

電力セイル用膜面集電回路の放電特性の評価

田中 孝治 (JAXA), 豊田 裕之 (JAXA), 久木田 明夫 (JAXA), 嶋田 貴信 (JAXA)
細田 聡史 (JAXA), 相馬 央令子 (JAXA)

1. はじめに

ソーラーセイルは、宇宙空間で大型の薄い帆（セイル）を展開し、太陽からの光の粒子を反射する力で推進する宇宙機である。そのアイデアは100年程度前からあったが、極めて軽量かつ広い面積を保持できる薄膜鏡が必要であるため、実現が困難であった。しかし、近年の薄膜技術の伸展によりソーラーセイルは実現に向かいつつある。特に、JAXAでは、ソーラーセイルの薄い帆の上に、薄膜太陽電池を搭載し、その発生電力で電気推進を作動させるソーラー電力セイルが開発されている。ソーラー電力セイルは、ソーラーセイルによる推進と薄膜太陽電池を貼り付けた電力セイルによる発電を組み合わせた日本オリジナルのコンセプトであり、ソーラーセイルとのハイブリッド推進を実現する。

従来、火星よりも遠方にある惑星探査にはRTG等の原子力エネルギーが使用された。JAXAでは原子力エネルギーではなく、ソーラー電力セイルを用いた木星圏探査計画が検討されている。この探査計画は、母船、木星オービター、（木星プローブ：オプション）で構成され、探査機は4.5年かけて木星へ到達する。木星スイングバイ時にオービターが分離され、木星周回軌道へ投入される。プローブは木星大気へ突入し、木星極域の大気の観測を行う。母船はさらに5年かけてトロヤ群小惑星へランデブする。

ソーラー電力セイルでは、太陽輻射圧を受ける帆の一部を発電膜で構成するため、発電膜には極度の軽量化が求められる。現在の商用化されている太陽電池の生産の主流はシリコン太陽電池である。一方で、宇宙用に関しては、太陽電池のコスト以上に衛星の打ち上げコストが高価であるため、より高い質量特性が期待できるIII-V族系結晶化合物太陽電池が使用されるようになってきた。三接合型太陽電池の場合、28%以上の変換効率が得られる。しかし、いずれもバルク型太陽電池であるため、薄膜でできたセイル膜の上に軽量で柔軟性を有して形成することは難しい。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。現在商業ベースで先行してい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、効率が10%前後と低いという問題がある。しかし、高分子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。数十 μm のフィルム上に1 μm 程度の発電層が形成されるのみであるため、軽量化が実現できる。太陽電池内部でレーザートリミングにより直並列回路を構成できるため、個々の発電セル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。本研究では、各種薄膜回路形成技術を比較し、ソーラー電力セイルの薄膜発電システムに応用可能な技術開発を実施している。本報告では、その予備的な結果に関して、述べる。

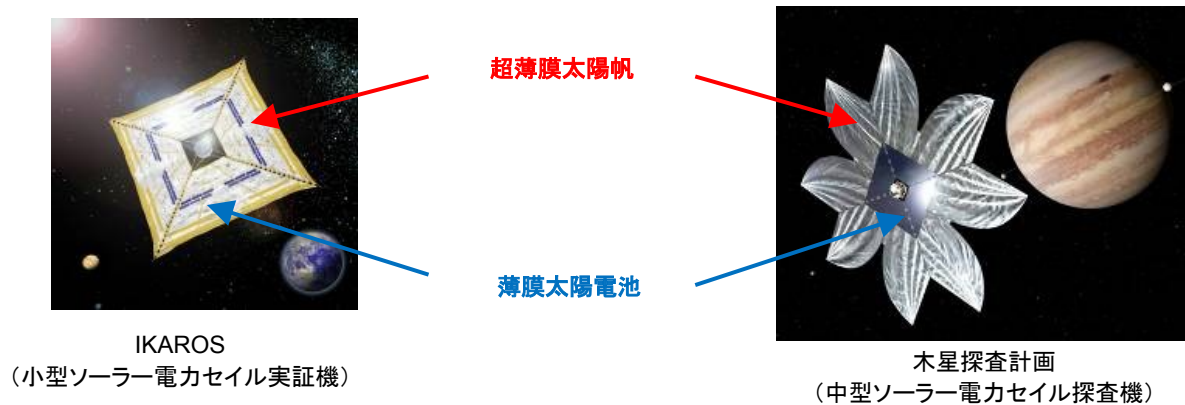


図1 木星探査計画と IKAROS

2. IKAROS の概要及び木星探査計画の要求仕様

図1に、小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) と木星探査計画を示す。IKAROS のセイル膜サイズは、膜面の差し渡しは20mであり、膜の中央に直径1.5mの円筒状をしたバス部が配置されている。全体質量は315kgであり、膜面質量は15kgである。セイル膜は厚さ $7.5\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムで構成されるが、膜面の一部に、薄膜太陽電池や姿勢制御用液晶デバイス及び理学観測用各種センサが取り付けられている。図2にセイル膜の一部を示す。

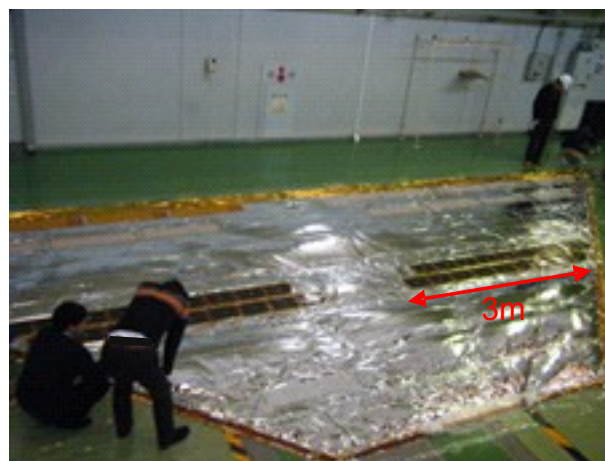


図2 セイル膜 (1 ペダル分)

IKAROS に搭載する薄膜発電システムは $220 \times 320\text{mm}$ の薄膜太陽電池を3枚直列接続し、それを6回路並列に接続している。IKAROS では、薄膜太陽電池の接続に銅箔をポリイミドフィルムで挟んだフラットケーブルを採用した。フラットケーブルをセイル膜上にはわせ、太陽電池の接続部で半田付けを行っている。しかし、よりサイズの大きなシステムでは、集電路は膜面上に形成した方が、製作が容易と考えられる。

木星探査計画における、薄膜発電システムへの要求仕様を以下に示す。

- 木星圏での12kWの電力を発生(地球近傍で300kW相当)
- 高比推力電気推進のための安定した電力供給とミッション期間を通した発電性能の維持
- 質量は300kg程度
- 搭載面積は 2500m^2 (50m角)程度
- 低コスト

木星探査では、発電膜は一辺が50mサイズとなることが予想され、従来の宇宙機とは異なる製造手法が要求さ

れ、太陽電池及び集電路はその製造手法に対応できなければならない。

3.

薄膜上導電路の形成方法

今回は、2種類の導電路の試作と試験を行った。一つは、銀ペーストを用いたスクリーン印刷、もう一つは、エッチング法である。エッチングを行う銅張積層板は2種類有り、接着剤を使用しない2層CCL（銅張積層板）及び接着剤でCu箔をフィルム上に貼り付ける3層CCL（接着剤を用いた銅張積層板）である。

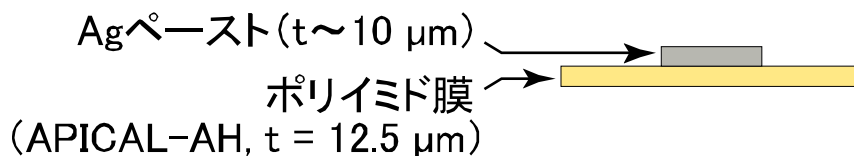


図3 Ag ペーストを用いたスクリーン印刷

図3にAgペーストを用いスクリーン印刷での回路の概略を示す。導電路の厚みは、Agペーストの粘度に依存するが、十マイクロメートル程度が上限となる。導電路の品質は、Cu箔に比べると低い（高抵抗・低強度）が、導電路を印刷で作製するため、材料の無駄がない。大面積へ形成することが容易と考えられる。

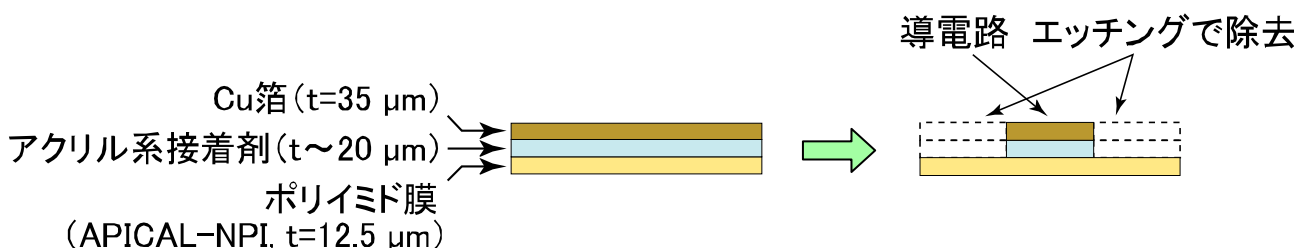


図4 エッチング法

図4にエッチングでの概略図示す。導電路の厚みは銅箔の厚みとなる。導電路の品質は高い（低抵抗・高強度）が、Cu箔の大部分がエッチングで除去され、無駄が多い。大面積に形成するには設備の制約が大きい。表1に今回試作で用いたフィルムの特性を示す。アピカルは、カプトンと同じ分子構造を有するカネカ製のポリイミドフィルムである。PIXEOはカネカ製の2層CCLである。

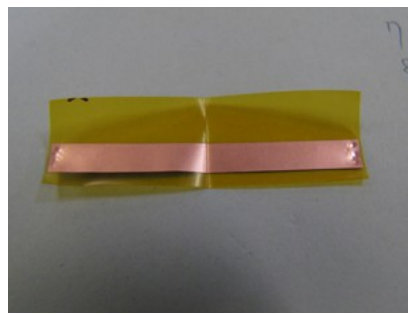
表1 フィルムの特性

フィルム	厚さ (μm)	絶縁破壊電圧 (kV)	Cu箔の厚さ (μm)
Apical (NPI)	12.5	3.925	35、17.5
PIXEO	14	7.5	9
			Agペースト
APICAL (AH)	12.5	3.9	5～10

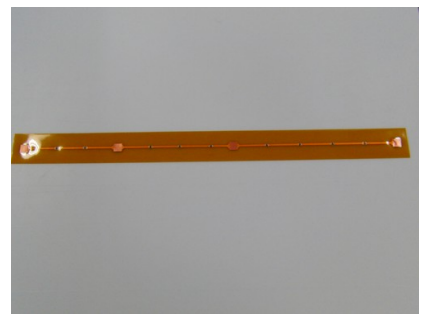
試作した導電路を図5に示す。アピカルを用いたエッチング方式にはチップ抵抗を実装した薄膜導電路も試作した。これら、試作導電路を用い、放電特性試験（縁面放電、貫通放電）、放射線試験、機械強度試験等を実施している。



Apical(AH)+銀ペースト



Apical(NPI)+Cu箔



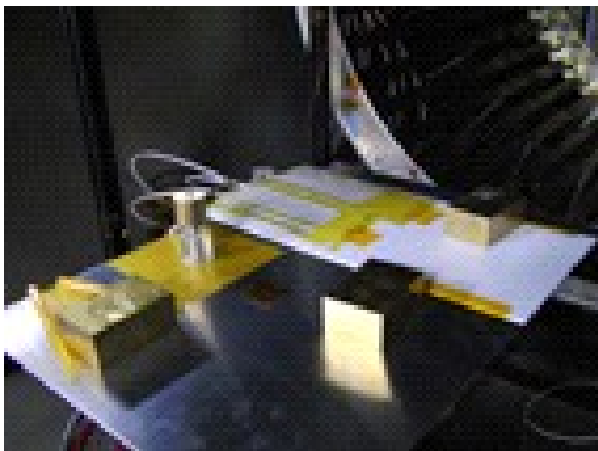
Apical(NPI)+Cu箔+チップ抵抗

図5 試作導電路

4.

放電実験

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に実験装置を示す。



(a) 放電試験試料の設置



(b) 真空チャンバ

図6 放電実験装置

図6(a)に試験試料の写真を示す。真空チャンバの外部から高電圧電源を用い電圧印加を行い、オシロスコープで放電の開始をモニタした。

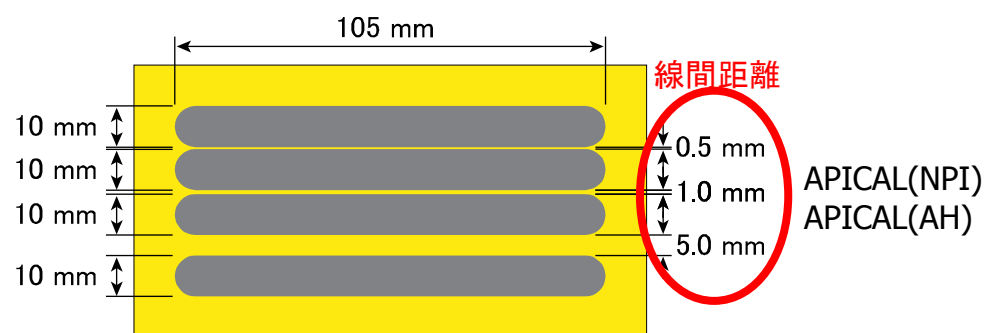


図7 縁面放電試験試料

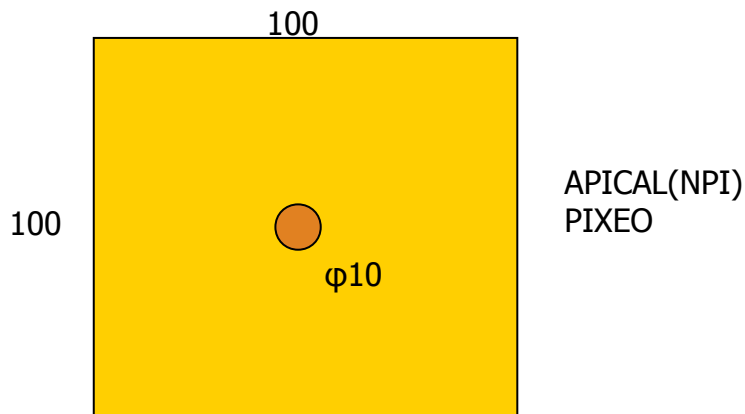


図8 貫通放電試験試料

図7に縁面放電試験用の回路パターンを示す。導电路の幅は10mm、間隔を0.5mm、1.0mm、5.0mmとした。貫通放電試験用のパターンを図8に示す。フィルム状の導体は直径φ10mmの円形である。

表2 縁面放電試験結果

サンプル	間隔	放電電圧	備考
APICAL(AH)+Agペースト	0.5mm	5kV	プロトン照射
APICAL(AH)+Agペースト	1.0mm	5.2kV	プロトン照射
APICAL(AH)+Agペースト	0.5mm	6.6kV	
APICAL(AH)+Agペースト	1.0mm	8.4kV	
APICAL(NPI)+Cu(35μm)	0.5mm	5.6kV	
APICAL(NPI)+Cu(35μm)	1.0mm	7kV	

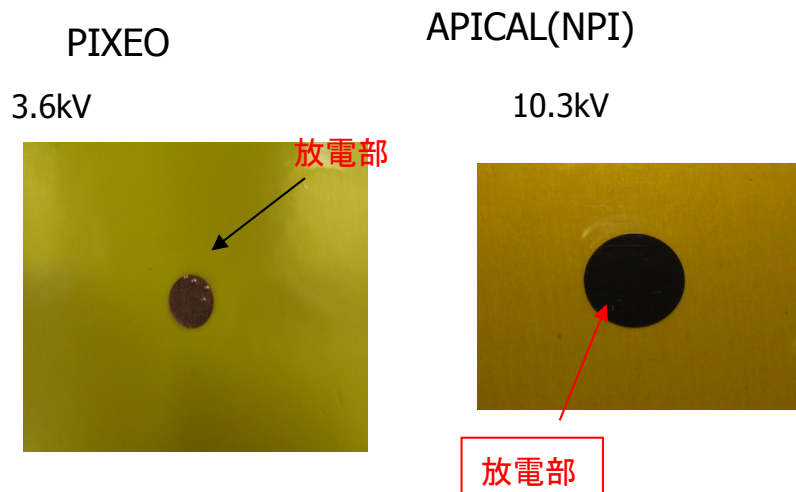


図9 貫通放電試験結果

表2に縁面放電試験結果を示す。プロトン照射試験後の試料に関しても同様の試験を行い、絶縁耐力の変化を比較した。エッチングで製作した導电路はAgペーストよりも絶縁耐力が高いことが分かった。また、エッチング法、Agペーストともに間隔が広い方が放電は発生しにくかった。しかし、プロトン照射試験後におい

では、Ag ペーストの場合、0.5mm と 1.0mm で有意な差は見られなかった。図9 に貫通放電試験結果を示す。2 層CCL のPIXE0は3.6kV で放電したが、Apical は 10kV 程度まで放電は発生しなかった。

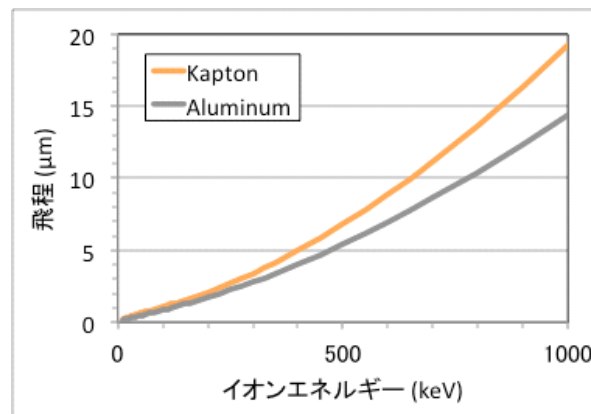
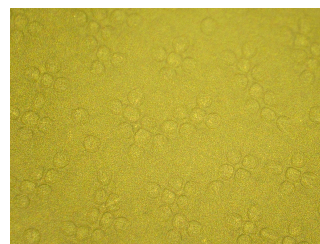


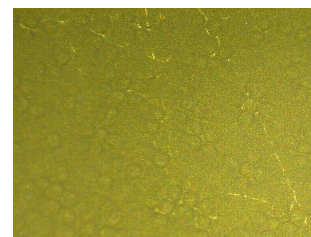
図 10 SRIMによる解析結果

- Ag-Sの表面には、亀裂が見られる。

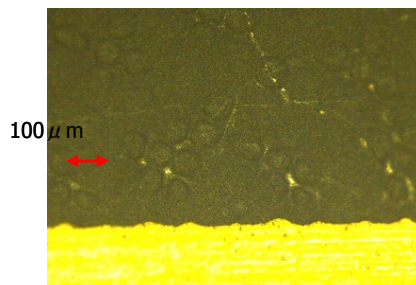
導電路表面の拡大写真



初期状態



50 keV p+, 1.25E12 cm⁻²照射後



Agペーストインクの端部

図 11 プロトン照射試験前後の Ag ペースト表面変化

5. プロトン照射試験

木星探査機を想定した放射線環境の評価と試験を開始した。惑星間の陽子線の環境は距離の二乗に反比例すると仮定した。また、木星磁気圏は月程度の視直径を有する強い放射線環境があるため、この効果は実軌道をもとに修正する必要がある。

低エネルギーの放射線は、物質内にとどまるため、今回試験を行う材料に対して、SRIM により飛程の算出を行った。カプトンとアルミの結果を図 10 に示す。数百 keV のプロトンは、発電及び導電路およびポリイミド膜内部で止まる。そのため、物性変化を確認する必要がある。低エネルギープロトンの照射施設には、200 keV 以下のプロトンを照射できる若狭湾エネルギー研究センターと低エネルギーから高エネルギーまで可能な原研の設備が可能である。今回は、若狭湾エネルギー研究センターで実施した低エネルギープロトンの照射試験結果を示す。

Ag ペーストには高粘度 (Ag-S) と粘度低 (Ag-G) の 2 種類のタイプで試験を行った。図 11 に高粘度の Ag ペーストに対するプロトン照射後の表面変化を示す。照射量は 50 keV 、 $1.25 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ である。照射後、表面に亀裂があることが分かる。亀裂の要因としては、プロトン照射時、何度か表面に放電が認められており、その時 Ag ペーストが損傷した可能性がある。

6. まとめ

ポリイミドフィルムを基材とした薄膜導電路を製作し、放電及びプロトン照射試験を実施した。ポリイミドフィルムには APICAL を用い、また、2 層 CCL として PIXE0 を用いた。銀ペーストによるスクリーン印刷及び Cu 箔のエッチングともにカタログ値以上の絶縁特性を有していた。しかし、PIXE0 の貫通破壊電圧は、カタログの代表値よりもかなり低い値が得られた。プロトン照射をした試料は、若干絶縁性能が劣化する傾向が見られた。サンプルを増やし、有意性を今後確認する。

ソーラー電力セイルの膜面の変形を考慮すると、導電路間の距離を 0.5 mm 以下に設定することは考えにくく、ポリイミド膜面上に形成した導電路は、保護層なしに用いても十分な絶縁耐性を持つことが確認できた。他のポリイミド材料に関しても今後評価試験を実施する。