

超小型人工衛星「鳳龍四号」の開発

福田大 鳳龍四号プロジェクトチーム Pauline Faure 豊田和弘 趙孟佑
九州工業大学

Abstract

HORYU-IV is a lean satellite under development at Kyushu Institute of Technology. The project started in October 2013 and its development is limited to two years by applying the know-how acquired during HORYU-II development. HORYU-IV project is composed of an international and interdisciplinary team and the satellite this project started in October 2013 and aims at developing within two years by applying the know-how acquired by HORYU-II development. Main mission is to acquire, in orbit, discharges current waveforms and photographs of discharge events. This mission will be a world's first feat if executed successfully. In addition to the main mission, there are nine sub-missions on-board HORYU-IV. In this paper, HORYU-IV missions' preliminary description, development status, and expected outcomes are reported.

Key Words : discharge, high voltage, plasma, lean satellite

1. はじめに

宇宙開発は我々の生活に様々な恩恵を与えてきた。GPS や気象衛星、通信衛星などより高性能な人工衛星が開発され、日々の暮らしが豊かになってきている。今後の宇宙開発において、より大電力の人工衛星が必要になるのではないかと考えられる。地上のインフラシステム同様に、人工衛星を高電圧で運用することで、送電ロスを軽減や電圧変換効率の上昇が見込まれ、打ち上げコストの削減などにつながると考えられる。

図1に人工衛星(宇宙機)のバス電圧と衛星電力の推移を示している。人工衛星のバス電圧が50Vから100Vに上昇した時期に、人工衛星の電力システムの不具合が多発した。この原因は太陽電池パドル上で発生した放電であ

ると推測された。宇宙空間には広くプラズマや高エネルギー粒子が存在し、人工衛星との相互作用で、帯電・放電が発生することが知られている。帯電・放電の規模は、人工衛星の発電量に応じて大きくなるため、高電圧化した人工衛星で発生した放電は、人工衛星のシステムに致命的な損傷を与え得る。今後の宇宙開発において、高電圧技術は必須であると考えられる。このため、周辺宇宙環境と高電圧システムとの相互作用を理解し、解決することが求められる。

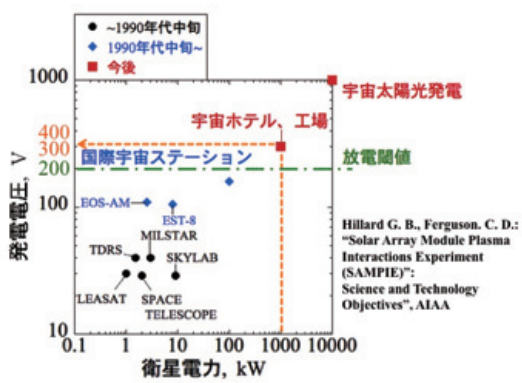


図1, 人工衛星のバス電圧と電力の推移[1]

現在、九州工業大学では鳳龍四号(Arc Event Generator and Investigation Satellite : AEGIS)を開発中である。鳳龍四号では、太陽電池上で発生する放電現象の観測を行う。これまでに、地上試験システムを用いて、太陽電池上で発生する放電に関する試験が数多く行われてきた。しかしながら、これまでに実際の軌道上で放電試験を行った例は数が少ないのが現状である。実際の宇宙環境は複合的であり、地上試験システムの妥当性を評価するには実際の宇宙環境での試験が必須であると考えている。

2, 鳳龍四号

図2に鳳龍四号を示す。鳳龍四号のサイズは440mm*315mm*480mmであり、重量はおよそ10kgである。

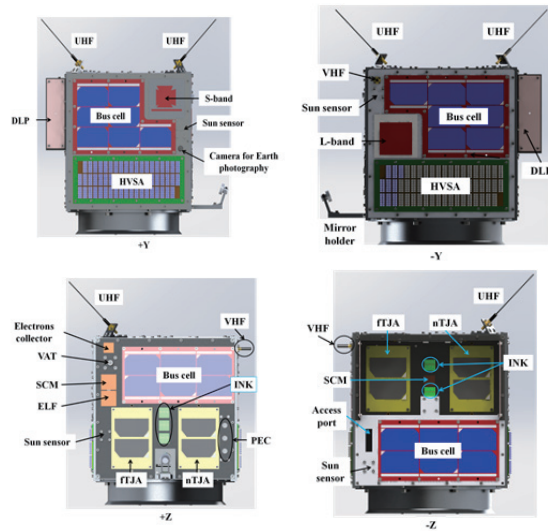
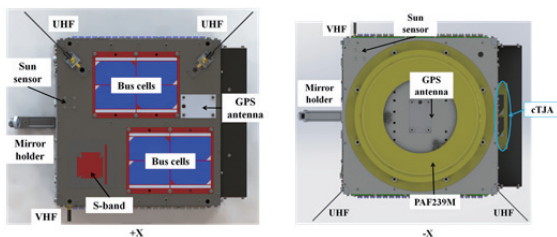


図2, 鳳龍四号外観

3, ミッションペイロード

鳳龍四号のメインミッションは、「宇宙軌道上での放電電流の測定及び放電発光の撮影」である。このメインミッション達成のために、超小型人工衛星搭載用のオシロスコープ(On Board Oscilloscope : OBO)及びカメラ(Arc Vision Camera : AVC)の開発を行った。鳳龍四号には、メインミッション以外に8つのサブミッションを搭載している。以下に、メインミッション及び幾つかのサブミッションに関して述べる。

3.1, On Board Oscilloscope

OBOの仕様を表1に、ブロックダイアグラムを図3に外観を図4に示す。

表1, OBO仕様

チャンネル数	4
分解能 [bit]	8
サンプリング周波数 [MSPS]	40
入力帯域幅 [MHz]	15
サンプル数	8192
メモリ容量 [kByte]	1024

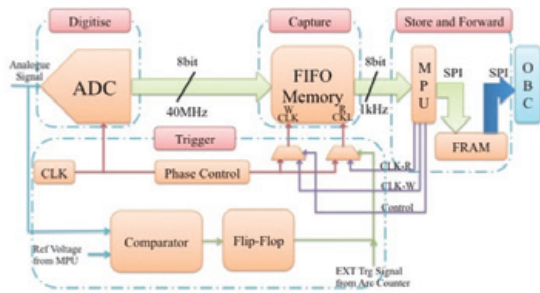


図 3, OBO システム

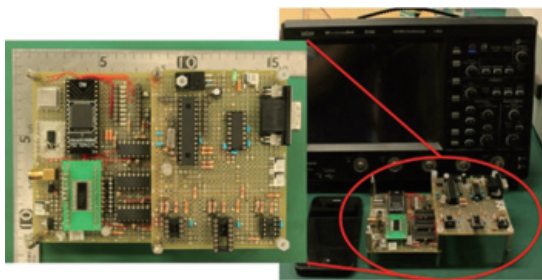


図 4, OBO 外観

OBO システムは、ADC や FIFO メモリから構成されており、トリガーの前後の波形を取得することができる。このシステムを用いて放電電流波形の取得を行った。試験結果を図 5 に示す。

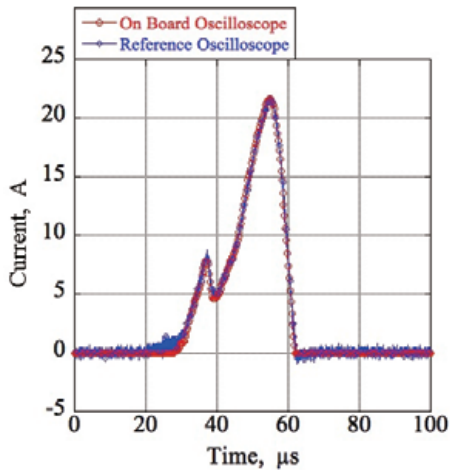


図 5, OBO システム試験結果

市販品のオシロスコープとの比較を行った結果、放電電流を取得するために十分な性能を有しているのではないかと考えている。

3.2, Arc Vision Camera[2]

次に AVC の仕様を表 2 に示す。

表 2, AVC 仕様

カメラ数	2
分解能[pixel]	752×480
色調	パングロ
フレームレート[fps]	30
消費電力[W]	0.7
撮影枚数 データサイズ	~4.5 frame, 2MByte
メモリ容量[MByte]	16

鳳龍四号は 2 つのミッション用カメラを搭載している(±Z 面)。+Z 面には、アームの先端に曲面鏡を設置しており、この鏡に反射した +Z 面のパネルの撮影を行う。また、-Z 面には魚眼レンズを装着したカメラを用いて撮影を行う。

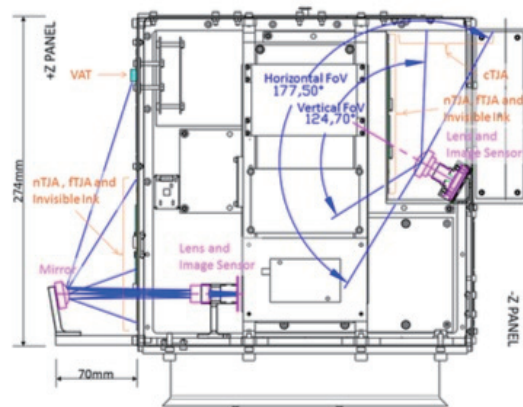


図 6, AVC システム

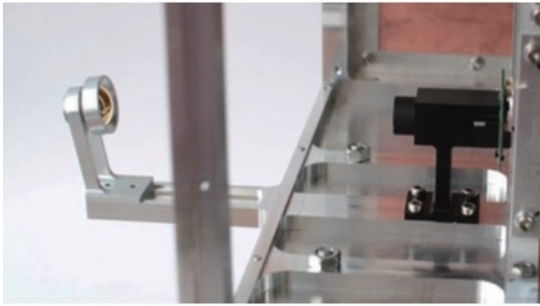


図 7, (+Z 面) 曲面鏡



図 8, (-Z 面) 魚眼レンズ

鳳龍四号は-Z面に凹みを持っている。これは、放電発光の撮影の際に、太陽光などの影響を遮るために設けられている。さらにパネルを黒色塗料(Z306)で塗装することで、放電発光の撮影に特化した作りをしている。図9に、凹み内部をハロゲンランプで照射し、-Z面の太陽電池を撮影した画像を示す。バスバーやインターコネクター部分は反射が強く、白く写ってしまっている。しかし、太陽電池の端（トリプルジャンクション）付近で発生する放電は日光照射中でさえ撮影可能ではないかと考えている。

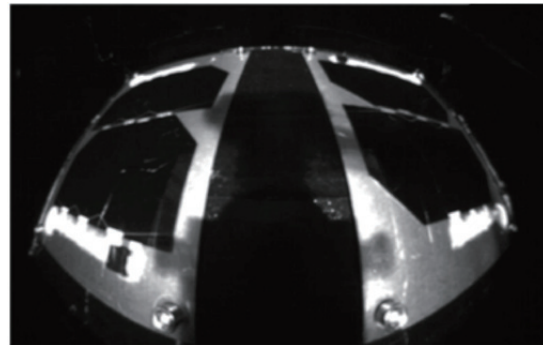


図 9, (-Z 面) 撮影結果

3.3, 高電圧システム(High Voltage Solar Array)[3]

鳳龍四号のメインミッションを達成するには、放電試験システムが必須となる。また、地上試験の結果と比較を行う為、地上試験システムを超小型人工衛星サイズに小型化する必要がある。このため、鳳龍四号では鳳龍式号で実証した高電圧システムを活用する。鳳龍式号のメインミッションは「宇宙軌道上での300V発電」であり、2012年5月18日に打ち上げられた。鳳龍式号の軌道上試験結果より、安定的に軌道上で350V程度の発電が確認された(図10)。

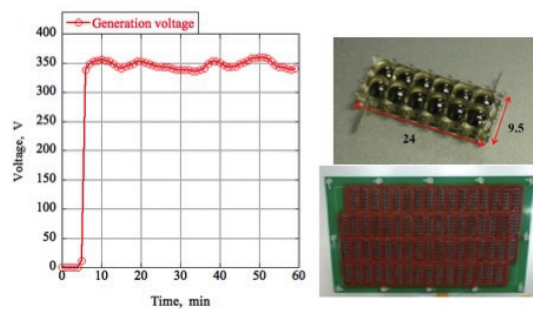


図 10, 鳳龍式号軌道上試験結果

鳳龍四号でも、同様のシステムを用いて高電圧発電を行う(図10)。この発電した高電圧を、放電試験用の太陽電池に負バイアスすることで放電環境を構築する。鳳龍式号でも同様の方法で、太陽電池上で放電が観測されている。

図 11 に放電試験システムの詳細を示す。

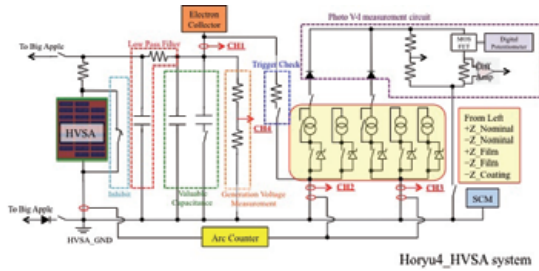


図 11, 放電試験システム

これに加え、鳳龍四号では2つの放電抑制技術実証を再度行う。太陽電池を ETFE フィルムでカバーする「フィルム抑制型」及び、太陽電池をコーティングする「コーティング抑制型」の2種類である。それぞれの原理を図 12 に示す。

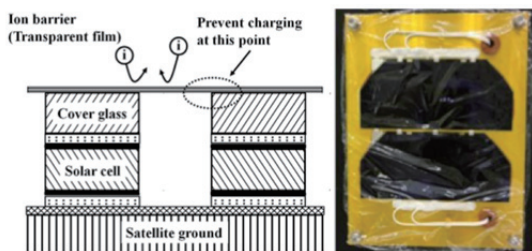


図 12, ETFE フィルム抑制型太陽電池

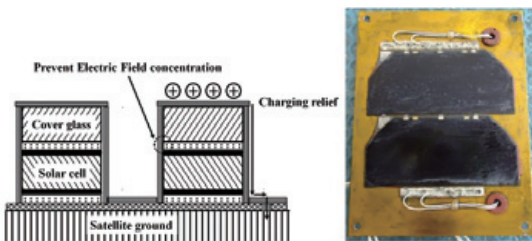


図 13, コーティング抑制型太陽電池

さらに、鳳龍式号で成し得なかった、放電による太陽電池の性能劣化試験を搭載している。これは、放電試験前後の太陽電池の性能(I-Vカーブ)を測定することで、太陽電池の性能の劣化を評価するミッションである。

3.4, 真空アーク推進機 Vacuum Arc Thruster

(VAT) [4]

サブミッションのひとつに、真空アーク推進機がある。超小型衛星が数多く打ち上げられている今日、環境外乱を抑えるだけの姿勢制御が必要である。そこで鳳龍四号では、低地球軌道のプラズマとの相互作用を用いて点火する真空アーク推進機(図 14)の軌道上実証試験を行う。この真空アーク推進機は、コンデンサに蓄えられたエネルギーで真空アークを形成する。コンデンサと放電電極を並列接続し、Breakdown 電圧以上の電圧を印加することで動作させることができる。この電圧の印加は、メインミッションでも使用する高電圧太陽電池を用いる。これにより、ノイズ源となりうる昇圧回路を排除でき、システムの複雑化を避けられるメリットがある。

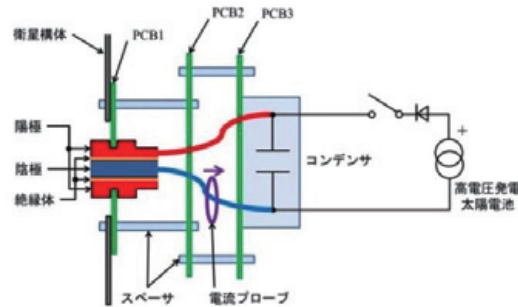


図 14, 真空アーク推進機

真空アーク推進機の陰極材には、炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP)を使用する。炭素繊維と樹脂の積層構造からなる CFRP には、多数のトリプルジャンクションが存在する。このトリプルジャンクションで発生したフラッシュオーバーによって、放電プラズマが形成され、このプラズマを介し陽極と陰極が短絡し、真空アークを形成する。

3.5, Double Langmuir Probe (DLP)[5]

本ミッションの主な目的は、鳳龍四号軌道のプラズマ密度及び温度を測定することである。図 15 に DLP のシステム概要を示す。

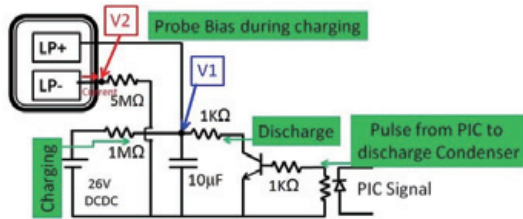


図 15, DLP

2つのプローブは±Y面に搭載されており、一方にバイアスする電圧をスイープすることで、プラズマ中を流れる電子電流の計測を行う。しかし、プローブを用いたプラズマ計測方法には、プローブ表面の汚染（コンタミネーション）に弱いという欠点がある。汚染されたプローブでは適切な測定ができないため、汚染除去のシステムが必要となる。そこで鳳龍四号では、メインミッションでも使用する高電圧太陽電池を用いて、双方のプローブに負バイアスをかける。プローブに対し、周辺プラズマ電位よりも負の電圧を印加することで、プローブはイオンを収集する。この収集されたイオンがプローブに衝突する際にプローブ表面に付着した汚染物の除去を行う。

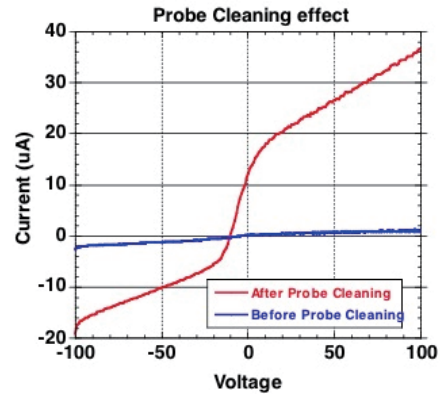


図 16, 5 分間の-300V バイアスによる結果
3.6, あぶり出し Secret Ink (INK)

鳳龍四号では ETFE フィルムによる放電抑制技術の実証試験を行う。しかしながら、軌道上に存在する原子状酸素、紫外線、放射線などの宇宙環境の影響により ETFE フィルムが劣化する。この中でも、低地球軌道において原子状酸素による影響は極めて大きく、ETFE フィルムに劣化、損傷が生じる。このため、本ミッションでは ETFE フィルムの耐宇宙環境性能を調べる。実証方法としては、図 17 のように衛星構体に銀の表面を ETFE フィルムで覆った供試体を取り付ける。原子状酸素が ETFE フィルムを侵食し、破損をもたらすと、銀が原子状酸素によって侵食されると、銀と原子状酸素が酸化反応を起こすことで黒色化する。この色の変化をカメラで撮影することで、ETFE フィルムの耐宇宙環境を調べる。また、この色の変化を利用して、「あぶり出し」を行う。銀の表面にアルミニウムを付着させておく。アルミニウムは耐食性が強く、銀の酸化を妨げることができる。この銀の酸化反応の差を利用して、模様や文字を浮かび上がらせることができる。供試体の酸化反応を撮影するカメラは、メインミッション

で使用するカメラ(AVC)を用いる。

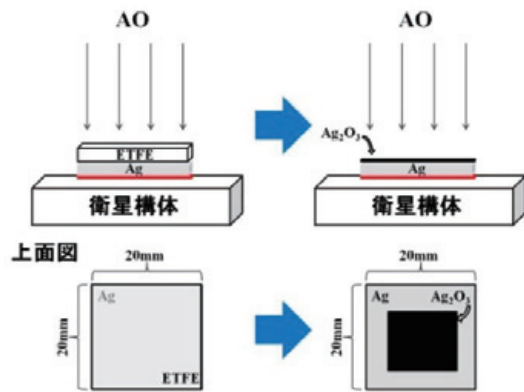


図 17, あぶり出しプロセス

3.7, 他のミッション

鳳龍四号には、他にも幾つかのミッションが搭載されている。ミッション一覧を表3に示す。

表 3, 鳳龍四号 ミッション一覧

Mission	Objectives
Electron-emitting film (ELF)	表面帯電緩和素子の軌道上実証[6]
Photo-electron current measurement (PEC)	軌道上での光電子電流計測[7]
Earth photography (CAM)	CMOS カメラによる地球撮影
Digi-singer (SNG)	ヴォーカルシンセサイザーを用いた、衛星からの音声データ配信[8]
Discharge (DIS)	軌道上での放電現象の観測
High Voltage Solar	軌道上での高電圧発電及

Array (HVSA)	び放電抑制技術実証
Double Langmuir probe (DLP)	プラズマ密度の測定
Vacuum arc thruster (VAT)	真空アーク推進機の軌道上実証
Secret ink (INK)	原子状酸素による材料劣化試験

4. 結論

本論文では、現在九州工業大学で開発中の超小型人工衛星「鳳龍四号」のミッションの概要説明を行った。鳳龍四号の目的は、宇宙軌道上で発生する放電現象の理解を深め、将来の大電力を要するスペースシステムの開発に貢献することである。このため鳳龍四号では、軌道上で発生する放電現象の観測をメインミッションとしている。

現在、本プロジェクトはEMフェーズである。鳳龍四号は2015年度のH-IIAロケットの相乗り小型副衛星として選定されている。鳳龍四号のメインミッションの成功は、世界初の快挙となり今後の宇宙開発において大いに貢献していくと考えている。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 25220915 の助成を受けたものである。

本論文を作成するにあたり、ご協力いただいたすべての鳳龍四号開発メンバーに感謝いたします。

参考文献

1. Hillard G. B., Ferguson. C.D : “Solar Array Module Plasma Interactions Experiment (SAMPPIE)”: Science and Technology Objectives “, AIAA
2. Tatsuo Shimizu, Hiroshi Fukuda, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, “Development of In-Orbit High Voltage Experiment Platform: HORYU-4”, IEEE Transactions, 2014
3. 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.
4. S. Fuchikami, K. . Aheieva, T. Shimizu, K. Toyoda and M. Cho, "Development of a Triggerless Vacuum Arc Thruster by Using a CFRP Propellant ," in 13th Spacecraft Charging Technology Conference , Pasadena, CA, 2014.
5. Taiwo Tejumola, Atomu Tanaka, Arifur Khan, HORYU-4 Team and Mengu Cho: “Development of Low Cost Double Probe Plasma Measurement System for Nano-satellites”44, IG08-A011, AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo, 2014
6. Atomu Tanaka, Naoki Matsumoto, Arifur Rahman Khan, Minoru Iwata, Kazuhiro Toyoda and Mengu Cho: “Performance Improvement of Electron-emitting Film for Spacecraft Charging Mitigation”, Proc. of the 29th Int. Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, June 2013
7. J. Wu, A. Miyahara, A.R. Khan, M. Iwata, K. Toyoda, M. Cho and X.Q. Zheng: “Effects of Energetic Electron and Proton Irradiation on Electron Emission Yield of Polyimide Induced by Electron and Photon”, Special Issue of ISTS, Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Science, Aerospace Technology, Aerospace Technology Japan, accepted 2014
8. Tae Nakano, Tatsuo Shimizu, Danny Chen, Hala Almubarak and Mengu Cho: “Space Education and Outreach using a Digi-singer on-Board a Nano-satellite”, 65th Int. Astronautical Congress, Toronto, Canada, 2014