

## 推進薬タンクを対象とした微小重力下横スロッシング挙動に関する研究

道原 孟里・今井 良二

### Study on the Lateral Sloshing Behavior under Microgravity Condition Targeted for a Propellant Tank

Mouri MICHIHARA and Ryoji IMAI

#### Abstract

Fluid behavior in microgravity ( $\mu g$ ) is different from in ground gravity since surface tension and wetting are dominant in  $\mu g$  conditions. In propellant tanks for artificial satellites and future on-orbit spacecraft, sloshing due to disturbance and settling behavior from changes in acceleration have to be understood for the design of the propellant supply system and attitude control system. In this paper, we observed sloshing behaviors in cylindrical containers in  $\mu g$  conditions created by a drop tower facility. In order to investigate the effects of the contact line velocity on dynamic contact angle, we measured dynamic contact angle using a capillary tube. CFD analysis introducing Cox's equation in consideration of capillary experimental results were also conducted and these results were compared with  $\mu g$  experimental results. Regarding the experimental results, the diameter of the test tank, excitation acceleration, and kinematic viscosity were found to have a significant effect on sloshing behavior in a  $\mu g$  condition. Regarding the comparison between the CFD analysis results and the experimental results, there was a slight difference in the wave shape and the time required for the liquid to reach the top of the test tank. Conversely, there was a qualitative agreement between the fluctuation period and the approximate shape of the liquid surface over time.

**Keyword(s):** Microgravity, Propellant tank, Sloshing, CFD, Contact angle

Received 30 July 2019, accepted 23 October 2019, published 31 October 2019.

#### 1. 緒言

微小重力環境下での推進薬タンク内液体挙動は、重力に代わり表面張力、濡れ性の影響が相対的に卓越するため、地上重力環境下とは異なったものになる。この環境下では推進薬タンク内の気液界面は湾曲し、ガス相が液排出口に接近するため、液排出時にガス巻き込みが発生しやすくなり、また、比重差を利用した流体の駆動と安定な保持、気液分離といった流体管理が困難となる<sup>1)</sup>。人工衛星や軌道間往還機、惑星探査機のような将来型宇宙機の推進薬タンクは、分離、ドッキング、軌道変更時に様々な加速度環境におかれ、スロッシングが生じる。特に微小重力環境下でのスロッシングは固有周期が長くなるため、一度発生すると抑制させるのは困難となる。また、宇宙機では推進薬が占める重量が大きいことから、スロッシングにより宇宙機全体の姿勢制御に悪影響を及ぼすだけでなく、推進薬の保持が困難となり、気液が混合することにより加圧ガス巻き込み

によるエンジン破損をもたらす可能性がある。今後は月や小惑星、火星探査など長期ミッションがターゲットとなっているため、従来と比較すると、推進薬タンク大型化に伴う推進薬増加や多数回マヌーバを強いられることが予想され、スロッシングの影響がより大きくなると想定される。以上のことから推進薬タンクや推進供給系、姿勢制御系においてタンク内の流体挙動を十分に把握することが重要となってくる。タンク内の流体挙動は動的濡れ性の影響を大きく受ける。しかし、地上重力環境下での動的濡れ性に関する研究は数多く実施されてきたが<sup>2-4)</sup>、微小重力環境におけるスロッシング挙動の数値解析においては、固体壁と液体の接触点からの接線のなす角度である接触角を簡易的に静的接触角にて一定値で与える場合が多い<sup>5), 6)</sup>。なお Luppès et al. は、数値解析においてより厳密にスロッシング挙動を再現するには、接触点の移動速度の依存性を考慮した動的接触角の導入が必要であるとしている<sup>5)</sup>。

本研究では、微小重力環境下でのスロッシング挙動を

室蘭工業大学大学院 航空宇宙システム工学ユニット 〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1

Unit of Aerospace System Engineering, Graduate school of Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido 050-8585, Japan.

(E-mail: r\_imai@mmm.muroran-it.ac.jp)

CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析から予測する技術を確認することを最終目標とする。本稿では短時間微小重力環境における円筒容器内の横方向の加速度変化に対応するスロッシング挙動の観察, および動的接触角に関する経験式を考慮した横スロッシング挙動の CFD 解析を実施し, 微小重力環境下における横スロッシング挙動に容器直径, 加振加速度および液体の動粘性係数がおよぼす影響を明確にすることを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 動的接触角の計測

動的接触角を考慮した CFD 解析を実施するために, 固体壁近傍の液面の接触点の移動速度が動的接触角に及ぼす影響を調査した。本実験では, シリンジポンプ (YMC 製 ysp-201) を使用して矩形断面の毛細管内 (材質: 石英ガラス,  $0.95\text{ mm} \times 0.95\text{ mm}$ ) の液体移動速度を変化させた。なお, 後述のように微小重力実験ではアクリル製容器を用いたが, 別途実施したアクリル板と石英ガラス製板での静的接触角の計測結果がほぼ同一の値となったことから, 石英ガラス製毛細管内での計測は妥当とした。毛細管内自由界面の観察には高速度カメラ (松電舎製 CHU130EX) を使用し, 画像処理ソフト ImageJ を用いて, 各々の移動速度に対する動的接触角の計測を行った。Fig. 1(a) に実験の装置の概要を示す。本実験に使用したシリンジポンプは最大流量  $8.538\text{ mL/min}$  を得ることができる。そこで  $0.05\sim 8.00\text{ mL/min}$  の間を  $0.05\text{ mL/min}$  刻みで設定し実験を行った。また, 試験液体は過去の短時間微小重力実験に使用したものと同一である Silicone oil (信越化学製 KF96) とし<sup>4)</sup>, 動粘性係数  $1\text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $50\text{ mm}^2/\text{s}$  の二種類を使用した。

なお, 接触角の計測方法について, Fig. 1(b) に示す。図の中で黒い部分が液面を示すが, この部分の下端の曲線が中心断面と液面の交線となる。この交線と毛細管壁の交点における接線と壁面のなす角を接触角 (図中 contact angle と表記) とみなした。なお, 液面を示す黒い部分が幅を持つのは, 矩形毛細管の角部を液面が上昇するためである。なお, 接触角は液面の断面形状を円の一部分とし, 円上の 3 つの点から円の方程式を求めることにより算出した。高速度カメラの画素数が  $1024 \times 1024$  であること, および視野を考慮した接触角の計測値の確からしさは  $\pm 3\text{ deg}$  であった。

### 2.2 短時間微小重力実験

株式会社植松電機所有の落下塔実験設備 COSMOTORRE を使用して, 横方向の加速度変化に対応する微小重力下でのスロッシング挙動の観察を行った。

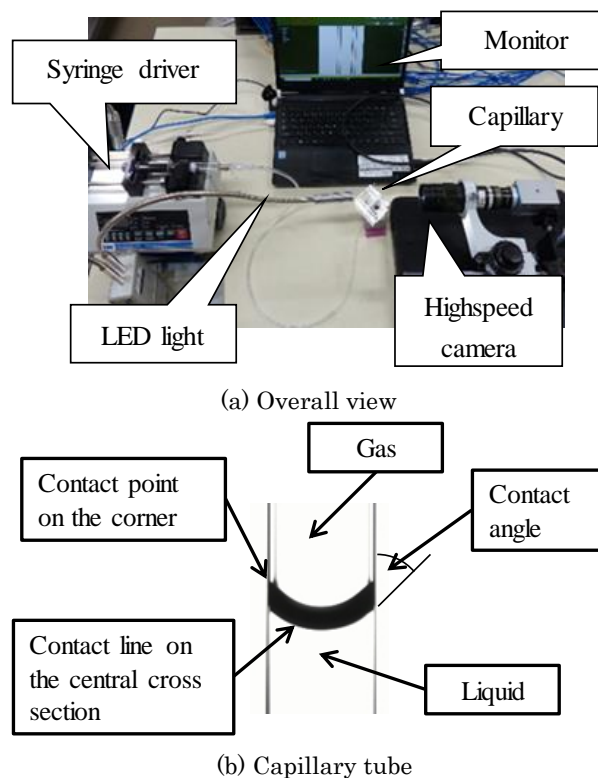
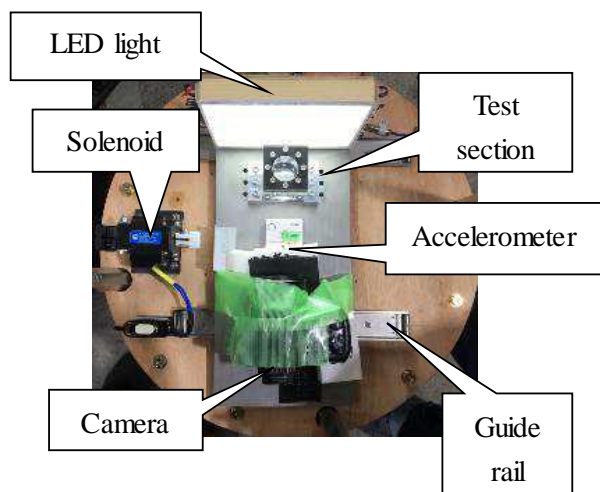


Fig. 1 Experimental apparatus for measuring the dynamic contact angle.

落下塔 COSMOTORRE の概要は, 自由落下距離が約  $45\text{ m}$  であり, 微小重力時間が約  $2.5\sim 3\text{ sec}$ , 微小重力環境約  $10^{-3}\text{ G}$  を得ることができる。スロッシング実験装置を Fig. 2 に示す。また, 試験体は直方体アクリルブロックに円筒をくり抜いた構造とし, 内径/高さ  $60/120\text{ mm}$  とした。横方向の加速度を印加する方法としては, 試験容器, 容器内液体挙動観察用ビデオカメラ (Panasonic 製 DMC-FZ200), 加振加速度測定用の加速度計 (ATR・Promotions 製 TSND121), 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。試験液体には二種類の動粘性が異なる Silicone oil を使用した。微小重力環境下での推進薬タンクに横方向加速度がかかった際のスロッシング挙動を再現するため, 本実験では断線検知およびタイマーを使用することで微小重力環境突入後, 気液界面が湾曲してからプレートを押し出して加振し, 加速度を与えている。なお微小重力開始から加振開始までの時間は, 静止円柱容器において地上重力から微小重力突入後, 液面形状が静定するまでに要する時間<sup>4)</sup>を考慮し,  $0.5\text{ sec}$  で設定した。実験条件を Table 1 に示す。



Experimental apparatus



Test section  
Material : acrylic resin  
Diameter / Height :  
30 / 60 mm, 60 / 120 mm

Test section

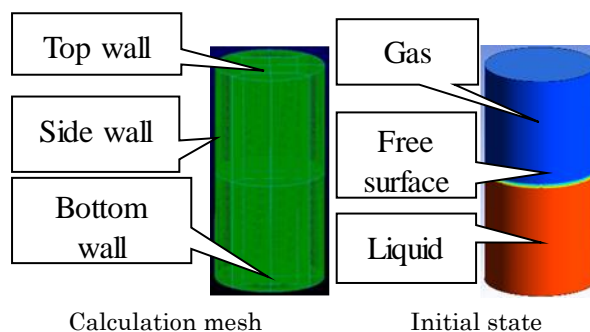
Fig. 2 Lateral sloshing experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

No.	Dia. / height mm	Drive volt. V	Liquid	Temp. °C	Gravity level (abs. value) G
1	60 / 120	40	KF-96L -1 mm <sup>2</sup> /s	12	1
2	30 / 60	40	KF-96L -1 mm <sup>2</sup> /s	21	<6x10 <sup>-3</sup>
3	60 / 120	40	KF-96L -1 mm <sup>2</sup> /s	12	
4	60 / 120	80	KF-96L -1 mm <sup>2</sup> /s	13	
5	60 / 120	80	KF-96L -50 mm <sup>2</sup> /s	13	

### 3. CFD 解析概要

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流動を、CFD 解析により求めた。本 CFD 解析では、汎用熱流体解析コード ANSYS FLUENT を利用した。



Calculation mesh Initial state

Fig. 3 Calculation domain.

CFD 解析モデルは Fig. 3 に示すよう 3 次元とし、気液二相流の CFD 解析には、気液界面が大きく変形することを考慮して、Level-Set 法<sup>7)</sup>と VOF 法 (Volume of Fluid Method) を連成させた CLSVOF 法 (Coupled Level Set and Volume of Fluid Method) を利用した。Level-Set 法は界面からの符号付き距離関数で表す Level-Set 関数  $\phi$  を定義して、移流計算をすることにより界面の捕捉と追跡を行う方法である。Level-Set 関数は  $\phi > 0$  で液相、 $\phi < 0$  で気相、 $\phi = 0$  で界面を表す。この方法は体積保存性の点で問題があることが知られているが<sup>8)</sup>、滑らかな連続関数であるため、空間勾配を正確に算出することができ、界面の湾曲と、それによって生じる表面張力の高精度な予測が可能となる。一方、VOF 法は、界面自体ではなく、各セル内の液体が占める体積割合を体積充填率  $F$  ( $0 \leq F \leq 1$ ) として定義し移流計算を行う手法である。そのため、Level-Set 法と異なり、体積を保存しながらの計算が可能である。しかしながら VOF 関数  $F$  の界面を挟んでの変化量が非常に大きくなるため、空間メッシュ数が十分に確保されていないと  $F$  の勾配の計算精度が悪くなり、界面形状を合理的に再現できない。そこで両者の利点を活かし、欠点を補う方法として Level-Set 法、VOF 法を連成させた CLSVOF 法を使用した。本解析では流れ場を層流とし、以下の基礎方程式を扱った。

連続の式

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho_m} \nabla p + \nu_m \Delta \vec{u} + \vec{g} + \vec{f} \quad (2)$$

VOF 関数  $F$  に関する移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla F = 0 \quad (3)$$

これらの式で  $\rho_m$  は気液相の平均密度で、液相、気相の密度を液相の体積分率  $F$  で平均化したものである。また  $\mu_m$  は

液相, 気相の動粘性係数に対し,  $\rho_m$ と同様の扱いとしたものである.  $\vec{f}$  は体積力で重力および後述の方法で表面張力を含み,  $\vec{g}$  は加速度ベクトル,  $p$  は圧力,  $\vec{u}$  は速度ベクトルを表す.

また, 表面張力項の計算には表面張力を体積力として計算する CSF (Continuum Surface Force) 法<sup>9)</sup>を使用し, 界面再構築には, 高精度の界面追跡が可能となる The geometric reconstruction scheme<sup>10)</sup>を適用し, 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 CFD 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, 動的接触角に接触線の移動速度の依存性を持たせる Cox の式<sup>11)</sup>を用いた CFD 解析を実施し, また, 実験により測定された加振加速度を, momentum のソース項に入力した. Table 2 に CFD 解析条件を示す. 表中の動粘性係数, 密度, 表面張力, 動粘性係数は 25 °C における値を記している<sup>12)</sup>. 密度に関しては, 25 °C を基準として 0 °C での値の変化が 3 % 以内であることから<sup>12)</sup>, Table 1 に示す実験温度に対する値として 25 °C の値を用いても差し支えないものとした. 表面張力については, Table 2 に示す温度係数を用い, 実験温度での値を計算し, 与えた. なおこの温度係数が文献<sup>13)</sup>で与えられているものに近い値を与えた. さらに動粘性係数は以下に示す式で与えた<sup>12)</sup>.

$$\log \nu = \frac{763.1}{273 + T} - 2.559 + \log \nu^{25} \quad (4)$$

ここで  $T$  は温度,  $\nu$  は温度  $T$  における動粘性係数,  $\nu^{25}$  は 25 °C での動粘性係数を示す. なお, 表中に記載の静的接触角は, 別途計測したものである.

Table 2 Conditions of CFD analysis.

Fluid	Liquid		Gas
	KF-96L-1 mm <sup>2</sup> /s	KF-96L- 50 mm <sup>2</sup> /s	Air
Kinematic viscosity <sup>12)</sup> @25°C mm <sup>2</sup> /s	1.0	50.0	14.6
Density <sup>12)</sup> @25°C kg/m <sup>3</sup>	815.6	957.0	1.225
Surface tension <sup>12)</sup> @25°C mN/m	16.9	20.8	N/A
Temp. coefficient of surface tension N/(mK)	-6.5x10 <sup>-5</sup>		N/A
Static contact angle deg	14.6	25.9	N/A
Dynamic contact angle	Cox(c=5)	Cox(c=6)	N/A

## 4. 実験結果

### 4.1 動的接触角の計測結果

毛細管内自由界面の観察結果一部を Fig. 4 に示す. 実験結果より, 毛細管の下部より流体がシリンジによって流入されることで, 界面が上昇している様子が分かる. また, シリンジからの流入流量が大きいほど固体壁近傍の接触点移動速度が速くなり, 接触角が大きくなる様子が分かる. そこで, 本実験から得られた固体壁近傍の液体接触線の移動速度  $U$ , および動的接触角  $\theta_d$  の関係と動的接触角に接触点移動速度の依存性を持たせる既存式である Cox の式との比較を行った. 実験における接触角は画像処理により測定した. Cox の式 (Cox's equation) は以下のように示される<sup>8)</sup>.

$$\theta_d = (\theta^3 + 9C \cdot C_a)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$C = \ln(L/S)$$

ここで  $\theta$  は静的接触角,  $L$  は特性長さ,  $S$  はスリップ長さをそれぞれ表す. Cox は接触点近傍の流動を解析的に求め, 接触点での粘性応力は特異点を有する, つまり応力の積分値が無限大となることを見出した. そこでスリップ長さ  $S$  を導入し, 接触点からスリップ長さの範囲内のせん断応力を無視した.  $S$  および  $L$  を個別にかつ定量的に評価するには接触点近傍の液膜等のミクロスコピックな観測が必要であり, 本研究で用いた計測機器の性能では困難であった. 一方, Brakke のレビュー<sup>3)</sup>によれば,  $S$  は液体種類と実

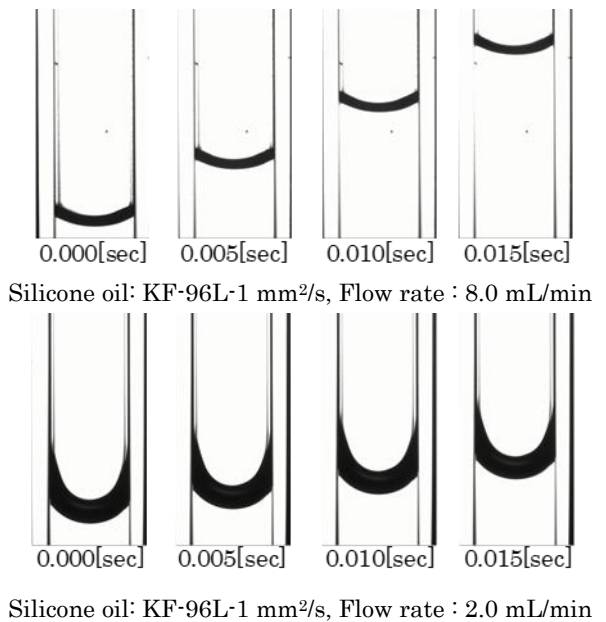


Fig. 4 Capillary tube experimental results.



験条件により非常に幅広い値を有し、 $S$  を含む  $C$  を adjustable parameter として扱うことが適当としている。また、キャピラリー数  $Ca$  (Capillary number) は以下の式で定義される。

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (6)$$

ここで  $\sigma$  は表面張力、 $\mu$  は粘性係数を表す。

上記の実験で得られた  $U$  と  $\theta_d$  の関係を Cox の式で近似するため、各実験試料に対し、 $C$  および  $\theta$  を決定した。それぞれの試験液体に対する比較結果を Fig. 5 に示す。青色のプロット点は毛細管実験により得られた固体壁近傍の接触点移動速度と動的接触角の関係を、オレンジ色の実線は Cox の式から得られた結果を示している。これより試験液 KF-96L-1.0 mm<sup>2</sup>/s において、Cox の式の  $C=6$  および  $\theta=15.6$  deg を与えた場合の結果が、計測で得られた  $U$  と  $\theta_d$  の関係と近くなることが分かった。一方、試験液 KF-96L-50 mm<sup>2</sup>/s の場合は、 $C=5$  および  $\theta=4.0$  deg の場合に、計測結果と近くなることが分かった。そこで、それぞれの液

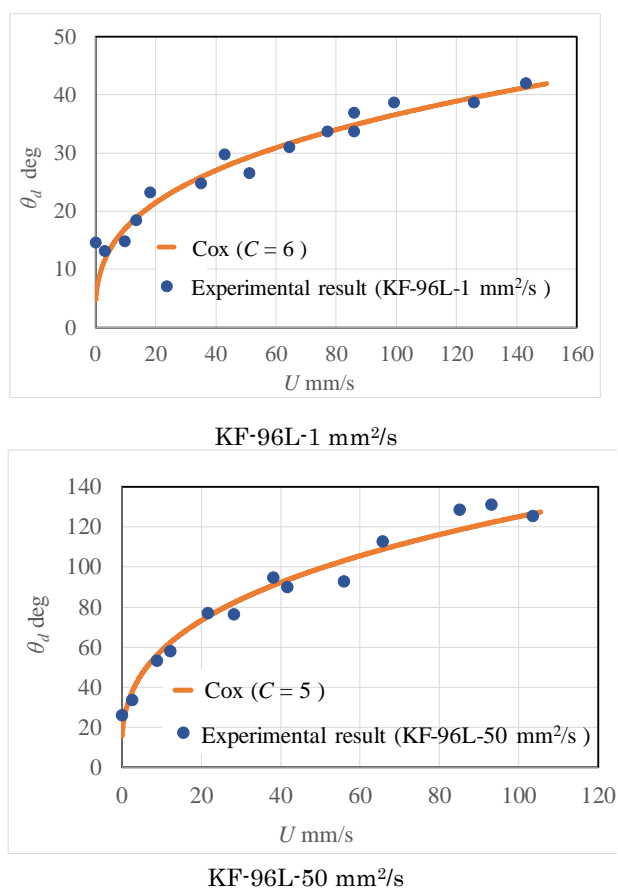


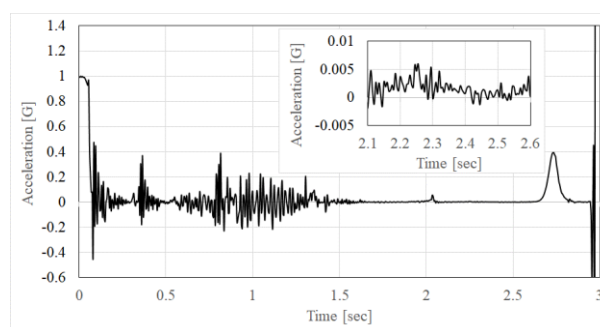
Fig. 5 Relationship between the ascending speed  $U$  and dynamic contact angle  $\theta_d$  about experimental results and Cox's equation

種で得られた  $C$  および  $\theta$  を用いた Cox の式を CFD 解析の境界条件としてそれぞれ使用した。なお上記で与えた静的接触角  $\theta$  は Table 2 に示す計測値と異なる。これは Cox の式で動的接触角を表す際、接触点の移動速度が非常に小さい場合は実現象を精度よく再現できていないことを示している。現在のところこの問題を解決する策は見出されておらず、今後の課題とする。

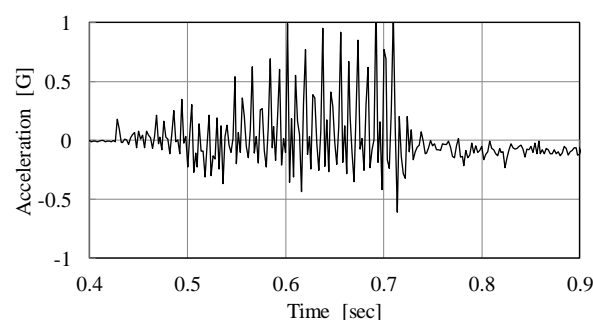
#### 4.2 短時間微小重力実験結果

本実験では、重力環境、試験体内径、試験体の加振力に対応するソレノイドの駆動電圧、液体の動粘性係数がスロッシング挙動におよぼす影響を調査した。なお液量は、加振を加えない場合の円筒容器内の動的濡れ挙動を調査した先行研究<sup>4)</sup>と同じ容器高さの 50% としており、加振方向は右方向 (図中の矢印方向) となっている。

まず本短時間微小重力実験における加速度環境について述べる。Fig. 6(a) に落下カプセル内部の加速度の時間変化を示す。図で落下開始時を 0 sec としている。落下後 1.5 sec までの振動的な加速度変化は、スロッシング形成時の加振によるものである。1.5 sec 以降、加振の影響は消失し、良質な微小重力環境が得られている。なお、その他実



(a) Acceleration in the drop capsule



(b) Acceleration on test section in the exitation by the solenoid

Fig. 6 Time history of acceleration in the test condition of No.5. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, kinematic viscosity of liquid is 50 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition.

験条件での値を合わせ、重力の振幅は  $6.0 \times 10^{-3} \text{ G}$  以下であった。なお、2 sec, 2.7 sec 近傍に重力レベルが急激に上昇する様子が見られるが、これは内部カプセルが外部カプセルに接触することによるものと考えられる。また Fig. 6(b) に加振時の試験体に作用する加振方向の加速度の時間変化を示す。この図においても、落下開始を 0 sec としている。図よりソレノイドの加振により、試験体に振動的な加速度が作用するが、平均値は加振方向に  $0.05 \text{ G}$  となった。

Figure 7 に実験条件 No. 1 におけるスロッシング挙動実験結果を示す。なお、No. 1 では加振を与えたタイミングを 0.0 sec としている。これより、地上重力環境下 (1 G) でのスロッシング挙動では、加振直後に、内部の液体が慣

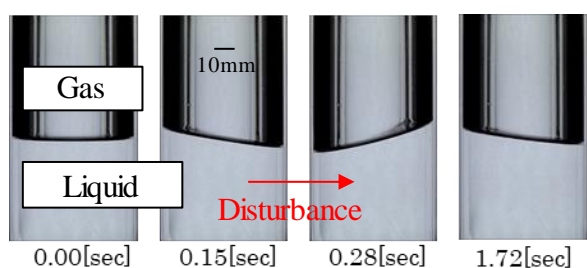


Fig. 7 Snapshot of liquid behavior in No. 1. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 60 V, kinematic viscosity of liquid is  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ , and in 1 G condition. The averaged value of acceleration on the test section during excitation was  $0.014 \text{ G}$ .

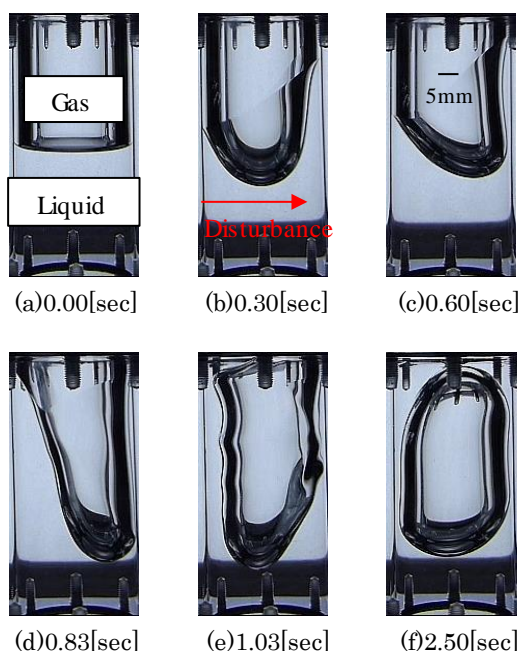


Fig. 8 Snapshot of liquid behavior in No. 2. Diameter of test section is 30 mm, drive voltage of solenoid is 40 V, kinematic viscosity of liquid is  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ , and in microgravity condition. The averaged value of acceleration on the test section during excitation was  $0.12 \text{ G}$ .

性により加振方向後方側の固体壁 (左側固体壁) に沿って上昇していく様子が見られた。しかし、その後は上昇していた液体が試験体底部に戻り、それに伴い、右側固体壁上の液体が上昇する様子が見られ、約  $0.26 \text{ sec}$  の短い周期で揺動する様子が観察された。

Figures 8~11 に実験条件 No.2~5 におけるスロッシング挙動実験結果を示す。なお、微小重力環境下に突入した際を時間(a)とし、加振開始時を時間(b)としている。なお、加振開始のタイミングは前述のとおり微小重力突入後  $0.5 \text{ sec}$  に設定しているが、落下検知システムおよび加振用のソレノイドの性能により、再現性は必ずしも良好とは言えず、実験毎に異なるものとなっている。微小重力環境下でのスロッシング挙動では、液面が湾曲したまま長い周期で揺動する様子が観察された。また、地上重力環境下と同様に、加振直後、内部の液体が慣性により加振方向後方側の固体壁に沿って上昇していく様子が見られたが、その後は、固体壁上の液体が上昇し続けるなど、異なった挙動が見られた。

No.2 に関して、 $0.30 \text{ sec}$  での液体挙動が左右非対称に見えるのは、落下の際に断線検知のための電線が内部カプセルに横方向の力を与えたためであると考えている。微小重力環境突入から約  $0.83 \text{ sec}$  後に液面が試験体の頂部に到達する様子が観察され、それに伴い、液面の湾曲形状が深くなり、気相が容器底部により近づく様子が観察された。

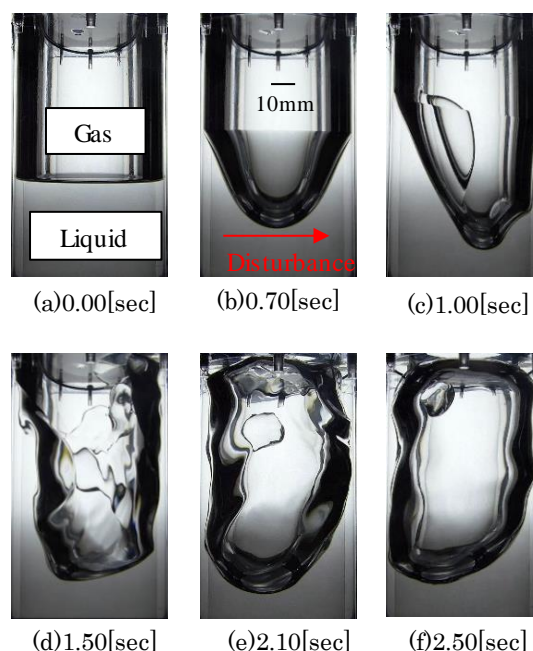


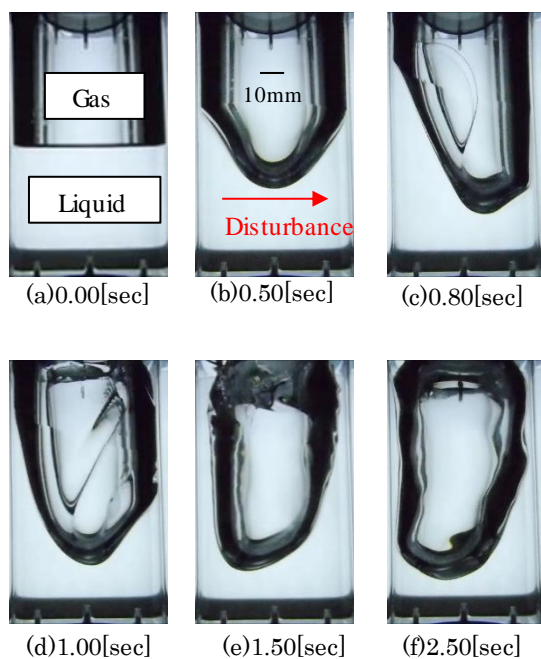
Fig. 9 Snapshot of liquid behavior in No. 3. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 40 V, kinematic viscosity of liquid is  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ , and in microgravity condition. The averaged value of acceleration on the test section during excitation was  $0.03 \text{ G}$ .

約 1.03 sec 後には、液体が試験体内部を一周することで右側固体壁上の液体と合体する様子が見られ、時間経過により、液体が固体壁に張り付くことで、気相の塊が中心部に形成される様子が見られた。

No. 2 とは容器内径のみが異なる No. 3 において、加振方向後方側の固体壁に沿って液体が上昇し、約 1.00 sec 付近には波が生じる様子が見られた。しかし、その後は、液体が頂部に到達せず、加振により生じた波が時間経過とともに崩れ、右側の液体と重なることで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。また、2.1 sec 以降では、一部の液体が分離して気相中に浮遊する様子も観察され、自由界面上に波長の短い波が重畳する様子も観察された。これより、容器内径により、気液界面形状が大きく異なることが分かる。

No. 3 とは加振加速度が異なる No. 4 に関して、加振方向後方側の固体壁に沿って液体が上昇し、約 0.80 sec 付近には波が生じる様子が見られた。その後は、No.3 と異なり、微小重力環境突入から約 1.00 sec 付近に固体壁上の液体が頂部に到達し、試験体頂部で液体が合体することで、気相の塊が中心部に形成される様子が見られた。これより加振力が大きいほど、液体移動量が大きくなることが分かる。

No. 4 とは動粘性係数が異なる No.5 に関しても、加振方向後方側の固体壁に沿って液体が上昇し、波が生じる様子



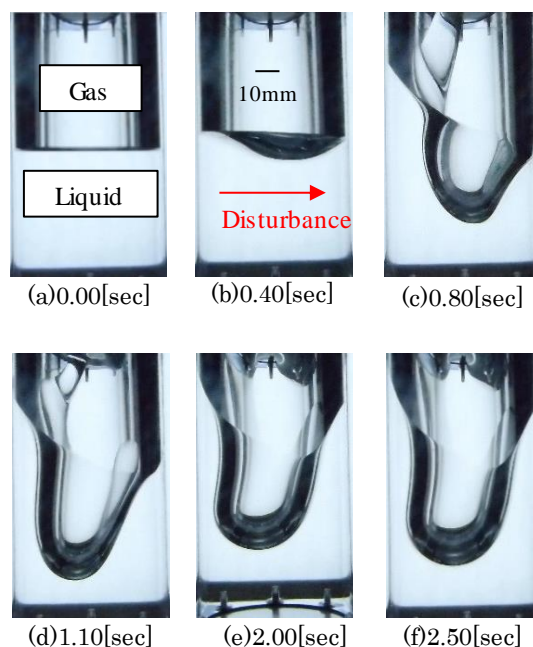
**Fig. 10** Snapshot of liquid behavior in No.4. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, kinematic viscosity of liquid is 1 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition. The averaged value of acceleration on the test section during excitation was 0.10 G.

が観察され、微小重力環境突入から約 0.70 sec 付近に波頭が試験体頂部に到達する様子が見られた。しかし、その後は液体が合体することなく、湾曲形状が深いまま液体が左右に揺動する様子が見られた。これより、低動粘性係数ほど液体移動量が大きくなることが分かる。

上述の実験結果のまとめとして、**Fig. 12** にスロッシング開始時の左側固体壁面上における液面の接触点高さの時間変化につき、加振加速度および液体の動粘性係数がおよぼす影響を示す。図より動粘性係数が大きいほど、接触点高さの移動速度が低下することが分かる。なお、4.1 で述べたように接触点移動速度と動的接触角の関係は動粘性係数により異なるため、つまり **Fig. 12** は動的濡れ性がスロッシング開始時の液面挙動におよぼす影響を示していることになる。

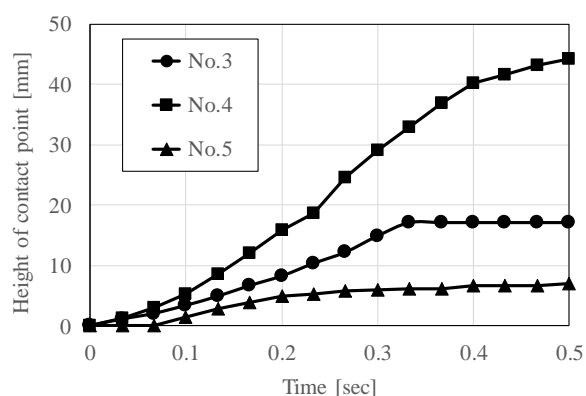
## 5. CFD 解析結果

微小重力環境下での時間経過におけるスロッシング挙動実験・CFD 解析結果、ならびに左側固体壁上の接触点移動距離を比較した結果につき以下に述べる。なお、微小重力環境での CFD 解析結果では、試験容器の中心軸上断面での液体挙動を濃く、前面の固体壁上を上昇する液体を薄く示している。また、実験・CFD 解析での左側固体壁上の接触点の移動距離を比較したグラフに関して、実験では面



**Fig. 11** Snapshot of liquid behavior in No.5. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, kinematic viscosity of liquid is 50 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition. The averaged value of acceleration on the test section during excitation was 0.05 G.



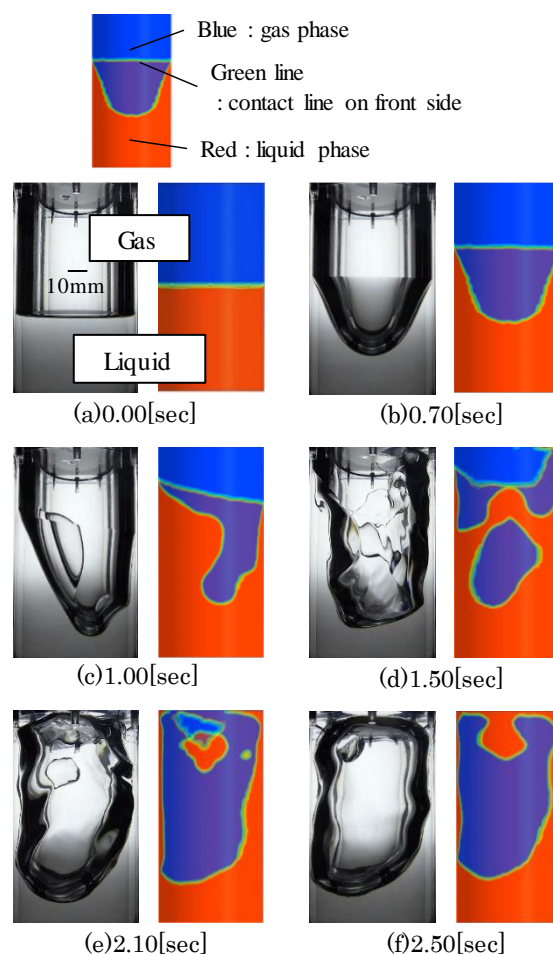


**Fig. 12** Time history of contact point. In No.3, diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 40 V, and kinematic viscosity of liquid is 1 mm<sup>2</sup>/s. In No. 4, diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, and kinematic viscosity of liquid is 1 mm<sup>2</sup>/s. In No. 5, diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, and kinematic viscosity of liquid is 50 mm<sup>2</sup>/s.

像処理ソフト ImageJ を使用して 1/30 sec 間隔で測定を行い, CFD 解析では 1/500 sec 間隔での結果を示した。

**Figure 13** に実験条件 No. 3 におけるスロッシング挙動実験・CFD 解析結果を, **Fig. 14** に左側固体壁上の接触点移動距離を示す。なお, 微小重力環境下に突入した際を時間(a)とし, 加振開始時を時間(b)としている。これより CFD 解析結果では, 実験結果と同様に加振直後である約 0.70 sec 以降に内部の液体が慣性により加振方向後方側の固体壁に沿って上昇していく様子が見られ, わずかに形状に差異が見られるものの, 約 1.00 sec 付近には加振により波が生じる様子が見られた。その後は, 両者ともに加振により生じた波が時間経過とともに崩れ, 右側の液体と重なることで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。また, 約 2.10 sec 以降では, 一部の液体が分離して気相中に浮遊する様子も観察された。

**Figure 14** より左側固体壁上の接触点移動量に関して, 微小重力環境突入から約 1.00 sec までは良好な一致を示した。しかしながらそれ以降, 実験結果では接触点の上昇が一旦停止し, 1.3 sec で急上昇し, 約 1.50 sec 付近において頂部に到達したのに対し, CFD 解析結果では上昇が一旦緩やかになり, 再度約 1.80 sec 付近から液体が上昇することで, 約 2.00 sec 付近に試験体頂部に到達する様子が確認された。上述の実験結果で見られた接触点の上昇が停止する挙動が, 実験結果と CFD 解析結果の不一致に起因している。このような挙動は, スロッシング開始前の固体壁の

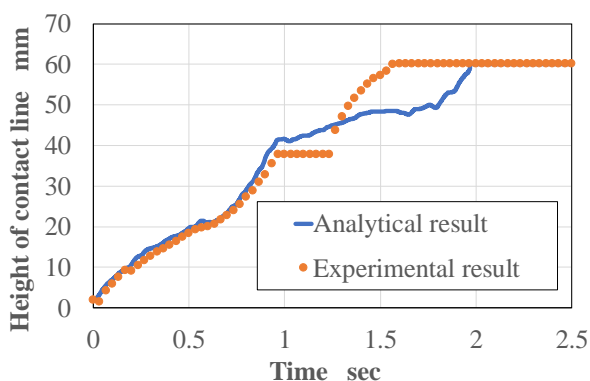


**Fig. 13** Snapshot of liquid behavior in No. 3. (Left: Experimental Right: Analysis) Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 40 V, kinematic viscosity of liquid is 1 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition.

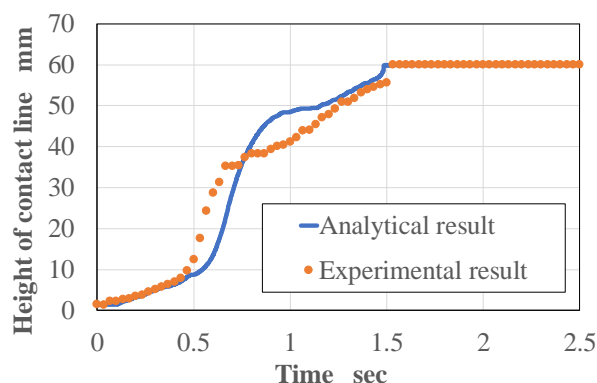
表面状態の不均一性によるものと考えられる。この不均一性は, 微小重力突入前に落下カプセルを上昇させる際に試験装置が揺動し, 試験体内部でスロッシングが発生して固体壁表面に厚みが不均一な液膜が形成されることにより生じたものと考えられる。上述のように波頭形状および時間経過における左側固体壁上の接触点移動量に関して一部差異が見られたが, 時間経過における固体壁上の液体挙動ならびに微小重力突入から加振直前まで良好な一致が得られたことから, Silicone oil 動粘性係数 1mm<sup>2</sup>/s の際に動的接触角における境界条件として導入した Cox の式 ( $C=6$ ) は妥当であると考えられる。

**Figure 15** に実験条件 No. 5 におけるスロッシング挙動実験・CFD 解析結果を, **Fig. 16** に左側固体壁上の接触点移動距離を示す。なお, 微小重力環境下に突入した際を時

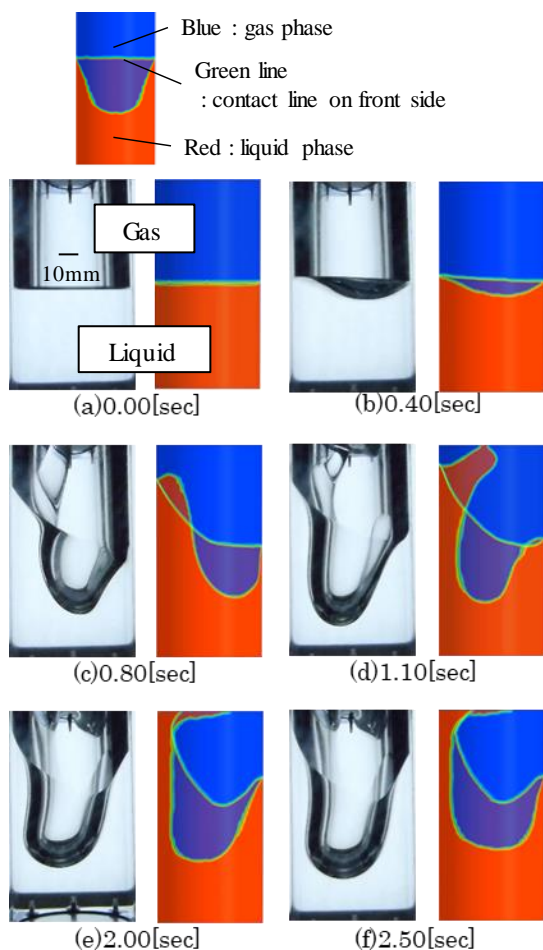




**Fig. 14** Height of contact line on the left side solid wall after sloshing behavior in No. 3. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 40 V, kinematic viscosity of liquid is 1 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition.



**Fig. 16** Height of contact line on the left side solid wall after sloshing behavior in No. 5. Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, kinematic viscosity of liquid is 50 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition.



**Fig. 15** Snapshot of liquid behavior in No. 5. (Left: Experimental Right: Analysis) Diameter of test section is 60 mm, drive voltage of solenoid is 80 V, kinematic viscosity of liquid is 50 mm<sup>2</sup>/s, and in microgravity condition.

間(a)とし、加振開始時を時間(b)としている。これより CFD 解析結果では、実験結果と同様に加振直後約 0.40 sec 以降に内部の液体が慣性により加振方向後方側の固体壁に沿って上昇していく様子が見られ、加振により生じた波が崩れることなく頂部に到達する様子が観察された。しかし、波頭形状および波頭が試験体頂部に到達する時間や、微小重力環境突入から約 2.50 sec における液面の湾曲形状に若干の差異が見られた。左側固体壁上の接触点移動量に関して、微小重力環境突入から約 0.40 sec までは比較的良好な一致が得られたが、その後は、CFD 解析結果では急激に液体が上昇するのに対し、CFD 解析結果では加振直後から約 0.10 sec 後に上昇するなどの差異が見られた。加振による波頭形状や時間経過における左側固体壁上の接触点移動量に関して一部差異が見られたが、時間経過における固体壁上の液体挙動および微小重力突入から加振直前約 0.4 sec までは良好な一致が得られたことから、Silicone oil 動粘性係数 50 mm<sup>2</sup>/s の際に動的接触角における境界条件として導入した Cox の式 ( $C=5$ ) は妥当であると考えられる。

## 6. 結 言

落下塔実験設備 COSMOTORRE を使用した短時間微小重力実験により、横方向加振を受ける円筒容器内スロッシング挙動を観察し、3 次元 CFD 解析結果との比較を実施した。実験において横方向に加振する方法として、試験容器、ビデオカメラ、光源等を搭載したプレートをガイドプレート上に設置し、電磁式可動プランジャで平板を押し出す方法を採用し、重力環境、試験体内径、試験体の加振力に対応するソレノイドの駆動電圧、液体の動粘性係数がタンク

内の流体挙動におよぼす影響を観察した。また、固体壁近傍の液体接触点の移動速度が動的接触角に及ぼす影響を調査するため、シリンジポンプを用いて毛細管内の液体移動速度を変化させることで動的接触角の測定を行い、本実験で得られた結果をもとに、動的接触角に接触点移動速度の依存性を持たせる既存式である Cox の式を決定し、CFD 解析の境界条件に導入することで動的接触角を評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- 動的接触角に接触点移動速度の依存性を持たせる既存式である Cox の式と毛細管実験結果の比較を行い、Silicone oil の動粘性係数  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$  の際は  $C=6$  に、 $50 \text{ mm}^2/\text{s}$  の際は  $C=5$  の結果と近くなることが分かった。そのため、これらの  $C$  の値を用いた Cox の式を CFD 解析の境界条件に導入し、微小重力環境下におけるスロッシング挙動を評価した。
- 実験結果に関して、試験体内径、加振加速度、動粘性係数が微小重力環境下でのスロッシング挙動に大きな影響をおよぼすことが分かった。特に試験体内径、加振加速度が大きく、かつ動粘性係数が小さい場合、液面に波長の短い波が重畳し、液面の破砕が生じることが分かった。このような液面の大きな変形は液相へのガス巻き込みを引き起こし、宇宙推進系においてエンジン不具合につながる可能性を有する。また、微小重力環境においては、地上重力環境と比較すると、揺動周期が長く、姿勢制御に悪影響を与える可能性がある。
- CFD 解析結果と実験結果の比較に関して、加振により生じた波形状や液体が試験体頂部に到達するまでの時間に若干の差異が見られたが、揺動周期や時間経過に伴う液面の概略形状に定性的な一致が見られ、また、気相中に分離した液体の塊が浮遊する様子等が精度よく再現された。左側固体壁上の接触点移動量に関して、加振前までの液体移動量に良好な一致が得られたことから、毛細管実験より得られた本 CFD 解析で導入した Cox の式は妥当であると考えられる。実験

と CFD 解析結果の不一致の要因として、実験においてスロッシング開始前の初期状態に固体壁の表面状態が不均一性であること、本実験における計測手法では、薄液膜等を観察することが困難で、画像処理の際に誤差が生じたことが考えられる。さらに CFD 解析においては、加振方向のみの加速度（1 軸方向）を momentum のソース項に入力したため、今後は 3 軸の加速度を導入することで再現度が向上すると考えている。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、実験においてご協力をいただいた株式会社植松電機様に心より厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) B.N. Antar and S. Vappu: CRC Press, ISBN0-8493-8913-5 (1993).
- 2) D. Bonn, J. Eggers, J. Indekeu, J. Meunier and E. Rolley: Review of modern physics, **81** (2009) 739. (DOI: 10.1103/RevModPhys.81.739)
- 3) T. D. Blake: J. of Colloid and Interface Science, **299** (2006) 1.
- 4) R. Imai and M. Michihara: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **37** (2017) 340306.
- 5) R. Luppès, J. A. Helder, and A. E. P. Veldman: Proc. of European Conference on Computational Fluid Dynamics ECOMAS CFD, (2006).
- 6) H. A. Snyder: Cryogenics, **39** (1999) 1047.
- 7) S. Osher and J. A. Sethian: J. Comput. Phys, **79** (1988) 12.
- 8) E. Olsson, G. Kreiss and S. Zahedi, J. Comput: Phys, **225** (2007) 785.
- 9) J.U. Brackbill, D.B. Kothe and C. Zemach: J. Comput. Phys., **100** (1992) 335.
- 10) D.L. Youngs: Numerical Methods for Fluid Dynamics, Academic Press (1982).
- 11) R. Cox: J. of Fluid Mechanics, **168** (1986) 169.
- 12) Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.: Technical Data, Silicone Fluid KF-96, Performance Test Results, 2004 (in Japanese).
- 13) S. Matsumoto, K. Nshino, I. Ueno, T. Yano and H. Kawamura: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **31**, Supplement 2014, (2014) S51.