

農工研報  
Bull. Natl. Inst.  
Rural Eng. Japan

ISSN 1882-3262

BULLETIN  
OF  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR  
RURAL ENGINEERING

No.54 March 2015

---

---

農村工学研究所報告

第 54 号

平成 27 年 3 月



独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農村工学研究所

---

---

NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING  
NATIONAL AGRICULTURE AND FOOD RESEARCH ORGANIZATION(NARO)  
INCORPORATED ADMINISTRATIVE AGENCY  
TSUKUBA, IBARAKI

# 農村工学研究所報告

第 54 号

所 長	小 泉 健
企 画 管 理 部 長	山 本 徳 司
審 議 役	笹 山 淳 治
技 術 移 転 セ ン タ ー 長	奥 島 修 二
農 地 基 礎 工 学 研 究 領 域 長	小 林 宏 康
施 設 工 学 研 究 領 域 長	増 川 晋
水 利 工 学 研 究 領 域 長	中 達 雄
資 源 循 環 研 究 領 域 長	増 本 隆 夫
農 村 基 礎 研 究 領 域 長	小 川 茂 男

## 編 集 委 員 会

編 集 委 員 長	山 本 徳 司
委 員	友 正 達 美
〃	渡 嘉 敷 勝
〃	濱 田 康 治
〃	吉 本 周 平
〃	國 光 洋 二
事 務 局	浜 田 善 幸

# 農村工学研究所報告

第 54 号 2015年 3 月

## 目 次

Dynamics of water circulation and anthropogenic activities in paddy dominant watersheds — From field-scale processes to catchment-scale models — .....	吉田 武郎	1
農業用ため池の地震動による被災要因に関する研究 — 2011年東北地方太平洋沖地震を例として — .....	鈴木 尚登	73

BULLETIN  
OF  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING

No.54 March 2015

Contents

YOSHIDA Takeo

Dynamics of water circulation and anthropogenic activities in paddy dominant watersheds

— From field-scale processes to catchment-scale models —

..... 1

SUZUKI Hisato

Study on damage factors to earth dams for irrigation due to earthquake motions

— In the Case of the 2011 Offshore Pacific Coast Tohoku Earthquake —

..... 73

# Dynamics of water circulation and anthropogenic activities in paddy dominant watersheds

— From field-scale processes to catchment-scale models —

Takeo Yoshida

Hydrology and Water Resources Management, Hydraulic Engineering Research Division

## Abstract

Irrigation in Japan accounts for 70% of total water diversion and is predominantly used for rice cultivation. Water movement within irrigated areas is complicated not only by the substantial volumes involved but also by repeated cycles of diversion and return flow, by which diverted water gradually drains from irrigated areas. Thus, understanding tivation use and its management is crucial for characterizing flow regimes in watersheds where irrigated paddies predominate. Recent changes in our natural and social environments are increasing the vulnerability of the water resources used for rice irrigation, which has been designed and operated under the assumption of stationarity. Distributed hydrological models have often been used to assess the vulnerability of water resources. However, although the importance of such assessments in analyzing anthropogenic water use in catchment-scale hydrological systems is being increasingly recognized, few models have attempted to incorporate the dynamics of water circulation associated with rice paddy irrigation. A model suitable for assessing water resources for rice irrigation must have the following capabilities. First, it must simulate water movements within irrigated rice fields, including water diversion from rivers, allocation through channels, and return flow from irrigated areas. Second, it should represent natural hydrological cycles in the whole watershed and should, integrate natural and anthropogenic water movement within the watershed.

In this thesis, the author presents an integrated model that couples catchment-scale natural hydrological cycles and human-related water cycles in irrigated paddy areas; hereafter the catchment-scale water circulation model. The main objective of model development is to assess the interaction between human-related and natural water cycles, especially in watersheds where densely irrigated paddies are dominant. Chapter 2 introduces the base model for this study. The base model simulates the interaction between catchment-scale hydrological cycles and paddy water uses. The author also traces some of the shortcomings of the base model and outlines the concept of the new model. In Chapter 3 presents the core issue of this thesis to be addressed: the representation of water circulation in densely developed irrigated paddy areas, and the integration of this model with natural hydrological cycles. The newly developed model is applied to a typical watershed in which irrigated paddies are dominant in Japan, and the interaction between natural and anthropogenic water cycles are evaluated. In Chapters 4 and 5, for extend the applicability of the new model, sub-models for snowmelt and flood inundation processes are introduced and validated. Finally, in Chapter 6, the catchment-scale water circulation model is applied to three experimental watersheds, each of which is dominated by different land uses and cultivation statures: namely cultivated paddies, abandoned paddies, and forest. We then discuss the ability of the new model to reproduce the hydrological changes associated with physical changes in paddy conditions.

The concepts in the model should contribute to ongoing discussions on how to incorporate anthropogenic impacts into distributed hydrological models. There are two potential beneficiaries of this model: the climate-change impact-assessment community and managers of water resources in paddy-dominant watersheds. A number of studies have examined the impacts of climate change on water resources. However, the effects of anthropogenic water cycles in paddy-dominant watersheds have not yet been examined explicitly, and thus the impact of climate change on paddy water-use systems is not fully understood. The proposed model calculates both natural and anthropogenic water cycles in watersheds. It thus provides not only stream flow changes, but also the potential effects of climate change on reservoir storages and the amounts of water diverted for paddy irrigation. Also, the model has the potential to contribute to water resources management, especially in watersheds undergoing rapid societal change. The expected societal changes in paddy-dominant watersheds in Japan will lead not only to an increase in the number of abandoned paddies, but also to increases in the number of crop varieties used and the length of irrigation periods, or increases in water demand due to changes in field water management. Moreover, in developing countries in the Asian Monsoon region, the area under irrigation and the number of reservoirs being developed are increasing at a tremendous rate. This model should be highly useful in the planning for optimum management of such watersheds.

**Keywords** : catchment, distributed hydrological model, rice paddies, irrigation, water resources

## CONTENTS

<b>1. Introduction</b> .....	<b>3</b>	gated areas .....	16
1.1 Background .....	3	3.5 Summary .....	17
1.2 Previous research on modeling watersheds with rice paddy irrigation .....	4	Appendix 3 .....	19
1.2.1 Distributed hydrological models and their application in water resources as- sessment .....	4	Appendix 3A: Hydrographs at Takada .....	19
1.2.2 Catchment-scale interactions between rice paddy irrigation and hydrological cy- cles .....	4	Appendix 3B: Changes in calculated discharges at Futagojima due to incorporation of wa- ter allocation and management module .....	20
1.2.3 Status of paddy cultivation and runoff characteristics .....	5	Appendix 3C: Changes in calculated discharges at Takada due to incorporation of return flow processes into the model .....	21
1.3 Objective and methods .....	5	<b>4. A snowfall and snowmelt module for warm climate   watersheds and its integration into DWCM-AgWU</b> .....	<b>22</b>
1.4 Thesis outline .....	6	4.1 Introduction .....	22
<b>2. Structure of the base model and novel concepts in   the newly developed model</b> .....	<b>6</b>	4.2 Development of the snowfall and snowmelt module .....	22
2.1 Introduction .....	6	4.2.1 Estimation of snowmelt based on the en- ergy balance .....	22
2.2 Basic structure of the base model .....	6	4.2.2 Estimation of the spatial extent of param- eter $k_{st}$ .....	23
2.2.1 Runoff module .....	6	4.3 Study watershed .....	24
2.2.2 Cropping pattern and area module .....	8	4.3.1 Winter- precipitation in the study watershed .....	24
2.2.3 Actual ET module .....	8	4.3.2 Collected winter precipitation data .....	24
2.2.4 Paddy water use module .....	8	4.4 Results and discussion .....	25
2.3 Novel concepts introduced in the new model	8	4.4.1 Estimated spatial distribution of parame- ter $k_{st}$ .....	25
2.4 Summary .....	9	4.4.2 Comparison of observed and calculated SWE .....	26
Appendix 2: Calculation of Reference Evapotranspiration .....	9	4.4.3 Calculated river discharges after incor- poration of the developed snowfall and snowmelt module .....	27
<b>3. Modeling of water circulation in river basins pos-   sessing large areas of irrigated paddy by incorpo-   ration of a water allocation and management mod-   ule</b> .....	<b>9</b>	4.5 Summary .....	27
3.1 Introduction .....	9	Appendix 4 .....	29
3.2 Structure of water allocation and management module .....	10	Appendix 4A: Time series of SWE at all the observed points included in the Kubiki Area .....	29
3.2.1 Reservoir operation scheme .....	10	Appendix 4B: Time series of SWE at all the observed points included in the Ikenodaira Area .....	32
3.2.2 Water allocation scheme .....	11	Appendix 4C: Time series of SWE at all the ob-served points included in the Myoko Area .....	33
3.3 Study watershed .....	12	Appendix 4D: Time series of SWE at all the observed points included in the Iiyama Area .....	34
3.3.1 Topography, geology and climate of the study watershed .....	12	Appendix 4E: Hydrographs in winter (from De- cember through May) .....	35
3.3.2 Agricultural water use in the basin .....	12	<b>5. Integration of an inundation module for low-   gradient rivers into DWCM-AgWU</b> .....	<b>36</b>
3.3.3 Collected data and data input procedures .....	12	5.1 Introduction .....	36
3.3.4 Settings for the water allocation and management module .....	14	5.2 Representation of inundation processes and its integration into DWCM-AgWU .....	36
3.4 Results and discussion .....	14		
3.4.1 Validation of model with river discharges .....	14		
3.4.2 Changes to the flow regime simulated by the reservoir operation scheme .....	15		
3.4.3 Estimated water circulation within an ir- rigated areas .....	15		
3.4.4 Retention ratio of diverted water from irri-			

5.2.1	Development of inundation module for low-gradient rivers	36	6.5.4	Effects of initial soil wetness on short-term runoff characteristics	53
5.2.2	Integration of the inundation module into DWCM-AgWU	36	6.6	Summary	55
5.3	Study watershed	37	Appendix 6: Observed discharges and calculated discharges in the rainfall events listed in Table 5		56
5.3.1	Inundation in the study watershed	37	<b>7. Conclusion</b>		
5.3.2	Data collection in the study watershed	37	7.1	Main findings	65
5.4	Results and discussion	39	7.2	Outlook	66
5.4.1	Application to the case study watershed	39	<b>1. Introduction</b>		
5.4.2	River flows without the inundation module	39	<b>1.1 Background</b>		
5.4.3	River flows with the inundation module	39	Irrigation in Japan accounts for 70% of the total water diversion and is used predominantly for rice cultivation. Water movement within irrigated areas is complicated not only by the substantial volumes involved but also by repeated cycles of diversion and return flow, when diverted water gradually drains from the irrigated areas. Understanding the dynamics of return flow is crucial for characterizing flow regimes in watersheds where irrigated paddies predominate.		
5.5	Summary	40	Recent changes in our natural and social environments are in creasing the vulnerability of the water resources used for rice irrigation, which uses systems that were designed and are operated under the assumption of stationarity (Milly et al., 2007). Distributed hydrological models are often used to assess the vulnerability of water resources. However, although the importance of such assessments in analyzing anthropogenic water use in catchment-scale hydrological systems is being increasingly recognized, few models have attempted to incorporate the dynamics of water circulation associated with rice paddy irrigation.		
Appendix 5		41	A model suitable for assessing water resources for rice irrigation must have the following capabilities. First, it must simulate water movements within irrigated rice fields, including water diversion from rivers, its allocation through channels, and the return flow from irrigated areas. Second, it should also represent natural hydrological cycles in the whole watershed and should integrate natural and anthropogenic water movements within the watershed.		
Appendix 5A: Observed discharges and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge		41	In this thesis, I presents an integrated model that couples catchment-scale natural hydrological cycles with human-related water cycles in irrigated paddy areas. The main objective was to produce a model that could be used to assess the interaction between the human-related and natural water cycles, especially in watersheds where densely irrigated paddies are dominant. In addition, to extend the applicability of the model to a broad range of hydrological conditions, several sub-models were developed for representing flooding and snow-melting		
Appendix 5B: Observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Xebanfai Bridge flow gauge		42			
<b>6. Short-term runoff modelling in hilly watersheds where paddy fields are prevalent</b>					
6.1	Introduction	43			
6.2	Experimental watersheds and hydrological observation	43			
6.2.1	Study area	43			
6.2.2	Selection of experimental watersheds	43			
6.2.3	Hydrological observations and data analysis	44			
6.3	Comparison of runoff characteristics based on paddy cultivation conditions	46			
6.3.1	Comparison of runoff ratios	46			
6.3.2	Comparison of peak runoff coefficients	46			
6.3.3	Comparison of retention characteristics	47			
6.3.4	Changes in peak runoff coefficients and runoff with more abandoned paddies	48			
6.4	Rainfall-runoff modelling of watersheds characterized by terraced paddy	48			
6.4.1	Modelling runoff processes in cultivated and abandoned paddies	48			
6.4.2	Initial conditions for short-term calculations	49			
6.4.3	Model application to experimental watersheds	49			
6.5	Results	50			
6.5.1	Comparison of discharges and storage in unsaturated and saturated zones calculated at different time intervals	50			
6.5.2	Results of short-term runoff calculations and comparison with observed values	51			
6.5.3	Initial conditions for short-term calculations	53			

processes and subsequently integrated into the catchment-scale water circulation model.

## 1.2 Previous research on modeling watersheds with rice paddy irrigation

### 1.2.1 Distributed hydrological models and their application in water resources assessment

Hydrological models are categorized into lumped models and distributed models according to how they spatially represent hydrological processes. Lumped models are developed to predict stream flow at a point of interest in a watershed based on the storage-discharge relationships. In contrast, Freeze and Harlan (1969) proposed that various hydrological processes could be represented by distributed hydrological models, in which catchment-scale hydrological cycles are modeled by combinations of equations based on laboratory results or plot-scale observations.

Numerous models based on the proposals of Freeze and Harlan (1969) have been developed, including SHE (Abbot et al., 1986) and IHDM (Calver and Wood, 1995). These distributed models are based on well-understood small-scale (local) processes (e.g., Richards' equation to describe flow in porous media), but they can be used to quantify large-scale processes (e.g., base-flow recession at the outlet of a catchment), as long as equivalent or effective values of scale-dependent (flow and transport) parameters can be identified. However, many of the needed parameters are not directly measurable, nor can they be determined by automated procedures, because hydrological modeling is subject to equifinality, which means that hydrological processes can potentially be well represented by multiple sets of parameters. Therefore, even models that produce a full physical representation of a hydrological system do not necessarily contribute to our understanding of complicated hydrological processes in watersheds (Beven, 2011).

Low-dimensional distributed models attempt to simulate hydrological cycles in a relatively simplified manner with only a few degrees of freedom. However, if the major processes that govern a watershed's hydrological cycles are not appropriately represented by such models, the perceived hydrological cycles may be false. An example of a low-dimensional model is TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979). Topographic similarity plays a crucial role in hydrological modeling with this model. TOPMODEL uses a topographic index of hydrological similarity for different points in a watershed, determined by analyzing topographic data. This index is calculated as  $\ln(a/\tan \beta)$ , where  $a$  is the area draining through a point from upslope and  $\tan \beta$  is the local slope angle. A higher index value at a point means that the upslope contributing area is larger and the slope gradient is lower, and thus the soil is more likely to be saturated. In

addition, Boorman et al. (1995) proposed a hydrological classification scheme for soil types of the UK that makes use of the fact that the physical properties of a catchment's soils, and the soil structure in particular, have a major influence on the catchment hydrology. Such semi-distributed models are easier to implement and require much less computer time than fully distributed models, and as a result, they have been applied to real-time flood forecasting and assessment studies of the impacts of climate change (Bell and Moore, 1998; Bell et al., 2009).

In addition, advances in computational and remote sensing techniques, by making it possible to assess water resources at large scale and in sparsely observed watersheds, have led to global-scale modeling of water resources. Fujihara et al. (2008) evaluated the impact of climate change on water resources, focusing on agricultural water use in a watershed in Turkey. Global models have been developed for assessing water resources, water trade, and climate change (Hanasaki et al., 2008a, 2008b; Rost et al., 2008). In those models, however, agricultural water use is simulated mainly for upland crops, and water flows in watersheds in humid climates where irrigated rice paddies are prevalent are not represented.

### 1.2.2 Catchment-scale interactions between rice paddy irrigation and hydrological cycles

Water-balance methods have been used to evaluate basic properties of water movement in irrigated paddies. For example, Okamoto (1973) proposed a water-balance method, called the critical block method, for evaluating actual water usage and return flow in irrigated paddy areas. However, water-balance approaches are based on observations of inflow and efflux within irrigated areas; hence, the scale at which they can be applied is limited, because even in small irrigated areas continuous observations at multiple influx and efflux points are laborious. Their application is also limited by the assumption of steady-state conditions, characterized, for example, by little rainfall and a constant intake of water for irrigation. In addition, the available water-balance methods were not designed to evaluate the interaction between natural and anthropogenic water flows but only to estimate the necessary water demand for irrigated areas.

Analytical methods that employ time series of measured river flows at multiple points in a watershed in which both water diversion and return flow takes place have been developed to evaluate time-variant water diversion and return flow (Shiraishi et al. 1976; Tanji, 1986). Although these approaches are quite effective for estimating the current status and time-variant nature of internal states within an irrigated area and for evaluating interactions between rivers and irrigated areas, they do not represent the physical structure of irrigated areas.

Hence, they cannot be used to properly assess the impacts of natural or social watershed changes on watershed environments.

To physically represent hydrological processes within watersheds with heterogeneous land uses and land covers, Maruyama et al. (1979) and Tomita et al. (1979) have proposed the complex tank model, a lumped model in which multiple tanks are used to account for rainfall-runoff processes from each land use or cover type. Nakagiri et al. (1998, 2000) extended this approach to evaluate the return flow of diverted water in a watershed with a highly developed irrigated system in Japan. However, lumped models generally require model parameters to be calibrated by using time series of river discharge data. Therefore, their application is limited to extensively observed watersheds. To quantify return flow in ungauged watersheds, a full understanding of the cumulative effects of natural and anthropogenic water interactions is needed.

Distributed hydrological models have been developed to model Japanese rivers strongly influenced by anthropogenic activities, including rice paddy irrigation (Goto, 1983), as well as to model the wide variety of rice cultivation systems in use in the Mekong River basin, which is a typical large watershed of the Asian monsoon region (Taniguchi et al., 2009a, 2009b, 2009c; Masumoto et al., 2009). Because these models do not only represent hydrological cycles in the watershed but also simulate spatial and temporal variations in planting area and water use, they can be used to evaluate the interaction between natural and anthropogenic water use cycles. However, most rice paddies in the Mekong River basin are rainfed or irrigated from small irrigation facilities. As a result, those models simulate water flows associated with each irrigated paddy area within a single grid cell. In addition, reservoir operations in the watershed are not fully implemented, although they can strongly impact flow regimes in highly developed watersheds.

To explicitly represent anthropogenic water flows in watershed with highly developed rice paddy irrigation systems, a model able to represent water diversion, allocation, and return flow within irrigated paddy areas is required. Moreover, such a model could be used to evaluate the interaction between natural and anthropogenic water flows as well as to assess the impacts of recent changes in the natural and social environment on the vulnerability of water resources.

### 1.2.3 Status of paddy cultivation and runoff characteristics

Watersheds in which paddy cultivation is predominant have different runoff characteristics than pristine watersheds because the water management systems used by rice paddies are unique.

In mountainous areas in particular, rice paddies are

typically surrounded by high levees to keep the ponding water level high.

Thus, some portion of the surface runoff during storm events remains in the paddies. If the storage capacity of the paddies is larger than that of the surrounding environment, in fact, paddy areas can fill a flood reduction function by reducing peak flows during floods. However, recent social changes, including abandonment of rice paddy cultivation, have decreased this function of rice paddies (Hayase, 1994).

Changes in runoff characteristics caused by the abandonment of paddy cultivation have been investigated by carrying out fieldscale observations of the physical structures of rice paddies that dominantly account for the changes in runoff characteristics from abandoned paddies, for example, modified soil surface properties, including soil porosity changes and the development of large cracks (Yoshida et al., 1997; Masumoto et al., 1997; Koga et al., 1997), and changes in the height of the levees and outlet of the paddies (Hayase et al., 1992).

Moreover, several studies have modeled such field-scale changes of paddies (Chiba et al., 1997; Masumoto et al., 2003). Physically based hydrological models, which are able to take such changes into account, are particularly useful for predicting changes in flow regimes caused by changes of land use and land cover. However, watershed-scale observations of runoff characteristics that focus on changes of land use and management are rare, although Tanakamaru and Kadoya (1994 a, 1995b) investigated differences in long-term runoff characteristics due to farm land reclamation in Japan.

### 1.3 Objective and methods

The objective of this thesis is to present an integrated model, called the distributed water circulation model incorporating agricultural water use (DWCM-AgWU) that couples watershed-scale hydrological cycles and human-related water cycles in irrigated paddy areas. The integrated model was developed as follows:

- 1) To represent water management in paddy fields, the model developed by Taniguchi et al. (2009a, 2009b, 2009c) for the Mekong River basin was used as a base model. In particular, two modules from this base model were used, the cropping pattern and area module and the paddy water use module. The first simulates spatial and temporal variations in the planting area and the second simulates water use within each model grid cell.
- 2) To explicitly represent human-related water flow in a watershed predominated by irrigated rice paddies, including reservoir management for irrigation, allocation of diverted water to large irrigated paddies, and return flow from irrigated paddies to rivers, a new water allocation and management module was

developed. What is novel about this module, and the core theme of this thesis, is that it represents water fluxes across multiple grid cells.

- 3) To assess the interaction between hydrological characteristics and paddy conditions, the integrated model's ability to reproduce differences in runoff characteristics between a watershed with highly developed irrigation systems and a mountainous watershed in which terraced paddy fields are prevalent was investigated. To represent near-surface hydrological processes in abandoned paddies in mountainous watersheds, a sub-module was developed and incorporated into DWCM-AgWU.
- 4) To extend the applicability of the model to a broader range of hydrological conditions, snowfall/snowmelt and flood inundation modules were developed and integrated into the main model.

#### 1.4 Thesis outline

Section 2 introduces the base model, which simulates water use associated with both rice paddy irrigation and watershed hydrological cycles. Some of the shortcomings of the base model are described, and the conceptual basis of the new model is outlined. Section 3 presents the core theme of this thesis: the water allocation and management module, which represents water circulation in densely developed irrigated paddy areas and its integration with natural hydrological cycles. The newly developed model with this new module is applied to a typical watershed in Japan in which irrigated paddies are dominant, and the interaction between natural and anthropogenic water cycles in the watershed are evaluated. In Sections 4 and 5, the applicability of the new model is extended by introducing and validating modules for snowmelt and flood inundation processes. Finally, in Section 6, the developed model is applied to three experimental watersheds, each of which is dominated by different land uses and cultivation statuses: namely, cultivated paddies, abandoned paddies, and forest. Then, the ability of the new model to reproduce the hydrological changes associated with physical changes in paddy conditions is discussed.

## 2. Structure of the base model and novel concepts in the newly developed model

### 2.1 Introduction

This section describes the structure of the base model and some of its shortcomings (Taniguchi et al., 2009a, 2009b, 2009c), along with the modifications and novel concepts introduced in developing the new model.

While the calculation time step  $dt$  is a day, we shorten the time step (e.g., to 1 h) in the module that simulates the generation of surface runoff (2.2.1.2) and routing of surface and stream flow (2.2.1.3). It should be noted

that in the description of the base model, the spatial and temporal dimensions of the variables are omitted because each calculation is completed within a single grid cell and time step.

### 2.2 Basic structure of the base model

The base model consists of four modules: runoff, actual evapotranspiration, cropping pattern and area, and paddy water use. The base model can simulate both natural and anthropogenic water flow. The hydrological components of the catchment are represented in a grid cell composed of three conceptual soil layers: the root zone, the unsaturated zone, and the saturated zone (**Fig. 1**). There are various land uses associated with each grid cell, and the model simulates the generation of surface runoff and actual evapotranspiration (ET) for each land use type. Then, actual ET (Allen et al., 1998), the amounts of overland flow and agricultural water use are calculated for the whole grid cell. The generated surface runoff is routed by using a one-dimensional kinematic wave for channel flow (Li et al., 1975) so that the daily flow rate can be calculated at any point of interest.

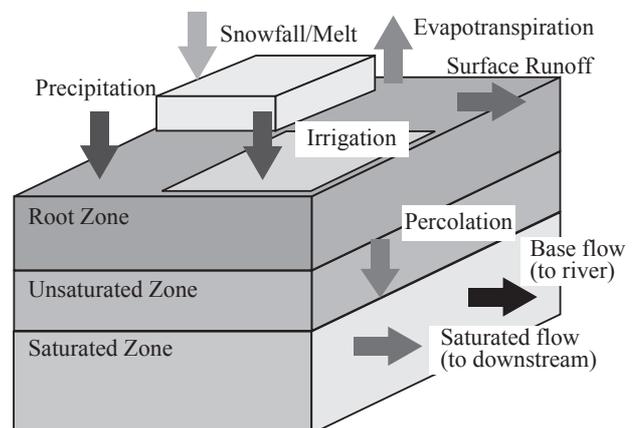
#### 2.2.1 Runoff module

##### (1) Water fluxes and storage in a grid cell

The grid cells are dynamically connected by various processes, including surface runoff, vertical drainage, and water fluxes via surface and subsurface flow pathways. The maximum capacity of root zone storage in each grid cell  $S_{\text{max}}$  (mm) is calculated as the areal average of the storage for each land use type. The change in the root zone storage  $S_r$  (mm) is calculated from the water budget as follows:

$$\frac{dS_r}{dt} = I - E_a - Q_v, \quad (1)$$

where  $I$  is infiltration rate (mm/dt),  $E_a$  is actual evapotranspiration (mm/dt). Each term in (1) will be discussed in more detail later.



**Fig. 1** Storage and runoff structure in a grid cell

Vertical drainage by gravity is generated when  $S_r$  exceeds  $S_{rmax}$ . Although the base model assumes that all vertical drainage reaches the saturated zone immediately after it is generated, the new model assumes gradual water movement and accounts for the time delay by introducing unsaturated zone storage.  $Q_v$  (mm/d) is estimated by the following equation (Beven and Wood, 1983):

$$Q_v = \begin{cases} \frac{S_u}{D_s T_d} & (D_s > 0) \\ \frac{1}{T_d} & (D_s = 0), \end{cases} \quad (2)$$

where  $S_u$  is storage in unsaturated zone (mm),  $D_s$  is the water deficit in saturated zone (mm), and  $T_d$  is a parameter to account for the time delay (dt/mm). The fraction of water that does not reach the saturated zone remains in the unsaturated zone.

$$\frac{dS_u}{dt} = \begin{cases} S_r - S_{rmax} - Q_v & (S_r > S_{rmax}) \\ -Q_v & (S_r < S_{rmax}) \end{cases} \quad (3)$$

Water flux from the saturated zone has two components: lateral flux  $Q_b$  (m<sup>3</sup>/dt) and direct runoff to river channel  $R_c$  (m<sup>3</sup>/dt). Thus, the water budget of the saturated zone is calculated by the following equation:

$$\frac{dD_s}{dt} = Q_v - Q_b - R_c \quad (4)$$

The lateral flux  $Q_b$  is simulated by assuming that the flux decreases exponentially with storage in the saturated zone and that it flows in the direction of the surface flow and slope (equation (5)).

$$Q_b = Q_{b0} \exp(-D_s/f_b) S_c L_s, \quad (5)$$

where  $Q_{b0}$  is the water flux when the saturated zone is full (m<sup>2</sup>/dt),  $S_c$  is the surface slope,  $L_s$  is the length of the grid cell (m), and  $f_b$  is the recession parameter (mm).

The base flow is estimated by assuming the storage in the saturated zone. The base model generates base flow when the storage in the saturated zone exceeds a certain threshold, whereas the modified model assumes that the generation of base flow is continuous:

$$R_c = R_{c0} \exp(-D_s/f_r) L_c, \quad (6)$$

where  $R_{c0}$  is the base flow when the saturated zone storage is full (m<sup>2</sup>/dt),  $f_r$  is a recession parameter (mm),  $L_c$  is the river length within the grid-cell (m).

## (2) Generation of overland flow

Overland flow is assumed to be generated by two processes: infiltration excess overland flow occurs during heavy rainfall, and saturation excess overland flow occurs around wet riparian zones.

Infiltration excess overland flow is generated when the rainfall intensity  $p_t$  (mm/dt) exceeds the infiltration rate  $f$  (mm/dt), which is calculated with the Green-Ampt

equation (Green and Ampt, 1911). The changes in infiltration rate  $f$  in one calculation time step (from time  $t$  to  $t+dt$ ) is estimated as follows (Chow et al., 1988). First, the current potential infiltration rate  $f_t$  is calculated from the known value of cumulative infiltration  $F_t$  (mm) .

$$f_t = K_{sat} \left( \frac{\psi \Delta \theta}{F_t} + 1 \right), \quad (7)$$

where  $K_{sat}$  is hydraulic conductivity (cm/dt),  $\psi$  is the suction of wetting front (mm), and effective porosity  $\Delta \theta = 1 - S_r/S_{rmax}$ . The resulting value of  $f_t$  is compared to the rainfall intensity  $p_t$  (mm/dt). If  $f_t$  is less than or equal to  $p_t$  overland flow is generated throughout the calculation time step.

In contrast, if  $f_t$  is larger than  $p_t$  and there is no ponding at the beginning of the time interval, it is assumed that no ponding will occur throughout the interval; then, the infiltration rate is  $f_t$  and the tentative cumulative infiltration value at the end of the time interval is

$$F'_{t+dt} = F_t + p_t dt \quad (8)$$

Next, the corresponding infiltration rate  $f'_{t+dt}$  is calculated from  $F'_{t+dt}$ . If  $F'_{t+dt}$  is greater than  $p_t$ , there is no ponding throughout the interval. Thus,  $F_{t+dt} = F'_{t+dt}$  and the problem is solved for this interval.

If  $f'_{t+dt}$  is less than or equal to  $p_t$ , ponding occurs during the interval. The cumulative infiltration  $F_p$  at the ponding time is found by setting  $f_t = p_t$  and  $F_t = F_p$  in equation (7) and solving for  $F_p$  to give, for the Green-Ampt equation,

$$F_p = \frac{K \psi \Delta \theta}{p - K} \quad (9)$$

Excess rainfall is calculated by subtracting cumulative infiltration from cumulative rainfall.

Saturation excess overland flow occurs in completely saturated grid cells: that is,  $S_r = S_{rmax}$  and  $D_s = 0$ . Once the grid cell meets these conditions at time  $t$ , all precipitation  $p_t$  becomes saturation excess overland flow; if these conditions are met after the beginning of the time interval, then the precipitation that falls after they are met becomes overland flow.

## (3) Routing scheme for overland flow

The flow routing module is configured to convert estimates of overland runoff to river flow with a delay associated with surface flow in the grid cells. The routing scheme is based on a discrete approximation of a one-dimensional kinematic wave equation with lateral inflow that relates channel flow  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) to lateral inflow per unit length of the river  $q$  (m<sup>2</sup>/s).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (10)$$

$$A = K Q^P, \quad (11)$$

where  $A$  is cross-section of the channel (m<sup>2</sup>), and  $K$  and  $P$  are parameters that are determined for each of sub-

watershed from the channel width and average slope of the sub-watershed.

In the base model, the routing scheme uses a 5-day moving average of generated overland flow to account for the delay caused by surface flow in a grid cell with a length of 10 km (Taniguchi et al., 2009c); however, the averaging period must be objectively determined. Thus, to account for the delay, the new model assumes that overland flow in the grid cells can be schematically represented by a channel between two slopes. The generated overland flow  $r_e$  (m/dt) is then treated as flow on the slopes.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (12)$$

$$h = kq^p, \quad (13)$$

where  $h$  is water depth (m), and  $k$  and  $p$  are flow parameters. Parameter  $k$  is represented as  $k = (N/\sqrt{s})^p$ , where  $N$  is a friction parameter and  $s$  is the gradient of slope. The standard value of  $N$  are 1.5 ( $\text{sm}^{-1/3}$ ) for forest, 0.4 ( $\text{sm}^{-1/3}$ ) for upland fields, and 2.5 ( $\text{sm}^{-1/3}$ ) for rice paddies, and  $p$  is normally set to 0.6. The gradient of slope  $s$  is estimated with the standard deviation of elevation in the grid-cells  $S_{\text{elv}}$ . Here, a digital elevation map with a spatial resolution of 50 m was used to calculate  $s$  as  $s = 2 \times S_{\text{elv}}/L_c$ .

Equation (10) can be expressed by the following finite-difference equation:

$$\frac{A_{i+1}^{j+1} - A_{i+1}^j}{dt} + \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{dx} = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (14)$$

This equation has been arranged so that it can be numerically solved for the unknown discharge  $Q_{i+1}^{j+1}$ . Li et al. (1975) performed a stability analysis and showed that the scheme using equation (14) is unconditionally stable. They also showed that a wide range of values of  $dt/dx$  could be used without introducing large errors in the shape of the discharge hydrograph.

### 2.2.2 Cropping pattern and area module

Because a wide variety of water use and irrigation systems are used in the Mekong River basin, the base model represents temporal and spatial differences in the planting pattern and area used for rice. To do this, it categorizes rice paddies into four classes: namely, rainfed without supplemental irrigation, rainfed with supplemental irrigation, irrigated, and flood utilization paddies. It also categorizes irrigation systems into six classes: namely, gravitational, pump, reservoir, colmatage, groundwater, and tidal irrigation. Rice varieties are also grouped into two classes: photosensitive and non-photosensitive rice. Please see Taniguchi et al. (2009) for details regarding the planting pattern and area module.

The basic idea of the planting pattern and area module is that the planting starts when required water  $P_{\text{cum}}$

(mm) is supplied to paddies, and the planted area steadily increases once planting begins:

$$A_c = A_p \frac{D}{T_{\text{tra}}}, \quad (15)$$

where  $A_c$  is the actual planted area ( $\text{m}^2$ ),  $A_p$  is the potential planted area for rice in each grid cell ( $\text{m}^2$ ),  $D$  is the number of days elapsed since the start of transplanting, and  $T_{\text{tra}}$  is the duration (days) of the transplanting period.

### 2.2.3 Actual ET module

The actual ET module calculates ET from the land surface by using the reference ET ( $E_{T0}$ ) estimated by the Modified Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998).

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U(e_s - e_a(T_a))}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U)}, \quad (16)$$

where,  $R_n$  is net radiation ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dt}$ ),  $G$  is ground heat flux ( $= 0$ ) ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dt}$ ),  $U$  is wind speed (m/s),  $T_a$  is air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $e_s$  is saturated vapor pressure (kPa),  $e_a(T_a)$  is vapor pressure at temperature  $T_a$  (kPa),  $\Delta$  is the slope of saturation vapor pressure curve ( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ),  $\gamma$  is psychrometric constant ( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ). The detailed procedure for calculating each term of equation (16) is described in appendix of this section.

Actual ET ( $E_a$ ) is estimated from the areal average of each land use type in the grid cell:

$$E_a = \frac{E_l A_l + E_w A_w}{A_{\text{gc}}}, \quad (17)$$

where  $A_{\text{gc}}$ ,  $A_w$ ,  $A_l$  are areas of the grid cell, water surface and land surface areas ( $\text{m}^2$ ), and  $E_w$  is evaporation from water surface ( $= E_{T0}$ ). Evapotranspiration from land surface  $E_l$  ( $\text{mm}/\text{d}$ ) is the averaged value from land use  $i$ :

$$E_l = \sum_i K_c(i, t) \frac{A(i)}{A_c} \frac{S_r}{S_{\text{rmax}}} E_{T0}, \quad (18)$$

where crop coefficient  $K_c(i, t)$  is a function of the land use  $i$  and time  $t$ ; its value is 1.1 for planted paddies and forest, 0.6 for upland crops, and 0.3 for non-planted paddies (Allen et al., 1998).

### 2.2.4 Paddy water use module

The paddy water use module simulates the water supply to and runoff from the paddies; here, the ponding depth of the paddies governs the entire process. The ponding depth is calculated by using the output of planting pattern and area, runoff, and actual ET modules.

The actual water supply to paddies  $Q_i$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) depends on the gross water requirement  $Q_{\text{gw}}$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ), flow rate in the grid cell  $Q_{\text{ch}}$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ), and the capacity for diversion  $Q_{\text{if}}$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ). Because both  $Q_{\text{ch}}$  and  $Q_{\text{if}}$  constrain the amount of water farmers can supply to the paddies,  $Q_i$  is estimated as follows:

$$Q_i = \min(Q_{\text{gw}}, Q_{\text{ch}}, Q_{\text{if}}) \quad (19)$$

The gross water requirement  $Q_{gw}$  is calculated from the irrigation efficiency  $I_e$  and the net water requirement  $Q_{nw}$  ( $m^3/d$ ).

$$Q_{gw} = \frac{Q_{nw}}{I_e} \quad (20)$$

$$Q_{nw} = A_{ia}(ET_a + I_p - p) \times 10^3, \quad (21)$$

where  $p$  is precipitation ( $mm/dt$ ),  $I_p$  is infiltration at paddies ( $mm/dt$ ),  $E_a$  is actual ET ( $mm/dt$ ). The difference between  $Q_{gw}$  and  $Q_{nw}$  is regarded as water loss through water allocation in a grid cells; thus, it is water supplied to the root zone.

The ponding depth of the paddies is estimated from the actual water supply  $Q_i$  as follows:

$$\frac{dH_p}{dt} = p - I_p - E_{Tpad} - H_{pout} + Q_i/A_{ia} \times 10^{-3}, \quad (22)$$

where  $H_{pout}$  ( $mm/dt$ ) is flow out of the paddies, which is calculated with overflow weir formula.

### 2.3 Novel concepts introduced in the new model

The base model simulates the planting pattern and water uses of rice paddies (Fig. 2). Because the base model was developed for application to the Mekong River basin, where most rice paddies are rainfed and irrigation reservoirs when present are small, complex irrigation systems covering multiple grid cells and large reservoirs are not modeled.

The new model represents not only processes applicable to individual grid cells but also water fluxes across multiple grid cells. The included water fluxes are flows from reservoirs for irrigation, diverted water flows allocated to large irrigated paddies, and return flows from irrigated paddies to rivers. In particular, representation of water fluxes across multiple grid cells is essential for assessing the return flow of diverted water from large irrigated areas. A distinguishing characteristic of the new model is that these components are managed in a unified manner by a water allocation and management module (Fig. 2; see Section 3).

### 2.4 Summary

This section describes the basic structure of the four modules that compose the base model, and the novel concepts introduced during new model development. The base model and the novel aspects of the new model can be summarized as follows:

- 1) The base model simulates planting patterns and areas and water use in rice paddies, including its interaction with natural hydrological cycles in a river basin where rice paddies are prevalent. The model explicitly represents water cycles in paddy areas as well as natural hydrological cycles, thus enabling water management for irrigated paddies to be assessed.
- 2) In addition to the processes represented in the base

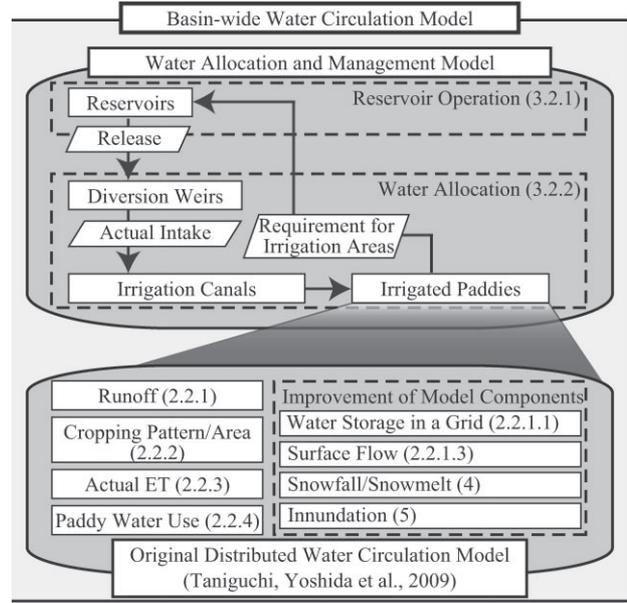


Fig. 2 Structure of the distributed water circulation model (base model) incorporating the new water allocation and management module (Numbers in the figure indicate corresponding sections in this paper)

model, the new model accounts for water fluxes, including flows from reservoirs for irrigation, diverted water flows to large irrigated paddies, and return flows from irrigated paddies to rivers. To simulate such anthropogenic water flows in a unified manner, a new water allocation and management module was developed. This module is described in the next section.

### Appendix 2: Calculation of Reference Evapotranspiration

The variables used in the equation (16) are calculated by the following equations (Allen et al., 1998).

$$\Delta = \frac{4098 \times 0.6108 \exp(17.27T_a/(T_a + 237.3))}{(T_a + 237.3)^2} \quad (23)$$

$$\gamma = 0.065 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (24)$$

$$P_{atm} = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (25)$$

$$e_a = \frac{e^0(T_n)(H_n/100) + e^0(T_x)(H_x/100)}{2} \quad (26)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_x) + e^0(T_n)}{2}, \quad (27)$$

where  $P$  is atmospheric pressure (kPa),  $z$  is elevation (m),  $H_x$  and  $H_n$  are daily maximum and minimum of relative humidity (%), and  $T_x$  and  $T_n$  are daily maximum and minimum of temperature ( $^{\circ}C$ ). Saturated vapor pressure  $e_0(T)$  (kPa) for a given temperature  $T$  is estimated with  $e_0(T) = 0.6108 \exp((17.27T)/(T + 237.3))$ .

Net radiation  $R_n$  is calculated as follows:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (28)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (29)$$

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{TK_n^4 + TK_x^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \quad (30)$$

$$(1.35R_s/R_{s0} - 0.35),$$

where  $R_{ns}$  is net short-wave radiation ( $\text{MJ/m}^2/\text{d}$ ),  $R_{nl}$  is net longwave radiation ( $\text{MJ/m}^2/\text{d}$ ),  $\alpha$  is albedo ( $= 0.23$ ),  $R_s$  is shortwave radiation ( $\text{MJ/m}^2/\text{d}$ ),  $R_{s0}$  is clear-sky short wave radiation ( $\text{MJ/m}^2/\text{d}$ ),  $TK_n$  and  $TK_x$  are minimum and maximum temperature (K), and  $\sigma$  is Stefan-Boltzmann constant ( $= 4.903 \times 10^{-9}(\text{MJ/K}^4/\text{m}^2/\text{d})$ ).

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5}z)R_a \quad (31)$$

$$R_s = 0.16 \sqrt{T_x - T_n}R_a \quad (32)$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} d_r (\omega \sin \phi \sin \sigma + \cos \phi \cos \sigma \sin \omega) \quad (33)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi}{365} D \right) \quad (34)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} D - 1.39 \right) \quad (35)$$

$$\omega = \arccos(-\tan \phi \tan \delta), \quad (36)$$

where  $R_a$  is extraterrestrial radiation ( $\text{MJ/m}^2/\text{d}$ ),  $d_r$  is inverse relative distance Earth-Sun,  $\omega$  sunset hour angle (rad),  $\phi$  is latitude (rad),  $\delta$  is solar delination (rad),  $D$  is julian day.

### 3. Modeling of water circulation in river basins possessing large areas of irrigated paddy by incorporation of a water allocation and management module

#### 3.1 Introduction

Section 3 presents the core of this thesis: the representation of water circulation in densely developed irrigated paddy areas and its integration with the natural hydrological cycle. Then the newly developed model, DWCM-AgWU, is applied to a typical watershed in Japan in which nearly 20% of the watershed is irrigated paddies, and the interaction between natural and anthropogenic water cycles is evaluated.

DWCM-AgWU consists of five modules: water allocation and management, planting pattern and area, paddy water use, actual evaporation, and runoff. Two modules from the base model are employed to represent spatial and temporal variations in planting area and water use in a watershed, namely, the cropping pattern and area and paddy water use modules. In the new model, however, a novel approach that represents water fluxes over multiple grid cells is used, and the development of this approach is the core theme of this thesis. The included water fluxes are flows from reservoirs for irrigation, diverted water flows allocated to large irri-

gated paddies, and return flows from irrigated paddies to rivers.

Although the default calculation time step  $dt$  is one day, the time step can be shortened (e.g., to 1 hour) in the reservoir operation scheme (3.2.1). It should be noted that the spatial and temporal dimensions of each variable are omitted because each calculation is completed within a single grid cell and time step.

#### 3.2 Structure of water allocation and management module

The components included in the water allocation and management module of DWCM-AgWU are schematically illustrated in Fig. 3. The water allocation and management module has two major schemes, namely, a reservoir operation scheme and a water allocation scheme.

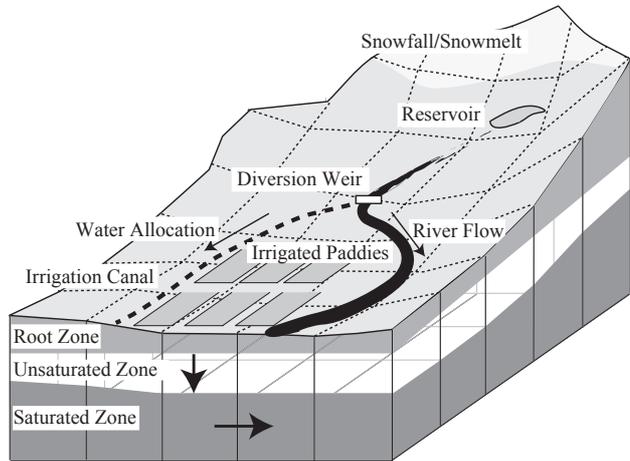


Fig. 3 Schematic representation of components of the water allocation and management module in irrigated paddy areas.

#### 3.2.1 Reservoir operation scheme

The reservoir operation scheme is used to estimate releases from the reservoir to diversion weirs for irrigation (Horikawa et al., 2011). Typical water releases from a reservoir, such as releases for hydropower generation or releases of excess water via a spillway, are simply calculated from the inflow into the reservoir and its storage capacity. In contrast, for calculation of irrigation releases, flow rates at the diversion weirs must be taken into account, because the amount of water released must be enough to meet the water demand at the downstream diversion weirs when the flow rates at those weirs are less than the water demand.

The scheme is based on the water balance in the reservoir:

$$V_r(t) = V_r(t-1) + Q_{rin}(t) - Q_{rout}(t), \quad (37)$$

where  $Q_{rin}(t)$  and  $Q_{rout}(t)$  are the inflow and release of water ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ), and  $V_r(t)$  ( $\text{m}^3$ ) is the storage in the reservoir at time  $t$  (day). The total amount of water released

from the reservoir is estimated by summing the amounts released for different reasons:

$$Q_{\text{rout}}(t) = Q_{\text{ru}}(t) + Q_{\text{spill}}(t) + Q_{\text{rf}}(t), \quad (38)$$

where  $Q_{\text{ru}}(t)$ ,  $Q_{\text{spill}}(t)$ , and  $Q_{\text{rf}}(t)$  (all  $\text{m}^3/\text{dt}$ ) are the amounts released for water use, as spillway flow, and to maintain the minimum required environmental flow, respectively.

### (1) Release for water use

Release for water use from reservoirs  $Q_{\text{ru}}(t)$  are the sum of amounts released for irrigation  $Q_{\text{ri}}(t)$ , domestic use  $Q_{\text{rd}}(t)$ , and hydropower generation  $Q_{\text{rp}}(t)$  (all  $\text{m}^3/\text{dt}$ ).

$$Q_{\text{ru}}(t) = Q_{\text{ri}}(t) + Q_{\text{rd}}(t) + Q_{\text{rp}}(t) \quad (39)$$

#### a) Release for irrigation

Water required for irrigation  $Q_{\text{ri}}(t)$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) is released to fulfill the water deficit at diversion weirs, when the water demand at the diversion weir  $Q_{\text{wr}}$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) exceeds the available river flow at the weir  $Q_{\text{rsf}}(t-1)$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ). Thus,  $Q_{\text{ri}}(t)$  is their difference:

$$Q_{\text{ri}}(t) = Q_{\text{wr}} - Q_{\text{rsf}}(t-1) \quad (40)$$

Although the water demand at the diversion weir varies temporally,  $Q_{\text{wr}}$  is assumed by the model to be equal to the maximum diversion capacity of the weir.

Typically, the ratio of river flow to total water diversion in irrigation areas in Japan is relatively large, compared with the ratio in other countries, both because the distance from reservoir to diversion weir is generally relatively long, and because the base flow from the part of the watershed below the reservoir is stable. The amount released for irrigation is thus just the amount of supplemental water needed to meet the difference between the water demand and river flow at the diversion weir.

#### b) Release for domestic water use

Release for domestic water use is set to a constant as the planned value.

#### c) Release for hydropower generation

The amount of water released for power generation is calculated as the product of the maximum that can be released for hydropower generation  $Q_{\text{rpmax}}(\text{m}^3/\text{dt})$  and the ratio of storage in the reservoir  $V_r(t-1)$  ( $\text{m}^3$ ) on the previous day to the effective storage of the reservoir  $V_{\text{rmax}}(\text{m}^3)$ , which is the difference between the maximum and minimum storage volumes.

$$Q_{\text{rp}}(t) = Q_{\text{rpmax}} \frac{V_r(t-1)}{V_{\text{rmax}}(t)} \quad (41)$$

### (2) Release from spillways

Water is released via spillways when the storage in the reservoir exceeds its maximum capacity  $V_{\text{rmax}}$ . Thus,

when the sum of the storage on the previous day  $V_r(t-1)$  and the reservoir inflow  $Q_{\text{rin}}(t)$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) exceeds  $V_{\text{rmax}}$ ,  $Q_{\text{spill}}(t)$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) is calculated as follows:

$$Q_{\text{spill}}(t) = Q_{\text{rin}}(t) + \frac{V_r(t-1) - V_{\text{rmax}}}{dt} \quad (42)$$

### 3.2.2 Water allocation scheme

The water allocation scheme simulates water diversion at the weirs, followed by its allocation to the associated irrigated areas. The estimated amount of diverted water  $Q_i$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) is allocated among the modeled irrigation systems along the flow pathways of the irrigation channel networks as described below. Thus, the amount of diverted water is calculated independently of the surface water flows in the runoff module. In the base model, the diverted water is supplied to paddies within the same grid cell, but the new model can simulate water allocation across multiple grid cells.

#### (1) Extraction of irrigation networks using GIS database

To model water fluxes across large irrigated areas, precise data describing water use facilities and channel networks are needed. These data were obtained from a recently configured GIS database of water use facilities throughout Japan (Japan Institute for Irrigation and Drainage, 2010; data acquired on 2014.5.12). This database includes specifications for irrigation facilities, irrigation channel networks, and irrigation block polygons; the latter two have rarely been incorporated into hydrological models.

The database includes water use facilities (diversion weirs, drainage pumps, and reservoirs) and irrigation and drainage channels that serve an area exceeding 100 ha; the former are represented by point data and the latter by line data. These data have attributes of function and name, and they can be separated or grouped according to their connectivity. However, the database lacks information necessary to link the vector (i.e., point and line) data to the polygon (areal) data of the irrigation blocks. Therefore, an algorithm was developed to link the vector and polygon data for simulation of water allocation to irrigated areas. The algorithm is implemented in two steps. First, an irrigation network is created by linking water diversion facilities (point data) to irrigation channels (line data). Second, the irrigation network is overlaid on the irrigated blocks (polygon data) to link the diversion facilities with their associated irrigated areas. In this way, the spatial extent of each irrigation system is determined, and water allocation to each irrigation area can be simulated.

#### (2) Water diversion and allocation schemes

First, the amount diverted daily at each diversion weir  $Q_i$  is determined as the minimum value among the fol-

lowing: daily river discharge  $Q_{ch}$ (m<sup>3</sup>/dt), designed maximum intake capacity  $Q_{if}$ (m<sup>3</sup>/dt), and the water requirement of the associated irrigation area  $Q_{gw}$ (m<sup>3</sup>/dt).

$$Q_i = \min(Q_{gw}, Q_{ch}, Q_{if}) \quad (43)$$

Then,  $Q_i$  is allocated by dividing it into irrigation water supplied to paddies and management water loss (i.e., the management water requirement). The management water loss, which consists of water that does not reach the irrigated area (paddy fields), gradually returns to streams. In the paddy fields, the irrigation supply is divided into percolation, runoff from fields, and ET. The management water requirement and runoff from paddy fields are passed to the surface runoff module.

The water allocation calculation is independent of the surface runoff calculation. In the runoff module, the flow direction in each grid cell depends on the local topography and the stream flow direction, but in the water allocation scheme, water flow to irrigated areas follows the irrigation channel network. Therefore, the model simulates water allocation to the irrigation areas according to the priority order of the grid cells composing each irrigated block of paddies (here, an irrigated block can be represented by multiple grid cells or by a single grid cell). Paddies in a grid cell in the upper part of an irrigation block that is directly connected to an irrigation channel have a higher priority than those in a grid cell in the lower part of a block that is not directly connected to a channel. Thus, the priority order of each grid cell is determined by 1) its distance from the diversion weir, 2) its distance from an irrigation channel, and 3) its elevation. Water is then allocated to each grid cell following its priority order in the irrigation block according to the water demand in that grid cell  $Q_{gw}$ .

The gross irrigation water requirement (mm/d) (i.e., the amount of water that must actually be extracted from the diverted water) is computed by dividing the net irrigation requirement by the irrigation efficiency  $I_e$ , which represents the water loss during the distribution and application of the water to the paddies.

$$Q_{gw} = \frac{Q_{rq}A_{ir}}{1,000 \times I_e} \quad (44)$$

Repetitive use of water within irrigated blocks is not accounted for in this model, and irrigation and drainage channels are assumed to be separate. Hence, the total  $Q_{gw}$  in an irrigated area may exceed the diverted amount  $Q_i$ , depending on the available river flow. In this case, water is not allocated to grid cells with a low priority order.

$Q_{gw}$  consists of allocated water  $Q_a$ (m<sup>3</sup>/dt)(=  $Q_{rq}A_{ir}/1,000$ ) and water loss during allocation  $Q_{dr}$ (m<sup>3</sup>/dt) (Fig. 4). Water lost during allocation returns to the drainage channels within a day (Sato et al., 1998); thus,  $Q_{dr}$  is added to the lateral inflow into drainage channels on the day following the allocation. If the sum of water

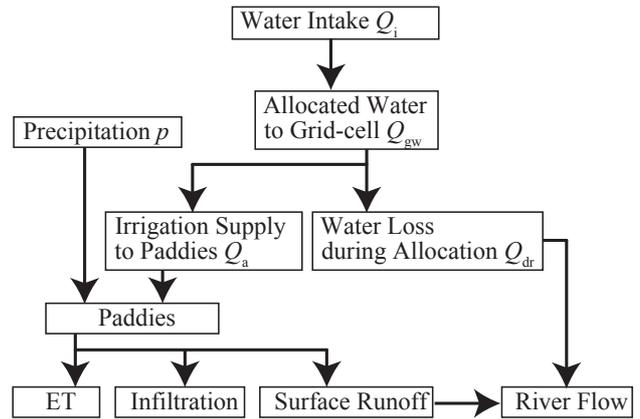


Fig. 4 Schematic diagram of water flows in the water allocation scheme.

allocated to all irrigated grid cells in the irrigated block is less than the total amount of diverted water  $Q_i$ , the remainder of the water is distributed equally to all grid cells in the irrigated block or added to the drainage channels via lateral inflow.

For irrigated blocks that consist of a single grid cell, the water diversion and allocation scheme is the same as that of the base model: that is, allocated water  $Q_a$  is determined as follows:

$$Q_a = \min(Q_{gw}, Q_{ch}, Q_{if}) \quad (45)$$

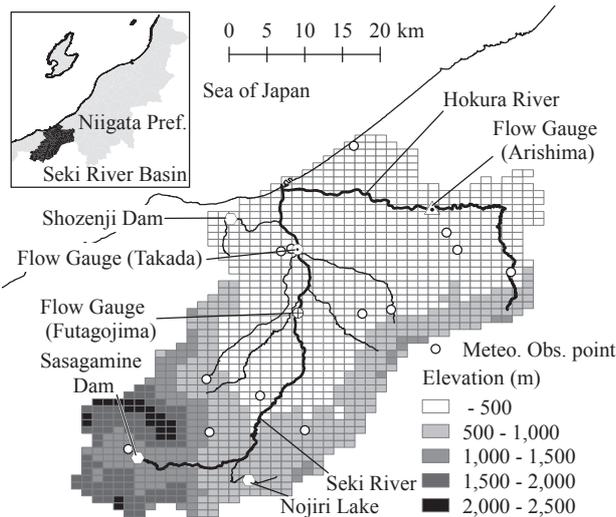
### 3.3 Study watershed

#### 3.3.1 Topography, geology and climate of the study watershed

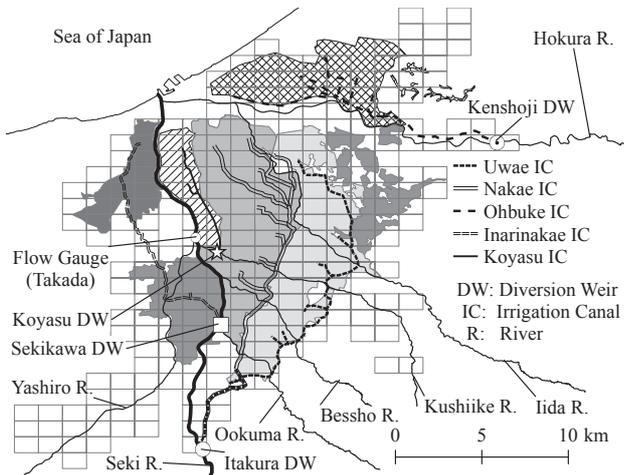
The Seki River basin in central Japan was selected for a case study. The Seki River is 64 km long, and its catchment area is 1140 km<sup>2</sup>. The land cover is dominantly forest (79%), but 17% of the land area of the catchment is agricultural land, mainly rice paddies. The Seki River flows from the Myoko Mountains (highest peak, Myoko Mountain, 2425 m a.s.l.) to the Japan Sea (Figs. 5, 6). Hillslopes are steep, and the bedrock is a mixture of various Tertiary sedimentary rocks, which are mantled by alluvium. The climate of the basin is humid, typical of the Japan Sea area, and snowfall is heavy in winter. Average annual precipitation is more than 3000 mm, over half of which falls as snow in winter.

#### 3.3.2 Agricultural water use in the basin

The total irrigated area of the basin is approximately 9000 ha, and it is mostly used for rice paddies. There are two major irrigation systems on the eastern side of the Seki River (Fig. 6); the Uwae (approximately 2000 ha) and the Nakae (approximately 3000 ha) systems. The Nakae diversion weir was originally located 3 km downstream from the Uwae diversion weir, which led to complex conflicts between the two systems when the conventional water use rule was applied, because Nojiri



**Fig. 5** Location of the Seki River basin (inset), and locations of hydrometeorological observation points in the basin. The grid applied to the study area and its topography are also shown.



**Fig. 6** The major irrigation facilities in the areas served by the Land Improvement Districts of the lower Seki River basin. Different irrigation areas are shown by different hatching patterns and gray shading.

Lake (effective storage for irrigation:  $9.8 \times 10^6 \text{m}^3$ ), one of the major irrigation reservoirs, is controlled by the Nakae system. However, the construction of Sasagamine dam  $9.2 \times 10^6 \text{m}^3$ , **Fig. 7**) and the Itakura diversion weir (**Fig. 8**), which now serves both systems, resolved these conflicts (Shinzawa, 1962). Currently, the Itakura diversion weir not only diverts and allocates water to both the Uwae and Nakae irrigation systems, it also diverts water for hydropower generation. Other irrigation systems shown in (**Fig. 6**) include the Inari-Nakae system on the western side of the Seki River (approximately 600 ha) and the Ohbuke irrigation system along the Hokura River (approximately 1600 ha). Shozenji dam (effective storage  $4 \times 10^6 \text{m}^3$ , **Fig. 5**) stores water for domestic use.



**Fig. 7** Photograph of Sasagamine dam looking west. See Fig. 5 for its location.



**Fig. 8** Photograph of the Itakura diversion weir looking upstream (north). See Fig. 6 for its location.

### 3.3.3 Collected data and data input procedures

For the model application, the Basic Grid Square (Third Area Partition) of the Standard Regional Mesh Code was used for the grid. In this system, each grid cell covers 45 seconds of arc in the longitudinal direction and 30 seconds of arc in the latitudinal direction, and in central Japan its area corresponds to approximately  $1 \text{ km}^2$ . Elevation and land use/cover data for each grid cell were obtained from the National Land Numerical Information website of the Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (data acquired on 2014/09/20) and the GIS database of water use facilities in Japan (Japan Institute for Irrigation and Drainage, data acquired on 2014/05/12). The steepest descent method was used to determine the water flow direction in each grid cell, and the direction of river flow in a grid cell was toward the lowest grid cell among the eight neighboring grid cells.

Required meteorological data (precipitation, temperature, humidity, and wind speed) were collected from

1976 through 2008 at existing observation stations (**Fig. 5**). The meteorological data were obtained from the database of the Automated Meteorological Data Acquisition System (Japan Meteorological Agency), the River Bureau of Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and the Myoko-Sasagamine Station of the National Institute for Earth Science and Disaster Prevention. To estimate the spatial variation in the observed meteorological variables, the inverse distance weighting method was employed. In this method, the grid cell values are determined by calculating the weighted average of values observed at observation stations in the neighborhood of each grid cell. The closer a station is to the center of the cell being estimated, the greater its weight in the averaging.

Precipitation  $p(x)$  (mm/d) in grid cell  $x$  was estimated by calculating the average of data from three observation stations, weighted according to the distance from  $x$  to the observation station. Then, the ratio of the observed precipitation to the estimated climatic value  $r(i)$  (where  $i = 1, 2, 3$ ) in the grid cell of station  $i$  was calculated as follows:

$$r(i) = p_o(i)/p_m(i), \quad (46)$$

where  $p_o(i)$  (mm/d) is the observed precipitation at station  $i$  and  $p_m(i)$  (mm/d) is the climatic value derived from Mesh Climatic Data 2000, which is the monthly climatic precipitation for the corresponding Basic Grid Square (Third Area Partition) estimated from the observed spatial distribution of rainfall from 1971 through 2000 (Japan Meteorological Agency, 2003).

Then, ratio  $r(i)$  is interpolated to each grid square of the model by using the inverse distance weighting method as follows:

$$r(x) = \frac{\sum_{i=1}^3 w(i)r(i)}{\sum_{j=1}^3 w(j)} \quad (47)$$

$$w(i) = \frac{1}{d(x, i)^2}, \quad (48)$$

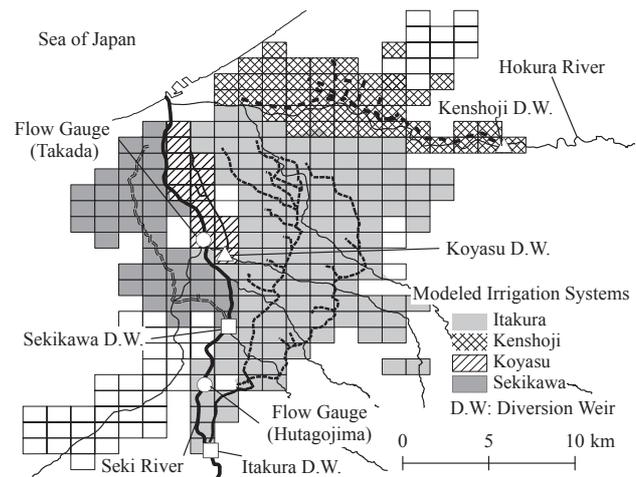
where  $d(i)$  is the distance from grid cell  $x$  to observation station  $i$ .

Finally,  $p(x)$  is estimated by multiplying  $r(i)$  by  $p_m(i)$ . Ideally, the estimated grid cell  $x$  should be located within a triangle formed by the three observation points; however, the same procedure was applied for grid cells outside of such a triangle. Snowfall and snowmelt processes, which were also incorporated in the precipitation estimation, are described in Section 4. The values of other meteorological variables used for ET estimation were similarly interpolated by using the inverse distance method.

River discharge, which was observed at Takada and Futagojima flow gauge stations (**Fig. 5**) from 2003 through 2008, was used to validate the model. The upstream station (Futagojima) is located immediately

downstream of the largest diversion weir, and the downstream station (Takada) is located near the basin outlet. The recorded data at both stations were affected by both water diversion and return flow.

Actual ET, calculated by the method proposed by Ohtsuki (1984), was used for the adjustment of the root zone storage  $S_{rmax}$  so that the actual ET calculated with equation (17) (see Section 2) would equal the Actual ET value. Then, the annual water balance at Takada station was calculated, and areal precipitation was corrected to satisfy the water balance of the watershed.



**Fig. 9** The modeled irrigated areas and their associated irrigation facilities in the lower Seki River basin.

### 3.3.4 Settings for the water allocation and management module

To apply the water allocation and management module, 16 irrigated blocks were delineated in the watershed by the method described in Section 2. Three major irrigation blocks, for which water is diverted at the Itakura, Sekikawa, and Kenshoji diversion weirs, respectively, are shown in **Fig. 9**.

In the reservoir operation scheme, each reservoir needs to be linked to a diversion weir, so that the water released for irrigation can be estimated. Here, the Sasagamine dam reservoir is linked to the Itakura diversion weir, and Nojiri Lake is linked to the Sekikawa diversion weir. The maximum release from each reservoir for hydropower generation was set to 3.28m<sup>3</sup>/s based on the published operation rule (Niigata Prefecture, 1985).

The paddy outlet height was set to 30 mm, and the maximum infiltration rate at the paddy surface was set to 5 mm/d, based on survey data obtained by the Hokuriku Regional Agricultural Administration (1984). Planting starts when the allocated water is greater than 120 mm, which is the water requirement for irrigation planning in this region, and the cropping period was set to 100 days.

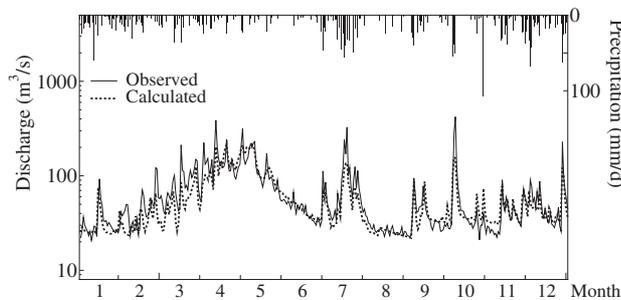
### 3.4 Results and discussion

#### 3.4.1 Validation of model with rivere discharges

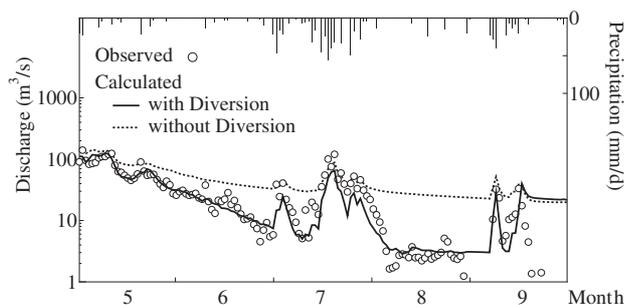
Model performance was first evaluated by comparing the calculated river discharges with the actual discharges observed at the two flow gauge stations along the Seki River (**Fig. 5**) during the period from 1976 to 2008. The hydrograph for 2006 is shown in **Fig. 10** and **Fig. 11**. The relative error between the calculated and the observed discharges was 27.0%, and the chi-square error was 7.2 m<sup>3</sup>/s. Hydrographs for the years 2003–2007 are shown in the appendix to this section (**Fig. 18–Fig. 22**).

Next, the impact of agricultural water use on the flow regimes at the two flow gauges was evaluated. Calculated discharges for the irrigation period (May through September) were compared with observed discharges at Futagojima station (immediately below the diversion weir) (hydrographs for 2006 are shown in **Fig. 11**). The hydrograph calculated with diversion (solid line) corresponds well to the observed discharges (open circles), but the hydrograph calculated without diversion (dotted line), which represents the natural flow condition, does not. Thus, the difference between the discharges calculated with and without diversion represents the effect of water diversion on the river flow. Hydrographs for the years 2002 to 2007 are presented in the appendix of this section (**Fig. 23–Fig. 28**).

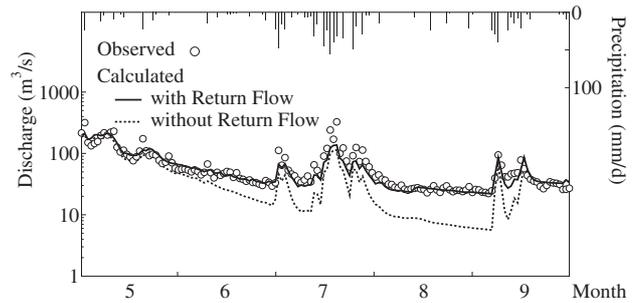
Finally, discharges at Takada station (near the basin outlet) during the irrigation period in 2006 were calculated with both diversion and return flow (**Fig. 12**, solid



**Fig. 10** Comparison between the calculated discharges and the observed discharges at Takada flow gauge station in 2006.



**Fig. 11** Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September 2006 due to incorporation of water allocation processes into the model.



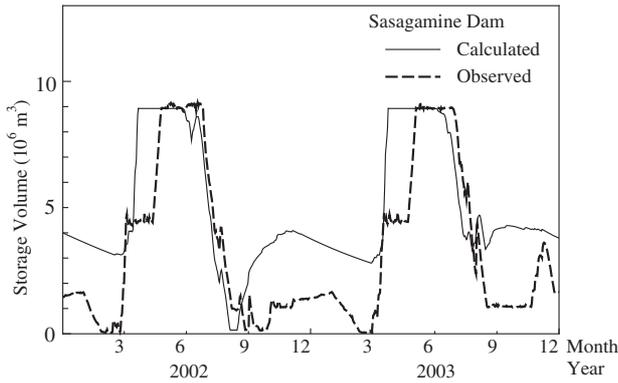
**Fig. 12** Changes in calculated discharges at Takada from May through September 2006 due to the incorporation of return flow processes into the model.

line) and with diversion but without return flow (i.e., water is diverted at the weirs but does not drain from the paddy fields) (dotted line) and compared with the observed values (open circles). Here, the difference between the calculated value with return flow and that calculated without return flow reflects the drainage from the irrigated paddy areas. However, the drainage water from irrigated areas consists of both rainwater and diverted water, and their contributions to total drainage are difficult to separate. Thus, this model experiment does not by itself reveal the amount of diverted water in the return flow. All results for 2002 to 2007 are presented in the appendix to this section (**Fig. 29–Fig. 34**).

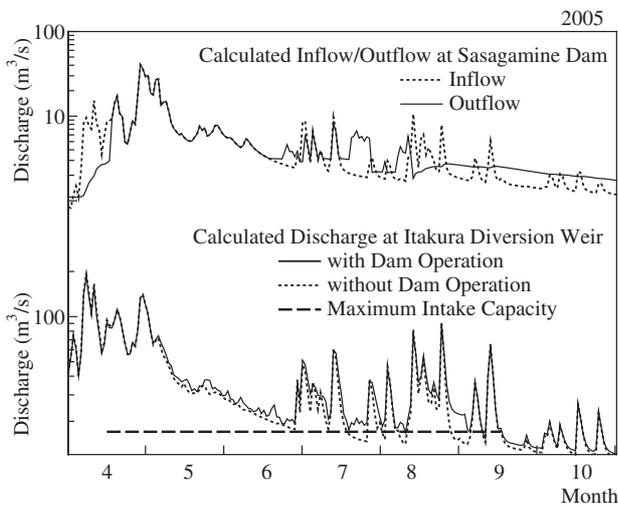
When water allocation was incorporated into the model, the calculated discharges during irrigation periods agreed closely with the observed data at both Futagojima and Takada flow gauge stations. These results show that river discharge at both observation points is strongly influenced by diversion and return flow processes, and that the developed water allocation and management module well represents the interaction between water circulation in irrigated paddy areas and the stream flow system.

#### 3.4.2 Changes to the flow regime simulated by the reservoir operation scheme

The reservoir operation scheme was validated by using the time series of storage data for Sasagamine dam for 2002 and 2003 (**Fig. 13**). Although the time series data for reservoir inflows and effluxes are published, the data do not satisfy the reservoir water balance; thus, these data were not used to evaluate the reservoir operation scheme. Instead, the calculated storage volume was compared with the observed storage volume of the dam. The general pattern of annual changes in the calculated storage agreed with the pattern of annual changes in the observed storage: (1) storage increased sharply at the end of March; (2) plateaued until 1 June, the starting date of irrigation releases (predetermined by the operation rule); (3) decreased as the volume released for irrigation increased; and (4) gradually recovered during fall and winter. However, the absolute values of the ob-



**Fig. 13** Comparison between the calculated and observed storage volumes in Sasagamine dam reservoir in 2002 and 2003.



**Fig. 14** Comparison of the calculated inflows and outflows at Sasagamine dam (top) and changes in the discharges at the Itakura diversion weir calculated with and without dam operation (bottom).

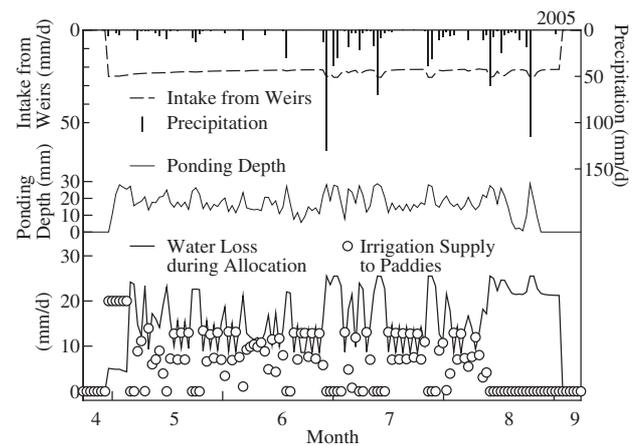
served and calculated storage values differed. These discrepancies are attributable to two assumptions of the module. First, as described in section 3.2.1, the release for hydropower generation was set to a constant. Second, the release for water use  $Q_{ru}$  was estimated simply by summing the releases for different uses, including irrigation  $Q_{ri}$  and hydropower generation  $Q_{rp}$  (see equation (39)). The discrepancies can be reduced by incorporating data specific to Sasagamine dam. For instance, Horikawa et al. (2012), who performed a detailed evaluation of the impact of climate change on reservoir operation, was able to improve the calculated storage by using a specific model for Sasagamine dam.

Although the reservoir operation scheme proposed here employed simple assumptions, water releases during the irrigation period were appropriately simulated. Comparison of the calculated inflows and outflows at Sasagamine dam (**Fig. 14**, top) with changes in the calculated discharge at the Itakura diversion weir with and without dam operation (bottom) showed that the calcu-

lated discharge without reservoir operation was less than the maximum intake capacity of the Itakura diversion weir in the middle of July and at the end of August, whereas the calculated discharge with reservoir operation remained higher than the maximum intake capacity. These results confirm that the reservoir operation scheme properly represents the supplementary release of water for irrigation.

### 3.4.3 Estimated water circulation within an irrigated areas

**Fig. 15** shows the estimated water circulation within the Itakura Irrigation Area, which is the largest irrigation block in the watershed, from April through September, including the time series of precipitation and water diversion at the weir (top), the ponding depth in the paddies (middle), and the amount of water supplied to paddies and the water loss during allocation (bottom). Each value in **Fig. 15** is averaged over the entire irrigated block. Water diversion at the Itakura diversion weir was stable at a rate of approximately 22 mm/d (top), and the ponding depth in the paddies was maintained at the target water depth of 20 mm (middle), indicating that the irrigation supply to paddies was sufficient. The maximum rate of water allocation (bottom) of approximately 12 mm/d, reflecting the irrigation efficiency  $I_e$  (set to 0.6), illustrates the trade-off between water allocation and water loss during allocation. During rainfalls (e.g., at the end of June and the beginning of July), much of the allocated water drained from the irrigated area (increasing the water loss), but the water loss decreased during low-precipitation periods (e.g., in the middle of July).



**Fig. 15** Estimated water circulation in the Itakura Irrigation Area, which receives water diverted at the Itakura diversion weir.

### 3.4.4 Return ratio of diverted water from irrigated areas

Water movement within the irrigated areas is complicated not only by the substantial Volumes involved but

also by repeated cycles of diversion and return flow. Understanding the dynamics of return flow is crucial for characterizing flow regimes in watersheds where irrigated paddies predominate. However, direct measurement data are rarely available and measurement alone cannot capture the entire return flow from irrigated areas for the following reasons. First, drainage from irrigated areas is composed of both rainwater and water diverted for irrigation. Second, these two components are difficult to separate because the mixing processes vary temporally and the residence times in each flow pathway are not known. Therefore, instead of an observation-based approach, DWCM-AgWU was used to estimate the return ratio of diverted water at the catchment scale.

To calculate the return flow from irrigated areas, the inflow and return flow (drainage) points were first identified for each irrigated area as the points where the modeled streams cross the borders of the irrigated areas. Then, total inflow  $Q_{\text{inf}}(t)$  and drainage  $Q_{\text{dng}}(t)$  of the irrigated area at time  $t$  were calculated as follows;

$$Q_{\text{dng}}(t) = \sum_{i=1}^{N_d} Q_{\text{ch}}(i, t) \quad (49)$$

$$Q_{\text{inf}}(t) = \sum_{i=1}^{N_i} Q_{\text{ch}}(i, t), \quad (50)$$

where  $Q_{\text{ch}}(i, t)$  is the calculated stream inflow at time  $t$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ), and  $N_i$  and  $N_d$  are the numbers of inflow and drainage points, respectively.

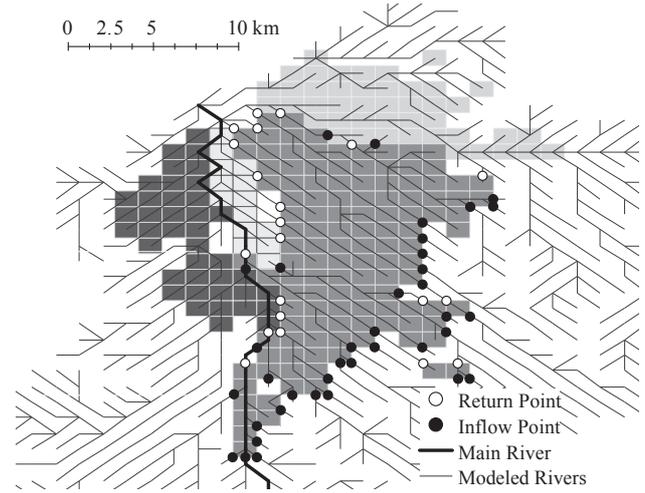
For the largest irrigated area in the watershed, the Itakura Irrigation Area, 33 inflow and 21 drainage points were identified **Fig. 16**. This large number of points means that it is difficult to conduct the necessary observations to evaluate return flow at the catchment scale.

To eliminate the effect of influx from adjacent upstream areas, net drainage from irrigated areas  $Q_{\text{net}}(t)$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ) was calculated by subtracting total inflow  $Q_{\text{inf}}(t)$  from total drainage  $Q_{\text{dng}}(t)$ .

$$Q_{\text{net}}(t) = Q_{\text{dng}}(t) - Q_{\text{inf}}(t) \quad (51)$$

Because  $Q_{\text{net}}$  can be composed of both rainwater and diverted water for irrigation, and these two components are difficult to separate, to evaluate the contribution to  $Q_{\text{net}}$  of water diverted for irrigation, the averaging time period for the calculation was set to a period during which  $Q_{\text{net}}$  consisted of both rainwater and diverted water. Then, the return flow of diverted water was evaluated over this averaging period. Here, the proportion of diverted water in  $Q_{\text{net}}$  was assumed to reflect the ratio of diverted water to the total water input during the averaging period, which is called the rainfall-irrigation ratio  $R_{\text{ri}}$ .

$$H_i(t) = Q_i(t)/A_{\text{irg}} \times 1000 \quad (52)$$



**Fig. 16** Locations of inflow and return flow points in the Itakura Irrigation area.

$$R_{\text{RI}} = \sum_{t_i}^{t_e} \left( \frac{H_i(t)}{H_i(t) + P_{\text{area}}(t)} \right) \quad (53)$$

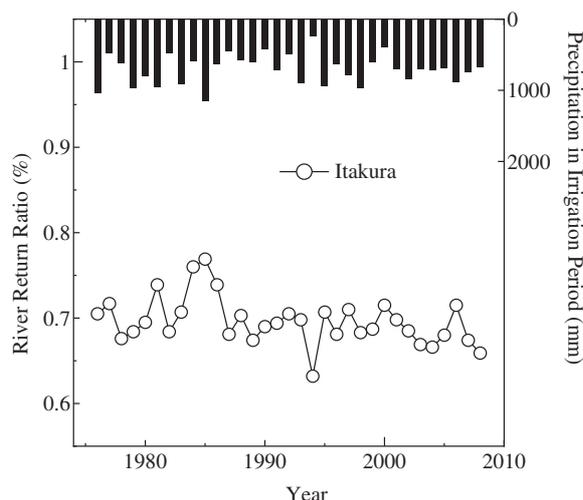
Equation (52) converts  $Q_i(t)$ , the volume of water diverted for irrigation at time  $t$  ( $\text{m}^3/\text{dt}$ ), to water depth  $H_i(t)$  ( $\text{mm}/\text{dt}$ ), where  $A_{\text{irg}}$  is irrigated area ( $\text{m}^2$ ). Then,  $R_{\text{RI}}$  is calculated with equation (53), where  $P_{\text{area}}(t)$  is precipitation over the irrigated area ( $\text{mm}/\text{dt}$ ), and  $t_i$  and  $t_e$  are the initial and terminal times of the averaging period, respectively. In this study, the entire irrigation period (25 April to 10 September) was used as the averaging period.

Finally, the return ratio  $F_r$  is calculated as the product of the rainfall-irrigation ratio and the ratio of net drainage to total diverted water, summed over the averaging period:

$$F_r = \sum_{t_i}^{t_e} \left( \frac{Q_{\text{net}}(t)}{Q_i(t)} \right) R_{\text{RI}} \quad (54)$$

The return ratio during the irrigation period was calculated for each irrigated area over a 33-year period (1976-2008). In the Itakura Irrigation Area, the average return ratio was 69.6%, and the ratio varied annually from 63.2% to 76.9% (**Fig. 17, Table 1**). Thus, a large proportion of the diverted water was returned to the river, where it presumably contributed to the stability of the downstream water supply.

The largest return ratio (76.9%) was obtained for the wettest year (1985) among the 33 years, and the smallest value (63.2%) was obtained for the driest year (1994). In 1994, 246 mm of rain fell during the irrigation period. Under such dry conditions, farmers try to retain water in the paddies, which decreases the management water loss. A large portion of the retained water, however, is lost through ET because of the dry conditions. Thus, the calculated decrease in the return ratio under extremely dry conditions is reasonable.



**Fig. 17** Annual variation in the return ratio in the Itakura Irrigation Area from 1975 to 2009 compared with precipitation during the irrigation period of each year.

**Table 1** Estimated precipitation (mm), actual ET (mm), and river return ratios in the Itakura Irrigation Area (1976-2008).

Year	Precipitation	Actual ET	River Return Ratio
1976	1038	511	0.705
1977	484	495	0.717
1978	618	533	0.676
1979	964	522	0.684
1980	796	517	0.695
1981	956	503	0.739
1982	483	503	0.684
1983	913	498	0.707
1984	586	484	0.760
1985	1148	467	0.769
1986	638	475	0.739
1987	446	498	0.681
1988	583	485	0.703
1989	608	524	0.674
1990	424	505	0.690
1991	719	500	0.694
1992	497	488	0.705
1993	899	484	0.698
1994	246	534	0.632
1995	937	509	0.707
1996	634	525	0.681
1997	785	505	0.710
1998	966	515	0.683
1999	598	514	0.687
2000	394	482	0.715
2001	704	506	0.698
2002	839	519	0.685
2003	698	525	0.669
2004	716	555	0.666
2005	691	540	0.680
2006	890	508	0.715
2007	744	529	0.674
2008	673	563	0.659
Average	706	510	0.696

Although the largest return ratio was obtained for the wettest year, a correlation between rainfall amount and the return ratio is less evident in wet years. For example, in 1998, the return ratio was relatively low (68.3%) (below the average) despite the higher than average

rainfall (966 mm). This result may be attributable to the duration of the averaging period (i.e., the entire irrigation period from 25 April to 10 September). During this rather long averaging period, a single intensive rainfall (e.g., 200 mm or more) could decrease the rainfall irrigation ratio RRI for the entire period, and consequently reduce the calculated return ratio. Further research is required to determine an appropriate duration for the averaging period.

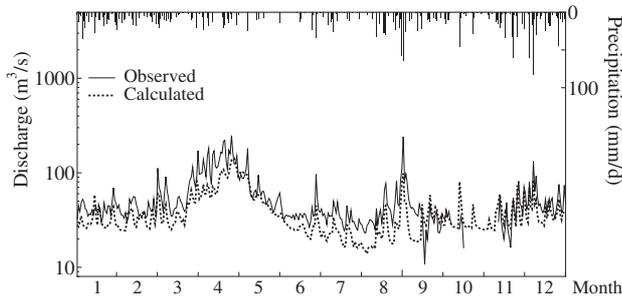
### 3.5 Summary

In this section, a novel approach to simulating the interaction between natural and anthropogenic water cycles in watersheds dominated by irrigated paddies was presented. The novel concepts used should contribute to ongoing discussions about how to incorporate anthropogenic impacts into distributed hydrological models. The approach and the results obtained by its application are summarized as follows:

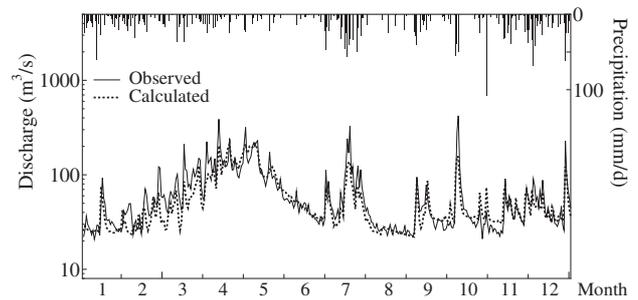
- 1) A recently configured GIS database of water use facilities throughout Japan was used to extract specifications for each facility, as well as for irrigation channel networks and irrigation block polygons. In addition, an algorithm was developed to connect vector and polygon data so that water allocation to irrigated areas could be simulated.
- 2) A water allocation and management module, which is independent of the surface runoff calculation, was incorporated into the base model so that the supplementary release of water for irrigation, water diversion at weirs, and water allocation and return flow within irrigated areas could be simulated.
- 3) When water allocation was incorporated into the model and applied to the Seki River basin as a case study, the calculated discharges during the irrigation period agreed closely with the observed data at two flow gauge stations, showing that stream flow was strongly influenced by both diversion and return flow processes. The water allocation and management module was thus shown to be highly capable of representing the interaction between water circulation in irrigated paddy areas and stream flow systems.
- 4) The largest and smallest return ratios were obtained for the driest and wettest years, respectively. These results are reasonable from the viewpoint of the water balance in the irrigated areas, though the correlation between rainfall amount and return flow was not as clear in wet years as it was in dry years. The lack of correlation in wet years may mean that the duration of the averaging period used was too long. Further research is required to determine the appropriate averaging period duration.

## Appendix 3

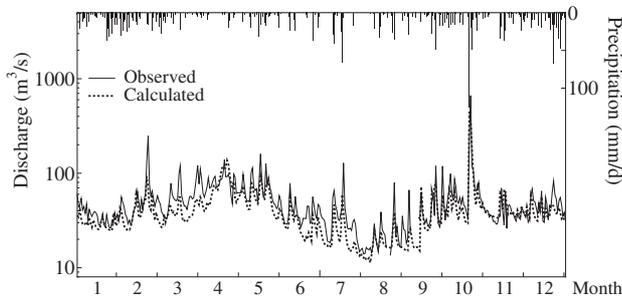
## Appendix 3A: Hydrographs at Takada



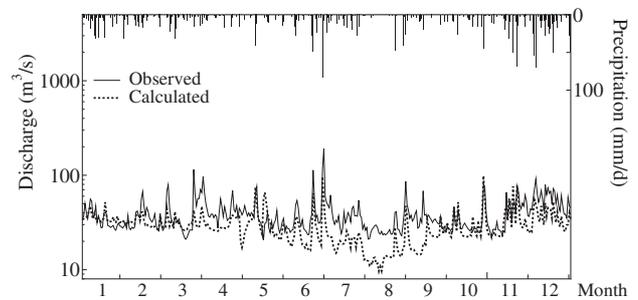
**Fig. 18** Comparison between the calculated discharges and observed discharges at Takada flow gauge station in 2003.



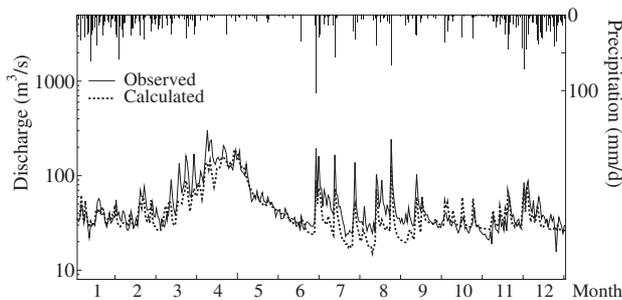
**Fig. 21** Comparison between the calculated discharges and observed discharges at Takada flow gauge station in 2006.



**Fig. 19** Comparison between the calculated discharges and observed discharges at Takada flow gauge station in 2004.



**Fig. 22** Comparison between the calculated discharges and observed discharges at Takada flow gauge station in 2007.



**Fig. 20** Comparison between the calculated discharges and observed discharges at Takada flow gauge station in 2005.

Appendix 3B: Changes in calculated discharges at Futagojima due to incorporation of water allocation and management module

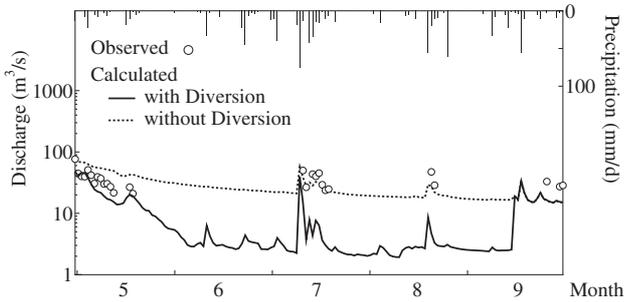


Fig. 23 Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September, 2002 due to incorporation of water allocation processes into the model.

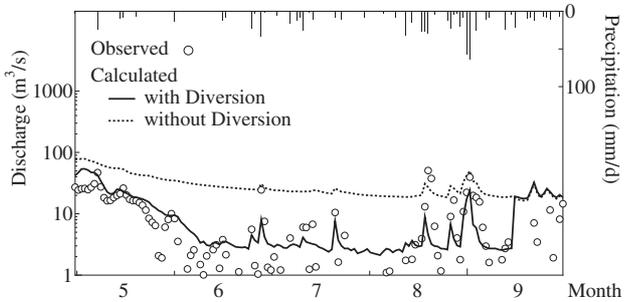


Fig. 24 Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September, 2003 due to incorporation of water allocation processes into the model.

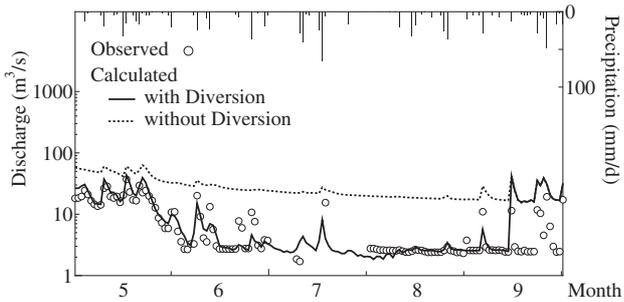


Fig. 25 Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September, 2004 due to incorporation of water allocation processes into the model.

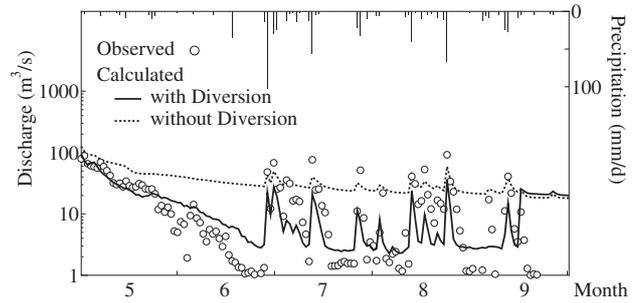


Fig. 26 Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September, 2005 due to incorporation of water allocation processes into the model.

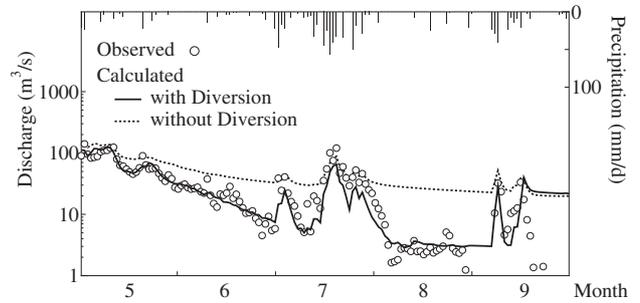


Fig. 27 Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September, 2006 due to incorporation of water allocation processes into the model.

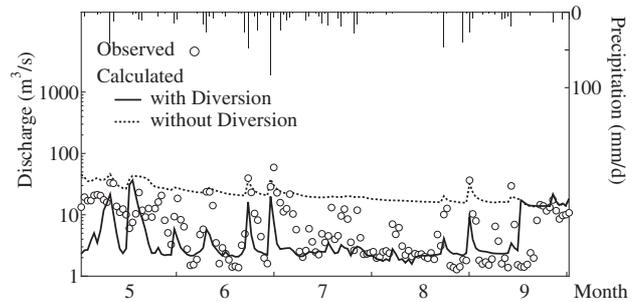
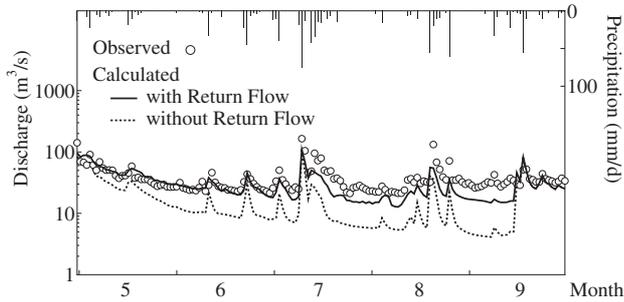
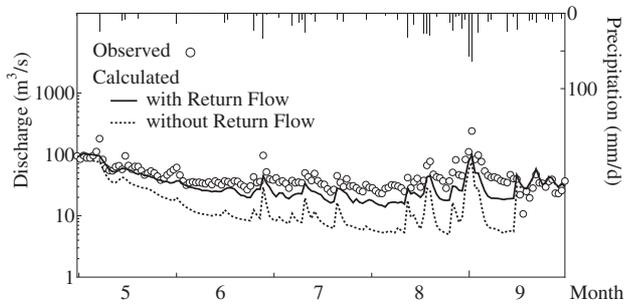


Fig. 28 Changes in calculated discharges at Futagojima from May through September, 2007 due to incorporation of water allocation processes into the model.

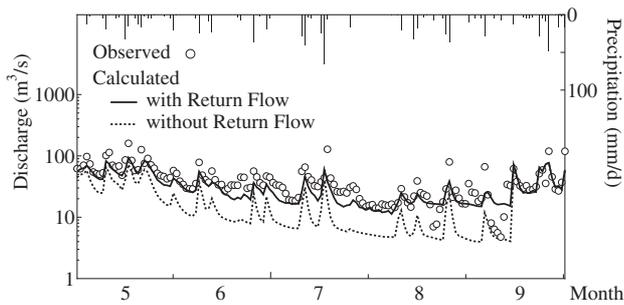
### Appendix 3C: Changes in calculated discharges at Takada due to incorporation of return flow processes into the model



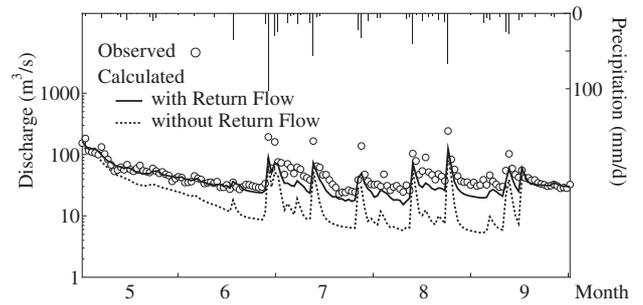
**Fig. 29** Changes in calculated discharges at Takada from May through September, 2002 due to incorporation of return flow processes into the model.



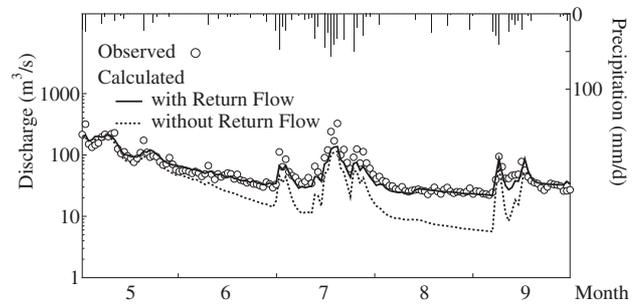
**Fig. 30** Changes in calculated discharges at Takada from May through September, 2003 due to incorporation of return flow processes into the model.



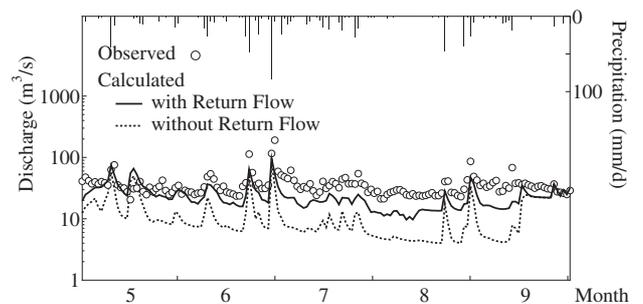
**Fig. 31** Changes in calculated discharges at Takada from May through September, 2004 due to incorporation of return flow processes into the model.



**Fig. 32** Changes in calculated discharges at Takada from May through September, 2005 due to incorporation of return flow processes into the model.



**Fig. 33** Changes in calculated discharges at Takada from May through September, 2006 due to incorporation of return flow processes into the model.



**Fig. 34** Changes in calculated discharges at Takada from May through September, 2007 due to incorporation of return flow processes into the model.

#### 4. A snowfall and snowmelt module for warm climate watersheds and its integration into DWCM-AgWU

##### 4.1 Introduction

The timing and pattern of snowmelt play a critical role in runoff generation in Japanese watersheds. Section 4 presents a grid-based snowfall and snowmelt module in which daily snow accumulation and snowmelt are calculated based on a simplified energy balance. Remotely sensed snow-covered areas are used to estimate the spatial distribution of a model parameter in regions where observed meteorological data are sparse.

##### 4.2 Development of the snowfall and snowmelt module

###### 4.2.1 Estimation of snowmelt based on the energy balance

The amount of energy used for snowmelt  $Q_m$  ( $W/m^2$ ) is estimated by using the energy balance of snow surface as follows

$$Q_m = R_n + H + \iota E + Q_g + Q_r \quad (55)$$

$$R_n = (1 - \alpha)S^\downarrow + L^\downarrow - \epsilon\sigma(T_s + 273.15)^4, \quad (56)$$

where  $R_n$  is net radiation,  $H$  and  $E$  are the sensible and latent heat fluxes (positive for influxes into the snow layer,  $W/m^2$ ),  $S^\downarrow$  is the downward short wave radiation ( $W/m^2$ ),  $L^\downarrow$  is the downward long wave radiation ( $W/m^2$ ),  $\alpha$  is albedo of snow surface,  $\epsilon$  is emission rate of snow surface ( $=0.97$ ),  $\sigma$  is the Stephan-Boltzman constant ( $= 5.67 \times 10^{-8} (W/(m^2 K^4))$ ),  $T_s$  is the temperature of snow surface ( $^\circ C$ ),  $Q_g$  is the heat flux from ground ( $W/m^2$ ), and  $Q_r$  is the heat flux from rain ( $W/m^2$ ).

The developed module is intended to represent snowfall and snowmelt in areas where precipitation in winter falls mainly as snow in a relatively warm climate. So that equation (55) could be applied to such an area, the energy balance employed for the calculation was simplified by adopting the following two assumptions (Suizu, 2001). First, the outgoing sensible  $H$  and latent heat  $E$  fluxes emitted from the snow surface were neglected (e.g., the sensible heat flux associated with extremely low temperatures or sublimation from the snow surface). Second, the freezing of meltwater in the snow layer was not simulated in the module. In other words,  $H$  is calculated by the module whenever the daily average air temperature  $T_a$  is more than  $0^\circ C$ , and the only latent heat flux considered is the influx into the snow layer that occurs with condensation at  $T_a > 7^\circ C$  and precipitation  $p > 0$ .

However, these assumptions cause snowmelt to be simulated whenever the calculated energy balance is positive (i.e.  $R_n + Q_r > 0$ ) even if the actual energy balance  $Q$  is negative ( $Q = R_n + H + \iota E + Q_r$ ). To avoid the simulation of snowmelt when  $Q$  is actually negative, the module calculates daily snowmelt  $M$  (mm/d) only when

$Q > 0$  and the daily average temperature is greater than  $-3^\circ C$  (Suizu, 2001).

$$M = \begin{cases} \frac{Q}{\iota \rho_w} \times 86400 & (T_a \geq 0) \\ \frac{Q}{\iota \rho_w} \frac{T_a + 3}{3} \times 86400 & (0 > T_a > -3), \end{cases} \quad (57)$$

where  $\iota$  is the specific heat of ice melt ( $= 0.33 \times 10^6$  (J/kg)),  $\rho_w$  is the density of water ( $1.0 \times 10^3$  (kg/m<sup>3</sup>)), and  $T_a$  is the daily averaged temperature ( $^\circ C$ ).

Besides the snowmelt  $M$  calculated with equation (57), the constant rate of snowmelt due to the ground heat flux  $M_g$  (mm/d) is also calculated. The value of  $M_g$  was set to 1.0 mm/d because observed values of  $M_g$  in Japan range from 0.6 to 1.2 mm/d (Ono et al., 1986).

###### (1) Estimation of shortwave radiation incorporating solar illumination geometry

Downward shortwave radiation  $S^\downarrow$  was estimated from the daily average global radiation  $S_d$ . The shortwave radiation received by a grid cell varies according to the angle and direction of its slope, especially during winter. Thus, solar illumination geometry was incorporated into the estimation of the actual shortwave radiation for each grid cell.

The daily average global radiation  $S_d$  ( $W/m^2$ ) was estimated from the sunshine ratio ( $=$ sunshine duration/potential sunshine duration) and extraterrestrial radiation  $S_{0d}$  ( $W/m^2$ ) (Kondo et al., 1991).

$$S_d = \begin{cases} \left( a \frac{N}{N_0} + b \right) S_{0d} & (N > 0) \\ c S_{0d} & (N = 0), \end{cases} \quad (58)$$

where  $N$  is the sunshine duration (h),  $N_0$  is the possible sunshine duration (h),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  is pyranometer coefficients; the typical values of the coefficients used for AMeDAS observations are  $a=0.244$ ,  $b=0.511$ , and  $c=0.118$  (Kondo et al., 1991) The extraterrestrial radiation  $S_{0d}$  is calculated with equation (59), and potential sunshine duration  $N_0$  is calculated with equation (61).

$$S_{0d} = \frac{I_{00}}{\pi} \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 (H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H) \quad (59)$$

$$H = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta), \quad (60)$$

where  $I_{00}$  is the solar constant ( $=1365$  ( $W/m^2$ )),  $H$  is the solar time angle from sunrise to its culmination (rad),  $\phi$  is latitude (rad),  $\delta$  is solar declination (rad), and  $d$  and  $d_0$  are the distance between the sun and earth and the average distance between them, respectively.

$$N_0 = \frac{2H_0}{0.2618}, \quad (61)$$

where  $H_0$  is solar time angle from sunrise to its culmination.

Next, the downward short wave radiation of each grid cell  $S^\downarrow$  is estimated from  $S_d$  and a reception index  $f$ , which accounts for solar illumination geometry of grid

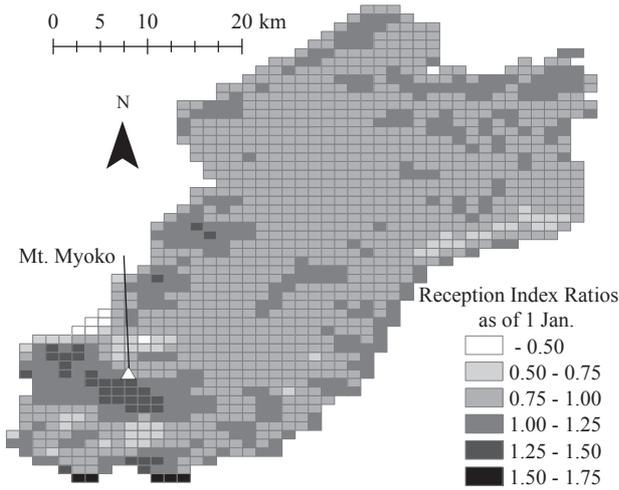


Fig. 35 Spatial distribution of reception index ratios on 1 January.

cells. The reception index  $f$  is given by equation (62) as the inner product of the vector normal to the grid cell and the direction of the sun at its culmination (Lu et al., 1998).

$$f = \cos \delta \cos \phi + \sin \phi \sin \delta + \tan \theta (\cos \delta \cos \beta \sin \phi - \cos \delta \cos \beta \cos \phi), \quad (62)$$

where  $\theta$  is slope angle ( $0 < \theta < \pi/2$ ),  $\beta$  is slope direction ( $-\pi < \beta < \pi$ , 0 for south facing slope, and positive in the counterclockwise direction). The reception index for horizontal surface  $f_0$  is given by  $\theta = 0$  as follows:

$$f_0 = \cos \delta \cos \phi + \sin \phi \sin \delta \quad (63)$$

Finally, the shortwave radiation received by a grid cell,  $S^\downarrow$ , is estimated with equation (64).

$$S^\downarrow = \frac{f}{f_0} S_d \quad (64)$$

The spatial distribution of the reception index ratios ( $f/f_0$ ) as of 1st of January of any given year is depicted in Fig. 35. Values of  $f/f_0$  are close to 1 over flat plains; they increase to more than 1.25 on south-facing slopes, and decreased to less than 0.75 on north-facing slopes around the Mt. Myoko,

The snow surface albedo was parameterized on the basis of snow age and temperature (Yamazaki et al., 1994).

$$\alpha_n = \alpha_{\min} + (\alpha_{n-1} - \alpha_{\min}) \exp(-1/k) \quad (65)$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} -0.12 T_a + 0.76 & (T_a \geq -1.0) \\ 0.88 & (T_a \leq -1.0) \end{cases} \quad (66)$$

$$k = \begin{cases} -4.9 T_a + 4.5 & (T_a \leq 0.1) \\ 4.0 & (T_a \geq 0.1), \end{cases} \quad (67)$$

where  $\alpha_0$  is an albedo of new snow surface, and  $\alpha_{\min}$  is the minimum of snow surface albedo (=0.4).

## (2) Estimation of net long wave radiation from sunshine duration

Net longwave radiation,  $L^\downarrow - \epsilon \sigma (T_s + 273.15)^4$  ( $\text{W/m}^2$ ), is estimated by using the empirical relationship between the net longwave radiation and daily sunshine duration (Suizu, 2001). The long term observed data used for this study included the meteorological characteristics for different snowy areas of Japan, including Moshiri, eastern Hokkaido (cold and dry weather), Sapporo, western Hokkaido (cold and wet weather), and Nagaoka, Niigata (warm and wet weather).

$$L^\downarrow - \epsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 = -53.01 \frac{N}{N_0} - 11.08 \quad (68)$$

## (3) Estimation of sensible and latent heat flux

The sensible and latent heat flux  $H$  and  $\iota E$  are estimated by the bulk equations (69) and (70).

$$H = c_p \rho C_h U (T_a - T_s) \quad (69)$$

$$\iota E = \iota \rho C_e U (q - q_s), \quad (70)$$

where  $c_p \rho$  is the specific heat at constant pressure for air ( $= 1.21 \times 10^3 \text{J/(K m}^3\text{)}$ ),  $C_h$  and  $C_e$  are the bulk coefficient for sensible and latent heat flux, respectively,  $q$  and  $q_s$  are the specific humidity of air and snow surface, respectively, and  $U$  is the daily averaged wind speed ( $\text{m/s}$ ). Here,  $E$  ( $\text{mm}$ ) denotes the amount of condensed water onto the snow surface.

To calculate  $H$  and  $\iota E$ , spatial distribution of the wind speed  $U$  and diurnal variation must be properly accounted for. However, detailed wind speed data are not available, especially in remote mountainous areas. Therefore, the parameter  $k_{sl}$  ( $\text{mm/(K d)}$ ) proposed by Suizu (2001), is employed, in which the spatial and diurnal variation of  $U$  are implicitly accounted for (equation (71)).

$$k_{sl} = \frac{c_p \rho C_h U}{\iota \rho_w} \times 86400 \quad (71)$$

For the calculation of  $k_{sl}$ , the following assumptions were made. First, the bulk transfer coefficients for sensible and latent heat on snow surface were set equal each other ( $C_h = C_e$ ), because their estimated values are approximately  $1.5\text{-}3.0 \times 10^{-3}$  (Kondo, 1994). Second, the specific humidity  $q$  was converted to  $q \cong 0.622e/p_{\text{atm}}$ , where  $e$  is vapor pressure at the snow surface ( $\text{hPa}$ ) and  $p_{\text{atm}}$  is the standard atmospheric pressure. Third, because the presumed latent heat flux occurred under very humid conditions (i.e.  $T_a > 7^\circ\text{C}$  and precipitation  $p > 0$ ), the vapor pressure  $e$  was equated to the saturated vapor pressure at  $T_a$ , and vapor pressure at snow surface  $e_0$  is equaled to the vapor pressure at  $T_a = 0$  (i.e.  $e_0 = 6.11$  ( $\text{hPa}$ )).

### 4.2.2 Estimation of the spatial extent of parameter

$k_{sl}$

Because of the absence of detailed time series data

for wind speed  $U$  and the bulk coefficients  $C_h$  and  $C_e$ ,  $k_{sl}$  was originally estimated by assuming that the calculated snow melting date was the same as the observed snow melting date (Suizu, 2001). For larger scale application of the model (e.g. watershed scale), the  $k_{sl}$  values at ungauged points can be estimated by a regression analysis in which the distance from the coast line, altitude and direction of slope are used as predictors (Suizu, 2002). However, clear relationship between the predictors and  $k_{sl}$  values are not always found, especially in the case of watersheds where snow observations are sparse.

Therefore, in this study, to allow more general application of the snowfall and snowmelt module, remotely sensed snow cover data are used to estimate the spatial distribution of  $k_{sl}$ . First, snow cover areas are extracted from remotely sensed images and overlaid on the model grid to estimate the snow melting date for each grid cell. The snow melting date (hereafter, the observed melting date) was assumed to be the same date that the images were taken. Next, the  $k_{sl}$  value of the grid cell was estimated such that the difference between the calculated and observed melting dates was minimized by using a global parameter search algorithm, called the SCE-UA method (Duan et al., 1992). The definition of the calculated melting date is that of the Japanese Society of Snow and Ice (1990), namely, the date after which no snow cover is observed at least for 30 days. To estimate  $k_{sl}$ , 10 repetitions of the search algorithm were carried out for each grid cell by changing the random seeds of the search algorithm for each repetition; then the average of the results was adopted as the estimated  $k_{sl}$  value of that grid cell. Finally,  $k_{sl}$  values of the grid cells for which no melting date could be estimated were determined by the inverse distance weighting method using the estimated  $k_{sl}$  values of the three neighbouring grid cells.

### 4.3 Study watershed

#### 4.3.1 Winter precipitation in the study watershed

In the Seki River Basin in central Japan was selected for a case study (see section 3.3), over half of the average annual precipitation of more than 3000 mm falls as snow in winter. Among 339 stations in Japan where snow depth is continuously observed, record snowfalls were observed in winter 2005-2006 at 23 (Takahashi, 2007), whereas in winter 2006-2007, snowfall was remarkably lower than average at many of the stations. In the Seki River Basin, the snow depth in winter 2005-2006 was about three times that recorded in 2006-2007 (Yokoyama et al., 2007). By comparison, in the Tohoku Region, snow depth in 2005-2006 was about twice that in 2006-2007 (Motoya, 2008).

#### 4.3.2 Collected winter precipitation data

##### (1) Estimation of the spatial distribution of snowfall

The grid system used for the snowfall and snowmelt module is the same as that described in section 3.3.3. Required meteorological data (precipitation, temperature, humidity, and wind speed) were collected from 1976 through 2008 at existing observation stations (**Fig. 36**). The details of the collected data and their processing for the model application are also described in section 3.3.3.

The estimated precipitation was classified into snowfall or rainfall depending on the daily average temperature  $T_a$ . The threshold value of  $T_a$  was determined based on 10 years of precipitation observations recorded at the Takada Weather Station (Sugaya, 1990). In these observations, the ratio of snowfall to total precipitation was 50% when  $T_a = 2.2$  °C, and it increased linearly from 0% to 100% as  $T_a$  increased from 0.5 to 4.0 °C. The underestimation of snowfall caused by wind was corrected for by calculating the catch ratio  $C_r$ :

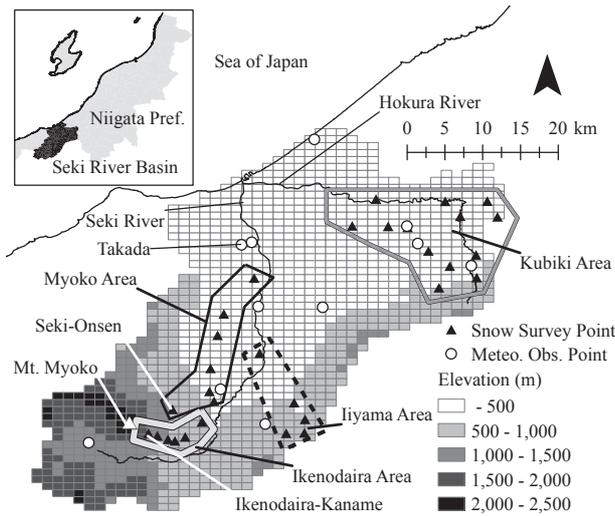
$$C_r = \frac{1}{1 + mU}, \quad (72)$$

where  $m$  is a specific parameter that depends on the type of raingauge (Yokoyama et al., 2003). The value of  $m$  was set to 0.346 for the typical AMeDAS raingauge (RT-3).

##### (2) Observed snow water equivalent data

For model validation, snow water equivalent (SWE) data were collected at 31 points in the study watershed (**Fig. 36**), where continuous monthly observations have been carried out for almost 20 years by researchers at the NARO Hokuriku Agricultural Research Center. The snow surveys are conducted monthly, in January, February, and March of each year. Each survey point is located in an open, flat to gently sloping area to minimize the effect of wind on the measurement. At each sampling time, three samples are collected at each point and the average is used as the observed SWE (**Fig. 37**). Among the 20 years of observed data, data from three years were selected for the model validation: namely, a heavy snow year (2005-2006), a light snow year (2006-2007), and an average snow year (2002-2003).

The snow surveys are carried out in four areas of the study watershed (**Fig. 36**). The distribution of SWE in relation to elevation in each of these areas in February 2006 is shown in **Fig. 38**. In February 2006, snowmelt was relatively small compared to the total snowfall, so the SWE distribution mainly reflects the original spatial distribution of the snowfall. The increase rate of SWE with elevation varied among the four areas: it was 0.159 in the Ikenodaira Area, 0.527 in the Iiyama Area, 1.585 in the Myoko Area, and 2.265 in the Kubiki Area. The increase rates in the four areas averaged over the nine observations were 0.326, 0.635, 0.902, and 1.618 mm/



**Fig. 36** Map of the Seki River Basin showing the snow survey observation points and areas.

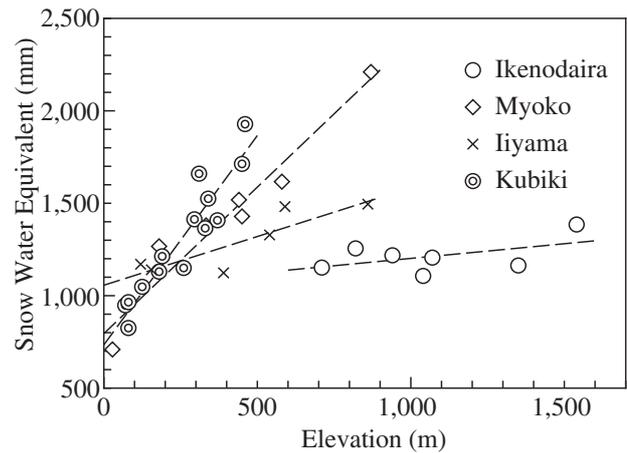


**Fig. 37** A snow sampler being used during the snow survey.

m, respectively.

### (3) Remotely sensed snow-covered areas

Remotely sensed imagery from the MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) satellite was used to detect snow-covered areas. The spatial resolution was 500 m for the wavelength ranges used in the analysis (1.230 - 1.250 $\mu$ m and 1.628 - 1.652 $\mu$ m, Japanese Agricultural System Society, 2007). Thirteen images were selected from the MODIS data archive. The selected images were acquired on 7 March, 24 March, 7 April, 28 April, 4 May, and 21 May in 2006; and on 21 March, 23 March, 12 April, 29 April, 14 May, 21 May, and 29 May in 2007. The snow-covered areas of the study watershed were detected by supervised classification using the spectral signatures for snow cover (e.g., at the top of high mountains) as the supervisor.



**Fig. 38** Relationship between SWE and elevation in the four areas of the study watershed (February 2006).

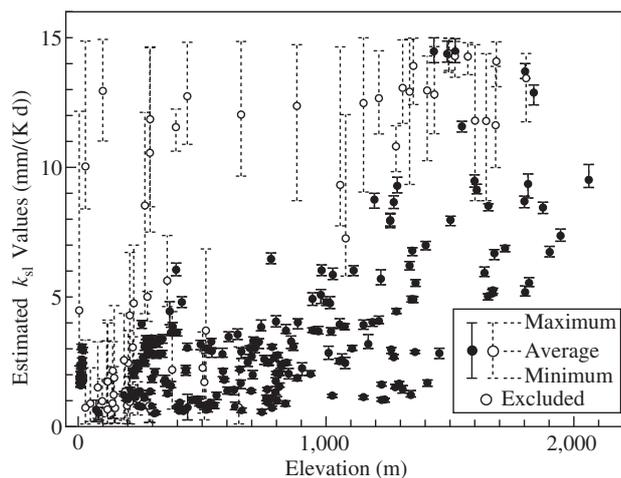
## 4.4 Results and discussion

### 4.4.1 Estimated spatial distribution parameter $k_{sl}$

The average values of  $k_{sl}$  obtained by the 10 repetitions of the parameter search are shown in **Fig. 39**. For most grid cells, the difference between the maximum and minimum estimate was 0.1-0.2, but for some it was as large as 5. Among the variables used to estimate  $k_{sl}$  (sensible and latent heat fluxes, net radiation, and the ground heat flux; see equation (71)), net radiation and ground heat flux were determined from the observed meteorological data. As a result,  $k_{sl}$  is the only parameter that determines the snow melting date. If the estimated value of  $k_{sl}$  is larger than the best (optimized) value, the difference between the observed snow melting date and the date calculated with an objective function will increase, and vice versa. Therefore, the shape of the objective function is theoretically similar to that of a quadratic function with one depression, at which the optimal  $k_{sl}$  can be obtained.

However, the actual shape of the function is composed of discrete values because the objective function is calculated as a difference between the observed and calculated melting dates. Thus, if the depression of the function is flat, the range of the estimated  $k_{sl}$  will be wider. A wide range of the estimated  $k_{sl}$  implies a low contribution of the sensitive and latent heat fluxes to the total energy used to melt the snow. Possible causes are overestimation of the net radiation and ground heat flux, underestimation of snowfall, and heat sources neglected by the model (e.g., heat emitted from urban areas).

Grid cells in which the estimation range of  $k_{sl}$  exceeded 1 (open circles in **Fig. 39**) were excluded from the analysis. As a result, 42 of the 313 grid cells (13.4%) were excluded. The values of the non-excluded grid cells (black circles in **Fig. 39**) were then used to estimate  $k_{sl}$  by the inverse distance weighting method. **Fig. 40** shows the spatial distribution of the estimated  $k_{sl}$  values. In the low-lying area near the coast,  $k_{sl}$  values



**Fig. 39** R relationship between estimated  $k_{sl}$  values and elevation. Bars indicate maxima and minima estimated from satellite images of snow-covered areas. Data shown with white circles were excluded from further analysis.

were approximately 1.5, similar to the value estimated at Takada ( $k_{sl} = 1.7$ ; Suizu, 2001). Then  $k_{sl}$  values gradually increased with elevation, and they exceeded 10 on the south-facing slope of Mount Myoko, where sensible heat transfer contributed greatly to snowmelt because of strong winds and high daytime temperatures.

#### 4.4.2 Comparison of observed and calculated SWE

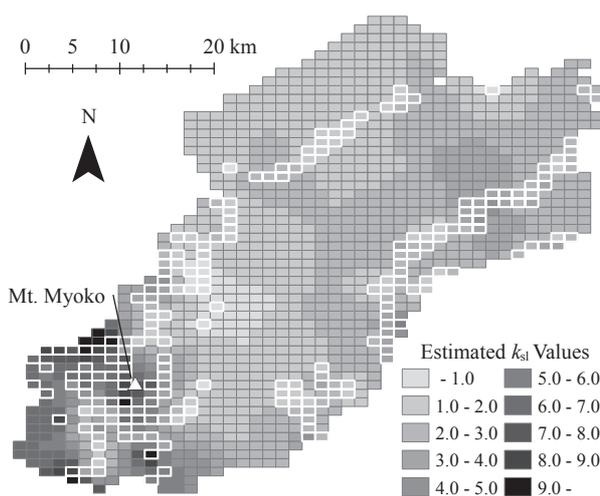
Calculated SWE values in each of four areas were plotted against observed values **Fig. 36**. In each graph (**Figs. 41, 42, 44, and 46**), dashed lines are plotted  $\pm 200$  mm away from the line of one-to-one correspondence between calculated and observed SWE. An SWE difference of 200 mm is equivalent to a difference of 5-7 days in the snow melting date if the maximum snowmelt rate is assumed to be 30-50 mm/d. This discrepancy in melting date is considered acceptable because of the heterogeneity of snow accumulation and snowmelt processes in the grid cells, and given the spatial resolution of the MODIS data (500 m). In the description below, the dashed lines are referred to as 200 mm lines.

##### (1) Kubiki Area

Among the four areas, SWE estimates were most accurate in the Kubiki area, where all but two data points plotted within the 200 mm lines (**Fig. 41**). This result is attributed to the relatively gentle slopes and high density of rain gauges within this area. Time series of SWE at all observed points in the Kubiki area are shown in the Appendix 4A of this section (**Figs. 50-62**).

##### (2) Ikenodaira Area

Calculated and observed SWEs in the Ikenodaira area, the highest area in the study watershed, are compared in **Fig. 42**. The data points are more scattered compared with those in the Kubiki area, but 76% of all points



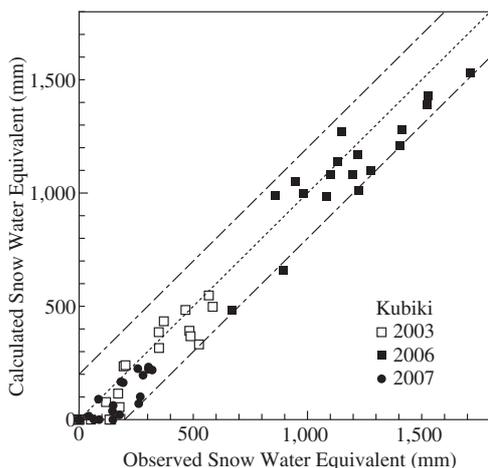
**Fig. 40** Spatial distribution of  $k_{sl}$  as estimated from satellite images of snow-covered areas. Snowmelt dates were obtained from satellite images for the grid cells outlined in white.

plotted within the 200 mm lines. The time series of observed and calculated SWE and cumulative snowmelt at the Ikenodaira-Kaname point (1540 m.a.s.l) (**Fig. 43**) shows that the cumulative snowmelt was only about 100 mm in the middle of March, which is quite small compared with the SWE (between 1000 and 2000 mm at maximum). Hence, the discrepancy between calculated and observed SWE can be attributed mainly to errors in snowfall estimation due to the few rain gauge observations and strong winds in high-altitude areas. Time series of SWE at all observed points in this area are shown in the Appendix 4B (**Figs. 63-67**).

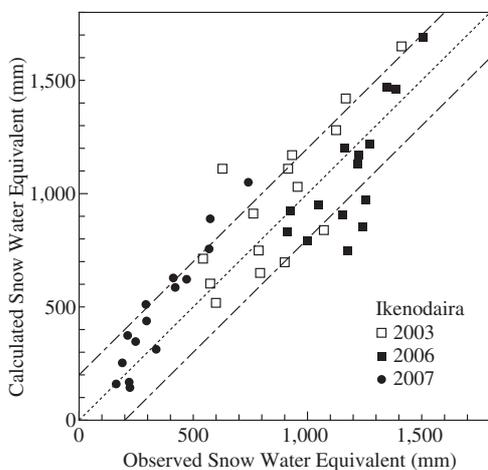
##### (3) Myoko Area

In a similar way in the Ikenodaira Area, all the observed and calculated SWE were presented (**Figs. 44 and 45**). In the Myoko area, the calculated SWE values were underestimated compared with the observed values; only 64% of the total points plotted within the 200 mm lines (**Figs. 44**). In this area, the increase rate with elevation of winter precipitation given by Mesh Climatic Data 2000 is 0.310 (mm/m), which is less than the observed increase rate of 0.902 mm/m (see section 4.3.2). Thus, the underestimation of SWE in this area is partly attributable to the underestimated winter precipitation.

Another possible cause of the discrepancy is locally heavy snowfall. The time series of observed and calculated SWE and cumulative snowmelt at the Seki-Onsen point (870 m.a.s.l) (**Fig. 45**) shows that the calculated SWE corresponds well to the observed SWE in 2003 and 2007 but not in 2006, when it was underestimated. Moreover, the discrepancy was large even in January and February, when the cumulative snowmelt was very small. Hence, the underestimation of the snowfall may account at least in part for the underestimation of SWE.



**Fig. 41** Comparison of observed and calculated SWE in the Kubiki Area.

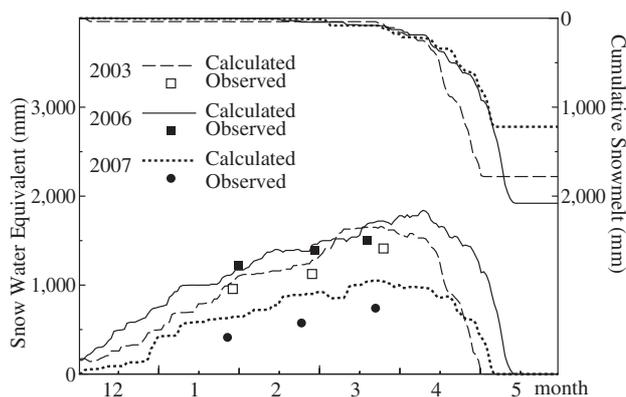


**Fig. 42** Comparison of observed and calculated SWE in Ikenodaira Area.

Local snowfall anomalies have also been reported in this area by intensive snow surveys carried out during winter 2005-2006 to evaluate the damage caused by that winter's abnormally heavy snowfall (Yokoyama, 2006). The survey revealed that snow depth on the southeastern slope of Mount Myoko, where the Seki-Onsen point is located, was 20% larger than the average. Time series of SWE at all the observed points included in this area are shown in the Appendix 4C (Figs.68-73).

#### (4) Iiyama Area

In the Iiyama area, comparison of calculated and observed SWE showed that more than 80% of the data plotted within the 200 mm lines (Fig. 46). The discrepancies are likely due to the effects of local snowfall and strong winds. Time series of SWE at all observed points in this area are shown in the Appendix 4D (Figs.74-78).



**Fig. 43** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Ikenodaira-Kaname (Stn. 2410; see Fig. 49).

#### 4.4.3 Calculated river discharges after incorporation of the developed snowfall and snowmelt module

Simulations were performed with DWCM-AgWU after incorporation of the snowfall and snowmelt module, and then the calculated discharges during the winters (December through May) of 2004-2005 (Fig. 47) and 2005-2006 (Fig. 48) were compared with discharges observed at the Takada flow gauge (Fig. 36). The relative error (RE) and chi square error (CSE) for the entire calculation period (2003-2007) were 27% and 7.2 m<sup>3</sup>/s, respectively; in winter 2004-2005, they were 19.4% and 4.5 m<sup>3</sup>/s, respectively, and in winter 2005-2006, they were 24.6% and 9.2 m<sup>3</sup>/s, respectively. Thus, as a result of incorporation of the module, DWCM-AgWU was able to represent well watershed-scale snowfall and snowmelt processes as a part of the natural hydrological cycle. In particular, the calculated maximum discharges, observed during periods of little or no precipitation, showed clearly that the skill level of the snowfall and snowmelt module is high.

#### 4.5 Summary

In this section, the development of a snowfall and snowmelt module for calculation of daily snow accumulation and snowmelt from the simplified energy balance was presented. The module was then tested against observed SWE and river discharges in the study watershed. The results obtained are summarized as follows:

- 1) A simplified form of the energy balance was employed for application in an area with a relatively warm climate and abundant winter snow. So that the model could be applied at watershed scale, a novel approach was used to estimate the spatial distribution of the model parameters. Namely, remote sensing data were used to determine the snow-covered areas in regions where observed meteorological

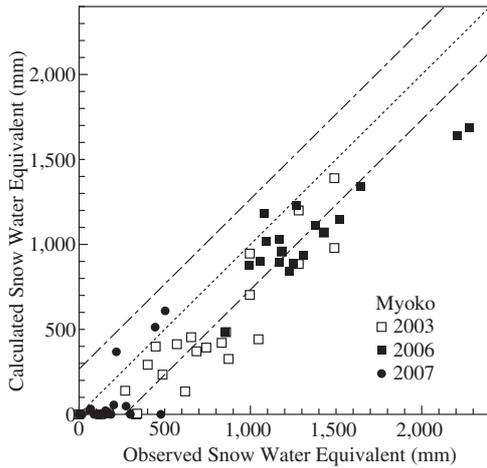


Fig. 44 Comparison of observed and calculated SWE in the Myoko Area.

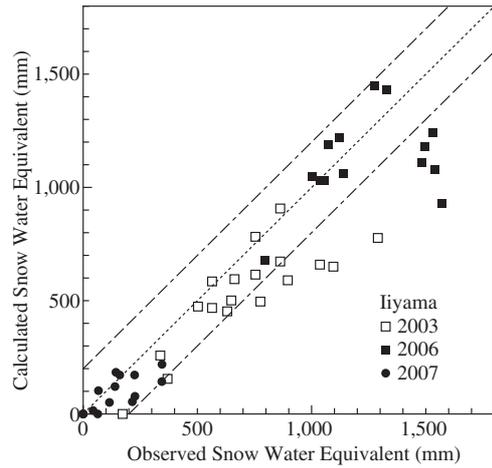


Fig. 46 Comparison of observed and calculated SWE in Iiyama Area.

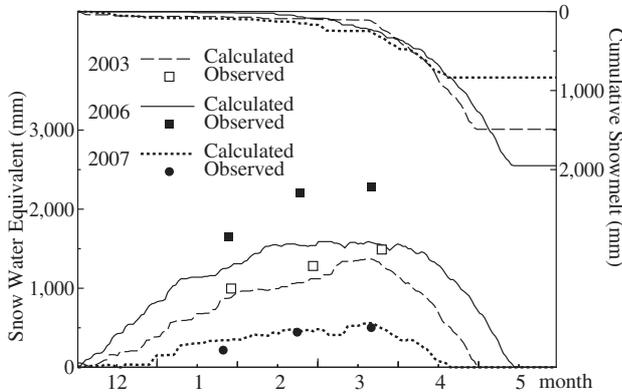


Fig. 45 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Seki-Onsen (Stn. 2813; see Fig.49).

logical data were sparse.

- 2) The model was applied to the Seki River Basin, a representative snowy basin in an area of Japan with a relatively warm winter climate. Comparison of calculated and observed snow water equivalent (SWE) revealed that the model successfully represented the spatial distributions of SWE within  $\pm 200$  mm, except in areas where locally intensive snow-fall occurred.
- 3) In addition, river discharges calculated during snow-melt periods with DWCM-AgWU represented observed variations in flow with high accuracy.

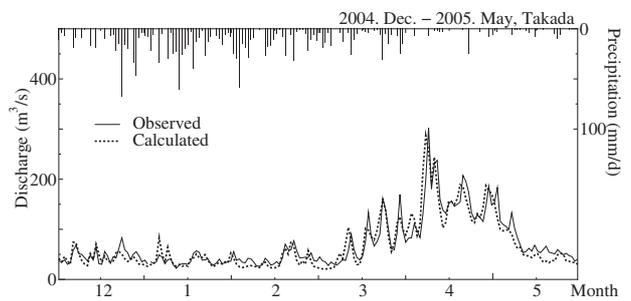


Fig. 47 Comparison of the calculated and observed discharge in winter 2004-2005.

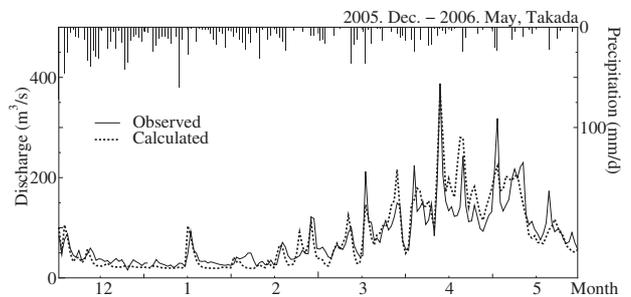
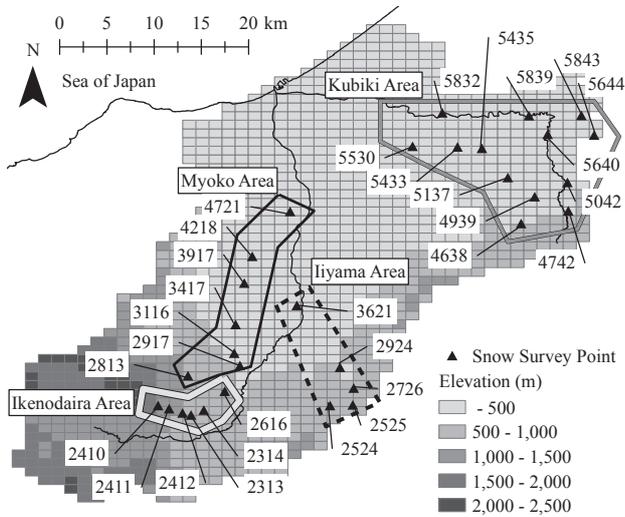


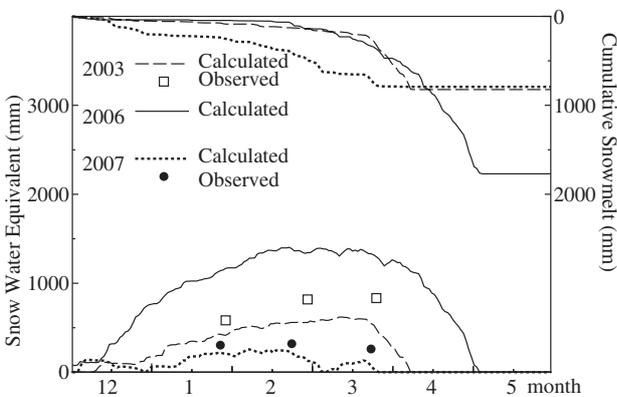
Fig. 48 Comparison of the calculated and observed discharge in winter 2004-2005.

Appendix of Section 4

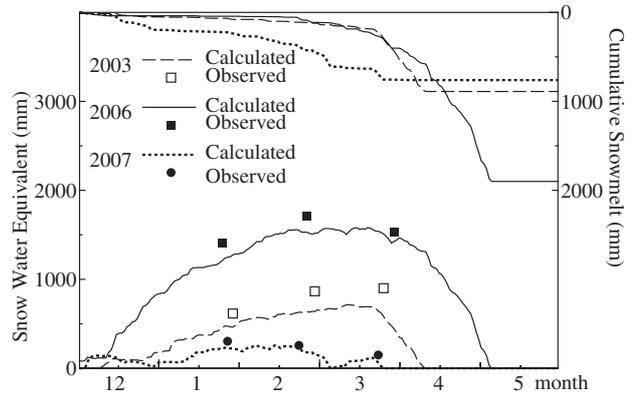


**Fig. 49** Map of the Seki River Basin showing the snow survey points and their associated station numbers in the four areas.

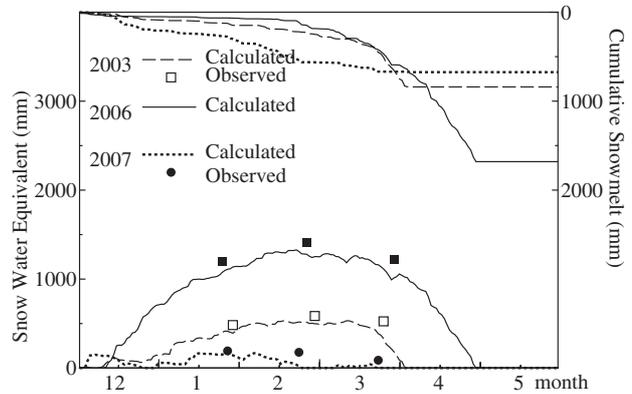
Appendix 4A: Time series of SWE at all the observed points included in the Kubiki Area



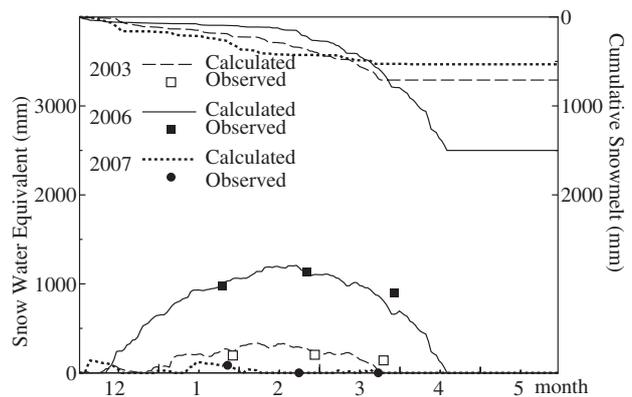
**Fig. 50** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 4742.



**Fig. 51** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 4638.



**Fig. 52** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 4939.



**Fig. 53** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5137.

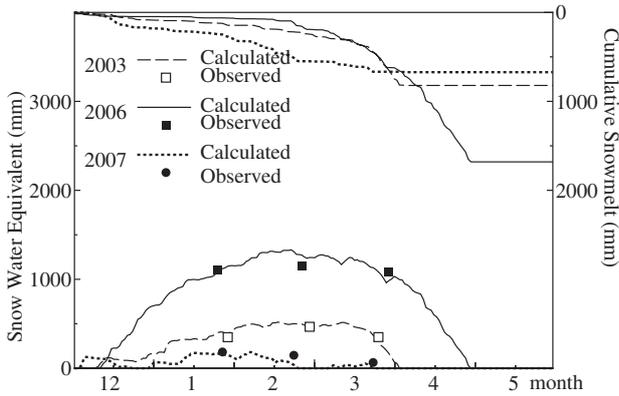


Fig. 54 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5042.

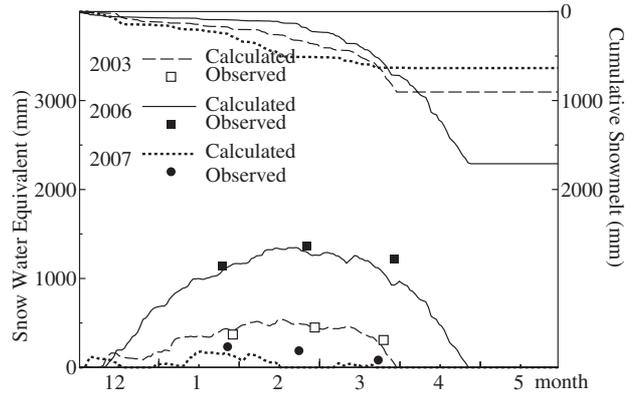


Fig. 57 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5843.

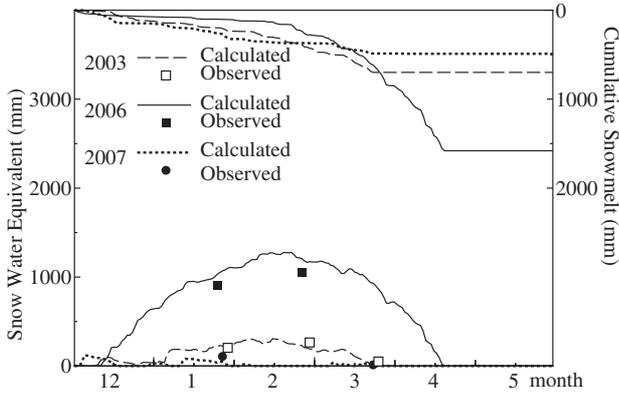


Fig. 55 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5640.

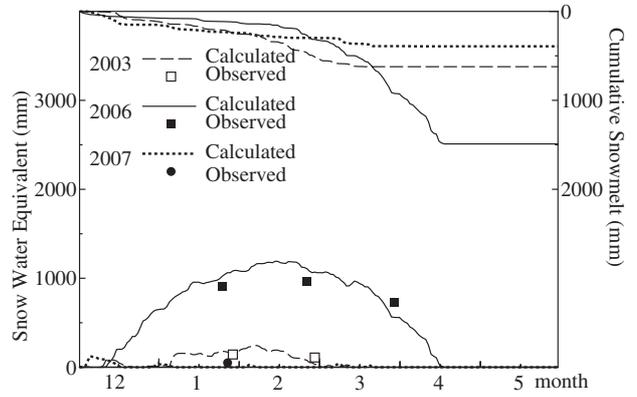


Fig. 58 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5839.

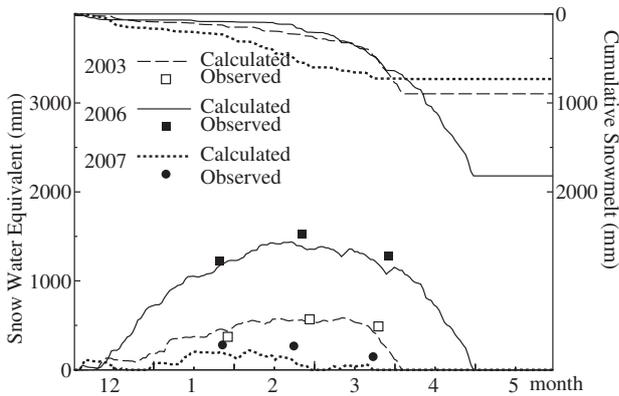


Fig. 56 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5644.

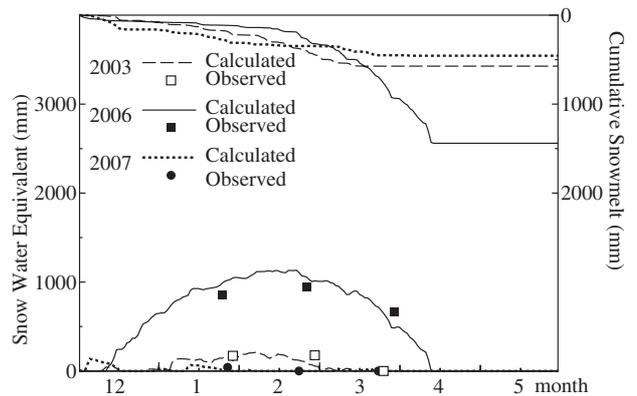
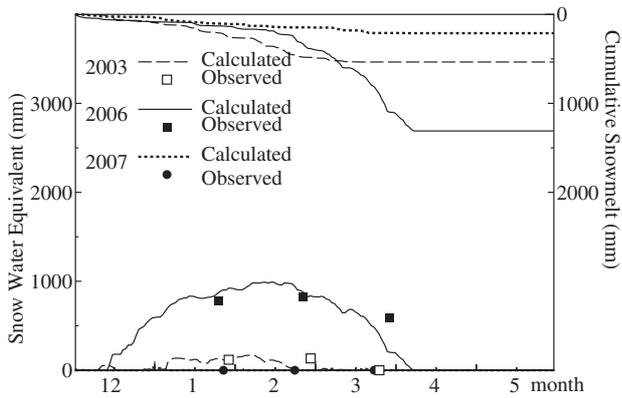
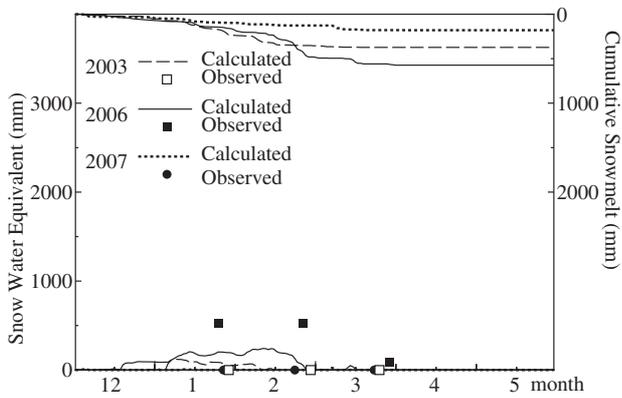


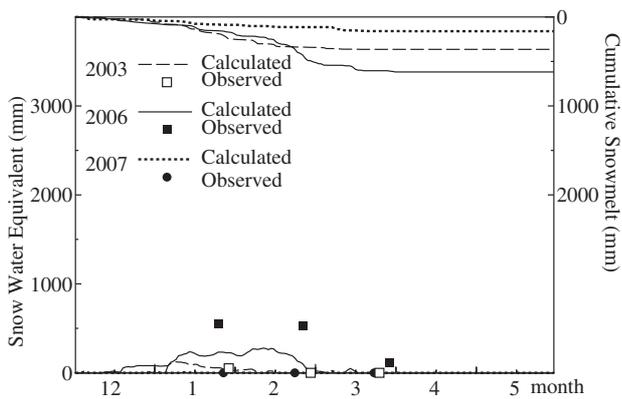
Fig. 59 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5435.



**Fig. 60** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5433.



**Fig. 61** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5832.



**Fig. 62** Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 5530.

Appendix 4B: Time series of SWE at all the observed points included in the Ikenodaira Area

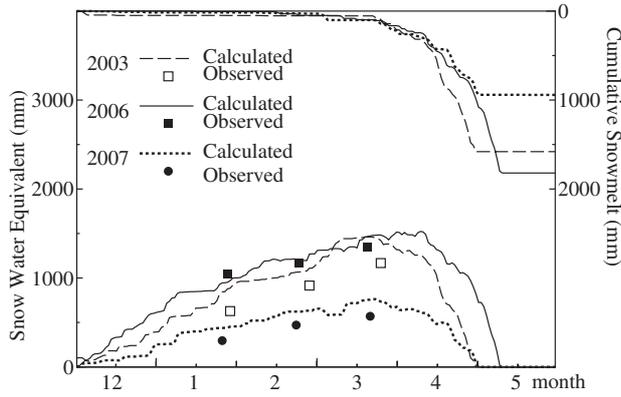


Fig. 63 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2411.

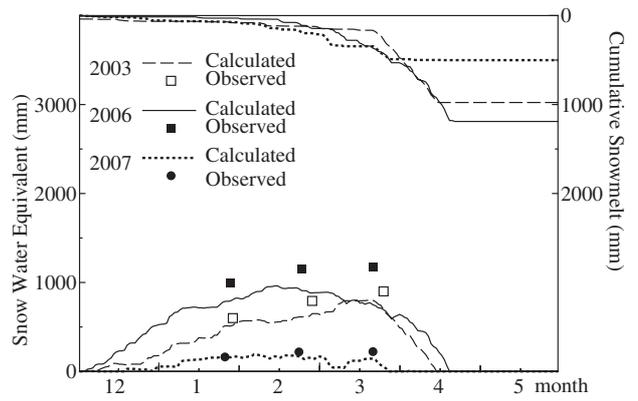


Fig. 66 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2314.

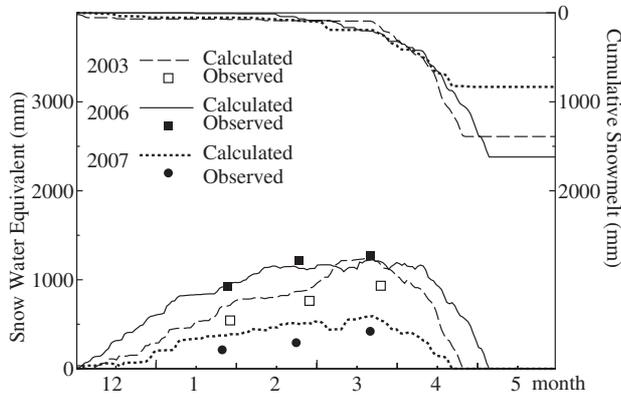


Fig. 64 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2412.

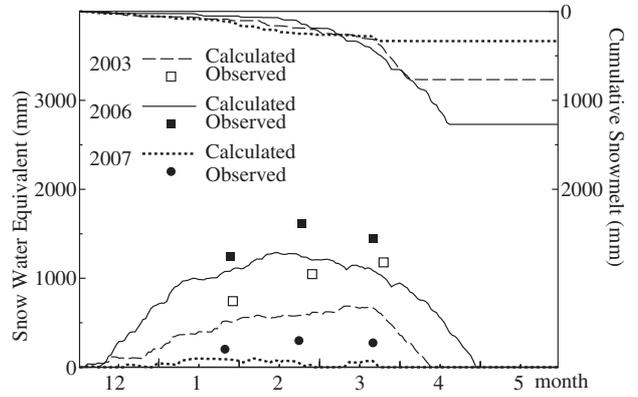


Fig. 67 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2616.

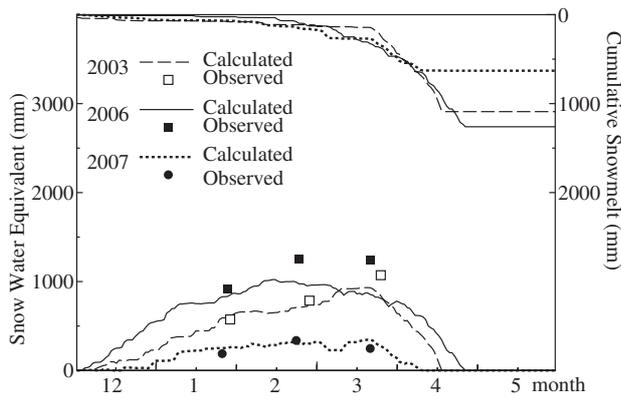


Fig. 65 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2313.

Appendix 4C: Time series of SWE at all the observed points included in the Myoko Area

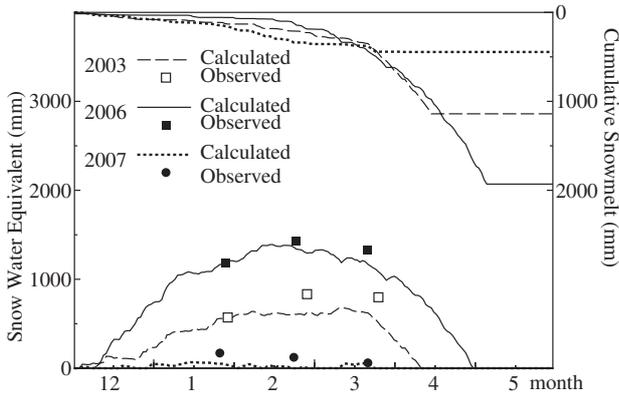


Fig. 68 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2917.

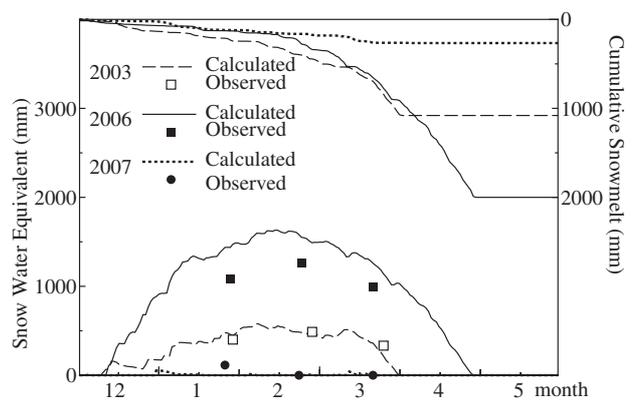


Fig. 71 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 3917.

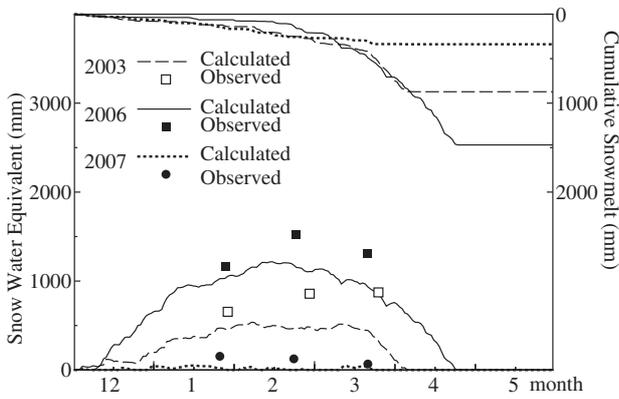


Fig. 69 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 3116.

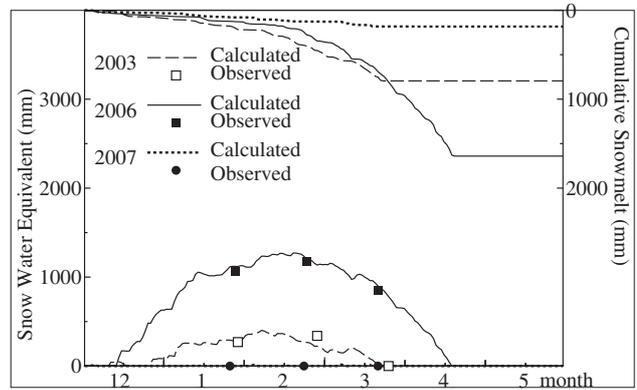


Fig. 72 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 4218.

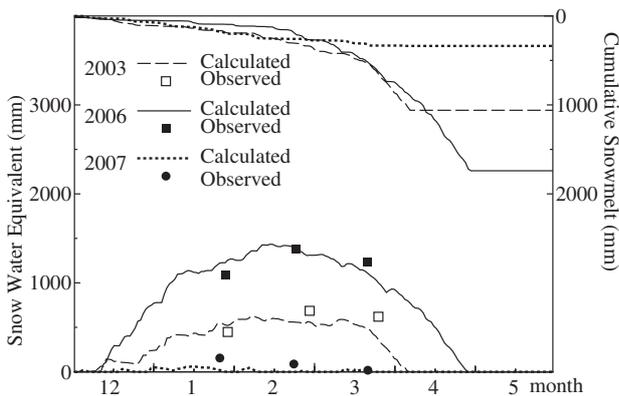


Fig. 70 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 3417.

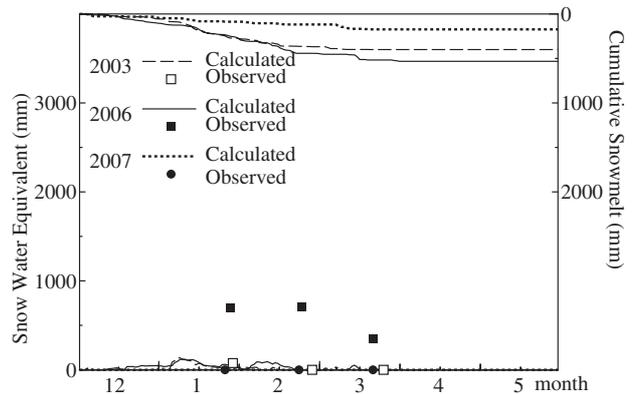


Fig. 73 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 4721.

Appendix 4D: Time series of SWE at all the observed points included in the Iiyama Area

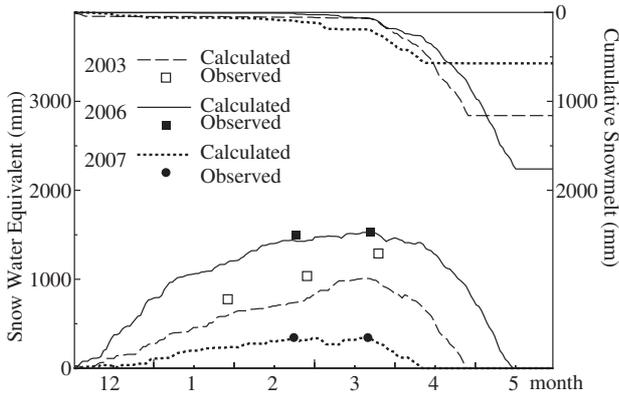


Fig. 74 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2524.

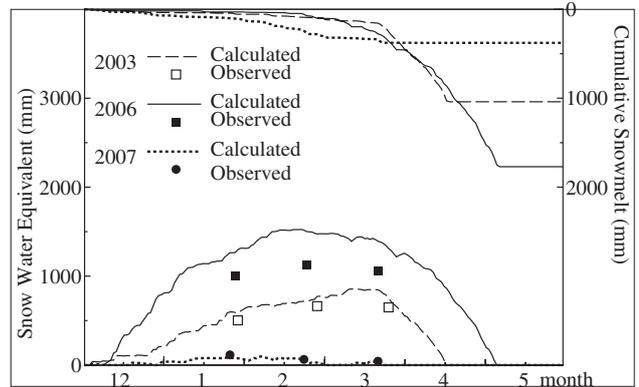


Fig. 77 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2924.

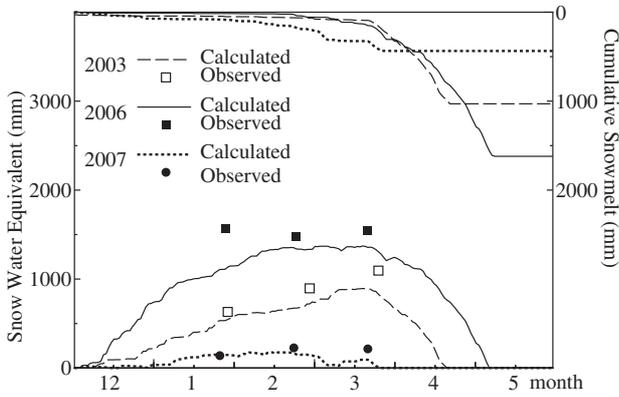


Fig. 75 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2525.

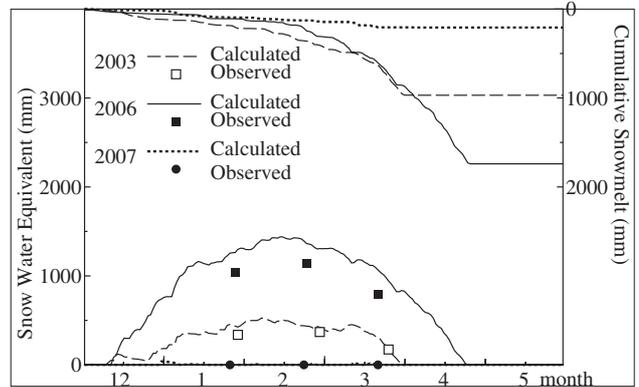


Fig. 78 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 3621.

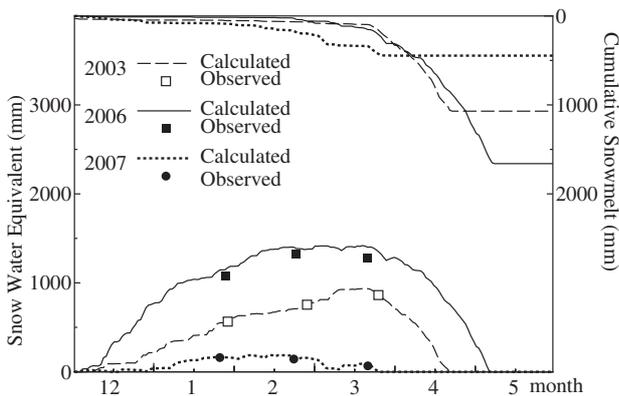
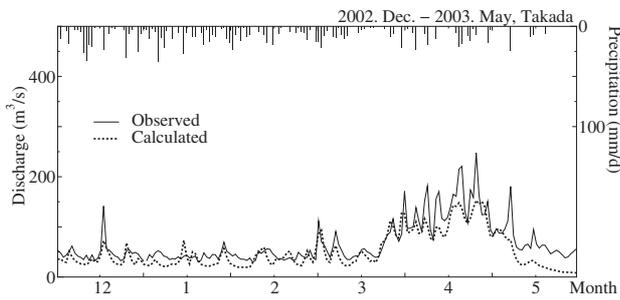
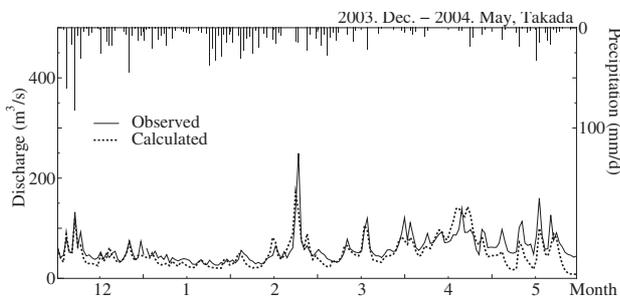


Fig. 76 Time series of observed and calculated SWE (bottom) and cumulative snowmelt (top) at Stn. 2726.

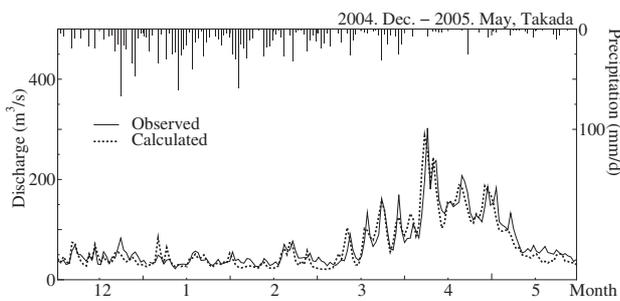
### Appendix 4E: Hydrographs in winter (from December through May)



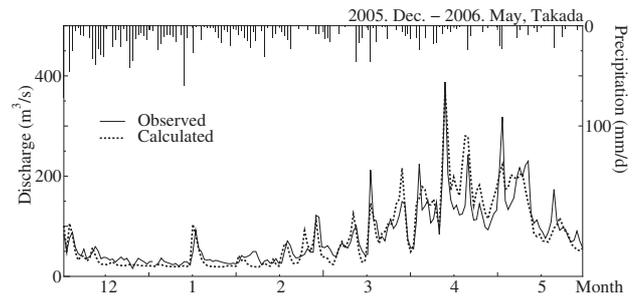
**Fig. 79** Comparison of the calculated and observed discharges in winter 2002-2003.



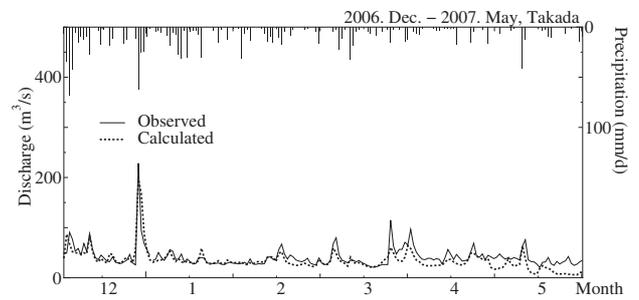
**Fig. 80** Comparison of the calculated and observed discharges in winter 2003-2004.



**Fig. 81** Comparison of the calculated and observed discharges in winter 2004-2005.



**Fig. 82** Comparison of the calculated and observed discharges in winter 2005-2006.



**Fig. 83** Comparison of the calculated and observed discharges in winter 2006-2007.

## 5. Integration of an inundation module for low-gradient rivers into DWCM-AgWU

### 5.1 Introduction

An inundation process module was developed and integrated into DWCM-AgWU to help assess flood hazard. The module is based on a simple model that assumes that an inundated area is a reservoir, and that water levels in the reservoir and the surrounding area are equivalent. To apply the model, high-resolution digital elevation models, which are becoming available on a global scale, were used to extract detailed topographical features within the grid cells of DWCM-AgWU.

Floods are categorized as flash floods due to intense rainfall in mountainous areas and large-scale inundation of long duration in the lower part of a catchment. The inundation module represents the latter type of inundation, which can be triggered by long-lasting rainfall in the upper catchment and high water levels in connecting river to which water is drained.

### 5.2 Representation of inundation processes and its integration into DWCM-AgWU

#### 5.2.1 Development of inundation module for low-gradient rivers

Kinematic wave models, in which wave speed is determined by the channel-bed slope and channel friction, can efficiently simulate wave propagation and water levels from topographic gradients. However, kinematic models do not account for inundation effects and may be difficult to use in areas with low relief, where flow regimes are strongly diffusive.

The simple model driving the inundation module assumes that there is no active water movement in the inundated area (Hayase and Kadoya, 1977; Masumoto and Kadoya, 1995). The inundation volume is calculated by using the relationship between the maximum conveyance capacity of rivers and detailed topographic data in the surrounding areas. Inundation level and volume are calculated using an equation of motion (described later) and the following continuity equation:

$$Q_{out}^{n+1} = \frac{W^{n+1} + W^n}{\Delta t} (H_{in}^n - H_{in}^{n+1}) + Q_{in}^{n+1} + Q_{in}^n - Q_{out}^n, \quad (73)$$

where  $Q_{in}^n$  and  $Q_{out}^n$  are the influx and efflux of the inundation area ( $m^3/s$ ),  $W^n$  is the inundation area ( $m^2$ ),  $H_{in}^n$  is the inundation depth (m),  $\Delta t$  is calculation time interval (3600 sec). Here, the suffix  $n$  and  $n + 1$  denotes the number of calculation steps. To calculate the inundation depth  $H_{in}^n$ , the relation between  $H_{in}^n$  and the inundation volume, referred to as H-V curve, is derived from topographic data for the surrounding area.

The efflux from the inundation area  $Q_{out}$  (influx from connected rivers to inundation area if efflux is negative) is calculated for uniform ( $\sqrt{F} > \sqrt{s}$ ) or non-uniform

( $\sqrt{F} < \sqrt{s}$ ) flows with the following equation (Kadoya and Hayase, 1981).

$$Q_{out} = \begin{cases} G \sqrt{F} & (\sqrt{F} < \sqrt{s}) \\ G \sqrt{s} & (\sqrt{F} > \sqrt{s}), \end{cases} \quad (74)$$

where  $G = \frac{A_{in} R_{in}^{2/3}}{N}$  and  $\sqrt{F} = \frac{H_{in} - H_{out}}{\sqrt{X} \sqrt{|H_{in} - H_{out}|}}$ ;  $H_{out}$  is the wa-

ter level of a channel to which water drained from an inundation area,  $X$  and  $s$  are respectively the length and slope of the connecting channel,  $A_{in}$  and  $R_{in}$  are respectively the cross sectional area and hydraulic radius of the channel, and  $N$  is a friction coefficient.

For nonuniform flow ( $\sqrt{F} < \sqrt{s}$ ), the inundation depth at time  $n + 1$ ,  $H_{in}^{n+1}$  is calculated from the inundation depth  $H_{in}^n$  at time  $n$ , the efflux from the inundation area  $Q_{out}^n$ , and the influx to the inundation area,  $Q_{in}^n$  and  $Q_{in}^{n+1}$  at times  $n$  and  $n+1$ . The runoff module in DWCM-AgWU provides the value of  $Q_{in}^{n+1}$ . The Newton-Raphson method is used to estimate  $H_{in}^{n+1}$  by the following procedures.

1) With  $Q_{out}^m$  denoting the  $m$  th iteration,  $Q_{out}^{m+1}$  is calculated with the following equation:

$$Q_{out}^{m+1} = Q_{out}^m + \left( \frac{\partial Q}{\partial G} \frac{dG}{dH_{in}} \right)^m dH_{in} + \left( \frac{\partial Q}{\partial F} \frac{dF}{dH_{in}} \right)^m dH_{in} \quad (75)$$

2)  $H_{in}^{m+1}$  is estimated by the following equation by assuming  $W^{m+1} = W^m$ , in which the continuity equation (73) and equation (75) are solved simultaneously

$$\left( \frac{W^m + W^n}{\Delta t} + D_G^m + D_F^m \right) H_{in}^{m+1} = \frac{W^m + W^n}{\Delta t} H_{in}^m + (D_G^m + D_F^m) H_{in}^n - Q_{out}^m - Q_{out}^n + Q_{in}^{n+1} + Q_{in}^n, \quad (76)$$

where  $D_G^m = \left( \frac{\partial Q}{\partial G} \frac{dG}{dh} \right)^m$  and  $D_F^m = \left( \frac{\partial Q}{\partial F} \frac{dF}{dH_{in}} \right)^m$ .

3) If  $|H_{in}^{m+1} - H_{in}^m| > \epsilon$ ,  $H_{in}^m$  is replaced with  $H_{in}^{m+1}$  and process 1) is repeated until an acceptable solution is obtained ( $|H_{in}^{m+1} - H_{in}^m| < \epsilon$ ). Here, threshold for constraints was set at  $\epsilon = 0.001$  (m).

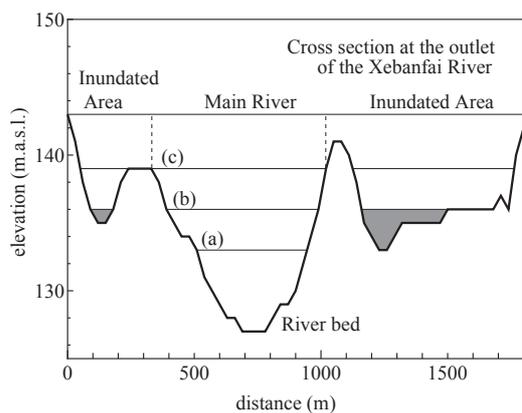
For uniform flow, the calculation proceeds by assuming  $\sqrt{F} = \sqrt{s}$ , and thus  $D_F^m = 0$  in equation (76). In the same way as with nonuniform flow,  $H_{in}^{n+1}$  is approximated by repeated iteration of the following equation:

$$\left( \frac{W^m + W^n}{\Delta t} + D_G^m \right) H_{in}^{m+1} = \frac{W^m + W^n}{\Delta t} H_{in}^m + D_G^m H_{in}^n - Q_{out}^m - Q_{out}^n + Q_{in}^{n+1} + Q_{in}^n \quad (77)$$

#### 5.2.2 Integration of the inundation module into DWCM-AgWU

The runoff and inundation modules were integrated with the following assumptions to ensure seamless calculation of both runoff and inundation within the DWCM-AgWU framework.

First, to apply the inundation module, inundation



**Fig. 84** Cross section of the outlet of the Xebanfai River showing schematics of the inundation calculation.

points were selected from the grid cells of the DWCM-AgWU. Points should be selected for which detailed cross section and slope data are available. Next, the H-V curve for each point was created using topographic data. Even if the potential inundation area covered multiple grid cells, the inundation area was represented as a single reservoir and inundation water levels in all of its grid cells were treated as equivalent.

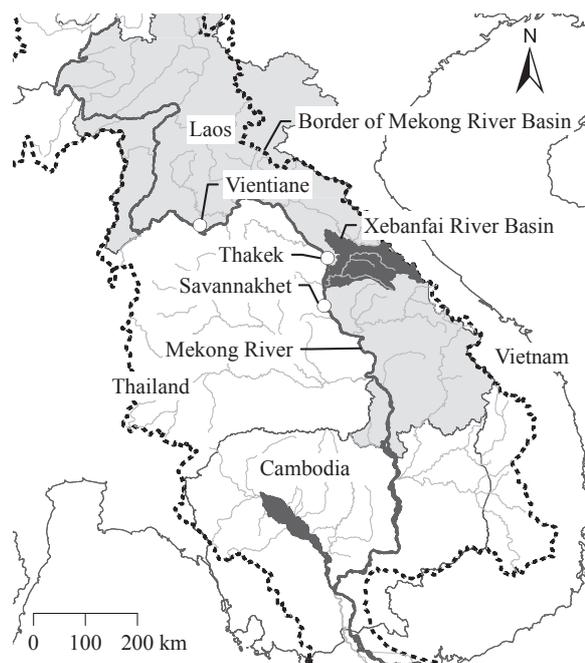
The inundation module was activated or deactivated by using the conveyance capacity at the inundation point, the calculated discharge at the inundation point, and the water level in the inundation area. The conveyance capacity was set as equivalent to the flow rate when the water level was at the level of the lowest bank (line (c) in **Fig. 84**), and was calculated by assuming uniform flow.

The inundation module was governed by the following three criteria.

- 1) The module is not activated when the discharge at the inundation point is less than the conveyance capacity (e.g., lines (a) and (b) in **Fig. 84**). Thus, this module permits only largescale inundation caused by water spilling over the banks of major rivers.
- 2) The module is activated when the discharge at the inundation point exceeds the conveyance capacity (line (c) in **Fig. 84**). The excess of surface flow above the conveyance capacity is allowed to expand the inundation area.

The drainage from the inundation area is calculated by the method described in section 5.2.1, and the main river flow at the inundation point is replaced by the drainage from the inundation area. The cross section for drainage calculation is taken as the area between the dashed lines in **Fig. 84**, even if the inundation level is above line (c).

- 3) The module is active until the inundation level falls below the minimum elevation in the inundation areas (line (a) in **Fig. 84**). Even if the inundation level is below the lowest river bank (below line (c) in **Fig. 84**), the inundation level is assumed



**Fig. 85** Location map showing the Xebanfai River in the lower Mekong region.

to be equal to the water level in the main river.

### 5.3 Study watershed

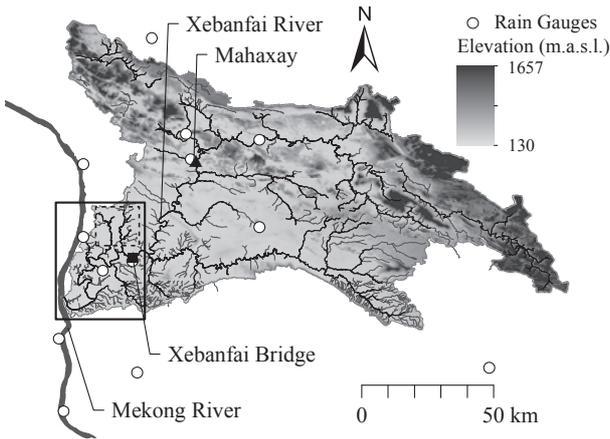
#### 5.3.1 Inundation in the study watershed

The inundation module was applied to daily data from the Xebanfai River, in the Lao PDR, from 2004 through 2008. The Xebanfai River, a tributary of the Mekong River, drains an area of 10,330 km<sup>2</sup>, and its elevation ranges from 130 to 1657 m.a.s.l. (**Figs.85** and **86**). The gradient in the upper reach, above Mahaxay, ranges from 1/2000 to 1/4000 (mean 1/3400), and in the reach below Mahaxay, the gradient is quite small (mean 1/7000). The gradient downstream from the Xebanfai Bridge is approximately 1/15,000. Paddy fields, which account for 23% of the total catchment area, are found predominantly in the lower catchment. Thus, prolonged flooding causes damage mainly to paddy areas and rural communities.

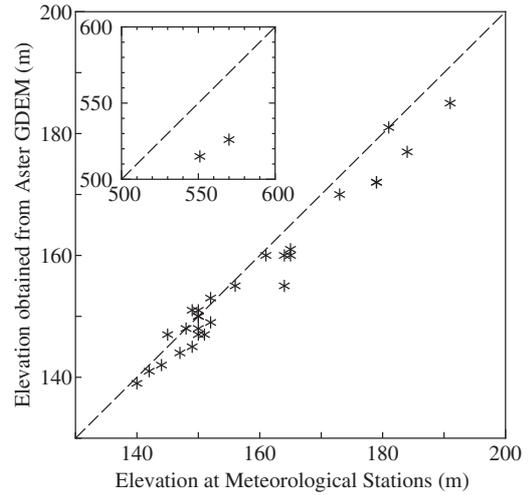
The average annual precipitation at Mahaxay is 2700 mm, most of which falls during the rainy season from May through October. Floods in this watershed are categorized as flash floods in the upper reach and large-scale inundation of long duration in the lower reach (Mekong River Commission, 2009). The inundation module represents the latter type of inundation, which can be caused by intense rainfall and high water levels in the Mekong River.

#### 5.3.2 Data collection in the study watershed

Meteorological data were obtained from the Department of Meteorology and Hydrology, Water Resource, and Environmental Administration, Lao PDR. The data



**Fig. 86** Topography of the Xebanfai River basin showing locations of observation stations (open circles); dashed and solid lines denote the areas shown in Fig.89 and Fig.96, respectively.



**Fig. 88** Comparison of elevation data for meteorological stations from Aster GDEM and NGD DEM.

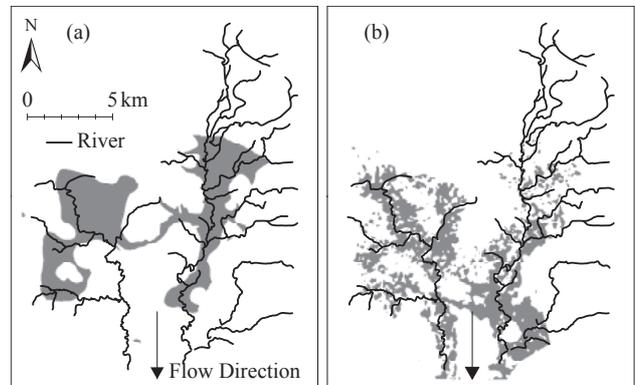


**Fig. 87** Photograph of an inundation field survey locality.

included daily water levels and discharges at Mahaxay (catchment area 4520 km<sup>2</sup>) and the Xebanfai Bridge (8539 km<sup>2</sup>) and meteorological data from 13 observation stations (**Fig. 86**). These data were processed for model application by the method described in section 3.3.3.

Two types of topographic data were used: a digital elevation model (DEM) dataset provided by the National Geographic Department of Lao PDR (NGD DEM) and a global DEM (GDEM) of high-resolution topographic data based on observations from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) instrument on the Terra satellite (Aster GDEM; Earth Remote Sensing Data Analysis Center, 2008). The NGD DEM uses elevation data obtained from field surveys, and it was interpolated into grid cells of 30 m spatial resolution. The Aster GDEM was generated from stereopairs of images acquired with nadir and backward angles over the same area.

Although high-resolution DEMs are becoming available at the global scale, the data are susceptible to speckle, or random noise. To investigate the validity of



**Fig. 89** Representation of areas lower than 141 m.a.s.l. (gray) in (a) the NGD DEM and (b) the Aster GDEM in tributaries of the lower reach of the Xebanfai River (location shown in Fig.86).

the Aster GDEM, it was compared to the NGD DEM with respect to specific landmarks and topography.

First, the elevations of the meteorological stations in **Fig. 86** were compared (**Fig. 88**). The root mean square error between the two DEMs was 11.5 m, and the discrepancy were relatively small in lower areas (140-160 m in elevation) and larger in higher areas (160-180 m). The elevations of the highest meteorological stations in the NGD DEM (551.2 m and 570.8 m) were 30 m higher than those in the Aster GDEM (515 m and 526 m).

Next, the topography represented by both datasets along a tributary to the lower Xebanfai River was compared. The shaded areas in **Fig. 89** represent the areas lower than 141 m.a.s.l. The shaded areas of the NGD DEM (**Fig. 89** (a)) did not cover the flow direction (downward in the figure), while those of the Aster GDEM corresponded to the flow direction (**Fig. 89** (b)).

The topography in the Aster GDEM was used for creating HV curves in the floodplains, and the NGD DEM was used for elevation data of each grid cell in the en-

tire watershed because of the low accuracy of Aster GDEM data in mountainous areas.

To validate the developed module, imagery from the Phased Array L-Band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) sensor on the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) was used. PALSAR instruments have the advantages of day-night operability (as active sensors), cloud penetration, and the ability to calibrate without performing atmospheric corrections. Where water is present, enhanced returns caused by specular scattering make it possible to distinguish between flooded and non-flooded areas (Kato and Yamazaki, 2010; Lowry et al., 2009). The spatial resolution of the imagery is 12.5 m. The imagery was acquired on 12 August 2008. Typhoon Kammuri crossed the region on 9 August and produced daily rainfall exceeding 200 mm.

## 5.4 Results and discussion

### 5.4.1 Application to the case study watershed

The inundation module was applied to daily data for the Xebanfai River from 2004 through 2008. Inundation points were introduced at Mahaxay, the Xebanfai Bridge, and at the confluence of the Xebanfai River with the Mekong River. The conveyance capacity at Mahaxay and the Xebanfai Bridge, calculated using the bank height at each point was  $1822\text{m}^3/\text{s}$  and  $2649\text{m}^3/\text{s}$ , respectively.

The drainage rates from the two higher inundation areas were calculated by assuming uniform flow. However, the drainage rate at the outlet of the Xebanfai River was calculated using the water levels between the higher inundation areas and the Mekong River, as described in section 5.2.1. The Mekong River water level at its confluence with the Xebanfai River was estimated by interpolation between water levels at Thakek and Savannakhet, located 40 km upstream and 50 km downstream from the confluence, respectively (Fig. 85).

The highest water level during the analysis period was observed in 2005. The maximum level recorded at Mahaxay was 156.18 m, the second-highest level since 1991, which coincided with severe flooding damage in the Mahaxay District (Mekong River Commission, 2006).

### 5.4.2 River flows without the inundation module

The calculated discharge without the inundation module was compared with the observations at Mahaxay (Fig. 90) and the Xebanfai Bridge (Fig. 91) for a five-month period in 2005. The calculated peak discharge agreed with the observations in June and early July. However, the higher peak discharges in late July and August were overestimated, and the calculated timing of the peak and its recession were earlier than the observed dates.

In general, the calculated peaks matched the observed

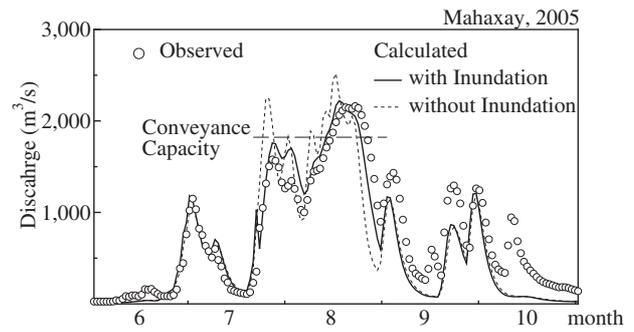


Fig. 90 Observed discharges and calculated discharges with and without inundation processes at Mahaxay from June through October 2005.

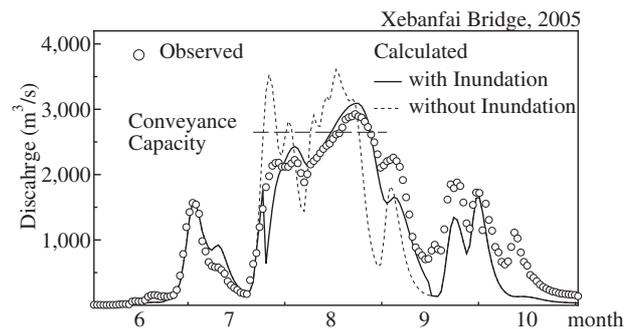


Fig. 91 Observed discharges and calculated discharges with and without inundation processes at Xebanfai Bridge from June through October 2005.

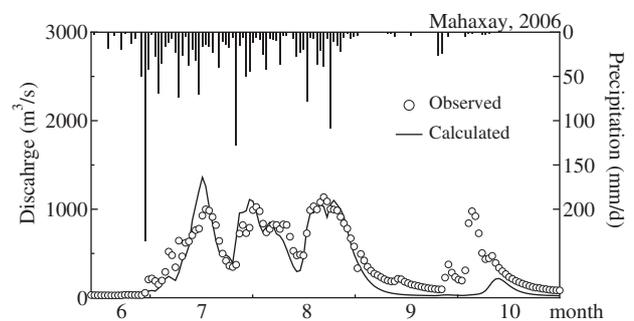


Fig. 92 Observed discharges and calculated discharges at Mahaxay from June through October 2006.

ones well when the peaks were relatively small (e.g. in 2006, Fig. 92), although the calculated discharges did not always agree with the observations (e.g., in October in Fig. 92). It may be that the network of rain gauges was not sufficiently dense to capture all of the precipitation events in the watershed.

### 5.4.3 River flows with the inundation module

The observed discharges were also compared to discharges calculated using the inundation module. The calculated discharge decreased when the inundation module was activated because the water level in the river was forced to match the water levels in inundation areas. However, the module reproduced the observed discharges well, especially the peaks and timing of dis-

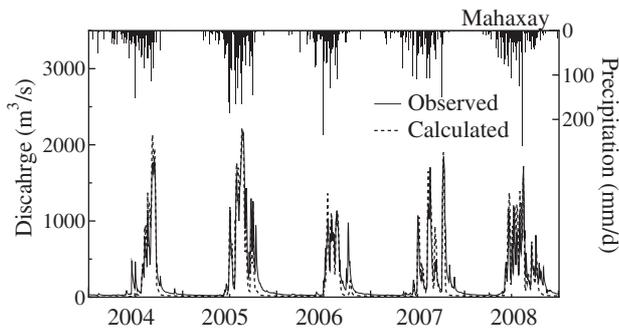


Fig. 93 Observed discharges and calculated discharges at Mahaxay from 2004 through 2008.

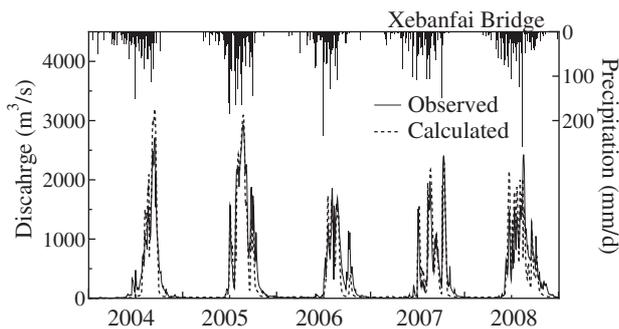


Fig. 94 Observed discharges and calculated discharges at Xebanfai Bridge from 2004 through 2008.

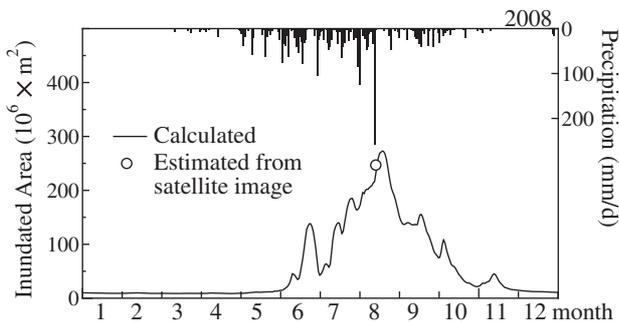


Fig. 95 Time series of inundated areas estimated at the outlet of the Xebanfai River in 2008.

charge. In 2005, the observed discharge at Mahaxay exceeded the conveyance capacity from 16 to 25 August and its peak was  $2148 \text{ m}^3/\text{s}$ , whereas the calculated discharge exceeded the conveyance capacity from 13 to 23 August and its peak was  $2220 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 90). Similarly, the observed discharge at the Xebanfai Bridge exceeded the conveyance capacity from 16 to 27 August and its peak was  $2926 \text{ m}^3/\text{s}$ , whereas the calculated discharge exceeded the conveyance capacity from 15 to 26 August and the peak was  $3090 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 91).

Next, the discharges calculated with the inundation module were compared with the observed discharges for the entire analysis period. The results were a close match at Mahaxay (Fig. 93) and the Xebanfai Bridge (Fig. 94). It should be noted that the calculated discharges exceeded the conveyance capacity only in 2004 and 2005. The relative errors were 48% and 47%, and

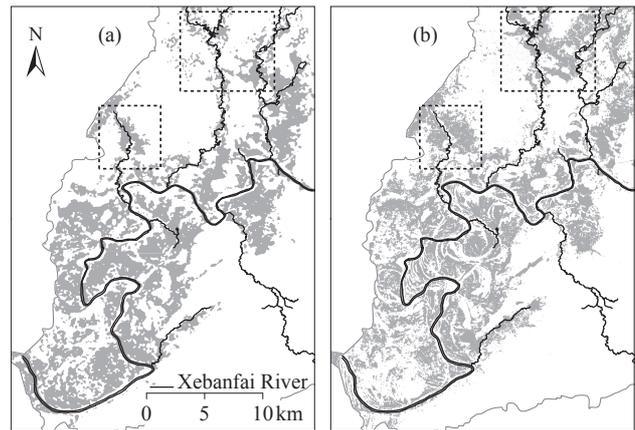


Fig. 96 (a) Calculated and (b) satellite-based inundation areas on 12 August 2008 of the lower reach of the Xebanfai River (location shown in Fig.86).

the chi square errors were  $154 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $226 \text{ m}^3/\text{s}$  at Mahaxay and the Xebanfai Bridge, respectively.

Next, the spatial extent of inundation simulated by the model was compared with the satellite imagery. Good agreement was observed between the total area of inundation from calculations and the satellite imagery (Fig. 95). The simulated extent of inundation (Fig. 96 (a)) also showed good agreement with the remotely observed inundation areas (Fig. 96 (a)). However, the calculated area of inundation ( $265 \text{ km}^2$ ) underestimated the observed area ( $250 \text{ km}^2$ ). The source of the underestimation may be discrepancies in inundation of the watersheds of tributaries to the Xebanfai River, as outlined by the dashed lines in Fig. 95. The outlets of these sub-watersheds were topographically constrained and acted as local inundation points that were not incorporated in the inundation module. Despite these discrepancies, the module succeeded in capturing the large-scale inundation by introducing simple assumptions into DWCM-AgWU, and hence the model enables better evaluations of the agricultural damage caused by flooding.

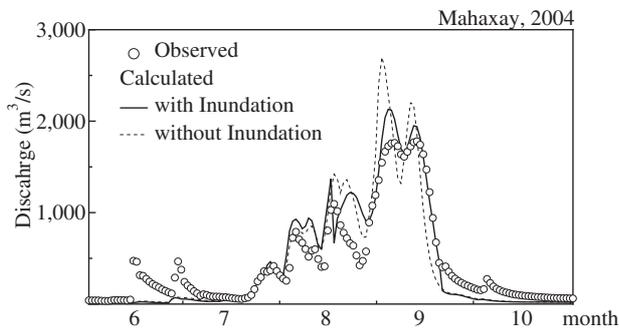
## 5.5 Summary

An inundation process module was developed and integrated into DWCM-AgWU. The integrated model was then tested by using data for the Xebanfai River basin in the Lao PDR. The results are summarized as follows:

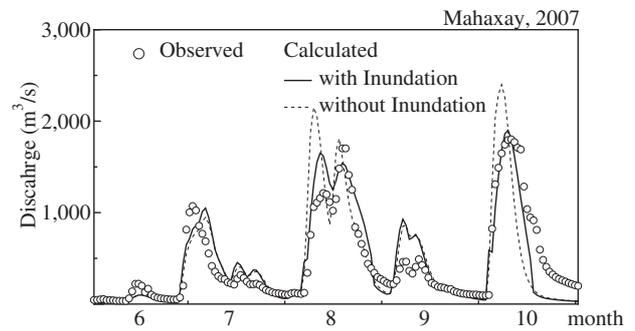
- 1) The inundation process module markedly improved the performance of DWCM-AgWU in terms of calculated discharges, especially the timing and duration of peak flooding.
- 2) The module was validated against the 2008 episode of maximum inundation, as determined from ALOS/PALSAR images. The comparison confirmed that the module accurately reproduced large-scale inundation processes in the lower reaches of the watershed. Thus, the module is useful for evaluating agricultural damage caused by flooding.

## Appendix of Section 5

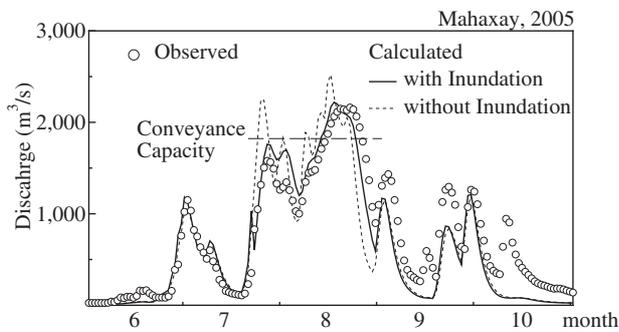
Appendix 5A: Observed discharges and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge



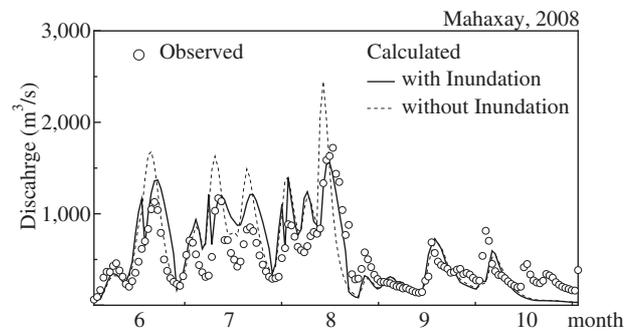
**Fig. 97** Observed discharges and calculated discharges with and without inundation processes at Mahaxay from June through October 2004.



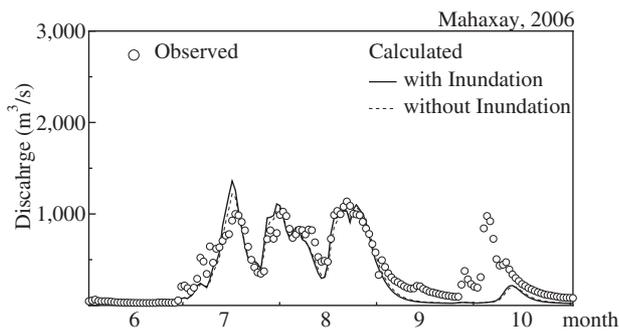
**Fig. 100** Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2007.



**Fig. 98** Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2005.



**Fig. 101** Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2008.



**Fig. 99** Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2006.

Appendix 5B: Observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Xebanfai Bridge flow gauge

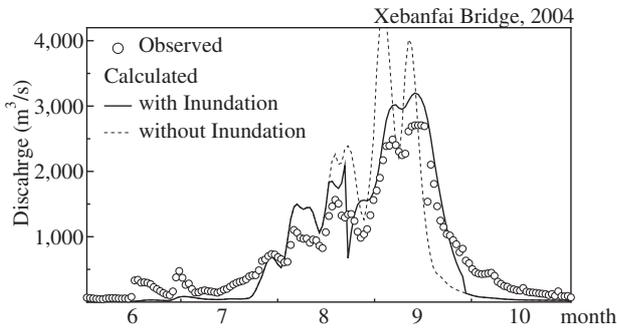


Fig. 102 Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2004.

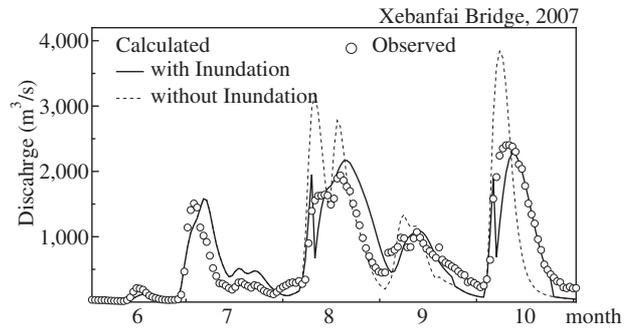


Fig. 105 Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2007.

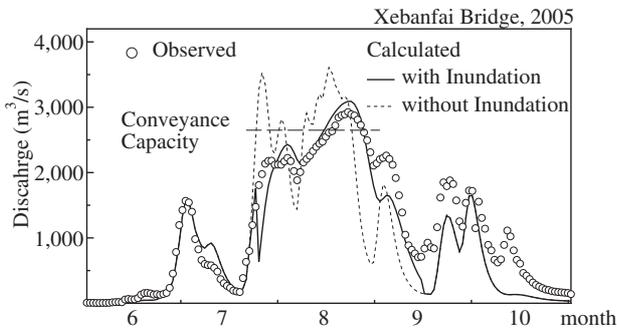


Fig. 103 Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2005.

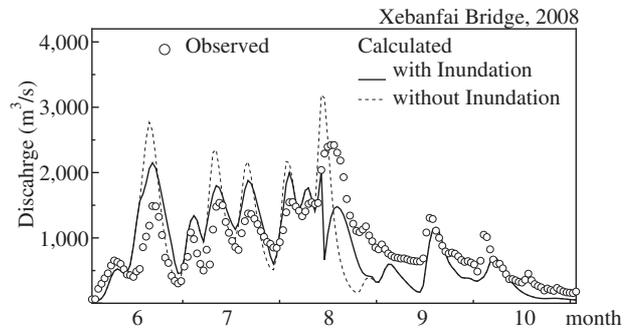


Fig. 106 Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2008

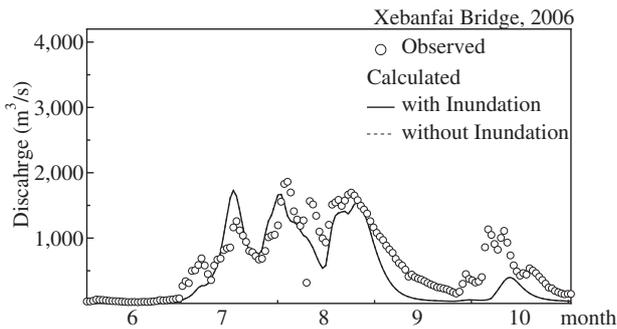


Fig. 104 Comparison of the observed and calculated discharges with/without inundation processes at the Mahaxay flow gauge from June through October, 2006.

## 6. Short-term runoff modelling in hilly watersheds where paddy fields are prevalent

### 6.1 Introduction

In section 6, the ability of DWCM-AgWU was investigated to reproduce differences in runoff characteristics among watersheds. To assess the interaction between hydrological characteristics and paddy conditions, three experimental watersheds in Niigata Prefecture that were characterized by cultivated paddies, abandoned paddies, or forest were examined (Fig. 107).

### 6.2 Experimental watersheds and hydrological observation

#### 6.2.1 Study area

The study area is in the Higashi-Kubiki region, which is a typical and active area for Tertiary strata landslides (Koide, 1973; Niigata University, 1987). The topography of the region is relatively gentle slopes ranging from 200 to 600 m in elevation. We examined three watersheds in the region that differ both in terms of land uses and land management of paddy fields.

The cropping season in the region starts in late May and ends in late September (Fig. 108). Irrigation systems in the area are mostly small-scale structures with direct intake from ephemeral streams or wells. Because the water for planting is mostly supplied by retaining snowmelt in paddies and small ponds, farmers prepare paddy fields by flooding them and tilling the soil to reduce the seepage from paddies (Figs.109-112).

In addition, the levees of rice paddies in this region are unique in height and thickness. The levees are approximately 40-50 cm tall, which allows rice to withstand dry spells of up to 1 month (Takeuchi, 1974). The farmers in the region retain as much water as possible to maintain a sufficient ponding level in the fields. Thus, they do not construct the levees lower to let water flow out in early summer, which is the typical management practice for irrigated paddies in Japan.

#### 6.2.2 Selection of experimental watersheds

Fourteen watersheds were surveyed in Higashi Kubiki region (Hokuriku Regional Agricultural Administration Office, 2006). The land uses were delineated by using aerial photographs taken in 1989 and 2002 and through field surveys. The land uses in the watersheds were categorized as forest, cultivated paddies, or abandoned paddies. From these, three experimental watersheds were selected, each of which is characterized by cultivated paddies (cultivated-paddy watershed, CPW; no. 1 in Fig. 113), abandoned paddies (abandoned-paddy watershed, APW; no. 6 in Fig. 113), or forest (forested watershed, FW; no. 14 in Fig. 113). The specifications of each watershed are presented in Table 2.

CPW is 1.02 km<sup>2</sup> in area and ranges from 1/5 to 1/10

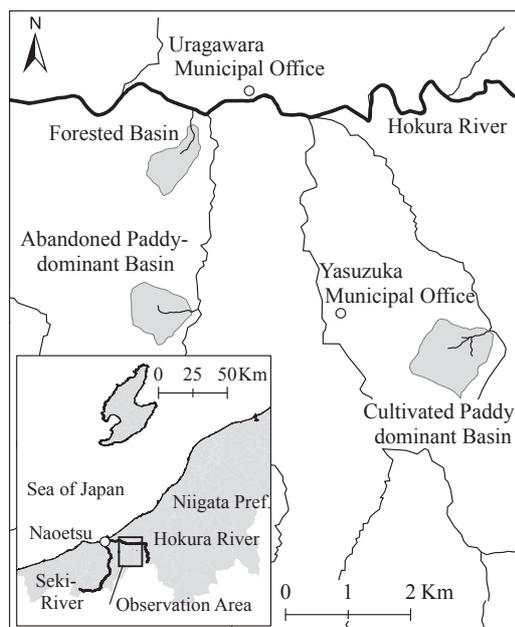


Fig. 107 Map of the Higashi-Kubiki region and experimental watersheds.



Fig. 108 View of the cultivated-paddy watershed during the cropping season.

in slope (Fig. 114). The areal ratio of cultivated paddies is about 29.4%, most of which are located in the upstream region of the watershed.

APW is 0.61 km<sup>2</sup> in area, and its slope is 1/7 and slightly steeper than that of CPW (Fig. 115). The watershed was covered by cultivated paddies 20 years ago, when the areal ratio of paddy fields exceeded 40%. However, most of the paddies are currently abandoned. The cultivated paddy are located only in the upstream of the watershed, where farmers can easily access them from the roads.

FW is 0.47 km<sup>2</sup> in area, the smallest watershed in the experimental watersheds (Fig. 116). The watershed is mostly covered by a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation of 30 years in age. Such plantations are typical in the study area, and the difference in forest conditions among the experimental watersheds are negligible.



Fig. 109 View of the cultivated-paddy watershed after puddling in autumn.



Fig. 111 Degraded levees and consequent steep slopes in the abandoned paddy watershed.



Fig. 110 Water intake system from streams to cultivated paddies.



Fig. 112 View of the abandoned-paddy watershed immediately after snowmelt.

Table 2 Area of each land use (km<sup>2</sup>) and its ratio to the total area.

	Cultivated	Abandoned	Forest
Catchment Area	1.02	0.61	0.47
Paddy Field	0.37 (36.3)	0.24 (39.3)	0.02 (4.2)
Cultivated	0.30 (29.4)	0.05 (8.2)	0.02 (4.2)
Abandoned	0.07 (6.9)	0.19 (31.1)	0.00 (0.0)
Forest	0.65 (63.7)	0.37 (60.6)	0.45 (95.7)

Abbreviations:

- Cultivated: Cultivated Paddy-dominant Watershed,
- Abandoned: Abandoned Paddy-dominant Watershed,
- Forest: Forest Watershed

The average slope in the experimental watersheds is approximately 1/7, and surface runoff velocities appear to be similar. The observed flood concentration times, which will be described later, also showed no significant differences among the watersheds. In this section, sub-surface storage capacity affects rainfall runoff characteristics will be discussed later; therefore, the topographic features of each watershed were compared by using a topographic index computed in TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979). TOPMODEL calculates the topo-

graphic index of hydrological similarity based on an analysis of the topographic data, which can be described as  $\ln(a/\tan \beta)$ , where  $a$  is the area draining through a point from upslope and  $\tan \beta$  is the local slope angle. The index identifies areas with greater upslope contributing area and lower gradient as being more likely to be saturated. The topographic index was evaluated with an algorithm proposed by Quinn et al. (1991). The evaluated topographic indexes in CPW and APW are illustrated in Fig. 117, which shows similar frequency distributions, indicating that spatial differences in storage capacity are small.

### 6.2.3 Hydrological observations and data analysis

#### (1) Hydrological observation in experimental watersheds

Rainfall and discharge were observed at 10-min intervals in each watershed. The observations were conducted from June 2007 through November 2011 in APW and FW and from August 2007 through November 2011 in CPW. Due to the heavy snowfall in this re-

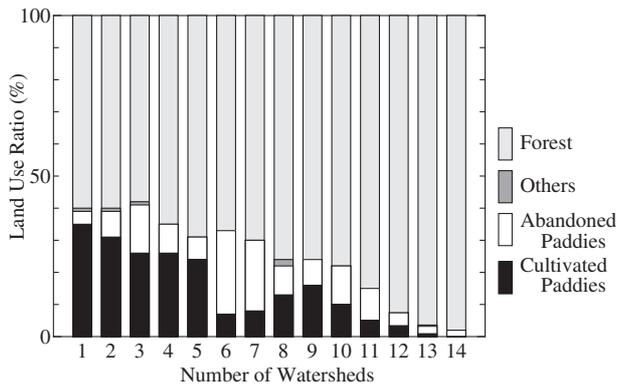


Fig.113 Areal ratio of land uses in each watershed assessed for the selection of experimental watersheds.

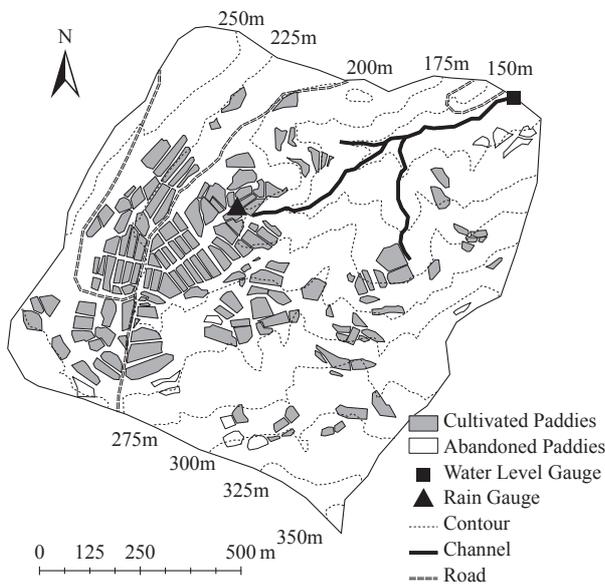


Fig.114 Map of the cultivated-paddy watershed.

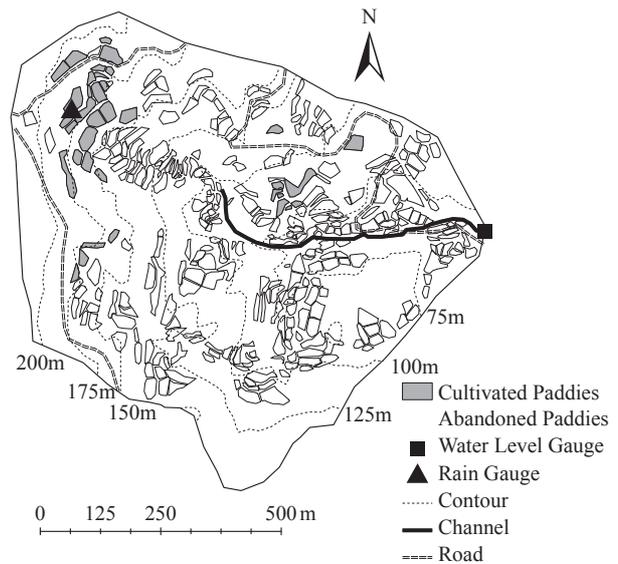


Fig. 115 Map of the abandoned-paddy watershed.

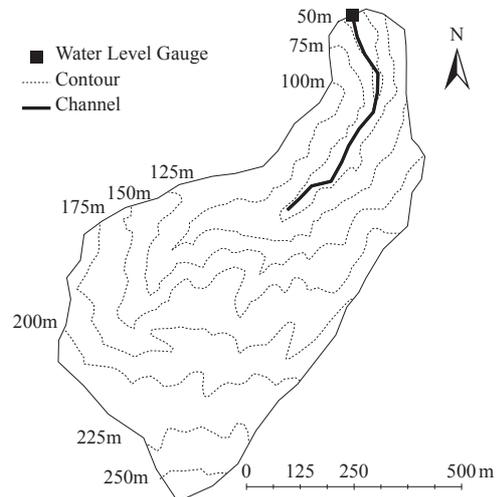


Fig. 116 Map of the forested watershed.

gion, we removed the rain gauges in winter, and replaced the missing data with the meteorological data gathered by the Automated Meteorological Data Acquisition System in Yasuzuka (see Fig. 107).

### (2) Flood concentration times and peak runoff ratio

Flood concentration time ( $T_p$ ) and peak runoff ratio ( $f_p$ ) were analysed for the observed rainfall runoff events following the procedures presented by Kadoya and Fukushima (1976). Peak runoff ratio was defined as the ratio of the amount of discharge to precipitation during the flood concentration time.

The flood concentration time was visually determined from a hydrograph as follows. First, the point when peak discharge was observed was identified; and the rainfall intensity at that point was noted. We then looked backwards in time on the flood hydrograph to find a point when the same rainfall intensity was observed.

The flood concentration time is the period between the two identified points.

Next, the total precipitation ( $R$ ) was obtained by summing the observed precipitation data during  $T_p$ ; and converted peak discharge during  $T_p$  to effective rainfall ( $R_e$ , mm/h) by using equation (78).

$$R_e = \frac{3.6 \times Q_p}{A}, \quad (78)$$

where  $Q_p$  is peak discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  is catchment area ( $\text{km}^2$ ).

Finally, the peak runoff ratio  $f_p$  was evaluated equation 79.

$$f_p = R_e/R \quad (79)$$

### (3) Separation of direct runoff

The direct runoff from total runoff was visually separated as the quick runoff component, and compared it with total precipitation of each rainfall event. Here the runoff ratio is defined as the ratio of direct runoff to the total precipitation, and watershed retention as the

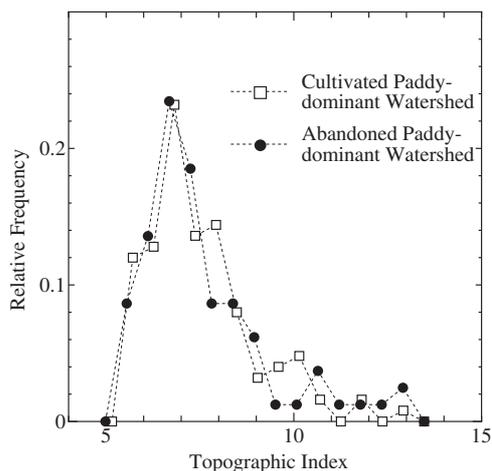


Fig. 117 Relative frequency distributions of topographic index in the cultivated- and abandoned-paddy watersheds

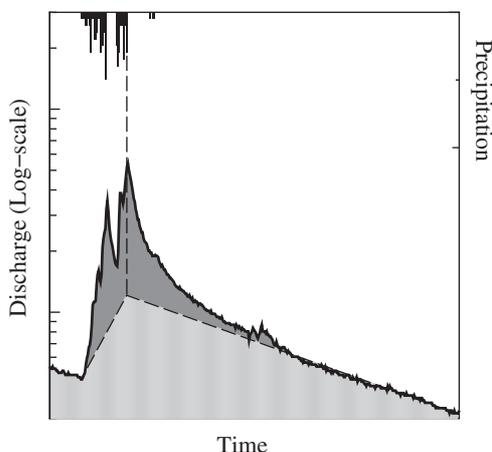


Fig. 118 Process for separating direct runoff using a storm hydrograph. Dark-shaded area represents the direct runoff as the amount of water.

amount of water that did not flow out as the direct runoff.

A storm hydrograph with a log-axis was used to separate the direct runoff. First, the recession line was extrapolated to the point when the peak discharge was observed. Next, it was connected to the point of initial discharge breakthrough in the storm hydrograph (Fig. 118). Then, the direct runoff was calculated as the amount of water above the line drawn by the previous procedures (dark-shaded area in Fig. 118). However, for the events without clear peaks and recession lines, the hydrograph was separated by using the horizontal line at the point of breakthrough of discharge to calculate the direct runoff.

### 6.3 Comparison of runoff characteristics based on paddy cultivation conditions

#### 6.3.1 Comparison of runoff ratios

The short-term rainfall-runoff characteristics were analysed in the case of rainfall events that exceeded a

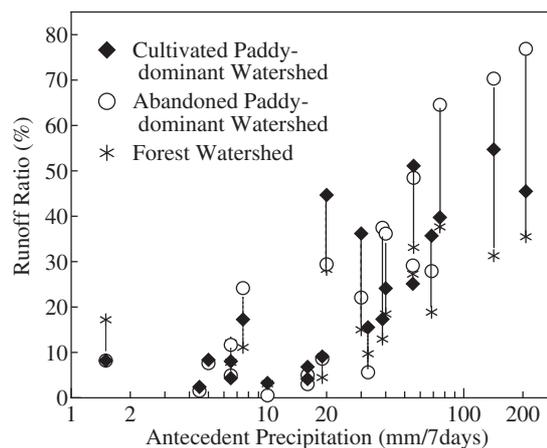


Fig. 119 Relationship between direct runoff ratios and antecedent precipitation for 7 days. Representative data were encircled with dashed line and corresponding rainfall numbers. The runoff ratios of each watershed in the same event are connected with lines.

daily precipitation of 20 mm and rainfall intensity of 5 mm/h. The observed rainfall-runoff events, including date, total precipitation (mm), runoff ratio (%), maximum rainfall intensity (mm/h), and peak discharge (mm/10 min), are summarized in Table 3. (Hereafter, we refer to a rainfall event that corresponds to the number  $x$  in Table 3 as rainfall no.  $x$ .)

In Fig. 119, the runoff ratios are compared with the antecedent precipitation in the 7 days prior to each rainfall event. The difference in observed runoff ratios among watersheds was significant in wetter antecedent conditions (i.e., when precipitation exceeded 70 mm), whereas no significant difference was observed in drier antecedent conditions. In those wet events, the runoff ratios of APW were significantly higher than those of CPW, with a maximum difference of 31.4%.

#### 6.3.2 Comparison of peak runoff coefficients

Table 4 summarizes flood concentration times ( $T_p$ , min), average rainfall intensity during flood concentration time ( $R$ , mm/h), effective rainfall intensity ( $R_e$ , mm/h), peak specific discharge ( $Q_p$ ,  $m^3/s/km^2$ ), and peak runoff coefficient ( $f_p$ ). Although we should use data whose peak specific discharge exceeds  $1 m^3/s/km^2$  for the evaluation of flood concentration time (Kadoya, 1980), due to data limitation we included smaller events as well. The peak specific discharge ranged from 0.34 to  $1.82 m^3/s/km^2$  in CPW and from 0.60 to  $1.91 m^3/s/km^2$  in APW; only two events (rainfall no. 13 and no. 14) in CPW and three events (rainfall no. 4, no. 13, and no. 14) in APW were valid in terms of the criterion.

Peak runoff coefficients differed according to antecedent moisture conditions and land use in the watersheds. The maximum peak runoff coefficient was observed during rainfall no. 14 in both CPW and APW, and the

**Table 3** Observed short-term rainfall-runoff characteristics in the experimental watersheds

No.	date	Cultivated Paddy-dominant					Abandoned Paddy-dominant				Forest			
		Ant.	Prc.	Rat.	Int.	Peak	Prc.	Rat.	Int.	Peak	Prc.	Rat.	Int.	Peak
2007														
1	22 Aug.	6.5	37.0	4.3	21.5	0.213	32.5	4.9	18.0	0.206	23.0	7.8	12.0	0.171
2	28 Aug.	32.5	42.5	15.5	8.5	0.142	48.0	5.6	9.5	0.078	51.5	9.7	13.5	0.125
3	30 Aug.	30.0	50.0	36.2	11.5	0.145	48.0	22.1	12.0	0.149	46.0	15.0	9.0	0.171
4	5 Sep.	60.0	-	-	-	-	48.0	24.8	31.0	0.721	46.0	14.9	21.0	0.563
5	8 Oct.	19.0	44.0	9.1	6.0	0.043	50.0	8.6	6.5	0.056	56.0	4.5	4.0	0.042
6	26 Oct.	20.0	84.5	30.2	6.0	0.133	-	-	-	-	73.5	16.7	9.0	0.142
2008														
7	20 May	4.5	22.5	2.4	6.0	0.008	22.5	1.6	6.5	0.014	-	-	-	-
8	23 Jun.	16.0	27.5	4.1	5.0	0.010	40.5	3.0	19.5	0.145	-	-	-	-
9	29 Jun.	40.0	82.5	24.1	9.5	0.239	82.5	36.2	9.5	0.267	78.0	18.5	6.5	0.204
10	8 Jul.	10.0	45.0	29.8	25.5	0.286	-	-	-	-	-	-	-	-
11	4 Aug.	5.0	27.5	1.4	20.0	0.055	27.5	7.6	20.0	0.406	-	-	-	-
12	15 Aug.	1.5	62.0	8.2	33.5	0.540	53.5	8.2	38.0	0.419	-	-	-	-
13	16 Aug.	55.0	64.5	25.1	34.0	0.967	70.0	29.1	38.0	1.017	94.5	27.2	35.5	1.895
14	19 Aug.	142.0	79.5	54.7	34.5	1.127	65.5	70.3	27.5	1.147	65.5	31.3	12.5	0.786
15	21 Aug.	223.5	51.0	45.5	13.5	0.540	54.5	76.9	16.0	0.780	51.0	35.5	9.5	0.622
16	25 Sep.	70.0	122.0	39.8	13.5	0.286	127.5	64.5	12.5	0.386	102.5	37.7	7.5	0.240
2009														
17	17 May	16.0	24.5	6.8	7.0	0.040	24.0	5.0	7.5	0.053	23.5	5.1	5.5	0.047
18	31 May	10.0	20.5	3.3	4.0	0.007	20.5	0.5	4.5	0.008	22.5	3.1	3.5	0.021
19	22 Jun.	0.5	42.0	17.0	24.5	0.431	43.0	20.8	27.0	0.461	40.0	19.0	22.5	0.764
20	1 Jul.	7.5	46.0	17.3	7.0	0.139	57.5	24.2	11.0	0.209	45.0	11.1	8.0	0.204
21	9 Jul.	55.5	90.0	51.7	12.0	0.427	88.5	48.5	11.0	0.465	81.5	33.1	9.0	0.448
22	18 Jul.	23.0	47.0	36.6	17.5	0.497	44.5	29.4	16.0	0.423	47.0	28.3	8.5	0.398
23	8 Aug.	38.5	22.0	17.3	11.5	0.272	31.5	23.2	11.0	0.262	35.5	13.0	10.0	0.403
24	29 Aug.	6.5	22.5	8.0	6.5	0.077	26.5	11.7	8.5	0.096	26.5	12.1	9.5	0.161
25	3 Nov.	68.5	42.0	35.7	6.0	0.218	46.5	27.9	5.5	0.172	44.0	18.9	6.0	0.164
26	11 Nov.	0.0	58.0	26.4	3.5	0.275	52.5	24.0	6.5	0.145	50.0	14.6	5.5	0.178

Abbreviations and units:

Ant.: Antecedent Precipitation for 7 days (mm/7d), Prc.: Total Precipitation (mm), Rat.: Direct Runoff Ratio (%),  
Int.: Maximum Rainfall Intensity (mm/h), Peak: Peak Discharge (mm/10min)

**Table 4** Flood concentration times and peak runoff coefficients of cultivated- and abandoned-paddy watersheds.

No.	Cultivated Paddy-dominant					Abandoned Paddy-dominant				
	$T_p$	$R$	$Q_p$	$R_e$	$f_p$	$T_p$	$R$	$Q_p$	$R_e$	$f_p$
4	-	-	-	-	-	40	46.50	1.19	4.32	0.09
10	40	36.75	0.48	1.72	0.05	-	-	-	-	-
12	40	42.75	0.34	1.25	0.03	30	47.00	0.70	2.51	0.05
13	50	39.60	1.61	5.82	0.15	60	37.50	1.68	6.10	0.16
14	90	27.66	1.82	6.56	0.24	90	22.90	1.91	6.88	0.30
19	50	28.20	0.71	2.59	0.09	30	28.00	0.77	2.77	0.10
22	80	15.37	0.78	2.82	0.18	50	16.20	0.60	2.20	0.14

Abbreviations and units:

$T_p$ : Flood Concentration Time (min),  $Q_p$ : Peak Discharge ( $m^3/s/km^2$ ),  $f_p$ : Peak Runoff Coefficient  
 $R, R_e$ : Average and Effective Rainfall Intensity within Flood Concentration Time (mm/h)

value in APW(0.30) was 1.25 times that in CPW (0.24). The total precipitation observed during rainfall no. 14 was 79.5 mm in CPW and 65.5 mm in APW, which implies that the difference would be larger if the total precipitation had been identical.

However, any significant difference could not be found between the observed peak runoff coefficients in other rainfall events, except for rainfall no. 22, which showed a larger peak runoff coefficient in CPW than in APW, which is the reverse of other events. Flood concentration time also did not show a clear difference between the watersheds, ranging from 40 to 90 min in CPW and 30 to 90 min in APW.

### 6.3.3 Comparison of retention characteristics

**Fig. 120** illustrates the retention capacities of CPW and APW. In rainfall events up to 40 mm, most of the rainfall was stored; however, there were discrepancies in retention capacities as rainfall increased beyond that value. The maximum retention capacities estimated using the envelope curve were 52 mm for CPW, 61 mm for APW, and 64 mm for FW.

### 6.3.4 Changes in peak runoff coefficients and runoff with more abandoned paddies

As noted, observed peak runoff coefficients in APW exceeded those observed in CPW, except for rainfall no.

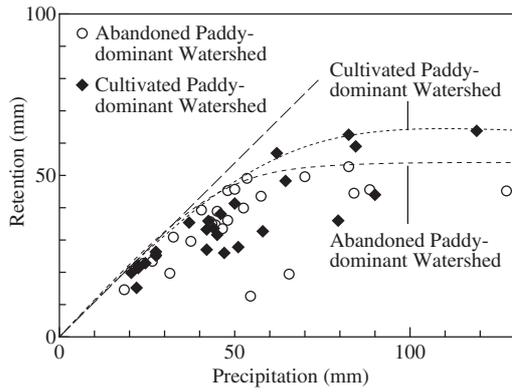


Fig. 120 Retention capacities of the cultivated- and abandoned-paddy watersheds.

22, and the maximum value in APW was 1.25 times that in CPW (no. 14). The runoff ratio also showed higher values in APW as compared with CPW, especially for events with wet antecedent moisture conditions, and the maximum difference between CPW and APW was 31.4% (no. 15).

Here, the runoff characteristics of both watersheds were compared using the data observed in rainfall no. 15 and no. 16, which were typical events that showed clear differences in the runoff ratios.

Rainfall no. 15 occurred on 21 August 2008 (Fig. 121). The 7-day antecedent precipitation exceeded 200 mm (223.5 mm for CPW and 207.5 mm for APW), most of which was attributable to the intense rainfall no. 12 and no. 13. The peak discharge for rainfall no. 16, on 26 September 2008, also occurred in wet watershed conditions. The total precipitation in rainfall no. 16 can be divided into that in the first half (up to 12:00 on 25 September) and the latter half. The 7-day antecedent precipitation (approximately 70 mm) and the precipitation in the first half of the event (70 mm for both watersheds) resulted in the total precipitation exceeding 140 mm before the peak flow was observed.

The precipitation that fell directly on the wet surface of abandoned paddies became surface runoff and flowed out through the pathways of degraded paddy levees. In CPW, however, part of the generated surface runoff was temporarily stored in paddy levees, resulting in differences in the peak runoff coefficients.

The rainfall intensity differed between rainfall no. 15 and no. 16, with relatively intense rainfall of 15 mm/h in no. 15 and only mm/h in no. 16 (Fig. 122). In other words, the increasing trend of runoff ratio under wet conditions did not depend on the rainfall intensity. However, the maximum rainfall intensity (38.0 mm/h) observed during our experimental period was equivalent to a return period of 5 years; thus, this conclusion may be limited to the range of our observations.

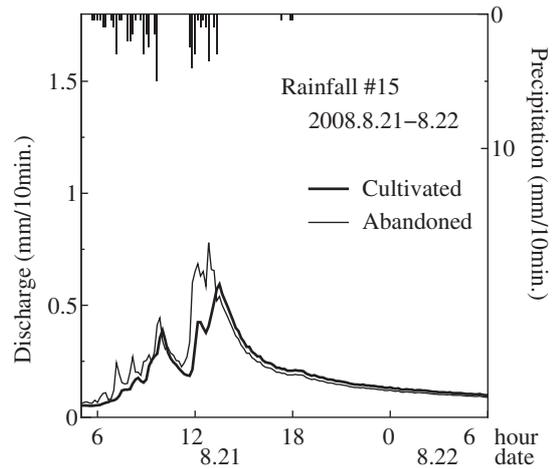


Fig. 121 Observed hydrograph for cultivated- and abandoned-paddy watersheds in rainfall no. 15.

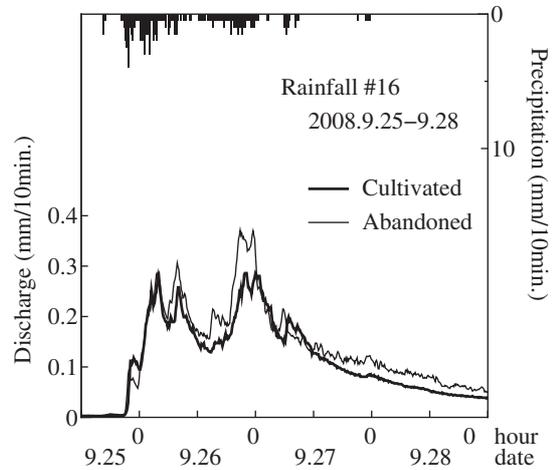


Fig. 122 Observed hydrograph for cultivated- and abandoned-paddy watersheds in rainfall no. 16.

## 6.4 Rainfall-runoff modelling of watersheds characterized by terraced paddy

### 6.4.1 Modelling runoff processes in cultivated and abandoned paddies

#### (1) Runoff processes from cultivated paddies

The ponding depth governs the runoff process from cultivated paddies. Thus, the ponding depth of paddies were calculated in every grid cell, using simple water balance equations of precipitation, irrigation supply, evapotranspiration, infiltration, and runoff from the outlet. Runoff from the outlet was estimated by using the formula to calculate water flow over weirs.

Interviews with farmers revealed that the ponding depth was kept at the target level by an irrigation supply from ephemeral streams. Here, the irrigation supply ( $Q_a$ ,  $m^3/dt$ ) was estimated; that is, in case the calculated ponding depth is below the target water level, farmers supply as much water as they need from streams. The model compares stream flow in a grid cell ( $Q_{cin}$ ,  $m^3/dt$ ) and water requirement for paddies, which is the product of unit water requirement ( $Q_{rq}$ ,  $m/dt$ ) and paddy area

( $A_i$ ,  $m^2$ ), and determines  $Q_a$  as the smaller value of the two. In extremely severe drought conditions, the farmers pump up water from downstream paddies; however, such water management were not incorporated in this calculation.

## (2) Runoff processes from abandoned paddies

Changes in the hydrological environment with the abandonment of paddy fields include not only levee degradation but also changes in soil properties, which are maintained through agricultural activities as mentioned above. Many studies have revealed the relationships between the surface hydrological environment and soil moisture conditions in abandoned paddies (Yoshida et al., 1997; Chiba et al., 1997). The soil properties in the Higashi-Kubiki region vary greatly following the repetition of drying and wetting. The observed changes include an increase in pore space during drying periods and a decrease during wetting periods. The effects of drying and wetting reach the soil base layer of paddies, which lies 25-30 cm below the surface, and during a severe dry spell permeability of the base layer had increased to approximately  $10^{-4}$  cm/s from  $10^{-7}$  cm/s (Yoshida et al., 1997). The changes in infiltration rate in an abandoned paddy plot were observed, and the rate decreased from 19 to 1 mm after a storm of 40 mm rainfall (Chiba et al., 1997).

However, upscaling these point- or plot-scale observations to the catchment scale is difficult due to the catchment's spatial heterogeneity. In equation (80), the maximum and minimum values of infiltration at the abandoned paddy surface were set; and a linear relationship between percolation from paddy surface and root zone storage were assumed:

$$I_{\text{abn}} = I_{\text{min}} + (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \left( 1 - \frac{S_r}{S_{r\text{max}}} \right), \quad (80)$$

where  $I_{\text{min}}$  and  $I_{\text{max}}$  are minimum and maximum value of percolation rate at paddy surface, respectively. If data were available regarding the structure of the pore space, then other distributions or multimodal expressions could be applied, at the expense of introducing further parameters.

## (3) Parameters for cultivated and abandoned paddy modules

The levee and outlet height of the cultivated and abandoned paddies were set based on field observations. The modelled levee and outlet height of the cultivated paddies are 400 and 300 mm, respectively, and those of the abandoned paddies are 100 and 30 mm. The water level of cultivated paddies is maintained such that it exceeds the target ponding depth of 50 mm. Maximum daily water intake for the cultivated paddies ( $Q_{\text{rq}}$ ) is set to 10 mm/d for the period from 1 May through 15 Au-

gust.

The infiltration rate at the paddy surface in this region is relatively small due to the hydraulic conductivity below the paddies, which is on the order of  $10^{-7}$   $10^{-6}$  cm/s. Therefore, we set the infiltration rate in cultivated paddies to 5 mm/d. Infiltration rate in the abandoned paddies, however, changes according to the development of large cracks during the drying periods and is modelled by using equation (80). The minimum and maximum values ( $I_{\text{min}}$  and  $I_{\text{max}}$ ) were set at 5 and 25 mm/d, respectively. These values follow the referenced values in our study area, which were observed in an abandoned paddy field using a long-term record of water balance studies during a period that included extreme drought (Yoshida et al., 1997).

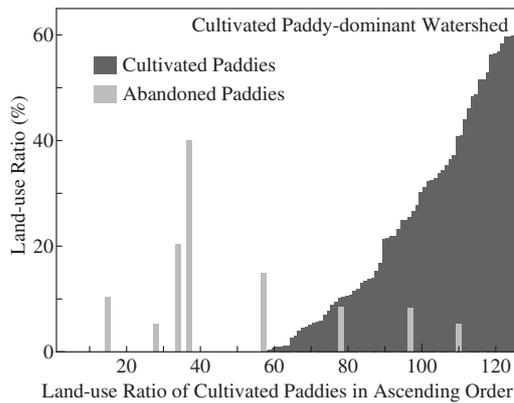
## 6.4.2 Initial conditions for short-term calculations

Our observations showed that initial moisture conditions affected the short-term rainfall-runoff characteristics. Although the initial conditions can be generated and optimized in lumped hydrological models, this is not possible in distributed hydrological models because they require spatial representation of state variables based on physical processes. Therefore, the initial conditions for each rainfall event were determined by using the results of long-term calculation of the model:

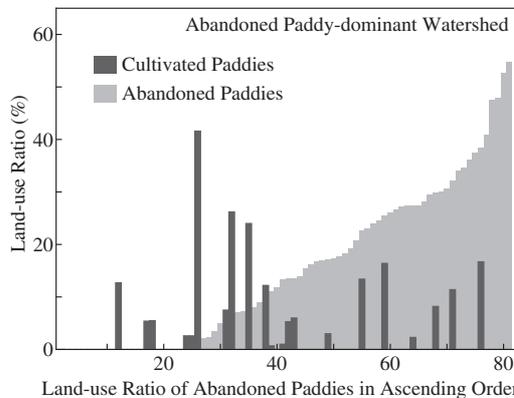
- 1) The model parameters were calibrated for hydrogeological properties using the long-term rainfall and runoff data observed in FW. The parameters  $Q_{b0}$ ,  $f_b$ ,  $R_{c0}$ ,  $f_i$ , and  $T_d$  can be determined by recession properties and base flow, whereas  $K_{\text{sat}}$  and  $\psi$  can be determined by peak flow.
- 2) The parameters obtained in process 1) and section 6.4.1 were applied to CPW and APW, while assuming that the subsurface properties are identical in the experimental watersheds.
- 3) Daily calculations were conducted throughout the observation period. The state variables of every grid cell in the model, which were root zone storage ( $S_r$ ), unsaturated zone storage ( $S_u$ ), deficit to saturation ( $D_s$ ), and ponding depth of paddies ( $H_{\text{pad}}$ ), for every rainfall event were saved.
- 4) The state variables obtained in process 3) were used as the initial conditions for the short-term calculations.

## 6.4.3 Model application to experimental watersheds

Grid cells of 100  $m^2$  in size were used for the application of DWCM-AgWU; and the grid cells including the watershed boundaries were assigned the actual area included in each grid cell. The number of grid cells was 125 for CPW and 81 for APW. Next, the average elevation for each grid cell was extracted using a digital elevation model of 50 m in spatial resolution, and determined flow directions following the steepest descent



**Fig. 123** Ratio of cultivated and abandoned paddy fields in each of the grids cells in the cultivated-paddy watershed (listed in ascending order of the ratio of cultivated paddy fields in each grid cell).



**Fig. 124** Ratio of cultivated and abandoned paddy fields in each of the grids cells in the abandoned-paddy watershed (listed in ascending order of the ratio of abandoned paddy fields in each grid cell).

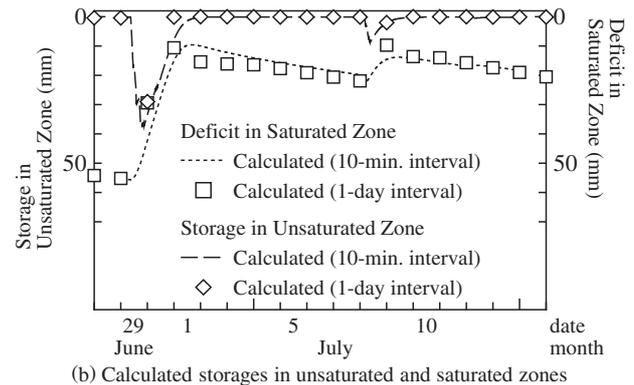
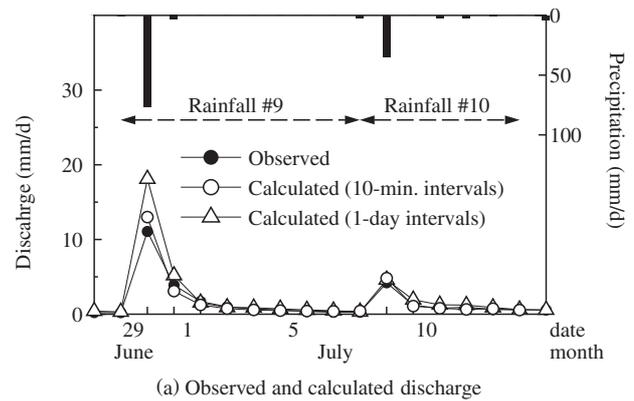
method. The areal ratios of cultivated and abandoned paddies in each of the grid cells for CPW and APW are shown in **Figs.123** and **124**.

Temporal resolution of the short-term calculation was set to 10 min, as the minimum flood concentration time of each watershed was 30 min. The land surface processes of evapotranspiration and snow melting were incorporated in the long-term calculation, but these processes were not incorporated in the short-term calculation because evapotranspiration during rainfall periods was negligible.

## 6.5 Results

### 6.5.1 Comparison of discharges and storage in unsaturated and saturated zones calculated at different time intervals

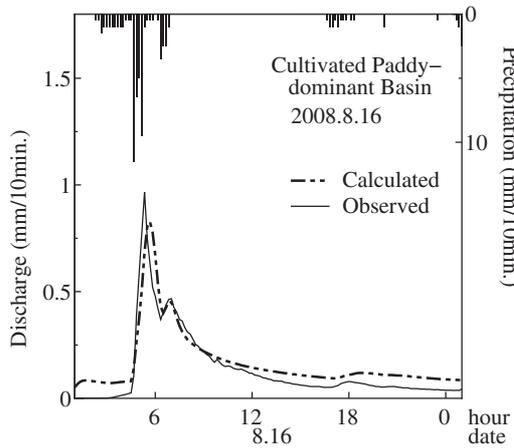
The results calculated at different time intervals (1 d and 10 min) were compared to assess the validity of the model. The results were those of two consecutive rainfall events, no. 9 and no. 10, in CPW; the calculation periods were 29 June to 7 July 2008 for rainfall no. 9 and 8 July to 13 July 2008 for rainfall no.10 (**Fig. 125**).



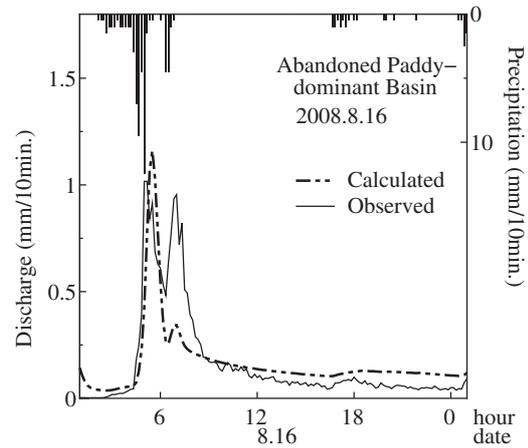
**Fig. 125** (a) Discharges and (b) storage in unsaturated and saturated zones calculated at different time intervals. Discharges calculated at 10-min intervals shown in (a) represent aggregated discharges in a day.

First the calculated discharge of both time intervals were compared with the observed values (**Fig. 125** (a)). Both of the calculated discharges represented well the observed discharge except for the peak discharge in rainfall no. 9 on 29 June. This may be attributable to the sudden decrease of  $D_s$  in the calculation with the time interval of 1 h. The calculated decrease in  $D_s$  with the 1-d time interval was 10 mm larger than that of 10 min, which led to a larger volume of saturation excess overland flow. However, these discrepancies in peak discharge were not observed in rainfall no. 10, implying that they were limited to rainfall events with high intensity.

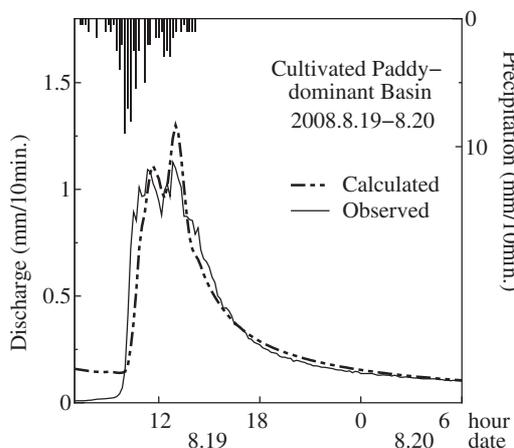
Then the calculated state variables  $D_s$  and  $S_u$  were compared in the same period (**Fig. 125** (b)). Because of the nonlinearity of the saturated zone calculation, there were some discrepancies between the results calculated at different time intervals. However, the discrepancies were negligible with regard to the estimation of initial conditions for short-term calculations, because differences in the initial conditions of  $D_s$  and  $S_u$  for rainfall no. 10 were 2.1 and 0.2 mm, respectively. Also, the overall representations of  $D_s$  and  $S_u$  were similar for both time intervals. These results indicate that the method is valid for estimating the initial conditions for short-term calculations utilizing the results from long-term calculations.



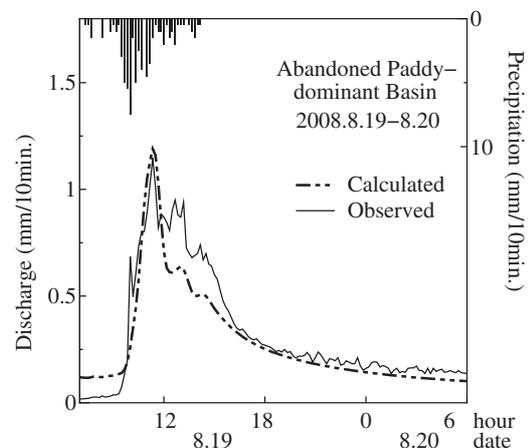
**Fig. 126** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 13 (CPW)



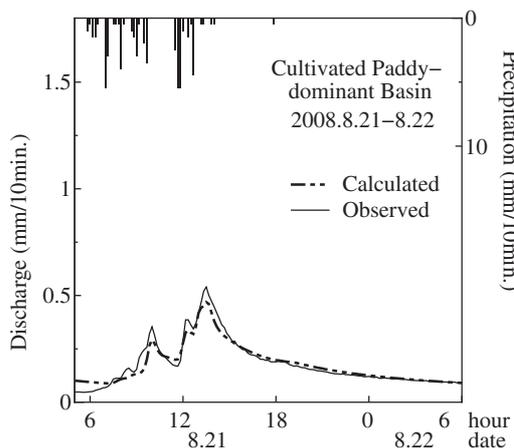
**Fig. 127** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 13 (APW).



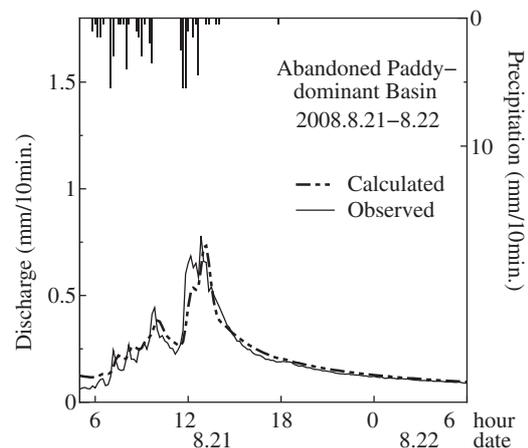
**Fig. 128** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 14 (CPW)



**Fig. 129** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 14 (APW).



**Fig. 130** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 15 (CPW)



**Fig. 131** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 15 (APW)

### 6.5.2 Results of short-term runoff calculations and comparison with observed values

The calculated results for the selected rainfall events that exceeded the threshold described in section 6.4.2 are summarized in **Table 5**. The relative error in the table was calculated by using the following equation:

$$RE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Q_{\text{obs}}(t) - Q_{\text{cal}}(t)|}{Q_{\text{obs}}(t)}, \quad (81)$$

where  $Q_{\text{obs}}(t)$  and  $Q_{\text{cal}}(t)$  are observed and calculated discharges, respectively, and  $N$  is the total time steps of the discharge data. The relative errors were calculated

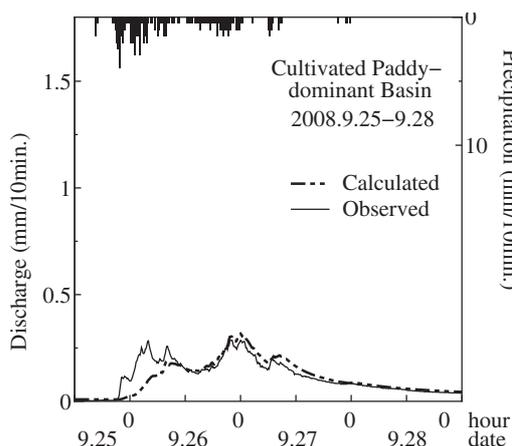


Fig. 132 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 16 (CPW)

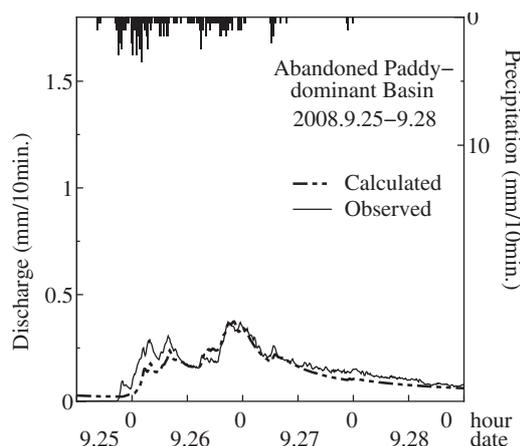


Fig. 133 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 16 (APW)

Table 5 Results of short-term runoff calculations for cultivated- and abandoned-paddy watersheds and comparison with the observed values.

No.	date	Cultivated Paddy-dominant							Abandoned Paddy-dominant						
		Ant.	Observed			Calculated			RE	Prc.	Peak	Roff	Calculated		
			Prc.	Peak	Roff	Peak	Roff	RE				Peak	Roff	RE	
2007															
1	22 Aug.	6.5	37.0	0.213	3.2	0.015	1.8	25.1	32.5	0.206	3.1	0.050	2.3	33.2	
2	28 Aug.	32.5	42.5	0.142	10.2	0.223	16.5	30.2	48.0	0.078	8.5	0.240	14.3	27.5	
3	30 Aug.	30.0	48.0	0.145	16.2	0.054	11.1	28.4	48.0	0.149	10.8	0.053	9.5	25.3	
4	5 Sep.	60.0	-	-	-	-	-	-	48.0	0.721	6.7	0.904	13.6	31.5	
5	8 Oct.	19.0	44.0	0.043	5.2	0.034	5.1	25.4	50.0	0.056	12.3	0.036	6.2	29.3	
6	26 Oct.	20.0	84.5	0.133	15.5	0.108	16.8	27.1	-	-	-	-	-	-	
2008															
7	20 May	4.5	22.5	0.008	0.5	0.004	1.7	36.5	22.5	0.014	0.9	0.022	2.9	32.6	
8	23 Jun.	16.0	27.5	0.010	0.5	0.003	0.6	31.2	40.5	0.145	1.3	0.061	2.0	20.5	
9	29 Jun.	40.0	82.5	0.239	14.7	0.285	14.6	27.6	82.5	0.267	23.5	0.104	21.4	30.4	
10	8 Jul.	10.0	45.0	0.286	5.2	0.270	5.4	22.3	-	-	-	-	-	-	
11	4 Aug.	5.0	27.5	0.055	0.4	0.117	2.4	20.4	27.5	0.406	2.4	0.230	3.6	24.5	
12	15 Aug.	1.5	62.0	0.540	5.3	0.565	5.7	16.4	53.5	0.419	4.5	0.586	5.2	36.1	
13	16 Aug.	55.0	64.5	0.967	29.4	1.106	21.2	14.2	70.0	1.017	37.5	1.227	56.6	23.6	
14	19 Aug.	142.0	79.5	1.127	53.8	1.301	62.9	13.1	65.5	1.147	61.2	1.190	56.1	11.5	
15	21 Aug.	223.5	51.0	0.540	41.6	0.466	42.5	15.8	54.5	0.780	45.6	0.807	42.5	19.8	
16	25 Sep.	70.0	122.0	0.286	64.8	0.308	64.7	26.2	127.5	0.386	89.9	0.374	80.7	27.2	
2009															
17	17 May	16.0	24.5	0.040	0.8	0.015	0.7	35.3	24.0	0.053	0.9	0.002	0.3	21.3	
18	31 May	10.0	20.5	0.007	4.3	0.003	1.5	45.2	20.5	0.008	2.5	0.026	2.0	36.2	
19	22 Jun.	0.5	42.0	0.431	7.6	0.614	5.8	26.1	43.0	0.461	8.1	0.548	8.3	42.3	
20	1 Jul.	7.5	46.0	0.139	7.8	0.036	8.3	23.9	57.5	0.209	13.4	0.063	15.4	36.1	
21	9 Jul.	55.5	90.0	0.427	39.6	0.336	48.6	37.0	88.5	0.465	46.2	0.452	61.5	38.8	
22	18 Jul.	23.0	47.0	0.497	30.0	0.438	43.1	33.9	44.5	0.423	29.1	0.301	33.6	27.5	
23	8 Aug.	38.5	22.0	0.272	8.5	0.276	10.3	21.3	31.5	0.262	13.6	0.380	21.5	37.4	
24	29 Aug.	6.5	22.5	0.077	2.5	0.114	5.9	34.9	26.5	0.096	1.8	0.124	6.5	34.2	
25	3 Nov.	68.5	42.0	0.218	10.9	0.375	15.4	24.6	46.5	0.172	13.5	0.209	12.3	23.5	
26	11 Nov.	0.0	58.0	0.275	15.9	0.453	35.1	30.8	52.5	0.145	13.8	0.119	20.5	43.5	

Abbreviations and units:

Ant.: Antecedent Precipitation for 7 days (mm/7d), Prc.: Total Precipitation (mm),

Peak: Peak Discharge (mm/10min), Roff: Total Runoff (mm), RE: Relative Error (%)

during the period in which the observed discharge exceeded 0.02 mm/10min, to exclude relatively large errors associated with the low-flow data.

The evaluated relative errors ranged from 13.1% to 45.2% in CPW (mean, 25.7%) and from 11.5% to 42.3% in APW (mean, 29.6%). In terms of the volume of peak discharge, the larger events whose observed discharges exceeded 0.5 mm/10 min resulted in better representation; relative errors were 14.9% in CPW and 21.6% in APW (as depicted in Figs. 126-131).

Those events with smaller peak discharge, however, yielded relatively low accuracy. The relative errors were 29.2% and 31.4% for CPW and APW, respectively, which resulted from the smaller calculated discharges. As shown in Fig. 132 and Fig. 133, the calculated discharges in the first half of rainfall no. 16 were underestimated, although the representation was improved in the latter half, when the cumulative precipitation exceeded 140 mm.

This underestimation for small events may be due to

the representation of saturated surface flow. This model generates both infiltration excess and saturation excess surface flows, and for small rainfall events in which infiltration excess does not occur, saturation excess surface flow is the dominant form. Despite the fact that small-scale saturated areas will emerge near river streams in the early stages of rainfall events, the model calculates the saturated area on a grid-cell basis, which is 100 m<sup>2</sup> here. For those small rainfall events in which the scale differences in saturated area were significant, calculated discharges tend to be underestimated for these reasons.

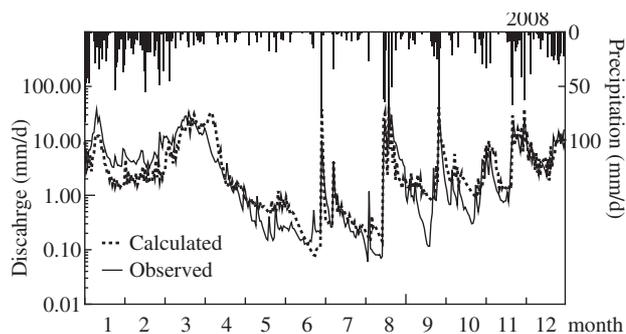
### 6.5.3 Initial conditions for short-term calculations

The calculated discharges in the long-term calculations are shown in **Fig. 134** to **Fig. 139**. The relative errors for the entire simulation period were 54%, 39%, and 38% for CPW, APW, and FW, respectively. The relative errors for the period without snow cover (i.e., excluding December to April) were 39%, 29%, and 29%, respectively. Thus, the errors in CPW were larger than those of the other watersheds in either case. These large errors in CPW were caused by the observation errors during low flows. The water level sensors in APW and FW were installed in artificial channels, whereas the sensor in CPW was in a natural stream, which was affected by sedimentation and natural fluctuation of stream lines. When the low-flow period (less than 0.5 mm/d) was eliminated from the evaluation period, a relative error of 31% was obtained in CPW.

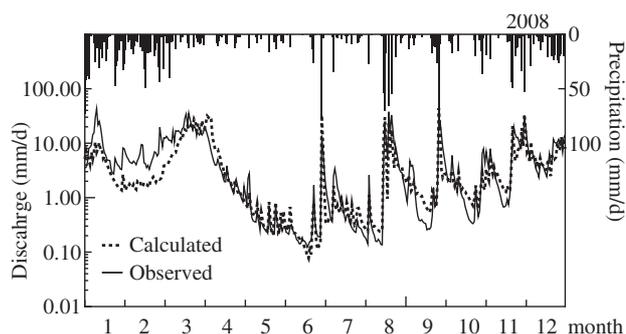
As described in section 6.4.2, the model parameters for hydrogeological properties were calibrated using the long-term rainfall and runoff data observed in FW and applied the parameters to APW and CPW. The results of the calculations in both watersheds were acceptable in terms of long-term runoff, confirming the parameter transferability of the proposed model.

Here, the initial conditions were compared to assess how they affected the calculated runoff characteristics. **Fig. 140** illustrates the deficit in the saturated zone ( $D_s$ ) from May through September 2008. The values shown in the figure are the maximum and average values over those grid cells in which paddies exist. The calculated  $D_s$  gradually decreased (i.e., water table was elevated) as the rainfall occurred in APW, whereas those in CPW remained relatively constant. Heavy rainfalls in late August brought sudden decreases in  $D_s$ , and the maximum  $D_s$  in APW approached zero, or complete saturation.

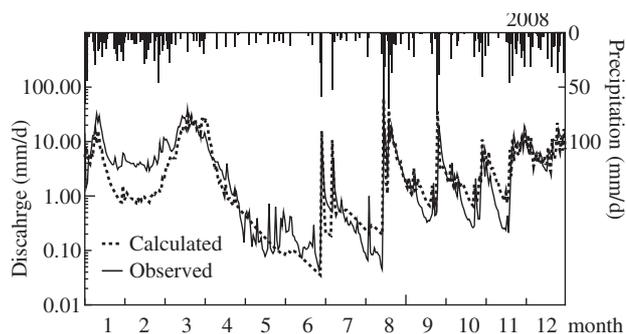
**Fig. 142** shows the ponding depth in paddies ( $H_{\text{pad}}$ ) for the same period illustrated in **Fig. 140**. Again, the values are the average over those grid cells in which paddies exist. The ponding depth was found to be remained fairly constant in CPW, whereas standing water disappeared in APW through infiltration and surface runoff from degraded levees.



**Fig. 134** Long-term observed and calculated hydrographs for cultivated-paddy watershed (2008).



**Fig. 135** Long-term observed and calculated hydrographs for abandoned-paddy watershed (2008).



**Fig. 136** Long-term observed and calculated hydrographs for forest watershed (2008).

### 6.5.4 Effects of initial soil wetness on short-term runoff characteristics

The initial soil wetness conditions differed, reflecting antecedent rainfall and catchment characteristics, as described in section 6.5.3. The effects of initial soil wetness on short-term runoff characteristics were investigated using two rainfall events: no. 14, which yielded the largest difference in peak runoff coefficients, and no. 13, whose peak runoff coefficients were similar in CPW and APW despite the rainfall intensity and amount being similar to those of rainfall no. 14.

The calculated peak coefficients for rainfall no. 13 were 0.12 for CPW and 0.14 for APW, whereas the observed peak coefficients were 0.15 and 0.16, respectively. The calculated peak coefficients for rainfall no. 14 were 0.18 for CPW and 0.23 for APW, whereas the observed peak coefficients were 0.24 and 0.30, respec-

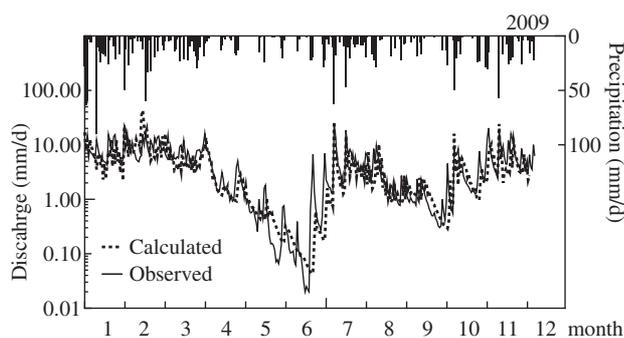


Fig. 137 Long-term observed and calculated hydrographs for cultivated-paddy watershed (2009).

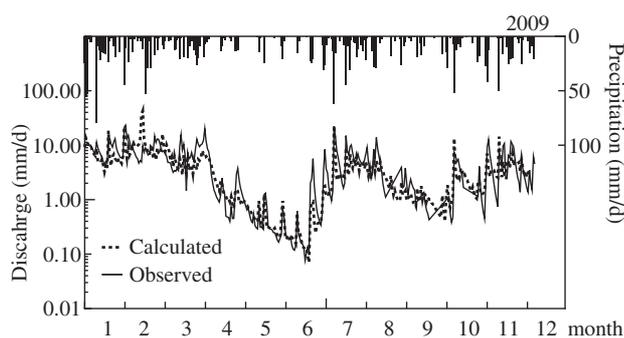


Fig. 138 Long-term observed and calculated hydrographs for abandoned-paddy watershed (2009).

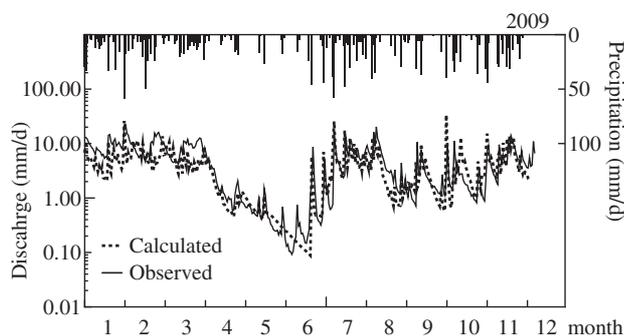


Fig. 139 Long-term observed and calculated hydrographs for forest watershed (2009).

tively. Thus, the model was able to represent the increasing trend of the peak runoff coefficient in APW for event no. 14.

The antecedent soil moisture conditions, as well as the topography and rainfall intensity, are important in governing the short term runoff processes. However, the effects of antecedent soil moisture conditions were discussed on short-term runoff characteristics observed in these two events, while neglecting the differences in topography (Fig. 117) and rainfall intensity. The  $D_s$  values averaged over grid cells with paddy fields were 123.5 mm in CPW and 83.6 mm in APW at the beginning of rainfall no. 13 (#13 in Fig. 140), whereas those at the beginning of rainfall no. 14 were 98.1 and 46.9 mm, respectively, or about 25-30 mm less.

The total precipitation in rainfall no. 13 (CPW, 64.5

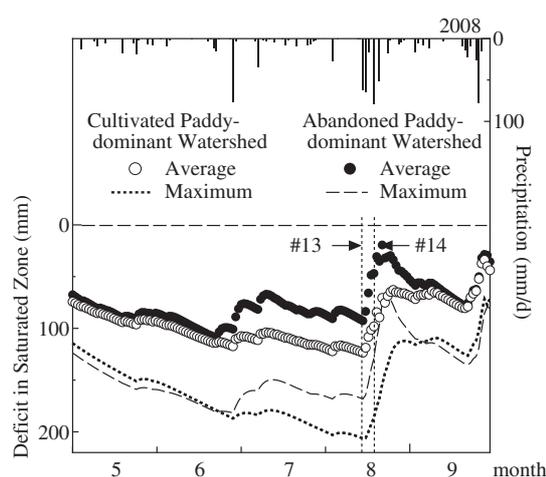


Fig. 140 Time-series of storage deficit in saturated zone for the cultivated- and abandoned-paddy watersheds in 2008. 'Average' in the figure represents the average values of grid cells in which paddy fields exist.

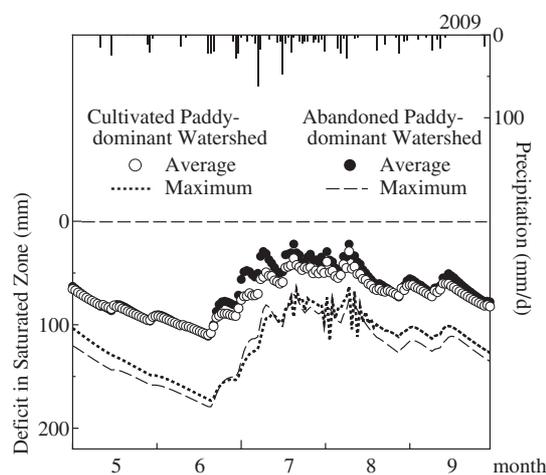


Fig. 141 Time-series of storage deficit in saturated zone for the cultivated- and abandoned-paddy watersheds in 2009. 'Average' in the figure represents the average values of grid cells in which paddy fields exist.

mm; APW, 70.0 mm) was smaller than the estimated  $D_s$  (CPW, 123.5 mm; APW, 83.6 mm), whereas the precipitation in no. 14 (CPW, 79.5 mm; APW, 65.5 mm) was smaller than the estimated  $D_s$  in CPW (98.1 mm) but larger than that in APW (46.9 mm). The calculated saturated excess overland flow in APW was larger than that in CPW, indicating that the water table near the abandoned paddies affected the short-term runoff characteristics in the watershed. The primary reason for the difference in  $D_s$  is that only vertical flow in unsaturated zones was assumed in the model. Onishi et al. (2003) noted that by incorporating detailed topography of paddies and slopes in a small hill slope with terraced paddies, water infiltrated into the paddy surface could be modelled to emerge at the bottom of the slope. This implies the necessity of performing detailed water flow analysis of the unsaturated zone for watersheds with

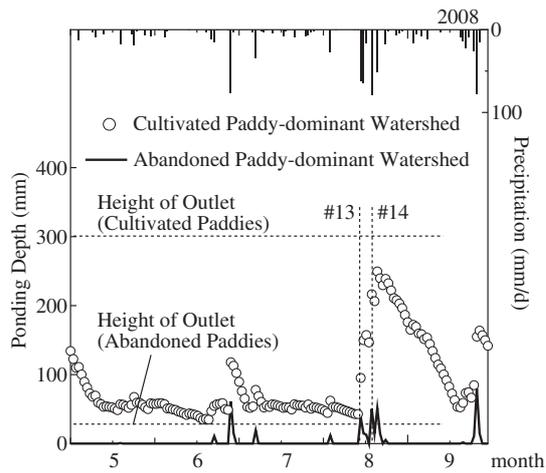


Fig. 142 Time-series of ponding depth for the cultivated- and abandoned-paddy watersheds (2008).

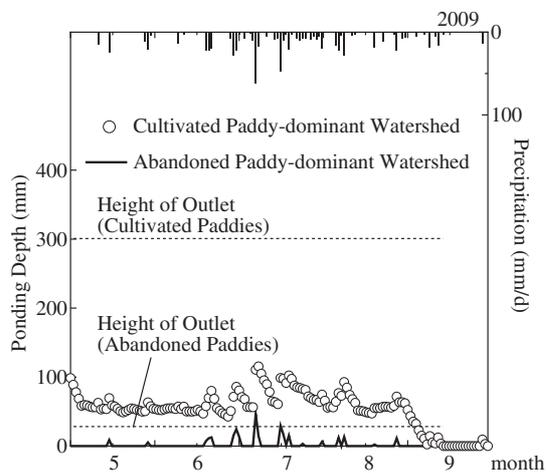


Fig. 143 Time-series of ponding depth for the cultivated- and abandoned-paddy watersheds (2009).

complex topography.

The proposed model is able to represent the mosaic of land uses in watersheds. Therefore, how flow regimes will be altered according to changes in land use and paddy cultivation conditions can be projected. In addition, the calibrated parameters can be transferred to watersheds of equivalent geological and topographical formations, which enables us to extend this watershed-scale evaluation to the regional scale.

## 6.6 Summary

In this section, the integrated model's ability was investigated to reproduce differences in runoff characteristics among watersheds. To assess the interaction between hydrological characteristics and paddy conditions, three small experimental watersheds were chosen, each of which was characterized by cultivated paddies, abandoned paddies, or forest.

1) The analysis revealed that the runoff ratios of APW were significantly higher than those of CPW under wet conditions, whereas no significant differences were observed between the watersheds under dry conditions. These results indicate that abandonment of paddies leads to larger peak discharges, suggesting that the presence of abandoned paddies increases the flood risk in a watershed.

2) The model parameters for hydrogeological properties were calibrated using the long-term rainfall and runoff data observed in FW and applied the parameters to APW and CPW.

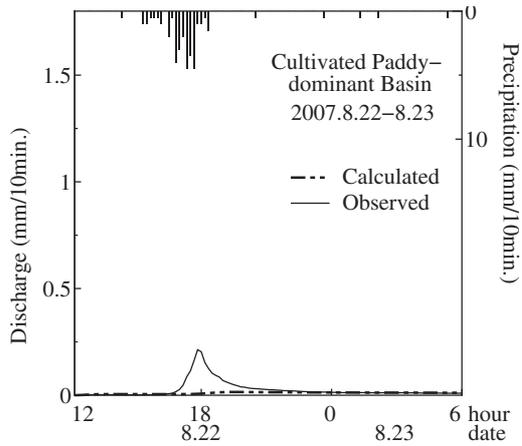
The results of the calculations in both watersheds were acceptable in terms of long-term runoff, confirming the parameter transferability of the proposed model.

3) Next, a submodel representing land surface process in abandoned paddies was developed and incorporated into the catchment-scale water circulation model, which was then applied to the three experimental watersheds. Before the calculation of the short-term runoff events, long-term calculations at 1-d intervals were performed to estimate the initial conditions or wetness in each experimental watershed.

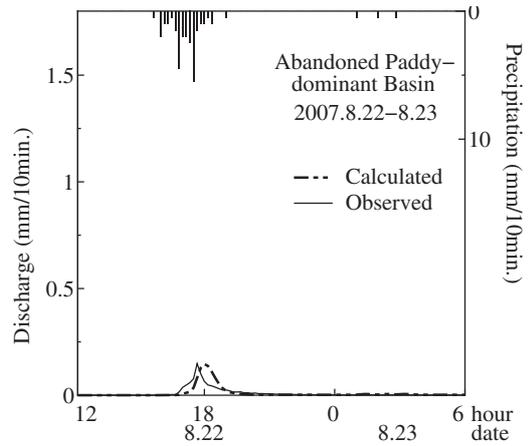
Then short-term runoff calculations were performed at 10- min intervals using the extracted state variables for CPW and APW.

4) The discharge calculations revealed higher flow peaks for APW than for CPW in wet conditions, whereas the flow peaks were equivalent in dry conditions. These results were in accordance with the observed runoff characteristics. Comparison of the initial conditions between the watersheds revealed that the storage Volumes of the saturated zones were greater in the abandoned paddies than in the cultivated paddies, suggesting that the water table was higher under the abandoned paddies. The modelling experiments showed that differences in groundwater storage may affect the short-term runoff characteristics of small watersheds

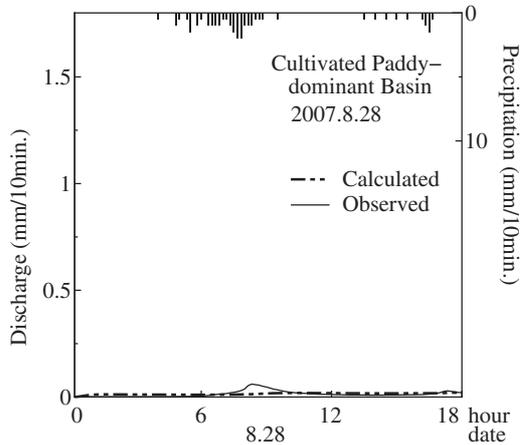
Appendix 6: Observed discharges and calculated discharges in the rainfall events listed in **Table 5**



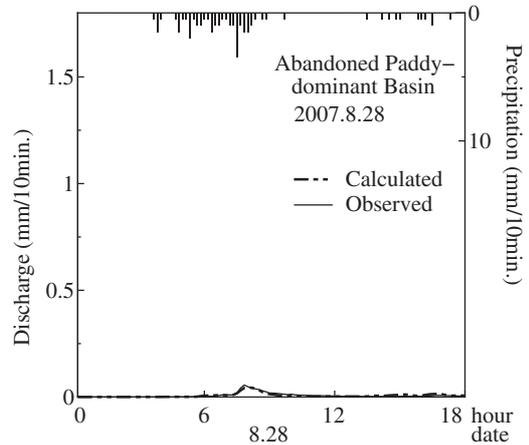
**Fig. 144** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 1 (CPW).



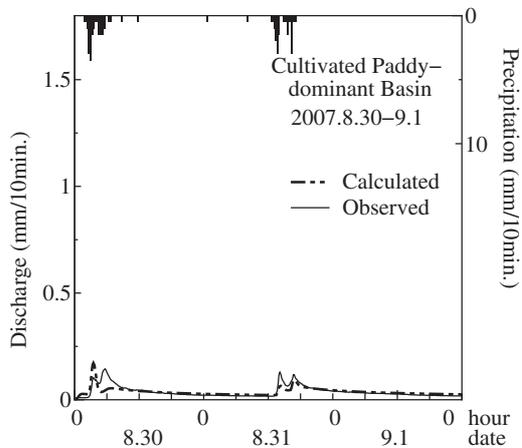
**Fig. 145** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 1 (APW).



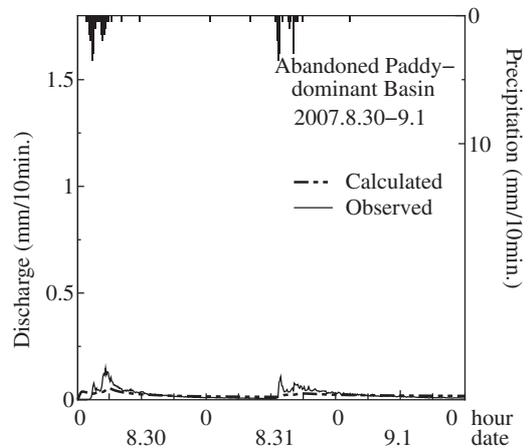
**Fig. 146** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 2 (CPW).



**Fig. 147** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 2 (APW).



**Fig. 148** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 3 (CPW).



**Fig. 149** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 3 (APW).

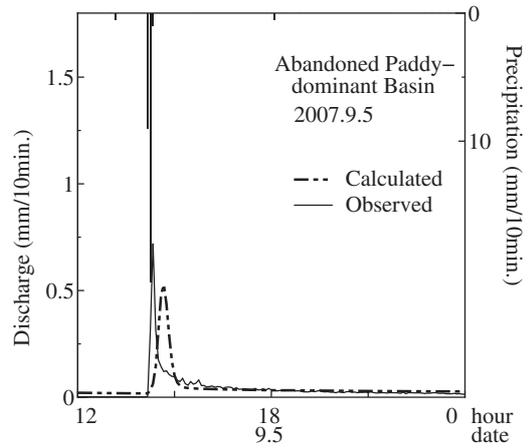


Fig. 150 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 4 (APW).

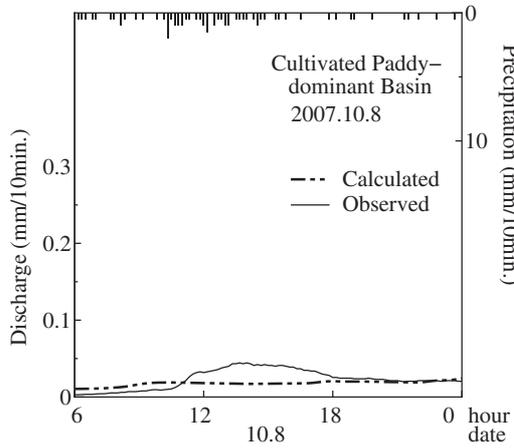


Fig. 151 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 5 (CPW).

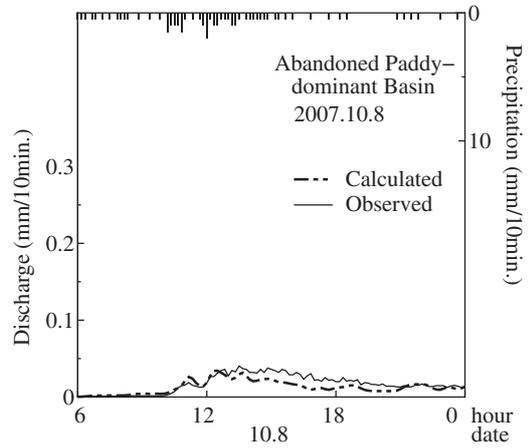


Fig. 152 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 5 (APW).

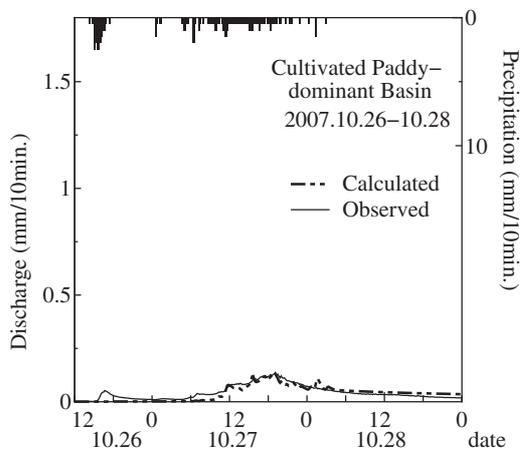


Fig. 153 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 6 (CPW).

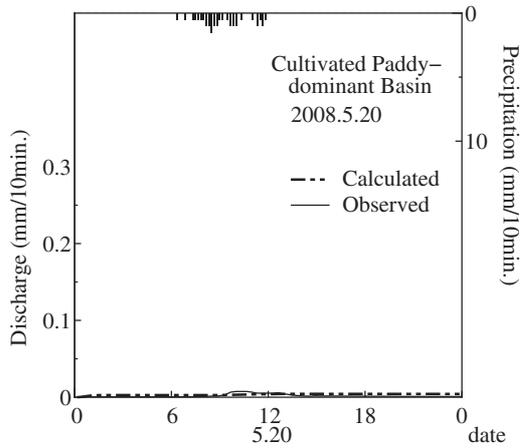


Fig. 154 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 7 (CPW).

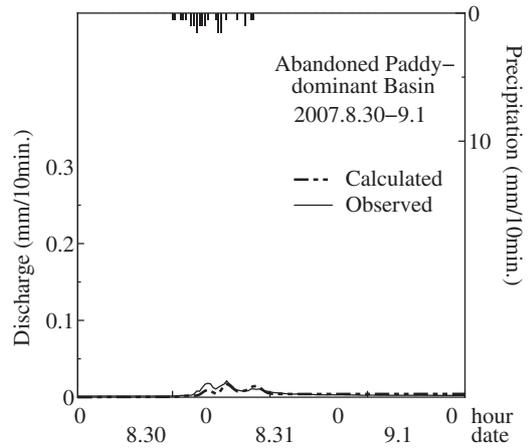


Fig. 155 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 7 (APW).

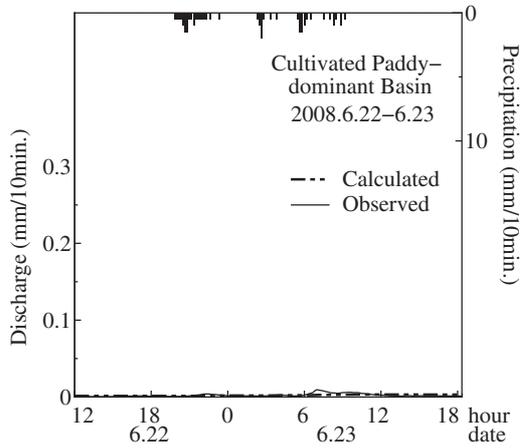


Fig. 156 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 8 (CPW).

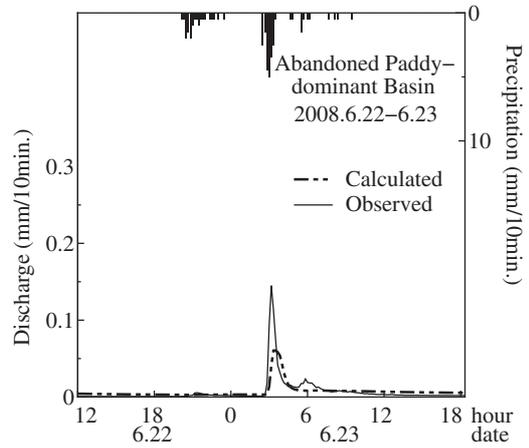


Fig. 157 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 8 (APW).

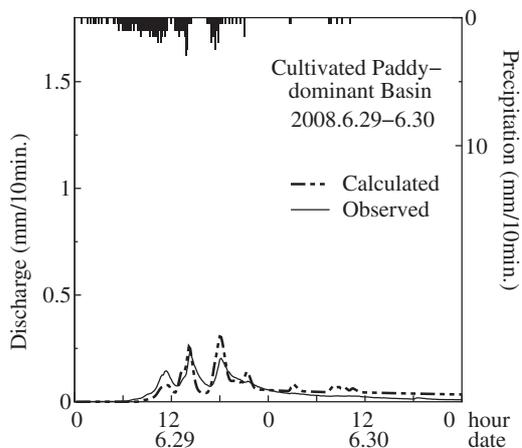


Fig. 158 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 9 (CPW).

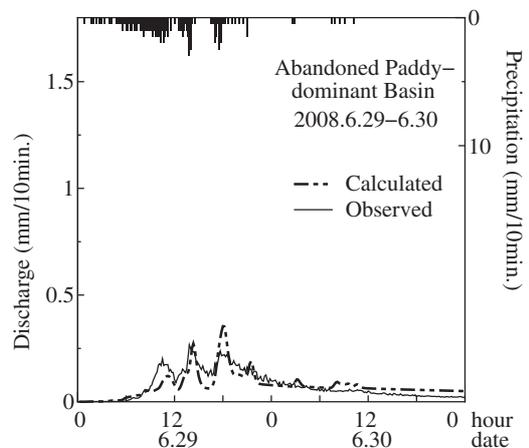
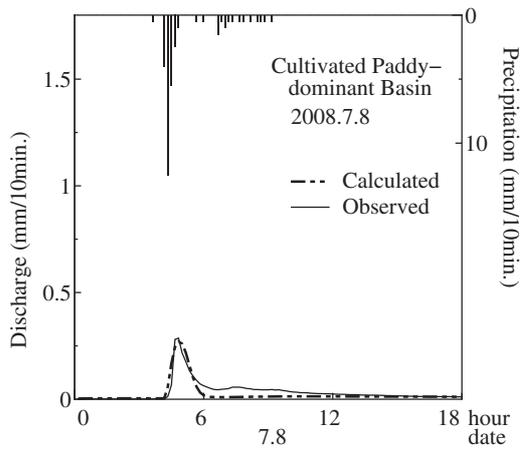
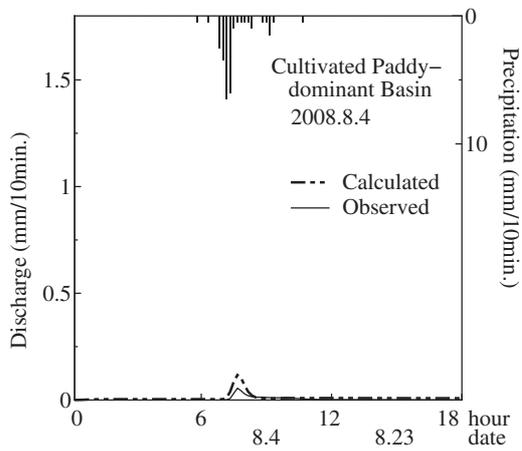


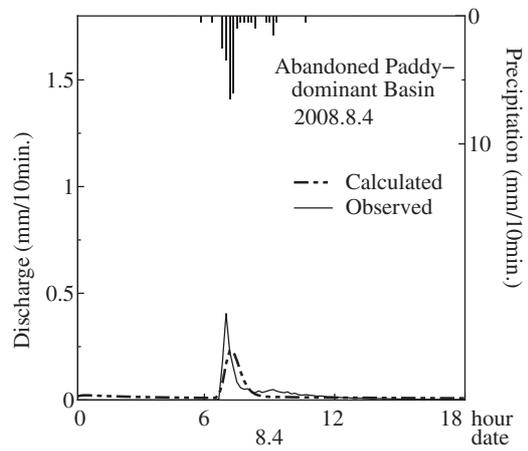
Fig. 159 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 9 (APW).



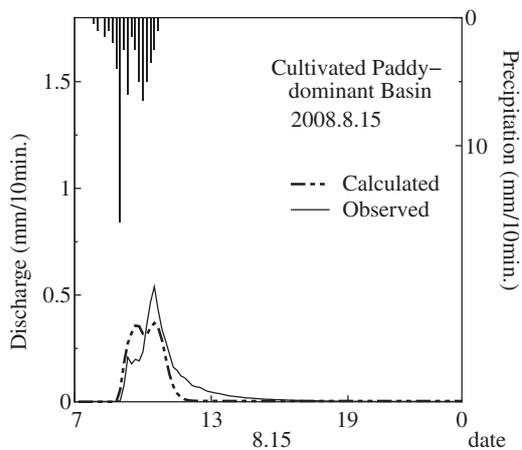
**Fig. 160** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 10 (CPW).



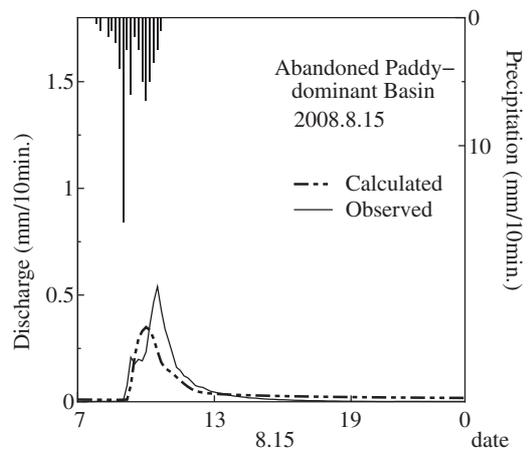
**Fig. 161** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 11 (CPW).



**Fig. 162** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 11 (APW).



**Fig. 163** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 12 (CPW).



**Fig. 164** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 12 (APW).

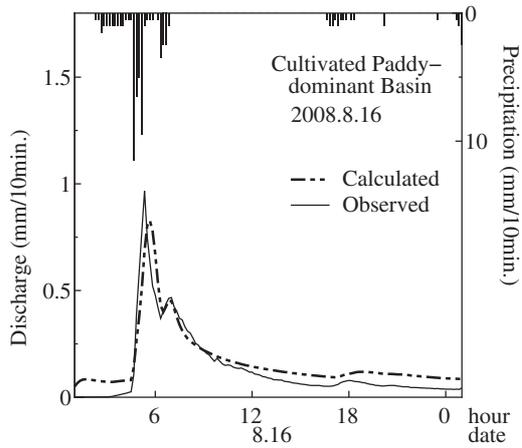


Fig. 165 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 13 (CPW).

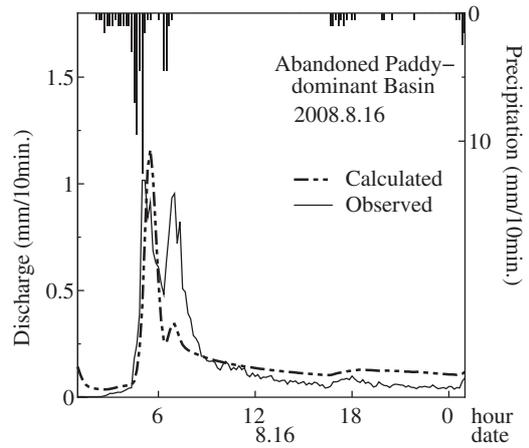


Fig. 166 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 13 (APW).

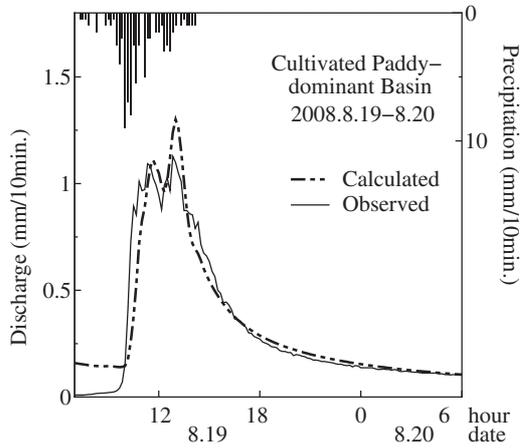


Fig. 167 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 14 (CPW).

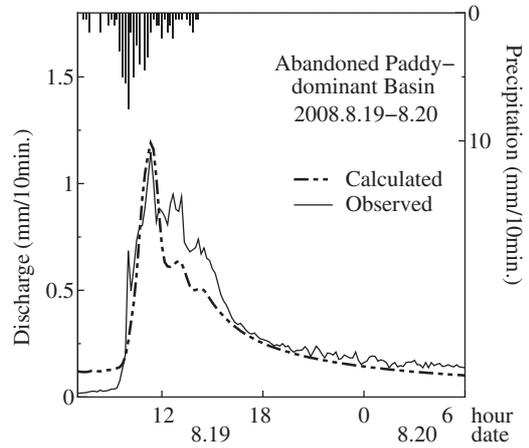


Fig. 168 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 14 (APW).

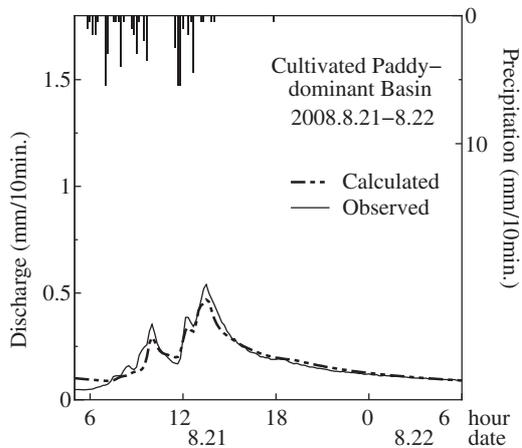


Fig. 169 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 15 (CPW).

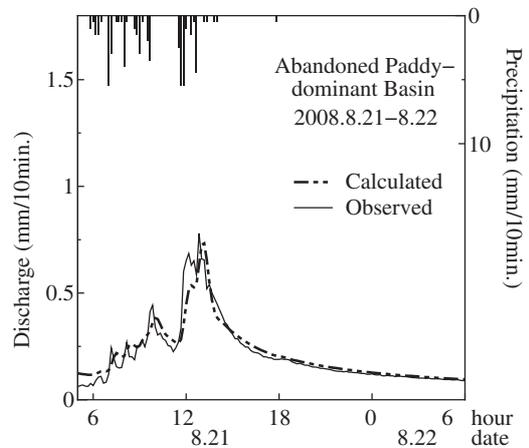
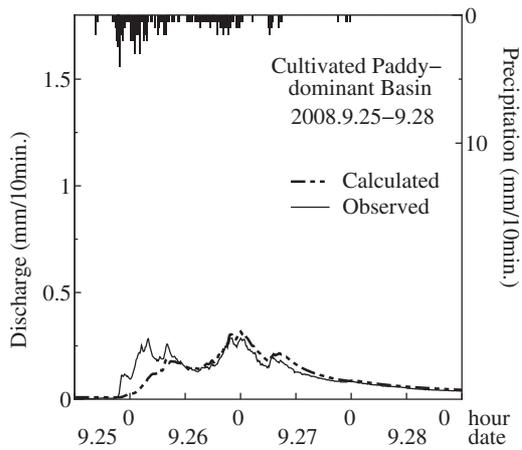
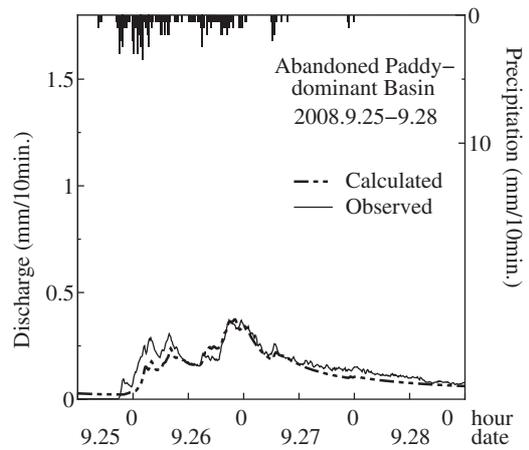


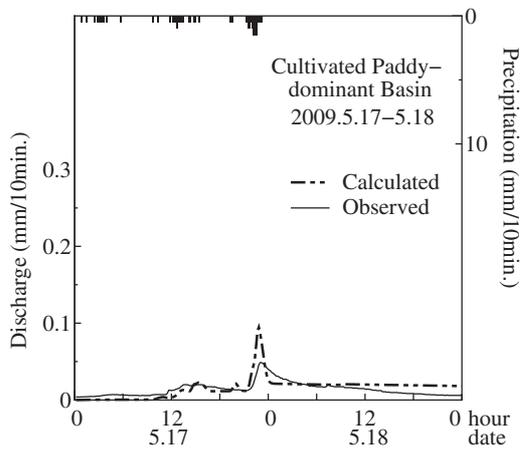
Fig. 170 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 15 (APW).



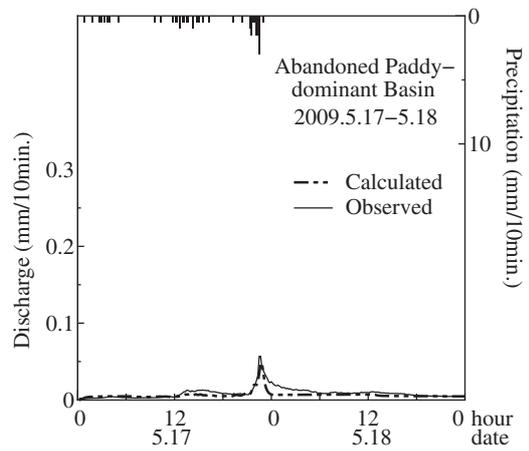
**Fig. 171** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 16 (CPW).



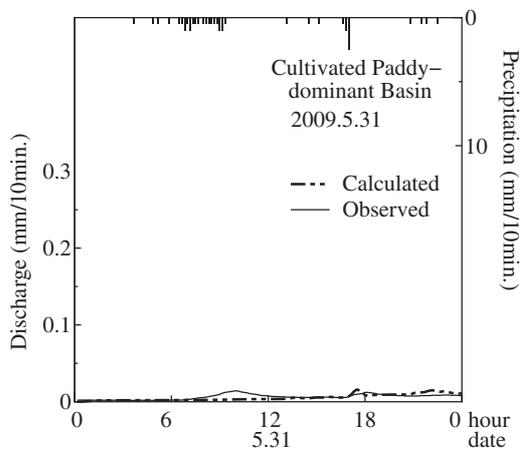
**Fig. 172** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 16 (APW).



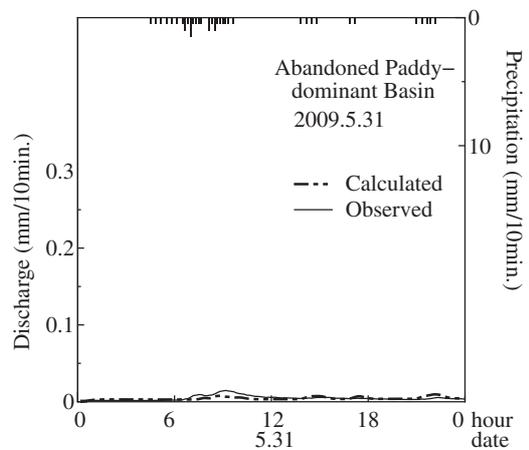
**Fig. 173** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 17 (CPW).



**Fig. 174** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 17 (APW).



**Fig. 175** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 18 (CPW).



**Fig. 176** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 18 (APW).

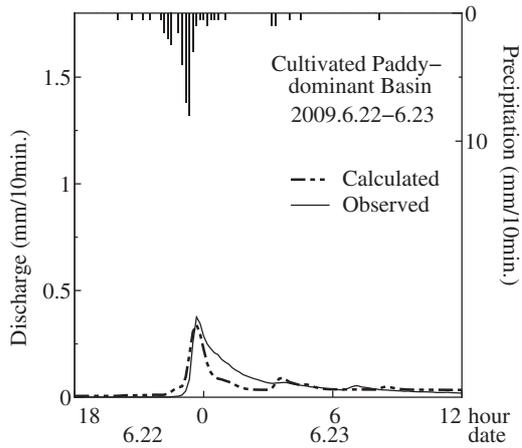


Fig. 177 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 19 (CPW).

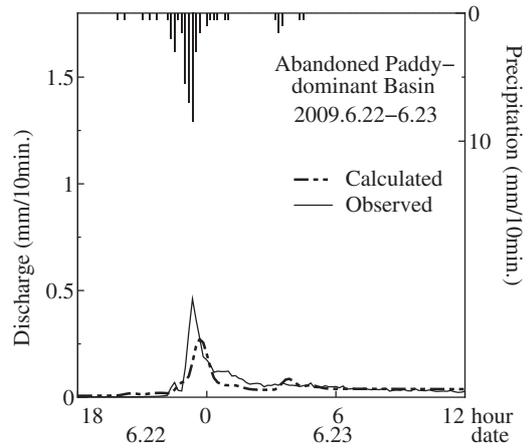


Fig. 178 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 19 (APW).

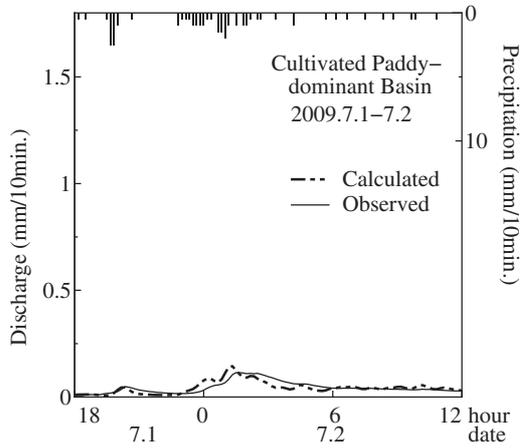


Fig. 179 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 20 (CPW).

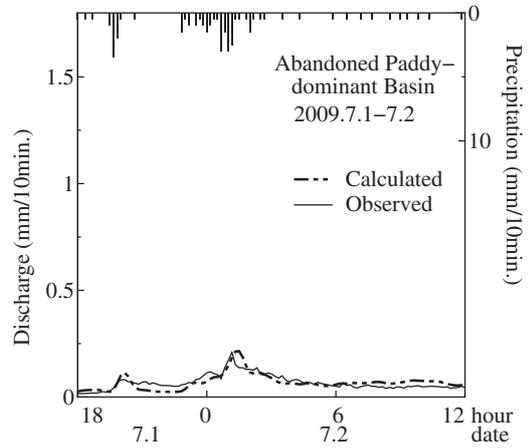


Fig. 180 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 20 (APW).

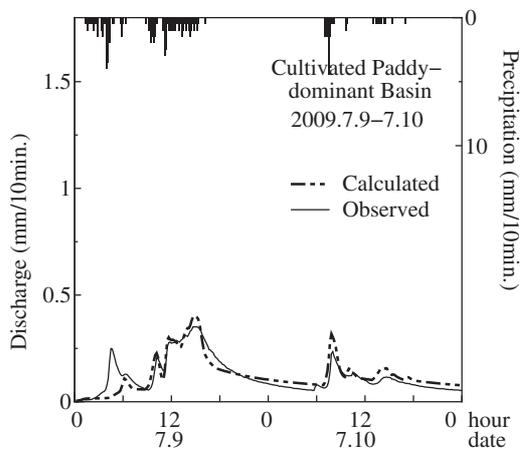


Fig. 181 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 21 (CPW).

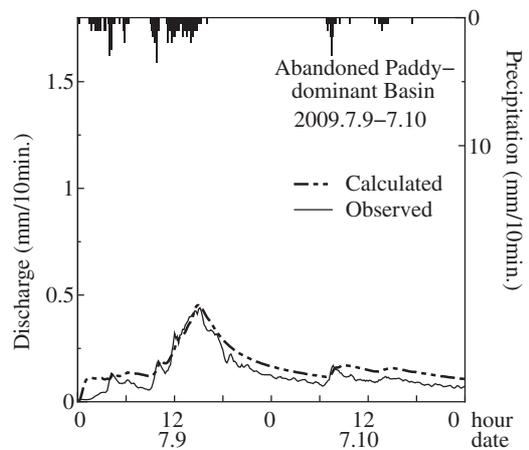
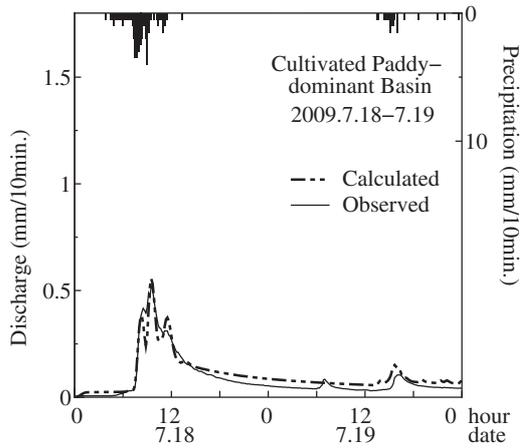
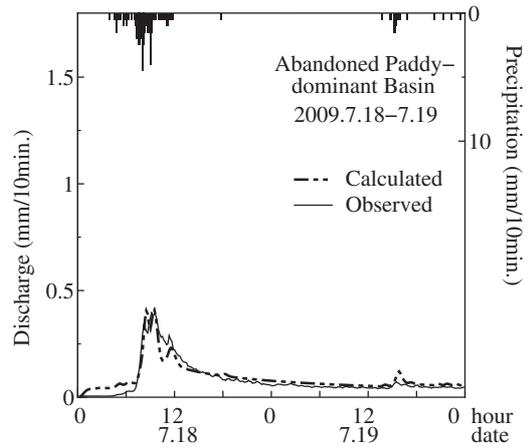


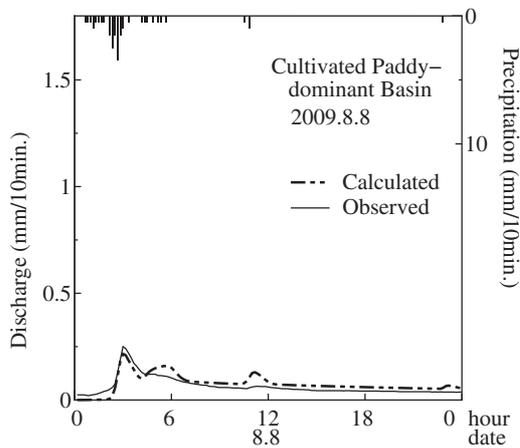
Fig. 182 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 21 (APW).



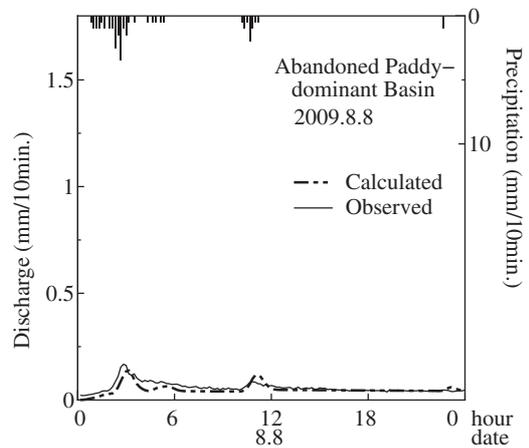
**Fig. 183** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 22 (CPW).



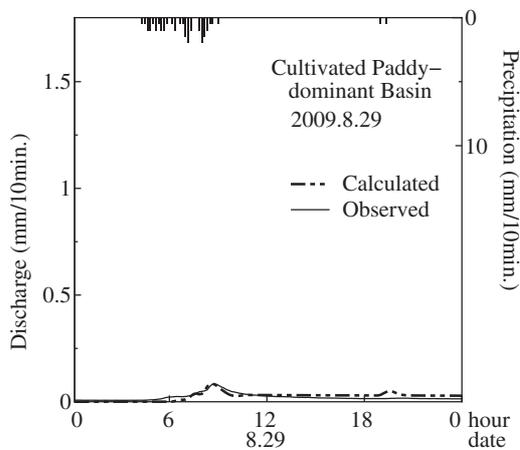
**Fig. 184** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 22 (APW).



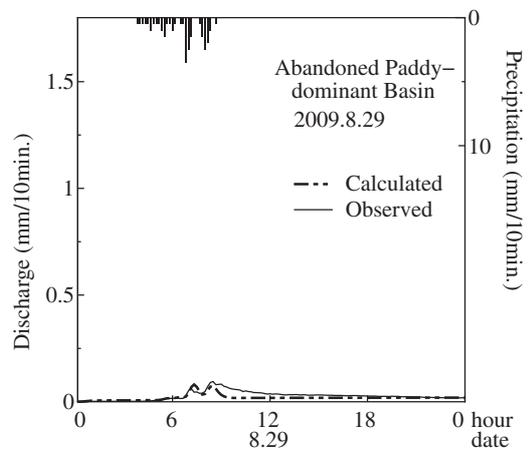
**Fig. 185** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 23 (CPW).



**Fig. 186** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 23 (APW).



**Fig. 187** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 24 (CPW).



**Fig. 188** Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 24 (APW).

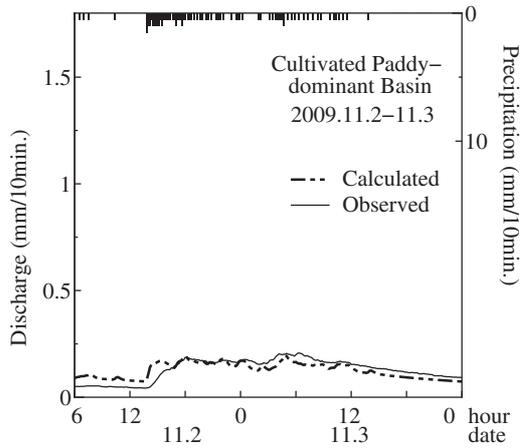


Fig. 189 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 25 (CPW).

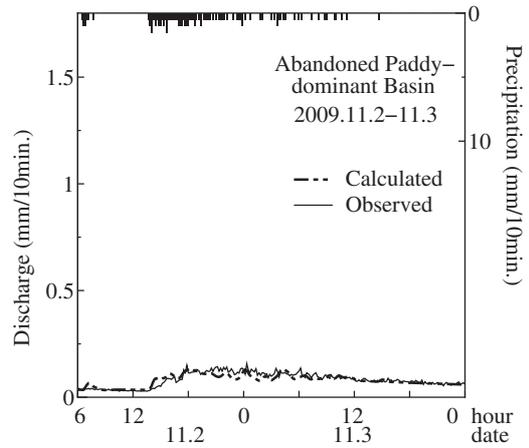


Fig. 190 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 25 (APW).

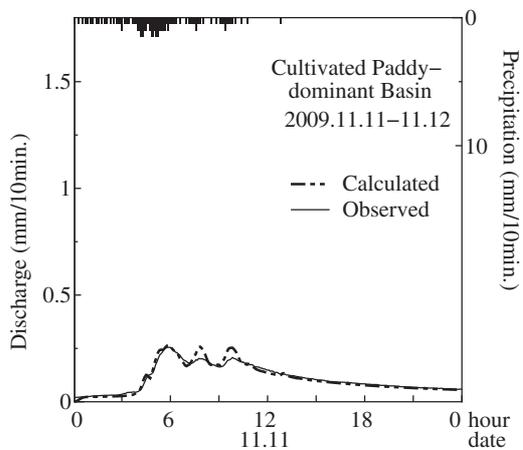


Fig. 191 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 26 (CPW).

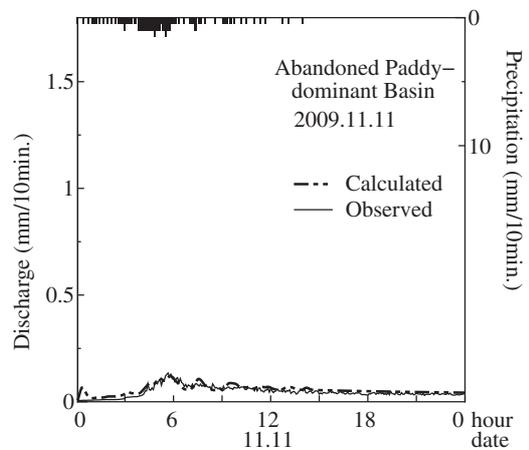


Fig. 192 Calculated discharge and observed precipitation in rainfall no. 26 (APW).

## 7. Conclusion

### 7.1 Main findings

In this thesis, the author presents an integrated model that couples catchment-scale natural hydrological cycles and human-related water cycles in irrigated paddy areas; hereafter the catchment-scale water circulation model. The main objective of model development is to assess the interaction between human-related and natural water cycles, especially in watersheds where densely irrigated paddies are dominant. In addition, to extend the applicability of the model to a broad range of hydrological conditions, several sub-models are developed for representing flood inundation and snow-melting processes. These sub-models are subsequently integrated into the catchment-scale water circulation model.

The new model consists of five modules: water allocation and management, planting pattern and area, paddy water use, actual evaporation, and runoff. The model simulates both natural and anthropogenic water flow on a grid-cell basis. In each grid cell there are three conceptual soil layers: root zone, unsaturated zone, and saturated zone storage. Each grid cell is associated with mixture of various land uses, and for each land use the model simulates the generation of surface runoff and actual evapotranspiration. The generated surface runoff is routed by using a one-dimensional kinematic wave for channel flow.

The model explicitly represents water cycles in paddy areas as well as representing natural hydrological cycles, thus enabling assessment of water management for irrigated paddies. To represent water management in paddy fields, two modules were employed from the base model, namely planting pattern and area, and paddy water use models. These sub-models simulate the spatial and temporal variation in planting areas and water use in watersheds dominated by rain-fed paddies. In contrast, a new part of the approach is the representation of water fluxes over multiple grid cells. Here, water fluxes include reservoir management for irrigation, allocation of diverted water to large irrigated paddies, and return flow from irrigated paddies to rivers. Representation of water flux over multiple grid cells is the core theme of this thesis.

The water allocation and management model is based on two major algorithms, namely, a reservoir operation scheme and a water allocation scheme. The reservoir operation scheme is used to estimate releases from the reservoir to irrigation weirs downstream. Typical water releases from a reservoir, such as releases for hydro-power generation or releases of excess water via a spillway, are calculated simply by evaluating the inflow and storage capacity of the reservoir. In contrast, irrigation releases need to consider the flow rates at diversion points downstream. In other words, the amount of water released should meet the water demand at the down-

stream diversion point.

The lack of precise data describing water-use facilities and channel networks inhibits the modeling of water flux over multiple grid-cells. Therefore, a recently configured GIS database of water-use facilities throughout Japan was used. The database contains specifications for each facility, as well as for irrigation channel networks and irrigation block polygons; these last two criteria have rarely been used for hydrological modeling. Instead of calculating detailed water flows with hydraulics, the model simulated water allocation according to priority orders of gridcells in each irrigated block. Thus, first the priority order were determined by assuming paddies in upper part in the irrigation block with channel have higher priority compared with those in lower part without channel. The priority order was determined by using the following attributes of each grid cell: 1) distance from weir, 2) distance from irrigation channels, and 3) elevation. Then, water was allocated on the basis of the water demand in each grid cell, following the priority order in each irrigation block. The modeled river networks were used to route the drainage from irrigated paddies.

As a case study, the catchment-scale water circulation model was applied to the Seki River Basin in Japan. The grid cell size was approximately 1km<sup>2</sup>, and the catchment area was 1140 km<sup>2</sup>. Three irrigated paddy areas extended along the sides of the main river; the total area of these paddies was 9200 ha. The model performance was first investigated by comparing the calculated discharges with those observed at two observation stations along the main river. One was located just downstream of the largest diversion weir, and the other was located at the outlet of the watershed. When the results from application of the water allocation schemes were incorporated, the calculated discharges during irrigation periods closely agreed with the observed data at both points. The results indicated that both of the observation points were strongly influenced by diversion and return flow processes, and that the water allocation and management model that we developed was highly capable of representing the interaction between water circulation in irrigated paddy areas and river flow systems. The results also suggested that a large portion of the diverted water was returned to the river and thus could contribute to stable flows for downstream water uses.

Two sub-models were developed and integrated into the main model to extend its applicability to a broad range of hydrological conditions. First, Section 4 presented a grid-cell-based snowfall/snowmelt model in which daily snow accumulation and snowmelt are calculated by using a simplified energy balance. Satellite images of snow-capped areas were used to estimate the spatial distribution of model parameters in regions where the observed meteorological data were sparse.

The model was applied to the Seki River Basin, a representative snowy basin in an area with a relatively warm winter climate in Japan. Comparison of the calculated and observed snow water equivalent (SWE) revealed that the model successfully represented the spatial distributions of SWE within a range of 200 mm, except in areas where locally intensive snowfalls occurred. In addition, the discharges during snow-melt periods, as calculated by using the catchment-scale water circulation model, represented flow peaks and flow regressions with high accuracy.

In Section 5, an inundation process model was also developed and integrated into the catchment-scale water circulation model. To assess flood hazard, a simple model that assumes that the inundated area is a reservoir was employed. In other words, no active water movement is assumed in the inundated area because the whole area is flat. In this model, the inundation volume is calculated by using a continuity equation with the relation between inundation depth and volume for the area: the excess rate of surface flow above the maximum conveyance capacity of the rivers is input by using a distributed water circulation model. To apply the inundation model, the high-resolution digital elevation model ASTER GDEM was used to extract detailed topographic features. High-resolution raster digital elevation models, which are becoming available at global scale, provide useful information on detailed topographical features within the grid cells of distributed hydrological models.

The model was applied to the Xebanfai River in the Laos PDR and performed daily calculations for 2004 through 2008. The Xebanfai River, a tributary of the Mekong River, drains an area of 10,330 km<sup>2</sup>. Paddy fields, which account for 23% of the total catchment area, are found predominantly in the lower part of the watershed. Thus, prolonged flooding causes damage to extensive paddy areas. Incorporation of the inundation process model, markedly improved the performance of the catchment-scale water circulation model in terms of calculated discharges, including the timing of peak discharges. In addition, the model was rigorously validated by using the maximum area inundated in 2008, as determined from ALOS/PALSAR images. The comparison confirmed that the large-scale inundation processes in the lower reaches of the watershed were precisely represented by the model; hence, the model enables the agricultural damage caused by flooding to be evaluated.

The integrated model's ability to reproduce differences in runoff characteristics among watersheds was investigated. To assess the interaction between hydrological characteristics and paddy conditions, three experimental watersheds were set, each of which is dominated by either cultivated paddies, or abandoned paddies, or forest: namely cultivated-paddy-dominant watershed (CPW), abandoned-paddy-dominant watershed (APW),

and forest watershed. Each of the watersheds was approximately 1 km<sup>2</sup> in area. Rainfall and discharge were observed at 10-min intervals in each watershed. The short-term rainfall-runoff characteristics were analyzed in the case of rainfall events exceeding a daily precipitation of 20 mm and a rainfall intensity of 5 mm/h. The analysis revealed that the runoff ratios of APW were significantly higher than those of CPW under wet conditions, whereas no significant difference between the watersheds was observed under dry conditions. These results indicate that abandonment of paddies leads to larger peak discharges, suggesting that the presence of abandoned paddies increase the flood risk in a watershed.

Next, a sub-model representing land-surface process in abandoned paddies was developed and incorporated into the catchment-scale water circulation model. The model was applied to the three experimental watersheds. Before the calculation of the short-term runoff events, long-term calculations at 1-day intervals were performed to estimate the initial conditions, or wetness, in each experimental watershed. Then short-term runoff calculations at 10-min intervals were performed using the extracted state variables for CPW and APW. The discharge calculations revealed higher flow peaks for APW than for CPW in wet conditions, whereas the flow peaks were equivalent in dry conditions. These results were in accordance with the observed runoff characteristics. Comparison of the initial conditions between the watersheds revealed that the storage Volumes of the saturated zones were higher in the abandoned paddies than in the cultivated paddies, suggesting that the water table was higher under the abandoned paddies. The model experiments showed that differences in groundwater storage may affect the short-term runoff characteristics of small watersheds.

## 7.2 Outlook

In this thesis, the author presents a novel approach for assessing the interaction between natural and anthropogenic water cycles in irrigated-paddy-dominant watersheds. In addition to assessing this interaction, the proposed model is able to reproduce the changes in water circulation in watersheds by accounting for differences in paddy field management schemes. The concepts in the model should contribute to ongoing discussions on how to incorporate anthropogenic impacts into distributed hydrological models.

There are two potential beneficiaries of this model: the climate change impact-assessment community and managers of water resources in paddy-dominant watersheds. A number of studies have examined the impacts of climate change on water resources. However, the effects of anthropogenic water cycles in paddy-dominant watersheds have not yet been examined explicitly, and

thus the impact of climate change on paddy water-use systems is not fully understood. The proposed model calculates both natural and anthropogenic water cycles in watersheds. It thus provides not only stream flow changes, but also the potential effects of climate change on reservoir storages and the amounts of water diverted for paddy irrigation.

Although this model explicitly accounts for the water management associated with irrigation for rice paddies, the model simulates 'business as usual' water management. In other words, the model has limited abilities to predict the response of irrigation systems to extreme flood or drought, or to estimate threshold level to which watershed systems can withstand. Since the levels differ according to the natural hydrological characteristics and system properties, empirical studies to investigate (clarify) the threshold behaviors of the system are important for the model improvement.

Also, the model has the potential to contribute to water resources management, especially in watersheds undergoing rapid societal change. The expected societal changes in paddydominant watersheds in Japan will lead not only to an increase in the number of abandoned paddies, but also to increases in the number of crop varieties used and the length of irrigation periods, or increases in water demand due to changes in field water management. Moreover, in developing countries in the Asian Monsoon region, the area under irrigation and the number of reservoirs being developed are increasing at a tremendous rate. This model should be highly useful in the planning for optimum management of such watersheds.

Assessing the potential impacts of changes in the natural and social environments of watersheds on water resources is one of the main areas of study to which hydrological models can contribute. If such impacts on water resources are found to be negative, then it will be important to propose effective countermeasures. The model presented here, which accounts for multiple water uses in an integrated manner, is suitable for addressing these issues and for optimizing water-use regulations for whole watersheds and water sharing among water-use sectors.

#### Acknowledgement

The work presented in this manuscript is based on the author's Ph.D. thesis. The Ph.D. thesis was not possible without the help of a great number of people. I would therefore like to appreciate important people during this project.

First, I would like to thank to my Ph.D. advisor, Naritaka Kubo, a professor at the University of Tokyo, for supporting and encouraging me through the project. I still think fondly of my time as an undergraduate student in his lab, and he was the reason why I decided to go to pursue a career in research.

All of the work presented in my Ph.D. thesis have con-

ducted under the Institute for Rural Engineering/National Agricultural Research Organization (IRE/NARO). I thank all the members of the Laboratory of Hydrology and Water Resources at IRE: Takao Masumoto, Naoki Horikawa, Ryoji Kudo, Tomoyuki Taniguchi, Hiroki Minakawa, Norio Nawa and Haruko Tomisawa for supporting me during these years.

In the field work, I thank the following people for helpful discussions with me: Kazuhide Adachi and Kotaro Yokoyama (both at the Hokuriku Research Center/National Agricultural Research Organization) and Hiroshi Akutsu (Japan International Cooperation Agency).

For this Ph.D. project, I would like to thank the members of the Laboratory of Water Environment Engineering at the University of Tokyo: especially for Toshiaki Iida and Masaomi Kimura, for their time and helpful comments. I would also like to thank the other three members of my oral defense committee, Sho Shiozawa, Taku Nishimura and Shuichiro Yoshida, for their time and insightful questions.

Lastly, I would like to thank my family for all their love and encouragement. For my parents who raised me with a love of science and supported me in all my pursuits.

#### Reference

- Abbott M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., O'Connell P.E. and Rasmussen J. (1986): An introduction to the european hydrological system-Systeme Hydrologique Europeen,"SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, **87** (1), 45-59.
- Adachi K., Tsuda Y., Bizen N. and Tamura H. (1994): Agriculture and rural environments in heavy snow and land slide are in Hokuriku region. *Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan*, **62** (6), 515-520 (in Japanese).
- Adachi K., Yoshida S., Masumoto T. and Itoh K. (1997): Method of measuring macropore volume contributed to underdrain discharge in clayey multi-purpose paddy field. *Trans. of JSIDRE*, **65** (6), 847-855 (in Japanese with English abstract).
- Alcántara-Ayala, I. (2002) : Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries, *Geomorphology*, **47** (2), 107-124.
- Allen, G.R., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998) : Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements-, *FAO Irrigation and drainage paper*, **56**, p.15.
- Bell V. A. and Moore R. J. (1998): A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: Part 1. formulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, **2**, 265-281.
- Bell V. A., Kay A. L., Jones R. G., Moore R. J. and Reynard N. S. (2009): Use of soil data in a grid-based hydrological model to estimate spatial variation in changing flood risk across the UK. *Journal of Hydrology*, **377**, (3), 335-350.
- Beven K. J. and Kirkby M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Journal Bulletin*, **24** (1), 43-69.

- Beven, K. and Wood, E.F. (1983) : Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing area, *Journal of Hydrology*, **65**, 139-158.
- Beven K. J. (2011): Rainfall-runoff modelling: the primer, John Wiley & Sons, Ltd.
- Boorman D. B., Hollis J. M. and Lilly A. (1995): Hydrology of soil types: a hydrologically-based classification of the soils of United Kingdom. *Institute of Hydrology*.
- Calver A. and Wood W. L. (1995): The institute of hydrology distributed model. In: Singh V. P. (Eds.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, chapter 17. 596-626. Water Resources Publications.
- Chiba K., Koga K. and Baba H. (1997): Soil physical properties of uncultivated paddy fields located in semi-wet sloping land and the simulation of their response to heavy rain. *Trans. of JSIDRE*, **65** (4), 507-516 (in Japanese with English abstract).
- Chow V. T., Maidment D. R. and Mays L.W. (1988): Applied hydrology, 572 pp. Editions McGraw-Hill, New York, 1988.
- Duan, Q.Y., Sorooshian, S. and Gupta, H.V. (1992) : Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resou. Res.*, **28** (4), 1015-1031.
- Freeze R. A. and Harlan R. L. (1969): Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, **9** (3), 237-258.
- Fujihara, Y., Tanaka, K., Watanabe, T., Nagano, T. and Kojiri, T. (2008) : Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations, *Journal of Hydrology*, **353**, 33-48.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911) : Studies on Soil Physics -Part 1. The flow of air and water through soils, *Journal of Agric. Sci.*, **4**, 1-24.
- Goto A. (1983): Long-term runoff analysis by a mesh-type simulation model. PhD thesis, The University of Tokyo (in Japanese with English abstract).
- Hai, P.T., Masumoto, T. and Shimizu, K. (2008) : Development of a twodimensional finite element model for inundation processes in the Tonle Sap and its environs, *Hydrological Processes*, **22** (9), 1329-1336.
- Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y. and Tanaka, K. (2008a) : An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **12**, 1007-1025.
- Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y. and Tanaka, K. (2008b) : An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Application and assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **12**, 1027-1037.
- Hayase Y. and Kadoya M. (1977): Numerical method for flood routing contained with junctions-Runoff analysis in low-lying drainage basin composed mainly of paddy field (II). *Trans. of JSIDRE*, 37-44 (in Japanese with English abstract).
- Hayase Y. (1994): Evaluation of paddy field's function for flood control and a proposal of their enhancing project. *Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan*, **62** (10), 1-6 (in Japanese with English abstract).
- Horikawa N., Kudo R., Yoshida T. and Masumoto T. (2011): Development of a reservoir simulation model for evaluation of water resources management. *Applied Hydrology*, **23**, 58-66 (in Japanese with English abstract).
- Inoue S. and Yokoyama K. (1998): Estimation of snow fall, maximum snow depth and snow cover condition in Japan under global climate change. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **60** (5), 367-378. (in Japanese with English abstract)
- Inoue S., Yokoyama K., Ohno H. and Kawashima S. (2001): Estimation of snowfall, maximum snow depth and snow-cover condition in Japan under the global climate change (Follow-up) - Estimating water equivalents of snowfall in major Japanese catchments. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **63** (6), 367-378. (in Japanese with English abstract)
- Ishizuka M. and Egusa N. (2008): Runoff analysis using distributed hydrological model with irrigation water use model in the Kinokawa river. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, **52**, 391-396 (in Japanese with English abstract).
- Kato K. and Yamazaki F. (2010): Detection of flooded areas using ALOS/PALSAR images for the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, **10** (3), 1-11 (in Japanese with English abstract).
- Kadoya M. and Fukushima A. (1976): Concentration time of flood in small or medium river basin. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, **19**, 143-152.
- Kazama S. and Sawamoto M. (1994): Estimation of snow volume in Tohoku district by using satellite data. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, **38**, 102-112 (in Japanese with English abstract).
- Koga K., Chiba K. and Baba H. (1997): Evaluation of one-plot intake rate of uncultivated paddy field by the observation of ponding process. *Trans. of JSIDRE*, **65** (1), 103-109 (in Japanese with English abstract).
- Koike T., Takahashi Y. and Yosino S. (1985): Estimation of basin-wide snow water equivalent using snow covered area. *Proceedings of JSCE*, 159-165 (in Japanese with English abstract).
- Koike T., Takahashi Y. and Yosino S. (1985): A study on modeling of snowmelt distribution. *Proceedings of JSCE*, 165-174 (in Japanese with English abstract).
- Kondo, J. and Yamazaki, T. (1990) : A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method, *J. Appl. Meteor.*, **29**, 1104-1110.
- Kondo J., Nakamura T. and Yamazaki T. (1991): Estimation of the solar and downward atmospheric radiation. *TENKI*, **38** (1), 41-48.
- Kudo R., Masumoto T., Yoshida T. and Horikawa N. (2012): Development of quantitative impact assessment method of

- climate change on agricultural water use in irrigation-dominant basins. *Journal of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, **80** (1), 31-42 (in Japanese with English abstract).
- Lee, J.S. (1980) : Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-2**, 165-168.
- Li, R-M., Simons, D.B. and Stevens, M.A. (1975) : Nonlinear kinematic wave approximation for water routing, *Water Resour. Res.*, **11**(2), 245-252.
- Lowry, J., Hess, L. and Rosenqvist, A. (2009) : Mapping and Monitoring Wetlands Around the World Using ALOS PALSAR: The ALOS Kyoto and Carbon Initiative Wetlands Products, In: Jones, S. and Reinke, K. (Eds.), *Innovations in Remote Sensing and Photogrammetry, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 105-120, doi:10.1007/978-3-540-93962-7\_9.
- Lu M., Koike T. and Hayakawa N. (1998): Development of a distributed snowmelt analysis system using AMeDAS data and Digital geographic information. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, **42**, 121-126 (in Japanese with English abstract).
- Lu M., Koike T. and Ishidaira H. (2002): Development of a simulation model of water utilization based on a distributed hydrological model. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, **46**, 277-282 (in Japanese with English abstract).
- Masumoto T. and Kadoya M. (1995): Function fitting to flood runoff hydrographs and its application to the design of a retarding basin. *Trans. of JSIDRE*, **63** (2), 241-251 (in Japanese with English abstract).
- Masumoto T., Takaki K., Yoshida S. and Adachi K. (1997): Effects of abandoned paddies in hilly rural areas on runoff *Trans. of JSIDRE*, **65** (3), 389-398 (in Japanese with English abstract).
- Masumoto T., Nozoe M., Yoshimura A. and Matsuda S. (2003): A paddy runoff model in hilly rural areas for evaluating runoff change due to abandoned rice cultivation. *Trans. of JSIDRE*, **71** (2), 175-184 (in Japanese with English abstract).
- Masumoto, T., Taniguchi, T., Horikawa, N., Yoshida, T. and Shimizu, K. (2009) : Development of a distributed water circulation model for assessing human interaction in agricultural water use, In: Taniguchi, M., Burnett, W.C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, Y. (Eds.), *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*, Taylor and Francis, 195-201.
- Mekong River Commission (2006) : *MRC Annual Flood Report 2005*, Vientiane, Lao **PDR**, p.82.
- Mekong River Commission (2009) : *MRC Annual Flood Report 2008*, Vientiane, Lao **PDR**, p.84.
- Milly P. C. D., Julio B., Malin F., Robert M. H., Zbigniew W. K., Dennis P. L. and Ronald J. S. (1997): Stationarity is dead. *Ground Water News & Views*, **4** (1). 6-8.
- Motoya K., Yamazaki T. and Yasuda N. (2001): Evaluating the spatial and temporal distribution of snow accumulation, snowmelts and discharge in a multi basin scale: an application to the Tohoku region, Japan., *Hydrological Processes*, **15** (11), 2101-2129.
- Nakagiri T., Watanabe T., Horino H. and Maruyama T. (1998): Development of a hydrological system model in the Kino river basin - Analysis of irrigation water use by a hydrological system model (I) -. *Trans. of JSIDRE*, **66** (6), 899-909 (in Japanese with English abstract).
- Nakagiri T., Watanabe T., Horino H. and Maruyama T. (2000): Analysis of sufficiency and reuse of irrigation water in the Kino river basin - Analysis of irrigation water use by a basin hydrological model (II) -. *Trans. of JSIDRE*, **68** (1), 35-42 (in Japanese with English abstract).
- Otsuki K., Mitsuno T. and Maruyama T. (1984): Comparison between water budget and complementary relationship estimates of catchment evapotranspiration. - Studies on the estimation of actual evapotranspiration (II). *Trans. of JSIDRE*, **112**, 17-23 (in Japanese with English abstract).
- Onishi T., Horino H., Nakamura K. and Mitsuno T. (2003): Evaluation of groundwater properties in terraced paddy fields using transient unsaturated-saturated water flow analysis. *Trans. of JSIDRE*, **71** (5), 657-664 (in Japanese with English abstract).
- Quinn P. F., Beven K. J., Chevallier P., and Planchon O. (1991): The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, **5** (1), 59-79.
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J. and Schaphoff, S. (2008) : Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resour. Res.*, **44**, W09405, doi:10.1029/2007WR006331.
- Sanders, B.F. (2007) : Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling, *Advances in Water Resources*, **30** (8), 1831-1843.
- Satoh M., Sakata H., Tuan D. D. and Fujiki T. (1998): Runoff characteristics of return flow from a paddy field area. *Trans. of JSIDRE*, **66** (6), 985-991 (in Japanese with English abstract).
- Shiraishi H., Oonish R. and Ito Y. (1976): Analysis of water balance in the Iwaki basin - Control of water resources and estimation of water balance-. *Bull. Nat. Res. Inst. Agric. Eng. Japan*, 49-116 (in Japanese with English abstract).
- Sugaya H. (1990): Micrometeorological studies on the snowpack evolution in the Hokuriku region: Measurements and modeling. *Bull. Hokuriku Natl. Agric. Exp. Stn*, **32**, 43-64 (in Japanese with English abstract).
- Suizu S. (2001): A snowmelt and water equivalent of snow model based on a simplified heat balance method. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **63** (3), 307-318 (in Japanese with English abstract).
- Suizu S. (2002): A snowmelt and water equivalent snow model applicable to an extensive area. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **64** (6), 617-630 (in Japanese with English abstract).

- Takahashi Y., Koike T. and Tahara I. (1987): Synthesizing the model for estimation of basin-wide snow water equivalent using LANDSAT data. *Proceedings of the Japanese Conference on Hydraulics*, **31**, 227-232. (in Japanese with English abstract)
- Tanakamaru H and Kadoya M. (1994): Runoff and water budget characteristics of reclaimed farm land - Effects of land reclamation on hydrological cycle (I) -. *Trans. of JSIDRE*, 91-97 (in Japanese with English abstract).
- Tanakamaru H and Kadoya M. (1994): Examination of runoff characteristics of reclaimed farm land by long and short terms runoff model - Effects of land reclamation on hydrological cycle (II) -. *Trans. of JSIDRE*, 99-105 (in Japanese with English abstract).
- Taniguchi T., Masumoto T., Shimizu K., Horikawa N. and Yoshida T. (2009): Development of a distributed water circulation model incorporating various paddy water uses, Part 1: A model for estimating cropping pattern and area. *J. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.*, **22** (2), 101-113 (in Japanese with English abstract).
- Taniguchi T., Masumoto T., Horikawa N., Shimizu K. and Yoshida T. (2009): Development of a distributed water circulation model incorporating various paddy water uses, Part 2: Estimation of water requirements on the basis of classification of paddy water use and water management. *J. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.*, **22** (2), 114-125 (in Japanese with English abstract).
- Taniguchi T., Masumoto T., Yoshida T., Horikawa N. and Shimizu K. (2009): Development of a distributed water circulation model incorporating various paddy water uses, Part 3: Structure of the total model and estimation of agricultural water circulation. *J. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.*, **22** (2), 126-140 (in Japanese with English abstract).
- Tanji H. and Oonishi R. (1986): Improved water management of agricultural facilities in Iwaki river basin - Water balance analysis aimed at improved water management. *Bull. Nat. Res. Inst. Agric. Eng. Japan*, 93-151 (in Japanese with English abstract).
- Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. and Oki, T. (2011) : A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, **47**, W04501, doi:10.1029/2010WR009726.
- Yamazaki T., Taguchi B. and Kondo J. (1994): Estimation of the heat balance in a small snow-covered forested catchment basin. *TENKI*, **41** (2), 71-77.
- Yokoyama K. (2000): Snow in the Hokuriku region under global climate change. *Hokuriku Crop Science*, **35**, 73-74 (in Japanese with English abstract).
- Yokoyama K., Ohno H., Kominami Y., Inoue S. and Kawakata T. (2003): Performance of Japanese precipitation gauges in winter. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **65** (3), 303-316 (in Japanese with English abstract).
- Yoshida S., Takaki K., Adachi K. and Masumoto T. (1997): Change of soil physical properties in abandoned paddies under the alternating meteorological condition. *Trans. of JSIDRE*, **65** (5), 655-663 (in Japanese with English abstract).
- (Following references are available only in Japanese)**
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (2008): 資源・環境観測解析センター, Aster 全球3次元地形データ, オンライン, 入手先<<http://gds.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/gds/www2002/indexj.html>>.
- Hayase (1992): 早瀬吉雄, 中山間水田域の洪水防止評価, 応用水文, **4**, 81-99.
- Hokuriku Regional Agricultural Administration (1984): 北陸農政局関川農業水利事業所, 事業誌関川, 渡辺印刷所.
- Hokuriku Regional Agricultural Administration Office (2006): 北陸農政局農村計画部資源課, 多面的機能維持増進調査報告書東頸城地区.
- Japanese Agricultural System Society (2007): システム農学会, 農業リモートセンシング・ハンドブック, 佐藤印刷.
- Japan Institute for Irrigation and Drainage (2010): 日本水土総合研究所 (参照2010.5.13): 日本水土図鑑 (オンライン), 入手先<<http://www.nngis.jp/>>.
- Japan Meteorological Agency (2003): 気象庁観測部, メッシュ気候値2000, 測候時報, 2003.
- Japanese Society of Snow and Ice (1990): 日本雪氷学会 (1990): 雪氷辞典, 古今書院, p.71.
- Kadoya (1980): 角屋睦(1980): 流出解析法 (その6) - 雨水流法-表面流出モデルによる洪水流出解析-, 農業土木学会誌, **48**(6), 419-425.
- Koide (1973): 小出博, 日本の国土: 自然と開発 (下), 東京大学出版会.
- Kondo (1994): 近藤純正, 水環境の気象学: 地表面の水収支・熱収支, 朝倉書店, 1994.
- Maruyama et al.(1979): 丸山利輔, 富田正彦, 小林慎太郎, 複合タンクモデルによる広域水収支解析-1-複合タンクモデルの特徴とその構成, 農業土木学会誌, **47**(2), 97-102.
- Motoya (2008): 本谷研, 東北地方における積雪水量の27年平均値と豪雪・寡雪, 日本雪氷協会雑誌, **70**(6), 561-570.
- Niigata Prefecture (1985): 新潟県, 笹ヶ峰ダム管理規程新潟県訓令第1号, オンライン, 1985, 入手先 <[http://www1.greiki.net/niigataken/reiki\\_honbun/ae40107311.html](http://www1.greiki.net/niigataken/reiki_honbun/ae40107311.html)>.
- Niigata University (1987): 新潟大学東頸城地域地質調査グループ, 新潟県東頸城地域の中新-鮮新統の層序, 地球科学, **41** (3), 165-181.
- Okamoto (1973): 岡本雅美, 水田農業用水の計画需要量の推定法, 水利科学, **17** (2), 54-65.
- Ono et al. (1994): 小野延雄, 石川信敬, 新井正, 若土正暁, 青田昌秋, 雪氷水文現象, 基礎雪氷学講座 VI, 古今書院.
- Shinzawa (1962): 新沢嘉芽統, 河川水利調整論, 岩波書店.
- Takahashi (2007): 高橋俊二 (2007) : 日本の天候の特徴, “本田明治, 楠昌司編著, 2005/06 日本の寒冬・豪雪”, 日本気象学会, p.3.
- Takeuchi (1974): 竹内常行, 棚田の水利-頸城丘陵と猿ヶ石川下流部丘陵地の棚田を例として, 早稲田大学教育学部学術研究 地理学・歴史学・社会科学編, **23**, 1-24.

- Tomita et al. (1979): 富田正彦, 小林慎太郎, 丸山利輔, 複合タンクモデルによる広域水収支解析-2-複合タンクモデルの運用, 農業土木学会誌, 47, No. 3, 189-194, 1979.
- Yokoyama (2006): 横山宏太郎 (2006) : 平成18年豪雪:上越地方の雪と農業への影響, 雪氷, **68**, 323-325.
- Yokoyama (2007): 横山宏太郎, 小南靖弘, 中野聡史, 宮崎伸夫, 水津重雄. 上越地方の山地積雪2006 冬と2007冬, 雪氷北信越, **27**, 69.

# 水田灌漑卓越流域の水循環モデル開発に関する研究

吉田武郎

日本における農業用取水量は河川からの全取水量の約7割に相当し、河川の流況を決定づける要因の一つに挙げられる。本研究では、灌漑水田における人為的な水循環系を表現し、流域の自然的水循環と一体的に解析する流域スケールの分布型水循環モデルを開発した。開発したモデルにより、ダムの貯水量、各施設の取水量の推定や、水田灌漑の人為的な取水・還元起因する河川流量の変化を定量的な評価ができることを示した。また、耕作放棄に伴って湿潤時にピーク流出量が増大することを観測から明らかにするとともに、耕作放棄水田の物理特性をモデルに反映させることで、観測された流出の変化をモデルで再現できることを示した。さらに、積雪・融雪、氾濫・湛水過程をモデルで同時に計算する手法を構築し、開発したモデルを水田が広く分布するアジアモンスーン地帯の多様な水文特性の流域へ適用可能にした。構築した一連のモデルにより、水田地帯の人為的な水循環が流域スケールの水循環に及ぼす影響を定量的に評価することができ、流域を取り巻く自然的・社会的条件の変化が水資源の脆弱性や洪水危険度に及ぼす影響評価に有用である。

キーワード：流域水循環，分布型水文モデル，水田灌漑，水資源，土地利用

# 農業用ため池の地震動による被災要因に関する研究

— 2011年東北地方太平洋沖地震を例として —

鈴木尚登\*

\*企画管理部 防災研究調整役

## 要 旨

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、多数のため池が被災し、藤沼湖では決壊・氾濫で死者・行方不明者を出す惨事となる等、頻発する大地震に対して甚大な被害をもたらすため池の被災危険度評価は必要不可欠である。本研究では、ため池の地震動による被災要因を多角的・客観的に評価するため、甚大な被害が生じた東北地震を事例に、気象庁の推計震度、ため池データベース及び国・県の被災情報を用いて、被災率 ( $R_d$ ) を定義することによって地形・地質、堤軸方向や堤体形状について被災検証を行った。その結果、 $R_d$ は推計震度によって増加し、特定の地形、堤軸方向や堤頂の長さ、高い堤高で天頂幅が広く・上流法勾配が緩い横断面形状が高い被災リスクとなる等、地震動による階層的な被災リスク構造を被災要因概念図として提案した。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、ため池、地震被害、推計震度、被災率、被災要因、被災リスク

## I 緒 言

### 1.1 研究の背景と目的

わが国のため池は、古墳時代から造営され、日本の水田農業を支える重要な生産資源である。少し大袈裟にいうならば、日本民族はため池によって扶持されてきた。ため池に頼らざるを得なかった理由は、日本の地形と気候に大いに関係がある。先ず、日本列島は四つのプレートが重なり合う地殻構造で、プレート活動に伴う褶曲と隆起によって山谷や無数の断層が形成され、その国土は複雑で急峻な地形を成している。一方、気候はアジアモンスーン型で年間降雨量は比較的多い割に、台風常襲など時季的に不安定なため、適期に、多量な用水を必要とする稲作農業にとっては、水を溜めおくポケット (=溜池) が不可欠となる。そのため、全国各地の起伏に富む国土で、時代毎・地域毎の農業土木技術を結集した土堰堤 (=ため池) 造営は、日本農業の歴史的必然であった。同じ灌漑でも、世界最長の大河・ナイル川ではエジプト古代文明繁栄の礎となり、今日も緩やかな地形勾配とエチオピア等の上流域国側の安定した雨季と乾季によって国家の基盤を成している。

本研究は、国内観測史上最大となった2011年東北地方太平洋沖地震 (以下、「東北地震」という) に伴い東日本に多数のため池被害が発生し、福島県内では藤沼湖の決壊・氾濫により8名の人命災害が起こったことを契機としている。即ち、農業土木関係者は、ため池も大きな地震動で決壊し、人命に危害を及ぼす人工構造物であり、「工学的な安全性評価が社会通念上、最高レベルで要請されている」(高瀬, 1967) ことを再認識した。特に今

回の震災を契機に、大規模地震に対する安全性評価については、世論の関心が急激に高まっている。

現在、農水省の通達により全国的に「ため池一斉点検」が実施され、一部で堤体材料をサンプルリングし、耐震性診断まで試みられている。明治以降、欧米由来の造るための土木工学的手法で、多様なサイト地形に古い時代から築造されているため池の安全性評価が本当に可能なのか、著者には疑問符が消えることはない。その最大の理由は、ため池の歴史性に起因する三つの命題に集約できる。一つ目は、全国のため池個数は約21万個で、千数百年の歴史的遺産としては今も膨大な数が現存している。二つ目は、その90%以上が昭和期以前 (年代不明を含む) の築造で、堤体の内部構造、築堤材料、施工方法等、土木工学的要素が殆ど不明である。三つ目は、ため池が時代 (=人口増加) と共に開田可能な全国津々浦々に造られ、今日も複雑・急峻な地形上に点在していることである。これが戦後施工の国営農業用ダムの200個程度であれば、規模は大きい数量も限定され、記録も残り、工学的知見からサイト選定がされている。一方、ため池は数の問題もあり、堤体毎にサンプルリング数点だけでは、信頼面で雲泥の開きがある。さらに、農村地域の人口減少・高齢化等の今日的な社会経済情勢下で、対象数万カ所のため池に対して、数千億円から数兆円の費用捻出が国家財政的に可能になるとは考えにくい。

日本の建築分野では、大規模地震毎に建物被災データの収集・分析を行い、関連耐震技術の進歩に役立てている。都市部は狭い範囲に多数の建物が密集し、地震計設置間隔が狭く、全壊時の罹災証明申請等を集約することで、建物到壊率が統計的に算定できる。その結果は、耐

震設計に係わる技術全般の向上にも役立てられ、地震災害対応上不可欠な被害想定基礎資料となっている。建物の倒壊率は、建築年代(建築基準の改正年等)、地盤、構造等の分類毎に統計的な確率として求めることができる。但し、データ量が過少では精度が低く、また無被災データがなくては、被災確率は求められない。

リスク評価・診断は医療の基本テーマである。漢方医や老内科医が行う診断方法は、患者の外見(身長、体重、年齢、表情、風貌等)と併せて、最近の日常生活や仕事環境等の問診によって病状が判断される。つまり、聴診器、脈拍及び血圧測定は診察第二段階で、血液検査等は過剰な診察行為とされる。医者は昔から人間を造らない代わりに健康面のリスクを患者個人の外見と環境要因で判断している。但し、この診断方式は、しっかりとした統計的裏付けがなければ、占いと同じであり、医療行為にはならない。特に伝染病に係る疫学は、基礎的データを収集し、統計的分析を駆使して病因究明が最大の目的と考えられている(重松, 1977)。因みに、この医療方式は、リスクを患者の個体要因と発症に至らしめた環境要因とに分けて病因究明がなされるもので、病因を地面の揺れ(地震動)に置き換えれば、本研究にも応用可能となる。

では何故、建築や医療の方式が、過去のため池地震動被災研究に応用可能されなかったのであろうか。まず、被災の誘因(村井, 2011)となる地震規模は、ため池が一般に小規模で地震計は設置されず、各サイトが地震計の設置される中心市街地から離れて点在するため、ため池毎の震度捕捉が難しかった。次に地震災害時の人命救助最優先の緊急事態下で、壊滅的被害ため池は注目されるが、無傷のものは注目されず、無被災分を含めた被災全体の情報収集や蓄積がされてなかった。加えてため池が多様な地形・地質上の立地や堤体形状を有するにも関わらず、災害報告が調査・研究者個々の主観的判断に委ねられ、その被災要因が多角的、包括的な統計的手法によって解明されてこなかった。

気象庁は、2004年から全国約4,300ヶ所観測点の計測震度網を活用して、1 kmメッシュ推計震度分布の公表を開始した。また、農研機構農村工学研究所では長年の地震災害に係る調査研究成果を踏まえ、1995年から農水省等と共同で全国的なため池データベース(DB)化を行い、2010年度に農村地域の防災情報システムとして「ため池DBハザードマップ」を完成させた。これにより実際に地震被災情報が入手できれば、最大震度5弱以上地震時のため池毎の推定震度と堤体諸元で包括的な危険度評価が可能な条件を備えていた。

本研究では、ため池の地震時危険度評価に向けて、被災要因を多角的、客観的に評価することを目的とした。そのために、甚大なため池被害が生じた東北地震について、気象庁が発表した推計震度、ため池データベース(DB)及び国と被災県から入手した被災情報を基礎デー

タとして用いた。これらのデータを用いて、ため池毎に推計震度を求め、地形・地質、堤軸方向や堤体形状の個体要因と組み合わせて、多角的に被災の検証を行った。そのため、被災の指標として、被害額と面積による被災密度とため池の被災数によって被災率  $R_d$  を定義した。

## 1.2 研究の構成

本研究は、7章より構成される。第I章は序論であり、本研究の位置付けと目的について記述する。第II章では既往研究のレビューを行う。すなわち、これまでの農業用ため池を含めた農地・農業用施設の地震動被災に関する研究経過と課題を概観した後、震度、震央距離、地形・地質及び堤軸方向を環境要因に、堤体形状を個体要因として各被災要因別にレビューする。

第III章では、震度と震央距離について被災分析を行った。そのため、ため池を含む農地・農業用施設等の市町村単位の被害額に対して被災密度( $D_i$ )を定義し、気象庁の1 kmメッシュ推計震度を用いた平均推計震度( $\bar{i}$ )によって、震度と被害の関係を明らかにする。また、ため池毎に推計震度を同定し、震度上昇と  $R_d$  の関係並びに震央距離と震度及びため池被災の関連について検証している。

第IV章では、震度とため池被災の関係が明確になったことを踏まえ、堤軸震央方向角度( $\omega_i$ )を定義し、広域的な地形・地質と推計震度及び  $\omega_i$  と  $R_d$  の関係を検証する。その結果、地震動被災は堤軸方向によって  $R_d$  に差があり、山地と平地の境で震度が大きく変動することを述べる。

第V章では、ため池被災が集中したエリアに注目し、無被災から決壊レベルに至る要因を検討する。そのため、福島県内で最も被災が集中したエリアを抽出し、集中域を内と外にエリア分けした被災要因分析と共に、ため池サイトの地形タイプを5つに分類し、集中域内でさらに詳細な被災分析を行った。その結果、集中域内では震度6弱以上がスポット的に生じる中で、ため池個々が立地する傾斜・地形(谷地や山丘等)条件によって  $R_d$  に大きな差があることを述べる。

第VI章では、福島県中・南域内のため池の堤体形状について、過去の研究と比較検証するため、統計的区分方法を用い、震度による  $R_d$  と併せて検証した。具体的には、ため池DBから堤高、堤頂長、堤頂幅、上下流法勾配等と  $R_d$  の関係を求める。この結果、ため池  $R_d$  は、堤頂長には明確な関係性が見られ、堤高・堤頂幅・法勾配の組み合わせによって、高被災リスクの横断面形状があることを述べる。

VII結言では、「環境要因と個体要因」、「誘因としての震度」、「被災要因相互間の関係」が明確になったことを踏まえ、「ため池地震動被災要因の概念図」を提案し、ため池被災要因について総括する。

## II 既往研究のレビュー

### 2.1 概説

既往研究については、次の三点から包括的なレビューを行う。一つ目は、これまで農業土木分野の自然災害及び防災・減災に関する研究経過と課題に関することである。ここでは地震災害に限らず、台風・豪雨等の自然災害全般に関する研究の流れを俯瞰した。この場合、農業用ため池が農業土木分野でどのように位置付けられてきたか、時代背景等も含めて時系列的にレビューすることで、何故、被災情報を集積するシステムが今日まで出来なかったか、その背景を考える。二つ目はため池の歴史性について、ため池 DB 等から地震被害研究の特性や技術的課題の抽出を行った。三つ目がため池地震動被災に直接関係する研究レビューである。ここでは被災に関わる要因を環境要因（外的要因・誘因）と個体要因（内的要因・素因）に大別した。環境要因は震度、震央距離、地形・地質、堤軸方向等地震の揺れに関連するものである。個体要因は堤高、堤頂長、堤頂幅、上下流法勾配等堤体形状に関連するもので、過去の研究成果から被災要因因子毎にレビューを行った。

### 2.2 農地・農業用施設等の災害被害研究

#### 2.2.1 農業土木学会と自然災害

農業土木分野の自然災害に関わる研究経過を見るために、農業農村工学会（旧・農業土木学会）発行の論文集と農村工学研究所（旧・農業土木試験場、以下、「農工研」という）発行の所報告及び所技報から、災害研究に関連性を有するものを Appendix 1~2 に時系列で整理した。因みに、農業土木学会（以下、「農土学会」という）は明治41年発足の耕地整理研究会を引き継ぎ、1929年（昭和4年）に改組、新たに学会として発足し、同年に「農業土木研究」を発刊している。農工研は1961年に農業土木分野の国の試験研究機関として発足し、1963年に場報告（後の所報告）、1965年に場技報（後の所技報）を各々発刊している。なお、農業土木の学祖とされる上野英三郎博士は、1929年学会発足の四年前に逝去しており、上野博士が「農業土木学と耕地整理と明確に区別され・・・、更に深く研究する必要がある」との考えは、（片岡、1929）が「農業土木研究の発刊」時に明らかにしている。この学会発足を機に、1900年に開始された耕地整理事業で土木学に属する研究がさらに深まることになった。Table 1 に主な自然災害との関連した歴史的経過（森瀧ら、2007）を整理したが、明治期末にはため池工事等が耕地整理事業に追加され、大規模な土地改良工事が急務化し、土木学に属する研究進展が喫緊事となっていた。

自然災害に関する最初の研究は、（雨森、1939）による耕地水害の全国規模分析である。同氏は農林省耕地課職員で、現在なら農村振興局防災課が担当する事項であ

る。この研究目的を、「災害を未然に防止するため、全国各地方のため池余水吐の設計排水量の資料を集め、統計的に検討し将来の設計に反映させる」とし、翌年も淡路島の降雨によるため池決壊災害を報告している。

地震災害については、（秋葉ら、1941）が秋田県男鹿地震で行った溜池被害調査研究を始まりとし、その後のため池地震被害研究のガイドラインになっている。ここで注目すべきは、東京大学農学部の学者である秋葉が、共著者で秋田県耕地課の役人である仙波と一緒に現地調査を行ったことにある。当時、上野博士の長年の尽力で全国の県庁耕地課内に農業土木学会員が相当数確保され、災害時被害調査は在京大学研究者と地方県庁行政官が一体で行う体制が既に形成されていたと考えることができる。

Table 1 農業土木と主な自然災害に係る歴史的経過  
Historical procedure on agricultural engineering and main natural disasters

1872年(M4)	: 上野英三郎(以下「上野又は上野博士」という)が三重県生誕
1894年(M27)	: 日清戦争開戦
1895年(M28)	: 上野が東京帝国大学農科大学農学科卒業
1899年(M32)	: 「耕地整理法」制定(2/3同意で施行可能になる)
1900年(M33)	: 耕地整理事業が着工、上野が大学院満了農科大学講師
1904年(M37)	: 日露戦争開戦
1905年(M38)	: 耕地整理法改正(区画整理にため池と灌漑排水工事を追加)
1908年(M41)	: 「耕地整理研究会」発足、「耕地整理研究会報」の発刊
1909年(M42)	: 耕地整理法改正(開墾工事追加、2/3同意で耕地整理組合設立)
1911年(M44)	: 上野博士が東大農科大学教授就任、農業工学講座の開設
1914年(T3)	: 耕地整理法改正(埋立と干拓工事追加)
1918年(T7)	: 米騒動勃発
1919年(T8)	: 「開墾助成法」制定(自産能保護のため開墾資金の利子補給)
1921年(T10)	: 「米穀法」制定(政府の米穀買入が可能)
1923年(T12)	: 関東大震災耕地整理学を準用した帝都復興計画策定
1924年(T13)	: 上野が秋田犬「ハチ」を購入
1925年(T14)	: 上野博士逝去(53歳)
1926年(T15)	: 東大農科大学農業工学講座から農業土木学専修へ
1929年(S4)	: 「農業土木学会」が耕地整理研究会を改組発足「農業土木研究」発刊
1931年(S6)	: 農業土木ハンドブック編纂発行
1933年(S8)	: 農林省が国営第1号巨椋池干拓事業着工(初代所長:可知貫一)
1937年(S12)	: 可知貫一が京都帝国大学農学部教授就任
1941年(S16)	: 太平洋戦争開戦
1945年(S20)	: 第2次世界大戦(太平洋戦争)の終戦
1949年(S24)	: 土地改良法の制定
1957年(S32)	: 八郎潟干拓事業着工
1959年(S34)	: 伊勢湾台風災害
1961年(S36)	: 農業基本法の制定
1961年(S36)	: 農林省農業土木試験場の設置
1961年(S36)	: 災害対策基本法の制定
1963年(S38)	: 中海干拓事業着工
1966年(S41)	: 土地改良事業計画設計基準「フィルダム」編改定案
1981年(S56)	: 土地改良事業計画設計基準「ダム」編制定
1989年(H元)	: 「農業基盤整備事業費」から「農業農村整備事業費」に予算科目変更
1990年(H2)	: 雲仙菅岳の噴火
1995年(H7)	: 阪神淡路大震災
2004年(H16)	: 新潟県中越地震
2011年(H23)	: 東日本大震災
2013年(H25)	: 国土強靱化法制定

#### 2.2.2 戦後の農業土木と自然災害研究

農土学会発行の農業土木研究は、終戦の2年前の1943年まで発行され、日本の植民地及び占領地の水利事業や災害に関する研究も増えていた。戦後は1948年に再開され、同年雨森は「ため池の洪水防止と発電利用のに関する研究」、1949年に「河川の最大洪水量の低減方策」を発表しており、同氏が農林省技官として「災害水文」を長年研究していたことが分かる。同じ年に京都大学農学部の澤田敏男は、浸透流に関する論文を発表し、今日に至るフィルダム工学の長年の研究が浸透問題から始まって

いる。

これより前に戦後食糧難による大規模土地改良事業が既に始まっており、1949年に土地改良法、自然災害からの農地・農業用施設の復旧に関して「農林水産業施設災害復旧事業費国庫補助の暫定措置に関する法律」（以下、「暫定法」という）が1950年に制定されると共に、農工研発足の最も古い母体組織・農林省農業技術研究所農業土木部が発足した。農林省は1952年に「コンクリート堰堤」、翌年に「土堰堤」の設計基準を制定し、大ダム工事を伴う国営事業の本格的な推進を図った。

戦後初の災害調査研究報告は、昭和28年6月の九州水害に関するもので、翌1954年の農業土木研究に特集号が組まれた。当時の農土学会は秋葉が会長で、総括、農地、頭首工、ダムの4調査班が、7大学から11名、総理府1名、農林省農業技術研究所3名の計15名をメンバーとした。その後、1957年台風による塩害報告があり、1959年9月の伊勢湾台風（1961年「災害対策基本法」の契機災害）に関する調査報告書が、1960年会誌の報告・資料となった。これは、農林省からの委託で農土学会が災害対策特別委員会を設け、東京教育大学和田教授を委員長、大学関係者等の委員9名、農林省農地局等の幹事12名（九州農業試験場1名を含む）で構成された。この報告書は発災後2週間目に現地調査を行い、補足調査と3回の委員会開催で半年後に完成した。

### 2.2.3 農業土木試験場の発足と災害研究

災害対策基本法が制定された1961年には農業基本法も成立しており、農林省に農業土木試験場が設立した。また、1965年に農土学会の定期発行雑誌は、農業土木研究から「農業土木学会論文集」（以下、「農土論集」と「農業土木学会誌」（以下、「農土誌」）の2雑誌となった。農業土木試験場は、1963年に「場報告」を、2年後には「場技報」を発刊している。因みに、場技報は完成度が高い研究論文（主に学位論文）、場技報は中間的な研究成果で速報的な報告、論文、技術資料とされている。1966年以降も農土論集で災害に関連する論文が多数掲載されているが、かつて「官学」の大調査団による災害現地調査報告を掲載することは皆無となった。一方、農業土木試験場は1964年新潟地震で被災現地に10名の研究職員を派遣し、翌年に第1号場技報で特集・発刊した。農業土木試験場は発足当時から「防災及び災害対策」を重点研究課題に挙げており、農業土木分野が幅広い研究領域を有する中で、有機的な災害調査が可能な国の研究組織として大いに期待・歓迎されていた。なお、同地震では農林技官の高瀬が「アースダムの安全性評価」の観点から、農業土木試験場と共同で研究していた。

その後農業土木試験場は、1968年十勝沖地震、1978年新潟平野6.26豪雨、1983年日本海中部地震等、大規模な地震・豪雨災害時には研究職員を被災地へ派遣し、災害対策上の技術支援と共に、災害及び防災に関する研究論

文を場技報で発行している。特に新潟平野6.26豪雨研究は、国営西蒲原排水地区農地防災事業の新規事業創設契機となる等、防災事業の制度化にも貢献している。

農業土木試験場は、2001年4月に国の研究機関から独立行政法人農業工学研究所になるに伴い、災害対策基本法の指定公共機関となった。2004年の台風・豪雨と新潟県中越地震等の度重なる災害、さらに2006年の農研機構農村工学研究所の改組・設立後には、2007年の能登半島地震と新潟県中越沖地震の災害対応を所技報の特集号とした。加えて歴史的な大災害となった2011年東北地方太平洋地震では、全所全領域を動員して被災現地調査及び災害時技術支援を実施し（鈴木ら、2012）、その翌年研究成果を所技報・特集号として発行している。

### 2.2.4 災害研究成果報告の現状

1983年日本海中部地震時に農業土木総合研究所（以下、「総研」という）が東北農政局の受託先となり、研究と行政が一体的に被災調査を行った。この方式はその後実施されず、被災地は専ら農工研が調査した研究報告だけが残る形態となった。また、農業土木試験場が自然災害現地調査と技報発行による研究成果報告を組織として担い、かつ農業土木研究が農土論集と農土誌に分離するに伴い、農業工学分野の大規模自然災害に関する研究論文を一般の農業土木学会員が目にする機会が少なくなった。

一方、これら論文の多くは、「土と基礎」（地盤工学会）に掲載されている。例えば、①1964年新潟地震のため池（アースダム）被害は、高瀬国雄（農林省農地局設計官）が筆頭著者で1966年10月の「土と基礎」に掲載され、その共同著者である山下進（農業土木試験場造構第1研究室）が場技報で報告、②1968年十勝沖地震では守谷正博（農業土木試験場造構第3研究室）が、筆頭著者で同年9月の「土と基礎」に、翌年1月に場技報に、同6月（単独著者、コンサルタントへ転出）に農土誌に掲載され、③1983年日本海中部地震で谷茂（農業土木試験場造構造部第3研究室）が筆頭著者で、1985年9月に「土と基礎」、同年11月に場技報に掲載された。

このようにため池地震災害研究の場合は、農業土木試験場設立以降、農林省の研究機関として専ら被災現地の調査研究報告を担うことことで、所技報と他学会論文集の投稿・掲載がパターン化し、かつて大学研究者と行政官の合同による災害調査報告が農業土木研究に掲載された頃とは大きく様変わりした。加えて、論文集の災害研究に関するテーマも、被害調査結果の統計的研究よりも、被害探手法、被災状況把握手法等、通信・情報に関する新技術導入を前提とした災害支援や防災・減災システム化の提唱等の研究報告がより多く見られる。

### 2.2.5 災害調査研究の課題

災害時被害推定や予測手法開発は、「防災及び災害対

策研究」の目標であり、そのための災害時毎の被災情報は不可欠かつ唯一の検証データとなる。また、それら研究の正否は、統計的分析が可能なデータの質と量にも掛かっている。これを上記①～③と1939年男鹿地震の秋葉らのケースで検証する。先ず、被災ため池は、4地震の最低が58個で、最高218個である。これに無被災分を含めた情報収集には、行政機関の全面的な協力が不可欠である。秋葉には秋田県庁が、①山下には農林省の高瀬技官が、③谷には、(東北農政局, 1984)が主体となってデータ収集を担っていたが、②守谷には行政機関との共働体制が確保できていないようである。

その後、1990年に噴火した雲仙普賢岳では調査派遣の要請実績が確認できず、1995年兵庫県南部地震では行政との災害現地調査実績が見られず、歴史的災害であったにも拘わらず農工研技報・特集号はない。2001年4月の「独立行政法人」化以降、さらに行政との一体的な調査体制が稀薄化し、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震及び新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震では、技報・特集号は発行したが、農水省及び被災県からの被災情報の共有関係は築けていない。1961年の農業土木試験場発足時に「防災及び災害対策」を重点研究課題に挙げていたにも拘わらず、誠に残念な状態である。

これは、(高瀬, 1967)が「災害報告書においても、その場その場の調査者の主観的判断に終始しており、被害の原因や核心を極め、より広い統計面からの客観的考察によって、その実態を正当に位置づける研究領域は、従来まったく未開発であった」と指摘した当時と変わらない状況である。今後、農業土木分野の災害時被災情報の統計的分析の重要性に鑑み、IT分野の進歩に適合した行政・研究の相互連携及び情報共有体制の整備と時代の変化に応じた災害に対する問題認識の醸成が研究・行政双方に必要と思われる。

## 2.3 ため池研究の特色

### 2.3.1 ため池の定義

我が国のため池は古墳時代から築造され、現在、全国に約21万個と言われ、灌漑農業を象徴する歴史的施設である。最新の農業農村工学ハンドブックでは「ため池に対する厳密な定義はないが、古来より造られてきた土質材料・岩質材料(フィル材)を主材料として築造される比較的小規模な貯水池を、一般に、ため池という(規模の大小にかかわらず、フィル材で築造される農業用貯水池を広くため池とよぶこともある。)」と記述されている。

定義がないとされる理由は、昭和41年初版の農業土木標準用語事典で、「溜池(ためいけ)」は古語・方言(農工学会が定める標準用語でない)に分類され、平成4年の改訂四版では古語・方言のほかに貯水工(ダムおよびその付帯施設等の計画・設計・施工に関する用語を取

録)に分類され、「灌漑目的のため歴史時代に築造されたアースフィル堰堤による貯水池。わが国の多くのものは西暦700年前後に築造が、開始されたものと推定され、その数はこれまでに約30万個といわれる」とされている。さらに、平成15年の改訂五版では古語・方言からは外され、貯水工の分類中で「灌漑目的のため築造されたアースフィル堰堤による貯水池(以下、平成4年の改訂四版同じ)」とされ、「歴史時代に」が削除されている。一方、農水省の土地改良事業設計指針「ため池整備」(2000年制定)では、「堤高15m未満のフィルダムタイプのため池の改修に適用する」とされ、堤高15m以上の農業用ダムと区別された。即ち、「ため池」は農業土木用語からは一旦外れ、今日に至って専門用語に復活した希有な名称である。

本研究の「ため池」は、堤体に起こる地震動被災に注目することから、「土質材料・岩質材料を主材料として築造される土堰堤」と定義し、高さ規模等の要件はない。

### 2.3.2 ため池の歴史的課題

(松尾, 1937)は、農業土木学会設立期に「2000年以上前の崇徳天皇の頃にため池が出来たことが日本書紀の記述にある」として、当時、ため池は農業土木関係者にとって先駆的な土木構造物のシンボルであった。古代からのため池築造の歴史に係る最初の問題は、今も①膨大な数が存在していることである。さらに、歴史的な数に関連した問題として、②立地の分散性と、③工学的な不統一・不透明性がある。

ため池の数に関して、Appendix 3では平成9年度に農水省構造改善局地域計画課(現・農村振興局土地改良企画課)が行った長期要防災事業量調査で集計された「ため池台帳」と農水省防災課が総研及び農工研の協力の下で整理した「ため池DB」都道府県別全国集計の比較表である。現在、ため池総数は210,769個所であるが、上記用語集の約30万個は、(高瀬, 1967)の1955年時点の農林省農地局「溜池台帳」では27万個超とあり、過去には現在よりもさらに多くのため池が存在していた。

以下では、ため池の歴史的観点から、築造の歴史、老朽化問題、ため池DBの3テーマを取り上げ、防災・災害対策に係る問題を論じる。

#### 2.3.2.1 ため池築造の歴史

ため池築造数の歴史的推移は、(高瀬, 1967)によると、受益面積5ha以上のため池数は江戸時代前に2万個弱だったが、泰平が続く300年間の人口増加に伴い約2倍の4万個に達した。その後明治維新を契機に人口増加が更に加速し、20世紀にはため池数も急増している。農業土木学会編の「本邦高土堰堤誌」に掲載されている高堤ため池(高土堰堤; 堤高50尺(15.15m)以上、かつ貯水容量5,000立坪(30,000m<sup>3</sup>)以上、かつ灌漑受益面積10ha以上)中で、朝鮮半島内の41個を除く221個の

ため池の86%が明治期以降の築造である。1905年(明治38年)に始まった耕地整理事業付帯のため池工事によって、今日、農業用ダムと呼ばれる高土堰堤が、食糧増産に不可欠な生産基盤施設として、如何に急ピッチで全国的に展開されたか理解できる。

明治期末から大正期のため池築造状況が分かる記事が、「耕地整理研究会」(1908年(明治41年)発足)の「耕地整理研究会報 第20号」(大正4年3月)に「溜池一覧」と「溜池直営工事概況」が掲載されていた。著者は農林省国営巨椋池干拓事業初代所長(鈴木ら, 2007)の(可知, 1915a, 1915b)で、当時、岐阜県庁技師として自ら設計した耕地整理事業付帯ため池31個所の設計諸元と現地の工事進捗状況を投稿し、研究会員に向けての技術的発信を行っていた。Table 2には、当該記事から可知が設計した31個所のため池諸元一覧表(尺間法からメートル法に変更表示)を示した。31ため池の平均堤高は10.6m(中間値9.1m)で、全般に規模が大きく、表中のNo.28と29の石堰堤を除き、堤体形状は堤高が高くなるに従って堤頂幅が広く、上下流法勾配が緩くなる傾向が見られる。また、31個中6個が15m以上の高土堰堤であり、その全てが「本邦高土堰堤誌」にもリストアップされ、工期も概ね大正3~5年着工で記事内容と符合していた。工事概況の記事には、500名内外の作業員を駆使し、如何に工事施工を司ったか等が詳細に記述されているが、築堤に使った土質材料や突き固め方法等の技術的な事項には全く触れられていない。会報を発行していた耕地整理研究会には、1915年(大正4年)時点の会員数が約1,300名で、在京の大学・農務局関係者と地方の

県庁等の関係者で構成されていた。この頃築造のため池堤体断面図が「本邦高土堰堤誌」に掲載され、かなり設計の標準化が図られているように見受けられる。このような事情から類推すると、当時全国の県庁在職研究会員が主体となって、ため池の設計・施工に関わっていたと考えられる。

因みに、(山崎, 1935)に拠ると、造構の研究は、明治44年(1911年)以降に農業工学の一部として行われ、大正15年東京帝国大学で農業土木学専修となった際に、農業造構学として講義が行われた。堰堤誌の中で、江戸期以前で築堤年代が判り、かつ堤体断面図が付いていたものが8個あった。これらの堤体構造から、明治期に入る10~20年前には既に「前法刃金」と「中心刃金」タイプは、明治期以降の様式に類似していた。

ため池の歴史性から生ずる工学的問題は、70%以上のため池が江戸時代以前と築造年代不明で、明治期以降も岐阜県の可知氏のように設計者が確認できるケースは極めて稀で、堤体断面図さえ不明なため池が大部分である。さらに岐阜県の例でも築堤材料や施工様式に至っては、想像の域を出ない。つまりため池は、設計、施工、材料等の土木工学的要素の不明度性が極めて高く、現存する大部分が、外見的形状以外は決壊の発生か全面改修しない限り堤体内部を知ることはできない。

近年施工された堤高15m以上のダムは、決壊時に下流域への影響度が甚大なため、特に構造的に高い耐震性が要求されている。一方、ため池は今日的耐震基準以前にその殆どが築造され、国内で頻発する地震・豪雨災害経験を踏まえた「伝承工法」に拠ったものと考えられる。

Table 2 大正期の岐阜県内耕地整理地区関連ため池一覧

List of earth dams for irrigation under land consolidation projects in Gifu Prefecture Taisho Era (1912-1926)

No.	受益面積 (ha)	H(堤高)m	L(堤頂長)m	W(堤頂幅)m	勾配		備考
					U(内)	D(外)	
1	1.14	6.7	40.0	2.7	1.5	1.5	No.1-2で1地区
2	6.7	30.9	2.7	1.5	1.5		
3	1.15	7.3	90.9	3.6	1.5	2.0	
4	3.00	9.1	72.7	3.6	2.0	2.5	
5	3.00	7.6	65.4	3.6	2.0	1.8	
6	7.00	10.9	83.6	2.7	1.8	1.8	
7	1.51	7.6	125.4	2.7	1.5	1.5	
8: 南宮池	4.70	19.7	61.8	7.3	1.8	1.8	
9	2.47	8.8	83.6	3.6	2.0	2.0	
10	0.88	8.2	60.0	2.7	2.0	2.0	
11	1.18	10.3	43.6	3.6	2.0	2.0	
12	0.82	7.3	34.0	2.7	2.0	2.0	
13	2.98	11.2	33.8	3.6	2.0	2.0	
14	0.35	5.5	21.8	1.8	1.8	1.5	
15	8.8	29.5	3.6	1.8	1.8		
16	6.00	3.9	23.6	2.7	1.8	1.5	No.15-17で1地区
17	8.5	50.0	3.6	2.0	2.0		
18	1.76	10.6	118.2	3.6	2.0	2.0	
19	1.50	11.5	150.9	3.6	2.0	2.0	
20	0.27	7.0	56.4	1.8	2.0	1.5	
21	0.92	7.6	202.7	2.7	2.0	2.0	
22: 小泉第一号溜池	7.00	17.3	216.2	5.5	2.2	2.0	
23: 小泉第二号溜池	1.20	15.2	110.9	4.5	2.0	2.0	
24	1.56	10.6	86.4	4.5	2.2	2.0	
25	1.05	7.9	83.6	3.6	2.2	2.0	
26: 北部総合第一号池	14.00	18.5	69.1	3.9	2.2	2.0	No.26-27で1地区
27: 北部総合第二号池	21.2	83.6	5.5	2.2	2.0		
28	12.7	34.5	2.4	0.5	1.2	石堰堤, No.28-29で1地区	
29	13.9	26.4	2.4	0.5	1.2		
30: 坂本池	5.90	15.2	79.3	4.5	2.2	2.0	☆図面有り
31	4	12.7	69.8	4.5	2.2	2.0	
平均	2.5	10.6	75.4	3.5	1.9	1.8	
中間値	1.56	9.1	69.1	3.6	2.0	2.0	

出典: 可知貴一, 耕地整理研究会報第20号p32-36, 大正4年3月発行

そもそも農業土木では、2千年に亘る灌漑用ため池築造に係る伝承技術を有していたが、20世紀に入ってからの大規模な耕地（水田）拡大に伴い、より高堤高の土堰堤築造技術の導入が必要となってきた。1929年（昭和4年）に耕地整理研究会を改組し、農業土木学会を発足させた背景には、近代的な土木工学を農業・耕地整理分野に取り入れ、国内で大規模土地改良事業による食糧増産の国家戦略があったものと考えられる。その後、1931年の「農業土木ハンドブック」発行を皮切りに、1933年に「国営巨椋池干拓事業」の着工を始め、全国各地で大規模な土地改良事業が展開された。因みに、福島県の藤沼湖の着工は戦前の1937年であった。

戦前後の数期間は、人員と物資不足で全国の土地改良事業は休止を余儀なくされたが、戦後の危機的食糧難のために土地改良事業が全国で劇的に推進されたのは云うまでも無い。この時期、投資効果の面から大きな受益面積を有する地区が優先され、新規水源に大ダム建設の需要急増は必然であった。そこに京都大学名誉教授沢田敏男らは、農業土木分野のフィルダム工学に関する学術的レベルを短期間で圧倒的に向上させた。これは終戦3年目以降、農業土木研究に目白押しに掲載された論文数から容易に理解される。この間、ため池、土堰堤、アースダムに関して本農業土木研究に論文が掲載されることが稀となり、フィルダム工学に関する論文が70年代末まで立て続けに発表された。同時期に東北農政局管内では堤高100m級のロックフィルダムが複数着工されていた。

### 2.3.2.2 老朽ため池問題と安全性評価

戦後復興による農村からの人口流出が顕在化する頃、老朽ため池が社会問題となり、1953年に農林省は老朽ため池補強事業を創設した。元来、ため池築造は（可知、1915b）ように大型重機のない時代は、農村地域で豊富な労働力となる農民を集め、地区内で採取でき盛土材料を使った「土方」作業によっていた。多量な用水を必要とする稲作農業にとって、ため池は極めて大切な地域の命脈的農業資源であり、台風や大地震等の自然災害時には「村」全体で必死に守られ、仮に一部損壊しても地域皆で造った「土」構造物だから、村総出で復旧を行い得た。村の命脈施設に対する「草刈り」、「泥上げ」等の保守管理は、村内では堆肥ともなり、問題なく万全に行い得た。即ち、農村地域が人口（＝農家・農民）過密な時代には、ため池老朽化問題の発生はあり得ない現象であった。つまり、ため池が土構造物である限り、一旦築造すれば長い年月を掛けて土が締まることで構造的に安定化し、人手さえあれば保守管理に専門家は不要である。土堰堤であるため池は、人口過密気味の農村地域で最も合理的な農業土木施設であり、この合理性こそが我が国に最大30万個のため池がストックされた理由ではないかと考えられる。言い換えれば、ため池老朽化問題の発端は、農村人口が過密から過疎へのシフトにあり、戦後日

本の高度経済成長と深く関連した社会現象であった（鈴木、1987）。

このことは、1967年に高瀬氏が「アースダムの安全性に関する統計的研究」を学位論文とした年代、さらに少し前の昭和30年（1955年）に農林省が「ため池台帳」をまとめた時代とも関連している。戦後日本の経済的復興が本格化した契機は、1950年の朝鮮戦争に伴う特需からで、昭和30年代には過剰な農村人口は急激な経済成長によって都会への流出が始まっていた。これまでは造ってさえあれば、農家や村社会において命脈的に維持管理されるため池は、国や県の関与が殆どない施設であったが、農村人口の流出、出稼ぎ、農家の兼業化が増加することで保守管理の粗放化が進み、草刈りや泥上げ等も化学肥料の普及によって経済行為としての価値が急落した。そのため保守管理に手抜きが始まったため池は、全国的に老朽化問題が顕在化した。加えて、都市近郊農村地域では混住化が進み、農業的には命脈的地域資源が、非農家側からは人命に危害を加える「危険施設」と見なされるようになった。

決壊する恐れのあるため池改修については、1937年に農業土木研究に掲載された「水害防止協議会決定事項（抄録）」の中で、次のことが書かれていた。「溜池堰堤の築造及其の維持に関しては特に其の取締を完全ならしむるは勿論現存溜池堰堤にして決壊の虞ありと認められるものは之が改築を促進するため助成の途を拡充すること」とある。これは内務省内の同協議会で決定されたもので、農業土木にも相当関連するとして載せてあった。即ち、昭和10年代の戦時体制から始まる農村人口の流出は、ため池が水害の元凶として、適切な維持管理と改修が社会的にも求められる施設となった。それが昭和30年代後半に農林技官・高瀬の学位論文テーマ「ため池・アースダム安全性」は、全国27万個を超える膨大な農業インフラストックの老朽化問題がベースとなり、当時、国の担当行政官が採るべき至極当然の研究テーマ設定であった。

ため池のストック管理に国や県等の行政関与の度合を高めたもう一つの背景には、その施工法の変化が考えられる。従来、ため池築造には農民を多数集めた人海戦術による土方工事が基本であった。戦後復興の本格化に伴い、農業用ダム建設やため池改修・改築に大型機械施工が一般化し、一方で農家側は出稼ぎや兼業収入で農業機械を購入し、農作業から肉体労働が解消された。さらに農家人口の減少や機械化農業が進行する中で、ため池の築造・改修も大型機械を有する土建業者の工事請負が一般化する。地震や豪雨によるため池は決壊・破損しても、かつてのように農家自らが総出して補修や復旧する光景は見られなくなった。地元自治体が主体となってため池を改修することで、さらに行政的関与度は年を追う毎に上昇した。今現在に至っては、災害リスクのあるため池に対して、平成25年の国土強靱化法の制定過程の中で国や自治体の行政的責任はさらに高まって来ている。

### 2.3.2.3 ため池DBの防災・災害対策上の課題

国家関与の初歩的行為となった全国版「ため池台帳」作成は昭和30年に始まり、その後数度に亘って再整理された。Appendix 3の最新版・平成9年の「ため池台帳」では、約21万個のため池が都道府県別に集計されているが、目的が長期の要防災事業量調査であるため、受益面積、ため池形式、事業主体、築造年代、管理の現状や課題に関する結果が集計されているだけで、ため池個々施設の安全性に関する評価に利用する前提にない。ため池台帳のあり方が問題化する切っ掛けになったのが、1995年兵庫県南部地震であり、国内初の震度7が適用され、ため池被害数も1,200個以上に及んだ。元々兵庫県は奈良・大阪に近く、気候柄も古くからため池造営が行われ、県内ため池数約4万8千個は、全国ため池数の23%にあたり、日本一のため池保有県であった。そこで結果的に決壊数9箇所を含め千個以上のため池に被害が生じたのがあるが、発災当初、何処でどれだけのため池に被害が発生したのか皆目分からず、地元市町村から県、農政局、農水本省までの災害対策関係者は、混乱に陥った。この教訓を下に農水省は総研に委託し、農工研はその依頼を受けて、検索機能付きため池台帳として「ため池DB」の開発を行い、同時期、都道府県はため池毎に所在地、施設諸元、管理者、管理状況等のデータ収集・整理・入力を実施した。データ入力及び検索システムの開発は(株)G&Sが行い、その後も農工研はGISを活用した検索・表示機能、地震、降雨等の気象情報の取り込み、簡易氾濫解析等機能充実を平成21年度まで順次進め、ため池DBの登録数も約12万個まで拡大させた。

この期間、地震災害では農工研技報で特集号化した大規模地震が3つ、2004年には台風豪雨災害により淡路島で多数のため池被害が生じたが、農水省も農工研もため池DB使って本格的な被害調査や研究報告を行っておらず、農水省の災害対策行政からも「ため池DB」忘れ去られた存在となっていた。そして2011年3月の東北地震では「藤沼湖決壊」の報道情報に対し、農水本省防災課は即時に被害箇所確認が取れなかった。「天災は忘れた頃にやってくる」は、寺田寅彦の有名な言葉であるが、備えの道具は持っていたのに使えなかったのである。

前節では、戦後、大型施設造営が社会的要請となっていた農業土木分野において、防災・災害対策に関わる脆弱な体制と研究・行政間の連携及び情報共有の希薄性の問題を指摘した。結局、(高瀬, 1967)の「災害報告書において、その場その場の調査者の主観的判断に終始しており、被害の原因や核心を極め、より広い統計面からの客観的考察によって、その実態を正当に位置づける研究領域は、従来まったく未開発であった」ことも、阪神・淡路大災害時に「農業土木分野の行政と研究が協力し、災害経験を踏まえた防災・災害対策研究の継続的蓄積」に対する教訓もその後、実質的に活かされることはなかった。

農村地域の人口減少・農家の高齢化や担い手不足の深刻化は、地方の存続すら危うくする情勢である。60年前に始まるため池の維持管理・老朽化問題は、地域の防災問題とも関連し、既に農家と地域住民だけでは背負いきれない状況下にある。また東日本大震災を契機に「行政側に対する責任論」が急速に高まりを見せ、平成25年の災害対策基本法の改正及び国土強靱化法の制定に伴って、警戒すべきため池についてはハザードマップを作成することが義務付けられた。今後は緊急に地震・豪雨時のため池災害リスク評価が求められるが、全国に5~6万個といわれる受益面積2ha以上のため池について、築堤材料の採取から解析評価までの対応は、必要性は認めても、工学的、時間的及び財政的な面から、適切かつ現実的な方法とは考えられない。ここで最優先すべき事は、「被害の原因や核心を極め、より広い統計面からの客観的考察によって、その実態を正当に位置づける」ため、過去の災害調査結果をレビューし、ため池DBを駆使した被害研究によって、現実に適合した防災・減災対策に繋げて行くことであると考えられる。

### 2.4 ため池の地震動被害に関する研究

Table 3には、我が国における大規模地震動によるため池被害を示した。ため池地震被害については、統計的研究のために、先人達は被害ため池と一緒に無被害池のデータ収集も必要としたが、そこには災害緊急時特有の制約があった。また、ため池の歴史性と地域性から派生する問題として、①膨大な数量、②立地の分散性、③工学的な不統一・不明性が有ることを前提条件としておく必要がある。一方、ため池の地震被害を統計面から分析検討するためには、やはり得られるデータが充分でなければ客観的な考察には役立てられない。上記3条件に関連して平時に長い年月を要して全国的に集積された「ため池DB」ではあるが、諸元データの全てを捕捉していくことは簡単なことではなかった。

Table 3 日本の主な地震のため池被害

Damages to earth dams due to past large earthquakes in Japan

地震名	発生日月日	マグニチュード	ため池被害数
北丹後	Mar. 07,1927	7.3	90
男鹿	May 01,1939	6.8	74
新潟	Jun. 16,1964	7.5	146
十勝沖	May 16,1968	7.9	202
宮城県沖	Jun. 12,1978	7.4	83
日本海中部	May 26,1983	7.7	238
北海道南西沖	July 12,1993	7.8	18
兵庫県南部	Jan. 17,1995	7.3	1,222
鳥取県西部	Oct. 06,2000	7.3	71
芸予	Mar. 24,2001	6.7	205
宮城県北部	July 26,2003	6.4	33
新潟県中越	Oct. 23,2004	6.8	561
能登半島	Mar. 25,2007	7.2	175
新潟県中越沖	July 16,2007	6.9	90
岩手・宮城内陸	Jun. 14,2008	6.8	102
東北地方太平洋沖	Mar. 11,2011	9.0	1,990

Table 4は、Appendix 3を基に各都道府県のため池DBに登録された項目別データの充足率を整理したものである。堤高、堤頂長に関するデータ登録における充足率は、全体でも95%超で府県別のバラツキも少ない。これと比較して堤頂幅、勾配、地形では、充足率8割～7割と低下し、築堤材料に関しては半分にも満たない状況である。このような充足率になる理由は、外見的に確認できるものはいつでも捕捉できるが、築堤年代や材料に関するものは過去の記録がなければ捕捉困難だからである。そのために本研究では、現状でデータ充足率の低い築堤年代、材料、ため池型式等堤体の内部構造に関する項目は参考程度に止める。

Table 4 ため池DB 諸元データの充足率

Satisfaction ratio of covering data concerning earth dams for irrigation on Tameike Data Base (DB)

		単位:千個							
①ため池台帳	②ため池DB	③堤高	④堤頂長	⑤堤頂幅	⑥勾配U	⑦勾配D	⑧地形	⑨堤体材料	
総数	210.8	116.8	111.4	111.1	97.4	86.0	85.9	93.4	49.0
指数	100	0.55	0.95	0.95	0.83	0.74	0.74	0.80	0.42
平均値	-	-	5.08	62.53	2.89	1.45	1.77	-	-

注)U上流, D下流

2.4.1 研究の概観

本研究でレビューするため池地震動被害に関する研究は、農業農村工学分野が耕地整理技術から土木工学的な技術研究・振興に舵を切った1929年の農業土木学会発足以降とした。また、同学会が発行した「農業土木研究」の研究論文をベースとし、1965年以降に農工研が発行した「所報告」及び「所技報」を含めた。さらに、関連する内容が地盤工学会の「土と基礎」等、他学会で掲載された研究論文等も包含した。

なお、本研究がため池DBを用いて統計面から地震動被災の要因研究をも趣旨するため、ため池形状諸元に関する研究の有無もレビューの必要条件にした。

Table 5では、それら研究結果を主要な地震災害毎に時系列的に整理した。

農業土木分野のため池地震動被害研究は、(秋葉ら, 1941)が1939年秋田県男鹿地震で行ったのが最初で、その調査研究は統計的手法を駆使し複合的に分析を行っている。その背景には、1934年に農業土木学会編の「本邦高土堰堤誌」が発行され、その前後にため池に関連して、(和久井, 1932)が地質学的考察、(井上, 1937)が天端率と内外法率の関係、(和田, 1937)が堤体断面決定、(石橋, 1939)が堤高と堤頂幅の関係について研究発表し、秋葉らも高堤高アースダム時代に向けて、従来のため池形状と地震被害の関連を検証する意図があったと推察できる。その結果、秋葉は「従来の農業用溜池の土堰堤及び其の附属構造物の計画・築造・管理には、震力の考慮が非常に欠けていて、経験にのみ依頼した結果、遺憾ながら被害の度を激しくしたかの感があったことである」とし、さらに「一地方に大地震が襲うのは・・・稀ではあるが、其の災害の戦慄すべきを思えば、あらゆる部門から、これが調査研究をなし、対策を講じなくてはならぬ。地震については専門家に任せて置けと云うが如き無責任極まる態度を排すべき」と総括した。

本節では、その後のため池地震動研究に大きな影響を与えた、秋葉らの被害調査研究項目をベースとし、Table 5の研究レビュー総括表に示すように、地震動に関連する三つ(①震度、②震央距離、③地形・地質)の環境要因と、ため池堤体形状に関して五つ(①堤高、②堤頂長、③堤頂幅、④堤体上下流法勾配、⑤堤体横断面形状)の

Table 5 ため池の地震被害に関する研究レビュー  
Review of studies on seismic damages to earth dams in Japan

地震名(年)	論文等・著者名(年)・雑誌等	環境要因				個体要因						備考
		震度	震央距離	地形等	堤軸角	堤高	堤頂長	堤頂幅	法勾配	横断形状	マルチ	
男鹿(1939)	秋葉(1941), 農業土木研究	△	-	○	△	○	-	○	○	○	-	
新潟(1964)	高瀬・山下ら(1966), 土と基礎, 技報	○	○	○	○	○	△	-	● ?	○	-	
十勝沖(1968)	守谷ら(1968-9)技報, 土と基礎, 学会誌	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
宮城県沖(1978)	東北農政局(1979)他, 中島(1979)学会誌	○	○	○	△	●	-	-	-	-	-	土質, Rd(不明)
日本海中部(1983)	谷ら(1985)技報, 東北農政局(1984)	○	○	○	○	○	△	○	○	-	-	
男鹿(1939)・新潟(1964)・十勝沖(1968)・日本海中部(1983)	谷・長谷川(1987), 学会誌, 谷所報	○	○	○	-	○	△	○	○	-	-	レビュー
日本海中部(1983)	山崎ら(1989), 土木学会	-	○	○ ?	●	○	○	○	○	-	◎	多変量解析
北海道南西沖(1993)	谷(1995)技報	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	レビュー, 土質
兵庫県南部(1995)	谷(1997)大ダム, 谷他(1998)所報	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	土質, 被害, レビュー
兵庫県南部(1995)	藤井(2005)	-	○	○	○	○	○	-	-	-	◎	多変量解析
宮城県北部・鳥取西部・芸予(1996)	谷(1998)技報, 谷(2005)学会誌	○	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	ため池DB
芸予(2001)愛媛	小林ら(2002)学会論文	-	○	○	-	○	○	○	○	-	◎	多変量解析
芸予(2001)広島	山本ら(2002)土と基礎	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	被害, 土質
新潟県中越(2004)	毛利ら(2006)技報	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	土質, 被害形態
能登半島・新潟県中越沖(2007)	毛利ら(2008)技報	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	土質, 被害形態
東北地方太平洋沖(2011)	堀ら(2012)技報	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	土質, 被害形態

○:関係有り ●:関係有り(結果反対)△:無関係

個体要因に区分した。但し、ため池堤軸方向は、ため池サイトの地形と深く関わるため、③地形・地質の環境要因に含めた。最後に、被災要因を多変量解析で求めた事例を紹介する。

## 2.4.2 地震等の環境要因によるため池の地震動被害

### 2.4.2.1 震度とため池被害

現在の農業用ため池の地震後緊急点検要領では、震度5弱以上で全ての対象ため池が、震度4では対象ため池のうち堤高15m以上のもので実施することになっている。対象ため池とは：①堤高10m以上、②貯水量10万 $\text{m}^3$ 以上、③決壊した場合、人的被害を及ぼす恐れがある、④地域防災計画等に定められているのうち、①～④のいずれかに該当するものである。この点検要領で規定されている震度とは、以下の研究成果の要旨がベースとなっている考えられる。

(高瀬ら, 1966)は、新潟地震の震度と被害ため池分布で、「震度3程度では全く被害がない、被害ため池は震度4と震度5の地域で、多くは震度5に含まれる」、「震度5で堤体破壊(決壊)がないので、決壊は震度6以上で起こる」と結論した。さらに「震度は市街地で観測され、ため池付近でないの、概略の値しか示していない点に注意すべき」としている。(谷, 1985)は、1968年十勝沖地震と日本海中部地震の震度コンタを、市町村別ため池被害率を6区分した分布図に重ね、両地震で「震度5の範囲に被害ため池はほぼ入る」とした。さらに、(谷, 2005)は、2000年鳥取県西部、2001年芸予地震、2003年宮城県北部地震の計測震度とため池被害率の関係から、「被害率は計測震度5.7付近から急激に大きくなる傾向が見られる」とした。

震度とため池被害の関係は、全ての研究でその関連性を前提に検討されているが、高瀬らの指摘のようにため池毎の震度特定に十分な精度がなく、谷らが市町村毎にため池被害率として示すことが、当時、唯一可能な方法であった。

### 2.4.2.2 震央距離とため池被害

(谷ら, 1998)は震央距離と $R_d$ に着目し、各地震の震央距離別に $R_d$ を並べて、地震被害が生じる最大震央距離と最短震央距離の $R_d$ を推定し、地震マグニチュードと被害発生の限界震央距離関係を明らかにした。但し、マグニチュード8.0以上でため池被害の記録がないことや特定の震央距離に高い $R_d$ が生じるなど、被害傾向を表す意図は理解できるが、推定式には地形・地質要因を考慮しておらず、問題がないとは言えない。

### 2.4.2.3 地形・地質とため池被害

地形・地質と地震被害の関係は、(秋葉ら, 1941)が最初に着目したテーマであり、地層や土壌分布等も比較考察し、被災池は地形的に「平地と山地の境で最も顕著

だった」とした。なお、秋葉らは地形と地震被害の関係考察のため、当時の地勢図上にため池位置表示した図面を作成していたが、時節柄(論文が発表された昭和16年は、太平洋戦争開戦年であり、国防上の配慮からか)省略されている。その他、重ね池では単一池よりも被害が甚だしく、特に上流池に被害が大きいことにも着目している。

(高瀬ら, 1966; 谷, 1985)では、地形の境界に着目し、秋葉らと同様な結果であった。(山崎ら, 1989a, 1989b)は同じ日本海中部地震で地形分類から、台地が最も $R_d$ が高くなった。また、(藤井ら, 2005)は兵庫県南部地震で標高を地形分類に代用し、高位標高で被災度が大きくなっており、地形に関して、秋葉らの結論と矛盾する結果はその後もなかった。

### 2.4.2.4 堤軸方向とため池被害

堤軸震央方向角度について、(秋葉ら, 1941)は男鹿地震で「堤体の方向と最大震動の方向及び震源地の方向には特別な因果関係は発見されない」と結論したが、この問題に対する関心は極めて高く、「堤体も一つの構造物なる以上震動の方向と無関係であり得ない」と考え、当時、相当綿密な現地調査を行っていた。その後、(高瀬ら, 1966; 守屋ら, 1969; 中島, 1979; 東北農政局, 1984; 山崎ら, 1989a, 1989b; 藤井ら, 2005)がこのテーマで検討したが、中島以外は全て因果関係ありと報告され、うち山崎ら以外は、「震央」-「堤体」-「貯水池」の位置関係で、さらに直角付近の $R_d$ が大きい傾向があるとした。但し、複数の地震事例で研究レビューを行っているが、このテーマに関する統一的整理は行われていない。

## 2.4.3 堤体形状等を個体要因とするため池の地震動被害

過去のため池地震動被害研究では、①堤高( $H$ )、②堤頂長( $L$ )、③堤頂幅( $W$ )、④上下流法勾配の4つを堤体形状に関する諸元とし、②/①形状係数( $L/H$ )、①と③、①と④及び③と④を形状諸元の組み合わせで検討されている。以下、ため池地震動被害に関して、①から④までを諸元毎(但し、 $L/H$ は②に含める)に、さらに堤体横断形状諸元(①、③及び④の組合せ)、多変量解析と順次レビューする。

### 2.4.3.1 堤高とため池被害

昭和9年発刊の「本邦高土堰堤誌」では、高堤高ため池(高土堰堤)を堤高50尺(15.15m)以上、貯水容量5,000立坪(30,000 $\text{m}^3$ )以上、灌漑受益面積10ha以上で定義とされ、堤高は構造物として最重要諸元であり、「地震時ため池緊急点検」でも、堤高によって点検対象が異なっている。(秋葉ら, 1941)の研究でも最初の堤体諸元として堤高を挙げ、これを5区分して被害との関係をみて

いる。戦前の尺間法では、～5尺(1.5m)、～10尺(3.0m)、～20尺(6.1m)、～30尺(9.1m)、30～54尺(9.1～16.4m)区分されている。

次の(高瀬ら, 1966)は、新潟地震で堤高を5m毎に分割し、無被災ため池数との対比で被害率としている。

(東北農政局, 1984)は、堤高0～1.5mまでを第一区分とし、1.5～7.5mまでを1.0m毎で6分割、7.5m以上を1区分の計8分割で被災ため池数を整理し、堤高区分毎に $R_d$ の変化を見ている。(谷ら, 1987)は、堤高と被害の関係を十勝沖・宮城県沖・日本海中部の3地震の被害事例を並べて比較した。堤高区分は、(高瀬ら, 1966)と同じ5.0m毎で、いずれの場合も「堤高が大きいほど被害が大きくなる」と結論した。因みに、著者毎に堤高分割に違いがあるのは、一応に区分毎の個数のバラツキを極力少なくする工夫と考えられる。その後も、地震被害研究の報告はされているが、単一の堤体形状諸元による被害分析研究は見当たらない。例えば、(山崎ら, 1989a, 1989b; 藤井ら, 2005; 小林ら, 2002)は、多変量解析に併せて $R_d$ を算定し、堤高と被害に因果関係があると報告した。

#### 2.4.3.2 堤頂長とため池被害

ため池形状を代表する諸元として堤高に次ぐものは通常、堤頂長である。しかし、地震被害関係で堤頂長を単独で論じたものは、(秋葉ら, 1941)にはなく、(高瀬ら, 1966)が行った、被害との関係検討では、「明確な傾向は見られない」であった。唯一、(東北農政局, 1984)が堤頂長25m毎毎の被災池度数分布を示し、「被害池は堤頂長25-50mのものが多く、100m以下が大多数」とだけ結論した。(谷ら, 1987)は、「堤頂長と被害の関係は特に見られない」とし、十勝沖と日本海中部地震の被害例について、「堤頂長/堤高を $L/H$ として、2.5以下では被災がなく、5.0以下では $R_d$ は小さく、5.0超では $R_d$ は一定レベルで大きくなる」とした。 $L/H$ と地震被害の関係性については、(畑中, 1952)の、「堤頂長が堤高の3～4倍以上であれば、自由振動周期として共振現象を起し得る」とした研究結果を根拠としている。その後、(山崎ら, 1989a, 1989b; 藤井ら, 2005; 小林ら, 2002)は多変量解析と併せて被害率を算定し、堤頂長規模とは因果関係があると報告した。

#### 2.4.3.3 堤頂幅とため池被害

一般に堤頂幅は高堤高ため池では広くなるため、堤頂幅単独で地震被害との関係を論じられることは少ない。過去の研究事例では(東北農政局, 1984)が唯一のもので、「被害ため池は堤頂幅2-4mが一番多い」としている。(秋葉ら, 1941)は、堤高と堤頂幅を関連付けて分析し、天頂幅の大小は被害に殆ど影響がないとした。(谷ら, 1987)は、日本海中部地震を事例に「堤頂幅が広くなると被害が多くなる」とし、「堤高が大になるにつれ

て堤頂幅が大きく、堤高の大きいものほど被害率が高くなることを反映したもの」と理由付けした。(山崎ら, 1989b; 小林ら, 2002)が示した被害率では、堤頂幅が大きいほど大きくなっている。

堤頂幅決定の研究では、①(井上, 1937)が天頂幅率と内外法率の関係から、②(石橋, 1939)は高土堰堤の堤高と堤頂幅の関係を、昭和9年の「本邦高土堰堤誌」の263個のため池から統計的に研究し、関係方程式を提案した。①及び②は異なる手法であるが、結論の「堤高(①は水深)が大きいほど堤頂幅は広くする」は、基本的に同じである。

#### 2.4.3.4 上下流法勾配とため池被害

堤体上下流法勾配は、(秋葉ら, 1941)が最も多くの図表を用い徹底して地震被害との関係を検討しており、「法勾配が緩くとも被害は免れず、被害、無被害何れに関しても一概に論じられない」としたが、秋葉らが提示した図表から、上流法勾配が緩やかなほど被害の程度が大きくなっていった。(高瀬ら, 1966)の法勾配と被害の関係は、「上下流とも勾配が緩いほど被害率が上がっている」。また、上下流法勾配比では、「上流緩・下流急」の場合に「被害池が一番多いが、無被害池数も多いため被害率は最低」となった。また、「上流急・下流緩」では、「被害池数は最も少ないが、無被害池数も少ないため被害率(被害池数/無被害池数)が最大であった。

(東北農政局, 1984)は、上下流法勾配で0～1.5割を最初の区分とし、それ以上2.5割までを0.1割刻みで計12区分し、各々の被害池数を集計した。その結果、「上下流とも2.0割の被害池が一番多く、急な1.5割以下、緩い3.0割以上でも被害が生じていた」。さらに上下流法勾配比の比較では、「上流緩・下流急」の場合に「被害池が一番多く」、「上流急・下流緩」で「被害池数は最も少なく、決壊池も無かった」。日本海中部地震の場合、無被害池数が不明で被害率で比較できないが、(高瀬ら, 1966)の新潟地震被害のパターンと大きな違いはない。

(谷ら, 1987)は「上下流の法面勾配と被害の関係」は、男鹿、新潟、十勝沖、日本海中部地震で「上下流ともおおむね緩くなるほど被害率が高くなる」ことを認めている。また、日本海中部地震で、堤高別に法勾配と被害の関係を上下流で調べても、「堤高区分に関係なく、勾配が緩くなると被害率が大きくなる」傾向にあるとした。

さらに①(山崎ら, 1989a, 1989b)の日本海中部地震、②(小林ら, 2002)の芸予地震における研究でも上下流法勾配が緩いほど被害率が高くなっていった。①と②は共に多変量解析を行い、緩い勾配の被害率が高いことを確認しているが、①は「従来の工学的知見とは逆の結果」であることを認め、「勾配が緩いものほど、堤体の材質等の施工条件が悪かった」と考察し、②では「一般に、盛土斜面は緩勾配の方が安定するが、堤体材料や基礎地盤の強度が小さい場合に法勾配を緩にすることから、土

質材料の特性が顕著に現れたもの」と考察している。

堤高と上下流法勾配との関係は、(石橋, 1942) が「本邦高土堰堤誌」のため池263個で統計的研究を行い、堤高の大きさに従い勾配が緩くなり、堤高15m以上では「上流勾配を下流勾配より相対的に緩くする」ように勧めていた。

#### 2.4.3.5 横断面形状とため池被害

(秋葉ら, 1941) は、堤高と堤頂幅を組合せて、2図1表を用いた被害分析から、「堤高/堤頂幅が2.5以上に決壊がない等、一定の高さに対して天端幅が狭くなれば決壊の患がないという矛盾を感じる結果が表れた」とした。また、堤高と法勾配及び被害の関係では、2割5分以上では堤高の高低に関係なく被害があった。(高瀬ら, 1966) は、堤頂幅/堤高比と被害の関係から、堤高に対して極端に堤頂幅が大きいのは危険であるとした。

#### 2.4.4 多変量解析によるため池被害分析

ため池諸元に関わる多変量解析は、1983年日本海中部地震で(山崎ら, 1989a, 1989b)、1995年兵庫県南部地震で(藤井ら, 2005)、2001年芸予地震の愛媛県内で(小林ら, 2002)の各々が、異なるに分析手法で研究している。山崎らは震央距離、堤頂幅、堤頂幅/堤高及び上流法面勾配が、藤井らは震央距離、堤軸角度、堤体積(堤高×堤頂長)、標高及び地質、小林らは震央距離、地形、堤高、堤頂長及び上下流法勾配が被害率に関連性が強いとした。

### 2.5 まとめ

Table 5の中で2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、同年新潟県中越沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震のため池被害研究については、農工研技報の特集号に掲載されている。しかしながら、堤体諸元に基づく検討が含まれておらず、専らため池個々の被害形態と土質面からの考察であり、上記のレビューでは全く触れることはなかった。ここでは、第II章のまとめとして、本研究の目的であるため池の地震動被災要因について、要因毎の検証テーマを以下の通り整理した。但し、被災の検証に当たっては、次章でため池被災率( $R_d$ )を改めて定義し、危険度評価の指標とした。

#### (1) 環境要因(誘因・外的要因)

- 1) 震度は $R_d$ と関連性があることは明白であるが、これまでため池毎の震度が曖昧であった。そのため、ため池毎の推計震度を同定し、同一震度グループ毎に $R_d$ を求めて関係を検証する。
- 2) 震央距離が近いほど $R_d$ は増加傾向にあるが、遠い距離でも局所的に震度及び $R_d$ は高い場合が見られる。そのため震央距離と $R_d$ の関係を、震度と地形・地質の関連性から検証する。
- 3) 地形・地質については、「山地と平地の境」で $R_d$

が高い傾向が一般的に見られることから、地形・地質と震度及び $R_d$ の関係を検証する。但し、推計震度にも地形・地質要素が含まれるため、県ブロック等の広域的な観点とため池サイトの狭域的観点に分けて被災要因の分析を行う。

- 4) 堤軸下流方向が震央と正対の関係の場合に被害率が高いとする事例が多数を示されているが、未だ一致した見解となっていない。そのため、ため池毎に堤軸の震央方向角度( $\omega_i$ )を定義し、 $R_d$ でその関係性を検証する。

#### (2) 個体要因(素因・内的要因)

- 1) 堤高が高いほど被害率が高いとする研究結果が一般的であるが、統計的確率から再検証すると共に、震度と堤軸方向の関係と併せて確認する。
- 2) 堤頂長は被害率との関連性の有無について定まった見解が得られていない。そのため、堤高と同じ手法で $R_d$ の検証及び確認を行う。
- 3) 堤頂幅は広いほど被害率が高いとする研究結果になっているが、統計的確率から $R_d$ を再検証する。
- 4) 理由は未解明であるが、堤体上下流法勾配が緩いほど、また上流勾配が緩いほど被害率は高いとする研究結果である。そのため、上下流の勾配別に $R_d$ を検証する他、上下流勾配比を定義して統計的確率から $R_d$ を再検証する。
- 5) 横断面形状について、堤高と堤頂幅、堤高と上下流法勾配比及び堤頂幅と上下流法勾配比の関係について統計的確率から $R_d$ を検証する。

#### (3) 被災度と要因間の整序化

地震動によるため池被災は、多様な要因が複雑に絡み合っており、その被災レベルも軽微なクラックから堤体崩壊まで幅が広い。そのため、被災要因究明に当たっては、ため池 $R_d$ と併せて第V章で定義する被災度によって検証を行うと共に、要因間の相互性・階層性を念頭に置いて被災要因の整序化を行う。

## III 震度によるため池の被災分析

### 3.1 概説

どれくらいの震度から農地やため池を始めとした農業用施設に被災が生じるか、統計的に研究されたものがない。その理由は農地・農業用施設が日本全国各地に広く分布し、農家個々から県・国まで多様なレベルで所有・管理され、大地震災害時の混乱下にあつて無数の被災箇所情報の収集・整理は容易な作業ではなかった。また、地盤揺れの尺度である震度は、かつては気象庁観測所が府県毎に2~3箇所しかなく、人口粗密な農村地域に広く分布する各農地や農業用施設と整合するものではなかった。さらに震度階には地震加速度で大きな幅があるため、被害度を測る尺度としては不十分であった。そのため農業土木分野では、建築分野のように建物被害について

震度を用いて検証する研究方向へ進んで行かなかった。

今日、大きな地震発生時には推計震度分布と一緒に震央が発表され、その距離に応じて被災影響が大きくなると考えられている。そのため震央距離から地域の被災レベルを想定する研究や提案もあるが、災害緊急時に震度と震央距離のどちらを判断基準とすべきか、事前に明確にしておくことも大切である。特にため池は地震時に決壊・氾濫の危険性があるため、被災度を大地震発生時毎に判断し、緊急時の点検や住民避難等の防災・減災対応が必要不可欠となっている。

### 3.1.1 震度と農地・農業用施設等の被害

(高岡ら, 1984) は1983年日本海中部地震の被災2県で農業用施設の個所当たり被害額を市町村別に求めていたが、これは「農林水産業施設災害復旧事業費国庫補助の暫定措置に関する法律」(昭和25年制定)に基づき市町村単位で農水省に被災報告されたデータに基づいている。但し、この方法では、1件だけの大きい被害額によって、当該市町村全体の被災程度が大きくなってしまふ。

また当時の震度分布は、県内数点の観測震度がコンタ表示され、地形・地質は考慮されず、場所毎の震度は目安程度でしかなかった。今日の推計震度分布は、地震時の地表地盤の揺れ方を考慮し、1kmメッシュ毎に小数点一位まで公表されている。

本章では、農地・農業用施設等の地震動被災に関して、公的な被害額を用いて説明が可能かを検証した。そのため、被災市町村毎の平均推計震度と被災密度の新しい指標を提案し、震度を尺度とする農地・農業用施設等の地震動被災分析を行った。

### 3.1.2 震度とため池被災

(高瀬ら, 1966) は1964年新潟地震で「震度は、市街地で観測されたもので、ため池付近でないので、概略の値しか示していない点に注意すべき」としていた。また、

(谷, 1985) は、震度コンタ図に市町村別のため池  $R_d$  を重ねて関係を検討した。さらに1996年に気象庁が計測震度を正式導入後、(谷, 2005) は、2000年鳥取県西部、2001年芸予地震、2003年宮城県北部地震のため池被災市町村の計測震度とため池被害率の関係を報告した。

本章では、気象庁の1kmメッシュ推計震度から、ため池毎の震度を同定し、震度増加とため池被災の関係を検証した。加えて、震度と震央距離及びため池被災分布から、被災要因としての震央距離の扱いを考察した。

### 3.1.3 東北地震の農地・農業用施設等被害

平成23年3月11日14時46分01秒、三陸沖、牡鹿半島の東南東130km付近、深さ24kmを震源とするモーメント・マグニチュード(M) 9.0の地震(本震)が発生し、同日気象庁は、「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地

震」(以下、「東北地震」という)と命名した。東北地震は、太平洋プレートと陸プレートの境界で発生した海溝型地震で、その規模は国内観測史上最大、世界でもスマトラ島沖地震(2004年)以来で、1900年以降では4番目に大きな巨大地震であり、宮城県北部で最大震度7、東北・関東8県で震度6以上など、東日本を中心に日本列島全体が大きく揺れた(Fig. 1)。

また、地震により津波遡上高は国内観測史上最大の40.5mに上る大津波が発生し、震源域に近い東北地方中南部から北部関東の太平洋沿岸部で約56,000haが浸水し、そのうち農地では約23,000haが冠水し、深刻な塩害と排水機能麻痺を引き起こした。大津波以外にも地震の揺れや液状化現象、地盤沈下などによって、東北及び関東の広大な範囲で各種ライフラインの寸断や建物、港湾、漁港等の施設に大きな被災が発生した。政府はこの震災の名称を「東日本大震災」とした。

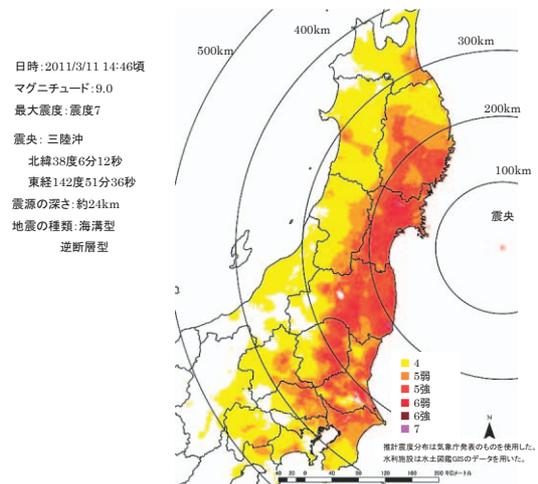


Fig. 1 東北地方太平洋沖地震の推計震度分布

Distribution of estimated seismic intensity during the 2011 Offshore Pacific Coast of Tohoku Earthquake in Japan Archipelago

未曾有の津波被災に加えて、内陸部でも強震動によって農業用施設等へ甚大な被災が生じた。特に農業用ため池、ダム、パイプラインなど基幹施設の被災が大きく、福島県須賀川市の藤沼湖では決壊・氾濫により8名の死者・行方不明者を出す人命災害となった。Table 6には、平成23年11月時点の東日本大震災農地・農業用施設等被害額を示した。被害は全国15県、被害額は約8,300億円に及び、うち宮城県が全体の55%を占め、福島県29%、岩手県7%、茨城県6%と続き、被害額上位4県が全体の96%と震源に近い太平洋沿岸に面した地域に被害が集中していた。

東日本大震災の農地・農業用施設被害を過去20年間と比較したのが、Fig. 2である。各年の被害額は平成24年版災害統計等により整理したが、豪雨・台風被災も含めた年間の平均的被害額が1,000億円程度に対し、今回は震災被害額だけで7倍近い被害額となった。また、過去

Table 6 東北地方太平洋沖地震の農地・農業用施設等被害額

Summary of damages to farmland and agricultural facilities during the 2011 Offshore Pacific Coast of Tohoku Earthquake in Japan

県名	農地		農業用施設等		農村生活関連施設		合計	
	箇所	被害額	箇所	被害額	箇所	被害額	箇所	被害額
青森県	20	1	23	5	2	0.2	45	6
岩手県	13,321	226	3,644	309	41	10	17,006	546
宮城県	317	2,769	2,994	1,489	102	267	3,413	4,535
秋田県	0	0	7	0.1	11	0.2	18	0.4
山形県	102	0.4	134	3	2	0.2	238	3
福島県	1,794	943	3,731	1,246	111	226	5,635	2,415
茨城県	640	40	7,597	342	100	93	8,337	475
栃木県	238	6	510	90	23	6	771	102
群馬県	0	0	32	3	0	0	32	3
埼玉県	0	0	67	4	0	0	67	4
千葉県	113	11	2,225	142	6	17	2,344	170
神奈川県	0	0	1	0.01	0	0	1	0.01
長野県	746	8.6	239	14	4	4	989	27
静岡県	0	0	2	0.1	0	0	2	0.1
新潟県	165	6	252	12	7	9	424	26
合計	17,456	4,012	21,457	3,658	409	633	39,322	8,302

注1) 農業用施設等の被害は、主に、ため池、水路、揚水機、農地海岸保全施設の被害である。  
 注2) 農村生活関連施設の被害は、主に、集落排水施設の被害である。  
 注3) 茨城県及び千葉県の農業用施設等には、(独)水資源機構から報告のあった、水資源開発施設の被害額を含んでいる。  
 ※農林水産省(2013.11.11プレスリリース)

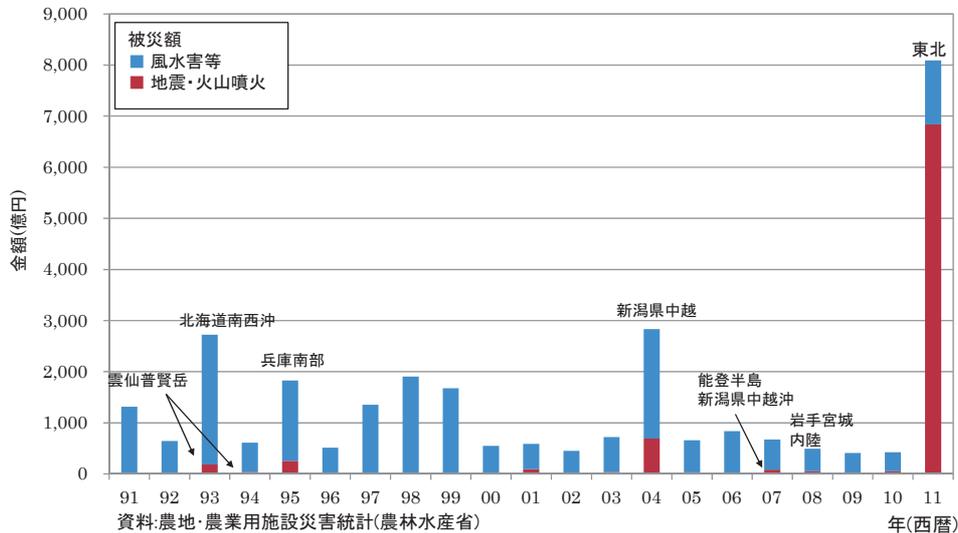


Fig. 2 過去20年間の自然災害による農地・農業用施設被害額の推移  
 Cost of damages to farmland and agricultural facilities for natural disaster events in Japan since 1991

に最大震度7を記録した2004年新潟県中越地震や1995年兵庫県南部地震と比べても、それぞれ約10倍と約26倍であり、いかに甚大な被災が生じていたかが分かる。

3.1.4 東北地震のため池被災

ため池の被災箇所数及び被害額は、暫定法に基づき被災市町村毎に農水省に報告される。Table 3の東北地震に伴う被災ため池数1990箇所は、2012年4月までに農村振興局防災課において集計されたものである。これには東北地震の翌日未明に発生した最大震度6強の長野県北部地震で被災した長野県と新潟県内のため池も含まれている。但し、本被災報告のため池数は、その後農水省が行う災害査定前のもので、被災規模や被災場所等公式の確認が行われていない状態にある。

Table 7では、東北地震のため池が被災した東北3県と関東4県の計7県について、被災ため池数及びその被災

総額と災害査定ため池数とその査定総額を示した。被災7県の被災ため池は1,961個、被災総額は315億円であるが、査定ため池では564個(被災池数の29%)、査定総額76億円(同24%)である。査定池が被災池の個数と総額で各々30%以下になっているが、その理由を現地で関係者に聞き取ったところ、被害が比較的軽度で地元農家レベルで補修・復旧対応可能、堤体天端の道路舗装破損等で他公共災害復旧工事等で対応したとの説明であった。被災池数と査定数の差の大きさや大震災時の混乱から推測すると、発災当初に確認されたクラックも、後日、再調査では消滅していたケースも多数あったものと考えられる。

ため池被災7県の内、最大は福島県で査定池257個(全数の46%)、査定総額53億円(総額の69%)で数量及び金額とも他県を圧倒している。但し、これには2012年3月時点で福島第一原発事故により災害査定が実施できな

かった池は入っておらず、今後、さらに他県とは差が広がることを見込まれている。宮城県2位、岩手県が3位と続き、東北上位3県で査定池数の90%、査定額の92%を占めている。通常、地震動被災は震央に近いほどその被災も大きいと想定されるが、今回の地震では、震央に最も近い宮城県よりも福島県内の方が被災ため池数が多く、さらに震央から距離の離れた群馬県内でも被災池が生じていた。

**Table 7** 東北地方太平洋沖地震のため池被災 Damages to earth dams due to the Tohoku Earthquake

県名	ため池数	被害ため池数	左記被害総額 (百万円)	災害査定 ため池数	左記査定総額 (百万円)
岩手県	1,218	401	1,387	121	548
宮城県	2,535	630	3,492	127	1,188
福島県	3,299	803	23,689	257	5,260
茨城県	1,123	78	1,234	45	367
栃木県	142	37	1,394	8	116
群馬県	587	5	250	5	91
千葉県	1,291	7	63	1	17
合計	10,195	1,961	31,508	564	7,587

資料：農林水産省農村振興局防災課調べ(2012年6月)  
注)ため池数はため池DB登録数

また本震災は、午後の早い時間帯に発災したため、自衛隊ヘリからの津波映像を始め様々な動画記録や地震及び津波に関する各種観測データが迅速に公表された。気象庁は地震の規模を示すマグニチュードを3度に亘って改訂したが、揺れを示す震度(計測震度及び推定震度分布)については、発震後30分以内に発表されている。現在、計測震度は全国で約4,300個所に設置された。観測点から地震動被災想定に直結するものとして、各方面の災害対応態勢始動やこれをベースとした防災・減災対策の体制作りに重要な役割を果たしている。

### 3.2 分析方法

#### 3.2.1 データベース

##### 3.2.1.1 東日本大震災の被害額

農地・農業用施設の自然災害からの復旧に関しては、昭和25年に制定された「農林水産業施設災害復旧事業費国庫補助の暫定措置に関する法律」(以下、「暫定法」という)に基づき、災害事件毎に各被災市町村から都道府県を經由して農水省へ被害額が報告されている。**Table 8**は、農水省農村振興局防災課が発災後3ヶ月経過した6月16日時点で市町村からの報告をベースに集計したものを、被災県毎に津波と地震動のみの被災形態別に被害額を整理したものである。被災県11県において、津波被災は47市町村、地震動被災(震災被災市町村数から津波被災市町村を除いた数)は239市町村、合計286市町村(被災県全市町村の61%)から農地・農業用施設等被害が報告されていた。なお、本章で検討する市町村毎の農地・農業用施設等被害額は、**Table 8**の集計表をベースとしたものである。

**Table 8** 東日本大震災における県別の被災形態別被害額 The damages caused by the earthquake and tsunami in each prefecture during the Tohoku Earthquake

県名	市町村数	震災被害		津波被災		地震被災	
		市町村数	総額	市町村数	被害総額	市町村数	被害総額
		①+③	②+④	①	②	③	④
青森県	40	7	443	2	135	5	308
岩手県	35	25	54,366	11	50,048	14	4,318
宮城県	36	31	379,283	13	375,208	18	4,075
秋田県	25	5	38	0	0	5	38
山形県	35	17	328	0	0	17	328
福島県	59	47	230,258	10	190,838	37	39,420
茨城県	44	44	38,824	6	4,893	38	33,931
栃木県	30	19	7,167	0	0	19	7,167
群馬県	38	8	262	0	0	8	262
千葉県	56	33	15,138	5	3,837	28	11,301
埼玉県	70	3	115	0	0	3	115
合計	468	239	726,221	47	624,959	192	101,263

データ：農林水産省農村振興局防災課2011年6月16日集計より

#### 3.2.1.2 ため池データベース

ため池に関するデータベースは、平成7年1月の阪神・淡路大震災を契機とし、紙ベースの「ため池台帳」が電子データ化された「ため池データベース」(以下ため池DBと略す)として、現在、全国約12万個のため池が登録されている。データ項目は、名称、所在地、位置座標、施設諸元等であり、各都道府県でため池台帳代わりに使用される他、リアルタイム気象情報による警報システムや簡易氾濫解析によってため池決壊時の洪水氾濫域予想(ハザードマップ作成)等の機能を有している(谷, 2005)。

ため池DB中、東北地震で暫定法に基づく災害査定が行われたため池を「被災ため池」、無被災(=災害査定のない)ため池を「無被災ため池」と定義した。また、ため池DB中の各ため池は、東北地震時の1kmメッシュ内推計震度で同定した。但し、ため池DBの位置座標等の分析に使用する必要情報は、福島県及び関係農政局に依頼して収集・確認・訂正を行っている。

#### 3.2.2 分析手法

##### 3.2.2.1 計測震度

現在、気象庁が日本国内で地震時に発表している震度は、器械で計測された震度によるもので、かつて専門の観測官が体感し、当時の建物被害の目安となった震度に調合するものである。そのため、人が揺れを感じやすい周波数帯や構造物に影響しやすい周波数帯に着目し、実際に強震計(周波数0.01~100Hzの範囲)で観測された地震波に**Fig. 3**で示すフィルター処理を行い、計測震度算定に用いる加速度を求めている。フィルター処理された3成分加速度は、**Fig. 4 (a)**でベクトル合成され、10秒毎に区分された合計時間0.3秒以上を満たす加速度をもって、以下の計測震度の算定式(1)の加速度とaなっている(気象庁HP)。

$$I=2\log a+0.94 \quad (1)$$

また、Fig. 4 (b) は計測震度と加速度の関係を示したが、同(c)では、同じ加速度  $a$  数値から求まる計測震度でも、 $a$  が含む地震波の周波数で大きく異なり、周波数 0.6~0.7Hz (周期1.67秒) 周波数帯を多く含む地震波ほど計測震度は大きくなる。

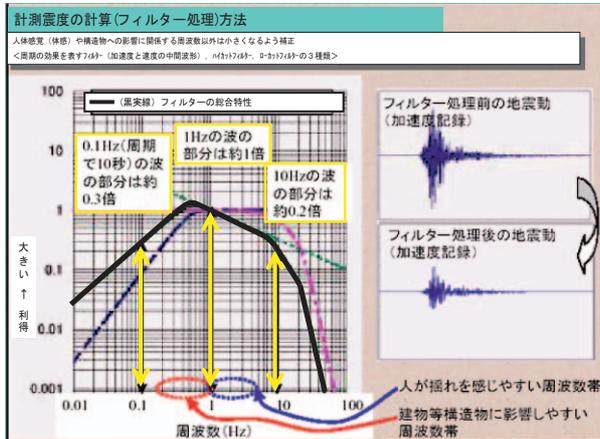


Fig. 3 計測震度の計算方法 (気象庁資料)

Method of measurement seismic intensity (How to filter relevant seismic acceleration)

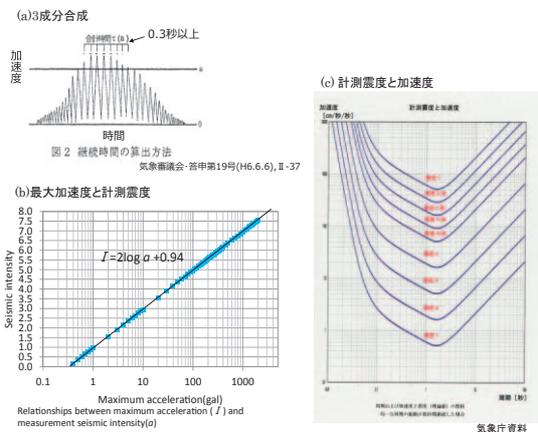


Fig. 4 計測震度と加速度の関係

Relationships between seismic acceleration and measurement seismic intensity

3.2.2.2 推計震度と平均推計震度

1995年の阪神・淡路大震災を契機に全国的な震度観測網の整備が進み、気象庁は2004年から国内で最大震度5弱以上の地震が発生した場合に推計震度分布を公表することとなった。また、2006年以降、全国各地の1 kmメッシュ推計震度データが地震発生から30分以内に得られるようになったことで、ほぼリアルタイムに人口疎密な農村地域でも震度情報が入手可能となった。Fig. 5には推計震度の算出方法の概要を示したが、全国4,300箇所余りの観測点で計測された震度に基づき、それを工学的基盤面と表層地盤の特性で既定された増幅度との関係で周

辺を補間する方法で震度が推計されている (気象庁, 2004)。

国土数値情報では微地形区分と表層地質から13区分され、統計処理によって割り当てられた係数を算出、表層地盤の増幅度が求められている。

本研究では気象庁が震度4以上で公表している1kmメッシュデータを使用し、当該1 kmメッシュ内の小数点一位の推計震度をエリア内の代表震度とし、各ため池推計震度は、所在する1 kmメッシュ震度で同定した。また、一定エリア毎の平均震度 ( $\bar{I}_i$ ) は式 (2) より算出した。なお、同一1 kmメッシュ内に複数の市町村エリアが含まれる場合は、メッシュ中心を含む市町村の該当エリアとした。

$$\bar{I}_i = \frac{\sum_{j=1}^n I_j}{n} \tag{2}$$

但し、 $I_j$ : 1 kmメッシュ  $j$  内の推計震度、 $n$ : 一定エリアのメッシュ数。

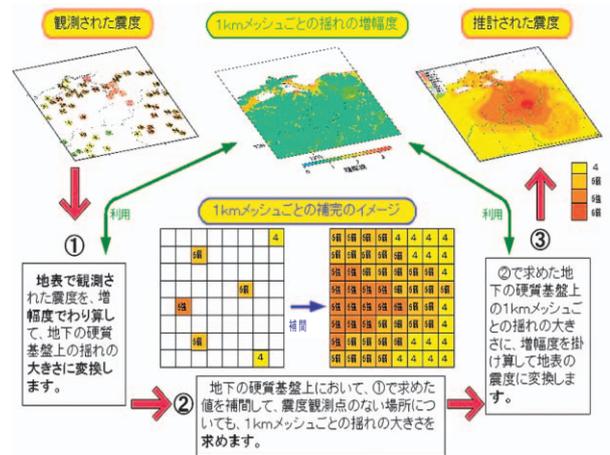


Fig. 5 推計震度分布の算出方法 (気象庁資料)

Method of estimated seismic intensity distribution map

3.2.2.3 被災密度

暫定法に基づき異常な自然災害により一箇所当たり40万円以上の被災を受けた農地・農業用施設等について、被災市町村はその被害額報告を農水省に行う必要がある。ここで農業用施設等とは、農業用ダム・ため池、頭首工、用・排水路、揚水機などのかんがい排水施設や農道等の農業用施設と農地保全施設、農地海岸施設である。これとは別に、主に集落排水施設等の農村地域の生活関連施設も関連して報告される。なお、自然災害被害を表現する際に被害額を用いて市町村単位の被災状況比較は可能であるが、被災総額が市町村の行政区画面積に応じて大きくなるため、市町村毎の被災レベルの比較にはならな

い。

通常、土地改良事業を実施する際は、どれだけの農地が裨益するかを「受益面積」で表し、事業規模を計る指標とされる。また、農地と農業用ダム・ため池、頭首工、揚水機、用排水路、農道等の農業用施設は、一体的な農業生産システムとして地域内に存在している。このことから、各市町村の農地・農業用施設等の被災(ダメージ)レベルを指標化するために、各市町村毎の総被害額を耕地面積で割り戻し、単位耕地面積 (ha) 当たり被害金額を見ることで、どの程度の被災水準となるかを比較検討できるようにした。因みに、各市町村の被災水準の数量化は、式 (3) を定義することで被災密度 ( $D_i$ ) としている。

$$D_i = \frac{C_i}{A_i} \quad (3)$$

但し、 $C_i$ ：市町村  $i$  の被害総額 (円)、 $A_i$ ：市町村  $i$  の耕地面積 (ha)。

### 3.2.2.4 ため池被災率

ため池の被災率 ( $R_d$ ) は、式 (4) により算定するものとし、分母と分子には各々 Table 7 のため池 DB の池数と被災 (= 災害査定) 池数から求める。

$$R_d = \frac{N_d}{N_t} \times 100 \quad (4)$$

但し、 $N_d$ ：ある条件下での被災ため池数、 $N_t$ ：左記と同一条件下の(被災及び無被災)ため池数。

### 3.2.3 分析手順

#### 3.2.3.1 被災密度と平均推計震度

農地・農業用施設等被害に関しては、まず被災市町村毎の被災密度を区分して日本地図上に表示し、震度分布との関係で「見える化」した。さらに津波と地震動で被災形態別に区分し、平均推計震度との関係で被災分析を行った。

#### 3.2.3.2 推計震度とため池被災率 ( $R_d$ )

ため池被災に関しては、まず推計震度分布図上に被災池と無被災池を色分け表示し、震度と被災状況を俯瞰した。また、ため池被災の大きかった宮城県と福島県で、ため池の推計震度毎に  $R_d$  を求めて比較した。さらに、ため池位置が確認できた震度 5 強以上を記録した 7 県分のため池について、推計震度別に  $R_d$  を求め、過去のため池  $R_d$  と比較すると共に、震度及び震央距離とため池被災の関係と比較検討した。

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 震度と被災密度

大きな地震動が発生した場合、その震度に応じて施設に対するダメージが大きくなると言われている。Fig. 6 では、式 (3) により市町村毎の農地・農業用施設等の被災密度を算出し、7 段階に区分してその分布を表示した。被災密度が高いエリアが岩手県、宮城県、福島県、茨城県に集中するなど、Fig. 1 の東北地震の推計震度分布とかなり似かよっていることが分かる。また、被災密度は震央・震源に近い太平洋沿岸域で最も高く、一部、内陸側にも被災密度が高いエリアが見られる。

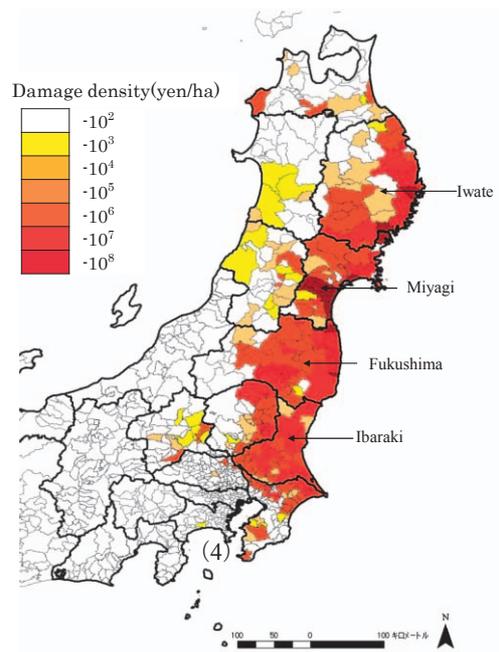


Fig. 6 東北地方太平洋沖地震における市町村別農地・農業用施設等被災密度分布図

Distribution of damage densities to whole agriculture facilities in Tohoku and Kanto regions due to the Tohoku Earthquake

Fig. 7 には、被災市町村毎に、縦軸に被災密度 ( $D_i$ ) と横軸に平均推計震度 ( $\bar{I}_i$ ) をプロットした。この際、沿岸域津波被災市町村を青色三角に、内陸側で地震動被災市町村を茶色四角に被災形態別に表示した。図中では主な被災市町村名を示している。これにより以下のことが明らかになった。

- ・青色三角の津波被災密度を緑色線①、茶色四角の地震動被災密度を赤色線②で近似線を示したが、全体的に大きな震度の市町村ほど、その  $D_i$  が指数関数的に大きくなる傾向がある。これは、推計震度の元となる計測震度が、地震加速度の対数式から求められ、 $D_i$  はこの加速度と相関関係があることを意味する。
- ・同じ震度でも津波被災の  $D_i$  が著しく高く (赤色矢線③では約30倍)、震度が大きくなる程その格差が広がる傾向にある。

- ・津波被災は震央半径200km圏内の市町村 (Aの黄色破線) の  $D_i$  が著しく大きい。
- ・茨城県稲敷市や千葉県神崎町など (Bのオレンジ破線) では、小さい  $\bar{I}_i$  にも拘わらず液状化等によって比較的大きな  $D_i$  となっている。

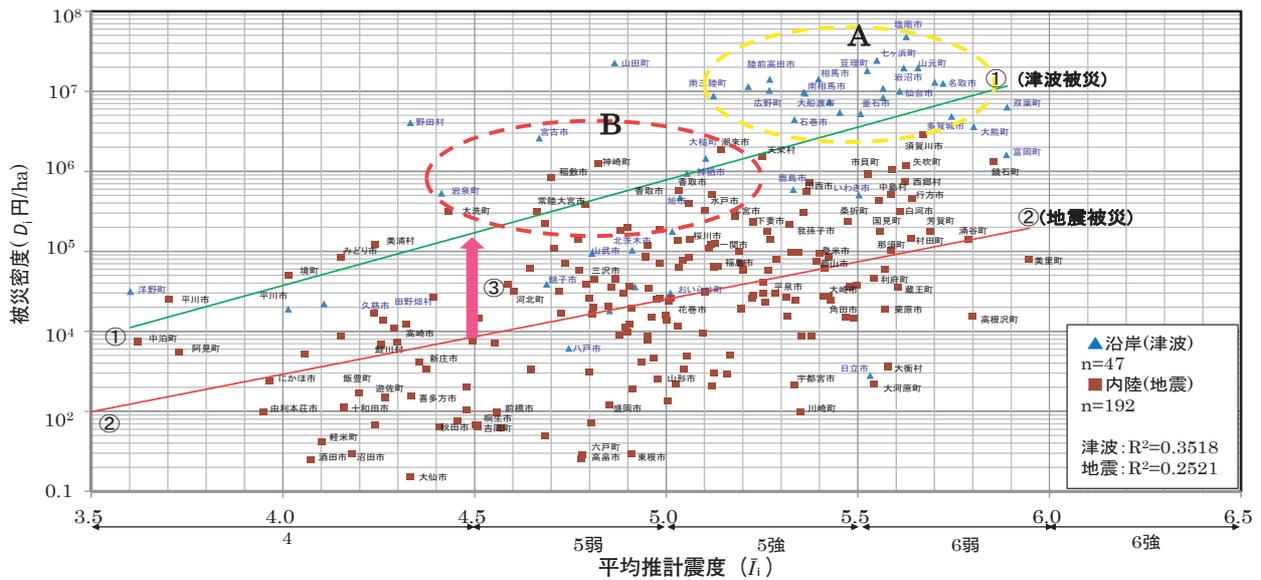
このことから農地・農業用施設等に関する被災は、地震動の大きさ (= 震度規模) に応じてそのダメージが増加すると共に、津波被災の場合は、その震度によって地震動よりも20~50倍に被災レベルが上がる。また、津波被災は震央距離に近く大きな震度であった市町村ほど  $D_i$  が指数関数的に増大したことが分かる。

Table 9 は、東北地震で被災した11県について、被災形態別に農地とそれ以外 (施設関係) に分けてその被害額を区分した。津波被災47市町村だけで被災総額全体の約86%を占め、大震災被害額の大半が津波によるものと推定された。また、農地被災の約98%が津波被災市町村によるもので、津波被災がなかった市町村の施設関係被災は施設被災全体の3割近くを占めている。津波被災地

は、地震動のみの市町村と比較して平均で約43倍の  $D_i$  で、津波被災地も事前に地震動による被災があったと想定され、その割合は各  $D_i$  の概ね2~4% (被災倍数の逆数 (1/50~1/25) 程度と推定される。

3.3.2 震度と農地・施設別被災密度

Fig. 8 は、Fig. 7 で地震動被災密度が上位20市町村の平均震度 ( $\bar{I}_i$ ) と該当各市町村の農地、ため池、水路、頭首工の被災密度 ( $D_i$ ) の関係をグラフにした。20市町村の平均震度の範囲は4.4~5.7で全体的に高い震度レベルにある。工種別に見ると、農地では平均震度が小さい市町村でも液状化によって、平均震度が大きい所より被災密度が大きく、頭首工では通常、基礎部が河床に岩着し、近代の建造でその多くが耐震構造であるなど、20の内、半数の市町村内は被災密度ゼロで、全体的な被災密度も低い。また、水路は震度の大きさに関わりなく被災密度が全般的に大きい。これら3工種と比較して、ため池は平均震度と被災密度に関係が見られる。



注) 対象は東北地方太平洋沖地震で揺れの大きかった東北6県 (宮城, 岩手, 福島, 青森, 秋田, 山形)、関東5県 (茨城, 栃木, 千葉, 埼玉, 群馬) の平均推計震度3.5以上、ha被害額100円以上の市町村。

Fig. 7 東北地方太平洋沖地震の平均推計震度と市町村単位の被災形態別農地・農業用施設等被災密度 Relationships between mean seismic intensities and damage densities during the Tohoku Earthquake

Table 9 東北地方太平洋沖地震の被災形態別被災密度 Comparison of the damages between caused by the earthquake and by tsunami

被害総額	津波被害市町村				単位被災額 ④(③/②)	地震被害市町村				単位被災額 ⑦(⑥/⑤)	倍率 ④/⑦	
	①	個数	耕地面積	被害額		割合(%)	⑤	耕地面積	被害額			割合(%)
被害全体	7,262	47	120,546	6,250	86.1	5,185	192	844,383	1,013	13.9	43.2	
内農地	3,964	42	103,772	3,887	98.1	3,746	106	472,138	77	1.9	234.1	
内農地以外	3,298	46	120,178	2,364	71.7	1,967	191	818,368	941	28.5	114	

注)四捨五入の関係で合計が合致しない場合がある

(単位:億円,千円/ha)

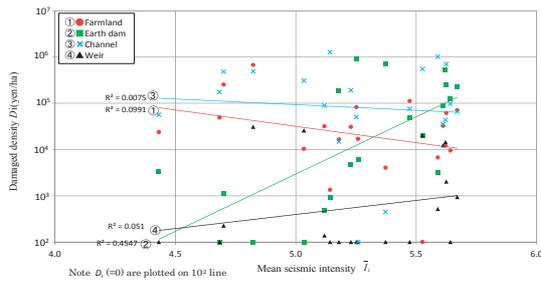


Fig. 8 東北地方太平洋沖地震の平均推計震度と農地・ため池・水路・頭首工の被災密度

Relationships between mean seismic intensities and damage densities for farmland, earth dams, channels and weirs in 20 seriously damaged municipalities due to the Tohoku Earthquake

### 3.3.3 震度とため池被災率 (R<sub>d</sub>)

ため池被災7県のため池DBで位置情報を確認できた池の位置を推計震度分布図上にプロットし、Fig. 9に示した。緑色は無被災を示し、Table 7に示した被災ため池を災害査定額毎に6区分し紫色で示した。因みに、東京電力福島第一原子力発電所周辺は、原発事故により平成24年4月時点で災害査定が未実施のため、関連地域内のため池は被災池表示がない。通常、震央に近いほど地震動被災が増大するが、東北地震被災では必ずしもその形態になく、震央から400km以上離れた群馬県下でも複数のため池が被災しているのに対し、震央半径200km圏内で無被災のため池が数多く存在している。さらに被災ため池は、比較的強震度の特定エリアに集中しており、宮城北部、仙台平野南部の海岸部から福島県相双域へ延びる区域や福島県中域エリアで被災池が顕著である。

なお、第IV章では、福島県中域の被災集中エリアに絞って被災分析を行う。

被災数が多かった宮城・福島両県のため池について、ため池サイトと1kmメッシュ推計震度を照合し、小数点一位推計震度毎に被災(災害査定有り)をピンクと無被災(災害査定なし)を宮城県緑色、福島県を青色に分けてため池数を集計(但し、原発事故関連で被災調査が実施されていない市町村域分のため池は除外)し、棒グラフにため池震度毎のR<sub>d</sub>をオレンジ折線にしたのがFig. 10である。この図から同じ地震に対し両県は異なる被災レベルであったと見ることが出来る。即ち、震央に近い宮城県側は福島県よりも震度が全般的に大きく、その大部分が震度5.4から5.7の範囲にあり、最多数は震度5.5であった。一方、震央から離れて東西に広がる福島県では、震度別ため池数は全体的に大きなピークもなく、震度は概ね5.0から6.1の範囲にある。

宮城県内被災ため池は震度4.8から、福島県では震度4.9から始まり、宮城県の震度別R<sub>d</sub>曲線は全体的にフラットで明確なピークが見られず、福島県は震度5.7と6.0にピークが見られ、最高R<sub>d</sub>は震度6.0で20%である。全体的なため池震度は宮城県側が大きい、福島県内平均R<sub>d</sub>は10%超と宮城県5%よりも高率である。

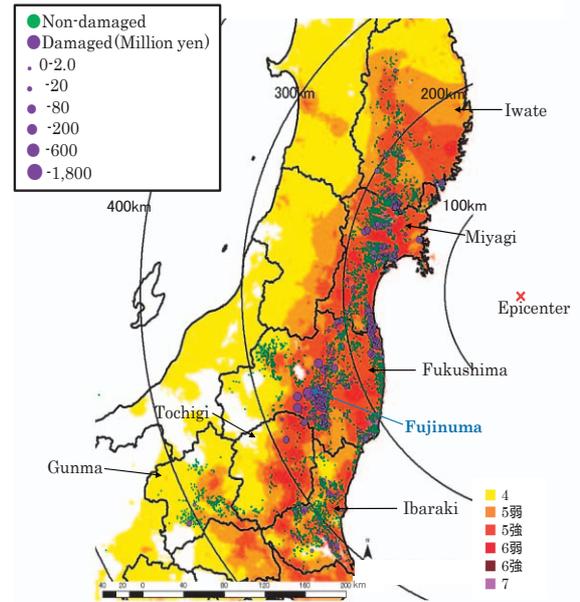


Fig. 9 東北地方太平洋沖地震におけるため池の被災分布  
Locations of damaged and non-damaged earth dams in Iwate Miyagi, Fukushima, Ibaraki, Tochigi and Gunma Prefecture due to the Tohoku Earthquake (Based on Restoration Assessment)

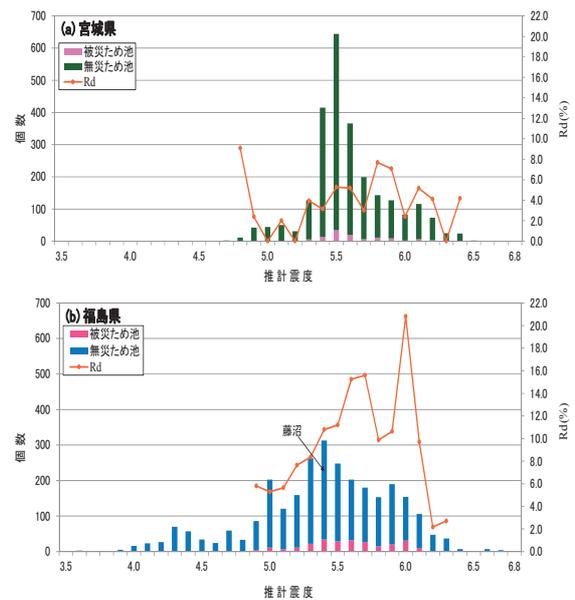


Fig. 10 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内ため池の推計震度と被災率 (R<sub>d</sub>)

Relationships between seismic intensities estimated at each dam site and damages of earth dams (a) Miyagi Pref., (b) Fukushima Pref. by the Tohoku Earthquake

Fig. 11は宮城・福島両県のため池被災市町村毎に、被災ため池総数を横軸に、被害総額(災害査定総額)を縦軸にして関係を見たものである。ため池一箇所当たりの被害額は、近似線の傾きから被災ため池数が多いところほど大きくなる傾向が見られ、被災ため池一箇所当たり被害額で見ても、福島県内の方が宮城県よりも全体的に大きなダメージを受けていたことが理解出来る。

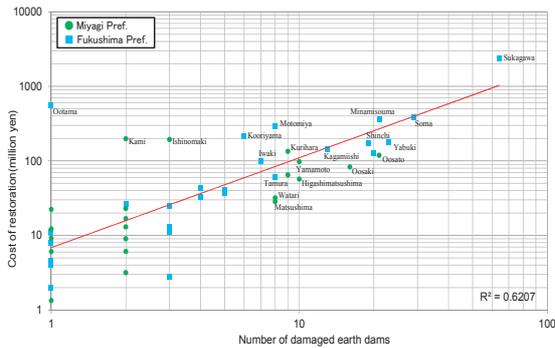


Fig. 11 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内市町村別被災ため池数と災害査定総額

Relationships between number of damaged earth dams and total costs of restoration of each municipality due to the Tohoku Earthquake, in Miyagi and Fukushima Prefecture

3.3.4 推計震度及び震央距離と被災率 (R<sub>d</sub>)

ため池毎の推定震度同定に使った1kmメッシュについて、東北地震発生時の両県の震度別メッシュ数及びため池数を各々 Fig. 12 に、また Fig. 13 には、県毎の累積度数で比較した。西寄りの会津地方を含む福島県域は震央距離の範囲が広く、震度毎のメッシュ数やため池数は宮城県側よりも均等化されたものとなる。但し、震度6弱(震度5.5以上)を超える範囲では、福島県内ため池数が宮城県よりも多い場合が増えてくる。これを Fig. 13 の累積度数で見ると、福島県は震度メッシュ5.0以下が4割に対し、宮城県は2割未満、震度5.5以上では福島県内が2割未満に対し、宮城県は4割未満で、宮城県全域では大きな強震度だったことが確認できる。

一方、宮城県内のため池は震度5.0以下が3%に対し福島県は22%で、震度上昇に伴って双方の累積度数は急速に縮まり、震度5.6の累積度数68%で交わっている。即ち、両県間に震度5.0以下で20%近くあった累積度数の差が、震度5.0から急速に縮まり、震度5.6以上でほぼ同程度となった。その結果、震度6.0以上の強震度ため池の相対度数は両県間に差がなく、数的にはむしろ福島県内が多かったことになる。

推計震度メッシュとため池震度の比較から、両県のため池は共により大きな強震度メッシュに属し、例えば、福島県の累積度数75%のメッシュ震度が5.4に対し、ため池震度は5.7でため池が比較的高い震度エリアに分布していたことが分かる。その理由は、ため池がより揺れ易いとされる水田地帯に分布することによると考えられる。

通常、震央に近い程、震度が大きくなると言われるが、前2図から、震央から遠いため池でも大きな震度であったことが分かる。Fig. 14 では、宮城・福島両県観測所の計測震度を縦軸と震央距離を横軸にして関係を見た。宮城県内では震央距離120kmから210kmの範囲にあり、1観測点を除く全ての観測点が震度5.0以上で、全体的に震央距離に近いほど大きな震度であった。一方、福島県

は最短距離170kmから330kmまで広範囲にまたがり、震度と震央距離の関係は緩やかな負の相関が見られと共に、震央距離250km前後の福島県中・南域観測所の計測震度でスポット的上昇が見られる。また、当該エリア計測震度は、宮城県内最大級の震度水準までに達していたことが分かる。

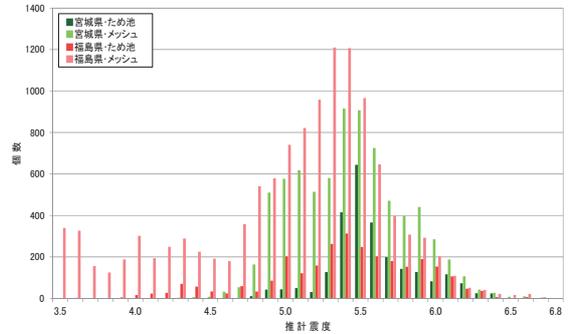


Fig. 12 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県の推計震度毎メッシュ数とため池数

Relationships between number of 1km-mesh and number of earth dams based on estimated seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the Tohoku Earthquake

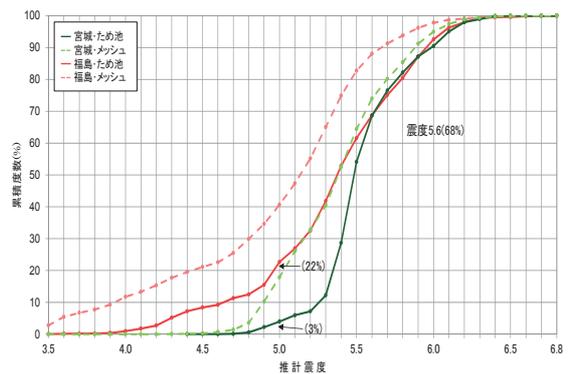


Fig. 13 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県の推計震度別メッシュ及びため池の累積度数

Cumulative curve on number of 1km-mesh and number of earth dams based on estimated seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the Tohoku Earthquake

Table 10 では、東北地震のため池被災6県(岩手県を除く)に埼玉県を含めた7県内のため池について、推計震度毎に被災と無被災に分けてそのR<sub>d</sub>を整理した。これを推計震度の棒グラフとR<sub>d</sub>の折線で図示したのが Fig. 15 である。推計震度分布では震度3.5以上のメッシュデータが公表されるため、図表中のため池推計震度も3.5から始まっている。ため池数は推計震度5.5をピークに最大推計震度6.8まで分布していた。R<sub>d</sub>は震度4.1以下は0であるが、震度4.2で被災が発生しているが、震度4.8まではR<sub>d</sub>が1%未満であった。震度4.9からR<sub>d</sub>は3%を超え、震度5.5までは10%未満であった。また、震度5.6~6.0はR<sub>d</sub>が10%以上に上昇・推移し、震度6.0でR<sub>d</sub>=17%でピークとなった。震度6.1超ではR<sub>d</sub>が減

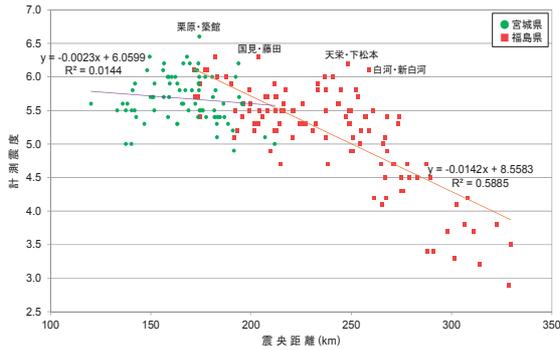


Fig. 14 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内観測所震央距離と計測震度

Relationships between measurement seismic intensity and distance from epicenter in Miyagi and Fukushima Prefecture during the Tohoku Earthquake

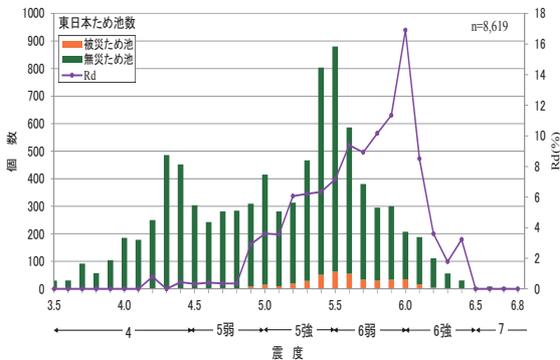


Fig. 15 東北地方太平洋沖地震のため池推計震度と Rd の関係 Relationships between estimated seismic intensity and damaged earth dams in stricken prefectures during the Tohoku Earthquake

少傾向となり、震度6.5超は Rd = 0%である。つまり、推計震度は概ね震度5弱以上から安定的に Rd が発現し、震度上昇に伴って Rd は一定の確率で上昇する。

また、本来は震度6.1以上でさらに Rd は上昇するはずが、震度6.0から6.1に上がった段階で Rd が半分以下になったように、震度が大きいだけで Rd が必ず高くなるとは限らないことを示している。但し、仮に震度6.5の Rd が統計的確率で30%と仮定した場合、Table 10 から4個のため池が全て無被災で Rd = 0%となるには、式 (5) から24%の確率で発生し得る現象であり、有意水準として棄却できるレベルでない。なお、震度6.1以上でなぜため池 Rd が低下傾向になるかは、第IV章以降で検討する。

Table 10 東北地方太平洋沖地震の推計震度別ため池数

The number of damaged and non-damaged earth dams based on estimated seismic intensities during the Tohoku Earthquake

震度	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	計
被災ため池	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	1	1	1	1	9	15	10	19	29	51	63	55	34	30	34	35	16	4	1	1	0	0	0	0	414
無災ため池	30	31	92	57	104	186	178	248	486	450	303	242	280	283	300	400	271	294	438	753	817	531	347	265	266	172	172	107	55	30	4	8	4	1	8,205
合計	30	31	92	57	104	186	178	250	486	452	304	243	281	284	309	415	281	313	467	804	880	586	381	295	300	207	188	111	56	31	4	8	4	1	8,619
Rd(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	1.2	0.7	0.8	0.5	0.5	3.2	3.8	3.4	6.3	6.2	6.3	7.2	9.4	8.9	10.2	11.3	16.9	8.5	3.6	1.8	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8

注ため池波、宮城、福島、茨城、群馬、栃木、千葉、埼玉県の7県分を集計

$$(1 - 0.3)^4 = (0.7)^4 = 0.2401 \quad (5)$$

Fig. 16 では、東北地震の7県内ため池の推計震度と震央距離の関係を被災・無被災池に区別してプロットした。2つの右下がり補助線は、マグニチュードと震央距離から震度を求める河角の推定式 (大崎, 1983) で、M = 8.5とM = 8.0で比較した。ため池推計震度は、震央距離の関係で概ねM = 8.5推定ライン上側にあるが、福島県内で震央距離250km前後と茨城県内300km超では、M = 8.5ラインよりかなり上方で被災池が見られた。また、震央から離れたため池ほど、推計ラインより上方にある傾向がある。即ち、東北地震のような数百kmにも及ぶ広大な震源域を有する巨大地震では、複数のM7クラスの強震動生成域によって震央から離れた場所でも大きな震度が生ずる場合がある (Asano, 2012)。

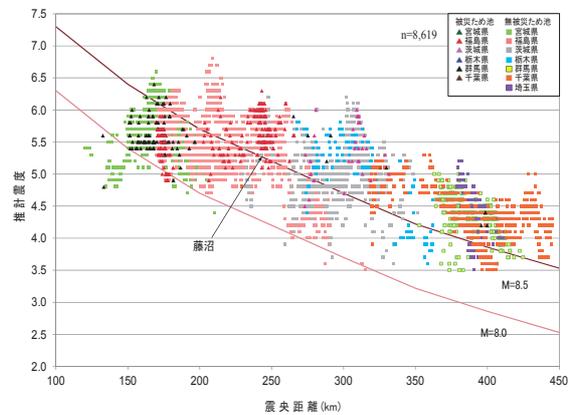


Fig. 16 東北地方太平洋沖地震のため池震央距離と推計震度の関係 Relationships between estimated seismic intensity and distance from the epicenter to damaged and non-damaged earth dams in stricken prefectures during the Tohoku Earthquake

そのため、M8クラス以上の巨大地震の場合、震央距離から被災ため池を想定するよりも、推計震度から Rd を想定する方が合理的である考える。Fig. 17 はFig. 10の宮城・福島両県の推計震度の Rd を水色と赤線で、Fig. 15の被災7県の震度の Rd を黒線で、宮城・福島両県の被災45市町村 (但し、域内のため池数が最低10個以上) 毎のため池平均推定震度と Rd 及び (谷, 2005) の3地震の市町村計測震度と Rd (但し、宮城県北部の一部データは削除) を合わせてプロットしたものである。Fig. 17から明らかなように、市町村単位の方が Rd のバラツキ

は大きく、全国の方が県単位よりも  $R_d$  が平均化され、カーブが滑らかである。このことから、 $R_d$  は震度によって上昇するが、母数となるため池数が少ないと各エリア内身体の性向が  $R_d$  のバラつく要因になっていると考えられる。

また同図で東北地震とは異なる3地震との関係で見ても、地震マグニチュードの違いによる震度と  $R_d$  間の傾向の違いは確認されず、基本的に推計震度でため池  $R_d$  を確率的に評価することは可能であると考えられる。

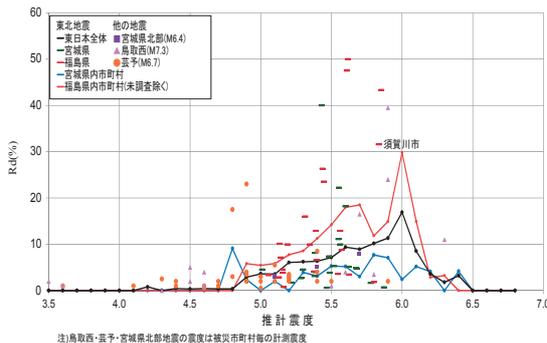


Fig. 17 ため池の市町村別平均推計震度と被災率の関係  
Relationships between estimated seismic intensity and damage ratio of earth dams in stricken areas during the Tohoku Earthquake

### 3.4 まとめ

第三章では、まず農地・農業用施設等の地震動被災について、新指標として市町村単位に被災密度 ( $D_i$ ) と平均推定震度 ( $\bar{I}_i$ ) を定義し、震度と被災の関係を考察した。次にため池の被災率 ( $R_d$ ) を定義し、宮城・福島県内ため池について推計震度を同定し、その震度毎に  $R_d$  を求め、震央距離との関係を含めて考察した。最後に過去の地震動被災ため池  $R_d$  と東北地震の  $R_d$  を比較して、以下のことが明らかになった。

1) 被災密度  $D_i$  と平均推定震度  $\bar{I}_i$  の関係は、 $\bar{I}_i$  の増加によって  $D_i$  が数級的に増加していた。また、 $D_i$  は津波と地震動の被災形態毎に異なる関係を有し、津波  $D_i$  は、地震動  $D_i$  の概ね40倍になると推定された。

なお、推定震度の基となる計測震度は、地震加速度の対数式から求められ、 $D_i$  はこの加速度との相関関係を意味していた。

2) 地震動の  $D_i$  の上位20市町村の農地、水路、ため池、頭首工で各々  $D_i$  を求め、当該  $\bar{I}_i$  と比較したところ、両者の関係は職種間に相違が見られ、特にため池は震度と被災に関係が見られた。

3) 東北地震のため池  $R_d$  は推計震度5弱から発現し、震度の増加に伴って増加する。また、地域毎に  $R_d$  発現上の相違が見られる。例えば、

- ・震度は宮城県内が全般的に大きいが、福島県内のため池  $R_d$  は宮城県の約2倍である。
- ・被災レベルは、被災ため池数が多い市町村ほど池個々の被災レベルが高い。

・震度とため池  $R_d$  の関係は、宮城県内では明確な上昇傾向は見られないが、福島県内では震度に伴い  $R_d$  が大きくなり、震度6.0で概ね20%に達した。

・東北地震に関係した約8,600個のため池では、 $R_d$  は概ね震度5弱から発現し、5強に近づくに伴い顕著な  $R_d$  の上昇が見られ、震度6.0で  $R_d = 17%$  となった。

4) 東北地震でも震央から離れるに従って推計震度は小さくなる傾向であるが、 $R_d$  は必ずしも震央距離が近いほど増加するとは限らずない。また、福島県中地方等では、震央から多少離れた特定エリアに強震度が発現し、ため池被災が激化した。

以上から、ため池毎の地震時危険度は推計震度によって評価が可能で、震央距離を用いなくとも被災想定は可能である。

## IV 地形・地質とため池被災

### 4.1 概説

第三章では、ため池地震動被災が、推計震度によって危険度評価が可能であることを明らかにした。しかし、同じ東北地震でも宮城・福島両県内のため池推計震度が同程度であるのに、両県の  $R_d$  には大きな差があり、推計震度だけで地震動被災は説明できないことも分かった。また、過去のため池地震動被害研究では、震央に近いほど  $R_d$  が大きくなる傾向であったが、東北地震では震央に近い宮城県よりも福島県内の  $R_d$  が大きく、距離400kmの震度4.2でも被災事例が生じている。そのため、ため池  $R_d$  を増加させる震度は、震央に近いだけで大きくはならない。

この章では、震度増減の要因となる地形・地質に着目して、 $R_d$  との関係を検討する。この場合、震央距離が地形・地質との関係で震度にどのように影響するか、また、震央方向と地形（特に堤軸方向、傾斜方向等）の関係が  $R_d$  にどう影響するかについて検討する。

#### 4.1.1 地震動被災と地形・地質

地震動による被災は通常、地面の揺れによって引き起こされる。これを（伯野，1992）は、地盤構造や地形が地震動に影響を及ぼすとして、硬地盤に近い軟弱地盤、盆地、崖っぷち、傾斜地などがよく揺れるとした。我が国のため池は水田の用水源として築造されるため、その大多数が揺れ易い地盤条件下にある。過去のため池地震動被害研究では、（秋葉ら，1941）が、「山地と平地の境で被害が多い」と報告以降、その後の研究でも地形変化に着目した被災現地調査が行われ、ほぼ同様な結果であった。これは1995年兵庫県南部地震の「震災の帯」で「硬軟の地盤が錯綜する地層では地盤の揺れが増幅する」（気象庁，2009）とした結論と符合するもので、ため池被災要因としても検証が必要である。

近年、(小林ら, 2002; 藤井ら, 2005) がため池 DB から位置と地形・地質情報を重ね合わせ、地震動被災との関係を見る研究が行われているが、ため池サイトの地盤評価が相対関係(地盤が岩盤上にあれば岩盤と同定すること)では、地形境界(硬軟地盤の変化等)部のため池被災は説明できない。つまり、ため池の属する地盤メッシュと隣接地盤メッシュ間で硬軟の質的变化を見れば地震揺れ増幅(=震度の増加)との関連を見ることができる。仮に、硬地盤メッシュ(推計震度は低めに評価される)内のため池でも、実際のサイト震度が境界部で大きくなれば、 $R_d$ も増大すると考えることができる。

本章では、広域的な地形・地質による震度の変化について、ため池の推計震度、震央距離、堤軸方向及び  $R_d$  の関係から考察する。

#### 4.1.2 震央距離とため池地震動被災

第II章で述べた通り、過去のため池地震動被害研究では、震央距離を遠近区分して統計的に  $R_d$  を求める場合と震央距離を説明変数にして  $R_d$  の関係を見るものがあった。何れの場合も、震央に近いほど  $R_d$  が上がる傾向ではほぼ一致した結果であった。しかしこれは、「震央に近いほど、震度が大きく  $R_d$  は上昇する」を言い換えただけで、地震発生後に震央位置が地図上に明示される理由が、「震央距離に近いほど震度が大きい」ことを、単純な前提としているからである。かつては震度に関する十分な情報が無い中では、大概の揺れの大きさが想定できて良かったが、実際は震央から離れた場所でも大きなため池被災が見られ、現在は推計震度分布の有効性が認知されてきている。つまり震央距離とため池被災については、推計震度をベースに検証・整理を行う環境が既にできてきたと考えるべきである。

本章では、第III章で比較した宮城・福島両県内のため池位置を震央距離との関係で検討すると共に、ため池が2ヶ所で決壊する等、甚大な被災が生じた福島県中地方を対象に震央距離と震度の関係を検証する。

#### 4.1.3 堤軸震央方向角度と地震動被災

ため池堤軸の震央方向角度と地震動被災について、(秋葉ら, 1941) は男鹿地震を事例に「無関係」としたが、その後の研究では、「何らかの関係を有する」が大勢を占めている。どちらの信憑性が高いかの検証は、震央位置に対してどの方向の堤軸が高被災リスクとなるかであり、ため池地震動被災に関しては重要な危険評価要素である。特に有意な関係があれば、堤軸方向を被災リスク要因として評価し、それに応じた災害時緊急対応が可能となる等、合理的なため池緊急点検が図れることになる。

本章では、福島県中地方のため池を対象に、堤軸震央方向角度を定義・データベース化し、位置情報を重ね合わせた地形図や推計震度及び  $R_d$  によって、複合的に検討する。

## 4.2 分析方法

### 4.2.1 地形と傾斜

ため池 DB 上には、地形、地質に関して山麓、台地、平地等で区分される「地形」、岩類、砂類などの「地表地質」及び硬岩、砂質土、粘土などの「基礎地盤」の3項目のデータが登録されている。入力データは地形・地質区分図からため池毎に照合可能であり、現地踏査を前提としたデータではない。例えば、ため池サイトが同じ山麓の分類でも、平地に近い所なのか、或いは山地内なのか、傾斜の向きや勾配大きさ等、記載データだけでは判断できない。あくまでもため池が位置する場所の区分図上の属性を示すだけで、隣接地との関係性や地形情報は得られない。つまり過去の地震動被害研究で、「山地と平地の境」が揺れやすい場所であったとしても、周辺との関係性を有しない点的な属性だけであり、これによって揺れやすい地形は判断できない。

そのため、ため池 DB で位置座標データ(地球測地系)を各種地図情報と重ね合わせて複合的に観察することで、山地と盆地間の震度分布、地形と堤軸方向、地形と被災ため池の分布などの関係性分析が可能となる。本研究上の、地図情報は、衛星画像(Arc-GIS Base Map)、シームレス地質図(防災科研)、推計震度分布(気象庁)、10DEM(国土地理院)等を分析に使用した。

### 4.2.2 ため池震央距離と緯度・経度

震央距離とマグニチュードから被害発生範囲の予測・想定が防災・災害関係で一般的に行われることから、(谷ら, 1998b) はため池被害事例から被害範囲を限界震央距離で推定した。今日、全国何処でも瞬時に震度分布が判るようになると、震央距離と震度分布が必ずしも整合した関係にないことは明かで、特にM9.0を記録した東北地震では強震度域が震央からの同心円というより真鱈模様であり、ため池被災集中箇所も震央距離とは連動していなかった。

Fig. 9の被災ため池分布図では、緯度・経度の位置で図示したが、東西方向或いは南北方向に震央距離何kmで被災池が集中しているか、必ずしも明確ではない。本章では、各ため池の緯度・経度座標と震央距離を使って、被災と無被災を色分けして地図情報上に図化することで、地形・地質、推計震度、ため池  $R_d$  等の関連性を検討する。

### 4.2.3 ため池堤軸震央方向角度

福島県内各ため池位置座標(世界測地系)は、グーグルアースの衛星画像を用いて確認し、Fig. 18から堤軸左右兩岸の緯度経度を求め、左岸部から震央までを各ため池の震央距離とした。

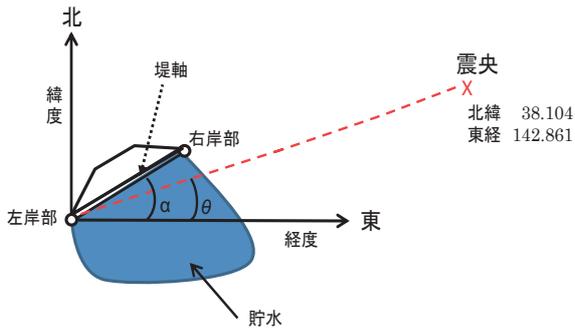


Fig. 18 ため池堤軸の震央に対する角度  
Angle of dam axis with respect to the epicenter

また、ため池  $i$  堤軸の震央方向に対する角度  $\omega_i$  は、式 (6) 及び (7) より求めることができる。

$$\omega_i = \alpha_i - \theta_i \quad \alpha_i \geq \theta_i \text{ の時,} \quad (6)$$

$$\omega_i = 360^\circ + (\alpha_i - \theta_i) \quad \alpha_i < \theta_i \text{ の時.} \quad (7)$$

ここに、 $\alpha_i$  : ため池  $i$  の堤軸と東西方向軸に対する交角、 $\theta_i$  : ため池  $i$  の東西方向軸と左岸部への震央からの交角である。

### 4.3 結果と考察

まず、震央に近い宮城県内の被災ため池分布を緯度・経度、震央距離、地形、推計震度等を使って複合的に検討し、被災発生エリアの特徴を考察する。次に福島県内の被災ため池分布を宮城県と比較検討し、最後に東北地震で被災ため池が最も集中した福島県中地方を対象に詳細な被災分析を行う。

#### 4.3.1 宮城県内の被災ため池分布

宮城県内ため池の緯度・経度分布を、東北地震の被災池と無被災池を地域ブロック毎に色分けして Fig. 19 に示した。

県北域の被災池の大多数が北緯38.40~38.50及び38.60~38.70付近で東西に並んでおり、県南域は北緯37.90~38.00の範囲で福島県相双域まで連なっていた。宮城県域に対する震央位置は、概ね仙台南部(山元町付近)と同じ緯度であり、県北域のため池から東南東方向にある。

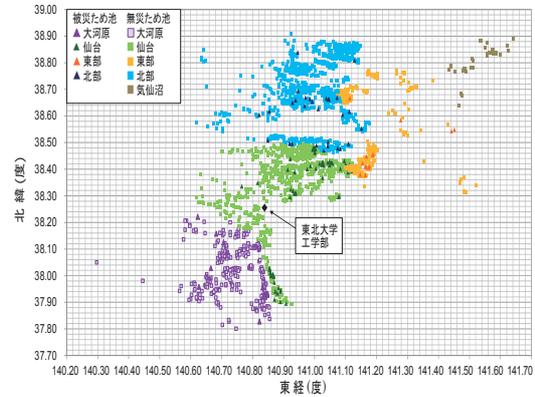


Fig. 19 東北地方太平洋沖地震の宮城県内被災ため池の緯度・経度分布  
Latitude and longitudinal distribution of damaged earth dams in Miyagi Prefecture during the Tohoku Earthquake

Fig. 20 には、宮城県内の推計震度分布及び地形図(衛星画像)上に被災黒●と無被災白○に分けてため池位置をプロットした。左図でより赤く見える部分が震度6強のエリアで、最大震度7を記録した栗原市築館はほぼこの中心にある。震度6強エリアは震央距離160~180kmの範囲にあり、震央距離が130km前後の牡鹿半島よりも震度がかかなり大きい。また、震央距離半径150km以内で震度5弱~5強と震度が低めのエリアは、右の画像より山地であることが確認できる。ため池の被災分布では、必ずしも震度6強エリアに被災池が集中している状況ではなく、仙台市内北部及び亘理・山元地区の震度6弱エリアに多数の被災池が確認できる。

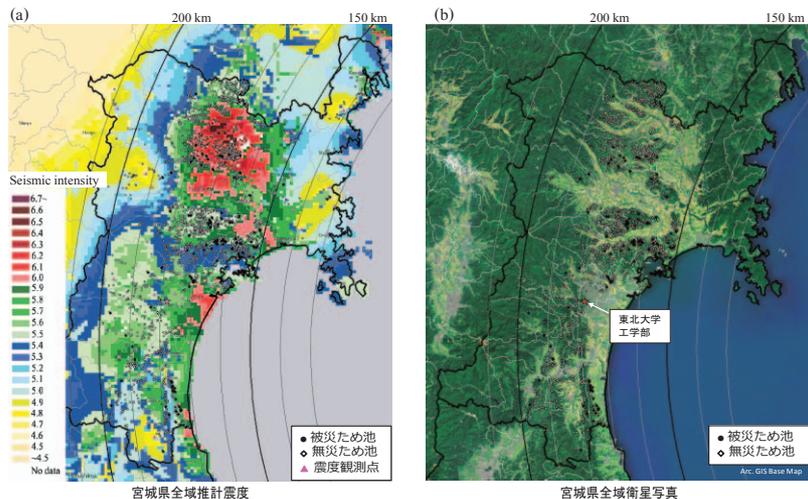


Fig. 20 東北地方太平洋沖地震の宮城県内推計震度と被災ため池分布

Distribution of estimated seismic intensity during the Tohoku Earthquake and damaged & non-damaged earth dams in Miyagi Prefecture

Fig. 21 には、震度6強エリアのシームレス地質図 (a) と古図 (b)を示したが、かつてこのエリアは大きな沼地で、元来揺れ易い軟弱な地盤からなり、そのため推計震度が周辺よりも高くなっている。ここから推計震度6強以上でも、ため池  $R_d$  が必ず大きくなるとは限らないことが分かる。

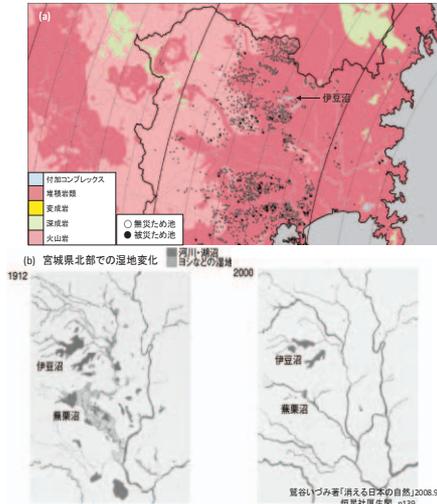


Fig. 21 宮城県北部の湿地変化 (古図)  
Transformation from swamps in Northern Miyagi Prefecture

宮城県内ため池の震央距離と経度及び緯度関係について、横軸に経度、縦軸に震央距離として Fig. 22 (a) にプロットした。また、Fig. 22 (b) では緯度を縦軸に、震央距離を横軸とした。被災池が震央距離150~180kmの範囲で分布し、特定経度に偏った形跡は見られず、単純に西方向へつながっている。Fig. 22 (b) では Fig. 19 の分布図と類似し、大きな震度が有った県北部域の被災ため池は、震央の緯度位置に対して南北に分かれて平行に分布している。また、ため池プロットがない空白部分は、仙台市街地であるが、地形の全体的な傾斜面が、震央に正対する向きにないことが分かる。

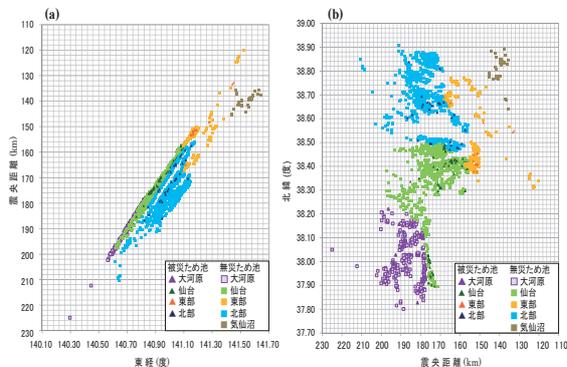


Fig. 22 東北地方太平洋沖地震の宮城県内ため池の震央距離と緯度・経度位置  
Relationships between distance from epicenter and longitudinal (a) & latitude (b) location of earth dams in Miyagi Prefecture

### 4.3.2 福島県内の被災ため池分布

Fig. 23 では、福島県内ため池の緯度・経度分布を、被災池と無被災池を地域ブロック毎に色分けして示した。但し、被災池のない南会津地方は含んでおらず、被災池が殆ど無い会津地方は、県中地方に隣接した関連部分のみを表示した。なお、相双地方南部は原発事故で災害査定未了のため、被災池表示がない。

図から県内被災ため池集中域は、県北東部の相双地方と県中・県南地方に見られ、特に被災池数の半分以上が県中地方に集まっていた。県南地方の被災池は、県中地方で被災池が集中したエリアに隣接して分布しており、被災集中エリアとしてはほぼ一体を成していた。同図に決壊3ため池の位置を示したが、県北地方の青田新池は県中地方に隣接し、被災集中域にも比較的近い場所にあった。

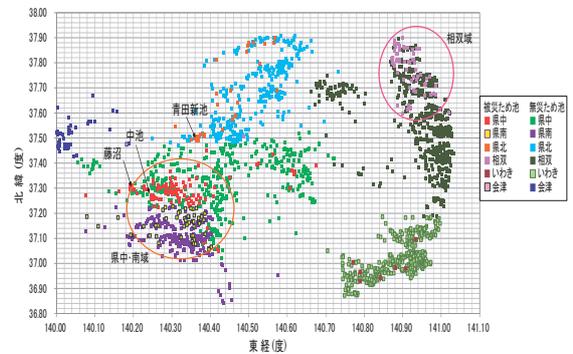


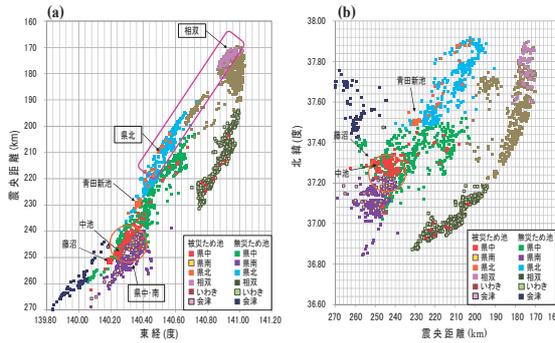
Fig. 23 東北地方太平洋沖地震の福島県内被災ため池の緯度・経度分布  
Latitude and longitudinal distribution of damaged earth dams in Fukushima Prefecture during the Tohoku Earthquake

Fig. 24 では、福島県内のため池について Fig. 22 の宮城県と同様に、震央距離と経度及び緯度の関係を示した。Fig. 24 (a) では、被災池が縦軸の震央距離170kmから230 kmのピンク線で囲った範囲に、相双地方北部と県北地方が経度上で並んでおり、同様に200kmから270kmの範囲でいわき地方から県中地方、県南地方、会津地方へ被災池が並んでいる。また、県中及び県南地方では震央距離240kmから250kmの範囲 (オレンジ線) で被災池の集中が際立つようになった。

Fig. 24 (b) は Fig. 23 と多少似た分布模様であるが、宮城県の Fig. 22 (b) が震央と緯度的に並んでいたことに比較し、県域全体の緯度が低いため、震央距離と連動した傾きを持った分布になっている。また、北緯37.10°から37.30°の範囲 (オレンジ線) に県中・県南地方の被災池が集中し、相双地方では震央距離が10km前後の範囲に北緯37.65~38.90°で被災集中が見られ、低緯度 (相双南) では震央からさらに10km離れていた。

Fig. 24 の2つの被災集中域は Fig. 23 と比較して分布域の凝集度が高くなっている。このことから、震央から

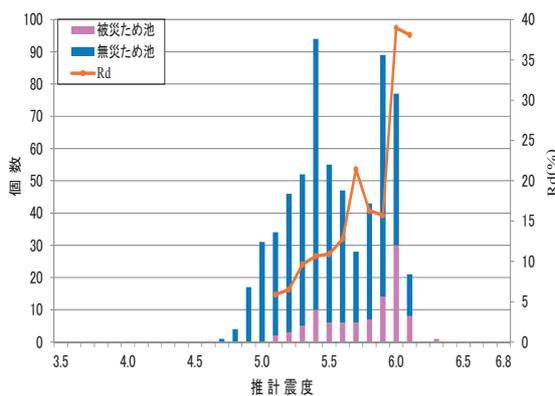
一定距離の場所には、震度と共にため池被災を増加させる何らかの地形・地質的要因を想起できる。



**Fig. 24** 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の震央距離と経度及び緯度  
Relationships between distance from epicenter and location of earth dams in Fukushima Prefecture(Left (a): longitudinal, Right (b): latitude)

4.3.3 福島県中地方の被災ため池分析

被災ため池数が最も多かった福島県中地方を見るために、東経140.00から140.80度までの東西70.9km、北緯37.00から37.50度までの南北55.7kmの範囲に区切ってため池の被災状況を整理した。Fig. 25 から福島県中地方では、推計震度5.4と5.9にため池数のピークが見られ、震度は大きく二つに分けることができる。一つは、山地で比較的低い震度、もう一方は盆地内で高い震度である。被災池数は震度増大に伴って増加し、 $R_d$ は震度6.0で40%近くに達していた。また、震度5.8~5.9で $R_d$ が一旦低下しているが、これはFig. 10 (b)の $R_d$ 低下と同じ震度であり、県中域の当該状況が反映したものと考えられる。

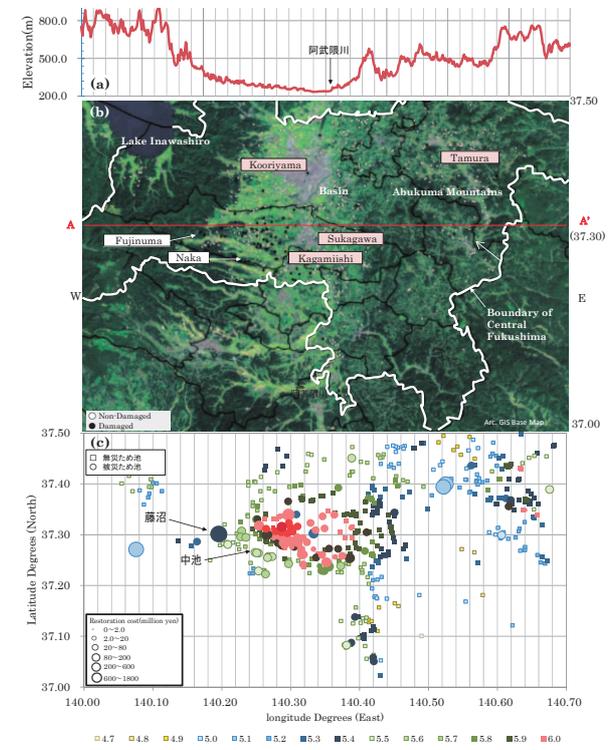


**Fig. 25** 東北地方太平洋沖地震の福島県中地方ため池の推計震度と被災率  
Relationships between seismic intensities estimated at each dam site and damages of earth dams in Central Fukushima due to the Tohoku Earthquake

Fig. 26 は、福島県中地方の被災ため池分布である。図 (b)には衛星画像上に被災池を黒●、無被災池を白○でプロットし、藤沼湖がある A-A 断面を国土地理院の10

mDEM から地形標高を図 (a)に示した。また図 (c)では被災池を災害査定額区別別に、○印の大きさと査定額を区分 (但し、小さな□は無災池) し、さらに○の中を推計震度毎に色分けした。赤色系は震度6強で、大きな○印が集まる北緯37.3度、東経140.30度のエリアに被災池が集中していた。多数のため池が深刻なダメージを受けたエリアは、狭い範囲に集中しており、特に震度の高いエリアは、その大半が水田に隣接する傾斜地形となっている。

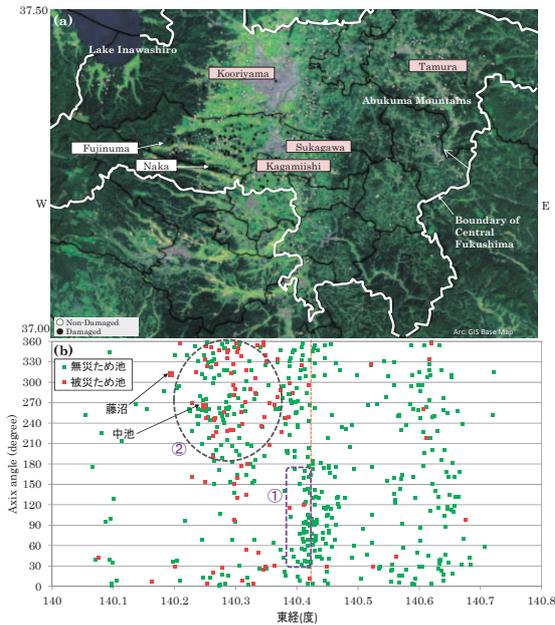
Fig. 26 全体を見比べると、東側の阿武隈山地内では震度5強レベルで被災池も少なく、標高が下がって郡山盆地に入り阿武隈川を越えた所から地形は東に面して傾斜している。震度は6弱から6強に上昇するに伴い、被災池の数も急激に増え、藤沼湖も中池も赤い部分の周辺にある。



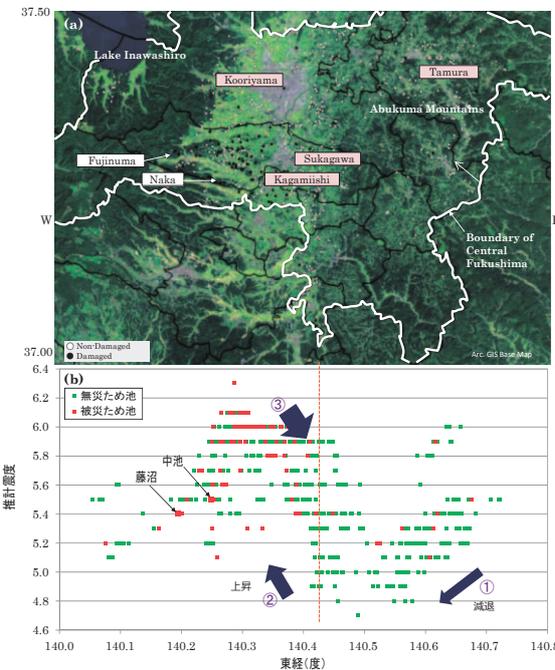
**Fig. 26** 東北地方太平洋沖地震の福島県中地方ため池の被災分布  
Relationships between locations of earth dams and damages estimated from restoration costs in Central Fukushima by the Tohoku Earthquake

Fig. 27 (b) は、ため池経度位置を横軸に、縦軸に震央に対する堤軸角度 $\omega_i$ を、赤色を被災池、緑色を無被災でプロットして地形図と見比べた。山地と盆地の境にオレンジの破線を引くと、①部分の堤軸方向は下流面西向きが大半で、反対に②の青色点線は盆地内で東向き ( $\omega_i$ は240-360°の範囲が大半 (全体3分の1角度範囲に6割を占める) であり、多数のため池堤体下流斜面が震央に

向き)で、かつ被災池の大半が東経140.30度付近に集中し、地形的には山地と盆地に挟まれたエリアであった。



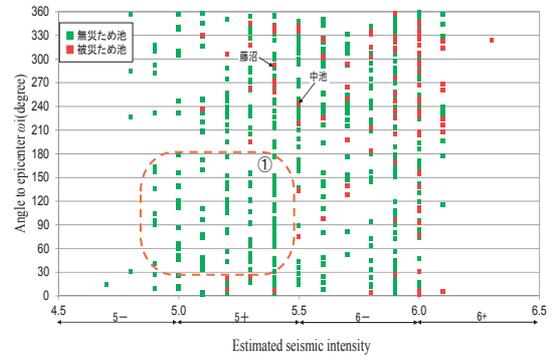
**Fig. 27** 東北地方太平洋沖地震の福島県中地方被災ため池の経度と堤軸方向  
Relationships between angle of dam axis with respect to the epicenter and longitudinal locations of earth dams in Central Fukushima



**Fig. 28** 東北地方太平洋沖地震の福島県中地方被災ため池の経度と推計震度  
Relationships between estimated seismic intensities during the Tohoku Earthquake and longitudinal locations of earth dams in Central Fukushima

**Fig. 28 (b)** は、横軸の経度位置に対し縦軸を推計震度にしたものである。東経140.45度の境界ラインの東側で山地から境界に向かって震度が減退①し、境界を越えたところで震度の急上昇②が見られる。これは、山地内の震度は震源域から離れるに従って減衰し、平地(盆地)では震度が増大したためである。但し、境界の西側で比較的大きな推計震度にも関わらず被災池が少ないのは、推計震度評価が盆地内の震度6強の影響③を受けて多少過大になった可能性があり、**Fig. 25** のため池数の2つのピークと  $R_d$  の落ち込みの原因と考えられる。

ため池堤軸方向  $\omega_i$  を縦軸に、推計震度を横軸として **Fig. 29** に示した。震度が5.4以下の時、 $\omega_i$  が30~180°では被災池は皆無で、震度6弱までは殆ど被災池が見られない。一方、堤軸下流が震央方向にある  $\omega_i = 270^\circ$  付近では、震度5強でも被災池が見られ、藤沼湖や中池はこの  $\omega_i$  領域に含まれている。



**Fig. 29** 東北地方太平洋沖地震の福島県中地方被災ため池の震度と堤軸方向  
Relationships between angle of dam axis with respect to the epicenter and estimated seismic intensity during the Tohoku Earthquake in Central Fukushima

**Fig. 30** は、福島県中域のため池  $R_d$  と堤軸  $\omega_i$  の関係図である。 $R_d$  の値は、震度5強(震度5.0-5.4)、震度6弱(震度5.5-5.9)、震度6強(震度6.0以上)の3震度階に区分し、 $\omega_i$  の値を以下の6等分にしてレーダーチャートに整理した。まず、グループaは  $\omega_i$  が0°を中心として0°~30°及び330°~360°の範囲で、同様にグループb~fまで全体を各60°毎に区分して6つのグルーピングを行い、グループ毎に震度階毎の  $R_d$  を計算した。全般に震度の増大に伴って  $R_d$  は大きくなる中で、震度5強ではb及びcグループで  $R_d$  がゼロであった。また、同じ震度5強でも堤体下流面が震央と正対するa、e及びfの  $R_d$  は比較的高く(10%以上)、他の3グループでは5%以下の低い  $R_d$  であった。また、震度6弱ではグループc及びfは  $R_d$  が20%を超え、グループa、d及びeでもそれらに次ぐ15%程度であった。反対にグループbでは、震度6弱でも  $R_d$  は5%程度であった(**Fig. 29** のオレンジ破線①の部分が**Fig. 30**の①で示すところである)。さらに、震度が6強に上がると、全グループに

において  $R_d$  は30%から40%を超える状況になり、 $\omega_i$  による  $R_d$  に大きな差は見られなくなっている。即ち、堤体下流斜面が震央方向の場合は全般に  $R_d$  が高くなり、ため池上流（貯水面）が震央側の場合は、被災リスクは小さくなると考えられる。

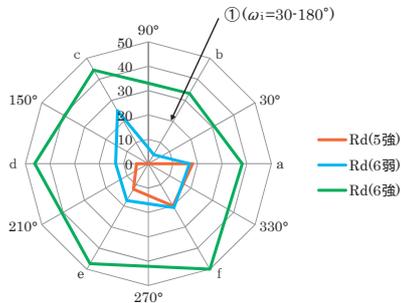


Fig. 30 東北地方太平洋沖地震の福島県中地方ため池の震度及び堤軸角度別被災率

Relationships between damage ratio based on estimated seismic intensity during the Tohoku Earthquake and angle of dam axis with respect to the epicenter in Central Fukushima

Fig. 31 は、シームレス地質図（防災科研 HP）上に Fig. 24 の県中・南地方のため池被災集中域を概ね赤い四角で囲った範囲を重ね合わせた図である。県中・南地方のため池集中域の東端は阿武隈山地西縁に接し、南西部分には棚倉構造線が通過する等、囲った領域は東西から中生代の硬い地盤に挟まれる共に、内部は火山岩からなる丘陵・台地と堆積層から成る平地が混在している。このような地盤構造エリアでは、地震波の多重反射等によって揺れが増幅し易い傾向にあり（伯野, 1992）、集中域内は周辺と比較して顕著な強震度になったと推測できる。因みに、本エリア内の棚倉構造線は地形的に明確な起伏形態がないため、増幅の要因となり得る硬い地盤としては見落とされ易い。

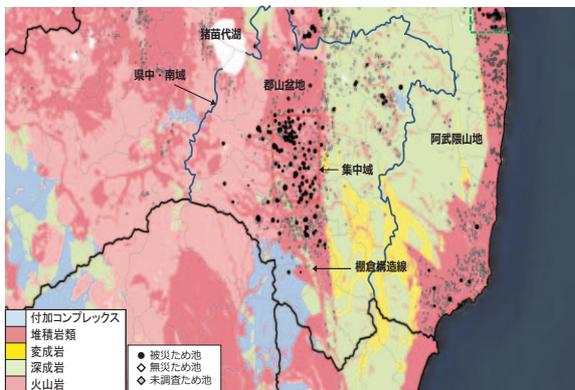


Fig. 31 福島県中・南地方の地質と被災ため池の分布  
Geological ground structure and distribution of damaged earth dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

Fig. 32 の地形学的な形成過程（小池, 1965）が示す通り、Fig. 31 で囲った被災集中域は「古郡山湖」の南

半分と重なっており、大小起伏山地、丘陵、台地に沖積層等、低平部と傾斜部が入り組んだ複雑な地形を呈している。即ち、この集中的なため池被災要因には、東側に硬い地層の阿武隈山地があり、かつて湖底にあった揺れやすい軟弱な地盤を挟んで、西側に硬い構造線が貫通する等、地震波の反復反射が起りやすい広域的な地形・地質条件が関係したものと考えられる。

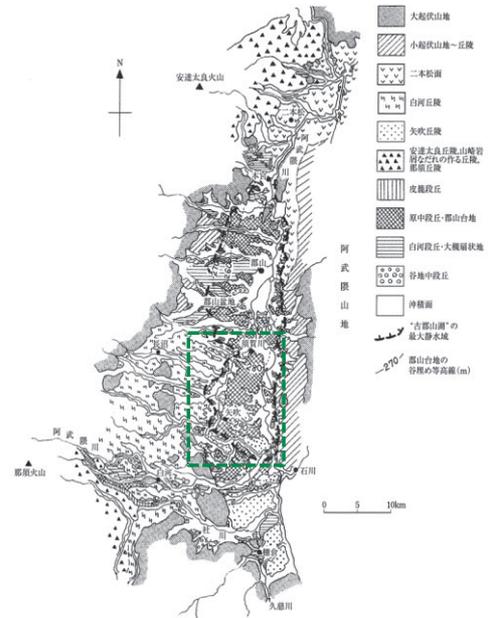


Fig. 32 福島県中・南地方の地形学図  
Topographical map of the in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

4.4 まとめ

第IV章では、ため池地震動被災要因解明のために、緯度・経度分布、震央距離、推計震度分布、広域的な地形・地質、堤軸震央方向角度等の関係要素について複合的な検討を行った。そのため、まず、被災ため池数が多かった宮城県と福島県を比較し、特に被災が集中した福島県中地方を対象域に詳細な検討を行った。以下、本章のまとめでは、両県の被災分布比較、広域的な地形・地質及び堤軸震央方向に分けて要因分析結果の総括を行う。

(1) 両県の被災比較

- ・福島県内は震度6強エリア周辺に被災ため池が集中したが、宮城県では震度6強域内でも顕著な被災集中は見られなかった。
- ・両県の被災ため池集中エリアは、宮城県北部、亶理町・山元町から南相馬市（同市南部は原発事故後、立ち入り制限区域で未調査）までの県境を跨ぐ沿岸市町エリア及び福島県中から県南地方であった。

(2) 地形・地質条件と震度及び被災率 ( $R_d$ )

- ・ため池の被災は、地盤の揺れ（震度）が小さくなる

硬い岩盤（山地・丘陵等）と震度が大きくなる軟弱な堆積層（平地）の両方が混在した場所（山地と平地の境）に多く発生していた。

- ・福島県中地方では、山地から盆地に向う地形・地質構造変化に伴い震度の減退・上昇現象が見られた。
- ・福島県中地方では盆地内の特定の緯度・経度域に強震度がスポット的に生じると共に、当エリア内の $R_d$ は震度6.0では40%であった。
- ・推計震度は間詰め方式で求められるために、地形の変わり目等で震度の推計誤差が生じる場合があった。

(3) 堤軸方向と被災率 ( $R_d$ )

- ・福島県中地方の被災ため池は地形条件（例えば、水田との位置関係等）から、堤体下流面が震央に向いている場合が過半である。
- ・震度5強～6弱までは堤体下流が震央向きの場合に $R_d$ が高い傾向にあり、震度6強ではその傾向が不明瞭となった。

以上から、地震動には広域的地形・地質において震央・震源からの方向性が見られ、それが推計震度に反映すること。また、ため池堤軸方向は下流面が震央に正対する場合に、 $R_d$ が大きくなることが明らかとなった。

V ため池被災集中域の分析

5.1 概説

第IV章では、東北地震に伴い被災ため池が集中した福島県中内の事例から、 $R_d$ を増加させる推計震度と広域的な地形・地質には深い関わりがあることを考察した。特に東西両側には硬い地盤の阿武隈山地と棚倉構造線があり、その間に軟弱な地盤の盆地が挟まっていたことが、震度上昇と被災集中の要因となっていた。また、堤軸と震央方向の関係は、堤体下流が震央方向に正対する場合に $R_d$ が高くなっていた。しかしながら被災現地をさらに細かく見ると、同じ震度や堤軸方向であっても、決壊に至る場合と無被災の池が隣接する等、狭域の $R_d$ ため池サイト条件の違いで $R_d$ の結果が大きく異なっていた。

第V章では、福島県内で最も被災が集中したエリアを震央距離と緯度経度から特定し、被災レベルを導入して被災度別に分布形態を詳細に観察する。さらに集中域内のサイト地形を分類し、 $R_d$ と被災度で要因分析を行う。

5.1.1 ため池被災度

第III～第IV章ではため池被災を災害査定の有無によって、被災池と無被災池の2区分で評価してきた。実際のため池被災は、ため池被覆工のクラックや堤体天端に起こる軽微なクラックから、堤体自体が滑りによって崩壊・決壊する等、被災の状態やレベルは大きく異なる。第V章では、東北地震に伴う福島県内の被災ため池について、過去の被害研究事例を踏まえて被災ため池毎に被災度評価を行い、被災要因を分析する。

5.1.2 被災集中域内ため池サイトの地形・傾斜

第IV章では、宮城・福島両県の地域ブロック別に比較的広範な地形・地質から、被災ため池の集中状況を見てきた。被災集中域内では、同じ強震度エリア内にありながら、ダメージの大きい被災池と全く無被災の池が隣接する場合が見られる。そのため第V章では、福島県内で最も被災ため池が集中したエリアを特定し、個々の立地サイトの地形・傾斜を細かく見るために、グーグル・アース画像と立体地形傾斜図を用いて、サイト周辺の地形（傾斜・勾配や谷地形等）で分類し、震度及び堤軸方向等と併せて被災要因の検討を行った。

5.2 分析手法

基本的な分析手法は第IV章と同じであるが、集中域内部の被災状況をより詳細に検討するために、被災ため池毎に被災のレベルに応じた「被災度」を設定した。これにより被災と無被災の2段階評価から、無被災の被災度0から堤体崩壊レベルの被災度5までの6段階評価とした。第IV章では福島県中域のみを検討したが、改めて福島県全域からため池被災集中域を抜き出し、集中域の内と外で被災要因別に比較検討を行った。さらに集中域内のため池毎に地形・傾斜別にタイプを分類し、被災度別に分布状況を詳細に検討し、隣接ため池間で被災・無災を分けた要因を究明する。

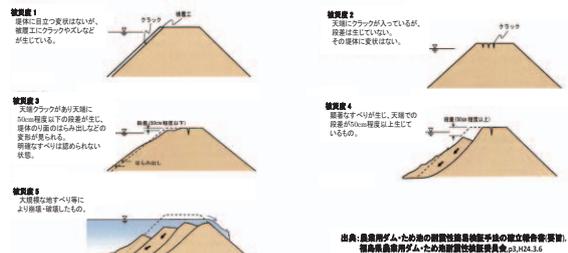
5.2.1 被災レベルとため池被災度

第IV章までは、「暫定法」(昭和25年法律第169号)に基づき東北地震で災害査定されたため池を「被災ため池」と定義した。第V章からは各ため池に対し、無被災を被災度0（ゼロ）とし、災害査定ため池で被災レベルが上がる毎に1～5まで被災度を設定した。具体的ため池被災度分類基準は、(福島県, 2012)のTable 11に基づき、福島県から提供された「ため池災害査定地区別整理カード」(2013年3月末時点)に拠って被災ため池毎に分類した。

Table 11 ため池の被災度分類

Classified list on damages to earth dams due to earthquake motions

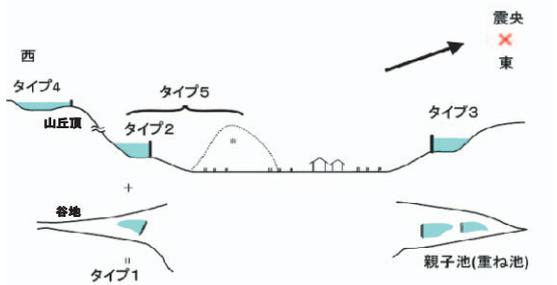
被災度	状態 (レベル)
0	無被災
1	堤体に目立つ変形はないが、被覆工にクラックやずれなどが生じている。
2	天端にクラックが入っているが、段差は生じていない。その他地盤に変形はない。
3	堤体クラックが走り、天端に50cm程度以下の段差が生じ、堤体のり面のほらみ出しなどの変形が見られる。明確なすべりは認められない状態。
4	顕著なすべりが生じ、天端の段差が50cm程度以上生じているもの。
5	大規模なすべり等により崩壊・破壊したものの。



出典：福島県庁「ため池の耐震性調査と被災度の設定報告書」(要約)  
福島県農林庁「ため池耐震性調査委員会」p.228-3.6

5.2.2 傾斜・地形タイプ

Fig. 33 により被災集中域内のため池サイト地形を、5タイプに分類した。タイプ1は、東に面して傾斜し（但し、東側に山丘がない）、谷地内にある「傾斜・谷地タイプ」、タイプ2は、東に面して傾斜し東側に山丘はないため池で、谷地内がないものを「傾斜・非谷地タイプ」、タイプ3は「逆傾斜タイプ」で、西に面した傾斜地にあるため池、タイプ4はため池サイトが山丘の頂き等の比較的緩い勾配にある「緩傾斜タイプ」、タイプ5は、タイプ1又は2で東面に山丘がある「東山タイプ」ため池とした。各ため池の傾斜・地形タイプ照合は、第IV章で堤軸方向 $\omega_i$ を求める際に使用したグーグル・アースの画像（Fig. 34）及び立体傾斜図（Fig. 35）に拠った。上記で地形・傾斜が判定しにくい場合には、国土地理院5mDEMを使ってため池周辺の傾斜勾配をさらに確認した。因みに、Fig. 35のため池被災集中域内立体傾斜図は、(株)横山空間情報研究所に依頼し、国土地理院5mDEMを基にため池位置を重ね合せたものである。



- 分類タイプ**
- ・タイプ1(傾斜・谷地): 東に面して傾斜し谷地内で東面に山がないため池
  - ・タイプ2(傾斜・非谷地): 東に面して傾斜し非谷地内で東面に山がないため池
  - ・タイプ3(逆傾斜): 西に面した傾斜ため池
  - ・タイプ4(緩傾斜): 山等緩い勾配のため池
  - ・タイプ5(東山): タイプ1と2の内の頂にあって東面に山丘があるため池

Fig. 33 ため池サイトに関する傾斜・地形タイプ分類  
Classification of gradient-landform on earth dams



Fig. 34 福島県中・県南地方のため池被災集中域の傾斜・地形タイプ

Types of geographical features for earth dam site on Google Earth in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

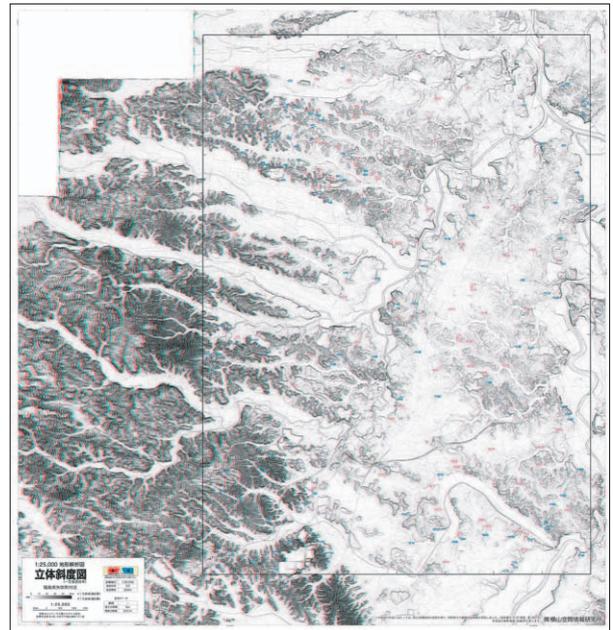


Fig. 35 福島県中・県南地方のため池被災集中域立体傾斜図  
Location of earth dams on three-dimensional decline map in the intensive damaged area for earth dams of Central-Southern District of Fukushima Prefecture

5.3 結果と考察

5.3.1 福島県内のため池被災度

Table 12 には、福島県内ため池を Table 11 の被災度分類に基づき評価した結果を示す。同県内では南会津地方を除く6域で合計283個の被災ため池が確認された。これは同県内のため池総数2,400個の約1割強に当たる。また、被災数最多が県中地方の98個で全体の35%、 $R_d$ では相双地方が22.6%で最も高く、県南、県中地方がそれに続き、当該3地方で被災池全体の87%を占めていた。さらに被災度別では、被災度3が152個で被災池全体の過半を占め、被災数が少ない地方でも被災度3の割合が最も大きい。被災度5は全県で9個、被災池全体の3%であった。

Table 12 東北地方太平洋沖地震の福島県内地域ブロック被災度被災度別ため池

Number of earth dams based on damage classification due to the Tohoku Earthquake in Districts of Fukushima Prefecture

地方	ため池総数※	被災レベル							被災数合計	被災率 (%)	備考
		0(無被災)	1	2	3	4	5	不明			
県北	371	342	7	8	7	6	1	29	7.8		
県中	550	452	12	15	56	9	3	98	17.8	羽田ダム含む	
県南	298	243	8	8	29	7	3	55	18.5	西郷ダム含む	
相双	411	318	8	18	56	9	2	93	22.6		
いわき	367	361	0	2	3	2	0	7	1.9		
会津	414	419	0	0	1	0	0	1	0.2		
合計	2,411	2,128	35	51	152	33	9	283	11.7		

※原発事故等による災害査定等未実施地区及び無被災の南会津域のため池は対象から除く、不明池は被災度で被災度判定不能

Fig. 36では、福島県全域のため池位置を被災度0（無被災）の白○と被災池の黒●に分け、1～5まで段階毎に黒丸のサイズを大きくし（被災度別のサイズ表示は以下同じ）、震央距離等距離線を付けた推計震度マップ上に表示した。被災池は、震央距離170-180kmの相双地方と240-250kmの県中及び県南地方の両エリア内に集中し、いずれも震度6弱（計測震度5.5）以上のエリアに集っていた。また、ため池被災度分布は全体的に分散しており、被災集中域内でも全てが高被災度池で占められている訳ではなかった。例えば、3決壊池（青田新池、中池、藤沼湖）近辺で無災池が多数存在し、被災池数の少ない県北、県中地方東部、いわき地方でも高被災度池が散見された。なお、相双地方南部沿岸部の震度6強エリアは、東京電力福島第一原子力発電所事故の関係で災害査定が2013年4月時点までに未実施であった。また、いわき地方の震度7（計測震度6.5以上）エリアでも被災池が少ないことが分かる。

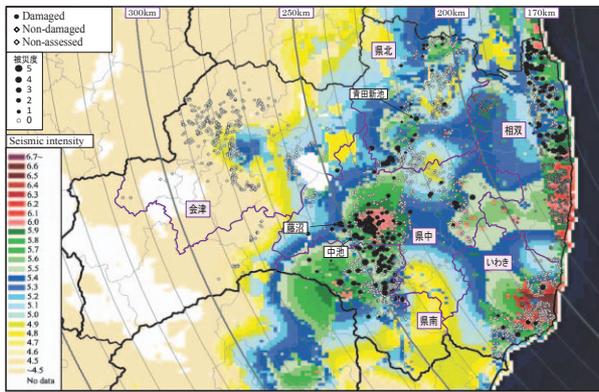


Fig. 36 東北地方太平洋沖地震の福島県内推計震度と被災度別ため池の分布

Distribution of estimated seismic intensity during the Tohoku Earthquake and damaged & non-damaged earth dams in Fukushima Prefecture

Fig. 37 (a) は、東北地震時の福島県内ため池について推計震度を横軸として青色を無災池、ピンクを被災池数にして、震度毎の  $R_d$  をオレンジ折線で表示している。県全体の  $R_d$  は12%で、震度4.8から被災が見られ、 $R_d$  は震度上昇に伴って増加傾向で、震度5.6と震度6.0で20%と30%の2つのピークがあり、推計震度6.1から  $R_d$  が低下していた。因みに、Fig. 10 (b) での2つのピークが16%より増加しているのは、相双地方内で1年後に災害査定を行なった26個の被災池が追加されたためである。

右図 (b) は、地域別に県北は水色、県中は緑色、県南はオレンジ色、相双は紫色、いわきはピンク色、会津は黄土色に各々の池数を推計震度別に棒グラフにし、 $R_d$  の青色折線と一緒に示した。震度6.1以上ため池の85%が、Fig. 33 で最も強震度が分布するいわき地方のもので、県中、県南、相双地方がこれに続いていた。但し、いわき地方内の被災池自体が少ないため、青  $R_d$  ライン

は震度6.1以降で無災池数のみの増加によって急激に低下していた。

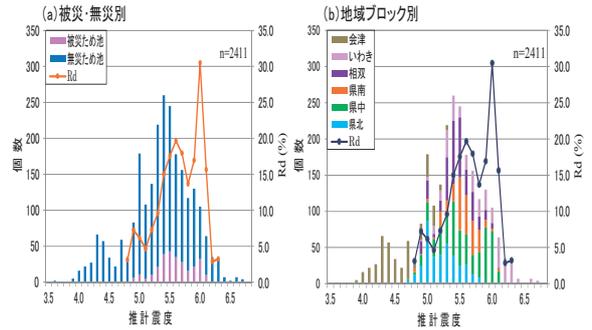


Fig. 37 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池震度と被災率 Relationships between seismic intensities estimated at each dam site and damages of earth dams (a) in Fukushima Prefecture, (b) in each district of Fukushima Pref. by the Tohoku Earthquake

Fig. 38 (a) は、福島県内全域の被災ため池だけを推計震度毎に被災度別に示し、Fig. 37 と同じ震度別  $R_d$  を折線で表示した。ため池被災数は震度と共に増加し、 $R_d$  も増加傾向にあるが、被災度は震度によってレベルが上がる傾向は見られず、いずれの震度でもレベル3が過半を占めていた。

Fig. 38 (b) では被災池を震度毎・地域別で見たが、震度6.1以上  $R_d$  の顕著な落ち込み理由は、震度6.0で県中地方の被災池は全数72個中31個、いわき地方は21個中1個、震度6.1では同じく県中の17個中8個、いわきは42個中0個で、いわき地方では強震度池が増える割に被災池が殆どないことが分かる。また震度6.0の被災池は殆どが県中地方であるが、被災度ではレベル3が過半を占めており、震度が大ききとも被災レベルが上がるとは限らないことが分かる。

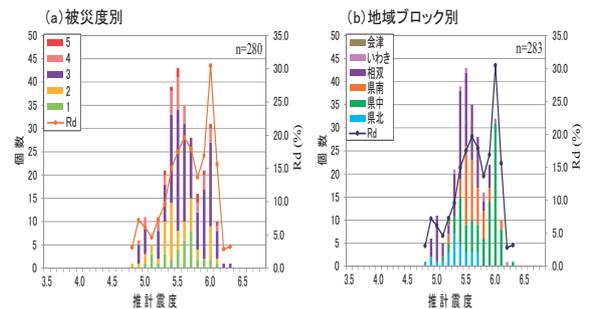


Fig. 38 東北地方太平洋沖地震の福島県内被災ため池震度と被災度・被災率

Relationships between seismic intensities estimated at each damaged earth dams (a) based on damage classification in Fukushima Prefecture, (b) in each district of Fukushima Pref., due to the Tohoku Earthquake

### 5.3.2 被災ため池集中域の設定

Fig. 39 は福島県内ため池について、縦軸に震央距離を横軸に経度（東経）をとり、各池の位置毎に被災度別

のサイズと地域別に色を変えてプロットした。震央から近い順に、相双地方で距離170-180km, 東経140.88-141.02度 (経度差: 0.14度), 県中・県南地方では距離240-250km, 東経140.24-140.40度 (経度差: 0.16度) の範囲に各々被災集中が見られた。他域では特定の震央距離範囲に同様な被災集中は確認できない。

Fig. 40 は縦軸に緯度 (北緯) を横軸に震央距離をとって前図と同様にため池位置をプロットした。相双地方では前図と同距離間に北緯37.50-37.90度 (緯度差: 0.40度), 県中・県南地方で同距離間に北緯37.15-37.33度 (緯度差: 0.18度) に被災池集中域があり, 県中・県南地方の方が緯度差は小さく南北間22kmで被災集中度が高い。

両域の比較から県内で被災池が最も集中したエリアは, 県中・県南地方の震央距離10km範囲で東西距離は14kmであった。なお, 県中・南の被災集中域の面積約300km<sup>2</sup>の範囲内には, 郡山市, 須賀川市, 白河市の3市を始めとして, 9つの市町村が関連していた。

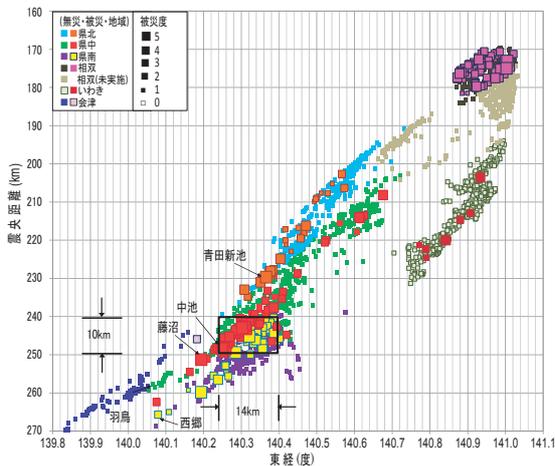


Fig. 39 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の被災度別震央距離・経度分布  
Relationships between distance from epicenter and longitudinal location of earth dams in Fukushima Prefecture

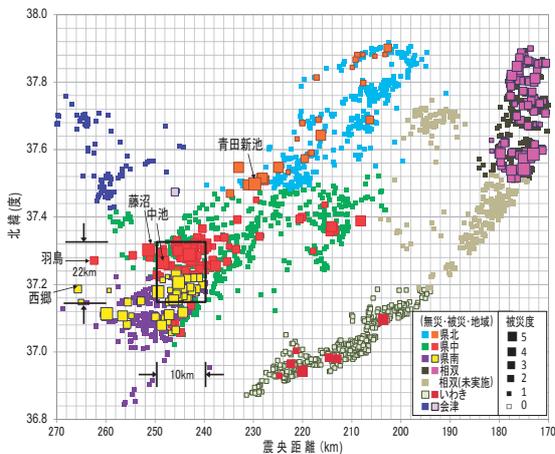


Fig. 40 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の被災度別震央距離・緯度分布  
Relationships between distance from epicenter and latitude location of earth dams in Fukushima Prefecture

Fig. 39 と Fig. 40 の両図から, 県北地方は震央距離200~235kmで東経140.30-140.56度, 北緯37.50-37.90度, いわき地方は205~225kmで東経140.78-140.94度, 北緯37.10-36.90度の範囲に各々分布し, 両域の震央距離範囲は丁度, 相双と県中・南の両被災集中域の中間に位置していたが, 特に被災の集中域は見られない。

Fig. 41 (c) は, Fig. 39 と Fig. 40 で県中・県南地方内に設定した被災集中域の範囲を衛星画像に赤枠で囲い, さらに集中域内外の地形・勾配を見るために域内で最も被災が集中した箇所を通過する A-A 線を, 国土地理院10 DEM によって同図 (a) に横断面図で示した。加えて相双地方南部に B-B 線を設け, 同図 (b) に示した。赤枠で示した集中域は郡山盆地の南部から矢吹丘陵に跨がる範囲にある。(a)図において, 集中域東端は阿武隈山地が盆地まで下がりきった地点から始まり, 西端が奥羽山脈に向けた急傾斜面手前までの平均勾配6.4%で東に傾斜している。被災池は阿武隈川より西側の東傾斜面に多く見られ, 阿武隈山地から川に向かって盆地に下る西向き斜面では殆ど無災あった。(b)図に示した相双地方では, 平均勾配が7.1%であり, 両域とも震央方向に向かって同程度傾斜していた。

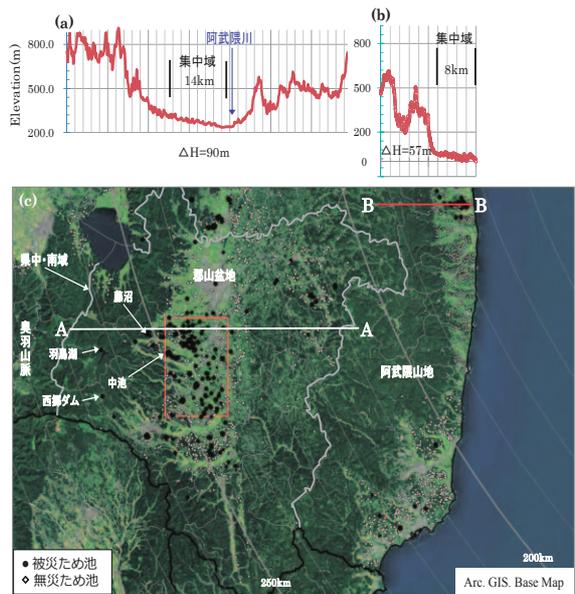


Fig. 41 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池被災集中域  
Location of intensive damaged area for earth dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

5. 3. 3 被災集中域内外の比較分析

福島県中・県南地方内848個のため池の内, 集中域内300km<sup>2</sup>には, 被災及び無災池が228個確認できた。Fig. 42 (a)では, 県中・県南地方の全ため池を推計震度毎に被災池をピンクで, 無災池を青色で, R<sub>d</sub>をオレンジ折線で示した。被災池は震度5.1からで, 震度5.5超のR<sub>d</sub>は20%前後で, 震度6.0からR<sub>d</sub>は40%を超え, 震度6.1でR<sub>d</sub>

は50%であった。

Fig. 42 (b) は、集中域内ため池をピンクで、域外を青色にして、震度毎に集中域分の占有率を赤色の折線で示した。集中域内は震度5.2から始まり、震度5.5超から3~4割に、震度6.0超では8割前後となる等、強震度のため池が集中域内に多く集まっていることが分かる。

Fig. 42 (c) は、県中・県南地方内150個の被災池を震度毎、被災度別に色分け表示し、オレンジ色の  $R_d$  折線と比較した。集中域内には県中・県南地方全体の27%のため池があるが、被災池では全体の63%が集中域内にある。全般に震度増大に伴って被災池数と  $R_d$  は上昇傾向にあるが、震度5.7-5.9で被災数は減少した。被災度はレベル3が過半を占め、震度によって被災レベルが上がる傾向は見られなかった。

Fig. 42 (d) は、集中域内ため池を無災分も含めて推計震度毎に被災度別で色分けし、 $R_d$  をオレンジ折線で示した。集中域内は震度5.5-6.1ため池が98%を占め、うち最多は震度6.0であった。集中域内の  $R_d$  は、30から50%の間で上下しており、この範囲内の震度によって  $R_d$  の上昇傾向は見られず、被災度はどの震度でもレベル3が過半を占め、特定の被災レベルに偏る傾向は見られなかった。

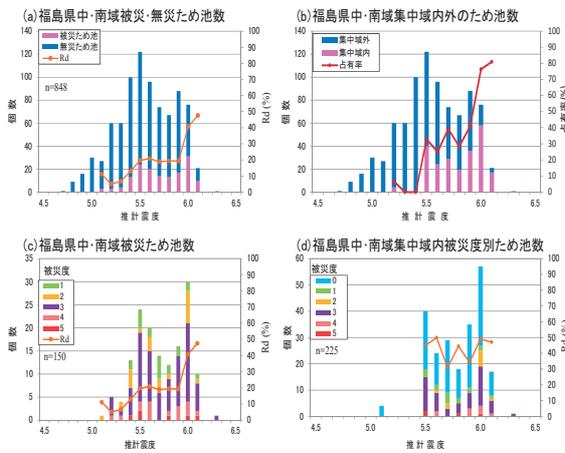


Fig. 42 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池被災集中の震度・被災度別域内外比較

Relationships between seismic intensities estimated at each dam site and damages of earth dams based on (a) damage ratio, (b) share between intensive damaged area and outside of the area, (c) damage classification, in Central-Southern District, (d) damage classification in the intensive area of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 43 は県中・県南地方ため池について、経度を横軸に、堤軸震央方向角度( $\omega_i$ )を縦軸として、Fig. 42 (a) は集中域外だけを、Fig. 43 (b) は集中域内だけを被災度別に色分けして示した。なお、図 (a)では藤沼湖、羽鳥ダム、西郷ダムを、Fig. 43 (b) は中池を参考に明示した(以下も同様)。先ず Fig. 43 (a) では集中域の少し東側(東経140.40-140.45°)に $\omega_i = 0-180^\circ$ のため池が卓越して

いる場所が一部あるが、全体としては $\omega_i = 180^\circ - 360^\circ$ のため池が多数を占めている。 $\omega_i$ を4等分して被災池の割合と  $R_d$  を比較すると、 $\omega_i = 0-90^\circ$ が19%と  $R_d = 8\%$ 、 $\omega_i = 90-180^\circ$ が11%と  $R_d = 5\%$ 、 $\omega_i = 180-270^\circ$ が30%と  $R_d = 11\%$ 、 $\omega_i = 270-360^\circ$ が40%と11%となり、集中域外の  $R_d$  は全体的に下流面が南東向き池ほど大きくなっている。同様に Fig. 43 (b) の集中域内では $\omega_i = 0-90^\circ$ が10%と  $R_d = 48\%$ 、 $\omega_i = 90-180^\circ$ が14%と  $R_d = 33\%$ 、 $\omega_i = 180-270^\circ$ が40%と  $R_d = 45\%$ 、 $\omega_i = 270-360^\circ$ が35%と  $R_d = 42\%$ と大部分の $\omega_i$ が180°以下の池数自体が少なく、 $R_d$ には大きな差が見られない。

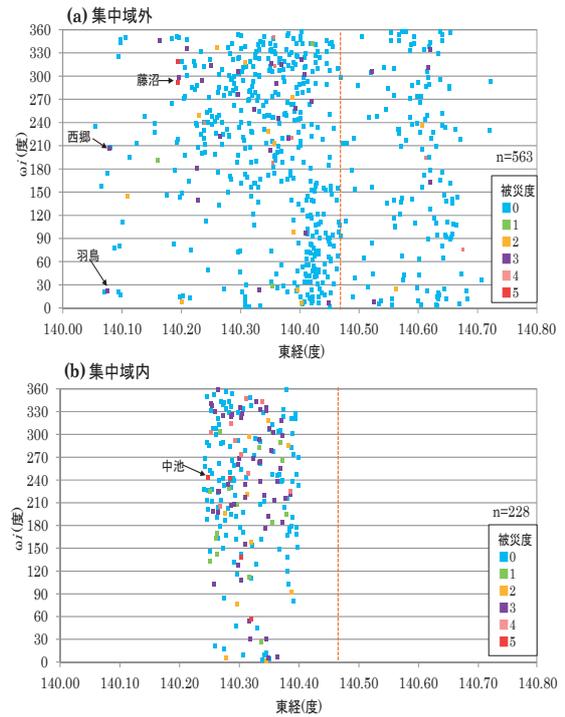


Fig. 43 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池経度と堤軸方向の被災集中域内外比較

Relationships between angles of dam axis with respect to epicenter and longitudinal locations of earth dams (a) outside, (b) inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 44 には、県中・県南地方ため池について、ため池DBから地形区分別の被災池と無災池数及びその  $R_d$  をグラフにしたものである。当域内のため池は、地形的に台地のため池が3分の1以上あるが、 $R_d$ では丘陵地が29%で最も高い。因みに、通常、地形区分だけで揺れ方を判断する場合には、低地の地盤が揺れ易く、 $R_d$ が最大と考えられるが、実際の  $R_d$  では丘陵地と台地の率が高くなっている。山麓地と低地のため池数は各々2割程度で、山地に囲まれている割に山麓地のため池は少ない。なお、本地域の地形に関する「ため池DB」捕捉率は76%であった。

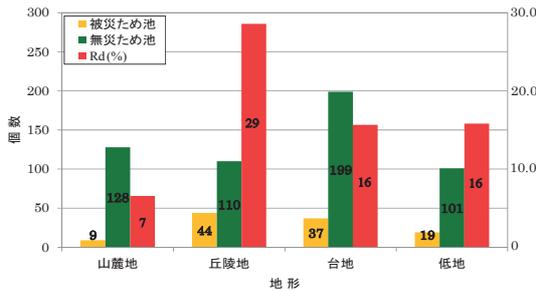


Fig. 44 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池地形区分別被災率

Damage ratio of earth dams based on geographical features of earth dam site in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 45 は、Fig. 44 を被災集中域内外に分けて  $R_d$  を比較したものである。集中域内外とも、丘陵地の  $R_d$  が最も大きい。左図 (a) 集中域内では台地及び低地とも  $R_d$  に差が余りなく、地形区分による差はあまり確認できない。因みに、集中域内は地形が錯綜して、丘陵地や台地に隣接して低地が存在しており、ため池が「山地と平地の境」で  $R_d$  が高いこととの関連で説明が可能である。また、右図 (b) の集中域外では、硬地盤の山麓地と低地の  $R_d$  が同程度で、台地よりも高くなっており、地盤が錯綜する「山地と平地の境」の  $R_d$  が高くなるのを支持する結果となっている。

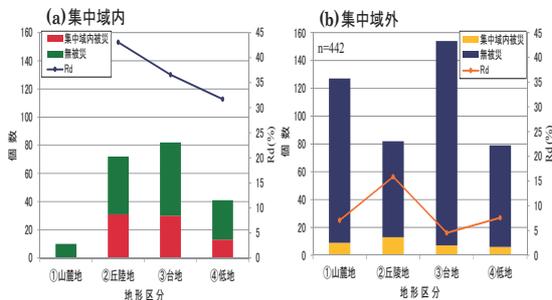


Fig. 45 東北地方太平洋沖地震福島県中・県南地方のため池被災集中域内外地形区分別被災率比較

Comparison of damage ratios of earth dams between (a) inside of the intensive damaged area, (b) outside, in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 46 では、被災集中域を内と外に分けて、横軸に経度を、縦軸に震度を取って被災度別に色分けプロットして、東西方向でため池震度推移が分かるようにした。Fig. 46 (a) の集中域外では、オレンジ点線の阿武隈山地のピークから下がり始める東経140.50度より東側のため池は、西へ行くほど震度が低下する傾向にあり、この経度を底にしてさらに西に向かって震度は上昇傾向となる。その後、集中域が始まる東経140.40から140.20度までは上昇傾向にあり、集中域西端の140.20度を境に再び減少している。Fig. 46 (b) の集中域内では、震度5.5を最低レベルとして東経140.30度付近で震度6.3をピークに、強震度が塊状になっていた。

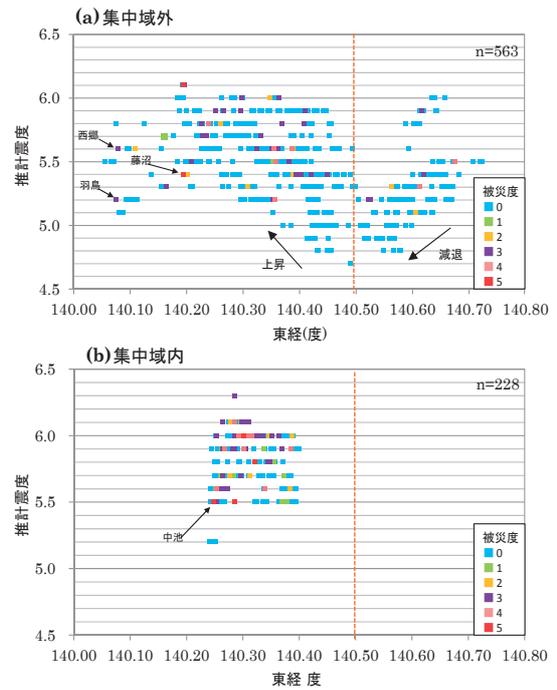


Fig. 46 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池経度と震度の被災集中域内外比較

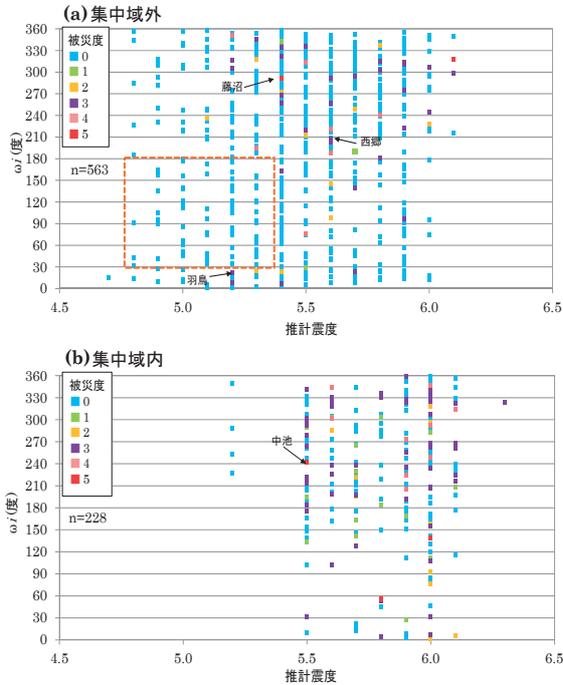
Relationships between estimated seismic intensities during the Tohoku Earthquake and longitudinal locations of earth dams (a) outside, (b) inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

Fig. 47 は、横軸に推計震度を、縦軸に  $\omega_i$  を取って被災度別にため池を色分けし、集中域外の Fig. 47 (a) と集中域内の Fig. 47 (b) で比較した。Fig. 47 (a) で  $\omega_i = 30-180^\circ$  で被災池が6個 ( $R_d = 3.1\%$ ) で、それ以外の  $\omega_i$  区間の51個 ( $R_d = 12.0\%$ ) と比較して被災池数が極めて少なく、特に震度5.3まで (オレンジ破線の範囲) は全く被災池がなかった。Fig. 47 (b) では、 $\omega_i = 0-180^\circ$  のため池数が60個 (全体の26%) と少なく、震度6.0に19個が集中する等、震度階毎に  $\omega_i$  区間別の  $R_d$  を比較するには母数が過少で偏り過ぎていた。一方、 $\omega_i = 180-360^\circ$  では池数が相対的に多く、震度階毎の数も適度に分散している。被災集中域内ため池を  $\omega_i$  区分して震度上昇と  $R_d$  を比較することは、個数の確保が難しいことに注意しなければならない。

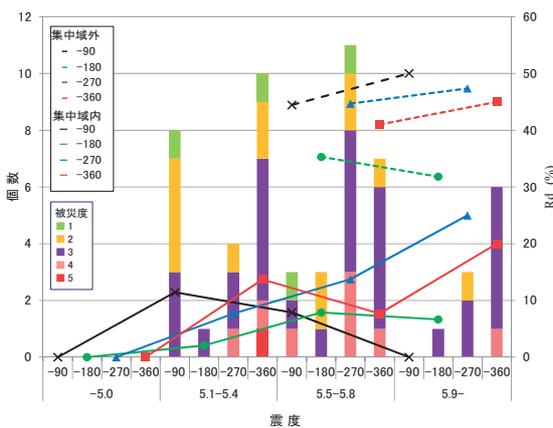
Fig. 48 は、Fig. 47 (a) の被災集中域外ため池について、震度を4.7-5.0, 5.1-5.4, 5.5-5.8, 5.9-6.3の4等分、 $\omega_i$  を  $0^\circ$  から  $90^\circ$  間隔で4等分の16区分とし、その区分毎に被災度別に色分けした池数の棒グラフと  $R_d$  を示した。

また、 $R_d$  は  $\omega_i$  の区間毎に  $\omega_i = 0-90^\circ$  を黒、 $\omega_i = 90-180^\circ$  を緑、 $\omega_i = 180-270^\circ$  を青、 $\omega_i = 270-360^\circ$  を赤の折線で示した。なお、図中右上の4本の点線は、集中域内の同じ  $\omega_i$  と震度区分毎の  $R_d$  を同色の点線で示して比較した。この図では  $\omega_i = 180-360^\circ$  のため池は概ね全ての震度区分で被災数が多く、震度増大に伴う  $R_d$  の増加傾向も明かであった。

また、右上集中域4点線は、どの区分の集中域外より常に  $R_d$  が高く、震度による増加傾向も  $\omega_i = 90-180^\circ$  で逆転する以外は、概ね増加傾向にあった。被災度では、被災度3が何れの区分でも多数を占めるが、被災度4以上の大部分は  $\omega_i$  が  $180-360^\circ$  範囲に多く集っていた。



**Fig. 47** 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池の震度と堤軸方向の被災集中域内外比較  
Relationships between angles of dam axis with respect to epicenter and estimated seismic intensities during the Tohoku Earthquake (a) outside, (b) inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture



**Fig. 48** 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池の被災集中域外の震度別・堤軸方向別被災率比較  
Relationships between angles of dam axis with respect to epicenter and damage ratios based on estimated seismic intensities during the Tohoku Earthquake outside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

### 5.3.4 被災集中域内の被災要因分析

**Fig. 49 (a)** では、福島県中・県南地方で被災池が集中した東西14km, 南北22kmの約300km<sup>2</sup>エリア内だけをクローズアップして、推計震度と被災度別ため池の分布図を示した。斜め線は震央距離2km毎のコンタ線で、枠外で数字の240と250を囲った斜線の範囲が震央距離240-250km区間である。四角の赤色は震度6強で、サイズが大きいほど被災度が大きくなっている。当域約300km<sup>2</sup>内には225個のため池が含まれ、その内93個が被災池で、集中域内全体の  $R_d$  は41%である。被災池分布は一様ではなく、高被災度池は震度6.0以上のエリアだけでなく、震度5.5前後でも多数確認できた。四角で囲った250kmコンタ線と重なる所に棚倉構造線があり、震央方向と直角となっていた。

集中域内の  $R_d$  を比較するために震央距離間隔4kmで、遠い震度距離から順にブロック分けした。但し、池数が距離240~246km区間で過多なため、被災池が著しい部分を目視で括り出し、最南西のブロック①から北東(震央)方向へ順に⑥ブロックに区分した。因みに、高い  $R_d$  として括り出したブロック④は、震央距離242kmを挟んで両側に1.6kmの範囲内にあり、棚倉構造線から約8kmの場所で平行するブロックとなった。

**Fig. 49 (b)** はブロック毎に被災度別池数の棒グラフと、被災率  $R_d$  の折線グラフで示した。  $R_d$  が最も高いブロック④は、集中域全体平均の  $R_d = 41%$  に対して70%となった。両脇の②, ③及び⑤ブロックの  $R_d$  は、平均と同レベルの40%前後で、両端①及び⑥の  $R_d$  は10%台と大きな開きがあった。  $R_d$  と被災度の関係は、ブロック③と④で被災池が30個前後あるが、被災度3の池が大半を占め、  $R_d$  が低いブロックが必ずしも被災度が低いと限らない。但し、被災度4以上のため池は、高  $R_d$  の②から④ブロックに集まっていた。また東経140.29度・北緯37.29度周辺(中池の直ぐ東北側区域)では、震度6.0超エリアで多数の高被災度池に接近して無災池が多数入り交じっているのが観察される。福島県中・県南地方の被災集中域内では、同一の強震度区域内で近接するため池が、高被災度池と無災池に分かれる事例が多数見られた。そのため集中域内の全ため池を **Fig. 33** に基づき5タイプに分類して被災度との関係を分析した。

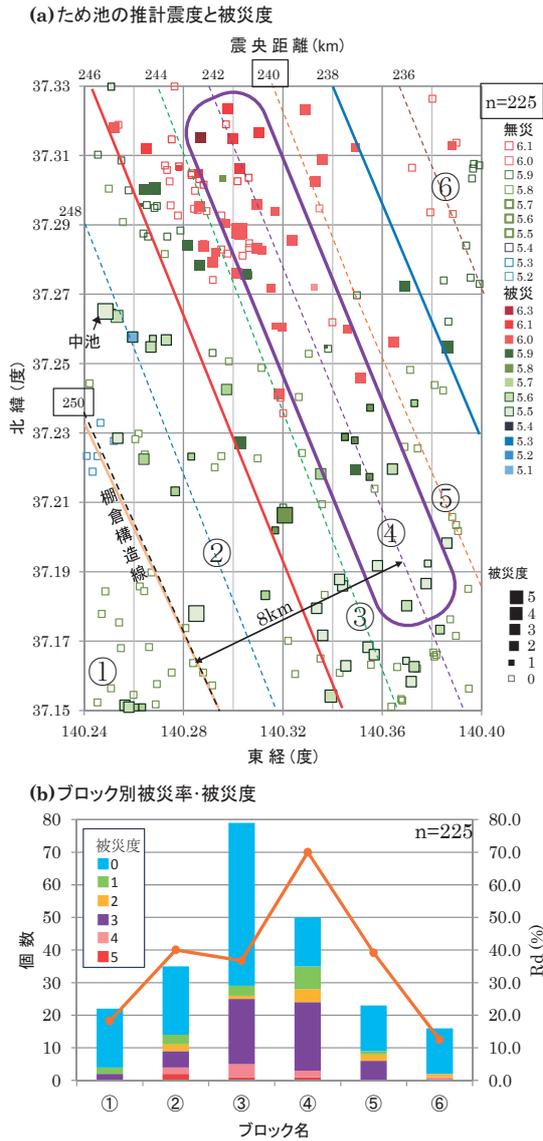


Fig. 49 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方の被災集中域内の震度・被災度別ため池分布

Distribution of damaged and non-damaged earth dams based on estimated seismic intensity and damage degrees (a), damage ratio in 6 blocks (b), due to the Tohoku Earthquake inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

Fig. 50 は, Fig. 43 (b) のため池を経度と  $\omega_i$  は同じ縦横軸として, サイト傾斜・地形タイプ毎に1を赤色, 2をオレンジ色, 3を緑色, 4を紫色, 5を青色で色別し, 被災度別にサイズを大きくしてプロットしたものである。

Fig. 43 (b) で  $\omega_i = 180-360^\circ$  で被災した池の大多数が傾斜・谷地型で, 特に堤軸下流が震央に直角方向となる  $\omega_i = 210-330^\circ$  に比較的多くの被災池が集まっていた。また緑色の逆傾斜型は, 西に面した傾斜で  $\omega_i = 0-180^\circ$  になるが, 被災池の多くが点線で囲った親子池 (重ね池) であった。さらに緩傾斜型や東山型では  $\omega_i$  に関係なく被災事例が殆ど見られない。

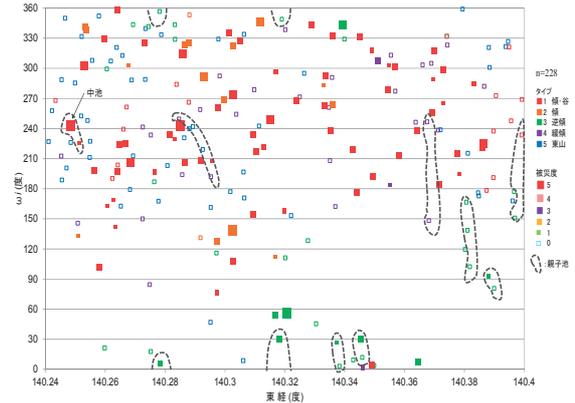


Fig. 50 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方の被災集中域内ため池の堤軸方向及び被災度と傾斜・地形タイプの関係

Relationships between angles of dam axis with respect to epicenter and types of gradient-landform on damaged and non-damaged earth dams based on damage degrees due to the Tohoku Earthquake inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

Fig. 51 は  $\omega_i$  の区間を, a で  $0-90^\circ$ , b で  $90-180^\circ$ , c で  $180-270^\circ$ , d で  $270-360^\circ$  の4つに区分し, サイト傾斜・地形タイプ毎に被災度別ため池数を棒グラフに,  $\omega_i$  区分毎の  $R_d$  を青の折線にしたものである。これまでは堤軸  $\omega_i$  が  $180-360^\circ$  のときに  $R_d$  が大きくなっていましたが, c では被災池の39%が集中し, 無災池数も47個と全体の37%が集まり, その結果  $R_d = 43\%$  と平均的な  $R_d$  で, a 区分よりも低い。その理由は多数の無被災池サイトが緩傾斜と東山タイプであり, d も同様に緩傾斜と東山タイプの池数が多く,  $R_d$  は区分 a よりも低い。一方, 区分 a 内はタイプ3の逆傾斜型が7割以上で,  $R_d = 48\%$  と被災池数が最低で  $R_d$  は最大となっていた。

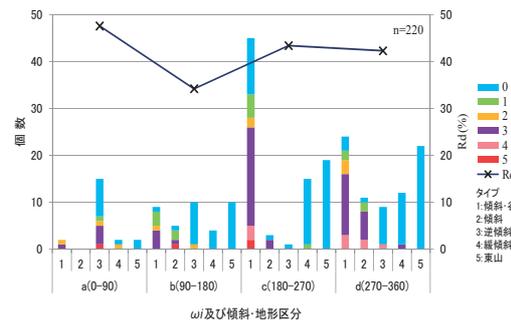


Fig. 51 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方の被災集中域内ため池の堤軸方向及び傾斜・地形タイプ別被災度

Relationships between damage ratios and damage degrees based on types of gradient-landform for earth dams due to the Tohoku Earthquake inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

集中域内のサイト傾斜・地形タイプと  $\omega_i$  の関係は,  $\omega_i$  区分で c 及び d で池数全体の73%であるなど堤軸下

流が東に面した $\omega_i = 180-360^\circ$ が圧倒的で、丘陵地、台地等が介在する地形の中で、緩傾斜勾配や東山タイプでは被害緩和となり、平地から谷地に向かう傾斜・谷地タイプでは被害が促進されたと考えることができる。即ち、集中域外で見られた $\omega_i$ と $R_d$ の関係が、震度6強の集中域で曖昧になった理由は、地形・傾斜タイプ4及び5に属する多数の無災池が、区分c及びdに多数含まれていたこと、さらに区分aとbに属する池数が極端に少ない中で、親子池等の特殊なパターンの被災池の存在が $R_d$ を押し上げたことによると考えられる。

Fig. 52は、Fig. 49(a)と同じ被災集中域エリア内を被災度別とサイト傾斜・地形タイプに置き換えた分布図である。ピンクの破線で囲った震度6強の範囲は、傾斜・地形タイプ1（傾斜・谷地）及び2（傾斜）で被災度が大きく、タイプ4（緩傾斜）と5（東山）は被災を免れている。全般的に堤軸が東に面して傾斜のある谷地内に立地するため池は、被災度が大きくなる傾向が見られる。一方で、高被災度池から僅か200-300mしか離れていない場所でも、山丘の頂きや平地で緩勾配の場所にあるため池や東側の山丘が堤体を隠す（地盤揺れを緩和する）形となり、大多数が被災を免れている。言い換えると、谷地内にあるため池は、低平地から谷筋を通して山頂に向う傾斜で、地盤の揺れが直接的に堤体下流面にぶつかり、被災を促進させた格好である。これら5タイプは何れもが地表面上の地形と深い関係にあるものばかりであった。

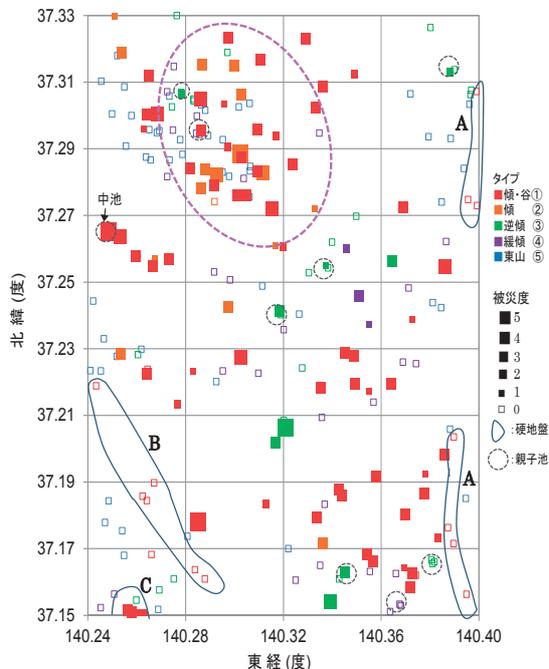


Fig. 52 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方等の被災集中域内ため池の被災度及び傾斜・地形タイプ別分布  
Distribution of damaged and non-damaged earth dams based on damage degrees and based on gradient-landform types in the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

但し、タイプ1（傾斜・谷地型）であっても、青色実線で囲んだ部分は無災池であった。この理由は、Aは集中域の東端、Bは棚倉構造線上に位置し、何れもがFig. 49(a)の④ブロックに含まれず、地震動の増幅が地形的に抑えられた場所と考えられる。なお、Bの構造線の南西部で無災池が広がる南側（cで囲った部分）の4つの被災池は、堤軸が全て南に面した傾斜・谷地型である。また西に向かって傾斜する緑色の逆傾斜タイプ3では被災度が全体に低い、紫色破線で囲んだ親子池の場合は、被災度が上がる事例が確認された。

Fig. 53は、サイト傾斜・地形タイプ毎に被災度別池数を棒グラフと $R_d$ を折線にしたものである。因みに、タイプ1（傾斜・谷地）の中で、Fig. 52で東端Aと棚倉構造線上Bの14池は揺れ方の状況が明らかに異なるため、除外扱いとした。タイプ1のため池数は、集中域内の32%しかないが、被災池全体の70%と最大割合を占め、次いでタイプ2, 3, 4の順で被災池数が少なくなり、タイプ5（東山）では被災池が0であった。無被災池数は被災池とは反対にタイプ5から順に数が多くなっており、タイプ別 $R_d$ はタイプ1が97%と極めて高いほか、タイプ2が84%、タイプ3が20%台、タイプ4では9%となる等、ため池サイトの地表面の傾斜・地形条件が $R_d$ に深く関係していることが明らかになった。

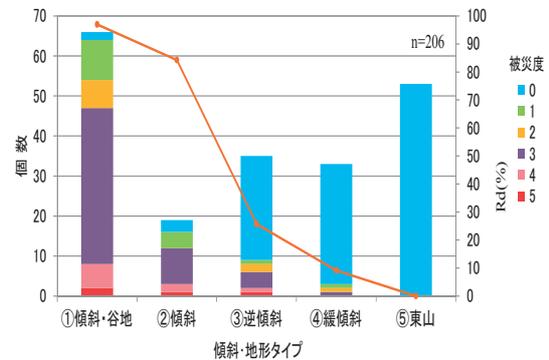


Fig. 53 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方の被災集中域内ため池の傾斜・地形タイプ別被災度・被災率  
Comparison between types of gradient-landform on damaged and non-damaged earth dams based on damage degrees due to the Tohoku Earthquake inside of the intensive damaged area in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

#### 5.4 まとめ

東北地震に伴う福島県内ため池について、被災が最も集中したエリアを特定し、その内外域の比較及び集中域内部の詳細な被災状況分析を行った。その際、ため池被災度及びサイト地形分類を新たな分析指標として導入し、狭域的な地形・地質要因と被災の関係性から以下の総括を行った。

##### (1) 被災ため池集中域

###### 1) 福島県内の被災集中域

- ・相双地方の震央距離170-180kmと県中・県南地方の同240-250kmに被災集中域が2箇所形成され、遠距離集中域の方が狭いエリアで被災池が多い。
  - ・県内集中域は、地形が全体的に震央方向（東方）に面して概ね6-7%平均勾配の傾斜地で、平坦部から山地に跨がる領域で被災池が顕著であった。
- 2) 福島県中・県南地方の被災集中域
- ・郡山盆地南部で阿武隈山地と棚倉構造線に挟まれた約300km<sup>2</sup>の範囲。
  - ・集中域内は強震度のみが集中し、そのバラツキは極めて少ない。
- 3) 被災集中域内
- ・震央距離等高線は棚倉構造線に平行（震央方向に直角）で、被災池の分布はこれに沿っていた。
  - ・震央距離241-243kmの  $R_d = 70\%$  のピークゾーン④は、棚倉構造線に平行して約8kmの距離にあった。
  - ・被災池最濃密のエリア内に各200-300m範囲で被災池と無災池が混在していた。
- (2) 震度とため池被災
- ・最大の推定震度であったいわき地方で被災池が少ないため、県全体の  $R_d$  が震度6.1以上で低下した。
  - ・震度6強域内でも、 $\omega_i$  及びサイト地形によって  $R_d$  の差が極めて大きい。
- (3) 集中域内の地表面に係る被災要因
- 1) 堤軸震央方向角度 ( $\omega_i$ )
- ・ $\omega_i = 90-180^\circ$  では逆傾斜が多く、被害が緩和される。
  - ・ $\omega_i = 180-360^\circ$  では東面の傾斜が多く、被害が促進される。
- 2) 傾斜・地形タイプ
- ・ $\omega_i = 180-360^\circ$  の傾斜・谷地タイプでは、被災が促進される。
  - ・東山丘の存在で被災事例が無く、被災が緩和される。
  - ・平坦地と山・丘陵の頂き等、緩傾斜勾配、西に面した逆傾斜面、非谷地形の順で被災緩和の度合いが大きい。
- 3) 重ね（親子）池
- ・傾斜の親子池は、高標高の上池側の被災傾向がある。
  - ・逆傾斜で親子池は、低標高の下池側の被災傾向がある。
- 4) その他
- ・集中域東端と棚倉構造線上のため池では例外的に被災がない。

以上、ためサイト地形の傾斜・地形タイプによって、 $R_d$  は90%を越える傾斜・谷地タイプから緩傾斜と東山タイプでは  $R_d$  が10%以下など大きな開きがある。即ち、地震動には広域的な地形・地質だけでなく、狭域のサイト地形にも方向性が見られる。

## VI 堤体形状とため池被災

### 6.1 概説

地震動被災は地面の揺れによって引き起こされるが、ため池の場合は、第V章で検討したようにサイトの狭域的な地形条件や堤軸の震央方向と関係があることが分かった。つまり、(秋葉ら, 1941) が「堤体も一つの構造物なる以上震動の方向と無関係であり得ない」と考えた通り、堤体の「有り様」が地震動被災の要因であることの確証が得られた格好となった。同様に地表面上で一定の高さ（堤高）や長さ（堤頂長）を持った形状も地震動被災の重要な個体上の被災要因であり得る。そのため、秋葉らの被害研究以降もため池堤体形状と地震動被災を関連付ける研究が数多く行われた。しかしながらこれら被災研究が、各自各様のやり方で分析整理がなされるため、現時点も  $R_d$  等で被災リスク評価として統一の見解が出されるに至っていない。

その最大理由は、被災データに対する確率・統計上の「不確実性」（小島, 2006）の問題がある。ため池の地震動被災の有無には様々な要因が関係し、その背後には何らかの「不確実性」が働いている。これは「確率現象」（涌井ら, 2010）と言い換えられ、一定の被災リスクとして評価するためには、「大数の法則」に基づく必要がある。即ち、「1つの母集団から、 $n$  個のデータを観察しその標本平均  $\bar{x}$  を作る。このとき、 $n$  が大きければ大きいほど、標本平均は母集団  $\mu$  に近い数値をとる可能性が高くなる」（小島, 2006）である。一方、ため池堤体諸元は小規模が大多数を占める「正の非対称分布」であり、過去の研究では該当ため池が数個しかない中で、 $R_d$  を求める事例も見受けられている。加えて、地震規模でため池被災数が少ない場合等も、要因別に被災リスクを確率的に求めるためには母数が過少となり、信頼性（確率的安定性）が乏しくなってしまう。

本章では、第V章で検討した福島県中・県南地方のため池を事例にして、過去の分析方法と比較検証すると共に、大数の法則を考慮し、複合的に  $R_d$  算定を行うことで、堤体形状の統一的な検証を行った。併せて、第III～第V章のため池推計震度と  $R_d$  の関係及び堤軸  $\omega_i$  と  $R_d$  の関係を踏まえて、堤体形状区分毎に  $R_d$  及び被災度を指標として被災要因分析を行った。

#### 6.1.1 過去の堤体形状諸元と地震動被害

過去のため池形状に関する地震被害研究では、第二章のレビューの通り、①堤高 ( $H$ )、②堤頂長 ( $L$ )、③堤頂幅 ( $W$ )、④上下流法勾配 ( $1:U$  及び  $1:D$ )、⑤横断面形状等の堤体形状が  $R_d$  に影響を及ぼすとされてきた。諸元別には、①  $H$  が高いほど  $R_d$  は高い、②  $L$  は  $R_d$  との関連性が明確でない、③  $W$  は広いほど  $R_d$  が高い傾向がある、④  $U$  と  $D$  が緩いほど  $R_d$  が高く、特に  $U$  が緩い場合に  $R_d$  が高い、⑤横断面形状は、 $H$  と  $W$ 、 $H$  と  $D/U$

及び  $W$  と  $D/U$  等の関係があるが、統一的に被災傾向を見出す研究はされていない。但し、ため池形状は  $H$  が高いほど、一般に  $U$  と  $D$  は緩く、 $W$  も広くなる傾向があり、この傾向が  $R_d$  を高める方向にあると考える向きもある。なお、ため池被災に関する多変量解析では、堤体形状諸元相互の関連を見ているが、諸元毎に  $R_d$  を求める手法にはなっていない。

過去の地震被害研究でも「大数の法則」は考慮され、ため池被災が多数発生する大規模地震時が事例とされている。つまり少数の被災事例では堤体諸元別に  $R_d$  を求められないと理解されていた。但し、 $R_d$  算定時の分母となる無被災池もデータベース化され、大数の法則を満足出来る状態かは別の問題である。本章では、堤高及び堤頂長について、先ず「大数の法則」の観点から過去の研究事例を検証し、統一見解に至らなかった背景を検証する。

6.1.2 ため池堤体形状諸元と度数分布

堤高や堤頂長等ため池形状諸元は、正規分布でなく、小規模なものが圧倒的多数を占める「正の非対称分布」である。また本研究で事例としたため池群が、全国或いは福島県内で特異的か、平均的かを確認しておくことは重要である。Table 13 は、Appendix 3 を基に対象域の堤体形状諸元 ( $H, L, W$ , 法面勾配 ( $U, D$ )) 4 項目の比較表である。対象地域は盆地や低い丘陵地形を反映して堤高の平均が若干低く、平均的な  $L$  は少し長めで、 $L=50m$  以下の割合が少ない等の特徴が見られるが、県内、被災7県内及び全国的と比べても概ね一般的な堤体形状であると考えられる。

Table 14 には、地形と堤体材料に関するデータの捕捉率を含めて示した。全体的に堤体内部に関するデータの捕捉率は特段に低く、県毎に大きなバラツキが見られ、堤体材料の福島県内捕捉率は0%である。そのため、堤体材料を用いた地震動と  $R_d$  の関係検証は行えなかった。

堤体諸元の被災リスクを検討するには、極端な「正の非対称分布」を前提に考える必要がある。例えば、全国の堤高15m以上は、「ため池DB」から1,318箇所て全体の1.2%しかない。仮にある高さ以上の唯一のため池が被災した場合、その区分の  $R_d$  は100%となる。Fig. 54 のサイコロ回数による確率のバラツキ (小林, 2012) から、妥当な  $R_d$  算定法と言えるか大いに疑問である。また、過去の被害調査事例では、どうしても甚大な被災ため池に関心が集中し、突然の災害時には無被災ため池のデータ収集が充分できない等、諸元区分毎の  $R_d$  が実態を反映していないことが考えられる。反対に母数を一定以上確保するために対象を複数被災県に跨がらせたことで、地形・地質や堤体材料等、各県特有のローカル性も一緒に包含して、大きなバイアスとなることも考慮すべきである。

以上のことから、本章では福島県中・県南地方を対象

地域として、過去の被害研究事例とも比較検討し、統計的確率を求める際の問題点を明らかにすると共に、(清水, 1996) の統計分析手法を参考に堤体形状諸元別に  $R_d$  の検討を行った。

Table 13 ため池堤体形状諸元の平均値及び度数比較  
Comparison between the mean of each dimensional shape parameter and the frequency of the mean values

区分	個数		堤高(m)	堤頂長(m)	堤頂幅(m)	勾配 U	勾配 D	備考
県中南域	1,035	平均	4.1	68.2	3.33	1.6	1.7	全国と同じ
		度数	67.5	41.6	50.0	40.7	38.0	
福島県	3,299	平均	4.9	64.8	3.45	1.7	1.7	全国と同じ
		度数	68.8	53.6	57.5	47.1	42.9	
被災県	10,193	平均	4.6	68	3.4	1.6	1.9	全国と同じ
		度数	73.1	54.1	59.4	56.5	50.3	
全国	116,781	平均	5.1	62.5	2.9	1.5	1.8	
		度数	5m以下	50m以下	3m以下	1.5以下	1.5以下	
			67.3	64.8	68.4	62.5	64.6	

Table 14 ため池堤体諸元データの捕捉率  
Satisfactory of covering data for each dimensional shape parameter of earth dams

		(単位: %)						
	DB 個数	堤高	堤頂長	堤頂幅	勾配 U	勾配 D	地形	堤体材料
県中南域	1,035	1.00	1.00	0.94	0.94	0.94	0.63	0.0
福島県	3,299	0.99	0.99	0.86	0.86	0.86	0.82	0.0
被災県	10,193	0.97	0.95	0.84	0.71	0.69	0.6	0.33
全国	116,781	0.95	0.95	0.83	0.74	0.74	0.8	0.42

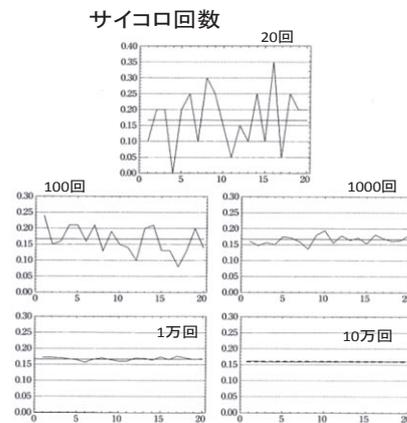


図 4.1 20人がサイコロを20回(上), 100回(中左), 1000回(中右), 1万回(下左), 10万回(下右)投げて □の目が出た相対頻度

小林道正: ため池にひそむ確立法則, 岩波書店, p50

Fig. 54 サイコロ回数と確率の関係  
Relationships between the number of dice trial and occurring probability

6.2 分析方法

過去のため池被害研究では、 $H$  及び  $L$  が「正の非対称分布」の関係で、区分方法が不統一で、規模の大きなため池は、被災及び無被災池とも極端に数が少ない中で各自の手法で被災率 (≒被災率 ( $R_d$ )) の算定を行っていた。本章では、過去の区分方法に則り東北地震の対象地域を事例に比較検証すると共に、以下の統計的分析手法を用いて検討した。

6.2.1 分析手法

地震災害時のため池被災は、有る程度限定されたエリアで発生し、その数は最大でも数百個程度である。 $R_d$ 算定では、該当区分内の被災と無災池数の合計を分母とする。母数が極端に少なくなると、Fig. 54のサイコロのように確率現象である $R_d$ が大きく乱高下し、実態を反映しなくなる。そのため、本章の検討では分母の数を一定数確保できるよう、以下の分析手法を用いた。

6.2.1.1 累積度数分布と四分位区分

Fig. 55には、「人口および死亡者数の累積値の割合」を確率の一例として示した(清水, 1996)。横軸は年齢区分である。人口(左線)と死亡者数(右線)のカーブがかなり離れ、右線は30代の年齢層まで傾きが緩く、60歳超の年代から傾きが急になるなど、自然の摂理として年齢が増すことで死亡確率が上がることが分かる。この手法を応用して、「正の非対称分布」の $H$ と $L$ の $R_d$ を算定する時は、以下の点に留意する必要がある。

度数分布では、平均値や中間値から離れるに従って、数(度数)少なくなり、分母数が過少となり、確率現象の確率値が安定しない。これを回避するため、度数を均等化し、一定数以上の母数を確保できる区分値が必要である。Fig. 56では「度数分布と累積度数分布」を重ね合わせ、度数を4等分する四分位(清水, 1996)区分を示している。なお、四分位では堤高( $H$ )や堤頂長( $L$ )の分布幅が広いことから、必要に応じて母数全体を8等分する八分位区分によっても $R_d$ 算定を行った。

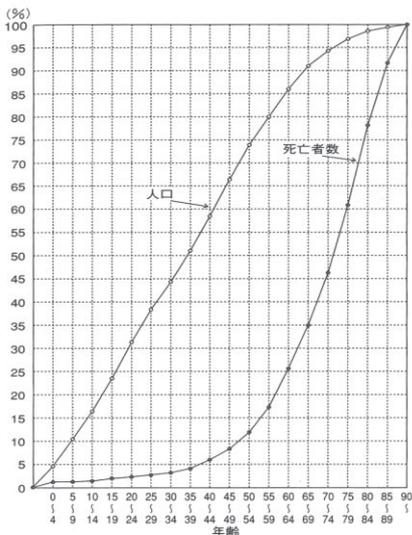
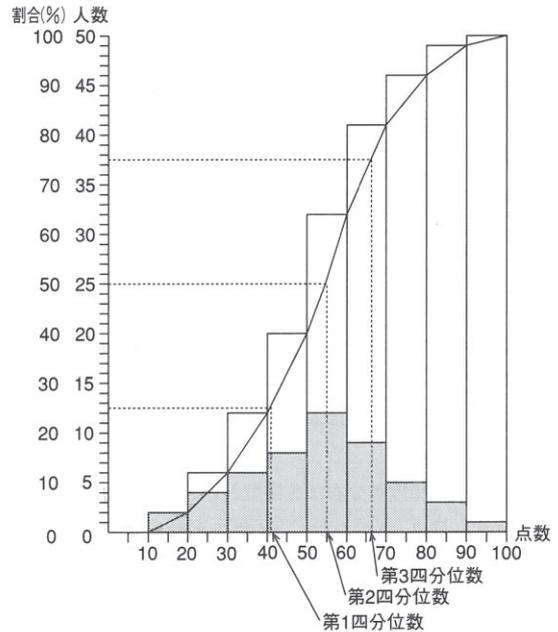


図3-3 人口および死亡者数の累積値の割合  
注: 死亡者数は'93年10月から'94年9月までに死亡した者の数  
資料: 総務庁「'94年10月1日現在推計人口」

清水 誠: データ分析ははじめの一步, 講談社p59

Fig. 55 日本の人口及び死亡者数の累積度数分布

Accumulate frequency distribution of age population and death number



清水 誠: データ分析ははじめの一步, 講談社p57

Fig. 56 度数分布と累積度数分布

Frequency distribution and accumulate frequency distribution

6.2.1.2 推計震度の重ね合わせ

第三章から第五章で、ため池推計震度と $R_d$ の関係を明らかにした。仮に $H$ が高いほど地震動(震度)に応じて $R_d$ が増大するならば、第3四分位以上の高 $H$ 区分の $R_d$ の方が、第1四分位の低 $H$ 区分の $R_d$ よりも高率になる筈であり、かつその震度が大きくなるほど、両者の差は拡大傾向になると想定できる。そこで四分位区分のため池 $H$ 毎に、推計震度を①5.0以下, ②5.1-5.4, ③5.5-5.8, ④5.9以上の4区分でクロス集計し、16(=4×4)ロットで $R_d$ を比較した。

6.2.1.3 堤軸 $\omega_i$ の重ね合わせ

推計震度で比較する考え方は、堤軸 $\omega_i$ でも適用可能である。ここでは、① $\omega_i = 0-90^\circ$ , ② $\omega_i = 90-180^\circ$ , ③ $\omega_i = 180-270^\circ$ , ④ $\omega_i = 270-360^\circ$ の4区分をクロス集計し、震度と同じ16ロットで $R_d$ を比較した。

6.2.1.4 諸元データの重ね合わせ

堤体横断面形状を検討する際は、諸元データの組合せが必要となる。例えば上下流法勾配の場合は、上流を1:U, 下流を1:Dとして上下流勾配比(D/U)を設定し、他の $H$ 及び $W$ の諸元データと組み合わせる。但し、組み合わせた諸元データは、累積度数分布で4分位数設定ができないので、2種類のデータをX-Y座標にプロットし、両軸の各ロット数が上中下で概ね3等分できる値で、9(=3×3)ロットに分割し、各 $R_d$ で比較を行った。

6.2.2 分析手順

6.2.2.1 被災分析エリアと分析データ

事例とした福島県中・県南地方のため池諸元は、「ため池DB」に登録されたデータをベースに、第V章と同じく福島県からの被災情報収集及び照合確認したものである。また、Table 15の被災度別ため池数は、第V章の分析で使用したものと同じである。対象域内のため池数は848個で、その内、位置情報が不明、重複登録、被災度不明等のデータ欠損があり、実際のため池母数は840個（歩留まり99.1%）となる。また、ため池DB中の諸元データ欠損により、さらにデータ数が少なくなる場合もある。なお、築堤材料に関しては、Table 13のため池DB中で盛土材が確認できるのは6（全て粘性土）池であり、平成25年度に実施された170箇所の一斉点検結果では、158箇所が粘性土であった。

Table 15 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方の被災度別ため池

The number of damaged earth dams based on damage degrees due to the Tohoku Earthquake in Central-Southern District of Fukushima Prefecture

ブロック	全数	被災レベル																
		0	1	2	3	4	5	不明	内集申域外			被災レベル						
県中	被災	64	0	10	7	35	7	2	3	被災	34	0	2	8	21	2	1	0
	無災	452	85	85						無災	307	367						
合計	550	149	85	10	7	35	7	2	3	合計	401	367	2	8	21	2	1	0
県南	被災	32	0	6	3	19	2	2	0	被災	23	0	2	5	10	5	1	0
	無災	243	47	47						無災	196	196						
合計	298	79	47	6	3	19	2	2	0	合計	219	196	2	5	10	5	1	0
中・南	被災	153	96	0	16	10	54	9	4	被災	57	0	4	13	31	7	2	0
	無災	695	132	132						無災	503	503						
合計	848	228	132	16	10	54	9	4	3	合計	560	503	4	13	31	7	2	0

6.2.2.2 過去の被害ため池との比較

複数の事例を比較した谷ら（1997）の研究を踏まえ、 $H$ はTable 16、 $L$ に関連した形状係数( $L/H$ )ではTable 17により、本研究の分析対象ため池と比較を行う。堤体諸元に係る分析順序は、堤高 ( $H$ ) 及び堤頂長 ( $L$ ) では、統計的手法や震度と $\omega_i$ などの他要因を考慮した分析を行い、その後、形状係数 ( $L/H$ )、体積係数 ( $H*L$ ) と比較検討を行う。また、堤体横断面形状に関しては、堤頂幅 ( $W$ )、上下流法勾配 ( $D, U$ ) 及び同勾配比 ( $D/U$ ) の順で検討し、 $H$ と $W$ 、 $H$ と $D/U$ 、 $W$ と $D/U$ を各々組み合わせた三等分で $R_d$ 比較を行った。Fig. 16には、ため池堤体形状諸元の模式図を示す。

Table 16 堤高とため池被害（十勝沖，宮城県沖，日本海中部地震）

The number of damaged earth dams based on dam-height by Tokachi-Oki, Miyagiken-Oki, and Nipponkai-Chube Earthquakes

堤高	十勝沖地震		宮城県沖地震		日本海中部地震	
	全数	被害率 (%)	全数	被害率 (%)	全数	被害率 (%)
0~4.9	932	138	3990	27	1235	123
5.0~9.9	241	55	2645	45	481	81
10.0~14.9	25	5	255	6	79	9
15.0~19.9	2	1.0	88	5	28	5
20.0~29.9	9	2	44.4	5	9	0
30以上	1	0	29	0	2	0
計	1208	202	7007	83	1834	218

\* 農林水産省地域計画課（1981）、溜池台帳（15m以上のものについては1969年以降のものは除く）

谷、長谷川高士：日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害、農業土木学会誌、第55巻第10号、p939-947

Table 17 形状係数（堤頂長／堤高）とため池被害（十勝沖，日本海中部地震）

Relationships between coefficient of dimensional shape ( $L/H$ ) and damages to earth dams during Tokachi-Oki and Nipponkai-Chubu Earthquakes

堤頂長/堤高	十勝沖地震		日本海中部地震			
	被害数	率 (%)	全数	被害数	率 (%)	被害率 (%)
0~2.49	0	0.0	8	0	0.0	0.0
2.5~4.99	7	3.4	72	2	0.9	2.8
5~7.49	16	7.9	193	26	11.9	13.5
7.5~9.9	22	10.9	182	19	8.7	10.4
10~19.9	81	40.1	639	77	35.4	12.1
20~29.9	27	13.4	316	35	16.0	11.1
30以上	49	24.3	403	59	27.1	14.6
計	202	100.0	1834	218	100.0	11.9

谷、長谷川高士：日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害、農業土木学会誌、第55巻第10号、p939-947

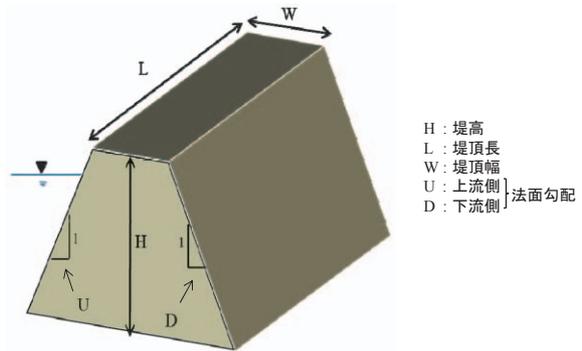


Fig. 57 ため池堤体形状諸元模式図

Earth dam schematic diagram of dimensional shape parameter

6.3 結果と考察

6.3.1 堤高と被災率 ( $R_d$ )

$H$ は区分の仕方でも $R_d$ がどう変化するか、また、ため池被災要因とした震度及び堤軸 $\omega_i$ を加味した場合でも $R_d$ に差が生じるか等、 $H$ と $R_d$ の関係を検証した。

6.3.1.1 堤高の定尺区分と $R_d$

Table 18では、福島県中・県南地方（以下、「対象全域」という）内ため池の堤高 $H$ について、対象全域の（ため池数840個）と対象被災集中域（以下「集中域」という、ため池数220個）に分けて、（谷ら，1987）のTable 16の区分でロッド分けして表示した。最大度数のロッドは、堤高5m未満が4分の3以上で、過去3地震の事例と同じである。 $H$ 区分毎の $R_d$ の傾向は、 $H$ が高くなるに従い $R_d$ が上っており、4つの地震動被災傾向には大きな相違は見られない。

Fig. 58は、Table 16の区分により $H=20m$ 未満までを5.0m毎及び20m以上30m未満と30m以上の計6区分し、対象全域の被災及び無災ため池個数をピンクと青色で区別した棒グラフで、また、当該 $R_d$ をオレンジ折線で示した。さらに集中域の $R_d$ を赤色線で図示した。加えて、Table 16から十勝沖（水色点線）、宮城県沖（緑色点線）、

日本海中部（紫点線）の各  $R_d$  を重ね合わせた。対象全域の堤高区分毎の  $R_d$ （オレンジ線）は、 $H=15\text{m}$ 未満までは  $R_d=20\%$ 未満で安定していたが、 $H=5\text{m}$ 以上で一旦、 $R_d=50\%$ まで上昇し、次の区分で  $R_d=0\%$ 、その次で  $R_d=57\%$ と大きく上下した。ため池個数が少なくなるに伴って  $R_d$  の増減振幅が拡大し、 $30\text{m}$ 以上では7個中に被災池が4個だった。集中域  $R_d$ （赤線）では、 $H=15\text{m}$ 未満までの範囲で  $R_d=40\%$ から  $R_d=50\%$ まで上昇するなど、対象全域と比べ震度が大きいエリア内の  $R_d$  は2倍以上になっていた。

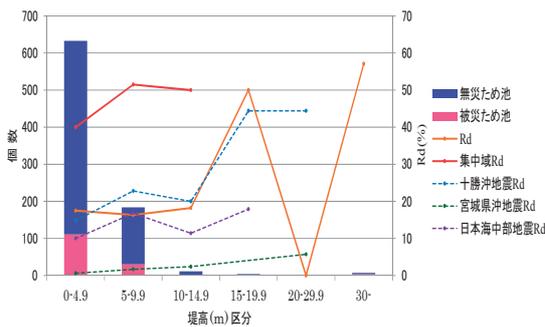
過去3地震との比較では、緑点線の宮城県沖は全池数が対象全域の8倍以上で  $R_d=1\%$ 未満から6%の低いレベルで上昇が見られる。紫点線の日本海中部では全数が2.2倍で  $R_d$  は10~20%の範囲にあり、水色点線の十勝沖では全数が1.4倍で  $R_d$  は  $H$  が  $20\text{m}$ 未満までは、対象全域とほぼ同様な傾向であった。以上5事例のグラフ表示からは、 $H$  が大きいほど  $R_d$  が大きくなると明確な判定はできないと考えられる。

**Table 18** 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高別被災数

The number of damaged earth dams based on dam height in Central-Southern District of Fukushima Prefecture during the Tohoku Earthquake

堤高	福島県(中・南域)				同被災集中域				比率(%)	
	①全数	率(%)	②被災数	率(%)	③全数	率(%)	④被災数	率(%)	③/①	④/②
0-4.9	633	75.4	111	17.5	185	84.1	74	80.4	40.0	29.2
5-9.9	184	21.9	30	16.3	33	15.0	17	18.5	51.5	17.9
10-14.9	11	1.3	2	18.2	2	0.9	1	1.1	50.0	18.2
15-19.9	4	0.5	2	50.0	0	0	0	0	0	0
20-29.9	1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
30以上	7	0.8	4	57.1	0	0	0	0	0	0
計	840	100.0	149	100.0	220	100.0	92	100.0	41.8	26.2

\* 全域の7つの被災池には、二つ調整池、羽鳥ダム及び苅掛ダムが含まれている。

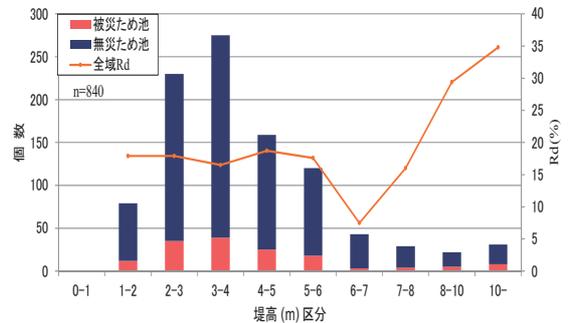


**Fig. 58** 東北地方太平洋沖の地震福島県中・県南地方のため池堤高別被災率

Damage ratio of earth dams based on dam height in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

**Fig. 59** は、対象全域のため池の  $H$  を  $1\text{m}$ 毎に区分した個数と  $R_d$  を図示した。 $H=3\text{m}$ 以上  $4\text{m}$ 未満の相対度数28%が最大で、 $R_d$  は  $H=1\text{m}$ 以上から  $H=6\text{m}$ 未満までの6区分が16~18%の範囲内にあり、 $H$  が高くなるに伴う  $R_d$  増加は見られない。さらに  $H=6\text{m}$

~  $7\text{m}$ 未満で  $R_d$  は一端8%まで下がり、 $H=8\text{m}$ 以上から増加傾向になり、 $H=10\text{m}$ 以上で  $R_d=35\%$ まで上昇するが、区分個数は相対度数で2~3%に縮小していた。



**Fig. 59** 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高 (1m毎) 別被災率

Damage ratio of earth dams based on dam height divided with 1 m each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.1.2 堤高の統計的区分と被災率 ( $R_d$ )

**Fig. 60** では、対象全域と集中域のため池を  $H=0.5\text{m}$ 毎に最大  $20\text{m}$ まで累積度数を図示した。集中域内全ため池（青線）は、累積度数25%（第1四分位）が  $H=2.0\text{m}$ に対し、全域内全池（緑線）が  $2.5\text{m}$ となり、それ以上でも累積度数で両方の線が交わらない。また、全池を全域と集中域の堤高  $5\text{m}$ で比べると、累積度は全域83%と集中域90%で、全域の  $H=5\text{m}$ 以上ため池の割合が多い。このことから、集中域は盆地内において堤高が全般に低めである。被災池は全域  $H=5\text{m}$ までの被災池度数（赤線）と全池度数（緑線）の線はほぼ同じ所であり、集中域でも  $H=5\text{m}$ までの被災池度数が幾分高い程度であり、高い堤高ほど被災が高まる傾向は見られない。さらに、 $H=10\text{m}$ の全域全池の緑線は、累積度数97%の  $2\sigma$ （標準偏差）以上にあり、 $H=10\text{m}$ 以上がため池が如何に例外的な高さか理解できる。このことを **Fig. 58** 及び **Fig. 59** と見比べると、集中域は  $H$  が  $5\text{m}$ 未満で若干  $R_d$  が低めであり、全域では  $H=6\text{m}$ までは  $R_d$  の変化は少なく、 $7\text{m}$ 付近で  $R_d$  が一旦低下し、 $8\text{m}$ 以上で上昇と同じになっていることが理解できる。

**Fig. 61** は **Fig. 60** の堤高累積度数から、対象全域ため池を四分位毎に、第1四分位区間を  $H=0-2.5\text{m}$ 、第2を  $H=2.6-3.5\text{m}$ 、第3を  $H=3.6-4.9\text{m}$ 、第4を  $H=5.0\text{m}$ 以上で区分し、被災（ピンク）と無災（青色）池個数の棒グラフと  $R_d$  の折線である。堤高別  $R_d$  は4区間で16-18%とほぼ均等となり、**Fig. 59** の高堤高で高い  $R_d$  も第4四分位数の  $H=5.0\text{m}$ 以上ため池が1ロッドとなって、平均化した形になった。この図からも、「堤高の大きさと地震に伴う  $R_d$  上昇」は説明できない。

**Fig. 62** では、対象全域の堤高  $H$  を八分位で分割し、**Fig. 61** と同様に区分毎に集計し、区分毎に  $R_d$  を図示し

た。八分位の  $R_d$  も全区分で15-20%の範囲内にあり、 $H$  による大きな変化は見られない。また、Fig. 59 では  $H = 10\text{m}$  以上で  $R_d = 36\%$  だったものが、母数  $H = 6\text{m}$  以上では  $R_d = 20\%$  前後に低減しており、 $H$  の大きいため池では母数が少ない場合に  $R_d$  は大きくなるのが分かる。

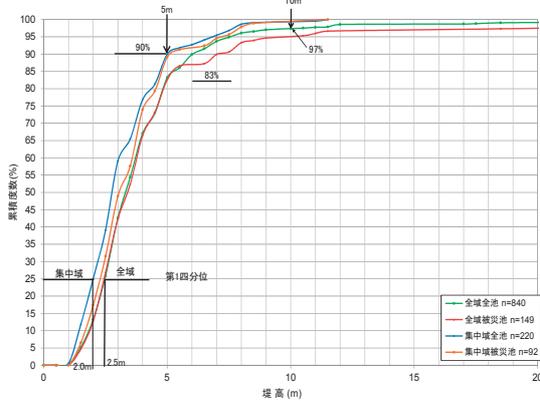


Fig. 60 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池被災別堤高累積度数分布

Accumulate frequency distribution of whole earth dams and damaged earth dams based on dam height in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

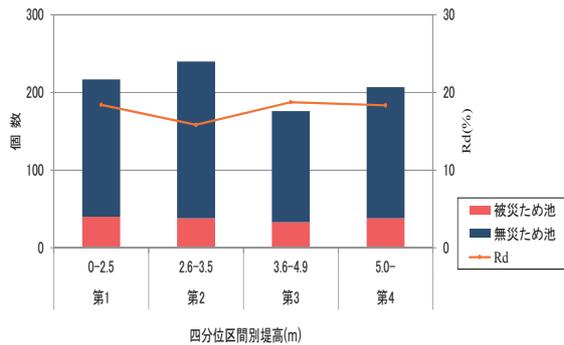


Fig. 61 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高四分位区分被災率

Damage ratio of earth dams based on dam height divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

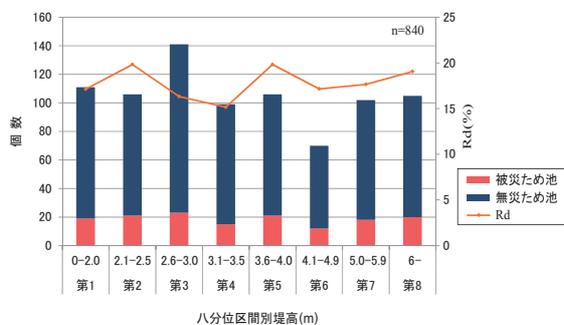


Fig. 62 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高八分位区分被災率

Damage ratio of earth dams based on dam height divided with one eighth in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 63 では、横軸を対象全域内の堤高とし、堤高0.5m毎と Fig. 58, Fig. 59, Fig. 61 及び Fig. 62 の各ロッド内平均堤高と当該ロッドの  $R_d$  を縦軸にプロットし、区分毎に結んで重ね合わせた。なお、全域には  $H = 30\text{m}$  以上の池が7個有るが、スケールの関係で25mまで表示した。 $H0.5\text{m}$  毎 (青線) では、堤高  $H = 6\text{m}$  を超える付近から  $R_d$  の振れ幅が大きくなり、 $H$  の増加に伴いさらに増幅する。 $H 1\text{m}$  毎 (紫線) では振れ幅は全般的に縮小し、9m付近から  $R_d$  は概ね30%で安定化する。Fig. 58 の6区分 (緑線) は  $H = 11\text{m}$  付近まで  $R_d$  の変化は少ないが、12m以上で  $R_d$  は最も大きく振れている。これに比較し四分位 (オレンジ線) 及び八分位区分 (赤線) では、全堤高区間で変動の少ない  $R_d$  となっている。このような高い堤高の  $R_d$  上昇と振れ幅増大は、母数となる池個数が少ないことと関係がある。

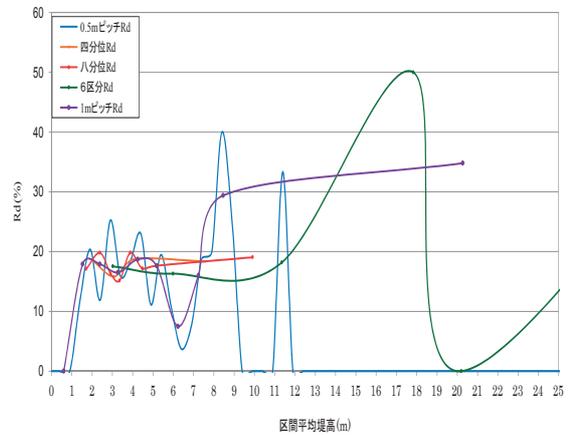


Fig. 63 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高区分別被災率比較

Comparison of damage ratio of earth dams among various average dam heights based on several division patterns in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

### 6.3.1.3 堤高の四分位・震度・堤軸角度別区分と被災率 ( $R_d$ )

対象全域のため池は、第IVと第V章で震度増加に伴う  $R_d$  の増加を確認しており、堤高による  $R_d$  の変化を震度レベル別に比較可能である。Fig. 64 では、横軸にため池推計震度を①5.0以下、②5.1-5.4、③5.5-5.8、④5.9以上に4区分し、縦軸を堤高に被災度別に第V章と同じ色分けで表示した。ここでは無災池 (□) の堤高を下側 (0の下) 領域に表示することで、被災傾向を対比し易くした。震度が大きくなるに伴い被災池数は増加するが、特に高い堤高ほど被災数が増える傾向は見られない。

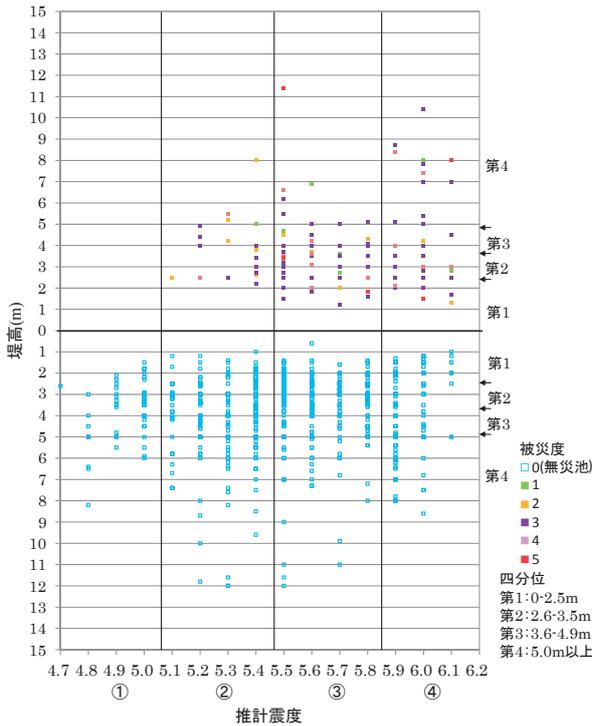


Fig. 64 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池震度及び堤高別被災度

Damage degrees of earth dams based on seismic intensity and height of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 65 は、横軸に Fig. 64 の 4 震度区分と縦軸に Fig. 61 の 堤高四分位を合成した 16 ロット毎の  $R_d$  を図示し、堤高区分毎に第 1 を赤線、第 2 を青線、第 3 を紫線、第 4 を緑線で結んだ。どの堤高区分も震度の上昇によって、①の 0% から④の  $R_d = 30\%$  前後まで確実に  $R_d$  が増加するが、第 1 から第 4 分位まで  $H$  による  $R_d$  差は殆ど見られない。

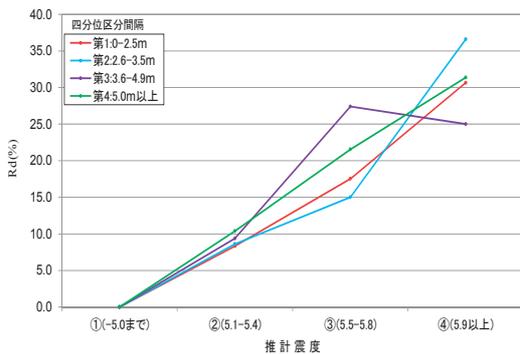


Fig. 65 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池震度及び堤高区分別被災率

Comparison of damage ratio of earth dams based on seismic intensity and height of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 66 では、横軸はため池堤軸震央方向角度 ( $\omega_i$ ) を各  $90^\circ$  で区分し、Fig. 64 の震度と同様の方法で整理した。第 V 章で見たように対象全域  $\omega_i = 0-180^\circ$  の区間の

被災池は少なく、 $\omega_i = 180-360^\circ$  で被災池数が増えるのは確認できるが、堤高によって被災池が増える傾向は見られない。

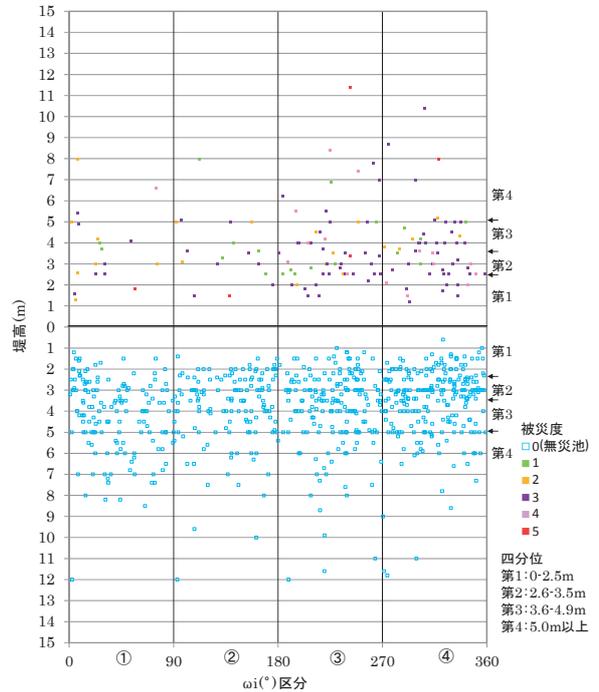


Fig. 66 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤軸震央方向角度及び堤高別被災度

Damage degrees of earth dams based on angle of dam axis with respect to the epicenter and height of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 67 では、Fig. 65 と同様の方法で Fig. 66 の 4 つの  $\omega_i$  区分を横軸に、Fig. 61 の 4 堤高区分を合成した 16 ロット毎の  $R_d$  を縦軸に図示し、堤高区分毎に色分けして線で結んだ。Fig. 65 の震度ほどではないが、 $\omega_i$  区分では  $R_d$  が  $\omega_i = 180-270^\circ$  で全体的に最も大きくなるが、 $H$  による  $R_d$  の変化は不規則で、第 1 から第 4 分位まで  $H$  の高低による  $R_d$  差は殆ど見られないことが分かる。

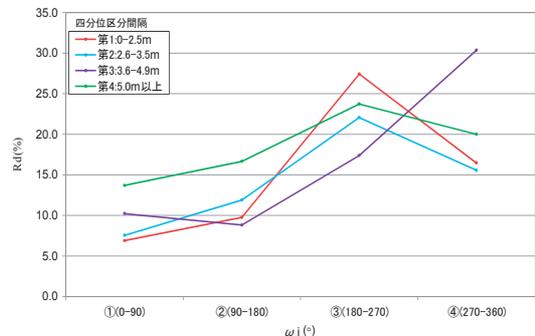


Fig. 67 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤軸震央方向角度及び堤高区分別被災率

Comparison of damage ratio of earth dams based on angle of dam axis with respect to the epicenter and height of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

### 6.3.1.4 堤高と被災率 ( $R_d$ ) のまとめ

Fig. 68 では, Fig. 63 の内で  $H=0.5\text{m}$  毎以外の  $R_d$  を縦軸に, 横軸を各区分の当該平均堤高をプロットし, その回帰式を図示した。回帰線は一見して堤高の増大に伴い  $R_d$  も増加し, 決定係数が  $R^2=0.425$  で正の相関が見えるが, 実際は四分位黄●と八分位区分緑◆では  $R_d=15\sim 20\%$  の幅で平均  $H$  が  $1\sim 10\text{m}$  範囲では変動が殆ど見られない。図中で最も  $R_d$  の振れ幅の大きい6区分の紫▲の平均  $H$  が小さい順に①～⑥の番号を付けたが, ③までは  $R_d=15\sim 20\%$  の幅の中にあるが, ④では  $R_d=50\%$  と③までの範囲から大きく逸脱し, ⑤では  $R_d=0\%$ , ⑥で  $R_d=57\%$  とさらに大きく振れた。さらに  $1\text{m}$  毎の赤■も同様に, 平均  $H$  が  $6\text{m}$  以上のものを低い順に a, b, c, d を付けて比較すると, 確かに a～d に  $H$  が高くなるに従って  $R_d$  は大きくなるが, 上昇パターンは a～c と c～d は大きく異なる。

以上から, 一定規模の度数 (= 母数) が確保された四分位及び八分位区分では,  $H$  の大きさに関係なく  $R_d$  は一定範囲内にあり, 母数にバラツキのある6区分及び  $1\text{m}$  毎区分では, 堤高が小さい時に  $R_d$  は  $20\%$  以下で, 堤高が大きい場合に  $R_d$  は大きく変動している。

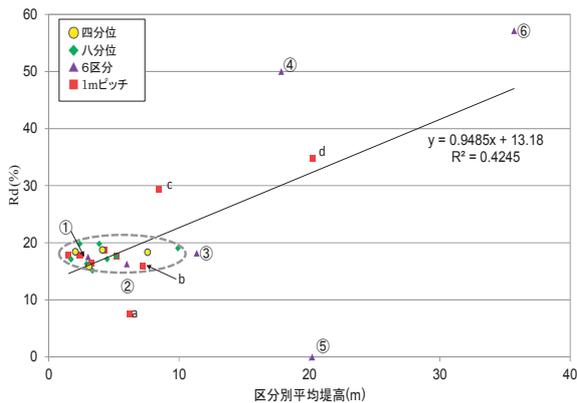


Fig. 68 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池区分別平均堤高と被災率

Relationships between damage ratio of earth dams and average height of earth dams under various division patterns in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 69 は, 堤高区分毎の相対度数と  $R_d$  の変化を見るために, 横軸に各  $H$  区間の相対度数と縦軸に区分毎の  $R_d$  を色分け図示した。相対度数が  $10\%$  以上の灰色破線で囲ったところは,  $R_d$  が  $15\sim 20\%$  のほぼ一定範囲内にあり, 相対度数が小さくなるほど  $R_d$  の増減が大きくなっている。因みに, Fig. 68 で6区分の紫▲に①～⑥まで番号付けのと同じ番号を Fig. 69 の同じ6区分の紫▲プロットにつけたが, 相対度数  $1\%$  以下では平均  $H$  が  $17\text{m}$  以上の④～⑥で  $R_d$  が大きく変動していた。これより,  $H$  の大きさで  $R_d$  が安定的に上昇する傾向は見出せない。さらに  $1\text{m}$  毎の赤■にも  $H$  が小さい順に a～d

を付けたものでは, 赤■は相対度数が  $5\%$  を下回るところから一定幅を逸脱し, 相対度数がさらに小さくなると  $R_d$  の増幅の度合いが益々大きくなる。加えて  $0.5\text{m}$  毎の黒×で見ると, さらに相対度数と  $R_d$  の関係がよく分かる。即ち,  $R_d$  は  $H$  の高さで増加するものではなく,  $R_d$  算定の分母黒×になる母数が少なくなることによって, 十分な度数が確保できず, 統計的確率がバラついたと考えられる。そのため,  $R_d$  を算定する時は, 当該区分内の相対度数を  $10\%$  程度は確保しなければ, 信頼できる  $R_d$  は確保できないことになる。なお, 対象地域内  $800$  個のため池で,  $R_d$  の信頼性を高めるには, 母数が  $100$  個程度必要となる。

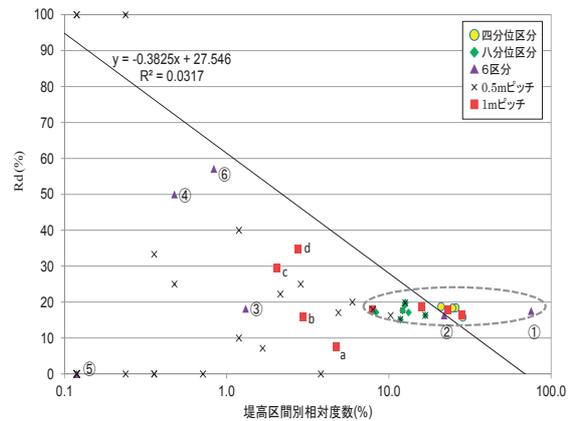


Fig. 69 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池区分別堤高相対度数と被災率

Relationships between damage ratio of earth dams and relative frequency based on various division patterns of dam height in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

### 6.3.2 堤頂長と被災率 ( $R_d$ )

ここでは, 前節の堤高 ( $H$ ) と同様な方法で, 堤頂長 ( $L$ ) と  $R_d$  の関係を検証する。

#### 6.3.2.1 堤頂長の定尺区分と被災率 ( $R_d$ )

ため池の  $L$  と地震動被災の関係进行分析した研究が殆どなく, (谷ら, 1987) も「特に関係は見られない」として, 関連図表が全く提示されていない。そのため, オソドックスに  $L=50\text{m}$  区分で, Table 17 の形状係数 ( $L/H$ ) 区分を踏まえた  $L$  の定尺区分と, 四分位及び八分位区分によって,  $R_d$  の関係を比較検討した。

先ず Fig. 70 は, 対象全域のため池  $L$  を  $50\text{m}$  毎で, ①  $L=0\sim 50\text{m}$  未満, ②  $L=50\sim 100\text{m}$  未満, ③  $L=100\sim 150\text{m}$  未満, ④  $L=150\sim 200\text{m}$  未満, その後を⑤  $L=200\sim 300\text{m}$  未満, ⑥  $L=300\text{m}$  以上の6分割し, 前節と同様に区分毎の池数の棒グラフと  $R_d$  の折線グラフである。対象全域の①と②区分の合計度数は  $84\%$  で,  $R_d$  は①の  $10\%$  台から順次上昇し, ⑤の  $L=200\sim 300\text{m}$  未満でピーク  $R_d$  が  $50\%$  となった。

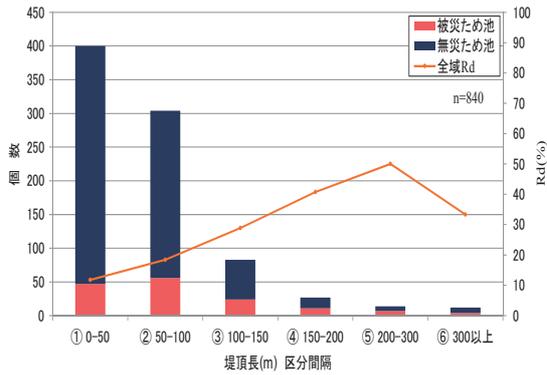


Fig. 70 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤頂長別 (50m毎) 被災率

Damage ratio of earth dams based on dam crest length divided with 50 m each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 71 は, Table 17 から  $L$  の区分間隔を逆算して, ① $L=12.5$ m未満, ② $L=12.5-50.0$ m未満, ③ $L=50.0-112.5$ m未満, ④ $L=112.5-200$ m未満, ⑤ $L=200-600$ m未満, ⑥ $L=600-900$ m, ⑦ $L=900$ m以上の7分割し, 対象全域ため池を①~⑦の区分毎に池個数の棒グラフと  $R_d$  の折線グラフである。①から③の合計度数は89%であるが,  $R_d$ は①の20%台から②で10%台に一端低下し, その後, ⑤で緩いピーク  $R_d=41\%$  (区間度数8%) となり, さらに⑦で  $R_d=100\%$  に跳ね上がっており, 全体的には  $L$  が長くなるに伴って  $R_d$  は上昇傾向であった。

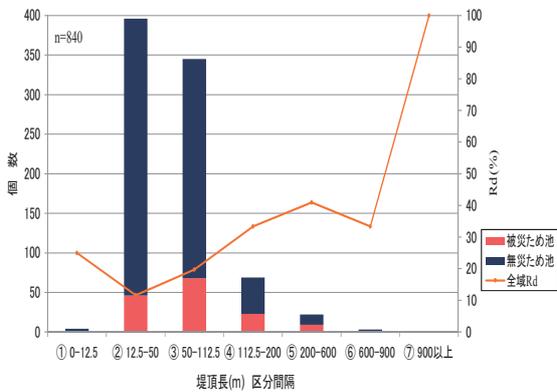


Fig. 71 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤頂長別 (形状係数ベース) 被災率

Damage ratio of earth dams based on dam crest length divided with the coefficient of shape ( $L/H$ ) pattern in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 72 は, 正の非対称分布の初期区間を細分化し,  $L=100$ mまでを20m毎で①~⑤に5分割し,  $L=200$ mまでを50m毎で⑥と⑦の2区間に, さらに  $L=200$ m以上の⑧で区分し, 池個数の棒グラフと  $R_d$  の折線グラフである。全域の①~③までの合計度数は幾分低下し,  $R_d$ は最長区間⑧まで一貫して上昇して  $R_d=40\%$  を超えていた。

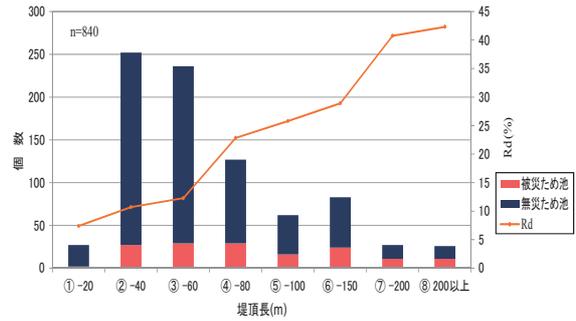


Fig. 72 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤頂長別 (20m毎) 被災率

Damage ratio of earth dams based on dam crest length divided with 20m each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.2.2 堤頂長の統計的区分と被災率 ( $R_d$ )

Fig. 73 は, 対象全域及び集中域のため池  $L$  を10m毎の累積度数分布で最大200mまでの図である。図中の累積度数25% (第1四分位)  $L$  の長さは, 全域と集中域共に  $L=35$ mであるが, 同50%では集中域の方が4m長くなっている。即ち, 盆地内の集中域内の  $H$  は低めでも,  $L$  は若干長めの割合が多かった。また, 被災池は第1四分位値が両域共に42mで, 全池35mよりも7mも長く, さらに被災池の第2四分位値で  $L=68$ mと全域全池より20m長くなっており。これは Fig. 55 の人口及び死者数で見た年齢が大きいほど死亡率が高いのと同じで,  $L$  が大きいほど  $R_d$  が大きくなる傾向になる。

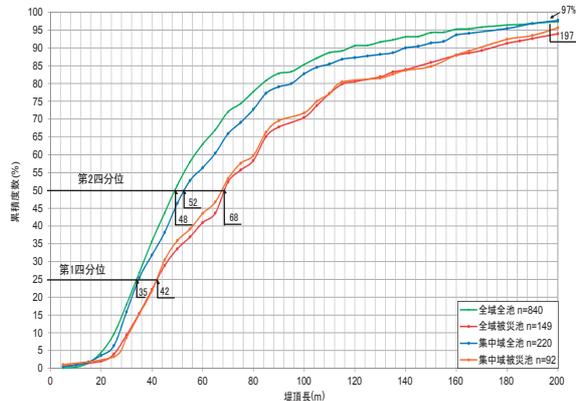


Fig. 73 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方等のため池堤頂長累積度数分布

Accumulate frequency distribution of earth dams and damaged earth dams based on dam crest length in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 74 では, 対象全域の  $L$  について四分位と八分位区分し, 各分位区間の被災と無被災で分けた池数の棒グラフと  $R_d$  の折線グラフを図示した。因みに, 四分位は被災池を黄, 無被災池を紫色に, 八分位では被災池を赤, 無被災を青色に, 各々の池数分だけを棒グラフにした。両分位とも  $L$  が大きくなるに伴い下側の被災池数が

徐々に増加した。 $R_d$ では、四分位の黒線は堅調な右肩上がりで、八分位のオレンジ線は第3から第5にかけて若干の浮沈はあるが概ね順調な上昇傾向を示している。特に第3から第4四分位間及び第5から第6以上の八分位で被災池数が大きく増加しており、八分位 $L$ の最長区間 $R_d=35\%$ 超と最短区間 $R_d=8\%$ では、 $R_d$ が4~5倍大きい。

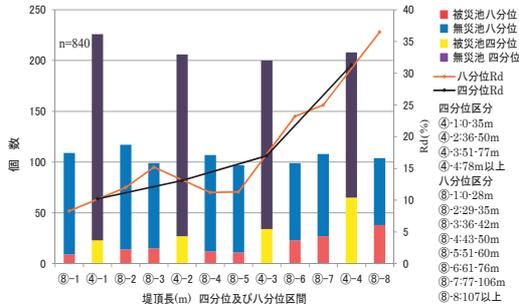


Fig. 74 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池四分位・八分位堤頂長別被災率

Damage ratio of earth dams based on dam crest length divided with quartile and with one eighth in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 75 は、横軸を対象全域の堤頂長 ( $L$ ) として、 $L$  が10m毎、Fig. 70~Fig. 72 及び Fig. 74 の各ロット内平均堤頂長と  $R_d$  を縦軸にプロットし、区分毎に結んで重ね合わせたものである。但し、スケールは  $L=360\text{m}$  までとした。まず、 $L=10\text{m}$  毎 (青線) では、 $L=15\text{m}$  以上80mまでは比較的  $R_d$  の振幅は大きくなかったが、それ以上は  $R_d=0\sim100\%$  で大きく振れ、母数が少ない状態で  $R_d$  は安定しないことが再確認できた。 $L=20\text{m}$  毎 (緑線) は安定的であるが、 $L=100\text{m}$  以上は Fig. 71 の50m毎と100m毎の  $R_d$  で、 $L=400\text{m}$  を超える範囲はスケール外にある。Fig. 70 の50m毎6区分 (紫線) では、母数が少ない  $L=200$  以上で  $R_d$  が50%と最も高くなっている。

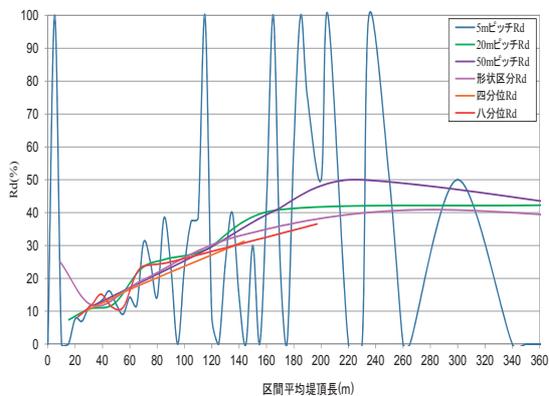


Fig. 75 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池区分別平均堤頂長の被災率比較

Comparison of damage ratio of earth dams among various average dam crest lengths based on several division patterns in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

また、Fig. 71 の形状係数区分 (ピンク線) では、 $L=400\text{m}$  以上が含まれず、 $R_d$  の初期区間以外は安定している。Fig. 74 の四分位 (オレンジ線) と八分位 (赤線) は、共に他の全ての曲線の間を通過し、 $R_d$  線全体の代表的な線と見なすことができる。

### 6.3.2.3 堤頂長の四分位・震度・堤軸角度別区分と被災率 ( $R_d$ )

Fig. 76 では、Fig. 64 と同様に横軸にため池推計震度を4区分し、縦軸に推計震度別に堤頂長  $L$  と被災度を色分けプロットした。無災池の堤頂長は Fig. 64 と同様に下方領域に表示し全体の被災傾向を見たが、震度が大きくなるに伴い被災池数が増えると共に、特に  $L$  が長い方にその傾向が強く見られる。

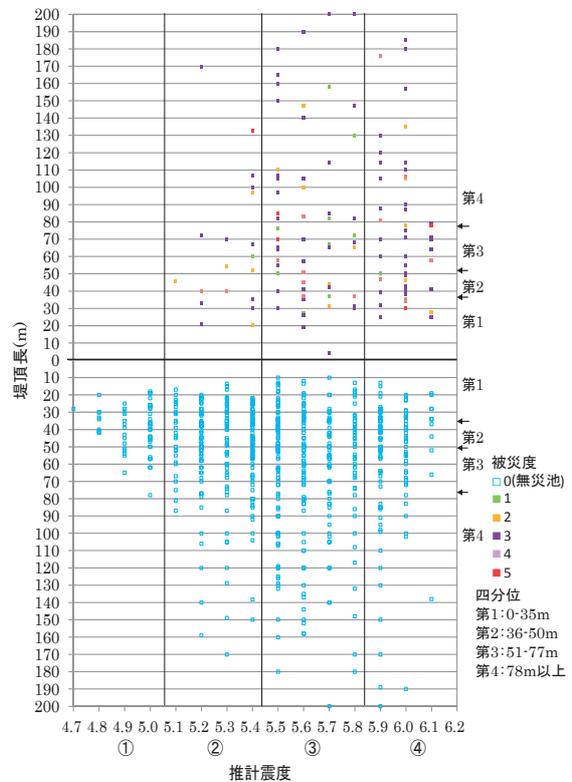


Fig. 76 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池震度と堤頂長別被災

Damage degrees of earth dams based on seismic intensity and crest length of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 77 は、Fig. 65 と同様に横軸に Fig. 76 の4震度区分と縦軸に  $L$  の四分位を合成した16ロット毎の  $R_d$  を図示した。全ての  $L$  区分で①震度区分 (震度5.0以下) は  $R_d=0\%$  であり、震度が大きくなるに伴って各  $L$  区分とも確実に  $R_d$  の増加は見られるが、 $L$  が最長の第四四分位 (緑線) では、常に  $R_d$  の値が他の区分より常に大きく、概ね第1分位 (赤線) の3倍、第3分位 (紫線) の2倍になっている。

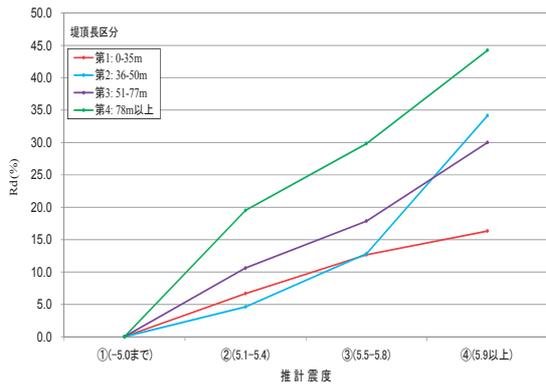


Fig. 77 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池震度及び堤頂長区分別の被災率

Comparison of damage ratio of earth dams based on seismic intensity and crest length of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 78 では、Fig. 66 と同様の方法で対象全域ため池を  $\omega_i$  と  $L$  及び被災度別に色分けプロットした。 $\omega_i$  が①及び②の0-180°区間の時と比較し、③及び④の180-360°区間の方が被災池は多くなり、また  $L$  の長い池の被災が多いことが分かる。

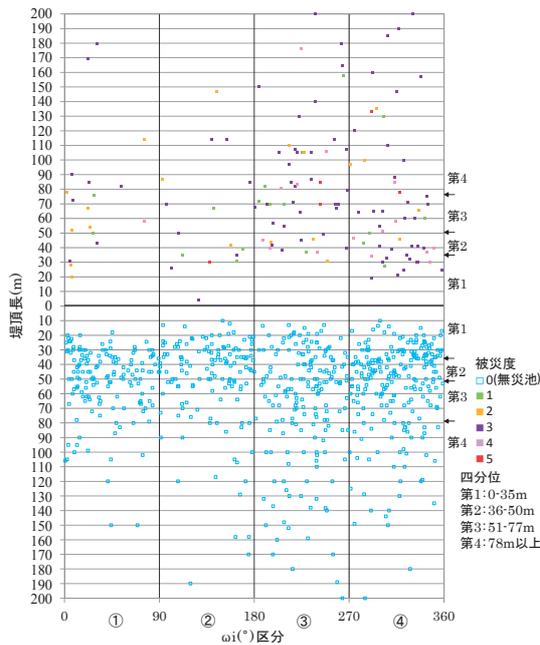


Fig. 78 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤軸震央方向角度と堤頂長別被災

Damage degrees of earth dams based on angle of dam axis with respect to the epicenter and crest length of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 79 では、Fig. 66 と同様に横軸にFig. 78 の4つの  $\omega_i$  区分と縦軸に  $L$  の四分位を合成した16ロット毎の  $R_d$  を図示した。 $L$  が最長の(第4分位緑線)では、全ての  $\omega_i$  区分で  $R_d$  が常に高いレベルにあり、 $L$  が長い方が  $R_d$  は大きくなるのがここでも明らかになった。一方、 $L$

が短い区分では堤体上流が震央方向側 ( $\omega_i = 0-180^\circ$ ) にある場合は、ピンクの破線で囲ったように  $R_d$  は全般に低い。また、堤体下流が震央方向側 ( $\omega_i = 180-360^\circ$ ) では、黄色破線で囲ったように  $R_d$  が一段高くなっていた。これは Fig. 77 の震度との関係ほど明確ではないが、 $L$  が長いほど堤軸向き ( $\omega_i$ ) の影響を受けて  $R_d$  が大きくなり、 $L$  が長い(緑線)場合の  $R_d$  は、他より概ね1.5~2倍となっていた。

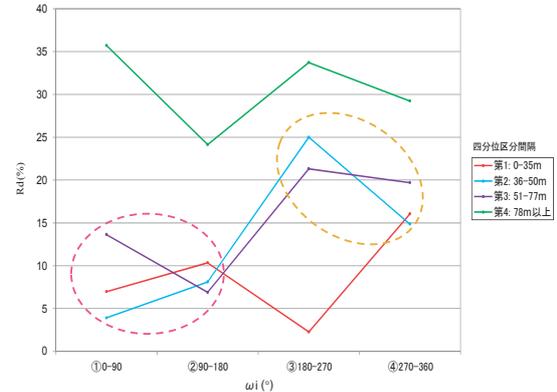


Fig. 79 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤軸震央方向角度及び堤頂長別被災率

Comparison of damage ratio of earth dams based on angle of dam axis with respect to the epicenter and crest length of dams in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.2.4 堤頂長と被災率 ( $R_d$ ) のまとめ

Fig. 80 では、 $L$  についてFig. 68 と同様、区分ロット毎の  $L$  の平均と  $R_d$  の関係を色分けプロットし、その回帰式を図示した。回帰線自体は  $L$  の増大に伴い  $R_d$  も増加して見えるが、傾き0.06、 $R^2=0.290$  で Fig. 68 と比較して正の相関は低く、傾きも緩くなっている。図中、破線(灰色)で囲った四分位と八分位区分の  $R_d$  は、回帰線の傾きより急で、相関も高いことが分かる。因みに、破線の範囲は  $L=200$ m未未満で、第8八分位区間の平均  $L=197$ mは、Fig. 73 の累積度数97% (標準偏差的には2 $\sigma$ と3 $\sigma$ の間)に当たり、大部分の堤頂長を包含している。図中に Fig. 68 と同様、最も  $R_d$  の振れ幅の大きい形状区分の黄土▲を平均  $L$  の小さい方から順に①~⑦の番号を付けたが、④までは破線(灰色)の中にあり、⑤の平均  $L=280$ mで  $R_d=41\%$ と距離が④の倍近く長くなった割に  $R_d$  は余り上ってない。また⑥では平均  $L=810$ mで⑤の約3倍の長さになったが、 $R_d$  は④と同じレベルまで下がった。さらに⑦では、平均  $L=930$ mで⑥より少しだけ長くなっただけで、 $R_d=100\%$ まで跳ね上がった。20m毎の赤■も同様に、 $L$  が大きくなるに従って  $R_d$  が上下に大きく振れていることが分かる。さらに50m毎紫▲について、同様に平均  $L$  が短い順にa~fを付けて観察すると確かにaからeまでは  $L$  が長くなるに従って  $R_d$  は大きくなるが、この上昇パターンはfで降下している。

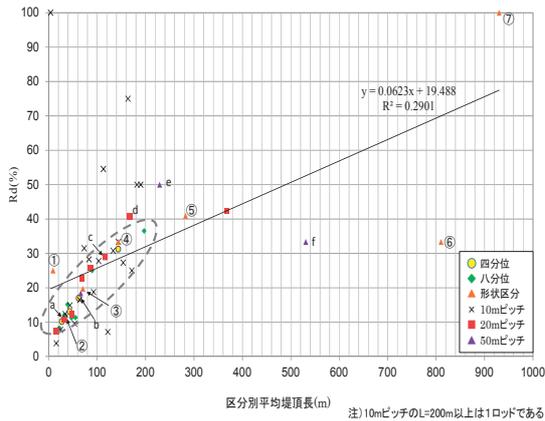


Fig. 80 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池区別平均堤頂長と被災率

Relationships between damage ratio of earth dams and average crest length of earth dams under various division patterns in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 81 ではFig. 69 と同様に  $L$  の区別相対度数と  $R_d$  の関係を図示した。堤高  $H$  の時とは違って、灰色点線で囲った八分位緑◆の相対度数10%以上で  $R_d = 8 \sim 37\%$  と  $4 \sim 5$  倍の差があった。これは最短の平均  $L = 22\text{m}$  及び最長の平均  $L = 197\text{m}$  であり、 $L$  が  $10\text{m}$  長くなる毎に  $R_d$  は  $1.62\%$  上昇する傾きになる。また、灰色破線の四分位黄●の相対度数20%以上では、 $R_d = 10 \sim 32\%$  と長短間に  $3 \sim 4$  倍の差があった。

Fig. 69 においては、 $R_d$  は  $H$  に関係なく  $15 \sim 20\%$  の範囲でほぼ一定であり、全般的に相対度数が小さくなるほど  $R_d$  の増減幅が大きくなることを確認したが、Fig. 81 では、 $R_d$  が  $L$  の長さに応じて大きくなる中で、 $L$  の区別相対度数と  $R_d$  の変動を観察する必要がある。そのため、Fig. 81 では、先ず八分位区分のプロットを囲った灰色点線の上下限に  $L = 200\text{m}$  相当の  $R_d = 38\%$  線と  $L = 20\text{m}$  相当の  $R_d = 8\%$  の所にピンク色一点破線で平行線を引いた。また、振幅が最も大きい形状区分黄土▲を平均  $L$  が小さい順に①～⑦の番号を付けた。因みに、これと同じ番号が Fig. 80 にも付けてある。先ず、①は  $L$  が最も短く、度数が  $1\%$  を下回っており平行線のほぼ中間にあり、②～③は灰色破線の右側(相対度数が大きい)にあって、四分位の同じ平均  $L$  とほぼ同じ  $R_d$  水準にある。④は平均  $L = 144\text{m}$  であるが、灰色点線の左側(相対度数は  $10\%$  以下)にあり、八分位の同じ平均  $L$  とほぼ同じ  $R_d$  水準にある。⑤は平均  $L = 282\text{m}$  の相対度数  $3\%$  でほぼピンク線上にあるが、同じ平均  $L$  とほぼ同じ  $R_d$  水準にある。⑥は平均  $L = 810\text{m}$  の相対度数  $0.4\%$  でピンクの延長線の下側にあり、低い  $R_d$  水準になっていた。⑦には  $L = 930\text{m}$  の被災池1個だけで  $R_d = 100\%$  で過大である。同様に  $50\text{m}$  毎・ $6$  区分紫▲で a~f を付けて検討したが、結果は形状区分と殆ど同じであった。

これは Fig. 69 の考察結果と同じで、相対度数  $10\%$  で

は安定的であった  $R_d$  が、度数  $5\%$  を切ると本来あるべき水準から逸脱が始まり、さらにその度数が小さくなると  $R_d$  の増幅の度合いが益々大きくなる。即ち、 $R_d$  は相対度数  $10\%$  が確保される場合は  $L$  の長さで増加するが、相対度数(母数)が  $10\%$  より低下すると統計的確率としてはバラツキが大きくなる。 $R_d$  を被災池と無被災池から算定する時は、当該区分内の相対度数を  $10\%$  程度(母数で  $100$  個程度)、最低でも  $5\%$  以上確保しなければ、ある程度的な被災  $R_d$  率評価はできないことになる。

以上の考察結果から何故過去の被害研究では正反対の結果となったかである。正の非対称分布のため池では、大多数の  $L$  や  $H$  は小さいものばかりであり、 $R_d$  算定時の小規模池の相対度数(母数)は必然的に大きく、その分  $R_d$  はバラツキが少なく、かつ  $R_d$  の値が低くなる可能性が高い。逆にサイズの大きいため池は、計算時の母数が極めて少なく、 $R_d$  は極端に高くなるか又は低くなる可能性が高い。堤高が大きいほど危険性が高いと一般に認識される中で、 $R_d$  が高いという結果は説明が付き易く、特に疑う必要がない。一方、堤頂長  $L$  に関しては、少ない母数で  $R_d$  は大きく増減する中で、ため池の規模は通常堤高によって代表され、特に長い堤頂長と  $R_d$  の関係を深く考察する必要もなかったと考えられる。

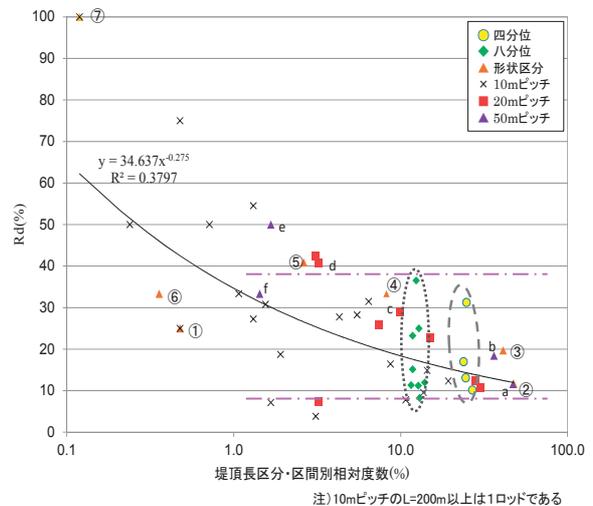


Fig. 81 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池区別堤頂長相対度数と被災率

Relationships between damage ratio of earth dams and relative frequency based on various division patterns of dam crest length in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

### 6.3.3 形状係数 ( $L/H$ )・体積係数 ( $L*H$ ) 別区分と被災率 ( $R_d$ )

(谷ら, 1987) は、Table 17 でため池を  $L/H$  と被害率 ( $\approx R_d$ ) の関係を検証していた。本節では、先ず堤高 ( $H$ ) 及び堤頂長 ( $L$ ) と  $R_d$  の関係を比較検討し、 $L/H$  から  $L*H$  と順にその関係を検討する。

6.3.3.1 堤高 (H) 及び堤頂長 (L) と被災率 (R<sub>d</sub>) の関係

Fig. 82 は、Fig. 61 と Fig. 63 から H の四分位区分及び八分位区分別の R<sub>d</sub> を、Fig. 75 からは、L の四分位及び八分位区分別の R<sub>d</sub> を重ね合わせたグラフである。前節の考察結果「H は R<sub>d</sub> に関係なく、L は長いほど R<sub>d</sub> は上昇」は、過去の研究結果「H と R<sub>d</sub> は関係があり、L は R<sub>d</sub> と無関係」と正反対の結果となっている。Fig. 82 から前節の考察結果が明らかで、H の R<sub>d</sub> は、統計的確率は15~20%の狭い変動範囲にあり、L では、最短の7%から最長の35%と5倍以上の開きがある。

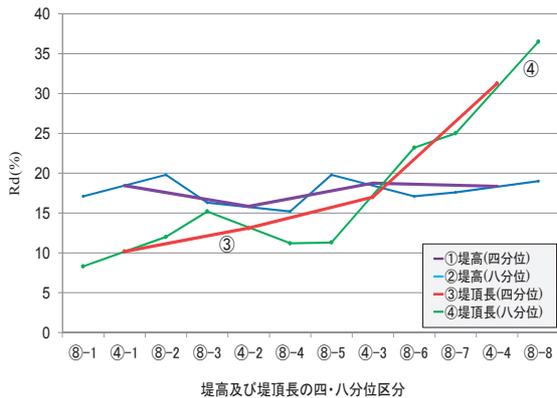


Fig. 82 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池四・八分位区分堤高及び堤頂長被災率

Comparison of damage ratios of earth dams based on scale of dam height and crest length divided with quartile and with one eighth in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 83 には、H 及び L と R<sub>d</sub> の関係を比較するため、L を横軸に H を縦軸として被災度別に色分けでプロットした。ここではため池の規模を考慮した判読のためにスケールを L=200m 以下、H=20m 以下に制限した。被災ため池は比較的高い H と長い L にもランダムに見られ、敢えて言えば長い堤頂長側に被災池が多めに見える。因みに、Table 17 でのため池の L/H と R<sub>d</sub> の関係分析を踏まえ、L/H=10 のラインを真中斜め線に引いたが、L/H=5 以下では該当ため池が極めて少なく、被災池は L/H=10 以上のラインよりも下の方により多く見受けられている。

6.3.3.2 形状係数と被災率 (R<sub>d</sub>)

Fig. 84 は、Table 17 の区分に従い対象全域を L/H で区分して被災池を赤、無被災を青色の棒グラフと各ロット別に R<sub>d</sub> を計算してオレンジ折線で結んだ。また、Table 17 の日本海中部地震の紫色 R<sub>d</sub> 線を重ね合わせて比較した。谷らが「L/H=5 を超えると被害率はほぼ同じで、5 以下では率は小さくなり、2.5 以下では被害は発生していない」とした結果が紫線に反映されている。両 R<sub>d</sub> 線は L/H が 20 未満までは概ね類似した傾向を示しているが、係数 20 以上では対象全域の R<sub>d</sub> が 2 倍以上になっている。この背景には、日本海中部地震の被災エリアの L/H=20 以上の全池数が相対的に大きいことで、R<sub>d</sub> が上昇しなかったことが考えられる。また、L/H=2.5~5 未満では、池母数が過少ないため、R<sub>d</sub> が大きくなることも考えられる。

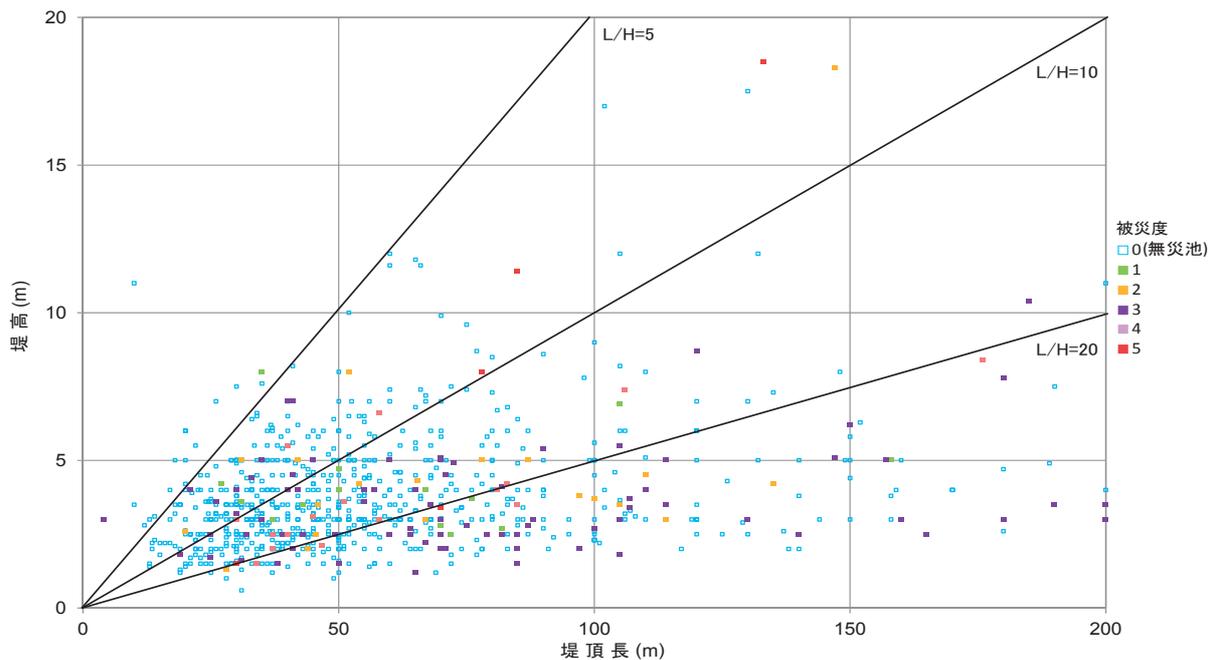


Fig. 83 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高及び堤頂長と被災度

Damage degree of earth dams based on scale of dam height and crest length in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

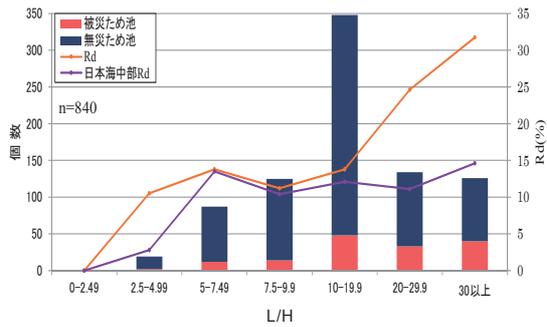


Fig. 84 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池形状係数と被災率

Damage ratio of earth dams based on the coefficient of shape ( $L/H$ ) divided with 2.5 each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 85 (a) では、Table 17 から日本海中部地震の被害池数と無被害池数をピンクと青の棒グラフで、区分毎の  $R_d$  を折線グラフで図示した。また、Fig. 85 (b) は当該地震で被災した青森・秋田両県のため池 DB を分母とした場合の池数とその  $R_d$  である。Fig. 85 (a) の無災ため池に関する資料は、被災関係市町村から聞き取ったとあり、それ以上詳しくは分からない。Fig. 84 の対象全域のため池  $L/H$  別の度数分布と Fig. 85 (a) の分布形態では微妙に異なっているが、Fig. 85 (b) の度数分布の棒グラフとでは、両方はかなり似かよっており、 $R_d$  の傾向も分母が対象域の 4 倍であるために全体として  $R_d$  は低下するが、区分毎の上昇傾向はかなり類似したものになった。さらに Fig. 85 (a) で  $R_d$  が  $L/H = 5$  以上で増加しないのは、 $L/H = 10$  以上無災ため池の個数が相対的に過大であったとも推定できる。因みに、 $L/H$  が大きくなるほど、通常、ため池規模も大きくなるため、数量として捕捉する確実性も高くなるのが考えられる。何れにしても、ため池  $R_d$  を統計的確率で求める際には、如何に無災池数を的確に捕捉できるかが重要である。

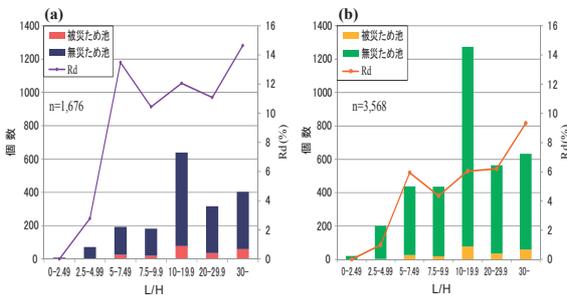


Fig. 85 日本海中部地震のため池形状係数 ( $L/H$ ) 別被災率 ( $R_d$ )  
Damage ratio of earth dams based on the coefficient of shape ( $L/H$ ) divided with 5.0 each in Aomori & Akita Prefectures due to Nipponkai-Chubu Earthquake

Fig. 86 は、Fig. 84 の  $L/H$  を 1.0 毎で区分した被災及び無災池のヒストグラムと  $R_d$  の折線グラフである。

Fig. 84 でも  $L/H$  の増加に伴う  $R_d$  の顕著な上昇が見られたが、ここでは  $L/H$  が 20 までは  $R_d$  が幅 10~20% で上下し、20 以上では上下振れ幅はさらに大きくなるが、 $R_d$  は概ね上昇傾向であった。

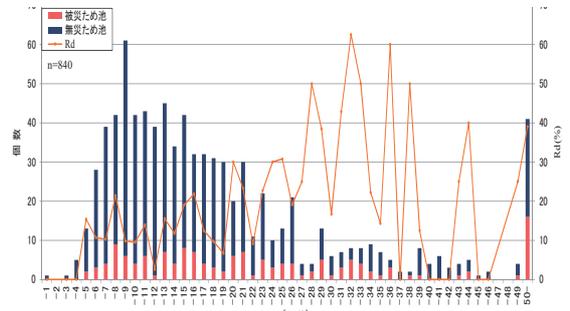


Fig. 86 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方等のため池形状係数別 (1.0 毎) 被災率

Damage ratio of earth dams based on the coefficient of shape ( $L/H$ ) divided with 1.0 each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 87 では、Fig. 61 と同様に①第 1 の  $L/H = 0-9.39$ 、②第 2 の  $L/H = 9.40-14.48$ 、③第 3 の  $L/H = 14.49-22.44$ 、④第 4 の  $L/H = 22.45$  以上に四分位区分し、区分ロッド毎の  $R_d$  をオレンジ折線で図示した。①と②は  $R_d = 11-13\%$  が、③で  $R_d = 18\%$  が上昇し、④で  $R_d = 30\%$  と急上昇している。ここから  $H$  に対して  $L$  の比率が大きい方が、 $R_d$  を押し上げると考えられる。

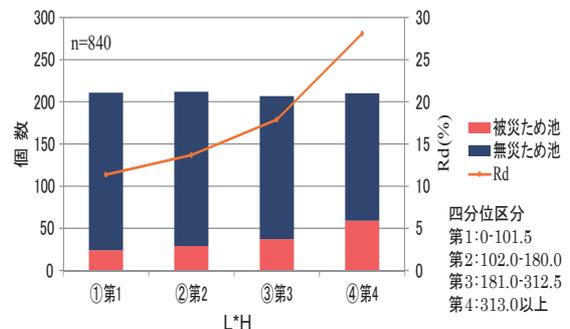


Fig. 87 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池四分位区分形状係数 ( $L/H$ ) 別被災率

Damage ratio of earth dams based on the coefficient of shape ( $L/H$ ) divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

### 6. 3. 3. 3 体積係数と被災率 ( $R_d$ )

Fig. 88 は、対象域内ため池の  $L*H$  を①第 1 の  $L*H = 0-101.5$ 、②第 2 の  $L*H = 102.0-180.0$ 、③第 3 の  $L*H = 181.0-312.5$ 、④第 4 の  $L*H = 313.0$  以上の四分位に区分し、区分ロッド毎の  $R_d$  をオレンジ折線で図示した。ここでは  $L$  と同様に段階的に  $R_d$  が上昇する形態となっている。

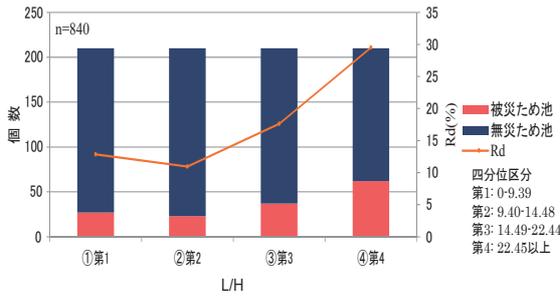
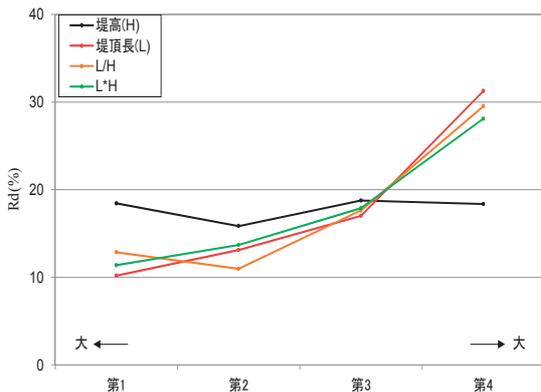


Fig. 88 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池四分位区分体積係数 ( $L*H$ ) 別被災率 ( $R_d$ )

Damage ratio of earth dams based on the coefficient of volume ( $L*H$ ) divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.3.4 形状係数及び体積係数の被災率 ( $R_d$ ) まとめ

Fig. 89 では  $L/H$  (オレンジ) と  $L*H$  (緑) の四分位別  $R_d$  と  $H$  (黒) 及び  $L$  (赤) の4つを並べて比較した。 $H$  はほぼ一定で、 $L$  は右方上がりで  $L/H$  と  $L*H$  の  $R_d$  の変化に反映している。詳細に見ると、 $L$  は第1で最低、第4で最高と上下差が最も大きく、 $L/H$  は第2で  $H$  と一緒に  $R_d$  が低下している。一方、 $L*H$  の場合は  $L$  が  $H$  の標準で10倍以上のために、 $H$  の影響を  $L/H$  ほど受けないため、 $L*H$  が最低レベルの時の  $R_d$  は  $L$  と  $L/H$  の間になり、反対に  $L*H$  が最高レベルの時は、 $L/H$  よりも  $R_d$  が小さくなる。即ち、Fig. 89 の結果は、「 $H$  の  $R_d$  はほぼ一定で、 $L$  の  $R_d$  は  $L$  が大きいほど上昇する」から推定可能であり、 $H$  と  $L$  の  $R_d$  における特性がさらに確認できた。



	第1四分位	第2四分位	第3四分位	第4四分位
H(m)	0-2.5	2.6-3.5	3.6-4.9	5.0-
L(m)	0-35	36-50	51-77	78-
L/H	0-9.39	9.4-14.48	14.5-22.44	22.5-
L*H	0-101.5	102-180	181-312.5	313-

Fig. 89 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体諸元及び四分位別被災率の比較

Comparison of damage ratios of earth dams based on 4 different dimensional shape parameters divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.4 横断面形状と被災率 ( $R_d$ )

ため池の横断面形状に関する過去の被害研究には、「堤頂幅が大きくなるにつれて被害率が高くなる」、「堤高が同じ場合には、堤頂幅の大小は被害にあまり関係ない」、「どの堤高区分においても斜面傾度が緩くなると被害率が大きくなる」などの報告がある。ここでは、堤頂幅 ( $W$ ) と上下流法勾配 ( $1:U$  及び  $1:D$ ) 及び勾配比 ( $D/U$ ) に関して、前節までと同様の手法で各々検証すると共に、横断面形状の構成要素である  $H$  を組み合わせたクロス集計した  $R_d$  を用いて比較検討する。

6.3.4.1 ため池堤頂幅 ( $W$ ) と被災率 ( $R_d$ )

Fig. 90 には、対象域の堤頂幅 ( $W$ ) を1.0m毎で①~⑨に区分し、その区間毎池数のヒストグラムと各  $R_d$  オレンジ折線を図示した。 $W$  は3m未満までは  $R_d=10\%$  余であるが、④3-4m区間の度数38%で  $R_d=19\%$  となった後、⑤4-5m区間で  $R_d=13\%$  と一端下がり、⑥5-6m区間からは  $R_d=20\%$  台を超え、⑧7-8m区間の  $R_d=27\%$  でピークとなった。即ち、⑤4-5m区間以降の度数は12%から5%になり、⑦6-7m以降は度数1-3%である。総じて  $R_d$  の大きなピークはないが、 $W$  が広いほど  $R_d$  は高くなる傾向である。

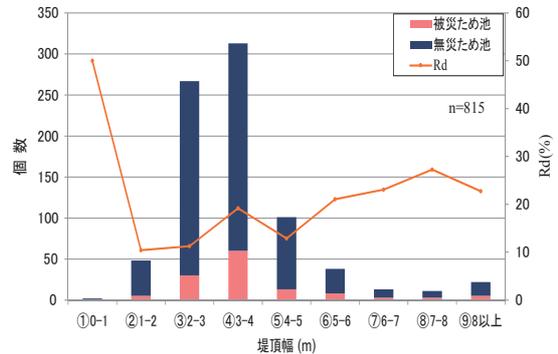


Fig. 90 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤頂幅 (1.0m毎) 別被災率

Damage ratio of earth dams based on dam crest width divided with 1.0m each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 91 は、Fig. 61 と同様に、 $W$  を四分位毎に第1を①  $W=0-2.5m$ 、第2を②  $W=2.6-3.0m$ 、第3を③  $W=3.1-3.8m$ 、第4を④  $W=3.9m$  以上で区分した個数と  $R_d$  の折線グラフである。③の度数が小さいのは、②に  $W=3.0m$  の個数が集中した分、③の区間度数が減少した。 $R_d$  がピーク区間は、③の  $R_d=20\%$  で、①の  $R_d=11\%$  から②  $R_d=7\%$  と順に増加し、④では②と同じ  $R_d$  になっている。Fig. 90 では大きな  $W$  ほど  $R_d$  が大きくなる傾向であったが、④  $W=3-4m$  の最初のピークが第3四分位区分のピークは照合していた。なお、③の第3四分位の度数は約110個であるが、相対度数は10%以上が確保され、 $R_d$  的には信頼できると思われる。

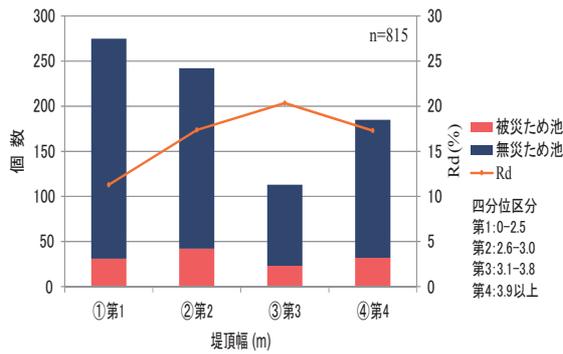


Fig. 91 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池四分位区分堤頂幅別被災率

Damage ratio of earth dams based on dam crest width divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.4.2 堤体上下流法勾配と被災率 (R<sub>d</sub>)

Table 19 は、対象全域ため池の堤体上下流法勾配別の R<sub>d</sub> を、過去の研究事例にならって整理した。法面勾配区分は、1:0.5毎に区分し、1:2.5以上で一括りにした。これまでは勾配が緩いほど R<sub>d</sub> は大きくなると指摘されたが、本表からも同様な傾向が見られる。上下流別では、上流勾配 (U) が緩くなるに従って R<sub>d</sub> が大きくなるの対し、下流は勾配 (D) が1.5-2.0の時に最大であるが、特に大きなピークではない。

Table 19 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体上下流法勾配 (D・U) 別被災率

Damage ratio of earth dams based on downstream slope (D) and upstream slope (U) divided with 0.5 each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

斜面傾度(割)	全域(A)		被災池(B)		B/A × 100(%)	
	上流	下流	上流	下流	上流	下流
0.5-1.0	69	25	6	4	8.7	16
1.0-1.5	182	146	18	20	9.9	13.7
1.5-2.0	252	370	43	65	17.1	17.6
2.0-2.5	255	224	50	32	19.6	14.3
2.5-5.0	45	38	10	6	22.2	15.8
計	803	803	127	127	15.8	15.8

Fig. 92 では、Fig. 60 と同様に、U及びDの各々を四分位毎(以下、Uを代表とした)に、第1四分位区間を①U=0-1.2、第2を②U=1.3-1.5、第3を③U=1.6-1.9、第4を④U=2.0以上で区分した池個数と各 R<sub>d</sub> の折線を図示した。なお、四分位は上流側 U で区分したため、下流 D に①と③で度数が少なくバラツキが生じたが、1つのロットで最低130個、相対度数16%は確保していた。下流 D の R<sub>d</sub> は概ね15~20%の範囲で比較的安定しているが、上流 U の場合は①と③で最低の R<sub>d</sub> = 7%で、勾配が最も緩いロットの④で最大 R<sub>d</sub> = 33%となる等、上下変化が大きい。

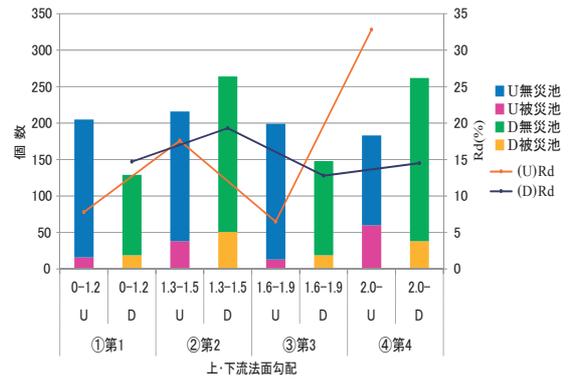


Fig. 92 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体上下流法勾配 (D・U) の四分位別被災率

Damage ratio of earth dams based on downstream slope (D) and upstream slope (U) divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 93 では、堤体の上下流法勾配比 (D/U) を1.0毎に、①0-1.0未満、②1-2.0未満と順に⑪まで区分し、各々ロット毎の R<sub>d</sub> を求めて図示した。①は相対度数31%で R<sub>d</sub> = 22%で最大となり、②は60%の相対度数で R<sub>d</sub> = 13%に低下し、③では相対度数5%に急落するが R<sub>d</sub> は余り変わらず、④以降は相対度数が1%以下で、⑤からは R<sub>d</sub> = 0%である。即ち、下流勾配が相対的に緩いほど R<sub>d</sub> が小さくなっていった。Fig. 93 では、対象全域のため池は上下流法勾配がバランスする D/U = 1.0付近で多数あることがわかった。

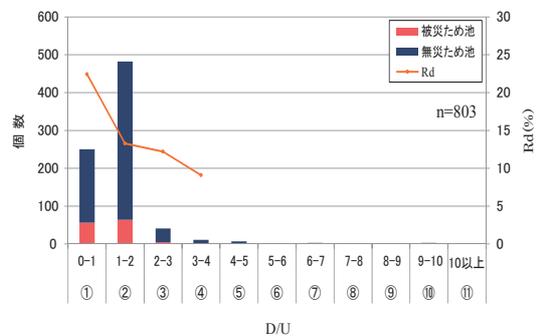


Fig. 93 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体上下流法勾配比 (D/U) 1.0毎別被災率

Damage ratio of earth dams based on ratios of downstream and upstream slope (D/U) divided with 1.0 each in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 94 では、①D/U=1/3未満、②D/U=1/3-1/2未満、③D/U=1/2-1/1未満、④D/U=1/1-4/3未満、⑤D/U=4/3-2/1未満、⑥D/U=2/1以上に6区分し、区分ロット毎に R<sub>d</sub> を折線グラフにした。因みに、①~③は上流勾配が下流よりも緩い区分に入り、上流勾配が相対的に緩い①の R<sub>d</sub> = 50%、②の R<sub>d</sub> = 38%、③の R<sub>d</sub> = 22%が大きい。但し、相対度数は①と②は0.2%と1%で、③の30%より前は度数が極めて僅かである。

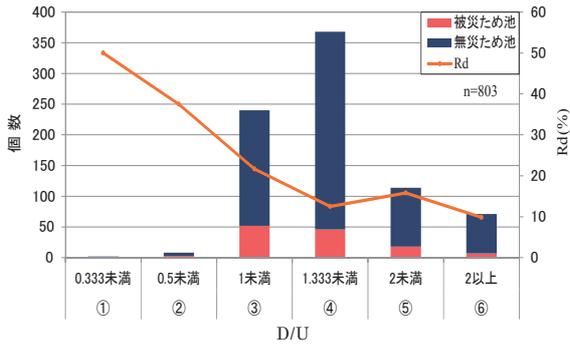


Fig. 94 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体上下流法勾配比 (D/U) 6区分別被災率

Damage ratio of earth dams based on ratios of downstream and upstream slope (D/U) divided with 6 divisions in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

Fig. 95 は、D/U を四分位区分し、区間毎に Rd をグラフにした。第3の相対度数が14%と低いのは、D/U = 1.0のため池が252個と多数が集中し、第2の区分にそれを全て含めたためである。区分別 Rd では下流勾配 D がさらに若干緩い第3区分の1.05-1.25で Rd = 6%と最低になり、下流勾配が相対的に緩くなる第4区分では Rd = 13%と、第3分位の2倍以上となった。

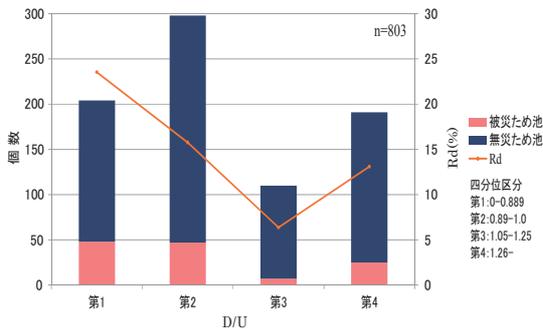


Fig. 95 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体上下流法勾配比 (D/U) 四分位別被災率

Damage ratio of earth dams based on ratios of downstream and upstream slope (D/U) divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

6.3.4.3 横断面形状諸元の比較と組み合わせ検証

Fig. 96 では、Fig. 89 から H と L、Fig. 91 から W、Fig. 95 から D/U の四分位区間別 Rd のみを抜き出して比較したものである。ここで対象全域の Rd は約17%であり、各形状諸元 Rd も無制限に上下変動することはない。例えば、ある区間の Rd が大きい時は、他の区間の Rd は小さくなる。そのため、H は平均 Rd 付近を変動する「安定型」、L は第3で平均 Rd を超える「一途上昇型」、W は第1の Rd が低く第3でピークとなる「中位ピーク型」、D/U は第1の Rd が高く、第3で底となる「中位ボトム型」に分類できる。即ち、W と D/U の Rd は正反対に動

き、その間で H が安定した Rd にあり、堤体の横断面形状3諸元間には Rd 増減との関連が想定される。一方、L はこれら3諸元と比べ Rd の動きは独立性が高いように見受けられる。

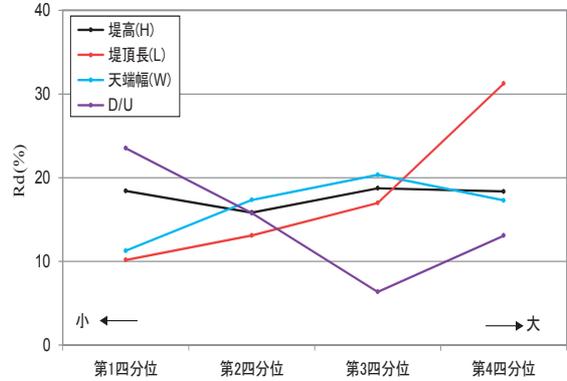


Fig. 96 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体横断面諸元と堤頂長及び四分位別被災率比較

Comparison of damage ratio of earth dams based on dimensional cross section shape parameter (H, W, D/U) and scale of dam crest length divided with quartile in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

	第1四分位	第2四分位	第3四分位	第4四分位
H(m)	0-2.5	2.6-3.5	3.6-4.9	5.0-
L(m)	0-35	36-50	51-77	78-
W(m)	0-2.5	2.6-3.0	3.1-3.8	3.9-
D/U	0-0.889	0.89-1.0	1.05-1.25	1.26-

Fig. 97 には、対象域内ため池の H を横軸、W を縦軸にして、被災度別 (但し、無被災池は被災度 0) にプロットし、H 及び W の池数がほぼ均等になるように各々を大、中、小に3分割して、9ヶ所のロット毎に Rd を求めた。但し、H はプロットの状況が分かるようにスケールを H = 12m までとし、図中の数字 (分母は全池数、分子は被災池数) には対象池全てが含まれている。ここでは、全体的に W が広い領域ほど Rd が高く、H の高い領域ほど Rd が低くなるが、両方の重なり方 (∩: 和集合、H<sub>大</sub> ∩ W<sub>大</sub> (H が高く W が広い断面) 領域の Rd = 20.6% が最も高くなっていた。また、Rd = 5.5% で最低となった H<sub>大</sub> ∩ W<sub>小</sub> 領域は、H が高く W が小さい場合の組合せであるが、最大 Rd の4分の1であった。

Fig. 98 は、Fig. 97 と同様に H を横軸にし、9つの領域毎に Rd を求めた。ここでの最高 Rd = 26.3% は、H<sub>大</sub> ∩ D/U<sub>小</sub> 領域 (H が高く上流側法勾配が緩い断面) であり、H<sub>大</sub> ∩ D/U<sub>大</sub> (H が高く下流側法勾配が緩い断面) では、最低 Rd = 4.9% の領域となっていた。因みに、D/U 中の領域は、H の高さが変わっても、Rd = 13-16% で殆ど差が無い。その理由は、Fig. 95 で第3四分位の D/U (=1.05-1.25) 区分の大半がこの D/U<sub>大</sub> 領域に入っており、この範囲では被災池が極めて少ない。

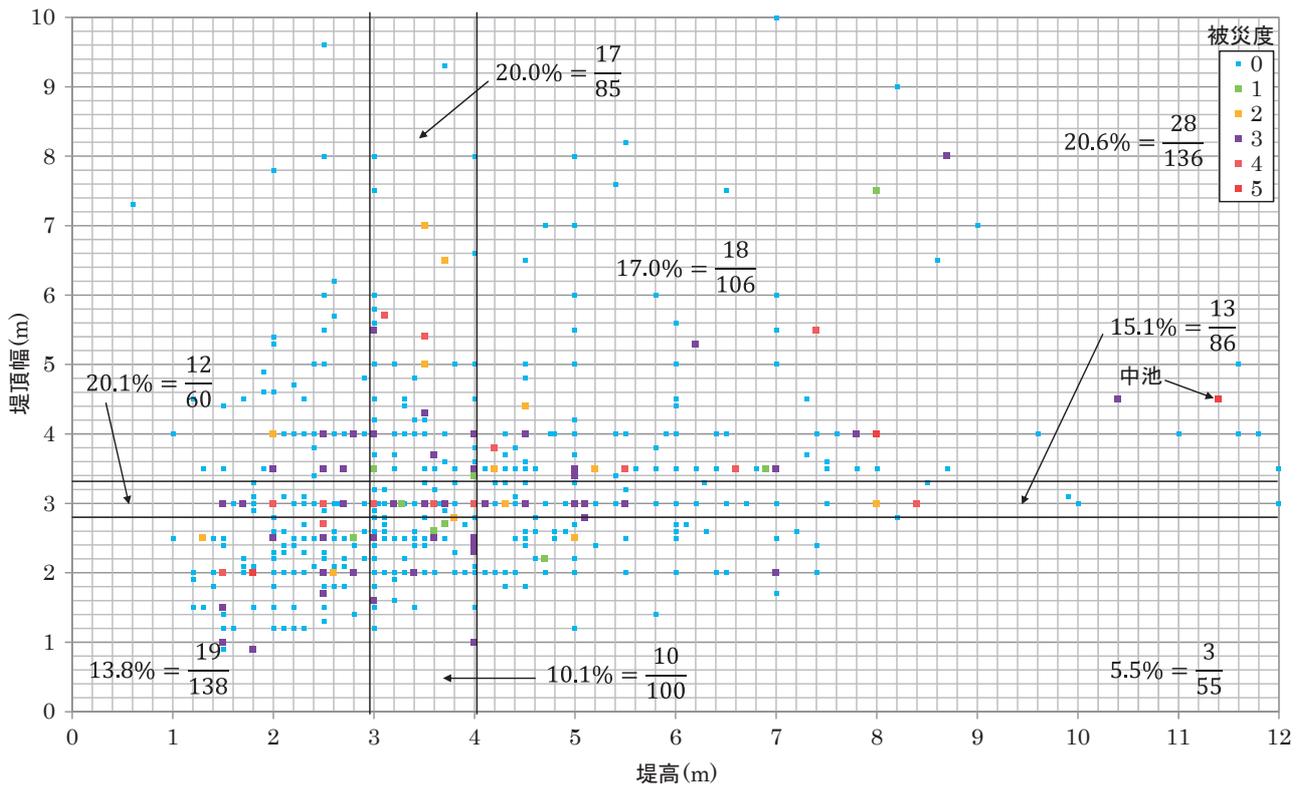


Fig. 97 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高及び堤頂幅と被災度

Relationships between damage degree of earth dams and dimensional cross section shape based on scale of dam height

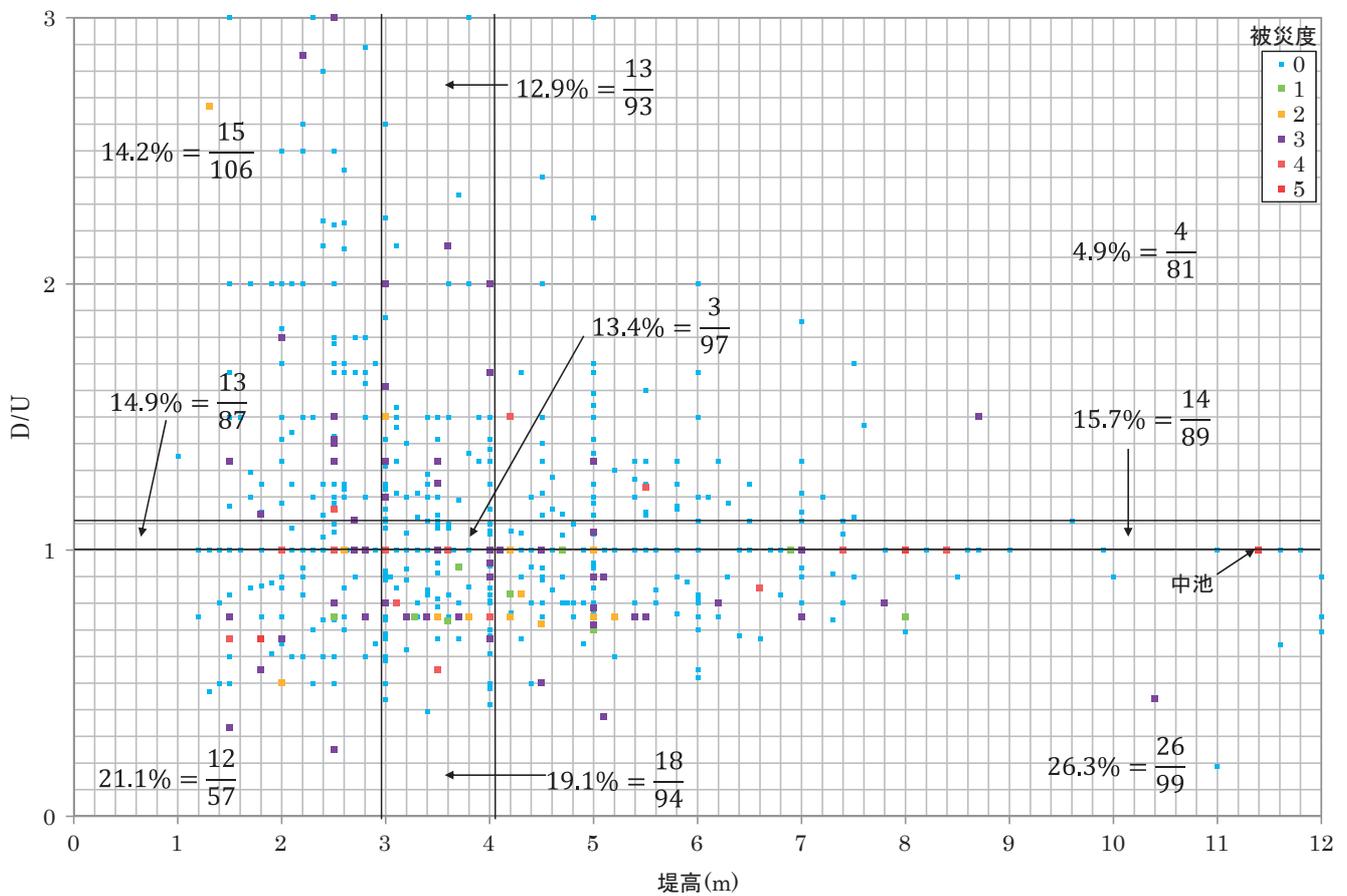


Fig. 98 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤高及び堤体上下流法勾配比 (D/U) と被災度

Relationships between damage degree of earth dams and dimensional cross section shape based on scale of dam height and D/U

Fig. 99 は、 $D/U$  を横軸、 $W$  を縦軸にして Fig. 97 及び Fig. 98 のように被災度別にプロットした。最大  $R_d$  は  $D/U_{小} \cap W_{大}$  (上流側法勾配が緩く堤頂幅が広い断面) の領域で  $R_d = 30.1\%$  と最も大きな  $R_d$  値であった。最小  $R_d$  は、 $D/U_{中} \cap W_{小}$  と  $D/U_{大} \cap W_{大}$  で  $R_d = 9.1\%$  と  $R_d = 9.4\%$  で特に小さな値ではなかった。なお、Fig. 95 で第3四分位  $D/U$  ( $=1.05-1.25$ ) 区分のため池がこれら領域の一部に入り、 $R_d$  を低下させていた。

Fig. 100 は、Fig. 97~Fig. 99 の結果から、ため池堤体横断面に関して地震動被災リスクを整理したものである。本図左側は、 $H$ 、 $W$  及び  $D/U$  の大中小毎にクロス集計したロッド毎の  $R_d$  について、クロス毎の最大  $R_d$  をピンクで、最小  $R_d$  を水色に着色し、それに関わる形状を同色でマークした。先ず、堤高では  $H_{大}$  で  $W_{大}$  又は  $D/U_{小}$  の時 (以上、ピンク着色で赤下線) に  $R_d$  が最大になり、同じ  $H_{大}$  でも  $W_{小}$  又は  $D/U_{大}$  の時 (青着色の赤下線)

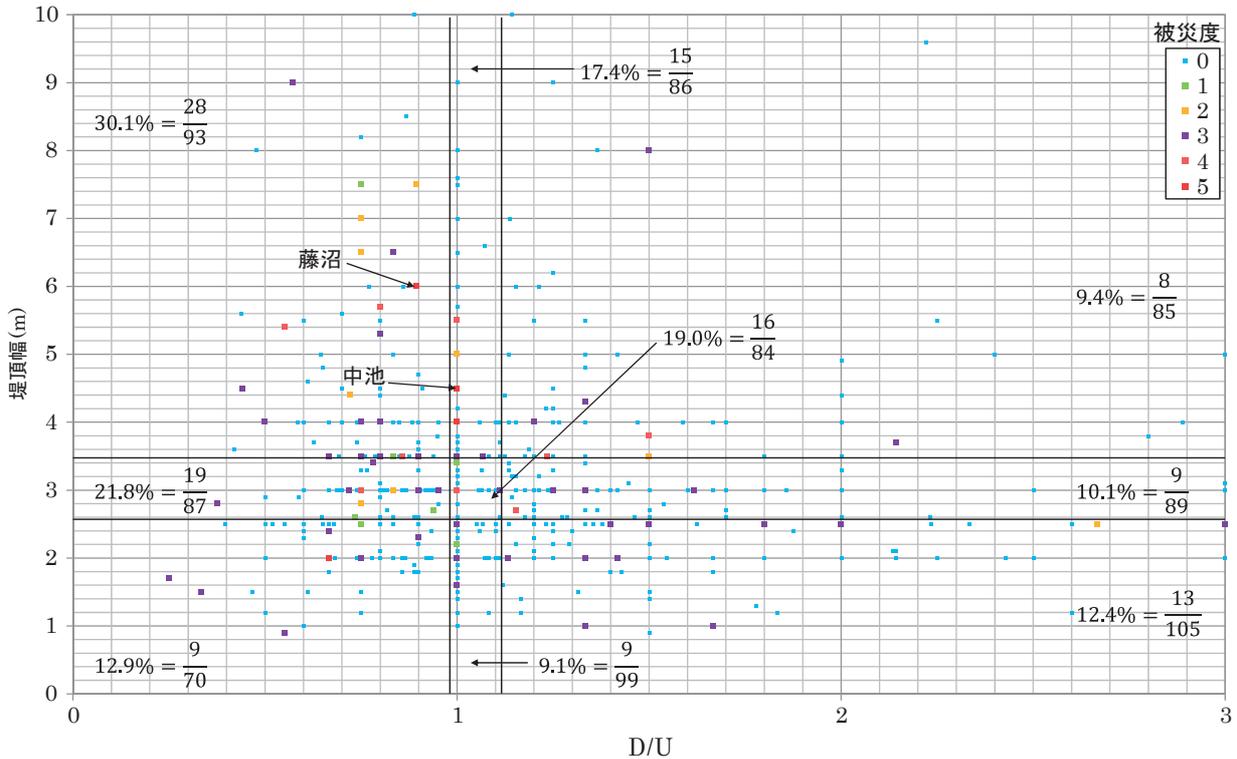


Fig. 99 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体上下流法勾配比 ( $D/U$ ) 及び堤頂幅と被災度 Relationships between damage degree of earth dams and dimensional cross section shape based on scale of dam crest width and  $D/U$  cross tabled in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

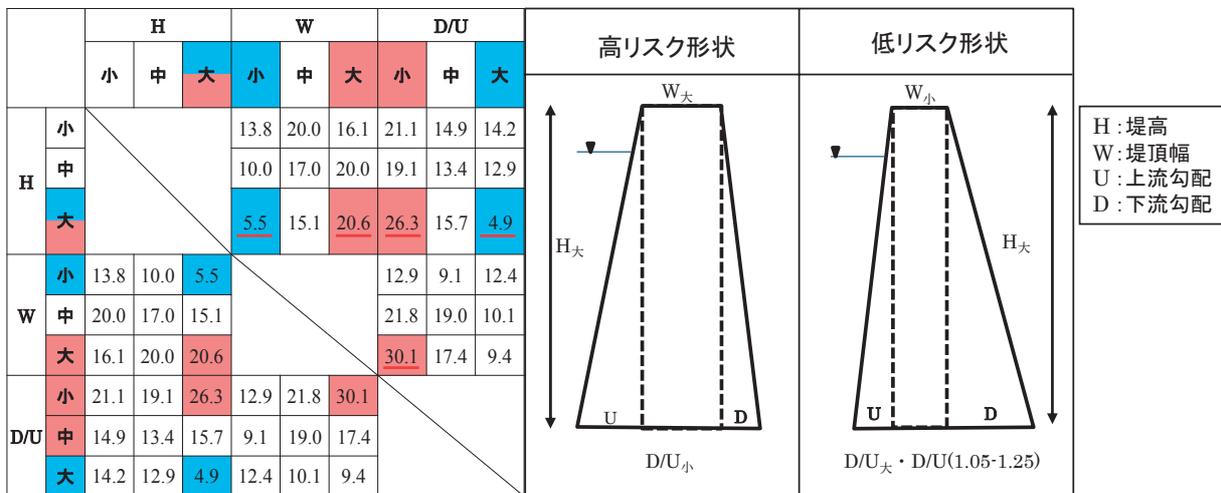


Fig. 100 東北地方太平洋沖地震の福島県中・県南地方のため池堤体横断面形状別被災率と被災リスク Damage ratio and higher & lower risk types of earth dams based on dimensional cross section shape in Central-Southern District of Fukushima Prefecture due to the Tohoku Earthquake

に  $R_d$  は最小であった。即ち、 $H$  が高い時は、 $W$  と  $D/U$  の状態によって被災リスクが上がる場合と、その反対にリスクが下がる場合がある。例えば、 $W_{大}$  の場合は  $R_d$  が上がり、 $W_{小}$  の時  $R_d$  は下がる。 $D/U$  では  $D/U_{小}$  (上流法勾配が緩い) の時に  $R_d$  が上がり、 $D/U_{大}$  (下流法勾配が緩い) の時に  $R_d$  が下がる。

上記のことを堤体横断面の高リスクと低リスク形状イメージを右図で示した。つまり、堤体横断面形状で地震動被災リスクの高い組合せは、 $H_{大} \cap W_{大}$  ( $H$  が高く  $W$  が広い)、 $H_{大} \cap D/U_{小}$  ( $H$  が高く上流法勾配が緩い) 及び  $D/U_{小} \cap W_{大}$  (上流法勾配が緩く堤頂幅が広い) の3つであった。因みに、決壊した藤沼湖は3つ全ての組合せに入っていた。逆に、リスクの低い組合せは、 $H_{大} \cap W_{小}$  ( $H$  が高く  $W$  が狭い) 及び  $H_{大} \cap D/U_{大}$  ( $H$  が高く下流法勾配が緩い) があつた。また、 $D/U$  と  $W$  の組合せで特にリスクが低いものはない。さらに Fig. 98 と Fig. 99 から、 $D/U (=1.05-1.25)$  で被災池が極めて少なく、下流側が若干緩めで上下流法面がバランスした勾配の形状は被災リスクが低かつた。

6.3.5 ため池堤体形状と被災度

第VI章では被災度で被災レベルを示しながらも、ここまで全て  $R_d$  だけで堤体形状との関係を説明してきた。本節では、堤体形状が地震動被災度にどのように影響していたか検討する。

6.3.5.1 堤体形状諸元とため池被災度

Fig. 101 には、対象域内ため池の被災度1~5を  $H$ ,  $L$ ,  $W$  及び  $D/U$  の堤体形状の四分位区別に示した棒グラフで図示した。被災度別色分けは、Fig. 83 と同じである。各形状諸元の四分位区分での相対度数は、Fig. 91 の  $D/U$  第三区分での度数14%以外、各区分とも原則25~20%程度の相対度数が確保され、被災池数の棒グラフの高低は、ほぼ  $R_d$  の大きさに連動している。最低被災池数は  $D/U$  ③第三区分の7個 ( $R_d = 6\%$ ) で、最高数の  $L$  第4区分の64個の9分の1であったが、その被災度3と4だけで、1~2の低レベル被災はなかつた。反対に  $R_d$  が高い (多数の被災池がある) 場合でも、低被災度池がかなりの割合で含まれている。これは、第V章でも考察したように  $R_d$  が高い場合であっても、被災度も必ず高くなる訳ではないことを物語っている。

6.3.5.2 堤体横断面形状とため池被災度

Fig. 102 は、Fig. 97 から横断面形状に係る  $H$  と  $W$  の大中小組合せ9グループ毎の被災度別池数を示した棒グラフと  $R_d$  の折線で図示した。組合形状③の  $H_{大} \cap W_{小}$  では被災数3個が最低で、被災度1~3が各1つで  $R_d$  の低さが際立っている。反対に被災数最大は、⑨  $H_{大} \cap W_{大}$  の形状で27個であるが、被災度は1~5まで含まれていた。ここで Fig. 101 の堤体諸元と比較すると、Fig. 102 は全

体的に被災池数が多いほど被災度の高い池 (4及び5) が多く含まれているように見える。但し、被災数が多くても被災度1~3もかなり含まれており、 $H$  と  $W$  の形状要因だけで、被災度まで決まるとは考え難い。因みに、決壊した藤沼湖と中池は⑨のグループに入っている。

なお、①~③では  $W_{小}$  の時  $H$  が大きいほど被災リスクが下がり (灰色点線)、⑦~⑨では反対に  $W_{大}$  の時に  $H$  が大きいほどリスクは上がっている (灰色破線)。

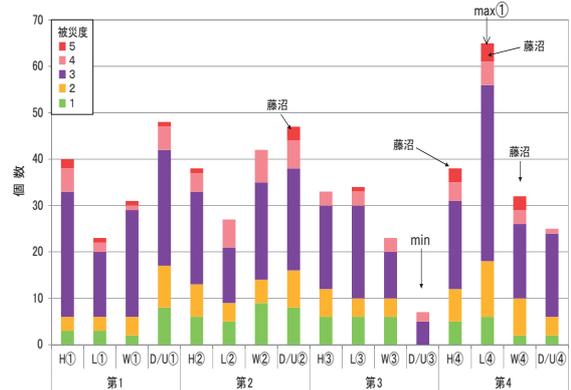


Fig. 101 堤体形状諸元四分位区分・被災度別ため池数  
Number of damaged earth dams based on dimensional shape parameter divided with quartile and damage degree

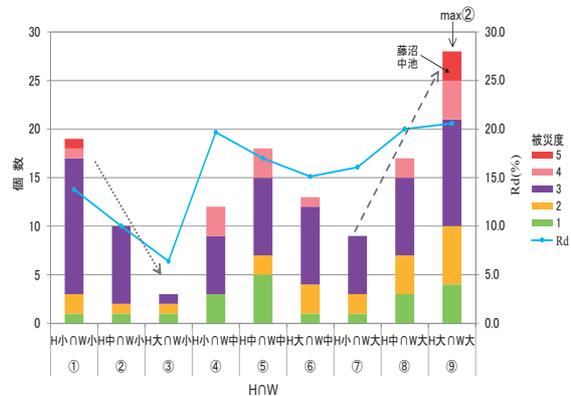
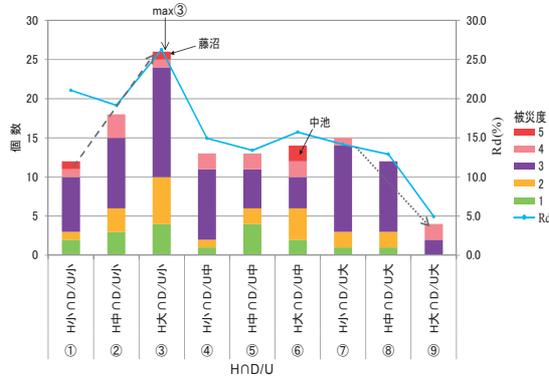


Fig. 102 ため池堤高及び堤頂幅の規模区分別被災度・被災率  
Damage degree and ratio of earth dams based on scale of dam height and crest width cross tabled divided with one third

Fig. 103 では、Fig. 98 から横断面形状に係る  $H$  と  $D/U$  の大中小組合せを、Fig. 102 と同様に図示した。最小被災数は⑨の  $H_{大} \cap D/U_{大}$  の4個で、他の形状区分は被災池数が10個以上ある中で顕著に少ない。最大被災数は③の  $H_{大} \cap D/U_{小}$  が26個で、最低区分⑨の6倍強であるが、被災度は1~3が多数含まれている。それ以外の7つのグループは、被災池数が  $15 \pm 3$  の範囲内にあり、この分類では最低最高の差が際立っている。但し、被災度に関しては、前2グループと同様に特定のレベルに偏ったものはなかつた。因みに、藤沼湖は③に、中池は⑥に入っている。

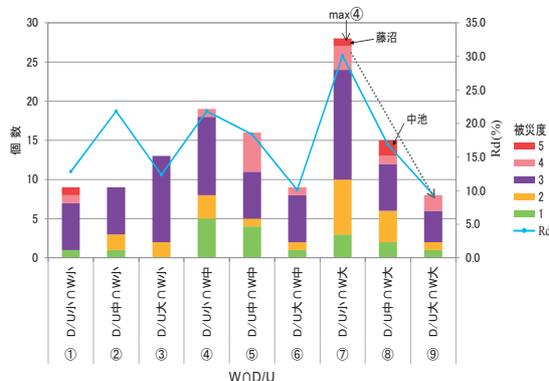
なおグループ①～③では $D/U_{小}$ （上流勾配が緩い）場合、 $H$ が大きいくほど被災リスクは上がり（破線）、⑦～⑨では反対に $D/U_{大}$ （下流勾配が緩い）の時、 $H$ が大きいくほどリスクが低くなっている（点線）。



**Fig. 103** ため池堤高及び法勾配比率 ( $D/U$ ) の規模区分別被災度・被災率  
Damage degree and ratio of earth dams based on scale of dam height and  $D/U$  cross tabled divided with one third

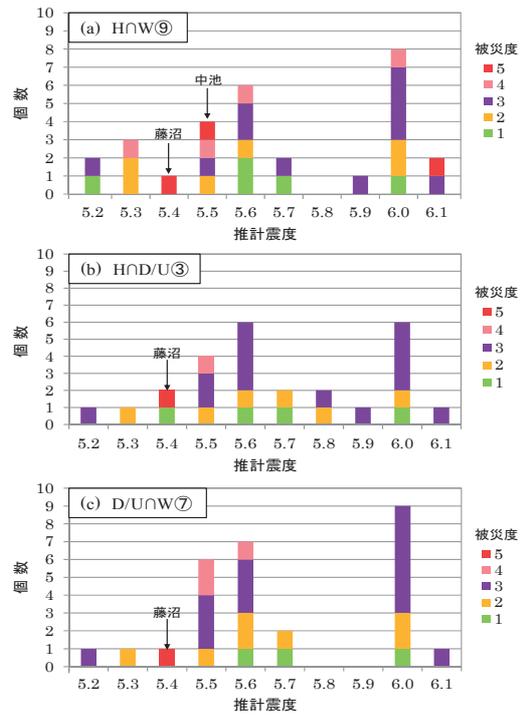
**Fig. 104** には、**Fig. 99** から横断面形状に係る  $W$  と  $D/U$  の組合せを、**Fig. 102** と同様に図示した。ここでは前2図と異なり、被災数5以下で著しく被災池が少ない区分は見られず、被災池数7～8個が4グループで、 $W$  が狭い2グループ（①及び②）、 $D/U$  が大きい2グループ（⑥及び⑨）である。また、断トツに被災池数が多い形状は、⑦の $D/U_{小} \cap W_{大}$ で28個で、残り4グループ（③、④、⑤及び⑧）の被災池数は $15 \pm 3$ 個の範囲にある。被災数最大の⑦区分も **Fig. 102** と **Fig. 103** での最大形状区分と同様な被災度構成となっている。因みに、藤沼湖は⑦に、中池は⑧に入っている。

なお⑦～⑨では反対に  $W_{大}$  の時に、 $D/U$  が大きくなる（下流が緩い）ほど被災リスクは小さくなっている（灰色点線）。



**Fig. 104** ため池堤頂幅及び法勾配比率 ( $D/U$ ) の規模別区分別被災度・被災率  
Damage degree and ratio of earth dams based on scale of dam crest width and  $D/U$  cross tabled divided with one third

**Fig. 105** には、**Fig. 102**～**Fig. 104** で被災池数が最高だった3区分について、推計震度毎の被災度別池数を棒グラフにした。**Fig. 105 (a)～(c)**とも震度によって被災池が増える傾向は見受けられるが、各形状グループとも震度の大きさだけで被災度が上がる状況は見受けられず、ため池被災度は強震度下であっても一つだけの高被災リスク堤体形状要因だけでは甚大な被災レベルに至るようには見受けられない。



**Fig. 105** 高被災リスク横断面形状ため池の震度別被災度  
Damage degree of earth dams with higher risk dimensional cross section shape based on seismic intensity

6.4 まとめ

東北地震により最もため池被災が集中した、福島県中・県南地方のため池総数848個（被災池153個と無被災池695個）を対象に、堤高 ( $H$ )、堤頂長 ( $L$ )、堤頂幅 ( $W$ )、上下流法勾配 ( $U$  及び  $D$ ) の堤体諸元毎に、震度や堤軸震央方向角度 ( $\omega_i$ ) を踏まえ、統計的手法を用いて  $R_d$  等の分析を行った。いわば、対象エリア内にある844個の規模や形状の異なるため池群を、一つの大きな揺れ（地震動）によって、その諸元や形状毎に被災数や被災レベルがどうなるか、現地実験の結果を考察したのと同じ意味となる。その結果は以下の通りで、ため池堤体形状諸元の関するこれまでの地震動被害研究結果と相反する部分を含むと共に、新たな知見も見出すことができた。以下では、諸元毎及び横断面形状と地震動の関連性について、総括を行った。

(1) 堤体形状諸元に係る被災リスクまとめ

- 1) 堤高 ( $H$ ) 及び堤頂長 ( $L$ ) と被災率 ( $R_d$ )  
堤体形状諸元の  $H$  と  $L$  については、バッチ毎に

多様な区分度数でロッドを設けて  $R_d$  を算定して比較検討を行うと共に、既に  $R_d$  との関係を示した推定震度と堤軸震央方向角度 ( $\omega_i$ ) と組み合わせて  $R_d$  の比較を行った。さらに、 $H$  と  $L$  に関連し、形状係数 ( $L/H$ ) 及び体積係数 ( $L * H$ ) と  $R_d$  の関係を検討し、以下のことが明らかになった。

- ① 区分度数と被災率 ( $R_d$ )
    - ・形状諸元に対する  $R_d$  は算定母数のとり方によって、その率は同じにならず、相対度数が大きいくほど、 $R_d$  のバラツキは小さくなる。
    - ・ $R_d$  は相対度数が少ない程バラツキが大きくなり、その  $R_d$  は全体的に高めと見る傾向がある。
    - ・区分  $R_d$  は、相対度数が10%以上で安定し、相対度数5%以下ではバラツキが大きくなる。因みに、対象域ため池数は約840個で、 $R_d$  算定の分母としては100個以上、或いは最低でも50個以上が必要となる。
  - ② 堤高 ( $H$ ) と被災率 ( $R_d$ )
    - ・ $H$  は高さの関係で  $R_d$  が大きくなる傾向がなく、「安定型」である。
    - ・震度が大きくなると、 $H$  に関係なく  $R_d$  は大きくなる。
    - ・ $\omega_i$  が270-330°の範囲に近いほど、 $H$  に関係なく  $R_d$  は高くなる。
  - ③ 堤頂長 ( $L$ ) と被災率 ( $R_d$ )
    - ・ $L$  は長くなるほど  $R_d$  が大きくなる「一途上昇型」である。
    - ・震度が大きくなるほど  $L$  の長さに応じて  $R_d$  はさらに増大する。
    - ・ $\omega_i$  が270-330°の範囲に近いほど、 $L$  の長さに応じて  $R_d$  はさらに大きくなる。
  - ④ 形状係数 ( $L/H$ ) 及び体積係数 ( $L * H$ ) と被災率 ( $R_d$ )
    - ・ $L/H$  は  $L$  の長さで  $R_d$  が大きくなる傾向を反映して、その値が大きいく程  $R_d$  は大きくなる。
    - ・ $L * H$  は  $L/H$  と同様の傾向を持つが、 $L/H$  より  $H$  の安定型の影響を受けた  $R_d$  になる。
- 2) 堤体横断面形状と被災率 ( $R_d$ )

横断面形状については、堤頂幅 ( $W$ )、上下流法勾配 ( $U \cdot D$ ) 及び勾配比 ( $D/U$ ) の順で複数の区分ロッド毎の被災率 ( $R_d$ ) の比較検討と共に、堤高 ( $H$ ) と堤頂幅 ( $W$ )、堤高 ( $H$ ) と勾配比 ( $D/U$ ) 及び勾配比 ( $D/U$ ) と堤頂幅 ( $W$ ) で各々クロス集計した9等分ロッドで  $R_d$  を求めて比較検討し、以下のことが明らかになった。

- ① 堤頂幅 ( $W$ ) と被災率 ( $R_d$ )
  - ・1.0m毎区分の  $R_d$  は、 $W$  が大きくなるに従って段々と大きくなる。
  - ・四分位区分の  $R_d$  は、第3区分の「中位ピーク

型」となる。

- ② 上下流法勾配 ( $U$  及び  $D$ ) 及び勾配比 ( $D/U$ ) と被災率 ( $R_d$ )
  - ・ $U$  が緩くなる従って  $R_d$  が大きくなり、第4四分位で  $R_d$  が30%を超える。
  - ・ $D$  は緩急による  $R_d$  の大きな変化はない。
  - ・ $D/U$  四分位の  $R_d$  は、第3 (1.05-1.25) が最低となる「中位ボトム型」である。
- ③ 横断面形状と被災率 ( $R_d$ )
  - ・ $H$ 、 $L$ 、 $W$  及び  $D/U$  の  $R_d$  から、 $L$  の被災リスクは縦断形状として独立的である。
  - ・横断面形状に係る  $H$ 、 $W$  及び  $D/U$  は、相互に関連したりリスク要因を成す。
  - ・ $H$ 、 $W$  及び  $D/U$  の組合せリスクは、 $R_d = 5\%$  から  $R_d = 30\%$  まで6倍の差がある。
  - ・ $R_d$  (=被災リスク) の大きい横断面形状は、 $H_{\text{天}} \cap W_{\text{天}}$ 、 $H_{\text{天}} \cap D/U_{\text{天}}$  及び  $W_{\text{天}} \cap D/U_{\text{天}}$  で、藤沼湖は3つ全てに入っている。
  - ・ $R_d$  (=被災リスク) の小さい横断面形状は、 $H_{\text{天}} \cap W_{\text{天}}$  及び  $H_{\text{天}} \cap D/U_{\text{天}}$  で、 $D/U = 1.05-1.25$  では特にリスクが低い。

### 3) 堤体及び横断面形状と被災度

堤体諸元及び横断面形状の四分位区分毎に被災度別ため池数を整理し、比較検証を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ① 堤体形状諸元と被災度
  - ・ $H$ 、 $L$ 、 $W$  及び  $D/U$  の被災数では、最高 (第4四分位  $L$ ) と最低 (第3四分位  $D/U$ ) で概ね6~7倍の差があった。
  - ・形状毎に被災リスクの差はあっても、被災度の片寄りが少ないことから、特定の堤体形状要因だけで被災度を大幅に引き上げることはない。
- ② 横断面形状と被災度
  - ・ $H$ 、 $W$  及び  $D/U$  被災数の格差は大きいですが、各横断面形状とも被災度は均質的で、特定の形状だけで被災度が上がる要因にならない。
  - ・被災リスクが大きい横断面形状グループだけで推計震度と被災度を比較したが、震度の大小に関わらず被災度はバラついており、単独要因によって高い被災度に至る状況は説明できないことが明らかになった。

以上、第VI章のため池堤体形状要因分析結果から、過去の研究成果と矛盾した内容が一部確認されたが、概ね過去の研究結果の理由や背景を裏付け、体系的説明が可能な内容となった。特に堤頂長の規模に伴う被災リスクの上昇、堤高と堤頂幅及び上下流法勾配と被災リスクの関係など、特筆すべきものとする。

### (2) 個体要因に係る被災リスクのまとめ

第IV章及び第V章では、「地震動の方向性」について、



堤体上流が震央方向にある  $\omega_i = 30\sim 180^\circ$  で  $R_d$  が小さいなど、地震動は広域的な地形・地質や堤体に対して方向性が見られ、 $R_d$  の出現傾向に影響することが分かった。因みに、震度では6弱までは  $\omega_i = 270^\circ$  つまり、①「堤体下流面が震央と正対する」場合に  $R_d$  が大きな値を示したが、震度6強ではどの方向でも  $R_d$  は大きな値を示した。

第V章では、福島県中・南地方の被災集中エリア内の詳細な被災分析のために、被災レベルを5段階（レベル5が最も被災度が高い）にした。被災度は福島県全域で被災度3が過半を占め、被災集中エリアでも同様であった。また、集中エリア内のため池サイトの地形を5タイプに分類したところ、②「サイト地形が傾斜・谷地」の場合は  $R_d$  が極めて高く、反対に震度6強エリア内でも、東面に山丘があるサイト地形では被災を免れるなど、地震動は狭域的にも方向性を有し、ため池被災は地形の影響を強く受けることが明らかとなった。

第VI章では、福島県中・南を対象域とし、堤体形状と  $R_d$  の関係を明らかにするために、堤高 ( $H$ )、堤頂長 ( $L$ )、堤頂幅 ( $W$ )、上下流法面勾配 ( $1:U$  及び  $1:D$ ) を形状諸元とし、既往研究の被災分析結果と比較するために、諸元毎の相対度数（母数）を考慮して  $R_d$  を求めた。 $H$  は  $R_d$  に影響を及ぼさず、どの堤高でも一定値を示したが、③「 $L$  が長い」方が  $R_d$  は増加した。ため池横断面形状では、④「 $H$  が高く、 $W$  が広く、上下流勾配比 ( $D/U$ ) が小さい（上流勾配が緩い）組合せ」において、 $R_d$  は大きな値を示した。これまでの地震動被災は、「 $H$  が大きいほど  $R_d$  は増加し、 $L$  は  $R_d$  に関係ない」とされてきたが、今回は正反対の結果となった。さらに、横断面形状に関する被災リスクは、新しい知見となった。因みに、震度5強で決壊した藤沼湖は、上記①～④の高被災

リスク特性を全て含んでいた。

ここまでの考察を基に Fig. 107 に「ため池地震動被災要因の概念図」を提案することで結言とした。この概念図は、要因間で階層構造を有し、下部階層が大きく上部に行くほど小さくなる台形状をしている。つまり、底辺の幅が広い程被災リスクが大きくなることを示している。下部は環境要因であり、強震動地震、広域的な地質及び推計震度の順で下から上へ構成される。上部は個体要因であり、それは外部と内部要因で構成されている。外部要因はサイト地形と堤軸方向が、内部要因は堤体形状が構成要素である。なお、本研究では言及していないが、堤体材料や構造は、内部要因として位値付けが可能である。この概念図によって、これまで震度との関連で曖昧になっていた被災要因について、要因毎の関係性を説明することができる。

環境要因の地震に関して誘因①と誘因②に分けた。その理由は、小規模な農業用ため池にとって唯一の地震情報である「推計震度」が、危険度評価に向けた重要指標と成る得ることを強調するため。また、誘因①と②の関係から、「推計震度」では、危険度評価時に強震動の揺れ時間及び推計上の精度等にも留意すべきである。

以上の様に、「ため池地震動被災要因の概念図」によって被災要因相互の関係を明らかにすることができたことから、今後、(a) 地震時緊急点検では、ため池毎の推計震度と堤体要件を踏まえて的確・効率的な点検実施に資する、(b) 農村地域の防災・減災対策のための大規模地震発生時の災害想定の基本資料として貢献できると思われる。但し、そうなるためには、全国のため池防災関係者は、ため池DBの精度向上に努めると共に、個体要因となった堤軸方向及びサイト地形に関するデータベース化にさらに取り組む必要がある。

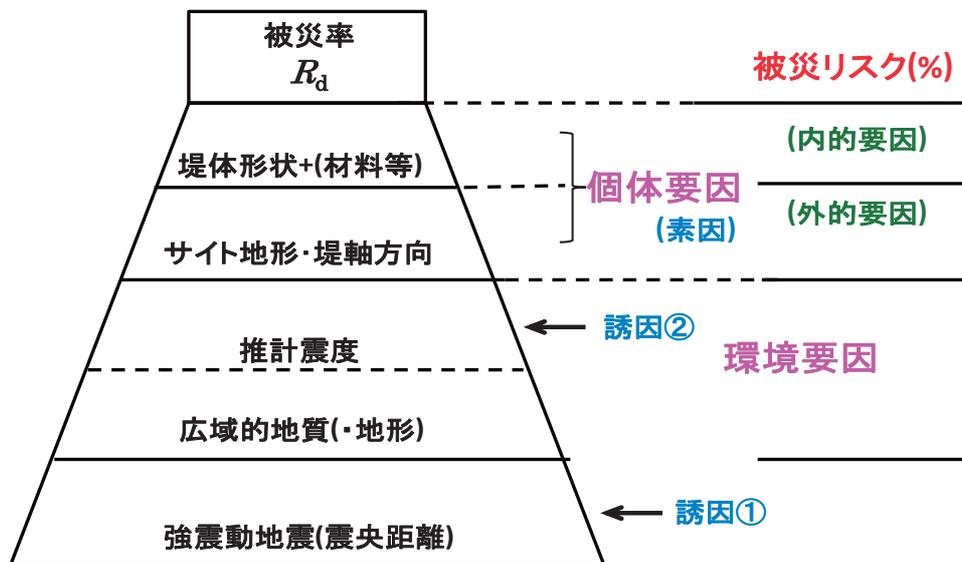


Fig. 107 ため池地震動被災要因の概念図

Conceptual diagram of damage factors to earth dams due to earthquake motions

謝辞：本研究は筆者の35年に及ぶ国家公務員としての成果をまとめたものであり、取り分け、京都府下在職中、平成17年秋に文化勲章を受章された沢田敏男京都大学名誉教授から「坂の上の雲を目指した農業土木の歴史」について直々に講義賜ったことが、今日に至る重要な原動力になっております。さらには、多くの方々のご縁、ご助力と励ましなしにはとうてい成し遂げることができませんでした。東京農工大学農学部向後雄二教授には、本論文の構成から内容に至るまで適切な指導、助言並びに励ましを頂きました。深甚より感謝致します。茨城大学農学部中石克也教授、東京農工大学農学部斎藤広隆准教授、同加藤亮准教授並びに宇都宮大学農学部飯山一平准教授には、本論文をまとめるに当たり貴重な助言と指導を頂きました。心よりお礼申し上げます。

文部科学省研究開発局地震・防災研究課の歴代の地震調査官で小屋政裕様、飯野英樹様、岩切一宏様には、毎月定例で行われる地震調査研究本部説明会において、地震に関する様々な疑問や質問に懇切・丁寧に御教授賜ると共に、貴重な資料提供及び多くの関係する方々をご紹介頂きました。特にこのご縁で、気象庁地震火山部地震津波監視課強震解析係長浦谷純平様には、計測震度、推計震度について懇切丁寧に御教授頂くと共に、東北地震時の震度観測について貴重な資料を提供及び紹介頂きました。また、京都大学防災研究所地震災害研究部門強震動研究分野助教の浅野公之博士には、強震動生成域に関するご自身の研究成果を長時間亘り丁寧に御教授頂きました。これらの方々のお教えなくしては、地震学に対して門外漢であった著者が学位論文としてまとめることは到底出来ませんでした。衷心より感謝申し上げます。

震災県の関係各位には、災害対応で超多忙な最中にも拘わらず本研究にとって不可欠な被災情報の提供を頂いた。取り分け、震災翌年4月に福島県農林水産部で災害復旧事業を担当する農村基盤整備課長に就任された小島重紀様(現相双農林事務所長)は、東京農工大時代からの学友・親友であり、本研究の目的を的確に理解し、本論文の肝となった福島県内ため池DBの整理・照合について陣頭指揮を取って頂いた。特に、同課水利防災担当主任主査の鈴木秀一郎様(現県中農林事務所農村整備課長)には、県内各ため池の位置情報の再確認と共に、手間の掛かる被災データの収集・整理の実務を司り、筆者らの被災ため池現地調査時のご案内・ご手配を頂いた。また、同県前農地管理課長菊池和明様(現農村基盤整備課長)には、著者の被害実態分析結果報告に対して、適宜・適切なコメントと震災後に見直された福島県内の防災・減災対策に関して貴重な情報を頂いた。これらのご理解・ご支援・ご協力がなければ、本論文を防災に関わる研究論文として成就させることができませんでした。深甚より感謝申し上げます。

宮城県内の農業基盤施設復旧事業対応では、宮城大学食産業学部教授郷古雅春博士(前宮城県農林水産部農地復興推進室長)に発災当時の対応状況を伺い、また、ため池被害に関する各種データの提供及び確認調整をお願いした。さらに、京都府から福島県へ災害支援のために先遣調査された、元農林水産部農村振興課副課長池垣明彦様(現同部水産課長)からは、震災直後

のため池被害形態から、震央・震源方向との関連性が有る旨のエンジニアとしての見解を伺うことができた。この4年振りの奇遇な再会は、本論文を成し遂げる重要な研究要素と動機であり続けた。

農林水産省の防災・災害対策の関係同僚各位からは、震災時の貴重な体験談と共に、本研究に關係する各種資料及び情報の提供を頂きました。中でも農村振興局防災課佐々木聡ため池防災係長は、前職の東北農政局防災課時代に東北地震を体験され、ため池地震被害及び復旧の取りまとめ、翌年4月から全国的な立場でため池地震時危険度評価等のため池防災・減災施策を担当され、謂わば著者の同志的存在として本研究の重要性の議論を深め、問題認識を常に共有させて頂きました。また、同じく震災翌年4月に着任された前防災班担当課長補佐北田裕道様(現設計課付課長補佐)は、ため池の一斉点検の実施、ため池データベース更新等を全国都道府県に指導通達すると共に、関係府県ため池防災担当者を構成員とする「ため池防災・減災に関する検討会」を立ち上げ、本研究内容を当会で報告する機会を何度も与えて頂き、ため池研究の社会的意義を広く共有できました。さらに、同課海岸・防災事業調整官遠藤知庸様とは、前職の日本水士総合研究所調査研究部長からため池防災関連でご一緒頂き、その工学的不透明性に問題提起を行い、農業土木工学との歴史的関わりを掘り下げる契機を与えて頂いた。これら同僚の真摯な行政的取組・対応が、著者の研究モチベーションを維持できた最大の要因であり、深甚よりお礼申し上げます。

加えて、著者の職務柄のカウンターパートとなる農村振興局防災課災害対策室各位には、震災後の着任直後から諸々の情報提供・交換をして頂き、特に歴代災害班担当課長補佐石橋正之様、平山和徳様、伊藤光弘様及び現課長補佐東崇史様とは、災害対応課題を共有すると共に、本研究に対する貴重なコメントを沢山頂きました。その他、同室前災害査定官木村充様(現モロッコ国派遣専門家)には、東北地震発災直後の災害対応体験を共有頂く共に、災害査定制度や被害報告データもご提供頂いた。現在も続く大震災の対応で多忙な最中、各種データ整理や提供にご協力頂いたことに対し、心からお礼を申し上げます。

さらに被災局となった東北及び関東両農政局防災課各位には超多忙な中で、被害データ整理や復旧工事の進捗状況等の情報提供頂く等、この上なくお世話になりました。特に東北農政局防災課防災係長佐藤幸太郎様と関東農政局元防災課長古木信也様(平成25年3月定年退職)には、関係県からの被害データを入手頂くと共に、著者の研究に対しても適宜、被災地の現況を踏まえた貴重な助言を頂き、さらに元資源課地質官大塚文哉様(現農村振興局農村環境課課長補佐)には、群馬県内被災ため池に関する数々の資料をご提供賜りました、本当に有り難うございました。

本研究は、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所において実施したものであり、研究を遂行するに当たって、多くの上司・同僚各位から有形無形の御助力及びご助言を頂きました。特に前施設工学研究領域長毛利栄征博士(現茨城大学農学部教授)には、ため池全般及び耐震研究に関して貴重なご助言を頂いた。また、本研究のベースとなった「ため

池DB」は、元来、施設工学研究領域広域防災担当の研究成果として引き継がれており、前担当上席研究員川本治博士（現日本大学農学部教授）始め、現担当各位には、本研究始動当初から全面的な協力を頂き、取りまとめに当たって貴重な助言を頂いた。さらに防災研究調整役着任よりご同室戴いている上席研究員中里裕臣博士及び久保田佐和子様からの全面的なサポートに対しては、感謝の言葉も見つかりません。

最後に東京農工大学博士課程小嶋創様には、修士課程時代から本研究に協力頂き、現地調査やデータ整理を手伝って頂きました。本研究は、これらの方々を含む多くの諸氏とのご縁と、ご指導、ご援助の賜と存じます。ここに記して深謝の意を表します。

#### 引用文献

- Asano, K. and T. Iwata (2012): Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, **64**, 1111-1123
- Suzuki H, Kohgo Y (2014): Relationships between Seismic Intensities and Damages to Earth Dams for Irrigation during the 2011 Offshore Pacific Coast Tohoku Earthquake, *PWE*
- 秋葉満寿次 (1594) : 昭和28年6月の豪雨による九州災害調査報告, *農業土木研究*, **22(3)**, 1-177
- 秋葉満寿次・仙葉秀 (1941) : 秋田県男鹿地震と溜池被害, *農業土木研究*, **13(1)**, 31-59
- 雨森常夫 (1939) : 雨量の分布と耕地災害, *農業土木研究*, **11(2)**, 157-162
- 雨森常夫 (1940) : 淡路の溜池破壊が農業経営に及ぼす影響並に之が復舊対策に就て, *農業土木研究*, **12(1)**, 1-9
- 雨森常夫・山下源彦 (1948-1949) : 溜池による洪水防止並に其の灌漑発電用水源としての利用性に關する調査研究 (豫報), *農業土木研究*, **16(3-4)**, 111-112
- 有田博之 (2009 a) : 新潟県中越地震における災害査定の特徴と課題, *農業農村工学会論文集*, **77(1)**(通号 **259**), 93-98
- 有田博之・湯澤顕太 (2009 b) : 2004年新潟県中越地震における農業生産基盤の小規模被害と復旧対策, *農業農村工学会論文集*, **77(4)**(通号 **262**), 417-422
- 五十嵐太郎編 (2013) : 見えない震災 建築・都市の強度とデザイン, みすず書房, 9月
- 石橋 豊 (1939) : 本邦高土堰堤に於ける堤高と堤頂幅との關係に就ての統計的研究, *農業土木研究*, **11(4)**, 341-347
- 石橋 豊 (1942) : 本邦高土堰堤に於ける堤高と内法並に外法勾配との關係に就ての統計的研究, *農業土木研究*, **14(3)**, 141-147
- 井上 勇 (1937) : 土堰堤断面決定に際し天幅率と内外法率との關係に就て, *農業土木研究*, **9(2)**, 17-24
- 大崎順彦 (1983) : 「地震と建築」, 岩波新書 (黄版) 240
- 片岡 謙 (1929) : 農業土木研究の發刊に際して, *農業土木研究*, **1(1)**, 1-6
- 可知貫一 (1915a) : 岐阜県下耕地整理地区溜池一覽表に就て, *耕地整理研究会報*, **20号**, 32-36
- 可知貫一 (1915b) : 岐阜県可見郡小泉村耕地整理地区溜池直営工事概況, *耕地整理研究会報*, **20号**, 60-68
- 可知貫一 (1932) : 京都府巨椋池干拓と其の沿岸耕地改良事業, *農業土木研究*, **4(4)**, 341-358
- 可知貫一 (1937) : 追憶 上野博士と将来の農業土木, *東京大学農学部農業工学科八十周年記念誌*, *東京大学農業工学同窓会*, 昭和59年, 54-56
- 気象庁 (2009) : 気象庁震度階級の解説, 平成2年3月
- 小池一之 (1965) : 阿武隈川中流域の地形 (短報), *地理学評論*, **38**, 519-525
- 功刀 卓・青井 真・鈴木 亘・中村洋光・森川信之・藤原広行 (2012) : 2011年東北地方太平洋地震の強震動, *防災科学技術研究所, 主要災害調査*, **48**, 67
- 小島寛之 (2006) : 完全独習 統計学入門, *ダイヤモンド社*, 9月
- 小林範之・吉武美孝・勝山邦久・岡林千江子 (2002) : ため池地震危険度評価システムの構築, *農業土木学会論文集*, **70(6)** **222**, 69-75
- 小林宏康 (2008) : 平成19年 (2007年) 能登半島地震及び新潟県中越沖地震における農村工学研究所の対応と技術支援力の強化, *農村工学研究所技報*, **208**, 1-13
- 小林道正 (2012) : でたためにひそむ確立法則 地震発生確率87%の意味するもの, 岩波書店, 7月
- 澤田敏男 (1949-1950) : 滲透水の流動に關する研究, *農業土木研究*, **17(2-3)**, 57-68
- 重松逸造 (1997) : 疫学とはなにか 原因追究の科学, 講談社, 6月
- 清水 誠 (1996) : データ分析 はじめの一步, 講談社, 10月
- 白石英彦・岩崎和巳・大西亮一・伊藤喜一 (1980) : 新潟平野における6.26豪雨について, *農業土木試験場技報*, **B**, 水理, **48号**, 1-26
- 鈴木尚登 (1987) : 我が国農業構造変動の定量的分析・マルコフモデル及び地域変動特性の分析-, 埼玉大学 政策科学研究科修士論文
- 鈴木尚登・中里裕臣 (2012) : 平成23年 (2011年) 東日本大震災における農村工学研究所の対応と農地・農業用施設等の被害実態, *農村工学研究所技報*, **213**, 1-21
- 鈴木尚登・花岡茂樹・森瀧亮介・柳浦良行 (2007) : 巨椋池干拓の「作業日誌」に見る可知氏の設計思想, *農土誌*, **75(2)**, 97-100
- 高岡恭三 (1984) : 1983年日本海中部地震調査報告, *農業土木試験場技報*, **Nov-84(3)**, 1-42
- 高瀬国雄・天野 充・山下 進 (1966) : 地震によるアースダムの被害, *土と基礎*, **(14)10**, 3-9
- 高瀬国雄 (1967) : アースダムの安全性に關する統計的研究, *京都大学学位論文*
- 高月豊一・南 勳 (1955) : アースダム法面安定に關する一考察, *農業土木研究*, **23(4)**, 199-206
- 高月豊一・南 勳 (1956) : アースダム滑動安定に対する静力学的考察, *農業土木研究*, **24(4)**, 187-192

- 谷 茂 (1985) : 1983年日本海中部地震によるため池の被害調査報告, 農業土木試験場技報, CE, 造構, 4号, 1-92
- 谷 茂・長谷川高士 (1987) : 日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害, 農土誌, (55) 10, 17-25
- 谷 茂・長谷川高士 (1990) : 溜池堤体材および基礎地盤の土質工学的性質, 農業土木学会論文集, **150**, 57-65
- 谷 茂・長谷川高士 (1991) : 溜池の地震時安全性の評価法, 農業土木研究, **152**, 55-64
- 谷 茂 (1995) : 北海道に被害をもたらした地震におけるフィルダムの挙動について, 農業工学研究所技報, Mar-95 (**192**), 17-39
- 谷 茂 (1998a) : 宮城県北部地震による農業施設の地震被害調査報告, 農業工学研究所技報, **196**, 29-43
- 谷 茂・堀 俊和 (1998b) : 日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震被害に関する研究, 農業工学研究所報告, **37**, 51-90
- 谷 茂 (2005) : ため池リアルタイム防災データベースの開発, 農土誌, **73(9)**, 817-820
- 谷 茂 (2006) : 農地・農業用施設被害の概要について, 農業工学研究所技報, Mar-06 (**205**), 1-4
- 東北農政局 (1984) : 「日本海中部地震」-土地改良施設の災害と復旧-
- 中里裕臣・井上敬資・海野寿康 (2007) : GISを利用した農地地すべり予測システムの開発, 農業農村工学会誌, **75(11)**, 979-982
- 中島淳一郎 (1979) : 宮城県沖地震による土地改良施設災害の実態と一考察, 農土誌, **47(6)**, 409-418
- 新潟地震調査報告 (1965), Oct-**65(1)**
- 農業土木学会編 (1934) : 本邦高土堰堤誌, 農業土木研究臨時刊行, 1934年6月
- 農業土木学会編 (1937) : 水害防止協議会決定事項 (抄録), 農業土木研究, **9(1)**, 89-95
- 農業土木学会伊勢湾台風災害対策特別委員会 (1960) : 伊勢湾台風災害対策調査報告書, 農業土木研究, **28(2)**, 59-81
- 伯野元彦 (1992) : 「被害から学ぶ地震工学」-現象を素直に見つめて-, 鹿島出版会
- 畑中元弘 (1952) : 土堰堤の振動に関する三次元的考察-自由振動について-, 土木学会誌, **37(10)**, 423-428
- 福島県農業用ダム・ため池耐震性検討委員会 (2012) : 農業用ダム・ため池の耐震性簡易検証手法の確立報告書 (要旨) 平成24年3月6日, 3
- 藤井弘章・難波明代・西村伸一・島田 清・西山竜朗 (2005) : 兵庫県南部地震による淡路島北部5町のため池被害・無被害要因の多変量解析, 自然災害科学**24-1**, 59-78
- 堀 俊和・上野和広・松島健一 (2012) : 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策, 農村工学研究所技報, **213**, 175-199
- 松尾欣二 (1937) : 技術的に見たる往古の農業土木事業, 農業土木研究, **9(4)**, 15-17
- 南 勲 (1960) : アースダム耐震性に関する一実験, 農業土木研究, **28(1)**, 51-52
- 村井俊治 (2011) : 東日本大震災の教訓-津波から助かった人の話-, 古今書院, 8月
- 毛利栄征 (1985) : 1983年日本海中部地震によるパイプラインの被災調査報告, 農業土木試験場技報, Nov-**85(4)**, 93-147
- 毛利栄征・堀 俊和・松島健一・有吉 充 (2006) : 平成16年 (2004年) 新潟県中越地震によるため池と集落排水施設の被災, 農業工学研究所技報, **205**, 61-76
- 毛利栄征・谷 茂・堀 俊和・有吉 充・増川 晋・田頭秀和・林田洋一 (2008a) : 平成19年 (2007年) 新潟県中越沖地震によるため池の被害, 農村工学研究所技報, **208**, 75-88
- 毛利栄征・堀 俊和・有吉 充・林田洋一・谷 茂 (2008b) : 平成19年 (2007年) 能登半島地震によるため池の被害, 農村工学研究所技報, **208**, 15-23
- 森瀧亮介・鈴木尚登 (2007) : 食料安全保障と第1号国営巨椋池干拓事業の成立背景, 農土誌, **75(2)**, 93-96
- 守屋正博・高岡恭三・山下 進 (1968) : 十勝沖地震によるアースダムの被害調査とその考察, 土と基礎, **541**, 39-45
- 守屋正博・高岡恭三・山下進 (1969) : アースダムの被害, 1968年十勝沖地震調査報告, 農業土木試験場技報, F, 総合, 3号, 1-10
- 山崎 晃・三宅克之・中村正博・池見 拓 (1989a) : ため池の地震被害の分析, 土木学会論文集, **404/I-2**, 361-366
- 山崎 晃・三宅克之・中村正博・池見 拓 (1989b) : 地震被害を受けたため池の悉皆調査に基づく被災率, 土木学会論文集, **404/I-2**, 367-374
- 山崎不二夫 (1935) : 農業造構學の概念, 研究対象, 研究範囲及び研究方法, 農業土木研究, **7(2)**, 29-40
- 山下 進 (1965) : アースダムの被害, 農業土木試験場技報, F, 総合, 1号, 59-86
- 和久井清次 (1932) : 高堰堤の地質學的考察, 農業土木研究**4(3)**, 299-314
- 涌井良幸・涌井貞美 (2010) : 史上最強凶鑑これならわかる! 統計学, ナツメ社, 10月
- 和田 保 (1937) : 土堰堤の断面決定に就て, 農業土木研究, **9(4)**, 105-111
- 和田 保 (1965a) : 農業土木の現状と将来, 農業土木学会論文集, **32(6)**, 36-39
- 和田 保 (1965b) : 農業土木の現状と将来, 農業土木研究, **32(6)**, 36-39
- [http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/calc\\_sindo.htm](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm)
- <http://www.j-shis.bousai.go.jp/map/JSHIS2/download..htm>

## Study on damage factors to earth dams for irrigation due to earthquake motions

– In the Case of the 2011 Offshore Pacific Coast Tohoku Earthquake –

SUZUKI Hisato\*

\*Department of Planning and General Administration, Coordinator for Disaster Prevention Research

### Abstract

There are approximately 210 thousand earth dams for irrigation in Japan. The 2011 Offshore Pacific Coast Tohoku Earthquake damaged a large number of dams and a breach of Fujinuma dam caused reservoir water flooding that killed 7 people and left one person missing. It is necessary to estimate the damage risks of dams that cause serious damage because of earthquakes occurring frequently in Japan. In this study, to clarify factors related to the seismic damages of dams, the author analyzed the relationships between damaged and non-damaged dams from the Tohoku Earthquake using the Japan Meteorological Agency seismic intensity, earth dams data base and damage collection from administrative organizations. In the process, the following indexes were introduced: 1 km mesh seismic intensities, damage ratio, angle of dam axis with respect to the epicenter, types of geographical features, and dimensional shape parameter. We found that the damage ratio increased with an increase in seismic intensity when dam axes were normal to the epicenter with a specific geographical location and dimensional shape.

**Key words:** Tohoku Earthquake, earth dam, seismic damage, estimated seismic intensity, damage ratio, damage factor, damage risk

## Appendix-1 農地・農業用施設と自然災害に関する研究文献 (農業農村工学会)

年	タイトル	著者	巻号・年	ページ
<b>農業土木研究(1929-1965)</b>				
1929	☆ 農業土木研究の發刊に際して	片岡 謙	1(1)1929	1-6
1930	△ 鐵筋コンクリート設計資料一	大淵 貞榮	2(1)1930	73-92
	△ 溜池水利計畫例	君塚 貢	2(2)1930	159-179
	△ 中空式鐵筋混凝土堰堤の理論と設計	木村 久満	2(3)1930	249-268
1931	☆ <b>農業土木ハンドブック發行(農業土木学会編)</b>			
1931	△ 轉動堰堤(ローリング・ダム)の理論と設計例	木村 久満	3(2)1931	237-280
1932	△ 廣頂堰に就て	古市 與一	4(2)1932	139-149
	○ 高堰堤の地質學的考察	和久井清次	4(3)1932	299-314
	☆ 京都府巨椋池干拓と其の沿岸耕地改良事業	可知 貫一	4(4)1932	341-358
1934	☆ 本邦高土堰堤誌	農業土木学会編	1934. 6月	1-94
1935	△ 堰底に作用する揚壓力の分布	狩野 徳太郎	7(1)1935	1-4
	△ 農業造構學の概念, 研究對象, 研究範圍及び研究方法	山崎不二夫	7(2)1935	29-40
	△ 彈性基礎上の函渠の受くる應力計算	柴田 道生	7(2)1935	51-57
	○ 災害河川の流量と搬出砂礫との關係に就て	雨森 常夫	7(2)1935	59-78
	○ 軟弱地盤に施工せる築堤沈下の力學的解析	柴田 道生	7(3)1935	51-64
1936	☆ 何故我が農業移民は北滿に迭るか	加藤 久男	8(1)1936	1-15
1936	△ 大阪府泉北郡光明池支配地域用水改良事業	青木 勝治	8(2)1936	17-40
1936	△ 宮崎縣杉安堰用水改良工事報告	柳原 鹿松	8(2)1936	41-52
	○ 「セメントグラウチング」に関する報告	前川 純三	8(3)1936	61-70
	○ 鋼土の粘着力に及ぼす石灰の影響	山崎不二夫	8(4)1936	31-40
1937	△ 群馬縣勢多郡新里村外五箇村用水改良事業として施行せる土堰堤工事とその歩掛りの一部に就て	齋藤美千司	9(1)1937	39-48
	△ 滋賀縣淡海溜池の設計とその完成後の概況		9(1)1937	71-86
	○ 水害防止協議會決定事項(抄録)		9(1)1937	89-95
	○ 粘質土の剪斷抵抗	山崎 不二夫	9(2)1937	7-16
	○ 土堰堤断面決定に際して天幅率と内外法率との關係に就て	井上 勇	9(2)1937	17-24
	☆ 技術的に見たる往古の農業土木事業	松尾 欣二	9(4)1937	15-17
	○ 二和土の締固め	山崎不二夫	9(4)1937	19-26
	○ 土堰堤基礎調査とグラウチングの實例に就て	柴田 道生	9(4)1937	91-94
	○ 土堰堤の断面決定に就て	和田 保	9(4)1937	105-111
	△ 犬走の効果及其位置に就て	緒方 末松	9(4)1937	119-123
1938	△ 福島縣本宮町外一ヶ村農業水利事業三森溜池取水塔と分水装置	澁川 幸雄	10(3)1938	363-372
1939	○ 土堰堤堤體の透水調査法として簡便なるパイプ試験	後藤 與治, 下川 善之	11(1)1939	12-17
	○ 雨量の分布と耕地災害	雨森 常夫	11(2)1939	157-162
	○ 本邦高土堰堤に於ける堤高と堤頂幅との關係に就ての統計的研究	石橋 豊	11(4)1939	341-347
1940	○ 淡路の溜池缺壊が農業經營に及ぼす影響並に之が復舊對策に就て	雨森 常夫	12(1)1940	1-9
	☆ 蒙疆の土地改良と水利問題	師岡 政夫	12(2)1940	113-114
	☆ 北支那に於ける水害と其の對策	藤井 順治	12(3)1940	157-171
	☆ 國土計畫に就いて	溝口 三郎	12(3)1940	178-204

	△ 本邦高土堰堤の工事費に就ての統計的研究	石橋 豊	12(4)1940	228-246
1941	◎ 秋田縣男鹿地震と溜池被害	秋葉満壽次, 仙波 秀男	13(1)1941	31-59
	☆ 混凝土重力堰堤内應力の計算例	立山 一徳	13(2)1941	112-126
	△ 溜池の池敷係數に就て	石橋 豊	13(3)1941	204-222
	☆ 佛印に於ける水利事業 (譯)	和田 保, 戸塚 正夫	13(3)1941	223-251
	☆ 佛印に於ける水利事業 (譯)(續)	和田 保, 戸塚 正夫	13(4)1941	283-308
	○ 土堰堤築堤材料の締固に就て (抄譯)	菊岡 武男	13(4)1941	309-315
1942	☆ 朝鮮の洪水	中村總七郎	14(1)1942	37-44
	☆ 農業土木事業に於ける學生々徒集團勤勞作業に関する調査研究 (序報)	石橋 豊	14(2)1942	104-109
	○ 本邦高土堰堤に於ける堤高と内法並に外法勾配との關係に就ての統計的研究	石橋 豊	14(3)1942	141-147
1943	△ ポートランドセメント混和劑としての初穀利用	松田 俊正	15(1)1943	1-8
	☆ 共榮圏各地農業水利開發に對する基礎的考察の差異	可知 貫一	15(2-3)1943	103-116
	△ 溜池に於ける最大水深と平均水深との相關關係に就て	石橋 豊	15(2-3)1943	311-317
1945	☆ <b>第二次世界大戦終戦</b>			
1948	△ 溜池による洪水防止並に其の灌漑發電用水源としての利用性に關する調査研究 (豫報)	雨森 常夫, 山下 源彦	16(3-4)1948-1949	111-112
1949	△ 河川の最大洪水量を低減する方策について	雨森 常夫	17(1)1949-1950	23-24
	○ 堰堤下の水流	田中 宏平	17(1)1949-1950	35
	☆ アメリカに於ける OVERHEAD IRRIGATION に就て	吉良 八郎	17(1)1949-1950	41-43
	△ 洪水調節について	廣松 直人	17(1)1949-1950	46-47
	○ 滲透水の流動に關する研究	澤田 敏男	17(2-3)1949-1950	57-68
	△ 洪水対策資料としての農作物浸水被害の實驗 (第1報)	高月 豊一, 吉田茂三郎	17(2-3)1949-1950	95-97
	△ 防水溜池設計計畫の基本的概念	出口 利祐	17(2-3)1949-1950	135-142
1949	☆ <b>土地改良法の制定</b>			
1950	△ 小阪部川農業水利事業の計畫概要及び堰堤築造コンクリートの二三の調査	上瀧 要美	18(3)1950-1951	224-233
	○ 滲透水の流動に關する研究 (3)	澤田 敏男	18(3)1950-1951	270-280
1950	☆ <b>昭和25年に農林水産業施設災害復旧事業費国庫補助の暫定措置に関する法律(暫定法)に基づき制定</b>			
1950	☆ <b>農林省農業技術研究所農業土木部、九州農業試験場干拓部発足</b>			
1952	☆ <b>土地改良事業計畫設計基準「コンクリート堰堤」編 制定</b>			
1953	△ 統計的に見た温水溜池に關する考察	秋葉満壽次他	21(3)1953.09	151-159
	△ 計畫洪水量に關する順序統計学的考察	角屋 睦	21(3)1953.09	188-195
1953	☆ <b>土地改良事業計畫設計基準「土堰堤」編 制定</b>			
1954	△ 滲透水の流動に關する研究-5-	沢田 敏男	21(5)1954.01	273-283
	△ 低堰堤の揚圧について	田中 宏平	21(5)1954.01	307-310
	○ アースダムに關する研究 (抄録)		21(5)1954.01	323-329
	△ 可見川石塊堰堤の設計および施行について	林 桂, 荒井 正義	22(2)1954.07	148-160
	○ 昭和28年6月の豪雨による九州災害調査報告	秋葉満壽次	22(3)1954.08	1-177
	○ 水路および貯水池の漏水防止のための疎水性土壤の研究	山崎不二夫	22(4)1954.10	413-414
1955	△ 堰堤溢流面の合理的曲線の一試案	山本 茂	22(6)1955.03	495-500
	△ 潮受堤防の災害復旧についての研究	松尾 欣二	22(6)1955.03	518-525
	△ 伊勢湾の異常潮位に關する一考察	川原 琢磨	23(2)1955.07	81-85
	○ アースダム法面安定に關する一考察	高月 豊一, 南 勳	23(4)1955.11	199-206
1956	△ 土堰堤の締固め過程における間隙圧について-1-	和田 保他	24(1)1956.05	9-12

- |  |                                     |                    |         |
|--|-------------------------------------|--------------------|---------|
| ○ 豪雨時アースダムに発生した地這り面の形の解析法                    | 高月 豊一他                              | 24(1)1956.05       | 18-23   |
| △ 浸透水運動の基礎理論                                 | 中村 充                                | 24(1)1956.05       | 40-44   |
| ○ 前双金を有する堤防の浸透                               | 田町 正誉                               | 24(3)1956.08       | 125-129 |
| ○ 土の応力と変形についての基礎的考察                          | 山田伴次郎他                              | 24(3)1956.08       | 130-133 |
| △ 特殊地盤を基礎としたコンクリートダムの設計                      | 遠藤 虎松, 山崎 順作<br>宮本 国雄               | 24(3)1956.08       | 139-144 |
| △ 帯状構造物に及ぼす地盤反力の静力学的影響-6-                    | 山田伴次郎                               | 24(3)1956.08       | 158-166 |
| ○ アースダム滑動安定に対する静力学的考察                        | 高月 豊一, 南 勳                          | 24(4)1956.10       | 187-192 |
| △ 浸透水運動の基礎理論 (II)                            | 中村 充                                | 24(4)1956.10       | 218-222 |
| <b>1956 ☆ 土地改良事業計画設計基準「アースダム」編 改定案</b>       |                                     |                    |         |
| 1957 △ 帯状構造物に及ぼす地盤反力の静力学的影響-7-               | 山田伴次郎                               | 24(6)1957.02       | 329-335 |
| △ 山口県營温見ダムにおける堤体内部温度について                     | 田中 真, 森 正義<br>光田 照秀, 木村 一郎<br>山口 重雄 | 24(7)1957.04       | 383-386 |
| ○ 災害復旧における浸透抑制について                           | 清水 義雄他                              | 24(8)1957.05       | 417-419 |
| △ 地層の電気比抵抗と透水係数                              | 桂山 幸典                               | 24(8)1957.05       | 421-422 |
| ○ 第12号台風による南児島塩害について                         | 小林 清                                | 24(8)1957.05       | 439-440 |
| 1958 △ 紀の川新六箇頭首工災害復旧工事におけるイントリユージョン工法とガンクリート | 高橋 三夫                               | 25(5)1958.02       | 325-328 |
| △ 豊沢川ダムにおけるコンクリートの品質管理について                   | 秋篠 憲作                               | 25(8)1958.05       | 462-464 |
| △ 地スベリに対する一考察                                | 吉原 公男                               | 25(8)1958.05       | 506-507 |
| 1959 △ 破碎帯地スベリについての考察-1-                     | 高橋寅吉他                               | 26(7)1959.03       | 438-440 |
| △ Vega ダムの施工とその管理について                        | 中原 通夫                               | 27(1)1959.05       | 29-33   |
| <b>1959 ☆ 農林省農地局建設部実験研修室発足</b>               |                                     |                    |         |
| 1960 △ 榎沢ダムのクラッシングプラントの設計とその実績について           | 北山 定一, 朝倉 愿<br>荒ヶ田国和, 北村 純一         | 27(7)1960.03       | 440-442 |
| △ 土えん堤かさ上げの設計一例                              | 矢上 光男<br>滝口 賢三, 近藤 庄平<br>泉川 利雄      | 27(8)1960.04       | 494-496 |
| △ 大夕張ダムのコンクリート打設について                         | 榊原 高男, 橋本 吉夫                        | 27(8)1960.04       | 518-521 |
| ○ アースダム耐震性に関する一実験                            | 南 勳                                 | 28(1)1960.06       | 51-52   |
| ○ 伊勢湾台風災害対策調査報告書                             | 農業土木学会伊勢湾台風<br>災害対策特別委員会            | 28(2)1960.08       | 59-81   |
| △ 高潮について                                     | 宮崎 正衛                               | 28(2)1960.08       | 82-86   |
| <b>1961 ☆ 農業基本法の制定</b>                       |                                     |                    |         |
| <b>1961 ☆ 3機関を母体に農林省農業土木試験場設立</b>            |                                     |                    |         |
| <b>1961 ☆ 災害対策基本法の制定</b>                     |                                     |                    |         |
| 1961 ☆ 新農村建設とは何か                             | 小倉 武一                               | 29(6)1961.12       | 241-243 |
| ☆ 農業基本法と農業土木の将来                              | 堀 真治                                | 29(6)1961.12       | 261-262 |
| ☆ 農業基本法と農業土木の将来                              | 和田 保                                | 29(6)1961.12       | 269-274 |
| ☆ 農業土木の技術学・工学および基礎学                          | 山崎不二夫他                              | 29(6)1961.12       | 50-52   |
| 1963 △ 関東ロームの粒度分析 火山灰土の物理性の研究                | 多田 敦他                               | 別冊(通号5)<br>1963.01 | 17-23   |
| △ 堤防の津波対策に関する水理学的研究-1-3-                     | 福井 芳朗他                              | 別冊(通号5)<br>1963.01 | 31-48   |
| 1964 △ 刀利アーチダムの設計について                        | 久徳 茂雄, 八木 直樹                        | 31(5)1964.01       | 251-257 |
| 1965 ☆ 農業土木の現状と将来                            | 和田 保                                | 32(6)1965.02       | 36-39   |
| <b>農業土木会論文集('66-'07)</b>                     |                                     |                    |         |
| 1966 ○ 建設中のアースダム堤体内間ゲキ水圧の解析について              | 沢田 敏男他                              | 15)1966.03         | 16-20   |
| <b>1966 ☆ 土地改良事業計画設計基準「フィルダム」編 改定案</b>       |                                     |                    |         |
| 1968 △ 積雪災害度の気候学的表示                          | 中峠 哲朗                               | 23)1968.03         | 9-18    |

	△ 複合ダム接合部に関する研究 (I) 複合ダム接合部の応力解析と形状設計	沢田 敏男, 辻 誠一	23) 1968. 03	25-28
1969	○ アースダムの振動性状に関する一解析法	沢田 敏男他	28) 1969. 06	17-21
	△ 岩盤内を伝バする弾性波の特性について	沢田 敏男他	28) 1969. 06	22-28
	△ ホローダムの振動性状に関する解析的研究	沢田 敏男他	30) 1969. 12	12-20
	△ 内の倉ホローダムの設計に関する研究	沢田 敏男他	30) 1969. 12	21-26
1971	<b>「河川管理設計等構造令」の施行</b>			
1972	○ 締固め土のクリープについて 締固め土の力学的性質について (II)	鳥山 暁司	40) 1972. 04	67-72
	△ 表面沈下量による締固め度の判定 フィルダムの締固めに関する実験的研究(I)	藤井 弘章他	41) 1972. 07	49-55
	△ 貫入抵抗による締固め効果の判定 フィルダムの締固めに関する実験的研究(II)	藤井 弘章他	41) 1972. 07	56-61
	△ 土圧計の検定ならびにその埋設における問題点について フィルダムの締固めに関する実験的研究(III)	藤井 弘章他	41) 1972. 07	62-69
	△ 締固め機械によって生ずる力について フィルダムの締固めに関する実験的研究(IV)	藤井 弘章他	41) 1972. 07	70-77
	△ タイヤローラーによって生ずる地中応力 フィルダムの締固めに関する実験的研究(V)	藤井 弘章他	42) 1972. 10	35-41
	△ 振動ローラーによって生ずる地中応力 フィルダムの締固めに関する実験的研究(VI)	藤井 弘章他	42) 1972. 10	42-46
	△ 振動ローラーによる締固め地盤の動的性質の推定 フィルダムの締固めに関する実験的研究(VII)	藤井 弘章他	42) 1972. 10	47-53
1973	○ フィルダムの地震時応力解析-1-フィルダムの固有モードについて	青山 咸康他	46) 1973. 08	49-55
	○ 有限要素法による堤体および基礎における浸透流解析	沢田 敏男他	47) 1973. 10	16-21
	○ フィルダムの地震時応力解析-2-フィルダムの地震応答解析について	青山 咸康他	47) 1973. 10	22-34
	△ コンクリートダム施工計画の最適化に関する研究-1-ダムコンクリート打設に関する最適な順序付け	浅井喜代治	47) 1973. 10	35-43
1974	△ コンクリートダム施工計画の最適化に関する研究-3-型ワク人夫数の制限を考慮した修正 PERT 計算の適用例とその考察	浅井喜代治	49) 1974. 02	35-40
	○ 締固め土の力学的性質について-4-締固め土のクリープへの含水比の影響	鳥山 暁司	52) 1974. 08	35-40
	○ 締固め土の力学的性質について-5-含水比によるクリープ後の締固め土のせん断特性の変化	鳥山 暁司	53) 1974. 10	33-38
1975	△ 破壊面の応力解析による残留強度の決定	藤川 武信, 宜保 清一	57) 1975. 06	33-38
	○ 特殊外力条件に対するフィルダムの設計-1-自動車走行によって発生するアースダム堤体挙動の特性	沢田 敏男, 長谷川高士 内田 一徳	58) 1975. 08	27-32
	○ 土の締固めにおける水分の役割に対する一考察	近藤 武	58) 1975. 08	21-26
	△ 構造物最適設計に対する FEM の適用	長谷川高士	59) 1975. 10	35-45
	○ 特殊外力条件に対するフィルダムの設計-3-堤頂に自動車道路をもつフィルダムの安定解析と結果の設計への適用	沢田 敏男, 長谷川高士 内田 一徳	59) 1975. 10	53-61
	△ 特殊外力条件に対するフィルダムの設計-2-自動車走行外力のシミュレーションと非線形応力解析	沢田 敏男, 長谷川高士 内田 一徳	59) 1975. 10	45-52
	○ アースダムの三次元浸透流解析	沢田 敏男, 渡辺 忠 吉武 美孝	60) 1975. 12	49-54
1976	△ 締固め土の力学的性質について-6-締固め土のクリープへの側圧の影響	鳥山 暁司	61) 1976. 02	31-36
	△ 締固め土の力学的性質について-7-クリープを受けた締固め土のせん断特性への側圧の影響	鳥山 暁司	62) 1976. 04	28-33
	△ 擬似地震動下 アースダムの応力挙動 [英文]	青山 咸康	65) 1976. 10	65-72
1977	○ アースダムの三次元浸透流解析-流量および浸出点について	沢田 敏男, 渡辺 忠 吉武 美孝	70) 1977. 08	46-51
1978	△ 三軸圧縮試験における土の応力と変形について	井上 宗治	74) 1978. 04	75-81
	○ FEM による斜面安定解析の一手法-最適設計過程としての斜面安定解析-1-	長谷川高士	74) 1978. 04	67-74
	○ 最適設計過程としての斜面安定解析-2-設計過程の構成	長谷川高士	75) 1978. 06	76-80
	△ 締固め粘性土のせん断特性へのヒズミ速度の影響	鳥山 暁司	78) 1978. 12	45-50
	△ 正規圧密粘土の体積変化特性について	沢田 敏男, 長谷川高士 鳥田 清	78) 1978. 12	31-39
	△ 日本における貯水池の捕ソク率と土砂収支	吉良 八郎	78) 1978. 12	16-23
1979	○ Three dimensional free vibrations of embankment dams	Shigeyasu Aoyama	79) 1979. 02	47-54
	△ 貫入深さを考慮に入れたコーン貫入抵抗の三次元的解析	藤川 武信, 甲本 達也	79) 1979. 02	33-38
	△ シラスの直接せん断強さに及ぼす粒子分布の影響	藤川 武信, 三輪 晃一	79) 1979. 02	39-46
	△ 最適設計過程としての斜面安定解析-3-動的状態に対する斜面安定性の解析	長谷川高士	80) 1979. 04	50-56

	△ 貯水池における滞砂分布の経験的予測	吉良 八郎, 広瀬 哲夫 大田 恵司	80)1979. 04	32-41
	△ ダイレタンシー特性と有効応力変化 発生間ゲキ水圧との関係	吉田 昭治	80)1979. 04	42-49
	△ フィルダムの震動解析-1-内部減衰力の評価と減衰モデルに関する一つの提案	沢田 敏男, 長谷川高士 菊沢 正裕	81)1979. 06	76-86
	△ フィルダムの締固めに関する実験的研究-9-ブルドーザーによる締固め地盤内の地中応力	藤井 弘章, 沢田 敏男 渡辺 忠	81)1979. 06	94-103
	△ 集中豪雨による改良山成畑の崩壊について	福岡 喜弘, 宮崎 毅 井上 久義	81)1979. 06	9-16
	○ フィルダムの震動解析-2-複合減衰モデルの実ダム動的解析への適用	沢田 敏男, 長谷川高士 菊沢 正裕	82)1979. 08	58-64
	△ 正規圧密粘土の CU・CD 試験時におけるセン断ヒズミについて	島田 清	83)1979. 10	30-37
	△ フィルダムの締固めに関する実験的研究-10-ブルドーザーの地中応力波形モデルの設定と実測波形	藤井 弘章, 沢田 敏男 渡辺 忠	83)1979. 10	44-55
1980	○ 締固め粘性土のセン断特性の水浸および締固め含水比による変化	鳥山 暁司	85)1980. 02	56-62
	○ Hardin 型復元力を有する振動系の応答性状	青山 咸康	86)1980. 04	51-56
	△ 不連続面へのジョイント要素の導入について-有限要素法による盛土斜面の解析-1-	永井 啓一, 中谷 三男	86)1980. 04	57-63
	△ 表面流出を伴う豪雨時の出水解析について	武上成比古	86)1980. 04	36-41
	○ 一次元上昇浸透流による砂柱の破壊に関する理論的研究-2-一次元二層系砂柱の浸透破壊問題	沢田 敏男, 長谷川高士 田中 勉	89)1980. 10	48-54
	○ 一次元三層系砂柱の浸透破壊問題-一次元上昇浸透流による砂柱の破壊に関する理論的研究-3-	沢田 敏男, 長谷川高士 田中 勉	90)1980. 12	63-73
	△ 土性と飛散侵食について-土の初期水食に関する土質理工学的研究-1-	藤川 武信, 内田 勝利	90)1980. 12	1-8
1981	△ 傾斜地盤上の盛土斜面の安定解析に関する一考察-有限要素法による盛土斜面の解析-2-	永井 啓一, 中谷 三男	94)1981. 08	55-60
	○ 初期剪断応力を受けた土の動的強度	長谷川高士, 内田 一徳 立石 卓彦	94)1981. 08	61-71
	○ アースフィルダム築堤材料の動的変形特性の定量化-初期剪断応力を受けた土の動的特性-3-	内田 一徳, 長谷川高士	94)1981. 08	72-81
	○ 振動台模型実験におけるフィルダムの動的挙動-フィルダムの動的特性に関する研究-1-	長谷川高士, 菊沢 正裕	95)1981. 10	57-64
	△ 一次元上昇浸透流による砂柱の破壊に関する理論的研究-5-限界時の残留有効応力と砂層の安定性	田中 勉, 長谷川高士	96)1981. 12	36-40
	△ 三軸圧縮供試体内の間隙水圧分布について	井上 宗治	96)1981. 12	49-57
	△ 材料及び幾何学的非線形性をとり入れた地盤・土構造物の静的解析	田中 忠次	96)1981. 12	64-71
	△ ローラーによる砂質ロームの締固め効果に関する実験的研究	吉田 勲, 河野 洋	96)1981. 12	41-48
	○ フィルダムの動的特性に関する研究-2-フィルダムの動的解析及び動的変形特性の同定	長谷川高士, 菊沢 正裕	96)1981. 12	20-29
1981	☆ 土地改良事業計画設計基準「ダム」編 制定 (「コンクリートダム」及び「フィルダム」を統合)			
1982	☆ 老朽ため池整備便覧を作成			
1983	△ 境界要素法によるフィルダム浸透流量に関する一考察	近藤 武, 河端 俊典	104)1983. 04	81-87
	△ 飽和-不飽和浸透流解析法とその適用上の問題点について-フィルダムの飽和-不飽和浸透特性-1-	長谷川高士, 森井 俊広	105)1983. 06	69-75
	△ フィルダムの定常および非定常浸透特性-フィルダムの飽和-不飽和浸透特性-2-	長谷川高士, 森井 俊広	107)1983. 10	1-8
	△ フィルダム監査廊の応力変形解析	長谷川高士, 内田 一徳	108)1983. 12	33-44
	△ 深山ダムの静的計測データの解析-表面アスファルト遮水壁型ロックフィルダムの挙動-1-	長谷川高士他	108)1983. 12	45-54
	○ 深山ダムの地震応答データの分析と動的挙動の予測-表面アスファルト遮水壁型ロックフィルダムの挙動	長谷川高士他	108)1983. 12	55-63
1984	△ フィルダム監査廊の応力特性-鉄筋コンクリート断面の解析-1-	石黒 覚, 中谷 三男 長谷川高士	110)1984. 04	19-28
	△ フィルダム監査廊の断面設計-鉄筋コンクリート断面の解析-2-	石黒 覚, 中谷 三男 長谷川高士	110)1984. 04	29-38
1984	☆ 1983年日本海中部地震・土地改良施設の災害と復旧			
1985	△ 浪岡ロックフィルダムの常時微動解析	長谷川高士, 菊沢 正裕 松本 伸介	115)1985. 02	41-47
	△ 実地震波観測記録に基づくフィルダムの動的物性値の推定	長谷川高士, 菊沢 正裕 松本 伸介	115)1985. 02	49-54
	△ 有限要素法による材料非線形性を考慮した Biot 圧密方程式の解析	向後 雄二	115)1985. 02	25-32
	△ 監査廊コンクリート打設時温度分布の境界要素解析	青山 咸康, 白滝 山二	116)1985. 04	67-77
	○ 日本海中部地震津波による熊石漁港内の水理現象と漁船避難への影響に関する研究	早瀬 吉雄	117)1985. 06	53-60
	△ 締固め方法の違いから見た土の充填特性	吉田 力	120)1985. 12	47-53
	△ 自然降雨の雨滴径分布と降雨エネルギーの理論的考察 [英文]	南 信弘, 小椋 正澄 藤原 輝男	120)1985. 12	29-35

1986 △ 加古川西部地区溜池群の貯水量変動特性—溜池地域の水管理に関する研究-1— 藤井 秀人, 南 勲 122) 1986. 04 19-28  
 ○ アースダムの動弾性模型実験と3次元固有値解析 安中 正実 124) 1986. 08 19-25  
 △ Kalman フィルタによるダム漏水量の予測—ダムの安全性管理 長谷川高士, 村上 章 126) 1986. 12 1-8  
 △ Characteristics of soil erosion caused by rain water flow-5-A Method of Estimating Soil Loss in Inclined Fields Tatsuro Kusaka 126) 1986. 12 41-49  
 △ 雨裂からの土砂流出に関する解析 高木 東, 中野 政詩 126) 1986. 12 51-58  
 1987 △ 溜池水量に対する満足度規定要因の分析—溜池地域の水管理に関する研究-3— 藤井 秀人, 南 勲 129) 1987. 06 39-47  
 ○ 地盤・斜面崩壊の3次元有限要素解析—動的緩和法の適用 田中 忠次, 川本 治 131) 1987. 10 79-86  
 ○ Endochronic 理論に基づく砂の繰返し3軸試験の液状化解析 田中 忠次, 谷 茂 132) 1987. 12 50-61  
 △ 締固め不飽和土の2, 3の圧縮特性について 鳥山 暁司 132) 1987. 12 63-70

**1988 ☆ 農林水産省農業工学研究所へ改組・設立**

1989 △ 粘性土の圧縮指数と物理特性の相関関係について 内田 一徳, 長谷川高士 141) 1989. 06 115-119  
 ○ 深田ダムの3方向地震入力3次元動的解析 安中 正実 141) 1989. 06 79-87  
 ○ モード重畳法を用いたフィルダムの3次元動的有限要素解析法 安中 正実 141) 1989. 06 71-78  
 1990 ○ 「モード重畳法を用いたフィルダムの3次元動的有限要素解析法」について(安中正実「農土論集」141号71-78, 1989掲載) 安中 正実回答 145) 1990. 02 99-101  
 ○ 土石流災害記録のある小流域における流入土砂量の推定 中島賢二郎, 渡辺 敏 149) 1990. 10 11-18  
 ○ 溜池堤体材および基礎地盤の土質工学的性質 谷 茂, 長谷川高士 150) 1990. 12 57-65  
 1991 ○ 溜池の地震時安全性の評価法 谷 茂, 長谷川高士 152) 1991. 04 55-64  
 ○ フィルダムの耐震性診断に関する2つの試み—年確率地震加速度スペクトル推定と耐震性の簡易診断システム 青山 咸康, 庄野 和隆 152) 1991. 04 91-99  
 △ 砂地盤におけるトラップドエア問題の研究-2-有限要素解析による進行性破壊とスケール効果の検討 田中 忠次, 酒井 俊典 153) 1991. 06 1-10  
 △ 堤体内間隙圧分布に関する一解析法 井上 宗治 153) 1991. 06 55-61  
 △ 有限要素法によるモデル斜面滑り面上の応力と安全率 国武 昌人 153) 1991. 06 11-21  
 △ 剪断帯を伴うひずみ軟化構成モデルと有限要素法による地盤の支持力解析 田中 忠次 154) 1991. 08 83-88  
 1992 ○ 変動水圧による液状化を防止するための地表面載荷について 桑原 久実, 玉井 佐一 159) 1992. 06 1-7  
 1993 ○ 年最大加速度分布の推定と設計問題への適用—中部地方西部の2地点における地震危険度解析 清水 英良, 仲野 良紀 164) 1993. 04 73-79  
 △ 豪雨の波形特性と最大雨量の分布—京都における事例研究 増本 隆夫 164) 1993. 04 105-113  
 △ 複峰型豪雨波形の一表現法 角屋 睦, 増本 隆夫 164) 1993. 04 115-123  
 △ 積雪層中の融雪水降下過程を考慮した山岳地流域の時間融雪流出解析 秀島 好昭, 星 清 164) 1993. 04 65-71  
 1995 ○ フィルダムの地震時挙動に土質基礎の及ぼす影響 増川 晋, 安中 正実 176) 1995. 04 207-213  
 ☆ 戦後干拓事業の変遷について—わが国の戦後干拓事業の実態に関する研究 田頭 秀和, 吉武 美孝, 松本 伸介 177) 1995. 06 383-393  
 △ The Effect on Seepage through Embankment Dams by the Nonlinear and Anisotropic Characteristics of Permeability Watcharin Gasaluck, Takeshi Kondo, Ken Ohno 178) 1995. 08 449-459  
 △ The Estimation of the permeability in the Embankment Dam Watcharin Gasaluck, Takeshi Kondo, Ken Ohno 178) 1995. 08 437-447  
 ○ 火山灰粘土質ロームの圧縮および引張の力学的特性に関する実験的研究—農業用溜池の漏水に関する研究-2— 西村 真一, 清水 英良 179) 1995. 10 649-657  
 ○ Stability of Earth Dams Subjected to Storms with Changing External Water Levels 仲野 良紀, 森井 俊広, 服部九二雄, 長谷川高士他 180) 1995. 12 777-784  
 1996 ○ フィルダムにおける地震時安全率算定の新提案に関する考察 青山 咸康, 稲田 克彦 183) 1996. 06 515-520  
 △ コンクリート重力ダムの地震挙動—兵庫県南部地震による呑吐ダムの事例 沢田 敏男, 福川 和彦 183) 1996. 06 529-540  
 △ フィルダム基礎の漏水のメカニズムに関する解析的研究—農業用溜池の漏水に関する研究(3) 平野 重久, 西村 真一, 清水 英良 184) 1996. 08 563-569  
 △ A Comprehensive Comparison Study on Estimation of Time to Ponding under Rainfall 仲野 良紀, Danyao Zhu, Masashi Nakano, Tsuyoshi Miyazaki 185) 1996. 10 785-795  
 △ 干拓地の地震危険度解析 吉武 美孝, 桜井 雄二, 森下 一男他 186) 1996. 12 1027-1036  
 1997 △ Cause of Leakage along the Outlet Conduit underneath a Low Fill Dam with Special Reference to Hydraulic Fracturing Samson Ngambi, Ryoki Nakano, Hideyoshi Shimizu 他 65(2) 1997.04 263-272

	△ 石川県能登地域における中山間ため池地帯の水管理	北村 邦彦, 喜多威知郎	65(2)1997.04	315-322
	△ フィルダム取水塔の地震加速度観測と応答解析	青山 咸康, 石田昇一郎	65(4)1997.08	491-497
	△ 降雨の時間集中度を利用した年最大1時間雨量の推定法	松田 誠祐, 大年 邦雄 George D. Uligan 他	65(5)1997.10	639-645
	△ 不飽和土の三軸応力条件下での力学的挙動に対する弾塑性論的解釈	向後 雄二, 森山 英樹	65(6)1997.12	771-781
1998	△ 不飽和シルトおよび砂・粘土混合土の三軸応力条件下での体積変化およびせん断挙動	向後 雄二, 森山 英樹	66(1)1998.02	35-49
	△ Fast Solution for Implicit Flood Routing in Channel Networks of General Configuration (一般的なネットワーク河川の洪水解析)	Quang Kim Nguyen, 河野 広	66(1)1998.02	51-59
	△ A Simulation Model for Quantification of Retention Characteristics of Watershed (流域保水特性の定量化のためのシミュレーションモデル)	Syahrul, 後藤 章 水谷 正一他	66(1)1998.02	61-67
	△ The Regional Characteristics of the Parameters for Estimating the Annual Maximum 1-hour Rainfall (年最大1時間雨量を推定するために用いるパラメータの地域特性)	G. D. Uligan, 松田 誠祐, 大年 邦雄 他	66(1)1998.02	147-158
	○ 北海道南西沖地震における農地造成盛土の被害	谷 茂, 中島 正憲 谷 忠	66(1)1998.02	169-176
	△ A Fracture Mechanics Approach to the Mechanism of Hydraulic Fracturing in Fill Dams (フィルダムにおける水理破碎のメカニズムへの破壊力学の適用)	Samson Ngambi, 清水 英良, 西村 真一他	66(3)1998.06	411-422
1999	△ Slope Stability Analysis Considering Reduction of Shear Strength of Unsaturated Soil Due to Rain Infiltration (降雨浸潤による不飽和土のせん断強度低下を考慮した斜面安定解析)	島田 清, 森井 俊広 藤井 弘章他	67(6)(通号204)1999.12	
	△ Change of Shear Strength of Unsaturated Decomposed Granite Soils with Matric Suction (マトリックサクシジョンの変化にともなう不飽和まさ土のせん断強度の変化)	島田 清, 藤井 弘章 西村 伸一他	67(3)(通号201)1999.06	395-400
2000	△ 低平地における洪水時排水の実時間予測モデルについて	曹 豊, 豊田 勝 三沢 眞一 宜保 清一, 中村 真也 江頭 和彦	68(2)(通号206)2000.04 68(6)(通号210)2000.12	253-128 785-790
	△ 地すべり土の残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係			
2000	☆ 土地改良事業設計指針「ため池整備」制定			
2001	☆ 独立行政法人農業工学研究所設立			
2001	△ 第三紀泥質岩(富山県西部地すべり丘陵地)の物理的風化特性に関する基礎的実験研究-エアスレーキングの影響について	荒井 涼	69(3)(通号213)2001.6	259-271
2002	△ 二つのサクシジョン効果を考慮した修正弾塑性モデル	向後 雄二, 浅野 勇 林田 洋一	70(1)(通号217)2002.2	9-18
	△ Pore Pressure Behavior on Embankment Dams during Construction (建設中のフィルダムの間隙水圧挙動)	Shemsu Kemal, 青山 咸康	70(1)(通号217)2002.2	25-33
	△ ため池の雨水貯留可能量の評価-香川県及び大阪府のため池の空き容量と水田の雨水貯留可能量との比較から	中西 憲雄, 加藤 敬 小林 宏康他	70(1)(通号217)2002.2	101-107
	△ ロックフィルを通る流れの非線形水頭損失式に関する室内実験検証	森井 俊広	70(1)(通号217)2002.2	119-124
	△ ロックフィルを通る非線形流れのパラメータ推定	森井 俊広	70(2)(通号218)2002.4	215-221
	△ 地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法	堀 俊和, 森 充広 毛利 栄征他	70(2)(通号218)2002.4	241-251
	○ 豪雨による農業用ため池の破壊原因と被災の特徴	堀 俊和, 毛利 栄征 青山 咸康	70(2)(通号218)2002.4	253-263
	△ ハイドロリックフラクチャリングによって発生する亀裂進展の特徴-農業用ため池の浸透破壊に関する実験的研究	堀 俊和, 毛利 栄征 松島 健一他	70(3)(通号219)2002.6	383-392
	△ 大阪府松沢池における洪水低減機能とその確率評価-ため池の洪水低減機能の評価	加藤 敬, 佐藤 政良	70(6)(通号222)2002.12	637-644
	△ 実降雨のパターンを考慮したため池の洪水調節機能評価	加藤 敬, 佐藤 政良 太田 高志	70(6)(通号222)2002.12	645-651
	◎ ため池地震危険度評価システムの構築-芸予地震による愛媛県のため池被害を事例として	小林 範之, 吉武 美孝 勝山 邦久	70(6)(通号222)2002.12	697-703
	○ 地震時の斜面安定問題を対象とした準静的弾塑性有限要素解析と円弧すべり計算	森 洋, 田中 忠次	70(6)(通号222)2002.12	713-720
2003	☆ 土地改良事業設計指針「ダム」制定 基準及び運用の解説、技術書の作成、「共通編」、「コンクリートダム編」「フィルダム編」作成			
2004	△ 残留係数を導入した地すべりの三次元安定解析-沖縄、仲順地すべりについて	中村 真也, 宜保 清一 林 義隆	72(1)(通号229)2004.2	47-53
	△ 三次元変位観測手法による斜面崩壊計測	小林 晃, 近藤 修一 青野 智則他	72(4)(通号232)2004.8	371-378
	△ 空中写真判読とGISによる三宅島農地復興のための噴火被害状況把握	横山 雄介, 吉野 邦彦	72(5)(通号233)2004.10	515-521
2005	△ 洪水吐ゲートを有する農業用ダムの洪水緩和機能の評価-安濃ダムを事例として	浪平 篤, 小林 宏康 高木 強治他	73(2)(通号236)2005.4	193-200
	△ 砂斜面崩壊実験の弾塑性有限要素解析	田中 忠次, 阿部 剛士	73(3)(通号237)2005.6	221-230
	△ 抑止壁を伴う地震時斜面安定問題に関する準静的弾塑性有限要素解析	森 洋, 田中 忠次	73(3)(通号237)2005.6	267-273
	△ Laboratory Study on Shear Behavior of Unsaturated Granular Soil During Cyclic Suction Loading (繰返しサクシジョン負荷過程での不飽和粒状土のせん断挙動に関する実験的研究)	Shemsu Kemal, 木山 正一, 青山 咸康他	73(4)(通号238)2005.8	
	△ Systematic Approach Evaluating Flood Mitigation Effect of an Irrigation Tank (システム論的アプローチによる溜池の洪水緩和機能評価)	吉本 周平, 宇波 耕一 河地 利彦	73(5)(通号239)2005.10	491-496
	△ 表面流出に及ぼす法面被覆植物の影響	永井 明博, 立 忠司 沖 陽子他	73(5)(通号239)2005.10	513-520

△ 繰返し単純せん断を受ける埋設管の浮上メカニズム	河端 俊典, 大石 順司 中瀬 仁他	73(5)(通号 239)2005. 10	521-528
<b>2006 ☆ 土地改良事業設計指針「ため池整備」改定</b>			
<b>2006 ☆ 独立行政法人農研機構農村工学研究所改組・設立</b>			
2006 △ 農村地域における水田を利用した震災時の避難労力低減効果	左村 公, 岡澤 宏 高田 沢彦他	74(2)(通号 242)2006. 4	265-272
△ 遅延率を用いたため池洪水緩和量推定法	竹下 伸一, 別枝 宏平 三野 徹他	74(3)(通号 243)2006. 6	291-300
△ 固化処理底泥土による老朽ため池堤体改修の新設計法の提案	谷 茂, 福島 伸二	74(3)(通号 243)2006. 6	301-308
△ セル・オートマトンによる堤体のパイピングシミュレーション	小林 範之, 吉武 美孝 安藤 光	74(3)(通号 243)2006. 6	323-331
△ 小型貯水池における水・物質収支—農業用ため池と洪水調整池の事例研究	多田 明夫, 百濟 昌人 田中丸治哉他	74(6)(通号 246)2006. 12	891-902
2007 △ 弾性波を用いたため池堤体内の水分状況推定	小林 晃, 丹羽 亮太 柳本 智也, 山本 清仁 青山 咸康	75(6)(通号 249)2007. 6	231-238
△ 河川堤防を対象とした粒状体個別要素法による液状化解析	森 洋, 小川 好	75(6)(通号 249)2007. 6	239-246

**農業農村工学会論文集('07-'13)**

△ GPS 可降水量を用いた大雨予測指標の検討	森 牧人, 田中 宏延 平松 和昭, 原田 昌佳	75 (通号 250)2007. 8	363-371
○ 老朽ため池における漏水領域の特定と抵抗電気探査による改修効果の評価	小林 範之, 吉武 美孝 松本 伸介, 宇佐美幸大	75 (通号 252)2007. 12	727-736
2009 ○ 新潟県中越地震における災害査定の特徴と課題	有田 博之	77 (通号 259)2009. 2	93-98
△ 地すべり崩土の力学特性と変形の局所化	川本 治, 宮崎 毅 中野 政詩	77 (通号 262)2009. 8	385-393
○ 2004年新潟県中越地震における農業生産基盤の小規模被害と復旧対策	有田 博之, 湯澤 顕太	77 (通号 262)2009. 8	417-422
△ 新潟県中越沖地震における現場打ちコンクリート水路の目地部損傷メカニズム	森 丈久, 森 充広 渡嘉敷 勝, 中矢 哲郎	77 (通号 264)2009. 12	631-636
2010 ○ Mechanism of Failure and Damage Probability of Irrigation Tank at Mid Niigata Prefecture Earthquake	Akira KOBAYASHI, Takuma HAYASHI Kiyohito YAMAMOTO Shoichi KIYAMA	78(2)2010	75-82
○ 2004年12月の巨大津波によるインドタミルナドゥ州の農地における塩性化被害と回復評価	久米 崇, 梅津千恵子 K. Palanisami	78(2)2010	83-88
△ 地域確率雨量の経年変化	工藤 亮治, 永井 明博 近森 秀高	78(2)2010	127-133
○ Seismic Risk Management of Irrigation System in an Earthquake? Based on data from the Mid Niigata prefecture earthquake ?	Akira KOBAYASHI, Takuma HAYASHI, Kiyohito YAMAMOTO, Shoichi KIYAMA	78(5)2010	305-315
○ 豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法	堀 俊和, 毛利 栄征 松島 健一, 有吉 充	78(6)2010	493-503
△ 地すべり土の強度図を用いたすべり面平均強度定数の推定— 沖縄, 島尻層群泥岩地すべりを事例として —	木村 匠, 宜保 清一 中村 真也	78(6)2010	445-453
2011 △ 堰基礎地盤浸透破壊問題での浸透路長の有効性の再検討と弾塑性有限要素解析の適用	岡島 賢治, 田中 忠次 小松 宜紘, 飯田 俊彰	79 (2)(通号 272)2011.	65-73
○ 新潟県中越地震後の時間経過と農業生産基盤の被害発現	有田 博之, 宮澤 紗文	79 (3)(通号 273)2011.	187-194
△ 砂・粘土混合材料の侵食速度測定と室内越流破壊実験	藤澤 和謙, 村上 章 西村 伸一	79 (3)(通号 273)2011.	195-205
○ 中越地震後の養鰐池における復旧事業の利用特性	坂田 寧代	79 (6)(通号 276)2011.	387-392
2012 ○ 中越地震後の養鰐池における復旧実態と未復旧地の立地特性	坂田 寧代, 吉川 夏樹 三沢 真一	80(1)(通号 277)2012. 2	59-64
△ Peak Over Threshold 理論による確率日雨量の推定	近森 秀高, 永井 明博	80(2)(通号 278)2012. 4	167-175
△ 大規模地震災害における農地・農業施設の地域形成的復旧	有田 博之, 橋本 禪	80(2)(通号 278)2012. 4	187-194
△ A Simple Model for Estimating Phreatic Surface Location and Seepage Discharge through a Small Homogeneous Earth Dam on Inclined Foundation	Yoshitaka YOSHITAKE, Masayuki FUJIHARA, Noriyuki KOBAYASHI, Tatsuro NISHIYAMA, Tomoki IZUMI	80(3)(通号 279)2012. 6	261-266
△ 流域水循環のモデル化における低平河川からの氾濫過程の導入方法	吉田 武郎, 増本 隆夫 堀川 直紀, 鮑津 博史 Vinliam BOUNLOM, Boulaythong KOUMPHONH	80(5)(通号 281)2012. 10	401-408
△ 上向き浸透流による浸透破壊時の砂粒子の移動速度	藤澤 和謙, 西村 伸一 中谷理友美, 村上 章	80(5)(通号 281)2012. 10	409-416
2013 ○ ため池コア材への旧堤体土・底泥土再利用に関する一考察—兵庫県下における老朽化ため池を事例として—	鈴木麻里子, 河端 俊典 内田 一徳	81(2)(通号 284)2013. 4	171-176
○ 堤体表面被覆によるため池の豪雨対策と波浪侵食対策	堀 俊和, 毛利 栄征 土橋 和敬, 高橋 浩 前田 和亨	81(3)(通号 285)2013. 6	245-256

## Appendix-2 農地・農業用施設と自然災害に関する研究文献 (農工研所報)

	タイトル	著者	発行年月	号	開始 ページ	終了 ページ
1961	☆ 3 機関を母体に農林省農業土木試験場設立					
<b>農業土木試験場報告(1963-1994)</b>						
1970	○ フィルダムの耐震設計に関する新安定計算法 (2)	中島保治, 山下進 上原健一	Mar-70	8号	231	246
1971	△ 数理モデルによる非定常現象の解析	中村充, 白石英彦	Mar-71	9号	137	158
	△ 粗粒材料のせん断抵抗角に関する研究	村尾重信, 三品直樹	Mar-71	9号	159	194
	△ 三軸ネジリ装置を用いた飽和砂のせん断特性	川口徳忠	Mar-71	9号	195	206
1976	△ 直立透過堤による港内水位の上昇及び港内水位の振動特性に関する研究	菅原輝男 長野章	Mar-76	14号	137	144
	△ 碎波による港内水位の上昇及び港内水位の振動特性に関する研究	菅原輝男 神瀬哲	Mar-76	14号	145	182
1983	△ 一面せん断試験を中心とした地すべり粘土の強度測定	古谷保	Jan-83	23号	31	54
1988	☆ 農林水産省農業工学研究所へ改組・設立					
<b>農業工学研究所報告(1995-2006)</b>						
1995	△ 不飽和土の力学的特性と土質構造物の安定性の解析について	向後雄二	Mar-95	34号	39	162
1996	○ 平成5年(1993年)北海道南西沖地震による農地・農業用施設の被害調査報告	安中正実, 谷茂 毛利栄征	Mar-96	35号	111	142
1998	◎ 日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震災害に関する研究	谷茂, 堀俊和	Mar-98	37号	51	90
2000	△ 耐風性向上のためのプラスチックハウス等の簡易基礎構造および立地配置を考慮した耐風設計に関する研究	豊田裕道	Mar-00	39号	121	160
2002	△ 地震観測による複数のフィルダムの地震時挙動	増川晋, 向後雄二 浅野勇, 林田洋一	Mar-02	41号	19	59
2005	○ 農業用ため池の豪雨災害に関する研究	堀俊和	Mar-05	44号	139	247
	△ 宮城県沖の地震(2003年5月26日)における農業用大ダムの地震時挙動	増川晋, 中西憲雄	Mar-05	44号	105	138
2006	△ 老朽化フィルダムにおける固化処理した底泥土を用いた堤体改修の設計法	谷茂, 福島伸二 北島明, 西本浩司	Mar-06	45号	1	19
	△ ダムの築造および管理過程における非破壊調査技術の応用に関する研究	森充広	Mar-06	45号	21	109
2006	☆ 独立行政法人農村工学研究所改組・設立					
<b>農村工学研究所報告(2007-2014)</b>						
2014	△ ジオンセティックスを用いた土質材料の補強メカニズムの解明と水利構造物への適用性に関する研究	松島健一	Feb-14	49号	49	199
	△ 河口低平農地における高潮氾濫モデルに関する研究	桐博英 Kiri, H.	Apr-14	51号	109	164

## 農地・農業用施設と自然災害に関する研究文献（農工研技報）

	タイトル	著者	発行年月	号	開始 ページ	終了 ページ
1961	☆ 3 機関を母体に農林省農業土木試験場設立 農業土木試験場技報(1965-1994)					
1965	● 新潟地震調査報告		Oct-65	1号		
	○ 農地災害の特質	金子良	Oct-65	1号	1	16
	△ 用排水機能障害の事例	中川昭一郎	Oct-65	1号	43	46
	○ 農地施設の被害とその復旧	田地野直哉	Oct-65	1号	47	50
	○ 農業土木構造物の震害と地盤性状	三品直樹, 佐藤瑞夫	Oct-65	1号	51	58
	◎ アースダムの被害	山下進	Oct-65	1号	59	86
	△ 農地地スベリに及ぼした影響	大平成人	Oct-65	1号	87	88
1966	○ 長野県地スベリ対策調査報告 (1)	大平成人, 岸本良治郎 仲野良紀, 萱野勇新	Jan-66	1号	67	118
	△ 鳥根県地スベリ対策調査報告 (1)	大平成人, 岸本良治郎	Mar-66	2号	1	29
	○ 長野県地スベリ対策調査報告 (2)	大平成人, 岸本良治郎 萱野勇新	Mar-66	3号	1	27
	△ 防波体の消波効果に関する水理模型実験報告	前田清康, 桜井喜十郎 鈴木博	Jan-66	4号	1	10
1967	○ 高潮および洪水流発生機構について	山口英太郎, 満田雅男 大西亮一	Mar-67	3号	1	31
	△ 東富士アースダム耐震設計に関する実験	中島保治, 山下進, 高瀬 国雄	Feb-67	4号	1	28
	△ 耐流力に関する研究	中村充, 白石英彦, 佐々 木泰雄, 伊藤三甲雄	Mar-67	13号	37	45
1968	△ 均一型アースダムの安定計算	村尾重信	Mar-68	2号	125	134
	△ 須山タメ池斜面アスコン舗装材料についての研究	海老名芳郎, 岩崎和巳, 竹内正一	Mar-68	5号	15	35
	△ 永源寺ダム接続部振動模型実験報告	中島保治, 山下進, 上原 健一	Mar-68	6号	15	43
	△ 深山ダム振動模型実験報告	中島保治, 山下進, 上原 健一, 川口徳忠	Mar-68	6号	1	14
1969	● 1968年十勝沖地震調査報告		Jan-69	3号		
	◎ アースダムの被害	守屋正博, 高岡恭三, 山 下進	Jan-69	3号	1	10
	○ 十勝沖縄地震津波と津波対策	中村充, 白石英彦, 佐々 木泰雄	Jan-69	3号	11	35
	△ 盛土斜面の安定計算法	川口徳忠	Mar-69	4号	57	74
	○ 稲取海岸波浪調査報告書	佐藤稔夫, 西尾重男	Mar-69	6号	1	34
	△ 神代地区地スベリ調査報告	仲野良紀, 大平成人, 萱 野勇新	Mar-69	7号	31	50
	△ 内の倉ダム用コンクリートに関する研究	海老名芳郎, 竹内正一 岩崎和巳	Mar-69	7号	51	68
1970	○ 長野県地スベリ調査報告 (3)	岸本良治郎	Mar-70	8号	53	64
	○ 長野県地スベリ調査報告 (4)	岸本良治郎	Mar-70	8号	65	68
	△ 双葉ロックフィルダムの振動模型実験報告	中島保治, 山下進, 田中 忠次	Nov-70	10号	1	31
	△ 深山ロックフィルダムの振動模型実験報告	中島保治, 山下進	Nov-70	10号	33	46
	△ フィルタイプダム限界コウ配形状と震度円安定解析法の解説	中島保治, 山下進	Nov-70	10号	47	58
1971	△ 種々の形態の異形ブロックの安定と消波に関する研究	桜井喜十郎, 鈴木博	Mar-71	26号	1	18
1972	△ 深山アスファルトフェイスングの実験報告と構造設計	中島保治, 田中忠次	Mar-72	13号	1	38
	△ 双葉アスファルトフェイスングの振動模型実験報告	中島保治, 菅ノ又仁治	Mar-72	13号	39	46
	△ 孫沢ダム浸透および振動模型実験報告	菅ノ又仁治, 中野博視	Mar-72	13号	47	76
	△ アスファルトフェイスングダムのギャラリ-接続部にアスファルト パネルを使用した場合の模型実験	中島保治, 田中忠次	Mar-72	13号	77	92
1974	△ 構造解析・浸透解析における有限要素法の応用	仲野良紀, 田中忠次	Mar-74	9号	35	94
1975	△ 有限要素法による二次元・三次元連続体の応力解析	田中忠次, 仲野良紀	Mar-75	16号	1	22

1976	△	降雨による地すべり地の地下水位変動予測	古谷保	Mar-76	17号	55	79
1977	△	ダムの老朽度と漏水機構の簡便な実証的解析法	木村重彦, 小前隆美	Mar-77	14号	17	26
	△	地すべり地における地表面応力分布について	中山康	Mar-77	18号	33	36
	△	水窪ダムの堆砂量の推定と洪水時のセキ上げによる影響範囲の解析	白石英彦, 岩崎和巳, 大西亮一	Mar-77	39号	55	66
1980	○	新潟平野における6.26豪雨について	白石英彦, 岩崎和巳, 大西亮一, 伊藤喜一	Mar-80	48号	1	26
1981	△	一志・大倉川・深田ダムの地震観測結果とフィルダムの動特性	田中忠次	Mar-81	21号	1	57
	△	繰返し三軸試験による大柿ダム・コア用土の動的性質	川口徳忠, 谷茂	Mar-81	22号	1	11
	△	共振法三軸試験機による土の動的性質の研究	谷茂	Mar-81	22号	13	39
	△	奈良尾地すべり地区の第三紀層泥岩及び粘土のせん断強度と安定解析による強度常数の検討	古谷保	Mar-81	22号	41	52
1982	○	園芸施設の豪雪による被害について	山下進, 佐藤義和	Mar-82	28号	35	60
	○	園芸施設の台風による被害について	山下進, 小倉力	Mar-82	28号	61	84
	△	干拓農地潮風害の実態解析	植田昌明, 端憲二	Mar-82	51号	33	47
1983	△	ダム用コンクリートに及ぼす碎石・砕砂の影響	毛利栄征, 海老名芳郎, 野村栄作	Mar-83	1号	13	33
	○	豪雨による農地・農業用施設災害と地域性との関連	矢野均	Mar-83	1号	69	82
1984	△	深田ダムの動弾性模型実験によるフィルダムの三次元的動特性	安中正実	Mar-84	2号	1	8
	△	日中ダム洪水吐水理模型実験報告	松本良男, 川合亨	Mar-84	2号	1	15
	△	中小洪水時における護岸工の浮上り現象の解明と対策	山本徳司	Mar-84	2号	89	98
	△	海岸堤防前小段上の共振波動と越波量	木ノ瀬紘一	Mar-84	2号	99	107
	△	干拓農地潮風害の実態解析 (2)	端憲二	Mar-84	2号	109	120
	○	1983年日本海中部地震調査報告	高岡恭三	Nov-84	3号	1	42
	△	葛丸ダム洪水吐水理模型実験報告	加藤敬, 石野捷治	Nov-84	3号	1	19
	△	二庄内ダム洪水吐水理模型実験報告	石野捷治	Nov-84	3号	21	32
1985	◎	1983年日本海中部地震によるため池の被害調査報告	谷茂	Nov-85	4号	1	92
	○	1983年日本海中部地震によるパイプラインの被災調査報告	毛利栄征	Nov-85	4号	93	147
1986	△	日中ダム洪水吐水理模型実験報告 (2)	松本良男	Mar-86	5号	15	22

### 1988 ☆ 農林水産省農業工学研究所へ改組・設立

#### 農業工学研究所技報(1995-2006)

1995	△	土質基礎上のフィルダムの地震時挙動	増川晋, 安中正実, 田頭秀和	Mar-95	192号	1	15
	○	北海道に被害をもたらした地震におけるフィルダムの挙動について	谷茂	Mar-95	192号	17	39
1997	○	農業用ダムと活断層の位置関係に関する調査	初川栄治, 安中正実, 増川晋	Mar-97	194号	1	150
1998	○	宮城県北部地震による農業施設の地震被害調査報告	谷茂	Mar-98	196号	29	43
	△	フィルダムの貯水後の長期挙動特性	初川栄治, 安中正実, 浅野勇	Mar-98	196号	45	70
1999	△	御前山ダム洪水吐の水理模型実験	中西憲雄, 加藤敬, 常住直人	Mar-99	197号	39	60
	△	新宮川ダムコンクリートの熱及び力学的特性値について	浅野勇, 長束勇	Mar-99	197号	61	72
	◎	ため池災害と底樋設計の検討	中島正憲, 毛利栄征	Mar-99	197号	73	81
2000	△	ダムの地形・地質三次元解析支援システムの開発	谷茂, 安中正実, 福原正斗	Mar-00	198号	101	111
2001	○	1998年台風7号による奈良・和歌山県下の果樹用ハウスに関する被災調査	森山英樹, 松島健一, 豊田裕道, 藤本直也	Feb-01	199号	149	163
	○	豪雨被災ため池の土質について	田頭秀和	Feb-01	199号	165	182
2002	△	トレーサー試験による岩盤地すべり斜面の地下水流動状況の解明	石田聡, 二平聡, 今泉眞之, 藤田裕一, 榎並信行	Mar-02	200号	33	42
2003	○	農地法面の崩壊・侵食事例と圃場の造成形態の特徴	古谷保, 小倉力, 中尾誠司, 加藤敬	Mar-03	201号	1	12
	△	地すべりブロック内におけるため池の浸透防止工による地下水流動の変化	奥山武彦, 黒田清一郎, 中里裕臣, 長束勇	Mar-03	201号	165	172
2004	△	排水トンネル施工による地すべり地の地下水の挙動	石田聡, 原郁男, 土原健雄, 今泉眞之	Mar-04	202号	91	100

	△	地すべり危険度区分における空中電磁法の適用性	中里裕臣, 黒田清一郎, 奥山武彦, 伊藤吾一, 佐々木裕	Mar-04	202号	197	204	
2005	△	中山間地域の自治防災組織を支援する防災情報通信システムの開発	山本徳司, 安中誠司	Mar-05	203号	9	19	
	△	地すべり対策地下水排除工による自然電位の変化	奥山武彦, 中里裕臣, 黒田清一郎, 竹内睦雄	Mar-05	203号	231	237	
	△	GPS 測位による地すべり対策事業概成後の安定性確認	黒田清一郎, 奥山武彦, 中里裕臣, 有吉充	Mar-05	203号	239	244	
2006	△	ため池周辺の地下水流入・流出量の評価	今泉真之, 石田聡, 土原健雄, 吉迫宏	Mar-06	204号	157	174	
	△	地すべり地における地下水流動調査のための比抵抗モニタリング	井上敬資, 中里裕臣, 中西憲雄, 菊池茂史, 大塚文哉	Mar-06	204号	287	294	
2006	●	<b>平成16年(2004年)新潟県中越地震対応</b>						
	○	農地・農業用施設被害の概要について	谷茂	Mar-06	205号	1	4	
	○	平成16年(2004年)新潟県中越地震	増川晋	Mar-06	205号	5	15	
	○	平成16年(2004年)新潟県中越地震による水田の被害	藤森新作, 若杉晃介, 谷本岳	Mar-06	205号	17	24	
	○	平成16年(2004年)新潟県中越地震による信濃川左岸地区の水利機能被害および施設復旧に関する調査	中達雄, 後藤真宏, 樽屋啓之, 田中良和, 吉永育生, 端憲二	Mar-06	205号	25	36	
	○	平成16年(2004年)新潟県中越地震による農業用フィルダムの被害	向後雄二	Mar-06	205号	37	45	
	○	平成16年(2004年)新潟県中越地震による農業用水路の被害	浅野勇, 向後雄二, 林田洋一, 井上敬資	Mar-06	205号	47	59	
	◎	平成16年(2004年)新潟県中越地震によるため池と集落排水施設の被災	毛利栄征, 堀俊和, 松島健一, 有吉充	Mar-06	205号	61	76	
	△	大規模崩壊地の遠隔画像モニタリング	奥山武彦, 黒田清一郎, 有吉充, 林田洋一	Mar-06	205号	77	83	
	○	平成16年(2004年)新潟県中越地震における農地地すべりとその調査観測手法について	黒田清一郎, 奥山武彦, 有吉充	Mar-06	205号	85	93	
	○	空中電磁探査法による広域斜面災害調査	中里裕臣, 井上敬資, 中西憲雄	Mar-06	205号	95	101	
	○	新潟県釜塚地すべりににおける中越地震前後のGPS 移動観測事例	中里裕臣, 奥山武彦, 荒川隆嗣	Mar-06	205号	103	107	
	○	大規模地震における農地・農業用施設の液状化被害の早期予測システム	井上敬資, 増川晋, 中里裕臣, 中西憲雄	Mar-06	205号	109	112	
2006	☆	<b>独立行政法人農村工学研究所改組・設立</b>						
<b>農村工学研究所技報(2007-2014)</b>								
2007	△	老朽化フィルダムの堤体改修の事例調査	谷茂, 福島伸二	Mar-07	206号	1	24	
	△	ため池群の持つ洪水軽減効果シミュレータの開発	吉迫宏, 小川潤, 小川茂男, 島武男, 中西憲雄, 大西亮一	Mar-07	206号	209	217	
	△	洪水流入防止のための無動力止水ゲート	向井章恵, 川井明, 村上文明, 江田保正, 佐竹正文, 中達雄	Mar-07	206号	267	274	
2008	●	<b>平成19年(2007年)能登半島地震対応及び新潟県中越沖地震対応</b>						
	○	平成19年(2007年)能登半島地震及び新潟県中越沖地震における農村工学研究所の対応と技術支援力の強化	小林宏康	Mar-08	208号	1	13	
	◎	平成19年(2007年)能登半島地震によるため池の被害	毛利栄征, 堀俊和, 有吉充, 林田洋一, 谷茂	Mar-08	208号	15	23	
	○	平成19年(2007年)能登半島地震による海岸施設の被害	毛利栄征, 堀俊和, 有吉充, 林田洋一	Mar-08	208号	25	31	
	○	平成19年(2007年)能登半島地震による地すべり災害と災害調査法	中里裕臣, 井上敬資, 海野寿康	Mar-08	208号	33	42	
	○	平成19年(2007年)能登半島地震による水路等コンクリート構造物の被害調査	林田洋一, 増川晋, 有吉充	Mar-08	208号	43	59	
	○	平成19年(2007年)能登半島地震による地すべり地水田の被災と営農状況	小倉力, 若杉晃介, 藤森新作	Mar-08	208号	61	66	
	○	平成19年(2007年)能登半島地震による農地被害調査	若杉晃介, 藤森新作	Mar-08	208号	67	74	
	◎	平成19年(2007年)新潟県中越沖地震によるため池の被害	毛利栄征, 谷茂, 堀俊和, 有吉充, 増川晋, 田頭秀和, 林田洋一	Mar-08	208号	75	88	
	○	平成19年(2007年)新潟県中越沖地震による農業用水路被害と災害調査	森丈久, 森充広, 渡嘉敷勝, 中矢哲郎, 増川晋, 田頭秀和	Mar-08	208号	89	101	
	○	平成19年(2007年)新潟県中越沖地震による農業集落排水施設の被害	有吉充, 毛利栄征	Mar-08	208号	103	110	
2009	○	平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による震源近傍の老朽水利施設被災状況に関する調査	常住直人, 森丈久, 田中良和, 高木強治	Mar-09	209号	139	152	
2010	○	氾濫解析を用いたため池決壊に伴う下流域の被害算定法	谷茂, 井上敬資	Mar-10	210号	137	144	
	○	老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した安全性評価法	谷茂, 堀俊和	Mar-10	210号	145	152	

	△	ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能の検証	林田洋一, 遠目塚良一, 浅野勇, 増川晋, 田頭秀和	Mar-10	210号	243	254	
2011	△	GISを活用した傾斜地水田における指標のマッピング	正田大輔, 川本治	Mar-11	211号	1	7	
	△	ジオテキスタイル工法による石川県宮ノ本池の強化復旧事例	松島健一, 毛利栄征, 堀俊和, 有吉充, 上野和広	Mar-11	211号	205	214	
	○	平成21年(2009年)に発生した山形県鶴岡市七五三掛(しめかけ)地区における地すべり災害対策への農工研の参画と技術開発	木下勝義, 川本治, 正田大輔, 石田聡, 中里裕臣, 田頭秀和	Mar-11	211号	215	221	
2012	△	農村工学研究所内における総合気象観測システムの構築とそのデータ品質管理	吉田武郎, T.増本隆夫, 堀川直紀	Mar-12	212号	43	52	
2012	●	<b>平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震対応</b>						
	○	平成23年(2011年)東日本大震災における農村工学研究所の対応と農地・農業用施設等の被害実態	鈴木尚登, 中里裕臣	May-12	213号	1	21	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震によるため池堤体亀裂に対する緊急的な電気探査	中里裕臣, 井上敬資, 吉迫宏, 堀俊和	May-12	213号	23	28	
	△	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による地域復興計画支援における景観シミュレーションの活用と役割	山本徳司, 福与徳文	May-12	213号	29	38	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の堆積物・土壌の理化学的特徴	北川巖, 友正達美, 原口暢朗, 塩野隆弘, 若杉晃介, 芦田敏文, 瑞慶村知佳	May-12	213号	39	51	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による水田面の起伏(不陸), 亀裂, 液状化に関する復旧対策技術	若杉晃介, 瑞慶村知佳, 北川巖, 原口暢朗	May-12	213号	53	62	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による利根川沿いにおける液状化を起因とする塩害が営農にもたらした影響	瑞慶村知佳, 北川巖, 若杉晃介, 原口暢朗	May-12	213号	63	71	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波で冠水被害を受けた砂質畑の土壌塩分モニタリング	宮本輝仁, 亀山幸司, 塩野隆弘	May-12	213号	73	78	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波被災農地における平成23年春期除塩作業の実施状況と今後の課題	友正達美, 坂田賢, 内村求	May-12	213号	79	87	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による宮城県沿岸部の園芸施設の被害状況	石井雅久, 奥島里美, 森山英樹, 相澤正樹	May-12	213号	89	103	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における海岸堤防の後背農地による津波減勢	毛利栄征, 丹治肇	May-12	213号	105	116	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による宮城県内の頭首工および水門の被害	渡嘉敷勝, 浅野勇, 森充広, 西原正彦	May-12	213号	117	143	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による利根川下流沿岸域の用排水路等の被害と特徴	浅野勇, 渡嘉敷勝, 森充広, 西原正彦	May-12	213号	145	173	
	◎	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策	堀俊和, 上野和広, 松島健一	May-12	213号	175	199	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による国営隈戸川農業水利事業における農業用パイプラインの被災と復旧	有吉充, 毛利栄征, 浅野勇, 上野和広	May-12	213号	201	215	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による国営農業用フィルダムの被害	増川晋, 田頭秀和, 黒田清一郎, 林田洋一, 國枝正, 高木強治, 中田達, 森丈久	May-12	213号	217	242	
	○	平成23年(2011年)長野県北部地震による農地・農業用施設の被害	丹治肇, 桐博英, 田中良和, 人見忠良, 堀川直紀	May-12	213号	243	254	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う津波による水門・樋門と排水機場の被災状況	桐博英, 丹治肇, 松島健一, 中矢哲郎, 毛利栄征	May-12	213号	255	268	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波による岩手県沿岸部の被災状況	桐博英, 丹治肇, 福与徳文, 毛利栄征, 山本徳司	May-12	213号	269	277	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震を対象にした減災農地の津波減勢効果の検証	福与徳文, 山本徳司, 桐博英	May-12	213号	279	286	
	△	岩手県大船渡市吉浜地区における農地復興計画作成支援	福与徳文, 山本徳司, 桐博英	May-12	213号	287	295	
	○	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の植生管理の必要性	嶺田拓也, 友正達美	May-12	213号	297	304	

Appendix-3 ため池台帳(H9年)とため池DBの登録データ比較

DBコード	県名	H9.3.31		堤高			堤頂長			堤頂幅			勾配U			勾配D										
		①ため池台帳	②DV総数	②①	③総数	③②	5m以下	5.1-15m以下	15m以上	④総数	④②	50m以下	51-100m以下	100m以上	⑤総数	⑤②	3m以下	3m以上	⑥総数	⑥②	1.5m以下	1.5m以上	⑦総数	⑦②	1.5m以下	1.5m以上
01	北海道	770	129	0.17	129	1.00	3	74	52	88	8	29	88	98	121	0.94	23	98	124	0.96	8	116	122	0.95	7	115
02	青森県	1,393	1,868	1.34	1,686	0.90	1,460	225	1	1,680	0.90	920	505	792	1,661	0.89	869	792	1,694	0.91	1,079	615	1,638	0.88	955	683
03	岩手県	3,160	2,218	0.39	1,040	0.85	719	315	6	1,040	0.85	497	404	440	1,036	0.85	596	440	1,034	0.85	403	631	1,035	0.85	321	714
04	宮城県	6,074	2,533	0.42	2,504	0.99	1,976	514	14	2,521	1.00	1,476	836	787	2,512	0.99	1,725	787	2,474	0.98	1,552	922	2,469	0.97	1,157	1,312
05	秋田県	2,892	1,943	0.67	1,892	0.97	1,225	625	42	1,891	0.97	925	644	681	1,880	0.97	1,199	681	1,860	0.96	967	893	1,866	0.96	993	873
06	山形県	1,187	1,097	0.92	1,096	1.00	639	422	38	1,095	1.00	610	344	486	1,090	0.99	604	486	1,042	0.95	625	417	1,021	0.93	562	459
07	福島県	3,287	3,299	1.00	3,279	0.99	2,255	976	48	3,275	0.99	1,755	1,080	440	2,834	0.86	1,629	1,205	2,848	0.86	1,340	1,508	2,847	0.86	1,222	1,625
08	茨城県	1,731	1,123	0.65	1,109	0.99	1,069	38	2	1,067	0.95	577	321	169	1,095	0.98	585	510	906	0.81	758	148	933	0.83	781	152
09	栃木県	527	142	0.27	138	0.97	120	14	4	138	0.97	66	52	20	131	0.92	44	87	108	0.76	51	57	124	0.87	67	57
10	群馬県	585	587	1.00	584	0.99	465	110	9	563	0.96	307	129	127	456	0.78	281	175	305	0.52	242	63	318	0.54	198	120
11	埼玉県	677	536	0.79	535	1.00	450	78	7	530	0.99	323	167	40	471	0.88	286	185	486	0.91	322	164	501	0.93	272	229
12	千葉県	1,230	1,291	1.05	1,278	0.99	922	330	26	1,276	0.99	710	418	148	1,223	0.95	607	616	1,157	0.90	648	509	1,185	0.92	612	573
13	東京都	11	6	0.55	6	1.00	2	3	1	6	1.00	4	0	2	3	0.50	0	3	3	0.50	0	3	3	0.50	1	2
14	神奈川県	34	6	0.18	6	1.00	4	2	0	6	1.00	5	0	1	6	1.00	3	3	6	1.00	1	5	6	1.00	1	5
15	新潟県	5,822	774	0.13	721	0.93	421	275	25	737	0.95	356	252	129	721	0.93	374	347	445	0.57	248	197	441	0.57	265	176
16	富山県	2,545	908	0.36	898	0.99	476	406	16	774	0.85	498	197	79	468	0.52	240	228	315	0.35	140	175	315	0.35	168	147
17	石川県	3,145	3,160	1.00	2,667	0.84	1,704	927	36	2,661	0.84	2,004	489	168	2,643	0.84	1,686	957	2,623	0.83	1,708	915	2,599	0.82	1,706	893
18	福井県	730	1,027	1.41	898	0.87	608	286	4	1,003	0.98	789	154	60	883	0.86	493	390	857	0.83	598	259	831	0.81	599	232
19	山梨県	131	129	0.98	127	0.98	60	61	6	126	0.98	26	46	54	106	0.82	65	41	116	0.90	46	70	115	0.89	66	49
20	長野県	1,943	1,970	1.01	1,966	1.00	1,360	594	12	1,891	0.96	961	587	343	1,875	0.95	1,247	628	1,792	0.91	1,199	593	1,798	0.91	1,346	452
21	岐阜県	2,395	2,504	1.05	2,495	1.00	1,902	553	40	2,490	0.99	1,830	492	168	1,640	0.65	1,179	461	1,221	0.49	585	636	1,205	0.48	641	564
22	静岡県	762	694	0.91	688	0.99	293	386	9	684	0.99	409	213	62	627	0.90	348	279	613	0.88	211	402	599	0.86	234	365
23	愛知県	3,364	3,193	0.95	3,179	1.00	2,327	829	23	3,176	0.99	1,867	798	511	275	0.09	140	135	270	0.08	106	164	253	0.08	66	187
24	三重県	3,506	3,517	1.00	3,279	0.93	2,181	1,080	18	3,247	0.92	2,125	803	319	3,352	0.95	2,368	984	1,106	0.31	532	574	1,163	0.33	341	822
25	滋賀県	1,985	805	0.41	788	0.98	512	259	17	788	0.98	288	274	226	785	0.98	382	403	767	0.95	506	261	770	0.96	451	319
26	京都府	1,758	1,693	0.96	1,664	0.98	930	713	21	1,666	0.98	1,028	445	193	1,471	0.87	429	498	1,223	0.72	613	610	1,234	0.73	656	578
27	大阪府	11,308	1,068	0.09	1,063	1.00	585	461	17	1,033	0.97	239	335	459	927	0.87	429	498	899	0.84	499	400	915	0.86	555	360
28	兵庫県	47,596	11,810	0.25	11,045	0.94	6,327	4,567	151	11,044	0.94	5,932	3,296	1,816	10,839	0.92	6,387	4,452	10,700	0.91	6,465	4,235	10,588	0.90	7,260	3,328
29	奈良県	5,757	1,761	0.31	1,750	0.99	1,273	464	13	1,712	0.97	648	456	608	1,592	0.90	962	630	1,571	0.89	1,062	509	1,557	0.88	1,076	481
30	和歌山県	5,925	5,041	0.85	4,961	0.98	3,366	1,547	48	4,982	0.99	4,082	693	207	4,850	0.96	4,068	782	1,266	0.25	811	455	1,401	0.28	926	475
31	鳥取県	1,212	683	0.56	598	0.88	370	212	16	602	0.88	305	240	57	602	0.88	215	387	595	0.87	336	259	592	0.87	345	247
32	高知県	5,782	5,379	0.93	5,269	0.98	4,275	975	19	5,269	0.98	4,679	526	64	5,271	0.98	4,694	577	5,196	0.97	4,493	703	5,185	0.96	4,410	775
33	岡山県	10,304	4,831	0.47	4,815	1.00	2,223	2,520	72	4,819	1.00	2,311	1,900	608	4,827	1.00	2,684	2,143	4,805	0.99	2,352	2,453	4,773	0.99	2,828	1,945
34	広島県	20,910	20,648	0.99	18,814	0.91	16,161	2,586	67	18,832	0.91	16,454	1,983	395	18,552	0.90	15,841	2,711	17,836	0.86	14,488	3,348	17,782	0.86	15,045	2,737
35	山口県	11,785	2,569	0.22	2,520	0.98	1,602	891	27	2,520	0.98	1,611	711	198	2,518	0.98	1,717	801	2,502	0.97	1,441	1,061	2,491	0.97	1,601	890
36	徳島県	794	409	0.52	400	0.98	168	219	13	397	0.97	221	130	46	397	0.97	224	173	385	0.94	147	238	379	0.93	212	167
37	香川県	15,990	7,268	0.45	7,186	0.99	4,747	2,389	50	7,227	0.99	4,589	1,702	936	1,638	0.23	857	781	1,638	0.13	165	789	952	0.13	513	439
38	愛媛県	3,274	3,353	1.02	3,346	1.00	1,715	1,576	55	3,346	1.00	2,138	759	449	2,175	0.65	1,567	608	1,342	0.40	464	878	1,331	0.40	575	756
39	高知県	425	422	0.99	421	1.00	259	142	20	366	0.87	297	60	9	328	0.78	228	100	352	0.83	232	120	343	0.81	259	84
40	福岡県	5,264	5,270	1.00	5,091	0.97	2,729	2,283	79	4,999	0.95	2,553	1,608	838	4,422	0.84	3,210	1,212	3,719	0.71	1,236	2,483	3,655	0.69	1,307	2,348
41	佐賀県	2,906	2,820	0.97	2,815	1.00	1,169	31	2,815	1.00	1,759	718	338	672	2,792	0.99	1,389	1,403	2,792	0.99	1,389	1,403	2,792	0.99	1,378	1,414
42	長崎県	3,766	1,258	0.33	1,257	1.00	568	660	29	1,258	1.00	577	521	160	1,246	0.99	647	599	1,045	0.83	684	361	1,038	0.83	546	492
43	熊本県	2,320	2,345	1.01	1,733	0.74	1,391	331	11	1,731	0.74	1,316	246	169	1,366	0.58	948	412	996	0.42	650	346	976	0.42	626	350
44	大分県	2,339	2,366	1.01	2,366	1.00	1,462	807	97	2,365	1.00	1,278	858	229	2,366	1.00	1,113	1,253	2,358	1.00	1,704	654	2,344	0.99	1,671	673
45	宮崎県	752	701	0.93	701	1.00	330	366	5	699	1.00	338	270	91	688	0.98	432	256	657	0.94	325	332	648	0.92	265	383
46	鹿児島県	648	627	0.97	622	0.99	359	239	24	607	0.97	288	207	112	606	0.97	256	350	597	0.95	319	278	552	0.88	283	269
47	沖縄県	68	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
計		210,769	116,781	0.55	111,425	0.95	74,953	35,154	1,318	111,079	0.95	71,979	26,898	12,202	97,382	0.83	66,608	30,774	85,962	1.29	53,750	32,212	85,685	0.73	55,369	30,316



60	有	720732022	寺池	140.2928	37.28205	4	6	1.5	34	22.7	3	L3	291.7	190	2	1	2	0	0	0	
61	無	720732023	太池	140.2952	37.28288		6	1.5	47	31.3	3	L3	46.8	190	5	2	2	1	0	0	
62	無	720732024	熊之池	140.2978	37.28166		6	1.3	31	23.8	3	L3	329.1	190	5	2	2	1	0	0	
63	無	720732025	油久保池	140.3038	37.28107		6	1.2	37	30.8	4	C3	254.2	190	4	2	2	0	0	0	
64	無	720732026	蓮池	140.3065	37.28464		6	2.0	23	11.5	4	C3	170.7	190	5	1	2	1	0	0	
65	無	720732027	向池	140.3064	37.28332		6	1.5	23	15.3	4	C3	333.8	190	5	1	2	1	0	0	
66	有	720732028	白山池	140.2866	37.31517	3	6.3	4.0	235	58.8	4	L1	323.5	100	2	1	2	0	0	0	
67	無	720732029	荷川池	140.2972	37.3189		6.1	2.0	66	33	4	L1	115.8	100	3	3	1	0	0	0	
68	有	720732030	杉葉池	140.2998	37.31487	3	6.1	2.5	79	31.6	4	L1	268.2	100	2	1	2	0	0	0	
69	無	720732031	和久池①	140.3018	37.30251		6.1	2.0	44	22	4	C2	177	160	5	1	2	1	0	0	
70	無	720732032	火澄壇池	140.3062	37.30355		6.1	1.5	28	18.7	4	C2	196.7	160	5	1	2	1	0	0	
71	有	720732033	入池①	140.2861	37.30474	4	6.1	3.0	58	19.3	3	L2	314.2	190	1	1	1	0	0	0	
72	無	720732035	中蔵池	140.2752	37.31464		6.1	2.0	138	69	3	L1	233.4	160	4	2	2	0	0	0	
73	無	720732036	荒池	140.2725	37.30707		6	2.0	58	29	3	L2	241.3	100	4	2	2	0	0	0	
74	無	720732037	諏訪池	140.2734	37.3058		6	3.0	47	15.7	3	L2	288.8	160	5	1	1	1	0	0	
75	無	720732038	金刀比羅池①	140.2782	37.30682		6.1	1.5	34	22.7	3	L2	356.5	160	3	3	1	0	0	1下	102親子
76	無	720732039	勝場池①	140.2833	37.30482		6.1	2.5	34	13.6	3	L2	343.4	160	3	3	1	0	0	1下	103親子
77	無	720732040	新池	140.2745	37.30251		6	2.5	83	33.2	3	L2	341.5	100	3	3	1	1	0	0	
78	有	720732041	鶴賀池	140.2686	37.30033	4	5.9	4.0	81	20.3	3	L2	205.6	100	1	1	1	0	0	0	
79	有	720732042	十三佛池	140.2628	37.29578	1	5.9	2.5	39	15.6	3	L2	169.2	100	1	1	1	0	0	0	
80	無	720732043	荒池	140.2652	37.2957		5.9	1.5	29	19.3	3	L2	162.5	100	5	2	2	1	0	0	
81	無	720732044	蛇池①	140.2683	37.29483		5.9	1.5	21	14	3	L2	179.1	100	5	1	2	1	0	0	
82	無	720732045	神蛇池	140.2748	37.29558		6	3.0	33	11	3	L2	84.4	100	4	2	2	0	0	0	
83	無	720732046	竹ノ内池	140.2556	37.29075		5.8	1.5	37	24.7	2	L2	307.8	100	5	2	2	1	3	0	
84	無	720732047	黒沢池	140.2638	37.28746		5.9	1.5	33	22	2	L3	320.8	100	5	1	2	1	0	0	
85	無	720732048	清水池	140.2657	37.28661		5.9	1.3	19	14.6	2	L3	312.8	100	5	1	1	1	0	0	
86	無	720732049	蟹沢池	140.2734	37.2866		5.9	2.0	27	13.5	3	L3	339.5	100	5	1	1	1	0	0	
87	有	720732050	石井池	140.2648	37.31192	3	6.1	2.5	64	25.6	3	L1	224	100	1	1	1	0	0	0	
88	無	720732051	北ノ俣池	140.2455	37.31022		5.9	3.0	50	16.7	2	L1	188.6	160	5	2	1	1	3	0	
89	無	720732052	五葉山池	140.255	37.30853		5.9	5.0	40	8	2	L2	227.1	100	5	1	1	1	3	0	
90	無	720732053	諏訪池	140.2499	37.30039		5.8	1.5	57	38	2	L2	285.3	100	5	2	2	1	3	0	
91	無	720732054	分校池	140.2579	37.29991		5.9	1.5	35	23.3	2	L2	352.1	100	5	1	1	1	3	0	
92	有	720732055	カバ池	140.2641	37.30017	3	5.9	2.5	25	10	3	L2	358.3	100	1	1	1	0	0	0	
93	有	720732091	不動池②	140.2538	37.31883	3	6	5.0	157	31.4	3	L1	338	160	2	1	2	0	0	0	
94	無	720732092	新池②	140.2857	37.29425		6	1.5	20	13.3	3	L2	193.9	100	4	2	1	0	0	1下	96親子
95	無	720732093	新池③	140.2893	37.29394		6	1.5	29	19.3	3	L2	241.9	100	5	1	2	1	0	0	
96	無	720732094	新沢池	140.2843	37.29458		6	1.5	60	40	3	L2	240.5	100	4	2	1	0	0	1上	94親子
97																					
98	有	720732096	弁天池	140.288	37.28369	3	6	2.0	71	35.5	3	L3	325.4	190	2	1	2	0	0	1上	59親子
99	有	720732097	二ガ池①	140.3028	37.30624	3	6.1	1.7	25	14.7	4	C2	322	160	2	1	2	0	0	0	
100	無	720732101	入池④	140.2864	37.30314		6.1	1.0	28	28	3	L2	230.6	100	5	1	1	1	0	0	
101	無	720732102	荒池②	140.2881	37.30151		6.1	1.2	19	15.8	3	L2	239.6	100	5	1	2	1	0	0	
102	有	720732103	金刀比羅池②	140.2784	37.30644	2	6.1	1.3	28	21.5	3	L2	6	160	3	3	1	0	0	1上	75親子
103	無	720732104	勝場池②	140.2833	37.30434		6.1	2.0	37	18.5	3	L2	328.8	160	3	3	1	0	0	1上	76親子
104	無	720732105	蛇池②	140.2693	37.2954		5.9	1.5	13	8.7	3	L2	212.7	100	5	1	2	1	0	0	
105																					
106	有	734212003	一貫池	140.3645	37.25628	3	6	5.4	90	16.7	5	R4	7	160	3	3	2	0	0	0	
107																				0	
108	無	734212006	大池	140.3499	37.26968		5.9	3.0	95	31.7	5	R4	3.6	140	3	3	1	0	0	0	
109	有	734212007	五斗蒔池	140.3459	37.26005	2	6	5.0	78	15.6	4	R4	2	140	4	2	2	0	0	0	
110	無	734212008	川崎池	140.3399	37.2619		6	2.0	64	32	4	C4	329	140	3	3	1	0	0	0	
111	有	734212009	岡ノ内池1	140.3373	37.25492	1	5.9	4.0	50	12.5	4	C4	26.8	140	3	3	1	0	0	1下	112親子
112	無	734212010	岡ノ内池2	140.3383	37.25424		5.9	2.0	30	15	4	C4	3	140	3	3	1	0	0	1上	111親子
113	無	734212011	七曲池	140.3305	37.25279		5.8	3.6	35	9.7	4	C4	45.2	190	3	3	1	0	0	0	
114																					
115	有	734212014	蓮池	140.345	37.22886	3	5.8	3.0	200	66.7	4	R6	330.9	100	1	1	1	0	0	0	
116	有	734212015	小橋池	140.3552	37.23722	1	5.8	2.5	72	28.8	4	R5	184.2	140	4	2	1	0	0	0	
117	有	734212016	梨池	140.3511	37.24575	3	6	4.0	110	27.5	4	R5	307	140	4	2	1	0	0	0	
118																					
119																					
120	無	734212019	借俣池	140.3277	37.22419		5.7	3.0	50	16.7	3	C6	128.2	140	3	3	1	0	0	0	
121	無	734212021	越中池	140.3202	37.23568		6	3.0	29	9.7	3	C5	338.5	190	4	2	1	0	0	0	
122	無	734212022	海ノ窪池	140.3265	37.24034		5.8	2.5	37	14.8	4	C5	294.9	140	5	1	1	1	0	0	
123	無	734212023	後山池	140.3812	37.24379		5.7	2.5	57	22.8	5	R5	215.2	140	5	2	1	1	0	0	

124	無	734212024	七ツ池	140.3846	37.24224		5.7	2.0	43	21.5	5	R5	175.9	190	5	1	2	1	0	0	
125	有	734212025	諏訪池	140.373	37.23855	1	5.7	5.0	158	31.6	5	R5	265	140	1	1	1	0	0	0	
126	無	734212026	高野池	140.369	37.22594		5.6	3.0	144	48	5	R6	304.8	140	4	2	2	0	0	0	
127	無	734212027	新池	140.3743	37.22547		5.6	2.0	83	41.5	5	R6	323.1	140	4	2	2	0	0	0	
128	有	734212028	太良坊池1	140.3182	37.24134	3	6	2.5	43	17.2	3	C5	30.5	190	3	3	1	0	0	1下	129親子
129	無	734212029	太良坊池2	140.319	37.24016		6	3.0	33	11	3	C5	348.9	190	3	3	1	0	0	1上	128親子
130	有	734412002	北小屋池	140.2973	37.24255	3	5.7	3.0	4	1.3	3	L5	127.6	140	2	1	2	0	0	0	
131	無	734412006	長者池	140.2422	37.24423		5.6	3.7	52	14.1	2	L5	257.7	140	5	1	1	1	3	0	
132	無	734412008	狸入池	140.2466	37.2329		5.2	6.0	50	8.3	2	L5	349.9	140	5	2	2	1	3	0	
133	無	734412009	地藏池	140.2411	37.22333		5.2	3.0	100	33.3	1	L6	226.9	40	5	1	2	1	3	0	
134	無	734412010	国旗池	140.252	37.22765		5.2	3.0	50	16.7	2	L6	252.4	100	5	1	2	1	3	0	
135	有	734412011	深沢池	140.2535	37.22848	3	5.5	4.0	40	10	2	L6	340.9	140	2	1	2	0	0	0	
136	無	734412012	細入池	140.2619	37.22973		5.5	4.5	50	11.1	2	L6	307.1	140	5	2	2	1	0	0	
137	無	734412013	三ノ輪池	140.2606	37.22815		5.5	11.0	10	0.9	2	L6	299.3	100	3	1	2	0	2	0	
138	無	734412015	上小井田輪池	140.2644	37.22377		5.7	6.0	20	3.3	2	L6	223.2	100	1	1	1	0	2	0	
139	無	734412016	関ノ入	140.2454	37.22329		5.2	2.5	30	12	1	L6	288.6	40	5	1	1	1	2	0	
140	無	75012002	雀池	140.3949	37.15626		5.6	3.2	30	9.4	5	R9	321.1	190	1	1	1	0	1	0	
県南																					
141	無	720513001	塩田池	140.2548	37.16792		5.7	4.6	62	13.5	1	L9	211	190	5	1	1	1	2	0	
142	無	720513004	山田池	140.2688	37.15174		5.7	3.5	30	8.6	1	L9	288.2	100	5	1	1	1	2	0	
143	有	720513009	荒田ノ入池	140.2607	37.15081	1	5.7	3.6	31	8.6	1	L9	163.1		1	1	1	0	3南	0	
144	有	720513010	河張池 No.2	140.2633	37.1509	1	5.7	4.0	67	16.8	1	L9	141.6		1	1	1	0	3南	0	
145	有	720513012	雁沢池 N	140.2563	37.15146	3	5.6	4.0	57	14.3	1	L9	198.3	100	1	1	1	0	3南	0	
146	無	720513013	犬火保池	140.2453	37.15226		5.6	6.3	152	24.2	1	L9	212.5	40	4	2	1	0	0	0	
147	無	720513054	七曲り池	140.2508	37.15633		5.7	3.0	35	11.7	1	L9	145.5	190	4	2	1	0	0	0	
148	無	720513055	蟹ヶ作池	140.2752	37.16085		5.7	2.6	30	11.5	1	L9	17.6	100	3	3	1	0	3北	0	
149	無	720513056	呑内池	140.2693	37.15757		5.7	2.7	28	10.4	1	L9	343.4	190	3	3	1	0	3北	0	
150	無	720513057	大山池	140.2599	37.15449		5.7	3.3	34	10.3	1	L9	21.3	190	3	3	1	0	3北	0	
151	有	720513058	雁沢池 No.2	140.258	37.15095	3	5.6	3.6	26	7.2	1	L9	101.9	100	1	1	1	0	3南	0	
152	無	720543003	金山	140.2434	37.21877		5.5	3.5	63	18	1	L6	267.8	40	1	1	1	0	3	0	
153	有	720543006	芹沢	140.2766	37.21318	2	5.7	2.0	44	22	2	L6	196.2	100	1	1	1	0	0	0	
154	無	746413012	山ヶ入池	140.2916	37.15715		5.7	3.0	76	25.3	2	L9	239.1	160	2	1	2	0	2	0	
155	無	746413016	八ヶ代池	140.2879	37.16085		5.7	3.0	105	35	2	L9	266.1	190	1	1	1	0	2	0	
156	無	746413017	証古池	140.2838	37.16362		5.7	3.0	80	26.7	1	L9	283.9	190	1	1	1	0	2	0	
157	無	746413018	日向池	140.3221	37.16999		5.5	3.0	86	28.7	2	C9	153.3	140	5	1	2	1	0	0	
158	無	746413019	坂ノ合池	140.2808	37.17371		5.7	3.0	55	18.3	2	L8	203	190	5	1	2	1	2	0	
159																					
160	無	746413021	一の沢池	140.2661	37.16823		5.7	3.0	55	18.3	1	L9	239.2	160	1	1	1	0	3	0	
161	無	746413022	新池	140.2541	37.17534		5.6	5.5	68	12.4	1	L8	247.9	40	5	1	1	1	3	0	
162	無	746413023	長久保池	140.2471	37.17777		5.6	4.0	33	8.3	1	L8	200.5	40	5	1	1	1	3	0	
163	無	746413024	博蛮久保池	140.2485	37.18433		5.6	4.0	33	8.3	1	L8	226	40	5	1	1	1	3	0	
164	無	746413026	梅ヶ入池	140.2624	37.18571		5.5	3.0	62	20.7	1	L8	190.2	40	1	1	1	0	3	0	
165	無	746413027	梅ヶ入下池	140.2642	37.18436		5.5	2.5	68	27.2	1	L8	203.6	40	1	1	1	0	3	0	
166	無	746413028	石倉池	140.2671	37.18972		5.5	5.0	53	10.6	1	L8	261.2	40	1	1	1	0	3	0	
167	無	746513001	松崎大池	140.3897	37.17143		5.5	4.4	150	34.1	5	R8	191	100	1	1	1	0	1	0	
168	無	746513002	踊池	140.3874	37.17625		5.6	2.3	100	43.5	5	R8	178.2	100	1	2	1	0	1	0	
169	有	746513003	横池	140.3832	37.17331	2	5.6	3.7	100	27	5	R8	285	100	1	1	1	0	0	0	
170	無	746513004	雁俣池	140.3661	37.16246		5.5	5.5	78	14.2	3	R9	303.3	140	4	2	1	0	0	0	
171	有	746513005	岩ヶ作池	140.3697	37.16425	1	5.5	4.7	50	10.6	3	R9	289.1	100	1	1	1	0	0	0	
172	無	746513006	中池	140.3742	37.162		5.5	3.0	50	16.7	3	R9	331.9	140	5	1	2	1	0	0	
173	有	746513007	菖蒲釜池	140.3729	37.16263	3	5.5	3.6	55	15.3	3	R9	298.7	100	1	1	1	0	0	0	
174	有	746513008	孫六池	140.3717	37.15832	3	5.5	6.2	150	24.2	3	R9	184.1	100	1	1	1	0	0	0	
175	無	746513009	本法寺池	140.3637	37.15107		5.5	3.0	13	4.3	3	R9	246.3	140	4	2	1	0	0	0	
176	無	746513012	蟹沢上池	140.3676	37.15325		5.5	2.0	34	17	3	R9	246.7	140	4	2	2	0	0	1上	177親子
177	無	746513013	蟹沢下池	140.3681	37.15283		5.5	3.5	37	10.6	3	R9	148.1	140	4	2	2	0	0	1下	176親子
178	無	746513022	薬師池	140.381	37.16548		5.5	4.5	77	17.1	3	R9	138.4	100	3	3	2	0	0	1下	179・180親子
179	無	746513023	泥鱒池	140.3819	37.166		5.5	2.4	50	20.8	3	R9	102.2	100	3	3	2	0	0	1上	178・180親子
180	無	746513024	真菰池	140.3806	37.16664		5.5	2.2	45	20.5	3	R9	166.5	140	3	3	2	0	0	1上	178・179親子
181	無	746613001	吉作後池	140.3898	37.20344		5.6	2.5	50	20	5	R7	237.4	190	1	1	1	0	1	0	
182	無	746613002	吉作前池	140.3906	37.20171		5.6	4.0	55	13.8	5	R7	272.7	140	1	1	1	0	1	0	
183	有	746613003	赤池	140.386	37.19822	3	5.5	5.5	105	19.1	5	R7	221.1	140	1	1	1	0	0	0	
184	無	746613005	坂口池	140.3946	37.185		5.5	4.5	80	17.8	5	R8	326.7	100	5	1	2	1	1	0	
185	有	746613009	原池	140.3784	37.19228	1	5.5	2.5	70	28	4	R7	194.8	140	1	1	1	0	0	0	
186	有	746613010	神ノ内池	140.3777	37.18656	3	5.5	1.5	85	56.7	4	R8	215.5	140	1	1	1	0	0	0	

187	有	746613012	波柳池	140.3641	37.2196	3	5.6	2.5	140	56	4	R6	238.3	140	1	1	1	0	0	0
188	無	746613013	行人田池	140.3569	37.21389		5.8	2.5	45	18	4	R6	277.1	100	4	2	1	0	0	0
189	有	746613014	牡丹池	140.3549	37.21732	1	5.8	3.0	130	43.3	4	R6	302.9	100	1	1	1	0	0	0
190	有	746613015	仲間池	140.3494	37.21938	3	5.9	2.0	70	35	4	R6	191.9	100	1	1	1	0	0	0
191	有	746613016	大池	140.3352	37.21817	3	5.7	3.5	200	57.1	4	C6	238.2	140	1	1	1	0	0	0
192	無	746613017	小池	140.3358	37.20940		5.7	2.0	140	70	3	C7	290.8	140	4	2	2	0	0	0
193	無	746613019	館池	140.3202	37.20845		5.9	2.0	35	17.5	3	C7	111.1	190	3	3	1	0	0	0
194	有	746613020	柳池	140.3208	37.20623	5	5.8	1.8	830	461.1	3	C7	56.2	190	3	3	1	0	0	0
195	有	746613021	二ツ池	140.3169	37.20187	3	5.8	4.1	82	20	3	C7	53.6	160	3	3	1	0	0	0
196	無	746613022	大池	140.3098	37.22261		5.8	2.0	74	37	3	C6	278.7	190	4	2	1	0	0	0
197	無	746613023	長命池	140.2953	37.22327		5.8	2.5	48	19.2	2	L6	191.9	100	4	2	1	0	0	0
198	無	746613024	入の沢池	140.2926	37.22007		5.8	3.0	68	22.7	2	L6	219	100	5	1	1	1	0	0
199	有	746613025	北田池	140.2831	37.22316	1	5.7	3.0	37	12.3	2	L6	229.1	100	1	1	1	0	0	0
200	有	746613026	前久保池	140.3698	37.18019	3	5.6	3.5	190	54.3	4	R8	317.3	100	1	1	1	0	0	0
201	有	746613029	荒池	140.3543	37.16825	3	5.5	2.7	64	23.7	3	R9	279	140	1	1	1	0	0	0
202	有	746613030	菱池	140.3568	37.16605	3	5.5	4.0	65	16.3	3	R9	301.6	140	1	1	1	0	0	0
203	無	746613031	銅矢場池	140.3555	37.16313		5.7	4.6	61	13.3	3	R9	312.9	190	4	2	1	0	0	0
204	無	746613034	夏張池	140.3459	37.16219		5.7	2.5	95	38	3	R9	11.8	190	3	3	1	0	0	1上 205親子
205	有	746613035	渡利池	140.3453	37.16283	3	5.5	3.0	180	60	3	R9	30.6	190	3	3	1	0	0	1下 204親子
206	無	746613036	茶平池	140.3429	37.16082		5.5	2.3	100	43.5	3	R9	9.3	140	3	3	2	0	0	0
207	有	746613037	原池	140.3581	37.19172	3	5.5	2.0	97	48.5	4	R7	212.7	140	1	1	1	0	0	0
208	有	746613038	上池	140.344	37.18589	3	5.5	2.0	85	42.5	3	R8	175.8	140	1	1	1	0	0	0
209	有	746613039	浅井名池	140.3428	37.18774	3	5.5	2.5	82	32.8	3	R8	218.8	140	1	1	1	0	0	0
210	無	746613040	牡丹池	140.3369	37.18326		5.6	3.0	158	52.7	3	C8	162.2	140	4	2	2	0	0	0
211	有	746613041	松房池	140.3336	37.17946	3	5.5	3.0	160	53.3	3	C8	292.4	140	1	1	1	0	0	0
212	有	746613042	堤内池	140.3361	37.17163	3	5.5	2.5	165	66	3	C8	263.4	190	2	1	2	0	0	0
213	無	746613043	申久保池	140.3351	37.16494		5.5	3.0	120	40	3	C9	208	140	4	2	2	0	0	0
214	無	746613044	新池	140.325	37.16046		5.5	2.5	125	50	2	C9	271.5	140	4	2	2	0	0	0
215	有	746613046	釜池	140.3129	37.18324	2	5.7	3.0	205	68.3	2	C8	221.2	140	1	1	1	0	0	0
216	有	746613047	堀ノ内池	140.3393	37.15411	4	5.6	2.0	37	18.5	2	C9	343.5	140	3	3	1	0	0	0
217	無	746613048	三ツ池	140.3882	37.20578		5.5	3.0	30	10	5	R7	320.6	190	5	1	1	1	1	0
県中																				
218	有		桜川(桜川池)	140.336	37.30874	3	6	5.0	60	12	5	C2	332.2		1	1	1	0	0	0
219	有		一本木第1(上ノ池)	140.2865	37.27824	3	5.9	2.5	60	24	3	L3	323		2	1	2	0	0	0
220	有		榎松第1(仏田池)	140.3199	37.2605	2	6	5.0	42	8.4	4	C4	157.5		1	1	1	0	0	0
221	有		高久田堤(高久田堤池)	140.3691	37.27233	3	5.9	3.5	114	32.6	5	R3	255.6		1	1	1	0	0	0
222	有		坂井第2(西ノ内池)	140.3095	37.28311	3	6	3.5	114	32.6	4	C3	154.4		1	1	1	0	0	0
223	有		田中(田中池)	140.3116	37.28272	4	6	3.0	30	10	4	C3	346.6		2	1	2	0	0	0
224	有		花見堂第2(花見堂池)	140.3026	37.28826	5	6	1.5	30	20	4	C3	138.1		2	1	2	0	0	0
225	有		大山第1(ボタ塚池)	140.349	37.22782	3	5.8	1.6	31	19.4	4	R6	4.8		1	1	1	0	0	0
226	有		穴田第2(北向池)	140.264	37.22244	3	5.7	4.0	42	10.5	2	L6	197.2		1	1	1	0	0	0
県南																				
227	有		矢吹町 池の入池	140.3027	37.22731	4	5.9	2.1	46.7	22.2	3	C6	273.8		1	1	1	0	0	0
228	有		泉崎村 原山地区	140.2852	37.17789	5	5.5	3.4	70	20.6	2	L8	242.3		1	1	1	0	0	0
不明 8																				
40	無	720722006	荒池	140.2879	37.27554		6	2.0	19	9.5		L3	336.2	190						一本木
97	無	720732095	池平池②	140.3026	37.28826		6	1.0	29	29		C3	141.6	100						花見堂
118	無	734212017	二池	140.3511	37.24577		5.8	1.5	91	60.7		C5	306.3	140						梨池
119	有	734212018	滋賀池	140.345	37.22875		5.8	1.5	102	68		C6	335.3	140						蓮池
159	無	746413020	新池	140.2852	37.17787		5.5	3.0	150	50		L8	242.1	140						原山
被災度無																				
105	有	734212001	ハヤ釣り池	140.3751	37.25828		6	2.5	45	18		R4	203.9	160	4	2	2	0	0	0
107	有	734212005	蒲ノ沢池	140.3561	37.27242		5.9	2.0	50	25		R3	247.1	100	4	3	2	0	0	0
114	有	734212013	サカサ池	140.3418	37.23834		5.8	3.0	190	63.3		R5	212.1	140	4	2	2	0	0	0

本報告から転載，複製する場合は，農村工学研究所の許可を得てください。

---

## 農村工学研究所報告 第 54 号

平成 27 年 3 月 30 日 印刷

平成 27 年 3 月 30 日 発行

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構

### 農村工学研究所

〒305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1 番 6 号

電話 029 (838) 8169 (情報広報課)

<http://www.naro.affrc.go.jp/nkk/>

印刷：牛久印刷株式会社

---