

## 博士學位論文審査結果

専攻名	生物資源科学専攻
氏名	沢田明彦
学籍番号	D23G004
論文題目	高度な基盤整備に根ざした水管理イノベーション技術と流域管理手法の開発
審査委員氏名	(主) 増本 隆夫 印 (副) 近藤 正 永吉 武志 (学外) 吉田 武郎 (特別)

## 研究概要及び審査概要

本研究は、水管理の課題を解決するための土台となる高度な基盤整備（ハード）のうえで展開可能なイノベーション技術（ソフト）ならびに流域管理手法を構築することを目的としている。実務者としての経験や視点を根拠に、現場の技術課題を基礎的に検討するとともに独創的な技術や手法を提案していることが特徴で、以下の成果を得ている。

提案する技術は、水管理や流域管理に係る対象者の違いから、1) 都市住民と農村住民に向けた技術、2) 農業に携わる技術者に向けた技術、3) 同一流域に係る様々な分野の技術者に向けた技術に大きく3分類している。具体的には、都市側の流出実態を考慮した都市・農村間の排水経費の負担割合の算定法、渇水に対応したパイプライン水管理やため池管理の分布型水循環モデルへの組込みと利活用技術、超過洪水に対応する水田域の持つ遊水地機能の評価法とその機能を利用した流域管理手法などを新たに開発した。さらに、農業水利用のモデル化を通して流域特性が比較できることを示した上で、その特性に応じたイノベーション技術を提示した。これらの技術は、農村地域での気候変動による極端現象の増大や水災害の頻発化等に対する水管理課題の解決や総合的な流域管理手法の確立に繋がると期待される。

先の予備審査会での意見を踏まえて適切に学位論文の改訂が行われたことを確認した。学位論文発表会では、研究成果を丁寧かつ分かり易く説明し、質疑に対して十分な回答ができていた。最後に、成果の一部は論文公表が行われ、高い評価が得られていることも確認した。

以上より、審査会では博士の学位を授与するに値すると判定した。

## 審査結果

博士の学位を授与するに妥当と認定する。

博士の学位を授与するに不十分である。

以上の審査概要ならびに審査結果について審査委員全員の同意がある。

氏名	さわた あきひこ 沢田 明彦
授与学位	博士（生物資源科学）
学位授与年月日	令和6年3月22日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項（注 課程博士：1、論文博士：2）
研究科専攻	秋田県立大学大学院生物資源科学研究科 博士後期課程 生物資源科学専攻
学位論文題目	高度な基盤整備に根ざした水管理イノベーション技術と 流域管理手法の開発
指導教員	教授 増本 隆夫
論文審査委員	主査 教授 増本 隆夫 副査 准教授 近藤 正、准教授 永吉 武志 学外 上級研究員 吉田 武郎（国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構）

## 論文内容要旨

農業現場では、農業者の高齢化や担い手不足による1経営体当たりの経営耕地面積の増加に伴い、水管理労力の負担増加などの多くの課題が生じており、適切な水管理の継続が懸念されている。また、農業現場を支える農村地域では近年の都市化による土地利用変化に伴う流出変化が進行する一方で、流域全体では気候変動による極端現象（洪水と渇水）の増大により、特に豪雨に伴う超過洪水がもたらす水災害が頻発化している。それらへの対応として水管理の課題解決とともに、気候変動を踏まえた総合的な流域管理手法の確立が求められている。

そこで本研究では、水管理の課題を解決するための土台となる高度な基盤整備（ハード）のうえで展開可能な、イノベーション技術（ソフト）と流域管理手法を開発し提案する。ここで提案する技術は、それらを水管理・流域管理に利活用する、またはそこに関係する対象者の違いから、1) 都市住民と農村住民に向けた技術、2) 農業に携わる技術者に向けた技術、3) 同一流域に関係する様々な分野の技術者に向けた技術、の3つに分類される。これらの技術として、まず都市と農村の協調による流域の適切かつ持続的な排水管理のため、都市側の流出実態を考慮した排水経費の負担割合の算定法を提示する。次に、渇水への対応にも繋がる農業水利用の視点から、水管理の高度化に向けた技術を開発・提案し、それらがほ場や流域で発揮する効果を分布型水循環モデルによる解析・評価から明らかにする。続けて、超過洪水に対応する流域治水の視点から、水田域の持つ遊水地機能を評価し、その機能を流域管理・流域治水の一環として利活用する手法を提案する。さらに、流域の農業水利用のモデル化を通して流域特性を明らかにし、その特性に応じて活用されるイノベーション技術を提示するとともに、流域の様々な問題への対応を含めた展開方向について論じる。

最後に、これらの一連の研究により、洪水や渇水による農作物被害の低減はもとより、

流域全体の防災や流域治水に寄与する流域管理手法を開発する。

本論文の各章で得られた成果は以下のように要約できる。

(1) 開発した水管理イノベーション技術と流域管理手法

第1章では、研究の背景と既往の研究成果を踏まえ、本研究の目的を「水管理の課題を解決するための土台となる高度な基盤整備（ハード）のうえで展開可能なイノベーション技術（ソフト）を開発・提案し、洪水や渇水による農作物被害の低減はもとより、流域全体の防災や流域治水に寄与する流域管理手法を開発する」こととした。本論文では、以下の流れで研究を進め目的を達成した。

まず第2章では、土地改良施設の排水経費に対する都市側の適正な負担割合を導くため、計画降雨に対する関数近似化した流出ハイドログラフを利用し、都市化による流出のピーク流量増大を考慮して求めた「地目別流出量を根拠とした排水経費の負担割合の算定法」を提案した（図1、図2）。さらにその方法を水稲作が盛んな日本有数の穀倉地帯である西蒲原地区に適用した。その結果から、都市化による農地の宅地化が顕著な地域において、排水経費に対する都市側の適正な負担割合を算定する方法の手順を具体的に示した。加えて、負担割合の推定値として、単位面積当たりで農地分を1として都市側は2.10～3.43の範囲となり（表1）、例えば単純に中間値を指標的に示すと2.77との有用な試算値を案出した。また、提案した手法は農地の減少・都市化の進行といった土地利用変化があった場合に対しても利用できることも明らかにした。

次に第3章では、流域内に分布する単独ため池やため池群の水循環過程やその要素を定式化し、「流域内に分布する全てのため池のモデル化」を行うとともに分布型水循環モデルに実装した（図3、図4）。続いて、それを米代川流域に適用し、ため池が農業水利用に及ぼす影響を定量的に評価した。さらに、用水供給へのため池の渇水時の貢献度を示す指標を導出した。そこでは、ため池の多様な管理実態を統一した管理規定や流域面積を考慮した流入量の算定法等を提案し、全てのため池をモデル化した（図5、図6）。また、ため池の有無による計算流量の違いを分析し、灌漑放流の河川への影響や放流量の特性を平年と渇水年で評価できた（図7、表2）。加えて、ため池による農業水利用の安定が、中山間地の多面的機能の持続に繋がることを論じた。得られた成果は、ため池の廃止や統合が農業水利用や中山間地に及ぼす影響の評価等への展開が期待できる。

第4章では、はじめに聞き取り調査等による秋田県の大区画ほ場における課題の整理により、今後そこでスマート農業を展開する際の留意点を提示した。次に、調査結果を踏まえて課題解決および今後の農業水利用の高度化展開に向けて「大区画ほ場に管水路とICT水管理を備えた灌漑地区のモデル化」を提案した。モデル化では、灌漑地区の需要に見合った水量を送水する構造等を提案し管水路による配水モデルを構築した（図8）。構築したモデルを分布型水循環モデルに実装して能代地区に適用し（図9）、モデル化したICT水管理の効果として、節水の可能性量が実測送水量に占める割合は5年間平均で32%であることを示した（図10）。また、上記のモデル化実証と同時に展開した高野尻地区における現地実証では、実証ほ場と対照ほ場を設置し、それぞれICT水管理

と慣行の水管理を行った。その結果、ICT水管理により無効放流量が79%削減され、水管理時間は61%削減された。そこではモデル化実証で示した節水効果に相当するほ場への給水量の削減効果について実証できておらず、現地でのデータ収集の際のリスクが示唆された。モデル化実証と現地実証の提示により、両者の手法や実証の規模、得られる情報といった特性の違いを示した。

第5章では、用排水路等の農業水利施設を含めた水田域の持つ潜在的な遊水地機能とその利活用方法を検討するため、マクロな水田域の貯留能力を定量化するとともに、その機能を用いた農村地域が流域治水に果たす役割を論じた。ここでは、流域の排水能力の整備水準を上回る超過洪水時に生じる水田域での氾濫水の貯留が、都市域の治水に貢献してきた実態を遊水地機能の効果として評価し、その機能を治水に利活用することを超過洪水に対する「ソフト対策」として定義した。次に、低平都市化水田域の西蒲原地区を対象に、排水（通水）能力 $D$ と水田貯留能力 $S$ の関係を定式化し、超過洪水に対する氾濫水を貯留するための水田貯留能力を定量化することで、水田域の持つ遊水地機能を評価する一連の手法を提示し、さらにソフト対策を案出した（図11、図12）。加えてソフト対策は、遊水地の新たな整備や排水（通水）能力の増強整備といったハード対策より迅速な対応であることを論じた（表3）。最後に、水田域がポテンシャルとして持つ遊水地機能を、農業者側と都市側の協働による補償制度創設を前提に、非常時には流域管理・流域治水の一環として利活用することを「水田域の持つ遊水地機能のソフト対策としての活用法」として、超過洪水対策の選択肢の一つとして提案した。

さらに第6章では、農業水利用のモデル化を通して流域特性を明らかにしたうえで、その特性に応じて活用されるイノベーション技術を提示するとともに展開方向について述べた。はじめに秋田県の米代川、八郎湖、雄物川、子吉川の4流域を対象とし、農業水利用をモデル化し実装した分布型水循環モデルを適用した（図13）。次に、構築したモデルの検証から米代川流域では12年間通算の相対誤差28%、雄物川流域では11年間通算の相対誤差41%の精度を得た。それらのモデル化を通じた各流域の特性の分析から、八郎湖流域は水田面積割合が高い特性であることを示すとともに（表4）、その多くを占める干拓地や低地に築造された排水機場では、第2章に示した排水管理が望ましいことを提示した。また、雄物川流域のような中流域に灌漑地区が広がる特性の流域では、第5章に示した水田域の遊水地機能を利活用した流域管理の実施が効果的であることを提示した。一方、ため池が多く分布する特性の中山間地では、第3章に示したため池要素のモデル化技術による水文解析が有用であること、加えて水不足の八郎湖流域では、第4章に示した農業用水の節水に繋がるICT水管理が望ましいことを提示した。次に、提案したこれらの技術の課題解決に向けた攻究を展開方向として示した。さらに、後述する本研究に関連して浮かび上がる流域の様々な問題への対応を含めた今後の展開を論じた。

## (2) 全体の結論と今後の展開

本論文では、まず、水管理の課題を解決するための土台となる高度な基盤整備のうえで展開可能な、イノベーション技術を開発し提案した。提案した技術はそれらを水管理・

流域管理に利活用する、またはそこに関係する対象者の違いから、都市住民と農村住民に向けた技術、農業に携わる技術者に向けた技術、同一流域に関係する様々な分野の技術者に向けた技術の3つに分類されることを示した。

次に、これらの技術について、まず都市と農村の協調による流域の適切かつ持続的な排水管理のため、都市側の流出実態を考慮した排水経費の負担割合の算定法を提示した。次いで、渇水への対応にも繋がる農業水利用の視点から、水管理の高度化に向けた技術を開発・提案し、それらがほ場や流域で発揮する効果を分布型水循環モデルによる解析・評価から明らかにした。また、超過洪水に対応する流域治水の視点から、水田域の持つ遊水地機能を評価し、その機能を流域管理・流域治水の一環として利活用する手法を提案した。さらに、流域の農業水利用のモデル化を通して流域特性を明らかにし、その特性に応じて活用されるイノベーション技術を提示した。同時に、これらの一連の研究により、洪水や渇水による農作物被害の低減はもとより、流域全体の防災や流域治水に寄与する流域管理手法を開発した。

最後に、本研究に関連して浮かび上がる流域の様々な問題への対応を含めた展開として、提案した技術の応用や、技術をさらに発展させることにより、防災のための氾濫解析、種々の流出変化が流域に及ぼす影響の評価、水管理手法の継承やICT水管理の最適設定の導出といった多様な展開が可能であることを示した。気候変動が流域水循環に大きく影響する近年、次々に生じる問題に対応する課題解決型の研究が重要となる。本論文で開発した流域管理手法は、様々な流域において活用できるほか、今後多くの展開に繋がるため意義がある。

- ① 地目別ピーク流出量の比 【ピーク比】  $W=Q_u/Q_{pa}$
- ② 地目別単位ピーク流出量の比 【単位ピーク比】  $W=Q_u'/Q_{pa}'$
- ③ 最大排水容量を超える地目別ピーク流出量の比 【超ピーク比】  $W=Q_{uo}/Q_{pao}$
- ④ 単位最大排水容量を超える地目別単位ピーク流出量の比 【超単位ピーク比】  $W=Q_{uo}'/Q_{pao}'$

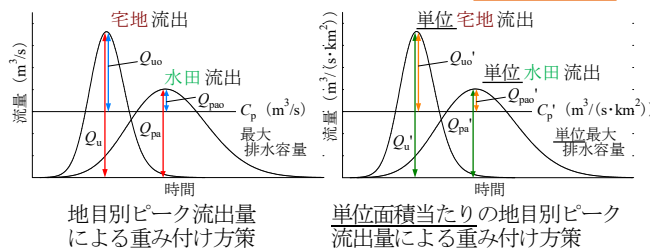


図1. 重み  $W$  (4種類) の算出

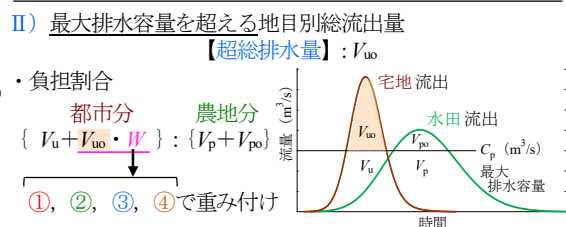
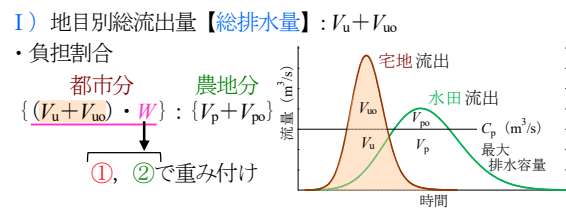


図2. 重み  $W$  を付ける対象流量 (2種類)

表 1. 重み  $W$  および単位面積当たりの負担割合の算出結果

最大排水容量	計画降雨		I) 総排水量に重み						II) 超総排水量に重み							
	降雨確率年	3日連続雨量 (mm)	I-1) 同等		I-2) ピーク比		I-3) 単位ピーク比		II-1) ピーク比		II-2) 超ピーク比		II-3) 単位ピーク比		II-4) 超単位ピーク比	
			$W$	割合*	$W$	割合*	$W$	割合*	$W$	割合*	$W$	割合*	$W$	割合*	$W$	割合*
529.9m <sup>3</sup> /s (農地防災)	200年	349.0	1.00	1.34	1.56	2.08	1.92	2.57	1.56	1.70	2.08	2.05	1.92	1.94	2.26	2.16
	50年	270.9	1.00	1.40	1.71	2.40	2.11	2.96	1.71	1.81	3.04	2.55	2.11	2.03	2.74	2.38
	30年	244.4	1.00	1.43	1.70	2.44	2.10	3.02	1.70	1.78	3.74	2.78	2.10	1.97	2.87	2.35
434.5m <sup>3</sup> /s (農業水利)	10年	190.2	1.00	1.56	1.77	2.78	2.19	3.43	1.77	1.91	7.29	4.36	2.19	2.10	3.31	2.60
	1年	65.5	1.00	1.96	3.86	7.53	4.77	9.31	3.86	-	-	-	4.77	-	-	-

\*割合は、農地分を1とした場合の都市側の単位面積当たりの負担割合。

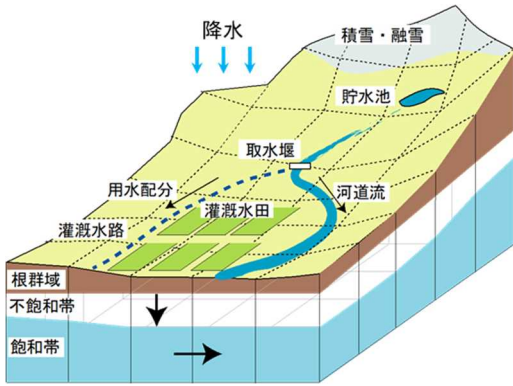


図 3. 分布型水循環モデルの概要

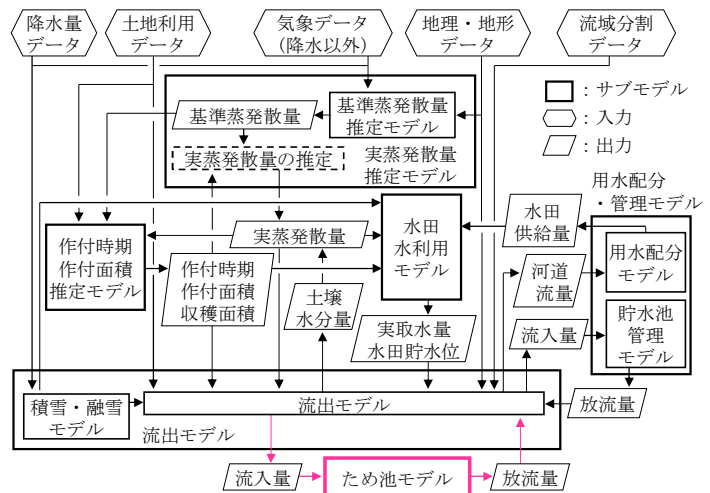


図 4. 分布型水循環モデルの構成

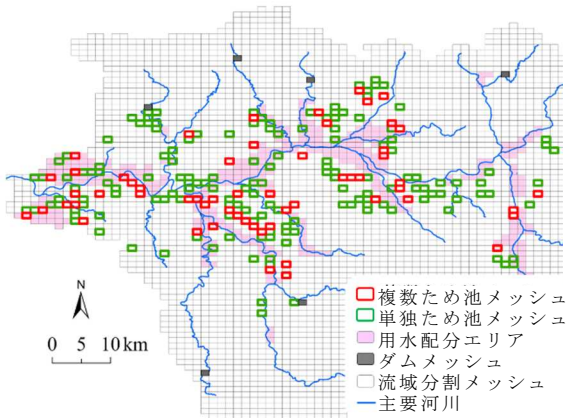


図 5. ため池メッシュの設定状況 (米代川流域)

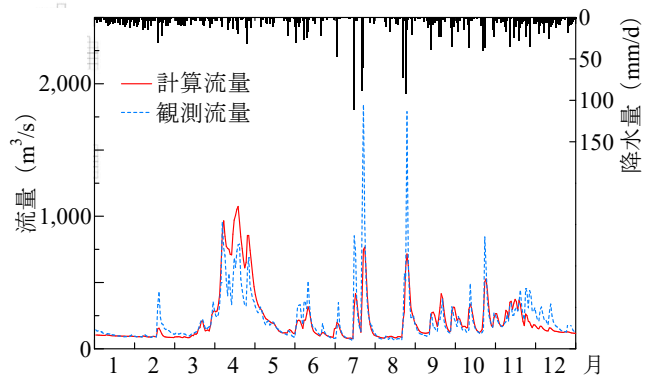


図 6. 計算流量と観測流量の比較 (二ツ井、2017)

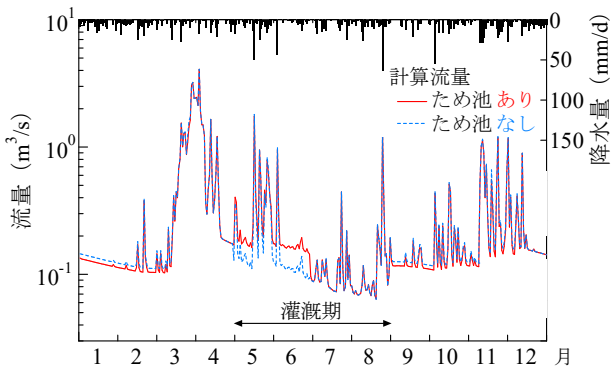


図7. ため池モデルの有無による計算流量の違い (平年 (2021年))

表2. 平年と渇水年およびため池モデルの有無による灌漑期間の総流量の比較

計算年	総流量		総流量 $a$ に占める増量分 ( $a-b$ ) の割合 ( $(a-b)/a \times 100$ )	総放流量 (ため池あり)
	ため池あり $a$ (千 $m^3$ )	ため池なし $b$ (千 $m^3$ )		
平年 (2021)	2,160	1,950	10	460
渇水年 (2015)	1,220	1,010	17	360
	(渇水年の割合) (56%)	(52%)	(170%)	(78%)

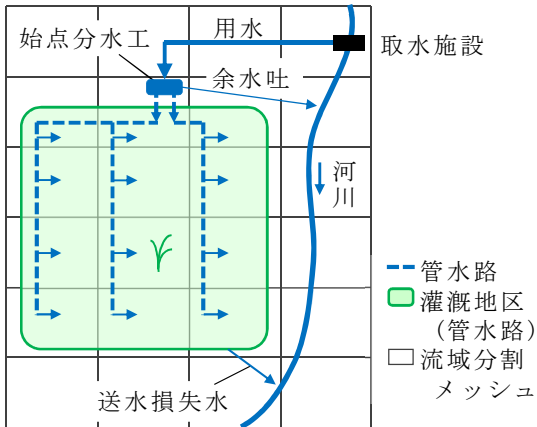


図8. 管水路による配水モデルの概念図

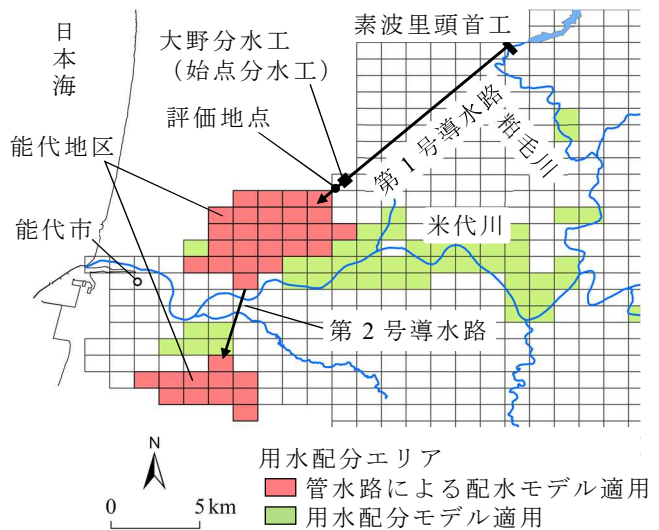


図9. 能代地区のメッシュ設定状況

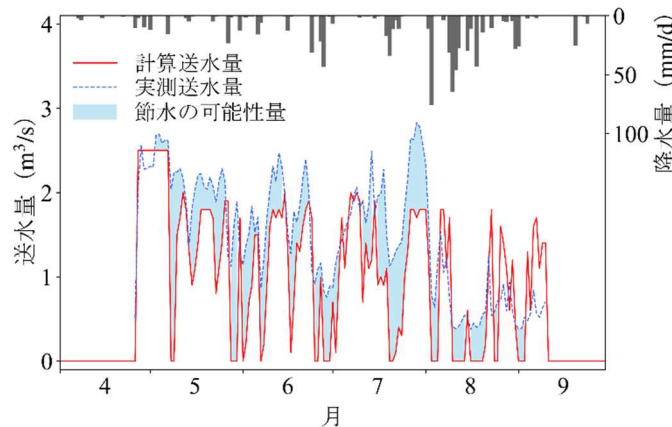


図10. 計算送水量と実測送水量の比較



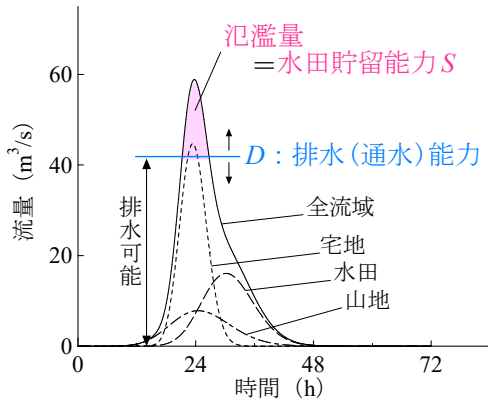


図 11. 全流域流出ハイドログラフ

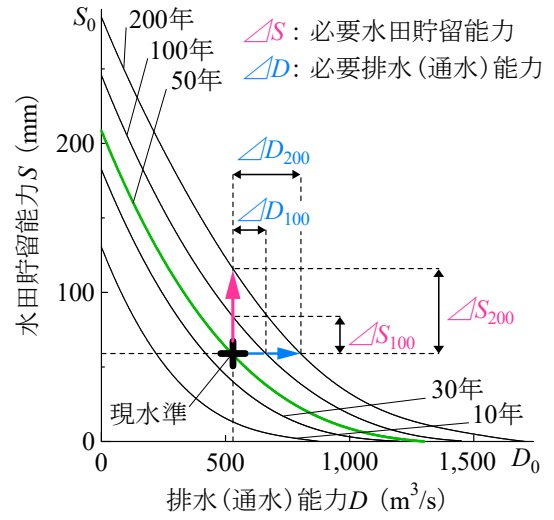


図 12. 西蒲原地区の D-S 関係図

表 3. 流域貯留機能評価法による評価結果。(a) 水田貯留能力を利用したソフト対策の結果、(b) ハード対策の結果および必要建設費用

(a)		水田貯留能力 S		必要水田貯留能力 ΔS	
ソフト対策の内容	確率年	貯留高 (mm)	貯留量 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	貯留高 (mm)	貯留量* (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
水田貯留能力の利用	50年(現状)	59	20.1	—	—
	100年	85	29.0	26 (ΔS <sub>100</sub> )	8.9 (ΔS <sub>100</sub> )
	200年	116	39.6	57 (ΔS <sub>200</sub> )	19.5 (ΔS <sub>200</sub> )
(b)		必要遊水地容量 ΔC*	排水(通水)能力 D	必要排水(通水)能力 ΔD	必要建設費用
ハード対策の内容	確率年	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(億円)
遊水地の新たな整備	100年	8.9 (ΔC <sub>100</sub> )	—	—	241
	200年	19.5 (ΔC <sub>200</sub> )	—	—	529
排水(通水)能力の増強整備	50年(現状)	—	529.9	—	—
	100年	—	666.3	136.4 (ΔD <sub>100</sub> )	1,004
	200年	—	811.6	281.7 (ΔD <sub>200</sub> )	2,074

\* 必要水田貯留能力 ΔS の貯留量と必要遊水池容量 ΔC は等しい。



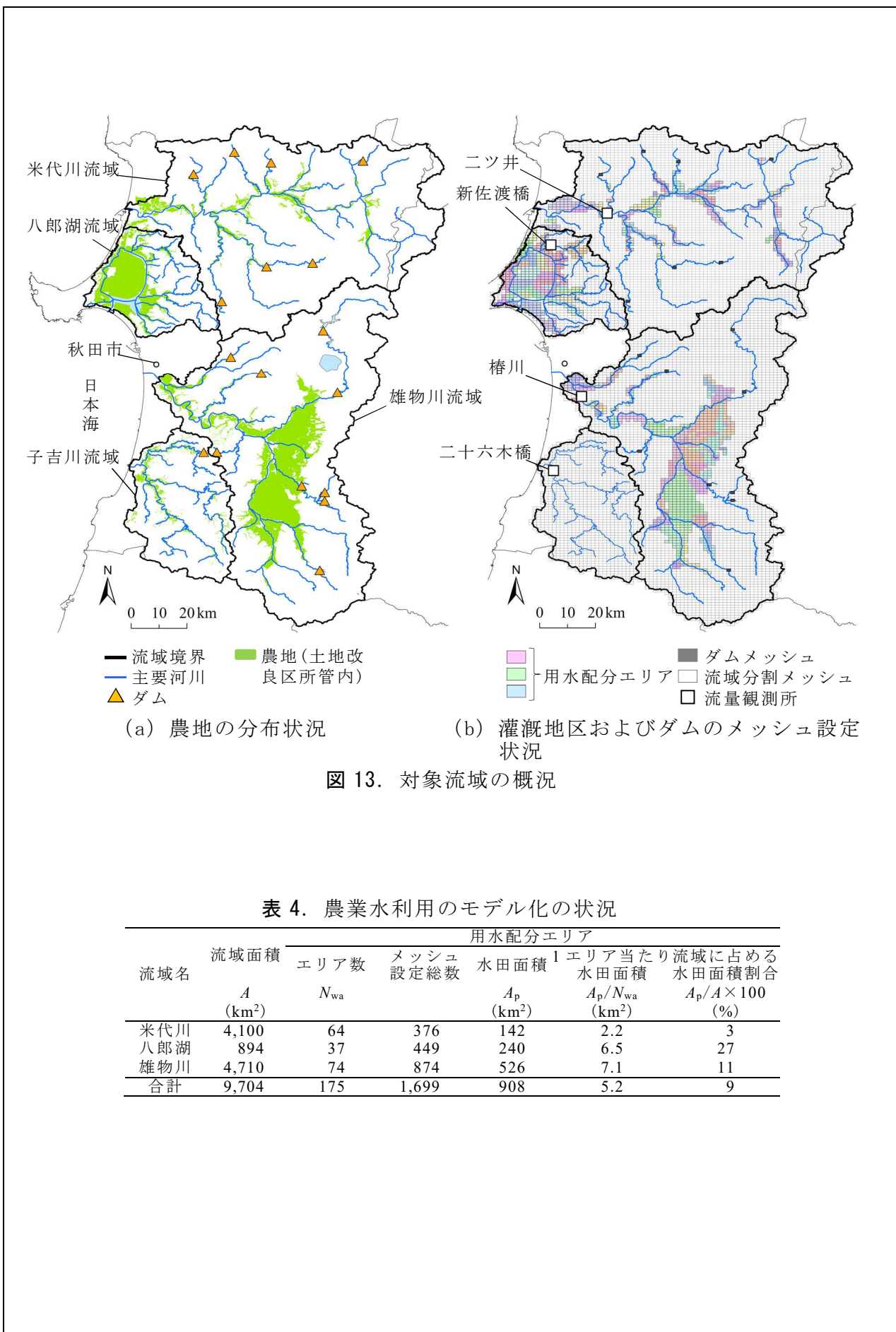


図 13. 対象流域の概況

表 4. 農業水利用のモデル化の状況

流域名	流域面積 $A$ ( $\text{km}^2$ )	用水配分エリア				
		エリア数 $N_{wa}$	メッシュ 設定総数	水田面積 <sup>1</sup> $A_p$ ( $\text{km}^2$ )	エリア当たり 水田面積 $A_p/N_{wa}$ ( $\text{km}^2$ )	流域に占める 水田面積割合 $A_p/A \times 100$ (%)
米代川	4,100	64	376	142	2.2	3
八郎湖	894	37	449	240	6.5	27
雄物川	4,710	74	874	526	7.1	11
合計	9,704	175	1,699	908	5.2	9

## 論文審査結果要旨

本研究は、水管理の課題を解決するための土台となる高度な基盤整備（ハード）のうえで展開可能な、イノベーション技術（ソフト）と流域管理手法を開発し提案することを目的としている。その結果、まず開発する技術として、それらを水管理・流域管理に利活用する、またはそこに関係する対象者の違いから、1) 都市住民と農村住民に向けた技術、2) 農業に携わる技術者に向けた技術、3) 同一流域に関係する様々な分野の技術者に向けた技術に3つに分類した上で、4つのイノベーション技術を提案した。得られた具体的な成果は以下ようになる。

まず都市と農村の協調による流域の適切かつ持続的な排水管理のため、都市側の流出実態を考慮した排水経費の負担割合の算定法を提示した。次に、渇水への対応にも繋がる農業水利用の視点から、水管理の高度化に向けた技術を開発・提案し、それらがほ場や流域で発揮する効果を分布型水循環モデルによる解析・評価から明らかにした。続いて、超過洪水に対応する流域治水の視点から、水田域の持つ遊水地機能を評価し、その機能を流域管理・流域治水の一環として利活用する手法を提案した。さらに、流域の農業水利用のモデル化を通して流域特性を明らかにし、その特性に応じて活用されるイノベーション技術を提示するとともに、流域の様々な問題への対応を含めた展開方向について論じた。最後に、これらの一連の研究により、洪水や渇水による農作物被害の低減はもとより、流域全体の防災や流域治水に寄与する流域管理手法を開発した。

その結果、提案された諸技術は、防災のための氾濫解析、種々の流出変化が流域に及ぼす影響評価、水管理手法の継承や ICT 水管理の最適設定の導出といった多様な展開が可能であることも明らかになった。近年は、水管理の現場で次々と発生する課題や問題に対応するための課題解決型の研究がますます重要となってきている。特に、農村地域では、高齢化による適切な水管理の継続懸念、近年の土地利用変化に伴う流出変化、流域全体の気候変動による極端現象（洪水と渇水）の増大、超過洪水がもたらす水災害の頻発化等の諸課題が発生しているが、それらに対応するための水管理に関する課題解決や気候変動を踏まえた総合的な流域管理手法の確立に繋がる。

令和5年12月21日に実施した先の予備審査では、都市側排水経費の負担割合（2.1～3.43）は具体的な数値はどのように決定されるのか、分布型水循環モデルの1kmメッシュでメッシュ内の斜面形状や流出特性を表す事ができるのか、米代川における検証結果の推定ずれの原因は何か、等の質疑が行われた。また、分布型水循環モデルでの要素としての推定値（水田湛水深、土壌水分量、蒸発散量、融雪量等）の追加で図化の可能性、ため池モデルでの実測値との比較、ため池流域への詳細なメッシュの組込み、ハード対策としての遊水地の代替法以外の経済評価法の追記、ため池と受益地の結び付け、超過洪水時の被害額の数値化等の検討可能性についての検討を行うこととしていた。令和6年2月16日実施の本審査会では、それらを踏まえて適切に学位論文の改訂が行われたことを確認した。また学位論文発表会では、研究成果や意義を分かり易く説明し、質疑に対して十分な回答を行った。

以上より、審査会では博士の学位を授与するに値すると判定した。

(研究科様式 博 7 添付)