

## 低温下における宇宙用太陽電池アレイ上での放電頻度の比較

○利光智圭(九州工業大学) 田邊靖典 遠藤泰史 増井博一 豊田和弘 趙孟佑  
九州工業大学宇宙環境技術ラボラトリー  
福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

現在打ち上げコストの抑制等により、一つの衛星にできるだけ多くの機能を搭載しようとしているため、衛星本体の大型化、運用の長期化が進んでいる。大型化に伴う衛星の大電力化により衛星の太陽電池アレイ上における帯電・放電現象の問題が確認されるようになった。

衛星が低温環境下にあるとき、太陽電池パネルからの脱ガス量の変化、太陽電池パネルのカバーガラス抵抗率の増加が考えられ、蝕明け後の太陽電池発電量の増加も考慮す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可能性がある。今回は低地球軌道の蝕時の環境を模擬したうえで、帯電放電試験を実施し低温環境下における放電発生の特異性の検証を行ったので報告を行う。

### 1 実験背景[1]~[7]

近年、衛星の多機能化に伴い、衛星の大型化、大電力化が増加の傾向にある。衛星の大電力化により宇宙空間で運用している衛星で放電が起りやすくなり、電力系統が破壊され、運用停止に陥るといった問題が発生している。

帯電・放電試験は現在、室温下でほとんど行われており、実宇宙環境の日照日陰による温度環境、すなわち-100~100℃に渡る太陽電池パネルの温度環境を模擬している例は数少ない。現在、熱サイクルの蝕時に帯電による不具合が発生することが報告されている。つまり、衛星が低温環境に曝されているときであり、帯電放電現象に大きな影響が出る可能性がある。そのため、各軌道上の蝕時環境を模擬した上で、帯電・放電試験を実施し、低温環境における放電発生の特異性について検証する必要がある。

### 2 実験設備

今回低地球軌道模擬の実験に使用したチャンバーには内部に低温試験用にシュラウドを入れ、チャンバーには四重極質量分析器(Qmass)が取り付けられている。表1にチャンバーの諸元を示す。チャンバーは円筒形の横置き型であり、真空ポンプとしてはロータリーポンプとターボポンプを用いている。

表1 チャンバー性能

Size	Diameter 1.0[m] Length 1.2[m]
Ultimate pressure	$2.0 \times 10^{-4}$ [Pa]
Pumping speed	300 [1/s]
Chamber pressure with plasma	$1.1 \times 10^{-2}$ [Pa] (Xe flow rate;0.4sccm)
Plasma temperature	1~2[eV]
Plasma density	$10^{12} \sim 10^{13}$ [m <sup>-3</sup> ]

測定システムの全体概要を図1に示す。試験中、温度測定は Labview により作成されたプログラムにより 1秒間隔おきに測定でき、リアルタイムに温度・真空度を表示することができる。また、Qmassによる測定データは QCS2001(ULVAC)プログラムにより 1秒間隔おきに測定され、リアルタイムにチャンバー内ガス量を表示す

ることができる。各測定データはテキストデータとして保存される。

太陽電池クーポン上にて放電が発生した場合、まず 8CH オシロスコープによりバイアス電圧の立ち上がりトリガー信号として放電電圧・電流波形の取得を行う。8CH オシロスコープは、LabView によりプログラミングされたオシロスコープである。8CH オシロスコープからはトリガー信号が出力でき、時間調節用遅延回路である DPG (Delay Pulse Generator) を介して画像取得用 PC(Quick Look)に入力される。画像取得用 PC(以下 Quick Look)は、8CH オシロスコープ同様 LabView により作成されたプログラムであり、九州工業大学宇宙環境技術研究センターにおいて構築されたものである。Quick Look は 8CH オシロスコープからのトリガー信号を受けて、放電発生時の発光画像を IR カメラより取得し記録・表示を行うものである。これにより、放電発生個所の特定が可能になる。

図1中における Cext は太陽電池のカバーガラスの静電容量を模擬している。また、Vbias からは負電圧を印加することにより宇宙機構造体電位を模擬している。

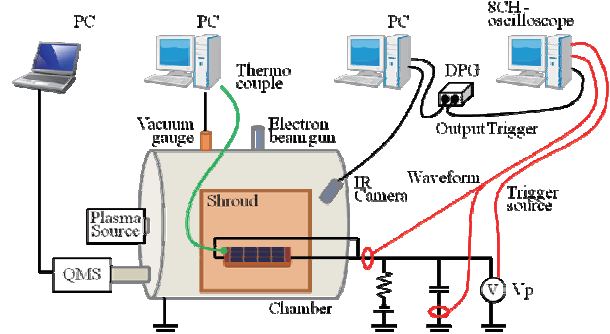


図1 測定システム

今回使用した四重極質量分析器(Qmass)は以下のように設定した。イオン化させる時の、ガス流入数とイオン電流の変換率をイオン化係数( $\eta_1$ )、電流増幅率は( $\eta_2$ )とする。本試験では、SEMの設定は-1.8kVである。事前にイオン化係数と、水分(質量数18)における電流増幅率の測定は行っており、イオン化係数  $\eta_1 = 4.08 \times 10^{23}$  [A・m<sup>-3</sup>]、電流増幅率  $\eta_2 = 1.15 \times 10^{-5}$  であった。[13]

今回使用した太陽電池クーポンは2種類ある。それぞ

れ図2、図3、に示す。図2の物はSi型セルであり、クーポンの大きさは縦24cm、横22cmである。図3の物はTJ型セルであり、クーポンの大きさは縦20cm、横20cm厚さ3cmである。

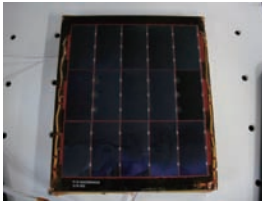


図2 SI型セル

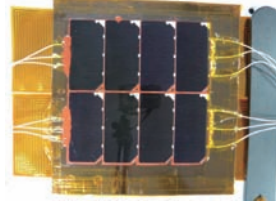


図3 TJ型セル

### 3 実験方法

#### 3.1 シュラウド温度を変化させた状態で放電頻度測定

クーポン温度を変化させる為にシュラウド温度も同時に変化させ、-200V,-300V,-400Vの印加電圧における放電頻度測定試験を行った。これはバイアス電圧を変えて温度変化を与えた場合、放電頻度に影響があるのか比較を行うことを目的に行った。試験に用いた太陽電池サンプルは、図2-24に示す3×5のシリコン型太陽電池クーポンを用いている。この時の測定システムは2.1.6測定システム全体概要からQmassを外したものである。放電試験回路図を図3-1に示す。

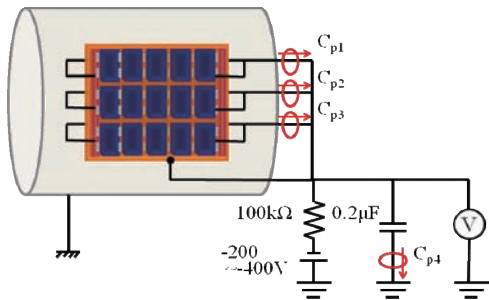


図4 放電試験回路

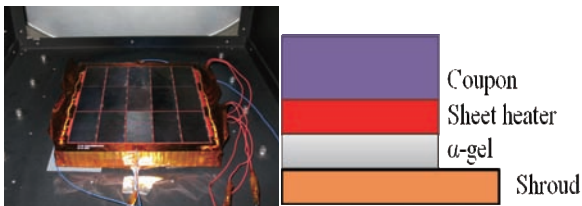


図5 試験セッティング

クーポンとシュラウドの間は図5のようクーポンの真下にシートヒーターを設置、さらにその下にαゲルを敷いた。これは低温時のクーポンへの熱伝導性を良くし、冷えやすくする為である。

試験手順のフローチャートを図6に示す。クーポンは試験前10時間以上真空に入れておく。印加電圧は-200,-300,-400Vとし、各電圧において図の試験手順に基づき試験を行った。各電圧にて熱変化を与える前に、チャンバーを開け3時間待ち水分を吸着させている。この試験での試験条件について表2に示す。ラングミュアプローブによるプラズマ密度測定はプラズマ導入後に行った。

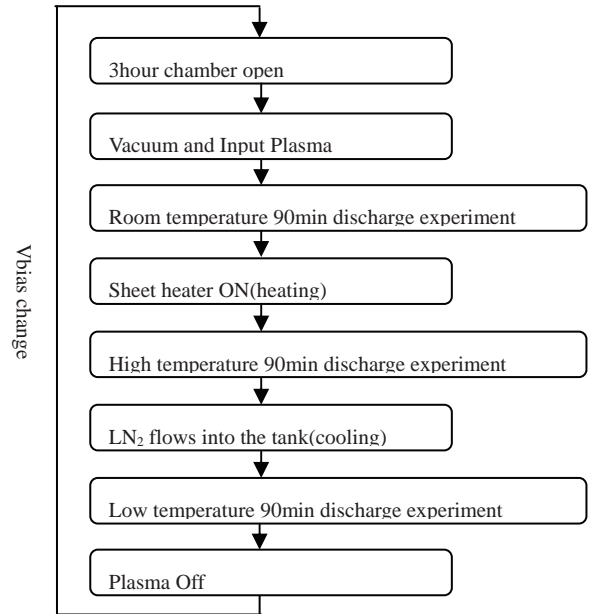


図6 試験手順(-200V~-400V)

表2 試験条件(-200V~-400V)

Vias[V]		-200	-300	-400
Experiment time[min]		90	90	90
Plasma density[1/m <sup>3</sup> ]		6.8×10 <sup>12</sup>	7.2×10 <sup>12</sup>	7.0×10 <sup>12</sup>
Plasma temperature[eV]		0.7	0.7	0.7
Back pressure[Pa]		2.9×10 <sup>-2</sup>	2.7×10 <sup>-2</sup>	3.6×10 <sup>-2</sup>
Coupon temperature [°C]	High	64~66	64~66	63~66
	room	30~31	30~30	20~39
	low	-34~-29	-42~-34	-46~-33

#### 3.2 シュラウド温度を一定とした状態での放電頻度・脱離ガス測定

またシュラウド温度を低温にて一定とし、クーポンの温度変化によるクーポン周辺ガス変化を測定しながら低地球軌道を模擬した環境下における放電頻度測定試験も実施した。放電試験回路図を図7に示す。クーポンとシュラウドの間は図8の様にした。クーポンとシートヒーター間にαゲルを挟むことにより、シートヒーターがクーポンに与える熱が伝わりやすいようにした。また、シートヒーターとシュラウドの間はホットベールを用いて断熱してある。これらの工夫により、シュラウドが低温状態でも、シュラウドに熱を与えることなくクーポンを高温にすることが可能である。Qmassへ続く配管に関してはシュラウド内部まで延長し設置してある。この時の図を図9に示す。配管にはシートヒーターを巻いてあり、シュラウドが低温環境下においても温度調節ができるようになっており、これにより低温環境下においても測定が可能となる。試験に用いた太陽電池サンプルは、図3

に示す2×4のTJ型太陽電池クーポンを用いている。この時の測定システムは図1と同様である。

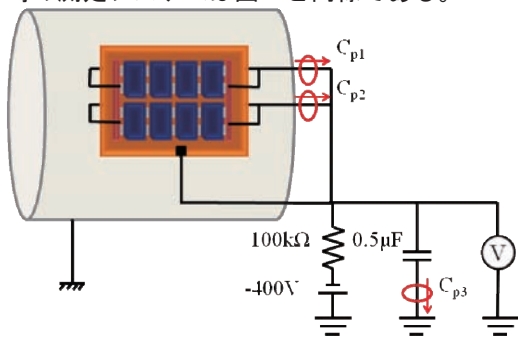


図7 放電試験回路

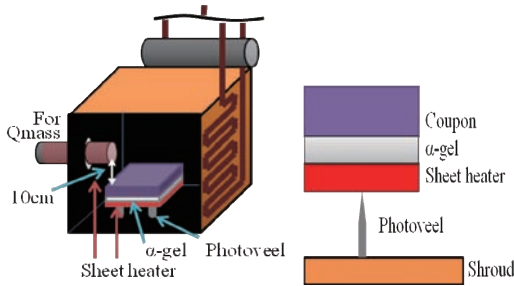


図8 試験セッティング

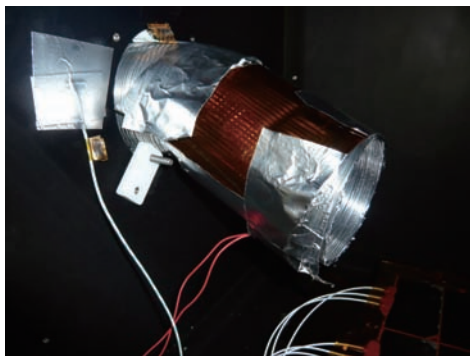


図9 Qmass への配管

試験手順のフローチャートを図10に示す。クーポンは試験前10時間以上真空に入れておく。試験中にてクーポンからの脱離水分測定値を明瞭にする為に、真空中に入れる前に3時間加湿器の中に入れてある。放電させた時の試験環境をわかりやすくする為に4つのcaseごとに分けて記載する。この試験での試験条件について表3に示す。ラングミュアプローブによるプラズマ密度測定はcase1~4はcase4が終わってから測定した。Case1の前の放電試験は、クーポンのコンディショニングの為にしている。

表3 試験条件

case	1~4	
Vias[V]	-400	
Experiment time[min]	60	
Plasma density[1/m <sup>3</sup> ]	4.7×10 <sup>12</sup>	
Plasma temperature[eV]	0.7	
Back pressure[Pa]	2.7×10 <sup>-2</sup>	
Coupon temperature [°C]	High	65~60
	room	22~24
	low	-32~-30

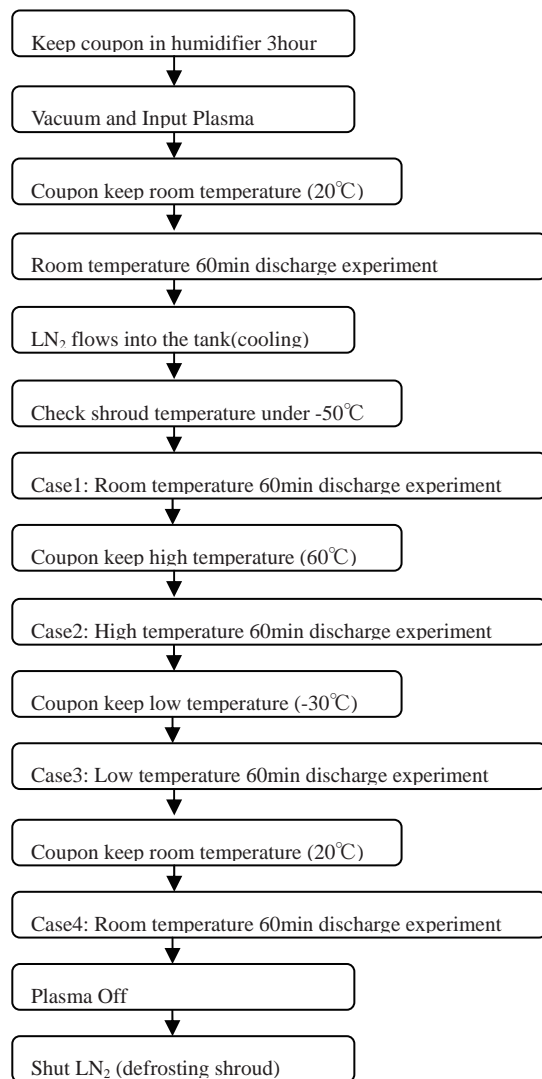


図10 試験手順

4 試験結果

4.1 シュラウド温度を変化させた状態で放電頻度測定

まず始めに、シュラウド温度を一定としなかった状態においてクーポン温度を変化させ、印加電圧を-200V、-300V、-400Vとした時の放電試験を行った。

試験中での放電回数をまとめた物を表4に示す。これらの結果より、プラズマ環境において印加電圧が大きくなった時、また低温時に放電頻度の増加している事がわかる。この時の低温時の放電頻度増加の要因としては、水分吸着量ではないかと考えられる。クーポンを低温にする際にシュラウドを冷やすのと同時並行でクーポンも冷やしてしまった為、シュラウドだけでなくクーポンにも常温・高温時以上に水分が吸着していた可能性がある。各バイアス電圧における、放電発生個所についてまとめた物を図11、図12、図13に示す。バイアス電圧を増やすほど、放電発生個所も増加しているのがわかる。なお図11~13において、クーポン表面上(セルエッジ付近)以外で発生している放電は試験結果から除外してある。

表4 試験結果(90分)

Bias	Room(30°C)	High(60°C)	Low(-30°C)
-200	0	1	6
-300	3	9	28
-400	15	11	60



図11 -200V 試験結果(左から順に常高低温)

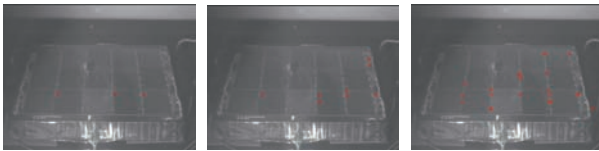


図12 -300V 試験結果(左から順に常高低温)

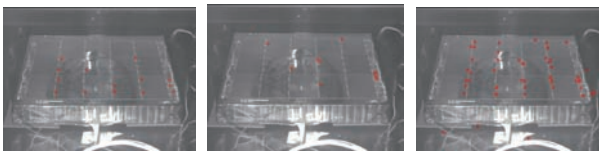


図13 -400V 試験結果(左から順に常高低温)

4.2 シュラウド温度を一定とした状態での放電頻度・脱離ガス測定

続いて、シュラウド温度を一定とした状態での放電頻度・脱離ガス測定試験の結果を示す。試験中での放電回数をまとめた物を表5に示す。また、図15にQmass 電流強度[A]を、図16にシュラウド内水分子密度[1/m<sup>3</sup>]を示す。

表5 試験結果 (60分)

Case	Coupon Temperature	Shroud Temperature	Arc Time
-	room(20°C)	room	10
1	room(20°C)	low	2
2	high(60°C)	low	3
3	low(-30°C)	low	43
4	room(20°C)	low	2

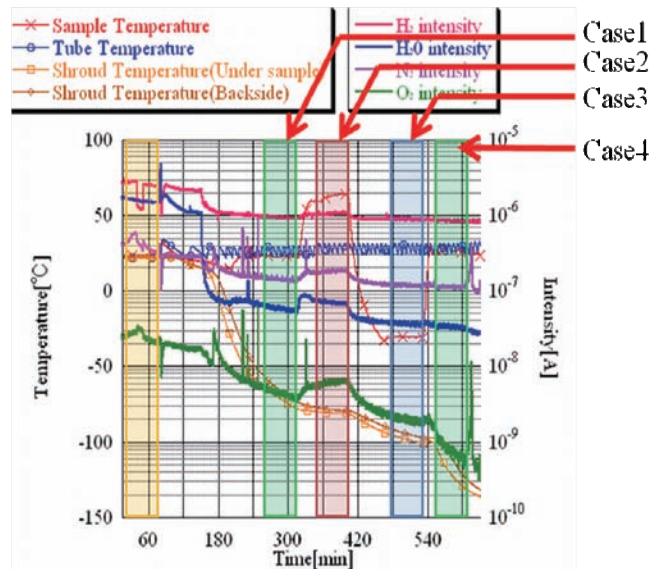


図14 各Caseと温度の関係

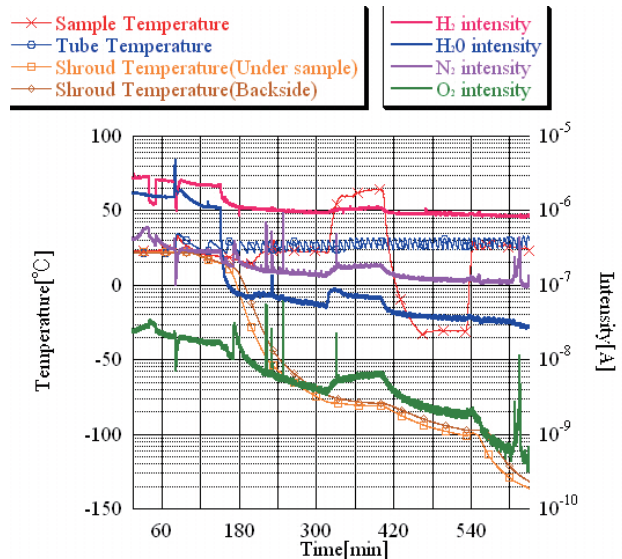


図15 温度・Qmass 電流強度

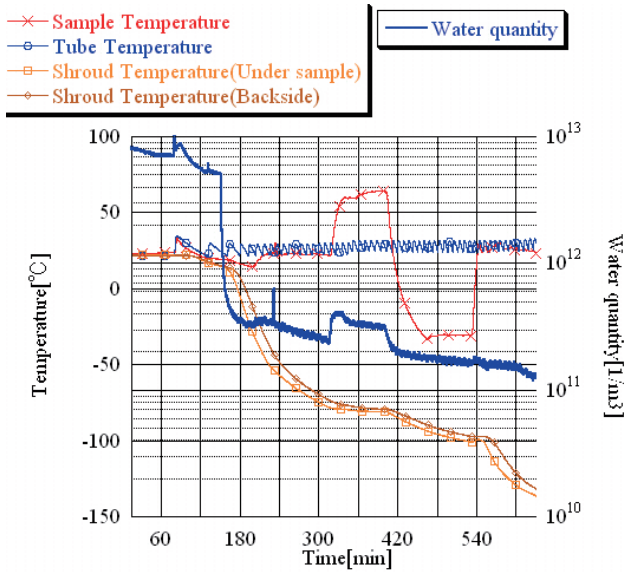


図 16 温度・シラウド内水分密度

シラウドを一定とした状態においてクーポンのみを温度変化させた場合、低温時クーポンへの水分吸着はほとんどない可能性がある。図 16 よりクーポン温度が低温時とその後の常温時においてシラウド内水分子密度がほとんど変化していないことがわかる。しかしながら低温前的高温時はクーポンからの水分の脱離による増加が見られており、低温→常温とした際にも変化がみられるはずであるが、測定結果では見受けられない。また、シラウド温度の低下と共にシラウド内水分子密度の大幅な減少がみられ、クーポンを低温とした際のクーポン周辺にある水分子密度は常温時と比べて極微量であった。よってクーポンを低温とした際にクーポンに吸着しようとする水分子自体の数自体が非常に少なかった事がわかる。以上より、今回の試験におけるクーポン低温時(case3)の水分吸着量は微量であったと言える。

表 6 各種気体の蒸気圧( $10^2$ Pa)における温度[14]

Vapor pressure : $10^2$ [Pa]	Temperature [K]
H <sub>2</sub> O	183
H <sub>2</sub>	6.0
O <sub>2</sub>	36.4
N <sub>2</sub>	31.1
Xe	67.4

表 4-4 より、放電回数は常温・高温後の低温時において大きく増加した事がわかる。上述の通り case3 での水分吸着量は微量であると考えられ、低温時における放電頻度増加の要因は水分の吸着以外にあると考えられる。

この試験での低温時の放電頻度増加要因としては、Xe の影響がある。この試験においては残念ながら Xe の測定を行わなかったが、試験中は常に Plasma を導入しているためシラウド内 Xe 密度は非常に高く、 $5.6 \times 10^{18}$ [m<sup>-3</sup>]と予想される。シラウドを低温とした際に他の分子同様シラウドへ Xe の吸着があると考えられ

るが、常に供給され続けているためシラウド内 Xe 密度は高い状態が続いているといえる。この状態においてクーポンを低温とした際、クーポンに Xe が吸着している可能性がある。故に、この試験において放電頻度増加の要因は Xe のクーポンへの吸着の可能性が高いと考えられるが更に実験する必要がある。

## 5 まとめ

本実験において、プラズマ環境下においても、放電結果より低温時のみ常温・高温時と比べて大幅な放電頻度の増加が見られた。この原因として、低温時の太陽電池クーポンへの水分吸着が考えられていたが吸着はほとんど見られなかった。また、温度変化によるカバーガラス抵抗値の変化についても考察を行ったが、放電への影響は限りなく少ないと考えられる。一番の要因として、クーポンへの Xe の吸着であると思われる。

今後の課題としては、プラズマ環境下での Xe 付着確認や、電子ビームを用いたさらなる高真空下(GEO 環境模擬下)における試験を行って行く予定である。また将来的には本研究の様な 1 次アークの放電頻度試験だけでなく、人工衛星の運用停止要因となる持続放電についても低温環境下にて検証していく必要がある。

## 6 参考文献

- [1] 趙 孟佑、藤井 治久：“第2回高電圧太陽電池アレイの放電現象と将来課題”日本航空宇宙学会誌、Vol.51、No.597pp.139～pp.144(May、2003)
- [2] V.A.Shuvalov, G.S.Kochubei, V.V.Gubin, and N.A.Tokmak “Power Losses of Solar Arrays of under the Action of an Environment in a Geosynchronous Orbit”, Cosmic Research, Vol.43, No.4, 2005, pp.259-267. (<http://www.springerlink.com/content/w6h3008718vv9207/fulltext.pdf>)
- [3] McPherson, D.A. and Schober, W.Z.R. “Spacecraft Charging at High Altitudes” the SCATHA Satellite Program in Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas, A.Rosen Ed, Prog. Astronautics and Aeronautics, 47, (1975), pp.15.
- [4] 丸橋克英、恩藤忠典：“宇宙環境科学”、オーム社、平成12年、pp180-pp186
- [5] Boris Vayner and Joel Galofaro and Dale Ferguson, “Interaction of High-Voltage Solar Arrays with Their Plasma Environment:Ground Tests”, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.41, No.6, pp1042-1049, November-December 2004.
- [6] Christopher F. Hoerber and Ernest A. Robertson and Ira Katz and V.A. Davis and David B.Snyder “Solar Array Augmented Electrostatic Discharge in GEO”, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1998.
- [7] 奥村哲平、趙孟佑 “平成19 年度 博士学位論文 放電による宇宙用太陽電池の劣化” p.8-p.21 p.44-p.46 p.56-p.57 p.99-p.112 p114-p.115
- [8] Daniel Hastings. Henry Garrett “Spacecraft Environment Interactions” CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- [9] 藤井 治久、西本 博信：“宇宙環境における飛翔体の帯電と放電”、日本航空宇宙学会誌、第 40 巻、第 463 号、pp.413～pp.423、(1992)

- [10]ELECTROSTATIC DISCHARGES ON LOW TEMPERATURE SOLAR PANELS IN SIMULATED LEO ENVIRONMENT Hideto Mashidori, Mitsuru Imaizumi, Shirou Kawakita, Kumi Nitta and Masato Takahashi Japan Aerospace Exporation Agency (JAXA), Tsukuba, Ibaraki, 305-8505 Japan、Society of Professional Rope Access Technicians
- [11]K. Nitta et al., “*Solar Panel ESD Ground Tests Under Low Temperature*”, 10th Spacecraft Charging Technology Conference, Biarritz, France, 18-21 June 2007.
- [12] 上田敦史、趙孟佑 “平成 21 年度 修士論文 低温および室温における帯電・放電試験の 1 次アーク発生の相違性”
- [13]二ノ宮隼一郎、趙孟佑 “平成 21 年度 修士論文 宇宙用太陽電池アレイ上の放電発生と吸着水分の関係”
- [14]アルバック(株)編：“新版真空ハンドブック”、オーム社、平成 14 年、P177
- [15]成瀬省著：“ガラス工学”共立出版、昭和 44 年、P340,341
- [16]DURAN GLASS(株)：ホウケイ酸ガラスの電気特性、<http://www.duran-glass.com/feature/elect.html>
- [17]田邊靖典、豊田和弘“平成 21 年度 学士論文 薄膜太陽電池を模擬した ITO ガラス板表面における静電放電発生の仕組みについての実験的研究