

## 高エネルギー電子放射線帯の長期予測モデル

中村 雅夫、米田麻人（大阪府立大学）、谷岡俊彦、林幹子（大阪府立大 OB）、  
高田拓（高知高専）、松岡彩子（JAXA）、長井嗣信（東工大）

### はじめに

地球の内部磁気圏には、放射線帯と呼ばれる陽子や電子などの高エネルギー粒子が地球磁場によって補足された領域が存在する。電子放射線帯は、内帯と外帯の同心2層のドーナツ状の構造になっており、通常それぞれ地磁気赤道面上で地球中心から2倍と5倍の地球半径程度離れた付近に分布のピークを持つ。その2層の間には、電子の少ないスロット領域が存在する。スロット領域と外帯の電子フラックスは、地磁気活動によってダイナミックに変化することが近年明らかになってきた。放射線帯の高エネルギー電子は、衛星の内部帯電や放射線積算量（トータルドーズ）効果による太陽電池など半導体部品の劣化を引き起こす。そのため、電子放射線帯による人工衛星の放射線被ばく量を見積もって適切な耐放射線設計を行うことが重要である。この目的のため、NASA が作成した電子放射線帯モデルのAE-8モデルが現在広く使われている[1]。このモデルは、1970年代に観測されたデータを用いて作成され、太陽極大期と極小期のモデルからなっている。しかし、これらモデルの適応時期が明確でなく、最近の観測値とのずれも問題となっており、新しい電子放射線モデルが必要とされている。

### Dst 指数を用いた高エネルギー電子放射線帯モデル

Dst 指数とは、地球の中緯度で観測した地磁気の水平成分の変動量から算出した指数である。Dst 指数が負に大きく振れる現象を磁気嵐と呼び、振れ幅が大きいほど地磁気活動が活発だと考えられる。Dst 指数と電子放射線帯の変動には強い相関があり、一般に、Dst 指数が負に大きく振れると、電子放射線帯外帯は一旦減少するが、その2~3日後に回復し半数程度は元の値を超えては増加することが知られている。この Dst 指数の年平均値が1年間の平均的地磁場の擾乱度合を表すと考え、放射線帯電子との相関を調べてモデルを作成する。

モデル化には、放射線帯は経度方向に一様で磁気赤道に対して対称に分布しているとして、b-L座標系を用いる。L値は、対象とする磁力線と磁気赤道との交点の地球中心からの距離を、地球半径を単位として表し、b値は、その磁力線上のある点と磁気赤道との交点の磁場の強さ  $B$ 、 $B_0$  の比 ( $b=B/B_0$ ) により、緯度方向の位置を表す。

あけぼの衛星は、1989年に打ち上げられた科学衛星で、現在まで23年にわたって運用されている。あけぼの衛星には、放射線計測器（RaDiation Monitor: RDM）が搭載されており、放射線帯粒子を継続的に計測してきた。つまり、あけぼの衛星は、11年の太陽周期にして2周期、22年の太陽磁場極性変動周期なら1周期にわたって放射線帯を計測したことになる。これまでもあけぼの衛星の計測データを用いて、太陽活動と地磁気活動を用

いた電子放射線帯モデルを作成してきた[2,3,4]。本研究では、1990,1991,1995-2009 年の 2.5 MeV 以上の電子の計測データを用いて解析をおこす。図 1 に、磁気赤道上の高エネルギー電子の L 値に対する各年平均フラックス分布図を示す。電子放射線帯は、スロット領域と外帯で、年毎に大きく変動している。内帯は、安定しているが放射線帯内帯の高エネルギー陽子のコンタミネーションの影響が考えられるため、これ以降は、スロット領域と外帯に対してのみ解析をおこす。

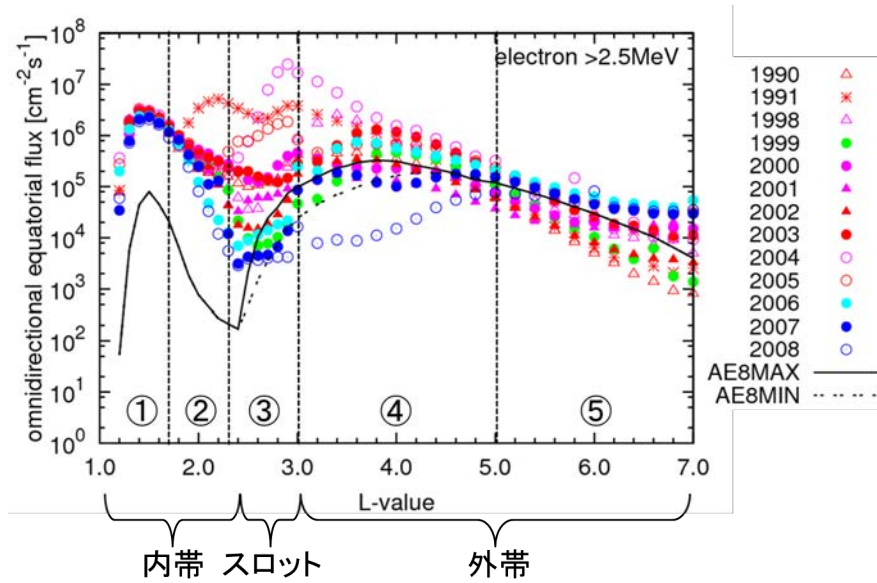


図 1 : 磁気赤道上の高エネルギー (>2.5 MeV) 電子の各年平均フラックス分布

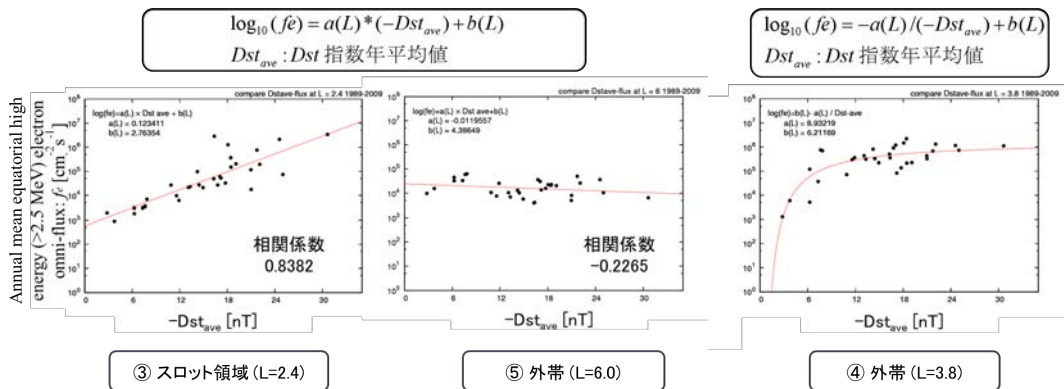


図 2 : L 値毎の Dst 指数の年平均値の絶対値(-Dst<sub>ave</sub>)に対する磁気赤道上の高エネルギー (>2.5 MeV) 電子フラックスの分布図。図中にフィッティング関数を示した。

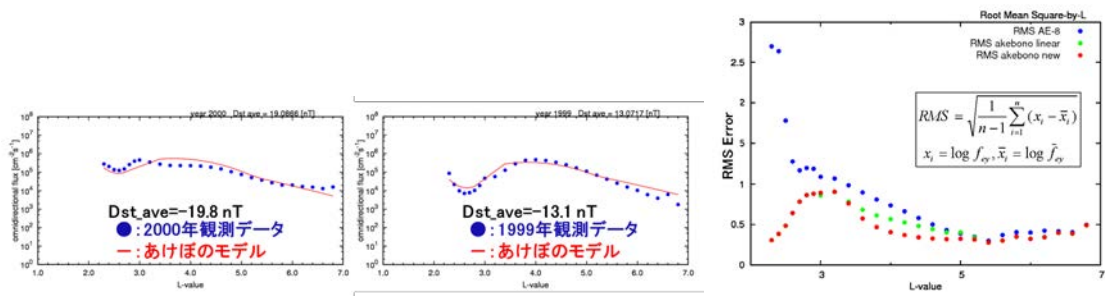


図3：計測とモデルとの比較例（2000年左、1999年中央）。観測とモデルとの誤差を、二乗平均平方根を取り赤丸（●）で示した（右）。

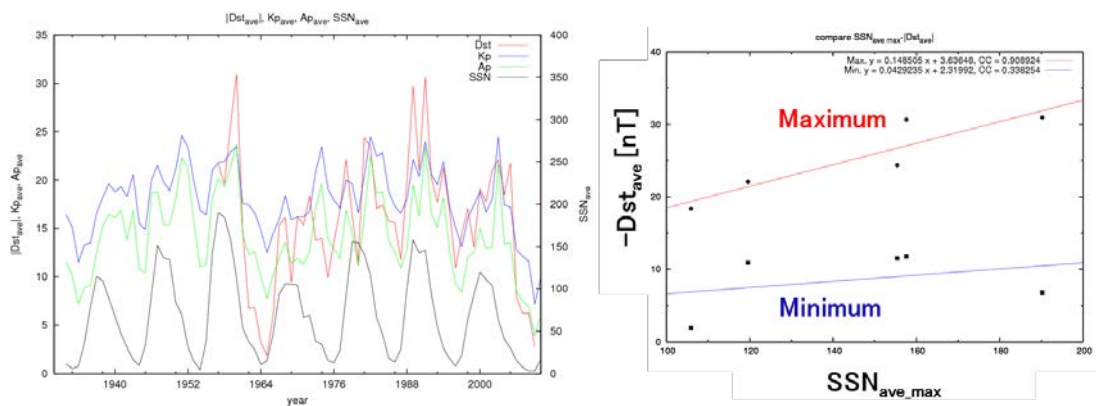


図4：太陽黒点数(SunSpot Number: SSN)と Dst 指数の大きさ、Kp、Ap の各指数の年平均値の時系列図（左）。太陽周期毎に太陽黒点数の年平均値の最大値(SSN<sub>ave\_max</sub>)に対する Dst 指数の年平均値の大きさ(-Dst<sub>ave</sub>)の最大値と最小値の分布図（右）。

図1に見られる各年のフラックス変動を調べるため、各L値に対して、Dst 指数の年積算値とあけぼの衛星で観測された高エネルギー電子の年平均値の相関を取る。図2に Dst 指数の年平均値に対する磁気赤道上のフラックスの年平均値の分布図を示す。スロット領域（図2左）と外帯の外側領域（図2中央）では、電子フラックスの対数を取った値と Dst 指数の年平均値の分布が線形関数  $\log_{10}(fe) = a(L) * (-Dst_{ave}) + b(L)$  でフィッティングでき、外帯の内側領域（図2右）では、関数  $\log_{10}(fe) = -a(L) / (-Dst_{ave}) + b(L)$  でフィッティングできることがわかった。これらの結果から、スロット領域では、磁気活動度が高い年は、対数的に高エネルギー電子フラックスが増える。その一方で、外帯の外側領域では、磁気活動度が高い年の方がフラックスは減る傾向にあり、外帯の内側領域では、磁気圏活動が高い年でもそれ以上増えないフラックスの上限があり、また磁気圏活動が極端に低い年は、フラックスが大幅に減少することを示している。各領域の L 値でフィッティング関数の係数  $a(L)$  と  $b(L)$  を求めることで、あけぼの高エネルギー電子放射線帯モデルを作成することができる。

このモデルと計測との比較例を図3左と中央に示す。また、図3右にモデルと計測との誤差を二乗平均平方根 (Root Mean Square: RMS) で示す。スロットと外帯の境界領域を除くと、対数値で計算した二乗平均平方根が 0.5 程度であるため、実際のフラックスでは誤差が 1 桁以下になると考えられる。

### 電子放射線帯モデルを用いた長期予測手法

本研究で得られたあけぼの高エネルギー電子放射線帯モデルを用いると、Dst 指数の年平均値を予測できれば電子放射線帯が予測できる。図4左に、太陽黒点数、Dst 指数の大きさ、Kp、Ap の各指数の年平均値の時系列図を示す。この図より、各太陽周期では、Dst 指数の年平均値の大きさが最小になるのは太陽黒点数の極大より数年早く、最大になるのは数年遅い。また太陽周期毎に見ると、太陽黒点数の年平均値の最大値が、Dst 指数の年平均値の大きさの最小値と最大値の両方に相関があり、それをプロットしたものを図4右に示す。この結果から、太陽周期の太陽黒点数の年平均値の最大値が、極大期を過ぎて既知か太陽周期予測手法の研究[5]から予測できれば、その周期における Dst 指数の年平均値の最小値と最大値が予測でき、それを用いて電子放射線帯を予測することができると考えられる。

### まとめ

あけぼの衛星の計測データから Dst 指数の年平均値を用いた高エネルギー電子放射線帯モデルを作成した。この放射線帯モデルを用いると太陽周期の太陽黒点数の年平均値の最大値の予測から、Dst 指数の年平均値の最大・最小値が予測でき、その値から放射線帯の予測ができると考えられる。

### 参考文献

- [1] Singley, and Vette, "The AE-8 Trapped Electron Model Environment," NSSDC/WDC-A-R&S91-24, NASA/Goddard Space Flight Center, 1991
- [2] 林 幹子, "あけぼの衛星(EXOS-D)の観測データを用いた電子放射線帯モデルの作成", 大阪府立大学修士論文, 2010.3
- [3] 谷岡 俊彦、他, "「あけぼの」衛星の観測データを用いた電子放射線帯の変動解析", 第8回宇宙環境シンポジウム講演論文集、JAXA-SP-11-012, 2012.2
- [4] 谷岡 俊彦, "地磁気活動度を用いた電子放射線帯モデル", 大阪府立大学修士論文, 2012.3
- [5] Hathaway, Wilson, and Reichmann, "A synthesis of solar cycle prediction techniques", J. Geophys. Res. 104, 22,375, 1999