

放電実験衛星「鳳龍四号」の実験結果と地上試験結果の比較検討

○福田大, 豊田和弘, 趙孟佑 (九州工業大学)

Comparison of experimental results of Arc Event Generator and Investigation Satellite “HORYU-IV” and ground experiment results

Hiroshi Fukuda, Kazuhiro Toyoda and Mengu Cho
(Kyushu Institute of Technology)

1. 目的および背景

超小型人工衛星「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、低地球軌道に投入された。本衛星の開発には、2014年10月から2016年1月の2年2ヶ月を要した。

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。鳳龍四号の前身である鳳龍式号では、宇宙環境下で約350Vの高電圧発電に成功し¹⁾、放電実験の実施を行っていた。鳳龍四号では、鳳龍式号のシステムを改良し、地上で行っている放電実験と同等のデータ(放電電流及び放電発光)を取得する事が出来る。これにより、太陽電池上のどこで、どのような放電が発生したかを見ることが出来る。

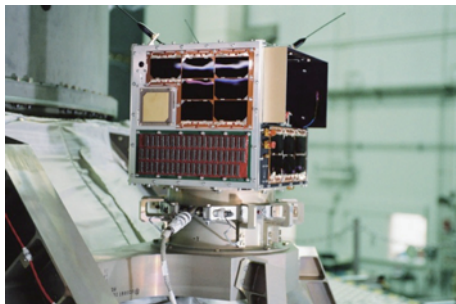


図1 H-IIA ロケットに取付けられた鳳龍四号²⁾

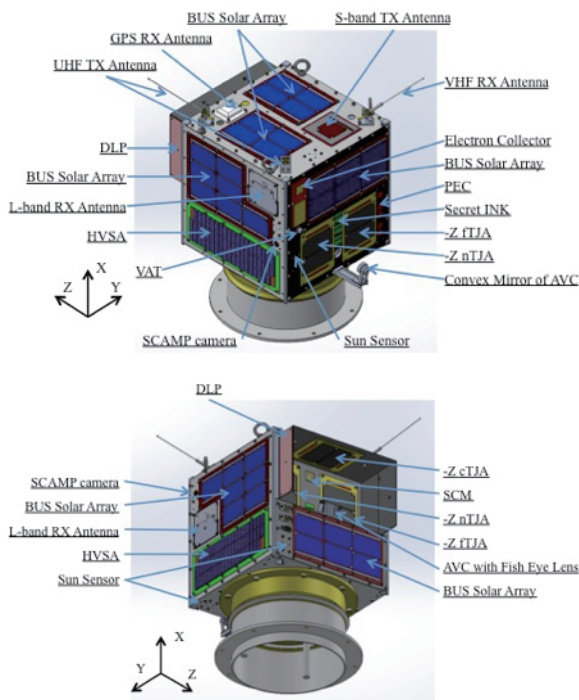


図2 鳳龍四号の外観

表1 鳳龍四号の概要

サイズ	450×420×430 [mm]
重量	10 [kg]
軌道	564- [km] 31[deg]

2. 鳳龍四号

2.1 諸元

図2に鳳龍四号の外観図を、表1に概要を示す。鳳龍四号は約40cm立方、10kgの超小型人工衛星である。衛星外面には衛星の電源となる太陽電池パネルだけでなく、多くの実験用のコンポーネントが搭載されている。通信にはアマチュア無線のUHF帯、VHF帯、2.4GHz帯の3つの周波数を使用している。

2.2 高電圧実験システム (メインミッション)³⁾

放電実験の高電圧バイアス源には、高電圧太陽電池 (High Voltage Solar Array : HVSA) を用いている (図3)。高電圧太陽電池は58個のスフェラーアレイ® (表2) で構成されており、最大420V発電することが出来る。鳳龍四号は姿勢制御として沿磁力線制御を採用しており、常に1軸を中心に回転している。このため、高電圧太陽電池を衛星の2面に対角線上に配置し、互いに直列に接続することで常に高電圧の発電を可能としている。高電圧太陽電池は放電実験の高電圧バイアス源として使用するため、高電圧太陽電池上で放電が発生することを防ぐ必要がある。こ

のため、全ての電極露出部分をシリコン系接着剤 (RTV) でグラウティングしている。

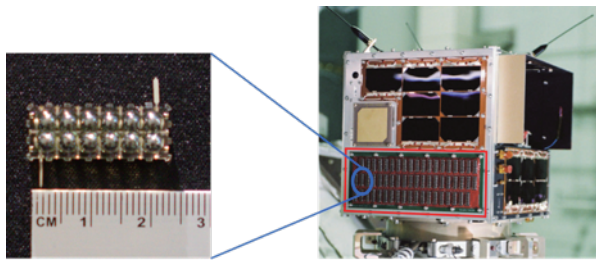


図3 スフェラーアレイ®と高電圧太陽電池

表2 スフェラーアレイ®の仕様

	V_{oc}	7.27 [V]
	I_{sc}	2.3 [mA]
	P_{max}	13.5 [mW]
	Size	2.4×9.5 [mm]

図4に放電実験システムのブロックダイアグラムを示す。放電発生時のノイズによる衛星全体への影響を低減するために、衛星バスから絶縁されており、独自のGNDを持っている。放電実験では太陽電池サンプルの1枚が高電圧バイアス源に接続され放電環境を構築する。放電が発生した際には、高電圧太陽電池に並列に接続されたキャパシタに蓄えられた電荷が放出される。太陽電池サンプル上には、電子コレクタと同電位の電極を搭載している。これは、放電発生時の放電電流のルートが形成されるように搭載している。

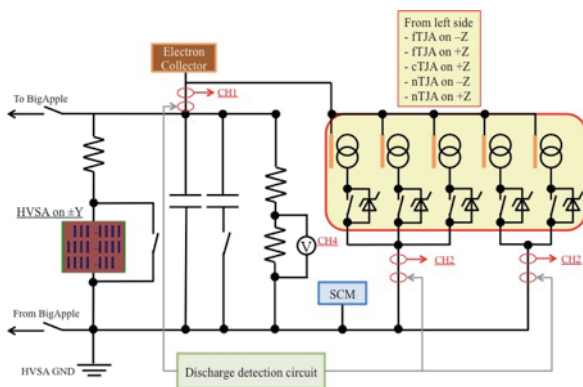


図4 高電圧実験システムのブロック図

放電実験用の太陽電池サンプルは3種類5枚を±Z面に搭載している。

- ノミナル型太陽電池：±Z面
- ETFEフィルムラップ型太陽電池：±Z面
- 半導電性コーティング型太陽電池：+Z面

図5、図6に各種太陽電池サンプルの特徴を示す。ノミナル型太陽電池は、カプトンテープが貼られたア

ルミサブストレート上に太陽電池を貼った物である。ETFEフィルムラップ型太陽電池はノミナル型太陽電池に厚さ12.5μmのETFE(Ethylene Tetra Fluoro-Ethylene)で覆い、周辺プラズマからのイオンの侵入を防ぐ役割を果たしている。一方、半導電性コーティング型太陽電池は、ノミナル型太陽電池に対しATO(Antimony Tin Oxide)をコーティングすることで、太陽電池カバーガラスに帯電した電子を衛星構体に流出させることが出来る。フィルムラップ型及びコーティング型太陽電池は、サブミッションとしてノミナル型太陽電池と比べ、放電抑制が出来るか否かの検証を行うために搭載されている。

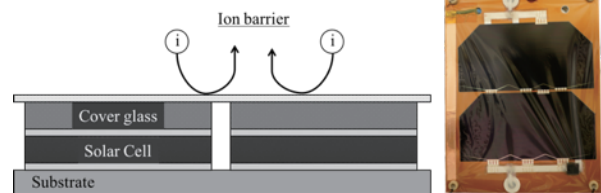


図5 フィilmラップ型太陽電池

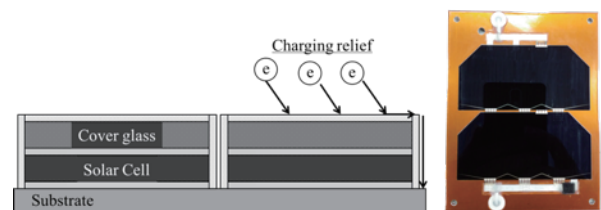


図6 コーティング型太陽電池

+Z面のミッション用太陽電池が搭載されている部分は、5cm程度窪んでおりフードの形をしている(図7)。これはメインミッションで放電発光を撮影する際、太陽光が直接太陽電池に当たらないよう、意図的に影を作るためである。+Z面の放電発光撮影用カメラはこのフード内に設置されており、魚眼レンズ備えたCCDカメラを搭載している。このカメラで+Z面のフード内部を全て撮影することが出来る。-Z面の放電発光撮影用カメラは衛星内部に搭載されている。-Z面は衛星外部にアームを伸ばしており、先端部分に曲面鏡を取り付けている。衛星内部のカメラで曲面鏡に反射した-Z面全体を撮影する仕組みである。

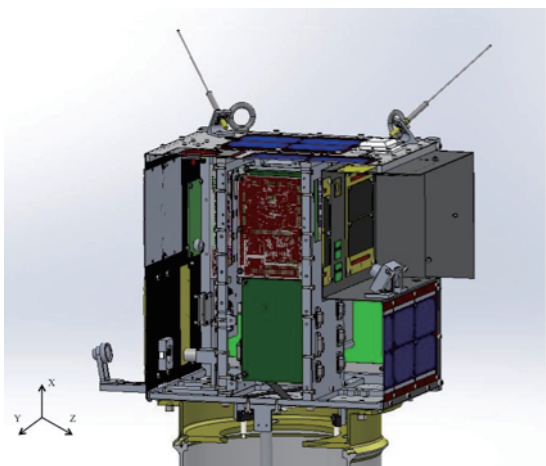


図7 鳳龍四号の断面図

放電実験では、放電電流測定用のオシロスコープ（On-Board Oscilloscope : OBO）及び放電発光撮影用カメラ（Arc Vision Camera : AVC）も同時に起動している。OBOは電流トランスで電圧に変換された放電電流を計測しており、同時に2箇所（図4中電子コレクタ直下及び太陽電池直下）の電流が測定可能であり、また高電圧太陽電池で発電された電圧も測定可能である。測定モードはシングルチャンネルモードまたはマルチチャンネルモードの選択を行うことが出来る。シングルチャンネルモードでは、CH1のみを計測し、マルチチャンネルモードでは、CH1,CH2（またはCH3）及びCH4の3箇所の測定を行う。OBOシステムは衛星バスGNDを使用しているため、発電電圧は絶縁アンプを介し測定している。OBOシステムは6MHzのサンプリング周波数で計測を行っている。鳳龍四号にはAVCを2つ搭載している。放電が発生した際に、OBOシステムからのトリガ信号を受け撮影を行う。撮影は2.8フレーム120fpsで行われ、トリガの前後の写真を撮影することが出来る。実際の実験では、1枚の太陽電池に対して放電実験を行うため、AVCはどちらか片方のみが起動する。

3. 軌道上実験結果⁴⁾

鳳龍四号の打ち上げ後、1週間でメインミッションの立ち上げを行い、30分間の試験で2回の放電を取得することが出来た。試験時のパスは図8中に示す通りであり、放電発生箇所も併せて示している。放電#1-2では放電発光の撮影にも成功している。図9に計測した放電電流を示す。放電電流はピーク約60A、パルス幅約2μsの非常に急峻な波形を計測することが出来た。図10に撮影した放電発光を示す。図中左

上部の太陽電池縁に小さな光を見ることが出来る。この光が放電発光である。

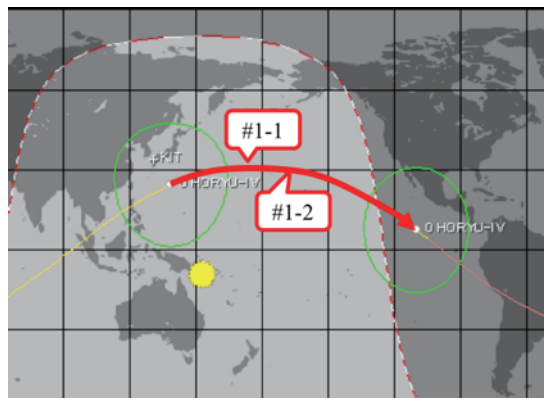


図8 第1回目試験パスと放電発生箇所

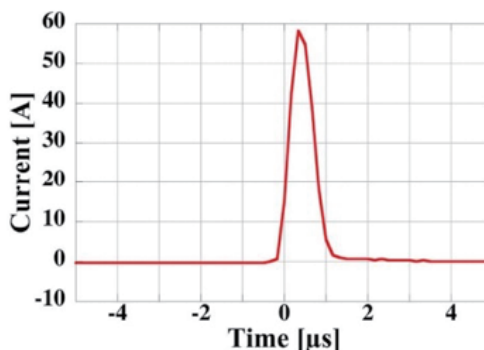


図9 放電#1-2時の放電電流波形

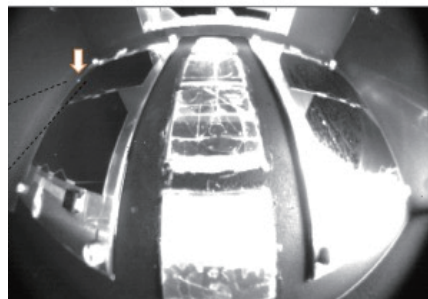


図10 放電#1-2時の放電発光写真

これまでの放電試験で取得することが出来た放電電流波形を3つのカテゴリーに別ける。

- タイプ1：高ピーク電流、短時間
- タイプ2：高ピーク電流、短時間+振動
- タイプ3：低ピーク電流、長時間

以下に各タイプの放電電流波形の例を示す。なおタイプ1は図9である。

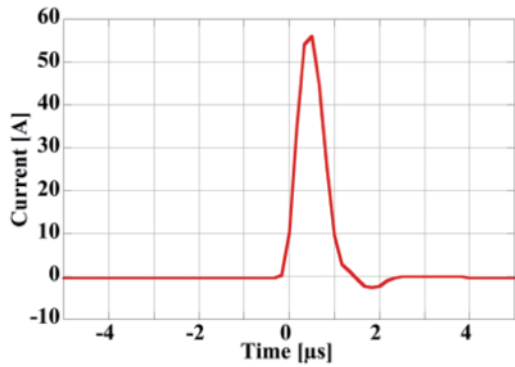


図 10 放電電流 (タイプ 2)

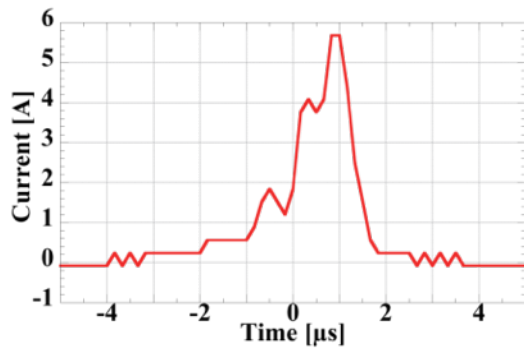


図 11 放電電流 (タイプ 3)

4. 地上実験結果

軌道上試験ではこれまでに 3 パターンの放電電流が計測出来ているが、地上試験でも同様の放電電流が取得できるかを確認するために地上試験を行った。地上実験では、鳳龍四号の EM を使用して実験を行い、試験時のプラズマ密度は $9.98 \times 10^{10} \text{ [m}^{-3}\text{]}$ で、 $2.0 \times 10^3 \text{ [Pa]}$ の圧力の下 100 分間の放電実験を行った。図 12 はバイアス電圧、回路基板温度そして放電検知のタイミングを示したグラフである。

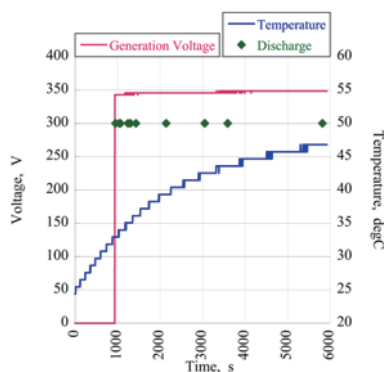


図 12 放電実験時のデータ

バイアス電圧、回路基板温度、放電のタイミング

この放電実験を通して、10 回の放電が発生し 3 つのタイプの放電電流波形を取得することが出来た。表 3 に放電発生タイミングと放電電流のタイプを示す。

表 3 放電発生時間と放電電流の分類

#	放電検知時間 [秒]	放電電流タイプ
1	952	A
2	1037	A
3	1066	A
4	1242	B
5	1302	A
6	1431	A
7	2141	A
8	3049	C
9	3588	C
10	5817	B

タイプ A~C の放電電流と放電発光の写真を以下に示す。

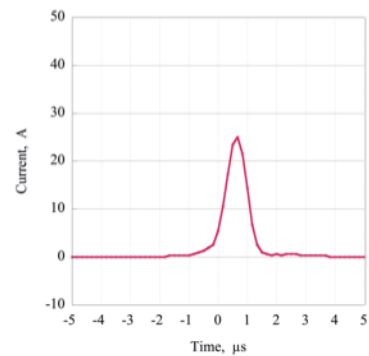


図 13 地上実験での放電電流#1



図 14 地上実験での放電発光#1

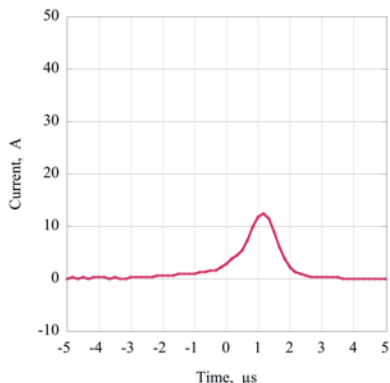


図 15 地上実験での放電電流#4



図 16 地上実験での放電発光#4

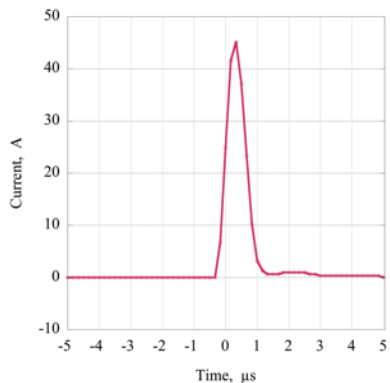


図 17 地上実験での放電電流#9



図 18 地上実験での放電発光#9

放電のタイプ分けは、放電電流のピーク値、波形の形を元に行っている。タイプ A~C はそれぞれピーク値が、約 25A・12.5A・45A であった。放電発生箇所は左下に集中している。放電発光の撮影は魚眼レンズ

で撮影されたものであるので、図 19 に写真にマッピングしたものを示す。

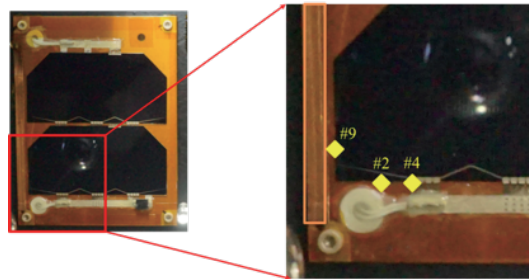


図 19 地上実験での放電発生箇所

放電発生箇所とサンプル上の電極間距離に応じて、放電電流のピーク値が変わることが見て取れる。

5. まとめ

2016 年 2 月に打ち上げられた超小型人工衛星「鳳龍四号」で複数回の放電実験を行い、放電電流波形に基づき 3 つのカテゴリに別けることが出来ている。地上試験でも同様の放電電流が取得できるかを確認するために地上試験を行った。地上試験では、鳳龍四号の EM を用いて行った。放電電流は軌道上で得られたものと似た波形を得られている。放電電流のピーク値は、放電発生箇所と電極間の距離に応じて変化していることが見て取れる。

参考文献

- 1) T. Yoke, S. Iwai, A. Khan, H. Masui, M. Iwata, K. Toyoda and M. Cho, "Development of mission payloads onboard high voltage technology demonstration satellite HORYU-II," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 41, no. 12, pp. 3477-3486, 2013.
- 2) "H-IIA F30 Piggyback Payload" : <http://jda.jaxa.jp/result.php?lang=j&id=732e418b959d1311b20ba7766120c700>
- 3) Shimizu, T., Fukuda, H., Toyoda, K., and Cho, M., "Development of an In -Orbit High-Voltage Experimental Platform: HORYU-4", IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, no. 9, pp. 3027-3040, 2015.
- 4) Shimizu, T., Fukuda, H., HORYU-IV team., Toyoda, K., Cho, M. : INITIAL RESULTS FROM IN-ORBIT HIGH VOLTAGE EXPERIMENT ON HORYU-IV, 14th Spacecraft Charging Technology Conference, ESA/ESTEC, Noordwijk, NL, 04-08 APRIL 2016