

農業用水の効率的配分を実現する 「弾力的用水供給モデル」の提案

ELASTIC WATER SUPPLY MODEL
FOR THE EFFICIENT DISTRIBUTION OF IRRIGATION WATER

宮津進¹・吉川夏樹²・三沢眞一³・安田浩保⁴

Susumu MIYAZU, Natsuki YOSHIKAWA, Shinichi MISAWA and Hiroyasu YASUDA

¹学生員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)

²正会員 博(農) 新潟大学助教 災害復興科学センター (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)

³非会員 博(農) 新潟大学教授 農学部 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)

⁴正会員 博(工) 新潟大学准教授 災害復興科学センター (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)

Irrigation water demand has tended to be concentrated during certain hours of the day, particularly in the morning and the evening, in response to an increase in the number of part-time farmers. On the other hand, the volume of supplied water is customarily fixed all day regardless of the fluctuation in demand. This results in a temporal and spatial imbalance of supply and demand, that is, a short supply occurs in the downstream area during the peak demand hours, despite the excessively supplied water is wasted during the low demand hours. In this study, authors proposed an “elastic water supply model” to realize more efficient irrigation water distribution and saving the usable water resource. The model was applied to the study field, K river basin, S city, Niigata prefecture, where water resource is chronically tight for the size of the beneficiary area of the irrigation water. The model evaluation was conducted by numerical simulation performed on the basis of the field survey concerning the time-series water demand fluctuation and arrival time of irrigation water. The result shows that the elastic water supply model functions to satisfy the peak demand requirement as well as to save water resources by 33% under the condition of installing regulating ponds with an appropriate capacity in the midstream of trunk irrigation channels for the sake of compensating the delay in the arrival of irrigation water.

Key Words : *Elastic water supply model, Irrigation water, Supply-demand imbalance, Saving water resources, Regulating pond*

1. はじめに

近年の兼業農家数の増加に伴って、水稻生産のための農業用水の需要は、農家の勤務前後の朝・夕の特定の時間帯に集中する傾向が高まっており、用水需要の日変動が顕著に現れることが指摘されている^{1) 2) 3) 4)}。一方、現況の用水計画設計基準⁵⁾では、用水需要の日変動に対応していないCB法^{6) 7)}およびLP法⁸⁾を用いて用水供給量を決定している。そのため、需要の時間的偏在にもかかわらず、農業用水は慣例的に需要量とは無関係に一定量が供給されている。この結果、水需要のピーク時に下流域で用水が不足する一方で、それ以外の時間帯では過剰供給となり、時間的・空間的な需給の不均衡が顕在化している。

緒形(1984)⁹⁾は、農業用水の供給システムのあり方として、「供給主導型システム」と「需要主導型システム」に大別できることを示している。前者は現状の用水供給システムであり、供給する側の都合によって、後者は受益末端の用水利用者の要求によって送配水量を決定するシステムである。供給主導型システムを採用した場合、用水源が逼迫している流域においては、水資源賦存量が制約条件となるため、常時用水需要を満足させる供給はできず、需給の不均衡に繋がる。この問題は、流域面積に対して受益面積が大きい地域で特に深刻であり、圃場の用水需要の日変動に対応した弾力的かつ効率的な需要主導型システムの実現が強く求められている。ただし、緒形は需要主要型システムでの具体的な供給量調整手法については言及しておらず、また、筆者らが知る限り、用水需要の日変動に対応した用水供給を実施してい

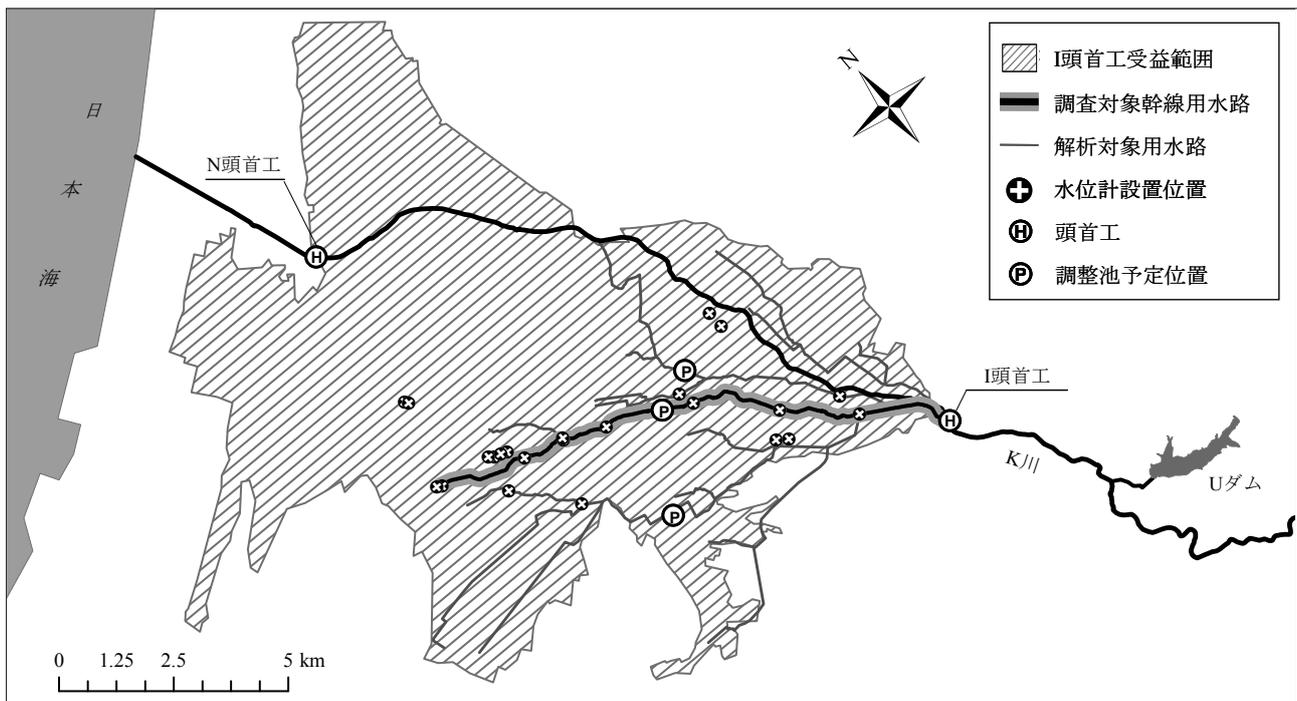


図-1 研究対象流域

る事例はない。

本研究では、新潟県S市のK川流域を事例とし、用水需給の時間的・空間的不均衡の解消に寄与する用水需要型システムの具体的な用水供給方法として「弾力的用水供給モデル」を提案する。モデルは、以下の2段階で評価した。1) 現地調査によって、用水需要の実態、用水到達時間を把握し、時間面での弾力性を持たせた用水供給量を決定。

2) 流域の用水路網をモデル化し、数値シミュレーションによって、需要量の満足および用水量節減の観点から、弾力的用水供給手法の有効性を検討。

2. 現地観測

(1) 研究対象流域の概要

S市K川のI頭首工の受益地域(4,197ha)を対象とした。図-1に研究対象流域を示す。I頭首工から取水された用水は幹線・支線用水路を経て圃場へと送配水される。受益範囲内の路線長が最も長いS幹線用水路の延長は約12kmである。取水元のK川は、融雪水により4月から5月にかけての自流量は豊富であるが、6月以降に減少し、河川自流量のみでは受益範囲内全ての用水需要を満たすことができない。そのため、河川自流量に加えて、農業利水のUダムからの用水供給を重要な補完水源として利用している。しかし、水資源賦存量に対し受益面積が大きく、渇水年にはダム貯水量が減少するため、上流のI頭首工と下流のN頭首工で2日置きの輪番制取水が実施

されている。なお、対象流域では兼業農家が全農家の87.7%という高い割合を占めている。

(2) 現地観測の方法

a) 圃場用水需要量の経時変化

上流域、中流域、下流域それぞれの圃場の用水需要の時間的、空間的変動を把握することを目的に、主要幹線・支線用水路内16箇所に水位計を設置し、灌漑期間中(4月20日-9月10日)の用水使用量を把握した(図-1)。

b) 用水供給量の経時変化

用水供給の時間的な変動は、新潟県より提供された過去35年間(1974-2009年)のUダムの水収支データおよびI頭首工の取水量データを使用して把握した。

c) 用水到達時間の把握

用水到達時間は取水元からの距離に応じて差が生じるため、受益面積が大きい対象流域では、用水到達時間が需給バランスへ大きな影響を与える。そこで、用水到達時間を把握するため、以下の2つの現地観測調査を実施した。

- ・河川部の用水到達時間調査(ダム-I頭首工間)
- ・水路部の用水到達時間調査(I頭首工-水路末端間)

表-1および表-2にそれぞれの調査条件を示す。

河川部の用水到達時間は、新潟県の協力のもと、試験的にダムの放流を行い、ダム放流開始から頭首工到達までの時間を頭首工に設置した水位計で観測した水位上昇

表-1 河川用水到達時間調査条件

	試験開始前	試験開始後
ダム放流量	1回目 2.45	8.20
(m^3/s)	2回目 2.30	11.30

表-2 水路用水到達時間調査条件

	試験開始前	試験開始後
I頭首工取水量 (m^3/s)	3.50	9.50

表-3 水路用水到達時間調査結果

	地点					
	2km	4km	6km	8km	10km	12km
	地点	地点	地点	地点	地点	地点
用水到達時間 (min)	10.0	22.5	50.0	70.0	118.7	160.0

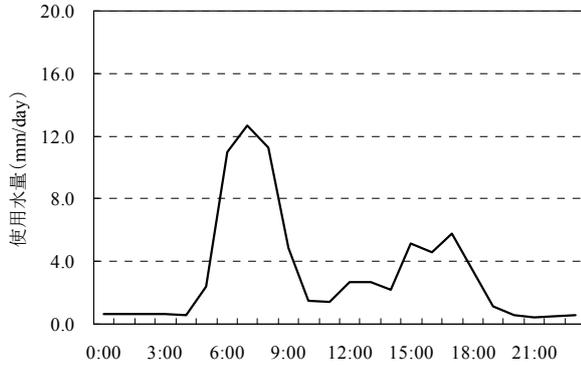


図-2 用水需要量の経時変化（上流域）

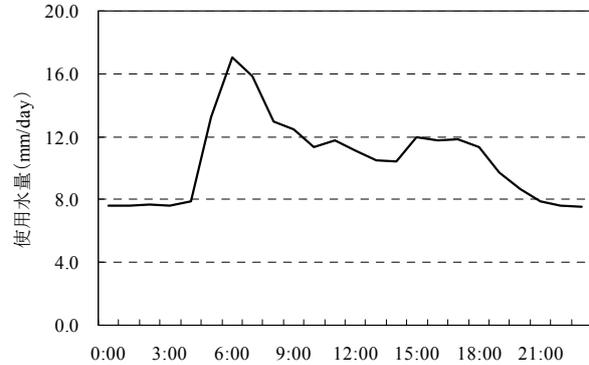


図-3 用水需要量の経時変化（中流域）

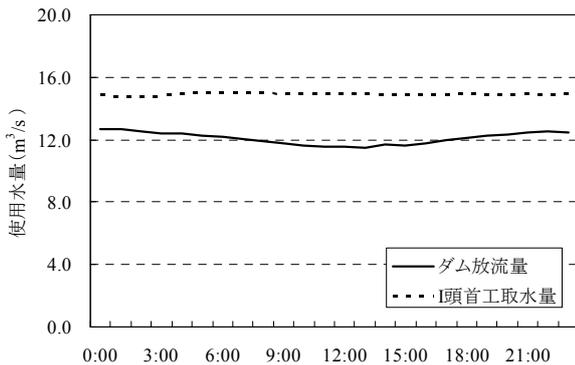


図-4 用水供給量の経時変化

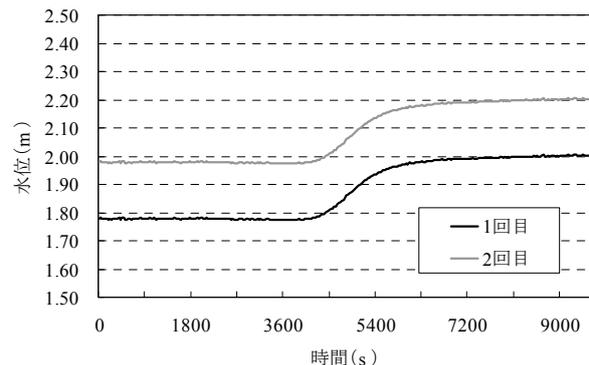


図-5 河川用水到達時間調査結果

によって把握した（図-1）。なお、放流量の違いによって到達時間に差が生じることが予想されたため、異なる放流量（ $8.2m^3/s$ および $11.3m^3/s$ ）で2回の観測を実施した。

水路部については、路線長が最も長い S 幹線水路を対象とした。頭首工から対象水路末端までの区間に6台の水位計を2km間隔で設置し、水位上昇を観測した時間によってそれぞれの地点における到達時間を判断した（図-1）。

(3) 現地調査の結果

a) 圃場用水需要量の経時変化

図-2、図-3にそれぞれ、上流域、中流域の圃場用水需要量の経時変化を示す。観測地点によって需要量に差異

はあるものの、上・中流域ともに、概ね朝：5～9時、夕方：15～18時に用水需要のピークがあり、用水需要の日変動が顕著に現れることが確認できた。また、需要量は、朝のピークが夕方のピークと比較して大きいという特徴が見られた。

b) 圃場への用水供給量の経時変化

図-4に用水供給量の経時変化（灌漑期間平均値）を示す。ダムからの放流量、頭首工の取水量ともに、常に一定量が供給されている。現状の用水供給は、圃場の用水需要の日変動に対応していないことが明らかとなった。

c) 用水到達時間の把握

・河川部の用水到達時間

図-5に河川用水到達時間調査の結果を示す。1回目（ $8.2m^3/s$ ）、2回目（ $11.3m^3/s$ ）ともに、大きな差はなく、

UダムからI頭首工までの用水到達時間は概ね1時間10分であった。

・水路部の用水到達時間

表-3に水路用水到達時間調査の結果を示す。取水量 $9.5\text{m}^3/\text{s}$ の場合、対象水路上流端のI頭首工から最初の分水箇所である2km地点まで約10分、下流端（12km地点）まで約2時間40分の到達時間を要した。したがって、受益最上流域と最下流域では、用水到達時間に概ね2時間30分のタイムラグがあることが明らかとなった。

3. 弾力的用水供給モデルの評価方法

(1) 弾力的用水供給モデルの概要

現地観測調査から、現況の用水供給は対象地区の需要ピークには対応しておらず、その結果、ピーク以外の時間帯では使用されずに排水される無効放流が大量に発生していることが明らかになった。水資源賦存量が逼迫し、その対策として輪番取水制度を採用している対象流域において、現状の用水供給方法は不効率であると言える。

こうした無効放流量の縮減には、圃場の用水需要の経時変化を考慮した供給側の対応、すなわち、弾力的用水供給が有効であると考えられる。筆者らが考える弾力的用水供給とは、現地観測で把握した圃場の用水需要パターンにあわせて、朝・夕の需要ピーク時に供給量を変化させるものである。ただし、用水需要が最も大きい朝のピーク時には、最大計画取水量を供給し（図-6）、この供給量の調整には、ダムの放流量調整で対応させることとした。

(2) 用水節減効果の評価方法

弾力的用水供給モデルによる用水節減効果の評価することを目的に、以下のダム水収支計算に基づいて、用水供給手法の違いがダム貯水量に与える影響を検証した。

$$V_{n+1} = V_n + (Q_{in} - Q_{out}) \quad (1)$$

ここに、 V_n :ダム貯水量、 Q_{in} :ダム流入量、 Q_{out} :ダム放流量である。

実際のダム運用は、6月以降の貯水量の減少に備えて、4月から5月の融雪水を利用してダムを満水位まで貯水する。そのため、モデル解析対象期間を6月以降の灌漑期間（6月1日～9月10日）とし、満水位のダム貯水量（ $17,800$ （ $\text{千}\text{m}^3$ ））を初期値とした。

ダム放流量は、弾力的用水供給モデル、従来型用水供給モデルそれぞれの供給パターンを満たすように決定した。また、弾力的用水供給モデルの効果の評価には、渇水年においてもダム貯水量を空にすることなく灌漑期を通して用水供給が可能であることを検証した。用水計画

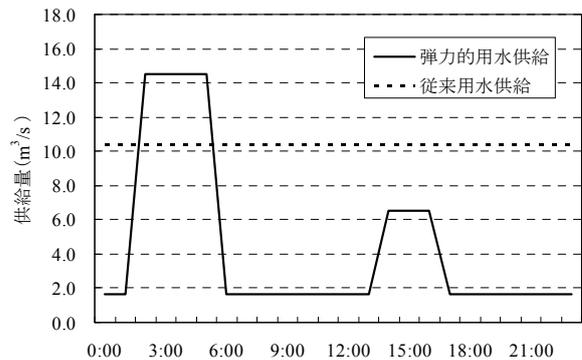


図-6 弾力的用水供給と従来型用水供給

設計基準⁵⁾で定められている渇水は再現期間が10年であるため、既往のデータから確率分布（グンベル分布）を用いて10年渇水時のダム流入量を算定し、使用した。

(3) 送配水系統の評価方法

a) 評価方法の概要

弾力的用水供給は朝および夕方の圃場の用水需要に対応するため、二つのピークをもつ供給流量波形を設定した（図-6）。ただし、ピーク形状の決定は単純ではない。用水需要ピークは受益地域内の全ての圃場で概ね同時刻であるのに対し、上下流間で用水到達時間にタイムラグがあるからである。全受益地での用水需要ピークに対応した弾力的用水供給の実施には、用水到達時間の考慮が不可欠である。そこで、弾力的用水供給モデルによる送配水の可能性を評価することを目的に、以下の1次元不定流モデルに基づく計算を行った。

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{LAT} \quad (3)$$

ここに、 v :流速、 t :時間、 h :水深、 x :距離、 S :水路底勾配、 g :重力加速度、 n :粗度係数、 R :径深、 Q :流量、 A :流積、 q_{LAT} :横流入量である。なお、横流入量とは、幹線用水路から支線用水路への分配される量を示しており、負の値を与えている。

なお、主要水路の各分水箇所の分水量は、設置した水位計による観測および地元土地改良区への聞き取り調査によって決定した。

対象としたのは、路線長の最も長いS幹線用水路（12km）を含むI頭首工の受益範囲である。水路緒言は、地元土地改良区により提供された用水路系統図および計画断面図、詳細については現地調査をもとに設定し、メッシュ間隔（ Δx ）を40m、計算時間間隔（ Δt ）を1sとした。

対象水路には、数多くの落差工が設置されていることに加え、急激な頭首工取水ゲートの開閉操作による段波の発生等から計算が不安定になるため、運動方程式の移流項にはMacCormackスキームを採用した。

b) 計算の妥当性検証

構築した一次元不定流モデルによる計算の妥当性を検証するため、水路用水到達時間調査で得られた実測値と計算値を比較した(図-7)。計算値は実測値を概ね再現し、計算の妥当性が確認できた。

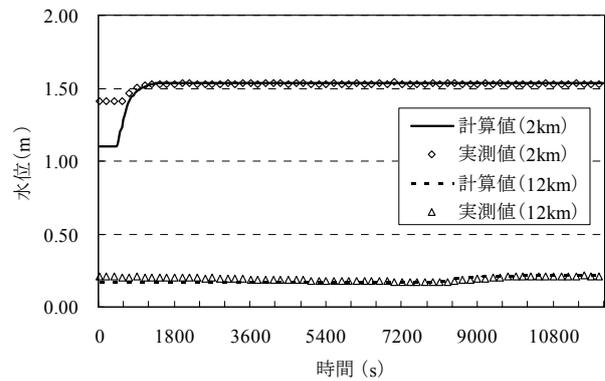


図-7 モデルの再現性の検証

4. 「弾力的用水供給モデル」の評価

(1) 用水節減効果

ダム放流シミュレーションによって、弾力的用水供給モデルと従来型用水供給モデルの必要用水量を比較した(図-8)。10年確率渇水年を想定してシミュレーションを実行した結果、従来型用水供給モデルでは、8月中旬にダムが枯渇し、灌漑期末期に33日間の灌漑が不可能になることが示された。一方、弾力的用水供給モデルの場合、ダム貯水量を枯渇させることなく、灌漑期間中の用水量を賄えることが示された。この結果、弾力的用水供給モデルは従来型用水供給モデルと比較して、約33%の用水を節減する効果があることが示された。本流域における水資源賦存量の確保には、主要補完水源であるダムからの弾力的な放流量調節が大きな意味を持ち、高い節水効果を有しているといえる。

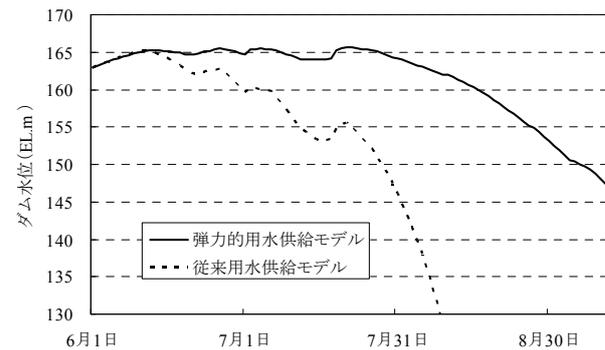


図-8 ダム放流シミュレーション結果

(2) 用水到達状況

弾力的用水供給モデルに基づき、最下流域の圃場の用水需要ピークに供給を合わせてダムの放流操作を行った場合のシミュレーション結果を図-9に示す。

最下流域では、朝：5～9時、夕方：15～18時の用水需要のピーク時に十分な用水量を確保できるが、最上流域では、朝・夕ともに圃場の需要ピーク時間の後半部に水路流量が不足し、用水需要を満たすことができなかった。同様に、最上流域の用水需要ピークに合わせた場合は、最下流域において需要ピークの前半部分で用水需要を充足させることができない。

最上流域と最下流域の用水到達時間は約2時間30分であるのに対し、弾力的用水供給モデルで需要ピーク時の需要量を賄える用水量の供給時間は朝：5時間、夕方：4時間である。すなわち、用水需要のピーク時間帯が受益地域内における位置とは無関係に兼業農家の勤務時間前後で固定されている状況下では、全ての受益地域で同時に需給を一致させるのは困難なのである。弾力的用水供給モデルの運用には避けられない課題である。

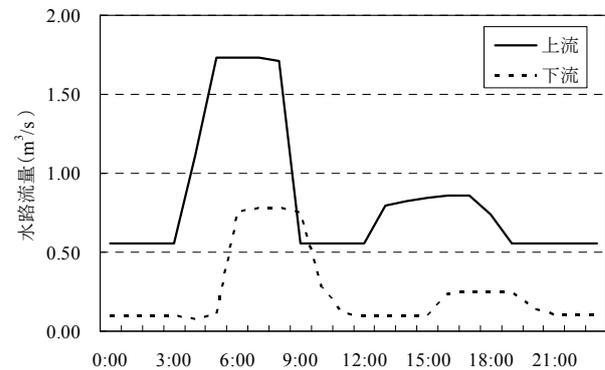


図-9 モデルによる用水到達状況計算結果 (S幹線水路—調整池不設置の場合)

めには、以下の2つの対応策が考えられる。

- ・ピーク取水量の時間延長
- ・中流域における調整池等によるバッファ機能の追加

前者は、総供給量の増加を意味する。必要用水量の観点から評価すると、10年確率渇水年においてダム貯水量が8月下旬に枯渇することが示された。弾力的用水供給モデルの目的は用水源の逼迫した流域における効率的な用水供給であるため、この方法では、効用が大きく損なわれる。したがって、ここでは後者による対応について検討する。

(3) 用水到達時間緩和の対応策

上下流域間における用水到達時間の遅延を緩和するた

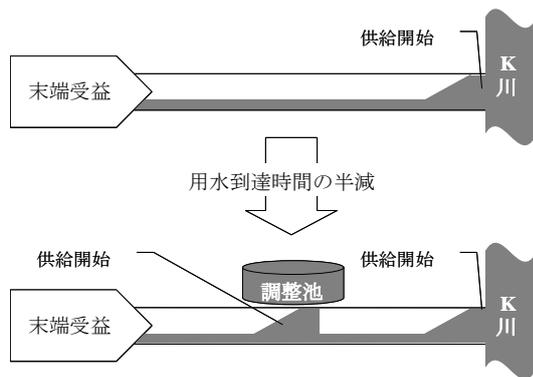


図-10 調整池設置の概念図

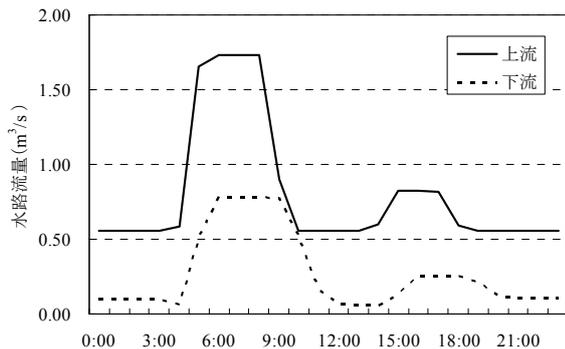


図-11 モデルによる用水到達状況計算結果
(S幹線用水路—調整池設置の場合)

図-10に調整池設置の概念図を示す。調整池によるバッファ機能の追加は、現行の用水計画設計基準⁹⁾において、用水の需給のタイムラグを緩和することを目的に採用されている手法である。調整池を設置し、頭首工からの用水供給と同時に調整池から用水供給を行うことで、用水需給のタイムラグの縮減を図ることができる。受益地域において、用水到達時間が課題となる主要3幹線用水路の中流部に調整池の設置を想定した場合の用水到達状況についてシミュレーションを行った。なお、各調整池容量を試行錯誤同定法で決定した結果、S幹線、O幹線、B幹線用水路それぞれに、容量3000m³、6000m³、4000m³の調整池を設置することとした(図-1)。

図-11にS幹線用水路の用水到達状況のシミュレーション結果を示す。上流域の用水需要ピークに用水供給を合わせた場合でも、調整池の設置によって、用水到達時間までの下流域の用水需要を賄うことができ、すべての受益圃場のピーク用水需要量を満足させることが可能となった。計算の結果、他の2幹線用水路(O幹線用水路、B幹線用水路)においても同様に需要を満たす供給が可

能であったことから、適正容量の調整池を設置することにより、弾力的用水供給モデルは、実現可能なモデルであることが確認された。

5. まとめ

用水需給の時間的・空間的不均衡を解消する弾力的用水供給モデルを提案し、効率的な農業用水利用のための水資源管理手法の検討を行った。圃場の用水需要ピーク時間帯の朝：5～9時、夕方：15～18時に合わせて用水供給を調整することを狙ったものである。受益面積が大きく幹線用水路の延長が長い場合は、取水元からの距離に応じて用水到達時間に差が生じるが、これは、用水路中間点付近に調整池を設けることで対応できることが確認された。弾力的用水供給モデルを適用することで、従来の一定量を固定的に供給する灌漑方法に比べ約33%の水資源節減効果が得られることが示された。

謝辞：本研究を行うにあたり、北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所、新潟県農地部、ならびに地元土地改良区には多大なる助言・協力を頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 前川勝朗：水田パイプラインと水管理，農業土木学会誌，48 (3)，pp.4-6, 1980.
- 2) 江崎要，竹中肇，大塚嘉一郎，丸山利輔，渡辺紹裕，堤聰：パイプライン系水田における水管理の特性，農業土木学会誌，52 (11)，pp.31-37, 1984.
- 3) 川尻裕一郎：耕地整備後の水田圃場における水管理情報の場—農業用水管理組織の検討の基礎として (VI)—，農業土木学会誌，53 (6)，pp.31-38, 1985.
- 4) 三沢眞一：農業用水取水実態の変化に対応を，農業土木学会誌，55 (8)，pp.2-4, 1987.
- 5) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準，計画・農業用水 (水田)，農業土木学会，pp.1-103, 1993.
- 6) 岡本雅美：水田農業田水の計画需要量の推定法，水利科学，91, pp.54-65, 1973.
- 7) 佐藤政良，岡本雅美：CB法におけるブロック判定の理論的検討，農業土木学会論文集，118, pp.17-22, 1985.
- 8) 三野徹，丸山利輔：用水系統の再編成と広域用水量の決定について，農業土木学会論文集，108, pp.9-17, 1983.
- 9) 緒形博之：水資源利用と中間貯留，東京大学出版会，pp.1-149, 1984.

(2010. 4. 8受付)