

氏 名 中村 和幸

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1044 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 複合科学研究科 統計科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Sequential Data Assimilation and Its Application to
Tsunami Analysis in the Japan Sea

論文審査委員 主 査 教授 土谷 隆
教授 樋口 知之
教授 田村 義保
助教授 川崎 能典
助教授 広瀬 直毅（九州大学）

論文内容の要旨

This thesis studies computational and algorithmic aspects of data assimilation. Data assimilation is a methodology for synthesizing information from a dynamic numerical model and observation data in meteorology and oceanography. In this study, the particle filter is adopted as the main methodological tool to approach the problem. The thesis consists in two parts. In Part 1, data assimilation with the particle filter is applied to fit a Tsunami-simulation model to real Tsunami data. Several issues on statistical modeling and computational algorithms are studied in Part 2 to challenge and overcome the existing difficulties in data assimilation.

Part I consists of six chapters.

Chapter 1 provides overview of Part 1, discussing importance of sea bottom topography based on data assimilation in Tsunami study.

In Chapter 2, a new data assimilation framework is explained. Data assimilation is formulated as a state estimation and/or a parameter identification problem in the state space model.

In Chapter 3, the simulation model based on a system of partial differential equations for describing shallow-water wave and the observation system for Tsunami data is described in detail.

In Chapter 4, numerical experiments called identical twin experiments are performed to validate the proposed method using two kinds of bathymetries; one is artificial bathymetry and the other is the Japan Sea bottom topography. The results demonstrate that the new approach works well for the purpose of correction of inaccurate bottom topography.

In Chapter 5, the framework developed from Chapters 2 to 4 is applied to real-data. Sea-bottom profile around Yamato Rises in the middle of the Japan Sea is estimated based on the tide gauge data of Okushiri (Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake) Tsunami occurred in the Japan Sea in 1993. The result indicates that Yamato Rises might be shallower than the profiles obtained for the same area before. In this analysis, the simulation model has many variables compared to ordinary statistical models. The model is nonlinear. These properties cause difficulty in data assimilation.

Chapter 6 is the concluding chapter in Part 1.

Part 2 deals with the difficulties in data assimilation which arises from high dimensionality of states and the size of simulation models which could be very large.

In Chapter 7 and 8, other approaches in data assimilation such as the four dimensional variation methods, ensemble Kalman filter are explained in detail. The particle filter is compared with these two methods. Similarities and differences among three methods are discussed to highlight the challenges.

In Chapter 9, numerical experiments are conducted to show advantages of the particle filter over the ensemble Kalman filter under the condition that observation system is nonlinear. A smooth bootstrap technique is discussed in view of relationship between ensemble Kalman filters and genetic algorithms. Numerical experiments are also conducted under two types of simulation models. Based on them, applicability of the smooth bootstrap technique in data assimilation is discussed.

In Chapter 10, a new scheme for the particle smoother employing recursive recomputation is proposed. The smoothing distribution is computed in the reverse chronicle order in the particle smoother. Suffering from repeated resampling, the computed smoothing distribution deteriorates quickly as the smoother goes back to the initial time point. A reasonable approach to overcome this problem is to increase the number of particles. However, this approach has fundamental difficulty as follows. The space complexity of the generic particle smoother is linear with respect to the length of the time series, storing the whole particles generated in filtering. At each time step we need nontrivial storage to store the particles. Therefore, it is a formidable task to store the whole particles in the particle smoother if the number of particles is increased. The new scheme, called recursive recomputation scheme, reduces required storage from $O(T)$ to $O(\log T)$ at the cost of computing the filtering distribution $O(\log T)$ times, where T is the length of the time series. The number of particles can be increased drastically. Numerical experiment using Nikkei 225 stock index indicates clear advantage of the new scheme, computed with particles 20 times more than before.

Chapter 11 is the concluding section.

論文の審査結果の要旨

[論文の概要]

本論文は、シミュレーションモデルと観測データの情報を統合するデータ同化について研究を行ったものである。粒子フィルタを方法論の中心に据えた点に特色があり、現実の津波シミュレーションモデルへの適用を行った第1部と、統計的モデリング・計算アルゴリズムの諸側面について論じた第2部からなる。

第1部は第1章から第6章で、粒子フィルタによるデータ同化の津波シミュレーションモデルへの適用について論じている。第1章は第1部の概要を与えている章であり、本研究において行われているデータ同化手法適用による海底地形補正について、津波に関する研究における位置づけと重要性を述べている。第2章ではデータ同化手法の非線形状態空間モデルによる定式化、ならびにその状態推定アルゴリズムとしての粒子フィルタについて、それぞれレビューを行っている。第3章では、データ同化手法の適用に際し、用いられる津波シミュレーションモデルが浅水波モデル、観測データが潮位計データであること、ならびに状態空間モデルによる定式化について記述している。第4章では、解がわかっている状況での予備的な数値実験を人工データおよび実際の海底地形を用いたデータで行い、手法の妥当性を検証している。第5章では、実際の潮位計データを用いた解析を行っている。北海道南西沖地震津波の潮位計データを用いた日本海の海底地形補正を行った結果、その中央部に位置する大和海嶺において従来から得られている海底地形データに対して、より浅い部分が多いという知見を得ている。また、津波の到達時刻についても若干ではあるが改善されている。第6章はまとめである。

第2部は第7章から第11章で、第1部の結果を受け、高次元性やモデルの大規模性、複雑性に由来するデータ同化の困難を克服するための手法について論じている。第7章は、導入として、克服すべき問題点を検討している。地球物理学分野でよく用いられるデータ同化手法である4次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタと本論文で用いる中心的手法である粒子フィルタとの類似点ならびに相違点に注目し、手法改良の必要性を記述している。第8章では、アンサンブルカルマンフィルタ、粒子フィルタならびにその発展手法であるスムーズブートストラップの適用を行った粒子フィルタについて説明している。第9章では、アンサンブルカルマンフィルタに対する粒子フィルタの優劣、ならびにスムーズブートストラップをデータ同化に適用した時の有効性について、数値実験を通じて検討している。第10章では、再計算の活用により、一般状態空間モデルのスムーズングの多くの手法において必要となる計算領域を、時系列長の線形オーダーから対数オーダーに削減する新手法を提案し、過去の粒子を保存するタイプのスムーズザに対し実際に適用して粒子数を大幅に増やすことが可能であることを示している。第11章はまとめである。

[論文の評価]

申請論文では、データ同化について前半部では津波シミュレーションモデルと潮位計データの統合による海底地形補正という、実際の問題に対するモデリングならびに解析を行っており、後半部ではそれを踏まえて、高次元データ同化の手法面での改良を目指したものである。前半部の海底地形補正という問題は、津波だけでなく他の地球物理学分野においても重要であること、津波の研究分野において新規であることなどが評価できる。また、大和海嶺周辺の補正といった実際の問題についても、今後のより深い検討が必要であるものの、これまで示唆されたことのない興味深い結果を得ている。後半部において示された再計算を用いた粒子スムーザは、あるクラスの問題に対して、粒子数を大幅に増加することで手軽に推定精度を上げられる汎用性の点で評価できる。

以上のように、大規模・複雑な計算を必要とするデータ同化の分野において、単純に既存の手法を適用するのではなく、現状では困難とされる問題に統計的モデリング・計算アルゴリズムの両面から接近し、それぞれについて意味のある新しい結果を提示していることから、統計科学に関わる学際的分野を主な内容とする論文として、十分意義があるものであると判断できる。

これらの成果に関連する学術論文は、第一著者として採録されたものが2本（1本和文学術雑誌，1本英文学術雑誌（招待論文．ただし査読なし）），改訂中のものが1本（英文，第一著者）ある。また査読付き国際会議録（英文，第一著者）が1本あり，国際会議で3回口頭発表を行っている。

以上述べてきたことにより，博士論文審査委員会は，申請者の学位請求論文が博士（学術）を授与するに十分な内容であると判断する。