

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	Manoj Khaniya
論文題目	Computationally efficient methods of water level and streamflow assimilation in distributed hydrological modeling (分布型水文モデリングにおける水位と流量の計算効率の高い同化手法)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、分布型降雨流出氾濫モデルによる河川水位と流量の予測精度を向上させることを目的とし、計算効率の高いデータ同化手法を開発して実流域でその適用性を検討したものである。本論文は以下の8章から構成されている。</p> <p>第1章は序論である。気象現象および水文現象のリアルタイム予測手法に関する最近の研究をレビューし、予測値の精度を高めると同時に予測情報の不確実性に関する情報を提供する手法としてアンサンブルデータ同化を導入した予測手法の最近の成果をまとめている。また、分布型洪水予測シミュレーションモデルにアンサンブル予測手法を導入することは計算負荷が高く、実用的なリアルタイム予測システムを構築するための新たな技術開発が必要であることを指摘している。その上で、これらの課題を解決し、分布型降雨流出氾濫モデルを用いてリアルタイムで流域内部の多地点の水位を予測すること、そのためにアンサンブル最適内挿法をもとにした複数のリアルタイム予測手法を開発することを本研究の目的とすることを述べている。</p> <p>第2章では、データ同化手法の概要を述べている。非線形システムにも適用できるフィルタリング手法としてアンサンブルカルマンフィルタやその発展形を概説するとともに、水文予測におけるデータ同化手法の適用とその課題をまとめている。</p> <p>第3章では、モデル状態量の誤差共分散行列を時間的に固定して最適内挿法を分布型降雨流出氾濫モデルに適用し、モデル状態量とモデルパラメータの推定精度を分析した結果を述べている。事前にアンサンブルカルマンフィルタを適用した洪水予測シミュレーションを実施し、そこで得られたモデル状態量の誤差共分散行列を時間的に変化させずに用いて最適内挿法を適用した。その結果、本手法によるモデル状態量の推定精度はアンサンブルカルマンフィルタを適用した場合よりも劣るものの、モデル状態量である河川水位および河川流量さらにモデルパラメータの推定精度向上に有効であることを見出した。また、事前に誤差共分散行列を推定した洪水とは別の洪水を対象とした場合でも、本手法によって状態量の推定精度が向上することを見出した。</p> <p>第4章と第5章では、モデル状態量の推定精度を向上させるために、計算負荷を抑えつつモデル状態量の誤差共分散行列を逐次生成する新たなアンサンブル最適内挿法を開発し、その性能を分析した結果について述べている。その一つとして第4章では、過去に発生した洪水の分布型洪水流出シミュレーションを事前に多数実施してそれら</p>			

のモデル状態量を格納したモデル状態量リポジトリを構築し、対象とする洪水の予測状態量ベクトルに類似する状態量ベクトルを逐次、リポジトリから複数抽出して誤差共分散行列を動的に生成する手法を開発した。状態量リポジトリから状態量ベクトルを抽出する際に、ランダム抽出する方法、予測状態量とのノルムを計算し予測に近い状態量を抽出する方法、予測状態量に加えて観測値にも近い状態量を抽出する方法を検討した。その結果、後者二つの手法はランダム抽出する場合よりも安定した推定精度を確保できることを見出した。また、対象とする洪水と類似する状態量ベクトルが状態量リポジトリに含まれている場合は本手法による推定精度は高く、状態量リポジトリに多数の洪水での状態量の空間分布情報が含まれていることが予測精度の向上に寄与することを見出した。

第5章では、モデル状態量の誤差共分散行列を逐次動的に生成する別のアンサンブル最適内挿法を開発し、その性能を分析した結果について述べている。第4章で開発した手法はモデル状態量リポジトリのデータサイズが大きくなるとモデル状態量の抽出に時間を要し実時間予測に適さない可能性がある。そこで、降雨流出氾濫モデルで予測したモデル状態量に空間的な相関構造を持つ予測誤差をランダムに付加して多数のモデル状態量を生成し、生成したモデル状態量からその誤差共分散行列を生成する新たな動的アンサンブル最適内挿法を開発した。モデル状態量に付加する誤差を固定的に与える場合と適応的に与える場合の二通りの手法を提案し、両手法ともアンサンブルカルマンフィルタよりも推定精度は劣るものの、大幅に計算量を削減しつつ状態量の推定精度を向上させることができること、予測誤差を固定的に与える場合は予測誤差を設定するパラメータ値に推定精度が依存すること、適応的に予測誤差を付加する場合は予測誤差を設定するパラメータ値に依存せず安定して推定精度の向上が確認できることを示した。

第6章は第5章で展開した動的アンサンブル最適内挿法を発展させ、状態量の誤差共分散行列に局所化手法を導入する効果に関して検討した結果を述べている。地点間の距離に応じて擬似的な相関関係を緩和させる局所化手法を導入することにより、予測精度が改善することを示している。

第7章では、分布型降雨流出モデルのモデル状態量の予測精度を高めるために、状態量の誤差共分散行列に局所化手法を導入する効果に関して検討を行った。その結果、空間的な距離に基づく局所化手法の導入は状態量の推定精度向上に有効であり、特にダム放流量がその下流の状態量にのみ相関関係を持たせる局所化手法が予測精度の向上に寄与することを示した。

第8章は結論であり、本論文の主要な結果をまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、分布型降雨流出氾濫モデルによる河川水位と流量の予測精度を向上させることを目的とし、計算効率の高いデータ同化手法を開発して実流域でその適用性を検討したものである。主な研究成果は以下のように要約できる。

1) モデル状態量の誤差共分散行列を事前に設定する定常最適内挿法を分布型降雨流出氾濫モデルに適用し、モデル状態量とモデルパラメータの推定精度を分析した。双子実験の結果、本手法は、アンサンブルカルマンフィルタを適用した場合よりも精度は劣るものの、モデル状態量である河川水位及び流量さらにモデルパラメータの推定精度向上に有効であることを見出した。

2) 計算負荷を抑えつつモデル状態量の誤差共分散行列を逐次生成する新たなアンサンブル最適内挿法を開発した。その一つとして、過去に発生した洪水の分布型洪水流出シミュレーションを事前に多数実施してそれらのモデル状態量を格納したモデル状態量リポジトリを構築し、対象とする洪水の状態量ベクトルに近い状態量をリポジトリから複数抽出して誤差共分散行列を動的に生成する手法を開発した。双子実験により本手法は定常の最適補間手法を用いた場合よりも安定した推定精度を確保できることを見出した。

3) 上記の手法はモデル状態量リポジトリのデータサイズが大きくなるとモデル状態量の抽出に時間を要し実時間予測に適さない可能性がある。そこで、降雨流出氾濫モデルで予測したモデル状態量に空間的な相関構造を持つ予測誤差をランダムに付加して多数のモデル状態量を生成し、生成したモデル状態量からその誤差共分散行列を生成する新たな動的アンサンブル最適内挿法を開発した。モデル状態量に付加する予測誤差を固定的に与える場合と適応的に与える場合の二通りの手法を提案し、両手法ともアンサンブルカルマンフィルタよりも推定精度は劣るものの、大幅に計算量を削減しつつ状態量の推定精度を向上させることができること、適応的に予測誤差を付加する場合は予測誤差を設定するパラメータ値に依存せず、安定して推定精度の向上が確認できることを示した。

4) 分布型降雨流出モデルのモデル状態量の予測精度を高めるために、状態量の誤差共分散行列の局所化手法を導入する効果について検討を行った。その結果、空間的な距離に基づく局所化手法の導入は状態量の推定精度向上に有効であり、特にダム放流量がその下流地点の状態量にのみ相関関係を持たせる局所化手法が予測精度の向上に寄与することを示した。

以上のように、本論文は、分布型降雨流出氾濫モデルによる河川水位と流量の予測精度を向上させることを目的とし、計算効率の高いデータ同化手法を新たに開発して実流域でその適用性を検討したものであり、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6年1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って、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。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。