

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289324

研究課題名(和文) ホールスラスタの放電振動と協調可能な電源の開発

研究課題名(英文) Development of synchronous power processing unit with Hall thruster

研究代表者

山本 直嗣 (Yamamoto, Naoji)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40380711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：電気推進の一つであるホールスラスタは、人工衛星の小型化および高機能化を強力に推進するため、NASAの小惑星タッチダウン計画のメインエンジンの候補に挙げられるなど、各国で競って研究開発が進められている。ホールスラスタの克服すべき課題として、放電振動が挙げられる。この放電振動現象に関して、振動の抑制から振動との協調へと発想の転換を行い、本放電振動を許容しつつも制御可能な電源を開発し、放電振動の制御を目指した電源を開発すべく、ホールスラスタのモデル化や協調電源の推進性能に及ぼす影響を調査した。

研究成果の概要(英文)：A newly developed power processing unit offers the advantages of smaller size and lighter weight than conventional PPU. For a small and lightweight PPU, we adopt a new PPU concept: Instead the PPU provides power that is controlled, but harmonized with the Hall thrusters. In the Hall thruster, discharge current naturally oscillates, due to the various instabilities, with the largest oscillation being prey-predator oscillation. The harmonized PPU provides power in accordance with the fluctuating (over time) impedance of the Hall thrusters. That is, it works as a constant voltage source for maintaining discharge when the discharge current is small, and it works as a constant current source during large pulsed current flows. The thrust performance with this new PPU was investigated; it showed good performance as compared to conventional power supplies. The thrust to power ratio was improved to 58 mN/kW at discharge voltage of 150 V and anode xenon mass flow rate of 1.0 mg/s.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：推進・エンジン プラズマ ホールスラスタ 振動現象

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙利用コストの大幅な低減が要求されている今日、国際的な宇宙開発の流れとして軌道保持、姿勢制御のための推進系も高性能な電気推進の搭載が不可欠となってきている。電気推進は、小惑星探査機“はやぶさ”で実証されたように、従来のエンジンと比較して 5-10 倍燃費がよい。そのため大幅な燃料の低減が望め、衛星の小型化の促進が期待できる。電気推進の中でも、ホール電流を利用したホールスラスタはエネルギー変換効率が 50%以上と高く、その推進原理上、高密度イオンを排出できるため、同じ推力レベルのイオンエンジンと比較するとサイズは 1/3 とコンパクトである。そのため次世代宇宙推進機として最も注目され、NASA が開発を進めている小惑星捕獲ミッションのメインエンジンとして研究開発が進められている。ホールスラスタの課題として、放電不安定性が挙げられる。これは電離不安定 (Predator - Prey 不安定性) に起因するプラズマ振動であり、申請者らはこの放電振動の物理を解明し、振動の抑制に取り組み、成功した。しかしながら時間の経過とともに抑制された振動は再び現れることがわかってきた。

ここで発想の転換を行い、放電振動がホールスラスタの本質であるならば、無理に抑えるのではなく、逆に主導権をもって振動と協調する電源を開発できれば、ホールスラスタにとって自然な動作となるため、作動の安定化と性能向上が図れるのではないかと考えた。この電源は、放電振動と協調するために、放電振動とほぼ同じ周波数で電圧を変動させて、振動を制御するという野心的な電源である。実際に試作電源を作り、その成果を試したところ、放電振動は制御可能であり、エネルギー変換効率は 5% 向上した。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的はホールスラスタの放電振動と協調可能な電源を開発する事である。

### 3. 研究の方法

ホールスラスタの放電振動と協調可能な電源を開発するために、電気的な負荷であるホールスラスタを回路でモデル化し、回路シミュレータを用いて、協調電源を改良する。これと平行して協調電源がビームの拡がりにも及ぼす影響を検証する。さらに、協調電源でのイオン生成・加速部のプラズマ状態を測定し、性能への影響や回路モデルの物理背景を明らかにする。得られた知見をもとに協調電源の最適化を進めると共に、ニューロ制御等を用いて常に最適な電源条件となる自己学習型協調電源を合わせて開発する。

### 4. 研究成果

協調電源の開発のためには、負荷であるホールスラスタの電気的特性を把握する必要がある。そこで、バイポーラ電源を用いて、図 1 に示すような DC の重畳された正弦波や

矩形波を印加し、重畳された波の大きさや時間幅、周波数と、放電インピーダンスの関係を周波数特性分析器によって調査した。図 2 に示すような、周波数特性が観察されたが、これは、LC 共振系を交流駆動する場合と類似の特徴が現れていることが分かる。すなわち、スラスタは周波数が低い時は C 負荷として振る舞い、結果として電流の位相が進み、一方、周波数が高いと L 負荷となり、電流の位相が遅れる。このように、LC 共振系としてホールスラスタのモデル化出来る事が明らかになった。

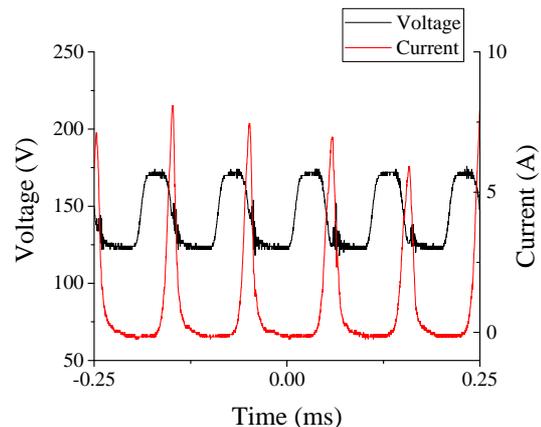


図 1 ホールスラスタに任意波形を印加した時の電流特性

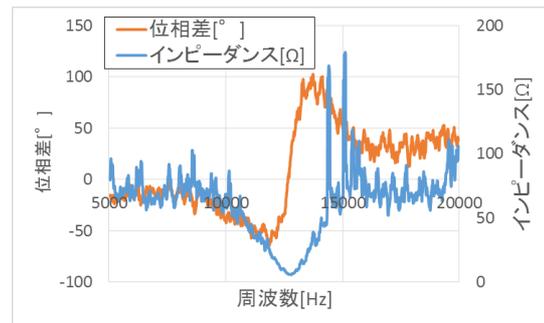


図 2 インピーダンス、位相差の周波数特性

次に協調電源の推進性能に及ぼす影響を調査した。すなわち、協調電源の駆動周波数やコンデンサ容量などの回路定数を変化させて、推進性能やエネルギー分布関数、ビーム発散角などの調査を行った。図 3 に励起周波数を変更した際のエネルギー変換効率と推力電力比を示す。従来の直流安定化電源において、効率 22% 推力電力比 50 mN/kW であったものが協調電源を用いると、推進効率 27%、推力電力比 58mN/kW と性能が向上することを確認した。また、最適な電流波形およびチョッピング周波数が存在することが明らかになった。この性能改善のメカニズムとして、電離不安定 (Prey - Predator model) と電源がうまくかみ合った結果であると言える。すなわち、図 4 に示すようなサイクルがうまく働いたと考える。

プラズマ密度が低い状態で、中性粒子は補充されていく。このとき電源は徐々に電圧

を増加させているが、中性粒子密度が低い  
ため、放電電流は抑えられている。  
電圧が高い状態となり、これに伴い電子の  
平均エネルギーは大きくなり、同時に中性  
粒子の補充により中性粒子密度が増加し  
ている。この結果として、雪崩的に電離が  
生じ、結果として放電電流が増加する。生  
成されたイオンは放電電圧が高い状態で  
生成したため、生成場所の静電ポテンシ  
アルも高い状態となる。よってイオンは十  
分に加速される。  
中性粒子の枯渇により、電離度が低下し電  
流が減少する。それに歩調を合わせて電源  
が電圧を低下させるため、電子電流およ  
びは抑制され、電子の平均エネルギーも低  
下する。一方、生成されたイオンはすで  
に加速されているので、推力には影響しな  
い。  
に戻る。

結果として、電子温度が高い時間帯でイ  
オンは生成され、この時間帯は放電電圧  
が高いため、生成領域のポテンシャルも  
高く、推力は低下せず、また、中性粒  
子が枯渇している時間帯は低電圧で放  
電維持に努めるため、消費電力が下がり  
、性能向上した。図5にホールスラスト  
と協調させた電源におけるビームプロ  
ファイルを示す。図5を見ても分かる  
とおり、協調電源を使っても、ビーム  
発散角はほとんど変化しておらず半値  
半幅で9から10度の値を得た。

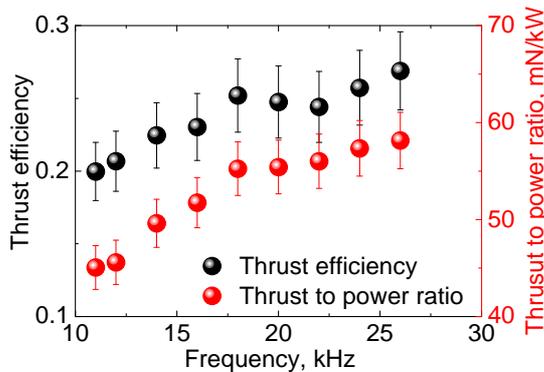


図3 チョッピング周波数を変更した際のエ  
ネルギー変換効率および推力電力比

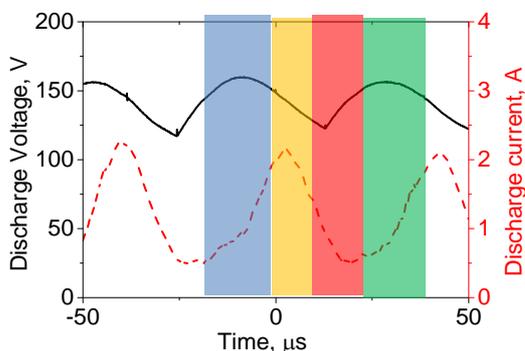


図4 電流・電圧履歴とその区分け

図6にイオンエネルギー分布関数を示すが、  
協調電源を使うとイオンのエネルギー分  
布関数は変わり、さらに、周波数の増加  
に伴い、イオンの平均エネルギーが上  
昇することを確認した。

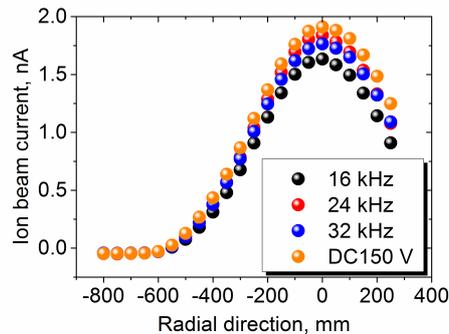


図5 イオンビームプロファイル

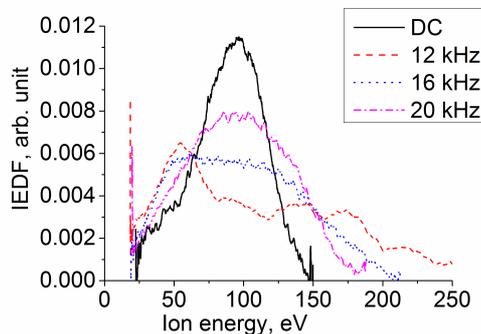


図6 イオンエネルギー分布関数

これと並行して、協調可能な電源の改良  
において、回路モデルの妥当性の検証や  
ホールスラストの性能への影響の物理  
的背景を解明に必要なホールスラスト  
のイオン生成・加速領域のプラズマ  
状態を計測を目指して、レーザート  
ムソン散乱計測システムの改良を行  
った。現状では、ホールスラストの  
イオン生成/加速領域の薄いプラズ  
マを計るためにはSN比が不十分であ  
ったためである。現状として、計測  
における最大のノイズは乱反射され  
た光である。そこで、乱反射され  
た光が入らないように図7のように  
光学系を改良した。主な改良点は  
ビューイングダンプとバッファを設  
置したことである。

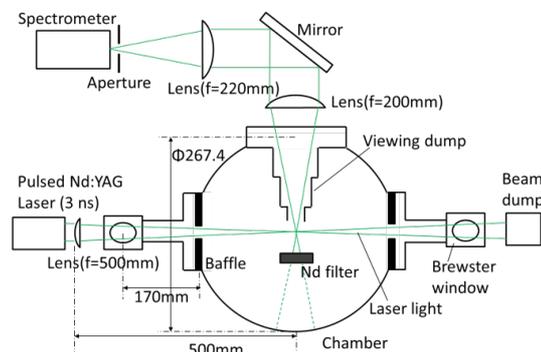


図7 レーザートムソン散乱計測装置

これらの変更と共に、レーザーのパルス幅を短くするとともに計測時間を従来の 10 ns から半分の 5 ns に短縮させた。その結果として、ノイズ成分は 1/100 と大幅に減少し、その結果として、 $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  と低密度のプラズマも計測できるシステムに改善された(図 8 参照)。

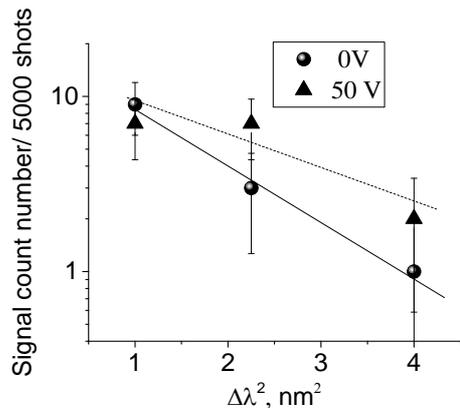


図 8 トムソン散乱スペクトル

さらに、ニューラルネットワークを用いたインテリジェンス電源の向上に取り組んだ。教師データの再現だけでなく、未知データの予測に最適な中間層の層数・ニューロン数、活性化関数の検討を行った。

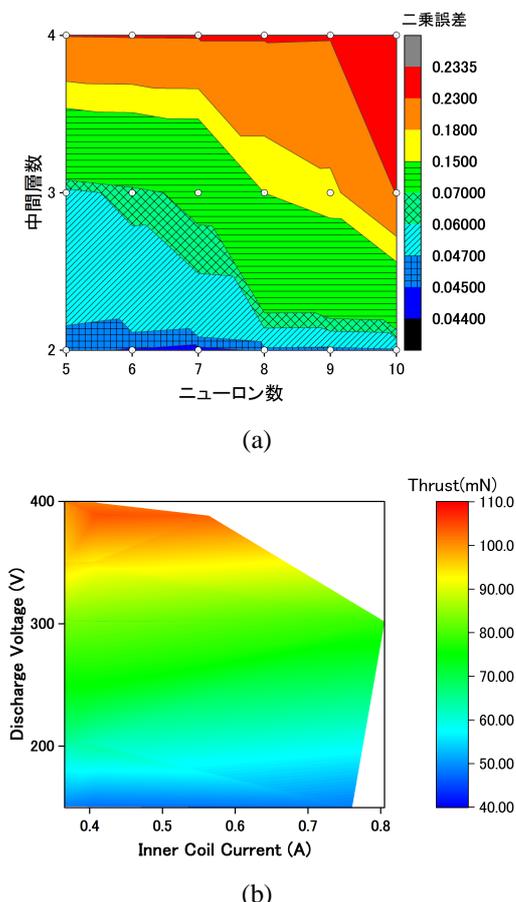


図9 ニューラルネットワークを用いたホールスラストの性能再現(a)層数・ニューロン数と残差, (b)ニューラルネットワークにより算出した様々な磁場および放電電圧かでの推力

様々な層数, ニューロン数, 活性化関数の未知データの予測精度についての比較を行い, 図 9 に示すとおり, 比較的少ないデータ (70 件) 程度で層数も 3 層と深くなくても, ある程度の確度でデータを予想することが出来ることが分かった。さらに, データの次元が増える時間変化を組み込み, 畳み込みニューラルネットワークを用いて低次元化し未来予測できる自己学習型の開発を行った。しかしながら, 満足できるものではなく, まだまだ改良が必要である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

Yushi Hamada, Junhwi Bak, Rei Kawashima, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki, Naoji Yamamoto, Yusuke Egawa, Ikkoh Funaki, Shigeyasu Iihara, Shinatora Cho, Kenichi Kubota, Hiroki Watanabe, Kenji Fuchigami, Yosuke Tashiro, Yuya Takahata, Tetsuo Kakuma, Yusuke Furukubo, Hirokazu Tahara, Hall thruster development for Japanese space propulsion programs, Transactions of JSASS, 採択決定

濱田 悠嗣, 朴 俊輝, 小紫 公也, 江川 雄亮, 山本 直嗣, 高畑 侑弥, 角間 徹生, 古久保 裕介, 田原 弘一, 5kW 級ホールスラスト RAIJIN の性能解析, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 65 (2017) No. 2 p. 82-86,

<http://doi.org/10.2322/jjsass.65.82>

Atsushi Yamaguchi, Atsushi Kibe, Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Hideki Nakashima, Measurement of Aluminum Erosion Rate by Cavity Ring-Down Spectroscopy, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30 (ISTS Special Issue: Selected papers from the 30th International Symposium on Space Technology and Science) p. Pb\_111-Pb\_116

[http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb\\_111](http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb_111)

Atsushi Yamaguchi, Atsushi Kibe, Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Hideki Nakashima, Measurement of Aluminum Erosion Rate by Cavity Ring-Down Spectroscopy, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30 (ISTS Special Issue: Selected papers from the 30th International Symposium on Space Technology and Science) p. Pb\_111-Pb\_116

[http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb\\_111](http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb_111)

Naoji Yamamoto, Kohei Takase, Yuya Hirano, Kimiya Komurasaki, Akira Kakami, Ryudo Tsukizaki, Satoshi Hosoda, Hitoshi Kuninaka, Shigeru Yokota, Thrust

Performance in a 5 kW Class Anode Layer Type Hall Thruster, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30 (ISTS Special Issue: Selected papers from the 30th International Symposium on Space Technology and Science) p. Pb\_183-Pb\_187. [http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb\\_183](http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb_183).

Naoji Yamamoto, Takumi Ito, Haruki Takegahara, Hiroki Watanabe, Taichiro Tamida, Hiroyuki Osuga, Thrust Performance in Hall Thruster with Pulsating Operation, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14 (2016) No. ists30 (ISTS Special Issue: Selected papers from the 30th International Symposium on Space Technology and Science) p. Pb\_173-Pb\_176. [http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb\\_173](http://doi.org/10.2322/tastj.14.Pb_173)

Atsushi Yamaguchi, Atsushi Kibe, Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Hideki Nakashima, Masakatsu Nakano, Erosion rate measurement in ion thrusters using Cavity Ring-Down Spectroscopy technique, Journal of Instrumentation, Volume 11, January 2016, 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (LAPD17)

10.1088/1748-0221/11/01/C01079

Naoji Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, K. Kuriki, T. Tamida, H. Osuga, Development of a novel power processing unit for Hall thrusters, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 1, pp.158-164, January, 2015.

Tamida, H. Osuga, N. Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, K. Kuriki, Performance Improvement of Hall Thrusters Using a Pulse-Synchronous Driver System, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 3, pp. 956-961, May-June, 2015. <http://dx.doi.org/10.2514/1.B35273>

〔学会発表〕(計 17 件)

淵上太貴, 他, ホールスラスタの制御におけるニューラルネットワークの適用可能性, 日本航空宇宙学会, 第 57 回航空原動機・宇宙推進講演会, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄, 2017, 3 月

岩本政隆, 他, 電気推進機のブルーム領域の物理量測定, 日本航空宇宙学会, 第 57 回航空原動機・宇宙推進講演会, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄, 2017, 3 月

Tomohiro Ichimaru, Optimization of the Voltage waveform applied to a Hall thruster, 18<sup>th</sup> Cross straits symposium, shanghai, China, 2016 年 1 2 月

Yusuke Egawa, et al., Effect of magnetic

field configuration and anode configuration on 5 kW class anode layer type Hall thruster, 67<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Guadalajara. Mexico, 2016 年 9 月

Naoji Yamamoto, et al., Measurement of Electron and Neutral atom density downstream of an electric propulsion, 52<sup>nd</sup> AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, USA, 2016 年 7 月

Yusuke Egawa, et al., Effect of magnetic field configuration on thrust efficiency in anode layer type Hall thruster, 8<sup>th</sup> Asian joint conference on propulsion and power, Takamatsu, Kagawa, Japan, 2016 年 3 月

江川雄亮, 他, アノードレイヤ型ホールスラスタの推進性能に対する陽極依存性, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 神奈川県, 2016 年 1 月

中野和彦, 他, マイクロ波中和器のプラズマ計測, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 神奈川県, 2016 年 1 月

A. Yamaguchi, et al., Erosion rate measurement in ion thruster using cavity ring-down spectroscopy technique, 17<sup>th</sup> international symposium on Laser-aided plasma diagnostics, Gateaux kingdom Sapporo, Sapporo, Hokkaido, 2015 年 9 月

市丸智裕, 他, ホールスラスタの周波数特性解析, 日本航空宇宙学会, 第 59 回宇宙科学連合講演会, 鹿児島県交流センター, 鹿児島, 2015 年 10 月

A. Yamaguchi, Measurement of aluminum erosion rate by cavity ring-down spectroscopy, Joint conference, 30<sup>th</sup> ISTS and 34<sup>th</sup> IEP`C and 6<sup>th</sup> NSAT, Kobe international conference center, Kobe, Hyogo, 2015 年 7 月

Naoji Yamamoto, et al., Thrust Performance in a 5 kW class anode layer type Hall thruster, Joint conference, 30<sup>th</sup> ISTS and 34<sup>th</sup> IEP`C and 6<sup>th</sup> NSAT, Kobe international conference center, Kobe, Hyogo, 2015 年 7 月

山本直嗣, 他, 5 kW アノードレイヤ型ホールスラスタの性能に関する研究, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 神奈川県, 2015 年 1 月

Naoji Yamamoto, Plasma - materials interaction in space propulsion, Plasma conference 2014, Toki messe, Niigata, Niigata, 2014 年 11 月

木邊厚視, 他, キャピティリングダウン方を用いたグリッド損耗評価システムの構築, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール, 長崎, 長崎, 2014 年 11 月

高瀬紘平, 他, 5 kW アノードレイヤ  
型ホールスラスタの熱解析, 第 58 回宇  
宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホ  
ール, 長崎, 長崎, 2014 年 11 月  
伊藤匠, 他, パルス重畳電源を用いたホ  
ールスラスタの性能調査および回路モ  
デルの構築, 第 58 回宇宙科学技術連合  
講演会, 長崎ブリックホール, 長崎, 長  
崎, 2014 年 11 月

〔その他〕

ホームページ等

[http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/Hall\\_j.html](http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/Hall_j.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 直嗣 (YAMAMOTO NAQJI)  
九州大学・総合理工学研究院・教授  
研究者番号: 40380711

### (2) 研究分担者

中島秀紀 (Nakashima Hideki )  
九州大学・総合理工学研究院・教授  
研究者番号: 60112306  
H26 のみ

### (4) 研究協力者

アザール ヤリン (Azer P. Yalin)  
Colorado State University・Mechanical  
engineering・教授