

平成 22 年 6 月 9 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740306

研究課題名（和文） データ同化による内部磁気圏環境の量的モデリング

研究課題名（英文） Quantitative modeling of the inner magnetospheric environment 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

研究成果の概要（和文）：内部磁気圏内の多数の人工衛星によって取得される荷電粒子直接観測データをリングカレントシミュレーションモデルに同化する手法を開発し、衛星配置の条件がよければ、リングカレントイオンや電場の空間分布が推定できることを模擬データによる実験によって確認した。一方、プラズマ圏を撮像した IMAGE 衛星による極端紫外線画像データをプラズマ圏モデルに同化する手法も開発し、これについても、有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a data assimilation technique for incorporating in-situ data of the ring current plasma obtained by multiple spacecraft into a kinetic numerical simulation model. Under the conditions that the spacecraft are sufficiently distributed, general features in the distributions of plasma and electric potential are well reconstructed. We have also developed a data assimilation technique for modeling the plasmasphere using ultra-violet imaging data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	450,000	2,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星磁気圏・磁気嵐 リングカレント データ同化

1. 研究開始当初の背景

従来の内部磁気圏数値シミュレーションでは、磁場・電場のような場の条件、境界条件を与えられたものとし、そのもとでプラズマ・荷電粒子の運動を計算するというアプローチが取られてきた。このとき、シミュレーション結果は与えた場の条件や境界条件に強く影響されるため、現実の内部磁気圏のプラズマの分布やその時間発展を正しく表現

するためには、これらを適切に与える必要がある。しかし、磁気圏は観測によって得られる情報が極めて少ないため、衛星観測などによる観測データのみに基づいて、シミュレーションに必要な場の空間構造などの条件や、境界条件を正しく設定するのは極めて困難である。そのため、このような条件設定の困難さを回避しながら、内部磁気圏のプラズマの動きを個々の事象ごとに精度よくモデリ

ングする手段が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、観測データをシミュレーションモデルに統合する、いわゆるデータ同化を行うことで、内部磁気圏のプラズマの運動を支配する電場の空間構造やその時間変動を推定するとともに、内部磁気圏プラズマ分布そのものについても精度よく推定・モデリングを行う手法を開発することである。これまでに我々は、IMAGE 衛星によって取得された高エネルギー中性粒子データをリングカレントシミュレーションモデルに同化する手法の開発を進めてきたが、ここでは、主として、静止軌道衛星などの多数の人工衛星による荷電粒子の直接観測データを用いる。高エネルギー中性粒子データと比較してはるかに長期間のデータが継続的に取得されている荷電粒子直接観測データを内部磁気圏環境の推定に活用する手法を開発することにより、多数の磁気嵐について個々にモデリングを行うための基盤技術を確立することを目指して研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) リングカレントシミュレーションモデルとしては、米国航空宇宙局・ゴダード宇宙飛行センターの M. C. Fok 博士らによって開発された CRCM (Comprehensive Ring Current Model) という空間 2 次元、速度空間 2 次元のモデルを用いた。このモデルには、入力として与えるべきパラメータが幾つかあるが、ここでは、電場構造を与えるパラメータ、およびモデル領域の外側境界における荷電粒子密度・温度をここでは推定すべきパラメータと設定し、データ同化によって推定することにした。磁場構造に関しては、Tsyganenko 96 モデルで与えられる磁場を仮定することにした。実際のデータ同化にあたっては、このモデルで時間発展が計算されるすべての変数、および推定すべきすべてのパラメータを状態変数とし、静止軌道衛星で観測される荷電粒子データを参照データとして逐次データ同化を行うことにした。

(2) 一方、当初の計画を変更して、プラズマ圏を撮像した IMAGE 衛星による極端紫外線画像データをプラズマ圏モデルに同化し、プラズマ圏プラズマ密度分布、およびそれを支配する電場分布を推定するプラズマ圏モデリング手法の開発も行ったので、これについてどのように研究を進めたのかについても述べる。この手法においては、基礎とするシミュレーションモデルとして M. C. Fok 博士らによって開発された 2 次元の流体モデルを採用し、これに紫外線画像データを同化するという手段を取った。このとき、シミュレ-

ションモデルに与えるべきパラメータのうち、電場構造を与えるパラメータに関してはデータ同化によって推定すべきパラメータとし、これにシミュレーションで時間発展が計算されるプラズマ圏プラズマ密度の各グリッドでの値を状態変数に加え、各状態変数の時間発展を推定するという方法を取った。

(3) さらに、リングカレントの強さの指標である Dst 指数の時間発展のモデリングも行った。このモデリングを行うに際しては、Burton et al. (1975) のモデルに基づいてリングカレントの時間変動についてのシステムモデルを構成するとともに、長期変動に関するパラメータや、太陽風についても時間変化もモデル化してシステムモデルの中に取り入れた。このシステムモデルに、太陽風データ、Dst 指数のデータを同化することで、リングカレントや太陽風の変動の推定を行うという方法を取った。

4. 研究成果

(1) 内部磁気圏内の多数の人工衛星によって取得される荷電粒子直接観測データをシミュレーションモデルに同化し、内部磁気圏環境、特にリングカレント荷電粒子密度分布、電場ポテンシャル分布を推定する手法を開発した。このうち電場分布については、物理モデルから初期条件や時間発展を得ることが困難であるため、シミュレーショングリッドの各点での電場ポテンシャルを推定することにした。ただ、各点での電場ポテンシャルをそのまま推定しようとした場合、各点のポテンシャルの分散共分散行列の設定が問題となる。そこで本研究では、電場ポテンシャルの空間構造を円筒関数の級数で表現し、円筒関数にかかる係数の事後分布を求めることで、全体の電場構造を推定するという手段を取り、これによって、分散共分散行列の設定の困難さを回避した。一方で、効率的に推定を行うために、データ同化アルゴリズム自体の改良も行った。非線型性の強いシステムに適用できる有用なアルゴリズムの一つとして、粒子フィルタと呼ばれるアルゴリズムがあるが、このアルゴリズムは類似の解について繰り返し計算する傾向にあり、計算効率に問題があった。そこで、繰り返し計算の回数を大幅に減らし、計算効率の改善を図った merging particle filter というアルゴリズムを提案し、本研究のデータ同化でもこのアルゴリズムを用いた。

次に、開発したデータ同化手法の有効性を確認するために、別途シミュレーションから生成した模擬データを用いて、どの程度リングカレント荷電粒子密度分布や電場分布の推定がうまくいくのかを検証した。その結果、衛星配置の条件がよければ、当初の予定通り、

内部磁気圏のリングカレント荷電粒子の分布、電場構造の特徴をある程度よくとらえられることを確認した。図1は、模擬データを生成したシミュレーション上の荷電粒子分布・電場分布と、その模擬データから本データ同化手法で推定された荷電粒子分布・電場分布である。また、模擬データを生成した際の仮想人工衛星の配置を図2に示している。図1より、荷電粒子分布、電場分布の特徴は概ねうまく再現できていることがわかる。ただし、ここには示していないが、内部磁気圏に存在する衛星の分布に偏りがある場合など、推定がうまくいかない場合もあることもわかった。

これまでも、複数の静止軌道衛星のデータに基づいてリングカレント荷電粒子の分布をモデリングする試みは幾つか存在したが、本研究のように、静止軌道衛星を含む様々な軌道の衛星のデータを統合し、一つのリングカレント荷電粒子分布、電場分布のモデルを構築するという試みは、これまでになかったものである。今後は、この手法を用いて、実際の観測データから実際の磁気嵐時のリングカレント分布などを推定し、現実の内部磁気圏環境のモデリングを行うという方針で研究を進めていきたい。

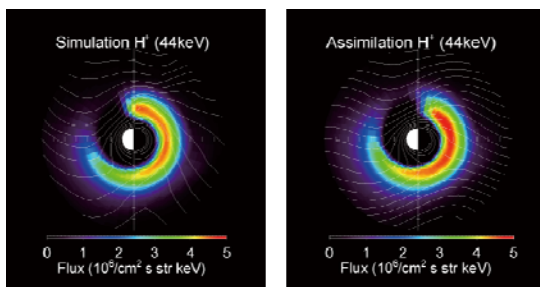


図1: 模擬データを生成したシミュレーションモデル上のリングカレントプラズマ、電場ポテンシャルの分布(左)、およびその模擬データをもとに本データ同化手法で推定されたリングカレントプラズマ分布、電場ポテンシャル分布(右)。但し、リングカレントプラズマ分布についてはフラックス値を紫-赤のカラースケールで、電場については等ポテンシャル線を白線でそれぞれ示している。

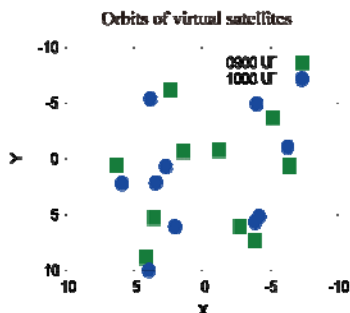


図2: 図1のデータ同化実験で模擬データを生成した際の仮想人工衛星の配置。

(2) プラズマ圏のヘリウムイオンによる共鳴散乱光を撮像した IMAGE 衛星による極端紫外線画像データをプラズマ圏シミュレーションモデルに同化し、プラズマ圏プラズマ密度分布および内部磁気圏電場分布を推定する手法も開発した。ここでも、電場の推定には、電場ポテンシャルの空間構造を円筒関数の級数で表現し、円筒関数にかかる係数の事後分布を求めることで、全体の電場構造を推定するという手段を取った。

模擬データによる手法の検証も行い、紫外光画像データから実際にプラズマ圏構造およびそれを支配する電場構造を推定することも確認した。図3は、模擬データを生成したシミュレーション上のプラズマ圏プラズマ密度分布、電場分布、および模擬データのデータ同化によって推定されたプラズマ密度分布、電場分布を示している。プラズマ密度分布、電場分布ともデータ同化によって特徴がよく再現できていることがわかる。

プラズマ圏のモデリングにこのような高解像度の観測データを活用しようとする試みは、宇宙科学分野においては、これまでになかった試みである。今後は実データを用いた実際のプラズマ圏のモデリングを進めていきたい。

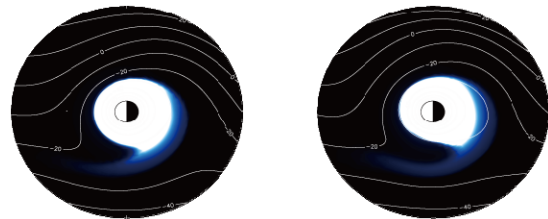


図3: 模擬データを生成したシミュレーションモデル上のプラズマ圏プラズマ密度分布および電場ポテンシャル分布(左)と、模擬データをもとに本データ同化手法で推定されたプラズマ圏プラズマ分布、電場ポテンシャル分布(右)。但し、プラズマ圏プラズマ分布については、プラズマ密度の値を黒-青-白のカラースケールで、電場については等ポテンシャル線を白線でそれぞれ示している。

(3) データ同化手法を応用した内部磁気圏のモデリングの一環として、リングカレントの強さの指標である Dst 指数、およびそれに関連する諸パラメータの時間変動について、Burton et al. (1975) に基づいたモデリングを行った。特に、Burton et al. のモデルで説明できる Dst の変動とそうでない変動とを分離し、Dst 指数の一ヶ月程度のスケールの変動について、太陽風密度・速度と逆相関を示す成分を新たに見出すことに成功した。

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 6 件)

- ① S. Nakano and T. Higuchi, "Estimation of a long-term variation of a magnetic- storm index using the merging particle filter", IEICE Transactions on Information and Systems, v. E92-D, pp. 1382-1387, 2009, 査読有.
- ② S. Nakano, G. Ueno, Y. Ebihara, M.-C. Fok, S. Ohtani, P. C. Brandt, D. G. Mitchell, K. Keika, and T. Higuchi, "A method for estimating the ring current structure and the electric potential distribution using ENA data assimilation", Journal of Geophysical Research, v. 113, A05208, doi:10.1029/2006JA011853, 2008, 査読有.
- ③ S. Nakano, G. Ueno, and T. Higuchi, "Merging particle filter for sequential data assimilation", Nonlinear Processes in Geophysics, v. 14, pp. 395-408, 2007, 査読有.

[学会発表] (計 22 件)

- ① S. Nakano, M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi,, "A data assimilation method for plasmasphere modeling using EUV imaging data", AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec. 2009.
- ② S. Nakano and T. Higuchi, "Monthly-scale variation of the Dst index and its relationship with solar-wind conditions", IAGA 2009 Scientific Assembly, Sopron, Hungary, Aug. 2009.
- ③ S. Nakano, G. Ueno, Y. Ebihara, M.-C. Fok, and T. Higuchi, "A feasibility study of ring current modeling using data assimilation of multi-satellite observations", AOGS 5th Annual General Meeting, Busan, the Republic of Korea, Jun. 2008.

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