

令和 6 年 4 月 26 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04492

研究課題名(和文) 二酸化炭素ホールスラスタの基礎放電特性および推進供給方法

研究課題名(英文) Discharge characteristics CO2 Hall thruster and its propellant storage and feed method

研究代表者

張 科寅 (Cho, Shinatora)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：40710596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ホールスラスタがCO₂で安定作動可能であることを確認でき、比推力1140秒、推力電力比27mN/kWといった推進性能を得た。また、プルーム計測及び数値解析により、推進剤利用効率が低いこと及びCO₂の解離に多くのエネルギーを取られていることが、要改善点であることがわかった。また、CO₂をドライアイスとして低温貯蔵し三重点を利用した、高圧貯蔵や調圧不要な貯蔵供給システムの基本コンセプトを確認できた。タンク内の可視化により、温度分布不均一を削減することが重要であることがわかった。さらに、貯蔵供給装置から供給されたCO₂ガスにより、1kW級ホールスラスタが安定作動する統合実験を実施できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高性能長寿命かつロバストであることから、探査・商用問わず様々な人工衛星でホールスラスタの利用が急速に拡大している。それに伴い、従来の推進剤であったキセノンの大量消費が課題になりつつある。本研究では、キセノンに代わり、これまであまり注目されてこなかった二酸化炭素推進の基礎検討を実施した。「CO₂を推進剤としたホールスラスタはどのような放電特性か。また、安定作動可能か」、「固体貯蔵したCO₂を安定的にガス流量制御し、ホールスラスタに供給可能か」を明らかにし、貯蔵及び供給方法まで含めたCO₂ホールスラスタの実現性について一定の見通しが得られたことは、重要な研究成果と考えられる。

研究成果の概要(英文)：It was confirmed that the Hall thruster can be stably operated with CO₂, and propulsion performance of 1140 s of specific impulse and 27 mN/kW of thrust power ratio were obtained. Plume measurements and numerical analysis revealed that the low propellant utilization efficiency and the large amount of energy required for CO₂ dissociation are points requiring improvement.

In addition, the basic concept of a storage and supply system that does not require high-pressure storage or pressure regulation was confirmed, utilizing the triple point of low-temperature storage of CO₂ as dry ice. Visualization of the inside of the tank revealed the importance of reducing uneven temperature distribution.

Furthermore, an integration experiment was successfully conducted that a 1kW-class Hall thruster was stably operated by CO₂ gas supplied from the storage and supply system.

研究分野：宇宙機用電気推進

キーワード：宇宙機用推進機 電気推進 ホールスラスタ 代替推進剤 推進剤貯蔵

1. 研究開始当初の背景

高性能長寿命かつロバストであることから、探査・商用問わず様々な人工衛星でホールスラスト（電気推進の一種）の利用が拡大している。それに伴い、従来の推進剤であったキセノンの大量消費が課題になりつつある。Xe は地上において大気中に僅かに存在するのみであり、もともと高価であり世界の Xe 生産量は年間 50 トン級であるのに対し、JAXA 技術実験衛星 9 号機 (ETS-9)でも開発中の全電化静止通信衛星は 1 機あたり約 1 トン、NASA で開発中の月軌道プラットフォームゲートウェイの推進モジュールは、月軌道までの片道で約 4.5 トンの Xe 推進剤を消費し、市場に重大な影響を及ぼしつつある。そのため、安価かつ持続可能な代替推進剤を用いたホールスラストの研究開発が求められている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、高価で有限であるキセノンに代わり、これまであまり注目されてこなかった二酸化炭素推進剤の基礎検討を実施した。二酸化炭素は地上にも

表1 ホールスラスト用推進剤候補の比較

元素	Xe	Kr	Ar	I	CO ₂
原子量	131.3	83.8	39.9	126.9	44
第一イオン化エネルギー, eV	12.1	14	15.8	10.5	17.3
最大電離衝突断面積, 10 ⁻¹⁶ cm ²	4.8	3.7	2.6	6.0	3.9
推進剤タンク貯蔵密度, g/cm ³	1.6	0.5	0.24	4.9(*)	1.56(*)
大気中含有量, 体積%	1E-5	1E-4	0.9	-	0.04
推定kg単価 (規格化)	1	0.3	0.002	0.6	0.003

*固体貯蔵

にも火星にも存在する "資源" であり、安価で大量に存在する観点でも、また ISRU (In-Situ Resource Utilization) の観点でも、様々なガスを電離加速できるホールスラストの推進剤として有望と考えられる。表 1 にホールスラストの推進剤候補の比較を示す。希ガスであるクリプトン(Kr)は Xe と各種特性が近く、SpaceX 社によりすでに実用化されている。大気中にごくわずかしが存在しない点は Xe と同じであり、当面のコストメリットはあるものの、課題の根本解決にはならない。アルゴン(Ar)は大気中含有量、産業消費量が Xe に比べて桁違いに多いが、電離断面積の小ささからイオン生成効率が低く推進性能が出ないことと、貯蔵密度が桁で低く推進剤タンクが大型化することから、実用化の見通しが立っていない。ヨウ素(I)は放電特性がよく固体で貯蔵密度も高いが、腐食性対策が必須で、推進剤タンク/配管・バルブ・流量制御系/スラストをすべて昇華温度まで昇温し、ガスとして供給する必要があるため、小型少量用途向けである。対して、CO₂ は入手性と(所謂ドライアイスとしての)貯蔵性を兼ね備え、物性から、Xe や I には劣るものの、Kr から Ar 程度の推進性能であることが期待される。しかしながら、その放電安定性や、ガス流量制御性といった基礎的な特性はこれまでほとんど調査されてこなかった。「CO₂ を推進剤としたホールスラストはどのような放電特性か。また、安定作動可能か」、「固体貯蔵した CO₂ を安定的にガス流量制御し、ホールスラストに供給可能か」の 2 点を明らかにするのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

ホールスラスト本体について、Xe 用に開発された JAXA 研究用 1kW 級スラストである 800 を用いた。初期の予備実験においては、CO₂ 放電が可能であることは確認できた一方で、着火時の突入電流や、その後の放電電流振動が非常に大きく、持続的な安定放電は困難であった。これは、ホールスラストにおける電離不安定性が、CO₂ プラズマでより一層卓越していることが原因と考えられる。そこで陽極形状の工夫により放電安定化を図ることで、結果的に持続的な安定放電を実現できた。また、非定常プラズマ解析とプラズマ計測により、現象解明を図った。実験装置については、既存 1kW 級ホールスラストの実験に用いられてきた JAXA 調布航空宇宙センターの 1.5m 電気推進実験装置を用いた。推力計測は錘校正を利用した振り子式推力スタンドにより行い、さらに回転ステージを用いてプラズマ計測用のプローブを掃引した。

推進剤貯蔵・供給装置については、Xe と同等の高い貯蔵密度を達成するため、いわゆるドライアイスとしての低温固体貯蔵から、5.1 気圧、-56.6 で三重点になり、固相がなくなるまで三重点に留まり、推進剤タンク圧が一定でかつ安定になる性質を利用し、調圧弁不要でスラストへの安定な CO₂ ガスの定流量供給が可能になり、衛星運用において必要な定電力作動を実現できる方式を考案した。図 1 に試作したドライアイス貯蔵タンクを示す。タンク内の温度が三重点維持と直結することから、温度計測箇所を多数設けて温度分布並びに温度差から流入・流出熱流の把握を行った。また、試作実験を通し一切の内部デバイスなしではタンク内温度差が大きくなり、三重点維持時間が理論より大幅に短くなることがわかったことから、温度分布縮減

のために内部フィンを追加した試作ドライアイスタンクの模式図並びに無重力下における三相分布予想を図2に示す。

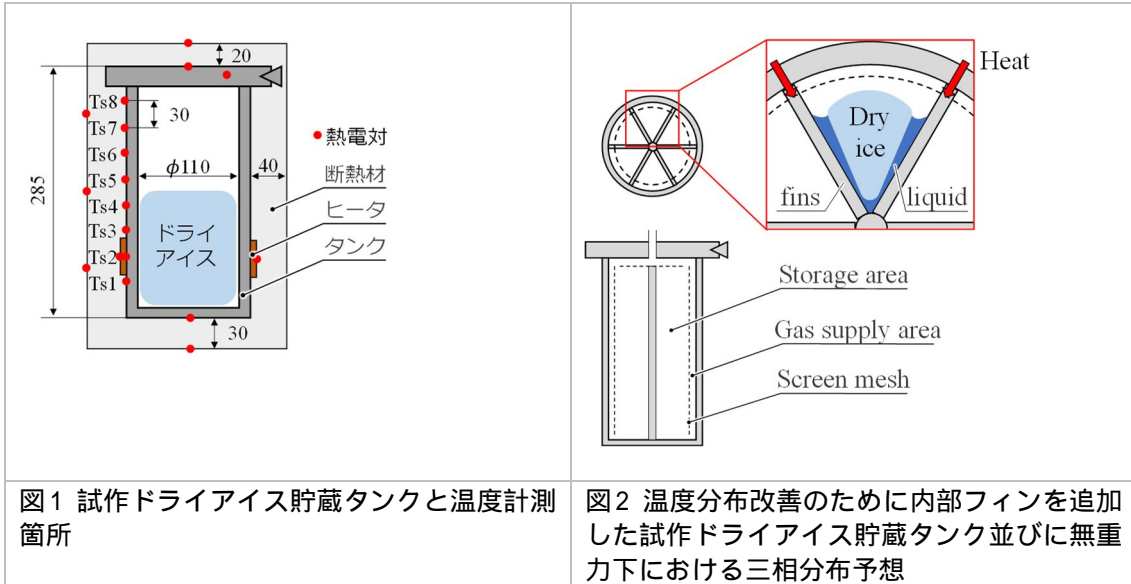


図1 試作ドライアイス貯蔵タンクと温度計測箇所

図2 温度分布改善のために内部フィンを追加した試作ドライアイス貯蔵タンク並びに無重力下における三相分布予想

ホールスラスト本体及び推進剤貯蔵供給装置の単体実験に加えて、図3に示す実験コンフィギュレーションにて、実際に推進剤貯蔵供給装置から供給されたCO₂ガスを用いて1kW級ホールスラストを作動させる、という統合実験を実施した。この際、推進剤貯蔵供給装置を1kW級ホールスラストと同じ真空槽に入れてしまうと、スラスト及びプラズマからの輻射入熱が推進剤貯蔵供給装置の温度及び三重点維持に悪影響を与えることがないように、推進剤貯蔵供給装置は別の真空槽に入れて高真空を維持した。

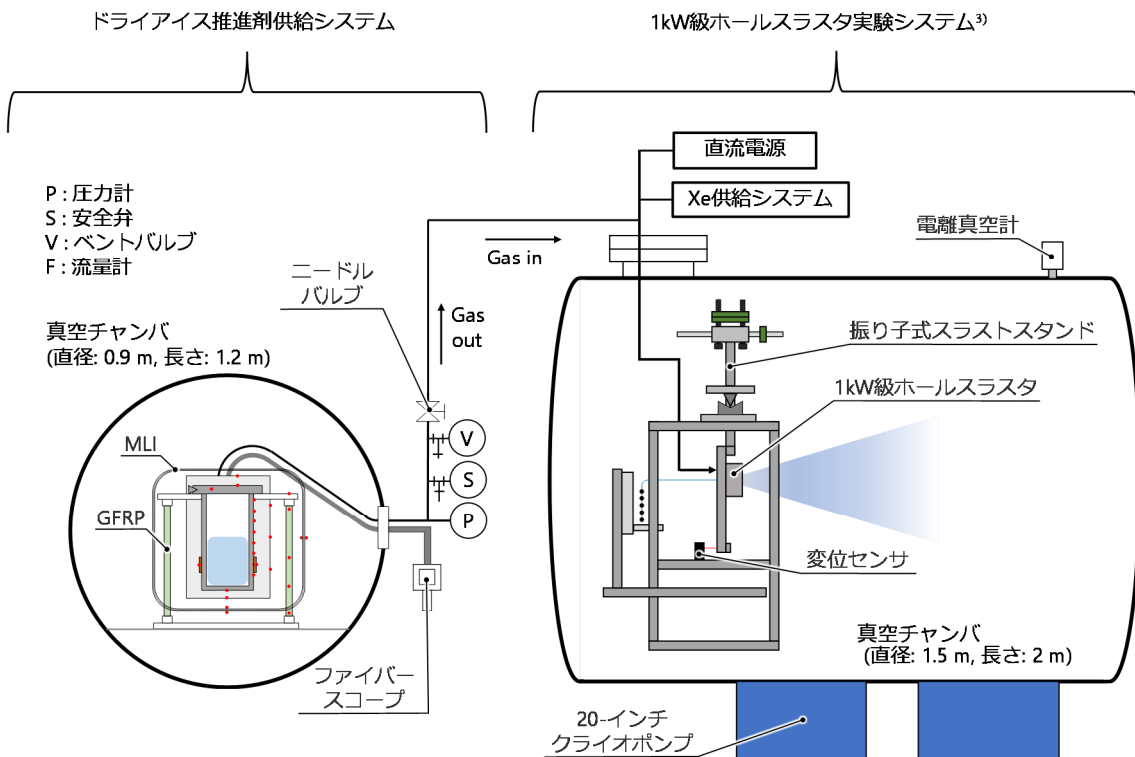


図3 1kW級ホールスラストと推進剤貯蔵供給装置の統合実験コンフィギュレーション

4. 研究成果

ホールスラスト本体について、純CO₂推進剤で安定した着火・定常作動が可能であることを確認できた。放電電圧100-200V、放電電力700-1600Wの広範囲にわたって推進性能をパラメトリックに取得し、トータル比推力最大1140秒/推力電力比最大27mN/kWといった推進性能を得た。図4-6に比較的良好な推進性能が得られたCO₂流量80-100sccm、放電電圧160-200Vのデ

ータを示す。放電電力を上げるほど高率、特に比推力が向上する傾向であり、電力密度の上昇がCO₂ホールスラストの性能向上に直結するといえるが、スラストに対する熱負荷は電力密度に基本的に比例するため、工学的にはスラストの高耐熱化や温度制御が課題となりうる。一方で推力電力比については放電電力に対しほぼ横ばいであることが示され、消費電力あたりの発生推力はほとんどスラストの作動状態によらない、という特性は人工衛星の運用上の利点になりうる。

また、ファラデープローブ及びE×Bプローブを用いたプルーム計測を行い、CO₂作動は推進剤利用効率が60%未満と低いこと、イオンビームに占めるCO₂+イオンの割合は全体の40%程度に過ぎず、他方CO⁺、O⁺、C⁺がそれぞれ20%程度を占めており、CO₂の解離に多くのエネルギーを取られていること、がXe作動と比べて効率が低い主因であり、性能向上に向けた改善点であることがわかった。また0次元及び2次元の粒子シミュレーションの実施により、解析的にもこれらの傾向を確認できた。

貯蔵供給装置については、CO₂をドライアイスとして低温貯蔵し三重点を利用することで、高圧貯蔵や調圧不要な貯蔵供給システムを構築可能とする基本コンセプトを確認できた。単体試験により、60分以上三重点維持し、スラスト作動に必要な流量を供給可能であることがわかった。流量供給によるエンタルピー流出と、貯蔵タンクへの環境入熱のバランスに基づく、軌道上運用を模擬した数理モデルを開発し、最小限の温度制御により軌道上運用できる方策を見出した。また、タンク内の可視化により、三重点維持時間が理論より短くなる原因が、タンク内の温度分布が不均一にあると特定し、伝熱促進フィンの追加により、大幅に改善できることを確認できた。微小重力下においてもこれらの供給方式及び内部デバイスが有効であることを評価するため、CFDを用いた三相分布解析を行い、生じた液相が想定通り表面張力でフィンに付着することが確認できた。ただし微小重力下での実験的な検証については後続の研究実施が待たれる。

最後に統合試験として、作動デモンストレーションを実施した。ドライアイス貯蔵供給装置から三重点維持により定圧で供給されたCO₂ガスにより、1kW級ホールスラスト本体が問題なく放電・推力発生することを確認できた。図7に統合実験における時系列データを示す。三重点維持時間内におけるスラストへの安定的な推進剤ガス供給及びスラストの作動を確認できた。

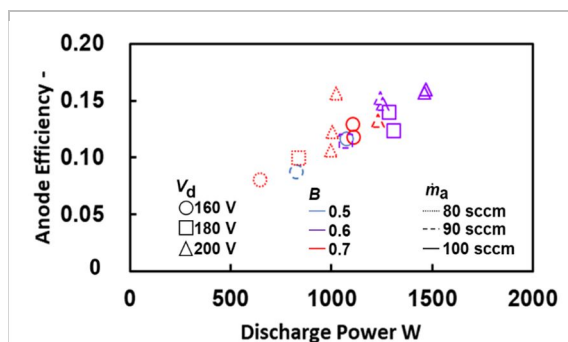


図4 放電電力に対するアノード効率

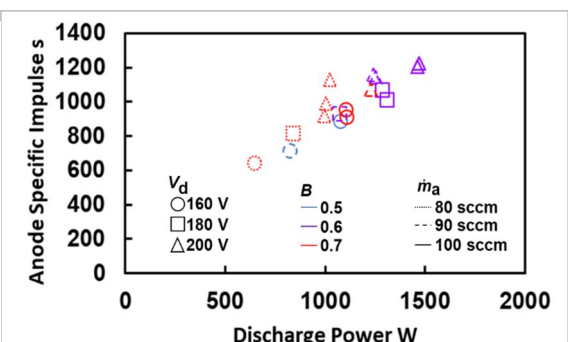


図5 放電電力に対するアノード比推力

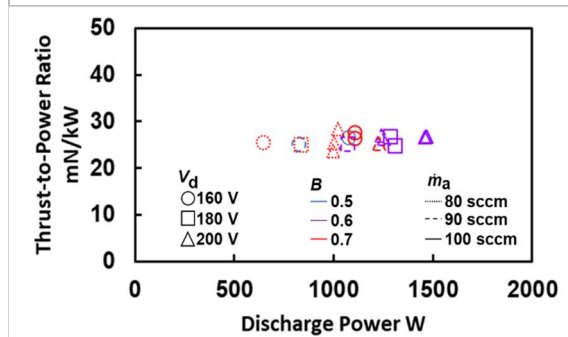


図6 放電電力に対する推力電力比

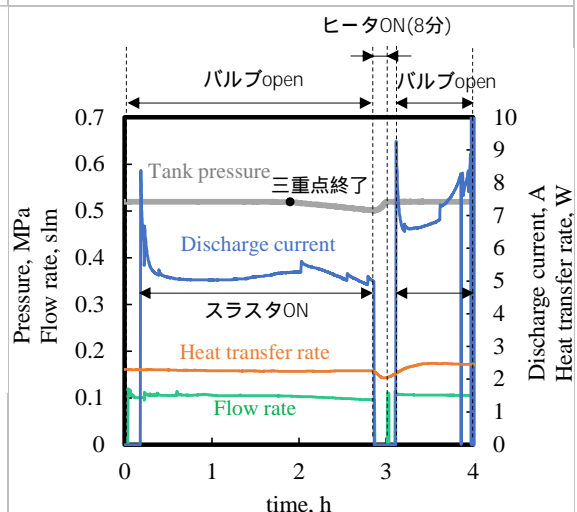


図7 統合実験における時系列データ

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Tatsuro Maki, Kiyoshi Kinefuchi, Shinatora Cho, Hiroki Watanabe	4. 巻 202
2. 論文標題 Dry ice propellant for electric propulsion with triple-point storage	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 283-291
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2022.10.034	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 軍司, 竹内, 渡邊, 張, 大川, 松井
2. 発表標題 推進剤に二酸化炭素を用いた1 kW級ホールスラストのプルーム特性
3. 学会等名 2023年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2024年1月
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野坂, 杵淵, 張, 渡邊
2. 発表標題 ドライアイス・ホールスラストのシステム実証と タンク内三相分布解析
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会, 富山, 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shu Tokuda, Shinatora Cho, Hiroki Watanabe, Yasushi Ohkawa, Kota Gunji, Makoto Matsui
2. 発表標題 Collision Model for Numerical Calculation of Carbon Dioxide Hall Thruster
3. 学会等名 ISTS2023, Kurume, June 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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	渡邊 裕樹 (Watanabe Hiroki) (30648390)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員 (82645)	
研究 分担者	杵淵 紀世志 (Kinefuchi Kiyoshi) (90648502)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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
---------	---------