

長短期流出に対応する水田モデルの構築と 構造的モデル化法によるその要素モデル化

市川 温・佐藤康弘*・立川康人・椎葉充晴

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

過去に提案されている水田モデルは大きく、(1) 長期流出計算を対象とするもの、(2) 短期洪水流出計算を対象とするものの二つに分類される。本研究では、それぞれの代表的モデルである複合タンクモデルと低平地タンクモデルを組み合わせた新しい水田モデルを構築した。ついで、この新しい水田モデルを構造的モデル化法によって要素モデル化し、木津川上流域に適用した。

キーワード：水田モデル、取排水、畦畔（堤防）越流、OHyMoS

1. 序論

日本をはじめとして中国、タイなどの東アジアの国々では稲作が農業の中心となっており、河川流域にはかなりの割合で水田がひろがっている。水田は、かんがい・排水などにより、水位や水量が人為的にコントロールされ、また、その構造上、卓越した貯留効果を持つなど、自然流域とはかなり異なった流出特性を持つ。

こうした水田独特の水循環を水文モデルに反映させることが、河川流域での水文現象を正しく評価・分析する上で重要である。

過去、農業水文学者を中心に提案された水田流出モデルは、長期流出計算を対象とするものと、短期洪水流出計算を対象とするものの二つに大きく分類される。長期流出計算モデルの代表的なものとして複合タンクモデル(渡辺ほか、1993)が、短期流出計算モデルの代表的なものとして低平地タンクモデル(早瀬・角屋、1993)がそれぞれ挙げられる。

複合タンクモデルは、土地利用状況に応じて複数のタンクモデルを組み合わせたもので、耕作者による取水や水田からの還元水を評価でき、水田での水管理を反映したモデルである。計算は日単位で行われ、基本的には通年の計算を念頭においているため

か、洪水氾濫時の畦畔越流を簡略化して取り扱っている。

低平地タンクモデルは、低平地の河川や水田における短期洪水流出を計算するモデルである。河道や水田を貯水池とみなし、それぞれを河道タンク、水田タンクと呼び、河道タンク、水田タンク間の流量は、両者の水位から堰の公式で計算される。よって、水田から河道への流出のみならず、氾濫時の河道から水田への流入をも模擬できるという利点を有している。しかし、短期洪水流出計算を対象としているため、取水等の水管理状況はモデルに組み込まれていない。

複合タンクモデルの水田モデルは、水田の場の構造と、取水という人為的なプロセスをモデル内部に組み込んでおり、低平地タンクモデルは、洪水時における水田-河道系の水の動きを物理的根拠に基づいて表現している。両モデルともに、現象や場の物理的構造を実際に近い形で表現しているのだから、両者を結合することによって、長期の流出計算にも短期の流出計算にも対応できる新しい水田モデルが構築できるのではないだろうか。

以上のことから本研究では、複合タンクモデルの水田モデル及び低平地タンクモデルの長所を組み合わせた新しい水田モデルを提案する。ついで、この

新しい水田モデルを構造的モデル化法(鈴木, 1994)を用いて計算機上に実現し、実流域に適用する。

本論文の構成は以下の通りである。2. では、長短期流出計算に対応した水田モデルについて述べ、3. では、構造的モデル化法について説明し、これを用いた水田モデルの要素モデル化について説明する。4. では、前章で実現した水田要素モデルを用いて作成した全体系モデルを実流域に適用し、その結果を考察する。最後に5. で結論および今後の課題を述べる。

2. 長短期流出計算に対応する水田モデルの構築

2.1 既存の水田モデルの概要

これまで農業水文学の研究者を中心として、様々な水田モデルが提案されてきた。

京都大学農学部かんがい排水学研究室を中心に開発された複合タンクモデル(渡辺ほか, 1993)の中の水田タンクモデルは、水田での水管理操作を表現するため、水田の落水口からの流出に対応した側方流出孔の高さを利水状況にあわせて変化させるという特徴を持っている。増本・足立(1994)は、中山間水田における耕作水田と放棄水田の流出形態の特徴や違いを加味したタンクモデルを開発した。亀裂による浸透の効果をモデル化し、さらに中山間水田地域に卓越した畦畔法面からの流出を計算するためのタンクを水田タンクとは別に設けたことが特徴である。このモデルも、複合タンクモデルにおける水田タンクモデルと同様に、地表面上の側方流出孔の高さを水管理の状況にあわせて変化させている。これらの水田モデルは水田の取排水過程をモデルに取り込んでいる点で共通している。

一方、水田-河道間の水の動きに主眼をおいた水田モデルとして、早瀬・角屋(1993)の低平地タンクモデルや、鈴木・西畑(1969)の作成したタンクモデルなどがある。低平地タンクモデルは河道や水田を貯水池とみなし、それぞれを河道タンク、水田タンクと呼び、河道タンク、水田タンク間の流量は堰の公式を使って計算される。鈴木・西畑のタンクモデルは水田を主体とする低平地の流出解析を行なうためのもので、対象流域が水路と田面からなるものとし、田面流域の面積、幹線水路網の水路面積、小排水路網の水路面積、そして幹線水路の支水路と考えられる水路及び幹線水路下流域の湛水が比較的大きい区域の面積を推定し、それぞれを一つのタンクと考えてモデル化したものである。各タンク間の流量が堰の公式によって計算されるのは低平地タンクモデルと共通している。

上記のように、既存の水田モデルはおおまかにい

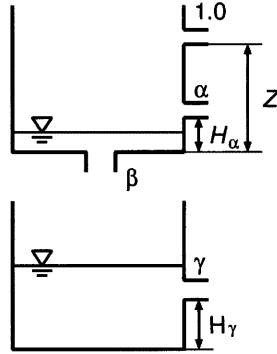


Fig. 1 Paddy field model used in the Complex Tank Model

えば、側方流出孔の高さを水管理の状況にあわせて変動させることで、取排水過程を組み込んだタンクモデルと、水田・河道をそれぞれタンクと考え、水田-河道間の流量を堰の公式などを用いて計算するタンクモデルの二つのタイプに集約される。前者の代表として複合タンクモデルの水田タンクモデルを、後者の代表として低平地タンクモデルをとりあげ、それぞれについて以下で詳細に説明する。

(1) 複合タンクモデルにおける水田タンクモデル

複合タンクモデルは、農業用水の合理的利用のため、反復利用状況を把握したり、農業用水と流域の水収支の関係を把握するといったことを目的として、京都大学農学部かんがい排水学研究室を中心に開発された。複合タンクモデルは、流入～流出の変換系として菅原のタンクモデルを採用している。単位流域に相当するタンク群を複数つなげ、分布型モデルの性格を持たせ、土地利用状況を反映させるべく、土地利用別に山地・水田・畑等のタンクを設定している。水田のタンクモデルは、畦畔、落水口、浸透量などの物理条件を反映したものであり、また季節によって異なる取排水状況をも考慮するなど、優れた特徴を持っている。この水田タンクモデルの詳細を以下に述べる。

水田タンクモデルは直列二段のタンクモデルとなっており(Fig. 1)、上段タンクには二つの側方流出孔と一つの浸透孔、下段タンクには一つの側方流出孔がある。上段タンクの下部側方流出孔からの流出は、水田の落水口からの流出に対応している。この流出孔の高さ(H_α)は、水田での平均的な湛水深(維持湛水深とよぶ)に一致しており、取水者は、この維持湛水深を満たすように取水すると考えること

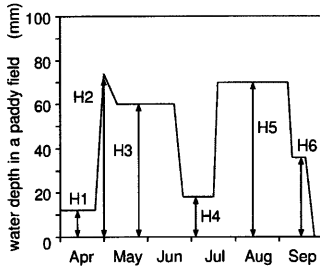


Fig. 2 Pattern of water depth in a paddy field

で水田での水管理状況をモデルに組み込んでいる。また、維持湛水深を実際の農作業に対応して季節的に変動させることで、水管理のモデル化をより現実的に即したもとしている。なお、維持湛水深は、減水深(蒸発散量と浸透量の和)を相殺するだけ取水することにより保たれるものであるから、浸透係数 β と維持湛水深のパターン (Fig. 2) は以下のように互に関連して定められている。ただしここでのパターンの決定手順は渡辺らが野洲川流域に適用したときのものである。

1. 灌漑期を以下の7期間に分割する。

- i. 苗代期 4/1 ~ 4/24
- ii. 代かき・田植え期 4/25 ~ 5/2
- iii. 生育前期 5/3 ~ 6/20
- iv. 中干期 6/21 ~ 7/20
- v. 生育後期1 7/21 ~ 9/5
- vi. 生育後期2 9/6 ~ 9/15
- vii. 落水期 9/16 ~ 9/25

2. 減水深の実測値を整理し、流域の水田をそれによって8タイプに分類する。生育前期の維持湛水深を全タイプ一律に60mm ($H_3 = 60\text{mm}$)とし、この時期の水田の浸透量実測値に上段タンクからの浸透量が等しくなるように、浸透係数 β を決定する ($\beta = P_1/H_3$, P_1 : 生育前期の実測浸透量)。

3. 苗代期の維持湛水深 H_1 は、浸透量が2mm/dとなるように逆算する。

4. 生育後期1の維持湛水深 H_5 は、生育後期の実測の日浸透量データとタンクからの浸透量が一致するように、2で決定した浸透係数 β から逆算する ($H_5 = P_2/\beta$, P_2 : 生育後期の実測浸透量)。

5. この他の期間の維持湛水深 H_2, H_4, H_6 は、 H_3 と H_5 を用いて決定する。

このようにして定められた維持湛水深パターンに従って上段タンク下部側方流出孔の高さを変動さ

せる。

上段タンクの上部側方流出孔からの流出は、畦畔越流を表現しており、この流出孔の高さ (Z) は畦畔の高さに一致している。また、畦畔より越流する水は通常24時間で流出すると考え、流出係数は1.0としている。下段タンクからの流出は地下水流出を表し、土壌水分や浸透性を考慮して流出孔の高さ、流出係数を定める。

このように、複合タンクモデルの水田タンクモデルは、水田の物理的構造と季節ごとの利水状況をかなり忠実に表現している。しかし、長期間の計算を対象とし、計算は日単位で行われるので、畦畔越流の部分がやや簡略化されている。

(2) 低平地タンクモデル

水田を主体とする低平地域の短期洪水流出解析法として、不定流の基礎式に基づく水理学的手法があるが、計算が煩雑になるという欠点がある。そこで、低平地の流出現象にみられる非定常性が小さいことに着目し、運動式よりもむしろ雨水の流出入についての連続条件に重点をおくことで計算を簡略化した準水理学的な流出解析法が考案された。低平地タンクモデル(早瀬・角屋, 1993)もそのひとつである。

低平地タンクモデルは、河道や水田を貯水池とみなし、それぞれを河道タンク、水田タンクとよぶ。河道タンク、水田タンクは「タンク」という名前がついているが、いわゆる菅原のタンクモデルとは異なり、河道タンク間の流量は水面勾配と河床勾配の関係から等流または不等流の式で計算される。また、水田タンクは河道タンクと越流堰によって結ばれているものとし、水田タンクと河道タンク間の流量は、両者の水位から堰の式で計算される (Fig. 3)。

完全越流 ($h_2/h_1 < 2/3$)

$$Q = C_1 B h_1^{3/2} \frac{H_P - H_R}{|H_P - H_R|} \quad (1)$$

潜り越流 ($h_2/h_1 \geq 2/3$)

$$Q = C_2 B h_2 \frac{H_P - H_R}{\sqrt{|H_P - H_R|}} \quad (2)$$

ここに、 B : 堰幅、 H_R : 接続する河道タンク水位、 C_1, C_2 : 流量係数で、m-sec単位では $C_1 = 1.5495, C_2 = 4.0258$ である。この越流係数により、 $h_2/h_1 = 2/3$ のときの完全越流と潜り越流の堰の式の連続性が保たれている。また h_1, h_2 は、 Z は堰高とすると

$$h_1 = H_H - Z, H_H = \max(H_P, H_R) \quad (3)$$

$$h_2 = H_L - Z, H_L = \min(H_P, H_R) \quad (4)$$

である。

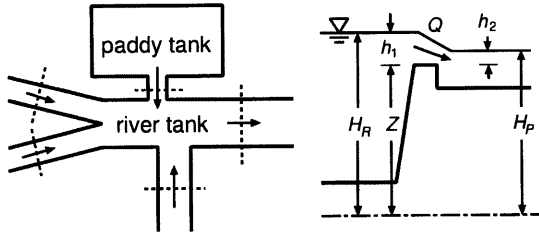


Fig. 3 Diffusive Tank Model

以上のように、低平地タンクモデルは氾濫時の水田・河道間の流出入をモデルに組み込んでいるが、短期洪水流出計算を対象としているため、取水等の水管理状況はモデルに反映されていない。

2.2 長短期流出に対応した水田モデルの構築

2.1 でみたように、複合タンクモデルの水田モデルは、水田の場の構造と、取水という人為的なプロセスをモデル内部に組み込んでおり、低平地タンクモデルは、洪水時における水田-河道系の水の動きを物理的根拠に基づいて表現している。両モデルとともに、水田での水理現象や場の物理的構造を実際に近い形で表現しているのだから、両者を結合することによって、長期間の連続的な計算のなかで、出水時の現象をもシミュレートできる新しい水田モデルを構築できるのではないだろうか。

具体的には、複合タンクモデルの水田モデルを基本的なモデルの構造として採用し、場の構造、落水口からの流出、田面からの浸透、地下水流出、取水過程については、複合タンクモデルと同様に取り扱う。畦畔越流については、低平地タンクモデルの考え方を採用し、河道と水田の水位の関係から堰の公式を使って計算する。以上まとめると、新しい水田流出モデルの構造は Fig. 4 のようになる。

r を降雨量、 E_{PU} を上段タンクからの蒸発散量、 E_{PL} を下段タンクからの蒸発散量、 h_{PU} を上段タンクの水深、 h_{PL} を下段タンクの水深、 α, β, γ をそれぞれ上段タンクの流出孔の流出係数、上段タンクの浸透孔の浸透係数、下段タンクの流出孔の流出係数、 H_α, H_α をそれぞれ上・下段タンクの側方流出孔の高さとする、上段タンクの基礎式は、

$$\frac{dh_{PU}}{dt} = r - E_{PU} - \alpha \max(h_{PU} - H_\alpha, 0) - \beta h_{PU} - q + i \quad (5)$$

下段タンクの基礎式は、

$$\frac{dh_{PL}}{dt} = \beta h_{PU} - \gamma \max(h_{PL} - H_\gamma, 0) - E_{PL} \quad (6)$$

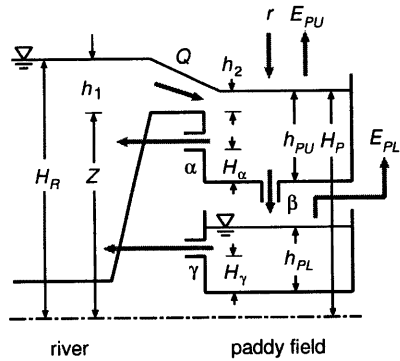


Fig. 4 New paddy field model which integrates the Complex Tank Model and the Diffusive Tank Model

となる。なお、複合タンクモデルの水田タンクと同様に、 H_α は維持湛水深の変化パターンに合わせて上下させる。また、上段タンクの基礎式の q は畦畔越流による流出入分、

$$q = \frac{Q}{A} \quad Q: \text{越流量}, A: \text{水田の面積} \quad (7)$$

となり、畦畔越流が起こったときに計算される。越流量 Q は堰の公式(式(1), 2)に基づいて計算される。

一方、上段タンクの基礎式の i は溪流、溜池、河川からの取水分、

$$i = \frac{I}{A} \quad I: \text{溜池などからの取水量の総和} \quad (8)$$

となる。

以上のように、複合タンクモデルの水田タンクと低平地タンクモデルの利点をあわせることで、長期流出、短期流出のどちらの計算にも対応できる水田流出モデルを構築した。3. ではこの水田流出モデルを構造的モデル化法を用いて要素モデル化する。

3. 構造的モデル化法による水田モデルの要素モデル化

3.1 構造的モデル化法・構造的モデル化システム

構造的モデル化法とは、ある流域の水文モデルを作成する際、斜面・貯水池・河道・水田・蒸発散・地下水流出…といった流域の構成要素や流出機構に対して各々のモデルを作成し(この各々のモデルを要素モデルとよぶ)、これらを対象流域の構造にしたがって接続して流域全体系モデルを構成するという手法である。

構造的モデル化法を用いることにより、全体系モデルの作成作業は、必要な要素モデルを選んでパラメータ・初期値を設定し、それらを水文系の構造に応じて構成する組み立て作業となる(Fig. 5)。また、土地利用の変更によって流域に一部の水文特性が変化したり、あるいは、一部の水文要素に対応する新しい要素モデルが提案され、全体系モデルを修正する必要が生じた場合でも、構造的モデル化法を用いれば、全体系モデルの修正は対応する要素のみを変更する交換作業となる(Fig. 5)。この構造的モデル化法を計算機上で実現するソフトウェアが構造的モデル化システム OHyMoS (Object-oriented Hydrological Modeling System) である。

計算機上で構造的モデル化法を実現するためには、少なくとも、複数の要素間での入出力方法を定義して各要素を接続し、構成された全体系を円滑に運用できるようにする必要がある。更に全体系の一部の要素が交換されたり、一部の要素間の接続関係が変更されても、全体系の円滑な運用を保証しなければならない。以上の条件を満たすため、構造的モデル化システムでは、流域の水文過程のモデルに共通な構造を抽出して、あらかじめモデル化しておき、個々の要素モデルはその共通構造を継承して作成するという方法を採用した。このように、「共通構造を抽出しあらかじめモデル化する」ということは、クラス・継承・多態性といった概念を備えたオブジェクト指向言語により実現可能である。構造的モデル化システムは、オブジェクト指向言語の一つである C++ で実現されている。

このシステムは、主として次のような特徴を持っている。

(1) 要素モデルを複数相互に接続することによって全体系モデルを作る。これにより全体系モデルの作成・修正作業は、それぞれ要素モデルの組立・交換作業となる。

(2) 水文系モデルの要素モデルとして普通に要求されるような動作、すなわち、パラメータ値の設定、状態量の初期化、計算時間の更新などを標準化し、

こうした機能のみを持つ基本型要素モデルを定義する。個々の要素モデルは、基本型要素モデルに各要素モデル独自の機能を付加して作成する。ここでいう標準化とは、その機能の運用手続きを統一するだけで、その機能の内容を統一することではない。機能の内容は、個々の要素モデルで独自に定義することが出来る。

(3) ある要素モデルの出力データを他の要素モデルが入力データとして利用するという関係を、端子によるデータ授受の関係としてモデル化した。端子によるデータ授受では対応できない場合にも対応するため、要素モデル同士が端子を通さずに、直接データを交換する直接通信の機能も用意されている。

3.2 水田モデルの要素モデル化

水田では、毎年4月下旬から9月下旬までが灌漑期にあたり、稲の生育状況に合わせた湛水深を維持すべく取水が行われる。取水源となるのは、山腹斜面からの溪流、灌漑用の溜池、河川に設けられた取水施設からの灌漑用水などである。水田モデルの要素モデル化にあたっては、これらの取水源についてもそれぞれ要素モデル化し、互いが情報を交換しつつ協調して動作するようにしなければならない。

(1) 水田要素モデル: Paddy

構造的モデル化システムの要素モデルは、パラメータ・状態量・受信端子・送信端子などを持ち、パラメータ・状態量・受信端子からの入力データを用いて1タイムステップの数理計算を行い状態量を更新し、送信端子から出力データを送信する。このような作業のうち、各要素モデルに共通した作業を抽出・規格化した基本型要素モデル Element がシステムに用意されている。今回作成する水田要素モデル Paddy も Element を継承して作成する。Element については、鈴木(1994)に詳しい。

水田要素モデル Paddy の作成方法の概略を以下に記す。

- クラス Element を継承する。
- 山腹斜面からの流出量を受信する端子、降雨データを受信する端子及び蒸発散データを受信する端子を定義する。
- 受信端子を登録する関数 Register_receive_ports を定義する。
- パラメータを定義する。
- 状態量を定義する。
- 作業用に変数を定義する。
- パラメータをファイルから読み込む関数 Set_parameter を定義する。
- 初期値をファイルから読み込む関数

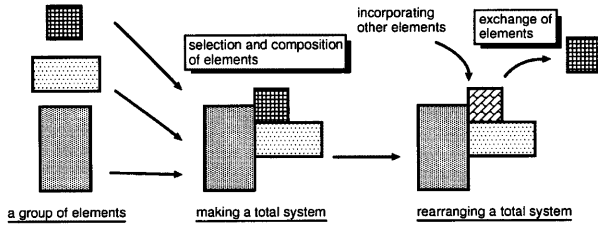


Fig. 5 Structure of a total system model

- Set_initial_state を定義する。
- 最終状態をファイルに書く関数 Save_terminal_state を定義する。
- コンストラクタとデストラクタを定義する。
- 初期出力関数 Initial_output を定義する。
- 計算時間間隔を計算する関数 Calculate_time_step を定義する。
- ステップ分の計算が可能かどうかを判断する関数 Can_you_calculate を定義する。
- ステップの計算をする関数 Calculate を定義する。
- 反復計算する要素に必要な関数 Calculate_iteration_step, Do_you_converge, Send_stocked_data を定義する。
- 堤防越流量を計算する関数、灌漑期での河川・溜池からの取水量を計算する関数など、Paddy に固有の関数を定義する。
- 直接通信によって他の要素モデルとデータをやり取りする関数を定義する。
- 初期化後の一連の計算・出力作業をする関数 Work を定義する。

Paddy は、河道モデルと直接通信によって要素間反復計算を行う。洪水氾濫で、河川や水田の水位が堤防の水位を越えると越流が起こる。その越流量は堰の公式(式(1), (2))によって示されるように、河川の水位と水田の水位の両方に依存する。したがって、越流時には河川水位、水田水位を未知数とする連立方程式を解く必要がある。このように未知数が複数のモデルにまたがる連立方程式を解くために、構造的モデル化システムでは、複数のモデルが互いの状態量のつじつまを合わせるように計算を反復するという仕組みも用意している。

以下に反復計算のアルゴリズムを示す。適宜、Fig. 6を参照されたい。

1. 河道モデル、水田モデルともに、時刻 t での状態量は既知であるとする。

2. 時刻 $t + \Delta t$ での河道水位 H_R 、水田水位 H_P 、越流量 Q を仮定する。
3. 水田モデルは Q を使って水田水位 H_P^* を計算し、さらに H_P^* 、河道モデルの水位 H_R を使って越流量 Q^* を計算する。
4. 河道モデルは水田モデルから Q^* を取得し、2で仮定した越流量 Q と重みをつけて足し合わせ、 Q^{**} を計算する ($Q^{**} = \alpha Q^* + (1 - \alpha)Q$: α は重み係数で 0.5 ~ 0.8)。
5. 河道モデルは Q^{**} を使って河道の水位 H_R^* や流量などを計算する。
6. ($|H_R - H_R^*| < \epsilon_{H_R}$) かつ ($|H_P - H_P^*| < \epsilon_{H_P}$) となっていれば反復計算が収束したとして計算終了 ($\epsilon_{H_R}, \epsilon_{H_P}$ は収束判定値)。
7. もし収束していなければ、 $H_R = H_R^*, H_P = H_P^*, Q = Q^{**}$ として3に戻る。

なお、構造的モデル化システムにおける要素間反復計算についての詳細は、村上(1996)を参照されたい。

(2) 他の要素モデルからの取水の仕組み

ここでは、水田モデル Paddy と接続している他の要素モデルについて述べ、あわせて取水という観点から Paddy との関係の説明する。適宜、Fig. 7を参照されたい。

TOPMODEL は、Kirkby(1979)によって開発された、地形・土壌データに基づいてパラメタをモデルに与える物理型集中モデルであり、流出の諸機構をより明示的に取り入れていて、すでに山田(1996)により要素モデル化されている。水田モデル Paddy と端子で接続することにより、TOPMODEL の出力した山腹斜面からの流出量を Paddy が受信端子で受け取る。これは溪流からの取水に対応し、Paddy は維持湛水深を満たすように取水する。維持湛水深を満たした後の余剰水は溜池モデル Pond に送られる。

溜池モデル Pond は、Paddy と直接通信で結ばれており、Paddy の取水要求に応じて送水する機能と、

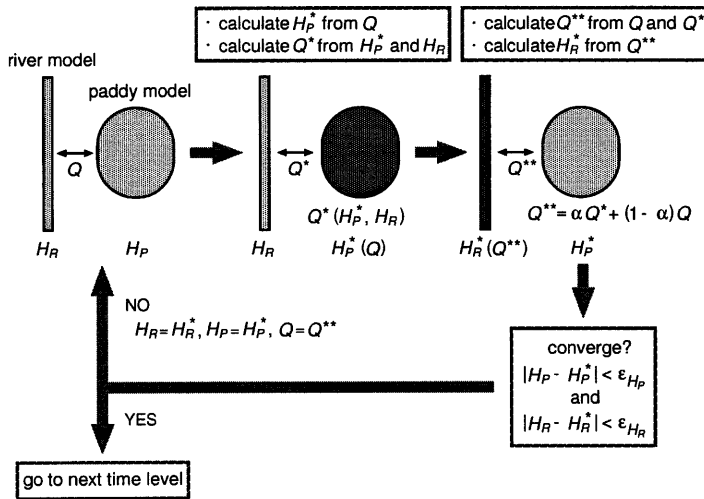


Fig. 6 Algorithm of the iterative calculation between a river model and a paddy model

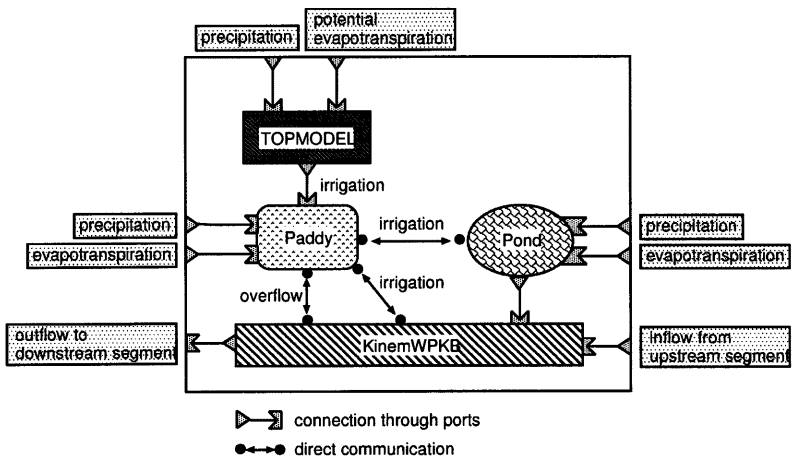


Fig. 7 Connection among element models

Paddy で余った水を貯める機能とを併せ持っている。Paddy から取水要求があった場合、貯水量があるかぎり送水し、なくなれば送水をやめる。逆に、Paddy で維持湛水深を上回り生じた余剰水が送られてきた場合は、ある一定量(有効貯水量)までは貯水するが、それを超えると、余剰分を送信端子で河道モデル KinemWPKB に送信する。

河道モデル KinemWPKB は単一河道区分内の流れを追跡計算するモデルで、kinematic wave を Beven(1979) が提案した差分スキームで解いている。KinemWPKB は Paddy と二種類の直接通信で結ばれている。一つは河道に存在する取水施設からの取水に対応する。Paddy からの取水要求に対して取水施設の存在する計算区間から、水田への側方流出とい

う形でPaddyに水を送ることとした。ここでは河川流量の全量を取水可能としている。もう一つの直接通信は洪水氾濫時の堤防越流に対応したものである。ここでは3.2.(1)で述べたような理由から要素間反復計算を行う。

なおPaddyは、溪流、溜池、河川の順で取水することとした。すなわち、溪流からの取水で足りなければ溜池から取水し、それでも足りない場合、もし河川に取水施設があれば河川から取水することにした。

4. 実流域への適用および考察

本章ではまずはじめに、前章で構築した水田要素モデルPaddyとそれに付随するいくつかの要素モデルを仮想的な流域に適用し、その動作を検証する。ついで、これらの要素モデルを三重県上野市付近の木津川・服部川・柘植川流域に適用し、流出シミュレーションを試みる。この流域は後述する通り水田の占める面積が大きいだけでなく、上野遊水地があり、洪水時には堤防越流が起こりやすい。したがって、今回作成した水田モデルの適用性を確認するのに適した流域といえる。

4.1 機能の検証

水田と河道との越流区間や取水区間の位置などを様々に変えてテストを行ったうち、テスト結果を三例挙げて考察し、要素モデルPaddyが正常に機能しているかどうかを検証する。

それぞれのテストにおける、越流区間と取水区間の位置を含めた水田と河道の構成をFig. 8に、主なパラメタの値をTable 1に示す。test 1は、一つの河道に一つの水田が接続しているケース、test 2は、一つの河道に二つの水田が接続しているケース、test 3は、一つの河道に一つの水田が接続しているが、二区間で堤防越流が生じ、かつ河道からの取水も行なうというケースである。

test 1, 2, 3における河道上流端からの流入量、河道下流端での流出量ならびに水田への越流量の時間的変化を表したグラフをそれぞれFig. 9, 11, 13に示し、越流区間直前・直後の河道計算断面の水位および水田の水位の時間的変化をそれぞれFig. 10, 12, 14に示す。越流区間の水位は越流区間の下流側断面での水位で代表させた。

まずtest 1についてであるが、Fig. 9, 10を比較してみると、ちょうど河道の水位が区間9の堤高2.0mを越えた時刻から、河道から水田への完全越流が始まり水田の水位が上昇し始めることが読み取れる。この結果、ピーク流量が水田に越流しただけカットされている。次に、一つの河道モデルに二つの水田モデルが接続して二箇所越流が起こる

り得るtest 2の結果をみてみる。Fig. 12の水田Aの水位の変動を追うと、河川の水位が区間4の堤高2.5mを越えると河道から水田への完全越流が起き水位が上昇している。水田の水位が区間4の堤高を越え始める(76000 sec)と潜り越流が起こるがまだ河川の水位が高いので水田へ流入する。しかし、完全越流から潜り越流に変化したことにより水田への流入量が減少したため流下方向の流量が増加し、河川の水位が上昇し始め、それにもない水田の水位も上昇している(76000~81000 sec)。そして水田の水位が河川の水位を上回ると水田から河川への逆越流が起こる。Fig. 11を見ると、81000 secあたりから区間4での越流量が負から正に転じている。Fig. 12では水田水位と河道水位の差は分かりにくいですが、データをみると81000 sec付近で水田の水位が河道の水位を上回っている。またBの水田では完全越流が起こっていることが確認できる。最後に、河川からの取水の機能を確認するtest 3についてであるが、Fig. 14の水田Aの水位をみると、計算開始直後から維持湛水深が保持されており、区間9で河道からの取水が行なわれているのがわかる。なお、test1, 2と同様に、区間4, 14での完全越流が確認できる。

以上のことから、取水と堤防越流に対応する機能が正常に動作していることが確認できた。次節では、Paddyを実流域に適用する。

4.2 実流域への適用

(1) 対象流域の概況

適用対象とする三重県上野市近辺の木津川上流域は、伊賀上野盆地に位置しており、布引山脈に源を発する木津川と、鈴鹿、布引山脈に源を発する柘植川、服部川の三川の流れが三重県上野市岩倉で合流している。上野盆地は降水量が全国平均をやや下回る雨の少ない気候のため、古来より農業灌溉用の溜池が数多くつくられ、豊かな水田が現出している。しかし紀伊山地の影響を受け降水量の多くが台風期に集中することと、三川合流地点が通称岩倉峽と呼ばれている狭窄部となっているため、上流より流出してきた洪水はここでせき上げられて上流の水田や上野市街地に常習的に浸水し、大きな被害を出している。そのため氾濫時に遊水地となっている水田を中心とする農地のうち、約250haの区域を計画遊水地として機能させ、大出水時に一時的に洪水を湛水させることで流量調節を行おうとする上野遊水地計画が建設省により推められている。四つの遊水地に一箇所ずつ越流堤を設け、河川流量が一定流量以上になった場合に自然越流させ、河川の水位の低下とともに各遊水地内に設けた排水施設により自然排水

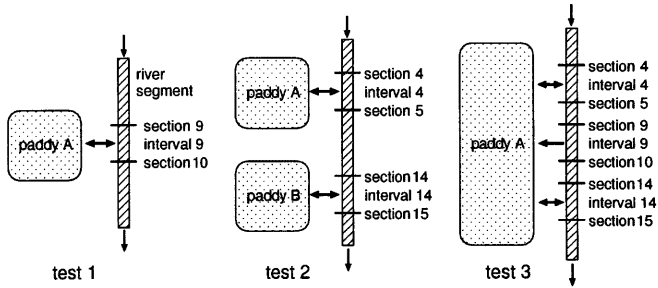


Fig. 8 Virtual basins for testing the new paddy field model

Table 1 Parameter values of Paddy and KinemWPKB

| | test 1 | test 2 | test 3 |
|--|-----------|--------|--------|
| river segment length (m) | 20000 | | |
| river segment gradient | 0.0001 | | |
| height of the upper end of the river segment (m) | 2 | | |
| width of the river segment (m) | 100 | | |
| Manning coefficient (m-sec) | 0.01 | | |
| kinematic constant m | 1.667 | | |
| tank parameter α (1/sec) | 0.000002 | | |
| tank parameter β (1/sec) | 0.0000006 | | |
| tank parameter γ (1/sec) | 0.000057 | | |
| tank parameter H_α (mm) | 0 | | |
| tank parameter H_γ (mm) | 0 | | |
| area of paddy A (m ²) | 1000000 | | |
| area of paddy B (m ²) | 1000000 | | |
| height of paddy A (m) | 1.0 | 2.0 | 0 |
| height of paddy B (m) | — | 1.0 | — |
| length between sections of the segment (m) | 1000 | | |
| distance from the upper end to section 4 (m) | — | 4000 | 4000 |
| distance from the upper end to section 9 (m) | 9000 | — | 9000 |
| distance from the upper end to section 14 (m) | — | 14000 | 14000 |
| levee height of interval 4 (m) | — | 2.5 | 2.5 |
| levee height of interval 9 (m) | 2.0 | — | — |
| levee height of interval 14 (m) | — | 1.5 | 1.5 |

させるものである。

本研究では上記のような特徴をもつ流域に対して、台風 19 号により上野遊水地が湛水した 1990 年の流出シミュレーションを行った。

(2) 適用結果

はじめに、流域を構成する水田、斜面などの水文要素の面積や河川からの取水施設の有無を Table 2

に示す。次に各要素を組み立て作成された全体系モデルの構成を Fig. 15 に示す。Fig. 15 に示すように木津川、服部川、柘植川の上流端はそれぞれ伊那古、荒木、佐那具地点になり、三川合流後の下流端は岩倉地点になる。それぞれの地区に水位観測所が設置されているが、佐那具での 1990 年の観測値を入手できなかったため、近くの荒木の観測値をもとに流

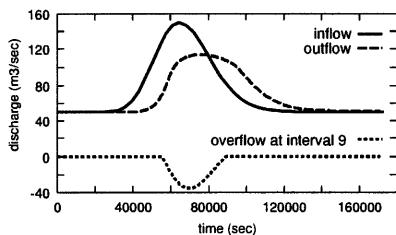


Fig. 9 Discharges of test 1 : inflow given at the upper end of the river segment, outflow from the lower end of the river segment, and overflow at interval 9

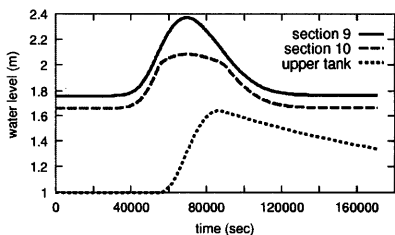


Fig. 10 Water levels of test 1 : water level at section 9, 10, and water level of the upper tank of paddy A

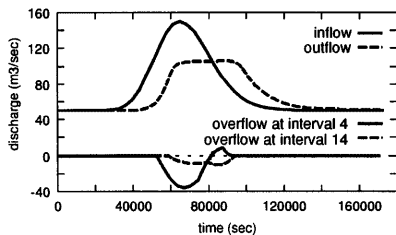


Fig. 11 Discharges of test 2 : inflow given at the upper end of the river segment, outflow from the lower end of the river segment, and overflows at interval 4 and 14

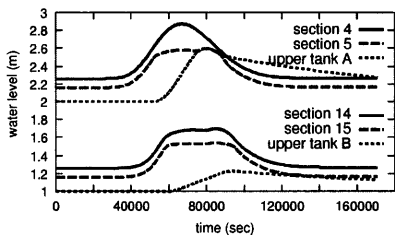


Fig. 12 Water levels of test 2 : water level at section 4, 5, 14, 15, and water level of the upper tanks of paddy A and B

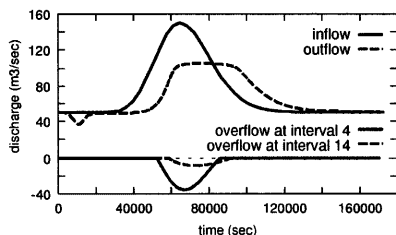


Fig. 13 Discharges of test 3 : inflow given at the upper end of the river segment, outflow from the lower end of the river segment, and overflows at interval 4 and 14

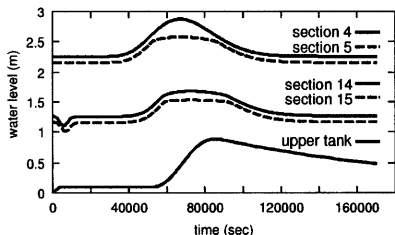


Fig. 14 Water levels of test 3 : water level at section 4, 5, 14, 15, and water level of the upper tank of paddy A

量データを推定した。また荒木での流量データも、岩倉での流量データや文献(建設省, 1991)に記載された9月洪水氾濫時の荒木でのピーク流量と比較すると過大に評価されており、やや信頼性に欠けるため、若干の修正を施した。具体的に述べると、荒木の流量データに関しては、文献(建設省, 1991)の9月洪水

氾濫時の荒木でのピーク流量を参考にして毎時流量を0.75倍に引き下げた。佐那具での流量データは、荒木での流出高を柘植川上流域の面積(154 km²)倍し、さらに荒木と同様、文献(建設省, 1991)を参考に0.541倍に引き下げた(Fig. 16, 17, 18)。

降雨データとしては AMeDAS で得られたものを

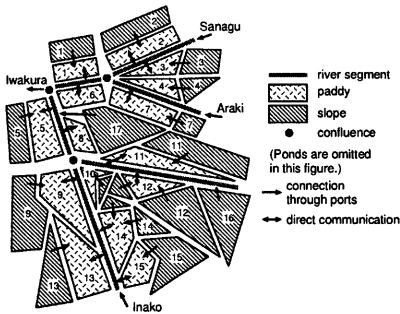


Fig. 15 Schematic diagram of Kizu River basin

与えた (Fig. 19)。また、蒸発散量は、立川 (1995) が島ヶ原流域を対象に、AMeDAS による気温、日照時間、風速、および蒸気圧の観測値をもとに、熱収支法を用いて推定したデータを用いた (Fig. 20)。いずれも通年のデータである。

以上のデータを入力として、水田要素モデル Paddy を含む全体モデルを適用し流域下流端の岩倉での流量データを出力する。水田要素モデル Paddy に与える主なパラメータを以下に示す。

上段タンク側方流出孔の流出係数 α (1/sec): 0.000002,
 上段タンク浸透孔の浸透係数 β (1/sec): 0.000006, 下
 段タンク側方流出孔の流出係数 γ (1/sec): 0.000057,
 上段側方流出孔の高さ H_α (mm): 非灌漑期 (1/1~
 3/31, 9/26~12/31) 0, 生育前期 (4/1~4/24) 12, 代か
 き・田植期 (4/25~5/2) 70, 生育前期 (5/3~6/20) 60, 中
 干期 (6/21~7/20) 15, 生育後期 (7/21~9/15) 70, 落水
 期 (9/16~9/25) 35, 下段側方流出孔の高さ H_γ (mm):
 50

簡単のため上記のパラメータは全水田要素モデルで共通とした。水田の標高については、各水田で氾濫の際湛水すると思われる部分の一番低い標高を用いた。

上記の条件で得られた岩倉地点での計算流量を Fig. 21 に示し、あわせて同地点での観測流量を Fig. 22 に示す。なお、計算期間は 31536000sec (1 年間) である。

また洪水が起こったときに水田要素モデルがうまく短期流出計算を行えているかどうか確認するために、台風 19 号による洪水のため上野遊水地への越流が起こった 9 月分の計算結果と観測結果を Fig. 21, 22 から取り出し Fig. 23 に示す。なお、Fig. 21, 22 は低水時の再現性を見るために流量を常用対数スケールで表示している。

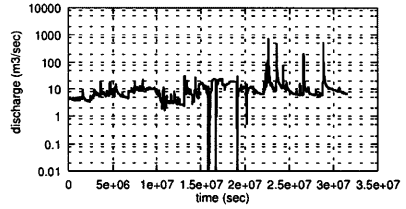


Fig. 16 Observed discharge at Inako

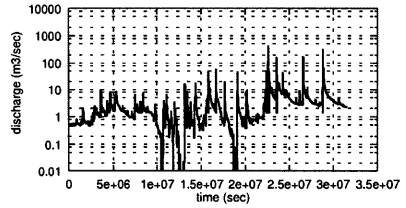


Fig. 17 Observed discharge at Araki

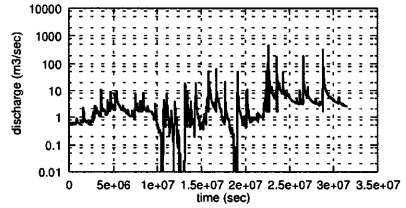


Fig. 18 Given discharge at Sanagu

(3) 考察

計算結果 (Fig. 21) と観測流量 (Fig. 22) を比較すると、計算結果の方が流量ピークの数が多いものの大体うまく再現できていると思われる。とくに $0 \sim 7.7e+06$ (sec) と $2.2 \sim 3.2e+07$ (sec) の非灌漑期での波形の再現性は良好である。一方、 $7.7e+06 \sim 2.2e+07$ (sec) の灌漑期では全般的に流量をやや大きめに評価する結果となった。

計算時刻 $2.2e+06$ (sec) は 4 月上旬で、ここから灌漑が始まる。とくに $1e+07$ (sec) は代かき・田植期の始まりにあたり、水田の漏水を防止したり田植えを容易にする代かき作業のため大量の水が必要とされるので取水が行われる。このことを反映して Fig. 21, 22 ともに流量が大きく減少する。計算時刻 $1.5e+07$ (sec) から梅雨に入り降雨量が多くなることと、中干し期に入り維持湛水深が小さくなることから、Fig. 21, 22 ともに流量が増えるが、計算流量が観測流量を大きく上回っている。この原因は、モデルにおいて降雨

Table 2 Areas(km²) of paddy fields, slopes and ponds, and irrigation from river

| number | paddy field(km ²) | slope(km ²) | pond(km ²) | irrigation from river |
|------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 4.6839 | 4.5273 | 104590 | — |
| 2 | 2.7655 | 2.8749 | 27074 | — |
| 3 | 3.4172 | 1.9537 | 69687 | exists |
| 4 | 2.8960 | 0.7408 | 10975 | exists |
| 5 | 2.7456 | 2.5461 | 38329 | exists |
| 6 | 1.7980 | 0 | 0 | exists |
| 7 | 3.0014 | 1.6513 | 12989 | exists |
| 8 | 0.6772 | 0 | 0 | exists |
| 9 | 3.2597 | 9.6191 | 88186 | exists |
| 10 | 0.8330 | 0.4558 | 4858 | exists |
| 11 | 3.2732 | 6.7612 | 146220 | — |
| 12 | 1.6053 | 5.2294 | 85967 | — |
| 13 | 5.0473 | 9.1052 | 220527 | exists |
| 14 | 1.9592 | 1.8825 | 26255 | exists |
| 15 | 1.8545 | 2.6922 | 89678 | exists |
| 16 | 0 | 8.0925 | 0 | — |
| 17 | 0 | 5.5904 | 0 | — |
| total area | 106.6378(km ²) | | | |

量の増加によって斜面からの流出と溜池の貯水量が増えたため、溪流や溜池からの取水で水田の維持湛水深が満たされ、河川からの取水が行われなかったためと考えられる。また、モデルの溜池の有効貯水量を小さく設定したため、有効貯水量を越えるたびに溜池から河川に送水され河川流量が増えているということも考えられる。他にも水田モデルの下段側方流出孔の高さや、流出係数などのパラメタに起因しているとも考えられる。計算時刻 1.7e+07(sec)(8月) 付近からは稲の生育後期になり維持湛水深の値が大きくなることと、降雨量が少ないことから、溪流、溜池からの取水ができず河川から取水され計算流量、観測流量ともに小さくなるが、ここでも計算流量が観測流量を上回っている。モデルでは溪流、溜池からの取水だけでは足りなかった分を河川から取水するのに対し、実際の河川からの取水は常に一定量取り続けるためと思われる。

このように全体系モデルは最下流端での流量をやや大きめに評価しているとはいうものの、取水のプロセスが組み込まれているので水田の湛水状況に応じた流量の変動をうまく再現している結果となった。

次に台風 19 号により河川から上野遊水地への越流が起こった 9 月分の計算結果について考察する。

1990 年 9 月には上野遊水地での堤防越流が起こる

ほどの大きな流量が観測されている。Fig. 21 をみると堤防越流の起こらない程度のピーク流量の再現性は保たれていると言えるが、Fig. 23 をみると堤防越流が起こるほどのピーク流量が過小に評価されているのが分かる。原因は、水田の標高を、堤防越流で湛水する河道付近の標高で代表させてしまったことにあると考えられる。実際には、どの水田にも少なからず勾配があるため、越流時に湛水する標高の低い部分と、越流が起きても湛水しない標高の高い部分がある。そのことがモデルに反映されておらず、水田の標高を過小に設定してしまったため、水田の貯留能力が過大に評価され、ピーク流量を大きく低下させたと考えられる。

5. 結論および今後の課題

本研究では、まず、過去に提案された水田流出モデルの特徴を整理した。その結果、水田流出モデルは大きく、(1) 長期間の流出計算を対象とし、耕作者による取排水操作を表現できるモデル、(2) 水田-河道系の洪水氾濫計算を対象とするモデルの二つに分類されることがわかった。さらに、(1) のタイプのモデルは人為的な水管理による影響を考慮することができるが、出水時の取り扱いが簡略化されていること、一方 (2) のタイプのモデルは、洪水氾濫計算

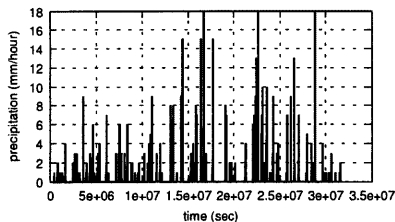


Fig. 19 Observed precipitation at Ueno

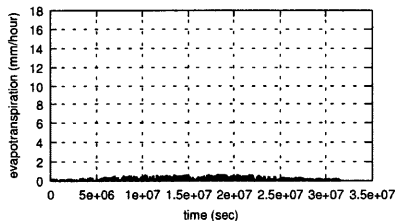


Fig. 20 Evapotranspiration at Ueno (calculated by Tachikawa(1995))

を対象としているため、耕作者による取排水操作は考慮されていないということもわかった。

そこで、これら二つの異なるタイプのモデルを組み合わせることで、灌漑期の耕作者による取排水操作を考慮し、かつ出水時には、水田-河道系の洪水氾濫計算を行なう新しい水田モデルを構築した。ついで、このモデルを構造的モデル化法によって要素モデル化し、木津川上流域の通年流出シミュレーションに適用した。

その結果、長期的流出、短期的流出のどちらに対しても満足のいく再現性を示したが、(a) 堤防越流時に河川ピーク流量を過小評価する。(b) 灌漑期の河川流量を過大評価するという傾向が見られた。

(a) の原因としては、水田地帯の標高を水田の中のもっとも低い標高で代表させたということが考えられる。地形勾配をもつ水田地帯には、河川の氾濫域に含まれる低平地の部分もあれば、ある程度高い標高に位置し河川の氾濫域に含まれない部分もある。こうしたことを考慮しなかったため、堤防越流時の水田の貯留効果が大きくなりピーク流量の過小評価に至ったと思われる。

(b) の原因としては、モデルに採り入れている取水源運用規則が理想的すぎることが考えられる。今回作成したモデルでは、取水源の優先順位を溪流、溜池、河川の順に固定し、さらに水田で消費・

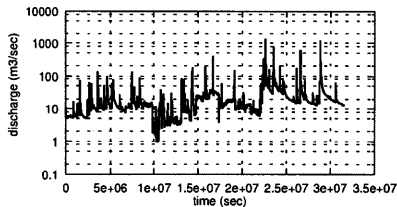


Fig. 21 Calculated discharge at Iwakura in 1990

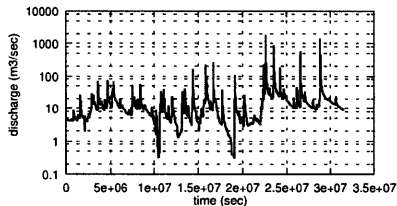


Fig. 22 Observed discharge at Iwakura in 1990

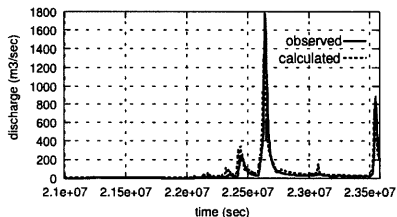


Fig. 23 Observed and calculated discharges at Iwakura in September, 1990

損失した水量の分だけを取水源の優先順位にしたがって取水している。しかし現実には、取水源の優先順位に従わずにいきなり河川から取水することもあるときにはあるだろうし、耕作者の心理からすれば、足りなくなった分だけを取るのではなく、余ってもいいから少し多めに取水すると思われる。こうした取水源運用に関するあいまいさがモデルで考慮されていないために、灌漑期の河川流量が過大評価されたものと考えられる。

以上述べた (a), (b) の二点を解決することが今後の課題である。

参考文献

- 建設省近畿地方建設局木津川上流工事事務所 (1991) : 上野遊水地樋門操作計画検討業務報告書, pp. 83-85.
- 椎葉 充晴・市川 温・柴田 研・榎原 哲由・村上 将道・高 棹 琢馬 (1996) : 構造的モデリングシステムにおける要素間反復計算の実現と河道網流れの追跡計算への適用, 京都大学防災研究所年報, 第 39 号 B-2, pp. 383-398.
- 鈴木 俊朗 (1994) : 流出系の構造的モデリングシステムの開発, 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文.
- 鈴木 正勝・西畑 勇夫 (1969) : 低平地における内水流出解析に関する一研究, 土木学会論文報告集 (163), pp. 29-37.
- 高棹 琢馬・椎葉 充晴・市川 温 (1995) : 構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 工学論文集 (39), pp. 141-146.
- 立川 康人 (1995) : 分布型流出予測システムの構成とリモートセンシング情報による流域場特性の取得に関する研究, 京都大学学位論文.
- 早瀬吉雄・角屋 睦 (1993) : 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 (1) -, 農土論集 (165).
- 増本 隆夫・足立 一日出 (1994) : 中山間水田の耕作放棄に伴う流出変化とそのモデル化, 水文・水資源学会 1994 年研究発表会要旨集, pp. 22-23.
- 山田 圭二郎 (1996) : 構造的モデル化法による TOP-MODEL の要素モデル化とその実流域への適用, 京都大学工学部土木工学科卒業論文.
- 渡辺 紹裕ほか (1993) : 水文水利総合モデルによる流域水環境の評価に関する研究, 平成 4 年度科学研究費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書.
- Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979) : A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), pp. 43-69.
- Beven, K. (1979) : On the Generalized Kinematic Routing Method, Water Resources Research, 15(5), pp. 1238-1242.

Development of the new paddy field element model which simulate long and short term runoff by using OHyMoS

Yutaka ICHIKAWA, Yasuhiro SATOH*, Yasuto TACHIKAWA and Michiharu SHIIBA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Paddy field runoff models proposed until now are mainly classified into two groups: (1) models which simulate long-term runoff taking into account irrigation and drainage, and (2) models which simulate short-term flood runoff taking into account overflow on a levee. In this paper, we develop the new paddy field runoff model integrating the Complex Tank Model and the Diffusive Tank Model, which are representative models of each group, respectively. Then, we build the new paddy field runoff element model by using OHyMoS (Object-oriented Hydrological Modeling System), and apply it to Kizu River basin in Japan.

Keywords : Paddy field runoff model, Irrigation and drainage, Overflow on a levee, OHyMoS