

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 9 月 14 日現在

機関番号：62603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740334

研究課題名(和文) データ同化による内部磁気圏の動的描像の解析

研究課題名(英文) Analysis of dynamic properties of the inner magnetosphere using data assimilation

## 研究代表者

中野 慎也 (Nakano, Shin'ya)

統計数理研究所・モデリング研究系・助教

研究者番号：40378576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：IMAGE衛星によって得られたリングカレント起源の高速中性粒子とプラズマ起源の極端紫外光のデータは、磁気嵐時などの際の内部磁気圏の振る舞いを知るための貴重な情報である。本研究では、リングカレントとプラズマ圏の2つを統合したシミュレーションモデルにIMAGE衛星の高速中性粒子データと極端紫外光データの情報を取り入れ、リングカレント、プラズマ圏の時間発展やそれを支配する電場の空間分布を推定するデータ同化システムを開発した。データの情報のモデルへの統合は、データ同化手法の一つであるアンサンブル変換カルマンフィルタによって実現した。人工データによって、開発したデータ同化システムの有効性も確認した。

研究成果の概要(英文)：The IMAGE satellite obtained global images of energetic neutral atoms (ENAs) and extreme ultraviolet (EUV), which provide valuable information on the ring current and the plasmasphere, respectively. In this study, we have developed a data assimilation system which assimilates these two imaging data into a combined simulation model of the ring current and the plasmasphere. The data assimilation is achieved by using the ensemble transform Kalman filter. The evaluation with an artificial data set suggested that this newly-developed data assimilation system gives reasonable results.

研究分野：データ同化

キーワード：データ同化 リングカレント プラズマ圏 内部磁気圏 磁気嵐

## 1. 研究開始当初の背景

リングカレント、プラズマ圏は、いずれも地球内部磁気圏において重要な役割を担っており、多種多様な観測データに基づいて研究がなされてきた。中でも 2000 年に NASA によって打ち上げられた IMAGE 衛星は、遠隔から撮像観測により、これまで衛星位置の点の情報しか得られていなかった、リングカレントやプラズマ圏の時空間変動の様子を 2 次元画像の形で取得することに成功した。しかし、撮像観測で得られるのは、プラズマ密度を観測点(衛星の位置)から視線方向に沿って積分した量の情報のみであり、物理過程を議論する上で必要なその場所の物理量が直接計測できるわけではない。そのため、従来の撮像観測データに基づく研究は、定性的な議論に留まるものがほとんどで、定量的な研究あるいは物理的なメカニズムの議論にはなかなか発展していなかった。

そこで我々は、データ同化と呼ばれる手法を用いて、撮像観測データを定量的あるいは物理的な議論に活用するべく、研究を進めてきた。データ同化とは、物理法則の知見を記述した数値シミュレーションモデルに観測データの情報を取り入れることにより、物理的に妥当かつ実際の観測とも整合的な推定値を得るアプローチである。これまでの研究で我々は、IMAGE 衛星の高速中性粒子(ENA)データの情報をデータ同化によって数値シミュレーションモデルに取り入れ、磁気嵐中のリングカレントの発達過程の推定を実現した(Nakano et al., J. Geophys. Res., v. 113, doi:10.1029/2006JA011853, 2008)。また、プラズマ圏についても、IMAGE 衛星の極端紫外光(EUV)画像のデータをシミュレーションモデルに同化するシステムの開発を進め、成果が出つつある状況にあった。

リングカレント、プラズマ圏には、その空間構造や変動が、内部磁気圏にかかる電場に強く影響されるという共通点がある。したがって、リングカレントの構造とプラズマ圏の構造の間には、電場を介した何らかの対応があると考えられる。内部磁気圏電場がリングカレントの発達にともなう遮蔽電場によって大きく変化し得るということを考慮すれば、単に対応があるだけに留まらず、リングカレントが電場を介してプラズマ圏の構造変化に重要な役割を果たしている可能性も考えられる。しかし、リングカレント、プラズマ圏を統合したモデルへのデータ同化は行われていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、データ同化手法を用い、リングカレントとプラズマ圏の 2 つを統合したシミュレーションモデルに、IMAGE 衛星の高速中性粒子データと極端紫外光データの情報を取り入れ、リングカレント、プラズマ圏の時間発展やそれを支配する電場の空間分布を同時に推定する技術を開発するこ

とである。リングカレント、プラズマ圏、内部磁気圏電場を同時に推定することにより、それぞれの時間発展が互いに矛盾しないような推定結果が得られる。これによって、磁気嵐時などのリングカレントとプラズマ圏、内部磁気圏電場の振る舞いを包括的に理解することを目指す。

## 3. 研究の方法

リングカレントに関しては Fok et al. (J. Geophys. Res., v. 104, p. 14,557, 2001)による Comprehensive Ring Current Model (CRCM)、プラズマ圏に関しては Ober et al. (J. Geophys. Res., v. 102, p. 14,595, 1997) のモデルを用いる。この 2 つのモデルは Fok et al. (J. Geophys. Res., v. 119, doi:10.1002/2014JA020239, 2014) によって統合されており、本研究でもこの統合モデルを基にデータ同化システムを構築する。

この統合モデルに同化するデータとしては、NASA の IMAGE 衛星によって得られた高速中性粒子(ENA)、極端紫外光(EUV)の 2 種類の撮像データを用いる。ENA、EUV から、それぞれリングカレント、プラズマ圏の分布に関する情報が得られる。データ同化は、高次元モデルでも比較的効率的な計算ができるアンサンブル変換カルマンフィルタ(Bishop et al., Mon. Weather Rev., v. 129, p. 420, 2001)を用いた。

リングカレントとプラズマ圏の動きは、いずれも内部磁気圏の電場によって駆動されている。磁気嵐時の内部磁気圏の電場分布に関してはよく分かっていないが、ENA によるリングカレントの情報、EUV によるプラズマ圏の情報をモデルに取り入れることで、リングカレント、プラズマ圏の動きを推定しながら、同時に内部磁気圏電場の時空間変化も同時に推定する。リングカレントは通常プラズマ圏よりもやや外側に位置しているため、リングカレント分布もプラズマ圏周辺の電場よりも少し外側の電場に影響される。したがって、リングカレントの情報とプラズマ圏の情報は、電場の空間分布の推定に関しては相補的になっており、リングカレントとプラズマ圏を別々に扱うよりも大幅に推定結果を改善できると期待できる。

## 4. 研究成果

当初、プラズマ圏モデルへの EUV データの同化が完成には至っていなかったため、平成 25 年度までは主としてプラズマ圏モデルへのデータ同化の技術開発を進めた。プラズマ圏モデルへの EUV データの同化に関しては、

1. データ同化を始める際の初期値を与えるために、1 枚の EUV 画像からプラズマ圏プラズマ密度分布を推定する必要がある。
2. 磁力線上のプラズマ密度分布を適切に決める必要がある。

という 2 つの課題があった。まず 1 つ目の課

題を解決するために、分布のなめらかさを事前分布に取り入れたベイズ推定を行うことで、1枚の画像からのプラズマ密度分布の推定を実現した。この推定手法に関しては、論文(Nakano et al., J. Geophys. Res., v. 119, doi:10.1002/2013JA019733, 2014)にまとめた。また、2つ目の課題を解決するために、各磁力線上でプラズマ密度が地球中心からの距離の冪乗に反比例し、かつその冪指数は磁力線に依らないという仮定の下、最尤法で連続した画像データから冪指数を推定するという手法を開発した。この新しい手法は、強い仮定を用いているとは言え、連続した2次元の画像データから、プラズマ分布に関して3次元的な情報が得られることを示した点で画期的であると言える。このように2つの課題が解決したことにより、プラズマ圏プラズマ密度分布のデータ同化による推定も、安定した結果が得られるようになった(Nakano et al., J. Geophys. Res., v. 119, doi:10.1002/2013JA019734, 2014)。

次に、リングカレント、プラズマ圏統合モデルにENA, EUVデータの情報を取り入れるデータ同化システムの開発を行った。これまでに開発したリングカレント、プラズマ圏のそれぞれを対象としたデータ同化システムを基礎とし、アンサンブル変換カルマンフィルタを用いて、ENA, EUVの2種類の遠隔観測データから、リングカレント、プラズマ圏、内部磁気圏電場を推定するという枠組みを実装した。また、統合モデルにある条件を与えて生成した人工データを使用して、今回開発したデータ同化システムの動作を検証し、リングカレントイオン、プラズマ圏プラズマ、内部磁気圏電場の空間分布に関して妥当な推定結果が得られることを確認した。平成27年度までに、実データを用いた現象の再現までを完了させることはできなかったが、技術的な問題はほぼ解決しており、間もなく実データを使用した実際の現象の再現に着手する予定である。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

1. S. Nakano and T. Higuchi, Weight adjustment of the particle filter on distributed computing systems, Proceedings of 15th International Conference on Information Fusion, 査読有, pp. 2480-2485, 2012.
2. S. Nakano, A prediction algorithm with a limited number of particles for state estimation of high-dimensional systems, Proceedings of 16th International Conference on Information Fusion, 査読有, pp. 1356-1363, 2013.
3. S. Nakano, Hybrid algorithm of ensemble

transform and importance sampling for assimilation of non-Gaussian observations, Tellus A, 査読有, Vol. 66, 21429, doi:10.3402/tellusa.v66.21429, 2014.

4. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Estimation of the helium ion density distribution in the plasmasphere based on a single IMAGE/EUV image, J. Geophys. Res., 査読有, Vol. 119, pp. 3724-3740, doi:10.1002/2013JA019733, 2014.

5. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Estimation of temporal evolution of the helium plasmasphere based on a sequence of IMAGE/EUV images, J. Geophys. Res., 査読有, Vol. 119, pp. 3708-3723, doi:10.1002/2013JA019734, 2014.

6. M. Nosé, S. Oimatsu, K. Keika, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, S. De Pascuale, C. W. Smith, R. J. MacDowall, S. Nakano, G. D. Reeves, H. E. Spence, and B. A. Larsen, Formation of the oxygen torus in the inner magnetosphere: Van Allen Probes observations, J. Geophys. Res., 査読有, Vol. 120, pp. 1182-1196, doi:10.1002/2014JA020593, 2015.

7. F. He, X.-X. Zhang, B. Chen, M.-C. Fok, and S. Nakano, Determination of the Earth's plasmapause location from the CE-3 EUVC images, J. Geophys. Res., 査読有, Vol. 121, pp. 296-304, doi:10.1002/2015JA021863, 2016.

〔学会発表〕(計15件)

1. 中野慎也, M.-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, Two-dimensional structure of the plasmasphere estimated by the ensemble transform Kalman filter, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌, 2012年10月.
2. S. Nakano and G. Ueno, Hybrid approach of ensemble transform and importance sampling for nonlinear data assimilation, International Conference on Ensemble Methods in Geophysical Sciences, Toulouse, France, 2012年11月.
3. S. Nakano, Comparison of two ways for representation of the forecast probability density function in ensemble-based sequential data assimilation, EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, 2013年4月.
4. 中野慎也, M.-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, Spatial distribution of the plasmaspheric ions estimated by assimilation of IMAGE/EUV data, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 千葉, 2013年5月.

5. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Global distribution of the plasmaspheric ions and electric potential estimated with data assimilation of the IMAGE/EUV data, XIIth IAGA Scientific Assembly, Merida, Mexico, 2013年8月.

6. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Estimation of the plasmaspheric helium ion distribution through assimilation of the IMAGE/EUV data, AGU 2013 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013年12月 (招待講演).

7. 中野慎也, M.-C. Fok, P. C. Brandt, 樋口知之, Inversion method for estimating the helium ion density distribution in the plasmasphere based on IMAGE/EUV data, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 横浜, 2014年4月.

8. S. Nakano, Application of data assimilation approach to space physics, The 23rd South Taiwan Statistics Conference and 2014 Chinese Institute of Probability and Statistics Annual Meeting, Hualien, Taiwan, 2014年6月.

9. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Temporal evolution of helium ion density distribution estimated by assimilation of IMAGE/EUV data into a plasmasphere model, AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan, 2014年7月.

10. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Estimating the latitudinal dependence of plasmaspheric helium ion density based on data assimilation of the IMAGE/EUV data, 第136回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 松本, 2014年10月.

11. S. Nakano, Comparison between two formulae for parameter evaluation based on the ensemble Kalman filter, EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria, 2015年4月.

12. S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, Maximum likelihood approach for estimating uncertain parameters in data assimilation for a plasmasphere model, XXVIth IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, 2015年7月.

13. 中野慎也, 地球磁気圏データ同化の現状と今後の展開, 第6回データ同化ワークショップ, 2016年2月.

14. S. Nakano, Data assimilation techniques in earth sciences, Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016, 2016年2月 (招待講演).

15. S. Nakano, P. C. Brandt, and M.-C. Fok, A pilot study for reconstruction of the inner-magnetosphere by data assimilation of global ENA and EUV measurements, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 千葉, 2016年5月.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)  
取得状況(計0件)

〔その他〕  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中野 慎也 (NAKANO, Shin'ya)

統計数理研究所・モデリング研究系・助教

研究者番号: 40378576