

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

Proposal of river basin management and smart agriculture
based on integrated infrastructure-development technologies.

2024年3月

沢田 明彦

Akihiko Sawata

目次

要旨	vi
第 1 章 序章	1
1.1 研究の背景と進め方	1
1.2 既往の研究	1
1.2.1 都市と農村の協調による排水経費の負担割合に関する研究	1
1.2.2 農業水利用を組み込んだ分布型流出モデルの高度化に関する研究	2
1.2.2.1 広域に分布するため池のモデル化に関する研究	2
1.2.2.2 大区画ほ場における ICT 水管理のモデル化に関する研究	3
1.2.3 流域における水田域の持つ遊水地機能の活用法に関する研究	4
1.3 目的と方法	5
1.4 論文の構成	6
第 2 章 低平都市化水田域における公的な排水経費の負担割合の算定法	7
2.1 はじめに	7
2.2 対象地区の概要	7
2.3 地目別流出量・排水量の算定法	8
2.3.1 全流域ハイドログラフの簡易算定方法	8
2.3.2 地目別面積・雨水保留量曲線	10
2.3.3 流出ハイドログラフの算定	11
2.4 流出ハイドログラフを用いた排水経費負担割合の算定法	14
2.4.1 排水経費負担割合の算定方法	14
2.4.1.1 比較に地目別総流出量を使う場合（総排水量）〔I〕	14
2.4.1.2 比較に最大排水容量を超える地目別総流出量を使う場合 （超総排水量）〔II〕	16
2.4.1.3 単位面積当たり負担割合の算出方法	17
2.4.2 比率算出法の適用条件および算定結果	17
2.4.2.1 適用条件	17
2.4.2.2 算定結果	17
2.4.3 考察	18
2.4.3.1 各比率算出法の比較および最良法の選定	18
2.4.3.2 降雨確率年の選定	20
2.4.3.3 最大排水容量（排水施設の整備水準）の選定	20
2.4.3.4 都市側への負担割合の提案	20

2.5	小括	21
第 3 章	分布型水循環モデルへのため池群要素の導入と流域の農業水利用に及ぼす影響の評価	22
3.1	はじめに.....	22
3.2	対象流域とデータ	22
3.2.1	米代川流域の概要.....	22
3.2.2	ため池の受益面積および集水面積等の特徴	23
3.2.3	水文・気象データ.....	24
3.2.4	土地利用および農業水利データ	24
3.3	分布型水循環モデルにおけるため池のモデル化.....	24
3.3.1	分布型水循環モデルの概要.....	24
3.3.2	ため池のモデル化.....	25
3.3.2.1	管理実態を統一した管理規定の設定	25
3.3.2.2	ため池の水収支	26
3.3.2.3	受益地との関連	27
3.4	改良モデルの米代川流域への適用結果とその考察.....	28
3.4.1	改良モデルの適用と検証.....	28
3.4.2	ため池が小規模支流域の農業水利用に及ぼす影響の評価および考察.....	29
3.5	小括	32
第 4 章	分布型水循環モデルへの大区画ほ場・管水路・ICT 水管理の要素導入と農業水利用の評価.....	34
4.1	はじめに.....	34
4.2	秋田県の大区画ほ場における課題	34
4.2.1	調査方法	34
4.2.2	調査結果と考察	34
4.2.2.1	地形条件別の課題（平坦地と中山間地）	34
4.2.2.2	配水システム別の課題（供給主導と需要主導）	36
4.2.2.3	調査結果のまとめ	36
4.3	モデルを活用した農業水利用の評価と節水効果および現地実証との特性比較	36
4.3.1	モデル化による農業水利用の評価と現地実証の手法	36
4.3.1.1	大区画ほ場・管水路・ICT 水管理のモデル化.....	36
4.3.1.2	現地実証の手順およびモデル化実証との相違点	38
4.3.2	対象地区と実証項目	38
4.3.2.1	モデル化実証	38
4.3.2.2	現地実証	39

4.3.3	モデルの適用による節水効果と現地実証の結果およびその考察.....	40
4.3.3.1	モデル化実証.....	40
4.3.3.2	現地実証.....	42
4.4	小括.....	44
第 5 章	水田域の持つ遊水地機能の超過洪水に対するソフト対策としての活用法.....	45
5.1	はじめに.....	45
5.2	研究方法.....	45
5.2.1	対象地区の概要.....	45
5.2.2	水田域の持つ洪水防止機能のマクロ評価法.....	45
5.2.3	豪雨に伴う超過洪水に対する遊水地機能の評価法.....	47
5.3	結果.....	48
5.3.1	対象地区への評価法の適用.....	48
5.3.2	豪雨に伴う超過洪水に対する遊水地機能評価.....	49
5.4	考察.....	50
5.5	小括.....	52
第 6 章	流域特性に応じたイノベーション技術の活用と展開方向.....	53
6.1	はじめに.....	53
6.2	モデル化を通じた流域特性の評価と活用するイノベーション技術.....	53
6.2.1	対象流域.....	53
6.2.2	対象流域へのモデルの適用と検証.....	56
6.2.3	流域特性の評価と活用するイノベーション技術およびその考察.....	57
6.3	課題と展開方向.....	60
6.4	小括.....	61
第 7 章	終章.....	63
7.1	各章のまとめ.....	63
7.2	全体の結論と今後の展開.....	64
	引用文献.....	66
	謝辞.....	72

図目次

Fig. 2.1	西蒲原地区の概況	7
Fig. 2.2	指数関数近似式を用いたハイドログラフ	8
Fig. 2.3	ハイドログラフの合成	10
Fig. 2.4	西蒲原地区の地目別雨水保留量曲線	11
Fig. 2.5	有効降雨強度と降雨継続時間および洪水到達時間との関係	13
Fig. 2.6	重み付けのための対象流量	15
Fig. 2.7	地目別ピーク流出量による重み付け方策	15
Fig. 2.8	単位面積当たりの地目別ピーク流出量による重み付け方策	16
Fig. 2.9	西蒲原地区全体の地目別流出ハイドログラフ	18
Fig. 2.10	農地転用面積に対する単位面積当たりの負担割合	21
Fig. 3.1	米代川流域の概況	22
Fig. 3.2	ため池の受益面積と貯水量の分布	23
Fig. 3.3	ため池の流域面積の分布	23
Fig. 3.4	分布型水循環モデルの構成	24
Fig. 3.5	ため池メッシュ内の計算手法の概念図	26
Fig. 3.6	ため池メッシュの設定状況（米代川中流部）	28
Fig. 3.7	計算流量と観測流量の比較（二ツ井，2017年）	29
Fig. 3.8	合津川流域の概況および評価地点	30
Fig. 3.9	ため池モデルの有無による計算流量の違い（2021年（平年））	31
Fig. 3.10	ため池モデルの有無による計算流量の違い（2015年（渇水年））	31
Fig. 4.1	管水路による配水モデルの概念図	37
Fig. 4.2	能代地区の概況	39
Fig. 4.3	高野尻地区の実証ほ場と対照ほ場	40
Fig. 4.4	能代地区のメッシュ設定状況	40
Fig. 4.5	能代地区の平均の計算水田湛水深（2022年）	41
Fig. 4.6	計算送水量と実測送水量の比較（2022年）	42
Fig. 5.1	ハイドログラフの合成	46
Fig. 5.2	D (排水能力)- S (貯留能力)関係図	47
Fig. 5.3	西蒲原地区の D - S 関係図	49
Fig. 6.1	対象流域の概況	53
Fig. 6.2	八郎湖流域の概況	54
Fig. 6.3	計算流量と観測流量の比較（椿川，2020）	57
Fig. 6.4	ため池の分布状況	59

表目次

Table 2.1	西蒲原地区内の地目別面積.....	10
Table 2.2	地目別流出ハイドログラフの算出に用いる諸量.....	12
Table 2.3	重み (W) および単位面積当たりの負担割合の算出結果.....	18
Table 3.1	ため池メッシュの分類.....	28
Table 3.2	平年と渇水年およびため池モデルの有無による灌漑期総流量 (5~8月)の比較.....	31
Table 4.1	秋田県の大区画ほ場における課題.....	35
Table 4.2	遠隔操作型給水栓による無効放流量の削減効果.....	42
Table 4.3	遠隔操作型給水栓による水管理時間の削減効果 (ほ場1筆当たり).....	43
Table 5.1	流域貯留機能評価法による評価結果.....	50
Table 6.1	八郎湖流域の集水域.....	55
Table 6.2	モデルの検証結果.....	56
Table 6.3	農業水利用のモデル化の状況.....	57
Table 6.4	対象流域別のため池の状況.....	59

要旨

はじめに

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）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次の3つに分類される。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である。

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。

開発した水管理イノベーション技術と流域管理手法の概要

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。さらにその方法を水稻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、

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。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。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。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。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、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。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、現地における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。そこでは、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。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。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。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同時に、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。

全体の結論と今後の展開

本論文では、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、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。

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。

第 1 章 序章

1.1 研究の背景と進め方

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）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次の 3 つに分類される。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である。

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。

1.2 既往の研究

1.2.1 都市と農村の協調による排水経費の負担割合に関する研究

都市化が進行する地域において、排水機場および用排水路等の土地改良施設が有する都市排水機能は地域の生活や生命および財産を守るものとして、その公共性が地域社会に不可欠なものとなっている。しかし、現状では排水施設の管理費の負担割合は農業者側に偏っており非農業者側との公平さを欠くことから、流域の排水管理の適切かつ持続的なあり方が問われている。

土地利用変化の著しい低平水田地帯においては、市町村などの公的機関に基幹排水施設等の維持管理費の一部負担が求められるようになってきたが（増本，1998a），これに関わる農業者側と非農業者側の適正な負担割合の指標は未だに明らかにされていない。特に低平域からの強制排水が必要であり都市化が著しい地域では、農業者に偏った排水経費の負

担は農家経済に非常に深刻な影響を与えている。例えば、低平水田地帯にある西蒲原土地改良区の現状をみると、令和2年度の排水経費負担の実績額から算出した負担割合は、国17.9%、県18.3%、市町村15.1%、土地改良区48.7%となっており（西蒲原土地改良区、2021）、公的負担の見直しが強く求められている。

これまでに、増本・角屋（1995）は、低平地の都市化に対処する合理的な排水施設計画のための基礎研究の一部として、出水ハイドログラフの関数近似化により、対象流域の地目別の流出ハイドログラフを簡易に導出する算定法を提案し、これを様々に応用できることの一例としてポンプ能力を考慮した流域の必要遊水池容量の推定を行ったが、排水経費の負担割合の算定については言及していない。

一方、都市化が進む地域における農業用水利施設の多面的な役割の定量評価を目的に、地目別等の流出成分を可視化する研究として、吉川・高野（2020）は、洪水時における排水中に含まれる地目別流出成分を可視化するモデルを開発し、亀田郷地区に適用のうえ、農業用排水機場の吐出量に占める農地・非農地の成分割合を示した。加えて、瀧川ら（2021）は、既存の内水氾濫解析モデルを白根郷地区に適用し、湛水構成成分を3つに区分し見える化することにより、湛水発生要因を明らかにしたうえで、湛水軽減に効果的な排水対策の提案を行っている。また、農業用水利施設の排水経費負担の現状を背景に、瀧川ら（2018）は、農業用水利施設の維持管理負担が厳しい状況におかれているとし、完全機械排水区の輪中地帯を対象とした水収支分析から、地区外への排水量に占める非農用地からの流出が4割程度であることを示した。これらの検討では、地区排水において都市側と農業側の適切な役割分担を検討する必要があると指摘しているものの、排水経費の負担割合の指標については検討していない。

さらに、行政の動きとして農林水産省では、排水機場の維持管理費に係る市町村負担分の地方財政措置に関連し、農地・非農地割合の算定方法について、流出形態を考慮しつつ効率的かつ簡便に区分するための簡易算定式を令和2年度から例示している（農林水産省農村振興局整備部設計課、2021）。しかし、この簡易算定式は面積割合から維持管理費を案分するものであり、農地と非農地のピーク流出係数による重み付けをしているだけで、実情に即した算定法には到達していない。一方でこれらのことから、都市と農村の協調による負担割合の算定手法について近年、社会的必要性の高いことが示唆される。

1.2.2 農業水利用を組み込んだ分布型流出モデルの高度化に関する研究

1.2.2.1 広域に分布するため池のモデル化に関する研究

農業水利用において欠くことのできないため池は、農業用水源に恵まれない地域の農地を潤すためや渇水への備えとして古くから築造され、全国に約15万4千箇所存在している。これらは農業用水の確保以外にも、生物の生息場所の保全や、洪水調節・土砂流出防止などの多面的な機能を有することから地域の資源となっている（農林水産省、2022a）。

一方、近年の気候変動に伴う豪雨の多発により、ため池の被災に伴う破堤が引き起こす災害の発生が懸念されている。これの防止に向け農林水産省は、ため池の適正な管理及び保全体制の整備を目的として、「農業用ため池の管理及び保全に関する法律」を令和元年7月に施行した。この法律に基づき、全国の都道府県において作成されたため池データベースによると、秋田県の農業用ため池は令和3年3月末時点で2,659箇所存在し、このうち

の 1,018 箇所が防災重点農業用ため池（下流に人家や公共施設等がある防災上重要なため池）に指定されている（秋田県農林水産部農地整備課，2021）。この数は都道府県別で中位よりやや上となる 18 番目の箇所数の多さであり（農林水産省，2022b），米どころ秋田において，ため池は欠かせない取水源の一つであることが分かる。

このように防災上重視され，地域の資源として広域に数多く存在し流出量を貯留調整する機能を持ったため池は，流域の水循環を定量化するうえで不可欠な要素であるが，そのモデル化は貯留関数法等による流出解析が主で（吉迫ら，2019），流域内に分布する全てのため池に長期間流出を対象として分布型の流出モデルを適用した例は見当たらない。

これまで分布型の流出モデルとして，モンスーンアジア流域を対象に農地水利用を考慮した分布型水循環モデルが構築されている（谷口ら，2009a，2009b，2009c；Masumoto et al.，2009）。吉田ら（2012）はこのモデルを高度化し，日本の広域水田灌漑地区の水循環と，貯水池運用モデル（堀川ら，2011）を組み込んだ用水配分・管理モデルを実装した分布型水循環モデル（DWCM-AgWU：Distributed Water Circulation Model with Agricultural Water Uses）を構築した。また，工藤ら（2014）はそのモデルをさらに改良し，大規模な貯水池による水田灌漑が支配的で受益地が複数のメッシュに跨るタイ東北部ムン川流域に適用した。これらの中では，大規模な貯水池（ダム）の水管理がモデル化されており，ため池は広域に多数分布する中・小規模の施設としてみなされることからその要素は組み込まれていない。

一方，分布型水循環モデルは農業水利用の複雑な過程の定量化や各メッシュでの多種の情報出力が可能のため，多方面での活用が展開されている。例えば，日本全域を対象として気候変動の農業水利用への影響の評価法を提案した研究（Kudo et al.，2017）や，取水・還元が連続する鬼怒川流域において，水循環モデルの適用精度のための各種データのスクリーニング手法を検討して方向性を示した研究（宮島ら，2018）などがある。加えて，少雪が信濃川流域の渇水リスクに及ぼす影響を評価した研究（吉田ら，2021）や，全国の豪雨災害リスクをリアルタイムで予測するシステムを構築した研究（皆川ら，2021）がある。しかし，これらのいずれの研究においてもため池の要素は検討されていない。

1.2.2.2 大区画ほ場における ICT 水管理のモデル化に関する研究

農業現場ではこれまでに，水管理の効率化および農地の生産性向上のための大区画ほ場整備が進められてきた。それに加えて近年，スマート農業およびその 1 つである ICT（Information and Communication Technology）を活用した水管理（以下，ICT 水管理）の技術開発が進み実用段階に入ってきたとして，これらを実装可能とする基盤整備が求められている（農林水産省，2021）。これまでに整備されたおよび今後整備される大区画ほ場は，ICT 水管理をはじめとしたスマート農業の展開の場としてより一層期待されている。

このような中でほ場レベルの ICT 水管理に着目すると，水田における水管理の省力化や農業用水の節水を可能とする遠隔操作型給水栓の開発・普及が加速的に展開されており，その効果の検証（若杉・鈴木，2017）や導入に適した農地条件等の整理（新村・鈴木，2022）により知見が蓄積されてきたものの，まだ発展途中である。また，大区画ほ場で ICT 水管理をはじめとしたスマート農業を展開する際の課題についての報告は少ない。一方，管水路による配水システムは，開水路に比べて合理的な水配分が可能となり無効放流を減少させる制御ができるため（農林水産省農村振興局，2021），管水路に ICT 水管理を組合せて水

管理を高度化した場合、開水路より高い効果が得られる。

これらから今後の ICT 水管理の展開を見据えたとき、大区画ほ場において管水路と ICT 水管理を組合せて広域に水管理を高度化した場合の評価が必要になる。評価手法の 1 つとして実際の現地における実証研究があげられるが、広域の ICT 水管理という現地での設定が困難な条件であることから、これまでに類似の実証研究の事例は見当たらない。そのため、現地実証で設定困難な要素をモデル化し、それを分布型の流出モデルに実装して評価を行うことが有用な手法となる。

1.2.3 流域における水田域の持つ遊水地機能の活用法に関する研究

水田を主体とする農地は、都市の水災害を減災する洪水防止機能を有しているといわれており（増本，2010b；2010c），排水機場および用排水路等の土地改良施設が有する都市排水機能と共に，その公共性は地域社会に不可欠なものとなっている。一方で，流域における適正な排水管理の実施にも関わらず，近年の気候変動の影響による豪雨の増加に伴う水災害の頻発化が懸念されている。これに対応するため，流域全体であらゆる関係者が協働して取り組む「流域治水」の機運が高まっている。これについて島谷・皆川（2021）は，緑を増やすことによる新たな治水対策手法は景観や生物の多様性を向上させ，さらに農業や林業の活性化などに貢献する可能性を秘めた方策であり，国土全体のあり方を治水の観点から問う国土再編の取り組みであると報告している。

農林水産省は流域治水の取り組みの推進が重要であるとし，2021 年 3 月に閣議決定された土地改良長期計画において（農林水産省，2021），田んぼダムに取り組む水田の面積を約 3 倍以上とすることを施策目標として明記した。田んぼダム以外にも，農村地域が流域治水に果たす役割および貢献の可能性は極めて大きいとも考えられる。例えば早瀬（2021）は想定外の豪雨に対し農村地域の低地に余剰水を遊水・貯留させ，下流都市域を減災する必要性を議論している。また，佐藤（2022）は水害発生条件を河川整備の視点から分析したうえで，流域治水への農地部門の貢献可能性に言及している。一方，川越・丸田（2021）は国土規模の河道外に内在する貯水ポテンシャルマップの開発により，水田貯留や都市公園貯留の貯水可能量を推定した。そこでは水田の貯水ポテンシャルの大きさを評価し，その利活用方法を提示している。加えて，増本（1998b）が示すように実際に流域の排水能力を上回るような洪水が発生した場合には，用排水路等の農業水利施設を含めた水田域が，流域レベルでマクロに見た場合に洪水を貯留するバッファとしての遊水地機能を果たしている。このような水田の有する洪水緩和機能の有効活用を意識した，流域治水に向けたマクロな流域管理の考え方や対応策およびそれらの定量的評価が求められているものの，明確で具体的な解析例は決して多くはない。

これまでに，水田の有する洪水緩和機能や貯留特性の研究は様々な着眼点から数多く行われている。例えば，全国規模で水田の貯水可能容量を試算したもの（志村，1982）に加え，水田の耕作放棄が流出特性に及ぼす影響を流出モデル解析や実測調査により評価した研究（早瀬，1994；千葉ら，1997；増本ら，1997；増本ら，2003）などがある。また，傾斜地の水田を対象に水収支から貯留特性を評価した研究（大西ら，2004）や，特に低平水田域を対象にしたものとして，貯留域を水田タンクで表現してモデル解析を行った研究（早瀬・角屋，1993a，1993b）などがある。さらに，水田の多面的機能の重要性を示す中で洪

水緩和機能を評価した研究 (Huang et al., 2006 ; Kim et al., 2006 ; Matsuno et al., 2006) や、水田域の持つ洪水防止機能を流域レベルでマクロに評価した研究 (Masumoto et al., 2006 ; 増本, 2010b, 2010c) などがある。

また、水田自体が本来有する洪水緩和機能に着目した評価とは異なり、水田の洪水調節機能を人為的操作により発揮させる点に特徴があるものとして、田んぼダムの導入や評価に関する研究がある (吉川ら, 2009 ; 宮津ら, 2012 ; 皆川・宮津, 2022)。さらに、これらの実際の導入による効果を経済評価した研究 (吉川ら, 2011 ; 宮津ら, 2013)、次いで、潜在的な洪水被害軽減効果を日本全域で推定した研究 (柳原ら, 2021) などがあり、それらの多くで田んぼダムが洪水緩和に有効であることが報告されている。しかし、これらの研究はいずれも水田の貯留特性や流出場からの排水抑制に関するものであり、下流側流域や河川が持つ通水・排水能力を上回る流出が発生した場合に、水田域を中心とした流域が持つ遊水地機能の評価や、さらに洪水防止や被害との相互作用に対する検討は行われていない。

一方、増本・角屋 (1995) は排水施設計画のための基礎研究として簡易的な流出ハイドログラフの関数近似化を提案し、これの応用の一つである排水ポンプの能力を考慮した流域の必要遊水池容量の推定方法の提案を行ったが、遊水地機能の定量的評価や活用法については言及していない。

1.3 目的と方法

前述のような背景を踏まえ、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」こととする。

この目的の達成のため、以下の方法により研究を進める。

- 1) 都市住民と農村住民に向けたイノベーション技術として、「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」を提案する。この算定法を低平都市化水田域である地区に適用し、排水施設の排水経費に対する都市側の適正な負担割合を算定する手順を具体的に示すとともに、負担割合の有用な試算値を案出する。
- 2) 農業に携わる技術者に向けたイノベーション技術の1つ目として、「流域内に分布する全てのため池のモデル化」を提案する。まずため池モデルを開発し、それを分布型水循環モデルに実装した改良モデルを構築する。次に、構築したモデルをため池利用の多い流域に適用してモデルを検証するとともに、ため池が流域の農業水利用に及ぼす影響の評価を行う。
- 3) 農業に携わる技術者に向けたイノベーション技術の2つ目として、「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」を提案する。はじめに、既存の大区画ほ場における水管理の課題を聞き取り調査等により明らかにする。次にそれらの課題解決および農業水利用の高度化のさらなる展開に向け、大区画ほ場において管水路と ICT 水管理を備えた灌漑地区をモデル化し、それを活用して農業水利用の評価を行う。さらに、ICT 水管理の効果について現地実証を行い、モデル化による評価との手法およ

び特性の違いについて述べる。

- 4) 同一流域に関係する様々な分野の技術者に向けた技術として、「水田域の持つ遊水地機能のソフト対策としての活用法」を提案する。まず超過洪水に対する水田貯留能力の定量化により、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する。次に、その手法を低平都市化水田域へ適用し評価を行う。それらを受け、水田域の持つ貯留ポテンシャルを用いた流域管理・流域治水としてのソフト対策の活用法を提案する。
- 5) 上記のように提案した技術は流域の特性に応じて活用されるため、はじめに特性の異なる流域を対象とし、農業水利用のモデル化を通して流域特性を評価する。次に、この評価により明らかにした流域特性に応じて活用すべき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。

1.4 論文の構成

この章ではここまで、本研究の背景と目的および方法について述べた。次章以降は、第2章～第5章で各イノベーション技術について述べる。

第2章では、「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」について、算定の手順および負担割合の有用な試算値を提示し、都市と農村の協調による流域の適切な排水管理のあり方を示す。

第3章では、「流域内に分布する全てのため池のモデル化」により、開発したモデルを活用してため池が農業用水の供給に貢献していることを定量的に明らかにする。

第4章では、「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」により、農業用水の節水効果について評価を行い、渇水への対応にも繋がる農業水利用の高度化展開の方向性について述べる。

第5章では、「水田域の持つ遊水地機能のソフト対策としての活用法」により、水田域の持つ遊水地機能を流域管理の一環として利活用する手法を示し、農村地域が流域治水に果たす役割を論じる。

さらに、第6章では第2章～第5章の提案を受け、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、その特性に応じ活用すべきイノベーション技術を提示するとともに展開方向を述べる。

最後に第7章では、全体の結論および今後の展開について述べる。

第 2 章 低平都市化水田域における公的な排水経費の負担割合の算定法

2.1 はじめに

本章では都市住民と農村住民に向けたイノベーション技術として、「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」を提案する。

この算定法は、都市と農村の協調による流域の適切な排水管理に必要となる、排水施設の排水経費に対する都市側の流出実態を考慮した負担割合を導くための算定法である。負担割合は、関数近似化した流出ハイドログラフから求めた地目別流出量を根拠に算定する。この手法を日本有数の穀倉地帯であり低平都市化水田域である西蒲原地区に適用し、算定方法の手順を具体的に示すとともに、負担割合の有用な試算値を案出する。

2.2 対象地区の概要

西蒲原地区（Fig. 2.1）は新潟県の中央に位置し、新潟市を含む 3 市 1 村にまたがる流域面積約 350km²、農地面積約 200km²の水稻作が盛んな日本有数の穀倉地帯である。

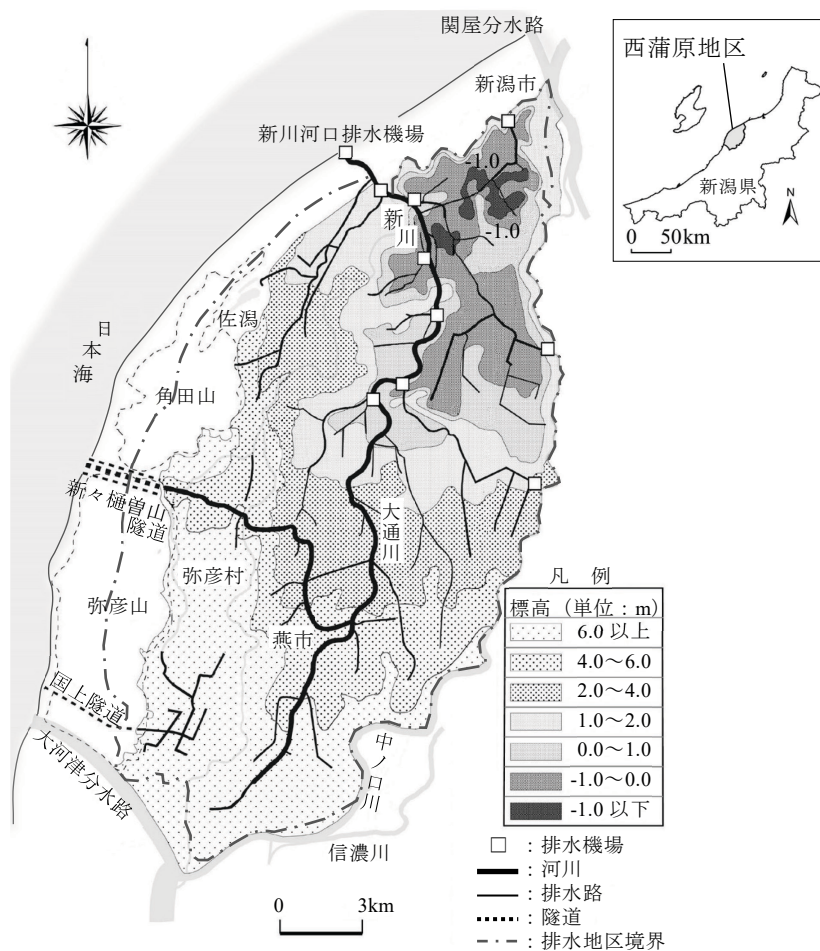


Fig. 2.1 西蒲原地区の概況

対象地区は標高 1.0m 以下の土地が全体の 1/3 を占め、常時においてもポンプによる強制排水が欠かせない地区である。地区内の排水施設は主に平成 15 年度事業完了の国営西蒲原排水農業水利事業（以下、国営事業）により整備され、計画排水量は 529.9m³/s となっている。このような土地改良事業は基本的に 10 年確率降雨に対する排水整備水準で実施されるが、この国営事業は“農業用排水事業と併せ行う農地防災事業”として、農地の防災のため 50 年確率降雨に対する排水整備水準で実施されている。また、近年では都市化が著しく、半世紀で約 2 割の農地が宅地化されている（西蒲原土地改良区，2007）。

2.3 地目別流出量・排水量の算定法

2.3.1 全流域ハイドログラフの簡易算定方法

流域全体の最下流にある排水機場地点において排水量を地目別に分離することは困難なことから、河道あるいは排水路への流入前で、豪雨時の氾濫等を考慮せず、純粹に流域内の各地目からの流出に着目し、これらが最下流に到達する場合の全流出量を考える。ここで、地目別流出量・排水量の算定法は、計画降雨に対する関数近似化された流出量ハイドログラフを用いる（増本・角屋，1995）。ハイドログラフの関数化に必要なデータは、①入力となる降雨データ（施設設計段階の計画降雨）、②対象流域の地目別面積、③地目別ピーク比流量、④流出遅れ時間、⑤地目別総流出量（地目ごとの有効雨量に一致）である。⑤の値は地目別の雨水保留量曲線から算定できる。機械排水主体の低平水田地帯における地目別の雨水保留量曲線は、特定の地目が大半を占める排水ブロックにおいて、過去の降雨量に対するポンプ排水量を分析して作成する。

ハイドログラフの波形を表現するための近似式として、指数関数型か代数関数型の関数式が適切なことが示されているが（増本・角屋，1995）、ピーク流出量および洪水到達時刻が的確に表され、かつ関数に係わるパラメータが 1 つで扱いが比較的容易である式 (2.1) の指数関数型式 (Fig. 2.2) に基づいて、地目別のハイドログラフを合成する手法を用いる。

$$Q(t) = Q_p (t/t_p)^s \exp\{(1-t/t_p)s\} \quad (2.1)$$

ここに、 $Q(t)$ ：時刻 t における地目別比流量 (m³/(s・km²))、 t ：時間 (h)、 Q_p ：地目別ピーク比流量 (m³/(s・km²))、 t_p ：降雨開始から流量ピークまでの時間 (h)、 s ：定数である。

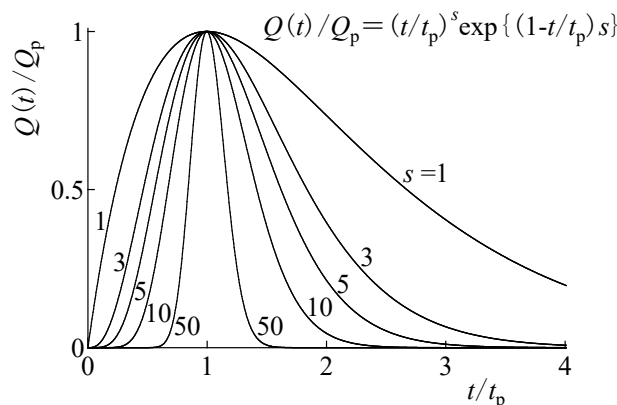


Fig. 2.2 指数関数近似式を用いたハイドログラフ（図中の関数式は式 (2.1) 参照）

1) D 時間の T 年確率雨量が与えられると、流域に固有の雨水保留量曲線（機械排水区における算定の仕方は 2.3.2 にて後述）を利用して有効雨量が推定でき、地目別総比流出量 V (m^3/km^2) が定まる。また、雨水保留量曲線が得られていない流域を対象にする場合は、地目別に作成された雨水保留量曲線であれば代用してもよい（例えば、農林水産省農村振興局（2019）の図-9.3 に示された地目別の雨水保留量曲線）。

2) 確率雨量に対して、土地利用ごとのピーク比流量 Q_p ($\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$) を推定する。このピーク比流量は別途流出モデルを用いて推定するのが望ましいが、合理式により簡易的に推定することも可能である。一方、これらのピーク比流量 Q_p と確率年 T (year) の間に関係 $Q_p = aT^b$ を当てはめておくと便利である。

3) 降雨波形のピーク位置 p ($0 < p < 1$) を仮定するとピーク雨量発生時刻 t_2 は次式で表される。

$$t_2 = pD \quad (2.2)$$

ここに、 t_2 : ピーク雨量発生時刻 (min), p : 降雨波形のピーク位置 ($0 < p < 1$), D : T 年確率降雨の継続時間 (h) である。

4) ハイドログラフのピーク流量発生時刻 T_p を設定するため、ここでは簡単に、洪水到達時間 t_p はピーク雨量発生時刻 t_2 とピーク流量発生時刻 T_p との差 t_L の 2 倍であると仮定し以下の式を用いる。なお、洪水到達時間は角屋・福島の式を採用する。

$$t_p = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (2.3)$$

$$t_L = t_p / 2 \quad (2.4)$$

$$T_p = t_L + t_2 \quad (2.5)$$

ここに、 t_p : 洪水到達時間 (min), C : 定数, A : 流域面積 (km^2), r_e : 洪水到達時間内の平均有効降雨強度 (mm/h), t_L : ピーク雨量発生時刻 t_2 とピーク流量発生時刻 T_p との差 (min), T_p : ピーク流量発生時刻 (min), t_2 : ピーク雨量発生時刻 (min) である。

5) Q_p と t_p より、地目別総比流出量 V を基準化し、式 (2.1) の s を決定する (s の決定については 2.3.3 にて後述)。ここで、定数 s の値としては増本・角屋 (1995) に整理されている数値が参考になる。

6) 流域内各地目の面積から、地目別のハイドログラフを求める。また、流出遅れ t_L を考慮してそれらを合成することにより、全流域からのハイドログラフが導出される (Fig. 2.3)。一連の合成方法は、以下の式で示される。

$$\left. \begin{aligned} Q_i(t) &= q_i(t) A_i \\ Q_{ai}(t) &= \sum_{i=1}^n Q_i(t + t_{Li}) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

ここに、 $Q_i(t)$: 時刻 t における地目 i の全流出量 (m^3/s), i : 地目番号, t : 時間 (h), $q_i(t)$: 時刻 t における地目 i からの流出比流量 ($\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$), A_i : 地目 i の面積 (km^2), $Q_{ai}(t)$: 時刻 t における全地目からの全流出量 (m^3/s), t_{Li} : 地目 i における雨量と流量のピーク時刻の差 (h), ただし $Q_{ai}(t) \geq 0$ である。

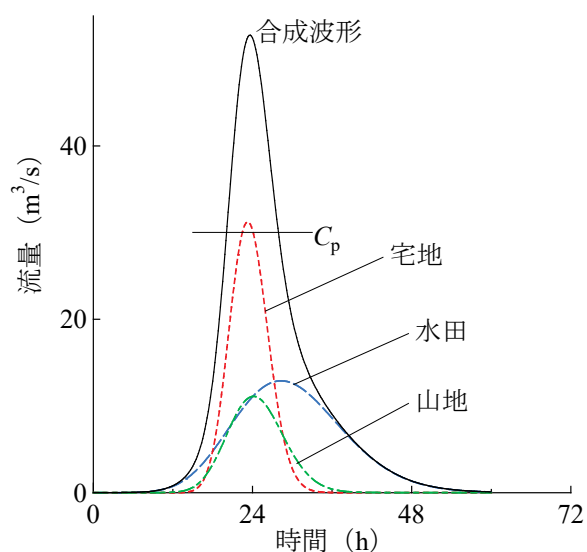


Fig. 2.3 ハイドログラフの合成

7) 排水能力と氾濫量の関係について、合成流出ハイドログラフ上で、最大排水容量（ポンプ場では最大ポンプ容量）を超える流量の総和が、氾濫量となる（Fig. 2.3 の $Q_{ai}(t) \geq C_p$ となる範囲の総流出量）。

$$V_s = \sum_{Q_{ai}(t) \geq C_p} (Q_{ai}(t) - C_p) \quad (2.7)$$

ここに、 V_s ：氾濫量（ m^3 ）、 $Q_{ai}(t)$ ：時刻 t における全地目からの全流出量（ m^3/s ）、 t ：時間（h）、 C_p ：最大ポンプ容量（ m^3/s ）である。

2.3.2 地目別面積・雨水保留量曲線

各地目の面積は地形図や国土数値情報等から求められるが、今回は **Table 2.1** を用いる。

Table 2.1 西蒲原地区内の地目別面積

地目	面積 (ha) *
水田	17,883 (51.0%)
畑地	1,023 (2.9%)
山地	2,845 (8.1%)
砂丘地	874 (2.5%)
宅地等	12,452 (35.5%)
合計	35,077 (100.0%)

*1993年度の地目別面積（西蒲原土地改良区，1993）を基に1993～2006年度の農地転用面積678ha（西蒲原土地改良区，2007）が宅地等に転用されたものとして推定した2007年度の地目別面積。

次に地目別雨水保留量曲線を算定する。雨水保留量曲線は累加雨量に対して浸透等により土中に保留される量が地目ごとに示され、多くの観測値をプロットすることにより求められる（農林水産省農村振興局，2019；渡邊ら，2017）。機械排水主体の低平水田地帯の場

合には、過去の降雨量に対するポンプ排水された量を分析してこの曲線を作成する。この方法により、対象地区の既存地目別雨水保留量曲線（増本，1998a）（以下，既存曲線）を改良して作成した，西蒲原地区における地目別雨水保留量曲線を **Fig. 2.4** に示す。

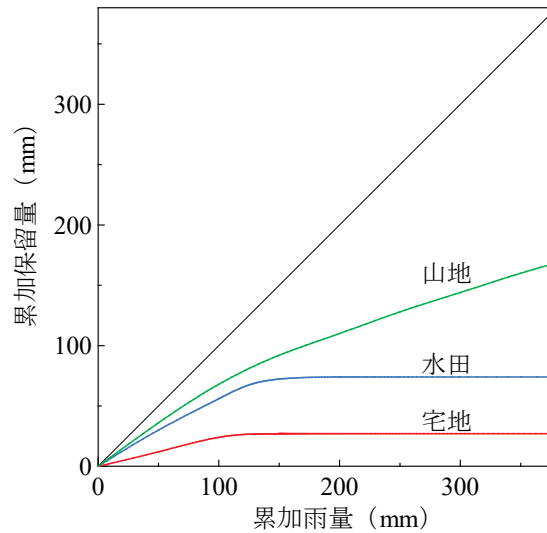


Fig. 2.4 西蒲原地区の地目別雨水保留量曲線

この曲線の作成について、既存曲線は昭和 50 年から平成 6 年（20 年間）のデータから作成されているため、新たに平成 7 年から平成 19 年（13 年間）のデータを用い、累加雨量と累加保留量の関係を地目別に算出する。ここでは、対象地区において面積割合の高い水田と宅地の既存曲線のみを対象とし、山地は既存曲線を採用した。対象地区内の水田主体 3 流域、宅地主体 2 流域の計 5 流域を選定し、連続雨量については累加保留量の限界値が確認できるよう、河川計画（100 年確率降雨）を超えるあるいは近い豪雨のみを 3 個選定した。次に各流域における降水量、排水量（5 流域は全て機械排水区）および河川からの浸透量、用水量、基底流出等を考慮して水収支を分析し、累加雨量と累加保留量の関係を算出した。この結果より、水田の既存曲線を採用し、宅地についてはさらに検討を続け、対象地区に隣接する純都市域 1 流域（機械排水区）を新たに選定した。ここでは、平成 13 年から平成 19 年（7 年間）の日雨量 50mm 以上（一部 30mm 以上）の降雨日を含む連続雨量 53 個を選定し、前述と同様の手順で水収支の分析を行った。その結果、宅地の累加保留量の限界値を 32mm から 27mm へ改良し、宅地の雨水保留量曲線を導出した。以上により、西蒲原地区における地目別雨水保留量曲線を作成した（**Fig. 2.4**）。

2.3.3 流出ハイドログラフの算定

地目別流出ハイドログラフの算出に用いる諸量を **Table 2.2** に示す。3 日連続雨量は超過確率から求められた施設設計段階の計画降雨であり、配分された時間ピーク雨量も併記している。地目別ピーク比流量 Q_p は、降雨流出モデル（水田流出法と雨水流法（キネマティック流出法））から算定されたものである（農業工学研究所水理制御研究室，1995）。

Table 2.2 地目別流出ハイドログラフの算出に用いる諸量

確率年	地目	3日連続 雨量 (mm)	時間 ピーク 雨量 (mm/h)	流出量 V (mm)	地目別 ピーク 比流量 Q_p ($m^3/(s \cdot km^2)$)	洪水到達 時間 t_p (min)	流出遅れ t_L (h)	パラメータ s
200年	農地(水田)			275.0	5.78	450	3.75	57.3
	宅地	349.0	47.2	322.0	12.36	24	0.20	156.7
	山地			189.0	6.62	100	0.83	135.3
100年	農地(水田)			234.8	5.02	480	4.00	60.1
	宅地	308.8	42.1	281.8	11.39	25	0.21	174.0
	山地			161.8	5.14	104	0.87	111.8
50年	農地(水田)			196.9	4.30	500	4.17	63.0
	宅地	270.9	37.3	243.9	10.41	26	0.22	194.5
	山地			136.4	3.70	109	0.91	81.9
30年	農地(水田)			170.4	3.77	530	4.42	65.2
	宅地	244.4	33.8	217.4	9.15	28	0.23	189.6
	山地			118.4	2.88	113	0.94	65.7
10年	農地(水田)			116.2	2.62	580	4.83	68.4
	宅地	190.2	26.5	163.2	6.72	30	0.25	181.0
	山地			83.7	1.55	127	1.06	36.6
5年	農地(水田)			83.8	1.94	640	5.33	74.4
	宅地	157.8	22.1	130.8	5.56	32	0.27	193.5
	山地			63.8	0.98	137	1.14	25.3
2年	農地(水田)			52.6	1.03	736	6.13	55.8
	宅地	113.6	15.8	88.1	4.20	37	0.31	244.4
	山地			39.6	0.45	158	1.32	14.1
1年	農地(水田)			27.5	0.36	935	7.79	25.9
	宅地	65.5	8.8	50.0	2.08	48	0.40	187.0
	山地			20.0	0.13	205	1.71	5.0

さらに **Table 2.2** の洪水到達時間 t_p および流出遅れ t_L の推定には前述の式 (2.3) ~ (2.5) を用いる。洪水到達時間 t_p を式 (2.3) から求める際には、土地利用別に有効降雨強度 r_e を式 (2.8) により算出する。

$$r_e = f_p \cdot r_r \quad (2.8)$$

ここに、 r_e ：有効降雨強度 (mm/h)、 f_p ：ピーク流出係数（農地：0.40、宅地：0.80、山林：0.60）、 r_r ：確率降雨強度 (mm/h) である。ピーク流出係数 f_p については、農地および宅地は西蒲原地区で採用されている値を用いた。山地の値は、類似地区の愛知県庄内川流域において、洪水防止機能をマクロ的に評価する解析手法により、平成12年の東海豪雨時の氾濫量を解析した研究で採用された値を流用した（増本，2010a；農林水産省農村振興局，農研機構農村工学研究所，2007）。有効降雨強度 r_e と洪水到達時間 t_p の関係 ($r_e - t_p$ 曲線) と、有効降雨強度 r_e と降雨継続時間 t_r の関係 ($r_e - t_r$ 曲線) を地目別に同一グラフ上に描き (**Fig. 2.5**)、両曲線の交点として確率有効降雨強度 r_{eT} が求められる（角屋，1980）。

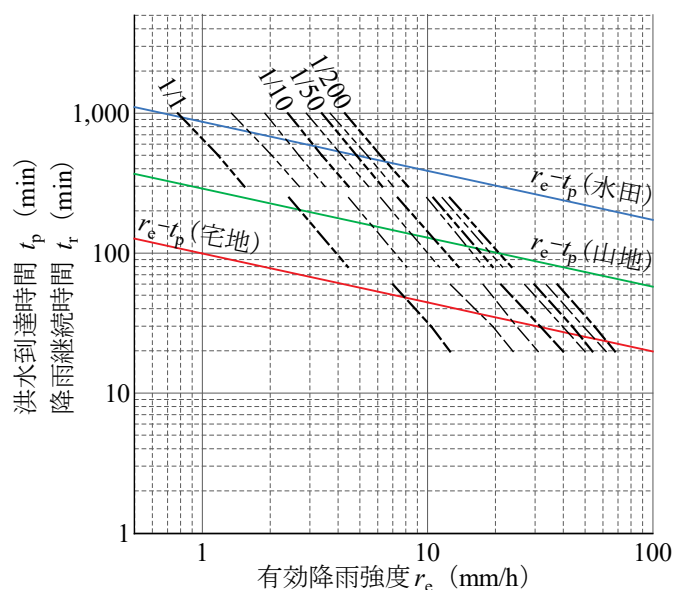


Fig. 2.5 有効降雨強度と降雨継続時間および洪水到達時間との関係

ここでは、式 (2.3) のパラメータ C は、土地利用別に 290 (自然山地), 140 (畑地), 100 (宅地) (角屋, 1980), 870 (水田: 山地の 3 倍) とした。ここで、870 (水田: 山地の 3 倍) は、角屋・福島の式を低平地である対象地区に適用するにあたり、筆者らの実測値や経験則から案出した値である。

Table 2.2 のパラメータ s は、式 (2.1) を積分すると地目別総比流出量 V と等しくなることから、地目別総比流出量 V を Q_p と t_p により基準化することにより決定する。なお、式 (2.1) を積分結果と地目別総比流出量 V が等しくなるように表計算ソフトを用いて求めることも可能である。

流出ハイドログラフのピーク流量の位置は、計画雨量のピークまでの時間である 36 時間に洪水到達時間 t_p を加えればよいことになる。ただし、**Table 2.2** の値は単位面積当たりの算定結果であり、地目別ハイドログラフの遅れ時間は流域面積に比例するとして、次式で算定した。

$$t_L' = A^{0.22} \cdot t_L \quad (2.9)$$

ここに、 t_L' : A 流域面積の場合の遅れ時間, A : 流域面積 (km^2), t_L : 1km^2 当たり遅れ時間である。

関数形が決まれば、後は対象とする流域・地区の地目別面積によって、ハイドログラフを描く。すなわち **Table 2.1** に示すような対象流域の地目別面積があれば、どのような組合せのハイドログラフでも作成可能である。

上記の手法により、**Table 2.2** の各種確率年 (1 年, 2 年, 5 年, 10 年, 30 年, 50 年, 100 年, 200 年) に対する地目別流出ハイドログラフ, およびそれらを合成した全流域流出ハイドログラフを、西蒲原地区全体と地区内の 7 つの排水ブロックにおいて導出した。なお、西蒲原地区全体の地目別流出ハイドログラフの導出にあたり、**Table 2.1** の面積比の小さい畑地は水田に統合し、同様に面積比の小さい砂丘地は無視するものとし、砂丘地を除く合計 342km^2 を流域面積として用いた。

2.4 流出ハイドログラフを用いた排水経費負担割合の算定法

2.4.1 排水経費負担割合の算定方法

排水機場等の施設は、計画降雨を用いてその施設規模や管理基準が決められることから、ここでも計画降雨に対する流出量を考える。排水経費の配分について考えると、①基本的には各地目からの総流出量で農地分と都市分の排水経費を分配するが、地目ごとにピーク流出量や洪水到達時間等の違いがあり、総流出量のみで議論できない、②地目の流出波形の違い（ピーク時間、ピーク流出量等）を何らかの形で考慮する視点が必要である。

ただし、ピーク時間の違いを妥当に考慮することは困難なため、ここではピーク流出量の違いを比較の対象と考える。この場合、ポンプ場の運転経費の配分について農地分と都市分の比率の算出法には以下の7種類の方式が考えられる。なお、以下の（ ）内は後述での簡略名である。

I) 比較に地目別総流出量を使う場合（総排水量）

I-1) 重みに各地目とも1を使用（同等）

I-2) 重みに地目別ピーク流出量の比（ピーク比）

I-3) 重みに地目別単位ピーク流出量の比（単位ピーク比）

II) 比較に最大排水容量を超える地目別総流出量を使う場合（超総排水量）

II-1) 重みに地目別ピーク流出量の比（ピーク比）

II-2) 重みに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）

II-3) 重みに地目別単位ピーク流出量の比（単位ピーク比）

II-4) 重みに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）

ここで、地目としては、宅地（都市域）と水田（農地部）を考える。このとき前述 2.3.3 のように畑地は水田（農地部）に統合したため、畑地の流出が水田と宅地の中間的な流出形態になると想定されることを考えれば、都市側に有利（都市側の負担を下げる方向）に作用する傾向となる。また、単位ピーク流出量とは各地目の単位面積当たりの流出ピーク量のことである。上記の重み W の場合分けは、排水計画で必要とされるポンプ容量はこれまでピーク流出量の $1/2 \sim 1/4$ 程度とされていること（田中・末沢, 1970）、水田には計画段階で基準田面上 30cm 以内および 30cm を超える場合は 24 時間以内の湛水を許容していること（農林水産省北陸農政局, 2004）、豪雨時には都市域からの排水を作物被害が最小となる条件で水田部に一時的に貯留することができる等、排水計画においても、最大排水容量を超える流出による水田での貯留を許容していることを考慮して検討したものである。対象流域の地目別流出ハイドログラフが確定していることを前提として、個々の算出法の詳細は以下のとおりである。

2.4.1.1 比較に地目別総流出量を使う場合（総排水量）[I]

Fig. 2.6 の地目別ハイドログラフで示す流出のうち、単独のハイドログラフにおける最大排水容量以下の流出量（宅地流出 V_u 、水田流出 V_p ）とそれを超える流出量（宅地流出 V_{uo} 、水田流出 V_{po} ）について、ピークの大きさが違うことから重みを付ける。

排水経費負担の割合は式 (2.10) で表現される。

$$(\text{都市分}) : (\text{農地分}) = \{(V_u + V_{uo}) \cdot W\} : \{V_p + V_{po}\} \quad (2.10)$$

ここに、 V_u ：最大排水容量以下の都市域からの流出量， V_{uo} ：最大排水容量を超える都市域からの流出量， W ： $(V_u + V_{uo})$ に対する重み， V_p ：最大排水容量以下の農地部からの流出量， V_{po} ：最大排水容量を超える農地部からの流出量である。対象が農業農村整備事業における施設であることから，農地部を基準にして都市側へ重み付けする。

I-1) 重みに各地目とも1を使用(同等)

地目の流出波形の違いは，特に考慮しないこととして同等に扱うことにする。すなわち，式(2.10)における重み $W=1$ である。そのため，負担割合の比は地目面積の比に近い値になることが予想される。

I-2) 重みに地目別ピーク流出量の比(ピーク比)

地目の流出波形の違いは，都市的利用になるほど違いがある(ピーク流出量増大，ピークの早期化等)ことから，地目ごとの流出ハイドログラフ(Fig. 2.7)のピーク流出量の大きさの比で補正することとする。すなわち，式(2.10)における重み $W=Q_u/Q_{pa}$ である。ここに， Q_u ：都市域からの最大ピーク流出量， Q_{pa} ：農地部からの最大ピーク流出量である。

I-3) 重みに地目別単位ピーク流出量の比(単位ピーク比)

地目の流出波形の違いについて，地目ごとの単位面積当たりの流出ハイドログラフ(Fig. 2.8)のピーク流出量の大きさの比で補正する。すなわち，式(2.10)における重み $W=Q'_u/Q'_{pa}$ である。ここに， Q'_u ：単位面積当たりの都市域からの最大ピーク流出量， Q'_{pa} ：単位面積当たりの農地部からの最大ピーク流出量である。

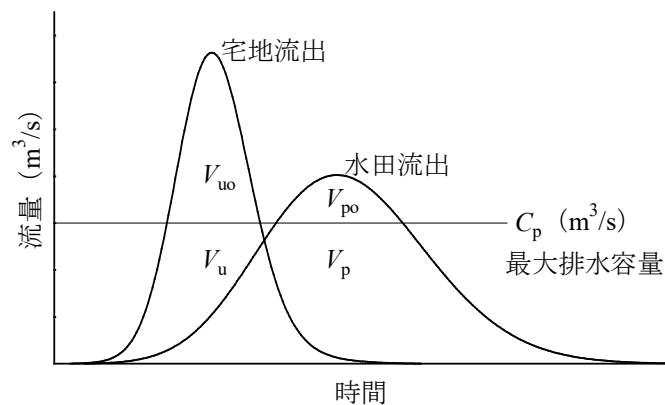


Fig. 2.6 重み付けのための対象流量

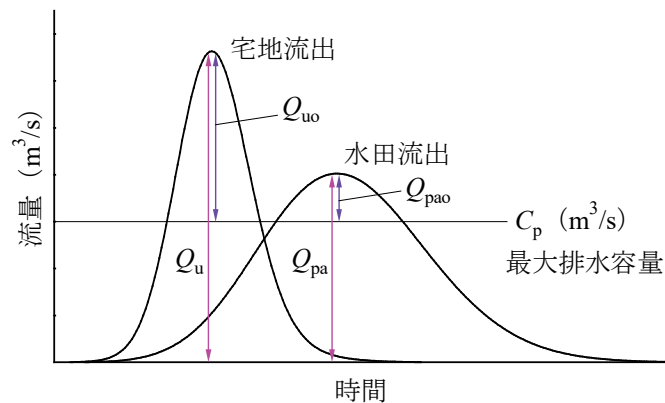


Fig. 2.7 地目別ピーク流出量による重み付け方針

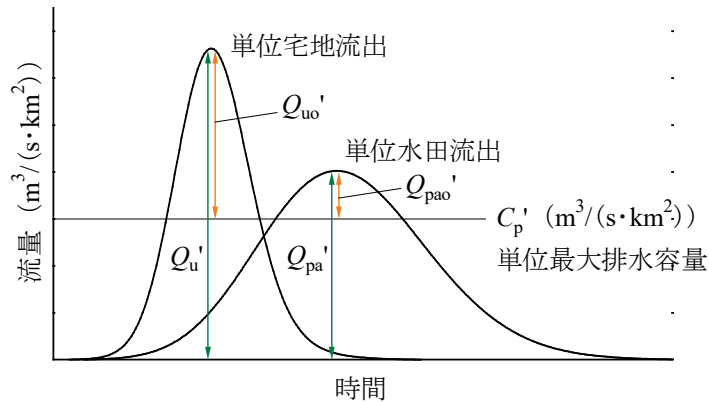


Fig. 2.8 単位面積当たりの地目別ピーク流出量による重み付け方策

2.4.1.2 比較に最大排水容量を超える地目別総流出量を使う場合（超総排水量）[Ⅱ]

地目別ハイドログラフ（Fig. 2.6）で示す流出のうち，単独のハイドログラフにおける最大排水容量以下の流出量（宅地流出 V_u ，水田流出 V_p ）については，容易に排水できるものと考えられるが，それを超える流出量（宅地流出 V_{uo} ，水田流出 V_{po} ）については，ピークの大きさが違うことから，重みを付ける。

排水経費負担の割合は次式で表現される。

$$(\text{都市分}) : (\text{農地分}) = \{V_u + V_{uo} \cdot W\} : \{V_p + V_{po}\} \quad (2.11)$$

ここに， V_u ：最大排水容量以下の都市域からの流出量， V_{uo} ：最大排水容量を超える都市域からの流出量， W ： V_{uo} に対する重み， V_p ：最大排水容量以下の農地部からの流出量， V_{po} ：最大排水容量を超える農地部からの流出量である。

Ⅱ-1) 重みに地目別ピーク流出量の比（ピーク比）

重みは前述 2.4.1.1 のⅠ-2)と同様とし，すなわち，式(2.11)における重み $W = Q_u / Q_{pa}$ である。ここに， Q_u ：都市域からの最大ピーク流出量， Q_{pa} ：農地部からの最大ピーク流出量である。

Ⅱ-2) 重みに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）

地目の流出波形の違いについて，地目ごとの流出ハイドログラフ（Fig. 2.7）のピーク流出量から最大排水容量 C_p を差し引いたピークの大きさの比で補正する。すなわち，式(2.11)における重み $W = Q_{uo} / Q_{pao}$ である。ここに， Q_{uo} ：最大排水容量を超える都市域からの最大ピーク流出量， Q_{pao} ：最大排水容量を超える農地部からの最大ピーク流出量である。

Ⅱ-3) 重みに地目別単位ピーク流出量の比（単位ピーク比）

重みは前述 2.4.1.1 のⅠ-3)と同様とし，すなわち，式(2.11)における重み $W = Q_u' / Q_{pa}'$ である。ここに， Q_u' ：単位面積当たりの都市域からの最大ピーク流出量， Q_{pa}' ：単位面積当たりの農地部からの最大ピーク流出量である。

Ⅱ-4) 重みに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）

地目の流出波形の違いについて，地目ごとの単位面積当たりの流出ハイドログラフ（Fig. 2.8）のピーク流出量から単位最大排水容量 C_p' を差し引いたピークの大きさの比で補正す

る。すなわち、式 (2.11) における重み $W=Q_{uo}'/Q_{pao}'$ である。ここに、 Q_{uo}' : 単位面積当たりの最大排水容量を超える単位面積当たりの都市域からの最大ピーク流出量、 Q_{pao}' : 単位面積当たりの最大排水容量を超える単位面積当たりの農地部からの最大ピーク流出量である。

2.4.1.3 単位面積当たり負担割合の算出方法

排水経費全体での負担割合の算出法は前述の I-1) から II-4) に示したとおりであるが、単位面積当たりの負担割合の算出方法は式 (2.12) で示される。

$$(\text{都市分}) : (\text{農地分}) = (X_u/A_u) : (X_{pa}/A_{pa}) \quad (2.12)$$

ここに、 X_u : 全体の排水経費に対する都市側の負担割合、 A_u : 都市側の面積、 X_{pa} : 全体の排水経費に対する農地側の負担割合、 A_{pa} : 農地側の面積である。

2.4.2 比率算出法の適用条件および算定結果

2.4.2.1 適用条件

前述の比率算出法の対象地区への適用にあたり、対象地区は国営事業により 7つの排水ブロックによる多段階の分散排水方式で整備されているが、各排水ブロックは完全に独立しているわけではないことから、ここでは西蒲原地区全体を 1つの排水ブロック (流域) として扱うこととし、西蒲原地区全体の排水経費に対しての負担割合の算出を考える。また、この国営事業は“農業用排水事業と併せ行う農地防災事業”であることから、建設費関連の負担において、農業者側は農業水利事業費分のみの負担を求められており、農地防災事業費分についての負担はないことも考慮する必要がある。そこで、排水経費負担に関して、農業者側が負担すべき範囲は農業水利 (10年確率降雨) 分までとして、農地防災 (50年確率降雨) 分については公的負担となることを前提に考える。さらに、最大排水容量については農業水利 (10年確率降雨: 434.5m³/s) と農地防災 (50年確率降雨: 529.9m³/s) の両者の計画値 (農林水産省北陸農政局, 2004) を利用する。すなわち、10年確率降雨までの範囲の降雨については農業水利事業分の最大排水容量 434.5m³/s を用い、それを上回る確率降雨については農地防災分の最大排水容量 529.9m³/s を用いて負担割合の算出を行う。以上の比率算出法の適用条件のもと、前述 2.3.3 で作成した西蒲原地区全体の流出ハイドログラフのうち、この 10年確率降雨および 50年確率降雨に対し導出した地目別流出ハイドログラフを Fig. 2.9 に示す。

2.4.2.2 算定結果

Fig. 2.9 のように降雨確率年ごとに求められた地目別流出ハイドログラフに対して、前述の I-1) から II-4) の 7種類の比率算出法により案出した、都市側からの流出への重み W 、この重みを考慮して求められた全体の排水経費に対して農地分を 1とした場合の都市側の単位面積当たりの負担割合 (以下、負担割合) を一覧にしたものを Table 2.3 に示す。ここでは比率算出法に対する前記の簡略化した呼び名を用いている。表中で数値が算出されていないのは、地目 (特に水田) からの流出量が最大排水容量以下になり、最大排水容量を超える流出量がないためである。

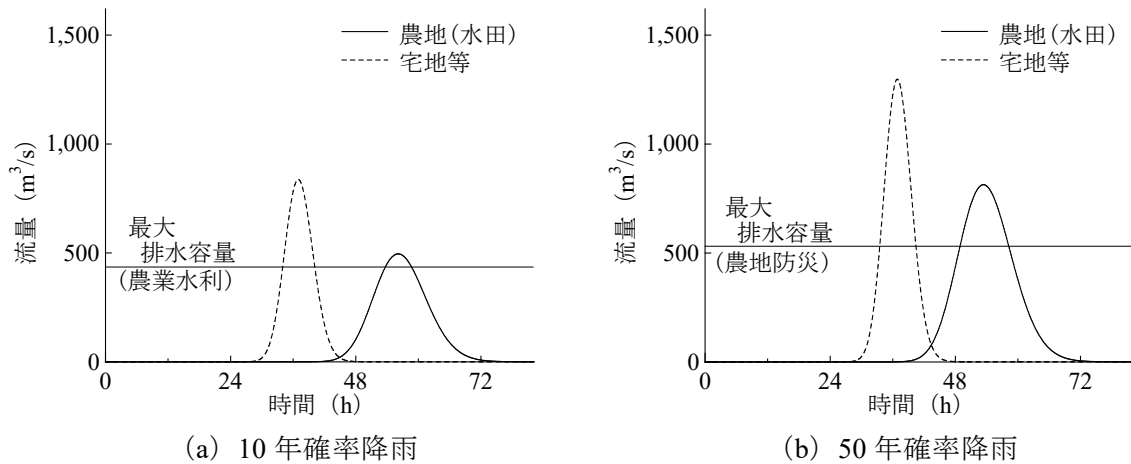


Fig. 2.9 西蒲原地区全体の地目別流出ハイドログラフ

Table 2.3 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*
529.9m³/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
434.5m³/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	-	-	-

*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。

2.4.3 考察

2.4.3.1 各比率算出法の比較および最良法の選定

Table 2.3 に示した、7種類の比率算出法ごとの重み W と負担割合の特性を比較し、最も適する比率算出法を選定する。選定にあたり、これらは現状においては農業者側から都市側へ提案される性質のものであり、提案後に行われるであろう農業者側と都市側との協議や、協議が整った場合の最終的な排水経費負担の契約締結等（以下、両者間協議）を考慮すれば、都市側からの理解が得られる比率算出法であることが、重要な選定要件の一つとなる。

宅地流出と水田流出との比較に、I)地目別総流出量を使う場合（総排水量）の下記の3種類に関して、最大排水容量以下の流出量に対しては都市側も既に排水経費負担を行っており、ここに重みを付けることは現状からの負担増加となるため、両者間協議においては都市側から不公平感がでることも考えられ、農業者側に有利な重み付けとも考えられる。

I-1) では、重み W に宅地と水田の両地目とも1を使用（同等）することから、それぞれの流出におけるピーク量が考慮されない。また、負担割合は全ての降雨確率年において7種類の中で最小となっている（Table 2.3）。農地が湛水を許容できることを考えると、重み W は過小であり、基準値とするには適さない。

I-2) では、重み W に地目別ピーク流出量の比（ピーク比）を使用する。重み W (Fig. 2.7 における (Q_u/Q_{pa})) と重み付けの対象流出量 (Fig. 2.6 における (V_u+V_{uo})) は共に、宅地と水田の両地目の面積に大きく影響される。農地面積が減少しその分が宅地化された場合（以下、農地の宅地化）、水田流出の減少と宅地流出の増加を同時に招くことから、重み W と重み付けの対象流出量は共に増加し、負担割合は飛躍的に増加する（以下、宅地化・ R 変化大型。ここに、 R ：負担割合）。そのため、農地の宅地化が進む傾向にある近年においては、都市側の負担割合が将来、飛躍的に増加する可能性があり、両者間協議においては都市側の理解が得られ難いと考えられることから、基準値とするには問題がある。

I-3) では、重み W に地目別単位ピーク流出量の比（単位ピーク比）を使用する。他の比率算出法と比較して全体的に負担割合は大きい算出結果となっている (Table 2.3)。また、重み W (Fig. 2.8 における (Q_u'/Q_{pa}')) は単位面積当たりのピーク流出量の比のため一定値をとり続けることから、農地が宅地化された場合でも重み W に変化はなく、重み付けの対象流出量 (Fig. 2.6 における (V_u+V_{uo})) の増加のみが負担割合に影響するため、他の比率算出法よりも負担割合の変化は小さい（以下、宅地化・ R 変化小型）。農地の宅地化が進んでも、都市側の負担割合が将来、大きく変化しないことから、両者間協議においては都市側の理解が得られやすい可能性があり、基準値とするのに適当であると判断される。

次に、宅地流出と水田流出との比較に、II) 最大排水容量を超える地目別総流出量を使う場合（超総排水量）の下記の4種類に関して、排水施設により容易に排水できる流出量は同等に扱い、それを超える流出量に対して重みを付けることは、都市側からの理解が得られやすいと考えられる。しかし、最大排水容量以下の流出量に対しても都市側に対する排水を行っていることを考えると、都市側に有利な重み付けとも考えられる。

II-1) では、重み W に地目別ピーク流出量の比（ピーク比）を使用する。I-2) と同様の重み W (Fig. 2.7 における (Q_u/Q_{pa})) を対象流出量 (Fig. 2.6 における V_{uo}) に重み付けすることから、I-2) と同じく宅地化・ R 変化大型の特性を示す（基準値とするには問題がある）。また、10年確率降雨を下回る降雨では、最大排水容量を超える流出がなかったため負担割合が導かれていない (Table 2.3)。あるいは最大排水容量を超える流出が少量あったとしても、この量が小さすぎて重み W が意味をなさないことも発生する（以下、小確率年・ R 不算定型）。基準値とするには問題がある。

II-2) では、重み W に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）を使用する。重み W (Fig. 2.7 における (Q_{uo}/Q_{pa0})) は両地目の面積に大きく影響されるため、宅地化・ R 変化大型の特性を示す。また、10年確率降雨を下回る降雨では、農地からの流出が最大排水容量を超えず、重要な重み W を算出できないことから負担割合も算出できない結果となった (Table 2.3)（以下、小確率年・ WR 不算定型。ここに、 W ：重み）。手法の一般性を考えた場合、重み W の計算ができずに手法が適用できないことが想定されるため、基準値とするには問題がある。

II-3) では、重み W に地目別単位ピーク流出量の比（単位ピーク比）を使用する。I-3) と同様の重み W (Fig. 2.8 における (Q_u'/Q_{pa}')) のため、宅地化・ R 変化小型の特性を示すことから、基準値とするのに適当であると判断される。ただし、II-3) を I-3) と比較した場合、10年確率降雨を下回る降雨をみると、II-3) のみ小確率年・ R 不算定型となっていることから (Table 2.3)、基準値としてはII-3)の方が劣ると判断される。

Ⅱ-4) では、重みに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）を使用する。重み W (Fig. 2.8 における (Q_{uo}/Q_{pao})) は単位面積当たりのピーク流出量の比のため一定値をとり続けることから、農地が宅地化された場合でも重み W に変化はなく、宅地化・ R 変化小型の特性を示す。しかし、10年確率降雨を下回る降雨をみると小確率年・ WR 不算定型となっていることから (Table 2.3), Ⅱ-2) と同様に基準値とするには問題がある。

以上の結果から、両者間協議において都市側の理解が得られやすい可能性がある宅地化・ R 変化小型の特性を示す、Ⅰ-3) 総排水量・単位ピーク比が最も基準値に適すると判断される。次に、同じく宅地化・ R 変化小型の特性を示すものの、同時に小確率年・ R 不算定型にもなる、Ⅱ-3) 超総排水量・単位ピーク比が次点候補となる。

しかし、上述のとおりⅠ) は農業者側に有利、Ⅱ) は都市側に有利な重み付けとも考えられ、すなわち、Ⅰ-3) およびⅡ-3) とどちらか一方に有利な比率算出法となることから、将来、両者間協議を円滑に進めることを考慮すれば、双方の中間的な値とすることも検討する必要がある。

2.4.3.2 降雨確率年の選定

負担割合の算出に最も適した降雨確率年について、現在の整備水準が50年確率降雨（農地防災の計画降雨）であることから、これを超える降雨確率年とするのは現実的ではない。また、整備水準内の確率降雨であっても、農業水利の計画降雨（10年確率降雨）を超える降雨については、前述 2.4.2.1 のとおり農業者が負担すべき範囲ではないことから、負担割合の算出根拠とするには適さない。そのため、ここでは国営事業で農業者負担が求められている範囲の農業水利の計画降雨（10年確率降雨）と考える。

2.4.3.3 最大排水容量（排水施設の整備水準）の選定

負担割合の算出に最も適した最大排水容量の選定にあたっては、現在の整備水準を用いることが適切と考えられ、 $529.9\text{m}^3/\text{s}$ （農地防災）か $434.5\text{m}^3/\text{s}$ （農業水利）のいずれかとなるが、前述 4.3.2 の降雨確率年の選定時と同様に、国営事業で農業者負担が求められている範囲を考えると、農業水利の整備水準である最大排水容量 $434.5\text{m}^3/\text{s}$ となる。

2.4.3.4 都市側への負担割合の提案

以上の結果から、比率算出法については、Ⅰ-3) 総排水量・単位ピーク比が適当であり、Ⅱ-3) 超総排水量・単位ピーク比が次点候補である。また、降雨確率年は10年確率降雨が適切で、最大排水容量は $434.5\text{m}^3/\text{s}$ が適当となる。よって、排水経費の都市側の負担割合は 2.10~3.43 と提案される (Table 2.3)。実務上、この範囲の中から両者間協議を経て、最終的な負担割合が決定される流れが一般的と考えられ、例えば単純に中間値を指標的に示すと 2.77 となる。

参考に、Ⅰ-3) とⅡ-3) およびその中間値の、地目の面積比率のみを変化させた場合（農地の宅地化を想定）の単位面積当たりの負担割合の変化を Fig. 2.10 に示す。

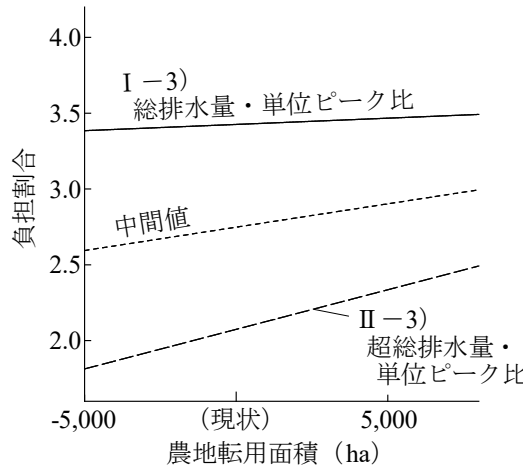


Fig. 2.10 農地転用面積に対する単位面積当たりの負担割合（10年確率降雨，I-3）およびII-3）は **Table 2.3** 参照）

2.5 小括

本章では、「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、算定の手順および負担割合の有用な試算値を提示するとともに、都市と農村の協調による流域の適切な排水管理のあり方を示した。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 新たに豪雨としての連続降雨を用いたこと、また、都市化率の高い宅地域での検討を追加したことにより、地目別の雨水保留雨量曲線の改良を行った。
- 2) 全流域での地目別流出ハイドログラフを利用して検討を行った結果、都市側が負担すべき割合の算出法を提案することができた。算出法としては、地目別総流出量に対して地目別単位ピーク流出量の比で重み付け（総排水量・単位ピーク比（I-3））が最も基準値に適すると判断され、最大排水容量を超える地目別流出量に対して地目別単位ピーク流出量の比で重み付け（超総排水量・単位ピーク比（II-3））が次点候補となる。
- 3) 負担割合の算出に適した確率降雨としては10年確率降雨が適切であり、最大排水容量としては農業水利（10年確率降雨）の整備水準である $434.5\text{m}^3/\text{s}$ が適切とした。
- 4) これらを基に検討した結果、排水経費の都市側の負担割合は、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、例えば単純に中間値を指標的に示すと2.77との提案を行った。
- 5) 提案した方法は、現行の負担方式に対して、将来土地利用の大きな変化がある場合にも、負担割合の算定が可能なが分かった。

本章の提案が、農業側からの解決に向けた提案に留まることのないよう、都市側または国民全体の認識および理解のもと、都市と農村の協調による排水管理の新たな展開が期待される。なお、提案した算定法では地目別のピーク流出量の違いのみを比較の対象とし、ピーク時間の違いを考慮していないことから、これを何らかの形で考慮することが今後の課題である。

第 3 章 分布型水循環モデルへのため池群要素の導入と流域の農業水利用に及ぼす影響の評価

3.1 はじめに

本章では農業に携わる技術者に向けたイノベーション技術の 1 つ目として、「流域内に分布する全のため池のモデル化」を提案する。

はじめに広域に数多く分布する単独ため池やため池群の要素を組み込んだため池モデルを開発する。次に、開発したため池モデルをほ場から流域レベルで展開でき、多様な水利用や水循環をも考慮できる分布型水循環モデルに実装して改良モデルを構築する。さらに、改良モデルを平野部が少なく中山間地におけるため池利用が多い米代川流域に適用し、モデル精度を検証するとともに、ため池が流域の農業水利用に及ぼす影響の評価を行う。

3.2 対象流域とデータ

3.2.1 米代川流域の概要

米代川は秋田、青森および岩手の 3 県境に位置する中岳に発し、岩手県、秋田県を貫流して能代市において日本海に注ぐ、幹川延長 136km、流域面積 4,100km² の一級河川である (Fig. 3.1)。流域の土地利用は、山林原野が約 88%、水田や畑地等の農地が約 10%、宅地等市街地が約 2% であり、世界遺産白神山地の一部を含め山地部が多く、大規模な平野部が少ないため、流域に占める農地の割合は比較的小さい。農業用水は許可水利権として流域内全体で約 50m³/s あり、農地約 15,100ha の灌漑に利用されている (国土交通省, 2002b)。これらの農地以外に、山あいには谷地田地形の狭小な農地が多く存在し、そこでは河川のほかにため池が主な農業水源であることが多い。加えて、流域内には発電、農業用水、上水道用水、工業用水の供給を目的とした 7 基のダムがある。

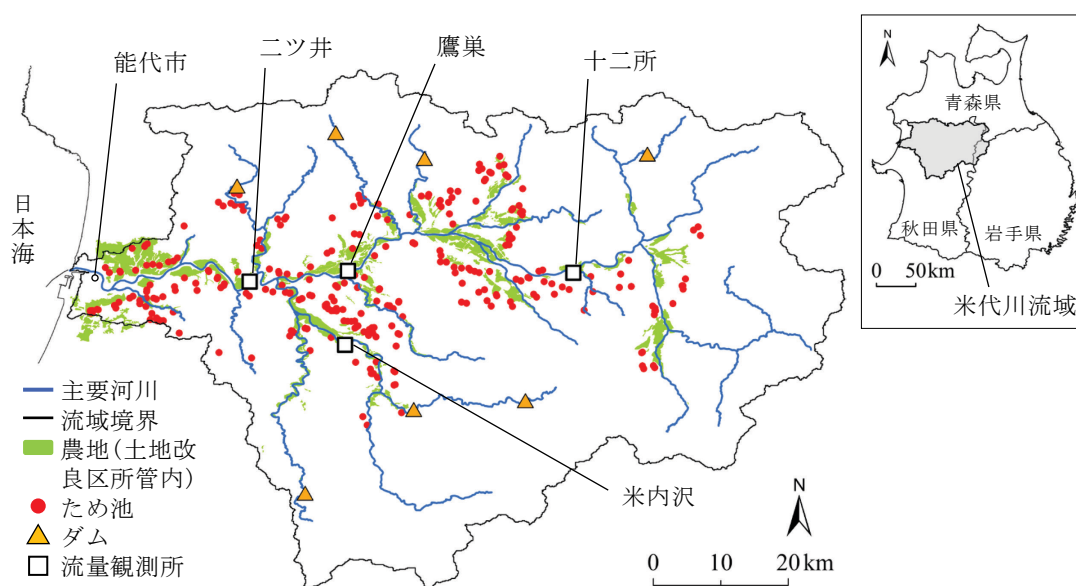


Fig. 3.1 米代川流域の概況

3.2.2 ため池の受益面積および集水面積等の特徴

ため池のデータは、水土里情報システム 2021 秋田（秋田県土地改良事業団体連合会，2021）のため池データベース GIS データを利用した。

はじめに、このデータより抽出した対象流域内のため池の分布状況をみると（Fig. 3.1），ため池は 295 箇所存在し，それらは農地の分布と共に，農地の周辺に偏在なく比較的分散して位置している．次に，ため池個々の受益面積と貯水量の関係に着目すると（Fig. 3.2），両者は概ね比例関係にあり，また，両者ともに小さいため池が多く，受益面積 20ha（貯水量では概ね 30 千 m^3 に相当）以下のものが 72%（211 箇所）を占めている．加えて，ため池個々の流域面積も小規模なものが多く，1 km^2 以下のものが 84%（249 箇所）を占めている（Fig. 3.3）．一方で，これらのため池を流域内のダムと比較したところ，全てのため池の合計貯水量は約 14 百万 m^3 であり，これは流域内のダム 7 基の合計有効貯水容量約 170 百万 m^3 の 8% 相当と僅かなものの，ダム 7 基の合計灌漑利水容量約 32 百万 m^3 の 44% に相当した。

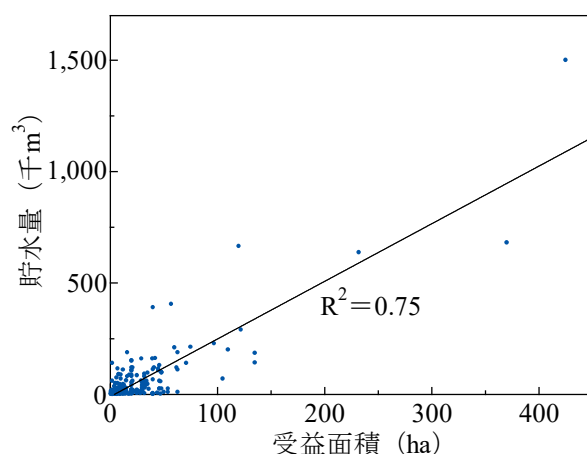


Fig. 3.2 ため池の受益面積と貯水量の分布

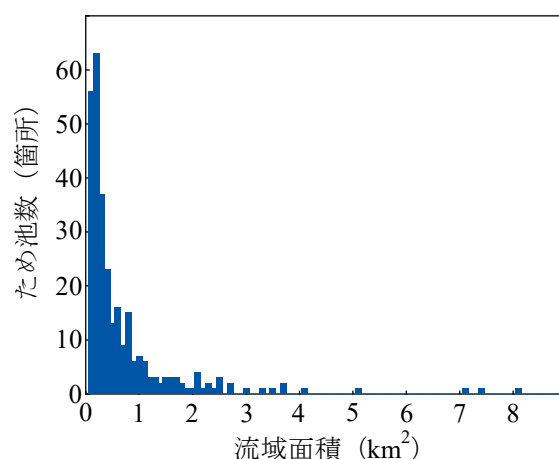


Fig. 3.3 ため池の流域面積の分布

3.2.3 水文・気象データ

モデル全体の精度の検証地点を国土交通省所管の河川流量観測所4地点とし(Fig. 3.1), そこでの河川の日流量の観測データを水文水質データベース(国土交通省, 2002a)から収集した。なお, 4地点のうち米内沢のみが支流の阿仁川に位置し, 他の3地点は米代川本川に位置する。また, モデルに入力する気象データ(降水量, 気温, 全天日射量, 相対湿度, 風速)は基準地域メッシュ(3次メッシュ)に準拠し整備されているメッシュ農業気象データ(農研機構農業環境変動研究センター, 2016)から収集した。

3.2.4 土地利用および農業水利データ

モデルに入力する土地利用情報は, 国土数値情報の土地利用3次メッシュデータ(国土交通省, 2022)を利用し, それらを5つの土地利用区分(森林, 水田, 畑地, 都市, 水域)に分類し, 3次メッシュごとに各土地利用の面積割合を設定した。また, モデルの構築に必要な農業水利施設とその受益地の情報は, 受益面積が概ね100ha以上のものは日本水土図鑑GIS(日本水土総合研究所, 2005)から収集し, それ以外のものは水土里情報システム2021秋田(秋田県土地改良事業団体連合会, 2021)の農業水利施設GISデータから収集した。さらに, ダムの情報は, 水文水質データベース(国土交通省, 2002a)のダム諸量データベース, およびダム管理者から入手した操作規則から読み取りにより収集した。

3.3 分布型水循環モデルにおけるため池のモデル化

3.3.1 分布型水循環モデルの概要

吉田ら(2012)が示すモデルの概要をFig. 3.4に示す(ため池モデルを除く部分)。

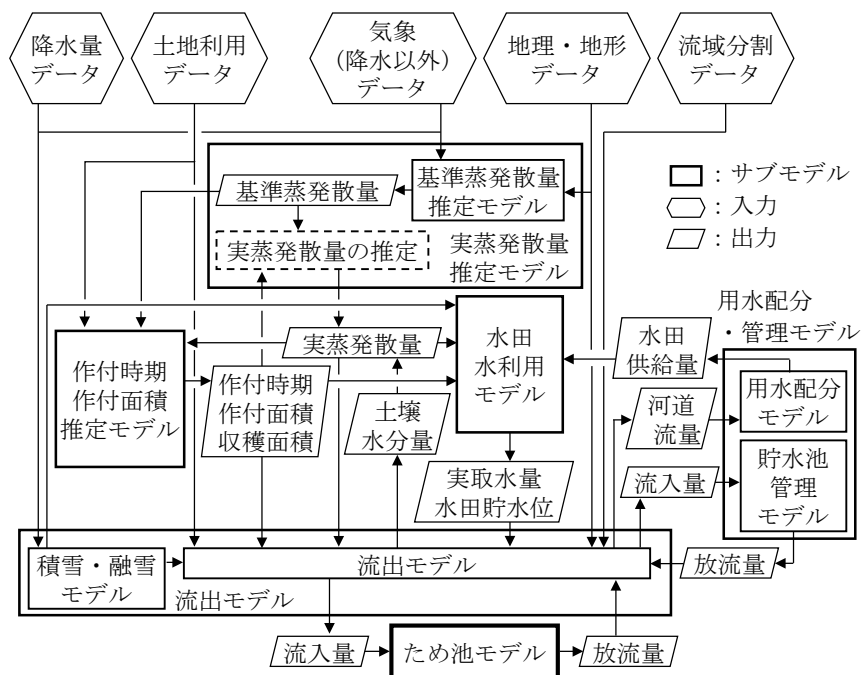


Fig. 3.4 分布型水循環モデルの構成

図は1メッシュ内のサブモデルの構成図であり、主に5つのサブモデルから構成される分布型モデルである。サブモデルは実蒸発散量推定モデル、作付時期・作付面積推定モデル、水田水利用モデル、流出モデル、用水配分・管理モデルの5つであり、それぞれが連動することで農業水利用をはじめ、多種の情報出力が可能となる。この中の用水配分・管理モデルは、貯水池運用および河川からの取水のほか、特定の取水地点からの用水が受益地であるメッシュへ規定順に配分される灌漑エリア（以下、用水配分エリア）の設定により、複数メッシュ間に跨る人為的な水循環をモデル化した特長がある。また、このサブモデルの構成モジュールの1つである貯水池管理モデル（堀川ら、2011）は、貯水池（ダム）の堤体が位置するメッシュをダムメッシュに設定し、そこへ流入する計算流量をダム流入量として放流量や貯水量を計算する。本研究ではこの貯水池管理モデルの改良により、ため池の要素をモデル化したサブモデルを新たに開発し（図中最下のため池モデル）、これを分布型水循環モデルに実装した改良モデルを構築した。

3.3.2 ため池のモデル化

3.3.2.1 管理実態を統一した管理規定の設定

数多いため池には多様な操作および管理の手法があり、それらの実態（以下、管理実態）を全て情報収集し、個々のため池に設定することは困難である。そこで、例えば秋田県における管理実態を考慮のうえ、ここでは以下に示すようにそれらを統一した管理規定を設定して全てのため池に適用した。

はじめに、ため池の期別の最大貯水量を次のように統一した。秋田県では灌漑期の終了後（概ね9月）から、各種ゲートを開放してため池の水位を低下させ、施設の点検・維持管理を行うことが多い。その後、積雪前（概ね12月）に全ゲートを閉じ貯水を開始するが、これは、積雪以降は施設へ進入できずゲート操作が不可能になることによる（山あいのため池周辺の道路は、費用対効果の観点から除雪されないことが多い）。これらの管理実態から期別の最大貯水量を、満水期（1～8月）は通常貯水量とし、各種ゲートが開放されている水位低下期（9～12月）は通常貯水量の2分の1とした。

次に、ため池個々の灌漑放流量は明確な定めがなく多様であり、それらは貯水量や天候および作柄の状況に応じて操作者の経験則により操作の都度決定されることが多い。そこで、米代川流域の既知水利権から受益面積1ha当たりの平均取水量を算定し（ $0.004\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{ha}$ （県が水利使用者である14件から算定））、これをため池個々の受益面積に乗じて推定灌漑放流量を設定した。ただし、ため池が用水配分エリア内に位置する場合、ため池の受益地も概ね同エリア内にあり、そこでは特定の取水地点に用水源があることから、ため池への用水依存度は低いといえる。そのため、用水配分エリア内のため池は渇水対策用の補助水源ため池である可能性が高く、通常は未放流または少量放流であると仮定し、それらには推定灌漑放流量の4分の1を設定した。なお、この推定法のほかに、ため池が存在するメッシュで算定される水田必要水量から灌漑放流量を推定することを検討したが、山間部で水田が皆無となる当該メッシュではこれが算定されず、課題が生じたためこの推定法は不採用とした。

さらに、灌漑放流の手法は概ね代かき期に最大放流し普通期に少量放流するが、これも前述の灌漑放流量と同様に多様である。加えて、ため池では貯水量を可能な限り温存する

節水管理が基本であり，貯水量や天候の状況により積極的に放流停止や短時間放流をすることも多い．そこで，灌漑期とした 5～8 月に推定灌漑放流量を一定放流し続ける設定とし，さらに 1 日当たりの放流時間のパラメータを設けた（灌漑期を通じた節水管理および放流停止時間を考慮し，今回は 1 日当たり 6 時間に設定した）．

3.3.2.2 ため池の水収支

ため池モデルは，貯水池管理モデルを改良し開発を進めた．まず，ため池の水収支式を次式に示す．

$$V_{\text{rest}}(t) = V_{\text{rest}}(t-1) + (Q_{\text{int}}(t) - Q_{\text{out}}(t)) \Delta t \quad (3.1)$$

ここに， V_{rest} ：貯水量 (m^3)， t ：計算日 (t 日目)， Q_{int} ：ため池流入量 (m^3/d)， Q_{out} ：ため池放流量 (m^3/d)， Δt ：計算時間間隔（ここでは日単位 (d)）である．なお，ため池水面からの蒸発量は分布型水循環モデルにより水域の蒸発量を求めるため上式では考慮しない．

ここで， Q_{int} について，基礎とした貯水池管理モデルではダムメッシュへの流入量を全てダムへ流入させている．しかし，実際のため池は河道本川に位置しない場合があり，このとき，実際のため池と当該ため池が位置するメッシュ（以下，ため池メッシュ）の流域面積は異なり，ため池メッシュへの流入量を全てため池に流入させることは実態と異なる．そこで改良法として，ため池を考慮せず算定したため池メッシュ流出量 Q'_{outm} (m^3/d) からため池流域面積 A_{upt} (km^2) 相当の流量を取り出し，それを Q_{int} とした．この手法の概念図を Fig. 3.5 に示す．

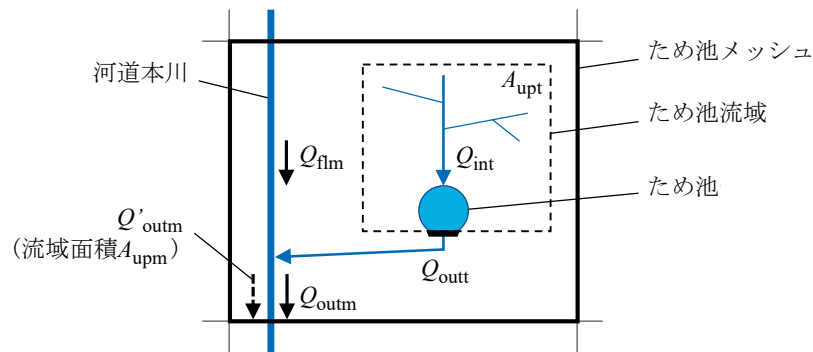


Fig. 3.5 ため池メッシュ内の計算手法の概念図

Q_{int} は Q'_{outm} に A_{upt} とため池メッシュ流域面積 A_{upm} (km^2) の比，すなわち流域面積比 C_{tm} を乗じて求めることとした．

$$Q_{\text{int}}(t) = C_{\text{tm}} Q'_{\text{outm}}(t) \quad (3.2)$$

ここで，流域面積比 C_{tm} は以下の式で示され，このとき Q_{int} が Q'_{outm} を超えないよう上限値は 1 である．

$A_{\text{upt}} < A_{\text{upm}}$ のとき

$$C_{\text{tm}} = A_{\text{upt}} / A_{\text{upm}} \quad (3.3)$$

$A_{\text{upt}} \geq A_{\text{upm}}$ のとき

$$C_{\text{lm}} = 1.0 \quad (3.4)$$

また、式 (3.3) の条件のときに生じるため池に流入しない流量は式 (3.5) で示される。

$A_{\text{upt}} < A_{\text{upm}}$ のとき

$$Q_{\text{flm}}(t) = Q'_{\text{outm}}(t) - Q_{\text{int}}(t) \quad (3.5)$$

ここに、 Q_{flm} ：非ため池流出量 (m^3/d) である。ここで、 Q_{flm} は河道本川の流量であり、ため池モデルにより計算されるため池からの放流量 Q_{out} (m^3/d) が加わり、ため池メッシュ流出量 Q_{outm} (m^3/d) となる。

$$Q_{\text{outm}}(t) = Q_{\text{flm}}(t) + Q_{\text{out}}(t) \quad (3.6)$$

次に、ため池放流量 Q_{out} (m^3/d) は灌漑放流量 Q_{irt} (m^3/d)、洪水吐越流量 Q_{spilt} (m^3/d) から構成される。

$$Q_{\text{out}}(t) = Q_{\text{irt}}(t) + Q_{\text{spilt}}(t) \quad (3.7)$$

ここで、 $Q_{\text{spilt}}(t)$ (m^3/d) は、前日の貯水量 $V_{\text{rest}}(t-1)$ (m^3) と当日のため池流入量 $Q_{\text{int}}(t) \Delta t$ (m^3) の和が最大貯水量 V_{restmax} (m^3) を超える場合にのみ発生し、以下の式から求める。

$V_{\text{rest}}(t-1) + Q_{\text{int}}(t) \Delta t > V_{\text{restmax}}$ のとき

$$Q_{\text{spilt}}(t) = Q_{\text{int}}(t) + \frac{V_{\text{rest}}(t-1) - V_{\text{restmax}}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

$V_{\text{rest}}(t-1) + Q_{\text{int}}(t) \Delta t \leq V_{\text{restmax}}$ のとき

$$Q_{\text{spilt}}(t) = 0 \quad (3.9)$$

さらに、1メッシュに複数存在するため池は、工藤ら (2014) の手法を援用し、それらの受益面積、貯水量、放流量、流域面積を統合し1つのため池として扱うこととした (以下、複数ため池メッシュ)。

上述の手法ではため池が河道本川に位置する場合、 A_{upt} と A_{upm} が等しく ($C_{\text{lm}}=1$)、 Q'_{outm} の全量が Q_{int} となってため池へ流入する。また、**Fig. 3.5** では A_{upt} をため池メッシュの面積未満として例示しているが、ため池メッシュの面積以上の場合でも同様に算定する。

3.3.2.3 受益地との関連

ため池モデルでは、多数のため池とそれらの受益地を全て関連付けることは困難であり、ため池からの灌漑放流は同メッシュの河道に直接流出させる。一方で、分布型水循環モデルでは用水配分エリア以外の場合、水田の必要水量は自メッシュの河川流量から直接取水する。これにより、ため池下流の水田は河川流量とともに灌漑放流を一部取水しており、この過程は実際の取水実態に近く、ため池と受益地は簡便に関連付けられているといえる。他方、用水配分エリアの場合、水田では自メッシュの河川流量からの直接取水は行われず、そこに灌漑放流が含まれる場合も取水されることがない。これについて、灌漑放流量の推定にて前述のように、同エリア内の水田は特定の取水地点に用水源があり、ため池への用

水依存度が低いことから問題ないものとした。

3.4 改良モデルの米代川流域への適用結果とその考察

3.4.1 改良モデルの適用と検証

前述のため池モデルを分布型水循環モデルに実装し、米代川流域に適用した。

はじめに、河道網データは国土地理院の基盤地図情報（数値標高モデル）および国土交通省の国土数値情報（河川）から作成するが、ここでは米代川流域の3次メッシュ（約1km四方）の河道網データを利用した。次に用水配分モデルでは、取水地点とその受益地内での配水順序を規定し、64箇所の用水配分エリアとしてメッシュ設定した。加えて、貯水池管理モデルでは、ダム7基の位置および有効貯水量、放流量（発電、灌漑、都市用水）をメッシュ設定した。なお、モデルに与える流出や積雪・融雪等のパラメータは、気候および地理条件が米代川流域に類似する（山間の積雪地域を貫流し日本海に注ぐ）、信濃川流域に適用されたモデル（吉田ら，2021）の値を援用した。さらに、ため池モデルでは、対象ため池295箇所をため池メッシュとして214メッシュに設定した（設定状況の一部を例示（Fig. 3.6））。それらの分類の状況をみると（Table 3.1），用水配分エリア外に位置し、地域の主な農業用水源である可能性の高いものが78%を占め、米代川流域の特徴を示していた。また、複数ため池メッシュに統合された池数は2~3池が91%と大多数であり、それらは主に上下流に隣接する重ね（親子）ため池であった（沢田ら，2022）。

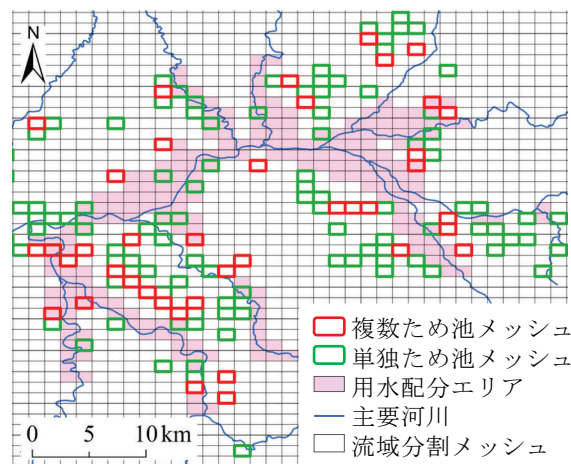


Fig. 3.6 ため池メッシュの設定状況（米代川中流部）

Table 3.1 ため池メッシュの分類

メッシュ名称	メッシュ数		合計
	用水配分 エリア内	用水配分 エリア外	
複数ため池	13	45	58
単独ため池	35	121	156
合計	48 (22)*	166 (78)*	214

* ()内は合計に占める割合 (%)

前述により構築した改良モデルを検証するため、はじめに、観測データの欠損が少ない2010～2017年において日単位の計算流量と観測流量を比較したところ、この8年間通算の平均相対誤差は検証地点4箇所では25～32%であった。次に各年の相対誤差をみると、まず2012年が全ての検証地点で最も大きく(32～71%)、これは2012年の1～2月に記録的大豪雪があり(例えば、対象流域内のアメダス鷹巣観測所では観測史上1位の最深積雪131cmを記録)、それに伴い4～5月に融雪による大增水が発生・観測されたのに対し、計算流量が過小であったことに要因があった。また、2010年では米内沢地点のみが他の検証地点(25～30%)と比較して特に大きく(39%)、この要因は、2010年1月から12月の期間に、米内沢地点上流の森吉山ダム完成に伴う試験湛水および放流が行われており、これに伴う特異なダム操作の影響と推察された。これら要因が明確であり相対誤差が比較的高いものを除いた場合、各年の相対誤差は検証地点4箇所では20～34%であった。このうち、最も下流に位置する二ツ井地点の2017年の結果(相対誤差21%)をFig. 3.7に例示する。

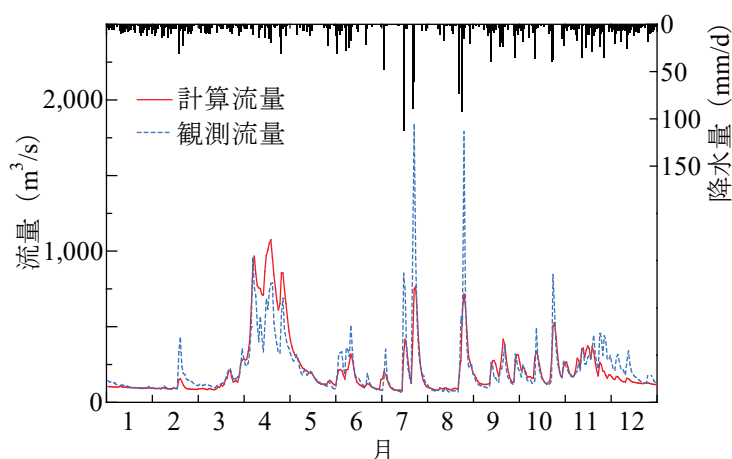


Fig. 3.7 計算流量と観測流量の比較 (二ツ井, 2017年)

図中の極端な洪水時において、流出ピーク時間は一致しているものの計算流量が過小推定となっていた。この要因として、入力したメッシュ農業気象データの降水量は解析雨量に基づくものであるため、豪雨時の降水量が山地等において過小推定されていることが考えられる。また、2月中旬から3月中旬の計算流量が過小であるのに対し、4月の融雪時の計算流量は過大となっていた。これはモデルによる冬季の融雪量の過小算定、および雨・雪の判定の条件設定が要因と推察され、対象流域における地熱融雪量等の融雪および雨・雪判定に関するパラメータの検討が課題といえる。一方で、低水の流況は長期にわたり良好な再現性を示しており、相対誤差の結果も踏まえると総じて改良モデルの河川流況の再現性は良好な精度であるといえる。ただし、それらの相対誤差はため池モデルの実装前の結果と同じであり(例えば二ツ井地点の2017年の相対誤差はモデル実装前後ともに21%)、そのため、流域レベルの水文解析ではため池の影響は小さいことが示された。そこで、小規模な支流流域に着目し、ため池が河川流量に及ぼす影響について分析した。

3.4.2 ため池が小規模支流流域の農業水利用に及ぼす影響の評価および考察

複数の支流流域を分析した中から、特に結果が明確であった合津川流域について示す。

合津川は (Fig. 3.8), 米代川中流部に位置し流路延長約 5km, 流域面積約 8km² の谷地田地形の支流域であり, 上流部には比較的大規模なため池 (受益面積 75ha, 貯水量 212 千 m³) が 1 箇所存在する. このため池の受益地を GIS の地形状況および受益面積から推定したところ, 河川沿いに細長く位置する典型的な谷地田形状であり, 対象流域のさらに下流まで分布していた.

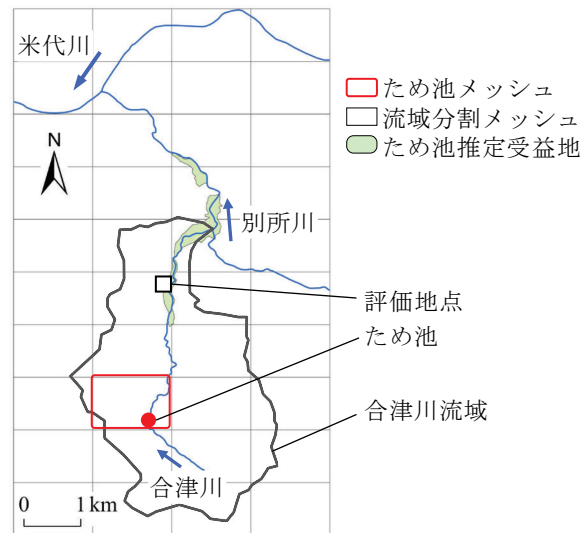


Fig. 3.8 合津川流域の概況および評価地点

ここでの評価手法として, 対象流域の下流部の地点を評価地点とし (Fig. 3.8), そこでの計算流量を, ため池モデルを設定した場合 (以下, ため池あり) と設定しない場合 (以下, ため池なし) の 2 通り算出し, 両者を相互比較した. なお, 評価地点は, 合津川最下流の別所川合流地点のメッシュでは別所川 (合津川合流後) の流量が算出されるため, その 1 つ上流のメッシュとした.

はじめに, 直近で通年計算が可能な 2021 年の結果を Fig. 3.9 に示す. 2021 年は夏がやや少雨だったものの渇水には至らず, 極端な豪雨もなくほぼ平年並みの降水量であった. 図中の灌漑期の初め (5 月初め) から 6 月下旬までの期間で, ため池ありの計算流量が多い. これはこの期間にため池からの灌漑放流があり, 貯水量がほぼ無くなる 6 月下旬まで続いていたことから, この灌漑放流が増水の要因であることが分かった. 一方, 非灌漑期 (1~4 月および 9~12 月) ではため池ありの計算流量が少ない期間があり, これはため池の貯留機能により, ため池からの流出が減少した影響による減水と推察された. ここで, 先の灌漑放流による増水に着目し, 評価地点での灌漑期総流量 (5~8 月) を求めたところ (Table 3.2), ため池ありが 2,160 千 m³, ため池なしが 1,950 千 m³ となり, 両者の差である増量分がため池ありの灌漑期総流量に占める割合 (以下, 増量分割合) は 10%であった. 加えて, ため池ありの場合に生じる同期間のため池からの総灌漑放流量は 460 千 m³であった.

次に, 著しい少雨が 5 月から 7 月中旬まで続き, その期間および夏に深刻な渇水に見舞われた 2015 年の結果を Fig. 3.10 に示す. 2021 年と同様に, 灌漑期の初めからため池ありの計算流量に増水がみられるが, この増水は 2021 年より半月ほど早い 6 月中旬に終了していた. これは, 2015 年の少雨によるため池流入量の減少に伴い, 貯水量および灌漑放流

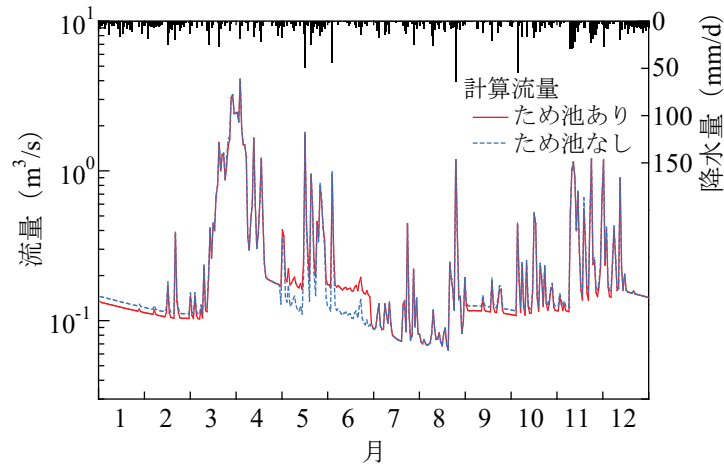


Fig. 3.9 ため池モデルの有無による計算流量の違い (2021年 (平年))

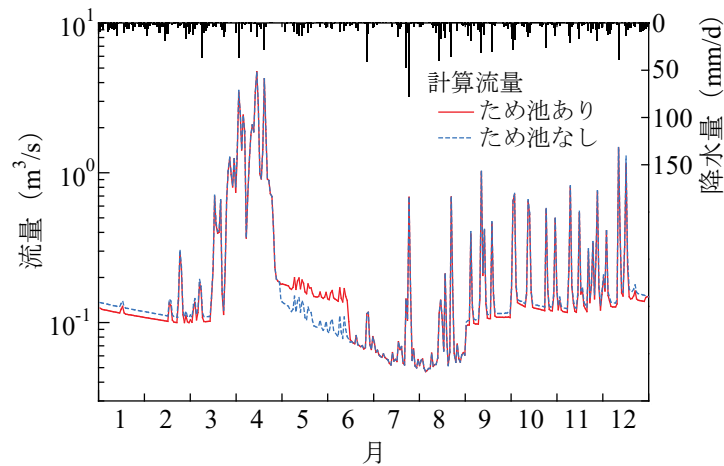


Fig. 3.10 ため池モデルの有無による計算流量の違い (2015年 (渇水年))

Table 3.2 平年と渇水年およびため池モデルの有無による灌漑期総流量 (5~8月) の比較

計算年	灌漑期総流量		灌漑期総流量(ため池あり)に占める増量割合 (a-b)/a×100	総灌漑放流量 (ため池あり)
	ため池あり	ため池なし		
	a (千 m³)	b (千 m³)	(%)	(千 m³)
2021(平年)	2,160	1,950	10	460
2015(渇水年)	1,220 (56) *	1,010 (52) *	17 (170) *	360 (78) *

* ()内は 2021 年に対する 2015 年の割合 (%)

量が早く減少したことが要因であった。続いて、灌漑期総流量は (Table 3.2), ため池ありが 1,220 千 m³, ため池なしが 1,010 千 m³ となり、これの増量割合は 17% であった。加えて、総灌漑放流量は 360 千 m³ であった。

これら両年の値を比較すると (Table 3.2), まず灌漑期総流量では、2021 年に対する 2015 年の割合はため池ありが 56%, ため池なしが 52% と約 5 割減少しており、ため池の有無に関わらず渇水による河川流量の減少が示された。続いて、灌漑期総流量 (ため池あり) に

占める増量分割合は、2021年に対し2015年が170%であった。これは、ため池が河川流量に及ぼした影響は、渇水年の方が大きかったことを示す。すなわち、ため池が受益地への用水供給に貢献した割合は、渇水年（2015年）の灌漑期では平年（2021年）の1.7倍であったといえる。この増量分割合の平年（基準年）に対する渇水年の割合は、ため池の渇水時の貢献度を示す指標となる（以下、渇水時貢献度。例えば170%は1.7と示す）。

次に、総灌漑放流量をみると、2021年に対し2015年は78%と約2割の減少であった。これは河川流量が平年の約5割となるような渇水年にあっても、非灌漑期にため池の貯水量が満水とされる効果により、平年の約8割の流量を灌漑放流したことを示し、これがため池の渇水時貢献度を高める要因となっていた。ここで、この灌漑放流による増水が顕著にみられた5～6月の期間に限定し（代かきや田植えが行われる期間）、渇水時貢献度を算定したところ、2.0とさらに高い値となった（増量分割合は2021年の14%に対し2015年が28%であった）。これにより、ため池は本来の目的である農業水利用で重要な灌漑初期の用水供給に、渇水時ほど貢献していることが定量的に示され、取水源の不安定な中山間地ではその影響が大きいことが示唆された。

前述により、小規模な支流域でのため池の灌漑放流や貯留機能が、河川流量および受益地への用水供給に及ぼす影響が示された。それらに伴い、新たに開発したため池モデルおよびそれを実装した改良モデルの有用性が示された。ここでは、米代川流域の全てのため池メッシュに同じ管理規定を設定した条件のもと、小規模支流域の1つのため池メッシュに着目し、灌漑放流の手法が平年・渇水年に関わらず同じとして評価を行った。一方、実際の少雨・渇水時には、例えば貯水位が規定の水位（満水位の3分の1等）を下回ると、放流量を減じて水田取水を番水制にするといった対応も行われる（農林水産省、2014；佐藤、2015）。このモデルでは、このような管理規定を個別に特定のため池メッシュに設定することにより、そこでの単独ため池やため池群についての解析精度を向上させることが可能となる。

ここで対象とした支流域のような中山間地に、ため池がもたらす安定した農業水利用の継続は、農地の維持および耕作放棄の抑制に繋がり、それにより、中山間地の土砂崩壊防止や洪水緩和といった多面的機能の健全な発揮が持続可能なものとなる。

3.5 小括

本章では、「流域内に分布する全てのため池のモデル化」により、開発したモデルを活用してため池が農業用水の供給に貢献していることを定量的に明らかにした。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 流域内に数多く存在するため池について、そ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、ため池モデルを開発した。なお、このため池モデルは、規模の大小に関わらず全てのため池に適用可能であることも示した。
- 2) ため池モデルを分布型水循環モデルに実装して、米代川流域に適用し、そこでの河川流況の再現性の検証から、8年間通算の平均相対誤差について25～32%と良好な精度を得た。一方、そこでは流域レベルの本川での水文解析ではため池の影響が小さいことが示された。

- 3) 次に、小規模な支流域を対象とし、ため池モデルの有無による計算流量の違いを分析し（2021年（平年（基準年））と2015年（渇水年））、ため池が用水供給に貢献した割合は、渇水年の灌漑期では平年の1.7倍であったことを示した。同時に、これをため池の渇水時の貢献度を示す指標（渇水時貢献度）とした。また、この指標を高める要因は、渇水時にあっても比較的潤沢な灌漑放流量にあること、加えて、農業水利用で重要な5～6月の期間の渇水時貢献度（2.0）はさらに高いことなどを示した。
- 4) これらから、ため池が農業水利用に及ぼす影響が示され、同時に、新たに開発した改良モデルの有用性が示された。また、管理規定を個別に特定のため池メッシュに設定することにより、そこでの解析精度が向上することを示した。
- 5) ため池がもたらす農業水利用の安定は、中山間地の多面的機能の持続に繋がることを論じた。

本章で構築したモデルではため池メッシュ個々に管理規定を設定することも可能であるが、多くのため池メッシュへの個別設定はモデル適用の汎用性を低下させるため、求める解析内容に応じた設定の精度選定が課題となる。一方で、例えば灌漑放流量の設定において、ダム放流に類似した手法としてため池の受益地付近の河川流量をキーとし、そこでの流量がある割合を下回ったときに放流するといった一般性を考慮した設定も考えられ、それらの手法検討も課題といえる。

第 4 章 分布型水循環モデルへの大区画ほ場・管水路・ICT 水管理の要素導入と農業水利用の評価

4.1 はじめに

本章では農業に携わる技術者に向けたイノベーション技術の 2 つ目として、「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」を提案する。

今後の大区画ほ場における ICT 水管理をはじめとしたスマート農業の展開を見据え、まず日本有数の穀倉地帯であり大区画ほ場整備の展開が著しい秋田県において、これまでに整備されてきた大区画ほ場における水管理や営農上の課題を、経営体への聞き取り調査等により整理し考察する。次に、それらの課題解決および農業水利用の高度化のさらなる展開に向け、大区画ほ場において管水路と ICT 水管理を備えた灌漑地区のモデル化を行う。続けて、構築したモデルを活用して農業水利用の評価を行うとともに、そこで示される農業用水の節水効果を明らかにする。さらに、ICT 水管理の効果について実際の現地において実証を行い、モデル化による評価との手法および特性の違いについて述べる。

4.2 秋田県の大区画ほ場における課題

4.2.1 調査方法

ほ場整備に関連した基準書等による調査のほか、秋田県内で実施された大区画ほ場整備の地区内で営農する、スマート農業の導入に積極的な経営体を対象として聞き取り調査を行った。聞き取り対象の選定にあたっては、秋田県が令和 2～4 年度に実施したスマート農業に対応した基盤整備の検討のための「スマート農業を支える基盤整備実証事業」(秋田県農林水産部農地整備課, 2022a) において、遠隔操作型給水栓による水管理や、トラクターの自動操舵による耕起作業といった現地実証に、実際に取り組んだ 3 つの経営体を選定した。3 者の経営耕地面積は約 100～200ha 規模のため、ほ場整備地区外でも営農しており、農地の地形条件はそれぞれ、主に平坦地、主に中山間地、平坦地と中山間地の両方と、3 者で異なる特徴がある。今後のスマート農業の展開を見据えたうえで、現在の大区画ほ場における水管理や維持管理といった営農上の課題について、1 者ずつ個別に幅広く議論しながら聞き取りを行った。

4.2.2 調査結果と考察

聞き取り調査および基準書等を参考に整理した、秋田県の大区画ほ場における課題を **Table 4.1** に示す。

4.2.2.1 地形条件別の課題（平坦地と中山間地）

平坦地で営農し、1 枚が 3.6ha (165m×218m) の大区画ほ場がある経営体からは、大区画ほ場の施工時の切土・盛土により生じた土壤養分の不均一による、水稻の生育ムラの発生が指摘された。その解消のため、土づくりや施肥の工夫に努めなければならず課題となっていた。また、農作業への風の影響については 2 つの指摘があり、1 つは強風時に生じる田面水位差について、一時的に湛水深を浅くするといった水管理で対処できており、生

Table 4.1 秋田県の大区画ほ場における課題

分類		課題
地形条件	平坦地	<ul style="list-style-type: none"> ・ 巨大区画のほ場における水稻の生育ムラの解消（施工時の切土・盛土により生じた土壌養分の不均一の解消） ・ 区画が大きくなるほど生じる，風による田面水位差および落水口から離れた場所での排水不良（農作業上の支障）
	中山間地	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大区画ほ場整備を契機とした経営規模拡大により増加した，遠方の中山間農地への移動時間の削減 ・ 草刈り労力の削減・ICT を活用した草刈り機器の導入コスト ・ 草刈り作業を行いやすくする法長・法形状および足場となる法面小段の現地配置の検討 ・ 草刈り対象となる法面積の根本的な減少に繋がる水路の管路化（地下埋設）の低コスト化
配水システム	供給主導	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔操作型給水栓による大区画ほ場の節水効果が，取水源である最上流の揚水機での節水・節電（電気料金の削減）に繋がらない ・ 遠隔操作型給水栓のゴミ詰まりによる開閉障害 ・ ICT 関連機器の将来の更新費用
	需要主導	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔操作型給水栓のゴミ詰まりによる開閉障害 ・ ICT 関連機器の将来の更新費用

育障害の発生までは至らないため，問題として捉えてはいないという内容であった．2つ目は土地柄として西風が強いいため，作業時に農機が横から強い西風を受けないよう東西に走行する（追い風または向かい風になるよう走行する）という内容であった．東西に走行した際には，3.6haの大区画ほ場の4辺全てが耕作道に接しているため，走行方向が限定されても農作業上の問題はないとのことであった．このように風の影響に関する2つの指摘は，ともに対処できているため課題とされなかった．この経営体ではこのほかに大区画ほ場の均平維持の困難についても課題とされなかったものの，一般的にはほ場の区画が大きくなるほど，風による田面水位差や落水口から離れた場所での排水不良が生じ，農作業に支障をきたすとの指摘があり（農林水産省農村振興局，2013），これらの指摘は秋田県においても課題となる．

平坦地と中山間地の両方で営農する経営体では，大区画ほ場整備を契機とした経営規模拡大により増加した，遠方の中山間農地への移動時間の増大が指摘され，移動時間の削減が喫緊の課題とされた．その対応として，遠方の中山間農地への遠隔操作型給水栓の導入を予定していた．この経営体では，地域の中山間農地が耕作放棄地とならないようそれらを多く引き受けており，早期の課題解消が望まれる．

中山間地で営農する経営体では，草刈り作業の労力の削減が課題とされた．その対応として ICT を活用した草刈り機器の導入を検討しており，導入コストが課題となっていた．これまでに，開水路形式のほ場整備により，草刈り対象となる水路の法面積がほ場整備前より増加するケースもあることが報告されている（田村・守山，2010）．今後は従来の草刈り作業のほか，ICT を活用した草刈りが行いやすい法長・法形状や，草刈り作業の足場となる法面小段の現地配置の検討が課題となる．また，法面積の根本的な減少に繋がる水路

の管路化（地下埋設）が解決策の1つになるが、開水路と比較し一般的に高価であり、その低コスト化が課題である。

4.2.2.2 配水システム別の課題（供給主導と需要主導）

開水路の小用水路に遠隔操作型給水栓を設置している経営体からは、遠隔操作型給水栓による大区画ほ場の農業用水の節水効果が、そこより下流への潤沢な用水流下には貢献するものの、取水源である最上流の揚水機での節水および節水に伴うポンプ稼働時間の削減による節電（電気料金の削減）に繋がらないことが指摘された。これは当該地区の配水システムが、供給主導型のシステムであることに起因するものであった。

一方で、クローズドタイプの管水路の小用水路に遠隔操作型給水栓を設置している経営体では、遠隔操作型給水栓による大区画ほ場の節水効果が、取水源である最上流の揚水機での節水およびそれに伴う節電（電気料金の削減）に繋がっていた。これは当該用水ブロックの配水システムが、圧力感知式の揚水機により用水が需要に応じ管水路で順次送水される、需要主導型のシステムであることに起因するものであった。

開水路および管水路の共通の課題として、遠隔操作型給水栓のゴミ詰まりによる開閉障害、および ICT 関連機器の将来の更新費用の負担が課題として指摘された。

4.2.2.3 調査結果のまとめ

大区画ほ場における技術的な課題のほか、経営規模拡大に伴い生じる課題や、ICT 水管理をはじめとしたスマート農業の導入に関する課題も浮かび上がった。

ICT 水管理では、遠隔操作型給水栓により末端ほ場における農業用水の節水効果は確実に得られていたものの、その節水効果が取水源である揚水機での節水に繋がるか否かは、配水システムの違いにより異なっていた。

4.3 モデルを活用した農業水利用の評価と節水効果および現地実証との特性比較

4.3.1 モデル化による農業水利用の評価と現地実証の手法

開水路に比べ無効放流の減少制御が可能とされる管水路（農林水産省農村振興局，2021）について前述の聞き取り調査から、需要主導型である管水路と遠隔操作型給水栓の組み合わせにより、大区画ほ場の節水効果と併せ、揚水機での節水や節電の効果が実際に得られていることが確認できた。

本研究ではこのシステムに着目し、ICT 水管理の主な展開の場となる大区画ほ場において、需要主導型の管水路による配水システムと ICT 水管理を備えた灌漑地区をモデル化し、それを活用して農業水利用を評価する。さらに、ICT 水管理の効果について実際の現地において実証を行い、モデル化による評価（以下、モデル化実証）との手法および特性の違いについて述べる。

4.3.1.1 大区画ほ場・管水路・ICT 水管理のモデル化

大区画ほ場において需要主導型の管水路による配水システムと ICT 水管理を備えた灌漑地区を仮定し、それをモデル化して、灌漑地区への農業用水の送水量を推定可能とするモデルを構築する。次に、構築したモデルを実際の送水量が実測・記録されている灌漑地区へ適用し、送水量の実測地点を評価地点として、そこでのモデルによる計算送水量と実測

送水量の相互比較から、ICT 水管理による農業用水の節水効果を評価する。

構築する管水路による配水モデルは、第 3 章の Fig. 3.4 に示した用水配分・管理モデルの構成モジュールの 1 つである用水配分モデルを改良して開発した。用水配分モデルは複数のメッシュに跨る灌漑地区について、供給主導型の配水システムを念頭に、河川取水した用水を取水地点からの距離が短いメッシュから順に、距離が同じ場合は幹線用水路の有無や標高の高低により配水順序を定める。そのため概ね灌漑地区に属する複数のメッシュの上流から下流へ順に配水する。これにより、供給水量が配水後に余れば灌漑地区から河道へ放流し、供給水量が配水途中で不足すればそれより下流のメッシュが取水不可能になるため、用水不足のリスクを常に下流域が負う構造になっている。

一方、需要主導型の管水路による配水システムは、管水路内を満水に保ち、用水を需要に応じ順次送水するため、地区全域での自由な取水を可能としている。その反面、地区の用水需要の急激な増大や、送水量不足による管水路内の水圧低下に伴う取水障害は全域で発生し得るため、上・下流を問わず地区全域が用水不足のリスクを負う特性がある。

このような需要主導型の管水路の特性について、以下のようにモデル化を行った。モデルの概念図を Fig. 4.1 に示す。

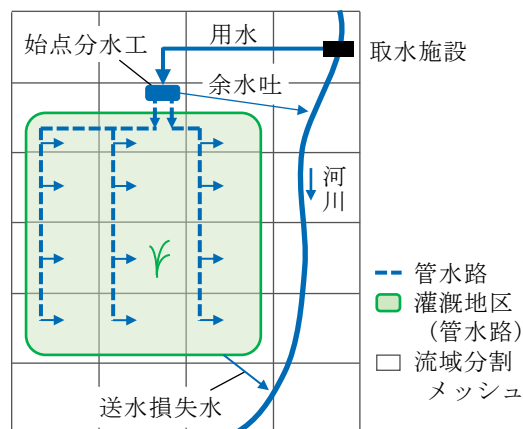


Fig. 4.1 管水路による配水モデルの概念図

計算間隔は日単位とし、まず取水施設で取水した用水量 Q_i (m^3/d) を、灌漑地区の最上流に設定した始点分水工に流入させる。取水する用水量 Q_i は、水利権許可量 Q_{wr} (m^3/s) と取水施設のメッシュへの流入量 Q_{in} (m^3/s) を比較し小さい方を日換算した量とした。

次に始点分水工では、流入した用水量 Q_i のうち灌漑地区全体の粗用水量分を管水路により地区へ送水し、送水後に用水量 Q_i が余れば用水残量 Q_{rf} (m^3/d) として余水吐から河道へ放水する構造とした。送水する灌漑地区全体の粗用水量は、灌漑地区に属する全てのメッシュ内の水田の粗用水量 Q_{gw} (m^3/d) の合計である。粗用水量 Q_{gw} は純用水量 Q_{nw} (m^3/d) を灌漑効率 I_e で除して算定される。

$$Q_{gw} = Q_{nw} / I_e \quad (4.1)$$

ここでは灌漑効率 I_e を、全面満流する管水路の送水損失 5% (農林水産省農村振興局, 2010) として $I_e = 0.95$ とした。また、純用水量 Q_{nw} (m^3/d) は次式とした。

$$Q_{nw} = A_c(ET_a + P_{pad} - P) / 1000 \quad (4.2)$$

ここで、 A_c ：水稲作付面積 (m^2/d)、 ET_a ：実蒸発散量 (mm/d)、 P_{pad} ：水田浸透量 (mm/d)、 P ：降水量 (mm/d) である。水稲作付面積 A_c と実蒸発散量 ET_a はモデルにより算定され、 P_{pad} ：水田浸透量はパラメータとなる。なお、栽培管理用水量は加味していない。

一方、灌漑地区に属する個々のメッシュでは、管水路から水稲作に必要な日々の用水を水田取水する。用水は代かき期では $20mm/d$ を設定し、普通期では水田湛水深が管理水位を下回ったときに純用水量 Q_{nw} を取水する設定とした。管理水位は普通期を通して $20mm$ に設定した。そのため間断灌漑や深水といった、特定期間の特異な水管理に伴う管理水位の変更は設定していない。なお、モデルでは水田落水口の堰板高を $30mm$ とし、これを上回る水田湛水は堰板を越流して排水（無効放流）される設定としたため、水田湛水深の計算値の上限は $30mm$ となる。

また、地区全域で農業者が自由に取水する設定として、疑似乱数を発生（乗積合同法）させて個々のメッシュの取水順を日々変化させた。これにより用水不足が発生した場合、それ以降に取水する順番のメッシュが取水不可能となり、上・下流を問わず日々の取水順が遅いほど用水不足のリスクを負うことになる。これにより、灌漑地区に属する全てのメッシュが用水不足のリスクを負う構造とした。また、送水損失水量 (Q_{gw} の 5% かつ Q_{gw} と Q_{nw} の差) は灌漑地区から河道へ放流する設定とした。

これらにより、灌漑地区内の水田では純用水量 Q_{nw} を適時管水路から取水し、その需要に見合った水量が送水される ICT 水管理を備えた、需要主導型の管水路による配水モデルを構築した (Fig. 4.1)。このモデルにより、始点分土工から灌漑地区へ送水される粗用水量の算定が可能となり、モデルにより算定される送水量と実際の灌漑地区での実測の送水量との相互比較から、ICT 水管理による送水量の節水効果が示される。

4.3.1.2 現地実証の手順およびモデル化実証との相違点

現地において実際に農業水利用を評価する場合、実証ほ場と対照ほ場を現地に設置し、それぞれで ICT 水管理および慣行の水管理を行い調査する方法がある。実証ほ場では、水田の給水量や無効放流量、ICT 水管理に要する時間といった、モデル化実証でも獲得できる情報と同様の情報が現地で得られる。それらと対照ほ場で得られる情報との対比により、ICT 水管理の効果が示される。

現地実証では、獲得したい情報が現場や気象の状況によっては得られないリスクが伴う。また、現地での実証の規模や面積は求める設定により小規模にせざるを得ないことも多い。一方、モデル化実証では、現地実証で設定困難な条件の設定による推定が可能であり、大規模・広域に実証を展開できるほか、現地実証で得られない情報の代替データを算定し補完することも可能である。

4.3.2 対象地区と実証項目

4.3.2.1 モデル化実証

秋田県北西部の米代川最下流の河口部両岸に位置する能代地区は (Fig. 4.2)、平成元年度完了の国営事業によりクローズドタイプの需要主導型の管水路による配水システムが広域に整備されている。地区内は起伏の少ない丘陵台地が多いため、受益面積 $3,168ha$ のう

ち水田 1,666ha, 畑 1,432ha, 排水改良 70ha と (秋田県能代地区土地改良区, 2020), 米どころ秋田において畑地が多い特徴がある。

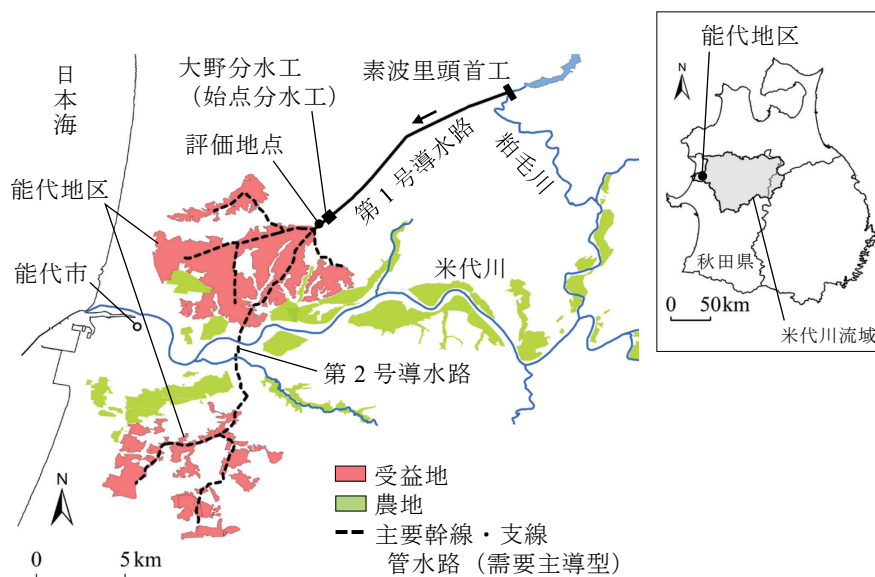


Fig. 4.2 能代地区の概況

米代川支流の粕毛川に位置する素波里頭首工にて取水された用水は、水路トンネルである第1号導水路により約12km導水され能代地区へと流下する。流下した用水は、まず能代地区の最上流に位置する大野分水工(構築したモデルの始点分水工に相当)に導水され、そこから管水路により用水需要に応じ地区へ送水される。用水はさらに米代川の右岸から左岸へと水管橋により送水され、広大な受益地に配水される。

日々の送水量は、大野分水工の直下流の地点で継続して実測・記録されている。この実測地点を評価地点とし、構築したモデルを能代地区に適用して得られる計算送水量と、実測送水量を相互比較する。

4.3.2.2 現地実証

前述4.2.1の秋田県による実証事業として、県北部に位置する高野尻地区において現地実証を行った(足立ら, 2023; 秋田県農林水産部農地整備課, 2022b)。

高野尻地区は(受益面積30ha, 令和6年度完了予定)、秋田県営事業により地区の一部である高野尻揚水機掛かりの用水ブロックにおいて(Fig. 4.3)、最上流の圧力感知式の揚水機から用水を需要に応じて順次送水する、クローズドタイプの需要主導型の管水路による配水システムが整備されている。この用水ブロックの下流域を現地実証エリアとし、実証ほ場を7筆6.3ha, 対照ほ場を1筆0.67ha設置した。

実証ほ場では、7筆の大区画ほ場について1筆当たり1基の遠隔操作型給水栓(水位計・自動給水機能付き)を設置し、実証者が設定した湛水深または水温を保つよう自動制御する水管理を行った。また、7筆のうち3筆では落水口の近接箇所に水位センサーを設置し、水田水位の連続観測を行った。これにより得られる水田水位と、落水口の堰板高および幅から四角堰の公式により排水量(無効放流量)の算出を行った。一方、対照ほ場では水口を手動で開閉する慣行の水管理を行った。併せて、落水口の近接箇所に水位センサーを1

基設置し、実証ほ場と同様に無効放流量の算出を行った。

水管理に要する時間について、両ほ場において現場での作業時間、現場への移動時間を、また、実証ほ場に限り ICT 水管理による遠隔での情報の閲覧時間、情報端末等の機器の操作時間を、実証者の計測・記録および実証者への聞き取りにより算定した。

実証期間は 2021 年の灌漑期間 94 日のうち、無効放流量については水位センサーを設置した 91 日間、水管理時間については中干し期間 9 日を減じた 85 日間とした。

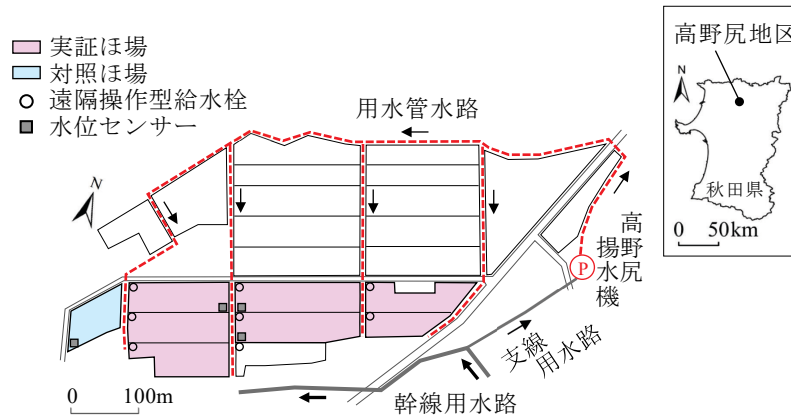


Fig. 4.3 高野尻地区の実証ほ場と対照ほ場

4.3.3 モデルの適用による節水効果と現地実証の結果およびその考察

4.3.3.1 モデル化実証

構築した管水路による配水モデルを、第3章で構築し米代川流域へ適用した改良モデルに実装し、能代地区へ適用した (Fig. 4.4). 具体的には、改良モデルに設定した 64 箇所の用水配分エリアのうち 1 つが能代地区であり、そこへ用水配分モデルに代えて構築した管水路による配水モデルを適用した。

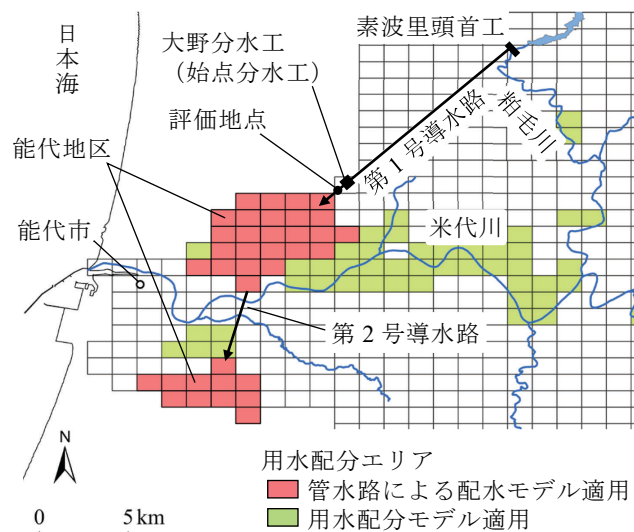


Fig. 4.4 能代地区のメッシュ設定状況

計算結果について、まず能代地区として設定した 36 メッシュ平均の日ごとの計算水田湛水深を Fig. 4.5 に示す（直近の計算結果である 2022 年を例示）。

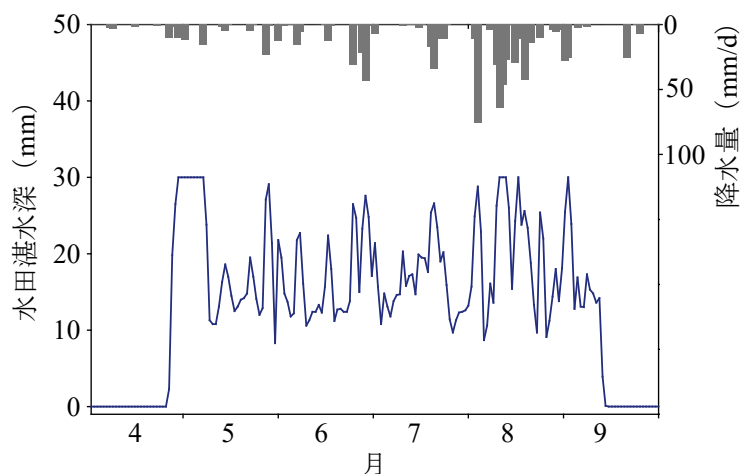


Fig. 4.5 能代地区の平均の計算水田湛水深（2022 年）

計算期間は、能代地区の許可水利権の灌漑期間に基づき 4 月 26 日～9 月 10 日とした。このうち、代かき期が 4 月 26 日～5 月 8 日、普通期が 5 月 9 日～9 月 10 日となる。

図より、計算水田湛水深は計算期間を通して管理水位に設定した 20mm 前後に保たれていることが分かる。また、計算水田湛水深が上限値となる 30mm であり無効放流が発生（前述 4.3.1.1）した日の要因について、4 月下旬～5 月上旬は代かき期の用水設定のためであり、ほかは降水量が多いためである。それら以外の計算水田湛水深は日々 30mm 未満に保たれており、無効放流の発生がないことが分かる。これにより、水田への過剰な用水供給を日常的に抑制する ICT 水管理をモデルが表現していることが確認できる。

次に、大野分水工の直下流の評価地点において、モデルによる計算送水量と施設管理者から収集した実測送水量を、過去 5 年（2018～2022 年）を評価期間とし、灌漑期間（4 月 26 日～9 月 10 日）において相互比較した。このとき、実測送水量のうち畑作分を除いた水稲作分の送水量を求め、能代地区の水利権協議資料（農林水産省東北農政局, 2018）から水稲作分の送水量割合（85%）を求め、実測送水量を補正して用いた。評価期間における結果のうち、直近の 2022 年のグラフを Fig. 4.6 に例示する。

図において、全体的に計算送水量と実測送水量のピーク時間は概ね一致していた。実測送水量をみると降水時に減少しており、農業者が日々の水管理に尽力している状況が分かる。また、全体的に計算送水量が実測送水量を下回っており、その時の両者の差（図中の着色部）は、モデル化した ICT 水管理による送水量の節水効果を示し、それらは栽培管理用水など実際に農業用水の節水に繋がる可能性のある量（以下、節水の可能性量）と考えられる。このような節水の可能性量は、評価期間とした 5 年間に共通して降水時に多くみられた。これは、モデルでは水田への降水量が加味され純用水量および粗用水量（計算送水量）が鋭敏に減少算定されるのに対し、人力の水管理現場では降水時といえど取水栓の閉塞が一部行えず、ほ場での取水が続く実態を示している。

一方で、7 月下旬頃の無降水時の節水の可能性量が特に多い。これは水稲の水管理で重要となる、栽培管理用水の一種であり出穂期に水を切らさないようほ場へ給水し続ける“花

水”が要因と推察される。花水は評価期間とした5年間の7月下旬～8月中旬の無降水時において同様に確認された。これにより、ほ場条件や水源状況といった様々な要因により変化する栽培管理用水（農林水産省農村振興局，2010）について、モデルを活用した水量推定等の展開への可能性が示唆される。さらに図より、8月下旬以降ではそれまでとは逆に計算送水量が実測送水量を上回っていた。これは、現場では一部で用水が不要となり落水しているのに対し、モデルでは普通期を通して管理水位を20mmに設定したためである。このような現場の明らかな水利用の変更に対するモデルの設定検討が課題といえる。

節水の可能性量は現場へのICT水管理の導入により、実際に現場で節水が期待できる量であり、水源を揚水機による取水に頼る地区では節電（電気料金の削減）の可能性量ともいえる。このような節水の可能性量が実測送水量に占める割合を両者の灌漑期間の総量から求めたところ、5年間平均で32%であった（各年では26～35%）。

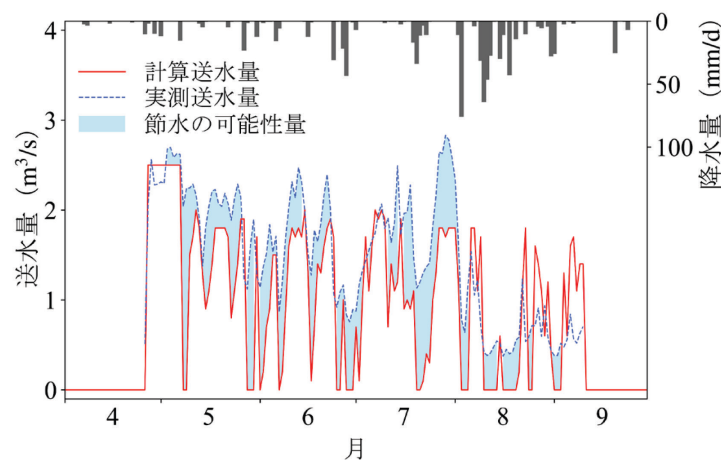


Fig. 4.6 計算送水量と実測送水量の比較（2022年）

4.3.3.2 現地実証

遠隔操作型給水栓による無効放流量の削減効果を Table 4.2 に示す。実証ほ場と対照ほ場の筆数および面積が異なることから実証ほ場では3筆を合計のうえ、それぞれ1日当たりの無効放流高を算出したところ、実証ほ場が0.38mm/d、対照ほ場が1.78mm/dとなり、対照ほ場に対する実証ほ場の無効放流高の比は0.21と、実証ほ場の無効放流は対照ほ場に比べ79%削減されていた。

Table 4.2 遠隔操作型給水栓による無効放流量の削減効果

ほ場 区分	ほ場 番号	面積 <i>a</i> (ha)	観測 日数 <i>b</i> (日)	無効放流		無効放流 高比 実証/対照
				放流量 <i>c</i> (m ³)	放流高 <i>c</i> / (10 × <i>a</i> × <i>b</i>) (mm/d)	
実証 (ICT)	1	0.95	91	240	0.28	0.21
	2	1.11	91	783	0.78	
	3	1.11	91	64	0.06	
	計	3.17	—	1,087	0.38	
対照 (慣行)	1	0.67	91	1,083	1.78	

次に、遠隔操作型給水栓による水管理時間の削減効果を **Table 4.3** に示す。ここではほ場 1 筆当たりの値を示している。現場の水管理の状況を見ると (**Table 4.3 (a)**)、現場での作業の総回数は、実証ほ場では 7 回であったのに対して対照ほ場が 170 回と、実証ほ場の方が圧倒的に少ない結果であった。そのため作業の総時間、現場までの移動の総時間、それらを合計した現場時間計において、実証ほ場が大幅に短い結果となっていた。また、両ほ場ともに作業より移動に要する時間が長い結果であった。一方、ICT 水管理の状況は (**Table 4.3 (b)**)、情報の閲覧の総時間 (5.7hr) が情報端末等の操作の総時間 (1.2hr) の約 5 倍と長かった。両ほ場においてこれら水管理の全てに最終的に要した水管理総時間は (**Table 4.3 (b)**)、実証ほ場が 7.7hr、対照ほ場が 19.8hr であり、対照ほ場に対する実証ほ場の水管理総時間の比は 0.39 と、実証ほ場の水管理時間は対照ほ場に比べ 61%削減されていた。

今回の現地実証では、モデル化実証で示した送水量の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、対照ほ場における手動の水管理による給水量が明確に獲得できなかったことから実証できておらず、現地でのデータ収集の際のリスクが示唆された。ただし、実証ほ場では無効放流量が 79%削減されていたことから、給水量も確実に削減されていたことが推察される。給水量について現地実証した研究として例えば、ICT 自動給排水システムにより、ほ場への給水量が約 50%削減されたとの報告があり (若杉・鈴木, 2017)、その節水効果が示されている。

Table 4.3 遠隔操作型給水栓による水管理時間の削減効果 (ほ場 1 筆当たり)。 (a) 現場の水管理時間、 (b) ICT 水管理の時間および実証ほ場と対照ほ場の総時間比

(a)

ほ場 区分	調査 日数	現場の水管理						現場 時間 計
		作業				移動		
		回数	時間	総 回数	総 時間	往復 時間	総 時間	
		a (日)	b (回)	c (min)	d^* (回)	$e=$ $c \times d / 60$ (hr)	f (min)	
実証 (ICT)	85	—	3	7	0.3	4	0.5	0.8
対照 (慣行)	85	2	3	170	8.5	4	11.3	19.8

* 実証ほ場の場合、必要に応じ現場に行った回数。対照ほ場の場合、調査期間中は毎日ほ場に行くため $a \times b$ 。

(b)

ほ場 区分	調査 日数	ICT 水管理 (実証ほ場のみ)							水管理 総時間	水管理 総時間 比	
		情報の閲覧				操作					ICT 時間 計
		回数	時間	総 回数	総 時間	時間	総 回数	総 時間			
		a (日)	i (回)	j (min)	$k=$ $a \times i$ (回)	$l=$ $j \times k / 60$ (hr)	m (min)	n (回)			
実証 (ICT)	85	2	2	170	5.7	2	37	1.2	6.9	7.7	0.39
対照 (慣行)	85	—	—	—	—	—	—	—	—	19.8	

4.4 小括

本章では、「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」により、農業用水の節水効果について評価を行い、渇水への対応にも繋がる農業水利用の高度化展開の方向性を示した。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 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。また、需要主導型である管水路と遠隔操作型給水栓の組み合わせにより、ほ場の節水や揚水機での節水・節電の効果が実際に得られていることを提示した。
- 2) モデル化実証では、需要主導型の管水路の特性をモデル化するため、灌漑地区の純用水量の需要に見合った水量を送水する構造や、地区全域での自由な取水の設定等を提案し、ICT 水管理を備えた需要主導型の管水路による配水モデルを構築した。
- 3) 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、モデルによる計算送水量と実測送水量を灌漑期間において相互比較した。それによりモデル化した ICT 水管理による送水量の節水効果が示され、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%であった。
- 4) 現地実証では、需要主導型の管水路が整備されている高野尻地区において、実証ほ場と対照ほ場を設置し、それぞれで ICT 水管理および慣行の水管理を行い調査した。その結果、遠隔操作型給水栓により無効放流量が 79%削減され、水管理時間は 61%削減されたことを実証した。こ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、現地実証の特性であるデータ収集の際のリスクが示唆された。
- 5) モデル化実証と現地実証の対比により、両者の手法や実証規模、得られる情報といった特性の違いを示した。

本章ではじめに提示した大区画ほ場における課題は、スマート農業を実装可能とする基盤整備のあり方の示唆に繋がる。また、構築したモデルでは灌漑地区に属する個々のメッシュでの間断灌漑や深水といった特異な水管理のほか、落水時期の考慮など用水供給に影響を及ぼす水管理の設定が課題となる。

第 5 章 水田域の持つ遊水地機能の超過洪水に対するソフト対策としての活用法

5.1 はじめに

本章では同一流域に関係する様々な分野の技術者に向けた技術として、「水田域の持つ遊水地機能のソフト対策としての活用法」を提案する。

はじめに、流域の排水能力の整備水準（流す機能）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、結果として都市域の治水に貢献してきた実態を、水田域が持つ遊水地機能の効果として理解・評価し治水に利活用すること、また、利活用の方法をさらに展開し、より広範囲の水田域に氾濫水を強制貯留させることを超過洪水に対する「ソフト対策」として定義する。そのうえで、この対策の要となる農村地域が流域治水に果たす役割の評価を行い、水田の貯留機能を利活用した流域管理手法を提案することを大きな目標に、都市化が進行する低平水田域において、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を評価する一連の方法を提案する。具体的には、水田域の持つ洪水防止機能のマクロ評価法（Masumoto et al., 2006）が示す、定式化された流域の排水能力と貯留能力の関係を応用し、新たに超過洪水に対する水田貯留能力の定量化により遊水地機能を評価する手法を提示し、さらにソフト対策を案出する。次に、その手法を低平都市化水田域へ適用し評価を行う。最後に、それらの評価を受けて、超過洪水に対する水田域の持つ貯留ポテンシャルを用いた流域治水としての活用法を提案する。

5.2 研究方法

5.2.1 対象地区の概要

第 2 章で対象とした西蒲原地区（**Fig. 2.1**）を本章においても対象とした。西蒲原地区は低平都市化水田域であり、国営事業により農地防災として 50 年確率降雨に対する排水整備水準を備え（計画排水量 $529.9\text{m}^3/\text{s}$ ）、計画上、水田への基準田面上 30cm 以内の湛水、および 30cm を超える場合は 24 時間以内の湛水が許容されている（農林水産省北陸農政局, 2004）。

対象地区では平成 10 年 8 月の記録的豪雨により（新潟観測所で観測史上最大の日降水量 265mm を記録）、**Fig. 2.1** の北部に位置する主に標高-1.0m 以下の地域周辺において農地湛水の被害が発生している（新潟県土木部河川管理課, 2019）。そこでは宅地への浸水被害もあり、仮に水田域での湛水（貯留）がなければ周辺都市域の被害はさらに拡大していたと考えられる。

5.2.2 水田域の持つ洪水防止機能のマクロ評価法

本研究で応用する用排水路等の農業水利施設を含めた水田域の持つ洪水防止機能のマクロ評価法は、流域をマクロに捉え、流域全体の水田貯留機能が定量化できる点に特徴がある。

ここでは、前述 2.3.3 で作成した西蒲原地区の各種確率年（1 年、2 年、5 年、10 年、30

年, 50 年, 100 年, 200 年) に対する全流域流出ハイドログラフの一部を使用する. このハイドログラフは, 施設設計段階の各種確率年の計画降雨に対応する流出を関数近似で標準化したものであり, ある確率年降雨が対象地区に降った場合の標準的な流出を表す. このグラフの一例として, 対象地区内の排水ブロックの 1 つである広通江地区 (流域面積 18km^2) の, 土地改良施設の基本的な排水整備水準である 10 年確率降雨に対する結果を **Fig. 5.1** に示す.

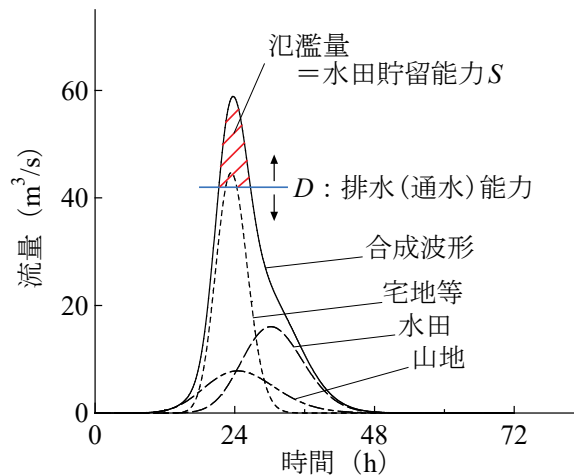


Fig. 5.1 ハイドログラフの合成

Fig. 5.1 の合成波形 (全流域流出ハイドログラフ) において流域の排水 (通水) 能力と氾濫量の関係を示すと, 図中のように排水 (通水) 能力 D を考慮したとき, これを超える流量の総和が氾濫量として規定され (図中の流量 $(Q_{ai}(t)) \geq D$ となる範囲の総流出量 (図中の斜線部)), 式 (5.1) で表される.

$$V_s = \sum_{Q_{ai}(t) \geq D} (Q_{ai}(t) - D) \quad (5.1)$$

ここに, V_s : 氾濫量 (m^3), $Q_{ai}(t)$: 時刻 t における全地目からの全流出量 (m^3/s), t : 時間 (h), D : 排水 (通水) 能力 (m^3/s) である.

Fig. 5.1 で規定した氾濫量に関して, 流域レベルでマクロに見た場合, 都市域の流下量は河川の最大通水能力を超えることができないため, 大洪水に対しては水田域 (排水路や排水河川を含む) が洪水を積極的に貯留するバッファーとしての遊水地機能を果たしていることになる. これにより氾濫量は水田貯留能力として表現でき, すなわち, 都市域の流下量と都市近郊の水田域の洪水緩和能力の関係は, 排水 (通水) 能力と水田貯留能力 (氾濫を緩和) の関係と言い換えることができる. この両者の関係を **Fig. 5.1** で示すと, 流域の排水 (通水) 能力 D が例えば増強整備によって今より向上すると, 水田貯留能力 S はその分減少して今より少量でよいことになる. そのため排水 (通水) 能力 D を様々に仮定し上下に変化させると, 排水 (通水) 能力 D と水田貯留能力 S の関係が複数プロットされ, それらを結ぶと **Fig. 5.2** に示す曲線が描かれる. 同図には, 5 つの降雨の確率年 (10 年, 30 年, 50 年, 100 年, 200 年) に対してそれぞれ求めた曲線を併せて示している.

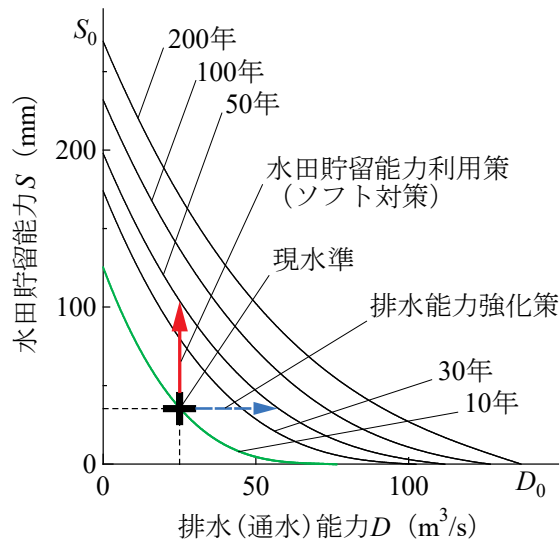


Fig. 5.2 D (排水能力)- S (貯留能力)関係図

このときの排水（通水）能力 D と水田貯留能力 S の関係（以下， D - S 関係）は式（5.2）で表現される（Masumoto et al., 2006）.

$$S/S_0 = ((D_0 - D)/D_0)^u \quad (5.2)$$

ここに， S ：水田貯留能力（mm）， S_0 ：最大水田貯留能力（mm）， D_0 ：最大排水（通水）能力（ m^3/s ）， D ：排水（通水）能力（ m^3/s ）， u ：曲線のパラメータである．

Fig. 5.2 において，例えば流域の排水整備水準が 10 年確率降雨に対応した施設規模の場合，そこでの現在の排水（通水）能力 D を規定すれば，図中の D の点線が 10 年確率降雨の曲線と交わる＋印の点の水田貯留能力 S が定まる．さらに，この＋点が現在の排水整備水準（以下，現水準）を示す点となる．このように示される D - S 関係図が水田域の持つ貯留能力（遊水地機能）を定量的に算定し，流域全体のマクロな遊水地機能を評価する一つの指標となる．

5.2.3 豪雨に伴う超過洪水に対する遊水地機能の評価法

D - S 関係図を使用し，新たに様々な条件を仮定した場合の水田貯留能力の定量化等から水田域の持つ遊水地機能を評価する．

はじめに，現水準を上回る各種の確率降雨に伴う超過洪水に対して，Fig. 5.2 の現水準を基点とした上向きの実線矢印で示される水田貯留能力の利用策が提示できる（これは 50 年確率降雨に対応する例である）．この矢印の長さは貯留すべき氾濫量であり，かつその量に応じて水田域から引き出される貯留に必要な水田貯留能力を定量的に示す（以下，必要水田貯留能力 ΔS ．図中の例は ΔS_{50} と書ける）．ただし，水田貯留能力はあくまでポテンシャルとして持つ機能量を評価していることになり，本研究では流域全体での貯留高として示している．

このように定量化される水田貯留能力を治水に利用する方策として，前述 5.1 で定義した水田域に氾濫水を貯留させるソフト対策が導出でき，これは水田域がポテンシャルとして持つ遊水地機能の利活用といえる．ソフト対策では具体的に，現状で流域内の水田域が，

氾濫水を標高の特に低い場所に集中し貯留する実態を理解・評価して利活用する。それに加え、利活用の方法をさらに展開し、都市域に新たな浸水リスクを生じさせないことを前提に、さらに農業者側のリスク分散のため、流域の中・下流部の現状より広範囲な水田域に氾濫水を強制貯留させ、治水に貢献することを想定している。これにより、将来の様々な超過洪水への柔軟な対応が可能になる。

次に、水田域の持つ遊水地機能を多角的に考察するため、ソフト対策以外の対策を考える。

超過洪水に対して、まず遊水地を新たに整備し氾濫水を貯留するハード対策が提示できる。このとき、この対策を示す **Fig. 5.2** の矢印は前述のソフト対策の実線矢印と等しくなる。そのためソフト対策の必要水田貯留能力 $\angle S$ の貯留量は、このハード対策の実施（整備）に必要となる遊水地の貯留容量に相当する（以下、必要遊水地容量 $\angle C$ 。ここでの例では $\angle C_{50}$ と書ける）。さらに2つ目のハード対策として、超過洪水に対し排水（通水）能力を強化（増強整備）して対応するハード対策が提示できる。この対策は **Fig. 5.2** の現水準を基点とした右向きの破線矢印で示される（これはソフト対策と同じく 50 年確率降雨に対応する例である）。このとき矢印の長さは、この対策の実施にあたり現水準からさらに増強整備が必要となる排水（通水）能力を定量的に示す（以下、必要排水（通水）能力 $\angle D$ 。図中の例は $\angle D_{50}$ と書ける）。最後に、これら2つのハード対策の実施に必要な建設費用を対象地区内で過去に実施された類似事業（工事）の整備量および総事業費から試算する。

ここで、ハード対策の遊水地整備の必要建設費用を試算することは、上述のようにソフト対策の必要水田貯留能力 $\angle S$ とハード対策の遊水地整備の必要遊水地容量 $\angle C$ が等しいことから、ソフト対策で示す水田貯留能力に頼る環境の価値を金銭単位で評価する環境評価手法に相当する。環境評価手法は大別すると顕示選好法と表明選好法に区分され、顕示選好法には代替法、トラベル・コスト法、ヘドニック法、表明選好法には CVM 法がある（栗山・馬奈木, 2020）。ここで用いる手法は、水田貯留能力と機能の類似性が高い遊水地を代替として評価する代替法である。

ここまで、前述 5.2.2 から本項までで示したように、全流域流出ハイドログラフから $D-S$ 関係を定式化し、これを基に超過洪水に対する水田貯留能力と排水（通水）能力の定量化により水田域の持つ遊水地機能を評価する一連の手法を、ここでは「流域貯留機能評価法」と呼ぶ。また、この評価法によりソフト対策が案出できる。

5.3 結果

5.3.1 対象地区への評価法の適用

対象とした西蒲原地区に一連の流域貯留機能評価法を適用した。ここで、 $D-S$ 関係図はこれまで、流域面積の約半分を山地が占める東海地方の庄内川流域（流域面積 1,010km²）において作成が試みられているが（農林水産省農村振興局・農研機構農村工学研究所, 2007）、西蒲原地区のように低平な都市化水田地域での作成事例はない。

ここでの新たな $D-S$ 関係図の作成には、第2章で導出した西蒲原地区全体の全流域流出ハイドログラフを使用した。具体的に使用した全流域流出ハイドログラフは5つの計画降

雨の確率年（10年，30年，50年，100年，200年）に対するものであり，それらから各 D - S 関係曲線を求め，対象地区の D - S 関係図を作成した（Fig. 5.3）.

Fig. 5.3 において，対象地区は 50 年確率降雨に対して計画排水量が $529.9\text{m}^3/\text{s}$ であり，図中の + 印の点がこの現水準を示す．このときの水田貯留能力 S は 59mm となり，貯留量としては $20.1 \times 10^6\text{m}^3$ となった（前述 2.3.3 の流域面積 342km^2 で換算）．これより，50 年確率降雨があった場合，現水準では水田域への氾濫（洪水貯留）は発生しないとした排水整備水準であることが示される．

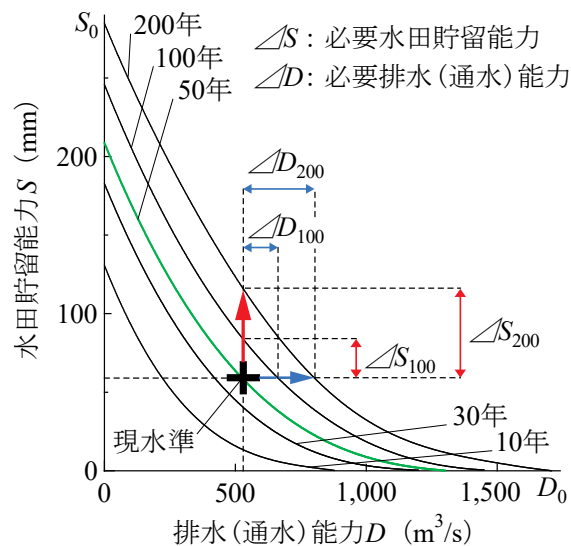


Fig. 5.3 西蒲原地区の D - S 関係図

5.3.2 豪雨に伴う超過洪水に対する遊水地機能評価

対象地区の現水準を上回る確率年を評価対象とし，Fig. 5.3 の 100 年，および 200 年確率降雨に伴う超過洪水に対応する場合の 2 通りについて評価した．

はじめに，水田貯留能力を利用したソフト対策について，必要水田貯留能力は Fig. 5.3 の ΔS_{100} および ΔS_{200} で示される．算定の結果から ΔS_{100} は 26mm （貯留量として $8.9 \times 10^6\text{m}^3$ ）， ΔS_{200} は 57mm （貯留量として $19.5 \times 10^6\text{m}^3$ ）となり（Table 5.1 (a)），これらは現水準の水田貯留能力 59mm の約 44～97% に相当することが分かった．また，これにより遊水地を新たに整備するハード対策の必要遊水地容量は，この必要水田貯留能力（ ΔS_{100} および ΔS_{200} ）の貯留量と等しく，必要遊水地容量 ΔC_{100} は $8.9 \times 10^6\text{m}^3$ ， ΔC_{200} は $19.5 \times 10^6\text{m}^3$ となった（Table 5.1 (b)）.

次に，排水（通水）能力を現水準からさらに増強整備するハード対策について，必要排水（通水）能力は Fig. 5.3 の ΔD_{100} および ΔD_{200} で示される．算定の結果から ΔD_{100} は $136.4\text{m}^3/\text{s}$ ， ΔD_{200} は $281.7\text{m}^3/\text{s}$ となり（Table 5.1 (b)），これらは現水準の排水（通水）能力 $529.9\text{m}^3/\text{s}$ の約 26～53% に相当することが分かった．

続いて，このように定量化した 2 つのハード対策の実施に必要なとなる建設費用を簡易に試算した．まず必要遊水地容量（ ΔC_{100} および ΔC_{200} ）について，この貯留容量を持つ遊水地を整備するとして，対象地区内に整備され遊水地機能を有する上堰潟公園の調整池容量および総事業費から試算した（調整池容量は $409,000\text{m}^3$ ，総事業費は 11.1 億円，平成 9 年

度事業完了（新潟市巻支所，2006）。具体的には事業実績値からまず単位調整池容量当たりの事業費を求め，それを必要遊水地容量に乗じて算定した。その結果，必要建設費用は $\angle C_{100}$ が241億円， $\angle C_{200}$ が529億円となった（Table 5.1 (b)）。ここで，上堰潟公園の総事業費には親水公園としての施設整備費用も含まれるため，これらの必要建設費用は純粋な遊水地の建設費用よりも過大傾向であることに留意する必要がある。

次に，必要排水（通水）能力（ $\angle D_{100}$ および $\angle D_{200}$ ）について，対象地区で実施された国営事業の排水施設の増強整備量，および総事業費から試算した（既存排水施設の排水量をさらに210.8m³/s増強，総事業費は1,552億円（西蒲原土地改良区，2007））。具体的には事業実績値からまず単位増強量当たりの事業費を求め，それを必要排水（通水）能力に乗じて算定した。その結果，必要建設費用は $\angle D_{100}$ が1,004億円， $\angle D_{200}$ が2,074億円となった（Table 5.1 (b)）。

Table 5.1 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評価結果，(b) ハード対策の評価結果および必要となる建設費用

(a)					
ソフト対策 の内容	確率年	水田貯留能力 S		必要水田貯留能力 $\angle S$	
		貯留高 (mm)	貯留量 (10 ⁶ m ³)	貯留高 (mm)	貯留量* (10 ⁶ m ³)
水田貯留能力 の利用	50年(現状)	59	20.1	—	—
	100年	85	29.0	26($\angle S_{100}$)	8.9($\angle S_{100}$)
	200年	116	39.6	57($\angle S_{200}$)	19.5($\angle S_{200}$)
(b)					
ハード対策 の内容	確率年	必要遊水地 容量 $\angle C^*$ (10 ⁶ m ³)	排水(通水) 能力 D (m ³ /s)	必要排水(通水) 能力 $\angle D$ (m ³ /s)	必要建設 費用 (億円)
遊水地の 新たな整備	100年	8.9($\angle C_{100}$)	—	—	241
	200年	19.5($\angle C_{200}$)	—	—	529
排水(通水)能力 の増強整備	50年(現状)	—	529.9	—	—
	100年	—	666.3	136.4($\angle D_{100}$)	1,004
	200年	—	811.6	281.7($\angle D_{200}$)	2,074

* 必要水田貯留能力 $\angle S$ の貯留量と必要遊水池容量 $\angle C$ は等しい。

5.4 考察

ソフト対策ではここで定量化した必要水田貯留能力を利用し，実際に既存の中・下流部の水田域に氾濫水を強制貯留させることになる。算定の結果から100年確率降雨にソフト対策で対応する場合，必要水田貯留能力は26mmであるため（Table 5.1 (a)），現水準の水田貯留能力59mmの44%の氾濫水量の貯留が必要になることが分かり，実際の貯留の実現可能性が示唆されている。また，ソフト対策での貯留面積を仮定した場合，必要水田貯留能力（貯留量）からそこでの貯留高が推定でき，対策を検討するうえでの参考となる。そこで，水田域がポテンシャルとして持つ遊水地機能を，ソフト対策のための補償制度の創

設や、その費用を治水の効果を楽しむ都市側が負担することを前提に、超過洪水が発生した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、超過洪水対策の選択肢の一つとして提案する。この対策による実際の貯留では農業者側が、水田域がポテンシャルとして持ち、すぐに利活用可能である遊水地機能を理解し、流域管理の一環として利活用することを承諾することが求められる。また、そのためには貯留への必要最小限の備えとして、農業者側の目標とする施設整備の水準の確保や浸水を回避すべき工作物の移転補償、および流水侵食を防止すべき箇所への補強整備が必要になる。さらに、実際の氾濫水の貯留により発生する農作物被害への補償も不可欠となる。

このような遊水地機能の利活用に伴い水田域で生じる浸水が、農作物に及ぼす影響や被害の研究が近年注目されている。例えば、広域に発生した水稻の冠水被害を模擬冠水試験や被害リスク評価から推定した研究（皆川ら、2016；皆川ら、2018）や、水田転換畑で作付けされることが多いダイズの冠水による影響を調査した研究（曾根ら、2022）などが参考になる。

一方、ハード対策では、まず遊水地の新たな整備を考えると候補地の選定やそこでの地権者との権利調整の課題が多く、それらの解決後に造成工事が開始される。このような候補地選定や権利調整の課題は先のソフト対策でも同様に生じるが、それらの解決後を考えると、ソフト対策の必要最小限とする貯留整備の工期と比較しハード対策の遊水地造成工事の工期がより長いと考えられる。次に、排水（通水）能力の増強整備では、排水機場の増強のみならず長大な排水路の通水断面の拡大を含めた排水系統全体の増強が必要となり、相当の建設費用が必要となる。さらにそれに伴い、増強後の維持管理費の増加の発生や工期の長期化も想定される。実際に過去の国営事業では既存排水施設の排水量を $210.8\text{m}^3/\text{s}$ 増強するため 24 年の工期を費やしている。これらから、遊水地機能を利活用したソフト対策の方が迅速な対策といえる。一方、前述のソフト対策での整備や補償の費用をハード対策の費用以下にすると考えた場合、費用の上限値としてハード対策の必要建設費用が一つの目安になる。

さらに踏み込んで、遊水地機能のソフト対策としての実際の活用法を想定した場合、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ことを、都市側が適正に認識・評価する意識のさらなる醸成や、流域内での合意形成および具体的な補償制度創設といった議論すべき課題が多く、これらの課題解決の前進に向け農業者側と都市側の協働が不可欠となる。そのため、このような意識の醸成には、混住化が進む農村地域において農業水利施設の管理者として長年培ってきた土地改良区の組織力や、農業の多面的機能の維持・向上を目指し農業者とその他の者が共に活動する多面的機能支払交付金施策（農林水産省、2022c）のさらなる展開、およびこの活動を通しての流域治水を見据えた情報発信が重要と考える。加えて、これらの取り組みを次世代に向けた防災教育に繋げ、都市側を含む地域ぐるみで防災・減災の意識を醸成していくことが望まれる。

今回提示した対策は水田貯留能力 S と排水（通水）能力 D のどちらか一方だけの利用・強化を仮定し、残り一方を固定（現水準を維持）した。これについて両者の利用・強化を同時に実施する対策も考えられる。ここでは様々なケースが想定され、例えばソフト対策を第一としつつ、排水（通水）能力 D を現水準から少しだけ増強し、それで排水（通水）しきれない氾濫水を水田貯留能力 S に頼り貯留するといった（ D - S 関係図中の対策を示す

矢印は、現水準を基点とし右斜め上方へ向かう)、その流域に応じたより現実的な対策の検討も可能となる。

5.5 小括

本章では、「水田域の持つ遊水地機能のソフト対策としての活用法」により、水田域の持つ遊水地機能を流域管理の一環として利活用する手法を示すとともに、農村地域が流域治水に果たす役割を論じた。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 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。
- 2) 本研究で応用した水田域の持つ洪水防止機能のマクロ評価法の概要を示し、対象地区の標準化された全流域流出ハイドログラフにおいて排水（通水）能力 D と水田貯留能力 S を規定し、この両者の関係から導出する D - S 関係図の作成方法を示した。
- 3) D - S 関係図を基に、新たに超過洪水に対する水田貯留能力の定量化により水田域の持つ遊水地機能を評価する一連の手法を、流域貯留機能評価法として提案した。また、この評価法からソフト対策を案出した。
- 4) 対象地区にこの評価法を適用し、そこで作成した対象地区の D - S 関係図から、ソフト対策に利用する水田貯留能力を定量化し遊水地機能を評価した。さらに、遊水地機能の多角的な考察のため2つのハード対策の定量化も行った。
- 5) 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とし、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超過洪水対策の選択肢の一つとして提案した。また、このソフト対策はハード対策よりも迅速な対策であることを論じた。
- 6) 遊水地機能のソフト対策としての実際の活用法を想定し、都市側の適正な認識の醸成や補償制度創設といった課題の解決に向け、農業者側の既存の管理組織や活動組織の活用が重要であることを示した。

本章での提案は流域全体のマクロな遊水地機能を評価したものであり、あくまで水田域の持つ貯留ポテンシャルを論じた。このポテンシャルは対象地区のように比較的水田面積率が高い流域ほど大きくなる特性のものであるが、本研究では水田面積率を考慮したより具体的な貯留面積の検討や、そこに貯留を限定した場合の解析は行っておらず、これらの検討が今後の課題となる。

第 6 章 流域特性に応じたイノベーション技術の活用と展開方向

6.1 はじめに

本章ではここまでに提案したイノベーション技術について、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すべき技術を提示するとともに展開方向について述べる。

提案したイノベーション技術は、それらを利活用またはそこに関係する対象者が異なるほか、それらは流域の特性に応じて活用されるものである。ここでは流域特性に応じた技術の活用例を示すため、まず秋田県の主要流域を対象とし、流域および農業水利用のモデル化を通して流域特性を定量的に評価する。次に、この評価により明らかになった流域特性に応じて活用すべき技術を提示するほか、それらの展開方向とともに、これまでの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方向について論じる。

6.2 モデル化を通じた流域特性の評価と活用するイノベーション技術

6.2.1 対象流域

対象とした秋田県の主要流域を **Fig. 6.1** (a) に示す。

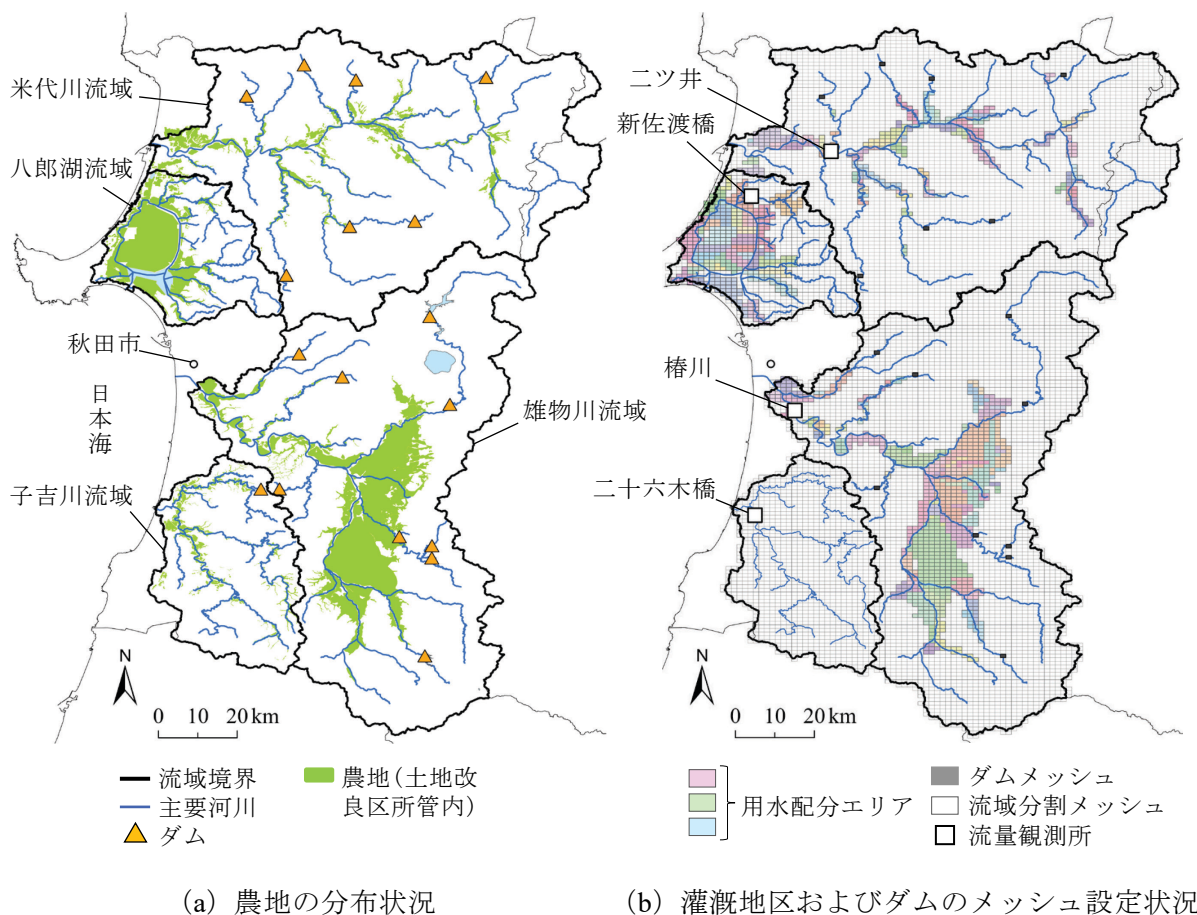


Fig. 6.1 対象流域の概況

対象流域は北から順に、1) 大規模平野が少なく中山間地が主体の米代川流域（流域面積 4,100km²）、2) 大規模干拓地が存在し中小 21 河川が流入する八郎湖流域（同 894km²）、3) 大規模平野が中流域に広がる雄物川流域（同 4,710km²）、4) 大規模平野が少なく中山間地が主体の子吉川流域（流域面積 1,190km²）の 4 流域である。このうち規模の大きい雄物川、米代川、子吉川が秋田 3 大河川と呼ばれる。

米代川流域の概況は前述 3.2.1 による。

八郎湖流域は（Fig. 6.2）、干拓後の八郎湖（面積 47km²）とそこに東部から流入する中小 21 の河川流域を有する流域面積 894km² からなっている。八郎湖は、昭和 32 年から始まった八郎潟干拓事業によって残された 3 つの水域（八郎潟調整池、東部承水路、西部承水路）を合わせた総称であり、干拓前の八郎潟 220km² のうち中央部 157km² と周辺部 16km² が干拓され、残りの水面 47km² が現在の八郎湖である。八郎湖内の水は、干拓事業により船越水道に設置された防潮水門で日本海からの海水の浸入を防ぐことで淡水化され、大潟村（中央干拓地）をはじめとする隣接市町の農業用水として利用されている（秋田県生活環境部環境管理課八郎湖環境対策室、2017）。八郎湖に流入する河川は中小 21 河川あり、大部分が八郎湖の東側に分布している。八郎湖流域の集水域について Table 6.1 に示す。まず八郎潟調整池へ流入する主要な河川は、調整池の東岸から馬場目川、井川、飯塚川、豊川、馬踏川であり、この流域ブロックが八郎湖流域の約 5 割を占める。次に、東部承水路へ流入する主要な河川は、北から浅内川、三種川、糸流川、鹿渡川、鯉川、夜叉袋川である。一方、西部承水路には河川の流入がない。そのほかに大潟村から排出される排水が南部排水機場と北部排水機場から八郎湖に流入している。八郎湖流域は二級河川馬場目川水系に属しており、馬場目川は流域面積 911km²、幹川延長 48km の秋田県最大の二級河川である。



Fig. 6.2 八郎湖流域の概況

Table 6.1 八郎湖流域の集水域

流域ブロック	集水域	集水面積 (km ²)	面積割合 (%)
八郎潟調整池	馬場目川	206	
	井川	53	
	飯塚川	13	
	豊川	25	
	馬踏川	33	
	直接域	59	
	湖面	31	
	計	420	47
東部承水路	浅内川	25	
	鶉川	29	
	三種川	150	
	糸流川	19	
	鹿渡川	10	
	鯉川	13	
	夜叉袋川	18	
	湖面	11	
計	275	31	
西部承水路	直接域	36	
	湖面	5	
	計	41	5
中央干拓地	大潟村	158	17
合計		894	100

この流域は秋田市の一部を含み五城目町等 3 市 4 町 1 村におよび、流域人口は約 10 万人であり、秋田・男鹿地域の社会・経済・文化の基盤をなしている（秋田県，2007）。

雄物川は（Fig. 6.1 (a)），秋田，山形県境の大仙山に発し，秋田県の南東端から北西へと流下し，秋田市新屋で旧雄物川を分派して本川は放水路を経て日本海に注ぐ，幹川延長 133km，流域面積 4,710km² の一級河川である．奥羽山脈と出羽山地に囲まれた流域を上流域とし，その地形は上流山間地域，横手盆地，玉川合流点より秋田平野にいたる狭窄部，秋田平野の 4 つの部分からなっている．流域の土地利用は，山林等が約 77%，水田や畑地等の農地が約 19%，宅地等市街地が約 4%であり，特に水田は秋田県全体の水田面積の約半分を占める有数の穀倉地帯である．農業用水は，流域全体で約 40,700ha の耕地に約 170m³/s が利用されている（国土交通省，2008）．農業水利用の特徴として，流域の中流部に広がる平野（横手盆地）では古くから大規模な灌漑事業とともに，大区画ほ場整備も随所で展開されており，秋田県内最大の穀倉地帯を形成している点あげられる．それらの大規模な灌漑地区としては国営事業で整備された仙北平野地区，田沢疏水地区，および雄物川筋地区，南旭川地区（2 つ併せて平鹿平野地区）の 4 地区がある．また，流域内には発電，農業用水，上水道用水，工業用水の供給を目的とした 9 基のダムがあるほか，現在建設中のダムが 1 基ある．

子吉川は（Fig. 6.1 (a)），秋田，山形県境の鳥海山に発し，本荘平野を貫流し日本海に注ぐ幹川延長 61km，流域面積 1,190km² の一級河川である．その流域は，由利本荘市を中心

とした1市10町からなっている。流域の土地利用は山地が約88%、水田や畑地等の農地が約11%、宅地等の市街地が約1%となっている。農業用水として約6,200haの農地の灌漑に31m³/sが利用されており、子吉川水系に水源を依存する農業用水の取水施設は約280件に及んでいる。また、上流部では水力発電が多く行われており、合計7施設の発電施設での取水量は最大44m³/sにのぼる（国土交通省、2004）。流域内には洪水調節と上水道用水の供給を目的としたダムが1基あるほか、現在建設中のダムが1基ある。子吉川流域は米代川流域と特性がよく類似しており、大規模な平野部が少なく中山間地が主体であり、山あいには谷地田地形の狭小な農地が多く存在することから、ため池も数多い。

6.2.2 対象流域へのモデルの適用と検証

対象とした4流域にそれぞれ分布型水循環モデルを適用した（Fig. 6.1 (b)）。

モデルの適用にあたり、米代川流域では第3章および第4章で構築した改良モデルを用いた。八郎湖流域では、農業水利用の組み込みとして八郎湖から中央干拓地への取水施設19箇所とその受益ブロックのほか、八郎湖へ流入する河川の流域においては取水施設18箇所とその受益地の、計37箇所を用水配分エリアとして設定した（加藤ら、2020；伊藤ら、2022）。雄物川流域では、74箇所の用水配分エリアと9箇所のダムをメッシュ設定した（加藤・沢田、2023）。なお、八郎湖流域と雄物川流域のモデルには第3章、第4章で開発したため池モデルおよび管水路による配水モデルは実装していない。また、子吉川流域については大規模平野が少なく中山間地が主体の流域であり、その特性が米代川流域に類似しかつ小規模なことから、農業水利用の組み込みは米代川流域で代表することとした。そのため、子吉川に適用したモデルでは農業水利用やダム、ため池モデルの組み込みは行っておらず自然状態のモデルとなっている。

次に、これらのモデル検証として日単位の計算流量と観測流量とを比較し相対誤差を求めた。検証地点は、米代川、雄物川、子吉川ではそれぞれ最下流の観測所である二ツ井地点、椿川地点、二十六木橋地点とした（Fig. 6.1 (b)）。また、八郎湖流域には国および県の流量観測所が設置されていないことから、流域内で独自に流量を観測している三種川の新佐渡橋地点を検証地点とした。モデルの検証結果をTable 6.2に示す。

Table 6.2 モデルの検証結果

流域名	流域面積 (km ²)	観測所	検証期間 (年)	相対誤差	
				通年 (%)	各年 (%)
米代川	4,100	二ツ井	2010～2021	28	20～36
八郎湖	894	新佐渡橋	2020～2022	71	58～82
雄物川	4,710	椿川	2010～2020	41	33～45
子吉川	1,190	二十六木橋	2010～2014	39	29～47

米代川流域では12年間通算の相対誤差は28%（各年では20～36%）と、前述3.4.1のとおり総じて河川流況の再現性は良好であった。八郎湖流域では3年間通算の相対誤差は71%（各年では58～82%）と他流域と比較し最も大きく、これは独自観測に起因したものと考えられ、現地での観測手法および観測値からの流量算出の精度向上が課題といえる。

雄物川流域では 11 年間通算の相対誤差は 41%（各年では 33～45%）であり，流域面積の規模に近い米代川流域と比較して検証期間の全体において相対誤差が大きい結果となった。子吉川流域は自然状態のモデルであるものの，5 年間通算の相対誤差は 39%（各年では 29～47%）と米代川流域に次いで良好であり，農地面積およびダムが少ない流域の特性によるものと推察される。なお，子吉川流域では近年の流量観測値の欠測が多い状況であった。

これらの結果のうち，流域面積が最も大きい雄物川流域について，通年の相対誤差（41%）に近い値を示した 2020 年の結果（相対誤差 42%）を Fig. 6.3 に例示する。

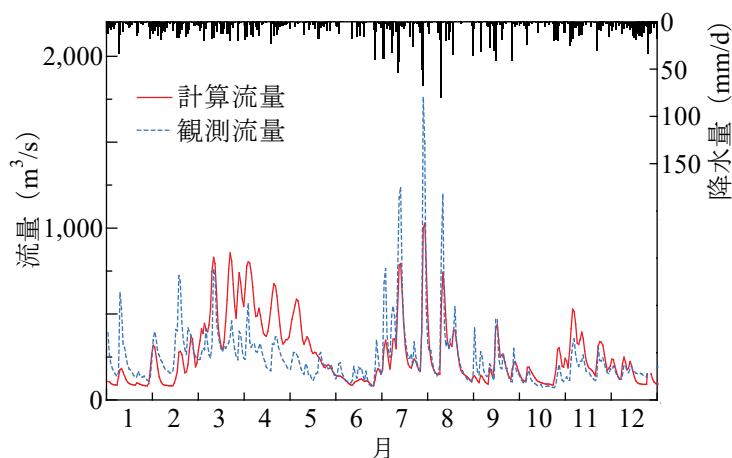


Fig. 6.3 計算流量と観測流量の比較（樺川，2020）

6.2.3 流域特性の評価と活用するイノベーション技術およびその考察

農業水利用のモデル化の状況を Table 6.3 に示す。

Table 6.3 農業水利用のモデル化の状況

流域名	流域面積 A (km^2)	用水配分エリアの設定状況				
		エリア数 N_{wa}	メッシュ 設定総数	水田面積 A_p (km^2)	1 エリアあたり 水田面積 A_p/N_{wa} (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

表中において，雄物川流域は用水配分エリア数が 74 エリアと最も多く，また，それらのメッシュ設定総数および水田面積が他流域と比較し特に大きい。さらに雄物川流域は 1 エリア当たりの水田面積も 7.1km^2 と最大であり，これは中流域に広がる平野における大規模な 4 つの国営造成の灌漑地区をはじめとした，県内有数の穀倉地帯をモデル化したことを示す。

次いで，流域に占める水田面積割合をみると八郎湖流域が 27% と最も高く，これは大規

模な干拓地の水田面積割合が高いことが要因である。八郎湖流域には中央干拓地である大潟村をはじめ、八郎湖の外周沿岸にも干拓地および低地の地域が多い。そのため排水を八郎湖へ排出する排水機場が多数築造されており、秋田県内で最も排水機場が集中する地域となっている。そこでは近年の降雨量の増大や、流域内の農地転用を伴う開発による排水量の増加、および水田の畑利用の増加といった土地利用変化から生じる流出形態の変化に対応した排水管理が求められている。そのため第2章で示した技術を活用し、流域の土地利用変化に対応した適切かつ持続的な排水管理が望まれる。一方、雄物川流域の水田面積割合は大規模な灌漑地区が広がるものの山地も多いことから11%であり、米代川流域では平野が少なく大規模な灌漑地区が少ないため僅か3%であった。

さらに、モデルの検証において米代川流域と比較して相対誤差が大きかった雄物川流域に着目し、各年の相対誤差をみたところ、渇水年であった2011、2012、2015年の相対誤差がそれぞれ33、34、38%と他年(41~45%)より低い値となっており、渇水年にモデルの流況再現性が向上していた。さらに各年の相対誤差を灌漑期間(5~8月)に限定して求めたところ、同渇水年で26、28、35%と概ね他年(27~47%)より低い値であり上記と類似した傾向にあった。なお、このように渇水年に相対誤差が低下(流況再現性が向上)する傾向は米代川流域では確認できなかった。これらの要因として、まず渇水年は河川流量が減少し、河川への人為的な農業水利用の影響が顕著になる。そのため、雄物川流域の中流域に広がる大規模な農業水利用をモデル化した効果として、農業水利用の影響が顕著になる渇水年ほど流況再現性が向上したと考えられる。また、これは中流域に広がる灌漑地区での水利用が、中流域およびそれより下流の流域に広く影響することを示唆する。これにより、中流域に灌漑地区が広がる特性の流域において、第5章で示した水田域の持つ遊水地機能を利活用した超過洪水の貯留をはじめ、田んぼダムによる雨水貯留といった洪水緩和に向けた流域管理を実施した場合、それらの効果が流域に広く及ぼされるため効果的であるといえる。

次に、米どころ秋田の農業水利用に不可欠となるため池の分布状況を、設定した用水配分エリアとともに **Fig. 6.4** に示す。ため池のデータは前述 3.2.2 と同じ GIS データを利用した。ため池は用水配分エリアの周辺や、それより遠方のエリア外の場所に比較的分散し位置しており、ため池が用水配分エリアの補助的な水源や、エリア外の農地の主水源とされていることが分かる。

各流域の特徴として、米代川流域は他流域と比較してため池が少なく分布が疎らであり、ため池が密集している場所も見当たらない。八郎湖流域では、大規模干拓地を中心に広がる用水配分エリアの東側にため池が多く密集しており、逆の西側においても数は少ないものの密集している場所があった。雄物川流域では、流域の中央西側の用水配分エリア外の場所にため池が多く分布しているほか、所々に密集している場所があった。子吉川流域では、いくつかのため池が密集する場所があるものの、他流域よりも流域全体に広く分布している傾向にあった。

八郎湖流域と雄物川流域でため池が密集する場所について GIS により地形状況を確認したところ、そこは本川から分岐する複数の小支流が流れる谷あい、多くの谷地田が形成された中山間地域であり、各谷地田の上流にそれぞれため池が存在する状況であった。これらのため池は第3章で示したように、中山間地に農業水利用の安定をもたらす営農を支

え，中山間地の多面的機能の発揮に貢献している．また，このような流域に適用する分布型水循環モデルに第3章で示した単独ため池やため池群をモデル化し実装することにより，ため池要素を含めた流域の水文解析が可能になる．

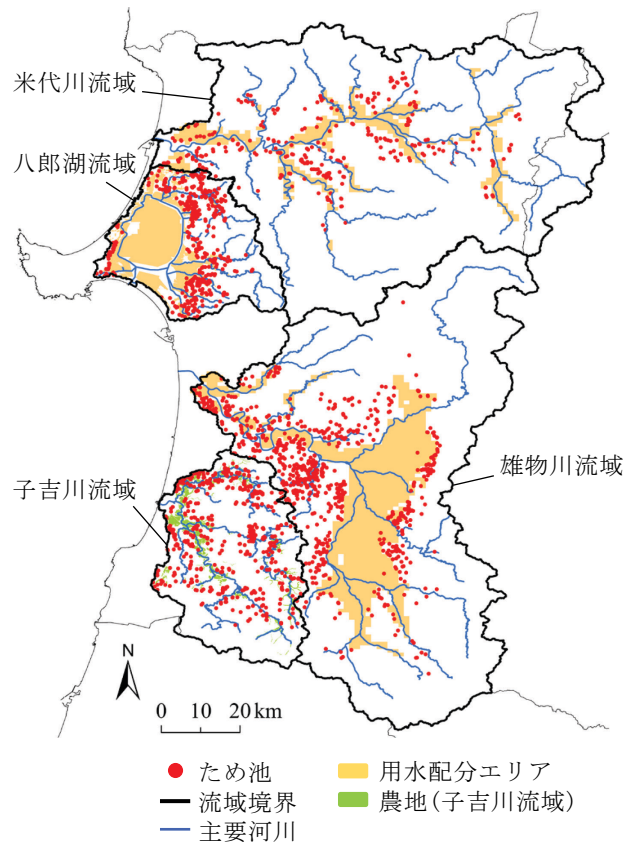


Fig. 6.4 ため池の分布状況

続いて，対象流域別のため池の状況を **Table 6.4** に示す．ため池の箇所数は4流域で2,000箇所以上あり，雄物川流域が783箇所と最も多く，最も少なかった米代川流域は295箇所と雄物川流域に比べ約4割程度であった．

Table 6.4 対象流域別のため池の状況

流域名	流域面積 A (km^2)	用水配分 エリアの 水田面積 A_p (km^2)	ため池			
			箇所数 N_t	合計 貯水量 V_a (千 m^3)	1箇所あたり 貯水量 V_a/N_t ($\text{千 m}^3/\text{箇所}$)	ため池密度 $N_t/(A-A_p) \times 100$ (箇所/ 100km^2)
米代川	4,100	142	295	13,600	46	7
八郎湖	894	240	436	15,900	36	67
雄物川	4,710	526	783	34,600	44	19
子吉川	1,190	(62)*	531	22,700	43	(47)*
合計	10,894	908	2,045	86,800	42	17

* 子吉川流域では用水配分エリアの水田面積に，流域内の灌漑農地面積 62km^2 を援用してため池密度を推定した．それらの数値を () で示し，合計から除く．

また、ため池の1箇所当たり貯水量は八郎湖流域が36千 m^3 /箇所と他流域と比較し最も小さく、他の3流域は43~46千 m^3 /箇所と概ね近い数値を示したことから、八郎湖流域のため池は他流域より小規模であるといえる。次に、各流域のため池密度（用水配分エリアの水田面積を除いた流域面積100 km^2 当たりのため池箇所数）を求めた。このとき、子吉川流域では用水配分エリアの水田面積に前述6.2.1で示した流域内の灌漑農地の面積6,200haを援用し、ため池密度を推定した。ため池密度は八郎湖流域が67箇所/100 km^2 と突出して多く、最も小さい値を示した米代川流域の7箇所/100 km^2 の約10倍の密度であった。そのほか雄物川流域が19箇所/100 km^2 、子吉川流域が47箇所/100 km^2 と流域により差があり、特性が異なる結果であった。八郎湖流域は、他流域より小規模なため池が密度濃く分布している特性であったことから水不足傾向にあることが示唆され、その要因は流域が複数の中小河川からなり、広い流域を持つ大河川がないためと推察された。一方で、八郎湖沿岸の灌漑地区の多くは八郎湖から揚水機により農業用水を取水している実態があり、この実態からも水源が少ない流域であることが分かる。このように水不足傾向であり、揚水機による取水が多い状況の流域では、第4章で示した渇水への対応にも繋がる農業用水の節水や、揚水機の節電に結び付くICT水管理の展開が望まれる。また、前述のようにこの地域は排水機場が多いため、農業用水の節水は排水量の減少（排水機の節電）にも繋がり効果的である。

6.3 課題と展開方向

これまでの小括で前述したイノベーション技術の個々の課題をまとめると、まず適切な排水管理のための技術である排水経費の負担割合の算定法では、地目別のピーク時間の違いを考慮することが課題であり、ため池要素のモデル化技術では、解析内容に応じたため池の設定の精度選定が課題となる。また、農業水利用での節水・節電に繋がるモデル化技術では、間断灌漑などの特異な水管理の設定が課題であり、水田域の持つ遊水地機能を活用する技術では、貯留場所を想定した解析が今後の課題となる。そのため、これら個々の技術の課題解決に向けた攻究が展開方向として重要である。

次に、これまでの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を以下に示す。

まず本研究で用いたモデルの課題として、キネマティック流下による流出計算のため氾濫現象に対応できないことがあげられ、氾濫現象を一体としてシームレスに解析可能な機能の追加による、さらなるモデルの発展が重要といえる。また、八郎湖流域のモデル化では、これまでに組み込んでいない要素として八郎湖の貯留、防潮水門・排水機場の排水機能、および隣接する他流域からの発電目的の流入量があり、これらのモデル組み込みが必要といえる。

流域の特性を踏まえると、下流域に位置する低平都市化水田域や干拓地では、気候変動および土地利用変化による排水量の増大が招く内水および外水氾濫の頻発化に対し、前述したモデルのさらなる発展により、農地および都市の防災に繋がる氾濫の解析が望まれる。一方、秋田県では令和5年7月に秋田市を中心に豪雨による大規模な災害が発生した（主な被害は床下浸水以上の住家被害が約7,000棟、農林水産関係被害額は約140億円（秋田

県災害対策本部，2023))。これを受け，秋田県ではあらためて超過洪水・氾濫への対応が全県的な課題となっている。農業の盛んな秋田県において，分布型水循環モデルに農業水利用を的確に組み込んだうえでさらに改良・発展させて氾濫解析を行う意義は大きく，今後の展開が望まれる。

下流および中流域に広がる平野では，スマート農業に対応した大区画ほ場の整備展開とともに，農業水利用の高度化として ICT 水管理の技術をどのように普及させていくのかが重要である。特に人口減少および農業者の減少が著しい秋田県では，ICT 水管理による水管理労力の軽減は喫緊の課題といえる。提案した農業水利用での節水・節電に繋がるモデル化技術の応用により，水管理労力の軽減効果の推定や，農業水利用の高度化の広域展開による流域の水管理への影響の評価が可能となる。さらに，洪水緩和に向けた流域管理として効果的である超過洪水の貯留や田んぼダムの評価に提案したモデル化技術を応用した場合，流域における変化や，ため池の貯留効果の要素を導入できることから，流域治水を見据えた流域管理手法のより良い提案への展開が期待できる。加えて同モデルの応用により，広域・狭域を問わず水管理を行う熟練技術者の水管理手法を反映・設定することにより，熟練された水管理技術の可視化や，後継技術者への水管理手法の継承ツールとしての活用が可能となる。また，ICT 水管理を導入する際の，最適な用水の配分設定を示すツールとしての活用が期待される。

中山間地域では，様々な地形や傾斜に応じたほ場整備手法の最適選定が重要である。例えば 1 筆のほ場区画を大きくした場合，営農にはメリットとなるが，畦畔法長が長くなり，法面崩落や草刈りの作業困難といったデメリットが生じる。そのため最適選定は困難なものとなっている。提案したモデル化技術を発展させることにより，ほ場区画や用水配分の最適解の導出に活用するといった展開が期待される。最適解によるほ場整備は担い手を支える土台となり，耕作放棄の防止はもとより農村振興に貢献する。また，中山間地においてため池は重要であるが，管理者の高齢化や担い手不足によりため池の廃止や，いくつかのため池を 1 つに統合する動きがある。提案したため池要素のモデル化技術の応用により，それらに伴う流出変化が流域の農業水利用や中山間地に及ぼす影響の評価，および防災の観点からの評価への展開が期待できる。

さらに，流域内の未利用資源の活用として注目される小水力発電では，発電適地の選定に時間を要する。水稲作が盛んであり農業水利用が多い秋田県においては，同モデルによる小水力発電の適地選定法の開発が期待される。

6.4 小括

本章では，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。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 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（子吉川流域のみ自然状態のモデルとなる）。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。

- 2) 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、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示した。さらに、ため池が多く分布する特性の中山間地では、第 3 章で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 章で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。
- 3) 提案した技術の課題を提示し、課題解決に向けた攻究を展開方向として示した。また、これまでの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、低平な下流域における、さらに発展させた分布型水循環モデルによる氾濫解析を提示した。下流および中流域に広がる平野では、提案したモデル化技術の応用により、農業水利用の高度化展開や洪水緩和に向けた流域管理の実施が、流域に及ぼす影響の評価を可能とするほか、水管理手法の継承や ICT 水管理の最適設定のツールとして活用できることを提示した。また、中山間地域では、提案したモデル化技術の応用やさらなる発展により、ほ場整備手法の最適選定、ため池の廃止や統合が流域に及ぼす影響の評価、さらには小水力発電の適地選定に展開の可能性のあることを示した。

第 7 章 終章

7.1 各章のまとめ

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。さらにその方法を水稻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、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。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。ここでは、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。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。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。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、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。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。こ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

地における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。そこでは、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。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。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。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、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、次節で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。

7.2 全体の結論と今後の展開

本論文では、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、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。

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。

引用文献

1. 足立 徹, 磐田 総, 増本隆夫, 柴田恭司, 沢田明彦 (2023) : ICT 水管理の導入による農業水利システムの特徴化と管理効果, 農業農村工学会誌, 91(11), 7~12.
2. 秋田県 (2007) (参照 2023.9.26) : 二級河川馬場目川水系河川整備基本方針, (オンライン), 入手先<https://www.pref.akita.lg.jp/uploads/public/archive_0000010601_00/babame_kihon.pdf>
3. 秋田県能代地区土地改良区 (2020) : 秋田県能代地区事業概要
4. 秋田県農林水産部農地整備課 (2021) (参照 2022.9.28) : あきたの農業農村整備 2021, (オンライン), 入手先<<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/61639/>「あきたの農業農村整備 2021」.pdf>
5. 秋田県農林水産部農地整備課 (2022a) (参照 2023.7.1) : スマート農業を支える基盤整備実証事業, (オンライン), 入手先<<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/63498/>>
6. 秋田県農林水産部農地整備課 (2022b) : 令和 3 年度スマート農業を支える基盤整備実証事業報告書, 秋田県土地改良事業団体連合.
7. 秋田県災害対策本部 (2023) (参照 2024.1.18) : 令和 5 年 7 月 14 日からの大雨による被害状況等について (第 42 報), (オンライン), 入手先<<https://www.bousai-akita.jp/uploads/user/system/files/>【第 42 報】被害報 (12 月 26 日 16 時 00 分現在) .pdf>
8. 秋田県生活環境部環境管理課八郎湖環境対策室 (2017) (参照 2023.9.26) : 八郎湖の概要, (オンライン), 入手先<https://www.pref.akita.lg.jp/uploads/public/archive_0000026334_00/八郎湖の概要 (H30.2) .pdf>
9. 秋田県土地改良事業団体連合会 (2021) (参照 2022.3.1) : 水土里情報システム 2021 秋田, (オンライン), 入手先<<https://web07.midorigisap2021.jp/web/>>
10. 千葉克己, 古賀 潔, 馬場秀和 (1997) : 傾斜地半湿田地帯における耕作放棄水田の物理特性と豪雨への応答の検討, 農業土木学会論文集, 190, 61-70.
11. 早瀬吉雄, 角屋 睦 (1993a) : 低平地タンクモデルとその基礎的特性—低平地タンクモデルによる流出解析法 (I) —, 農業土木学会論文集, 165, 75-84.
12. 早瀬吉雄, 角屋 睦 (1993b) : 低平地タンクモデルの適応性—低平地タンクモデルによる流出解析法 (II) —, 農業土木学会論文集, 165, 85-91.
13. 早瀬吉雄 (1994) : 水田地帯の洪水防止, 軽減機能の評価と機能向上事業の提案, 農業土木学会誌, 62(10), 1-6.
14. 早瀬吉雄 (2021) : 温暖化台風による水害に挑む水土里資源のソフトパワー, 農業農村工学会誌, 89(3), 179-182.
15. 堀川直紀, 工藤亮治, 吉田武郎, 増本隆夫 (2011) : 流域水資源管理のための貯水池運用モデル, 応用水文, 23, 58-66.
16. Huang, C.C., Tsai, M.H., Lin, W.T., Ho, Y.F. And Tan, C.H. (2006): Multifunctionality of paddy fields in Taiwan, *Paddy and Water Environment*, 4, 199-204.
17. 伊藤禎恵, 加藤晃成, 沢田明彦, 増本隆夫 (2022) : 大規模干拓地区のパイプライン化に伴う余剰排水量と維持管理コストの変化, 2022 年度 (第 71 回) 農業農村工学会大

- 会講演会講演要旨集, 357-358.
18. 角屋 睦 (1980) : 流出解析手法 (その 8) - 洪水到達時間と合理式 -, 農土誌, 48(8), 39-44.
 19. 加藤晃成, 佐々木幸太, 増本隆夫, 宮島真理子 (2020) : 農業主体流域における灌漑地区情報と配水順序導入への一考察, 農業農村工学会東北支部第 62 回研究発表会講演要旨集, 10-11.
 20. 加藤晃成, 沢田明彦 (2023) : 分布型水循環モデルの雄物川流域への適用と農業基盤分野における実用化に向けて, 農業農村工学会東北支部第 64 回研究発表会講演要旨集, 105-108.
 21. 川越清樹, 丸田大空 (2021) : 日本列島を対象とした土地構造, 施設に基づく貯水ポテンシャルマップの開発, 土木学会論文集 G (環境), 77(5), I_77-I_84.
 22. Kim, T.C., Gim, U.S., Kim, J.S. and Kim, D.S. (2006): The multi-functionality of paddy farming in Korea, *Paddy and Water Environment*, 4, 169-179.
 23. 国土交通省 (2002a) (参照 2022.3.1) : 水文水質データベース, (オンライン), 入手先 <<http://www1.river.go.jp/>>
 24. 国土交通省 (2002b) (参照 2022.3.1) : 米代川水系河川整備基本方針 流水の正常な機能を維持するため必要な流量に関する資料, (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/yoneshiro-3.pdf>
 25. 国土交通省 (2004) (参照 2023.9.26) : 子吉川水系河川整備基本方針 流水の正常な機能を維持するため必要な流量に関する資料, (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/koyoshi-3.pdf>
 26. 国土交通省 (2008) (参照 2023.9.26) : 雄物川水系河川整備基本方針 流水の正常な機能を維持するため必要な流量に関する資料, (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/omonogawa22-3.pdf>
 27. 国土交通省 (2022) (参照 2022.3.1) : 国土数値情報 (土地利用 3 次メッシュデータ), (オンライン), 入手先 <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-a-v3_1.html>
 28. 工藤亮治, 増本隆夫, 堀川直紀, 吉田武郎 (2014) : 大規模貯水池を備えた水田灌漑システムのモデル化による人為的影響を受けた河川流況の再現, 水文・水資源学会誌, 27(5), 219-232.
 29. Kudo, R., Yoshida, T. and Masumoto, T. (2017): Nationwide assessment of the impact of climate change on agricultural water resources in Japan using multiple emission scenarios in CMIP5, *Hydrological Research Letters*, 11, 31-36.
 30. 栗山浩一, 馬奈木俊介 (2020) : 環境経済学をつかむ (第 4 版), 有斐閣, 150-176.
 31. 増本隆夫, 角屋 睦 (1995) : 内水流出ハイドログラフの関数近似と遊水池容量算定への応用, 農土論集, 176, 121-131.
 32. 増本隆夫, 高木強治, 吉田修一郎, 足立一日出 (1997) : 中山間水田の耕作放棄が流出に与える影響とその評価, 農業土木学会論文集, 189, 59-68.
 33. 増本隆夫 (1998a) : 流出ハイドログラフの簡易算定による水文設計手法 (その 4) - 排水施設管理費の公的負担割合算出への応用 -, ARIC 情報, 49, 20-25.

34. 増本隆夫 (1998b) : 水田の貯留機能評価と水資源の流域管理にみるパラダイム・シフト, 水文・水資源学会誌, 11(7), 711-722.
35. 増本隆夫, 野添 学, 吉村亜希子, 松田 周 (2003) : 耕作放棄に伴う流出量変化を評価する中山間水田流出モデル, 農業土木学会論文集, 224, 35-44.
36. Masumoto, T., Yoshida, T. and Kubota T. (2006): An index for evaluating the flood-prevention function of paddies, *Paddy and Water Environment*, 4, 205-210.
37. Masumoto, T., Taniguchi, T., Horikawa, N., Yoshida, T. and Shimizu K. (2009): Development of a distributed water circulation model, for assessing human interaction in agricultural water use, *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*, 195-201.
38. 増本隆夫 (2010a) : 気候変動下の災害軽減に向けた水田の洪水防止機能の利活用, 農業農村工学会誌, 78(9), 11-14.
39. 増本隆夫 (2010b) : 広域水田地帯の洪水防止機能の評価と将来の流域水管理への利活用 (I), 水利科学, 315, 23-38.
40. 増本隆夫 (2010c) : 広域水田地帯の洪水防止機能の評価と将来の流域水管理への利活用 (II), 水利科学, 316, 66-77.
41. Matsuno, Y., Nakamura, K., Masumoto, T., Matsui, H., Kato, T. and Sato, Y. (2006): Prospects for multifunctionality of paddy rice cultivation in Japan and other countries in monsoon Asia, *Paddy and Water Environment*, 4, 189-197.
42. 皆川裕樹, 北川 巖, 増本隆夫 (2016) : 洪水時の流域管理に向けた水田域の水稻被害推定手法, 農業農村工学会論文集, 303, I_271- I_279.
43. 皆川裕樹, 池山和美, 北川 巖, 増本隆夫 (2018) : 低平水田域における豪雨排水に関するリスクとその不確実性の評価法, 農業農村工学会論文集, 307, I_175- I_184.
44. 皆川裕樹, 吉田武郎, 工藤亮治, 相原星哉, 北川 巖 (2021) : 豪雨災害リスクのリアルタイム予測システムの構築—システム構成と令和元年台風 19 号時の事例検証—, 応用水文, 33, 31-40.
45. 皆川裕樹, 宮津 進 (2022) : 模擬豪雨を活用した特徴の異なる田んぼダム器具の機能評価, 農業農村工学会論文集, 314, I_157- I_165.
46. 宮島真理子, 吉田武郎, 森田孝治, 村山 香, 名和規夫, 増本隆夫 (2018) : 取水・還元が連続する河川の流況解析に必要な水利情報の段階的スクリーニング—分布型水循環モデルの鬼怒川流域への適用—, 農業農村工学会論文集, 307(86-2), I_185- I_195.
47. 宮津 進, 吉川夏樹, 阿部 聡, 三沢眞一, 安田浩保 (2012) : 田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用, 農業農村工学会論文集, 282, 15-24.
48. 宮津 進, 吉川夏樹, 阿部 聡, 三沢眞一 (2013) : 輪中水田地帯における田んぼダムの洪水緩和機能の経済評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), 69(4), I_1531- I_1536.
49. 日本水土総合研究所 (2005) (参照 2022.3.1) : 日本水土図鑑 GIS, (オンライン), 入手先 <<https://www.nngis.net/>>
50. 新潟県土木部河川管理課 (2019) (参照 2023.3.29) : “8.4 水害浸水状況詳細図その1”, (オンライン), 入手先 <<https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/54138.pdf>>

51. 新潟市巻支所（2006）：上堰潟公園概要，1.
52. 西蒲原土地改良区（1993）：西蒲原土地改良区資料，p.1.
53. 西蒲原土地改良区（2007）：西蒲原土地改良区概要，14-74.
54. 西蒲原土地改良区（2021）：令和2年度排水経費負担実績，1-3.
55. 農業工学研究所水理制御研究室（1995）：西蒲原地区における排水解析－西蒲原排水地区における放水路新設に伴う制水門制御方法の検討－，平成6年度依頼研究報告書.
56. 農研機構農業環境変動研究センター（2016）（参照 2022.3.1）：メッシュ農業気象データ（The Agro-Meteorological Grid Square Data, NARO），（オンライン），入手先<<https://amu.rd.naro.go.jp/>>
57. 農林水産省（2014）（参照 2023.1.25）：豪雨・渇水に対する備えと対応（参考事例集）ため池編，（オンライン），入手先<https://www.maff.go.jp/j/nousin/kantai/tekiou/pdf/tameike_sankou.pdf>
58. 農林水産省（2021）（参照 2022.6.1）：土地改良長期計画，（オンライン），入手先<<https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/totikai/attach/pdf/index-13.pdf>>
59. 農林水産省（2022a）（参照 2022.9.28）：ため池，（オンライン），入手先<https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/>
60. 農林水産省（2022b）（参照 2022.9.28）：ため池管理保全法に基づく都道府県別の対応状況について，（オンライン），入手先<https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/tameike_taiou.html>
61. 農林水産省（2022c）（参照 2022.6.1）：多面的機能支払交付金のあらまし，（オンライン），入手先<https://www.maff.go.jp/j/nousin/kanri/attach/pdf/tamen_siharai-80.pdf>
62. 農林水産省北陸農政局（2004）：国営西蒲原排水農業水利事業成績書 事業計画概要.
63. 農林水産省農村振興局，農研機構農村工学研究所（2007）：水田域の持つ洪水緩和機能の評価法の開発と東海豪雨への適用，平成18年度システム技術研修（技術解析）課題研究成果集，1-28.
64. 農林水産省農村振興局（2010）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水（水田）」，p.147，p.170.
65. 農林水産省農村振興局（2013）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「ほ場整備（水田）」，p.81.
66. 農林水産省農村振興局（2019）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」，228-230.
67. 農林水産省農村振興局（2021）：土地改良事業計画設計基準・設計「パイプライン」，110-111.
68. 農林水産省農村振興局整備部設計課（2021）（参照 2021.11.4）：土地改良施設の維持管理における地方財政措置，（オンライン），入手先<<https://www.maff.go.jp/j/nousin/tizai/ijikanri.html>>
69. 農林水産省東北農政局（2018）：能代地区かんがい用水水利使用協議書（変更）.
70. 大西建夫，堀野治彦，三野 徹（2004）：傾斜地水田群における貯留特性の事例的評価，農業土木学論文集，230，53-59.
71. 佐藤政良（2022）：流域治水における農地の位置と役割，水文・水資源学会誌，35(1)，

- 41-57.
72. 佐藤俊典 (2015) : 将来の気候変動がため池に及ぼす影響予測の事例報告, 農業農村工学会誌, 83(9), 3-6.
 73. 沢田明彦, 加藤晃成, 吉田武郎, 増本隆夫 (2022) : 分布型水循環モデルへのため池群の要素導入と規模のスクリーニング, 2022年度(第71回)農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 309-310.
 74. 島谷幸宏, 皆川朋子 (2021) : 流域治水から国土の再編へ, 河川技術論文集, 27, 575-578.
 75. 志村博康 (1982) : 水田・畑の治水機能評価ー国土に必要な治水容量の農地・ダム・森林による分担ー, 農業土木学会誌, 50(1), 25-29.
 76. 新村麻実, 鈴木 翔 (2022) : ICT水管理機器利用に関する普及担当者の評価と導入への留意点, 農業農村工学会誌, 90(5), 21~26.
 77. 曾根千晴, 村上 萌, 山名晃貴, 鈴木一哉, 近藤 正, 皆川裕樹, 増本隆夫 (2022) : 処理時期及び条件を変えた冠水がダイズの生育と乾物生産に及ぼす影響, 日本作物学会第253回講演会要旨集, 98.
 78. 瀧川紀子, 森田孝治, 宮島真理子, 松尾洋毅 (2018) : 中長期的視点からみた農業用水由来の排水検討事例, 農業農村工学会誌, 86(1), 21-24.
 79. 瀧川紀子, 田中丸治哉, 多田明夫 (2021) : 低平水田地域における湛水構成成分の見える化, 応用水文, 33, 61-70.
 80. 田村孝浩, 守山拓弥 (2010) : 圃場整備前後における維持管理作業面積の評価, 農業農村工学会誌, 78(11), 3~6.
 81. 田中礼次郎, 末沢慶康 (1970) : 農地の機械排水計画と実績に関する調査研究, 島根大学農学部研究報告, 4, 125-128.
 82. 谷口智之, 増本隆夫, 清水克之, 堀川直紀, 吉田武郎 (2009a) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (I)ー作付時期・作付面積推定モデルー, 水文・水資源学会誌, 22(2), 101-113.
 83. 谷口智之, 増本隆夫, 堀川直紀, 清水克之, 吉田武郎 (2009b) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (II)ー水利用分類と水管理に基づく必要水量の推定ー, 水文・水資源学会誌, 22(2), 114-125.
 84. 谷口智之, 増本隆夫, 吉田武郎, 堀川直紀, 清水克之 (2009c) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (III)ーモデル構成と農地水循環量の推定ー, 水文・水資源学会誌, 22(2), 126-140.
 85. 若杉晃介, 鈴木 翔 (2017) : ICTを用いて省力・最適化を実現する圃場水管理システムの開発, 農業農村工学会誌, 85(1), 11~14.
 86. 渡邊紹裕, 堀野治彦, 中村公人 (2017) : 地域環境水利学, 朝倉書店, 118-119.
 87. 柳原駿太, 山本 道, 風間 聡, 峠 嘉哉, Yikai CHAI, 多田 毅 (2021) : 田んぼダムの潜在的な洪水被害軽減の国内地域別評価, 土木学会論文集 G (環境), 77(5), I_33- I_42.
 88. 吉田武郎, 増本隆夫, 工藤亮治, 谷口智之, 堀川直紀 (2012) : 広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化, 農業農村工学会論文集, 27

7, 9-19.

89. 吉田武郎, 宮島真理子, 松尾洋毅, 森田孝治, 相原星哉, 皆川裕樹, 河島克久 (2021) : 少雪条件下での灌漑期水資源の統計的予測—2019-20 年積雪条件下での信濃川流域における検討—, 応用水文, 33, 11-20.
90. 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢眞一 (2009) : 田んぼダム実施流域における洪水緩和機能の評価, 農業農村工学会論文集, 261, 41-48.
91. 吉川夏樹, 有田博之, 三沢眞一, 宮津 進 (2011) : 田んぼダムの公益的機能の評価と技術的可能性, 水文・水資源学会誌, 24(5), 271-279.
92. 吉川夏樹, 高野陽平 (2020) : 地域排水における地目別流出成分可視化モデルの開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), 76(2), I_781-I_786.
93. 吉迫 宏, 林 貴史, 藤原俊樹, 同前浩司 (2019) : 減災対策を目的としたため池洪水流出モデル, 農業農村工学会誌, 87(5), 7-10.

謝辞

本研究および論文作成を進めるにあたり、秋田県立大学生物資源科学部の増本隆夫教授には、活動の全てにおいて数多くの有意義なご指導、ご助言ならびにご高閲を賜りました。さらに、現場で生じている問題から研究課題を見つけ、新たな方法を研究・開発して課題を解決していくという農業農村工学分野の研究姿勢をご教示いただきました。心より感謝申し上げます。また、秋田県立大学生物資源科学部の近藤正准教授、同永吉武志准教授には、研究遂行の重要な節目において、有益かつ的確にご助言いただきましたことに感謝申し上げます。

農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）農村工学研究部門の吉田武郎博士には、モデル化に関するデータの提供や技術指導をいただいたほか、多岐にわたり本当に多くのご指導、ご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。さらに、農研機構農村工学研究部門の久保田富次郎博士、皆川裕樹博士、相原星哉氏、高田亜沙里博士には、同部門の技術講習を通して流域管理に関するご助言と温かい励ましをいただきました。

西蒲原土地改良区の後藤慎一氏には、貴重なデータの提供や現地での調査指導のほか、本研究の多方面において数多くのご協力をいただきました。加えて、同土地改良区の関係者各位にも多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

NTC コンサルタンツ株式会社の加藤晃成氏（当時秋田県立大学大学院地域環境水文学研究室）には、プログラミングおよび GIS 操作の基礎習得にお力添えいただきました。また、秋田県立大学地域環境水文学研究室の後輩諸氏からは常に温かい励ましをいただきました。心より感謝いたします。

最後に、本研究の遂行に際し、いつも理解して励まし続けてくれた妻と息子に感謝の意を表します。