

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04852

研究課題名(和文) 細管内の高熱流束条件下での相変化および相分布を伴う液体酸素流の熱伝達特性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of heat transfer characteristics of liquid oxygen flow with phase change and phase distribution under high heat flux conditions in a thin tube

研究代表者

北川 幸樹 (Kitagawa, Koki)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10575476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ハイブリッドロケットの再生冷却ノズルを模擬した細管、高熱流束条件下での液体酸素流の熱伝達特性を明らかにすることを目的に、熱伝達特性計測実験システムを開発に成功した。機能確認試験として、コールドフロー試験および配管単体加熱試験を実施し、計測システムの特性を把握した。液体酸素熱伝達特性計測実験を実施し、実験データから熱伝達特性を推定する計算手法を構築し、熱伝達率を推定した。既存の熱伝達相関式から得られる熱伝達率と比較を行い、現象の相違があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハイブリッドロケットは、本質的非爆発性の画期的な推進システムであり、来る高頻度宇宙輸送時代の輸送システムに適している。実用化のためには、液体酸素を気化した上で、旋回流として燃焼室に噴射し、高効率な推進力を得ることが不可欠である。本研究では、液体酸素の熱伝達特性を明らかにし、システムを開発するために必要な液体酸素気化に関する基礎データを蓄積することができた。この結果は、ハイブリッドロケット実用化の促進に貢献するものであり、将来的には宇宙開発の発展につながる。

研究成果の概要(英文)：The author has succeeded in developing a heat transfer characteristic measurement experimental system to clarify the heat transfer characteristics of a liquid oxygen flow under high heat flux conditions, which is a thin tube simulating a regenerative cooling nozzle of a hybrid rocket. As a function verification test, cold flow tests and a tube unit heating tests were conducted, and the characteristics of the measurement system were understood. Liquid oxygen heat transfer characteristic measurement experiments were carried out. A calculation method to estimate heat transfer characteristics from experimental data was constructed, and the heat transfer coefficients were estimated. By comparing with the heat transfer coefficient obtained from the existing heat transfer correlation equation, it was clarified that there is a difference in the phenomenon.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：ハイブリッドロケット 液体酸素 再生冷却 熱伝達 二相流 ノズル 熱流束 気化

1. 研究開始当初の背景

次世代ロケット推進系として、固体の燃料と液体の酸化剤を用いたハイブリッドロケットエンジンの研究、開発が世界的に行われている。ハイブリッドロケットエンジンの燃焼形態は、境界層燃焼と呼ばれるものであり、燃料表面で気化した燃料と気相の酸化剤が燃焼反応を起こし、燃焼ガスを発生し推進力を得る。非爆発性の燃焼形態であるため、安全性が高く低コスト化が期待できる。その利点から、アメリカでは民間企業が有人ロケットに採用を試みているなど、世界的に研究、開発が進められている。一方で、燃料の後退速度および燃焼効率が低いという課題があり、実用化はされていない。そこで、酸化剤流に旋回を与える方式が提案されている。気体酸素に旋回を与えて噴射した場合には、燃料後退速度および燃焼効率が向上した報告がなされている。酸化剤として液体酸素を直接燃焼室に旋回を与えて噴射した場合は、燃料壁面に液体の層を形成し、霧化や気化が抑制され、十分な性能を得るためには、燃焼室に噴射するインジェクタより上流で液体酸素を気化させる必要があることを明らかにした[1]。その気化方法の一つとして著者は液体酸素気化再生冷却ノズルを提案している。これは、ロケットエンジンの燃焼ガスとノズル壁面内に設けられた狭い流路を流れる液体酸素との間で熱交換を行い、ノズルを冷却すると共に燃焼ガスの熱で液体酸素を気化させるノズルである。ノズルで酸化剤に熱エネルギーを回収するため、エネルギー効率を向上できるという利点もある。

著者らは、小型のハイブリッドロケットエンジン用の液体酸素気化再生冷却ノズルを新規に設計製作し、気化燃焼実験を実施し、自立気化燃焼に世界で初めて成功し、液体酸素気化再生冷却ノズルが適用可能であることを示した[2]。この研究では、乱流状態で管内を流れる流体に対する汎用的な熱伝達評価式を用いて設計を行ったため、ノズル壁面および酸素温度の予測精度は低かった。これは、ノズル冷却溝内を流れる酸素が液体から気体へ相変化し、沸騰状態で熱の移動が行われ、重力の影響を受け、気相は管内の上方に移動し、液相と気相に偏りが発生し、熱伝達率は汎用的な熱伝達評価式から求められる値と一致していないことに起因すると考えている。そのため、より実用的な設計を行うためには、相変化を伴う沸騰状態で、液相および気相の分布に偏りがある状態での熱伝達特性を把握し、熱伝達評価式を構築する必要がある。

2. 研究の目的

研究の最終目標は、精度の高い液体酸素気化再生冷却ノズルの設計に使用できる実用的な熱伝達評価式を構築することである。本研究では、細管、高熱流束条件下での酸素の熱伝達特性を計測可能な実験システムを構築すること、管内の亜臨界圧力領域・高熱流束条件下での相変化を伴う液相および気相分布に偏りがある状態での液体酸素流の熱伝達特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

ジュール加熱により細管を加熱する方式の液体酸素熱伝達特性計測実験システムを構築した。機能確認試験として、コールドフロー試験および配管単体加熱試験を実施し、液体酸素流量特性の確認および計測システムの妥当性を確認した。印可電圧をパラメータとした熱伝達特性計測実験を実施し、亜臨界圧力領域での相変化を伴う液相および気相分布に偏りがある液体酸素流の熱伝達特性を見積もるためのデータを取得した。実験データから熱伝達特性を推定する計算手法を構築し、熱伝達率を推定した。既存の熱伝達相関式から得られる熱伝達率と比較を行った。さらに、実験システムの問題点を洗い出し、改良を実施した。

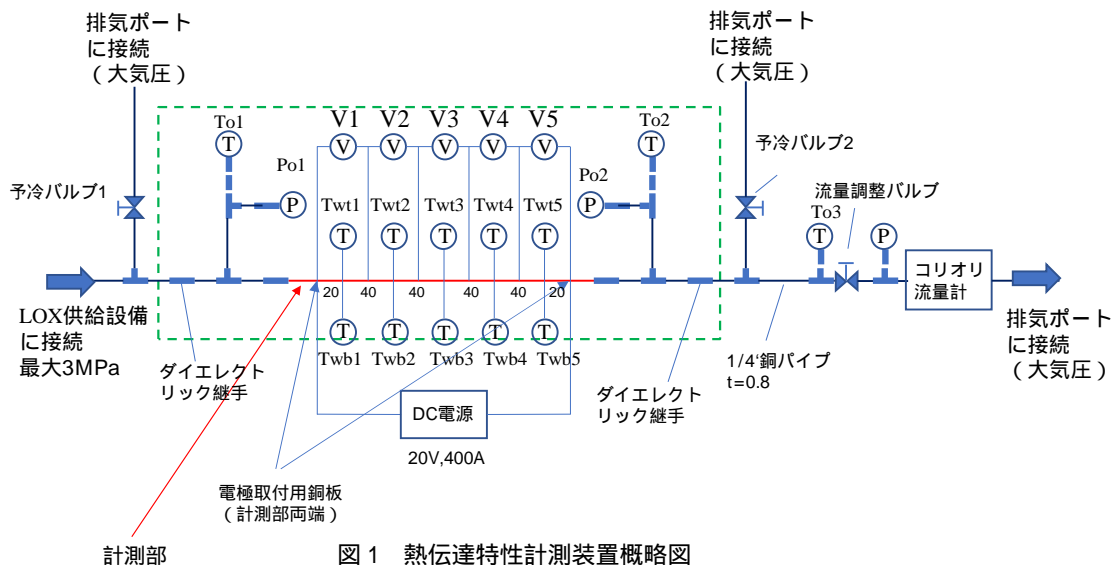


図1 熱伝達特性計測装置概略図

4. 研究成果

(1) 熱伝達特性計測実験システムの構築

実験システムは、液体酸素供給系、熱伝達特性計測装置、加熱装置で構成した。図1に熱伝達特性計測装置の概略図を示す。計測部の管は外径3.175mm、厚さ0.5mm、長さ200mmとし、材質は流れ方向の熱移動が小さくなるように熱伝導率の低いステンレスチューブを採用した。管入口、出口での流体の温度、圧力を計測し、さらに、管の外壁面の上下に5ヶ所ずつ熱電対を設置し、温度計測を行えるようにした。直流電源により管の両端に最大8kWまで電圧を印加し、ジュール加熱によって管内を流れる液体酸素を加熱できるようにした。計測部周りを窒素ガスで満たした状態にすることで流体と管の熱伝達以外の熱輸送を最小限にし、精度の高い計測を実現した。

(2) 機能確認試験

コールドフロー試験

十分な流量が流れるか、流量の調整が可能かを確認することを目的にコールドフロー試験を実施した。計測部は加熱なしで、加圧圧力を最大2.5MPaまで変化させた。液体酸素流量は流量調整バルブの開度を手動で変更し調整した。結果の一例として、最大流量を流した場合の圧力履歴、液体酸素流量履歴、液体酸素温度履歴を図2~4に示す。

液体酸素は最大で100g/s流すことが可能であることが確認できた。また、液体酸素流量は流量調整バルブの開度を変えることによって任意に調整できることが確認できた。さらに、この実験結果から、管摩擦係数を取得した。

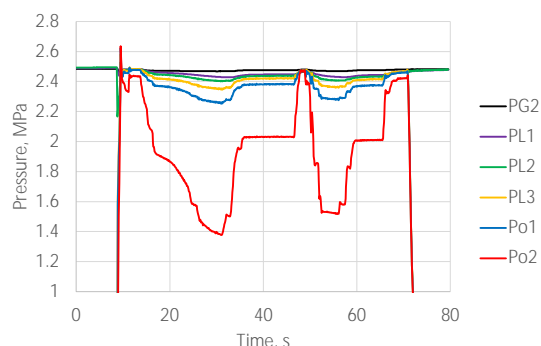


図2 コールドフロー試験圧力履歴

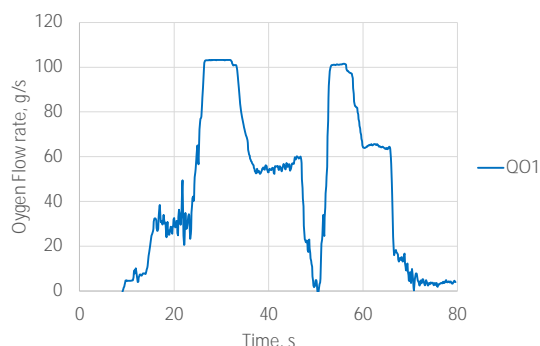


図3 コールドフロー試験流量履歴

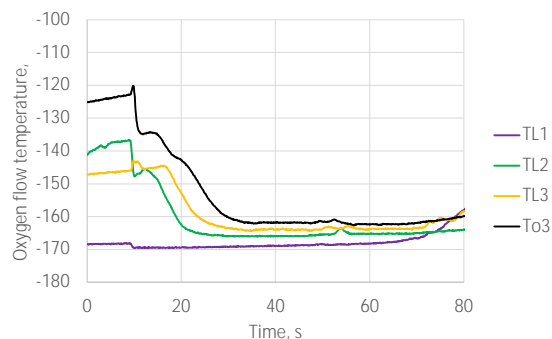


図4 コールドフロー試験温度履歴

配管単体加熱試験

計測部配管に電圧を印加して問題なく加圧されるか、電圧印加状態で温度および圧力の計測が精度良く可能かを確認することを目的に、液体酸素を流さない状態での配管単体加熱試験を実施した。0.1~0.5Vまでステップ上に電圧を印加した場合の各セクションの電圧履歴と壁温履歴を図5,6に示す。この時、各セクションの電圧は、0.02V~0.1Vまで変化している。

電圧を変化させると同時に壁温の表示値は瞬間的に変化した。上昇する箇所と下降する箇所があることが分かる。これは、印加電圧が熱電対の計測電圧に付加されていることが原因と考えられる。

そこで、印加電圧のオンオフ繰り返し、壁温が同じであることが明らかな瞬間の壁温の表示値を取得し、印加電圧の影響を調べた。その結果、印加電圧と壁温の表示値の誤差は比例関係があることが明らかになった。この結果を用いて、壁温を補正した結果を図7に示す。壁温の瞬間的な段差は無くなり、滑らかに壁温が変化する結果が得られた。このことから、印加電圧の影響を考慮して補正することで、正しい壁温が得られることが確認できた。

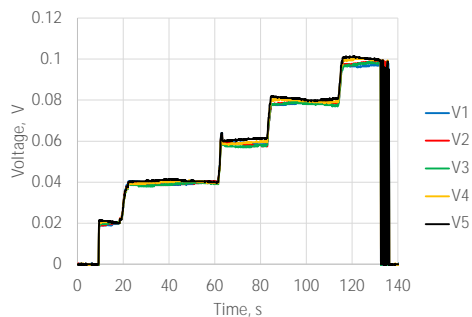


図5 配管単体加熱試験電圧履歴

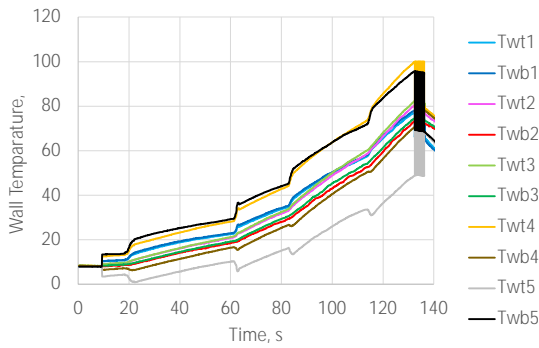


図6 配管単体加熱試験壁温履歴

(補正前)

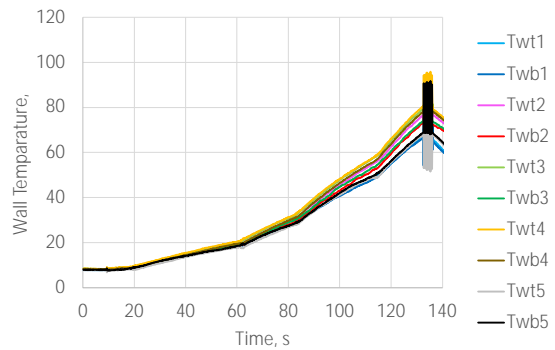


図7 配管単体加熱試験壁温履歴

(補正後)

(3)熱伝達特性計測実験

加圧圧力を 1.5MPa とし、流量調整バルブの開度を半回転で一定とし、液体酸素を流し、印加電圧を 3,4,5,6V にステップ上に変化させた実験を実施した。得られた実験データを基に、計測部配管内部の液体酸素の温度および圧力をセクションごとに逐次計算し、推定した。その結果を図 8 に示す。加熱とともに流体の圧力は低下し、温度は上昇していることが確認された。出口における計算結果と実験結果が一致していることから、推定方法は妥当であることが確認された。さらに、外壁を断熱と仮定した円管の熱伝導方程式を解くことで、各セクションの内壁温度を算出し、各セクションにおける熱伝達率を求めた。その結果を、図 9 に示す。比較のために、加熱した円管内を流れる単相流の強制対流熱伝達相関式 Dittus - Boelter の式から得られた計算値を示している。適切なオーダーの熱伝達率が得られていることから、本研究で構築した実験システムおよび解析手法が妥当であることが示された。また、実験結果が Dittus - Boelter の式から得られる熱伝達率より低いことから、配管内を流れる液体酸素は二相流状態であることが示唆される結果が得られた。

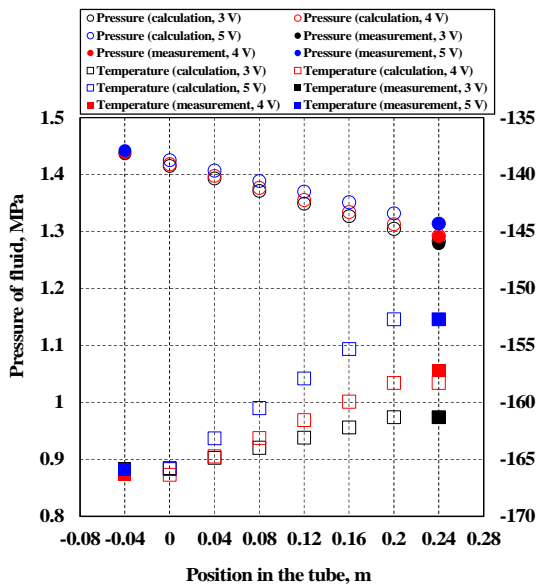


図8 配管内液体酸素の温度および圧力の

推定結果

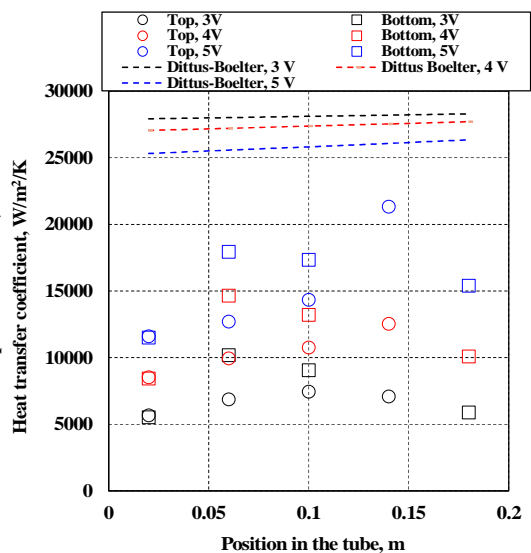


図9 各セクションにおける熱伝達率

(4)実験システムの改良

熱伝達特性計測実験を実施した結果、実験システムの流量計測と壁温計測に問題点があることを明らかにした。

実験システムに実装している流量計測方法の一つであるコリオリ流量計は、流量調整バルブの下流に設置していたため、条件によってはキャビテーションが発生し、流量を計測できないこと

が分かった。コリオリ流量計を流量調整バルブの上流に設置することで解決を図った。

壁温計測用の熱電対は、印加電圧の影響を受けることを明らかにし、補正を行ったが、温度条件によっては適正な補正ができない可能性があることが分かった。印加電圧を受けにくい方向に熱電対を精度よく取り付けすることで解決を図った。

上記改良を行い、機能確認試験を実施した結果、改善策の妥当性が確認された。今後、多くの条件で熱伝達特性計測実験を行い、熱伝達特性を定量的に評価していくことが課題である。

<引用文献>

[1] 北川 幸樹, 湯浅 三郎、液体酸素旋回型ハイブリッドロケットエンジンの燃焼特性、日本航空宇宙学会論文集、54 巻、629 号、2006、242-249

[2] 北川 幸樹、桜沢 俊明、湯浅 三郎、推力 1500N 級酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットエンジン用 LOX 気化ノズルの評価燃焼実験、宇宙技術、6 巻、2007、47-54

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 福田 次朗, 松井 康平, 北川 幸樹
2. 発表標題 LOXの熱伝達特性計測システムの改良と評価実験
3. 学会等名 第4回 ハイブリッドロケットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Kitagawa, Kohei Matsui
2. 発表標題 Evaluation of Heat Transfer Characteristics of Liquid Oxygen Flow in a Thin Tube under High Heat Flux Conditions
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川幸樹、中源也、嶋田徹
2. 発表標題 LOXの熱伝達特性計測予備実験
3. 学会等名 第3回 ハイブリッドロケット シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kitagawa, G. Naka, T. Shimada
2. 発表標題 Development of Experimental System to Measure Heat Transfer Characteristics of LOX
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (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
---------	---------