

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 京都大学大学院 工学研究科 准教授  
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のうえで、水温は重要な環境因子の一つである。本研究ではまずダム貯水池での水温を気温から予測する数理モデル（回帰式）の構築を、全国4か所の水道水源ダム（室生ダム、阿木川ダム、一庫ダム、寺内ダム）に関して行った。また室生ダムに関しては、曝気循環装置の運転や設定水位を考慮し、曝気循環の有無ならびに夏期・秋期それぞれの条件下での、流域気温からダム湖水温を予測する回帰式を作成した。この回帰式に対して、将来の気温変化予測データを適用して、室生ダム貯水池の将来の水温変化を予測した。加えて、ダム湖流入河川流量の水温予測への影響の有意性を重回帰式で確認した。この流入河川流量と、藻類増殖の重要な因子である栄養塩濃度を推算する準分布型水文水質モデルの構築を昨年度に引き続き行った。本年度は下水道や畜産に伴う汚濁負荷源を考慮して栄養塩類予測性についても確認するとともに、ソフトウェアを活用したパラメータ感度解析、補正を実施し、河川流量予測精度向上を試みた。また、将来気象予測データを用いて、室生ダムへの流入河川流の変化を予測した。

#### 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からの流量量や水温、栄養塩等の環境因子の予測が必要である。本研究ではまず、全国4か所の水道水源ダムに関して、水温予測のための回帰モデルの検討を行った。さらにそのうちの室生ダムにおいては、水温予測の高精度化のための河川流量予測、ならびに水温と並んで重要な藍藻類の増殖制限因子である栄養塩濃度の挙動予測のための水文水質モデルを構築した。また、作成されたモデルを用いて、将来の気候変動下での水温変化の予測を行った。

#### B. 研究方法

##### 解析対象

本研究では、図1ならびに表1に示した4つの水道水源ダムを対象とした。室生ダム（図2）では、管理開始以降から主として7～10月に藍藻（アオコ）の発生が見られた。その対策として2011年度に浅層曝気循環装置導入され、2012年度より本格運用が開始され、アオコの発生が抑制されている。阿木川ダム（図3）では、平成9年の上水道での異臭味障害発生以降アオコ（*Microcystis* 等）が頻繁に発生するようになり、2002年には貯水池全体にまでアオコが拡大し、

阿木川ダム水質保全検討会が立ち上げられた [1]。その後、浅層曝気循環設備9基を設置し、2009年度から本格的に運用されている [1]。一庫ダム（図4）では、2006年から浅層曝気の運用が開始され、その後の更新及び増設が2010年までに終了し、2011年から浅層曝気のフル運転が開始されている [2]。寺内ダム（図5）では運用開始直後から貯水池内でアオコやカビ臭障害が頻繁に発生し、1999年に曝気循環装置1基、2003年に1基、2011年に4基設置され計6基が稼働している [3]。

##### 使用したデータならびに解析ソフト

本研究で使用した各種データは次のとおりである。過去の気温データは農研機構メッシュ農業気象データシステム [4]を用いた。大宇陀観測所のデータは気象庁 [5]より入手した。ダム湖の緒言や水温データはダム諸量データベース [6]から入手した。室生ダムの詳細な流入量や水温に関するデータは水資源機構よりご提供いただいた。高倉橋の水質は国土交通省水文水質データベース [7]から入手した。将来気温は、気象予測データセット DS2022「本州域 d4PDF ダウンスケーリングデータ」 [8, 9]から得た。宇陀川浄化センターの放流水水質、ならびに宇陀市の下水道普及状況は奈良県流域下水道センター [10]から得た。下水道以外の生活雑排水負荷は大久保ら [11]、林ら [12]を参考に決定した。宇陀市の畜産に関する情報は2015年度農林業センサス [13]より入手した。家畜

排せつ物の窒素、リン排せつ量原単位は千葉県  
の資料 [14]、利谷ら [15]、農林水産省 [16]を参考  
に決定した。

本研究で数値解析に用いたソフトウェアは次  
のとおりである。統計解析は Microsoft Excel (Mi-  
crosoft) を用いた。流域モデル SWAT+ [17]は rev  
60.5、GIS 解析には ArcGIS Pro (ESRI Japan)、なら  
びに QGIS : 3.22.16-Białowieża [18]を使用した。  
SWAT+のデータ入力には QSWAT+ [19] ver.2.3.3、入  
力パラメータの編集には SWAT+ Editor [20] 2.2.0、  
パラメータ補正には SWATplus-CUP 2022 v3.0 for  
windows [21]、ならびに SWAT+ Toolbox [22]を用い  
た。

### 水温の回帰分析

水温予測モデルとして、まず過去平均気温（水  
温測定日から任意日数さかのぼった期間（遡及期  
間）の日平均気温の平均値）を説明変数、ダム表  
層（水深 0.1 m）水温を目的変数とした単回帰分析  
を行った。また上述の曝気循環装置の導入により  
ダム表層水温が変化することを踏まえ、解析対象  
期間は曝気循環装置の導入前とした。さらにデー  
タ入手の可否から、室生ダムは 1993~2010 年の  
午前 9 時の水温、阿木川ダムは 1993~2001 年の  
午前 9 時あるいは 10 時の水温、一庫ダムは 1993  
年~2005 年の午前 9 時あるいは 10 時の水温、寺  
内ダムは 1993 年~1998 年の午前 11 時の水温とし  
た。過去平均気温は、図 2~図 5 に示した各ダム  
サイト最寄座標点（室生：180-143（東経 135.98°、  
北緯 34.55°）、阿木川：185-175（東経 137.43°、北  
緯 35.44°）、一庫：167-142（東経 135.42°、北緯  
34.93°）、寺内：125-61（東経 130.72°、北緯 33.43°）  
）において、様々な遡及期間（過去 2、5、10、20、  
30 日）の平均値を用い、決定係数 ( $R^2$ ) を判断材  
料として、予測性の高い気温遡及期間を決定し、  
線形回帰式ならびにその 95%信頼区間、95%予測  
区間を求めた。また、曝気循環装置導入後（寺内  
ダムのみ 2014 年~2017 年、その他は 2019 年~  
2022 年）の遡及平均気温と水温の関係も比較と  
して図示した。

さらに室生ダムについては、より詳細に曝気循  
環装置の影響の違いや流域内の気温の影響を確  
認するため、6 月下旬~8 月中旬（夏期）と、9~  
10 月（秋期）それぞれにおける各月の上・中・下  
旬の室生ダムサイト表層平均水温予測を行った。  
ここで、対象旬から過去 1 ヶ月に湖内 2 基の曝気  
循環装置が最大出力の 75%以上で運転された場  
合を曝気有とした。予測はまず線形単回帰式にて  
行った。水温（連続定値、水資源機構提供）を目  
的変数、室生湖近傍（図 2C）、室生湖周辺（図 2  
B、C、F）の平均、及び流域全体平均 7 地点の 3  
ケースにて、対象旬から旬毎に 4/3 ヶ月前まで遡  
った 4 期間の日平均気温の平均値、あるいは日最  
高気温の平均値を説明変数とし、 $R^2$  を比較した。  
加えて、気温以外の影響因子として河川流量を取  
り上げて検討した。浅層曝気循環がない時期  
（2006~2010 年）を仮定した 7 月のダム湖表層水  
温を目的変数、大宇陀気象観測所（図 2）の過去  
20 日平均気温とダム湖への流入量を説明変数と  
した重回帰分析を行った。流入量は当日から 6 日

前まで遡り、それぞれの予測における  $R^2$  を比較し  
た。

### 水文水質モデルによる解析

室生ダムの SWAT+ [17]による流量、ならびに栄  
養塩濃度予測では、ダムへの流入河川流量総量の  
パラメータ補正による予測性の向上、ならびに宇  
陀川本川上の観測点である「高倉橋」（図 2、支流  
域 7 内の本川上）の栄養塩濃度の予測性を確認し  
た。SWAT+モデルは流域を再構築しつつ、昨年度  
までと同様の土地利用や土壌に関する入力デー  
タを用いて作成した。また流域内気象情報入力点  
は、後述の d4PDF の予測点である流域内の 7 地点  
に改めた。

流量に関するパラメータについては、作成され  
たモデルに対して、キャリブレーションツールで  
ある SWATplus-CUP [21]の Spe アルゴリズムを用  
いて、まず感度解析を行った。感度解析で用いた  
気候データは、2012~17 年の平均値から作成され  
た仮想的な 2 年間に続く 2012 年の合計 3 年を初  
期化期間、2013~2015 年の 3 年間を対象期間とし  
た。目的変数は 2013~2015 年の 3 年間のダム流  
入量とした。Model Performance criteria は  $\chi^2$  とし、  
Baseflow separation を施し、閾値 3.5  $m^3/s$  とし  
て、重みづけを smaller : 9、larger : 1 としたう  
えで、水文に影響すると考えた 51 個のパラメー  
タを変動させて 1,000 回の試行計算によるパラメ  
ータ補正を行い、感度の高いパラメータ ( $p < 0.05$ )  
を抽出した。

続いて、抽出された高感度パラメータと、文  
献を参考して決定されたパラメータを対象に、  
SWAT+ Toolbox を用いてパラメータ補正を行  
い、パラメータ値を決定した。対象期間は上述の  
感度解析と同一である。Model Performance criteria  
は NSE あるいは RMSE の 2 つとし、100 回の試  
行計算を行い、検証期間 2016-17 年を加えた  
2013-17 年の NSE、RSR、PBIAS を確認して、良  
好な方を選択した。

これらの感度解析、パラメータ補正における  
ダム流入量計算値は、最下流の channel 1（図 2、  
流域 0 の流出）の flow out とした。続いて、最  
終的に補正されたパラメータ値を用いて、流入水  
量として図 6 に示した支流のうち、湖面への流入  
前の 8、171、175、185、71、76、29、173、85  
の流出流量を合計して、実測値と比較して検証  
した。河川中 SS (SWAT+では sediment) 濃度を鑑  
み、河川の土壌流失に関するパラメータ Erodibility  
factor は 0.00005、Cover factor は 0.000025（双  
方とも SWAT+初期値の 1/500）と設定した。

栄養塩濃度については、高倉橋で測定される  
アンモニウム態窒素 ( $NH_4-N$ )、亜硝酸態窒素  
( $NO_2-N$ )、硝酸態窒素 ( $NO_3-N$ )、総窒素  
(T-N)、オルトリン酸態リン ( $PO_4-P$ )、総リン  
(T-P) の予測性を検証した。同時に、BOD や SS  
についても予測性を検証した。ここでは、流域内  
の農業活動や生活、畜産に伴う窒素、リン負荷  
が大きな影響因子となる。農業活動に関して、  
今回作成した SWAT+モデルでは、流域内の農地  
は 1 つの HRU (HRU : Hydrologic Response Unit、  
SWAT+で設定される流域内の単位) を除いてす  
べて水田となったため、

すべて水田と仮定した。水田での刈取は 10 月 31 日とした。

流域からの栄養塩流入については、ポイントソースとして宇陀川浄化センターの放流水を加味し、channel 9 (図 6) から流入するものと仮定した。また下水道未普及地域とその人口は国勢調査を参考に判断し、各小流域に割り当てて、下水道未普及地域からの排出は、その流域の下流 channel からポイントソースとして流れ込むものとした。畜産が行われている小流域とその頭数は農林業センサスを参考に判断した。負荷量原単位は上述の資料を参考にしつつ、結果として計算される各態窒素、リン、BOD 濃度を見ながら、NO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub> の比率、T-P 負荷量、BOD 負荷量を変動させた。また放流時には、T-P の放流基準未満となるように希釈されて、各小流域の下流 channel から、生活雑排水とともにポイントソースとして放流されるものと仮定した。

### 将来予測

室生ダムについて得られた水温回帰式を用いて、将来の日平均気温が変化する条件下での水温予測を行った。将来の気象予測は、5 km メッシュにダウンスケーリングされた、産業革命前に比べて全球平均気温が 2°C 上昇した条件での計算結果である HFB\_2K\_MR\_m101 (海面水温変化パターン MRI)、HFB\_2K\_MI\_m101 (MIROC)、同じく 4°C 上昇した条件での計算結果 HFB\_4K\_MR\_m101 (MRI)、HFB\_4K\_MI\_m101 (MIROC) を用いた。比較対象とした過去の気象データは、20 世紀末実験結果 HPB\_m001 とした。

## C. 研究結果

### 水温の回帰分析

4 つのダムの過去平均気温遡及期間と決定係数 R<sup>2</sup> の関係を図 7 に示す。一庫ダムは過去 5 日間、それ以外は過去 20 日間の日平均気温平均値が、水温を推算するうえで最も適しているものと判断できた。各ダムの過去平均気温と水温の関係を図 8~図 11 にそれぞれ示す。図中には回帰式の 95%信頼区間と予測の 95%区間を示している。また、曝気循環装置設置後の値もあわせてプロットしている。図より、すべてのダム湖で R<sup>2</sup>>0.946 の回帰式が得られた。一方、いずれのダムにおいても、高気温期に曝気循環装置導入後に 95%予測区間から外れる(下回る)値がみられた。これは曝気循環装置の運転によって生じる湖水流動によるものと考えられる。

以下、室生ダムについての曝気循環装置の運転の有無を考慮した解析結果を述べる。曝気無、夏季の単回帰における、平均気温あるいは最高気温の遡及期間と流域内気温観測点の違いが決定係数 R<sup>2</sup> に与える影響を図 12 に示す。過去 2/3 ヶ月の最高気温を用いた場合に予測性が高い傾向にあり、そのうち流域全体の値を用いた場合が最も R<sup>2</sup> が高かった。同様に曝気無、秋季の結果を図 13 に示す。過去 2/3 ヶ月の平均気温で R<sup>2</sup> が高く、地点による差はほとんど見られなかった。

曝気有、夏季の単回帰における、平均気温あるいは最高気温の遡及期間と流域内気温観測点の

違いが決定係数 R<sup>2</sup> に与える影響を図 14 に示す。過去 2/3 ヶ月~1 ヶ月の最高気温で R<sup>2</sup> が高く、地点による差はほとんどみられなかった。同様に曝気有、秋季の結果を図 15 に示す。過去 2/3 ヶ月の最高気温による回帰で予測性が高く、そのうち室生湖近傍の最高気温を用いた場合に R<sup>2</sup> が最も高い値となった。

夏季の過去 2/3 か月の日最高気温平均値を説明変数とした回帰式による予測結果を図 16 に示す。まず曝気の有無によって表層水温は明確に異なるが、それぞれ十分に予測できている。また、曝気有の予測性が高いことがわかった。秋季の過去 2/3 か月の日最高気温平均値あるいは日平均気温平均値による予測結果を図 17 図 16 に示す。夏季と同様に曝気の有無によって表層水温は異なりその様子は十分に再現できたが、傾きにも違いがみられ、20°C 付近では差が小さくなった。また曝気無に関しては平均気温での予測性が最高気温の場合よりも高くなったが、その差は小さかった。図 18 は、曝気有の系に対して最高気温あるいは平均気温で予測した場合の予測性の違いを示している。最高気温を用いたほうがより予測性は高くなるが、大きな違いは見られない。以上より、回帰式による水温予測においては、独立変数は最高気温、平均気温ともに差はないといえる。

一方で、将来の気候変動においては、気温の上昇のみならず、降水パターンの変化も考えられる。回帰解析では、流域降水量も含めた重回帰を試みたが、降水量そのものは有意な影響を与えなかった。しかしダムへの流入量を独立変数とした場合、予測性が向上するケースが確認された。例えば図 19 はその一例である。回帰計算では、気温は図 2 のうちの C 地点における過去 20 日間の平均気温をとった。流量はダムへの流入量の過去 6 日間平均値とした。気温のみの単回帰の場合 R<sup>2</sup>=0.440 であるのに対し、重回帰では流入河川流量は水温に対して統計学的に有意な負の影響を与えた、R<sup>2</sup>=0.625 となった。

### 水文水質モデルによる解析

SWAT+モデルを新たに構築したところ、小流域は 20 となった(下流域に生じた小流域 0 を除く)。このモデルに対して、表 2 および表 3 に示した 51 のパラメータを、表中に示した範囲内で変動させた感度解析を SWATplus-CUP にて 1,000 回の試行により実施した。結果として、赤字で示したパラメータ (day\_lag\_max、alpha\_bf、flo\_min、revap\_min、細粒質普通灰色低地土及び礫質普通褐色森林土の soil\_k) において高い感度が示された (p>0.05)。この結果を踏まえ、alpha\_bf、flo\_min、revap\_min ならびにすべての土壌の soil\_k、さらに文献 [23] を参照して Condition II Curve Number (cn2)、Soil evaporation compensation factor (esco) についてのパラメータ補正を SWAT+ ToolBox により行った。補正に用いた範囲は、alpha\_bf、flo\_min、revap\_min については表 2 に示した範囲、それ以外は relative (元の値に乗じる変更比率) として -40%~+40% の範囲で行った。また室生ダムへの流域外からの subbasin 4 への流入 (10 月 1 日~4 月 30 日、室生川より最大で 2 m<sup>3</sup>/s) を考慮し、

補正は2013年5月1日～2015年9月30日(10月1日～4月30日を除く)のダム湖への流入流量に対するchannel 1の流出量のNSE最大化を指標として行ったところ、表4のようなパラメータ値、あるいは変更比率を得た。

得られたパラメータを用いて、2013年1月～2017年12月の室生ダムへの流入河川(channel 8、171、175、185、71、76、29、173、85)の合計流入量と、室生ダムへの流入量測定値の比較を、図20(日々)、図21(月平均)に示す。月平均には、補正前のパラメータでの計算も合わせて示している。Moriashiら[24]に基づいてモデル性能を評価すると次のようになる。月平均において、NSEは、補正期間でsatisfactory、検証期間でvery good、全期間でgoodとなった。RSRは補正期間でsatisfactory、検証期間でvery good、全期間でgoodとなった。PBIASは補正、全期間でunsatisfactoryとなったが、検証期間でsatisfactoryとなった。高倉橋の水質に関しての実測値と予測値の比較を図22(硝酸態窒素)、図23(アンモニア態窒素)、図24(全窒素)、図25(リン酸態リン)、図26(全リン)、図27(SS)、図28(BOD)に示す。モデルではNO<sub>3</sub>比率を文献値の4倍、NH<sub>4</sub>比率を1/4、T-Pを1/4、BODを1/10とし、TPの放流基準の1/4以下と希釈して河川にポイントソースとして放流されたものと仮定した。これらの仮定の妥当性確認の余地は残しているが、これにより窒素やリンの概ねのレベルは再現することができた。一方で、硝酸態窒素に関しては夏期に低くなる傾向がみられたが、この傾向は再現できたとはいえない。リンに関しては、計算では激しい摂動が見られた。SSに関しては、時折見られる高濃度は再現できなかった。

## 将来予測

室生ダムにおいては、回帰式による将来水温予測を行った。曝気を現在同様に継続的に実施すると仮定した場合の、夏季の各旬ごとの水温予測結果を図29に示す。2Kシナリオでは、MIROC、MRIともに7月下旬の水温上昇が最高となり、それぞれ過去に比べて2.0°C、及び2.5°C上昇となった。4Kシナリオでは、回帰式のもととした過去の水温範囲から逸脱する予測結が多くなった。予測平均値が回帰式の水温範囲(図12図29のグレー以外の部分)に入った6月下旬から7月上旬では、ともに7月上旬の水温予測結果の上昇が大きく、MRIで5.0°C、MIROCで5.4°Cとなった。予測精度は低くなるが、過去の範囲から逸脱したものは、MRIでは8月下旬、MIROCでは7月下旬の水温上昇が最も大きくなり、それぞれ5.3°C、及び5.9°Cとなった。

SWAT+モデルによる、気候の過去実験(HPB、m001)、将来実験(MRI、2K/m101、4K/m101)での、室生ダムへの流入河川流量の計算結果を図30(27年間連続シミュレーション)、図31(各月平均と最大最小値、2013～2017年のシミュレーション計算結果も併せて示している)、流域からの蒸発散量の予測を図32(各月平均と最大最小値)それぞれ示す。また、流域内の気温を図33、降水量を図34にそれぞれ示す。流入河川流量につい

ては、HPB(1980-2010年)から2K(2060-90年)、4K(2080-2110年)と進むにつれて、3～5月は平均値が増加、7～9月は減少する傾向が見られた。また、7～9月期には蒸発散量の増加(図32)も予測された。7～9月期には降水量の減少(図34)も見られ、これらが河川流量減少につながったものと考えられる。

## D. 考察

今回の検討では、ダム水温の直接予測に焦点を当てた。ダム水温を決定するダム内での熱挙動はブラックボックス化し、曝気循環の有無と季節による違いで場合分けしている。より厳密な水温予測を行うためには、河道での水温変化をより精密に予測[25, 26]し、またダム内での温度分布もモデリングするといった余地はある。そのためには流域熱収支解析の根拠となる、より局所的な水温情報など、モデル検証のためのデータが重要となる。

また、SWAT+による予測に関して、水量予測において、特に4～6月に過大評価傾向となったが、これは、同時期に湛水を行う水田の水収支が十分にモデルで再現できていないことに起因するものと考えられる。

水質について、今回の水質計算では、流域からの栄養塩やSS負荷に関する値の不確実性が高く、前述のような仮定を置いていることから、そもそもこれら窒素・リン挙動に関する動力学的パラメータ補正は行わなかった。より精度の高い栄養塩負荷の情報が入手できれば、改めてパラメータ補正を行うことで、これらの値の精度を高めることができる。

ダム湖への流入河川流量については、図19に示したように、水温変化に対しての線形回帰での負の影響の有意性を示した。流量のみではなく、河川水温まで考慮することで、より精度の高いエネルギー収支解析が行える。温度分布のより詳細な情報(流域内での時空間分解能の高い実測値)が得られれば、今回作成したSWAT+モデルを活用して、河川水温の予測[26]も可能となる。

## E. 結論

全国4か所の水道水源ダム(室生ダム、阿木川ダム、一庫ダム、寺内ダム)に関して、気温から水温を予測する回帰モデルを作成した。室生ダムに関しては、曝気循環装置の運転や設定水位を考慮し、曝気循環の有無ならびに夏期・秋期それぞれの条件下での、流域気温からダム湖水温を予測する回帰式を作成し、将来の気候変動下での水温変化を予測した。また、流入河川流量が増加することで水温が有意に低下することを確認し、河川流量予測の重要性を示した。一方、SWAT+を用いた室生ダムの水文水質再現において、ダム湖への流入河川流量については水田作付期となる4～6月期の再現性には向上の余地は残しつつも、それ以外の時期は十分に再現しうるパラメータ群を決定した。また同モデルを用いて窒素、リン濃度予測にも目途をたてることができた。さらにSWAT+によって将来の気候変動下での室生ダムへの流入河川流量をシミュレートし、過去から

2℃上昇、4℃上昇と進むにつれて 3～5 月は流入河川流量平均値が増加、7～9 月は減少する傾向を確認した。

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

下ヶ橋雅樹, 佐野大輔, 西村修, 浅田安廣, 秋葉道宏. 室生ダムの藻類増殖予測のための流域水文モデル作成. 化学工学会第 54 回秋季大会; 2023.9.12; 福岡.

下ヶ橋雅樹, 三浦耀平, 佐野大輔, 西村修, 今本博臣, 浅田安廣, 秋葉道宏. 室生ダムにおける藍藻類異常発生評価のための水温予測. 化学工学会第 89 年会; 2024.3.20; 堺.

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] 西将吾, 渡辺稔, 小野周. 阿木川ダム曝気循環設備の新たな運用方式に関する検証. in 令和3年度 (第55回)水資源機構技術研究発表会. 2021.
- [2] 阿部剛, 一庫ダムの水質状況と選択取水設備の効果的運用の検証. 近畿地方整備局研究発表会論文集(Web), 2019: p. 16 (WEB ONLY).
- [3] Narumol, V., 曝気循環対策に伴う寺内ダムの水質特性の変化に関する研究. (一社)九州地方計画協会令和3年度公益支援事業報告書(調査・研究活動).
- [4] 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/>.
- [5] 気象庁. 過去の気象データ・ダウンロード. Available from: <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>.
- [6] 国土交通省. ダム諸量データベース. 2024; Available from: <https://mudam.nilim.go.jp/home>.
- [7] 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](https://net.jmc.or.jp/mapdata/gsi_online/dkg.html).
- [8] 山崎剛, 佐々井崇博, 川瀬宏明, 杉本志織, 大楽浩司, 伊東瑠衣, 佐々木秀孝, 藤田実季子, 5km力学的ダウンスケーリングデータセット (SI-CAT DDS5TK) の概要. シミュレーション, 2019. 38: p. 145-149.
- [9] DIAS データ統合・解析システム - 気象予測データセット DS2022. 2020. Available from:

<https://diasjp.net/ds2022/>.

- [10] 奈良県流域下水道センター, 業務年報. Available from: <https://www.pref.nara.jp/4742.htm>.
- [11] 大久保卓也他, 嫌気・好気濾床法の処理性能に及ぼす流量変動および懸濁物質の影響. 水質汚濁研究, 1991. 14(4): p. 233-242.
- [12] 林幸子他, 生活排水実態調査—し尿単独浄化槽の排出水と家庭雑排水の水質状況—. Available from: <https://www.city.kawasaki.jp/300/cmsfiles/contents/0000014/14035/10-2-06.pdf>.
- [13] 政府統計の総合窓口. 農林業センサス 2015 統計データダウンロード. Available from: <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00500209>.
- [14] 印旛沼プロジェクト(調査報告)印旛沼をモデルとした特定流域圏における環境改善と再生に関する研究報告書(平成20年3月). 2008. Available from: <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/suishitsu/inbanuma/>.
- [15] 利谷翔平他, 畜産排水を高窒素負荷で施肥した飼料イネ水田における窒素除去の解明. 化学工学論文集, 2012. 38(5): p. 290-298.
- [16] 農林水産省, 畜産経営に関する排水基準について. Available from: [https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t\\_info/02\\_haisui/](https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_info/02_haisui/).
- [17] Texas A&M Agrilife Research, USDA Agricultural Research Service. SWAT+. Available from: <https://swat.tamu.edu/software/plus/>.
- [18] QGIS Association, QGIS Geographic Information System (Ver 3.22). Available from: <https://www.qgis.org/ja/site/>.
- [19] Dile, Y., R. Srinivasan, and C. George, QGIS Interface for QSWAT+. 2022. Available from: <https://swatplus.gitbook.io/docs/user/qswat+>.
- [20] SWAT+ editor, Available from: <https://swatpluseditor.readthedocs.io/en/latest/>
- [21] 2W2E GmbH, SWATplus-CUP. Available from: <https://www.2w2e.com/home/SwatPlusCup>
- [22] James, C., SWAT+ Toolbox version 1.0. 2022. Available from: <https://celray.github.io/docs/swatplus-toolbox/v1.0/index.html>.
- [23] Arnold, J.G., et al., SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. Transactions of the ASABE 2012. 55(4): p. 1491-1508.
- [24] 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.
- [25] Barnhart, B., G. Whittaker, and D. Ficklin, Improved Stream Temperature Simulations in SWAT Using NSGA-II for Automatic Multi-Site Calibration. Transactions of the ASABE, 2014. 57: p. 517-530.
- [26] Ficklin, D.L., et al., Development and application of a hydroclimatological stream temperature model within the Soil and Water Assessment Tool. Water Resources Research, 2012. 48(1): p. W01511.
- [27] Miura, Y., et al., Prediction of algal bloom using a combination of sparse modeling and a machine learning algorithm: Automatic relevance

determination and support vector machine.  
Ecological Informatics, 2023. 78: p. 102337.

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。

J. 謝辞

表 1 研究対象のダム

ダム名	所在地	水系	集水面積[km <sup>2</sup> ]	間接流域(外数値)[km <sup>2</sup> ]	総貯水容量[千m <sup>3</sup> ]	有効貯水容量[千m <sup>3</sup> ]	年平均流入量[m <sup>3</sup> /s]	年平均放流量[m <sup>3</sup> /s]
室生	奈良県宇陀市 北緯34度33分23.00秒 東経136度0分23.00秒	淀川水系・宇陀川	136.0	33.0	16,900	14,300	2.64	2.76
阿木川	岐阜県恵那市 北緯35度25分29.62秒 東経137度25分53.50秒	木曾川水系・阿木川	81.8	-	48,000	44,000	3.75	3.85
一庫	兵庫県川西市 北緯34度54分19.00秒 東経135度24分42.00秒	淀川水系・猪名川	115.1	-	33,300	30,800	1.96	1.94
寺内	福岡県朝倉市 北緯33度25分39.00秒 東経130度43分31.00秒	筑後川水系・佐田川	51.0	-	18,000	16,000	1.57	1.63



表 2 感度解析の対象パラメータ (bsn, aquifer)

Parameter code	description	included file name (extension)	tested range (value)
la_noevap	Leaf area index at which no evaporation occurs from water surface	bsn	0 □ 10
sw_init	Initial soil water storage expressed as a fraction of field capacity water content	bsn	0 □ 1
surq_lag	Surface runoff lag coefficient	bsn	1 □ 24
msk_co1	Coefficient to control the impact of the storage time constant for normal flow on the overall storage time constant for the channel	bsn	0 □ 10
msk_co2	Coefficient to control the impact of the storage time constant for low flow on the overall storage time constant for the channel	bsn	0 □ 10
msk_x	Weighting factor control relative importance of inflow rate and outflow rate in determining storage on reach	bsn	0 □ 0.3
nperco_bhtile	Nitrogen concentration coefficient for tile flow and leaching from bottom layer	bsn	0 □ 1
evap_adj	Reach evaporation adjustment factor	bsn	0.5 □ 1
scoef	Channel storage coefficient	bsn	0 □ 1
adj_uhyd	Adjustment factor for subdaily unit hydrograph base time	bsn	0 □ 1
plaps	Precipitation lapse rate [mm/km]	bsn	-25 □ 25
tlaps	Temperature lapse rate [deg C/km]	bsn	3 □ 8
urb_init_abst	Maximum initial abstraction for urban areas	bsn	0 □ 1
petco_pmpt	PET adjustment for Penman/Monteith and Priestley-Taylor methods	bsn	0 □ 1
uhyd_alpha	Alpha coefficient for gamma function unit hydrograph	bsn	0.5 □ 10
surq_exp	Exponential coefficient for overland flow	bsn	1 □ 3
day_lag_max	Maximum days to lag hydrographs for HRUs, routing units, and channels	bsn	0 □ 3
gw_flow	Initial groundwater flow [mm]	aqu	0 □ 2
dep_bot	Depth from mid-slope surface to bottom of aquifer [m]	aqu	0 □ 10
dep_wt	Depth from mid-slope surface to initial water table [m]	aqu	0 □ 10
bf_max	Baseflow rate at which all streams linked to an aquifer receive groundwater flow [mm]	aqu	0 □ 2
alpha_bf	Alpha factor for groundwater recession curve [1/d]	aqu	0 □ 1
revap	Groundwater revap coefficient [fraction]	aqu	0.02 □ 0.2
rchg_dp	Recharge to deep aquifer [fraction]	aqu	0 □ 1
spec_yld	Specific yield of the aquifer [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	aqu	0 □ 0.4
fb_min	Threshold depth from surface to water table for groundwater flow to occur [m]	aqu	0 □ 10
revap_min	Threshold depth from surface to water table for revap to occur [m]	aqu	0 □ 10

表 3 感度解析の対象パラメータ (soil)

Parameter code	description	tested range (value)	soil name	tested range (relative multiplied by (1 + a given value))
awc	Available water capacity of soil layer [mm/mm]		腐植質普通アロフェン質黒ボク土	-0.9 ~ 9
			中粒質普通低地水田土	
			細粒質還元型グライ低地土	
			中粒質斑鉄型グライ低地土	
			細粒質普通灰色低地土	
			中粒質水田化褐色低地土	
			細粒質下層赤黄色褐色森林土	
			岩盤質普通褐色森林土	
			礫質普通褐色森林土	
			細粒質普通褐色森林土	
			中粗粒質普通褐色森林土	
			市街地/水域など	
soil_k	Saturated hydraulic conductivity of soil layer [m/hr]		腐植質普通アロフェン質黒ボク土	-0.9 ~ 9
			中粒質普通低地水田土	
			細粒質還元型グライ低地土	
			中粒質斑鉄型グライ低地土	
			細粒質普通灰色低地土	
			中粒質水田化褐色低地土	
			細粒質下層赤黄色褐色森林土	
			岩盤質普通褐色森林土	
			礫質普通褐色森林土	
			細粒質普通褐色森林土	
			中粗粒質普通褐色森林土	
			市街地/水域など	

表 4 補正結果 (NSE 最大化)

parameter	finally calibrated value
alpha	0.742 days
flo_min	0.438 m
revap_min	4.968 m
k	37.748 %
cn2	38.855 %
esco	-33.023 %

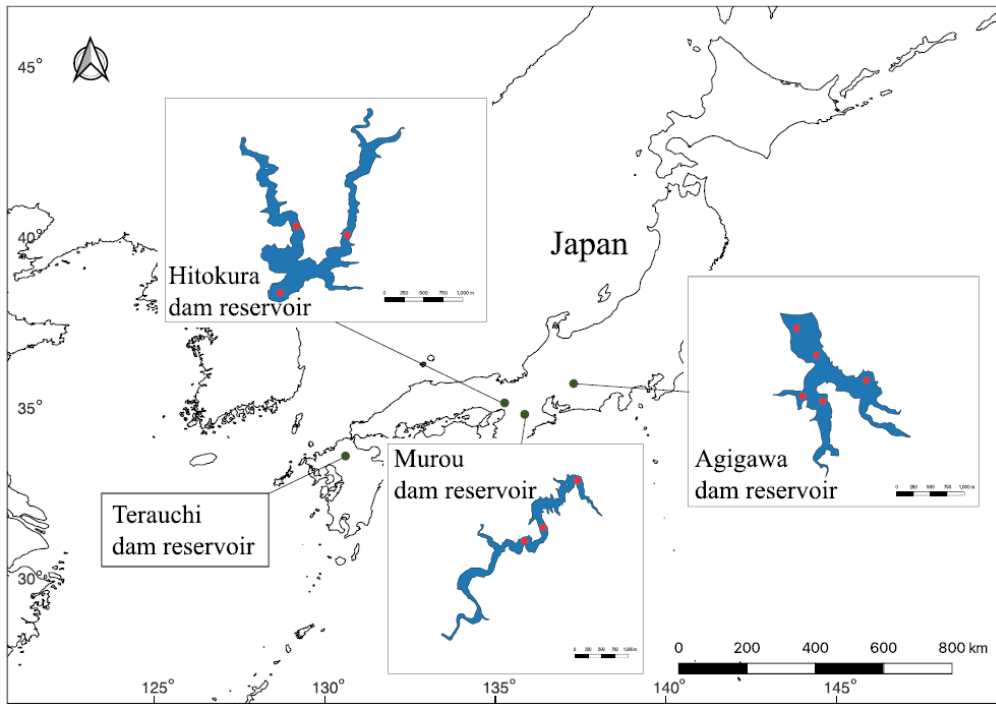


図 1 室生ダム、阿木川ダム、一庫ダム、ならびに寺内ダムの配置 [27]

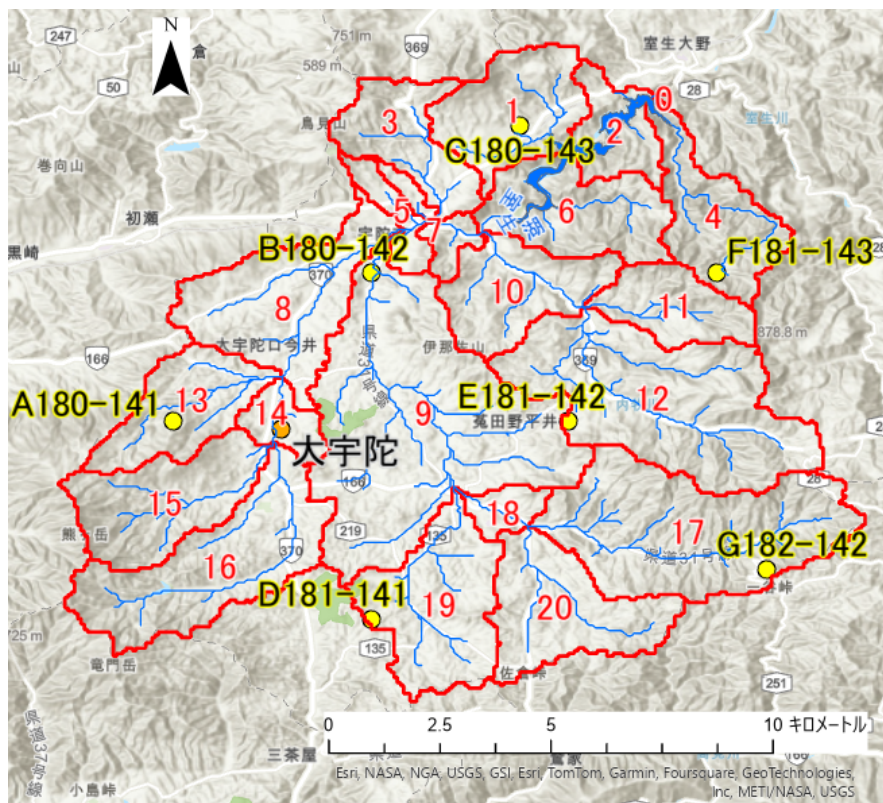


図 2 室生ダム流域（支流域：赤字）と河道、ならびに気象観測点（黄色あるいは橙色）  
（作図は ArcGIS Pro を使用）

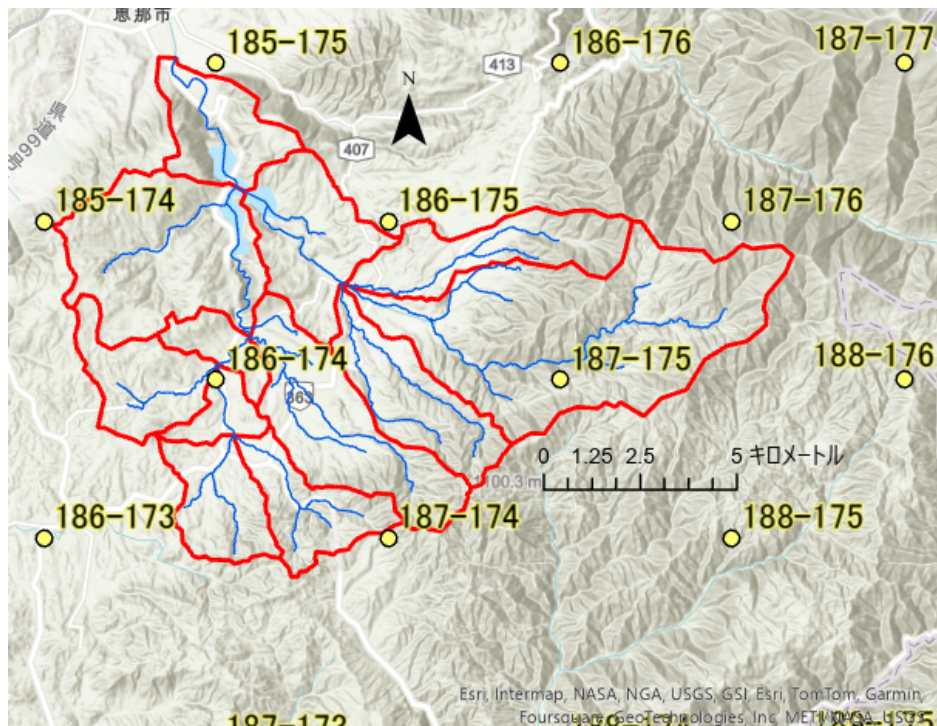


図 3 阿木川ダム流域  
(作図は ArcGIS Pro を使用)

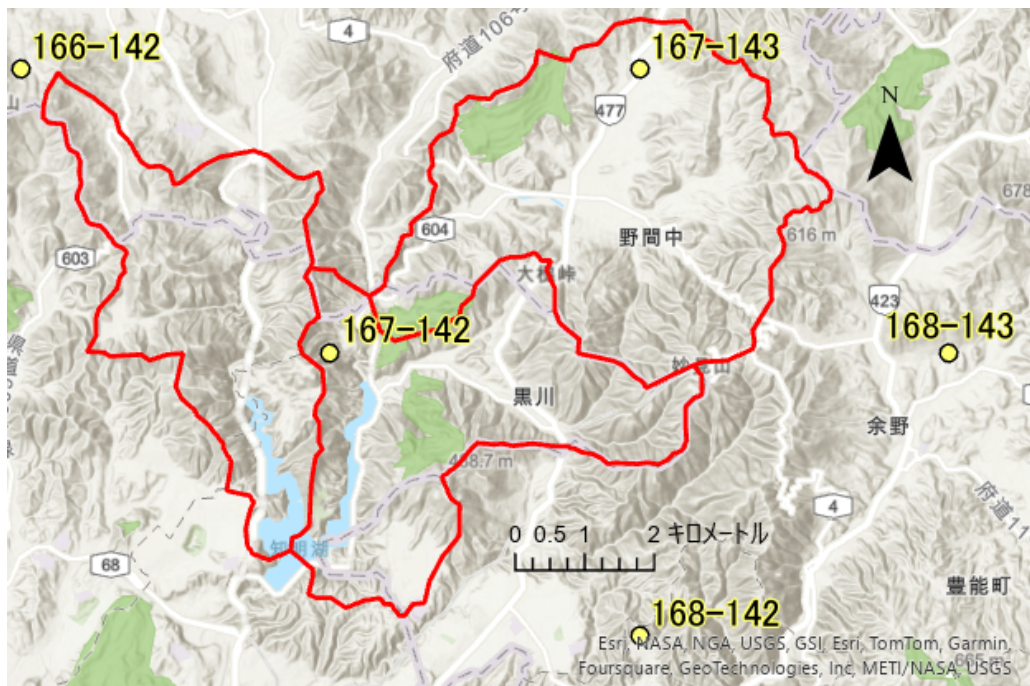


図 4 一庫ダム流域  
(作図は ArcGIS Pro を使用)

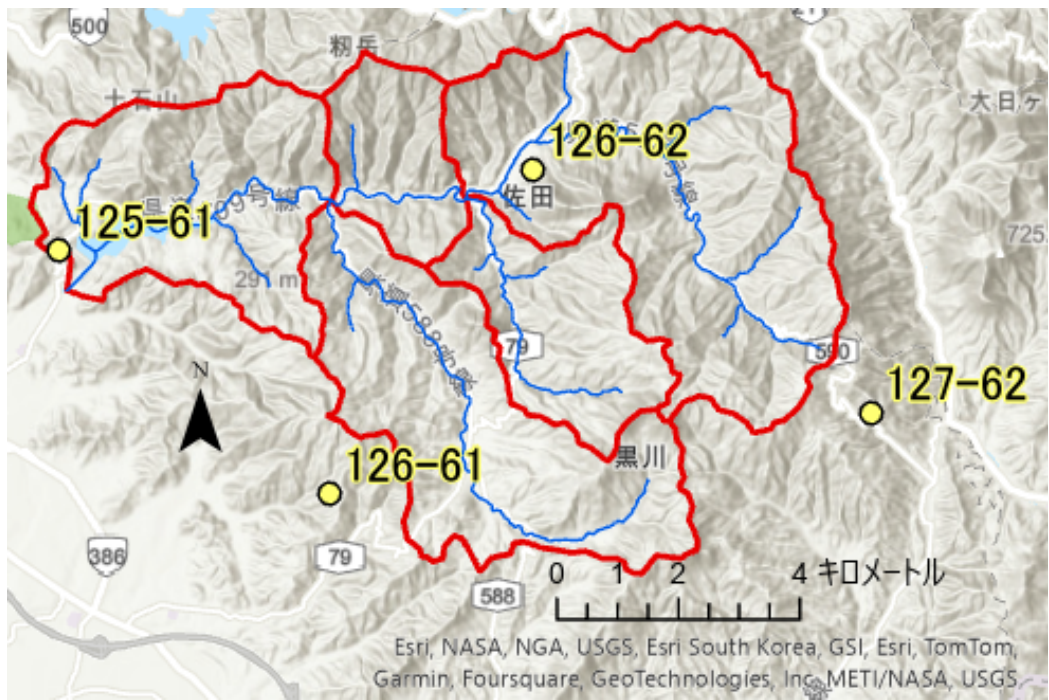


図 5 寺内ダム流域  
(作図は ArcGIS Pro を使用)

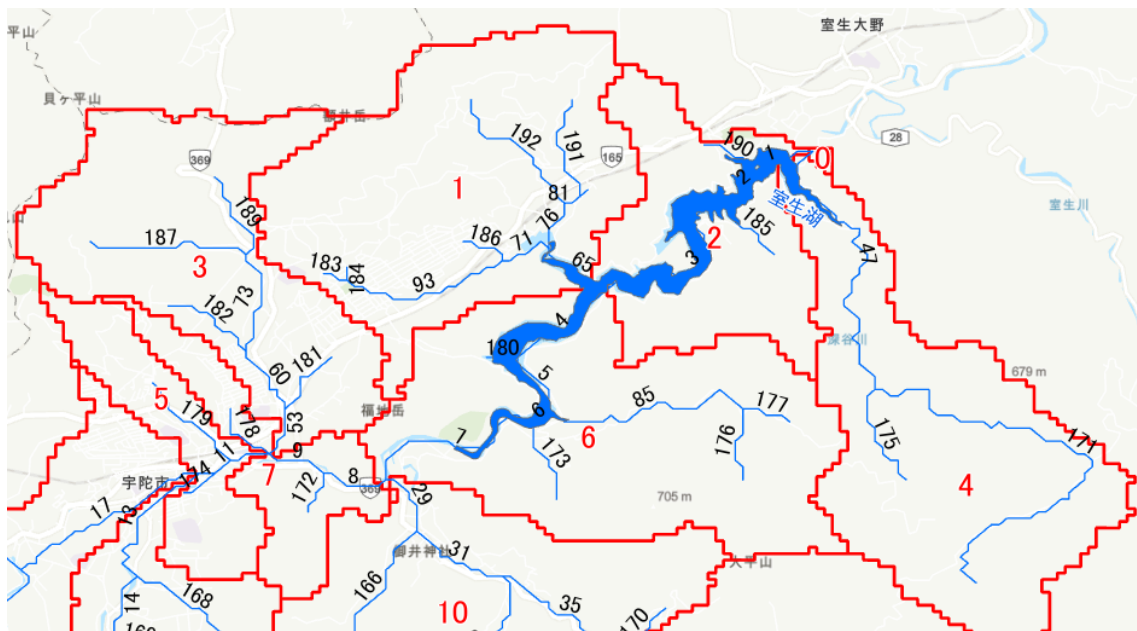


図 6 室生ダムへの流入河川  
(作図は ArcGIS Pro を使用)

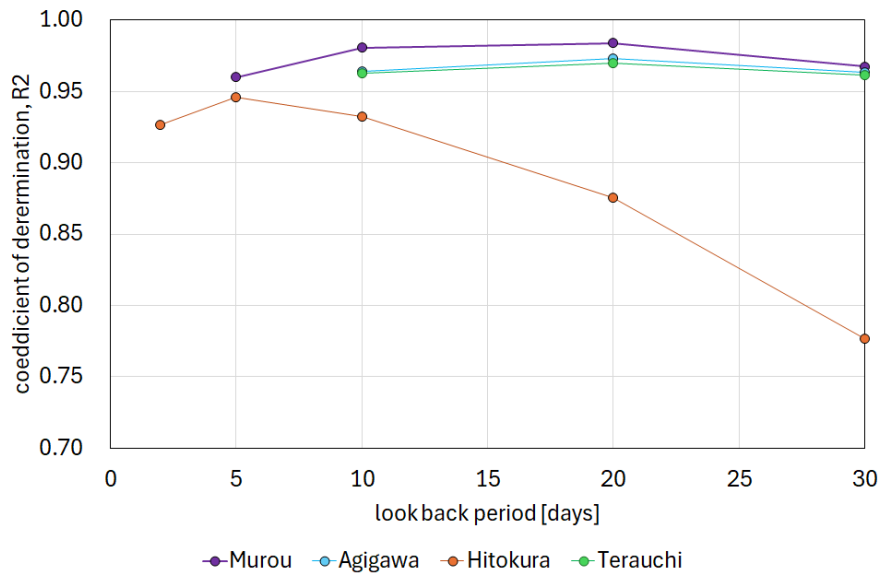


図 7 単回帰分析における決定係数と平均気温遡及期間の関係

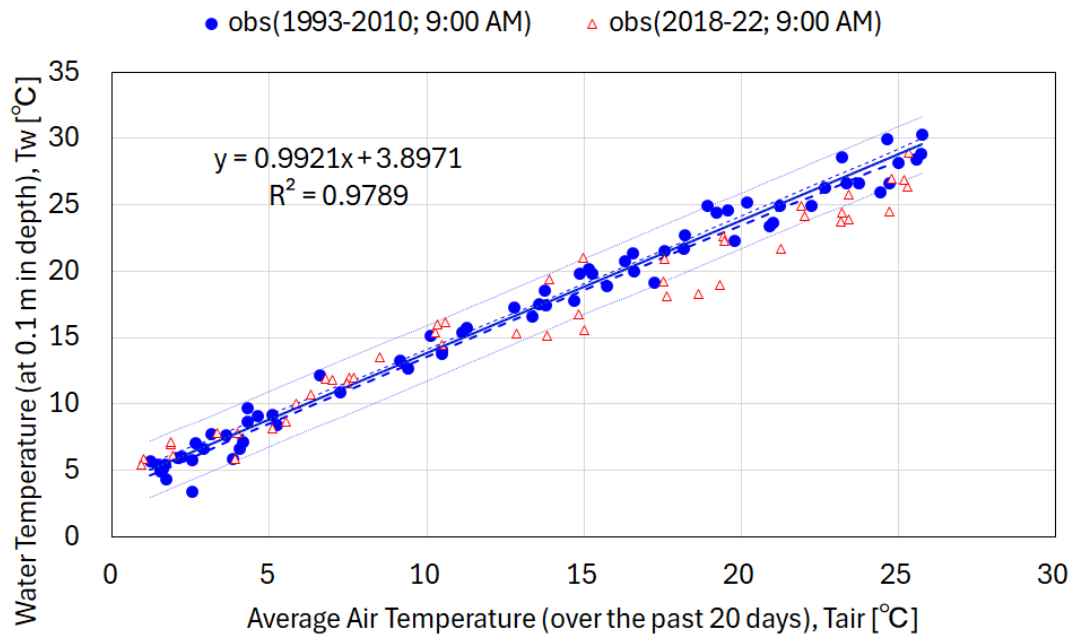


図 8 室生ダムのダムサイト付近過去 20 日間平均気温と表層水温の関係 (実線は回帰式、破線は回帰式の 95%信頼区間、点線は 95%予測区間)

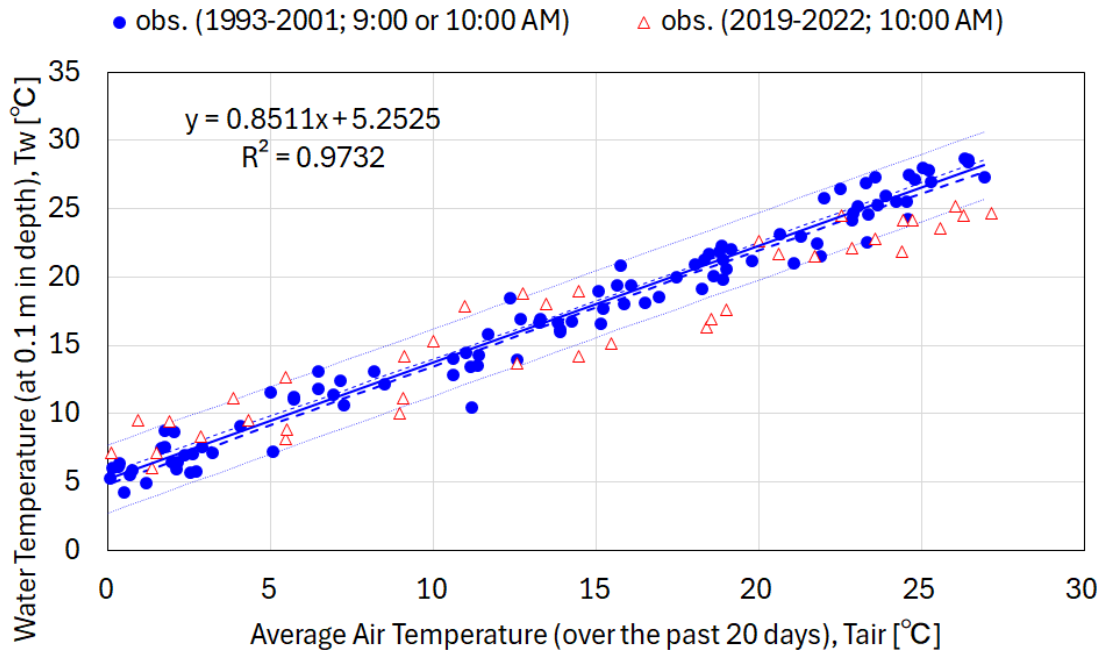


図 9 阿木川ダムのダムサイト付近過去 20 日間平均気温と表層水温の関係  
(実線は回帰式、破線は回帰式の 95%信頼区間、点線は 95%予測区間)

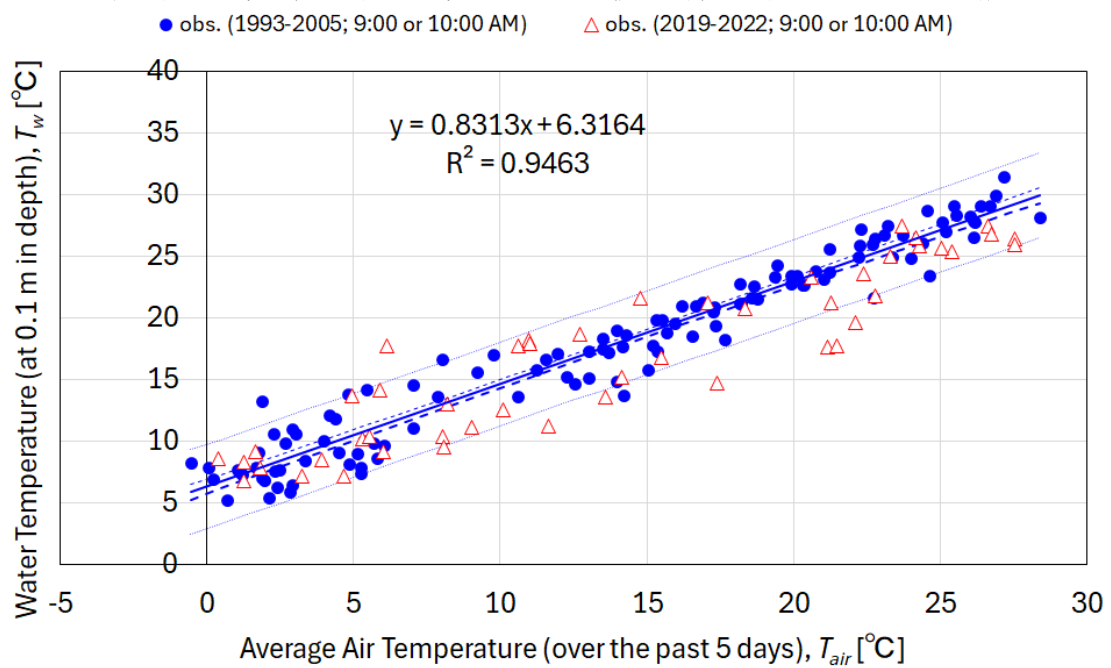


図 10 一庫ダムのダムサイト付近過去 5 日間平均気温と表層水温の関係  
(実線は回帰式、破線は回帰式の 95%信頼区間、点線は 95%予測区間)

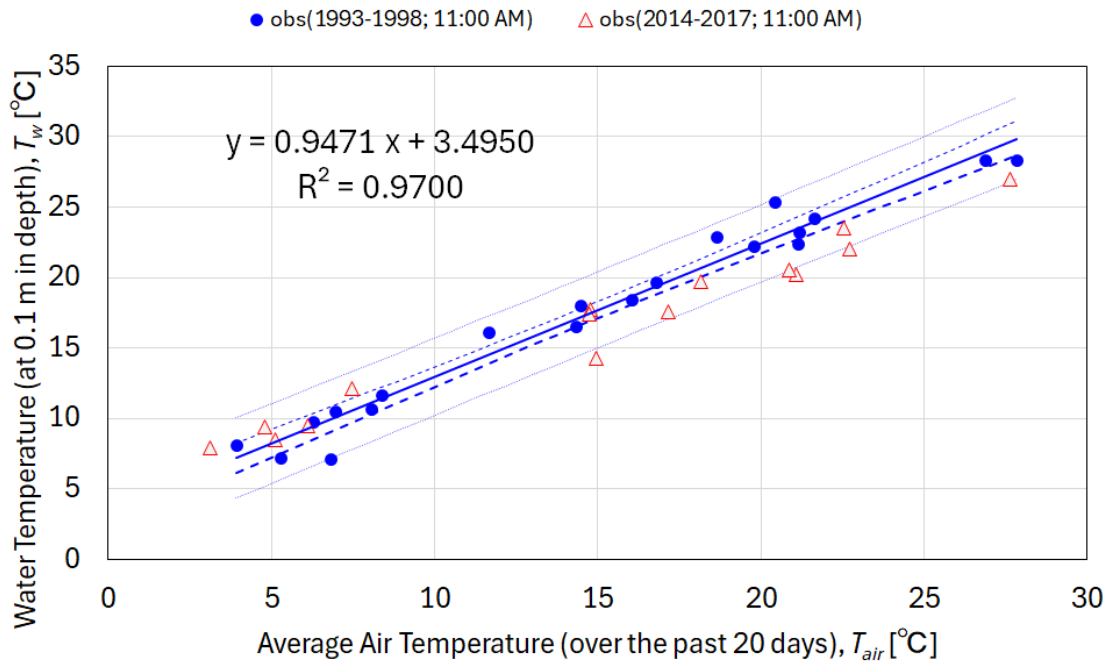


図 11 寺内ダムのダムサイト付近過去 20 日間平均気温と表層水温の関係 (実線は回帰式、破線は回帰式の 95%信頼区間、点線は 95%予測区間)

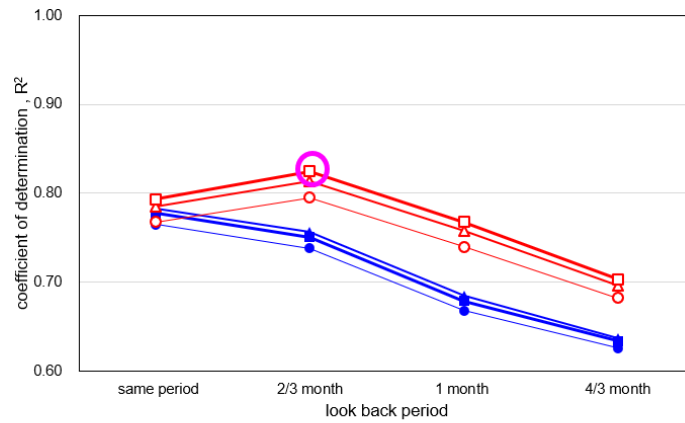


図 12 単回帰式による水温予測における、決定係数 R2 (曝気無、夏季)

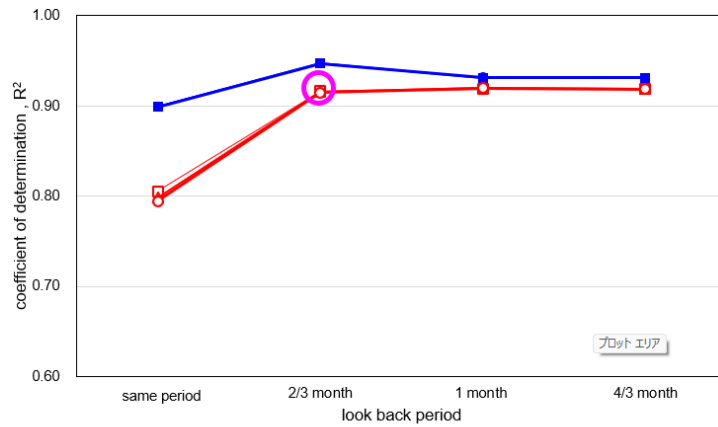


図 13 単回帰式による水温予測における、決定係数 R2 (曝気無、秋季)



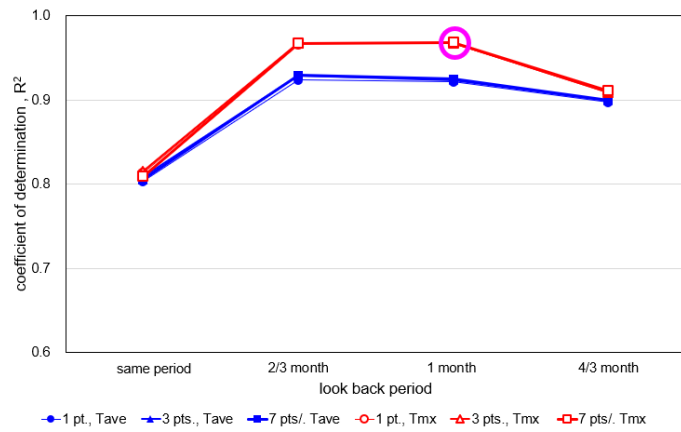


図 14 単回帰式による水温予測における、決定係数 R2 (曝気有、夏季)

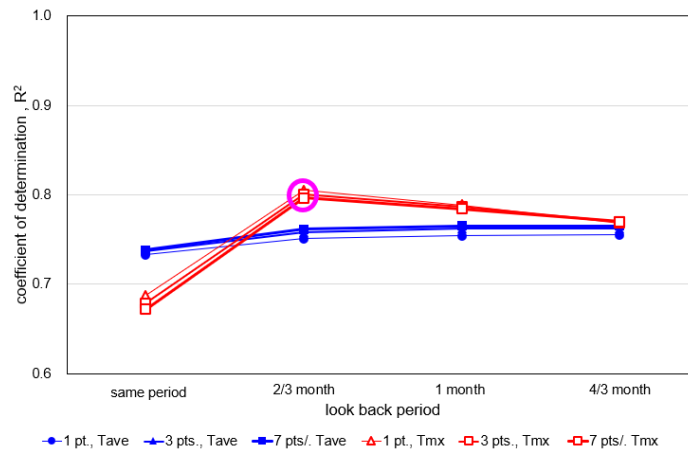


図 15 単回帰式による水温予測における、決定係数 R2 (曝気有、秋季)

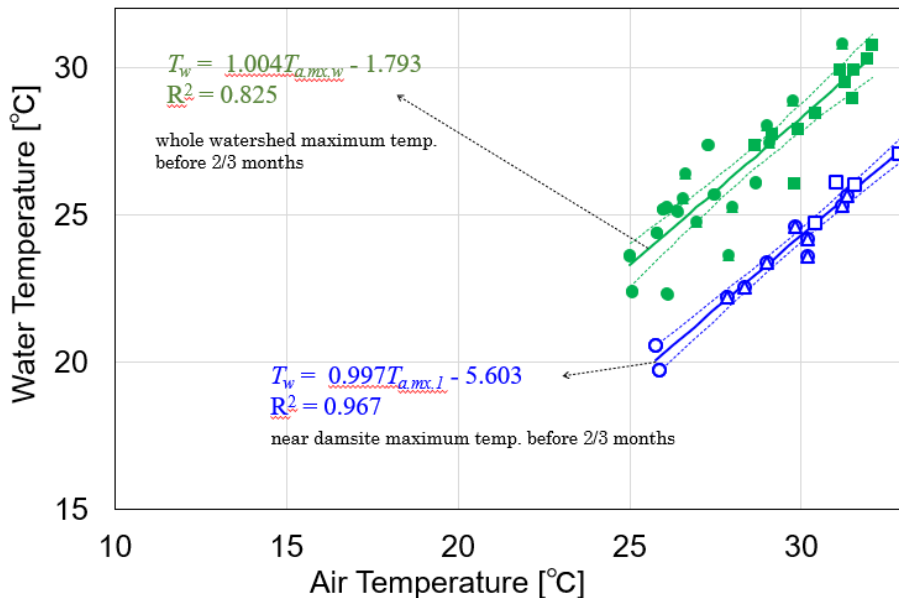


図 16 夏季の流域内過去 2/3 か月の日最高気温平均値による水温予測結果 (青：曝気有、気温：C 地点 緑：曝気無、気温：流域全体 (A~G))

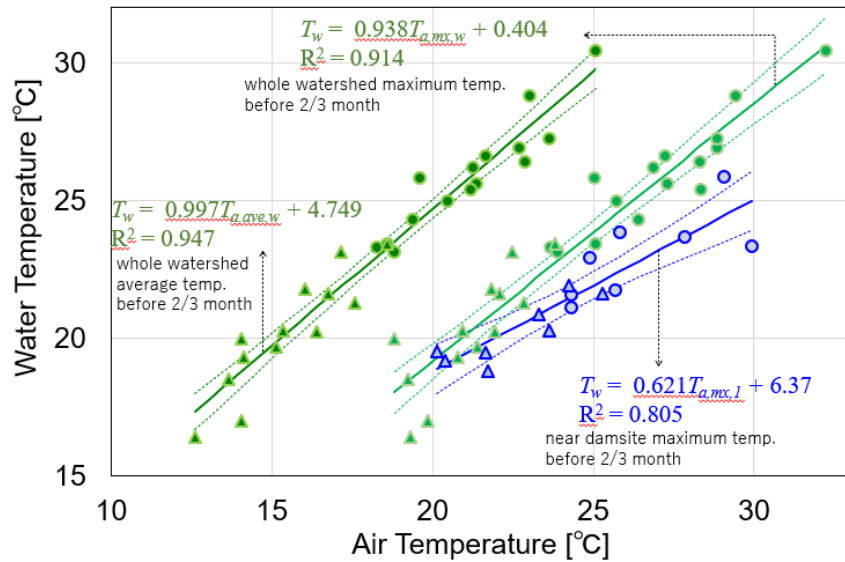


図 17 秋季の流域内過去 2/3 か月の日最高気温あるいは日平均気温平均値による水温予測結果

(青：曝気有、気温：C 地点 緑：曝気無、気温：流域全体 (A~G))

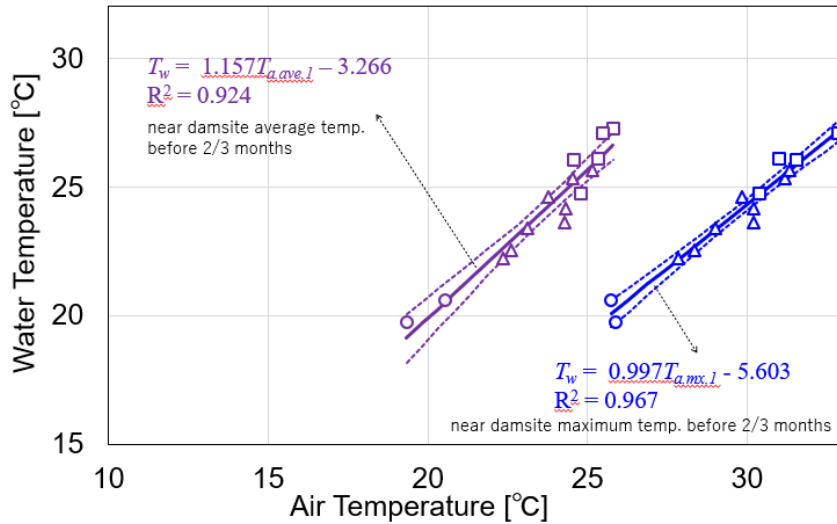


図 18 曝気有、夏季の流域内過去 2/3 か月の C 地点での日最高気温あるいは日平均気温平均値による水温予測結果

(青：最高気温 紫：平均気温)

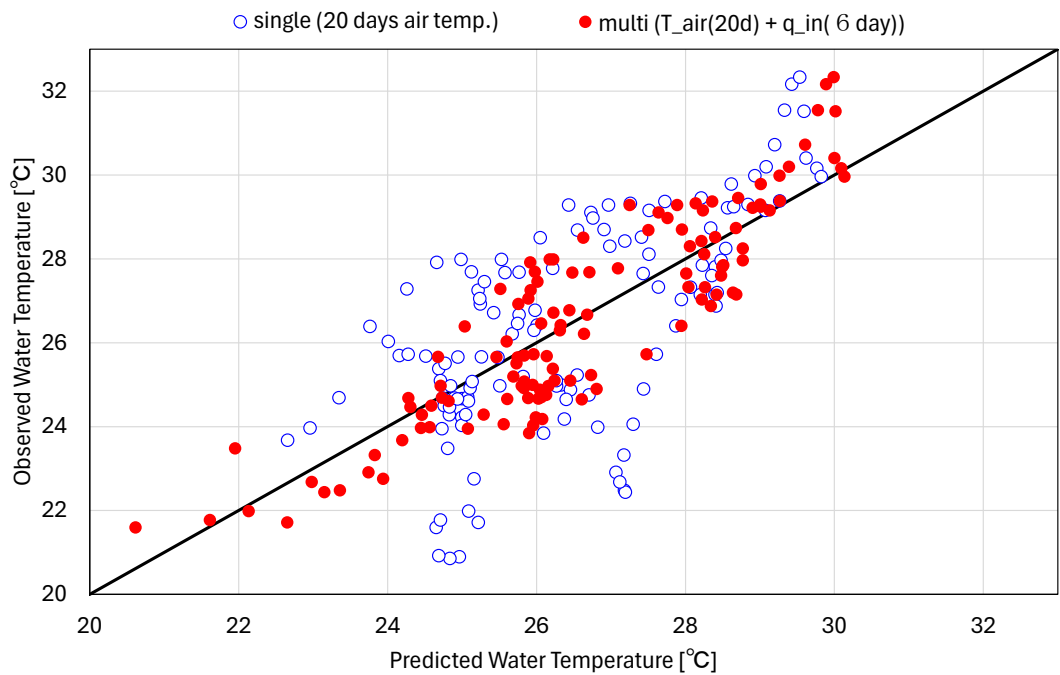


図 19 C 点 (図 2) での過去 20 日間平均気温と室生ダムへの流入量 (過去 6 日平均) を独立変数とした場合の 7 月の日々の室生ダム表層水温予測結果 (2007~2010 年、曝気無)

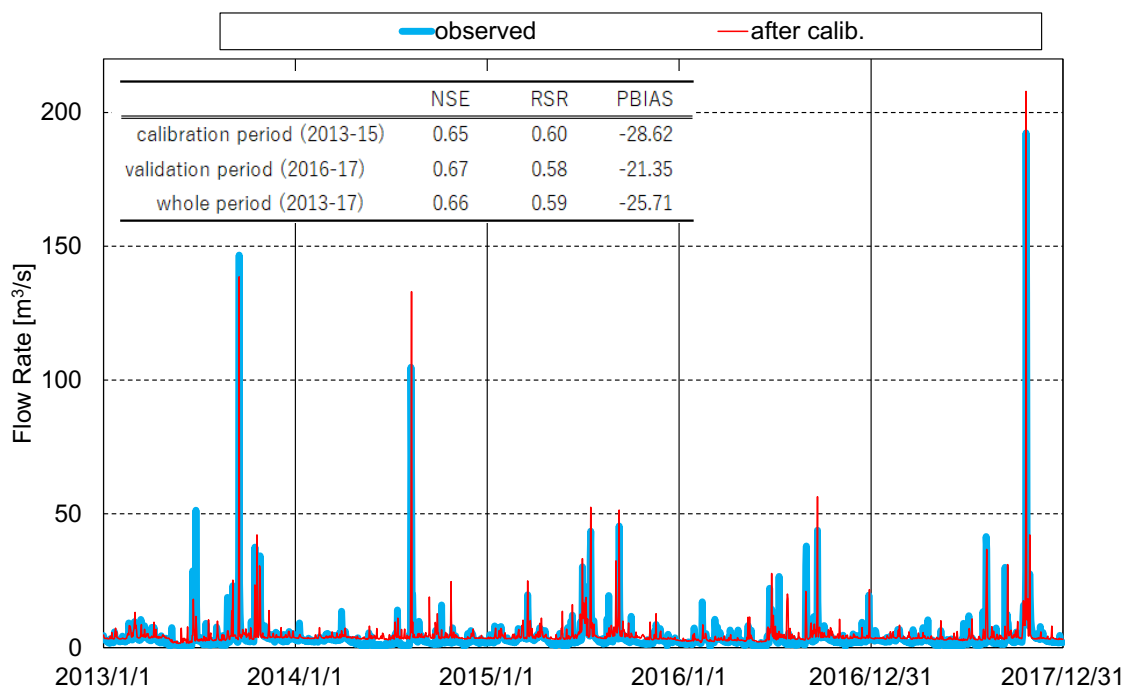


図 20 室生ダム流入量 (実測：ダム流入量、計算：支流 8、171、175、185、71、76、29、173、85 の合計値) の比較 (日々)

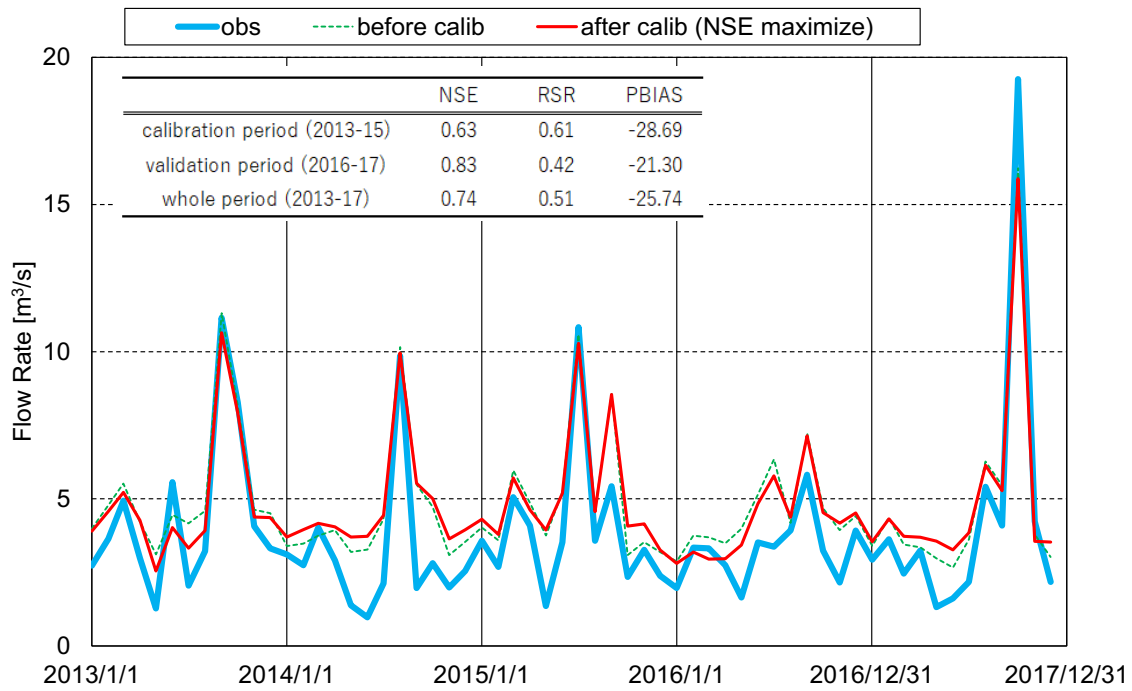


図 21 室生ダム流入量（実測：ダム流入量、計算：支流 8、171、175、185、71、76、29、173、85 の合計値）の比較（月平均）

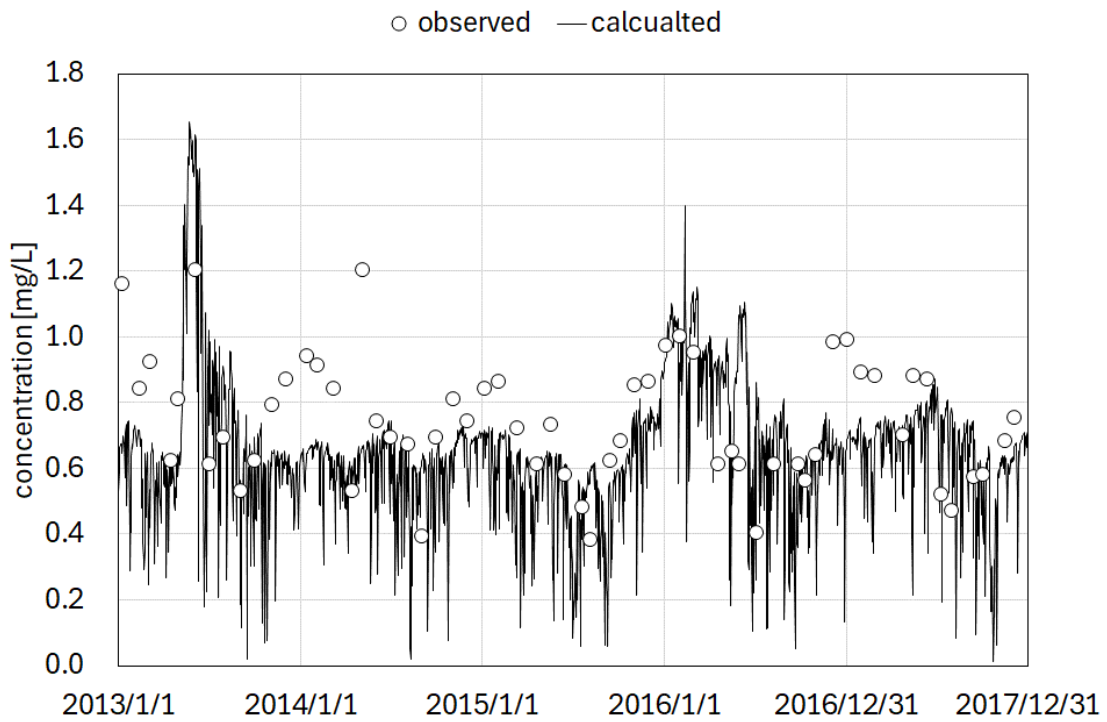


図 22 硝酸態窒素

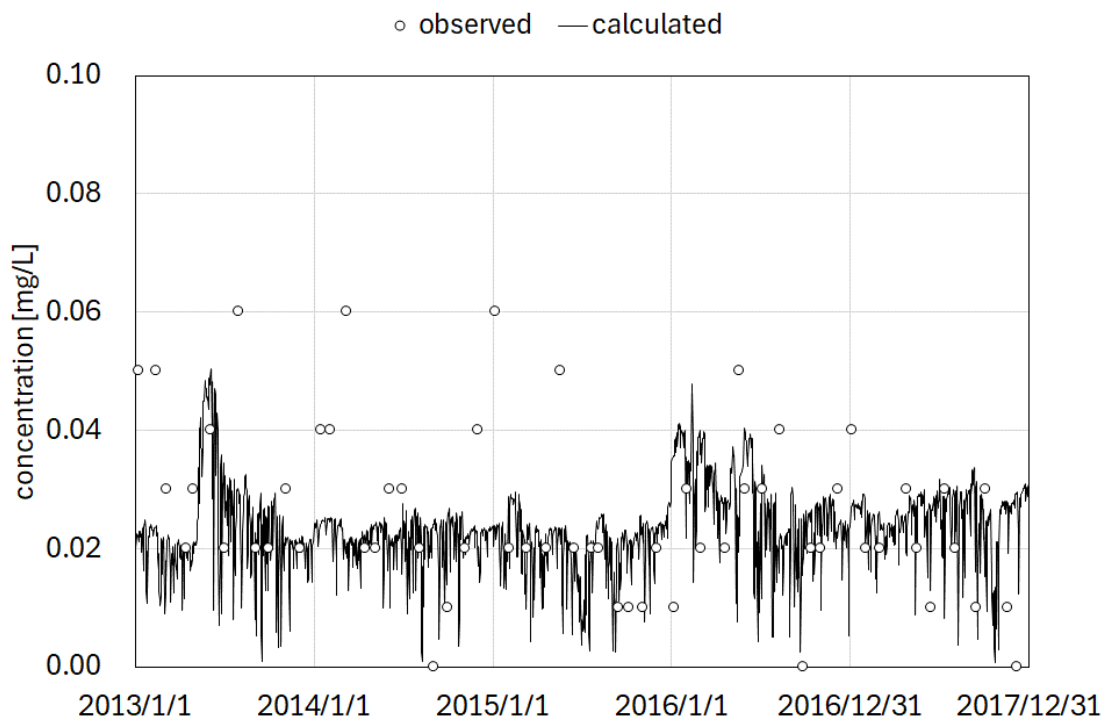


図 23 アンモニア態窒素

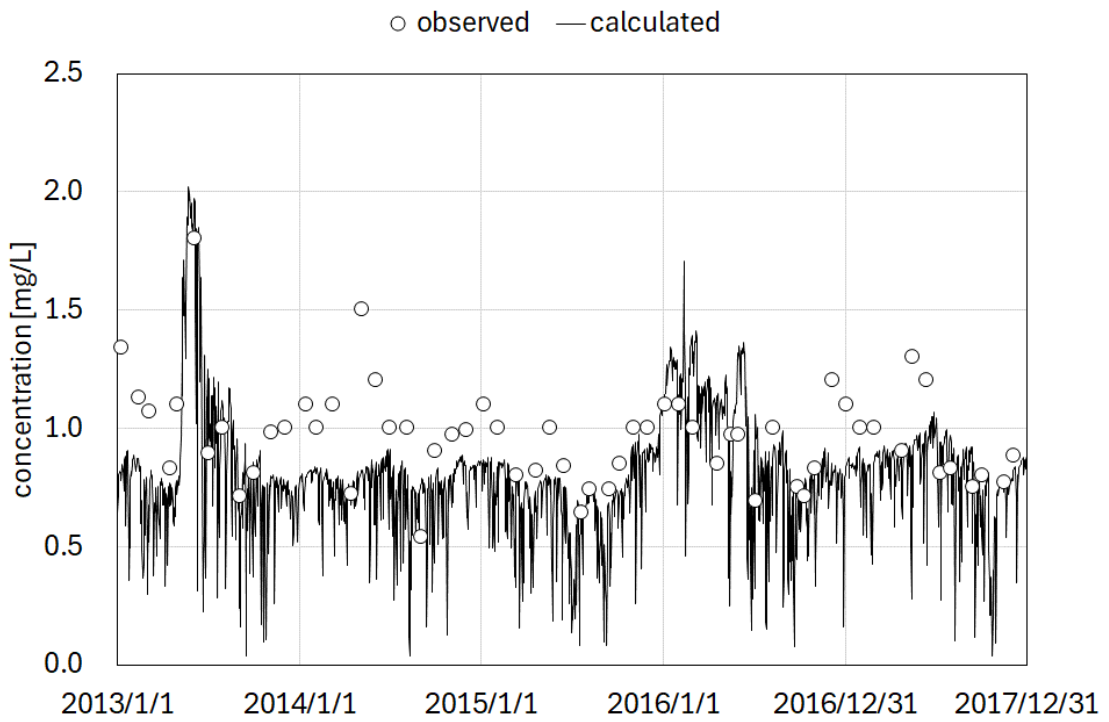


図 24 全窒素

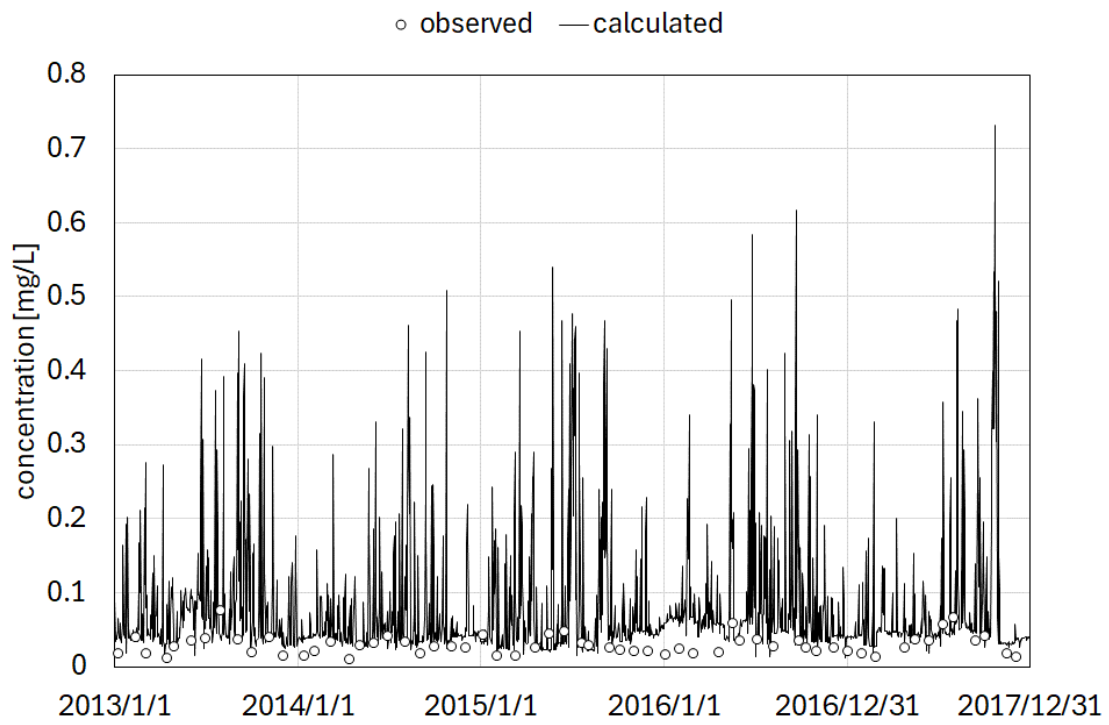


図 25 リン酸態リン

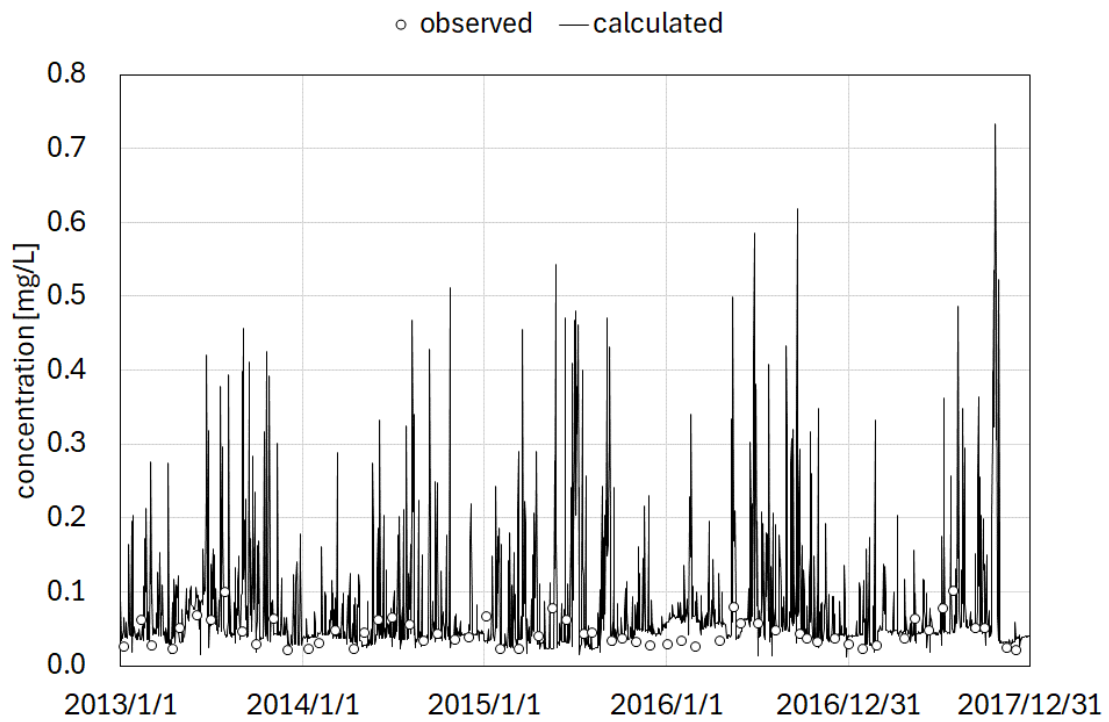
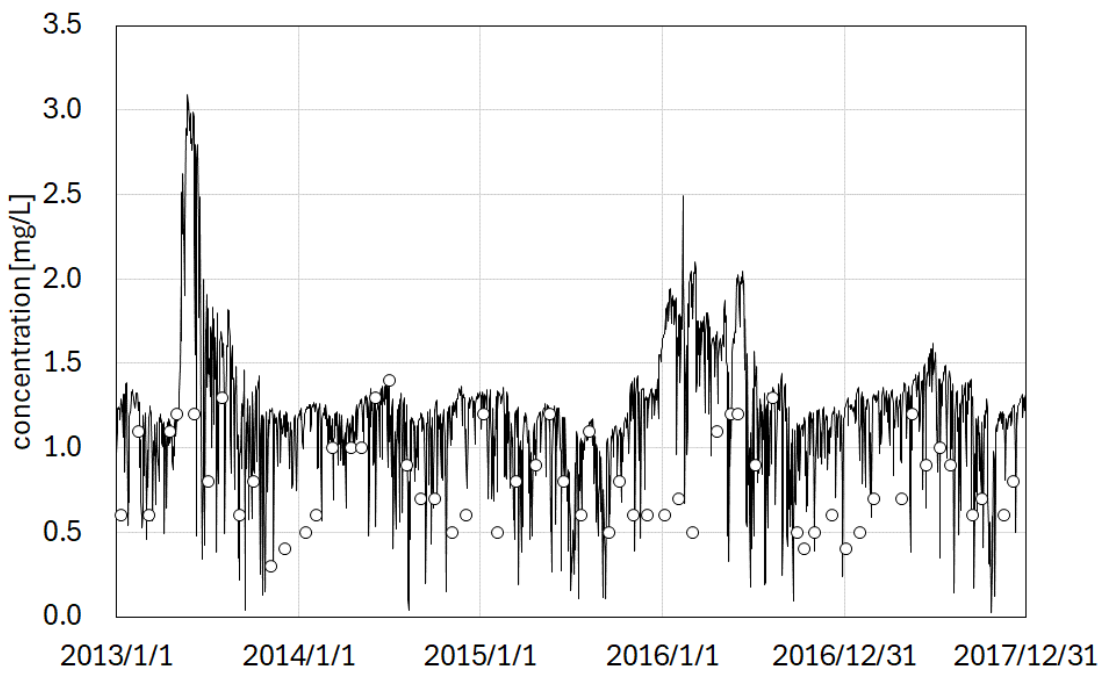
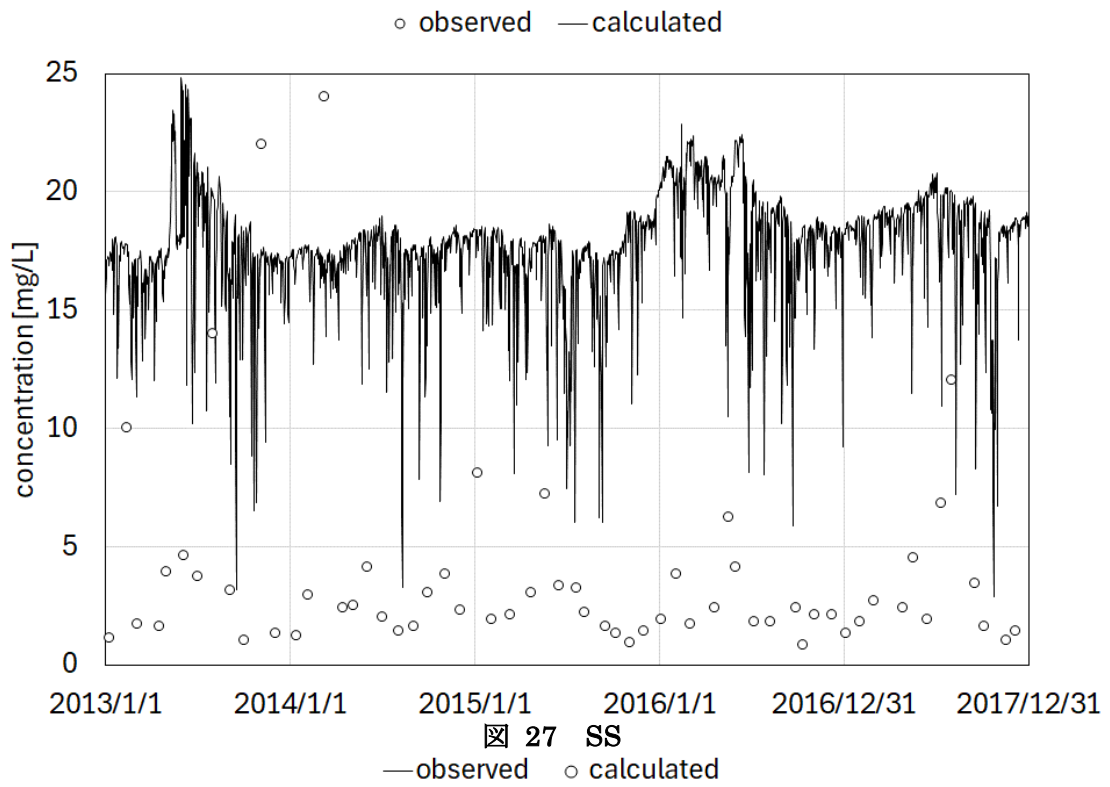


図 26 全リン



⊠ 28 BOD

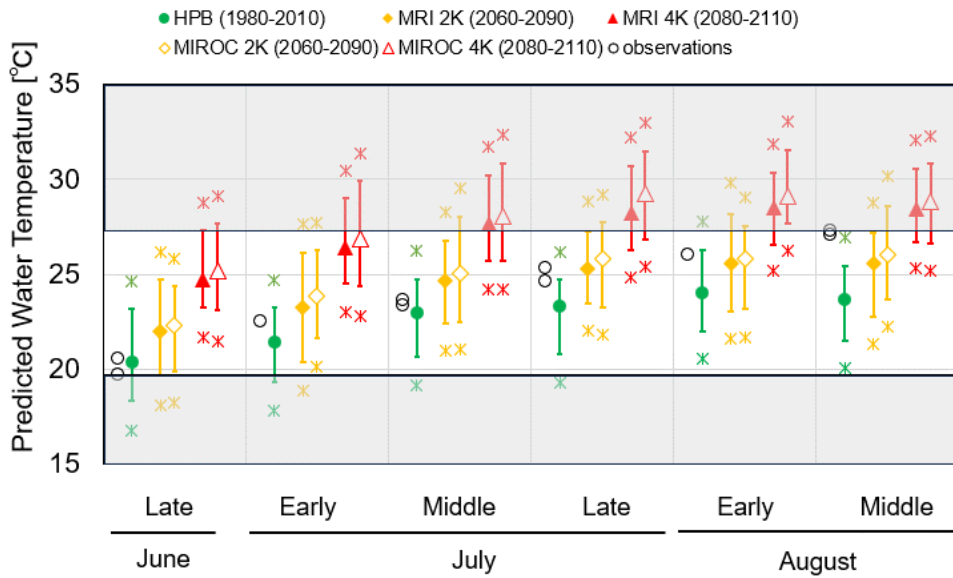


図 29 曝気有条件下、平均気温のみによる単回帰式での将来水温変化の予測 (グレー部分は回帰曲線の範囲外)

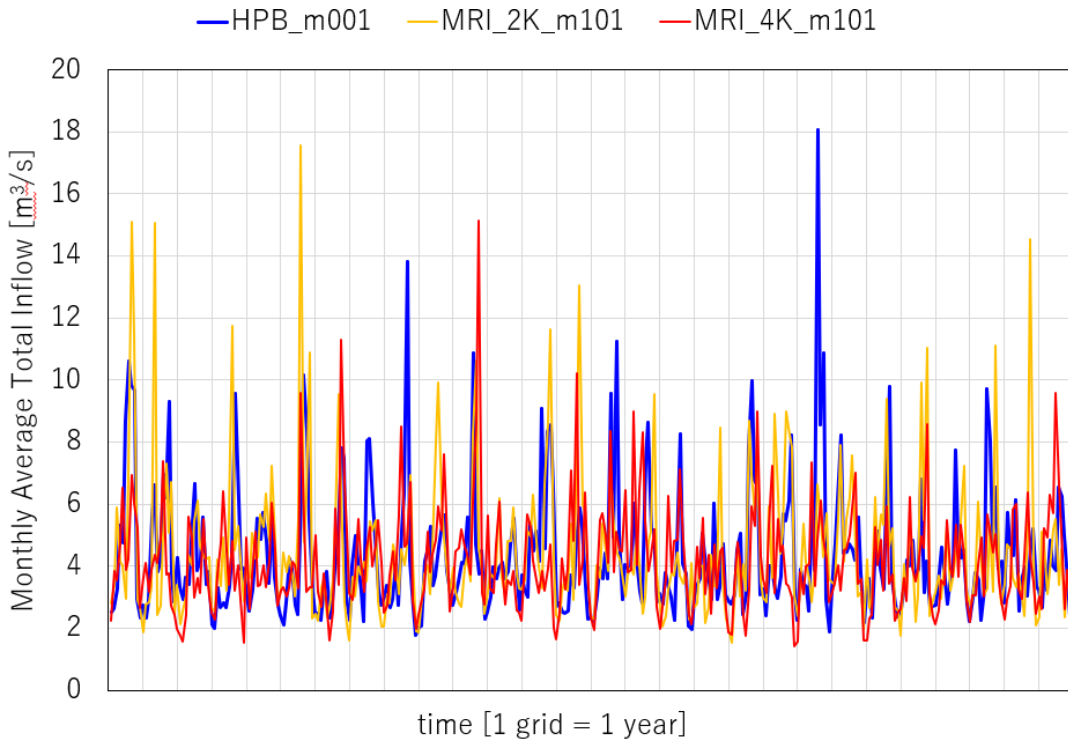


図 30 過去実験 (HPB)、ならびに将来実験 (MRI、2K/4K) の気候条件下での室生ダム流入河川流量シミュレーション (月平均流量の 27 年間計算値)



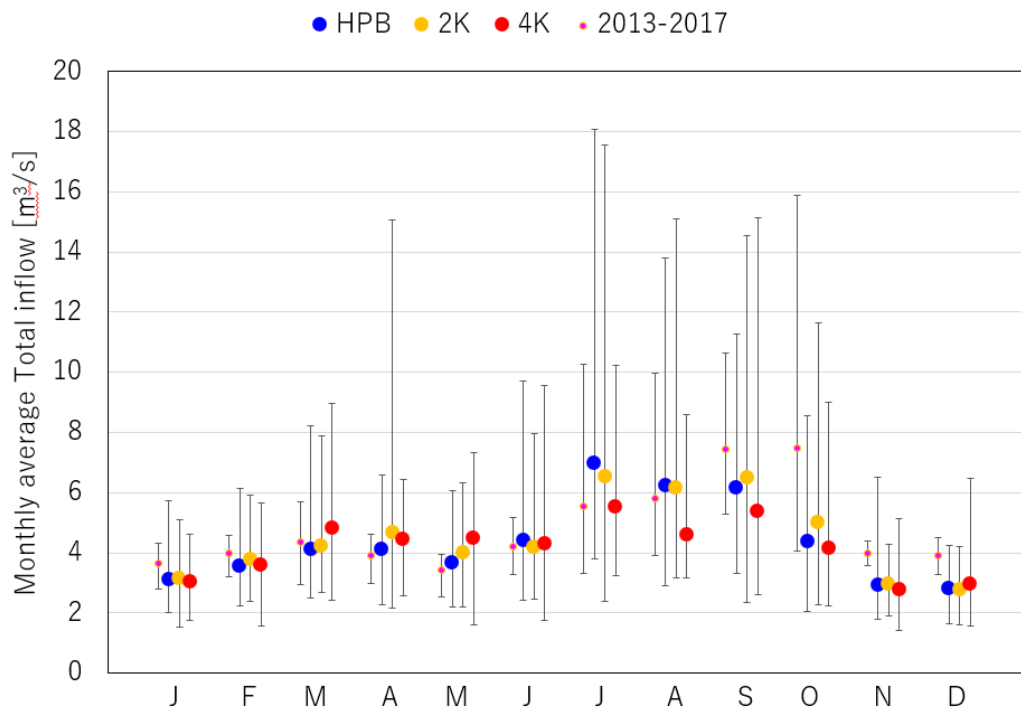


図 31 過去実験 (HPB)、ならびに将来実験 (MRI、2K/4K) の気候条件下での室生ダム流入河川流量シミュレーション (各月平均、幅は最大・最小値)

● HPB\_m001 ● MRI\_2K\_m101 ● MRI\_4K\_m101

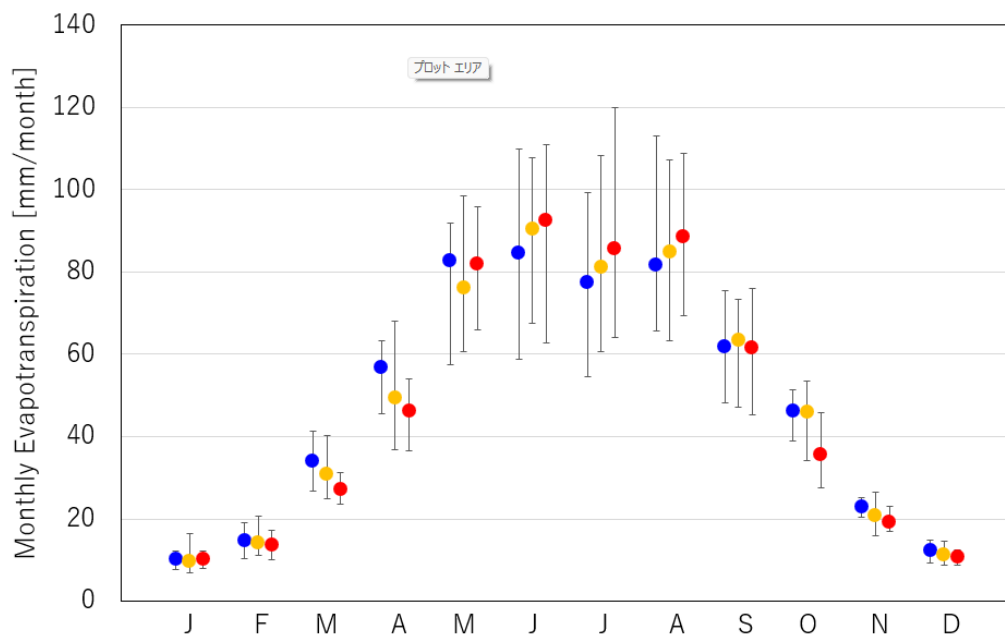


図 32 過去実験 (HPB)、ならびに将来実験 (MRI、2K/4K) の気候条件下での室生ダム流域からの蒸発散量シミュレーション (各月平均、幅は最大・最小値)

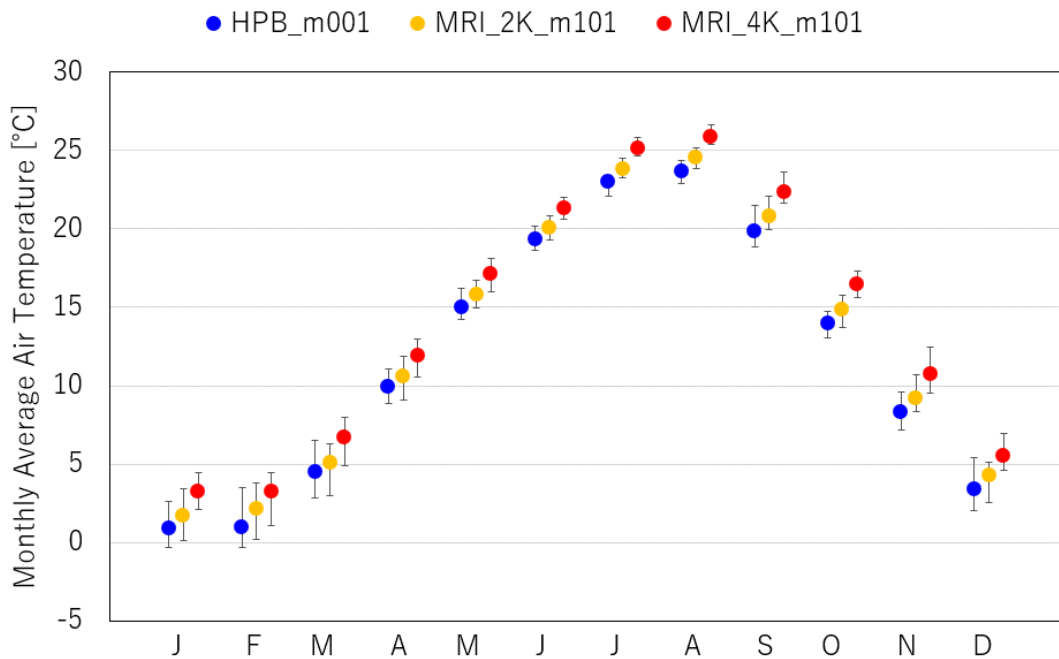


図 33 過去実験 (HPB)、ならびに将来実験 (MRI、2K/4K) の気候条件下での室生ダム流域内平均気温 (各月平均、幅は最大・最小値)

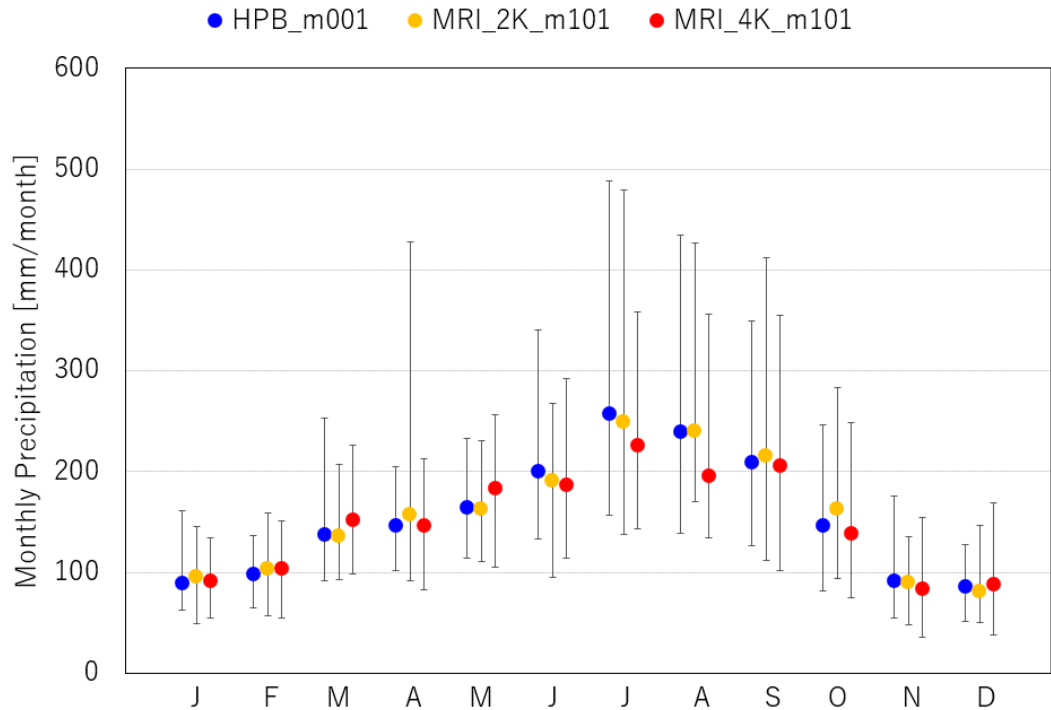


図 34 過去実験 (HPB)、ならびに将来実験 (MRI、2K/4K) の気候条件下での室生ダム流域内月降水量 (各月平均、幅は最大・最小値)