

地球磁気圏の撮像観測とそのデータ同化

Data Assimilation of Imaging Observation in Earth's magnetosphere

モデリング研究系 中野 慎也 (Shin'ya Nakano)

1. はじめに

地球磁気圏は、宇宙空間の中でも地球の持つ磁場の影響が及ぶ範囲を指す。地球磁気圏は、太陽風と呼ばれる太陽からのプラズマ (電荷を持った粒子で構成されるガス) の流れの影響で非対称な形状をしており、太陽側は地上 6 万 km 程度まで、太陽と反対側には地上数百万 km 以上まで広がっている。通常、地球磁気圏の研究では、人工衛星によって直接その場所の環境を観測して得たデータを用いる。しかし、現在運用されている衛星の情報を集めても、広い磁気圏中の数点の情報只得られるに過ぎず、磁気圏の大域的な現象の全体像をつかむのが難しい。

地球磁気圏のプラズマの空間分布を、遠隔から 2 次元的に捉える撮像観測は、衛星による直接観測の欠点を解決する有用な方法である。特に、2000 年から 2005 年に運用されていた人工衛星 IMAGE は、様々な手段による撮像観測を実現した衛星であり、有用なデータが取得されている。しかし撮像観測は、プラズマ密度以外の物理量について情報を得るのが難しいという欠点がある。そこで我々は、データ同化技術を活用することにより、人工衛星 IMAGE による撮像観測データから磁気圏の大域的な現象の全体像を捉える手法の開発を進めてきた。本稿では、これまでに行ってきた撮像観測のデータ同化について紹介する。

2. 高速中性粒子データ同化

地球磁気圏の荷電粒子の中でも、比較的エネルギーの高い 1keV–100keV (eV は荷電粒子のエネルギーを表す単位。電子を 1 ボルトの電圧で加速して得られるエネルギーが 1eV となる) の陽イオン (主に H^+) は、磁気嵐と呼ばれる地上の全球的な地磁気変動を引き起こす他、オーロラ嵐をはじめとする高緯度域の電離圏現象とも密接に関係している。この 1keV–100keV 程度の陽イオンの空間分布に関する情報を得る手段として、高速中性粒子撮像観測がある。高速中性粒子は、高エネルギーの陽イオンが、磁気圏中に漂う地球起源の中性粒子から電子を受け取ることによって生成される中性の粒子である。磁気圏中の陽イオンは、地球磁場によるローレンツ力の影響で自由に動くことができないが、中性に変化すると力を受けずに高速で直線運動する。これを遠隔で観測することにより、陽イオンの空間分布に関する情報が得られる。我々は、IMAGE 衛星で観測された高速中性粒子のデータを磁気圏荷電粒子モデルに同化し、荷電粒子分布の時間発展を推定する手法の開発を進めてきた Nakano et al. (2008)。ここで問題となるのは、荷電粒子の動きを決める電場と磁場のうち、地球磁気圏においては電場について十分な情報がないということである。そこで、電場についてはデータ同化の過程で推定することにより、全体の感電粒子分布の時間発展を推定することを実現した。高エネルギーの荷電粒子は、運動にエネルギー依存性があるため、磁力線方向の運動を平均化した Boltzmann 方程式で扱っている (Fok et al., 2001)。データ同化には、当初、粒子フィルタを再帰的に適用する手法を用いていたが、開発の過程で、融合粒子フィルタ Nakano et al. (2007)、アンサンブル変換カルマンフィルタ Bishop et al. (2001) に変更され、現在は次に述べる極端紫外光データ同化と

の統合を進めている。

3. 極端紫外光データ同化

IMAGE 衛星では、30.4nm の波長の極端紫外光による撮像観測も行っていた。太陽から来る紫外光のうち、30.4nm の波長のものはヘリウムイオン (He^+) に散乱されるため、これを遠隔から観測することにより、磁気圏の He^+ の分布について情報が得られる。極端紫外光の撮像観測で得られる情報は、磁気圏の中でもエネルギーが低い 1eV–10eV 程度の荷電粒子の情報である。この低エネルギーの荷電粒子は、地球の高度 20000–30000km 以下の領域に高密度で分布しており、プラズマ圏と呼ばれる。プラズマ圏の低エネルギー He^+ は、水素イオン (陽子; H^+) など、他の低エネルギー荷電粒子と同じ方程式にしたがって動くため、 He^+ のデータから、プラズマ圏中のプラズマを構成する荷電粒子全体の動きを推定することができる。我々は、アンサンブル変換カルマンフィルタを用いて、プラズマ圏の物理モデルに、極端紫外光撮像観測データを同化し、プラズマ圏のプラズマ密度分布の時間発展を推定する手法を開発した Nakano et al. (2014)。低エネルギーの荷電粒子の動きも電場と磁場の影響を受けるが、電場について十分な情報がないため、高速中性粒子データ同化と同様にデータ同化の過程で電場の推定を行っている。また、ここで用いているプラズマ圏モデルは、地球磁力線方向の密度構造についてある関数系を仮定した 2 次元モデルであるが、磁力線方向の密度構造に関するパラメータを周辺尤度最大化で推定することにも成功した。

4. おわりに

現在我々は、高速中性粒子データと極端紫外光データの両方を磁気圏統合モデルに同化する新たなデータ同化システム開発を進めている。高速中性粒子の起源となる高エネルギー荷電粒子は、極端紫外光で観測される低エネルギー荷電粒子の分布するプラズマ圏と比較して、磁気圏のやや外側に分布しており、磁気圏内の電場を推定する上で、高速中性粒子データと極端紫外光データは、互いの情報を保管する役割を果たすと考えられる。最初に述べたように、地球磁気圏に関して観測から得られる情報は非常に限られている。我々は、データ同化を活用し、物理法則の知見を活用して直接観測できない物理量を推定しながら、地球磁気圏で起こる様々な現象の全体像を包括的に捉えることを目指している。

参 考 文 献

- Bishop, C. H., B. J. Etherton, and S. J. Majumdar, 2001., Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects, *Mon. Wea. Rev.*, *129*, 420–436.
- Fok, M.-C., R. A. Wolf, R. W. Spiro, and T. E. Moore, 2001., Comprehensive computational model of Earth's ring current, *J. Geophys. Res.*, *104*, 8417.
- Nakano, S., G. Ueno, and T. Higuchi, 2007., Merging particle filter for sequential data assimilation, *Nonlin. Process. Geophys.*, *14*, 395–408.
- Nakano, S., G. Ueno, Y. Ebihara, M.-C. Fok, S. Ohtani, P. C. Brandt, D. G. Mitchell, K. Keika, and T. Higuchi, 2008., A method for estimating the ring current structure and the electric potential distribution using ENA data assimilation, *J. Geophys. Res.*, *113*, A05208, doi:10.1029/2006JA011853.
- Nakano, S., M.-C. Fok, P. C. Brandt, and T. Higuchi, 2014., Estimation of temporal evolution of the helium plasmasphere based on a sequence of IMAGE/EUV images, *J. Geophys. Res.*, *119*, 3708–3723, doi:10.1002/2013JA019734.