

審査の結果の要旨

氏名 アブドゥル ムイズ

水力発電は信頼性および安定性の高い再生可能エネルギーの1つであり、世界の電力構成のうち再生可能エネルギーの中で最も高い割合を占めている。カスケード型的水力発電ダム群は、融雪水や高い落差を利用するために降雪の多い山岳流域に建設されることが多い。積雪山岳流域の水力発電ダム群を効率的に操作・運用し、便益を最大化するためには、高い精度の気象水文予測とダム操作の最適化が必要である。気象水文予測は気象予報の精度に加えて、気象観測データから導出する水文流出モデルの初期条件に大きく依存するが、積雪山岳地域では信頼性の高い観測データは非常に限られている。さらに、水文流出モデリング・コミュニティと水資源管理コミュニティとの間の隔たりや、水力発電ダムの最適化問題の複雑さとその計算コストなどの科学的問題などから、特に短期間の気象水文予測を用いた水力発電ダム群の最適化はこれまで十分に研究されていない。また、リアルタイムでの最適化計算の実現は実用化に向けての大きな課題である。そこで本論文は、積雪山岳流域の水力発電ダムの操作・運用を支援するための、計算効率の高いデータ・モデル駆動型のリアルタイム最適化フレームワークを開発することを研究目的とした。

はじめに、従来のWEB-DHM-Sモデル（積雪融雪を考慮した水エネルギー収支分布型水循環モデル）の並列化を実装して、WEB-DHM-4cSモデルを開発した。この新モデルは、従来モデルと比べて約5倍の高速計算を実現するため、より効率的な気象水文予測によるリアルタイムでのダム操作への応用を可能にする。

次に気象水文予測のための信頼性の高い初期条件を取得するために、気象庁の高解像度リアルタイムレーダー降雪観測値（高解像度降水ナウキャスト）を自動補正するために、2km以上/未満という2つの高度帯での降雪補正係数（パラメータ）を初めて開発した。黒部川流域でWEB-DHM-4cSモデルによる4年間の水文流出解析を行ったところ、全ての高度帯で単一パラメータを使用した既存手法に比べて、大幅に高い精度で積雪と流量の両方を再現することができた。具体的に本手法は、単一パラメータに比べて、流出量のNash-Sutcliffe 指標（NS）を0.80から0.85に改善するとともに、積雪面再現における過剰評価誤差を最大47%減少することができた。

そして、鉛直断面温度分布についての再解析データ（JRA-55）を用いて、観測所が限られた山岳地域での気温観測値を補正するための新手法を開発した。

本手法により山岳地域での高解像度の気温分布情報の提供が可能になり、積雪と流量の再現が改善することを実証した。具体的には、既存の気温補正手法に比べて、流出量のNSを0.83から0.85に改善するとともに、積雪深の誤差 (RMSE) が0.45mから0.27mへ減少した。本手法により、リアルタイムでの気象水文予測を行うために、信頼性の高い水文流出モデルの初期状態の取得を可能にした。

最後に、カスケード型的水力発電ダム群での収益と貯水量の両方を最大化することを目的として、短期間(39時間) 気象予測データを使用した最適運用のための新手法を開発した。黒部川ダム群での完全予測データを過去の複数の洪水事例に適用すると、本手法により、高い貯水位を維持しながら収益を最大5.8%増加できることを実証した。本結果により、水力発電ダム運用における短期間気象予測情報を活用することの潜在的価値を明確に示した。また本手法を実装するために、ダウンスケールした32メンバーの気象庁アンサンブル全球数値予報モデル (GSM) を利用して、2019年出水期の水力発電ダム運用の最適化を試みた。その結果、実際のアンサンブル予測では、現在の運用と比較して平均0.89%の収益増加となり、完全予測では1.5%の収益増加が見られた。個々の予測メンバーのほとんどがダム操作のパフォーマンスの改善を示したが、一部のアンサンブルメンバーは収益の減少をもたらした。本結果は、決定論的予測に対するアンサンブル予測の利点を定量的に示した。

以上のように本論文では、積雪山岳地域のカスケード型水力発電ダム群の運用最適化を目的に、計算効率の高いデータ・モデル駆動型のリアルタイム意思決定支援のフレームワークを開発し、短期間気象予測を使用した黒部川でのケーススタディにより、その適用可能性と生み出される便益を実証した。個々の研究成果は、WEB-DHMモデル開発コミュニティおよび水文モデリング・コミュニティ、水資源管理コミュニティに科学的貢献をもたらした。そして、本論文全体を通して提示したフレームワークは、積雪山岳流域での水力発電ダムの短期的運用における意思決定に貢献しうる。本フレームワークを実際のケーススタディへ適用することで、リアルタイム予測の制約を考慮しながら、水力発電ダムの操作管理者にタイムリーで効果的な意思決定を支援するという点で、実用面からも高い価値が認められる。

本論文は新規性と実用性が大変高い研究であり、その研究成果は積雪山岳地域での気象水文予測の大幅な精度向上に役立つとともに、短期間気象予測情報を水力発電ダムの運用に活用することの価値を示し、ひいてはアンサンブル水文気象予測を利用した水力発電ダムの最適運用システムの実装において大いに役立つことが期待される。このように、Abuld Moiz氏の研究成果は水文学はもとより、実務的な水資源管理にも大きく貢献するものである。よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。