

京都大学	博士 (工学)	氏名	盧 晟進
論文題目	Sequential Monte Carlo methods for probabilistic forecasts and uncertainty assessment in hydrologic modeling (逐次モンテカルロ法を用いた確率的水文予測と水文モデリングにおける不確実性評価)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、逐次モンテカルロ法を用いたデータ同化手法を、集中型および分布型降雨流出モデルに導入して水文予測の高精度化を図り、降雨流出モデルの不確実性を評価するとともに、それを実現する水文モデル構築環境の開発手法を示して、その有効性を検証したものであって、7章から構成される。</p> <p>1章は序論であり、本研究の背景、研究目的、本論文の構成を述べている。</p> <p>2章では、本論文の理論的な背景を述べている。逐次データ同化手法の理論的背景とカルマンフィルタ、変分法など、線形・ガウス型システムに対する代表的な最適フィルタリング手法をレビューするとともに、非線形・非ガウス型の状態空間モデルのフィルタリング手法として、逐次モンテカルロ法の代表的な手法である粒子フィルタの基本原則、誘導方法、特徴についてまとめている。</p> <p>3章では、集中型降雨流出モデルに粒子フィルタを適用し、モデル状態量とモデルパラメータを同時に更新して河川流量を逐次予測する方法を提案している。特に、モデルパラメータを安定的に推定するために、粒子を更新する際にカーネル平滑化法を導入する手法を新たに提案し、それを各種の粒子フィルタに導入して予測性能を比較検討した結果を示した。この予測手法を桂川流域(887km²)に適用してモデルパラメータを逐次推定した結果、洪水ピーク後にすべてのモデルパラメータで不確かさの減少が認められ、推定されたモデルパラメータの値はオフラインでの最適推定結果と良好な適合を示した。また、SIR(Sequential Importance Resampling)、ASIR(Auxiliary Sequential Importance Resampling)、RPF(Regularized Particle Filter)など、異なる粒子フィルタを同一の条件で用いて予測シミュレーションを実施して予測値を比較検討した結果、いずれの粒子フィルタも同様の予測精度が得られ、粒子数が1000を超えると、どの粒子フィルタでも安定した予測結果が得られることを示している。</p> <p>4章では、水文プロセスの異なる時間応答を考慮する逐次データ同化手法としてラグタイムフィルタリング手法LRPF(Lagged Regularized Particle Filter)を新たに提案し、分布型降雨流出モデルに組み込んだ結果を示している。この手法では、正規化粒子フィルタ(RPF)を基本フィルタとして、粒子の更新にMarkov Chain Monte Carlo(MCMC)移動ステップを採用することによって粒子の多様性を確保している。提案したLRPFとSIRフィルタを物理的分布型流出モデルであるWEP(Water and Energy transfer Processes model)に適用し、洪水流量の予測精度を比較した結果、粒子フィルタを用いた場合、どちらのフィルタも、オフライン計算の計算結果に比べて、予測流量が大幅に改善されることを明らかにした。次に、土壌水分に関するシステム誤差がデータ同化後の河川流量予測値に与える影響を分析し、SIRフィルタでは、最適な予測値を得るためのシステム誤差が洪水ごとに異なり、システム誤差の値に応じて予測信頼区間が鋭敏に変化する一方、LRPFではシステム誤差の設</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	盧 晟進
<p>定によらず、一定した予測精度を有することを見出した。</p> <p>5章では、アンサンブルカルマンフィルタと粒子フィルタの2つのデータ同化手法を分布型流出モデルに適用して、河川流量の予測精度を比較評価した結果を示している。アンサンブルカルマンフィルタとして、EnSRF(Ensemble Square Root Filter)を用い、粒子フィルタには正規化粒子フィルタ(RPF)を採用した。分布型流出モデルにはWEPを用い、モデルの不確かさを考慮するために土壌水分量にシステム誤差を導入して、モデル状態量の更新手法には4章で示したラグタイムフィルタリング手法を採用している。適用流域は日本の桂流域(887 km²)と韓国のGyeongancheon流域(565km²)である。桂川流域では、ラグタイムウィンドウを大きくするにつれて、EnSRFとRPF、両方の方法で予測精度が改善することを確認し、データ同化の効果は15時間先の予測まで続くことを示した。ラグタイムウィンドウを導入しない場合あるいはラグタイムウィンドウの期間が十分ではない場合は、予測精度、流量予測分布ともに不安定な結果が得られることを示し、ラグタイムウィンドウを導入することの効果を一層明らかにした。また、粒子数の予測結果に対する感度分析を行った結果、粒子数が少ない場合には、RPFはEnSRFと比べて同等あるいはよりよい予測精度を示すこと、特にEnSRFは予測時間が4時間以下の場合、RPFよりも予測性能が低下することを両流域における結果から明らかにした。これらの結果から、ラグタイムウィンドウを導入したパーティクルフィルタは安定した予測結果が得られることが示した。</p> <p>6章では、確率過程的シミュレーションとデータ同化のための汎用的な水文モデル構築環境としてMPI-0HyMoS(Message Passing Interface based Object-oriented Hydrological Modeling System)の開発について述べている。MPI-0HyMoSでは、粒子フィルタに基づくモデル状態量とモデルパラメータ同時更新手法とカーネル平滑化法などを実装し、水文モデルの不確かさを考慮する確率過程的な降雨流出モデリングを可能とした。粒子フィルタによる予測シミュレーションは、高性能コンピューティングシステム(HPC, High Performance Computing)の環境下で、MPI(Message Passing Interface)を用いて流出計算を並列化させることに成功している。本章では、MPI-0HyMoSの適用性を集中型、分布型などの異なる流出モデルを用いて実証した結果を示している。まず、線形貯水池モデルを用いた流出予測シミュレーションを通してMPI-0HyMoSの構成と適用方法を示した。次に、MPI-0HyMoSを用いて確率論的な分布型流出モデルを構成し、モデル状態量とモデルパラメータを同時更新する手法を採用して、模擬観測値と実観測値による2のケースでモデルパラメータの不確かさを分析した。模擬観測値を用いたケースでは、モデル状態量とモデルパラメータ同時更新方法により、パラメータの事後分布が模擬作成されたパラメータ分布に適合するよう推定できることを確認した。また、実際の観測データを用いたケースでは、パラメータと状態量が安定的に推定されるとともに、1つの降雨イベントで推定されたモデルパラメータ分布を他の洪水予測の初期分布とすることで、河川流量の予測精度が向上することを示した。</p> <p>7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、逐次モンテカルロ法を用いたデータ同化手法を、集中型および分布型降雨流出モデルに導入して水文予測の高精度化を図り、降雨流出モデルの不確実性を評価するとともに、それを実現するソフトウェアフレームワークの開発手法を示して、その有効性を検証したものであり、得られた成果は次のとおりである。

1. 集中型降雨流出モデルに粒子フィルタを適用し、モデル状態量とモデルパラメータを同時に更新して河川流量を逐次予測する方法を提案した。特に、カーネル平滑化法を導入することによってモデルパラメータを安定的に推定することに成功した。
2. 異なる粒子フィルタを同一の条件で用いて予測シミュレーションを実施して予測値を比較検討した結果、カーネル平滑化法を導入した場合、いずれの粒子フィルタも同様の予測精度が得られ、粒子数が 1000 を超えると、どの粒子フィルタでも安定した予測結果が得られることを示した。
3. 水文プロセスの異なる時間応答を考慮する逐次データ同化手法としてラグタイムフィルタリング手法を新たに提案し、分布型降雨流出モデルに組み込むことにより、オフライン計算の計算結果に比べて、予測流量が大幅に改善されることを明らかにした。また、SIR フィルタでは、最適な予測値を得るためのシステム誤差が洪水ごとに異なり、システム誤差の値に応じて予測信頼区間が鋭敏に変化する一方、LRPF ではシステム誤差の設定によらず、一定した予測精度を有することを見出した。
4. アンサンブルカルマンフィルタと粒子フィルタの 2 つのデータ同化手法を分布型流出モデルに適用して河川流量の予測精度を比較評価し、どちらの手法もラグタイムフィルタリング手法を導入することにより、予測精度が改善することを見出した。
5. 確率過程的シミュレーションとデータ同化のための汎用的な水文モデル構築環境 MPI-OHyMoS(Message Passing Interface based Object-oriented Hydrological Modeling System)を開発し、分布型流出モデルを用いた流出予測シミュレーションにより、データ同化手法を導入することでモデル状態量とモデルパラメータの不確かさが大幅に減少することを明らかにした。

以上のように、本論文は、逐次モンテカルロ法を集中型および分布型の降雨流出モデルに導入して、降雨流出モデルの不確実性を評価しつつ水文予測の高精度化を図ったものであり、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、平成24年11月14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。