

1. はじめに

これまでに、宇宙空間において宇宙機がデブリおよびメテオロイドによる衝突が原因と考えられる不具合が多数報告されている。最近の例で言えば、2006年3月にロシアの通信衛星「エクスプレス AM11」(2004年4月打ち上げ)において微小粒子が熱制御パイプに衝突したために制御材が噴出し、衛星の機能を維持できなくなる事故が発生した[1]。また、平成2006年9月に帰還したスペースシャトルの外観を検査した結果、先と同じ熱制御系に微小な衝突痕が観測された[2]。

一方、国内においては、環境観測技術衛星「みどり2号」(ADEOS-II)の太陽電池パネルの発生電力の異常運用が発生する以前[3]、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アレイ相当の発生電力の低下および回復が発生した。この原因究明の結果、太陽電池パネルへの微少粒子の衝突がひとつの候補と言われている[4]。同じ太陽電池パネル系の不具合としては、1984年にハレー彗星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、微少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た。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 の微少粒子を10~15km/sの高速で10⁵から10⁶個衝突させた結果、電気性能の劣化が観測された[5]。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。

以上の不具合を鑑み、JAXAにおいて平成17年3月に軌道上でのデブリ衝突および防護に関する考え方を検討するチームとして設計標準 WG 3が発足された。ここでは、宇宙機のデブリ衝突のリスクアセスメントや防護方法に関して提案することを目的としており、平成20年3月にデブリ防護マニュアルを報告する予定である。ここでは、本検討チームにおいて行っている微小粒子の高速衝突試験に関して報告する。

2. 衝突試験

本 WG にて対象としている宇宙機材料およびコンポーネントは、

- 1) 電源系：太陽電池パネル、電力ハーネス
- 2) 構体系：アルミニウムスキンハニカム、CFRFP スキンハニカム
- 3) 熱制御系：多層断熱フィルム (MLI) ,
- 4) 防護系：強化型多層断熱フィルム、アルミニウムプレート

である。これらは、宇宙機の表面材料であり、軌道上での衝突確率が高くかつ衝突による影響評価の報告がほとんどない。一方、衝突試験に使用する微小粒子 (プロジェクタイト) のサイズは、軌道上にて衝突確率が高く、かつ衝突による影響が大きいものとして、0.1 から 1.0mm とした。プロジェクタイトの種類は、ソーダライムガラス、ステンレス、アルミ

ニウムである。

本衝突試験で用いた試験装置は、JAXA 宇宙科学研究所にて所有する二段式軽ガス銃である。サンプルは、ロータリーポンプにて 0.1Torr 程度の真空環境にしたチャンバー内に設置された。試験時のサンプルの温度は室温である。プロジェクタイトルの速度は装置の最大速度に設定し、ほぼ 4km/s であった。

以下に、各宇宙機材料およびコンポーネントの衝突試験の結果を記す。

3.試験結果

3.1 電源系

電源系として、宇宙環境に暴露されており、かつ総面積が大きい太陽電池パネルおよび電力ハーネスへの高速衝突試験を行った。

本試験にて用いた太陽電池パネルは、太陽電池が宇宙用シリコン太陽電池、サブストレートが CFRP スキンのアルミニウムハニカムコアの構造をとる一般的なタイプである。試験時に太陽電池パネルには電源が印加されており、太陽電池が Hot に、パネルを Return とした。これは、微小粒子の衝突によって発生したプラズマ介して電源のエネルギーが放電に供給されることによって発生する 2 次放電および持続放電の有無、およびそれによる影響を評価するためである。

電力ハーネスは、太陽電池パネルに一般的に使用されているタイコレイケム社製の 55-0112-22-9 電線である。サンプルは 3 層のハーネスとアルミニウムプレートにて構成されており、最表面と第 3 層を電源の Hot とし、2 層とアルミニウムプレートを Return としている。サンプルのチャンバー設置時の外観写真を図 1 に示す。

試験のパラメータとして、プロジェクタイトルのサイズ(0.1,0.2,0.5mm)、種類 (ガラス, ステンレス)、電源 (電源 : 110V 一定,電流:1.5,3.0, 9.0 A) とした。また、太陽電池パネルは、プロジェクタイトルの入射方向の影響の有無を評価するため、表面および裏面からの衝突試験を行った。試験結果を以下に示す。

- ・ 太陽電池パネルは、ほぼすべての衝突試験にて 2 次放電が発生した。しかし、持続放電には至らなかった。また、これにより太陽電池の短絡および地絡故障は発生しなかった[6]。
- ・ 電力ハーネスは、プロジェクタイトルが 0.3mm 以上のサイズにて表面およびその下層ハーネス間での持続放電が発生し、芯線の溶解による短絡もしくは開放に至る。試験後のサンプル外観を図 2 に示す。

3.2 構体系

構体系として、アルミニウムおよび CFRP スキンのアルミニウムハニカムサブストレートへの衝突試験を行った。アルミニウムスキンは、種類が A2024 で厚さが 0.62mm である。CFRP はクロスタイプで厚さが 0.3mm である。サブストレート厚は 1 インチである。

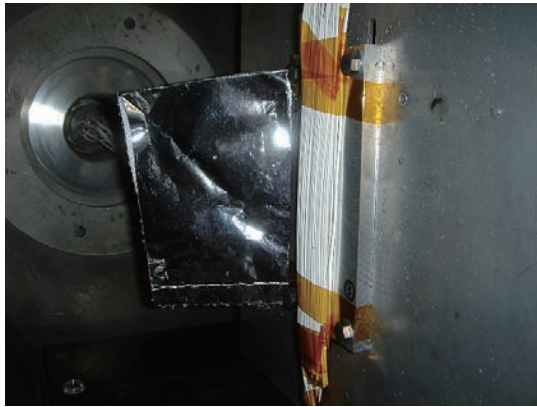


図1 電力ハーネス束（チャンバー設置）



図2 放電による電力ハーネスの溶断

衝突の影響評価として、プロジェクタイトルのサイズをパラメータとして、貫通の有無および貫通後の基板（アルミニウムプレート 2024-T3）の衝突痕とした。

本試験は、プロジェクタイトルの種類をガラスとステンレス、サイズを 0.2, 0.3 および 0.5mm とした。試験の結果を以下に記す。

- ・アルミスキンサブストレートにて、プロジェクタイトルが 0.15mm のガラスにおいては、貫通せず。
- ・両スキンのサブストレートにて、プロジェクタイトルが 0.5mm のステンレスの場合、貫通痕が発生した。貫通痕の深さは、両サブストレートともに 1.0mm 以下であった。

3.3 熱制御系

熱制御系として、多層断熱フィルムをサンプルとした衝突試験を行った。ここで用いたサンプルは、12層の MLI である。その構成は、最表面および最下層がアルミナイズドポリイミドフィルムで、その厚さ 25 μ m である。また、内層の 10層は厚さ 5 μ m のポリエステルである。

サンプルは、先の構体系で用いたアルミスキンサブストレートの上に、ほぼ隙間なく貼り付けた。

試験条件は、プロジェクタイトルがガラスで、サイズが 0.1, 0.25 mm である。試験結果を下記に記す。

- ・0.1mm のプロジェクタイトルでは、MLI 最下層部にくぼみが生じており、裏面のサブストレートへの影響はなかった。
- ・0.25mm のプロジェクタイトルでは、プロジェクタイトルは MLI を貫通し、表目のアルミスキン層にて衝突痕が発生した。この衝突痕と、アルミニウムスキンに直接プロジェクタイトルが衝突した場合の痕とを比較した結果、そのサイズはアルミニウムスキンに直接衝突したもののほうが大きかった。

以上より、0.3mm 以下の微小粒子においては、ある程度は MLI にシールド効果があることが分かった。

3.4 防護系

軌道上にて微小粒子の衝突による影響が懸念される部位においては、適切な防護を施すことによって、衝突確率を下げリスクを低減させる必要がある。その防護の手段として、アルミプレートおよび強化型多層断熱フィルムを考え、これらの防護効果に対する試験をおこなった。

ここで用いたアルミプレートは、厚さが 1.0 と 1.5mm である。また、強化型多層断熱フィルムとは、MLI の表面層下に 3 層のベータクロス (厚さ 25 μ m) を挿入したものである。

試験条件は、プロジェクタイトルをステンレス、サイズを 0.3 と 0.5mm とした。防護される対象とし電源系の電力ハーネス束とした。試験結果を下記に記す。

- ・ 強化型多層断熱フィルムの試験の結果、電力ハーネス束への影響は無い場合と比べて、0.3mm サイズでは傷がつくのみであり、0.5mm にて放電による短絡故障が発生した。これより防護効果は得られたと考える。
- ・ アルミプレートにおいて、厚さが 1.0mm の場合は、プレートが無い場合と比べて、プロジェクタイトルのサイズが 0.3mm では持続放電が発生せず、0.5mm にて持続放電が発生し電氣的に短絡に至った。一方、厚さが 1.5mm の場合は、プロジェクタイトルのサイズが 0.5mm にて貫通は発生せず。高い防護効果が示された。

以上より、電力ハーネス束を対象とした防護においては、強化型多層断熱フィルムは防護効果がある程度はあること、アルミプレートは 1.5mm 厚以上にて高い防護性が確認された。

4.まとめ

人工衛星の表面材料の微小粒子の衝突試験を行った。その結果、太陽電池パネルは微小粒子の衝突による短絡および地絡には至りがたいことや、電力ハーネスは放電によって電氣的に短絡もしくは開放故障に至ることなど、新たな多くの知見を得ることができた。19 年度も、構体系および防護系を中心とした衝突試験をおこない、デブリ防護設計の標準をまとめあげる。

参考文献

- [1] <http://www.rscg.ru/ru/news/news/2006.03.29.html>
- [2] http://www.space.com/missionlaunches/061005_sts115_atlantis_damage.html
- [3] ADEOS-II 不具合原因究明チーム、「ADEOS-II 不具合原因究明概要」第 1 回宇宙環境シンポジウム (2004 年 12 月) p.84-92.
- [4] ADEOS-II 不具合原因究明チーム、「ADEOS-II 100W 発生電力変動調査」第 1 回宇宙環境シンポジウム (2004 年 12 月) p.128-135.
- [5] V.A. Letin, A.B. Nadiradze, L. S. Novikov, “Solar Cell Shunting Under High Velocity Impact of Solid Particles”, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2004, p.3644-3647.
- [6] 平成 17 年度 スペースプラズマ研究会