



# MARCO サテライトワークショップ 2015 「アジアの作物生産システムと水資源問題のための SWAT の適用と適応」開催報告

江口定夫<sup>1</sup>

Report of the MARCO Satellite International Workshop 2015 “Adoption and adaptation of SWAT for Asian crop production systems and water resource issues”

Sadao EGUCHI<sup>1</sup>

## 1. はじめに

急激な人口増加が進むアジアでは、それを支えるための食糧増産と、持続的な農業生産を実現するための土壌資源保全及び水資源保全が喫緊の課題となっている。過度に集約的な農業を行えば、土壌侵食等土壌そのものの劣化やその結果としての作物生産性の低下を招くだけでなく、本来農地生態系に対してのみ効果を発揮すべき有用化学物質（栄養塩、農薬等）の農地系外への流出を引き起こし、流域レベルでの土壌・水資源や生態系サービス等に大きな影響を及ぼすことが懸念される。さらに、気候変動や土地利用変化が引き起こす極端な気象・水文学的現象は、これまで私達が経験したことのない規模で、農地～流域レベルの物質循環に多大な影響を及ぼす可能性がある。

流域レベルの水・物質動態予測モデル SWAT (Soil and Water Assessment Tool) は、このような流域レベルでの土壌・水資源利用及び保全や作物生産等に関わる複雑な問題の解決を目的として、USDA-ARS (米国農務省農業局) と TAMU (テキサス農工大学) により開発が進められてきた準分布型の流域モデルである (Arnold et al., 1998)。モデルの開発・改良と利用の歴史は 30 年間以上にも及び、SWAT の汎用性の高さと有用性は、欧米を中心として世界各地で実証されている (Gassman et al., 2007)。近年では、アジア各国や日本への適用も進み (Somura et al., 2009a; 2009b; 2012; Jiang et al., 2011; 2014; 清水ら, 2013; Fan and Shibata, 2015; 小保内ら, 2015; Wang et al., 2015)、アジアの食糧問題や環境問題の解決に向けた SWAT の活用が大きく期待されている。

ところが、SWAT は水田のような湛水管理を行う農地を想定しておらず、現状では、水田における節水管理や循環灌漑等による環境保全効果の評価に SWAT を利用す

ることは困難である (加藤ら, 2013)。近年、韓国 (Kang et al., 2006)、日本 (Kato et al., 2011; Sakaguchi et al., 2014a; 2014b) 及び中国 (Xie and Cui, 2011) において、水田を含む農業流域への SWAT 適用の問題点の指摘や水田水文過程に注目したモデル改良等が行われた。しかし、水田を湛水管理できる農地として取り扱った上で、水動態だけでなく、SS (懸濁物質)、農薬及び栄養塩等の動態予測に SWAT を適用した事例 (Kang et al., 2006; Boulange et al., 2014) はまだほとんどなく、水田流域における SWAT の適用と改良をさらに推進する必要がある。また、流域レベルでの放射性セシウム (Cs) の動態予測、硝酸塩による地下水汚染問題等、SWAT のような流域モデルを適用すべき新たな課題は山積している。

そこで、国立研究開発法人農業環境技術研究所 (農環研) は、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター (JIRCAS) との共催により、MARCO サテライトワークショップ 2015 「アジアの作物生産システムと水資源問題のための SWAT の適用と適応」を開催し、アジアの食糧問題や環境問題の解決に SWAT を活用するため、水田流域への SWAT の適用と改良を中心テーマとして、アジアモンスーン地域の様々な農業流域への SWAT 適用に関わる講演・議論を行った。本ワークショップは、農環研が主導する MARCO (モンスーンアジア農業環境研究コンソーシアム) (Table 1a) の活動の一貫として開催された MARCO シンポジウム 2015 (Table 1b) のサテライトワークショップの一つである。前年には、国立大学法人東京農工大学 (東京農工大) と MARCO の合同ワークショップ「SWAT 水田モジュール開発 2014」を開催しており (Table 1c)、その後、日本、米国、インド、ベトナム等の各国でどのような進捗があったかを皆で確認すると共に今後の方向性を議論することも、本ワークショップの大きな目的の一つであった。また、本ワークショップは、これまで東南アジアや東アジアを対象に 2 年に 1 回の頻度で開催されてきたアジアの SWAT 会議を初めてアジア全域に拡大し、第 4 回国際 SWAT アジア会議 (International SWAT-Asia Conference IV, 略称

<sup>1</sup>National Institute for Agro-Environmental Sciences. Corresponding author: 江口定夫, 農業環境技術研究所  
2016 年 3 月 4 日受稿 2016 年 3 月 6 日受理

**Table 1** 本ワークショップに関連する Web サイト一覧.  
List of websites related to this Workshop.

	Web サイトのタイトル, 内容	URL
a	MARCO : モンスーンアジア農業環境研究コンソーシアム The Monsoon Asia Agro-Environmental Research Consortium	<a href="http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/index-j.html">http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/index-j.html</a>
b	MARCO シンポジウム 2015 「モンスーンアジアにおける 農業環境研究の挑戦」平成 27 年 8 月 26 日 (水) ~ 28 日 (金)	<a href="http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/marco2015/index.html?1021">http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/marco2015/index.html?1021</a>
c	Web マガジン「農業と環境」No.177 東京農工大 - MARCO 合同国際ワークショップ「SWAT 水田モジュール開発 2014」開催報告	<a href="http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/177/mgzn17707.html">http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/177/mgzn17707.html</a>
d	Web マガジン「農業と環境」No.187 MARCO ワークショップ「アジアの 作物生産システムと水資源問題のための SWAT の適用と適応」開催報告	<a href="http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/187/mgzn18704.html">http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/187/mgzn18704.html</a>
e	Web マガジン「農業と環境」No.189 MARCO ワークショップ「アジアの 作物生産システムと水資源問題のための SWAT の適用と適応」詳細報告	<a href="http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/189/mgzn18901.html">http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/189/mgzn18901.html</a>
f	SWAT のホームページ	<a href="http://swat.tamu.edu/">http://swat.tamu.edu/</a>

SWAT-Asia IV) と位置づけて実施した (Table 1d). さらに, これまでの SWAT 会議にはない取り組みとして, SWAT 以外のモデル研究, モデル研究ではないモニタリング研究やデータベース開発の研究等も対象に含め, 広く発表を募集した. 2015 年は, 国際連合 (国連) の国際土壌年「元気な暮らしは元気な土から」であると同時に, 国連の国際 10 年「生命のための水」(International Decade for Action 'Water for Life' 2005-2015) の最終年でもあり, これらの活動への貢献も本ワークショップの目的の一つとした.

本ワークショップの開催にあたり, 土壌物理学会をはじめ, 農林水産省農林水産技術会議事務局, 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構, 東京農工大, 茨城県, USDA-ARS, WASWAC (世界土壌水保全機構), TAMU, 一般社団法人日本土壌肥料学会, 公益社団法人農業農村工学会, 公益社団法人日本水環境学会, 一般社団法人水文・水資源学会の御後援を頂いた. ここに記して感謝の意を表する.

## 2. ワークショップの概要

本ワークショップの中心となる口頭及びポスターセッションは, 2015 年 10 月 20 日 (火) ~ 22 日 (木) の 3 日間, 農林水産技術会議事務局筑波事務所つくば農林ホールにおいて行われ, 初日と三日目の夜間には, 農環研大会議室において SWAT 講習会 (初心者及び上級者コース) を実施した. また, 会議前日の 10 月 19 日には前夜祭を催し, ベジタリアン及びハラルフードに対応した料理 (主担当: 箭田佐依子氏), 能楽の謡 (同: 大倉利明氏), サックス演奏 (同: 吉川省子氏) 等でもてなした. 会議後の 10 月 23 日にはエクスカージョンを行い, 農環研の調査対象流域である筑波山麓の水田流域 (逆川流域) や銚田川流域内のハウス野菜栽培農業地帯, 霞ヶ浦湖岸のハス田地帯 (JA 土浦れんこんセンター), 茨城県霞ヶ浦環境科学センター等を見学した. アジア各国を中心に計 12 ヶ国 (マレーシア, 中国, ベトナム, インド, フィリピン, 米国, インドネシア, カナダ, ドイツ, エジプト, チュニジア, 日本) から 82 名の参加者がおり, 25 の口

頭発表と 12 のポスター発表があった (Table 2). 個々の発表概要や, SWAT 講習会及びエクスカージョン等については, 農環研の Web マガジン「農業と環境」No.189 (Table 1e) を参照頂くことにして, ここでは, 筆者の個人的見解に基づき, 会議全体から得られた主な知見について幾つか述べたい. なお, 以下の文中における口頭及びポスター発表の番号は, すべて Table 2 に示すものである.

第一の知見は, SWAT がアジアや世界各国で依然として様々な用途で広く利用され (S1-1), SWAT に対するニーズが益々高まっていることが非常に明確になったことである. 中でも, 土地利用変化と気候変動の影響を SWAT (等) で予測する研究が最も多く (S2-1, P14 等), 対象は, 表面水及び地下水, SS 輸送, 水収支, 土壌侵食, 作物収量, 土壌有機態炭素等々, 多岐に及んだ. そのほか, 農薬, 窒素, リン, カリウム (K), 放射性 Cs 等の化学物質を対象として, 農業流域や都市流域に SWAT が適用されていた. 森林流域では, 水資源の評価や管理を目的として SWAT が適用され, 水力発電のための水資源量を評価する研究 (P-8, P-19) も見られた.

第二の知見は, 従来版 SWAT に加えて, 新 SWAT や非 SWAT モデルの情報が得られたことである. 従来版 SWAT をそのまま水田流域に適用した場合, 水動態 (河川流量) については多数のモデルパラメータの調節により, 実測値との適合性が妥当となる例も少なくないが, 化学物質動態の予測精度は不十分となる (Kato et al., 2011). しかし, 流域内での緻密な調査データ等に基づき, 対象流域内の水・物質動態の特徴を十分に採り入れて SWAT を適用すれば, 妥当な精度で実測値を再現できる事例が示された (S3-8). 新 SWAT としては, 次の段落で述べる水田用 SWAT だけでなく, 放射性 Cs 動態予測用の SWAT-Cs 及びその開発の元となった K 動態予測用の SWAT-K が紹介された (S4-1). 非 SWAT では, 圃場レベルを対象としたより詳細な農地管理の影響を評価することができる圃場レベルのモデルとして APEX (Agricultural Policy/Environmental Extender) モデル (S3-1) や EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) モデル (S4-2) 等が示された. また, SWAT が

**Table 2** 口頭発表セッション及びポスター発表セッションにおける発表タイトルと発表者の一覧（和訳）。  
List of presentation titles and speakers in the oral and poster sessions (translated in Japanese).

	発表タイトル	発表者
口頭発表セッション（☆は招待講演）		
S1	「地球規模の SWAT 適用とアジアでの展望」 10月20日午前	
	S1-1 [基調講演] 生態水文モデルである土・水評価ツール (SWAT) の 2015 年頃における地球規模での適用傾向、洞察と課題	Philip W Gassman (アイオワ州立大学・農業農村開発センター, 米国)
☆	S1-2 水田流域のための SWAT による水文シミュレーションの改良：モデル開発とデータ同化	Xianhong Xie (北京師範大学, 中国)
	S1-3 低地水田における水と物質収支解析のための SWAT 適用	加藤 亮 (東京農工大学)
	S1-4 マレーシアにおける水文モデル SWAT の適用：最近の状況	Muhamad Radzali Mispan (マレーシア農業調査開発研究所・戦略的資源調査センター, マレーシア)
S2	「土地利用変化と気候変動が流域プロセスに及ぼす影響」 10月20日午後	
☆	S2-1 土地利用変化と気候変動がベトナム・中央高地のスレポク流域における土壌及び水資源に及ぼす影響の評価	Kim Loi Nguyen (ノン・ラム大学気候変動研究センター, ベトナム)
	S2-2 ベトナムのブ・ギア・ス・ボン流域における土地利用変化を予測するためのマルコフ鎖・セルラーオートマタモデルの適用	Hoang Tu Le (ノン・ラム大学気候変動研究センター, ベトナム)
	S2-3 気候変動が懸濁物質輸送に及ぼす影響のモデル化：統合的手法を用いた事例研究	Nor Faiza Abd Rahman (マラ工科大学, マレーシア)
	S2-4 ブラジルの土地利用が対照的な二つの小流域における水収支のモデル化に及ぼす土壌パラメータの影響	Gabriele Lamparter (ゲッティンゲン大学, ドイツ)
	S2-5 SWAT で用いられる降水、表面流出及び懸濁物質流出の関係の日本における人工降雨実験による研究	Farag Malhat (東京農工大学)
	S2-6 富栄養湖の総合的な流域管理のための拡散汚染対策	黒田久雄 (茨城大学)
S3	「土壌・水資源の合理的管理のための水田流域における SWAT の適用と改良」 10月21日午前～午後	
☆	S3-1 [基調講演] 水田の水文学的シミュレーションのための APEX と SWAT の適用	Jaehak Jeong (テキサス農工大学ブラックランド研究センター, 米国)
☆	S3-2 SWAT でテラスをシミュレートするためのプロセスに基づいたアルゴリズム	Hui Shao (ゲルフ大学, カナダ)
	S3-3 日本における SWAT (土・水評価ツール) の適用	宗村広昭 (島根大学)
	S3-4 新しいモジュラー SWAT コードを用いた 1 時間以下の時間ステップでの水文学的シミュレーション	Younggu Her (テキサス農工大学ブラックランド研究センター, 米国)
☆	S3-5 SWAT を用いた水田のための灌漑モジュールの開発と試用	Balaji Narasimhan (インド工科大学マドラス校, インド)
	S3-6 詳細な管理データを用いた水田圃場における農薬の挙動と輸送のシミュレート	Julien Boulange (東京農工大学)
	S3-7 三江平原の典型的な農業流域における農薬流失のシミュレーション	Guanqing Cai (北京師範大学, 中国)
	S3-8 SWAT を用いた西日本の郊外農業流域からの懸濁物質と栄養塩類の流出の推定	清水裕太 (農研機構・近畿中国四国農業研究センター)
	S3-9 土壌流失による水稲収量低下の定量的なリスク評価のための SWAT モデル, リモートセンシング及び GIS	Jeark A Principe (フィリピン大学ディリマン校, フィリピン)
	S3-10 窒素動態と脱窒活性の間の関係	Xiaolan Lin (東京農工大学大学院連合農業研究科)
S4	「非 SWAT と新 SWAT：流域スケールモデルの更なる必要性と挑戦」 10月22日午前	
☆	S4-1 [基調講演] SWAT を用いた放射性セシウムシミュレーションモデル開発と適用における幾つかの側面	波多野隆介 (北海道大学)
	S4-2 集約的な耕起実践条件下における土壌炭素フラックスと気候変動下における作物収量の反応	Wei Ouyang (北京師範大学, 中国)
	S4-3 黒ボク土が優占する流域における過去に投入した窒素の出現の要因	板橋直 (農環研)
	S4-4 WEAP-MABIA モデルを用いたコメのための灌漑戦略の評価：サルダール・サラパール・コマンド地方の地域-I における研究事例	Gopal H Bhatti (マハラジャ・サヤジラオ大学パロオダ校, インド)
S5	「アジアの流域における土壌の資源と機能」 (S5-1 は当日キャンセル) 10月22日午後	
	S5-2 SWAT 水文学的モデルにおけるマレーシアの土壌データ	Khairi Khalid (マラ・パハン工科大学, マレーシア)
	S5 の一部として、閉会式後に、農業環境インベントリー展示館 (農環研) の土壌モノリス展示等の見学コースを実施	神山和則 (農環研)

発表タイトル	発表者
ポスター発表セッション (★はベストポスター受賞, 欠番は当日キャンセル)	10月20~22日
P-8 国スケールの水力資源評価計画のための ArcSWAT 入力データセットの開発 — フィリピンの事例	Greyland C Agno (フィリピン大学ディリマン校, フィリピン)
P-9 地下水と用水路の灌漑水の共用での土壌水収支シミュレーション: サルダール・サロパール・コマンド地方の地域-I における蓖麻子作物についての研究事例	Hareshkumar M Patel (マハラジャ・サヤジラオ大学バローダ校, インド)
P-10 GIS を用いたケダにおける農業利用のための土地利用可能性と土壌-作物適合性	Hasliana Kamaruddin (マレーシア農業調査開発研究所, マレーシア)
P-12 日本の茨城県の水田流域における水, 懸濁物質及び栄養塩類の移動を推定するための SWAT モデルの適用	吉川省子 (農環研)
★ P-14 マレーシア・ケランタン川流域の水文学的成分に対する気候変動の影響	MouLeong Tan (マレーシア工科大学, マレーシア)
P-15 マレーシア半島地方の高地について ASTER 及び SRTM から作成した数値標高モデルの評価	Muhammad Zamir Abdul Rasid (プトラ・マレーシア大学, マレーシア)
P-17 タマン・トロピカ・ケニールにおける土壌水分: 地球温暖化への影響を緩和する灌漑管理のための必須要素	Norlida Mohamed Hamim (マレーシア農業調査開発研究所, マレーシア)
P-19 水力資源評価における SWAT と地理空間技術の適用: フィリピン・ミンダナオ島の Liangan 川の事例	Rowane May A Fesalbon (フィリピン大学ディリマン校, フィリピン)
★ P-20 水田における流出過程についての SWAT モデルの改良	土屋遼太 (東京農工大学)
P-21 ArcGIS を用いたカメロン高地の様々な流域における重金属濃度	Siti Humaira Haron (ケバンサーン・マレーシア大学, マレーシア)
P-22 SWAT モデルを用いたチュニジア・Joumine 川流域における懸濁物質流出量と表面水流出の推定	Slim Mtibaa (筑波大学)
P-25 ベトナム・コンタム県のポ・コ流域における表面流と基底流のシミュレート	Vo Ngoc Quynh Tram (ノン・ラム大学, ベトナム)

不得意な不飽和帯における硝酸塩の輸送過程について、圃場レベルのモデル LEACHM (Leaching Estimation and Chemistry Model) の改良版 (Asada et al., 2013) を流域レベルに適用した事例が紹介された (S4-3)。

第三の知見としては、本ワークショップの中心テーマである水田版 SWAT を挙げたい。前出の APEX では水田用のアルゴリズム構築が大きく進み (S3-1), それを参考に水田版 SWAT 「SWAT-PADDY」が開発され、日本の水田流域への適用事例が紹介された (P-20)。このほか、棚田地帯に SWAT を適用するために改良された SWAT-T (S3-2), 水田農業を対象とした PCPF-1@SWAT (S3-6), 水田用の灌漑モジュールの開発 (S3-5) 等、水田版 SWAT は各国で大きく進展していた。

第四の知見は、モデル適用以前の様々な困難な課題が、あらためて認識されたことである。すなわち、SWAT のような流域モデルを適用するためには、まず、①長期間 (少なくとも数年間以上) の信頼しうる連続観測データが必須であり、②水、SS、化学物質 (農薬、栄養塩、放射性 Cs 等)、作物収量、土壌特性等についての多岐にわたる実測データをとるだけでなく、③必要に応じて、一地点ではなく多地点あるいは流域内での面的な実測データや、そのデータ解析に基づく様々な流域プロセスの十分な理解が必要となる。また、④国・地域によっては容易に入手できない地理情報システム (GIS) データや、GIS データと現在の土地利用状況の相違、農家による農薬・肥料散布時期の大きな違い等、モデルに入力する所謂「活動量」の正確なデータを如何に整備するか、整備出来ない場合にはどのように入力値を与えれば良いか等、流

域モデルに付きものの課題があらためて浮き彫りとなった。モデル主体の会議を開催することで、逆に、モニタリングデータや実態把握のための研究が如何に重要であるかを強く認識することが出来た。

第五の知見は、モデル予測に最適な空間・時間単位の問題についてである。準分布型の流域モデルである SWAT では、HRU (Hydrological Response Unit) と呼ばれる最小単位の空間領域が定義され、この領域は一つの均質な圃場 (土壌、地形、作物条件等が均質) のようにみなされる。この HRU が幾つも集まって一つのサブ流域を形成し (ただし、HRU 間の相互作用はなく互いに独立している)、サブ流域が幾つも集まって一つの流域を形成する。この HRU やサブ流域の数や大きさは、流域特性とユーザーの設定によって変わるが、最適な設定は、対象物質や研究目的、労力や時間制限等に応じて、試行錯誤で決めざるを得ないのが現状である。計算時間単位についても同様である。この一つの解決策となりうるのが、Modular SWAT code (S3-4) と呼ばれる新たな機能であり、HRU 間の相互作用を考慮することが出来て、HRU の数が増えても入力ファイル数が変わらないという特長を有する。また、SWAT におけるデータ同化手法についての発表もあり (S1-2)、長期にわたって流域レベルでのモデル予測精度を高く維持するための工夫が示された。

### 3. おわりに

最後に、SWAT の今後の研究方向について、①土地利用変化と気候変動の影響予測、②水田版 SWAT の開発と公

開, ③国際共同研究の推進, ④ BMPs (best management practices) のための費用便益分析, の4点を挙げたい。①については, 本ワークショップでも最多の報告があり, 今後もさらに重要なテーマとしてアジア各国での SWAT 適用を進める必要がある。そのためには, ②は必須であり, ③を活かして条件の大きく異なる各国の水田流域に同じモデル (例えば, SWAT-PADDY) を適用し, モデルの検証と改良を行う必要がある。④は SWAT-T (S3-2) において棚田の整備にかかる費用とそれによる土砂流出軽減効果の便益の計算例が示されたが, 流域管理では常に必要不可欠な課題である。

水田版 SWAT が圃場モデルである APEX を参考に開発されていることから分かるように, 流域モデルの開発では, 圃場レベルでのモニタリングと現象説明に基づく圃場モデルの開発と, 流域規模にスケールアップするための工夫 (例えば, HRU のような考え方) が鍵となる。圃場モデルは土壌物理の研究対象そのものであり, SWAT のような流域モデル開発への土壌物理の貢献は, 今後益々必要とされるだろう。

本ワークショップの会議案内最終版 (Table 1d) 及びプログラム・講演要旨集 (Table 1e) (主担当: 朝田 景氏, 平野七恵氏) は, いずれも農環研ホームページよりダウンロードできる。次回, 2017 年の SWAT-Asia V は, マレーシアで開催される。まだ案内は出ていないが, SWAT のホームページ (Table 1f) をご覧頂きたい。

## 謝辞

本ワークショップ開催準備と当日運営のため, 事務局メンバーとして精力的に取り組んで下さった農環研 (吉川省子, 神山和則, 大倉利明, 板橋 直, 三島慎一郎, 中島泰弘, 中村 乾, 朝田 景, 箭田佐依子, 平野七恵, 阿部薫, 堀尾 剛, 八木一行), JIRCAS (飯泉佳子, 伊ヶ崎健大), 農研機構・近畿中国四国農業研究センター (松森堅治, 志村もと子, 清水裕太), 東京農工大 (渡邊裕純, 加藤 亮, Boulange Julien), 茨城大学 (黒田久雄), 島根大学 (宗村広昭), 茨城県環境対策課 (北村立実), 茨城県霞ヶ浦環境科学センター (菅谷和寿) の計 25 名の皆様 (敬称略) に, 心より深く御礼申し上げます。

## 引用文献

- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S. and Williams, J.R. (1998): Large area hydrological modeling and assessment: Part I. Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34: 73–89.
- Asada, K., Eguchi, S., Urakawa, R., Itahashi, S., Matsumaru, T., Nagasawa, T., Aoki, K., Nakamura, K. and Katou, H. (2013): Modifying the LEACHM model for process-based prediction of nitrate leaching from cropped Andosols. *Plant Soil*, 373: 609–625.
- Boulange, J., Watanabe, H., Inao, K., Iwafune, T., Zhang, M., Luo, Y. and Arnold, J.G. (2014): Development and validation of a basin scale model PCPF-1@SWAT for simulating fate and transport of rice pesticides. *J. Hydrol.*, 517: 146–156.
- Fan, M. and Shibata, H. (2015): Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan. *Ecol. Ind.*, 50: 79–89.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. (2007): The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50: 1211–1250.
- Jiang, R., Li, Y., Wang, Q., Kuramochi, K., Hayakawa, A., Woli, K.P. and Hatano, R. (2011): Modeling the water balance processes for understanding the components of river discharge in a non-conservative watershed. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 54: 2171–2180.
- Jiang, R., Wang, C.Y., Hatano, R., Hayakawa, A., Woli, K.P. and Kuramochi, K. (2014): Simulation of stream nitrate-nitrogen export using the Soil and Water Assessment Tool model in a dairy farming watershed with an external water source. *J. Soil Water Conserv.*, 69: 75–85.
- Kang, M.S., Park, S.W., Lee, J.J. and Yoo, K.H. (2006): Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing paddy fields. *Agric. Water Manage.*, 79: 72–92.
- Kato, T., Somura, H., Kuroda, H. and Nakasone, H. (2011): Simulation of nutrients from an agricultural watershed in Japan using the SWAT model. *Int. Agric. Eng. J.*, 20: 40–49.
- 加藤 亮, 渡邊裕純, Boulange Julien, 江口定夫, 坂口 敦, 宗村広昭 (2013): SWAT モデルの水田を含む流域への適用の問題点と改善に向けて. *農業農村工学会誌*, 81: 983–987.
- 小保内啓太, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏 (2015): 水文水質モデルを用いた釜房ダム流域における豪雨による高濁度化の浄水処理システム影響評価. *水道協会雑誌*, 84: 1–14.
- Sakaguchi, A., Eguchi, S. and Kasuya, M. (2014a): Examination of the water balance of irrigated paddy fields in SWAT 2009 using the curve number procedure and the pothole module. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60: 551–564.
- Sakaguchi, A., Eguchi, S., Kato, T., Kasuya, M., Ono, K., Miyata, A. and Tase, N. (2014b): Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agric. Water Manage.*, 137: 116–122.
- 清水裕太, 小野寺真一, 齋藤光代 (2013): 郊外農業流域におけるリン流出量推定への SWAT モデルの適用可能性. *水文・水資源学会誌*, 26: 153–173.
- Somura, H., Arnold, J., Hoffman, D., Takeda, I., Mori, Y. and Di Luzio, M. (2009a): Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve. *Hydrol. Process.*, 23: 1887–1900.
- Somura, H., Takeda, I. and Mori, Y. (2009b): Sensitivity analyses of hydrologic and suspended sediment discharge in the Abashiri River basin, Hokkaido region, Japan. *Int. Agric. Eng. J.*, 18: 27–39.

- Somura, H., Takeda, I., Arnold, J.G., Mori, Y., Jeong, J., Kannan, N. and Hoffman, D. (2012): Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin. *Japan. J. Hydrol.*, 450–451: 25–35.
- Wang, C., Jiang, R., Mao, X., Sauvage, S., Sanchez-Perez, J.M., Woli, K.P., Kuramochi, K., Hayakawa, A. and Hatano, R. (2015): Estimating sediment and particulate organic nitrogen and particulate organic phosphorous yields from a volcanic watershed characterized by forest and agriculture using SWAT model. *Int. J. Limnol.*, 51: 23–35.
- Xie, X. and Cui, Y. (2011): Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice. *J. Hydrol.*, 396: 61–71.