

ソーラー電力セイル用薄膜材料の耐宇宙環境試験

田中 孝治(JAXA), 相馬 央令子(JAXA), 横田 力男(JAXA), 豊田 裕之(JAXA),
久木田 明夫(JAXA), 嶋田 貴信(JAXA), 佐々木進(JAXA), 中園 智幸(AES)

1. はじめに

従来の木星以遠の探査では,宇宙機の電源には原子力電池が採用されてきた.2011年8月に打ち上げられたNASAの木星探査機「ジュノー」が,電源として太陽電池を用い,原子力電池を採用しない初めての木星以遠の探査機となる.木星圏では,太陽光のエネルギー密度は地球近傍と比較して25分の1にまで減少する.ジュノーでは地球近傍で12kW程度の発電能力を有し,木星軌道で500W弱発電可能な太陽発電システムを搭載している.一方,JAXAでは,木星近傍で5kW以上の発電能力を有し,ペイロード質量もジュノーの数倍である500kg程度を目指すソーラー電力セイルの開発が行なわれている.その小型技術実証機である「IKAROS」が2010年5月に打ち上げられ,セイル膜面上に搭載した薄膜発電システムの軌道上実証実験が行なわれた.

従来の宇宙用発電システムは,太陽電池にはバルク型を採用している.その厚さは数十~百 μm 程度を有し,さらに耐宇宙環境性のために数十~百 μm 程度のカバーガラスを装着して用いている.リジッドなハニカムパネル上に太陽電池を貼り付け,セル間の接続,集電用ケーブル配線を行い太陽電池アレーを形成するため,質量特性は数十W/kg程度の性能にとどまっている.また,バルク型の太陽電池は,製造上,結晶基板サイズの制約を受け,一枚の大きさは数cm角となり,大規模システムでは膨大な量の結線,ケーブル配線が必要となる.我々は,軽量大面積太陽発電システムの開発のため,薄膜太陽電池やフレキシブル基板の応用を検討している.

現在の商用化されている太陽電池の生産の主流はバルク型シリコン太陽電池であるが,民生太陽電池市場では,より低コスト化が可能と考えられる薄膜太陽電池の市場導入が開始され,研究開発も活発である.アモルファスシリコン太陽電池(a-Si太陽電池)は光吸収係数が高いため薄膜化が可能であるが,変換効率が10%前後で長らく推移しており,今後も変換効率の向上はあまり期待できない.しかし,プラスチックフィルム膜上に製造が可能であり,軽量化という面で大変優れている.薄膜太陽電池の中ではCIGS太陽電池がもっとも高い変換効率を有しているが,フィルム上での形成は開発途上である.薄膜太陽電池の特徴は,Roll to Rollでの製造が可能であり,これにより,低コストで大面積化が可能となることである.太陽電池内部でレーザースクライブにより直並列回路を構成できるため,個々の発電ユニットの単位を大きくすることが可能である.ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」では,a-Si太陽電池を使用した薄膜発電システムの実証実験が行われている.このような薄膜太陽電池を使用した薄膜発電システムでは,太陽電池間を結線する集電網も軽量で柔軟性を有した状態で数十m規模での薄膜上形成が必要である.導電性インクを用いた回路パターン印刷やエッチング技術を用いれば,低コストで大面積な発電システムを構築できる可能性がある.

一方,大電力システムにおいて,電力効率向上のために,送電電圧を高くし,ジュール損を少なくする必要がある.薄膜発電システムでは,フィルム上に形成された集電路の沿面放電や貫通放電現象が,送電電圧を決定する上では重要である.本報告では,我々が検討している薄膜発電システムで採用の可能性のあるフィルム材料に関して,放電特性の評価試験,耐宇宙環境性評価としてUV照射による特性の比較を実施した.その結果に関して報告する.

2. 薄膜発電システムの開発目標

木星圏探査のための電力セイルでは,発電システムに関して以下の要求がある.

- 約2000m²で木星近傍において5.5kW程度の発電を行う.
- 長さ1~5m,折幅30~40cm程度の発電膜を組み合わせて,電力セイル膜を形成する.
- 発電部の質量は300kg程度で実現する.

- 収納展開のために、曲率半径 10mm 程度の柔軟性を有すること。
- カールによる膜の応力を遠心力により発生する展張力以下に抑えること。
- 10 年程度の寿命を有すること。

上記要求では、発電規模は地球近傍では 100kW 以上となり、国際宇宙ステーションに搭載されている発電システムよりも大きくなる。IKAROS に搭載された薄膜発電システムの面積は 10m² であるから 200 倍大きなシステムである。図 1 に軌道上で展開した「IKAROS」を示す。また、コストに関しても一桁程度の低コスト化を目指している。

上記に対して、我々は、質量特性 1kW/kg 以上、展張力以下の膜応力、曲率半径 5mm 以下の薄膜柔軟構造を有する発電膜と発電膜間を電氣的及び機械的に接続する高い耐宇宙環境性を有する薄膜集電路の開発を行っている。現在、約 2m 程度のサイズの試作を行いながら、数十 m サイズの製造技術の確立を目指している。

3. 薄膜集電路

薄膜太陽電池は、内部直列化により高電圧化が可能であるが、材料の絶縁特性により上限値は制限される。また、発電ユニット間は、薄膜集電路で接続されるが、沿面放電を起こさない範囲での回路構成が必要である。図 2 に IKAROS に搭載した発電膜を示す。発電面及び集電面は、全面保護フィルムで覆われている。従って、多層構造をとる発電膜の貫通放電と沿面放電のみで耐電圧が決まると考えられるが、一方で、デブリ衝突により貫通孔が生じ、あるいは、多層膜間の接着の劣化により剥がれが生じた場合、電位を持つ導体部分が宇宙空間に露出する可能性がある。このとき、高い電位が印可された導体部は、周囲の電子を引き込み、ある電位以上では、スナップオーバー減少により電力損失が発生する可能性がある。デブリによる貫通孔の発生は確率的に生じ避けがたいが、剥離は、十分な耐宇宙環境材料で回避する必要がある。IKAROS で用いた、シリコン系接着剤では、10 年以上の寿命の実現は不可能であるため、我々は、耐宇宙環境性の高い接着剤として熱可塑性ポリイミドを用い、熱融着により接続を行う薄膜集電路の開発を行っている。試作した集電路の試験サンプルを図 3 に示す。本集電路は、両面粗化銅箔にカプトン系ポリアミック酸を塗工し 2 層 CCL を製作し、エッチングによるパターン形成後、両面に熱可塑性ポリイミドのカバー層を形成している。この、熱可塑性カバー層により、発電膜と集電膜を熱融着により接続を行う集電路の断面を図 4 に示す。

4. 実験方法

本実験では、5 種類のサンプルに関して、絶縁強度確認試験を行った。絶縁強度は、貫通放電開始電圧と沿面放電開始電圧で評価を行った。サンプルの種類を表 1 に示す。

表 1 試験サンプル

サンプル	備考
熱可塑性ポリイミド(PI) : ISAS-TPI	熱可塑性 PI, 厚さ : 12.5 μm, 25 μm
低熱膨張率 PI	厚さ : 10 μm, 33 μm
カプトン系 PI	厚さ : 25 μm
接着層付 PI	カプトン系ポリイミドに ISAS-TPI をコーティング
フィルム集電路	カプトン系 PI を用いた 2 層 CCL を用い、回路パターンエッチング後両面に ISAS-TPI をコーティング

また、耐宇宙環境性評価の一つとして、UV 照射試験を実施した。照射試験装置を図 5 に示す。照射強度は AMO の条件で 5Sun で実施した。また、照射時のサンプルの温度は 80°C 以下に制御した。照射期間は、30ESD である。

放電試験には,ISAS 大学共同利用設備の真空チャンバを使用した.図6に真空チャンバと放電実験の様子を示す.図7に沿面放電用試料を示す.電極パターンの間隔は0.5mm, 1.0mm, 5.0mm である.各電極間に電圧を印加し,放電開始電圧を記録した.

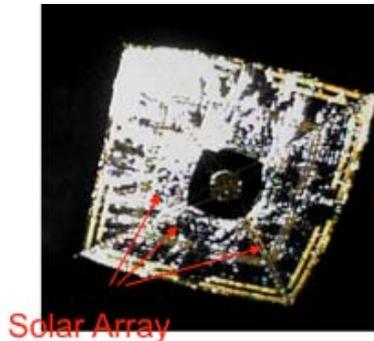


図1 軌道上での IKAROS

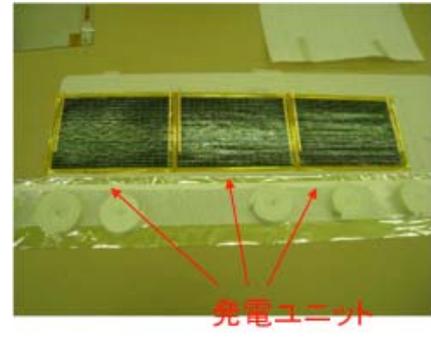


図2 IKAROS 搭載発電膜



図3 熱融着層付ポリイミドフレキシブル集電路

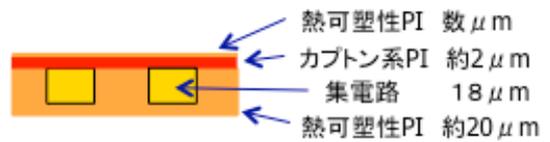


図4 フレキシブル集電路の断面



図5 UV 照射試装置

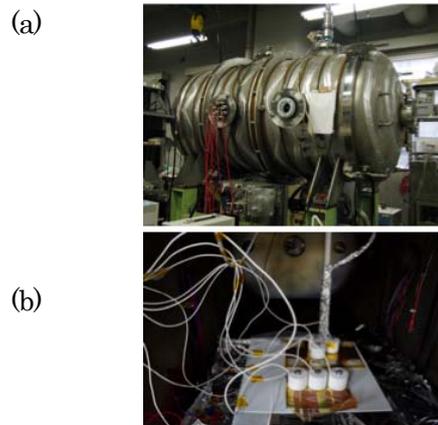


図6 (a)真空チャンバと(b)放電実験装置

5. 実験結果

図8に沿面放電試験結果を示す.○が低熱膨張率 PI, ●がISAS-TPI, ■が集電路,□がUV照射後の集電路の結果である.ISAS-TPIは線間距離を0.5mm から5mm まで変えても,3kV 程度で放電が発生した.一方,低熱膨張率ポリイミドフィルムの場合,線間距離を0.5mm から5mm まで変化させたとき,放電開始電圧が直線的に増加した.間隔5mm の時の放電開始電圧は,10.4kV である.UV 未照射の集電路は,0.5mm 間隔の場合,極めて低い電圧で放電を開始する場合があったが,1mm 程度で低熱膨張率 PI と同等の値であった.しかし,UV 照射後



図7 沿面放電用試料パターン

は、放電開始電圧が大きく上昇した。

図 9 に貫通放電試験結果を示す。○が低熱膨張率 PI, ●が ISAS-TPI, □がカプトン系 PI, ▲が接着層付 PI, △が UV 照射後の接着層付 PI, ◆が未照射集電路, ◇が UV 照射後の集電路の結果である。ISAS-TPI の場合は、厚さ 12.5 μm の時 5.7kV であるのに対して、25 μm では 2.7kV と放電開始電圧が低下している。一方、低熱膨張率ポリイミドフィルムは、厚さの増加にほぼ比例して、放電開始電圧が高くなっている。厚さ 10 μm で約 4kV の耐電圧が確認された。接着層付 PI、集電路とも UV 照射後貫通放電開始電圧の低下が認められた。

6. 考察

低熱膨張率ポリイミドフィルムに関しては、沿面放電及び貫通放電試験結果は、いずれも距離や厚さに関して、良好な結果が得られた。しかし、熱可塑性ポリイミドである ISAS-TPI に関しては、沿面放電、貫通放電ともに特異な現象が見られた。電極間距離を広げても放電開始電圧が上がらず、厚さが厚い方が低い電圧で貫通放電が発生する現象が見られた。一方で、UV 照射により、沿面放電開始電圧の上昇が見られた。UV 照射時 80°C までサンプル温度が上昇しているため、残留溶媒等の揮発性物質が減少している可能性がある。これにより、電圧印可時の膜表面におけるコロナ放電の発生が抑制されるようになり、沿面放電が起こりにくくなったと考えられる。しかし、貫通放電に関しては、UV 照射により特性が劣化している。これは、イミド膜が UV 照射により劣化したためと考えられる。しかし、30ESD の場合、5kV 以上の特性が維持されている。

7. まとめ

ソーラー電力セイル用の超軽量薄膜発電システムに使用を検討しているフィルム集電路に関して、絶縁特性評価試験を行なった。UV 照射による特性の変化を調べた。貫通放電に関しては、UV 照射により絶縁特性の劣化が見られた。熱融着に用いる熱可塑性 PI に関して

は、総合的に絶縁特性が低い結果が得られている。乾燥等の製造過程における条件の検討が必要と考えられる現象も見られており、製造管理も含め再検証を行う予定である。紫外線照射による劣化傾向が、今回確認されており、外惑星探査においては、太陽から遠ざかるにつれて紫外線強度は低下するが、ミッション期間内における照射量に対する劣化の評価は必要である。劣化予測のためにさらなる評価試験を実施する予定である。

謝辞

本研究は、宇宙科学研究所のスペースプラズマ実験設備を使用した。関係者に感謝する。

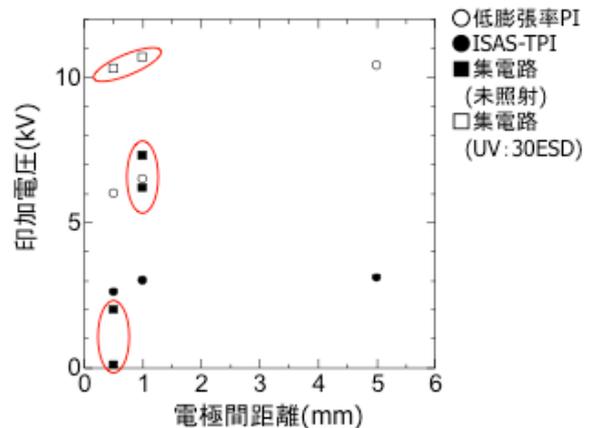


図 8 沿面放電試験結果

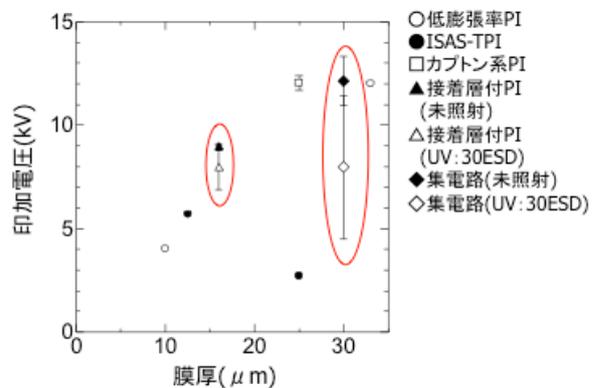


図 9 貫通放電試験結果