

豪雨に対する谷池ならびに 下流域の被災リスク低減に関する研究

吉迫 宏*

*施設工学研究領域地域防災ユニット

要 旨

本稿は、ため池における管理実態の解明や各種の機能診断・評価手法の検討を通じて、ため池の豪雨に対する施設と下流域の被災リスクを管理により低減する方策を解明した。

受益農家や集落が実施する管理作業の実態は、石川県珠洲市のため池を事例としてアンケート調査と現地調査に基づいて明らかにした。また、目視点検を踏まえた機能診断手法として、堤体の漏水経路を1m深地温の測定結果を基にして、堤体中の地温分布のシミュレーションによる逆解析から推定する手法を提案した。

豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策は、広島県東広島市のため池を事例として洪水流出モデルによるため池貯水位予測モデルを作成し、貯水位を指標として検討した。減災対策のうち、水位の低下管理は流域面積の大きなため池では被災リスクの低減効果は限定的な効果に留まるのに対し、洪水吐の簡易改修は安定的に被災リスクを低減することを明らかにした。

ため池群の洪水緩和効果による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策は、広島県椋梨川上流域を事例としてため池群を組み込んだ広域洪水流出モデルを作成し、下流河川の基準点における水位を指標として検討した。ため池群を活用して被災リスクの低減を図るためには、降雨ピーク前の空き容量確保が重要なことを明らかにした。

ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、広島県東広島市のため池を事例として取水に伴う貯水率の減少度合と降雨による回復度合を観測水位から求め、検討期間中の貯水率変化を簡便に予測する手法を考案して検討した。受益水田の転用・転作が進んでいるため池では、かんがい期間と洪水期間が競合する期間においても利水容量を転用できる可能性が高いことを明らかにした。

棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池集水域管理の検討は、島根県出雲地方における棚田の土壌流出の観測結果に基づいて観測田（耕作田／遊休田）の土壌流出実態を明らかにした上で、土壌流亡予測式における水稲・水田の作物係数 C と保全係数 P を算出して行った。土壌流亡予測式の係数比較から水稲作の維持は土壌流出の抑制に有効であることを明らかにし、貯水池への土砂流入抑制による貯水容量の維持に資する、棚田を含むため池集水域の管理について考察した。

キーワード：ため池、減災、洪水流出、被災リスク、土壌流出

【目次】

1. 総説

要旨

1. 総説
2. ため池の施設管理と被災リスク低減
3. 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策
4. ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策
5. ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出
6. 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討
7. 総合考察

謝辞

引用文献

Abstracts

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 ため池管理に関する政策的な課題

近年の集中豪雨の発生増加や今後の発生リスクが指摘されている南海トラフ巨大地震などにより、ため池における災害脆弱性の高まりが指摘されている。農村においては、人口減少や高齢化・混住化の進行などから地域社会での災害対応力が低下していることもあり、ため池の防災・減災対策は重要度を増している。

このような情勢の中で、2012年3月に閣議決定された「土地改良長期計画」（農林水産省、2012）では、7つの政策目標の1つとして「ハード・ソフト一体になった総合的な災害対策の推進による災害に強い農村社会の形成」が取り上げられている。食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会報告「農村社会の変化や新たな農政の展開における農業農村整備の課題（中間整理）」（農

林水産省農村振興局, 2013)では、ため池に関する課題として「ハード・ソフト対策を計画的に実施していくことが重要」「水田やため池を活用した豪雨時の一時貯留など、上下流一体の広域な視点から農地・農業用施設が有する防災機能をフル活用して地域全体の災害対応力を向上させる取組について、地域コミュニティとも連携しつつ促進していくことが効果的」が挙げられている。また、2014年6月に閣議決定された「国土強靱化基本計画」(内閣官房, 2014)では、地球温暖化等による災害リスクの高まりの懸念を指摘した上で、ため池に関してもハード対策とソフト対策を組み合わせた防災・減災対策の強化が取り上げられている。さらに、2015年には「農業の有する多面的機能の発揮の促進に関する法律」が施行され、これに基づく多面的機能支払交付金によりため池を含む農業・農村の有する多面的機能の維持・発揮を図るための地域の共同活動の支援がなされている。

想定される豪雨や地震に対応した堤体や洪水吐等の諸施設が整備されていない未改修ため池、ならびに機能診断において堤体や洪水吐などの施設に漏水や変形、劣化などの変状が見られるため池においては、改修による施設の整備、すなわちハード対策が従来から公共事業として行われてきた。しかし、すべての施設を改修して整備することは財政事情が逼迫している現状では困難である(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2014)。また、改修したため池においては、施設の健全性維持と多面的機能を増進してその機能を積極的に活用する際には、適切な維持管理の取り組みが不可欠である。

下流域を含むため池の防災・減災に関するハード・ソフト対策を計画的に実施するためには、豪雨や地震に対する施設の機能診断や想定されるリスク評価を実施し、これに基づいて改修を実施するため池の選定と優先順位付けを行うことが必要である。その上で、改修が完了するまでの期間や当面改修を実施しないため池では、避難対策や被災発生リスクを低減するための管理操作といった施設の整備によらないソフト対策、ならびにため池管理者による直営施工を含む簡易なハード対策を講じることが求められている。

1.1.2 ため池管理における技術的課題

防災・減災に向けたため池の被災発生の抑止と多面的機能の積極的な活用、ため池の管理体制脆弱化への対応に向けて、農林水産省はため池管理者等が行うため池の保全・管理や防災・減災に関する各種の手引き類を作成し、公表している。これら手引き類では、ため池管理における管理項目や作業内容、管理体制整備にあたっての検討事項が具体的に示されている。手引き類において示されている管理項目と作業内容、検討事項に対し、対応する技術を示すことが課題となる。

このうち「ため池管理マニュアル」(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2013)は、専門技術者ではない受益

農家等のため池管理者を対象として、ため池の役割や構造、決壊メカニズムの説明とともに、堤体や洪水吐などの施設別に日常の点検や管理作業のポイント、ならびに豪雨時や地震時における対応を示したものである。日常点検作業や洪水や地震が発生した際に確認する際の具体的なポイントを整理した点検チェックシート、ならびにため池の変状に関する点検結果の市町村役場への報告書式についても示されている。報告書式で対象施設別に整理されている点検項目を **Table 1-1** に示す。なお、「ため池管理マニュアル」においては、ここで示された変状の項目が新たに確認された場合には、市町村に相談することとされている。

これらの点検は現地において目視により行うものであり、変状を把握する際の指標となる事項は「土部分の変状」「コンクリート等部分の変状」「漏水」「通水の阻害(土砂や流木の堆積、雑草の繁茂によるもの)」の4つに分類できる。各点検項目が当該する事項を整理した結果を **Table 1-1** 中に示す。漏水を指標とする点検事項が最も多いことがわかる。また、「①堤体法面に「陥没」や「亀裂」, 「はらみだし」が生じている箇所がある」や「⑩コンクリート(洪水吐)と堤体の境界に隙間が見られる」「⑮コンクリート(斜樋)と堤体の境界に隙間が見られる」についても、点検の対象となる変状は漏水に伴って生じた可能性がある。従って、堤体の漏水の把握とは目視による点検において最も重要な要素であり、漏水に関する機能診断を適切に行うことが求められる。

農地・農業用水等の資源の保全に関する地域共同活動を支援する「多面的機能支払交付金」(2007～2011年度は農地・水・環境保全向上対策, 2012～2013年度は農地・水保全管理支払交付金)は、農地や農地周りの水路と農道とともにため池も対象とされており、活動の解説として「多面的機能支払交付金【農地維持活動】農地, 水路等の基礎的な保全管理」(農林水産省農村振興局, 2015a)と「多面的機能支払交付金【資源向上活動(長寿命化)】農地周りの水路, 農道等の長寿命化のための活動の解説」(農林水産省農村振興局, 2015b), 「多面的機能支払交付金【資源向上活動(共同)】地域資源の質的向上を図る共同活動の解説」(農林水産省農村振興局, 2015c)が作成されている。これらの中で、ため池についても施設の保全管理と長寿命化、多面的機能の増進を図る活動のねらいと作業内容、技術的な要点、作業手順等が示されている。活動の担い手はため池管理者や受益農家とともに、地域住民などが想定されている。

多面的機能支払交付金に関する3つの手引き類に記載されている活動項目を **Table 1-2**, **Table 1-3** に示す。点検や見回り、機能診断を除く活動項目においては、施設の補修と予防保全的な維持管理作業が主体であり、これに加えて施設の補修とは異なる機能維持のための活動として貯水池内に流入・堆積した土砂の泥上げや流木の除去、洪水吐に堆積した土砂・流木の除去等が示されている。

Table 1-1 「ため池管理マニュアル」で示された点検項目
The check items of "The small earth dam management manual"

対象施設	変状の箇所と内容	変状の種類			
		土構造物等の変状	コンクリート等の変状	漏水	通水障害
堤体	① 堤体法面に「陥没」や「亀裂」、「はらみだし」が生じている箇所がある。	○			
	② 堤体法面にリップラップ材、張石、積みブロックなどに損傷や浸食箇所がある。		○		
	③ 堤体の下流の裏面に湿潤土壌を好む「シダ」「フキ」「コケ」類の繁茂等、植生の変化が見られる。			○	
	④ 堤体の”へり”の部分から湧水が見られる。			○	
	⑤ 堤体の下流法面や子段の側溝部で水のしみ出しや湧水、滞砂が見られる。			○	
	⑥ 接続道路からの排水による堤体の浸食が見られる。	○			
洪水吐	⑦ 水路コンクリート表面のひび割れから湧水が見られる。また、鉄筋がむき出しになっている箇所がある。		○		
	⑧ 壁の天端のはらみだし、また水路内側へのたわみがみられる。		○		
	⑨ 水路の底板や側壁に激しいすりへりや損傷が見られる。		○		
	⑩ 洪水吐内又はその下流水路に植物の繁茂が見られる。				○
	⑪ コンクリート(洪水吐)と堤体の境界に隙間が見られる。	○			
観測施設・観測計器	⑫ 雨も降らないのに漏水量が最近になって急増した／漏水に濁りが生じてきた。			○	
	⑬ 体内水位の計測値がこれまでと異なる値を示した。			○	
取水施設	⑭ 斜樋が損傷している。底樋が破損したり通水障害を生じたりしている。		○		○
	⑮ コンクリート(斜樋)と堤体の境界に隙間が見られる。	○			
	⑯ ゲート周りに漏水が生じたり、周辺に土砂やゴミが堆積している。				○
	⑰ 取水ゲート全閉にも関わらず底樋出口から泥水が出ている。			○	
	⑱ 下流地盤において、湿地や水溜りが見られる。			○	
貯水池内・貯水池周辺の斜面	⑲ 貯水池内で大規模な斜面の崩壊や連続した亀裂・湧水が発生している箇所がある。	○			
	⑳ 堤体に近接した法面で、連続した亀裂・湧水が発生している箇所がある。	○			
件数		6	5	7	3

出典：農林水産省農村振興局整備部防災課(2013)より作成

土砂や流木はため池の流域(集水域)から降雨流出に伴って貯水池へ流入するものであり、従って流域を適切に管理して土砂や流木の流入を抑制することは、ため池の防災・減災と機能維持の上でも重要な課題と考えられる。

ため池に関わる多面的機能の増進を図る活動としては、地域が一体となった防災・減災力の強化のための活動が示されており、「ため池の雨水貯留機能の活用」「危険ため池の管理体制の整備・強化」があげられている。前述の手引き類には具体的な活動内容の記述はないものの、前者はため池流域からの洪水流出が貯水池の空き容量や洪水吐の越流水深で貯留されることによって生じる雨水貯留機能の活用に関するものである。防災・減災に資する多面的機能の増進に関わる具体的な活動内容としては、大雨に備えた事前の貯水位の低下管理などによる

雨水貯留機能の強化が重要であると考えられる。

「ため池の保全管理体制整備の手引き」(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2014)は、ため池の防災・減災を推進するための保全管理体制の整備における基本事項と望ましい体制整備の方法をとりまとめたものである。保全管理体制の整備においては、保全管理計画を作成することとしており、その中で想定される危険を把握するためのリスク評価やため池が持つ多面的機能を把握するための地域資源評価を行うこととされている。

リスク評価については、豪雨と地震に対する構造的な被災の可能性や現地でのリスク確認・評価に加え、簡易氾濫解析によるため池の堤体決壊時に想定される被災範囲の想定や降雨に伴う貯水位上昇量の評価を行うこととされている。多面的機能については、多面的機能チェッ

Table 1-2 多面的機能支払交付金に関する活動項目
(ため池の基礎的な保全管理と長寿命化のための活動)
The activity item about the multiple functions payment grant

農地、水路等の基礎的な保全管理
点検 貯水池内の泥の堆積状況(ゴミの投棄状況を含む)、管理道路の状況(側溝のゴミの投棄状況を含む) 取水施設等のため池付帯施設の点検(水抜き時)
実践活動 草刈り(堤体等) 泥上げ(貯水池) かんがい期前の清掃(洪水吐・取水施設等) 管理道路の管理(草刈り・泥上げ・路面の補修) 遮光施設の適正管理 ゲート類の保守管理の徹底(取水施設) 異常気象後の見回り(堤体の異常と漏水の有無、洪水吐への土砂・ゴミ堆積、貯水池への土砂・流木・ゴミの流入等) 異常気象後の応急措置(土砂や雑木、倒木の処理)
農地周りの水路、農道等の長寿命化のための活動
・堤体 洗掘箇所の補修 漏水箇所の補修
・附帯施設 取水施設の補修 洪水吐の補修 安全施設の補修 ゲート、バルブの更新 安全施設の設置

出典：農林水産省農村振興局(2015a, 2015b)より作成

Table 1-3 多面的機能支払交付金に関する活動項目
(ため池の地域資源の質的向上を図る共同活動)
Activity item about the multiple functions payment grant

施設の機能診断 実践活動に位置付けた予防保全活動を手利きを実施するための施設の状況確認
実践活動
・堤体の適正管理 遮水シートの補修 コンクリート構造物の目地詰め コンクリート構造物の表面劣化への対応 堤体侵食の早期補修 破損施設の補修 きめ細やかな雑草対策
・附帯施設の適正管理 破損施設の補修 遮光施設の補修等 多面的機能の増進を図る活動 防災・減災力の強化 水田やため池の雨水貯留機能の活用、危険ため池の管理体制の整備・強化等、地域が一体となった防災・減災力の強化のための活動

出典：農林水産省農村振興局(2015c)より作成

クシートの項目として洪水調節機能が取り上げられており、活動の事例としては「低水管理による洪水調節容量の確保」が示されている。保全管理体制の整備の後は策定した保全管理計画に基づいて活動を取り組むこととなるが、大雨に備えた事前の貯水位の低下管理を実施し、施設自体の被災抑止や下流域の洪水緩和などの事前防災の取り組みによる被災リスクの低減が活動における一つの柱になるものと考えられる。

1.1.3 ため池の実態

農業水利施設であるため池は、古くから開発が行われてきた近畿地方や降水量の少ない瀬戸内地方を中心に、全国に存在する。ため池は、農業用ダムと類似の構造を持つ土構造物であっても、施設の規模とともに築造・改修年代や管理主体において大きく異なる。

内田(2003)は我が国におけるため池の存在形態を明らかにする一環として、農林水産省が1989年に実施した長期要防災事業量調査に基づいて全国の受益面積2ha以上のため池68,853箇所を対象に築造年代を集計した。この結果、1944年までに築造されたものが34,250箇所と築造年代不明の30,814箇所を除くと大半を占めること、加えて大きな改修を行っていないため池は48,470箇所と約7割を占めることを明らかにしている。これらの結果は古いデータに基づくものであるが、佐々木ら(2013)は2011年度における受益面積2.0ha以上の整備ため池数を約13,000箇所と報告しており、未改修のため池が多数残存する実態は2011年時点においても変わらない。

これらのことから、大半のため池は近代的な設計・施工技術ではなく経験的な知識と技術に基づいて築造されており、かつ防災上必要な改修が行われていない、すなわち豪雨や地震に対して弱点を抱えたままのものが多数存在していることがわかる。実際に、2013年度には全国1,000箇所以上のため池が被災し、うち12箇所が決壊が生じている(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2014)。

また、内田(2003)は前述のデータを用いて管理者の属性を集計し、「集落または申し合わせ組合」「個人」による管理、すなわち公的機関ではなく受益農家自身が自ら管理を行っていると考えられるため池が38,625箇所と半数以上に上ることを明らかにした。この結果から、多くのため池における管理の担い手は専門技術者ではない受益農家自身であること、従って専門的な技術的知見に基づく十分な管理がなされていないため池、すなわち施設の長寿命化や防災・減災の観点から施設管理上の改善の必要があるため池は少なくないものと推定される。加えて、農村の過疎化・高齢化の進行、米価の下落や水田の転作・転用に伴う水稲作付面積の減少とこれに伴うけ水需要の減退、代替する水利施設の整備によるため池利用度の低下などにより、ため池の改修事業に関する負担金の負担力低下や管理体制の脆弱化が指摘されている。

さらに、多くの農村においては都市化ないし混住化が進んでおり、かつては農地や林地であったため池の下流が宅地化している場合も多く見られる。このため、豪雨や地震に対しては、農業生産活動に対する被害の防止に留まらず、ため池下流の人命や財産に対する被災の防止・軽減が強く求められるようになってきている。また、豪雨時における洪水緩和など、ため池の多面的機能を積極的に活用した地域の防災・減災対策についても、都市化・混住化や転作の進行など流域の土地利用の変化などに伴い、

効果を発現する場面が広がっていると考えられる。

なお、ため池はその形態から、流域からの降雨流出を貯水池に貯留する自流域を持つため池と貯水池と連結された用水路から流入する河川から取水した用水等を中継する機能のため池に大別できる。両者の形態を併せ持つため池も少なくなく存在するものの、洪水流出や用水管理はこの2つの形態のため池の間で明確に異なることから、これらの検討にあたっては自流域を持つため池と用水の中継を行うため池は明確に区分して検討する必要がある。本稿における流出解析と用水管理の検討においては自流域を持つため池を対象とし、「谷池」はこの自流域を持つため池を指すものとする。

1.1.4 本稿の目的と構成

本稿は、政策的にも重要な課題である谷池の防災・減災に関する課題のうち、豪雨による施設ならびにその下流域の被災リスクを適切に谷池の施設や貯水、上流域を維持管理することによる低減策を示すことを目的とする。

検討は、手引き類で示された管理項目や作業内容、管理体制整備にあたっての検討事項を踏まえ、ため池の施設管理と被災リスク低減策、豪雨による谷池の被災リスクの評価と低減策、ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策、ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出、および棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討を対象とする。このうち、ため池の施設管理、ならびに被災リスク低減と豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策は決壊などの施設自体の被災リスク低減、ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策は多面的機能の発現によるため池下流域の被災リスク低減を対象とする。利水容量の転用による洪水調節容量の創出と棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討については被災リスク低減策として必要な降雨前の空き容量を利水容量の転用で確保するとともに、谷池上流域を適正に維持管理することによって貯水量の維持を図るものである。

1.2 既往の研究

1.2.1 ため池の施設管理と被災リスク低減

ため池の維持管理においては、堤体や貯水池、洪水吐、取水施設等の各施設、周辺の地山、ならびに接続水路などにおいて日常的な点検や軽微な補修を含めた管理作業を行ってため池を常に健全な状態に保つとともに、管理者では対処できない異常が発生した場合には、速やかに技術者による対応を行うことが基本である。

ため池の管理に関する研究は、管理組織や管理者、住民参加、費用などの人的要素（例えば今田ら、2009、鈴木ら、2003）、水管理（例えば角道ら、2013、北村・喜多、1997）、動植物（例えば嶺田ら、2009、渡辺・高村、2006）などの分野に関しては多くの研究が進められてい

る。本稿で扱う受益農家や集落などのため池関係者が自ら行う維持管理作業については、嶺田ら（2013）が石川県珠洲市のため池を対象に実施したアンケート調査に基づいて受益農家等が行っているため池管理の実態を示した上で、ため池関係者や地域住民以外の者を含めた多様な連携によるため池再生の取り組みを紹介した。佐藤（2014）は気候区分と貯水量、流域比を用いて全国のため池から偏りなく対象ため池を抽出し、管理者に日常管理状況と気候変動に伴う管理者の意識と管理面での対応についてアンケート調査を行った。これらの事例はあるものの、施設の健全性維持や防災・減災のための維持管理作業に係わる実態を明らかにし、被災リスク低減に向けた管理の改善方策等を検討することは課題として残されている。

また、ため池堤体内部を対象とした調査手法に関する研究には、小林ら（2014）の簡易弾性波速度分布測定ならびに他の物理探査結果との複合評価の提案、黒田ら（2013）の地震波伝搬特性評価と経年変化監視への適用性検討、鈴木ら（2013）の常時微動スペクトルデータを用いた損傷ため池堤体の健全度評価、小林ら（2007）による弾性波を用いたため池堤体内の水分状況推定、堀ら（2002a）の地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法の検討などがある。これらの研究においては、いずれも大～中規模ため池への適用を暗黙の前提にしたものと考えられ、市町村や土地改良区の技術職員等が機能診断を直営で実施する際に用いることができる、安価かつ簡便な手法とはいえない。ため池管理者が目視点検で堤体等に変状を発見したため池において、ため池管理に携わる現場技術者が自ら実施できる堤体内部に関する機能診断手法の開発は課題として残されている。

1.2.2 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策

ため池は豪雨や地震等の自然災害により、毎年少なくともため池が被災している。佐々木ら（2013）は1998年～2011年の被災箇所数と被災金額を各年毎にとりまとめ、2004年の新潟県中越地震と10回にわたる台風の上陸による被害、2011年の東日本大震災による被災が顕著であることとともに、他の年においても少なくともため池で被災が生じていることを示した。また、堀ら（2002b）は1986年から1996年において災害査定を受けたため池の件数を地震と豪雨の別に示し、毎年被害が発生していることに加え、1995年の兵庫県南部地震を除けば、被害のほとんどは豪雨によるものであり、その割合は95%以上となることを明らかにしている。自然災害によるため池の被災リスク低減においては、特に豪雨に対する対策が重要であることが判る。

豪雨によるため池の被災リスクの評価に関しては、堀ら（2010a）や堀ら（2010b）が豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法の開発を行っている。また西村ら（2009）は

豪雨時のため池堤体の越流リスクの評価、ならびに洪水吐の改修効果について検討がなされた。しかし、これらの研究においては、豪雨時の被災リスク評価の鍵となる洪水流出モデルを用いた貯水位の時間変化、すなわち貯水位ハイドログラフの算出が観測データによる検証を踏まえていない簡便な手法に留まることや、流域比等のため池への降雨流出を規定する立地条件と貯水位管理や洪水吐改修による貯水位の異常上昇に伴う被災リスクの関係については明らかにされていない。

従って、自流域を持つため池の降雨流出特性の解明とこれに基づく貯水位予測手法の開発、ならびに被災リスク低減策、すなわち減災対策の効果をため池の立地条件や降雨特性の違い、気候変動に伴う降雨の将来変化を踏まえて明らかにすることは残された課題である。

1.2.3 ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策

ため池の洪水緩和に関する研究は単体のため池を中心に行われてきた。加藤・佐藤(2002)は、大阪府下の松沢ため池において貯水位と降水量の記録から洪水緩和の実績を分析するとともに確率降雨を用いてシミュレーションにより洪水を再現し、洪水低減割合の大きさは洪水発生前の空き容量の大きさ、貯水池への洪水流入パターンに強く影響を受けていることを明らかにした。また加藤ら(2002)は、同池において実降雨の降雨パターンを分析し、この結果に基づいて行った洪水シミュレーションに基づいて貯水池の水位低下管理は洪水ピーク緩和効果の増強に有効であることを明らかにした。中西ら(1999)は、洪水調節容量を持たない農業用ダムである大迫ダムにおいて洪水時の流入と放流の実態解析からピーク放流量がピーク流入量に対し小さくなること、水理学的解析から洪水緩和機能は空き容量あるいは洪水吐クレスト天端から上部での一時的な貯留により生ずることを明らかにした。中西ら(2002)は、香川県と大阪府を事例地区としてため池の水利用の過程で生じる空き容量を洪水防止機能の指標としてため池の雨水貯留の可能性を評価した。竹下ら(2006)は、これらの研究を踏まえた上でため池による洪水緩和を洪水ピーク流量の減少と整理し、ピーク流量を減少させる要因として洪水到達時刻の遅延に着目して遅延率を用いたため池洪水緩和量推定法を提案した。

ため池群による洪水緩和に関する研究として、内田(2008)は愛知県武豊町内のため池群を持つ4つの河川を対象に、2000年9月の豪雨時に流域内のため池群が果たした洪水調節効果を河川水位とため池貯水位、降水量の観測データを用いて検討した。ただし、河川ごとの観測ため池数は2池(うち1河川は1池)に留まることや洪水流出モデルを用いた流出過程の検討は行われていないため、分析結果は定性的な推定に留まる。大八木ら(2005, 2006)、大槻ら(2008)は福岡県下の御笠川流域ため池群

を対象に洪水流出モデルを作成し、ため池群の洪水緩和に関する一連の研究を2003年7月の豪雨を対象に行った。この中で大八木ら(2006)はため池群の洪水緩和機能について、2003年7月19日の洪水時に観測された降雨を用いてシミュレーションに基づき洪水調節開始時貯水率(0~100%)に対応したため池群下流の御笠川上の基準点におけるピークカット量を求め、ため池群の空き容量が大きいほどピークカット量は大きくなることを明らかにした。ただし、ピークカット量に関する知見は1事例の降雨に関するものに限られる。

しかし、観測貯水位に基づく現況のため池群が発揮している洪水緩和効果の評価、すなわち多面的機能(外部経済性)の評価は行われていない。加えて、評価の前提となる谷池型ため池群に関する流域単位での悉皆調査に基づく貯水率の報告はこの大八木ら(2006)による2005年8月かんがい期の御笠川流域における1事例に留まる。

従って、流域内のため池と河道を明示的に組み込んだ再現性の高い広域洪水流出モデルの作成によるため池群の洪水緩和効果の評価とともに、観測貯水率に基づく現況のため池群が発揮している洪水緩和効果の評価とため池群の洪水流出特性を踏まえた洪水緩和効果の増強方策の提案は残された課題である。

1.2.4 ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出

ため池の持つ多面的機能の一つである洪水緩和機能は近年積極的な評価がなされ、農業農村整備や河川整備に関する事業においても洪水緩和機能の発揮に向けた各種の取り組みが行われている。農林水産省の補助事業「広域防災ため池等整備モデル事業」は、農村地域における広域的かつ大規模な洪水被害に対応するために、農村地域に点在する既存のため池群に洪水調節容量を持たせると共に、水利再編等で相互にため池等を連携させ、広域での防災対策を行うことを目的としている。国土交通省と流域自治体が進める「総合治水対策特定河川事業」においても、奈良県下の大和川流域や愛知県下の境川流域、静岡県下の巴川流域などでため池の保全と治水利用が行われ、洪水調節容量を持つため池の整備も進められている(内田, 2003, 内田, 2008)。

ため池に洪水調節容量を持たせる方法としては、堤体の高上げや貯水池の浚渫、もしくは既存の利水容量の転用が考えられる。堤体の高上げや貯水池の浚渫による洪水調節容量の創出は、利水容量を減ずることなく洪水調節容量を確保することが可能である。しかし、ため池の改修が前提となることから、ため池改修の事業と一体的に行うことによって実現可能な方法である。これに対し、利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、ため池の利水容量に余裕のあることが前提となるものの、ため池の改修と一体的に実施しなくとも実施可能な方法である。角道ら(2013)は農業用ダムの水利計画手法である渇水要貯水量曲線法を事例ため池において適用して期別の空き

容量を設定し、流出調整効果の検討を行っている。しかし、渇水要貯水量曲線法は10年程度の水文観測データの取得を前提とする方法であり、大部分のため池においては水文観測が行われていない現状では、一般的な計画手法ではない。ため池に適用する利水計画手法としては、1～2シーズン程度の短期間で得られた水文観測データを用いて利水計画を行うことができる手法が求められる。

従って、受益水田の転用・転作が一定程度進んだため池において利水容量の一部転用による洪水調節容量創出の可能性を明らかにすること、ならびにため池における水文観測の現状を踏まえた短期間で得られた水文観測データにより利水余裕度を検討し、利水調整を行う手法の開発は残された課題である。

1.2.5 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討

水田は土壌面が水平であること、土壌侵食の大きな要因である雨滴の衝撃エネルギーが水面で吸収されること等の理由により、土壌侵食を生じないものと見なされてきた。日本学術会議が農林水産大臣の諮問を受けて行った答申においても、これら水田の構造面の特性を指摘した上で、水田の土壌侵食防止機能は耕作放棄によって荒地となった場合と比較して非常に高いとしている（日本学術会議、2001）。

しかし近年、営農形態の変化や環境配慮への要請などを背景として水田でも土壌流出観測が行われ、水稲作が行われている水田においても土粒子などの懸濁物質の流出事例が報告されている。谷山（2002）は慣行栽培が行われている水田を対象に、かんがいや表面排水等に伴う懸濁物質の年間の流入・流出量とその収支をとりまとめ、収支の算出が行われた11地点中9地点で懸濁物質の流出量が流入量よりも多い結果を示した。松井ら（2007）は沖縄県石垣島の水田で流出観測を行い、降雨出水時に水田から土粒子が流出している観測結果を示すとともに、松井・須永（2013）は沖縄県石垣島の水田群において1年間の浮遊土砂流出量を観測し、代かき・田植期を中心に水田からの土壌流出が生じていることを明らかにした。また、須戸ら（2009）は滋賀県宇曾川流域の水田群を事例として排水路末端でSS濃度等を行い、代かき・移植時に流出するSS成分が土壌流出の原因であることを考察した。

従来、きめ細かい水管理がなされてきた水田においても省力的ないし粗放的な管理に移行している事例も見られることから、水稲作が行われている水田における土壌流出の事例は増加している可能性がある。これらのことを考えると、水田の持つ土壌侵食防止機能の検討にあたっては、単に水田の構造面の特性のみでなく、観測データに基づく土壌流出の実態把握が求められる。加えて、水田からの土壌流出も畑地や樹園地、草地、林地等における土壌侵食と一元的に評価を行うことができれば、ため

池上流域管理の管理にも寄与できる。

従って、ため池流域からの土砂流出、特に観測事例の少ない棚田における土壌流出を明らかにすること、ならびに土壌流出予測式に関わる水田の係数、特に求められた事例に限られる作物係数 C と保全係数 P を求めることは、土壌流出予測式の枠組みを用いてため池上流域にある水田の保全管理を検討する上で残された課題である。

2. ため池の施設管理と被災リスク低減

2.1 ため池の施設管理実態

2.1.1 目的

ため池の防災・減災に向けては、堤体や洪水吐、取水施設、貯水池などのため池の諸施設を常に健全な状態で維持することが基本である。多くのため池では、受益農家や集落などの地域の関係者が管理者を務めるとともに、関係者が自ら経験的な知識や技術に基づいて維持管理作業を担っている特徴がある。

そこで、受益農家や集落によって行われている施設の維持管理作業の実態について、石川県珠洲市のため池を対象にアンケート調査と現地調査に基づいて明らかにする。また、受益農家や集落において経験的に行われている維持管理作業に対し、特に豪雨に対する被災リスク低減に向けた改善点を考察する。



この地図は国土地理院の地理院地図（電子国土Web）を加工して作成したものである。

Fig. 2-1 珠洲市の位置
Location of Suzu-city

2.1.2 調査地域の概要と調査方法

2.1.2.1 調査地域の概要

調査地域である石川県珠洲市は能登半島の先端に位置する (Fig.2-1)。珠洲市一帯は海成段丘が発達しており、また残丘が山地を形成している。国土地理院発行の1/25,000地形図や空中写真より、段丘面には国営農地開発事業による開畑地を含む畑地、河川による段丘面の開析により形成された谷底部には大区画水田を含む水田、及び山地や段丘涯には針葉樹または広葉樹からなる林地が展開していることが判読できる。農業地域類型は中間農業地域に区分される。

珠洲市内には、石川県が管理する12本の二級河川が存在する。しかし、低平な山地や丘陵地が海に迫っていることから、いずれの河川とも河川延長は短い。このため古くからため池が築造、利用されている (北陸農政局珠洲開拓建設事業所, 1992)。

2.1.2.2 調査方法

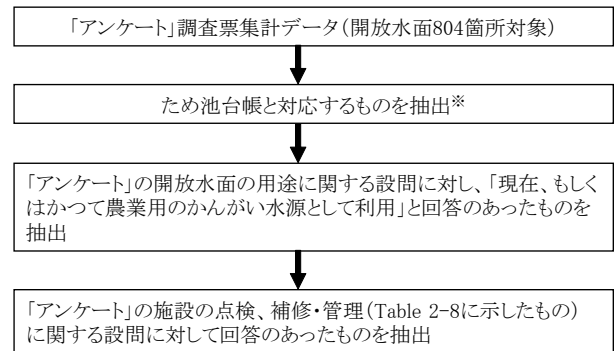
a 調査の対象と方法

施設管理の実態は「利用状況」、「日常的な維持管理」、「施設の点検、補修・管理」、「貯水池、洪水吐の現況」、及び「ため池利用に関する将来の意向」の5分野を対象に調査した。このうち「貯水池、洪水吐の現況」は現地調査により、これ以外の分野はアンケート調査により実態を明らかにした。

施設管理に関するアンケート調査は後述する現地調査時に把握したため池の諸施設に関する管理現況に関わる現地調査を踏まえて項目を決定し、石川県農林水産部と農研機構農村工学研究所が共同で実施した「ため池の管理に関するアンケート」(以下「アンケート」とする)の一環として2010年1月に実施した。

「アンケート」は1/2,500地図(珠洲市:1975年及び1993年作成)ないし市販の住宅地図(「ゼンリン住宅地図 石川県珠洲市」:2007年発行)で判読できた開放水面(804箇所)を調査対象とし、ため池管理者への調査票の配付と回答依頼は珠洲市と珠洲市土地改良区の協力を得て行った(回収は郵送による。有効回答率60.1%)。「アンケート」の対象とした開放水面は現存するため池だけでなく、既に廃止されたため池や防火水槽、個人宅の庭池、養魚池などを多数含んでいる。また、「アンケート」は石川県環境部による「外来生物アンケート」と一体の調査票で共同実施したため、その設問は多岐にわたる上、一部の設問のみ回答がなされた調査票も存在した。そこで、Fig.2-2の手順により、ため池台帳に記載があるため池106箇所を対象に、回収した調査票から分析用のデータを抽出した。分析対象のため池の内、珠洲市土地改良区が管理するものは4箇所(3.8%)のみで、他は受益農家により管理が行われていた。

「貯水池、洪水吐の現況」は珠洲市を流れる二級河川である紀の川流域において、1/25,000地形図(国土地理



※ ため池台帳と対応できるため池においても、ため池台帳上にデータの記載がないもの(12箇所)と堤高15m以上のもの(3箇所)は除外した。

Fig. 2-2 分析データの抽出手順
Extraction procedure of analysis data

院2009年発行)とため池台帳の双方に記載されているため池25箇所を調査の対象とした。これらのため池は受益農家によって管理作業が担われているものと判断できる、後述するように珠洲市における典型的なため池である。また、現地調査は2010年3月3日～7日と2010年6月12日～15日に予備調査、2010年8月25日～26日に本調査を実施した。

加えて、珠洲市内のため池の概要を把握するために、ため池台帳の分析を行った。ため池台帳には珠洲市内218箇所のため池が記載されている。分析はため池台帳記載のため池の内、ため池台帳にデータの記載がないもの(12箇所)、データの記載があっても所在地の特定ができないもの(12箇所)、「アンケート」対象外のため池(前述の開放水面として判読できなかったもので、前2者と重複するものを除いた16箇所)、及び、法令等でダムとして扱われる堤高15m以上のもの(3箇所)を除いた175箇所を対象に行った。また、「アンケート」分析ため池と現地調査ため池についても比較のために分析を行った。

b 分析項目

(1) ため池の概要

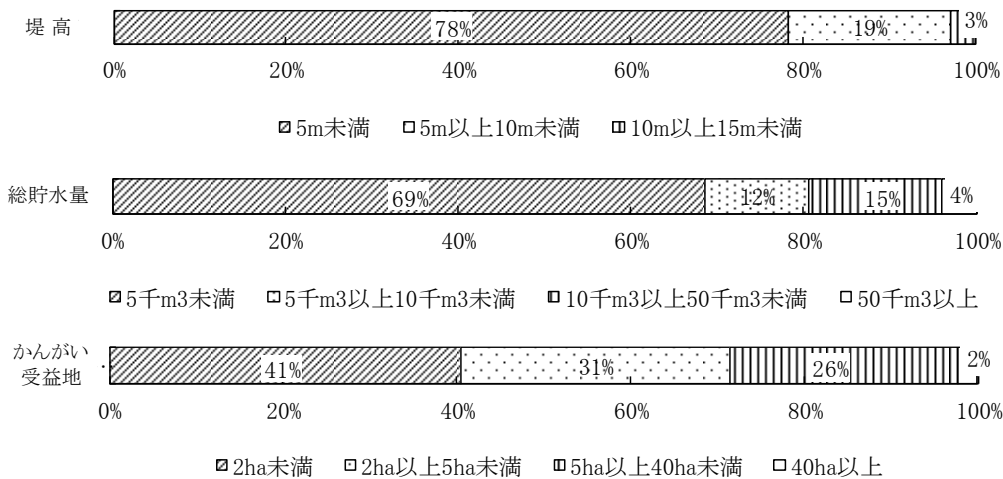
分析項目はため池台帳の項目の内、ため池の規模を表す「堤高」、「総貯水量」、及び「かんがい受益地」とした。

(2) 利用状況

分析項目は、「アンケート」の設問の内、「ため池のかんがい水源としての具体的な利用」と「ため池の日常のかんがい水源以外で具体的な利用」とし、各選択肢の回答数を分析した。なお、かんがい水源としての具体的な利用についての設問は2009年の1年間に関して問うたものである。

(3) 日常的な維持管理

分析項目は「アンケート」の設問の内、「ため池に何らかの用務で出向いた回数」と「堤体の草刈り(作業回数、



※「かんがい受益地」は全て水田である(Table 2-1も同じ)。

Fig.2-3 ため池の規模別割合 (珠洲市全体)
A ratio according to the scale of irrigation ponds

Table 2-1 調査ため池の概要
Summary of the investigation irrigation ponds

	ため池数	堤高(m)	総貯水量 (m ³)	かんがい受益地(ha)
珠洲市全体	平均値	3.9	10,476	5.8
	中央値	3.5	2,300	2.0
アンケート分析	平均値	3.7	13,124	5.8
	中央値	3.5	2,900	2.0
現地調査	平均値	3.7	19,308	11.8
	中央値	3.2	3,600	2.0

作業者)」とし、各選択肢の回答数を分析した。なお、ため池に出向いた回数は2009年の1年間に関して問うたものである。

(4) 施設の点検、補修・管理

分析項目は「アンケート」の設問の内、堤体と洪水吐、取水施設、貯水池の点検と補修・管理に関する設問とし、作業内容と作業回数、作業者に関する選択肢の回答数を施設別に分析した。

(5) 貯水池、洪水吐の現況

分析項目は貯水池内の流木・倒木の状況、並びに洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の状況とし、現地調査において目視でこれらを把握した。

(6) ため池利用に関する将来の意向

分析項目は「アンケート」の設問である「かんがい水源の今後」と「かんがい水源以外に今後期待する役割」とし、各選択肢の回答数を分析した。

2.1.3 調査結果と考察

2.1.3.1 ため池の概要

珠洲市全体のため池に関する堤高と総貯水量、かんがい受益地の規模別割合を Fig.2-3 に示す。また、項目別の平均値と中央値を Table 2-1 に示す。堤高 5m 未満のものは 78.3%、総貯水量 5,000m³ 未満のものは 68.6%、2ha 未満のものは 40.6% であり、老朽ため池研究会 (1979) が全国のため池を対象にため池台帳の集計により求めた値である堤高 5m 未満の割合 32% と総貯水量 5,000m³ 未満の割合 26% と比べ、珠洲市内のため池は小規模なものが主体であるといえる。一方、堤高 10m 以上のものは 2.9%、総貯水量 50,000m³ 以上のものは 4.0%、かんがい受益地 40ha 以上のものは 2.3% と規模の大きなため池は少数に留まる。

「アンケート」分析ため池と現地調査ため池に関する各項目の平均値と中央値を Table 2-1 中に示す。なお、各項目の値の分布は正規分布やこれに近いものとは限らないことから、平均値に加えて中央値についても検討する。珠洲市全体と「アンケート」分析ため池、現地調査ため池を比較すると、中央値については各項目とも同様の値である。平均値は現地調査ため池の「総貯水量」と「かんがい受益地」において他よりも高い値となる傾向が認められるものの、20%水準(両側検定)による t 検定ではいずれの項目についても珠洲市全体と「アンケート」分析ため池、現地調査ため池の相互間に有意差は認められなかった。従って、ため池の規模に関しては、「アンケート」分析ため池と現地調査ため池は珠洲市内のため池を代表するデータであると判断できる。

2.1.3.2 利用状況

Table 2-2 にかんがい水源としての利用状況を示す。「アンケート」分析ため池の内、82.1%のため池は主たる水源として利用されている。その一方、かんがい水源として

Table 2-2 かんがい水源としての利用状況
Situation of utilization as the irrigation source

	(単位:%)			
	全用途	水稲作	畑作物	果樹園
主たる水源	82	82	14	4
補助水源	10	9	6	0
利用しない (無回答を含む)	8	9	80	96

Table 2-3 10年前と比べた利用の変化
Change of the availability in comparison with ten years ago
(単位:%)

利用の変化	割合
以前より使わなくなった	26
変わらない	61
以前より使うようになった	7
わからない・無回答	6

利用しないため池は7.5%に留まる。水稲作の水源としての利用は主たる水源と補助水源を合わせて90.6%に達するのに対し、畑作物の水源としては19.6%、果樹園の水源としての利用は3.7%に留まる。なお、水稲作以外の作目のみを対象に主たる水源として使用するため池は存在しない。

Table 3-3に10年前と比べた利用の変化を示す。この設問はかんがいの水量や頻度、受益面積の変化など、管理者が認識する利用の変化を問うている。61.3%のため池においては利用の変化は見られないものの、26.2%のため池においては以前よりも利用度合が低下している。

Table 3-4に日常のかんがい水源以外の利用方法を示す。59.8%のため池では日常のかんがい水源以外の利用はなされていない(無回答を含む)。10%以上のため池で行われている利用方法は上位から順に「干ばつ時の緊急水源(18.7%)」、「防火用水(14.0%)」、及び「生物の生息場所(10.3%)」である。なお、「干ばつ時の緊急水源」以外の利用、すなわち干ばつ時を含めたかんがい水源以外の目的で利用がなされているため池は27.4%、日常のかんがい水源以外の利用を含め、全く利用されていないため池は5.7%に留まる。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池は利用度合の低下傾向は見られるものの、大半のため池においては水稲作を主としたかんがい水源として利用されているといえる。

2.1.3.3 日常的な維持管理

Table 2-5に管理者が何らかの用事でため池に出向いた回数(2009年)を示す。「アンケート」分析ため池の内、63.2%のため池で年11回以上、76.2%のため池で年6回以上の頻度で管理者は利用・管理のためにため池へ出向

Table 2-4 日常のかんがい水源以外の利用方法
Usage except the irrigation source

利用目的	(単位:%, 複数回答可)	
	割合	
干ばつ時の緊急水源	19	
防火用水	14	
生物の生息場所	10	
散歩などの憩いの空間として	3	
養魚	3	
釣り(養魚池以外)	2	
全く利用していない(無回答を含む)	60	
その他	1	

いている。管理者が全く出向かないため池は5.7%に留まる。なお、管理者が全く出向かないため池は水稲作の補助水源として使われている1箇所を除き、かんがい水源ないしかんがい水源以外の利用がなされていない

Table 2-6に草刈りの回数を示す。59.6%のため池において年1回以上の草刈りが行われている。一方、草刈りを実施していない可能性が高い「無回答」(「アンケート」の設問には「実施せず」の選択肢なし)は33.0%である。なお、草刈りの実施は雑草の繁茂度合にも規定されるものであり、雑草の繁茂が取水などの作業や施設管理に支障ない程度であれば、草刈りを実施しないことも当然考えられる。このため、単純に草刈り回数を指標として維持管理の状況を判断することは適当ではない。

Table 2-7に草刈りの作業者の内訳を示す。作業者の割合は受益農家による共同(分担)作業による場合が最も多く、次に管理者自身(家族を含む)による作業、集落の共同作業による作業の順が多い。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池においては大半のため池で管理者は施設の異変を把握する上で十分と考えられる頻度でため池に出向いているといえる。草刈りについても、前述したように大部分のため池はかんがい水源として利用されていることから、多くのため池において水源施設として利用する上で支障ない程度の雑草管理はなされているものと考えられる。

2.1.3.4 施設の点検、補修・管理

Table 2-8に「アンケート」分析ため池における点検、補修・管理作業に関する作業内容ごとの実施ため池割合を施設別に示す。

堤体に関しては、30%を越えるため池で「堤体の亀裂や陥没」と「漏水箇所」、「堤体の浸食や崩れ」の点検が実施されている。また10%を越えるため池で「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」と「安全施設」の点検についても実施されている。補修・管理作業については、10%を越えるため池で「堤体の亀裂や陥没箇所の埋め戻し」と「漏水箇所の補修」、「堤体の浸食や崩れ箇所の修復」が実施されている。

Table 2-5 何らかの用事でため池へ出向いた回数（2009年）
The number of times that went to irrigation ponds on some kind of business

（単位：％）

回数	割合
0回	6
1～2回	8
3～5回	8
6～10回	13
11～20回	15
20回以上	49
不明	1

Table 2-6 草刈りの回数
The number of times of the mowing

（単位：％）

作業回数	割合
10年以上行っていない	1
数年に1回程度	5
年1回	12
年2回	26
年3～5回	20
年6回以上	1
不明	2
無回答	33

Table 2-7 草刈りの作業者
Worker of the mowing

（単位：％）

作業者	割合
受益農家の共同(分担)作業	24
管理者自身(家族を含む)	22
集落の共同作業	16
その他	3
不明	3
無回答	32

洪水吐に関しては、10%を越えるため池で「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」と「落ち葉、流木の堆積」の点検、並びに補修・管理作業として「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

取水施設に関しては、30%を越えるため池で「樋管など周辺施設の草の繁茂状況」の点検、10%を越えるため池で「樋管の破損状況」と「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」、「落ち葉、流木の堆積」の点検が実施されている。補修・管理作業については、40%を越えるため池で「樋管など周辺施設の草刈り」、10%を越えるため池で「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

貯水池に関しては、40%を越えるため池で「貯水状況の確認」の点検、20%を越えるため池で「落ち葉、流木の堆積」と「池内の藻の発生状況」、「池内の土砂の堆積」の点検が実施されている。補修・管理作業については、20%を越えるため池で「池の水抜き」、10%を越えるため池で「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

なお、「アンケート」分析ため池において、Table 2-8で分析した項目の点検、補修・管理作業を全く実施していないため池は9.4%に留まる。

Table 2-9に点検と補修・管理作業の作業回数を施設別に示す。点検を1回以上実施しているため池の割合は高い順に堤体で50.0%、貯水池で44.3%、取水施設で43.4%、洪水吐で34.0%である。

Table 2-10に点検と補修・管理作業の作業者の内訳を施設別に示す。洪水吐の補修・管理作業において「受益農家の共同(分担)作業」の割合が低いことを除くと、各施設とも点検、補修・管理の作業者の割合は「管理者自身(家族を含む)」と「受益農家の共同(分担)作業」、「集落の共同作業」で概ね同比率となっている。

これらの結果から、大部分の「アンケート」分析ため池においては、何らかの施設の点検、補修・管理に関する作業が行われていることがわかる。この中で、実施割合の高い「漏水箇所」や「堤体の亀裂や陥没」、「堤体の浸食や崩れ」、「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」などの点検、補修・管理については、ため池を利用する上で直ちに補修等の対応が必要となる施設の異常だけでなく、通常の利用においては支障のない軽微な施設の劣化や破損についても対象としている可能性がある。農業水利施設の予防保全は劣化等による施設の性能低下が許容範囲を超える前に適切な補修等の対策を行い、施設の長寿命化を図るもの（機能保全における性能設計入門編集委員会、2008）であり、受益農家の手によってため池の各施設に対する初期的な劣化箇所の点検と点検結果に応じた補修・管理の取組が可能であれば、ため池においても予防保全の導入による長寿命化は可能であると考えられる。今後、管理者や作業を行う受益農家に対する聞き取り調査を行い、点検と補修・管理に関するより詳細な作業内容を明らかにする必要がある。

2.1.3.5 貯水池、洪水吐の現況

Table 2-11に貯水池内の流木・倒木の状況を示す。現地調査ため池の内、40.0%のため池で貯水池内に流木・倒木

Table 2-8 点検・補修・管理に関する作業内容別の実施ため池
A ratio of irrigation ponds according to work contents about check and repair.

(複数回答/単位:%)

	堤体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理
A	36	14	4	2	3	2	1	1
B	37	16	—	—	—	—	—	—
C	30	12	—	—	—	—	—	—
D	16	3	18	1	14	0	0	0
E	3	0	7	0	1	0	0	0
F	3	2	2	3	1	4	8	9
G	15	4	1	1	0	0	0	0
H	7	8	5	8	30	42	0	2
I	1	0	—	—	17	2	0	0
J	4	1	16	14	10	12	22	16
K	0	0	0	0	0	0	0	0
L	3	0	0	0	0	0	0	0
M	—	—	—	—	—	—	21	8
N	—	—	—	—	7	8	45	24
O	—	—	—	—	—	—	21	5
P	1	0	1	0	1	0	1	1
実施せず	32	49	56	68	31	43	28	43
不明	2	16	4	9	12	4	6	12

記号	作業の内容	
	点検	補修・管理作業
A	漏水箇所	漏水箇所の補修
B	堤体の亀裂や陥没	堤体の亀裂や陥没箇所の埋め戻し
C	堤体の浸食や崩れ	堤体の浸食や崩れ箇所の修復
D	コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み	コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの補修
E	コンクリートやブロック構造物の裏側の空洞	コンクリートやブロック構造物の裏側の空洞の埋め戻し
F	ゴミの不法投棄	ゴミの回収
G	安全施設(柵や看板が壊れていないか)	安全施設(柵や看板など)の補修
H	樋管など周辺施設の草の繁茂状況	樋管など周辺施設の草刈り
I	樋管の破損状況	樋管の補修
J	落ち葉、流木の堆積	落ち葉、流木の除去
K	機械部分の動作確認	機械部分への注油
L	機械部分の損耗	機械の部品等の交換
M	池内の藻の発生状況	池内の藻刈り
N	貯水状況の確認	池の水抜き
O	池内の土砂の堆積	池内の泥上げ・泥吐き
P	その他	その他

Table 2-9 点検と補修・管理の作業回数
The work number of times of check and repair

(単位:%)

	堤体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理
10年以上行っていない	1	2	1	1	1	2	1	1
数年に1回程度	5	4	4	4	5	4	3	6
年1回	20	11	16	8	14	11	10	8
年2回	14	5	8	4	12	10	10	6
年3～5回	10	7	8	4	5	9	11	9
年6回以上	6	1	2	2	12	4	12	5
実施せず	32	48	55	68	31	43	29	41
不明	12	22	6	9	20	17	24	24

Table 2-10 点検と補修・管理の作業者
The worker of check and repair

(単位:%)

	堤体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理
管理者自身(家族を含む)	17	14	14	11	23	20	19	20
受益農家の共同(分担)作業	20	11	10	3	25	16	21	12
集落の共同作業	19	19	11	11	15	15	21	19
その他	4	3	4	3	2	2	4	4
実施せず	32	48	55	68	31	43	29	41
不明	8	5	6	4	4	4	6	4

が見られた。現地調査で把握した洪水吐流入口に漂着した流木の例を Fig.2-4 に示す。

Table 2-12 に洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の状況を示す。軽度のものを含めれば洪水吐内で 25.0%、流入口付近で 54.2% のため池において、洪水吐を流下する洪水の通水を阻害しうる雑草の繁茂、枯れ草等が見られた。現地調査で把握した洪水吐流入口付近に繁茂する雑草の例を Fig.2-5 に示す。なお、貯水池内の流木・倒木と洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の両方、ないしはどちらか一方が見られたため池は現地調査ため池の 80.0% である。

流木・倒木や雑草・枯れ草等の除去が行われていないため池においても、多くのため池は現地調査において堤体の草刈りなどの通常の維持管理は適切に行われていると判断できた。また、Table 2-8 に示したように取水施設で「樋管など周辺施設の草刈り」を行うため池の割合は

41.5% なのに対して「落ち葉、流木の除去」を行うため池の割合は貯水池で 15.7%、洪水吐で 13.9% に留まる。従って、これら流木・倒木と雑草・枯れ草等の除去は少なからずため池管理者と受益農家にとって作業すべき事柄として意識されていない、もしくは意識されていても労力面などの理由で実施できていない可能性がある。

地球温暖化に伴って生じる降雨形態の変化に対しては、ため池についても洪水吐の排水能力の不足が懸念されている。貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等は単純に洪水吐の排水能力を低下させるだけでなく、降雨形態の変化に伴って懸念される降水の極値現象の変化、すなわち既往の観測値を超える豪雨時に洪水吐の閉塞、ひいては堤体越流による堤体の決壊を引き起こす原因となるおそれがある。ため池利用上の直接的な問題を生じていない場合においても、これら流木・倒木や雑草の繁茂、枯れ草等は豪雨時の災害リ

Table 2-11 貯水池内の流木・倒木の状況
The situation of driftwood and the fallen tree in the reservoir

(単位: %)

状況	割合
問題なし	60
流木・倒木あり	40



Fig.2-4 洪水吐流入口に漂着した流木
The driftwood which was cast ashore in spillway

Table 2-12 洪水吐の状況
The management situation of the spillway

(単位: %)

状況	洪水吐内	流入口付近
問題なし	75	46
雑草の繁茂、枯れ草等(軽度)	4	25
同上(通水を阻害)	21	29



Fig.2-5 洪水吐流入口付近に繁茂する雑草
The weed which grows thick in front of spillway

スクの軽減のために除去することが望ましい。今後、これらの除去に対する管理者への啓蒙や除去作業に対する支援を行う必要があると考えられる。

2.1.3.6 ため池利用に関する将来の意向

Table 2-13 にかんがい水源としての今後の意向を示す。「アンケート」分析ため池の内、64.2%のため池で管理者は現状維持を望んでいる。一方、ため池の廃止を望む管理者は0.9%、公的機関などへの管理の委譲を望む管理者は5.7%に留まる。

Table 2-14 にかんがい水源以外の役割への期待を示す。29.2%のため池で生物生息の場としての役割、27.4%のため池で防火用水としての役割が求められているものの、45.3%のため池ではかんがい水源以外の役割は求められていない。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池においては当面現状の利用と施設管理が維持されるものと考えられる。しかし、高齢化と人口減少、水田面積の減少などは珠洲市においても進行しており、将来を考えた場合には維持管理の困難を来したため池に対する対応策が必要となる可能性がある。

2.1.3.7 ため池の施設管理と被災リスクの低減

アンケート分析ため池では、多くのため池で施設の異変発生を把握する上で十分な頻度の見回りと水源施設として利用する上で支障ない程度の雑草管理がなされているものと考えられることや堤体や洪水吐、取水施設、貯水池に関する何らかの点検と補修・管理に関する作業が行われていること、直ちに補修等の対応が必要な施設の異常だけでなく、軽微な施設の劣化や破損を対象とした点検と補修・管理が行われている可能性があることが明らかになった。一方、現地調査ため池では、貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草・枯れ草等の除去が十分行われていないことが明らかになった。

このことはため池管理者を中心とした受益農家が行っている施設管理は施設の健全性維持に大きく寄与するものであることとともに、ため池管理者等では対処しきれない事項があることを示している。技術的な専門知識を持たない管理者等が把握した変状に関する情報を自治体や土地改良区などのため池管理に関わる公的機関が系統的に集約し、技術者による機能診断や労力的に対応できない作業の支援など、機敏に次の対応をとる体制作り、ならびに対応する技術開発はため池の被災リスク低減に向けて重要であるといえる。

2.2 被災リスク低減に向けた機能診断手法の開発

2.2.1 目的

ため池管理者が実施する目視による点検において変状が発見された場合には、専門技術者による点検ないし機能診断を行うこととなる。この際、万一ため池が決壊し

Table 2-13 かんがい水源としての今後の意向
Intention as the irrigation source

(単位：%)	
選択肢	割合
現状のままでよい	63
かんがい時の水源としてもっと活用したい	14
干ばつ時の緊急水源として活用したい	8
かんがい水源として管理することが困難なので、公的な機関などに管理を委ねたい	6
かんがい水源として利用しないので、つぶしたい(埋めたい)	1
その他	4
不明	4

Table 2-14 かんがい水源以外の役割への期待
Expectation to the role except the irrigation source

(単位：%)	
選択肢	割合
生物の生息場所としての役割	29
防火用水としての役割	27
散歩など憩いの空間としての役割	8
災害や洪水防止としての役割	8
養魚池としての役割	4
釣り場所としての役割	3
その他	6
かんがい水源としての役割以外は求めない	45
不明	6

た場合に重大な被害を及ぼすため池において、危険度合いの高い変状が認められた場合には、相応の費用を費やして機能診断を行うことが可能であると考えられる。しかし、決壊時における想定される被害が相対的に小さなため池でかつ差し迫った緊急性がないと判断される変状に対しては、市町村や土地改良区の技術職員、あるいはため池管理に関わる者で技術的な経験を持つ者などの現場技術者が自ら機能診断を実施することが求められると考えられる。

そこで、目視点検で捉えられる変状で最も重要なものは堤体ならびに堤体と地山等の境界部で発生する漏水とされていることから、現場技術者がため池管理者などの協力を得て自ら実施できる漏水に関する目視点検を踏まえた機能診断手法として、堤体の漏水経路を1m深地温の測定結果に基づいて堤体中の地温分布のシミュレーションによる逆解析から推定する手法を提案する。

2.2.2 1m深地温探査法によるため池堤体の漏水調査法の開発

2.2.2.1 技術開発に当たっての課題

まず、ため池堤体の漏水や1m深地温探査法に関する既

往の研究結果に基づき、技術開発に当たっての課題を整理する。

土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)では、ため池堤体等の漏水箇所として、堤体盛土部と基礎地盤または両岸地山との境界部、底樋や洪水吐等の堤体横断施設の周囲を挙げている。堀ら(2002b)は、豪雨による農業用ため池の破壊原因として、常時満水位付近の上流斜面を浸入点とする浸透破壊が最も多いことを明らかにしている。従って、1m深地温探査法による漏水調査においては、堤体中に生じたパイピング穴や堤体横断施設からの漏水によって生じた高透水域などの堤体内部への貯水の浸入経路とその周囲の高含水域(以下、堀ら(2002a)の例に倣い、これらを合わせて「漏水経路」とする)の位置や深度を把握できることが求められる。

湯原(1955)は地下熱源の規模や深度、竹内(1983b)は地下水流脈の規模や深度について、地盤中の熱源・地下水流脈を円柱型、地表面を半無限に広がる平面、かつ地下水流脈以外の土壌の熱伝導率は一定と見なした上で定常熱伝導方程式の近似解を求め、1m深地温から理論的に推定する方法を提案している。前述の奥山ら(2003)は、ため池堤体を基礎地盤と一体の長大な斜面と見なした上で、1m深地温の測定値とこの推定方法による計算値が一致する地下水流脈の規模と深度を求めるとともに、推定結果を検証している。しかし、ため池堤体自体は地すべりブロック等の長大な斜面とは異なり、法面の一方の大半は貯水に、天端ともう一面の法面は大気と接し、その構造も半無限平面と見なすことはできない。従って、ため池堤体内部の1m深地温のシミュレーションを行う場合には、半無限平面と見なすことができない、ため池堤体の構造に即した地下水流脈の規模・深度の推定法を開発する必要がある。

竹内(1996)は、ため池堤体における1m深地温探査において、天端から堤体末端にかけて1×3mあるいは2×3mの測点網の設定を提案している。しかし、土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部

設計課, 2006) では堤体法面の後法勾配を 1:1.5 ~ 2.5 (参考寸法) としているものの, 実際には 1m 深地温測定に関わる諸作業が難しい急勾配の法面を持つため池も多い。従って, 堤体法面上に密な測点網を設定することが困難なため池も少なくないことから, 堤体天端上に設定した測点のみで漏水経路の探査が可能かどうかを検討する必要がある。

また竹内 (1983a) は, 地況の相違が 1m 深地温に与える影響を資料から整理した上で, 1m 深地温の補正方法を提案している。ため池堤体においても, 例えば貯水には深度方向の温度勾配の存在が考えられることから, 貯水と接する側の堤体表面はこれの影響等を受け, 堤体表面温度の相違が存在すると考えられる。しかし, 調査に当たって堤体表面の温度や堤体土の物性値などを詳細に測定する必要があるれば, 1m 深地温探査法の長所である簡便性は失われる。従って, 1m 深地温以外の測定項目は極力少なくする必要がある。

2.2.2.2 ため池堤体の漏水と 1m 深地温

堤体天端上に設定した測点において 1m 深地温を測定し, 測定結果を検討した。

1m 深地温の測定は, 青池 (香川県善通寺市生野町) において行った。青池の堤体においては, 右岸側地山寄り下端部分を中心に, 表面に漏水が浸出している。堤体天端付近の表層土は日本統一土質分類法による分類で粘土質砂 (SC), 堤体土はシルト質砂 (SM) である。水面下の部分を除いた堤体の表面は草で覆われ, 年間を通じて草刈りが行われている。青池の平面図 (諸元含む) を Fig.2-6 に示す。

堤体中の漏水経路は特殊な場合を除き, 堤体軸とほぼ直交すると考えられることから, 堤体表面に漏水が浸出している区間とその前後の区間に対して天端中心に測線を設定し, 測線上に 1m 間隔で測点を設けた。また, 堤体中の浸透水の水温を測定するために, 前述の漏水浸出区間, 非浸出区間にそれぞれハンドオーガーで削孔した観測孔を 1つずつ設けた。測線・測点と観測孔の位置を Fig.2-6 中, Fig.2-7 に示す。

1m 深地温の測定に当たっては, 直径 6mm の鋼棒を 1m 弱の深さまでハンマーで叩き込んだ後に引き抜き, この孔へデータロガーに接続した白金測温抵抗体を深さ 1m の位置に挿入して周辺土と密着させた。1m 深地温は測定開始から 4 分経過した時点の値とした。また, 合わせて Fig.2-6, Fig.2-7 の地点 1 (非浸出区間), 地点 2 (浸出区間) において観測孔内の浸出水の水温を測定した。1999 年 7 月 21 日における測定結果を Fig.2-8 に示す。

Fig.2-8 より, 測点 40 付近を中心に, 測点 38 ~ 42 において明瞭な低温部が認められる。測点 1 ~ 35 の平均地温 24.0℃ を非漏水部の代表値, これと最も温度差がある測点 39 の地温 23.3℃ を低温部の代表値とすると, 両者の間には 0.7℃ の温度差が認められる。正規分布とした場合の測点 1 ~ 35 に関する信頼度 99% の信頼区間下限値は 23.9℃ であるので, 両者の温度差は明確に把握できると考えられる。従って, 堤高の低いため池堤体においては, 堤体天端上に設定した測点から 1m 深地温を測定することにより, 地温異常の把握は可能であることがわかる。青池堤体では地況や日射の条件はほぼ同じであり, 1m 深地温に大きな変動のない測点 1 ~ 35 区間に含まれる地点 1 で測

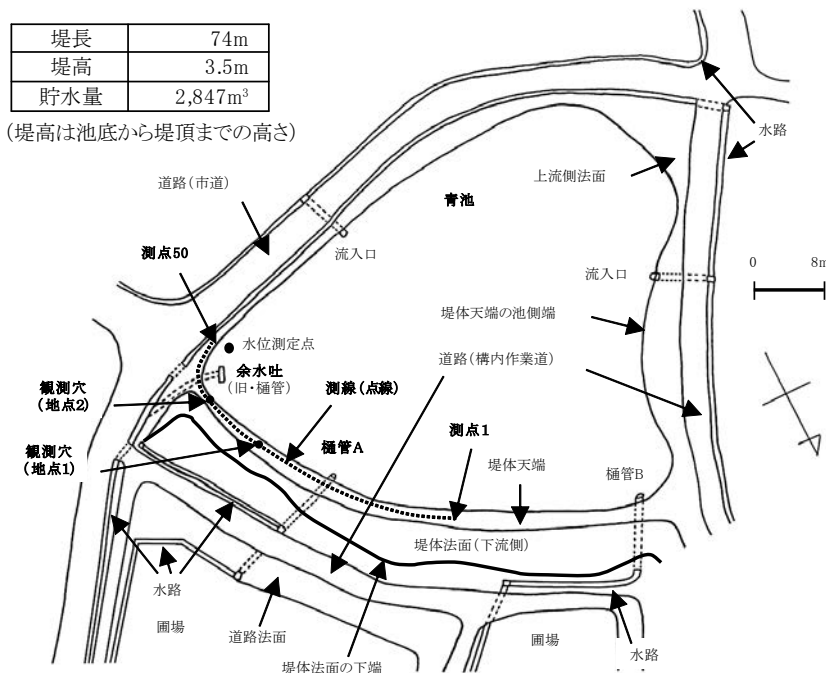


Fig. 2-6 青池平面図
Ground plan of Aoike pond

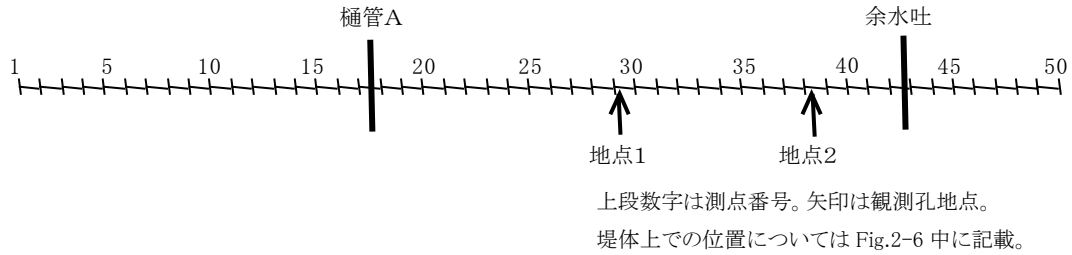


Fig. 2-7 測線と測点 (青池・天端中央)
The survey line and observation points

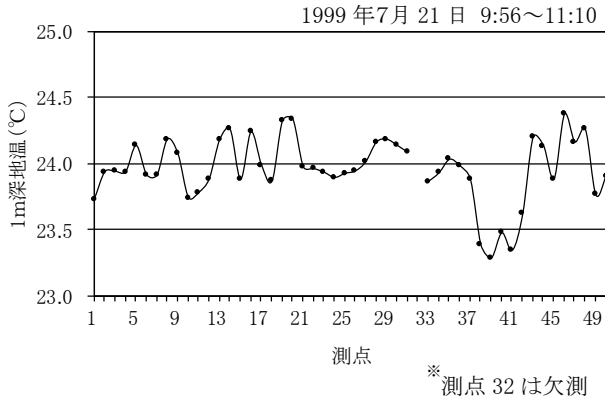


Fig. 2-8 1m 深地温の測定結果 (青池)

Result of measuring ground temperature at a depth of one meter

定した浸出水の水温は 21.6°C であるのに対し、低温部に含まれる地点 2 で測定した浸出水の水温は 20.6°C と低いこと、低温部の下流側堤体表面では漏水の浸出が観察されることから、低温部の形成は漏水の影響によるものと考えられる。

2.2.2.3 ため池堤体 1 m 深地温の日較差

ため池堤体における 1m 深地温の日較差を把握するために、青池において 1m 深地温の日変化を測定するとともに、比較のために気温の日変化を測定した。

Fig.2-8 において通常的な地温を持つ測点 35 と低温部である測点 39 において 1m 深地温を、青池から約 370 m 離れた気象観測露場において気温を測定した。1999 年 8 月 30 日の毎正時の測定値を Fig.2-9 に示す。

Fig.2-9 から、気温の日較差は 7.7°C であるのに対し、1m 深地温の日較差は両測点とも 0.1°C である。従って、堤体天端上から測定した 1m 深地温の日較差は、気温の日較差と比較して極めて小さいことがわかる。

2.2.2.4 ため池堤体 1 m 深地温の年変化

ため池堤体における 1m 深地温の年変化を把握するために、青池において 1m 深地温を季節毎に測定した。

Fig.2-8 において通常的な地温を持つ測点 28 ~ 31 と低温部である測点 38 ~ 42 の 1m 深地温、及び比較のために Fig.2-6, Fig.2-7 示した地点 2 における観測孔内への浸出

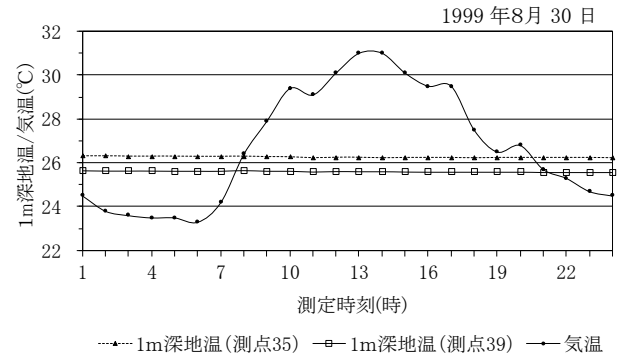


Fig.2-9 1m 深地温の日変化 (青池)

Daily fluctuations of the ground temperature at a depth of one meter

水の水温について、1998 年 8 月 7 日 ~ 1999 年 7 月 21 日の間において季節毎に測定した。測点 28 ~ 31 の平均値(通常)、測点 38 ~ 42 の間において平均値(通常)と最も温度差のある測点の測定値(特異)、両者の差、及び地点 2 の水温を Fig.2-10 に示す。

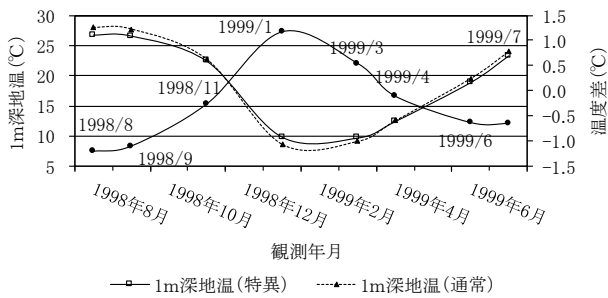
Fig.2-10 から、両者の 1m 深地温の間には夏期(1998 年 8 月 7 日)で 1.4°C、冬期(1999 年 1 月 29 日)には 1.3°C の温度差が認められる。これに対し、春期と秋期の温度差は小さい。従って、1m 深地温の測定は、両者の温度差が大きい夏期または冬期を行うことが適当である。

2.2.2.5 ため池堤体の表面温度

ため池堤体表面における温度分布、及び表面温度の日較差を把握するために、堤体の表面温度を測定した。

新井・西沢(1974)は人工貯水池の水温構造の特徴として、その水温分布は複雑なことと水温成層の形成を指摘している。青池の水深は約 2m と浅いことから、堤体の表面温度の測定は人工貯水池に特徴的な水温構造が形成されると考えられる水深を持つ六道池(広島県東広島市豊栄町乃美、堤高 7m、堤長 88m)において行った。大気と接する側の堤体表面については、草刈りがなされた状態の天端で 2005 年 9 月 7 日 ~ 8 日に地表下 0.2m において温度を測定した。水面下の堤体表面については、2005 年 9 月 8 日に垂直方向の表面温度分布(水面から水深 2.7m 地点までの堤体表面上の水温)を測定した。これらの結果を Fig.2-11, Fig.2-12 に示す。

Fig.2-11 から、大気と接する側の表層地温には日較差が



*温度差=1m深地温(特異)-1m深地温(通常)
 水温(地点2)はボーリング孔内の水温(位置は Fig 2-6, 7 参照)

Fig. 2-10 1m 深地温の年変化 (青池)

Annual change of the ground temperature at a depth of one meter

あることがわかる。従って、ため池堤体天端においても、地すべりブロックなどと同様に、地温異常の把握は日較差が十分に小さい1m深地温の測定によることが有利である。Fig.2-12 から、水面下の堤体表面温度は水深約0.5mの地点を境として温度勾配が異なること、水面から水深約0.5mまでの間に日射や気温等の影響を強く受ける層が、その下には別の層が形成されていることがわかる。また、夏季においては深層の貯水は表層より低温であり、この低温水が漏水として堤体内に浸透することによって地温異常(低温部)が形成されることがわかる。

2.2.3 ため池堤体1m深地温のシミュレーション

2.2.3.1 基礎方程式とシミュレーション

前節の結果より、ため池堤体は1m深地温の日較差が極めて小さいことから、堤体内における熱移動はフーリエの法則による定常熱伝導問題(内部発熱なし)として扱う。また、前述した既往の1m深探査法では土壤の熱伝導を一定として扱っていること、熱伝導率と密接に関連する堤体土の水分状態の詳細な把握は困難なことから、近似的に浸潤面から上部の堤体土の熱伝導は一定と見なし、定物性問題として扱う。従って、ため池堤体の1m深地温の形成に関わる熱移動の基礎方程式は、式(2-1)(庄司, 1995)となる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad \text{式(2-1)}$$

T:温度(°C) x, y, z:各座標値

シミュレーションは、黒田(2003)の有限要素法による三次元熱伝導解析プログラムを用いて行った。シミュレーションに用いる堤体は、青池での測量結果を基に後述する Fig.2-13 に示す断面とした。有限要素法の計算には堤長12mかつ均一型の堤体を想定し、六面体20節点を持つアイソパラメトリック要素を用いて要素・節点を設定した。頂点節点間の間隔は、堤体天端下においてX(堤体軸)方向100cm, Y(堤体軸直交)方向35cm, Z(高さ)方向12.5cmとし、中間に中間節点を設定した。

2.2.3.2 温度境界の設定方法の検討

シミュレーションでため池堤体の1m深地温を求める際の温度境界条件の設定方法を検討する。

温度境界は、漏水経路と堤体表面(大気に接する面:大気側/貯水に接する面:貯水側)、堤体内の浸透流が形成する浸潤面から構成される。検討に当たっては、この温度境界の条件(形状/温度勾配)と1m深地温の関係をシミュレーションで求めた。

温度境界の条件は Table 2-15 に示す5条件とした。なお、堤体と基礎地盤の接面、堤体の両端面は断熱境界とした。検討に用いた堤体断面の例(浸潤面の形状が水平の場合)は Fig.2-13 に示した。条件A~Cにおいては、浸潤面は貯水位を2.0mとして土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)及び土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム編〕(農林水産省農村振興局, 2003)に示されている A.Casagrande の方法により求めた放物線状の浸潤面とした。条件D, Eにおいては、設定条件の単純化を検討するために堤体全面にわたって等しい高さ、すなわち水平の浸潤面とした。浸潤面の温度勾配は、条件A, Bについては線形の温度勾配とし、条件C~Eについては設定条件の単純化を検討するために温度勾配がない、すなわち全面に渡って等しい温度とした。条件D, Eについて

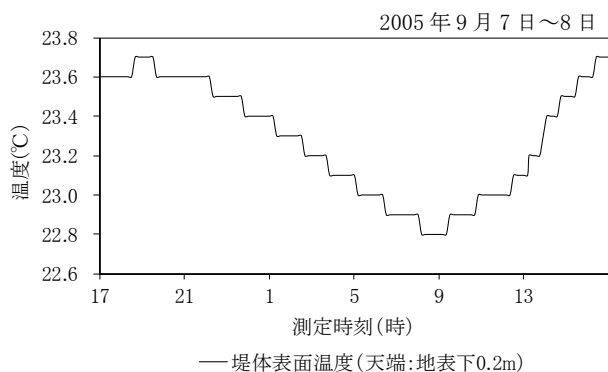


Fig.2-11 堤体表面温度(天端)の日変化(六道池)
 Daily fluctuations of the dam body surface temperature

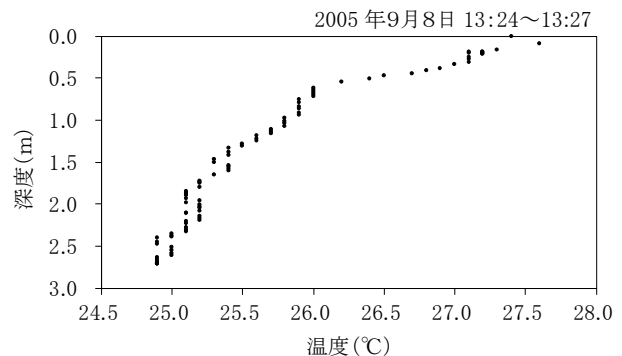
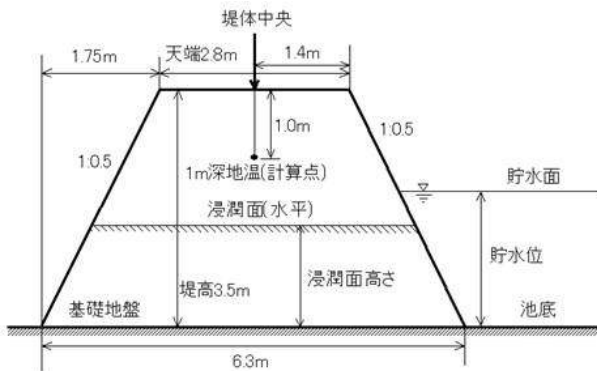


Fig.2-12 堤体表面温度(水面下)の鉛直分布(六道池)
 Distribution of the plumb direction of the dam body surface temperature

Table 2-15 計算条件（1）と1m深地温の計算値
List of parameters used for the calculation and calculated value of the ground temperature at a depth of one meter

温度固定境界の条件	条件A	条件B	条件C	条件D	条件E
浸潤面の形状	放物線	放物線	放物線	水平	水平
貯水位(m)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
浸潤面高さ(堤体中央)(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
浸潤面表面温度(貯水との接点)(°C)	19.6	17.6	21.6	21.6	21.6
" (堤体中央)(°C)	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6
" (堤体末端)(°C)	24.2	26.7	21.6	21.6	21.6
堤体表面温度(大気側)(°C)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
" (貯水側)(°C)	—	—	—	20.6	27.3
1m深地温(堤体中央:計算値)(°C)	24.0	24.0	24.1	24.0	24.1

※堤体軸平行方向の全長に対して同一条件を設定



※浸潤面の形状、ならびに貯水面との位置関係は Table 2-15 の条件D, Eの場合を示した。

Fig. 2-13 シミュレーションに用いた堤体断面 (青池)
The dam body section used in the simulation

は水面と浸潤面との間の堤体表面（貯水側）も温度境界とし、条件Dは低温側の条件として Fig.2-8 に示した青池の観測孔内（地点2）の浸出水の水温を、条件Eは高温の条件として Fig.2-6 に示した水位観測点における水面下1mの堤体表面（貯水側）の水温（1999年7月21日測定）を設定し、浸潤面と同様に設定条件の単純化を検討するために温度勾配はないものとした。条件D, Eとも、温度勾配を想定しないことから、実際の堤体表面（貯水側）温度と比してそれぞれより低温側、高温側と考えられる条件であり、堤体表面（貯水側）の温度境界条件の相違に対する1m深地温の影響をより強く検討できる。なお、堤体表面（大気側）は、条件A～Eとも、全面にわたって等しい温度とした。これら条件の下で形成される堤体中央の1m深地温の計算値を Table 2-15 中に示した。

Table 2-15 中の条件A～Cに関する1m深地温（計算値）の比較から、浸潤面表面の温度勾配の違いによる温度差はほとんど生じないことがわかる。また、条件C, Dから浸潤面の形状の違いによる温度差もほとんど生じない

こと、条件D, Eから浸潤面と水面との間の堤体表面温度（貯水側）の違いによる温度差もほとんど生じないことがわかる。

これらの結果から、浸潤面の形状は堤体軸直交方向に対して等しい深度を持つ平面として単純化して設定する。浸潤面の温度についても、温度勾配は存在しない、すなわち全面に渡って均一な値を設定する。堤体表面温度（大気側/貯水側）も、大気側、貯水側それぞれに対して均一な値を設定する。また、浸潤面の温度は堤体上に設置した観測孔への浸出水の水温から、堤体表面の温度は大気側、貯水側それぞれの任意地点での表層地温や堤体表面の水温、もしくはこれらを代替する観測データを基に設定する。日較差の存在する表層地温や堤体表面の水温については日平均値等を用いる。

2.2.3.3 漏水経路の設定

シミュレーションでため池堤体の1m深地温を求める際の漏水経路の設定方法を検討する。

検討に当たっては、Table 2-16 に示す9条件について、Fig.2-13の堤体を用いてシミュレーションを行った。但し、漏水経路の条件が1m深地温に与える影響を明確に捉えるために、浸潤面は設定していない。漏水経路については長方形断面とし、前節の検討結果から堤体軸直交方向の形状や温度勾配の相違は1m深地温に影響を及ぼさないと考えられるので、漏水経路は堤体軸直交方向の全長にわたって等しい厚さかつ温度勾配を持たない直方体とした。漏水経路を持つ堤体断面は Fig.2-14 に示す。1m深地温は堤体中央において堤体軸平行方向に0.5m間隔で求めた。計算結果は Fig.2-15 ~ Fig.2-18 に示す。

Fig.2-15 から、漏水経路厚さの違いによる温度差はほとんど生じない、すなわち漏水経路厚さの探査はできないことがわかる。これに対し、Fig.2-16 から、漏水経路幅の

Table 2-16 計算条件(2)
List of parameters used for the calculation

温度固定境界の条件	条件F	条件G	条件H	条件I	条件J	条件K	条件L	条件M	条件N
漏水経路の形状	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形
貯水位(m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
漏水経路表面高さ(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	2.0
漏水経路高さ(m)	0.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	2.0
漏水経路幅(堤体平行方向)(m)	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
漏水経路表面温度(°C)	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	19.6	21.6	20.6	20.6
堤体表面温度(大気側)(°C)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
〃 (貯水側)(°C)	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3

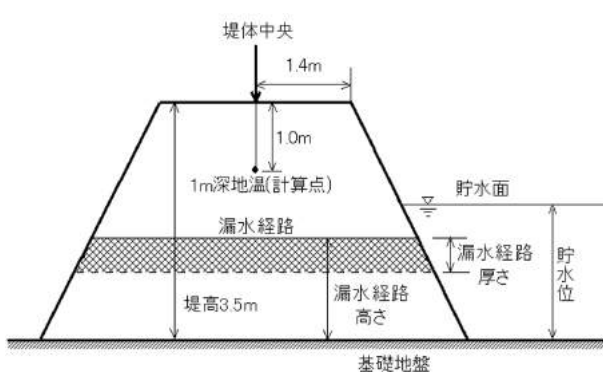


Fig. 2-14 想定した堤体中の漏水経路
Course of the assumed outflow in the dam body

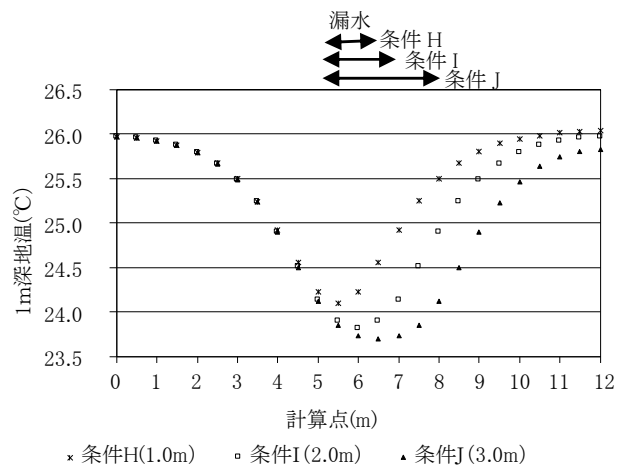


Fig. 2-16 漏水経路幅と1m深地温の関係
Relations of width of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

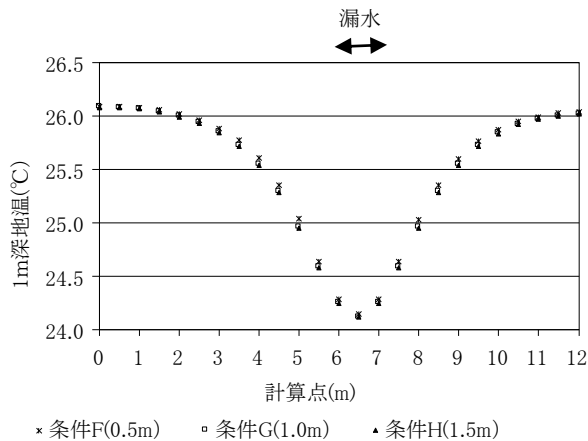


Fig. 2-15 漏水経路厚さと1m深地温の関係
Relations of thickness of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

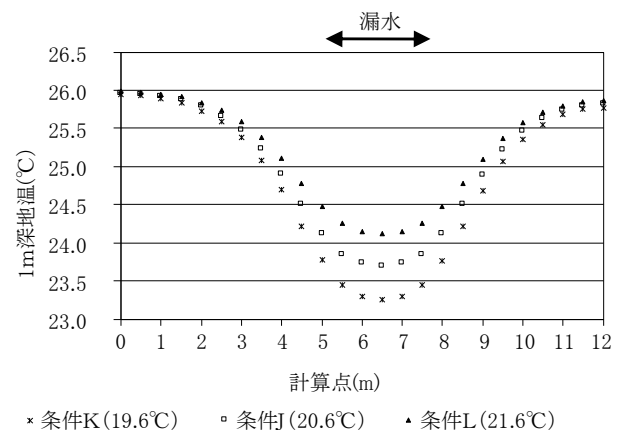


Fig. 2-17 漏水経路温度と1m深地温の関係
Relations of temperature of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

違いによって明確な温度差が生じることがわかる。**Fig. 2-17**, **Fig. 2-18** から、漏水経路の温度が異なる場合と漏水経路高さが異なる場合には、いずれも明確な温度差が生じることがわかる。また、計算点0m地点の1m深地温と0.5°C

以上の地温差を生じる範囲は、**Fig. 2-17** においては条件K、Jで計算点3m～10m地点、条件Lで計算点3.5m～9.5m地点、**Fig. 2-18** においては3条件とも計算点3m～10m地点の間である。従って、1m深地温の地温差を生じる範囲

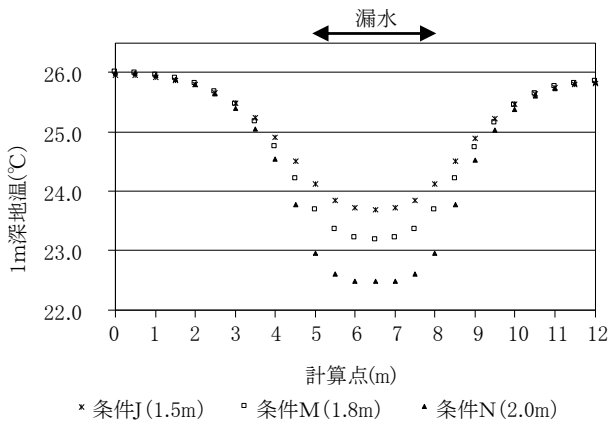


Fig.2-18 漏水経路高さ と 1m 深地温の関係

Relations of the height of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

は、漏水経路温度や漏水経路高さに関わらず、ほぼ等しいことがわかる。

これらの結果から、漏水経路の温度が既知の場合には、堤体軸平行方向に設けた測点の1m深地温の実測値と計算値が整合するよう漏水経路の幅と深度を変えてシミュレーションを行い、両者をマッチングさせることで、測線と直交する漏水経路の幅と深度の推定が可能であることがわかる。

2.2.3.4 ため池堤体中の漏水経路の推定手順

得られた結果を踏まえ、漏水経路の位置と深度の推定手順を次に提示する。なお、適用に当たっては、漏水経路は直方体で近似できることを前提とする。

- ① 堤体天端上に測線・測点を設定し、1～2m程度の間隔で1m深地温を測定。
- ② 1m深地温の測定結果から、漏水経路の中心を推定。
- ③ 漏水経路直上とそれ以外の堤体天端上でハンドオーガー等により観測孔の削孔し、漏水経路と浸潤面の水温を測定。
- ④ 既往の観測資料や実測により、堤体表面温度（大気側／貯水側）を決定。
- ⑤ A.Casagrandeの方法や観測孔内の水位測定で測線直下の浸潤面深度を決定。
- ⑥ 漏水経路の幅と深度を仮定し、直方体として漏水経路を設定。
- ⑦ 上記の②～⑥の条件に基づいて、堤体物性を均一（定物性問題）と見なした三次元熱伝導シミュレーション（定常熱伝導問題（内部発熱なし））により1m深地温を求める。
- ⑧ 上記の①と⑦の結果を比較し、両者がほぼ等しいと見なせるようになるまで作業を繰り返す。
- ⑨ 上記の①と⑥の結果がほぼ等しいと見なせた時点の漏水経路の幅と深度を推定結果とする。

2.2.4 青池における漏水経路の推定と検証

2.2.4.1 漏水経路の推定

前節で提示した手順に従い、Fig.2-8に示した1m深地温の測定結果を用いて青池堤体における漏水経路の探査を行う。

シミュレーションに用いた温度境界条件は、1m深地温の測定と同時にを行った測定値等を用いた。漏水経路水温はFig.2-8に示す地点2における観測孔内への浸出水の水温、漏水経路外の浸潤面温度は同様に地点1における水温、及び堤体表面温度（貯水側）は地点1付近の堤体表面（貯水側）の水温（水面下1m地点）とした。池水位はFig.2-6に示す水位測定点における測定値とし、浸潤面深度はこの値を用いてA.Casagrandeの方法で求めた。また、堤体表面温度（大気側）は、前述の気象観測露場において1m深地温の測定日と同時期の1993年7月15日～29日に観測された地表下0.2mの地温の平均値を用いた。既出のものを含め、これらをTable 2-17に示す。

得られた1m深地温の計算値と実測値をFig.2-19に、漏水経路の諸元をTable 2-18に示す。青池にはFig.2-6、Fig.2-7に示す位置に、余水吐として機能している旧樋管がある。貯水池側の堤体法面においては、パイピング穴等の漏水の浸入点となるような場所は旧樋管（余水吐）の流入口付近を除いて観察されなかったことから、青池堤体の漏水は旧樋管（余水吐）の流入口付近から旧樋管の管路に沿って堤体内に浸入していると考えられる。また、下流側の道路法面下端の水路周辺一帯（Fig.2-6参照）では、漏水が常時浸出している。従って、青池堤体においては、旧樋管（余水吐）の流入口付近から堤体内に浸入した漏水が、測点番号40地点を中心として推定した深度・幅の経路で測線下を流下した後、下流側の道路法面の浸出地点に達していると推定される。

2.2.4.2 推定結果の検証

旧樋管の管路の埋設深度は、貯水池内の流入口と下流側水路への流出口の位置から推定すると、堤体天端下約1.7mである。測線付近の漏水経路の深度は管路の深度に近いものと考えられることから、深度の推定結果は妥当

Table 2-17 計算条件（3）
List of parameters used for the calculation

項目	値
浸潤面温度(°C)	21.6
漏水経路温度(°C)	20.6
堤体表面温度(大気側)(°C)	26.0
堤体表面温度(貯水側)(°C)	26.7
池水位(天端からの深度)(m)	1.51
浸潤面深度(天端からの深度)(m)	2.0

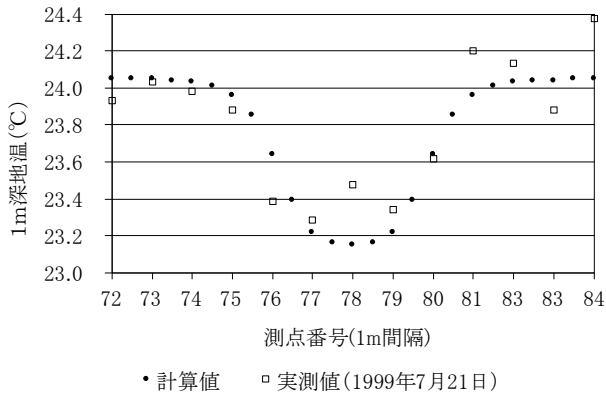


Fig.2-19 計算値と実測値の比較 (1m 深地温：青池)
Comparison between observed value and calculated value

Table 2-18 推定した漏水諸元 (青池)
Specifications of the estimated water leakage

項目	値
漏水経路表面深度(天端から)(m)	1.7
漏水経路幅(堤体軸平行方向)(m)	3.0

であると判断できる。

堀ら (1995) は、青池において塩水トレーサ法により、Fig.2-20 に示す堤体表面に浸出する漏水の卓越する流速ベクトルを求めた。他地点と比して著しく速い流速が測定された地点 A, H と旧樋管流入地点を結んだ直線は、漏水経路の中心と推定された測点 40 を包括し、かつそれぞれ推定した漏水経路の幅をもって測線と交差する。従って、測線上の漏水経路の幅についても妥当なものと考えられる。

これらの検証結果から、提示した手順により測線下における漏水経路の位置と深度の推定を行うことが可能であると判断できる。

3. 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策

3.1 背景と目的

ため池の被災要因の太宗は豪雨であることから、豪雨による被災リスクの低減、すなわち決壊を避けることは極めて重要である。しかし、ため池の改修事業は進められているものの、現行の「土地改良事業設計指針」ため

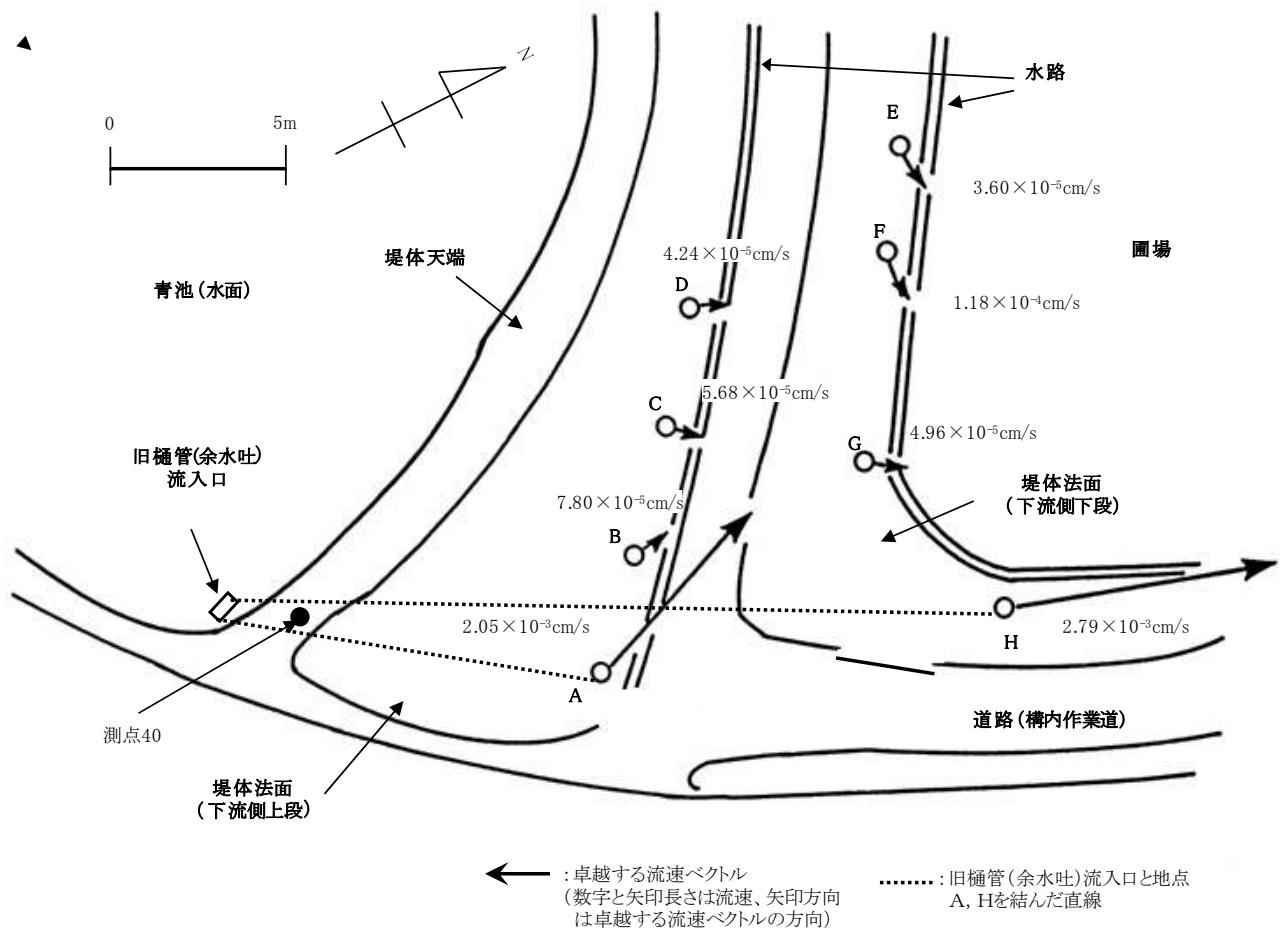


Fig. 2-20 流速ベクトルと推定した漏水の主な水みち (青池)
The flow vectors and course of the estimated outflows

池整備」に相当する水準で堤体や洪水吐などの整備がなされていない、すなわち豪雨時に被災するおそれがあるため池は多数存在する。

豪雨に起因する、ため池の決壊を招く堤体の被災は越流破壊とすべり破壊、浸透破壊の3つに大別される（農林水産省農村振興局整備部防災課，2013）。越流破壊は貯水位が堤頂を超えることにより、越流水で堤体法面が侵食され生じるものである。すべり破壊は貯水と降雨が堤体に浸透し、堤体法面に円弧すべり等が生じる現象である。また、浸透破壊は堤体中に貯水が浸透して水みちが形成され、堤体が破壊される現象である。いずれも降雨に伴う貯水位の上昇と密接に関わり合う現象であることから、設計洪水水位ないし未整備ため池であればこれに準ずる水位を貯水管理上の上限水位として設定し、ピーク水位がこれを超えないようソフト対策ないしハード対策を講じることにより、被災リスクを低減することができる。

ため池管理者が主体となって取り組む減災対策として、ピーク水位をソフト対策ないし簡易なハード対策によって低下させる取り組みが示されている（農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室，2014）。ソフト対策としては、豪雨が予想される期間にあらかじめ貯水位を常時満水位よりも引き下げて貯水の管理を行う低水位管理や気象予報に従って降雨前にあらかじめ放流を行って貯水位を低下させる事前放流の取り組みがある。これらの対応で創出した空き容量に流域から流入する降雨流出を貯留することで、ピーク水位を低下させることが期待できる。また、ため池管理の一環として実施される簡易なハード対策としては、洪水吐の拡幅や増設がある。この場合は洪水吐の放流能力を増強することにより、ピーク水位の低下が期待できる。貯水位を指標とした被災リスクの評価を行う場合、ならびに空き容量の創出や洪水吐の放流能力増強によるピーク水位引き下げによる被災リスク低減の効果を検討する場合には、洪水流出モデルを用いて降雨に伴う流域からの流入量を求め、これと洪水吐からの放流量ならびに降雨前の貯水位から貯水位ハイドログラフを妥当な精度で作成する必要がある。

また、農林水産省が全国のため池管理者を抽出して実施したアンケート調査においては、「10年程度前と比べた変化」として約7割の回答者が豪雨の頻度・強さが増したことと対応した管理強化の必要性を回答している（佐藤，2014）。地球温暖化に伴い、大雨や短時間強雨の発生回数の増加などが指摘されており、豪雨に対するため池の防災・減災対策においては気候変動に伴う降雨の変化を想定して検討を行う必要がある。

そこで、自流域を持つため池の洪水流出特性を明らかにした上で洪水流出モデルによるため池貯水位予測モデルを作成し、貯水位を指標として気候変動による降雨の変化を踏まえたため池の被災リスクの評価、ならびにため池管理者により実施可能な減災対策による被災リスクの低減効果について検討を行う。さらにこの結果に基づいて、ため

池管理者が減災対策を講じることによる被災リスクの低減策、すなわち決壊の回避策について考察する。

3.2 検討内容

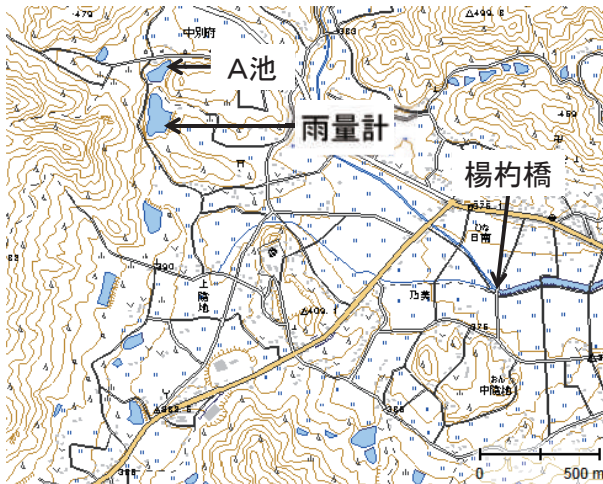
3.2.1 水文観測と洪水流出特性の検討

水文観測は2005年3月12日から2011年3月31日を観測期間として、広島県東広島市豊栄町乃美のA池の貯水池、ならびに比較のために下流の椋梨川楊杓橋地点の河道に圧力式水位計（センシズ HM-900 ないし同等品）を設置して実施した。水位計の設置にあたっては、A池においては堤体法面、椋梨川楊杓橋地点においては護岸法面に塩ビ管を取り付けて塩ビ管底部に水位計のセンサ部分を設置するとともに、機器収納箱を水没しない地点に設置して記録装置を納めた。A池には雨量計の設置に適した場所がないことから、雨量計（太田製作所 34-T）は天空を遮る樹木等がない、隣接するため池の堤体上に設置した（Fig.3-1, Fig.3-2）。水位と雨量の観測は10分ないし15分間隔で行った。A池は河川や沢などの貯水池への流入水路を持たない小規模のため池であり、上流域からの流入水は流域の斜面から貯水池へ直接流入するものと考えられる。A池の諸元（Table 3-1）は現地調査によるほか、満水面積と流域面積については1/25,000地形図上で求めた。



この地図は国土地理院の地理院地図(電子国土 Web)を加工して作成したものである。

Fig. 3-1 東広島市とA池、椋梨川楊杓橋地点の位置
Location of Higashi-Hiroshima city, A pond and Youjyaku bridge point in Mukunashi river



この地図は国土地理院発行の1/25,000地形図(乃美)を使用したものである。

Fig. 3-2 A池と椋梨川楊杓橋地点、雨量観測地点の位置
Location of A pond, Youjyaku bridge point and rainfall amount observation point

Table 3-1 A池の諸元
Specifics of A pond

	A(流域比小)	B(流域比大)
堤高(m)	3.31	3.82
流域面積(m ²)	90,000	480,000
越流幅(m)	0.21	0.43
最大越流水深(m)	0.26	0.51
余裕高(m)	0.26	0.51
流域比	15	80

洪水流出特性の検討にあたっては、まず観測期間において椋梨川楊杓橋地点で最も水位が上昇した2010年7月14日降雨を対象に、A池においては流域から貯水池への流入量、椋梨川椋梨川楊杓橋地点においては河川流量を求めた。A池貯水池における水収支は豪雨を対象とした検討であることから、池敷や堤体から地盤への浸透量や貯水面から大気への蒸発量は無視し、単位時間あたりの貯水量 dS/dt (変化量) は式 (3-1) とする。従って、流入量 I は貯水池容量 dS/dt (変化量) と放流量 O を求めることにより、式 (3-1) から計算できる。A池では貯水の利用などの人為的な放流は全くなされていないことから、放流量 O は洪水吐からの流出のみとして式 (3-2) を使い、水面と洪水吐水路底の水位差を越流総水頭 H として、これを観測貯水位から求めて計算した。なお、洪水吐は素掘り土水路であり、長方形断面の水路流入型のものと見なすことができることから、Table 3-1 に示した値を用いた。貯水池の断面構造は第5章においてA池を含む東広島市豊栄町内椋梨川流域のため池を対象に推定した断面構造を用い、貯水量は観測貯水位から求めた。楊杓橋地点の河川流量は第4章で作成した広域洪水流出モデルより水位-流量曲線を作成し、観測水位から求めた。

$$dS/dt = I - O \quad (3-1)$$

I : 流入量 (m³/s)
 O : 放流量 (m³/s)
 S : 貯水量 (m³)
 t : 単位時間 (s)

$$Q = CBH^{3/2} \quad (3-2)$$

Q : 流量 (m³/s)
 B : 水路幅 (m)
 H : 越流総水頭 (m)
 C : 流量係数 (=1.2 : m^{1/2}/s)

降雨に伴う流出水は降雨が地表面ないし表層部を流下して到達する表面流出(表層流出)と比較的浅い領域を流下して到達する中間流出、地中の深い領域まで浸透した後時間をかけて流下する地下水流出にその流出経路に応じて大別される。従って、観測された流量ハイドログラフはこれらの3成分が合成されたものである。流出成分の分離法には図解法があり、水谷(2008)はBarnsの方法(Barns, 1940)に基づいて縦軸を対数表示としたピーク流量出現時刻以降の流量、横軸を経過時間とした片対数のグラフを作成することで、流出成分の分離を行っている。この方法で作成した片対数グラフは2つの屈折点で区分される3本の直線で近似され、それぞれの直線が3つの流出成分に対応することから、流出成分の分離ができる。

図解法による片対数グラフの作成は、2010年7月14日降雨におけるピーク流量出現時刻以降の流量について、A池流入量と椋梨川楊杓橋地点を対象に行った。

3.2.2 貯水位予測モデルの作成

貯水位予測モデルはFig.3-3に示す構成のものとした。流域から貯水池への流入量の計算に対しては貯留関数法を適用し、洪水吐からの放流量と貯水池容量(単位時間あたり変化量)の計算は前述のA池流入量の計算方法と同じとした。貯水位予測モデルにおいても豪雨時の洪水流出を対象とすることから、池敷や堤体から地盤への浸透量や貯水面から大気への蒸発量は無視し、取水施設からの放流量は考慮しない。貯留関数法の計算にあたっては、木村(1975)の基礎方程式を式(3-3)、式(3-4)を連立させ、ルンゲクッタ法により差分化するとともに、計算時間刻みは1分とした。

$$S = kq^p \quad (3-3)$$

$$\frac{dS}{dt} = r_e - q \quad (3-4)$$

S : 見かけの貯留高 (mm)
 q : 流出高 (mm)
 r_e : 有効降雨強度 (mm)
 k, p : 係数 (無次元)

貯留関数法の係数は2005年7月2日降雨ならびに2005年9月7日降雨時の観測データを用い、A池流入量とA池貯水位を用いて試行錯誤により決定した。有効雨量の計算は第4章で求めた飽和雨量と一次流出率を用いた。これらの値はTable 3-2に示す。

3.2.3 降雨データの作成

検討に用いた降雨データのうち、現在降雨については独立行政法人土木研究所が公開するフェア式による計算プログラムを用い、東広島地点のアメダス観測値（1976～2000年）からハイエトグラフを作成した。降雨継続時間と降雨パターンは「土地改良事業設計指針「ため池整備」」の「参考資料-1 貯留効果の計算例」（農林水産省農村振興局整備部設計課，2006）と土地改良事業計画

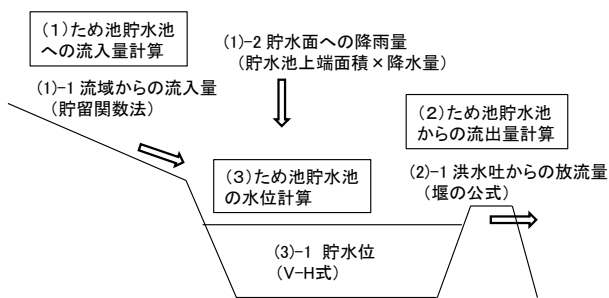


Fig. 3-3 貯水位予測モデルの概要
Summary of the reservoir levels prediction model

Table 3-2 貯留関数法の係数等（A池）
Coefficients of storage function

項目	値等
k値	15
p値	0.6
一次流出率	0.4
飽和雨量(mm)	100

設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準の運用（農林水産省農村振興局，2006）を参考に24時間連続降雨とし、降雨パターンは中央集中型と後方集中型を作成した。

将来降雨については、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）による第5次評価報告書で用いられた、世界気候計画（WCRP）が策定した第5期結合モデル相互比較計画（CMIP5）の実験仕様に基づく気候モデルで得られた降水量の予測データを用いて作成した。作成にあたっては、アメダス観測点における将来の日雨量の予測に使用できる空間解像度と考えられる、Table 3-3に示した水平解像度200km程度以下の気候モデルを選択した。また、CMIP5の実験仕様で設定されている複数の温暖化シナリオのうち、比較的緩やかに温暖化が進行することを想定しているRCP4.5に対応した予測データを使用した。使用する予測データの期間は、現在降雨についてはアメダス

Table 3-3 検討した気候モデル
Examined climate models

気候モデル名
MIROC5
MRI-CGCM3
CNRM-CM5
CSIRO-Mk3-6-0
HadGEM2-ES

観測値に対応する1976年～2000年とし、将来降雨は今世紀末の2081年～2100年とした。

予測データには統計的な誤差（バイアス）が含まれるため、将来降雨のデータ作成にあたってはバイアス補正を行った。まず、各気候モデルの予測データ（現在/将来）を計算格子間距離の重み付けにより5kmメッシュ化し、1976年以降の降水量が観測されているA池最寄りのアメダス観測地点であるアメダス東広島地点と重なるメッシュの値を求め、これをアメダス東広島地点の予測データとした。次に、各気候モデルによる現在の日雨量の予測データと同期間の東広島地点におけるアメダス観測値の日雨量の双方について、月最大日雨量を用いてグンベル法により月毎の確率雨量（2～30年）を求め、この2つの確率雨量の間で気候モデル別かつ月ごとに回帰式を作成した。バイアス補正はこの回帰式を用い、対応する気候モデルならびに月ごとに現在と将来の予測データに対して適用して行った。

将来降雨のハイドログラフ作成にあたっては、まずアメダス観測値とバイアス補正後の予測データに関し、年最大の日降水量を用いてグンベル法により現在降雨の確率雨量（2～30年）を気候モデル毎に求めた。アメダス観測値に関しては、24時間雨量に関する確率雨量についても同様に求めた。次に、得られた確率雨量の比較から、アメダス観測値による確率雨量と近い値が得られた気候モデルを選択した。選択した気候モデルの将来降雨においては、同様にグンベル法で気候モデル毎に確率雨量（2～30年）を求めるとともに、各気候モデルの予測データから作成した年最大の日降水量にデータを全て用いたマルチアンサンブルの確率雨量（2～30年）を求めた。その上で、アメダス観測値と将来降雨（各気象モデル/アンサンブルデータ）の確率雨量から回帰式を、またアメダス観測値の24時間雨量と日雨量に関する確率雨量の間でも相互の回帰式を求めた。

将来降雨においても降雨継続時間と降雨パターンについては現在の降雨と同一とし、各時刻とも同倍率で雨量が変化するものと仮定して、現在降雨のハイエトグラフからこれら回帰式を用いて将来降雨のハイエトグラフを作成した。

3.2.4 A池における検討

豪雨によるため池の被災は、前述のように越流破壊とすべり破壊、浸透破壊に大別され、いずれも貯水位と密接な関係がある。このうち越流破壊は貯水位が堤頂の高さを超えた時点で堤体越流が生じることで発生する現象であり、堤頂の高さと等しい貯水位を被災発生の際値と見なすことができる。これに対して、未改修ため池においては一般に堤体内部は不均一である上に内部構造や土質定数、透水係数等は不明であること、浸透破壊に関わる現象は堤体内部の局所的な弱部を起点に発生する機会が多いことが想定され予測が困難なことから、すべり破壊と浸透破壊の発生限界となる閾値の貯水位は明確ではない。

そこで、洪水吐水深の半分の水位を一意に被災発生を目安水位として設定し、前述の貯水位予測モデルをA池に適用してピーク水位が堤頂に達する降雨確率年、ならびにこの逆数である年間の生起確率を貯水位予測モデルの逆解析で求めた。

減災対策は、ピーク水位引き下げによる被災リスク低減効果が期待できる貯水位の低下管理（低水位管理・事前放流）と洪水吐の拡幅（簡易改修）に関し、対策シナリオを設定した（Table 3-4）。被災リスクについては、貯水が常時満水位にある現況のため池、ならびに対策シナリオを設定した場合について、降雨確率年から生起確率を求めた。

また、一般にため池の設計洪水流量の計算に用いる200年確率の降雨に関して、降雨継続時間24時間の中央集中型ならびに後方集中型降雨に対するピーク水位を求めた。

3.2.5 モデルため池における検討

豪雨に伴う貯水位の上昇度合は式(3-1)の通り、流入量と放流量の関係で規定される。ピーク水位引き下げを目的とする減災対策の効果は、貯水池の規模の指標である満水面積に対する流域面積の比率である流域比（流域面積/満水面積）の影響を大きく受けるものと考えられる。そこで、満水面積と貯水量は共通とし、流域比（流域面積/満水面積）の異なる2種類のモデルため池を設定し、流域比の相違と減災対策による被災リスク低減効

果の関係を評価した。なお、堤体の被災発生に対する閾値の水位は堤頂と常時満水位である洪水吐底面の標高差である洪水吐深さの半分に対応する水位とし、洪水吐の放流能力は未改修ため池を想定して30年確率の24時間連続降雨・後方集中型（現在）においてピーク水位がこの貯水位となるよう洪水吐の諸元を設定した。モデルため池の諸元等はTable 3-5、Table 3-6に示す。

減災対策は、A池における検討と同様に、貯水位の低下管理と洪水吐の拡幅に関し、対策シナリオを設定した（Table 3-7）。被災リスクについても同様に確率降雨年から生起確率を求めた。

Table 3-5 モデルため池の諸元1（共通部分）
Specifics of the model irrigation pond

諸元	値等
満水面積(m ²)	6,000
総貯水量(m ³)	15,120
常時満水位(m)	2.8
洪水吐形式	水路流入型
流量係数(m ^{0.5} /s)	1.35
k値	15
p値	0.6
一次流出率	0.4
飽和雨量(mm)	100

Table 3-6 モデルため池の諸元2
Specifics of the model irrigation pond

	A(流域比小)	B(流域比大)
堤高(m)	3.31	3.82
流域面積(m ²)	90,000	480,000
越流幅(m)	0.21	0.43
最大越流水深(m)	0.26	0.51
余裕高(m)	0.26	0.51
流域比	15	80

Table 3-4 対策シナリオ（A池）
Measures scenarios

- ①貯水位の低下管理(貯水量75%)
降雨前水位を1.84m→1.45m(-0.39m)下げて管理
- ②貯水位の低下管理(貯水量50%)
降雨前水位を1.84m→1.03m(-0.81m)下げて管理
- ③洪水吐の簡易改修
越流幅を0.25m→0.5m(2倍)に拡幅
※最大越流水深/余裕高は変更なし

Table 3-7 対策シナリオ（モデルため池）
Measures scenarios

- ①貯水位の低下管理(貯水量50%)
降雨前水位を2.8m→1.48m(-1.32m)下げて管理
- ②洪水吐の簡易改修(越流幅を1.5倍に拡幅)
A. 越流幅を0.21m→0.32mに拡幅
B. 越流幅を0.43m→0.64mに拡幅
※越流水深/余裕高は変更なし

なお、降雨パターンはピーク水位が最も上昇する後方集中型降雨のみ検討に用い、将来降雨についてはアンサンブルデータによる将来降雨データを用いて生起確率を求めた。

3.3 結果と考察

3.3.1 A池の洪水流出特性

A池流入量と比較対象の棕梨川楊杓橋地点に関する流量ハイドログラフを Fig.3-4 に示す。A池流入量のピークは降雨のピークとよく対応していること、また縦軸（流量）の倍率を合わせると、A池流入量と棕梨川楊杓橋地点流量の波形は近似していることが判る。

作成した減水曲線を Fig.3-5 に示す。A池流入量においても、棕梨川楊杓橋地点流量と同様に減水曲線の作成に

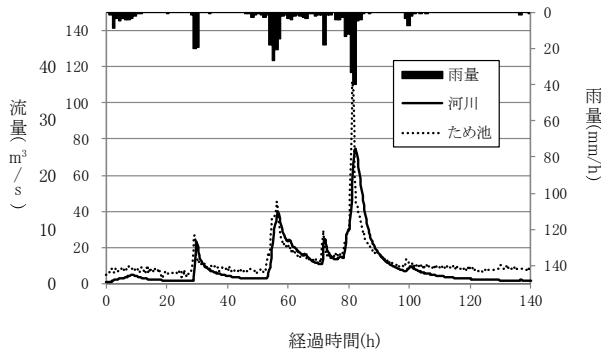
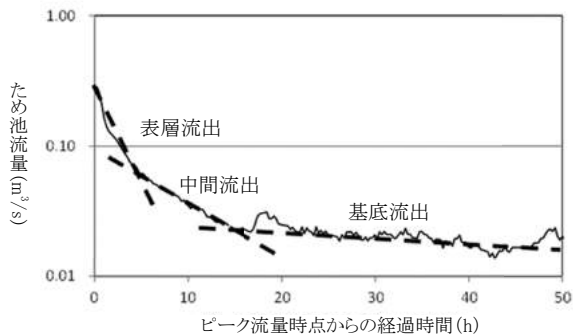
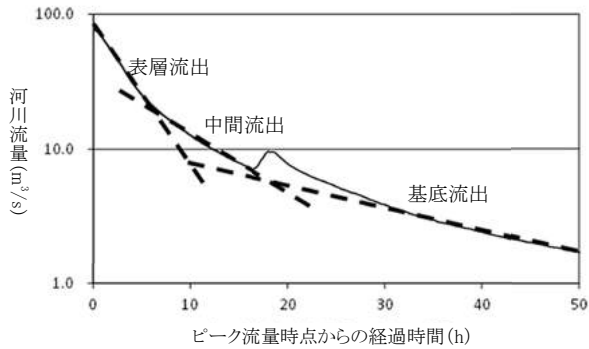


Fig.3-4 流量ハイドログラフ（2010年7月14日降雨）
Discharge hydrograph



(上：楊杓橋地点の河川流量，下：A池流入量)

Fig.3-5 作成した減水曲線（2010年7月14日降雨）
Composed recession curves

よって流出成分の3成分が分離されること、表面流（表層流）と中間流を合わせた直接流出が基底流出である地下水流に対して卓越し、洪水流出時の主要な流出成分であることがわかる。

これらの結果から、A池のように河川や沢などの貯水池への流入水路を持たず上流域からの流入水が直接貯水池へ流入するため池においても、豪雨時の貯水池への流出は河道に対する流域からの流出と同様の現象であると考えられること、従ってため池流域からの洪水流出に関しては、貯留関数法をはじめとした直接流出を解析対象とする洪水流出モデルが適用可能であると判断できる。

3.3.2 作成した貯水位予測モデル

A池において、貯留関数法の係数を決定した2010年7月14日降雨において、A池において評価モデルの再現性を流入量について検証した結果を Fig.3-6 に、貯水位について検証した結果を Fig.3-7 に示す。流入量ならびに貯水位とも、良好な精度で再現できていることがわかる。

3.3.3 作成した降雨データ

作成した現在降雨の例として、30年確率のハイトグラフを Fig.3-8 に示す。

各気候モデルのバイアス補正後の予測データ（現在）、ならびにアメダスデータから確率年毎の日雨量を求めた結果について Fig.3-9 に示す。CNRM_CM5 から作成した確率雨量はアメダスデータから作成した確率雨量と乖離

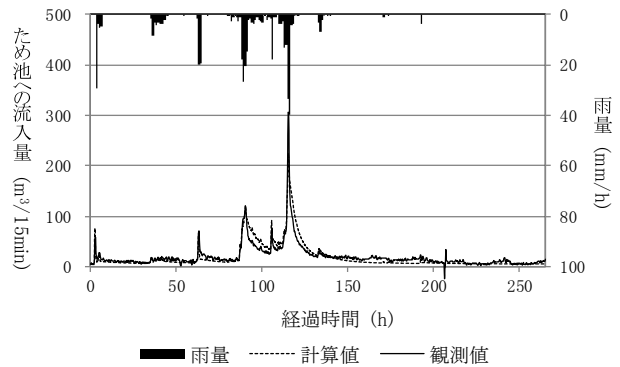


Fig.3-6 流入量予測結果（A池：2010年7月14日降雨）
Estimation result of inflow

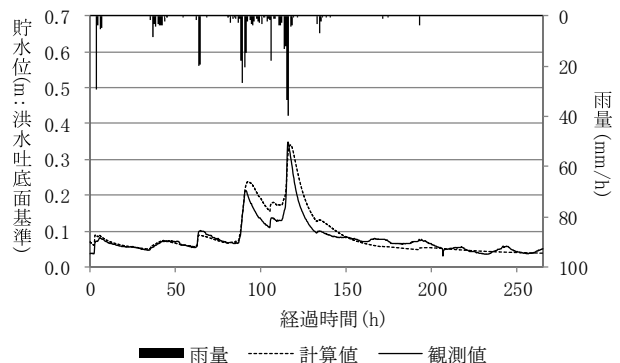


Fig.3-7 貯水位予測結果（A池：2010年7月14日降雨）
Estimation result of reservoir level

が見られるため、アンサンブルデータによる確率雨量の算出時には除外した。

将来降雨データについて、確率年ごとの24時間雨量を気候モデル別(アンサンブルデータならびにアメダスデータによるものを含む)に求めた結果を Fig.3-10 に示す。将来降雨は現在降雨よりも大きく増加するほか、気候モデル間で大きくばらつくことがわかる。このことから、気候モデル間のばらつきを踏まえて将来降雨データを作成する必要がある。その対処方法の一つとして、複数の気候モデルのデータを用いてマルチアンサンブルの将来気候データを作成することが有効であると考えられる。

3.3.4 A池の被災リスクと減災対策の評価

A池において、求めたピーク水位が被災発生の目安水位に達する生起確率を現在降雨と将来降雨ならびに中央

集中型降雨と後方集中型降雨の別に、現状のため池と3種類の減災対策を講じた場合について求めた結果を Fig.3-11 に示す。生起確率に対応する降雨確率年については Fig.3-11 中に記した。また、200年確率・降雨継続時間24時間の中央集中型ならびに後方集中型降雨に関するピーク水位は Fig.3-4 に示した。

Fig.3-11 より、被災発生の目安水位に達する生起確率は中央集中型よりも後方集中型において高いことがわかる。また、雨量の増加に対応して、現在降雨よりも将来降雨に対して生起確率が高くなることがわかる。減災対策に関しては、いずれの対策も被災リスク低減の効果を発揮すること、設定したシナリオにおいては洪水吐の拡幅が最も効果を発揮することがわかる。また、降雨確率200年の降雨におけるピーク水位は、後方集中型降雨の方が中央集中型降雨に対してピーク水位が高くなるものの、両パターンともピーク水位は堤頂には達しないことがわかる。

設計洪水時の貯水が堤頂を越流することがないように定められる堤頂と設計洪水位の標高差である堤体の余裕高は、土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)において、ため池決壊時に想定される被害規模が小さい堤高5.0m未満のため池の場合には最小1.0とされている。A池の洪水吐水深は0.6mであり、堤体の余裕高は大幅に不足しているものの、200年確率の24時間連続降雨で予測されるピーク水位は堤頂を下回ることから、現況においても一定規模の豪雨に

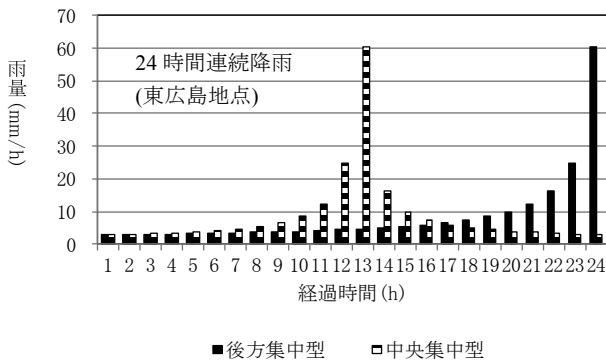


Fig.3-8 現在降雨のハイエトグラフの例(確率降雨30年)
Example of thehyetgraph of the present rain

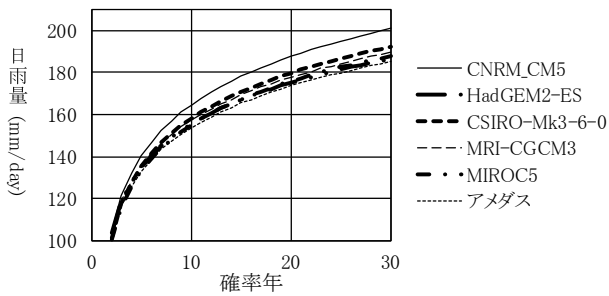


Fig.3-9 気候モデルによる現在降雨データ(1976~2000年)
The present rain with the climate model

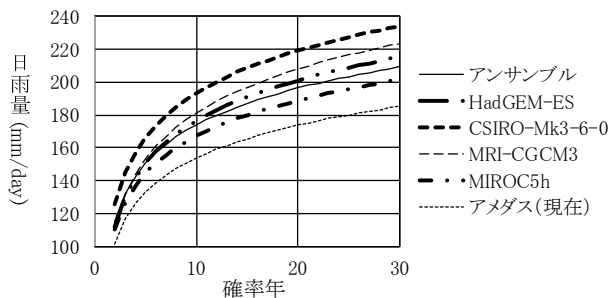


Fig.3-10 気候モデルによる将来降雨データ(2081~2100年)
The future rain with the climate model

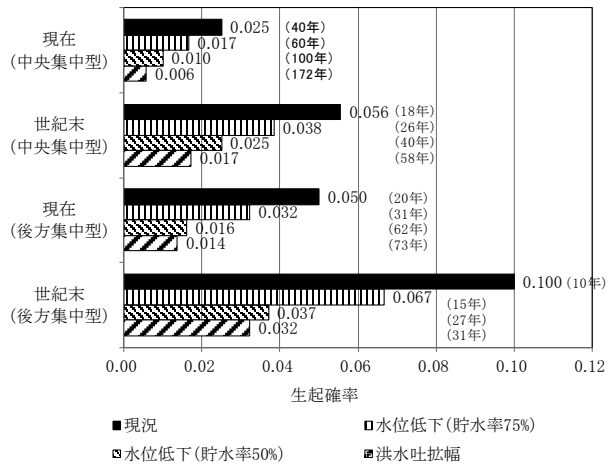


Fig.3-11 被災リスクの評価結果(A池)
Evaluation result of the damaged risk

Table 3-8 A池におけるピーク水位
Peak water level in A pond

(単位: m)	
降雨パターン	ピーク水位
中央集中型降雨	0.45
後方集中型降雨	0.53

※水位は洪水吐底面基準。堤頂に達する水位は0.6m。

は耐えうるものと考えられる。しかし、水深の半分の水位を被災発生を目安水位とした現在降雨に関する検討では、中央集中型降雨では降雨確率 40 年、後方集中型降雨では降雨確率 20 年でピーク水位が目安水位に達すること、ならびに将来降雨においては目安水位に基づく被災リスクが上昇することから、堤体や洪水吐の本格的な整備が行われるまでは減災対策を実施してピーク水位を引き下げ、被災リスクの低減を図る必要があると考えられる。

3.3.5 モデルため池における被災リスクと減災対策の効果

モデルため池において、ピーク水位が現在降雨および将来降雨において目安水位に達する生起確率を求めた結果について、Table 3-9 に示す。

検討結果より、洪水吐の簡易改修は現在降雨において流域比の大小にかかわらず減災効果を発揮することがわかる。これに対し、貯水位の低下管理は流域比 15 の場合は一定の効果を発揮するものの、流域比 80 の場合は効果を発揮しないことがわかる。また、将来降雨においては洪水吐の簡易改修は流域比 15 ならびに流域比 80 のため池とも将来降雨においても減災効果を発揮するのに対し、貯水位の低下管理は現在降雨では効果があつた流域比 15 においても十分な効果が期待できないおそれがある。ため池の減災対策の選定にあたっては、将来を含む想定する降雨と被災リスク軽減の効果の関係を検討することが重要である。

流域比が大きい場合は流域からの流入量が相対的に大きく、ピーク水位が形成される時間前に水位低下分の空き容量が失われる。貯水位の低下管理は上流域からの流入水を貯水池の空き容量での貯留により受け止めることにより、ピーク水位を低下させるものである。従って、流域比の大きなため池ではピーク水位の出現時刻前に満水となり、ピーク水位を低下させることができない。また、降雨継続時間が長い後方集中型降雨においても、同様の状態が考えられる。貯水位の低下管理は、利水容量に余裕のあるため池であれば水利権者の合意と管理者の取水施設等の操作のみで実施できる減災対策であり、工事等を要することなく実施可能という利点があることから、直ちに実施可能な減災対策として重要である。しかし、貯水位の低下管理によって必要な被災リスク低減効果が得られない場合には、他の対策を併用する必要がある。

Table 3-9 被災リスクの検討結果（モデルため池）

Evaluation result of the damaged risk

		現在	世紀末
A 流域比15	現況	0.033	0.071
	水位低下	0.012	0.029
	洪水吐拡幅	0.012	0.029
B 流域比80	現況	0.033	0.071
	水位低下	0.033	0.071
	洪水吐拡幅	0.011	0.027

洪水吐の拡幅は洪水吐放流量の増強により迅速に放水を図ることにより、ピーク水位を低下させるものである。流域比が大きく流域からの流入量の大きなため池でも、対応した拡幅を行えば、ピーク水位出現時刻前の流入の影響は小さく、安定した被災リスクの低減効果が期待できる。また、洪水吐の拡幅は常時満水位を引き下げる必要がなく、貯水容量は減少しない。従って、浚渫等を同時に行わない限り貯水容量が減少する洪水吐の掘り下げによる放流能力の拡大とは異なり、利水容量の調整は不要である。貯水容量の減少を招かない洪水吐の放流能力向上策としては、現在の洪水吐の拡幅の他、副洪水吐を堤体や地山に追加設置することも考えられる。現有の洪水吐の拡幅が困難な場合や放流先の下流水路の通水断面が不足する場合などにおいては、副洪水吐の設置により放流能力の拡大を行うことで、被災リスクの低減を図ることが考えられる。

4. ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策

4.1 背景と目的

ため池は貯水位が洪水吐底面よりも低い場合には、空き容量に流域からの流入水を貯留することにより、上流域からの流出量を低減する。満水の場合でも、貯水池に洪水吐の越流水深に対応する容量を一時的に貯留することにより、ため池は降雨から流出に至る時間を遅延させる。ため池が持つ多面的機能であるこれら洪水緩和機能により、ため池群は下流域の農地の湛水防除や河川・水路の氾濫抑制など下流河川流域の被災リスクを低減させる効果を発揮しているものと考えられる。ため池群を持つ河川の流域においては、農地防災や治水にあつたため池群の積極的な活用が求められている。

ため池群の洪水緩和効果による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策の検討は、ため池によるため池群を対象として、流域内に多数あるため池が下流河川上の基準点に与える洪水緩和効果を評価する。基準点における洪水緩和効果の評価は、流域の流出過程におけるため池群の役割を解明することである。また前述した既往の研究から、単独ため池での洪水緩和効果の大きさは洪水発生前の空き容量の大きさ、貯水池への洪水流入パターンに強く影響を受けること、また貯水池の水位低下管理は洪水ピーク緩和効果の増強に有効であることが明らかになっている。

そこで、対象流域においてため池の貯水位を観測するとともに、ため池群と河道を明示的に組み込んだ広域洪水流出モデルを作成する。その上で、貯水位の調査結果を用いて基準点における河川水位と確率降雨を指標として従来明らかにされていない現況のため池群が発揮する洪水緩和効果の大きさを求める。この結果から、ため池群を積極的に活用して多面的機能としての洪水緩和効果

を發揮させ、下流河川流域の被災リスクを低減させるための貯水管理を考察する。

4.2 対象流域

対象流域は地形的に閉じた流域と見なすことができる棕梨川揚杓橋地点の上流域（広島県東広島市）とし、基準点是对象流域の出口である揚杓橋地点とした。棕梨川は広島県東部を流れる沼田川（二級河川）の支流である。対象流域は中国山地を構成する標高400～600m程度の丘陵からなる中山間地帯であり、水田を主体とする農地と集落は主に河川沿いの緩傾斜地に広がっている。ため池は水田の広がる河川沿いの緩傾斜地と山林との境目を中心に、中小規模のため池が多数散在している。対象流域の概要は Fig.4-1, Table 4-1 に示した。

二級河川沼田川水系河川整備計画（広島県、2003）によれば、棕梨川流域は度々洪水にみまわれている。直近では1999年6月29日に梅雨前線による大雨で基準点を含む棕梨川・西原川合流点（新堰橋付近）～棕梨川・霜降川合流点（河木橋付近）区間の一帯などで氾濫し、家屋や農地の浸水被害が発生している。

4.3 洪水流出モデルの作成

4.3.1 対象流域のモデル化

対象流域における洪水流出モデルの作成にあたっては、流域の流出過程を河道の洪水流、ため池貯水池における

Table 4-1 対象流域の概要 of the study basin

検討流域面積	18.04km ²	ため池個数	56個
うち田面積	3.59km ²	総貯水面積	113千m ²
うち畑・牧草地面積	0.63km ²	総貯水量	251千m ³
うち果樹園面積	0.07km ²	総流域面積	3.71km ²
うち林地・その他面積	13.75km ²	総流域面積率	20.6%

貯留と洪水吐からの流出、および河道・ため池貯水池の後背地からの降雨流出の3つに区分し、それぞれに異なる計算モデルを適用した。河道は基準点の前後区間などで平坦に近く、洪水時に背水による水位の堰上げの可能性があること、河川水位を洪水流出モデル検証と洪水緩和効果評価の指標としたことから、不定流モデルを用いた。河道とため池貯水池の後背地からの降雨流出には貯留関数法を適用した。ため池貯水池は単一要素のボックスモデルとして扱い、流入量に基づいて非定常計算を行って貯水位と洪水吐からの流出量を求めた。なお、河道の氾濫は検討対象としないため、モデル化においても考慮しなかった。

モデル化の範囲は対象流域に加え、基準点において下流側水位を考慮した計算ができるように棕梨川（本流）の河道については棕梨川・霜降川合流点（河木橋付近）から4.75km下流の東広島・三原市境界付近まで、ため池貯水池や後背地については同合流点から750m下流地点の河道に対応した範囲までとした（Fig.4-1）。モデル化に関わる地理情報の処理はESRI ArcGIS 9.2と小山ら（2007）が作成した水理計算用データ作成プログラムを用いて行い、作業手順等は吉迫ら（2007）に準じた。

洪水流出モデルは現況のため池群に対応したものととも、全てのため池が潰廃された場合のものを作成した。

4.3.2 河道

河道は1/25,000地形図に記載された河川・水路に加え、同図上の等高線を基に設定したため池から河川・水路までの流路、ならびにこれと等価と考えられる等高線の凹部に設定した沢を仮想河道とし、モデル化の対象とした（Fig 4-1）。

不定流解析の基礎方程式は河道の流れを一次元とし、摩擦抵抗にマンニングの法則を用いた運動方程式の式（4-1）と連続方程式の式（4-2）を用いた。河道に対する後背地からの流入量、ため池洪水吐からの流入量、および合流する河道からの流入量は式（4-2）において横流入量として扱った。

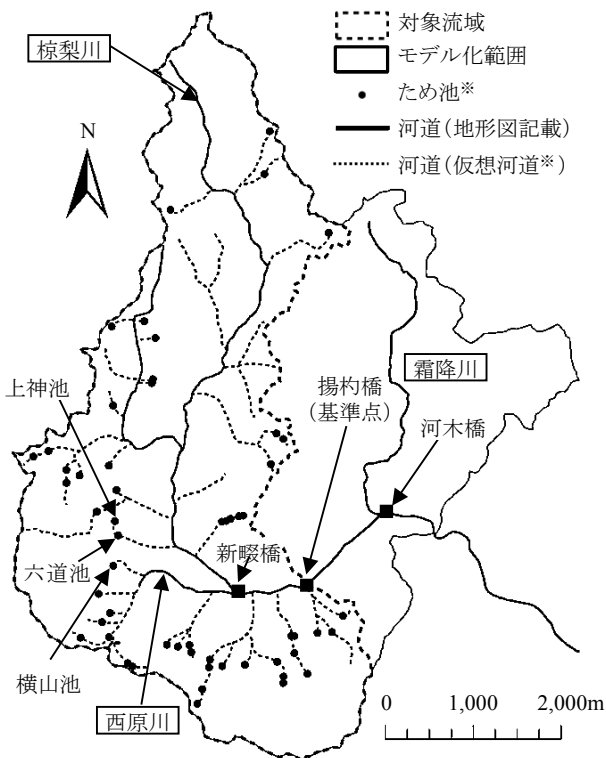
$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) - S_1 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0 \quad (4-1)$$

x: 流れの方向を正とする距離 (m)

t: 時間 (s)

g: 重力加速度 (m/s²)

v: 流速 (断面平均流速) (m/s)



*ため池と仮想河道は対象流域に限って記載

Fig.4-1 対象流域と洪水流出モデルの作成範囲 The studied basin and the scope of the flood outflow model

- h : 水深 (河道底から水面までの高さ) (m)
- R : 径深 (m)
- S_l : 河道底勾配 (無次元)
- n : マニングの粗度係数 (無次元)

$$\frac{\partial A_l}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (4-2)$$

- A_l : 通水断面積 (m²)
- Q : 流量 (m³/s)
- q_l : 単位長さ当たりの横流入量 (m³)

不定流モデルの差分格子点に対応する河道のセル分割は 100m 単位とした。断面形状や粗度係数は、1/25,000 地形図に記載された河川・水路については現地測量・調査に基づく値 (粗度係数: 0.035 ~ 0.1) とし、仮想河道については一律に一定値 (粗度係数: 0.1) を各セルに与えた。河道標高は解析上重要な椋梨川・西原川合流点~椋梨川・霜降川合流点区間などについては GPS による測量値を、他の区間については数値地図 50m メッシュ (標高) から補完して求めた値を用いた。

基礎方程式は中村・白石 (1971) や白石 (1971) が示した方法に基づいて中心差分化し、陽解法を用いて計算した。

4.3.3 後背地

後背地は降雨流出の単位であり、ため池貯水池に対する流出域はため池貯水池を単位として、河道に対する流出域は右岸・左岸別に河道長 1,000m を単位 (河道長 1,000m に満たない上流端は兩岸をあわせて 1 単位) として、1/25,000 地形図の等高線を基にモデル化範囲全域を空白域や後背地の重複が生じないように分割して設定した。貯留関数モデルは 1/25,000 地形図の土地利用・植生区分に従って田、畑・牧草地、果樹園、および山林・その他 (針葉樹林、広葉樹林等) の別に、各後背地内を更に細分した単位で作成した。河道に対する流出地点は後背地に接する不定流モデルのセルの内、最下流のセルとした。

貯留関数法の基礎方程式は木村 (1975) の式 (4-3)、式 (4-4) を用いた。有効降雨の推定は建設省水文研究会 (1971) に準じ、基準点で作成した保留量曲線、ならびに流出高累加曲線から求めた飽和雨量と一次流出率を用いて行った。対象流域は比較的狭域のため貯留関数法の係数は全後背地共通の値とし、基準点における観測水位と不定流モデルによる計算水位が整合するよう試行錯誤で係数の値を決定した。決定された係数等の値を Table 4-2 に示した。

$$S_2 = kq_2^p \quad (4-3)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = r_e - q_2 \quad (4-4)$$

Table 4-2 決定された係数等の値
Decided values of the coefficients

k 値 (田)	8	飽和雨量 (田を除く)	115mm
同 (畑・牧草地・樹園地)	12	同 (田)	50mm
同 (林地・その他)	15	一次流出率	0.33
p 値	0.6	時間遅れ	45min

- S_2 : 見かけの貯留高 (mm)
- q_2 : 流出高 (mm)
- r_e : 有効降雨強度 (mm)
- k, p : 係数 (無次元)

4.3.4 ため池

ため池は 1/25,000 地形図に記載されているもの (ただし、現地で潰廃を確認した 1ヶ所は除く) を対象とした。

洪水吐の形式は現地調査により把握した。対象流域内の洪水吐の形式と流量係数は Table 4-3 に示した。水路流入型や越流堰型、縦樋型の洪水吐による放流量は式 (4-5) により、ヒューム管や取水孔の開放口、すなわちオリフィスによる放流量は式 (4-6) により求めた。洪水吐の水路幅や堰の有効長、孔断面積等の計算に必要な諸元は測量により求めた。矩形断面における水路流入型と越流堰型、ならびに縦樋型の洪水吐に関する流量係数は加藤 (2005) と農林水産省農村振興局整備部設計課 (2006) を参考に設定し (Table 4-3)、台形断面や複断面の水路を持つ洪水吐の流量係数はこれらの値を基に椿・荒木 (1961) により求めた。オリフィスの流量係数は農林水産省農村振興局整備部設計課 (2006) に示された斜樋の流量係数とした (Table 4-3)。取水による放流量は無視した。

$$Qd = Cd \cdot B \cdot Hd^{3/2} \quad (4-5)$$

- Qd : 流量 (m³/s)
- Cd : 流量係数 (m^{1/2}/s)
- B : 水路幅 / 堰の有効幅 (m)
- Hd : 速度水頭を含む越流総水頭 (m)

$$Q = C \cdot A_2 \sqrt{2gH} \quad (4-6)$$

- Q : 流量 (m³/s)
- C : 流量係数
- A_2 : 孔断面積 (m²)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- H : 孔中心までの水深 (m)

満水面積は 1/25,000 地形図から計測した値、堤高はため池台帳に記載されている値 (記載のない場合は現地での測量値) とし、断面構造は第 5 章で対象流域のため池について求めたものを用いた。貯水位の計算方法は農林水産省農村振興局整備部設計課 (2006) に準じた。

全ため池が潰廃された場合のモデルは貯水池への流入

Table 4-3 洪水吐の形式と係数
The type and coefficients of the spillway

形式	箇所数	流量係数
水路流入型(コンクリート)	21	1.35
水路流入型(石積)	10	1.35
水路流入型(素掘)	11	1.20
越流堰型(標準・コンクリート)	3	2.00
越流堰型(簡易(刃型)・コンクリート)	2	2.00
越流堰型(石積)	1	1.35
縦樋型(コンクリート)	5	2.00
ヒューム管	2	0.62
取水孔の開放(洪水吐代用)	1	0.62

量, すなわち貯留関数モデルによって計算されるため池後背地からの流出量が洪水吐の流出地点と同一の河道地点(不定流モデルのセル)へ直接流出するものとした。

4.3.5 計算

洪水流出モデルの計算時間刻みは, 仮想河道と対象流域外の椋梨川本流のそれぞれ一部に急傾斜区間があることから, 不定流モデルにおいて発散が生じないように0.1秒とした。不定流モデルの境界条件は, 不定流モデルの最下流側セル(椋梨川本流)と基準点との間には十分な距離と高低差があることから, 最下流側メッシュの水位を2.0m(固定値)とした。

4.4 検討

4.4.1 観測

観測はため池の貯水率把握と洪水流出モデルの検証のために, 2005年3月12日から2011年3月31日を観測期間としてため池貯水位と雨量, 河川水位, 河川流速に関して行った。

ため池貯水位は上神池と六道池, 横山池において圧力式水位計(ハイネットHM-900-05またはセンシズHM-900-05)による連続観測を行った。加えて, 対象流域内のモデル化ため池全てを対象に, 洪水吐敷高(ヒューム管や取水孔の開放口の場合は孔の下端)と貯水位との標高差を空き水位として測量用ポールにより10cm単位で後掲するTable 4-5中に示した観測日をはじめ随時測定した。雨量は転倒マス型雨量計(太田製作所34-T)により六道池堤体上で, 河川水位は圧力式水位計(ハイネットHM-900-05)により基準点で連続観測を行った。河川流速は浮子法により2005年9月7日の降雨を対象に基準点で行った。これらの観測地点はFig.4-1中に示した。なお, 連続観測の時間間隔は水位に関しては15分, 雨量に関しては10分ないし15分とした。

4.4.2 洪水流出モデルの検証

洪水流出モデルの検証は河川水位・流量に関して行った。

河川水位・流量は基準点(堤防護岸高さ3.0m)において検証した。水位については観測期間中に基準点で2m以上のピーク水位が観測されたTable 4-4に示した4つの降雨(降雨日はいずれもピーク雨量の観測日)を, 流量については流量観測を行った2005年9月7日の降雨を対象に行った。検証用の計算開始時点のため池貯水位(初期値)は, 水位計設置ため池での検証対象降雨の降雨前貯水位(水位計による観測値)と随時実施した空き水位観測から求めた貯水位が最も近い観測日の観測空き水位を検証対象降雨の降雨前空き水位と見なし, この観測空き水位を用いて計算開始時点のため池貯水位を設定した(水位計設置ため池は水位計観測値を使用)。雨量は六道池堤体上での観測値を用いた。4つの検証対象降雨に関する降雨強度と降雨継続時間, ピーク水位, 比流量, 計算開始時点の設定貯水率(ため池群総貯水率)はTable 4-4に示した。河川水位の計算精度は式(4-7)の相対基準と式(4-8)の χ^2 -基準を用い, 比流量0.6以上の場合の観測値を対象として評価した。河川流量については観測値と計算値を対比した。

$$E_1 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_{oi} - H_{ci}| / H_{oi} \right) \times 100 \quad (4-7)$$

E_1 : 相対基準誤差 (%)

H_{oi} : 観測水位 (m)

H_{ci} : 計算水位 (m)

N : データ数

$$E_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - H_{ci})^2 / H_{oi} \quad (4-8)$$

E_2 : χ^2 -基準誤差 (m)

H_{oi} : 観測水位 (m)

H_{ci} : 計算水位 (m)

N : データ数

4.4.3 河川流量の緩和度合

河川流量の緩和度合は降雨前のため池貯水率に対応した基準点のピーク流量の緩和率として洪水流出モデルにより求めた。

「土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準, 基準の運用, 基準及び運用の解説, 技術書」(農林水産省農村振興局, 2006)では, 連続降雨を対象とする場合の小規模洪水調節ダムにおける計画基準降雨は1日降雨について確率計算を行って確率降雨を定めた後, 適当な単位時間ごとに配分するとしている。そこで, 評価に用いる降雨の継続時間は24時間とし, 降雨パターンは中央集中型と後方集中型の2つとした。降雨強度は独立行政法人土木研究所が公開するフェア式による計算プログラムと近隣のアメダス観測地点「東広島」の観測データ(1976~2000年)を用いて求めた。計算に用いた降雨強度は後

Table 4-4 洪水流出モデル検証に用いた降雨と基準点水位等、および検証結果

Data for the flood outflow model verification and model					
項目	単位	2005.7.2	2005.9.7	2009.8.1	2010.7.14
ピーク雨量	(mm/h)	36.0	21.0	50.0	34.0
総雨量	(mm)	289.0	202.5	106.5	299.5
継続時間	(h)	126	86	5	106
ピーク水位	(m)	2.17	2.35	2.24	2.94
比流量	(m ³ /(s・km ²))	2.18	2.49	1.94	4.15
設定貯水率	(%)	62	90	96	87
相対基準E ₁	(%)	7.1	11.0	7.3	9.0
χ ² -基準E ₂	(m)	0.010	0.026	0.026	0.027

で示す全ため池が潰廃された場合に基準点のピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する22年確率(中央集中型)と11年確率(後方集中型)とし、単位時間は1時間とした。作成したハイエトグラフはFig.4-2に示した。

初期値として設定したため池貯水率は常時満水位(非洪水時の最高水位)に対する空き水位比0~100%(10%間隔)に対応するものとし、全てのため池に対して同一の貯水率を与えた。

ピーク流量の緩和率は式(4-9)より求めた。

$$R = ((Q_0 - Q_1) / Q_0) \times 100 \quad (4-9)$$

R: 緩和率 (%)

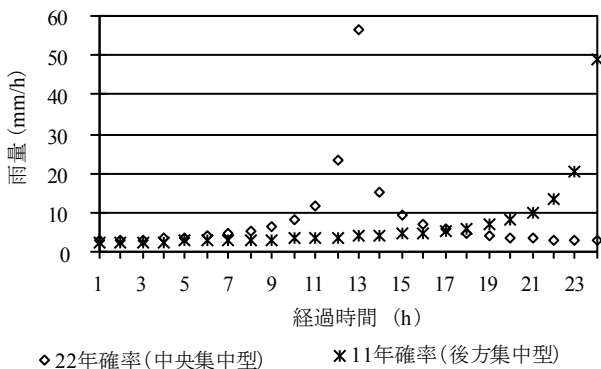
Q₀: ため池潰廃時のピーク流量 (m/s³)

Q₁: 各降雨前貯水率に対応したピーク流量 (m/s³)

4.4.4 河川水位の緩和度合

河川水位の緩和度合は、降雨前のため池群貯水位に対応した基準点のピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する降雨の確率年を洪水流出モデルによる逆解析により求めた。

降雨パターンは前節と同じく中央集中型と後方集中型の24時間連続降雨とし、降雨強度も前節と同様に求めた。確率年は堤防護岸高さに最も近い値となるピーク水位が得られるまで1年単位で確率年(降雨強度)を変え、繰



総雨量: 196.3mm(22年確率), 170.1mm(11年確率)

Fig.4-2 想定したハイエトグラフ
Hypothesized hyetographs

り返し計算を行って求めた。

評価はTable 4-5中に示した観測日全てについて観測された空き水位を用いて行った。また、全ため池の空き水位が常時満水位に対する空き水位比で一律に0~100%(10%間隔)の場合、ならびに全ため池潰廃の場合についても評価した。

4.5 結果

4.5.1 ため池の貯水状況

各年の梅雨入り前(2006年は梅雨入り後)と台風シーズンの9月初旬(2008年は8月下旬)に観測した空き水位から求めたため池群の貯水率(基準点上流域および新堰橋上流域)をTable 4-5に示す。また、近隣のアメダス観測地点「東広島」における各年の降水量(3~5月および6~8月計)、ならびに1981~2010年の観測値を3等分に階級区分して求めた多雨と平年、小雨の区分をTable 4-5中に示す。

Table 4-5より、梅雨入り前後におけるため池群の総貯水率は3~5月の降水量が多雨に区分される2006年と2010年においては95%前後、平年に区分される2008年においては90%程度である。一方、アメダス東広島地点での観測開始(1976年1月1日)以降において3~5月の降水量が最も少ない2009年と2番目に少ない2005年においても総貯水率は62~63%である。対象流域の梅雨入り前後のため池群は、降雨状況に関わらず貯水量には余裕があることがわかる。なお、小雨に区分される2007年は5月の降水量が平年値(148.0mm)に近い144mmであったために高い総貯水率が観測されたものと考えられる。

台風シーズンにおけるため池群の総貯水率は6~8月の降水量が多雨に区分される2009年において87%である。一方、アメダスの観測開始以降において6~8月の降水量が2番目に少ない2008年は60%、少雨に区分される2007年は80%程度である。対象流域のため池群は、かんがい期間の終期においても、相当量の貯水を残していることがわかる。なお、小雨に区分される2005年は7~8月の降水量が平年値(369.8mm)より高い468mmであり、かつ平成17年台風第14号に伴う降雨中の観測であったために高い総貯水率が、逆に平年に区分される2010年は8月の降水量が20.5mmとアメダスの観測開始以降2番目に少なかったことから低い総貯水率が観測されたものと考えられる。

Table 4-5中に示した各ため池の貯水率に関する中央値と最大値、最小値より、小雨に区分される年でも満水(貯水率100%)のため池が、多雨の年でも空(同0%)のため池が存在するものの、中央値はいずれの観測日においても総貯水率に近いことがわかる。なお、多雨の年に空のため池が存在するのは、かんがい期間中においても樋管を開放し、落水を行っているため池が存在するためである。

Table 4-5 ため池群の観測貯水率
Observed reserve ratio of the studied ponds

梅雨入り前後										
観測年	観測日	総貯水率 ^{※1}		個別ため池の貯水率(基準点上流)			降水量(mm) (3~5月計)	降雨状況	求めた確率年	
		新堰橋上流	基準点上流	中央値	最大値	最小値			中央集中型	後方集中型
2005年	6月8~10日 ^{※2}	63%	—	65%	100%	0%	216	小雨	29年	15年
2006年	6月17~20日	96%	96%	100%	100%	0%	561	多雨	24年	13年
2007年	5月30日~6月2日	92%	92%	100%	100%	0%	282	小雨	25年	13年
2008年	5月26~28日	88%	90%	100%	100%	13%	429	平年	25年	13年
2009年	6月12~13日	62%	62%	64%	100%	0%	188	小雨	29年	15年
2010年	6月1~2日	94%	94%	100%	100%	44%	587	多雨	25年	13年

台風シーズン										
観測年	観測日	総貯水率 ^{※1}		個別ため池の貯水率(基準点上流)			降水量(mm) (6~8月計)	降雨状況	求めた確率年	
		新堰橋上流	基準点上流	中央値	最大値	最小値			中央集中型	後方集中型
2005年	9月6日 ^{※3}	98%	97%	100%	100%	0%	509	小雨	24年	13年
2007年	9月4~8日	79%	80%	89%	100%	0%	398	小雨	27年	14年
2008年	8月20~23日	60%	60%	61%	100%	0%	244	小雨	29年	14年
2009年	9月1日	87%	87%	92%	100%	0%	788	多雨	26年	13年
2010年	9月2~4日	69%	67%	69%	100%	0%	578	平年	29年	14年

※1: 新堰橋上流のため池個数は40個(基準点上流は56個).
 ※2: 2個のため池は欠測。「個別ため池の貯水率」は新堰橋上流における値.
 ※3: 新堰橋上流で3個, 基準点上流で7個(新堰橋上流分を含む)のため池は欠測.

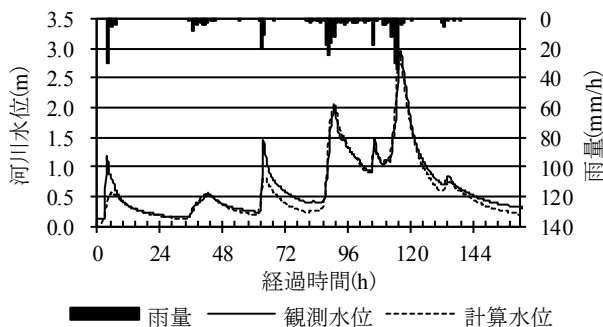


Fig.4-3 観測値と計算値の比較 (河川水位: 2010.7.14 降雨)
Comparison between observed and calculated river water levels on 14th July 2010

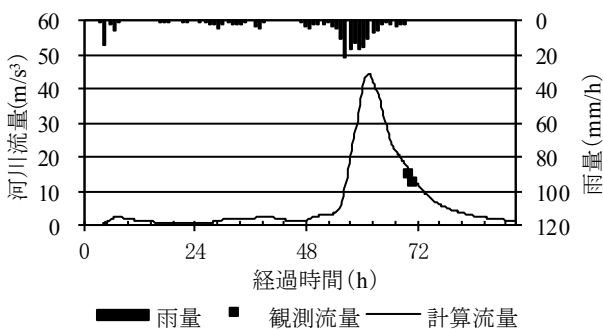


Fig.4-4 観測値と計算値の比較 (河川流量: 2005.9.7 降雨)
Comparison between observed and calculated river discharge on 7th September 2005

4.5.2 洪水流出モデルの再現性

河川水位の相対基準と χ^2 基準による評価結果を **Table 4-4** 中に示す。また、堤防護岸高さとはほぼ等しい、最大のピーク水位を観測した2010年7月14日の降雨における観測値と計算値を比較した結果を **Fig.4-3** に示す。これらの結果より、洪水流出モデルは基準点における河川水位

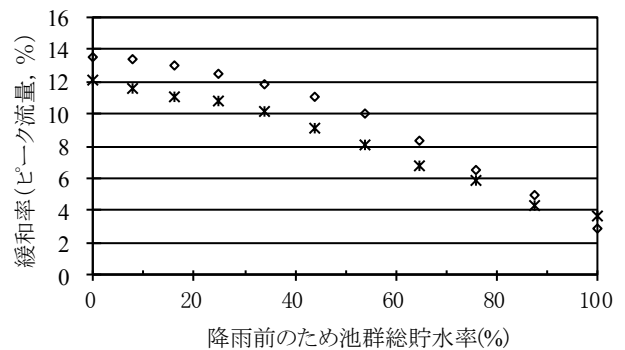


Fig.4-5 ピーク流量の緩和率 (基準点)
Mitigation ratio of peak flow at the reference point

を高い精度で再現していると判断できる。河川流量について観測値と計算値を対比した結果を **Fig.4-4** に示す。観測値は2時点かつ小流量のものに限られるものの、観測時点においては良好な精度を再現していることがわかる。

4.5.3 降雨前貯水率とピーク流量の関係

降雨前のため池群総貯水率とピーク流量の緩和率の関係を **Fig.4-5** に示す。

Fig.4-5 より、前述の大八木ら(2006)が福岡県下の御笠川流域ため池群で得た結果と同様に、対象流域のため池群においても検討した後方集中型と中央集中型の降雨とも降雨前のため池群総貯水率(初期値)の減少、すなわち空き容量(以下、既往の研究における定義にかかわらず、常時満水位以下の貯水可能容量とする)の増大に伴って緩和率は増大することがわかる。また、満水時、すなわち空き容量がない場合の緩和率はそれぞれ2.8%と3.6%と小さく、ため池の貯留効果、すなわち満水時のため池において貯水池に流入した洪水が貯水位を高めつつ

Table 4-6 ピーク水位が護岸天端高さに達する確率年
The year of return period that peak water level reaches top of dike

降雨前の貯水率 (降雨前の水位率)	0%	8%	16%	25%	34%	44%	54%	65%	76%	88%	100%	潰廃
	(0%)	(10%)	(20%)	(30%)	(40%)	(50%)	(60%)	(70%)	(80%)	(90%)	(100%)	
確率年(中央集中型)	37	36	35	34	33	32	31	29	27	26	24	22
確率年(後方集中型)	17	17	17	17	16	16	15	15	14	13	13	11

洪水吐を流下する際に生じる一時貯留が基準点のピーク流量の緩和に寄与する効果は小さいことがわかる。

4.5.4 降雨前貯水率とピーク水位の関係

求めたピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する確率年を **Table 4-5** 中と **Table 4-6** に示す。**Table 4-6** より、中央集中型降雨においてため池全てが潰廃した場合にピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する降雨強度は22年確率であるのに対し、降雨前の貯水池が全て空（総貯水率0%）の場合は37年確率である。従って、この22年確率と37年確率の間が対象流域のため池群が中央集中型24時間連続降雨において基準点の溢水防止に発揮し得る効果の最大幅である。これに対して後方集中型降雨においては、全潰廃の場合は11年確率、総貯水率0%の場合は17年確率となり、中央集中型降雨と比べて効果は小さいことがわかる。

4.6 考察

4.6.1 対象流域のため池群が発揮する洪水緩和効果

基準点の17.9km下流には、洪水調節容量を持つ椋梨ダム（広島県管理）が存在する。椋梨ダムの洪水期間は椋梨ダム操作規則で6月16日から9月30日と定められている。対象流域のため池群に関しても、この期間において洪水緩和効果の発揮が期待される。**Table 4-5** 中に示したため池群の貯水率は洪水期間の始期前と終期に対応しており、洪水期間におけるため池群の貯水状況は **Table 4-5** 中に示した貯水率と降雨状況から推定できると考えられる。また、対象流域のため池においては、6月上旬はかんがい期前半の用水需要のピークである水稲作の代かき～活着期を過ぎて中干し期以降のかんがい期後半の用水需要ピークに備えて梅雨による貯水の回復を待つ時期であり、9月上旬はかんがいによる取水をほぼ終えた時期である。従って、この2つの観測時期は用水利用によってため池に最も大きな空き容量が形成され得る時期であると考えられる。

Table 4-5 中に示したため池群の貯水率には、前述のようにアメダス東広島における降水量がアメダスの観測期間を通じた最小年（2009年3～5月：平年値の48%）と2番目に少ない年（2005年3～5月：同55%、2008年6～8年：同39%）のものが含まれる。これらの年における総貯水率は3時期とも60～63%であり、観測期間中の小雨の年を超える記録的な渇水を除外して考えれば、用水利用を通じて形成される洪水期間中のため池群の空き容量（総量）の上限は総貯水量の40%程度と考えられる。

一方、多雨や平年並みの年における総貯水率は観測日の前1ヶ月が小雨だった2010年9月を除いて87～96%と高いことから、多雨や平年並みの年においては洪水期間を通じてため池群は満水に近い状態にあると考えられる。これは、対象流域の水田は河川や沢などのため池以外の水源を主たる水源とし、ため池は小雨時など主たる水源からの用水が不足する際の補助水源として利用する機会が多いことに起因する。他地域でも、主に補助水源として利用されているため池型ため池群においては同様の貯水状況にあるものと考えられる。

Table 4-5 中に示したように、中央集中型降雨であれば観測された総貯水率が最も小さい2008年8月（基準点上流の総貯水率60%、以下同じ）においては29年確率、2009年6月（62%）においても29年確率の降雨で基準点のピーク水位は護岸高さに達する。従って、前述の全ため池潰廃時の22年確率との対比から、対象流域のため池群は基準点の溢水・氾濫防止に対して洪水緩和効果を発揮し、下流域の防災に寄与しているといえる。しかし、後方集中型24時間連続降雨の場合には2008年8月において14年確率、2009年6月において15年確率であり、全ため池潰廃時の11年確率と比較して基準点におけるため池群の洪水緩和効果は小さい。また、中央集中型降雨であっても3～5月の降水量が平年に区分される2008年5月（90%）では25年確率、6～8月が多雨と区分される2009年9月（87%）では26年確率であり、同様に洪水緩和効果は小さい。

従って、対象流域においては用水利用によって生じる洪水期間中のため池群の空き容量は渇水年を除いて小さく、基準点に対する大きな洪水緩和効果は期待できないといえる。また、後方集中型降雨に対しては、小雨の年においても基準点に対する大きな洪水緩和効果は期待できないといえる。

4.6.2 対象流域における洪水緩和効果の強化

谷池によるため池群が河川上の基準点に対して発揮する洪水緩和効果は基準点上流域の面積に対する各ため池の流域面積の総和の比に支配され、実際に発揮される洪水緩和効果の大きさはため池群の空き容量と満水時の貯留効果の割合により規定されるものと考えられる。

「土地改良事業設計指針「ため池整備」」（農林水産省農村振興局整備部設計課、2006）では、貯留効果が見込めるため池の目安として、流域面積/貯水（満水）面積が30以下であることを挙げている。前述の加藤・佐藤（2002）は松沢ため池（流域面積/満水面積=16）においてシミュ

レーションを行った結果から、満水時においても降雨パターンに関わらず洪水吐流出量のピークは37～43%緩和されることを明らかにしている。しかし、対象流域においては、Table 4-7に示すように流域面積/満水面積の比が30以下であるため池数は51%に留まること、貯留効果が見込めるため池においても満水時の緩和率は空き容量がある場合の緩和率(100%)と比べれば小さいことから、満水状態のため池群による基準点における洪水緩和効果はFig.4-5で示されたように小さいと考えられる。

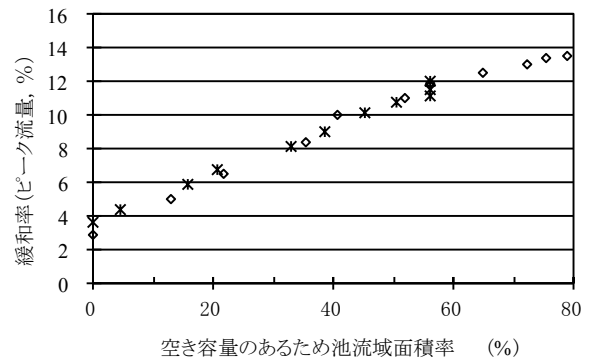
Fig.4-6はFig.4-5で示した計算データを用い、基準点でのピーク流量出現時刻の1時間前時点における空き容量のあるため池の流域面積率(空き容量のあるため池総流域面積/ため池総流域面積)と基準点のピーク流量緩和率との関係を求めたものである。対象流域においては、Fig.4-6中に示すように中央集中型22年確率と後方集中型11年確率の降雨とも、空き容量のあるため池流域面積率と緩和率の間で一次式の関係が成り立つ。このことは、基準点におけるピーク流量を形成する降雨流出を貯留する空き容量がピーク流量の緩和に直接寄与することを示している。また、図中のデータの分布からも読み取れるように、後方集中型11年確率降雨の場合は中央集中型22年降雨の場合と比べ、降雨前の空き容量が同一の場合においてピーク流量出現前に先行降雨によって満水となるため池が当然ながら多い。Table 4-7で示した両降雨に対

Table 4-7 対象流域内ため池の流域面積/貯水面積の比
Statistics of ratio of catchment area to surface area of irrigation ponds in the subject basin

流域面積/ 貯水面積の比	個数	割合
0.0～15.0	13	23%
15.1～30.0	16	28%
30.1～45.0	10	18%
45.1～60.0	6	11%
60.1～	11	20%

して発揮し得るため池群の洪水緩和効果の違いは、このピーク流量出現前におけるため池群の貯水状況の相違によって生じていることがわかる。

従って、対象流域におけるため池群が基準点に対して発揮する洪水緩和効果を強化するためには、利水容量の転用や堤体の嵩上げ、貯水池の浚渫などにより、洪水調節容量を設定したため池の流域面積率が大きくなるように洪水調節容量をため池へ付与することが重要である。同時に、洪水調節容量を有効に機能させ、かつ降雨パターンにかかわらず安定的に洪水緩和効果を発揮させるために、降雨前の事前放流による洪水調節容量の維持とともに、ピーク水位の形成に直接関係しない時間帯における貯水池への流入水を極力放流し、ピーク水位の形成に直接繋がる流入水を貯留するための空き容量の維持が必要である。このための方策としては、堤体上の洪水期間満



◇ 22年確率(中央集中型) × 11年確率(後方集中型)

回帰式:

$$y = 0.136x + 3.567 \text{ (22年確率(中央集中型)), } R^2 = 0.978$$

$$y = 0.139x + 3.770 \text{ (11年確率(後方集中型)), } R^2 = 0.994$$

x: 空き容量のあるため池流域面積率

y: 緩和率(ピーク流量)

Fig.4-6 空き容量のあるため池流域面積率とピーク流量の緩和率(基準点)

Flood mitigation rate of the peak flow quantity and the basin area rate with the space capacity of the reservoir

水位の高さに放流口(オリフィス)を設置すること等が有効であると考えられる。

なお、Fig.4-6で示した一次式の一般性については、今後他流域で検討する必要がある。

5. ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出

5.1 背景と目的

ため池は農業用水の貯水を目的に築造されており、一般に洪水調整容量は持たない。しかし、貯水管理による被災リスク低減や洪水緩和効果の発揮に際しては、降雨前に貯水位を引き下げて空き容量を持たせることが重要である。ため池に洪水調節容量を持たせる方法としては、堤体の嵩上げや貯水池の浚渫、もしくは既存の利水容量の転用が考えられる。堤体の嵩上げや貯水池の浚渫による洪水調節容量の創出は、利水容量を減ずることなく洪水調節容量を確保することが可能である。しかし、ため池の改修が前提となることから、ため池改修に関わる事業の一環として行うこととなる。これに対し、利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、ため池の利水容量に余裕のあることならびに水利権者の合意が必要なものの、現状のため池を前提に実施可能な方法である。

2007年度の水田面積に占める水稻作付面積の割合は全国で66%に止まることや、都市化や混住化、耕作放棄地の発生に伴って受益水田の潰廃が進行しているため池も少なくない。これらは、ため池管理の脆弱化を招く要因であると共に、水田における必要水量を減少させ、利水容量の転用の余地を生み出す要因でもある。

そこで、広島県東広島市において、ため池貯水位の観測を行い、観測結果に基づいて利水容量の一部転用による洪水調節容量創出の可能性を検討する。

5.2 ため池貯水位の観測と貯水率の算出

5.2.1 観測ため池の概況

ため池貯水位の観測は、広島県東広島市豊栄町乃美の六道池において行った。乃美地区は、沼田川水系の椋梨川（二級河川）の流域に位置し、中国山地を構成する残丘群と河川沿いに広がる比較的平坦な土地からなる。水田は河川沿いの平坦地を主に、ため池は残丘群と水田の境界となる山裾を主に存在する。同地区のため池は、いずれも谷地形を堰き止めて作られた中小規模のため池であり、広島県下の中山間地域における典型的なため池である。六道池を含む乃美地区の地形図を Fig.5-1 に示す。

六道池は乃美地区における最大規模のため池であり、ため池台帳に記載されている諸元を Table 5-1 に示す。水稻作付けが行われている水田は、現地調査の結果、全受益水田の約 33%（2006 年）ないし約 35%（2004, 2005 年）であった。ため池からの受益水田への配水は開水路を通じて行われ、取水は管理者が一元的に取水施設を操作するのではなく、受益農家が必要に応じて各自操作することにより行われていた。ため池からの取水期間は、2004 年～2006 年を通じ、4 月 20 日前後から 8 月 12 日までであった。

5.2.2 貯水位の観測と貯水率の算出

貯水位の観測は、貯水池内に圧力式水位計（ウイジン UIZ-WL500）を設置して行った。観測は 2004 年 4 月 22 日から 2007 年 3 月 31 日にかけて行い、観測値は 15 分間隔でデータロガーに記録した。

貯水率の算出にあたっては、貯水池の断面形状を把握し、水位から貯水量を計算する必要がある。六道池を含む東広島市豊栄町内の椋梨川（支流含む。以下同じ）流域のため池は、いずれも山裾の谷地形を堰き止めて作られたため池であり、ため池貯水池の断面形状は相似的な関係にあると考えられる。そこで、Fig.5-1 中に示した乃美地区の宇手飛 1 号池、宇手飛 2 号池における深浅測量（今泉ら、2006）に基づき、Fig.5-2 に示した断面形状を想定した。

この想定した断面形状が妥当なものであることを検証するために、1/25,000 地形図に記載されている東広島市豊栄町内の椋梨川流域のため池 63 箇所を対象に、地形図に記載されている貯水池を満水時の面積とし、ため池台帳記載の堤高や現地測量した洪水吐水深を用いて Fig.5-2 の断面形状によって算出した貯水量とため池台帳に記載されている貯水量を比較した。結果は Fig.5-3 に示す。両者は相関関係（相関係数 0.98）にあること、またほぼ 1:1 の関係（ $y=1.045x-435.7$ ）にあることがわかる。従って、Fig.5-2 に示した断面形状は妥当なもの判断できる。

貯水率は、15 分間隔で記録した水位から日平均水位を



電子国土(国土交通省国土地理院)より作成

Fig.5-1 乃美地区の概要
Outline of Nomi area

Table 5-1 六道池の諸元
Specifics of Rokudo pond

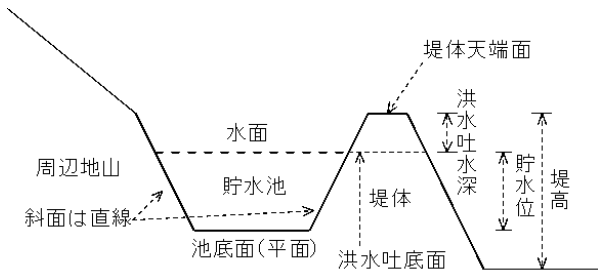
項目	値
貯水量(千m ³)	34
受益面積(ha)	10
受益戸数(戸)	13
流域面積(km ²)	0.106
堤高(m)	6.8
堤頂長(m)	88

求め、1/25,000 地形図から求めた満水時の貯水面面積と Fig.5-2 から、日平均貯水率として求めた。観測期間中の貯水率は Fig.5-4 に示す。

5.2.3 観測期間の降水量

降水量は、最寄りのアメダス観測地点である東広島地点（広島県東広島市八本松、六道池から南西方向へ約 19km）のアメダスデータを用いた。なお、六道池堤体上に設置した雨量計で観測した日降水量と東広島地点のアメダスデータの日降水量の間には、2005 年 3 月 13 日～2005 年 12 月 5 日において、相関関係（相関係数 0.90）とほぼ 1:1 の関係（ $y=0.998x+0.616$ ）が成り立つ。アメダスデータの日降水量は Fig.5-4 中に記した。

また、各年の降水量の多寡を表すために、土地改良事業において計画基準降雨を決定する際に多く用いられている岩井法（岩井・石黒、1970）を用い、期別降水量の超過確率/非超過確率を求めた。超過確率/非超過確率の計算は、乃美地区におけるしろかきや田植、活着期に対応する 4～5 月、分けつ期や出穂期、登熟期に対応する 6～8 月、及びため池の貯水期である前年度の 9 月～3 月の期間別に求めた降水量に対して行った。計算は、確率水文量の計算プログラム Ver.1.2（フカダソフト）を用いて行った。期間別の降水量を含め、結果は Table 5-2 に示す。



※1 (満水面面積) : (池底面積) = 10 : 6
 ※2 (池底面～洪水吐底面までの高さ)
 = (堤高 - 洪水吐水深) × 0.75

Fig.5-2 想定したため池貯水池の構造
 Hypothesize shape of reservoir basin

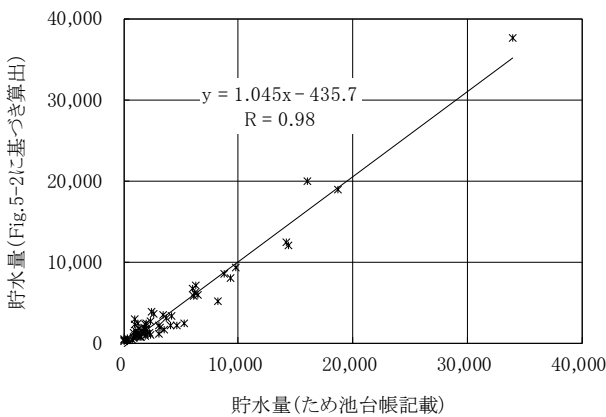


Fig.5-3 想定したため池貯水池構造の検証
 Inspection of hypothesized shape of reservoir basin

5.2.4 貯水率と降雨の関係

Fig.5-4 と Table 5-2 より, 2004 年度においては貯水期である前年度9月～3月は小雨であったものの, しろかき～活着期である4～5月は多雨であり, 年度を通じてほぼ80%以上の貯水率が確保されている。6～8月においても平年程度の降雨があり, 取水に伴って減少した貯水は降雨に伴って満水近くまで回復している。

2005 年度においては, 4～5月にかけては平均の半分以下の降水量の小雨であり, この時に貯水率は50%近くまで低下している。但し, その後の降雨により, 貯水率は回復している。

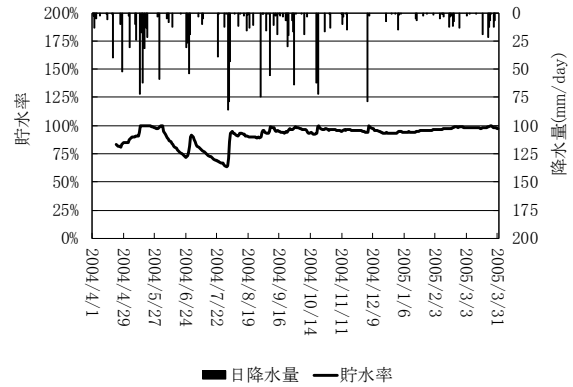
2006 年度は4～8月を通じて多雨であり, 貯水率は常時80%台～満水を維持している。但し, 9月以降の貯水期は小雨気味であり, 貯水率は低下傾向にある。

3ヶ年を通じた取水期間(4月22日～8月12日とする。以下同じ)の総日数に対し, 満水の日数は9%, 90%以上は42%, 80%以上は65%, 及び70%以上は86%である。逆に, 60%を下回る日数は4%である。

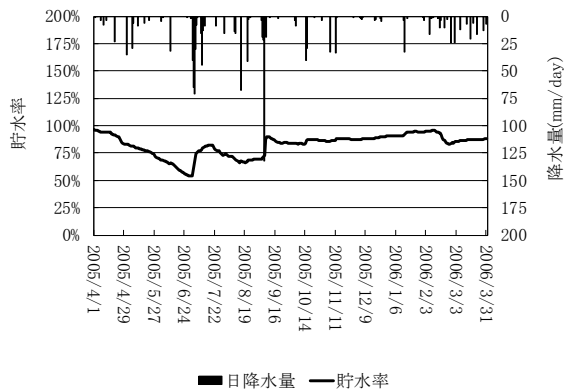
5.3 利水容量の転用による洪水調節容量の創出

5.3.1 貯水率の減少度合の算定

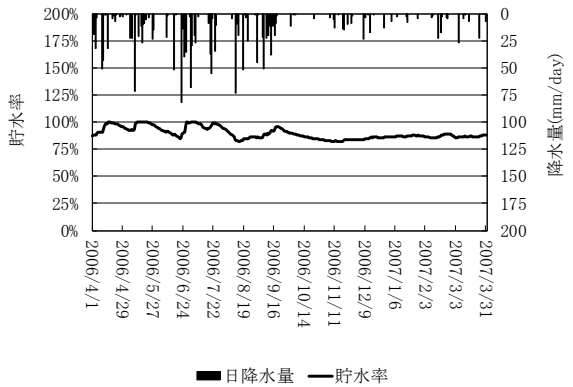
利水容量の一部転用による洪水調節容量の創出の検討



(a)2004 年度(2004.4.22～2005.3.31)



(b)2005 年度(2005.4.1～2006.3.31)



(a)2006 年度(2006.4.1～2007.3.31)

Fig.5-4 貯水率と降水量 (六道池)
 Reserve ratio and precipitation

Table 5-2 期別の降水量と確率 (東広島)
 Precipitation and probability every period

年度	4～5月		6～8月		9月～3月	
	降水量 (mm)	確率	降水量 (mm)	確率	降水量 (mm)	確率
2003	—	—	—	—	337	1/29
2004	487	(1/33)	580	1/2	769	(1/7)
2005	129	1/57	509	1/3	603	(1/2)
2006	454	(1/20)	794	(1/6)	477	1/4
平均	286	—	583	—	595	—

※1 平均, 確率とも1976年4月～2008年3月のデータより算出
 ※2 確率の括弧表記は超過確率, それ以外は非超過確率

にあたっては、渇水年においても取水期間中に利水容量と洪水調節容量の両立が可能であることを明らかにする必要がある。この検討を行うために、取水期間中のため池貯水量変化を定式化する。

ため池貯水量の変化は、灌漑に伴う取水や降雨に伴う地表水・地下水の流入、地盤中への貯水の浸透など、多数の要素が複合する現象である。類似の性質を持つ農業用利水ダムにおいては、貯水運用ルール策定手法として、貯水量を貯水池への流入量や取水量、流出量等の合成量として直接解析の対象とし、貯水量の時系列変化を表す基準貯水ラインを作成して利水運用の検討を行う渇水要貯水量曲線法が知られている（農林水産省農村振興局整備部水利整備課，2004，千賀，2007）。そこで、貯水量変化の定式化にあたっては、渇水要貯水量曲線法に倣い、ため池貯水量を直接解析の対象とする。

貯水量変化の定式化においては、まず貯水率の減少度を求めた。貯水率の減少度合は、取水期間中において、10日間以上にわたって一定の割合で貯水が減少している期間を選び、一次回帰式の傾きとして求めた。一様減少期間の始期と終期、日数、減少度合である一次回帰式の傾き、及び一次回帰式の適合度合として相関係数を **Table 5-3** に示す。加えて、一次回帰式の傾きを支配する可能性

がある先行降雨についても、始期前日より前30日間の降水量を求め、**Table 5-3**中に記した。また、求めた先行降雨と一次回帰式の傾きの関係を **Fig.5-5** に示した。

Fig.5-5より、一次回帰式の傾きと先行降雨の間には、逆相関の傾向を読み取ることができる。貯水量の変動が水文的な要素に支配される場合には、順相関の関係（先行降雨が多いほど、貯水率の減少度合は小さい）になると考えられる。また、受益農家の水利用が降水量に支配される場合（降水量の多い時は潤沢に用水を使用し、少ない時は節制的に使用する）には、逆相関の関係になると考えられる。**Fig.5-5**中において逆相関の傾向から外れる期間2005年7月21日～8月9日は、当該年前半が渇水年であることもあり、六道池においては、受益農家の用水の使い方（節制的な水利用か否か）が貯水量の減少度合に対する支配的な要素と考えられる。

5.3.2 要貯水率の算定

六道池において、利水容量の一部転用により洪水調節容量の創出を行う際に、洪水調節容量の設定期間始期に利水容量として確保する必要がある貯水率（以下、要貯水率）を求める。

要貯水率の算定に用いた諸条件は **Table 5-4** に示した。洪水調節容量は梅雨期以降に設定することとし、設定期間始期を6月1日とした。また、利水容量の設定期間終期は、取水期間の終期である8月12日とした。この始期と終期の間を検討期間とした。貯水率の減少度合は、**Fig.5-5**に示した回帰直線から乖離する期間2004年6月5日～6月23日と期間2005年7月21日～8月9日を除いた最大値と最小値を、それぞれ通常時と節水時の値とした。また、ため池の伝統的な維持管理活動として非灌漑期の水抜き（落水）があることから、取水期間の終期における貯水率は0%とした。検討期間中の降雨は、最も厳しい条件を想定し、0mmとした。

要貯水率は、検討期間中においては貯水率減少度合の値に対応する一定量の取水が毎日行われるものとして、取水期間の終期における貯水率（0%）を起点として要貯水率をシミュレーションした。シミュレーション結果は **Fig.5-6** に示す。通常時の貯水率減少度合による要貯水率は58%、節水時は34%となる。

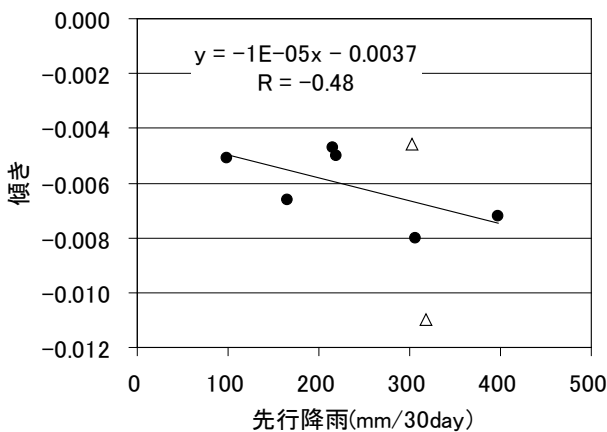
5.3.3 降雨による貯水率の回復

取水期間中の降雨による貯水量の回復を定式化するために、取水期間において一連降雨ごとの降水量と各一連降雨による貯水率増加率を求めた。一連降雨は日単位で連続する降雨かつ総降水量20mm以上のものを対象とし、貯水率増加率は一連降雨の開始日前日から終了日翌日までの総貯水量に対する貯水量の増加率とした。両者の関係は **Fig.5-7** に示す。

Fig.5-7 から、一連降雨の降水量と貯水率増加率の間には相関関係（相関係数:0.89）が成り立つこと、一次回帰

Table 5-3 貯水率の減少度合（傾き）と先行降雨
The decrease degree of the reserve ratio and the antecedent precipitation

No.	始期	終期	日数	傾き	相関係数	先行降雨 (mm/30day)
1.	2004/6/5	2004/6/23	19	-0.0110	0.997	318
2.	2004/7/6	2004/7/30	25	-0.0066	0.995	166
3.	2005/4/16	2005/6/29	75	-0.0051	0.994	99
4.	2005/7/21	2005/8/9	20	-0.0046	0.951	303
5.	2006/4/24	2006/5/6	13	-0.0050	0.999	219
6.	2006/5/24	2006/6/21	29	-0.0047	0.988	216
7.	2006/7/7	2006/7/16	10	-0.0072	0.976	397
8.	2006/7/27	2006/8/9	14	-0.0080	0.999	307



△：逆相関の傾向から外れるもの

Fig.5-5 先行降雨と傾きの関係

Relations of the percentage of storage and the antecedent precipitation

式 ($y = 0.134x - 5.14$) より、降雨が貯水量を回復させるか否かの閾値は 38mm であることがわかる。

降雨によって期待される貯水率の回復量は、水田農業用水の水源計画に関わる計画基準年に準じ、1/10 確率の渇水時の降雨に対応するものとした(農林水産省農村振興局, 2014)。回復量の計算にあたっては、検討期間において貯水量を回復させる降水量閾値 (38mm) を超える一連降雨の総降水量合計値について、岩井法により 1/10 確率の渇水時に相当する総降水量合計値を求めた (Table 5-2 と同一の降水量データを使用して計算)。この総降水量合計値に対する貯水率の回復量は、Fig.5-7 に示した一次回帰式にこの値を代入して求めた。また、Fig.5-6 で得られた要貯水率から、降雨時期は考慮せず、単純にこの回復量を差し引いたものを降雨を考慮した場合の要貯水率とした。これらの値は Table 5-5 に示す。

Fig.5-6 に示した節水時の貯水率減少度合に基づく要貯水率 (34%) に、1/10 確率の渇水時の降雨による貯水率回復量を見込んだ場合の要貯水率 (17%) は、現行の水稲作付面積に対応する六道池受益水田の「土地改良事業計画

Table 5-4 要貯水率の算定に用いた諸条件

List of parameters used for the calculation of the necessary reserve ratio

項目	値
検討期間の始期 (洪水調節容量の設定始期)	6月1日
検討期間の終期 (取水期間の終期)	8月12日
検討期間の日数	73日間
貯水率減少度合(通常時)	-0.0080
〃 (節水時)	-0.0047
検討期間終期における貯水率(%)	0
検討期間中の降水量(mm)	0

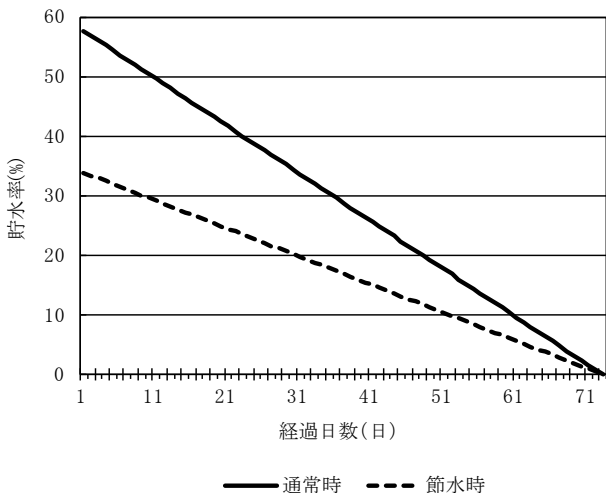
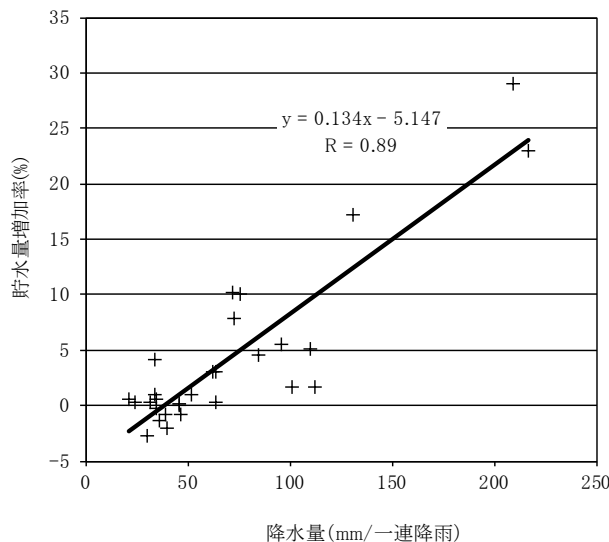


Fig. 5-6 貯水率のシミュレーション結果
Simulation result of percentage of reserve ratio



X:横軸 Y:縦軸

Fig. 5-7 降雨と貯水量増加率の関係
Relations of the precipitation and growth rate of water storage

基準 計画 農業用水 (水田)」(農林水産省農村振興局, 2014) の水源計画で定める計画用水量に相当するものと考えられる。

5.4 考察

第4章での広域洪水流出モデルを用いた検討により、六道池の下流の椋梨川楊杓橋流点の上流域のため池群は一定の洪水緩和効果を発揮することが示されている。第4章での検討結果では、ため池群の降雨前貯水率を一律に常時満水位の70% (六道池の場合は貯水率59%) とした場合、降雨継続時間24時間の22年確率の中央集中型降雨に対し、全てのため池が潰壊した場合との比較でピーク流量を8.3%軽減する。

Fig.5-4 より、六道池において検討期間中にこの貯水率 (59%) を下回ったのは、小雨と取水期間が重なった2005年6月20日~7月2日 (観測期間を通じた検討期間総日数の6%) に留まり、逆に少なくない期間 (同34%) において、貯水率は満水を含め、90%以上となっている。従って、六道池においては、受益水田内の水稲作付面積が減少したことに伴い、利水容量には余裕が生じていること、取水による水位低下のみでは、洪水緩和機能の発揮に当たって必要な洪水調節容量は多くの期間を通じて生じていないことがわかる。

Fig.5-6 と Table 5-5 に示した洪水調節容量の設定期間始期の要貯水率は、一番条件の厳しい条件である無降雨かつ通常時の減少度合によるシミュレーションの結果でも58%であり、上限水位を常時満水位の70%とした場合の貯水率 (59%) を下回ることがわかる。また、水源計画で定める計画用水量に相当すると考えられる1/10 確率の渇水年の降雨を考慮した要貯水率 (節水時) は17%であり、用水量が水稲作付面積に比例すると仮定した場合、受益

水田の水稲作付率は前述のように約33%（2006年）であることから、再び受益水田全体に水稲を作付けする場合の用水量は2006年の約3倍となり、この場合の要貯水率（節水時）は51%と概算できる。この値も上述の貯水率（59%）を下回ることから、受益水田において水稲作付面積が拡大した場合においても、利水容量と洪水調節容量の両立は可能であると考えられる。従って、六道池においては、利水容量の一部転用による洪水調節容量の創出は可能であると判断できる。

東広島市豊栄町内の椋梨川流域には、国土地理院1999年発行の1/25,000地形図上において109箇所のため池（現地調査で潰廃を確認した1箇所を除く）が記載されている。国土地理院1967年発行の1/25,000地形図との対比では、ため池の潰廃は確認されなかった。また、東広島市豊栄町においては、Fig.5-8に示すように、1968年から2003年の35年間に、水田面積は16.3%、水稲作付面積は47.1%減少している。ため池の潰廃が殆ど生じていない中で、水稲作付面積については大幅に減少していることから、この一帯のため池においては検討を行った六道池と同様に、利水容量に余裕が生じているため池も少なくないものと判断できる。

従って、東広島市豊栄町内の椋梨川流域のため池群においては、現行の水稲作付面積を前提にすれば、利水容

量の一部転用によってため池群に洪水調節容量を創出し、洪水緩和機能を増強できる可能性は高いと考えられる。

6. 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討

6.1 背景と目的

被災リスク低減においても重要なため池の貯水機能の維持にあたっては、貯水池に堆積した土砂を定期的に取り除くことが必要である。貯水池の集水域である上流域から流入し貯水池に堆積する土砂は上流域の農地・林地等を適切に管理し、土壌流出を抑制することで低減できる。また、多面的機能支払交付金の活動のため池の多面的機能の増進を図る活動を取り組む場合には、ため池上流域の農地はため池と一体のものとして、遊休農地の有効利用など国土保全に寄与する農地の保全管理に関する取り組みを行うことが想定される。

前述のように、水田は土壌面が水平であるという地形的な特徴や湛水栽培を行うという管理上の特徴から、土壌侵食を生じないものと見なされてきた。しかし、耕作放棄などによる水田の遊休化などにより、水田においても無視できない土壌流出が生じている場合が予想される。ため池の上流域において多面的機能の増進を図る取り組みにおいては、水田からの土壌流出に関わる実態に基づき畑地や樹園地、草地、林地等の他の土地利用と一体に水田・水稲の土壌侵食の評価ができれば、ため池上流域の適正な管理に向けた活動計画の検討に寄与するものと考えられる。

そこで、ため池流域からの土砂流出の実態を明らかにする一助として、従来少数の報告に留まる棚田の土砂流出について、鳥根県出雲地方の棚田で実施した土壌流出観測に基づき、観測水田における土壌流出の実態を明らかにする。また、ため池流域の土砂流出量を評価し、適正な管理指針・計画を立てる一助として、棚田の土壌流出観測データを「土地改良事業計画指針 農地開発（改良山成畑工）」（農林水産省構造改善局計画部資源課，1992）の参考資料（以下、「事業計画指針」とする）として記載されている土壌流亡予測式（以下、本文中では「予測式」とする）に当てはめ、観測水田（耕作田）の係数、特に従来求められた事例の少ない作物係数 C と保全係数 P に関わる値を計算するとともに、予測式の枠組みを用いてため池上流域にある水田の保全管理について考察する。

6.2 棚田における土壌流出

6.2.1 流出観測の概要

流出観測は多面的機能維持増進調査（農林水産省：2000～2007年度）の一環として農林水産省中国四国農政局が鳥根県出雲市野尻町と同県雲南市三刀屋町里坊の2地点で実施した（農林水産省農村振興局企画部資源課，2008）。観測地区の位置をFig.6-1に、観測水田とそ

Table 5-5 降雨を考慮した要貯水率
Necessary reserve ratio in consideration of the rain

項目	値
貯水率回復に寄与する総降水量(mm) (検討期間中)	163
降雨による貯水率回復量(%)	17
降雨を考慮した要貯水率(%) (通常時)	41
降雨を考慮した要貯水率(%) (節水時)	17

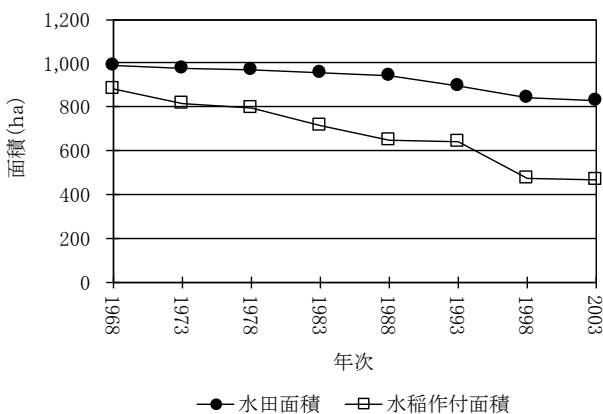


Fig.5-8 水田面積と水稲作付面積の変化
Change of paddy field area and wet-rice cultivation area

の周辺の地形図を Fig.6-2 に、観測水田の概要(写真)を Fig.6-3 に、現地測量で把握した観測水田の面積を Table 6-1 に示す。両地点とも、観測水田からの流出水は排水口に接続した塩ビ管を通じて三角堰箱に導かれ、三角堰箱内に設置した水位計(ウイジン UIZ-GY050)と濁度計(アレック電子 Compact-CLW)による毎正時を基準とした測定が20分間隔で行われている。観測により、三角堰箱内の水位と濁度(FTU)の値が得られている。三角堰内は整流板で3区画に仕切った上で塩ビ管からの導水先と水位計・濁度計設置の区画は中央の区画を挟んでその両側に分け、塩ビ管から取り入れた流出水による水位計・濁度計での乱流が生じないように考慮した。また、三角堰箱内に堆積した土壌や落ち葉等については定期的に清掃し、観測に影響が出ないように観測施設の点検・管理を行った。

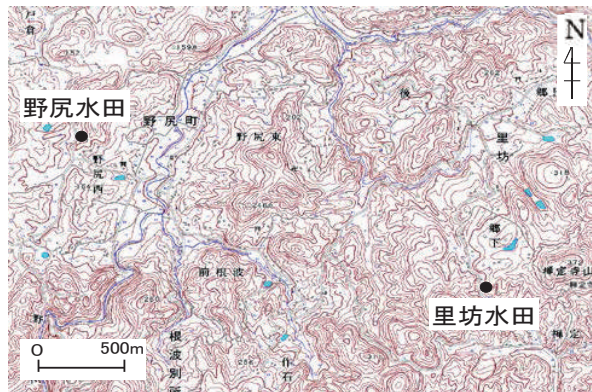
観測期間を Table 6-1 中に示す。観測機器は凍結による破損を防ぐため、冬季に取り外した。よって、この間は欠測となっている。

6.2.2 観測水田の概要

流出観測が行われた観測水田はいずれも傾斜面に立地する棚田であり、両地点は標高約250mの丘を挟んで近接(直線距離で約2.6km)している。観測水田の諸元や観測期間中の状況は流出観測と平行して独自に行った現地調査により把握した。

出雲市野尻町の観測水田(以下、野尻水田)は連担す

る棚田の最上段に位置する耕作田である。観測期間を通じて水稲作(慣行作、裏作なし)が行われていた。この一帯の棚田は小区画ながら県営圃場整備事業により区画等の整備がなされている。山側にため池が隣接しており、かんがい水はこのため池から必要に応じてビニールホースで直接引水していた。但し、一連降雨時には湧水で用水がまかなわれており、水田外からの引水とこれに伴う土壌の流入は認められなかった。直接流出域は田面と畦畔、隣接する法面(地山、ため池堤体)からなる。水田



この地図は国土地理院の数値地図25000(地図画像)「松江」を使用したものである。

Fig. 6-2 観測水田と周辺の地形図
The topographical map around the observation paddy fields



この地図は国土地理院の地理院地図(電子国土 Web)を加工して作成したものである。

Fig. 6-1 観測地区の位置
Location of the observation area



里坊水田:2007年2月20日撮影



野尻水田:2007年2月8日撮影

Fig. 6-3 観測水田の概要(写真)
Outline of the observation paddy fields

Table 6-1 観測水田の面積と観測期間
The area and observation period of the observation paddy fields

	面積(m ²)		観測期間	
	直接流出域	うち、田面	全期間	うち、欠測期間
野尻水田(耕作田)	329	176	2006.6.29～2007.8.9	2006.12.19～2007.3.27
里坊水田(遊休田)	149	103	2006.6.27～2007.8.9	2006.12.19～2007.5.15

※ 欠測期間は1日以上の間を示す。

の作土を含め、流出域の土壌はまさ土を主体とする。田面には地山・ため池側を中心として多量の湧水が生じており、落水時は畦畔に沿って田面に設けられた排水溝を通じて排水がなされていた。水田からの排水は湛水時には堰板を越流して、落水時には田面から直接排水口に流出していた。但し落水時においても、排水口周辺や田面に設けられた排水溝に目視で把握できる土壌侵食は発生していなかった。法面は年間を通じて密な植生（枯死した地上部も含む）で覆われ、土壌面の露出は生じていなかった。法面の草刈りは稲刈り後に行われていた。雲南市三刀屋町里坊の観測水田（以下、里坊水田）は四段の棚田の最下段に位置する遊休田である。一連の水田とも、小区画かつ圃場整備は未実施である。但し、観測水田とその上段水田の法面下部はコンクリートブロック積となっていた。直接流出域は田面と隣接する法面（地山、上段水田）からなる。野尻水田と同様に、水田の作土を含め、流出域の土壌はまさ土を主体とする。田面には多量の湧水が生じており、水田からの排水は洗掘等が生じないように排水口に堰板を設置し、越流水を三角堰箱へ通じる塩ビ管に流出させていた。このため、田面はほぼ観測期間を通じ、全面にわたって湛水していた。法面は年間を通じて密な植生（枯死した地上部も含む）で覆われ、土壌面の露出は生じていなかった。法面、田面とも草刈りや除草は行われていなかった。田面にはミゾソバやガマ等が密生していたが、一部では湛水面が露出していた。

6.2.3 土壌流出量の算出

土壌流出量は炉乾燥質量として流出観測で得られた三角堰箱内の水位と濁度（FTU）から求めた。水位はまず三角堰の越流水深に変換し、中国四国農政局が作成した三角堰の水位－流量換算式を用いて流量を算出した。濁度（FTU）はホルマジン基準の濁度のため、両観測水田の排水口付近から採取した作土を用いて独自に作成した濁度（FTU）－濃度換算式を用い、観測水田における濁水の濃度に変換した。土壌流出量は流量と濃度の積として算出した。

なお、観測値は観測間隔である20分間の平均値と見なし、算出した値も20分間の平均値とした。

6.2.4 降水量

降水量は国土交通省水文水質データベース上で一般に

公開されている最寄りの水文水質観測所である鍋山観測所（里坊水田）と所原観測所（野尻水田）における観測値（60分間雨量／毎正時）を用いた。鍋山観測所は里坊水田の南南東方向約2.2km、所原観測所は野尻水田の北西方向約4.1kmに位置する。

6.2.5 土壌流出量の集計

予測式では土壌流出発生の際値とされている総降雨量13mm以上かつ降雨開始後6時間以上の無降雨時間を生じるまでの降雨を一連降雨としている。そこで、一連降雨毎に降雨開始時刻と降雨終了時刻、継続時間、降雨開始時刻前6時間の間における流出水観測の有無、総降水量、流量、土壌流出量を集計した。結果をTable 6-2、Table 6-3に示す。野尻水田における作付期間は中国四国農政局から提供を受けた資料に基づいて把握し、作付期間中となる一連降雨をTable 6-2中に示した。

また、欠測期間を含むものの、年間の総土壌流出量と一連降雨に伴う土壌流出量、野尻水田については代かきとその前後期間の土壌流出量についても集計した。結果をTable 6-4に示す。

6.2.6 考察

Table 6-4より、両観測水田とも土壌流出が生じていること、土壌流出の7割前後は一連降雨時に生じていること、また野尻水田においては代かき期間（前後期間を含む）に発生する土壌流出の割合は3.2%と小さいことがわかる。またTable 6-2、Table 6-3より、里坊水田では全ての、野尻水田においてもNo.25とNo.29以外の一連降雨において降雨開始前に観測水田からの流出水を観測しており、一連降雨による土壌流出は降雨前から既に田面が湛水した状態で生じていることがわかる。

一連降雨中の観測水田の状態と土壌流出の状況を把握するために、2007年7月12日～14日に現地調査を行った。現地における観察により、両観測水田とも直接流出域に含まれる法面からの流出水や崩落土壌の発生は生じていないこと、流出水は田面への降雨と田面に生じた湧水に由来すること、三角堰箱に通じる塩ビ管以外の直接流出域外への地表流出は認められないこと、及び水田の湛水には全体に土壌由来の濁りが発生していることを把握した。また、2006年12月4日～6日、2007年2月4日～8日、2月18日～21日、7月24日～25日、及び10月11日に行っ

た現地調査においても、いずれも直接流出域に含まれる法面からの流出水や崩落土壌の発生、三角堰箱に通じる塩ビ管以外への地表流出を伺わせる痕跡は両観測水田とも見いだせなかった。なお、野尻水田においては2007年7月12日～14日、2007年7月24日～25日とも、かんがいは行われていなかった。従って、観測水田における土壌の流出は、降雨による田面への湧水発生に伴う土壌中の土壌子の移動や田面内での水移動に伴う土粒子の攪乱、移動などが絡み合う現象が想定される。里坊水田においては、田面に密生するミゾソバやガマ等が形成する土粒子を含む根群域を流出水が通過しているものと考え

られる。

また、一連降雨前にも流出水が観測されていることから、観測水田内で生じた濁水は水田内に貯留、沈降することなく流出するものと考えられる。

6.3 土壌流亡予測式の係数算出

6.3.1 土壌流亡予測式

土壌流亡に関する予測式はUSLE (Universal Soil Loss Equation, 汎用土壌流亡式) (Wischmeier, H. H. and Smith, D. D., 1978) が広く世界的に用いられている。予測式はUSLEの構成に準拠した式であり、これを構成する係数を

Table 6-2 一連降雨時の観測データ (野尻水田)
Observation data at the continuous rainfalls

No.	降雨開始時刻	降雨終了時刻	継続時間 h	降雨前流出	総降水量 mm	El_{60} $tf \cdot m^2/ha \cdot h$	流量 m^3	土壌流出量 kg	作付期間
1	2006/07/02 00:00	2006/07/02 09:00	10	○	32	4.8			○
2	2006/07/04 18:00	2006/07/05 09:00	16	○	22	2.9	10.1	0.9	○
3	2006/07/16 11:00	2006/07/16 15:00	5	○	19	2.0	2.6	0.7	○
4	2006/07/17 05:00	2006/07/19 10:00	54	○	315	178.4	492.8	54.4	○
5	2006/07/20 22:00	2006/07/21 03:00	6	○	17	1.8	46.3	2.6	○
6	2006/07/23 17:00	2006/07/25 01:00	33	○	62	7.2	204.4	10.0	○
7	2006/08/07 17:00	2006/08/07 17:00	1	○	17	6.7	0.3	0.0	○
8	2006/08/20 15:00	2006/08/20 16:00	2	○	17	3.5	1.0	1.2	○
9	2006/09/05 02:00	2006/09/05 04:00	3	○	16	3.5	1.8	0.5	○
10	2006/09/09 18:00	2006/09/10 12:00	19	○	17	0.7	5.3	0.9	○
11	2006/09/15 22:00	2006/09/16 16:00	19	○	23	1.3	6.4	0.7	○
12	2006/10/01 14:00	2006/10/02 08:00	19	○	13	0.6	3.1	0.1	
13	2006/10/05 04:00	2006/10/05 16:00	13	○	14	0.9	3.0	0.2	
14	2006/10/23 20:00	2006/10/24 21:00	26	○	14	0.6	4.3	0.2	
15	2006/11/06 21:00	2006/11/07 07:00	11	○	25	2.0	1.6	0.7	
16	2006/11/11 01:00	2006/11/11 16:00	16	○	35	7.3	2.2	0.8	
17	2006/11/19 07:00	2006/11/19 20:00	14	○	16	0.7	0.5	0.1	
18	2006/11/20 08:00	2006/11/20 22:00	15	○	22	2.7	1.1	0.6	
19	2006/11/27 12:00	2006/11/28 09:00	22	○	38	3.9	1.6	0.5	
20	2006/12/09 17:00	2006/12/10 13:00	21	○	22	0.9	1.1	0.3	
21	2007/03/29 20:00	2007/03/30 03:00	8	○	16	2.4	4.2	4.2	
22	2007/03/31 18:00	2007/03/31 18:00	1	○	74	75.2	41.5	27.1	
23	2007/04/16 17:00	2007/04/17 02:00	10	○	15	0.9	0.1	0.0	
24	2007/05/01 02:00	2007/05/01 06:00	5	○	21	3.1	1.4	0.4	○
25	2007/05/25 04:00	2007/05/25 14:00	11	○	33	9.2	2.0	0.4	○
26	2007/05/30 05:00	2007/05/30 08:00	4	○	33	12.6	0.8	0.4	○
27	2007/06/08 23:00	2007/06/09 10:00	12	○	18	1.4	0.3	0.0	○
28	2007/06/14 00:00	2007/06/15 04:00	29	○	25	1.9	0.8	0.1	○
29	2007/06/22 03:00	2007/06/22 12:00	10	○	53	14.4	10.1	1.4	○
30	2007/06/24 04:00	2007/06/24 20:00	17	○	57	12.0	43.5	2.2	○
31	2007/06/29 10:00	2007/06/29 14:00	5	○	34	8.2	23.1	3.8	○
32	2007/07/01 10:00	2007/07/02 05:00	20	○	75	34.2	122.3	13.5	○
33	2007/07/04 08:00	2007/07/04 19:00	12	○	53	11.1	89.4	14.4	○
34	2007/07/10 02:00	2007/07/10 18:00	17	○	47	17.2	48.0	4.2	○
35	2007/07/12 07:00	2007/07/12 10:00	4	○	33	9.2	41.6	3.3	○
36	2007/07/13 04:00	2007/07/14 18:00	39	○	59	9.3			○
37	2007/07/15 04:00	2007/07/16 01:00	22	○	25	1.5			○
38	2007/07/16 09:00	2007/07/16 14:00	6	○	40	8.9	56.8	3.1	○
39	2007/07/20 10:00	2007/07/20 20:00	11	○	20	2.5	9.8	0.8	○
40	2007/07/29 21:00	2007/07/29 22:00	2	○	20	8.7	6.9	3.5	○
41	2007/08/03 10:00	2007/08/03 17:00	8	○	42	9.0	15.9	1.6	○

※1 降雨開始時刻は初めに降水量が観測された時刻、降雨終了時刻は最後に降水量が観測された時刻を示す (Table 6-3 も同じ)。

※2 流量と土壌流出量は降雨開始時刻から降雨開始時刻6時間経過時点までの合計値とした (Table 6-3 も同じ)。

※3 No.1 は観測施設の設置直後のため、除外した。

※4 No.4～7 の総降水量と El_{60} は所原観測所が欠測のため、鍋山観測所の降水量データを用いた。

※5 No.36～37 は隣接するため池余水吐からの流出水が観測水田内に流入したため、除外した。

Table 6-3 一連降雨時の観測データ（里坊水田）
Observation data at the continuous rainfalls

No.	降雨開始時刻	降雨終了時刻	継続時間 h	降雨前流出	総降水量 mm	EI_{60} tf·m ² /ha·h	流量 m ³	土壌流出量 kg
1	2006/07/02 01:00	2006/07/02 08:00	8	○	31	3.9		
2	2006/07/04 18:00	2006/07/05 02:00	9	○	20	2.0	130.3	25.2
3	2006/07/08 20:00	2006/07/09 02:00	7	○	17	1.1	76.1	7.0
4	2006/07/16 12:00	2006/07/16 16:00	5	○	17	2.5	41.9	2.4
5	2006/07/17 05:00	2006/07/19 10:00	6	○	315	178.4		
6	2006/07/20 22:00	2006/07/21 03:00	6	○	17	1.8	60.1	5.7
7	2006/07/23 17:00	2006/07/25 01:00	9	○	62	7.2	156.4	8.2
8	2006/08/07 17:00	2006/08/07 17:00	1	○	17	6.7	1.2	0.1
9	2006/09/05 03:00	2006/09/05 05:00	3	○	19	6.5	2.2	0.1
10	2006/09/09 23:00	2006/09/10 11:00	13	○	26	3.6	12.9	0.8
11	2006/09/12 17:00	2006/09/13 11:00	19	○	13	0.3	22.6	1.0
12	2006/09/15 22:00	2006/09/16 15:00	18	○	15	0.6	34.8	1.9
13	2006/09/17 00:00	2006/09/17 03:00	4	○	15	1.6	30.0	2.6
14	2006/10/05 06:00	2006/10/06 08:00	3	○	38	3.0	54.3	3.5
15	2006/10/23 23:00	2006/10/24 21:00	23	○	20	0.8	10.6	0.4
16	2006/11/06 22:00	2006/11/07 07:00	10	○	23	1.9	6.8	0.8
17	2006/11/11 02:00	2006/11/11 18:00	17	○	33	5.3	25.0	3.1
18	2006/11/19 08:00	2006/11/19 19:00	12	○	15	0.4	19.3	0.9
19	2006/11/20 08:00	2006/11/20 23:00	16	○	18	1.7	45.5	4.1
20	2006/11/27 11:00	2006/11/28 08:00	22	○	31	2.4	62.8	5.0
21	2006/12/09 17:00	2006/12/10 11:00	19	○	22	1.0	28.7	1.8
22	2007/05/25 04:00	2007/05/25 13:00	10	○	34	6.4	33.4	4.8
23	2007/05/30 07:00	2007/05/30 08:00	2	○	24	10.2	21.8	3.6
24	2007/06/08 23:00	2007/06/09 10:00	12	○	13	0.5	7.1	0.5
25	2007/06/13 23:00	2007/06/14 18:00	20	○	19	1.5	14.7	0.9
26	2007/06/22 03:00	2007/06/22 12:00	10	○	62	25.2	106.3	43.9
27	2007/06/24 02:00	2007/06/24 20:00	19	○	43	9.3	76.1	18.2
28	2007/06/29 10:00	2007/06/29 14:00	5	○	27	6.4	55.7	19.1
29	2007/07/01 10:00	2007/07/02 05:00	20	○	92	58.8	204.3	126.9
30	2007/07/02 22:00	2007/07/02 23:00	2	○	14	2.5	25.4	5.0
31	2007/07/04 08:00	2007/07/04 19:00	12	○	58	15.6	161.1	53.3
32	2007/07/09 14:00	2007/07/10 23:00	10	○	48	9.8	87.3	45.1
33	2007/07/12 03:00	2007/07/12 11:00	9	○	35	8.0	61.0	39.3
34	2007/07/13 06:00	2007/07/14 20:00	15	○	54	10.3	149.5	37.7
35	2007/07/15 05:00	2007/07/15 20:00	16	○	32	2.0	123.7	28.3
36	2007/07/16 08:00	2007/07/16 14:00	7	○	48	21.7	106.4	66.8
37	2007/07/20 10:00	2007/07/20 19:00	10	○	21	4.0	21.4	1.9
38	2007/08/03 10:00	2007/08/03 17:00	8	○	31	4.5	49.7	11.7

※1 No.1 は観測施設の設置直後のため、除外した。

※2 No.5 は隣接する水路からの越流水が観測水田内に流入したため、除外した。

Table 6-4 年間及び期別の土壌流出量
Soil loss of the year and period

	野尻水田	里坊水田
	流出土壌量等	流出土壌量等
全期間(2006年8月9日～2007年8月8日)計(kg)	143.8	712.5
一連降雨計(kg)	98.6	533.1
同(全期間計に対する割合)(%)	68.5	74.8
しろかき+前後期間(4月20日～5月31日)(kg)	4.6	—
同(全期間計に対する割合)(%)	3.2	—

※野尻水田については表2のNo.36～37降雨とその前後期間を含めて集計した。

日本の実情に適合するよう、使用単位をメートル法、基準とする斜面長を20m、傾斜を5°、及び降雨係数の単位時間に改めて求めたものである。基となったUSLE同様に、係数については国内の試験圃場で得られた観測データに基づいて得られた流亡土量予測の経験式である。予測式を式(6-1)に示す(土壤流亡予測式は流亡土量を重量(tf・ha⁻¹)で求めるものであることからSI単位系に変換せず、事業計画指針に記載されている単位のままとした。式(6-2)～式(6-6)、及び関連する図表も同じ)。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (6-1)$$

A: 単位面積当たりの流亡土量(重量)(tf・ha⁻¹)

R: 降雨係数(tf・m²・ha⁻¹・h⁻¹)

K: 土壌係数(h・m⁻²)

LS: 地形係数(無次元)

C: 作物係数(無次元)

P: 保全係数(無次元)

予測式は降雨係数の算出に30分間雨量を用いるUSLEとは異なり、毎正時の60分間雨量を用いる。観測水田最寄りの鍋山観測所と所原観測所において一般に公開されている降水量の観測値は毎正時の60分間雨量であること、流出観測データも毎正時を基準に20分間隔で観測されていることから、本式を検討の対象とした。

6.3.2 水田への予測式の適用

予測式は造成農地における流亡土量の予測手法の確立を目的としてとりまとめられており、水稻や水田に適用することは想定されていない。湛水状態の水田では、畑地での土壌侵食発生の大きな要素である雨滴の衝撃エネルギーが水面で吸収されるように、土壌流出過程は当然ながら畑地と異なる。

予測式の係数の内、降雨係数Rは一連降雨毎に求めた降雨エネルギーEと60分間ピーク降雨強度I₆₀の積である降雨侵食指数EI₆₀の年間累計値(平均値)の1/100として定義されている。降雨侵食指数EI₆₀は雨滴落下や表流水による土粒子の剥離・運搬と関係する物理的な指標を組み合わせたものであり、表流水についても考慮したものである。また、長沢ら(1993)は一連降雨ごとに求めたEI値と傾斜枠試験で求めた流亡度量の間に高い相関性が得られた結果に基づいて、EI値は雨滴侵食だけでなく表面流出水による侵食作用をも反映する総合的な指標とみなせるものと考察している。そこで、水田においても、降雨係数Rを畑地と類比(アナロジー)的に適用可能かどうかを検討した。

予測式はUSLEと同様に土壌侵食に関する各要因を項(係数)として与え、これらの積により年間の流亡土量を求めるものである。事業計画指針では、これらの係数は作期または年間を通じて一定とされてことから式の構成上、流亡土量は降雨係数Rに比例するものと考えら

れる。そこで一連降雨毎に降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量を求め、両者の間に相関関係が成り立つかどうかを検討した。予測式における降雨侵食指数EI₆₀の算出式を式(6-2)、式(6-3)に、式(6-2)、式(6-3)で算出した一連降雨毎の降雨侵食指数EI₆₀をTable 6-2、Table 6-3中に、降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量の関係と相関係数をFig.6-4に示す。

$$EI_{60} = E \cdot I \quad (6-2)$$

$$E = (210 + 89 \log I) \cdot r \quad (6-3)$$

E: 区間降雨の降雨エネルギー(m²・tf・ha⁻¹)

I: 区間雨量(毎正時間の降雨量)の降雨強度(cm/h)

但し、I ≤ 7.6cm/hとする

r: 区間雨量(cm)

Fig.6-4より、両観測水田とも降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量の間に高い相関関係(野尻水田:0.96、里坊水田:0.90)が成り立つことがわかる。前述のように、両観測水田とも一連降雨による土壌流出は降雨前から既に田面が湛水した状態で生じていることから、試験区のうち田面での雨滴侵食は生じていないものと判断できる。田面を除いた試験区に含まれる法面部分においては雨滴侵食が生じうるものの、前述のように現地調査で痕跡を含む表面流出や土壌侵食の発生が確認されていない。従って、両観測水田においては、降雨侵食指数EI₆₀ならびに降雨係数Rは、田面の攪乱土壌を流水が巻き上げることや流

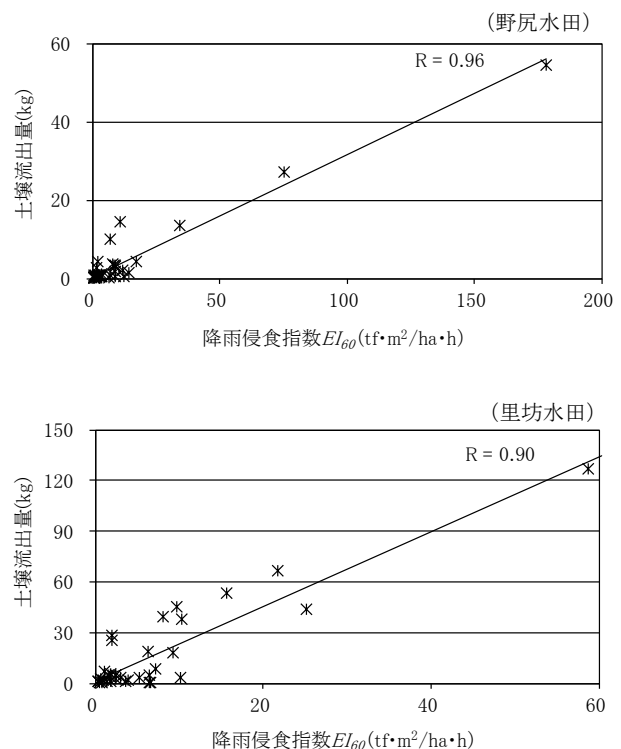


Fig.6-4 一連降雨毎の降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量の関係
Relations of rainfall erosion index EI₆₀ and soil loss at the continuous rainfalls

出水が土壌間隙を通過する際に土粒子を剥離することによって発生する土壌流出を表す指標となり得るものと判断できる。

6.3.3 耕作田に関する係数の算出

耕作田である野尻水田を対象に、降雨係数 R を除く水稲・水田に関する予測式の各係数を求めた。

土壌係数 K は事業計画指針に記載されているノモグラフ法に従い、式 (6-4) ~ 式 (6-6) を用いて求めた。

$$100Ku = 2.1 \cdot M^{1.14} (10^d) (12-a) + 3.25 (b-2) + 2.5 (c-3) \quad (6-4)$$

Ku : USLE における土壌係数 (ヤード・ポンド単位)

M : 粒径パラメータ

a : 有機物含有量

b : 土壌構造コード

c : 土層透水性級位

$$M = (\text{シルト} + \text{極細砂}) \% \times (100 - \text{粘土} \%) \quad (6-5)$$

砂 : 粒径 2.00 ~ 0.10mm

シルト + 極細砂 : 粒径 0.10 ~ 0.002mm

粘土 : 粒径 < 0.002mm

$$K = 1.18 \cdot (EI_{30}/EI_{60}) Ku \quad (6-6)$$

EI_{30}/EI_{60} : EI_{30} と EI_{60} の比

粒径パラメータや土壌構造コードに係わる粒度は JIS A 1204「土の粒度試験方法」に準じ、ふるい分析と沈降分析から求めた。有機物含有量は地盤工学会基準 JGS T231「土の有機物含有量試験方法」に準じ、重クロム酸法で求めた(事業計画指針に記載されているノモグラフ法は重クロム酸法で求めた有機物含有量とされていることから、旧基準に準じた)。これら土質試験は水田作土層から採取した土壌を用いて行った。土層透水性級位に係わる透水度は非作付期に田面で行った円筒法でのシリンダーインテグレートによるベイシックインテグレートから求めた。また、30分間雨量から求める降雨侵食指数 EI_{30} と 60分間雨量から求める降雨侵食指数 EI_{60} の比である EI_{30}/EI_{60} は鳥根県仁多郡奥出雲町横田地区における観測によって

得られた値を用いた。計算に用いた値と求めた各係数を **Table 6-5**、**Table 6-6** に示す。

地形係数 LS も事業計画指針に従って式 (6-7) を用いて求めた。但し、斜面長 l は観測田における排水口までの最大流路長、勾配 θ は田面の勾配とした。計算に用いた値と求めた地形係数 LS の値を **Table 6-7** に示す。

$$LS = (l/20.0)^{0.5} (68.19\sin^2 \theta + 4.75\sin \theta + 0.068) \quad (6-7)$$

l : 斜面長 (m)

θ : 勾配 ($^\circ$)

作物係数 C は休閑地(裸地状態の圃場)の値を 1.0 とし、休閑地と作付等がなされている圃場からの流亡土量の比として定義されている。保全係数 P も平畝・上下耕がなされている圃場の値を 1.0 とし、平畝・上下耕と保全的耕作(等高線栽培等)がなされている圃場からの流亡土量の比として定義されている。水稲の作物係数 C と水田の保全係数 P を分離することは得られた観測データのみでは不可能なことから、両係数はその積である作物・保全係数 CP とした。作物・保全係数 CP は流亡土量 A と降雨係数 R を通期(全観測期間)、作付期(4月20日~9月30日)、及び非作付期別に **Table 6-2** 中の土壌流出量と降雨侵食指数 EI_{60} の値から集計し、式 (6-1) から逆算して求めた。計算に用いた値と求めた各係数を **Table 6-8** に示す。

6.3.4 考察

水稲・水田を対象に、作物係数 C と保全係数 P の双方を求めた事例は限られる。吉川ら(1998)は USLE を改変した中山間農地に適用する土壌侵食評価式を作成して

Table 6-5 粒径パラメータ M の算出に使用した値
Values for calculation of particle size parameter M

※野尻水田で得られた値		
砂	シルト+極細砂	粘土
粒径2.00~0.10mm	粒径0.10~0.002mm	<0.002mm
%	%	%
14	62	24

Table 6-6 土壌係数 K の算出
Calculation of soil coefficient K

※野尻水田で得られた値					
粒径パラメータ	有機物含有量	土壌構造コード	土層透水性級位	土壌係数(USLE)	土壌係数
M	a	b	c	Ku	$K(\text{h}/\text{m}^2)$
4712	4.00	1	6	0.30	0.56

※1 有機物含有量の 4.00 は重クロム酸法で求めた有機物含有量(4.06%)に対応(4%を超える場合は一律に 4.00)。

※2 土壌構造コードの 1 は「極細粒 礫<5%」に対応。

※3 土層透水性級位の 6 は「極めて遅い <0.125cm/h」に対応。

※4 $EI_{30}/EI_{60}=1.57$ (「平成3年度 改良山成工調査(土壌流亡)地区別資料 総括報告書(財団法人日本農業土木総合研究所)」に記載されているものを使用)

Table 6-7 地形係数 LS の算出
Calculation of topography coefficient LS

※野尻水田で得られた値	
項目	値
斜面長 l (m)	23.0
傾斜角 θ (°)	0
地形係数 LS (無次元)	0.0729

いる。同式では予測式や USLE と同じ定義による作物係数 C と保全係数 P についても既往文献等に基づき整理、作成されており、棚田田面の作物係数 C 、保全係数 P の値もそれぞれ 0.38、0.6 として示されている。これらの値から作物・保全係数 CP を求めると 0.228 となり、Table 6-8 に示した野尻水田の値に近いことがわかる。但し、棚田を含む水稲・水田の一般的な作物・保全係数 CP を得るためには、多数の観測地点で得られたデータに基づく検討が必要である。

野尻水田に関する作物・保全係数 CP の値が得られたことから、予測式の枠組みを用いて野尻水田の土壌流出や土壌保全度合を他の農地利用と比較検討できる。野尻水田を現状の棚田として利用する場合と原地形のまま傾斜畑として利用する場合は、降雨係数 R と土壌係数 K が同一の圃場であれば、圃場の土壌保全度合は地形係数 LS と作物・保全係数 CP との積 $LSCP$ の値の比較でできる。そこで野尻水田で得られた値と事業計画指針に記載されている畑作物の作物係数 C の値を用い、野尻水田の立地地点を現状の棚田として利用する場合と原地形（傾斜度約 5°）のまま傾斜畑として利用する場合の $LSCP$ 値を求めた。作物係数の値に対応した現況の水田（Table 6-8 に対応した通期、作付期、非作付期別）を含む作物群ごとの $LSCP$ 値を Table 6-9 に示す。

棚田として利用した場合の通期の $LSCP$ 値は 0.019 となるのに対し、傾斜畑として利用した場合は最も土壌保全度合の高い牧草を作付けした場合においてもこれより高い 0.021 となることがわかる。従って、現状の野尻水田は原地形のまま傾斜畑として利用する場合よりも土壌保全的であると判断できる。

野尻水田を棚田のまま転作する場合は土壌係数 K に加えて地形係数 LS についても同一であるため、Table 6-9 に示した作物・保全係数 CP により比較できる。野尻水田は一連降雨の降雨開始前にも流出水を観測しており、このような水田で畑作物を栽培する場合には湿害を避けるために作土を高く盛立てる畝立を行い、作物を畝に植え付けることが一般的である。野尻水田においては Table 6-2 中の作物群 A～C の作物のように畝立を行わない作物の作付けは想定外であるため、畑作物への転作を行った場合の作物・保全係数 CP は作物群 D～G の LS 値である 0.3～0.6 が対応する。これに対して野尻水田の LS 値は通期で 0.25、非作付期においても 0.276 であり、畑作物への転作を想定した場合と比して非作付期においても同等ないし小さいことがわかる。

多面的機能支払交付金の活動等において、ため池と一体でため池上流域の水田の保全管理を行う場合には、水田・水稲の係数を求めることにより、予測式の枠組みを用いて棚田を含む農地を適切に保全管理するための計画立案に資することができる。

7. 総合考察

7.1 ため池の施設管理と被災リスク低減

7.1.1 ため池管理者を主体にした施設管理実態

ため池管理者を主体とした維持管理の実態を、石川県珠洲市のため池を事例として、アンケート調査と現地調査に基づいて明らかにした。

アンケート調査においては、管理者等が実施する点検や軽微な補修により、ため池は施設の健全性の維持が図られている実態が明らかになった。施設の健全性維持は豪雨による決壊など施設の被災防止、ならびに洪水緩和効果による下流域の被災防止などのため池の持つ多面的機能の発揮においても基本となる重要な事項である。但し、維持管理作業は、多くのため池においては公的な機関ではなく、ため池管理者をはじめとする受益農家や集落などのため池と地域の関係者により行われており、作業内容は地域の慣行ないし作業者の経験に基づいて行わ

Table 6-8 作物・保全係数 CP の算出
Calculation of topography coefficient CP

項目	※野尻水田で得られた値		
	通期	作付期	非作付期
流亡土量 A' (kg/m ²)	0.49	0.38	0.11
流亡土量 A (tf/ha)	4.9	3.8	1.1
降雨係数 R (tf・m ² /ha・h)	469.6	371.6	98.0
土壌係数 K (h/m ²)	0.56	0.56	0.56
地形係数 LS (無次元)	0.0729	0.0729	0.0729
作物・保全係数 CP (無次元)	0.257	0.251	0.276

Table 6-9 求めた地形係数 LS × 作物・保全係数 CP の値
Calculated values of topography coefficient LS × soil coefficient K

	作物係数 C	$LSCP$	作物等
作物群A	0.02	0.021	牧草
作物群B	0.1	0.107	ブドウ(果樹)、ワラ・乾草マルチ、エンバク
作物群C	0.2	0.214	コムギ
作物群D	0.3	0.322	陸稲、キャベツ、ブロッコリー、ハクサイ、レタス、カボチャ、スイカ、マクワウリ、パレイシヨ、トウガラシ、トマト、ピーナッツ、カンショ、除虫菊、ソバ、ゴマ
作物群E	0.4	0.429	トウモロコシ、ワタ、ダイコン、ホウレンソウ、ゴボウ、ニンジン、セロリ、ナス、ピーマン、ソラマメ、ダイズ
作物群F	0.5	0.536	ネギ、タマネギ、ラッキョウ、エンドウ、インゲン、アズキ、ナガイモ
作物群G	0.6	0.643	アスパラガス、タバコ
	0.257	0.019	(通期)
野尻水田	0.251	0.018	(作付期)
	0.276	0.020	(非作付期)

※ 作物群 A~G については傾斜度 $I=5^\circ$, 斜面長 $\theta = 23\text{m}$ として地形係数 LS を算出。また保全係数 $P = 1.0$ とした。

れていることから、地域により相違することが考えられる。また、過疎化・高齢化ないし都市化・混住化の進行、かんがい水源におけるため池の重要度合の変化などにより、将来において管理の粗放化が生じる可能性もある。

一方、現地調査においては、貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草・枯れ草等の除去が十分行われていないことが明らかになった。流木・倒木や雑草・枯れ草等の除去が十分行われていないことの背景としては、受益農家や集落の高齢化・過疎化や用水需要の減少を背景とした労力の不足だけではなく、今までに流木・倒木や雑草・枯れ草の放置による顕著なため池の被災が発生していなかったことも考えられる。しかし、小規模なため池では、当然ながら整備されたため池でも洪水吐の規模が小さいままの場合もあり、流木等が枯れ草等のゴミと一緒に洪水吐に流れ込み通水障害を生じた場合には、被災を招く貯水位の異常上昇をもたらす危険は高い。

ため池管理者を主体にした施設管理においては、ため池管理者や作業者を対象に、施設の健全性維持と減災・防災に資する作業項目をとりまとめた手引き類の作成、ならびに自治体や土地改良区による作業講習会の実施を行うことで、慣習や経験だけでなく技術的な体系を踏まえた施設管理が可能となり、被災リスク低減に資するものと考えられる。作業講習会においては、地域内のため池における管理上の問題点や防災上の弱点を洗い出し、これを踏まえてため池管理者を中心とした現状の管理体制では十分な対応ができない事項に対する自治体や土地改良区などの支援策を講ずることができれば、さらに被災リスク低減に資すると考えられる。

7.1.2 現場技術者による機能診断技術

目視点検を踏まえた現場技術者が自ら行う機能診断手法として、堤体の漏水経路を 1m 深地温の測定結果を基に堤体中の地温分布のシミュレーションによる逆解析から推定する手法を提案した。

ため池の場合、一般に機能診断のために多額の費用を費やすことは困難である。特に、決壊時の浸水想定区域などから想定される被害が相対的に小さいため池において、かつ差し迫った緊急性がないと現場技術者の目視点検で判断される変状については安価な手法以外の機能診断は困難である。開発した手法は白金測温抵抗体と対応するデータロガー、白金測温抵抗体を挿入する穴を削る用具、ならびにパソコンと解析ソフトがあれば実施可能であり、自治体や土地改良区の現場技術者においても、自ら機材・用具を取りそろえて実施可能な手法である。従って、ため池管理者等による堤体などの施設の点検で変状が見いだされた際の、現場技術者による機能診断手法としての実用性は高いといえる。

漏水に関わる変状は、漏水の流出に伴って時間経過とともに変状が進行する危険性が高い現象である。このため、差し迫った緊急性がないと判断された変状についても、目視点検や漏水量計測などとともに本手法による機能診断で変状の進行状況を定期的に監視すれば、現場技術者による変状のモニタリングも可能と考えられる。モニタリングを通じて堤体の決壊等に対して危険度合の高まり等が見られる場合に直ちに対応策を講じることができれば、ため池の被災リスク低減に大きく寄与できる。

7.2 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策

豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策は、広島県東広島市のため池を事例として洪水流出モデルによるため池貯水位予測モデルを作成し、貯水位を指標として堤体の決壊などによるため池の被災リスクと減災対策の効果を評価した。

決壊等の被災リスクの低減に向けた対策は堤体や洪水吐の改修が基本であるが、全国20万箇所とされるため池全てを土地改良設計指針「ため池整備」の水準で整備することは困難である。また、計画的に整備を行うため池に関しても、改修事業が完了するまでの間については、減災対策を講じる必要がある。豪雨によるため池の被災リスクは洪水流出モデルを用いた貯水位予測モデルを作成した上で堤体など施設に被災が発生する閾値と判断する貯水位を設定し、想定する降雨に対してピーク水位が閾値となる貯水位に達する降雨確率年ないし生起確率を求めることにより評価できる。

未改修ため池であっても、長期に運用されている実績から、一定程度の降雨には耐えうるものと考えられる。しかし、地球温暖化に伴う気候変動により大雨の発生回数などが増加すると考えられることもあり、将来降雨を含めて貯水位の上昇を外力とするため池の被災リスクを評価することは重要である。

ため池管理者が主体になって実施する減災対策には、洪水期間にあらかじめ常時満水位よりも貯水位を引き下げる低水位管理や気象予報に基づいて降雨前にあらかじめ貯水位を低下させる事前放流により、降雨前に空き容量を創出するソフト対策、ならびに洪水吐の拡幅や副洪水吐を追加する簡易なハード対策がある。前者のソフト対策は豪雨時の上流域からの流入水を貯水池の空き容量での貯留により受け止めることで、後者の簡易なハード対策は洪水吐放流量の増強により迅速に放流を図ることで、いずれもピーク水位を低下させて被災リスクを低減するものである。後者は前者に比べ、上流からの流入量の大小、すなわち流域比（流域面積／満水面積）や大雨の頻度が増加した場合にも安定的に被災リスクを低減させる。但し、前者、すなわち降雨前の空き容量創出による対策は利水容量に余裕のあるため池であれば、水利権者の合意と管理者の取水施設等の操作のみで実施できる減災対策であり、工事等を要することなく実施可能という利点があり、直ちに実施可能な減災対策として重要である。

7.3 ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策

ため池群の多面的機能による洪水緩和効果に基づいた下流河川流域の被災リスクの評価と低減策は、広島県椋梨川上流域を事例としてため池群を組み込んだ広域洪水流出モデルを作成し、下流河川の基準点における水位を指標として検討した。

ため池群を活用して下流河川のピーク水位を被災リスクの低減を図るためには、降雨ピーク前の空き容量確保が重要である。ため池群の洪水緩和効果を強化するには、洪水調節容量を設定したため池の流域面積率が大きくなるように洪水調節容量を付与することがまず必要であり、その上で降雨前の放流による洪水調節容量の維持とともに、ピーク水位の形成に直接関係しない時間帯における貯水池への流入水を極力放流し、ピーク水位の形成に直接繋がる流入水を貯留するための空き容量の維持が必要である。従って、決壊等のため池被災リスクの低減策である低水位管理や事前放流は、ため池群を活用して下流河川流域の被災リスク低減を図る際にも有効な方策であることから、これら貯水管理に関するソフト対策は施設の被災発生リスク低減策としての効果が小さい場合でも下流河川流域の被災リスク低減の観点から取り組む意義がある。

広島県椋梨川上流域のため池群のように、主たる水源からの用水が不足する際の補助水源として利用するため池においては、渇水年を除くとかんがい期間と重なる洪水期間においても用水に余裕があるものと考えられる。水利権者の同意が前提になることやため池用水の利用状況・形態によって異なるものの、多面的機能である洪水緩和効果の発現に向けた用水管理を実施できるため池群は他流域でも少なくとも存在すると想定される。多面的機能の効用はため池関係者に限らず下流河川流域関係者に及ぶので、洪水緩和効果の受益者からため池管理に必要な費用ないし賦役を転移し、ため池群を活用して下流河川のピーク水位を被災リスクの低減を積極的に図ることも考えられる。

但し、ため池は基本的に河道外の貯留施設であり、自流域を持つため池が多数存在する流域においても河川の流域に占めるため池の流域面積の比率は高くないものと考えられる。また、降雨中にため池に向いて貯水の放流等を行うための操作を行うことは労力面で一般に困難であり、特に豪雨中のため池管理者による施設の操作は不測の事態を招く危険性があることから、基本的には避けるべきである。このため都市化の進行で受益水田が消滅し、ため池を治水のための施設に転用し、改造することができる場合などを除くと、ため池の洪水緩和効果が発揮できる降雨や貯水管理の条件が揃った際に、付加的に下流河川に対して被災リスクを軽減するものとして位置づけることが妥当であると考えられる。

7.4 ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出

ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、広島県東広島市のため池を事例として取水に伴う貯水率の減少度合と降雨による回復度合を観測水位から求め、検討期間中の貯水率変化を簡便に予測する手法を考案して検討した。

ため池は農業用水源として築造されていることから、

洪水調節容量など被災リスク低減に用いる容量は一般に想定されていない。しかし、水稲作から畑作物への転作が進んでおり、2007年度の水田面積に占める水稲作付面積の割合は全国で66%に止まることや、都市化や混住化、耕作放棄地の発生に伴って受益水田の潰廃が進行しているため池も少なくない。また、河川から取水した用水などため池外の水源によるかんがい施設を整備した地区においては、ため池は干ばつ時の補助水源として運用されている場合が多いと考えられる。従って、現状のため池においては、利水容量の転用により洪水調整容量を創出できる余地は大きいと考えられる。

水位計や雨量計を設置して水文観測を実施しているため池は少数であり、今後防災面で重点的に管理を行う必要があるため池に関しては水文観測機器を整備して貯水位や雨量のモニタリングを行う可能性は高いと考えられるものの、多くのため池における貯水位の観測は将来においても目視によるものと考えられる。重要な今回考案した手法は1～2期間の日水位データを基に検討することが可能であり、ため池の利水容量転用の可能性を定量的に評価・検討する手法として、高い実用性を持つと考えられる。

7.5 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討

棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池集水域管理の検討は、鳥根県出雲地方における棚田の土壌流出の観測結果に基づいて観測田（耕作田／遊休田）の土壌流出実態を明らかにした上で、土壌流亡予測式における水稲・水田の作物係数 C と保全係数 P を算出して行った。

水田・水稲は他の土地利用・作物と比べて土壌流出に対して保全的であることから、一般的には水田に起因する土壌が貯水池内に堆積し、一般にはため池管理上の問題を引き起こす可能性は少ないものと考えられる。しかし、今回得られた観測データや既往の研究報告では水田においても無視できない量の土壌流出が生じていることから、ため池上流域に占める水田の面積比率が大きく、かつ耕作放棄などによる水田の遊休化に伴って土壌流出量が増大する場合や既往の研究で報告されている代かき後の強制落水などに伴う土壌流出が見られる場合には、水田からの土壌流出が生じないよう水田の利用・管理を行う必要がある。加えて、ため池の多面的機能増進に関わる活動においては、流域内の水田についても一体的に扱うべきものであり、ため池への土壌流出の観点だけでなく、上流域の水田は国土保全の観点からも適切に利用・管理する必要がある。

土壌流亡予測式の枠組みで行った検討により、既往の研究で指摘されている代かき・田植時に水田から出る流出水に伴う土壌流出を除くと、水稲以外の作物に転換する場合よりも水稲作を維持する方が土壌保全的である。また、作付けを行わずに水張り水田として管理した場合

の土壌流出も水稲作時と同程度と考えられる。上流域水田の管理にあたっては、耕作放棄等の管理粗放化を放置することなく、土壌流出抑制の視点から適正な管理を行うことで、貯水容量の維持を通じたため池と下流河川流域の被災リスク低減に資することができる。

7.6 まとめ

ため池は古くから農民が築造し、今日においても多くのため池が受益農家や集落などのため池管理者をはじめとする関係者が自ら維持管理している。施設の健全性維持、ならびに多面的機能の発揮を含む豪雨に対するため池とその下流河川流域の被災リスク軽減に際しては、ため池管理者等による維持管理が重要な役割を果たす。

本稿における実態調査や観測、検討はそれぞれ特定の地区・ため池で行った事例であり、立地条件を相違する地区やため池における比較検討や手法の適用性は今後の課題である。ため池の施設管理や用水管理は地域によりその実態は様々であると考えられる。また、気候や地形、都市化や過疎化の進行状況など、ため池の立地条件によっても維持管理の実態は大きな影響をうけるものと考えられる。従って、本稿の成果に基づいてため池の減災対策を取り組む場合には、適用地区・ため池での技術的な検討は不可欠である。

但し、自流域を持つ谷池は上流域からの降雨流出を貯留し、用水をかんがいに使用すること、ならびに豪雨時の流入水を洪水吐から放流するという基本的な機能は不変であることを踏まえれば、本稿で開発・提案した手法や技術的な知見は広く全国に適用し得るものと考えられる。

謝辞：本稿をとりまとめるにあたり、三重大学大学院生物資源学研究所の成岡市博士には終始丁寧なご指導とご援助を頂いた。また、同研究所の加治佐隆光博士、酒井俊典博士、ならびに岡島賢治博士には貴重なご助言とご示唆を頂き、とりまとめにあたって大きなご援助を頂いた。

本稿を構成する研究の共同研究者である農研機構（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）農村工学研究部門の小川茂男博士と福本昌人博士には、特に研究計画やとりまとめにおいてご指導とご助言を頂いた。塩野隆弘博士には土壌流亡予測式の適用に関してご助言を、嶺田拓也博士にはため池管理に関するアンケート調査の共同作業を頂いた。ハイドロシステム（株）の小山潤氏には広域洪水流出モデルのプログラム作成を、ならびに岡山大学大学院環境生命科学研究科の工藤亮治博士には温暖化実験データの入手とダウンスケーリングに関する作業を担当して頂いた。また、元独立行政法人農村工学研究所の大西亮一博士にはため池群の洪水緩和をはじめとするため池の水文・流出解析に関わる研究の端緒を、元秋田県立大学教授生物資源科学部の高橋順二博士にはため池の維持管理に関わる研究の端緒を、ならびに茨城大学農学部毛利栄征博士にはため池減災に関する研究の端緒を与えて頂いた。また、農研機構農村工学研究部門の鈴木尚登博士と増本隆夫博士、堀俊和博士、ならびに著者が参画したプロジェ

クト研究等の参画研究者であった方々には、研究推進にあたっての各種のご助力と研究会等での有益なご意見を頂いた。さらに日本大学生物資源科学部の川本治博士をはじめ、上司や同僚として同じ研究部・研究領域で共に仕事をした方々には、様々な研究推進上の便宜を図って頂いた。

本稿に関する研究にあたっては、ため池や水田を所有する農家をはじめとした地域の方々、ならびに関係行政機関の方々から観測や調査に対する便宜・協力を頂いた。本稿の研究は全てフィールドでの観測や調査に立脚するものであり、これらの方々から頂いた協力がなければ為し得ないものであった。また、いずれの研究も行政機関等における技術検討と何らかの形で連携して実施したものであり、技術検討の場での議論や担当者との意見交換は研究計画の立案や研究とりまとめにあたって大変有益であった。関係各位には、深く御礼を申し上げる。

なお、本論文は三重大学大学院生物資源学研究科学学位審査論文であることを付記する。

引用文献

- Barnes, B. S. (1940) : Discussion of analysis of runoff characteristics, Trans., ASCE, **105**, 106
- Wischmeier, W. H. and Smith D. D. (1978), Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, U.S. Dep. Agric., *Agriculture Handbook*, No.537.
- 新井正・西沢利栄 (1974) : 水温論, 共立出版, 185-190
- 今泉眞之・石田聡・土原健雄・吉迫宏 (2006) : ため池周辺の地下水流入・流出量の評価－広島中央の谷ため池を例として－, 農業工学研究所技報, **204**, 157-174
- 今田美穂・青柳みどり・渡辺貴史・高村典子 (2009) : ため池の管理組織形態と存続をめぐる費用負担の実態, 農村計画学会誌, **27**(論文特集), 239-244
- 岩井重久・石黒正儀 (1970) : 応用水文統計学, 森北出版, 73-83
- 内田和子 (2008) : ため池—その多面的機能と活用—, 農林統計協会, 139-153
- 内田和子 (2003) : 日本のため池 防災と環境保全, 海青社, 35-70
- 大槻順朗・大八木豊・島谷幸宏・朴崎璨 (2008) : 御笠川流域における貯留施設の治水効果の評価, 水工学論文集, **52**, 361-366
- 大八木豊・島谷幸宏・杉本知佳子・加藤憲介・朴崎璨 (2006) : ため池を用いた御笠川流域の治水強化策, 水工学論文集, **50**, 325-330
- 大八木豊・島谷幸宏・杉本知佳子・加藤憲介・朴崎璨 (2005) : 御笠川流域におけるため池の治水効果, 河川技術論文集, **11**, 261-266
- 奥山武彦・黒田清一郎・中里裕臣・長束勇 (2003) : 地すべりブロック内におけるため池の浸透防止工による地下水流動の変化, 農業工学研究所技報, **201**, 165-172
- 角道弘文・高橋一将・千賀裕太郎 (2013) : 湯水要貯水量曲線法を用いた農業用ため池の流出調整効果の検討, 農業農村工学会論文集, **81**(3), 257-262
- 加藤敬 (2005) : 農業用ため池の洪水低減機能に関する水文・水理学的研究, 農業工学研究所報告, **44**, 1-22
- 加藤敬・佐藤政良 (2002) : 大阪府松沢池における洪水低減機能とその確率評価—ため池の洪水低減機能の評価—, 農業土木学会論文集, **222**, 637-644
- 加藤敬・佐藤政良・太田高志 (2002) : 実降雨のパターンを考慮したため池の洪水調節機能評価, 農業土木学会論文集, **222**, 645-651
- 北村邦彦・喜多威知郎 (1997) : 石川県能登地域における中山間ため池地帯の水管理, 農業土木学会論文集, **188**, 315-322
- 機能保全における性能設計入門編集委員会編 (2008) : 機能保全における性能設計入門, 農業農村工学会, 142-143
- 木村俊晃 (1975) : 貯留閘数法, 河鍋書店, 10-35
- 黒田清一郎・増川晋・田頭秀和 (2013) : 土構造物の地震波伝播特性評価と経年変化監視への適用性, 農業農村工学会誌, **81**(8), 627-630
- 黒田英男 (2003) : Visual Basic による 3 次元熱伝導解析プログラム, CQ出版, 176-246
- 建設省水文研究会 (1971) : 流出計算例題集 2, 全日本建設技術協会, 81-146
- 小林晃・丹羽亮太・柳本智也・山本清仁・青山咸康 (2007) : 弾性波を用いたため池堤体内の水分状況推定, 農業土木学会論文集, **249**, 231-238
- 小林晃・山本清仁・岡田謙吾 (2014) : ため池堤体の効率的調査法—簡易弾性波速度分布測定の提案と複合評価—, 土木学会論文集 F4, **70**(1), 1-10
- 小山潤・小川茂男・吉迫宏・島武男 (2007) : 水理解析を目的とした流域 GIS データのオブジェクト構造化と応用, GIS—理論と応用—, **15**(2), 93-102
- 佐々木聡・鈴木浩之・北田裕道 (2013) : ため池の防災・減災の施策について, 農業農村工学会誌, **81**(8), 631-634
- 佐藤俊典 (2014) : 気候変動影響に関するため池管理者へのアンケート調査の結果報告, 農業農村工学会誌, **82**(1), 47-50
- 庄司正弘 (1995) : 伝熱工学, 東京大学出版会, 17
- 白石英彦 (1971) : 第 9 章 不定流数値解析における初期条件および境界条件について (農業水利を中心として), “伊藤 剛編, 数値解析の応用と基礎 (水理学を中心として)”, アテネ出版, 177-196
- 鈴木隆善・河合宏夫・米村 誠・西島信一 (2003) : 住民参加によるため池の保全・管理体制づくり, 農業土木学会誌, **71**(10), 921-924
- 鈴木哲也・荻原龍太郎・森井俊広・河合隆行 (2013) : 常時微動スベクトルデータを用いた損傷ため池堤体の健全度評価, 農業農村工学会誌, **81**(8), 611-614
- 須戸幹・三木俊和・増田佳昭 (2009) : 代かき・移植時における水田からの濁水流出特性—滋賀県宇曾川流域の水田群を事例として—, 農業農村工学会論文集, **77**(2), 113-119
- 千賀裕太郎 (2007) : 水資源管理と環境保全, 鹿島出版会, 86-103
- 竹内篤雄 (1996) : 温度測定による流動地下水調査法, 古今書院, 70

- 竹内篤雄 (1983a)：地すべり地温測定による地下水調査法，吉井書店，46-50
- 竹内篤雄 (1983b)：地すべり地温測定による地下水調査法，吉井書店，59-64
- 竹下伸一・別枝宏平・三野徹・中村公人 (2006)：遅延率を用いたため池洪水緩和量推定法，農業土木学会論文集，**243**，291-300
- 谷山一郎 (2002)：Ⅷ 農林地の土砂流出に伴うリン流出をモニタリングする (長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規：環境負荷を予測する－モニタリングからモデリングへ)，博友社，127-142
- 椿東一郎・荒木正夫 (1961)：水理学演習上巻，森北出版，221-222
- 内閣官房 (2014)：国土強靱化基本計画－強くて，しなやかなニッポンへ，内閣官房，24
- 長沢徹明・梅田安治・李里漫 (1993)：USLEにおける降雨係数の評価について－北海道における土壌侵食抑制に関する研究 (I)－，農業土木学会論文集，**165**，121-127
- 中西憲雄・加藤敬・小林宏康・中達雄 (2002)：ため池の雨水貯留可能量の評価，農業土木学会論文集，**217**，101-107
- 中西憲雄・加藤敬・常住直人 (1999)：農業用ダムが発揮する洪水低減機能の解明－大迫ダムの洪水時放流事例とその分析から－，農業土木学会論文集，**202**，533-539
- 中村充・白石英彦 (1971)：数理モデルによる非常現象の解析－湾，河川，湖におけるシミュレーション－，農業土木試験場報告，**9**，137-158
- 西村伸一・森俊輔・藤澤和謙・村上章 (2009)：豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計，応用力学論文集，**12**，89-97
- 日本学術会議 (2001)：地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申)，日本学術会議，48-49
- 農林水産省 (2012)：土地改良長期計画，農林水産省，22-23
- 農林水産省構造改善局計画部資源課 (監修) (1992)：土地改良事業計画指針 農地開発 (改良山成畑工)，農業土木学会，158-178
- 農林水産省農村振興局 (2015a)：多面的機能支払交付金【農地維持活動】農地，水路等の基礎的な保全管理，農林水産省農村振興局，45-58
- 農林水産省農村振興局 (2015b)：多面的機能支払交付金【資源向上活動 (長寿命化)】農地周りの水路，農道等の長寿命化のための活動の解説，農林水産省農村振興局，51-64
- 農林水産省農村振興局 (2015c)：多面的機能支払交付金【資源向上活動 (共同)】地域資源の質的向上を図る共同活動の解説，農林水産省農村振興局，14-16，81-96，237
- 農林水産省農村振興局 (監修) (2014)：土地計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水 (水田)」，農業農村工学会，70-71
- 農林水産省農村振興局 (2013)：平成25年度食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会報告 農村社会の変化や新たな農政の展開における農業農村整備の課題 (中間整理)，農林水産省農村振興局，13-14
- 農林水産省農村振興局 (監修) (2006)：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準，基準の運用，基準及び運用の解説，技術書，農業土木学会，86-87
- 農林水産省農村振興局 (監修) (2003)：土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書 [フィルダム編]，農業土木学会，II -60-62
- 農林水産省農村振興局企画部資源課 (2008)：多面的機能維持増進調査報告書，農林水産省農村振興局企画部資源課，110-118
- 農林水産省農村振興局整備部水利整備課 (監修) (2004)：土地改良施設管理基準－ダム編－，農業土木学会，103-108
- 農林水産省農村振興局整備部設計課 (監修) (2006)：土地改良事業設計指針「ため池整備」，農業土木学会，3，17-18，48，61-68，102，133-143
- 農林水産省農村振興局整備部防災課 (2014)：ため池の保全管理体制整備の手引き，農林水産省農村振興局整備部防災課，1-64
- 農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室 (2014)：農業水利施設減災管理手引き，農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室，2-1-2-111
- 農林水産省農村振興局整備部防災課 (2013)：ため池管理マニュアル，農林水産省農村振興局整備部防災課，1-30
- 広島県 (2003)：二級河川沼田川水系河川整備計画，広島県，5-6
- 北陸農政局珠洲開拓建設事業所 (1992)：珠洲事業誌，北陸農政局珠洲開拓建設事業所，22-23
- 堀俊和・毛利栄征・松島健一・有吉充 (2010a)：豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法，農業農村工学会論文集，**78** (6)，493-503
- 堀俊和・毛利栄征・松島健一・有吉充 (2010b)：豪雨リスクを考慮したため池の減災対策，農業農村工学会誌，**78** (9)，759-763
- 堀俊和・森充広・毛利栄征・青山咸康 (2002a)：地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法，農業土木学会論文集，**218**，241-251
- 堀俊和・毛利栄征・青山咸康 (2002b)：豪雨による農業用ため池の破壊原因と被災の特徴，農業土木学会論文集，**218**，253-263
- 堀俊和・山下恒雄・吉迫宏 (1995)：塩水トレーサ法によるため池の漏水調査法について，農業工学研究所技報，**192**，41-53
- 松井宏之・須永吉昭 (2013)：石垣島・水田地帯からの浮遊土砂流出量の長期観測およびL-Q式の適用，土木学会論文集B1，**69** (4)，I_955-I_960
- 松井宏之・福永隆二・清水智 (2007)：石垣島の水田における降雨出水時の浮遊土砂収支，農業農村工学会論文集，**252**，689-694
- 水村和正 (2008)：水文学の基礎，東京電機大学出版局，118-140
- 嶺田拓也・小出水規行・石田憲治 (2009)：水田における冬期湛水の導入による持続的な多面的機能の発揮－宮城県大崎市伸萌地区の生物相保全機能を事例とした考察－，農村計画学会誌，**27** (論文特集)，335-340
- 嶺田拓也・吉迫宏・赤石大輔 (2013)：過疎高齢化地域の老朽化・放棄ため池の新たな利活用創造に向けた取組み，農業農村工学会誌，**81** (8)，635-638
- 湯原浩三 (1955)：地下1m深の地温分布から地下熱源を理論的に推定する一方法，物理探査，**8** (1)，27-33
- 吉川 (暉澤) 省子・山本博・石原暁・花野義雄 (1998)：四国地域における農地管理の粗放化に伴う土壌侵食の変動評価，日本土壌肥科学雑誌，**69** (3)，265-277
- 吉迫宏・小山潤・小川茂男・島武男・中西憲雄・大西亮一 (2007)：

- ため池群の持つ洪水軽減効果シミュレータの開発－広島県椋梨川流域への適用－, 農村工学研究所技報, **206**, 209-217
- 吉迫宏 (2008) : 地温探査によるため池堤体の漏水調査, 土壌の物理性, **108**, 67-80
- 吉迫宏・小川茂男 (2009) : ため池における利水容量の転用による洪水調節容量の創出－東広島市六道池における検討－, システム農学, **25** (1), 63-70
- 吉迫宏・小川茂男・塩野隆弘 (2009) : 棚田における土壌流出と土壌流亡予測式の係数算出, システム農学, **25** (4), 205-213
- 吉迫宏・福本昌人・嶺田拓也・松森堅治・瀬川徳子 (2011) : 石川県珠洲市における小規模ため池の施設管理実態, 農村工学研究所技報, **211**, 121-130
- 吉迫宏・小山潤・小川茂男・福本昌人 (2013) : 広島県椋梨川流域における谷池型ため池群の洪水緩和効果, 農業農村工学会論文集, **81** (3), 205-214
- 老朽ため池研究会 (監修) (1979) : 老朽ため池整備便覧<昭和57年度版>, 公共事業通信社, 14
- 渡辺貴史・高村典子 (2006) : 兵庫県東播磨地域における生物保全に対するため池管理者の意識, 農村計画学会誌, **25** (論文特集), 353-358

受理年月日 平成 28 年 12 月 26 日

Disaster reduction technique for damage on the irrigation pond of valley type and the lower basin caused by heavy rain

YOSHISAKO Hiroshi*

*Disaster Prevention Unit, Division of Facilities and Geotechnical Engineering

Abstract

In this study, we investigated management measures to reduce the risk of heavy rain disaster to irrigation pond facilities and downstream areas by clarifying the actual condition of irrigation pond management and discussing various methods of functional diagnosis and evaluation.

We made a case study on the actual condition of management conducted by farmers and local community members who benefit from irrigation ponds in Suzu City, Ishikawa Prefecture through questionnaire survey and field investigation. We then proposed a functional diagnosis method based on visual checks; this method estimates leakage paths in a dam from the inverse analysis of simulated ground temperature distribution in the dam on the basis of ground temperature measurements at a depth of 1 m.

We evaluated the risk of heavy rain disaster to irrigation ponds and discussed mitigation measures for the case of irrigation ponds in Higashi-hiroshima City, Hiroshima Prefecture by developing a reservoir level prediction model based on a flood runoff model and using the reservoir level as an indicator. We found that among the disaster mitigation measures, controlled water level reduction in an irrigation pond having a large catchment area has only a limited effect on disaster risk reduction, whereas minor modifications to spillways can reduce disaster risks on a stable basis.

We evaluated disaster risk reduction in downstream river areas resulting from flood mitigation using a group of irrigation ponds and discussed mitigation measures for the case of the upper river basin of the Mukunashi River in Hiroshima Prefecture by developing a regional flood runoff model incorporating a group of irrigation ponds and using river water levels at downstream reference locations as an indicator. We found that it is important to secure an available capacity before experiencing peak rainfall in order to reduce disaster risks by using a group of irrigation ponds.

To create an extra capacity of flood control by diverting the service water capacity of irrigation ponds, we studied the case of irrigation ponds in Higashi-hiroshima City, Hiroshima Prefecture and deduced, from the observed water levels, decrease in the percentage of storage due to withdrawal and increase in the percentage of storage due to rainfall. We then created and discussed a simple method to predict changes in the percentage of storage during a given investigation period. We found that in irrigation ponds serving water to paddy fields where diversion and crop changeover have progressed, it is likely that service water capacity can be diverted even during an overlapping period of irrigation and flood control.

In studying the management of irrigation pond catchment areas in consideration of soil runoff from terraced paddy fields, we observed soil runoff from terraced paddy fields in the Izumo district of Shimane Prefecture to clarify the state of soil runoff from the observed cultivated and idle paddy fields, and then calculated the cropping factor C and the conservation practice factor P in the soil loss equation for the studied paddy and paddy fields. From the comparison of factors in the soil loss equation, we found that preserving rice cultivation is effective for suppressing soil runoff. We then discussed the management of irrigation pond catchment areas including terraced paddy fields in terms of maintaining reservoir capacity by suppressing the flow of deposit into reservoirs.

Key words: *irrigation pond, disaster mitigation, storm runoff, disaster risk, soil runoff*