

周辺プラズマ環境が高電圧太陽電池上で発生する 一次放電に与える影響

○福田 大, 豊田 和弘, 趙 孟佑 (九州工業大学)

1. 背景及び目的

放電実験衛星『鳳龍四号』は、2016年2月にH-IIAロケット30号機の相乗り小型副衛星として打ち上げられた。約30cm立方重量約11kgの超小型人工衛星であり、軌道高度575km軌道傾斜角31度の低地球軌道に投入されている。鳳龍四号のメインミッションは、「高電圧化した太陽電池上で発生する放電現象の観測」である。これまで地上の実験室で行われてきた放電実験の妥当性を評価するために、実際の宇宙軌道上で同様な放電実験を行う。地上設備と同等の質で放電現象を観測できる測定機器を衛星に搭載することで、地上での放電実験結果と比較を行っている[1]。

図1に鳳龍四号に搭載している放電実験システムの概略図を示す。放電実験のバイアス源として高電圧太陽電池を搭載している。この高電圧太陽電池は、鳳龍四号の前身である鳳龍式号で宇宙実証されている[2]。高電圧太陽電池のアノード側には電子コレクタを接続している。電子コレクタは衛星外部に搭載されており、周辺プラズマと放電実験システムのコンネクタとしての役割を果たしている。放電実験の際には、高電圧太陽電池のカソード側が周辺プラズマ電位と比べ負の電位を持つ。この負電圧を放電実験サンプルにバイアスすることで、放電実験サンプル上で放電が発生する環境を構築している。放電が発生した際には、図中赤矢印ルートで放電電流が流れるため、道中に電流プローブを設置し放電電流の計測を行う。また、同時に放電発光の撮影を行い、放電発生箇所の特定制を行う[3]。

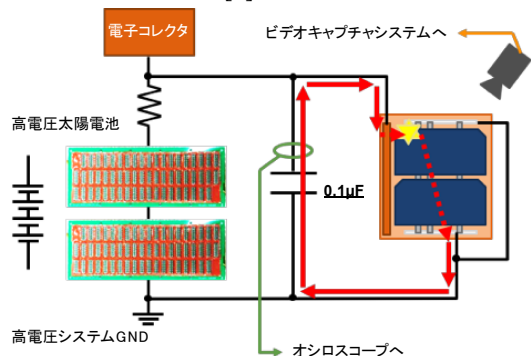


図1 鳳龍四号の放電実験システム概略図

図2に地上での放電実験システムの概略を示す。地上実験では、真空チャンバ内部に鳳龍四号の地上試験モデルを設置し実験を行っている。周辺プラズマ環境はキセノンガスを用いてECRプラズマ源で模擬している。高電圧バイアス源は、チャンバ外部で高電圧太陽電池を用いて発電した電圧を投入している。放電実験の開始や衛星からのデータ取得等はすべて無線通信を用いて行い、実際の衛星運用と同様の手順で行っている。

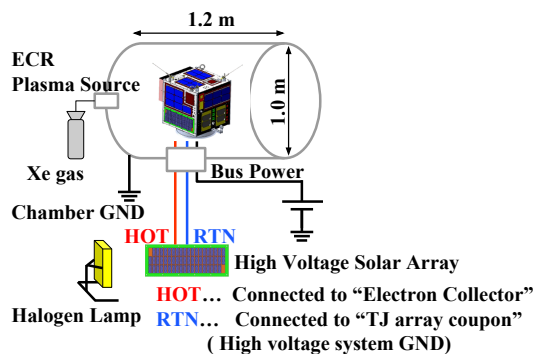


図2 鳳龍四号の地上試験モデルを用いた放電実験システム概略図

それぞれの実験から得られた結果の一例を図3、図4に示す。放電発光の画像から双方の放電は同様の位置で発生していることが見て取れる。一方で放電電流波形は、軌道上実験結果のピーク電流が地上実験結果より約10A大きく、わずかに違いが見られる。

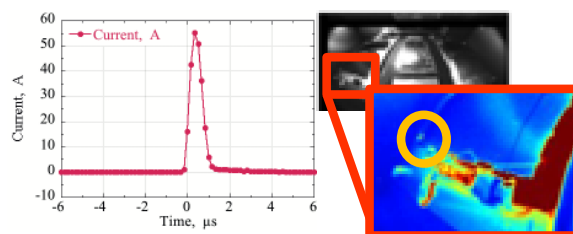


図3 鳳龍四号で得られた軌道上放電実験結果

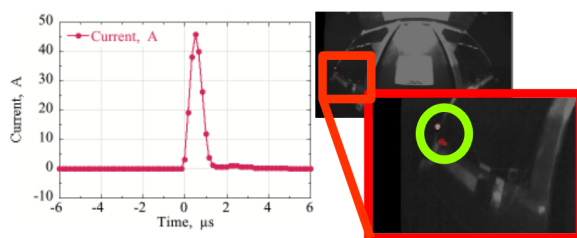


図 4 地上実験で得られた結果

軌道上と地上の実験環境は、背圧やプラズマパラメータ、プラズマ種などの違いが存在し、これらの違いが放電電流波形に影響を及ぼしている可能性がある。実際の宇宙軌道上環境は、酸素イオンが支配的な環境である[4]。このため、酸素プラズマを生成し実験を行うことが理想的である。しかしながら、安定的な酸素プラズマを地上の試験設備で生成するには多量のガスを要し、結果としてチャンバ圧力が高くなってしまふ。チャンバ内部圧力は放電電流波形に影響を及ぼすことは過去の研究から明確であり[5]、軌道上結果と直接比較することができない。

そこで、複数種類のガスを用いてプラズマを生成し放電実験を行い、結果を比較することで周辺プラズマ環境が放電電流波形に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。本論文では、キセノンガスとアルゴンガスを用いてプラズマを生成し、放電実験を行った結果に関して示す。第 2 章には実験構成に関して示し、第 3 章に実験結果に関して示す。最後に第 4 章にて本論文のまとめを示す。

2. 放電実験の構成

異なるガス種で生成したプラズマ環境下で 2 種類の回路構成で放電実験を行った。それぞれの実験構成図を図 5、図 6 に示す。実験構成-1 (チャンバグラウンド実験) では、真空チャンバ内部に実験サンプルの太陽電池を配置し、真空チャンバ外部に安定化電源 (型番: Takasago TMK 1.0-50)、外部キャパシタを設置した。放電発生時に放出される電子はチャンバ外部へ流れ、このときの放電電流はチャンバ外部で電流プローブを用いてオシロスコープ (型番: National Instruments PCI-5105) で計測した。一方、実験構成-2 (フローティング実験) では実験回路とチャンバグラウンドは絶縁トランスを用いて絶縁させている。真空チャンバ内部に、実験サンプルの太陽電池、電子コレクタ、外部キャパシタ、電流プローブ (型番: Tektronix P6022) を設置し、真空チャンバ外部から安定化電源を用いて高電圧を投入している。実験サンプルの太陽電池セル横に、電子コレクタと同電

位の電極を貼り付けている。この電極は、太陽電池上で発生する放電のアノードとしての役割を持つ。計測点として、外部キャパシタ電圧、太陽電池電位、放電電流の 3 点をオシロスコープで計測した。なお、外部キャパシタ電圧と太陽電池電位は差動プローブ (型番: Pico Technology TA044) を用いて計測した。この構成は鳳龍四号の実験構成を簡略化したものであり、放電電流経路のハーネス長は、鳳龍四号のフライトモデルと長さを合わせている。また双方の実験構成において、真空チャンバ外部にカメラを設置し、放電が発生した際の放電発光を撮影した。表 1 に放電実験回路のパラメータを示す。真空チャンバ内部のプラズマパラメータはラングミュアプローブ (30mm 球) で計測した。本実験はキセノンガスとアルゴンガスで生成したプラズマ環境下で行った。ここで、考慮事項としてチャンバ内部圧力を各実験で合わせ、周辺圧力の違いによる放電電流波形への影響をなくしている。実験時のプラズマパラメータは表 2、表 3 に示している。

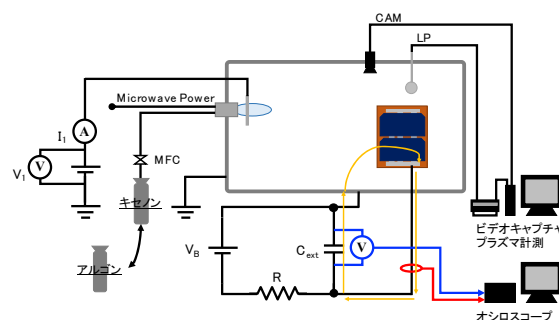


図 5 放電実験構成-1 (チャンバグラウンド実験)

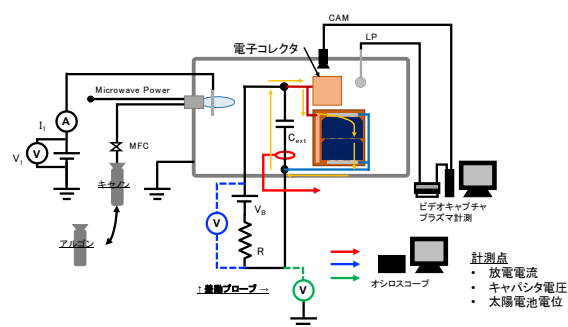


図 6 放電実験構成-2 (フローティング実験)

表 1 放電実験回路のパラメータ

V_B	350 [V]
R	100 [k Ω]
C_{EXT}	0.1 [μ C]

表 2 キセノンプラズマの環境

	実験構成-1	実験構成-2
n_e	$9.2 \text{ E}+10 [\text{m}^{-3}]$	$3 - 5 \text{ E}+11 [\text{m}^{-3}]$
T_e	$3.37 [\text{eV}]$	$3.5 - 4.5 [\text{eV}]$
V_P	$5.3 [\text{V}]$	$5 - 10 [\text{V}]$
P	$3.68 \text{ E}-3 [\text{Pa}]$	$3.43 \text{ E}-3 [\text{Pa}]$

表 3 アルゴンプラズマの環境

	実験構成-1	実験構成-2
n_e	$7 - 8 \text{ E}+10 [[\text{m}^{-3}]]$	$3 - 5 \text{ E}+10 [\text{m}^{-3}]$
T_e	$3.4 - 4.7 [\text{eV}]$	$4.5 - 6.2 [\text{eV}]$
V_P	$7 - 9 [\text{V}]$	$15 [\text{V}]$
P	$3.51 \text{ E}-3 [\text{Pa}]$	$3.43 \text{ E}-3 [\text{Pa}]$

3. 実験結果

3.1 実験構成-1（チャンバグラウンド実験）

キセノンプラズマ環境下での放電実験は合計 220 分行った。この実験から 40 回の放電が検知された。計測された放電電流の一部を図 7 に示す。放電電流のピーク値は $2.2 \sim 4.7 [\text{A}]$ （平均値: $3.45 [\text{A}]$ ），放電持続時間は $13 \sim 22 [\mu\text{s}]$ （平均値: $17.45 [\mu\text{s}]$ ）であった。放電は太陽電池上の様々な箇所が発生しており、場所による放電電流波形の違いは見られなかった。

一方、アルゴンプラズマ環境下での放電実験は合計 2100 分行った。この実験から 50 回の放電が検知された。計測された放電電流の一部を図 8 に示す。放電電流のピーク値は $0.6 \sim 1.9 [\text{A}]$ （平均値: $1.01 [\text{A}]$ ），放電持続時間は $28 \sim 73 [\mu\text{s}]$ （平均値: $53.9 [\mu\text{s}]$ ）であった。キセノンプラズマ時同様に、放電は太陽電池上の様々な箇所が発生しており、場所による放電電流波形の違いは見られなかった。

双方の結果を比較すると、放電電流のピーク値はキセノンプラズマ時の方が大きく、放電持続時間はアルゴンプラズマ時の方が長くなる結果が得られた。チャンバグラウンド実験での放電は、放電点から放出された電子はプラズマ中を通りチャンバグラウンドへと流れる。この過程では中性粒子との衝突・電離を繰り返しており、キセノンとアルゴンのイオン化エネルギーの違いが放電電流波形に影響を及ぼしていると考えられる。

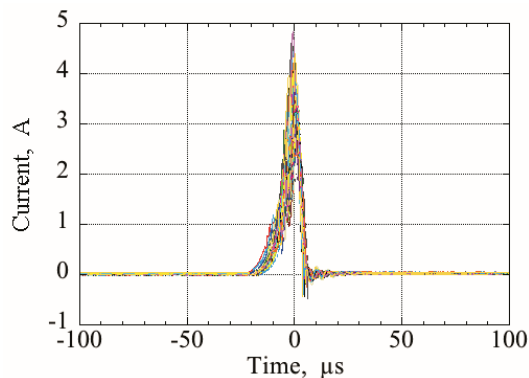


図 7 キセノンプラズマ環境下での放電電流
（チャンバグラウンド実験）

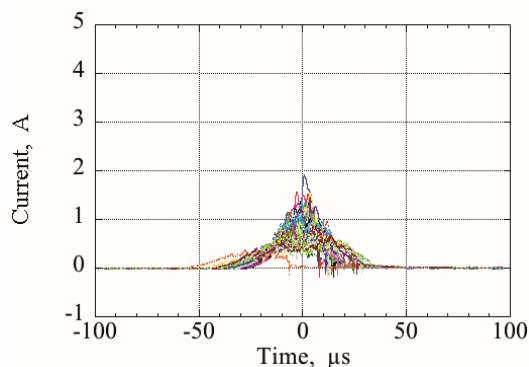


図 8 アルゴンプラズマ環境下での放電電流
（チャンバグラウンド実験）

3.2 実験構成-2（フローティング実験）

キセノンプラズマ環境下での放電実験は合計 1650 分行った。この実験から 27 回の放電が検知された。図 9 に放電発生箇所のマッピングを示す。図中赤丸が放電発生箇所を示しており、放電発生箇所によってグループ A からグループ E に分類した。これは放電発生箇所に応じて放電電流波形に違いが見られたためである。また、図中橙色で示しているのは、実験サンプル上に設置した電極の位置である。表 4 に各グループの放電の計測データを示す。放電前の外部キャパシタの電圧は $-343 [\text{V}]$ であり、グループ A 以外では殆ど放電していない。また、放電前の太陽電池セルの電位は $-321 [\text{V}]$ であり、すべてのグループで放電発生後に上昇する結果が得られた。

グループ B3 で発生した放電の計測データを図 10 に示す。このグループでは外部キャパシタの電圧が数ボルトのみ放電しており、放電電流のピーク値も約 0.34 A と非常に小さい。放電電流の立ち下がり時は、遮断されたように急峻に 0 になっている。

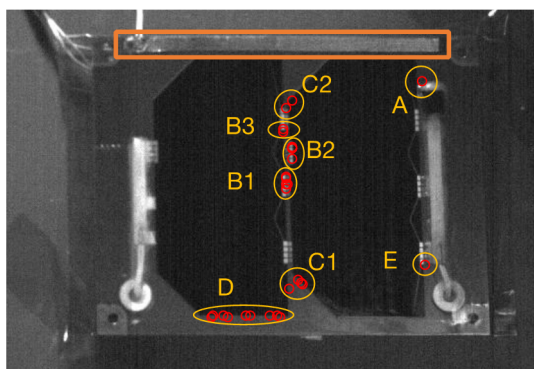


図 9 キセノンプラズマ時の放電発生箇所
(フローティング実験)

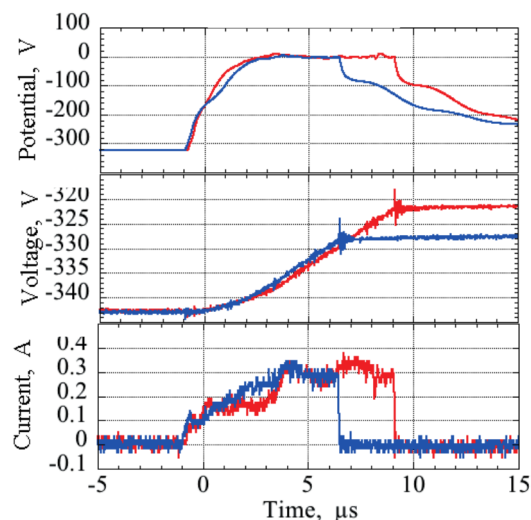


図 10 グループ B3 の計測データ
(フローティング実験)

(a):太陽電池電位 (b):外部キャパシタ電圧
(c):放電電流

表 4 キセノンプラズマ時の計測データ一覧 (フローティング実験)

Group	Peak Current [A]	Duration [μ s]	Capacitor Voltage [V]	Solar Cell Potential [V]
A	(35)	(1.4)	+37.5	+84.3
B1	0.15	3.3 ~ 5.5	-341 ~ -338	-15 ~ 0
B2	0.2	5.2 ~ 11.2	-336 ~ -323	0
B3	0.34	7.4 ~ 10.1	-328 ~ -321	+4.5 ~ +9
C1	0.1	7.6 ~ 16.9	-338 ~ -332	0
C2	0.14 ~ 2.8	20.5 ~ 22	-322 ~ -39	+9.7 ~ +49
D	0.08	2.4 ~ 6.6	-342 ~ -340	-141 ~ -7.6
E	0.15	3	-341	-26.1

アルゴンプラズマ環境下での放電実験は合計 1200 分行った。この実験からは 1 回のみ放電が検知された。放電発生箇所を図 11 に、放電時の計測データを図 12 に示す。放電発生箇所は、太陽電池セル間のインターコネクタ付近であり、キセノンプラズマ時の結果のグループ B3 の箇所と同様である。放電時に外部キャパシタの電圧は約 2 [V]しか放電しておらず、放電電流のピーク値も 0.1 [A]程度、放電持続時間は約 5.5 [μ s]と非常に小さな放電であった。キセノンプラズマ時の放電データと比較すると大幅に異なる結果である。しかしながら、放電回数が 1 回のみであるため、フローティング実験でのガス種の違いが放電電流波形に及ぼす影響を見出すことはできない。

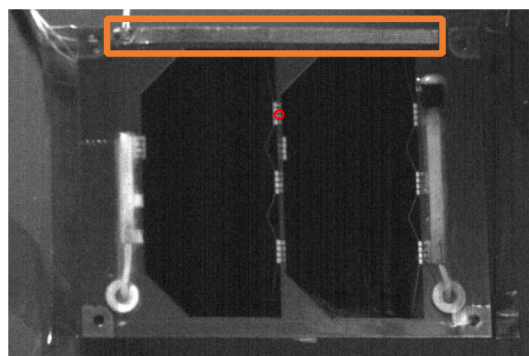


図 11 アルゴンプラズマ時の放電発生箇所
(フローティング実験)

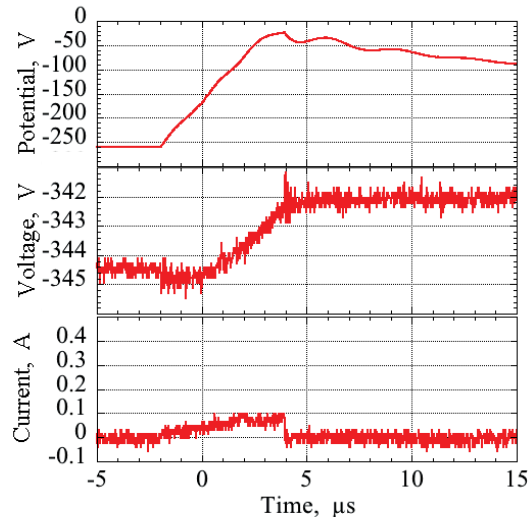


図 12 アルゴンプラズマ時の計測データ
(フローティング実験)

4. まとめ

周辺プラズマ環境が放電電流波形に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、キセノンとアルゴンプラズマ環境下で、チャンバグラウンド実験とフローティング実験の 2 つの構成で実験を行った。チャンバグラウンド実験では、キセノンプラズマ環境下での放電の方が、放電電流のピーク値が高く持続時間が短い結果が得られた。プラズマを生成するガス種のイオン化エネルギーの違いが放電電流波形に影響を与えたと考えられる。一方フローティング実験では、アルゴンプラズマ環境下での放電回数が 1 回であったため、キセノンプラズマ環境下での結果と比較しガス種の違いが放電電流波形に及ぼす影響を見出すことはできなかった。引き続きフローティング実験をアルゴンプラズマ環境下で行い、周辺プラズマ環境が放電電流波形に与える影響を明らかにしたいと考えている。

参考文献

- [1]. Shimizu, T., Fukuda, H., Nguyen T. S., Toyoda, K., Iwata, M. and Cho, M., "Initial Results From an In-Orbit High-Voltage Experimental Platform: HORYU-IV," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 45, No. 8 (2017), 1853-1863
doi: 10.1109/TPS.2017.2688725
- [2]. Iwai, S., Masui, H., Iwata, M., Toyoda, K. and Cho, M., "Flight Results of Arcing Experiment Onboard High Voltage Technology Demonstration Satellite Horyu-2," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 52, No. 2 (2015), pp. 544-552
doi: 10.2514/1.A33007
- [3]. Shimizu, T., Fukuda, H., Toyoda, K. and Cho, M., "Development of an In-Orbit High-Voltage Experimental Platform: HORYU-4," *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 43, No. 9 (2015), pp. 3027-3040
doi: 10.1109/TPS.2015.2453330
- [4]. Hastings, D., and Garrett, H., "Spacecraft-Environment Interactions," 1996, pp. 44-99
- [5]. Okumura, T., Masui, H., Toyoda, K., Cho, M., Nitta, K., and Imaizumi, M., "Environmental Effects on Solar Array Electrostatic Discharge Current Waveforms and Test Results," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 46, 2009, pp. 697-705.