

「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

(情報・システム研究機構・統計数理研究所 副所長)

「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

シミュレーションなどの数値モデルによる対象状態の時間発展更新と、装置からの部分的な観測量に基づく状態補正の二つを適切に組み合わせる作業はデータ同化と呼ばれる。本研究では先端的なデータ同化手法を開発し、さらにこの技法をもとに、シミュレーションモデルを複数走らせ、データ適応的に数値モデルを切り替え、あるいはそれらを統合するようなメタシミュレーションモデルを創出するプラットフォームを創造することが最終的な目標である。

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ものであり、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。

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し、併せて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なければならない。この観点から、昨年度に引き続き、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。また今年度から、ゲノムデータ同化プロジェクトもスタートさせている。

## 2. 研究実施内容

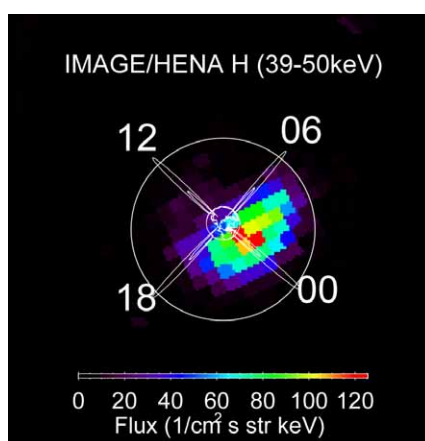
大気・海洋データ同化プロジェクトでは、PEX/Poseidon (T/P) 衛星による海面高度偏差データと、大気海洋結合シミュレーションモデル (Zebiak and Cane [1987] (以下 ZC)) の同化を継続して行っている。ZC モデルは、太平洋赤道域に着目し、簡単ながらも海洋と大気の相互作用を取り入れ、ほぼ 4 年ごとのエルニーニョらしき海面水温の準周期的変動を

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、アンサンブルカルマンフィルタ(**EnKF**)を用いた同化研究をすすめている。メンバー数は本研究所のスーパーコンピュータメモリーいっぱい、2048メンバーである。アンサンブルカルマンフィルタにはいくつかの変形バージョンも提案されているが、ここで用いたのは **Evensen (2003)** に見られるオリジナルのものである。したがって、期待するフィルタ値を得るためや計算負荷の軽減のために、対症療法的に使われることの多い共分散膨張や局所化なども用いていない。メンバー数 2048 を選んだ理由は、それがデータベクトルの次元数 1981 よりも大きいからである。数学的に見ると、アンサンブルサイズが独立な観測データの数よりも大きいときにアンサンブルカルマンフィルタの能力が落ちないことがわかっている。

津波データ同化プロジェクトでは、潮位データと津波シミュレーションモデルの同化研究を継続して行っている。津波シミュレーションで採用した物理方程式は、浅水波方程式を基礎とした比較的簡単なものである。津波のシミュレーションにおいて必要となる、津波発生源の形状や位置（初期条件）・波動伝播に影響を与える水深（境界条件）は、無視できない誤差を含むことはあまりよく知られていない。本同化実験では、初期条件のうち、水深の部分がある確率分布に従うとして構成することにより、不確実性をデータ同化によって見積る。海底地形の相違は、津波だけではなく海洋現象全体、ひいては大気との相互作用にも影響を与えるため、海底地形補正は諸々の地球物理学上の問題において重要であることは言うまでもない。状態推定のアルゴリズムには、粒子フィルタを用いた。H17年度から開始した双子実験などの人工データを用いた手法の動作確認実験を今年度は十分に行った。この後、北海道南西沖地震津波の際の日本海沿岸 18 点の潮位計データを用い、海底地形補正を行った。補正を行う領域は、誤差の大きい大和堆周辺とし、4 地形データの平均を初期推定地形とした。この領域に対し、推定地形が 4 地形の線形和であるという仮定のもと、海底地形推定を行った。

宇宙空間データ同化プロジェクトでは、**IMAGE** 衛星により得られた高速中性粒子の遠隔観測の 2 次元動画データに、リングカレント・イオンのダイナミクスを扱うシミュレーションモデル(**Comprehensive Ring Current Model: CRCM**)を同化した。このシミュレーションモデルは、磁気圏のイオンのフラックス分布を 3 次元的に扱うことができるモデルである。実際にデータ同化する際には、モデル内の物理量を、観測する高速中性粒子のフラックスの値と対応づける必要がある。しかし、**CRCM** 内の物理量と観測される高速中性粒子フラックスとの関係は線型ではないため、従来よく使われている拡張カルマンフィルタやアンサンブルカルマンフィルタといった手法を使うことができない。そこで本研究では、モデルとデータとの関係が線型でなくても適用可能である粒子フィルタを用いて同化を行っている。**CRCM** に入力すべき未知のパラメータには、磁気圏の磁場・電場分布、シミュレーション領域境界でのイオンの密度・温度などがあるが、磁気圏電場分布及び領域境界でのイオンの密度・温度をデータ同化によって推定した。まず手法の有効性確認の

ため、高速中性粒子の擬似データを人工的に生成し、この人工データを同化することを試みた。同化によって推定されたリングカレント・イオン及び電場ポテンシャルの分布は、人工データを生成したシミュレーション上の分布を概ねうまく再現していることがわかった（下図）。また、シミュレーション領域境界でのイオンの密度・温度についても、妥当な推定結果が得られることを確認している。したがって、高速中性粒子のデータを同化することで、うまく磁気圏のリングカレント・イオンや電場の分布をモデリングできることが確認できた。今、実際に観測された高速中性粒子のデータを試みている。



また本年は、生体パスイシミュレーションモデルとマイクロアレイ実験等から得られる遺伝子発現データとのデータ同化プロジェクトも立ち上げた。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「樋口」グループ

##### ①グループリーダー

樋口 知之(大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構・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
- ・リングカレントモデルへの応用
- ・新規応用分野の開発調査
- ・MCMKF の実装化

### 4. 研究成果の発表等

#### (1) 論文発表(原著論文)

- R. Yamaguchi and T. Higuchi, State-space approach with the maximum likelihood principle to

identify the system generating time course gene expression data of yeast, *International Journal of Data Mining and Bioinformatics*, Vol. 1, No.1, 77 – 87, 2006.

- K. Nakamura, T. Higuchi, and N. Hirose, Sequential Data Assimilation : Information fusion of a numerical simulation and large scale observation data, *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 12, 608–626, 2006. (Invited Paper)
- R. Yamaguchi, R. Yoshida, S. Imoto, T. Higuchi, and S. Miyano, Finding module-based gene networks in time-course gene expression data with state space models, *IEEE Signal Processing Magazine*, Special Issue on Signal Processing Methods in Genomics and Proteomics, no.1, 37-46, 2007.
- G. Ueno, T. Higuchi, T. Kagimoto, and N. Hirose, Application of the ensemble Kalman filter and smoother to a coupled atmosphere-ocean model, *SOLA*, Vol. 3, 005-008, 2007, doi:10.2151/sola.2007-002

#### **Proceedings (査読あり)**

- K. Nakamura, T. Higuchi, and N. Hirose, Application of particle filter to identification of Tsunami simulation model, *SCIS&ISIS 2006*, 1890–1895, 2006.
- G. Ueno, T. Higuchi, T. Kagimoto, and N. Hirose, Prediction of ocean state by data assimilation with the ensemble Kalman filter *SCIS&ISIS 2006*, 1884–1889, 2006.
- G. Ueno, T. Higuchi, T. Kagimoto, N. Hirose, Application of the ensemble Kalman filter to atmosphere-ocean coupled model, *Proceedings of Nonlinear Statistical Signal Processing Workshop 2006*, 2006.
- M. Nagasaki, R. Yamaguchi, R. Yoshida, S. Imoto, A. Doi, Y. Tamada, H. Matsuno, S. Miyano, T. Higuchi, Genomic data assimilation for estimating hybrid functional Petri net from time-course gene expression data, *Genome Informatics (IBSB2006)* , 17, 1, 46–61, 2006.