

京都大学	博士（工学）	氏名	塩尻 大也
論文題目	詳細な土壌水動態に基づく地下水位解析を組み込んだ陸面過程モデルの開発		
<p data-bbox="188 394 448 427">（論文内容の要旨）</p> <p data-bbox="172 439 1420 808">世界の人口は近年急激に増加しており、それに伴い水需要も増加している。水不足が発生する危険が増している中、水文循環に関する科学的な理解に基づき、適切に水資源を管理してゆくことが重要である。広く利用されている地下水資源は涵養される以上の過剰な取水が長期的に行われることで枯渇するだけでなく圧密による地盤地下を生じるなど非可逆的な変化も惹起している。持続可能な水利用を行ってゆく上で地下水資源の持続可能性評価は重要であり、様々な全球陸域水循環モデルが近年開発されているが、それらのモデルの精度検証には、陸域総貯水量や河川流量、あるいはモデル出力同士の比較などが用いられ、地下水について解析するモデルであるにもかかわらず地下水位そのものの精度評価はほとんど行われてこなかった。</p> <p data-bbox="172 819 1420 1144">本論文はこれまで地下水資源が考慮されていなかった小槻ら(2012)による全球陸域水循環モデルを改良し、地下水の解析を可能とすることを目的としている。これまで他の研究では観測井戸による地下水位データを用いた地下水位そのものの精度検証が不足していることを踏まえ、本論文では観測井戸による詳細な地下水位の再現に重点を置いたモデル開発を行っている。この際、他の研究で用いられる手法を用いることで詳細な地下水位解析が可能かについて様々に検証しつつ、最終的に独自の地下水位解析手法の開発に成功している。本論文は 6 章構成となっており、独自のモデルの実装に至るまでの過程が順を追って示されている。</p> <p data-bbox="172 1200 1420 1312">第 1 章は序論であり、水不足問題と非持続可能な地下水取水についての現状をまとめている。またそれらの問題について全球規模で解析を行うことのできる他の研究のモデルについても紹介している。</p> <p data-bbox="172 1323 1420 1951">第 2 章は、他の研究で用いられている地下水解析手法を実装することで、地下水位の再現が可能かを確認している。その手法ではそれぞれの解析対象グリッドに地下水貯水槽を設置し、地下水涵養量と地下水取水量の差によって地下水貯水量が変動するというものである。地下水資源の持続可能性は地下水貯水量を基に評価される。また地下水涵養量は陸面過程モデルにより出力される基底流出量の一部として算出される。このモデルにより非持続可能な地下水取水を行う地域の可視化には成功したものの、その値の定量的な評価は難しかった。また基底流出量のうち地下水涵養量が占める割合を、GRACE による陸域総貯水量（TWS）の変動成分の観測データを用いた検証を通して算定しようと試みたものの、有効な結果は得られなかった。計算された陸域総貯水量は入力となる降水量の精度に影響を受けやすく、またこのモデルでは GRACE の観測データで検出されている地球温暖化による氷河融解や地下水の過剰取水による陸域総貯水量の継続的な減少を正しく評価できていないことが原因だと考えられる。以上より地下水貯水槽を設置し地下水涵養量を基底流出量の一部として算定する手法での地下水位解析は難しく、より地下水面付近の水分動態を現実に即した形で表現するモデル化手法を採るべきであると結論付けられている。</p> <p data-bbox="204 1962 1420 1995">第 3 章は第 2 章の結論をふまえ、土壌水分動態をより現実に近い形で組み込んでい</p>			

る他の研究手法の利用可能性について解析的に検証を行っている。またそのモデル改良の概要について示している。本論文では陸面過程モデル SiBUC を改良し、地下水位を診断変数に加える。そのために SiBUC では土層が 3 層構造であったものに、さらに土層第 4 層を追加している。第 4 層は SiBUC の土層の最下端から地下水面までの範囲に位置する、地下水面直上の不飽和層である。なお、地下水面が第 3 層の底よりも上昇した際には、第 3 層がなくなり、第 2 層の下は第 4 層になる。つまり、第 4 層は常に第 3 層の下に位置する必要はなく、あくまでも地下水面の直上の不飽和層という定義である。このモデルを SiBUC-GW と呼称しており、SiBUC-GW で地下水位を診断するための支配方程式として、他の研究で用いられている手法を利用可能か、解析的に検証を行っている。他の研究で用いられる支配方程式では、診断変数として地下水貯留量が用いられ、地下水貯留量を specific yield というパラメータで割ることで地下水位が算定される。ここで地下水貯留量は地下水涵養量と基底流出量の差によって変動する値である。ただしこの手法では地下水面直上の不飽和土層の土壌水分が考慮されていない。この不飽和土層は SiBUC-GW で地下水位を診断するために新たに追加された土層第 4 層に相当するものである。そこで地下水面直上の不飽和土層の土壌水分がどのように変動するのかについて解析的に検証し、地下水面直上の不飽和層の土壌水分量の実情に即した形での再現が難しい可能性があることを示した。これが原因となり既往のモデル化手法では地下水位の詳細な再現が難しいという可能性が示されている。そこで本論文では地下水位の詳細な再現のために、地下水面直上の不飽和層の土壌水分移動を可能な限り正確に表現可能なモデル化手法をとるべきだと結論付け、土層第 4 層である地下水面直上の不飽和層内における質量保存則を支配方程式として用いるべきであると示している。ただし第 4 層の層厚は地下水位の変動とともに変化するため、質量保存則 1 式に対し未知変数が層厚と土壌水分量の 2 つとなり、この 1 式だけでは解くことができない。

第 4 章は、質量保存則内の未知変数である土層第 4 層の土壌水分量と層厚の関係式を導き出すため、土層を多層に分割して詳細な土壌水分分布を解析可能な多層モデルを開発し、それを用いた仮想的な数値実験を行っている。ここでは湛水状態から外力として排水のみを与える実験が行われ、その結果を SiBUC-GW の未知変数の関係はシグモイド関数によって近似できることが判明した。このシグモイド関数と質量保存則を連立することで、SiBUC-GW によって地下水位を解析する手法が提案された。

第 5 章は、SiBUC-GW を実装するための詳細について解説している。さらに SiBUC-GW による解析を行い、モデル検証を行っている。第 4 章で多層モデルを用いて行われた湛水状態からの排水実験を SiBUC-GW を用いて行い、多層モデルと同様の結果を再現できることを確認している。さらに 1 時間おきの観測地下水位も SiBUC-GW によって比較的良好に再現できることを確認している。このように従来のモデルでは行われてこなかった地下水位の詳細な再現を達成することができた。

第 6 章は結論であり、本論文を総括し、今後の展望について述べている。

氏名	塩尻大也
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、全球陸域水循環モデルにおいて地下水位を解析可能とするための手法について様々な角度から検討を行ったものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 類似の既往研究ではどのような解析手法が用いられているかをレビューし、それらを大別して、仮想的な地下水貯水槽を設置するものと地下水位を診断変数に加えるものの2種類に分けて整理した。
2. 仮想的な地下水貯水槽を設置する手法については、これを実装することでその手法が利用可能であるか、またどのような問題点があるかを検討し、地下水の持続可能性推定は可能であるものの、地下水位の解析は困難であることを指摘した。
3. 地下水位を診断変数に加える手法について解析的に検討した結果、これまで妥当なモデルであると考えられてきたそれらの手法は、現実の土壌では起こりづらい挙動をとるような拘束条件を仮定することと同義であることを指摘した。
4. これらの検討により、これまで様々な既往研究で用いられてきた手法は地下水動態を実情に即した形で解析するには不十分であると結論付けている。この指摘は全球規模での地下水解析についての従来の常識に一石を投じるものと言える。
5. リチャーズ式に基づいた土壌水分場の詳細な解析が可能な多層モデル（層厚0.5cm）を構築し、排水過程における地下水位と土壌水分の関係を調べた結果、地下水位と地下水面直上の不飽和層の土壌水分には一定の関係性があり、シグモイド曲線で近似できることを見出している。
6. 多層モデルによる詳細な解析から見出された地下水位と土壌水分量の関係式を用いることで、陸面過程モデルにおいてより実現象を反映した仮定に基づく地下水位の算定を可能とする新たな解析手法を提案した。
7. 本論文で提案されている手法について地下水位観測データを用いた検証を行い、地下水位を比較的良好に解析可能であることを示している。これまで陸面過程モデルでは難しかった観測地下水位の再現を、本研究では可能としている。

以上のように、本論文は、地中の水分移動に関する詳細な数値解析を元に、広域の陸面水文モデルにおける地下水の新たな解析手法を開発したものである。これまでに開発されてきた地下水を考慮可能な複数の全球陸域水循環モデルの解析手法とは一線を画す手法を提案しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年10月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。