

太陽電池パドル上で発生する沿面放電の放電電流経路

豊田 和弘 (九州工業大学)

1. はじめに

静止軌道や極軌道ではエネルギーの高い電子により人工衛星構体が負に帯電することがある。この時、カバーガラスなどの絶縁体表面は、電子衝突による二次電子放出、太陽の真空紫外光による光電子放出により、衛星構体とグラウンドを共にする太陽電池よりも正に帯電することがある。これを逆電位勾配とよび、衛星構体と絶縁体表面電位の差を乖離電圧とよぶ。

乖離電圧が放電閾値電圧を超えると、カバーガラスと太陽電池の間で静電放電が発生し、人工衛星と宇宙空間に溜まっていた電荷がブローオフとして放電され、衛星電位は上昇する。衛星電位が上昇してもまだカバーガラスの帯電電荷は残っており、放電点から沿面放電が進展し、太陽電池パネル上のカバーガラスの電荷が中和される(図1)。これまで、沿面放電の進展速度や進展範囲などの研究が行われており、太陽電池パネルの地上放電試験の国際標準 ISO-11221 には、進展速度が 10km/s^{1,2)}、進展範囲は 3m とされている。

地上試験では沿面放電波形を模擬した放電電流波形を用い、持続放電の有無、太陽電池の劣化について評価が行われている。しかし、沿面放電電流による太陽電池パネル以外への影響については考えられていないのが現状である。本論文では、沿面放電電流による太陽電池アレイ回路への影響を考える。

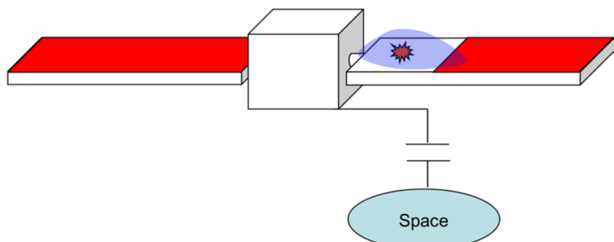


図1 太陽電池パネル上を進展する沿面放電のイメージ

2. 沿面放電

逆電位勾配の沿面放電電流の研究は多く行われており、過去に JAXA 相模原キャンパスの大型チャンバ内で長手方向 4m に太陽電池クーポンを配置して試験を行っている^{3,4)}(図2)。試験では太陽電池クーポンを負にバイアスし、電子ビームを照射することでカバーガラス表面を太陽電池に対して正に帯電させており、沿面放電により図3のような放電電流が流れた。4A 程度のピークを持ち、400μs 程継続する沿面放電電流波形が確認されている。また、電子によりカバーガラス表面が中和される際にカバーガラスのコーティング剤

のフッ化マグネシウムから光ルミネッセンスが確認され、イメージンテンシファイアによる時間分解撮影を元に沿面放電の進展速度を計算した結果、以下のような結果が得られた。

$$v = \frac{dL}{dt} = 53 \times t^{-0.5} [m/s]$$

この進展速度により見積もられた電流波形は図3のように実験と良く一致しており、進展速度を用いて沿面放電波形を見積れることがわかる。

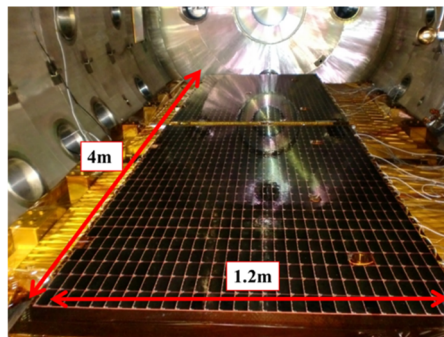


図2 大型チャンバに設置された太陽電池クーポン⁴⁾

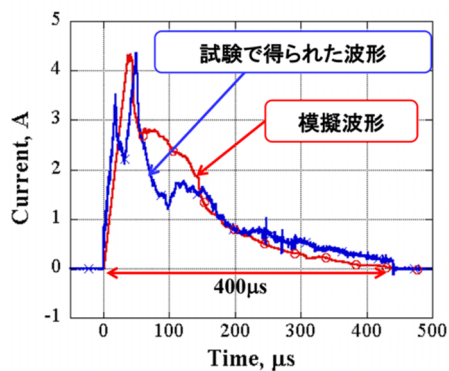


図3 沿面放電電流波形⁴⁾

太陽電池クーポンを使った実験の他に、沿面放電電流のモデルを構築するためにリング電極を使った研究も行った⁵⁾。リング状の電極を同心円状に並べ、その上にポリイミドテープを貼ることで太陽電池パネルを模擬したクーポンを作成した(図4)。この実験では、中心の金属が露出した部分で放電は発生し、沿面放電が同心円状に進展することを想定している。真空紫外線を照射することでポリイミド上を負にバイアスされたリング電極に対して正に 2kV 以上帯電させ、沿面放電電流と、各電極に流れる中和電流の計測を行なっている。その結果、図5にあるような沿面放電電流が得られている。沿面放電としてはピークで 7A 程度で 30μs の継続時間を持った電流波形となっているが、中和電流は中心からの

距離には関係なく、ほぼ全ての電極で同時に電流が流れ始めていることがわかる。このことから放電点と電荷が溜まっている各ポリイミド間の放電回路とみなすことができ、ポリイミドをコンデンサにし、距離を抵抗とすることでモデルを構築することができた。

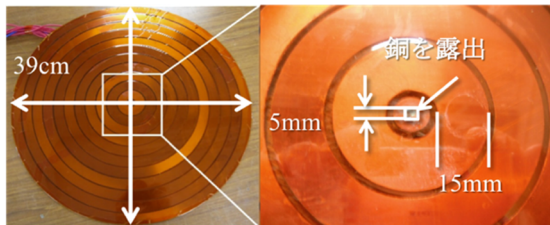


図4 リング電極を用いた沿面放電電流計測⁵⁾

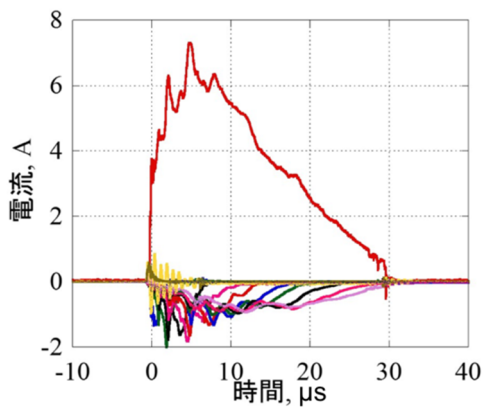


図5 リング電極を用いた沿面放電電流波形⁵⁾

3. 沿面放電電流経路と電圧上昇

太陽電池パネルで発生した沿面放電の経路について考える。図6に太陽電池アレイと衛星構体の簡略図を示す。太陽電池パネルと衛星構体は電源ケーブルで接続され、発電された電流は図の太陽電池回路の上側から衛星構体内の電源回路へと流れていく。電源回路はかなり簡略化しているが、バッテリーなどを含めた負荷と、それに並列に接続されているバスキャパシタンス C_B がある。太陽電池回路は1直列毎にブロッキングダイオードが接続されており、図では1回路毎に電源ケーブルが構体内に接続されているが、3回路または

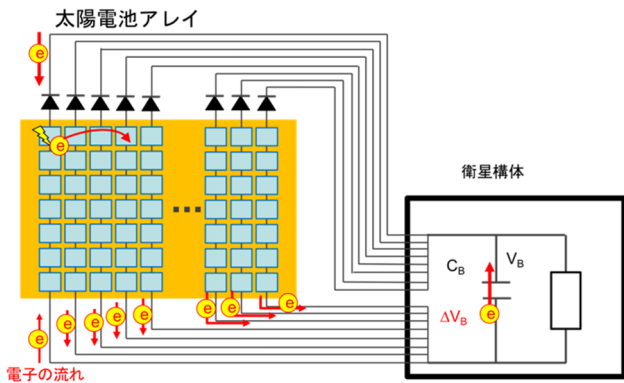


図6 太陽電池パネル上で発生した沿面放電の電流経路

4回路毎に並列にして構体内まで接続されることが多い。ここで沿面放電が図のように発生したと想定する。放電点と電荷が蓄えられたカバーガラス間で沿面放電が発生し、放電点とカバーガラス間で回路が形成される。放電点から飛び出した電子は回路を回って放電点まで流れるループが出来る必要があるが、太陽電池回路のプラス側にはダイオードがあるため流れることはできない。そのため、マイナス側の電源ケーブルを通して放電点に戻る必要がある。経路のインピーダンスによって、放電した太陽電池回路のマイナス側から流れてくる電子と、プラス側に流れてくる電子の量が決まってくる。プラス側から流れてくる電子は、衛星構体内のバスキャパシタンスを回ってくることになる。

ここで、全ての中和電流がプラス側から流れてくることを想定する。沿面放電電流の電荷量を Q_{FO} [C]、カバーガラスの総容量を C_{SAP} [F]、放電閾値を V_{th} [V]、バスキャパシタンス容量を C_B [F]、バス電圧の上昇を ΔV_B [V] とすると、

$$Q_{FO} = C_{SAP} V_{th} = C_B \Delta V_B$$

となり、単位面積当たりのカバーガラス容量を C'_{SAP} [F/m²]、太陽電池パネルの面積を A_{SAP} [m²] とすると、

$$C'_{SAP} A_{SAP} V_{th} = C_B \Delta V_B$$

となり、

$$\Delta V_B = C'_{SAP} A_{SAP} V_{th} / C_B$$

となる。8m x 2m の太陽電池パネルを考え、 $C'_{SAP} = 300$ nF/m²、 $C_B = 10$ mF、 $V_{th} = 2000$ V とすると、 ΔV_B は、 $\Delta V_B = C'_{SAP} A_{SAP} V_{th} / C_B = 300e-9 \times 16 \times 2000 / 10e-3 = 1$ V となり、ほぼ上昇しないことがわかる。大型衛星のように10mF 程度のバスキャパシタンスが設置されている場合には、沿面放電電流に対してバス電圧の上昇は大きくはならない。

バスキャパシタンス容量を10mF で固定し、太陽電池パネル面積が変化した場合を図7に示す。100m² 程度では10V 程度の上昇に止まり、1000m² を超えると60V 程度の上昇となる。現在、沿面放電がどこまで進展するかについてはわかってはいないが、パネルの大きさによってはバスキャパシタンスを更に大きくする必要がある。

図8にパネル面積を16m² と固定し、バスキャパシタンス容量を変化させた場合のバス電圧上昇のグラフを示す。バスキャパシタンス容量を1mF まで小さくすると、10V の上昇、0.1mF では100V まで上昇する危険性がある。電源回路の設計を変更し、バスキャパシタンスの容量を減らす時は注意が必要となる。

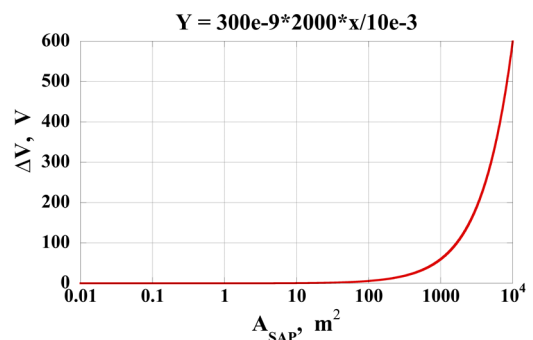


図7 太陽電池パネル面積とバス電圧上昇

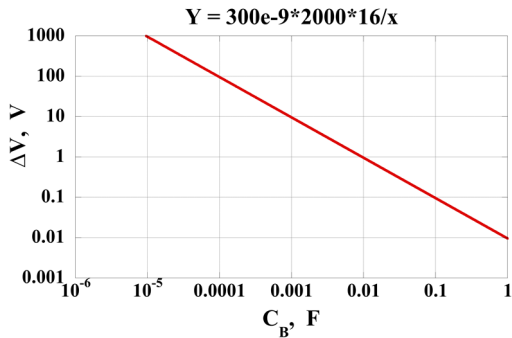


図8 バスキャパシタンス容量とバス電圧上昇

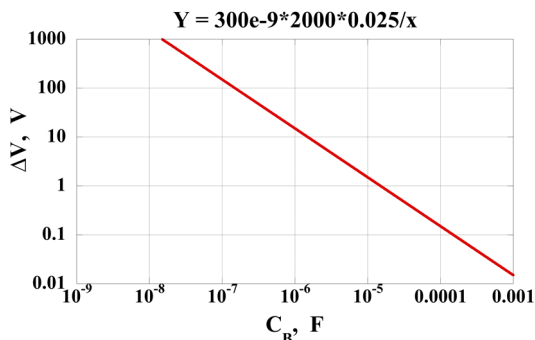


図9 50cm 衛星のバスキャパシタンスとバス電圧上昇

図9に50cm立方の超小型衛星の場合の、バスキャパシタンスとバス電圧上昇の関係を示した。沿面放電が衛星の1面に貼り付けられた太陽電池回路上で発生し、その面全てのカバーガラスの電荷が沿面放電電流として流れたと想定した。1μFのバスキャパシタンスで20V程度上昇する結果となっており、もともとバス電圧が10V程度の超小型衛星での上昇値としては無視できなくなる。また、このような電圧上昇を想定しているとは無く、素子の故障も懸念される。そのため数十μF程度のバスキャパシタンスでも設置しておくことで電圧上昇は1V以下になると考えられる。

次に電源ケーブルでの電圧上昇について見積もる。大型衛星では太陽電池回路から電源機器までのケーブル長が長くなり、そのインダクタンスは無視できない。仮にケーブル1mあたり1μHとして見積もると、ケーブル長が10mの場合には10μHのインダクタンスとなる。図5の電流波形の立ち上がり部に注目すると、およそ0.25μsで4A程度上昇していることから、ケーブルでの電圧上昇 ΔV_{cable} は

$$\Delta V_{cable} = L \frac{di}{dt} = 10\mu \frac{4}{0.25\mu} = 160V$$

のように160Vとなる。

このように沿面放電電流の立ち上がりによりケーブルに過渡的に電圧が加わることが考えられるため、沿面放電電流波形を用いた詳細な回路設計が必要となる。

4. まとめ

静止軌道または極軌道では太陽電池パネル上で沿面放電が発生するが、その放電電流は電源ケーブルを通して衛星構体内のバスキャパシタンスを流れる。現在静止衛星で用いられている10mF程度のバスキャパシタンスでは電圧上昇は1V前後であると見積れるが、バスキャパシタンスの大きさによっては大きくなる可能性がある。また、超小型衛星ではバスキャパシタンスの値によっては大きな電圧上昇が想定される。

沿面放電電流の立ち上がりにはケーブルのインダクタンスにより電圧が加わる危険があるため、電圧上昇を見積もった設計が必要となる。

これらの観点から沿面放電の経路とその影響を正しく理解し、太陽電池パネルからの配線を含めた電源回路の設計をする必要があることがわかる。

参考文献

- 1) Masui, H., Toyoda, K., and Cho, M. : Electrostatic Discharge Plasma Propagation Velocity on Solar Panel in Simulated Geosynchronous Environment, IEEE Transactions on Plasma Science, 36 (5), pp. 2387-2394 (2008)
- 2) Kawasaki, T., Hosoda, S., Kim, J., Toyoda, K., Cho, M. : Charge Neutralization via Arcing on a Large Solar Array in the GEO Plasma Environment, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.34, No.5, pp. 1979-1985, (2006)
- 3) Okumura, T., Nitta, K., Takahashi, M., Toyoda, K. : Propagation Area of Flashover on Solar Array under Electron Environment Simulating Geosynchronous Orbit, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.130, No.9, pp. 793-799, (2010)
- 4) Okumura T., Imaizumi M., Nitta K., Takahashi M., Suzuki T., Toyoda K., : Flashover discharge on solar arrays: Analysis of discharge current and image, , Journal of Spacecraft and Rockets, 48 (2), pp. 326-335 (2011)
- 5) Toyoda, K., Kawano, A., Miyazaki, M., Cho, M. : Flashover Discharge Measurement with Uniform Surface Charging and Modeling of Current Waveform, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.43, pp. 3064-3069, (2015)