

「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

谷岡 俊彦 [1]; 林 幹子 [1]; 中村 雅夫 [1]; 浅井 佳子 [2]; 高田拓 [3];
松岡 彩子 [4]; 長井 嗣信 [2]

[1] 大阪府大・工・航空宇宙; [2] 東工大・理・地球惑星;
[3] 高知高専・電気; [4] JAXA/宇宙研

要旨

地球の内部磁気圏に存在する放射線帯の高エネルギー荷電粒子は、人工衛星の搭載機器の劣化や故障を引き起こすことが知られている。特に放射線帯電子は、衛星の深部帯電や太陽電池の劣化などを引き起こす。そのため、運用中の人工衛星が放射線に被曝する量を見積もるために放射線帯モデルが必要となる。現在、NASA が開発・公開した電子放射線帯モデルの、AE-8 モデルが広く使われている。このモデルは太陽活動の極大期と極小期の2つからなるが、モデル適応期間の切り替えの閾値が明確でないことや、最近の観測値とのずれが問題となっている。本研究では、あけぼの衛星が観測した放射線帯の高エネルギー荷電粒子のデータを使って新しい電子放射線帯モデルを作成した。

はじめに

近年の人工衛星の集積化、精密化により、人工衛星の放射線被ばくが問題となっている。地球の内部磁気圏には、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し、放射線帯と呼ばれている。放射線帯の高エネルギー粒子は、人工衛星の搭載機器の劣化や故障を引き起こす。特に放射線帯電子は、太陽電池の劣化や、衛星の内部帯電に関係している。そのため、放射線帯内の粒子の分布を把握し、運用中の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になる。電子放射線帯のモデルには、NASA で作成され、現在も広く使われている AE-8 がある^[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ており、太陽極大期と太陽極小期の2つのモデルが作られている。しかし、このモデルの適用期間の切り替えの閾値が明確でないことや、最近の観測値とのずれが指摘されている。

電子放射線帯は内帯、外帯の2層構造になっており、地磁気赤道面上でそれぞれ地球中心から $2R_e, 5R_e$ 付近に分布のピークを持つ (R_e は地球半径)。またその2層の間に電子の少ないスロット領域が存在する。(図 1) しかし、その放射線量は太陽活動や地磁気活動の状態によって変化することが近年になって分かってきた。そのため、耐放射線設計の際には、この変化を考慮してより正確な放射線帯の荷電粒子分布を把握するため、太陽活動や地磁気活動の状態ごとに新しいモデルを作成する必要がある。

また、新しいモデルでは、適応期間を決める新しい基準を設けることも考える。

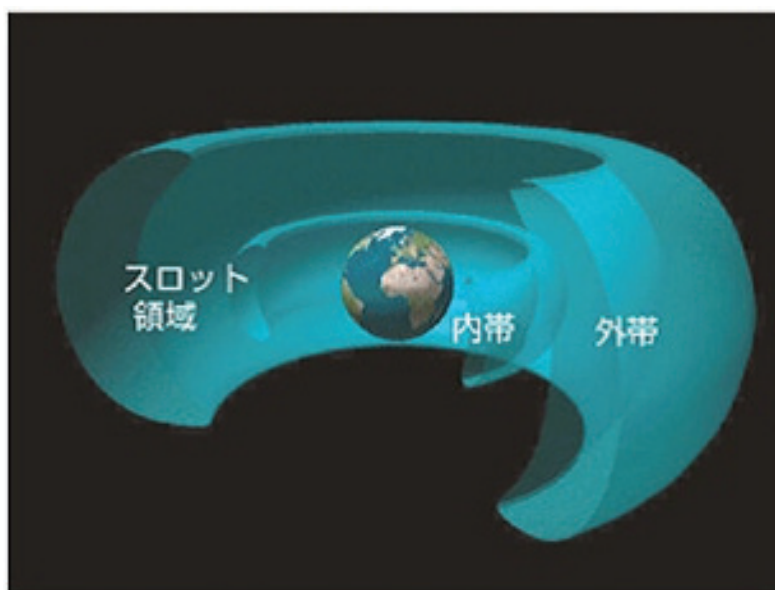


図1 電子放射線帯の構造 [2]

あけぼの衛星は、1989年より運用されている科学衛星で、放射線帯を毎パス通過する軌道を取り、今年で22年の継続的な運用を達成した。つまりあけぼの衛星は、太陽活動の極性変動を含めた1周期分のデータを計測したことになる。このデータを利用してモデルを作成することにより、最新の観測結果を用いた、太陽活動の全ての状態に対応したモデルを作成することが出来る。現在までに、我々はこのデータを用いて電子放射線帯モデルを作成してきた [3]。

太陽活動と地磁気活動の指標

モデルを作成するのに際して、太陽活動や地磁気活動による放射線量の変化を考慮する必要がある。太陽活動は、11年周期で変動し、11年に1度磁極の反転が起こる。つまり、磁極の反転を含めると太陽活動は約22年のサイクルで周期変動していることが分かっている。太陽活動の指数の一つとして、太陽黒点数がある。太陽黒点数が大きいほど、太陽活動が活発であることを示している。

また、地球磁場の変動指数の1つにDst指数がある。これは、地球の赤道付近で観測している地磁気の変動量から算出した指数である。この値は地球磁場の擾乱の度合いを示しており、Dst指数が負に大きく振れるほど地磁気活動が活発化していることを示す。また、これを1年分積算した値は1年間の磁場の擾乱度合いを表していると考えられる。このDst指数の年積算値と太陽黒点数の関係をみると、ある程度の逆相関を持っていることが分かる (図2, 図3)。さらに、1年間のDst指数の最小値を図4に示す。これは、1年間に起こった最も大きな磁気嵐の規模を表したものである。図

2と図4から、太陽黒点数と1年間に発生する最大の磁気嵐の規模にもある程度の逆相関があることがわかる。これらの指標を用いて観測データを分類し、モデルを作成する。

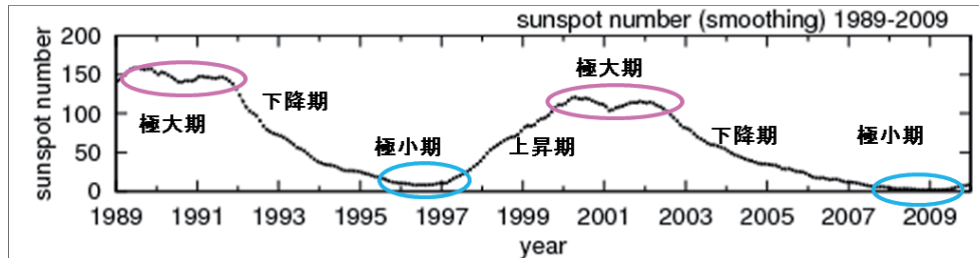


図2 太陽黒点数

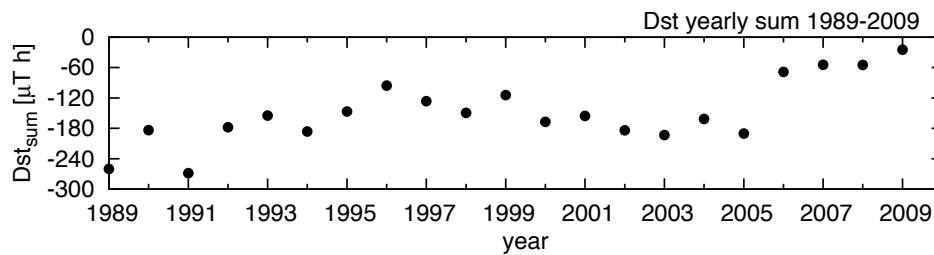


図3 Dst 指数の年積算値

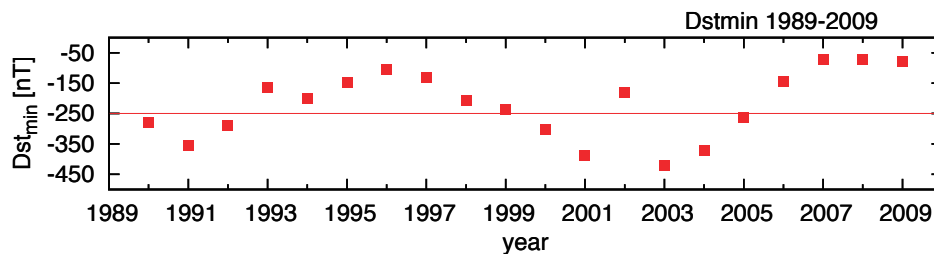


図4 Dst の年間最小値

解析結果

まず、あけぼの衛星が観測した15年分のデータのうち、2.5MeV以上の高エネルギー全方位電子フラックスデータを解析した。解析には、2次元b-L座標系を用いた。

内帯に関しては、 $1.2 \leq L < 1.7$ と $1.7 \leq L < 2.3$ の領域で分けられる。 $1.2 \leq L < 1.7$ の領域に関しては、図5の左図のように、年によって電子フラックス値がほとんど変化しない。 $1.7 \leq L < 2.3$ の領域に関しては、図5の右図のように、2006-2009年の電

子フラックス値が他の年と比べて1桁程度小さくなっている。これらの年はDst積算値が $-100\mu\text{T}\cdot\text{h}$ を上回る年である。

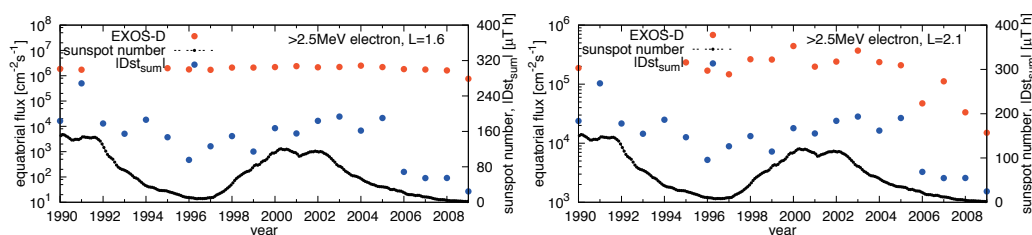


図5 磁気赤道面上での内帯の電子フラックス値の年変動 (左: $1.2 \leq L < 1.7$ 右: $1.7 \leq L < 2.3$)

スロット領域に関しては、電子フラックス値は年によって大きく変動する。これは、図6の左図より、巨大磁気嵐の発生に関連していると考えられる。そこで、磁気赤道面上での全方位電子フラックス値が $9.0 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を超える年と超えない年に分類する。全方位電子フラックス値が $9.0 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を超える年は、年間のDst指数の最小値が -250nT を下回る年とほぼ一致している。巨大磁気嵐が起こっていない年に関しては、図6の右図より、1995-1996, 1999, 2006-2009年は、他の年に比べ電子フラックス値が1桁程度小さい。

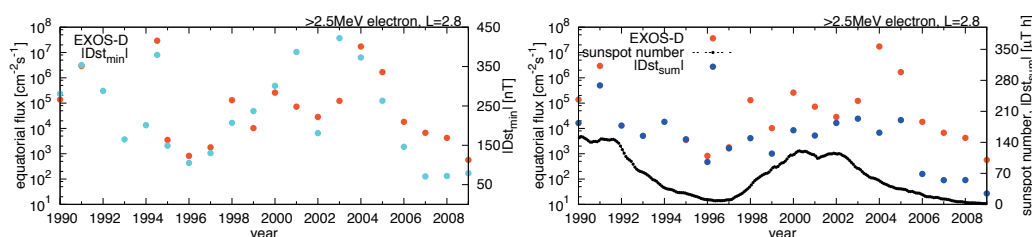


図6 磁気赤道面上でのスロット領域の電子フラックス値の年変動 (左:Dst最小値との関係 右:Dst積算値との関係)

外帯に関しても、内帯と同様に $3.0 \leq L < 5.0$ と $5.0 \leq L < 7.0$ の領域に分けられる。まず $3.0 \leq L < 5.0$ の領域に関して、L値毎の磁気赤道面上での電子フラックス値を図7に示す。この領域では、巨大磁気嵐の発生に着目して分類する。巨大磁気嵐が発生した年は、フラックス値のピークが $L=3$ 付近にある。(図7 右図)次に、巨大磁気嵐が発生していない年のデータは、Dst年積算値が $-60\mu\text{T}\cdot\text{h}$ を下回る年とそうでない年に分ける。(図7 右図)磁気圏活動が比較的活発な、Dst年積算値が $-60\mu\text{T}\cdot\text{h}$ を下回る年の電子フラックス値(緑色のプロット)は、ピークが $L=4$ 付近にあるのに対して、磁気圏活動が静穏な年の電子フラックス値(青色のプロット)はピークが $L=5$ 付近にある。 $5.0 \leq L < 7.0$ の領域に関しては、図8に示すように、太陽活動の下降期・極小期の電子フラックス値は、他の期間に比べて1桁程度大きくなる。

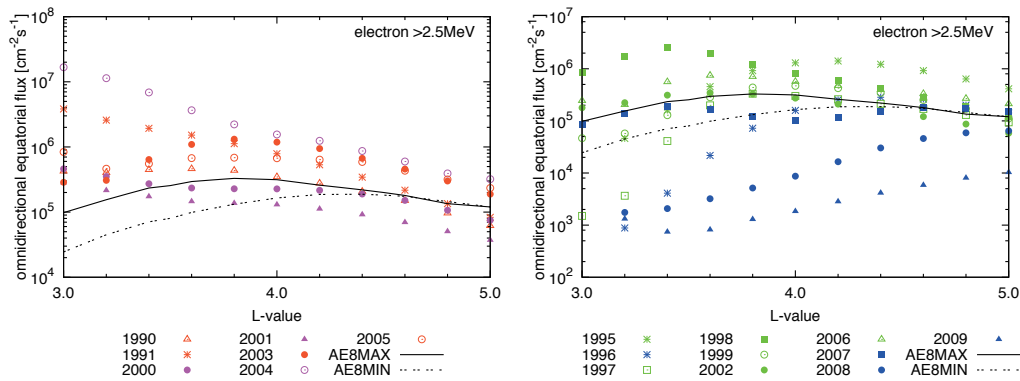


図 7 磁気赤道面上での外帯内側の電子フラックス値の年変動 (左:巨大磁気嵐発生時 右:巨大磁気嵐未発生時)

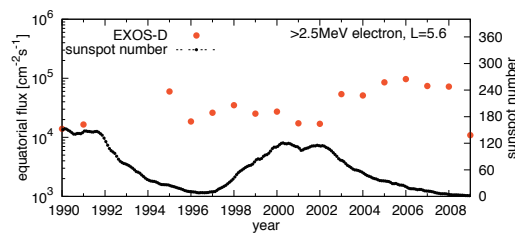


図 8 磁気赤道面上での外帯外側の電子フラックス値の年変動

あけぼのモデル

これらの解析結果から、あけぼの衛星の 1990,1991,1995-1996,1998-2009 年ののべ 15 年の観測データを使い、新たに電子放射線帯モデルを作成した (図 9)。このモデルでは、地磁気活動の指標として Dst 指数と Dst 年積算値をパラメータに用いており、巨大磁気嵐モデル、通常モデル、静穏モデルの 3 つに分類されている。巨大磁気嵐モデルは、Dst 指数が -250nT を下回る大きな磁気嵐が起こった年のデータを用いて作ったモデルである。通常モデルは、大きな磁気嵐が起こらない年のうち、磁気圏活動が活発な年のデータを用いて作成したモデルである。静穏モデルは、大きな磁気嵐が起こらない年のうち、磁気圏活動が静穏な年のデータを用いて作成したモデルである。

AE-8 モデルと比較してみると、内帯では 1 桁~2 桁程度電子フラックス値が増加している。またスロット領域では、巨大磁気嵐の有無と地磁気活動の活発さによって 1 桁程度モデルの電子フラックス値が変動する。さらに外帯の内側領域では、あけぼのモデルの静穏期と AE-8 の極小期モデルは電子フラックス値がほぼ一致していることと、巨大磁気嵐発生時には、AE-8 の極大期モデルと比べて最大 1 桁程度電子フラックス値が大きくなっていることが分かる。この領域においては、地磁気活動によって電子フラックス値のピークの位置が移動するということが分かる。最後に外帯の外側領

域においては、太陽活動の活発な時期よりも静穏な時期の方が電子フラックス値が高くなることが分かる。

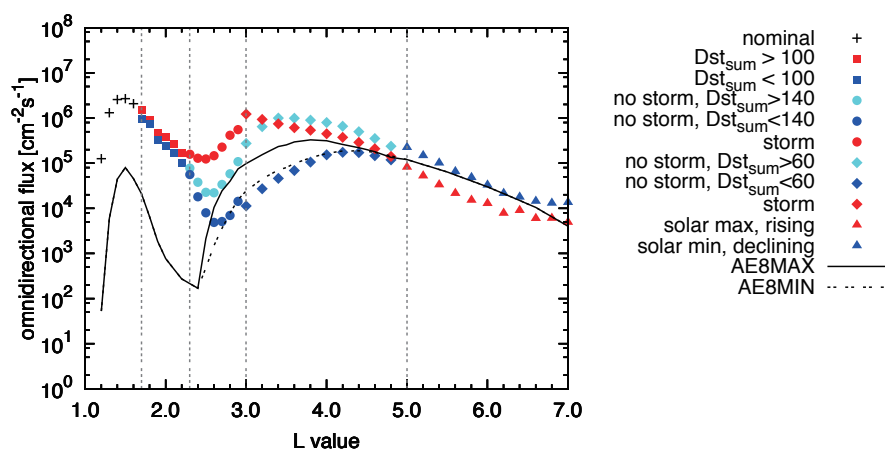


図9 作成したモデルの磁気赤道面上での全方位電子フラックス値

まとめ

あけぼの衛星の1990,1991,1995,1996,1998-2009年の約15年分のデータを使って、電子放射線帯モデルを作成した。このモデルは、最新の長期観測データを用いており、太陽活動や巨大磁気嵐の発生に対応した3つのモデルで出来ている。

参考文献

- [1] G.W. Singley and J.I. Vette: “The AE-8 Trapped Electron Model Environment,” NSSDC/WDC-A-R&S91-24, NASA/Goddard Space Flight Center (1991).
- [2] 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所, ”ISAS — ジオスペース最高エネルギー 粒子誕生の謎を追う 放射線帯の研究 / 宇宙科学の最前線”, <http://www.isas.ac.jp/j/forefront/2006/miyoshi/index.shtml>, (参照 2011-10-10)
- [3] 林 幹子 ”あけぼの衛星 (E X O S - 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