

国際標準規格のための新しい太陽陽子フルーエンスモデルの提案
A NEW SOLAR-PROTON FLUENCE MODEL FOR ISO SPECIFICATION

風間 洋一, 五家 建夫

Yoichi Kazama and Tateo Goka

総合技術研究本部 環境計測グループ

Space Environment Measurement Group, Institute of Aerospace Technology

Abstract

Solar energetic protons degrade performance and reliability of spacecraft systems, such as single-event effects, total dose effects of electronic components, and especially displacement damage of solar cell. On designing a solar cell panel, a low-energetic solar proton fluence model is needed to estimate radiation damage over mission life. Nowadays solar panel area of spacecraft is increasing as spacecraft mission life becomes longer (15–18 years). Thus an accurate solar proton model is strongly required for the cost-minimum design from the aerospace industry. The solar proton flux model, JPL-91 proposed by Feynman *et al.*, is currently used widely for solar cell designing. However, it is known that the JPL-91 model predicts higher fluences of protons than values actually experienced in space, especially after 7 years on orbit. In addition, the model is based on several assumptions on solar proton events, and also needs Monte-Carlo simulations for calculating fluences. In this study, we propose a new solar-proton model especially focused on solar cell designing. The newly-proposed model is an empirical model, which is constructed directly upon proton flux measurement data taken by instruments onboard spacecraft. This method has no assumptions or no dependence on solar-proton event selection both of which are needed in JPL-91. Our model shows lower fluences in longer missions compared to JPL-91. This model has been proposed to ISO (International Organization for Standardization) and has been discussed as a new standard solar-proton model.

1. はじめに

宇宙機の設計に用いられる太陽陽子イベントのモデルとして Feynman 等が10年以上前に提案した JPL-91 が広く用いられている[1]。太陽電池パネルの放射線劣化の評価にも JPL-91 が一般的に利用されているが、実際の太陽電池パネル劣化と比較して JPL-91 は過剰なプロトンフルーエンスを示すことが広く知られている。その乖離は長期間運用される宇宙機でより顕著である。表1は欧州宇宙機構(European Space Agency; ESA)の衛星設計基準であるが[2]、

より寿命の長い衛星には、より低い信頼レベル、すなわちより低い陽子フルーエンス値を適用することとなっている。これは、JPL-91 モデルが実際と比較してより高いフルーエンスを示すことを考慮していると考えられる。このようなモデルと現実との不一致は、すなわち太陽電池の過剰設計に繋がっており、太陽電池のコストを押し上げる要因となっている。近年の衛星の長寿命化やコスト意識の高まりから、より現実に即した太陽陽子モデルの構築が宇宙航空産業界から強く求められている。そしてその任に当たることは、宇宙利用の推進を目的とする宇宙航空研究開発機構がまさになすべきであると考えられる。

Table I ESA's standard confidence levels to be applied for various mission durations.

Exposure year	Confidence level [%]
1	97
2	95
3	95
4	90
5	90
6	90
7	90

2. 研究概要

本研究では、特に太陽電池設計に特化した太陽陽子フルーエンスモデルの構築を目指す。我々の提案するモデルは JPL-91 と異なり、実際に衛星で観測された陽子フラックスデータを直接用いる。モデルは、長期間に亘るフラックスデータを積分し、衛星寿命に対する太陽陽子フルーエンスを求める。これにより、JPL-91 のベースとなっているいくつかの仮定は必要としない。また、実際に得られたデータを直接用いることでより現実に即したモデルの構築が可能である。図 1 に用いた陽子フラックスデータを示す。データは気象衛星ひまわり 2 号から 4 号に搭載された環境計測モニターによる陽子計測器で得られたものである[3]。データの期間は、1981 年 12 月 21 日から 1995 年 6 月 13 日までである。エネルギーチャンネルは 4-8 MeV(図中上のパネル)と 8-16 MeV(図中央のパネル)の 2 チャンネルに着目する。放射線劣化係数プロファイルによると、太陽電池の放射線劣化には特に数 MeV から 10 MeV 程度の陽子をもっとも重要であり[4]、我々が用いたこの二つのエネルギー領域は太陽電池の劣化を評価する上で十分な範囲をカバーしている。図 1 では、太陽活動度(図中下のパネル)に比例して太陽陽子イベントが観測されていることが分かる。

モデル構築の具体的な手法は以下のとおりである。

- (1) 衛星寿命分の年数に亘ってデイリーフルーエンスデータを積分する。その積分範囲を一日ごとにずらし、衛星寿命に対するフルーエンスデータセットを計算する。
- (2) そのデータセットの中から最悪条件として最高値を取り、その衛星寿命に対する陽子フルーエンスとする。

この計算により、用いた陽子プロトンデータの期間において、与えられた衛星寿命の中で実際に被曝する陽子フルーエンスの最悪値を得ることができる。注意点として、与えられたデ

一ヶ月期間中に発生しなかった極めて大きな太陽陽子イベントが極めて低い確率で発生しうる点が挙げられよう。

3. 成果概要

図2に上述の方法により計算されたフルーエンスを示す。横軸は衛星寿命、縦軸はフルーエンスである。比較のため、JPL-91モデルの計算値も併せて示す。衛星運用初期においては、我々の計算値はJPL-91の信頼度95%程度のフルーエンスに対応し、運用期間が延びるにしたがって4-8 MeVのエネルギーでは50-75%、8-16 MeVのエネルギーでは75-90%と一致することが分かる。太陽電池パネルの設計に際して、一般的にはJPL-91モデルの90-95%の信頼度が採用されていることを考えると、JPL-91が与える陽子フルーエンスは過大評価していることが示されている。これはすなわち太陽電池が過剰設計となっており、そのコスト削減の可能性を示していると言えよう。

我々は、この新しい太陽陽子フルーエンスモデルを国際標準とすべく、国際標準化機構(International Organization for Standardization; ISO)にすでに提案を行った。現在はISO Specificationとして、ISOのワーキンググループ内で継続して検討を進めている段階である。

4. まとめ

我々は太陽電池劣化評価のための太陽陽子フルーエンスモデルを構築した。このモデルにより、より現実的な太陽陽子フルーエンスを求めることができ、太陽電池の製造コストを削減する可能性が示唆された。われわれは、本モデルを太陽電池劣化評価のための太陽陽子フルーエンスモデル国際標準として、ISOに提案を行った。

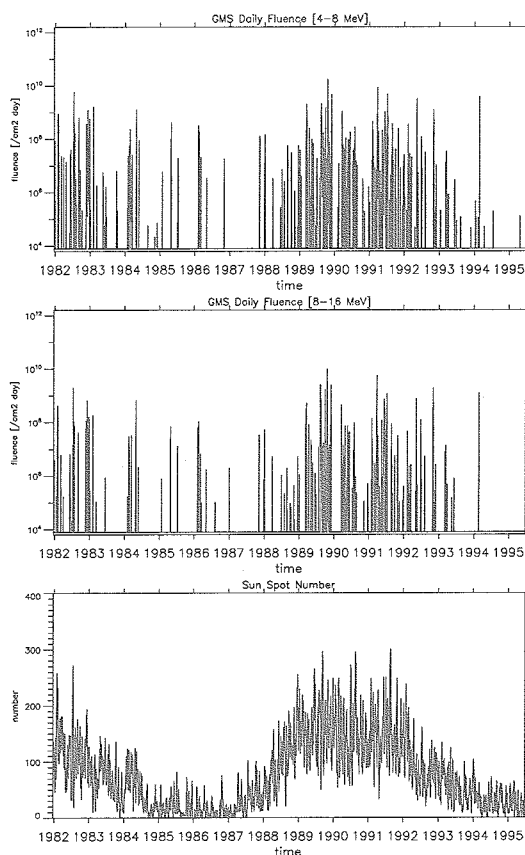


Figure 1. Proton daily fluxes observed by Geostationary Meteorological Satellites. The upper and lower panels correspond to energy ranges of 4-8 MeV and 8-16 MeV, respectively. One can see the correlation between solar-proton events and the solar activity (sunspot number, shown in the bottom panel).

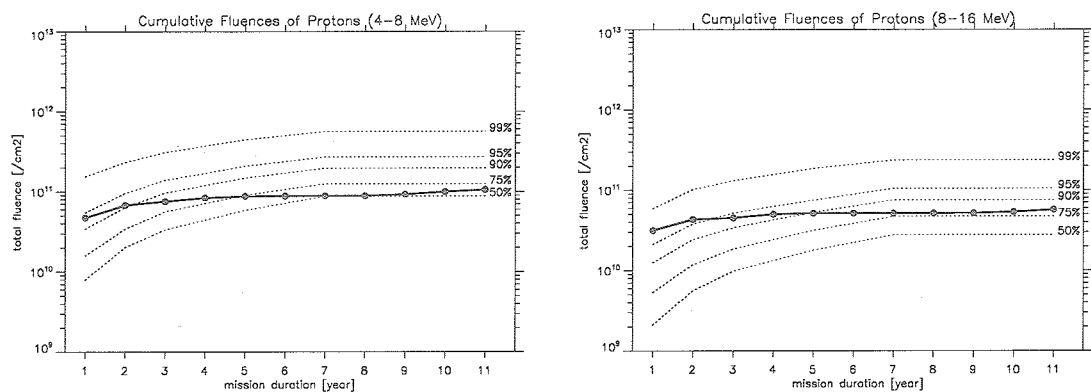


Figure 2. Calculated fluences with energies of 4–8 MeV and 8–16 MeV. The dotted lines show >4-MeV and >10-MeV fluences of JPL-91 with several confidence levels. In long-term mission durations, the calculated fluences are lower than fluences currently applied in designing solar cell panels.

[参考文献]

- [1] Feynman, J., G. Spitale, J. Wang, and S. Gabriel, Interplanetary Proton Fluence Model: JPL 1991, *J. geophys. Res.*, 98, 13281–13294, 1993
- [2] Space engineering, Space environment, European cooperation for space standardization (ECSS-E-10-04A), ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, 2001
- [3] Kohno, T., Current and future data available in Japan, *Geophys. Monogr. Ser.*, 97, 217–222, 1996
- [4] Assessment of Multijunction Solar Cell Performance in Radiation Environment, The Aerospace Corporation, Feb. 29, 2000