

NICTにおける放射線帯予測モデルの開発 Development of the NICT's Radiation Belt Prediction Model

長妻 努¹、斉藤 慎司¹、坂口 歌織¹、国武 学¹、三好 由純²、関 華奈子²、村田 健史¹

¹情報通信研究機構 電磁波計測研究所

²名古屋大学太陽地球環境研究所

T. Nagatsuma¹, S. Saito¹, K. Sakaguchi¹, M. Kunitake¹, Y. Miyoshi², K. Seki², K. T. Murata¹

¹Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

1. はじめに

情報通信研究機構（NICT）は、太陽—地球系システムの宇宙環境変動の現況把握や予測を行う「宇宙天気予報」を業務として実施する日本において唯一の機関である。NICTは、世界13カ国で構成される国際宇宙環境サービス（ISES）の地域警報センターとして、日本国内に対して宇宙天気情報を発信すると共に、他国の地域警報センターと観測データや情報の交換を行っている。更に、宇宙天気予報に必要な観測ネットワークを様々な大学・研究機関と協力しながらアジア・オセアニア域を中心に独自に展開している他、シミュレーションを用いた数値予測やインフォマティクス技術を用いた宇宙天気研究をこれまでに進めてきている。

NICTでは今年度（平成23年度）から5年間の第Ⅲ期中期計画が開始した。本中期計画の中で、我々の研究室ではこれまで培ってきた観測、シミュレーション、インフォマティクス技術を融合させ、宇宙天気とその予測に関する研究を更に推進していく。特に成果の社会利用の観点から下記の2課題を中心課題に据えて取り組む予定である。

1) 静止軌道衛星環境予測：放射線帯電子環境の予測モデルの開発、及び高精度グローバルMHDシミュレーションコードの開発を行い、静止軌道におけるkeV～MeV粒子の環境予測を行う。

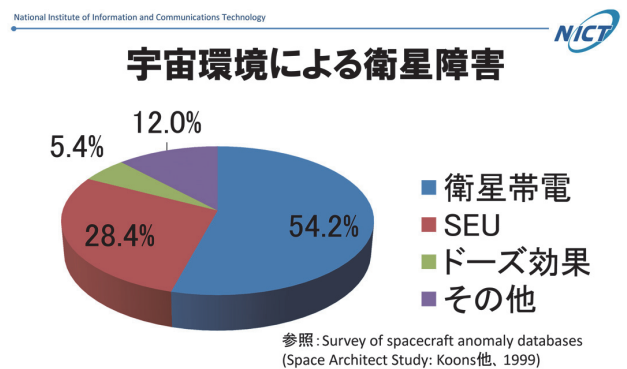
2) 電離圏変動予測：赤道プラズマバブルの生成と伝播の準リアルタイム監視システムの開発及び大気圏や磁気圏との相互作用を考慮した高精度電離圏シミュレーションコードの開発を行い、1時間先の電離圏擾乱の予測を行う。

本稿では、1)の静止軌道衛星環境予測のうち、主に放射線帯粒子の予測モデルの研究開発について紹介する。2章で静止軌道における宇宙環境予測の

重要性について述べ、3章においてNICTにおける放射線帯予測モデルの開発の現状と今後の進め方について述べる。

2. 静止軌道の宇宙環境予測の重要性

高度約3万6千kmの静止軌道（GEO：Geostationary Earth Orbit）は、通信・放送衛星や気象衛星など、実用で最もよく利用されている軌道である。現在、世界中で300機以上の人工衛星がGEOで運用されている。日本の静止衛星も20機以上運用されている。一方、人工衛星障害は、過去に発生した衛星障害の事例データベースに基づく、年間平均で約60件近く発生している換算となる。また、巨大フレアやコロナ質量放出現象（CME）、プロトン現象、地磁気嵐など大規模な宇宙環境イベント発生時には、GEOに限らず多数の人工衛星・宇宙機に障害が発生する。近年では2003年10-11月のハロウィーンイベントの際に、多数の人工衛星に宇宙環境に起因する障害が発生したことが知られてい



半数以上が衛星帯電（表面帯電＋深部帯電）による障害。

図1 宇宙環境による衛星障害の統計[1]

る。このため、静止軌道における宇宙環境変動を把握し、その変動及び人工衛星に対する影響を予測することは、障害によるリスクを低減させるためには重要であることがわかる。

また、衛星障害にもいくつか種類があるが、原因として最も多いのが衛星帯電（表面帯電、深部帯電両方を含む）であり、半数以上を占めている（図1）。表面帯電・放電は静止軌道においては主にサブストームに伴う数十keV程度のエネルギーを持つ粒子注入によって生じると考えられている。一方、深部帯電・放電は放射線帯外帯電子のエネルギー範囲であるMeVオーダーの高エネルギー電子が衛星構体を突き抜けて衛星内部の導線や回路を帯電・放電して機器を故障させると考えられている。このため、サブストーム粒子と放射線帯粒子を予測することが静止軌道の宇宙環境予測の中で、特に重要な位置を占めている。また、放射線帯外帯フラックスは太陽活動下降期の回帰性磁気嵐に伴って増大することが知られている[2]。現在の太陽活動サイクル（第24サイクル）の下降期は2014年以降と考えられており、放射線帯外帯フラックス増加に起因する深部帯電による衛星障害のリスクが高まる可能性があると考えられる。そのため、ここ数年の間に、実利用に供することができる予測モデルの開発・運用が望まれている。

3. 静止軌道の衛星障害事例

本章では、静止衛星で実際に発生した衛星障害とその際の宇宙環境変動の関係について述べる。

National Institute of Information and Communications Technology

最近の衛星不具合事例（2001年以降）

- 2001/09/25（静止衛星A）姿勢制御異常 #プロトン現象 SEUによるコマンドエラー？
- 2001/11/07（静止衛星A）姿勢制御異常 #プロトン現象 SEUによるコマンドエラー？
- 2003/10/24（低軌道衛星A）故障 #サブストームに伴うオーロラ粒子降下
- 2004/02/14（静止衛星A）トラボン故障 #放射線帯粒子増大 深部帯電？
- 2005/01/17（静止衛星F）スラスタ異常 #プロトン粒子増加？
- 2005/07/22（静止衛星F）姿勢異常 #放射線帯電子増加？
- 2005/08/19（静止衛星A）コマンド受信機故障 #放射線帯粒子増大 深部帯電？
- 2005/09/23（静止衛星D）カメラの電源断 #放射線帯電子増加継続？
- 2006/04/16（静止衛星D）姿勢異常 #放射線帯電子増加？
- 2007/03/13（静止衛星D）電波混信による画像の乱れ #電離圏側の問題？
- 2007/11/05（静止衛星E）姿勢異常 #放射線帯電子増加？
- 2008/09/11（静止衛星B）トラボン故障 #放射線帯粒子増大継続 深部帯電？
- 2008/09/14（静止衛星B）トラボン故障 #放射線帯粒子増大継続 深部帯電？
- 2009/11/11（静止衛星D）姿勢不安定 #銀河宇宙線？
- 2010/08/24（静止衛星C）一時的な姿勢変動 13分間放送中断 #高速太陽風通過 + 地磁気擾乱 但し、関連性は不明。

表1 2001年以降の日本の人工衛星不具合事例

表1に2001年以降に日本の人工衛星に発生した

主な障害事例をまとめている。この表は衛星を運用している機関から障害事例の情報が公になっているものを一覧としてまとめたものであり、サービスに影響が及んだ比較的重度の障害事例のみが取り上げられていると考えられる。そのため、サービスに影響が及ばない軽微な障害事例の状況についてはその有無も含めて不明である。表1の右側にはこれらの障害事例の際の宇宙環境の状態をまとめている。すると、ほぼすべての障害事例において、宇宙環境が何らかの擾乱状態にあったことがわかる。

但し、このことはこれらの衛星障害の要因が宇宙環境擾乱に起因していたと結論付けるものではない。実際の衛星障害の要因分析のためには、衛星メーカー、衛星運用機関、及び宇宙天気情報を提供する機関が相互に協力して情報や意見を交換する必要があるが、そういった体制作りは目下途上段階にある。そのため、この結果は現時点ではあくまでも状況証拠に過ぎない点に留意する必要がある。

4. NICTにおける放射線帯予測モデルの開発

NICTでは、宇宙環境情報に対する利用機関のニーズを知るために、いくつかの衛星運用機関と情報・意見交換を行ってきた。その結果、衛星運用機関は現況情報だけでなく、数日、1週間先の予測情報も必要としていること、及び発生した衛星障害の事後分析のために、障害時の衛星周辺の宇宙環境情報を必要としていることなどが明らかになってきた。

このような利用者の要求を踏まえ、以下の2種類の予測モデルを開発し、将来的にサービスとして情報提供することを想定している。

予測モデルA：衛星位置における数日（1～3日程度）先の1日平均値の時系列予測

予測モデルB：物理モデルを基盤とした高時間・高空間分解能の放射線帯変動予測

予測モデルAは、提供する情報の時空間分解能は高く無い代わりに即時的な情報提供を行うことで、衛星運用機関等に利活用してもらうことを想定している。一方で、障害時の状況を現場で直接再現・分析することは事実上不可能であることから、衛星障害の原因分析のためには、シミュレーションや室内実験を通じて現象を再現・分析するしかない。その場合に重要となるのは、人工衛星周辺の宇宙環境の詳細な情報である。予測モデルAの情報では分解能は不十分であり、予測モデルBのような分解能の

高いシミュレーションが必要となる。このようなシミュレーションをリアルタイムで計算させることは現状では不可能であるが、事後解析の場合には時間の制約が無い場合、障害発生後に十分な時間をかけて計算を行うことで、情報提供が可能となる。

この2つの予測モデルの研究開発を、我々は次のような3つの開発要素に分類し、それぞれに研究開発を進めていくことで最終的な予測モデルの完成に到達したいと考えている。

第1開発要素：予測フィルタ開発

この開発要素は、ほぼ予測モデルAに対応している。既存の人工衛星観測データに基づき、AR法などの時系列モデルを用いて人工衛星位置における変動予測モデルを開発する。現状で、人工衛星による観測データは数が限られているため、原則として有限点の予測情報となる。なお、人工衛星データのエネルギーチャンネル数やピッチ角方向の分解能が良ければ、有限点ではあるが、エネルギー方向とピッチ角方向には原理的には詳細な予測が可能である。

第2開発要素：放射線帯粒子の3次元分布構築

本開発要素は、予測モデルAと予測モデルBの橋渡しとなる要素を開発するものである。具体的には、予測データまたは経験モデルで得られた赤道領域の有限点の情報（特に、ピッチ角分布）を、粒子追跡計算などを行って磁気圏内の放射線帯粒子3次元分布を推定する。

第3開発要素：3次元放射線帯詳細変動物理モデル

本開発要素は、ほぼ予測モデルBに対応している。第2開発要素で推定された磁気圏内の3次元粒子フラックス分布を初期値として用いて、背景磁場としては、グローバルMHDシミュレーションの計算結果を用い、粒子追跡による時間発展計算に粒子の拡散過程や波動-粒子相互作用による加速・加熱、消失等の物理モジュールを組み込むことで、放射線帯粒子の3次元分布の詳細変動モデルを構築する。

開発の現状であるが、第1開発要素については、入力パラメータを追加することによって既に良好な初期結果が得られつつあるところである[3]。そのため、リアルタイム衛星データを用いた評価用の放射線帯粒子予測システムを構築し、試験運用を開始する予定である。

5. まとめ

人工衛星の障害要因の半数以上が帯電現象（表面帯電、深部帯電）によるものであり、その予測のためには、サブストーム及び放射線帯予測モデルを構築する必要がある。

放射線帯予測モデルに関して、我々は、即時的に衛星位置での放射線帯電子フラックス情報を提供するための時系列予測モデルと、事後解析向けに詳細な宇宙環境情報を提供するためのシミュレーションを用いた数値予測モデルの構築するために、3つの開発要素に分類して、開発を進めている。

参考文献

- [1] Koons, H. C., J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder, and P. C. Anderson, The impact of the space environment on space systems, Proc. of 6th SCTC, AFRL-VS-TR-20001578, 2000.
- [2] Miyoshi, Y., and R. Kataoka, Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences, J. Atm. Solar-Terr. Phys., 73, 77-87, 2011.
- [3] 坂口歌織、三好由純、長妻努、齊藤慎司、関華奈子、村田健史、多変量自己回帰モデルを用いた静止軌道上の2MeV電子フラックス一日平均値の予測、第8回宇宙環境シンポジウム集録論文