

## Van Allen Probes の観測データを用いた 放射線帯外帯電子フラックス予測モデルの開発

坂口 歌織, 長妻 努  
情報通信研究機構

### 要旨

情報通信研究機構では、NASA の Van Allen Probes の衛星観測データを用いた放射線帯外帯の L 値毎の電子フラックス変動を予測するためのモデル開発を行っている。静止軌道予測に用いている多変量自己回帰モデルを各領域に当てはめるため、まず、太陽風観測パラメータ（速度、磁場南北成分/南向き成分、動圧）と地磁気活動度（Kp 指数, Dst 指数, AE 指数）との相関関係を調べた。結果、 $L=3$  以外の領域についてはすべてのパラメータが有意な相関をもつことが分かった。これらの時系列データの組み合わせから赤池情報量基準に基づき最も適するモデルを検証した。 $L=5$  の電子フラックス (2.3 MeV) は太陽風速度・Dst 指数の過去 7 日分のデータを用いた三変量自己回帰モデル、 $L=4$  の電子フラックス (2.3 MeV) は太陽風速度・GEO 電子フラックス・Dst 指数の過去 9 日間のデータを用いた四変量自己回帰モデルが適していることが分かった。そこで、2012 年 9 月から 2013 年 12 月の観測値を用いてモデルの係数行列を推定し、続く 2014 年 1-8 月の観測値を用いて予測結果の検証を行った。観測値と予測値を比較検証した結果、両領域とも概ね予測値の誤差範囲内に実際の観測値がおさまっていることが分かり、 $L=4, 5$  については多変量自己回帰モデルにより予測可能であることが示唆された。

### 1. はじめに

地球周辺の宇宙空間には、地球の固有磁場に補足された高エネルギーの荷電粒子により、地球を帯状に取り囲む様に放射線帯が形成されている。放射線帯は、地球に近い場所に安定して存在する内帯と、静止軌道付近のフラックスの変化が激しい外帯の 2 つに分かれて存在する。放射線帯を構成する MeV エネルギー帯の電子は人工衛星の機体に侵入し内部帯電障害を発生させる危険性がある。特に、変動が激しい放射線帯外帯の電子が増加すると、その影響が静止軌道におよび多数の衛星に帯電障害が発生するリスクが高まること危惧されている。

放射線帯外帯の電子フラックスの変動原因は、主に太陽活動に起因するジオスペースの環境変動に依存する。そこで、情報通信研究機構では太陽風の観測値を説明変量とした多変量自己回帰モデルを開発し、静止軌道 (GEO: Geostationary Earth Orbit) の放射線帯電子フラックスの予測をしている[1]。モデルの詳細については論文中に記載されているためここでは割愛するが、過去 2 日分の太陽風速度、惑星間磁場の南北成分と太陽風動圧を説明変量として入力すると、静止軌道衛星 GOES が観測する放射線帯電子フラックスの 1

日平均・最大値、1時間平均値を2日先まで予測することができる。算出された予測値はウェブサイトを通して準リアルタイムで配信されている <<http://seg-web.nict.go.jp/radi/>>。

放射線帯外帯の中心部は、静止軌道より地球側の  $L=4-5$  付近に位置する。静止軌道より内側は中軌道 (MEO: Medium Earth Orbit) と呼ばれ、準同期軌道の GPS 衛星やイリジウム衛星などが運用されている。現在、情報通信研究機構では電子フラックスの予測領域を放射線帯全体に拡大するため、予測モデルを  $L$  値方向への拡張するための研究開発を行っている。本講演では、中軌道における  $L$  値毎の放射線帯電子フラックスデータの相関解析結果、多変量モデルの推定方法と予測値の検証結果を報告する。

## 2. Van Allen Probes の観測データ

放射線帯外帯の  $L$  値毎の電子フラックスの多変量自己回帰モデルを作成するため、予測変量として 2012 年 9 月に米国 NASA が打ち上げた Van Allen Probes A (VAP-A) 衛星に搭載された Relativistic Electron and Proton Telescope (REPT) の観測データを使用する。図 1 に、VAP-A/REPT が 2012 年 9 月から 2014 年 8 月の約 2 年間に観測したエネルギーが 2.3 MeV の電子フラックスの  $L$ - $t$  ( $L$  値-時間) ダイアグラムと時系列プロットを示す。 $L$ - $t$  ダイアグラムの  $L$  値は、静的な外部磁場の OP77Q (Olsen-Pfizer quiet magnetic field model) モデルと内部磁場の IGRF (International Geomagnetic Reference Field) モデルを用いて推定された  $L$  値に対応する。予測モデルを構築するにあたって  $L$  値を  $\Delta L=1$  毎に、 $L=3, 4, 5$  に分類し、各々の  $L$  値に対する一日平均値の時系列データを作成した。時系列プロットからは、電子フラックスの変動パターンが  $L$  値によって大きく異なっていることが分かる。主立った傾向として、放射線帯の中心部 ( $L=4-5$ ) や内側 ( $L=3$ ) では増加後の減少が緩やかなのに対し、放射線帯の外側 ( $L=5$ , 静止軌道) では増減の周期が短い。約 2 年間の観測データのうち、2013 年までのデータを多変量自己回帰モデルの回帰係数行列の推定に使用し、2014 年以降のデータを予測モデルの検証に使用する。

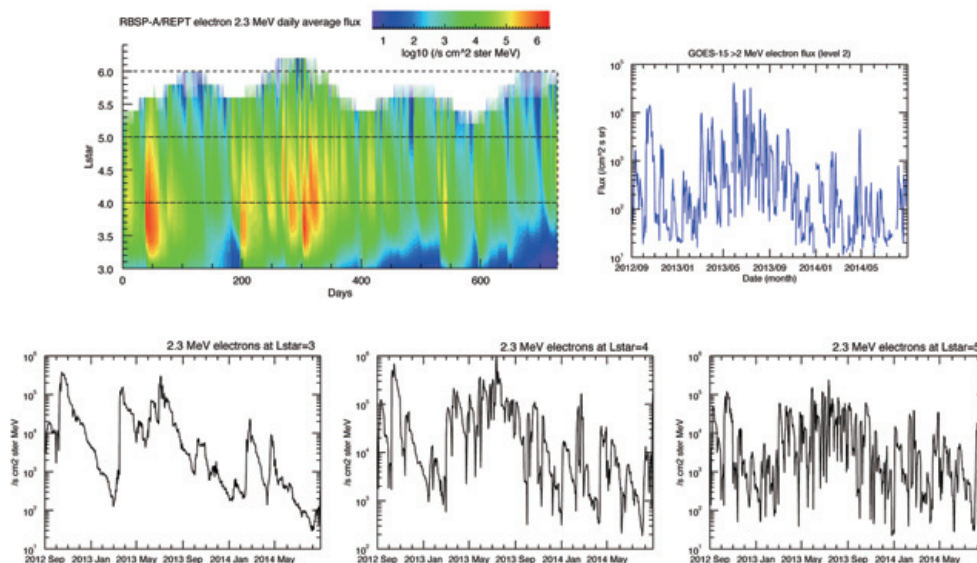


図 1. Van Allen Probes による  $L=3-6$  の 2.3 MeV 電子フラックスと GOES-15 による静止軌道上の  $>2\text{MeV}$  電子フラックスの観測データ

### 3. 相互相関関係

静止軌道モデルでは、電子フラックスを予測変量とする多変量自己回帰モデルの説明変量として、太陽風速度、惑星間空間磁場南北成分、太陽風動圧の3つの太陽風パラメータを使用している。放射線帯外帯の L 値毎の多変量自己回帰モデルを作成するにあたり、これまで採用している3つの太陽風パラメータに加え、以下に挙げる、惑星間空間磁場の南向き成分、地磁気活動指数や静止軌道のフラックス観測値など新たに5つの時系列データも説明変量の候補として検討する。

- ✓ 太陽風速度 (SWV), 惑星間空間磁場の南北成分 (Bz) / 南向き成分 (Bs), 太陽風動圧 (Pdyn)
- ✓ AE 指数, Kp 指数, Dst 指数
- ✓ 静止軌道のエネルギー2 MeV 以上の電子フラックス

これら8つの変量はすべて準リアルタイムで取得可能なため、定常運用する際にも利用することが可能である。これら8つの時系列データと VAP-A による L<sup>\*</sup>=3 (黄色), 4 (緑色), 5 (水色) の 2.3 MeV 電子フラックス、また GOES-15 による静止軌道の >2 MeV 電子フラックス (青色)との相関関数を図2に示す。

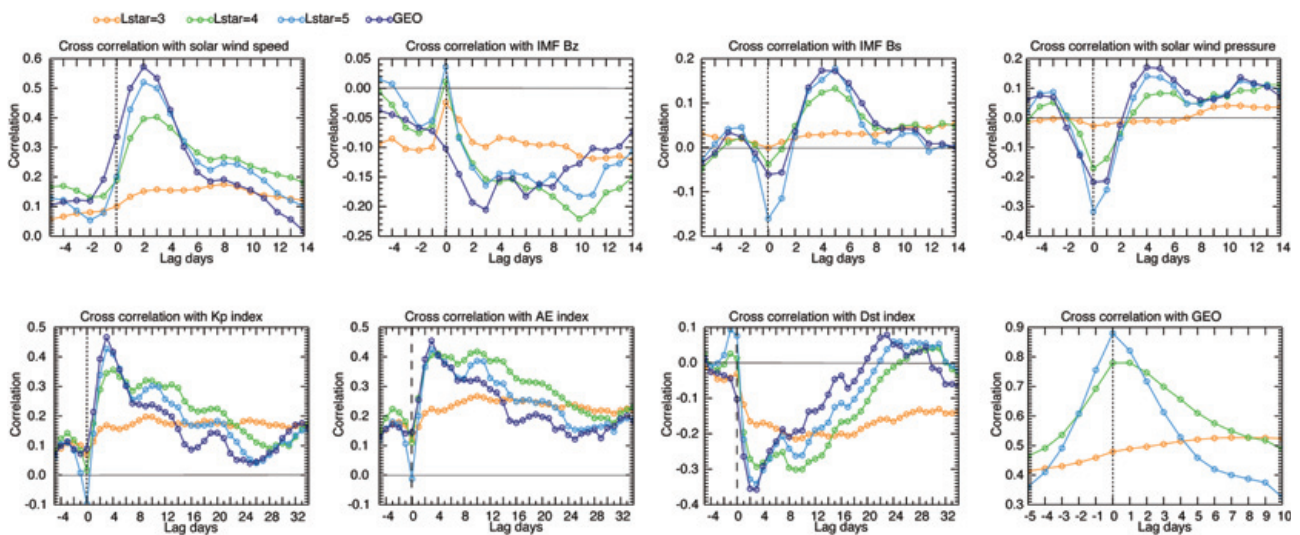


図2. 放射線帯電子フラックス (L<sup>\*</sup>=3 黄色, L<sup>\*</sup>=4 緑色, L<sup>\*</sup>=5 水色, GEO 青色) と太陽風速度、惑星間空間磁場南北成分/南向き成分、太陽風動圧、Kp 指数、AE 指数、Dst 指数、静止軌道>2MeV 電子フラックスの相互相関関数

まず全体的な傾向として相関係数は外側ほど高いこと、そして L<sup>\*</sup>=3 に関してはどの変量とも有意な相関がないことが分かる。つまり L<sup>\*</sup>=3 の電子フラックスは変動傾向が他の L 値と異なり、これら8つの説明変量を用いた多変量自己回帰モデルでは予測できないことを意味する。そこで以下では L<sup>\*</sup>=3 以外について述べる。

#### ➤ 太陽風速度との相関

太陽風速度と電子フラックスの相関関数のピークの最大値は GEO (+2 days) で 0.57 である。次いで、L<sup>\*</sup>=5 (+2 days) で 0.52、L<sup>\*</sup>=4 (+3 days) で 0.40 である。電子フラックスは太陽風速度の上昇後に GEO, L<sup>\*</sup>=5 では2日後、L<sup>\*</sup>=4 では3日後に増加する傾向がある。

➤ 惑星間空間磁場との相関

惑星間空間磁場の南北成分の平均値 ( $B_z$ ) と電子フラックスの相関関数の最小値は GEO (+3 days) で  $-0.21$ 、 $L^*=5$  と  $4$  (+10 days) で  $-0.18$  と  $-0.22$  である。一方、惑星間空間磁場の南向き成分の平均値 ( $B_s$ ) と電子フラックスの相関関数の最小値は GEO (+4 days) で  $0.17$ 、 $L^*=5$  と  $4$  (+5 days) で  $0.18$  と  $0.13$  である。 $B_z$  の相関関数は顕著なピークがないのに対して、 $B_s$  の相関関数にはピークがみられる。電子フラックスは、南北成分の平均値 ( $B_z$ ) が負に変化したあと、3日後に GEO で増加し始め  $L^*=5, 4$  では10日をピークに増加を続ける。一方、南向き成分の平均値 ( $B_s$ ) の上昇に対しては、4-5日後に電子フラックスが増加する傾向がある。

➤ 太陽風動圧との相関

太陽風動圧と電子フラックスの相関関数は、GEO,  $L^*=4, 5$  共に遅延がなく  $\pm 0$  day にピークがある。最小値は  $L^*=5$  の  $-0.32$ 、次いで、GEO の  $-0.22$ 、 $L^*=4$  の  $-0.17$  である。太陽風動圧が上昇するとともに、電子フラックスは GEO から  $L^*=4$  にかけて遅延なく減少する傾向がある。

➤ Kp 指数との相関

Kp 指数は、全球的な地磁気活動度を示す。Kp 指数と電子フラックスの相関関数のピークの最大値は、GEO (+3 days) で  $0.47$ 、次いで、 $L^*=5$  (+3 days) で  $0.43$ 、 $L^*=4$  (+4 days) で  $0.36$  である。また、 $L^*=5$  (+10 days) は  $0.30$ 、 $L^*=4$  (+9 days) は  $0.32$  に相関関数のセカンドピークがある。電子フラックスは Kp 指数の上昇後に GEO では3日後に増加する傾向がある。また、 $L^*=4, 5$  では3,4日後と9,10日後の二段階で増加する傾向がある。

➤ AE 指数との相関

AE 指数は、極域の地磁気活動度で主にサブストームの規模を示す。AE 指数と電子フラックスの相関関数のピークの最大値は、GEO (+3 days) で  $0.45$ 、次いで、 $L^*=5$  (+3 days) と  $L^*=4$  (+10 days) で  $0.42$  である。また、 $L^*=5$  (+10 days) は  $0.38$ 、 $L^*=4$  (+4 days) は  $0.41$  に相関関数のセカンドピークがある。電子フラックスは AE 指数の上昇後に GEO では3日後に増加する傾向がある。また、 $L^*=4, 5$  では3,4日後と10日後の二段階で増加する傾向がある。

➤ Dst 指数との相関

Dst 指数は、赤道付近の地磁気活動度で主に磁気嵐の規模を示す。Dst 指数と電子フラックスの相関関数のピークの最大値は、GEO (+3 days) で  $-0.36$ 、次いで、 $L^*=5$  (+3 days) で  $-0.34$ 、 $L^*=4$  (+9 days) で  $-0.30$  である。また、 $L^*=5$  (+9 days) は  $-0.26$ 、 $L^*=4$  (+3 days) は  $-0.29$  に相関関数のセカンドピークがある。電子フラックスは Dst 指数の上昇後に GEO では3日後に増加する傾向がある。また、 $L^*=4, 5$  では3日後と9日後の二段階で増加する傾向がある。

➤ 静止軌道電子フラックスとの相関

静止軌道におけるエネルギーが 2 MeV 以上の電子フラックスと  $L^*=5$  の 2.3 MeV 電子フラックスの相関関数は、ピークが  $0.88$  ( $\pm 0$  day) で相関係数が非常に高く遅延がない。また、 $L^*=4$  の電子フラックスとの相



関関数もピークが 0.77 ( $\pm 0-1$  day) で相関係数が高く、約半日の遅延がある。静止軌道の電子フラックスが増加後 1 日以内に  $L^*=5$  で電子フラックスが増加し、続いて半日以内に  $L^*=4$  の電子フラックスも増加する。

太陽風パラメータや静止軌道電子フラックスと、各々の  $L^*$  値の電子フラックスの相関関係は、過去の研究から推測される結果と相違ない。しかしながら、地磁気活動と  $L^*=4, 5$  の相関関数に発見された 2 重ピークは予見しなかった結果であり非常に興味深い。地磁気活動に関連した現象が時定数の異なる 2 つの放射線帯電子加速プロセスを駆動している可能性を示唆する。しかしながら、ここでは予測モデルの作成が課題であるため、2 重ピークの物理学的要因解明については今後の研究課題とする。

#### 4. 多変量自己回帰モデルの推定

$L^*$  値毎の放射線帯外帯の多変量自己回帰モデルを作成するため、AIC (赤池情報量基準) 最小法[2]に基づき、電子フラックスの変動を最も適切に再現することができる説明変量の組み合わせを検討する。AIC は、統計モデルの適切さを評価する指標である。パラメトリックモデルは一般的にパラメータ数を増やすと観測値との適合度が高まる。しかしながら、パラメータが多すぎるとモデルが複雑になり無関係なノイズにまで合わせてしまうため、予測値には適合できない過剰適合に陥る場合がある。AIC は、このような過剰適合をさけるために用いる指標であり  $AIC = -2$  (最大対数尤度) + 2 (パラメータ数) で表現される。

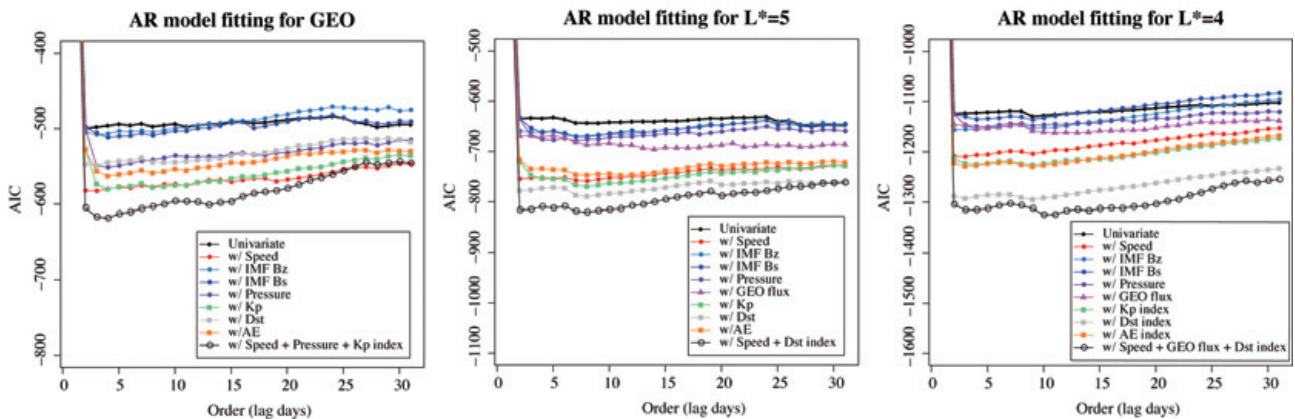


図 3. GEO と  $L^*=5, 4$  の電子フラックスを予測変量としたときの一変量自己回帰モデルの AIC と、7 つの説明変量 (太陽風速度、磁場南北成分、磁場南成分、動圧、静止軌道電子フラックス、Kp 指数、Dst 指数、AE 指数) を用いた場合の二変量自己回帰モデルの AIC、もっとも AIC を最小にする組み合わせの多変量自己回帰モデルの AIC の推定値。

まず、二変量自己回帰モデル (予測変量 + 説明変量 1 種類) から推定される AIC の最小値を用いて、各々の領域のモデルに最も適切な説明変量を調べた。図 3 に、7 種類の二変量自己回帰モデルの AIC の回帰次数関数プロットを示す。二変量モデル間の AIC 最小値の比較から、それぞれの領域で最も有効な説明変量が推定できる。静止軌道の場合は、太陽風速度を説明変量としたモデルで order=2 のときに AIC が最も小さい。

つまり、7種類の時系列データの中で、過去2日分の太陽風速度を説明変量に用いる場合がもっとも観測を良く再現するモデルができることが分かる。静止軌道フラックスの場合は、過去3日分のKp指数を用いた場合も、過去2日分の太陽風速度とほぼ同等にAICが小さいモデルが推定できる。一方で、惑星間空間磁場BzとBsの最小値は共に一変量自己回帰モデル(説明変量なし)の最小値とほぼ差異がない。つまり、惑星間空間磁場の観測値は静止軌道フラックスの説明変量としてモデルの適合度の向上にあまり効いていないことを意味する。L'=5の場合は、過去7日分のDst指数が最もAICが小さい。次に、Kp指数、太陽風速度、AE指数と続く。L'=4の場合は、過去8日分のDst指数によりAICが最小となるモデルが作成でき、他のどの変量よりも圧倒的に適合度が高いことが分かる。

次にすべての変量を用いて、最もAICが最小となる多変量自己回帰モデルの説明変量の組み合わせを調べた。その結果、以下の組み合わせがAIC最小で最も適合度の高いモデルとして推定されることが分かった。

■ 静止軌道の電子フラックス (> 2 MeV)

太陽風速度、太陽風動圧、Kp指数の過去3日分のデータを用いた四変量自己回帰モデル

■ L'=5の電子フラックス (2.3 MeV)

太陽風速度、Dst指数の過去7日分のデータを用いた三変量自己回帰モデル

■ L'=4の電子フラックス (2.3 MeV)

太陽風速度、GEO電子フラックス、Dst指数の過去9日間のデータを用いた四変量自己回帰モデル

これらの説明変量の組み合わせは、統計的に予測変量をもっとも良く再現する。静止軌道に関しては、地磁気指数を検討したことによって、これまで説明変量として使用していた惑星間空間磁場Bzに置き換わりKp指数が採用された。サブストームに伴う電子フラックスの変動はBzよりKp指数の方がモデルへの適合度が高いことを示す。一方、L'=4,5の説明変量にはDst指数が採用された。静止軌道に比べてフラックスの変動が緩やかな放射線帯中心部は、Kp指数が代表する地磁気変動より時定数の長い地磁気嵐を代表するDst指数の方がモデルへの適合度が高いことを意味する。電子フラックスの消失に効果的な太陽風動圧は、静止軌道モデルには採用されたが、L'=4,5の説明変量には採用されなかった。これは、動圧の影響が静止軌道より内側の内部磁気圏には効果的ではないことを意味する。また、L'=4のフラックス変動は一定の時間差で静止軌道の変動と相関があるため、静止軌道フラックスが説明変量として採用されている。

## 5. 予測結果と検証

AICが最小となる説明変量の組み合わせの多変量自己回帰モデルを、2012年9月から2013年12月の観測データを用いて推定した。多変量自己回帰係数行列の推定には最小二乗法を用いた。図4は、2014年1月から8月の観測値(黒線)と多変量自己回帰モデルに基づき計算された電子フラックスの予測値(赤線)を示す。このプロットが示す予測値のリードタイムは1日である。ピンク色の線は予測値の誤差範囲、青色の線は観測値が予測誤差範囲から外れ少なかった場合の差分値(over estimate)、緑色の線は観測値が予測誤差範囲から外れ多かった場合の差分値(under estimate)を示す。

観測値はおおむね予測誤差範囲内に収まっている。予測の期待値と観測値の対数値の二乗差分平均の平方根 (RMS) は、静止軌道で 0.29、 $L^*=5$  で 0.37、 $L^*=4$  で 0.27 である。NOAA の Space Weather Prediction Center が提供している静止軌道電子フラックス予測の skill score <<http://www.swpc.noaa.gov/refm/doc/REFMDoc.html>> に基づき予測値の精度を検証すると Prediction efficiency は、静止軌道で 0.73、 $L^*=5$  で 0.74、 $L^*=4$  で 0.80 であり、 $L^*=4, 5$  でも静止軌道と同等の精度の予測効率がでている。Persistence は静止軌道ではむしろ 0.07 と低いが、 $L^*=5$  で 0.37、 $L^*=4$  で 0.27 である。

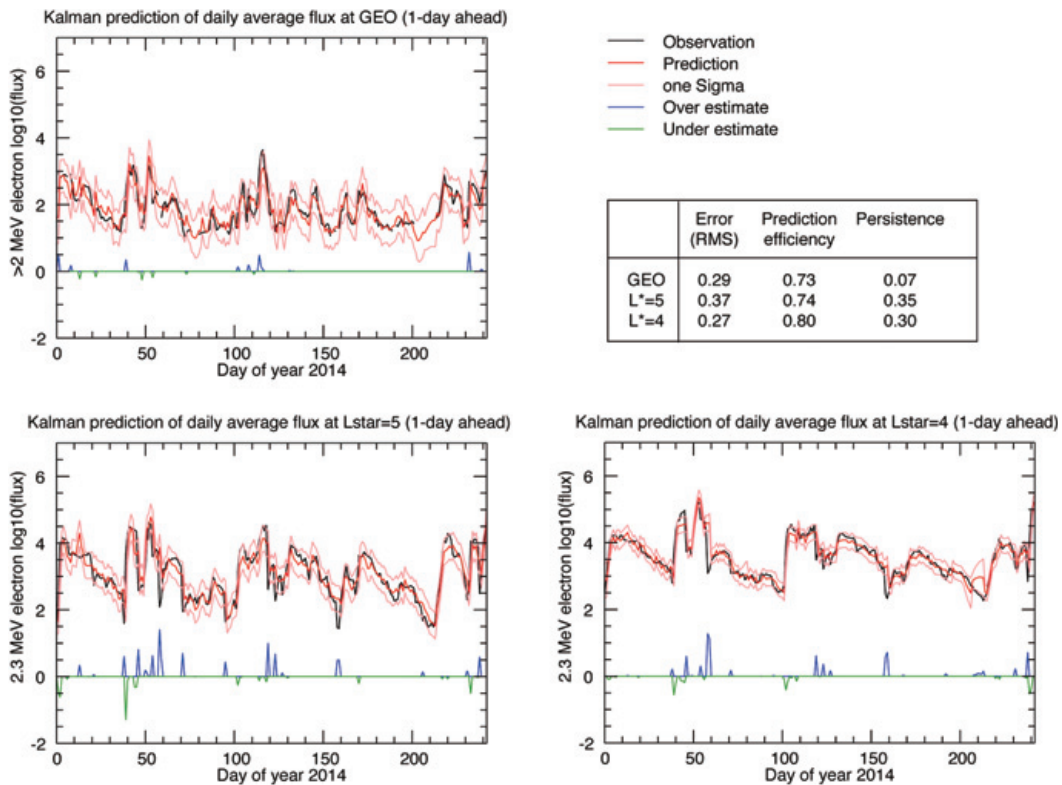


図 4. 多変量自己回帰モデルに基づき計算された 1 日先の電子フラックスの予測値 (赤線)、予測誤差範囲 (ピンク線) と実際の観測値 (黒線)、観測値が予測誤差範囲より多かった場合の under estimate 値 (緑色)、誤差範囲より少なかった場合の over estimate 値 (青色) を示す。期間は 2014 年 1-8 月。

## 6. まとめ

情報通信研究機構では、Van Allen Probes Relativistic Electron and Proton Telescope による放射線帯外帯の電子フラックスの衛星観測データを用いて  $L^*=3, 4, 5$  の多変量自己回帰モデルの開発を行っている。これらの領域の電子フラックスと、太陽風観測パラメータ (速度、磁場南北成分/南向き成分、動圧) と地磁気活動度 (Kp 指数, Dst 指数, AE 指数) との相関関係を調べた結果、 $L^*=3$  以外の領域とは有意な相関関係があることが分かった。これらの時系列データの組み合わせから、赤池情報量基準に基づき各領域に最も適するモデルを検証した結果、 $L^*=5$  の電子フラックス (2.3 MeV) は太陽風速度・Dst 指数の過去 7 日分のデー

タを用いた三変量自己回帰モデル、 $L^*=4$  の電子フラックス (2.3 MeV) は太陽風速度・GEO 電子フラックス・Dst 指数の過去 9 日間のデータを用いた四変量自己回帰モデルが適していることが分かった。そこで、2012 年 9 月から 2013 年 12 月の観測値を用いて、各領域のモデルを推定し、続く 2014 年 1-8 月の観測値を用いて予測結果の検証を行った。観測値と予測値を比較検証した結果、おおむね予測値の誤差範囲内に実際の観測値がおさまっていることが分かった。Prediction efficiency を計算すると、 $L^*=5$  が 0.74、 $L^*=4$  が 0.80 であり、同時期の静止軌道の Prediction efficiency = 0.73 と同等の精度の予測効率がでていた。

この研究から、多変量自己回帰モデルを用いることで  $L^*=4, 5$  の放射線帯電子フラックスの変動を予測できることが分かった。 $L^*=3$  の予測モデルについては、今後の課題であり他の説明変量、または多変量解析以外の方法を検討する必要がある。自己回帰モデルをリアルタイム予測に使用するためには放射線帯電子フラックスの現在の観測値が必要である。2016 年以降、日本から放射線帯探査を目的とした ERG 衛星が打ち上げられ観測データが準リアルタイムで使用できる予定である。情報通信研究機構では本モデルに基づく予測値の配信に向けた準備を進める予定である。

## 謝辞

本研究に使用した Van Allen Probes A Relativistic Electron and Proton Telescope のデータは Energetic Particle Composition & Thermal Plasma Suite チームの Dr. Harlan Spence, Dr. Geoff Reeves の協力により提供されています。また、GOES 衛星の放射線帯粒子観測データは NOAA NGDC (<http://www.ngdc.noaa.gov/satellite/goes/>) より、太陽風観測データと地磁気指数は OMNIweb Plus (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) より提供されています。観測データを提供していただいた方々と関連機関に深く感謝致します。

## 参考文献

1. Sakaguchi, K., Y. Miyoshi, S. Saito, T. Nagatsuma, K. Seki and K. T. Murata, Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model, Space Weather, 11, doi:10.1002/swe.20020, 2013.
2. 北川原二郎, 時系列解析入門, 岩波書店, 2005