

On-orbit Performance Analysis on Solar Array Paddle of X-ray Astronomy Satellite “Suzaku”

Takanobu Shimada, Hiroyuki Toyota, Akio Kukita, Kazuyuki Hirose,
Yoshitomo Maeda, Kazuhisa Mitsuda

Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract:

This paper presents the analysis results for the on-orbit performance of a solar array paddle of the X-ray astronomy satellite *Suzaku*. *Suzaku*, formerly known as ASTRO-EII, is an X-ray astronomy satellite developed by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) and has been successfully making observations since its launch in July 2005. However, the current generated by its solar array was confirmed to be gradually but continuously decreasing since the middle of 2011.

Consequently, we estimated the degradation of the solar array output to simulate the on-orbit environment according to the JPL prediction method in the *Solar Cell Radiation Handbook* using the relative damage coefficient (RDC) obtained in ground tests. The analysis results indicated that greater on-orbit degradation of the solar cell occurred compared to the predicted performance degradation under the space environment where *Suzaku* was exposed to the orbit. We considered that this difference in the on-orbit data and analysis results could be attributed to (i) an increase in cell temperature or (ii) radiation degradation due to solar flares.

The analysis results showed that the solar array operated at a lower current point in the constant voltage region of I–V curve when the cell temperature was higher. The deterioration can be explained under the assumption that the cell temperature rose up approximate 20°C higher than the nominal operating temperature of 73°C 6 years after launch. On the other hand, it was found that the proton fluxes observed by the GOES-13 satellite increased with frequent occurrences of solar flares since 2011, which corresponded to when degradation of the *Suzaku* solar array performance was observed. The calculated results showed good consistency with the on-orbit deterioration under the assumption that the solar cells were irradiated with an equivalent 1-MeV electron fluence of 3.0×10^{14} particles/cm² for one year from 6 years after launch. At present, we are examining the equivalent fluence for its validity.

Presented at the 32nd ISAS Space Energy Symposium, 1st March, 2013

X線天文衛星「すざく」太陽電池パドルの軌道上発生電力解析

嶋田 貴信、豊田 裕之、久木田 明夫、廣瀬 和之、前田 良知、満田 和久
(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)

1. はじめに

X線天文衛星「すざく」(第23号科学衛星 ASTRO-EII)は、宇宙科学研究所(ISAS)によって開発され、2005年7月の打ち上げ以来順調に観測を続けてきた。しかし、2011年中頃以降それまでとは異なる傾きで太陽電池パドルの発生電流が低下していることが確認された。そこで、「すざく」軌道上環境における太陽電池パドル発生電力の予測および原因究明のため、JPL ‘Solar Cell Radiation Handbook’ 記載の予測手法に従い解析を試みた。解析の結果、2011年中頃以降で見られた軌道上での太陽電池アレイの劣化量は、本予測手法に基づいて算出された性能低下に比べて大きいことが示唆された。本研究では今回確認された軌道上での「すざく」太陽電池パドルの発生電力低下に対する要因について検討を行った。

2. ミッション概要および太陽電池パドル

「すざく」は日本で5番目のX線天文衛星であり、これまでの衛星から飛躍的に発展させることにより優れた分光能力を有し、軟X線からγ線までの広い帯域を高感度で観測することが可能である¹⁾。「すざく」は日本とアメリカとの国際協力によって研究開発され、2005年7月10日にM-Vロケットによって内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。

図1に「すざく」の外観図を示す。衛星構体は八角柱の形状で8枚の側面パネルから構成されており、5台のX線望遠鏡が搭載されている。衛星の寸法は、太陽電池パドルを展開した状態で約6.5m×5.4m×1.9m、総重量は約1700kgである。打ち上げ後、「すざく」は軌道傾斜角31°、近地点高度570km、軌道周期96分の略円軌道で地球周回している。ミッション期間の3年を超えた現在でも運用を続けている。

衛星構体+Y方向の側面パネル両隣のパネルそれぞれに太陽電池パドル(Solar Array Paddle: SAP)が2翼取り付けられている。科学観測のための衛星姿勢制御により太陽光垂直方向からの入射角を最大で±25°まで変化させるため、SAPに入射する太陽光強度は0.87から1sunの間で変動する。軌道上での太陽電池セルの予測最高温度は73°Cとされていた。

「すざく」では、シャープ製高効率シリコン(High Efficiency Silicon: HES)太陽電池セルを搭載している。BOLでの変換効率は16.7%であり、セル面積24cm²、厚さ100μm、基板比抵抗2ΩcmタイプのHESセルが採用されている。太陽電池アレイ回路は132セル直列が26ストリングと131セル直列が4ストリングから構成されている。ミッション期間(3年)末期において最低1530Wの電力が要求されていた。「すざく」では50V非安定バスの電力制御方式としてシャント装置を採用しているため、電流-電圧(I-V)特性上の太陽電池アレイの動作点は日照期間中シャント装置とのインターフェース電圧である51.5Vに常に制御される。

3. 軌道上ステータス

図2に、打ち上げ以降の「すざく」電源系のテレメトリ推移を示す。搭載されたSAPの発生電流はテレメトリにより直接監視されていないため、SAP発生電流(図2中SAP I)は電力制御器(PCU)入力電

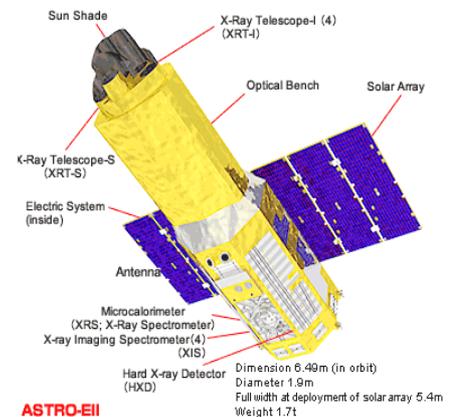


Fig. 1. Schematic drawing of *Suzaku*

流 (PCU in I) とシャント電流の合計から求めた。

SAP I および SAP 温度 (SAP T) のテレメトリでは、地球の公転に伴う太陽光強度の変化による周期的な季節変動、つまり冬期に僅かな上昇そして夏期に僅かな減少の繰り返しが示されていることが確認できる。同時に、これよりも短期的な変動も見られるが、これは前述した観測に伴う衛星の姿勢制御による 0° から 25° の太陽光入射角の変化の影響であり、季節変動周期に比べると頻繁に行なわれている。

一方、SAP-1 の温度は SAP-2 に比べ 10°C 前後高く推移している。これは、SAP 用温度センサは SAP-1 では 3 枚あるうち衛星構体に一番近いパネル、SAP-2 では一番遠いパネルのそれぞれ反セル面に取り付けられており、視野内により深宇宙が見える SAP-2 のほうが放熱され易いためである。また、SAP-2 の温度で 2012 年中頃以降に急激な上昇が観測されている。これは、負荷電力低減運用や後述する許容太陽光入射角の制限を加えたことにより余剰電力が増し、最外パネルに配置したストリングからシャント制御が順に働く設計となっているため、SAP-2 では電気に変換されないセルが増え温度上昇が発生したと考えている。

「すぎく」は 2005 年 7 月の打ち上げ以降、順調に観測を続けてきた。しかし、図 2 で示す通り 2011 年中頃以降、SAP I にこれまでの傾きとは異なる低下が約 1 年間続いていることが確認できる。この期間中のテレメトリデータを調べた限り、ストリングオープン故障の際に見られるような SAP 発生電流のステップ状の低下は確認できなかった。結果として、発生電流が低下するにつれバッテリーの充放電収支が減少して行ったため、バッテリー放電終止電圧の低下が進行し、2012 年 1 月 24 日に搭載バッテリーを保護するための電源系の機能である下限電圧制御が動作した。この機能により負荷電力が低減されたため、同日に電力制御器出力電流 (PCU out I) が急激に低下されていることも図 2 から確認できる。この SAP 発生電力の低下を受けて、SAP 面への太陽光入射角の制限をこれまでの 25° から 20° へ変更し、さらにバッテリーの充電電圧レベルを高く設定し対策することで、その後も観測は続けている。このような背景から、今回確認された「すぎく」太陽電池パドルの軌道上での発生電力低下が妥当な劣化によるものか、または設計上の寿命末期を迎えたのかどうかを検証するため、次項で記す解析モデルを用いて検討を行った。

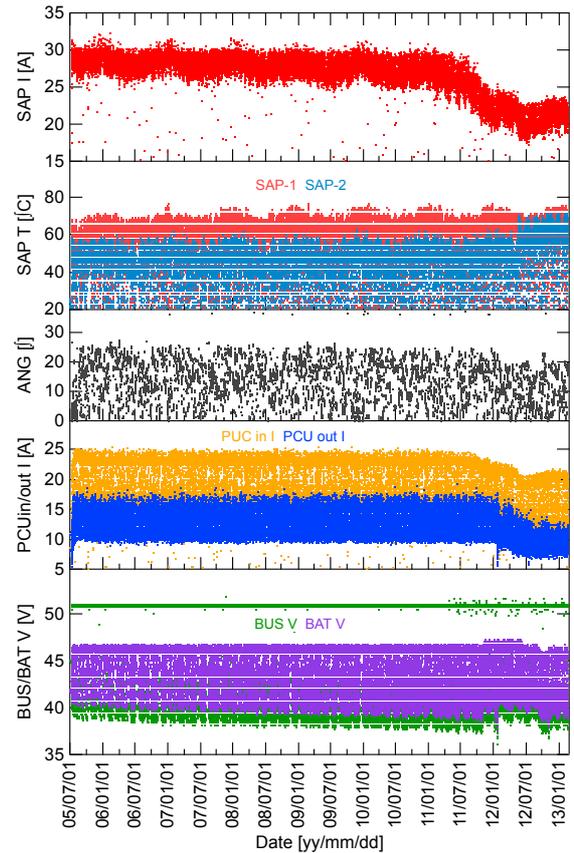


Fig. 2. Telemetry of on-board status for the *Suzaku* electrical power subsystem since the launch

4. 軌道上発生電力解析

4.1 解析方法

「すぎく」ではバス電力制御にシャント方式を採用しているため、太陽電池アレイの動作点は電流-電圧 (I-V) 曲線上のバス電圧付近に制御される。詳細な発生電流・電力を予測するため、太陽電池の 4 つの電気パラメータ (V_{oc} 、 V_{mp} 、 I_{sc} 、 I_{mp}) および内部抵抗により導出可能な近似方程式を用いて I-V 曲線を算出した^[2]。軌道上での放射線環境による太陽電池セルの劣化量については、劣化後の各電気パラメータの保存率を JPL ‘Solar Cell Radiation Handbook’ 記載の予測手法に従って求めた^[3]。

表 1 に、今回の計算で使用した解析条件をまとめる。ミッション期間中の放射線環境は、「すぎく」の軌道および打ち上げ後の経過年数を基に補足粒子モデル AE-8 および AP-8 用いて求めた。地上での HES

セルの放射線照射試験で得られた相対損傷係数 (Relative Damage Coefficient: RDC) を用いて、本放射線環境に対する等価 1 MeV 電子換算被曝量を計算し保存率を求めた。太陽電池セルへの放射線の遮蔽効果を考慮し、セル面には 100 μm 厚のカバーガラスを、反セル面には無限遠の厚みを想定した。また、電気パラメータは等価 1 MeV 電子換算被曝量に応じた HES セルの温度係数も考慮に入れた。太陽強度、太陽光入射角、およびセル解析温度はワーストケースを想定した値で解析を行った。

Table I. Analysis conditions to predict solar array output

Solar cell area	24 cm ² (4 cm × 6 cm)
Coverglass thickness	100 μm
Array configuration	30 strings × 131 cells in series
Launch date	2005/07/10
Orbit	Semi-major axis: 6928.1 km Inclination: 31.0°
Radiation environment model	AP-8 (Solar activity: min) AE-8 (Solar activity: max)
Solar intensity	1307 W/m ² (*summer solstice)
Sun incidence angle	25°
Cell temperature	73 °C
Conversion factor to 1 MeV ^{e-} from 10 MeV ^{p+}	3000 (Voc) 4350 (Isc)

4.2 解析結果および考察

図 3 に、表 1 で示した条件を基に得られた BOL および打ち上げ 3、5、7、10 年後での I-V 曲線の計算結果を示す。図 4 には、軌道上テレメトリデータと併せて、インターフェース電圧での SAP 発生電流および発生電力推移の計算結果をプロットする。解析の結果、与えられた放射線環境下で予測した性能低下の推移と比較すると、打ち上げ 6 年後以降では軌道上の太陽電池パドルは大きく劣化が進行していることが示唆された。テレメトリと解析結果との間でなぜ発生電流の劣化量に差異が生じたのかを考察したところ、以下の 2 点 (a) 急激な温度上昇が見られないことからサブストレートの密着度の低下による太陽電池セル温度の上昇、または (b) 2012 年前後では太陽活動極大期に近づくため太陽フレア等の影響による放射線劣化量の増加、に起因していることが疑われた。以降で、それぞれの検討結果について記す。

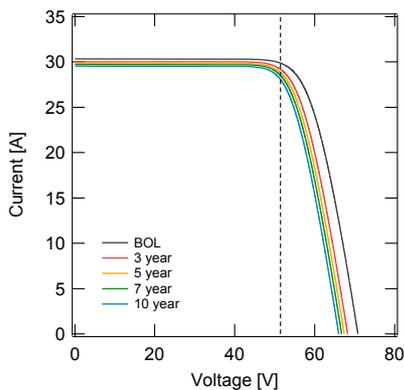


Fig. 3. Calculated I-V characteristics based on the *Suzaku* analysis conditions

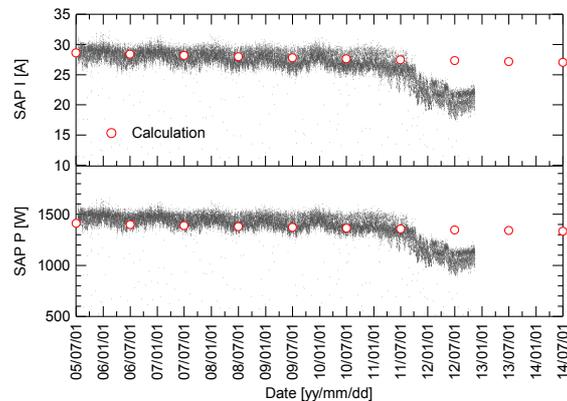


Fig. 4. Comparison of SAP generated current and power at 51.5 V between the on-orbit status and the calculated results

最初に、太陽電池セル温度上昇に対する SAP 発生電流の推移の変化を予測した。ただし前述した通り、2012 年中頃以降に SAP-2 温度テレメトリで見られる急激な上昇は、負荷低減に対する余剰電力増加によるセル温度上昇と考えている。図 5 に、セル解析温度をノミナルの 73°C に加え、83°C、93°C とした時の SAP 発生電流推移の計算結果をテレメトリデータと併せてプロットする。

解析の結果、セル温度が高くなるにつれて、I-V 曲線の定電圧領域が図中の左 (低い) 側へシフトし、

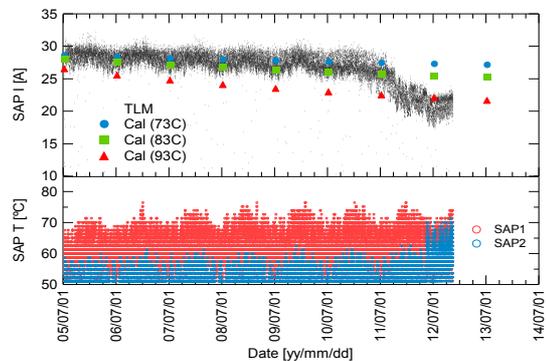


Fig. 5. Comparison of SAP-generated current between the on-orbit data and calculated temperature dependency

インターフェース電圧 (51.5 V) での交点である太陽電池アレイの動作点は定電圧領域と交わり負荷へ供給できる電流が大きく減少していくことが分った。図 5 で示す通り、軌道上での発生電流の推移と厳密に一致する温度条件は存在しなかった。しかし、打ち上げから 6 年後以降でセル温度がノミナルの動作温度から 20°C 程度上昇したと仮定すると、軌道上での SAP 発生電流の低下を説明することはできる。セルパネル間の密着度の低下の他にも、パネル表面材料の熱光学特性の劣化も要因として考えられる。

次に、2012 年から 2013 年にかけて太陽活動が極大期に近づくことと予測されているため、太陽フレアによる太陽電池セルの放射線劣化を要因として検討した。「すざく」が航行する地球低軌道 (LEO) では比較的緩やかな放射線環境であるため、解析では 2011 年以降も SAP 発生電流の推移は急激な低下は見られず、打ち上げ以降と同様に緩やかな傾きの低下のまま推移すると予測された。しかし、軌道上 SAP 発生電流の低下の要因は放射線劣化であると説明するためには、太陽電池セルの劣化を加速させるための 2011 年中頃以降で何かしらの放射線照射量の増加が必要と考えられる。

図 6 の中段に NASA の静止軌道衛星 GOES-13 によって観測された高エネルギー陽子のフラックスを、同図下段にクラス M およびクラス X の太陽フレア発生回数を示す。この図より、2011 年以降の陽子のフラックスは太陽フレアの頻繁な発生とともに増加を示しており、「すざく」太陽電池アレイの性能低下が確認された時期と一致していることが分かる。

一般に、地球は (特に低軌道では) 地磁場のシールド効果により宇宙空間より飛来する高エネルギー放射線から守られている。一方で、地磁気の異常構造である南大西洋異常帯 (SAA) においては、太陽より飛来する放射線は地上付近まで到達することが知られており、「すざく」は SAA を通過する軌道を航行している。打ち上げ 6 年後からの 1 年間に等価 1 MeV 電子換算被曝量 3.0×10^{14} /cm² の放射線が太陽電池セルに照射されたと仮定すると、解析結果は軌道上での発生電流低下と一致することが示された。現在のところ、この等価被曝量の妥当性についての検討を行なっている。

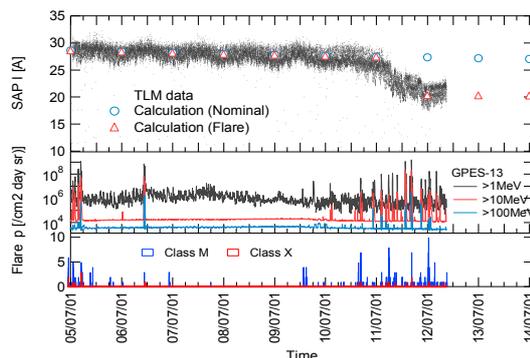


Fig. 6 Comparison of SAP-generated current between on-orbit and calculated data due to a solar flare

5. まとめ

X線天文衛星「すざく」は、2005年7月の打ち上げ以降順調に観測を続けてきた。しかし、2011年中頃以降、太陽電池アレイ発生電流に打上げ後のこれまでの傾きとは異なる低下が約1年間続いたことが確認された。テレメトリが示す軌道上での太陽電池アレイ発生電流は、JPL放射線劣化の予測手法を用いて計算した結果に比べ大きく低下していることが判明した。この差異について、(a) 太陽電池セル温度の上昇、または (b) 太陽フレア等の影響による放射線劣化量の増加に起因していることを疑った。前者については、解析の結果この発生電流低下は打ち上げから6年以降にセル温度が93°C付近まで上昇したと仮定すると説明することができることが示された。一方後者では、打ち上げ6年後から1年間に等価1 MeV 電子換算被曝量 3.0×10^{14} /cm² の放射線が太陽電池セルに照射されたと仮定すると、解析結果は軌道上での発生電流低下と一致することが判明した。現在、これらの仮定の妥当性について検討を進めている。

参考文献

- [1] K. Mitsuda et al., "The X-ray Observatory Suzaku," Publications of the Astronomical Society of Japan, 59, S1-S7 (2007).
- [2] W. T. Picciano et al., "Determination of the Solar Cell Equation Parameters, Including Series Resistance, from Empirical Data," Energy Conversion, Vol. 9, pp. 1-6 (1968).
- [3] B. E. Anspaugh, "Solar Cell Radiation Handbook," JPL Publication, 82-69, Addendum 1 (1989).