

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 —

宮島真理子* 吉田武郎** 森田孝治* 村山 香* 名和規夫** 増本隆夫**

* サンスイコンサルタント (株), 〒600-8108 京都市下京区五条通新町西入西鋸屋町 23 番地 陽和ビル

** (国研) 農研機構 農村工学研究部門, 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

要 旨

取水・還元が連続した鬼怒川流域において、これまで主に本川の観測点で行われてきた分布型水循環モデルの用水循環過程の検証を、取水・還元の影響がより強く現れる支川の観測点でも行った。検証の際、現行の汎用的なモデルに加え、貯水池運用で2段階、取水で4段階、用水配分で1段階の計8段階で水利施設運用に関する制約条件を段階的に与え、各段階での流量計算精度の変化から必要な制約条件をスクリーニングした。ダム操作規則や維持流量等の制約条件の貯水池運用モデルへの反映は、本川上の流量観測点の計算精度の向上に寄与した。また、モデル上の取水時期・量の設定により、本川中下流・支川の観測点での計算精度が段階的に改善された。これらの結果から、農業水利用の影響下にある流域の水循環モデル化に不可欠な情報を明らかにするとともに、現行モデルの改良の方向性を示した。

キーワード：分布型水循環モデル，農業水利用，用水還元量，流域，DWCM-AgWU

1. はじめに

農業用取水量は河川からの全取水量の約7割に相当し、その水源の9割以上を河川水が占める(国土交通省, 2014)。取水量の多さに加え、河川の複数地点で繰り返される取水・河川への再流入(還元)の過程により、農業水利用は流域の流況や水質、地下水の循環に大きな影響を与える。河川の低水管理を適正に行うためには、このような用水循環のメカニズムを理解することが重要である。しかし、そのために必要な取水・分水データの多くは基幹的施設での観測に限られ、土地改良区、水利組合等が管理する末端の分水施設や各圃場への取水実態は観測すらされていないことが多い。そのため、農業用水の取水・還元の河川流況への影響を評価することは困難であった。

一方、河川流量は長期間の蓄積があり、かつ、農業用水の取水・還元の影響がその時系列に色濃く反映されている。そのため、水文モデルを援用して農業用水の循環構造を推定する手法が数多く開発されてきた(白石ら, 1976; 丸山ら, 1979)。さらに、流域全体の水文量の時空間変化を複数のセルの組み合わせにより表現する分布型水文モデルに農業用水の循環機構を組み込み、自然的・人為的な影響を統合して表現するモデル開発へと展開してきた(後藤, 1983; 松井, 2002; 谷口ら, 2009; Masumoto et al., 2009)。吉田ら(2012a)は日本全国の農業水利施設を収録したデータベース(以下、日本水土図鑑 GIS; 日本水土総合研究所, 2005)

を活用した用水配分・管理アルゴリズムを開発し、それを流域スケールの分布型水文モデルに実装した(以下、分布型水循環モデル: Distributed Water Circulation Model with Agricultural Water Uses, DWCM-AgWU)。このアルゴリズムにより農業水利用の表現に必要なデータ収集・整理のための労力が軽減され、分布型水循環モデルは日本全域での気候変動の農業水利用への影響評価に活用されている(Kudo et al., 2017a)。

分布型水循環モデルの汎用的な構造は、広域へのモデル展開のための大きな利点の一つといえる。ただし、施設諸元のデータベースのみからは、個々の農業水利施設に設けられている様々な制約条件は読み取ることができない。そのため、より精度の高い流出計算を行うためには、前述のデータベース以外の資料や、現地調査等から施設の制約条件を収集し、モデルに与える必要がある。モデルの汎用性を担保しながら、要求される計算精度を得るために必要な情報量を整理することは、分布型水循環モデルに限らず、農業水利用を流域スケールで表現するための有用な指針となる。

そこで本研究では、分布型水循環モデルを取水・還元が連続する鬼怒川流域に適用し、モデルに与える農業水利施設の運用に関する制約条件を段階的に導入する。それぞれの入力情報に対するモデルの計算精度の変化から、人為的な影響下にある河川において流量を精度よく計算するために必要な情報を明らかにする。また、これまで本川上の観

測点に限られてきた分布型水循環モデルの検証を、鬼怒川流域に高密度で分布する支川の観測点においても行うことで、より徹底的にモデルを検証するとともに、現在のモデル構造を改良する方向性についても議論する。

2. 対象流域とデータ

2.1 鬼怒川流域の特徴

鬼怒川は栃木県日光市の鬼怒沼に水源を持ち、流域面積 1,761 km² の一級河川で、茨城県守谷市で利根川に合流する (Fig. 1)。鬼怒川の上流には複数の多目的ダム (五十里・川俣・川治各ダム) があり、洪水貯留、発電、農業用水、工業用水、上水供給を目的として国土交通省により統合管理されている。鬼怒川本川上には三基の頭首工 (佐貫・岡本・勝瓜各頭首工) があり、これらにより合計 21,000 ha の灌漑地区 (以下、鬼怒川三堰地区) に最大 71m³/s にのぼる用水を供給している。鬼怒川三堰で取水された水は地区内で取水・還元が繰り返され、その一部は隣接する小貝川 (流域面積 1,043 km²) へ還元する。

2.2 水文・気象データの収集

鬼怒川・小貝川流域では、本川・支川ともに流量観測の密度が非常に高く、国土交通省、栃木県による継続的な水位観測の蓄積がある。本研究では、鬼怒川・小貝川流域内の 13 地点の河川流量の観測データを収集した (Fig. 1)。観測地点を流域ごとに分類すると、鬼怒川本川上の観測点が 5 地点 (上流から佐貫頭首工 (SNK)、岡本頭首工 (OKM)、勝瓜頭首工 (KTR)、平方 (HIR)、水海道 (MKD))、小貝川本川上の観測点が 4 地点 (上流から三谷 (MYA)、黒子 (KRG)、川又 (KWM)、戸田井 (TDI)) である。その他、鬼怒川右岸の支流河川には 2 地点 (上流から東橋 (AZM)、明治橋 (MJI)、ともに田川)、左岸にも 2 地点 (上流から監物橋 (KNM)、野元川)、妹内橋 (IMO、五行川)) の流量観測所がある。これらの流量観測所のうち、欠測の多い川又観測所を除く 12 地点をモデルの検証地点とした。

モデルに入力する気象データは流域内の AMeDAS および気象官署の観測要素 (降水量、気温、風速、日照時間、相対湿度) を吉田ら (2012a) の提示する手法に従って処理し、グリッドセルごとに日単位のデータセットとした。

2.3 農業水利に関する資料収集

分布型水循環モデル構築に必要な基幹水利施設の諸元、灌漑受益地の情報は、前述の日本水土図鑑 GIS から抽出した。また、土地改良調査管理事務所の調査資料 (農林水産省関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所, 2006, 2014) を参照し、鬼怒川三堰地区の受益地 (鬼怒川中部地区、鬼怒川中央地区、鬼怒川南部地区, Fig. 2 参照) の現行水利権策定の基礎資料を収集した。貯水池運用に関する情報は、五十里・川俣・川治各ダムの操作規則に加え、維持流量等の基礎諸元を各ダムのウェブサイトから収集した (国土交通省関東地方整備局鬼怒川ダム統合管理事務所, 参照

2017.2. 24)。

3. 方法

3.1 現行モデルの構築 (段階 1)

本研究ではまず、吉田ら (2012a) に従って情報の収集、モデル構築を行った。このモデルを本論文中では現行モデルと称し、「段階 1」(英文では Step 1) と表記する。また、以下の入力情報の段階的な変更とともに数字を一つずつ増やして表す (Table 1)。

まず、国土数値情報土地利用細分メッシュ (国土交通省国土政策局国土情報課, 参照 2017.6.20) に基づき 4 つの土地利用区分 (森林・水田・畑地・水域) に分類し、蒸発散量を支配する根群域容量および蒸発散係数をそれぞれの地目ごとに設定した。この際、都市・市街地は森林に区分される。現行モデルの 5 個の流出パラメータは、人為的な影響を受けないダム地点 (川治ダム, 五十里ダム) における流量時系列を再現するように試行錯誤により決定し、これらのパラメータを流域の全てのセルに与えた。この際、ダム地点の長期水収支から、ダム流域のみに降雨量の割り増し補正を行った。また、積雪・融雪モデル (吉田ら, 2012b)

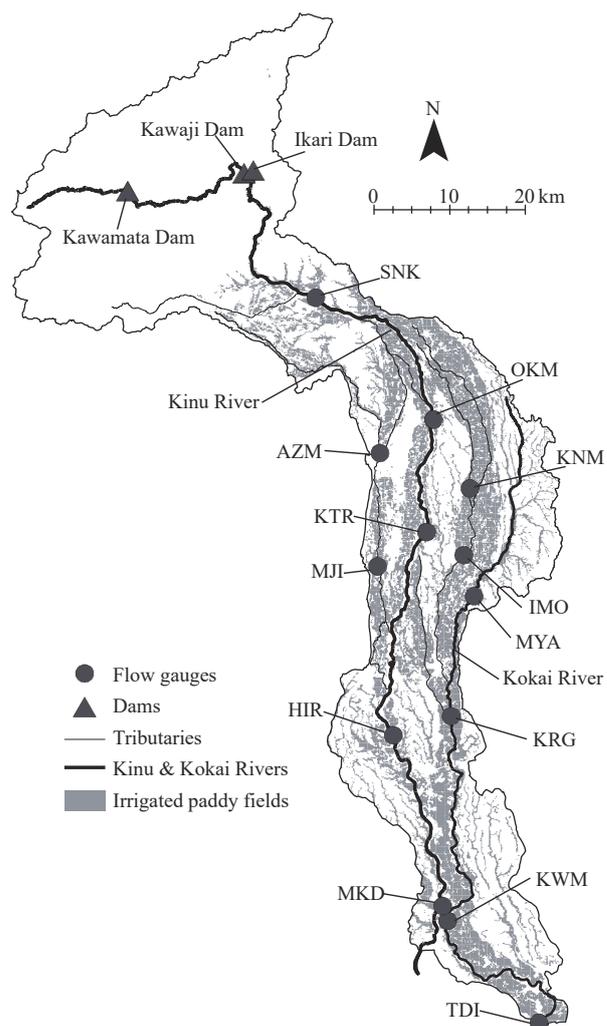


Fig. 1 鬼怒川流域の全体像
Overview of the Kinu River Watershed

のパラメータ (k_{sl}) は、標高と k_{sl} 間の経験的な関係式を用い、セルの平均標高から決定した (Kudo et al., 2017a, 2017b).

分布型水循環モデルでは、貯水池運用、用水配分・管理という 2 つのサブモデルから人為的な水循環過程を表現する (吉田ら, 2012a).

貯水池運用モデル (堀川ら, 2011) に必要なパラメータ (ダムの目的, 有効貯水量, 最大発電放流量) は前述のダム操作規則から読み取った. 同モデルでは有効貯水量を通年の管理貯水量とし, 貯水池の流入量, 放流量から貯留量を日単位で算出する. 放流量は洪水吐越流量, 灌漑放流, 発電放流, 都市用水放流量からなる. 灌漑放流量は, 各ダムに予め関係づけられた取水施設 (目的放流地点) における前日の河川流量と取水要求量を比較し, その不足分を補給するように決定する. ここでは, 五十里ダムおよび川俣ダムの目的放流地点を佐貫頭首工, 川治ダムを岡本頭首工とそれぞれ設定し, 取水要求量は期別の水利権取水量とした. 佐貫頭首工への灌漑放流量は, 五十里・川俣ダムの有効貯水量比で配分し, 両ダムから放流することとした.

用水配分・管理モデルでは, 本川上の三頭首工 (SNK, KTR, OKM) に加え, 支川上の頭首工 (江川, 田川, 黒子) および揚水機場 (花島, 船玉, 河岸) での取水を推定する. 取水量の決定に必要なパラメータ (水利権取水量, 取水期間) は水利使用規則から設定し, 取水量の総量規制, 有効降雨を考慮した取水パターンは考慮しない. また, 取水された水は, 取水施設からの距離, 水路の有無, セルの標高によって定められる地区内の優先順序に従って配分される (吉田ら, 2012a). この時, 地区内の複数の用水ブロックが存在する場合 (例えば頭首工からの両岸取水) であってもその配分比は考慮しない.

3.2 サブモデル設定の段階的な変更

各段階の設定は, データの入手容易度により設定した (Table 1). ここでは, 本モデルを日本の任意流域に適用する際にモデル利用者が資料準備をする順序を想定し, 以下のように設定した. データの入手容易度が高い情報は一般に公開された資料, 入手容易度が中程度のものは事業実施主体等への問い合わせに応じて入手できる資料とした. 最も入手しやすさが低い情報とは必ずしも出版されておらず, ダム管理者や土地改良区等の実際の管理者への聞き取りによって得られる情報とした.

また, 上流側施設への制約条件の影響が下流に順次及ぶように, 流出パラメータ, 貯水池運用モデル, 用水配分・管理モデルの順に設定した. そのため, 段階 3 の貯水池運用モデルの改良 (データの入手容易度「低」) が, 段階 4 の用水配分・管理モデルの改良 (データの入手容易度「中」) より先になった.

3.2.1 貯水池運用モデルの変更 (段階 2~3)

a. **ダム操作規則の反映 (段階 2)**: 洪水制御を目的に持つ多目的ダムでは, 洪水期 (6~9 月) に洪水調整容量を確保するために常時満水位よりも水位を低下させる. 段階 2

Table 1 サブモデル設定の段階的検証

Sequential screening of information related to agricultural water use		
段階	内容	入手先
1	現行モデル: 吉田ら (2012a) に準拠 (3.1)	日本水土図鑑 GIS (高)
	・水収支による降雨補正, 流出パラメータ設定	
2	貯水池運用モデル (3.2.1 a.)	インターネット (高)
	・取水要求量, 期別制限貯水位, 維持流量, 正常流量, 最大放流量の設定	
3	貯水池運用モデル (3.2.1 b.)	ダム管理者 (低)
	・ダム連携を考慮した放流ルールの設定	
4	用水配分・管理モデル (3.2.2)	国営事業者 (中)
	・用水諸元・灌漑期間の地区ごとの設定	
5	用水配分・管理モデル (3.2.3 a.)	国営事業者 (中)
	・取水量の総量規制の導入	
6	用水配分・管理モデル (3.2.3 b.)	国営事業者 (中)
	・雨なし取水パターンの導入	
7	用水配分・管理モデル (3.2.3 c.)	土地改良区 (低)
	・取水実績の日平均の導入	
8	用水配分・管理モデル (3.2.4)	国営事業者 土地改良区 (低)
	・灌漑地区内の用水配分ブロックの導入	

「内容」列の数字は本文中の章番号, 「入手先」列の括弧は著者が判断したデータの入手容易度 (高, 中, 低) を表す.

The numbers in the second column refer to the section of this paper; and the parentheses in the third column indicate the data accessibility we evaluated.

では, ダム操作規則で定められた期別制限水位を貯留上限値として設定した. なお, 非洪水期から洪水期への移行は, 灌漑開始日から洪水期の初日 (6 月 1 日) にかけて, 一樣な放流速度で制限貯水容量を低下させる. さらに, 低水管理上の目標として正常流量を設定し (国土交通省, 2006), 鬼怒川ダム統合管理事務所ホームページよりダム下流の河川環境保全のための維持流量を整理した (国土交通省関東地方整備局鬼怒川ダム統合管理事務所, 参照 2017.2.24). なお, 五十里ダムについては湯西川ダム完成前後 (2012 年) で維持流量が異なるが, 検討対象期間 (1998~2010 年) を考慮し, 湯西川ダム完成前の値とした.

b. **ダム連携運用ルールの推定 (段階 3)**: 鬼怒川上流のダム群 (五十里ダム, 川俣ダム, 川治ダム) は国土交通省により統合管理されている. 隣接する五十里・川治ダムは導水路で結ばれ, 水の相互融通がなされているが, 具体的な運用方法は明らかでない. そこで, 両ダムの流入量および有効貯水量から定まる回転率を考慮し, 利水放流の優先順位を反映した運用ルールを設定した. すなわち, 回転率が早い五十里ダムの貯水量が制限貯水容量を上回る場合には五十里ダムから最大発電放流量を放流し, 川治ダムから

は灌漑放流量から五十里ダムの放流量を差し引いた量を放流することとした。

また、非洪水期から洪水期への移行期間における実績貯水量を参考に、放流調整の目安となる貯水の上限（制限貯水容量）と下限（最低貯水量）を設定した。そして、10月1日～4月15日の間に貯水が最低貯水量を下回る場合には、発電放流は行わないこととした。

3.2.2 灌漑期間・用水諸元の設定変更（段階4）

現行モデルでは灌漑期間、用水諸元を流域一様として設定するが、段階4では以下のように鬼怒川三堰地区それぞれの灌漑期間を河川協議資料から整理した。また、鬼怒川三堰地区以外の灌漑地区には、鬼怒川三堰地区のうち最も近傍の地区の諸元を割り当てた。設定した諸元は、灌漑期間（開始日、終了日）、用水諸元（作付け必要水量、代かき用水量、圃場単位用水量、水田浸透量、管理水深、水田欠口高、水田欠口幅、灌漑効率）である。灌漑開始および終了日に関しては、各地区における水稲作期のうち灌漑開始の最も早い品種の代かき開始日および灌漑終了の遅い品種の終了日により決定した。用水諸元については、作付け必要水量は各地区の代かき用水量とし、各地区のブロック別代かき用水量を面積加重平均した値とした。水田浸透量は蒸発散量と各地区の平均減水深より算定し、蒸発散量は6 mm/dとした。管理水深および水田欠口高は80 mm, 100 mmとした（農林水産省関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所, 2006）。水田欠口幅は土地改良事業計画設計基準・計画「ほ場整備（水田）」（農林水産省構造改善局計画部資源課, 2000）を参考に1 m/ha, 水田灌漑効率は全地区共通で0.85とした。

3.2.3 頭首工での取水水量の変更（段階5～7）

a. 取水水量の総量制限（段階5）：取水水量の設定方法の見直しの第一段階として、鬼怒中央地区、鬼怒川南部地区で定められている年間総取水水量の上限を、河川協議資料を参照して定めた。鬼怒中央地区は岡本頭首工（OKM）のみから取水されるが、鬼怒川南部地区の取水水量は勝瓜頭首工（KTR）、田川頭首工（Tagawa D.W.）、江川頭首工（Egawa D.W.）から取水される（Fig. 2）。鬼怒中央地区では岡本頭首工、鬼怒川南部地区では勝瓜・江川・田川各頭首工の取水水量の合計が期別の取水制限量を上回る場合、それ以上の取水を行わないこととした。

b. 雨なし取水パターンの導入（段階6）：次に、取水水量を水利権取水水量から雨なし取水パターンに変更した。雨なし取水パターンは、粗用水量から区内反復利用量を差し引いたもので、利水計画基準年の気象条件で取水すべき最大量と定義され、河川協議資料の基礎資料である。対象としたのは前項で検討した地点に加え、佐貫頭首工（SNK）、黒子頭首工（Kurogo D.W.）である（Fig. 2）。

c. 取水実績値の期別パターンの反映（段階7）：最後に、13年間（1998～2010年）の実績取水水量を基に日平均値を算出し、この期別パターンを全ての年に与えた。対象施設は前項で検討した施設に加え、船玉（Funatama P.S.）・川岸（Kashi P.S.）・花島（Hanashima P.S.）各揚水機場とした（Fig.

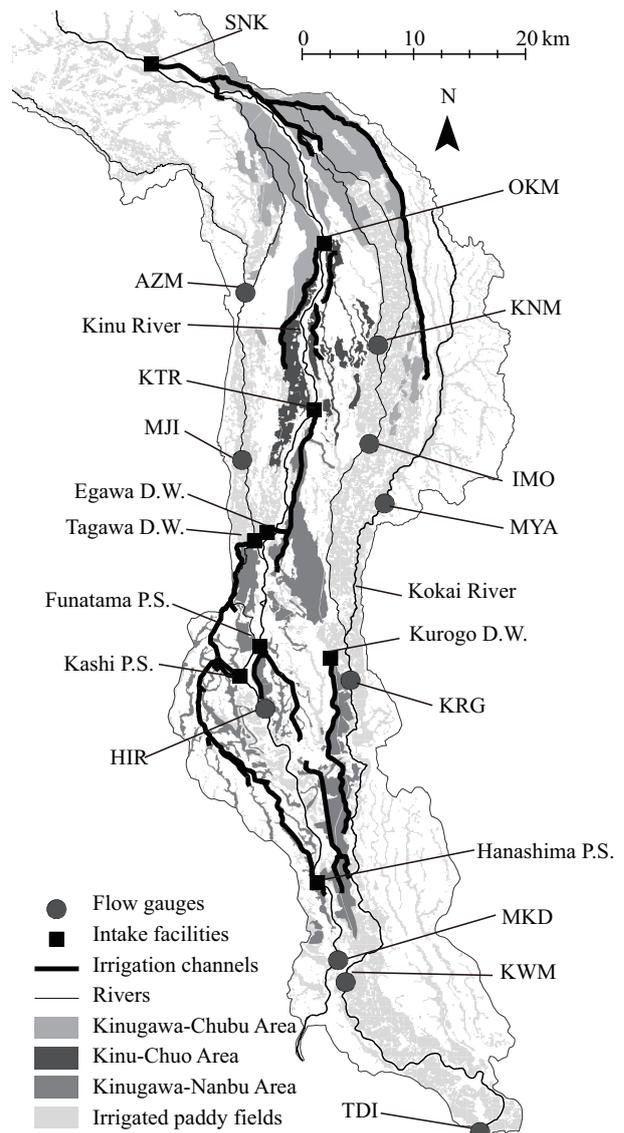


Fig. 2 佐貫頭首工より下流の水利利用
Water uses in the lower part of the Kinu River Watershed

2).

3.2.4 地区内の用水配分過程の変更（段階8）

段階8として、河川協議資料の用水系統模式図を参考に、地区内に用水配分ブロックをより細かく設定した。現行モデルでは各取水施設に対し単一の灌漑地区を想定するが、その想定は鬼怒川では必ずしも成り立たない。例えば佐貫頭首工で取水した水は鬼怒川の左右両岸に分配され、その分配比は取水直後にある分水地点で定められている。これを表現するため、河川協議資料を参照して灌漑地区を複数のブロックに分割するとともにブロックの最大取水水量を得る。頭首工での取水水量は、ブロックの最大取水水量比に従って各ブロックに分配することとした。なお、各ブロック内の配水順序は吉田ら（2012a）のアルゴリズムに従って決定した。

3.3 モデル検証に用いた水文指標

モデルの計算は1998～2010年の13年間を連続して行い、

モデルの検証はそのうち4~9月を対象とした。これは、勝瓜頭首工の流量観測は4月から9月までしか実施されていないことと、非灌漑期の支流河川の流量は冬期維持用水の影響が大きいことによる。なお、解析期間をパラメータの同定・検証期間に分けた検証は行っていない。

河川流量の観測・計算値から適合度を検証する指標として、相対誤差、Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash and Sutcliffe, 1970) およびバイアスを利用する。上述した段階的なモデル入力情報の変更によるこれらの指標値の相対的な変化から、流量の計算精度の向上に必要な入力情報を整理する。

相対誤差 (RE) は式 (1) で示され、観測値に対する絶対相対誤差の割合を表す。相対誤差は小さいほど流出予測精度が良く、河川協議等の実務現場では20~30%程度の値が要求される (農業水利研究会, 1998)。

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_s(i) - Q_o(i)|}{Q_o(i)} \quad (1)$$

ここで、 n はデータ数、 $Q_o(i)$ および $Q_s(i)$ は i 日目の観測・計算流量である。ただし、相対誤差は観測流量に対する誤差の大きさを表すため、流量の観測値と計算値の差が同程度の場合、流量が小さい地点では大きい地点と比較して誤差が大きく見積られる。そのため、流量が大きく異なる地点間の比較や、低水流量の観測誤差が大きい地点の評価には不都合な場合がある。

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) は計算・観測流量の平均二乗誤差を観測流量の分散で正規化したもので、次式により計算される。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_s(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

ここで、 \bar{Q}_o は算定期間における $Q_o(i)$ の平均である。NSE の値は計算値と観測値が完全に一致する場合には1、計算値の平均二乗誤差が観測値の分散と一致する場合には0、適合度がそれ以下であれば $-\infty$ までの負の値をとる。モデルの適合度を判断する NSE の値には絶対的な基準はないものの、例えば Moriasi et al. (2007) は0.5以上を良好なモデルとしている。NSE の値は、流出ピーク時の誤差およびタイミングに左右されやすい。本研究では、低水時も含むハイドログラフの全体的な適合性を評価するため、流量の対数を用いて算出した。なお、後述する月ごとの NSE の算出には、各月の観測流量の平均値を \bar{Q}_o として用いた。

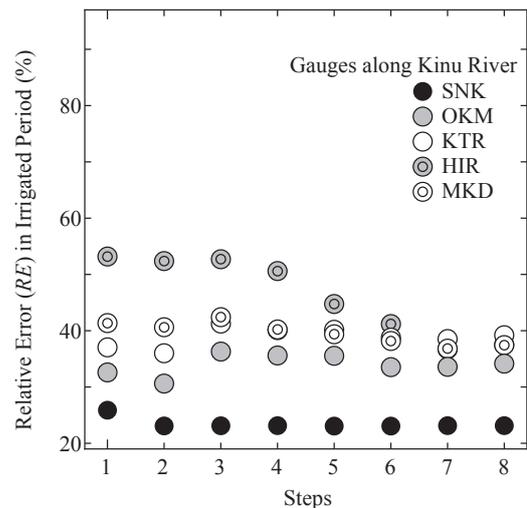
バイアス (Bias) は総観測流量に対する総計算流量の比率を示したもので、モデル上の水収支や用水の還元先を確認するために用い、この値が1に近いことが望ましい。

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n Q_s(i)}{\sum_{i=1}^n Q_o(i)} \quad (3)$$

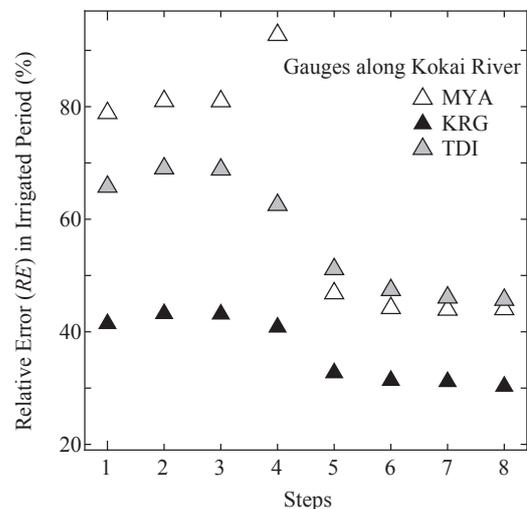
4. 結果

4.1 相対誤差の段階的な変化

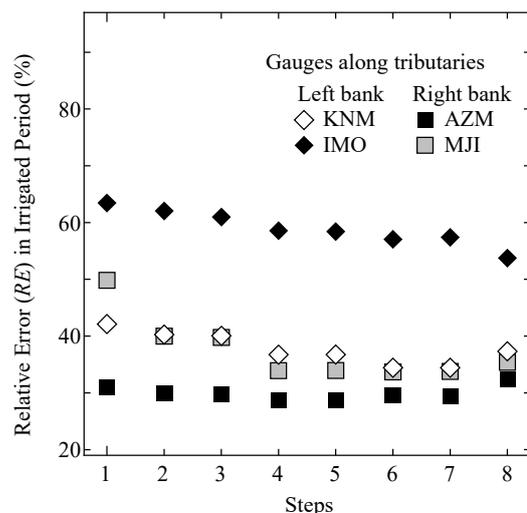
鬼怒川の流量観測点 (Fig. 3 (a)) で最も低い相対誤差を示すのは最上流に位置する佐貫頭首工 (SNK) で、岡本



(a) Gauges along Kinu River



(b) Gauges along Kokai River



(c) Gauges along tributaries

Fig. 3 与えた情報に対する相対誤差の段階的な変化
Changes in the relative errors (RE) according to the information applied to the model at flow gauges along (a) Kinu River, (b) Kokai River and (c) tributaries

(OKM)・勝瓜 (KTR) 各頭首工に流下するに伴って増大した。SNKの流量は段階1から2でやや改善するが、その後の変化は小さい。また、段階1での平方 (HIR) の相対誤差は鬼怒川で最大 (53.1%) であったものの、段階4から7にかけて減少し、最終的には34.9%まで低下した。最下流の水海道 (MKD) では40%前後で推移し、入力情報の変化による計算精度の変化は明瞭でなかった。

小貝川の観測点 (Fig. 3 (b)) では中流の黒子 (KRG) が最も低い相対誤差となり、最下流の戸田井 (TDI), 最上流の三谷 (MYA) の順に大きくなった。小貝川の全地点における相対誤差は、段階3から6にかけて段階的に低下した。

その他の支流河川の観測点 (Fig. 3 (c)) では、右岸上流側の東橋 (AZM) が最も低く (段階8で32.3%), 次いで右岸下流の明治橋 (MJI, 同35.4%) と左岸の監物橋 (KNM, 同37.3%) が同等の値を示し、左岸下流の妹内橋 (IMO) が最大 (同53.7%) となった。段階ごとの変化をみると、MJI, KNM, IMO では多少の上下動はあるものの、段階1から6にかけて徐々に減少した。一方で、AZMは変化に乏しかった。

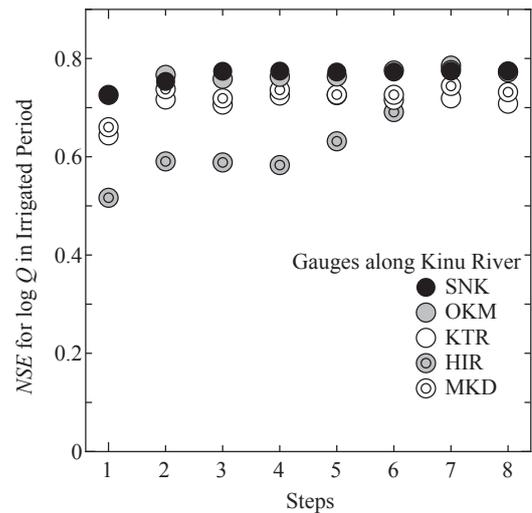
4.2 MSEの段階的な変化

鬼怒川の流量観測点では、全ての地点でNSEは0.5以上となった (Fig. 4 (a)). 段階1から2の貯水池運用モデルの変更で全ての地点で適合度が上昇した。また、現行モデルによる再現性が最も低かった平方 (HIR) では、段階4 (NSE=0.583) から段階7 (同0.786) にかけて連続的な値の上昇がみられた。

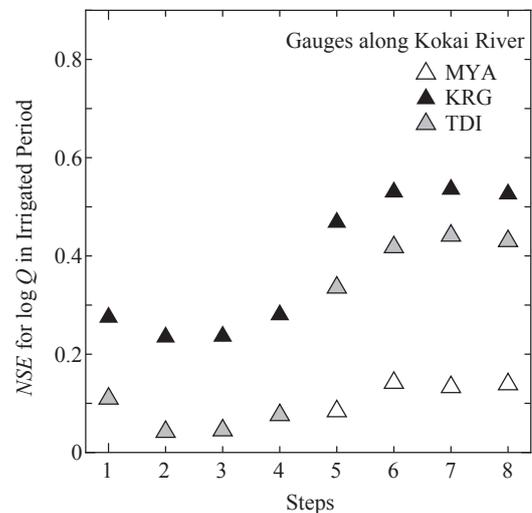
小貝川の流量観測点で得られたNSEは鬼怒川本川上のそれと比較して全体的に低かった (Fig. 4 (b)). また、相対誤差でみられた結果と同様、段階3から6にかけて全地点で大きく上昇した。なお、Fig. 4 (b) に示した三谷 (MYA) のNSEは段階4まで負の値であったが (段階1: -0.854, 段階2: -0.915, 段階3: -0.914, 段階4: -1.050), Fig. 4の3枚の図の縦軸を統一するため、それらは図中に示されていない。

支流河川の流量観測点のNSEは、左右両岸とも上流地点 (KNM, 0.500; AZM, 0.518) の方が下流地点 (IMO, 0.064; MJI, 0.302) より高い値であった。段階ごとの変化は地点により異なる挙動を示し、明瞭な変化のパターンは読み取れなかった (Fig. 4 (c)). 特に、明治橋 (MJI) および妹内橋 (IMO) ではNSEの値が段階に応じて大きく上下した。すなわち、MJIでは段階3から4にかけてNSEが減少し、段階7から8では上昇した。一方、妹内橋 (IMO) では逆に段階7から8でNSEが急減した。また、東橋 (AZM) では殆ど変化が見られず、監物橋 (KNM) では段階3から4にかけてNSEが急上昇したほかは明瞭な変化が見られなかった。

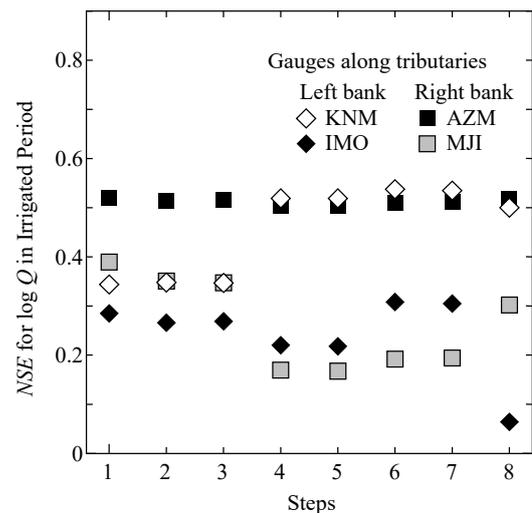
次に、流出計算の適合度をより詳細に評価するため、月ごとのNSEをFig. 5に示す。ここでのNSEは、段階8の計算結果を用いて算出した。なお、Fig. 5では全ての値を示すために、図ごとに縦軸の範囲を変えていることに注意さ



(a) Gauges along Kinu River



(b) Gauges along Kokai River



(c) Gauges along tributaries

Fig. 4 与えた情報に対するNSE(logQ)の段階的变化
Changes in the Nash-Sutcliffe Efficiencies (NSE(logQ)) according to the information applied to the model

りたい。

鬼怒川の流量観測点では4月のNSEが最も低く、時間の経過とともに徐々に高くなった (Fig. 5 (a))。また、7月以降は全地点でNSEが0.8以上の良好な再現性が安定して得られた。

一方、小貝川の流量観測点では、月ごとの変動が非常に大きく、特に、5月のNSEは全地点で負の値になり (Fig. 5 (b))、また、三谷 (MYA) ではNSEが8月に急落した (NSE = -0.655)。全体的にみると、4~6月のNSEは低く、7月以降は高くなる傾向がみてとれた。支流河川の流量観測点でも小貝川同様に全体的に4~6月のNSEが低く、7月以降に上昇する傾向があり、5月には全地点のNSEが負の値になるという点も小貝川と同様であった (Fig. 5 (c))。

4.3 バイアスの段階的な変化

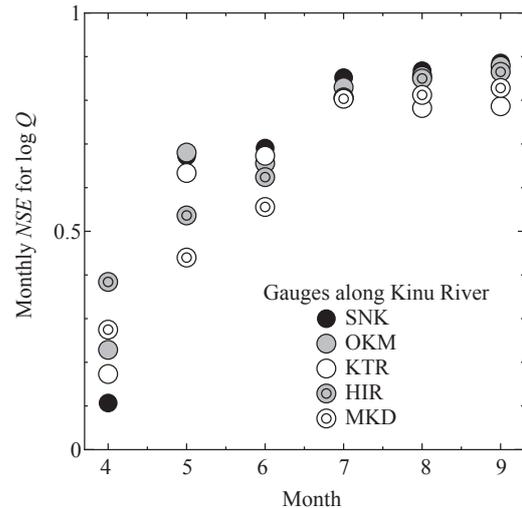
鬼怒川の流量観測点で段階8のバイアスを比較すると、上流にある佐貫・岡本・勝瓜各頭首工 (SNK, OKM, KTR) のバイアスが1より大きい一方で、下流の平方, 水海道 (HIR, MKD) は2割程度過小推定する結果となった (Fig. 6 (a))。小貝川の流量観測点では、段階4から5にかけて大きくバイアスが減少し、最終的には段階8でバイアスは全地点で1を下回った (Fig. 6 (b))。小貝川中流の三谷 (MYA) では、段階4までのバイアスが1.2を超えていたものの、段階5でバイアスが急減し、ほぼ1になった。さらに、支流河川の流量観測点でのバイアスは、段階8で全ての結果が1を下回った (Fig. 6 (c))。

下流の観測地点でバイアスが1を下回ったことは、中・下流域での蒸発散が過大推定された可能性を示唆する。そこで、現行モデルでは「森林」に分類されていた「都市・市街地」における蒸発散係数を、森林の値 (1.2) から0.4に変更したところバイアスは1に近づいた (Fig. 6 中の段階LU)。特に、都市域である宇都宮下流に位置する明治橋地点 (MJI) で顕著に改善効果が見られ、全地点のバイアス値の平均は0.920から0.974に改善された。

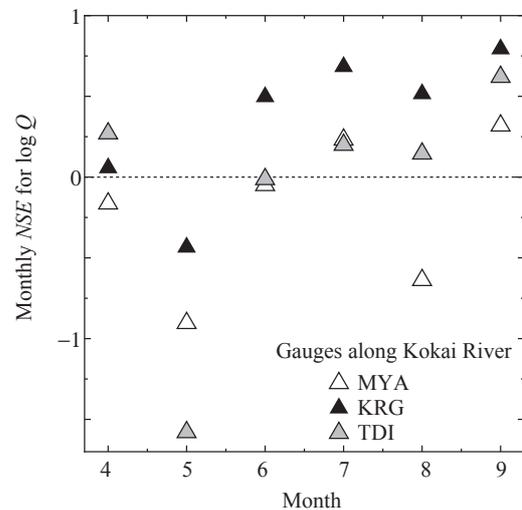
5. 考察

5.1 現行モデルの計算精度向上に寄与した要因

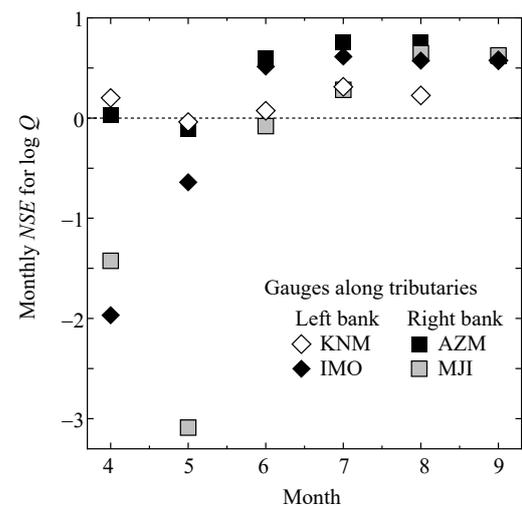
貯水池運用モデルの変更 (段階2, 3) は、主に鬼怒川の流量観測点の計算精度に寄与した。2段階の変更のうち、段階2でのNSEの上昇は段階3でのそれより大きかった (Fig. 4 (a))。このことは、ダム操作規則や維持流量といった既存の文献資料により現行モデルの計算精度向上が見込め、貯水池の連携といった流域に固有な運用ルールの効果はそれに比べて限定的であることを意味する。ただし、段階2から3への変更により、灌漑期におけるダム貯水量のNSE値は、五十里ダムで0.711から0.948、川治ダムで0.437から0.830、川俣ダムで0.644から0.654へとそれぞれ上昇した。そのため、河川流量のみではなく、ダムに蓄えられる水資源量を議論の対象にする場合にはこうした貯水池運用方法の詳細な設定は不可欠といえる。



(a) Gauges along Kinu River



(b) Gauges along Kokai River



(c) Gauges along tributaries

Fig. 5 段階8におけるNSE (logQ) の月変化 (図中の点線はNSE (logQ) = 0を示す.)

Monthly variations in Nash-Sutcliffe Efficiencies (NSE(logQ)) with the simulated streamflow of Step 8 (The dashed lines in each panel indicate NSE(logQ) = 0)

用水配分・管理モデルの変更（段階4～8）により、鬼怒川の平方（HIR）および小貝川の全流量観測点では、段階4から6への流出予測精度が連続的に向上した（Fig. 3 (a), (b) ; Fig. 4 (a), (b)）。灌漑期間の地区ごとの設定（段階4）によって流量予測精度が向上したことは、灌漑期間をモデル上で適切に表現することの重要性を示唆する。また、段階5, 6で取水量の制限により流量の再現性が向上したことは、現行モデルで設定した取水量が過大であることを示唆する。一方で、実績取水量を日平均した取水パターンの導入（段階7）では、RE, NSEともに改善の効果は小さかった。鬼怒川本川、小貝川での計算精度には、河川協議資料等の既存資料の活用による用水諸元、取水量の見直しが重要であり、取水実績値の反映の効果はそれらに比べて小さいといえる。

一方、支流河川の流量観測点では、用水配分・管理モデルの設定により適合度が改善した地点（例えばKNMにおける段階4, Fig. 4 (c)）と、やや結果が悪化した地点（同MJIやIMO）があり、モデルに反映させた情報量と計算精度の間に明瞭な関係は見いだせなかった。

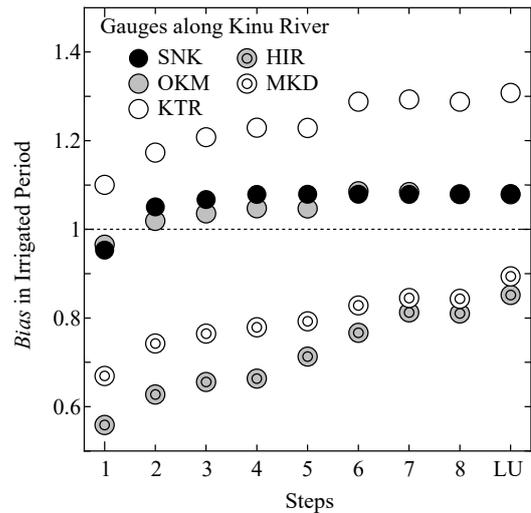
本研究では、入手が容易な情報は現実との差が大きい、入手の難しい情報はより現実的な状況を反映している、との暗黙的な前提を置いていた。しかし、制約条件の追加によって計算精度が低下する段階があることは、追加した情報と現実との乖離があることを示唆する。このような情報は、逆に言えば、モデル精度向上のために今後の重点的な調査が必要な項目とも言える。例えば、本研究で考慮した取水・用水配分のルールは、13年間の平均的なルールにより表現することを試みたもので、年々の変化は考慮していない。しかし、実際の取水開始時期や用水の配分状況は気象条件や営農状況で変化し、年変動があると考えられる。本川の流量は各地区の水運用の影響がある程度平均化されるのに対し、支流河川では流量が相対的に小さく、年変動の影響を強く受ける。そのため、精度の向上が本川のように段階的に現れなかったのではないかと推察する。

5.2 分布型水循環モデル改良の方向性

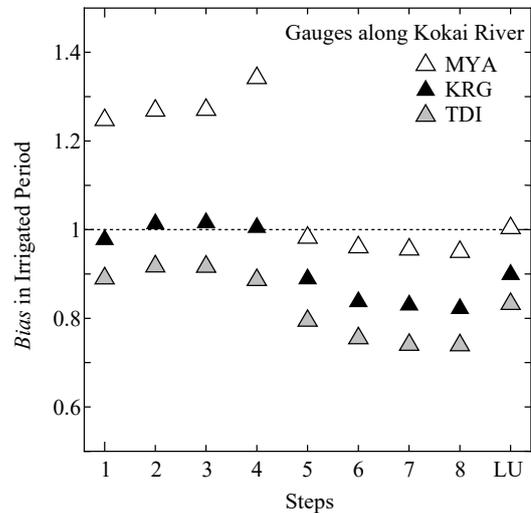
入力情報の段階的な変更によっても計算精度が低い地点や時期は、現在の分布型水循環モデルの改良の手がかりとなる。以下では、指標のスコアが低い地点・時期をとりあげ、それぞれに考えられる改良の方向性を考察した。

小貝川・支流河川では灌漑初期（4～5月）の計算精度が低く、主に観測値が計算値を下回っていた（Fig. 7 (a)）。この一つの原因として、前述したように、本研究では考慮していない取水量・時期の年々変化があげられる。この効果は、年々変動する実績取水量をモデル上の取水量として与えたときに、支流観測点における計算精度が向上するかを調べることにより検証できる。今後の課題としたい。

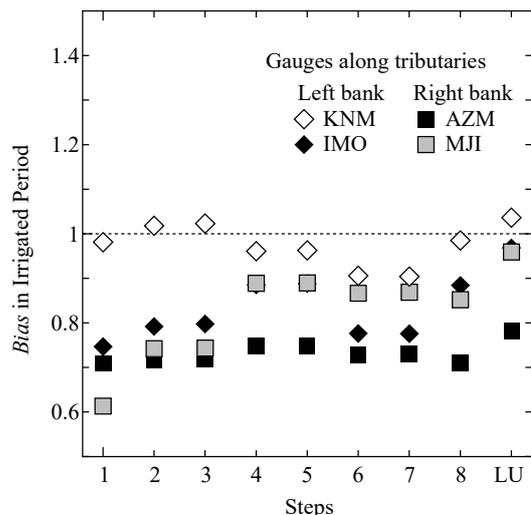
灌漑初期の流量精度が低いもう一つの要因として、代かきによる流出過程の変化があげられる。水田の代かきにより、代かき層直下の土壌間隙の目詰まりや粘土層の沈積により浸透が抑制される（足立, 1988）。現在のモデルではこ



(a) Gauges along Kinu River

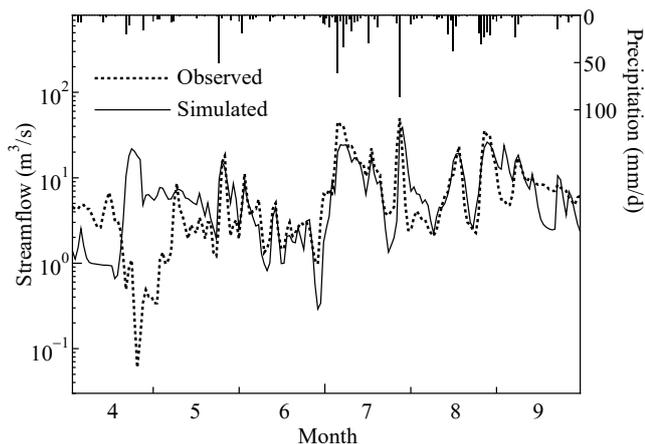


(b) Gauges along Kokai River

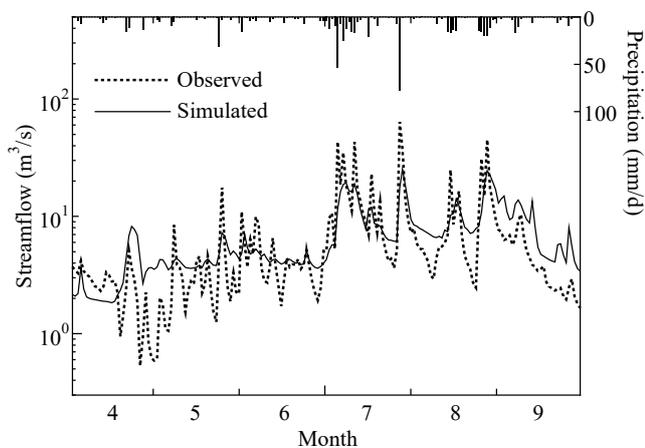


(c) Gauges along tributaries

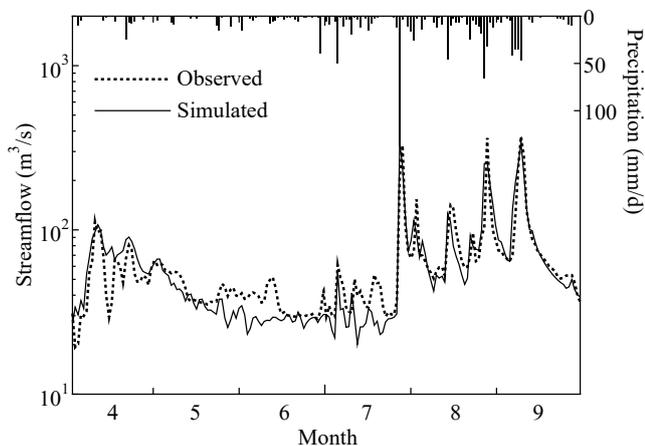
Fig. 6 灌漑期のバイアスの段階的变化
(点線は Bias = 1, LU は土地利用見直し後の値を示す)
Simulated Bias with the information applied to the model (The dashed lines in each panel indicate Bias = 1. Plots for LU represents the Bias with corrected land use data.)



(a) IMO in Gogyo River (tributary)



(b) MYA in Kokai River



(c) SNK in Kinu River

Fig. 7 2005年灌漑期の観測・計算流量の比較 (段階8)
Simulated (Step 8) and observed streamflow during the irrigation period in 2005

うした浸透特性の時間変化は反映されておらず、水田の浸透量は前述の通り非灌漑期においても一定値として与えられる。そのため、モデル上では代かき期に供給された水の大部分は地中に浸透することなく地表流出し、灌漑初期の計算流量が観測流量より過大になったと考えられる。Fig. 7 (a) に示した五行川妹内橋地点の上流には取水堰が複数あ

り、4月下旬から観測流量の急減は代かき用の大量取水の影響を受けたものであると考えられる。一方、支流河川においても、灌漑中期・後期には取水・還元過程がある程度再現されており、上述した代かき期の水田浸透量の時間的遷移をモデルで適切に表現できれば、計算精度の改善に繋がる可能性がある。

次に、小貝川の流量観測点の中でも特に精度が低かった三谷 (MYA) に着目すると、観測流量のばらつきに対し、計算流量は基底流が安定し、ばらつきが小さい (Fig. 7 (b)). 本モデルでは、各グリッドの飽和帯水層の水面は地表面と平行であり、飽和帯水層の貯留量に応じて貯留量の一部が河川に湧出するという仮定を置く。この仮定は多くの斜面流出モデルで援用されるが (Beven and Kirkby, 1979)、鬼怒川扇状地では扇央部の地下水面は扇端部のそれより深く、必ずしもこの仮定を満足しない。そのため、扇状地河川における浅層地下水と地表河川との交流現象の理解に基づき (例えば土原ら, 2009 ; Iwasaki et al., 2016)、モデルの基本構造を改良することは今後の課題となるだろう。なお、8月のNSEの急激な低下 (Fig. 5 (b)) は、ピークから減衰部の変動が大きいことに起因すると考えられる。その原因は定かではないが、水利用がこの時期に最盛期を迎えることや蒸発散量の増加により河川流量が低下しやすく、計算流量の誤差が大きくなったものと推察される。

鬼怒川本川では、4~5月に相対的に計算精度が低い。取水・還元の影響を受けない最上流の佐貫頭首工 (SNK) でNSEが最低値 (0.106) となることから、この時期の計算精度の低さは積雪融雪過程や貯水池運用モデルの影響によるものと考えられる (Fig. 5 (a)). 4~5月の佐貫頭首工地点での観測流量には不自然な上下動が観察されることから (Fig. 7 (c)), この時期の誤差が貯水池からの放流量の推定誤差に起因することが示唆される。

最後にバイアスの特性をまとめると、上流ではやや観測流量より過大に算出され、下流の観測点では計算流量は実測流量より全体的に小さい傾向にあった (Fig. 6). 4.3で述べたように、土地利用区分に「都市・市街地」を追加し、その蒸発散係数を変更することにより、中・下流の観測点でのバイアスは改善された。一方で、本川の岡本 (OKM)・勝瓜 (KTR) 両頭首工での計算流量の過大推定は、土地利用の修正では殆ど改善されない。この原因として、佐貫頭首工で取水し、右岸に分流された水の行き先をモデル上でうまく表現できていないことが考えられる。佐貫頭首工での取水量は左右岸に分流される (段階8で考慮)。右岸側に配分された水は発電に用いられた後、支流河川の西鬼怒川に放流され、さらにその一部は逆木用水として取水される。取水後、西鬼怒川の水は鬼怒川本川に流入し、逆木用水として取水された水は水田に供給され、その多くは田川に還元する。東橋地点 (AZM, 田川) の計算流量が過小であることを考えると、計算上、実際より多くの水が西鬼怒川に配分され、勝瓜・岡本両頭首工で計算流量が過大となったものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、現行の分布型水循環モデル(吉田ら, 2012a)に農業水利に関する情報を段階的に与え、農業水利用の影響下にある流域水循環のモデル化に必要な情報の抽出を行うとともに、現行モデルの改良の方向性を考察した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 貯水池運用モデルにダム操作規則や維持流量等の既存文献資料の情報を反映させることにより、主に本川上の流量観測点の計算精度が向上した。貯水池の連携運用等の流域固有の運用ルールへの効果は限定的であったが、ダム貯水量の推定精度は向上した。そのため、ダムに蓄えられる水資源量を議論の対象にする場合には、こうした流域固有の情報も収集する必要がある。
- 2) 用水配分・管理モデルに与える情報の向上により、還元の影響を強く受ける支川および本川中流の観測点での計算精度が段階的に改善された。取水期間の地区ごとの設定によって流量予測精度が向上したことは、モデルでの灌漑期間の地区ごとの設定の重要性を示唆する。また、総取水量の制限、雨なし取水パターンへの変更による計算精度の向上は、現行モデルの取水量設定が過大であったことを意味する。
- 3) 本研究で洗い出されたモデルの改良点として、取水量・時期の年々変化の表現、水田における浸透特性の時間的な変化の表現、扇状地における浅層地下水と河川の交流現象のモデル化があげられた。

謝辞: 本研究は、農業水利基本調査「水田還元率評価分析業務」(農林水産省関東農政局) および JSPS 科研費 16K18774 の助成を受けた。農林水産省関東農政局 尾美広幸水利計画官、恵美須美生技術係長(ともに当時)、宇都宮大学 松井宏之教授、農研機構農村工学研究部門 土原健雄上級研究員との議論から多くの知見と示唆を頂いた。

引用文献

- 足立一日出(1988): 代かきによる浸透抑制効果の実験的考察—輪換田の水移動に関する研究—, 農土論集, **135**, 1-8.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*, **24**, 43-69.
- 後藤 章(1983): 平面メッシュ型流出モデルの基礎理論と長期流出解析への適用, 東京大学, 博士論文.
- 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.
- Iwasaki Yoshioka, Y., Nakamura, K., Nakano, T., Horino, H., Shin, K.-C., Hashimoto, S. and Kawashima, S. (2016): Multiple-indicator study of groundwater flow and chemistry and the impacts of river and paddy water on groundwater in the alluvial fan of the Tedoru River, Japan, *Hydrological Processes*, **30**, 2804-2816, doi:10.1002/hyp.10785.
- 国土交通省(2006): 利根川水系河川整備基本方針.
- 国土交通省(2014): 日本の水資源, 社会システム.

- 国土交通省関東地方整備局鬼怒川ダム統合管理事務所(参照 2017.2.24): 鬼怒川とダムの紹介, (オンライン), 入手先 <<http://www.ktr.mlit.go.jp/kinudamu/kinudamu00009.html>>
- 国土交通省国土政策局国土情報課(参照 2017.6.20): 国土数値情報ダウンロードサービス, (オンライン), 入手先 <<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>>
- Kudo, R., Yoshida, T. and Masumoto, T. (2017a): 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.
- Kudo, R., Yoshida, T. and Masumoto, T. (2017b): Uncertainty analysis of impacts of climate change on snow processes: Case study of interactions of GCM uncertainty and an impact model, *Journal of Hydrology*, **548**, 196-207, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.03.007.
- 丸山利輔, 富田正彦, 小林慎太郎(1979): 複合タンクモデルによる広域水収支解析—1. 複合タンクモデルの特徴とその構成, 農土誌, **47**(2), 19-24.
- 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, In: Taniguchi, M., Burnett, W.C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, Y. (Eds.), *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*, Taylor and Francis, 195-201.
- 松井宏之(2002): 農業水利が卓越した流域におけるグリッド型流出モデルの開発—鬼怒・小貝モデルの基本構造—, 農土論集, **221**, 71-79.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007): Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **50**(3), 885-900.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, **10**, 282-290.
- 日本水士総合研究所(2005)(参照 2017.2.24): 日本水士図鑑, (オンライン), 入手先 <<http://www.nngis.jp/>>
- 農業水利研究会(1998): 農業農村整備事業のための河川協議の実務(1998年版), 公共事業通信社.
- 農林水産省関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所(2006): 鬼怒川流域水循環解析及び河川協議補足説明資料作成業務報告書.
- 農林水産省関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所(2014): 鬼怒川三堰用水計画検討業務報告書.
- 農林水産省構造改善局計画部資源課(2000): 土地改良事業計画設計基準・計画「ほ場整備(水田)」, 1-89.
- 白石英彦, 大西亮一, 伊藤喜一(1976): 岩木川水系の広域水収支—水系管理と水収支予測—, 農業土木試験場報告, **14**, 49-116.
- 谷口智之, 増本隆夫, 清水克之, 堀川直紀, 吉田武郎(2009): 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)—作付時期・作付面積推定モデル—, 水文・水資源学会誌, **22**, 101-113.

土原健雄, 福田武真, 吉本周平, 石田 聡, 増本隆夫, 今泉眞之
(2009) : 環境同位体からみた農業用水利用に伴う地表水-地下水
交流特性, 応用水文, **21**, 10-19.
吉田武郎, 増本隆夫, 工藤亮治, 谷口智之, 堀川直紀 (2012a) : 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, **277**, 9-19.
吉田武郎, 増本隆夫, 堀川直紀, 工藤亮治 (2012b) : 暖地積雪流域
における積雪・融雪モデルの構築と分布型水循環モデルへの統
合, 農業農村工学会論文集, **277**, 21-29.

Sequential Screening of Information Related to Agricultural Water Use in Modelling Watersheds Experiencing Substantial Human Influences

— Application of distributed water circulation model to Kinu River Watershed —

MIYAJIMA Mariko*, YOSHIDA Takeo**, MORITA Koji*, MURAYAMA Kaoru*,
NAWA Norio** and MASUMOTO Takao**

* *Sansui Consultant Co., Ltd.*, 23 Yowa Building, Nishikazariya-cho, Shinmachi-Nishiiru, Gojo-dori, Simogyo-ku,
Kyoto, Kyoto 600-8108, JAPAN

** *Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization*, 2-1-6 Kan-nondai,
Tsukuba, Ibaraki 305-8609, JAPAN

Abstract

To quantify the influence of agricultural water use on streams, we developed a hydrological model incorporating diversion and return flow processes. To rigorously validate the model, we applied it to the Kinu River watershed with intensive observation of streamflow on both the main and branch channels, all of which experience substantial human influences. We sequentially applied the information related to agricultural water use with different details, trying to identify the details in the operational rules necessary for modelling watersheds. The operational and management rules were divided into eight steps, including the initial model, two for reservoir operation, four for water diversion, and one for water allocation in the irrigation areas. The accuracies of the simulated streamflow along the main stream improved by introducing the first rule on reservoir operation related to the seasonal variation of maximum water levels, whereas detailed information related to the integrated operation of multiple reservoirs was not as effective at improving accuracy. Each rule on water diversion from the main stream improved the accuracies and water balances, suggesting the diversion volume in the initial model was overestimated. The sequential screening also revealed the issues regarding the structural errors in the current model and their potential direction for improvement.

Key words : *Distributed water circulation model, Agricultural water use, Return flow, Watershed, DWCM-AgWU*