

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06595

研究課題名(和文) ミクロスコピックな動的濡れ性とマクロな熱流動挙動の相互関係解明のための研究

研究課題名(英文) Study for understanding of interrelationship between microscopic dynamic wetting and macroscopic fluid behavior

研究代表者

今井 良二 (Imai, Ryoji)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：60730223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：微小重力環境下の液体挙動は、表面張力、濡れ性等が顕著となるため、地上重力下と異なる。宇宙機の推進タンクの設計には、外乱によるスロッシングや加速度変化によるセトリング挙動を把握することが必要であり、かつ動的濡れ挙動はこれらに多大な影響を与えるため、これを理解することが重要となる。本研究では微小重力環境において、円筒容器内の液体挙動を実験的に調査した。さらにミクロな動的濡れ性とマクロな液体挙動を連成させた数値解析を実施し、実験結果との比較検証を実施した。その結果、ミクロスコピックな現象を考慮した理論による動的接触角と接触点移動速度の関係を反映した数値解析が、実験結果と最もよく一致することを示した。

研究成果の概要(英文)：Fluid behavior in microgravity is different from in ground gravity since surface tension and wetting are dominant. In propellant tank for spacecraft, sloshing due to disturbance and settling behavior by change of acceleration have to be understood for design of propellant supply system. These fluid behaviors are affected by a dynamic wetting significantly, therefore it is important to understand this. We observed fluid behaviors in cylindrical containers in microgravity conditions created by drop tower facility, and effect of viscosity and diameter of container on fluid behaviors were investigated. CFD analyses considering interrelationship between microscopic dynamic wetting and macroscopic fluid behavior were conducted and these results were compared with experimental results. It was confirmed that numerical model considering dependence of contact line velocity in dynamic contact angle by theoretical methods including microscopic phenomena provided more reasonable results.

研究分野：航空宇宙熱流体力学

キーワード：流体力学 伝熱工学 宇宙推進系 推進タンク 微小重力環境 表面張力 数値解析 微小重力実験

## 1. 研究開始当初の背景

人工衛星、ロケット、将来型宇宙機の推進系は、エンジン、燃料及び酸化剤のタンク等で構成される。これらは運用中に微小重力環境におかれ、微小重力環境でのタンク容器内の液体の挙動は、静水圧、浮力が小さくなる代わりに自由界面に作用する表面張力や固体壁に対する濡れ挙動、粘性力が支配的となり、地上とは異なる特異な挙動を示す。人工衛星の姿勢変更時、ロケットのコースティング（宇宙空間でのエンジン停止後の慣性飛行）突入時において、微小重力環境でタンク内の燃料（液体）が移動する。一方、タンク内の液体挙動およびそれに伴う流体力は、宇宙機の姿勢制御系および燃料供給系の設計に影響を与えるため、微小重力下での液体挙動を把握、予測することは重要である。さらにロケットや将来型宇宙機では、燃料や酸化剤に液体水素、LNG、液体酸素等の極低温液体が用いられ、蒸発や凝縮に伴う圧力変動の予測および対策、断熱等、熱マネジメントも重要となる。上記の中で濡れ挙動の取り扱いには、液体、気体、固体三つの相の接触部（三相界面）近傍のサブマイクロスケールの現象を分子間力の影響を考慮し、かつ、マクロスケールの流体挙動と連成させる必要があり、極めて高い難易度を有する。濡れ挙動の解明に向けた研究は、これまで液滴の濡れ拡がり等を対象とし数多く行われてきているが、いまだに不明な点が多い。一方、微小重力下においては、地上重力下に比べて大きなスケールの流体挙動が、濡れ挙動の影響を大きく受ける。しかしながら、例えばロケットタンク内の微小重力下での燃料挙動を数値解析等で扱う際、濡れ挙動の影響は、接触角（定義は図1を参照）を気液界面の固体壁に対する接触線に対し境界条件として与える等、簡易的かつ経験的な手法で扱われるのが一般的である。三相界面近傍のマイクロ領域の液体挙動（濡れ挙動）と大きなスケールの流動挙動およびそれらの相互関係を定式化し、濡れ挙動をより一般的かつ厳密に扱った例が見られない。

## 2. 研究の目的

上述の背景をもとに本研究では、サブマイクロスケールの動的濡れ挙動（マイクロ領域の流体挙動）と、大きなスケールの熱流動挙動の相互関係を考慮した、熱流動解析技術の確立を最終目的とする。最終目的達成に先立ち、本研究期間内においては以下の項目を実施する。

マイクロ領域の動的濡れ挙動（界面蒸発なし、あり）の解析モデル構築

分子間力の影響を考慮した自由界面を通じた圧力差を記述するモデル（disjoining pressure）をベースとした基礎方程式系を構築する。

マイクロ、マクロ領域の流体挙動の接続、相互関係を考慮した数値解析手法の確立

で作成したマイクロ領域の基礎方程式とマクロ領域の連続体熱流動の方程式の接続方法を検討し、マイクロ、マクロ領域の熱流動を連成させて数値的に解析する手法を確立する

マイクロ領域の解析モデルの検証試験（地上重力環境実験）

毛細管内部の動的濡れ挙動（主に界面蒸発が存在する場合）を観測し、で作成した基礎方程式系の解と比較検証し、解析モデルの評価を行う。

マイクロ、マクロ領域の相互関係を考慮した数値解析モデルの検証試験（微小重力環境実験）

微小重力環境においてより大きなスケールを対象とし、マイクロ、マクロ領域の熱流動現象が連成した条件での観察を行い、で構築した数値解析モデルの評価を行う。

## 3. 研究の方法

本研究計画では、以下に示す解析技術の構築および実験による検証を行う。

固体壁近傍マイクロ領域の動的濡れ挙動につき、熱流動の基礎方程式を立式し、数値的に解を求める手法を確立する。

マイクロ、マクロ領域の熱流動挙動の数値解析による解を接続、連成させる手法を考案する。

地上重力下において、マイクロ領域の熱流動挙動を観察する。計測対象は、マクロ領域の流動挙動が単純で、マイクロ領域の熱流動挙動の評価が容易な毛細管を上昇する液体挙動とする。

短時間微小重力環境で、大きなスケールの熱流動挙動にマイクロ領域の動的濡れ挙動がおよぼす影響を明確にする。計測対象は50mm以下の円筒容器とし、微小重力突入時の動的濡れによる過渡的熱流動挙動および加振時の液揺動（スロッシング）を観察する。

## 4. 研究成果

(1) マイクロ、マクロ領域の流体挙動の接続、相互関係を考慮した数値解析手法の確立

動的濡れ挙動を考慮した微小重力下円筒容器内気液二相流動を、数値解析により求めた。本解析では、汎用熱流体解析コードANSYS FLUENTを利用した。気液二相流の解析には、VOF (Volume of Fluid) 法を用い、界面再構築には、geometric reconstruction scheme を適用した。表面張力は運動量保存則の中にソース項として考慮するCSF (Continuum Surface Force) 法により考慮され、動的接触角は、固体壁に対する境界条件として導入した。なお接触線の移動速度は、固体壁に隣接する解析セル内の速度ベクトルとVOFの勾配単位ベクトルの内積値として求めた。

本研究では動的接触角につき、接触線の移動速度の依存性を有する既存の理論式、経験式を適用し、上述の数値解析の壁面に対する

境界条件として入力した . その中で  $C_{ox}$  の式を適用した解析を実施し, 円筒容器内における中心軸上の自由界面座標の時間変化につき, 微小重力実験結果との比較を実施したが, 両者の一致は良くないことが分かった . そこで接触線近傍の流動挙動をモデル化するため, 自由界面を介した圧力差に, 表面張力以外に disjoining pressure を導入し, かつ, 接触線近傍の薄液膜領域内の流動を, lubrication theory で表現する手法 (Thin liquid film theory) を用いた . 本理論において取り扱う液膜およびその内部の流速分布, 圧力のつき, 図 1 に示すように考えた .

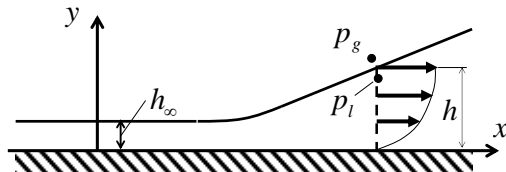


図 1 接触線近傍の薄液膜内流れ

本手法においては, 液膜厚さに対する以下の常微分方程式を立式し, これを解くことで求められる液膜形状から接触角を算出し, 接触線移動速度と動的接触角の関係を予め求めておき, これを数値解析の壁面に対する境界条件として入力する方法を用いた .

$$h_{xxx} = \frac{3\mu U}{\sigma} \frac{h-h_\infty}{h^3} (1+h_x^2)^{3/2} + \frac{3h_x}{h_x^2+1} h_{xx}^2 + \frac{4B}{\sigma} \frac{1}{h^5} h_x (1+h_x^2)^{3/2}$$

ここで,  $B$ : disjoining pressure 算出式の係数,  $h$ : 液膜厚さ,  $x$ : 固体壁に沿う座標,  $U$ : 濡れ速度,  $\mu$ : 粘性係数,  $\sigma$ : 表面張力

図 2 に円筒容器内における中心軸上の自由界面座標の時間変化につき, 解析結果と実験結果の比較を示す . ここで disjoining pressure の係数として Panchamgam らが用いた値  $B=1.2 \times 10^{-27} [J]$  を採用した . 図より実験結果と解析結果は良好に一致することがわかる .

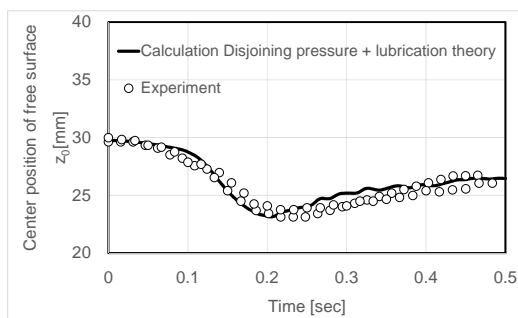


図 2 円筒容器内における中心軸上の自由界面座標の時間変化.

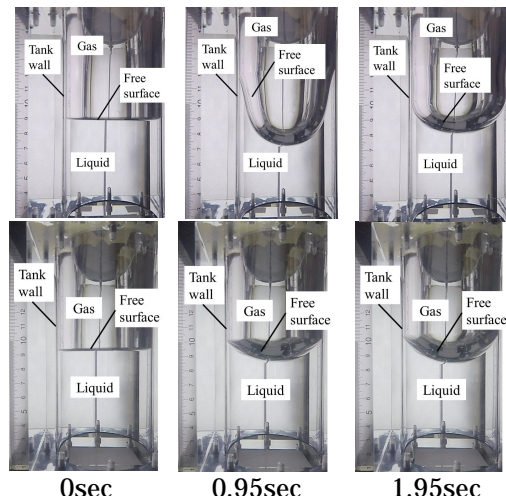
(2) 微小重力突入時の円筒容器内動的濡れ挙動解析および短時間微小重量実験結果

株式会社植松電機所有の落下塔実験設備コスモトーレを用い, 微小重力実験を行った . 本施設の自由落下距離は約 40m, 微小重力時間は約 2.5sec, 微小重力のレベルは  $10^{-3} G$  で

ある . 実験装置には, 二種類の円筒容器 ( 内径/高さ 30/60mm, 45/90mm, 60/120mm のアクリル樹脂製 ), 容器内液体挙動観察用高速度カメラを搭載した . また使用液体はシリコン油 ( 信越化学製 KF96 ) とし, 以下に示す二種類のものを用いた .

	Dynamic viscosity [mm <sup>2</sup> /s]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Surface tension [N/m]
KF96L-1cst	1	816.6	17
KF96-50cst	50	957	20.8

図 3 に直径 60mm 円筒容器内の低粘性液体 ( KF96L-1cst ) の流体挙動を示す . 図より時間経過に伴い, 濡れにより自由界面が固体壁面に沿って上昇する一方, 中心軸上の自由界面座標は低下したのちに上昇を始めることが分かった . その他高粘性液体 ( KF96-50cst ) の流体挙動を確認し, 2.5sec の微小重力時間における固体壁面上接触点の移動量は, 低粘性液体に比べ, 十分に小さいことが分かった .



0sec 0.95sec 1.95sec  
図 3 微小重力突入時の自由界面挙動  
Dia.:60mm, height:120mm, liquid:  
KF96L-1cst(upper), KF96-50cst(lower)

図 4 に実験結果と解析結果の比較として, 微小重力突入後の自由界面に関し, 固体壁との接触線座標および自由界面の中心軸座標の時間変化を示す . Fig. 5(a)には低粘性液体 (KF96L-1ct), (b)には高粘性液体 (KF96-50ct) に関する解析結果と実験結果の比較について示す . 図より低粘性, 高粘性いずれの流体の場合においても, 固体壁の接触線座標につき一定の接触角を与える場合の実験結果との差異は大きく,  $C_{ox}$  の式 ( $C=3$ ) および Thin liquid film theory による結果と実験結果との一致が良好であることが分かる . さらに中心軸上座標に関しては, いずれの解析結果に対しても実験結果との一致は良好である . 上記と同様の傾向は, 直径 30mm の円筒容器に対しても得られた .

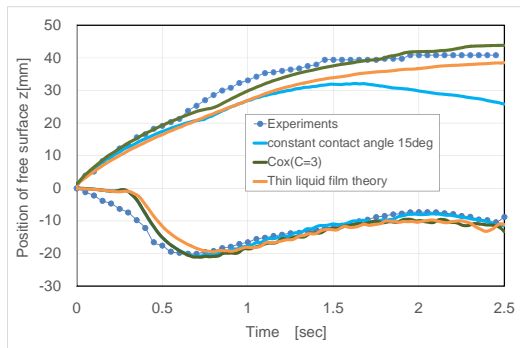
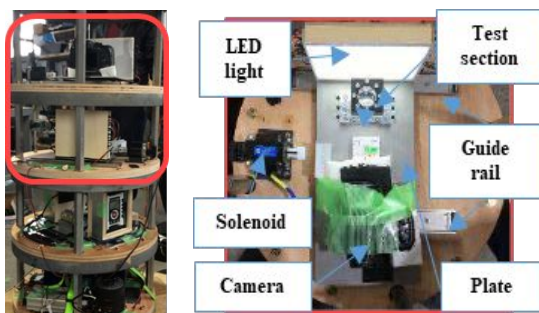


図4 円筒容器中心軸上自由界面座標, 固体壁接触線座標の時間変化 (微小重力実験と数値解析結果の比較)

(3)微小重力下容器内スロッシング挙動に関する数値解析および短時間微小重力実験

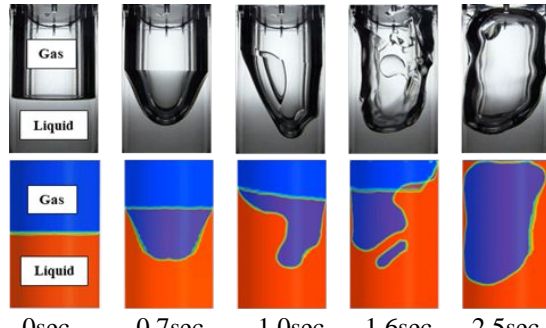
本研究では, 横方向加速度を受けた際の容器内液体の微小重力環境下におけるスロッシング挙動を観察した. 図5にスロッシング挙動観察実験装置の落下カプセルへの搭載状況および実験装置を示す. 実験装置として試験体, 容器内液体挙動観察用ビデオカメラおよび光源を木製円板上に搭載した. スロッシング発生に横方向の加速度を印加するため, 試験供試体, ビデオカメラ, 光源を搭載したプレートをガイドレール上に設置して並進移動可能とし, 電磁式可動プランジャ(ソレノイド)でプレートを押し出す方法を用いた. 印加加速度は電圧によりプランジャを押し出す力を調整することにより設定した. また試験液は Table 1 に示す二種類の動粘度が異なる Silicone oil を使用した.



カプセル搭載状況 実験装置, 観測系搭載状況  
図5 スロッシング挙動観察実験装置

まず地上重力環境下におけるスロッシング挙動の実験, 数値解析結果を比較した結果, スロッシング周波数と合わせ, 非常に良好な結果が得られることを確認した. 次に微小重力下におけるスロッシング挙動につき, 液体の動粘性係数を  $1\text{cst}$ , ソレノイド駆動電圧を  $40\text{V}$  とした場合のスロッシング挙動につき実験による観察結果と解析結果を比較したものを図6に示す. 加振直後の自由界面変形量が小さい場合 ( $1.0\text{sec}$  付近), 比較的良好な一致が得られた. また実験・解析共に加振によ

り左側固体壁で生じた波が, 右側の液体と合体することにより反時計回りに液体が流動し, 気相の塊が中心部にできる様子が観察された. しかし, 時間経過に伴い ( $1\text{sec}$  以降), 界面変形量が大きくなると, 実験と解析での差異が大きくなる様子が観察された.



0sec 0.7sec 1.0sec 1.6sec 2.5sec  
図6 円筒容器 (直径 60mm, 高さ 120mm) における微小重力下スロッシング挙動 (上: 実験結果, 下: 数値解析結果)

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)

Takuya IMAMURA, Masatoshi SUGIOKA, Kazuyuki HIGASHINO, Ryoji IMAI, Study on Liquid Management Technology in Water Tank for Propulsion System Utilizing Aluminum and Water Reaction (Improvement of Liquid Acquisition Performance by Hydrophilic Coating in Metallic Tank), International Journal of Microgravity Science and Application, Vol.35, No.1 35103-1-6, 2018, DOI: 10.15011/jasma.35.35103, 査読有.

Ryoji IMAI and Mori MICHIHARA, Study on Dynamic Wetting Behavior in Microgravity Condition Targeted for Propellant Tank, International Journal of Microgravity Science and Application, Vol.34, No.3, 340306-1-11, 2017, DOI: 10.15011/jasma.34.340306, 査読有.

Ryoji Imai, Takura Imamura, Masatoshi Sugioka, Kazuyuki Higashino, Research on Liquid Management Technology in Water Tank and Reactor for Propulsion System with Hydrogen Production System Utilizing Aluminum and Water Reaction, Microgravity Science and Technology, Vol.29, No.6, 475-484, 2017, <https://doi.org/10.1007/s12217-017-9566-5>, 査読有.

[学会発表] (計 13 件)

道原孟里, 田村健一郎, 今井良二, 推進薬タンクを対象とした微小重力下動的濡れ及びスロッシング挙動の観察, 可視化情報学会全国講演会, 2017.

道原孟里, 田村健一郎, 今井良二, 推進薬タンクを対象とした微小重力下動的濡れ及びスロッシング挙動解析技術の向上, 日本マイクログラフィティ応用学会第 29 回学術講演会, 2017.

今井良二, 天野 裕司, 道原 孟里, 推進薬タンクを対象とした微小重力下容器内スロッシング挙動に関する研究, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017.

道原孟里, 天野裕司, 今井良二, 宇宙機推進薬タンクを対象とした微小重力下動的濡れ挙動とスロッシング挙動に関する研究, 日本航空宇宙学会北部支部創立 30 周年記念 2017 年講演会ならびに第 18 回再使用型宇宙推進系シンポジウム講演論文集, 2017.

Ryoji Imai, Sho Goto, Takuya Imamura, Masayuki Saito, Masatoshi Sugioka, Kazuyuki Higashino, Basic research for liquid acquisition device and reactor in thrust system utilizing hydrogen production by aluminum and water reaction, AIAA Paper, AIAA 2017-4762, 1-14, 2017.

Ryoji Imai, Yuji Amano, Shuhei Yuze, Study on Dynamic Wetting Behavior in Microgravity Condition Targeted for Propellant Tank, 11th Asian Microgravity Symposium, 2016.

Ryoji Imai, Propellant management technology and thermal problem in propellant tank, 11th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications, 2016.

天野 裕司, 湯瀬 秀平, 今井 良二, 宇宙機推進薬タンクを対象とした微小重力下動的濡れ挙動の解析技術に関する研究, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2016.

Ryoji Imai, Numerical calculation and reduced gravity experiment for dynamic wetting behavior in liquid container, AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition 2016.

Ryoji Imai, Yuji Amanom and Sho Goto, Study for numerical calculation of dynamic wetting in spacecraft propellant tank, AJCPP2016, 2016.

天野祐司, 湯瀬秀平, 今井良二, 微小重力下における推進薬タンク内動的濡れ挙動の研究, 日本航空宇宙学会北部支部 2016 年講演会ならびに第 17 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 2016.

今井良二, 天野裕二, 後藤翔, 宇宙機用推薬タンク内における動的濡れ挙動に関する数値解析技術に関する研究, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2015.

今井良二, 微小重力環境における容器内動的濡れ挙動解析技術に関する研究, 第 12 回 HASTIC 学術講演会, 2015.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~13999408/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今井 良二 (Imai, Ryoji)

研究者番号: 60730223

### (2) 研究分担者

なし ( )

### (3) 連携研究者

なし ( )

### (4) 研究協力者

なし ( )

〔図書〕(計 0 件)