

低温及び室温における 太陽電池クーポンパネルの放電頻度の比較

○ 上田敦史、二ノ宮隼一郎、増井博一、岩田稔、豊田和弘、
趙孟佑、(九州工業大学)、仁田工美(JAXA)

Atsushi Ueda, Shunichiro Ninomiya, Hirokazu Masui, Minoru Iwata,
Kazuhiro Toyoda and Mengu Cho (Kyushu Institute of Technology) and Kumi Nitta

概要

近年、静止軌道衛星に搭載される太陽電池パドルは大電力化・高電圧化が進んでいるが、これに伴い、軌道上における放電発生の危険性が高まり、放電による短絡事故などの不具合が相次いでいる。これらの事故を未然に防ぐため、打ち上げ前に十分に太陽電池パドルの帯電放電試験を実施する必要があるが、これらの試験は現在、室温下で行われており、実宇宙環境の日照日陰による温度環境を模擬している例は数少ない。特に低温環境では、太陽電池パネルからの脱離ガスの減少、カバーガラスの抵抗率増加などにより放電頻度や放電閾値が変化することが考えられ、帯電放電現象に大きな影響が出る可能性がある。

本論では、低温および室温で太陽電池クーポンパネルの帯電放電試験を実施し、放電頻度を比較した。試験の結果、放電頻度は低温の方が室温よりも高い傾向が認められたが、放電頻度は太陽電池クーポンパネルの水分吸着量にも依存するため、純粋に温度変化による放電頻度の変化を調べるためには水分吸着量の影響を除去する必要があることがわかった。

1. 目的および背景

近年、静止軌道衛星に搭載される太陽電池パドルは大電力化・高電圧化が進んでいるが、これに伴い、軌道上における放電発生の危険性が高まり、放電による短絡事故などの不具合が相次いでいる。^[1]これらの事故を未然に防ぐため、打ち上げ前に十分に太陽電池パドルの帯電放電試験を実施する必要があるが、これらの試験は現在、室温下で行われており、実宇宙環境の日照日陰による温度環境、すなわち-100～100℃に渡る太陽電池パドルの温度環境を模擬している例は数少ない。特に低温環境では、太陽電池パネルからの脱離ガス量の変化^[2]、太陽電池のカバーガラスの抵抗率の増加が考えられ、(蝕明け後の太陽電池パネルの発電電圧の増加)等も考え合わせると、放電頻度や放電閾値が変化するなど、帯電放電現象に大きな影響が出ると考えられる。

通常の静止軌道では、光電子電流密度が支配的となり宇宙機構造体電位は光電子の平均エネルギー(1～2eV)程度の正となる。太陽活動の変動に伴って、サブストームが発生すると、高エネルギー電子が宇宙機構造体に流入し宇宙機構造体電位は大きく負に沈む。そして、カバーガラスと宇宙機構造体電位との二次電子放出係数の違いから電位差が生じる(図1)。この時導体・絶縁体・真空が接するトリプルジャン

クション(図2)で局所的に電界が集中し、周囲環境との相互作用により放電が発生する。図2に示した太陽電池パネルのカバーガラスのような絶縁体電位が宇宙機電位に対し負になる場合を順電位勾配と呼び、正になる場合を逆電位勾配と呼んでいる。

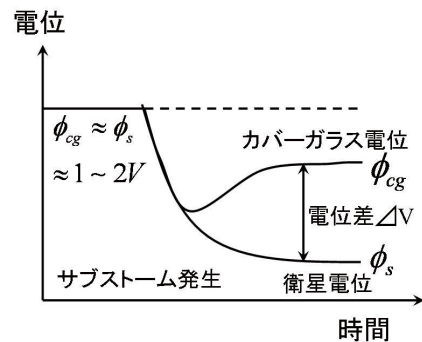


図1 サブストーム発生時の宇宙機電位の時間変化

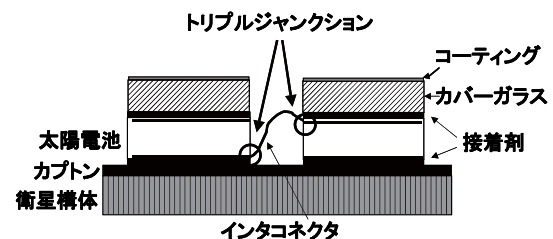


図2 太陽電池パネルの構造

本研究は、低温で太陽電池パドルの帯電放電試験を実施し、放電頻度・放電閾値を室温環境下と比較することによって、低温の帯電放電現象の特異性を理解し、太陽電池パドルの帯電放電試験技術の確立に寄与することを目的としている。本論では、低温環境下の帯電放電試験を実施し、室温環境下の放電頻度との比較を試みた。

2. 実験

2-1 試験クーポン

試験に用いた太陽電池クーポンを図3に示す。太陽電池クーポンは70mm×35mmのSiセルを、絶縁用ポリイミドテープを張り付けたアルミニウムプレートにシリコン接着剤 RTV-S691 で固定したものを使用した。太陽電池のP電極およびN電極にはケーブルを取り付けられており、これらのケーブルを外部回路に接続して実験を行うためである。本研究では上記構造の太陽電池クーポンを2枚使用(それぞれクーポンAおよびクーポンBとする)して室温および低温における帯電放電試験を同条件で実施した。

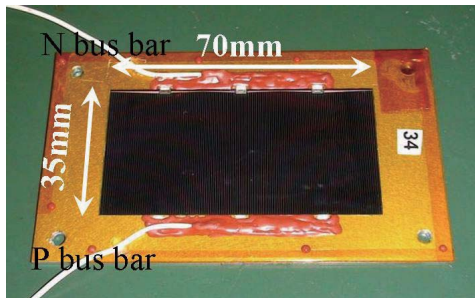


図3 試験に用いた太陽電池クーポン

2-2 試験装置

帯電放電試験は真空チャンバー内に太陽電池クーポンを設置して実施した。真空チャンバーは直径600mm、奥行き900mmであり、ロータリーポンプおよびターボ分子ポンプを備え、到達圧力は、 $2.7 \times 10^{-4} \text{Pa}$ である。帯電放電試験中のチャンバー内圧力は $1.02 \times 10^{-3} \text{Pa} \sim 4.00 \times 10^{-4} \text{Pa}$ である。真空チャンバーには電子銃、IRカメラ、冷凍機、および四重極質量分析計が備え付けられている。真空チャンバー上部に設置された電子銃(オメガトロン社製)は、サブストーム時の帯電状態を模擬するために使用し、太陽電池クーポン全体に電子ビームが照射されるように太陽電池クーポンを設置している。太陽電池クーポンの放電発生箇所を特定するため、試験中の放電発光画像はIRカメラで記録されている。図7に示すように太陽電池クーポンは冷凍機の冷却ヘッドが接続され

た試料台に固定されており、試料台から大きく張り出したアルミニウム板を低温に保つことで、低温放電試験中の太陽電池クーポンへのコンタミネーションを軽減している。図4に太陽電池クーポンの試料台への設置状況を示す。

太陽電池クーポンと銅製試料台との間には熱伝導性ゲルを挟み、接触熱抵抗の軽減を図った。低温放電試験では冷凍機の動作により、 -25°C まで冷却が可能である。太陽電池クーポンの放電頻度は表面に吸着した水分量の影響を受けることが知られている^[2]。このため本研究では太陽電池クーポンの水分吸着量を考慮に入れて放電頻度を評価するために、四重極質量分析計(ULVAC 社製)を用いて吸着水分量の測定を実施した^[3]。

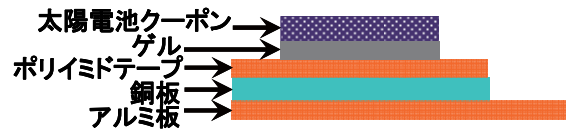


図4 太陽電池クーポンの試料台への設置状況

2-3 試験回路および測定システム

図5に本論で用いた試験回路および測定システムを示す。図5において C_{ext} は宇宙機太陽電池パドルのカバーガラスの静電容量を、 V_{bias} は宇宙機構造体電位を、それぞれ模擬している。放電発生時に太陽電池を通じて流れる電流をCP1で、太陽電池クーポングラウンドを通じて流れる電流をCP2で、チャンバーから太陽電池クーポンへ流れるブローオフ電流をCP3で、電流プローブ(HIOKI 社製)を用いて測定している。放電発生時の電圧・電流波形を、高電圧プローブ(Agilent 社製)を用いて測定した太陽電池クーポンの電位変化をトリガとして、WAVESURFER(Lecroy 社製)で測定し、これと同時にIRカメラを用いて撮影した放電発光画像を記録することによって、放電波形と放電発生箇所のマッチングを実現している。

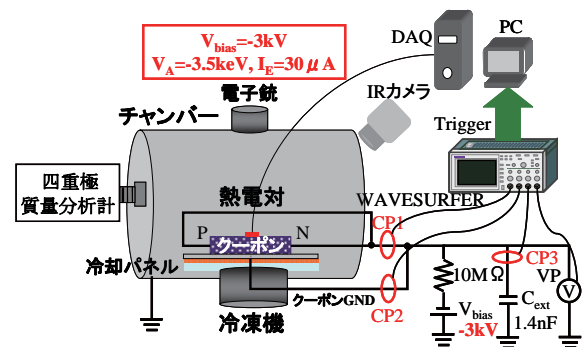


図5 試験回路および測定システム

2-4 試験方法

試験手順のフローチャートを図 6 に示す。試験チャンパーに入れる前の太陽電池クーポンの水分吸着状況を同等にするために、熱電対を貼り付けた太陽電池クーポンを容器に入れ、冷凍庫に 90 分間保管する。その後、太陽電池クーポンを取り出し、図 7 に示すように試験チャンパー内に設置する。ターボ分子ポンプでの排気開始から、17 時間後に大気さらしていた太陽電池クーポンのイレギュラーな放電を取り除くために、コンディショニングとして 20 発放電を発生させる太陽電池クーポンに電流を流して 45 分間ベーキングを行う。ベーキング時の四重極質量分析計による水の信号強度変化を用いて、吸着水分量を測定する。この際のベーキング時間と温度変化を図 8 に示す。ベーキング終了後、冷凍機を動作させ、太陽電池クーポンを冷却する。冷却時間と温度変化を図 9 に示す。その後に、低温試験を 60 分間行う。低温試験終了後、冷凍機を停止し、太陽電池クーポンを室温まで自然昇温させ、再度ベーキングを行い、室温試験を 60 分間行う。上記の低温から室温の放電試験を 1 サイクルとし、本試験では、合計 3 サイクルの低温・室温放電試験を実施した。

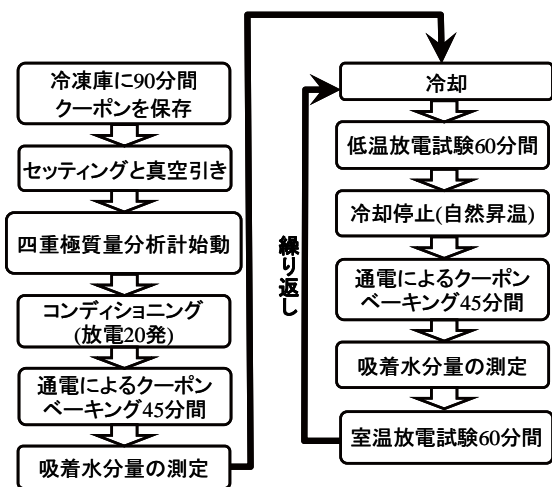


図 6 試験手順のフローチャート

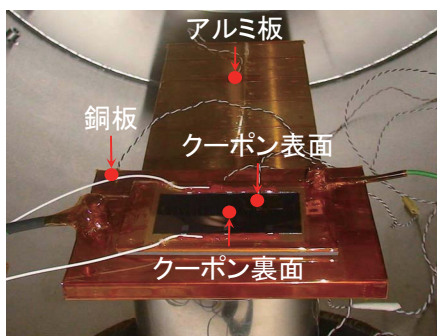


図 7 クーポン設置状況と熱電対取り付け箇所

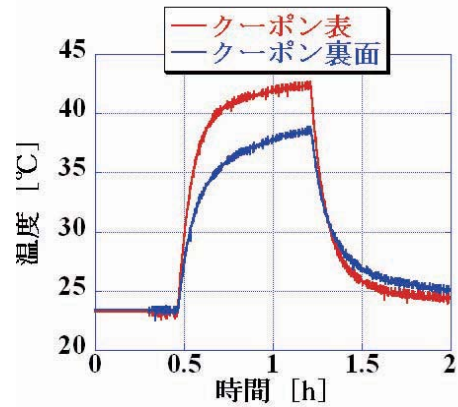


図 8 ベーキング時間と温度変化

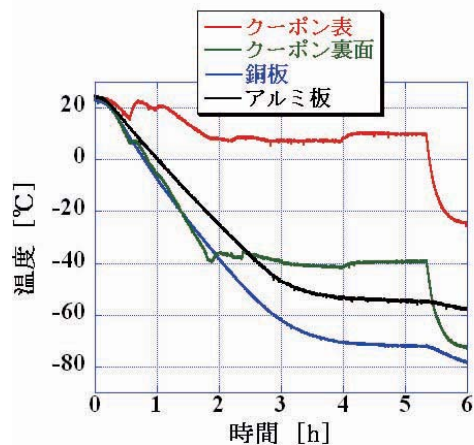


図 9 冷却時間と温度変化

2-5 試験条件

放電試験では、60 分間電子ビームを照射し、その間に発生した放電回数を取得し、室温時・低温時との一次放電発生頻度の比較を行った。室温試験では太陽電池クーポン温度を約 24°C、低温試験では太陽電池クーポン温度を約-25°Cにして試験を行っている。試験は室温・低温共に同一条件とし、バイアス電圧-3.0kV、電子ビームの加速電圧-3.5keV、エミッション電流 30 μ A、太陽電池クーポンのカバーガラスの静電容量を 1.4nF とした。

3. 実験結果と考察

図 10 にクーポン A およびクーポン B の室温および低温における放電頻度測定結果を示す。また試験中の吸着水分量測定結果も合わせて示す。図 10 の横軸は、1 サイクル目の低温放電試験前に行うベーキング終了後以降の試験経過時間を示している。3 サイクルに及ぶ低温および室温放電試験の間、太陽電池クーポンは大気開放されることなく真空チャンパー内に保管されているため、経過時間と共に太陽電池クーポンの水分吸着量は減少している。図 10 の結果よ

り、放電の発生頻度は、太陽電池クーポンの吸着水分量と共に減少する傾向が認められ、また低温の方が室温より放電の発生頻度が高い傾向が認められた。図 11 に示す、室温および低温の放電発生頻度と吸着水分量の関係からこの傾向を確認することができる。しかし、太陽電池クーポンの冷却時に水分が吸着するため、本論で述べた試験手順シーケンスでは低温における太陽電池クーポンの吸着水分量を正しく評価できていない。事実、低温放電試験終了後の太陽電池クーポンの昇温時に、吸着水分の脱離とみられる信号が測定されており、冷却することによって、吸着水分量が増えることが低温での放電頻度増加につながっていると考えられる。したがって純粋に室温および低温の放電頻度を比較するためには、水分吸着量による放電発生頻度変化の影響を除去する必要がある。

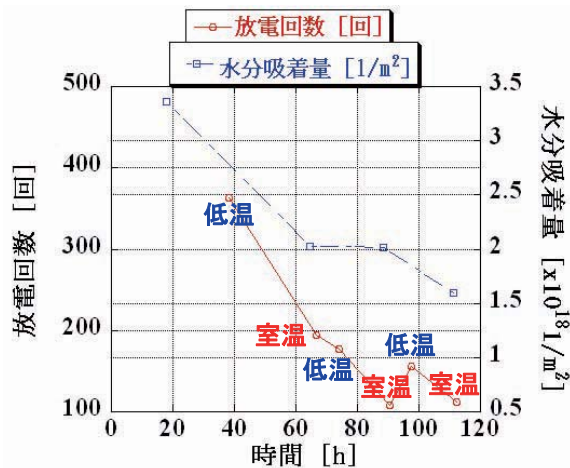
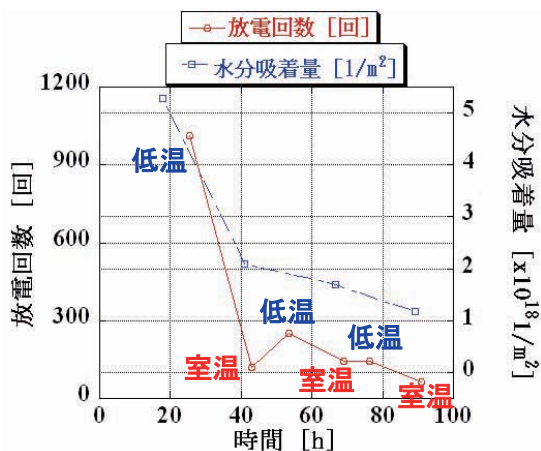


図 10 放電頻度測定と水分吸着量
(a)クーポン A



(b)クーポン B

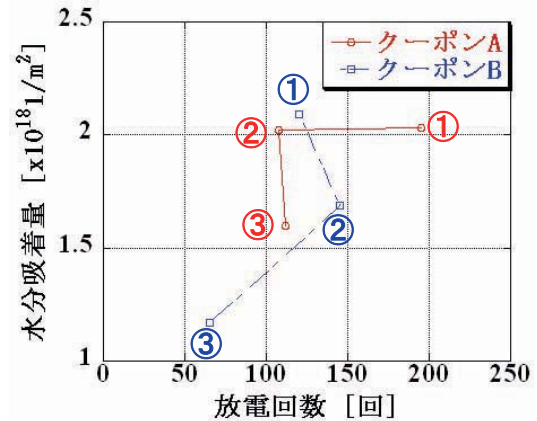
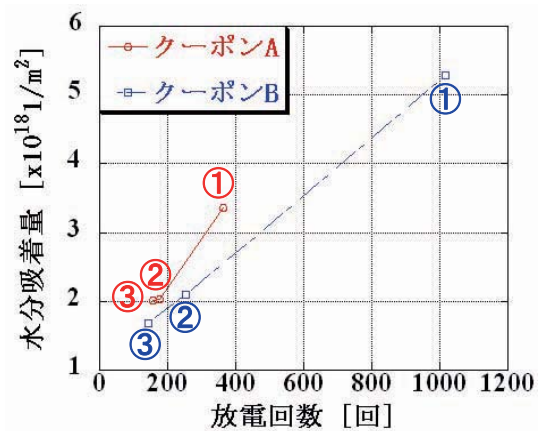


図 11 放電発生頻度と水分吸着量
(a)室温



(b)低温

次に、低温および室温の放電箇所を図 12 に示す。また、放電箇所および放電発生確率を特定するために、放電箇所を 20 箇所に分けた図を図 13 に示し、放電発生確率のグラフを図 14 に示す。低温では太陽電池クーポン全体で放電が発生する傾向があるのに対し、室温では特定箇所放電が発生する傾向が認められる。これは冷却によって太陽電池クーポン全体に水分が吸着したため、放電箇所が太陽電池クーポン全体に渡ったと考えられる。

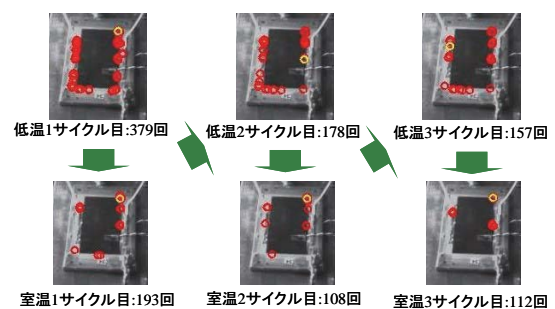


図 12 低温および室温の放電箇所
(a)クーポン A

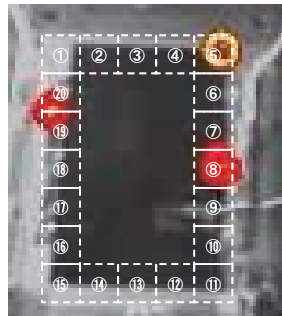
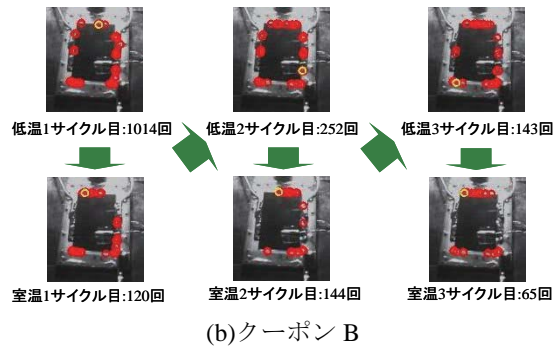


図 13 クーポン A の放電箇所

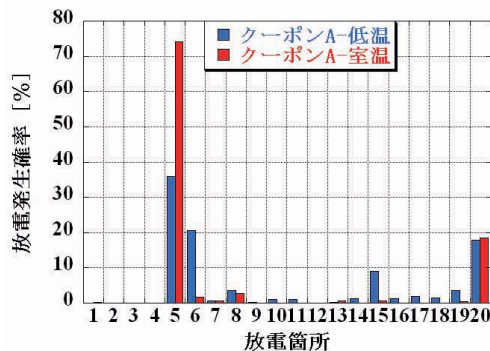


図 14 クーポン A の放電発生箇所と放電発生確率

4. まとめ

室温と低温の放電頻度の比較を目的として、静止軌道環境を模擬した低温・室温サイクル放電実験を行った。その結果、各サイクルおきに比較すると低温時の方が室温時より放電回数が増加することがわかった。そして、水分吸着量の減少と共に放電頻度が減少していることがわかった。また、低温時と室温時の放電箇所を比較すると、低温時には太陽電池クーポン全体で放電が発生するのに対し、室温時には特定の箇所で放電が発生することがわかった。これは、太陽電池クーポン冷却による水分吸着やその他のコンタミネーションが放電頻度と放電箇所に影響していると考えられる。

今後は低温時の太陽電池クーポンの水分吸着量を測定し、放電頻度との関係を明らかにすることで、室温における放電頻度との差をより明確にする。ま

た、低温および室温の放電閾値明らかにしていく。

参考文献

- [1]趙孟佑、藤井治久；宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題：宇宙環境と宇宙機の帯電電位 Vol.51、No.591 pp.109～117, April 2003
- [2];Boris Vayner Ohio Aerospace Institute, Cleveland, Ohio 44142 and Joel Galofaro and Dale Ferguson NASA John H. Glenn Research Center at Lewis Field, Cleveland, Ohio 44135; “Interactions of High-Voltage Solar Arrays with Their Plasma Environment:Ground Tests”,JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS Vol. 41, No. 6, November-December 2004
- [3]二ノ宮隼一郎、豊田和弘、趙孟佑；宇宙用太陽電池アレイ上での表面水分吸着量と放電発生の関係 第 52 回宇宙科学技術連合講演会,pp681-pp682