

放電実験衛星「鳳龍四号」の運用成果

○福田大, Faure Pauline, 鳳龍四号開発チーム, 豊田和弘, 趙孟佑 (九州工業大学)

Operation results of Arc Event Generator and Investigation Satellite “HORYU-IV”
 Hiroshi Fukuda, Faure Pauline, HORYU-IV member, Kazuhiro Toyoda and Mengu Cho
 (Kyushu Institute of Technology)

1. 目的および背景

鳳龍四号は 30cm 立方、約 10kg の超小型人工衛星であり、2014 年 10 月から九州工業大学で開発を行ってきた。図 1 に H-IIA ロケットに取り付けられた鳳龍四号を示す。本衛星は 2016 年 2 月 17 日に 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、高度 575km 軌道傾斜角 31 度の低地球軌道に投入された。

鳳龍四号の目的は、実宇宙空間での実験を通して高電圧技術の発展に貢献することである。鳳龍四号の前進である鳳龍式¹⁾では、実宇宙環境で約 350V の高電圧発電に成功し、この高電圧を利用して放電実験（放電抑制技術の実証）を実施した。鳳龍式¹⁾の測定装置では放電回数のカウントは行っているが、放電電流などの他のパラメータの測定は行っていなかった。

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。これは鳳龍式¹⁾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（放電電流や放電発光）の取得するミッションである。これにより、太陽電池上の「何処で」「どの様な」放電が発生したかを見ることが出来る。またサブミッションとして、放電抑制技術の実証や宇宙環境計測（プラズマ密度、光電子電流）、超小型衛星用推進器を、アウトリーチミッションとして地球撮影用カメラ、デジシンガー（衛星からの音声データ送信）を搭載している。

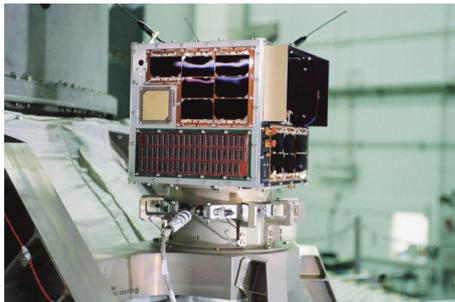


図 1 H-IIA ロケットに取付けられた鳳龍四号²⁾

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。

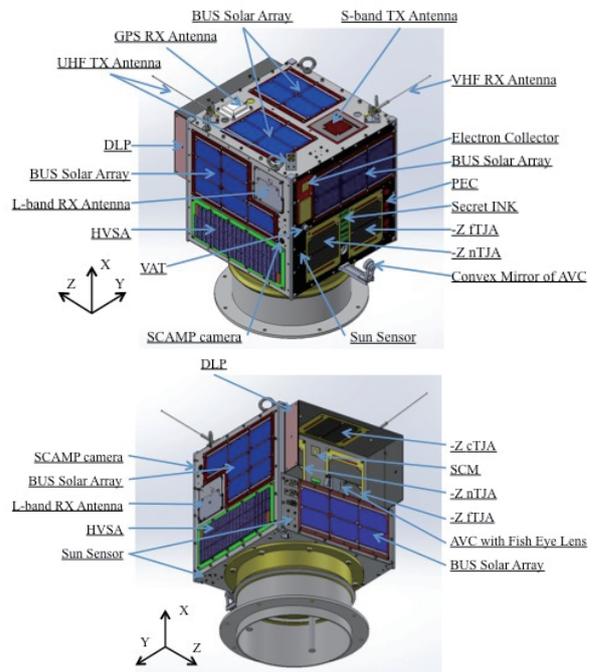


図 2 鳳龍四号の外観

表 1 鳳龍四号の概要

サイズ	440×315×480 [mm]
重量	13 [kg]
軌道	564 [km] 31[deg]

2.2 高電圧実験システム (メインミッション)³⁾

メインミッション用の太陽電池サンプルは以下の 3 種類計 5 枚を±Z 面に搭載している。

- ノミナル太陽電池：±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 3, 4 に各種太陽電池の特徴を示す。ノミナル太陽電池は他の衛星に使われているような太陽電池とサブストレート以外に違いはない物を使用している。ETFE フィルムラップ型太陽電池はノミナル型太陽電池を、12.5μm 厚の ETFE フィルムで覆い隠し、周

辺プラズマからイオンの侵入を防ぐ役割を果たしている。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。

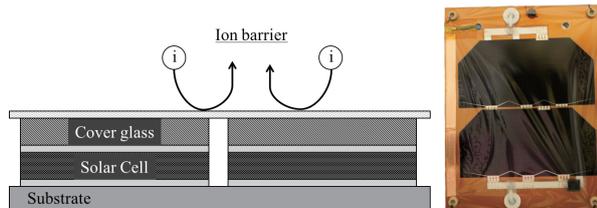


図3 フィルムラップ型太陽電池

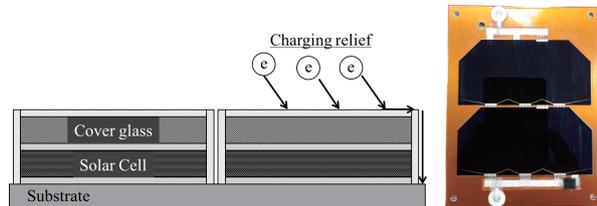


図4 コーティング型太陽電池

+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5)。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。

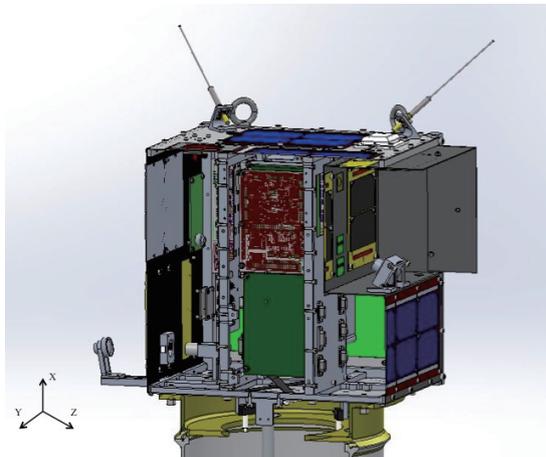


図5 鳳龍四号の断面図

図6に高電圧実験システムのブロックダイアグラムを示す。高電圧実験システムは、放電発生時のノイズ等で衛星システムに与える影響を低減させるため衛星バスGNDから絶縁されており、独自のGND(高電圧GND)を持っている。放電実験の際に、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。高電圧バイアス源はスフェラーアレイ®を58個直列に接続した高電圧太陽電池(High Voltage Solar Array : HVSA)を用いている(図7)。スフェラーアレイ®はVoc:7.27Vであり、これを58個直列に接続することで350V以上の電圧を発電することが出来る。スフェラーアレイ®は球状太陽電池であるため、真横から太陽光が入射したとしても発電が可能である特徴を持っている。鳳龍四号は姿勢制御として沿磁力線制御を採用しているため、常に1軸を中心に回転することになる。このため、HVSAを衛星の2面に対角線上に配置することで常に350V以上の発電を可能としている。HVSAは放電実験の高電圧電源として使用するため、HVSA上で放電が発生することは防ぐ必要がある。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。

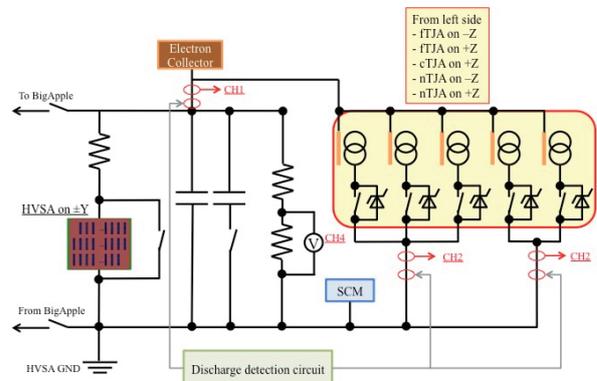


図6 高電圧実験システムのブロック図

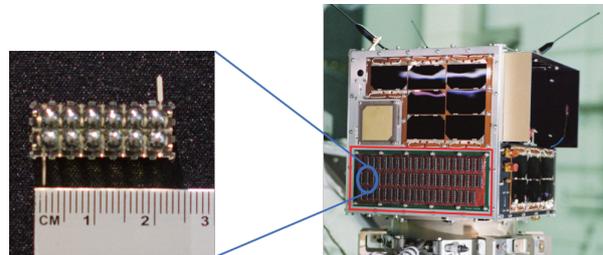


図7 スフェラーアレイ®と高電圧太陽電池

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 HVSA で発電された電圧も測定可能である。地上局からのアップリンクコマンドで、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、図 6 中の 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 箇所での測定を行う。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 システムはサンプリング周波数:6MHz 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 3 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. 運用成果

打ち上げられて以降 2016 年 10 月末日時点で、計 12 回メインミッションを行っている。12 回の内、6 回をシングルチャンネルモード、6 回をマルチチャンネルモードで試験を行っている。試験時間は 30 分とし、試験対象の太陽電池サンプルは +Z 面ノミナル型太陽電池で試験を行っている。表 2 に試験一覧を示す。表中右側に示すのは、各試験において放電が発生したか否か、発生していたら何度発生したか、そして試験開始時刻からの経過時間を示す。表に示した通り、シングルチャンネルモードでのみ放電が発生し、放電電流データの計測に成功している。表中の太字で記載された放電は放電発光にも撮影に成功した放電である。放電が発生したタイミングで太陽光が試験サンプルに入射していると、放電発光は太陽光の明るさに埋もれてしまい放電点の特定をすることはできなくなってしまう。また、放電は非常に短時間のイベントのため、撮影フレームの間に埋もれてしまっていることもある。

表 2 ノミナル型太陽電池での放電試験結果一覧

OBO モード		Day	No.	Time (Elapsed)[s]
シングルチャンネル	1	24 th Feb	1-1	550
			1-2	834.5
	2	9 th Mar	2-1	701.5
			2-2	1326
			2-3	1572
	3	2 nd Jun	3-1	393.5
4	1 st Jul	No discharge		
5	14 th Jul	No discharge		
6	28 th Jul	No discharge		

マルチチャンネル	7	16 th Sep	No discharge
	8	22 nd Sep	No discharge
	9	28 th Sep	No discharge
	10	7 th Oct	No discharge
	11	17 th Oct	No discharge
	12	20 th Oct	No discharge

第 1 回目のミッションは図 8 のような衛星パスで試験を行った。放電は 2 度発生し、それぞれ図中に #1-1,#1-2 として示している。#1-2 では、放電発光の撮影にも成功している。この放電の放電電流を図 9 に、放電発光を図 10 に示す。放電電流はピーク約 60A、パルス幅約 2 μ s の非常に急峻な波形を計測することが出来た。図 10 中左上部の太陽電池縁に小さな光を見ることができる。この発光が放電発光であり、図 9 の放電電流と併せて、メインミッションの達成となった。

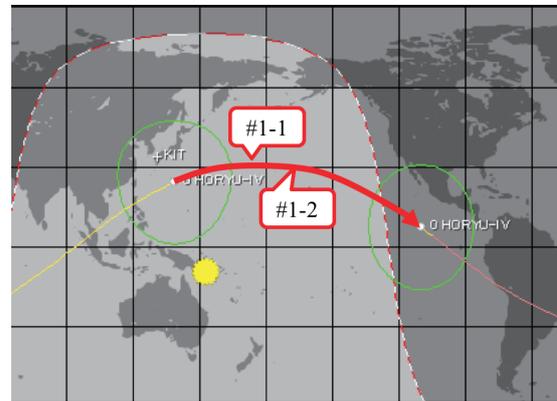


図 8 第 1 回目試験パスと放電発生箇所

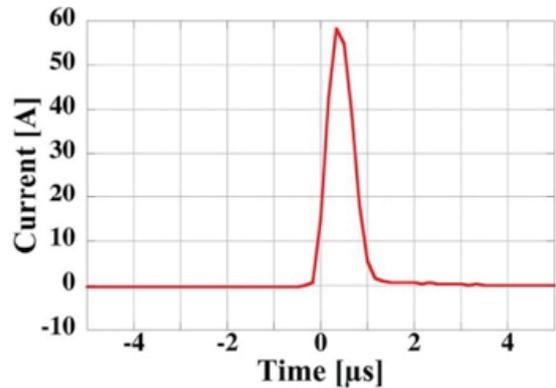


図 9 放電#1-2 時の放電電流波形

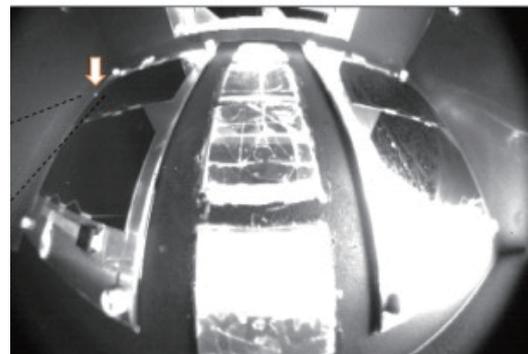


図 10 放電#1-2 時の放電発光写真

第3回目のミッションで放電は1度発生した。放電#1-2と同様に、放電電流はピーク約60A、パルス幅約2 μ sの非常に急峻な波形を計測することが出来た。また、放電#1-2と同様な箇所で放電発光を取得することが出来る。

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は3つのカテゴリーに別けることが出来ている。

- 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

4. まとめ

2013年10月から開発を開始した鳳龍四号は、2016年2月17日にH-IIA ロケットの相乗り小型副衛星として打ち上げられた。打ち上げ1週間後、第1回目のメインミッションを行い、宇宙空間で発生した放電の放電電流及び放電発光の撮影に世界で初めて成功した。その後繰り返しミッションの実行を行っているが、実際に放電現象を観測することが出来たのは3つの試験(6回の放電)である。6つの放電電流波形は3つのカテゴリーに別けることが出来ている。

5. 謝辞

本研究は、日本学術振興会 科学研究補助金 25220915 の助成を受けて行われました。

鳳龍四号の初期運用段階において、電波の受信にご協力いただきました全ての方に感謝致します。

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