

ニューラルネットワークによる静止軌道の高エネルギー電子フラックス予測について
Forecast of high-energy electron flux at geosynchronous orbit using neural network

亘 慎一 (情報通信研究機構)、徳光政弘 (豊橋技術科学大学)
北村健太郎 (徳山工業高等専門学校)、石田好輝 (豊橋技術科学大学)

Shinichi Watari (National Institute of Info. and Com. Tech.)
Masahiro Tokumitsu (Toyohashi University of Technology),
Kentarou Kitamura (Tokuyama College of Technology)
Yoshiteru Ishida (Toyohashi University of Technology)

Abstract

High-energy electron flux at geosynchronous orbit significantly increases associated with high speed solar wind. The high-energy electron cause internal charging of satellites. It is important for satellite operations to forecast increase of the flux. Here, we report a forecast model using neural network with inputs of solar wind data.

1. はじめに

放射線帯は比較的変動が少ないものと考えられてきたが、近年、地磁気嵐などに伴いダイナミックに変動することがわかってきた。通信、放送、気象観測などの衛星で使われている静止軌道は、この放射線帯外帯の外縁にあたる。そのため、放射帯の変動に伴って高エネルギー電子のフラックスが大きく上昇し、内部帯電による衛星障害を発生させることがある[1, 2, 3, 4]。たとえば、1994年2月にリルハンメルオリンピックの日本向けのジャンプ競技の衛星中継が中断された。このとき、米国の気象衛星 GOES で高エネルギー電子フラックスの上昇が観測されていた。

高エネルギー電子は同じエネルギーのイオンに比べて侵入深さが一桁から二桁深いため、宇宙機の外被を通り抜けて宇宙機内部の回路や導体に帯電を起こしたり、宇宙機の外被のケーブルシールドなどの絶縁物に入り込んで帯電を起こしたりする[2]。このような帯電は表面帯電に対して内部帯電と呼ばれている。

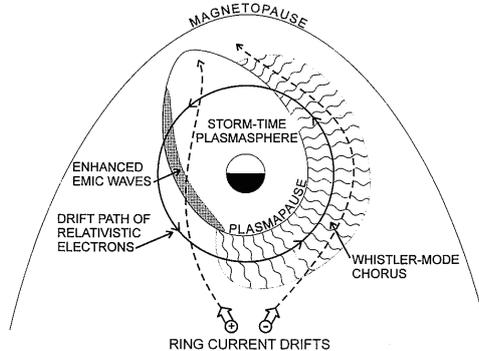


図1 VLF 波動による高エネルギー電子フラックスの増加メカニズム[1]

高エネルギー電子の増加するメカニズムについては、図1に示すように VLF 波動と粒子の相互作用による加速とする説が最近有力になってきているがまだはっきりとはしていない [5, 6, 7]。また、VLF 波動の直接観測データをリアルタイムで入手するのは現状では困難である。これまでの研究から高エネルギー電子のフラックスは、地磁気嵐の発達に伴って減少し、地磁気嵐の回復期に増加するということがわかっている。また、図2に示すように大きな地磁気嵐の後に高速な太陽風が続くと高エネルギー電子フラックスの大きな上昇が起こることが知られている [8, 9, 10]。

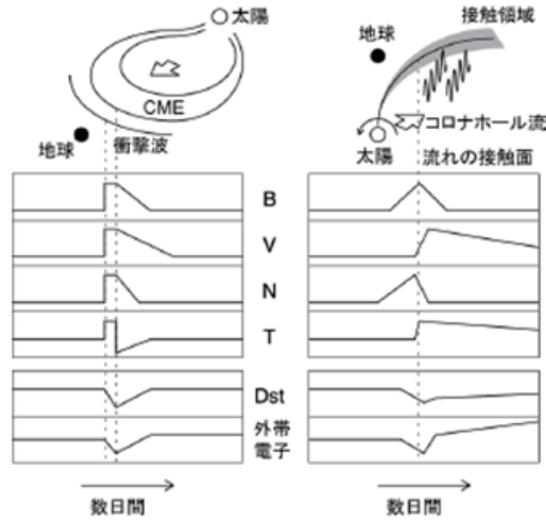


図2 太陽風の変動(B：磁場、V：速度、N：密度、T：温度)と高エネルギー電子の増加[10]

高エネルギー電子フラックスが危険なレベルに達することをあらかじめ知って衛星の運用を安全に行うためには、高エネルギー電子の増加についての正確な予測が必要となる。そこで、ACE 衛星からの準リアルタイムで入手することができる太陽風データを入力としたニューラルネット [11] による高エネルギー電子の予測について検討を行ったので報告する。

2. ニューラルネットによる予測

2-1 予測誤差の評価方法について

予測モデルの検討を行う際には、その予測誤差の評価が必要であり、相関係数(CC: Correlation Coefficient)、二乗誤差 (MSE: Mean Square Error、式 (1) 参照)、予測効率 (PE: Prediction Efficiency、式 (4) 参照) を用いて評価を行った。以下の式で N は予測値の数、 f_i は予測値、 x_i は予測値に対応する観測値を表す。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - x_i)^2 \quad (1)$$

$$VAR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

$$PE = 1 - \frac{MSE}{VAR} \quad (4)$$

2-2 ニューラルネットへの入力データについて

米国の気象衛星 GOES で観測された 2MeV 以上のエネルギーを持つ電子のフラックス変動、対応する太陽風速度、惑星間空間磁場の南北成分、過去 72 時間のイプシロンの積分値、時刻 (UT) の 5 つの入力パラメータにより、24 時間先の電子フラックスの変動を予測することにした。データに関して、太陽風の速度、惑星間空間磁場の南北成分は NASA/NSSDC の OMNI2 データベースからの 1 時間平均値、高エネルギー電子フラックスに関しては NOAA/NGDC のデータベース SPIDR から GOES10 衛星によって観測された 2MeV 以上の電子フラックスの 1 時間平均値を用いた。イプシロンは、以下の式であらわされる赤祖父[12]によって考えられた太陽風から磁気圏へのエネルギーフラックスの指標である。ここで、V は太陽風の速度、B は惑星間空間磁場の大きさ、By は惑星間空間磁場の東西成分の大きさ、Bz は惑星間空間磁場の南北成分の大きさをそれぞれ表す。

$$\varepsilon \propto VB^2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

$$\theta > B_z \text{ のとき } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{|B_y|}{|B_z|}\right) \quad (6)$$

$$\theta < B_z \text{ のとき } \theta = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{|B_y|}{|B_z|}\right) \quad (7)$$

2-3 ニューラルネットについて

ニューラルネットワークを用いた予測モデルを構築する際には、予測誤差や計算時間を考慮して中間層の数及び中間層のニューロンの数を決める必要がある。そこで、まず、中間層のニューロンの数を 10 個に固定して、中間層の数を 1 から 5 まで増やして予測誤差を調べた。その結果、中間層の数を増加させても予測誤差はほとんど変わらないことから、中間層の数を 1 にすることにした。次に中間層の数を 1 に固定して、中間層のニューロンの数を 5 から 25 まで増やして予測誤差を調べた。ニューロン数が 10 個あたりで予測誤差がほとんど改善されなくなることから中間層のニューロン数を 10 とした。

入力データ及び上記の検討から図 3 に示す予測モデルを作成し、1998 年から 2006 年までのデータを使って学習させ、2003 年 1 年間を内挿で予測させた。図 4 にこのモデルによる予測値とそれに対応する観測値の散布図を示す。予測値と観測値を比較した結果、高エネルギー電子フラックスの予測値は磁気嵐主相での急激な減少には追従できないものの、

日変化及び回復相におけるフラックスの増大は予測値と観測値でよい一致が得られることがわかった。

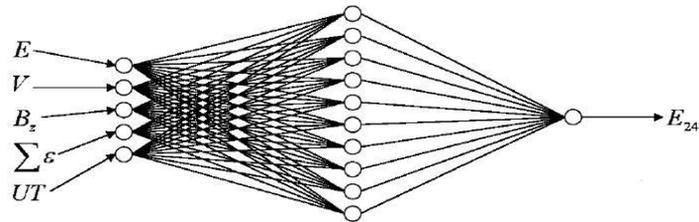


図3 ニューラルネットワークによる予測モデル

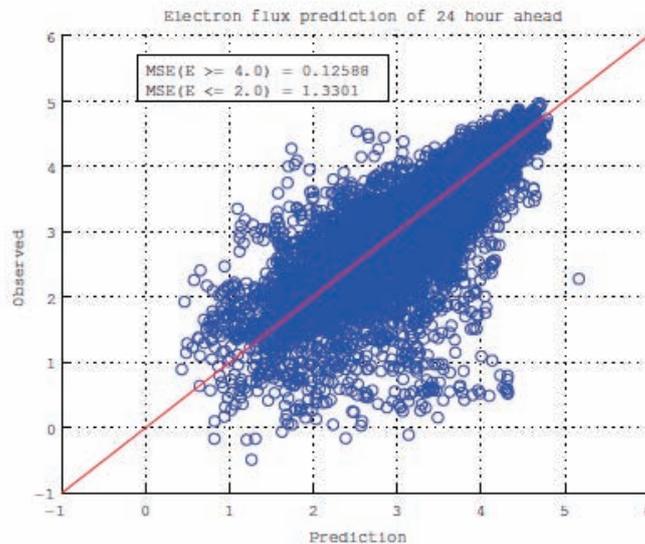


図4 モデルによる予測値とそれに対応する観測値の散布図

2-4 入力データ依存性について

入力データ依存性を調べるため、5つの入力データから1つだけデータを外して4つの入力データで学習、予測させて5つの入力データによる予測誤差と比較を行った。その結果、現在の高エネルギー電子フラックス値の予測誤差に対する寄与がかなり大きいことがわかった。

3. まとめ

情報通信研究機構では、これまで米国の気象衛星 GOES による高エネルギー電子フラックスのリアルタイムデータをモニターし、2機以上の GOES 衛星で、そのフラックスが 10,000 を超えた場合に臨時情報を出して衛星運用者に注意を促してきた。また、フラックスレベルを自動判定し、そのフラックスが 1,000 以下であれば「緑」、1,000 を越え 10,000 以下であれば「黄」、10,000 を超えた場合は「赤」という基準で、図 5 に示すような web page のレベルメータによる準リアルタイムの情報配信を行ってきた。



図5 web page による NICT 宇宙天気情報の提供 (<http://swc.nict.go.jp/>)

これらに加えて、今回報告した太陽風の準リアルタイムデータを入力とするニューラルネットワークによる高エネルギー電子フラックス予測システムを開発した。この予測システムを用いて2007年のなかば頃より試験的に図6に示すようなweb pageによる情報提供を開始した。現在は、3日先までの予測情報を提供している。

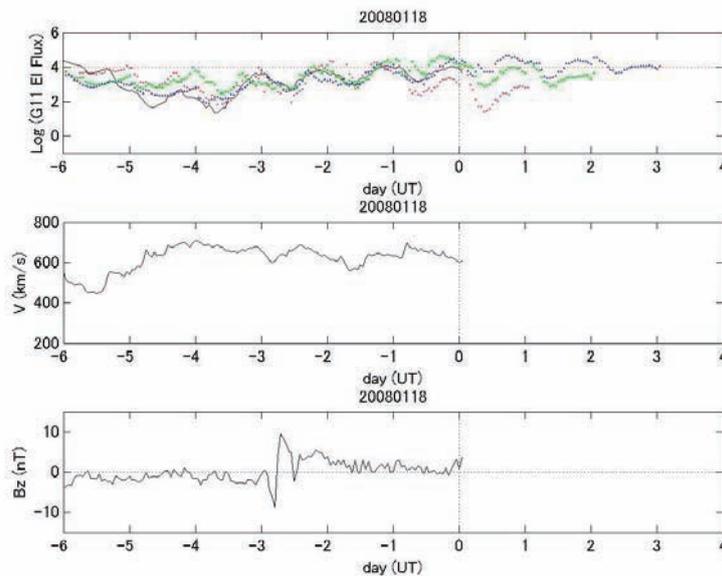


図6 ニューラルネットワークによる高エネルギー電子フラックスの予測
(<http://www2.nict.go.jp/y/y223/sept/swcenter/elforecast.html>)

参考文献

- 1 D.N. Baker, S. Kanekal, J.B. Blake, B. Klecker, and G. Rostoker, "Satellite Anomalies Linked to Electron Increase in the Magnetosphere," EOS, Trans. Am. Geophys. Union, vol.75, pp.401-405, 1994.
- 2 趙孟佑, 藤井治久, "宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題 第1回宇宙環境と宇宙機の帯電電位," 日本航空宇宙学会誌, vol.51, no.591, pp.109-117, Apr. 2003.
- 3 亘 慎一, "宇宙天気予報," 日本航空宇宙学会誌, vol.51, no.598, pp.274-281, Nov. 2003.
- 4 亘 慎一, "宇宙天気予報小特集2.宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報," プラズマ核融合学会誌, vol.82, no.11, pp.739-744, Nov. 2006.
- 5 D. Summers, R.M. Thorne, and F. Xiao, Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in magnetosphere," J. Geophys. Res., vol.109, A03213, 2004
- 6 R.B. Horne, R.M. Thorne, "Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms," Geophys. Res. Lett., vol.25, no.15, pp.3011-3014, Aug. 1998.
- 7 Y. Chen, D.G. Reeves, and R.H.W. Friedel, "The energization of relativistic electrons in the outer Van Allen radiation belt," nature physics, doi:10.1038/nphys655, Jul. 2007.
- 8 D.N. Baker, R.L. McPherron, T.E. Cayton, and R. Klebesadel, Liner Prediction Filter Analysis of Relativistic Electron Properties at 6.6 Re, JGR, vol.95, no.A9, pp.15133-15140, 1990.
- 9 R. Kataoka, and Y. Miyoshi, "Flux enhancement of radiation belt energetic electron during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions," Space Weather, vol.4, S09004, doi:10.1029/2005SW000211, 2006.
- 10 片岡龍峰, 三好由純, "放射線帯の宇宙天気予報," 天文月報, Vol.99, no.12, pp.675-681, Dec. 2006.
- 11 松本隆, , "II 非線形ダイナミカルシステムの再構成と予測," 階層ベイズモデルとその周辺 時系列・画像・認知への応用, 石黒真木夫, 乾敏郎, 松本隆, 田邊國士編, pp.89-170, 岩波書店, 東京, 2004.
- 12 S.-I. Akasofu, "Energy Coupling Between the Solar Wind and the Magnetosphere," Space Sci. Rev., vol.28, pp.121-190, 1981.