

農村工学研究所技報

第216号

目次

震災からの復旧過程における農業用水の塩分濃度モニタリング 友正達美・谷本 岳・内村 求 1

Numerical Estimation of the Vertical Fecal Coliforms Distribution in Reservoirs
..... 濱田康治・白谷栄作・久保田富次郎・人見忠良 9

[技術資料]

震度を用いた農業用ため池の地震動被害研究
-平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震を事例として- 鈴木尚登・中里裕臣・井上敬資 21

平成26年7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



TECHNICAL REPORT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
No. 216
July 2014

CONTENTS

TOMOSHO Tatsumi, TANIMOTO Takeshi and UCHIMURA Motomu Salt Concentration Monitoring of Irrigation Water during the Recovery Process from the Earthquake Disaster	1
HAMADA Koji, SHIRATANI Eisaku, KUBOTA Tomijiro and HITOMI Tadayoshi Numerical Estimation of the Vertical Fecal Coliforms Distribution in Reservoirs	9
〔technical data〕	
SUZUKI Hisato, NAKAZATO Hiroomi and INOUE Keisuke Use of Seismic Intensity to Study Damages to Irrigation Ponds during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake	21

NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
NATIONAL AGRICULTURE AND FOOD RESEARCH ORGANIZATION (NARO)
INCORPORATED ADMINISTRATIVE AGENCY
Tsukuba, Ibaraki, 305-8609 Japan

農村工学研究所技報 第216号

所	長	小	泉	健
企 画 管 理 部 長		山	本	德 司
審 議 役		笹	山	淳 治
技術移転センター長		奥	島	修 二
農地基盤工学研究領域長		小	林	宏 康
施設工学研究領域長		毛	利	栄 征
水利工学研究領域長		中		達 雄
資源循環工学研究領域長		増	本	隆 夫
農村基盤研究領域長		小	川	茂 男

編 集 委 員 会

編 集 委 員 長	山	本	德	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	児	玉	正	文

TECHNICAL REPORT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
No. 216

KOIZUMI Takeshi	Director-General
YAMAMOTO Tokuji	Director, Department of Planning and General Administration
SASAYAMA Junji	General Administration Coordinator
OKUSHIMA Shuji	Director, Technology Transfer Center
KOBAYASHI Hiroyasu	Director, Agricultural Environment Engineering Research Division
MOHRI Yoshiyuki	Director, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division
NAKA Tatsuo	Director, Hydraulic Engineering Research Division
MASUMOTO Takao	Director, Renewable Resources Engineering Research Division
OGAWA Shigeo	Director, Rural Development and Planning Research Division

EDITORIAL BOARD

Chairman	: YAMAMOTO Tokuji
Members	: TOMOSHO Tatsumi TOKASHIKI Masaru HAMADA Koji YOSHIMOTO Shuhei KUNIMITSU Yoji
Secretary	: KODAMA Masafumi

震災からの復旧過程における農業用水の 塩分濃度モニタリング

友正達美* 谷本 岳* 内村 求*

*農地基盤工学研究領域用水管理担当

キーワード：地震，地盤沈下，農業用水，塩分濃度モニタリング，電気伝導度，水稲

I 緒言

平成23年東北地方太平洋沖地震の発生から2年を経過し、被災農地の復旧は、被害の大きかった沿岸部や河川沿岸が中心となりつつある。こうした沿岸部や河川沿岸では、水門等の水利施設が津波で損壊し、さらに地盤沈下によって、河川への塩水侵入が見られる。こうした河川が農業用水の水源となっている場合、塩水侵入は農地の復旧や営農再開の大きな妨げとなる。筆者らは、北上川下流左岸の皿貝川を対象に、2012年5月から9月まで農業用水の電気伝導度（EC）観測による塩分濃度モニタリングを行い、ECは時間的な変動が大きいことから、モニタリングは営農再開の時点だけでなく、継続的に行うこと、また塩害を回避するためにリアルタイムでECの観測値がわかる方法で行うことの必要性を明らかにした（友正ら，2013）。

本稿では、その後継続して行っている塩分濃度モニタリングの2013年9月までの結果、および2013年5月から試行している塩害回避のためのリアルタイムのモニタリングの結果を報告する。また、これまでの調査結果を踏まえて、震災後の被害調査、復旧、営農再開の各段階に応じたモニタリングの方法について検討する。

II 塩分濃度モニタリングの対象と方法

2.1 モニタリングの対象

農業用水の塩分濃度モニタリングの対象は、北上川下流左岸の支流、皿貝川の下流である（Fig.1）。2011年3月11日の東日本大震災の津波により、北上川との合流点（北上川河口より上流3.0km）にある月浜第一水門が被災し、周辺一帯の農地は冠水した。北上川下流の地盤は平均で約0.8m沈下した（遠藤ら，2011）。

その後、2011年6月に月浜第一水門が応急復旧、2013年3～4月に付帯する防潮水門が復旧した。皿貝川下流左岸の大長尾（月浜第一水門より上流2.4km）、小長尾（月浜第一水門より上流3.3km）で農業用水を取水する水田では、2012年5月から水稲作が再開された。営農再開時には農業用水の塩分濃度に異常がないことが確認されて

いたが、出穂後の2012年8月には農業用水が原因と見られる塩害が発生した（Fig.2）。

これを受けて、翌2013年の水稲作について、宮城県では、皿貝川下流左岸の水田に代替水源として北上大堰（北上川河口から上流17.2km）で取水した農業用水を送水し、大長尾、小長尾における皿貝川からの取水を停止する対策を取った。この水田は、震災以前から実施中の土地改良事業により、北上大堰からの用水に切り替える計画となっており、皿貝川右岸の幹線水路から大長尾、小長尾の中間付近で左岸側に送水するサイホンが建設済みであった。そのため、このサイホン出口に仮設の管路を設置して大長尾、小長尾に送水することが可能であった。しかしながら、更に皿貝川の上流左岸の曾呂美（月浜第一水門より4.5km）では、地形勾配からサイホンからの送水が困難なため、皿貝川からの取水が継続された。

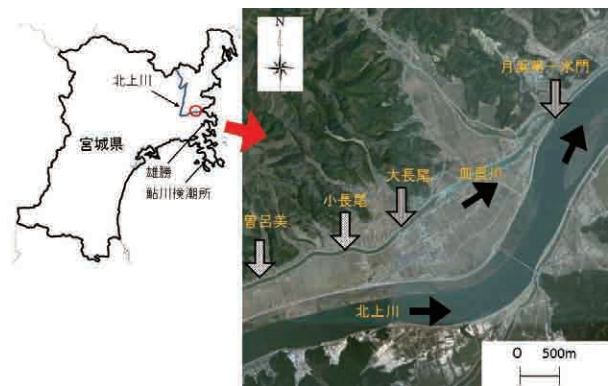


Fig.1 皿貝川とモニタリング地点の位置
Location of Sarakai River and EC monitoring points



Fig.2 2012年に発生した水稲の塩害
Rice damaged from salt water, in 2012

2.2 モニタリングの方法

a ECロガーによるモニタリング

大長尾、小長尾では、2012年5月より、ECセンサーと観測データを蓄積するロガーが一体となったECロガー（Hobo社製U-24、測定範囲0～15mS/cm、精度±3%）による農業用水のモニタリングを行っている。ECロガーは大長尾、小長尾の取水地点に各2個ずつ、設置時（2012年5月16日）の水面から深さ0.8m（浅部）、2.0m（深部）とし、10分間隔でECを記録した。なお、浅部のECロガーの位置は、大長尾、小長尾でポンプに接続している取水ホースの呑み口高さと概ね一致させている。

b ECデータ送信システムによるモニタリング

2013年に皿貝川からの取水を行う曾呂美では、塩分濃度が上昇した場合に取水を停止する用水管理を行うことを意図して、新たにECデータ送信システムを導入し、2013年5月15日よりモニタリングを開始した。

ECデータ送信システムは、ECを観測し、その値を指定したメールアドレスにメールで送信するものである（Fig.3）。これによって、用水管理者はECの観測値をリアルタイムで把握でき、それに応じた用水管理を行うことができる。

ECデータ送信システムはECセンサー、メール送信器、電源から構成される。ECセンサー（東邦マーカントイル社製AQUA watcher、測定範囲0.05～100mS/cm、精度±0.5%+0.001mS/cm）は、取水するホースの先端付近（水深約1.2m）に設置した。EC観測の時間間隔、メールの送信間隔はそれぞれ任意に設定できるが、用水管理者と協議して、メール受信の回数があまり多すぎず、かつ、用水管理を行う上で実用的な頻度として、試行的に1時間間隔、毎正時に観測しメール送信することとした。電源は外部からの電力供給を必要としないよう、太陽光パネルとバッテリーを使用した。

c ECに応じた用水管理の検討

曾呂美におけるECデータ送信システムによるリアルタイムのモニタリングの結果に応じて、具体的にどのような用水管理を行うかを検討した。

水田かんがい用水におけるECの基準としては、農業（水稲）用水基準では0.3mS/cm以下となっている。ま



Fig.3 ECデータ送信システム
EC data-mail sending system

た、島根県が行った試験では1.5mS/cm以上でコシヒカリ等の収量に大きな影響があった（道上ら、1998）。またIRRIでは2.0mS/cm以上はかんがいに適さないとしている（IRRI、2009）。

皿貝川からの取水の場合、2012年かんがい期の塩分濃度モニタリングの結果（友正ら、2013）から、農業用水基準（水稲）の0.3mS/cmを基準とすると、取水可能な日数が少なくなりすぎる怖れがあった。そのため、塩害による減収をなるべく回避するという観点から、1.5mS/cm以上の場合に原則として取水停止、2.0mS/cm以上の場合に取水停止することとした。農業用水の塩分濃度がこの基準を超えても、かんがい時に田面に湛水があれば希釈されるため、直ちに水稲が高濃度の塩水にさらされるわけではない。しかし、田面湛水の有無や量は水田の水管理によって異なるため、用水管理上安全側の措置として、これらの基準で取水を停止することとした。

また、用水管理者がメールでECが基準を超えたことを把握してから、実際に取水を停止するまでには、施設を操作する者への連絡、移動等に一定の時間を要し、この間に基準値を超える用水が水田に送水される。特に夜間は、メールの確認遅れなどにより、対応までの時間が長くなるおそれがある。そのため、ECが上記の1.5mS/cmに達する以前に、用水管理者、耕作者の双方が、取水停止に備える準備段階を設けることとした。この取水停止に向けた準備に入る基準値は、ECの作物への影響ではなく、用水管理の作業上の目安とする値である。ここでは、2012年のECのモニタリング結果、および概ね1時間程度で用水管理上の対応が可能との聞き取り結果に基づいて、試行的に1.0mS/cmに設定した。以上の検討に基づいて作成した、ECに応じた用水管理の案をTable 1に示す。

III 塩分濃度モニタリングの結果

a ECロガーによるモニタリングの結果

2012年5月から2013年9月までの、大長尾、小長尾でのECロガーによる塩分濃度モニタリングの結果をFig.4に示す。全体的な経過としては、2012年は測定開始後にECは2.0mS/cmを超えて大きく上昇するようになった。翌2013年の3月から4月にかけてECは大幅に低下し、5月以降は前年より全体的に低い水準で推移した。

ただし、2013年5月以降に、ECの上昇が全く見られなくなったわけではない。2013年5月から9月のECの

Table 1 ECに応じた用水管理（案）

Irrigation management plan according to EC level of water	
EC(mS/cm)	用水管理
1.0以下	(通常通りに取水)
1.0～1.5	取水停止に備える準備段階。EC上昇の速度、用水管理上の対応時間を考慮してこの範囲を設定する。更なるEC上昇に即応できるよう、夜間かんがいの停止、農家への注意喚起などを行う。
1.5～2.0	減収が発生する濃度。異常渇水時を除き、原則として取水を停止する。
2.0以上	塩害が発生する濃度。取水を停止する。

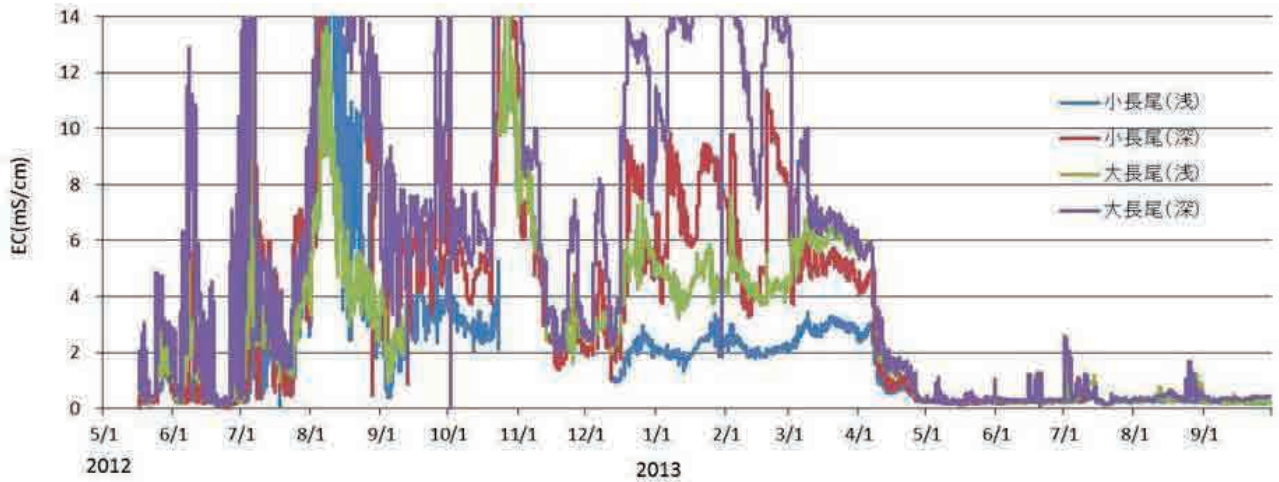


Fig.4 大長尾, 小長尾における EC の推移 (2012年5月~2013年9月)
Trend of EC at Ohnagao and Konagao May.2012-Sep.2013

推移を Fig.5 に示す。大長尾では、7月1日から2日にかけて、2.0mS/cm を超える EC の上昇が観測された。同時期に小長尾では7月2日に1.2mS/cm の最大値を観測した。

b ECデータ送信システムによるモニタリングの結果

ECデータ送信システムを設置した曾呂美では、システムの運用を開始した2013年5月15日以降、9月30日までECは最大値で0.3mS/cmと低い水準で推移した。その最大値を記録した、7月1日の大長尾, 小長尾, 曾呂美の観測値の推移を Fig.6 に示す。

7月1日に大長尾では2.0mS/cm を超える EC の上昇が観測されているが、曾呂美では0.3mS/cm と EC の変動はほとんど見られていない。

こうした経過から、曾呂美では Table 1 の EC に応じた用水管理 (案) は実施に移されることはなく、また、かんがい用水が原因と考えられるような塩害の発生も見られなかった。

IV 考察

4.1 ECの変動に関係する要因とモニタリングの重要性

Fig.4 に示した EC の推移から、皿貝川への塩水浸入は、2013年3月~4月の月浜第一水門に付帯する防潮水門の復旧によって、大きく減少したと考えられる。ただし、Fig.5 に示したような一時的な EC の上昇が見られることから、塩水浸入が完全に防止されたわけではない。皿貝川および北上川下流周辺では、河川堤防, 水門等の復旧, 改修工事が現在も継続して実施されており、今後も、これらの進捗によって塩水浸入の起こりやすさが変化する可能性がある。

また、皿貝川への塩水浸入の有無や程度に関連する要因として、潮汐や降雨が考えられる。2013年のかんがい期における日最大潮位 (最寄りの鮎川) の推移と、大長尾において EC が 1.0mS/cm を超えた期間を Fig.7 に示す。

EC が 1.0mS/cm を超えた時期は、潮位上昇から 5~6

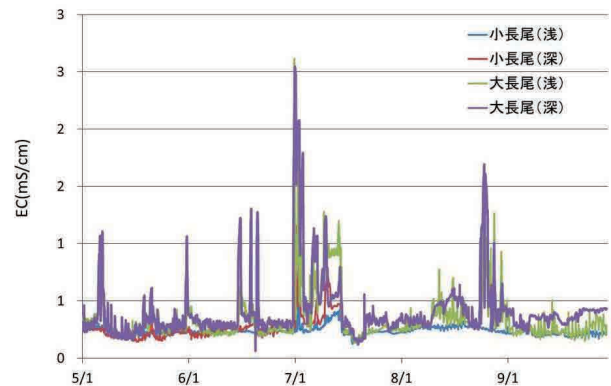


Fig.5 大長尾, 小長尾における EC の推移
(2013年5月~9月)

Trend of EC at Ohnagao and Konagao during irrigation period

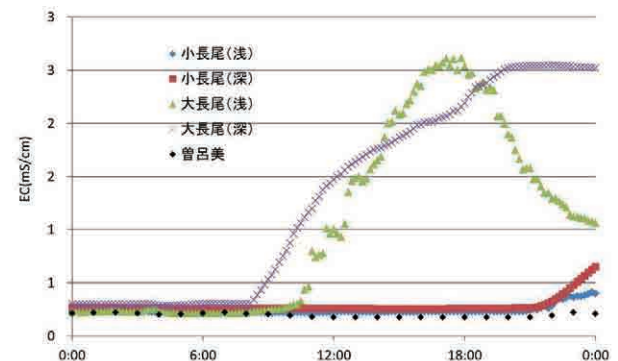


Fig.6 2013年7月1日の EC の推移
Trend of EC on July 1 2013

日後に発生しているが、他方、5月~9月の期間中に最も高い潮位となった7月下旬の前後に EC の上昇が見られないなど、その対応関係は明確ではない。

かんがい期間中の最寄りのアメダス地点 (雄勝) における 2012年, 2013年, 平年の旬別降水量を Fig.8 に示す。

2013年は7月上旬まで少雨傾向, 7月中旬に大きな降雨量が観測され, それ以降は平年に近い傾向で推移した。

Fig.7 において, 2013年の7月下旬の前後に, 大長尾で

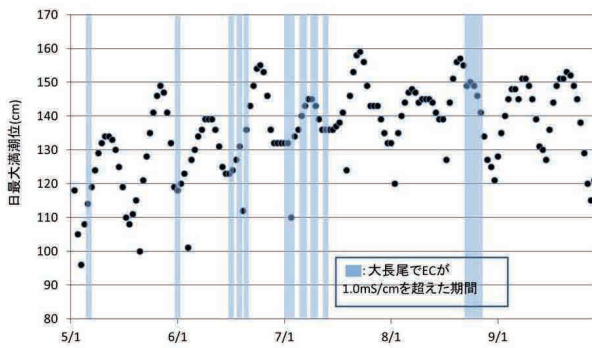


Fig.7 2013年かんがい期の日最大潮位（鮎川）と大長尾におけるECの上昇時期

The highest tide levels in a day at Ayukawa and high EC days at Ohnagao monitoring point during irrigation period 2013

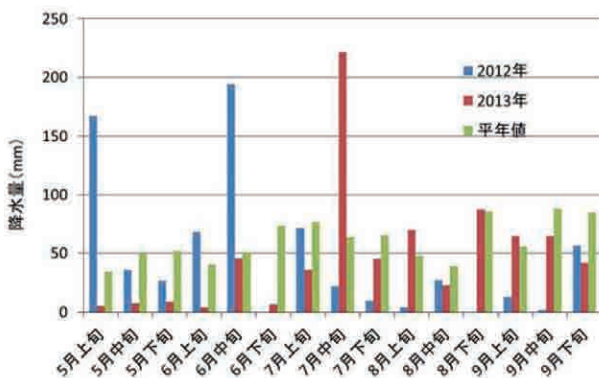


Fig.8 かんがい期の降水量（雄勝）

The precipitation at Ogatsu during irrigation period 2013

潮位が高い時期においても 1.0mS/cm を超える EC の上昇が見られなかった理由として、この大きな降雨量が影響した可能性が考えられる。

皿貝川最下流の月浜第一水門の操作は、内外水位差に基づいて行われており、潮位の変動の他、降雨流出による北上川本川、皿貝川の流量によって影響を受ける。そのため、年ごとによって異なる降雨は、潮位と共に塩水浸入に影響を及ぼすと考えられるが、その過程は複雑である。2012年は6月中旬に大きな降雨がありそれ以降は少雨傾向であった。2013年は7月下旬以降の降雨量は概ね平年並みであった。月浜第一水門に付帯する防潮水門が復旧した2013年も皿貝川下流ではFig.5に示したような塩水浸入が観測されているが、今後、2012年のように夏期に少雨傾向になった場合、塩水浸入がどのように変化するかは不明である。塩水浸入がどこまで到達するかについても、皿貝川の河床勾配が下流部で $1/2,000$ から $1/3,000$ と非常に小さく（宮城県，2003），地形的条件から判断することは難しい。

このように、農業用水の取水河川への塩水浸入には、周辺の水利施設の復旧の状況、潮位、降雨等の要因が影響しており、その程度や範囲を事前に予測することは難しいことから、実際のモニタリングに基づいて、復旧計

画の策定や、用水管理を実施することが重要と考えられる。

4.2 ECデータ送信システムによる用水管理の有効性

ECデータ送信システムを設置した曾呂美では、前述の通りTable 1の基準に達するようなECの上昇は観測されず、取水停止等の具体的な用水管理は行われなかった。しかしながら、聞き取りでは、用水管理者はECデータ送信システムの有効性を高く評価しており、少なくとも2014年のかんがい期初めまでの継続的なモニタリングを希望している。曾呂美では、塩害が発生した翌年に同じ水源から取水せざるを得なかったことから、リアルタイムでモニタリングを行いながら取水できたことの安心感は大きいとのことであった。

次に、もし今後、曾呂美でECの上昇があった場合、Table 1の用水管理が行うことが可能かどうかを、Fig.6の2013年7月1日の観測値から検討する。大長尾（浅部）でのEC上昇は、 1.0mS/cm を超えてから 1.5mS/cm に達するまで約2時間、 1.5mS/cm から 2.0mS/cm に達するまで約2時間を要した。前述のように、用水管理者はメールでECの上昇を知ってから、概ね1時間で対応可能である。そのため、EC上昇がこれ以上早くならなければ、試行した毎正時のデータ送信の設定で、Table 1のECに応じた用水管理は可能と考えられる。

更に、もし仮に、曾呂美より下流の大長尾、小長尾で代替水源が確保できず、皿貝川からの取水を継続せざるを得なかった場合、ECデータ送信システムによる用水管理によって、水稲作が可能であったかを検討する。Fig.5から、大長尾では、ECが7月に一時的に 2.0mS/cm を超えており、ECデータ送信システムによる用水管理が行われていた場合、取水が完全停止となったのは7月1～2日の2日間のみであったと考えられる。また、小長尾では、2013年かんがい期間中のECの最大値は 1.2mS/cm であり、ECがこれ以上上昇しない間に取水するよう農家に注意喚起が行われた程度で、取水停止等には至らなかったと考えられる。

以上のことから、塩水浸入の懸念がある場合、農業用水の安全を確認しつつ取水したり、塩分濃度が上昇した場合に取水を停止する等の用水管理を行ったりする場合には、ECデータ送信システムによるリアルタイムのモニタリングは有効な方法であると言える。

ただし、上記の考察はあくまで結果論であって、月浜第一水門の防潮水門の復旧によって、皿貝川への塩水浸入がどの程度抑止できるかは、2013年のかんがい開始の時点では不明であった。従って、代替水源の確保が可能な場合は、それが第一の選択肢であり、ECに応じた用水管理は次善の対策である。

4.3 復旧段階に応じたモニタリングの方法

2012年5月からの継続的なモニタリングによって、塩

水浸入は、潮汐、降雨等の変動だけでなく、農地の復旧と同時並行で進められている周辺の河川堤防、水門等の復旧・改修によって影響を受け、変化していく実態を捉えることができた。また、地震によって大きく沈下した地盤そのものが、余効変動によって徐々に隆起する現象が観測されており（飛田ほか、2012）、今後、塩水浸入に影響を及ぼすことも考えられる。

従って、塩分濃度モニタリングは、農地の復旧後、営農再開の時点で安全確認のために行うだけでは不十分であり、震災発生後の復旧の段階ごとに、必要に応じて方法を変えながら継続して行う必要がある。

その際、モニタリングの実施には、機器の入手の難易、時間、予算、マンパワー等、災害後の様々な制約を考慮しなければならない。そこで、復旧段階に応じたモニタリング方法について検討する。

Table 2に、用水管理者および著者が、調査対象の皿貝川およびその周辺の被災地で実際に使用しているECモニタリング機器について、経験的に感じられた特徴および適した使用方法を示す。

モニタリングの目的、機器の特性、制約要因等を考慮すると、各段階に応じておおよそ以下のようなモニタリング方法が望ましいと考えられる。

a 調査段階

震災発生後は、取水施設本体の被害状況の把握と同時期に、農業用水の水質、特に塩水浸入の有無と程度を把握することがモニタリングの主な目的となる。取水地点で塩水浸入が確認された場合は、深さ方向の濃度分布を把握するとともに、周辺の主要な地点に計測対象を広げ、調査時点での塩水浸入の規模と範囲を概定する必要がある。モニタリング方法としては、準備しやすい、携帯型EC計による、ある調査日の一斉観測が一般的であろう。

その後、塩分濃度の時間的、季節的な変動を把握するため、継続的な塩分モニタリングを行うことが望ましい。観測地点は、取水地点の他、主要な水路、河川との合流点付近などを選定する。観測水深は、用水の取水深さの

他、塩水浸入を観測しやすい河床、水路床付近に設定する。モニタリングの結果から、農業用水の水源を、塩分濃度が常に高く使用できない水源、塩分濃度上昇が一時的に上昇する水源、塩分濃度上昇のおそれの少ない水源、等に区分して、復旧計画の策定に反映させることができる。機器としては、携帯型EC計でも可能であるが、多地点での継続的なモニタリングを行うにはマンパワーが不足しやすい。主要な観測点にECロガーを設置すれば、機器コストは必要であるが、モニタリングに必要なマンパワーを大幅に節約できる。

b 復旧段階

復旧計画の策定において、塩分濃度が常に高い水源は、代替水源の確保が必要となる。塩分濃度が一時的に上昇する水源は、代替水源を確保することが望ましいが、それが難しい場合、塩分濃度が高い時だけ使用を停止する用水管理のためのモニタリング方法を検討する。その際、取水河川の水利施設の復旧等によって、将来的に塩水浸入の解消が期待できる場合には、本調査で導入したような、ECデータ送信システムを導入して、その結果を用水管理に反映させる方法でよい。しかし、将来にわたって一時的な塩水浸入の解消が期待できない場合には、モニタリング機器を取水施設の一部に組み込んで、ECに応じた用水管理を自動的に行うような、恒久的な施設整備を行うことがより望ましい。

農地復旧の進捗が相対的に早く、復旧計画の策定までに十分な塩分濃度モニタリングの期間がない場合、2012年に皿貝川で経験したような、営農再開時に予期していない塩分濃度の上昇に備える必要がある。復旧工事の実施期間中も含めて、取水周辺でECロガーや携帯型EC計による定期的なモニタリングを行い、取水地点には安全確認のためECデータ送信システムを設置することが望ましい。塩水浸入が観測された場合には、対策を取り入れた復旧計画へと変更する。

c 営農再開段階

事前に塩分濃度が一時的に上昇することが分かっており、かつ代替水源が確保できない場合は、ECに応じた用水管理のために、また、塩分濃度上昇のおそれの少ない水源では取水の安全確認のために、ECデータ送信システムを設置する。また、周辺の復旧工事の進捗、地盤の余効変動による隆起・沈降の影響を把握するため、ECロガーや携帯型EC計による定点観測でモニタリングを実施する。

数年程度モニタリングを継続し、将来的にも塩水浸入の懸念がないと判断されればモニタリングを終了する。なお、モニタリング終了後の機器類は、次に復旧を進める地区に移設して使用することができる。

Table 2 ECモニタリング機器の特徴と適した使用方法
Features and typical usage of EC monitoring instruments

機器	特徴	適した使用方法
携帯型EC計	・観測値は測定時にリアルタイムでわかる。 ・観測点、観測頻度が多くなると労力を要する。	・被災直後の広域的な概査 ・特定の地点での定期的な安全確認
ECロガー	・観測値はまとめて回収するためリアルタイムではわからない。 ・観測点、観測頻度が多い場合に労力を節約できる。 ・設置数に応じてコストを要する(1カ所8万円程度)	・復旧前後を通じた長期的な観測
ECデータ送信システム	・観測値はリアルタイムで遠隔地でもわかる。 ・機器、設置、通信にコストを要する(1カ所年間100万円程度)	・営農再開後の安全確認 ・流域の復旧が進捗するまで短期的な用水管理 ・安全が確認されたら撤去、他の地区に移設
ECで自動制御する取水施設	・観測値に応じて送水の停止、再開を自動的に行う。	・塩水浸入が長期的に続く場合の用水管理

V 結 言

北上川下流左岸の津波被災地を対象に、2012年5月から農業用水の塩分濃度モニタリングを行った。また2013年5月から新たにECデータ送信システムを導入して用水の安全性の確認を行い、ECに応じた用水管理の案を作成した。その結果、農業用水への塩水浸入は、河川の水利施設の復旧の進捗により変化することが明らかになった。また、農業用水への塩水浸入の懸念がある場合、ECデータ送信システムによる用水管理が有効であることが確認された。更に、これらの結果から、震災復旧における調査、復旧、営農再開の各段階においての、塩分濃度モニタリングの望ましい方法について検討した。

なお、この調査を行うにあたり、宮城県および北上川沿岸土地改良区の関係者各位には多大なご協力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

遠藤希実, 大沼克弘, 天野邦彦 (2011) : 東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下が汽水域植生に与える影響の分析, 河川技

術論文集, 18, 53-58.

IRRI (2009): Rice Knowledge Bank, Rice Doctor, Salinity,

<http://www.knowledgebank.irri.org/RiceDoctor/information-sheets-mainmenu-2730/deficiencies-and-toxicities-mainmenu-2734/salinity-mainmenu-2753.html>

道上伸宏, 伊藤淳次 (1998) : 水稻 ‘コシヒカリ’ ‘ときめき35’ の塩分耐性, 近畿中国四国農業研究センター, 1998年度(平成10年度)近畿中国農業研究成果情報, 生産環境推進部会, http://www.naro.affrc.go.jp/org/warc/research_results/h10/kankyo/cgk98074.html.

宮城県 (2003) : 北上川 (1) 流域河川整備計画, 2,

<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/42691.pdf>

飛田幹男, 木村久夫 (2012) : 余効変動の推移と今後の隆起・沈降の見通しについて, 地震予知連絡会会報87, 535-538, http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou87/12_10.pdf

友正達美, 坂田賢, 内村求 (2013) : 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震により地盤沈下した取水河川における農業用水の塩分濃度モニタリングの必要性, 農工研技報214, 25-30.

受理年月日：平成25年12月5日

Salt Concentration Monitoring of Irrigation Water During the Recovery Process from the Earthquake Disaster

TOMOSHO Tatsumi*, TANIMOTO Takeshi* and UCHIMURA Motomu*

*Agricultural Environment Engineering Research Division, Irrigation Management

Summary

Salt concentration of irrigation water from a river in the ground subsidence area by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake is monitored by using the electric conductivity (EC) loggers at 2 points, and an EC data-mail sending system for irrigation management at 1 point. An irrigation management plan according to EC level monitored by the EC data-mail sending system is prepared.

The EC of irrigation water became lower after the restoration of the water gate at downstream, before the 2013 irrigation period. During 2013 irrigation period, the EC level was low for the most time, but raised once over 2mS/cm at the downstream.

The result of EC monitoring suggests that the EC data-mail sending system is useful for irrigation management in the area where the EC of water is not sure after resume of farming. In the disaster-struck area, salt concentration monitoring should be continued according to the recovery process. The outline of the effective monitoring for the each recovering stage is discussed.

Keywords : earthquake, ground subsidence, irrigation water, salt concentration monitoring, electric conductivity, rice

Numerical Estimation of the Vertical Fecal Coliforms Distribution in Reservoirs

HAMADA Koji*, SHIRATANI Eisaku**,
KUBOTA Tomijiro* and HITOMI Tadayoshi*

*Hydraulic Engineering Research Division, Water Environment

**Department of Planning and General Administration, Senior Research Coordinator

Keywords: vertical one-dimensional layer model, fecal coliforms, vertical profile

I Introduction

Fecal contamination of irrigation water is responsible for the spread of many contagious diseases (WHO, 2006), and agricultural activity can increase infection risks for farmers and consumers of crops. Fecal bacteria in human and animal waste may contain some pathogenic organisms on rare occasions. Some agricultural reservoirs in Japan (particularly those in the middle reaches of river basins) receive runoff from residential areas and stock farms, and such runoff is at a risk to contaminating of fecal bacteria in irrigation water. Accordingly, understanding the dynamics of fecal bacteria in such reservoirs is critical for the prevention and management of fecal contamination of irrigation water.

Fecal coliforms (FC), which have been utilized as indicators of fecal contamination, have been shown to exhibit vertical fluctuations within an agricultural reservoir (Hamada *et al.*, 2010). Vertical profiles describing FC concentration are used in the management of reservoir intake, and it is possible that differences in intake depth may result in differences in risk for farmers and consumers of crops, yet the mechanisms underlying the vertical distribution of FC remain unknown. Therefore, further studies are required to improve understanding of the distribution of fecal bacteria.

Ecological modeling is one of the most effective means of investigating the ecological mechanisms at work in the water environment. Previously, ecological models incorporating the behavior of fecal bacteria have been adapted for investigation of wastewater treatment plants (e.g., Suh *et al.*, 2009), coastal lagoons (e.g., Steets and Holden, 2003), and lakes (e.g., Canale *et al.*, 1993). However, previous studies have targeted primarily the horizontal and temporal distributions of fecal bacteria in water bodies and have neglected to consider the vertical distributions of fecal bacteria in water bodies in any great detail.

Many numerical models have been developed for the investigation of reservoirs and lakes, including one-dimensional, vertical/horizontal two-dimensional, and three-dimensional models. All models developed previously are associated with some advantages and disadvantages, although an appropriate model can usually be selected according to the specific aims of a given study. Fecal bacteria such as coliforms move through water bodies in two ways: they can be considered to be free-floating or particle-attached types (Chapra, 1997). In this context, it is important to consider the movements of such particles within reservoirs when constructing vertical profiles of fecal bacteria. Aki *et al.* (1981) used a vertical one-dimensional model to simulate a vertical turbidity profile in a reservoir, and vertical one-dimensional models have been used widely for the simulation of vertical water quality profiles in reservoirs and lakes. For example, Momii and Ito (2008) used such a model for the simulation of water temperature in a reservoir in Japan. In general, vertical one-dimensional models have achieved positive results in reservoir settings, demonstrating their applicability for investigation of the mechanisms controlling the vertical distribution of FC in reservoirs.

In the present study, the vertical distribution of FC is simulated using a vertical one-dimensional layer model. In particular, FC are separated into free-floating and particle-attached fractions to simulate the effects of differences on density of free-FC or flocks, particle size and sensitivity for solar radiation.

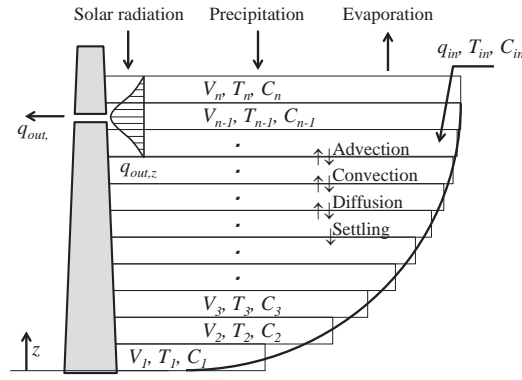


Fig.1 Vertical one-dimensional layer model of reservoir

II Model Structure

2.1 Vertical one-dimensional layer model

The present study adopts a vertical one-dimensional layer model that was designed to calculate temperature and can simulate the distribution of indicators of fecal bacteria. **Figure 1** illustrates the framework of the model. The reservoir in the model is constructed from horizontally partitioned layers and the model calculates flow, heat, and mass balances in each layer. Surface areas and storage volumes are calculated as functions of water depth based on rating curves. Although the number of layers is fixed and all layers exhibit equal thickness, this thickness is not fixed, and it is determined by each calculation step according to the water level the reservoir.

The basic equations adopted to describe flow, heat, and mass conservation in the model at height z are as follows.

$$\frac{\partial Av}{\partial t} = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A}(q_{in}T_{in} - q_{out}T) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(vAT) + \frac{D_T}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_w c A} \frac{\partial}{\partial z} (A\phi) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A}(q_{in}C_{in} - q_{out}C) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(vAC) + \frac{D_C}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) + \mu C \quad (3)$$

Here, v is the vertical velocity of water (m h^{-1}), A is the horizontal water area of the reservoir (m^2), and q_{in} and q_{out} are the inflow and discharge, respectively, of the reservoir ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$). T is water temperature in the reservoir ($^{\circ}\text{C}$), T_{in} is the water temperature at the inflow ($^{\circ}\text{C}$), D_T is a heat diffusion coefficient ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$), ρ_w is water density (g cm^{-3}), c is the specific heat of water ($4.184 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ degree}^{-1}$), ϕ is radiation heat ($\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$), C is water quality in the reservoir (mg L^{-1} or MPN (100 mL)^{-1}), C_{in} is water quality at the inflow (mg L^{-1} or MPN (100 mL)^{-1}), D_C is a water quality diffusion coefficient ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$), μ is the specific reaction rate (d^{-1}), and w is the settling velocity (m h^{-1}).

2.2 Inflow and discharge

Inflow and discharge for each layer are calculated according to a Gaussian distribution using inflow depth and discharge depth as mode depths following equations as entrainment flows. Inflow depth is determined by comparing water densities between the inflowing river and each layer, assuming that water density at the inflow corresponds to that of the inflowing river. Water intake depth is determined using the actual depth of the intake from the reservoir. Accordingly,

$$q_{i/o} = A \exp \left[-\frac{(z - z_{i/o})^2}{2\delta_{i/o}^2} \right] \bigg/ \int_{\text{bottom}}^{\text{surface}} A \exp \left[-\frac{(z - z_{i/o})^2}{2\delta_{i/o}^2} \right] dz \cdot Q_{i/o} \quad (4)$$

where $q_{i/o}$ is inflow/discharge ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), $z_{i/o}$ is inflow/discharge height (m), $Q_{i/o}$ is total inflow/discharge ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), and $\delta_{i/o}$ is the flow thickness associated with inflow/discharge (m). Equations 5 and 6 describe inflow and discharge, respectively:

$$\delta_{in} = \frac{1}{3.92} \left(\frac{q_{in}}{G\theta\sqrt{g\varepsilon}} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\delta_{out} = \frac{1}{3.92} \left(\frac{q_{out}}{G\theta\sqrt{g\varepsilon}} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

$$\varepsilon = -\frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho_w}{dz}, \quad (7)$$

where δ_{in} and δ_{out} represent the flow thickness associated with inflow and discharge, respectively (m). Additionally, G is the Froude number for axisymmetric flow (-), θ is the aperture angle of the intake (rad), g is gravity acceleration (m s^{-2}), and ε is the density gradient (m^{-1}). The horizontal speed of water at height z , u (m h^{-1}), is calculated using the values of $q_{in}(z)$ and $q_{out}(z)$ determined by equation 4:

$$u = \frac{q_{in} + q_{out}}{3600s\sqrt{A}}, \quad (8)$$

where s is the thickness of the layer under consideration (m).

2.3 Diffusion coefficient

The diffusion coefficient is computed according to the Munk–Anderson formula (Munk and Anderson, 1948):

$$D_T = D_C = \frac{10}{\sqrt{1+10R_i}}, \quad (9)$$

where R_i is the gradient Richardson number and is defined as

$$R_i = -\frac{g}{\rho_w} \frac{\partial\rho_w}{\partial z} \bigg/ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2. \quad (10)$$

ρ_w is approximated using the following equation, which is based on Lemmon (2011).

$$\rho_w = 4.3298333 \times 10^{-5} T^3 - 8.1864490 \times 10^{-3} T^2 + 6.2139784 \times 10^{-2} T + 9.9984914 \times 10^2. \quad (11)$$

2.4 Mixing process

The specific water density for each layer is calculated according to equation 11. If the specific water density gradient between layers becomes positive (i.e., $\partial\rho_w/\partial z > 0$), two neighboring layers are mixed. If the specific water density gradient fails to stabilize after the mixing of the two layers, mixing is repeated with the increasing of number of mixing layers until the specific water density gradient becomes stabilized.

2.5 Settling velocity

As for particles, flows are calculated according to the characteristic curve method. The settling velocities of particles are calculated according to Stocks' law, as follows:

$$w = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_w) g}{18\eta}, \quad (12)$$

where D_p is particle diameter (m), ρ_p is particle density (g cm^{-3}), and η is water viscosity (Pa s).

2.6 Ecological model of fecal coliforms (FC) as an indicator of fecal contamination

Both FC and total coliforms (TC) are used as indicators of fecal bacteria, although FC are typically associated with higher cultivation temperatures. Nevertheless, biological reactions involving FC are assumed to be controlled by similar mechanisms to those involving TC. In natural water bodies such as rivers and lakes, it has been shown that the reactivi-

ty of TC (and thus of FC) is limited only by their loss rates (Chapra, 1997), which can be described as follows.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \mu C = -k_b C, \quad (13)$$

where C represents FC concentration (in MPN (100 mL)⁻¹) and k_b is the total loss rate (d⁻¹).

In the present study, the total FC loss rate is assumed to be the same as that of TC, which has been described previously (Mancini, 1978; Thomann and Mueller, 1987; Chapra, 1997):

$$k_b = 0.8 \times 1.07^{T-20} + \frac{\alpha \phi_s'}{0.55m(z_{sur} - z)} (1 - e^{-0.55m(z_{sur} - z)}), \quad (14)$$

where α is a proportionality constant (-), ϕ_s' is surface light energy (ly h⁻¹), m is suspended solids concentration (mg L⁻¹), and Z_{sur} is the height of the water surface (m). The first term on the right-hand side of equation 14 represents the base mortality rate, whereas the second term represents the rate of loss due to solar radiation (i.e., UV disinfection). This latter term is described by the Beer–Lambert law, using the relationship between extinction and suspended solids presented by Di Toro *et al.* (1981).

In the model, FC are divided into two types: a free-floating type (F-FC), and a particle-attached type (P-FC). Loss rates of F-FC due to solar radiation are represented by the second term in equation 13. Similarly, loss rates of P-FC due to solar radiation are typically based loosely on equation 13, although these rates are generally reduced owing to the interception of light before it reaches the particles under consideration. In the present study, the model incorporates a reduction factor (0.5) based on the assumption that particles are ball-shaped and that P-FC are attached uniformly to the surfaces of particles.

2.7 Solar radiation heat

At the water surface, heat loss occurs through evaporation, conduction, and reverse radiation. The net heat loss at the surface, ϕ_L , is defined as

$$\phi_L = \phi_e + \phi_c + \phi_{ra}, \quad (15)$$

where ϕ_e , ϕ_c , and ϕ_{ra} are heat loss by evaporation, conduction, and reverse radiation, respectively. All heat loss values are given in kcal m⁻² h⁻¹.

The empirical equations adopted for the calculation of heat losses correspond to those of Rohwer and Swinbank (Tsanis *et al.*, 2007):

$$\phi_e + \phi_c = (1.710965 \times 10^{-5} + 1.027689 \times 10^{-5} W) \rho_w \left(e_w - \frac{R_a e_a}{100} \right) \left[L_b + cT + \frac{269.1(T - T_a)}{e_w - \frac{R_a e_a}{100}} \right], \quad (16)$$

$$\phi_{ra} = 0.97k \left[(T + 273.15)^4 - 0.937 \times 10^{-5} (T_a + 273.15)^6 (1.0 + 0.17n) \right], \quad (17)$$

where W is wind speed (m s⁻¹), T_a is air temperature (°C), e_w is saturated vapor pressure at T (hPa), e_a is saturated vapor pressure at T_a (hPa), R_a is relative humidity (%), L_b is the difference in enthalpy between the vapor and liquid states (kcal kg⁻¹), k is the Stefan–Boltzmann constant (4.87654×10^{-8} kcal m⁻² h⁻¹), and n is cloudage (-).

The difference in enthalpy between the vapor and liquid states (Lemmon, 2011) is approximated by the following equation:

$$L_b = 597.7383 - 0.5671T. \quad (18)$$

Heat produced by solar radiation penetrates into the lake water and decays according to the Beer–Lambert law:

$$\phi = (1 - \alpha_r)(1 - \beta)\phi_s \exp[-\lambda(z_s - z)], \quad (19)$$

where ϕ_s is solar radiation at the water surface z_s (kcal m⁻² h⁻¹), α_r is reflectance at the water surface (≈ 0.06), β is ab-

sorbance at the water surface (≈ 0.5), and λ is a decay coefficient (m^{-1}).

2.8 Water-sediment interactions

Particles settling to the bottom of the water body are assumed to become part of the sediment and precipitated suspended solids are not allowed to disturb the water body. No dilution is incorporated into the model.

2.9 Boundary conditions

River inflow volume data are generated from daily observation data. FC and suspended solids (SS) concentrations of inflowing water are described by L-Q equations, as follows:

$$L = aQ^b, \quad (20)$$

where L is the load of water quality constituents (g d^{-1} or $\times 10^4 \text{ MPN d}^{-1}$), Q is the inflow ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), and a and b are constants.

In the model, the percentage of FC represented by F-FC and P-FC depends on SS concentration (Chapra, 1997):

$$FC = FC_F + FC_p, \quad (21)$$

$$FC_F = \frac{1}{1 + K_d m} FC, \quad (22)$$

$$FC_p = \frac{K_d m}{1 + K_d m} FC, \quad (23)$$

where FC_F and FC_p represent F-FC concentration and P-FC concentrations, respectively (in MPN (100 mL)^{-1}), and K_d is a partition coefficient ($\text{m}^3 \text{ g}^{-1}$).

Annual fluctuations of river inflow, reservoir effluent, and weather conditions are given as boundary conditions. All input data for calculation step pitch are generated from existing data by linear interpolation. Boundary conditions on the surface of the sediment and the surface of the water body are assumed to be equal to the bottom and top layers, respectively. The discharge volume of the reservoir is calculated from the relationship between observed inflow volume, evaporation from the reservoir surface, precipitation, and fluctuation of reservoir water depth. Air temperature, rain, wind speed, relative humidity, and cloud coverage are referred to the Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) of Japan. Solar radiation is referred to the solar radiation database of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan.

2.10 Study reservoir

2.10.1 Overview

The studied reservoir was constructed at the meeting point of two rivers, was filled from late 2002 onward, and has been formally operational since April 2003. The reservoir has a dam body with a height of 63.7 m and has surface area, total storage volume, active storage volume, and catchment area of 910,000 m^2 , 11,300,000 m^3 , 8,600,000 m^3 , and 75.7 km^2 , respectively. Water depth at full water level is 59.1 m. Water intake is always taken at 1 m depth near the dam body. Many breeding livestock can be found in the catchment area.

2.10.2 Water sampling and water quality measurements

Monthly observations were conducted at the deepest point of the reservoir, near the dam, and at the two river inflows in 2004. Water samplings were conducted in the morning (10:00–12:00). Sample water was collected at three depths within the reservoir: at the surface (0.5 m depth), from a middle layer (i.e., halfway between the surface and the bottom), and from a bottom layer (1 m above the bottom). Water temperature was measured with a temperature gauge linked long cable. Sample water was collected using a Van Dorn water sampler (VR Type 5042-A, RIGO Co., Ltd), and FC concentration was measured according to the most probable number (MPN) method using EC medium (JWWA, 2011); the minimum probable number was 1.8.

2.11 Simulation conditions

In the model simulations, the L–Q equations ($L = aQ^b$) describing the water quality of the inflow were solved using summing the inflow rate of the two rivers, and water temperature was calculated to be the flow-weighted mean of the two rivers. Coefficients for the L–Q equations are presented in **Table 1**. Water intake depth from the reservoir was set to remain at 0.3 m, and all of the effluents were constrained to flow out from that depth.

Coefficient values are presented in **Table 1**. D_p and ρ_p were assumed heuristically to be 1×10^{-6} m (i.e., 10 μ m) and 1.2 g cm^{-3} for F-FC and 3×10^{-5} m (300 μ m) and 2.6 g cm^{-3} for SS, respectively. Based on the assumption that P-FC attach primarily to SS, D_p and ρ_p of P-FC were set equal to those of SS.

Input data for each step, q_{in} , q_{out} , T_{in} , C_{in} , and weather conditions were calculated by linear interpolation from the closest before and after data. Calculation was repeated three times continuously using the same annual data set, and a calculation result from the third year was adopted as the simulation result. The outflow from the reservoir (q_{out}) was calculated by a balance of observed values of inflows, reservoir water depths, precipitation, and estimated evaporation. Then, q_{out} was multiplied by 0.5656 from day 306 to day 366 (i.e., from November 1 to December 31) in each calculation year to match the water depths on day 366 (December 31) and on day 1 (January 1) of the next calculation year. Therefore, the verification timescale of the simulation ran from January 1 to October 31.

III Results and Discussion

3.1 Observed FC concentrations in the reservoir

Table 2 presents the observed FC concentrations in the reservoir and demonstrates that almost all values were less than $1.8 \text{ MPN (100 mL)}^{-1}$, which represents the lower detection limit of the measurement method. FC concentrations in the surface layer were very low. Similarly, FC concentrations in the middle and bottom layers were almost always very low, although higher concentrations ($200\text{--}300 \text{ MPN (100 mL)}^{-1}$) were observed occasionally.

3.2 Annual simulation results for water quality

General remarks regarding the simulation results are first mentioned in this section; then, comparisons between the simulation results and observed values (shown in **Table 1**) are discussed in the next section. **Figure 2** illustrates the simulation results for water depth, water temperature (**Fig.2a**), FC concentration (**Fig.2b**), and SS concentration (**Fig.2c**). The horizontal and vertical axes denote time (in days) after January 1 and the water depth of the reservoir, respectively. The plots show FC and SS concentrations of $0\text{--}200 \text{ MPN (100 mL)}^{-1}$ (**Fig.2b**) and $0\text{--}10 \text{ mg L}^{-1}$ (**Fig.2c**), respectively, although only a few points exhibited very high values. **Figure 2** shows that the thermocline formed in late April and persisted until late November (**Fig.2a**), with a seasonal thermocline formed at approximately 10–15 m depth in summer. The deep layers maintained a constant temperature of approximately 4°C throughout the year, except during a period of

Table 1 Coefficient values

			Coefficient value			
			SS	FC	F-FC	P-FC
a	coefficient for L-Q equation	-	1.484	517.73		
b	coefficient for L-Q equation	-	2.370	0.622		
k_d	partition coefficient	($\text{m}^3 \text{ g}^{-1}$)				0.06
α	proportionality constant	(-)			0.4	0.4
n	reduction factor	(-)				0.5
D_p	particle diameter	($\times 10^{-6}\text{m}$)	30		1	30*
ρ	particle density	(g cm^{-3})	2.6		1.2	2.6*

*P-FC = SS, assuming P-FC attach primarily to SS surface

Table 2 Observed FC concentrations in the reservoir (2004)

	fecal coliforms (FC, MPN (100 mL) ⁻¹)		
	surface	middle	bottom
Apr. 23	<1.8	<1.8	<1.8
May 11	<1.8	11	<1.8
Jun. 9	<1.8	<1.8	<1.8
Jul. 21	<1.8	220	<1.8
Aug. 4	<1.8	2	<1.8
Aug. 18	<1.8	<1.8	9
Sep. 10	<1.8	<1.8	<1.8
Sep. 29	<1.8	<1.8	2
Oct. 20	2	<1.8	270

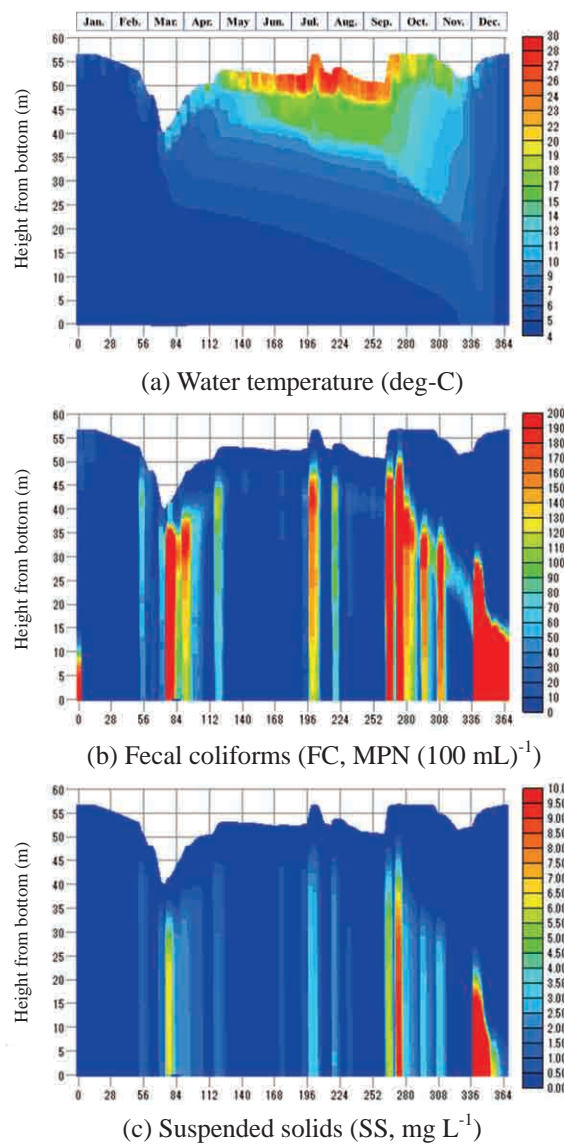


Fig.2 Simulated annual water quality fluctuation

mixing that lasted from late November to early December. This phenomenon is common in reservoirs of this type.

FCs were introduced into the reservoir only through the influent, with no additional growth within the reservoir in the simulation. Accordingly, FC concentrations were generally low and increased in response to increased influent flow (**Fig.2b**). In the layers near the surface, FC concentrations were almost zero for the majority of the time, likely owing to

FC loss due to solar radiation (UV disinfection). These results agree with the observed values (**Table 1**). The FC fraction attached to particles (P-FC) settled along with SS immediately (i.e., within a few days) after being introduced into the reservoir (**Fig.2c**). Thus, the transport of P-FC to depth within the reservoir was more pronounced than that of F-FC. Moreover, the UV disinfection rate of P-FC is half that of F-FC owing to particle shading. Accordingly, despite the dominance of P-FC in the reservoir as a whole, the settling of P-FC occurred in contrast to the concentration of F-FC in the upper parts of the reservoir. In particular, the majority of F-FC became concentrated between the first and seasonal thermoclines, in a layer approximately 5–20 m below the surface, during the summer irrigation season. Overall, FC concentrations tended to be higher below the depth of the daily thermocline, particularly after large inflows.

3.3 Comparison between observed and simulated vertical water quality profiles

Simulation results were verified based on their conformance with observed values on July 21 (day 203 in the simulation) and October 20 (day 296), when the maximum FC concentrations were observed (**Table 1**). **Figure 3** presents comparisons between the observed (circles) and simulated (lines, 12:00) values for temperature on July 21 (**Fig.3a**), FC concentration on July 21 (**Fig.3b**), temperature on October 20 (**Fig.3c**), and FC concentration on October 20 (**Fig.3d**). Water quality indicators and the water depth of the reservoir are shown on the horizontal and vertical axes, respectively. Water depth was 55.8 m and 56.2 m on July 21 and October 20, respectively. FC values below the limit of detection (<1.8 MPN (100 mL)⁻¹) are plotted as 1.8 MPN (100 mL)⁻¹.

For the other observation day of shown in **Table 2** the simulation results for FC concentrations in the bottom, middle, and surface layers are all lower than 0.21 MPN (100 mL)⁻¹, except for September 29, and there are similar to observed values. The simulation result for September 29 appears to have been overestimated: it was approximately 500 MPN (100mL)⁻¹ around the middle layer. This discrepancy can be attributed to the overestimation of FCs and SS for inflows (calculated according to the L–Q equations) when the reservoir received very large inflows (see the surface elevation in late September; **Fig.2**).

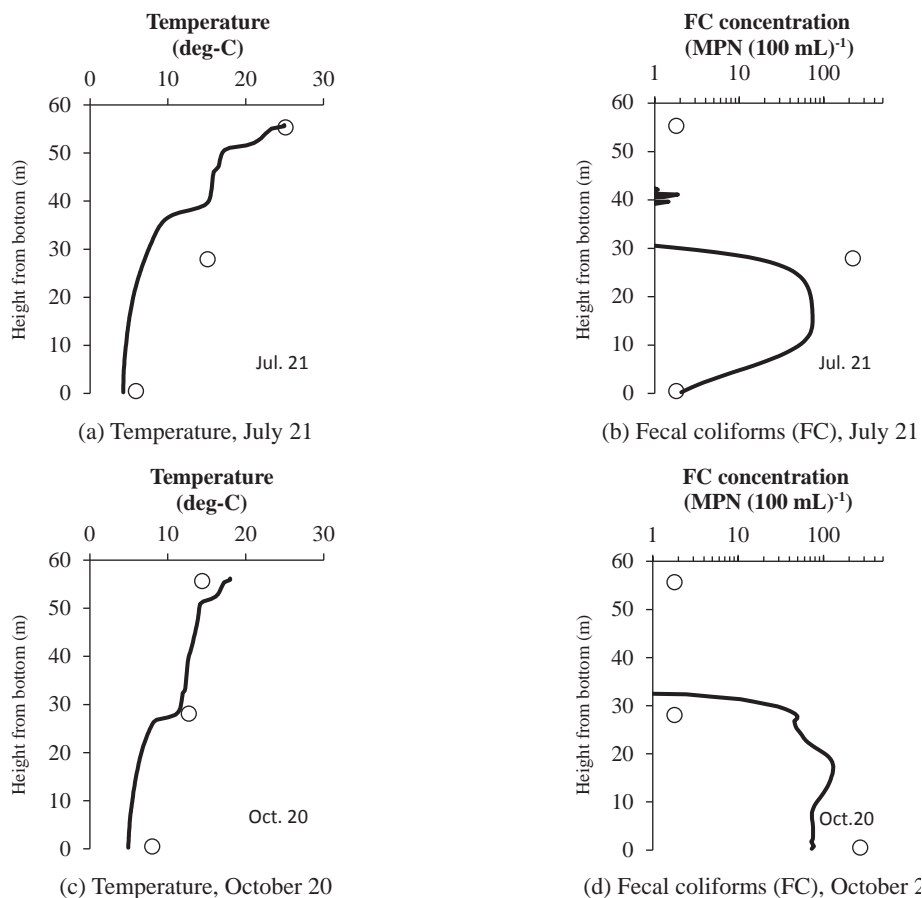


Fig.3 Comparison of simulated and observed vertical profiles of water quality in the reservoir for different days

The simulated water temperatures illustrate clearly the daily and seasonal thermoclines on July 21 (**Fig.3a**) and October 20 (**Fig.3c**). Although the seasonal thermocline simulated on July 21 was shallower than that observed (**Fig.3a**), the simulated water temperature was considered to reproduce the observed data successfully.

The simulated FC concentrations indicate interesting results for both of the days studied. On July 21, higher FC concentrations were observed in the middle layer, corresponding approximately to the peak in FC concentration in the lower middle layer in the simulation results (**Fig.3b**). Moreover, FC concentrations were similar in the bottom layer for both the simulated and observed results. The small peak in simulated FC concentrations around 40 m from the bottom can be attributed to the accumulation of F-FC, as described above. While very large inflows were observed in late July, as in late September, the simulation result for July 21 can be considered appropriate and is not associated with any overestimation of FC concentrations. This may indicate that a seasonal coefficient is required in the L–Q equation describing FC concentration. On October 20, the simulated FC concentrations in the bottom layer underestimated the observed values, whereas FC concentrations in the middle layer were below the detection limit for both the simulated and observed distributions (**Fig.3d**). FC concentrations in reservoirs can vary by up to several orders of magnitude; for example, observed FC concentrations in this study cover a wide range (<1.8 to 270 MPN $(100 \text{ mL})^{-1}$). In contrast, quantitative mismatches between the simulation results and observed values (**Fig.3b** and **Fig.3d**) are typically within one order of magnitude; this degree of accuracy is considered to be reasonable for simulation of FC concentration. In this context, the comparisons shown in **Fig.3** demonstrate the validity of the model developed here. Nonetheless, the results seem to suggest that the model requires further tuning, particularly in its treatment of parameters such as SS size distribution and the consideration of seasonality in the L–Q equations use to describe FC load. Such tuning should be conducted in future to refine the model further.

IV Conclusions

In the present study, a numerical model has been developed to simulate the vertical profiles of fecal coliforms in reservoirs. Based on a comparison of the simulation results obtained using this model with observed data describing FC concentrations, it is concluded that the model exhibits reasonable reproducibility for almost every comparison and is applicable for use in a reservoir setting. Accordingly, this model will be useful in the management of reservoir water intake and in monitoring contamination by fecal bacteria, which can be introduced into reservoirs through agricultural runoff and domestic effluent. In Japan, the diversification of water use is widespread and fecal contamination may be increased by such diversification, particularly in the case of recycled water. Thus, the monitoring and management of fecal contamination, which can be achieved by models such as the one described here, are likely to be critical to maintaining a safe and reliable supply of water.

Acknowledgements

We would like to extend our thanks to everyone who assisted in the collection of field data.

Reference

- 1) Aki, S., O. Shimoda, T. Shirasuna, T. Akasaki, Y. Miyayaga and M. Sakata (1981) Reservoir Water Quality -- Investigation and Analysis, CRIEPI Research Report No.302, Central Research Institute of Electric Power Industry. (in Japanese with English abstract)
- 2) Canale R. P., M. T. Auer, E. M. Owens, T. M. Heidtke and S. W. Effler (1993) Modeling fecal coliform bacteria - II. Model development and application, *Water Research*, **27**, 703-714.
- 3) Chapra S. C. (1997) Surface Water-Quality Modeling, Waveland Pr Inc.
- 4) Di Toro, D. M., D. J. O' Connor, R. V.Thomann and J. P. St. John (1981) Analysis of fate of chemicals in receiving waters. Phase 1. Chemical Manufacturers Association, HydroQual Inc.
- 5) Hamada K., T. Hitomi, T. Kubota and E. Shiratani, (2010) Fluctuation and Transportation of Indicator Microorganisms in the Agricultural Irrigation System, *Proc. of Annual Meeting of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, 744-745. (in Japanese)

- 6) JWWA (2011) Water Examination Methods of Japan (2011 Edition), Japan Water Works Association.
- 7) Lemmon, E.W. (2011) Thermophysical properties of water and steam, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 91st edition, CRC Press, pp. 6-1 - 6-4.
- 8) Mancini, J. L. (1978) Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions, *Journal of Water Pollution Control Federation*, **50**(11), 2477-2484.
- 9) Momii, K. and Y. Ito (2008) Heat budget estimates for Lake Ikeda, *Japan. Journal of Hydrology* 361: 362-370.
- 10) Munk, W. and E. Anderson (1948) Notes on the theory of the thermocline. *Journal of Marine Research*, 7: 276-295.
- 11) Steets B. M. and P. A. Holden (2003) A mechanistic model of runoff-associated fecal coliform fate and transport through a coastal lagoon, *Water Research*, **37**, 589-608.
- 12) Suh C.W., J. W. Lee, Timothy Hong Y. S. and H. S. Shin (2009) Sequential modeling of fecal coliform removals in a full-scale activated-sludge wastewater treatment plant using a evolutionary process model induction system, *Water Research*, **43**, 137-147.
- 13) Thomann and Mueller, 1987
- 14) Tsanis, IK, J. Wu, H. Shen and C. Valeo (2007) Environmental Hydraulics - Hydrodynamic and Pollutant Transport Modelling of Lakes and Coastal Waters, Elsevier.
- 15) WHO (2006) WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater - Volume II, Wastewater Use in Agriculture.

Received: 9 December 2013

ダム湖における糞便性大腸菌群の鉛直分布に関する 数値解析法の開発

濱田康治*, 白谷栄作**, 久保田富次郎*, 人見忠良*

* 水工学研究領域 水環境担当

** 企画管理部 研究調整役

要 約

鉛直一次元のレイヤーモデルによりダム湖内での糞便性大腸菌群の動態を解析した。糞便性大腸菌群を浮遊態と土粒子に付着したものの2種類に分別した。土粒子の沈降を特性曲線法により解析することで、糞便性大腸菌群が土粒子とともに移動・沈降する糞便性大腸菌群の動態を考慮可能とした。集水域に畜産牧場があり降雨時に糞便性大腸菌群の流入が増大するダム湖を対象とした実測値とモデルシミュレーション結果との比較により、提案したモデルがダム湖最深部地点での糞便性大腸菌群数実測値の鉛直プロファイルを良好に再現可能であること示した。また、モデル解析の結果から、糞便性大腸菌群は出水イベント直後を除き湖水中での著しい濃度上昇が見られないこと、浮遊態の糞便性大腸菌群が日躍層と季節躍層の間に低濃度であるが浮遊する傾向があること、土粒子付着態の糞便性大腸菌が流入後速やかに沈降し、出水イベント直後に深部において高濃度で存在する傾向があることが示された。

キーワード：鉛直一次元レイヤーモデル、糞便性大腸菌群、鉛直プロファイル

技 術 資 料

震度を用いた農業用ため池の地震動被害研究

— 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震を事例として —

鈴木尚登* 中里裕臣** 井上敬資***

*企画管理部 防災調整役

**企画管理部

***施設工学研究領域広域防災担当

キーワード：東北地方太平洋沖地震，ため池，地震被害，計測震度，推計震度，強震動生成域，被災リスク

I 緒言

平成23年3月11日14時46分頃、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」と命名した。本地震は、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弱以上など、東日本を中心に日本列島全体が大きく揺れた(Fig.1参照)。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と関東地方の太平洋沿岸部で約56,000haが浸水し、多くの尊い生命と財産が一瞬にして奪われた。大津波以外にも地震の揺れや液化化現象、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害が発生した。さらに農地やため池・水路等農業用施設関連でも全国15県で約6,800億円の被害額(平成24年版農地農業用施設災害統計)が報告され、政府はこの震災の名称を「東日本大震災」とした。

農地・農業用施設に未曾有の津波被害を及ぼした東日本大震災のもう一つの局面は、大きな地震動による農業用施設の甚大な被害であり、特に農業用ため池、ダム、パイプラインなど基幹施設の被害が大きく、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。通常、地震動被害は震央に近いほどその被害も大きくなると想定されるが、本地震では震央に近い宮城県よりも福島県内の方がため池被害を始めとして全般的に大きく、震央から400km以上離れた群馬県内でもため池被害が生じている。さらに本震災では、津波映像を始めとする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数度に亘って

改訂したが、揺れの大きさを示す震度(計測震度及び推定震度分布)については、発震後30分以内に発表され各方面の災害対応態勢が始動されたことで、地震情報をベースとした防災・減災対策や体制作りには重要な役割を果たすことが一般にも再認識された。

このような中、災害対策基本法第2条第5号に基づく指定公共機関である農研機構農村工学研究所(以下、農工研)は、「防災に関する試験・研究・調査の推進と災害対策の技術支援」の一環として、平成7年度から「ため池DBハザードマップシステム」(以下、「ため池DB」という。)に着手することで農村地域のリアルタイム防災・減災対応を目指してきた。本報では、過去のため池に関する地震被害研究成果を踏まえ、本地震の被災実態からため池DBを用いてその要因検証を行った。これまでのため池に関する地震被害研究では、ため池個々の地震の揺れに関する情報が希薄なことから、ため池サイトの地形・地質条件、堤体形状、築造年代、震央に対する堤軸方向、貯水位等の情報を統計的に扱うことで被災リスク要因を求めてきた。本研究では公表された推計震度分布からため池個々の震度を特定、分析することで、これまで明らかにできなかった震度とため池被災の地震工学的関係を検証することができた。また、本研究の過程で広範な震源域で複数の強震動生成域からの地震波が被災ため池の集中エリアを発生させていたことも明らかになった。本報は全国で計測震度及び通信方式が本格化して最初に経験した大地震であり、得られたデータやその分析によって将来の耐震や防災減災対策に貢献することは重要と考え、詳細な分析過程についても報告を行った。

II 研究の背景

2.1 農地・農業用施設等の震災被害

a 東日本大震災の被害額

戦後最大の犠牲者を出した東日本大震災は、平成23年度版防災白書で「農林水産地域中心」とされたように、東北・関東の広範な地域で膨大な数の農地・農業用施設

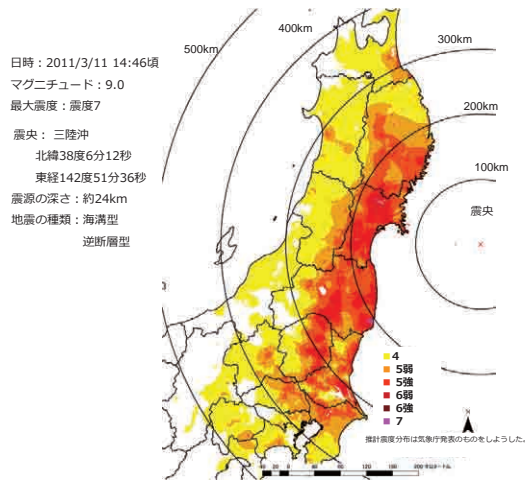


Fig.1 東北地方太平洋沖地震の推定震度分布

Distribution of estimated seismic intensity during the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Japan Archipelago

等が大きな被害を受けた。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)に基づき、災害事件毎に都道府県を通じて各被災市町村からその被害額が報告されている。

平成23年8月23日時点で農林水産省が公表した東日本大震災の農林水産関係被害額は約2兆3千億円で、過去に最大震度7を記録した新潟県中越地震(平成16年)や兵庫県南部地震(平成7年)と比べて、それぞれ約17倍から約25倍と極めて甚大な被害が生じている。被害額の内訳は、津波による漁船や漁港施設等の水産関係被害額が約1兆2,500億円で全体の半分以上、農業関係の農地・農業用施設等被害額約7,900億円(同3分の1)と合わせて農林水産関係全被害額の大部分をこの2分野で占めている(鈴木・中里, 2012)。平成24年版災害統計等により過去20年間の農地・農業用施設被害額と東日本大震災との比較(Fig.2)では、年間平均被害額が約1,000億円程度に対し、今回の震災被害額だけで7倍近い被害額となった。なお、阪神・淡路大震災と新潟県中越地震の農地・農業用施設被害額は、各々257億円と689億円で、約10倍から27倍の被害額になる。

b 大災害時の被害想定と予測

東日本大震災では広範な地域の膨大な数の農地・農業用施設等が大きな被害を受けたが、その被害状況の全容については、津波による被害が甚大であったことや、道路・鉄道等の社会資本インフラとは異なり一般からの関心が薄いこともあって、余り俯瞰されてこなかった。加えて、地震と津波被害が地域的に重複しており、被害状況を要因別に明確に分解できていない。災害対策基本法第八条3項では、「国及び地方公共団体は、災害が発生した時は、すみやかに、施設の復旧と被災者の援護を図り、災害からの復興に努めなければならない」とされ、

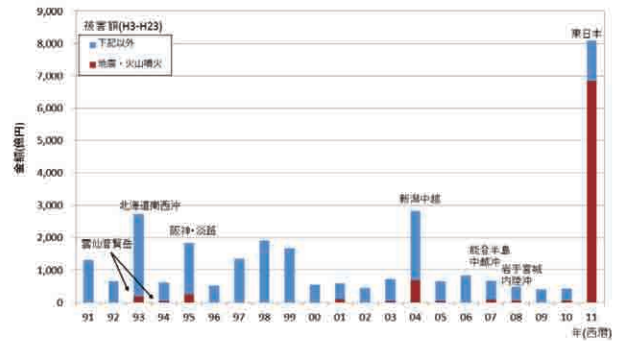


Fig.2 過去20年間の自然災害による農地・農業用施設被害額の推移

Cost of damages to farmland and agricultural facilities for natural disaster events in Japan since 1991

農地・農業用施設被害の的確な把握が、大震災からのスピード感を持った復旧と農村地域の復興を図るための大前提となる。特に生産時期が季節的に拘束されている農業では、復旧のタイミングを逸することは即ち、地域の復興が遅れることを意味する。そのために被災した時点で地域(=市町村毎、都道府県)毎に被害水準を推定することは、その後の復旧計画や支援体制整備ために不可欠の要件となる。特に本震災のように複数の農政局や多数の県が同時・多発的に甚大な被害を受けた場合は、被災状況を勘案した計画性・効率性を持った全国的な復旧支援体制確立に科学的・定量的情報が不可欠となる。

全国に張り巡らされた地震観測網から得られる揺れの程度(震度等)と被災程度を工種毎に定量的に推定することができれば、想定される大規模地震災害に対しても震度レベルに応じた被害水準の推定が可能となり、今後、農村地域における大災害への備えとして極めて重要な役割を果たすことができる。

2.2 地震と震度

a 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基づいており、かつて専門の観測官が体感し、当時から被害目安に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注目し、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、10秒毎に区分され積算時間0.3秒以上満たす加速度を持って以下の計測震度の算定式(1)の加速度となっている(気象庁HP)。

$$I = 2\log a + 0.94 \quad (1)$$

但し、I: 計測震度、a: 積算時間0.3秒以上満たすフィルター処理後の三成分加速度の最大値(gal)。

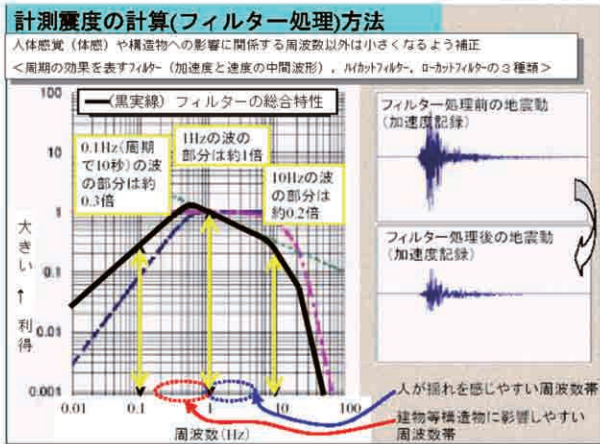


Fig.3 計測震度の計算 (フィルター処理) 方法 (気象庁資料)
Method of measurement seismic intensity (How to filter relevant seismic acceleration)

また、Fig.4に計測震度と加速度の関係を示されている。(a) では同じ計測震度でも地震波の周波数によって大きく異なり、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。

b 推計震度

平成7年の阪神・淡路大震災を契機に全国的に震度計観測網の整備が進み、気象庁は平成16年から国内で最大震度5弱(5-)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、平成18年以降、全国各地の1kmメッシュ推計震度データが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定されている。因みに、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。

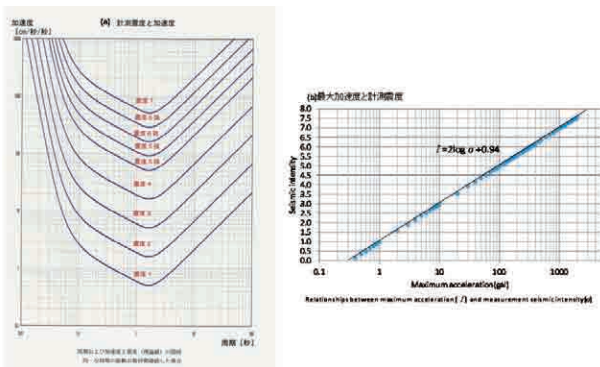


Fig.4 計測震度と加速度の関係 (気象庁資料)

Relationships between seismic acceleration and measurement seismic intensity

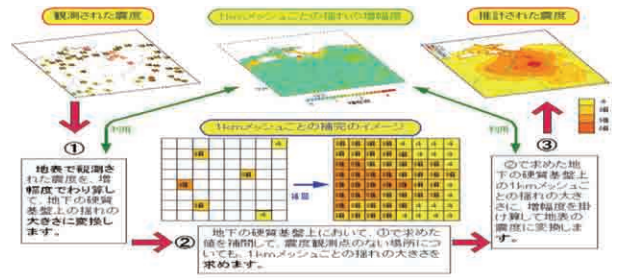


Fig.5 推計震度分布の算出方法 (気象庁資料)
Method of estimated seismic intensity distribution map

2.3 ため池の地震被害研究

a 研究の概観

我が国は、大小様々な地震が頻発し地球上の0.3%の陸域に10%の地震が集中する地震大国とも呼ばれ、昭和期以降、Table 1に示すように大規模な地震動によって多数のため池が被害を被ってきた。近年では兵庫県南部地震が過去最大といわれ、千箇所を超えるため池に被害があったが、これら大規模地震の度毎に被災地調査が実施され研究成果としてまとめられている。これに対し本地震のマグニチュードが桁違いに大きく、全国で2千箇所近いため池が被害を被ったにも拘わらず、被害が複数の農政局と多数の県に及び、特に地震と津波の複合災害を受けた県では津波被害からの復旧が優先され、従来のような行政と研究が一体となり現地での悉皆的調査は実施できないまま、復旧工事を急ぐこととなった。

Table 2に過去のため池地震動被害に関する研究成果をまとめた。これら研究では、被災後に現地調査を行い、被害を受けたため池の形態を個々に整理し、震央からの距離や方向、当時発表された震度の大きさ等も被害要因分析に用いられている。これら研究成果の共通したエッセンスとして、①地形条件、②地質条件、③堤軸方向、④貯水条件、⑤その他地震動関連であったが、このTableから被災リスクの高い要因を包括的に要約すると、ため池サイトは平地と山間・傾斜地の中間にあつて (①

Table 1 日本における大規模地震動によるため池被害
Damages to irrigation ponds due to past large earthquakes in Japan

地震名	発生日月	マグニチュード	ため池被害数
北丹後	Mar. 7,1927	7.3	90
男鹿	May 1,1939	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 26,1893	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. 6,2000	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	1,990

Table 2 ため池の地震動被害に関する研究レビュー
Review of studies on seismic damages to irrigation ponds in Japan

著者名(年)	地名	地形条件	地盤条件	堤防方向	貯水条件	③+④	地震動関連	文献No.
秋置 (1949)	男原 (6.8)	境界部	-	堤防体	-	-	震央・震度・ため池軸方向	1)
永瀬 (1966)	新洲 (7.5)	境界部	第四紀層	直角方向	満水時被害大	震央・震度分布	被害・震度分布・被害ため池分布	2)
守屋 (1969)	十勝沖 (7.9)	-	-	直角方向	-	-	被害は震度4から	3)
伊 (1987)	日本海中部 (7.7)	境界部	第四紀層	-	中水位 (0.4~0.9) 貯水被害大	-	震央距離とため池被災率	4)
山崎 (1989)	日本海中部 (7.7)	境界部 (低相間)	第四紀層 (高相間)	直角方向 (低相間)	中水位<0.4 貯水被害大	震央側	-	統計解析 (5,6)
内田 (1995)	兵庫東南部 (7.3)	-	-	直角方向	-	-	-	7)
藤井 (2005)	兵庫東南部 (7.3)	高標高部	軟地盤 (低相間)	直角方向 (低相間)	-	震央対称	震央距離 (高相間)	統計解析 (8)
小林 (2002)	兵庫(淡路島内) (6.7)	境界部	第四紀層	-	-	-	震央距離とマグニチュード	統計解析 (9)
伊 (1999)	多敷地震事例	-	-	-	-	-	震央距離とマグニチュード	10)
伊 (2001)	鳥取西部 (7.3)	-	-	-	-	-	震度とため池被災率	11)
伊 (2001)	淡路 (6.7)	-	-	-	-	-	震度マップと被災率	12)
伊 (1998)	多敷地震事例	-	-	-	-	-	震央距離とマグニチュード	

注: ①境界部: 山地(傾斜地)と平地との中間位置。②第四紀層: 洪積層・沖積層の地層。③直角方向: 震央方向に対する角度。④貯水位のレベルで0.5が中間水位。③+④: 堤防と貯水位と震央方向との関係(震央側とは堤下流面に震央に向いた場合)

と②に関連), 概ね堤体下流が震央方向を向き(但し, 無関係の場合あり)で, 貯水位が中水位(あるいは空虚)(③と④に関連)の時の被災リスクが大きくなる。また, 地震動に関しては, 震央に近く(震度が一般に大きくなる)(⑤に関連)なる程, 被災リスクが高くなる傾向があることが分かっていた。

b 震度とため池被害

一般に家屋, 堤防, 橋等の建築物に対する地震動被害は, 震度が大きくなるに伴って拡大する。そもそも震度は明治以来我が国における地震動被害を計る指標として使用されており, 気象庁は一定規模以上の地震が生じた場合, 各地の震度を随時速報的に発表し, 初期段階からの災害対応体制の的確な始動に寄与する等, 国民全般にとって地震の揺れを知る最も馴染の深い用語である。平成7年1月の兵庫県南部地震で初めて震度7が適用されたが, 当時は家屋の倒壊率が30%以上とする判定基準等から, その該当エリアを震度7とし, 後日, 「震災の帯」と言われるなど, 地形・地質条件によって特殊な揺れの増幅があった場所とされた。

Fig.6の兵庫県南部地震時の計測震度と家屋倒壊率の関係では, 震度5.0から倒壊被害が始まりその増加に伴って被災率は級数的に増加する。また, 家屋の築造や耐震基準の適用年代に応じて倒壊率には明確な格差が見られる。都市部では多数の地震計が設置されるなど家屋密度も高く, Fig.6のような被災分析が可能であるが, 人口粗密な農村地域に広く散在するため池にあっては, 個々のサイトで震度に応じた被災率を求めることは困難であった。

気象庁は平成8年の震度階見直しに先立って, その前年に計測に基づく震度判定を開始し, 地震情報公表の迅速化を図っている。また, 平成16年には各観測所の計測震度に基づく1kmメッシュの推計震度分布を最大震度5弱以上の地震を観測した際の公表を試行し, 平成20年からは発震後10分以内に震度分布公表を原則として, 推計震度のメッシュデータも同時配信となった。

Table 3は地震動被害に関する文献から揺れやすい地形と地盤とその要因をまとめたが, Table 2に示すため池地震動被害が平地と傾斜地の境界部や軟弱地盤に集中

する傾向が高いことに符合しており, ため池が水田灌溉を目的した施設であることを踏まえると, Table 2でまとめた被害傾向は調和性が高いと考えられる。

III 分析手法と手順

3.1 ため池DBと震度

a ため池DB

ため池DBは, 平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災を契機に従来からの紙ベースの「ため池台帳」を電子化・データベース化を図ったもので, 現在までに全国約12万個のため池が登録されている。ため池のデータ

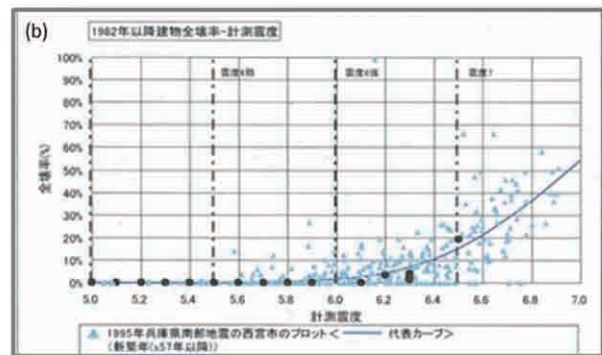
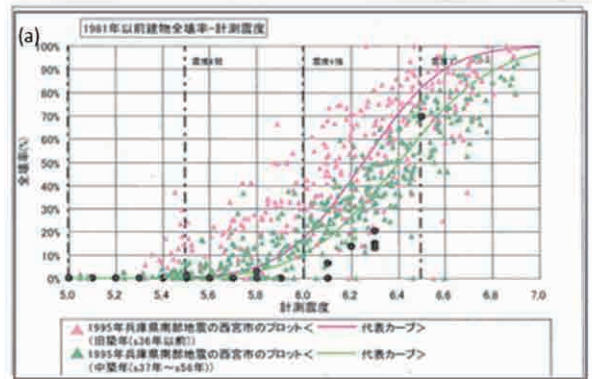


Fig.6 震度と木造家屋被災率 (気象庁資料)

Relationships between seismic intensity and seismic damage ratio to houses

Table 3 揺れやすい地形・地盤とため池立地

Topographical and geological condition to shakable ground and location of earth dams

原理	現象名	揺れやすい地形・地盤	ため池立地条件
<p>図例-11 地震の震度分布が谷間と斜面の傾斜に異なる</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・フォーパス: 谷・地盤の一部に軟弱な地盤がある場合で震度分布が谷間に集中しやすくなる時, 地震動は軟弱地盤の方へ集中しやすくなる。 ・多重反射: 地盤面は傾斜地(谷間)の傾斜地盤に入りやすくなる。強い地震動が谷間に集まりやすくなる。一旦, 軟弱地盤に入った地震動は軟弱地盤に閉じこめられて何層も反射を繰り返して増幅される。 ・なだま: 平野部や谷間の谷間が断崖そばでは傾斜に押し寄せやすくなる。地震動は傾斜地盤では断崖に集まりやすくなる。また, 断崖地盤の傾斜が急峻な部分では, 震動エネルギーが集中して増幅の揺れが大きくなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 軟弱な地盤 窪地 傾斜地盤 傾斜地 崖のふち 	<ul style="list-style-type: none"> 水田灌溉のために増積層が立地 ①氷田(低平地)・窪地=軟弱地盤の傾向が強い ②用水の自然落下のために, 小・高・堤防(傾斜地)・崖のふちが立地 ③上記の①, ②の場所は軟弱地盤の傾向が強い ④通常, ため池基礎は岩盤に接している

※本誌掲載資料(地震)編143
※化野元典著「地震から学ぶ農村工学」P30-34

項目は、名称、所在地、位置座標、施設諸元等であり、現在、ため池台帳代わりに使用される他、Fig.7に示す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る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。

本報ではため池DBを用いて災害査定が行われたため池を「被災ため池」と定義し、各種分析を実施した。また、地震時の1kmメッシュ推計震度はリアルタイム気象情報に基づき、該当するため池毎に照合を行った。なお、ため池DBになかった追加的データについては、福島県及び関係農政局に依頼して収集及び確認を行った。

b 推計震度と平均震度

気象庁はFig.5の通り、観測所の計測震度に基づき1kmメッシュ毎に震度推計を行い、震度4以上の分布を表示している。本報では気象庁が公表する1kmメッシュデータを使用し、当該1kmメッシュ内での推定震度を小数点一位とした震度をエリア内を震度として同定した。また、各ため池推計震度は、所在する1kmメッシュ震度で同定すると共に、一定エリア毎の平均震度は式(2)より算出し、同一1kmメッシュ内に複数の市町村エリアが含まれる場合は、メッシュの中心を含む市町村のエリアとした。

$$\bar{I}_i = \frac{\sum_{j=1}^n I_j}{n} \quad (2)$$

但し、 I_j : 1kmメッシュj内の推計震度、 n : 一定エリアのメッシュ数。

c ため池堤軸の震央方向に対する角度

Table 2に示したようにため池の立地条件の中で堤軸の震央に対する方向が被災率と関係があるとされている。これを検証するために、Fig.8により式(3)及び(4)によってため池毎に堤軸の震央方向に対する角度 ω_i を求めた。因みに、当該分析に供するため池については、各堤軸左右岸をグーグルマップ上で照合し、新たにデータベースに組み込んだ。

$$\omega_i = \alpha_i - \theta_i \quad \alpha_i \geq \theta_i \text{ の時}, \quad (3)$$

$$\omega_i = 360^\circ + (\alpha_i - \theta_i) \quad \alpha_i < \theta_i \text{ の時}. \quad (4)$$

但し、 α_i : ため池iの堤軸と東西方向線に対する角度、 θ_i : ため池iの東西方向線と左岸部への震央からの交角。

d 震源域と震央距離

一定規模以上の地震が生じた場合には、各地域で観測された震度と併せて、当該地震の起震点となる震央と地震の規模を表すマグニチュードが気象庁から発表される(Fig.1参照)。通常、地震の揺れは震源(震央が一般的)からの距離に応じて減衰するために、震央位置と各観測地点までの「震央距離」は、地震被害推定上重要な指標

となっている。一方、Fig.9の観測結果から明らかになったように東北地方太平洋沖地震は広範囲な震源域を有し、複数の強震動を引き起こした強震動生成の存在が想起されおり、本報では地震動被害との関連を分析・検討するために、関係する強震動生成域の起震点からの距離を震央距離とは別に設定することになる。

3.2 地震被害の計量化

a 農地・農業用施設等の被害密度

暫定法に基づき異常な自然災害により一箇所当たり40万円以上の被害を受けた農地・農業用施設等について、被

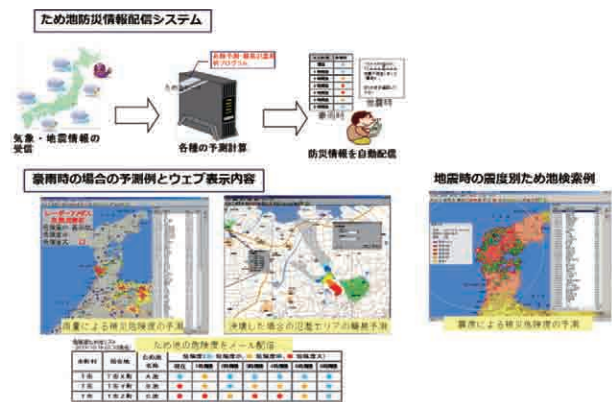


Fig.7 ため池DBハザードマップシステムの概要
Outline of Tame-ike (irrigation ponds) Data Base Hazard Map System

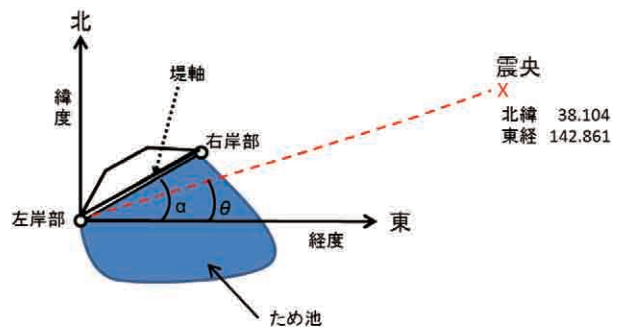


Fig.8 ため池堤軸の震央に対する角度
Angle of dam axis with respect to the epicenter

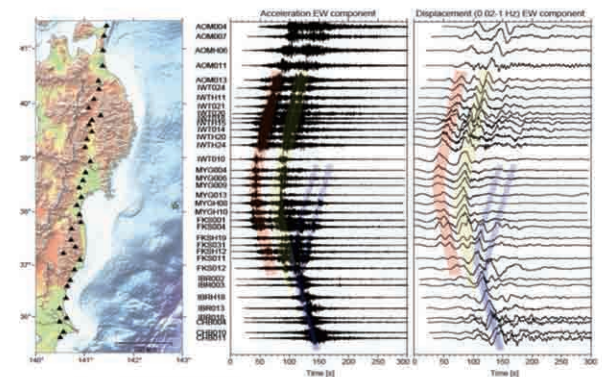


Fig.9 東北地方太平洋沖地震の強震記録
Record of strong seismic motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

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。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害比較は可能であるが、被害総額が市町村の行政区画面積規模に応じて大きくなるため、エリア毎の被害程度を比較することにはならない。特に近年、市町村の広域合併の進展によって農村地域は大きな行政区画に括られ、農業生産インフラの被害程度を市町村単位の被害総額で推し量ることは困難である。

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」で現し、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・農業用施設等の被害（ダメージ）程度を指標化するために、市町村毎の被害額を耕地面積で割り戻し、単位耕地面積（ha）当たりで被害金額を見ることでどの程度の被害水準となるかを比較検討できるようにした。因みに、各市町村の被害水準の数量化は、式（5）を定義することで被害密度 D_i としている。

$$D_i = \frac{C_i}{A_i} \quad (5)$$

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）。

b ため池被害額と被災率

ため池の被害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 1**の東日本大震災に伴う1990箇所の被災ため池数は、2012年4月時点で農村振興局防災課において集計されたものであるが、この段階の被災ため池は、復旧工事のための災害査定前であり、被害規模や被災位置等の公的確認ができていない。このため、ため池被害額と被災ため池数は**Table 4**の復旧工事に伴う災害査定額によった。また、被災率 R_d は式（6）により算定するものとし、分母と分子にはそれぞれ**Table 4**のため池DB数と災害査定ため池数としている。

$$R_d = \frac{N_d}{N_t} \times 100 \quad (6)$$

但し、 N_d ：ある条件下での被災ため池数、 N_t ：左記と同一条件下での（被災及び無被災）ため池数。

3.3 分析手順

a 分析の目的

本報の研究テーマは「ため池の地震動被災リスクを高める要因について震度を用いて地震工学面から究明する」

Table 4 東日本大震災におけるため池被害
Damages to irrigation ponds due to the 2011 off the Pacific coast of 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	1,217	401	1,387	121	548
宮城県	2,535	630	3,492	127	1,188
福島県	3,276	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	10,171	1,961	31,508	564	7,587

ことである。ここで大崎氏の文献を引用し、「地震工学」を「地震学」と「耐震工学」との関係で定義した。まず地震とは、地殻内のある部分に急激なすべり破壊－断層が生じることによって地震波が発生し、それが地殻内をあらゆる方向に伝わる自然現象である。いつどこで、どんな破壊が生じ、どんな地震波が発生するか。その地震波が、どの方向へどのようにして地殻内を伝わっていくのか。このような、主として地震の発生と地震波の伝わり方に関する問題を対象とした学問が「地震学」であり、地球の物理的現象について研究する地球物理学の一環であるとされている。

地震波が地表面に到達すると地面はゆれ動き、人々はそのゆれを感じる。物や建築も揺れ、甚だしい場合は壊れてしまう。このような地震に起因する地面の動きは「地震動」と呼び、地震そのものとは区別する。地震動に対して、人工の構造物－建築・橋・道路・ダム・堤防から、ガス・水道・通信網などのライフ・ラインに至るまで、壊れない設計技術が「耐震工学」と呼ばれている。

地震学と耐震工学の中間点、境界領域にあって、主として地震動の性質を研究し、耐震設計の基礎固めを目的とする学問分野が、「地震工学」である。大崎は「地震工学」をいわば地震と人間との接点にある学問と結んでいるが、地震災害に関する防災・減災研究に不可欠な学問でもある。**Fig.10**に示すように筆者らは三つの関係をため池に適用した概念図を考えた。ここで、地震学と耐震工学については、急速なIT技術等の進歩に伴って、近年、劇的に進化してきたが、これら地震学の研究成果を活用し、

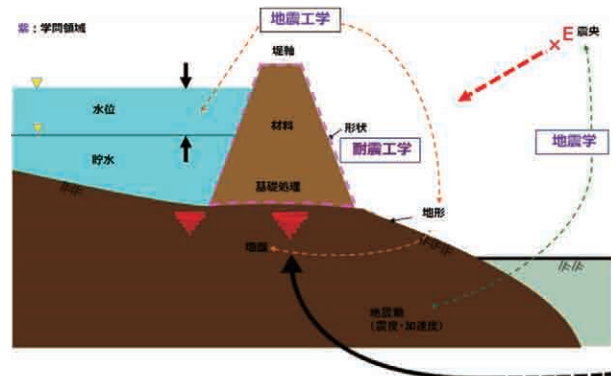


Fig.10 ため池地震動研究の学際性
Interdisciplinary of study on seismic damages to irrigation ponds

地震工学面ではため池に関する耐震性の向上の基礎固めに役立てられているか、さらに農村地域の防災面での活用面にはもっと大きな疑問符が付くはずである。

元来、分析の目的とは仮説の立証であるが、本報では「震度の大きさは、被害の大きさと相関性がある」を仮説とし、ため池の地震動被害に関しては、「震度の大きさに伴ってため池被災率は上昇する」を検証する。具体的にはFig.6のような震度と木造家屋の倒壊率の関係をとため池でも見出すことである。

b 全体の流れ

大規模地震時に震度等の情報を活用して災害対応体制を適確に立ち上げることができれば、農村地域の防災・減災力は格段に向上する。これは東日本大震災における筆者らの教訓、且つ研究する大切な動機であり、これにこだわり続けられる不可欠な「原体験」(有田, 2011)に支えられている。その背景には、過去、人口粗密な農村地域でため池の震度をベースとした被害研究事例がなく、広範な学問領域を有する農業農村工学分野でも震度と農地・農業用施設等被害額を直接比較し、分析・検討することはなかった。一方、東日本大震災で見られた「地震動被害は大きな震度分布の宮城県よりも福島県の方が大きかった」は、これまでの常識と矛盾した事象であった。Fig.11では本研究における分析の構図と流れを図解したが、Q1～Q4の設問に対する分析・考察を順次進める形式で被災ため池に関する要因整理を行った。

IV 個別項目毎の分析結果と考察

本研究ではFig.11に示す検討プロセスに基づき、以下の5項目について個別に分析を行った。以下、各分析項目の狙いとポイントを示し、4.1～4.5の各節に分析結果と考察をそれぞれ述べる。

① 震度と被害密度

農業生産インフラの震災被害額と震度に相関があるかについて (Fig.11の左上), 災害発生後、暫定法に基づき農水省に報告された市町村毎の農地・農業用施設等被

害額と気象庁の震度に基づき検証した。併せて、東日本大震災が巨大津波によって未曾有の被害を被ったことを考慮して、地震動と津波被害を比較した。

② ため池の被災分布 (Fig.11のQ1)

東日本大震災の被災ため池で災害査定が行われた東北及び関東農政局管内7県について、ため池DBを使って推計震度分布と被災ため池の重ね合わせと共に、被災集中地域を絞ることで地形、緯度・経度、堤軸角度と震度の関係を詳細な観察を行い、地震動によるため池被災傾向を明らかにした。

③ 福島県中・南域ため池の被災集中 (Fig.11のQ2)

福島県内ため池の被災箇所が多かった背景には、須賀川市を初めとした福島県中域から県南域で著しく被災集中が生じたことにある。第3節では第2節の考察結果を踏まえ、何故、このような被災集中が発生したか、Q2のホットスポット発生の原因究明を行った。このため、福島県内の被災集中エリアを緯度・経度と震央距離との関係及び当該エリア内のため池被災の特徴を考察した。さらに震央に関連する強震動生成域を特定し、被災ため池との位置関係から地震波伝播について考察した。

④ 被災ため池の宮城・福島県比較 (Fig.11のQ3)

第3節の考察から、福島県中・南域のため池被災には強震動生成域 (strong motion generation areas・略称SMGA)からの地震波による時空間関係を明らかにした。Q3では宮城・福島両県の震央及び各SMGAの起点距離と被災ため池の位置関係及び観測点における計測震度と各SMGAからの推定した地震波到達時刻から、両県の地震動発現形態の違いとため池被災の関係を考察した。

⑤ 震度によるため池被災リスク (Fig.11のQ4)

第1節～4節までの考察結果を踏まえ、Q4では他の被災県を含めて分析・検討を拡大し、地震動によるため池の被災リスクに係る震度の適用方策を考察した。

4.1 震度と被害密度

a 震度と被害密度

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被害(ダメージ)が大きくなると言われている。Fig.12では、式(4)により被災市町村毎の農地・農業用施設等被害密度を算出し、7段階に区分してその分布を示したが、高い被害密度エリアは岩手県、宮城県、福島県、茨城県に集中するなど、Fig.1の東北地方太平洋沖地震(以下、「東北地震」という。)の震度分布とかなり似かよっていることが分かる。また、被害密度は震央に近い太平洋沿岸域で最も高く、一部、内陸側にも被害密度が高い部分が見受けられる。各被災市町村をこの被害密度と式(2)による平均推計震度でプロットした。この際、沿岸域津波被災市町村を青色三角に、内陸側で地震動被害を茶色四角に被災形態に応じた区別を行いFig.13に表示した。その内訳はM9.0を記録した東北地震で影響を受けた東北6県及び茨城、栃木、群馬、千葉、

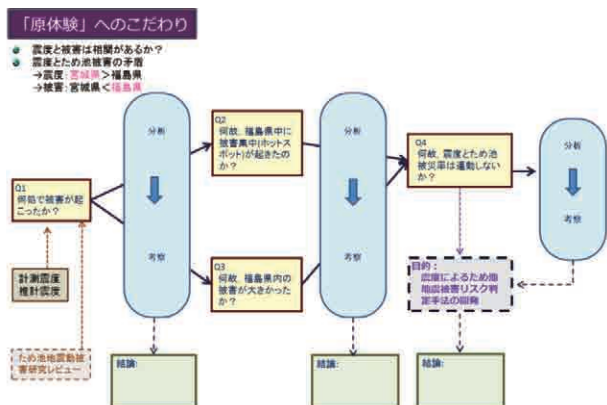


Fig.11 分析の構図と検討プロセス

Composition of analysis of seismic damages to irrigation ponds due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its procedure

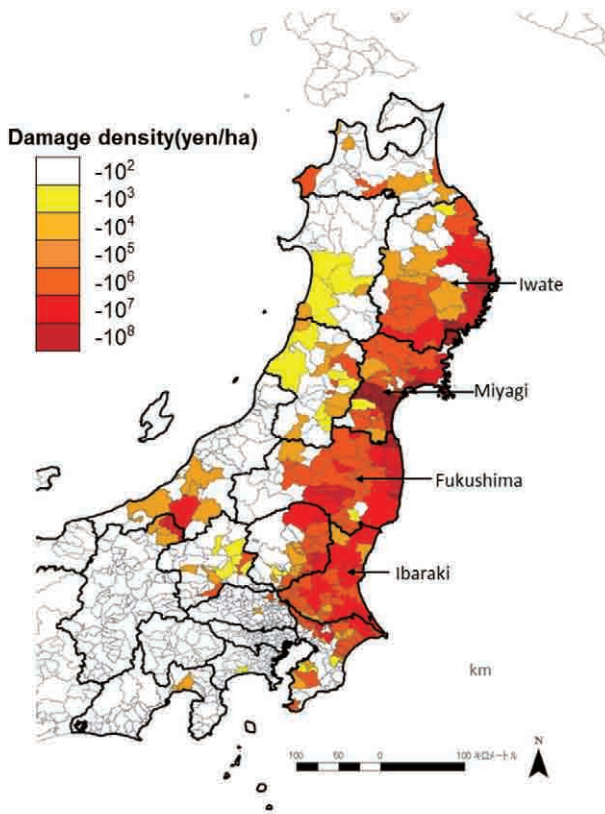


Fig.12 東北地方太平洋沖地震における市町村別被害密度分布図
Distribution map of the damage densities to whole agricultural facilities in Tohoku and Kanto regions due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

埼玉の関東5県の計11県の内、被災密度100円/ha以上及び平均推計震度3.5以上のもので、津波被災47、それ以外(地震動被災)192の合計239市町村を対象とした。図中に主立った被災市町村名を示しているが、これにより以下のことが明らかになった。

- ・津波被害密度を緑色線①、地震動被害密度を赤色線②で近似線を示したが、全体的に大きな揺れを受けた市町村ほど、その被害密度が指数関数的に大きくなる傾向がある。
- ・同じ震度でも津波被災の被害密度が著しく高く(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。
- ・津波被災は震央から半径200km圏内の市町村(Aの黄色破線)の被害密度が著しく大きい。
- ・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、小さい震度にも拘わらず液状化等によって比較的大きな被害密度となっている。

このことから農地・農業用施設等に対する被害は、地震動の大きさ(≒震度規模)に応じてそのダメージ(被害)が拡大すると共に、津波被災の場合は、その震度によって地震動よりも20~50倍に被害レベルが上がる。また、津波被害は震央距離に近く大きな震度を受けた市町村ほど被災密度が指数関数的に増大したことが分かる。

Fig.13の下表は、東北地震で被災した東北6県及び関

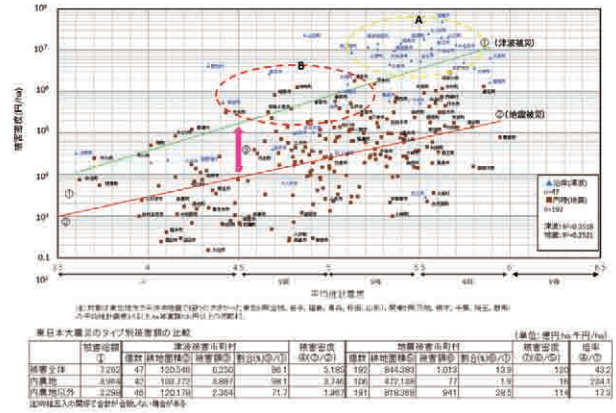


Fig.13 東北地方太平洋沖地震の平均推計震度と市町村単位の被災形態別農地・農業用施設等被害密度

Relationships between mean seismic intensities and damage densities for whole agricultural facilities par municipality during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

東5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市町村だけで被害総額全体の約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、農地被害の約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だけで施設に係る総被害額の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倍の被害密度で、津波被災地も事前に地震による被害があったと想定され、その割合は被害密度全体の概ね2~4%(被害倍数の逆数(1/50~1/25)程度と推定される。

被災形態別被害密度の整理から、津波被災市町村の被害密度の内、3.3%(赤色線②の30倍の逆数)分を地震動によると推定して県全体の地震被害額に合算し、Fig.14で県別の被害額と被害密度を被災形態別にプロットし、青線①と赤線②で被災形態別に回帰線を引いた。さらに過去の大規模地震と比較するために、各災害時の被害総額を赤線上に交差させた。その結果、津波による

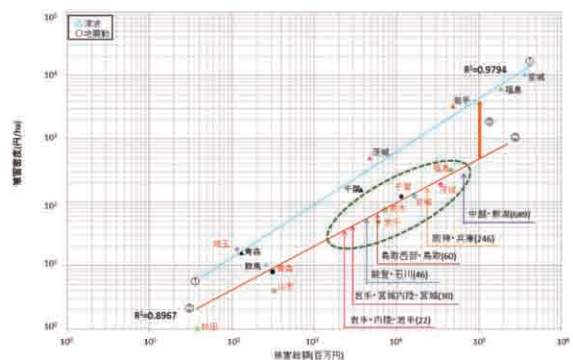


Fig.14 東日本大震災の県単位の被災形態別農地・農業用施設等被害額と被害密度

Comparison between the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and the other large earthquakes on damage densities and damage costs to whole agricultural facilities

農地・農業用施設等の被害は、宮城県、福島県、岩手県の順で被害が甚大で、地震動によるものでは、福島県、茨城県、宮城県、千葉県順で被害が大きくなるのが視覚的に捉えられる。また、県単位の被害密度では津波被害は地震動よりも全体的に約7倍となり、過去の地震被害との比較では、平成16年の新潟県中越地震による新潟県内の被害が福島県を若干上回る程度で、福島県では今回の震災で更に高い水準の津波被害を被っている。同様に地震動被害のみで比較すると、平成7年の阪神・淡路大震災時の兵庫県が茨城、宮城県と、平成12年の鳥取西部地震時の鳥取県が千葉、栃木、岩手県とほぼ同レベルとなっている。いうならば、今回の大震災は地震動被害だけで過去の5大地震が同時に発生し、それを遙かに上回る甚大な津波被害が同時に起こっていたことが理解できる。

b 震度と農地・施設別被災密度

Fig.15は、Fig.13で地震動被害密度が最上位20市町村の平均震度と当該20市町村における農地、ため池、水路、頭首工の被害密度の関係をグラフにした。20市町村の平均震度の範囲、4.4～5.7で全体的に比較的高い震度レベルにある。対象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、震度が大きかった所より被害密度が大きく、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、半数の市町村で被災密度がゼロで全体的にも被害密度が低い。また、水路は震度の大きさに関わりなく被害密度が全般的に大きい。これら3種と比較して、ため池は平均震度と被害密度の相関が見られる。

c 考察

この節では以下のことが、明らかになった。

- 1) 新たな指標として被害密度 D_i を式(5)で定義したが、この D_i を導入することで、津波による被害と地震動によるものとを明確に分けながら、当該区域の平均推定震度 I_i が大きくなるに従って D_i が大きくなることが明らかになった。また、この指標によ

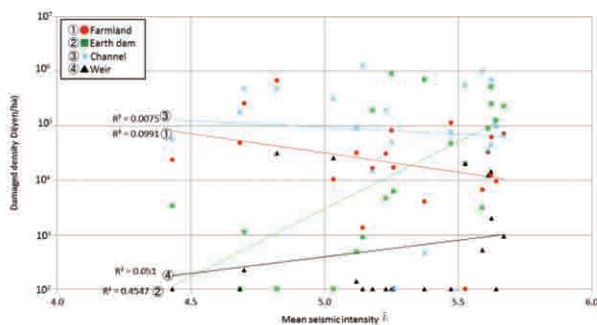


Fig.15 東北地方太平洋沖地震の平均推定震度と農地・ため池・水路・頭首工の被害密度

Relationships between mean seismic intensities and damage densities for farmland, irrigation ponds, channels and weirs in 20 serious damaged municipalities due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

れば、津波による被害密度は、地震動によるものの概ね40倍になると考えられる。

- 2) 地震動による被害密度を県別に集計整理することで、過去の地震動被害との比較が可能で、大震災時の災害対応及び復旧支援体制について経験を踏まえた想定ができる。
- 3) 農地及び農業用施設等の地震動被害は震度が大きくなるに従って全体的に大きくなるが、その被害程度は工種別に異なっていた。特にため池の地震動被害は震度との相関が比較的高かった。

4.2 ため池の被災分布

a 推計震度と被災ため池の分布

ため池DBに登録された被災6県のため池の場所をFig.16でGISの推計震度分布上に緑色でプロット(無被災)し、その上でTable 4の復旧工事査定額を大小6区分として紫色(被災)で示した。因みに、東京電力福島第一原子力発電所事故の関係により、災害査定が実施されおらず、関連する地域のため池については被災区分をしていない。過去の地震被害研究 (Table 1, 文献4), 8), 9)) によれば、震央に近いため池ほど被災率が高く、個々の被害も増大するが、東北地震の被害は必ずしもその形態になっておらず、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、震央から半径200km圏内であっても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特定エリアに被災が集中しており、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顕著である。本節では、追って福島県中域の被災集中エリアに絞った検証を行う。

被災数が多かった宮城・福島両県のため池について、

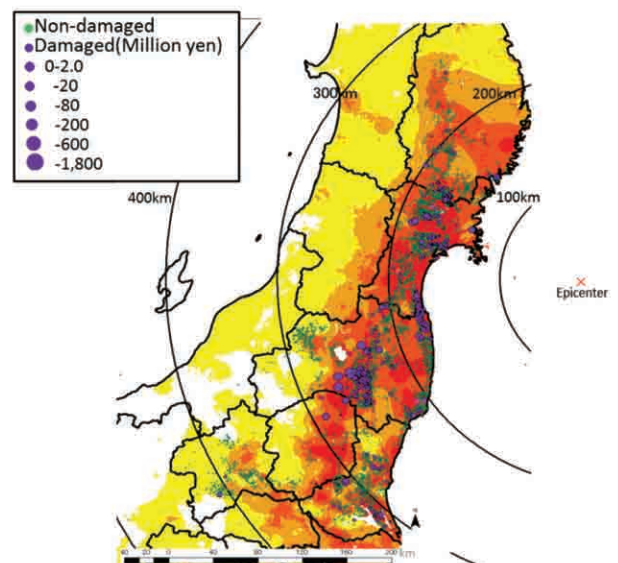


Fig.16 東北地方太平洋沖地震における被災ため池の分布
Locations of damaged and non-damaged irrigation ponds in Iwate Miyagi, Fukushima, Ibaraki, Tochigi and Gunma Prefecture due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

各ため池サイトの1kmメッシュ推計震度と照合し、小数点一位震度毎に被災（災害査定有り）と無被災（災害査定なし）に分けてため池数を集計（但し、原発事故関連で被害調査が実施されていない市町村域分のため池は除外）したものをFig.17に示す。この図からため池の震度と被災率の関係が分かるが、同じ地震に対して両県では異なる性状を見て取ることが出来る。宮城県域内は震央に接近し福島県内よりも全般的に震度が大きく、その大部分が震度5.4から5.7の範囲にあり、ため池数が最大なのは震度5.5であった。一方、震央から少し離れた福島県では、震度別のため池数は全体的にフラットでその大部分が震度5.0から6.1の範囲にある。

宮城県内のため池被災は震度4.8から、福島県では震度4.9から始まり、宮城県の震度別被災率の曲線は全体的にフラットで明確なピークが見られず、福島県では震度5.7と6.0でピークが見られ、最高被災率は震度6.0で約30%である。宮城県では全体的にため池震度は大きいものの、福島県内ため池の平均被災率が10%超と宮城県の5%よりも高率となっている。

Fig.18は宮城・福島両県のため池被災市町村毎の被災ため池総数とその被害総額(災害査定総額)の関係である。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、全体的に福島県内で被災した個々のため池の方が宮城県内よりも大きなダメージを受けていたことが理解出来る。

b 被災ため池の分布形態分析

福島県では須賀川市内で藤沼湖、中池、本宮市内で青田新池の3つのため池が東北地震に伴い決壊した。ここでは福島県内のため池被害にフォーカスして考察を進める。まず、Fig.19では気象庁が発表した推計震度分布を小数点一位毎に表示したGISマップ上に被災ため池と無被災ため池の位置を重ね合わせた。また、Fig.20では県中域の地盤構造をシームレス地質図で示した。これらの

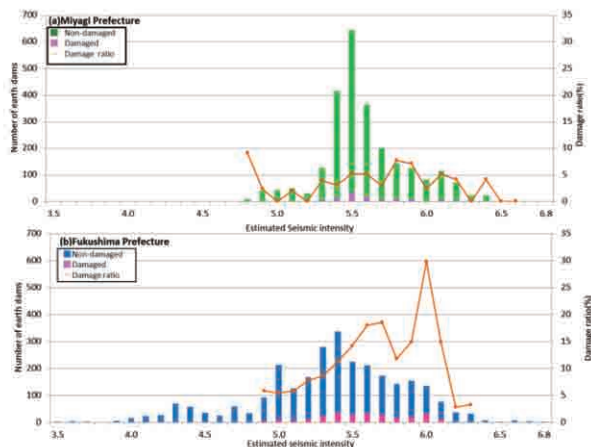


Fig.17 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県の推計震度と被災ため池

Relationships between estimated seismic intensities and damaged irrigation ponds in Miyagi and Fukushima Prefecture due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

図から大きな地震動が、沿岸域と内陸部の2ゾーンに分かれて発生しており、その間にある阿武隈山地では、地震の揺れは全体的に小さくなっている。特に阿武隈山地と郡山盆地の境界部に震度規模の大きな格差を生じ、さらに盆地の西側沿って棚倉構造線が存在することで、地震波による揺れが比較的軟弱とされるこの部分で増幅していることが見て取れる。そのため、福島県中域では地形的・地質的条件の下で震度の二つのピークとため池被災

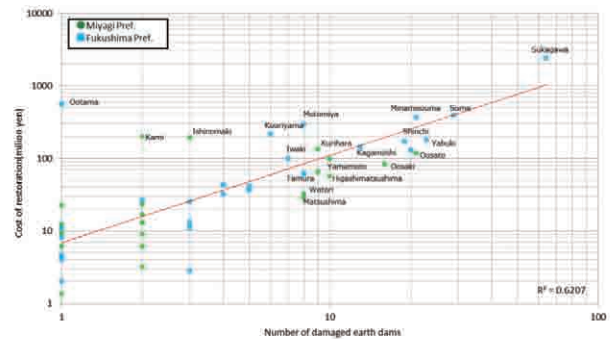


Fig.18 東北地方太平洋沖地震の市町村別被災ため池数と被害総額

Relationships between number of damaged irrigation ponds and total costs of restoration of each municipality due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, in Miyagi and Fukushima Prefecture

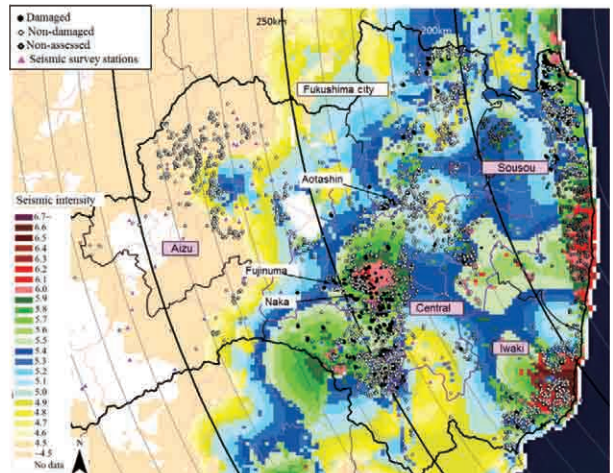


Fig.19 東北地方太平洋沖地震の福島県内における推計震度と被災ため池の分布

Distribution of estimated seismic intensity during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and damaged & non-damaged irrigation ponds in Fukushima Prefecture

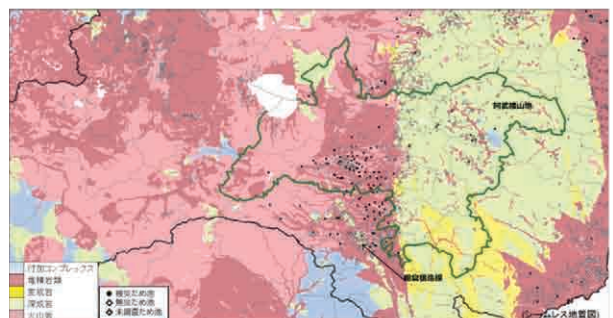


Fig.20 福島県中域の地盤構造
Geological ground structure in Fukushima Prefecture

災率の二つのピークが生ずると考えられる。一方、宮城県内では大きな震度ではあったものの、福島県中域とは異なる地形・地質的条件により必ずしも深刻なため池被災率には至らなかったと考えられる。

被災率が最も大きかった福島県中域を見るために、東経140.00 - 140.80までの70.9km、北緯37.00 - 37.50までの55.7kmの範囲に区切ってため池の被災状況整理をした。**Fig.21**は**Fig.17(b)**の福島県内分から県中域分だけを抜き出して表示したものである。**Fig.19**と**Fig.21**から震度5.4と5.9でため池数のピークが見られることから、この区域では震度パターンが概ね二つに分けることができる。その一つは、山地で比較的低い震度、もう一つは盆地での高い震度である。被災ため池数は震度増大に伴って徐々に増加し、被災率Rdは震度6.0で40%に達していた。**Fig.22(a)**に福島県中域の標高横断面図、同(b)

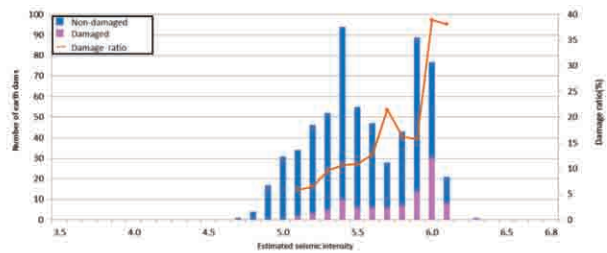


Fig.21 東北地方太平洋沖地震の福島県中の推計震度と被災ため池

Relationships between seismic intensities estimated at irrigation ponds site and damages of earth dams in Central Fukushima by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

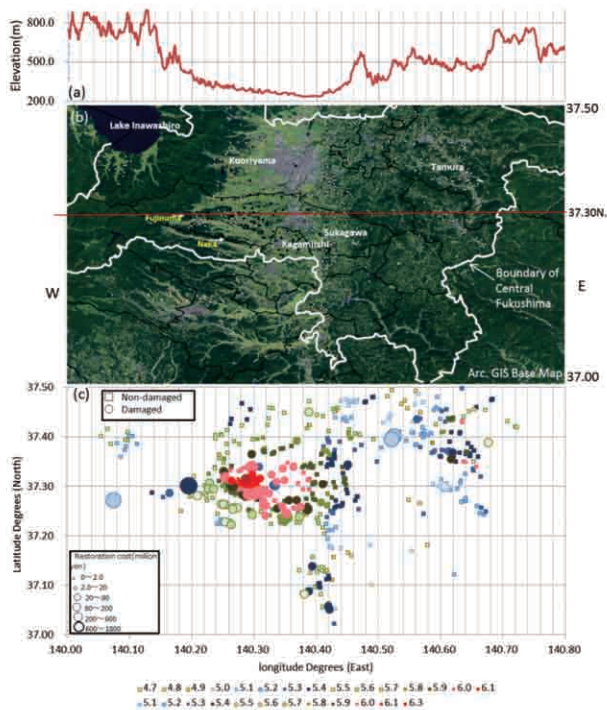


Fig.22 東北地方太平洋沖地震の福島県中被災ため池の分布 Relationships between locations of irrigation ponds and damages estimated from restoration costs in Central Fukushima by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

の衛星画像 (Arc.GIS Base Map) 上に被災と無被災ため池分布、同(c)で被災ため池位置を災害査定額区別で示した。被災ため池は北緯37.3度、東経140.30度のエリアに集中しており、深刻なダメージを受けた多数のため池が極めて狭い範囲に集中し、現地の状況からその大半が水田に隣接する小高い傾斜部にあり、そのエリアで高い震度となっている。

Fig.23は、震央に対する堤軸角度 ω_i とため池の経度位置の関係を示しているが、被災ため池の大半は概ね東経140.30度に位置し、地形的に小高い山と平地の境界部にあたる場所である。また、堤軸角度 ω_i は240 - 360°範囲が大半(全体の3分の1で6割を占める)であり、受益水田に対し多数のため池が堤体下流斜面を震央に向けていた。

Fig.24のため池の経度位置と震度の関係では、東経140.45度付近を転換ラインとして東側に震度の低いグループと西側の高いグループに分けられる。さらに震度の低い東側では震源域から離れるに従って地震波動減衰によって震度は徐々に小さくなり、一旦、東経140.55度の付近で震度4.8で底となるが、西に向かって平地(盆地)が広がるに伴って段々に震度が大きくなり、今度は東経140.30付近で震度6.3のピークとなる。このようなことから**Fig.21**では、ため池数において2つの震度ピークが見られたと考えられる。

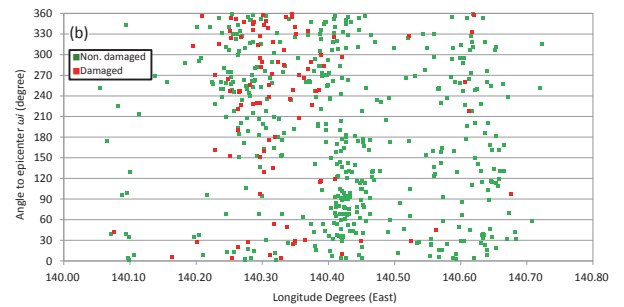


Fig.23 東北地方太平洋沖地震の福島県中ため池の経度と堤軸方向

Relationships between angle of dam axis with respect to the epicenter and longitudinal locations of irrigation ponds in Central Fukushima

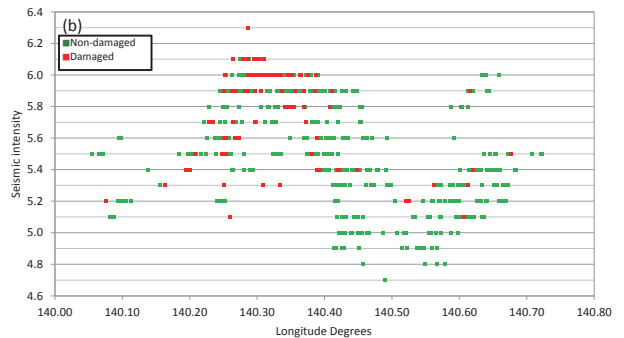


Fig.24 東北地方太平洋沖地震の福島県中ため池の経度と推計震度

Relationships between estimated seismic intensities during the Tohoku Earthquake and longitudinal locations of irrigation ponds in Central Fukushima

ため池の震央に対する堤軸角度 ω_i と震度との関係をFig.25に示したが、震度が5.4以下の時、 ω_i 角度が30-180°では被災したため池は皆無であった。一方、震度が6.0を超えると被災ため池の ω_i 方角範囲が広がり、この図からは角度と被災の関係は確認できない。その点を明らかにするために、Fig.26を示した。

ため池の震央に対する堤軸角度 ω_i と震度との関係をFig.25に示したが、震度が5.4以下の時、 ω_i 角度が30-180°では被災したため池は皆無であった。一方、震度が6.0を超えると被災ため池の ω_i 方角範囲が広がり、この図からは角度と被災の関係は確認できない。その点を明らかにするために、Fig.26を示した。

Fig.26は福島県中域のため池被災率 R_d と堤軸の震央方角 ω_i との関係図である。 R_d の値は、震度5+（震度5.0-5.4）、震度6-（震度5.5-5.9）、震度6+（震度6.0以上）の3震度階に区分し、堤軸角度の値を以下の6等分にしてレーザグラフに整理した。まず、グループa

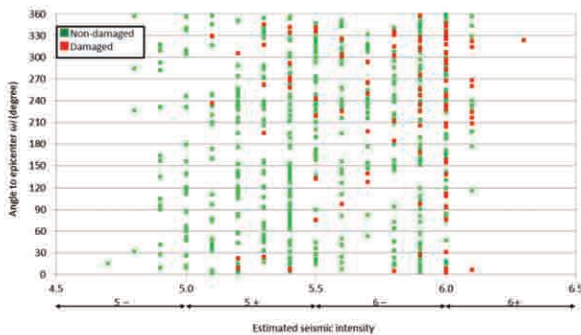


Fig.25 東北地方太平洋沖地震の福島県中ため池の震度と堤軸方向

Relationships between angle of dam axis with respect to the epicenter and estimated seismic intensity during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Central Fukushima

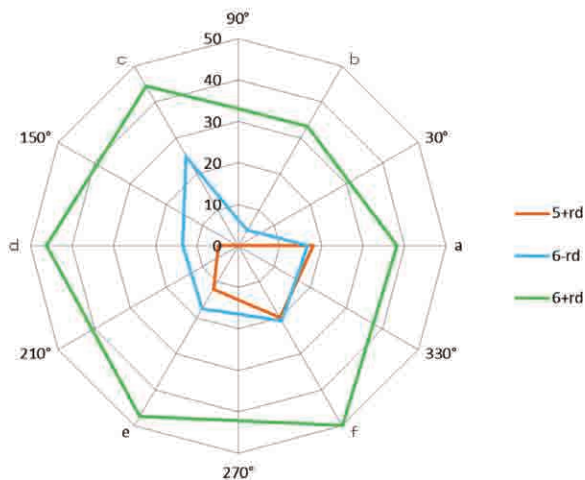


Fig.26 東北地方太平洋沖地震の福島県中域ため池における堤軸角度毎の震度階別被災率

Relationships between damage ratio based on estimated seismic intensity during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and angle of dam axis with respect to the epicenter in Central Fukushima

はため池震央方向角度 ω_i が0°を中心として、0°-30°及び330°-360°の範囲にあるもので、同様にグループb~fまで全体を各60°毎に6区分してグルーピングを行い、各角度のグループ毎に震度階毎の被災率 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、震度階級5+ではb及びc角度グループで R_d がゼロであった。また、同じ震度階5+のグループでもa、e及びfの R_d は比較的高く(10%以上)、その他の3角度グループでは5%以下の低い被災率であった。さらに、震度階級6-でグループ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。反対方角側にあるグループbでは、震度階6-でも R_d は5%程度で、このグループだけは震度階級が6+に上がっても R_d は30%程度で、他のグループの R_d が概ね40%を超える状況になっている。即ち、堤体下流斜面が震央方向に向いているグループでは全般に被災率が高くなることから、ため池貯水面が震央に向かっている場合は、そのリスクは小さくなる傾向があると考えられる。

c 考察

第2節では東北地震でため池被害が大きかった宮城県と福島県を比較し、被災数の大きかった福島県で特に被災ため池が集中した県中域について考察を行った。ここでは、両県比較と地形・地質的条件に分けて被害形態の総括を行う。

(1) 両県の被害比較

- 被災ため池は両県とも高い震度の区域内にある場合に起こっている。因みに、宮城県では震度4.8から、福島県では震度4.9から被災事例が見られ、被災が始まる震度は両県ともほぼ同レベルであった。
- 被災ため池が集中したエリアは、宮城県北部、亘理町・山元町から南相馬市（同市南部は原発事故後、立ち入り制限区域になり被災状況が未調査）までの県境を跨ぐ沿岸市町エリアと福島県中域から県南区域であった。
- 震度は宮城県内が全般的に大きいのが、被災率は福島県が宮城県の約2倍と大きく上回っていた。
- 福島県内のため池被害レベルは、被災数が多い市町村ほどため池個々の被害程度が高くなっていた。
- 震度とため池被災率の相関は、宮城県では明確な上昇傾向は見られないが、福島県では震度に伴い被災率も大きくなり、震度6.0では概ね30%に達した。

(2) 地形・地質条件と被害

- ため池の被災は、揺れ(震度)が小さくなる硬い岩盤(山地・丘陵・傾斜地)と震度が大きくなる軟弱な堆積層(平地)の両方が混在していた場合に多く発生していた。
- 特に福島県中域では、震度分布に地形・地質構造に伴う大きなギャップが見られ、特に震度6.0を超えるエリアで被災が集中していた。
- 福島県中域では被災ため池が特定の緯度・経度地点に集中すると共に、震度に応じてため池被災率 R_d が上

昇し、震度6.0では被災率は40%に上った。

- ・福島県中域の被災ため池は地形条件（水田が存在する平地と傾斜の関係等）から、堤体下流面が震央に向いている場合が多くなるが、震度6±以上ではその傾向は不明瞭である。

(3) ため池の地震動被災要件のまとめ

- ・福島県中域の地盤構造（Fig.20）から、堆積層が阿武隈山地と北西-南東方向に走行する棚倉構造線に東西から挟まれていた。また、多くのため池が郡山盆地の水田に近接して存在することを考慮すると、福島県中域の地震動によるため池被災要因は、前出の Table 3 から Table 5 のように整理できる。即ち、
- ・震央距離に近いほど地震波の影響は大きくなるが、地形・地質的に地震波の集中や閉じ込め現象が伴わない場合は、ため池被災率は大きくなる。
- ・ため池が山地・傾斜地と平地の境界部にある等の地形条件を有する場合、その被災リスクは高まる。また、地震波の方向と山地と平地の地形的並びによっても被災リスクが異なる。
- ・地質的な硬軟ギャップが大きいほど、また軟弱な地盤にあるため池ほど被災リスクは大きくなる。
- ・ため池被災リスクをその立地条件で検証する場合には、広がりを持ったゾーン（マクロ）面と堤軸向き等のポイント（ミクロ）の両面から見る必要がある。

以上を要約すると、県中域の盆地が硬い地盤に挟まれ、入射した地震波を溜め込み易い条件下で、多くのため池が地震動の増幅し易い傾斜部に立地する等の複数の被災リスク要因が重複していた。

4.3 福島県中域ため池の被災集中

a ため池被災集中域の特定

東北地震で福島県内の被災ため池の半数以上が県中域に集中していたことは、Fig.27の緯度・経度分布（被災ため池が殆ど無かった会津地方は一部分のみ）とFig.28の地域別推計震度別ため池被災数で確認できるが、福島県中域から繋がる南域でも多数のため池が被災していた。

Table 5 東北地方太平洋沖地震の福島県中ため池の被災集中要因まとめ

Element factors of causing intensive damages to irrigation ponds in Central Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

高い被害リスクの条件	揺れやすい条件	関連性	被災ため池サイト	被災要因
①地盤動 ➢震央距離	・震央に近い	△	・特定の震央距離内に被災集中	➢近い震央距離でも以下の条件が重なって大きな地震動となった
②地形条件 ➢山と平地の境界	・盆地 ・水田と斜面	△	・堆積地から山地に ・(山地から)盆地へ	➢山地と盆地間立地より軟らかい地盤へ地震波が集中的に曲げられた(フォーカス現象)
③地質条件 ➢第四紀層(堆積層)	・堆積地盤 ・硬盤の近接	◎	・多くは丘または傾斜地に立地 ・第四紀層(堆積層)	➢盆地と構造線との間に立地：地震波が軟弱地盤中に閉じ込められ地盤の共振及び揺れの長期化した(多重反射)
④堤軸方向 ➢堤体下流が震央に直交方向	・傾斜地 ・東側の水田向き	◎	・西側に双葉断層、棚倉構造線の存在 ・被災は堤体下流が東向きのため池に多発	➢傾斜地に立地：軟弱地盤の端部(層)の薄くなる部分では震動エネルギーが集中した(なごみ現象) ➢阻し、震度6強では堤軸方向性との関連が稀薄化

県南域内のため池ではFig.28から震度6.0以上のものが殆どなく、被災分も震度5.1から5.9の範囲にその大半が存在する。

Fig.27とFig.28から震央距離に近いことが、必ずしもため池の震度及び被災上昇に直結しないことが理解できた。具体的にどのような場所で被災したか、Fig.29とFig.30のため池震央距離と経度及び緯度の関係で見ることができる。Fig.29では、被災ため池が震央距離170kmから230kmの範囲で相双域北部と県北域が経度的に並んでおり、同様に170kmから270kmの範囲に相双域南部から県中域、県南域、会津域へ、少し外れて190kmから230kmの範囲にいわき域の被災ため池が並んでいる。また、県中及び県南域では被災ため池が震央距離240km-250kmの範囲に際立った集中が見られ、Fig.30の緯度関係では北緯37.10度から37.30度の範囲に被災が集中していた。

Fig.31では福島県中・南域のため池をフォーカスし、横軸に震央距離を、縦軸に東経と北緯を各々として被災ため池の集中エリア特定を行った。ここで被災ため池は図(a)より震央距離240km-250kmの範囲内にあり、東

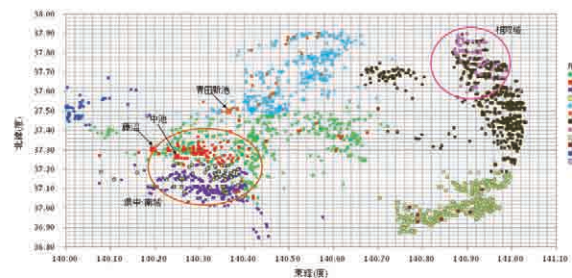


Fig.27 東北地方太平洋沖地震の福島県内被災ため池の緯度・経度分布

Latitude and longitudinal distribution of damaged earth dams in Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

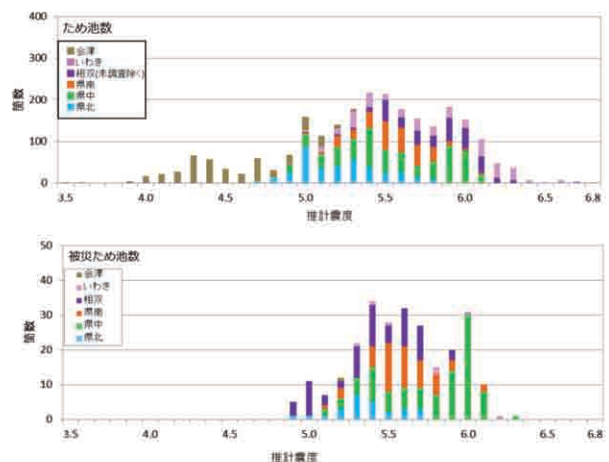


Fig.28 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の地域別推計震度と被災数

Relationships between estimated seismic intensity and damaged irrigation ponds in each district of Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

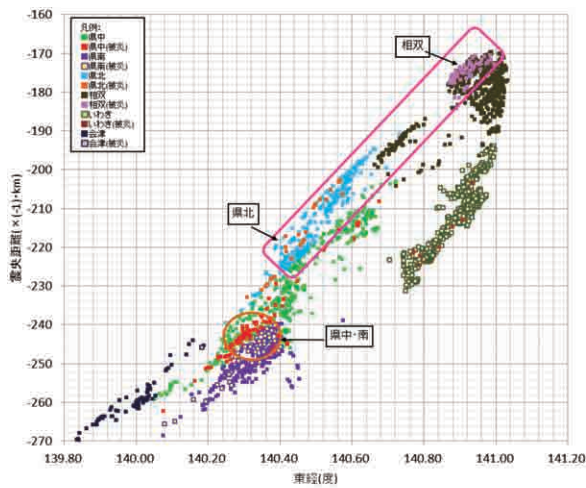


Fig.29 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の震央距離と経度位置
Relationships between 1 distance from epicenter and longitudinal location of irrigation ponds in Fukushima Prefecture

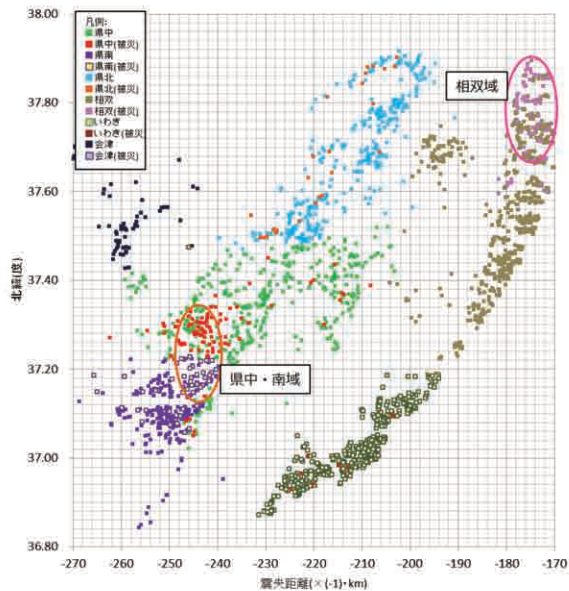


Fig.30 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の震央距離と緯度位置
Relationships between distance from epicenter and latitude location of irrigation ponds in Fukushima Prefecture

経 140.24 度 - 140.40 度 (東西約 14km), 図 (b) より北緯 37.15 度 - 37.33 度 (南北約 22km) の約 300km² のエリア内集中していた。因みに、決壊した中池は集中エリア内に、藤沼湖は近接していた。

被災のバラつきを見るために、Fig.32(a) では震央距離を踏まえて6ブロックに分け、それぞれの被災率を(b)で比較した。式(6)の被災率 R_d は④ブロックで70%の鋭いピークを形成しており、同じエリア内でも⑥ブロックでは被災率は10%程度とかなりバラツキが見られた。また、震度は北緯 37.30 度、東経 140.30 度を中心にピーク震度 6.3 となり、この部分での被災率はかなり高くなっている。Table 6 は集中エリア内のため池震度毎に被災

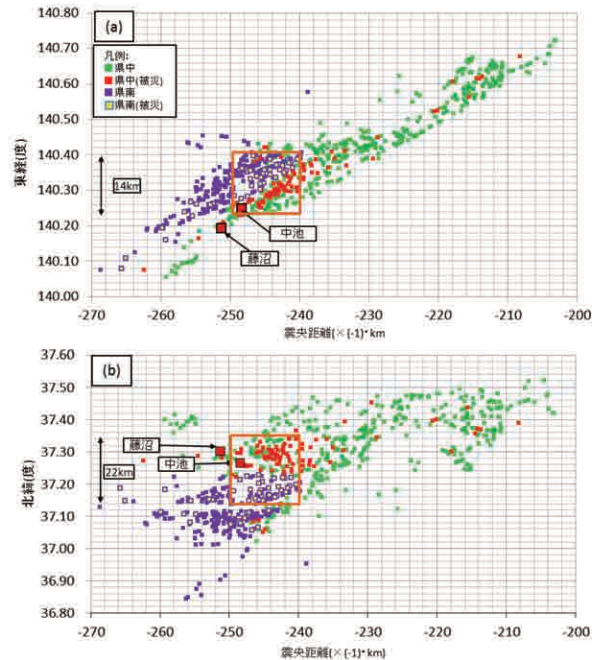


Fig.31 東北地方太平洋沖地震の福島県中・南ため池の震央距離と経度及び緯度
Relationships between distance from epicenter and latitude and longitudinal location of irrigation ponds in Central and Southern Fukushima

率をまとめたが、震度が高いほど全体的に大きな被災率となる等、震度と被災率には相関が見られるものの、震度 5 + レベルでも高い被災率が散見され、震度の大きさだけでため池の被災を判断することはできない。Table 7には集中エリアに関する市町村毎に被災ため池の状況を整理した。集中域内の被災ため池数は96箇所、丁度半数が須賀川市内のものであった。また、集中域内で最も被災率が高いのは矢吹町で第2位の鏡石町までが被災率5割以上である。いずれの市町村も集中エリア内のため池被災率が大きくなっており、特にこのエリアに被災ため池が集中したことを物語っている。

b 強震動生成域と福島県内ため池被災集中

被災ため池は必ずしも震央距離に応じた分布とならず、福島県中・南域で特定震央距離内の狭いエリアに集中していた。また、被災集中エリア内で最大震度 6.3 のホットスポットが発生する等、複数断層破壊面からの地震波が交錯することによる揺れの増幅現象ではないか考えることができる。一方、東北地震では平成7年の阪神・淡路大震災を契機に気象庁や自治体等によって急激に増設された多数の地震計(強震加速度計・震度計)から観測データが得られ、京都大学防災研究所の浅野ら(2013)は本震源域内に4つの強震動生成域(SMGA)を報告した。Fig.33では4箇所のSMGAとその起震点及び起震時間差等のパラメータを論文より抜き出したものである。SMGAは東北地震の震源域が東西200km、南北500kmの広範な領域の中にあつて、特に陸域に大きな地震動を引き起こした4つの領域であり、震災直後からFig.9等でも4つの強震動記録は報告されていた。これら4つの

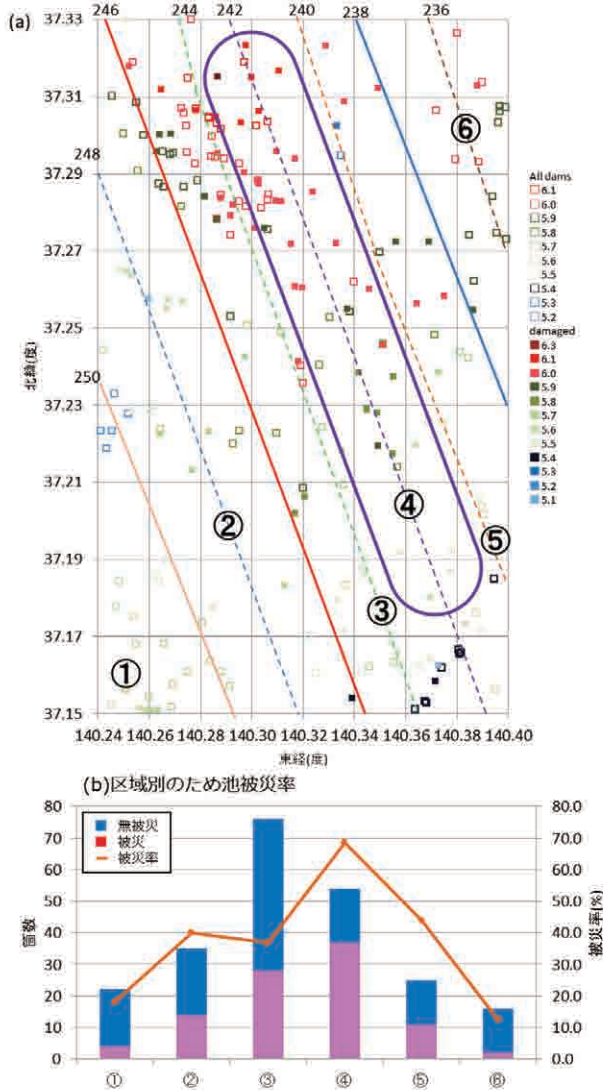


Fig.32 東北地方太平洋沖地震の福島県中・南被災集中エリア内の推計震度とため池被災率

Distribution of estimated seismic intensity and damage ratio of irrigation ponds in intensive damaged area of Central and South Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Table 6 東北地方太平洋沖地震の福島県中・南被災集中エリア内ため池の推計震度別被災率

Damage ratio of irrigation ponds based on estimated seismic intensity within intensive damaged area in Central and Southern Fukushima due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

震度階	全池	被災池	被災率	震度階	被災率
6.3	1	1	100	6強	48.6
6.2	0	0	0		
6.1	17	8	47.1		
6	56	27	48.2		
小計	74	36	48.6		
5.9	36	12	33.3	6弱	40.7
5.8	19	8	42.1		
5.7	29	9	31		
5.6	22	10	45.5		
5.5	29	16	55.2		
小計	135	55	40.7		
5.4	10	2	20	5強	26.3
5.3	2	1	50		
5.2	5	0	0		
5.1	2	2	100		
小計	19	5	26.3		
合計	228	96	42.1		

Table 7 東北地方太平洋沖地震の福島県中・南被災集中エリアの市町村別ため池被災率

Damage ratio of irrigation ponds in each devastated municipality of Central and South Fukushima due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

市町村	全域			集中域			割合	
	ため池数 ①	被災数 ②	被災率 ②/①	ため池数 ③	被災数 ④	被災率 ④/③	ため池数 ③/①	被災率 ④/②
郡山市	168	6	3.6	1	0	0	0.6	0
須賀川市	193	61	31.6	110	48	43.6	57	78.7
鏡石町	30	13	43.3	26	13	50	86.7	100
天栄村	20	4	20	11	3	27.3	55	75
石川町	26	1	3.8	1	0	0	3.8	0
白河市	227	20	8.8	13	5	38.5	5.7	25
泉崎村	29	1	3.4	14	1	7.1	48.3	100
中島村	19	5	26.3	14	4	28.6	73.7	80
矢吹町	46	23	50	38	22	57.9	82.6	95.7
合計	758	134	17.7	228	96	42.1	30.1	71.6

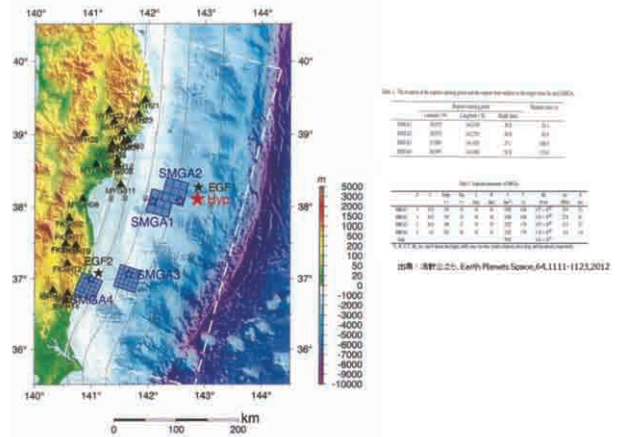


Fig.33 東北地方太平洋沖地震による強震動生成域 (SMGA) と起震位置

Location of strong motion generation areas (SMGA) and their rupture starting points during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

SMGA 領域には震央と同じような起震点を有し、浅野らによって緯度・経度及び時刻が観測データから高い精度で推定されていた。因みに、起震順番は SMGA の後に付いた数字順で、最初の2つが宮城沖で震央の東側、後の2つは福島沖となり、SMGA1 起震から SMGA4 起震までに約2分間のタイムラグがあった。

福島県中・南域の被災集中エリアにおいては、震度ホットスポットに対して震央から距離 240km - 250km の範囲で交点を結ぶような断層破壊起点 (ここでは「SMGA 起震点」) を別方向から設定する必要がある。Fig.33 で震央と SMGA1 及び SMGA2 は同一方向にあることから、SMGA2 との起震時間差 41 秒の SMGA3 起震点から被災集中エリアとの位置関係を Fig.34 に示した。因みに、震央から被災集中エリアまでの最短距離は 233km、SMGA3 の起震点からは 112km となる。

福島県中域内の各ため池から震央及び SMGA3 起震点 (以下、「S3」という) 距離を算出し、被災ため池を赤点、無被災分を緑点でプロットし、被災分だけで最小二乗法で近似線を求め Fig.35 に示した。ここで S3 距離は横軸 (x) に震央距離を縦軸 (y) として、被災分の近似式は $y=0.9983x+120.66$ 、決定係数 (R^2) は 0.7858 であった。決壊した中池及び藤沼湖は近似線上にあり、集中エリアから離れる程、近似線からのバラツキは大きくなる

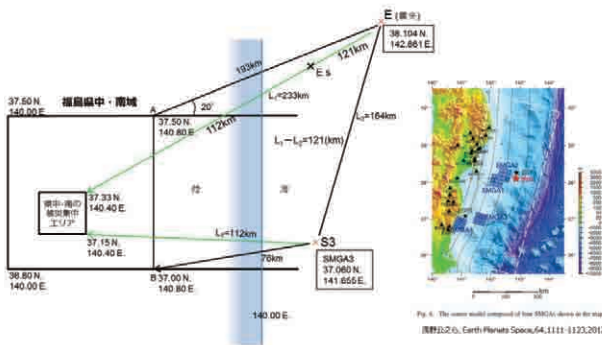


Fig.34 福島県中・南域の被災ため池集中エリアと東北地方太平洋沖地震の震央及び強震生成域 (SMGA3) 起震点の位置

Location of the intensive damaged area of Central and South Fukushima, the starting point of SMGS3 and the epicenter during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

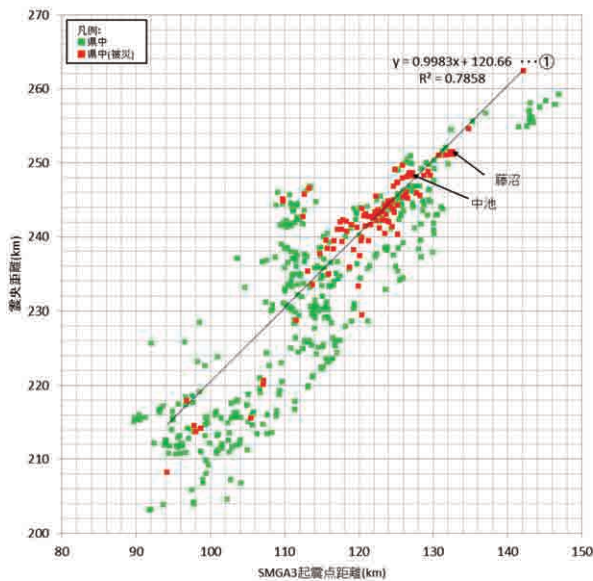


Fig.35 東北地方太平洋沖地震の福島県中被災ため池の震央及びSMGA3距離

Relationships between distance from the epicenter and from the starting point of SMGA3 to damaged irrigation ponds in Central Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

傾向が見られる。

Fig.36は県南及び県北域内のため池について、Fig.35と同様の方法で震央とS3からの距離を算出、プロットして地区別の分布状況を比較した。ここでFig.35で求めた県中域の近似式の傾き及び切片の数値をまとめて式(a) $Y=X+120$ とし、集中エリア内で被災ため池の中心を通る線を式(a)と平行に引いた式(b)を $Y=X+125$ としてFig.36に図示した。県中・南域のため池については、式(a)及び(b)に近接した処で被災が見られるが、県北域の被災分とはかなり異なっている。

Fig.37はFig.27から福島県北・中・南域のため池を抜き出し、震央及びS3からの距離等高線上に式(a)及び(b)の線をひいた。式(a)の線は、被災集中エリアに向けて距離コンタの交点を通過して西南西方向に進んで

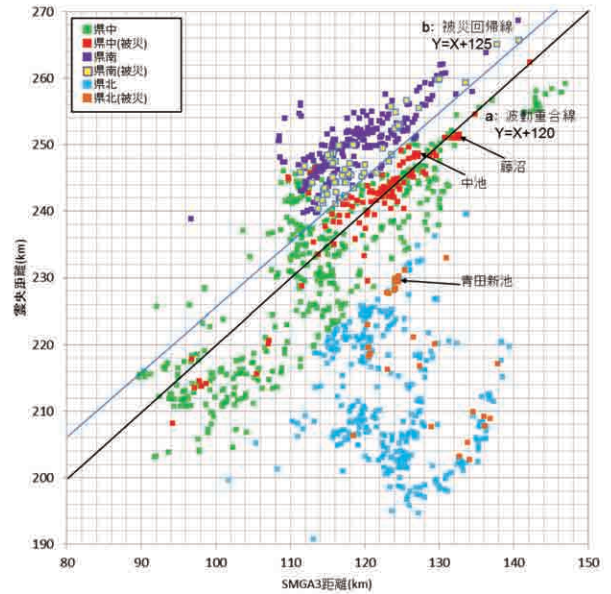


Fig.36 東北地方太平洋沖地震の福島県北・中・南域の被災ため池の震央及びSMGA3距離

Relationships between distance from the epicenter and from the starting point of SMGA3 to damaged irrigation ponds in North, Central and South Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

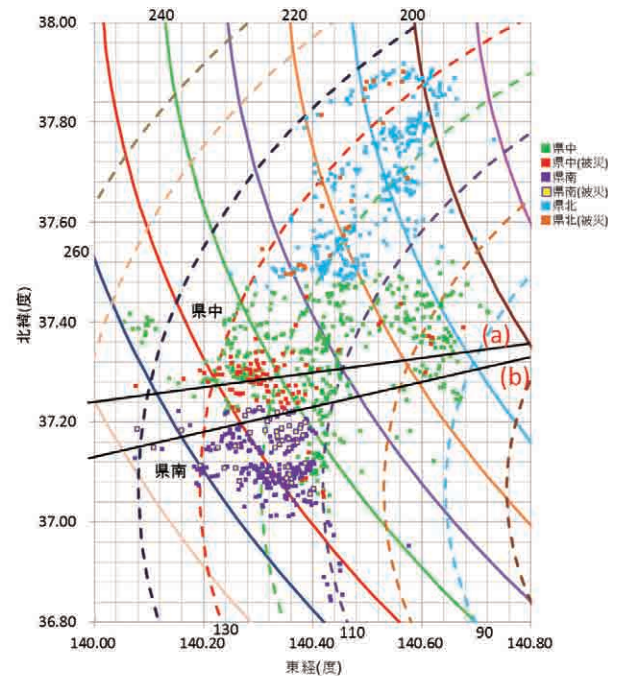


Fig.37 東北地方太平洋沖地震の福島県北・中・南域のため池の震央及びSMGA3距離等高線分布と被災ため池ライン
Distribution of damaged irrigation ponds and seismic mixed line with distance contour line from the epicenter and from the starting point of SMGA3 in North, Central and South Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

おり、一瞥すると異なる二起点からの水面波が交差する現象に似ている。

Fig.38ではFig.19の震度分布にFig.37の式(a)及び(b)のラインを重ね合わせた。図上の2ラインは太平洋沿岸

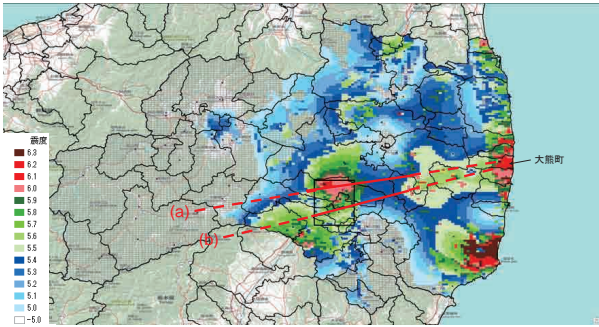


Fig.38 東北地方太平洋沖地震の福島県内推計震度分布と被災ため池ライン

Passage of seismic mixed line on estimated seismic intensity distribution map of Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

の福島県大熊町から西南西方向に進み、阿武隈山地では2ライン付近のみで震度6-が分布し、さらに西南西側で一端は震度5+レベルに下がるが、盆地に入った所で再度、震度6-に上昇し、(a)線では被災集中エリア内北側で震度6+がホットスポット状となり、(b)線では同じ集中エリアの南側を進み、白河市及び西郷村の震度6-ゾーンを通過している。

Fig.38の(a)線 $Y=X+120$ は、**Fig.39(a)**で切片120、傾き1の直線になるが、下**(b)**の図では震央距離120km地点(=地点Es)とSMGA3の起震点(=S3距離0km地点)から同距離の点を結ぶ線である。即ち、EsとS3を結ぶ線を底辺とする二等辺三角形の頂点を繋ぐ線に当たる。換言すると、仮に震央とS3から一定速度の地震波が伝播した場合に、震央から120km先のEs点に達したと同時にS3から起震した波が、式(a)線上に両点から同時に到達したことになる。

c 考察

この節では福島県内でため池被災が顕著だった県中・県南域で集中エリアを設定し、被害がホットスポット的に集中した要因を考察してきた。**Fig.40**では集中エリアをクローズアップして関連事項を取りまとめた。なお、図中に計測震度観測所の位置を表示し、計測震度と推計震度分布の関係が分かるようにした。

Fig.40より以下の4項目について、総括的なまとめを行った。

1) 震度ホットスポット

- ・震央とS3からの距離 (a)線は、被災集中エリア内の震度ホットスポットを通過することから、二つの起震点からの地震波の重合いがこの領域を通過したと推定できる。
- ・被災集中エリア内で最大震度6.3となった1kmメッシュに最近接した計測震度観測点・須賀川市岩瀬支所でも、東北地震当時に最高計測震度6.3を記録しており、集中エリア内のピーク震度がこの地点にあることが確認できる。因みに、その後の点検で周辺地盤の陥没と震度計台の傾きが見られ、当時の観測結果は欠測扱い

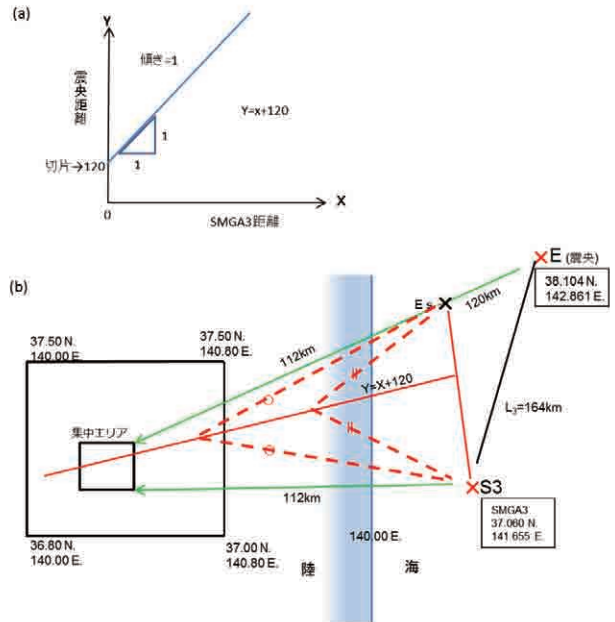


Fig.39 東北地方太平洋沖地震の福島県中被災ため池と震央及びSMGA3距離に関する模式

Model on relationship between intensive irrigation ponds damaged area and distance from epicenter & starting point of SMGA3 during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

となったが、推計震度のピーク発現には影響はなかった。

- ・棚倉構造線上付近にある4つの観測点の計測震度は最大でも5.4であり、ホットスポットのピーク震度6.3に比較して震度レベルで2ランク(**Fig.4**から加速度で200~300gal程度)低く、約300km²の被災集中エリア内でも大きな震度ギャップが発生していた。

1) 地形・地質条件と震度

- ・**Fig.26**の地盤構造では、阿武隈山地と棚倉構造線に挟まれた盆地の堆積層地盤範囲に被災ため池が集中しているが、**Fig.40**中の約300km²の集中エリア内でも南

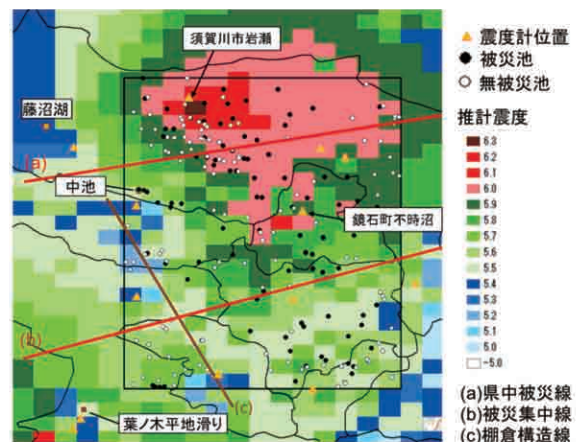


Fig.40 東北地方太平洋沖地震の福島県中・南域被災ため池集中エリア内の推計震度分布

Distribution of irrigation ponds based on estimated seismic intensity within intensive damaged area in Central and Southern Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

東方向及び南西部分からエリア外北西方向に向かって震度5.4以下であった。

・推計震度は観測点の計測震度に基づき、また、その周辺部は地盤増幅率によって算定されるため、北から須賀川市長沼支所、天栄村下松本、白河市大信、泉崎村泉崎までの棚倉構造線上観測点では震度5+程度の揺れである。それ以外の観測点では震度6+クラスを記録し、且つ周辺1kmメッシュが堆積層に係る増幅率のため、狭い領域内で大きな震度ギャップは生じた。その結果、線(b)が集中エリア内南西を通過する部分が震度6-程度の震度分布となっている。

2) 震度と被災ため池

・大きな震度がホットスポット状になっている中心部分では被災率が高いが、震度6+分布エリアの東西両周辺には、無被災ため池が多く散見される。
 ・集中エリア内で棚倉構造線が通る南西側部分では、推計震度6-レベルであるにも拘わらず被災率が低くなっているが、周辺に硬い地盤が存在し実際的には推定された震度より低かったことが考えられる。

3) その他

・集中エリアから南西約2kmに白河市葉ノ木平地すべり被害(死者数13名)地区があり、決壊した藤沼湖及び中池と併せ、このエリアが東北地震時における最大の地震動被災エリアの一つと考えられる。

Table 8ではTable 5をベースに本節の考察結果より、地震波の重合いを考慮した被災要因の総括を行った。地震動による被災集中は広域的(マクロ的)な地盤条件に硬軟格差がある場合、「フォーカス現象」や「多重反射」によって揺れの増幅を引き起こし易い。また、水田灌溉のため池サイトが傾斜地で「なぎさ現象」を起りやすい条件下にあるなど、本エリアは潜在的に被災リスクを抱えていた。そのような中で、東北地震では盆地地形で潜在的に揺れ易いエリアに内において、強震動生成域か

Table 8 東北地方太平洋沖地震に伴う福島県中・南のため池被災集中要因のまとめ

Element factor of causing intensive damages to irrigation ponds within Central and Southern Fukushima during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

(ため池被害レビュー) 高い被災リスクの条件	揺れやすい条件	関連性	福島県中の被災ため池サイト	被災要因
①地震動 ➢ 震央距離 ➢ 近距離重なり	・震央に近い ・多重震源	△ ●	・震央距離250kmに被災集中 ・棚倉構造線走向は震央に向きほぼ直角 ・被災ラインがエリア内を構造線とほぼ直交して通過 ・震度6級のホットスポット発生	➢ 強い震央距離にも関わらず脆弱地盤において以下の条件が重なって被災が大きくなった ➢ 方向の異なる強震動域の地震波が重なり、震度を増大させた
②地形条件 ➢ 山と平場の境界	・盆地 ・水田と斜面	◎ ◎	・(山地から)盆地へ ・多くは丘または傾斜地に立地	➢ 山地と盆地間立地・より軟らかい地盤へ地震波が集中的に届けられた(フォーカス現象)
③地質条件 ➢ 第四紀層(堆積層)	・堆積地盤 ・緩斜の近接	◎ ◎	・第四紀層(堆積層) ・西側に棚倉構造線の存在 ・構造線に平行して変動8mmのところまで70%被災率	➢ 盆地と構造線との間に立地・重なりた地震波が脆弱地盤中に閉じ込められ地盤の共振及び揺れの増幅・が長期化した ➢ 多重反射
④埋込方向 ➢ 埋込下流が震央に直交方向	・傾斜地 ・東側の水田両岸	◎ ◎	・被災は埋込下流が東向きのため常に多発 ・6強では方向性が協定	➢ 傾斜地に立地・脆弱地盤の埋込(層の厚くなる部分)では波動エネルギーが集中した(なぎさ現象) ➢ 震度6強で埋込方向性と傾斜度とが地盤化するのは、異なる強震動生成域が関係

らの重合った地震波が、棚倉構造線の硬い地盤層に対して震源方向からほぼ直角に入射したことで、大きな揺れの増幅がホットスポット的に生じたものと考えられる。因みに、本エリアはFig.41から明らかなように、過去、統計的には強震動の発生確率が低い地域に区分されていたが、今回のような複数方向からの強震動地震波の入射事象がなければ、ホットスポット的な地震動による被災発生はなかったものと思われる。

4.4 被災ため池の宮城・福島県比較

a ため池の分布と震央及び強震動生成域

前節でため池被災に強震動生成域が関連していたことが明らかになったことから、被災が軽微であった会津地方を除く福島県全域のため池について、Fig.42に震央及びS3からの距離でプロットし、地域ブロック毎に被災分を最小二乗法で近似式と決定係数を求めた。近似式では県中域の傾きが1に最も近く、被災数の少ないいわき域も県中域と同様な傾きで、決定係数は県中域よりも1に近い。一方、県北域では負の傾きで県中及び県南域とほぼ直交し、相関域では傾き0で決定係数も殆ど0である。

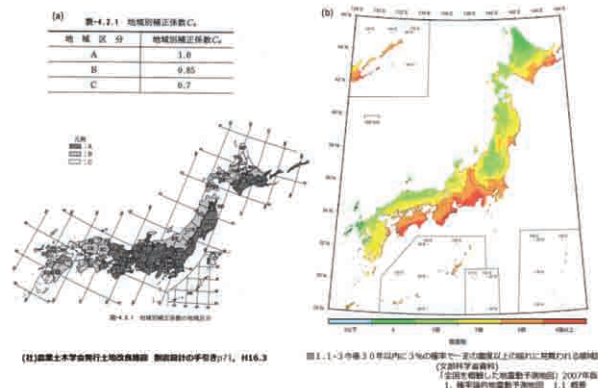


Fig.41 従来の強震動地震発生頻度 Frequency of strong seismic motion in past time

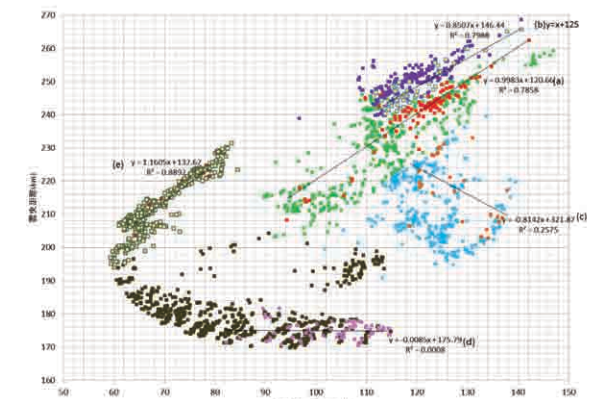


Fig.42 東北地方太平洋沖地震に伴う福島県内の被災ため池の震央及びSMGA3距離

Relationships between distance from epicenter and starting point of SMGA3 to damaged irrigation ponds due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Fig.42のプロット及び近似線を Fig.43(イ)の震央及び S3からの距離コンタに、また Fig.42の値を奇関数的処理 (XY軸とも値に-1を掛ける) によって方向調整して図示した。ライン (a) と (b) は Fig.37と同じものであるが、(a) が切片の120kmまで、(b) が切片の125km地点まで震央から直進した地点と起震点S3からの等距離点 (=二等辺三角形の頂点) を結ぶ線となる (Fig.39参照)。即ち、被災集中エリアの中心に対してはS3からの距離が5km程接近しており、(b) では地震波伝播が同時になるためには、震央からの距離が (a) よりも5km進んだ点からスタートしたことになる。それに比較しいわき域ライン (e) では (a) と比べS3からの距離がさらに近いため、震央から13km進んだ点をスタート点としており、傾きも1よりも若干大きく、S3距離が1に対し震央距離が1.16倍長くなる位置をいわき内の被災ラインが通ることになる。一方、県北域の被災線(c)では傾きがマイナスで、(a) とほぼ直交し、震央及びS2を起点とする二等辺三角形の頂点に対しては、S3からの距離が5km程接近しており、(b) で地震波伝播が同時になるためには、震央からの距離が (a) よりも5km進んだ点からスタートしたことになる。それに比較しいわき域ライン (e) では (a) と比べS3からの距離がさらに近いため、震央から関係なく、県北及び相双域の被災ため池はSMGA3とは異なる強震動生成域からの影響を検討する必要がある。なお、これ以降、震央及びSMGA起震点間距離の表示は、右上を原点 (北東方向) として行う。

ため池位置の震央及びS3からの距離関係に対し、Fig.44ではSMGA1, SMGA2, SMGA4を含めて震央とため池距離を模式図に示した。これにより Fig.45では、震央及び各SMGA起震点から福島県内ため池の距離を (イ) ~ (ニ) にプロットした。その内、被災ため池は別色に分けてプロットし、それを地域ブロック毎に最小二乗法で近似式と決定係数を求め、その傾き及び決定係

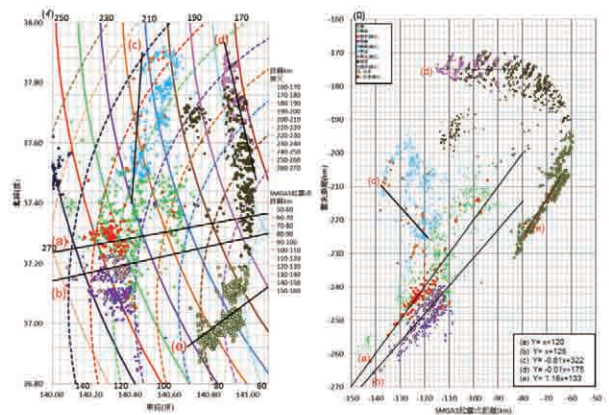


Fig.43 東北地方太平洋沖地震の福島県内被災ため池の震央及びSMGA3距離等高線と地震重合ライン
Distribution of damaged irrigation ponds and seismic mixed line within distance contour line from the epicenter and from the starting point of SMGA3 in Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

数の値を Table 9にまとめた。まず、(イ) では相双域以外の傾きが0.9以上で、決定係数は全域で大きく、切片は相双と県北が80kmで、県南域が20km小さいことから、その分震央からの直進した点から始まっていた。(ロ) では全域の傾き及び決定係数が限りなく1.0に近く、切片差も県北と県南域間で最大6kmと幅が狭く、震央と

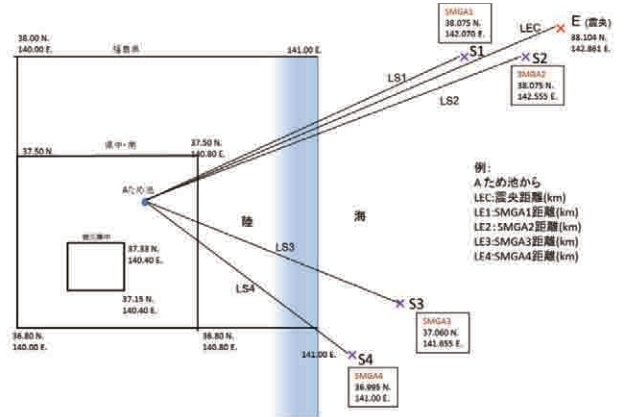


Fig.44 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の震央及び各SMGA距離に関する模式

Location of irrigation ponds devastated area of Fukushima Prefecture, starting points of 4 SMGS and the epicenter during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

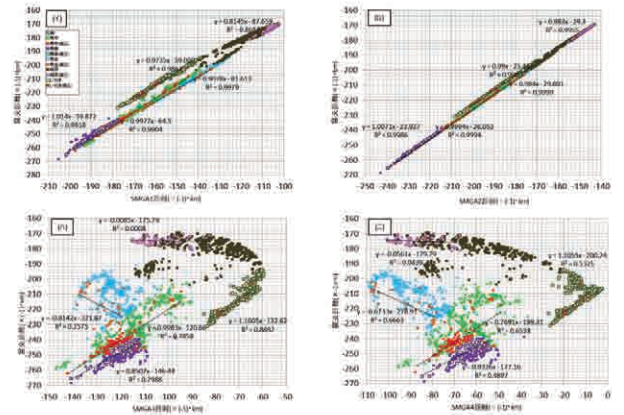


Fig.45 東北地方太平洋沖地震の福島県内ため池の震央及び各強震動生成域 (SMGA) 距離

Relationships between distance from the epicenter and from the starting point of 4each SMGA to irrigation ponds in Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Table 9 東北地方太平洋沖地震の福島県内の被災ため池の震央及び各強震動生成域起点間距離と被災ラインの傾き及び決定係数

Relationships between regression coefficient and coefficient of determination on distance from the epicenter and from the starting point of 4each SMGA to damaged irrigation ponds in Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

図	距離分類	式	県中	県南	県北	相双	いわき	備考
(イ)	震央×SMGA1	式	y=0.995x+65	y=1.014x+60	y=0.908x+82	y=0.815x+88	y=0.974x+59	Fig. 42
	R ²		0.99	0.982	1	0.869	0.986	
(ロ)	震央×SMGA2	式	y=0.999x+26	y=1.007x+24	y=0.984x+30	y=0.983x+29	y=0.98x+25	Fig. 42
	R ²		0.999	0.999	1	0.999	0.999	
(ハ)	震央×SMGA3	式	y=0.998x+120	y=0.851x+146	y=0.814x+322	y=0.009x+176	y=1.161x+133	Fig. 42
	R ²		0.786	0.799	0.258	0.001	0.889	
(ニ)	震央×SMGA4	式	y=0.891x+180	y=0.769x+199	y=0.673x+279	y=0.153x+189	y=1.106x+200	Fig. 42
	R ²		0.463	0.654	0.67	0.06	0.533	

SMGA2起震点が接近し、福島県全域に対して如何に細い二等三角形となっていたが分かる。また、(ハ)と(ニ)は前二つに比べ近似線間の切片幅が大きく、特に(ハ)の県北域で傾きがマイナスでもあり、県中域とは200km離れている。因みに、(ハ)と(ニ)は基本的に相似しているが、被災近似線のバラツキは、県北と相対域以外は(ハ)の決定係数が大きかった。全体として、傾きが1で相関性が大きい程、有為な地震波が重なしたことによる影響が大きいと考えられる。

ここからは宮城県内のため池を対象に前段までと同様の手法で整理し、福島県との比較を行う。まず、東北地震時の宮城県内推計震度と被災ため池の分布をArc.GIS上のFig.46に、Fig.47には震度別ため池数を地域区分して示した。なお、宮城県内では決壊ため池が無かったことから、代わりに東北大学工学部内で全壊した校舎位置をベンチマークとした。両図から宮城県内では被災ため池が特に集中したエリアが見られず、福島県中域のように

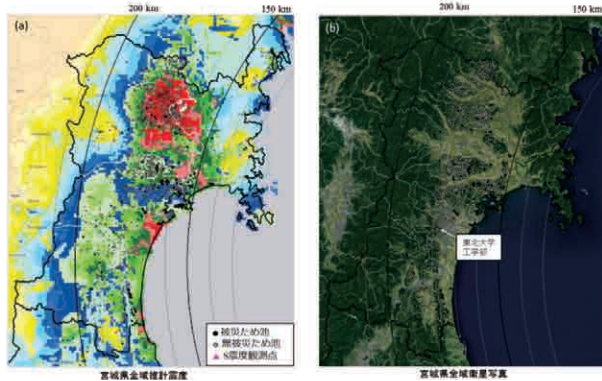


Fig.46 東北地方太平洋沖地震の宮城県内における推計震度と被災ため池の分布

Distribution of estimated seismic intensity during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and damaged & non-damaged irrigation ponds in Miyagi Prefecture

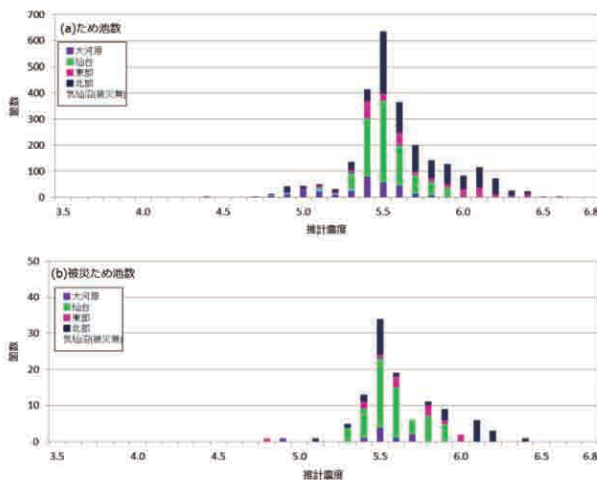


Fig.47 東北地方太平洋沖地震の宮城県内被災ため池の地域別推計震度と被災数

Relationships between estimated seismic intensity and damaged irrigation ponds in each district of Miyagi Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

突出するブロックも見られない。地域別被災ため池数も概ね震度に応じたもので、被災エリアは分散的である。震度分布との関係では、宮城県北部域に震度6+クラスが大きく広がっている割には被災ため池数は少なく、福島県中・南域被災集中エリアのように必ずしも強震度域に被災が集中していない。宮城県北部の震度6+以上のエリアはFig.48のシームレス地質図に示すようにかつて湿地だった場所が、東北地震で最大震度7を記録した栗原市築館周辺の軟弱な堆積地盤として広がっていた。

宮城県内ため池の緯度・経度分布をFig.49に示したが、北部域の被災ため池の大多数が北緯38.40~38.50及び38.60~38.70にあって東西に並んでおり、南部域では北緯37.90~38.00の範囲で福島県相対域まで連なっていた。Fig.44で福島県全域に対して高い緯度であった震央及びSMGA1と2に起震点は、宮城県域に対しては概ね大河原域北部と同じ北緯にあり、県北部の被災ため池に対しては南側に位置する。

福島県内ため池をFig.29、Fig.30及びFig.45で図化した手法で、宮城県内のため池の距離関係をFig.50とFig.51にプロットした。まず、Fig.50(a)で被災ため池が震央距離150~180kmの範囲に偏っており、その分布は

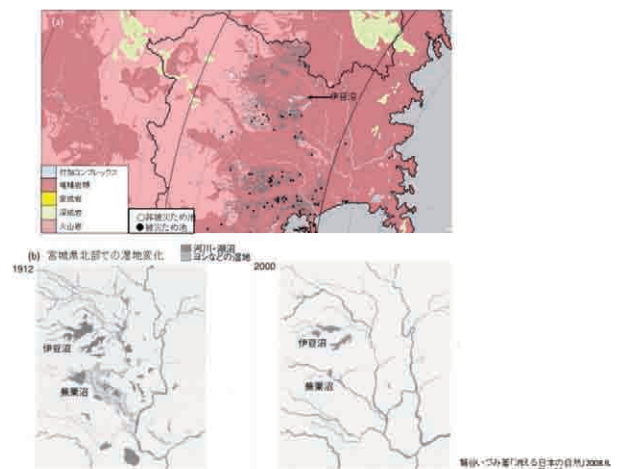


Fig.48 宮城北部の湿地変化
Transformation from swamps in Northern Miyagi Prefecture

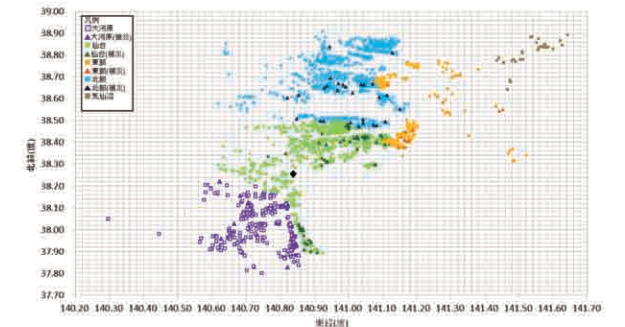


Fig.49 東北地方太平洋沖地震の宮城県内被災ため池の緯度・経度分布

Latitude and longitudinal distribution of damaged irrigation ponds in Miyagi Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

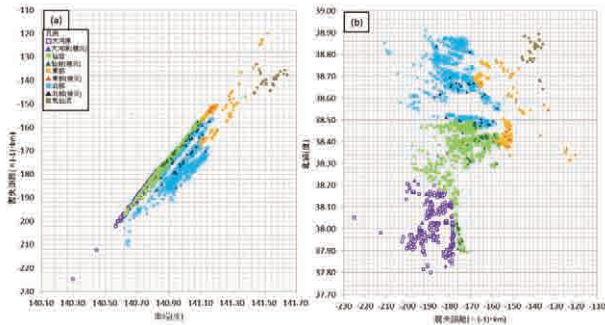


Fig.50 東北地方太平洋沖地震の宮城県内ため池の震央距離と緯度・経度位置

Relationships between 1 distance from epicenter and longitudinal & latitude location of irrigation ponds in Miyagi Prefecture

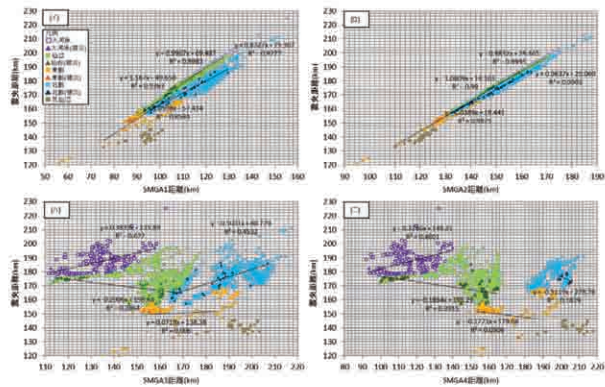


Fig.51 東北地方太平洋沖地震の宮城県内被災ため池の震央及び各SMGA距離の分布

Relationships between distance from the epicenter and from the starting point of 4each SMGA to irrigation ponds in Miyagi Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Fig.29の福島県の相双から県北域の被災と似通った形状で、**(b)**の南北に分かれた被災も震央距離は30km範囲内に特定されていた。**Fig.51(イ)**から各ブロックの傾きは全て1前後で、決定係数も相当大きく、**(ロ)**ではさらにその傾向が強くなると共に、切片の格差幅が15kmまでと狭くなっていた。その理由は、震央とS1及びS2がほぼ同緯度で宮城県域に面しており、**Fig.45**の**(イ)**及び**(ロ)**と同様に各2起点から細い二等三角形となっていることが分かる。また、**(ハ)**と**(ニ)**では震央とS3及びS4からため池までの距離の関係性が乏しく、各地域ブロックとも近似線の傾きは1からかけ離れ、切片及び決定係数もバラツキが大きい。

b 震度表示と地震波動速度

東北地震では宮城県域が震央に近く震度が大きかったと一般的に考えられるが、両県の地震動被害を比較するためには、実際に福島県域と比較して強震度の大きさはどの程度であったか、また、ため池地点での震度はどうかを明らかにしておくことが必要である。まず、**Fig.52**で宮城県と福島県内で観測された3成分合成最大加速度 (gal) と計測震度の比較を行った。因みに、この最大加速度はフィルター処理されていない数値で、式

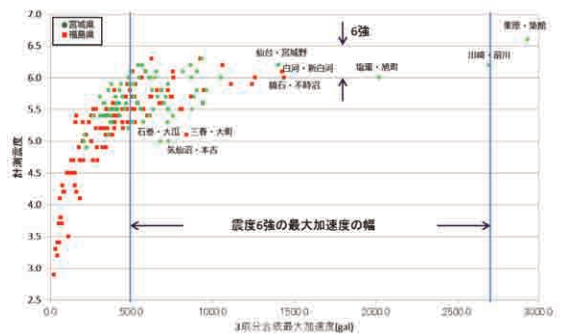


Fig.52 東北地方太平洋沖地震における宮城・福島県の最大加速度と計測震度

Relationships between maximum seismic acceleration and measurement seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

(1)で計測震度の算定に使われるa値とは異なるものである。因みに、唯一震度7(計測震度6.5以上)に達した栗原市築館観測点では、最大加速度2,900galを超えているが、計測震度6.6でのa値は700gal程度である。計測震度のトップ3は全て宮城県内の観測点であるが、4位と5位は福島県中・南域の鏡石町不時沼、白河市新白河であり、宮城県内の震度が圧倒的に大きかった訳ではなかった。また、地震動被害が激増する震度6+以上の観測点数では宮城県が若干多い程度であり、最大加速度が500gal以上の観測点数ではほぼ同数であった。

通常、震央に近い程、震度が大きくなると言われる。

Fig.53では宮城・福島両県の観測点を震央距離と計測震度で比較した。宮城県内では震央距離が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+以上であった。福島県では最短170kmから330kmまで震央距離が広範囲で、震度と距離の関係は緩やかな逆相関であった。前節で福島県中・南域の震度ホットスポットを見たが、当該エリア周辺観測点の計測震度が震央距離240-250km付近で全体が盛り上がっていた。

ため池毎の震度特定に使った1kmメッシュを用いて、

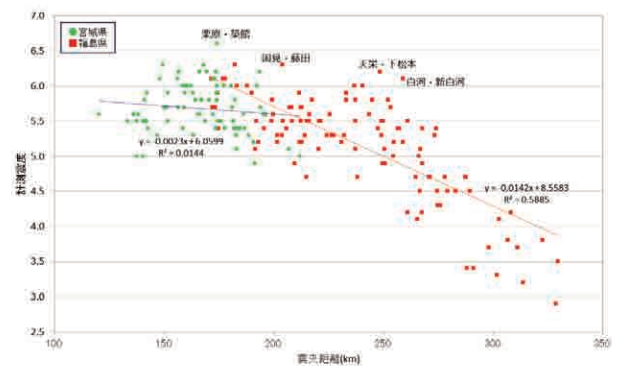


Fig.53 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内観測所震央距離と計測震度

Relationships between measurement seismic intensity and distance from epicenter in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

東北地震発生時の両県の震度別メッシュ数とため池数を Fig.54 の棒グラフで、Fig.55 の累積割合によって比較を行った。福島県域では会津地方を含め震央距離が長くなるため、震度毎のメッシュ数やため池数は全体的に宮城県よりも均平化されたものとなる。但し、震度6-（計測震度5.5以上）を超える範囲では、福島県内のため池数が宮城県よりも多くなる場合が増えてくる。これを Fig.55 の累積割合で震度メッシュを見ると、震度5.0以下で福島県が6割に対し宮城県は2割未満、震度5.5以下では福島県内で8割を超えているのに対し、宮城県では6割程度であることから、宮城県全域でより大きな強震度分布を確認できた。同様にため池では震度5.0+以下で宮城県が5%に満たないのに対し、福島県は2割を超えてさらに震度が大きくなるに従って双方の割合が急速に縮まり震度5.6の68%で交わっている。即ち、両県間で15%あった震度5.0以上ため池の割合の差が震度5.0から5.5間で急速に縮まり、震度5.6以上ではほぼ同程度になる。その結果、震度6-以上の強震度で揺すられたため池の割合は、両県間には基本的に差がなく、数量的には寧ろ福島県内が多かったことになる。また、震度メッシュとため池震度の比較から、両県ともため池が高い震度のエリアに分布していたが、その理由はため池がより揺れやすい水田地帯に分布するためであると考えられる。

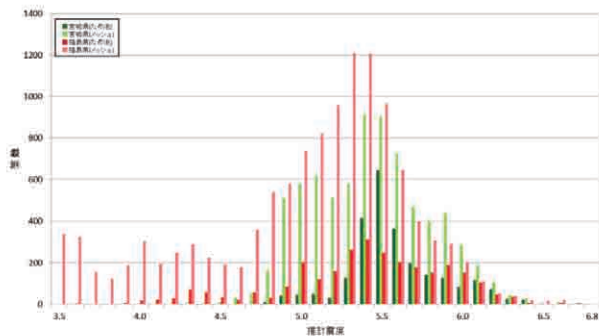


Fig.54 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県の推計震度毎の1kmメッシュ数とため池数

Relationships between number of 1km-mesh and number of irrigation ponds based on estimated seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

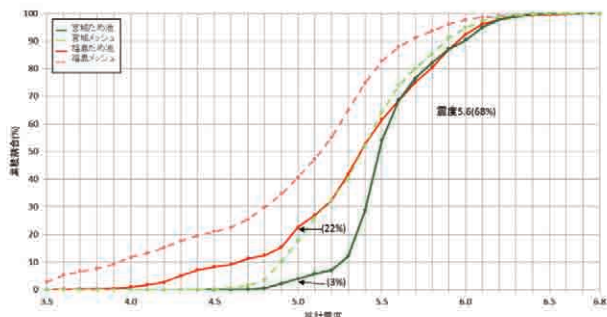


Fig.55 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県の推計震度及ため池の累積割合

Cumulative curve on number of 1km-mesh and number of irrigation ponds based on estimated seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

c 計測震度と有為な地震波動の重なり

まず、気象庁が震度を発表する際に計測震度は観測点毎にどのように求められるかであるが、全国約4,300以上の観測点震度計は、常時、震度計測されている訳ではなく、Fig.3の通り、周波数が0.01~100Hzの範囲で一定レベル以上の振幅があった場合に10秒間を1単位として震度計測がされている。また、3成分の加速度データを各々分岐しデジタル積分により速度波形に変換し、加速度波形と速度波形により地震が発生しているかの判別（「トリガー判定」という）を行う。トリガー判定がONになった場合に、60秒間を1地震として分離し、震度と最大加速度等が求められている（震度を知る－基礎知識とその活用－、気象庁監修、ぎょうせい 60頁、平成8年9月）。Fig.56は、東北地震時の宮城・福島両県の各観測点へのトリガー到達時刻を横軸、震央距離を縦軸にプロットし、各県毎に近似式を求め、その傾きは毎分246~250kmであった。これを60秒で除して平均4.2km/secが観測点へのトリガー到達速度となる（但し、Fig.56では①と②の傾きから、伝播速度を求めている）。

東北地震では大きな揺れが3分以上継続したが、1地震単位を60秒間とする計測震度の定義からは、複数の地震によって異なる計測震度が連続して観測されたことになる。Fig.57は東北地震時の両県内の代表的な観測点の震度経過を表示したが、実際に公表された推計震度マップ (Fig.1参照) は、この一連の地震動を一地震震度とみなして、各観測点の最大計測震度を基に各メッシュの推計震度分布を求めている。Fig.57では宮城・福島両県から2つ観測点（登米市米山町、鏡石町不時沼）の計測震度を1分間の太線で表示したが、トリガー到達時刻が震央からの距離で異なるために、計測震度のスタートにも時間差がある。因みに、1分間の計測震度の開始時刻は、トリガー時刻の前10秒区切り時刻である。ここでは宮城県を寒色系、福島県を暖色系にして比較したが、全般に宮城県が計測震度のスタートが早く、

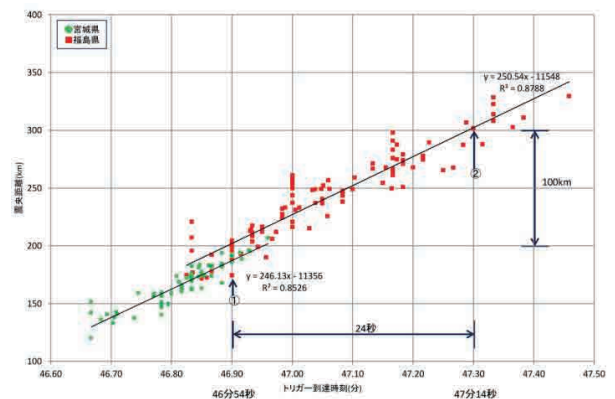


Fig.56 東北地方太平洋沖地震における宮城・福島県内の震度観測所の震央距離とトリガー時刻

Relationships between distance from epicenter and arrival time of seismic trigger to survey stations in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

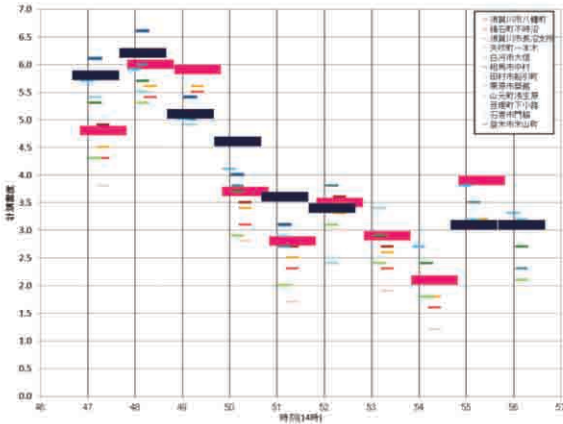


Fig.57 東北地方太平洋沖地震における宮城・福島県内の震度計観測所の計測震度の時間変化

Progress of one minute's measurement seismic intensity at some survey stations in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

14時47分台では宮城県が、48分台では両県が同レベルに、49分台では福島県の計測震度が大きくなっている。但し、福島県内の最大計測震度が宮城県の最大値を上回ることは殆どないものの、揺れが大きい地域での東北地震時の震度は、両県間には殆ど差がなかったと考えることができる。

波には重なり合う時、その地点で増幅する特性がある。

Fig.39で震央とSMGA3の起震点から陸域側に「有為な地震波」が同じ速度で伝播し、ある特定の場所で重合し、それが大きく増幅したことでため池被災が集中的に発生したと想定した。その同時発進の震央側の起点をEsとして、震央EとEsの距離は式(a)及び(b)の切片から120km~125kmであった。また、SMGA3とその前のSMGA2との時間差が41秒で、これが震央からスタートしたものと仮定すると、この有為地震波伝播速度は概ね3kmとなる。さらにFig.58では、過去の記録(左図)を含めて最大加速度が発現した際の震央からの伝播速度は3.0kmであり、有為地震波速度とも同速度であった。因みに、この3.0km/secで伝播する波は、同図ではRg(レイリー)波と呼ばれ、表面波の一つとされている。

Fig.59では浅野らのFig.33を踏まえ、東北地震の震央及びSMGA1~SMGA4と宮城・福島両県と被災集中エリアの時空間関係を模式化した。右表中は各起点間の距離(上段)と起震時間差(下段・括弧内)を整理した。ここで有為地震波の伝播秒速を3.0kmと仮定し、特に起震時刻が相前後する地震波間の重合の影響が最も大きいと考えれば、SMGA間マトリックスの上段数値/下段数値の倍率が3以上の場合にのみ、先発起震点から速度3.0km/secの有為地震波が後発起震点に到達する前に後発有為波が発進したことになる。Table 10・(a)では各起震点タイムテーブルと先発の有為地震波が、次発の起震時点で何処まで到達したか、そのオーバーランの距離計算を行った。因みに、有為地震波伝播速度が3.0km/secで、

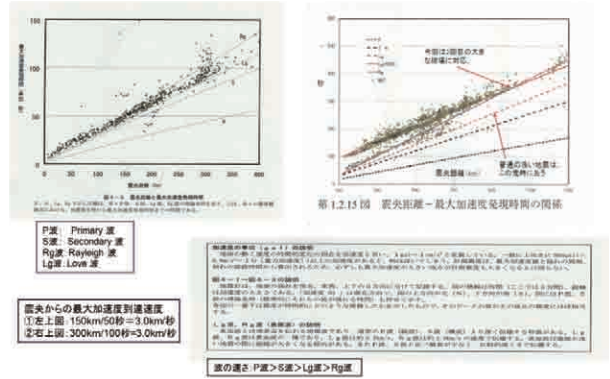


Fig.58 震央距離と最大加速度の発現時間(気象庁資料)
Relationships between distance from epicenter and maximum seismic acceleration appearing time

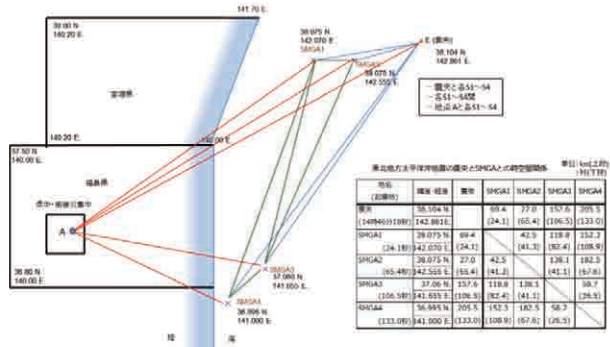


Fig.59 東北地方太平洋沖地震の震央及び各強震動生成域(SMGA)起点の時空間関係

Spatiotemporal relationships among the epicenter and each starting point of 4 SMGA during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Table 10 東北地方太平洋沖地震の震央及び各強震動生成域の起震タイムテーブル

Starting time table of the epicenter and each starting point of 4 SMGA during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

事項	時間差(起震時)	2011年3月11日16:00					オーバーラン距離
		46分	47分	48分	49分	50分	
◎震央	0.0 (60.4)	18°					3×24.1=◎ =2.9km
①SMGA1	24.1 (42.5)	42.1°	41.3				3×41.2=◎ =81.1km
②SMGA2	65.4 (138.1)	23.4°	41.1				3×41.1=◎ =61.45km
③SMGA3	106.5 (138.7)	4.5°	30.3				2×28.5=◎ =20.8km
④SMGA4	132	11.0°					

注)到達時間は各SMGAから観測所までの距離を3km/秒で除して求めた。

前後する各起震時間差(矢印下の秒数)を掛けて到達距離を求め、各起震点間距離(a km)から差を求めた。その結果、SMGA2とSMGA3の起震点の時空間関係のみ、後発が発進する時点で前発の有為地震波が後発起震点の手前(=未到達)であり、他のケースは全て前発の有為地震波が後発起震点を既にオーバーランしていた。この

前発波が未到達の場合では、2つの有為地震波が同時に到達・重合する地点が存在することを意味しており、オーバーランの場合には、後発有為波が先発波に遅れて同じ地点に到達することになる。なお、Fig.59の赤線は陸域内点Aと震央及び各SMGA起震点との距離を示しているが、一例として震央距離240kmの鏡石町不時沼観測点に震央及び各SMGAからの有為地震波が秒速3.0km伝播した場合のタイムテーブルをTable 10 (b) に示している。

Fig.60はTable 10で求めた不時沼観測点における到達地震波について、気象庁が参考値として公表している5秒間隔の計測震度経過(上段(a))と照合させた。また、比較のために1分間単位の計測震度のタイムテーブル(下段(b))とも照合をさせた。ここでの時間スケールは、(a)の5秒間隔では6分間、(b)の1分間を1地震単位とする10秒間隔の計測震度では11分間である。ここでは、震央からの有為地震波到達時刻を①、各SMGAからのものを起震順に②から④として、(a)と(b)それぞれの計測震度のタイムテーブル上で照合した。不時沼観測点には震央からの有為地震波とS1からの波がほぼ同時刻に到達し、その時点で(a)の5秒間隔計測震度は増大がみられた。その後71秒間にS2、S3及びS4からの3波到達によって、一端下がりがかけた震度は、その都度、波状的に上昇を見せた。(b)の1分間隔毎の震度では、微妙な増減は確認出来ないが、各SMGAからの波がどの分帯の計測震度に関係していたか、福島県中・南域被災集中エリア内では計測震度6.0レベルの揺れが相当長い時間連続していたことが分かる。

Fig.61には、Fig.60と同様の手法で宮城県内で震央距離157kmの登米市米山町観測点における各到達地震波を照合した。米山町地点は震央及びS1及びS2からの距離が近く、②の地震波到達時刻が福島県内の不時沼地点より約30秒近く早い、逆にS3及びS4からは遠くなるこ

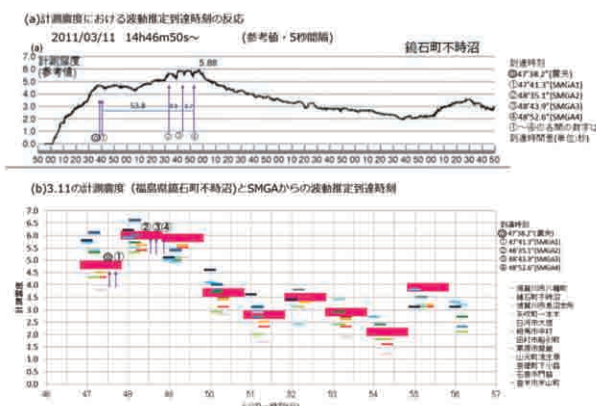


Fig.60 東北地方太平洋沖地震の計測震度と強震動域有為波の到達 (福島県鏡石町不時沼)
Relationships between measurement seismic intensity (5 seconds type) and arriving time of affecting seismic waves from 4 each SMGA at Fujinuma, Kagamiishi, Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

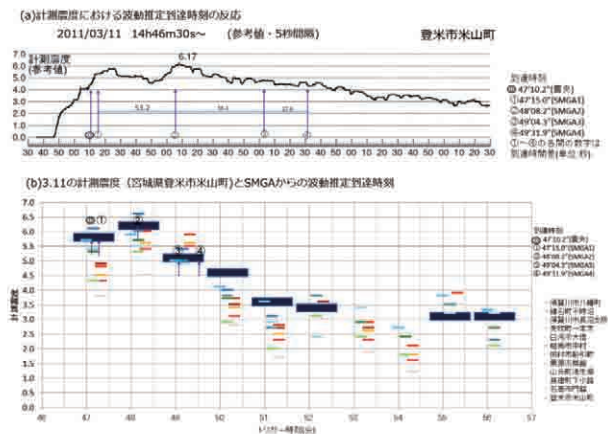


Fig.61 東北地方太平洋沖地震の計測震度と強震動域有為波の到達 (宮城県登米市米山町)
Relationships between measurement seismic intensity (5 seconds type) and arriving time of affecting seismic waves from 4 each SMGA at Yoneyama-machi, Tome, Miyagi Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

とで、③の到達時刻は20秒遅れることから、②と③の到着間隔が不時沼地点の8秒間程度に対し、1分近く掛かっていた。このことから②到達でピークになった計測震度は、その後下がり続け遠方から遅れて到達した③と④によっても下げ止めるまでには至らなかった。

Fig.62では気象庁が公表している10秒間隔毎の計測震度によって、宮城・福島両県内の複数観測点の揺れ時間長さの違いを比較した。実線の宮城県側は強震度の立ち上がり早く、その約一分後の2度目のピークまでの間で震度が一端、5-レベルまで下がる「フタコブ駱駝」型になっている。一方、破線の福島県側は最初の震度立ち上がりが遅れる分、第2～第4波到達までの間隔が短くなり、ピーク震度は後半が極大化し揺れの時間も長くなっていった。

d SMGA距離と被災ため池

前段までで各SMGAを起震点とする有為地震波が震度上昇と関係していたことが分かった。ここからは各SMGAと被災ため池の関係を検証するために、Fig.42と

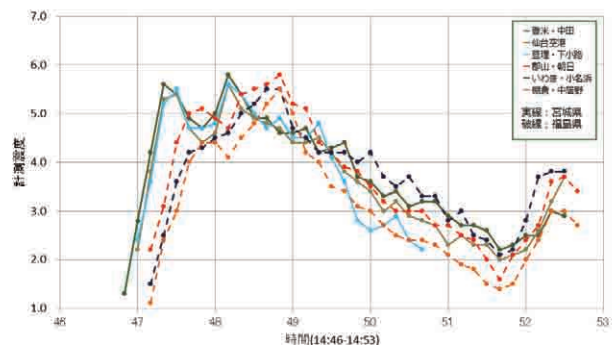


Fig.62 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内観測所の計測震度の時間変化
Progress of measurement seismic intensity (10 seconds type) at some survey stations in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Relationship

同様に各ため池地点までの距離を求め、その分布をプロットした。まず、Fig.63では福島県に近いS3とS4の関係は、県北域の被災ため池（オレンジ色）線の傾きはプラスとなり、決定係数もかなり1に近いものとなっていた。S3とS4の各起震点を底辺とした二等辺三角形を検討し、各地域の被災ラインの傾きと切片を比較したところ、いわきと県南域の被災ラインは傾きが概ね1で、切片が57付近にあった。ここでS3とS4の起震点間距離は58.7kmであるが、Fig.63で傾き1で同値を切片とするS3=S4+58.7ラインは、いわきと県南域の外縁（=最南端）を通過するS3からS4への延長線であると共に、後発のS4からの地震波が先発のS3波の関係で最も高い同時性を有する線である。即ち、Table 10(a)での検討から、S4からの波はS3波が20.8kmオーバーランした時点で発進するが、その時点で既に6.9秒（20.8km ÷ 3km/sec）経過しており、S4波が追いつくための最短コースはS3がS4を通過した延長線（S3=S4+58.7ライン）上となる。因みに、本線より左上にある同じ傾き1のS3=S4+50ライン上では、某ため池のS3とS4からの距離差が8.7（=58.7 - 50.0）km分だけ拡がり、その分S4からの有為波到達が2.9秒（=8.7km ÷ 3.0km/sec）さらに遅れることになる。Fig.63ではS3=S4+58.7ラインから離れるライン（傾き1で切片が小さくなる）上の地点ほど、S4からの有為波到達が遅れることでS3との同時性が薄れ、波の重合による震度上昇が小さくなることを意味している。

Fig.42でS3=S4+58.7ラインを求めた要領で、震央及び4つSMGA起震点からの同時性を考慮した有為波到達ラインをTable 11にまとめた。ここでの最短時間差とは、先発起震波がオーバーランした距離を伝播波速度3.0km/secで除したもので、例えば、S2とS3では同時（=非オーバーランで時間差0秒）、震央とS1では1秒差、S3とS4では6.9秒差で全て陸地側に向かっているが、太平洋側に向かってS1がオーバーランした81.1kmをS2が27秒差で後を追ひ、その真逆方向（仙台平野方向）のS2では55.5秒遅れ（=最長時間差）となっている。因みに、

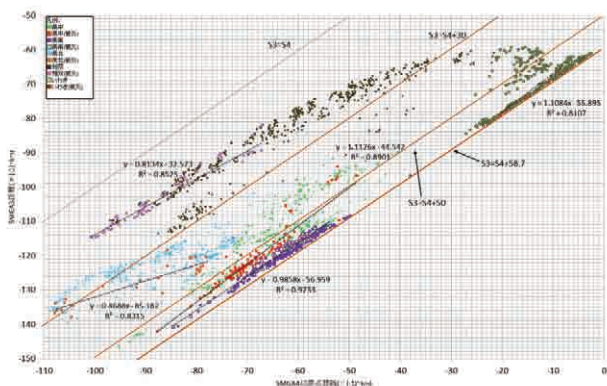


Fig.63 東北地方太平洋沖地震のSMGA3及び4の起点距離と福島県内の被災ため池

Relationships between distance from stating points of SMGA3 and SMGA4 to damaged irrigation ponds in Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Table 11 東北地方太平洋沖地震の震央及び各SMGA起点から宮城・福島県内陸域に対する有為波到達ラインと到達時間差

Arrival timelag of affecting seismic waves from the epicenter and starting points of each 4 SMGA to inland of Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

起震点	起震時間 (秒)	オーバーラン距離 (km)	距離時間差 (秒)	最短時間差 (秒)		最長時間差 (秒)	
				ライン式	差秒①	ライン式	差秒②
震央							
SMGA1	24.1	2.9	1.0	E=S1+69.4	1.0	E=S1+40	9.8
SMGA2	41.3	81.1	27.0	S1=S2+20	48.0	S1=S2+42.5	55.5
SMGA3	41.1	14.8	0.0(同時)	S2=S3+123.3	0.0	S2=S3+80	67.8
SMGA4	26.5	20.8	6.9	S3=S4+58.7	6.9	S3=S4+10	29.8

注：①②最長時間差は、宮城・福島県の陸域に再入したものであり、少人数第二回調査結果

に、震央・S1の最短時間差ラインE=S1+69.4は、震央からS1を結ぶ線が仙台平野に向ったもので、そこから放射状に離れるに従って到達時間差は大きくなるが、S1・S2ではその真逆になる。また、同じ陸域に向けでもS2とS3の関係では、S2=S3+123.3ラインで同時であるが、岩手県三陸方向のS2=S3 - 80ラインでは時間差67.8秒で大きな乖離がある。

Table 12は、Fig.63と同じ要領で震央及び各SMGA起震点間距離を①～⑧の組合せ毎に被災ラインを求め、各々の近似式と決定係数をまとめた。また、震央及び各SMGA起震点からの影響を傾きと切片及び決定係数で評価し、その関係性が比較的大きいラインをA、多少関係が見られるものをBにグループ分けを行った。また、強震動生成域とは異なる性格の震央とSMGA1・3からの影響については、別枠Cを設けた。被災ため池が最も集中した県中域では、最もタイムラグが大きいS1及びS4から以外は全ての起震点からの影響が認められ、県南及びいわき域も同様の傾向であった。相双と県北域は震央とS1及びS2並びにS3及びS4からの影響が見られるが、起震点から距離が離れ被災箇所は分散的であった。全体的には起震時点の間隔が大きい場合（例えば、③、④及び

Table 12 東北地方太平洋沖地震の福島県内の被災ため池の震央及び各SMGA起震点間距離と被災ラインの傾き及び決定係数

Relationships between regression coefficient and coefficient of determination on distance from the epicenter and from the starting point of 4each SMGA to damaged irrigation ponds in Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

No.	距離分類	式中	傾斜	切片	決定係数	1秒差	備考
①	震央×SMGA1	式 y=0.995x+65	y=1.014x+60	y=0.986x+62	y=0.815x+68	y=0.972x+59	
		R ² 0.98	0.992	1.00	0.869	0.986	
②	SMGA1×SMGA2	式 y=0.996x+37	y=0.986x+33	y=1.082x+57	y=1.076x+52	y=1.007x+33	
		R ² 0.99	0.99	0.999	0.91	0.993	
③	SMGA1×SMGA3	式 y=0.940x+64	y=0.496x+126	y=0.962x+273	y=0.134x+121	y=1.127x+80	
		R ² 0.697	0.28	0.297	0.148	0.806	
④	SMGA1×SMGA4	式 y=0.789x+123	y=0.671x+143	y=0.763x+219	y=0.138x+121	y=1.008x+147	
		R ² 0.364	0.522	0.707	0.278	0.426	
⑤	震央×SMGA3	式 y=0.998x+120	y=0.851x+146	y=0.814x+322	y=0.088x+176	y=1.161x+133	
		R ² 0.768	0.799	0.258	0.001	0.888	
⑥	SMGA2×SMGA3	式 y=0.985x+98	y=0.823x+124	y=0.827x+258	y=0.029x+151	y=1.157x+109	最長時間差
		R ² 0.764	0.771	0.263	0.009	0.867	
⑦	SMGA2×SMGA4	式 y=0.919x+153	y=0.724x+178	y=0.688x+254	y=0.089x+154	y=1.084x+177	
		R ² 0.465	0.621	0.673	0.068	0.90	
⑧	SMGA3×SMGA4	式 y=1.113x+45	y=0.986x+57	y=0.469x+85	y=0.813x+33	y=1.108x+56	
		R ² 0.89	0.973	0.832	0.85	0.81	
距離評価	A	①,②,③,④,⑤,⑥,⑦,⑧	①,②,③,④,⑤,⑥,⑦,⑧	①,②,③,④,⑤,⑥,⑦,⑧	①,②,③,④,⑤,⑥,⑦,⑧	①,②,③,④,⑤,⑥,⑦,⑧	
	B	③,④	③,④	③,④	③,④	③,④	
	C	③,④	③,④	③,④	③,④	③,④	

び⑦)では、傾きと決定係数は小さくなる傾向がある。これは起震時間差が短いほど有為地震波の重なり合う増幅効果が大きくなること意味し、Fig.60, Fig.61での考察が再確認された。また、①及び⑤においては、震央が広大な震源域全体の起震点であり、一連の断層破壊に伴う地震波は特定された強震動生成域内の起震点からよりも比較的長い時間この方面から伝播してきたと考えられる。さらに、4つのSMGAで最大マグニチュードのSMGA2が震央に最接近していることも、この方向からの伝播が交錯する理由であると推量できる。

Table 11では、起震時点が前後するSMGAの2つの起震点から有為地震波の同時性を加味した重合ラインを検討したが、これらラインが東北地震時の推計震度分布上でどのような関係を有するかについて、宮城・福島両県のマップを用いて以下で検討を行った。まずFig.64では、震央からの起震時点がSMGA1より24.1秒早く、且つ陸域から離れた側にあったことから、S1の有為地震波は震央からの波が通過後、最短約1秒(=2.9km ÷ 3.0km/sec, 参照Table 10)遅れで通過するラインが図中のE=S1+69.4であり、丁度、震央からS1を結ぶ延長線が仙台平野を東西方向に横断している。この最短時間差ラインから南北方向に放射状にひかれたライン上では、S1からの距離が相対的に遠くなり、その分S1有為波に到達遅れが生じることになる。結果的に震央とS1の有為地震波の重合が及ぼす震度への影響は、本ライン上において最大になると考えられる。因みに、仙台平野では当該ライン上に震度6-が分布しているが、Fig.62で見た宮城県内での「フタコブ駱駝型」強震度の第一コブに相当するものがこの震度であったと考えられる。なお、S1からの波が最も遅れて到達するのは、E=S1+40上にある宮城県気仙沼地域で、切片の差30kmで最短差ラインより10秒遅れとなる。同様に福島県内ではいわき地域で差15km、5秒程度の遅れとなった。

Fig.65では、SMGA1とSMGA2起震点からの距離を式とラインにしてFig.64と同じ方法で図示した。ここでは

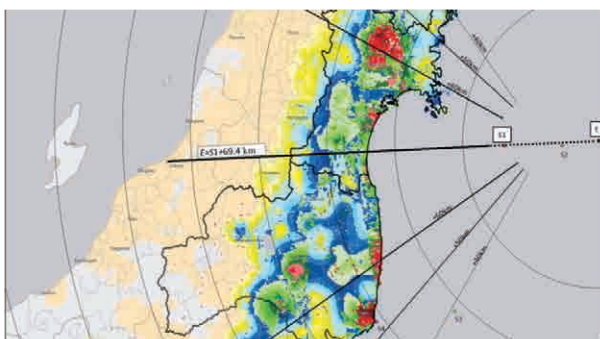


Fig.64 東北地方太平洋沖地震の震央及びSMGA1距離と宮城・福島県内の震度分布

Relationships between distance lines from the epicenter and from the starting point of SMGA1 to inland and distribution of seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

陸地から離れた後発S2が先発S1を後追いするために、S2からS1を結ぶラインS1=S2-42.5上でS2からの後発波が最も遅れて到達することになる。因みに、同ライン上での到達時間の遅れは、55.5秒(=41.3sec + 14.2sec (=42.5km ÷ 3km/sec), 参照Table 10)で、S1及びS2波の重合の影響が最も低く、南北方向に切片の数字が大きくなる(負の値小さく)なるに従って同時性が強まり、地震波の重合による震度も大きくなる。また、S1=S2-42.5ラインはFig.64のE=S1+69.4とほぼ同じ所を通過しており、同じ震央距離圏内にあっても宮城県北部の方が、S1及びS2波の同時性が強い。Fig.61の「フタコブ駱駝型」強震度の内、第2コブに相当するものがこの重合による影響で発生したと考えられる。但し、両県内陸域に対して重合同時性最大のラインがS1=S2-20上の気仙沼地域で、同時性の短縮は8秒(=22.5km (42.5km - 20km) ÷ 3km/sec)未満となり、S1・S2両波の重合による震度への影響は、伝播方向間で極端な格差は生じることなかった。言い換えれば、S1・S2の重合波による宮城・福島両県への影響は、向かった方向性より震央距離に応じて大きくなっていった。

Fig.66では、SMGA2及びSMGA3起震点からの距離を式とラインにしてFig.64と同じ方法で図示した。前2図とは異なり、S3が福島沖に位置し、S2とS3を結ぶ線が両県とほぼ平行関係にあるために、傾きを1とした切片の範囲は+125km~-80kmと約200kmの広いに範囲に跨がっている。また、図中のS2=S43+123.3(太い緑)ラインは、S2及びS3からの有為地震波の伝播速度を3.0km/secとした場合に両波が同時に到達するラインであり、この線から離れる(切片の差が大きくなる)ほど、S3からの波の到着が遅れて同時性が薄れることになる。因みに、S3波の到着が最も遅れた気仙沼地域では、先発S2の波到達後67秒(=200km ÷ 3km/sec)遅れで、両起震点を結ぶ線を底辺とした二等辺三角形の頂点であるS2=S3ラインでは、両点の実際の起震時間差41秒がそのままS3からの到達時間遅れとなっている。地震波の同

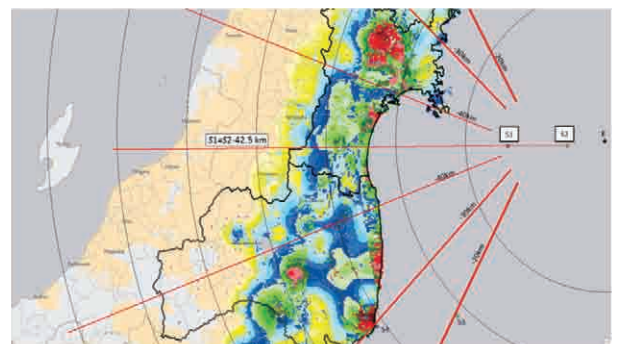


Fig.65 東北地方太平洋沖地震のSMGA1及び2からの距離と宮城・福島県内の震度分布

Relationships between distance lines from starting points of SMGA1 and SMGA2 to inland and distribution of seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

時性ラインと震度分布の関係では、時間差0のS2=S43 + 123.3ラインが通過したいわき市沿岸部では6+の大きな震度となり、S3が約8秒遅れて到着したS2=S43 + 100ラインは、福島県相双域南部と県中・南域の被災集中域付近を通過しており、Fig.60(a)の③による震度上昇と符合している。そのため、さらに北に向うほどS3からの波は遅れ、宮城県方面の震度への影響は低かったと考えられる。

Fig.67では、起震点が福島県側のSMGA3及びSMGA4から両県に向けた地震波の同時性ラインを前図と同様に図示した。両起震点の時空間関係は、先発のS3が後発のS4より陸から離れた側にあり、Table 10より先発波が後発起震点を約21kmオーバーランしており、Fig.64の震央とS1の同じパターンとなっている。そのため、最も到達時間差が短いのは、S3からS4を結ぶS3=S4 + 59.7ラインで、時間差は約7秒(=21km ÷ 3km/sec)である。因みに、このラインがいわき地域をかすめて栃木県方向に進み、被災集中の福島県中・南域では+3秒(9km(=59km - 50km) ÷ 3km/sec)で到着時間差10秒、さらに県北方面には+8秒(24km(=59km - 35km) ÷ 3km/

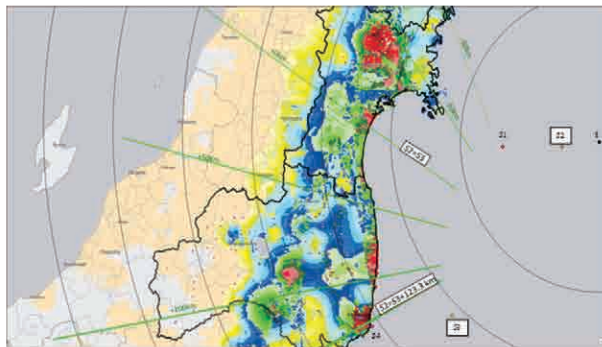


Fig.66 東北地方太平洋沖地震のSMGA2及び3からの距離と宮城・福島県内の震度分布

Relationships between distance lines from starting points of SMGA2 and SMGA3 to inland and distribution of seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

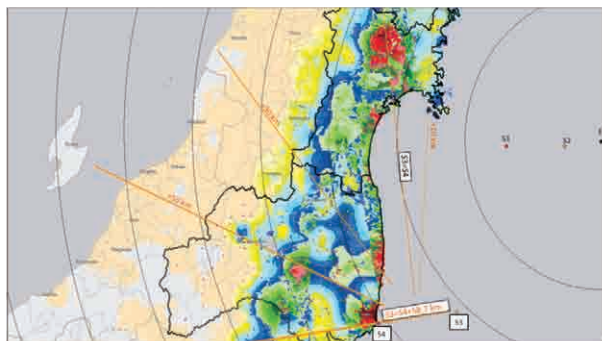


Fig.67 東北地方太平洋沖地震のSMGA3及び4からの距離と宮城・福島県内の震度分布

Relationships between distance lines from starting points of SMGA3 and SMGA4 to inland and distribution of seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

sec)で15秒遅れ、最も遅れた宮城県東部・気仙沼地域は+約23秒(70km ÷ 3km/sec)で30秒遅れて後発のS4波が到達する。なお、宮城県北部に向けては切片0km(S3=S4, 二等辺三角形の頂点)ラインとなるが、両波の到着時間差が27秒で起震点からも200km離れており、Fig.61(a)で見た通りこの地域でのS3及びS4から震度上昇に及ぼす影響は小さかった。

Fig.68は、Fig.64～Fig.67から主要な有為地震波到達ラインを抜き出し、1つにまとめたものである。震央及びS1の到達ライン①とS1及びS2の到達ライン②は、ほぼ同じエリアを通過しているが、同時性はライン①が最短で②は最長で真逆の関係にある。仮にS1とS2の起震順番だけが真逆になるだけで、2つの最短ラインが集中し、55.5秒の間隔であったS2とS1の到達時間差が27秒に短縮されて仙台平野を直撃し、このエリア内の強震度分布は大きく変わることになる。一方、福島県側は先発の3起震波からの伝播距離によって震度は抑制気味であったが、後発2波が福島側からの起震であり、S2とS3では同時到達ライン⑥の通過エリア周辺では大きな震度となった。因みに、いわき市内を通過した同時到達ライン⑥に対して、宮城県内を通過する⑥'(切片0km)ラインは、S3波が41秒遅れて且つS4を含めて遠距離があることから、後発の2つのSMGAによる宮城県全体における震度への影響は小さいと考えられる。

e 震央・起震点距離と震度

通常、起震点から近距離ほど地震波の減衰が小さく震度自体は大きくなる。Fig.69では宮城・福島両県内の観測点計測震度と各観測点から震央及びSMGA各起震点までの距離をFig.68の起震点の組合せ毎にプロットした。例えば、①到達ライン(黒)は震央及びS1から観測点までの距離で、それを県別、震度別に区分して①ラインと併せてプロットした。他に②ライン(赤・S1とS2)、⑥ライン(緑・S2とS3)及び⑧ライン(オレンジ・S3とS4)についても同じ手法で同一グラフ上にプロットし、それぞれ異なる色の線をひいた。なお、同色線で太さを

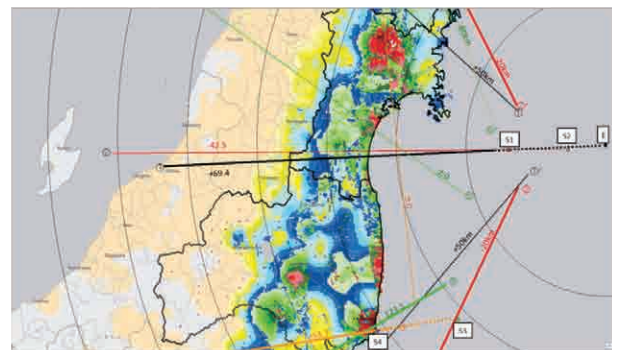


Fig.68 東北地方太平洋沖地震の震央及び各SMGAの起震点距離と宮城・福島県内の震度分布

Relationships between distance lines from the epicenter and 4 starting points of SMGA's to inland and distribution of seismic intensity in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

変えることで、同時性の強弱を表した。さらに図中には、**Fig.60**と**Fig.61**で両県の代表観測点とした鏡石町不時沼と登米市米山町を特定することで、到達ライン毎の時空間的推移を比較できるようにした。

まず、**Fig.69**では全体的に原点、即ち起震点に近いほど計測震度が増大する傾向が見られると共に、各到達ラインとの関係では到達時間差が短くなることを示すためラインに近いほど震度が大きくなる傾向が見られる。代表観測点では、米山町の計測震度を到達順に(A)~(D)と明示したが、前半(A)と(B)では原点(=起震点)に近く、特に(B)の時点では起震点S1距離100km、S2距離135kmと接近しており、この時点で最大震度になっている。以降、S3距離180km、S4距離180kmと段々に遠くなると共に、同時性の高い⑥及び⑧ラインからも離れており、後半の(C)と(D)では大きな震度は起こり得ない。一方、不時沼観測点では、前半(E)と(F)の震央距離240km、S1距離180km、S2距離215kmからは6+レベルは過大な震度となるが、後半の(E)と(F)はS3距離120km、S4距離65kmとかなり接近すると共に、⑥の同時到達ラインや⑧ラインにも近い。このことから、不時沼地点の最大震度の計測は、S3及びS4からの地震波が到達した段階であった。

Fig.69と同様の手法で、宮城・福島両県内ため池の起震点距離を**Fig.70**に県別・到達段階を区別してプロットした。また、前図同様、比較検討のために3つの決壊ため池を代表点として明示した。因みに、3ため池の推計震度は、青田新池・5.3、中池・5.5、藤沼湖・5.4である。震央、S1及びS2からの有為波が到達する①及び②の段階では、青田新池が起震点に近く、県中域のため池より大きな地震波の影響を受けたが、S3から到達する⑥時点では藤沼湖より同時ラインから離れ、さらにS4からの到達時点⑧でも同時性が薄い場所にあった。因みに、福島県内で県中・南域でため池被災が集中した要因に地形・地質条件を挙げてきたが、同図における県北域

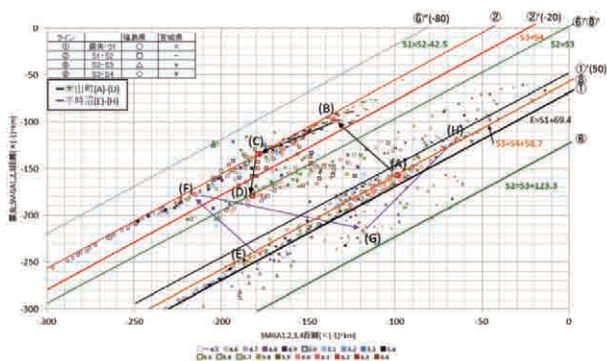


Fig.69 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内観測点の震央及び各SMGA距離と計測震度
Relationships between measurement seismic intensity and distance from the epicenter and from starting points of every 4 SMGA to survey stations in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

との被災分布では有為波の到達同時性にもかなりの差異があった。また、青田新池は県北域にありながら、到達同時性においては県中・県北域に被災ため池群に近い関係があった。なお、⑥'(S2=S3)及び⑧'(S3=S4)ライン上にため池が存在せずに凹形となっているが、この部分は仙台平野に東面する海面に当たり、ここを陸地と仮定すれば大被害に見舞われたと想定できる。

宮城・福島両県内ため池の震央距離と震度の関係を**Fig.71**にプロットしたが、震央に近い順に被災ため池分布を宮城県北、亶理・相双、いわき、福島県北、福島県中・南域に5区分できた。宮城県北域では震度6+以上のため池が多数あるにも拘わらず、被災ため池は震度5.5前後が多数を占め、亶理・相双域ではさらに低く震度5.0前後からの被災が見られる。いわき域では最大震度6.8から最低4.7と幅広いが、被災ため池は震度5.5が中心でその数が極めて少ない。福島県北域では震度5.9から4.8の範囲で被災しているが、特段の偏りは見られない。福島県中・南域では震度6.3に明確なピークが見られ、比較的大きな震度に被災が集中している。

前段でため池被災地域を5つに区分したが、**Fig.72**で

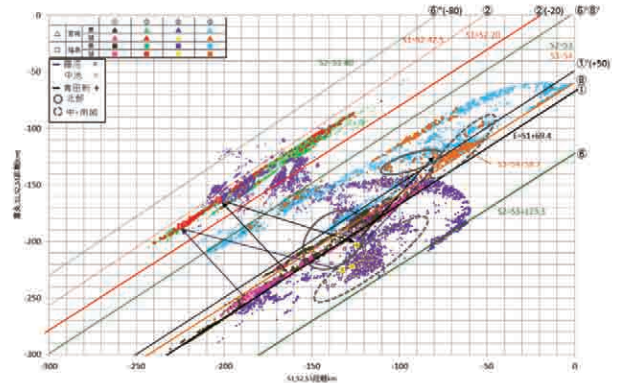


Fig.70 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内被災・無被災ため池の震央及び各SMGA間距離と推計震度
Relationships between estimated seismic intensity and distance from the epicenter and from starting points of every 4 SMGA to damaged & non-damaged irrigation ponds in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

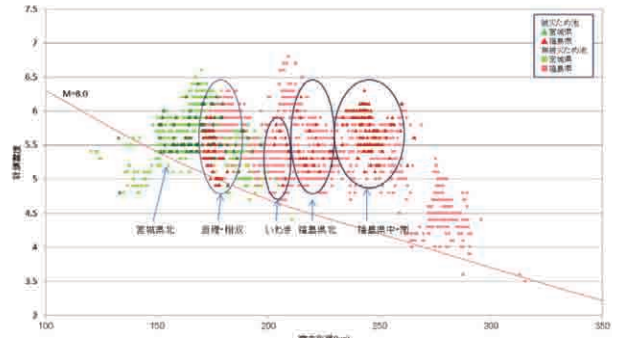


Fig.71 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内ため池の震央距離と推定震度
Relationships between estimated seismic intensity and distance from the epicenter to irrigation ponds in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

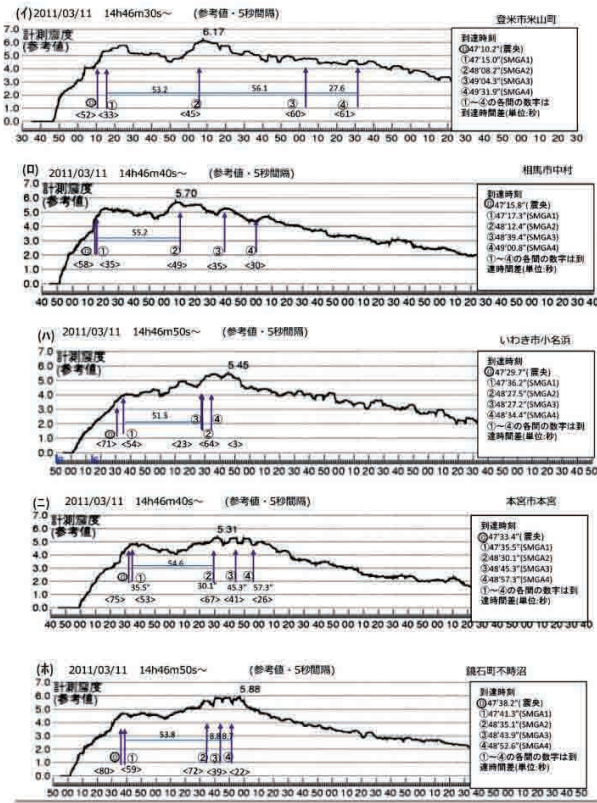


Fig.72 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内観測点の計測震度と有為波到達時刻比較

Comparison of measurement seismic intensity (5 seconds type) and arrival time of affecting waves at survey stations in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

は各々を代表する観測点を(イ) 登米市米山町, (ロ) 相馬市中村, (ハ) いわき市小名浜, (ニ) 本宮市本宮, (ホ) 鏡石町不時沼として, 5秒間隔計測震度の時刻経過に震央及び各SMGA起震点からの有為地震波到達時を入れて比較し, 被災地域毎の特徴をTable 13で整理した。被災率が最大であった(ホ) 福島県中・南域では, 2番目の震度「コブ」が他の地域よりも高水準で長く続いており, (イ) では震度6+レベルが2度起こったが, いずれも継続時間が短く, ため池の被災増加に至らなかった。(ロ) では震央とS1波の到達がほぼ同時で, S2到達後のS3とS4は距離が短い分(イ)より早い, 震度を大きく増大させるまでに至っていない。(ハ) でS2とS3から同時到着した以降, S4が短い間隔で到達したことで, 震度は「1コブ駱駝」型のピークとなっている。(ニ) は震央とS1の時間差が短く, 「フタコブ駱駝」型のピークとなるが, S2からS4までの到達間隔が比較的小さいため, (ロ)よりも2番目のピークが立っている。総じて言えば, (ロ)と(ホ)のように同様の盆地地形で震度が増大しやすい条件下にあっても, 有為地震波が絶妙な同時性を持って到達しなければ, 大きな震度が長く継続する可能性は低くなる。

Fig.72の考察を踏まえ, Table 13に被災5地域のため

Table 13 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内被災地域別の震度及び継続時間特性とため池被災リスク

Relationships between damage risk to irrigation ponds and characteristic of seismic intensity and its continuous time in devastated areas in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

地域名	(A)起震点距離	(B)到達同時性	(C)震度変化	(D)強震度継続時間	(E)被災リスク(順位)
宮城北部 (登米市)	①最も近い ②最も近い	①S1が少し遅れる ②極めて近い	①断続的で震度増大化 ②ピーク後に速やかに低減 ③S1とS2のインパクト増大化	①明確な2つのピーク ②強震度ピークは長続きしない	震度は増大で継続時間は長くない 3位
宮城・相馬 (相馬市)	①近い ②近い	①同時 ②あまり遅くない	①数地震でS2到達時に最大 ②ピーク後も揺れが継続 ③同時性が低く震度は高減衰	①不明確ながら2つのピーク ②強震度ピークは増大化しないが短い	震度は増大化しないが継続時間は長い 2位
いわき (小名浜)	①近い ②最も近い	①ほぼ同時 ②同時が最も高い	①継続的で震度ピークは増大化しない ②強震度は長期化しない ③同時性が低いと震度後は発生しなかった	①ピーク1つだけ ②強震度は長続きしない	震度は増大化せず継続時間も短い 5位
福島北部 (本宮)	①近い ②近い	①ほぼ同時 ②短い間隔で断続的	①数地震で震度は上昇 ②ピーク後は速やかに低減 ③高減衰しなかったため, 強震度は増大化せず	①不明確ながら2つのピーク ②強震度レベルは低く継続時間も長くない	震度は増大化しないが長い継続時間 3位
福島南中 (鏡石)	①最も近い ②近い	①ほぼ同時 ②短時間の中で断続的	①数地震で震度は上昇 ②ピーク後も震度継続しにくい ③震2波が真中到達したために震度が増大化	①強いピークが低いかつ の大きな震度の山 ②震1波で連続的震度 ピークが長時間継続	震度は夏以降で増大化し, 長い時間レベル震度が最上層に継続 1位

池被災リスク評価を行った。表の見方は, ため池被災地域ブロック毎に個々の起震点からの距離関係 (A), 5起震点の到達同時性 (B), 地形・地質条件を加味した震度変化の特徴 (C), 強震度の継続時間 (D), (A) ~ (D)の特性を踏まえて地域毎の被災リスク順位付けを (E)で行った。今回の地震で被災が最も高くなった福島県中・南域では, 地形・地盤条件から震度が高レベルに達する潜在性を有し, そこに複数の有為波が絶妙のタイミングで波状攻撃的に到来することで強震度が尻上がりに上昇し, 長い継続時間となったため池被害を激化したことが原因であると考えられる。

Fig.25の福島県中域だけを対象として堤軸角度別被災を見てきたが, 集中エリアを形成した有為地震波が震央以外にも複数存在したことを踏まえ, Fig.73では県南域も含めてエリア全体の再検証を行った。その場合, 角度区分毎の被災率を表すレーダーグラフの周りに震央及び各SMGA起震点方位を示した。また, 参考にFig.25を再掲 (Fig.73 (b)) し, 図(a)と同様に方位を追加した。これまでは震央方向に対する角度だけを見てきたが, ため池堤軸に対しては震央からS1へ約8°, S4へ約49°の併せて全体約60°のやや広角度な方向から地震波が入射し

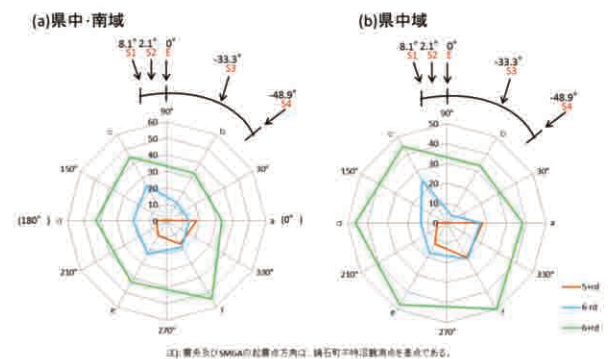


Fig.73 東北地方太平洋沖地震の福島県中・南域ため池の堤軸角度毎の震度階別被災率

Relationships between damage ratio based on estimated seismic intensity during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and angle of dam axis with respect to the epicenter in Central & Southern Fukushima

ており、堤体下流面が起震点方向に直角に面する場合に被災率リスクが高まることを再確認できた。

f 考察

本節のテーマであった、宮城・福島両県の被災要因を Fig.74 にまとめた。主要因は地形・地質条件と大きな地震動が重なり合うことで、福島県中・南域でため池被災率が最大となった。但し、これが地震時に同じ場所で常に起り得るものでないことは、過去の地震歴から見て明かである (Fig.41 参照)。仮に東北地震の SMGA の起震点の位置や時点が違えば、即ち、起震の時空間関係によって異なる揺れやすい地形・地質条件を有する場所でため池被災が集中する可能性がある。

4.5 震度によるため池被災リスク

a 適用課題の整理

Fig.75 では東日本大震災の被災県の内、ため池DB上で被災 (災害査定済)・無被災が各々位置座標で確認できた宮城・福島・茨城・栃木・群馬の5県分について、全ため池の推計震度 (a) と被災分の推計震度 (b) を示したが、ため池被災率は震度5+レベル以上で急激に増加していたことが分かる。図中では宮城・福島両県内の被災ため池が多数を占め、震度が5+から6-レベルに上がるに従い被災ため池数とそのリスクが格段に上昇している。また、茨城・群馬県内では震度5-レベル以下でも被災事例が見られたことが注目される。以下、震度とため池被災リスクの関連について、これら5県分の被災ため池データを含めて検証をおこなった。

本稿ではため池の被災リスクを気象庁が公表する推計震度をベースに検証しているが、その場合に先ず、推計震度が観測点の計測震度と周辺地盤の相対的な増幅度から求められていることを想起する必要がある。そのため、同一市町村内の観測点計測震度がため池の推計震度とどの程度差違があるか、また、被災ため池震度とはどうかを確認する必要がある。Fig.76 では、宮城・福島両

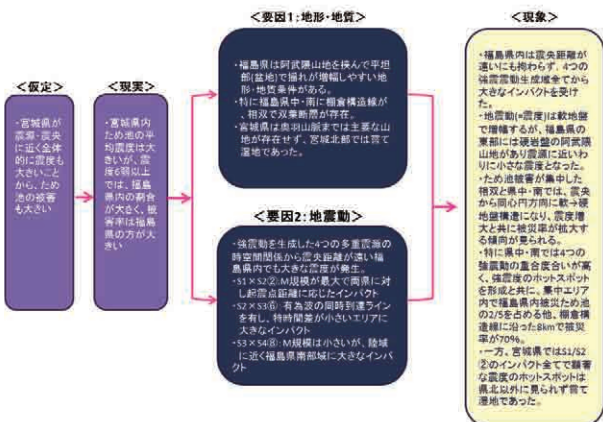


Fig.74 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県のため池の被災要因

Element factor of causing damages to irrigation ponds in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

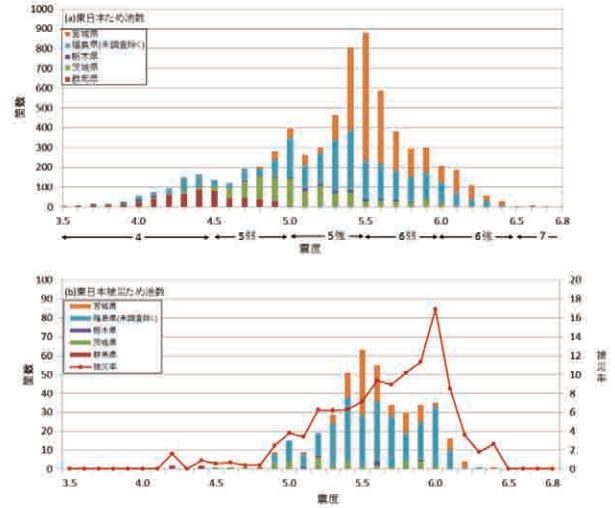


Fig.75 東北地方太平洋沖地震のため池の推計震度と被災率 Relationships between estimated seismic intensity and damaged irrigation ponds in devastated prefectures during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

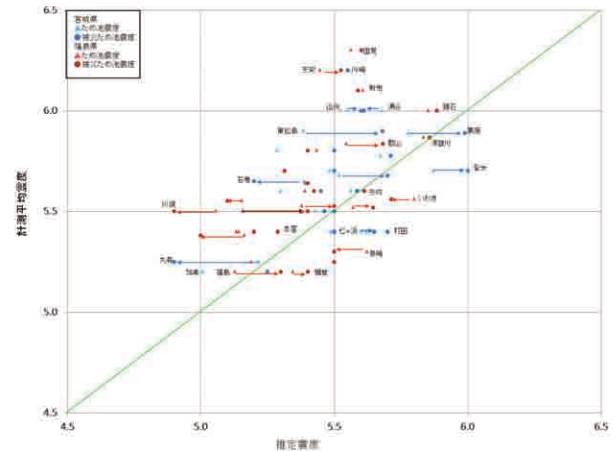


Fig.76 東北地方太平洋沖地震の宮城・福島県内ため池被災市町村の計測震度とため池推計震度 Relationships between measurement seismic intensity at survey stations and estimated intensity at irrigation pond sites in Miyagi and Fukushima Prefecture during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

県で市町村内に10個以上のため池を有し、うち複数ため池が被災した同一市町村の観測点計測震度(複数観測点がある場合はその平均値)と当該市町村内の全ため池の平均震度と被災ため池の平均震度を比較した。図中、傾き1の緑線上は、市町村計測震度とため池平均推計震度が同じ場合であり、緑線の左上領域は観測点計測震度が、右下側はため池推計震度が相対的に大きい領域になる。ため池平均震度は全体的に左側領域にあり、市町村の計測震度より低くなる傾向であった。また、一部の被災市町村で逆転する場合もあるが、被災ため池震度の方がため池全体の平均震度より全般的に大きくなるのが分かった。この理由は、震度観測点は概ね平成合併前の市町村役場敷地内に設置され、住民利便性の観点からその多くが平地に設けられている。一方、ため池サイトは

県で市町村内に10個以上のため池を有し、うち複数ため池が被災した同一市町村の観測点計測震度(複数観測点がある場合はその平均値)と当該市町村内の全ため池の平均震度と被災ため池の平均震度を比較した。図中、傾き1の緑線上は、市町村計測震度とため池平均推計震度が同じ場合であり、緑線の左上領域は観測点計測震度が、右下側はため池推計震度が相対的に大きい領域になる。ため池平均震度は全体的に左側領域にあり、市町村の計測震度より低くなる傾向であった。また、一部の被災市町村で逆転する場合もあるが、被災ため池震度の方がため池全体の平均震度より全般的に大きくなるのが分かった。この理由は、震度観測点は概ね平成合併前の市町村役場敷地内に設置され、住民利便性の観点からその多くが平地に設けられている。一方、ため池サイトは

山間窪地や谷間に多くあって相対的に硬い地盤と評価される場所にあり、推計震度的には低くなる傾向にある。実際のため池サイトの震度は、個別的に揺れ易い地形・地質条件下にあり、単純な地盤評価では震度が過小にならないと考えられる。また、同一市町村内の被災ため池平均震度は、計測震度が高い市町村ほどため池被災率も高くなっている。

Fig.77では、被災5県で震央距離と震度の関係から被災ため池がどのような場所で発生したかをみたが、茨城・栃木両県では震央距離270～320kmの範囲に被災が散見される。震度では栃木県内で5+以上、茨城県では5-レベルでも被災が見られ、全体的に推計震度が大きいため池に被災が集まっている。しかしながら、震度ピークのエリアで被災ため池が集中している訳ではなく、いわき地域のように推計震度は大きくても無被災ため池も数多く見受けられる。一方、距離400kmと最も離れた場所で被災が見えるが、被災ため池で最も低い震度は4.2であった。

b 強震動生成域からの距離と震度

前節のFig.72等で福島県内のため池被災にSMGA3及び4からの強震動波の影響を見たが、Fig.78ではFig.77の震央距離に対してS3とS4の中間点からの距離でため池の震度と被災の関係をプロットした。震央距離では最も近かった宮城県内のため池は、中間点からは150～200kmの距離になった。また、震央距離270～320kmの範囲にあった茨城・栃木両県のため池は、50～150kmの範囲で福島県に一部重なる等、南北の分布が入れ替わっている。特に被災ため池はS3・S4中間点距離が70～130kmの(b)範囲にいわき域(a)を除く福島県内全域と宮城県亘理及び茨城・栃木県のほぼ全域が含まれ、宮城北部域(c)と群馬県内の被災ため池が離れて分布しており、後半SMGAの発震域が今震災の被災形態に深く関係することが分かる。

Fig.79では、Fig.68の同時性到達ライン①、②、⑥及び⑧を宮城・福島両県からさらに南北に拡げた図(a)に引き、震央(E)及び各SMGA起震点の時空間とマグニ

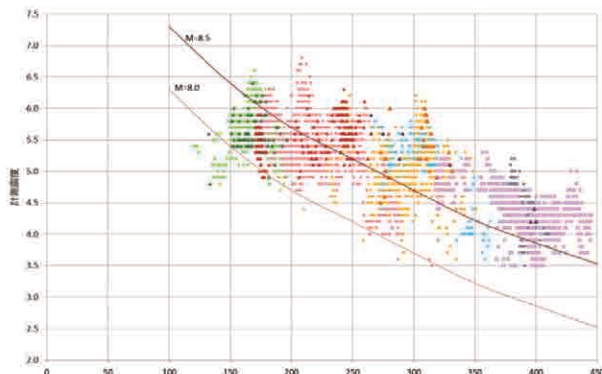


Fig.77 東北地方太平洋沖地震の震央距離とため池震度

Relationships between estimated seismic intensity and distance from the epicenter to irrigation ponds in devastated prefectures during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

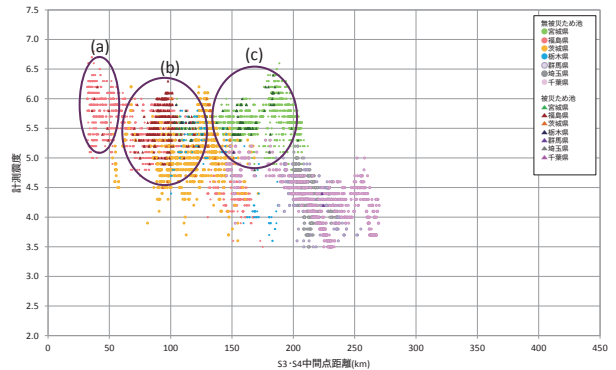


Fig.78 東北地方太平洋沖地震のSMGA3/SMGA4中間距離とため池震度

Relationships between estimated seismic intensity and distance from the middle point of SMGA3/4 to irrigation ponds in devastated prefectures during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

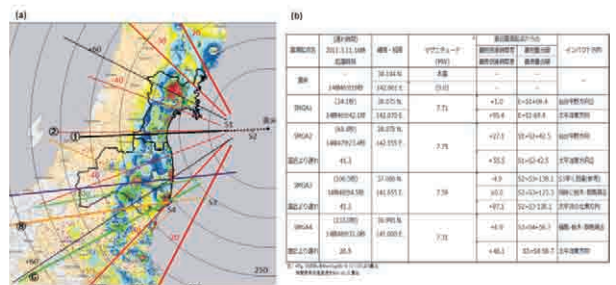


Fig.79 東北地方太平洋沖地震における強震動生成域のマグニチュード及び時空間と推計震度分布

Relationships between distribution of estimated seismic intensity in Japan Archipelago and magnitude & spatiotemporal element on the epicenter and starting points of 4 SMGAs during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

チュードを表(b)に整理した。本章第3節の被災集中ラインE=S3 + 120は、別途、紫ラインで追加した。先ず、ライン① (E=S1+69.4) の太い黒線が仙台平野に直進するが、その際のEとS1からの到達遅れは1秒未満であり、南北に放射状に広がる少し細い黒線① (+60) までの範囲は3秒前後 ((69.4 - 60.0) ÷ 3km/sec) の遅れで宮城北部から福島南部に伝播する。赤線②のS1とS2の同時性ライン (S1=S2 + 42.5) は、S1が陸側に近くS2が41秒遅れて起震するため、陸地で55秒遅れ (41 + (42.5 ÷ 3)) のラインとなり、南北方向へ広がる+40の赤線ではS2が②ラインより1秒 ((42.5 - 40.0) ÷ 3) 早く到達する範囲が宮城北部周辺から福島北部南端まで広がっている。緑ライン⑥ (S2=S3+123.3) のS2とS3では41秒の起震時刻差があるが、S2の有為波がS3をオーバーランせず、しかもS3が福島県の陸域に接近しているために、同時到達ラインがいわき市小名浜付近から南西の茨城・栃木・群馬の3県を貫通する。因みに、福島被災集中エリア付近を通過する+100の緑線は8秒 ((123.3 - 100.0) ÷ 3) 差である。オレンジ⑧ライン (S3=S4+58.7) では、起震秒差26.5でS3がS4を20.8 km (3km/sec × 26.5 - 58.7) オーバーランするため、最短7秒遅れで⑧

ラインとなり、⑥と同じ小名浜付近から西南西に向けて進み、福島被災集中エリアを通るS3=S4+50とはプラス3秒(58.7-50.0)÷3以内である。なお、被災集中ラインE=S3+120は宮城沖と福島沖からの4つの同時性ラインにおいて、絶妙なタイミングで高い震度の波状の増幅が続いたと考えられる。

福島県内の被災集中エリアを通過した震央・S3ライン(E=S3+120)上の計測震度経過を見るため、Fig.80(イ)に地図を拡大してそのライン(A)と観測点の位置を示した。また、比較のため同図にS2=S3+100(B)ライン、S1=S2+40(C)ライン及びS3=S4+50(D)ライン、Fig.80(ロ)にS2・S3同時(E:S2=S3+123.3)ライン、S3=S4+58.7(F)ラインの位置を示した。また、(A)、(B)及び(E)の各ライン上の観測点についてFig.61と同様に5秒間隔計測震度の経緯と各起震点からの有為波到達時点をFig.81~Fig.83に明示した。先ずFig.81では、震央・S3ライン(E=S3+120)において福島県沿岸部の富岡町本岡観測点を(イ)、西方向へ順に(ロ)川内村上川内早渡、(ハ)田村市滝根町、(ニ)須賀川市八幡町、(ホ)須賀川市長沼支所までを比較した。なお、矢印①は震央から、①~④は各々S1~S4からの有為地震波、各矢印間の数字は有為波到達時間差(秒)、矢印下の<>内の数字は起震後の経過時間(秒)である。①と②の到達時間差はE=S1+60が南西に向かっており(A)ライン上を西に行くほど間隔が縮まるが、起震点から徐々に離れることで到着時間が遅れ、(ホ)及び(ニ)の震度は大きくなっていない。②、③及び④の到達時間差は(E)ラインに平行的なことで②と③の間隔は同程度であるが、(D)ラインとは方向に差があり、さらに西へ進むほど③と④の到達時間差が短縮する。その結果、(イ)及び(ロ)は起震点から近く震度は比較的大きいが、④が遅れることで(ニ)や(ロ)のような波状的な震度の上昇は見ら

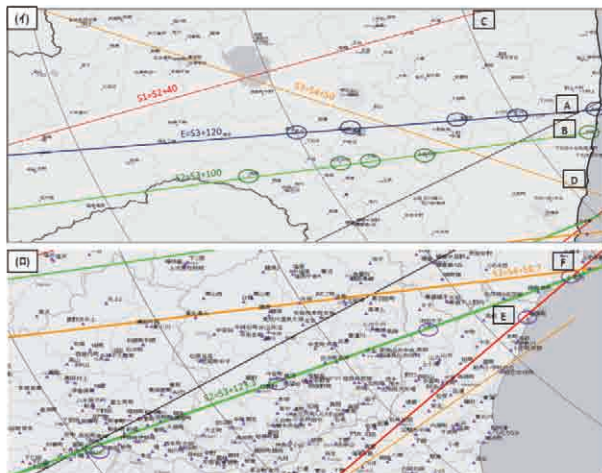


Fig.80 東北地方太平洋沖地震の観測点と震央・S3同時性(E=S3+120)ライン及び周辺ライン

Location of survey stations and E=S3+120, S2=S3+100, S2=S3+123.3, & S3=S4+58.7 lines during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

れなかった。また、阿武隈山地内にあつて地盤の固い(ロ)及び(ハ)は、起震点からの有為波到達による震度上昇の影響を受けにくい。なお、(イ)、(ロ)及び(ハ)では、②の地震波が到達する前に明確な震度上昇現象が見られ、福島県沿岸付近での4つのSMGAとは別の強震動域があったことが疑われる。

Fig.80のB(S2=S3+100)ラインは、A(E=S3+120)とC(S2=S3+123.3)ラインの間にあり、Fig.82で①~④波の到達時間差のパターンはAラインと基本的に同じであるが、震央とS1及びS2からの距離が離れることで、Aと比較して震度上昇が抑え気味である。また、(ホ)の西郷村熊倉地点では(ニ)の矢吹町の地盤条件が異なり、震度を尻上がり上昇させるような震動に対する謂わば「保温効果」が見られない。なお、(イ)、(ロ)及び(ハ)では、Fig.81と同様に②の地震波が到達する前に明確な震度上昇現象が見られ、福島県沿岸付近での4つのSMGAとは別の強震動域があったことが疑われる。

Fig.80のE(S2=S3+123.3)ラインは、S2とS3の同時到達ラインであるが、Bラインに比べ震央とS1及びS2から距離がある。そのためFig.83では②及び③の有為波が同時に到達しているにも拘らず、その震度上昇は①と①による震度の盛り上げが低調な分、AやBラインに比較して全体的に低めである。また、②~④の同時性が高

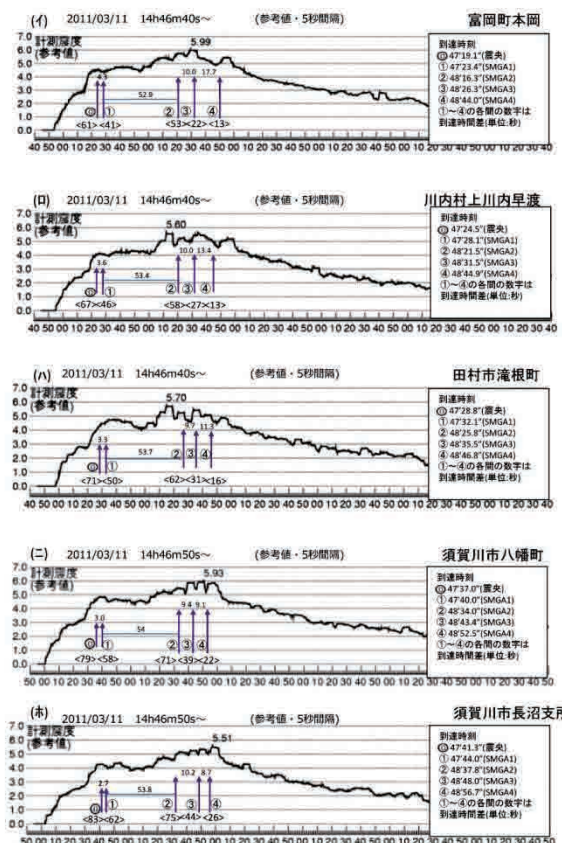


Fig.81 東北地方太平洋沖地震の震央・S3重合(E=S3+120)ライン上観測所の計測震度経過

Comparison of measurement seismic intensity (5 seconds type) and arrival time of affecting waves at survey stations on E=S3+120 line during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

いことから、①及び②の低い波に被さる形で「ヒトコブ駱駝」的な震度ピークが見られる。さらに、有為波の到達時刻の矢印は栃木県から群馬県に震央やSMGA起震点から距離が離れるに従って震度の上昇曲線から遅れが目立って来ており、有為波速度は伝播距離に比例して速くなる傾向があるようにも見える。

c 震度とため池被災率

本節の目標は、気象庁が公表する震度をベースにため池の被災リスク推定手法を検討することである。Fig.84では東北地震における震度とため池に関する全ての被災率をTable 7等の市町村別被災率を含めて図示した。地帯別、県別、地域別など全体的に平均化された実線と比較して、市町村別にプロットした中には高い被災率を示すエリアが存在する。そうした場所の特徴は、ため池サイトが傾斜地にある等、地形・地質条件として地震波が同じ場所に長く留まり、放出し難い状態にある等、謂わば震度に対する「保温効果」が高く、逆に相当の強震度域でも低被災率市町村では、地盤が硬い等で強震動が短い時間しか継続しなかった。県別には宮城県が低被災率、福島県が高被災率、東北地震時の全体的震度別被災率はその中間的なものであった。さらに被災が集中した福島県中域の震度別被災率を加えたが、激甚被災率市町村ではこれを遙かに超える所も複数存在した。

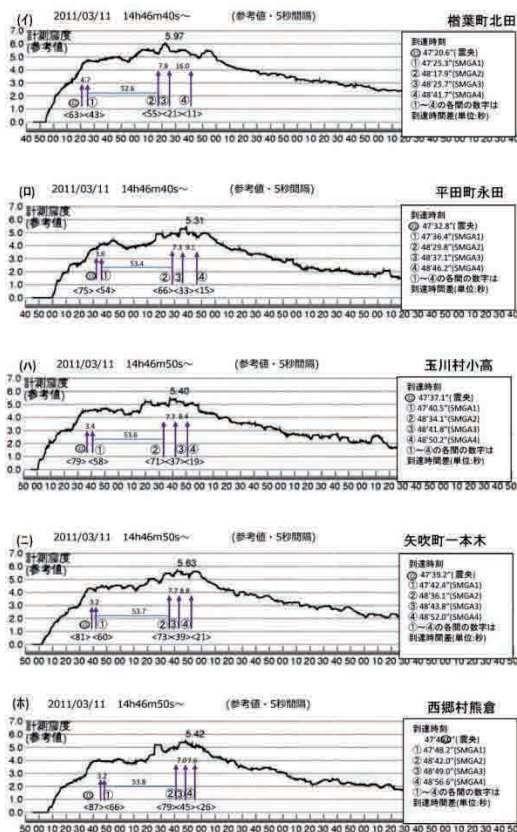


Fig.82 東北地方太平洋沖地震のS2・S3重合ライン(S2=S3+100)上観測所の計測震度経過

Comparison of measurement seismic intensity (5 seconds type) and arrival time of affecting waves at survey stations on S2=S3+100 line during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

これまでの福島県中・南域の被災集中エリアの考察によって、ため池の被災リスクは地震動(=震度)の大きさだけでなく、その強震動が地形・地質条件や複数地震波の入射タイミングでどれだけ長く継続するかにも拠ることが分かった。但し、Fig.75では東日本全域で地震継続時間が3~4分間と長かったが、震度4.0以下で被災ため池が見られず、揺れが長くとも低い震度では被災リスクは低いことも分かった。また、震度4.0を超える処から4.8までに被災例が見られているが、これら地域はFig.77とFig.83で考察したように、震央からは離れるものの複数地震波の入射同時性が高く、震度上昇と併せて揺れが比較的長く続いており、震度4.0でもため池が被災する事例となった。さらに震度5+を超えると被災率は明確且つ急激に上昇し、震度6.1で平均的被災率は16%を超えた。震度7(計測震度6.5以上)レベルで、一定継続時間以上にその揺れが続いた場合は、被災率はさらに急上昇することが想定されるが、過去に震度と関連した被災記録もなく、そのレベルでの被災リスクの実測数値化は困難である。これらの現状を踏まえつつ、震度と継続時間との関係をため池被災リスクと関連して模式化しておくことは、Fig.10に示した地震学、地震工学及び耐震工学の三位一体的研究の一助になると考え、そ

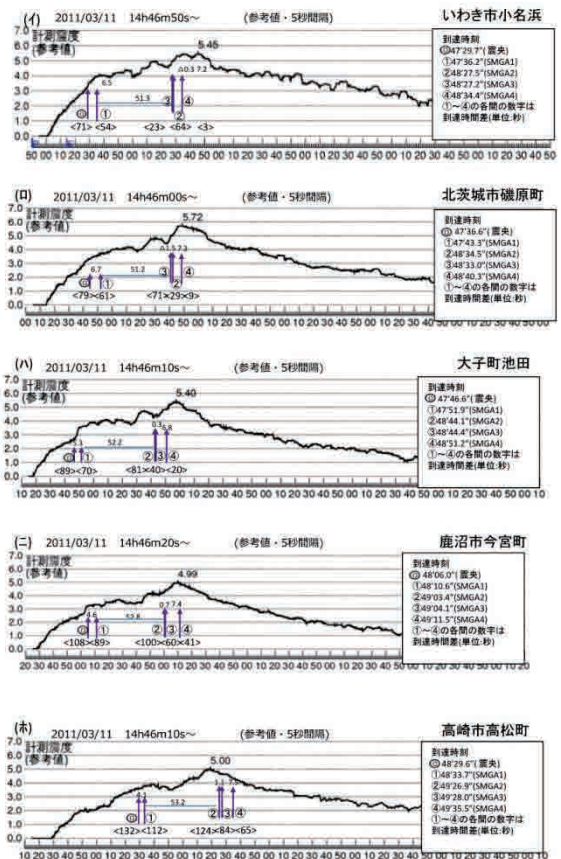


Fig.83 東北地方太平洋沖地震のS2・S3同時ライン(S2=S3+123.3)上観測所の計測震度経過

Comparison of measurement seismic intensity (5 seconds type) and arrival time of affecting waves at survey stations on S2=S3+123.3 line during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

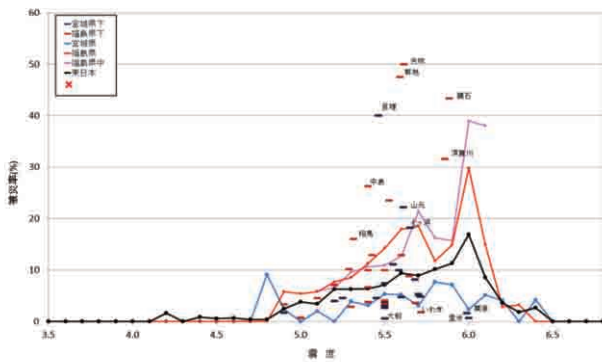


Fig.84 東北地方太平洋沖地震時のため池推計震度と地域別被災率

Relationships between estimated seismic intensity and damage ratio of irrigation ponds in devastated areas during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

のイメージを **Fig.85** に提示した。この図は X(継続時間), Y(震度), Z(被災率) の3軸から三次元グラフであるが, XとY平面上において継続時間と震度の両方が一定値を超えた段階でZ軸の被災率が上昇する形態となっている。因みに, 今回の地震を事例に震度4.0以上から継続時間の長さによって低いレベルの強震度でも被災率が增加する傾向を表現しているが, 今後の研究成果によって, さらに精緻な被災リスク図を描くことが可能となる。本稿の目的を達成するためには, 震度によるため池被災リスクを提示する必要がある。**Fig.6**の1995年兵庫県南部地震時の木造家屋倒壊率と震度の関係は一箇の地震における一定地域の被害でデータであるが, ため池は分散するため **Fig.6**と同じ条件で検証することは不可能である。条件が異なる理由は, 同じ地震, 同一震度であっても分散するため池は, 個々サイトの地盤条件や地震波の到達の仕方によっては揺れ方や継続時間が異なる上に, 被災ため池のデータ数も, 今回の地震事例分だけで被災リスクを評価するためには必ずしも充分ではない。そのため

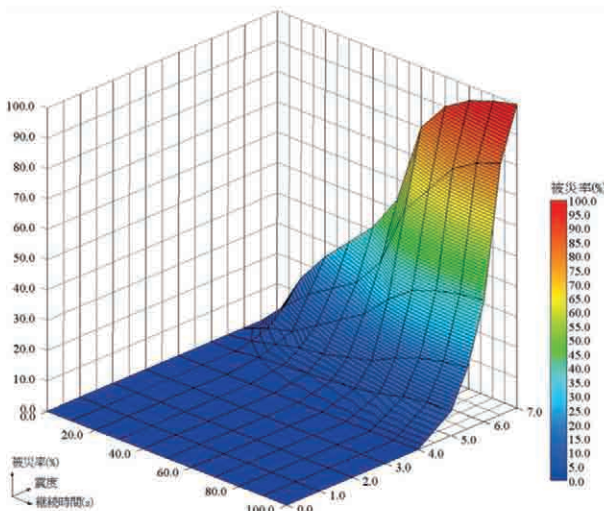


Fig.85 震度及び揺れ継続時間とため池被災リスク推定図

Relationships between damage risk to irrigation ponds and seismic intensity a & its continuous time

Fig.86では, 谷(2001)による2000年鳥取県西部地震(ピンクの△)と2001年芸予地震(オレンジ○)時の震度別のため池被災率も組み込み, 被災リスクを検証した。谷のため池震度は関係市町村の地震観測点における計測震度で3.0~4.0の低いレベルでも被災事例があるが, 被災リスクは東北地震と同様に震度4.0を超えた段階で上がり始めたと考える必要がある。その理由は, 被災ため池の震度が観測点のため池サイトと比べ低い震度で同定されており, 推計震度分布上で見ると低めの震度評価がされている可能性が大きいと考えられる。

震度4.0を超えることに伴うリスク上昇は, 主因となる地震特性と要因となるため池特性によって低位から激甚レベルで条件を設定して検討する必要がある。例えば, 低レベル条件としては硬い地盤, 地震の継続時間が短いや高い耐震性ため池等が想定され, 地盤の軟弱度合, 地震の継続時間, 低い耐震性によって高いリスク条件になる。**Fig.86**では, 低リスク条件を宮城県の平均被災率を事例とし, 同様に中リスクを東北地震の平均被災率, 高リスクを福島県平均, 激甚リスクを福島県中域の事例とした。また, 福島県被災集中エリアでの被災率70%は最大震度6.3であったことから, 本図ではこの点(赤色×印)を延長することで震度7レベル(震度6.5以上)のリスク線とした。今後, 大規模地震時に被災ため池データが同様な方法でさらに積み上がっていくことで, より有効な被災リスク評価が可能になると期待される。

一般に都市と農村を分けるのは地区内の人口密度であり, 防災上不可欠な地震情報を得るために設置される震度計は稠密な都市部に集中する。人口やインフラが粗密な農村部で災害対応や防災体制の前提となる地震情報は, 各市町村役場の計測震度とそれを基にした推計震度を適正に活用するしか方法がない。**Table 14**はこれまでの考察を踏まえ, 震度情報によるため池リスク上の適正利用に関する問題点を整理した。日頃, ため池管理及び防災関係者は震度情報に関心を持ち, 事前に最寄り震度計の場所とため池の位置や地形・地盤条件関係を確認するよう心掛けておくと共に, 大規模な地震発生時には強震度の継続時間にも注意を払う必要がある。

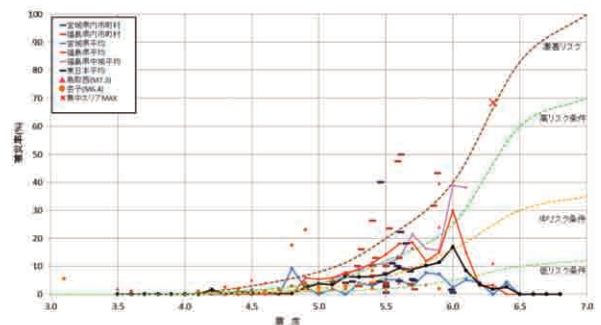


Fig.86 震度とため池被災リスク推定図

Relationship between seismic intensity and damage risk to irrigation ponds

Table 14 ため池被災リスクに関する震度の適正利用上の問題点整理

How to apply seismic intensity on estimation of damage risk to irrigation ponds

事項	判ること(利点)	適用上の問題
推計震度	・低い震度では被災リスクが小さい(高い震度ほど被災リスクが大きい)	・10段階の震度階だけで被災リスクを考慮してはならない。(計測震度を指ること)
	・揺れの時間が長い場合、震度4レベルでも被災リスクが生じる。 ・震度が大きくなるに従って順次、被災リスクは大きくなる。 ・烈震度(6.0以上)だけでは必ずしも被災リスクは高くない。	・公表される震度は、一連する揺れの最大値であり、同等の震度が長くても震度の層は変わらない。 ・推計震度は観測所の計測震度と周辺の地盤の相対的な揺れやすさの程度から算出されるもので、各地点の揺れの大きさ(震度)を正確に表示しているとは限らない。 ・震度の継続時間は連絡されていない。 ・公表される震度階表示では、指数関数的な加速度と被災リスクの連続性が見られない。 ・傾斜地・硬軟地盤混在地等の局所的地形・地質条件や震源位置・方向に由来する推計震度の差異は、反映できていない場合が多い(特に人口過疎な農村地域は観測点が少ない)。
震度分布	・高い震度の分布域から、揺れやすい地盤と地震動の影響度がわかる(山地・山脈部では相対的に震度が低くなる)	・傾斜地・硬軟地盤混在地等の局所的地形・地質条件や震源位置・方向に由来する推計震度の差異は、反映できていない場合が多い(特に人口過疎な農村地域は観測点が少ない)。
	・強・烈震度の分布から高い被災リスクエリアが推定できる。 ・震度分布が一律でなく、大きなギャップがある場合は、硬軟地盤の混在分布の可能性がある。	・ため池特有の条件(堤防方向・形状・材料・築堤年代・管理状況等)による被災リスクは個別検証が必要。

d 個別事例検討

震度によって被災リスクを評価する際、ため池地点の推計震度に基づくとした。Fig.87とFig.88はFig.77において被災ため池の中で、最低震度4.2で被災した事例と推計震度6.8(震度7)で無被災だった事例である。Fig.87の被災ため池は震央距離400kmと最も離れた地点であるが、観測点計測震度は5.0(震度5+)でFig.83(ホ)の5秒間隔計測震度でもS2・S3の同時到達によって震度5.0を記録していた。当該被災ため池が山間部にあることから、推計震度は山地の増幅率適用で低減され、1km震度メッシュは実際のため池サイト震度よりも低めに評価された可能性が考えられる。

Fig.83(イ)の福島県いわき市の事例では、同時到達とS3=S4+58.7ラインが交錯したにも拘わらず、最寄り観測点の計測震度は5.5(震度6-)までであった。一方、ため池地点の推計震度は震度7クラスに評価されたが、被災率は低位に留まった。Fig.88では最近の推計震度図を示しているが、この時点でもため池の被災事例は報告されていない。

ここでは地盤増幅率によって震度が過大に推計され、また地域全体が硬い地盤で震度上昇を抑制し、継続時間も短いことが低い被災率の要因と考えられる。さらに同地域が東(震源)側が海に面しており、地震動を引きこす表面波との関連も考慮する必要がある。

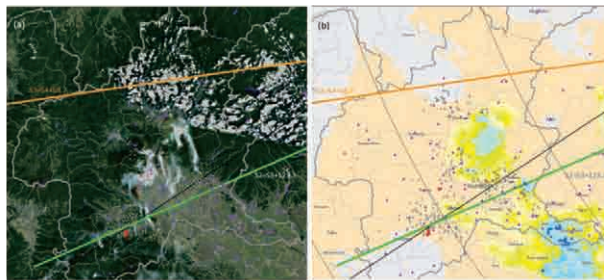


Fig.87 東北地方太平洋沖地震の最長震央距離における被災ため池

Location of damaged irrigation ponds which were most distant from the epicenter during 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

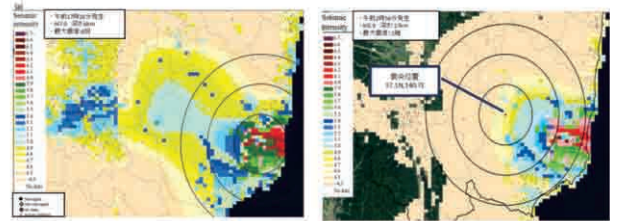


Fig.88 福島県いわき市域の推計震度とため池分布
Distribution of irrigation ponds and estimated seismic intensity in Iwaki District during other large earthquakes

e 考察

本章本節の最後に考察のまとめをFig.89に示した。これまでため池の地震動被害に関しては、地震や位置情報が十分に得られず、被災分布形態など正確さを欠いていた。その意味で、本報が今後の地盤や地震波伝播特性を踏まえたため池被災リスク研究の礎となり、さらなる地震被害研究の進化に貢献することを期待している。そのためには、研究と行政がさらに連携し、ため池被災データ蓄積や震度情報の適正活用のためのIT化導入が不可欠であると考えられる。

V 結言

筆者がこだわった「原体験」とは別に、東日本大震災の教訓を下に災害対策基本法が改正され、総則に「基本理念」が追加規定された。曰く、①災害の発生を常に想定すること、②国、地方公共団体及びその他の公共機関の適切な役割分担及び相互の連携協力を確保すること、③災害に備えるため科学的知見及び過去の災害から得られた教訓を踏まえて絶えず改善を図ること、④災害の発生直後その他必要な情報を収集することが困難なときでも、できる限りの確に災害の状況を把握すること等である。即ち、大地震が発生した場合は、救援・支援側は自らの判断で各機関が対象とする被害量及び場所の想定を行い、速やかに被災地へ緊急支援体制を立ち上げることである。その意味で阪神・淡路大震災以降、全国に張り巡らされた地震計測網は、極めて重要な情報ツ-

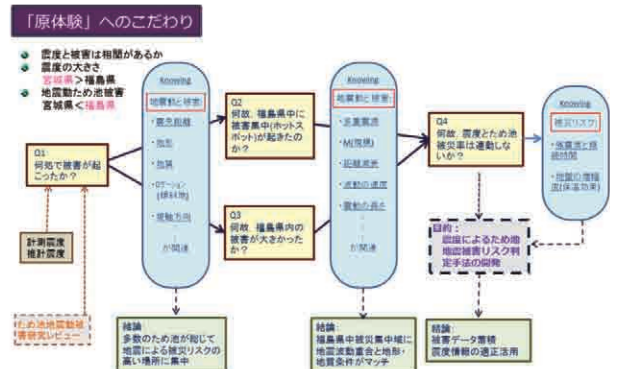


Fig.89 ため池地震動被害研究構図と検討結果

Composition of study on seismic damages to irrigation ponds due to 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its result

ルでありことが証明された。このことから、本稿の結言を以下のようにした。

- (1) 震度とため池被災率には一定の相関性がある。
- (2) 複数の強震動生成域は起震点の時空間関係によって地震域の震度及び継続時間に大きな影響を与える。
- (3) ため池サイト周辺の地形・地質条件及び個々の立地条件によって地震動被災リスクは大きな影響を受ける。
- (4) 福島県中・南域のため池被災集中は、特殊な地形・地質条件において複数の強震動生成域からの偶発的な時空間的起震が原因である。

このことから、地震動によるため池被災リスク D_r の関係式を次のように試算的に提案したい。

$$D_r = a I_M^\alpha T_c^\beta L_r^\gamma M_r^\delta \quad (\%) \quad (7)$$

但し、 I_M ：地震時の最大震度（気象庁の公表震度）、 T_c ：強震動継続時間、 L_r ：ため池の立地リスク、 M_r ：ため池の材質リスク、 $a \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta$ ：百分率表示のための係数

今後、ため池DBシステムを活用した災害データの蓄積と分析と共に、本稿で考察できなかった被害関係データを含め、ため池地震動被災リスク研究の推進によって、ハード・ソフト一体となった総合的な災害対策や強靱な農村地域形成に向けた体制作りに貢献する必要がある。特に災害情報を記録・データ化する地道な取組は教訓や経験をベースとした防災・減災対策に不可欠であり、今後さらに農業・農村整備関係技術者の理解促進と連携提携に努めることが使命であると認識している。

謝辞：本報の取りまとめに当たり、文部科学省研究開発局地震・防災研究課、気象庁地震火山部地震津波監視課、農林水産省農村振興局防災課、東北農政局及び関東農政局整備部、宮城県農林水産部、福島県農林水産部の関係者に多大なるご協力を頂いた。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 秋葉満寿次・仙葉秀男（1941）：秋田県男鹿地震と溜池被害、農業土木研究、13(1)、農業土木学会
- 有田博之（2011）：大震災復興特別委員会～課題と展望～、農村計画学会誌、30(1)、111
- 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
- 功刀 卓・青井 真・鈴木 亘・中村洋光・森川信之・藤原広行（2012）：2011年東北地方太平洋沖地震の強震動、防災科学技術研究所、主要災害調査、48、67
- 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
- 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、33-34
- 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、222、69-75
- 文部科学省（2007）：全国を概観した地震動予測地図
- 守谷正博・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
- 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
- (社)農業土木学会（2004）：土地改良施設 耐震設計の手引き、71
- 大崎順彦（1983）：「地震と建築」、岩波新書（黄版）149、240
- 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、農工研技報、213、1-21
- 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
- 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、農業土木学会誌、(55) 10、17-25
- 谷茂（2001）：ため池の地震災害と震度について、第20回日本自然災害学会学術講演会、1-8,15-18
- 谷茂・堀俊和（1998）：日本におけるため池を含めた農業用フィラ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
- Tani S, Nakashima M (1999): Earthquake damage to earth dams in Japan – maximum epicentral distance to cause damage as a function on magnitude, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **18**:593-602
- 内田和子（1996）：1995年兵庫県南部地震によるため池の被災と貯水率との関係、地学雑誌、105(5)、649-658
- 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
- http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm

受理年月日：平成25年12月19日

Use of Seismic Intensity to Study Damages to Irrigation Ponds during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

SUZUKI Hisato*, NAKAZATO Hiroomi** and INOUE Keisuke*

Department of Planning and General Administration ,Senior Disaster Prevention Research Coordinator *

Department of Planning and General Administration **

Facilities and Geotechnical Engineering Research Division, Disaster Prevention ***

Summary

The 2011 Offshore Pacific Coast Tohoku Earthquake, magnitude M 9.0, damaged a large number of agriculture facilities in Tohoku and Kanto areas Japan. Concerning seismic intensity, the highest level 7 recorded at Kurihara, Miyagi Prefecture, however, there were the most serious damages to irrigation ponds in Fukushima Prefecture. In this study, in order to clarify factors related to the damages of irrigation ponds, we analyzed relative locations, seismic intensity, the epicenter including strong motion generation areas. In the process, we introduced some indexes: mean and 1 km mesh seismic intensities, damage ratio for irrigation ponds, angle of dam axis with respect to the epicenter and distance from rupture starting points. It was found from the analysis that the damage risk in irrigation ponds increased with an increase in seismic intensities and long-time strong seismic motions based on the topographical and geological condition of each dam site.

Keywords : the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, earth dam, seismic damage, measurement seismic intensity, estimated seismic intensity, strong motion generation area, damage-risk

本技報から転載・複製する場合は、農村工学研究所の許可を得てください。

農村工学研究所技報 第216号

平成26年7月18日 印刷
平成26年7月18日 発行

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

〒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：株式会社横山印刷
