

宇宙機の放電事故を防ぐ

工学研究院宇宙システム工学研究系 教授 豊田 和弘



宇宙機の帯電と放電

はじめに

90年代の終わりに運用中の静止軌道衛星で太陽電池パネルの発電電力の15%が失われる事故が起きました。その後の研究により事故の原因は太陽電池パネル上での放電と結論付けられました。この事故以来、宇宙機の帯電放電の研究が各国で盛んに行われるようになりました。研究が進み、現在では打ち上げ前に太陽電池パネルの帯電放電試験を行うことで放電事故への対策を行っています。今回は宇宙機で帯電放電が起きる原因と地上試験の実施方法について紹介させていただきます。

人工衛星などの宇宙機は地上と異なり大気の無い宇宙空間で運用されています。また地面も無いため接地することが出来ず、見た目だけではなく、電気的にも浮いています。宇宙空間と宇宙機の間にはコンデンサがつながっていると考えると、その容量は数百pF（ピコファラド）程度と非常に小さい値になります。そのため宇宙空間から非常に小さい電流が宇宙機に流れ込んだとしても簡単に帯電してしまいます。例えば静電容量を500pFとした場合、1000V（ナノクーロン）の電荷量が必要ですが、静止軌道では $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のオーダーの電子が降り注ぐため、数メートルの大きさの宇宙機では1秒かからず帯電してしまいます。しかし、宇宙機が宇宙空間に対して帯電するだけでは放電は起きません。これは宇宙機と宇宙空間では放電するのに必要な電

界が十分では無いためです。実際の宇宙機には表面は全て導体ではなく、抵抗の大きい絶縁体が貼り付けられています。太陽電池のカバーガラスのような絶縁体と宇宙機表面では帯電状態が異なるため電位が異なります。そのため宇宙機表面で電位差が発生することになります。さらにカバーガラスは厚みが100 μm 程度と薄く、カバーガラス表面と太陽電池で電位差が発生すると電位差を距離で割った電界が、放電が発生する閾値以上に大きくなります。これが宇宙機帯電によって放電が発生するメカニズムです。この放電は皆さんが冬に経験する静電気放電と同じで、ちよつと痛いくらいで深刻なダメージを引き起こすようなものではありません。しかし、地上でも小さな静電気放電が発火性のガスの大爆発を引き起こすように、宇宙でも大きなエネルギーを持った放電を引き起こすトリガーになります。

太陽電池のカバーガラスが帯電して静電放電が発生しますが、宇宙機の太陽電池アレイ一面に太陽電池が貼り付けられているため、放電発生時には全てのカバーガラスが帯電しています。そのため、一箇所

で放電が発生すると、そこを起点として放電がパネル上に広がっていきま

す。これが沿面放電と呼ばれる放電です。カバーガラスが帯電するとコンデンサとして電荷を蓄えます。カバーガラスは薄いためコンデンサとしての容量が大きく、1 μm^2 あたり数百nFの容量があります。宇宙機と宇宙空間の間の静電容量と比較すると圧倒的に大きいのが分かります。沿面放電は放電点から毎秒10kmの速度でカバーガラスに帯電した電荷を取り込みながら進んでいきます。大型太陽電池パネルを使った地上試験では数Aの電流が数百 μs （マイクロ秒）流れたことが確認されています。太陽電池も100 μm 程度と薄い

ため、沿面放電によって故障する危険性があります。また初期放電や沿面放電は太陽電池の端面や太陽電池を直列接続するための電極上で発生します。できるだけ多くの太陽電池をパネルに貼るために、太陽電池間の隙間は1 μm 以内になっています。また必要な電圧を発生させるため、太陽電池は直列に接続され、パネル上で直列接続が折り曲げられることがありま

す。隣り合った太陽電池に電位差があり、その間で初期放電や

沿面放電が発生すると放電プラズマを介してアーク放電が発生する危険性があります。直列接続された太陽電池の発電電圧、電流によってアーク放電が太陽電池間で維持され、沿面放電よりも長く続くことがあります。このアーク放電が太陽電池間を永久的に短絡させる危険性があります。これを持続放電と呼び、太陽電池パネルから宇宙機へ電力を供給できなくなります。この持続放電が発生しないようにすることが放電事故を防ぐために非常に重要になります。

地上帯電放電試験

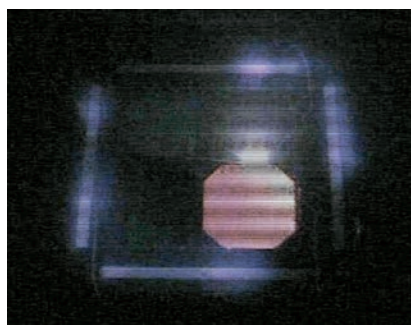
宇宙機での持続放電発生を防ぐため、地上試験方法を開発してきました。試験では太陽電池パネルをA4サイズ程度に切り取ったクーポンを使用します。クーポンを宇宙環境を模擬できる真空容器内に入れて試験をします。試験では、太陽電池のカバーガラスの電位が何ボルトになったら放電するか閾値を計測します。帯電には電子ビーム銃やプラズマ源を使い、非接触の表面電位計でスキャンすることで放電直前のクーポンの表面電位の2次元分布を取得します。実験で取得された放電閾値は、

軌道上での放電回数見積もり、試験での沿面放電電流見積もりに使用されます。放電回数は帯電解析ソフトによって行われ、この帯電解析ソフトMUSCATは九州工大とJAXAによって開発されました。放電試験では見積もった放電回数を実際に試験し、持続放電が発生しないことを確認することが第一目標です。また放電により太陽電池が劣化することもあり、軌道上での電力低下を見積もることも重要な目的です。このように開発してきた試験方法は九州工大が主導して策定した国際標準ISO 19923の基礎となっており、世界各国の研究機関で使用されています。また、軌道上の最悪プラズマ環境を定義した国際標準ISO 19923も九州工大主導で策定し、帯電解析ソフトで事前に計算することで帯電の危険予測ができるようになっていきます。

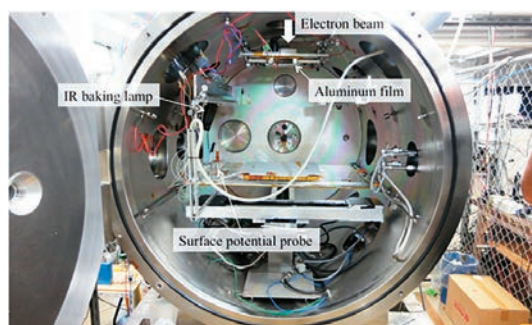
さいごに

これまで九州工大では国際標準に基づいて数多くの人工衛星の太陽電池パネルの地上帯電放電試験を実施してきました。JAXAの人工衛星だけでなく、国内や海外の商用衛星の

試験も実施し、軌道上での放電事故を防いできました。今後も放電事故を防ぐため試験を行なっていくと共に試験方法の開発もすすめていきます。また、帯電放電の抑制に関する研究もすすめ、放電事故を防ぎ、安心して宇宙機の運用に貢献していきます。



放電による発光



試験装置内部



地上帯電放電試験設備