

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009 年～2011 年

課題番号：21686080

研究課題名（和文） 宇宙機の長秒時航行へ向けた極低温推進薬の熱流動挙動解明とその数値予測技術の構築

研究課題名（英文） Experimental and Numerical Research on Heat Transfer and Phase Change in Propellant Tanks of Space Vehicles

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、宇宙輸送システムにおける極低温流体管理技術の確立へ向けて、宇宙機の推進薬タンク内部の自由表面流を対象とし、様々な加速度条件下における熱流動特性を、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、動的加速度環境ならびに低重力環境の実現方法と熱流動特性の計測手法を確立し、常温液体だけでなく、液体窒素と液体水素を用いた極低温スロッシング試験を実施した。その結果、大きな気液温度比が課される極低温条件に特徴的な凝縮・沸騰現象を確認した他、可視化観察を通じて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.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2010 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	20,900,000	6,270,000	27,170,000

研究分野：

工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：

推進・エンジン・液体ロケット・極低温・相変化・計算力学

1. 研究開始当初の背景

宇宙開発利用の進展に伴い、宇宙輸送システム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・凝縮器の内部は、気液両相の共存系となるが、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。

2. 研究の目的

このような課題認識から、本研究では、地上とは異なる様々な加速度条件下での自由表面流を対象とした。加速度と比重差に駆動されるスロッシング現象については、砕波を含む液面挙動が界面熱伝達に及ぼす影響について、実験的手法と数値解析の両方を用いて考察を行った。また、微小重力環境で、界面張力と濡れ性に駆動される流動現象についても、液面と接触線の非定常変位を観察し、対応する数値解析での再現を試みた。以上のように、計算と実験の相関を確認した後、液体ロケットの上昇飛行および慣性飛行に相当する加速度条件を課し、実機スケールの極低温推進薬タンクにおける液体挙動の数値的模擬を試み、各種の飛行シーケンスについて極低温流体管理の見地から評価を行った。

3. 研究の方法

実験では、加速度と比重差に駆動されるスロッシング現象について、真空断熱を施した透明な小型密閉容器に常温または極低温の液体を封入し、図 1(a)および(b)に示すような装置を製作し、液体揺動と温度場が連成する流れ場を実現した。電動加振器に搭載した容器に、様々な大きさの非定常加速度を与え、液体揺動が線型的応答を呈する微小な場合から、砕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。並行して、内部の液面変化を高度撮影により観察し、加速度に駆動された

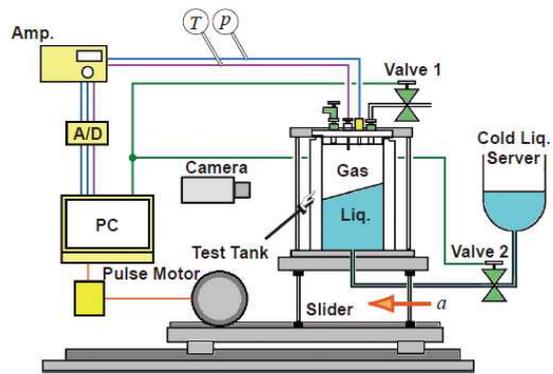


図 1(a): スロッシング試験装置
(常温液体試験用の屋内実験装置 : 模式図)

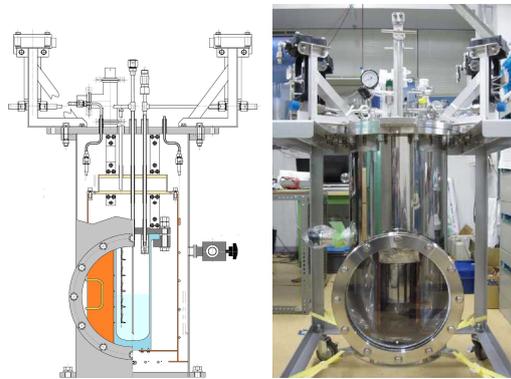


図 1(b): スロッシング試験装置
(極低温液体試験用の野外実験装置)

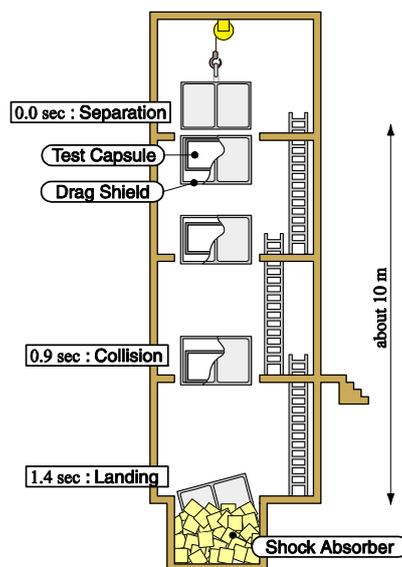


図 2: 落下塔試験装置(模式図)

自由表面流の動力学挙動と圧力変動の相関を整理するとともに、その発生機序を伝熱

学的に説明することを試みた。

加えて、界面張力と濡れ性に駆動される流れについて、図2に示すような落下塔を用いて実現される単秒時の微小重力環境において、液面変形と接触線変位を詳細に観察するとともに、相似則に基づいて現象を整理した。

他方、研究代表者らは、様々な加速度条件に対応した独自の自由表面流数値解法を構築しており、主として動力学観点から宇宙機における液体揺動の予測に取り組んできた。本研究では、この数値解法を高度化し、気液両相の状態方程式を考慮したうえで温度場が連成する実験の模擬を行う。数値解析結果と実験結果とを統合する過程を通じて、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

実験では、高精度の位置決めが可能な電動スライダを構成要素とする加振器を用い、透明壁を有する断熱密閉容器を製作して加振実験に供した。供試液体として、相変化の影響を排除するために不揮発性の常温シリコン油を用い、断熱膨張を利用して容器内に気液間温度差を生じさせたうえで、液体揺動(スロッシング)と温度場が連成する流れ場を創出した。容器内部の圧力が、密閉された気体の内部エネルギー総和に比例することを利用し、熱交換に起因する圧力変動に関しても再現性のあるデータを取得し、熱入力を定量的に評価できた。初期条件と境界条件が比較的明確に課された系を実験室で実現することで、数値解析の検証用に適する実験データを取得できた。並行して、高解像度の高速カメラを用いた高速撮影を行うとともに、液体揺動の振幅や砕波発生の有無を観察した。加速度振幅、加振周波数、気液温度差を色々に変えた実験を通じ、液体揺動の規模と圧力変動の相関を定量的に考察した。その結果、図3(a)に示すように、線形応答的で穏やかな液体揺動の場合に比べ、飛沫や砕波の発生を伴う非線形応答的で激しい液体揺動の場合に、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。加えて、液面観察結果と圧力変化履歴の照合により、飛沫の発生に加えて、液体揺動が容器壁を濡らすことに伴う液膜の存在が、気体側への熱入りに大きく影響していることが示唆された。

さらに本研究では、宇宙航空研究開発機構の協力を得て、供試液体として極低温の液体窒素を用いた野外実験を実施した。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。実際、液体窒素と気体窒素を共存させた密閉容器(クライオスタット)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する現象が計測されるとともに、観察窓を通じた高速カメラ撮影により、気相側の凝縮現象を観察することに世界で初めて成功した。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降下が起こらないことも確認された。

今後、気相側の温度をパラメータとして、液体揺動の規模と圧力変動の相関を定量的に整理するとともに、液体揺動を減衰させる邪魔板を容器内に装備した場合や、界面熱伝達を強制遮断する浮体を導入した場合について試験を行い、各種デバイスがタンク内熱環境に与える影響に関する知見を獲得するという研究指針が得られた。

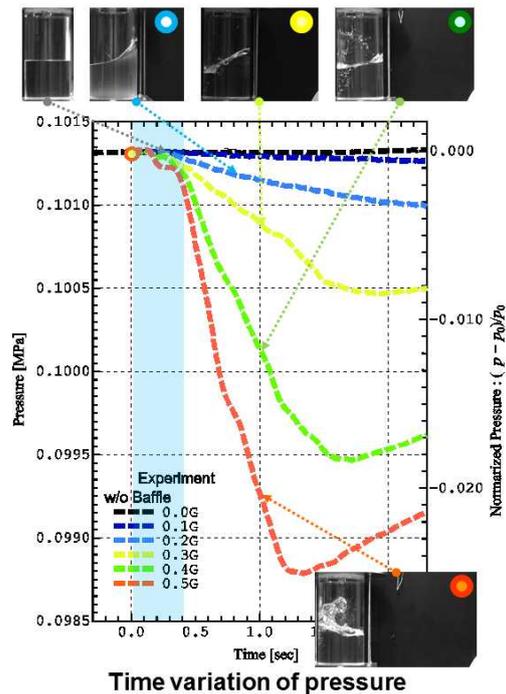


図3(a): スロッシングによる気液熱交換促進 (シリコン油 = 相変化なし)

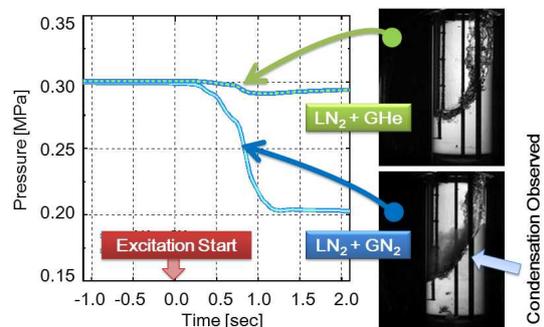


図 3(b) : スロッシングによる気液熱交換促進
(液体窒素 = 相変化あり)

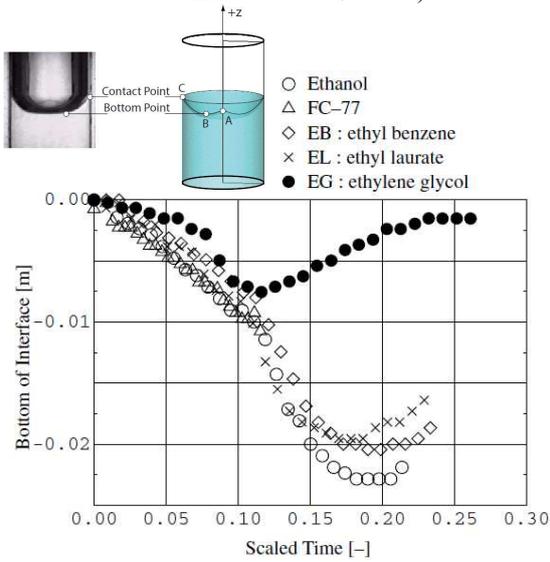


図 4 : 濡れ性に駆動される接触線変位履歴
(界面張力と接触角で記述される相似性)

他方、微小重力環境で濡れ性に駆動される液体の挙動を詳細に観察するため、物性の異なる様々な液体を落下塔試験に供した。その結果から、図 4 に示すように、液面変形が時間方向を含めて、界面張力(ウェーバー数)と接触角により記述される相似則によって、よく整理できることを確認した。

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)を用い、まずは、不揮発性の供試液体を用いた加振実験に対応する計算を行った。実験データとの比較を通じ、液面における適切な熱伝達モデルの検討と、固体壁面上の薄い液膜を再現できるだけの格子解像度の検討を行ったうえで、加振実験の数値的模擬を試みた。その結果、図 5 に示すように、小さな計算格子を用いた詳細計算により、固体壁面上の薄い液膜が、液体揺動と連成する熱伝達促進に大きく寄与していることが示唆されるとともに、液体揺動に伴う気液間熱伝達促進と圧力変動をよく再現することができた。

続いて、落下塔実験で観察された液面変形の再現を確認したうえで、様々な加速度環境における沸騰現象の数値的模擬を目指した相変化モデルの構築に取り組んだ。まず、界面張力が支配的となる条件における沸騰二相流を分析するためには、流動場を非定常な自由表面流として捉えることが重要との認識に立ち、二相流体の支配方程式を変形し、相変化に伴う体積湧出と潜熱の項を明らかにした。続いて、支配方程式の離散化にあたっては、気液界面の合体分裂を容易に扱える

界面捕獲法を採用したうえで、各計算格子点の中間(スタッガード)位置に体積湧出と潜

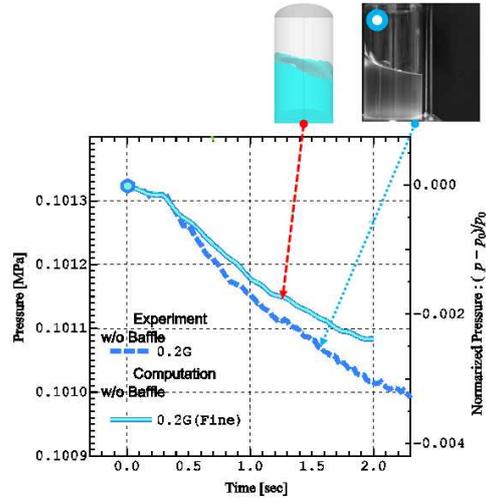


図 5 : スロッシングによる気液熱交換促進
(計算・実験比較 : シリコン油 = 相変化なし)

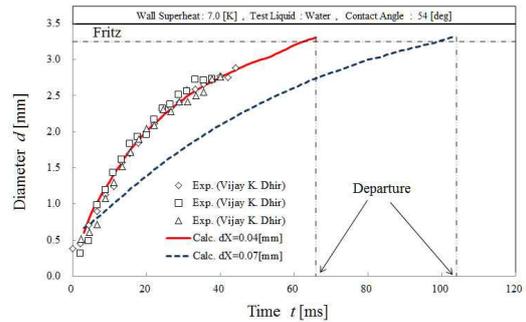
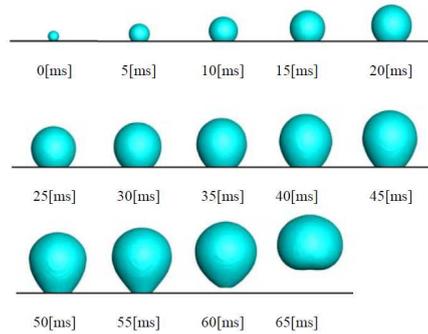


図 5 : 沸騰伝熱面からの周期的気泡離脱
(計算・実験比較)

熱を集中配置し、気液界面を挟んだ熱流束の不連続から相変化質量を計算するという新たなモデルを提案した。

ステファン問題および球形気泡の成長問題により手法の妥当性を確認したうえで、伝熱面上で気泡が成長と離脱を反復する沸騰現象を解析し、図 6 に示すように、表面張力と濡れ性の効果も含め、気泡の成長速度、形

状、離脱周期について定量的に実験と良く一致する結果を得ることに成功している。

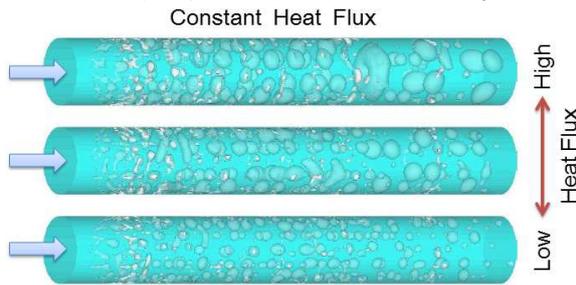


図 6：初期気泡を与えた管内沸騰流の解析例 (定量的には未検証)

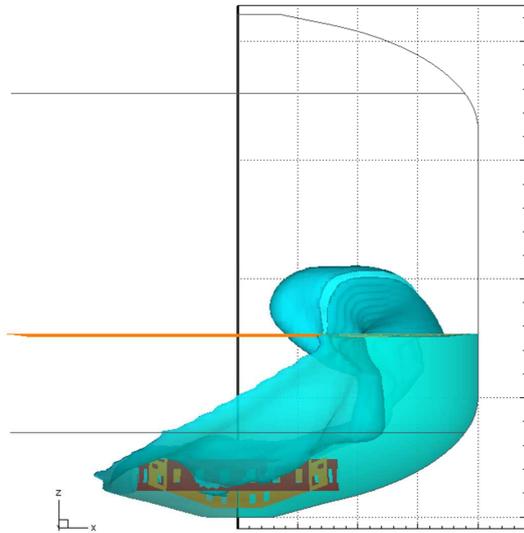


図 7：上段推進系の推進薬挙動解析例

さらに、局所的な気泡成長の初期段階と大域的な流動場との相互干渉が小さな場合について、加熱度を引数とするサブグリッド気泡成長モデルを追加することで、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。

マルチスケールを繋ぐ、サブグリッド気泡成長モデルの定量的検証を行い、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。

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 7 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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 姫野武洋, 渡辺紀徳, 梅村悠, 鶴沢聖治, 野中聡 “伝熱を伴うスロッシング現象の数値解析”, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.26, No.3 (2009)
- ② 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 鶴沢聖治, “噴射器内部流れが自由液膜挙動と微粒化特性に与える影響とその機構”, 日本機械学会論文集, 76-765, B (2010), pp.755-762.
- ③ 姫野武洋, 根岸秀世, 野中聡, 井上智博, 渡辺紀徳, 鶴沢聖治, “様々な加速度環境における自由表面流の数値解析(CIP法、MARS法、Level Set法を協調した解法の改良)”, 日本機械学会論文集, 76-765, B (2010), pp.778-788.
- ④ T. Himeno, C. Inoue and T. Watanabe, “Study on Free-surface Flows in Aerospace Propulsion Systems” Interdisciplinary Information Sciences Vol. 17, No. 1 (2011), pp.15-17
- ⑤ 梅村悠, 姫野武洋, 渡辺紀徳, “加熱面上における気泡成長・離脱過程の数値解析”, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.29, No.1 (2011).
- ⑥ 姫野武洋, 梅村悠, 梅村悠, 鶴沢聖治, 渡辺紀徳, “濡れ性に駆動される自由表面流と接触線挙動”, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.29, No.1 (2011).

[学会発表] (計 14 件)

- ① C. Inoue, T. Watanabe and T. Himeno, “Liquid Sheet Dynamics and Primary Breakup Characteristics at Impingement Type Injector”, AIAA 2009-5041, The 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Denver, 2-5 August 2009.
- ② T. Himeno, Y. Umemura, Daizo Sugimori, Seiji Uzawa, Toshinori Watanabe and Satoshi Nonaka “Investigation on Heat Exchange Enhanced by Sloshing”, AIAA 2009-5397, The 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Denver, 2-5 August 2009.
- ③ 姫野武洋, 野中聡, 成尾芳博, 徳留真一郎, 丸山辰也, 青木広太郎, 稲谷芳文, 青木宏, 渡辺紀徳, “再使用ロケット実験機の推進薬スロッシング予測” 日本航

- 空宇宙学会第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 京都, 2009 年 9 月 9-11 日, 講演論文集(CD-ROM), No.3B09.
- ④ 姫野武洋, 野中聡, 青木広太郎, 渡辺紀徳, “CIP-LSM による複雑形状を有する容器内自由表面流の数値解析” 日本機械学会第 22 回計算力学講演会, 金沢, 2009 年 10 月 10-12 日, 講演論文集(CD-ROM) No.302
- ⑤ 姫野武洋, 杉森大造, 梅村悠, 井上智博, 鶴沢聖治, 渡辺紀徳, 野中聡, 成尾芳博, 稲谷芳文, “スロッシングに促進される気液熱交換の数値解析” 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, 2009 年 12 月 16-18 日, 講演論文集(CD-ROM) No.C3-4
- ⑥ T. Himeno, “Numerical Analysis of Violent Free-surface Flows by CIP-LSM” No. AW6-KN3, Sixth Asia Workshop on Computational Fluid Dynamics (6AWCFD), Kashiwa, 15-19 March 2010.
- ⑦ T. Himeno, Y. Umemura, Daizo Sugimori, Seiji Uzawa, Toshinori Watanabe and Satoshi Nonaka “Heat Exchange and Pressure Drop Enhanced by Violent Sloshing”, AIAA 2010-6979, The 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, 25-28 July 2010.
- ⑧ 姫野武洋, 杉森大造, 石川勝利, 梅村悠, 井上智博, 鶴沢聖治, 渡辺紀徳, “非等温スロッシングに伴う密閉容器内圧変化の数値解析” 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 横浜, 2010 年 12 月 16-18 日, 講演論文集(CD-ROM) No.A6-5
- ⑨ 梅村悠, 姫野武洋, 渡辺紀徳, “沸騰の数値解析に向けた界面追跡法の改良” 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 横浜, 2010 年 12 月 16-18 日, 講演論文集(CD-ROM) No.A6-2
- ⑩ 杉森大造, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 鶴沢聖治, 井上智博 “スロッシングに伴うタンク内熱伝達に関する実験及び数値解析”, JSASS-2011-0059, 日本航空宇宙学会第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 広島, 2011 年 3 月 3-4 日, 講演論文集(CD-ROM)
- ⑪ 宮下陽輔, 姫野武洋, 井上智博, 渡辺紀徳, 鶴沢聖治 “衝突型噴射器における微粒化と噴霧特性に関する研究”, JSASS-2011-0058, 日本航空宇宙学会第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 広島, 2011 年 3 月 3-4 日, 講演論文集(CD-ROM)
- ⑫ K. Kinefuchi, W. Sarae, K. Aoki, T. Himeno, S. Nonaka and K. Okita, Upper Stage Propulsion System Development for H-IIA Upgrade. 4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)

Saint Petersburg, Russia, July 4-8, 2011

- ⑬ T. Himeno, D. Sugimori, K. Ishikawa, Y. Umemura, S. Uzawa, C. Inoue, T. Watanabe, S. Nonaka, Y. Naruo, Y. Inatani, K. Kinefuchi, R. Yamashiro, T. Morito and K. Okita “Heat Exchange and Pressure Drop Enhanced by Sloshing”, AIAA 2011-5682, The 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, 1-4 August 2011.
- ⑭ 杵淵紀世志, 東伸幸, 更江渉, 沖田耕一, 谷直樹, 小林弘明, 八木下剛, 北山治, 姫野武洋 “基幹ロケット推進系開発計画”, IS13 日本航空宇宙学会第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 松山, 2011 年 9 月 9-11 日, 講演論文集(CD-ROM), No.3B09.

[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/research/twophase/>

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