

太陽活動に伴う放射線帯粒子の長期変動

○松本 晴久 (JAXA)

1. 目的および背景

放射線帯粒子には、電子、陽子が存在し、電子は、磁気嵐等で短時間に数ケタ Flux が変動する場合があります、これらの環境変化は、帯電現象を引き起こすなど宇宙機の不具合の原因となる場合があります。一方、捕捉陽子は、最大数 100 日の時間スケールでかなり安定しているが、太陽活動サイクルという長期間のスケールで見ると変動していることが分かってきている^{1,2)}。放射線帯陽子は、宇宙飛行士の活動や低軌道衛星の潜在的なリスクとなっており長期的変動を把握することは重要である。本報告では、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT: Greenhouse gases Observing Satellite) の放射線観測データによる、捕捉陽子の長期変動、観測データと放射線帯陽子モデルの比較及び、現在開発している放射線帯陽子モデルの開発について報告する。

2. GOSAT 衛星搭載 TEDA

GOSAT 衛星に搭載した技術データ取得装置 (TEDA) は、軽粒子観測装置 (LPT) と重イオン観測装置 (HIT) により構成され、衛星の障害につながる軌道上の高エネルギー荷電粒子計測を目的として開発された。GOSAT 衛星は、高度 667km、軌道傾斜角約 98 度、太陽同期軌道 (回帰日数 3 日) で運用され、2009 年 1 月 23 日～2018 年 11 月 (現在) まで 9 年間の放射線環境データを取得することができている。TEDA の装置の搭載位置を図 1 に示す。本報告では、放射線帯陽子環境計測を目的として搭載した LPT1 のデータ結果を中心に述べる。

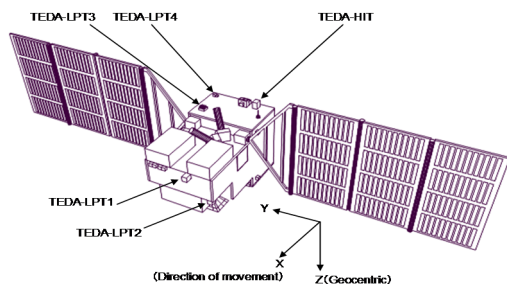


図 1 GOSAT 衛星と TEDA 搭載位置

3. 観測期間と太陽活動

GOSAT で太陽活動極小期→極大期→極小期の約 9 年間のデータを取得することができた。図 2 に太陽電波強度 F10.7 と観測された 3 種類のエネルギー CH における L 値毎の 1 ケ月平均 Flux 値の推移を示す。太陽活動極大期に向かう 2009 年から 2015 年にかけて少しずつフラックスが減少している。L 値が 1.7~2.0Re においてその傾向は顕著に表れている。また、太陽活動極大期から極小期に向かう 2015 年ごろからは L 値の大きいものから先に増加に転じている。F10.7 のデータから太陽極大期のピークは、2014 年 6 月と推測されるが、Flux の減少は 2015 年初めごろまで続いており、半年程度のずれが生じている。また、低エネルギー CH ほど 2012 年～2014 年に短期間変動が確認された。これは、この期間太陽フレアが多く発生したことにより、放射線帯へ陽子が入り込み一定期間捕捉されていると推測されるが、夏季に増加している理由は不明である。また、2015 年からは、それまでの変動幅に比べフラックスが大きく増加している。原因として、太陽活動の低下により大気密度が低くなったことによるもの、銀河宇宙線の増加 (中性子崩壊を含む) によるものなどが考えられる。また、低いエネルギーほど変化も大きく、この時期、磁気嵐が頻繁に発生しており磁気嵐の影響も加わっていることも予想される。

4. モデルの比較

観測されたデータと業界標準として使用されている放射線帯モデル AP8 及び AP9 との予測値を比較した。まず、エネルギースペクトルの比較を図 3 に示す。太陽活動極小期 (2017 年 12 月) に関しては、実測値と AP8MIM モデル予測値は良く一致している。一方、太陽活動極大期 (2015 年 1 月) では、AP8MAX モデル予測値は、低エネルギーで食い違いが大きい。新しく開発されている放射線帯陽子モデル AP9 モデルは、太陽活動の極小期、極大期の区別がなくなったため、MEN で評価した。結果は、太陽活動極小期の観測データに近い予測値で、低エネルギーでは AP8 モデルよりも一致するが、他のエネルギーは全体的に AP8 モデルよりも食い違っている。次に、太陽活動極小期観測データ (2018 年 1 月) と AP8MIN モデ

ルの空間分布の比較を図4に示す。SAAのピーク位置は、モデルが作成された磁場分布の変化を考慮すると妥当な値となっている。実測ではモデルほど位置(L値)によるFluxの変化が大きくなく、なだらかな分布をしていることが分かった。

また、図5に太陽活動極大期(2015年1月)の分布データを示す。図から分かるように太陽活動による変化は、大気密度の増加等によるFluxの減少と推測され40keV~20MeV放射線帯陽子のピークであるL値(1.8~2.0Re)の範囲で顕著となって表れている。

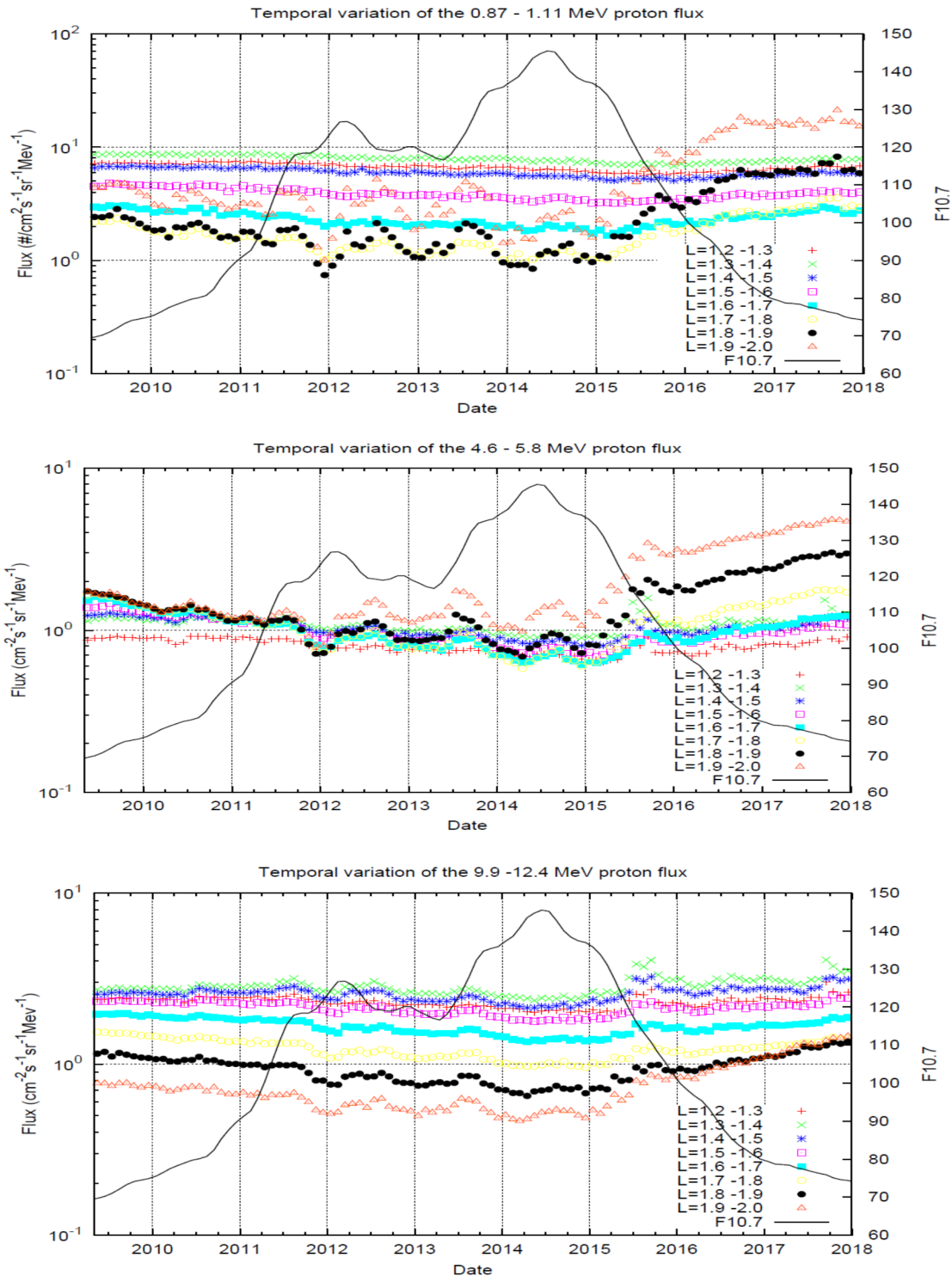


図2 L値の違いによる陽子フラックスの変動

実線は、同じ期間の太陽電波強度F10.7の13か月移動平均を示す。

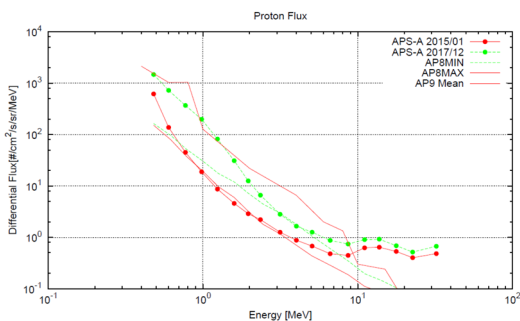


図3 観測データとモデル予測値の比較

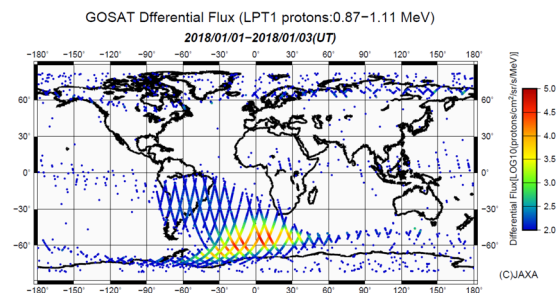
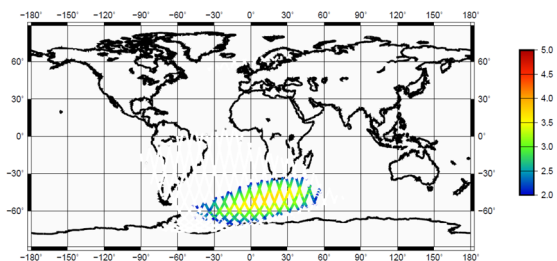


図4 AP8MINモデルと実測データの比較
上段：モデル、下段：実測値

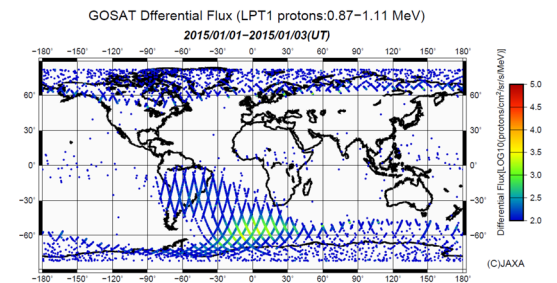


図5 太陽活動極大期の実測値

5. 陽子モデル開発

GOSAT 衛星で観測した陽子 Flux データを基に太陽活動の変動を模擬できる放射線帯陽子モデルの開発を実施している。変動パラメータとしては、例えば大気密度等が考えられ、5.1 項に示す式(1)の太陽活動変動係数 k を求めることができれば Flux の変動予測が可能となる。

5.1 全方向エネルギー微分フラックス

AP8 モデルなどと同じように Omni_flux は以下のように定義できる

$$\text{omni_flux} = k \times 4\pi \int_0^{\pi/2} f(B, L, \alpha) \sin(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

ここで、omni_flux: 全方向フラックス (/cm²/s)、 f : ピッチ角方向のフラックス (/cm²/s/sr)、 L : L 値 (Re)、 B : 磁場(gauss)、 α : ピッチ角、 k は、大気密度等による係数である。

5.2 ピッチ角方向のフラックス

ピッチ角方向のフラックス $f(B, L, \alpha)$ は、Badhwar と konradi³⁾による以下の式を利用している。

$$f(B, L, \alpha) = K \left(\frac{\sin(\alpha)}{\sqrt{B}} - \frac{\sin(\alpha_L)}{\sqrt{B}} \right) e^{-\beta \left(\frac{\sin(\alpha)}{\sqrt{B}} - \frac{\sin(\alpha_L)}{\sqrt{B}} \right)} \quad (2)$$

ここで、 K 及び β は形状パラメータである。

式(2)の算出例を図 6、式(1)から求めた任意の位置 (L, B) に対する全方向フラックスの算出例を図 7 に示す。また、これらの結果から求めた静穏時の放射線帯スライス例を図 8 に示す。

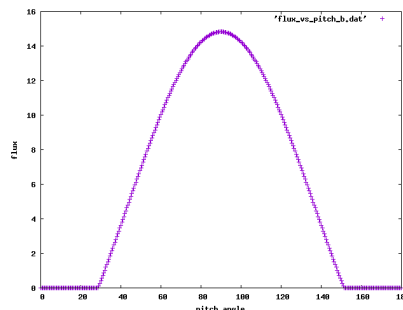


図6 ピッチ角方向のフラックスの例

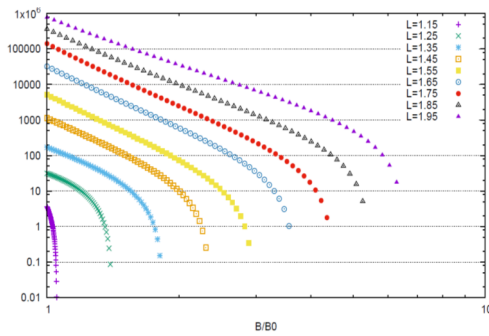


図7 全方向フラックス例

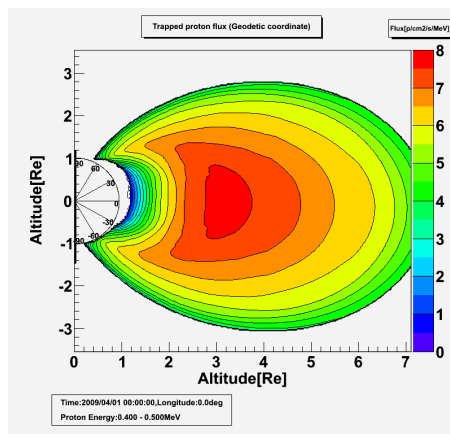


図8 放射線帯スライス例

6. まとめ

GOSAT 搭載 LPT の実測値は、太陽活動極大期の時 AP8MAX と良く一致した。MAX と MIN の変化幅は、数 MeV 以上では、観測値と一致する結果となっている。

る。AP9 MEAN は、AP8 に比べ精度が悪い結果となった。観測値と AP8 モデルの比較において、太陽活動極大期における数 MeV 以下のモデルの改良が必要であることが分かった。

太陽活動 1 サイクル 11 年に近い約 9 年間という長期間のデータにより、太陽活動にともなう、変化（大気密度の影響）が観測された。また、太陽極大期から極小期に向かう 3 年間で、数 MeV の陽子で 5 倍程度増加するフラックスの変動が観測された。低いエネルギーほど変化が大きい。これらの、原因は、大気密度以外に磁気嵐、銀河宇宙線等に関係するものと推測される。今後、重イオン観測装置のデータを用いるなど引き続き要因を明らかにしていく。

まず、太陽活動による変化を考慮した、放射線帯陽子変動予測モデルを開発していく。

最後に、貴重なデータを取得するのにご尽力されている GOSAT 衛星運用関係者の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) S.L.Huston, G.A.Kuck and K.A.Pitzer: SOLAR CYCLE VARIATION OF THE LOWALTTITUDE TRAPPED PROTON FLUX, Adv. Res. 21, 12, pp. 1625-1634, 1998
- 2) Murong Qin, 他, Solar cycle variations of trapped proton flux in the inner radiation belt, JGR Space Physics, Vol.119, Issue 12, December 2014.
- 3) Gautam D Badhwar and Andrei Konradi: Conversion of Omnidirectional Proton Fluxes into a Pitch Angle Distribution, J. Spacecraft, 27, 3, pp. 350-352