

水田域での栄養塩類動態への適用をめざした SWAT モデルの改良

Modifying SWAT toward the nutrient dynamics modeling in watersheds containing paddy fields

(独) 農業環境技術研究所 江口定夫・坂口敦

1. はじめに

水と栄養塩類は、全ての生物にとって必要不可欠な物質である。したがって、これらの利用と管理に関わる様々な地域及び地球規模的問題は、今すぐ解決しなくてはならない喫緊の最重要課題であると同時に、地球上の全ての生物が死滅しない限り永遠に終わることがないであろう解決不可能な課題でもある。しかしながら、問題解決できなくとも、多様で複雑なトレードオフ効果を考慮しながら、問題が少しでも改善すると思われる方向へ状況を導いていくこと、改善された状態を長期的に維持することが必要であり、その実現に必要な最も現実的かつ効率的な手段を科学的手法に基づき提示することが求められている。

農業は、人間にとって利用価値の高い植物や動物を、人為的に大量生産する産業であり、必然的に、多くの水と栄養塩類を必要とする。日本で最も水利用量の多い産業分野は農業であり、農業用水が日本全体の水使用量の 67% を占める (図 1)。農業用水の 95% は河川水 (湖沼含む) に依存し、その多くは水田灌漑水として利用されている。また、国内の工業用水、生活用水も含めた全ての水使用量は、降水量から蒸発散量を差し引いた残りの水量 (水資源賦存量) の 20% を占める。即ち、日本の陸域から海域へ流出する水の 20% は、人為的な影響を直接受けた排水である。一方、農業で利用される大量の栄養塩類の一部は、表流水 (surface runoff) あるいは土壌浸透水～浅層地下水と共に、農地系外へと流出する。流出した栄養塩類は、硝酸性窒素による地下水汚染問題や、閉鎖性水域における富栄養化問題等を引き起こす。

農地は、市街地や山林等と共に非特定汚染源 (面源) の一つであり、栄養塩類等の流出負荷量や汚染拡大範囲の把握、さらには、流出負荷量を削減するための様々な改善策の効果の把握が非常に困難であるという点で、工場排水等の点源と大きく異なっている。このため、点源に比べて、面源からの流出負荷量の正確な評価や削減対策は進んでいない。農地あるいは農業流域からの栄養塩類の流出負荷量の実態や、様々な改善策の効果を実量的に評価するための試験研究は以前より行われているが (表 1)、どういった土壌・気象・作物条件でどの改善策が最も効果的であるかを定量的に直

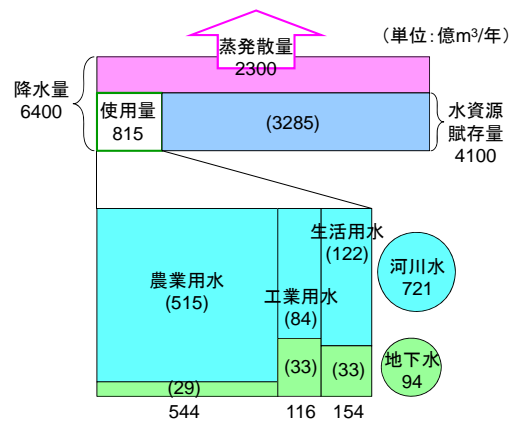


図 1 日本の水資源賦存量と使用量: 国土交通省水管理・国土保全局水資源部 (2012) より作成

表 1 国内の水田以外の農地及び農業流域からの栄養塩類流出負荷量に関する慣行・改善農法別の文献データ数 (1980 年以降) (江口 2012)

	畑地	樹園地、草地、ハス田	農業流域
全データ数	114	88	86
農法			
慣行	40	70	81
改善			
有機物施用	28	1	-
緩効性肥料	17	4	-
不耕起	6	0	-
側条施肥	3	0	-
地下水水位制御	4	0	-
緑肥	3	0	-
硝化抑制	1	0	-
少灌水	2	0	-
草生栽培	0	1	-
マルチ	1	0	-
その他	3	7	-

接提示できるほど、文献データの蓄積は多くない。例えば、地目・作目・農法（慣行と改善）別の全窒素（TN）の流出負荷量の集計結果（図 2）は、改善農法により、慣行よりも TN 流出負荷量を平均 20~40%程度削減できる可能性を示すが、改善策の違いや土壌・気象・作物による違い等、全ての要因の影響を網羅的に示すことはできない。また、農業流域スケールでは、改善農法による流出負荷削減効果を示す文献は見当たらない（表 1）。

対象とする現象に関わる様々な要因間の複雑かつ多様な相互作用を考慮しながら、現象の将来予測を網羅的に示すには、モデルを使用する以外にない。モデルには、現象のメカニズムをある程度反映したものであること（汎用性があること）や予測精度の高さが求められるが、同時に、今すぐ使える（readily available）ものを直ちに提供する必要性もある。また、様々な人間活動（例えば、表 1 の様々な改善農法）の影響を予測すると共に、その妥当性を実測値によって検証できるようなモデルが必要である。さらに、独自モデルではなく既にユーザーの多いモデルであれば、異なる流域間での比較や様々な情報交換ができ、モデル改良による波及効果も大きい。本報告では、そのようなモデルとして国際的に最も広く使用されている流域モデル SWAT を選定し、水田流域における水・物質動態のモデル化を検討した事例について紹介する。

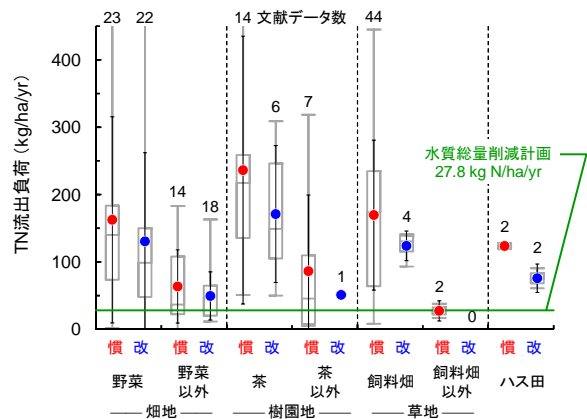


図 2 慣行及び改善農法での畑地、樹園地、草地及びハス田からの TN 流出負荷量のボックスプロット（灰色線）と算術平均値（赤と青の丸プロット、エラーバーは標準偏差）：緑の水平線は水質総量削減計画の原単位、各数値は文献データ数（江口 2012）

2. 準分布型の流域モデル SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) は、土地利用や農業活動が集水域及び大河川流域における面源汚染 (nonpoint source pollution) に与えるインパクトの長期的評価を行う水資源管理者のために、USDA-ARS (米国農務省農業研究局) が作成した概念モデルである (図 3) (Arnold et al 1998)。対象流域内の水・物質動態を、物理学的メカニズムに基づいてできるだけ精緻に記述することを目指すようなモデルとは異なり、SWAT では、およそ

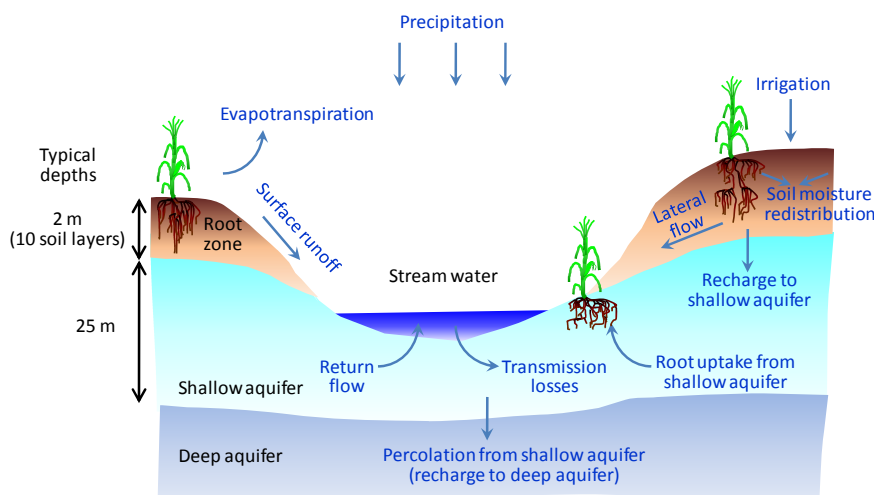


図 3 SWAT のサブ流域 (subbasin) 内で計算される主な水文学的要素: Arnold et al (1998) を一部改変

の概念が妥当であれば、あとはモデルパラメータを調節してモデル予測値と実測値をできるだけ適合させることにより、対象流域内での様々な土地管理、水管理、気候変動シナリオ条件下での水・物質動態の長期的な将来予測を可能とすることを最大の目的としている。

SWAT そのものは、15 年前に発表されたモデルだが (Arnold et al 1998)、その構成要素となるモデル (GLEAMS、CREAMS、EPIC、SWRRB、QUAL2E、ROTO) は、ほぼ全て 1980 年代には既に発表されていたものであり (図 4)、実質的な SWAT 開発の歴史は、30 年以上にも及ぶ。近年は、各地域の実情等に合わせた改良版も多く作成されている。流域モデルとしての SWAT の一番興味深い特徴は、HRU (hydrological response unit) を最小計算単位とする準分布型のモデルという点である。モデル化対象流域は複数のサブ流域

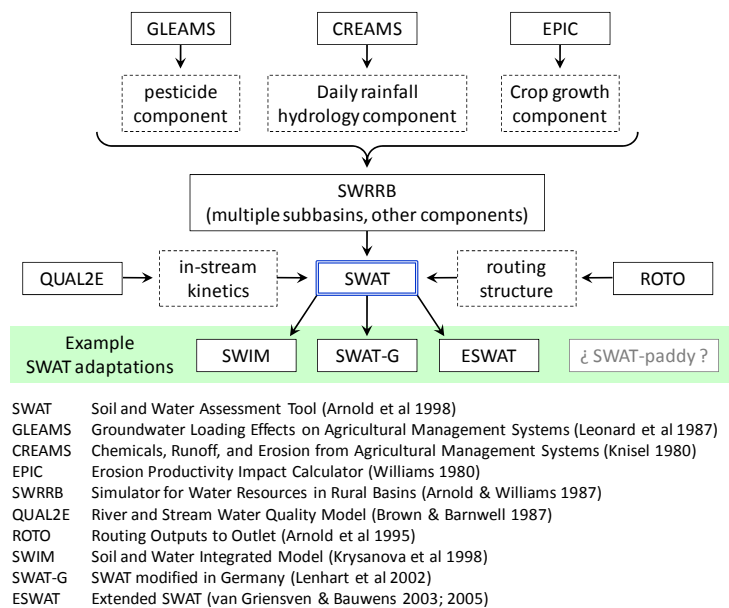


図 4 流域モデル SWAT の開発履歴の概要と SWAT 改良版の事例：Gassman et al (2007) を一部改変

(subbasin) に区分されるが、そのサブ流域は、空間的位置が定義されない複数の HRU で構成される。各 HRU から流出する水は、サブ流域末端へと集まるが、各 HRU からサブ流域末端までの水移動時間に関わるパラメータは、モデルが実測値 (河川水流量等) を最も良く再現するように、オートキャリブレーション機能によって、ユーザーが選択する他のパラメータと共に最適化される。この HRU 機能に代表されるような非現実的とも言える自由度の高さは、SWAT が現象解明ではなく、どのような流域の実測値でも良く再現できるように極力工夫された流域スケールの問題解決型モデルであることを明確に示している。

モデル予測値と実測値との適合性を見ると、SWAT では、Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe 1970) 値を用いることが多い：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \quad (1)$$

ここで、 Y^{obs} 、 Y^{sim} 及び Y^{mean} は、それぞれ、観測値、モデル予測値及び観測平均値を表す。NSE 値は、1 から $-\infty$ までの範囲の値をとるが、Moriassi et al (2007) は、月単位で評価したときの NSE 値を ≤ 0.50 、 $0.50 \sim 0.65$ 、 $0.65 \sim 0.75$ 及び > 0.75 に 4 区分し、それぞれ、モデル適合性が unsatisfactory、satisfactory、good 及び very good と評価している。SWAT は大河川流域への適用を想定して作られたモデルであるが、面積が数 km^2 以下の小流域へ適用されることも少なくない。そこで、日単位の河川流量についての NSE 値と流域面積との関係を、多数の SWAT 文献値を用いて整理したところ (図 5)、明瞭な関係は見られなかった。したがって、SWAT は、流域サイズによらず適用可能であると言える。なお、図 5 のキャリブ

レーションとは、SWAT のモデルパラメータを実測値を用いて最適化することであり、バリデーションとは、そのキャリブレーション後のモデルを用いて、他の観測期間の実測値とモデル予測値との適合性を見ることである。

3. 表面流出水量の計算 : Curve Number 法と Green-Ampt 法

流域モデルにおいて、表面流出水量を決める計算ステップは、直ちに河川へ流出する直接流出成分と、土壤中へ浸入後、比較的緩やかに流出する基底流出成分を分けるという点で、非常に重要である。SWAT では、各 HRU における表面流出の計算方法として、経験的パラメータに依存する SCS Curve Number 法 (CN 法) (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service 1972) または物理学的メカニズムをより重視した Green-Ampt infiltration 法 (GA 法) (Green & Ampt 1911; Mein & Larson 1973) が用いられる。

CN 法では、日単位で、降水量 R_{day} (mm) から表面流出水量 Q_{surf} (mm) を計算する :

$$Q_{\text{surf}} = \begin{cases} \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{R_{\text{day}} - I_a + S} \approx \frac{(R_{\text{day}} - 0.2S)^2}{R_{\text{day}} + 0.8S} & R_{\text{day}} > I_a \approx 0.2S \\ 0 & R_{\text{day}} \leq I_a \approx 0.2S \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 I_a (mm) は降雨初期の水除去効果、 S (mm) は保水パラメータ (retention parameter) である。保水パラメータ S は、土壌タイプ、植被条件等により異なる値を日毎に設定できる CN (curve number) 値及び土壌断面内の保水量 (萎凋点 1500 kPa における保水量を差し引いた値) SW (mm) 値と次のように関係づけられている :

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{\text{CN}_1} - 10 \right) \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp[w_1 - w_2 SW]} \right) \quad (3)$$

$$\text{CN}_1 = \text{CN}_2 - \frac{20(100 - \text{CN}_2)}{100 - \text{CN}_2 + \exp(2.533 - 0.0636[100 - \text{CN}_2])} \quad (4)$$

ここで、 CN_1 及び CN_2 は、それぞれ、土壌乾燥状態 (萎凋点) 及び平均的水分状態での CN 値、 w_1 と w_2 は形状係数を表す。表面流出水量 Q_{surf} は、CN 値が大きいほど、また、 S 値が小さいほど、増大する。CN 値もまた、オートキャリブレーションにより最適化される。

GA 法では、土壤中への水の浸入速度が一定条件下での表面湛水発生時間を推定する手法 (Main & Larson 1973) を用いて、ある時間内における降水量が土壤中への浸入水量を上回ったときに、表面流出水量が計算される。ある時間 t における浸入速度 $f_{\text{inf},t}$ (mm/h) は :

$$f_{\text{inf},t} = K_e \left(1 + \frac{\psi_{\text{wf}} \Delta \theta_v}{F_{\text{inf},t}} \right) \quad (5)$$

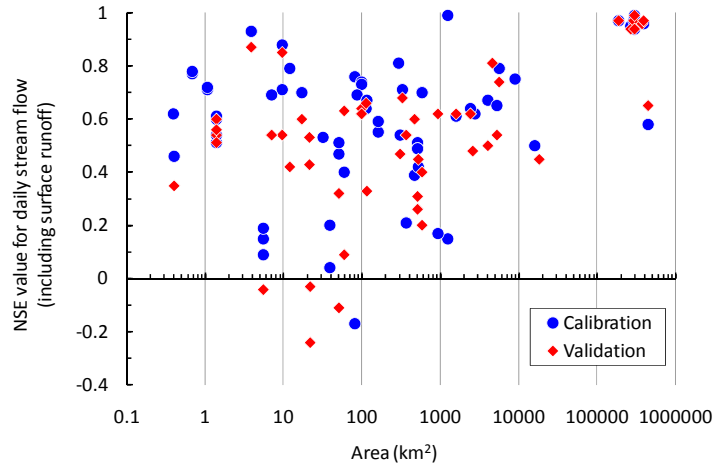


図 5 日単位の河川水流量 (表面排水を含む) について、SWAT 予測のキャリブレーション期間とバリデーション期間についての NSE (Nash-Sutcliffe efficiency, 予測値と実測値との適合性を表す指標) 値と流域面積の大きさとの関係 (計 75 文献、125 データ) : 主として、Gassman et al (2007) の Table 2 に基づき作成

ここで、 K_e は有効透水係数 (mm/h)、 ψ_{wf} は浸潤前線のマトリックポテンシャル (mm)、 $\Delta\theta_v$ は浸潤前線の両側の体積含水率の差、 $F_{inf,t}$ は時間 t における積算浸入水量 (mm) である。有効透水係数 K_e は、地表面の被覆等も考慮したパラメータであり、飽和透水係数 K_{sat} と CN 値から、次式で推定される (Nearing et al 1996) :

$$K_e = \frac{56.82K_{sat}^{0.286}}{1+0.051\exp(0.062CN)} - 2 \quad (6)$$

CN 法の利点は、流域内の土壌・植生情報の有無に関わらず、パラメータを最適化することにより、どのような流域へも適用可能な点である。実際、これまでに報告されている SWAT 論文のほとんどは、CN 法によるものである。GA 法は、メカニスティックなモデルだが、土壌特性データや測定間隔 1 時間以下の降雨データ等を必要とし、実測値への適合性は CN 法ほど高くないとの報告もある (Kannan et al 2007)。

4. 水田流域への SWAT モデルの適用

SWAT は、米国で開発されたモデルであり、水田のように灌漑水によって表面湛水状態が長期間続くような農地は想定していない。近年、アジアの水田流域への SWAT 適用論文も見られるが、SWAT が水田に適用できないことには何も触れないまま CN 法でモデル化する場合 (Rossi et al 2009; Hao et al 2012)、独自に作成したモデルを導入する場合 (Kang et al 2006)、そして SWAT そのものを改良する場合 (Xie & Cui 2011) がある。一つ目は、汎用性は高いが、水田土壌中での表面湛水条件下での様々な物質動態予測をモデルの目的とする場合、CN 法では限界がある。一方、二つ目のように独自モデルを導入した場合、他の SWAT ユーザーにとって自由に使うことが出来る状況にはならない。三つ目は、著者らが公開するならば、世界中の SWAT ユーザーが使用可能となる。

そこで、本研究では、SWAT そのものを改良することを選択した。SWAT のマニュアルで水田に使用可能と記されている窪地 (pothole) 機能の適用を試みたが、現状では、表面湛水状態では降下浸透水が発生しないという問題が明らかとなった (Sakaguchi et al 2012a)。また、円錐型の pothole の形状を、直方体に変更し、基盤整備で作成される標準的な水田圃場サイズに設定し直す等の修正も必要であった。そこで、モデル内のアルゴリズムを修正し、灌漑期には浸透水量が増加すること、中干し期や非灌漑期には畑地と同じような状況になること等を表現できるようにした (Sakaguchi et al 2012b)。

水田流域用に改良した SWAT モデルを適用する流域として、愛知県の阿羅田川流域を選定した。この川は、閉鎖性水域である三河湾に流入する梅田川の支流である。流域面積は 3.2 km²、台地上には野菜畑 (キャベツ、茶等) が広がり (流域面積の 54%)、河川沿いには水田 (同 17%) が分布する (糟谷ら 2010)。土壌は、細粒質の赤黄色土が主体である。流域外からは、豊川用水の灌漑水が供給され、畑地灌漑と水田灌漑 (+水路維持のための放流) の両方に使用されている。また、牛、豚、鶏を飼養する畜産事業所が複数存在する。

SWAT モデルを適用するにあたり、できるだけ現実に近い条件でのシミュレーションが可能となるように、一般的に入手可能な GIS 情報に加えて、現地調査等に基づき、流路の壁や底の性状、川幅や深さの実測、分水工の分布、排水路網の設定、豊川用水の日供給水量データ、畑地灌漑と水田灌漑の分配量の推定、この地域における水稻の栽培暦や表面湛水深さの基準値、地下水位の実測値、深層までの地質構成や水理学的パラメータ、日本の

農地土壌の物理的性質データベース SolphyJ (江口ら 2011) 等を整備した。これらのデータは、対象流域が小さいほど、モデル予測結果に大きな影響を及ぼす。また、この流域では 10 分間隔での降雨データが実測されていたことから、畑地からの表面流出計算には GA 法を適用した。

図 6 は、阿羅田川流域末端における河川水流量の実測値と、キャリブレーション期間における SWAT 改良前・

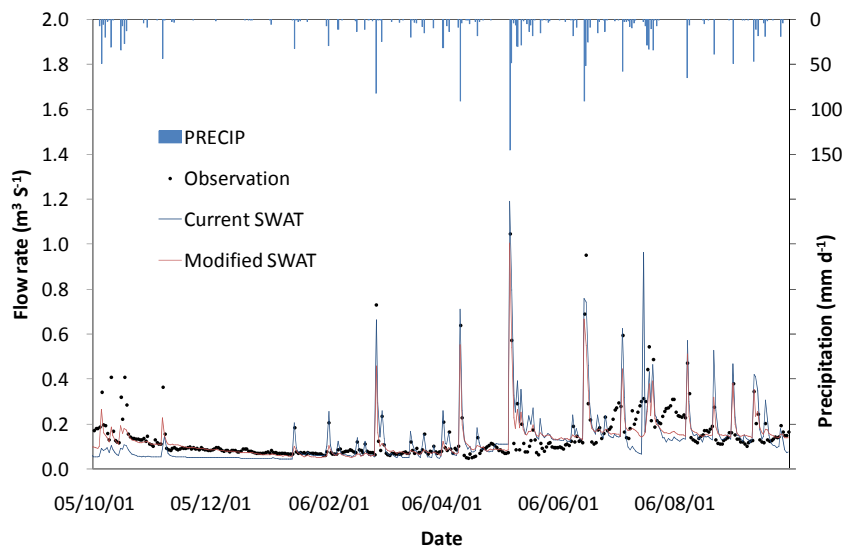


図 6 阿羅田川の河川水流量の実測値と、キャリブレーション期間における SWAT 改良前・後の予測値との比較 (Sakaguchi et al 2012b)

後のモデル予測値との比較結果である。現状の SWAT モデルによる NSE 値は 0.51 であったが、改良後は、特に基底流量の再現性が向上し、NSE 値は 0.77 まで上昇した。

現在、水田 pothole についてさらなる改良を実施すると共に、改良 SWAT モデルのバリデーションを実施中である。また、水田 pothole からの懸濁物質の流出を表現するための簡便な式の検討とアルゴリズムの構築を試みている。栄養塩類動態の予測はその次のステップとなるが、水田流域の水動態が現実に近いアルゴリズムによって表現できるようになったことは、大きな進歩と考えている。水田流域の水・栄養塩類動態予測に適用可能な SWAT 改良版 (SWAT-paddy?) (表 1) の構築を目指すと共に、特にモンスーンアジア地域の SWAT ユーザーに広く使ってもらえるような、汎用性の高いモデルを目指したい。

参考文献

- 1) Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. 1998. Large area hydrological modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73–89
- 2) 江口定夫, 青木和博, 神山和則. 2011. 日本の農地土壌の物理的性質データベース SolphyJ の作成. 農業環境技術研究所平成 22 年度研究成果情報第 27 集. Available online at http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result27/result27_60.html
- 3) 江口定夫. 2012. 水田以外の農地及び農業流域からの流出負荷量の実態と検討課題. 平成 23 年度環境省環境総合推進費 [RFb-11T1] 「非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究」成果発表会, 2012 年 12 月 13 日, 東京
- 4) Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(4):1211–1250
- 5) Green WH, Ampt GA. 1911. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4(1):1–24

- 6) Hao F, Zhang X, Wang X, Ouyang W. 2012. Assessing the relationship between landscape patterns and nonpoint-source pollution in the Danjiangkou Reservoir basin in China. *Journal of the American Water Resources Association* 48(6):1162–1177
- 7) Kang MS, Park SW, Lee JJ, Yoo KH. 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing paddy fields. *Agricultural Water Management* 79(1):72–92
- 8) Kannan N, White SM, Worrall F, Whelan MJ. 2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-2000. *Journal of Hydrology* 332(3-4):456–466
- 9) 糟谷真宏, 坂西研二, 板橋直, 荻野和明, 廣戸誠一郎. 2010. 畜産業を伴う赤黄色土野菜畑地帯の河川における窒素、リンの流出. *日本土壌肥料学雑誌* 81(5):481–488
- 10) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部. 2012. 平成 24 年版日本の水資源. Available online at <http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/H24/index.html>
- 11) Main RG, Larson CL. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9(2):384–394
- 12) Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 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
- 13) Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):282–290
- 14) Nearing MA, Liu BY, Risse LM, Zhang X. 1996. Curve number and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resources Bulletin* 32(1):125–136
- 15) Rossi CG, Srinivasan R, Jirayoot K, Le Duc T, Souvannabouth P, Binh N, Gassman PW. 2009. Hydrologic evaluation of the lower Mekong River basin with the Soil and Water Assessment Tool model. *International Agricultural Engineering Journal* 18(1-2);1–13
- 16) Sakaguchi A, Eguchi S, Kasuya M. 2012a. Applying SWAT to a watershed containing paddy fields with soil-profile physical properties dataset. 2012 International SWAT Conference, 16–20 July 2012, Delhi, India
- 17) Sakaguchi A, Eguchi S, Kato T, Kasuya M. 2012b. Verifying and modifying SWAT for modeling hydrological processes in a watershed containing paddy fields. MARCO Symposium 2012, 24–27 September 2012, Tsukuba
- 18) United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. *National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4–10*
- 19) Xie X, Cui Y. 2011. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice. *Journal of Hydrology* 396(1-2):61–71