

Ⅲ 神奈川県宮ヶ瀬ダム上流域における水循環モデル解析

森 康二¹⁾・多田和弘¹⁾・伊藤 洋¹⁾・西岡 哲¹⁾・山根正伸²⁾

Full-3D Modeling for Terrestrial Fluid Flow in Miyagase Basin

Koji Mori, Kazuhiro Tada, You Ito, Tetsu Nishioka & Masanobu Yamane

要 約

森林環境の変化と水源かん養能の関わりを論じるには、対象フィールドの実態を捉えた水循環モデルを構築することが1つの有効な手段である。本研究では、これまでに取得されてきた水文観測データを活用し、宮ヶ瀬ダム流域を対象とした水循環モデルの構築と地表水・地下水を一体化した高解像度3次元数値シミュレーションを実施した。現況を再現した後、林床植生の被度の相違による水源かん養へ与える影響を予察的に評価した結果、中津川下流地点のピーク流量は、現況に対して10～20%抑制され、また基底流量は30%程度増加し、林床状態の改善が水源かん養機能に対して効果を有することを示した。

1. はじめに

水源地の森林環境保全に対する関心が高まる中、水循環モデルに求められる役割は多様かつ重要なものとなっている。今日では、モデリング技術や計算機性能の向上のみならず、地理情報システム (GIS) を使ったデータ公開の飛躍的な普及を背景にその実用化が進んでいる。水源林地の水循環には、主として森林や林床植生により特長付けられる降水遮断、蒸発散、地表流出、地下への浸透、それにとまなう物質や熱の輸送などの様々な素過程が含まれ、対象とする時間、空間スケールも非常に幅広いものとなる。必然的に、水循環モデルへ反映すべきフィールド情報は膨大・多岐にわたるため、それらに統一的な解釈を与えたり、組織化することは容易ではない。こうした中、我々人間が水循環の実態に迫るには、でき得る限り作為を排除したモデリングによって、フィールドと同じように動く数値モデルを創り上げることが1つの理想的なアプローチとなる。

本研究では、これまでに取得されてきた水文観測データを活用し、宮ヶ瀬ダム流域を対象とした水循環モデルの構築と地表水・地下水を一体化した3次元数値シミュレーションを実施した。また、林床状態の変化に着目したケーススタディを行い、水源かん養に与える影響について予察的な評価を行った。

2. 水循環過程の数値シミュレーション

土壌中に存在する水や空気等の地圏流体は地上における様々な状態変化を受けながら相互に干渉し合いながら流動している。地上で観察される水 (湧水や渓流水などの地表水) がこういった土壌中の流体流動と密接に関係する点はあるまでもない。

水循環を構成する地表水と地下水は流速が極端に異なり、両者を同時に解くことは通常困難である。登坂ほか (1996) は、地表流動を一般化されたダルシー則と同型の運動方程式として定式化することで実用規模の3次元問題を高速で解くことを可能にした。

いま、対象とする水循環過程を地表及び地下の水・空気

2相流れとして考え、これを以下に示す一般化されたダルシー則で表す。

$$\nabla \cdot \left(\frac{Kk_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{Kk_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) - q_g = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_g}{B_g} \right)$$

ここで、 K は絶対浸透率 (m^2)、 K_r は相対浸透率 (-)、 μ_p は粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 B_p は容積係数 (m^3 / m^3)、 ϕ は空隙率 (-)、 S_p は飽和率 (m^3 / m^3)、 q_p は単位体積、単位時間当たりの生産・圧入量 ($m^3 / m^3 / s$) である。添え字 w, g は水及び空気の各流体相に関する諸量であることを示す。上式は幾つかの補助方程式と組み合わせ、有限差分法により数値的に解くことが可能である。

本研究では、水・空気2相流れ系を基本として地表水との同時追跡を可能とした統合型水循環シミュレータ GETFLOWS を用いる (登坂ほか, 1996)。

3. 宮ヶ瀬流域モデルの構築

(1) 対象領域と地形

対象領域は丹沢山地東に位置する宮ヶ瀬ダムとその集水範囲を包含する東西 12km、南北 14km の流域面積 48.6km² である。集水域の地形は大山 (1,252m)、蛭ヶ岳 (1,673m)、丹沢 (1,567m) 等の水源山地に囲まれ、蛭ヶ岳から北東へ連続する稜線により、宮ヶ瀬ダムへの主要な流入河川である早戸川及び中津川流域に隔てられる (図1)。水循環モデルへ入力する地形情報は 12m メッシュ DEM をもとに作成した。

(2) 降水・蒸発散

対象領域の気象データは堂平、札掛、早戸、宮ヶ瀬で観測されている (気象庁アメダス)。1998年～2005年間の年平均降水量 7.73mm / 日である。堂平観測所の気温、日射量データを用い Harmon 式から求めた蒸発散量は 1.23mm / 日である。水循環モデルへの入力はこちらの年平均値を基本とし、後述する大洞沢流域のハイドログラフの再現には 2003 年の日データを与えた。

1) 地圏環境テクノロジー技術開発部 2) 神奈川県自然環境保全センター



図1. 対象領域

(3) 土地利用

流域内の土地利用は、森林、草地、伐採地、崩壊地、水域、市街地、農耕地と大別されるが、その大半を森林が占めている。本検討では、神奈川県林政情報システムデータコードに基づき、上記区分を水循環モデルへ組み込んだ。それぞれの区分にはマニングの粗度係数（日本河川協会編、2002）を与え、地表流体の可動性を表現した。

(4) 地質

解析領域にあたる丹沢山地東部は、前期中新世～後期中新世における噴出岩盤を主体としており、その新第三系の層相は下位から塔ヶ岳亜層群、大山亜層群、煤ヶ谷谷亜層群、愛川亜層群の4亜層群に区分される（図2）。各層

の最大層厚は1,500～4,000mと見込まれ、大部分の地域で地層が深成岩体に対して、外側へ30°～70°傾斜した同斜構造になっている。深成岩体に接する地域や特定の構造帯や断層付近では地層が直立あるいは逆転する。

解析モデルに組み込む地質構造は、表土層、風化岩、中津挟層、舟沢層、宮が瀬層、落合層、寺家層、大沢層相当層、唐沢川層、本谷川層、四十八瀬川層、断層としたが、各地層の基本物性に関する情報が限られているため、水理地質区分として単純化した以下の値を与えた。

(5) 3次元格子モデル

以上の諸データを組み込んだ3次元格子モデルを構築した。計算格子は尾根線、谷筋などの複雑な地形形状が表現できるよう細密に分割した（図3）。

深さ方向は深度-1,000mまでをモデル化し、地質構造を適切に割り当てることができるよう格子分割を行った。総格子数は831,312であり、平面内を251×276分割、深度方向を12分割とした。

4. 領域初期化と再現性の検証

(1) 領域初期化

上記で設定した基本条件を組み込み、対象流域の平均的な流況（平衡流動場）を再現する領域初期化を行った。まず始めに、地上に地表水が無く、水面を地形と同じくした完全飽和の状態を作成する。この状態から出発し、流域の平均降水量を与え続け、水、空気との2相挙動を追跡する。その間、低地では湧水が起こり、また河川が形成される。同時に高地では地盤内に空気が侵入し、不飽和帯が発達する。次第に、与えられた降水量・地形・地質構造とバランスし、地表水・地下水が完全に一体化された流況が描き出される。この状態が地表水分布、水位、流量、湧水などのフィールドで観測されている諸量と一致するよう条件設定を修正し繰り返し計算を実施する。

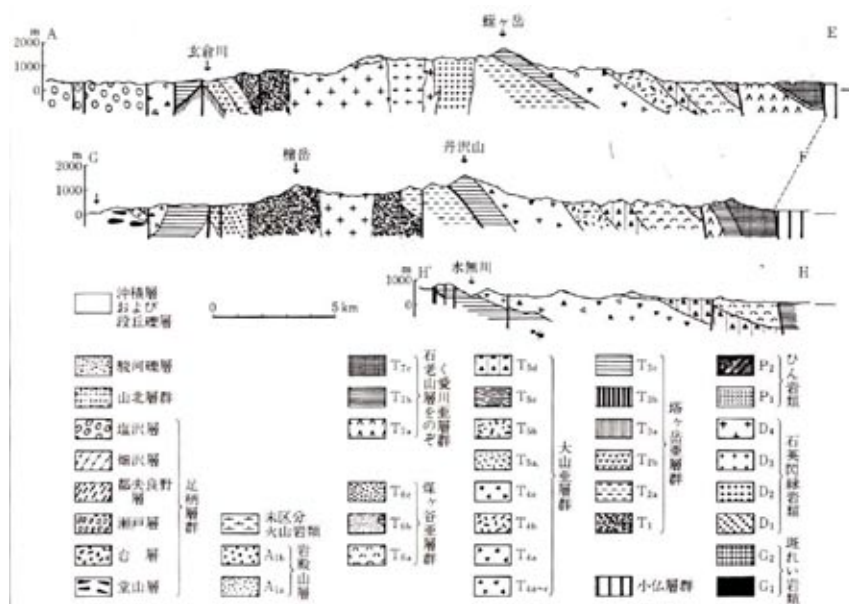


図2. 対象流域の地質（日本の地質3 関東編集委員会編、1998）

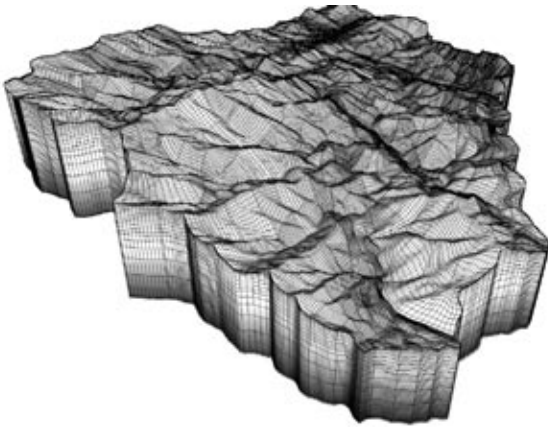


図3. 宮ヶ瀬流域3次元格子モデル

表1. 水理パラメータ

	透水係数cm/s	空隙率%
森林土壌(表土層)	10^{-3}	50
風化岩	10^{-3}	15
その他	10^{-5}	5

(2) 大洞沢ハイドログラフ

中津川上流の大洞沢における流量観測データを用い、2003年3月～7月のハイドログラフの再現を行った。図4上段に示す結果は、初期推定値(表1)によるものである。計算結果は観測値に対して流出過大となり、降雨停止後の減衰が極端に早い傾向が認められる。両者の相違から推定される仮説に基づき、幾つかの試行錯誤を経た結果、実際のフィールドは現モデルよりも地下浸透能が大きく、中間流出による緩衝が寄与する状態にあると推定される。この状況は表層土壌の透水係数を 5×10^{-2} [cm/s]とすることで説明することができ、観測データを良好に再現することがわかった(図4下段)。

(3) 宮ヶ瀬ダム自然流入量

上記の試行錯誤を経た結果に対して、宮ヶ瀬ダム湛水後の流況再現を行った。ダム貯水位、他水系からの導水、放流等の基本データは1999～2006年の7年間の平均値を参考にし、この間の自然流入量の再現を試みた。解析の結果、主要河川および地下水などによる自然流入量は $7.41 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、実績平均値 $7.9 \text{ m}^3/\text{s}$ とほぼ整合する結果が得られた。図5は解析により推定された自然流入量の内訳である。具体的な数値の検証は今後の課題であるが、これらの情報は、宮ヶ瀬ダムに対する河川水、地下水の寄与と水源かん養の実態を明らかにする上の一助となる。

(4) 水位

対象流域の観測水位に関する情報はほとんど無く、再現性の検証は十分でないが、参考のため本解析により推定された水位分布を示しておく。

図6及び図7は浅層水位(自由水面)及び深層水位(EL.0mにおける被圧水位)の各平年値を示したものである。浅層水位コンターは湧水や渓流水の分布を反映した自由水面の形状を示しており、流域内の地形にほぼ対応した

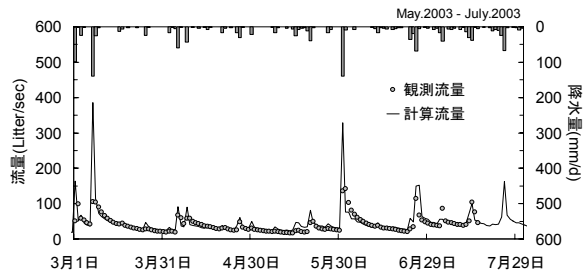
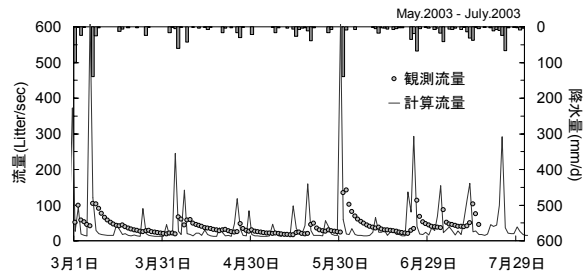


図4. 大洞沢ハイドログラフと計算流量の比較

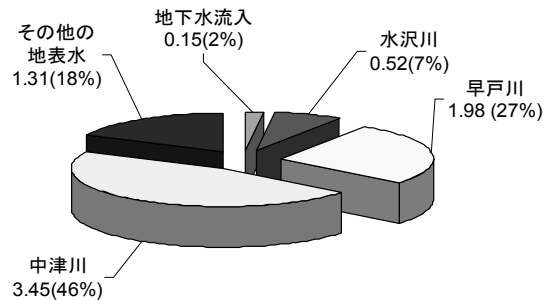


図5. 宮ヶ瀬ダム自然流入量の内訳 (m³/s)

結果となった。深層水位は、蛭ヶ岳や大山などの山岳地で涵養された地下水が中津川への湧昇流として流下しながら、宮ヶ瀬ダムへ向かう大きなポテンシャル場に規制される流況が確認できる。

5. シナリオ計算

上記で構築した宮ヶ瀬ダム流域モデルを用い、本流域の水源かん養機能に着目したシナリオ計算を行った。前提とするシナリオは森林の林床植生の被度が異なる幾分極端な条件設定とし、水源かん養機能へ与える影響を予察的に評価することとした。

解析ケースは以下に示す4ケースを設定した。

- ① 現状 (現状の林床状態)
- ② 放置 (林床植生の被度が低下)
- ③ 40%改善 (林床植生の被度が改善)
- ④ 80%改善 (林床植生の被度が大きく改善)

各ケースの林床状態の変化は、森林の林床植生の被度から試算した平均的なマンニングの粗度係数で代表させ、それぞれ①現状ケース: 0.195, ②放置ケース: 0.065, ③40%改善ケース: 0.31, ④80%改善ケース: 0.426とした。上記ケース間の相違をより明確に示すため、ここでは林床状態がある時点を境に瞬時に変化するものと仮定し、その後の状態を予測した。

図8は各ケースの中津川下流地点でのハイドログラフを



図 6. モデル解析により推定された浅層水位



図 7. モデル解析により推定された深層水位

比較したものである。この間の最大流量をとる7月26日時点のピーク流量と降雨停止後の基底流量を早戸川、中津川の両下流地点についてケース間で比較した(図9)。林床状態を放置したケースに対して、改善ケースではピーク流量の低下と基底流量の増加を示し、水源かん養能の明らかな改善が認められる。改善ケースの早戸川、中津川のピーク流量は、現況流量に対して10~20%減少し、基底流量は30%程度増加する結果となった。

6. まとめ

水源地の実態把握ならびに各種施策の効果を検討するためのモデリング検討を行った。モデルの検証は、大洞沢

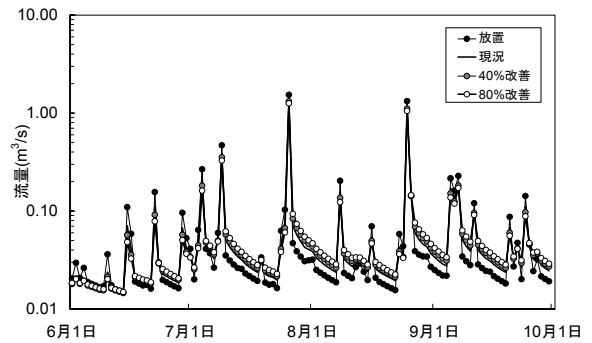


図 8. シナリオ計算例：林床植生の改善が中津川流量に与える影響

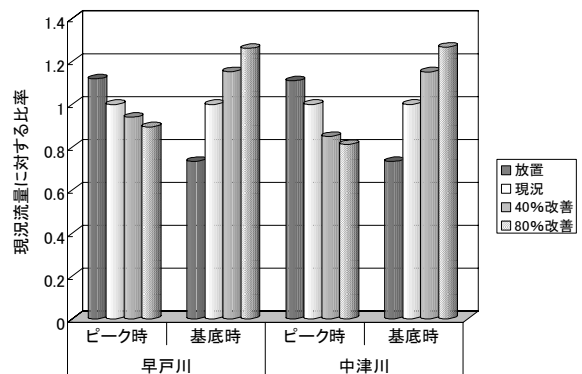


図 9. シナリオ計算例：林床植生の改善とピーク流量・基底流量の関係(早戸川、中津川)

流量、ダム流入流量の観測データとの比較を通して行い、概ね良好な結果を得ることができた。これを元に、林床植生の被度の相違による水源かん養へ与える影響を予察的に評価した結果、流域内の中津川及び早戸川下流地点におけるピーク流量は10-20%抑制され、基底流量が30%程度大きくなる結果が得られ、林床状態の改善が水源かん養機能に対して効果を有することが示された。

今後は、観測データとの比較を充実させ、構築モデルの質を高めると同時に、様々な予測評価に適用できるよう実用的な数値モデルへと発展させていきたい。

文献

- 登坂博行・小島圭二・三木章生・千野剛司, 1996. 地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発. 地下水学会誌, 38(4): 253-267.
- 日本の地質「関東地方」編集委員会編, 1998. 関東地方日本の地質 3, 335pp. 共立出版, 東京.
- 日本河川協会編, 2002. 建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編). pp.84-147. 山海堂, 東京.