

## GISを利用した農薬予測モデルの筑後川流域への適用

中嶋， 一郎

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室 | NTCコンサルタンツ株式会社

井芹， 晴香

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

深田， 泰介

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

平松， 和昭

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室

他

<https://doi.org/10.15017/16507>

---

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 64 (2), pp.147-160, 2009-10-29. 九州大学大学院農学研究院

バージョン：

権利関係：

## GIS を利用した農薬予測モデルの筑後川流域への適用

中嶋 一郎<sup>1</sup>・井 芹 晴 香<sup>2</sup>・深 田 泰 介<sup>2</sup>  
平 松 和 昭\*・原 田 昌 佳・Thai Khanh Phong<sup>3</sup>

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室  
(2009年6月30日受付, 2009年7月13日受理)

### Application of a GIS-based Pesticide Runoff Model to Chikugo River Basin

Ichiro NAKASHIMA<sup>1</sup>, Haruka ISERI<sup>2</sup>, Taisuke FUKATA<sup>2</sup>, Kazuaki HIRAMATSU\*,  
Masayoshi HARADA and Phong Khanh THAI<sup>3</sup>

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,  
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,  
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

#### はじめに

日本の稲作において、稲の生育を害する多種多様な病害虫や雑草の防除に農薬の使用は必要不可欠な資材となっている。その一方で農薬は病害虫あるいは雑草に対して生理活性を持つ化学物質であるため、近年、農耕地やゴルフ場などで使用される農薬が河川や湖沼などの公共用水域に流出し、飲料水源の汚染や生態系への悪影響を及ぼしているのではないかという社会的懸念が強まっている。このような農薬使用の結果として起こりうる環境への影響を未然に防止する対策を講じることがきわめて重要である。

これを受け、わが国において農薬の水質汚濁防止にかかる各種規制、基準などが設定されており、環境省は湖沼や河川などの公共用水域において、水田で使用される農薬について一律にモニタリングを実施している。しかしこのようなモニタリングは多大な時間、労

力、経費を必要とする。またモニタリング結果は農薬の使用条件や自然条件など様々な条件に依存したものであり、特定の条件下における結果でしかない。これらの農薬の挙動を支配する個々の要因および、要因の関連性を把握することは困難である。環境モニタリングに対して数理モデルによるシミュレーションは農薬の動態研究や流出管理において有効な方法である。数理モデルを利用する利点として、一定の評価シナリオにおいて農薬の環境動態を迅速に予測できること、土壌条件、気象条件、散布条件などの様々な条件の下での予測ができること、野外試験を行う際の適切な試験設計が行えること、圃場試験にかかる時間・経費を低減できること、以上が挙げられる。

また、近年の地理情報システム (GIS) と計算機技術の発達により、地理情報、気象情報、統計情報などの詳細な空間分布を入手することが容易になってきていること、および、量、質、ともに異なる多様なデー

<sup>1</sup>九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室 (現在 NTC コンサルタント株式会社)

<sup>2</sup>九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

<sup>3</sup>日本学術振興会外国人特別研究員

<sup>1</sup>Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environmental Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University (now at NTC Consultants Inc.)

<sup>2</sup>Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environmental Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

<sup>3</sup>JSPS Postdoctoral Fellow

\*Corresponding author (E-mail: hiramatsu@bpes.kyushu-u.ac.jp)

タを位置情報と結びつけたまま統一的に扱うことが可能となってきた。それにより流域スケールが拡大しても空間的な分布特性を忠実に反映させる分布型モデルの構築が容易となってきた。分布型モデルのメリットは流域の任意の地点での流量、汚濁負荷量などを推定できる点にあり、しかもそのプロセスを物理的に追従しているために、流域内の人間活動や自然条件の変化などの空間的な分布特性を計算に反映させることが可能なことにある。

こうした背景の下に、これらを統合した流域ベースでの水質モデルによる、水田に使用される農薬を対象とした流出解析に関する研究は、Matsui *et al.* (2006)、Karpouzias *et al.* (2006) などによりなされているが、あまり進んでいない。その原因としては、農薬の散布日、散布量が最終的に営農者の判断に任せられている点、および一筆レベルの水管理が農薬の系外流出量に大きな影響を与える点など、パラメータ設定の難しい部分にあると考えられる。本研究では筑後川を対象に細密流域情報（GIS データ）を利用した分布型水収支モデルをベースに、農薬動態予測モデルを組み込むことで農薬の挙動を再現し、流域内における農薬の動態について考察する。

本研究の実施にあたり、水資源機構筑後川下流総合管理所、福岡県朝倉農林事務所、福岡県南広域水道企業団、福岡地区水道企業団、久留米市企業局浄水管理センターから、河川流量、取水量、ダム放流量、河川水中農薬濃度のデータを提供頂いた。記して、謝意を表します。

## 材料と方法

### 1. 研究対象地域

本研究では筑後川の筑後大堰から上流側を対象流域とした。筑後川は熊本県阿蘇郡瀬の本高原を源流とし、福岡県、佐賀県、熊本県、大分県にまたがる九州地方最大の一級河川である。流域面積は2,860km<sup>2</sup>、流路長は143kmで、解析対象となるのは筑後大堰よりも上流の約2,100km<sup>2</sup>である。上流域に日田市、中流域に久留米市、および下流域に大川市、佐賀市など主要都市が位置しており、九州北部における社会、経済および文化活動の基盤となっている。流域の治水、利水は古くから行われており、流路上の筑紫平野は、稲作をはじめとした農業が盛んな地域である。土地利用に関しては、上流域は、大部分を森林が占め、中流域では、主に水田からなる耕地と都市域が占めており混雑化が進行しているのがこの地域の特徴となっている。

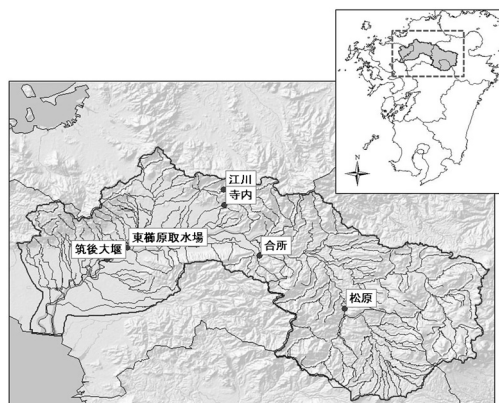


図1 研究対象流域

水道水源となっている一方、稲作期には多数の農薬が検出されている。そのため農薬の挙動の把握を行う必要性が非常に高い地域となっている。

本研究で再現の対象とする流量データは、2005年4月～8月筑後大堰における流量（筑後大堰直下流量+大堰取水量）とした。再現対象となる河川水中農薬濃度データは、2005年4月～8月東櫛原取水場における農薬濃度（対象となる農薬：除草剤プロモプチド、メフェナセット、カフェンストロール、プレチラクロール）である。流量計測地点の筑後大堰、河川水中農薬濃度計測地点の東櫛原取水場、および流域上のダム4地点を筑後川流域の地図とともに図1に示す。また本研究で使用したデータ一覧を表1に示す。

### 2. GIS による流域のモデル化

(1) GIS (Geographic Information System) とは地球上には様々な物事が存在あるいは生起している。この事物の位置、形、属性に関する情報を地理情報と呼び、地理情報を取り扱うコンピュータシステムおよびに地理情報自体を含めてGISという。GISでは、様々な地理情報を取り扱うことができ、さらに地理情報の加工や解析、データベース作成などの様々な情報処理によって、必要とする地理情報のみを容易に抽出することができる。

(2) 本研究で使用するGISデータ

本研究ではGISデータとして、国土交通省国土計画局の国土数値情報ダウンロードサービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>) からインターネット上で公開されている以下のデータを用いた。

- ・土地利用3次メッシュデータ（平成9年度）

全国の土地利用の状況について、3次メッシュ

表1 モデル再現に利用したデータ

	使用データ	入手先
流域情報	標高・傾斜度3次メッシュデータ (S56) 土地利用3次メッシュデータ (H9) 行政区画データ (H15)	国土数値情報 <a href="http://mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/index.html">http://mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/index.html</a>
流量	ダム放水量 (松原・下笠) ダム放水量 (寺内・江川) ダム放水量 (合所) 取水量 (下流筑後・佐賀, 福岡導水) 筑後大堰直下流量	国土交通省ダム諸量データベース <a href="http://www2/river.go.jp/dam/">http://www2/river.go.jp/dam/</a> 水資源機構筑後川下流総合管理所 福岡県朝倉農林事務所 水資源機構筑後川下流総合管理所 水資源機構筑後川下流総合管理所
水質	農業濃度データ	福岡県南広域水道企業団 福岡地区水道企業団, 久留米市企業局浄水管理センター
気象	アメダスデータ	国土交通省気象庁ホームページ <a href="http://www.jma.go.jp/jma/index.html">http://www.jma.go.jp/jma/index.html</a>
農業	農業製剤別県別出荷量 農業製剤有効成分含有率	農業要覧, 日本植物防疫協会 農業・農業情報サポート, 農林水産消費安全技術センター <a href="http://www.agriculture.jp/agr/home.seam">http://www.agriculture.jp/agr/home.seam</a>

(約1km四方)毎に, 各利用区分(田, 畑, 果樹園, 森林, 荒地, 建物用地, 幹線交通用地, 湖沼, 河川等)の面積を整備したもの

- ・標高・傾斜度3次メッシュデータ(昭和56年度)  
標高(平均, 最高, 最低), 最大傾斜角度・方角, 最小傾斜角度・方角について3次メッシュ(約1km四方)毎に整備したもの
- ・行政区画データ(平成15年度)  
全国の行政区界について, 都道府県名, 支庁名, 郡・政令都市名, 市区町村名, 行政コード等を整備したもの

### (3) 流域のモデル化

ここでは, 流域の様々なデータをGIS上で処理する手順を提示する。なお3次メッシュデータのメッシュのサイズは約1km四方であるが, 本研究では計算時間の短縮のためにメッシュの大きさを, 各2km四方に統合して使用する。GISデータの加工に関しては, ArcGIS (Esri Japan社)を利用した。

#### ①流域データの作成

ソフトウェア上で地理情報を利用して, 土地利用3次メッシュデータ, 標高・傾斜度3次メッシュデータ, 行政区画データを重ね合わせ, 1つの流域データ(標高, 土地利用および行政区画からなる)を作成する。

#### ②流下方向の決定

各メッシュにおいて, 隣接する8方向のメッシュとの標高を比較し, 最急傾斜方向になるメッシュを落水方向とする。落水方向を探索しそのメッシュが凹地で

あれば, そのメッシュの標高をわずかに上昇させ, 落水方向への追跡をやり直す。この過程を経て河川を抽出する。各メッシュの標高により地形を表現したDEMを図2に, 標高データから抽出した河道を図4に示す。

#### ③計算領域の決定

流域の下流端となるメッシュを設定し, そのメッシュより上流側のメッシュを流域と設定した。また, 計算ではダム放流量を直接与えるために, 流域上のダム4地点も流域界とした。それにより決定した流域界を図3に示す。

#### ④土地利用の再設定

土地利用3次メッシュデータには, 12種類に分類された土地利用データがメッシュ内に収められている。ここで, 類似した流出特性を持つものをまとめ, モデルを簡略化する方針で, 以下の5分類に再分類する。  
分類1(山地): 森林, 荒地, ゴルフ場  
分類2(水田): 田  
分類3(畑地): 他農用地  
分類4(都市): 建物用地, 幹線交通用地, その他用地  
分類5(水域): 湖沼, 河川, 海浜, 海水域  
ただし, 水収支モデルの計算上では, 分類2(水田)に関しては灌漑期のみ存在し, それ以外では分類3(畑地)に含まれるものとする。再分類した土地利用を図4に示す。

#### ⑤気温, 降水量データの配分

近傍のアメダス観測地点の位置情報をGIS上に入

かし、その位置データを利用し、Thiessen法により雨量を配分する。Thiessen法とは、雨量観測値が、1地点の降雨量(点雨量)であるため、河川の流域全体における降雨量(面雨量)を知るために、任意の雨量観測所が支配する面積(当該観測所の降雨が代表降雨となり得る範囲)を幾何学的に捉える方法である。具体的には、流域内外の雨量観測所を直線で結ぶことにより三角形網をつくり、各辺の垂直二等分線によりできる多角形を当該観測所が支配する面積とするものである。Thiessen法で配分した計算対象内のアメダス観測地点の支配領域を図5に示す。気温データが不足するアメダス観測地点(九千部山、耳納山、椿ヶ鼻)については、距離の逆数による加重平均をとり補完した。

### 3. 分布型水収支モデル

#### (1) 水収支モデルの概念

Matsui *et al* (2006) のモデルを参考にして分布型水収支モデルを構築した。このモデルでは、流域を複数のメッシュに分割し、各メッシュ内に複数のコンパートメントを設置し、各コンパートメントでの物質の挙動について収支式を用いて表現した。各メッシュ内における物質の挙動の概念図を図6に示す。計算にはRunge-Kutta-Gill法を使用し、計算時間ステップは30秒とした。

水量流出過程における適用条件・仮定を以下に挙げる。

- 1) 平面的にはメッシュ型、鉛直的には多層型を用いて、メッシュ型多層流出モデルを適用した。
- 2) メッシュ幅は、2 km 四方とした。
- 3) 各メッシュは、土地利用に応じた面積で配分された河川水、河床、田面水、水田土壌A、水田土壌B、山地表層、山地土壌、畑地表層、畑地土壌、深層土壌A、深層土壌B、都市の12のコンパートメントから構成される。
- 4) 水田に関するコンパートメントは、非灌漑期は畑地として扱った。
- 5) 積雪の影響は計算期間中においては無視できるとし、考慮していない。
- 6) 各コンパートメントの水深の初期値は、モデルを使用して初期値ゼロの状態から1年間計算を行い、そちらの値を実流量と適合性を高めるために試行錯誤的に変化させて与えた。
- 7) コンパートメント間では溶液の濃度、そして水位は均一と考えられ、それは一つの変量で表される。

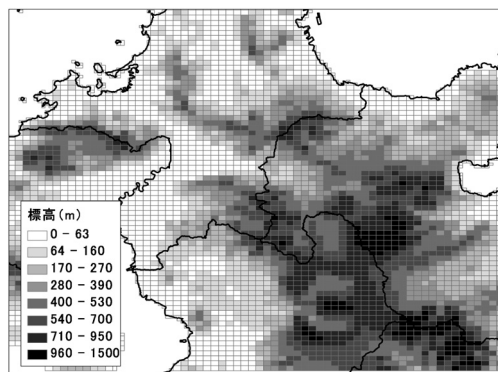


図2 対象流域周辺のDEM

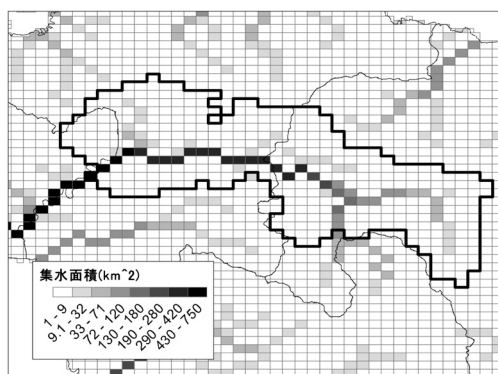


図3 抽出した河道および流域界

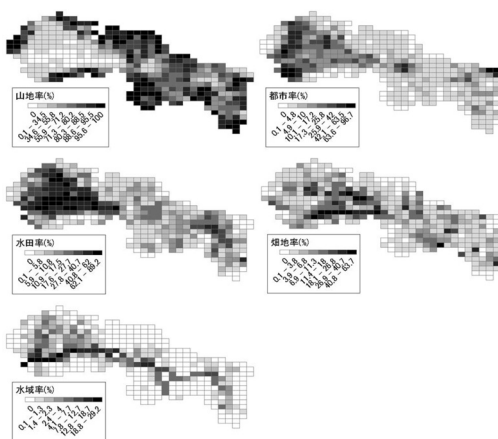


図4 再分類された土地利用



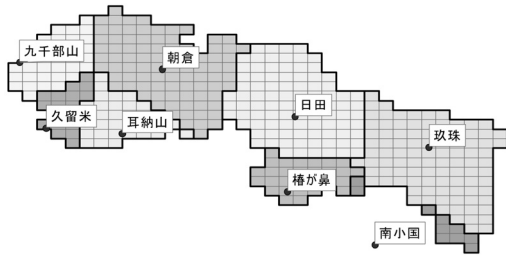


図5 Thiessen法により分割された観測地点の支配地域

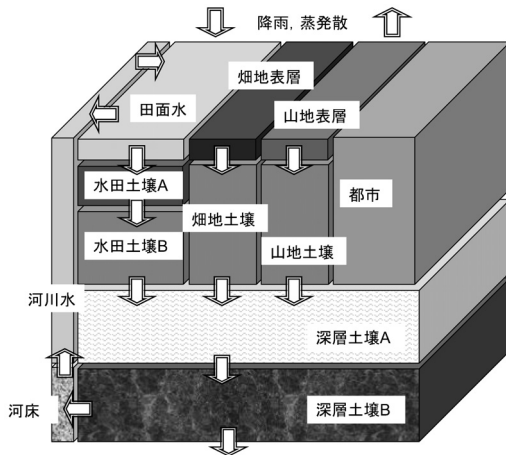


図6 モデル内の物質挙動の概念図

8) ダム放水量は、ダムを含むメッシュの流下方向のメッシュに河川流量として与えた。

#### (2) 蒸発散過程

蒸発散量の算定には、Thorntwaite法をもちいた。この算定法は、気象学や水文学の分野で広く適用されている方法で、「与えられた気象条件の下で、密に地表面を覆った緑草に十分に水を供給した場合に失われる蒸発散量」と定義され、いわばその地点での最大可能蒸発散量である。最大可能蒸発散量は式(3.1)で表される。

$$E_{\max} = 16 \left( \frac{10T}{I_t} \right)^a \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{1}{30} \right) \quad (3.1)$$

ここに、

$$I_t = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = (0.675I_t^3 - 77.1I_t^2 - 17,920I_t + 492,390) \times 10^{-6}$$

$$\delta = 0.4093 \cos \{0.01689(D - 173)\}$$

$$N = 24(\omega_0/\pi)$$

ここで、 $E_{\max}$ ：日最大蒸発散量 ( $\text{mmd}^{-1}$ )、 $T$ ：月平均気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $N$ ：月平均日照時間 (h)

$D$ ：1月1日から対象日までの通算日数 (d)、 $\phi$ ：対象地点の緯度 (rad) である。日蒸発散量は、日最大蒸発散量  $E_{\max}$  に標準値0.7を乗ずることで、算出した (周ら, 2002)。

#### (3) 流れの基礎式

山地表層、畑地表層、都市表層および河川水コンパートメントにおける表層の水の流れは Manning 式で表現されるものとする、式(3.2)で表現される。

$$Q_h = \frac{A}{L} h \frac{1}{n} h^{2/3} I^{1/2} \times 24 \times 3600 \quad (3.2)$$

ここで、 $Q_h$ ：水平方向流量 ( $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ )、 $A$ ：コンパートメント面積 ( $\text{m}^2$ )、 $L$ ：河道長またはメッシュ長 (m)、 $h$ ：水深 (m)、 $n$ ：等価粗度 ( $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ )、 $I$ ：傾斜である。

地下のコンパートメント (山地土壌、畑地土壌、水田土壌上層、水田土壌下層、深層土壌上層、深層土壌下層) の水の流れは、Darcy 則に従うと仮定すると式(3.3)により表現される。

$$Q_h = a_h I \frac{A}{B} h \quad (3.3)$$

ここで、 $a_h$ ：水平方向浸透係数 ( $\text{md}^{-1}$ )、 $B$ ：グリッドセル幅 (m) である。

鉛直方向の流量に関しては、地表面では水深に、地下層では層厚に対する水深の比に、浸透係数をそれぞれ乗じて算出した。鉛直方向の流量の基礎式を式(3.4)に示す。

$$Q_v = a_v \cdot A \cdot \left( \frac{h}{h_c} \right) \quad (3.4)$$

ここで、 $Q_v$ ：鉛直方向流量 ( $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ )、 $a_v$ ：地表面における鉛直方向浸透係数 ( $\text{md}^{-1}$ )、 $h_c$ ：層厚 (m)、但し地表面の計算を行う場合、 $h_c = 1$  とする。

各係数は同様パラメータ決定の簡易化のためグリッドセルのタイプに係らず、同じコンパートメントならば同じ値を示すとし、土地利用に応じて文献値を利用し、試行錯誤的に決定した。水収支モデル内で計算に使用したパラメータを表2に示す。

#### (4) 水田モデル

水田水位に関しては、実際の水管理をモデル化することを念頭に、灌漑期間中は別途定める期別湛水深が維持されるように灌漑するものとした。期別湛水深に関しては、JA くるめ発行のヒノヒカリの栽培歴に従

い設定した。設定した期別湛水深を、図7に示す。移植時期に関しては、6月1日を中心とした10日間の幅で正規乱数を用いて表現する。このモデルでは、水田の水深が希望する水深に合うように河川からの灌漑水量、河川への排水量が調節されている。灌漑水量、排水量は現在の水深と期別湛水深の差によって与えられ、灌漑水量が式(3.5)で、排水量が式(3.6)で表現される。

$$Q_{in} = A \cdot a_{in} \cdot \max(0, h_0 - h) \quad (3.5)$$

$$Q_{out} = A \cdot a_{out} \cdot \max(0, h - h_0) \quad (3.6)$$

ここで、 $Q_{in}$ ：灌漑水量 ( $m^3 d^{-1}$ )、 $Q_{out}$ ：排水量 ( $m^3 d^{-1}$ )、 $a_{in}$ ：灌漑効率 ( $d^{-1}$ )、 $a_{out}$ ：排水効率 ( $d^{-1}$ )、 $h_0$ ：期別湛水深 (m) である。

田面水コンパートメントの鉛直方向の流れは、田面水コンパートメントとその直下に位置する水田土壌上

層コンパートメントの水深により決定され、式(3.7)で表現される。

$$Q_{v,w} = a_{v,w} A_w \quad (3.7)$$

$$\text{when } h_w > 0 \text{ and } h_x < h_{x0}$$

$$Q_{v,w} = 0$$

$$\text{when } h_w = 0 \text{ and } h_x = h_{x0}$$

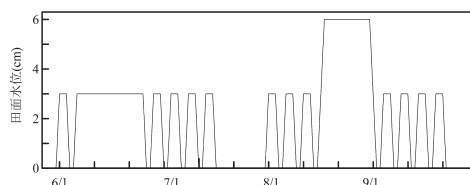


図7 設定した期別湛水深

表2 水収支モデルで用いるモデルパラメータ

パラメータ		コンパートメント	値	決定方法	
等価粗度	$n$	$m^{-1/3} s$	河川水	0.04	文献値
			山地表層	0.7	
			畑地表層	0.3	
			都市	0.03	
鉛直方向浸透係数	$a_v$	$md^{-1}$	山地表層	0.13	文献値および 試行錯誤的決定
			山地土壌	0.13	
			畑地表層	0.6	
			畑地土壌	0.6	
			水田土壌 A	0.01	
			水田土壌 B	0.09	
			深層土壌 A	0.035	
			深層土壌 B	0.1	
都市	0				
水平方向浸透係数	$a_h$	$md^{-1}$	山地土壌	2500	文献値および 試行錯誤的決定
			畑地土壌	840	
			水田土壌 A	0.01	
			水田土壌 B	70	
			深層土壌 A	1400	
			深層土壌 B	155	
層厚	$h_c$	m	山地土壌	0.1	文献値
			畑地土壌	0.1	
			水田土壌 A	0.005	
			水田土壌 B	0.095	
			深層土壌 A	1	
			深層土壌 B	5	
			河床	0.1	
用水速度	$a_{in}$	$d^{-1}$	5	文献値	
排水速度	$a_{out}$	$d^{-1}$	2		
土壌密度	$\rho_d$	$kgm^{-3}$	2600	文献値	
土壌間隙率	$\varphi$	—	0.5		

ここで、添え字 W は田面水コンパートメントを、添え字 X は水田土壌 A コンパートメントを表している。 $Q_{v,w}$  : 鉛直方向流量 ( $m^3d^{-1}$ ),  $a_{v,w}$  : 鉛直方向浸透係数,  $A_w$  : 面積 ( $m^2$ ),  $h_w, h_x$  : 水深 (m),  $h_{x0}$  : 水田土壌 A コンパートメントの深さ (m) である。水田土壌 A および水田土壌 B コンパートメントにおける鉛直方向浸透係数は水田の平均的な鉛直浸透率から、灌漑速度、排水速度では実際の水田の灌漑速度、および排水速度から決定した (表 2)。

また、田面水コンパートメントの排水は、同一メッシュ内の河川水コンパートメントへと流入し、灌漑水は、同一メッシュ内の河川水コンパートメントから取水するとし、同一コンパートメント内の河川水コンパートメントの水量が灌漑水を供給するのに不十分な場合、流下方向のメッシュの河川水コンパートメントから灌漑水を得るものとした。

#### 4. 農業動態予測モデル

##### (1) 農業モデルの概念

本研究では、農業の挙動に関しては、田面水およびその直下のコンパートメントに関しては稲生 (2004) による Paddy-2モデルを参考にモデルを構築し、前述の水収支モデルの田面水コンパートメントに導入した。

農業動態予測モデルの構築における仮定を示す。

- 1) 田面水コンパートメントに投入した農業は、図 8 で示される、田面水、水田土壌 A、水田土壌 B、深層土壌 A、深層土壌 B、河床および河川水コンパートメント内で移動し、他のコンパートメントには存在しないものとする。
- 2) 各コンパートメント間の農業の挙動プロセスとして、製剤からの有効成分の溶出、水田土壌への吸着、田面水への脱着、表面流出、鉛直浸透、大気への揮発、および田面水中および土壌中での分解があり、化学的反応は、1次反応式として表現される。
- 3) 農業水中濃度は、もし農業の量が水溶解度を越えた場合、水溶解度として与える。
- 4) 土壌コンパートメントは孔隙水と土粒子で構成される。
- 5) コンパートメントが孔隙水と土粒子で構成されている場合、土相と水相間で吸脱着が起こる。
- 6) 田面水コンパートメントに吸脱着で影響をおよぼすのは、水田土壌 A コンパートメントのみとする。

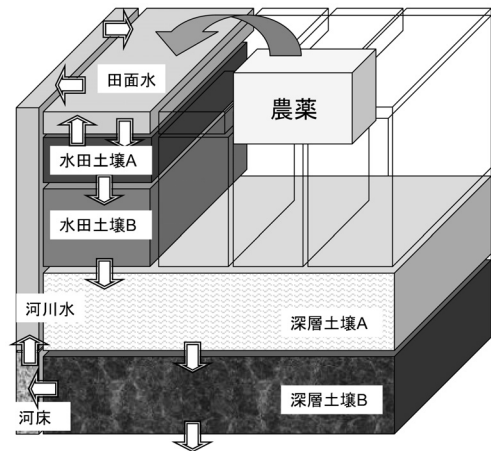


図 8 農業動態モデルの概念図

- 7) 吸脱着は、常に平衡状態である (吸着プロセスは即座に起こり線形の 1 次反応式で表現)。
- 8) 土相-土相間での溶質の移動は土相-水相間での物質移動と比較して遅く、全体の溶質の移動に対しては、影響をあたえるようなものではないとした。
- 9) 植物体による取り込みはこのモデルでは考慮されていない。(その他の過程によるものより輸送よりも小さく無視できると考えられるため。)
- 10) 農業の粉体の風による流出は考慮していない。(対象となる農業が風で流されやすい製剤形態ではないため。)
- 11) SS に吸着される形としての農業は考慮していない。(水田からの農業の流出特性に関する研究において農業の濃度、検出頻度において、SS 態は溶存態と比較して非常に少ないということから。)
- 12) ダム上流側に位置する水田が少ないことから、ダム放水の農業濃度は無視できると考えゼロと設定した。

以上の仮定から各コンパートメントにおいて物質収支式を立てて、農業の挙動を追跡する。

##### (2) 物質の挙動の基礎式

製剤からの農業有効成分の溶出は、Nearest と Brunner による二層薄膜移動理論により次の一時反応速度式で表すことができる (Grand and Higuchi, 1990)。

$$\frac{dC_w}{dt} = k_s (C_{ws} - C_w) \quad (4.1)$$



ここで  $C_w$  : 水中の農薬濃度 ( $\text{gm}^{-3}$ ),  $k_s$  : 溶出速度定数 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $C_{ws}$  : 農薬の水溶解度 ( $\text{gm}^{-3}$ ) である.

水と土壌粒子間での吸着, 脱着は一時反応速度論で表されると仮定し, Freundlich の吸着等温式を用いることにより, 土壌中の農薬濃度変化は次式のように表される (Davidson *et al.*, 1973).

$$\frac{dC_s}{dt} = k_{\text{ads}} K_f C_w^{1/n} - k_{\text{des}} C_s \quad (4.2)$$

ここで,  $C_s$  : 土壌中の農薬濃度 ( $\text{gm}^{-3}$ ),  $k_{\text{ads}}$  : 吸着速度係数 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $k_{\text{des}}$  : 脱着速度係数 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $K_f$  : フロインドリッヒ吸着係数 ( $\text{g/g}$ ),  $1/n$  : 非線形度である.

水相と気相間の物質移動は Lewis と Whitman による二層薄膜移動理論により次式のように表される (Lewis *et al.*, 1926).

$$V \frac{dC_w}{dt} = -K_L A C_w \quad (4.3)$$

ここで,  $V$  : 田面水体积 ( $\text{m}^3$ ),  $K_L$  : 揮発速度定数 ( $\text{md}^{-1}$ ),  $A$  : 田面面積 ( $\text{m}^2$ ) である.

水中および土壌中の分解プロセスは一時反応として取り扱うこととしそれぞれ式(4.4), 式(4.5)で表される.

$$\frac{dC_w}{dt} = -k_{\text{dw}} C_w \quad (4.4)$$

$$\frac{dC_s}{dt} = -k_{\text{ds}} C_s \quad (4.5)$$

ここで,  $k_{\text{dw}}$  : 水中分解速度定数 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $k_{\text{ds}}$  : 土壌中分解速度定数 ( $\text{d}^{-1}$ ) である.

農薬の流入, 表面流出および鉛直浸透は次式で表される.

$$V \frac{dC_w}{dt} = Q_{\text{in}} C_{\text{in}} - Q_{\text{out}} C_w - Q_v C_w \quad (4.6)$$

ここで,  $C_{\text{in}}$  : 用水中の農薬濃度 ( $\text{gm}^{-3}$ ),  $Q_{\text{in}}$  : 用水の流入量 ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ),  $Q_{\text{out}}$  : 田面水の流出量 ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ),  $Q_v$  : 田面水の降下浸透量 ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ) である.

### (3) モデルパラメータ

粒剤の溶解に関するパラメータとして, 溶出速度定数  $k_s$ , 水溶解度  $C_{ws}$  がある. 製剤からの溶出速度係数は, 本研究では, 単位面積当たり農薬投入量が少なくなることおよび製剤としてフロアブル剤 (水和剤) の使用が多いことから溶出は速やかに進行すると考え, 投入した瞬間, 完全に溶解するものとして設定していない.

吸脱着に関するパラメータとして, フロインドリッヒ吸着係数  $K_f$ , 非線形度  $1/n$ , 吸着速度定数  $k_{\text{abs}}$ , 脱着速度定数  $k_{\text{des}}$  がある. フロインドリッヒ吸着係数を実験により得られない場合, 土壌吸着平衡定数をフロインドリッヒ吸着係数として用いる. この場合, 非線形度  $1/n = 1$  である. 土壌吸着において, 有機物への吸着が主体と考え, 土壌吸着平衡係数は土壌吸着定数  $K_{\text{oc}}$  と土壌中の有機炭素含有率  $r_{\text{oc}}$ , そして水溶解度  $C_{ws}$  を用いると次式で求められる.

$$\log K_{\text{oc}} = -0.55 \times \log C_{ws} + 3.64 \quad (4.7)$$

$$K_d = K_{\text{oc}} \times \frac{r_{\text{oc}}}{100} \quad (4.8)$$

吸着速度係数と脱着速度係数は等しいと仮定し, 脱着速度係数は水溶解度と正の相関が見られ次式で求められる.

$$k_{\text{des}} = 0.039 + 3.0 \times 10^{-4} \times C_{ws} \quad (4.9)$$

揮発速度係数は Liss (1974) および Mackay (1975) が与えた式により, 次のように求められる.

$$K_L = \left( \frac{1}{k_1} + \frac{1}{H k_g} \right)^{-1}, \quad k_1 = \sqrt{\frac{44}{MW}},$$

$$k_g = \sqrt{\frac{18}{MW}} \quad (4.10)$$

ここで,  $H$  はヘンリー定数,  $MW$  は化学物質の分子量であり,  $H$  については(4.11)式から算出される.

$$H = \frac{16.04 \times MW \times V_p}{C_{ws} \times T} \quad (4.11)$$

ここで,  $V_p$  : 化学物質の蒸気圧 ( $\text{mmHg}$ ),  $T$  : 絶対温度 ( $\text{K}$ ) である.

分解に関するパラメータとして, 水中分解速度定数  $k_{\text{dw}}$ , 土壌中分解速度定数  $k_{\text{ds}}$  がある. これらの速度定数はそれぞれ, 水中における半減期  $\text{DT}_{50\text{water}}$  と土壌中における半減期  $\text{DT}_{50\text{soil}}$  により求められる.

$$k_{\text{dw}} = \frac{0.693}{\text{DT}_{50\text{water}}} \quad (4.12)$$

$$k_{\text{ds}} = \frac{0.693}{\text{DT}_{50\text{soil}}} \quad (4.13)$$

ここで, 水溶解度と吸着性に関しては, 製剤に添加できる補助剤により変化させることができ, 散布される農薬の物性を修正することができる. しかし, 補助剤の効果は補助剤についてのデータが無いため考慮し

ていない。

本研究で対象とする農薬の物性値とパラメータを表3に示す。

#### (4) 農薬の投入量の決定

農薬の流通経路には近年情報整備が進みつつあるが、詳細な追跡は現在行われていない。また、散布量および散布日などの最終的な決定が営農者の判断によるもののため、詳細な散布量、散布日のデータは流域全体で聞き取り調査等を行わない限り入手困難である。

本研究では、以下の過程で出荷量を算定した。農薬要覧から対象農薬を有効成分として含む製剤を抽出する。こちらは農薬要覧（日本植物防疫協会、2006）を利用した。各農薬の製剤の含有率から、県別に出荷された農薬有効成分総量を算定する。各製品の農薬の製

剤の含有率はインターネット上のデータベース（農業・農業情報サポート <http://www.agriculture.jp/agr/home.seam>）を参考とした。

GISデータである土地利用3次メッシュデータおよび行政区画データより各県における水田面積を計算し、県別単位面積当たり農薬有効成分使用量が算定できる。

各メッシュにおける田面水コンパートメントへの投入量は、上記の量に田面水コンパートメント面積を乗じたものとする。農薬散布時期は、稲の移植日に準ずる形で与えられ（移植後10日）、その日を基準に、散布時期には偏差があると考え、5日間の幅で、正規乱数を用いて散布日を決定した。対象農薬の県別出荷量を表4、5、6、7に示す。

表3 農薬の物性値およびパラメータ

パラメータ	メフェナセト	プロモブチド	カフェンストロール	プレチラクロール
$MW$	298.4	312.3	350.4	311.9
$C_{ws}$ mg/L	4.00	3.54	2.50	50.00
$VP$ mmHg	$4.80 \times 10^{-10}$	$4.18 \times 10^{-8}$	$7.60 \times 10^{-10}$	$9098 \times 10^{-7}$
$K_f$ g/g	91.01	19.59	79.11	18.84
$DT_{50soil}$ d	30	40	25	30
$DT_{50water}$ d	30	40	670	200
$K_{ads}$ d <sup>-1</sup>	$5.10 \times 10^{-2}$	$4.96 \times 10^{-2}$	$4.65 \times 10^{-2}$	$1.89 \times 10^{-1}$
$K_{des}$ d <sup>-1</sup>	$5.10 \times 10^{-2}$	$4.96 \times 10^{-2}$	$4.65 \times 10^{-2}$	$1.89 \times 10^{-1}$
$K_L$ md <sup>-1</sup>	$3.46 \times 10^{-8}$	$3.48 \times 10^{-5}$	$9.51 \times 10^{-7}$	$5.98 \times 10^{-5}$
$K_{dw}$ d <sup>-1</sup>	$2.31 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-2}$	$2.77 \times 10^{-1}$	$2.31 \times 10^{-2}$
$K_{ds}$ d <sup>-1</sup>	$2.31 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$3.47 \times 10^{-3}$

表4 農薬の有効成分出荷量（プロモブチド）

有効成分名	種類コード	商品名	県別出荷量 (t)			含有率 (%)	県別有効成分出荷量 (t)		
			福岡	佐賀	大分		福岡	佐賀	大分
プロモブチド	44536	三共シーゼットフロアブル	11.1	1.2	0.7	10.0	1.11	0.12	0.07
	44705	シンエート1キロ粒剤	—	—	0.5	6.0	—	—	0.03
	44827	ナイスショットジャンボ	12	—	2.9	18.0	2.16	—	0.52
	44907	JA サムライフロアブル	3.9	0.2	—	12.0	0.47	0.02	—
	44912	サムライジャンボ	3.2	—	—	12.0	0.38	—	0.12
	44976	リボルパーエース1キロ粒剤	—	—	—	6.0	—	—	—
	45024	ラクダープロLフロアブル	0.3	—	1.3	12.0	0.04	—	0.16
	45063	パワーウルフ1kg粒剤	—	27.1	—	9.0	—	2.44	—
	45065	クサトリー DX ジャンボL	0.3	—	—	15.0	0.05	—	—
	45070	ラクダープロ1キロ粒剤51	0.1	—	—	6.0	0.01	—	—
	45094	デュボントップガンGT1キロ粒剤51	1.2	0.4	0.7	9.0	0.11	0.04	0.06
	総計 (t)						5.06	2.62	0.96

表5 農薬の有効成分出荷量（メフェナセット）

有効成分名	種類コード	商品名	県別出荷量 (t)			含有率 (%)	県別有効成分出荷量 (t)		
			福岡	佐賀	大分		福岡	佐賀	大分
メフェナセット	44507	ザーク D 粒剤17	52.9	2.2	30.6	3.5	1.852	0.077	1.071
	44527	ヤシマアクト粒剤	19.9	1.6	28.3	3.5	0.697	0.056	0.991
	44552	バイエルウルフエース粒剤17	—	1.1	79.3	1.0	—	0.011	0.793
	44593	ヤシマアクト 1 キロ粒剤	5.6	1.0	—	10.0	0.560	0.100	—
	44595	ウルフエース 1 キロ粒剤	2.7	22.3	1.0	3.0	0.081	0.669	0.030
	44596	ザーク D1キロ粒剤51	20.3	3.4	0.6	10.0	2.030	0.340	0.060
	44618	バトル粒剤	3.4	9.0	18.4	3.5	0.119	0.315	0.644
	44716	プロスパー 1 キロ粒剤51	0.2	—	0.2	2.3	0.005	—	0.005
	44725	リボルパー 1 キロ粒剤	24.0	15.6	6.1	7.5	1.800	1.170	0.458
	44788	武田ロンゲットフロアブル	1.5	3.1	0.5	8.0	0.120	0.248	0.040
	45063	パワーウルフ 1 kg 粒剤	—	27.1	—	4.5	—	1.220	—
	総計 (t)						7.2625	4.2055	4.0905

表6 農薬の有効成分出荷量（カフェンストロール）

有効成分名	種類コード	商品名	県別出荷量 (t)			含有率 (%)	県別有効成分出荷量 (t)		
			福岡	佐賀	大分		福岡	佐賀	大分
カフェンストロール	44710	ストライカー 1 キロ粒剤	—	—	1.0	2.1	—	—	0.021
	44711	クラッシュ 1 キロ粒剤	2.4	0.4	2.2	3.0	0.072	0.012	0.066
	44713	ウィードレス粒剤17	—	—	5.6	1.0	—	—	0.056
	44739	ラクダー L フロアブル	2.1	—	0.9	5.5	0.116	—	0.050
	44740	ウィードレス 1 キロ粒剤51	—	0.9	—	3.0	—	0.027	—
	44742	クサトリエース L ジャンボ	3.8	3.6	4.1	7.0	0.266	0.252	0.287
	44755	永光ジョイスター L フロアブル	3.5	9.5	0.2	4.2	0.147	0.399	0.008
	44758	ジョイスター 1 キロ粒剤51	6.1	—	0.2	2.1	0.128	—	0.004
	44763	ネビロス 1 キロ粒剤	—	—	0.1	3.0	—	—	0.003
	44764	ネビロスジャンボ	—	1.0	—	3.0	—	0.030	—
	44827	ナイスショットジャンボ	12.0	—	2.9	4.0	0.480	—	0.116
	44829	テクノスタージャンボ	0.6	0.5	0.9	7.0	0.042	0.035	0.063
	44901	クラッシュ EX ジャンボ	1.7	0.8	1.4	4.2	0.071	0.034	0.059
	44933	レッドスターフロアブル	0.1	0.1	0.4	4.2	0.004	0.004	0.017
	45017	SDS テクノスターワイドジャンボ	0.7	0.1	0.1	5.3	0.037	0.005	0.005
	45024	三共ラクダープロ L フロアブル	0.3	—	—	5.5	0.017	—	—
	45070	三共ラクダープロ 1 キロ粒剤51	0.1	—	—	3.0	0.003	—	—
	45090	SDS テラガードフロアブル	—	0.9	—	4.2	—	0.038	—
	45113	テラガード 1 キロ粒剤51	—	0.2	—	2.1	—	0.004	—
	45114	テロス 1 キロ粒剤	—	8.6	—	2.1	—	0.181	—
総計 (t)						1.3825	1.0207	0.755	

表7 農薬の有効成分出荷量（プレチラクロール）

有効成分名	種類コード	商品名	県別出荷量 (t)			含有率 (%)	県別有効成分出荷量 (t)			
			福岡	佐賀	大分		福岡	佐賀	大分	
プレチラクロール	44421	石原ワンオール粒剤	—	—	11.4	1.5	—	—	0.171	
	44466	武田バレージ粒剤	2.2	—	—	2.0	0.044	—	—	
	44550	三共スラッシュ粒剤	3.4	—	0.4	1.5	0.051	—	0.006	
	44573	エリジャン粒剤	3.6	0.3	—	12.0	0.432	0.036	—	
	44576	ICI スパークスター粒剤	—	—	0.1	1.5	—	—	0.002	
	44611	スパークスター1キロ粒剤	—	—	0.2	4.5	—	—	0.009	
	44613	ソルネット1キロ粒剤	0.6	—	—	4.0	0.024	—	—	
	44617	ハヤテ粒剤	—	0.3	—	1.5	—	0.005	—	
	44633	ユニハーブフロアブル	2.2	1.2	1.4	5.0	0.110	0.060	0.070	
	44651	日産ブローダックス粒剤	1.3	1.7	0.5	8.0	0.104	0.136	0.040	
	44653	石原ワンオール S1キロ粒剤	0.4	—	1.1	4.5	0.018	—	0.050	
	44655	SDS バデホープ1キロ粒剤	—	12.0	0.1	3.0	—	0.360	0.003	
	44687	シェリフ1キロ粒剤	—	2.7	—	4.5	—	0.122	—	
	44844	三共スラッシュ1キロ粒剤	19.5	2.4	—	4.5	0.878	0.108	—	
	44877	クサナインLフロアブル	0.9	—	0.4	7.0	0.063	—	0.028	
	44952	SDS クサコンフロアブル	2.3	—	—	7.6	0.175	—	—	
	45027	アピロスター1キロ粒剤	10.7	23.3	0.1	1.8	0.193	0.419	0.002	
	45029	アピロトップ1キロ粒剤51	1.4	1.3	1.8	1.8	0.025	0.023	0.032	
	総計 (t)						2.1161	1.2688	0.4122	

## 結果と考察

### 1. 水収支モデル再現結果

水収支モデルによる筑後大堰直上流量の再現結果を図9に示す。ピークの位置、流量および低水時の水位など、波形として十分に満足できる結果が得られた。実測値と観測値の相対誤差 (RE) は0.246、再現期間中の (計算総流量/実測総流量) が0.885と、良好な値を得られ、これらにより水収支モデルの再現性は十分といえる。

### 2. 農薬濃度再現結果

研究では、4種類の物性の異なる製剤 (プロモプチド、メフェナセット、カフェンストロール、プレチラクロール) について計算を行った。その計算結果を図10に示す。計算に乱数を使用しているため、各10回計算を行いその最大値、最小値を示している。ピーク時の濃度値の変化およびそのタイミングを良好に再現している。ただし、6月前半における実測値を再現するには至らなかった。これは、計算上での農薬の生育スケジュールの設定 (6月1日を中心とした10日間) に原因があると考えられる。すなわち筑後川近辺の稲作の栽培体系では、5月中に移植する水田も存在しており、そこで使用された農薬が検出しているためではな

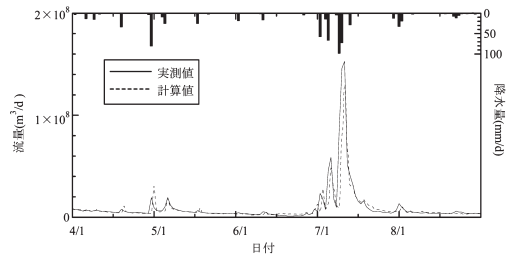


図9 水収支モデルの再現結果

いかと考えられる。またピーク濃度に関しては、プロモプチド、メフェナセットの2種類の農薬が、カフェンストロール、プレチラクロールと比較して再現性が高かった。この原因として考えられるのは農薬の普及率の差である。福岡県での農薬有効成分出荷量は表4、5、6、7を参考にすると、それぞれ5.02t、7.26t、および1.38t、2.11tであり、前者は広く用いられているが後者の使用には地域的な偏差があると考えられる。以上から、6月前半の再現率と、使用量が少ない農薬のピーク値の予測精度の低さは、詳細な農薬の入力データの必要性を示唆するものと考えられる。より詳細な稲作の作付け時期の管理、水管理、農薬散布時期および散布量の日程の設定を行うことで、モデルの再現性は格段に向上すると考えられる。

また、分布型モデルは、任意の地点での予測値を表現できるという利点がある。図11は各メッシュにおける河川水中でのプロモブチドの濃度について時系列変化を表現したものである。主河道と支川とを比較すると、主河道では、農業投入に対する濃度の上昇が速やかであることがわかる。また、主河道は比較的高い濃度を示すことが少なく、支流の方がより高い値を示すことが見て取れる。これは、主河道では水田からの排水量に対する河川流量が非常に大きいことが原因と考えられる。一方、支川では、水田排水量に対する河川流量が主河道と比較して少なく、高濃度の期間が長期間継続しやすいため、農業による生態系への悪影響が

出やすい地域である。よって、農業散布が行われた際にリスクが大きくなるため、その影響を抑えるために詳細なモニタリングが必要とされる地域といえる。

### 3. 止水期間についてのシナリオ分析

農業の使用において、農業散布効果の維持、水田系外への農業流出の阻止のために、通常、農業散布後に田面水の表面流出を起こさない止水期間を1週間程度設定するように農業の使用方法に明記されている。しかし、営農者側の水管理に対する意識が低く、必ずしも止水期間は厳守されていない状況にある。

本研究では、止水期間の重要性をモデル上で検証す

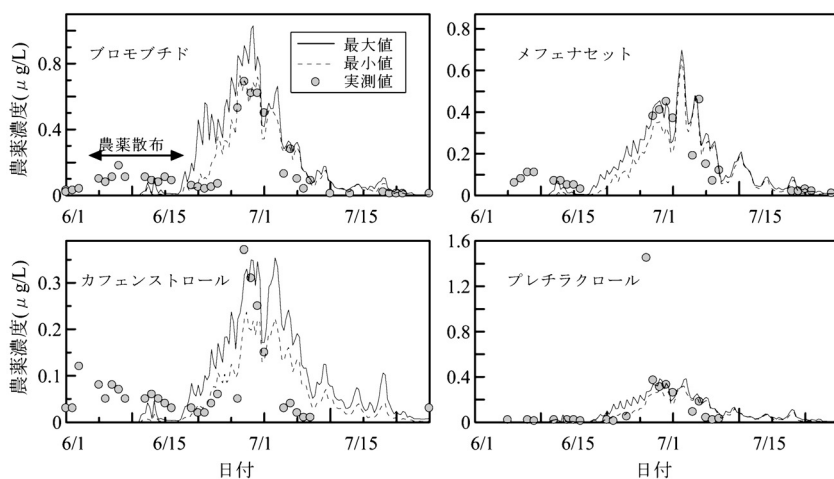


図10 河川水中農薬濃度の再現結果（東櫛原取水場）

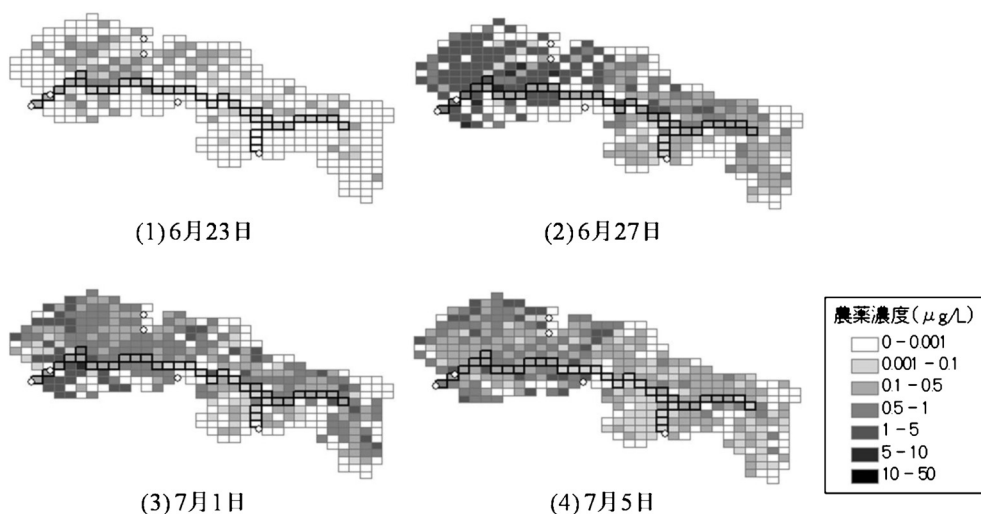


図11 河川水中農薬濃度の地域変位（プロモブチド）



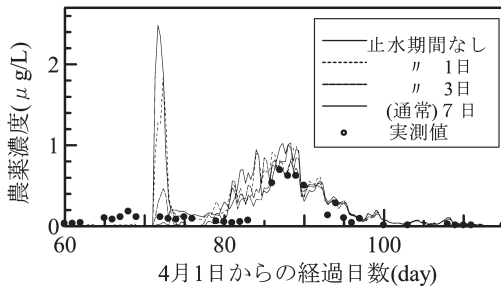


図12 止水期間の変化による変動 (プロモブチド)

るため、開発したモデルを利用してシナリオ分析を行った。前章までモデル計算では1週間の止水期間を設定して再現を行っていたが、ここでは使用方法が正しく守られなかった場合を想定し、止水期間を変化させてシナリオ分析を行った。シナリオ分析に使用する農薬はプロモブチドとし、全ての水田において止水期間を0日、1日、3日、7日(通常)と変化させて、計算を行った。その結果を図12に示す。

計算の結果、止水期間なしの場合、6月12日において、降雨があったため、水田から高濃度の排水が発生し、河川水中濃度が $2.5 \mu\text{g/L}$ という高い値を示しており、一筆単位の水管理が農薬流出に大きく影響することがわかる。3日間の止水期間ではピークは出現しているがそれほど顕著ではなく、ある程度の農薬の水田系外への流出の阻止が期待できると考えられる。

これらの排水に関しては通常、営農者により制御できるため(落水口の高さの上昇、低水深の維持)、営農者への情報普及の徹底により環境中に排出される農薬総量は、より低減できるものと考えられる。

## 要 約

本研究ではGISを援用した分布型水収支モデルに、農薬動態予測モデルを組み込み、入手や計算上での設定が難しい農薬情報に関しては乱数を用いた計算手法により、筑後川流域を対象に河川水中農薬濃度の予測を行った。

水収支モデルに関しては高い精度で再現し、実流域の水の挙動の再現が必要となる汚濁物質挙動モデルのベースとしての利用が可能であると判断した。そして、農薬動態予測モデルで計算した結果、農薬濃度を比較的高い値で再現した。本モデルにより再現性の低い6月前半および使用量の少ない有効成分の濃度に関しては、入力データの不足を示唆される結果となった。

今後、より詳細な農薬の使用される経路の追跡が可能となれば、モデルの再現性はそれに応じてより高くなると考えられる。農薬濃度の地域的変位に関しては、主河道は比較的濃度が上がることは少なく、支線水路では高濃度の期間が長期間続く傾向になり、農薬使用の影響の出やすい地域だといえる。

また、止水期間に関するシナリオ分析から、止水期間の徹底が環境中への農薬の流出を減少させることが明らかになり、営農者への理解の徹底を行うことで環境への負荷を減少できるということがモデル上でも認められた。農薬は環境負荷の大きい化学物質であること、またその使用に対して使用法の徹底が行われていない点でも、より詳細な農薬の追跡が今後求められる。

## 文 献

- Davidson, J. M. and J. R. McDougal 1973 Experimental and Predicted Movement of Three Herbicides in a Water-saturated Soil. *J. Environ. Quality*, 2: 428-493
- Dimitrios, G. K., E. Capri and E. Papadopoulou-Mourkidou 2006 Basin-Scale Risk Assessment in Rice Paddies: An Example Based on the Axios River Basin in Greece. *Vadose Zone Journal*, 5: 273-282
- Grant, D. J. W. and T. Higuchi 1990 Solubility behavior of organic compounds. In "Techniques of chemistry", Vol. XXI. Wiley-Interscience Publications, pp.474-480
- 稲生圭哉 2004 水田環境における農薬の挙動予測モデルの開発と有効性の検証, 農業環境技術研究所報告, 23: 27-76
- 金澤 純 1992 農薬の環境科学. 合同出版, pp.7-11, pp.115-117, p.127, p.161
- 金澤 純編 1996 農薬の環境特性と毒性データ集, 合同出版, p.40, p.220, p.227
- Lewis, W. K. and W. G. Whitman 1924 Principles of Gas Absorption. *Ind. Eng. Chem.*, 16: 1215-1220
- Matsui, Y., K. Narita, T. Inoue and T. Matsushita 2006 Investigating Rice-Farming Pesticide Concentrations in River Water using a Basin-Scale Runoff Model with Uncertain Inputs, *Transactions of the ASABE*, 49: 1723-1735
- 日本植物防疫協会 2006 農薬要覧, 日本植物防疫協会, pp.214-397
- 周 国云・江崎哲郎・三谷泰治・吉岡隆宏 2002 広域水循環—地盤沈下時空解析システムの構築, 第6回水資源に関するシンポジウム公演論文集, pp.139-144

## Summary

A GIS-based integrated distributed-parameter model was applied to Chikugo River Basin for predicting pesticides runoff from the basin. The targeted ingredients were Mefenacet, Bromobutide, Cafenstrole and Pretilachlor. The model consisted of the water balance sub-model and the pesticides runoff sub-model that described rainfall-runoff process and pesticides transportation process respectively. The model parameters that would be strongly related to farming pattern of each farmer and therefore could not be treated as deterministic ones, such as the amount and timing of pesticides application and the water management in each paddy plot, were dealt in stochastic manner in the model by introducing Monte Carlo method.

The water balance sub-model showed high performance to predict the river discharge at Chikugo Barrage where is located at the downstream end of the targeted basin. The pesticides runoff sub-model incorporated with the water balance sub-model had a good agreement between the observed and the simulated pesticide concentrations in river water. The scenario analyses using the integrated model suggested that the water management in each paddy plot by each farmer was key factor for reducing the pesticide runoff from paddy plots and lowering the pesticide concentration in river water.