

6. 日本列島の水循環解析

多田 和広^{1*}・森 康二¹・田原 康博¹・吉田 堯史¹・柿澤 展子¹
飯山 敦子¹・山田 正²・登坂 博行³

¹㈱地図環境テクノロジー（〒101-0063 東京都千代田区神田淡路町2-1）

²中央大学大学院理工学研究科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

³東京大学工学系研究科システム創成学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

* E-mail: tada@getc.co.jp

日本列島をカバーした国土水循環モデルを開発した。本モデルは、水平解像度 1km メッシュで既に構築された初期バージョンに対して、新たな流域情報を組み込み大幅な改良を加えたものである。本モデルに搭載される膨大な流域情報は、今後の継続的な蓄積・更新・再利用を効率的に行うことができるよう、全てのデータを空間 3 次元、時間 1 次元の軸と関係付け、オブジェクト指向の考え方に基づいたデータモデルとして整備した。本研究では、このデータモデルを元に構築した新たな国土水循環モデルにより、水、空気、熱、塩分の同時輸送過程を考慮した自然状態の水循環解析を行っている。本稿では、最新の国土水循環モデルについて、その特徴と考え方及び現状の解析結果について概要を述べる。

Key Words : hydrologic cycle, water resources management, simulation, Japan islands, GETFLOWS

1. はじめに

行政の保有する公共データを機械判読可能な形で公表し、営利、非営利を問わずその活用を促進するオープンデータの取組が進められている¹⁾。インターネットやスマートフォンの急速な普及を背景にICTを活用した新たな社会サービスが次々と考案されている。地理空間データの分野における地質Navi²⁾や地理院地図（電子国土Web.Next）³⁾はその一例である。世界的なICTの浸透は、巨大化するデータから、従来知られていなかった新しい傾向やパターンを取り出したり、他の異なる情報と組み合わせることで単体では得られなかった新たな法則性を得る知識獲得が本質にあると思われ、分野を超えたデータの活潑な利用が期待されている。

一方で、健全な水循環の維持・回復を推し進める水循環基本法は施行から1年が経過し、関連学会や自治体等では今後の水資源管理のあり方に対して議論が行われている^{例えは4) 5)}。持続的な水資源利用のためには、水循環の場となる流域の正しい実態把握と適正な管理が不可欠となる。そこには、地形測量、気象・水文観測、地質調査など、これまでに行政で蓄積された膨大な公共データが利用可能であり、一層のオープン化の促進が期待される。

しかしながら、これらの情報は時間的、空間的に不均一に存在するため、それだけから流域実態の全容を把握することは容易でない。とりわけ、直接視ることのできない地下の情報は通常極端に限られる。

そこで、時間的、空間的に断片化された情報を物理的原理に基づいて補間・統合化する流域モデリングと超並列計算技術が有効となる。オープンデータを駆使して構築された流域モデルに対し、気象条件や人間活動の地上環境の変動を絶えずインプットし、出力される時空間情報から流域の実態を知ろうとすることもまたICTを利用した知識獲得の行為の1つであろう。それらを流域管理のための意思決定や行動を助ける情報として迅速に利用することが可能となる。

著者らは、これまでに日本列島をカバーした流域水循環モデルを開発し、データ処理及び計算量の実用性、出力情報の妥当性に着目した検証を進めてきた^{6) 7)}。それらの成果を踏まえ、現在は気象、地形、地質、土地利用・被覆などのより詳細な流域情報を加えたモデルの改良・更新に取り組んでいる。本稿では、開発中の水循環モデルについて、その考え方、特徴と現状の水循環解析の結果について概要を述べる。

2. 国土スケールの流域モデリング

森らによる1kmメッシュ国土水循環モデルは^{6,7)}、国土スケールを対象とした大規模な流域モデリングの初めての試みであり、膨大なデータ処理量、実用的な計算速度の視点から実行可能性を評価・確認したものであった。構築されたモデルは公開データを用いて統一的なルールのもとで処理したやや簡易なものであったが、試行した幾つかの水循環解析結果からは、日本列島の地表水、地下水流動パターンの特徴が可視化され、ほぼリーズナブルな結果が得られたものと判断された。

この結果を踏まえ、著者らは、初期の国土水循環モデルの大幅なバージョンアップ（以下、第二次国土水循環モデルと呼ぶ）に着手している。

初期モデルとの主な違いは、次のようなものである。

- ・ 気象外力は過去30年の多年平均または日単位変動データを使用
- ・ 水、空気、熱、塩分の同時輸送過程を考慮
- ・ 詳細な陸面過程（降水遮断、積雪・融雪、蒸発散、熱収支など）を考慮
- ・ 3次元地質構造モデルの詳細化

特に3次元地質構造モデルについては、初期モデルで考慮された地質区分が沖積層、洪積層、基盤岩類の3区分のみであったのに対して、20万分の1シームレス地質図をベースに、主要平野の帯水層構造、山岳部の風化弛みゾーン、近海域の地下地質を組み込んだ100以上の地質区分へ大幅に細分化している。

表-1に第二次国土水循環モデルの基本緒元と利用データの一覧を示す。

本モデルに搭載されるデータは、今後の継続的な蓄積・更新・再利用を効率的にできるよう特徴を持たせている。具体的には、流域モデリングに必要な全てのデータを空間3次元、時間1次元の軸と関係付けられたデータ

表-1 基本緒元と利用データ

項 目	諸元・利用データ
陸域範囲	北海道、東北、関東甲信越、中部東海、近畿、四国、九州
海域範囲	海岸線から 50km まで
深度	標高-10,000m
解像度	空間 500m, 時間 1.0 日
格子数	約 1 億 3,000 万
流体システム	非等温流体（水、空気）＋熱＋塩分
地形	国土地理院 50m メッシュ（標高）
地質	産総研シームレス地質図ほか
植生	環境省植生調査 2 次メッシュ
LULC	国土数値情報土地利用 3 次メッシュ
水・熱利用	生活、農業、工業
気象	メッシュ平年値 2010、レーダ解析雨量
地下温度	産総研地温勾配及び地殻熱流量 DB 他

モデルを開発した。

本データモデルは、任意の時間、空間分解能を基本単位として、その1つ1つに対して、例えば、気象、地形、土地利用、水利用、地質、熱に関するデータを組み合わせてパッケージ化したものである。すなわち、地図上の水平位置、垂直位置（深度）と時期を決めれば、基本単位に格納された全てのデータを特定し自在に操作することができる。いわゆるオブジェクト指向の考え方である。オブジェクトと呼ばれる複数のデータのパッケージは、任意の場所、時間の特定のデータのみを変更・更新することが可能となる。典型的なオブジェクトを再利用して



図-1 国土水循環モデルの概念と利用の流れ

新しいオブジェクトを派生させることもできる。GISで取り扱うレイヤー型データの全てを更新するよりもはるかに効率的である。言うまでも無く、継続的なデータの蓄積・更新・再利用を行う中で、これらのデータには更新頻度の違いがある。地形標高のように更新頻度は少ないものから、気象要素のように絶えず変化し更新されるものまで様々である。この更新頻度の違いを利用してオブジェクトの粒度や派生関係を適切に設計することで、データアクセス時の効率面で格段と高い性能を実現することができる。なお、データモデルは実際の数値計算を行うモデルと同義ではない。同一のデータモデルを用いて異なる数値計算モデルを作成することも可能である。現時点で上述のデータモデルの水平解像度は500m、垂直分解能は深度に応じて異なり1mから500mの範囲である。数値計算モデルは、主要な河川域をLGR (Local Grid Refinement)等により細分化することも可能である。なお、特定の地域のみを解析する場面は多い。そのような場合は、専用のデータ抽出ツールを用いて全体から部分を抽出し、必要に応じて格子分割を細分化する。個別の検討を通じて明らかになった知見や同定された地下地層構造、物性分布等は上述のデータモデルへフィードバックさせ以降の検討で再利用できるよう更新する。データモデルから作成した数値計算モデルは、超並列計算機を用いて連続的に計算処理を行うことができる。絶えず出力される水、熱及び塩分等の収支は、流域管理のための重要なモニタリング指標の1つであり、それらを監視しながら様々な意思決定を支援する。以上の流れを図-1に示す。

3. 手法

上述した水平分解能500mのデータモデルをベースに具体的な数値計算モデルを作成した。ここでは、流域内の水、空気、熱、塩分の同時輸送過程を考慮した解析をGETFLOWSを用いて実施した。基本数値モデルの詳細は登坂ら⁸⁾、森ら⁹⁾を参照されたい。

本解析では、過去30年間の観測値から1kmメッシュごとの平年値を推定・算出した気象データを与え、水利用を考えない平衡流動場を求めた。初期状態は海水で飽和した状態から出発し、流体、温度、塩分濃度の平衡状態に達する過程を非定常計算によって求めた。海水位は標高0mとした。熱的条件は深度に依存した地温勾配から推定されるモデル底面の温度を境界条件として与えた。平衡状態を求める方法は、森ら¹⁰⁾を参照されたい。

4. 結果

平衡状態の解析結果より、地表水・地下水流動経路及び地下水涵養量の分布図を作成した（図-2）。

地表水・地下水流動経路は、地表付近に1,000m間隔で配置した粒子の3次元流動経路を解析した結果を水平面へ投影表示したものである。青線は地表面上を流れる地表水、赤線は地表面下を流れる地下水を表す。結果の詳細な検証は今後の課題であるが、陸域の主要な河川網はほぼ再現されている。平野部は地表水が集まり湛水する傾向が見られるため、近年の現況を再現するには、河川堤防、揚水機場等の人工的要因を考慮する必要がある。

地下水涵養量は地表面を通過する流れのうち、下向きの地下浸透フラックスのうち0.1 mm/日より大きい地域を示したものである。空白域は0.1 mm/日以下の涵養域または地下水の湧出域を表す。得られた涵養量は降水量の空間分布とほぼ対応する結果となった。主要な平野部の平均降水量は3~5mm/日であるが、ほとんどが1mm/日より小さい涵養域または湧出域となることが示された。

5. 結言

国土スケールの流域モデリングの試みとして、日本列島をカバーした流域水循環モデルを開発し、現状の水循環解析結果について概要を述べた。また、本研究では絶えず変化する流域環境に対して、継続的にデータを蓄積・更新し、再利用する際の実用性を重視したデータモデルを提案した。今後は、最新の気象データによる常時の連続計算を行う中で、環境変化の傾向を早期に捉え、民間事業者や行政機関に必要となる様々な意思決定に貢献できるよう発展させてゆきたい。

参考文献

- 1) 総務省: 報通信白書平成 26 年版,
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/> (2015/6/30 閲覧)
- 2) <http://www.gsi.go.jp/johofukyu/johofukyu40032.html> (2015/6/30 閲覧)
- 3) <https://gbank.gsi.jp/geonavi/> (2015/6/30 閲覧)
- 4) 嶋田純, 谷口真人: 水循環基本法に関する学会からの提言, 地下水学会誌, 第 56 巻 3 号, pp187-188, 2014
- 5) 秦野市: 秦野名水の利活用指針, 2014
- 6) Mori K., Tada K., Tawara Y., et al.: Large-scale Terrestrial Fluid-Flow Modeling to Predict the Climate Change Impacts on Regional Water System, IAHR International Groundwater Symposium 2010
- 7) 森康二, 多田和広, 田原康博, 山下紘司, 佐藤壮, 西岡哲, 登坂博行: 日本列島の 3 次元水循環モデル構築の試み, 日本地下水学会講演会講演要旨, pp.238-243, 2010.
- 8) Tosaka H., Itho K., Furuno T.: Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation, Hydrological Process, 14 (3), pp449-464, 2000.
- 9) 森康二, 田原康博, 多田和広, 山田正, 登坂博行: 流体・熱・化学物質・土砂の同時輸送過程を考慮した統合型流域モデリング, 第 23 回地球環境シンポジウム講演集
- 10) 森康二, 田原康博, 多田和広, 登坂博行: 流域における物質・エネルギー輸送場の 3 次元数値モデリングと生態系分野への応用可能性, 応用生態工学会 第 18 回研究発表会講演集, C-18, pp243-246, 2014

地表水・地下水流動経路

平均的な気象条件とバランスした平衡状態の流速分布に対し、地表付近に1,000m間隔で配置した粒子の3次元流動経路を解析した結果の平面投影図。青線は地表水（地表面上を流れる水）、赤線は地下水（地表面下を流れる水）を表す。

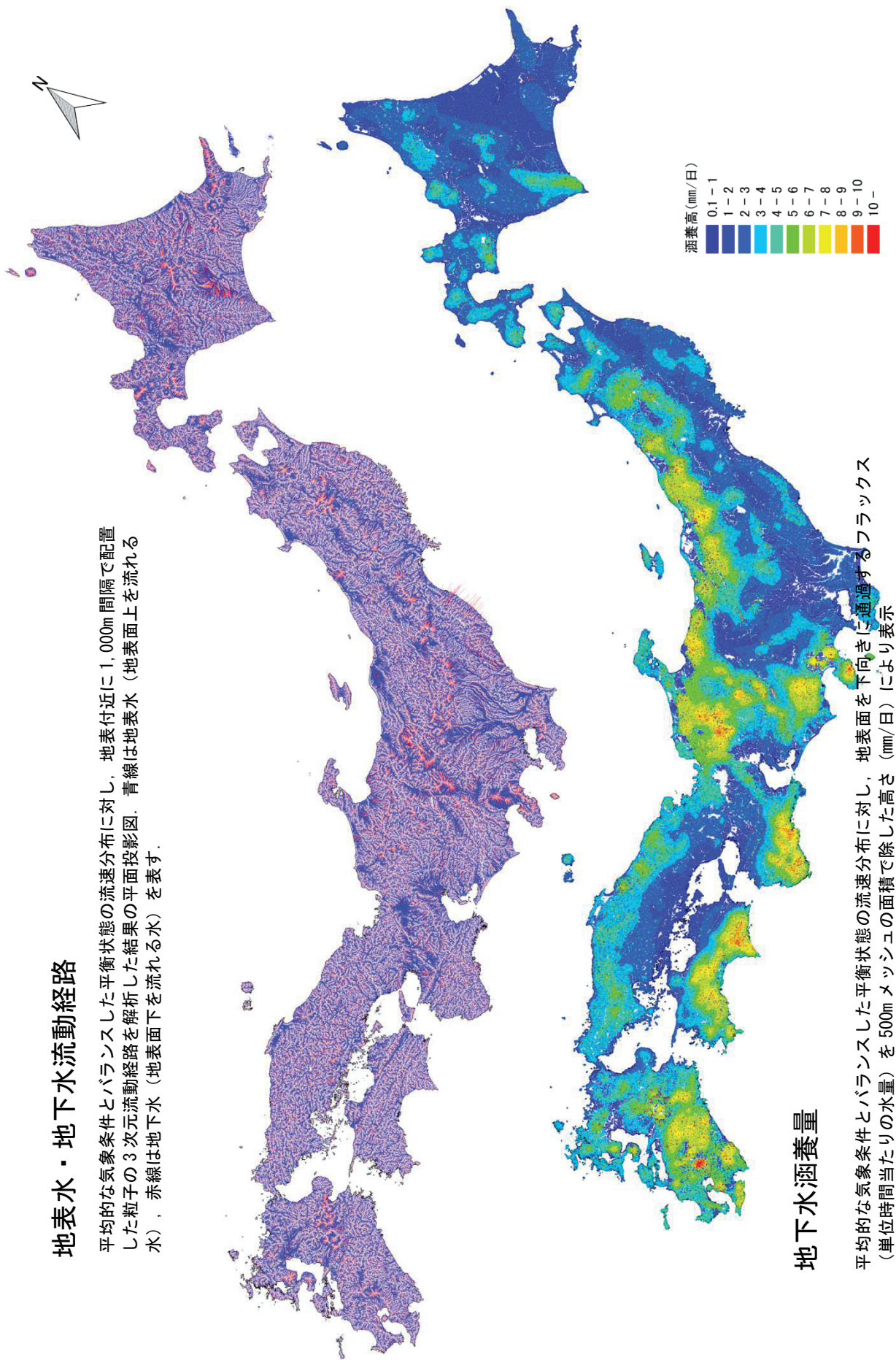


図-2 第二次国土水循環モデルによる地表水・地下水流動経路，地下水涵養量の解析結果