

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)
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型
水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：相模ダム流域の水文モデル作成と気候変動影響評価

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官
研究分担者 下ヶ橋 雅樹 国立保健医療科学院 上席主任研究官
研究協力者 萩山 将 国立保健医療科学院 研究生

研究要旨

気候変動に伴う異常降水や異常気温が水衛生環境に与える影響が懸念されている中、将来にわたり水道事業を継続するには、気候変動影響を定量的に把握し、その適応策を策定する必要がある。本報告では、横浜市水道局他が水道水源とする相模ダム流域から河川流出モデルとして、複雑さの異なる 3 つのモデル（回帰式、タンクモデル、準分布型水文モデル（Soil and Water Assessment Tool; SWAT））を作成し、特に洪水や渇水に対する予測性を比較した。その結果、豪雨と渇水の双方を予測するうえでは、SWAT の再現性が高く、その使用が妥当であることがわかった。この SWAT に関して、流域内の水挙動メカニズムをより詳細に表現すること目的として、パラメータ補正方法の改定や、降雪についてのより詳細な検討を加えた。その結果、同流域から相模ダムへの流入を再現できる良好なパラメータセットを得た。このパラメータセットを用いた SWAT にて、RCP2.6, 4.5, 8.5 での MIROC5 による将来（2081～2100 年）気候計算結果を入力としたシミュレーションを行ったところ、RCP2.6 および 4.5 では過去（1981～2000 年）の気象のもとでは推算されないレベルの、流域からのピーク流出が推算された。また RCP4.5 では過去の気象のもとでは推算されない長期的な低流量が推算された。特に 2, 4 月の渇水, 6, 7 月の洪水の増加が示唆された。

A. 研究目的

気候変動に伴う異常降水や異常気温が水衛生環境に与える影響が懸念されている。将来にわたり水道事業を継続するには、気候変動影響を定量的に把握し、その適応策を策定する必要がある。本研究費補助金における昨年度の報告書[1]では、横浜市他の水源である相模川流域中の相模ダム流域（図 1）の河川流出を、準分布型水文モデルである Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [2] を利用して再現したところ、良好な再現性を得た旨報告した。本年度はさらにこの SWAT 利用の妥当性の評価を行うとともに、そのメカニズムをよ

り詳細に表現すること目的として、SWAT パラメータ補正方法の改定や、降雪についてのより詳細な検討を加えた。また、将来の気候変動に適応した水資源管理を検討するうえで、様々な気候変動シナリオのもとでのリスクを予測することは重要である。ここでは今回新たに得られたパラメータセットを用いた SWAT により、2081～2100 年に予測される流域気候変動の結果として生じる洪水や渇水を推算し、そのリスクについて検討を行うことを目的とした。

B. 研究方法

(1) モデル選択の妥当性評価

流出解析に使用する水文モデルには、いわゆる集中型モデルや、分布型モデル等様々なものが提案されている。使用者側からはできるだけ簡便なモデルが望ましいが、結果的に予測性が低下してしまうことは避けるべきである。ここでは、1日ごとの流出水量を計算しうる以下の3モデルを相模ダム流域に対して作成し、豪雨と渇水に対する予測性を比較した。なお、モデル作成にあたっては、2004年から2006年を、観測値を元にモデルパラメータを補正する期間、2007年から2009年をその補正されたパラメータを有するモデルの予測妥当性の検証期間とした。

(a) 回帰式

最も単純なモデルとして、降水と河川流量の関係を示す回帰式を作成した。補正期間の豪雨日において、2日間雨量と流出水量の回帰式を指数型の関数と仮定し、最小二乗法を用いてパラメータを求めた。また渇水日において30日間雨量と流出水量の回帰式を一次関数と仮定し、同様に最小二乗法でパラメータを求めた。

(b) タンクモデル

次に複雑なものとして、蒸発散を考慮した3段タンクモデルを作成した。その作成ならびにパラメータ補正などの詳細は既報(田中ほか[3])に準じる。ただし本研究では流域内の水田や畑地の割合が低いため、流域内の地下水利用は考慮しなかった。また、2003年7月から12月を流域初期化期間とした。またNSE(後述)を最適化するパラメータセットを求めた。

(c) SWAT

本研究でもっとも複雑なものとして、準分布型のSWATを対象とした。ここでのパラメータ補正は昨年度の報告書[1]に準じるが、ここでは流域初期化期間は2001年から2003年、補正・検証期間は上述のごとくとし、補正対象パラメータも感度解析に基づいて改めて選択した。

また、前日と当日の合計雨量(2日間雨量)が42.5mm(検証期間の上位5%値)を越える日を豪雨日、29日前から当日までの合計雨量(30日間雨量)が65mm(検証期間の下位25%値)を下回る日を渇水日と定義した。

日々の降水量については、農業環境技術研究所の1kmメッシュデータ[4]を基に、流域平均を算出した。各モデルの妥当性評価にあたっては、

Moriassiら[5]を参考に、相模ダム流入量の観測値(神奈川県)とモデルにより計算される流出水量から算出されるNSE及びPBIAS(後述)を指標とした。

(2) SWATパラメータの再補正

SWATでのモデリングは、基本的には昨年度の報告書に準じるが、要点について改めて記載する。
流域データ

流域内の高度分布は国土地理院の50mメッシュ標高より計算した。この分布を用いて相模ダム流域内の小流域と河道をSWATにて計算した(図4)。土地利用については、国土数値情報ダウンロードサービスより入手した2006年の土地利用図ものを使用し、図5及び表1に示したようにSWATの土地利用と対応させた。図より、流域の77%が森林でおおわれていることがわかる。なお、SWATでの水田の取扱いについては、既報(例えば[6])と異なるが、その面積割合が小さい(約2%)ことも鑑みて、小保内ら[7]と同様に”water”として分類した。また、富士山山頂に近い荒地(wasteland)は、ArcSWATとは別のSWATインターフェースであるMWSWAT[2]のデータベースに含まれる裸地(Bare)とした。一方、富士山の麓に位置する荒地はSlender Wheatgrassとした。また、その他用地(other land)はResidential-Med/Low Densityとした。流域内土壌の約80%は褐色森林度によって占められている(国土交通省)。このため、流域全体を1つの土壌種と仮定し、土壌関連の水理学的パラメータセット1つで示すこととした。

流域では、道志第1発電所が流域外から水を取り入れているが、その流量は神奈川県から入手した。

気象データ

SWATの計算では、流域内の日々の降水、最大・最低気温、日射量、風速、及び相対湿度が必要である。降水、最大・最低気温、日射量については3次メッシュ(約1kmの空間解像度)のデータは農業環境技術研究所から入手した[4]。相対湿度はAMeDAS(気象庁)の河口湖、風速はAMeDASの小河内、八王子、大槻、古関、河口湖、及び山中のデータを使用した。

パラメータ補正と検証

モデル予測性は日々の流域からの平均流出流

量[m³/s]予測性により評価した。評価に用いた流出流量(=相模ダム流入量)は神奈川県から入手した。評価にあたっては、Moriyasuら[5]に従い、Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) (Eq. (1))ならびに percent bias (PBIAS) (Eq. (2))を指標として用いた。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - N_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{i,ave})^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - N_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (2)$$

ここで、nは観測数、O_iは観測された流出量(=相模ダム流入量)[m³/s]、N_iは計算された流出量[m³/s]、O_{i,ave}は観測値の平均[m³/s]である。

補正対象とするパラメータは感度解析により決定した。ここでNSEは洪水時の予測性により左右されることが明らかである。今回の検討では洪水のみならず、低流量も含めた長期間の予測性を高める必要性があったため、図6に示した、補正対象パラメータを選択したのちにPBIASに感度の高いパラメータをまず補正し、引き続いて残りのパラメータを補正する方法を提案し使用した。なお、計算に影響を与えないSWATのパラメータについては補正対象外とした。パラメータ補正には、SWAT-CUP [8] ver. 5.1.5.4を使用し、SUFI-2を用いて、1回の補正あたり2000回計算により実施した。この補正・検証において、2001~2003年のデータは流域内の初期化、2004~2006年は補正、2007~2009年は検証に用いた。

(3) 将来気候変動の影響評価

(2)で得られたパラメータセットを用いて、SWATによる将来気候の影響予測を行った。ここでは、過去(1981~2000年)の流量実測値と、将来(2081~2100年)の予測値の比較をもって、将来の気候変動の影響として評価した。過去の気象データについては、農業環境技術研究所[4]ならびに気象庁から得た。将来気候については、Model for Interdisciplinary Research on Climateのversion 5(MIROC5)[9]により、2100年の放射強制力が2.6、4.5及び8.5 W/m²となる代表的濃度経路(RCP)[10](RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)での計算結果を

the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)[11]より入手して使用した。なお、CMIP5に収録されているMIROC5の計算結果は3次メッシュではない。このため、相模ダム流域付近の点(北緯 35.72° ;東経 139.2°)のデータをまず入手し、図4に示した各点のデータを累積度数関数によるバイアス補正[12, 13]により得た。このバイアス補正においては、1981~2000年の実測気象値(農環研, 気象庁)とMIROC5による過去の計算値を参照として用いた。すなわち、図4に示した点でのそれぞれの実測値とMIROC5による北緯 35.72° ;東経 139.2°の計算値の差を示す累積密度関数を作成した。この累積密度関数を用いて、将来予測値から各点の予測値を得た。なお、将来予測においては土地利用の変化は想定しなかった。

なお、上記(1)~(3)における解析では、ArcSWAT ver.2009.93.7b [2], ArcGIS (Ver. 9.3; ESRI ジャパン), Microsoft Office Excel 及びそのVBA (Ver 2010 及び Ver. 2013; Microsoft, WA, USA), エクセル統計 2010 (社会情報サービス)を使用した。

C. 研究結果及びD. 考察

(1) モデル選択の妥当性評価

回帰式については、豪雨に関しては決定係数 R² = 0.73 (n = 57) となったが、渇水については十分な回帰式が得られなかった (R² = 0.034, n = 284)。タンクモデル及びSWATについては、検証期間において、NSEがそれぞれ0.82及び0.79と良好であったが、PBIASはSWATの0.3に対してタンクモデルでは21となり、タンクモデルでの過小評価傾向がみられた。

豪雨日の流出水量について、観測値と計算値の比較を図2に示す。回帰式モデルでは、図中に矢印で示した流出水量の多い2点で観測値と計算値が大きく異なる結果となった。この2点におけるそれぞれの2日間降水量は回帰に使用しなかった範囲、すなわち外挿部分であり、その結果予測性が著しく低下したものと推測された。この2日を除いたデータに対する回帰式モデルのNSEは0.46、PBIASは5.0であった。一方、タンクモデルとSWATに関しては、この強い雨に対しても一定の予測性があることがわかる。また両指標から、若干タンクモデルの再現性が良い結果となった。

渇水日の流出水量について、観測値と計算値の

比較を図 3 に示す。タンクモデルでは渇水になるほど過小評価となった。一方、SWAT は渇水時の流出水量の再現性が高く、渇水予測にも使用しうるものとなった。なおタンクモデルに関しては、良好な予測性が得られている流域もある（田中ほか[3]）ことから、流域条件の違いで、その適用性が左右されるものと考えられる。

以上より、相模ダム流域において豪雨に伴う洪水とともに少雨に伴う渇水（低流量）も予測するためには、SWAT を利用することが妥当であることがわかった。

(2) SWAT パラメータの再補正

SWAT のパラメータについては、ArcSWAT の初期値や文献報告値等、様々な情報があり、それらの値を用いて暫定的に計算を行うことが可能である。しかしながら、適切な範囲でパラメータ補正を行うことで予測性を向上させることも重要である。ここでは、図 6 に示した方法による予測性の向上を、暫定的なパラメータを用いた計算結果と比較することで確認した。なお、ここでは図 6 の感度解析に基づいて決定された 14 の高感度パラメータと、これまでの経験から好感度と分類した 7 つのパラメータ、及び流達時間に関する 1 パラメータを補正対象とした（表 2）。これらについて、補正前のパラメータ（=ArcSWAT に含まれる初期値、表中の tentative value(s)）の計算では、NSE は -4.7、PBIAS は -6.2 となり、補正の必要性がうかがえた。これらのパラメータは、既報（[8, 14]）においても補正されている。SWAT-CUP にて SUFI-2 を実施したところ、これら 22 のうち 11 のパラメータが NSE の場合と比較して、PBIAS に対して高感度となったため、これら 11 のパラメータを PBIAS 影響パラメータ（PBIAS-influencing parameters, 表 2）とした。これらの PBIAS 影響パラメータには、土壌に関するパラメータ（例えば SOL_K）や雪に関するパラメータ（例えば SFTMP）、及び地下水に関するパラメータ（例えば GWQMN）が含まれた。これらのパラメータのうちのいくつかは NSE に対しても感度が高く、それらは次の段階で再補正した。結果として、NSE のみを参照する補正と比較して、今回の方法ではより再現性の高いハイδροグラフが得られた。Arnold ら[8]は基底流出（base flow）と（降水に直結する）流出（runoff）を分離し、逐次的に補正する方法を提案している。今回ここで提案した補

正方法は、基底流出と流出を分離しない簡便な 1 方法として有効である。

最終的に補正されたパラメータセット（表 2）を用いた、2004 年から 2009 年の日々の流出流量計算結果を示すハイδροグラフを図 7 に示す。補正、検証それぞれの期間の NSE 及び PBIAS も併せて示している。補正期間では NSE は 0.837、PBIAS は 2.73 となり、検証期間では NSE は 0.751、PBIAS は -2.67 となった。検証期間において NSE では若干の低下がみられたが、予測性を大きく劣化させるほどのものではないと判断した。この日々計算結果をもとに算出される月平均流量の予測結果を図 8 に示す。Moriassi らの示したモデル予測性の評価と照らし合わせ、ここで得られた NSE と PBIAS は”very good”の範囲にあり補正期間：NSE = 0.958, PBIAS = 2.79, 検証期間：NSE = 0.909, PBIAS = -2.63, ここで得られたパラメータセットが良好な予測性を与えるものであることがわかった。

予測の不確定性を確認するため、予測値と実測値の関係を図 9 に示した。ここで、対象とした期間の日々を、降水量に基づいて 3 種類に分類した。一つは豪雨日（“heavy precipitation day”）であり、その日とその前日の 48 時間雨量が 100 mm を超えるものをこの分類とした。もう一つは乾燥日（“dry day”）であり、48 時間雨量が 1 mm 未満のものとした。その他を通常日（“normal day”）とした。計算結果の±50%と±100%を図中に破線、あるいは点線で示しているが、この範囲の内外により、予測の不確定性を評価した。予測±50%の幅で見た場合、すべての日の 96.2%、乾燥日の 96.8%、豪雨日の 63.2% がその範囲内にあった。一方豪雨日については、観測された 19 のうち 4 日が予測の 1.5 倍を超えた。ここで、もし予測の信頼区間を -50%~+100%とすると、豪雨日についてはその予測の 73.7%がこの範囲に入ることになる。通常日と乾燥日の分布は概ね重なっているとともに、乾燥日のいくつかの流量は豪雨日のそれを上回っている。これらの日の予測値は良好なものであり、結果的に流域での水の滞留が十分に再現できたものと判断した。

(3) 将来気候変動の影響評価

前述のように、ここでは RCP2.6, 4.5, 及び 8.5

のもとで予測される相模ダム流域からの 2081 年～2100 年の流出流量を、今回補正されたパラメータセットを用いて SWAT で計算し、過去 (1981～2000 年) のそれと比較して、リスクの変化について考察する。ここで、過去の流出流量は実測された流出量 (=相模ダム流入量) ではなく、過去の気象から計算された流出量であり、気象から算出されるポテンシャルベースの考察であることに注意されたい。日々単位のハイドログラフを図 10 に示す。日平均流出量が $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える洪水が 1982 年 8 月、同年 9 月、および 1983 年 8 月の 3 回見られている。これらすべてのケースでは、台風による豪雨が相模川の上中流域で生じていた。1982 年の 2 件では、相模ダム河口の平塚市にて河川浸水や雨水下水道の逆流が発生した。さらに、河口湖の水位上昇による洪水が 1982 年 9 月と 1983 年 8 月に生じている[15]。さらにこのような相模ダムへの高流入は濁水長期化[16]といった問題を引き起こす可能性がある。実際のところ、 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ は一日あたり 86 百万 m^3 となり、相模ダムの有効容積の 1.8 倍に相当する。

1981～2000 年にかけて観測された流域内平均雨量の最大値は 299 mm/day であった。一方、2081～2100 年において予測される 300 mm を超える雨量は RCP2.6, 4.5 および 8.5 でそれぞれ 2 回、2 回、および 1 回である。それらのうちの 2 回の豪雨に相当する降水は過去 (1981～2000 年) には見られなかった $2,500 \text{ m}^3/\text{s}$ の流出量が RCP2.6 で予測されている。この極めて高い流入量は連続的な豪雨 (その前日が 260 mm 、当日が 365 mm) のもとで計算されたものである。RCP4.5 のもとでは、 305 mm の降水時に $1,600 \text{ m}^3/\text{s}$ の流出量が計算された。ここでは、前々日と前日にそれぞれ 28 mm および 60 mm の降水が予測されている。一方で、短い計算刻みがこのような極めて高い流出量を算出した可能性もある。たとえば、3 日間の平均流出としてすると、RCP2.6 のそれは $1,397 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP4.5 のそれは $1,063 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、この数値は過去 (1981～2000 年) に計算された値のおよそ 1～1.3 倍となる。月ごとの比較については後述する。

渇水リスクについては、このシミュレーションで計算された低流量を用いて考察する。1996 年 2 月 26 日から 4 月 24 日、および 7 月 5 日から 23 日にかけて、横浜市水道局他では、相模ダム等の水位低下による取水制限が行われた。この期間の

平均流出水量計算値は $10 \text{ m}^3/\text{s}$ を下回っていた。この値を下回る日は、過去において 57 日、RCP2.6 にて 24 日、RCP4.5 にて 289 日、RCP8.5 にて 22 日計算されている。特に RCP4.5 では、2099 年 12 月から 2100 年 4 月までのおよそ 5 ヶ月間、平均流入量が $8\sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$ という低流量が計算されており、深刻な渇水の可能性を示唆している。

さらに各月ごとの流量の分布を統計的に解析した。図 11 には、過去および将来における各月の日流量平均値の最大値、75% 値、中央値、25% 値、および最低値を箱ひげ図として示した。ここで、過去と比較した将来の値の有意差を Brunner-Munzel 検定にて確認した。その結果、9 月から 4 月 (RCP2.6 での 3 月を除く) においては、将来、流量が有意に低下するものと予測された。特に RCP4.5 における 4 月の減少が目立った (中央値が $25.0 \text{ m}^3/\text{s}$ から $18.9 \text{ m}^3/\text{s}$ へと 24% 減少)。前述のように、1996 年 2～4 月には取水制限が起こっている。したがって、2～4 月の流域からの低流出量は、水不足の大きなリスク要因と考えられる。一方、6、7 月および 11 月の流出量は増加するものと予測されており、特に 6、7 月の増加が目立つ。6 月における中央値は、過去において $30.8 \text{ m}^3/\text{s}$ であったものが、RCP2.6 では $60.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP4.5 では $53.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP8.5 では $44.5 \text{ m}^3/\text{s}$ となった (44～97% の増加)。また 75% 値は、過去に $38.7 \text{ m}^3/\text{s}$ であったものが、RCP2.6 では $124.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP4.5 では $96.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP8.5 では $86.2 \text{ m}^3/\text{s}$ となった (122～222% の増加)。7 月における中央値は、過去において $33.2 \text{ m}^3/\text{s}$ であったものが、RCP2.6 では $49.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP4.5 では $43.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RCP8.5 では $43.7 \text{ m}^3/\text{s}$ となった (32～50% の増加)。これらの結果より、6、7 月の洪水に伴う濁水や施設損壊のリスクが高くなるものと推測され、その適応策の必要性を示唆した。

前述のように、今回のシミュレーションでの、計算ステップが短いことによって生じる過大評価を避けるため、月平均としての比較もあわせて行った。その結果を図 12 に示す。前述の渇水月についても同図に示している。1996 年 2 月の月平均流出量は $10.8 \text{ m}^3/\text{s}$ と計算され、1981～2000 年において 2 番目に低い値となった。この値は図 12 中、破線で示している。また 1996 年 3 月の値は $11.5 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、3 番目に低い値となった。これらと同じレベルの低流出量は、1984 年と 1988 年

に2回計算されている。しかしながら、それらの低流量は双方ともに単月で収束した。一方、1996年2月から3月のように2ヶ月以上連続で12.0 m³/sを下回ったものがRCP4.5において、2094年、2096年、2098年、2099年、および2100年に推算されている（最大で5ヶ月の連続）。このことから、RCP4.5下で予測される相模ダム流入の低下はもっとも深刻であることが示唆される。Mouri[17]は、日本でのRCP4.5における土砂生成(wash load)予測が他のシナリオでのそれに比べて低いことを示している。土砂生成量の低下は河川流量の低下に伴うものであり、今回のRCP4.5での降水量低下と同じ傾向を示すものである。一方で実際には横浜市他の水源として、宮ヶ瀬ダムが建設され、2001年から運用されているため、渇水に対する適応性は高まっているものと考えられる。しかしながら、渇水ポテンシャルが増加することには注意を要するものといえる。

一方、今回はMIROC5のみを用いたシミュレーション結果を示しており、将来予測モデルの不確定性についてはまだ検討の余地は残されている。今後はMRI等のほかのモデル計算結果を用いたシミュレーションを行い、その不確定性についても考察を行う必要がある。したがって、ここで示したシミュレーション結果は将来予測の一結果として位置づけるべきである。しかしながら、水文モデルと気候変動予測を用いた、将来の洪水、渇水リスク評価の例を示すことができた。

E. 結論

相模ダム流域の河川流出モデルとして、複雑さの異なる3モデル(回帰式、タンクモデル、SWAT)を作成し、豪雨と渇水の流出水量の予測性を比較した。豪雨に関しては、最も単純な回帰式では、回帰の範囲を考慮することによりある程度の予測ができることがわかった。またタンクモデル及びSWATでは良好な予測性が確認された。一方、渇水に関してはSWATの再現性の高さが際立った。

相模ダム流域の流出を再現するSWATのパラメータ補正方法の改定や降雪についてより詳細な検討等を行い、良好なパラメータセットを得た。

このパラメータセットを用いたSWATにて、RCP2.6, 4.5, 8.5でのMIROC5による将来(2081~2100年)気候計算結果を入力としたシミュレー

ションを行ったところ、RCP2.6および4.5では過去の気象からは推算されないレベルの、流域からのピーク流出が推算された。またRCP4.5では過去の気象からは推算されない長期的な低流量が推算された。特に2,4月の渇水リスク増加,6,7月の洪水リスク増加が示唆された。今後、複数の将来気候予測モデルによるシミュレーションを行ってその不確定性を確認する必要がある、今回の結果は一例に過ぎないが、水文モデルを用いた将来の洪水、渇水リスクの評価方法が例示できた。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1) 論文発表

秋葉道宏, 下ヶ橋雅樹, 靱山将 (2017). 水供給システムにおける気候変動の影響—生物障害の発生に及ぼす水温上昇の影響について—. 用水と廃水 59(1), 45-50.

2) 学会発表

靱山将, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏 (2016). 気候変動影響評価のための河川流出モデルの予測性比較. 平成28年度全国会議(水道研究発表会); 2016年11月10日, 京都. 同講演集, p. 218-219.

靱山将, 永見健輔, 桑原直樹, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏 (2017). 水道水源流域の水文モデルの作成と気候変動の影響評価. 第51回日本水環境学会年会; 2017年3月17日, 熊本. 同講演集, p. 414.

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] 秋葉道宏, 下ヶ橋雅樹, 靱山将 (2017) 流域システムの水管理対策に関する研究, in 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) 大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究 (研究代表者: 秋葉道宏. 〈課題番号: H27-健危-一般-003〉) 平成 27 年度 総括・分担研究報告書. p. 17-31.
- [2] USDA and Texas A&M University. SWAT | Soil & Water Assessment Tool. <http://swat.tamu.edu/> (2014 年 4 月 23 日確認).
- [3] 田中太一, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏 (2015) タンクモデル及び LQ 式を用いた気候変動による水道原水流量及び濁度への影響評価. 平成 27 年度全国会議 (水道研究発表会); 2015 年 10 月 22 日, さいたま. 同講演集: p. 154-155.
- [4] 清野裕 (1993) アメダスデータのメッシュ化について. 農業気象 48(4): pp. 379-383.
- [5] Moriasi, D.N., et al. (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE. 50(3): p. 885-900.
- [6] Xie, X. and Cui Y. (2015) Improving hydrological simulations with SWAT for paddy watersheds: Model development and data assimilation. in MARCO Satellite International Workshop 2015 Adoption and adaptation of SWAT for Asian crop production systems and water resource issues (International SWAT-Asia Conference IV) Oct. 20, 2015, Tsukuba, Japan. Program & Abstract: p. 19.
- [7] 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(5): p. 2-13.
- [8] Arnold, J.G., et al. (2012) SWAT: Model Use, Calibration and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers 55(4): p. 1491-1508.
- [9] Watanabe, M., et al. (2010) Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. Journal of Climate 23(23): p. 6312-6335.
- [10] Thomson, A.M., et al. (2011) RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. Climatic Change. 109: p. 77-94.
- [11] Department of Energy, Lawrence Livermore National Laboratory (2016) Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5), <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/> (Access January, 2017)
- [12] 飯泉仁他 (2010) 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門. 農業気象 66(2): p. 131-143.
- [13] 松田恵他 (2013) 地域スケールの気候変動予測と観光快適性指標を用いた影響評価. 三菱総合研究所所報(56): p. 30-45.
- [14] 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(3): p. 153-173.
- [15] 国土交通省 (2007) 相模川水系の流域及び河川の概要 (案) .
- [16] 堀田哲夫他 (2003) 下層密度流によるダム貯水池の濁水長期化現象とその対策. 水文・水資源学会誌 16(3): p. 236-245.
- [17] Mouri, G. (2015) Assessment of spatiotemporal variations in the fluvial wash-load component in the 21st century with regard to GCM climate change scenarios. Science of the Total Environment 533: p. 238-246.

J. 謝辞

相模ダム流入量ならびに道志第 1 発電所の流入水量は神奈川県企業局利水電気部利水課にご提供いただきました。記して謝意を表します。



図 1 相模ダム流域位置図

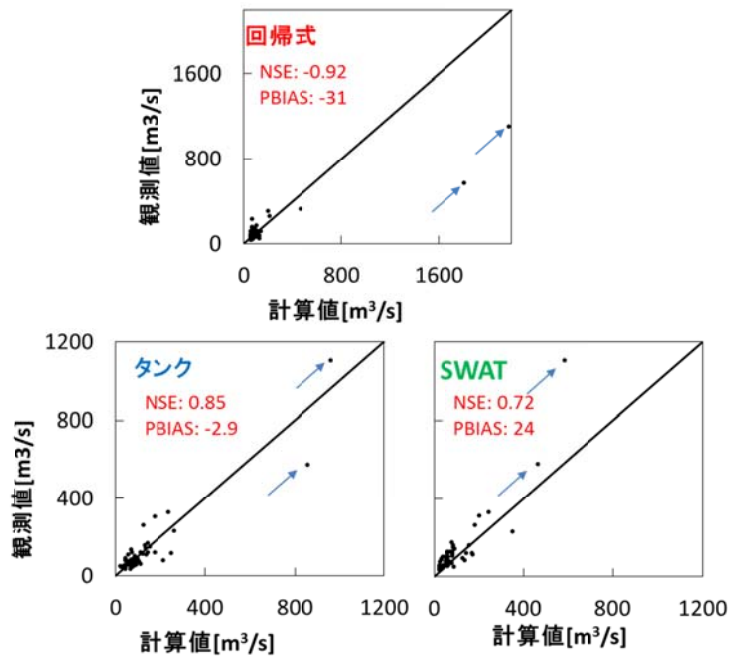


図 2 豪雨日における流出水量観測値と3つのモデルによる計算値

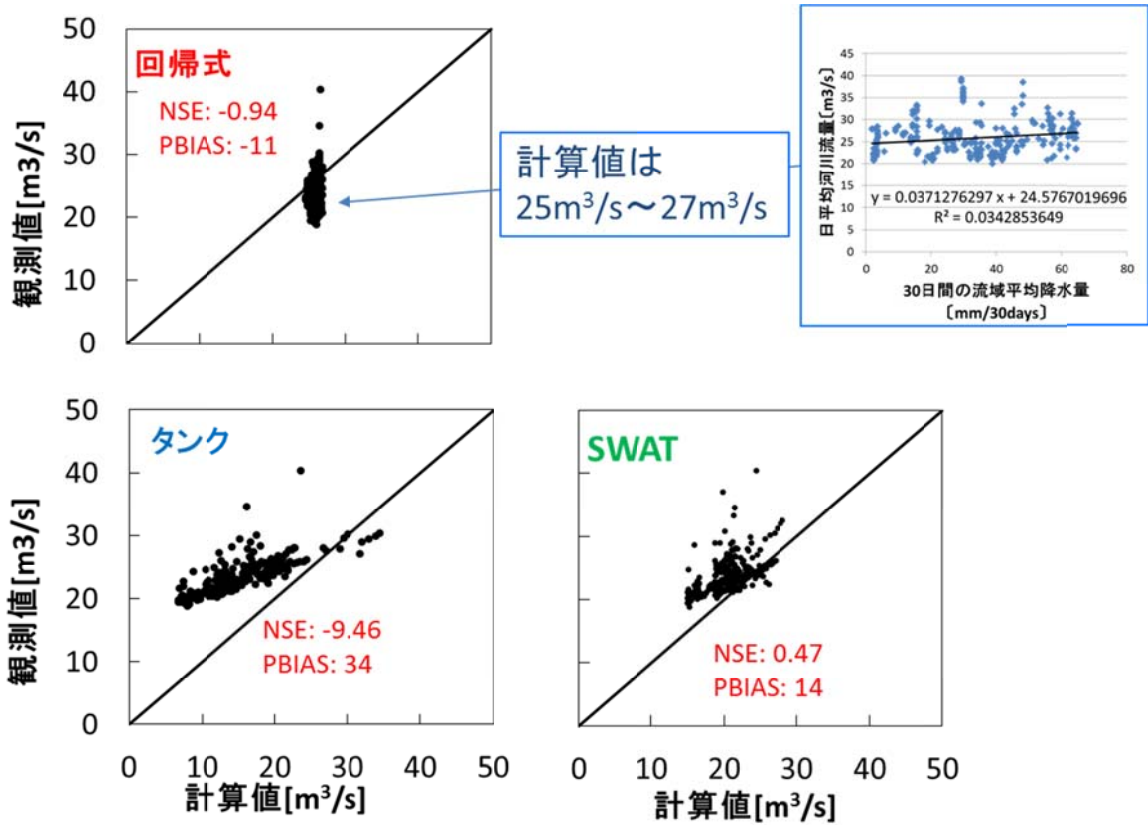


図 3 渇水日における流出水量観測値とモデルによる計算値

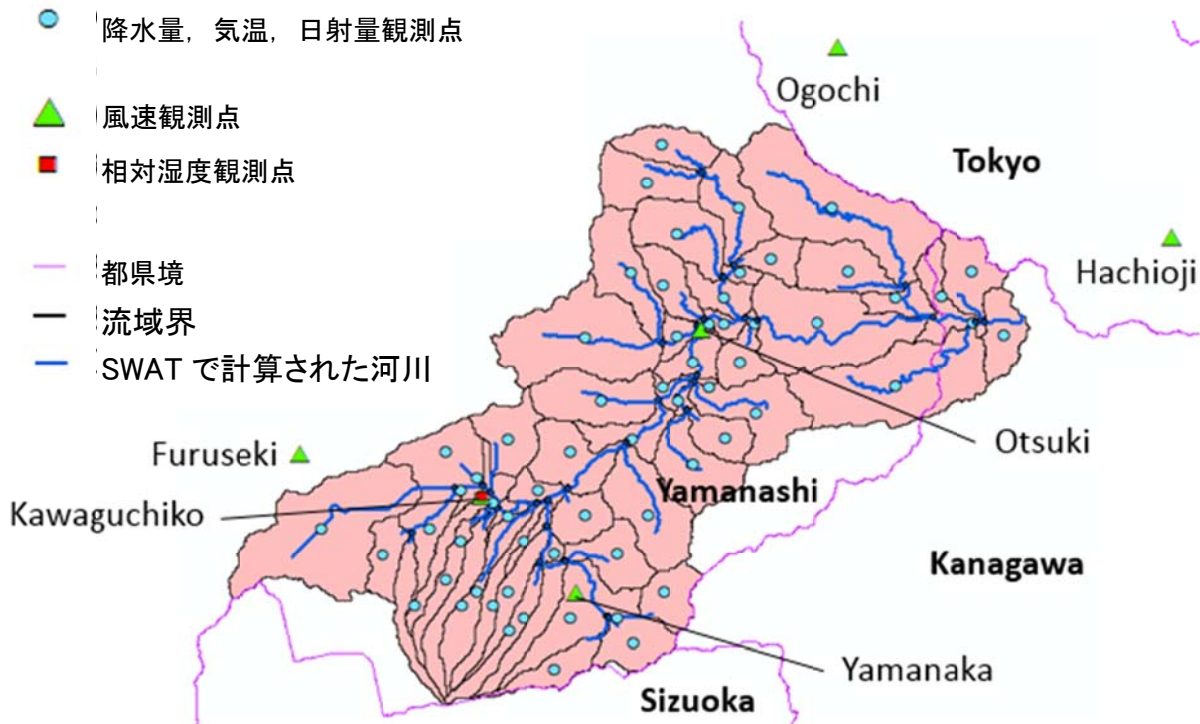


図 4 相模ダム流域の小流域及び気象観測点

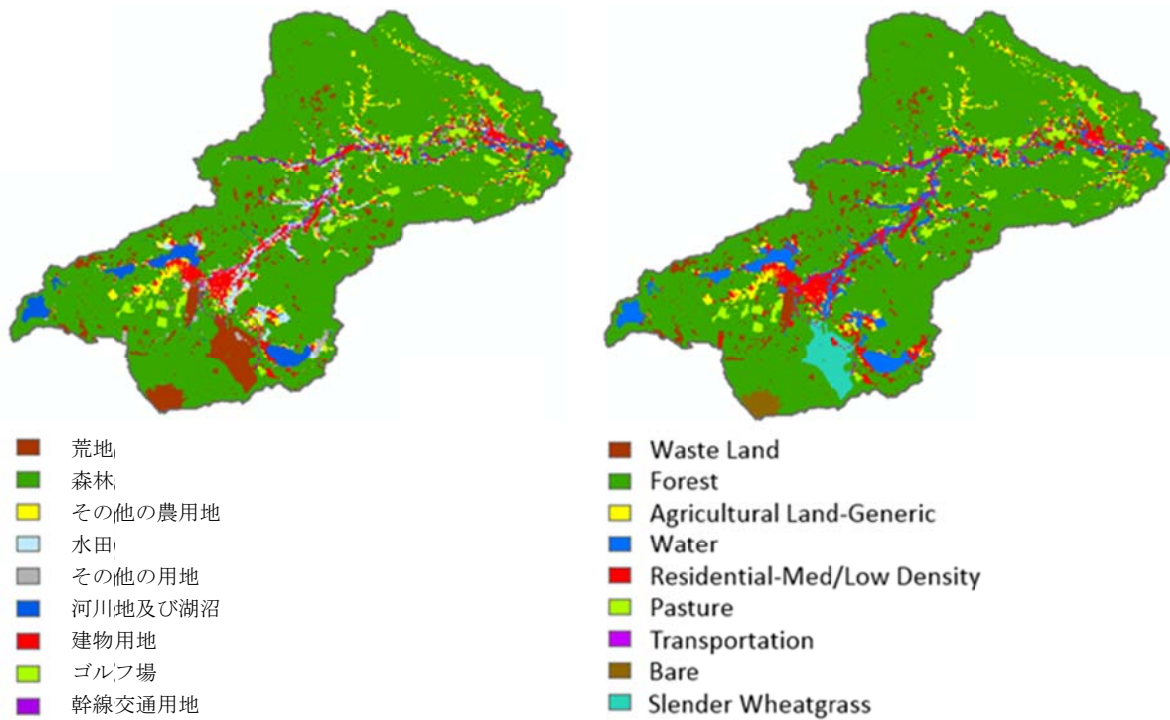
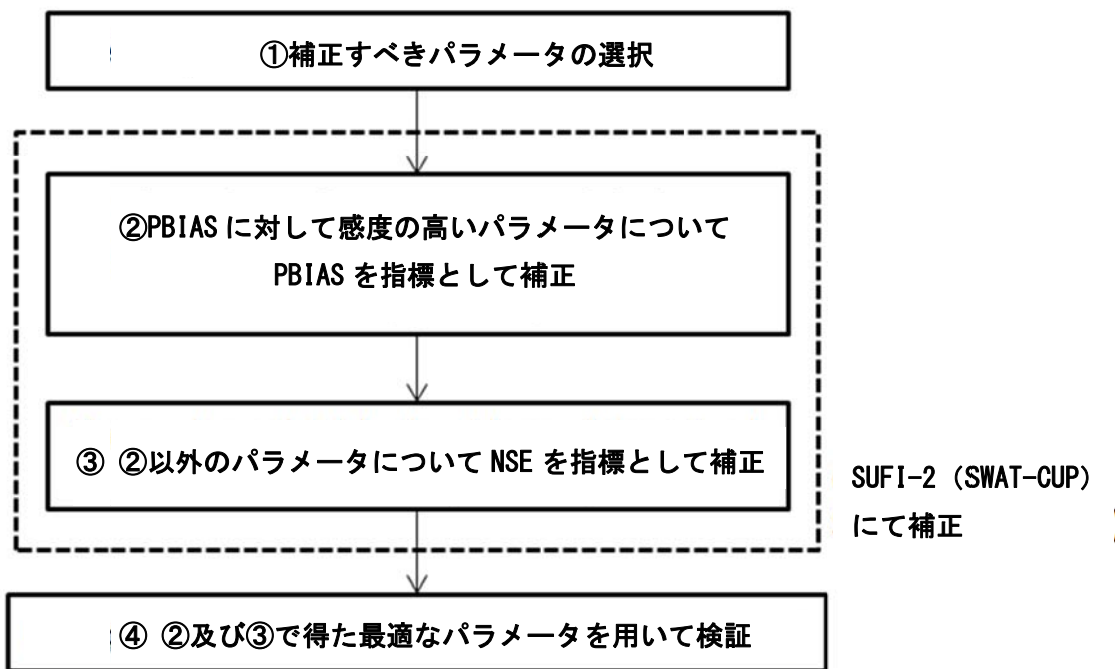


図 5 相模ダム流域の土地利用分布。左：国土交通省から得た土地利用データ，右：SWAT にて仮定した分布



※SWAT-CUP に装備されているそれぞれのパラメータ値の範囲で補正

図 6 パラメータ補正及び検証の手順

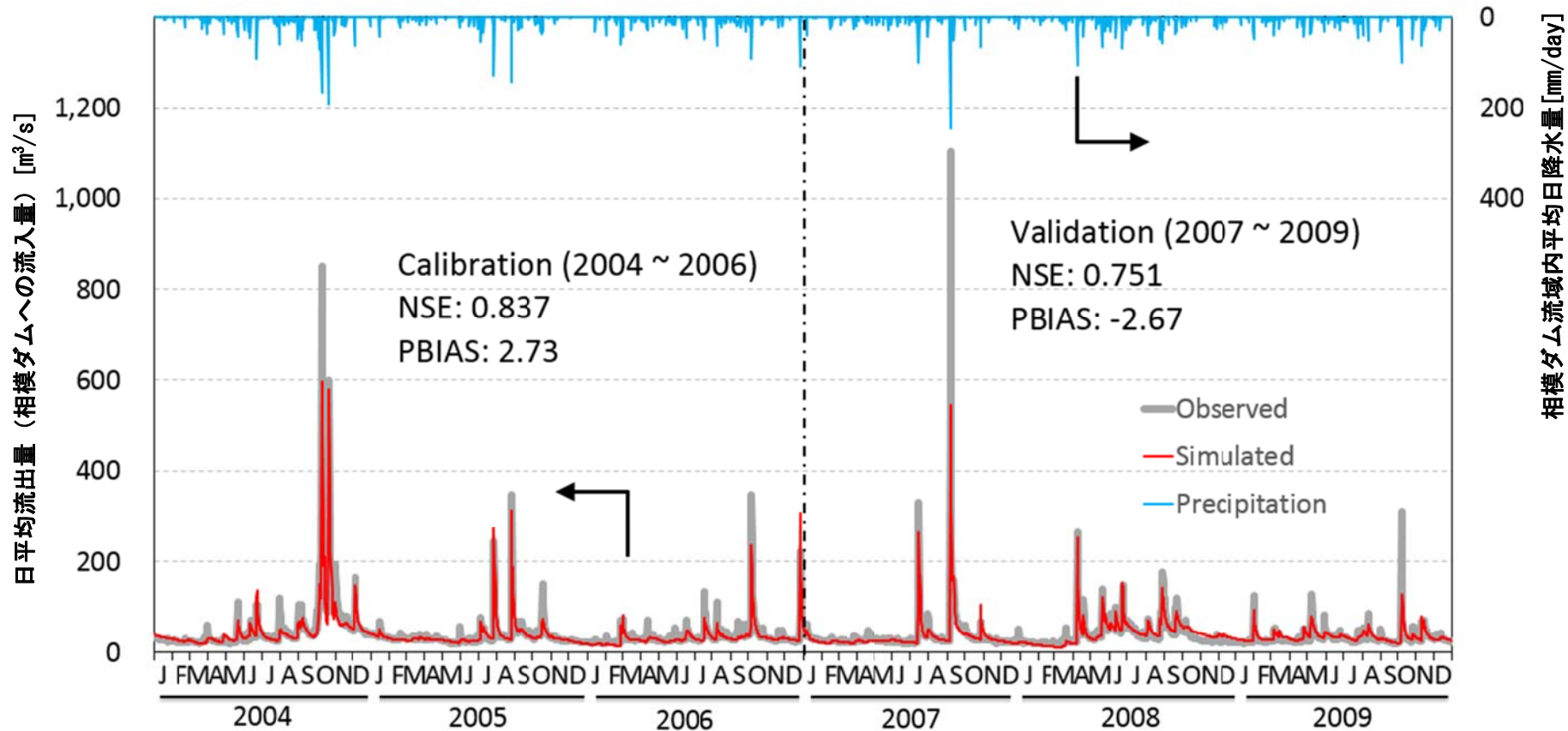


図 7 補正, 及び検証期間の日々単位のハイドログラフ

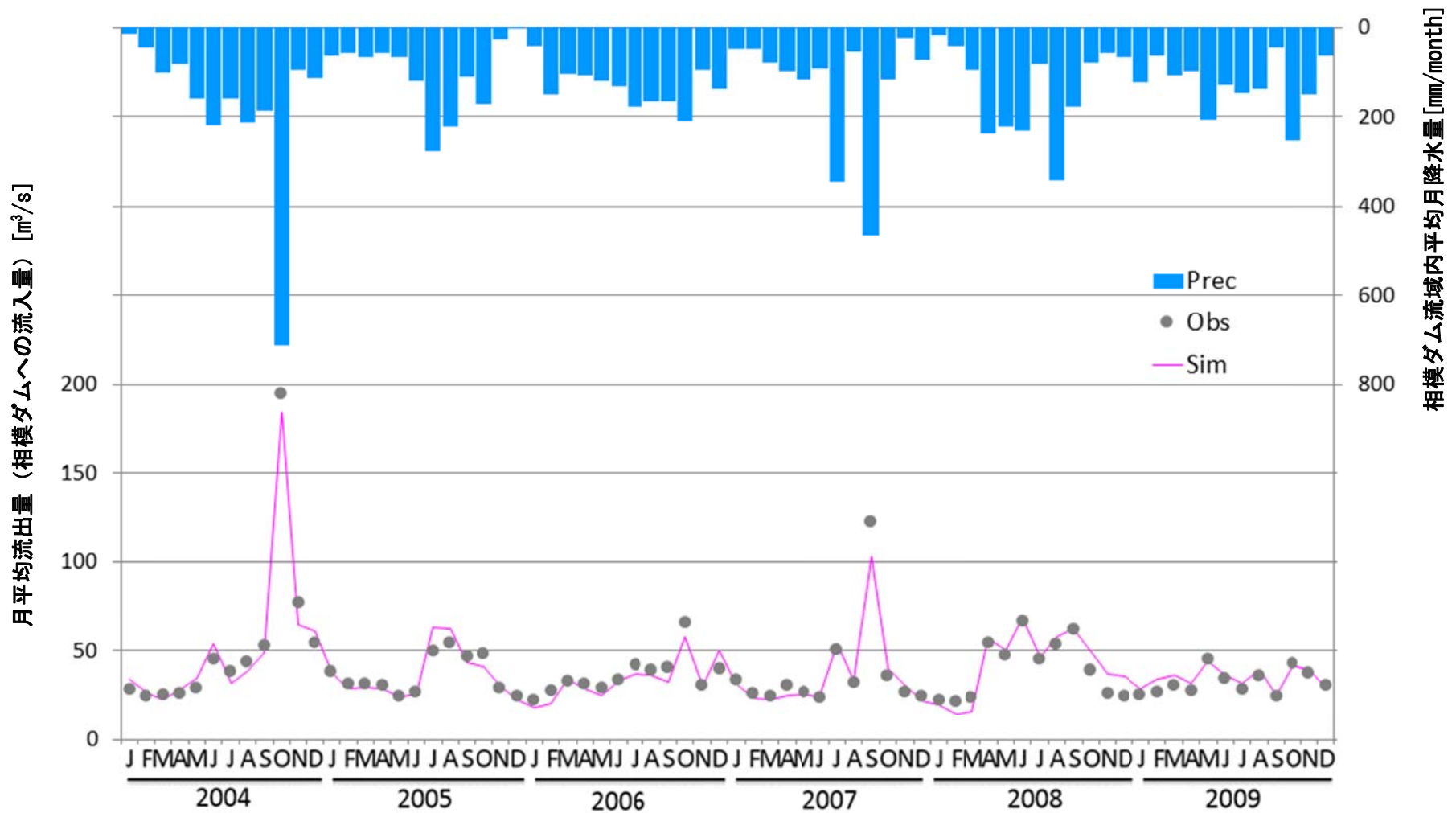


図 8 補正, 検証期間の月単位のハイドログラフ

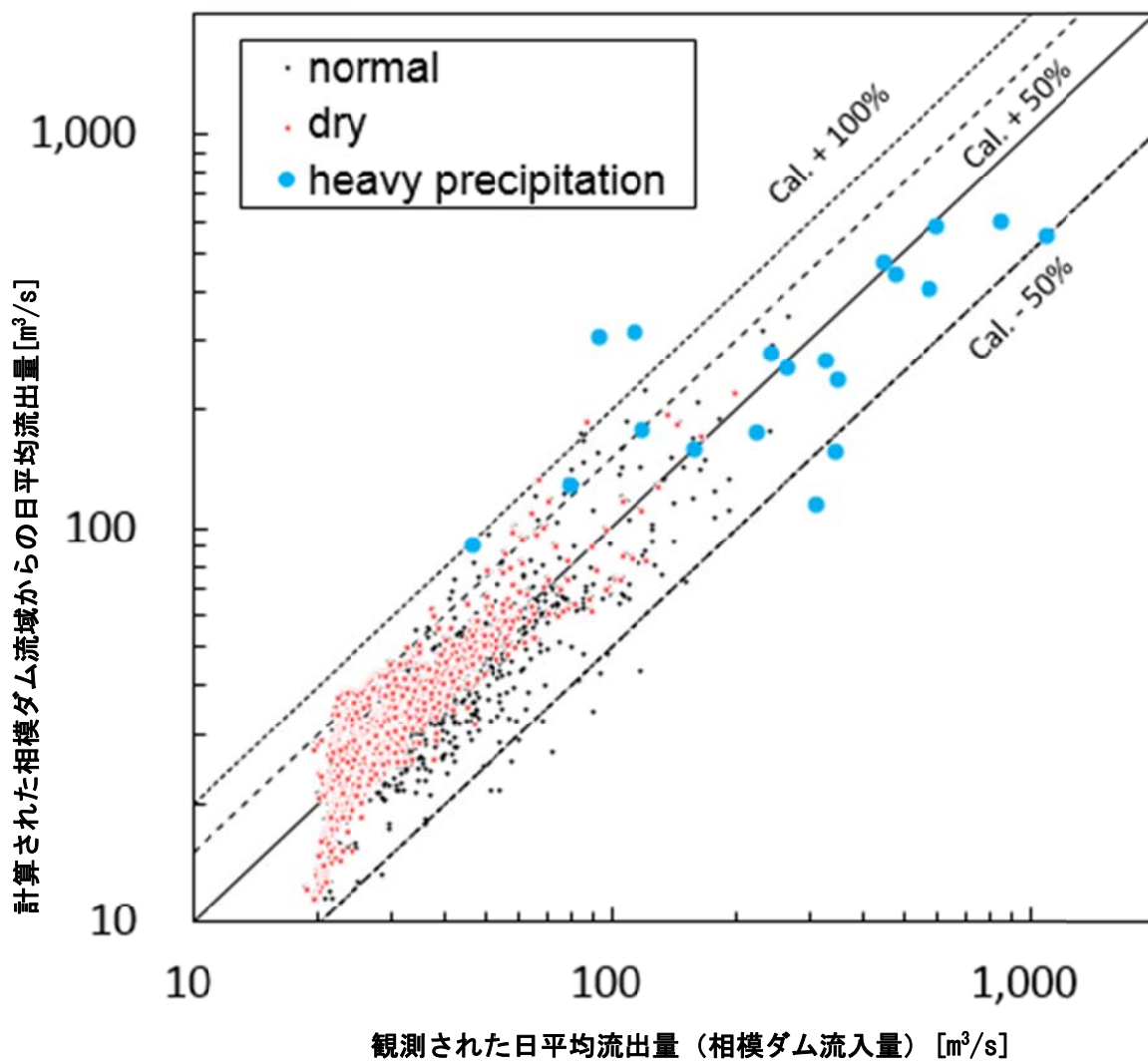
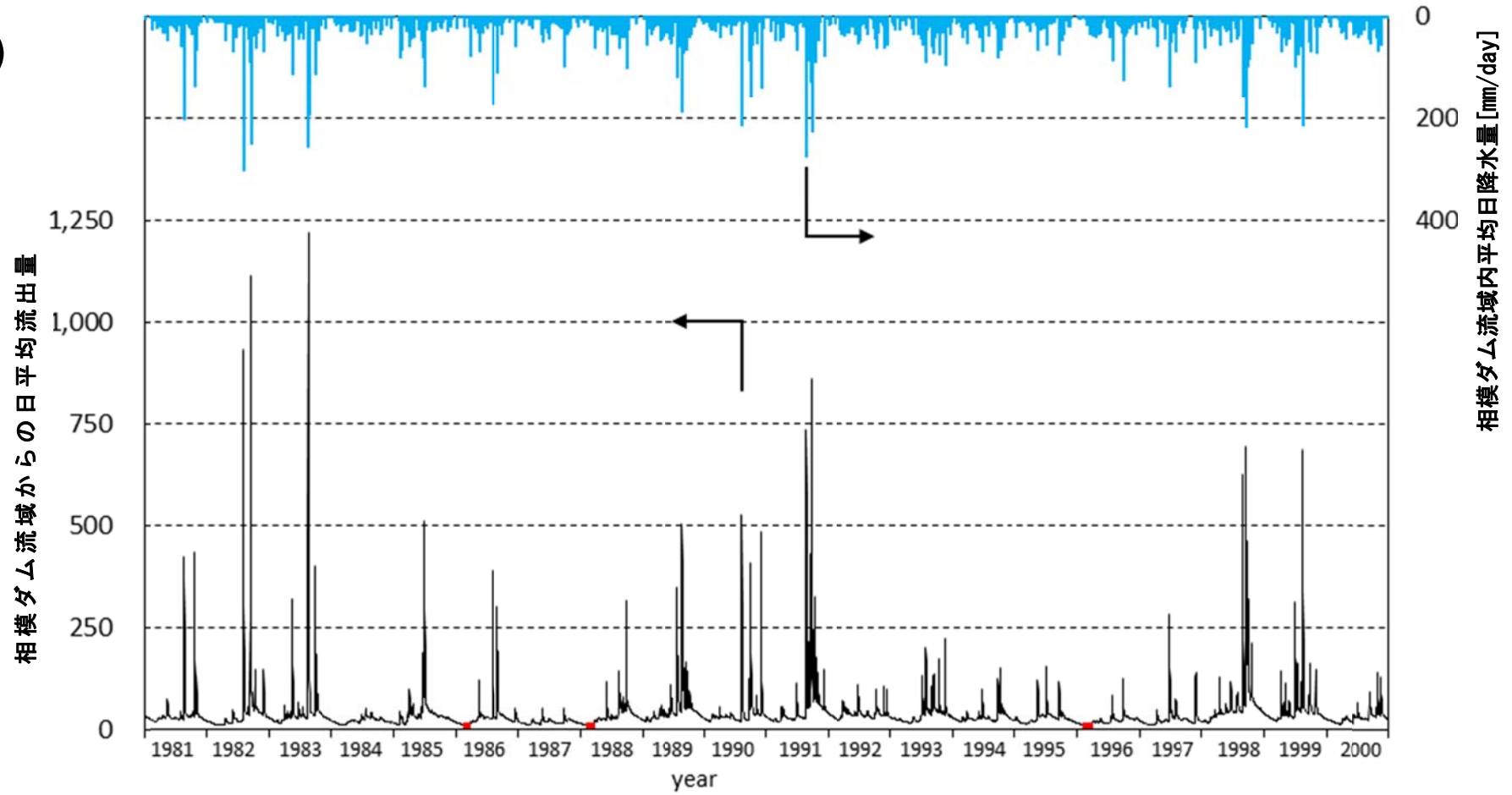
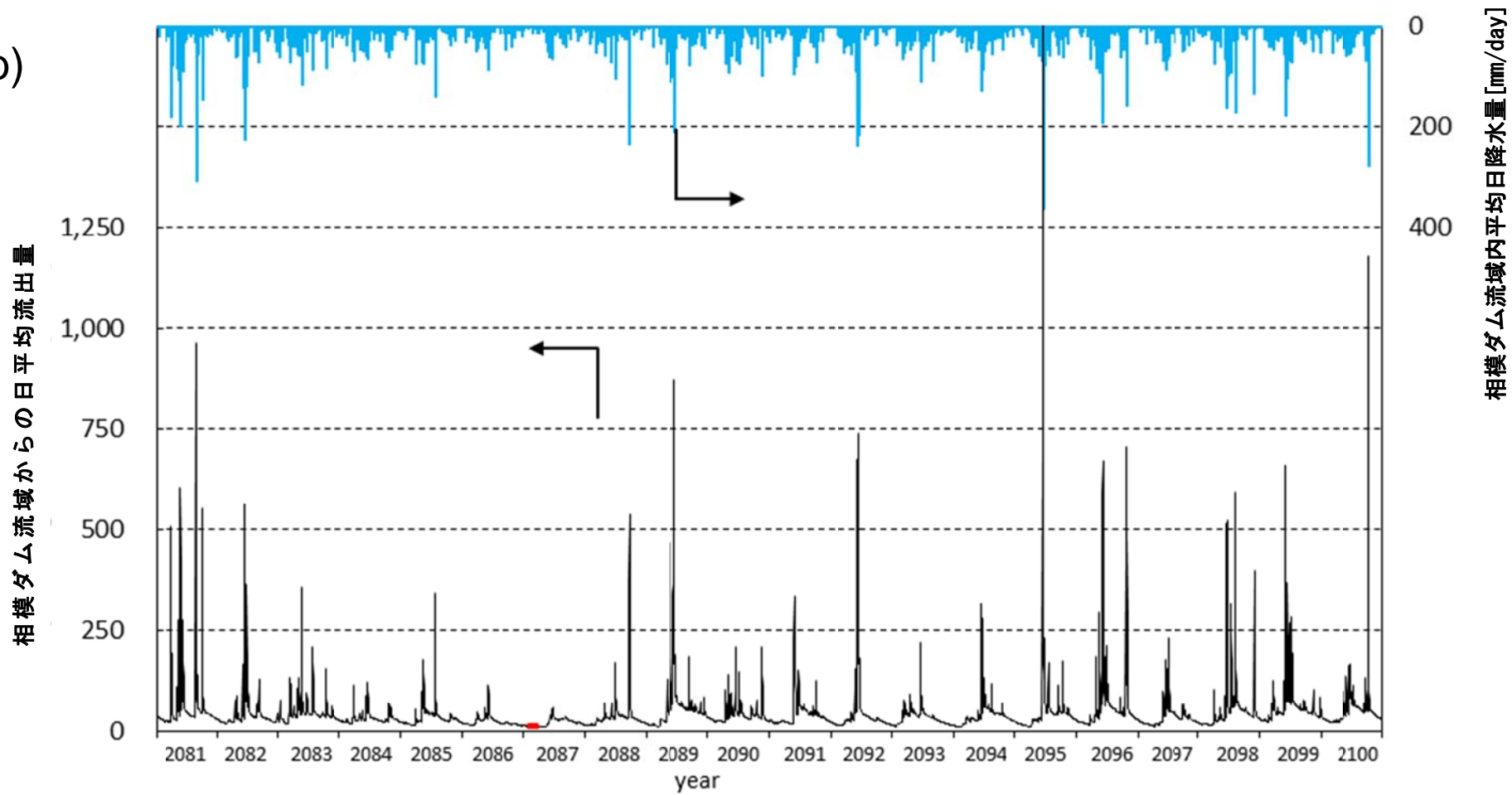


図 9 相模ダム流域からの流出量計算値と実測値 (相模ダム流入量) の比較

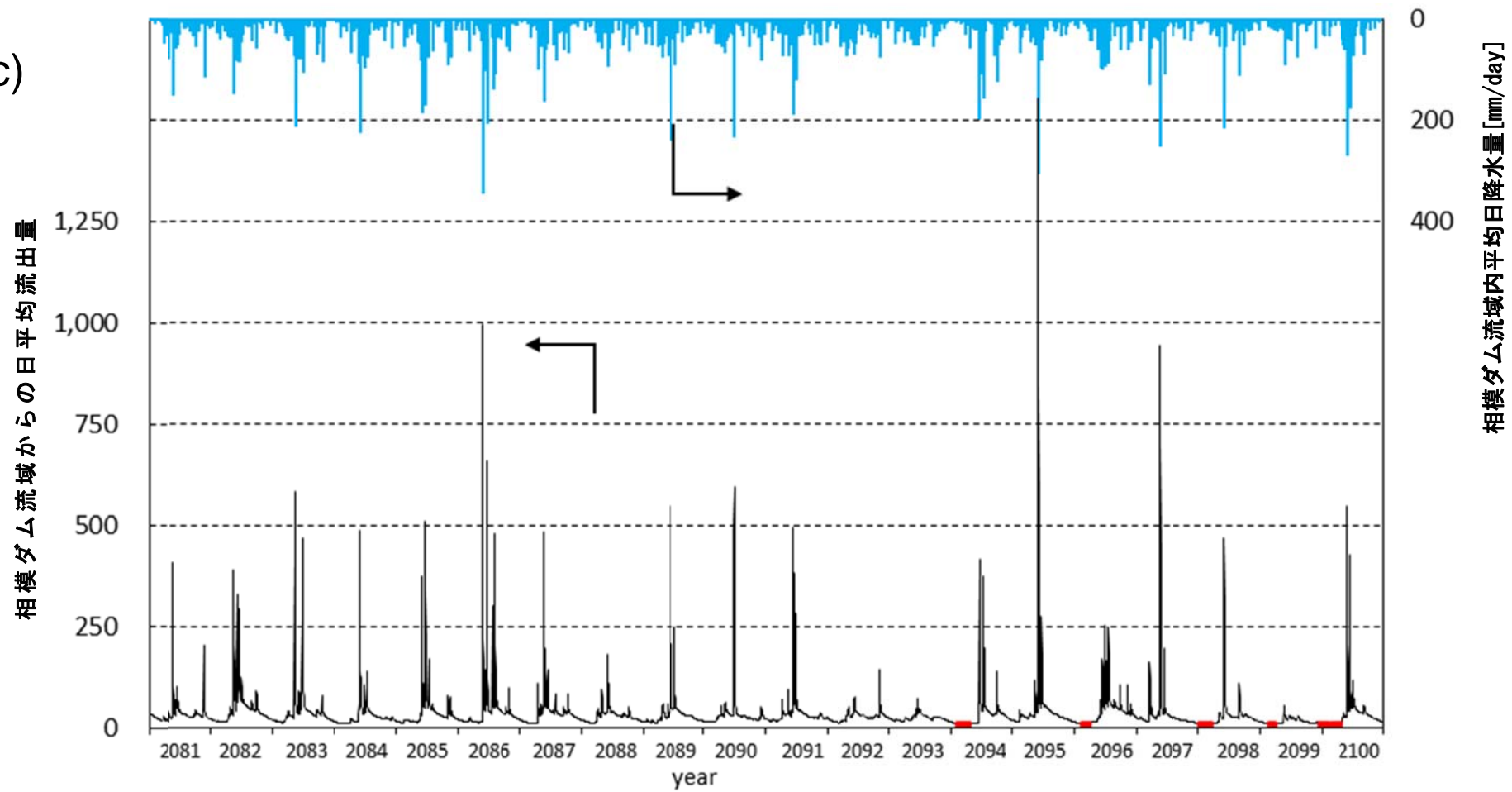
(a)



(b)



(c)



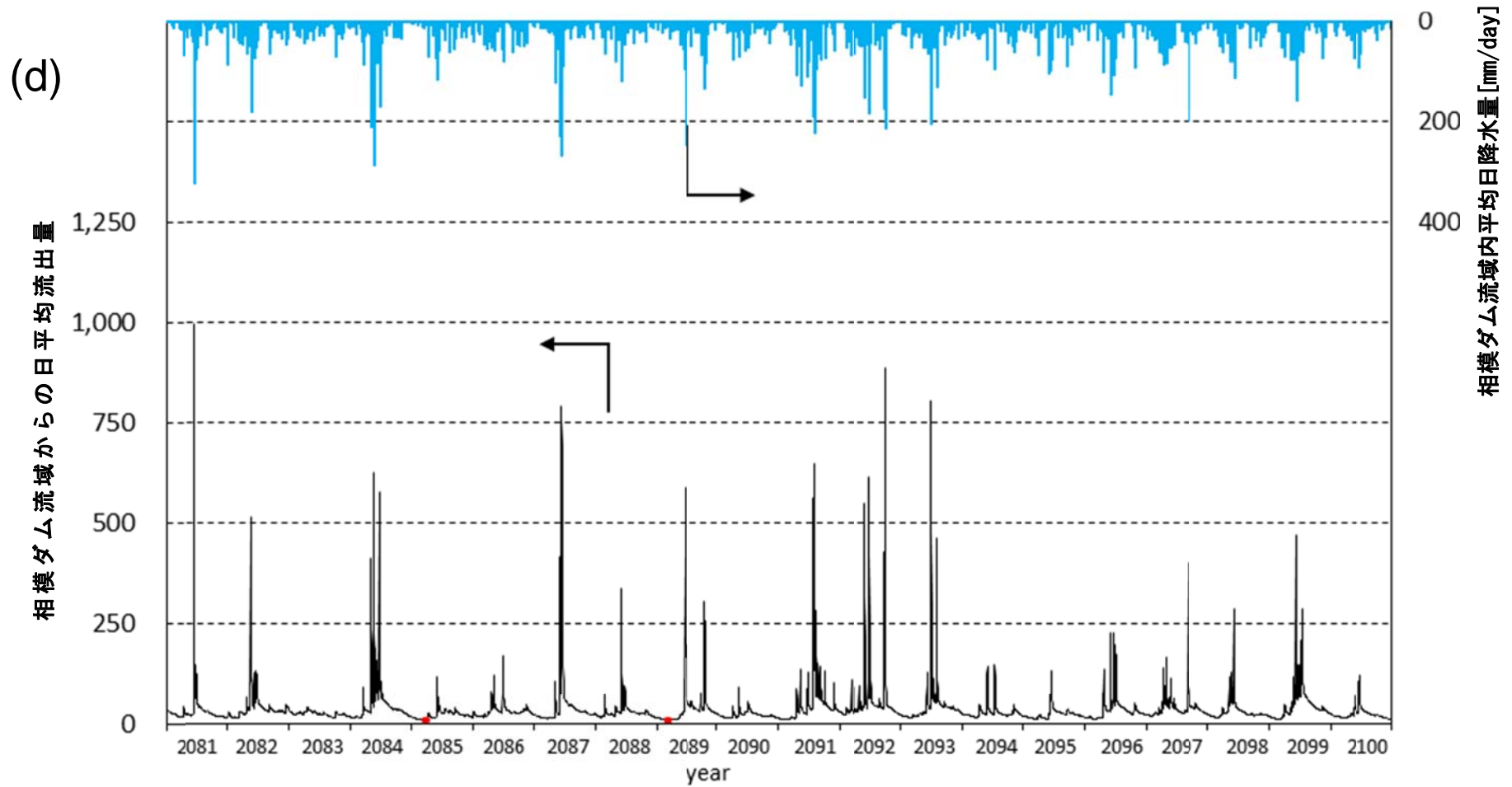


図 10 過去及び将来の予測ハイドログラフの比較。(a) : 過去 (1981~2000年), (b) RCP2.6 下での将来 (2081~2100年), (c) RCP4.5 下での将来 (2081~2100年), (d) RCP8.5 下での将来 (2081~2100年)。10 m³/s を下回る日は図中赤プロットで示している。

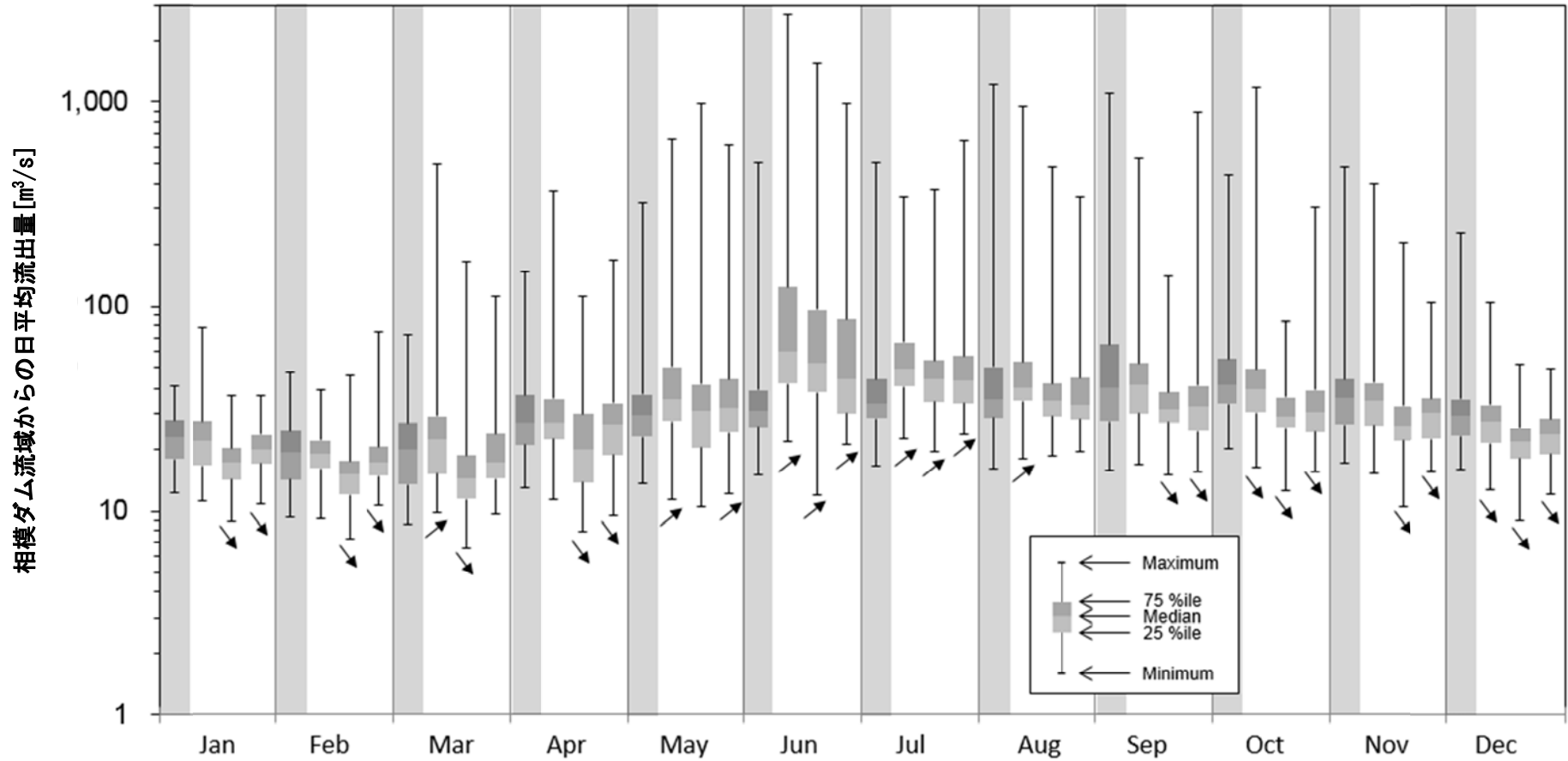


図 11 過去（1981～2000 年）および将来（2081～2100 年）の各月の日平均流量の分布。各月のカラムにて、左から順に、過去（グレーでハッチング）、RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 の結果を示す。図中、右上がりの矢印および右下がりの矢印は、それぞれ過去と比較して統計学的に有意な増加あるいは減少 ($p < 0.001$, Brunner-Munzel 検定)を示す。

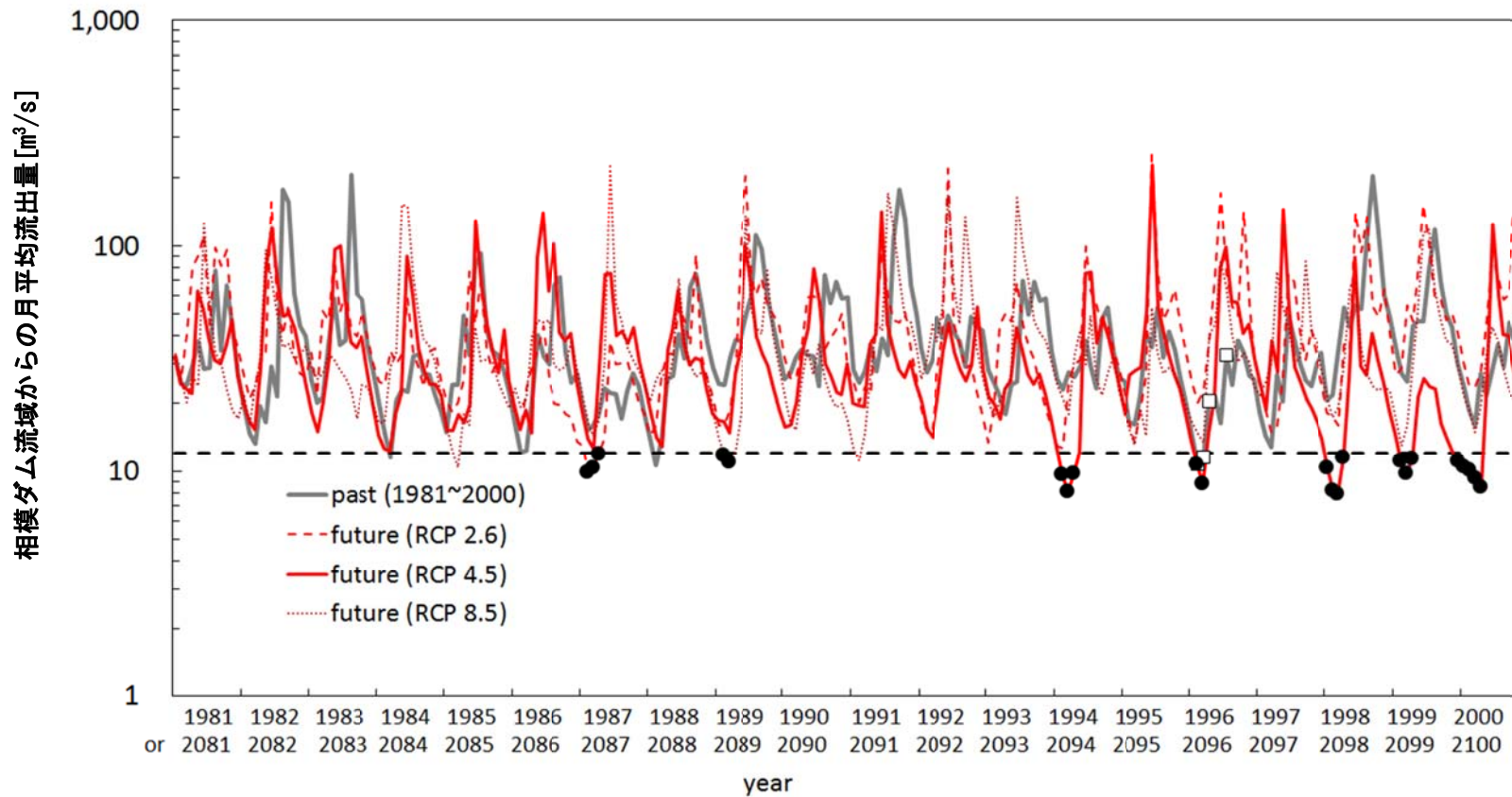


図 12 過去（1981～2000年）および将来（2081～2100年）の、相模ダム流域からの月平均流出量計算結果
 （横浜市水道局他で取水制限が行われた時期を□で示している。また、その取水制限時の状況から算出された、月平均流量が $12 \text{ m}^3/\text{s}$ （図中破線）を下回る月が連続したものを●にて示した）

表 1 土地利用図の分類（国土交通省）と SWAT での土地利用の対応

土地利用図の分類（国土交通省）	SWAT で登録されている土地利用
水田	Water
その他の農用地	Agricultural Land-Generic
森林	Forest-Mixed
荒地	Wetlands / Bare / Slender Wheatgrass
建物用地	Residential-Med/Low Density
幹線交通用地	Transportation
その他の用地	Residential-Med/Low Density
河川地及び湖沼	Water
ゴルフ場	Pasture

表 2 補正後のパラメータ値

	Parameter	Description	Minimum	Maximum	Tentative Value(s)	Value after calibration	Calibration Method*	PBIAS -influencing parameter **
1	ALPHA_B F	Base flow alpha factor	0	1	0.048	0.7073	V	
2	BLAI	Maximum potential leaf area index	- 0.2	+ 0.2	0 – 6 †	0.0199	R	○
3	CANMX	Maximum canopy storage [mm]	0	100	0	7.000	V	○
4	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium [mm]	250	500	0	399.625	V	
5	CH_N2	Manning’s “n” value for the main channel.	0	0.1	0.014	0.02993	V	
6	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	- 0.2	+ 0.2	59 – 98 †	0.0707	R	
7	ESCO	Plant uptake compensation factor	0	1	0.95	0.0578	V	○
8	GW_ DEREY	The delay time, cannot be measured directly	0	500	31	42.38	V	
9	GWQMN	Threshed depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0	5,000	0	2,736	V	○
10	RCHRG_ DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	0.05	0.4663	V	○

11	LAT_ TTIME	Lateral flow travel time [days]	0	180	0	97.07	V	
12	SOL_ AWC	Available water capacity of the soil layer	0	1	0.074	0.8353	V	○
13	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity [mm/h]	0	2,000	220	1,391	V	○
14	SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer [mm]	- 0.2	+ 1.0	1,000	0.3859	R	○
15	SARLUG	Surface runoff lag coefficient	0.05	24	4	16.75	V	
16	SFTMP	Snow fall temperature [°C]	0	5	1	0.3713	V	○
17	SMTMP	Snow melt base temperature [°C]	0	5	0.4	3.516	V	○
18	SMFMX	Melt factor for snow on June 21 [mm/(°C ·day)]	0	20	4.5	13.875	V	○
19	SMFMN	Melt factor for snow on December 21 [mm/(°C ·day)]	0	20	4.5	13.245	V	
20	TIMP	Snow pack temperature lag factor	0	1	1	0.9328	V	
21	SNOCOV MX	Minimum snow water content that corresponds to 100% snow cover [mm]	0	500	1	183.625	V	
22	SNO50 COV	Fraction of snow volume represented by SNOCOV MX that corresponds to 50% snow cover	0	0.75	0.5	0.638	V	

Values differ depending on land use for the part marked with †

*V: The existing parameter value is to be replaced by a given value.

R: An existing parameter value is multiplied by $(1 + \text{a given value})$.

**Parameters more sensitive for PBIAS than NSE.

