

あけぼの太陽電池出力の変動とプロトン放射線帯の関連

三宅 亙[†] 三好 由純[‡] 松岡 彩子^{*}

[†] 東海大学工学部 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

[‡] 名古屋大学太陽地球環境研究所 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

^{*} 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

E-mail: [†] wmiyake@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

あらまし 衛星の太陽電池は、宇宙空間の放射線などにより劣化し出力が低下していく。1989～1992年では、あけぼの衛星の太陽電池出力の低下は、衛星が浴びる放射線帯プロトンのフラックス量と、良く対応していた。1991年の大きな放射線帯変動の期間も含めて、この対応関係は継続しており、太陽電池の劣化から放射線帯変動が検出できることを示した。1993年以降においては、劣化が進み、温度による変動がより支配的となり、単純な月平均処理に基づく1ヶ月間の変動量解析では、放射線量との対応が見いだせなかった。この期間について、(1)地球からの輻射が最少となる軌道条件によるデータ選別、と(2)太陽からの輻射が同じになる前年の同月との差に着目することにより、1996年までプロトン放射線帯との関連が追跡可能となった。

キーワード プロトン放射線帯, 太陽電池劣化, あけぼの衛星

Relationship between Variation of Solar Cell Output of Akebono Satellite and Proton Radiation Belt

Wataru MIYAKE[†] Yoshizumi MIYOSHI[‡] and Ayako MATSUOKA^{*}

[†] School of Engineering, Tokai University 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 259-1292 Japan

[‡] Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University Furocho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan

^{*} Institute of Space and Astronautical Science 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, 252-5210 Japan

E-mail: [†] wmiyake@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

Abstract Solar cells on any satellite degrade gradually due to severe space radiation environment. We found a fair correlation between the decrease rate of solar cell output current of Akebono satellite orbiting in the inner magnetosphere and trapped proton flux from AP8 model between 1989 and 1992. After 1993, presumably as a result of long-term degradation, variation of solar cell output seems more susceptible to other causes such as high temperature effect, and simple monthly averaged data show no significant relation between them. One of possible causes for the temperature variation of the solar cells is terrestrial heat radiation with changing orientation of solar cell panels towards the earth and another is solar radiation varied with eccentric earth's orbit around the sun. In order to remove the possible temperature effect, we sort the data expected to be least affected by the terrestrial heat radiation from the orbit conditions, and also analyze difference of the output current for a month from that for the same month in the previous year. The analysis method leads us to successfully track a continuous correlation between the decrease rate of solar cell output and energetic trapped proton flux up to 1996.

Keyword Proton Radiation Belt, Degradation of Solar Cells, Akebono Satellite

1. はじめに

宇宙空間の高エネルギー粒子による衛星機器部品への影響としては、入射粒子のエネルギーが長期間にわたってデバイスに吸収されることによる劣化(トータルドーズ効果)がある[1]。衛星の太陽電池は、その典型的な例であり、劣化により供給電力が低下していく。内部磁気圏を飛翔するあけぼの衛星[2]の太陽電池

の場合も、1989年の打ち上げから20年後の2009年にかけて、その出力電流が13Aから7A程度にまで低下している[3]。

あけぼの衛星は、オーロラに関連した地球周辺の電磁気現象の観測・解明を目的とした、極軌道の科学衛星であり、打ち上げ時の遠地点が10,582km、近地点は272kmの長楕円軌道に投入された。衛星はプロトン放射線帯が存在する内部磁気圏を飛翔するため、放射線

帯プロトンによる太陽電池の劣化が顕著であると考えられている[3]。本稿では、太陽電池出力の変動と放射線帯プロトンのフラックスとの対応関係について調べた結果を報告する。

2. 1ヶ月間の単純差分解析

本研究で使用したデータは、日照時の出力電流値の月平均値をもとにしている。この月平均値に、太陽から距離 R による光量変動の補正として、 R^2 をかけた後、前月との差分を取ってみたのが、Fig. 1 の黒線である。大きな劣化（負の差分値）とゼロに近い変動を繰り返していることがわかる。

NASA の AP8 モデルを用いて、放射線帯プロトンのフラックスを衛星軌道に沿って積分した。10 MeV 以上と 30 MeV 以上について求めた 1ヶ月間の積分量を、重ねて表示してある。これを見ると、プロトンフラックスの 1ヶ月積分量も、電流値の差分量と同じような周期で増減を繰り返している。なお、あけぼの衛星の太陽電池のカバーガラスの厚みは 0.5mm であり、これに対応する飛程をもつプロトンのエネルギーは、およそ 8MeV である[4]。

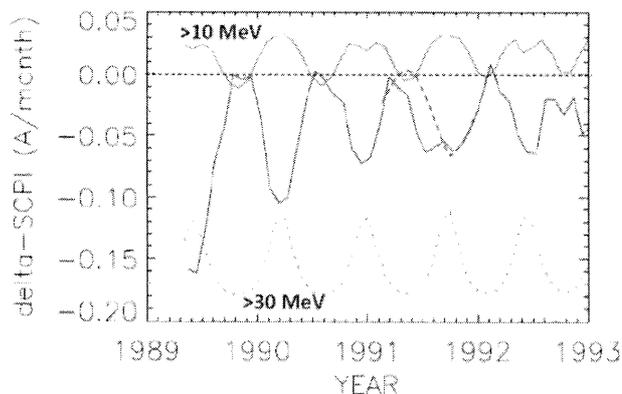


Fig. 1. Monthly variance of solar cell output current from 1989 to 1993 with energetic proton flux integrated over a month from NASA's AP8 model.

衛星は超楕円軌道であり、その遠地点と近地点は軌道の摂動により、高緯度から、低緯度、そして反対側の高緯度へと数ヶ月で移動していく。このため、プロトン放射線帯の中心部を衛星が横切る時期と、これを避けて通る時期とができる。

Fig. 2 には、NASA の AP8 モデルから計算した 10 MeV 以上の放射線帯プロトンの分布と衛星軌道の例を示した。円筒座標系で磁力線座標について示しており、赤道で折り返して、南北半球を同一面上に表示してある。A の軌道の時期では、衛星の遠地点と近地点はともに低緯度にあった。このため、放射線帯の中心

部（地心距離 $2 R_e$ 弱あたりの赤道上）を通るには、遠地点は高過ぎ、近地点は低過ぎ、つまり中心部を避ける状態である。このような軌道の場合には、Fig. 1 では積分フラックスが小さい時期となる。

一方、これより 4ヶ月ほどずれた B の軌道の時期には、遠地点と近地点はともに高緯度であり、赤道近辺では、丁度、放射線帯中心部の高度を通ることになる。この時、積分フラックスは大きな値となる。このようにして、緯度に対する遠地点・近地点の動きが周期的なため、積分フラックスも同様の周期的変動を示すことになる。

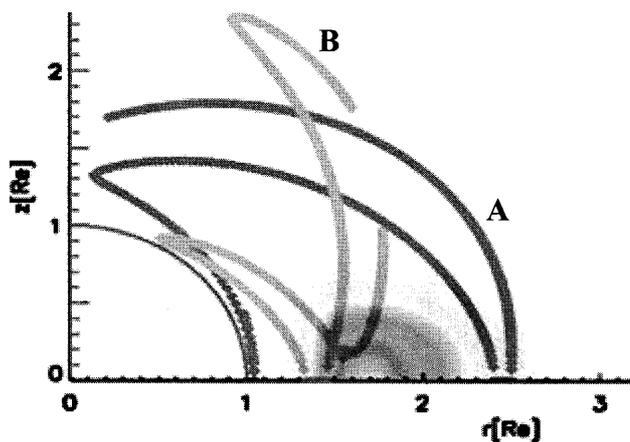


Fig. 2. Examples of satellite orbit in 1991 overlaid with trapped > 10 MeV proton distribution in a cylindrical coordinate. R_e means one earth radius.

なお、Fig. 1 を詳細にみると、1991 年から 1992 年の初めにかけて、太陽電池の劣化が大きな負の値を取っている時期が、他に比べて長いことがわかる。きれいな周期性を示すならば、破線で挿入したような変動であるはずである。1991 年 3 月には、大きな太陽フレア（太陽面爆発現象）があり、それに付随して発生した磁気嵐の後、放射線帯高エネルギー粒子の分布に大きな変動があったことが知られている[5]。

この変動では、通常のプロトン放射線帯フラックスピークのすぐ外側に、2つ目のピークが現れ、放射線帯が外側に広がったようになっていた。このため、どのような衛星軌道にあっても、1周回の積分をすれば、常に高いフラックスを浴びる結果となった。この特異な分布状態は 1991 年末まで継続したと考えられており、Fig. 1 の劣化が早い状態が長く続いた波形の乱れは、この放射線帯プロトン分布の変動とよく一致している[3]。

3. 温度変化の影響とその除去

Fig. 1 に示したような単純な 1ヶ月間の差分では、

1993年以降は、高エネルギープロトンフラックスとの明確な対応はなくなる。その様相を示したのが、Fig. 3である。これはFig. 1の太陽電池出力の1ヶ月間の差分について、周波数解析をした結果である。上のパネルがFig. 1の期間にほぼ対応するのであるが、5/7年(約8.5ヶ月)周期の変動が卓越している。これはFig. 1に明確に見えている周期的変動である。

一方、下のパネルは1994年以降について、同様の解析を行った結果である。初期に見られた5/7年の周期変動は影をひそめ、5/5つまり1年周期の変動が卓越する。この1年周期変動の位相関係を調べてみると、夏に上がり冬に下がることが分かった。また、この1年周期成分の振幅は、後年になるほど徐々に大きくなっていく。

太陽からの距離は、夏に大きくなり冬に小さくなる。前述したように、それに伴う光量補正はすでに施してある。考えられる要因は、太陽に近づく冬は太陽電池の温度が上昇するため、出力低下を引き起こしている可能性である。

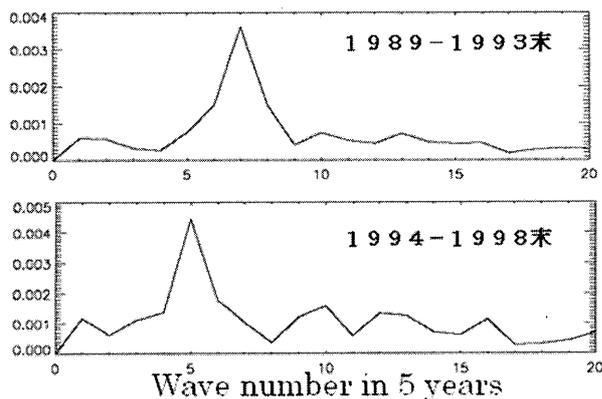


Fig. 3. Power of frequency component of the monthly variance of solar cell output current.

90年代の初めの間は、放射線による劣化がそれほど進んでいなかったため、温度が少々変化しても、大きな出力変動はなかった。しかし、劣化が進んだ後年では、太陽電池出力のV-I曲線上で急激に出力が落ちる点が、定常運用電圧に近づいてくる[6]。高温時にはこの点がさらに低電圧側にくるため、出力電流値の低下が起こることが予想される。

実際に周回軌道について出力の変動を調べてみると、Fig. 4のような例が見つかる。すなわち、近地点が昼側にあるような場合に、近地点近傍で太陽電池出力電流が低下している。あけぼの衛星は太陽指向であり、常に太陽電池パネルは太陽方向を向いている。太陽からの放射を太陽電池パネル前面から浴びる他に、

地球からの放射(アルベド)をパネルの背面から浴びて、温度が上昇した状態と考えられる。同じ背面の打ち上げ時の接合部の温度(最下段)は、少し遅れて上昇している。熱容量の小さい太陽電池パネルの温度は、より早く上昇し、また熱入力が低下すれば直ちに下降しているものと推測される。

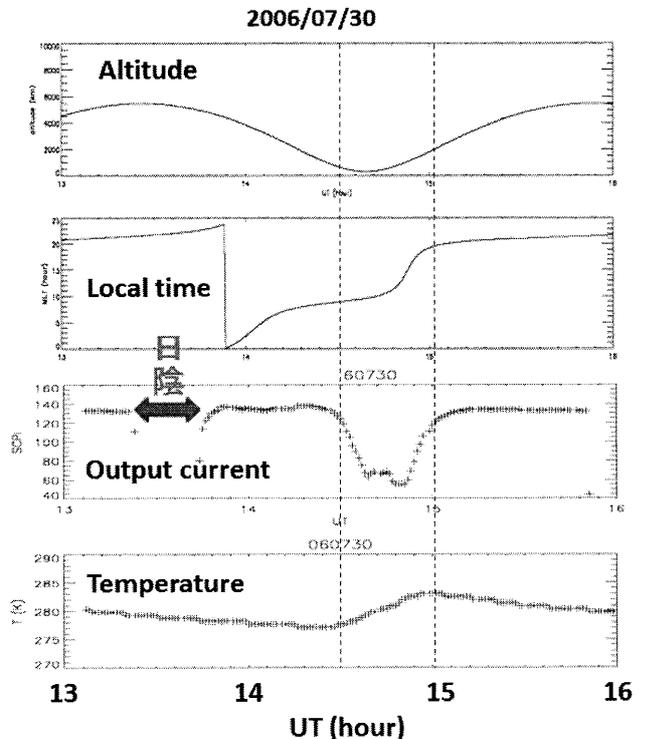


Fig. 4. A example of abrupt decrease of output current at dayside and low altitude.

なお、軌道面が回り、昼側で高度が高い場合は、この図のような電流値の急激な低下は、見られていない。このような大きな低下は後年に見られるもので、1990年代の初めでは、低下はあるがごくわずかであり(Fig. 5参照)、劣化が進むにつれて、より顕著となっていった様相が分かっている。

このように、後年になるほど温度変化により敏感になっていったことが結論されるので、以下の2点に着目した解析を新たに試行してみた。

- (1) 地球からの放射が最少となる軌道条件によるデータ選別
- (2) 太陽からの放射が同じになる前年の同月との差分

(1)については、太陽からの放射は十分に当たり、一方で、背面に地球を背負うことなく宇宙空間への放熱が十分に行われる状態を選んでみた。即ち、昼夜境界線上に近く、かつ高度が十分に高い条件である。こ

のデータ選別を行った後、月平均値を導出し、(2)の解析を行った。1年間の差分となるため、時間変動の早い成分はこれでは見ることはできないが、放射線帯プロトンとの比較は可能である。

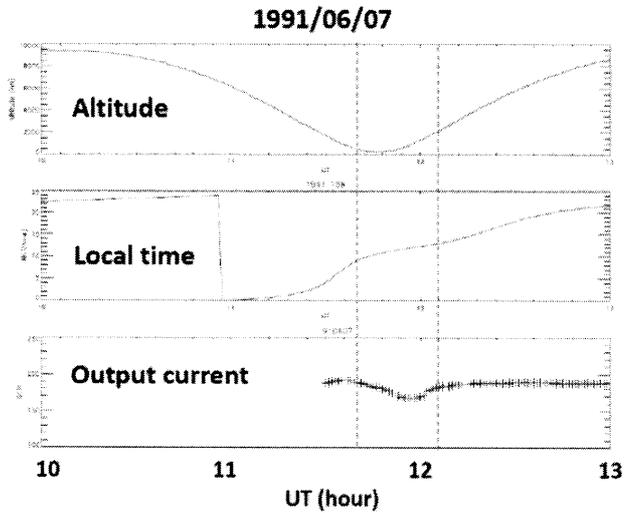


Fig. 5. Output current variation at dayside and low altitude in 1991.

結果を Fig. 6 に示す。1月間で(1)の条件を満たすデータがない場合もあり、必ずしもプロットが連続しているわけではない。また、図中の縦線は、NASAの AP8 モデルにより、衛星軌道について1年間積分した高エネルギープロトンのフラックスが極小となる時期を示している。AP8 モデルから予想されるフラックス極小の時期と、1年間の差分が小さい(劣化が遅い)時期が、1996年あたりまで、ほぼ一致していることが分かる。

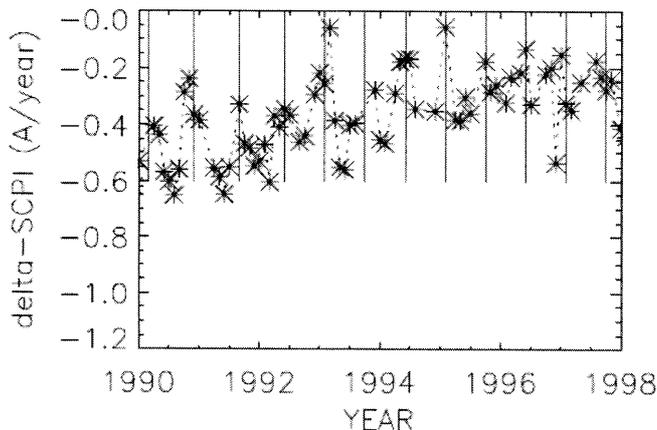


Fig. 6. Annual variance of solar cell output current. The vertical bars indicate the minimum variance expected from energetic proton flux integrated over a year based on NASA's AP8 model.

4. おわりに

以上の解析から、内部磁気圏を飛翔するあけぼの衛星太陽電池の劣化から放射線帯プロトンとの関係を抽出できることが分かった。特に、1990年代の初めでは、大きな宇宙環境じょう乱に伴う、数ヶ月スケールでのプロトン放射線帯の変動まで議論できることも示した。放射線帯プロトンについては、1992年に CRRES 衛星の観測[5]が終結して以来、低高度での観測[7]しかなく、放射線帯中心部を通る軌道で、その変動を議論できる意義は大きい。

一方で、劣化が進み、高温下で出力が低下する効果が、後年ほど顕在化することも明らかとなった。本報告では、2000年以降のデータについては、ほとんど触れなかったが、温度効果がより顕著となっている。この時期のデータからの、さらなる放射線帯プロトンの変動との関連の追求の可能性は、今後の課題である。

あけぼの衛星の20年以上にわたる運用、データの取得・蓄積は、長年にわたってのあけぼのプロジェクトチームの多くの方々の方々の尽力と支援の賜物である。ここに深く謝意を表したい。

文 献

- [1] 富田二三彦, “宇宙放射線の影響,” 宇宙環境科学, 恩藤忠典, 丸橋克英, pp. 191-215, オーム社, 2000.
- [2] H. Oya and K. Tsuruda, Introduction to the Akebono (EXOS-D) satellite observations, J. Geomag. Geoelectr., vol. 42, pp. 367-370, 1990.
- [3] H. Ishikawa, W. Miyake, and A. Matsuoka, Variation of proton radiation belt deduced solar cell degradation of Akebono satellite, Earth Planet. Space, vol. 65, pp. 121-125, 2013.
- [4] 木村逸郎, 阪井英次, 放射線計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1991.
- [5] M. S. Gussenhoven, E. G. Mullen, and D. H. Brautigam, Improved understanding of the Earth's radiation belts from the CRRES satellite, IEEE Trans. Nuclear Sci., vol. 43, pp. 353-368, 1996.
- [6] M. R. Patel, Spacecraft Power System, CRC Press, 2005.
- [7] M. D. Looper, J. B. Blake, R. A. Mewaldt, J. R. Cummings, and D. N. Baker, Observations of the inner radiation belt to the violent Sun-Earth connection events of October-November 2003, Geophys. Res. Lett., vol. 32 L03S06, doi: 10.1029/2004GL021502, 2005.