

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14946

研究課題名（和文）再生冷却によるハイブリッドロケット黒鉛ノズル浸食抑制の実証

研究課題名（英文）Demonstration of Graphite Nozzle Erosion Suppression in Hybrid Rockets Through Regenerative Cooling

研究代表者

KAMPS LANDON (KAMPS, LANDON)

北海道大学・工学研究院・特任助教

研究者番号：70869502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：民間宇宙利用の増大に伴い、低コストで安全な宇宙輸送システムの需要が増加している。ハイブリッドロケットは、その低コストで安全な宇宙輸送システムを提供でき、特に小規模打ち上げ機および人工衛星用推進系に適しているが、ノズルスロート部が熱化学的に浸食される「ノズル浸食」という、ロケット性能の著しい低下を招く問題に直面していた。本研究では、黒鉛ノズル浸食開始温度が従来型再生冷却の銅ノズル熔融温度より高いことに着目し、より安全で冷却が容易な再生冷却システムを開発した。そして、黒鉛ノズル浸食を抑制することで、黒鉛ノズル浸食の理解を大幅に向上させ、ハイブリッドロケットの宇宙輸送システムの実現に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙市場の規模は40兆円で、今後数十年にわたり成長を続けると予測されている。更に、日本は打ち上げ能力だけでなく、世界トップクラスの深宇宙探査計画を持ち、この産業の主要なプレーヤーの1つとなっている。本研究の期間中、主幹研究者は大学で開発された技術を商業化し、宇宙産業の向上に貢献するために事業会社を設立した（Letara株）。ハイブリッドロケット推進を産業に応用するための重要な技術の1つは、ノズルの熱管理に関するものである。本研究では、金属3Dプリンター等の新技術により、より安全で低コスト、かつ大量生産可能な再生冷却黒鉛ノズルが、高性能ハイブリッドロケットの実現に最も適していることを実証した。

研究成果の概要（英文）：With the increase in civilian space utilization, the demand for low-cost and safe space transportation systems is increasing. Hybrid rockets can provide such low-cost and safe space transportation systems and are particularly suitable for propulsion systems for small launchers and satellites. However, hybrid rockets have faced a problem of "nozzle erosion," in which the nozzle throat is thermochemically eroded, resulting in a significant degradation of rocket performance. In this study, we focused on the fact that the graphite nozzle erosion start temperature is higher than the copper nozzle melting temperature in conventional regenerative cooling nozzles, and developed a safer and easier regenerative cooling system. By actively suppressing graphite nozzle erosion, the understanding of graphite nozzle erosion was greatly improved, contributing to the realization of a hybrid rocket space transportation systems.

研究分野：航空宇宙工学関連

キーワード：ハイブリッドロケット ノズル浸食 再生冷却 黒鉛

1. 研究開始当初の背景

超小型衛星の打ち上げやサブオービタル宇宙旅行等の分野で宇宙の民間利用が世界的に活発になる今日、低コストな小型ロケットの需要が増大している。既存の固体ロケットや液体ロケットは推進剤として火薬類や危険物を使用するため、製造、運搬、貯蔵、消費の全過程で安全管理コストがかかる。これは機体の規模にほとんど依存しないため、小型ロケットの低コスト化のためには安全管理コストの削減が必須である。その手段としてハイブリッドロケットが注目されている。ハイブリッドロケットは、図1に示すように、プラスチック等の固体燃料と液体酸素等の液体酸化剤を推進剤とするのが一般的である。安全管理が容易なため、低コストで安全な輸送システムを実現することができる。例えば、Virgin Galactic社の宇宙船SpaceShipTwoにおいて、コストと安全面を熟慮した結果、メインエンジンにハイブリッドロケットが採用された。ハイブリッドロケットの開発が進展するに従って、ノズルの熱管理が重要な課題として注目されてきた。研究開始当初は、すべての商用ハイブリッドロケットでは、高い融解温度(4000K以上)、軽量(比重2以下)、高い熱伝導率(100W/m-K以上)、および、製造コストが低いという理由から、ノズルスロート部に「黒鉛」が使用されている。黒鉛の主な欠点は、燃焼ガスによって酸化され、浸食することである。ノズル浸食によりノズルスロート面積が増大すると、ノズル開口比の減少により比推力が低下する。ノズル浸食の主な機構は、燃焼ガスに含まれる酸化物質(H₂O, O₂, CO₂等)による化学的浸食である。研究実施者らはノズル温度依存性を含む黒鉛ノズル浸食の実験モデルを構築することに世界で初めて成功した(2018 AIAA Hybrid Rockets Best Paper Award)。先行研究において、ノズル浸食はノズル壁面温度がある閾値(1500K程度)を超え、化学反応が起きやすくなったときに生じ始めることが示された。ハイブリッドロケットの酸化剤は液体で供給されるため、燃焼室に供給する前にルスロート周辺に流す「再生冷却」と呼ばれる方法で浸食抑制ができると考える(図2参照)。従来、再生冷却においては、高い耐酸化性および高熱伝導率を有する銅がノズルスロート材料として選ばれてきた。その一方で、銅製ノズルの耐熱温度は1000Kと低く、この温度を超えた際に溶損し、温度管理を失敗すると破壊的な結果を招く。銅製ノズルの耐熱温度より500K以上高い浸食開始温度を持つ再生冷却黒鉛ノズルでは、要求される冷却能力が小さくて済む。更に、冷却し切れなかった場合でも溶損ではなく、比較的遅い(表面後退速度0.4mm/s以下)浸食が起こるだけであるため、冷却剤として液体酸化剤しか利用できないハイブリッドロケットにおいては、再生冷却黒鉛ノズルは唯一選択可能で現実的なノズル冷却システムであった。

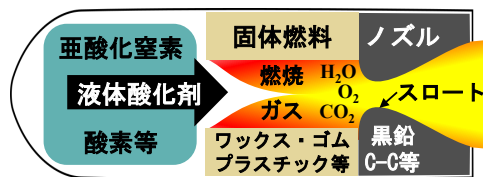


図1 従来型ハイブリッドロケット

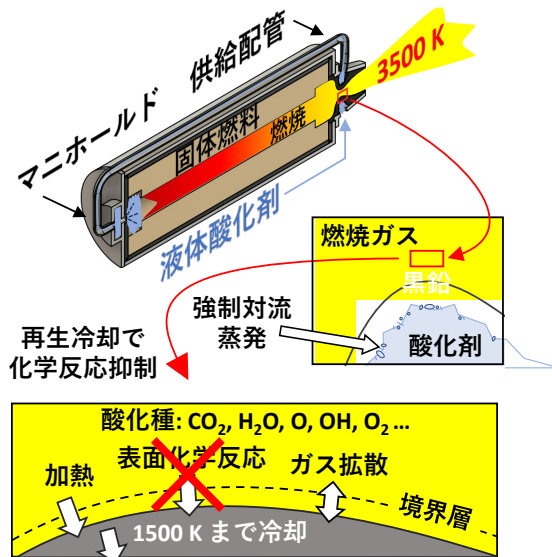


図2 再生冷却式ハイブリッドロケットとノズル部の詳細反応

2. 研究の目的

黒鉛ノズルの冷却による浸食抑制効果の解明および黒鉛ノズル浸食抑制を実現する再生冷却式ハイブリッドロケットの実証を目的とした。

3. 研究の方法

計画の概要を図3に示す。実施計画を3つの学術的「問い」に応じて段階にわけて行った。その際、設計、実験、および分析というサイクルをフィードバックすることで実験手順および物理モデルの改善が可能となった。採用までの期間では、既存の実験装置の改造および試用を行い、第一段階の実験のための経験を積み上げ、実験手順を確立できた。

第一段階: 令和2年度末迄に冷却による黒鉛ノズル浸食抑制効果を定量的に検討するために、冷却材に水を用いた燃焼実験を行い、黒鉛ノズル温度、当量比および圧力の影響の解明を目指した。

第二段階: 令和3年度末迄に液体酸化剤による黒鉛ノズル冷却能力および特性を検討するために水冷却装置を再利用し、冷却材にハイブリッドロケットモータの酸化剤を用いて燃焼実験を行った。その際、当研究室で開発されてきたCAMUI型ハイブリッドロケットに使用する液体酸素を用いた。第三段階: 令和4年度末迄に再生冷却システムを実証するために、ハイブリッドロケットモータに供給する酸化剤を冷却材に採用し再生冷却燃焼実験を行った。そのため、冷却方

法の検討、気液混相酸化剤の乾き度およびインジェクション特性を明らかにすることを旨とした。

4. 研究成果

本研究の目標は、黒鉛ノズルの冷却による浸食抑制効果の解明および黒鉛ノズル浸食抑制を実現する再生冷却式ハイブリッドロケットの実証であった。再生冷却黒鉛ノズルを実証するために明らかにすべき学術的「問い」は以下の3点であった。(1) 冷却によるノズル浸食の抑制は可能か、(2) 液体酸化剤による十分な冷却は可能か、(3) 再生冷却黒鉛ノズルシステムの設計解は存在するのか、であった。研究実施計画は、これら3つの学術的「問い」に応じて段階的に設定し、計画通りに実施することに成功した。

(1) 冷却によるノズル浸食の抑制は可能
第1段階として、2020年度までに冷却による黒鉛ノズル浸食抑制効果を定量的に検討するため、入手が容易な水を冷却材として燃焼実験を行い、ノズル内部の温度データを蓄積した。燃焼時間および水の流量を実験パラメータとして設定し、10回以上の地上燃焼実験を実施した。そのほかの実験条件については、過去の無冷却でのノズル浸食実験の条件に合わせて行い、冷却の有無によるノズル浸食への影響について比較を行った。燃焼実験の結果から、適切な流量で冷却することでノズル浸食を抑制することが可能であることが確認された。

(2) 液体酸化剤による十分な冷却は可能
第2段階として、ノズル冷却材に液体酸素(LOX)を用いる5回の実験を行い、ノズルの内部の温度データを取得した。2021年度前半には、これら実験結果をもとに理論モデルを更新し、再生冷却用のノズルの設計を行った。2021年度後半には、金属の3Dプリントと従来の溶接を組み合わせて、再生冷却経路を含むノズルを製作した。そして、新設計の流量能力を実験的に確認するために、LOX流量試験を実施した。

(3) 再生冷却黒鉛ノズルシステムの設計解は存在する

第3段階として、ノズルの冷却材として供給したLOXを酸化剤としてモータに供給する「再生冷却」という方式で10回以上燃焼実験を行い、世界で初めて黒鉛ノズル浸食を抑制しながら、ハイブリッドの再生冷却を実証した(図4参照)。研究者の知る限り、黒鉛製ロケットノズルをハイブリッドロケットノズルの再生冷却構成で使用したのは、これが世界で初めてであった。図5に示すように、ロケットの燃焼室圧力と推力は正常であっただけでなく、ノズル全体がノズルの浸食開始温度よりもはるかに低い定常温度に達した。第一段階及び第二段階の実験結果から予測されるように、1500K以下の温度を維持することで、許容できないレベルで発生するノズル侵食による性能低下をなくすことができた。以上のことから、本研究は、化学ロケットノズルの再生冷却における黒鉛の実現可能性と優位性を実証することに成功した。

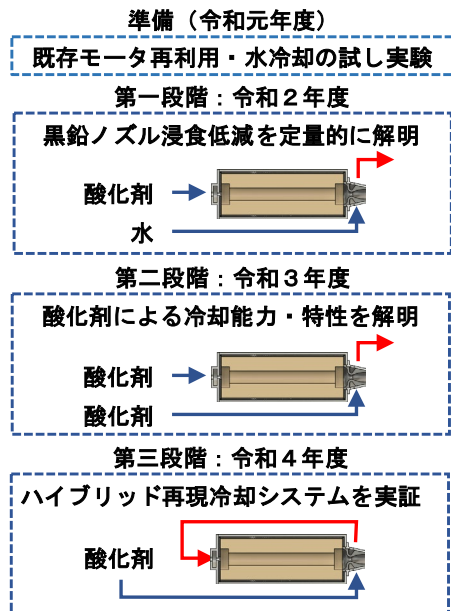


図3 研究実施の概要

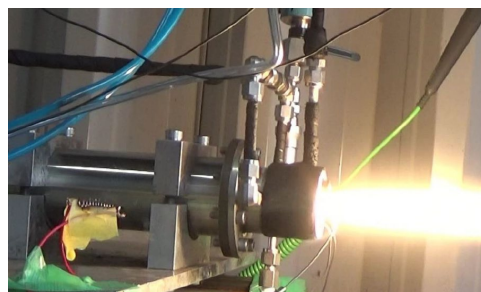


図4 再生冷却黒鉛ハイブリッドロケットノズルを世界で初めて実証

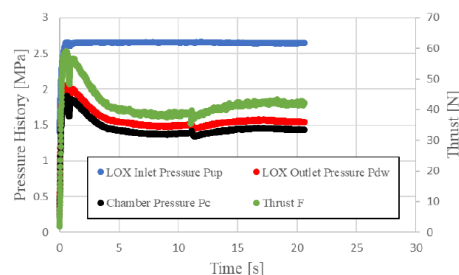


図5 圧力、燃焼室圧力及び推力は目標値に達成

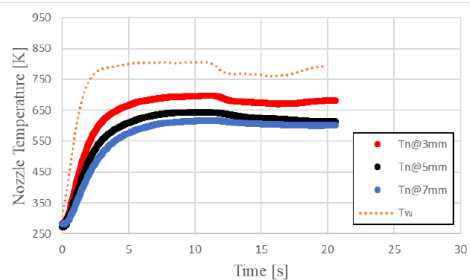


図6 再生冷却により、ノズルスロート表面温度が浸食開始条件以下で定常になり、浸食しない

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Bianchi Daniele, Migliorino Mario Tindaro, Rotondi Marco, Kamps Landon, Nagata Harunori	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Analysis of Nozzle Erosion in Hybrid Rockets and Comparison with Experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 1~22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B38547	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 該当する

1. 著者名 Gallo Giuseppe, Kamps Landon, Hirai Shota, Carmicino Carmine, Nagata Harunori	4. 巻 210
2. 論文標題 One-dimensional modelling of the nozzle cooling with cryogenic oxygen flowing through helical channels in a hybrid rocket	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 176~196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2023.05.013	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Seiji Ito, Landon Kamps, Satoshi Yoshimaru, Harunori Nagata
2. 発表標題 Evaluation of the Thermal Onset of Graphite Nozzle Erosion
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy Forum（国際学会）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Landon Kamps, Seiji Ito, Harunori Nagata
2. 発表標題 Regenerative Cooling Concept for Thermal Management of Graphite Nozzle Throat
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics（国際学会）（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
--	---------------------------	-----------------------	----

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