

# 宇宙環境におけるフィルム集電路に関する帯電・放電特性の基礎実験

田中 孝治(JAXA), 豊田 裕之(JAXA), 佐々木進(JAXA)

## 1. はじめに

宇宙機の大型化、大電力化に伴い、大規模な宇宙用発電システムが求められている。また、ソーラー電力セイルや太陽発電衛星では、宇宙環境における大電力システムを極めて軽量で実現することが要求されている。従来の宇宙用の太陽電池は、バルク型であるため数十~百  $\mu\text{m}$  程度の厚みを有し、さらに耐宇宙環境性のためにカバーガラスを必要とする。リジッドなハニカムパネル上に太陽電池を貼り付け、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  $\text{W/kg}$  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  $\text{cm}$  角となり、大規模システムでは膨大な量の結線、集配電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。

大電力システムにおいて、電力効率向上のためには、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、放電特性や模擬太陽電池を試作してのスナップオーバー現象発生条件に関する実験結果に関して報告する。

## 2. 薄膜発電システムの高電圧化と周囲プラズマの影響

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 1 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、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。図 2 に、宇宙プラズマ環境中の薄膜発電システムの模式図を示す。微小孔を介しての、プラズマ収集実験による、スナップオーバー現象の評価も重要である。

## 3. 実験方法

本実験では、2 種類のポリイミドフィルムを用い 2 層 CCL を作成し、エッチングにより放電実験用のパターンを試作した。ポリイミドフィルムには ISAS が開発した、熱可塑性ポリイミドフィルム (ISAS-TPI) と、もう一つは、低熱膨張率ポリイミドフィルムを用いた。ISAS-TPI は近赤外から可視領域の透過率に優れ、太陽光発電面の保護フィルムに使用するとともに、熱融着性能を用い耐宇宙環境性に優れた接着剤としても使用する。一方、低熱

膨張率ポリイミドフィルムは、金属、半導体材料と CTE が近く、また、高弾性率特性を用いカールしにくい発電膜、集電路の形成に応用する予定である。

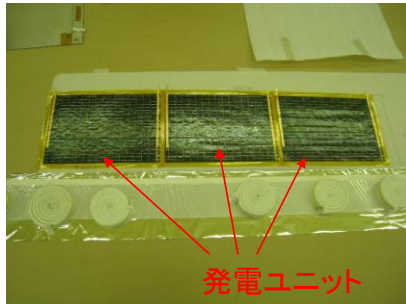


図1 薄膜発電システム

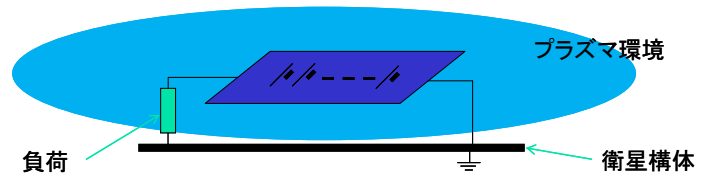


図2 薄膜発電システムと宇宙プラズマ環境

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3に真空チャンバを示す。図4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5に貫通放電用試料を示す。フィルムの厚さは、ISAS-TPIは $12.5\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、低熱膨張率ポリイミドフィルムは、 $10\mu\text{m}$ と $33\mu\text{m}$ を用いた。フィルムの両面に電圧を印加し、電流が急激に増加する電圧を記録した。

図6にプラズマを介した電流リーク実験の実験装置を示す。磁場拡散型プラズマ源を用い、プラズマ用作用ガスにはアルゴンガスを使用した。プラズマ点火時のチャンバ内圧力は $1\times 10^{-2}\text{Pa}$ である。電子温度は、 $1\sim 4\text{eV}$ 、電子密度は電離層のプラズマ密度を模擬して、 $10^5/\text{cm}^3$ に設定した。試料には、デブリ衝突を模擬した小孔を有する模擬太陽電池を使用した。ポリイミドフィルム上に導電路を形成し、その上に、直径 $\phi 1\text{mm}$ の小孔を開けたフィルムをかぶせ、小孔からのプラズマ収集電流を計測した。小孔間の距離は10mmである。小孔を開けたカバーに使用したポリイミドフィルムは、ISAS-TPIと低熱膨張率ポリイミドフィルムの2種類である。図6に電圧印加パターンを示す。両サイドの電極には固定バイアス電圧を印加し、中央の電極には0V～約400Vまで電圧を印加した。

#### 4. 実験結果

図7に沿面放電試験結果を示す。◆がISAS-TPI、■が低熱膨張率ポリイミドフィルムの結果である。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は、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。

図8に貫通放電試験結果を示す。◆がISAS-TPI、■が低熱膨張率ポリイミドフィルムの結果である。ISAS-TPIの場合は、厚さ $12.5\mu\text{m}$ の時、5.7kVであるのに対して、 $25\mu\text{m}$ 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 $10\mu\text{m}$ で約4kVの耐電圧が確認された。

図9に低熱膨張率ポリイミド、図10にISAS-TPIのプラズマ収集実験の結果を示す。いずれも、図6に示した、case1～case4の4種類の結果をプロットした。ラングミュアプローブの結果を×で示す。また、実験中のプラズマ密度の変化を※でプロットしている。低熱膨張率ポリイミドでは、電圧印加方法による違いはほとんど見られず、200Vくらいから急激な電流増加が始まっている。ISAS-TPIでは、周囲の電位分布の影響を受けていることがわかる。いずれの場合も、低電圧印加時は、ラングミュアプローブ特性よりも、収集電流が低い結果が得られた。



図3 真空チャンバ

膜面回路パターン

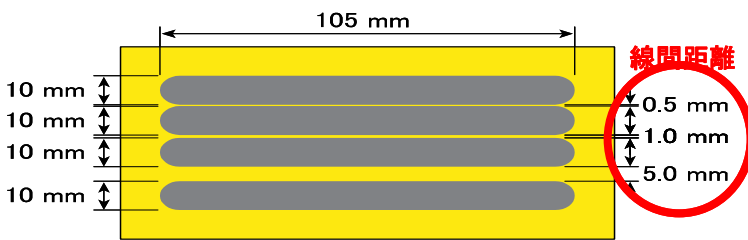


図4 沿面放電用試料パターン



図5 貫通放電用試料

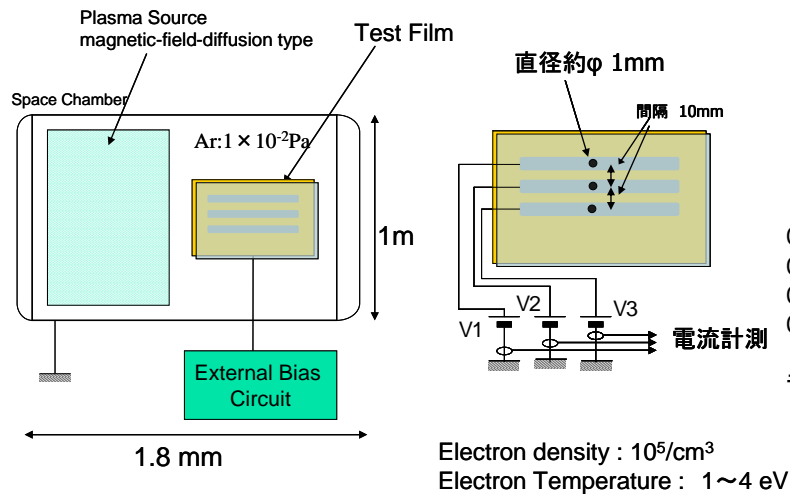


図6 プラズマを介した電流リーク実験

5. 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フィルムに関しては、電極間距離や厚さに関して、特異な傾向が見られた。特に、貫通放電に関しては、厚さが厚い方が低い電圧で放電が発生している。沿面放電発生電圧と近い値で放電が発生しており、アウトガス等により、微小放電が発生し、融点が低いことにより損傷が速く進んだことが考えられる。プラズマ収集実験に関しても、より低い電圧でスナップオーバー現象が発生している。熱可塑性ポリイミドフィルムは融点が低いために、アウトガスが多い場合は、加熱によるフィルムの破壊が早く起きてしまうためと考えられる。熱可塑性ポリイミドフィルムは、絶縁材料としては使用条件を詳細化する必要がある。

る。

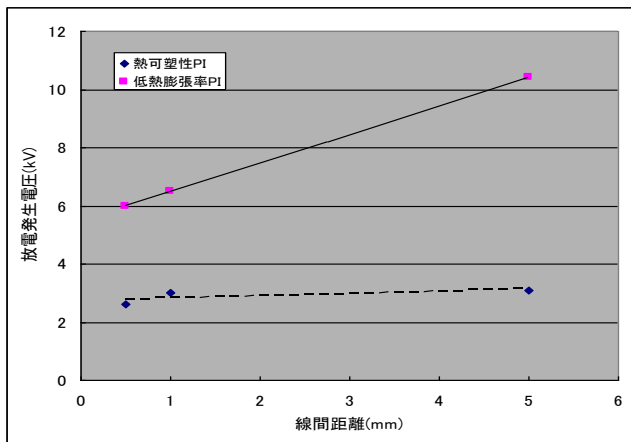


図7 沿面放電試験結果

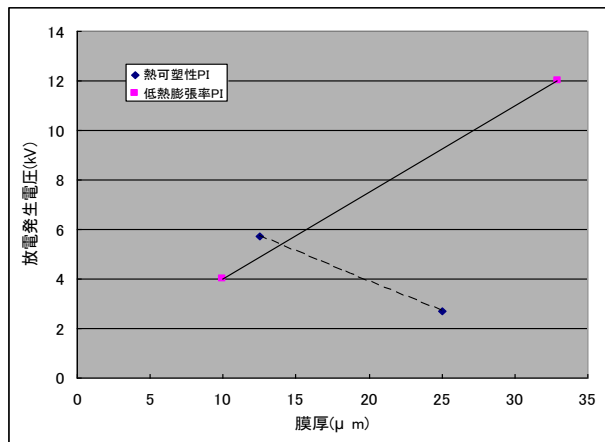


図8 貫通放電試験結果

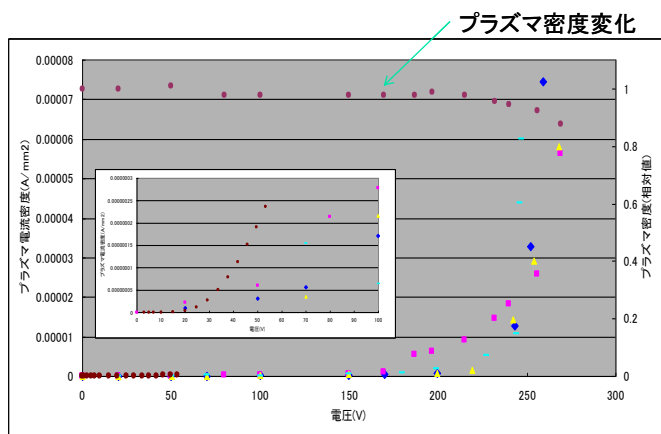


図9 低熱膨張率ポリイミドフィルムの実験結果

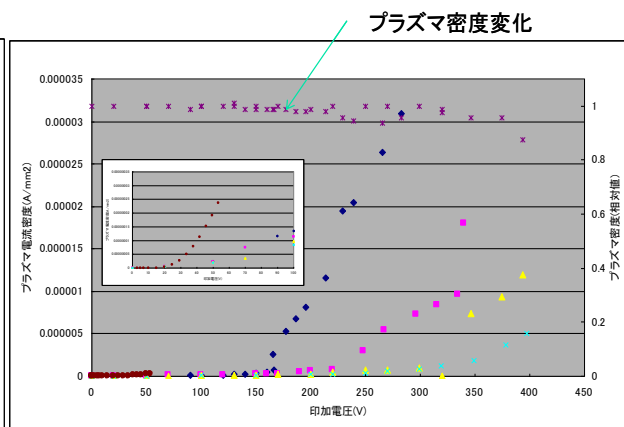


図10 ISAS-TPIの実験結果

## 6. まとめ

ソーラー電力セル等の超軽量薄膜発電システムに使用を検討している2種類のポリイミドフィルムに関して、絶縁特性試験及びプラズマ収集実験を行なった。低熱膨張率ポリイミドフィルムは、良好な結果が得られた。ISAS-TPIは絶縁特性、スナップオーバー現象いずれに関しても、特性が劣っており、使用には注意を要する。また、絶縁特性は、いずれのフィルムも10 $\mu$ m以上の厚さがあれば1kV以上は期待できる。しかし、スナップオーバー現象が200V程度で発生するため、周囲にプラズマ環境が形成される場合には、200V以上の電圧の使用は工夫が必要となる。今回の実験は、短時間での放電開始特性を比較した。しかし、より長い時間の場合にはアウトガス等の影響により前駆放電が繰り返され、より低い電圧で放電にいたる可能性がある。今後、長時間特性検証実験が必要と考える。

## 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。