

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：流域システムの水管理対策に関する研究

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 初山 将 国立保健医療科学院 研究生

研究要旨

水道水源流域における水収支並びに水質に与える気候変動の影響評価を行うことを目標とし、(1)全国規模での表流水利用浄水場（57ヶ所）の流域における、2つの温暖化シナリオ（RCP2.6及び8.5）下での2種の気候変動モデル（MIROCならびにMRI）計算結果に基づく月平均気温の変化の推算と可視化、及び(2)相模川流域内の相模ダム流域における流出解析に使用する水文モデルの構築、を行った。

(1)については、国内の上水道及び簡易水道の総給水量の約10%に相当する浄水場の流域における気候変動による月平均気温の変化（1981～2000年と2081～2100年の平均値の差）の分布が可視化された。また、全国を集計すると、平均気温の上昇はRCP2.6では概ね1～3、同8.5では3～5程度と予想された。

(2)については、相模川流域中の相模ダム流域の流出モデリングを行った。モデリングにはSWAT（USDA他）を用い、SWAT-CUPによるパラメータ補正を行った。計算対象としては、2004年を初期化期間、2005年～2007年を補正期間、2008年～2009年を検証期間とした。その結果、補正～検証期間に対して良好なパラメータセットを得た。また高濁等を引き起こす洪水時、あるいは渇水時の流量予測を行ううえで重要となるピークや基底流量に対しても十分な予測性がみられた。

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[1]。特に水道に注目すると、温度上昇による有害なシアノバクテリアの増殖促進[2]、豪雨に伴う原水の濁度やNatural Organic Mattersの増加[3,4]、下水越流水混入量の増加[5]、あるいは特定時期の雨量の減少に伴う排水割合の増加[4]等はシステム運用上の負荷を高める要因であり、合理的な水道計画においてその影響予測が重要となる[6]。もとより、厚生労働省の新水道ビジョン[7]の持続・安全・強靱といった

観点や、水循環基本法において求められる健全な水循環の維持や回復ならびに流域としての総合的かつ一体的な管理、あるいは国連の2030アジェンダにおいても取り上げられるIntegrated Water Resource Management（統合的水資源管理）[8]の視点からも、流域気候変動の水循環にあたる影響の把握は重要である。すなわち、持続可能な環境調和型の水道システムを検討するためには、将来の気候変動が流域水循環に与える影響を定量的に把握し、合理的な対策を講ずる必要があるといえる。

そこで本研究では、水道水源流域の水収支に与える気候変動の影響評価を行うことを目標として定め、

時間的な解像度が比較的大きな視点からの検討と位置づけられる、(1)全国規模での表流水利用浄水場の流域における将来の月平均気温の変化の推算とその可視化を行うこととした。さらに数日から1週間程度の短期的な豪雨や渇水の予測を行うため、時間的な解像度が小さい検討である、(2)水運用により安定的な水量確保を実施している相模川流域での水道水源に対する気候変動影響評価のための日々流量予測水文モデルの構築、の2点を目的とした。

B. 研究方法

(1) 全国の気候変動影響把握

全国の浄水場のうち、表流水のみを水源とする浄水場のうちの57ヶ所(北海道:7、東北:11、関東:11、中部・北陸:13、近畿・中国:7、九州:8)を対象とした。これらの浄水場の総平均給水量は4.4百万 $\text{m}^3/\text{日}^1$ [9]であり、2010年度の全国の上水道及び簡易水道の総給水量[11,12]の約10%に相当する量である。それぞれの浄水場の取水口の位置を地理情報システム(GIS)上に確定し、国土数値情報(国交省)[13]「流域界・非集水域」を用いて、その流域を確定した(図1)。GISの操作には、Arc GIS Desktop Basic (ESRI Japan, 東京)を用いた。

一方、気候変動に関しては、図2に示したRCPシナリオに基づく、気候変動モデル計算結果を用いた。モデルは、東京大学気候システムセンター、国立環境研究所、及び海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターによるMIROC5.0(以下、MIROC)及び気象庁気象研究所によるMRI-CGCM3.0(以下、MRI)による2081~2100年の3次メッシュ月平均気温予測値[14]を、対照としては農業環境技術研究所(農環研)の3次メッシュデータ[15,16]に基づく1981~2000年の同値を用い、両者の20年間(=240ヶ月)の平均値を算出して比較した。なお、気象データから各流域内の気象を確定する際には、GIS上での空間検索、ならびに3次メッシュコードに基づいたデータ抽出(Microsoft Office 2010 Access(日本マイクロソフト、東京))を行った。また、人口あたりの影響度をいくつかのクラスにわけて把握するため、次式にて給水量による重みづけを行って評価し

た。

$$x_i = \frac{\sum_j q_{i,j}}{Q} \quad (1)$$

ここで、 x_i はクラス*i*(例えば「気温上昇が2をこえ3以下」など、影響を範囲により区分したもの)の割合、 $q_{i,j}$ はクラス*i*と分類された浄水場*j*の配水量[m^3/d]、 Q は全国の上水道ならびに簡易水道の総給水量[m^3/d](=43.2百万 m^3/d)[11,12]である。

(2) 相模川流域水文モデル

2-1) モデル

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(例えばタンクモデル[17,18])や、分布型モデル(例えばSagehashiら[19])として、多くのモデルが提案されている。本研究では、気候変動の影響評価のため、土地利用や植生、土壌の物理パラメータを用いることができ、それらの将来変化や、他の地域への応用も見据えた物理モデルを構築することを目的とした。また、対象とする流域は日本国内では比較的広大で、気候の変化にも富むことから、分布型モデルの構築が求められる。そのため、小保内ら[6]と同様に、米国農務省とテキサス農工大学が開発した、降雨、蒸発、浸透、流出などを物理的な過程をもとに、小流域、土地利用や植生、土壌種別ごとに計算する準分布型物理モデリングツールであるSoil and Water Assessment Tool (SWAT)[20]を用いてモデルを構築した。実際の構築にあたっては、ArcGISと連動して稼動するArcSWAT 2009(以下、ArcSWAT)ならびにパラメータ補正ツールであるSWAT-CUP 5.1.5.4(以下、SWAT-CUP)を使用した。

2-2) 対象流域

本研究の最終的な目標のひとつとして、相模川を水源とする小雀浄水場の流域のモデリングを考えているが、本年度はその第一段階として、同流域におけるダム間水運用の効果を排し、また水源の安定性を評価するため、図3に示す相模ダム流域を対象流域とした。

2-3) データ

気象や河川流量などの時系列データについては、2004~2009年の日々のデータを使用した。また、入手したデータは、ArcSWATに読み込ませるため、指定された形式に変換して使用した。以下にそれぞれの詳細について記述する。

¹ うち用水供給事業浄水場が1.2百万 m^3/d を占める。一部、供給・受水関係にある浄水場があるが、送水分は重複計算していない。

標高データ

国土地理院「数値地図 50 m メッシュ (標高)」(平成 13 年 5 月 1 日発行)を ArcGIS の「国内データ変換ツール」によりポイントベクターデータとして読み込み、セルサイズ 60 m のラスターデータに変換したものを使用した。このデータを用いて 1,000 m² 以上から集水する河川流路を計算し、小流域に区切った結果、**図 4**のように流域が分割された。

土地利用データ

国土数値情報[13]「土地利用 3 次メッシュ」(平成 21 年度作成)を入手し、小保内ら[6]を参考に、当該流域内の土地利用を表 1 のように、ArcSWAT にあらかじめ登録されている土地利用形態に対応させた。また、入手した GIS シェープファイル (ポイントベクター) は、セルサイズ 60 m のラスターデータに変換して使用した。土地利用種別の分布は**図 5**のとおりであり、森林が流域内の約 80% を占めた。なお、近年アジア地域で地域特有となる水田の取り扱いについて水文モデルでの取扱いが検討[19]されており、SWAT においても同様の議論がなされている[21]。今回の検討では、モデルを適用するにあたり当該流域内において水田は 2% であるため、本研究では池や湖と同じ扱い (Water) とした。

土壌データ

国土交通省土地分類調査・水調査[22]により当該流域内の土壌分類の分布 (**図 6**) を確認したところ、流域の 8 割以上で褐色森林土であった。また、土壌物性値が関わる多くのパラメータについては、後述のとおり SWAT-CUP を用いて補正することから、簡便化のため流域全体を単一の土壌として扱うこととした。なお、今回使用した ArcSWAT には、現状では日本で使用されている土壌分類が初期登録されていなかったため、土壌の物性値をもって登録する必要がある。解析に必要な物性値は、主に土壌情報閲覧システム[23]で公表されている作土層の標準理化学性データベース及び土壌断面データベースから取得した。物性値ごとの詳しい取得先及び設定根拠は**表 2** のとおりである。なお、今回のモデルは流域の流出水量に対して補正を行うものであることを考慮し、土壌のアニオン排除能、土砂流出に関する Universal Soil Loss Equation (USLE) の K ファク

ター、及び土壌の電気伝導度については SWAT のデータベース値 (それぞれ 0.5、0.32、及び 0.1) を使用した。

気象データ

降雨量、最高気温、最低気温、及び日射量については、農環研の 3 次メッシュデータ[15,16]から、当該流域内のデータを Microsoft Office 2010 Access を用いて抽出し、使用した。風量、相対湿度については、気象庁の気象台等観測所 (風量: 河口湖、大月、山中、相対湿度: 河口湖、**図 3** 参照) で観測されたデータを気象庁ホームページ[24]からダウンロードした。なお、ArcSWAT 内では、小流域ごとに代表する観測点が自動で選択され、その観測点のデータが小流域全体のデータとして扱われる。計算に使用された観測点の分布は**図 4**に記載した。

河川流量データ

流出解析ではモデルの再現性を評価するために解析の流域最下流部の河川流量 (流出水量) の観測データが必要である。本研究では相模ダム流入量データを同流域の流出水量と考え、相模ダムを管理する神奈川県から入手した。また、当該流域内の水力発電所である道志第 1 発電所では隣接する別の流域で取水した水が放流される。これに関しても管理者である神奈川県から発電所流量データを入手し、使用した。

2-4) パラメータ補正

プログラム

SWAT モデルでは土地利用や土壌種別を入力することによりパラメータが割り当てられ、蒸発量、土壌水分量、河川への流出水量、地下浸透量などが計算される。前述のとおり、土地利用に関しては、その利用形態を ArcSWAT に登録されているものに置き換え、土壌分類に関しては新たな土壌を登録した。しかし、土地利用に関しては、畑地を単一の作物に、水田を湖沼に置き換えるなど、現実とは異なる扱いをしている。土壌に関しては 1 断面の物性値を代表値としてとらえ、流域全体を単一の土壌と扱っている。そこで、流出解析に関するパラメータを補正し、再現性の高いモデルを構築するため、流出水量の観測値に対する予測における Nash Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) [25] (式(2))、または Percent bias (PBIAS)[25] (式(3)) を最適化指標として、SWAT-CUP に具備され

る SUFI2 によるパラメータ補正[6]を行った。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - N_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - N_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (3)$$

ここで、 O_i は流量観測値[m³/s]、 N_i は流量予測値[m³/s]、 \bar{O} は観測値の平均を示す。

NSE は、計算値の精度を観測値の計算値に対する残差分散を観測値の観測平均値に対する分散により規格化することによって評価する指標である[25]。1 に近いほど観測値と計算値が一致していることを示し、0 未満では計算値よりも平均値を用いるほうが現象の再現に適することを意味する。

PBIAS は、観測値が計算値に対する、平均的に見た大小をパーセンテージで表した数値である[25]。PBIAS が正であることはモデルが過小評価となっていることを、負であることはモデルが過大評価となっていることを意味し、0 となることが最も望ましい。

Moriasi ら[25]によると、これらの指標に対する評価は表 3 のとおりである。なお、同表は月ごとの流出解析に対する解釈である一方で、今回の検討は日単位のものであるが、今回の検討では、同表を目安として適用できるものと判断した。

本研究で用いた SUFI2 とは、各パラメータについて与えられた範囲の中で等間隔の値を作成し、それらをランダムに組み合わせた(ラテン超方格法)パラメータ値セットにより、それぞれ独立した計算によって目的関数を求め、最適なパラメータ値セットを求める手法である。したがって、最適化されるパラメータについては、あらかじめ設定したデフォルト値とは無関係の最適値が求められる。また、パラメータ値セットはランダムで作成されるため、ソフトウェアに対し同じ操作を行っても完全に一致する結果は作成されないことに注意が必要である。

計算期間

本研究では、2004~2009 年の各種データを入手することができたため、2004 年を初期化期間、2005 年~2007 年をパラメータの補正期間、2008 年~2009 年を検証期間とした。

補正パラメータの選択

小保内ら[6]を参考に流出解析に影響を及ぼすと考えられるパラメータを選択し、補正することとした。選択したパラメータは結果とともに表 4 に記載した。

補正計算方法

選択したパラメータ数は 16 であり、次のように段階を踏んだ最適化を行った。

選択したパラメータについて、2,000 回の計算により PBIAS の絶対値を最小にするパラメータセットを求めた。

別途、NSE を指標として 2,000 回の計算を行い、NSE に対して感度が大きいと思われるパラメータ 4 つを選択した。

で選択した 4 つのパラメータについて、変動範囲を 1/2~1/3 に絞り、このパラメータのみを可変とし、NSE を指標とした 2,000 回の計算を行い、パラメータを最適化した。可変とした以外のパラメータは、で得られたパラメータ値セットを使用した

C. 研究結果及び D. 考察

(1) 全国の気候変動影響把握

それぞれのシナリオ条件下での全国のモデル計算結果から算出された、2081~2100 年の各浄水場水源流域の月平均気温の変化(1981~2000 年と 2081~2100 年の平均値の差)を図 7 に示す。ここで、各浄水場の値は MIROC ならびに MRI から算出された変化量の平均値である。いずれの系においても、特に関東以北の浄水場流域でその差(上昇量)が若干大きくなる傾向がみられた。また、それぞれの計算結果の全国集計を図 8 に示す。同図において、右側は左側の拡大である。同図より、月平均気温の 20 年平均値は、RCP2.6 シナリオでは MIROC では計算対象とした浄水場流域のすべてが、MRI ではその 8 割程度が 1~2 増加すること、RCP8.5 シナリオでは MIROC では計算対象とした浄水場流域すべてが 4 以上、MRI では 3~5 増加することが推算された。

(2) 相模川流域水文モデル

図 9 に、パラメータ補正期間と検証期間を併せた 2005 年から 2009 年までの、相模ダム流域の流

出水量に関する観測流量と計算流量のグラフを示した。また、NSE 及び PBIAS についても、図中に示した。Moriasi らの基準[25] (表 3) によると補正期間については NSE、PBIAS とともに very good、検証期間については、NSE は good、PBIAS は very good となる。

補正期間については NSE、PBIAS とともに very good、検証期間については、NSE は good、PBIAS は very good となる。

図 10 には、パラメータ補正の手順中で、流出結果が変わる様子を示した。暫定初期値での流出結果では降雨が少ない時期の基底流量は確保されず、降雨が多い時期の流量は過大となる結果であった。これに対し、PBIAS の絶対値を最適化 (補正計算方法手順) したパラメータセットでは、降雨が少ない時期の基底流量の精度が向上したが、降雨が多い時期の流量でピーク後のテーリングが観測と合わない様子が見られた。さらに NSE を用いて最適化 (補正計算方法手順) したことにより、基底流量や、テーリングの再現性が進み、全体としてさらに再現性の高いモデルとなった。

モデルの再現性の評価として、降雨量が多く、河川流量が増大した場合に、最大流量 (ピーク流量) がどの程度再現できるか、または無降雨日が続く、河川流量が減少した場合、その基底流量をどの程度再現できるかが重要となる。そこで、2005 ~ 2009 年に日降雨量が 50 mm を超えた 15 回と、一週間無降雨日が続いた (7 日間無降雨であった場合の 7 日目、8 日間無降雨であった場合には 7 日目と 8 日目の 2 回とカウントした。) 150 回について、観測流量と計算流量を比較した (図 11)。基底流量時については全体として良好な再現性がみられる。ピーク流量時においては、高い流量時の 2 点で観測値と計算値にずれがみられるが、この 2 点は連続した日のものであり、これらを平均すると良好な予測といえる。以上より、渇水対策のうえで重要な基底流量、ならびに高濁等の原因となるピーク流量に対して良好な予測性を有するモデルが得られたと言える。

E. 結論

(1) 全国の上水道と簡易水道の総給水量の約 10% に相当する、表流水水源浄水場の流域での RCP2.6 及び 8.5 を想定した気候変動モデル計算結

果に基づく月平均気温の 20 年間平均値の変化を推算した。その結果、1981 年 ~ 2000 年に比べて 2081 年 ~ 2100 年の平均気温上昇の分布が可視化された。また、全国的には概ね 1~3 、同 8.5 では 3~5 程度の変化となるものと推算された。

(2) 相模川流域中の相模ダム流域の流出に対して準分布型水文モデル SWAT を用いてモデリングを行ったところ、流出パターンや、ピーク・基底流量に対して良好な予測性を有するモデルが得られた。以上の結果は、将来の気候変動が流域水循環に与える影響を把握するうえで重要な基礎情報・あるいはツールとなるものである。

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

初山将、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏 (2016)。気候変動の水道システム影響評価のための相模川流域水文モデルの作成。日本水環境学会第 50 回年会; 2016 年 3 月 18 日、徳島。発表番号 3-J-16-1。

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] Guzman Herrador, B.R., De Blasio, B. F., MacDonald, E., Nichols, G., Sudre, B., Vold, L., Semenza, J. C. and Nygård, K. (2015) Analytical studies assessing the association between extreme precipitation or temperature and drinking water-related waterborne infections: A review. *Environmental Health* **14:29** (DOI

- 10.1186/s12940-015-0014-y)
- [2] Paerl, H.W. and J. Huisman (2008) Blooms Like It Hot. *Science* **320**(5872): p. 57-58.
- [3] Kobayashi, Y., Itoh, M., Yamada, T., Akiba, M., and Matsui, Y. (2012) Experimental evaluations of water treatment systems using a pilot-scale plant for adaptations to a sharp increase in raw-water turbidity caused by climate change. *Water Science and Technology: Water Supply* **13**(1): p. 139-146.
- [4] Delpla, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., and Thomas, O. (2009) Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environmental International* **35**(8): p. 1225-1233.
- [5] Patz, J.A., Vavrus, S. J., Uejio, C. K., McLellan, S. L. (2008) Climate Change and Waterborne Disease Risk in the Great Lakes Region of the U.S. *American Journal of Preventive Medicine* **35**(5): p. 451-458.
- [6] 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水道システム影響評価. *水道協会雑誌* **84**(5): p. 2-13.
- [7] 厚生労働省健康局 (2013) 新水道ビジョン.
- [8] United Nations. International Decade for Action 'WATER FOR LIFE' 2005-2015. <https://www.un.org/waterforlifedecade/iwrm.shtml>. (2016/02/29 確認)
- [9] 水道産業新聞社 (2012) 全国浄水場ガイド 2012. 水道産業新聞社, 大阪, 760 pp.
- [10] 水道産業新聞社 (2008) 全国浄水場ガイド 2008. 水道産業新聞社, 大阪, 816 pp.
- [11] 日本水道協会 (2012) 水道統計 施設・業務編 平成 22 年度.
- [12] 厚生労働省健康局水道課 (2012) 平成 22 年度全国簡易水道統計, 213pp.
- [13] 国土交通省. 国土数値情報ダウンロードサービス. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>. (2016/02/08 確認)
- [14] 花崎直太, 高橋潔, 脇岡靖明, 日下博幸, 飯泉仁之直, 有賀敏典, 松橋啓介, 三村信男 (2014) 日本の温暖化影響・適応策評価のための気候・人口・土地利用シナリオ(第2版). *環境科学会誌*, **27**(6): p. 362-373.
- [15] 清野豁 (1993) アメダスデータのメッシュ化について. *農業気象* **48**(4): p. 379-383.
- [16] 農業環境技術研究所. 農業環境情報データベース. <http://agrienv.dc.affrc.go.jp/mesh/mesh.html>. (2016/02/08 確認)
- [17] 気象庁. 土壌雨量指数. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>. (2016/02/08 accessed)
- [18] 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), さいたま, 同講演集 p.154-155.
- [19] Sagehashi, M., Mori, M., Hareyama, Y., Sakuma, K., Akiba, M., Hosomi, M. (2016) Integration of the rice paddy water management into a coupled surface-subsurface water flow model in the Sakuragawa River watershed (Japan). *Hydrol Res* **47**(1): p. 137-156.
- [20] USDA-ARS, Texas A&M AgriLife Research and Texas A&M University System (2016). Soil & Water Assessment Tool. <http://swat.tamu.edu/> (2016/02/08 確認)
- [21] Xie, X. (2015) Improving hydrological simulations with SWAT for paddy watersheds: Model development and data assimilation. *MARCO Satellite International Workshop 2015 Adoption and adaptation of SWAT for Asian crop production systems and water resource issues (International SWAT-Asia Conference IV)*. 2015. Tsukuba, Japan.
- [22] 国土交通省. 土地分類調査・水調査. ; <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html>. (2016/02/08 確認)
- [23] 農業環境技術研究所. 土壌情報閲覧システム. http://agrimesh.dc.affrc.go.jp/soil_db/. (2016/02/08 確認)
- [24] 気象庁. 過去の気象データ・ダウンロード. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>. (2016/02/08 確認)
- [25] Moriasi, D.N., et al., (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans ASABE*, 2007. **50**(3): p. 885-900.

- [26] 文部科学省 (2014) RCP (代表的濃度経路) シナリオについて .
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/03/attach/1346369.htm. (2016/02/29 確認)
- [27] 森澤眞輔 (2004) 地下水・土壌 In 土木学会環境工学委員会環境工学に関わる準備小委員会 編, 環境工学公式・モデル・数値集, 土木学会 / 丸善, 東京, 727pp.
- [28] 福本昌人, 小川茂男 (1996) 各種の裸地土壌におけるアルベドと分光反射率の土壌水分依存性. 水文・水資源学会誌 9(1): p. 92-95.

J. 謝辞

一部の取水口位置、及び用水供給事業 - 上水道事業の供給・受水状況の確認において、水道事業体の方から情報をいただきました。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。

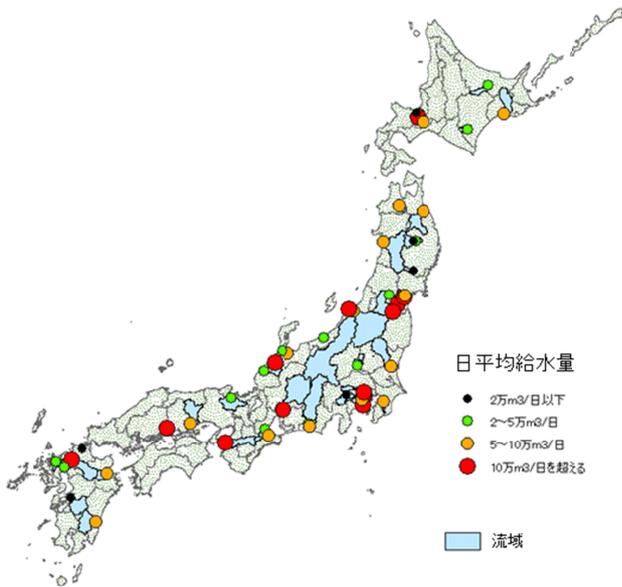


図 1 検討対象浄水場とその流域
(給水量は文献[9,10]による)

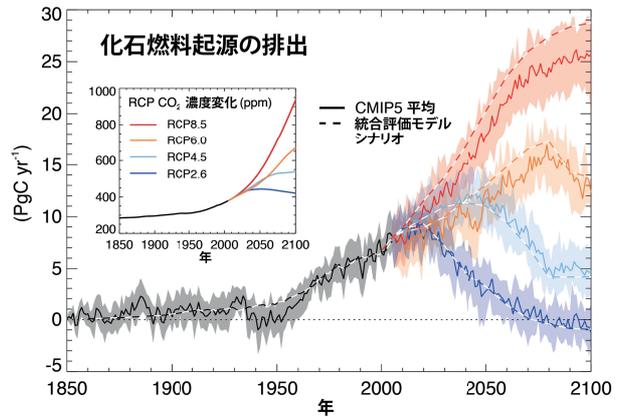


図 2 RCP (代表的濃度経路) シナリオ
(出典: 文部科学省 HP[26])



図 3 相模ダム流域

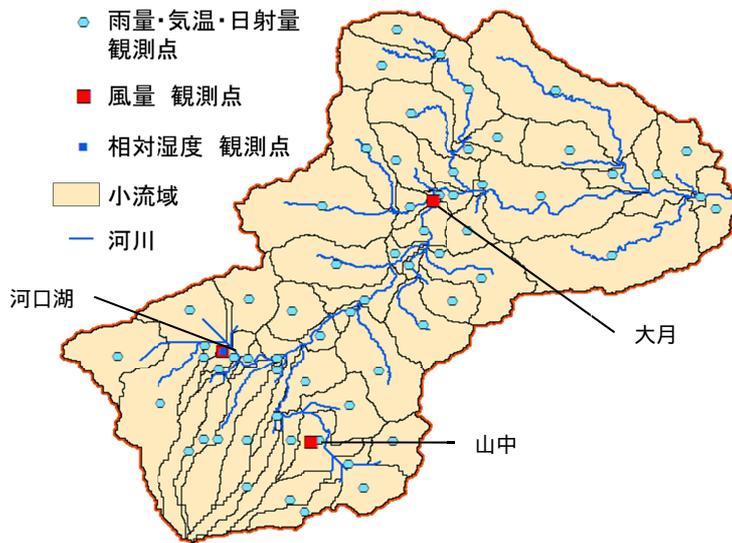


図 4 小流域と観測点の分布

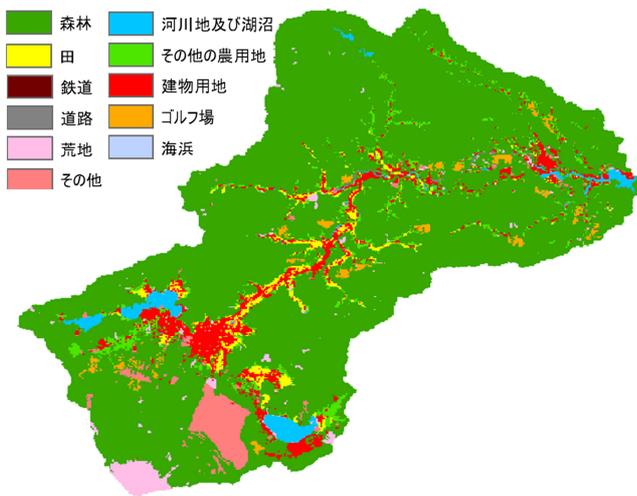


図 5 相模ダム流域における土地利用種別

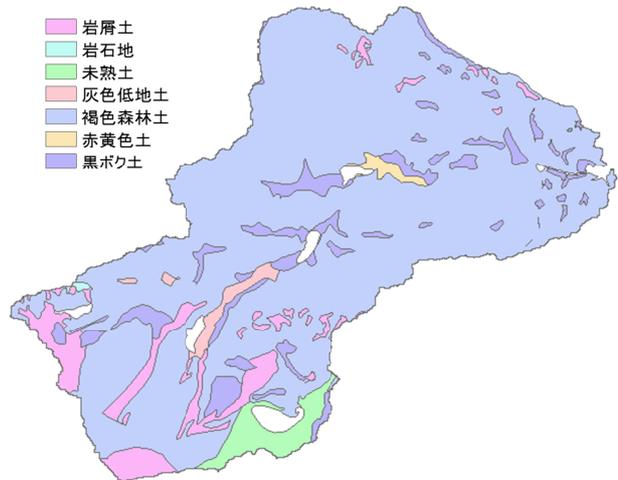


図 6 相模ダム流域における土壌分類

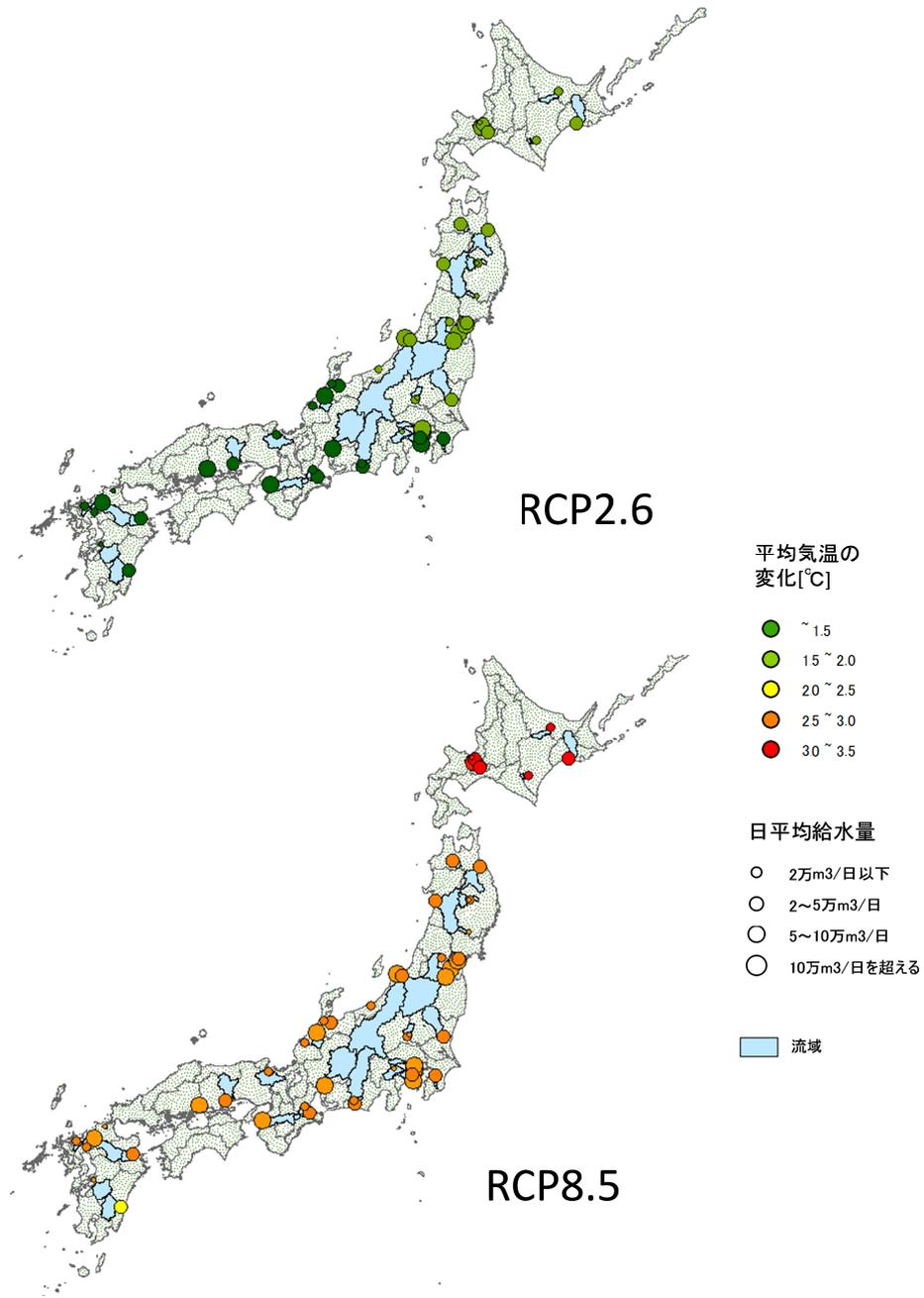


図 7 各浄水場の流域における平均気温変化（2081～2100年と1981～2000年の差）の予測
（凡例中、「～」は「を超え、以下」を意味する）

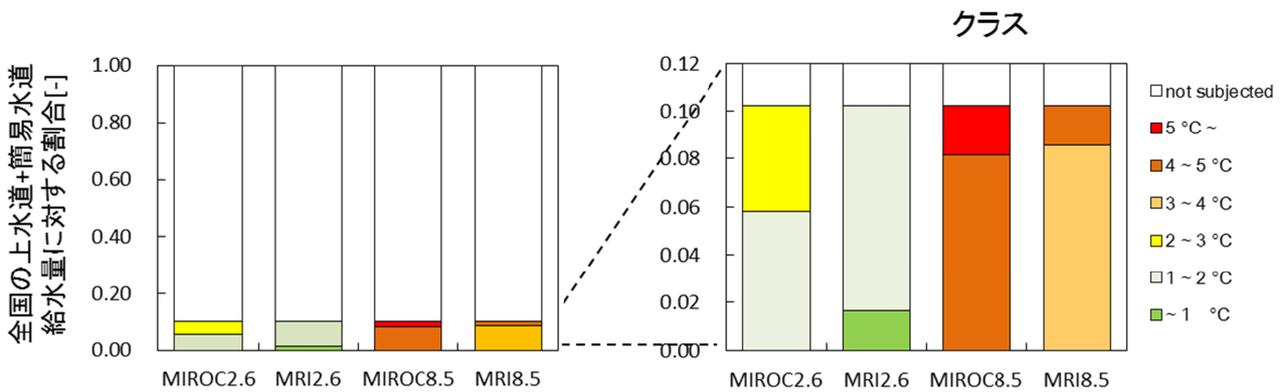


図 8 全国の浄水場流域での平均気温変化の予測

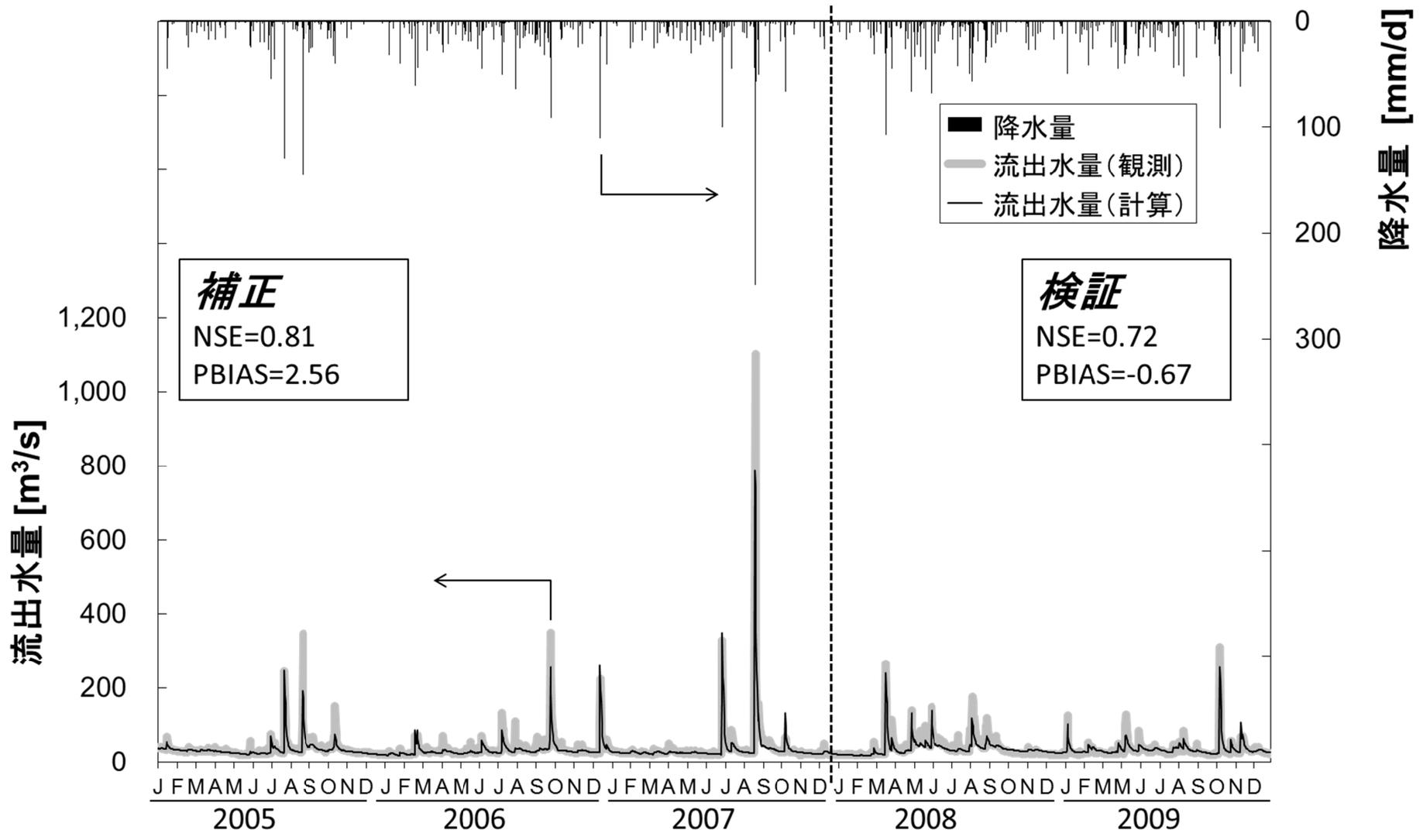


図 9 相模ダム流域流出解析の結果

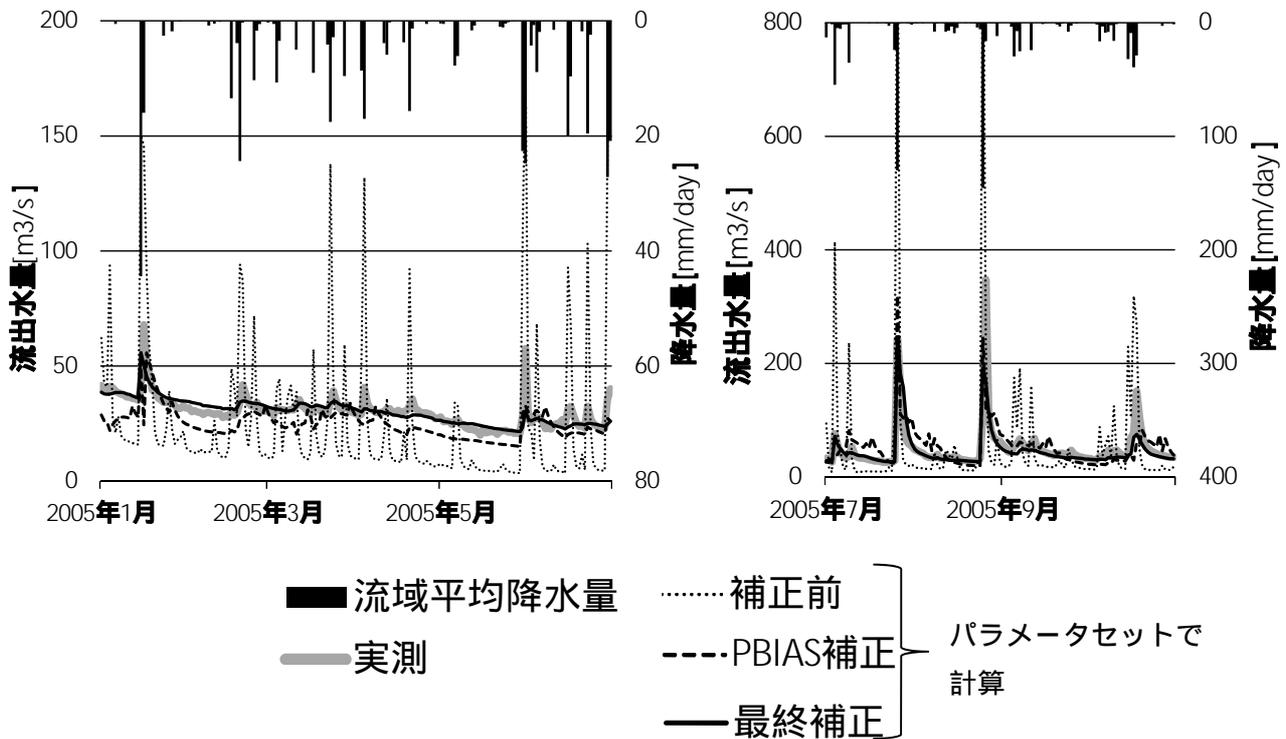


図 10 パラメータ補正と流出解析結果の変化例 (左: 基底流量時 右: ピーク流量時)

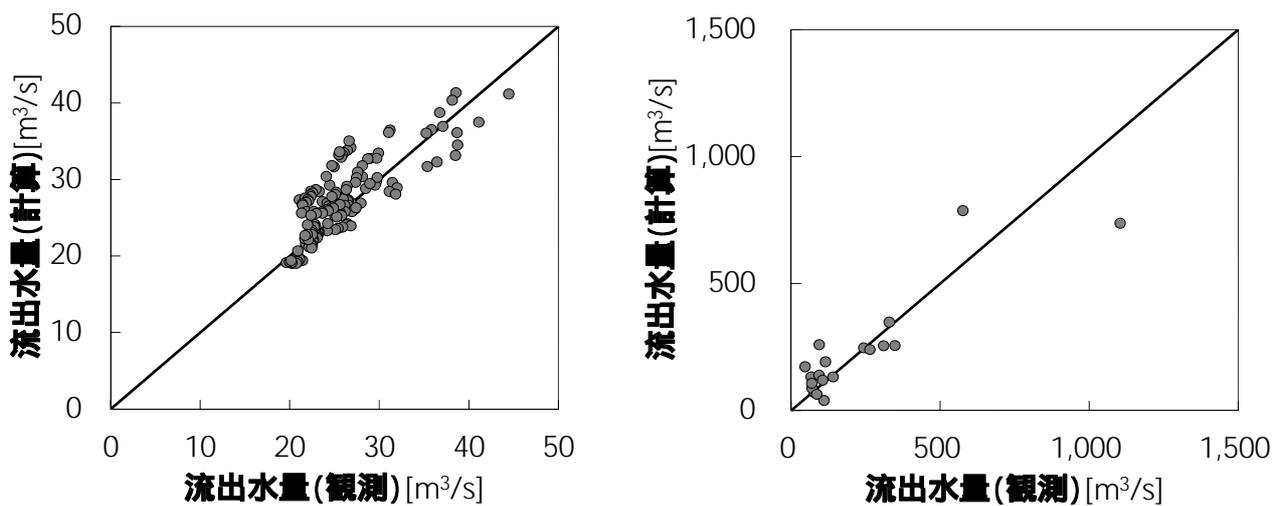


図 11 ピーク時と基底流量時の再現性の比較 (左: 基底流量時 右: ピーク流量時)

表 1 本研究での SWAT における初期値入力のための土地利用種別分類

国土交通省土地利用種別	SWAT に入力した土地利用種別
田	Water
その他農用地	Alfalfa
森林	Forest-mixed
荒地	Wetlands
建物用地	Residential-Med/Low Density
道路	Transportation
鉄道	Transportation
その他用地	Industrial
河川及び湖沼	Water
海浜	Wetland
ゴルフ場	Pasture

表 2 土壌データに関するパラメータとその暫定初期値（補正前の値）の設定手法

（表中、2 段の数値は、上が土壌上層、下が土壌下層を示す）

	パラメータ名	パラメータの内容	値	入手先・設定手法
1	NLAYERS	土壌の層数	2	土壌断面データベース中、旧神奈川県津久井郡（現在の相模原市内）で観測された断面のデータ（ 1 ）により設定。
2	HYDGRP	水はけのよさに関する土壌のグループ分け（A～D）	A	他のパラメータを初期値で固定し、4 つのパターンで計算した場合にもっとも NSE による判定が良かったものを使用。
3	SOL_ZMX	土壌深さ [mm]	1000	1 により設定。（断面調査が 1,000 mm）
4	SOL_CRK	土壌の空隙率	0.7	1 により設定。
5	SOL_Z	土層毎の厚さ [mm]	310 690	1 により設定。
6	SOL_BD	土層毎の湿潤密度	0.659 0.853	1 により設定。
7	SOL_AWC	土層毎の有効水分	0.074 0.074	作土層の理化学性データベース中、中粗粒褐色森林土の 1999 - 2003 作土層の理化学性の平均値表中、土地利用全体の平均値を使用。
8	SOL_CBN	土層毎の有機炭素量	4.22 2.64	1 のうち、腐植を有機炭素と読み替えて使用。
9	SOL_K	土層毎の透水係数	220 220	細砂～砂で $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ m/s} = 180 \sim 3,600 \text{ mm/hr}$ [27]。SWAT のデータベースも参考とし、初期暫定値として 220 mm/hr を使用。
10	CLAY	土層毎の粘土率	21.8 22.2	1 により設定。
11	SILT	土層毎のシルト率	30.1 27.9	1 により設定。

表 2 土壌データに関するパラメータとその暫定初期値（補正前の値）の設定手法（続き）

	パラメータ名	パラメータの内容	値	入手先・設定手法
12	SAND	土層毎の砂率	48.1 49.9	1 により設定。
13	ROCK	土層毎の岩石率	38.9 37.2	1 により設定。
14	SOL_ALB	土層毎の湿潤アルベド	0.12 0.12	福本ら[28]により，沖積土，洪積土，火山性土の分類で湿潤アルベドが計測されているが，褐色森林土を洪積土と仮定し、値を入力した。

表 3 Moriasi ら[25]による水文流出モデルの精度に関する分類

Performance Rating	NSE	PBIAS[%]
Very Good	0.75 < NSE ≤ 1.0	PBIAS < ± 10
Good	0.65 < NSE ≤ 0.75	± 10 PBIAS < ± 15
Satisfactory	0.5 < NSE ≤ 0.65	± 15 PBIAS < ± 25
Unsatisfactory	NSE ≤ 0.5	PBIAS ≥ ± 25

表 4 補正したパラメータの一覧と補正結果

	パラメータ名	説明	最低値	最高値	補正前	補正後	備考
1	EPCO	植物による地中水の吸い上げに関する係数(1)	0	1	1	0.8817	
2	ESCO	土壌からの蒸発に関する係数(2)	0	1	0.95	0.9908	
3	ALPHA_BF	基底流出逓減係数	0 (0)	1 (0.5)	0.048	0.9856	3
4	GW_DEREY	土中水が土壌から帯水層へ移動するのに要する日数	0	500	31	201.125	
5	GW_REVAP	帯水層からその上部への逆浸透に関する係数	0.02	0.2	0.02	0.0527	
6	GWQMN	帯水層から基底流出が起こる条件となる帯水層の水位[mm]	0	5000	0	128.75	
7	RCHRG_DP	帯水層へ浸透する水量のうち被圧水層へ浸透する割合	0	1	0.05	0.9937	
8	REVAPMN	帯水層からその上部への逆浸透する条件となる帯水層の水位[mm]	0	500	1	442.125	
9	CANMX	降雨により樹幹に蓄えられる水量の最大値[mm]	0	100	0	5.875	
10	LAT_TTIME	側方流出に要する日数	0	180	0	147.645	
11	CN2	SCS-CN 法による、表面流出と降雨の関係を表す係数	35 (35)	98 (65)	31~92 (4)	59.85	3
12	CH_K2	河川部の有効透水係数 [mm/hr]	0 (250)	500 (500)	0	460.438	3
13	CH_N2	河川部におけるマンニングの粗度係数	0 (0)	0.3 (0.1)	0.014	0.0293	3
14	SOL_ALB	土層の湿潤アルベド	0	0.25	0.12	0.1781	5
15	SOL_AWC	土層の有効水分[%]	0	1	0.074	0.0342	5
16	SOL_K	土層の透水係数	0	2,000	220	1,269.5	5

1 植物が地中水を吸い上げる場合、通常根の密度が高い、浅い部分から吸い上げるが、浅い層に十分な水分が無い場合に、深い層からの吸い上げをどの程度許すかを表す係数。EPCO=1 は浅い層で足りない水分をすべて深い層が受け持つことができることを意味する。

2 土壌からの蒸発について、通常浅い部分ほど蒸発が起こりやすいが、深い層からの蒸発をどの程度許すかを表すための係数。ESCO=0 は深い層からの蒸発を許すことを意味する。

3 PBIAS を用いて補正した後、NSE を用いて補正したパラメータ。NSE を用いた際に変域を変更しているため、最低値、最大値欄の括弧内に示した。

4 土地利用ごとに異なる。

5 補正前の数値は、表2に示す土壌パラメータ設定時に入力した値。なお、この他のパラメータの補正前の数値(暫定値)は、SWAT データベース中の数値を使用した。