

水文流出モデルを用いた流域からのリン流出量推定の現状と課題

Estimations of phosphorus flux from a watershed, using hydrological models: overviews

清水 裕太^{1*}・小野寺 真一²
Yuta SHIMIZU^{1*} and Shin-ichi ONODERA²

¹ 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター
日本学術振興会特別研究員 PD

² 広島大学大学院 総合科学研究科

¹ National Agriculture and Food Research Organization,
Western Region Agricultural Research Center, JSPS Research Fellow

² Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

摘 要

本稿では、水文流出モデルを用いた流域からのリン流出量推定の現状と課題について整理することを目的に、農業流域・都市流域・山地流域における既往研究のレビューを行うとともに SWAT (Soil and Water Assessment Tool) の中山間地流域への適用を行った。この結果、市街地においては点源負荷の見積り方法を確立することが必要であること、山地・中山間地流域においては実測データ不足のためモデルパラメータの検証が不十分であり、森林の樹木の生育や林床の植生などに改善すべき点があることが示された。

キーワード：水文流出モデル, SWAT モデル, 物質輸送, 流域スケール, リン

Key words : Hydrological models, Soil and Water Assessment Tool,
Material transportation, Watershed scale, Phosphorus

1. はじめに

流域からのリン(P; Phosphorus)流出量を推定する方法の一つとして、水文流出モデルが世界各地で用いられている。水文流出モデルは、流域内の面源負荷、点源負荷、河道から発生したリン流出量及びその寄与率の推定や、シナリオ解析による流域からのリン流出量を削減するための対策の評価、流域内のリン発生源のホットスポットを突き止めることなどに使用されている。1992年から2010年までの論文から、合計494流域を扱う257本の文献を整理した Wellen ら¹⁾のレビューによると、面源負荷推定に関する研究の多くは米国や欧州で行われ、そのほとんどが農地を対象としており森林や都市を対象とした事例は少ない。これは、窒素(N)、リン等の栄養塩類を扱うモデルの多くが、農地など面源からの過剰な窒素、リン負荷を低減させるために最適な土地管理手法を提案し、それを評価することを目的として開発されたからである。また、Wellen ら¹⁾によるレビューの結果、約半数の研究が硝酸態窒素(NO₃-N)や土砂流出量を推定しているのに対して、総リンの推定については全体の38%に、溶存態リンについては17%に、懸濁態リンについては6%に留まってお

り、リンを扱った研究事例は比較的少ない。また、水文流出モデルを用いてリン流出量を推定する場合、対象とする空間スケール及び時間スケールに応じて適切なモデルを選択する必要がある。例えば、圃場スケールを対象とする場合、農地や小流域スケールを対象とする場合、そして流域スケールを対象とする場合では適切なモデルはそれぞれ異なる。同様に時間スケールについても、年間の流出量を推定するのか、それとも出水イベントを対象とするのか、目的に応じた計算の時間単位によって選定する必要があるが、これまでに開発されたモデルの数は膨大であり全てを把握することは困難である。

そこで本稿では、比較的多く用いられている水文流出モデルについて、流域からのリン流出量推定の現状と課題を整理することを目的とする。具体的には、農業流域・都市流域については既往研究のレビューを行い、研究事例の乏しい山地・中山間地流域については実際の解析を交えながら課題の整理を試みる。

2. 農業流域・都市流域への適用における現状と課題

これまで多くのモデルが開発され、それぞれのモ

受付：2015年2月3日，受理：2015年4月29日

* 〒721-8514 広島県福山市西深津町6-12-1, e-mail: shimizuy@affrc.go.jp

表1 水文流出モデルの比較.

Model	Time step	P fraction	Type	Data required
Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	Daily	Organic P, Inorganic P	Process-based	High
Hydrological Simulation Program – Fortran (HSPF)	Sub daily	Particulate P, Dissolved P	Process-based	Medium
Annualized AGRicultural Non-Point Source (AnnAGNPS)	Daily	Sediment attached P, Dissoluble P	Process-based	High
Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model-NP (HBV-NP)	Daily	Organic PP (plankton, bacteria), Inorganic PP (absorbed to sediment), SRP	Process-based	High
The Integrated Catchment model of phosphorus dynamics (INCA-P)	Daily	PP, TDP	Process-based (simple)	High
GROWA/MEPhos	Annual	TP	emissions-oriented	Low

デルの比較も行われてきたが²⁾⁻⁷⁾、いくつか具体的なモデルを表1に示す。1992年から2010年の間において流域の栄養循環を扱ったモデルとして最も多く使われていたモデルはSoil and Water Assessment Tool (SWAT)⁸⁾で、次にIntegrated Catchment Model (INCA)⁹⁾、Agricultural Non-Point Source Pollution Model (AGNPS) / Annualized AGRicultural Non-Point Source model (AnnAGNPS)¹⁰⁾、Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)¹¹⁾、Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model (HBV)¹²⁾であった¹⁾。Nasrら¹³⁾によると、農業流域においてリン流出量を日単位で推定する場合には、HSPFは日平均流量を最も良く再現したが、リンの日流出量はSWATの方が妥当な結果を出力することが示された。また、リンの流出量に強く関連する土砂流出量の推定において、AnnAGNPSは、夏季の集中豪雨のようなイベントスケールの短い期間における土砂流出量の推定は良く見積ることができるが、流域スケールで地下水流出量が卓越するような流域におけるリンの流出量の推定には向かないという指摘もあり¹⁴⁾、AnnAGNPSよりもSWATの方が妥当な結果を示す可能性が高い¹⁵⁾。農業流域における面源負荷の推定にはSWATが、農地と市街地が混在する流域ではHSPFが適しているという報告もある⁶⁾。

ただし、リンの年間流出量の定量評価についてGROWA/MEPhos (GROWA; Großräumiges Wasserhaushalts modell/MEPhos; Modell zur Ermittlung des Phosphateintrags aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer)¹⁶⁾及びSWATの比較を行ったGuseら¹⁶⁾の事例によると、GROWA/MEPhosではリン負荷源の65%が市街地からの点源負荷であると見積られたのに対し、SWATでは60%が農業地域からの土壌浸食によるものであると見積られ、SWATによって推定された浸食による年間平均のリンインプット量はGROWA/MEPhosによって推定された値と比較して約6倍も多い結果となった。これはモデルの概念が異なることが要因であったが、SWATでも点源負荷を考慮す

ることで改善できる余地がある。しかし、流域内に複数存在する点源負荷については、ユーザーが実測値又は原単位法等による推定値を与えるという方法となる。これらの場合、前者では流域内の全てを網羅することは困難であること、後者では降雨時の流出量変化を考慮することができないことなど課題が残る。特に合流式下水道が残る市街地を含む流域を対象とする場合、豪雨時の未処理水放流によるリン負荷を土壌浸食によって再現してしまう可能性があるため注意が必要であり、今後の重要な課題の一つとして考えられる。また、これに関連して、平水時の溶存態リンの主要な負荷源が下水処理水である流域において、下水処理水を正しく考慮しない場合、モデルの再現性を示すNash-Sutcliffe係数¹⁷⁾及び決定係数 r^2 が0.2を超えることは稀であること¹⁸⁾や、不足したリン負荷を補うため河川へと流出する地下水中の溶存態リン濃度が上昇したこと¹⁸⁾が報告されている。都市と農地が混在する郊外農業流域では、溶存態リンの供給源として生活排水の占める割合が高まるため、これらを考慮することが重要であり、地下水や土壌水、下水道処理施設からの排水等の知見を蓄積する必要がある。以上のように、農業流域・都市流域へ水文流出モデルを適用する際の点源負荷に関する課題が確認された。農地が面源負荷の主要な発生源である農業流域では、農学研究者らによって圃場スケールでの土壌特性や流出量等の実測データが比較的揃っている場合もあり、現時点では、点源負荷の存在を考慮することが可能で、かつ農業活動を細かく入力できるSWATに優位性があると考えられる。

3. 山地・中山間地流域への適用における現状と課題

日本のように森林が多い流域においても面減負荷を評価することは重要であるが、いくつか課題も見受けられる。SWATは実測値の乏しい流域において長期間のリン流出量を妥当に推定できる¹⁹⁾ことや、植林、伐採、山火事などを考慮できる点で有用であ

るが、日本のような地形、土壌、地質、降水量など自然要因のみでも複雑性の高い流域への適用例は多くはない。例えば、流域の大半を森林が占める斐伊川流域(島根県・鳥取県)²⁰⁾や旭川流域(岡山県)²¹⁾に適用した事例があるが、森林からのリン流出量の検証は十分とはいえない。特に、日本の国土面積の7割以上を占める中山間地域では²²⁾、今後、高齢化に伴う耕作放棄地の拡大により、流域からのリン流出量が増加する可能性が考えられることから、中山間地域の大部分を占める森林からのリン流出量を検証し、推定精度を向上させることは、流域からのリン流出量の将来予測を行ううえで重要である。そこで、広島県及び岡山県の県境を流れる高梁川水系小田川上流域(117.43 km²; 図1)を対象にSWATを用いた解析を行い、課題について整理をする。

ここではSWAT version 2012 Rev632を使用した。SWATは、Hydrologic Response Unit (HRU, 水文学的反応単位)と呼ばれる土地利用、土壌及び斜面勾配が同じと見なせる単位をもとに計算を行い、サブ流域と呼ばれる支流域ごとに集計し、途中、河道内でのプロセスを経て、流域最下流からの流出量を見積っている。本研究では、対象流域を九つのサブ流

域に分割し、合計211個のHRUを作成し計算を行った。詳細な計算概念や計算式についてはSWATのマニュアル⁸⁾や関連する論文²³⁾を参照していただきたい。パラメータのキャリブレーション(校正)及びヴァリデーション(検証)を行い、流量、土砂、リン濃度についてMoriassiら²⁴⁾を参考に客観的な再現性を示す統計指標を用いて評価したところ、それぞれ満足できる結果であった。計算結果では、平均で約9%のリンが河道内で堆積作用によってトラップされる傾向を示し、特に比較的平坦な北西部の上流域において、リンのトラップ率が高い傾向を示した。北西部の上流域の低地沿いの水田や畑地、そして周辺部の傾斜地上の荒地からのリン流出量は比較的多い結果を示した(図2)。

また、北東部の支流では、水田、畑地、荒地、森林からのリン流出量が多く、本流への影響が強いことが明らかとなった。土地利用別のリンの面積あたりの年間平均流出量は、畑地で11.2 kg/ha/yr、荒地で11.1 kg/ha/yr、水田で平均9.6 kg/ha/yr、森林で3.9 kg/ha/yr、市街地で3.4 kg/ha/yrと見積られた。流域の大半を占める森林は比較的低い値を示したが、流域からの正味のリンの年間平均流出量は26.9 Mg/yr

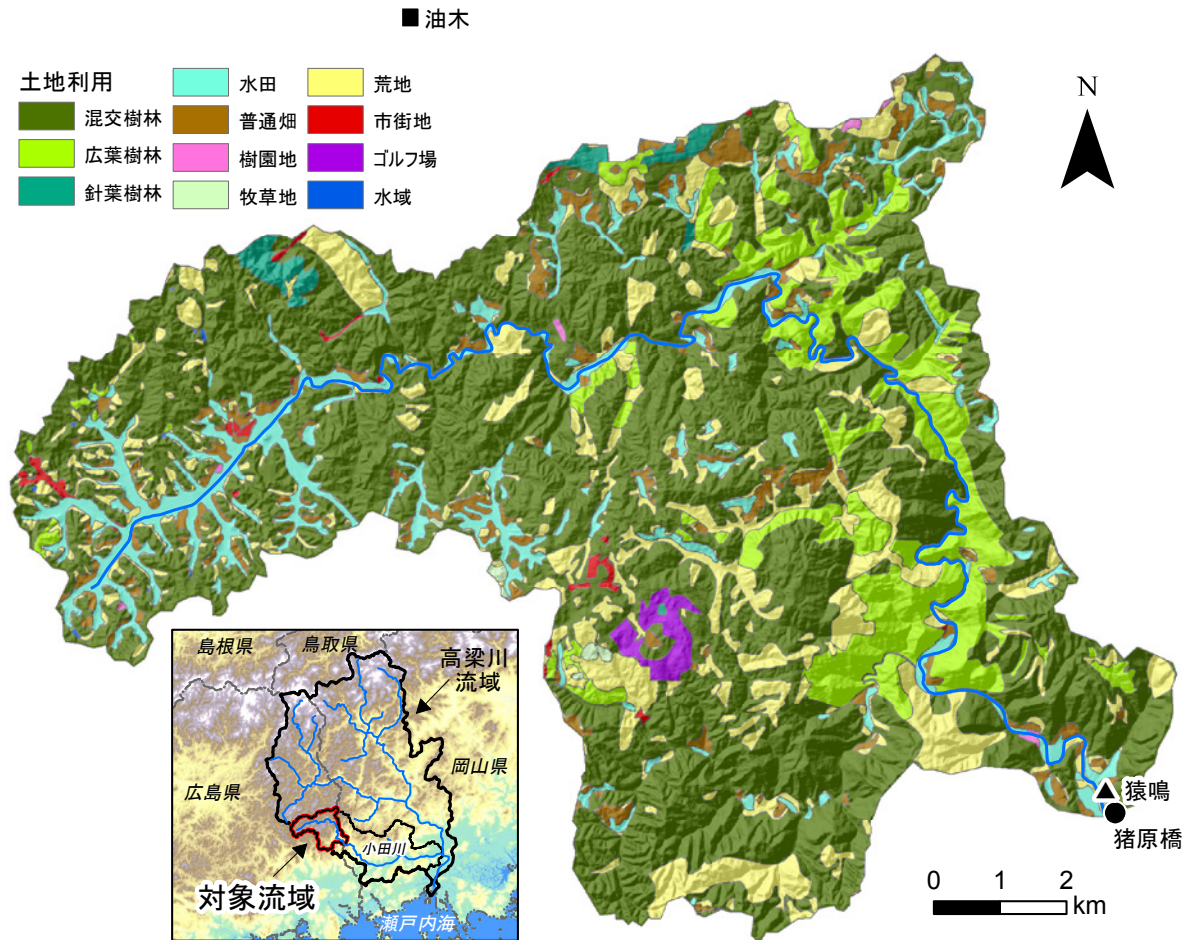


図1 対象流域の土地利用。

(■: 気象観測所, ▲: 流量観測所, ●: 水質観測所)

1/50,000 植生調査(第2~5回)広島県 GIS データ(環境省自然環境局生物多様性センター)及び日本水土図鑑 GIS データ(一般財団法人日本水土総合研究所)を加工したものである。

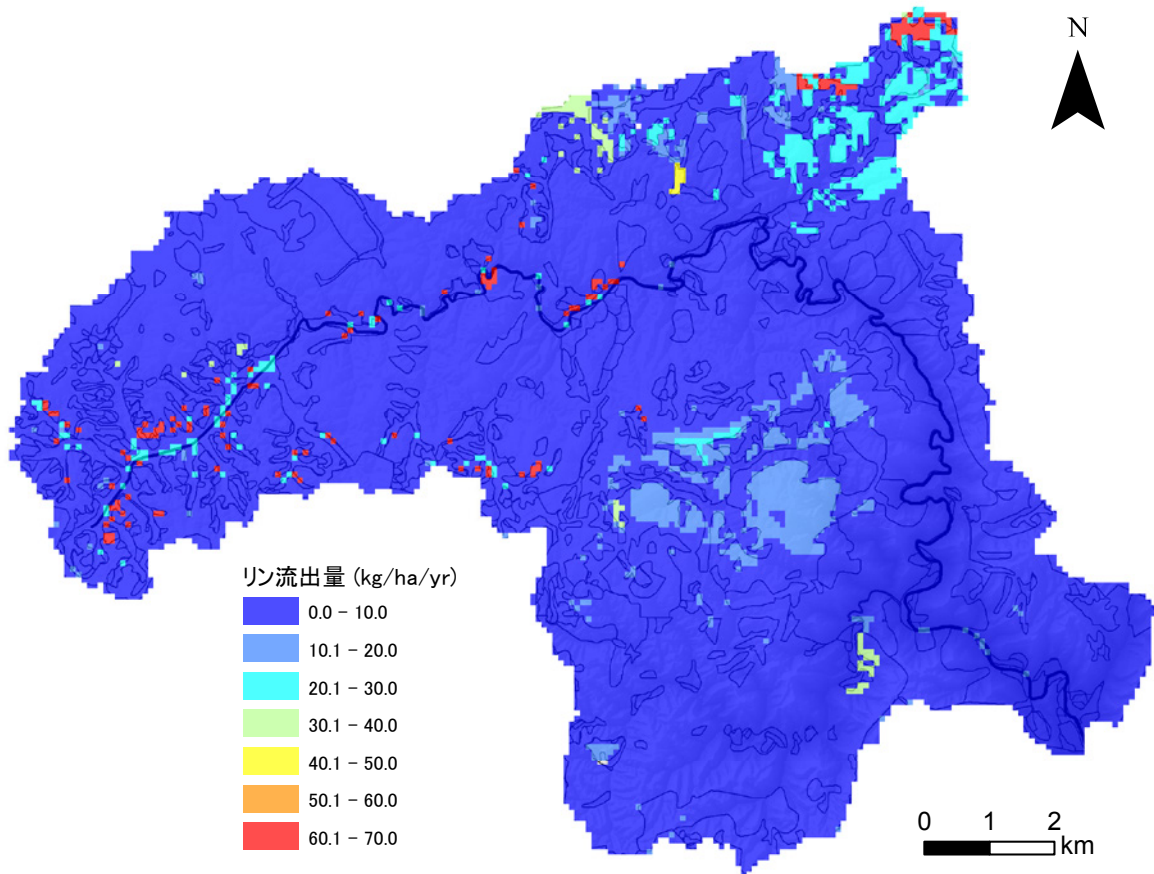


図2 SWATによって推定されたリンの年間平均流出量の空間分布。

と見積られ、その約6割が森林から発生したと推定された。面積が広いため森林から多くのリンが流出する結果となり、これは前述した事例^{20), 21)}と同様の傾向であった。

ただし、この結果については実際にこのような大量のリンが森林から流出するのかどうかには疑問が残る。山地流域や中山間地流域では、山林や荒地などにおける実測データが乏しく、山地源流域や斜面スケールでの土砂、リン流出量の検証が難しいためである。森林からのリン流出量の推定精度を上げるためには、今後さらなる知見を蓄積するとともに、関連する既往論文及び公開できる観測データの共有に向けたデータベースの構築が望まれる。一方、モデルの構造による問題としては、土壌中のリンのプール間の平衡時間に課題が見られることや²⁵⁾、森林としての土地利用は下草などが生えていない単一種の樹木のみでの扱いであること²⁶⁾、土砂流出時のリン流出量が過大に見積もられる可能性があること¹⁶⁾などが指摘されている。また、樹木は積算温度の年間上限値に達するとその年の生育が止まること、樹木の生育に関するパラメータのデータベースが少ないことも課題であると考えられる。

SWATを含む多くの水文流出モデルは、開発の趣旨が異なることから地質は考慮しておらず、地質由来のリンが卓越するような自然流域においては、地下水中のリン濃度のパラメータを調整することにな

る。しかし、人間活動による負荷が非常に小さい山地・中山間地流域では前述した Jackson-Blake ら¹⁸⁾が指摘したように、キャリブレーション時において実測値とあわせるために地下水中のリン濃度を調整しないように注意しなくてはならない。

以上のことから、山地・中山間地流域からのリン流出量の推定に水文流出モデルを用いる際の問題点として、実測データが乏しいこと、モデル構造に不足があることが示された。もともと農地や市街地からの面源負荷を推定するために開発されたものが多いため、森林については樹木の生育や林床の植生の考慮などに課題が見られた。これに対して、光競合モデルを用いた生育に及ぼす雑草や間作の影響を推定することができる植生モデル Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria (ALMANAC)²⁷⁾と SWAT の連結による改良が一つの案として提案されているが²⁶⁾、地形など自然条件が複雑な日本の流域への適用に向けた検証や、別の手法による森林内の植生に関するプロセスの改善も今後必要とされるであろう。

4. まとめ

本稿では、水文流出モデルを用いた流域からのリン流出量推定の現状と課題の整理を目的とした。その結果、農業流域・都市流域への適用における課題

として、市街地からの点源負荷を考慮しない場合、再現性が向上せず、地下水など他のパラメータに影響を及ぼすことから、正しく見積る方法を確立することが必要であることが示された。また、山地・中山間地流域への適用における課題として、実測データの不足と森林の生育プロセスや林床の小草等を考慮していない点において改善が必要であることが示された。今後は、モデル内のプロセスの改良とともに、データ不足を補うために既往論文及び公開できる観測データの共有に向けたデータベースの構築が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は独立行政法人日本学術振興会 科学研究費補助金特別研究員奨励費(課題番号:13J07499, 代表者:清水裕太), 若手研究(B)(課題番号:26870837, 代表者:清水裕太)及び基盤研究(A)(課題番号:25241014, 代表者:福岡正人)による研究成果の一部である。また、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業センターの松森堅治上席研究員には農業に関する有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Wellen, C., A. R. Kamran-Disfani and G. B. Arhonditsis (2015) Evaluation of the current state of distributed nutrient watershed-water quality modeling. *Environmental Science & Technology*, 49, 3278-3290.
- Singh, V. (2012) Computer Models of Watershed Hydrology (second printing), Water Resource Publications.
- Singh, V. P. and D. K. Frevert (2006) *Watershed Models*. Taylor & Francis, CRC Press, 653.
- Radcliffe, D. E. and M. L. Cabrera (2006) Modeling Phosphorus in the Environment, CRC Press.
- Schoumans, O. F. and M. Silgram (eds.) (2003) Review and literature evaluation of quantification tools for the assessment of nutrient losses at catchment scale. EUROHARP report 1-2003, NIVA report SNO 4739-2003.
- Borah, D. K. and M. Bera (2003) Watershed-scale Hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE*, 46, 1553-1566.
- Vanderkruk, K., K. Owen, M. Grace and R. Thompson (2010) *Review of Existing Nutrient, Suspended Solid and Metal Models*, Australian Centre for Biodiversity and Water Studies Centre, Monash University.
- Arnold, J. G., J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney and S. L. Neitsch (2012) *Soil & Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012*.
- Wade, A. J., P. G. Whitehead and D. Butterfield (2002) The integrated catchments model of phosphorus dynamics (INCA-P), a new approach for multiple source assessment in heterogeneous river systems: model structure and equations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 583-606.
- Binger, R. L. and F. D. Theurer (2003) *AnnAGNPS Technical Processes: Documentation Version 3*.
- Johanson, R. C., J. C. Imho and H. H. Davis Jr. (1980) *User's Manual for Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF)*, United States Environmental Protection Agency Research, EPA-600/9-80-015.
- Andersson, L., J. Rosberg, B. C. Pers, J. Olsson and B. Arheimer (2005) Estimating catchment nutrient flow with the HBV-NP model: sensitivity to input data. *Ambio*, 34, 521-532.
- Nasr, A. E., M. Bruen, P. Jordan, R. Moles, G. Kiely and P. Byrne (2007) A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. *Water Research*, 41, 1065-1073.
- Kliment, Z., J. Kadlec and J. Langhammer (2008) Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models. *Catena*, 73, 286-299.
- Parajuli, P. B., N. O. Nelson, L. D. Frees and K. R. Mankin (2009) Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes*, 23, 748-763.
- Guse, B., A. Bronstert, M. Rode, B. Tetzlaff and F. Wendland (2007) Application of two phosphorus models with different complexities in a mesoscale river catchment. *Advances in Geosciences*, 11, 77-84.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Jackson-Blake, L. A., S. M. Dunn, R. C. Helliwell, R. A. Skeffington, M. I. Stutter and A. J. Wade (2015) How well can we model stream phosphorus concentrations in agricultural catchments? *Environmental Modelling & Software*, 64, 31-46.
- Gassman, P. W., M. Reyes, C. H. Green and J. G. Arnold (2005) SWAT peer-reviewed literature: a review. *Proceedings of Third International SWAT Conference*, 1-18.
- Somura, H., I. Takeda, J. G. Arnold, Y. Mori, J. Jeong, N. Kannan and D. Hoffman (2012) Impact of suspended sediment and nutrient loading from land

- uses against water quality in the Hii River basin, Japan. *Journal of Hydrology*, 450-451, 25-35.
- 21) Shimizu, Y., Onodera, S. and Saito, M. (2011) Effect of climate change on nutrient discharge in a coastal area, western Japan. *WATER QUALITY: Current Trends and Expected Climate Change Impacts*, 348, 172-177, International Association of Hydrological Sciences Publication.
- 22) 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.
- 23) 農水水産省(2014)中山間地域等直接支払制度の最終評価－参考資料.
 〈http://www.maff.go.jp/j/nousin/tyusan/siharai_seido/pdf/ref_data.pdf〉
- 24) Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900.
- 25) Chaubey, I., K. W. Migliaccio, C. H. Green, J. G. Arnold and R. Srinivasan (2006) Phosphorus modeling in soil and water assessment tool (SWAT) model. In: D. E. Radcliffe and M. L. Cabrera, eds., *Modeling Phosphorus in the Environment*, 163-188, CRC Press.
- 26) Kiniry, J. R., J. D. MacDonald, A. R. Kemanian, B. Watson, G. Putz and E. E. Prepas (2008) Plant growth simulation for landscape-scale hydrological modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 53, 1030-1042.
- 27) Kiniry, J. R., J. R. Williams, P. W. Gassman and P. Debaeke (1992) A general process-oriented model for two competing plant species. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 35, 801-810.



清水 裕太 / Yuta SHIMIZU

広島大学大学院総合科学研究科博士課程後期修了。博士(学術)。広島大学大学院総合科学研究科研究員を経て2013年より日本学術振興会特別研究員PD(国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター)。

専門は水文学, 自然地理学。現在は, 農業流域からの栄養塩類流出に関する研究を行っている。



小野寺 真一 / Shin-ichi ONODERA

広島大学大学院総合科学研究科教授。1992年に千葉大学で博士(理学)を取得。現在の専門は水文化学, 流域環境学。地下水や河川の流出とそれらの物質循環や生態系に及ぼす影響について, 陸域-海域を含む流域スケールを対象とした研究

を行っている。近年は, 特に地表水(海水を含む)と地下水が接する境界域における水輸送とそれともなう栄養塩(リン, 窒素など)の動態に注目している。著書は「Forest Hydrology and Biogeochemistry」(分担執筆, Springer)など。