

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年3月21日現在

宇宙システムの高電圧化に向けた超小型衛星による  
帯電・放電現象の軌道上観測

On-orbit Observation of Charging and Arcing Phenomena  
by a Nano-Satellite for Realization of High Voltage  
Space System

課題番号：25220915

趙 孟佑 (CHO MENGU)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要

衛星帯放電に関する諸現象の軌道上観測並びにその抑制技術の軌道上実証を行う。

超小型衛星「鳳龍四号」を開発し、低軌道上に打ち上げて、太陽電池アレイ表面で発生する放電電流を計測し、放電画像を取得する。また350Vで発電しても放電を起こさない高電圧太陽電池アレイ技術の実証試験を行う。その他、衛星帯放電に関する宇宙実験を行う。

研究分野：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙環境、衛星帯電、小型衛星

1. 研究開始当初の背景

大電力を扱う際には、配電損失とケーブル重量の軽減のために、電力の1/2乗に比例して電圧をあげる必要がある。静止衛星電力が10kWを超えだした90年代半ば以降、発電電圧が従来の50Vから100Vに引き上げられた途端に、太陽電池アレイ表面の放電事故が多発した。地上の帯電放電試験では、軌道上の太陽電池アレイの放電電流波形と同じ電流が流れるように試験回路が定められている。しかし、軌道上での放電電流波形は誰も観測したことがない。「正しい地上試験」を実施するには、真空容器の壁がない複合環境の中で、一度は放電電流を計測する必要がある。

H24年5月に趙等が開発した鳳龍弐号が打ち上がり、微小太陽電池を多数直列接続した高電圧太陽電池アレイを用いて世界初の軌道上での350V発電を行うことに成功した。本研究課題は鳳龍弐号で得られた成果を更に発展させようとするものである。

2. 研究の目的

衛星帯放電に関する諸現象の軌道上観測並びにその抑制技術の軌道上実証を行う。そのために超小型衛星「鳳龍四号」並び搭載ミッション機器を開発し、低軌道上に打ち上げて、以下の宇宙実験を行う。(1)太陽電池アレイ上での放電電流を計測し、放電画像を撮影すると共に、放電による太陽電池の電気性能劣化を調べる(DIS)、(2)300Vで発電しても放電を起こさない高電圧太陽電池アレイ技術の実証(HVSA)、(3)ラングミュアプローブによるプラズマ計測とプローブ表面のイオ

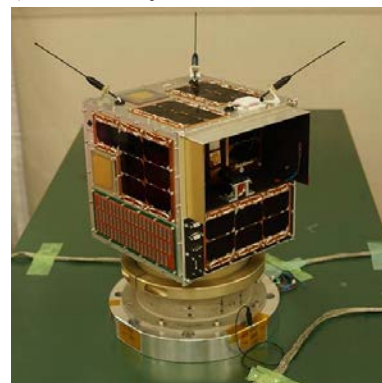
ンスパッタリングによる汚染除去効果の確認(DLP)、(4)真空アークスラストの軌道上実証(VAT)、(5)宇宙材料劣化の画像計測(INK)、(6)光電子電流計測

3. 研究の方法

鳳龍弐号をベースに鳳龍四号を開発する。ミッション機器以外の殆どは、既開発品または市販品で構成する。放電電流計測用オシロを自作し、カメラ・画像取得ボードに統合する。放射線試験を除き、衛星及び搭載機器は全て九工大内で試験する。衛星を2年半で製作し、H2A ロケット相乗りで打ち上げる。運用は最低でも1年間実施する。

4. これまでの成果

鳳龍四号をH28年1月に完成させてJAXAに引き渡した。H28年2月17日に鳳龍四号は種子島宇宙センターからH2A30号機により打ち上げられ、高度575km、軌道傾斜角31度の円軌道に投入された。



鳳龍四号フライトモデル

打ち上げ1週間後に放電実験を行い、放電発光と放電波形の同時計測に成功した。未だかつて、誰も宇宙空間での放電をカメラでとらえたことはなく、放電電流波形の計測に成功したこともない。これは世界初の画期的な成果である。放電発生箇所は地上実験と同様で、放電電流波形も地上実験から予測されるものと大きな違いはない。このことから、これまでの地上試験は正しかったと言える。2016年3月現在、結果の詳細解析中であるが、早急に速報を学術雑誌に投稿する予定である。また、今後データを更に蓄積し、太陽電池の劣化の有無を含め、研究成果を発表していく予定である。

超小型衛星に搭載可能な衛星搭載オシロスコープ(帯域10MHz, 40MS/s, 4CH)とそれに同期したカメラシステム(720x480pixel, 8bit B/W, 30fps)を設計・開発した。オシロスコープで放電を検知すると同時に外部トリガ信号をカメラに送り、放電発生時のコマをメモリに保存することができる。宇宙空間での動作も実証できた。我々の知る限り衛星にオシロスコープを搭載した例はない。このオシロスコープとカメラは、今後宇宙空間で高速現象を観測する際に大きく役立つ。地上民生品を使用しているために圧倒的な低価格(100万円以内)と短納期(数週間)で供給でき、キューブサットにも搭載できる大きさである。今後超小型衛星に限らず中大型の衛星も含め、様々な技術実証・科学ミッションに貢献できる。

鳳龍四号の開発・試験過程において、不具合発生についての詳細な時系列記録を残した。そのような記録を公開した衛星はない。個別のコンポーネント試験が進行すると共に不具合発生率が低下するものの、それらを組み合わせた途端に不具合発生率が再度上昇することが確認され、故障発生率をワイブル分布で仮定したモデルを用いるモンテカルロシミュレーションにて再現した。衛星の信頼性が試験を通じてどのように成長していくか貴重なデータであり、超小型衛星の信頼度向上に向けた研究に大きく貢献できる。

超小型衛星に搭載可能な真空アークスラストを開発し、フライトモデルを鳳龍四号に搭載した。真空アークスラストの宇宙実証は世界初であり、特に太陽電池による直接駆動は実験室でも世界的に例がない。軌道上実験で有効性が確認できれば、今後高電圧太陽電池アレイと真空アークスラストを組み合わせた受動的デオービットシステムの開発等につながる。

超小型衛星に搭載可能なラングミュイアプローブを開発した。ラングミュイアプローブは、軌道上でプローブ表面の汚染が進行することでデータの有効性が低下するが、今回開発したシステムは高電圧太陽電池アレイを直結して、高速イオンスパッタによる軌道上クリーニングを行う点にある。軌道上

でその有効性が確認できれば、ラングミュイアプローブの衛星への搭載の幅が広がる。例えば、超小型衛星群によるプラズマ多地点同時計測等に利用可能であり、様々な科学ミッションを可能にする。

鳳龍四号は15ヶ国以上の留学生が参加して開発された世界的にも極めて稀な多国籍プログラムである。超小型衛星を用いた途上国の宇宙人材育成について多くの試行錯誤がなされているが、鳳龍四号で得られた経験をまとめることで、宇宙人材育成について、新たな手法を提案することができる。

#### 5. 今後の計画

衛星が平成28年2月に打ち上がり、放電検出・撮影機器並びに高電圧発生太陽電池アレイの軌道上動作を確認できた。今後、衛星実験と地上検証試験を並行して進め、論文作成と学会発表を行っていく。残りの2年間で予定していた軌道上実験を全て終わらせる。それと並行して、次世代機の構想立案にとりかかる。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. Kateryna Aheieva, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Vacuum Arc Thruster Development and Testing for Micro and Nano Satellites", Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, (掲載決定) (2016)

2. Kateryna Aheieva, Shingo Fuchikami, Masayoshi Nakamoto, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho "Development of a Direct Drive Vacuum Arc Thruster Passively Ignited for Nano-satellite", IEEE Transactions on Plasma Science, pp100-106, January (2016)

3. Mengu Cho, Pauline Faure, "RELIABILITY GROWTH OF A NANO-SATELLITE THROUGH ASSEMBLY, INTEGRATION AND TESTING", IAC-15-D1.7.10, 66th IAC, Jerusalem, Israel, October (2015)

4. Shimizu, T., Fukuda, H., Toyota, K., Cho, M., "Development of an In-Orbit High-Voltage Experimental Platform: HORYU-4", IEEE Transactions on Plasma Science, Volume 43, Issue 9, pp3027 - 3040, September (2015)

5. Taiwo Tejumola, Atomu Tanaka, Arifur Khan, HORYU-4 Project Team, Mengu Cho, "Development of Low Cost Double Probe Plasma Measurement System for a Lean Satellite HORYU-IV", 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe-Hyogo, Japan, 4th-10th July (2015)

ホームページ等

<http://kitsat.ele.kyutech.ac.jp/horyu4WEB/horyu4.html>