

NICTにおけるジオスペース環境予報 NICT's Geospace Environment Forecast

長妻 努、齊藤 慎司、坂口 歌織
情報通信研究機構 電磁波計測研究所

T. Nagatsuma, S. Saito, K. Sakaguchi

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

1. はじめに

「ジオスペース」は約 10 倍の地球半径 (6 万 3700km) よりも地球側の宇宙空間を指す比較的新しい用語である。ジオスペースは主に現在人類が社会インフラの一部として宇宙環境を利用している領域と対応している。ジオスペースでは、太陽活動の影響によってサブストームや地磁気嵐と呼ばれる宇宙環境変動が発生する。これに伴って生じる地磁気変動は地上の送電線網に誘導電流を流し、時には停電などの障害の要因となることがある。また、ジオスペース内にはエネルギーの高い電子やイオンが磁力線に捕捉されている放射線帯と呼ばれる領域があり、電子フラックスは地磁気嵐に伴って大きく変動する。放射線帯電子のフラックス増大やサブストームに伴う粒子注入等によって、人工衛星が帯電し、障害を引き起こすことがある。このため、ジオスペースの環境を予測することは、太陽から地球超高層までの環境を予測する宇宙天気予報において重要な課題の一つである。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。

ジオスペース環境で予測するべきターゲットは大きく 2 つある。1 つは「地磁気活動」である。地磁気活動はジオスペース環境変動における基本情報であり、サブストームや地磁気嵐に伴う宇宙環境変動を把握する上での手がかりとなる。地磁気活動の情報は電離圏変動や放射線帯変動予測モデルの入力としても扱われる。もう 1 つは「中・高エネルギー粒子変動」である。これは、前述したように衛星障害の主な原因の一つである。

NICT では平成 23 年度からスタートした第Ⅲ期中期計画の下で、静止軌道の電磁環境予測を中心課題の一つに据えて取り組んでいる。課題を進める戦略

として、次のように考えている。現在、第 23 サイクルの太陽活動極大期を迎えつつあり、利用者に対する予報情報の迅速な提供が求められている。そのため、短期的戦略としては、経験モデルを用いた予測を実現し、利用者にはリスク回避の判断の手助けとなる情報をリアルタイムに提供する。長期的戦略としては、宇宙機の故障の事後解析・詳細解析に資する、更には様々な利用者の要求に応えられるような 3 次元の高精度・高時間分解能の数値予測技術を確立していくことを考えている。

本稿では、短期的戦略に関する話を紹介する。2 章で地磁気活動予測の経験モデルについて述べ、3 章において、静止軌道放射線帯電子フラックス予測の経験モデルについて述べる。4 章では、現在我々が準備している静止軌道放射線帯電子フラックス予測情報サービスについて紹介する。5 章でまとめを行い、併せて現状の問題点について述べる。

2. 地磁気活動予測の経験モデル

宇宙環境変動に伴って複雑に変動する地磁気活動状況を表すために、様々な地磁気指数が考案され、利用されている。地磁気活動のドライバは太陽風であることから、これまで地磁気指数の経験予測モデルとして、太陽風パラメータを入力とした様々なカップリングの式が考えられてきた。これらのほとんどが太陽風-磁気圏のカップリングの効率を一定と仮定したものであった。しかしながら、効率が一定と仮定したモデルでは、地球の自転軸の傾きの変化に関連した地磁気変動の季節依存性 (Equinoctial/McIntosh 効果) が説明出来ず、カップリングの効率が季節変化することを考慮する必要性が指摘されていた。ただし、その変化の要因については、物理的な解釈がなされていない状況であった。

一方、ここ 10 年くらいの研究によって、プラズ

マ対流を駆動する Region1 電流系の作り出す磁場そのものが磁気圏の形状を変形させ、太陽風-磁気圏相互作用の効率を低下させることがわかってきた。Region1 電流系の強さは極冠電位差と極冠域電離圏の電気伝導度の積なので、電場の発達のみならず、電気伝導度の増加によっても、Region1 電流系は増加し、その結果としてプラズマ対流の発達が抑制される。Region1 電流系は北半球と南半球それぞれに存在することから、極冠電位差の発達の度合いが極冠域電離圏の電気伝導度（北極と南極の両極間域の電気伝導度の和）に依存することがこれまでの研究によって示されている[1]。このことは、極冠域の電気伝導度の大きさによって、太陽風-磁気圏-電離圏相互作用の効率が変化することを意味している。そこで、我々は汎地球的な地磁気活動の指数 am 指数及びその対数スケールの指数である Km 指数を用いて、太陽風-磁気圏-電離圏相互作用の効率変化の特徴を調べ、この考え方に基づく経験モデルの開発を行った。

図1に地磁気活動と太陽風電場の関係を南北両極間の Pedersen 電気伝導度の和の関数として各 Km 指数毎にプロットしたものを示す。

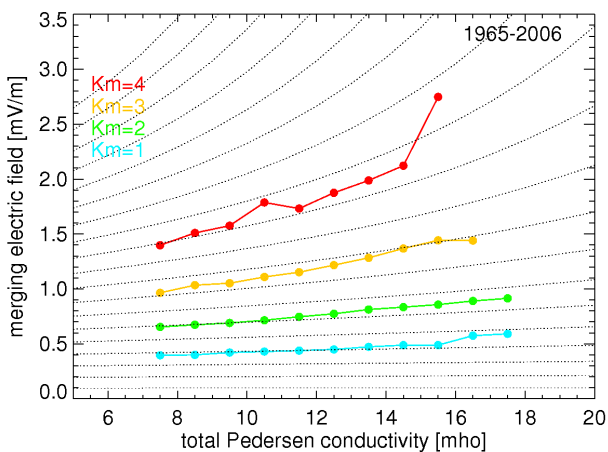


図1 各 Km 指数毎の地磁気活動に必要な太陽風電場の大きさの Pedersen 電気伝導度依存性[2]

背景の線はSiscoeらの研究[3]から予測される極冠電位差の値である。両者の変動の傾向は良い一致を示している。このことは、Km 指数及び am 指数の変動が極冠電位差の関数として表せることを意味している。

この結果を踏まえて、am 指数を予測するための経験モデルを開発した。am 指数は前述のような極冠電

位差に対する依存性の他に、太陽風動圧に対する依存性、粘性効果による磁気圏対流に対する依存性があるため、それぞれに対して、太陽風パラメータと am 指数の解析を行い、構築される am 指数の経験式は次の通りである。

$$am = -9.83 - 0.097\Phi_{PC} + 0.0079\Phi_{PC}^2 + 7.51(P_{SW})^{0.5} + 0.55(V_{SW}/100)^2 \quad (1)$$

$$\Phi_{PC} = 57.6E_m P_{SW}^{1/3} / (P_{SW}^{1/2} + 0.0125\xi \Sigma_P E_m) \quad (2)$$

$$\xi = 4.45 - 1.08 \log \Sigma_P \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{Ptotal} &= \Sigma_{PN} + \Sigma_{PS} \\ &= Sa^{0.5}(1.2(\cos \chi_N + \cos \chi_S) + 0.3472) \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、(1)は am 指数の予測式で、(2)は極冠電位差の推定式、(3)は極冠電位差を推定する際の補助パラメータの式、(4)は南北両極冠の電気伝導度の和の太陽天頂角依存性の式である。この4つの式を用いて am 指数を太陽風の速度、密度、磁場、F10.7 指数、南北両磁極の太陽天頂角によって計算することができる。この経験式によって、地磁気の日変化、季節変化、太陽活動周期変化も再現することが可能である。

図2に4太陽活動周期にわたる太陽活動の変化と am 地磁気指数の変化、及び我々の経験モデルから得られた予測結果との比較を示した。太陽活動の変動に関わらず、am 指数の変動と予測値は良く一致しており、本経験モデルを用いることで長期間にわたって安定的に地磁気活動を予測することが可能となった。

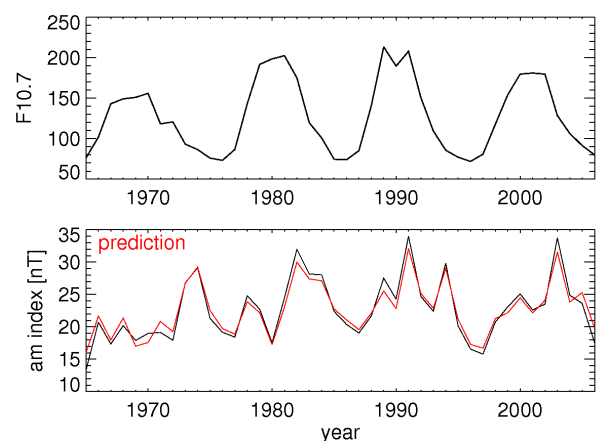


図2 4太陽活動周期にわたる太陽活動変化と am 指数の変化、及び我々の経験モデルから得られた予測結果（赤線）

3. 静止軌道放射線帯電子フラックス予測の経験モデル

我々は、多変量自己回帰モデルを用いた静止軌道上の2MeV以上の電子フラックス予測モデルの開発を行っている。従来の予測には太陽風速度のみを入力とする線形予測フィルタが用いられていた。しかし、最近の研究によると、静止軌道の放射線帯電子flux変動には惑星間空間磁場の南向き成分や、太陽風動圧なども影響を与えていることがわかっている。そこで、予測精度向上のために太陽風速度に加えて惑星間空間磁場の南北成分、太陽風動圧なども入力パラメータとして取り扱うことができる多変量自己解析モデルを導入した[4]。この経験モデルは従来の太陽風速度のみを入力とする線形予測フィルタよりも精度が良く、特にフラックスの増大・減少に対する追従が従来よりも向上している。

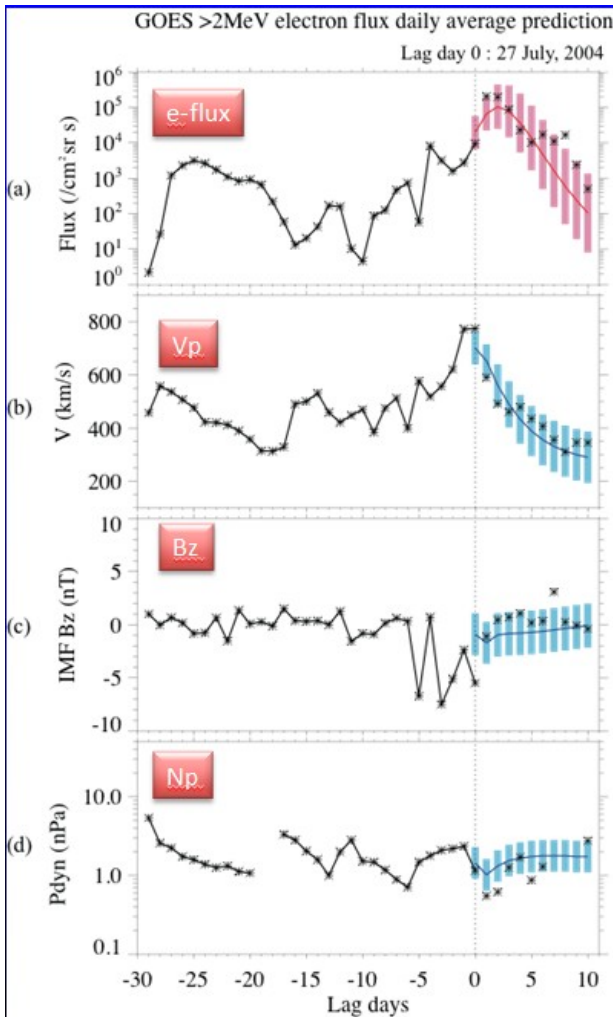


図3 放射線帯電子 flux 予測の例[4]

我々はこのモデルをベースに更にリアルタイム

の太陽風データを入力とし、カルマンフィルタを用いて予測するシステムを開発した。図3に2004年7月の放射線帯電子 flux 増大イベントの予測結果を示す。一番上が電子フラックス(e-flux)のグラフで、黒が観測値、赤が予測値と標準偏差である。2番目から一番下までの3つのグラフはそれぞれ上から太陽風速度(V_p)、惑星間空間磁場の南北成分(B_z)、太陽風密度(N_p)である。こちらは、黒が観測値、青が太陽風パラメータの予測値と標準偏差である。我々の構築した予測システムで高速太陽風到来後の105を超える電子 flux の増大が予測できていることがわかる。しかしながら、予測精度は予報のリードタイムが長くなるにつれて低下する。これは太陽風のパラメータが本経験モデルの出力に基づく予測値を用いているため、リードタイムの長い予報を精度良く実現するためには、高精度な太陽風予測モデルの導入が不可欠となる。

4. 静止軌道放射線帯電子 flux 予測情報サービス

前述した放射線帯電子 flux 予測の経験モデルの成果を踏まえ、現在予測情報サービスを実施するためのwebページを準備中である。図4はそのトップページである。情報提供に際し、2MeV以上の電子 flux の量を以下の「静穏」「やや高め」「高め」の3段階のレベルで定義している。



図4 放射線帯電子 flux 予測サービスのトップページ

「静穏」: (flux < 1,000 /cm² sr sec.)

「やや高め」: (1,000 <= flux < 10,000 /cm² sr sec.)

「高め」: (flux >= 10,000 /cm² sr sec.)

このレベル設定に基づき、「今日」、「明日」、「明後日」の状態をお知らせする予定である。更に詳細な情報を必要とするユーザーのために、2MeV以上の電子フラックスの1時間毎の予測値のグラフや地方時表示プロット、ACE衛星の太陽風データやGOES衛星、DRTS衛星の粒子データ、地磁気活動の指標となるAE指数やDst指数などの指数データを時系列で表示するサービスなども準備している。表示する時間スケールは任意で選択可能である上に、マウスカーソルを操作することでグラフ上の数値を表示させる機能もある。その他に、予報モデルの予測結果と実績の比較・評価を行うページや、放射線帯やその衛星に対する影響の解説するページなども準備している。これらの情報サービスは近日中に公開の予定である。

5. まとめ

我々はジオスペース環境予報のための経験モデルとして、地磁気擾乱予測モデルと放射線帯電子フラックス予測モデルを開発してきた。どちらも従来よりも高い精度の予測が可能である。しかし、両者のモデルとも、予測のリードタイムを伸ばすためには、太陽風データあるいは太陽風変動予測の精度向上が今後の大きな課題となる。

また、放射線帯電子フラックスの経験予測モデルとしては、現在2MeV以上のエネルギーの静止軌道1か所での予測であるが、今後、異なる場所や異なるエネルギーレンジ、ピッチ角分布のデータによる予測モデルの開発を進めていく必要がある。これに関連して、NICTではJAXAからDRTS衛星の宇宙環境データの提供を受け、新たな予測モデルの構築に着手している。

これらの経験予測モデルの予測結果をベースに、粒子追跡の手法を用いて3次元分布の推定を行い、3次元の経験モデルの構築を第2ステップとして実施することを考えている。これによって、予測領域を静止軌道から放射線帯全体、LEO等、他の領域にも拡大していきたいと考えている。

参考文献

- [1] T. Nagatsuma, Conductivity dependence of cross-polar potential saturation, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, No. A04210, doi:10.1029/2003JA010286, 2004
- [2] T. Nagatsuma, Diurnal, semiannual, and solar cycle variations of S-M-I coupling, *J. Geophys. Res.*, 111, A0902, doi:10.1029/2005JA011122, 2006.
- [3] G. L., Siscoe, G. M. Erickson, B. U. O. Sonnerup, N. C. Maynard, J. A. Schoendorf, K. D. Siebert, D. R. Weimer, W. W. White, and G. R. Wilson, Hill model of transpolar potential saturation: Comparisons with MHD simulations, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No. A6, 1075, doi:10.1029/2001JA000109, 2002.
- [4] K. Sakaguchi, Y. Miyoshi, S. Saito, T. Nagatsuma, K. Seki, K. T. Murata, Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model, *submitted to Space Weather*.