

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18907

研究課題名（和文）金属燃料を用いたスパッタリング式新概念電気推進機の開発

研究課題名（英文）New concept of electric propulsion using a liquid metal sputtering

研究代表者

安藤 晃（ANDO, Akira）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：90182998

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スパッタリング現象によって金属材料を効率よく放出することで推力を発生する、新規電気推進方式の原理実証を行うことに成功した。ここでは、発生する推力がターゲット材料によって大きく変化することが確認され、この変化は材料固有の特性であるスパッタリング率によって説明可能であることが示された。また、プラズマ計測を実施した結果、荷電粒子によって発生する推力は、実際に計測された推力よりも十分小さく、無視できることが示された。したがって、スパッタリング現象による推力発生が実証された。さらに小型推進機開発を目指して、セシウムプラズマによるスパッタリング法に関する実験を展開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型衛星の開発は、宇宙開発を活性化するとともに、宇宙開発産業を開拓していく重要な技術である。特に、衛星への推進系の搭載は大きな課題であり、精力的な研究開発が進められている。本研究ではスパッタリングによる推力発生という新概念を原理実証したため、宇宙工学の観点での学術的意義が大きいといえる。また小型衛星向けに複数種の推進方式を提供することは社会的な意義が大きく、本研究はその一助となるものである。

研究成果の概要（英文）：Principle demonstration of the thrust generation by an efficient emission of the metallic material due to a plasma sputtering phenomenon is successfully performed, where the conventional magnetron sputtering source is used for the experiment. The detected thrust is significantly affected by the target material and the variation well agrees with the sputtering yield, which is the number of the sputtered target atom by an incident ion. Furthermore, the measured ion density downstream of the sputtering source shows that the thrust induced by the charged particles is much less than the actually detected thrust, i.e., is negligible, ensuring the thrust generation by the sputtering phenomenon. For further development of the compact electric propulsion system, the experiment is extended to the plasma production and sputtering by using the liquid metallic propellant of cesium. Further improvement of the propellant seeding is required in near future.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：電気推進 CubeSat スパッタリング 小型衛星

1. 研究開始当初の背景

CubeSat と呼ばれる 10cm 四方程度の超小型衛星は、相乗り衛星として低コストでの打ち上げが可能であるため、近年大学を中心として研究開発が進展しており、宇宙開発技術、観測技術の試験的運転から観測データ収集と、今後の宇宙開発の多様性を切り拓く技術であると期待されている。ミッション終了後はスペースデブリ化を防ぐために、大気圏突入による燃焼処理、または地上帰還が必要である。したがって、著しいサイズ制限のため自律推進エンジンと観測機器の同時搭載が困難な小型衛星では、投入可能な軌道に制限がある。この問題を解決するためには、超小型電気推進エンジンの開発がキーテクノロジーであり、これによりミッション中またはミッション終了後の衛星自律推進、軌道変更による大気圏落下が可能になり、小型衛星の活動領域が拡大可能になると期待される。イオンエンジン等の小型化が進む一方で、希ガス(キセノン)を燃料として使用するため、燃料貯蔵用の高圧ガスポンプを搭載する必要があり、システム容積の大部分を占めていることから、気体燃料を用いた方式では CubeSat への電気推進機搭載が容易ではなく、技術革新が求められる。現在テフロンを燃料としたパルスプラズマスラスタの CubuSat での動作実証が進められているが、発生できる推力が低く (μN レベル)、また着火の問題や燃料表面が炭化し電極間が導通して動作不良を起こすなど課題が多い。より質量密度の大きい金属材料を燃料として安定作動できれば、推進機の小型化、超小型衛星への推進機と観測機器の同時搭載が可能となるため、超小型衛星の活動領域が拡大可能である。

2. 研究の目的

本研究では、金属材料を燃料とし、衛星の軌道変更を実現するために高推力密度発生が可能となる新概念電気推進機の開発に着手し、超小型衛星を用いた宇宙ミッションの多様性拡大へと貢献することを目的とした。後述するように従来の電気推進機開発の常識を覆し、我が国オリジナルの技術発信を行うことで、今後産業化が進展する宇宙開発分野における国際的なイニシアチブ獲得へ貢献可能であることが期待される。従来の電気推進機では生成したイオンを加速することで推力を発生する。一方で今回の研究では従来とは全く異なる発想・原理で、金属液体のスパッタリング現象による大量質量放出と反跳粒子による高速粒子放出を活用した、高推力密度発生型の電気推進機開発へと着手し、その動作原理実証実験を実施した。

本研究期間内では下記の項目に注力して実験を実施し、動作原理実証と性能評価、パラメータサーベイを行い、性能向上と小型推進機開発への設計指針を樹立する。

- (1) アルゴンガスを用いた予備実験を実施し、マグネトロンスパッタ源の動作確認
- (2) 真空容器内部に推力計測器を設置し、推進性能とプラズマパラメータの評価を実施。
- (3) セシウム導入とセシウムプラズマ生成実験。

3. 研究の方法

本研究では、分担者の発案であるスパッタリングによる質量放出での推力発生を目的としている。そこで、成膜用スパッタリング法として実績の多いマグネトロンスパッタ源を用いて、まず初めに、アルゴンプラズマを用いたプラズマ発生と推力評価を行い、その後セシウムを燃料としたプラズマ発生に関する実験を展開した。図 1(a)には今回用いたマグネトロンスパッタ源の概略図を示す。水冷が可能な金属製ブロック内部に環状永久磁石を設置し、ターゲット表面に約 300-500Gauss 程度の半径方向磁場を形成している。磁場強度が最も強い領域にガス導入口 8 個を設け、ター

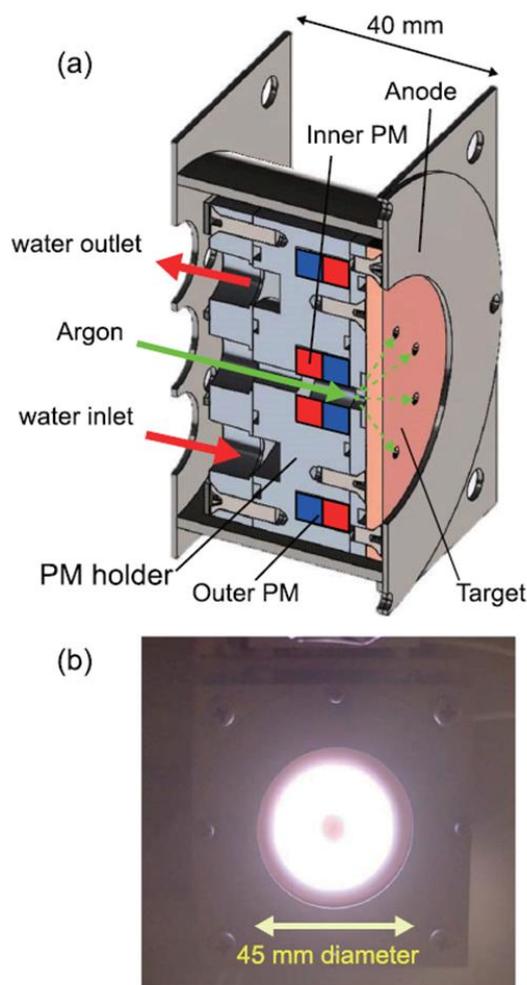


図 1: (a)マグネトロンスパッタ源概略図. (b) DC マグネトロンスパッタ源の作動の様子.

ゲット裏面からアルゴンガスを導入可能な構造となっている。また電氣的に絶縁された金属カバーをアノードとして今回用いて、カソードとなるターゲットとアノード間に DC 電圧を印加することでプラズマ発生およびスパッタリングが可能となる。図 1(b)はその際の放電の様子であり、典型的なマグネトロンスパッタ源で観測されるドーナツ状のプラズマが形成されていることが分かる。

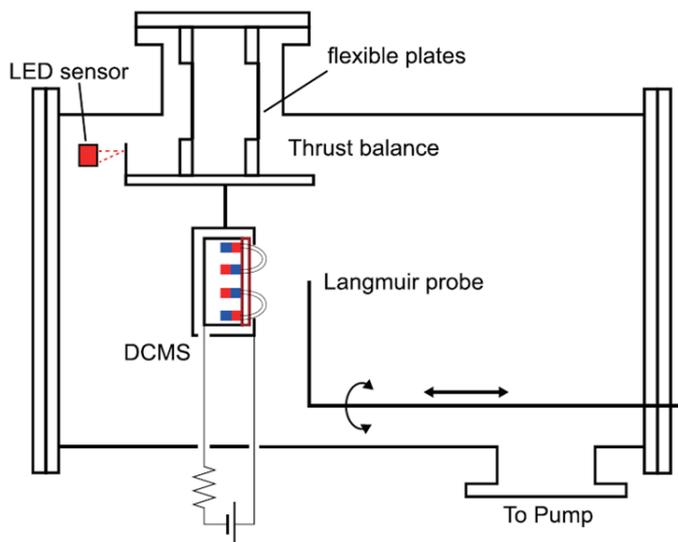


図 2: 実験装置概略図。

実験装置概略図を図 2 に示す。内径 26cm, 長さ 73cm の円筒状真空容器内部に設置した板バネ式のスラストバランスに、マグネトロンスパッタ源を接続することが可能な構造としている。マグネトロンスパッタ源には電流制限抵抗を介して 300-600V 程度の直流電圧を印加し、ターゲット表面でプラズマ発生を可能としている。この際に、プラズマ中のイオンがターゲット表面へ入射しスパッタリング現象を誘起することで、ターゲット材料が真空中へと放出される。この際に誘起されるスラストバランスの変位を、LED 変位計を用いて計測した。予めスラストバランスに既知の力を印加した際の変位を計測し、力と変位を関係づける校正曲線を取得することで、プラズマ発生の際に観測される変位から推力の絶対値を算出することが可能である。またスパッタ源の下流には、空間的に可動なラングミュアプローブを設置しており、プラズマ密度の空間分布計測が可能となっている。

4. 研究成果

図 3 には、ターゲット材料を Al(□), Cu(●), C(▲)とした場合の推力計測結果、および代表的な推力電力比の計算結果を示している。ターゲット材料によって発生する推力が大きく変化していることが分かり、最大で 8-12mN/kW の推力電力比が得られることが分かった。これは金属材料を燃料とした Cathodic Arc Thruster と同等の推力電力比であることが示された。ここで、材料固有の値であるスパッタリング率は、Cu, Al, C に 500eV のアルゴンを入射した場合それぞれ 2.5, 1, 0.12 であり、スパッタリング率に応じて発生する推力が変化していることが示された。すなわち、従来の電気推進機のようなイオン放出による推力ではなく、スパッタリングによる

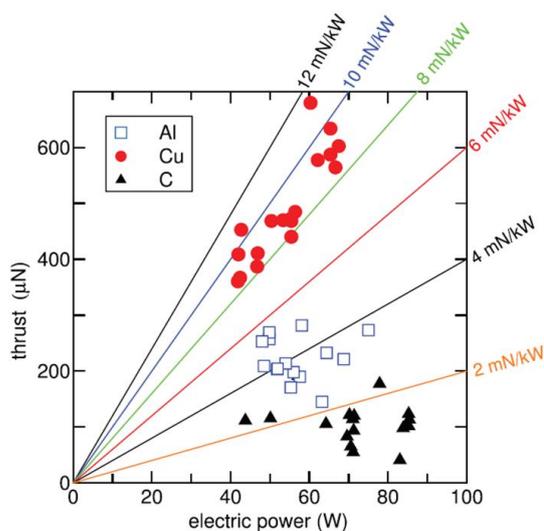


図 3: ターゲット材料を Al(□), Cu(●), C(▲)とした場合の推力計測結果、および代表的な推力電力比(実線)。

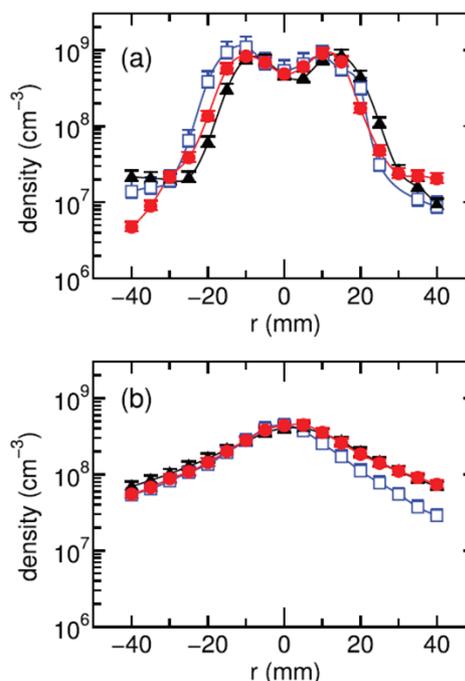


図 4: ターゲット材料を Al(□), Cu(●), C(▲)とした場合のプラズマ密度分布計測結果。(a) $z = 5$ mm, (b) $z = 40$ mm。

質量放出によって推力が発生している可能性が示唆された[文献①].

図4は、ターゲット表面から下流5mm、および40mmにおいて測定したArイオン密度の半径方向分布計測結果である。ターゲット材料によって推力が変化することも拘わらず、イオン密度はすべてのターゲット材料において変化がないことが分かる。またここで計測した密度分布より見積もった推力は約 $1\mu\text{N}$ 程度であり、観測される推力よりも十分小さく、無視できる値であることが分かった。このことから、今回観測された推力にはプラズマ中の荷電粒子の寄与はほとんどなく、スパッタリングによるターゲット材料の放出によって推力が発生していることが実証されたといえる。

イオンを加速して推力を発生するイオンエンジンやホールスラストでは、推進機の帯電と、帯電によるイオンの逆流を防ぐため、電子放出源である中和器が必要とされている。一方で、DCマグネトロンスパッタ源によって発生するスパッタ粒子は一般的に中性粒子であるため、今回のスパッタリングによって推力を発生する方式は、中和器を不要とする小型電気推進機の実現へとつながる成果であるといえる。

上述のシステムではプラズマを維持するための原料ガスとして、燃料貯蔵に高圧ポンベを必要とするアルゴンを使用している。したがって、高圧ポンベを不要とする液化ガスまたは金属蒸気をプラズマ発生燃料とすることで、推進システムの飛躍的な小型化が可能となる。そこで今回の研究では、DC放電の際にもターゲット表面の導電率低下を抑制可能なセシウム蒸気を用いたプラズマ発生を試みた。図5には、セシウム蒸気を導入した際の放電の様子を示しており、右下のガス放出孔付近で強い発光が確認されたが、アルゴンに比べてプラズマ密度が低下していることが示唆されている。この原因として、導入されているセシウム蒸気の量が少ない等の可能性が考えられるため、今後燃料ガスの導入システムの改良・開発が必要であると考えられる。

本研究によって、スパッタリング現象によるターゲット材料放出によって、小型衛星の軌道遷移に使用可能な推力電力比が得られることが初めて示された。この際に発生する中性粒子は数 km/s 程度の速度を有している点と、中性粒子放出によって推力を発生していることから中和器を使用する必要が無く、小型衛星に搭載可能な推進機の実現へとつながる知見が得られた。一方で、高圧ポンベを用いない燃料貯蔵を可能とするために、今回はターゲット表面の絶縁物化を防ぐ目的でCsを用いたプラズマ発生に関する実験を展開した。今後効率の良い燃料供給システムまたは燃料の再選定が課題であるといえる。



図5: セシウムを燃料とした際の放電の様子。

<引用文献>

- ① K. Takahashi and H. Miura, *Applied Physics Letters*, **118**, 154101 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahashi Kazunori, Saito Taichi, Ando Akira, Yabuta Yuki, Mizuguchi Hisashi, Yamamoto Naoko, Kamei Ryuichiro, Hara Shiro	4. 巻 171
2. 論文標題 Minimal multi-target plasma sputtering tool	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 109000-1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.vacuum.2019.109000	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazunori, Sugawara Takeharu, Akahoshi Hikaru, Takao Yoshinori, Ando Akira	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of a momentum vector measurement instrument in steady-state plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105117-1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5050553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazunori, Miura Hidemasa	4. 巻 118
2. 論文標題 Direct measurement of thrust induced by a magnetron sputtering source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 154101-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0042798	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kazunori Takahashi, Taichi Saito, Akira Ando, and Shiro Hara
2. 発表標題 Minimal multi-target helicon sputtering tool
3. 学会等名 15th International Symposium on Sputtering & Plasma Processes（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦英将, 高橋和貴, 安藤晃
2. 発表標題 Direct measurement of thrust induced by sputtered materials for a compact electric propulsion device
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Development of a Minimal multi-target helicon sputtering tool
3. 学会等名 International Symposium on Semiconductor Manufacturing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 小型高周波プラズマ源を用いた実用化装置開発
3. 学会等名 プラズマ流の基礎と応用に関する研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidemasa Miura, Kazunori Takahashi, and Akira Ando
2. 発表標題 Direct measurement of a thrust induced by sputtered materials in magnetron-type plasma sources
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 和貴 (TAKAHASHI Kazunori) (80451491)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	小室 淳史 (KOMURO Atsushi) (70733137)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------