

## 論文の内容の要旨

論文題目 水田灌漑卓越流域の水循環モデル開発に関する研究

氏名 吉田 武郎

### はじめに

日本における農業用取水量は河川からの全取水量の約7割、平水年の水資源賦存量の約1割に相当し、河川の流況を決定づける要因の一つに挙げられる。取水量が多いことに加え、用水の取水・還元は河川の複数地点で繰り返されることから、水田灌漑が卓越した流域（水田灌漑卓越流域）の水循環は複雑な様相を呈する。

近年、水田灌漑卓越流域を取り巻く自然的・社会的条件が変化し、洪水や渇水のリスクが高まることが危惧されている。このような流域の変化に対する水資源の脆弱性、持続性の評価が分布型流出モデルにより行われている。しかし、水田灌漑に係わる水循環系が複雑であるために、流域の変化が水田灌漑用の水資源に及ぼす影響の予測やその影響を緩和するような水利施設の運用方法の提案には至っていない。

水田灌漑卓越流域での水資源を評価するためには、水田灌漑に係わる人為的な水循環系を表現するとともに、それを自然的な水循環系を一体的に解析する手法が必要となる。特に、高度に開発された大規模な水田灌漑システムを有する流域では、貯水池による放流や複数地点での取水量の推定、さらには灌漑地区からの還元量などの人為的な水配分過程のモデル化が必要となってくる。

そこで本研究では、水田灌漑卓越流域における水田地帯の人為的な水循環系と流域スケールの水循環の相互関係を明らかにすることを目的に、自然的・人為的な水移動過程を分布型流出モデルで一体的に解析する手法を構築する。モデル開発にあたっては、日本のように水田灌漑が古くから行われ、高度に開発された流域を念頭に置く。ただし、水田が広く分布する東南アジア、東アジアの多様な水文特性をもつ流域へのモデル適用のため、積雪・融雪、氾濫・湛水といった過程を同時に計算する手法を開発する。

### 結果の概要

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「水田灌漑卓越流域における人為的な水循環系を表現し、流域の自然的水循環過程と一体的に解析するモデルの開発を行う」こととした。本論文では、以下の過程を経ることでその目的を達成した。

まず第2章では、本研究で開発する「流域水循環モデル」の原型となる、多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデル（「基本モデル」）について、それを構成するサブモデルの概念や計算方法について述べた。さらに、流域水循環モデルの開発ポイントを

「高度に開発された河川流域における、貯水池運用、取水・用水配分・還元といった人為的な水循環系を表現するとともに、それを自然的な水循環と統合して解析する手法の開発」と明確にした。

これを受けて第3章では、本研究の開発ポイントの中心となる、水田灌漑に起因する人為的な水循環系を表現する「用水配分・管理モデル」を開発した。用水配分・管理モデルは、用水配分モデルと貯水池管理モデルから構成される。用水配分モデルは河川から灌漑地区への取水、水田への灌漑供給量の推定、河道への還元過程を定式化したアルゴリズムを有し、灌漑地区ごとに適用できる。用水配分モデルの実装のために、農業水利施設データベースから灌漑受益地および施設諸元を抽出し、灌漑地区の水利システムをモデル上で表現する手順を示した。加えて、日本の灌漑用放流の特性を考慮した貯水池管理モデルにより、取水地点の要求水量と河川流況から放流量を決定できる。用水配分・管理モデルを実装した「流域水循環モデル」により、ダムの貯水量、各施設の取水量を推定できることや、取水・還元の影響を強く受ける地点での流量を特に低水部でよく表現できることを明らかにした。

第3章で確立した流域水循環モデルを多様な自然条件下の流域に適用するため、第4章ではグリッドセル単位での積雪融雪を熱収支に基づいて表現するモデルを開発し、流域水循環モデルに組み込んだ。特に、データが少ない地域に熱収支法を適用するために、衛星画像から抽出した冠雪域の境界線からパラメータを推定する方法を提案した。構築したモデルにより各グリッドセルの積雪水当量および河川の流量を良好に再現できることを示した。

さらに第5章では、低平地の氾濫モデルを構築するとともに、それを導入した流域水循環モデルを提案した。提案したモデルを低平な水田地帯での湛水被害が頻発する流域に適用し、大規模かつ長期間におよぶ低平地帯の氾濫現象が把握できることや、大出水時のピーク流量とその発生時期の再現性が向上することを示した。

最後に第6章では、流域水循環モデルで土地利用・耕作状況が異なる地目から流出過程を表現するとともに、それを耕作水田・耕作放棄水田が卓越した中山間小流域に適用して、流域水循環と水田管理状態の相互関係を評価した。

まず、土地利用や水田の管理状況が異なる複数の試験流域（耕作型・放棄型・森林各流域）を設定し、降雨・流出量の観測値から推定した直接流出率、ピーク流出係数、流域保留量を比較した。その結果、降雨開始前7日間の先行降雨が150mmを超える湿潤時に、放棄型流域の直接流出率およびピーク流出係数が耕作型流域のそれを上回ることを明らかにした。次に、耕作放棄に伴う耕作放棄水田の物理特性の変化を反映した流域水循環モデルを各試験流域に適用した結果、湿潤時に放棄型流域のピーク流出係数が増大する傾向をモデルでも再現できることを明らかにした。さらに、モデルの状態量からの考察から、湿潤時に放棄水田周辺の地下水面上昇して発生した地表流が、試験流域間の短期流出特性の違いに寄与した可能性を示した。

## まとめと今後の展開

本論文では、水田灌漑卓越流域における水田地帯の人為的な水循環系と流域スケールの水循環の相互関係を明らかにすることを目的に、自然的・人為的な水移動過程を分布型流出モデルで一体的に解析する手法を構築した。構築したモデルにより、ダム貯水量や河川からの取水量を推定できることや、取水・還元の影響を強く受ける地点での流量を特に低水部で高い精度で表現できることを明らかにした。また、同モデルで土地利用・耕作状況が異なる地目から流出過程を表現することにより、流域水循環と水田管理状態の相互関係を評価できることを示した。

提案した流域水循環モデルには、大きく二つの展開の可能性がある。一つは気候変動による影響評価および対応策の検討である。気候変動に関連して関心が大きい課題の一つは、自然的条件の変化が我々の生活にどのような影響を及ぼすかという点である。自然的・人為的な水循環を一体として解析する流域水循環モデルにより、単に自然的条件の変化による流況の変化を予測するだけでなく、それが農業用の取水量、灌漑用貯水池の貯水量等に現れる変化の見通しに活用できる。

ただし、本論文で開発した流域水循環モデルは水田灌漑に係わる人為的な水循環過程を表現できるものの、その表現は「通常時の」水管理に留まっている。すなわち、極端な渇水や洪水に対する水管理者の対応の表現や、許容しうる気候値の変動を明らかにするまでには至っておらず、これらの点は今後のモデル開発・改良に関する課題となろう。自然的变化に対する流域の潜在的な脆弱性や万が一の事態に対する対応力は流域ごとに異なると考えられ、それらを過去の水文・水利用の情報に基づいて明らかにする研究も重要といえる。

他方の展開として、流域を取りまく社会的環境の変化に対する水資源予測や運用方法の提案が挙げられる。本論文で取り上げた耕作放棄水田の増加に加え、日本では農業経営の規模拡大や作物品種の多様化により、水管理の粗放化や灌漑期間の長期化が懸念されている。本論文で提案した流域水循環モデルはモザイク状に混在する複数の地目からの流出過程の違いを表現でき、土地利用や水田管理の変化が流域の水需給に対する影響を評価できる。さらに、モンスーンアジア地域に目を向ければ、水田灌漑用水需要の伸びは非常に大きく、日本より遙かに速いスピードで開発が進められている。流域水循環モデルは、こうした社会変化が大きい流域において、その変化が流域水循環へ及ぼす影響や水利施設の望ましい運用方法の提案等にきわめて有効である。

以上をまとめると、流域を取り巻く自然的・社会的条件が変化していく中で、それらが水資源の脆弱性、持続可能性に及ぼす影響の評価や、その変化による負の影響を抑えるための対応策の検討等に流域水循環モデルは大いに貢献できる。特に近年、新たな利水・治水施設の建設が困難な状況下では、既存の施設を柔軟に利用することも対応策の一つとなり得る。こうした観点から、従来の計画立案手法のような単独の灌漑地区を対象とした解析モデルでなく、開発した流域水循環モデルのように、複数の施設、灌漑地

区を含む流域を一体的に解析する手法には意義がある。