

農薬の流域動態解明のための SWAT モデル
— 流域スケール農薬動態予測モデル PCPF-1@SWAT の開発 —
SWAT model for investigating pesticide fate and transport in river basin
— Development of a basin scale simulation model for pesticide fate and transport,
PCPF-1@SWAT —

渡邊裕純¹・Julien Boulange²・Minghua Zhang³, Yuzhou Luo³, Jeff Arnold⁴
稲生圭哉⁵・岩船敬⁶・加藤亮¹・五味高志¹

¹ 東京農工大学大学院農学府国際環境農学専攻

² 東京農工大学連合農学研究科農業環境工学専攻

³ University of California at Davis, Department of Land Air and Water Resources

⁴ USDA, Agricultural Research Services

⁵ (独) 農業環境技術研究所 農業環境インベントリーセンター

⁶ (独) 農林水産消費安全技術センター 農薬検査部

1. はじめに

日本は耕地面積の約半分が水田であり、国内での出荷農薬の約4割が水田に使用されている。これら水田で使用する農薬の一部が、不適切な水管理や降雨などにより河川や湖沼等の水系へ移行することが懸念され、これまでに様々な流域における農薬の検出事例が報告されてきた。2005年、農薬取締法に基づく「水産動植物の被害防止に係る農薬登録保留基準」が改正され、簡素な数値計算および野外試験結果による農薬の環境中濃度の算定方法が導入された。一般に、農薬の環境中濃度を把握するための環境モニタリングが行われているが、近年、数理モデルを用いた農薬濃度の評価も国内外で盛んに行われている。欧米では、水田使用農薬の動態予測を行う際に、RICEWQ モデル（米国 Waterborne Environmental Inc.）や SWAGW（EU MED-RICE）などが活用されている。また、日本においても PADDY モデル（稲生、2004）、PCPF-1 モデルなどの開発研究が進められている（Watanabe et al., 2008）。

一方、流域スケールでの農薬動態のモデル化では、GIS 手法を活用した PADDY-Large モデルにより、茨城県の一級河川流域を対象とした詳細な水稲用農薬の動態予測が報告されている（Iwasaki et al., 2012）。本研究では流域内の水文現象をモデル化しておらず、河川流量に実測データを用いた予測となっている。しかし、水田からの農薬流出に伴う河川水中濃度を精密に予測するためには、水田を含む様々な土地利用が混在する集水域での水文現象をモデル化し、水田からの排水量に加え、畑地や森林などからの流入水量を把握する必要がある。そこで本稿では、SWAT モデル（Soil and Water Assessment Tool）を改良し、流域スケールの水文現象を考慮した農薬動態予測モデル PCPF-1@SWAT を開発し、その検証および適用を試みたので報告する。

2. SWAT モデルおよび水田圃場中農薬動態予測モデル PCPF-1 の概要

今回開発した農薬動態予測モデル PCPF-1@SWAT は、米国農務省農業研究サービス（USDA/ARS）で開発された流域スケールの物質循環モデル SWAT（Neitsch et al., 2011）

に、圃場スケールの水田農薬動態予測モデル PCPF-1 (Watanabe et al., 2006) を移植することで、水田を含む集水域での水稲用農薬の動態を予測することを可能とした。SWAT モデルは GIS インターフェースを搭載し、集水域での水循環、土壌侵食、栄養塩、農薬、微生物等の動態プロセスを再現し、予測するモデルである。主に欧米の集水域での水文現象や物質循環のシミュレーションに使用されてきたが、水田を含む集水域での SWAT モデルの適用に関してはその予測手法や精度に課題が残っていた (Xie et al., 2011)。

PCPF-1 は、水田圃場内の水収支、田面水および水田土壌表層 (農薬処理層 1 cm) の農薬の収支を考慮した統合パラメータモデルである。農薬動態においては、排水や浸透などの水移動に伴う農薬の移動に加え、田面水中および土壌表層中における農薬の分解、吸・脱着を考慮する (図 1)。PCPF-1 は、図 1 に示す要因を用いて田面水中と土壌表層中の農薬の収支を連立常微分方程式で表現し、数値解法 (ピカード逐次計算法及び 4 次ルンゲクッタ法) を用いて計算する。計算に必要な入力データの読み込み、実行および結果の出力は、マイクロソフトエクセル®で作動する VBA マクロプログラムにより行われるため、操作が非常に容易である。

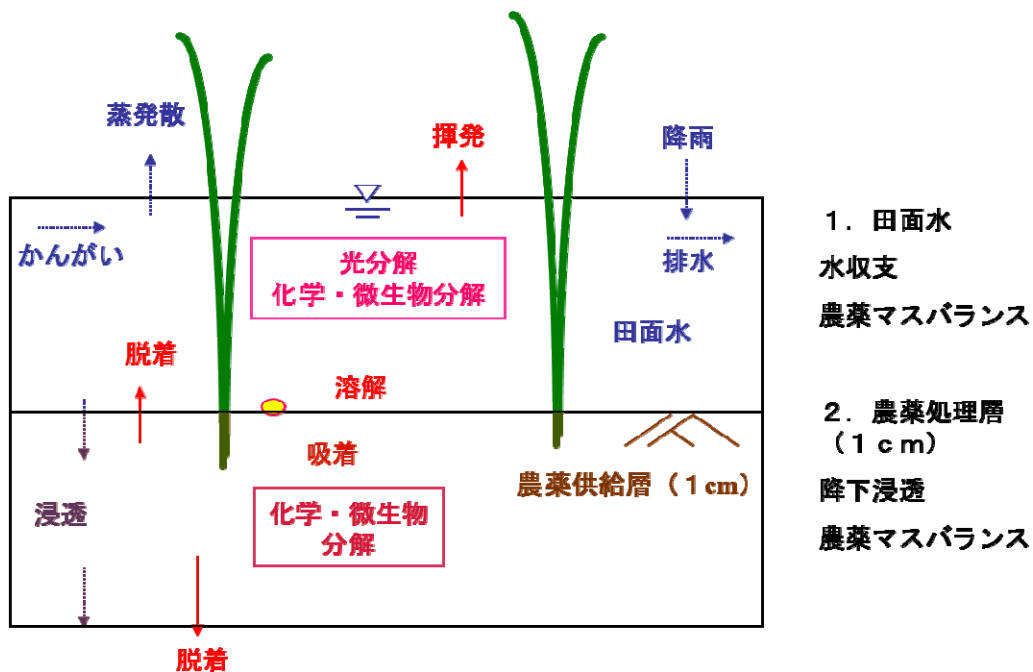


図 1. PCPF-1 モデルにおける水田環境中の農薬動態の概念図

3. PCPF-1@SWAT の開発および動作確認

SWAT モデルについて水田を含む集水域へ適用させるため、湛水窪地 (Pothole) における水・物質動態のシミュレーション用アルゴリズムを改良した。既往の Pothole の形状を円錐形から四角形に変更し、その中での水田の水収支計算手法を再構築した。さらに水田における水管理のシナリオを構築して連動させた。次に PCPF-1 モデルを SWAT モデルに移植するにあたり、懸濁粒子に吸着した農薬の移動および循環灌漑による農薬動態への影響を考慮したモジュールを PCPF-1 に新たに追加した。改良した PCPF-1 プログラムを SWAT の Pothole モジュールに適用するための改良を行った。図 2 に PCPF-1@SWAT モデルの構造を示す。現行のバージョンでは、全流域をサブ流域に分割した上で、サブ流域

ごとに1つの水田集水域とその他の土地利用を設定することによって、サブ流域内の水文特性を表現する。そして、サブ流域内の水および物質の河川中の動態を再現する。流域内では、標高データに基づき上流から下流への水および物質の流下追跡が行われる。構築したPCPF-1@SWATによる水田における農薬濃度の計算結果は、オリジナルのPCPF-1モデルによる計算結果との間に差がないことを確認した。また、流域内の水田から河川に至るまでの農薬の動態についても、正しく計算できることを確認した。(Boulangue, 2013)。

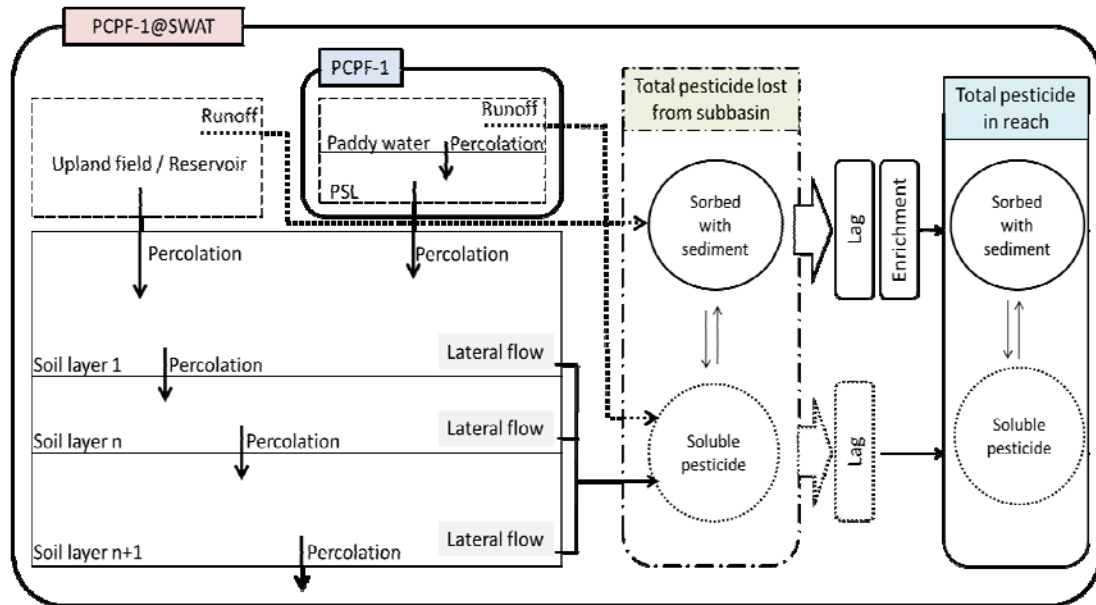


図 2. PCPF-1@SWAT モデルの構造

4. 桜川流域データによるモデルの調整および農薬動態予測の検証

茨城県の桜川中流域（君島橋）における水稲用除草剤メフェナセットのモニタリング調査結果 (Iwasaki et al., 2012) を用い、PCPF-1@SWAT モデルの検証を行った。桜川流域は、面積 345km²のうち、水田が約 28%、森林が 32%、畑地が 17%を占める (図 3)。2006 年と 2007 年を水文応答に関するモデル調整のための期間とし、2008 年を農薬動態の検証のための期間とした。桜川流域の標高データ、土地利用および土壌分類データ、河川流量データ、気象データについて ArcSWAT を用いて整理した。流域内でのメフェナセットの散布量および散布時期の頻度分布は、Iwasaki et al.(2012)の結果を使用した。2008 年にメフェナセットが散布された水田の割合は 8.1%と推定され、流域内の水田に均等に散布されたと仮定した。さらに、代かき、田植え、中干し、落水、刈取り等の水稲栽培に

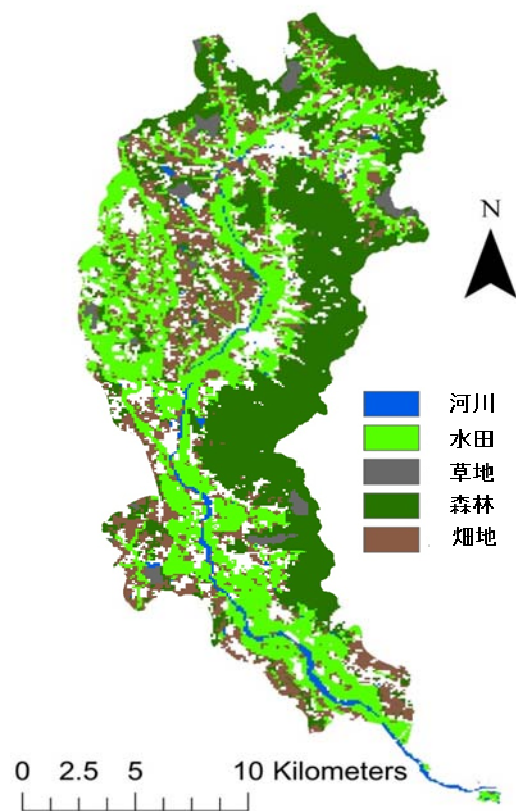


図 3. 桜川流域の土地利用

関する作業シナリオを構築した。農薬管理に関して、止水期間（0、3、7日）、水田排水量（0.12、0.25、0.50cm/日）および水田降下浸透量（1.0cm/日）をシナリオ設定に加えた。

2008年の桜川中流域の河川流量の観測値と、PCPF-1@SWATの予測値を比較した結果を図4に示す。4月以降の水田の作付け期とそれ以前の非耕作期の全てを通して、流量の予測値と観測値に大きな乖離はなく、基底流および降雨流出を精度よく再現することができた。また、水文応答に関するモデルパラメータを調整した結果、水田からの日排水量が0.12cm/日に設定した場合に、最も精度の高いモデル予測の結果が得られた。

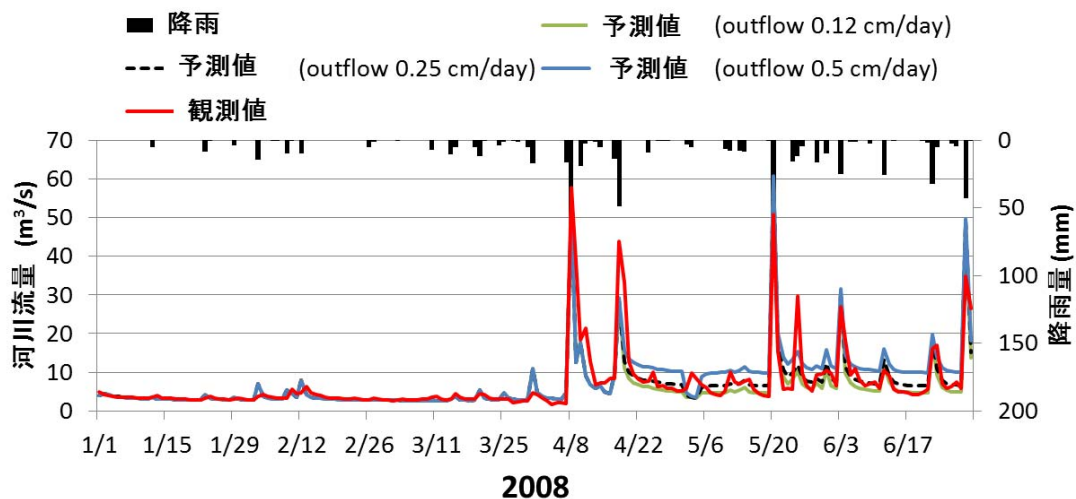


図 4. 2008年の桜川中流域での河川流量観測値とPCPF-1@SWATによる予測値

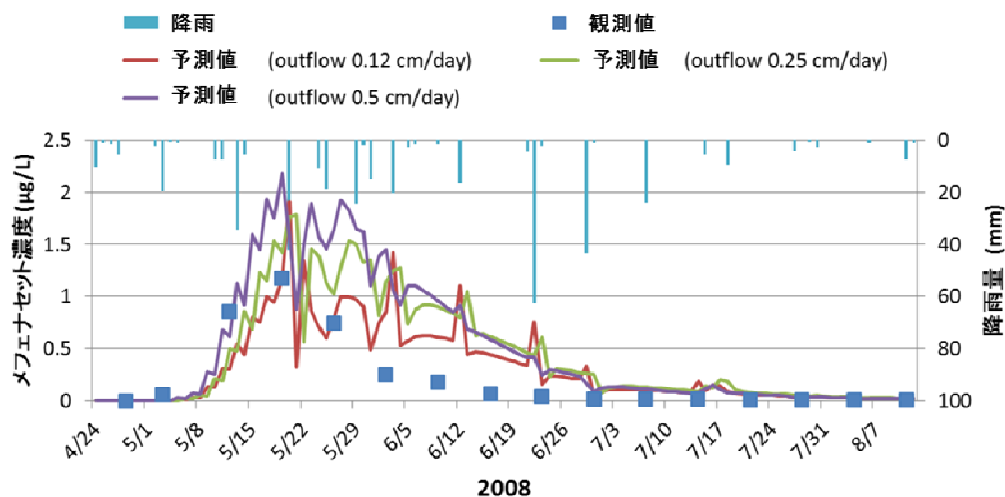


図 5. 桜川中流域の河川水中メフェナセット濃度の実測値とモデル予測値

次に、2008年の桜川中流域におけるメフェナセットの河川水中濃度の実測値とモデル予測値を図5に示す。モニタリング調査結果によると、田植え後の5月第1週目以降、メフェナセットの河川水中濃度が上昇し、5月中旬にピーク値に達した。6月になるとメフェナセットの河川水中濃度は減衰した。モデルによる予測結果はメフェナセットの河川水中

濃度の挙動を再現できており、水田日排水量が 0.12cm/日の場合、最も高い精度で実測値を再現することができた。PCPF-1@SWAT によるメフェナセットの河川水中濃度の傾向は、流域水田での農薬散布日の頻度分布に対応していた。6 月初期の実測値との乖離は、実際の現場での農薬散布状況との違いが考えられるが、その立証には詳細な農薬使用状況調査が必要である。

5. カリフォルニア州サクラメント川流域水田地帯での適用

次に、米国カリフォルニア州のサクラメント川流域の水田地帯で得られたデータを用い、PCPF-1@SWAT による農薬動態予測を行った。対象地はサクラメント川流域内のコルサ排水に係る約 4150km² の集水域で、25 万 ha の農地からの排水を担い、原生植物地帯、水田、牧草地がそれぞれ 41%、20%、5%を占める。対象農薬は水稲用除草剤チオベンカルブとモリネートとし、1999 年から 2001 年にかけてのシミュレーションを行った (Boulangé, 2013)。

コルサ排水路の流量予測においては、地形が平坦なため、自然流下による流量追跡が困難なことに加え、現地の灌漑排水による人為的水循環が複雑なため流量予測精度の向上が課題となった。水稲用除草剤の動態に関しては、詳細な農薬使用データの分析に基づき高精度の予測ができる可能性を示唆したが、カリフォルニアで施行されている農薬流出防止のための長期止水期間の再現するためには更なる改良が必要である。

6. おわりに

本モデルの開発により、水田を含む集水域での水文現象を考慮した農薬動態予測が可能となった。桜川流域では高精度の農薬動態予測のモデル手法が確立された。またコルサ排水においては、モデルの適用における課題を提示し、今後のモデル手法の改良に向けた提案を行った。これらの知見は今後、アジア地域の水田を含む流域での農薬や環境汚染物質の動態リスク評価研究に大きく寄与するものである。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究 C 課題番号 24580352 および The OECD Cooperative Program fellowship 201 の助成を受けて行いました。カリフォルニア大学デービス校・Jim Hill 教授、カリフォルニア大学 Cooperative Extension Cristpher Greer 博士、グレン・コルサ灌漑地区 (GCID)・Pat Kennedy 氏と Ben Pennok 氏、他の皆様にデータや資料のご提供をいただき感謝申し上げます。

参考文献

Boulangé, J. Development and application of the PCPF-1@SWAT model for simulating the fate and transport of rice pesticides in watersheds containing paddy fields. 博士学位論文 東京農工大学 連合農学研究科 農業環境工学専攻 2013.
稲生圭哉、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、農環研報

2004; 23: 27-76

- Iwasaki N, Inao K, Iwafune T, Horio T, Obara H. Coupling of the PADDY-Large model with geospatial information for predicting paddy pesticide behavior in river basins, *Limnology* 2012; 13: 221-235.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Willams JR. Soil and water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2009. Texas Water Resources Institute, College Station, Temple, Texas. 2011,
- Watanabe H, Takagi K, Vu SH. Simulation of mefenacet concentrations in paddy fields by an improved PCPF-1 model. *Pest Manage Sci* 2006; 62: 20-29.
- Watanabe, H.; Inao, K.; Vu, S. H.; Phong, T. K.; Ishihara, S.; Takagi, K.;Tournebize, J. In *Pesticide risk assessment in rice paddies: theory and practice*; Capri, E., Karpouzas, D., Eds; Elsevier: 2008; pp 168–214.
- Xie X, Cui Y. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice. *Journal of Hydrology* 2011; 396: 61-71.