

論文の内容の要旨

論文題目 全球への適用を目指した地下水流動モデルの開発
Development of groundwater flow model for global scale

氏 名 三浦 陽介

これまで全球を対象とした水資源に関する研究は、水不足に関する指標を用いて、現在及び将来について実施されてきた。将来における水資源は、今後予想される気候変動や人口増加に伴い、全球的に逼迫すること、乾燥地域ではより乾燥し、湿潤地域ではより豪雨などの発生回数が増え、人間が利用できる水資源賦存量は減ることが予想されている。また、水資源は使用する地域内で消費される資源であるが、今日のグローバルな社会・経済活動に伴い、使用される水が地域で消費されていたとしても、その効果や影響は他の地域にも波及し、グローバルな影響力を持つものとなっている。

これまで実施されてきた全球を対象とした水資源に関する研究は河川水を中心とする地表水に対し、議論がなされており、地下水、特に地下水の水平方向の流動については十分に考慮されてこなかった。近年、全球を対象とした研究において、河川への流出現象に対する水平方向の地下水流動の重要性が認識されつつあり、さらには、地下水面の位置の違いにより、蒸発散量の割合が変化することが指摘され、気候学的観点からも地下水の重要性が増している。将来予測を実施するためには、モデルが必要であるが、これまで開発されてきた全球スケールのモデル、**Earth System Model** (以降、**ESM**)には、地下水流動を陽に扱うモデルは少ない。また、流域スケールの地下水流動モデルは大規模計算に活用できるようには設計されていないため、これをそのまま全球スケールに適用することは計算コストが非常にかかるという問題がある。

これまで実施されている全球スケールでの解析では、計算コストを抑えるため、様々なパラメタリゼーションが施されている。これらは検証され、適用されているものもある一

方で、十分な検証が実施されていないものもある。そのため、ある条件には適合したとしても、条件が変わった場合には、適合しないものもあると考えられる。

その一方で、近年の計算機環境の進展に伴い、大陸スケールでは地表・地下を一体的に扱い、物理・数学に忠実なモデルが開発されてきている。これらのモデルは大規模計算にも活用できるように設計されているものの、それぞれに一長一短があるとともに、これをそのまま全球に適用するには、計算機環境が進展した今日においても困難と予想され、実際、これまでに全球スケールに適用された事例はない。

このような背景を受け、本研究では、特に水平方向の地下水流動に着目し、これまで全球スケールで活用されてきた地表付近を中心とする陸面モデルと結合させることを念頭に、全球への適用が可能な地下水流動モデルの開発を目指し、以下の目的で研究を実施した。

- ・ 地下水流動を平面的に数km単位で表現し、地表や気象へ与える影響を解析でき、計算コストを抑えながら、大規模な問題に対応できるモデルを構築する
- ・ 今後のモデル開発やパラメタリゼーションの方向性を示すため、平野部、山間部における表現上必要な要素や表現の仕方を示す

本論文では、上記の目的を果たすため、モデル開発を行い、コードとしての確からしさを確保しながら、高速に解き、実現象を再現できるモデルを構築した。構築したモデルを実際の流域へ適用し、観測値や既存モデルとの比較結果から、地下水流動に関連する現象を表現する上で、必要な要素や表現の仕方に関する知見をまとめた。

各章の要旨を以下に示す。

第2章では、モデルの基礎となる採用した支配方程式、その離散化手法を示し、開発したモデルで扱える現象について示す。採用した支配方程式は、飽和・不飽和を一体的に扱える方程式であり、気象条件により異なる不飽和帯の厚さを自動的に診断し、忠実に地下水の状況を再現するために採用した。モデルで扱える現象は地下における水の流動であり、地表水と地下水の水のやり取りを考慮できる。

第3章では、計算コストがかかると考えられる非線形解法と線形解法に対する高速化手法とその結果を示す。非線形解法にはNewton-Raphson法のうち、線形解法における収束性を高めるための手法であるInexact-Newton法を採用し、さらなる収束性改善のため、残差を最小化するBacktracking法と緩和係数によるUnder-relaxationを適用し、高速化を図った。線形解法の高速化として、計算時間が反復回数の増加の影響を受けにくく、問題の規模のみに依存しやすい解法であるMultigrid法のうち、代数的Multigrid法を前処理として適用し、高速化を図った。高速化を図ったコードを用いて第5章の対象地域であるセントラル・バレーに適用し、地下水位の安定状態を得るための定常解析を実施した。その結果、代数的Multigrid法を適用した場合、1億年の計算を約7日 (1CPU)で終了させることができた。

第4章では、開発したコードの確からしさを示す。確認を実施したケースは、今後のモデルの活用方法を想定し、鉛直一次元・鉛直二次元の浸透問題、三次元地下水揚水問題、浸出面境界問題を設定し、それぞれ、他の研究者が実施した計算結果や模型実験によ

る観測値と比較した。また、ある計算範囲での水収支についても確認を実施した。その結果、開発したコードは正しい答えを出していると判断できる結果であり、信頼性のあるコードと言えるモデルが構築できた。

第5章では、開発したモデルの平野部におけるモデルの再現性を確認する目的で、実際の流域へ適用させ、流域内で観測されている地下水位と比較し、モデルの再現性、妥当性の確認結果を示す。これらの結果から平野部におけるスケールの大きな問題に対する表現方法について提案を実施した。対象とした流域は、全球での地下水利用の傾向と同様であり、地下地質構造がある程度把握されており、地下水位や地下水揚水のデータが公表され、さらに世界的に有名な地下水モデルであるMODFLOWが適用されているという理由から米国、カリフォルニア州のセントラル・バレーを選定した。はじめに、パラメータ調整を実施し、観測されている地下水位と比較を実施したのち、MODFLOWとの結果とも比較しながら、妥当性の確認を実施した。その結果、本研究で開発したモデルとMODFLOWでは複数の計算グリッドにまたがる井戸からの揚水に対する計算上の取り扱いの違いにより、結果に差異が見られた。そこで、本モデルでも複数の鉛直方向の計算グリッドにまたがり、一つの平面格子内で複数の井戸を考慮でき、さらに、全球への適用性を鑑みて、井戸の半径などの諸元を必要としない手法を提案した。その結果、地下水位の表現力が向上したが、それでもなお、MODFLOWの結果と差異が見られ、計算開始時の初期水位の違いが計算に影響していることが示唆された。そこで、観測水位を初期水位とする計算を実施し、計算結果が改善したことを示した。これらの一連の結果から、全球においても、適用可能な地下水揚水の新たなパラメタリゼーション手法を提案するとともに、今後の全球スケールでの計算を実施する際には、地下水揚水が盛んになる前を非定常計算の開始年と設定し、涵養量などの境界条件を時間変化させない定常的な数値計算を実施することで、非定常計算開始時の初期水位を作成することが望ましいことを提案した。

第6章では、開発したモデルの山間部におけるモデルの再現性を確認する目的で、実際の流域へ適用させ、流域内で観測されている河川流量と比較し、モデルの再現性、妥当性の確認結果を示す。これらの結果から地下水流動から見た山間部におけるスケールの大きな問題に対する表現に必要な要素や表現方法について提案を実施した。対象とした流域は、起伏の激しい地形を有し、河川流量などのデータが入手しやすい日本全域を選定した。これまで、ESMで用いられてきた一定の深さによる鉛直分割した計算では、数値解として、良好な初期値を設定することが難しいこと、設定する基盤の深さ及びパラメータの設定が重要であることを明らかにした。また、ESMの一部として活用されている陸面モデルであるMATSIRO、河川・氾濫現象を扱うモデルであるCaMa-Floodと本モデルをカップリングし、そのカップリング手法による計算結果の違いについて比較した。その結果、本モデルでは観測されている河川流量が少ない場合に、良好な結果を示し、これまで考慮されて来なかった水平方向の地下水流動を陽に表現したことにより、基底流出成分の精度が向上したと考えられる。その一方で、河川流量が多い場合には、過小に予測する傾向にあり、山間部

のような起伏の激しい地域で大きなグリッドサイズを採用した場合、一つのグリッド内で地表面流出が起きていると考えられる。しかし、本モデルでは、一旦浸透した水はそのグリッド内の水位を上げ、隣接するグリッドとの水位差によって、水平及び鉛直方向に流れてしまうため、地表面流出成分を十分に表現することが難しいと考えられる。この結果から、MATSIROとCaMa-Floodとのカップリング手法として、MATSIROの地表面流出成分を除いた浸透量を本モデルが受け取り、本モデルから計算される流出成分とMATSIROの地表面流出成分を合わせてCaMa-Floodに受け渡すというカップリング手法を提案した。その結果は、これまでのMATSIROのみの結果と比較すると、低水時の河川流量の精度を大きく改善することが可能となり、本モデルが地下部分におけるESMの一部を担える可能性を示すことができた。また、本モデルでの課題である地表面流出成分への表現をより高めるパラメタリゼーション手法を提案し、これを適用した結果、地表面流出成分を表現できるようになり、高水時の河川流量の表現力を向上させるとともに低水時の河川流量も向上させることが可能となった。

第7章に結論として、全体のまとめ、今後のモデル開発及び研究の方向性、今後の展望を示した。