

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760560

研究課題名（和文） 宇宙機における液体推進薬のスロッシングと相変化が連成する熱流動現象の解明

研究課題名（英文） Experimental and Numerical Research on Heat Transfer and Phase Change Enhanced by Sloshing

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：

本研究では、流体管理技術の確立へ向け、主として宇宙機の推進薬タンク内部の自由表面流を対象とし、その熱流動特性を実験と数値解析の両面から詳しく調べた。加速度振幅を様々に変えた実験を通じ、密閉容器内部における液体揺動(スロッシング)の規模と圧力変動の相関を定量的に整理した。その結果、スワールモードや砕波などの非線形的な液体揺動の出現と容器内圧力変化に強い相関が確認され、容器内の気相への熱伝達が著しく促進されることが確認された。また、関連する流体機器の設計に不可欠な基盤技術として、自由表面流の数値解析手法(CIP-LSM)を高度化し、気液界面での物理量不連続を1計算格子以内で捕捉するとともに、気相側の状態方程式を考慮しつつ温度場の解析を可能にする界面熱伝達モデルおよび相変化モデルを考案した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

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： 航空宇宙流体・推進・液体ロケット・相変化・スロッシング

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙開発利用の進展に伴い、宇宙輸送系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、しばしば液体と気体の共存系となるが、比重差を利用した液体の駆動を期待できない軌道上の低重力環境では、液体の保持や搬送など、流体管理(fluid management)が難しく

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、液体の重心移動などの動力学特性だけでなく、共存する気体との熱交換に起因する変化を把握することが重要である。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、流体管理技術の確立へ向け、主として宇宙機の推進薬タンク内部の

自由表面流を対象とし、その熱流動特性を実験と数値解析の両面から解明することを目的とした。同時に、関連する流体機器の設計に不可欠な基盤技術として、相変化を考慮した自由表面流の数値解析手法を構築して提案することを目指した。

### 3. 研究の方法

実験では、図1に示すように、気体の断熱膨張を利用する独自の手法により、密閉容器中の液体と気体の間に温度差を生じさせ、液体揺動と温度場が連成する流れ場を実現させた。この容器を加振器に搭載して様々な振幅の周期的加速度を与え、液体揺動の振幅が微小な場合(図2(a))から、碎波を生じる大振幅の場合(図2(b))まで、熱交換と相変化に起因する容器内の圧力変動を計測した。液体揺動が目視では認識できないほど微小な場合についても、図3のように、光の屈折を利用して液面の微小傾斜角を非接触計測する手法を考案して適用し、揺動振幅を捕捉した。

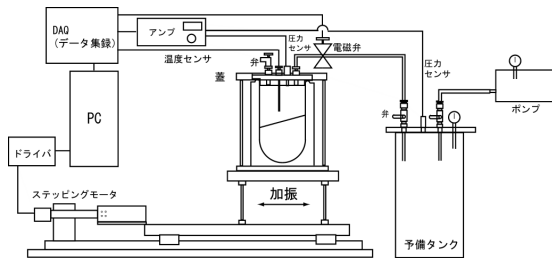


図1: 断熱容器加振装置模式図



(a) 小振幅 (b) 大振幅(スワール・碎波)

図2: 観察された液面変化の例

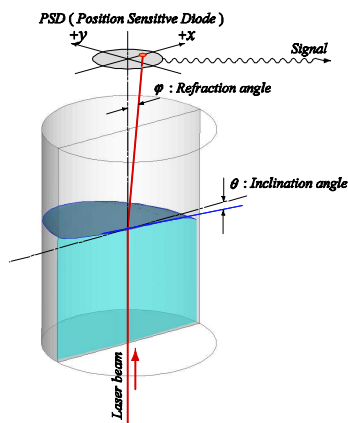


図3: 液面の微小角度振幅検出原理

数値解析では、研究代表者が開発した自由表面流の数値解析手法(CIP-LSM)を高度化し、気相側の状態方程式を考慮しつつ温度場の解析を可能にする界面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

実験については、断熱耐圧容器を用い、容器中に液体と気体を封入した後、系を減圧して断熱膨張によって気体側に一様な温度降下を生じさせる系を構築した。比較的明確な温度場の初期条件を獲得した後に容器の加振を開始することで、液体揺動と温度場が連成する流れ場を創出し、熱交換に起因すると考えられる圧力変動に関して再現性のあるデータを取得した。平行して、断熱容器と同じ内壁形状を有する透明容器を製作して加振実験に供し、液体揺動の振幅や碎波発生の有無を観察した。加速度振幅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整理した。その結果、図4に示すように、液体揺動の有無によって容器内圧力の時間変化に明確な差異が認められた。このように、比較的明確な温度場の初期条件を獲得した後に容器の加振を開始することで、同時に取り組んでいる数値解析の検証に適する実験データの取得できた。ただし、容器の断熱性をさらに向上させる等、断熱条件の改善が課題として残った。

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、浮体(落し蓋)を導入した場合について試験を行った。邪魔板と液面の相対位置関係が、液体揺動の振幅を決定する支配的要因であることを確認し、振幅の相違が圧力変化に及ぼす影響を定量的に評価した。浮体については、液体揺動の制振効果と、液面上の熱交換を遮断する効果によって圧力変化を抑制することを確認した。

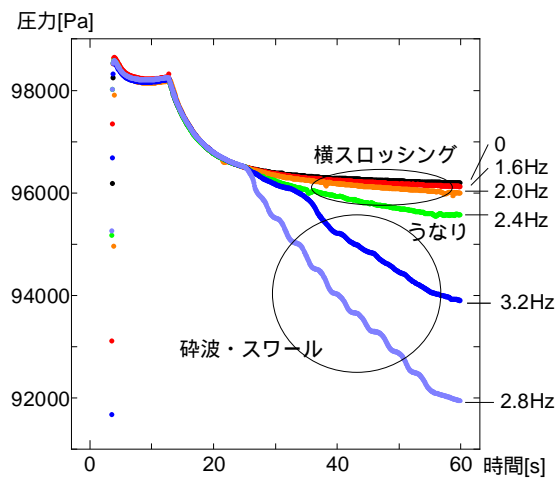


図4: 密閉容器内で起こるスロッシングに伴う圧力の時間変化(円筒,実験)

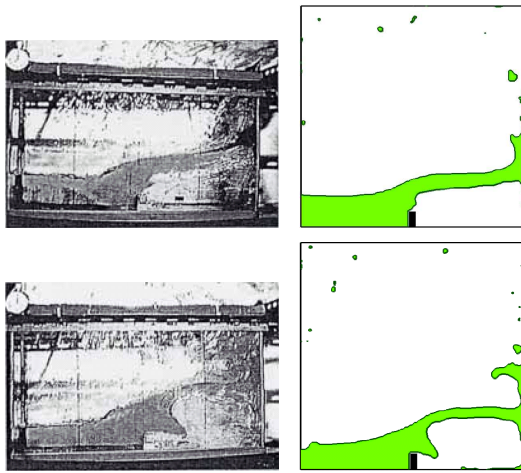


図5：ダム崩壊問題による数値解析手法検証  
(実験は越塚ら<sup>(1)</sup>による既存のもの)

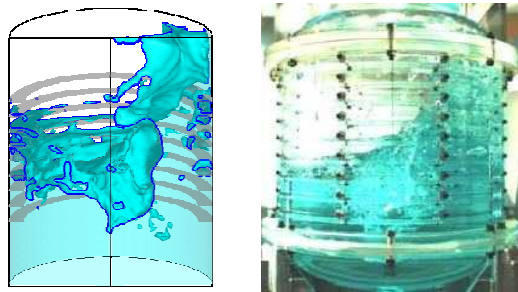


図6：邪魔板を装備したタンクスロッシング  
(実験は研究協力者<sup>(2)</sup>提供)

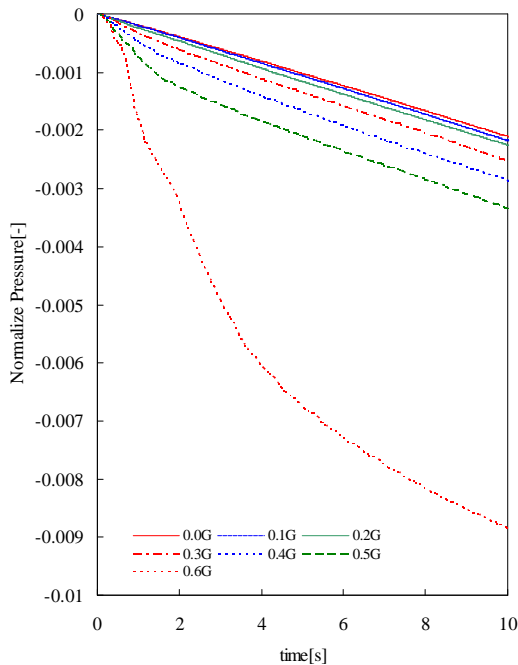


図7：密閉容器内で起こるスロッシングに伴う圧力の時間変化(矩形,計算)

数値解析については、研究代表者らが開発している自由表面流解法(CIP-LSM)を、まず、気液界面を横切る物理量の不連続を1計算格子で捕捉できるよう高度化し、図5に示す既存のダム崩壊問題に関する実験<sup>(1)</sup>、および、図6に示すような、研究協力者から提供を受けたスロッシング実験<sup>(2)</sup>結果に基づき検証を行った。

そのうえで新たに、伝熱および相変化現象を安定に解析できる数値モデルを考案してに実装した。ステファン問題および単一気泡成長問題など、既存データと比較した検証により、当該モデルが適切性を確認した。

そのうえで、2次元計算ではあるが、実験を数値的に模擬することにより、計算が密閉容器内の液体揺動に伴う圧力変化を定性的に再現できることを確認した(図7)。更に、相変化を考慮した場合についても数値実験を行った結果、砕波に伴って発生する飛沫が蒸発し、周囲気体と混合する過程が、容器内部の圧力変動を大きく促進する可能性があることが分かった(図8,図9)。ただし、定量的な観点からは、界面熱伝達と相変化量を支配

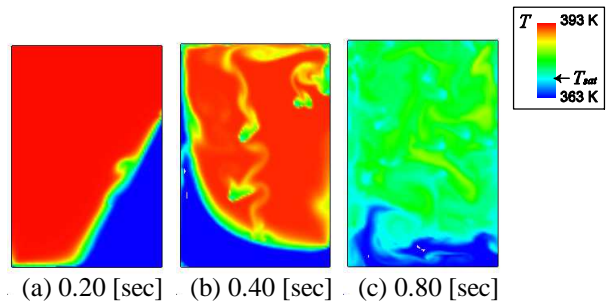


図8：密閉容器内で起こるスロッシング相変化を考慮した場合の温度分布(矩形,計算)

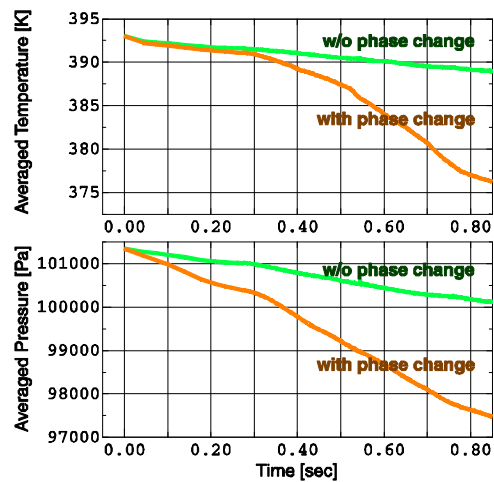


図9：密閉容器内で起こるスロッシングに伴う圧力の時間変化(矩形,計算)

する気液界面近傍の乱流を、広範な加速度条件の下で適切に評価できるモデルの構築が課題として残されている。

以上の結果をまとめて、変形する液面が熱交換と相変化を促進する効果を評価するとともに、密閉容器内の圧力変動を予測するための数値的手法としてとりまとめた。

#### 参考文献

- (1) Koshizuka, S., Tamako, H., and Oka, Y., Computational Fluid Dynamics J. Vol. 4, (1995), pp.29-46.
- (2) T. Himeno, T. Watanabe, S. Nonaka, Y. Naruo, Y. Inatani and H. Aoki, *AIAA Paper 2007-5557*.

#### 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3件)

K. Fukagata, N. Kasagi, P. Ua-arayaporn and T. Himeno, "Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow and convective heat transfer in a micro tube", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.28 (2007), pp.72-82, 査読有.

C Inoue, T. Watanabe and T. Himeno, "Numerical Study on Flow Induced Vibration of LOX Post in Liquid Rocket Engine Preburner", *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*(2007), Vol.1, No.1, pp.22-29, 査読有.

姫野武洋, "様々な加速度環境における自由表面流の数値解析", *日本応用数理学会誌 "応用数理"*, Vol.18, No.1 (2008), pp.128-139, 査読有.

##### [学会発表](計12件)

T. Himeno, T. Watanabe, S.Nonaka, Y. Naruo,,Y.Inatani and H. Aoki, "Numerical and Experimental Investigation on Sloshing in Rocket Tanks with Damping Devices", *AIAA 2007-5557*, The 43rd AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cincinnati., 8-11 July 2007.

T. Himeno and T. Watanabe, "Numerical Analysis of Sloshing and Wave Breaking in a Vessel by CIP-LSM", *APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI*, Kyoto, 3-6 December, 2007. No. MS7-7-1, CD-ROM.

T. Himeno, "Development of Effective Algorithms for the Analysis of Free-surface Flows under Various Conditions in Gravity", *The 2nd International Symposium on*

*Propulsion for Space Transportation*, Heraklion, 5-8 May 2008.

T. Himeno, S.Nonaka, Y. Naruo,,Y.Inatani, H. Aoki and T. Watanabe, "Numerical Analysis of Sloshing in Tank for Reusable Sounding Rocket", *ISTS-2008-a-14*, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, June1-8 2008.

T. Himeno, Y. Umemura, T. Watanabe and H. Aoki, "Preliminary Investigation on Heat Exchange Enhanced by Sloshing", *AIAA 2008-4055*, The 43rd AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford., 21-23 July 2008.

姫野武洋, "CIP法、MARS法、Level Set法を協調した自由表面流解析法", *日本計算工学会第12回計算工学講演会*, 東京, 2007年5月22-24日, 講演論文集(No.E-11-1)

姫野武洋,渡辺紀徳, "Level Set法、CIP法、VOF法を協調させた界面追跡法" *日本機械学会2007年度年次大会講演論文集*, 大阪, 2007年9月9-12日, 講演論文集(IV), (No.F01-2)

姫野武洋, 野中聡, 青木広太郎, "バップル板によるスロッシング抑制効果の数値解析", *第21回数値流体力学シンポジウム*, 東京, 2007年12月19-21日, 講演論文集(CD-ROM) No.C2-2

姫野武洋, "濡れ性に駆動される液体の数値解析", *日本計算工学会第13回計算工学講演会*, 仙台, 2008年5月19-21日, 講演論文集(No.E-1-1)

姫野武洋, 梅村悠, 渡辺紀徳, 野中聡, "スロッシングに促進される気液熱交換と相変化の数値解析" *日本機械学会第21回計算力学講演会*, 沖縄, 2008年11月1-3日, 講演論文集(CD-ROM) No.602

小野智之, 宮本康治, 姫野武洋, "CIP-LSM法を用いた自由表面流解析の非構造格子系への拡張" *日本機械学会第21回計算力学講演会*, 沖縄, 2008年11月1-3日, 講演論文集(CD-ROM) No.603

姫野武洋, 野中聡, 成尾芳博, 青木広太郎, 渡辺紀徳, 稲谷芳文, 青木宏, "リングバップルによる大振幅スロッシング抑制効果の数値解析" *日本航空宇宙学会第49回航空原動機・宇宙推進講演会*, 長崎, 2009年3月5-6日, 講演論文集(CD-ROM) No.B12

##### [その他]

###### ○受賞

T. Himeno, T. Watanabe, S.Nonaka, Y. Naruo,,Y.Inatani and H. Aoki, Best Paper Award (Liquid Propulsion), American

Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). 2008 年 7 月(贈賞).

姫野武洋, 優秀講演論文賞, 日本計算工学会第 13 回計算工学講演会, 2008 年 12 月(贈賞)

姫野武洋, 優秀講演表彰, 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 2009 年 3 月(贈賞)

○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