

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01622

研究課題名(和文) 極低温ロケットの多用途化に関わる界面相変化と熱流動現象の総合的研究

研究課題名(英文) Cryogenic Propellant Management with Phase Change for Liquid Rocket Systems

研究代表者

姫野 武洋 (Himeno, Takehiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：60376506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：人類の活動領域が地球周回軌道上まで拡大するのに伴い、液体ロケットや人工衛星の推進薬タンクやエンジン、宇宙ステーションでの熱制御装置など、地上とは異なる加速度環境で液体を利用する場面が増えつつあります。しかし、このような環境では、貯蔵容器内の液体を望ましい位置に保持し、思い通りに外部へ搬送するなど、気液二相流を操るのがとても難しくなります。地上では再現が困難な熱流動現象に関する知見の獲得と蓄積が不可欠であり、理論と実験を補完する手段として数値シミュレーション技術の確立が期待されています。本研究では、実験と数値シミュレーションの両方から、宇宙で液体を操るための技術や知見を獲得しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙輸送システムは、地上からの打上ロケットの再利用化だけでなく、宇宙空間の多地点を往来する軌道間輸送機の実現、推進薬再補給ステーションなどの軌道上インフラ構築へ向かって発展します。そのような場面で、しっかり働く機械を設計するためにも、流体工学や熱工学を含む学問体系を、低重力・極低温・超高压などの極限的な条件にも拡張するように発展させることが重要です。本研究成果は、実験で得られた知見を、数値流体シミュレーション手法の改良に反映し、より広範な応用が可能な形で関連する研究者や技術者に提供する点で貢献できると考えています。

研究成果の概要(英文)：For the prediction of heat transfer coupled with sloshing phenomena in the propellant tanks of reusable launch vehicle for sounding mission, the pressure drop induced by heat transfer and the dynamic motion of liquid in sub-scale vessels were experimentally investigated. The correlation between the pressure drop and liquid motion was confirmed in the experiment. It was suggested that splash and wavy surface induced by violent motion of liquid cause the pressure drop in the closed vessel. In addition, as the preliminary investigation, non-isothermal sloshing of liquid nitrogen and liquid hydrogen were successfully visualized and pressure drop depending on the gaseous species was discussed.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ロケット 極低温 気液二相流 液体水素 相変化 自由表面 軌道間輸送 CFD

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙活動を支える基盤技術として、低重力環境で推進薬や冷却剤などの液体を貯蔵そして輸送する技術は欠かせないものであり、軌道上推進薬再補給や軌道間輸送機の実現へ向けて、今後ますます重要となる。しかし、推力や姿勢変動を伴うロケット飛翔中の動的加速度環境や、比重差による液体駆動をそもそも期待できず、界面張力の影響が顕在化する地球周回軌道上の低重力環境では、自由表面流の挙動や沸騰を伴う伝熱特性が地上の場合と大きく異なり、貯蔵容器内の望ましい位置に液体を捕獲して温度や圧力を制御することや、流路内の二相流に適切な流量や熱交換を実現させることすら難しくなる。このため、地上での経験を頼りに設計された流体機器は、軌道上で想定した性能を発揮できず、計画通りに運用できない恐れがある。今後、軌道上で運用される流体機器の信頼性を向上させ、同時に開発コストと運用リスクを低減するには、その設計・計画段階から作動流体の熱流動特性を適切に予測する技術が求められる。

実際の課題として、極低温ロケットの上段推進系において、エンジンを停止した慣性飛行(弾道飛行)中に機体姿勢を変更する際、大規模なスロッシング(液面揺動)発生に伴う気液間の熱伝達と凝縮が促進される結果、タンク圧力の大幅低下が懸念されている。同じく、慣性飛行後のエンジン再着火に先立ち、推進系の配管や回転機械軸系を、極低温推進薬を冷媒として再冷却(予冷)する際、地上に比した流路圧損が変化し予冷に要する推進薬消費量の予測が難しいという課題がある。いずれの事象も、相変化を伴う熱交換過程が地上重力環境と飛行中の加速度環境で異なることに起因している。今後、性能面で有利な極低温ロケットの打上能力向上と軌道間輸送にも対応できる多用途化を実現するには、加圧システムまでを含めた推進薬全体消費量の節約が必須となる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、数週間を超える長期間運用が可能な極低温ロケットの実現に不可欠な極低温流体管理技術の確立へ向け、液体推進薬供給系の内部(タンク・供給配管・ターボポンプ)で、沸騰凝縮を伴う自由表面流を対象とし、地上と異なる様々な加速度環境における熱流動特性を、多角的に解明することを目指した。

## 3. 研究の方法

具体的には、(1)加振機を用いた、極低温スロッシング実験、(2)大型液体水素タンクを用いた、減圧沸騰特性取得実験、ならびに、(3)落下塔を用いた、加速度外乱を伴う低重力環境における液体挙動実験実施した。(4)同時に、独自の先進的な自由表面流数値解法を固体伝熱解法と連成させて改良し、工学的に有用な設計手法として提案する目標を掲げた。

## 4. 研究の成果

### 4.1 極低温スロッシング実験

極低温スロッシング試験は、本研究課題に先立つ報告者らの研究課題(基盤研究(B))から継続して実施しており、調査範囲を拡げるとともに、実験再現性を改善し、定量的評価に適した知見の蓄積を目指した。実験では、図 1 に示すように、真空断熱槽(クライオスタット)の内部に設置した小型透明の密閉容器に極低温液体(液体窒素)と常温気体を封入し、スロッシングと温度場が連成する流れ場を実現した。真空断熱槽を電動加振機に連結し、水平方向と鉛直方向に様々な非定常加速度を与えることで、液面変形が線型応答を呈する場合から、砕波を生じる強非線形応答を呈する場合まで、容器内部での熱交換と相変化に起因する圧力変動を計測できる。同時に、真空断熱槽の観察窓を通じて容器内部の液面挙動や液滴を高速度撮影した。

高荷重電動加振機は、申請者らの既往研究で製造したものを改修して加振能力を増強したうえで、密閉容器(ポリカーボネート製・直径 100 mm 程度の円筒形)を格納した観察窓付きの真空断熱槽(光学クライオスタット)と連結されている。実験装置各部の温度を監視することで、液面近傍に形成される飽和液層(液温成層)の厚さを制御できる実験手法を確立した。これにより、液相温度分布を色々に変えた非等温スロッシングの実験条件を創出できる。加振開始後は、観察窓を通じた液面挙動の高速度撮影と温度・圧力の同時計測が可能であり、容器内部の圧力が気体領域の内部エネルギー総和にほぼ比例する原理に基づき、計測された圧力変動の時系列データから、潜熱と顕熱を含めた気体側への入熱量を獲得できる。実験で印加された加振波形の一例を図 3 に示す。加速度振幅は、再使用型ロケットが姿勢を大きく変更する際の水平方向加速度を、フルード数の一致に基づく相似則に従い、実機寸法から模型寸法に変換したものである。

一連の実験では、密閉容器内で相変化を伴うスロッシングによる減圧現象を対象とした。急激な動的加速度を印加した場合の液面挙動と圧力変化に注目し、液温成層の厚さに注目し、図 4 に示すように、初期条件として飽和液層厚さを変化させた。

まず、容器内に(液位計、温度計、注液管を除いて)スロッシングを妨げる障害物を配置しないベアタンクの場合について、観察された液面挙動を図 5a に示す。また、ベアタンクを用いて飽和液層厚を変化(D1~D4)させた場合に得られた圧力変化を図 6a に示す。図 6a からは、加振開始後、スロッシングが発生しているものの液面形状が比較的滑らかな秒時には顕著な圧力降下は観察されない。その後、液面形状が乱れ、砕波に続く気相巻き込みが発生すると、急激な圧力降下が計測された。また、図 5a に示すように、気相部分に黒く見える霧の発生も観察された。圧力変化の履歴からは、飽和層が一定以上の厚みを持つ場合、圧力降下は抑制される。

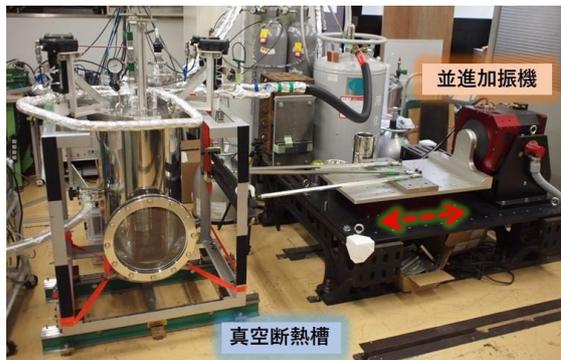


図1 光学クライオスタットと電動加振機

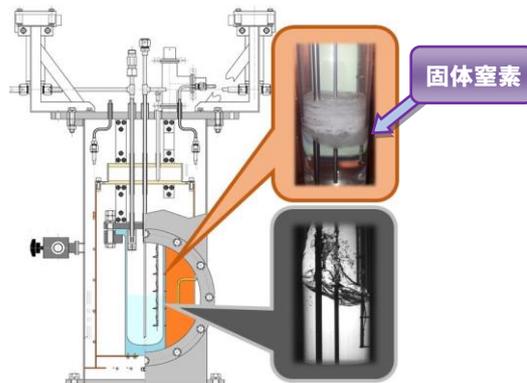


図2 真空断熱槽と可視化観察例

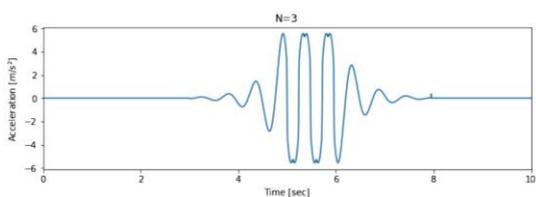


図3 印加加速度の例

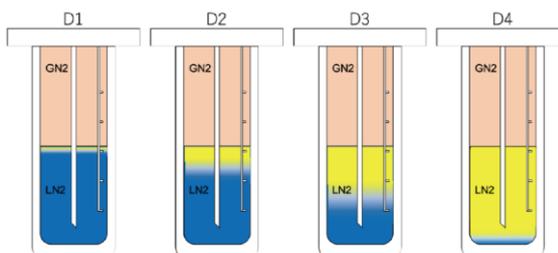


図4 初期液温分布の例：飽和液層厚を変化



図5a 可視化観察の例 (ベアタンク)

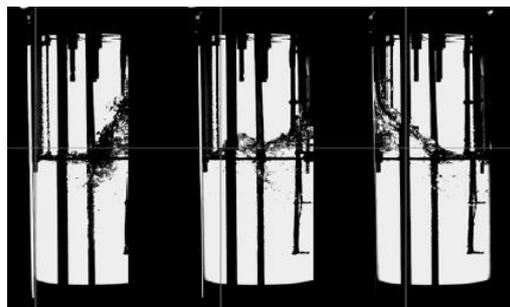


図5b 可視化観察の例 (バッフル付)

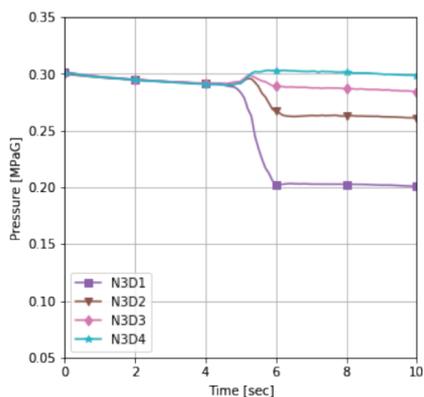


図6a 飽和液層厚と圧力降下 (ベアタンク)

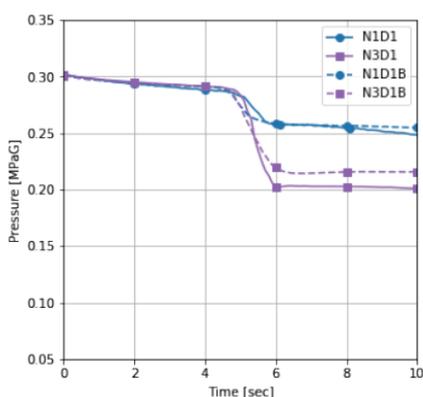


図6b 飽和液層厚と圧力降下 (バッフル付)

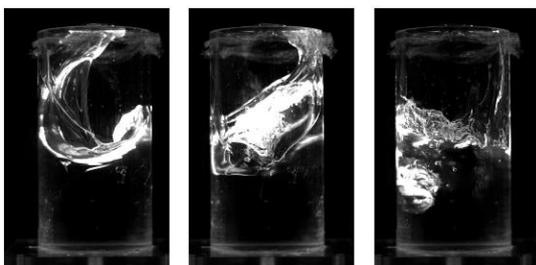


図7a 液面近傍の攪拌 (ベアタンク)

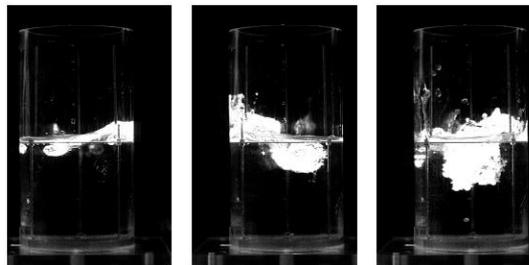


図7b 液面近傍の攪拌 (バッフル付)

続いて、容器内に障害物としてリング状バップルを追加配置した場合について、可視化結果と圧力履歴を図 5b と図 6b にそれぞれ示す。図 5a と図 5b を比較すると、バップル版によりスロッシングの発生は抑制されていることが見て取れる。他方、図 6b 中には、ベアタンク(実線)とバップル板付タンク(破線)の結果を比較して図示しているが、圧力降下は抑制されていない事がわかる。

これらの観測事実から、液温成層が薄い場合には、スロッシングに伴ってサブクール液相が容易に気相側へ露出し、気相の冷却と凝縮が促進された結果、顕著な圧力降下が発生する。液温成層が厚い場合には、サブクール液相は気相側に露出しにくく、気相の冷却も促進されにくいため、圧力降下が生じにくくなると説明できる。

実際、スロッシングやバップル板の存在による液面近傍の攪拌現象に注目し、水と蛍光染料を用いた可視化結果を、ベアタンクとバップル板付タンクの場合について、それぞれ図 7a と図 7b に示す。図 7a からは、砕波を伴う大振幅スロッシングによる成層破壊が明瞭に観察された。また、バップル板により、スロッシング振幅が抑制された場合でも、障害物の存在により誘起される渦による成層破壊が確認された。

これらの結果から、液体ロケット推進薬タンクの圧力制御を検討する際には、液面挙動だけでなく、液相内部の温度分布を把握することが極めて重要であることに加え、液面揺動を抑制するための減衰デバイスが、成層破壊に与える影響を考慮すべきであると示唆された。

#### 4.2 大型液体水素タンクの減圧沸騰

大型液体水素タンク減圧実験では、研究協力者として宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の支援を得て、図 8 に示す同機構能代ロケット実験に設置された容量 30 m<sup>3</sup> の液体水素タンクを活用し、実機ロケットに近い寸法規模のタンクで液体水素を対象とした減圧特性の取得試験を行った。報告者の既往研究により、内部の中心軸上の高さ方向に 16 点の温度計測点が設置されている。実験では、当該タンクを数週間に亘って 0.4Mpa 程度まで加圧維持し、液体水素の液面近傍に発達する飽和液層が薄い場合から、液相のほぼ全域が飽和液となる場合まで、様々な初期条件を実現した後、排気弁を開放し、排気流量とタンク内部の温度分布と圧力を同時計測した。減圧過程でサブクール液とその近傍の固体壁からは沸騰が生じないと予想され、結果として、初期液温分布に依存して減圧速度が異なることが確認された。

また、独自の数値解析手法に、計算格子より小寸法(サブグリッドスケール)の気泡生成・成長モデルと、格子寸法より大きな自由表面計算を接続することにより、実験で観察された突沸とみられる現象も含め、減圧沸騰現象を数値的計算により模擬できる見通しを得た。同時に、数値解析手法の相変化モデルに含まれる経験定数の設定など、今後の研究発展へ向けた課題を抽出した。



図 8 大型液体水素タンク(左)と解析(右)

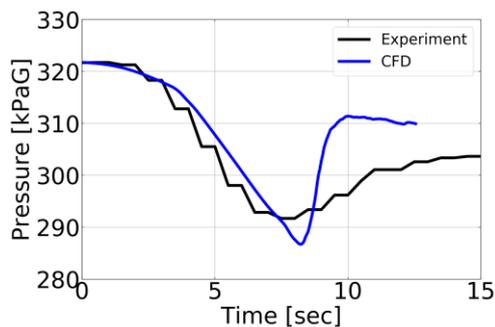


図 9 減圧開始直後の突沸現象

#### 4.3 落下塔実験

落下塔実験では、打上ロケットの段間分離や、小惑星探査機の着地時を想定し、低重力環境で且つ外乱加速度を受ける環境における、容器内液面挙動観察実験を実施した。

具体的には、図 10 に示す、(株)植松電気の微小重力落下塔を用い、 $10^{-3}G$  以下を約 2.5 秒間持続する微小重力環境を獲得した上で、図 11 に示す落下筐体に、図 12 に示すような、並進方向と回転方向の自由度を持つステージを搭載し、鉛直方向加速度がほぼ消失した環境で、回転に伴う遠心方向加速度を供試体に与えることができた。

実験では、遠心加速度と表面張力の比で表される無次元数であるボンド数をパラメーターとした。供試体としては、単純球形容器(ベアタンク)に加え、容器の赤道位置にリング形状の液体捕獲デバイスを追加装着した場合(バップル付)についても実験を行った。

一例として、図 13 に示す加速度を印加した場合の液面挙動を、ベアタンクとバップル付タンクの場合について、図 14a と図 14b に示す。ベアタンクの場合、重力の消失に伴って壁面の濡

れが進行して単一気泡が形成された後、加速度の印加に伴って容器中心軸に液柱が立ち上り、これが容器上方ドームに衝突する。一方、リングバブルを醸装すると、これが表面張力による液体捕獲デバイスとして働き、濡れ進行と液柱形成を共に抑制するのが観察された。

図 14a と図 14b には、本研究課題で構築された数値解析手法による解析結果も並べて図示した。上記の実験結果を検証のために参照して液面形状を比較した結果、実験と計算の間に良好な一致が認められた。



図 10 落下塔



図 11 落下管体

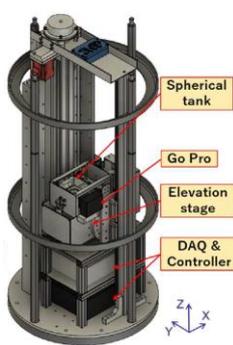


図 12 昇降・回転機構

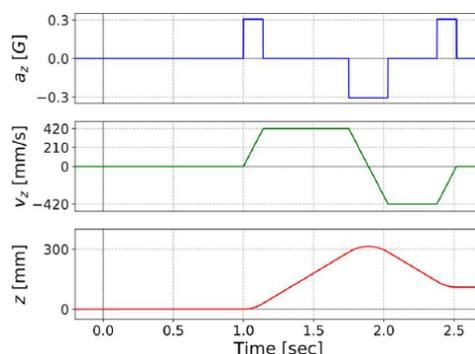


図 13 加速度・速度・変位

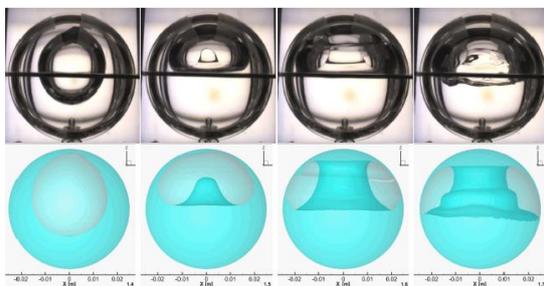


図 14a 液面挙動 実験/計算 (ベアタンク)

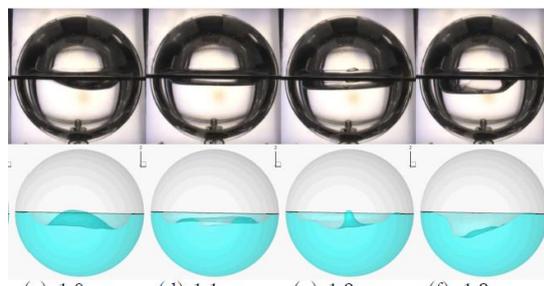


図 14b 液面挙動 実験/計算 (バブル付)

#### 4.4 自由表面流数値解法

本研究の学術的特色の一つは、独自の自由表面流数値解法(CIP-LSM)を分析と統合の両方に援用することであり、液面近傍における熱流動現象を分析するだけでなく、実験で観測される巨視的变化の解明と定量的予測手法の確立を目指す点である。

数値解析手法それ自体についても、複雑形状流路に対応した多領域計算が可能な、独自の自由表面流解析手法(CIP-LSM)の構築を勧めた。計算コードの並列化を施して解析の高速化を進めた。また、気泡生成から界面捕獲まで、計算格子を基準として大小スケールの相変化モデルを組み合わせ、比較的少ない格子点数で、相変化を含む自由表面流挙動を再現できる見通しを得た。

既に、図 8 や図 14 に示したように、気液二相熱流動現象を自由表面流として捉え、可視化観察を伴う実験に基き、マクロな熱伝達特性の予測に必要な現象の機序を把握するとともに、それに対応した界面相変化と壁沸騰モデルの高度化に繋げた。

本研究で改良された解析手法は、図 15 に示すブール沸騰や図 16 に示す管内沸騰現象などに適用が試みられ、対応する実験との間に良い一致を確認できた。

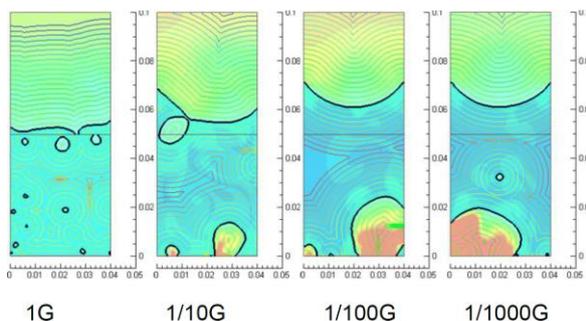
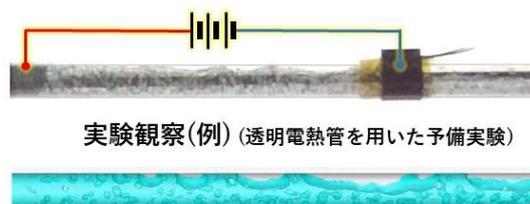


図 15 様々な重力環境での沸騰 計算 (2次元)



実験観察(例) (透明電熱管を用いた予備実験)



数値解析(例)

図 16 管内沸騰現象 実験(上)・計算(下)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kiyoshi Kinefuchi, Wataru Sarae, Yutaka Umemura, Takeshi Fujita, Koichi Okita, Hiroaki Kobayashi, Satoshi Nonaka, Takehiro Himeno and Tetsuya Sato	4. 巻 56
2. 論文標題 Investigation of cryogenic chilldown in a complex channel under low gravity using a sounding rocket	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 91-103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.A34222	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 Ryoji Imai, Osamu Kawanami, Yutaka Umemura, and Takehiro Himeno	4. 巻 502
2. 論文標題 Study on break of thermal stratification in container targeted to thermodynamic vent system for future spacecraft	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/502/1/012082	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 Chihiro INOUE, Yuta TAKEUCHI, Koji NOZAKI, Takehiro HIMENO, Toshinori WATANABE, Go FUJII, Yu DAIMON	4. 巻 62
2. 論文標題 Unified length scale of spray structure by unlike impinging jets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 213-218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.62.213	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 K. Tani, T. Himeno, Y. Sakuma, T. Watanabe, H. Kobayashi, T. Toge, S. Unno, S. Kamiya, O. Muragishi, K. Kanbe	4. 巻 184
2. 論文標題 Pressure recovery during pressure reduction experiment with large-scale liquid hydrogen tank	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2020.12.184	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 Kinefuchi, K., Kawashima, H., Sugimori, D., Umemura, Y., Okita, K., Kobayashi, H., Himeno, T.	4. 巻 112
2. 論文標題 Experimental analysis of thermal behavior in cryogenic propellant tank with different pressurants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 103196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cryogenics.2020.103196	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Takehiro Himeno
2. 発表標題 Effect of Thermal Stratification Thickness on Pressure Drop Enhanced by Sloshing in a Closed Vessel
3. 学会等名 2019 Space Cryogenics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Takeuchi
2. 発表標題 Experimental and Numerical Investigation on Boiling Flow of a Refrigerant FC72 in a Pipe,
3. 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 O. Kartuzova
2. 発表標題 Slosh of Non-Volatile Liquid: Experiment & JAXA and NASA CFD Model Validation
3. 学会等名 International symposium on space technology and science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuma Tani, Takehiro Himeno, Yasunori Sakuma, Toshinori Watanabe, Hiroaki Kobayashi, Terukuni Toge, Hiroaki Kagaya, Shoji Kamiya, Osamu Muragishi
2. 発表標題 Experimental Research on the Characteristic of Pressure Drop Influenced by the Temperature Distribution in Liquid Hydrogen Storage Vessel
3. 学会等名 Asian Congress on Gas Turbines (ACGT) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehiro Himeno, Akifumi Ohashi, Keitaro Anii, Daichi Haba, Yasunori Sakuma, Toshinori Watanabe, Chihiro Inoue, Yutaka Umemura, Hideyo Negishi, Satoshi Nonaka
2. 発表標題 Investigation on Phase Change and Pressure Drop Enhanced by Violent Sloshing of Cryogenic Fluid
3. 学会等名 The 54th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 姫野武洋, 大橋昭文, 兄井啓太郎, 幅大地, 佐久間康典, 渡辺紀徳, 梅村悠
2. 発表標題 密閉容器内で相変化を伴うスロッシングによる減圧現象
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehiro Himeno, Akifumi Ohashi, Yutaro Furuichi, Keitaro Anii, Daichi Haba, Yasunori Sakuma, Toshinori Watanabe, Yutaka Umemura, Hideyo Negishi, Kiyoshi Kinefuchi, Satoshi Nonaka
2. 発表標題 Effect of Thermal Stratification Thickness on Pressure Drop Enhanced by Sloshing in a Closed Vessel
3. 学会等名 Space Propulsion 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kartuzova, O., Kassemi, M., Umemura, Y., Kinefuchi, K., Himeno, T.
2. 発表標題 AIAA 2020-3794, AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum CFD modeling of phase change and pressure drop during violent sloshing of cryogenic fluid in a small-scale tank
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keitaro Anii, Takehiro Himeno, Mitsuhsa Baba, Toshinori Watanabe, Masatsugu Otsuki, Yutaka Umemura
2. 発表標題 Research on Propellant SLOSH Dynamics of a Martian Moon Lander
3. 学会等名 Space Propulsion 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇宙で液体を操る (解説) <a href="https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/topics/setnws_201906281249459745867077.html">https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/topics/setnws_201906281249459745867077.html</a> 様々な加速度環境における自由表面流の数値解析 (解説) <a href="https://www.jsme-fed.org/papertech/2013_11/001.html">https://www.jsme-fed.org/papertech/2013_11/001.html</a> 自由表面流関連研究紹介 <a href="http://www.jsme-fed.org/papertech/2013_11/001.html">http://www.jsme-fed.org/papertech/2013_11/001.html</a>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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			
ドイツ	Bremen University	ZARM		
米国	NASA	Glenn Research Center		