

「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」

平成 16 年度採択研究代表者

樋口 知之

(統計数理研究所 教授)

「先端的データ同化手法と適応型シミュレーションの研究」

1. 研究実施の概要

データ同化とは、数値物理シミュレーションモデルに含まれる変数を物理モデルと観測データの両方なるべく満足するよう修正する手法であり、近年海洋学・気象学において研究が進んでいる。物理シミュレーションモデルが含む変数の次元は、数百次元から 100 万次元程度の超大規模な問題であり、データ同化の研究はいろいろな意味で計算限界への挑戦である。データ同化は逐次型と非逐次型の方法があり、逐次型においてはアンサンブルカルマンフィルタなどが主に用いられているが、粒子フィルタの適用もわずかながらなされてきている。我々データ同化グループでは、アンサンブルカルマンフィルタ、粒子フィルタ、混合カルマンフィルタを中心に、逐次データ同化とよばれる同化手法の研究と応用を行っている。一方非逐次型においては、4 次元変分法という方法が用いられている。

実際にデータ同化手法の研究を行うには、具体的なシミュレーションモデルとデータセットの二つ、つまり具体的テーマの選定が必要である。そのテーマには、手法の新展開の観点から未解決の数理的及び数値的課題を内包すること、応用分野における知識発見や予測性能向上の観点からも興味深いものであること等が求められる。データ同化チームでは現在主に、大気・海洋、津波、宇宙空間(リングカレント)の3つの領域における具体的テーマに取り組んでいる。

大気・海洋:エルニーニョ現象の解明に向けた大気海洋結合シミュレーションモデルと人工衛星による海面高度リモートセンシングデータのデータ同化

津波:海底地形情報の逆問題アプローチによる推定等を目的とした、津波シミュレーションモデルと潮位計データのデータ同化

宇宙空間:磁気圏内に地球を取り巻くように流れる巨大電流、いわゆるリングカレントの、シミュレーションモデルと、人工衛星による視線方向に積分された 2 次元画像データのデータ同化

2. 研究実施内容

大気・海洋データ同化プロジェクト

Zebiak and Cane [1987] (以下 ZC) のモデルは、太平洋赤道域に着目し、簡単ながらも海洋と大気の相互作用を取り入れ、ほぼ4年ごとのエルニーニョらしき海面水温の準周期的変動を再現し

ている。このモデルはいくつもの非線型のプロセスを内包しているため、標準的なカルマンフィルタ・平滑化のアルゴリズムはもはや使えない。そこで、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を用いて、多数個の実現値を用いてカルマンゲインを近似することで対処することとした。このときの状態ベクトルの次元は 54,403 となる。同化に使用する観測データは TOPEX/Poseidon (T/P) 衛星による海面高度偏差である。ZC モデルの海盆範囲とデータ取得位置の関係から、各タイムステップで得られるデータ点数は最大で 8388 点となる。

これまでの同化実験の結果から、EnKF により適切なフィルタリングを行うためには、システムモデルを適切に設定することが本質的に重要であることが分かってきた。そこで、変数の因果関係を頂点と辺で表すグラフィカルモデリングのアプローチを利用して、システムモデルの設計法を提案した。最も左に示す ZC モデルが、最も右に示す観測データをもとに EnKF を実行した結果、観測に近い出力が得られることがわかる。

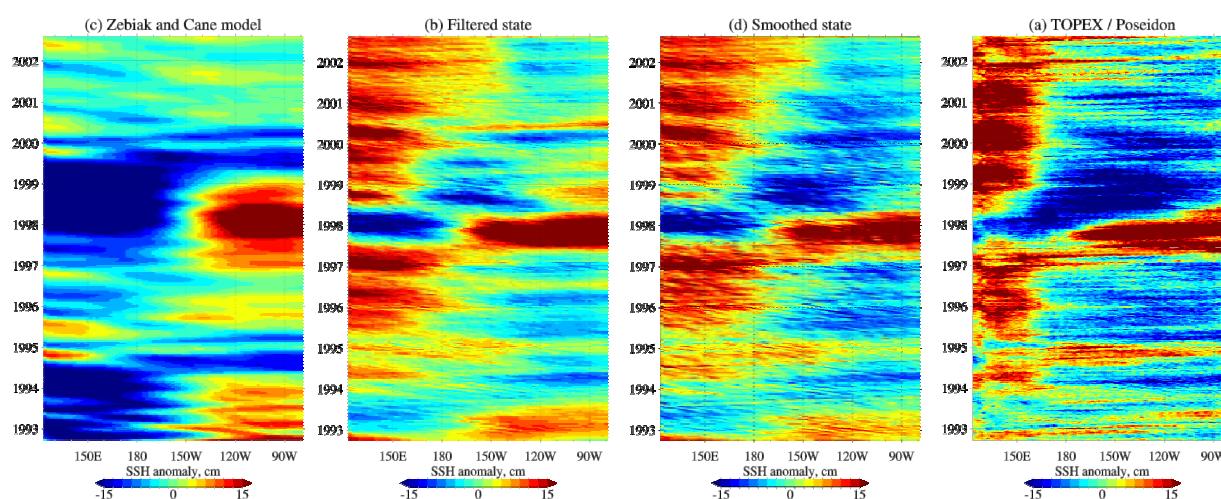


図1: 赤道沿いの海面高度偏差の時間発展、左から ZC モデル、EnKF の結果、EnKS の結果、T/P による観測データ

続いて、EnKS を用いることで、全期間のデータを使った平滑化推定値を求めた。当然ながら、全期間のデータを使った平滑化推定値の方は精度が向上する。EnKS の計算結果を図1の右から2番目に示す。フィルタ推定値よりもデータに近い値が得られていることが明らかである。

津波データ同化プロジェクト

本プロジェクトにおいては、津波のシミュレーションモデルとして、海洋学において用いられる浅水波モデルを用いる。このシミュレーションモデルに含まれる変数は、各格子点における海水面高、海水の流速ベクトル、水深である。一方観測として用いるデータは、特定の地点の海水面高を各時点において計測した沿岸の潮位計データである。この設定のもと、粒子フィルタを適用し、データ同化実験を行った。データ同化の際に注目する変数は、各地点における水深とした。これは、水深データの計測には誤差があり、データ同化によりシミュレーションモデルおよび観測データに適

合した水深値を推測できるからである。またこのことにより、海底地形に対する新たな知見の獲得や、津波の正確な予測が期待できるためでもある。対象とする海域・津波は、

- 人工地形・津波
- 日本海・北海道南西沖地震津波
- 日本海・日本海中部地震津波

である。実際の適用対象として日本海を選択した理由は、信頼できる潮位計データが収集できるからである。日本海域においては、シミュレーションモデルの格子点は経度方向に 192 点、緯度方向に 240 点をとる。各格子点上に前述4変数があり、格子点の半数弱が海上にあるため、状態変数ベクトルの次元はおよそ 9×10^4 となる。一方、観測変数ベクトルの次元数は潮位計データの観測点数となり、30 程度である。現在、シミュレーションモデルを構成しそこからデータを模擬的に構成し、(粒子フィルタによる)データ同化を行う、いわゆる双子実験を進行中である。図 2 に示したのは、その結果の一部である。右の折れ線グラフにおいて、左の図中央部の白い斜め線にそった海水面変位を赤色が、元の海底地形を緑色が、可能性のある最深、最浅深度を紫、橙がそれぞれ示す。この図は津波がおきてすぐの状態推定を示しているため、津波が沿岸にまだ到達していない(赤で示した海面が平坦であることで明らか)ため同化の影響がみられない。いずれ津波が沿岸に到達すると、徐々に同化される海底地形情報が元の地形に近づくのが確認できる。

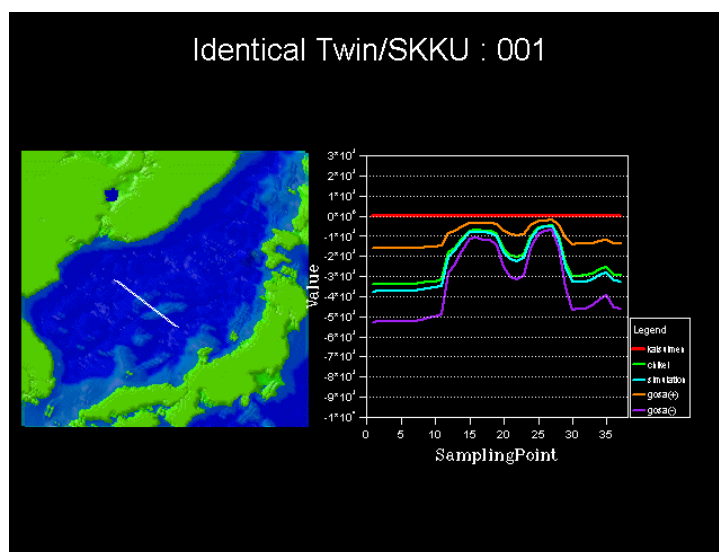


図 2:

3. 研究実施体制

(1)「樋口」グループ

- ①研究分担グループ長：樋口 知之（統計数理研究所、教授）
- ②研究項目：
 - ・ 粒子フィルタの高次元化

- ZC モデルへの応用
- ゲノム情報分野への応用
- 津波モデルへの応用
- 新規応用分野の開発調査
- MCMKF の実装化

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- S. Ohtani, G. Ueno, T. Higuchi, H. Kawano, Annual and Semiannual Variations of the Location and Intensity of Large-Scale Field-Aligned Currents, Journal of Geophysical Research, 110, A01216, #DOI 10.1029/2005.JA010634, 2005.[PDF(996K)]
- S. Ohtani, G. Ueno, T. Higuchi, Comparision of large-scale field-aligned currents under sunlit and dark ionospheric conditions, Journal of Geophysical Research, 110, A09230, #DOI 10.1029/2005JA011057, 2005
- R. Yamaguchi, S. Yamashita, T. Higuchi, Estimating gene networks with cDNA microarray Data Using State-space models, Proceedings of 2005 International Workshop on Data Mining and Bioinformatics , Lecture Notes in Computer Science, Springer, 3482, 381–388, 2005.
- R. Yoshida, S. Imoto, T. Higuchi, Estimating Time-Dependent Gene Networks from Time Series Microarray Data by Dynamic Linear Models with Markov Switching , Proceedings of Computational Systems Bioinformatics Conference(CSB2005), 289–298, 2005.
- 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之, データ同化:その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, Vol. 53, No.2, 211–229, 2005.