

宇宙放射線帯モデルの開発

Development of Radiation Belt model

総合技術研究本部 環境計測技術グループ

Space environment measurement Group

松本晴久、越石英樹、五家建夫

H. Matsumoto, H. Koshiishi, T. Goka

Abstract

The onboard electronic devices and astronauts on spacecrafts have many effects on the space radiation. It is one of the important issues for space mission planning to predict the space radiation environment and to evaluate it. Because the space vehicles must be designed to decrease the radiation exposure to protect devices and astronauts. Among many kinds of radiation in space, the radiation belts particles having continuously high fluxes give a large dose contribution to a near-earth space mission.

The radiation belts have been measured with various satellites and detectors. NASA's radiation belt models, AP8 (Sawyer and Vette, 1976) and AE8 (Vette, 1991) were derived from the data which had been observed in the 1960s and 1970s. In the recent, CRRES models have been developed with the data of the CRRES satellite (Gussenhoven et al., 1996). NOAA-PRO (NOAA proton) model have been developed with the data of the NOAA-TIROS satellite (Huston, 1998). POLE model have been developed with the data of the LANL's geostationary satellite (Boscher et al., 2003).

We have developed the radiation belt models (beta version) using MDS-1 data.

1. はじめに

衛星を設計する上で重要な設計条件として放射線環境がある。これまで、放射線帯粒子を評価するには、1970年代、1980年代にNASAで作成されたモデルAP8（陽子）、AE8（電子）が用いられてきた。これらのモデルは、1960年代、1970年代の衛星に搭載された検出器で観測されたデータを基に作成されている。

モデルが完成した後の1980年代に入ると、研究者の関心が太陽粒子やエネルギーのより高い分野に移り、放射線帯への研究的な意欲が薄れていった。しかし、1990年代になって米国のCRRES衛星により、大きな地磁気擾乱後に放射線帯に新たなピークが観測されたことにより、放射線帯は時間的に安定したものでなく、時に激しい現象を伴うことがわかってきた。これを機会に放射線帯の研究が活発化し、様々な機関で放射線帯の見直しの作業が実施され、例えばNOAA-PRO（低軌道陽子のみ）、POLEモデル（静止高度低エネルギー電子のみ）等の部分的モデルが提案されたがAP8やAE8を代替するモデルはまだ出来ていない。

JAXAにおいては、1999年に1980年代、1990年代に運用された「ETS-VI」、「おおぞら」、「あけぼ」に搭載された放射線計測装置による観測データを用いて、太陽活動極小期の放射線帯モデルを開発した¹⁾。更に、平成18年7月に2002年2月から2003年9月まで運用した「MDS-1（つばさ）」に搭載した放射線計測装置による観測データを用いた太陽活動極

大期の放射線帯モデル（ β 版）を開発した²⁾。このモデルには、NASAモデルの代替えだけではなく各粒子のピッチ角分布、 α 粒子のモデルを含んでいる点に新規性がある。さらに、現在放射線帯の時間変動を扱えるようモデルの改良を検討している。本稿では、静的モデルの開発と変動モデルの検討結果について述べる。

1. 研究の概要

1) 静的モデルの開発

太陽活動極大期の放射線帯モデルは、NASAが開発したAE8, AP8モデルに使用していると同じMCI1WainのL値とB/B0を用いて開発した。L値は、観測点を通る磁力線の赤道面での距離を地球半径を単位として表した値である。B/B0は、観測点の磁場の強さを赤道面での磁場の強さを割った値である。Fig 1にL=2, 3, 4, 5, 6の磁力線とB/B0=1.0, 1.1, 1.7, 3.1, 7.4の関係を示す。MDS-1衛星は、Lが1.07~10、B/B0が1.0~10の範囲のデータを取得した。

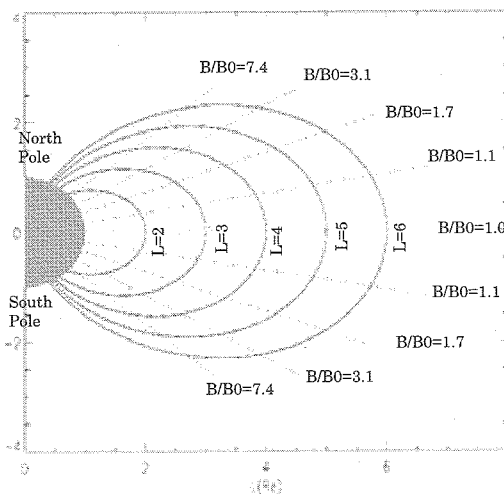


Figure 1. L Shells 2, 3, 4, 5, 6 (Solid Lines) and Lines of Constant B/B0 = 1.0, 1.1, 1.7, 3.1 and 7.4 (Dashed Line) in a Dipole Field Centered in Earth.

2) 変動モデルの検討

放射線帯粒子は、磁気嵐等で変動することが様々な論文で報告されており MDS-1 データでも確認された。これらの粒子の変動と最も相関の高いと考えられる比較的容易に入手できる磁気活動指数APと太陽風速度SWに関してL値毎にどのように変動するか調べた。

3. 成果の概要

1) 静的モデルの開発

電子、陽子共に空間的なフラックス分布の形は、NASAモデルと良く一致していたが、エネルギー分布に関しては、特に、AP8モデルに対して陽子の実測値は、低エネルギーのところでNASAモデルより1桁程度低く、高エネルギーのところでNASAモデルより数倍程度高い傾向を示していることが分かった³⁾。開発したモデルのLogフラックスのスライス図をFig 2にNASAモデルになかった各粒子のピッチ角に関しては、ピッチ角分布を $\sin^N \alpha$ でフィッティング際の係数N分布のスライス図をFig3に示す。ピッチ角分布は、電子はLが3以上、

陽子はLが2以上でフラットな分布をしており、Lが小さくなるほど係数Nは、大きくなる
ことが分かった。

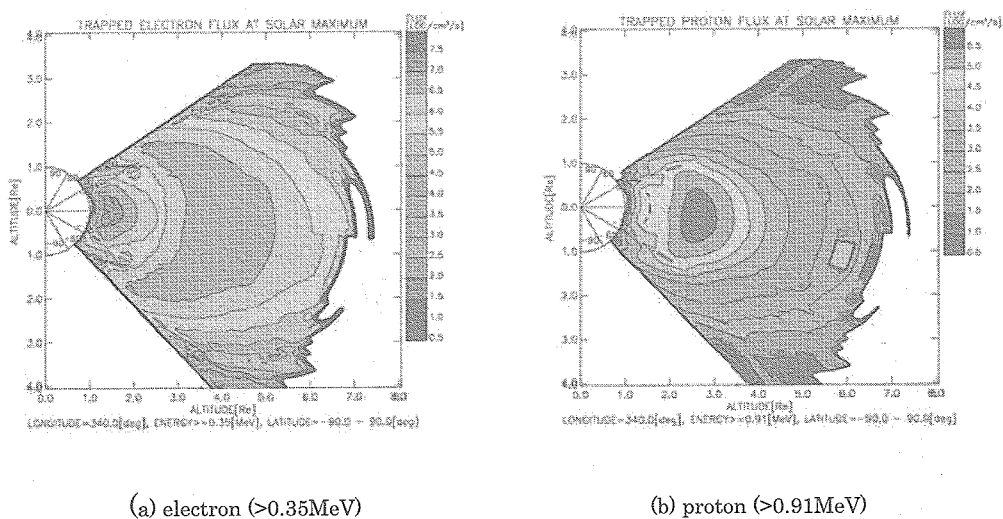


Figure 2. Contour Plot of Log Flux

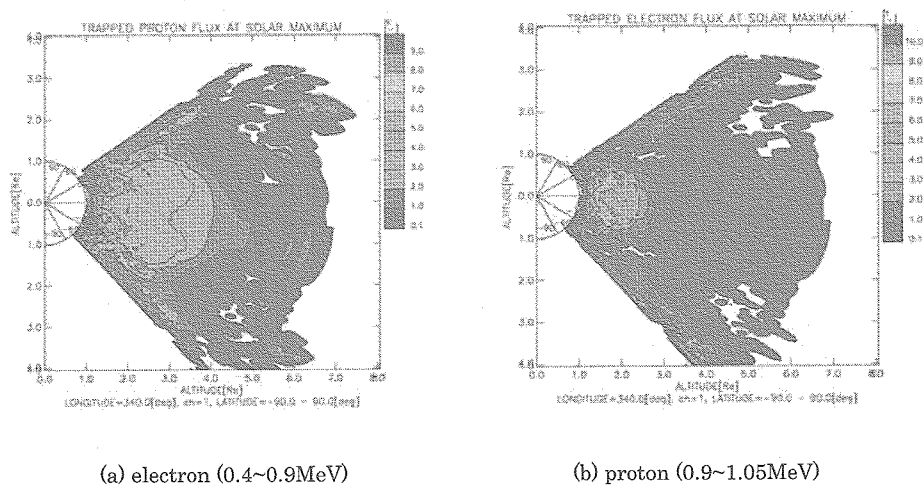


Figure 3. Countour Plot of Average Pitch-angle Coefficient N ($\sin^N \alpha$)

2) 変動モデルの検討

磁気活動指数APと太陽風速度SWの移動平均を用いてL毎の相関係数を求めた。移動平均 $t_{avg, lag}$ は、 t_{lag} を含まない t_{avg} 間の平均と定義する。定義をFig 4 に示す。

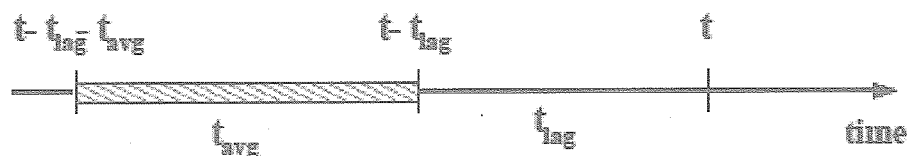
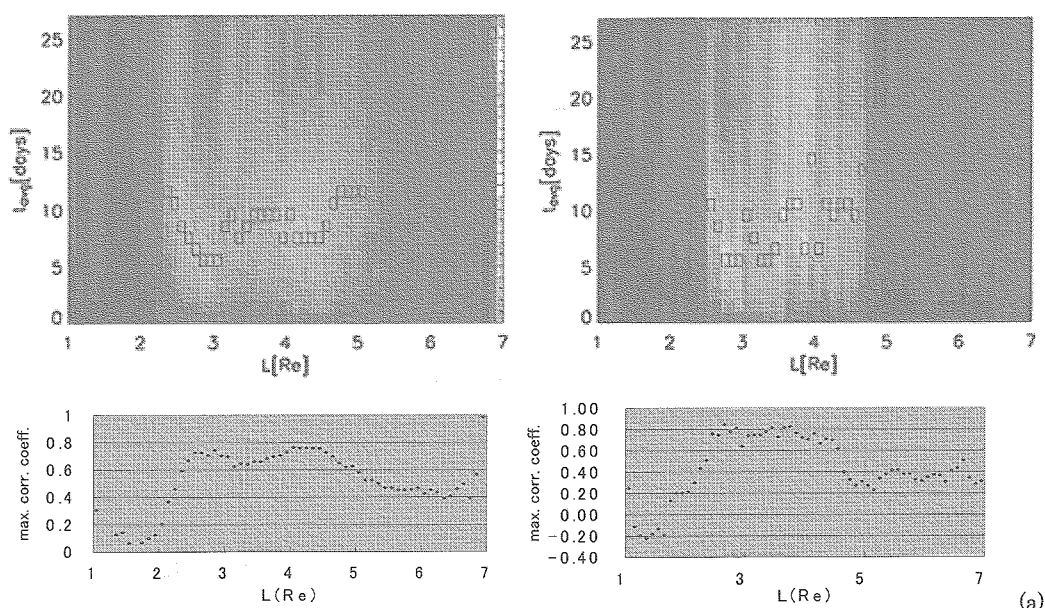


Figure 4. The definition of the average time $T_{avg, lag}$.



Electron (0.4~0.9MeV), B/B0=1

(b) Electron(0.4~0.9MeV), B/B0=2.09

Figure 5. Correlation coefficient $\log(e)$ versus $AP_{tavg, 1.00}$.

Fig 5 に 0.4~0.9MeVの電子と磁気活動指数の移動平均 $AP_{tavg, 1}$ の関係を示す。上段のコンター図は、相関係数 0 から 1 を黒から白色で表し、L値毎に 0.55 より大きく、相関係数が $AP_{0.1} \sim AP_{27.1}$ の最大値のところに口印を表示した。下段には、L値の最大相関係数を示している。L が 2.5~4.5 で強い相関があることが分かった。また、赤道面 ($B/B0=0$) より磁気緯度が高い ($B/B0=2.09$) 方がより磁気活動の影響を受けることが分かった。また、全般にわたり $AP_{10.1}$ が良い相関を示した。以上のことから 0.4~0.9MeVの電子におけるLが 2.5~4.5 の変動に影響を与える磁気嵐の期間は、10 日間程度であるといえる。

Fig 6 に 0.4~0.9MeVの電子と太陽風速度の移動平均 $SW_{tavg, 1}$ の関係を示す。太陽風の影響は、L が 4 まで影響を与えており、影響を与える期間は 2~3 日であることが分かる。また、静止軌道付近では、相関係数が 0.7 以上と非常に強い相関があることが分かった。

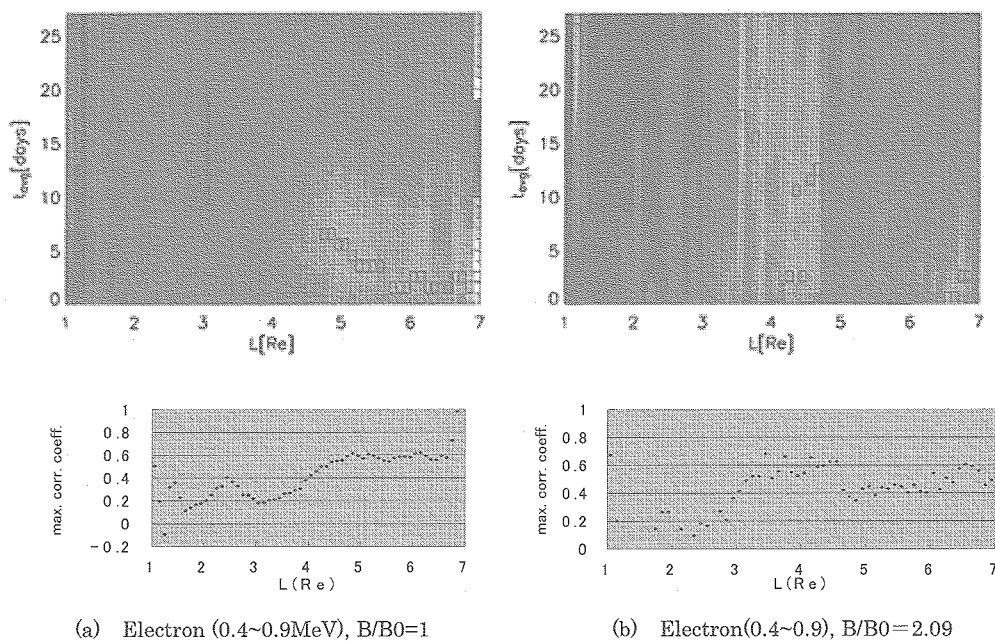


Figure 6. Correlation coefficient $\log(e)$ versus $SW_{\text{tavg},1.00}$.

Fig 7 に 0.4~0.9MeV の陽子と磁気活動指数の移動平均 $AP_{\text{tavg},1}$ の関係を示す。陽子は、当初磁気嵐の変動を受けづらいと思われたが、解析結果から非常に強い相関があることが分かった。変動に影響を与え磁気嵐の期間は 24~25 日と長期間であることが分かった。

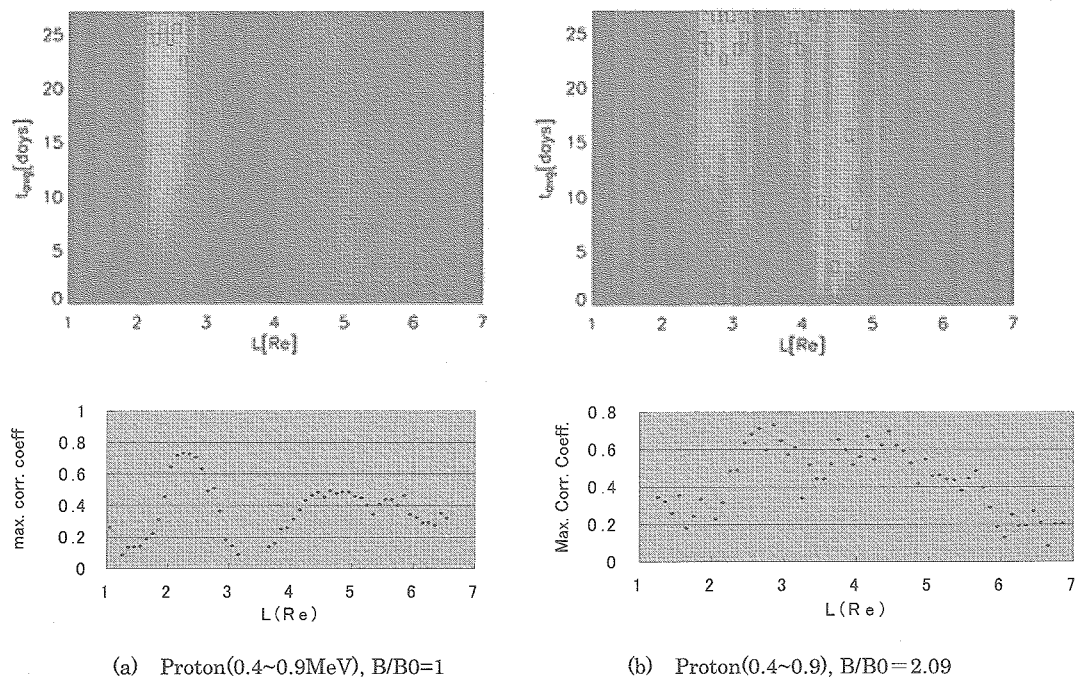


Figure 7 Correlation coefficient $\log(e)$ versus $AP_{\text{tavg},1.00}$.

Fig 8 に 0.4~0.9MeVの陽子と太陽風速度の移動平均 $SW_{\text{avg},1}$ の関係を示す。磁気活動指数の移動平均 $AP_{\text{avg},1}$ と同様に太陽風についても相関があることが分かった。

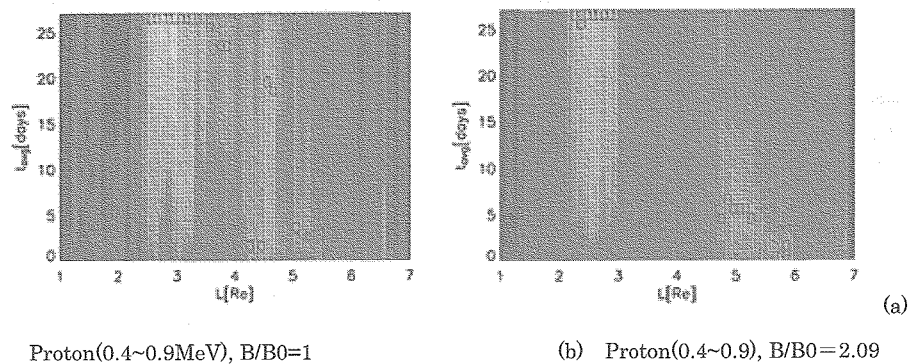


Figure 8 Correlation coefficient $\log(e)$ versus $SW_{\text{avg},1.00}$.

4. まとめ

静的モデルの β 版を開発することができた。また、磁気活動指数 AP と太陽風速度 SW の移動平均を用いて放射線帯モデルの変動を予測することの可能性(宇宙天気予報や衛星運用警報への応用の可能性)を得ることができた。MDS-1 の観測は、1年半と短いためモデルの精度が気になるところだったが、磁気活動指数 AP と太陽風速度 SW の移動平均からフラックスを内挿する式を求めることによりモデルの精度を保障できる可能性を得た。

[参考文献]

- 1) Goka, T., H. Matsumoto, S. Takagi, Radiation Measurements, Vol. 30 (1991) 617-624.
- 2) Matsumoto, H., H. Koshiishi, T. Goka, MDS-1 Data Base and Radiation Belts Model, CO.1-0015-16, 36th COSPAR, Beijing China, 2006
- 3) 松本晴久, 越石英樹, 五家建夫, 「つばさ」衛星データと放射線帯モデル, 宇宙放射線, Vol.4, No.2, 2004