

特集「日本における衝突研究の軌跡」

太陽電池パネルの微小粒子衝突による電氣的影響

川北 史朗¹

2015年5月11日受領, 査読を経て2015年7月16日受理.

(要旨) スペースデブリの増加により, 人工衛星への衝突確率が増すことでその影響が益々懸念されている. 地球周回を離れても, 惑星間空間にはマイクロメテオロイドが存在する為, 探査機は微小粒子衝突に晒されている. 特に, 太陽電池パネルは, 宇宙機構成機器の中でも面積が広いことや, 宇宙空間に曝露されているために存在確率が高い0.1 mm以上の微小粒子によっても損傷を受けることなどから, 微小粒子衝突の影響を把握することが宇宙機の設計には重要である.

本論文では, 太陽電池を実際の発電を模擬した状態にて衝突試験を実施し, それによる地絡故障の発生の有無を中心に電氣的の評価を行った. その結果, 衝突によって太陽電池の電気出力は多少低下するが, その影響は宇宙機システムに及ぼすほどではないことを明らかにした.

1. はじめに

近年, 耐用年数の経過した人工衛星や爆発により発生した破片などの多数のゴミを起源としたスペースデブリの急激な増加に伴い, 人工衛星への衝突確率が増している. 特に, 太陽電池パネルは, その大きさから, 人工衛星の中でも衝突確率が最も高い機器であり, 衝突による影響を評価することが宇宙機の設計において重要である. また, 地球周りの人工的なスペースデブリのみならず, 惑星間空間や彗星の周りにも天然起源の塵であるマイクロメテオロイドが存在する. 即ち, 人工衛星・探査機に問わず, 宇宙機の設計において, 太陽電池パネルへの微小粒子衝突評価は重要なことである.

今までに, 人工衛星・探査機の太陽電池パネルへの微小粒子衝突が原因と推察される事象がいくつか報告されている. 2003年10月25日に, 環境観測技術衛星みどりIIの太陽電池パネルの発生電力が3分間で6 kWから1 kWまで低下する異常運用が発生した[1]. その後の原因究明検討により, これは太陽電池の発生

電力を衛星本体に供給する電力ハーネスの帯電・放電現象による損傷が原因であることが明らかとなった.

これ以前の2003年3月20日から7月22日の期間に, 太陽電池7回路に計10回の1 Aレイ相当の発生電力の低下および回復現象が観測されており, これは太陽電池パネルへの微小粒子の衝突が有力な候補と推定された[2]. また, 1984年に1 P/Halleyおよび金星探査を目的に打ち上げられたVEGA-1, 2(旧ソ連)にて, 1 P/Halley近傍時の微小粒子の入射数の増加に伴い太陽電池パネルの発生電力の低下が観測されている. この原因を調べるために, 太陽電池パネルに直径0.1~10 μm の微小粒子を10~15 km/sの高速で 10^5 から 10^6 個衝突させたところ, 電気性能の劣化が観測された[3]. これは, 衝突による物理的な損傷によって太陽電池の並列抵抗が減少したためと報告されている.

1990年に打ち上げられた米国のHST(Hubble Space Telescope)において, 発生電力の向上および小型化のために, 打ち上げ1320日後に太陽電池パネルの交換が行われた. この時, 回収した太陽電池パネルの外観検査を行ったところ, 2000個以上の微小粒子による衝突痕が観測され, 大きな衝突痕が8個/ m^2 確認された[4]. しかし, これだけの衝突痕が観測されたが,

1. 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第一研究ユニット
kawakita.shirou@jaxa.jp

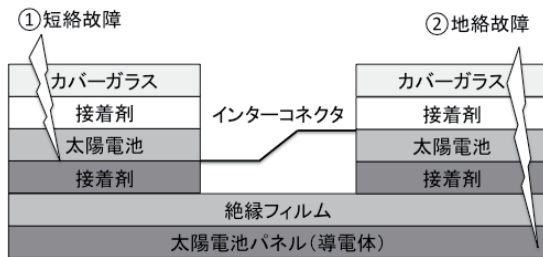


図1： 太陽電池アレイの微小粒子衝突による電氣的損傷モード。

太陽電池とパネル基板との地絡故障などのシステムに影響を及ぼすような発生電力の低下は見られなかった。

最近では、国際宇宙ステーションによる太陽電池の軌道上実験であるFTSCE(The Forward Technology Solar Cell Experiment)にて約400日間の実験後に地上に持ち帰ったところ、いくつかの太陽電池に微小粒子衝突による衝突痕が観測された[5]。しかし、このときも太陽電池の電気性能の低下はほとんど観測されなかった。

図1に、一般的な太陽電池パネルの構造と、デブリやメテオロイドなどの軌道上での微小粒子衝突による太陽電池アレイの考えられる電氣的故障モードを示す。

太陽電池は、宇宙環境の放射線による損傷を防護することを目的に、宇宙環境側に接着剤にて100 μm 厚のカバーガラスが貼り付けられている。この太陽電池は、アルミニウムハニカムと炭素繊維強化プラスチック(CFRP)シートにて構成された太陽電池パネルに絶縁フィルムを介して接着剤で貼り付けられ、太陽電池パネルと電氣的に絶縁されている。これらの太陽電池は、宇宙機システムが要求する発電量となるよう、電氣的に直列および並列に接続される。特に太陽電池アレイの1回路を構成する太陽電池の直列数は、使用する太陽電池の種類や、宇宙機システムが要求する電圧によって200以上になる場合がある。特に、地絡故障は、衝突された太陽電池を含む直列接続されたすべての太陽電池の電気出力が取り出せなくなるため、宇宙機システムに大きな影響を与えることとなる。

微小粒子衝突による太陽電池アレイの電氣的影響として、衝突された太陽電池のみが影響を受ける短絡故障(図1①)と、衝突された太陽電池が太陽電池パネル構体と電氣的に接続する地絡故障(図1②)がある。

この微小粒子衝突による損傷のメカニズムとして以

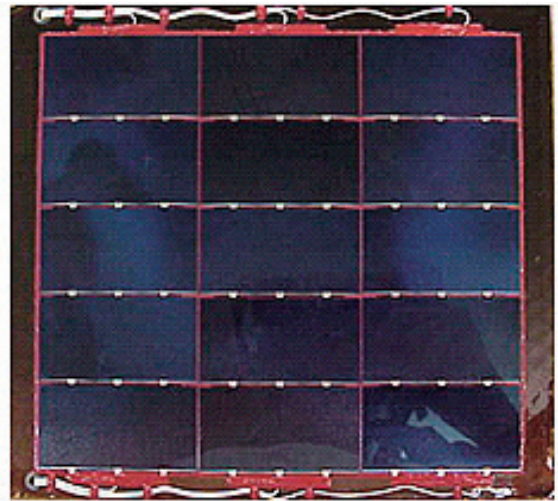


図2： 太陽電池クーボンパネル。

下の4つが考えられる。

- 1) 物理的接触による太陽電池の短絡および太陽電池とパネルとの地絡故障。
- 2) 微小粒子衝突時に発生したプラズマを介しての放電による太陽電池の短絡および太陽電池とパネルとの地絡故障。
- 3) 微小粒子衝突時に発生した放電をトリガーとした、低軌道環境の雰囲気プラズマ中での太陽電池とパネル間での放電による地絡故障。
- 4) 微小粒子による衝突痕を起点とした、軌道上での電子線による帯電・放電による太陽電池とパネル間での地絡故障。

実際の宇宙環境では、太陽電池は発電状態となるため、上記の2)の評価を目的とし、外部電源を用いた衝突試験を実施した。なお、この時、衝突時は外部電源の有無によらず衝突による損傷によってメカニズム1)の物理的接触も発生しており、1)と2)を同時に評価することになる。ここでは、宇宙機システムに大きな影響を及ぼす地絡故障の発生の有無を中心とした評価結果について報告する。

2. 微小粒子衝突試験

ここで用いた太陽電池クーボンパネルは図1と同じ構造であり、人工衛星の太陽電池パネルを模擬した100 μm 厚のカバーガラスを貼り付けた宇宙用シリコ

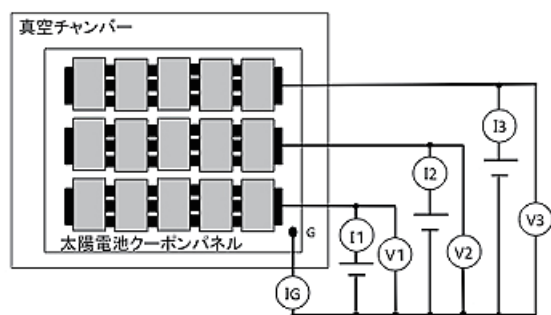


図3： 微小粒子衝突試験 電気回路構成。

ン太陽電池を15枚搭載したパネルである。太陽電池クーボンパネルの外観写真を図2に示す。

これらの太陽電池は5枚が直列に接続し3並列にて構成されている。衝突試験時は、図3に示すような各太陽電池アレイに外部より電源を接続することで、軌道上での発電状態を模擬した。電源の電圧は人工衛星のバス電圧として60 Vもしくは110 Vとし、電流は一般的な1アレイ相当の1.5Aとした。また、衝突時に発生するプラズマを介した放電現象を評価するため、各太陽電池アレイの電圧および電流の時間変化をプローブおよびオシロスコープにて取得した。

衝突試験は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所にて所有する二段式軽ガス銃を用いて行った。衝突方向は太陽電池クーボンパネルに対して垂直にし、微小粒子は太陽電池面側より入射した。また、衝突試験時のチャンバーの真空度は10 Pa程度であった。この真空度は実際の宇宙環境と比べて低圧環境であるが、微小粒子衝突時は、衝突によって発生したプラズマ密度は宇宙環境におけるそれよりも高いことを計測にて確認しており、本試験の目的においては十分と考える。ただし、高真空環境にて同様の試験を行い、この後に述べる衝突試験における太陽電池パネルの電气的影響に差異がないことを確認した方が良いと思われる。

微小粒子は、粒子の種類と故障モードとの相関の有無を調べるために、誘電体としてソーダ石灰ガラスと酸化アルミニウム、導電体としてアルミニウムとした。また、その直径は、軌道上にて太陽電池パネルに十分な確率にて衝突し、かつ影響を及ぼすと考えられる100 μm ～500 μm とした[6]。衝突試験時の微小粒子の速度は約4 km/sであった。

3. 結果と考察

100 μm ～125 μm 径のソーダ石灰ガラスをプロジェクタイトルとした衝突試験を行った。試験後の太陽電池クーボンの外観写真を図4に示す。この時、多数の衝突痕がひとつの太陽電池に集中的に形成された。衝突試験時の電気信号の計測結果より、2 msec程度の電源が関与した2次アーク放電が観測されたが、太陽電池アレイの地絡故障には至らなかった。

次に、上記の衝突試験を行ったクーボンパネルに、150 μm ～175 μm 径のソーダ石灰ガラスをプロジェクタイトルとした衝突試験を行った。このとき、衝突箇所は、先の試験にて衝突したところと異なるところにな

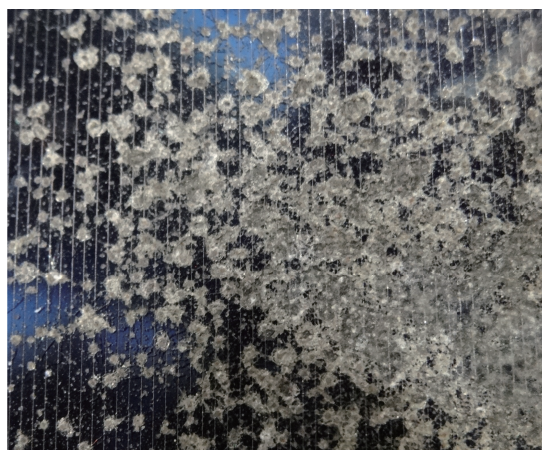


図4： 100 μm ～125 μm 径のソーダ石灰ガラスの衝突痕。

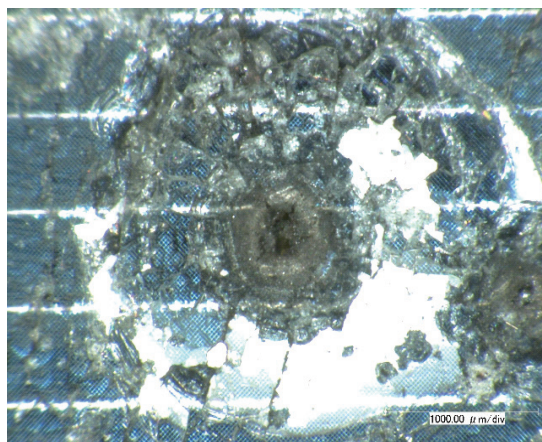


図5： 150 μm ～175 μm 径のソーダ石灰ガラスによる衝突痕。

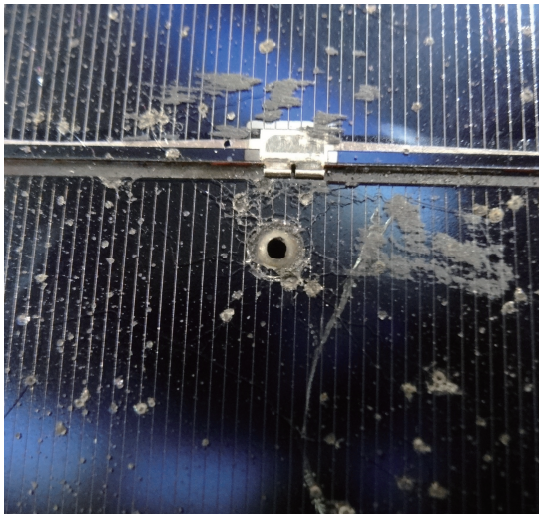


図6： 400 μm ～600 μm 径のアルミナによる衝突痕(中央部分)。

るよう、太陽電池クーポンパネルをセットした。試験後の外観観察を行った結果、数個の衝突痕が観測された。衝突痕の光学顕微鏡写真を図5に示す。これより、最表面のカバーガラスが衝突痕を中心とした波紋が形成されているのが分かる。これは、衝突時に表面温度の急激な温度上昇による融解および降下による凝固のためと考えられる。また、衝突時の電気計測において、2次アーク放電は観測されず、地絡故障は確認されなかった。

次に、上記の2回の衝突試験を行ったクーポンパネルに、400 μm から600 μm 径の酸化アルミニウムをプロジェクティルとした衝突試験を行った。試験後の外観写真を図6に示す。この結果、2個の衝突痕が形成され、いずれもパネルを貫通していた。衝突時の電気計測において、2次アークは観測されず、地絡故障は確認されなかった。

これらの衝突試験前後の太陽電池アレイおよび各太陽電池の電気性能を測定した結果、100 μm ～125 μm 径のソーダ石灰ガラスの衝突試験にて多量の衝突痕が発生した太陽電池に、並列抵抗の低下によるある程度の電気性能の低下が見られた。この挙動は、VEGA-1, 2の再現試験と同じであった。また、同試験における他の太陽電池や、他の衝突試験による太陽電池に顕著な電気性能の低下は観測されなかった。この電気性能の劣化は、1)衝突痕による太陽光の透過率の減少による発生電流の低下、2)衝突痕によって太陽電池が損傷

し部分的にショート状態となったことによる発生電力の低下、が原因と考えられる。また、100 μm ～125 μm のソーダ石灰ガラスの衝突試験の電気性能劣化は多量の微小粒子が衝突したためであり、人工衛星軌道にて予測されるようなスペースデブリ・マイクロメテオロイドの粒子数においては殆ど影響しないと考えられる。

上記の衝突痕の光学顕微鏡による観察を行い、各衝突痕の深さを調べた。この結果、100 μm の衝突痕はカバーガラス内、200 μm の衝突痕は太陽電池を貫通しパネル表面まで、500 μm は完全に貫通することが分かった。以上より、本試験は、太陽電池クーポンパネルへの微小粒子衝突により想定される全ての地絡故障を中心とした電氣的損傷モードを評価できたと考える。

最後に、プロジェクティルの電氣的性質による影響を調べるため、上記の衝突試験を行った太陽電池クーポンパネルに、125 μm ～150 μm 径のアルミニウムのフレークをプロジェクティルとした衝突試験を行った。本試験の各太陽電池アレイの印可電圧はすべて100 Vとした。衝突速度はこれまでと同じく約4 km/sであった。衝突試験後の外観観察を行った結果、200 μm 径のソーダ石灰ガラスの衝突試験時と同サイズの衝突痕が多数観測された。また、本試験時の電気計測にて200 msecの2次アーク放電が観測されたが、試験後の電気性能を測定したところ、太陽電池アレイの電気出力がこれまでと同様な挙動で若干低下したが、太陽電池の短絡および基板との地絡故障は観測されなかった。

4. まとめ

電力を発生した状態を模擬するために、電圧を印加した太陽電池クーポンパネルに0.5 mm以下の微小粒子による衝突試験を行い、その電気性能への影響を評価した。この結果、微小粒子の衝突によって、若干の電気性能の低下は観測されたが、太陽電池の短絡および基板との地絡故障は発生しなかった。

また、1項に述べた損傷のメカニズム3)については、宇宙環境プラズマよりも、メカニズム2)における微小粒子衝突時のプラズマの密度が高いことから、本研究の主眼である地絡故障の有無の評価は、ここでの実験にて包含されていると考える。さらに、メカニズム

4)については、衝突後の帯放電試験にて、現在の宇宙機システムの電気設計においては、放電による地絡故障が発生しないことが確認されている [7].

以上の地上での衝突試験や、軌道上より持ち帰った太陽電池の性能評価より、軌道上にて微小粒子衝突による太陽電池パネルへの電气的影響はごくわずかであり、宇宙機システムに影響を及ぼすほどではないと考える。但し、本研究で評価試験に用いた太陽電池はバルクタイプであり、また太陽電池パネルはリジットタイプであることから、将来の宇宙用太陽電池パネルとして計画されている薄膜太陽電池や、それをベースとした軽量太陽電池パネルなどの異なる構造でかつ地絡故障が懸念される場合は、本試験と同様の試験による評価が必要と考える。

謝 辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構 デブリ防護設計標準WGの活動として行いました。関係者に深い感謝の意を表します。また、本研究は宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 スペースプラズマ(超高速衝突実験)の共同利用のサポートを受けている。

参考文献

- [1] ADEOS-II不具合原因究明チーム, 2004, 第1回宇宙環境シンポジウム, 84.
- [2] ADEOS-II不具合原因究明チーム, 2004, 第1回宇宙環境シンポジウム, 128.
- [3] Letin, V. A. et. al., 2004, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3644.
- [4] Gerlach, L., 1995, HST Solar Array Workshop ESA WPP-77, 257.
- [5] Jenkins, P. et. al., 2008, 8th European Space Power Conference.
- [6] Kanemitsu, Y. et. al., 2012, JAXA-RM-11-020E.
- [7] 豊田裕之 他, 2005, 第2回宇宙環境シンポジウム, 173.