

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860052

研究課題名（和文） 強誘電体材料を用いたマイクロプラズマスラスタの研究開発

研究課題名（英文） Development of a Micro Plasma Thruster using Ferroelectric Materials

研究代表者

鷹尾 祥典 (TAKAO YOSHINORI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80552661

研究成果の概要（和文）：宇宙ミッションの低コスト化に貢献が期待される超小型高機能衛星の実現にはマイクロ推進機が求められる。本研究では、強誘電体とそれを挟む2つの電極からなり強誘電体自身を燃料とする強誘電体マイクロプラズマスラスタの研究開発を行った。高圧両極性パルス電源を用いることで強誘電体プラズマ生成を実証し、また、電圧・電流波形を測定することによりイオン放出によって推力を得ると同時に電子放出によって自己中和が行われていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Small satellites have been attracting great interest to reduce the total mission costs. We have proposed a micro plasma thruster using ferroelectric materials, sandwiched by metal electrodes. When a high voltage bipolar pulse is applied between the electrodes, the plasma is produced on the ferroelectric surfaces, and simultaneously, the ions and electrons are repelled from the plasma by the applied electric fields. The ions emitted produce the thrust, and the electrons emitted give self-neutralization.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：プラズマ、推進機、強誘電体、マイクロ、人工衛星

1. 研究開始当初の背景

宇宙開発において人工衛星など宇宙機の小型・軽量化、低消費電力化は多種多様なミッションにとってコスト削減という経済性の面から大変重要である。最近では、10 kg 以下のナノ級、1 kg 以下のピコ級小型衛星の開発も盛んになっている。小型衛星単体では大型衛星と比較して機能が限られるものの、複数の小型衛星による機能分散・協調システムの構築により、大型衛星よりも柔軟性・信頼性を高めることが可能である。例えば、必要

に応じて衛星を追加したり、一部が故障した場合にはその衛星を取り替えたりすることでシステムの機能向上や回復が図れる。大型宇宙機にとっても、本体の故障・異常発生の監視や、周辺の小規模観測などの目的で小型衛星は有用である。このような超小型衛星（ナノ・ピコサテライト < 10 kg）を機動的に運用して有用性を高めるには、衛星の軌道・姿勢制御を行う超小型推進機（マイクロスラスタ）が不可欠であるが、現状、他の要素と比較して研究開発が遅れている。マイク

ロスラスタには、微小推力 (< mN) を高精度に制御すること、また従来型より 2~3 桁以上小さい質量、体積、消費電力 (< 数 W) が求められ、単純な小型化ではなく新概念に基づく研究開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究「強誘電体材料を用いたマイクロプラズマスラスタの研究開発」は、マイクロプラズマ源に強誘電体材料を用いて、高効率化（低消費電力化）を図るとともに、自己中和可能なマイクロスラスタの実現へ向けた要素技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 強誘電体プラズマ源の試作と特性解明:
強誘電体材料としてランタンドープジルコン酸チタン酸鉛(PLZT)、定比ニオブ酸リチウム(SLN)、一致熔融ニオブ酸リチウム(CLN)、ソフトチタン酸バリウム(Soft-BTO)の4種類の強誘電体材料を用いる。そして、高圧両極性パルス印加することにより高真空(10^{-4} Pa)から大気圧までの広い圧力範囲において直径 5 mm 程度のディスク状マイクロプラズマ源を作成する。

(2) マイクロスラスタの試作と実証:
高圧両極性パルス印加時における電圧・電流波形を測定することにより強誘電体材料の正イオンと電子双方の電流を求め、それぞれの電流測定値を比較することによりイオン放出によって推力を得ると同時に、電子放出によって自己中和が行われていることを確認する。

4. 研究成果

図1に本研究で作成した強誘電体マイクロプラズマスラスタの概念図を示す。

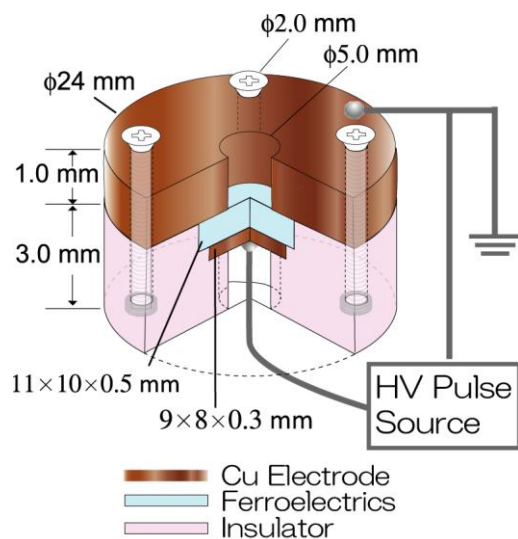


図1 強誘電体マイクロプラズマスラスタの概念図

このマイクロスラスタは強誘電体材料および二つの電極から成り、非常に簡単な構造である。強誘電体に高圧両極性パルス印加することで、その表面に強誘電体材料で構成されたプラズマを生成することができる。そして、印加された正負それぞれの高圧パルスにより、プラズマからイオン・電子双方を加速放出することで推進力と中和の両機構を作り出す。ここでは強誘電体材料として

- ・ CLN: Congruent LiNbO₃
 - ・ SLN: Stoichiometric LiNbO₃
 - ・ Soft-BTO: 0.91BaTiO₃-0.09Ba(Hf_{1/2}, Zr_{1/2})O₃
 - ・ PLZT: (Pb, La_{0.08})(Zr_{0.65}, Ti_{0.35})O₃
- の4種を用いた。

(1) 発光分光法によるスペクトル測定:
図2に発光分光法によるスペクトル測定に用いた実験装置の概略図を示す。実験装置は、マイクロスラスタ、両極性パルス供給機構、真空系、および測定系から構成される。

両極性パルス供給機構は、印加パルス電圧により二種類の電源を用いた。高電圧 (≥ 200 V, pulse width: 2 μs) は高圧両極性パルス電源 (Haiden, SBP-10K-HF2) を用いて生成し、低電圧 (< 200 V, pulse width: 250 μs) はマルチファンクションジェネレータ (NF, WF1974) より発振された信号を高速バイポーラ電源 (NF, BA4825) により増幅することで生成した。生成された両極性パルスは同軸ケーブルを介して強誘電体へ印加される。

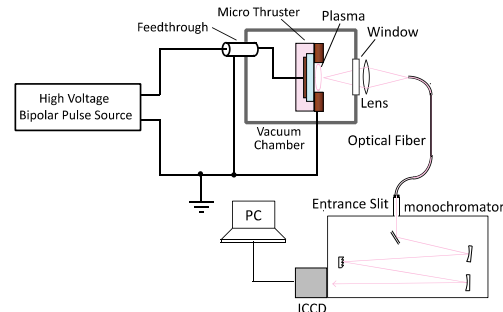


図2 発光分光測定に用いた実験装置図

測定系はレンズ、分光器 (Acton, SpectraPro 2500i, 焦点距離 50 cm, 格子間隔 2,400 lines/mm), CCD カメラ (Princeton, PI-MAX1K: 1024 × 1024 pixels, 13.3 mm × 13.3 mm) で構成されている。プラズマの発光はレンズにより集光され、光ファイバーを通して分光器に導かれる。ここで、分光器の入射スリットは 5 μm である。

CLN と PLZT を用いた際にはプラズマの生成が確認され、強誘電体の分極反転回数が多くなるほどプラズマ生成電圧は増加した。強誘電体の分極反転回数が増加すると、強誘電体材料のヒステリシス・ループ形状は大きく変化し、抗電界の上昇、残留分極量の減少、分極反転速度の低下が引き起こされる。その

結果、三重点（強誘電体-電極-真空の接点）からのイオン・電子放出の閾値電圧が上昇し、プラズマ生成開始電圧が上昇したと考えられる。

図 3(a) に CLN を用いたマイクロスラストの写真、図 3(b) に ± 4.5 kV の両極性パルスを印加した際に生成したプラズマの写真を示す。図より三重点からプラズマが生成されている様子が見て取れる。また、図 4 に CLN の中心部に銀ペーストを浮遊電位の状態で設置した場合の正面写真を示す。この場合も、三重点よりプラズマが生成されている様子が見て取れる。露光時間が長いため明確には言えないが、プラズマは円周部から中心部に向かって広がるように発生していると考えられる。

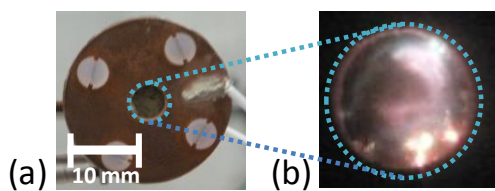


図 3 CLN を用いた(a)マイクロスラスト、および(b) ± 4.5 kV 印加時におけるプラズマ生成の様子

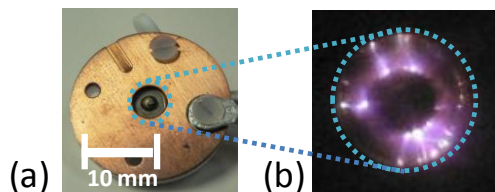


図 4 CLN の中心部に銀ペーストを浮遊電位の状態で設置した(a)マイクロスラスト、および(b) ± 4.5 kV 印加時におけるプラズマ生成の様子

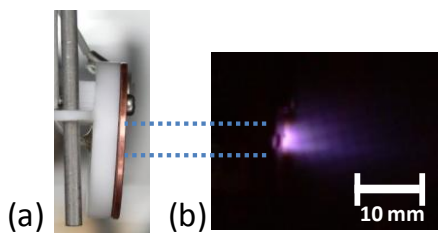


図 5 (a)図 4 と同じマイクロスラストを側面から見たもの、および(b) ± 4.5 kV 印加時におけるプラズマ生成の様子

図 5 に、図 4 と同じマイクロスラストを用いた際の側面からの写真を示す。強誘電体表面に生成されたプラズマがマイクロスラストから加速放出され、プラズマブルームが生成されている様子が確認できる。

なお、SLN を用いた場合はプラズマ生成が確認される前に SLN にクラックが生じた。これは、抗電界以上の両極性パルスを連続印加したことで、圧電性による振動が生じた影響

と、三重点に電界集中が生じた影響の相乗効果で起こったものと考えられる。また、Soft-BTO を用いた場合はプラズマ生成が確認される前に、電源の出力電流上限に到達したため印加電圧を十分に上げることができなかった。これは、Soft-BTO のヒステリシス・ループ形状は低電圧で非常に大きい分極量変化をしていることと、Soft-BTO のサイズが $15 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ であるため、分極反転面積が大きくなったことが原因と考えられる。

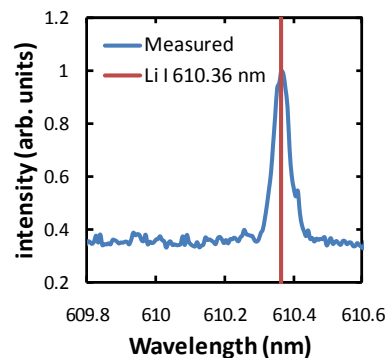
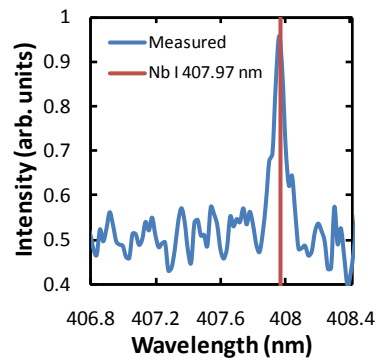
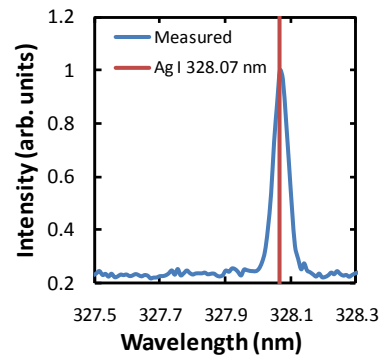


図 6 観測されたスペクトルの一例(CLN)

次に、プラズマ生成が確認できた CLN、PLZT を用いて、プラズマのスペクトルを分光分光法により測定した。図 6 に CLN を用いた場合に観測されたスペクトルの一例を示す。CLN を用いた場合、構成元素である Li, Nb のスペクトルと、強誘電体と電極の接着に用いた銀ペーストの主成分である Ag スペクトルが観測された。PLZT を用いた場合は、プラズマの発光強度が非常に小さかった

ため PLZT の構成元素 (Pb, La, Zr, Ti) のスペクトルは観測できなかつたが、Ag スペクトルは観測できた。この結果より、生成されたプラズマは強誘電体ならびに銀ペーストによって構成されていることが示された。

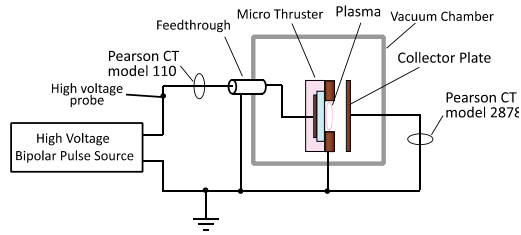


図 7 放出電荷量測定に用いた実験装置図

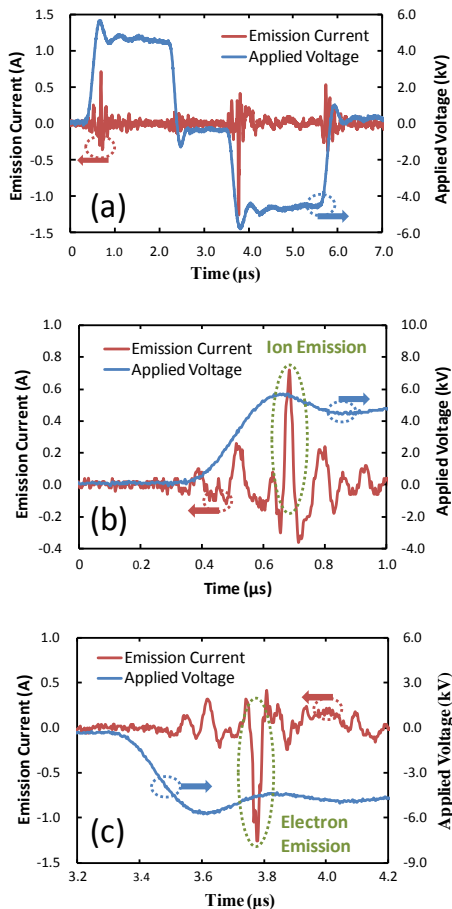


図 8 CLN に±4.5 kV の両極性パルスを印加した際に測定された電圧・電流波形

(2) 放出イオン・電子電荷量測定:

図 7 に放出イオン・電子電荷量測定に用いた実験装置の概略図を示す。測定系以外は図 2 に験装置と同様である。マイクロスラスタの前方に銅製のコレクタ電極を配置して、両極性パルス印加により放出されたイオン・電子を収集する。コレクタに流れる電流をログスキーコイル (Pearson, Current Transformer Model 2878) により測定する事で、マイクロスラスタから放出されたイオン・電子電荷量を求めた。また、同時に下部電極へ流れ込む

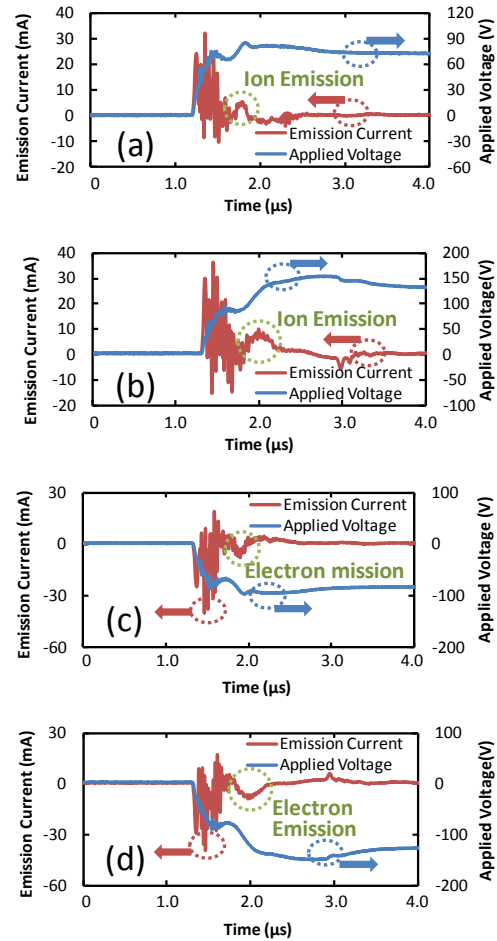


図 9 Soft-BTO に(a)+100, (b)+150, (c)-100, (d)-150 V のパルスを印加した際に測定された電圧・電流波形

電流量をログスキーコイル (Pearson, Current Transformer Model 110) により、印加電圧を高電圧プローブ (Tektronix, P6015A) により測定し、消費エネルギーを算出した。

図 8 に、CLN に±4.5 kV の両極性パルスを印加した際の電圧・電流波形を示す。図 8(b) においてイオン電流が確認され、図 8(c) においては電子電流が確認された。想定していたプロセス通り、正パルスの立ち上がり時にイオン電流が、負パルスの立ち下がり時に電子電流が観測された。イオン・電子の電荷量を図 8 より計算すると、正負各パルス間の放出イオン電荷量は 15 nC/pulse、放出電子電荷量は 28 nC/pulse であった。一方、PLZT ではプラズマの弱い発光が観測されたもののイオン・電子放出はどちらも観測することができなかった。両極性高圧パルスラインからのノイズに埋もれてしまい測定できなかったと考えられる。

次に、Soft-BTO を用いた場合は、±100~150 V 程度の両極性パルス印加時にイオン・電子放出を確認することができた。図 9 にその時の電圧・電流波形を示す。図 9(a), (b) ではイ

オン電流が、図 9(c), (d) では電子電流が観測された。CLN のイオン・電子電流と同様に、正パルスの立ち上がり時にイオン電流が、負パルスの立ち下がり時に電子電流が観測された。その放出イオン電荷量は+100 V で 0.50 nC/pulse、+150 V で 2.6 nC/pulse、放出電子電荷量は-100 V で 0.51 nC/pulse、-150 V で 3.4 nC/pulse であり、印加電圧を増大させるに従い放出イオン・電子電荷量も増加した。さらに印加電圧を増大させるため、高圧両極性パルス電源に変更して 200 V 以上のパルス印加したが、イオン・電子電流を観測することはできなかった。これは、電源変更に伴いノイズが増大し、電流信号がノイズに埋もれてしまったためと考えられる。また、SLN を用いた際には、いかなる印加電圧においてもイオン・電子放出は観測されなかった。

CLN では ± 4.5 kV でイオン・電子電流が観測されたが、Soft-BTO では ± 100 V という非常に小さい電圧でイオン・電子電流が観測された。これは、Soft-BTO の抗電界が 40 V/mm と極めて低く、かつ、抗電界付近での分極量変化が急激であるため、三重点からのイオン・電子放出が低電圧でも発生したためと考えられる。また、Soft-BTO からの放出イオン・電子電荷量は CLN からの放出イオン・電子電荷量と比べると一桁以上小さかった。これは、低電圧では水平電界も小さく、目視できる密度のプラズマ生成には不十分であったこと、イオン・電子を静電的に加速放出する役割を担う垂直電界も小さかったためと考えられる。

CLN, Soft-BTO にて観測されたイオン・電子放出は、いずれも電子放出の方が大きい電荷量を持っていた。すなわち、イオン放出によって静電加速的に推力を得ると同時に、電子放出によって自己中和が行われていることが確認された。

(3) 消費エネルギー測定:

強誘電体材料に両極性パルス印加した際の消費エネルギーを、印加電圧とスラストの下部電極へ流れる電流（以下、これを生成電流と呼ぶ）を測定することで求めた。一例として、図 10 に CLN に ± 0.7 kV の両極性パルス印加した場合における印加電圧と生成電流波形を示す。印加電圧が変化した場合、つまり分極量が変わった際に大きな電流が発生している様子が確認できる。この両極性パルス間での消費エネルギーを計算すると 0.17 mJ であった。

同様に Soft-BTO (分極反転回数: 10^3)、PLZT (分極反転回数: 10^{2-3} , 10^{8-9})、CLN (分極反転回数: 10^{8-9}) にて、印加電圧を変化させ、両極性パルス一回の間で消費されるエネルギーを求めた。その結果を図 11 に示す。この消費エネルギーは誘電損失、弾性損失、プ

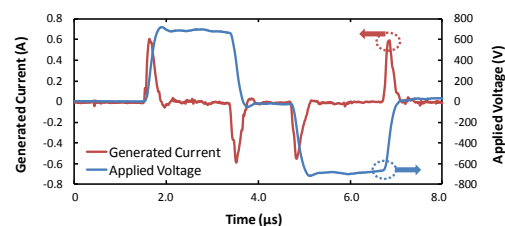


図 10 CLN に ± 0.7 kV の両極性パルス印加した際における印加電圧と生成電流波形

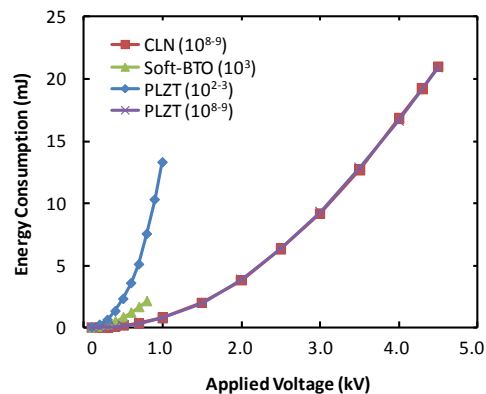


図 11 各強誘電体における両極性パルス一回の間で消費されるエネルギー

ラズマ生成損失、イオン・電子加速損失などにより構成されている。

生成電流は強誘電体の分極面積に比例し、ヒステリシス・ループに大きく依存している。PLZT では分極反転回数によって消費エネルギーが大きく異なっている。分極反転回数が増えると、ヒステリシス・ループ形状が変化し、分極量が減少する。分極量変化が減少し、生成電流が小さくなったため、消費エネルギーが減少したと考えられる。

本研究で作成したマイクロスラストは試作型であり電極構造や回路の最適化は行っていない。放電はドーナツ型上部電極の内側で発生していることから、その近傍のみ分極反転させれば十分である。しかしながら、現在は放電に寄与しない部分も分極反転させているため、生成電流が大きくなりエネルギーを必要以上に消費している。そこで、下部電極の面積を最適化し、分極反転面積を小さくすることで生成電流を減少させれば、消費エネルギーを約 30% に抑えられる。加えて、回路の最適化により印加パルスのリングングを抑制することで同じく約 30% の減少が見込める。すなわち、理論上は消費エネルギーを現在の 10% 程度にまで抑えることが可能と考えられる。また、この消費エネルギーは両極性パルス一回あたりであるため、両極性パルスの繰り返し周波数を変更することも消費電力の調整が可能である。例えば、CLN の場合 ± 4.5 kV の両極性パルス印加における消費電力を求めると、パルスの繰り返し

周波数 10 kHz で 210 W、1 kHz で 21 W であった。今後改良を施すことで、同条件において 10 kHz で~21 W、1 kHz で~2.1 W 程度での運用が期待できる。

なお、推進機の性能としては、CLN を用いた場合、印加電圧 ± 4.5 kV、パルス幅 2 μ s、パルス繰り返し周波数 10 kHz の条件において、推力 120 μ N、比推力 115 s 程度と見積もられた。今後、得られた結果と構築した粒子計算モデル(PIC/MC: Particle-in-Cell/Monte Carlo)との比較を行い、実験結果の妥当性を検証することが課題である。

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 1 件)

- ① Y. Takao, N. Kusaba, K. Eriguchi, and K. Ono, Two-dimensional particle-in-cell Monte Carlo simulation of a miniature inductively coupled plasma source, J. Appl. Phys., 査読有, Vol.108, No.9, 2010, pp.093309-1-8.
<http://hdl.handle.net/2433/134553>

[学会発表] (計 6 件)

- ① 北西駿典、鷹尾祥典、江利口浩二、斧高一、強誘電体材料を用いた静電加速型マイクロプラズマにおけるイオン・電子放出の基礎特性評価、宇宙輸送シンポジウム、2011 年 1 月 21 日、JAXA 宇宙科学研究所

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷹尾 祥典 (TAKAO YOSHINORI)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80552661

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し