

藻類増殖に影響を与える環境因子サブモデルに関する研究

研究代表者	秋葉 道宏
研究分担者	下ヶ橋雅樹
研究分担者	西村 修
研究分担者	浅田 安廣
研究協力者	佐野 大輔

厚生労働科学研究費補助金 (健康安全・危機管理対策総合研究事業)
気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価とその適応性の強化に向けた研究
分担研究報告書

研究課題：藻類増殖に影響を与える環境因子サブモデルに関する研究

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 生活環境研究部 特任研究官
研究分担者 下ヶ橋雅樹 叡啓大学 ソーシャルシステムデザイン学部 教授
研究分担者 西村 修 東北大学大学院 工学研究科 教授
研究分担者 浅田 安廣 国立保健医療科学院 生活環境研究部 主任研究官
研究協力者 佐野 大輔 東北大学大学院 工学研究科 教授

研究要旨

水道水源における藍藻類個体数予測モデルを構築するために必要となる水源での河川流量や水温、栄養塩等のミクロな環境変化を予測する数理モデルの構築を、奈良県の室生ダム貯水池流域を対象として、準分布型水文水質モデル Soil and Water Assessment Tool (SWAT) のうちの SWAT+、ならびに QSWAT+を用いて行った。特に本年度は同貯水池の流入河川流量予測手法を確立するとともに、水温および栄養塩の予測についても予備的な検討を行った。地形や土地利用に関しては国土数値情報、局所的な気候や土壌に関しては農研機構の情報をもとに動力学的パラメータや計算の環境条件を決定した。室生ダム貯水池への流入水量（独）水資源機構）に対する予測性を、3つのモデル性能指標（Nash-Sutcliffe efficiency、RSR、および PBIAS）を用いて評価しつつ、地下水と表流水の交換にかかわる2つのパラメータの補正を行った。結果として、室生ダム貯水池への流入量の基底流量に関しては良好な予測を与えるシミュレーションを行うことができた。一方ピーク流量については過小評価傾向にあった。河川水温については夏期に過小評価する結果となり、より詳細な水温予測手法の導入の必要性がうかがえた。室生ダムへの流入河川の栄養塩（各態の窒素及びリン）濃度について、特に各態窒素濃度予測に関しては施肥や植生等を考慮した抜本的な検討を行う必要があることがわかった。

A. 研究目的

水道水源で発生する藍藻は異臭味等の生物障害の原因となり、数理モデルを用いた発生量予測が水道運用上重要となる。一方、水道水源における藍藻類個体数予測モデルを構築するためには、その水源将来の気候変動のもとでの藻類増殖に影響を与える河川流量や水温、栄養塩等の環境因子の予測が必要である。本研究では気候モデル MIROC5 等による気象予測から、水源での河川流量や水温、栄養塩等のミクロな環境変化を予測する数理モデル手法を開発し、将来的な気候変動に伴う水源での藍藻類の発生予測に資する情報を与えることを目的とする。本年度は奈良県の室生ダム貯水池流域を対象とし、準分布型水文水質モデルを用いて同貯水池の流入河川流量予測手法を確立するとともに、水温および栄養塩の予測についても予備的な検討を行い、今後の展望を考察した。

B. 研究方法

研究の対象とした室生ダムは北緯 34 度 33 分 19 秒、東経 136 度 00 分 25 秒に位置するダムであり、流域面積は 169 km² (直接: 136 km², 間接: 33 km²) である [1]。今回の水文水質モデルは、室生ダム貯水池（室生湖）に流入する宇陀川、天満川、宮川、及び深谷川（図 1）本川とその支流、およびそれ

ぞれの流域を対象とした。

水文水質モデルは、テキサス農工大及び米国農務省の開発した Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [2]のうちの SWAT+ [3]、ならびに QGIS 用インターフェースである QSWAT+ [4]を使用した。SWAT+は SWAT [5]の revise 版である。

SWAT+の計算で必要となる標高データ（50m メッシュ標高）は日本地図センター [6]から購入した。土地利用に関する情報は国土数値情報 [7]から「土地利用細分メッシュ」（平成 28 年、世界測地系、メッシュコード 5135 及び 5136）（識別子 L03）を入手して使用した（図 2）。土壌に関する情報として、まず縮尺 20 万分の 1 土壌図 [8,9]を用いて土壌の水平分布を決定した（図 3）。ついで、それらの土壌に近いものを土壌断面 DB [10]及び国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）のデータベース SolphyJ [11]から選択し、それらの値を参照しながら、SWAT+で用いられるパラメータ（SCS Curve Number にて参照される土壌の水文グループ、各層の土壌のかさ密度、利用可能水分量（AWC）、飽和透水係数、有機炭素含量、粘土・シルト・砂・岩の存在比）を決定した。決定に際してはできるだけ流域内の土壌に近

いものを選択して使用した。根圏深 (root zone depth) は流域内で一律 1,500 mm とし、それ以上深い層を deeper zone とした。上記データベースで入手できなかった値は、SWAT+に具備されている例 (エチオピアの Robit) の値を暫定的に用いた。その他のパラメータは SWAT+で初期に入力されているパラメータを用いた。

気候データは農研機構のメッシュ気象データ [12]から、流域内の代表的な 5 地点 (

図 4) の 2012 年 1 月 1 日~2017 年 12 月 31 日の期間の日々の日最高気温、日最低気温、降水量、相対湿度、日射量、風速のデータを入手して使用した。流域と河川流路はそれぞれ国土数値情報 [7]の「河川」(識別子 W05)、「流域界・非集水域」(識別子 W12)を使用した。地理情報システムの解析は Arc GIS Pro Ver. 3 (ESRI ジャパン) ならびに QGIS Ver 3.22 [13]を使用した。

SWAT+の計算結果の検証は室生湖の流入水量 (独) 水資源機構提供) を使用した。モデルの予測性評価には、Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (式 (1))、RSR (式(2))、および PBIAS (式(3)) のモデル性能指標を用いた [14]。

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

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

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right) \quad (3)$$

ここで、 Y_i^{obs} は i における観測値、 Y_i^{sim} は i における計算値、 Y^{mean} は観測値の平均値、 n は観測数を示す。NSE は残差の分散 (ノイズ) と測定データの分散 (情報) の相対的な大きさを示す正規化された統計指標であり、観測値と計算値のプロットが 1:1 の直線にどれだけフィットするかを示す [14]。RSR は、一般に使用される誤差指標 2 乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) と観測値の標準偏差の比である [14]。PBIAS は計算値が観測値より大きいか小さいかの平均的な傾向を示す [14]。なお、これらの値に関しての予測性評価基準は表 1 [14]の通りである。モデル予測性において表流水と地下水の交換は重要な役割を担う。SWAT+における地下水の動きに関するいくつかの式は以下のとおりである [5]。

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (4)$$

$$w_{deep} = \beta_{deep} \cdot w_{rchrg} \quad (5)$$

$$w_{rchrg,sh} = w_{rchrg} - w_{deep} \quad (6)$$

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad (7)$$

$$\frac{dh_{wtbl}}{dt} = \frac{w_{rchrg,sh} - Q_{gw}}{800 \cdot \mu} \quad (8)$$

$$\frac{dQ_{gw}}{dt} = 10 \cdot \frac{K_{sat}}{\mu \cdot L_{gw}^2} \cdot (w_{rchrg,sh} - Q_{gw}) = \alpha_{gw} \cdot (w_{rchrg,sh} - Q_{gw}) \quad (9)$$

ここで、 $aq_{sh,i}$ は i 日に浅い帯水層 (shallow aquifer) に蓄えられている地下水 [mm H₂O]、 $w_{rchrg,sh}$ は i 日に浅い帯水層に再充填される地下水 [mm H₂O]、 w_{rchrg} は浅い帯水層と深い帯水層 (deep aquifer) の両方に再充填される地下水 [mm H₂O]、 Q_{gw} [mm H₂O] は地下水から河川への再流入、 w_{revap} は水不足に起因して土壌ゾーンに戻る水 [mm H₂O]、 $w_{pump,sh}$ は i 日にポンプアップにより浅い帯水層から採取される水、 w_{deep} は i 日に深い帯水層に移動する水 [mm H₂O]、 β_{deep} は帯水層の浸透に関する係数、 K_{sat} は帯水層の透水係数 [mm/day]、 L_{gw} は地下水系の尾根や小流域の分水嶺から本流までの距離 [m]、 h_{wtbl} は地下水位の高さ [m]、 μ は浅い帯水層の比収率 [m/m]、 α_{gw} は基底流の後退係数 [1/day] である。

本研究ではモデル予測性向上のために、上記の β_{deep} および α_{gw} の補正を行った。なおこの 2 パラメータについては SWAT+では双方ともに初期値として 0.05 が与えられている。

また、SWAT+では、水温や各態窒素、リンの流出量が計算される。今回の検討では水温や各態窒素、リンについては補正を行わなかったが、水温については出力結果を高倉橋及び室生路橋 (

図 4) の水温と比較した。各態窒素やリンの流出量 [kg/day] は、その河川の流量で除することで濃度に換算し、国土交通省水文水質データベース [15]から入手した水質データと比較し、予測の程度を確認した。

C. 研究結果

SWAT による河道と流域作成

SWAT+で、まずデジタル標高 (本研究では 50 m メッシュ標高) を入力して河川及び流域を計算した。図 5 は SWAT+での計算の結果得られた流域、及び河川国土数値情報から描画した流域及び河川を示す。図より、今回 SWAT+で作成した室生ダム流域の支流と河川は国土数値情報のそれとほぼ一致し、その妥当性が確認された。また SWAT+では同流域内に 18 の支流が設定されたが、それぞれの番号を図 5 に示している。

河川流量

前述「B. 研究方法」に記載の手順によって決定されたパラメータならびに SWAT+の初期パラメータを用いた際の河川流量の計算結果を図 5 に示す。まず、PBIAS が負であることから、全体として過大評価の傾向にあった。また日々の計算結果から、流出ピーク位置についてはある程度予測

されているが、ピーク高さは過小評価となった。河川流量のシミュレーション予測性を向上させるため、前述の地表流と地下との交換に係るパラメータ β_{deep} および α_{gw} の補正を行った。まず β_{deep} を初期値の 0.05 から 0.1、0.2、0.5 と変化させた場合の計算結果を図 7 に示す。図より、 β_{deep} が 0.5 となった場合に基底流量が十分に再現される結果となった。 α_{gw} を初期値の 0.05 から 0.1、0.2、0.5 と変化させた場合の計算結果を図 8 に示す。ピーク流量の予測性が若干向上したが、基底流量の予測性は向上しなかった。日々計算に関する各モデル性能指標とパラメータ値の関係を図 9 に示す。 β_{deep} に関しては、NSE および RSR は 0.5 までの範囲で一樣に増加あるいは減少しているが、PBIAS は 0.5 では 0 を超えていた。以上より、今回行ったパラメータ調整の範囲では、 $\beta_{deep}=0.5$ で最もよい予測を与えるものと判断した。なお、そのときのモデル性能指標とその評価 (表 1 参照) は、NSE は日々予測で 0.705 (Good)、月平均予測で 0.606 (Satisfactory)、RSR は日々予測で 0.543 (Good)、月平均予測で 0.628 (Satisfactory)、PBIAS は日々予測で 17.1 (Satisfactory)、月平均予測で 0.561 (Very Good) であった。

水温

SWAT+では、以下の単純な線形式により水温を計算している。

$$T_{water} = 5.0 + 0.75T_{av} \quad (10)$$

ここで、 T_{water} は水温[°C]、 T_{av} は平均気温[°C]である。図 10 は今回の SWAT+ の出力値 (=式(10)による計算値) である。図より、冬期の低水温の予測は十分であると判断できるが、夏期の予測性が低い。特に 2014 年、2016 年の夏期水温が過小評価となった。

窒素、リン

今回のシミュレーションでは、栄養塩 (窒素、リン) に直接的に関係するパラメータの設定は行っておらず、SWAT+ の初期値 (あるいは Robit の値) を用いて各態窒素 (有機態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素)、および各態リン (有機態リン、溶存態リン) の流出量を計算した。流域 10 (図 5) の流出 (高倉橋付近) において、各態窒素、リンの合計流出量をその日の流出流量で除して求めた、各態窒素濃度を図 11、各態リン濃度を図 12 にそれぞれ示す。また、室生路橋および高倉橋の水質測定データ [15] を表 2 に示す。窒素に関しては実測値と比較して、2~4 桁低い計算結果 (平均値として有機態 N は 23.2 $\mu\text{g/L}$ 、 $\text{NO}_{2+3}\text{-N}$ は 0.09 $\mu\text{g/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ は 0.07 $\mu\text{g/L}$) となった。各態リンに関しては 3 倍程度の過大評価であった (平均値として有機態 P は 11.9 $\mu\text{g/L}$ 、溶存態リンは 9.3 $\mu\text{g/L}$)。

D. 考察

河川流量について、今回行ったパラメータ補

正では、基底流量が十分に再現されたといえる。しかしながらピーク流量の再現は十分とはいえず、今後その予測性を改善する必要がある。今回のパラメータ補正では、表流水と地下水の交換にかかわる 2 つのパラメータである β_{deep} 、あるいは α_{gw} をすべて流域全体で一括して変更し、表流水に与える影響をみた。より詳細なパラメータ補正には、各小流域のパラメータを個別に調整する必要や、これら以外のパラメータについても検討する必要がある。また土地利用は、河川流量のみならず窒素・リンの収支や水温にも影響を与える因子である。今回は SWAT に具備される土地利用パラメータを使用した。特に独特な水収支を行う水田や、森林植生の特徴を踏まえて、より詳細に検討する必要がある。

水温に関しては前述のとおり気温との簡単な線形関係式で求めている。結果として冬期の水温はある程度予測できたが、藻類増殖において重要な夏期水温に関して十分な予測は得られていない。SWAT における水温モデルの構築 (Ficklin et al. [16]) やそのパラメータ決定手法の検討 (Barnhart et al. [17]) 等を参考に、水温予測性の向上を図る必要がある。水田水収支に関しては SWAT-PADDY モデル [18, 19] 等を参考にモデルでの表現を検討する必要がある。

栄養塩について、リンに関してはある程度オーダーの予測が可能であったが、窒素については全く予測できていない状況であり、抜本的なパラメータ設定が必要である。Jung et al. [20] は窒素降下物の影響も含めて窒素動態を SWAT で検討したが、このような例を参考にしながら、今後窒素予測を可能とさせる必要がある。

E. 結論

SWAT+ を用いて、室生ダム流域の水文水質シミュレーションを実施した。室生湖への流入水について、基底流量に関しては良好な予測を与えるシミュレーションを行うことができた。一方、ピーク流量については過小評価傾向にあった。同流入河川の水温、栄養塩についても予備的に検討を行った。水温については、気温からの簡単な線形式による推算では、冬期の水温はある程度予測できたが夏期に過小評価する結果となり、より詳細な水温予測手法の導入が望まれる。各態窒素及びリン濃度については SWAT+ での予測を確認したが、特に各態窒素濃度予測に関しては、施肥や植生等を考慮した抜本的な検討を行う必要がある。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1. 論文発表

該当なし

2. 学会発表
該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定も含む。)

1. 特許取得
該当なし

2. 実用新案登録
該当なし

3. その他
該当なし

I. 参考文献

- [1]一般財団法人日本ダム協会, ダム便覧2021 室生ダム [奈良県] (むろう) . Available from: <http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranA/All.cgi?db4=1568>
- [2] Texas A&M University, Texas A&M Agrilife Research, and USDA Agricultural Research Service. The Soil & Water Assessment Tool. Available from: <https://swat.tamu.edu/>.
- [3] Texas A&M University, Texas A&M Agrilife Research, and USDA Agricultural Research Service. SWAT+. Available from: <https://swat.tamu.edu/software/plus/>.
- [4] Dile, Y., R. Srinivasan, and C. George, QGIS Interface for QSWAT+. 2022.
- [5] Neitsch, S.L., et al., SOIL & WATER ASSESSMENT TOOL Theoretical Documentation Version 2009. 2011.
- [6] 地図センター Net Shopping. 数値地図 (国土基本情報) オンライン . Available from: https://net.jmc.or.jp/mapdata/gsi_online/dkg.html.
- [7] 国土交通省. 国土数値情報ダウンロードサイト. Available from: <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>.
- [8] 農研機構, 縮尺 20 万分の 1 土壌図. Available from: <https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/download20.html>
- [9] 小原洋他, 包括的土壌分類第 1 次試案に基づいた 1/20 万日本土壌図. 農環研報, 2016. **37**: p. 133-148.
- [10] 農研機構, 日本土壌インベントリー 土壌断面 DB. Available from: <https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/danmen.html>
- [11] 江口定夫, 青木和博, and 神山和則. 日本の農地土壌の物理的性質データベース SolphyJ. in H23 農業農村工学会大会講演会講演要旨集. 2011. 福岡県福岡市九州大学 50 周年記念講堂及び箱崎キャンパス.
- [12] 農業・食品産業技術総合研究機構. 農研機構 メッシュ農業気象データシステム. 2022. Available from: <https://amu.rd.naro.go.jp/>.
- [13] QGIS Association, QGIS Geographic Information System (Ver 3.22). Available from: <http://www.qgis.org>
- [14] Moriasi, D.N., et al., Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 2007. **50**(3): p. 885-900.
- [15] 国土交通省. 水文水質データベース. Available from: <http://www1.river.go.jp/>.
- [16] Ficklin, D.L., et al., Development and application of a hydroclimatological stream temperature model within the Soil and Water Assessment Tool. Water Resources Research. **48**(1): p. W01511.
- [17] Barnhart, B.L., G. Whittaker, and D. Ficklin, Improved stream temperature simulations in swat using NSGA-II for automatic multi-site calibration, Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2014. **57**(2): p. 517-530.
- [18] 土屋遼太, 加藤亮, ジェハクジオン. 持続的なコメ生産のための SWAT 水田モデルの改良と検証. in H28 農業農村工学会大会講演会. 2016. 仙台市.
- [19] Tsuchiya, R., et al., Development of SWAT-Paddy for Simulating Lowland Paddy Fields. Sustainability, 2018. **10**(9): p. 3246.
- [20] Jung, C.-G. and S.-J. Kim, SWAT Modeling of Nitrogen Dynamics Considering Atmospheric Deposition and Nitrogen Fixation in a Watershed Scale. Agricultural Sciences, 2017. **8**: p. 326-340.

J. 謝辞

本研究の遂行にあたり情報提供にご協力いただいた国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構様ならびに独立行政法人水資源機構様に、記して謝意を表します。

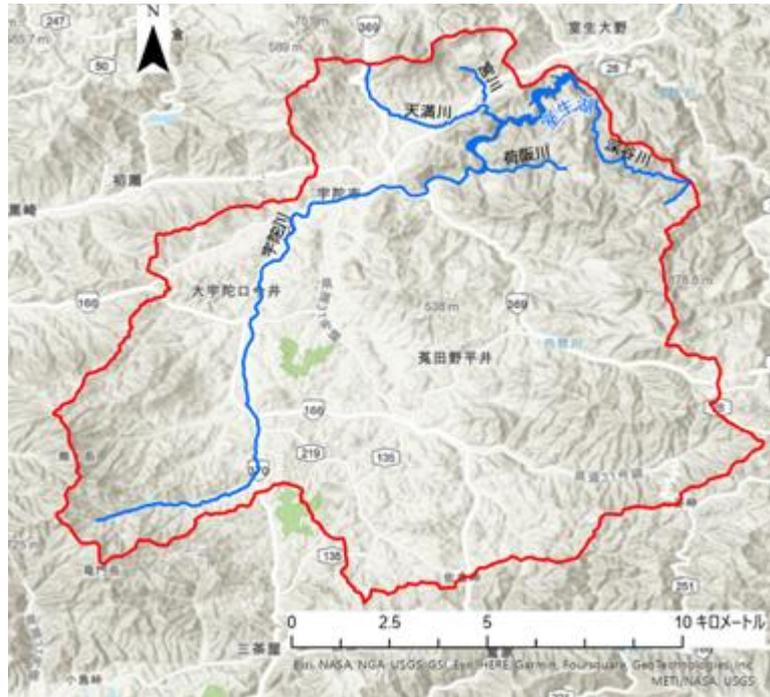


図 1 室生ダム（室生湖）流域と流入河川

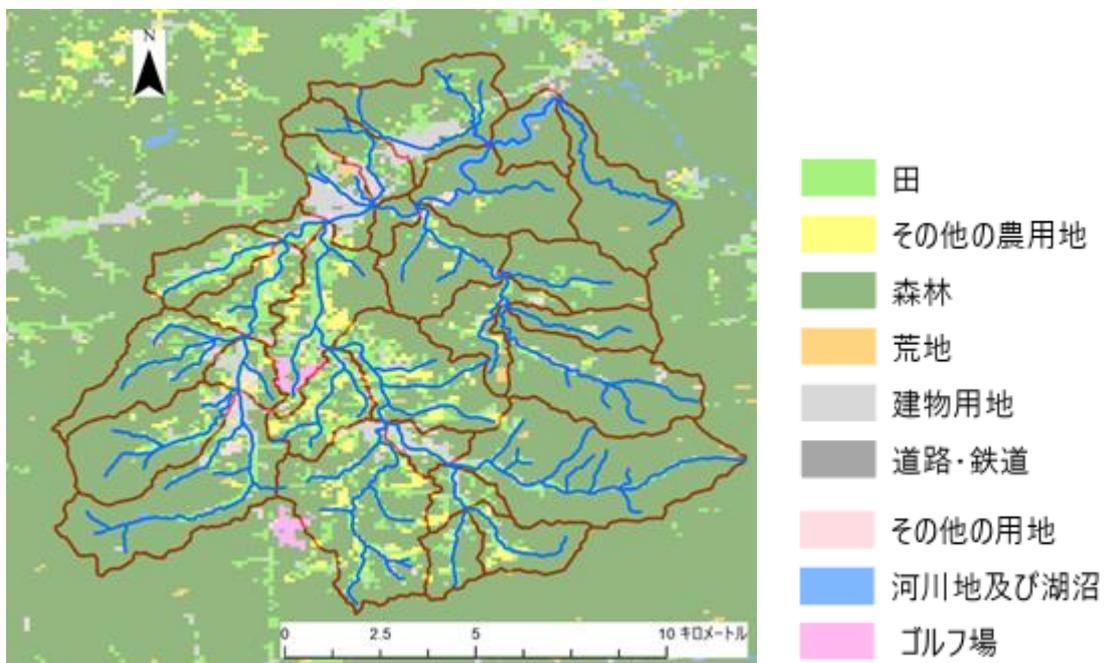


図 2 室生ダム流域の土地利用 [7]

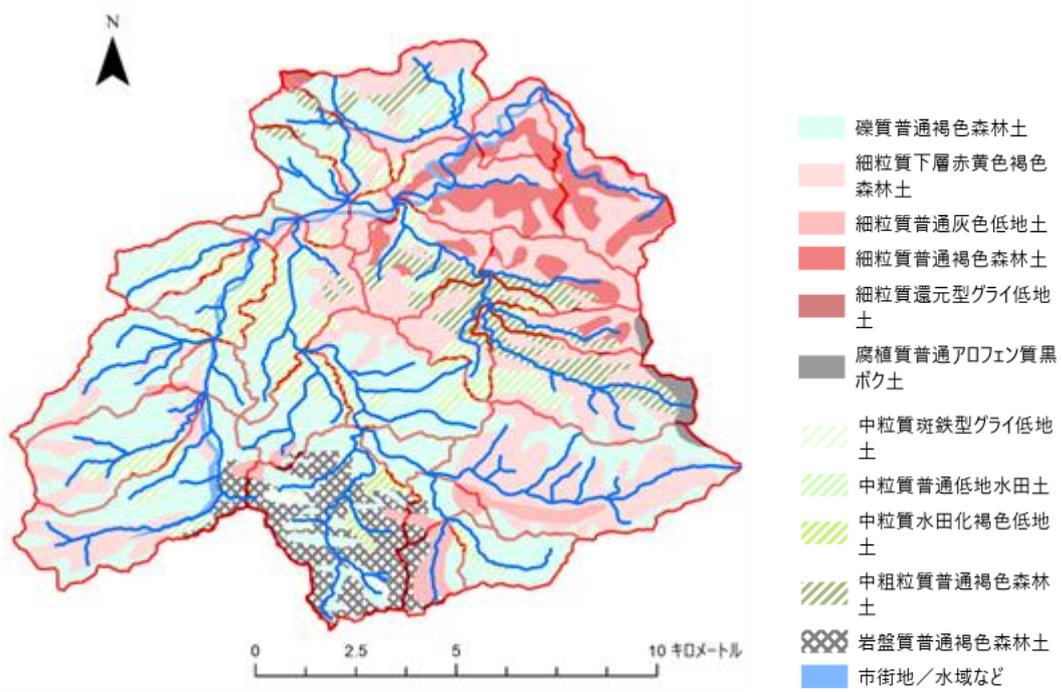


図 3 室生ダム流域内の土壌分布 [8]

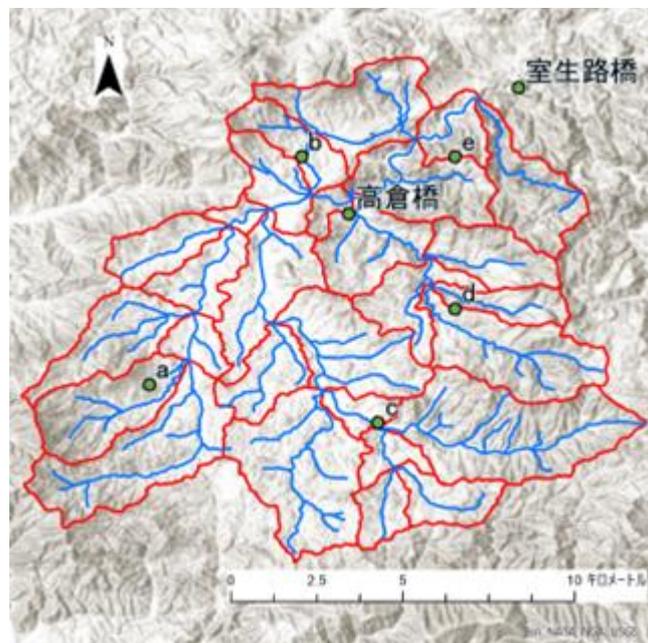


図 4 入手した気象データ (a~e) と水質データ観測所 (室生路橋、高倉橋) の位置

表 1 RSR、NSE、PBIAS によるモデルパフォーマンス評価

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$\text{PBIAS} < \pm 15$	$\text{PBIAS} < \pm 25$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 30$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS} < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\pm 30 \leq \text{PBIAS} < \pm 55$	$\pm 40 \leq \text{PBIAS} < \pm 70$
Unsatisfactory	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{PBIAS} \geq \pm 55$	$\text{PBIAS} \geq \pm 70$

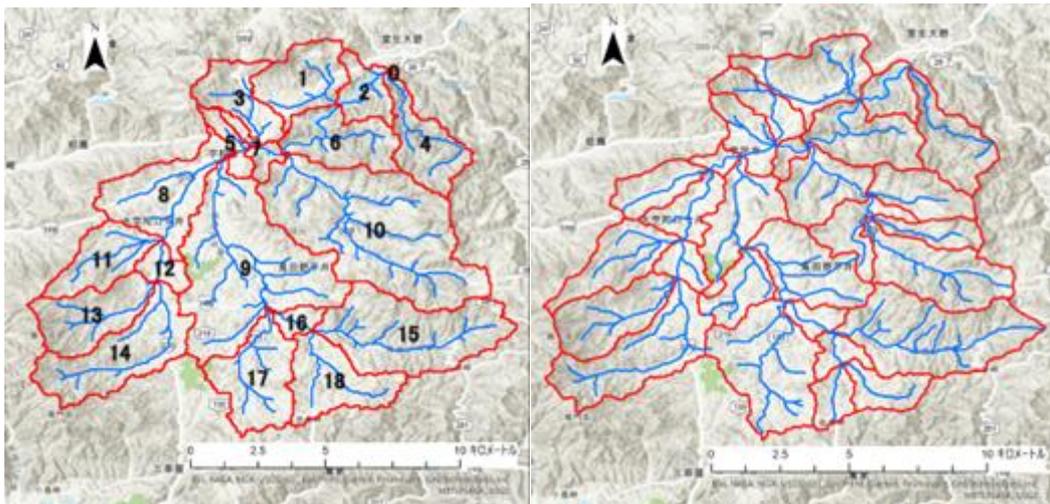


図 5 SWAT+で算出された流域と河川（左）と国土数値情報のデータで描画した流域と河川（右）

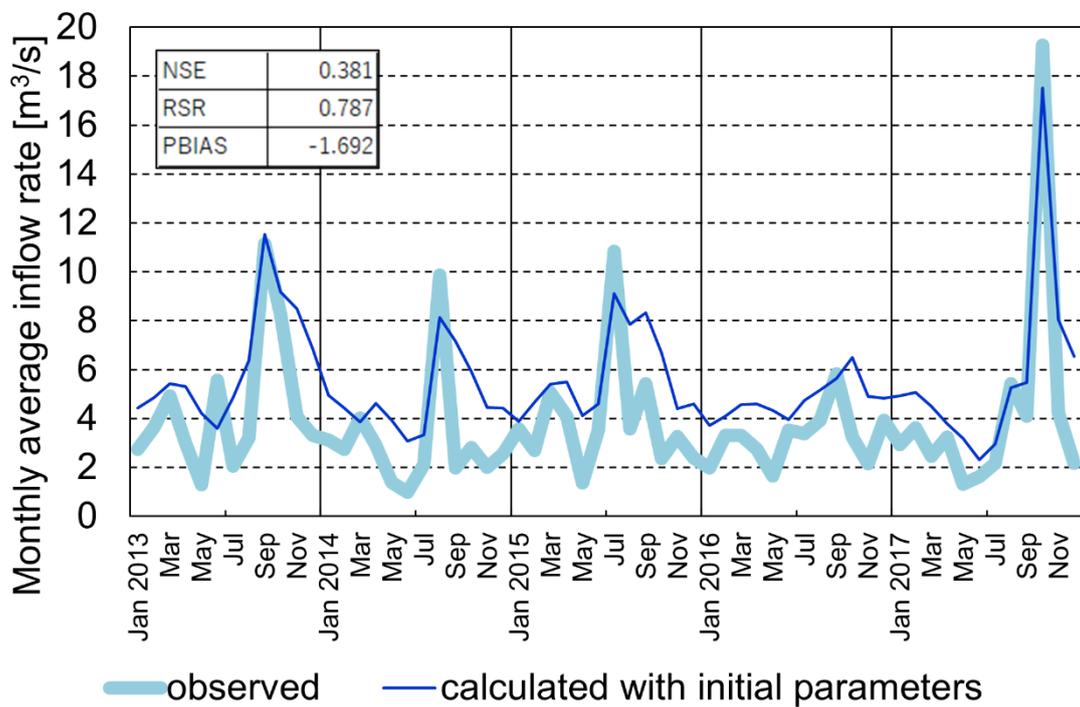
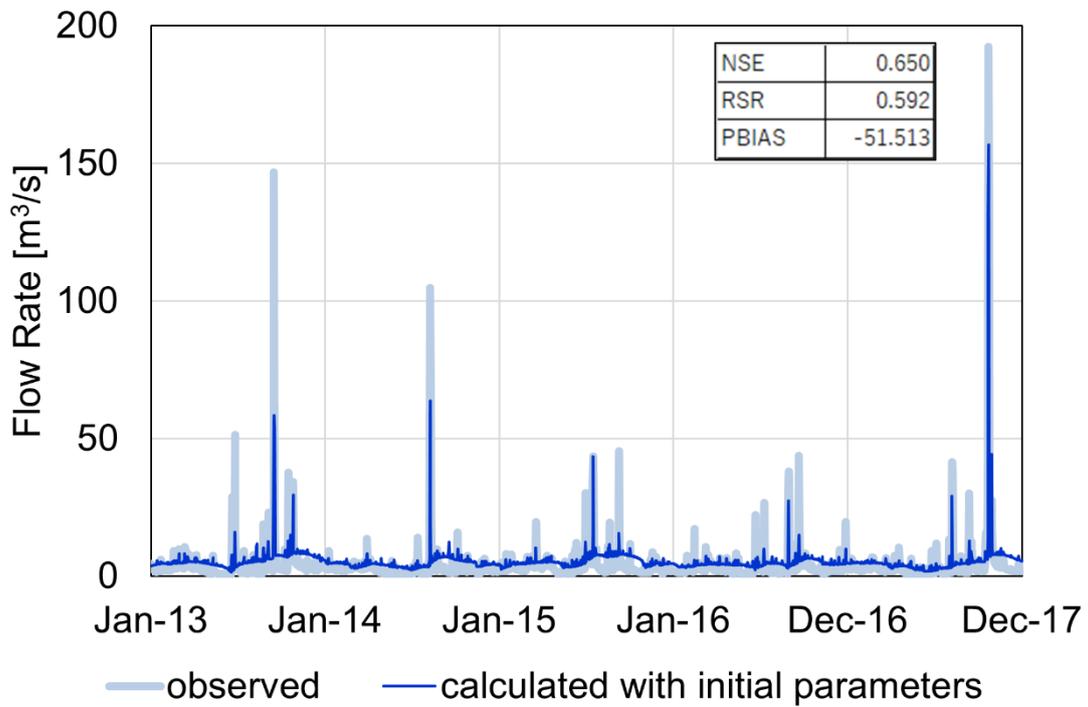


図 6 補正前のパラメータを用いた流入水量シミュレーション
(上：日々の流量、月平均をとった日々の流量)

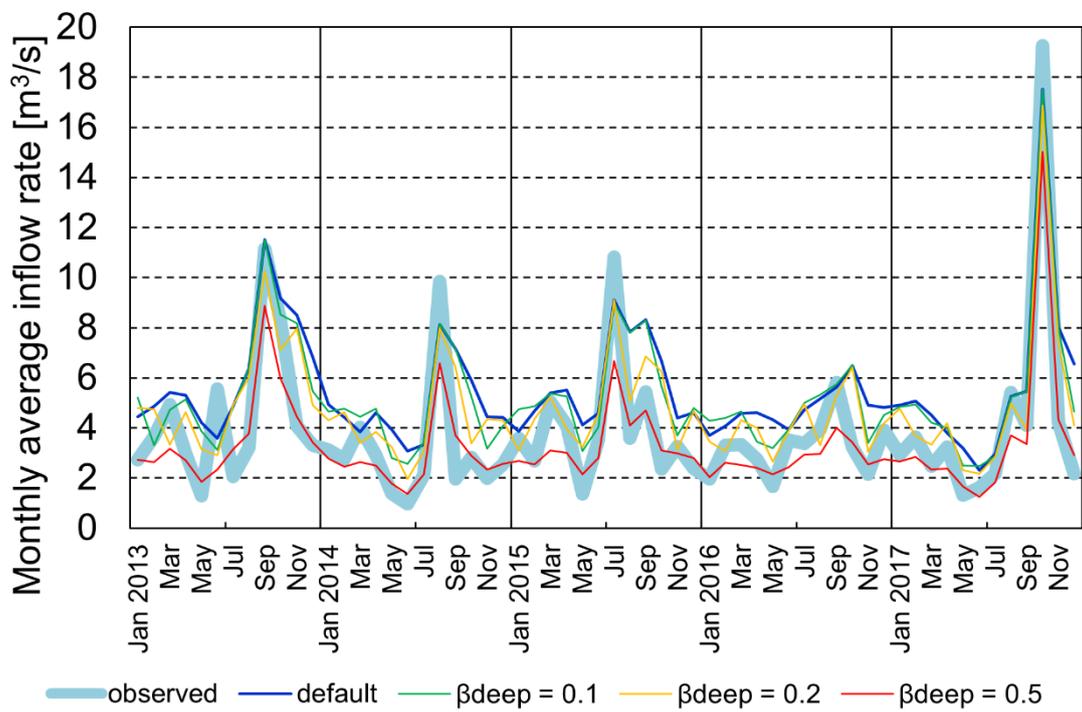
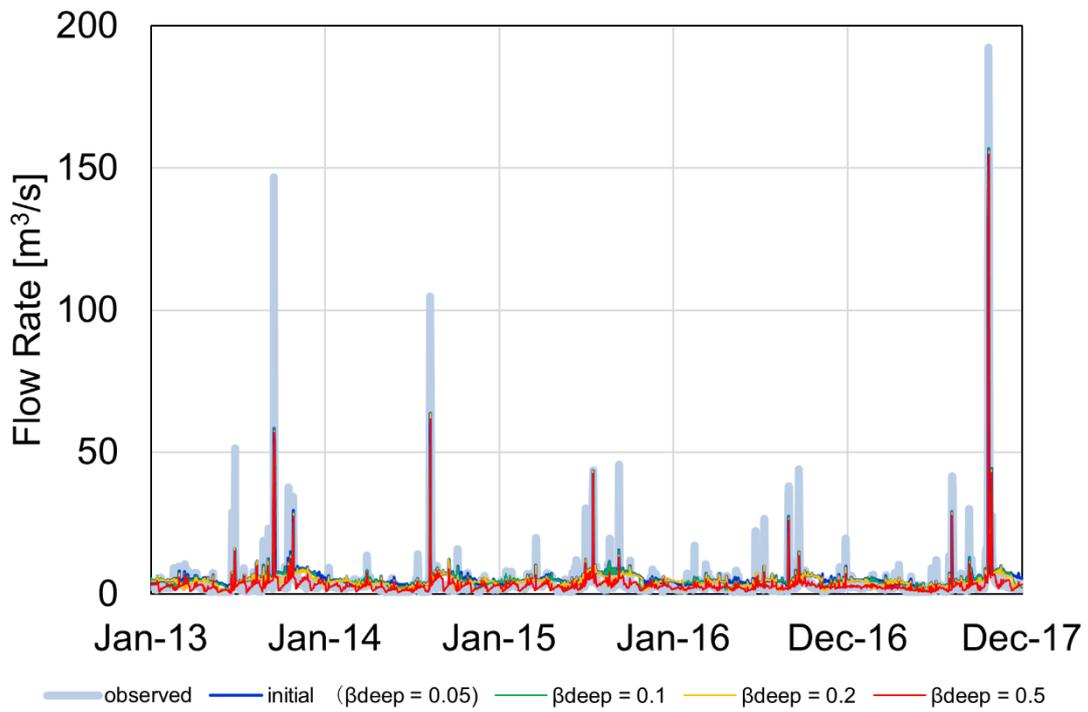


図 7 β_{deep} を変化させた場合のシミュレーション結果
 (上：日々の流量、月平均をとった日々の流量)

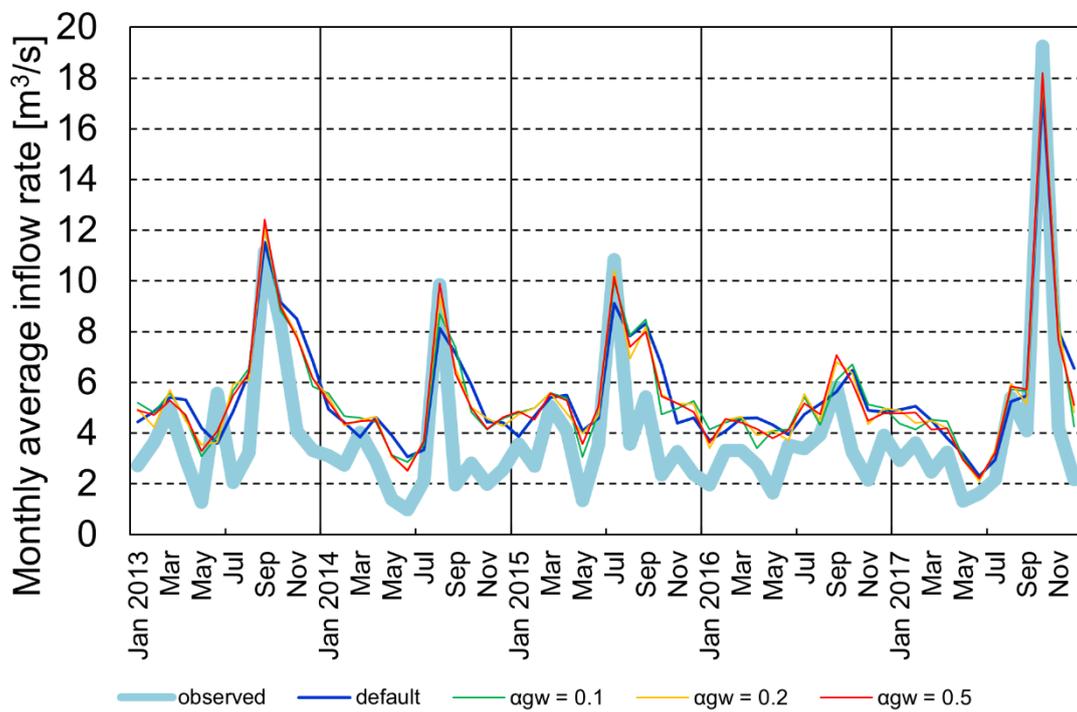
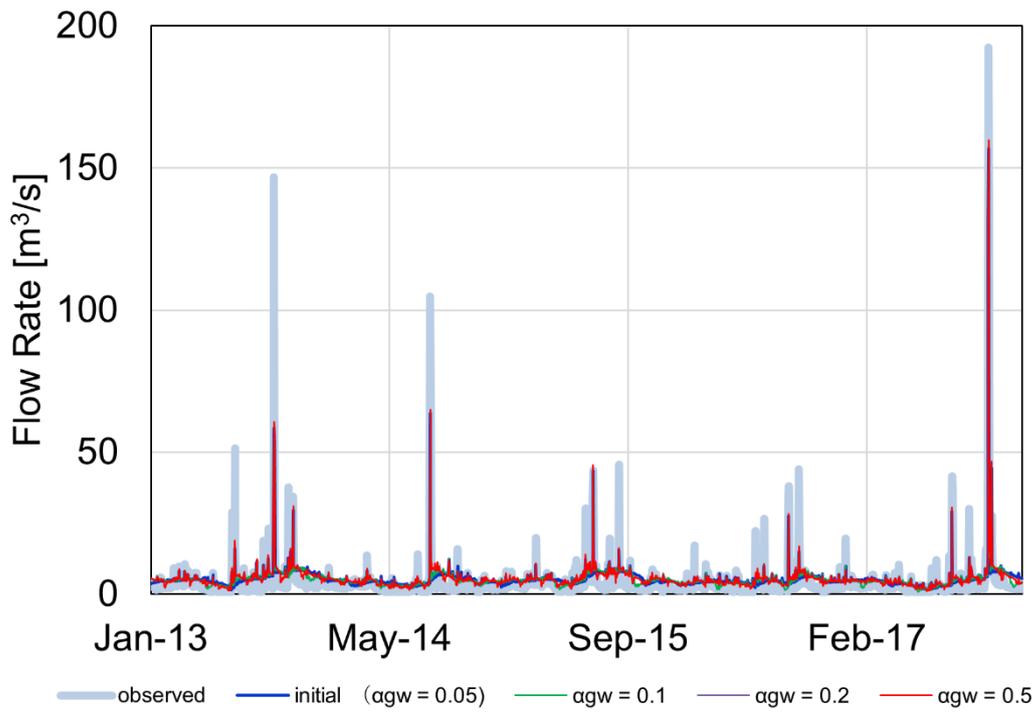


図 8 α_{gw} を変化させた場合のシミュレーション結果
(上：日々の流量、月平均をとった日々の流量)

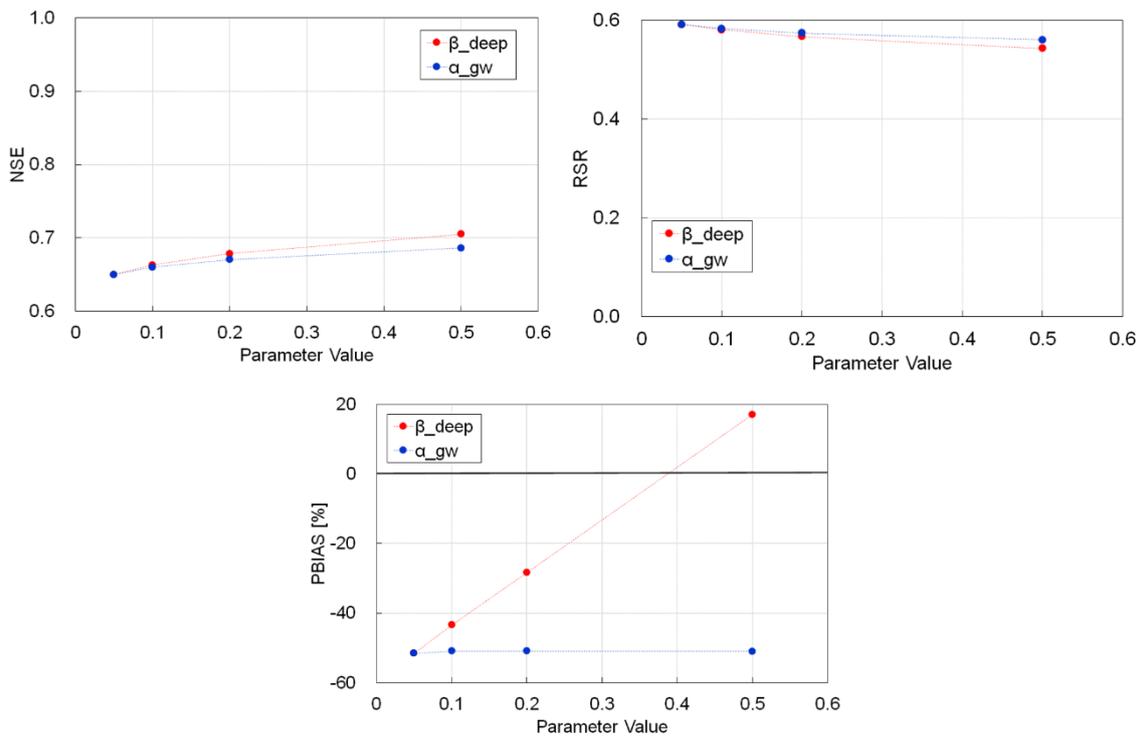


図 9 パラメータ値変動に伴う各モデル性能指標の変化

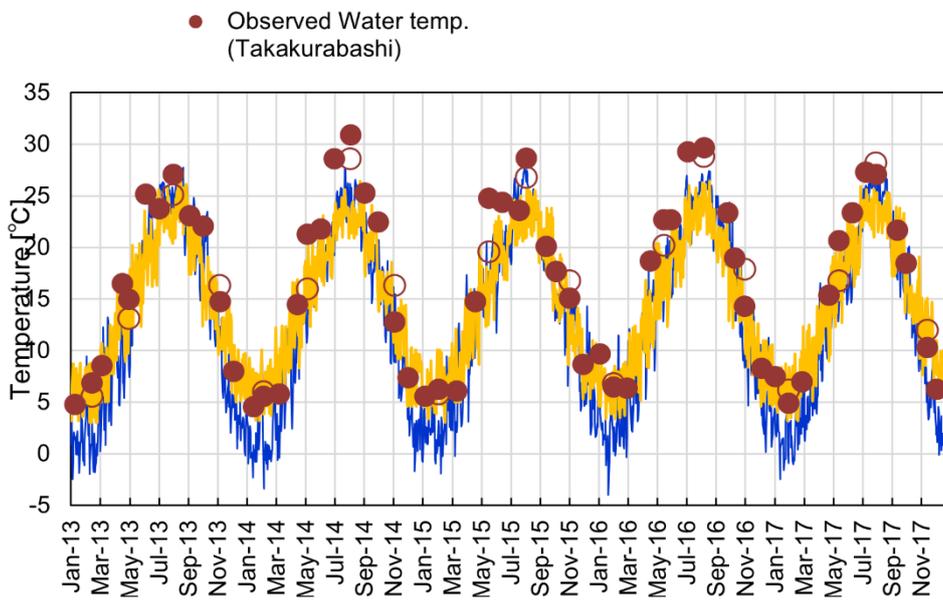


図 10 気温（モデル入力）と水温（実測値と計算値）

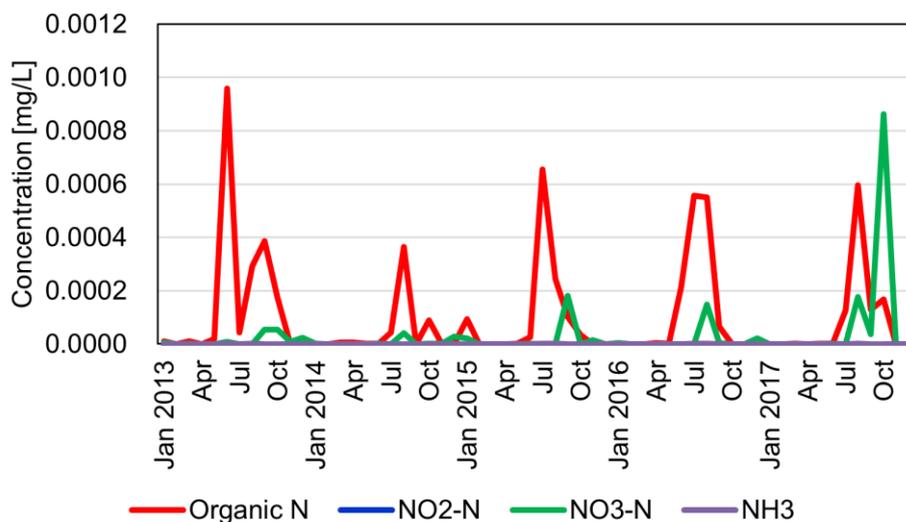


図 11 支流域 10 流出河川における各態窒素の計算結果

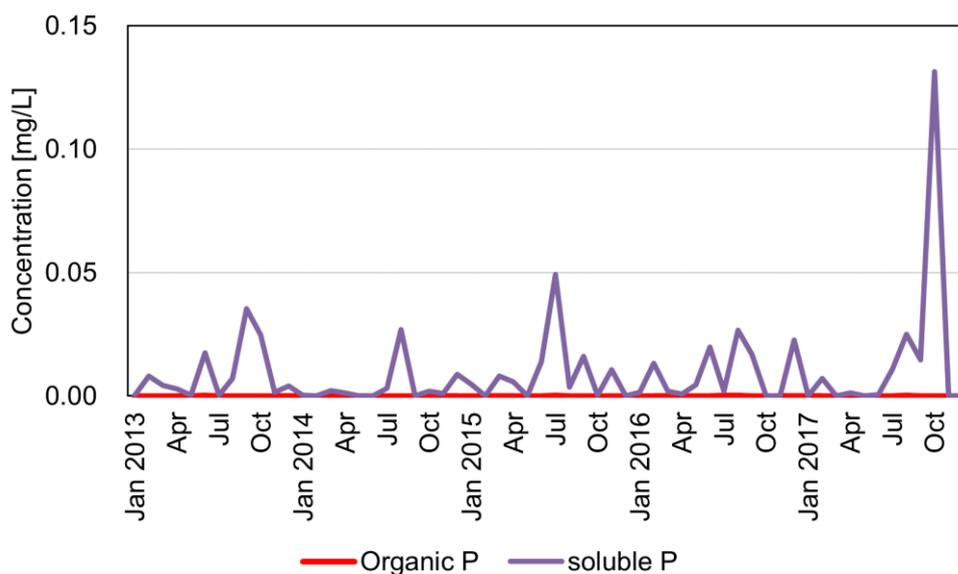


図 12 支流域 10 流出河川における各態リン濃度計算結果

表 2 室生路橋、高倉橋の水質データ (単位: mg/L) [15]

	高倉橋		室生路橋	
	2013年	2017年	2013年	2017年
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	0.8	0.73	0.56	0.5
アンモニウム態窒素	0.03	0.02	0.02	0.02
亜硝酸態窒素	0.008	0.006	0.012	0.005
硝酸態窒素	0.8	0.73	0.55	0.5
総窒素	1.1	0.9	0.71	0.71
オルトリン酸態リン	0.03	0.031	0.031	0.019
総リン	0.047	0.04	0.044	0.028

去率