

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220915

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) On-orbit Observation of Charging and Arcing Phenomena by a Nano-Satellite for Realization of High Voltage Space System

研究代表者

趙 孟佑 (CHO, MENGU)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60243333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 162,300,000円

研究成果の概要(和文)：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超小型衛星「鳳龍四号」を用いて実施した。5年の研究期間内に、ミッション機器を開発し、2016年2月17日に高度575km・軌道傾斜角31度の軌道に打ち上げ、現在に至るまで運用を継続している。太陽電池アレイ上の放電について、放電発光像と放電電流波形の取得に世界で初めて成功した。それ以外にも、ダブルラングミュイアープローブによるプラズマ計測、光電子電流計測等で、有意義な軌道上データを取得できた。衛星ミッションでなく、バス系や衛星試験手法等も含めて、5年間で査読付き雑誌14件を発表した。

研究成果の概要(英文)：On-orbit observation of various phenomena associated with spacecraft charging and on-orbit demonstration of its mitigation technology has been conducted onboard a nanosatellite, HORYU-IV. During the five years research period, the mission payloads were developed and the satellite was launched to an orbit of 575km altitude and 31 degree inclination on February 17, 2016. Since then, the satellite operation has been conducted. The first time in the world, we captured an image and a current waveform of discharge on solar array in orbit. In addition to this achievement, we succeeded in obtaining data related to plasma measurement by Double Langmuire Probe and photo-electron emission. In total, 14 papers were accepted and published in peer-reviewed academic journals.

研究分野：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、SA表面の放電事故が多発した。趙と豊田は、2000年代の日本の衛星の帯電放電試験を一手に引き受けてきた。その経験に基づき、2011年にプロジェクトリーダーとしてISO-11221「衛星搭載太陽電池パネルの帯電放電試験方法」を成立させた。ISO-11221では、軌道上のSAの放電電流波形を理論的に導出し、真空容器内でも軌道上と同じ電流が流れるように試験回路が定められており、国際標準規格の最重要点である。しかし、これらの電流波形は地上試験結果と理論に基づいており、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、真空容器の壁がなく、超高真空・太陽光・紫外線・衛星速度等々といった軌道上複合環境の中で、一度は放電電流を計測する必要がある。

国際宇宙ステーション(ISS)は100kW強の電力を160Vで発電し120Vで配電しているが、ISS以降の1MW近い次世代大型宇宙システムの実現には、最低でも300Vでの発電が必要である。しかし、低軌道で発電電圧が200Vを超えるとプラズマによる太陽電池表面の帯電により放電が発生する。また電気推進システムでは、DC/DCコンバータで昇圧せずに、高電圧発電した電力で直接ビーム加速をしたい。2012年に、NASAは、300kW級の電気推進システム実現に向けて300V発電技術をTechnical Readiness Level (TRL) 5にするための競争型研究公募を行なった。

H24年5月に趙等が開発した鳳龍式号が打ち上がり、微小太陽電池(スフェラー)を多数直列接続した高電圧SAを用いて世界初の軌道上での350V発電を行なうことに成功し、-300Vにバイアスされた従来型SAでの放電検知にも成功した。本研究課題は鳳龍式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を超小型衛星「鳳龍四号」にて実証する。5年の研究期間の内に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。

1-1 太陽電池アレイ(以下SA)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)

1-2 300Vで発電しても放電を起こさない高電圧SA技術の実証(HVSA)

また、鳳龍四号が作り出す350Vの高電圧を利用して、以下の実験を行う。

2. プラズマ密度計測用ダブルラングミュイアプローブ(DLP)を-350Vにバイアスして、軌道上イオンによる表面スパッタリングでプローブ表面の汚染を除去し、プローブ測定が長期間に亘って有効となることを実証する(DLP実験)

3. 真空アークスラスタ(VAT)を軌道上で-350Vにバイアスして、スラスタ表面で自発的に放電を起こさせ、発生した種火プラズマにキャパシタからエネルギーを注入して加速し、衛星の回転速度の変化から推力を測定する(VAT実験)

また、これ以外に下記のミッションを行う。

4. カプトン、金、ブラックカプトンからの光電子放出電流を計測する。成功すれば世界で初めて宇宙空間で光電子放出電流を測定することになる(PEC実験)

5. 高分子フィルムの宇宙空間での劣化具合を、フィルム下の銀板に書かれた文字の黒色化具合から観測する。高分子フィルムは放電抑制型太陽電池アレイに使われるものと同じ材質のものを使用する(INK実験)

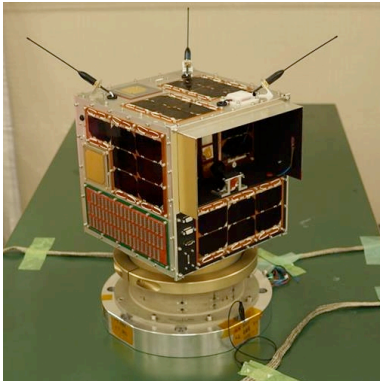
6. 地球の任意の箇所をVGA(640x480)カラーで撮影し、撮影画像をWebで配信する(CAMミッション)

3. 研究の方法

鳳龍式号をベースに鳳龍四号を開発した。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した。放電電流計測と画像取得は、市販カメラに接続する衛星搭載用オシロスコープ及び画像取得ボードを自前で設計・開発し、製作を企業に外注した。放射線試験を除き、衛星及び搭載機器は全て九州工大内の設備を用いて試験した。衛星を2年半で製作し、H2Aロケット相乗りにて打ち上げて、各種宇宙実験を行う。

4. 研究成果

図1に鳳龍四号のフライトモデルの写真を示す。



衛星は2016年2月17日に打ち上げられ、2018年4月現在も運用中である。

1-1 打ち上げ1週間後に放電実験を行い、図2に示すように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。

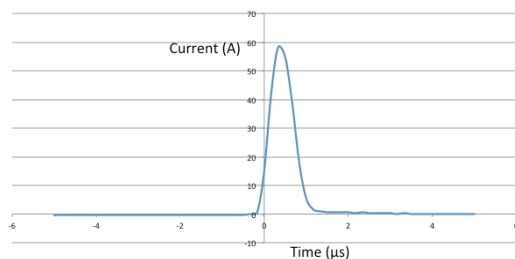
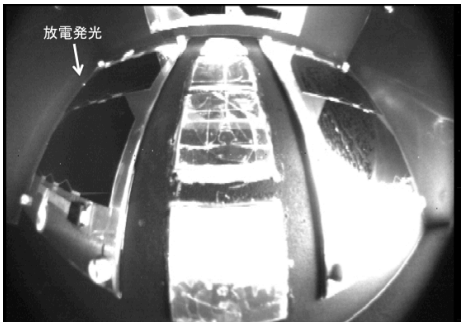


図2 軌道上で観測された放電発光と放電波形

その後の実験でも、放電データを複数取得することができた。放電波形には、図2に示すような短時間(1 μ 秒程度)でピーク値の大きい(50A以上)、短時間の大電流だけれども放電終了時に1~2 μ 秒程振動しているもの(図3上)、比較的長い(3~4マイクロ秒程度)パルスでピーク値の低い(10A以下)(図3b下)の3つのパターンがあることが分かった。尚、現時点で放電による太陽電池の劣化は確認されていない。

1-2 放電を抑制するために、鳳龍式号と同様にフィルムで太陽電池を覆ったもの、半導電性コーティングを施したものの2種類を搭載した。2018年3月現在も実験を続行中である。

2. DLP 実験を行い、データを取得した。例を図4に示す。コンピュータシミュレーション

の結果とつきあわせてところ、プローブのバイアス電圧が数V以下の領域でサンプリング速度をあげなければ、電子温度を精度よく測定できないこと、衛星の飛行姿勢にプラズマ密度測定値が大きく依存することが分かった。これらの教訓をまとめて論文に発表した。スパッタリングの効果については、現在も実験を続行中である。

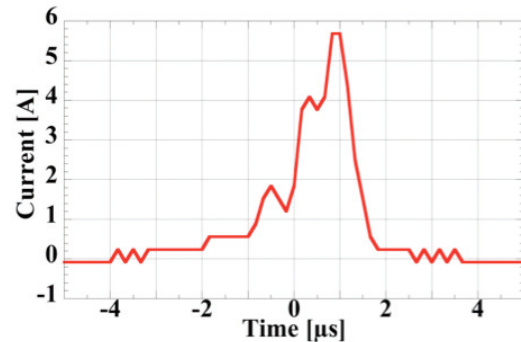
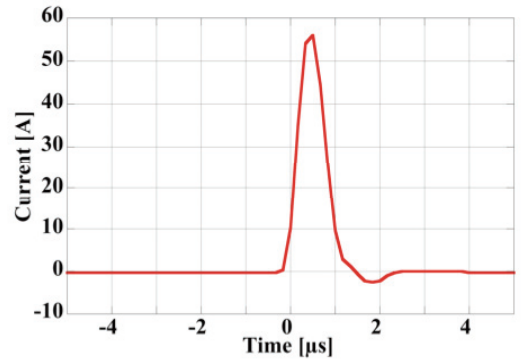


図3 軌道上で観測された放電波形

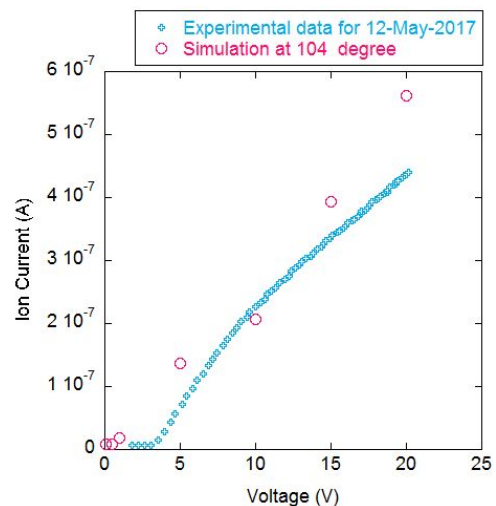


図4 ダブルラングミュイアープローブの軌道上データと計算機シミュレーションの比較

3. 真空アークスラスタ(VAT)を起動したところ、放電発生は確認できた。しかしながら、放電電流波形を取得するには至らず、また回転速度の変化を検出するには至っていない。しかしながら、真空アークスラスタのペイロ

ード開発過程において複数の学術雑誌論文を発表した。

4. カプトン、金、ブラックカプトンからの光電子放出電流を計測することに成功した。ブラックカプトンの計測例を図5に示す。世界で初めて宇宙空間で光電子放出電流を測定することに成功した。ブラックカプトンではAM0での光電子電流密度は $14\sim 18\mu\text{A}/\text{m}^2$ であった。この値は、これまで地上での実験値を元に推測されていた値の範疇に入っている。

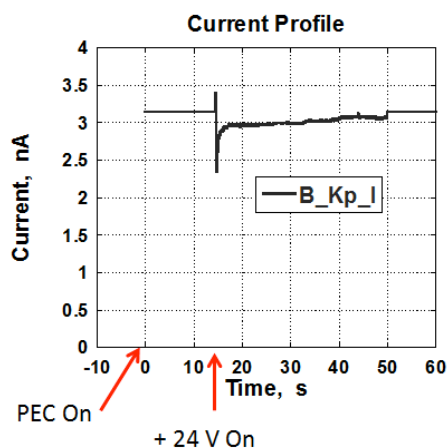


図5 光電子電流計測の結果

5. 高分子フィルムの宇宙空間での劣化については、カメラ画像から判断する限り、打ち上げ後2年経ってもまだ確認されていない。
6.地球各地の撮影を行い、Webにて配信している。

これらの他にも、衛星の開発・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。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。この結果は、学術雑誌論文にて発表している。また、衛星の姿勢制御決定系・電源系・通信系についても、論文を発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計14件)

1. M. Samsuzzaman, M. T. Islam, S. Kibria, and M. Cho, "A compact circularly polarized high gain S-band nanosatellite antenna using ramped convergence particle swarm optimization," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 57, pp. 1503-1508, 2015,
2. M. T. Islam, Mengu Cho, M. Samsuzzaman, and S. Kibria, "Compact Antenna for Small

Satellite Applications", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 57, No. 2, April 2015, pp.30-36

3. Tatsuo Shimizu, Hiroshi Fukuda, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Development of an In-Orbit High-Voltage Experimental Platform: HORYU-4", IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 43, no. 9, pp. 3027-3040, 2015. doi: 10.1109/TPS.2015.2453330

4. Kateryna Aheieva, Shingo Fuchikami, Masayoshi Nakamoto, Kazuhiro Toyoda, and Mengu Cho, "Development of a Direct Drive Vacuum Arc Thruster Passively Ignited for Nanosatellite", IEEE Trans. Plasma Science, Vol.44, no.1, pp. 100-106, 2016. doi: 10.1109/TPS.2015.2500601

5. Mohamed Yahia Edries, HORYU-IV Team, Mengu CHO, "Design and Testing of Electrical Power Subsystem of a Lean Satellite, HORYU-IV", TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN 14(ists30), Pf_7-Pf_16, 2016

6. Kateryna Aheieva, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Vacuum Arc Thruster Development and Testing for Micro and Nano Satellites", Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30, Pb_91-Pb_97, 2016

7. Taiwo R. Tejumola, Atomu Tanaka, Arifur Khan, HORYU-IV Project Team, Mengu Cho, "Development of Low Cost Double Probe Plasma Measurement System for a Lean Satellite HORYU-IV", Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30, Pr_39-Pr_60, 2016

8. Tatsuo Shimizu, Hiroshi Fukuda, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Solar Array Electrostatic Discharge Current and Image Captured in Orbit", Journal of Spacecraft and Rockets, <http://dx.doi.org/10.2514/1.A33622>, 2016

9. Pauline Faure, Atomu Tanaka, Mengu Cho, "Toward lean satellites reliability improvement using HORYU-IV project as case study", Acta Astronautica, Volume 133, April 2017, Pages 33-49

10. Shimizu, Tatsuo; Fukuda, Hiroshi; Nguyen, Su; Iwata, Minoru; Toyoda, Kazuhiro; Cho, Mengu, "Initial Results from an In-Orbit High-Voltage Experimental Platform: HORYU-IV", IEEE Transaction on Plasma Science, 2017, Vol.45, No.6, Digital Object Identifier: 10.1109/TPS.2017.2688725

11. Essien Ewang, HORYU-IV Team, Akira Miyahara, Arifur R. Khan, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Photoelectron Current Measurement on Horyu IV Satellite in the Low Earth Orbit", International Review of Aerospace Engineering, 2017, Vol.10, No.3,

DOI:<https://doi.org/10.15866/irease.v10i3.12394>
12. Dmytro Faizullin, Koju Hiraki, HORYU-IV team, Mengu Cho, “IMPROVEMENT OF SUN ANGLE ACCURACY FROM IN-ORBIT DATA OF A QUADRANT PHOTODIODE SUN SENSOR”, International Journal of Research – Granthaalayah, Vol.5 (Iss.5), 2017, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.583886>

13. Taiwo Raphael Tejumola, Guillermo Wenceslao Zarate Segura, Sangkyun Kim, Arifur Khan, Mengu Cho, “Validation of Double Langmuir Probe in-Orbit Performance onboard a Nano-Satellite”, Acta Astronautica 144 (2018) 388–396.

14. Dmytro Faizullin, Koju Hiraki, HORYU-IV team, Mengu Cho, “OPTIMIZATION OF A SUN VECTOR DETERMINATION FOR PINHOLE TYPE SUN SENSOR”, International Journal of Research – Granthaalayah, Vol.5 (Iss.7), 2017, DOI: 10.5281/zenodo.838573

[学会発表] (計 28 件)

1. Tatsuo Shimizu, Hiroshi Fukuda, Shota Hidaka, Shunsuke Iwai, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, “Development of a Very Small on-Board Oscilloscope for a Cube-Satellite HORYU-3”, 5th Nano-Satellite Symposium, Tokyo, Japan, November 2013

2. T. Shimizu, S. Hidaka, M.M. Ibrahim, S. Iwai, K. Toyoda, H. Masui, and M. Cho, “Development of a Very Small on-Board Oscilloscope for a Cube-Satellite HORYU-3”, The 5th Nano-Satellite Symposium, Takeda Hall, University of Tokyo, Japan, November 2013

3. Akira Miyahara, Jiang Wu, Arifur R Khan, Kazuhiro Toyoda and Mengu Cho, “Electron Emission Yield Measurement of Polyimide”, 13th Spacecraft Charging Technology Conference, Pasadena, USA, June 2014

4. Shimizu, T., Fukuda, H., Toyoda, K., Cho, M., “Development of In-Orbit High Voltage Experiment Platform: HORYU-4”, 13th Spacecraft Charging Technology Conference, Pasadena, USA, June 2014

5. Tejumola.R.Taiwo, A.Tanaka, A.R.Khan, HORYU-4 Project Team, M. Cho, “Development of Low Cost Double Probe Plasma Measurement System for Nano-Satellite”, Asia and Oceania Geosciences Society Conference, Sapporo, Japan, 2014

6. Kateryna Aheieva, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, “Vacuum Arc Thruster Development and Testing for Micro- and Nano satellites”, 30th International Symposium on Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan July 4 – 10, 2015

7. Pauline Faure, HORYU-IV Team, Mengu Cho, “Reliability Growth of Lean Satellites through

Testing: HORYU-IV EM Case Study”, 30th International Symposium on Space Technology and Science/6th Nano-satellite Symposium, Kobe, Japan, July 2015

8. M. Y. Edries, A. Tanaka, E. Dashdondog, H. O. Almubarak, M. Alkali, A. R. Khan, H. Masui and M. Cho, “Design and Testing of Electrical Power Subsystem (EPS) of a Lean Satellite, HORYU-IV,” 30th International Symposium on Space Technologies, Kobe, Japan, 4-10 July 2015

9. 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

10. Essien Ewang, Akira MIYAHARA, Kazutaka Kawasaki, Arifur R. Khan, Kazuhiro TOYODA and Mengu CHO, “Photoelectron Current Measurement on Nano-Satellite in Low Earth Orbit”, 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT, Kobe, Japan, July 4-10, 2015

11. Hiroshi Fukuda, Tatsuo Shimizu, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, “Development of Arc Experiment System for Nano-satellite "Horyu4"”, 30th ISTS, Kobe, July 2015

12. Hala O. Almubarak, Dr. Hirokazu Masui, Prof. Mengu Cho, “Environment Test Campaign of Aluminium Substrate Solar Panel for Lean-satellites”, 30th ISTS, 34th IEPC & 6th NSAT, Kobe, Japan, July 2015

13. Trinh Thang LONG, Takashi YAMASAKI, Hirokazu MASUI, Mengu CHO, “Thermal Analysis and Testing of Arc Event Generator and Investigation Satellite (AEGIS), HORYU-IV”, International symposium on Space Technology and Science, ISTS, Kobe-Hyogo, Japan, July 2015

14. Mengu Cho, Tejumola R. Taiwo, Arifur Khan, HORYU-IV Team, “Plasma and Charging Measurement Onboard a Nanosatellite, HORYU-IV”, AOGS, 12th Annual Meeting, Singapore, August 2015

15. Kateryna Aheieva, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, “Deorbit System Based on Vacuum Arc Thruster for Microsatellite”, IAC 2015, Jerusalem, Israel, October 11-16, 2015

16. Hiroshi Fukuda, Tatsuo Shimizu, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, “DEVELOPMENT OF MISSION PAYLOADS FOR ARC EVENT GENERATOR AND INVESTIGATION SATELLITE HORYU-IV”, 66th IAC, Jerusalem October 2015

17. Mengu Cho, Pauline Faure, HORYU-IV Project, “Overview of Arc Event Generator and Investigation Satellite HORYU-IV”, 14th Spacecraft Charging Technology Conference, ESTEC, The Netherland, April 2016

18. Tatsuo Shimizu, Hiroshi Fukuda,

HORYU-IV Team, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Initial Results from In-orbit High Voltage Experiment on HORYU-4", 14th Spacecraft Charging Technology Conference, Noordwijk, The Netherlands, April 2016

19. Nguyen Tien Su, Akitoshi Takahashi, Minoru Iwata, Mengu Cho, "Charging Mitigation by Using Semi-Conductive Coating for Horyu IV Solar Cell Coupon on Ground Test", 14th Spacecraft Charging Technology Conference, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, April 2016

20. H. Masui T. Yamasaki, M. Cho, T. T. Long and Horyu-4 project team ICES_masui_v6, "Comparison of Thermal Design of Horyu-Series and Results of Thermal Vacuum Testing", 46th International Conference on Environmental Systems, ICES-2016-186, Vienna, July 2016

21. Mengu Cho, Pauline Faure, Atomu Tanaka, HORYU-IV Project, "Development Philosophy and Flight Results of Arc Event Generator and Investigation Satellite HORYU-IV", 67th International Astronautical Congress (IAC), IAC-16-6B,12,x33146, Guadalajara, Mexico, September, 2016

22. Pauline Faure, Atomu Tanaka, Mengu Cho, HORYU-IV Team, "Toward the Improvement of Lean Satellites Reliability through Testing - The HORYU-IV (AEGIS) Nano-satellite Case Study", 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, September 2016

23. Bonsu Benjamin, Tatsuo Shimizu, Horyu-IV project Members, Cho Mengu, "Overview Report of S-band Ground Station Verification and Operation for Lean Satellite HORYU-4", 7th Nanosatellite Symposium and 4th UNISEC Global Meeting, Varna, Bulgaria, October 2016

24. Mengu Cho, Hiroshi Fukuda, HORYU-IV Project, "Flight Results of New Technology Onboard a Lean Satellite HORYU-IV", Singapore, November 2016

25. Bonsu Benjamin, Cho Mengu, "Preliminary Performance and Accuracy Evaluation for the 2.4GHz S-band Ground Station for Lean Satellite", SAES 2016, Kitakyushu, Japan, December 2016

26. Pauline Faure, Atomu Tanaka, Mengu Cho, HORYU-IV Team, "Multi-Criteria Assessment for the Optimization of Lean Satellite Programs", 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites, Buenos Aires, Argentina, March 7-10, 2017

27. Hiroshi Fukuda, HORYU-IV Members, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho, "Mission Results of Arc Event Generator and Investigation Satellite HORYU-IV", 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan, June 3-9, 2017

28. Kazuhiro Toyoda, Kateryna Aheieva, Yayoi Murakami, Hiroshi Fukuda, Tatsuo Shimizu,

HORYU-IV Project Team, Mengu Cho, "Demonstration of Vacuum Arc Thruster with Plasma Interaction Ignition by Nanosatellite," 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, USA, October 8-12, 2017

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称 : A Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna

発明者 : Mohammad Tariqul Islam, Mengu Cho, 他 2 名

権利者 : Universiti Kebangsaan Malaysia

種類 : Patent

番号 : MY-162698-A

取得年月日 : 2017 年 7 月 5 日

国内外の別 : 国外 (マレーシア)

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

趙孟佑 (CHO, Mengu)

九州工業大学・工学研究院・教授

研究者番号 : 60243333

(2) 研究分担者

豊田和弘 (TOYODA, Kazuhiro)

九州工業大学・工学研究院・准教授

研究者番号 : 10361411

(3) 研究分担者

奥山圭一 (OKUYAMA, Keiichi)

九州工業大学・工学研究院・教授

研究者番号 : 30442461

(4) 研究分担者

岩田稔 (IWATA, Minoru)

九州工業大学・工学研究院・准教授

研究者番号 : 80396762

(5) 研究分担者

増井博一 (MASUI, Hirokazu)

九州工業大学・工学研究院・助教

研究者番号 : 30437793

(6) 研究協力者

Mohammad Tariqul Islam

Universiti Kebangsaan Malaysia・教授