

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686095

研究課題名(和文) 極低温推進系の多用途化に関わる気液相変化と熱流動現象の解明および予測技術の確立

研究課題名(英文) Investigation on two-phase flows for the Innovation of Cryogenic Upper Stage

研究代表者

姫野 武洋 (Himeno, Takehiro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60376506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙輸送システムの極低温流体管理技術の確立へ向け、宇宙機推進薬タンク内の自由表面流を対象とし、様々な加速度条件下の熱流動特性を、加振器を用いた地上実験と先進的な解法に基づく数値解析の両面から詳しく調べた。実験では、動的加速度環境を再現性良く実現し、圧力計測に基づく界面熱伝達の計測手法を確立した。常温液体に加え、液体窒素を用いたスロッシング試験を実施し、極低温条件に特徴的な凝縮・沸騰現象を確認した他、液面挙動と気液熱交換の相関を整理した。一方、液体ロケットの推進機関を設計するために不可欠な基盤技術として、相変化と実在流体効果を適切に考慮した独自の自由表面流数値解析手法を更に発展させて提案した。

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, the pressure drop induced by heat transfer and the dynamic motion of liquid in sub-scale vessels were experimentally observed and numerically investigated. The correlation between the pressure drop and liquid motion was confirmed in the experiment. The mechanisms enhancing heat transfer were discussed based on the computation. 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：工学

キーワード：推進 エンジン 液体ロケット 極低温 相変化 自由表面流 表面張力 CFD

1. 研究開始当初の背景

宇宙開発利用の進展に伴い、宇宙機の推進機関や軌道上構造物の熱管理機器など、地上とは異なる加速度環境で、極低温の液体を利用する場面が増えつつある。これらの流体機器を構成する液体貯蔵容器や蒸発・凝縮熱交換器の内部は気液共存系となるが、推力や姿勢変動を伴う宇宙機内部の動的な加速度環境や、比重差による液体駆動を期待できない軌道上の低重力環境では、液体を望ましい位置に保持し、思い通りに搬送するという、流体管理(fluid management)が非常に難しくなる。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ためには、その設計・計画段階から作動流体の挙動を適切に予測する技術が求められる。特に、貯蔵容器や流路内部の自由表面流を考える場合、液体の重心移動などの動力学特性に注目するだけでなく、伝熱や相変化までも考慮し、共存する気体との熱交換に起因する熱流動特性を把握することが重要である。

軌道上での流体搬送技術と熱管理技術を確立するためには、低重力環境における自由表面流の流動と伝熱の特性を適切に評価および予測できる知見が求められる。しかし、自然現象に潜む支配法則を分析するだけでなく、それらの知見を総合し、熱流動現象を制御して人工物の設計に反映するという工学的立場からは、残念ながら、関連する知見の蓄積は十分でない。実際、低重力環境において種々の熱流動現象を観察する実験は精力的に実施されているが、大気圏内で落下塔や航空機を用いて人為的に低重力環境を創出できる機会は設備と費用の両面から限られており、機会に恵まれたとしても獲得できる低重力環境の質と持続時間にかかなりの制約を受ける。このことが軌道上で運用される機器の設計段階における試運転を難しくしており、勢い設計は保守的にならざるを得ず、宇宙開発利用を展開していく技術の革新と低コスト化を阻む一要因となっている。

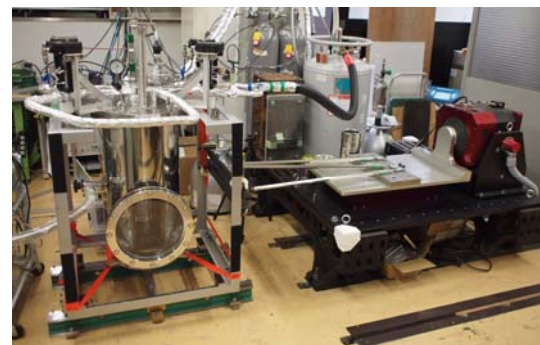
一方、理論的予測と実験的再現が困難な現象への第三のアプローチとして、系全体を有限個の要素に分割し、要素の内部状態と相互関係を規律した支配方程式を数値的に解くシミュレーションの援用が期待される。近年著しい計算機性能の向上とあいまって、かつては大規模と冠された数値解析は様々な分野の研究開発に従事する研究者や設計部署の個人レベルでも可能となり、計算力学という横断的な学問領域が形成されている。実際、单相流の計算流体力学(CFD)は、理論と実験を補完する手段として、様々な流体機械の設計に応用されている。自由表面流の分野でも、経験的な構成方程式やモデルをできるだけ排除した数値解析手法の構築が試みられており、大変形しながら移動する気液界面を精度良く追跡できる技術が確立されつつある。

2. 研究の目的

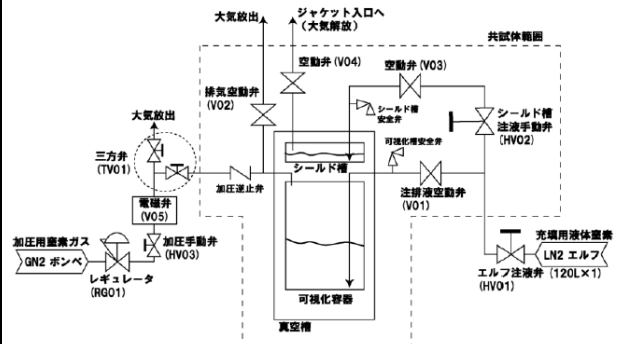
本研究課題では、数時間を超える長秒時運用が可能な極低温ロケット(cryogenic upper stage)の実現に不可欠な極低温流体管理(cryogenic fluid management)技術の確立へ向け、推進薬タンクおよび供給配管内部で、相変化を伴う自由表面流を対象とし、地上と異なる様々な加速度環境における熱流動特性を、加振機を用いた極低温スロッシング実験、沸騰二相流実験、ならびに、先進的な解法に基づく数値解析によって多角的に解明することを目的とした。同時に、基幹ロケット上段推進系の多用途化や、将来の軌道間輸送システムを設計するための基盤技術として、相変化と実在流体効果を適切に考慮した独自の自由表面流数値解析手法を更に発展させ、提案することを目指した。

3. 研究の方法

極低温スロッシング実験では、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。図1に示すように、真空断熱槽を電動加振機に搭載し、水平方向に様々な非常加加速度を与えることで、液面変形が線型的応答を呈する微小な場合から、碎波を生じる大規模な場合まで、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する。同時に、真空断熱槽の観察窓を通じて容器内



(a) 真空断熱槽(左)と 電動加振機(右)



(b) 系統図

図1 スロッシング試験装置

部の液面挙動や液滴を高速度撮影し、加速度に駆動された自由表面流の動学的挙動と圧力変動の相関を整理するとともに、その発生機序について考察を加えた。

沸騰二相流実験では、宇宙航空研究開発機構の協力を得て、液体ロケット上段推進系の一部を模擬した複雑形状を有する流路を製作した。初期状態で常温の流路に、少流量(低ウェーバー数)の液体窒素による沸騰流を実現し、流動様式が、気体単相から気液二相を経て液体単相へ遷移する現象を可視化観察した。同時に、流路固体壁の温度を計測し、流動様式と関連づけて、伝熱特性の変化の説明を試みた。

数値解析に関しては、様々な加速度条件に対応できる申請者ら独自の自由表面流数値解法を、極低温液体の状態方程式と相変化を適切に考慮するように高度化し、容器・管路壁内部の熱伝導との連成解析に対応できるように改良したうえで、様々な熱流動現象の模擬を行った。数値解析結果と実験結果を統合する過程を通じ、気液界面での適切な熱伝達モデルおよび相変化モデルを考案した。

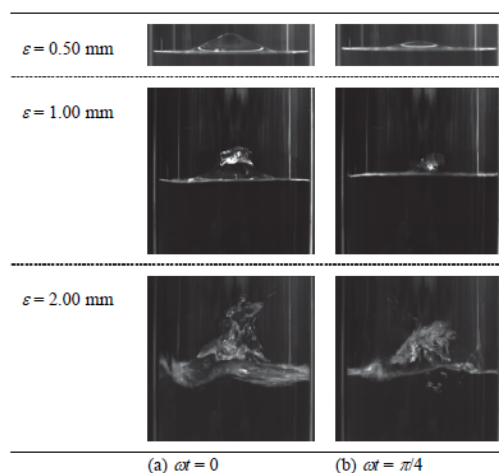
4. 研究成果

極低温スロッシング実験に先立つ予備実験として、鉛直方向加振を印加できる小型電動アクチュエータを構成要素とする加振装置を導入し、加振に伴って円筒容器内に誘起される液面挙動の観察と気液界面を通じた熱伝達促進効果の計測実験を実施した。気体より低い温度を与えた不揮発性液体(シリコンオイル)を用いることで、スロッシングと温度場が連成する流れ場を創出し、液面挙動の高速度撮影と温度・圧力の同時計測を行った。実験では、図2に示すように、ベッセル関数で記述される液面の固有振動モードを再現性良く実現する手法を確立した。さらに振幅を大きくし、図3(a)のように、砕波を伴う場合も含め、容器内圧力が、気体領域の内部エネルギー総和にほぼ比例する値を呈する原理に基づき、計測された圧力変動の時系列データから、気体側への入熱量を定量的に評価できた。その結果、図3(b)のように、線形応答的で穏やかな液面変形の場合に比べ、飛沫や砕波の発生を伴う非線形応答的で激しい揺動の場合に、気体側への熱入力が桁違いに大きくなることが確認された。

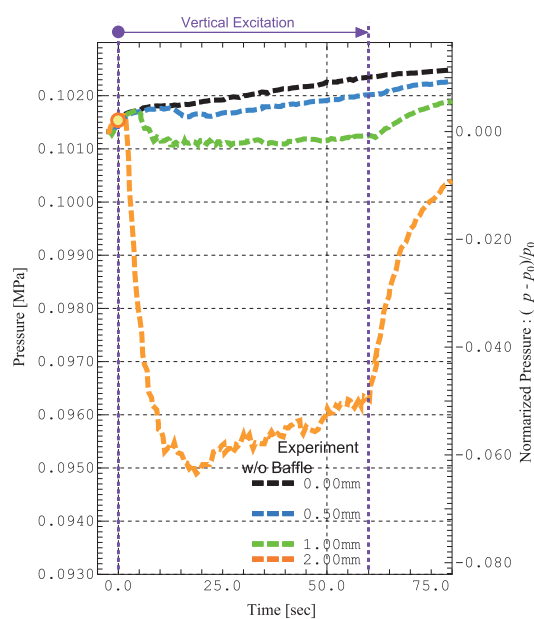
続いて、液体窒素を用いた極低温スロッシング実験を実施した。高荷重電動アクチュエータと密閉容器を格納した真空断熱槽を供し、密閉容器内の気液間に比較的大きな温度差を課した条件で実験を行った。一般に、密閉容器内に純物質かつ同種の液体と気体を共存させると、熱力学的に非平衡一成分系となるタンクの圧力制御が難しくなることが知られている。報告者らの既往研究では、液体窒素と気体窒素を共存させた真空断熱槽を激しく加振すると、液相に冷やされる気相側で凝縮が発生し、容器内部の圧力が急降下



図2 縦加振による様々な液面変形モード (可視化のため牛乳を用いた場合)



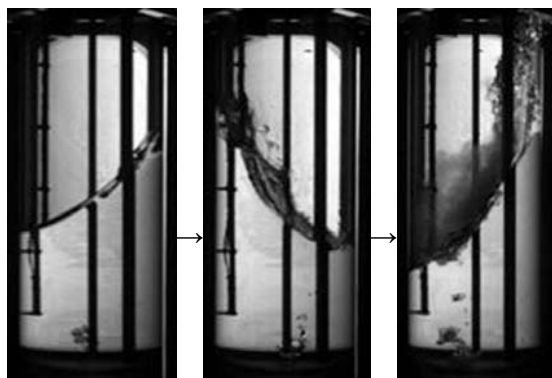
(a) 液面の線形応答(上)と非線形応答(下)



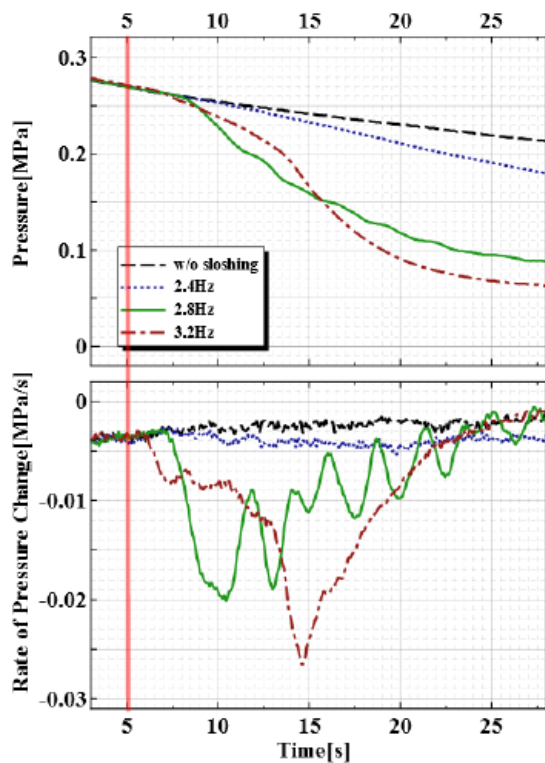
(b) 液面の線形応答(上)と非線形応答(下)

図3 非等温不揮発スロッシング

する現象が計測されている。本研究課題では、電動加振機を用いて加振振幅や周波数を様々に変えた場合について、横方向(=(1,1)モード)スロッシングに伴う界面熱伝達と相変化の促進効果を定量的に把握した。その結果、図4に示すように、加振より長周期で反復される砕波と同期した圧力低下率の変動計測に成功するなど、自由表面流の動学的挙動と圧力変動の相関を確認することができた。また、気体ヘリウムによる異種加圧の場合には、ヘリウム分圧の存在により大幅な圧力低下が起こらないことも確認された。一連の実験を通じて、数値解析の検証用にも適した、再現性のある実験データを取得できた。



(a) 砕波に伴う液面での凝縮と気相断熱膨張



(b) 様々な加振周波数に対する
圧力低下(上)と瞬時圧力低下率(下)

図4 極低温スロッシング
(同種加圧 = 液体窒素-気体窒素)

沸騰二相流実験では、図5に示すような、透明なポリカーボネート樹脂製で、絞り部・分岐部・行止部を持つ流路を製作して供試体とし、常温の供試体が、少流量の極低温窒素により徐々に冷却される過程を観察した。この間、供試体流路内部の流動様式は、気体単相から、沸騰を伴う気液二相を経て、液体単相へ遷移する様子が確認された。例えば、図6のように、供試体の下流側を鉛直上向きとした場合、絞り部を通過する液体が重力に逆らって噴射されるので、なかなか行止部の壁に届かず、分岐管の高さ位置に液面が形成された結果、行止部付近には液体窒素が行渡らず、位置Bの温度なかなか下がらないことが確認できた。重力の方向を様々に変化させた一連の実験より、複雑形状流路における少流量の沸騰対流現象を理解し予測するためには、現象を非定常な自由表面流として捉え、液面挙動と熱伝達特性を関連付ける視点が重要だと認識された。

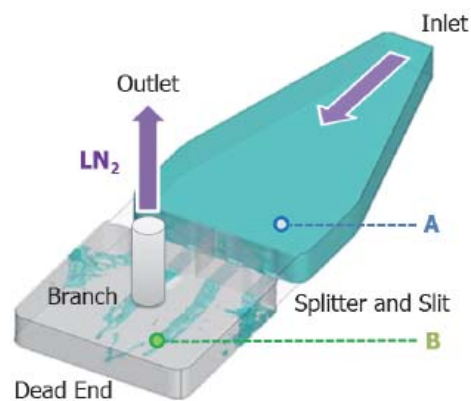


図5 沸騰二相流観察流路形状

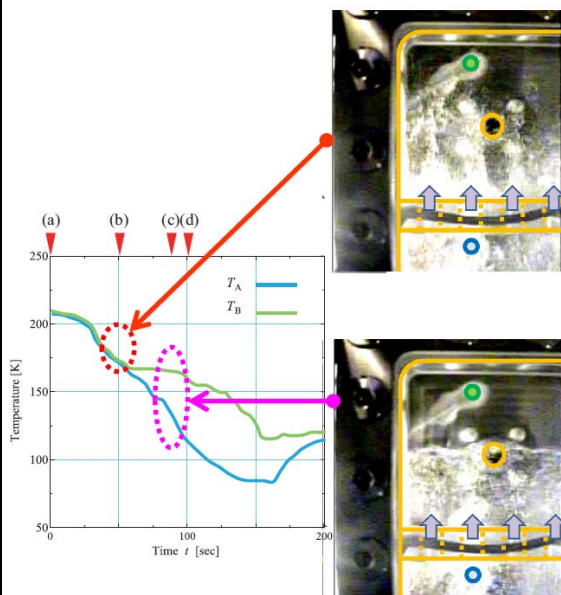


図6 液体窒素の沸騰対流現象像
(壁温履歴(左)と瞬時可視化画像(右))

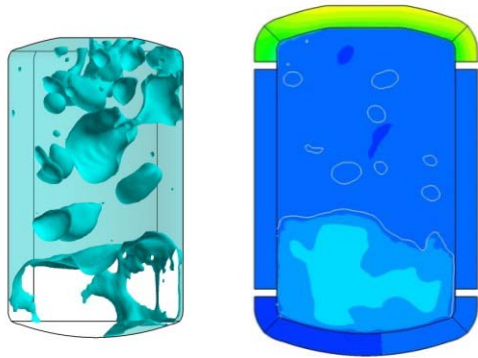


図7 固体伝熱と連成した沸騰二相流解析
(気液界面(左)と温度分布(右))

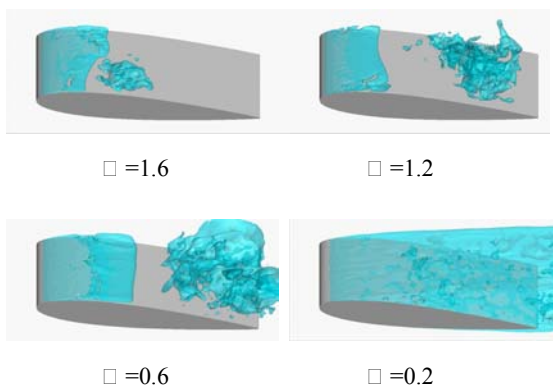


図8 NACA0015 翼周りのキャビテーション
(迎角 8 deg :自由表面流解析、相変化考慮)

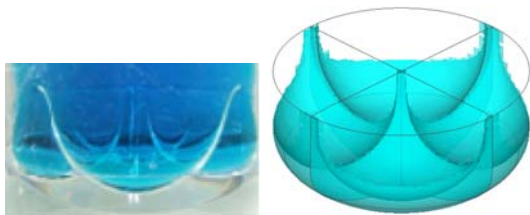


図9 濡れ性を利用した液体捕獲
(実験(左)と数値流解析(右))

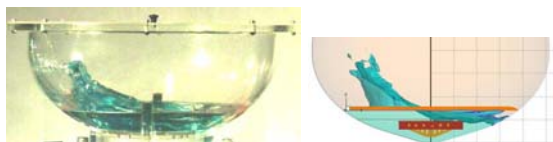


図10 基幹ロケット上段推進系タンク内
液面挙動解析への適用例
(実験(左)と数値流解析(右))

数値解析については、報告者らが開発している自由表面流解法(CIP-LSM)に対し、気液界面で、顕熱と潜熱の熱収支を考慮しつつ、蒸発・凝縮を考慮できる相変化モデルを考案のうえ実装した。本研究課題においては、図7に示すように、固体壁面での気泡初生と初期成長過程をサブグリッドモデルとして表現し、固体壁内部の伝熱解析と連成することで、数値解析の定量的妥当性を大きく損なうことなく、ロケットエンジン配管やタンクの寸法に相当する比較的大きな計算領域を対象とした計算を、効率的に実行できる可能性を示した。

熱収支を考慮する相変化モデルは、減圧沸騰現象の数値解析に対しても、大きな変更を施さずに適用できる可能性がある。実際、単独翼周りに発生するキャビテーション現象の模擬を試みたところ、図8に示すように、広範なキャビテーション数(□)の条件に対し、対応する実験とよく一致する流れ場を再現することができた。

他方、微小重力環境で濡れ性と界面張力によって決定される液面変形についても、液体の挙動を詳細に観察するため、比重差が殆ど変わらない非混和性二液体を用い、低ボンド(Bo)数環境を模擬した報告者らの実験を参照し、数値解析を試みた。図9に示す結果からは、界面張力と濡れ性を利用して捕獲される流体の液面形状を、計算でも良好に再現可能であることが確認された。今後、人工衛星ならびに上段推進系に採用される推進薬捕獲デバイスの形状検討を進める計画である。

研究成果の社会への展開について、本研究を通じて開発された自由表面流解析手法に基づく数値解析プログラム(CIP-LSM)が、宇宙航空研究開発機構および複数の宇宙機製造メーカーに供与され、図10に例を示すように、我が国の基幹ロケット上段推進系高度化に関わる実機推進薬タンク内の液面挙動予測に活用されている。

今後、様々な加速度環境と二相流動様式における対流沸騰熱伝達現象を予測できるよう改良を進めるためには、本研究を発展させた形での実験的および数値的取組が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 杵淵紀世志, 加納康仁, 齊藤靖博, 姫野武洋, 沖田耕一, “微小重力下での液体推進薬保持技術開発のための地上模擬実験”, 日本航空宇宙学会航空宇宙技術, Vol.12, (2013), pp.73-77.
- ② 姫野 武洋 “ロケット・宇宙機における推進薬管理”, 日本混相流学会誌, Vol.32, No.3 (2013), pp.79-85.
- ③ 姫野 武洋 “液体ロケットの推進薬挙動予測”, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.27, No.4 (2014), pp.385-392.
- ④ Ishikawa, K., Umemura, Y., Himeno, T.,

- Watanabe, T., Tani, N., Terashima, H. and Koshi, M., Numerical Analysis on Unsteady Cavitation by Direct Interface Tracking Approach, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol.12 (2014) pp.63-69.
- ⑤ 姫野 武洋, 熊谷 剛彦, “減圧環境における上昇気泡の数値解析”, 日本鉄鋼協会論文集「鉄と鋼」, Vol.101, No.2 (2015), pp.109-116.
- [学会発表] (計 33 件)
- ① T. Himeno, Y. Umemura, T. Watanabe, S.Nonaka, D. Sugimori, K. Kinefuchi and K. Okita, “Heat Exchange and Pressure Drop in a sloshed Tank”, Space Propulsion 2012, Bordeaux, French, 7-10 May 2012.
- ② T. Himeno, K.Ishikawa, Y.Umemura, C. Inoue, T. Watanabe, S.Nonaka, Y. Naruo, Y.Inatani, K. Kinefuchi, D. Sugimori and K. Okita, “Investigation on Pressure Change Induced by Cryogenic Sloshing”, AIAA 2012-4295, The 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Atlanta, 29 July-1 August 2012.
- ③ K.Ishikawa, Y.Umemura, T. Himeno, T. Watanabe, N. Tani, H. Terashima and M. Koshi, “Numerical Analysis on Unsteady Cavitation by Direct Interface Tracking Approach”, ISTS-2013-a-42, Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, June 2-9, 2013.
- ④ G. Imai, K. Ishikawa, H. Kawato, S. Nonaka, T. Ito and T. Himeno “Development and Testing of Propulsion Systems for Reusable Sounding Rocket”, ISTS-2013-m-13, Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, June 2-9, 2013.
- ⑤ T. Himeno, D. Haba, K.Ishikawa, Y. Umemura, C. Inoue, S. Uzawa, T. Watanabe and S.Nonaka, “Experimental Investigation on Heat Exchange and Pressure Drop Enhanced by Vertical Sloshing”, AIAA 2013-3906, The 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Jose, 14-17 July 2013.
- ⑥ Y. Umemura, T. Himeno and T. Watanabe, “Numerical Analysis on Boiling Flow in Surface Tension Dominant Environment”, AIAA 2013-3843, The 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Jose, 14-17 July 2013.
- ⑦ T.Furumoto, T.Himeno, C.Inoue, S.Uzawa, T.Watanabe and K.Fujimoto, “Numerical Simulation of Water-entry of Space Capsule and Evaluation of its Safety”, AJCPP2014-072, Asian Joint Conference on

- Propulsion and Power 2014, 5-8 March 2014. Jeju, Korea. CD-ROM
- ⑧ T.Himeno, D.Haba, S.Uzawa, T.Watanabe, S.Nonaka, D.Sugimori, Y.Umemura, K.Kinefuchi, “Heat Exchange and Pressure Drop Enhanced by Viorient Sloshing”, Space Propulsion 2014, Cologne, Germany, 19-22 May 2014.
- ⑨ Y. Kurishita, S. Noritake, K. Matsuyama, K. Masuda, M. Miyanaga, T. Himeno, S. Takata, HTV Numerical Simulation Model of the Helium Solubility in the Propellant”, AIAA 2014-3567, The 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cleveland, 28-30 July 2014.
- ⑩ 梅村 悠, 姫野 武洋, 根岸 秀世, 杵淵 紀世志, 大平 勝秀, 井上 智博, 渡辺 紀徳, “宇宙輸送系に関わる自由表面流の数値解析”, 第28回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2014年12月9-11日, 講演論文集(CD-ROM) No. F02-4
- ⑪ 更江 涉, 杵淵 紀世志, 小林 弘明, 梅村 悠, 藤本 圭一郎, 藪崎 大輔, 杉森 大造, 姫野 武洋, 野中 聡, 藤田 猛, 佐藤 哲也, “観測ロケット実験による極低温沸騰二相流観察実験”, 日本航空宇宙学会第51回航空原動機・宇宙推進講演会, 富山, 2015年3月9-10日, 講演論文集(CD-ROM), No. 1B14
- ⑫ 堤 圭之介, 石川 佳太郎, 川戸 博史, 野中 聡, 姫野 武洋, “再使用観測ロケット開発に向けた推進系技術実証試験”, 日本航空宇宙学会第51回航空原動機・宇宙推進講演会, 富山, 2015年3月9-10日, 講演論文集(CD-ROM)
- ⑬ 武田 直哉, 姫野 武洋, 渡辺 紀徳, 梅村 悠, “気液界面の直接捕獲による極低温流体中の翼型に発生するキャビテーションの数値解析”, 日本航空宇宙学会第51回航空原動機・宇宙推進講演会, 富山, 2015年3月9-10日, 講演論文集(CD-ROM)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

- ホームページ

http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/jetlab/themes/two_phase.html

http://www.jsme-fed.org/papertech/2013_11/001.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

姫野 武洋 (HIMENO TAKEHIRO)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号 : 60376506