

だいち衛星(ALOS)軌道に於ける宇宙放射線環境評価 - 計測結果と太陽活動極小期宇宙放射線環境モデルの比較 -

丸山 健太*[1]、越石英樹[2]、松本晴久[2]、五家建夫[2]

[1] 鹿児島大学、 [2] 宇宙航空研究開発機構

Evaluation of the space radiation environment in the orbit of the DAICHI satellite (ALOS)

- Comparison of the measurement results with the space radiation environment models during the solar activity minimum period -

Kenta Maruyama* [1], Hideki Koshiishi [2], Haruhisa Matsumoto [2], Tateo Goka [2]

[1] Kagoshima Univ., [2] Japan Aerospace Exploration Agency

概要

今現在、地球周りの放射線環境を模擬したモデルが多数存在している。放射線帯に捕捉されている陽子線や電子線に関しては AP-8, AE-8 モデル、太陽陽子線に関しては JPL-1991, SOLPRO モデル、銀河宇宙線に関しては CREME モデルなどである。しかし、これらの放射線モデルはどれも 1990 年代よりも昔のデータに基づいて作成されており、データの精度があまり良くないという問題点がある。また、モデルによる計算結果が実際の放射線環境とはズレが生じていることがわかってきており、さまざまな問題点や改良すべき点が報告されている。それらの問題点や改善点を考慮した新しい放射線モデル作成の提案が出ているが、まだまだ議論や観測データが必要とされている。

そこで本研究では、新しい放射線モデル作成に有益な情報を得ることを目的として、だいち衛星によって観測されたデータとこれらのモデルの計算結果を用いることで、だいち衛星の軌道に於いてという限られた範囲ではあるが、既存モデルと実際の放射線環境との比較を行った。

1. イントロダクション

地球周りの放射線環境は大きく分けると、捕捉粒子線、太陽陽子線、銀河宇宙線に分けられる。

捕捉粒子線とは放射線内帯に捕捉されている電子線、陽子線のことであり、それぞれに関して AE-8⁽¹⁾、AP-8⁽²⁾という放射線モデルが存在する。また、太陽陽子線とは太陽フレアなどに伴い太陽から飛来してくる陽子線で、これに関しては JPL-1991⁽³⁾、SOLPRO⁽⁴⁾という放射線モデルが存在する。銀河宇宙線とは太陽系外から飛来してくる粒子線で、これに関しては CREME⁽⁵⁾というモデルにより計算される。

なぜこのような放射線モデルが必要なのだろうか。近年、宇宙機に搭載されるような半導体素子はより高性能で小型化されてきているが、それに伴い放射線に対する感受性が高くなり、トータルドーズやシングルイベントと呼ばれる劣化や誤動作を衛星に引き起こすことがある。従って、これらのモデルを用いて軌道上での放射線環境を予測することが重要となってくる。

しかし、これらのモデルはどれも 1990 年代よりも前の観測データに基づいて作成されているためにデータの精度が悪くという問題点がある。また、各国の衛星による観測デ

ータとつき合わせてみると、実際の放射線環境とはズレが生じているという報告が多数されている。

そこで本研究では、だいち衛星によって観測されたデータとモデルによる計算結果を用いることで、だいち衛星の運用されている軌道に於いてという限られた範囲ではあるが、既存モデルと実際の放射線環境との比較を行う。

2. 観測装置

本研究で使用した観測データはだいち衛星 (ALOS) に搭載された技術データ取得装置 (TEDA: Technical Data Acquisition equipment) により観測された。だいち衛星は 2006 年 1 月 24 日に種子島宇宙センターより打ち上げられた地球観測衛星であり、赤道上高度: 691.65km、軌道傾斜角: 98.16° の太陽同期準回帰軌道で運用されている。技術データ取得装置は衛星周りの放射線環境を知る目的で搭載されており、軽粒子観測装置 (LPT: Light Particle Telescope)、重イオン観測装置 (HIT: Heavy Ion Telescope) から構成される。本研究では LPT により観測された電子、陽子のデータを用いて解析を行った。LPT の主要緒元を表 1. に示す。

表 1. 軽粒子観測装置 (LPT) の主要緒元

観測粒子	観測エネルギー範囲 (MeV)
電子	0.100 - 4.122
陽子	5.9 - 25.7
He3	20.7 - 94.0
He4	23.5 - 96.0

3. 観測結果

図 1、図 2 にだいち衛星により観測された陽子、電子フラックスの地理的分布を示す。

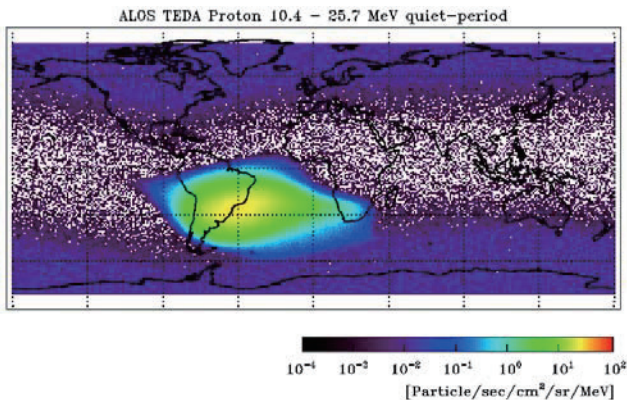


図 1. 陽子フラックスの地理的分布 (静穏期)

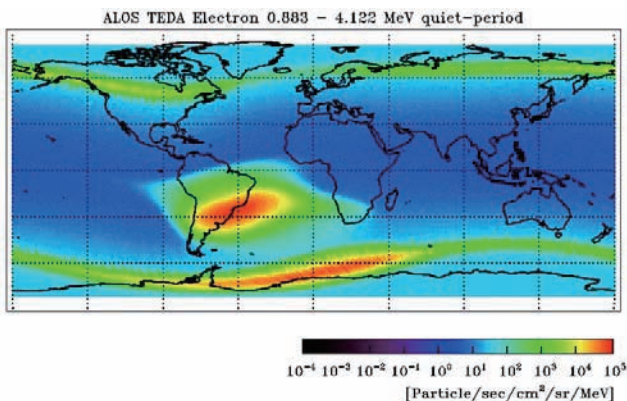


図 2. 電子フラックスの地理的分布 (静穏期)

今後、だいち衛星により観測されたデータと既存モデルの計算結果とを比較するために、観測データを平均したモデルを作成する。ここで問題となってくるのは SAA (South Atlantic Anomaly) 領域と呼ばれる放射線内帯の一部が低軌道に入り込んでいる領域 (図 1、2 のブラジル上空に見られる粒子フラックスの値の大きい領域) が存在することである。SAA 領域とそれ以外の領域とでは放射線環境が大きく異なるため、観測データの平均モデルを作成するにはこれらを分けて考える必要がある。また電子については放射線外帯の一部が低軌道に入り込んでいる Horn 領域 (図 2 の高緯度域で見られる粒子フラックスの値の大きい領域) も分けて考える必要がある。

したがって、陽子については SAA 領域とそれ以外、電子については SAA 領域と Horn 領域とそれ以外の領域でそれぞれ平均モデルを作成していく。

図 3、図 4 に太陽活動の比較的静かな静穏期に於ける SAA 領域についての陽子、電子フラックスの地理的分布と IGRF モデル⁽⁶⁾により計算された磁場との関係を示す。

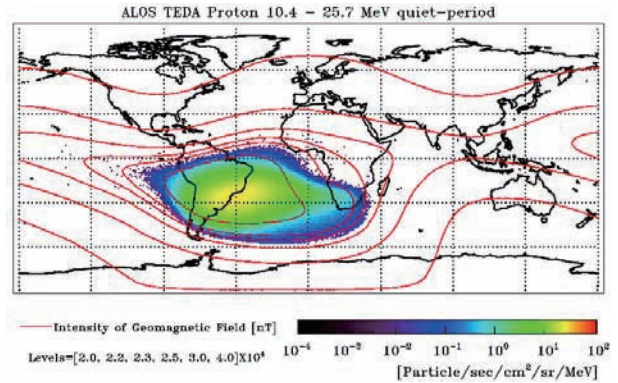


図 3. 陽子フラックスの地理的分布 (SAA 領域)

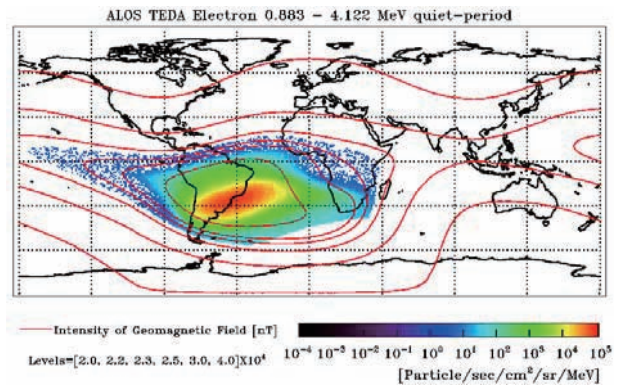


図 4. 電子フラックスの地理的分布 (SAA 領域)

SAA 領域に於いては、陽子、電子の粒子フラックスは磁場に沿って分布している。よって SAA 領域に於ける平均モデルを作成する際には、粒子フラックスと磁場の相関関係を利用することにする。

同様に SAA 領域以外に於いては、粒子フラックスと Geomagnetic Cut-Off Rigidity の相関関係を利用し、Horn 領域に於いては粒子フラックスと経度の相関関係を利用してそれぞれの領域に於いて陽子と電子の平均モデルを作成する。

また、だいち衛星の運用期間は太陽活動極小期にあたるために太陽活動は比較的静穏なのだが、2006 年 12 月に太陽フレア/CME (Coronal Mass Ejection) が多数発生している。したがって、太陽フレアなどの太陽活動が活発な時期をフレア期、それ以外の時期を静穏期として分けて解析を行った。

4. 作成した平均モデルについて

図5、図6にSAA領域に於ける陽子、電子フラックスと磁場の関係を示す。図の横軸は磁場の強さ、縦軸は粒子フラックスで表されており、黒色は静穏期、赤色はフレア期のデータであることを示している。また、エラーバーによりその点のデータがどれほどのバラつきを持ったデータの平均値なのかということを示している。

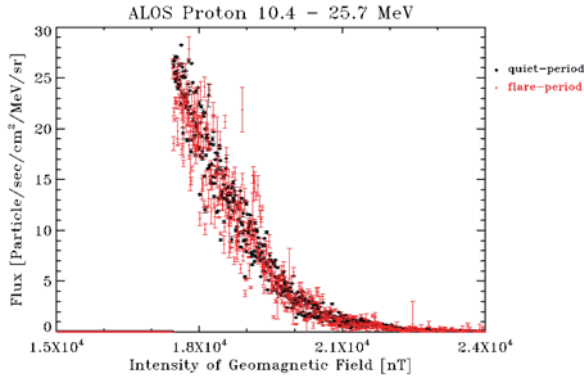


図5. 陽子フラックスと磁場の関係 (SAA領域)

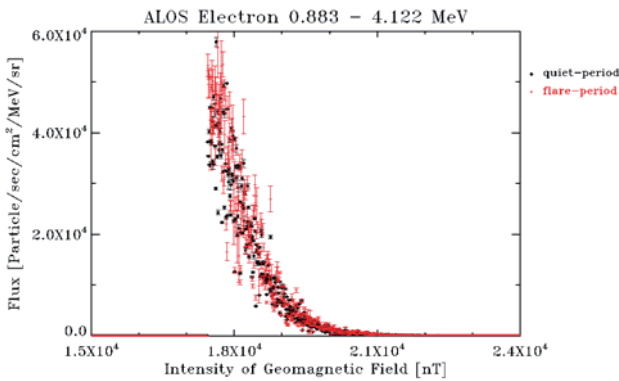


図6. 電子フラックスと磁場の関係 (SAA領域)

陽子、電子ともに粒子フラックスと磁場に良い相関関係が見られる。静穏期とフレア期のデータを比べるとあまり大差ないように見える。これはSAA領域に捕捉されている粒子が放射線内帯の粒子であり、放射線内帯は太陽フレアなどの影響を受けにくい安定な領域であるためと考えられる。しかし、データのバラつきを見てみるとフレア期のデータのバラつきが大きいため、太陽フレアなどの影響をいくらかは受けているようである。

図5、図6を多項式でフィッティングしたものを図7、図8に示し、これをSAA領域に於ける平均モデルとする。

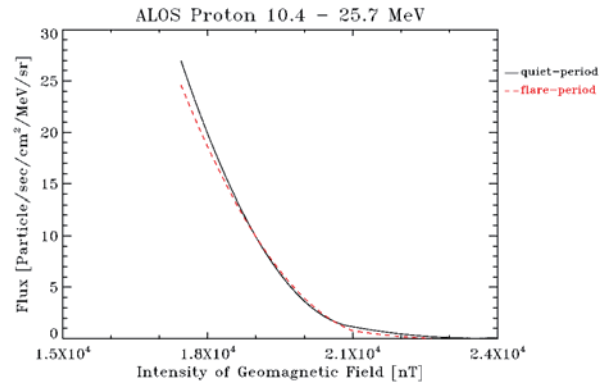


図7. 平均モデル (SAA領域、陽子)

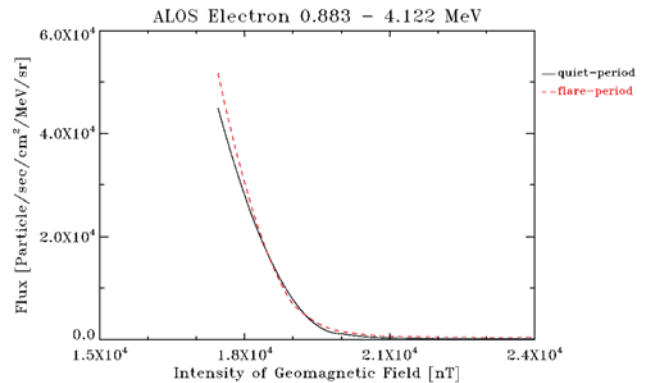


図8. 平均モデル (SAA領域、電子)

同様に作成したSAA領域以外に於ける平均モデルを図9、図10に示す。フレア期のデータでRigidityが小さい領域、つまり極域で粒子フラックスの値が大きいのは、磁力線の開いた極域に太陽フレアなどに伴う粒子が降り込んできているためであると考えられる。電子のデータが一部除かれているのは、Horn領域の定義としてRigidityが0.1-3GVという定義をしているためである。

Horn領域に於ける静穏期、フレア期の平均モデルを図11、図12に示す。図の青色は北極側のHorn領域、橙色は南極側のHorn領域の平均モデルを示している。粒子フラックスの値の違いはあるが、静穏期とフレア期とは同じような形を持った平均モデルが得られた。

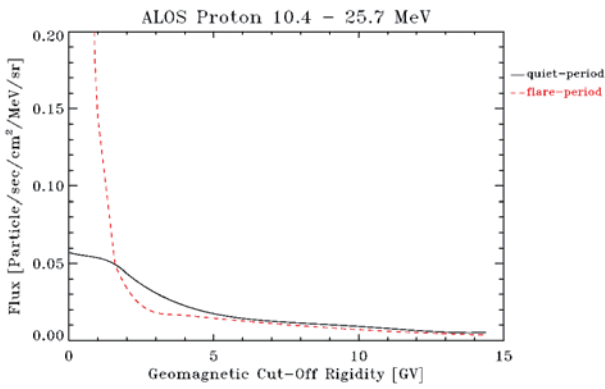


図9. 平均モデル (SAA 領域以外、陽子)

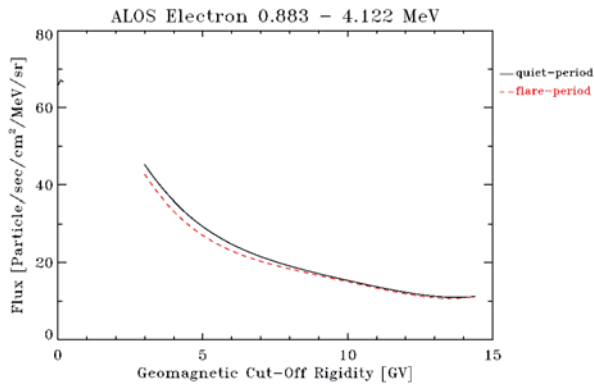


図10. 平均モデル (SAA 領域以外、電子)

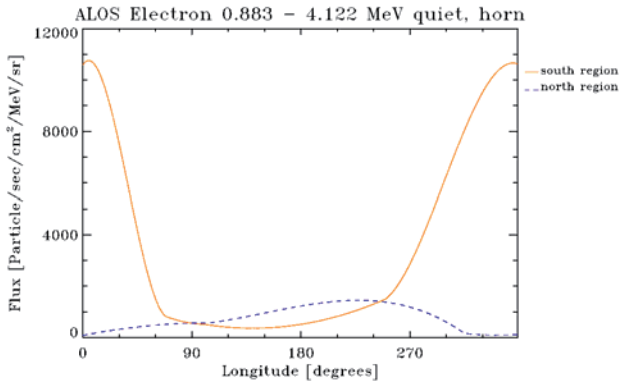


図11. 平均モデル (Horn 領域、静穏期)

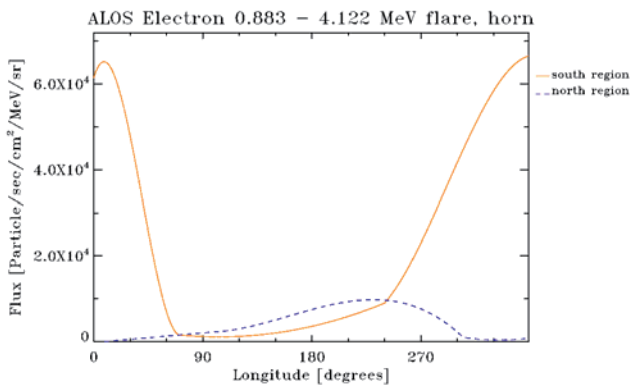


図12. 平均モデル (Horn 領域、フレア期)

5. 既存モデルとの比較

次に上記のようにして作成した平均モデルと既存モデルによる計算結果とを比較してみる。

図13、図14にSAA領域に於ける陽子の平均モデルと既存モデルによる計算結果を示し、図15、図16にSAA領域に於ける電子の平均モデルと既存モデルによる計算結果を示す。ここではそれぞれを比較しやすいように縦軸のスケールを合わせてある。また、だいち衛星の観測データは太陽活動極小期にあたるデータであるため、既存モデルでは太陽活動極小期のモデルであるAP8MINの計算結果を比較対象としている。

陽子、電子についてそれぞれ比較してみると、陽子については既存モデルが平均モデルよりも過大評価、電子については既存モデルが平均モデルよりも過小評価しているという結果になった。

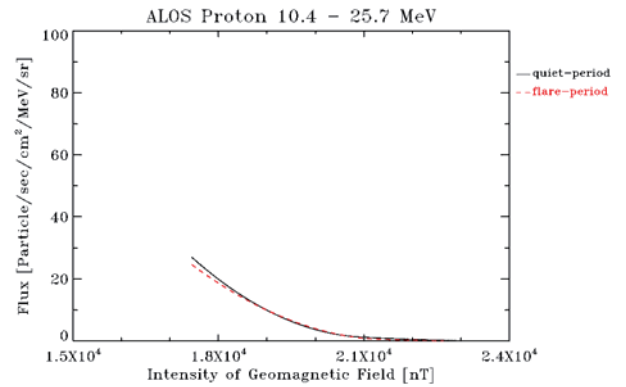


図13. 平均モデル (SAA 領域、陽子)

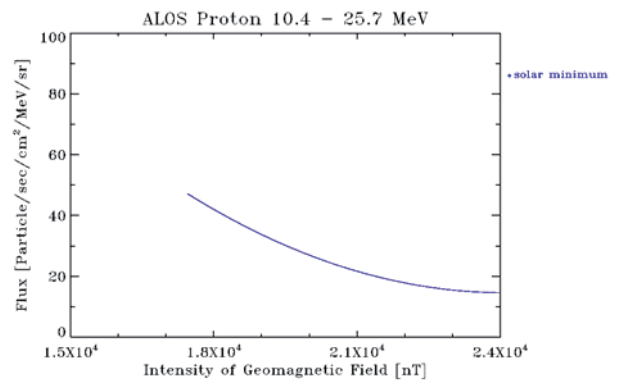


図14. 既存モデル (SAA 領域、陽子)

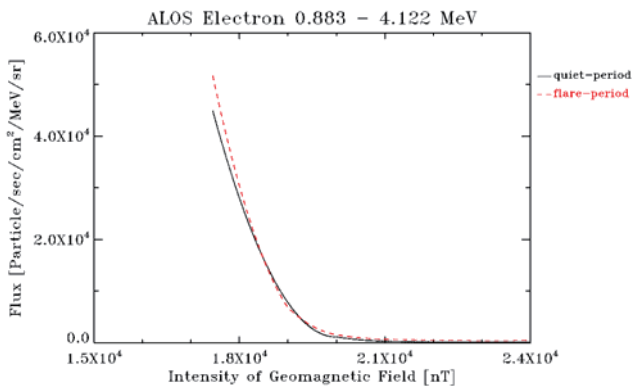


図 15. 平均モデル (SAA 領域、電子)

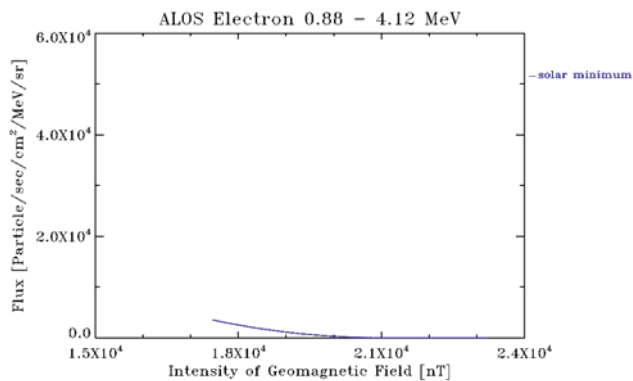


図 16. 既存モデル (SAA 領域、電子)

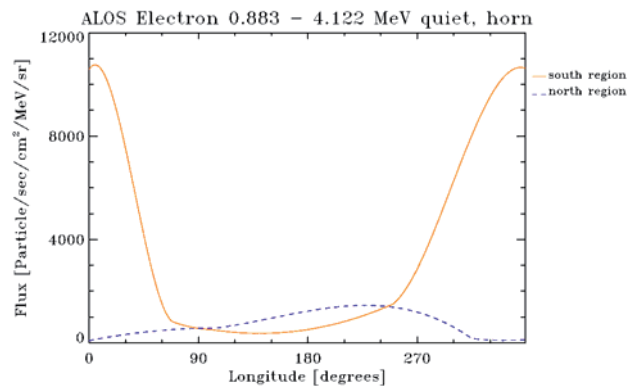


図 17. 平均モデル (Horn 領域、静穏期)

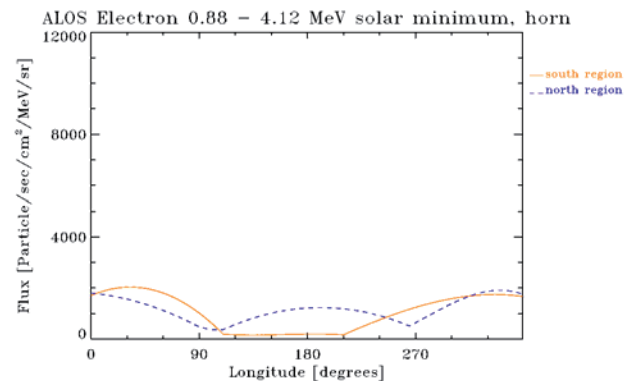


図 18. 既存モデル (Horn 領域、極小期)

SAA 領域以外に於いては、陽子に関してはいくつかの既存モデルが存在するが、電子に関しては存在しない。陽子の既存モデルもだいち衛星のような低軌道に関してはあまり良い計算結果が得られず、観測データと比較するにしても極域のごくわずかな領域でしか比較することができない。また、このような低軌道に於ける放射線環境は SAA 領域による影響が大半を占めており、それ以外の領域による影響は極めて小さい。

そこで本研究では SAA 領域以外に於いては平均モデルと既存モデルとの比較を行わないこととし、既存モデルとしては AP-8、AE-8 モデルを用いて比較を行っていく。

図 17、図 18 に Horn 領域に於ける電子の平均モデル (静穏期) と既存モデルによる計算結果を示す。ここでもそれぞれを比較しやすいように縦軸のスケールを合わせてある。既存モデルとしては太陽活動極小期のモデルである AE8MIN の計算結果を比較対象としている。

比較してみると、北極側ではモデルの形も粒子フラックスの値もほぼ一致していると言えるが、南極側では既存モデルが平均モデルよりも過小評価しているという結果となり、SAA 領域と同様の結果が得られた。

6. 粒子フルエンスの比較

これまでの結果を受け、平均モデル、既存モデルを粒子フルエンスを用いて比較する。

粒子フルエンスというのは粒子フラックスを時間方向に積分したもので、ある軌道に於いてどれだけの放射線環境に曝されてきたのかというを示す値である。実際に衛星の設計などで耐放射線環境を考える際には、設計寿命の間でどれだけの放射線環境に曝されるかということが問題となってくるため、放射線モデルにより粒子フルエンスを計算することは耐放射線環境設計において非常に重要なものである。

図 19、図 20 に 1 年 4 ヶ月分の陽子、電子の粒子フルエンスを示す。黒は平均モデルにより計算された粒子フルエンス、赤は実際にだいち衛星により観測された実測値、青は既存モデルにより計算された粒子フルエンスを示している。既存モデルにより計算された結果には SAA 領域以外の計算結果が含まれていないため、赤と黒の点線により SAA 以外の領域を除いた平均モデルの計算結果、実測値を示している。

また、既存モデルの結果は太陽活動極小期のモデルで計算したものであり、太陽フレア/CME の影響はほとんど含まれていない。一方、平均モデル、実測値では 2006 年 12 月

に複数発生した太陽フレア/CME の影響でその期間において急激に粒子フルエンスが増大している。

陽子について SAA 領域以外を除いた平均モデル、実測値の計算結果 (図の点線で表されている結果)、つまり SAA 領域のみでの計算結果では、太陽フレア/CME による影響が見られない。これは陽子が太陽フレア/CME の影響を受けるのは主に極域であることによるものである。

一方、電子について SAA 領域以外を除いた平均モデル、実測値の計算結果では太陽フレア/CME による影響を受けているように見える。これは電子では SAA 領域以外を除いても Horn 領域が含まれているためである。

つまり、陽子では太陽フレア/CME により主に極域で粒子フラックスが増大するが、電子では極域での粒子フラックスの増大よりも、Horn 領域での増大の影響が大きいということになる。

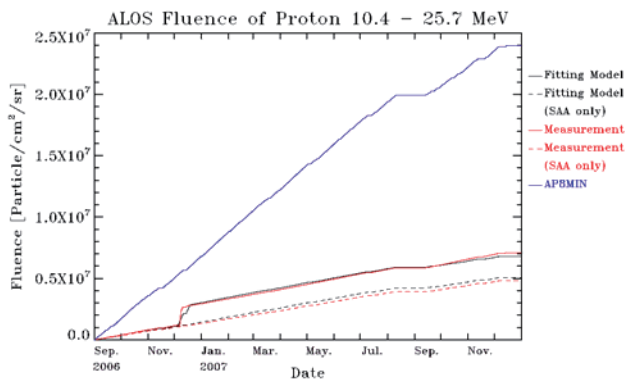


図 19. 陽子の粒子フルエンス

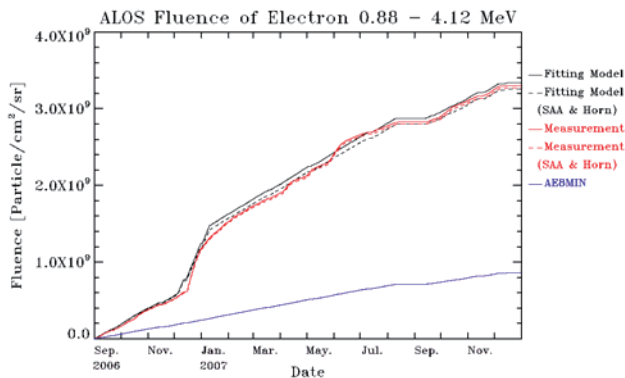


図 20. 電子の粒子フルエンス

陽子について見てみると、既存モデルが実際の放射線環境を 1 年間換算で約 4.6 倍大きく見積もっているという結果になる。

電子については、既存モデルが実際の放射線環境を 1 年間換算で約 1/4 倍小さく見積もっているという結果になる。

7. まとめと課題

地球周りの放射線環境を模擬するモデルが多数存在しているが、どのモデルも 1990 年代よりも昔のデータに基づいて作成されており、データの精度があまり良くないという問題点がある。また、これらのモデルにより計算された結果と実放射線環境との間にズレが生じているという報告もなされており、さまざまな問題や改善点が残されている。そこでこれらの問題や改善点を考慮した新しい放射線環境モデルを作成しようという試みがあるのだが、まだ完成には至っていない。

そこで本研究では、新しい放射線環境モデルが作成されるまでの間に実際の放射線環境を知ることが目的とし、だいち衛星の軌道に於いてという限られた範囲ではあるが、実際に衛星によって取得された観測データと既存モデルで計算された結果との比較を行った。

結果として、太陽活動極小期、高度約 700km の低軌道において、AP8MIN は陽子の放射線環境を 1 年間換算で約 4.6 倍過大評価しており、AE8MIN は電子の放射線環境を 1 年間換算で約 1/4 倍過小評価しているという結果が得られた。

今後の課題として、だいち衛星の観測データのみでは全ピッチ角をカバーしきれていないため、ピッチ角の分布を考慮した解析が必要であるということがある。また、本研究では粒子フルエンスを用いて既存モデルと実放射線環境との比較を行ったが、より実用的な新放射線モデル作成のためにはスペクトルを用いての比較結果が必要となる。

参考文献

- (1) D.M. Sawyer, J.I. Vette: "AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum", 1976
- (2) J.I. Vette: "The AE-8 trapped electron model environment", 1991
- (3) J. Feynman et al.: "Interplanetary proton fluence model - JPL 1991", Journal of Geophysical Research (ISSN 0148-0227), vol. 98, no. A8, p. 13,281-13,294., 1993
- (4) E.G. Stassinopoulos: "SOLPRO: A computer code to calculate probabilistic energetic solar proton fluences", 1975
- (5) J.H. Adams Jr. et al.: "Cosmic ray effects on microelectronics. Part 1: The near-Earth particle environment", 1981
- (6) J. Geomag. Geoelectr.: "International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision", IAGA Division V Working Group 8, 43, 1007-1012, 1991