

新捕捉放射線帯モデルの宇宙機設計適合性に関する研究

○市丸慎一郎, 木本雄吾 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)

Study on the Spacecraft Design Suitability of New Van Allen Radiation Belt Models
Shinichiro Ichimaru and Yugo Kimoto (Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words: Van Allen Radiation Belt, IRENE, AE9/AP9, AE8/AP8

Abstract

The AE8/AP8 model simulates the Van Allen Radiation Belt model and is currently widely used. However, IRENE, including its successor AE9/AP9, has been released. IRENE expands the orbital region and energy range by utilizing more satellite datasets than AE8/AP8, and its future use is expected. However, to effectively utilize the new model, a thorough understanding of its specifications and performance is necessary. This paper describes analysis results using IRENE, compares them with AE8/AP8, and outlines future plans.

1. 緒言

捕捉放射線環境を模擬したモデルとして、AE8/AP8^{1,2)}があり、現在、これらがスタンダードとして宇宙機設計に用いられている。NASA が発行している SLS-SPEC-159 CROSS-PROGRAM DESIGN SPECIFICATION FOR NATURAL ENVIRONMENTS³⁾ (以下、DSNE) においても、捕捉放射線帯モデルが定義されており、従来から AE8/AP8 が推奨されていた。一方で 2020 年発行された Revision H より、International Radiation Environment Near Earth⁴⁾ (以下、IRENE) の利用も推奨されるようになった。

AE8/AP8 は、主に NASA のデータセットを使用しており、衛星の設計において使い勝手が良く、現在のデファクトスタンダードとして使用されている。しかし、モデルによる計算結果が実際の放射線環境とずれがあることも観測結果から分かっている⁵⁾。これに対して、IRENE は AE8/AP8 の後継である AE9/AP9 を持ち、宇宙プラズマモデルも含んでいる。IRENE は 33 の衛星のデータセットを利用しており、AE8/AP8 よりも多くの衛星のデータセットを利用することで、軌道領域とエネルギー範囲を AE8/AP8 よりも拡大させている。また、新たなデータセットを取り込むことができる仕様となっており、データのアップデートが可能になっている。しかし、新しいモデルを使用し衛星設計に適用していくにあたっては、仕様・性能を十分に把握し、計算によりどのようなデータを示すかを事前に理解しておく必要がある。そこで本稿では IRENE の AE9/AP9 を用いた解析結果と AE8/AP8 との比較結果を示す。

2. 解析方法

本研究では、ISS 軌道、Jason-3 軌道、QZSS 軌道の 3 つの軌道において解析を実施した。IRENE は 3 つのモデルモード (Mean モード、Perturbed Mean モード、Monte Carlo モード) を持っており、それぞれのモードの差異も把握する必要があるため、これらのモードで解析を実施するとともに、IRENE 中に機能する AE8/AP8 (Solar Maximum) でも解析を実施した。

- Mean : 平均的なフラックスマップを使用
- Perturbed Mean : 計測誤差の変動範囲で複数の異なるフラックスマップをランダムに作成
- Monte Carlo : 計測誤差の変動範囲に加えて、宇宙天気 (太陽活動・地磁気嵐) の変動範囲で複数の異なるフラックスマップをランダムに作成

表 1 IRENE の解析条件

軌道タイプ	Two-Line Element (TLE) File を使用
軌道情報	
Input File	ISS (ZAYRA), Jason-3, QZSS の TLE
伝播方式	SatEph
計算期間	2014/6/1 0:00:00 - 2015/6/1 0:00:00
計算間隔	60 秒
シナリオ数	100
フラックス/フルエンスタイプ	Integral
積算間隔	1 日

表 1 に IRENE の解析条件を示す。それぞれの軌道情報は Two-Line Element を使用し、計算期間は太陽活動極大期の 1 年 (2014/6/1-2015/6/1) とした。

3. 解析結果

図 1 に ISS 軌道における電子の Integral Fluence, 図 2 に ISS 軌道における陽子の Integral Fluence の解析結果を示す。ISS 軌道は円軌道, 軌道高度 400km, 軌道傾斜角は約 51.6 度である。

図 1 に示す通り, 電子 Fluence においては, AE9 Mean (平均), AE9 Perturbed Mean (50%), AE9 Monte Carlo (50%) の 3 つのモードに差異は見られなかった。しかし, AE8 の方が, AE9 より, 1~5MeV の範囲においては, 大きな Fluence を示していることが確認される。AE8 の高エネルギー側 (5MeV 以上) と AE9 の乖離は, それぞれのモデルがカバーするエネルギー範囲やデータ数の差によるものと考えられる。

図 2 に示す通り, 陽子 Fluence においても, AP9 Mean (平均), AP9 Perturbed Mean (50%), AP9 Monte Carlo (50%) に 3 つのモードに差異は見られず, AP8 もこれらとほぼ同じ Fluence を示した。

なお, Jason-3 軌道においても ISS 軌道と同様の傾向を示した。そのため, 本稿では解析結果は省略する。

図 3 に QZSS 軌道における電子の Integral Fluence, 図 4 に QZSS 軌道における陽子の Integral Fluence の

結果を示す。QZSS 軌道は, 準天頂軌道 (中心経度: 東経 135 度), 軌道高度は, 近地点 32,600km, 遠地点 38,950km, 軌道傾斜角は約 41 度, 周期は 23 時間 56 分の軌道である。

図 3 に示す通り, QZSS 軌道の電子 Fluence は AE9 Mean (平均), AE9 Perturbed Mean (50%), AE9 Monte Carlo (50%) の 3 つのモードに差異は見られなかったが, ISS, Jason-3 軌道と異なり, AE8 はこれらより小さな Fluence を示した。

図 4 に示す通り, 陽子 Fluence においては陽子の高エネルギー側のデータは出力されなかった。これは, QZSS は内帯を通らないためと考えられる。また AP8 の方が AP9 より顕著に小さな値を示しており, 1MeV 以上のデータは確認されなかった。これは ISS や Jason-3 軌道と異なる結果である。

4. おわりに

今回, 解析した 3 つの軌道において, AE9/AP9 Mean(平均), AE9/AP9 Perturbed Mean (50%), AE9/AP9 Monte Carlo (50%) の 3 つの解析結果に差異は見られなかったが, AE9 と AE8, AP9 と AP8 との差は確認された。AE9/AP9 の方が AE8/AP8 よりも, エネルギー範囲が広い仕様となっているため, 電子において, AE9 は高エネルギー側においてもプロットが確認されるが, AE8 においてはデータが出力されなかった。

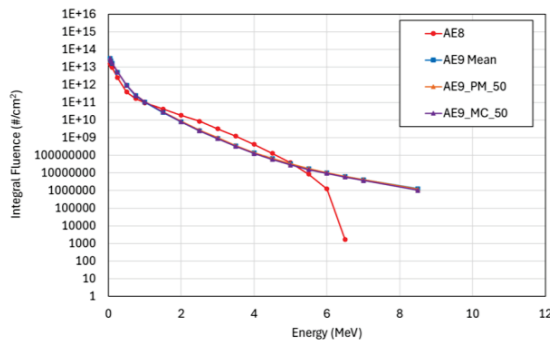


図 1 ISS 軌道における電子の Integral Fluence

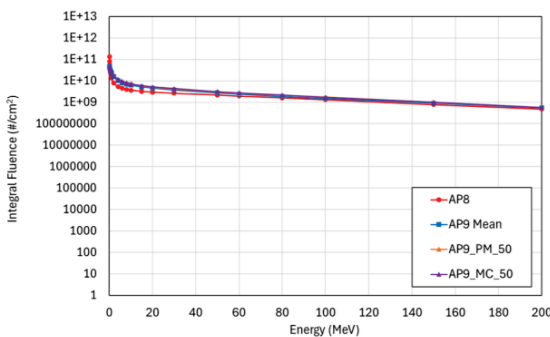


図 2 ISS 軌道における陽子の Integral Fluence

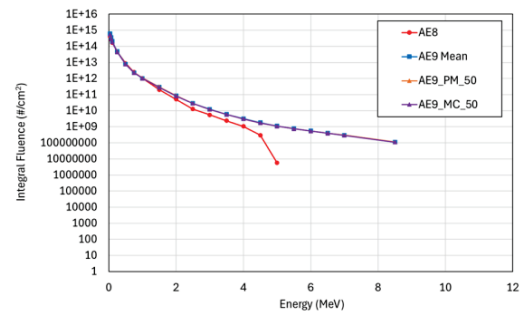


図 3 QZSS 軌道における電子の Integral Fluence

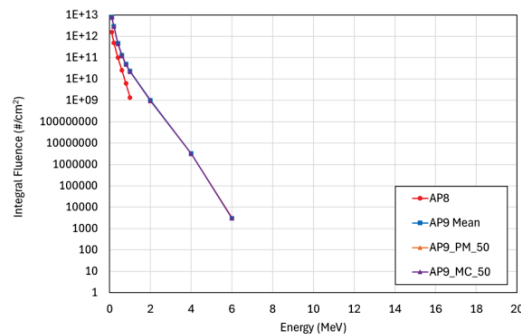


図 4 QZSS 軌道における陽子の Integral Fluence

表 2 に各軌道における AE8/AP8 と AE9/AP9 との比較結果を示す. 表 2 に示す通り, AE8/AP8 と AE9/AP9 との差は軌道により異なるため, 他の軌道においても結果の比較を行う必要があるとともに, 衛星設計のためにどのように使うか, どのモードを使用するか, またパラメータをどう設定するか等, 今後, 更なる検討が必要である. 加えて, 実データとの差異がどの程度あるかも確認していく必要がある.

(2011) 131, 965-970.

表 2 各軌道における AE8/AP8 と AE9/AP9 との比較

軌道	電子 (1-5Mev)	陽子
ISS	AE8>AP9	AP8≒AP9
Jason-3	AE8>AP9	AP8≒AP9
QZSS	AE8<AE9	AP8 ≪AP9

そのため, 今後, 実データとの比較を行うこととする. 具体的には, 宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP) の高エネルギー軽粒子モニタ⁶⁾(SDOM) による観測データと IRENE による放射線帯モデルの比較を行う. SEDA-AP は 8 種類の搭載機器を用いて ISS が周回する軌道の宇宙環境を観測した観測装置であり, 2009 年 8 月から 2018 年 3 月まで「きぼう」船外実験プラットフォームで運用された. その搭載機器の一つである. SDOM は部品材料の劣化や電子部品の誤動作等の原因となる電子, 陽子, α 線等の高エネルギー軽粒子の粒子別エネルギー分布を計測しているため, 今後, SDOM の観測データと AE9/AP9 の解析結果の比較を行う計画とする.

参考文献

- 1) Sawyer, D.M., Vette, J.I., AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum, NASA-TM-X-72605 (1976).
- 2) Vette, J.I., The AE-8 trapped electron model environment, NASA-TM-107820 (1991).
- 3) Frank B Leahy, SLS-SPEC-159, Cross-Program Design Specification for Natural Environments (DSNE) REVISION I (2021)
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20210024522>
- 4) IRENE-AE9/AP9/SPM
<https://www.vdl.af.mil/programs/ae9ap9/>
- 5) G.P. Ginet, B.K. Dichter, D.H. Brautigam, D.Madden, Proton flux anisotropy in low Earth orbit, IEEE Trans. Nucl. Sci. (2007) 54 1975–1980.
- 6) 小原隆博, 「きぼう」曝露部搭載・宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP) による宇宙環境計測, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials