

静止軌道の宇宙環境モニタリング・予測 Monitoring and Prediction of Space Environment around GEO

長妻 努

情報通信研究機構 電磁波計測研究所

T. Nagatsuma

Applied Electromagnetic Research Institute,

National Institute of Information and Communications Technology

1. はじめに

地球からの高度約3万6千kmに位置する静止軌道(GEO)は、その軌道上の人工衛星が地球の自転周期と同期して運動できることから、通信・放送・気象等、実利用に最も利用されている軌道である。現在、世界中で200機を超える人工衛星が実際に静止軌道上で運用されている。

一方、静止軌道を飛翔する人工衛星には、宇宙環境変動に起因する障害のリスクがある。静止軌道は数百 keV 以上のエネルギーを持つ電子が磁力線に捕捉されている放射線帯外帯と呼ばれる領域の外縁に位置している。放射線帯外帯電子のフラックスは、地磁気嵐等の宇宙環境変動に伴ってダイナミックに変化し、時には地磁気嵐の回復相において地磁気嵐以前よりもフラックスが著しく増大した状態が長期間継続することがある。数百 keV 以上の電子は衛星構体を突き抜け、内部に侵入することができるため、衛星内部の半導体やケーブル等に帯電を引き起こし(深部帯電)、それが放電することによって、衛星障害を引き起こすことがある。

また、サブストームと呼ばれる別の宇宙環境変動では、地球半径の10~20倍の距離で太陽と反対方向に位置する磁気圏尾部領域からサブストームオンセットと呼ばれる現象開始後に、数十~数百 keV の電子やイオンのサブストーム粒子の地球方向への注入(サブストームインジェクション)を引き起こす。このプラズマ環境の急激な変化は、静止軌道の人工衛星の表面を帯電させ、放電によってやはり衛星の障害を引き起こすことがある。

表面帯電に関しては、放電対策技術の進展により、以前に比べると衛星障害全体に占める割合は低下しつつある。一方、深部帯電に関しては、現在も未だ対策技術が十分とは言えない状況にある。いずれにせよ、帯電現象は衛星障害の主要因の一つであることから、これらを事前に予測し、衛星運用会社等

に情報提供することは重要である。情報通信研究機構(NICT)は、我が国で「宇宙天気予報」を業務として実施する唯一の機関である。加えて、宇宙天気予報の高精度化に向けた様々な研究開発を実施する研究機関でもある。我々は、静止軌道の宇宙環境予測として、深部帯電の要因となる放射線帯電子フラックス、及び表面帯電の要因となるサブストーム粒子の現況把握と予測に取り組んでいる。

本稿では、2章でGEO放射線帯電子フラックス予測モデルについて述べ、3章では新たに打上予定のひまわり(GMS)8,9号に搭載される宇宙環境データ取得装置(SEDA)、4章ではサブストーム粒子予測モデルについて述べる。そして、5章でまとめを行う。

2. GEO放射線帯電子フラックス予測モデル

静止軌道(GEO)での放射線帯電子フラックスの危険度情報提供のために、我々は2MeV以上の電子フラックスの1日平均値を予測するGEO放射線帯電子フラックス予測モデルを開発した。これまで、同様の予測モデルとしては、NOAA/SWPCが用いている太陽風速度のみを入力パラメータとした線形フィルタが多く用いられてきた。これは放射線帯電子フラックス変動が太陽風速度と良い対応関係にあることが古くから知られていたためである。しかしながら、その後の研究によって、放射線帯外帯電子フラックス変動には惑星間空間磁場の南北成分や、太陽風動圧などのパラメータも寄与していることが判明した。そのため、これら複数のパラメータを同時に扱うことができる予測モデルを導入する必要がある。

我々は、多変量自己回帰モデルとカルマンフィルターを用いることで、複数の太陽風パラメータを入力として、GEOの2MeV以上の放射線帯電子フラックスを予測するモデルを開発した[1, 2]。このモデルは現在、「放射線帯電子フラックス予報」としてWWW

による情報提供を実施している(図1)。現在は、同予報のために、米国上空の気象衛星 GOES の宇宙環境モニター (2MeV 以上の電子フラックス量) のデータを用いている。



図1 放射線帯電子フラックス予報
(<http://seg-web.nict.go.jp/radi/>)

3. GMS(ひまわり)-8,9号による宇宙環境計測

前述したように、現在運用している静止軌道の放射線帯電子フラックス予報においては、米国上空の静止軌道で宇宙環境を計測している GOES 衛星のデータを用いている。但し、我々は静止軌道の環境が経度毎に異なっていることに留意する必要がある。

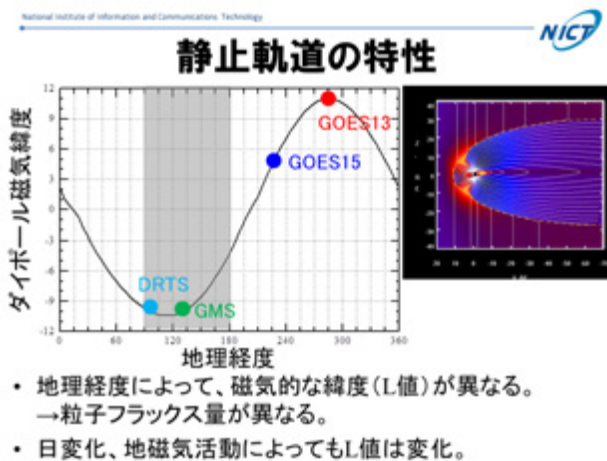


図2 静止軌道の特性

地球のダイポール磁気軸は自転軸に対して傾きを持っているため、図2に示すように、同じ静止軌道上であっても、経度によって磁気緯度は異なる。高エネルギー粒子は同一磁気緯度(L値)内を運動する性質があり、磁気緯度が異なるということは、粒子フラックスの量やその変動の振る舞いが異なっていることを意味する。また、磁気圏においては、

太陽風との相互作用によって生じる電流系によって、磁気圏の磁場構造がダイナミックに変化するため、地磁気活動の状態によって静止軌道上の磁気緯度も変化する。また、サブストーム粒子変動の影響は局所的であるため、経度が異なればサブストーム粒子変動の状況は大きく異なる。そのため、日本近傍の静止軌道の宇宙環境の現況を把握するためには、日本上空の宇宙環境計測データを取得することが重要となる。JAXA の DRTS 衛星にも宇宙環境計測装置 (SDOM: 放射線吸収量モニタ) が搭載されており、我々はこのデータも宇宙環境の現況把握に活用しているが、DRTS 衛星の位置は東経 90 度と日本の上空よりもかなり西に位置しているため、東経 140 度付近の宇宙環境計測が必要である。

2014 年夏、2016 年夏に打ち上げを予定しているひまわり 8 号、9 号には、宇宙環境データ取得装置 (Space Environment Data Acquisition: SEDA) が搭載される。SEDA の諸元を図3に示す。本装置のデータによって、放射線帯外帯電子やプロトン現象に伴う高エネルギー陽子のモニターが可能となる。我々は、気象庁から本装置のデータを準リアルタイムで提供を受け、日本上空の宇宙環境の現況把握、及び同データを入力パラメータとした予測モデルの開発・運用を予定している。



図3 宇宙環境データ取得装置 (SEDA) 外観・諸元

4. GEO サブストーム粒子予測モデル

サブストーム粒子の変動は、放射線帯粒子変動に比べると時間変化が急激、かつ局所的である。この

ため、磁気圏グローバルMHDシミュレーションを用いたGEOのサブストーム粒子予測モデルを開発中である。予測するのは、静止軌道の任意の場所での電子・イオンの密度、温度というパラメータである。この予測のために、数値天気予報で広く用いられている「ガイダンス」を導入する。

ガイダンスとは、数値シミュレーションの結果から、統計的な手法等を用いて、具体的な場所(緯度、経度)の物理量(これは、数値シミュレーションから直接導出されるものに限らない)を導出する手法及びその値を言う。これまでにも、中村らによって、同様の試みが為されてきている[3]。

現在、NICTのサイエンスクラウド[4]上に蓄積されている静止軌道のサブストーム粒子計測のデータ、及びこれまでNICT内で運用されてきたリアルタイム磁気圏シミュレーション[5,6]の計算結果を活用して、ガイダンスの導出に着手している。

得られた結果を元に、ガイダンスの技法を現在NICTで開発を進めている高分解能の磁気圏グローバルMHDシミュレーションに応用していく予定である。将来的には、サブストーム粒子のガイダンスをMUSCATなどの衛星帯電モデルの入力として用いることで、個々の衛星の帯電量を具体的に推定することを試みたいと考えている。

5. まとめ

我々は静止軌道の宇宙環境モニタリング・予測として、下記の取り組みを実施している。

1) GOES衛星データ及び太陽風データを用いた多変量自己回帰モデルにより、GEO放射線帯電子フラックス予測モデルを開発した。また、この成果として、放射線帯電子フラックス予報のWWWサービスを現在実施している。

2) 気象庁より、2014年夏、2016年夏に打上予定のGMS(ひまわり)8,9号に搭載される宇宙環境データ取得装置(SEDA)のデータ提供を受け、日本上空の高エネルギー電子・陽子環境の現況把握に着手する予定である。また、同データを用いて、GOESと同様の放射線帯電子フラックス予測モデルを開発する。これにより、日本上空の静止軌道領域にカスタマイズした宇宙天気情報を提供する予定である。

3) NICTのグローバルMHDシミュレーションの出力とサブストーム粒子を計測しているLANL衛星データを比較・解析することで、サブストーム電子・

イオンの密度・温度のガイダンスを作成する予定である。これを用いてサブストーム予測モデルを構築したいと考えている。

参考文献

- [1] 長妻 努, 斉藤 慎司, 坂口 歌織, NICTにおけるジオスペース環境予報, 第9回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, JAXA-SP-12-017, 2012.
- [2] Sakaguchi, K., Y. Miyoshi, S. Saito, T. Nagatsuma, K. Seki, K. T. Murata (2013), Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model, *Space Weather*, 11, 79-89, doi:10.1002/swe.20020.
- [3] 中村 雅夫, 他, 磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道プラズマ環境予報, 第3回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, JAXA-SP-06-035, 2006
- [4] Murata, K. T., Watari, S., Nagatsuma, T., Kunitake, M., Watanabe, H., Yamamoto, K., Kubota, Y., Kato, H., Tsugawa, T., Ukawa, K., Muranaga, K., Kimura, E., Tatebe, O., Fukazawa, K. and Murayama, Y. (2013) A Science Cloud for Data Intensive Sciences, *Data Science Journal*, Vol.12, pp.WDS139-WDS146.
- [5] Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, and T. Takei (2006), Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code, *Space Weather*, 4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100.
- [6] Shimazu, H., K. Kitamura, T. Tanaka, S. Fujita, M.S. Nakamura, T. Obara (2008), Real-time global MHD simulation of the solar wind interaction with the earth's magnetosphere, *Adv. Space Res.*, 42, 1504-1509.