

平成 30 年度
先進的高性能冷却デバイス開発に必要な気
液界面相変化を伴う濡れ挙動の解明

研究報告書



競輪とオートレースの補助事業



平成 31 年 3 月 31 日

室蘭工業大学大学院 航空宇宙総合工学コース

今井 良二

道原 孟里, 田村 健一郎, 郡司 理来

目次

第1章	緒言	3
1-1	社会的課題の現状	3
1-2	目指す姿	3
1-3	本研究の目的	3
第2章	相変化を伴わない動的濡れ挙動の観察	4
2-1	毛細管内における動的接触角の測定	4
2-2	微小重力実験	11
2-3	鉛直方向スロッシング実験	15
2-4	まとめ	36
第3章	加熱による相変化を伴う動的濡れ挙動の観察	38
3-1	実験装置, 実験方法	38
3-2	供試体の加熱されていない角を上昇する液体の気液界面高さの時間変化	46
3-2-1	実験 No.2, No.3 の実験結果	48
3-2-2	実験 No.4, No.5 の実験結果	51
3-2-3	実験 No.6 の実験結果	53
3-2-4	実験 No.7, No.8 の実験結果	56
3-3	供試体の加熱されていない角を上昇する液体の界面高さの時間変化の結果	59
3-4	まとめ	62
3-5	今後の課題	62
第4章	減圧による相変化を伴う自由界面挙動の観察	64
4-1	目的	64
4-2	実験装置	64
4-3	実験方法	66
4-3-1	学内切り離し式落下装置による微小重力実験	66
4-3-2	落下塔による短時間微小重力実験	67
4-4	実験結果と考察	71
4-4-1	学内切り離し式落下装置による微小重力実験結果	71
4-4-2	落下塔による微小重力実験結果	73
4-5	参考文献	91
第5章	マイクロチャンネル薄液膜蒸発現象を利用した高熱流束除熱の実証	92
5-1	薄液膜蒸発の伝熱特性	92
5-2	研究ターゲット	94
5-3	実験方法	94

5-3-1	実験概要	94
5-3-2	熱流束の算出方法	94
5-3-3	実験条件	95
5-3-4	マイクロチャネル	98
5-3-5	実験装置	99
5-4	実験結果	101
5-5	矩形断面マイクロチャネルを用いた場合の結果	101

第1章 緒言

1-1 社会的課題の現状

地球温暖化の原因物質であるCO₂削減が社会的課題となっている。特にCO₂排出量の多い産業部門、輸送部門における各種機器、システムの省エネ化はCO₂削減に貢献する有効な手段である。その中で冷却技術は省エネを実現するのに必要な共通技術の一つである。例えば多大なエネルギーを消費するデータセンターの電子機器の冷却、CO₂を排出しない電気自動車のパワーデバイスの冷却がその例として挙げられる。しかしながら現状の冷却機器、システムは、古典的な空冷、水冷を適用したものが一般的であり、劇的な性能向上が実現されていない。

1-2 目指す姿

少量の冷媒で効率的な冷却を実現可能な、気化熱を利用した二相冷却システムを、電子機器、パワーデバイスに適用することを最終目的とする。特に薄い液膜上で発生する蒸発（薄液膜蒸発）を利用すると、非常に高い排熱密度（単位面積あたりの排熱量）を実現することが可能である。これにより、冷媒の少流量化が可能となり、冷却機器、システムの小型化、小規模化が実現される。

1-3 本研究の目的

薄液膜蒸発現象は、多大な排熱を実現できることは知られているが、非常に微細な領域で起こる現象であり、伝熱メカニズムは十分に解明されていない。薄液膜の形成においては、気液界面が固体壁面上を移動する濡れ現象が関与しており、かつ冷却に応用する場合は、濡れ現象に気液界面上での蒸発も考慮する必要がある。本研究では、気液界面上で蒸発を伴う濡れ現象を詳細に観察、計測する技術を確立することを目的とする。本成果を蒸発を伴う濡れ現象の解明およびこれを利用した冷却デバイスの実用化につなげることを狙う。

第2章 相変化を伴わない動的濡れ挙動の観察

2-1 毛細管内における動的接触角の測定

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した。本実験はシリンジポンプ（YMC 製 ysp-201）を使用して毛細管内（0.95mm×0.95mm）の液体移動速度を変化させることで、動的接触角の計測を行った。なお、毛細管内自由界面の観察は高速度カメラ（松電舎製 CHU130EX）を用いて行い、図 3-2-1-1 に実験装置を示す。試験液体は微小重力実験に使用するものと同じである Silicone oil（信越化学製 KF96）とし、表 2-1-1 に示す動粘性係数 $1\text{mm}^2/\text{s}$, $50\text{mm}^2/\text{s}$ の 2 種類を使用した。毛細管に後方から強く照明を当てて、濃淡をはっきりつけ観察を行った。

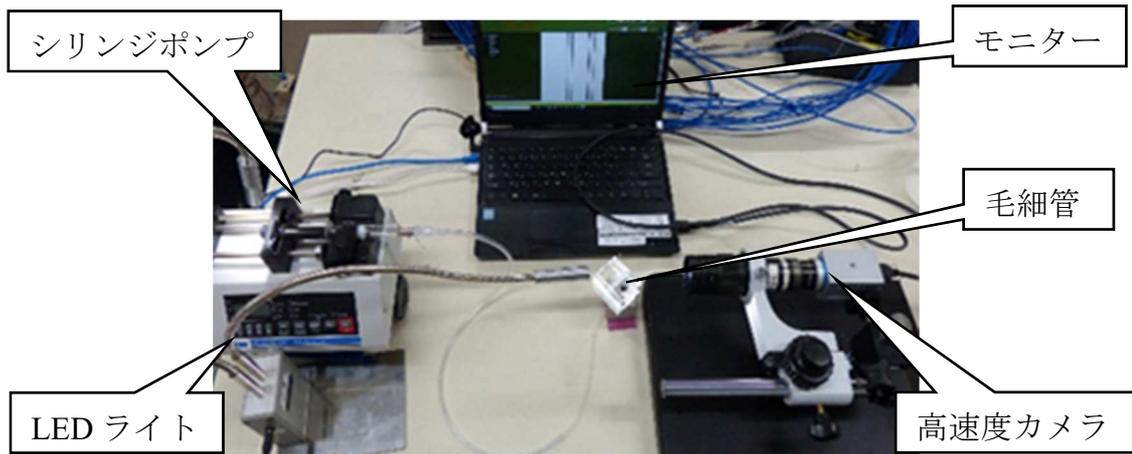


図 3-2-1-1 毛細管実験装置

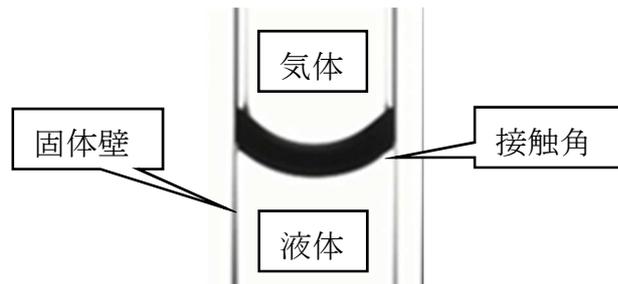


図 3-2-1-2 毛細管内

表 2-1-1 物性値表

試験液	動粘性係数[mm ² /s]	密度[kg/m ³]	表面張力[mN/m]
Silicone oil	1	815.6	17
	50	957	21

実験装置の詳細を以下に示す.

・ガスタイトシリンジ

本実験に使用したガスタイトシリンジ (ジーエルサイエンス製 ハミルトン ガスタイトシリンジ 1010LTN) を図 3-2-1-3 に示す. シリンジ容量 10[mL]となっており, シリンジポンプに設置して使用した.



図 3-2-1-3 ガスタイトシリンジ

・ハイスピードカメラ

本実験ではハイスピードカメラ (松電舎製 CHU130EX) を使用した. 有効画素数 1280×1024, 1/2 インチの CMOS センサーにより, フルフレームで 2000 コマ/秒, VGA サイズで 800 コマ/秒, 最大 4000 コマ/秒の高速撮影が可能なのである. 本実験では 200fps で撮影を行った.

・シリンジポンプ

本実験ではシリンジポンプ (YMC 製 YSP-201) を用い, 液体を駆動した. 本ポンプではプログラムを入力することで定量の送液, 吸引が可能である. ディスポーザブルシリンジでは 1~60[mL], ガスタイトシリンジでは 10[μL]~50mL のシリンジサイズが使用可能であり, 最小流速 0.012[μL/min], 最大流速 42.57[mL/min]得ることができる. 本実験ではエラー! 参照元が見つかりません. に示すガスタイトシリンジを使用した.

本実験にて選定したシリンジを使用した際、シリンジポンプ最大流量 8.538[mL/min] 得ることができる。そこで、0.05[mL/min]~8.00[mL/min] 間を 0.05[mL/min] 刻みで設定し、それぞれの試験液に対して計 16 回ずつ実験を行った。ハイスピードカメラにより撮影された映像を ImageJ にて画像処理を行い、接触角および接触点移動速度を測定した。なお、測定は何十点か行い、平均値を算出している。図 3-2-1-4 に接触点移動速度の測定を、図 3-2-1-5 に接触角測定の様子をそれぞれ示す。

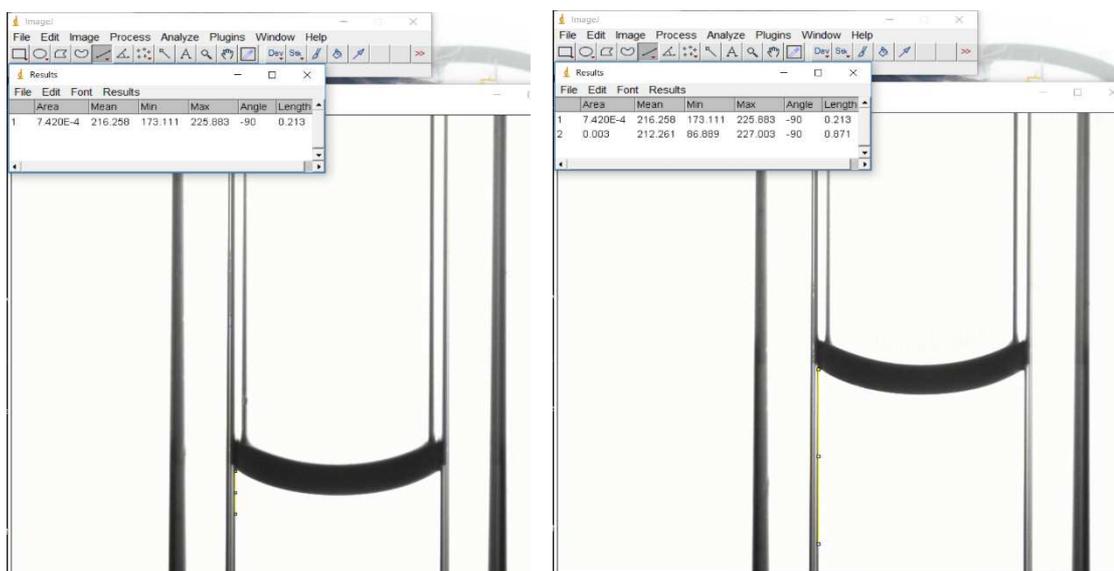


図 3-2-1-4 接触点移動速度測定

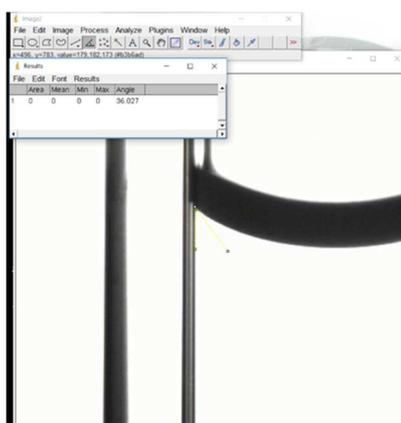


図 3-2-1-5 接触角測定

毛細管実験結果の一部を以下に示す。

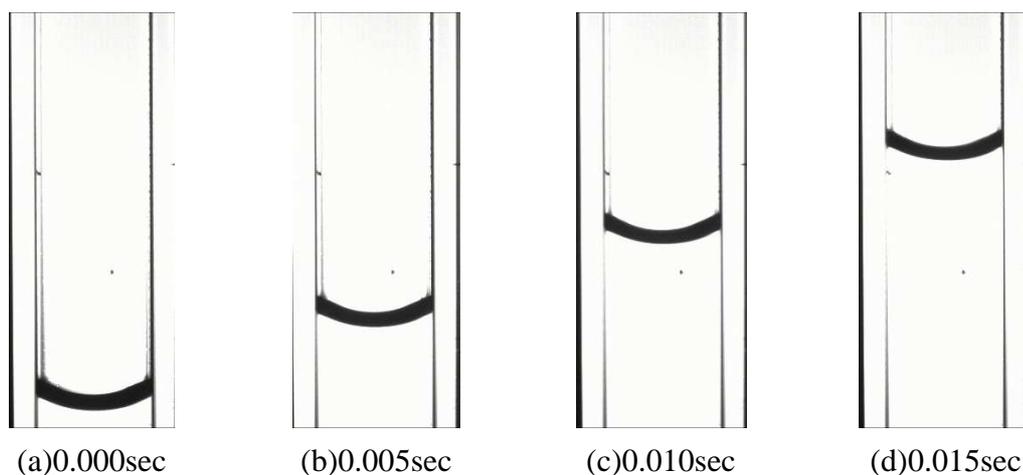


図 3-2-1-6 Silicone oil:1[cst], シリンジポンプ流量 8.0[mL/min], 前進接触角

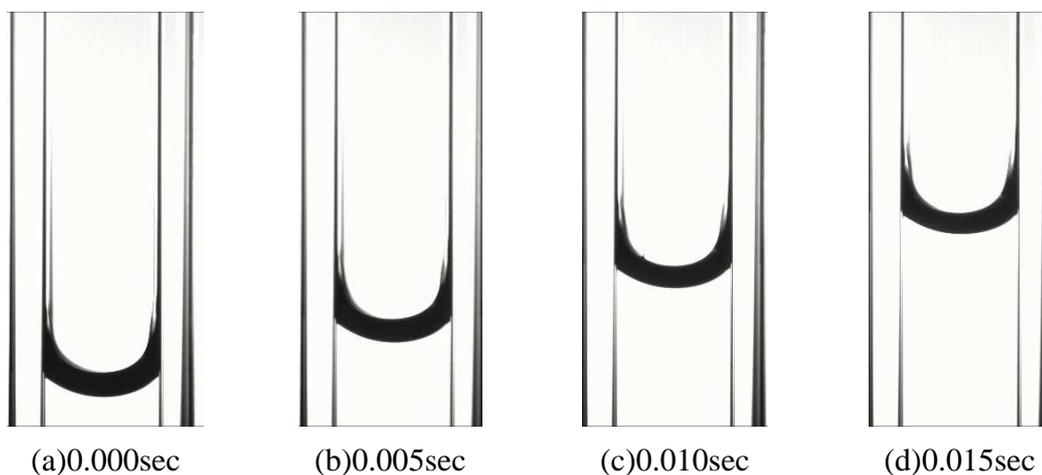


図 3-2-1-7 Silicone oil:1[cst], シリンジポンプ流量 4.0[mL/min], 前進接触角

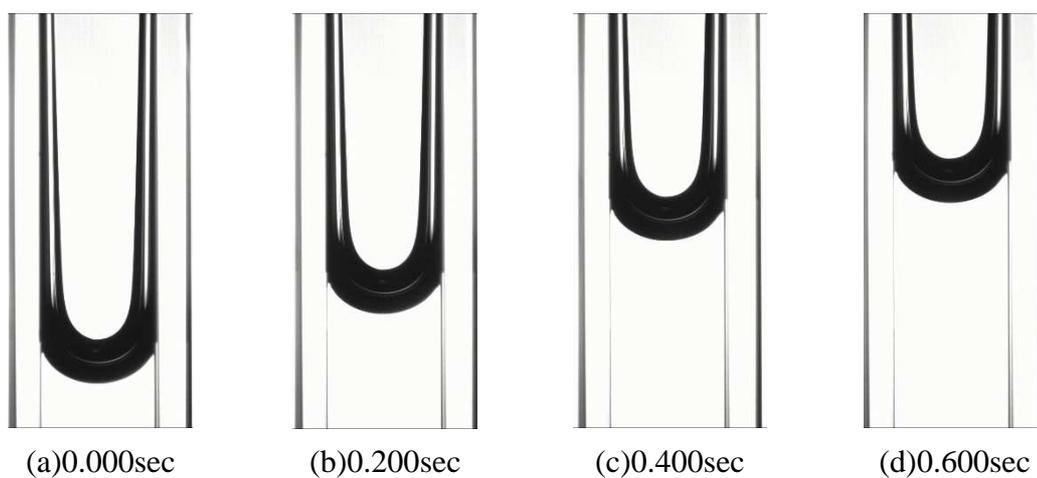


図 3-2-1-8 Silicone oil:1[cst], シリンジポンプ流量 0.10[mL/min], 前進接触角

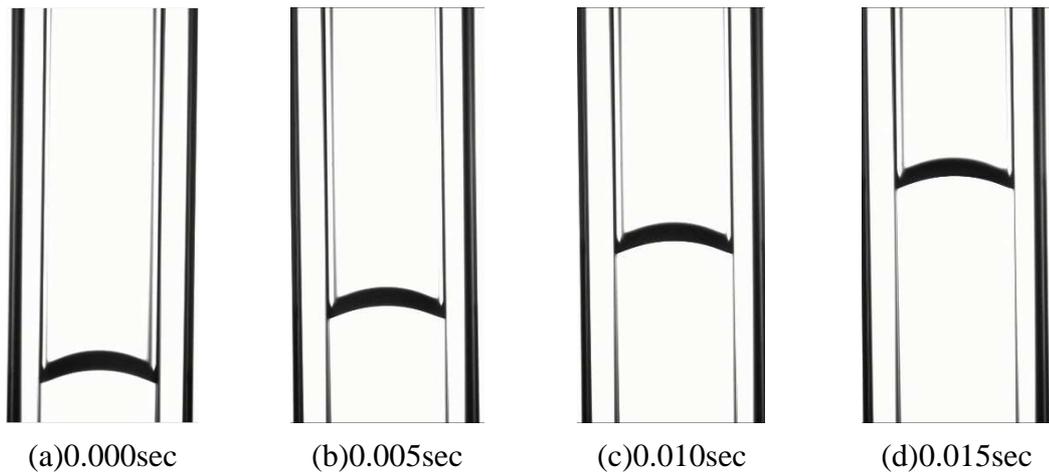


図 3-2-1-9 Silicone oil:50[cst], シリンジポンプ流量 8.00[mL/min], 前進接触角

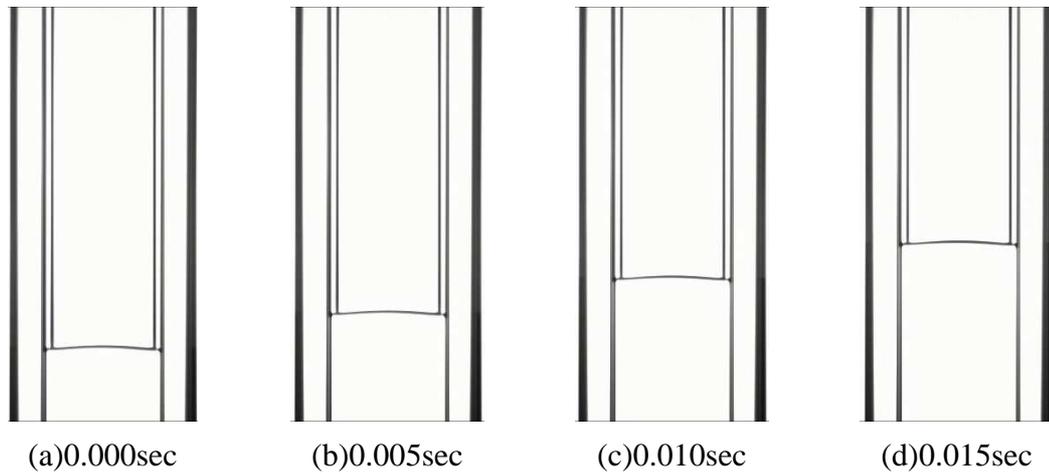


図 3-2-1-10 Silicone oil:50[cst], シリンジポンプ流量 4.00[mL/min], 前進接触角

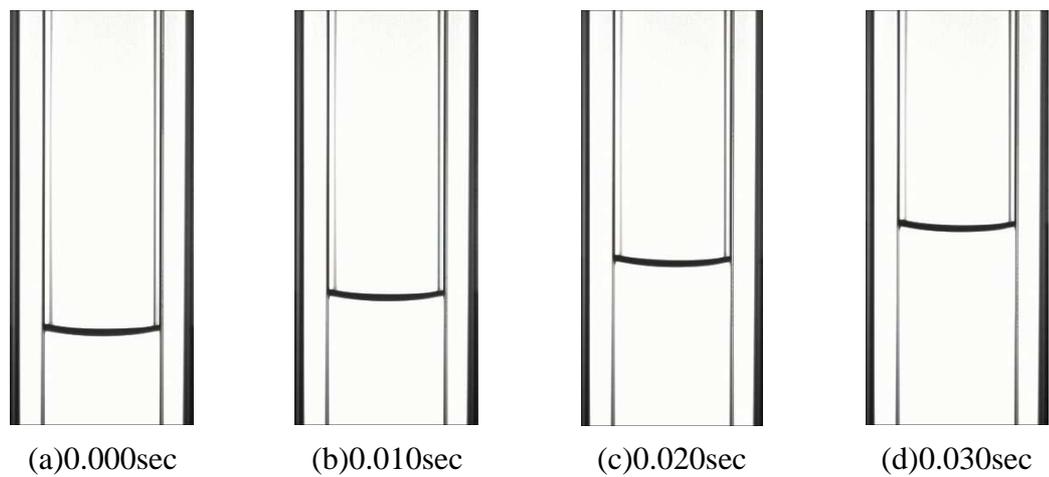
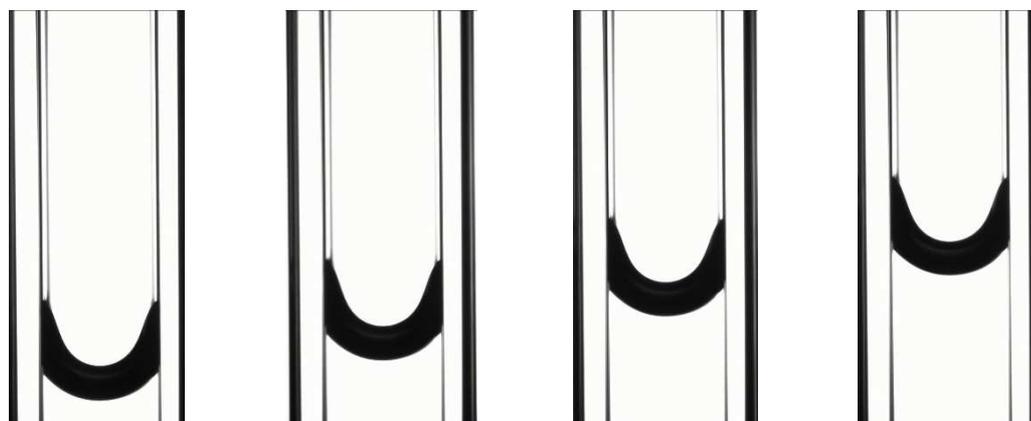


図 3-2-1-11 Silicone oil:50[cst], シリンジポンプ流量 2.00[mL/min], 前進接触角



(a)0.000sec (b)0.400sec (c)0.800sec (d)1.200sec

図 3-2-1-12 Silicone oil:50[cst], シリンジポンプ流量 0.10[mL/min], 前進接触角

Silicone oil 動粘性係数 1[cst], 50[cst]での接触角 θ_d と液体移動速度 U の関係を示した実験結果と接触点の速度依存性を考慮した Cox の式を比較したグラフを図 3-2-1-13, 図 3-2-1-14 にそれぞれ示す. 実験結果より, 接触点の移動速度が速くなるほど, 前進接触角が大きくなることがわかる. これらの図より Silicone oil 動粘性係数が 1[cst]では Cox の式のパラメータ $C=6$ の際に, Silicone oil 動粘性係数が 50[cst]では Cox の式のパラメータ $C=5$ の際に毛細管実験結果と近くなることがわかった. そこで, これらの C の値を用いた Cox の式を数値流体解析における固体壁近傍の動的接触角の境界条件とし UDF にて導入した.

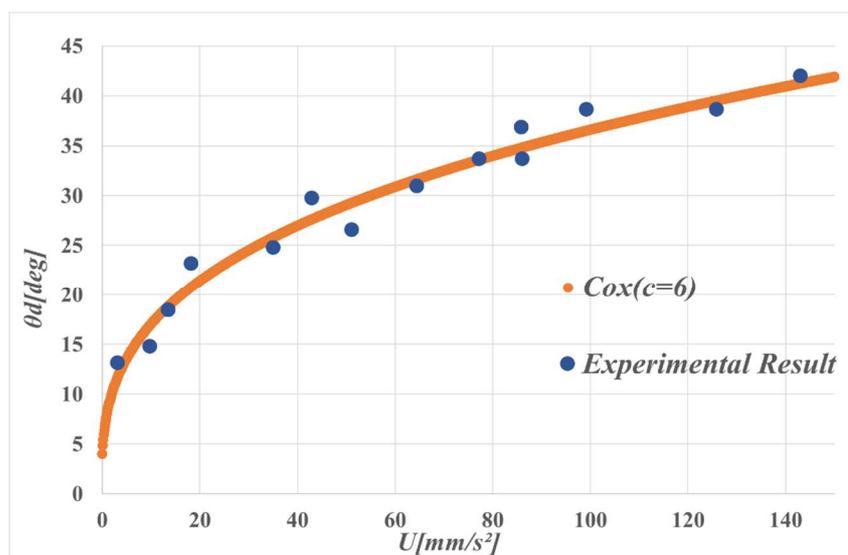


図 3-2-1-13 接触点移動速度と接触角の関係 (動粘性係数 1[cst])

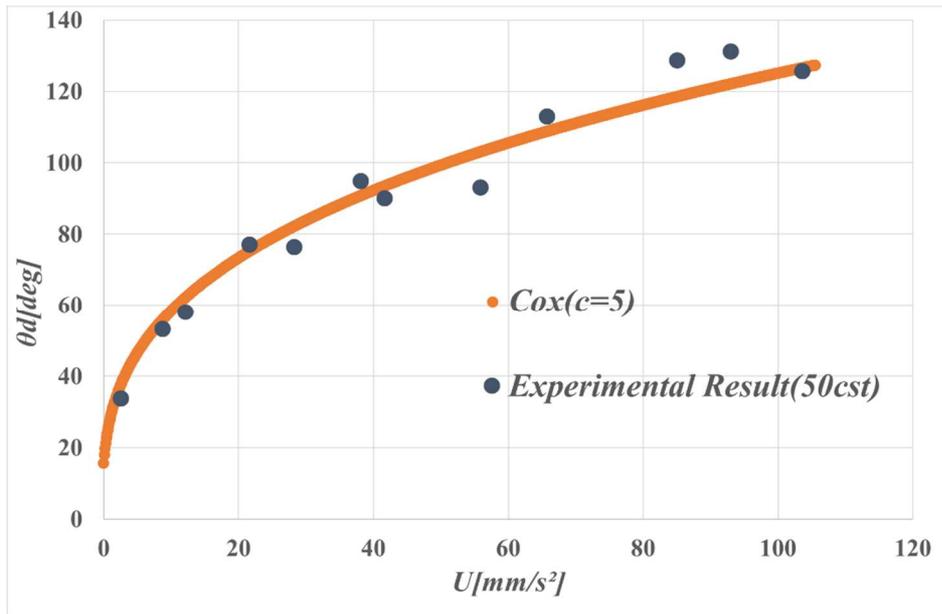


図 3-2-1-14 接触点移動速度と接触角の関係 (動粘性係数 50[cst])

2-2 微小重力実験

微小重力実験には図 2-2-1 に示す，株式会社植松電機所有の落下塔設備コスモトローレを使用した．落下塔設備コスモトローレは，実験装置を搭載したカプセルを自由落下させることに微小重力環境を得ることができ，概要は自由落下距離約 45m，微小重力時間は 2.5～3sec，微小重力環境約 $10^{-3}G$ となっている．また落下カプセルは外箱と実験装置を搭載する内箱からなる二重構造であり（図 3-2-1-1），外箱が直接空気抵抗を受けることで，実験装置を搭載した内箱は非常に質の高い重力環境を得ることができる．また内部カプセルは図 3-2-1-13 に示すよう，ニクロム線が巻いてある樹脂でつるされており，電気を流しニクロム線を加熱して，樹脂を焼き切ることで自由落下を行う．



図 3-2-1-1 コスモトローレ



図 3-2-1-2 カプセル内部



図 3-2-1-3 連結部

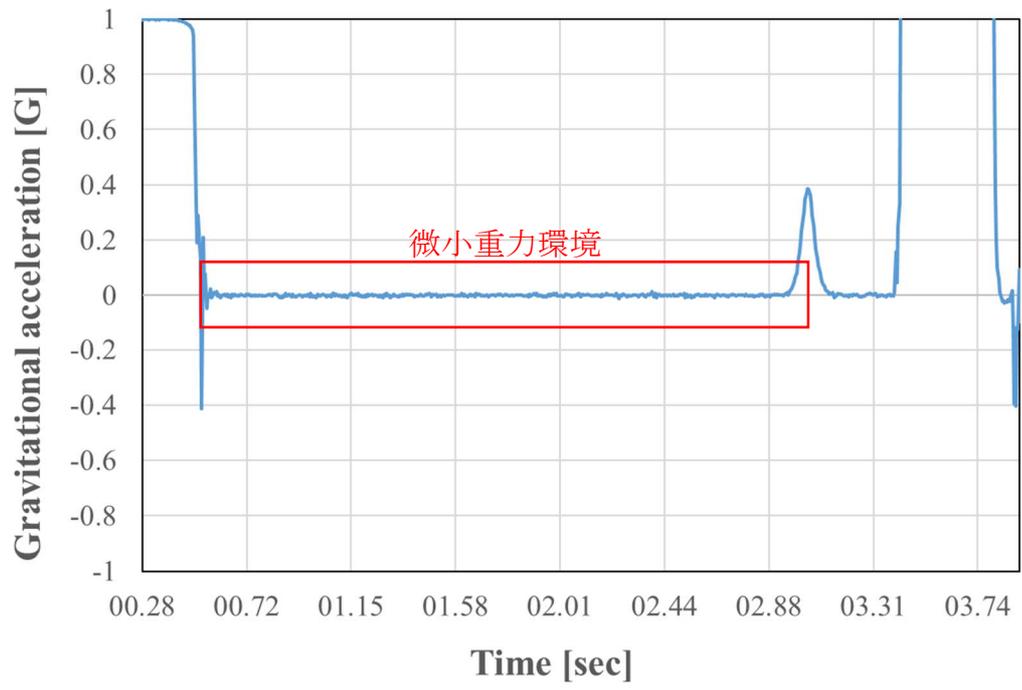


図 3-2-1-4 微小重力環境

鉛直方向スロッシング実験装置全体図を図 3-2-1-5 に、実験装置搭載部の詳細をエラー! 参照元が見つかりません。、図 2-2-7 にそれぞれ示す。

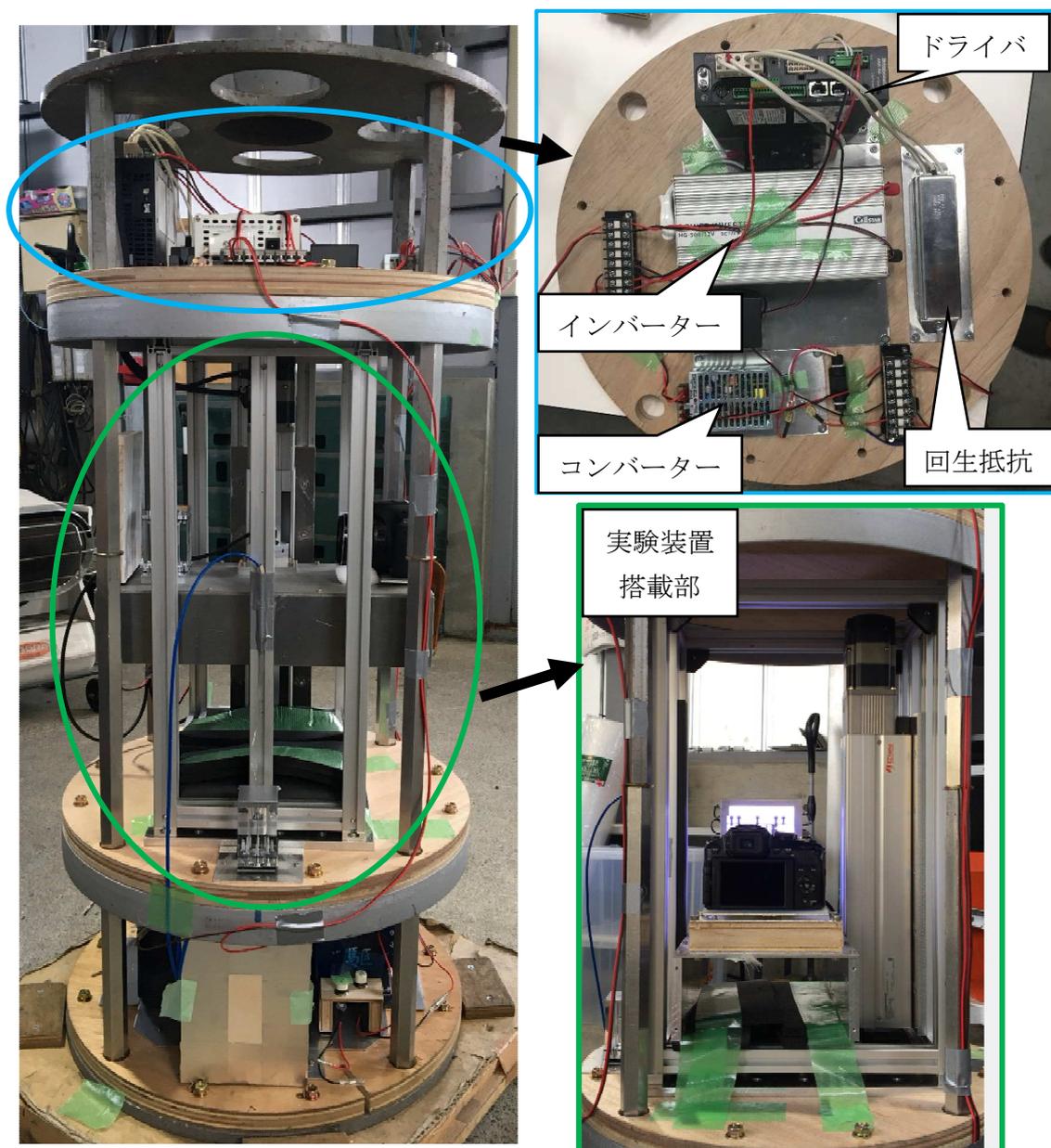


図 3-2-1-5 鉛直方向スロッシング実験装置全体図

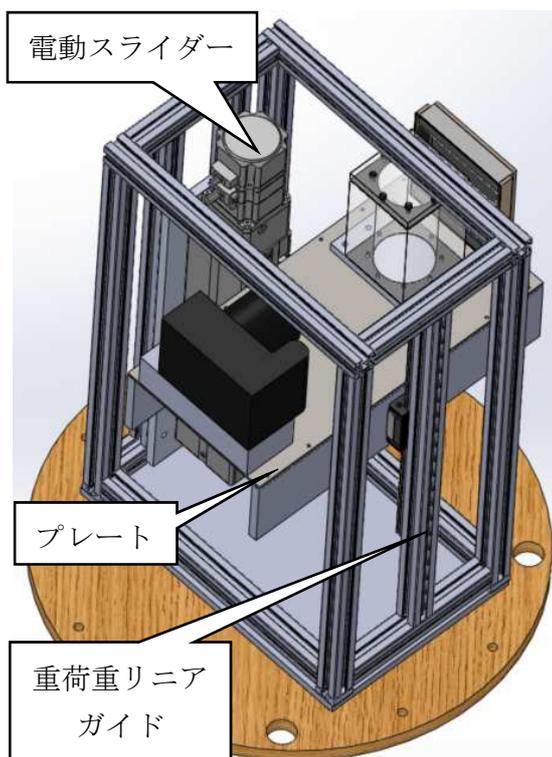


図 3-2-1-6 実験装置搭載部

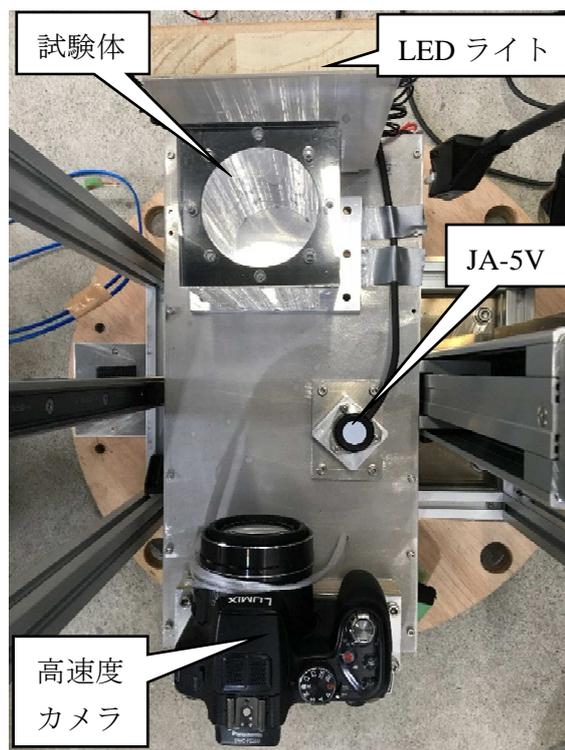


図 3-2-1-7 プレート上詳細

2-3 鉛直方向スロッシング実験

鉛直方向スロッシング実験条件を表 2-1-1 に示す。

表 2-3-1 鉛直方向スロッシング実験条件

実験条件	容器内径 [mm]	Siliconeoil [cst]	液体温度 [°C]	加速度	運転速度 [Hz]	移動量 [step]	加速レート [ms/kHz]	減速レート [ms/kHz]
No.1a	30	1	13.8	減速	12500	15000	120	8
No.2a	30	1	13.2	減速	1000000	17000	24	1
No.3a	30	1	16.0	加速	12500	15000	120	8
No.4a	30	1	17.4	加速	1000000	17000	24	1
No.5a	60	1	15.3	減速	1000000	17000	24	1
No.6a	60	1	12.5	加速	1000000	17000	24	1

以下に実験結果を示す。なお、初期液量は容器の 50%、微小重力突入時を時間 (a)、加振開始時間を時間(b)としている。

- No.1a の駆動データ、実験結果、加速度データをそれぞれ示す。

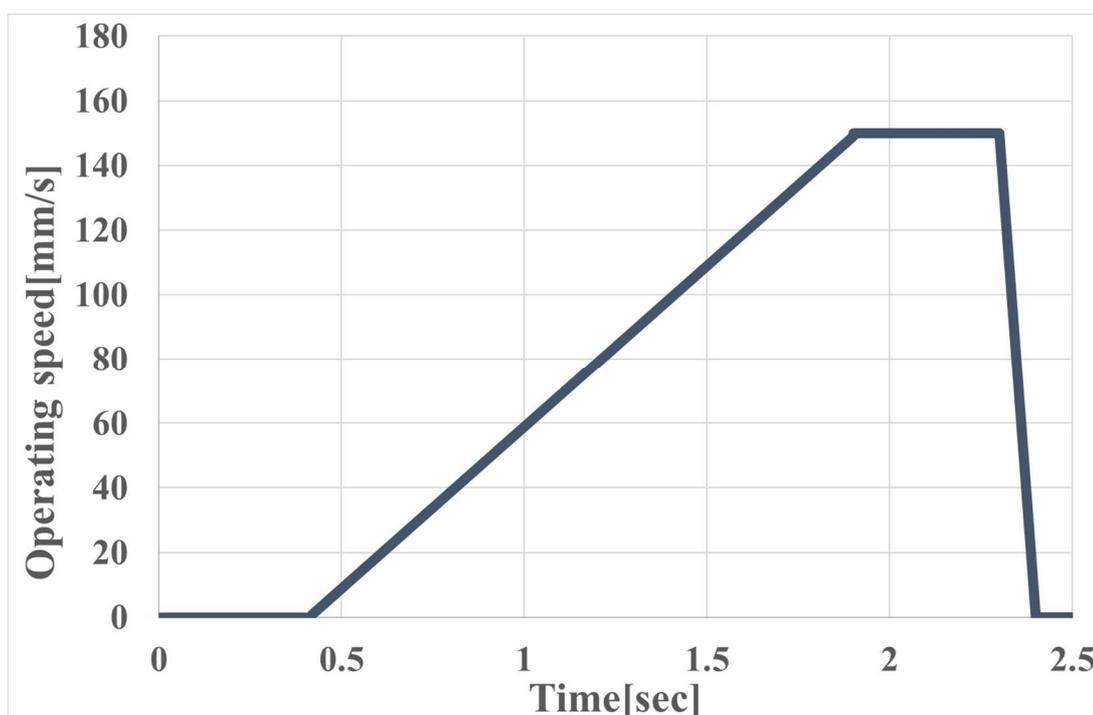


図 3-2-1-1 No.1a 駆動データ (減速)



(a)0.0sec



(b)0.40sec



(c)0.70sec



(d)1.00sec



(e)1.30sec



(f)1.60sec

図 3-2-1-2 No.1a 実験結果

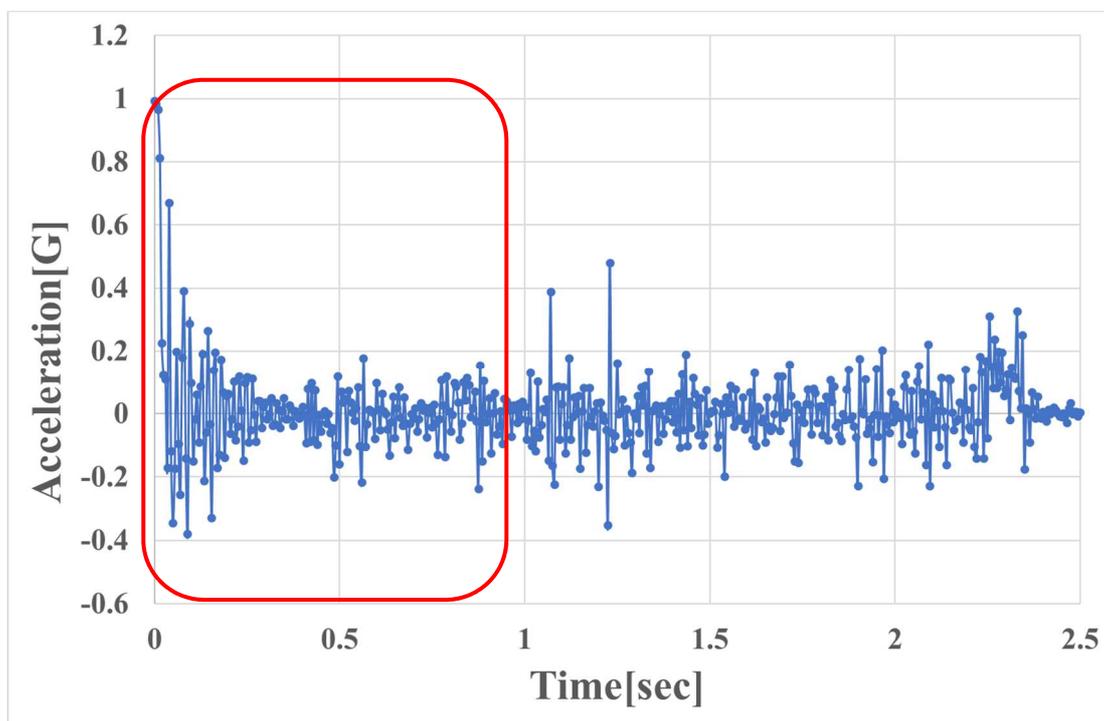


図 3-2-1-3 No.1a 重力加速度データ

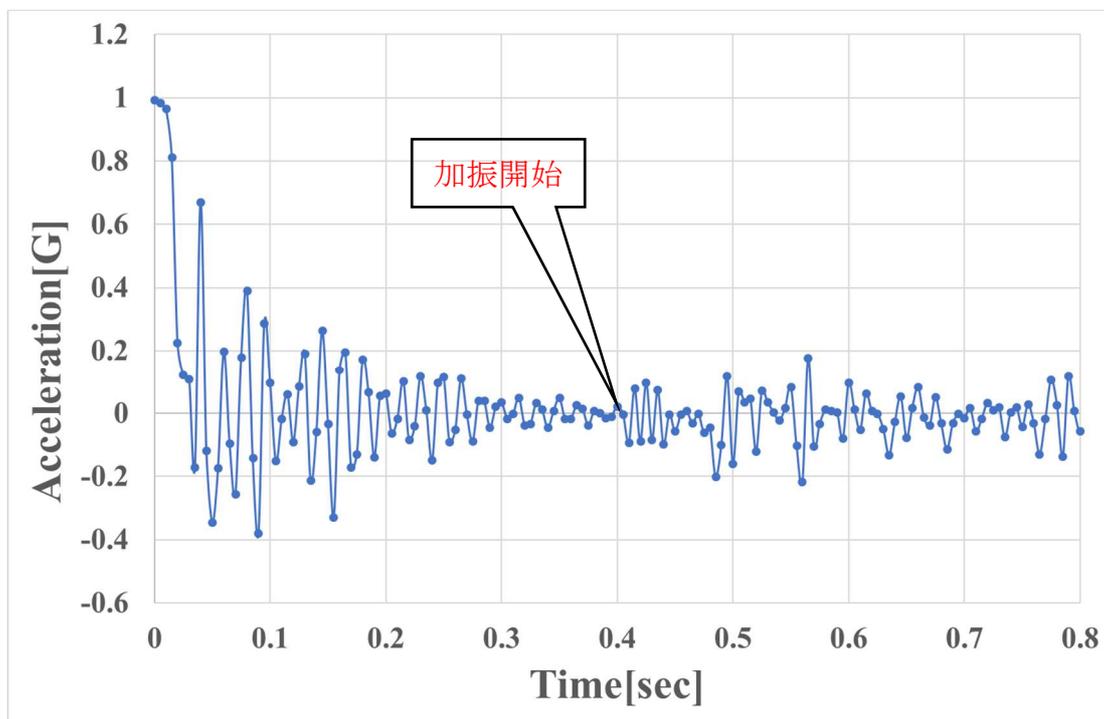


図 3-2-1-4 No.1a 重力加速度データ (赤部分抜粋)

微小重力環境突入から約 0.4sec 後にモーターを駆動させ、微小重力環境の中、下向きに微小な加速度 0.01G を 1.5sec 加えた。JA-5V により計測した重力加速度データに関して、図 3-2-1-4 より、落下直後は切り離しの衝撃により大きく加速度が変動しているが、時間経過により加速度が $10^{-3}G$ に近づいていくことがわかる。また微小重力突入から約 0.4sec 後にモーターを駆動させることで、加速、等速、減速運転を約 2.0sec 行い、微小重力突入から約 2.4sec 後にモーターが停止した様子が図 3-2-1-3 の加速度データよりわかる。微小重力環境下で加速度を与えた際の液面挙動を観察することがターゲットとなっているため、今回は微小重力突入から約 1.9sec 後までの液体挙動をメインに観察する。微小重力環境下において液面が湾曲してから、下向きに微小な加速度 0.01G を与えた際、液面の湾曲形状にそれほど大きな変化は見られなかった。しかし、以前に行った動的濡れ挙動の実験と比較すると（加速度を与えない純粋な微小重力環境での液体挙動）、動的濡れ挙動では湾曲した液面が単振動を起こして徐々に液面形状が落ち着いていくため、接触角や固体壁面上の液体の接触点が常に変化する様子が観察された。それに比べ、今回のように微小な加速度を与えた際は、液面に単振動のようなものは見られなく、固体壁面上の液体の接触点は上昇しようとしているため変化せず、また接触角もあまり変わっていないように見える。微小重力突入から 1.9sec 以降は等速、減速運転のため、試験体には下向きの加速度がかかり、液面の湾曲が抑えられていく様子も観察された。

・ No.2a の駆動データ，実験結果，加速度データをそれぞれ示す。

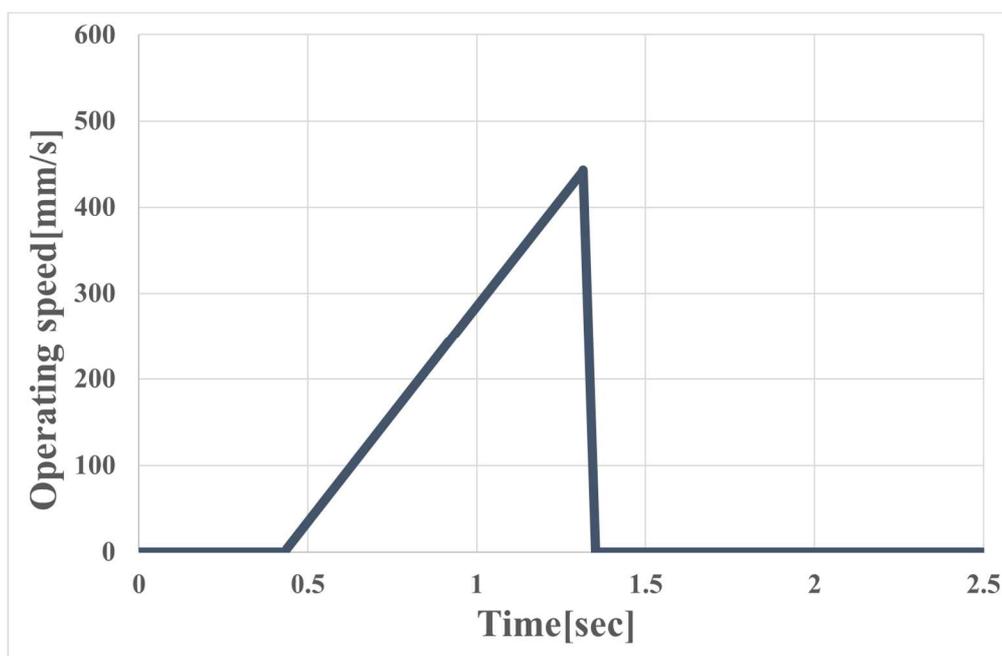
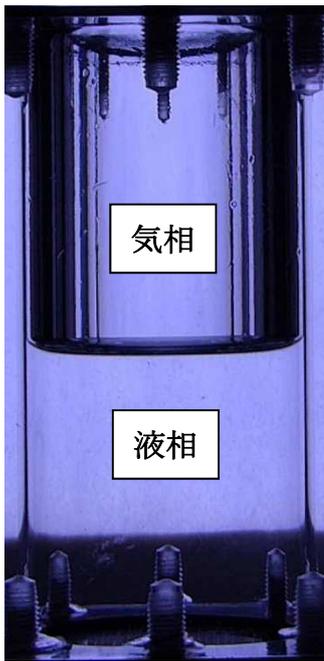
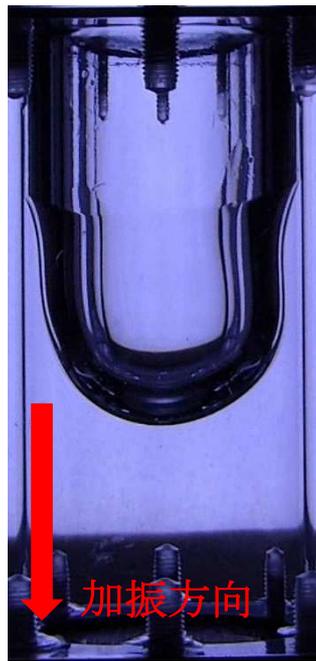


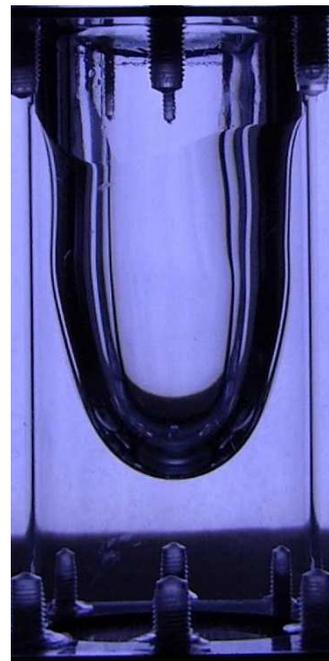
図 3-2-1-5 No.2a 駆動データ (減速)



(a)0.00sec



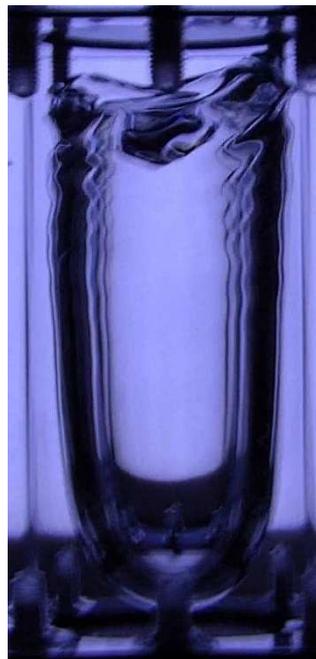
(b)0.43sec



(c)0.63sec



(d)0.83sec



(e)1.03sec



(f)1.23sec

図 3-2-1-6 No.2a 実験結果

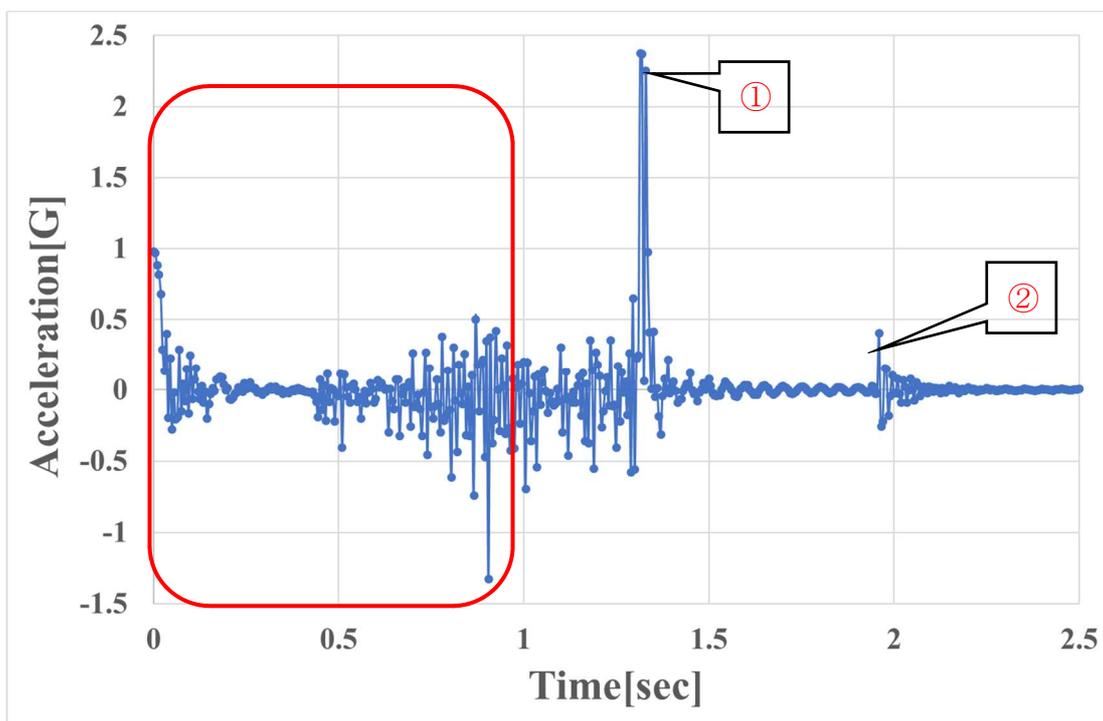


図 3-2-1-7 No.2a 重力加速度データ

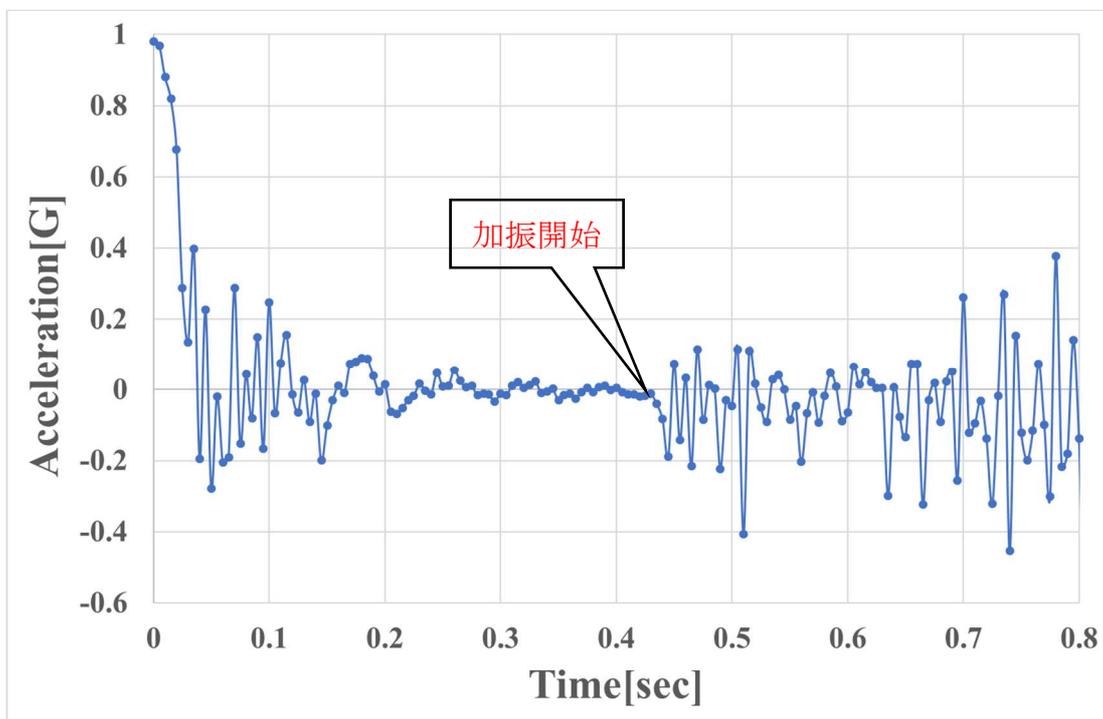


図 3-2-1-8 No.2a 重力加速度データ (赤部分抜粋)

微小重力環境突入から約 0.43sec 後にモーターを駆動させ、微小重力環境の中、下向きに比較的大きな加速度 0.05G を約 0.9sec 加えた。JA-5V により計測した重力加速度データに関して図より、落下直後は切り離しの衝撃により大きく加速度が変動しているが、時間経過により加速度が $10^{-3}G$ に近づいていくことがわかる。また、図 3-2-1-5 のように微小重力突入から約 0.43sec 後にモーターを駆動させることで、加速、減速運転を約 0.9sec 行い、微小重力突入から約 1.33sec 後にモーターが停止した様子が図 3-2-1-7 の加速度データよりわかる。図に見られる加速度が変動している部分に関して、赤①で示す部分は、モーターの急減速により生じたものであり、赤②は内側の落下カプセルが外側のカプセルに追いつき、干渉した際に計測されたものだと考えている。(カプセルが追いつくことで微小な加速度変動が見られるのは以前からである。) 微小重力環境下で加速度を与えた際の液面挙動を観察することがターゲットとなっているため、今回は微小重力突入から約 1.33sec 後までの液体挙動をメインに観察する。微小重力環境下において液面が湾曲してから下向きに比較的大きな加速度 0.05G を与えると、固体壁上を勢いよく液体が上昇することで湾曲の凹み形状が大きくなる様子が観察され、加速から約 0.17sec 後(微小重力環境突入から 0.6sec) 付近に、液体が試験体の頂部に到達する様子が見られた。左右の固体壁上を上昇した液体が約 0.83sec 付近にて試験体頂部で合体することにより中心部に気相の塊が形成された。その後の液体挙動に関して、時間経過により気相の塊が試験体の下部に移動していることから、液体は固体壁上を上昇し続けていると推測できる。また加速レートが小さい No.1a と比較すると、少しの加速度の違いが液面形状に大きな影響を及ぼすことがわかる。

- No.3a の駆動データ，実験結果，加速度データをそれぞれ示す.

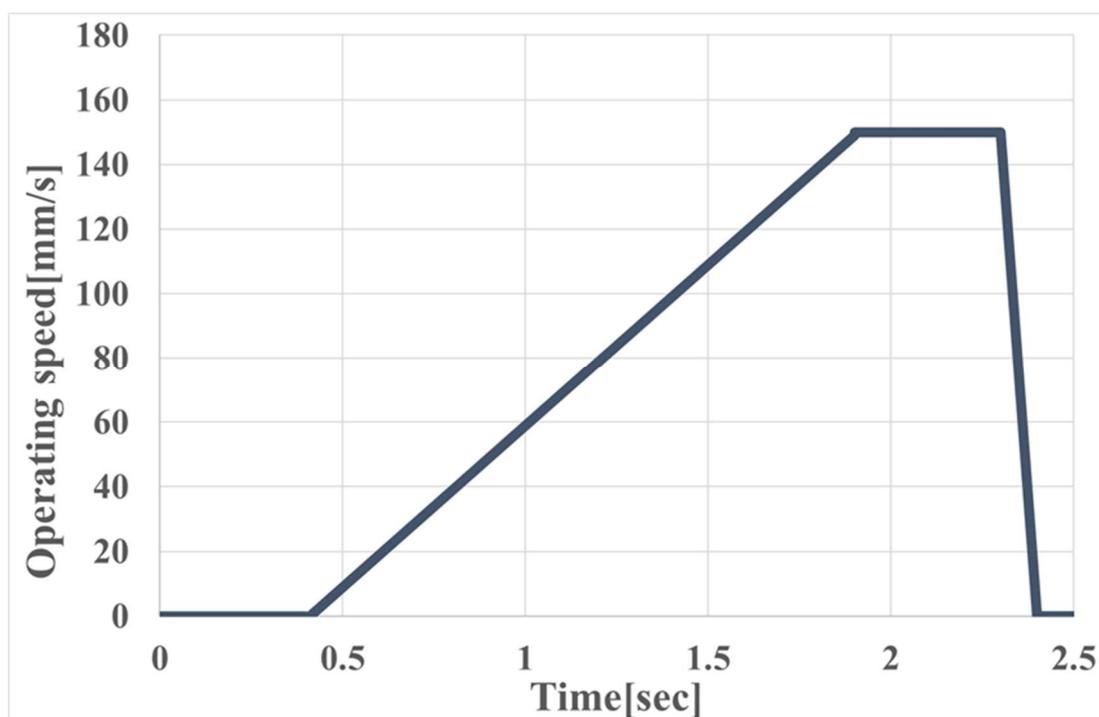


図 3-2-1-9 No.3a 駆動データ (加速)

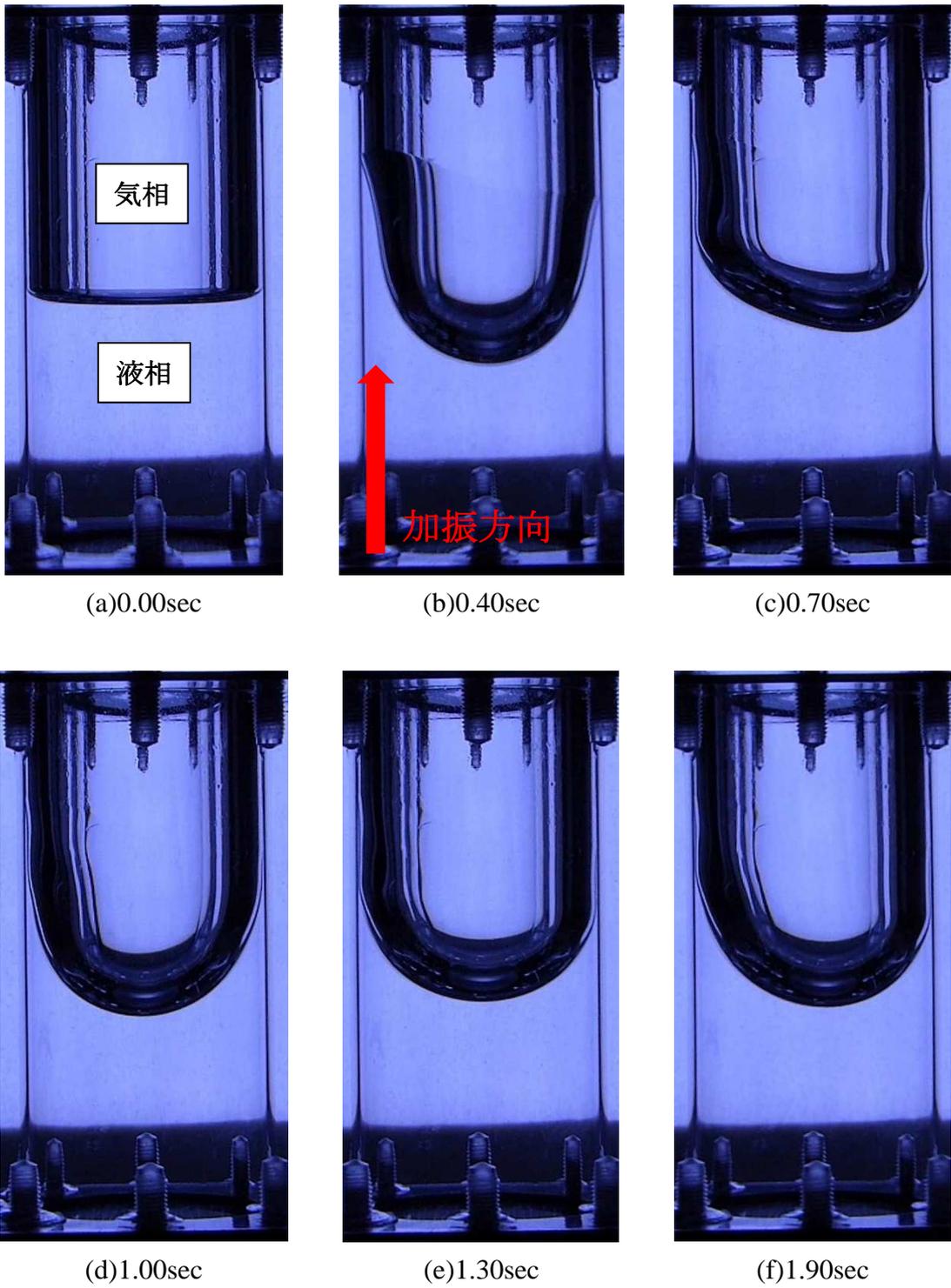


図 3-2-1-10 No.3a 実験結果

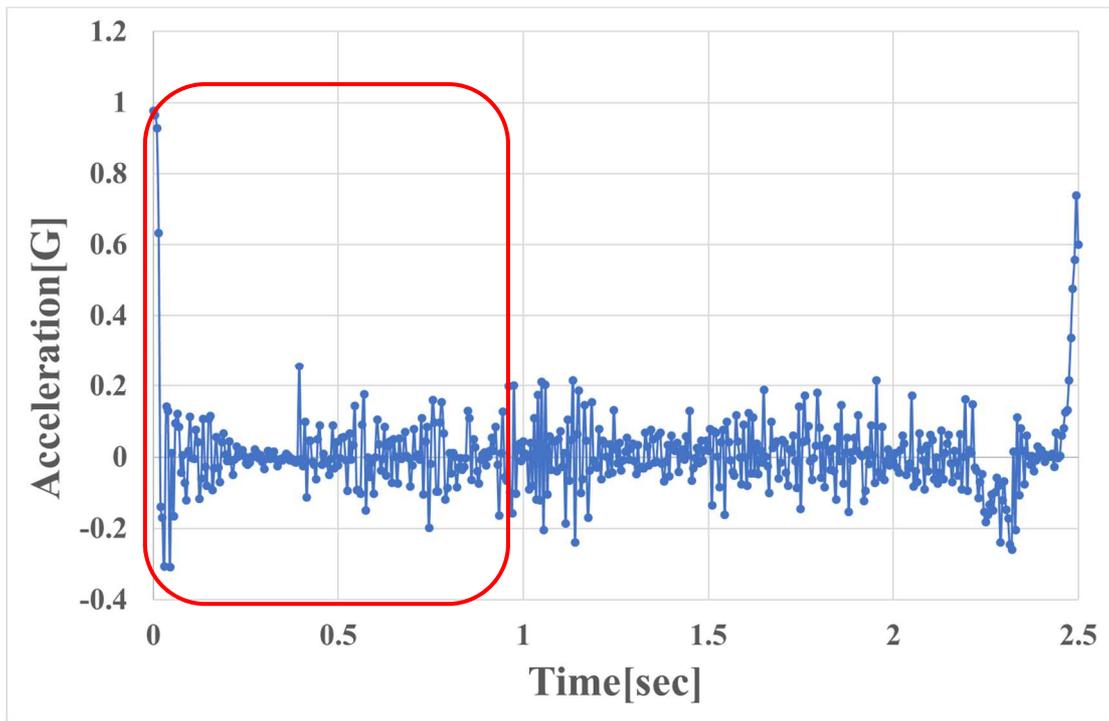


図 3-2-1-11 No.3a 重力加速度データ

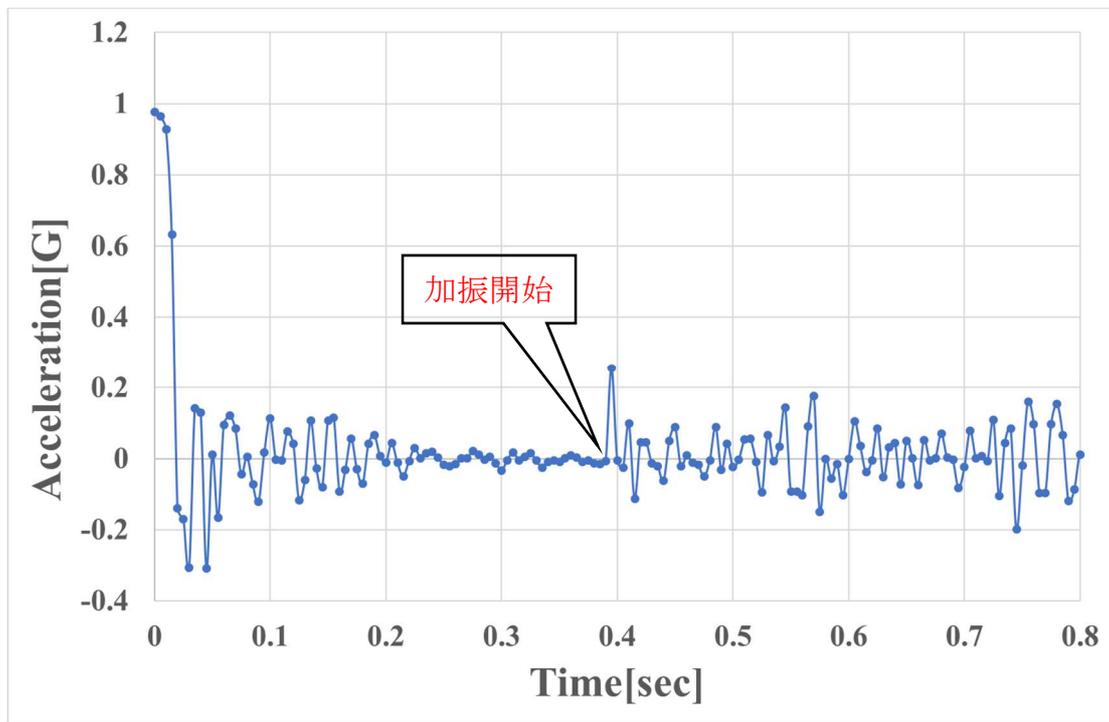


図 3-2-1-12 No.3a 重力加速度データ (赤部分抜粋)

微小重力環境突入から約 0.39sec 後にモーターを駆動させ、微小重力環境の中、上向きに微小な加速度 0.01G を 1.5sec 加えた。JA-5V により計測した重力加速度データに関して、図 3-2-1-12 より、落下直後は切り離しの衝撃により大きく加速度が変動しているが、時間経過により加速度が $10^{-3}G$ に近づいていくことがわかる。また、図 3-2-1-13 のように微小重力突入から約 0.4sec 後にモーターを駆動させることで、加速、等速、減速運転を約 2.0sec 行い、微小重力突入から約 2.4sec 後にモーターが停止した様子が図 3-2-1-11 の加速度データよりわかる。微小重力環境下で加速度を与えた際の液面挙動を観察することがターゲットとなっているため、今回は微小重力突入から約 1.89sec 後までの液体挙動をメインに観察する。微小重力環境下において液面が湾曲してから上向きに微小な加速度 0.01G を与えると、液面形状に大きな変化は見られなかったが、湾曲形状のまま上下に単振動する様子が観察された。また、以前に行った動的濡れ挙動の実験と比較すると、微小な加速度を与えた今回の実験のほうが、単振動の振幅が大きくなる様子が見られた。

- ・ No.4a の駆動データ，実験結果，加速度データをそれぞれ示す。

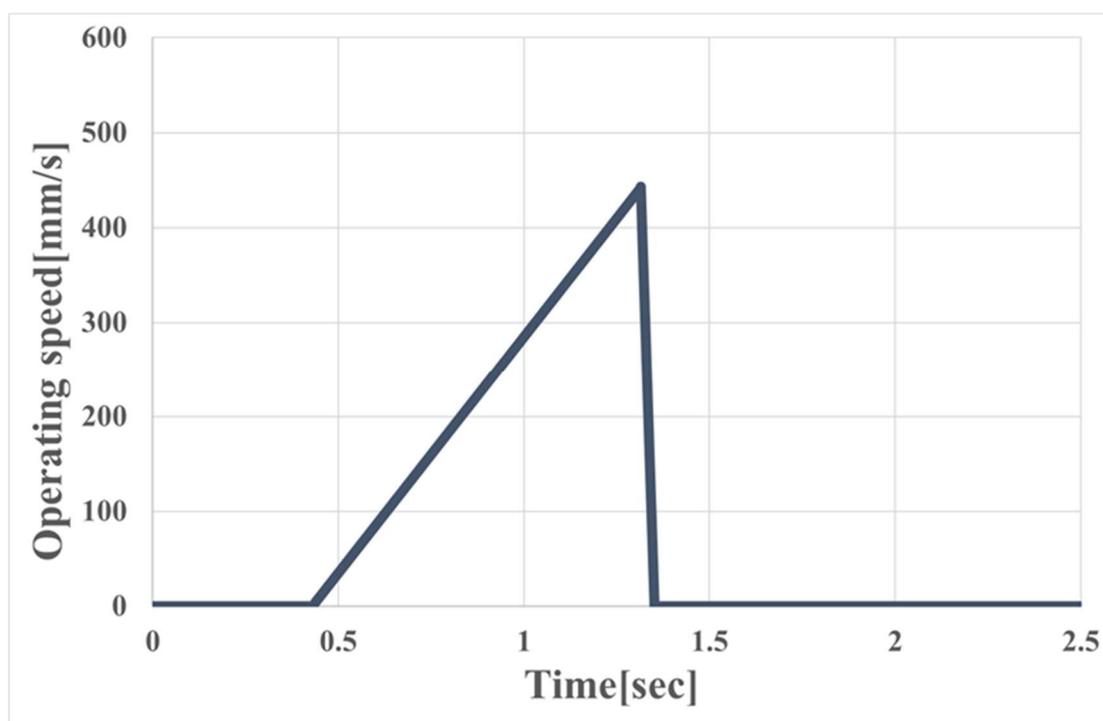


図 3-2-1-13 No.4a 駆動データ (加速)

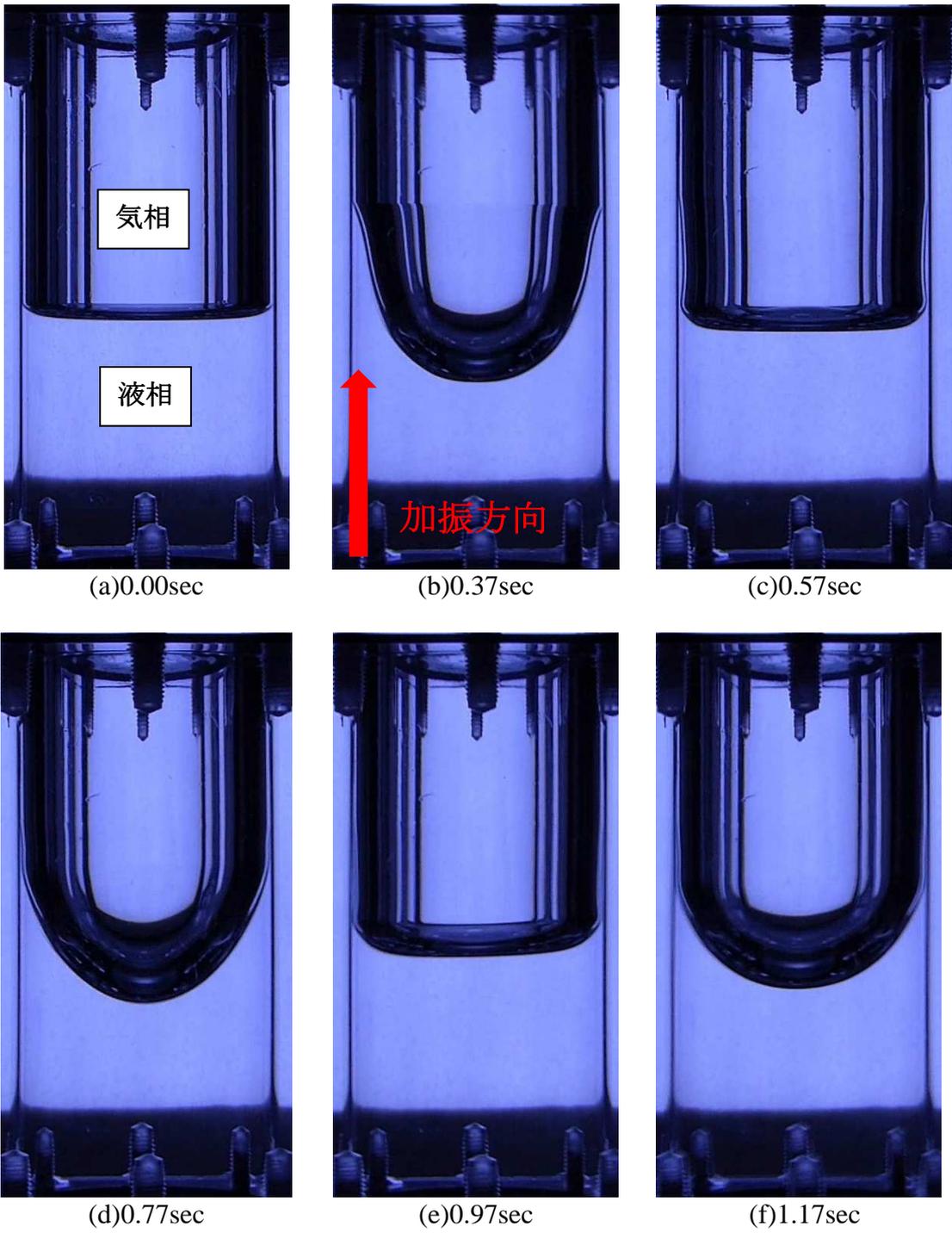


図 3-2-1-14 No.4a 実験結果

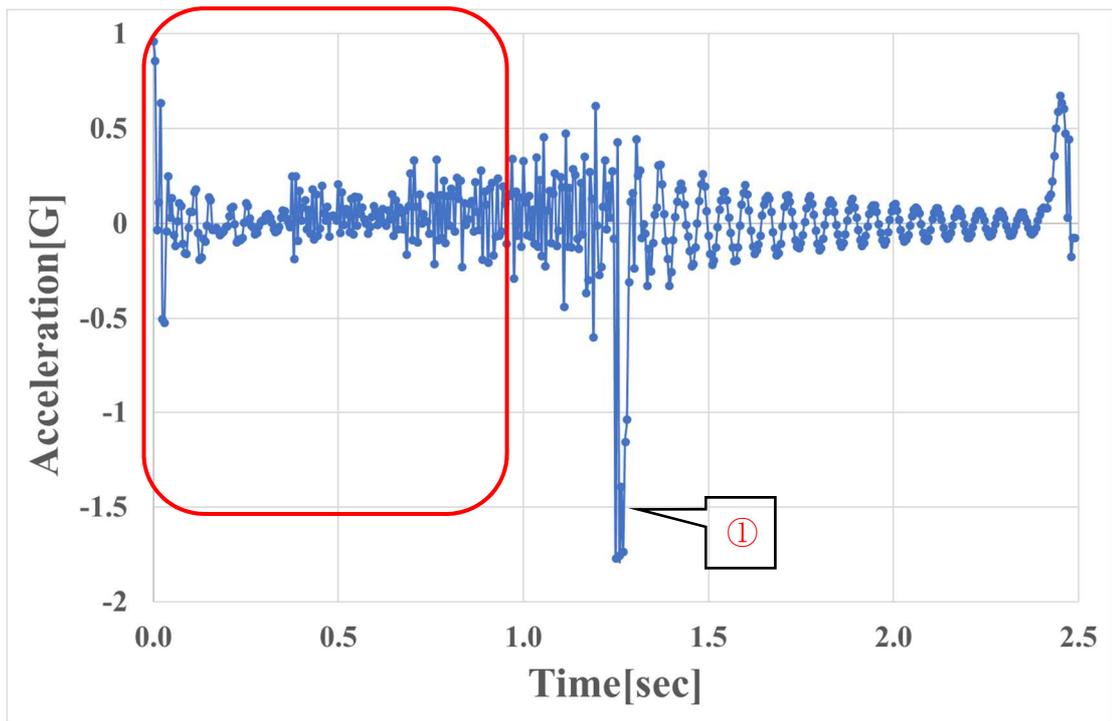


図 3-2-1-15 No.4a 重力加速度データ

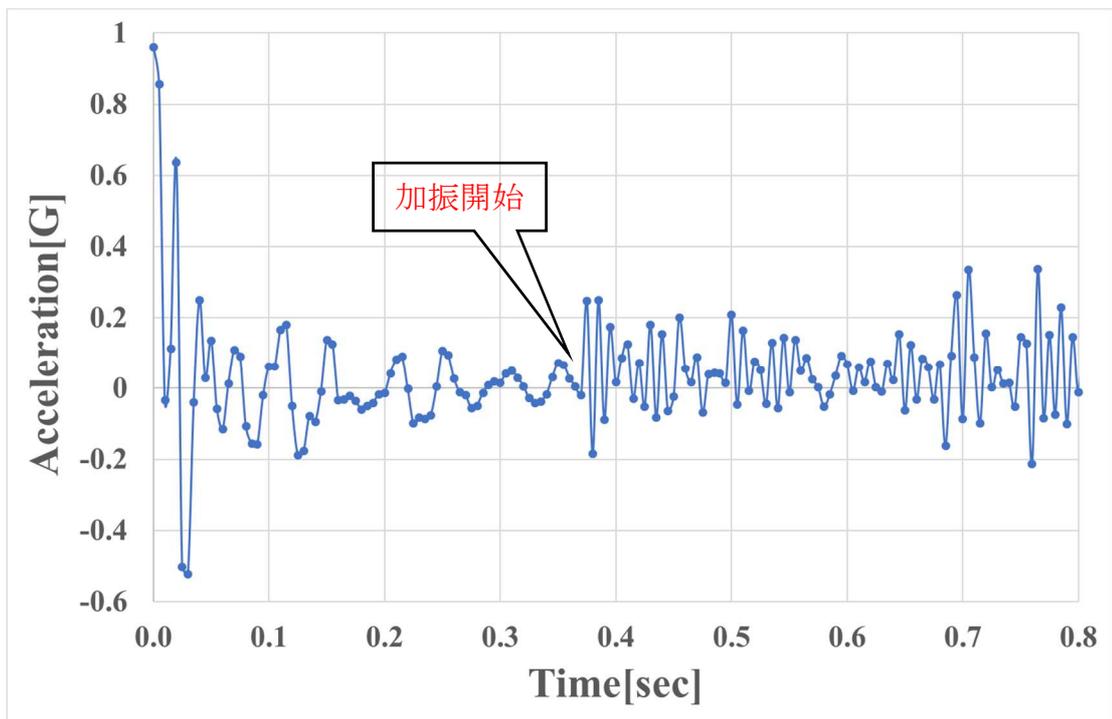


図 3-2-1-16 No.4a 重力加速度データ (赤部分抜粋)

微小重力環境突入から約 0.37sec 後にモーターを駆動させ、微小重力環境の中、上向きに比較的大きな加速度 0.05G を約 0.9sec 加えた。JA-5V により計測した重力加速度データに関して、図 3-2-1-16 より、落下直後は切り離しの衝撃により大きく加速度が変動しているが、時間経過により加速度が $10^{-3}G$ に近づいていくことがわかる。また、図 3-2-1-19 のように微小重力突入から約 0.37sec 後にモーターを駆動させることで、加速、減速運転を約 0.9sec 行い、微小重力突入から約 1.27sec 後にモーターが停止した様子が図の加速度データよりわかる。図に見られる加速度が変動している部分に関して、赤①で示す部分はモーターの急減速により生じたものであると考える。微小重力環境下で加速度を与えた際の液面挙動を観察することがターゲットとなっているため、今回は微小重力突入から約 1.27sec 後までの液面挙動をメインに観察する。微小重力環境下において液面が湾曲してから上向きに比較的大きな加速度 0.05G を与えると、固体壁上を上昇していた液体が試験体底部に戻っていき、湾曲形状が平坦になっていく様子が見られた (0.57sec 付近)。しかし、その後は液面がわずかに凸状になるものの、再び固体壁上を液体が上昇していき液面が湾曲する様子が見られ、液面が上下に大きく単振動する様子が観察された。加速レートが小さい No.3a と比較すると、単振動の周期に違いは見られなかったが、振幅に大きく差が生じ、加速度レートが高いほど、液面の揺動も大きくなった。

- ・ No.5a の駆動データ、実験結果、加速度データをそれぞれ示す。

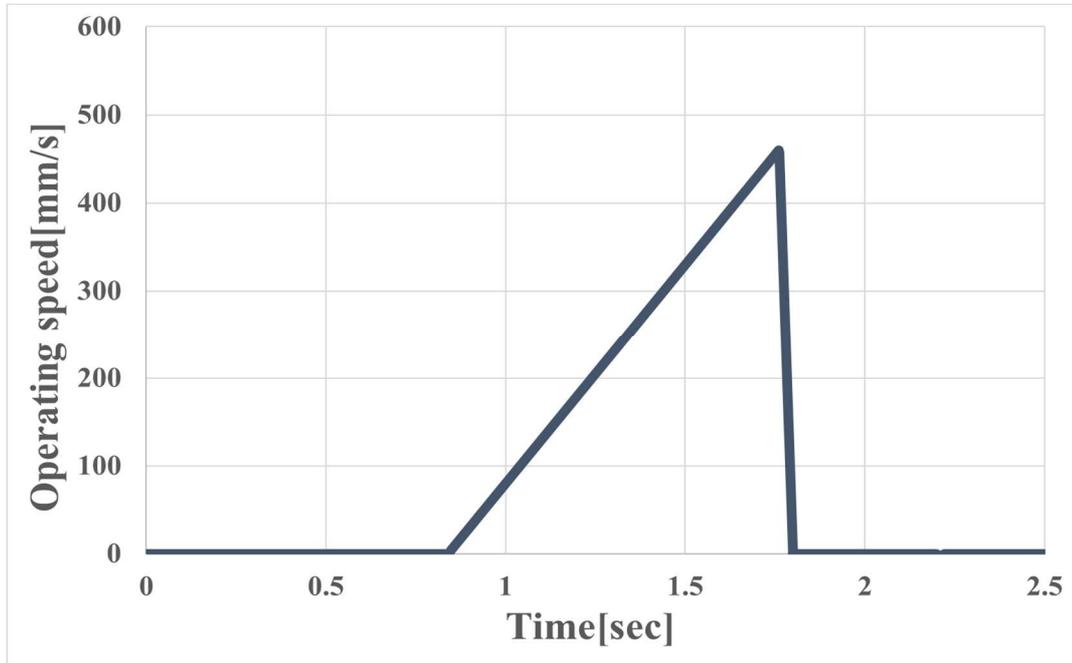


図 3-2-1-17 No.5a 駆動データ (減速)

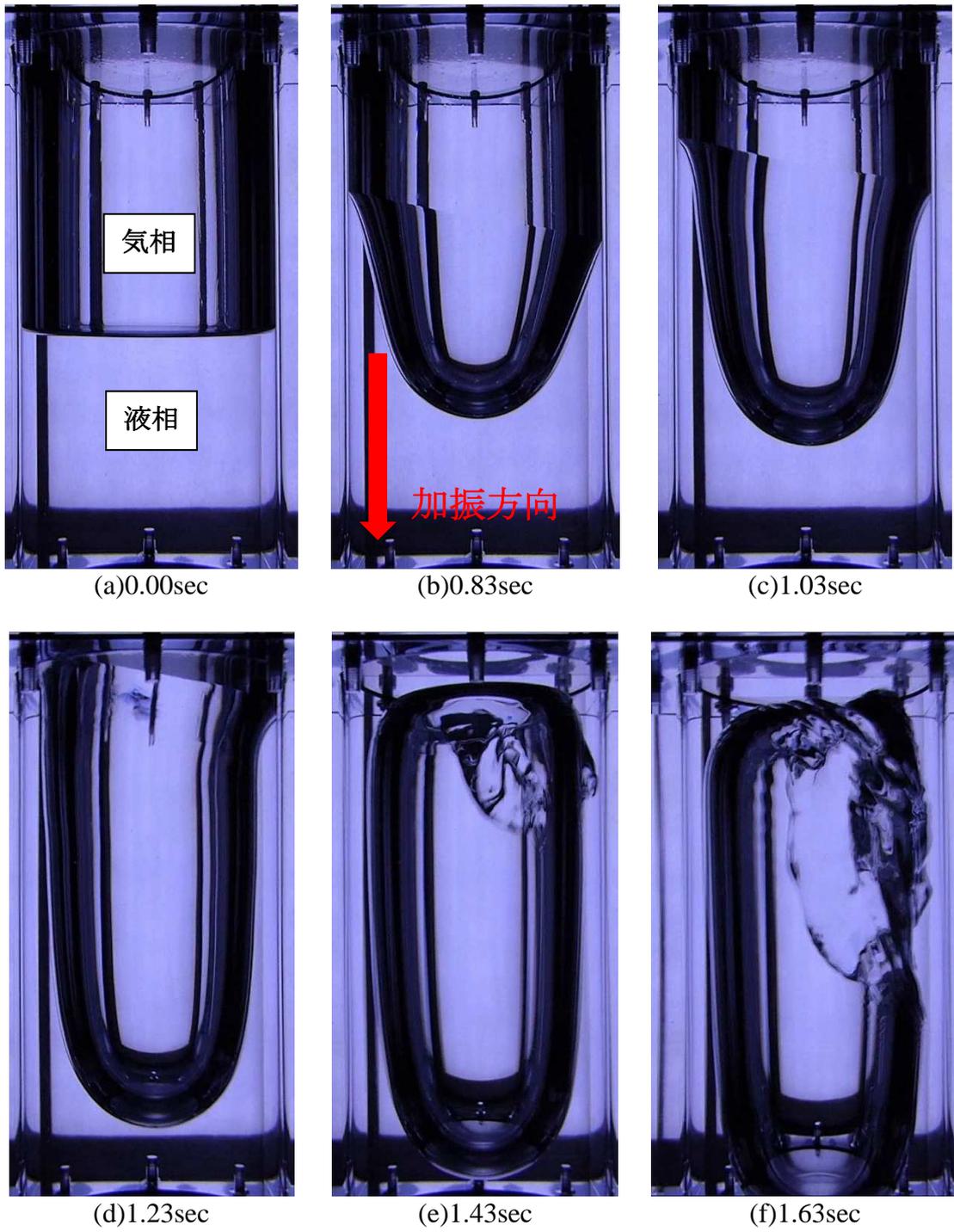


図 3-2-1-18 No.5a 実験結果

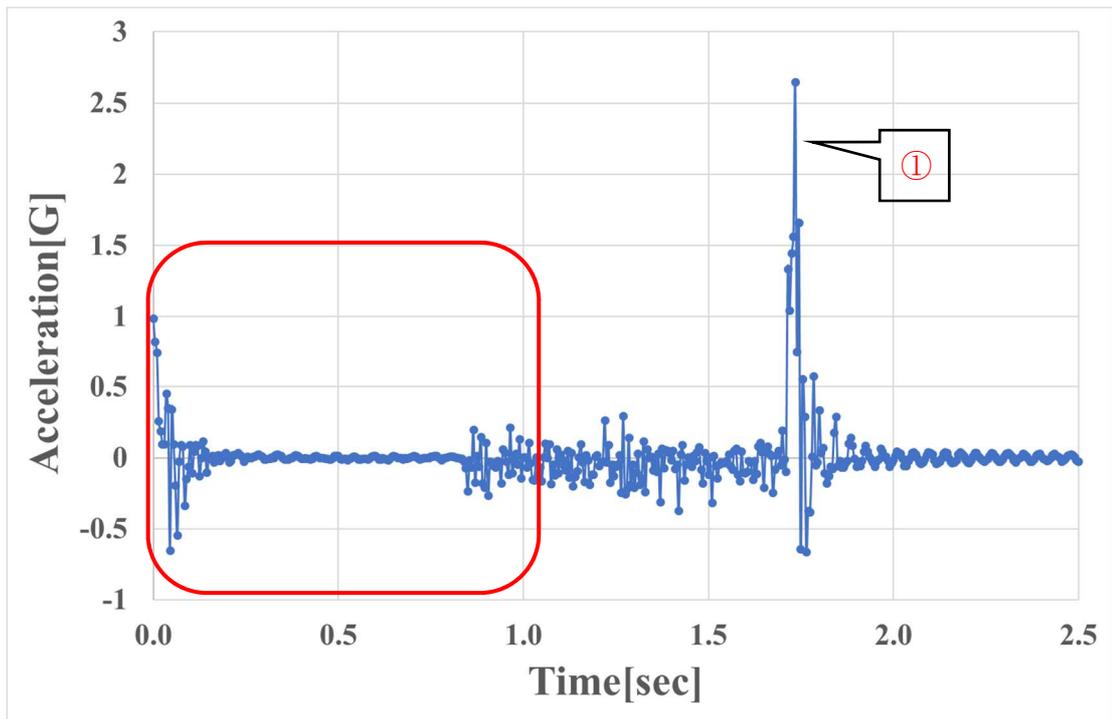


図 3-2-1-19 No.5a 重力加速度データ

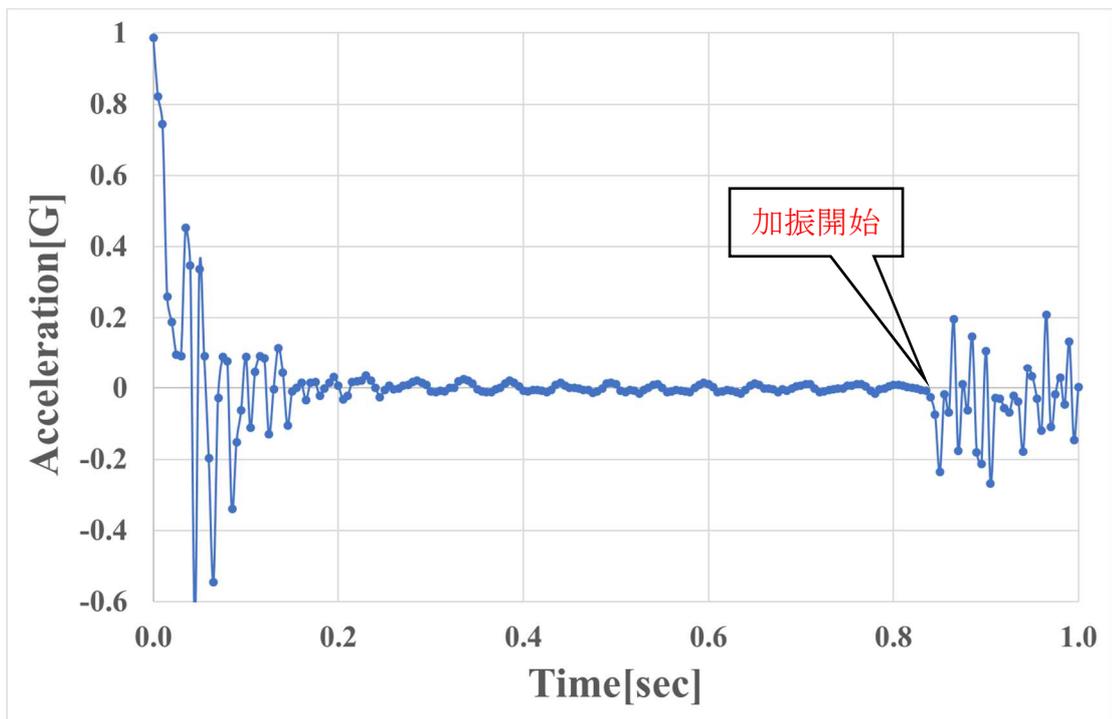


図 3-2-1-20 No.5a 重力加速度データ (赤部分抜粋)

微小重力環境突入から約 0.84sec 後にモーターを駆動させ、微小重力環境の中、下向きに比較的大きな加速度 0.05G を約 0.9sec 加えた。JA-5V により計測した重力加速度データに関して図 3-2-1-23 より、落下直後は切り離しの衝撃により大きく加速度が変動しているが、時間経過により加速度が $10^{-3}G$ に近づいていくことがわかる。また図のように微小重力突入から約 0.83sec 後にモーターを駆動させることで、加速、減速運転を約 0.9sec 行い、微小重力突入から約 1.74sec 後にモーターが停止した様子が図の加速度データよりわかる。図 3-2-1-19 に見られる加速度が変動している部分に関して、赤①で示す部分はモーターの急減速により生じたものであると考える。微小重力環境下で加速度を与えた際の液面挙動を観察することがターゲットとなっているため、今回は微小重力突入から約 1.73sec 後までの液体挙動をメインに観察する。微小重力環境下において液面が湾曲してから下向きに比較的大きな加速度 0.05G を与えると、固体壁上を勢いよく液体が上昇することで湾曲の凹み形状が大きくなる様子が観察され (1.03sec 付近)、加速から約 0.36sec 後 (微小重力環境突入から 1.20sec) 付近に、液体が試験体頂部に到達する様子が見られた。左右の固体壁上を上昇した液体が約 1.3sec 付近にて試験体頂部で合体することにより、中心部に気相の塊が形成される様子が観察された。その後の液体挙動に関しては、時間経過により気相の塊が試験体の下部に移動していることから、液体は固体壁上を上昇し続けていると推測できる。容器内径が異なり、加速度レートが等しい No.2a と比較すると、容器内径の違いから湾曲形状が形成されるまでの時間が異なるため、モーターを駆動させ加速度を与えた始めた時間が異なるが、衝撃をかけた後の時間経過による液体挙動には、そこまで大きな差が見られなかった。

- No.6a の駆動データ，実験結果，加速度データをそれぞれ示す.

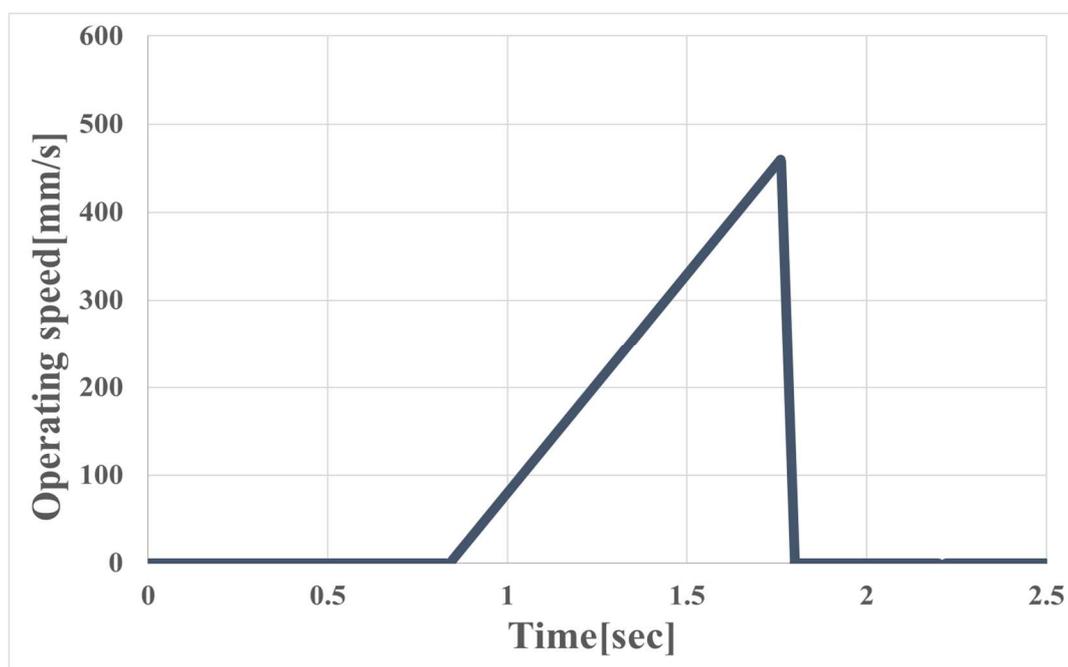


図 3-2-1-21 No.6a 駆動データ (加速)

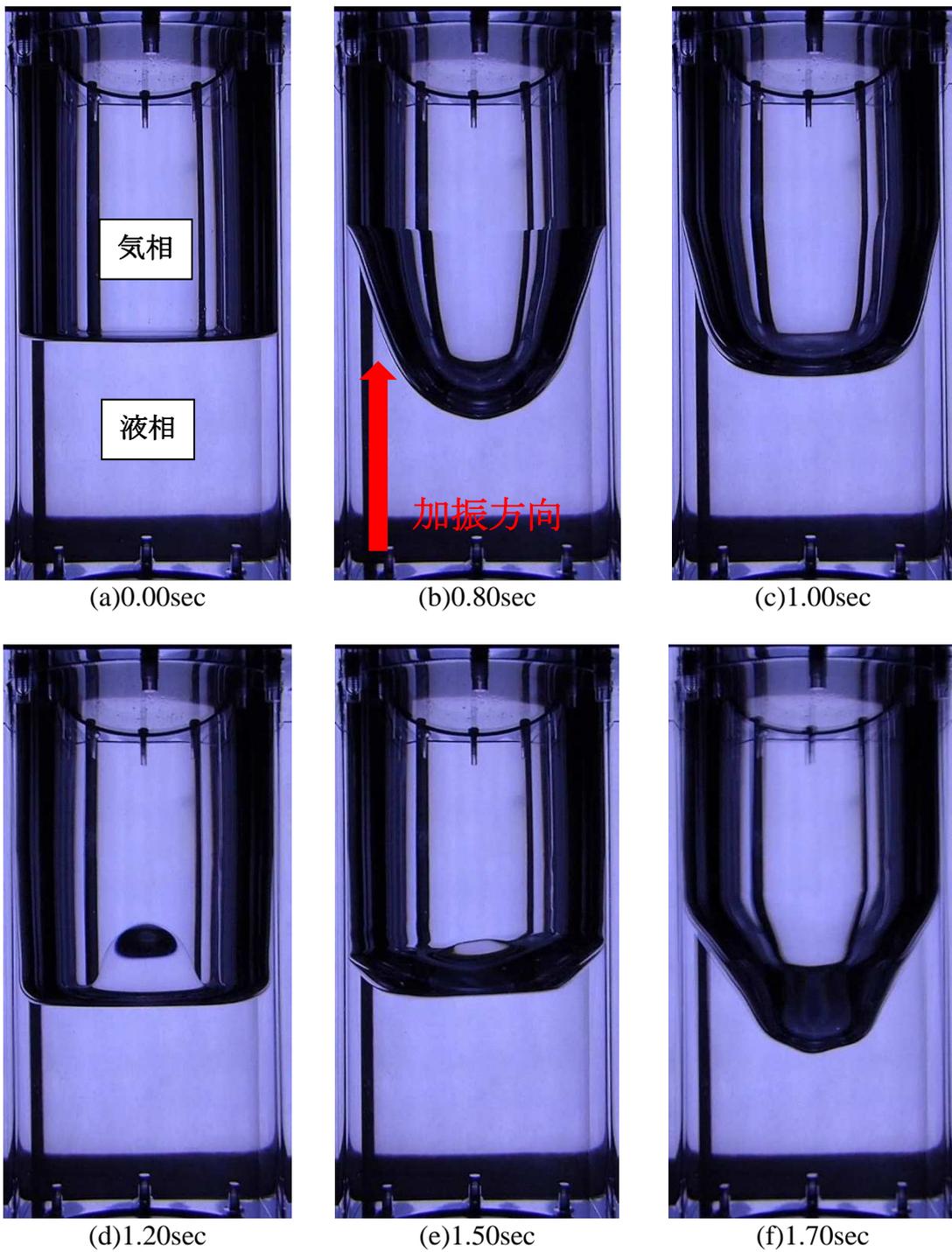


図 3-2-1-22 No.6a 実験結果

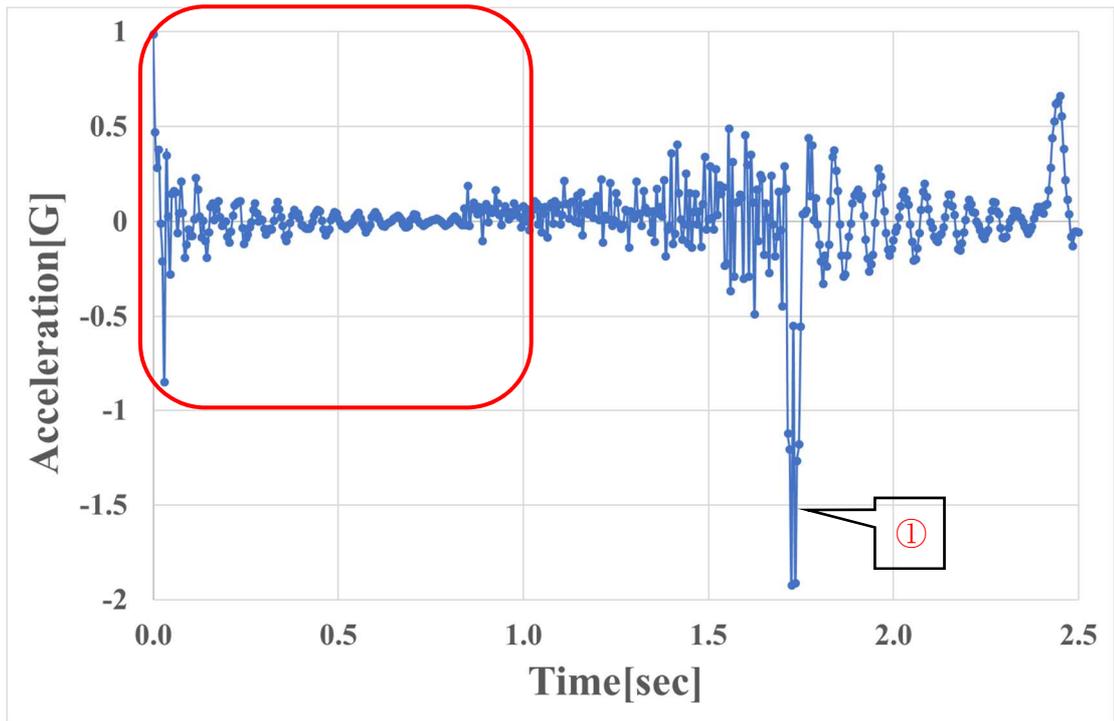


図 3-2-1-23 No.6a 重力加速度データ

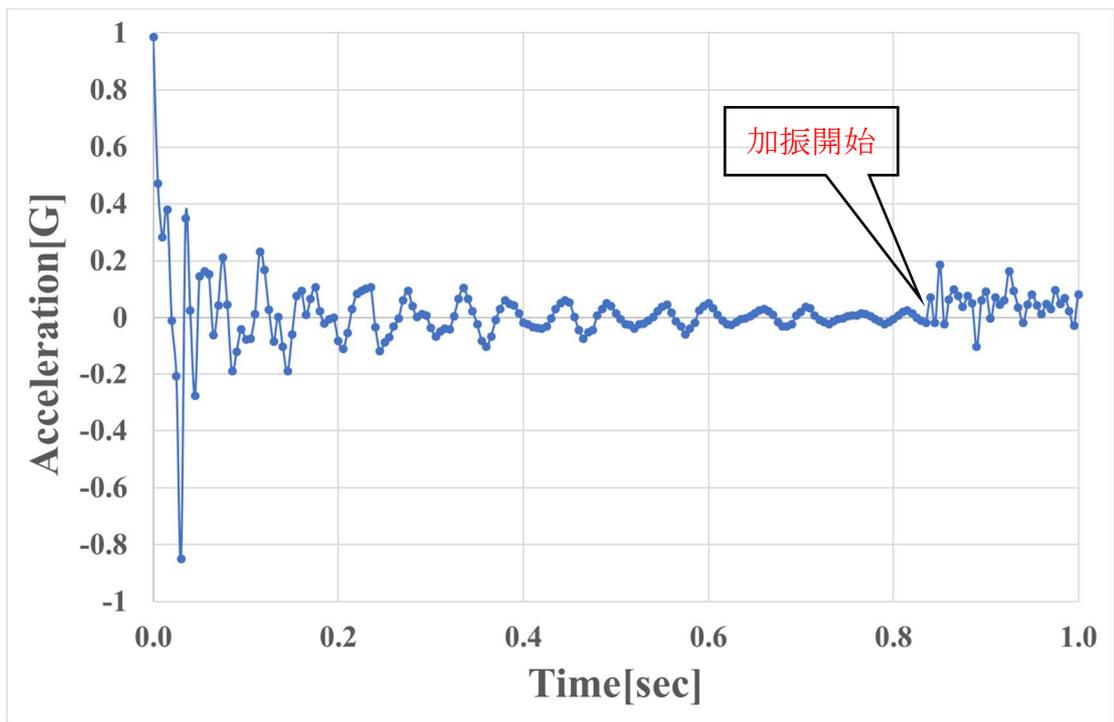


図 3-2-1-24 No.6a 重力加速度データ (赤部分抜粋)

微小重力環境突入から約 0.80sec 後にモーターを駆動させ、微小重力環境の中、上向きに比較的大きな加速度 0.05G を約 0.9sec 加えた。JA-5V により計測した重力加速度データに関して、図 3-2-1-24 より、落下直後は切り離しの衝撃により大きく加速度が変動しているが、時間経過により加速度が $10^{-3}G$ に近づいていくことがわかる。また、図 3-2-1-21 のように微小重力突入から約 0.80sec 後にモーターを駆動させることで、加速、減速運転を約 0.9sec 行い、微小重力突入から約 1.70sec 後にモーターが停止した様子が図 3-2-1-23 の加速度データよりわかる。図 3-2-1-23 に見られる加速度が変動している部分に関して、赤①で示す部分はモーターの急減速により生じたものであると考える。微小重力環境下で加速度を与えた際の液面挙動を観察することがターゲットとなっているため、今回は微小重力突入から約 1.7sec 後までの液体挙動をメインに観察する。微小重力環境下において液面が湾曲してから上向きに比較的大きな加速度 0.05G を与えると、固体壁上を上昇していた液体が試験体底部に戻っていき、湾曲形状が平坦になっていく様子が 1.0sec 付近以降見られ、固体壁上の液体が下部に移動し続けることで、中心軸上に液面が盛り上がることで凸形状になる様子が 1.2sec に見られた。その後は固体壁上の液体が再び上昇していき、凸形状から湾曲形状に戻っていく様子が観察された。容器内径が異なり、加速度レートが等しい No.4a と比較すると、衝撃直後の液面挙動は共に固体壁上の液体が試験体底部に戻ることで、液面が平坦になるところまでは一致したが、その後の挙動に差異が見られた。

2-4 まとめ

落下塔設備を利用した微小重力実験を実施し、鉛直方向スロッシング挙動の観察を行い、数値流体解析との比較を行った。以下に結果をまとめる。

(1) 微小重力環境下において下向き加速度を与えると、タンク壁面に沿って液体上昇が加速し、湾曲形状が深くなる様子が観察され、加速度が大きい際は、試験体頂部で合体することで気相の塊が中心部に形成されることが確認できた。また、液体は上昇し続けることで気相が試験体底部に移動するため、ガス巻き込み発生リスクが上昇することもわかった。

(2) 微小重力環境下において上向き加速度を与えると、湾曲していた液面が平坦になる様子が確認され、加速度が大きい際は、中心軸上に液柱が観察される様子が見られた。このことから、タンク直径に応じて適切な加速度を与えなければ、液面変動がより大きくなり、姿勢制御に悪影響を及ぼすことが分かった。

(3) 実験および数値解析を比較すると、時間経過における定性的な液体挙動は良好な一致が得られた。固体壁上の接触点移動量に関して、上向き加速度を与えた際は、液面形状の非対称から若干の差異が生じたものの、良好な一致が見られた。下向き加速度を与えた際は、解析において固体壁近傍の液体がちぎれてしまい若干の差異が生じた。中心軸上の変位量に関して、上向き加速度を与えた際は、薄液膜の影響、液面の非対称性に伴う影響から若干の差異も見られたが概ね一致している。下向き加速度を与えた際は、実験での観測手法の問題から精度よく測定できないため若干の差異が見られたが概ね一致している。

今後の課題

(1) 鉛直方向スロッシングに関して、数値解析において界面形状を精度よく表現する Level set 法の併用、メッシュサイズの変更、また Timestep 数を小さくし、クーラン数をより小さくことでの薄液膜の観察。

(2) 3次元解析を行うことで、中心軸上の液体挙動を厳密に計算する。

(3) 鉛直方向スロッシング挙動にて下向き加速度を与えた際、数値解析における、適切な後退接触角の導入。

(4) 実機との Bo 数を合わせた実験および数値解析を実施することで、より実環境での液体挙動の観察を行い、また数値解析からの高精度予測を可能とする。

(5) 将来型宇宙機の推進薬タンクにおいて、極低温推進薬で熱入力を伴う場合のスロッシング挙動の解明。

参考文献

- 1) Basil. N. Antar. and Vappu S., CRC Press, ISBN0-8493-8913-5 (1993)
- 2) Takehiro HIMENO., Liquid Motion in the Propellant Tanks of Space Vehicles, NAGARE32, 239-244 (2013)
- 3) ISECG., The Global Exploration Roadmap (2018)
- 4) 小松敬治., スロッシング 液面揺動とタンクの振動, 森北出版株式会社 (2015)
- 5) The first lunar landing., Apollo 11 Lunar Surface Journal
- 6) NEAR Anomaly Review Board, The NEAR Rendezvous Burn Anomaly of December 1998, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, November 1999.
- 7) F.T. Dodge., The New “Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers”
- 8) 小松敬治., 低重力下における宇宙機タンク内液体のメカニカルモデル, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.16 No.3, 182-190(1999)
- 9) Hideyo Negishi, Naoki Tani and Nobuhiro Yamanishi., Numerical Analysis of Propellant Feed Systems in Liquid-Propellant Rocket Engines
- 10) 上野一郎., 固液気 3 相境界線近傍流体挙動の可視化, 可視化情報 Vol.33 No.129(2013)
- 11) http://www.face-kyowa.co.jp/science/theory/what_contact_angle/
- 12) Kenji KATOH., On the Contact Angle Hysteresis and the Sliding Down of a Liquid Droplet on Inclined Surfaces, J of the Heat Transfer Society of Japan, Vol.46, No.194 (2007)
- 13) D. Bonn., J. Eggers., J. Indekeu., J. Meunier. and E. Rolley., Review of modern physics, Vol. 81, 739-805(2009) (doi: 10.1103/RevModPhys.81.739)
- 14) T. D. Blake., J. of Colloid and Interface Science, Vol. 299, 1-13 (2006)
- 15) 姫野武洋., 第 5 章 人工衛星と宇宙輸送機における液体推進薬の挙動予測
- 16) A.E.P. Veldman, J. Gerrits, R. Luppens, J.A. Helder and J.P.B. Vreeburg, The numerical simulation of liquid sloshing on board spacecraft, J of Computational Physics, Vol.224, 82-99(2007)
- 17) S. van Mourik, A.E.P. Veldman and M.E. Dreyer., Simulation of Capillary Flow with a Dynamic Contact Angle, Microgravity sci. technol. XVII-3 (2005)
- 18) R. Cox., J. of Fluid Mechanics, Vol. 168, 169 (1986)
- 19) S.Osher and J. A. Sethian., Fronts Propagating with Curvature-dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, J. Comput. Phys, 79, 12-49 (1988)
- 20) E.Olsson, G.Kreiss and S.Zahedi., A Conservative Level Set Method for Two Phase Flow II, J. Comput. Phys, 225, 785-807 (2007)
- 21) J. U. Brackbill., D. B. Kothe and C. Zemach., A continuum method for modeling surface tension, J. Comput. Phys., 100, 335-354 (1992)
- 22) D.L. Youngs., Numerical Methods for Fluid Dynamics, Academic Press (1982)
- 23) https://www.silicone.jp/catalog/pdf/kf96_j.pdf#search=%27https%3A%2F%2Fwww.silicone.jp%2Fcatalog%2Fpdf%2Fkf96_j.pdf%27

第3章加熱による相変化を伴う動的濡れ挙動の観察

3-1 実験装置, 実験方法

・ 供試体構造

本章で使用する実験装置として図 3-1-1 に示す供試体構造を考案する. 供試体はステンレス (SUS303), アルミ (A5052P), ポリカーボネートから構成した. 図 3-2-5 は供試体の正面からみた図である. 加熱壁面であるアルミ平板は A2027 を使用している. なお, ラバーシールには 1mm 厚を使用している

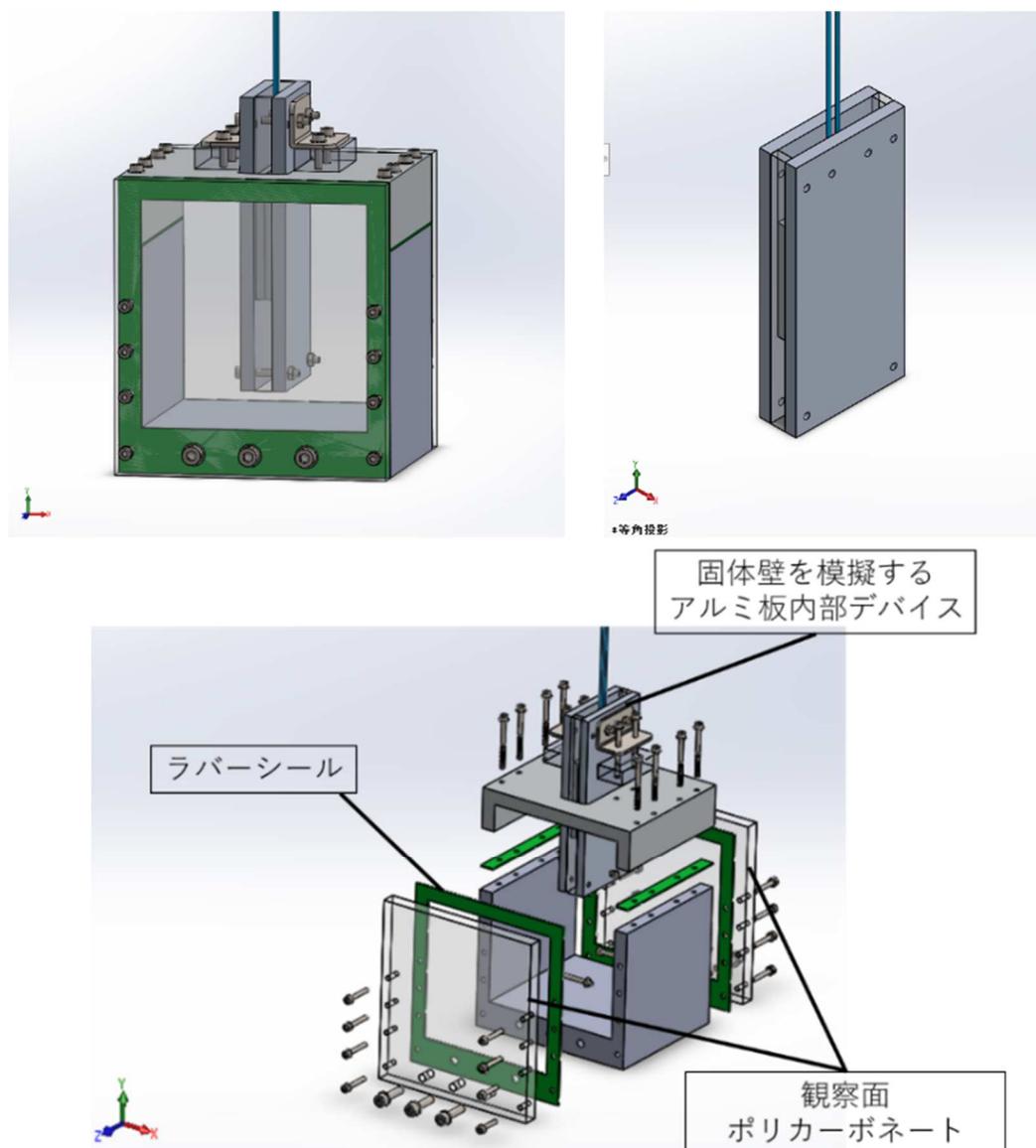


図 3-2-1-1 供試体およびアルミ製内部デバイスの外観 (CAD)



図 3-2-1-2 供試体

入手可能なシリコンラバーヒーターの最小サイズ（50mm 角）を供試体サイズの選定基準とした。供試体の内寸法は 100mm×100mm×100mm，外寸法は 120mm×120mm×130mm である。

図 3-2-1-3，図 3-2-1-4 は加熱された固体壁面を模擬するアルミ板（60mm×130mm×10mm）である。この 2 枚のアルミ板でシリコンラバーヒーターを挟み込み、供試体の中心軸上に設置することで、加熱された固体壁面を模擬する。

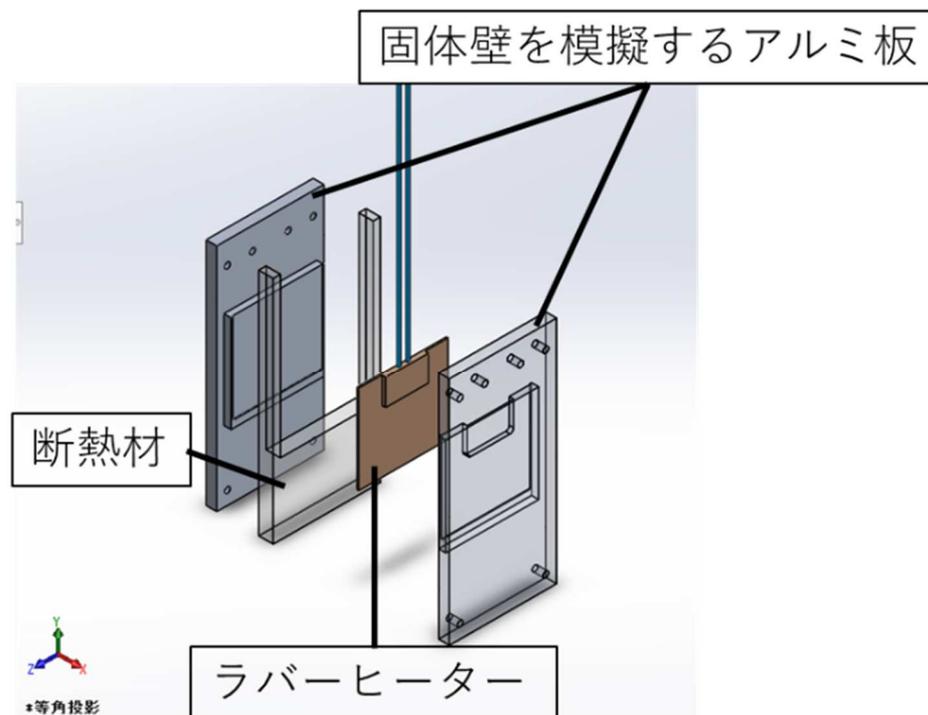


図 3-2-1-3 加熱された固体壁を模擬するアルミ板の状態（CAD）

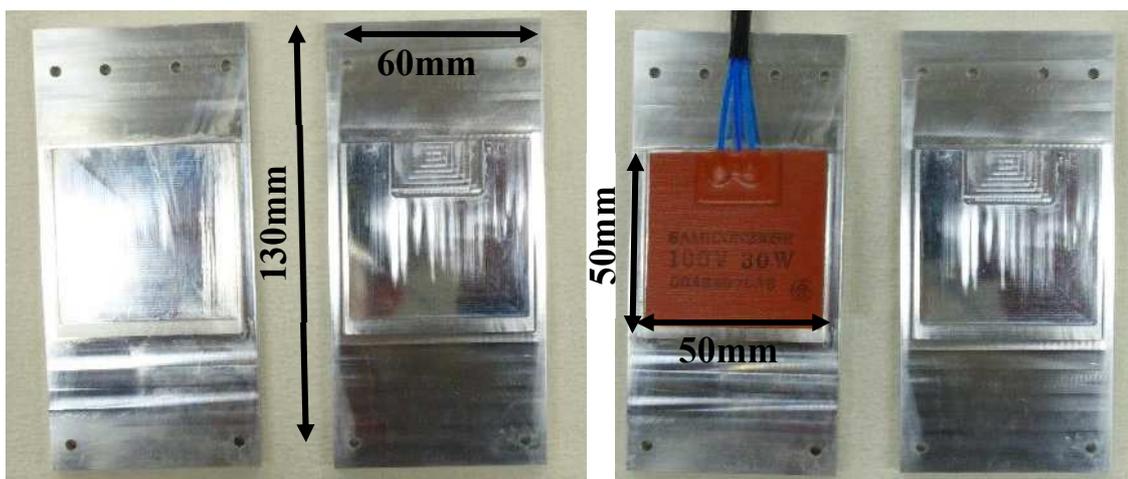


図 3-2-1-4 アルミ製内部デバイス及びラバーヒーターの配置

供試体上部部品と固体壁を模擬する内部デバイスはL字アングル (SUS303) を用いて固定される。また、L字アングルからの熱伝導を極力小さくするために10mm厚のポリカーボネート板を 図 3-2-1-5 のように挟み込み連結した。

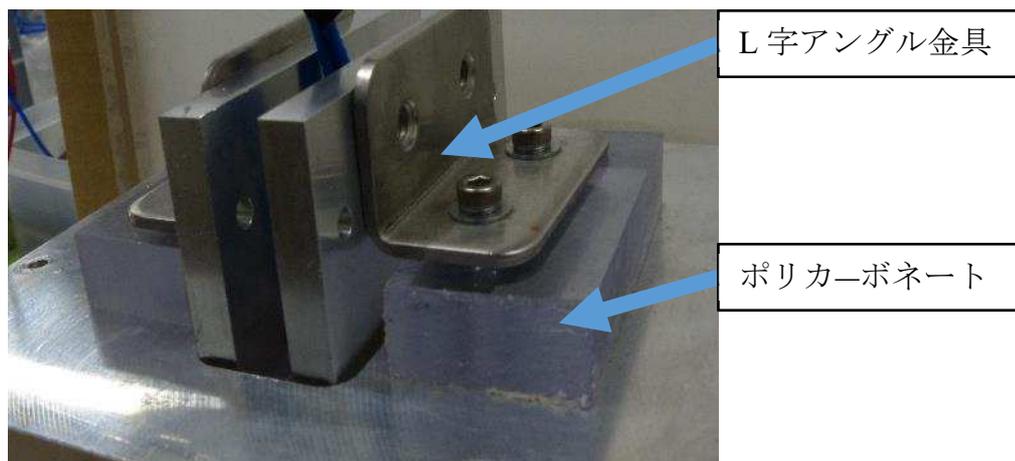


図 3-2-1-5 熱伝達の軽減

これは、熱容量の大きい供試体上部 (アルミ) に伝導されてしまい、供試液体の温度を上げることができなかつたので、このように金属よりも熱伝導率の低い樹脂を挟み込むことで、ヒーターの熱が固体壁を模擬するアルミ板から供試液体に伝わりやすくするようにした。

図 3-2-1-6 は加熱された固体壁を模擬するアルミ板を装着した供試体上部の外観図である。

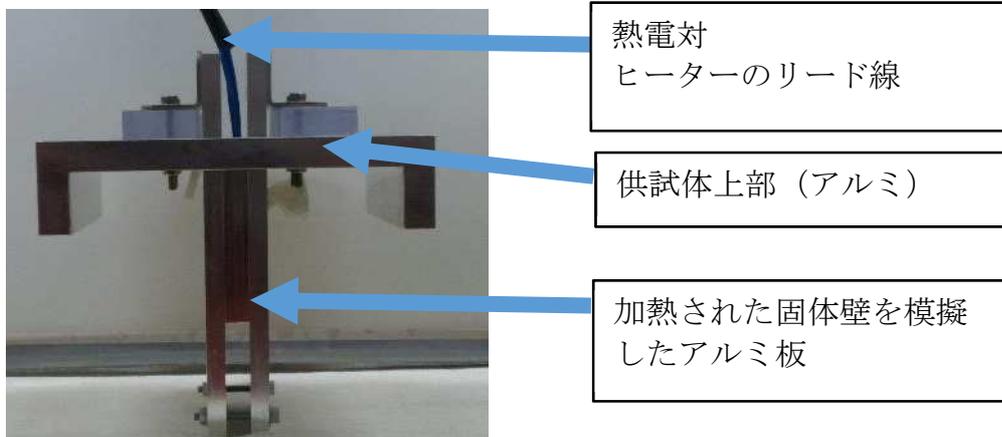


図 3-2-1-6 加熱されたタンク固体壁を模擬するアルミ固体壁

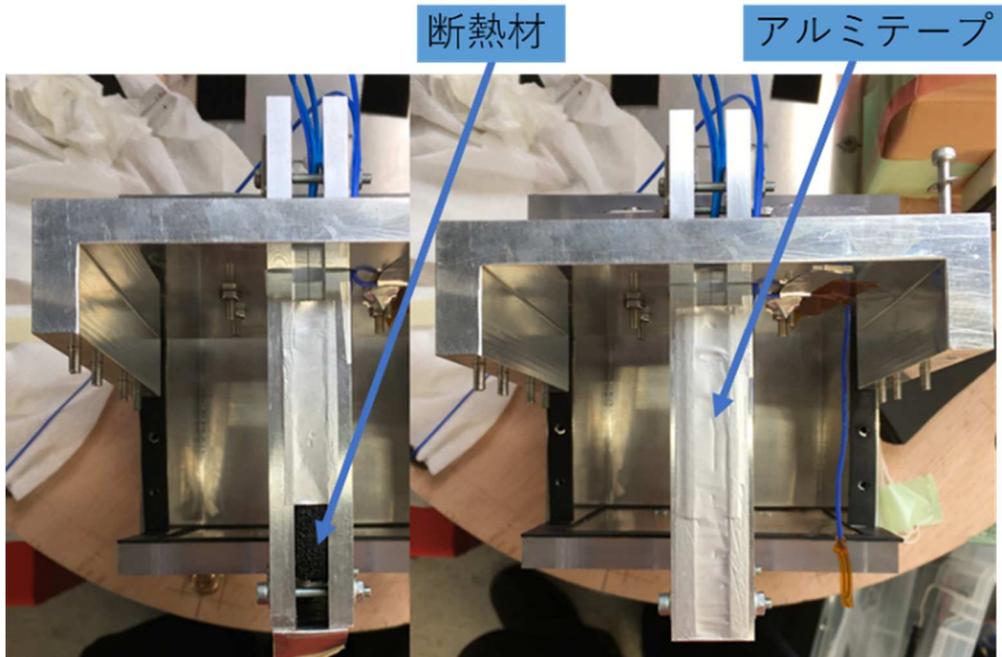


図 3-2-1-7 加熱された固体壁面を模擬したアルミ板の構成

- ・ 内部落下カプセルの段配置
落下カプセルの内部における実験装置の配置について記載する。

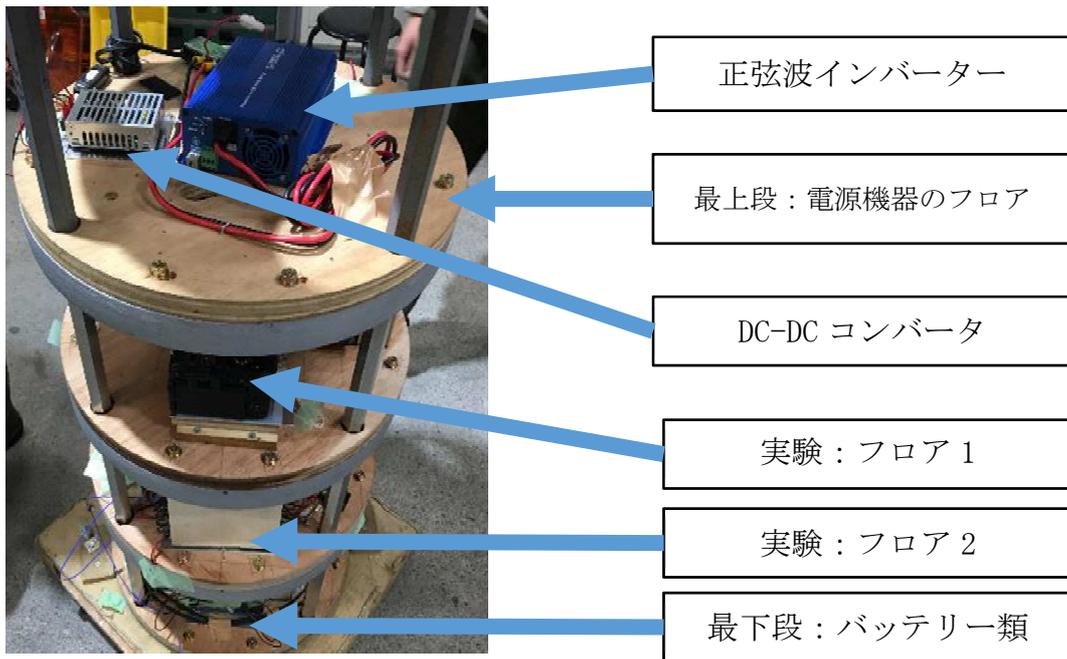


図 3-2-1-8 落下内部カプセル搭載図

図 3-2-1-8 は落下 2 回目（実験 No.2, 3），落下 3 回目（実験 No.4, 5），落下 11 回目（実験 No.7, 8）における内部カプセルの搭載状況である。重量の大きいものを下段および中心軸対象に設置することで、カプセル全体のバランスをよくしている。

図 3-2-1-9 に示す再下段にはバッテリー，データロガー，底盤の中心には加速度計（日本航空電子工業 JA-5V）を設置し，鉛直方向加速度を計測した。

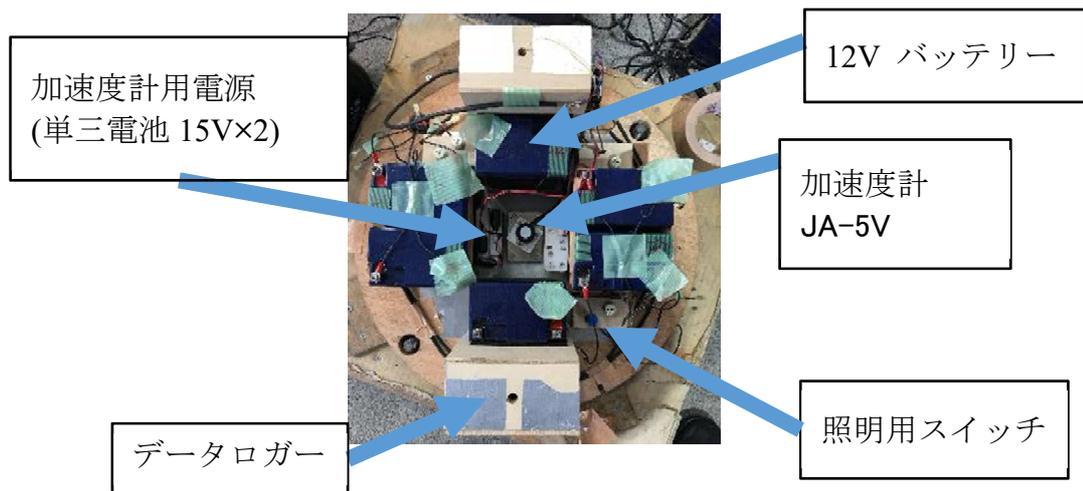


図 3-2-1-9 内部カプセル最下段の搭載状況

図 3-2-1-10 は実験フロアの実験機器の搭載状況（フロア 1，フロア 2 とともに共通）である。

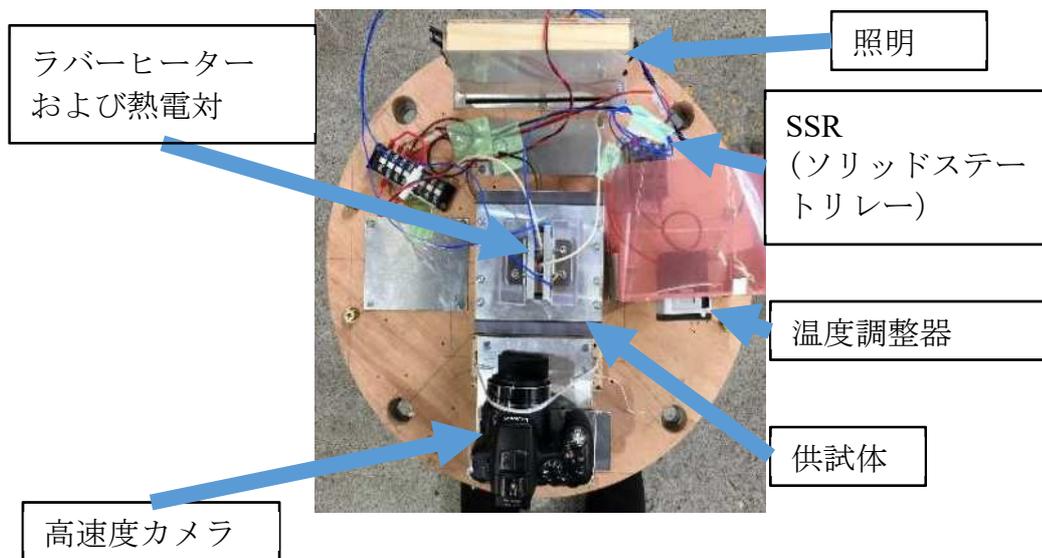


図 3-2-1-10 実験フロアの実験機器搭載状況

図 3-2-1-11 は、実験 No.1, No.4 における内部カプセル内の実験装置の搭載状況である。

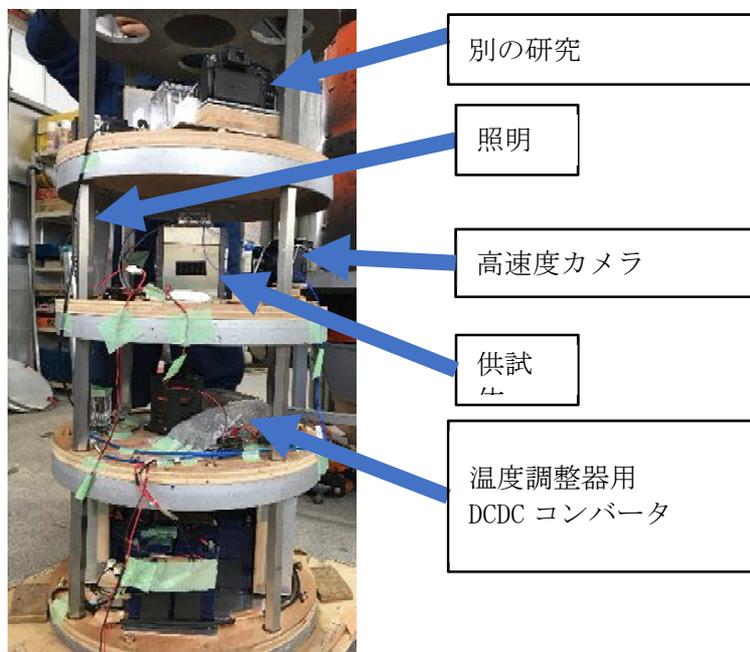


図 3-2-1-11 実験 No.1, 実験 No.6 における内部カプセルの搭載状況.

・実験内容

まず、シリコンラバーヒーターは、ラバー表面温度の管理をしないで空焚きしてしまうと、発火してしまう危険性がある。本実験では可燃性であるエタノールを使用するので、安全性のためにも温度調整器を導入し、ON/OFF 制御によるヒーター表面温度の温度調整を行った。

数値解析では、落下直前における固体壁面の温度を一定の値として、解析の境界条件として使用するため、データロガーで、液体温度とアルミ固体壁表面温度を記録した。また、目的の固体壁温まで温度上昇させるためには落下カプセルに搭載するバッテリーだけでは電力が足らず、均衡するまで時間もかかる。そのため、カプセル搭載前にシリコンラバーヒーターには外部電源を印加させながらデータロガーで温度上昇を確認した。温度調節器の熱電対はシリコンラバーヒーターの表面温度であるため、アルミ板と隙間ができてしまうと空気断熱により、すぐに設定温度まで到達してしまい、アルミ板側に熱伝導するまでに時間がかかる。対策として、適宜、温度調節器の設定温度を高温に設定することでアルミ板への熱伝導に要する時間を短縮した。

落下カプセルをウインチで釣り上げる直前に、内部に収めた実験器具に最後アクセスできる機会が設けられている。この段階で外部電源から 12V バッテリー（内部電源）に切り替える。

・実験条件

実験に使用した、供試液体にはエタノール（関東化学株式会社製 99.5%特級）を使用した。1日の実験において試験液の入れ替えは行っていない。コスモトローレ実験における実験条件と目的を表 3-1-1 に示す。

表 3-1-1 コスモトローレ実験条件

実験No.	落下通し番号	液量	温調器 設定温度	目的
1	1	40%	無し	装置動作確認
2	2	40%	無し	常温
3		40%	40°C	No.2 に対して加熱有の比較
4	3	40%	75°C	No.3 に対する異なる固体壁温度での比較
5		40%	40°C	3の再現性確認
6	9	30%	40°C	No.4で固体壁上での挙動がフレームアウトしたため減量、加熱有
7	11	30%	75°C	No.6に対する異なる固体壁温度での比較
8		30%	無し	No.7に対する常温下での比較

・熱電対の計測位置

加熱された固体壁を模擬するために、2枚のアルミ板(A2027 厚さ 10mm)で、シリコンラバーヒーターと温度調整器に接続した熱電対を挟みこみ M3 六角ボルトで固定する。この片面を加熱された固体壁面とみなし、図 3-2-1-12 に示すように反対面を固体壁温の温度測定する面として、高さ 50mm の場所に熱電対をカプトンテープ、アルミテープで固定した。段差のない固体壁面上を上昇する液体挙動を観察したいので、熱電対が障壁となるためである。下部部品の底面を基準に高さ "+50mm" のところを固体壁面上の温度計測点とした。液体温度

は界面高さから“-10 mm”の位置になるように熱電対を設置した。

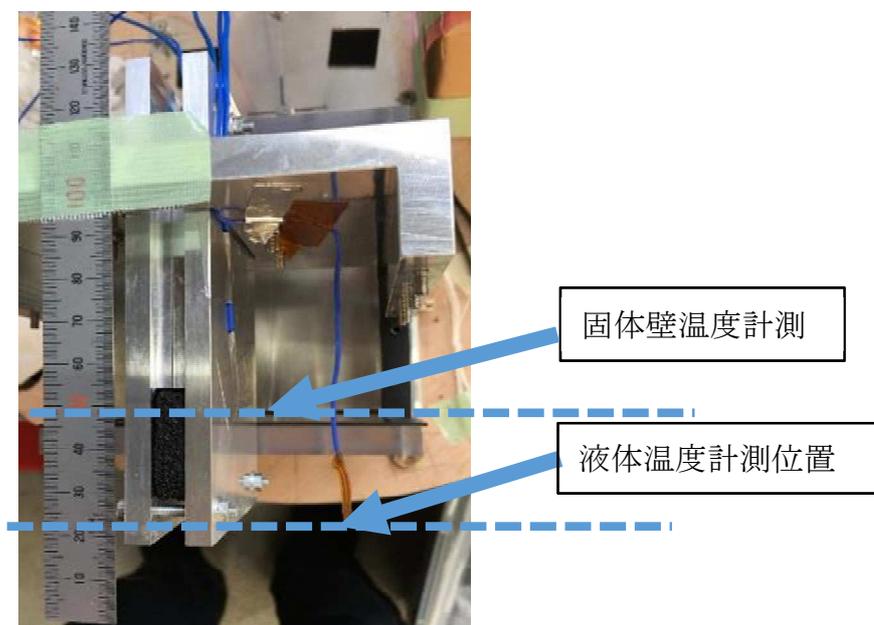


図 3-2-1-12 熱電対の貼り付け位置

3-2 供試体の加熱されていない角を上昇する液体の気液界面高さの時間変化

第5章1節の結果を受けて、製作した供試体を使用した落下塔コスモトールによる微小重力実験を実施した。その結果について記載する。

まず、落下実験で得られた計測データの補正について述べる。

データロガー（MCR-4V,MCR-4TC）での計測データの吸い上げには付属ソフトの“MCR for Windows”を使用した。

エラー! 参照元が見つかりません。は、データロガーの付属ソフトである“T&D Graph”を使用して、計測された重力加速度と温度を一つの時系列グラフにしたものである。

ここで、この図で示す実験 No.7,No.8 のグラフにおいて、微小重力突入前から加熱壁の温度と液体温度の低下が起きていることがわかるが、このような現象は実験映像からは確認できない。

ここで実験 No.7 の実験映像のキャプチャをエラー! 参照元が見つかりません。に示す。

表 5-2-1 は先に述べた実験 No.2 から No.8 までの実験時における落下直前の温度計測結果と実験目的をまとめたものである。固体壁温度とは、加熱された推薬タンク固体壁を模擬する AI 固体壁の表面温度であり、液体温度はエタノールの温度である。

表 3-2-1 微小重力実験の落下直前の温度計測結果および実験目的

実験No.	液量 [%]	温調器 設定温度[°C]	固体壁温度 [°C]	液体温度 [°C]	目的
2	40	無し	16.3	16.2	常温
3	40	40	31.1	27	No.2 に対して異なる固体壁温度での比較
4	40	75	47.5	48.9	No.2 に対する異なる固体壁温度での比較
5	40	40	33.3	29.1	3の再現性確認
6	30	40	33.4	24.1	No.4で液体挙動がフレームアウト。減量で対策。加熱有
7	30	75	68.2	53.3	No.6に対する異なる固体壁温度での比較
8	30	無し	16.5	16.5	No.6に対する異なる固体壁温度での比較

実験条件 No.2 から No.8 までのそれぞれの実験結果について、実験映像の 0.5sec ごとのスナップショットを並べ結果と考察を述べる。

3-2-1 実験 No.2, No.3 の実験結果

落下 2 回目の液量 40%の実験 No.2, 実験 No.3 の温度履歴と重力加速度履歴を図 3-2-1-1 に示す. また, 図 3-2-1-2 には重力加速度グラフを示す.

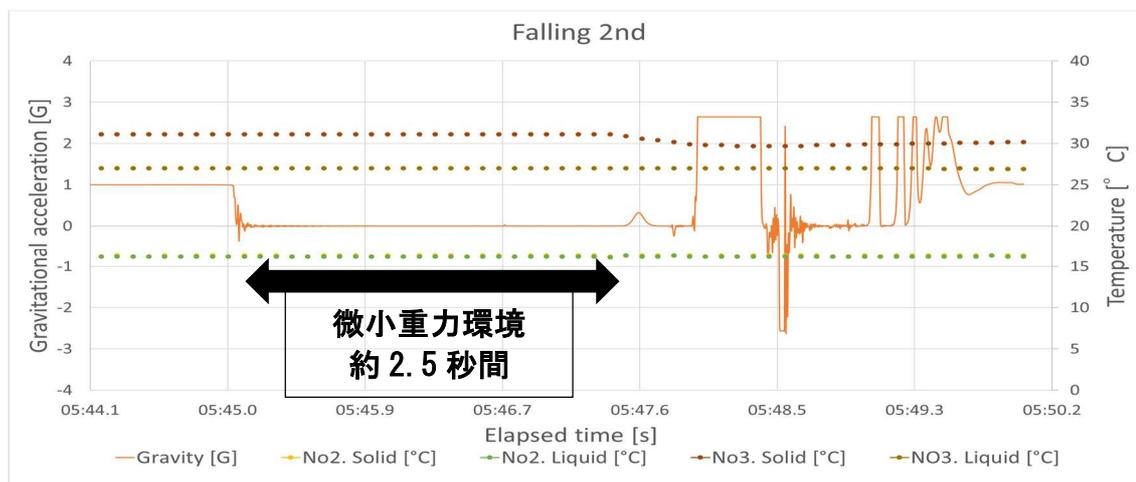


図 3-2-1-1 落下 2 回目の実験 No.2, No.3 における重力加速度および温度グラフ

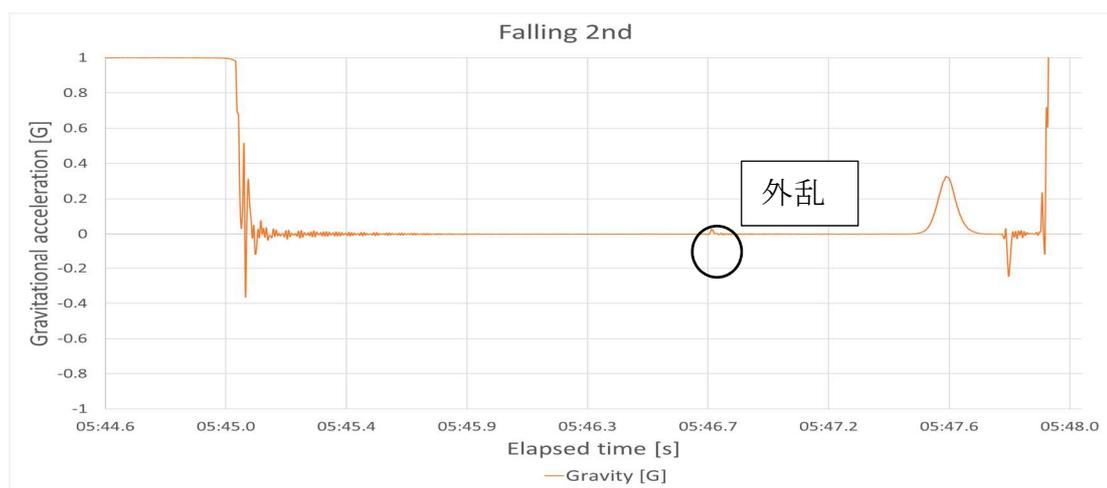


図 3-2-1-2 落下 2 回目の実験 No.2, No.3 における重力加速度グラフ

落下 2 回目は液量 40%における, 実験 No.2 (常温) 実験と, 実験 No.3 (温度調整器設定温度 40°C) の実験である.

No.2 の実験は温度調整器無しの実験である. 図 3-2-1-1 の No.2 Solid が No.2 のアルミ固体壁温度で 16.3[°C], No.2 Liquid が液体温度で 16.2[°C]であった.

No.3 の実験は温度調整器を 40°C設定にして実施した. 図 3-2-1-1 の No.3 Solid が No.3 のアルミ固体壁温度で 31.1[°C], No.3 Liquid が液体温度で 27[°C]であった.

図 3-2-1-3 に実験 No.2 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す

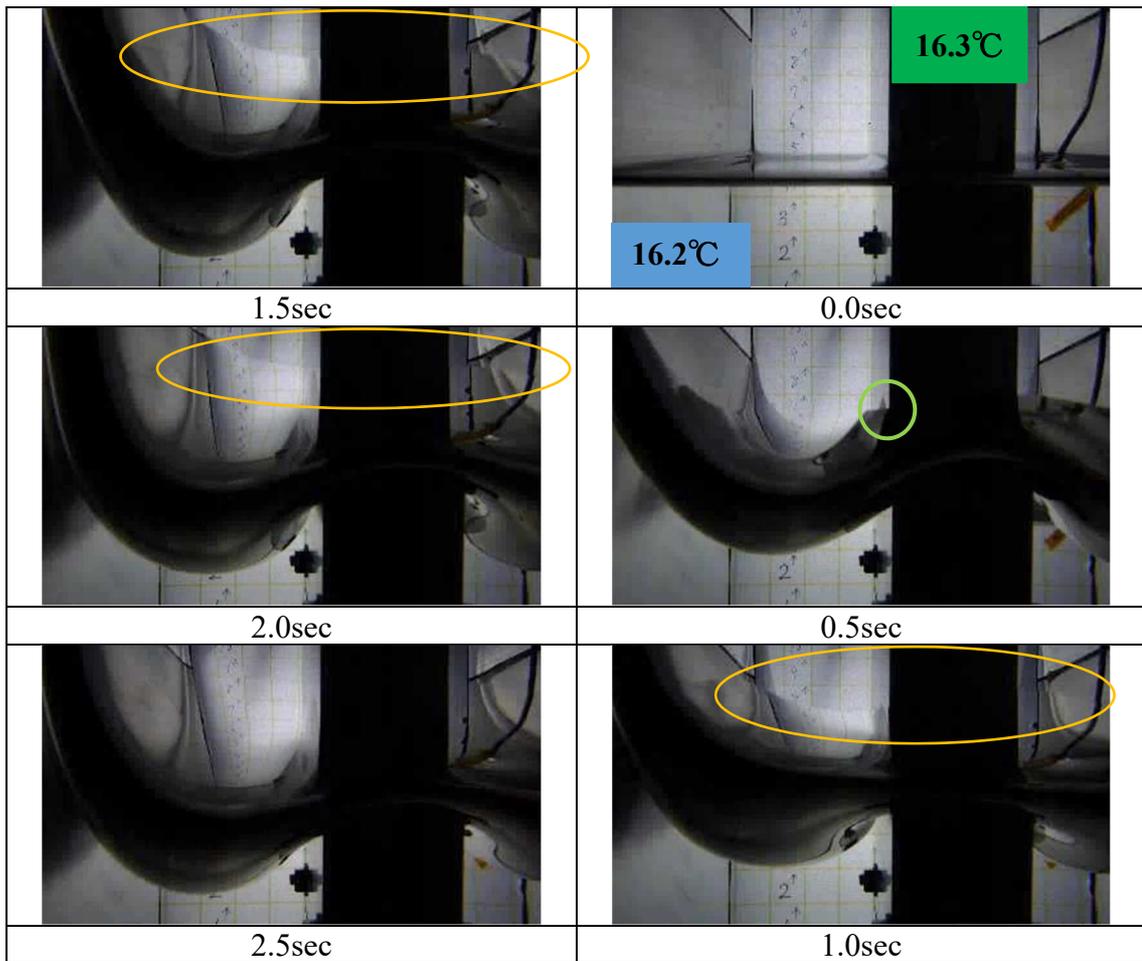


図 3-2-1-3 実験 No.2 の 0.5sec 間隔のスナップショット

実験 No.2 では 0.5sec のとき，推薬タンク固体壁を模擬するアルミ平板上を上昇する液体（緑色の円）が確認できた．しかしながら，正面に薄い液膜（黄色の楕円）が上昇してきているのが確認できた．それに合わせてアルミ平板上における液体挙動が認識しがたくなってしまっている．

図 3-2-1-4 に実験 No.3 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す

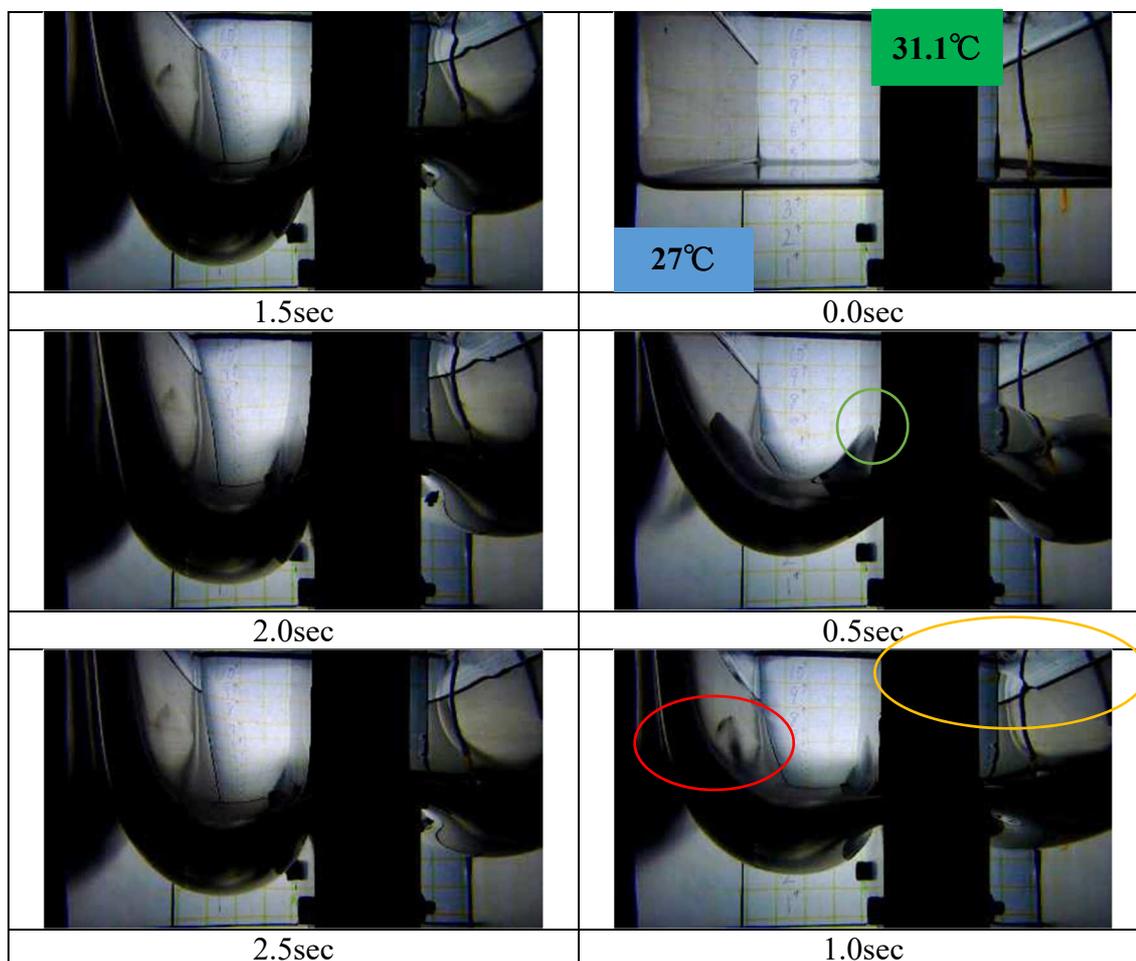


図 3-2-1-4 実験 No.3 の 0.5sec 間隔のスナップショット

No.3 の実験は温度調整器設定温度を 40°C 設定にして実施した。結果，落下直前においてアルミ固体壁温度は 31.1[°C]，液体温度は 27[°C]であった。

No.2 の常温における実験結果（図 3-2-1-3）と見比べると，あまり液体挙動に変化がないようにも見受けられる。しかし，0.5sec のときに実験 No.2 でみられるアルミ固体壁を上昇する濡れ挙動の様子が確認できない。また，正面を上昇する薄液膜の上昇が No.3 ではやや早い。さらに，1.0sec では赤い円で囲ったところに，液膜がはっきりと確認できる。これは無加熱の No.2 では見受けられない。

3-2-2 実験 No.4, No.5 の実験結果

落下 3 回目の液量 40%における，実験 No.4，実験 No.5 の温度履歴と重力加速度履歴を図 3-2-2-1 に示す．また，重力加速度のグラフを図 3-2-2-2 に示す．

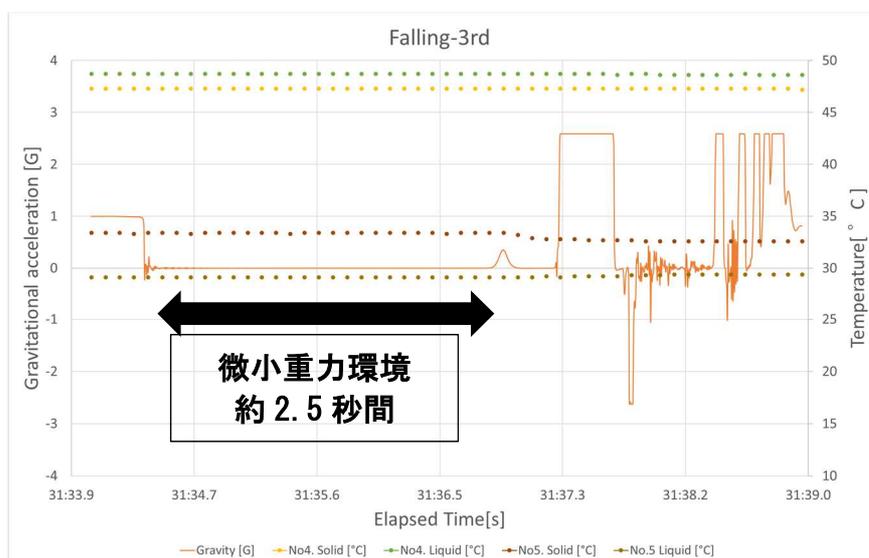


図 3-2-2-1 落下 3 回目の実験 No.4，No.5 における重力加速度および温度グラフ

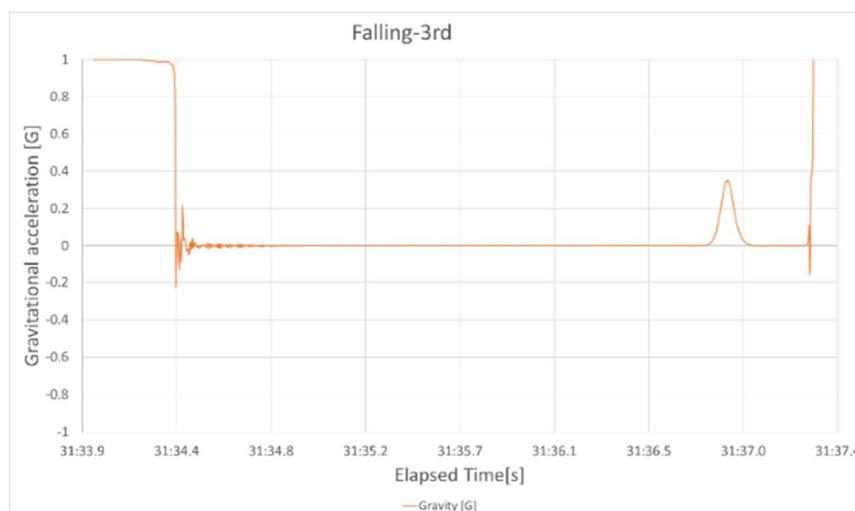


図 3-2-2-2 落下 3 回目の実験 No.4，No.5 における重力加速度グラフ

落下 3 回目は液量 40%，における実験 No.4（温度調整器設定温度 75℃）と，実験 No.5 熱を（温度調整器設定温度 40℃）である．

No.4 の実験は温度調整器を 75℃設定にして実施した．その結果，落下直前において，

図 5-2-20 の No.4 Solid が No.4 のアルミ固体壁温度で固体壁温度で 47.5[℃]，No.4 Liquid が液体温度で 48.9[℃]である．

図 3-2-2-3 に実験 No.4 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す

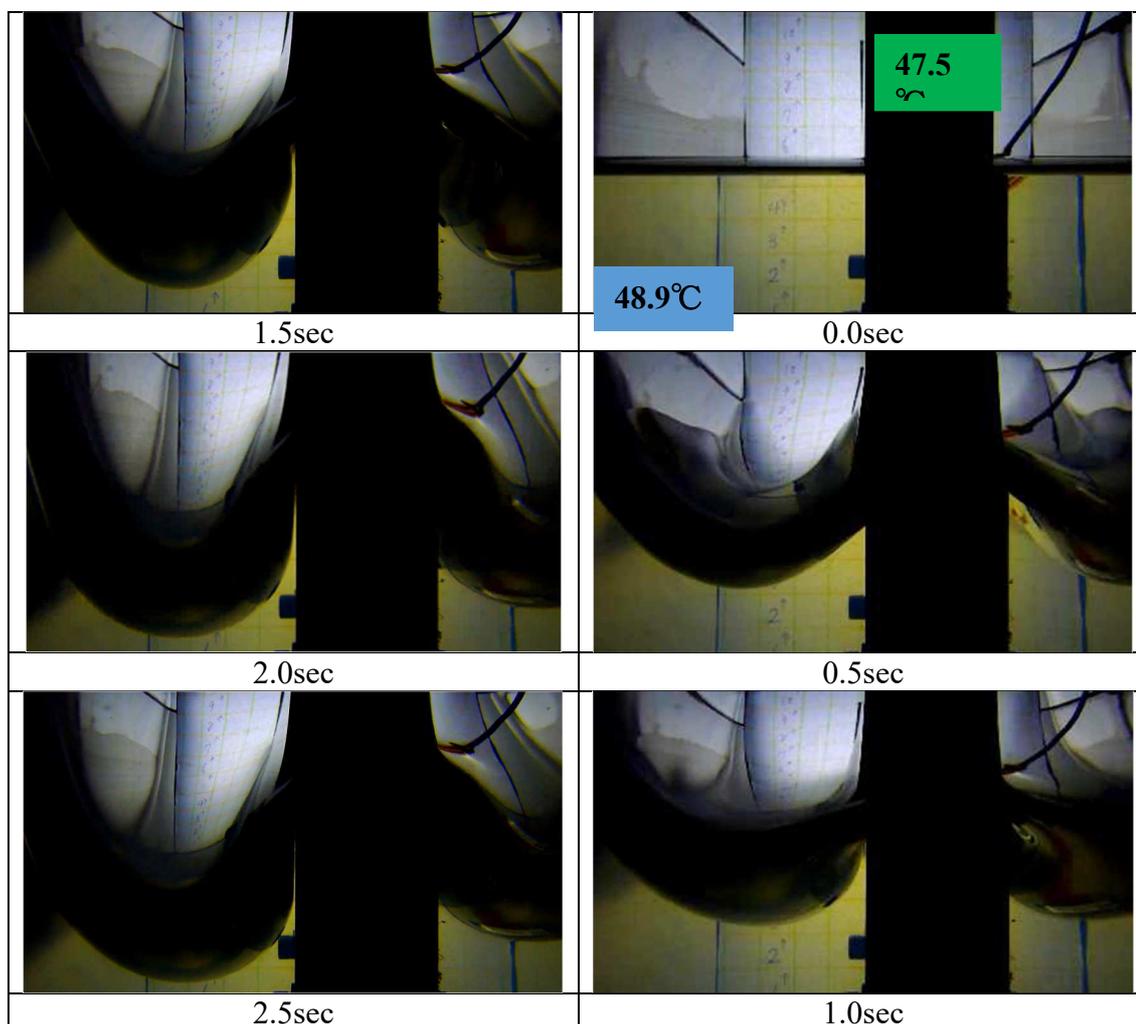


図 3-2-2-3 実験 No.4 の 0.5sec 間隔のスナップショット

No.4 の実験では落下前に、正弦波インバーターの電源が落ちてしまい、ヒータへ電力供給がなされていなかった。そのため、落下直前のアルミ固体壁温度は 47.5°C で液体温度はそれよりも高い 48.9°C となっていた。これは金属であるアルミの熱容量が、エタノールよりも大きいため、先に冷えだしたと考えられる。エタノールの色に変色している理由は検討中である。

No.4 は常温条件の No.2 と温度設定 40°C 条件の No.3 と見比べると、液体の挙動が大きく異なることがいえる。特に 2.5sec における No.2 常温条件（図 3-2-1-3）の映像と比較すると、液体の凹みによって生じる影が異なることは明瞭である。また、特に全体にわたって液面の湾曲が大きいことがわかる。

この No.4 の実験では微小重力突入後の液体挙動が早々にフレームアウトしてしまい、固体壁を上昇する様子が確認できなかったため、実験 No.6 からは液量を 30% に減らし実験を行った。

図 3-2-2-4 に実験 No.5 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す

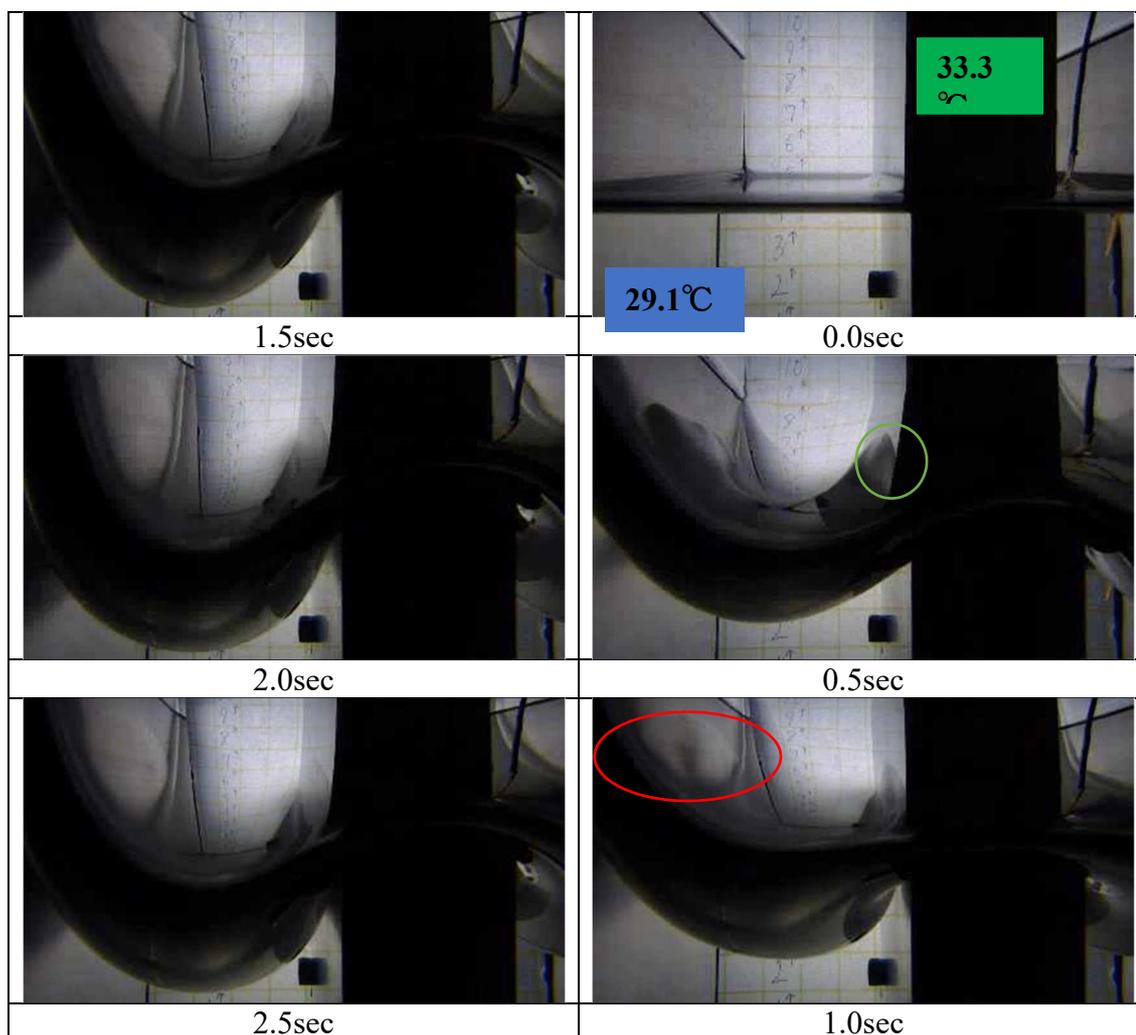


図 3-2-2-4 実験 No.5 の 0.5sec 間隔のスナップショット

No.5 の実験は温度調整器を 40°C 設定にして実施した。その結果、落下直前においてアルミ固体壁温度が 33.3[°C]、液体温度で 29.1[°C]であった。実験 No.5 の目的は実験 No.3 の再現性の確認であるが、温度設定は温度調整器を 40°C に設定するのみで、細かい温度調整はできないので落下時の温度計測値はその場の環境に委ねるほかない。実験 No.3 に対して、固体壁温度は”+2.2°C”あり、液体温度は”+2.1°C”であった。映像動画を見比べると、全体的な挙動は一致していると考えられる。緑で囲んだアルミ板を上昇する液体挙動は正面に上昇する液体で屈折が起こり上昇が認識できない。また、赤い円で囲む加熱していない固体壁面では No.3 に見られるような薄膜の広がり実験 No.3 よりも広範囲にわたっている。

3-2-3 実験 No.6 の実験結果

落下 9 回目の液量 30%における、実験 No.6 の温度履歴と重力加速度の履歴

を図 3-2-3-1 に示す. また, 図 3-2-3-2 に重力加速度のグラフを示す.

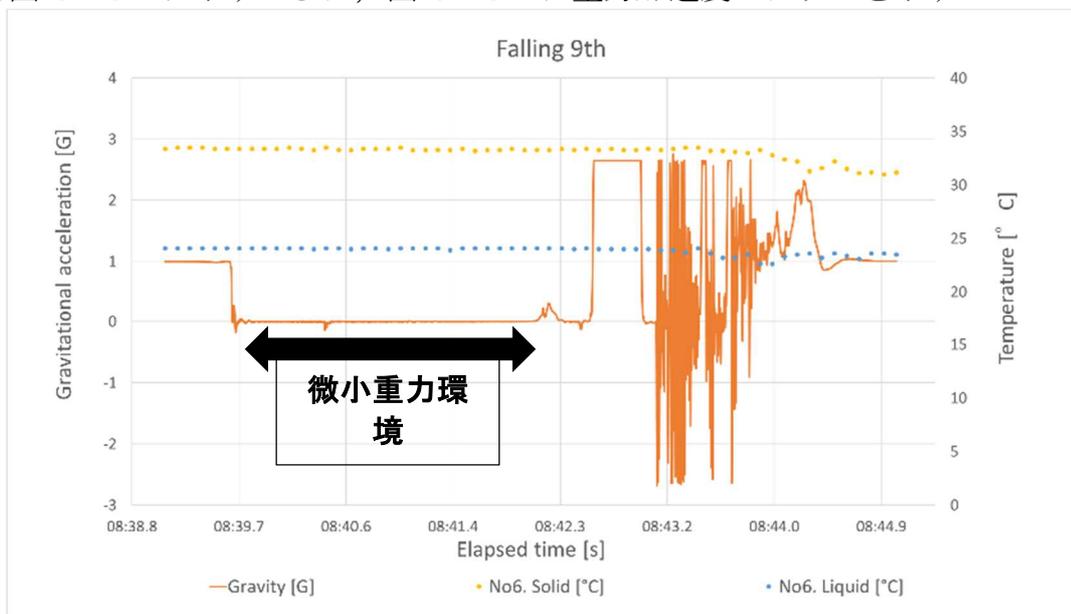


図 3-2-3-1 落下 9 回目の実験 No.6 における重力加速度および温度グラフ

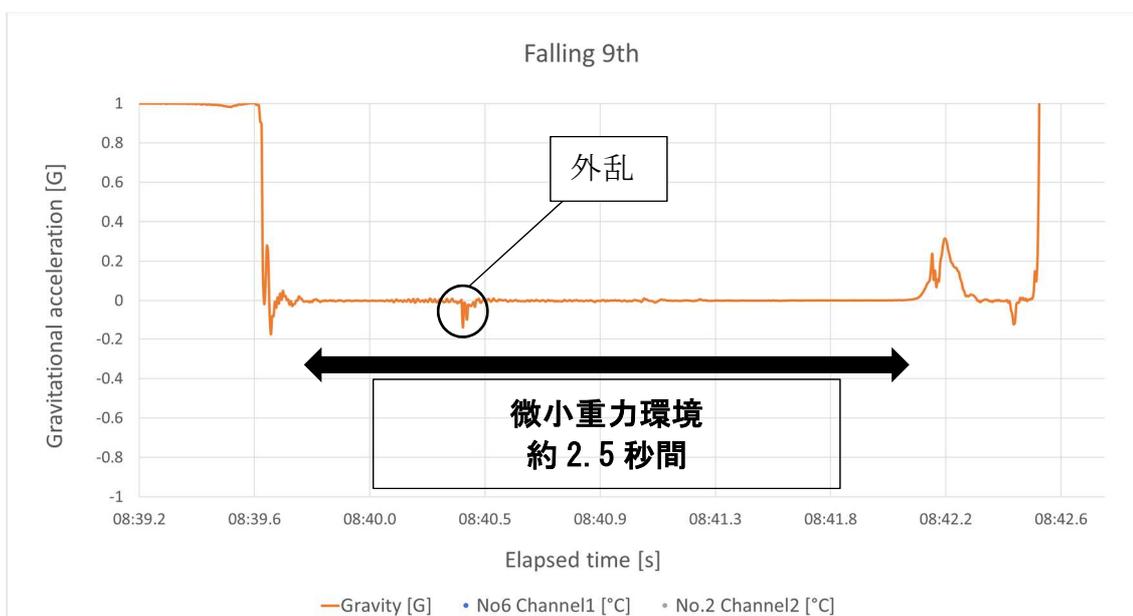


図 3-2-3-2 落下 9 回目の実験 No.6 における重力加速度グラフ

落下 9 回目は液量 30%における実験 No.6 (温調器設定温度 40°C) である. No6 の実験は温度調整器を 40°C 設定にして実施した. その結果, No6.Solid が固体壁温度で 33.4[°C], No4.Liquid が液体温度で 24.1[°C]であった. 図 3-2-3-3 に実験 No.6 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す.

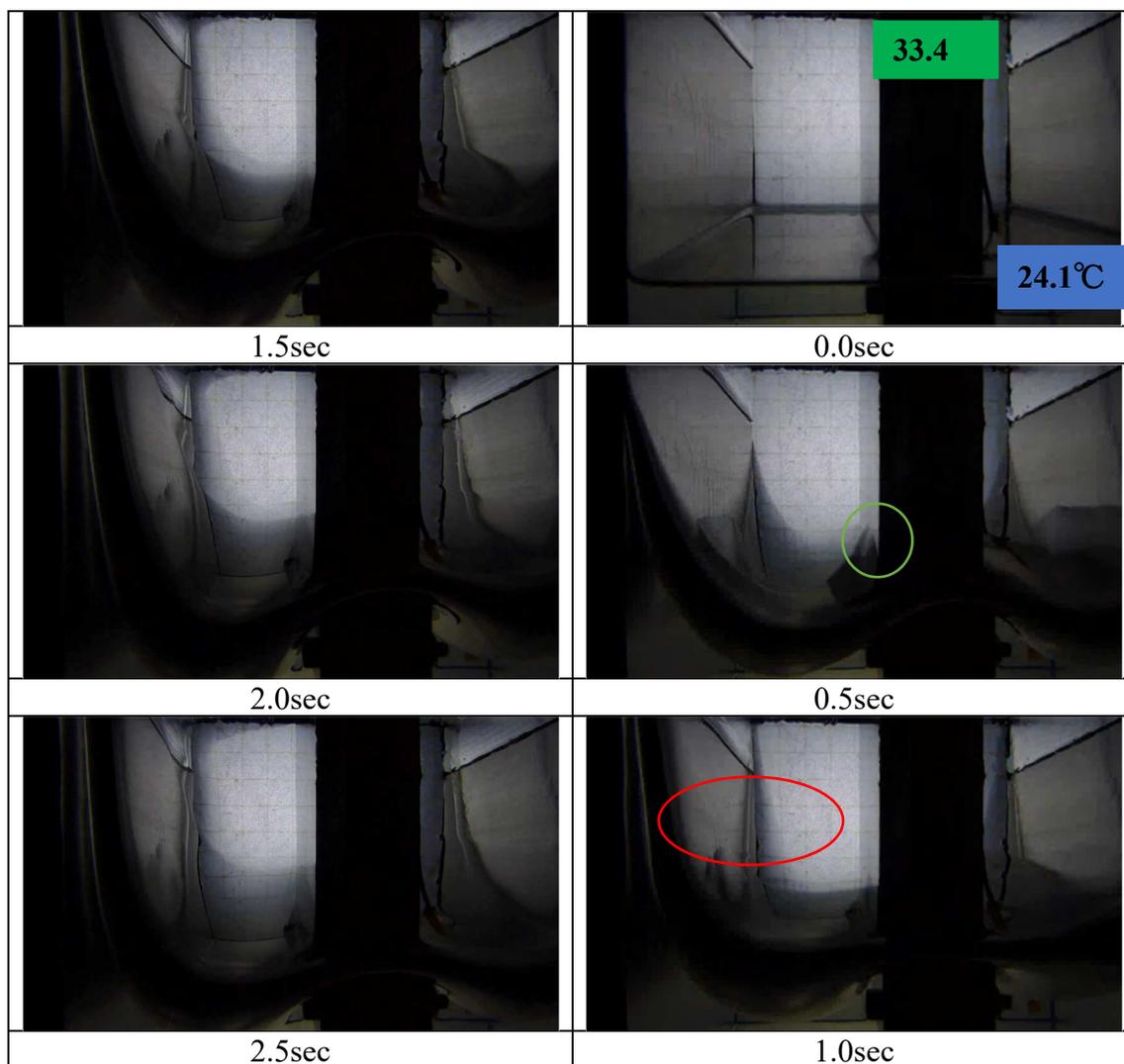


図 3-2-3-3 実験 No.6 の 0.5sec 間隔のスナップショット

図 3-2-3-3 では、温度調整器の設定温度が同じ設定である実験 No.3, No.5 と実験 No.6 のアルミ固体壁温度及び液体温度差は、アルミ固体壁温度が、No.3 に対して“+2.3℃”, No.5 に対して, “+0.1℃”であり, 液体温度は No.3 に対して“-2.9℃”, No.5 に対して“-5℃”であった. 緑で囲んだアルミ固体壁における液体の上昇は鮮明にはみられない. これは, 液量 40%で行った実験 No.3, No.5 (温度調整器設定温度 40℃) と同様である. また, 赤い円で囲んだ加熱していない固体壁において, 実験 No.3, No.5 と同様に液膜の確認ができる.

液体温度には差があるが, 固体壁を上昇してく液体挙動が視認できないのは, ①液量が少ないことで, 矩形容器の隅を上昇する液体に他の液体が引っ張られて, アルミ固体壁面に液体が上昇していない. ②液体が蒸発している可能性. ③正面に上昇する液膜によって歪められてしまっている. といった 3 つの理由が考えられる.

3-2-4 実験 No.7, No.8 の実験結果

落下 11 回目の液量 30%における，実験 No.7，実験 No.8 の温度履歴と重力加速度履歴を図 3-2-4-1 に示す．また重力加速度のグラフを図 3-2-4-2 に示す．

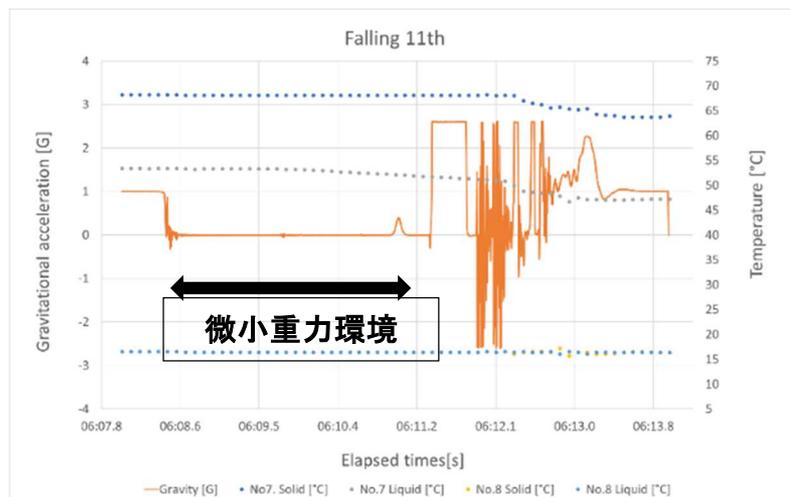


図 3-2-4-1 落下 11 回目の実験 No.7，No.8 における重力加速度および温度グラフ

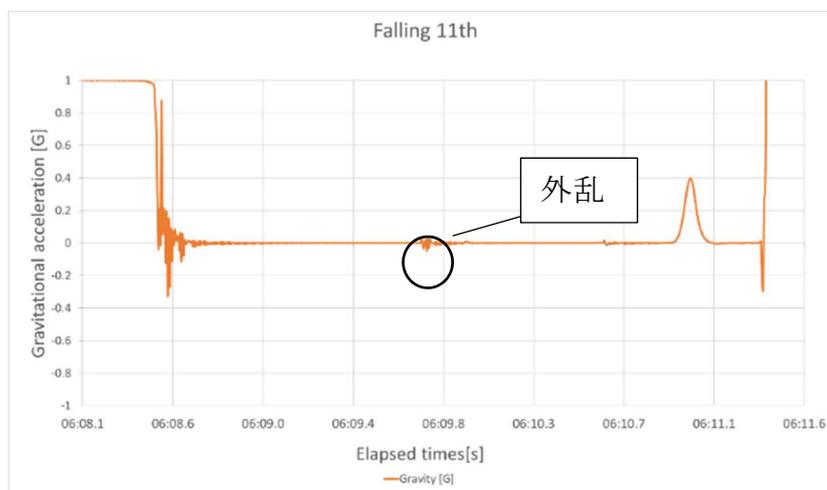


図 3-2-4-2 落下 11 回目の実験 No.7，No.8 における重力加速度グラフ

落下 11 回目は液量 30%における実験 No.7（温度調整器設定温度 75℃）と，実験 No.8（常温）の実験である．

No.7 の実験は温度調整器を 75℃設定にして実施した．その結果，落下直前において No.7 Solid が固体壁温度で 68.2[°C]，No.7 Liquid が液体温度で 53.3[°C]であった．

No.8 の実験は加熱無しの状態にして実施した．その結果，落下直前において No.8 Solid が固体壁温度で 16.5[°C]，No.8 Liquid が液体温度で 16.5[°C]であった．

図 5-2-29 に実験 No.7 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す。

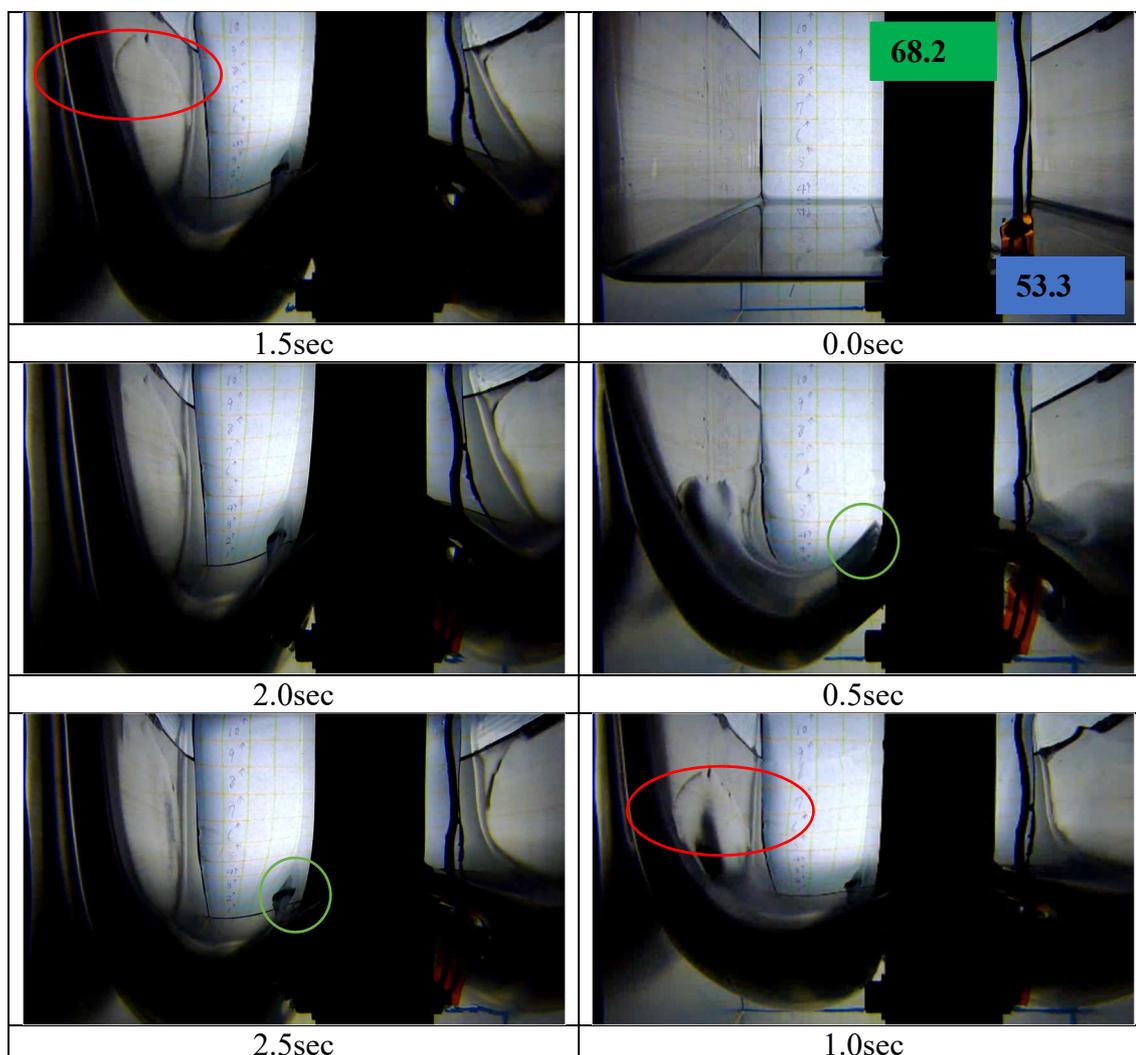


図 5-2-29 実験 No.7 の 0.5sec 間隔のスナップショット

No.7 の実験は温度調整器を 75°C 設定にして実施した。落下直前にはアルミ固体壁温度で 68.2[°C]、が液体温度で 53.3[°C]であった。

0.5sec では他の実験と同様に緑の円で囲ったところで、内部デバイス上を上昇する液体が確認できる。しかしながら、1.0 秒あたりからはその様子は映像からは判断がつかない。これは、加熱壁面温度が 68.2°C であり、エタノールの沸点は 78.3°C であるために、薄液膜が上昇しながら蒸発してしまった可能性も考えられる。または、角を上昇する液膜に曳かれた液面が、正面に上昇することで収差によって見えなくなってしまった可能性も考えられる。また、赤い円で囲った加熱されていない壁面に対して広がる液膜は他の実験映像と見比べても広く薄く存在しているのが確認できる。

落下直前の液体温度が一番近い実験 No.4 (図 3-2-2-3) と比較すると、ともに供試体内の液体の湾曲が大きい。液量の違いはあるが、液体の温度が近いということで全体的な挙動は一致している。

図 3-2-4-3 に実験 No.8 の映像の 0.5sec 間隔のスナップショットを示す。

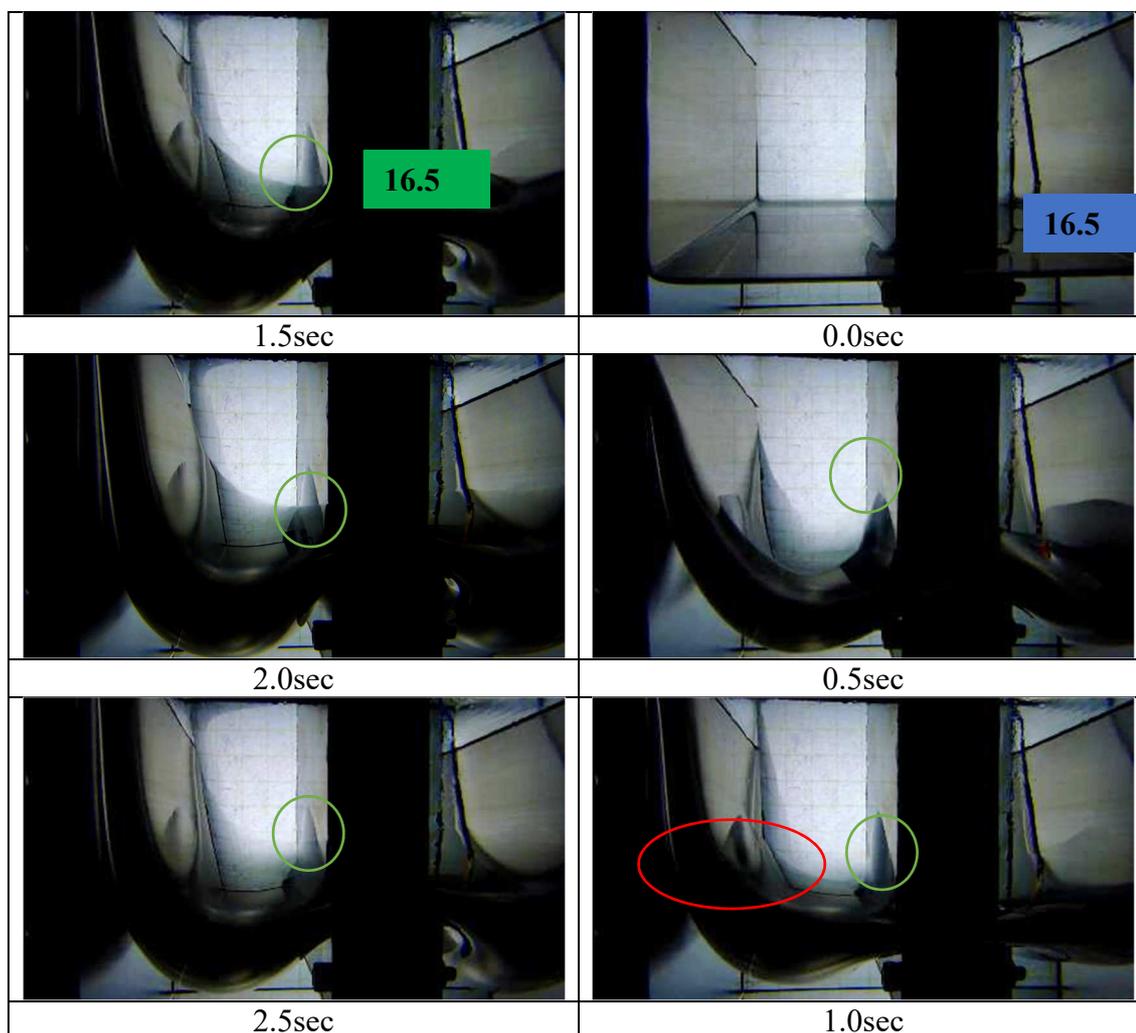


図 3-2-4-3 実験 No.8 の 0.5sec 間隔のスナップショット

No.8 の実験は温度調整器を使用しない常温における実験である。落下直前の固体壁温度は 16.5℃、液体温度は 16.5℃であり、両者は一致している。また、これは落下カプセル内の温度であるとも言える。

液量 30%の他の実験 (No.7, No.6) に対して比較した結果を述べる。まず、緑の円で囲んだ付近で、アルミ固体壁面を上昇する液体の姿が 2.5 秒間で明瞭に確認できる。これは実験 No.6, No.7 とともに確認できないことである。この結果が得られた理由としては、特に、液体の粘性がかかっているのではないかと考えられる。特に実験 No.7 に対しては液体温度差は -52.6°C である。No.7 では液体の粘性が小さく、供試体内全体の液体の挙動に影響を与えていると考えられる。No.8 では粘性が動的濡れ挙動に対する抵抗となることで、角を上昇する液に曳かれた液面により正面を上昇する薄い液膜の上昇量が、小さくなることで、供試体の内部が鮮明に認識できたと考えられる。さらに、赤い円で囲んだ領域における薄液膜の広がり No.7 に対して小さいことがわかる。

3-3 供試体の加熱されていない角を上昇する液体の界面高さの時間変化の結果

図 3-2-4-1 は実験 No.8 における供試体の加熱されていない角を上昇する気液境界点高さの計測例である。

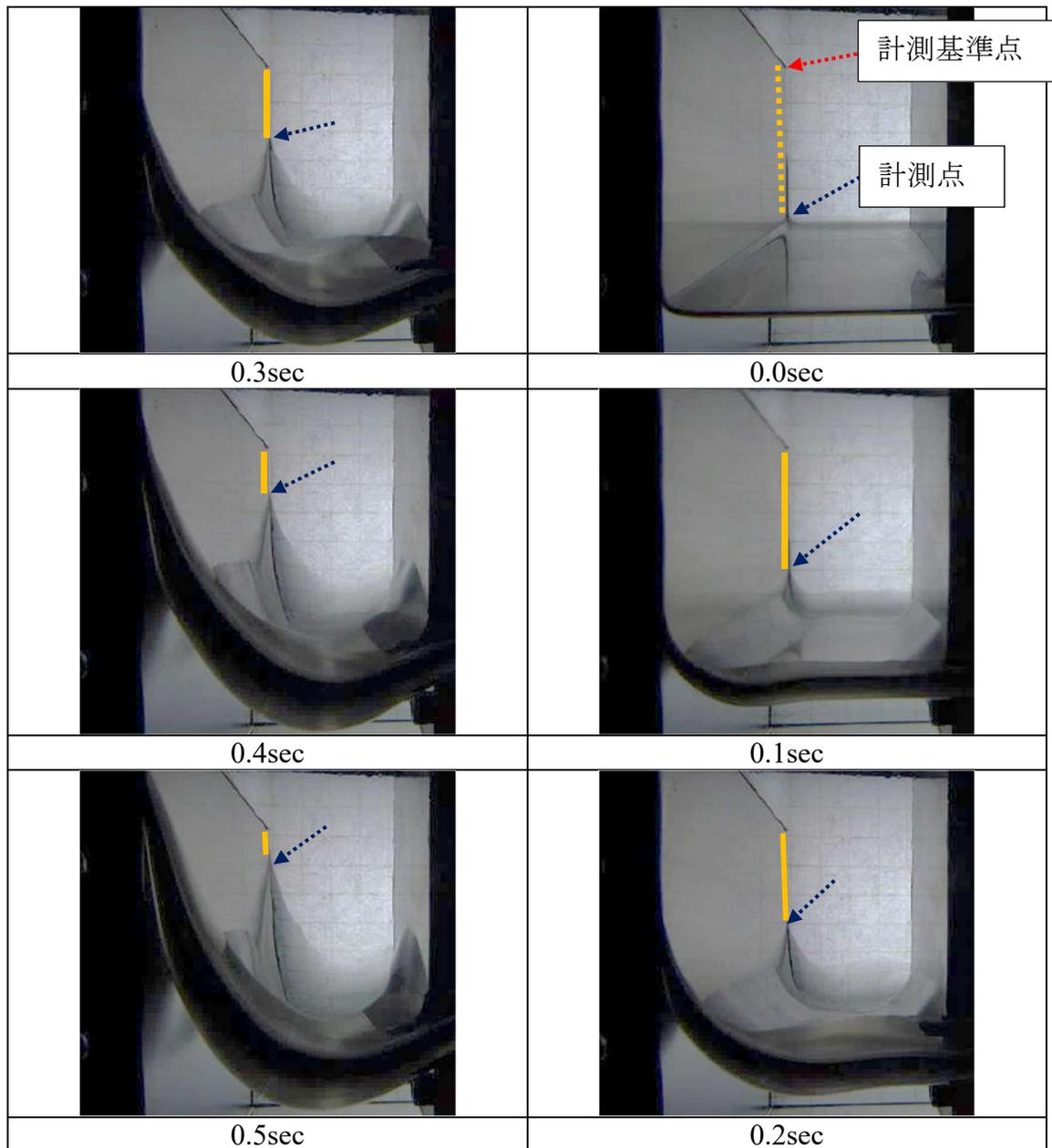


図 3-2-4-1 実験 No.8 の角の気液境界点高さの時間変化 (0.1sec 間隔)

前述のように計測基準点からの垂線の距離を計測した。そして、図 3-2-4-2 はそれぞれの実験において、供試体の加熱されていない角を上昇する気液界面点の高さの時間変化を ImageJ を使用し計測した結果である。計測基準点 (供試体

下のブロックの高さ 80mm) を基準に、鉛直下向きに計測するときは、“80-計測基準点から計測点までの距離”とし、計測基準点から鉛直上向きに計測するときは、“80+計測基準点から計測点までの距離”として計算した。なお、計測間隔は 0.016667 sec である。

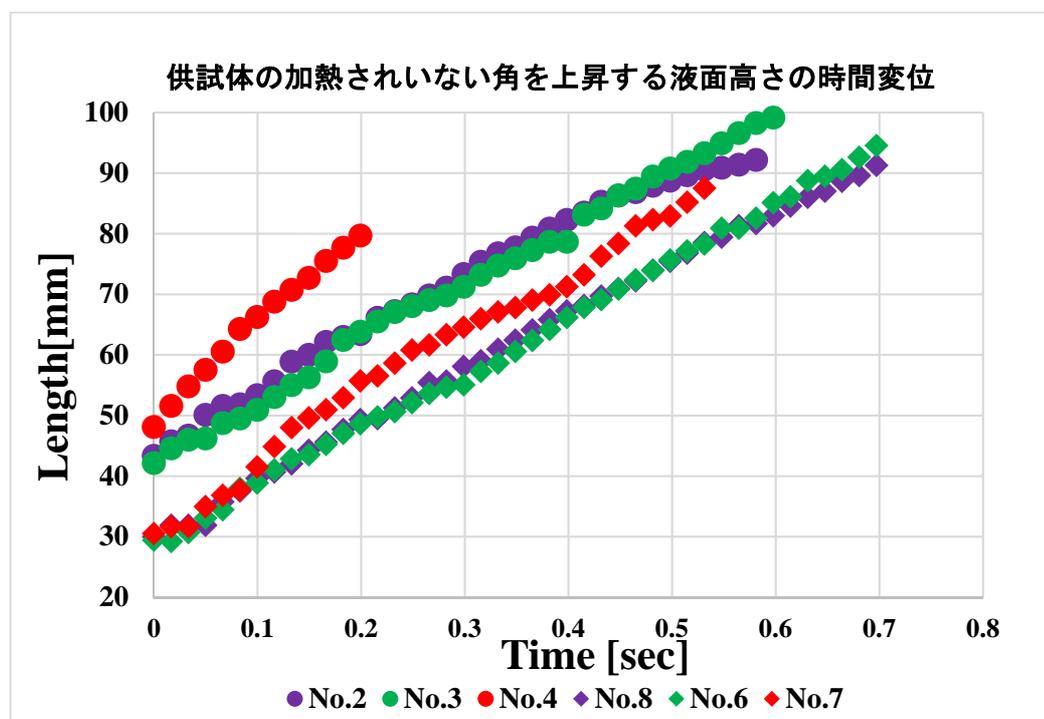


図 3-2-4-2 供試体の加熱されていない角を上昇する液面高さの時間変位

供試体の加熱されていない角を上昇する液体の高さを時間変化でプロットした。No.2,3,4 は初期液量 40% のときで、No.8,6,7 は初期液量 30% の時である。また、No.2,8 は温度調整器を使用しない常温における実験である。No.3,6 は温度調整器設定温度を 40℃ に設定した実験である。No.4,7 は温度調整器設定温度を 75℃ に設定した実験である。

グラフからは液体温度が高い No.4,7 のほうが、初期液量 40%、30% においても角を上昇する液体の速度は大きい。これは液体が加熱されたことで液体温度の上昇に伴い、表面張力および粘度ともに低下するが、粘性の低下の影響がより顕著なため、壁面に対する摩擦や抵抗が小さくなり上昇しやすくなったと考えられる。常温条件での液体温度 (No.2,8) と温度調整器設定温度 40℃ 設定の時の液体温度 (No.3,6) における高さの時間変化の差はあまり違いがないが、やや No.3,6 の上昇の仕方が大きい。

これらの理由には、温調設定温度 40℃ (No.3,6) と常温温度 (No.2,8) における液体の温度が近く、粘性によって生じる差も小さいのではないかと考えられる。または、手動における画像計測の誤差、気液境界点の厳密な検出ができていない、カメラ配置による収差も誤差の原因だと考えられる。

しかしながら、本研究の先行研究⁴⁾では動粘性の動粘性係数の違いによる液体挙動の違いが報告されている。液体の動粘性係数が小さいほうが、動的濡れ挙動

に及ぼす影響が大きいということで、これらの見解は一致すると考えられる。

3-4 まとめ

- 微小重力環境下において、液体の温度変化が、動的濡れ挙動に及ぼす影響を確認できた。
- 本研究で使用した矩形容器では角を上昇する液によって、加熱壁面上における液体挙動の観察ができるが、液温が高くなると正面にも薄膜が上昇してしまい、観察が阻害されることがわかった。対策としては、①正面背面に濡れを悪くするコーティングを施し上昇を抑える。②角の途中に障害物を設置して上昇を抑止する。などが考えられる。
- 2次元数値解析と実験結果を比較すると、大部分で差異が認められた。これには特に供試体の3次元形状が液体の挙動に影響を与えているのではないかと推察される。
- 本研究の目標達成には可視化手法を見直す必要がある。

3-5 今後の課題

- 伝熱を伴う動的濡れ挙動の予測技術を確立するためには、接触角の計測が重要になる。本研究では、可視化手法に問題があり、接触角の計測ができていない。そのため、伝熱を伴う動的濡れ挙動の動的接触角の測定ができるように可視化手法を改善する必要がある。
- 本研究では、加熱方法に手間と時間がかかってしまうため、より効率的な実験ができるよう実験装置の改良をする必要がある。
- 液面変位の観測および計測。レーザー距離計等を用いた厳密な移動量の測定の実施をする必要がある。
- 数値解析においては、モデルの3次元形状を考慮し、また、蒸発を考慮した3次元数値解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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 32 (2013), pp.239–244.
- 2) 宇宙開発データブック 財団法人 日本宇宙フォーラム
- 3) 上野一郎 固液気 3 相境界線近傍流体挙動の可視化
- 4) 道原 孟里 微小重力環境における動的濡れ及びスロッシング挙動に関する研究 室蘭工業大学卒業論文 (2017)
- 5) <http://www.cradle.co.jp/glossary/detail/0000000114?c=en>
- 6) 稲葉 克典 LNG 貯槽ロールオーバー解析技術の開発 室蘭工業大学卒業論文 (2017)
- 7) <https://www.ansys.com/services/training-center/fluids/ansys-fluent-using-user-defined-functions>

第4章 減圧による相変化を伴う自由界面挙動の観察

4-1 目的

マイクロチャネルでの薄液膜蒸発を利用した冷却デバイスでは、マイクロチャネルに捕捉された自由界面上で蒸発を生じる。この際の自由界面挙動を詳細に把握するため、比較的大きなスケールで固体壁近傍の濡れ挙動が観測可能な微小重力環境下での実験を実施した。

4-2 実験装置

本実験には、供試液体としてエタノール 99.5%を使用した。本研究では極低温液体の挙動を対象としているが、実験では後述する落下塔施設での取り扱いが容易であるため、また、比較的相変化させやすく、また表面張力が小さい理由から採用した。

供試体

本実験に使用した供試体を図 3-2-4-1 に示す。本供試体はポリカーボネート板同士を溶着させることにより、内部の液体挙動を可視化させた。供試体の内寸は $50 \times 50 \times 100$ mm である。

供試体の蓋はアルミ合金製である。ガス流路用と熱電対ポート用の穴を加工している。

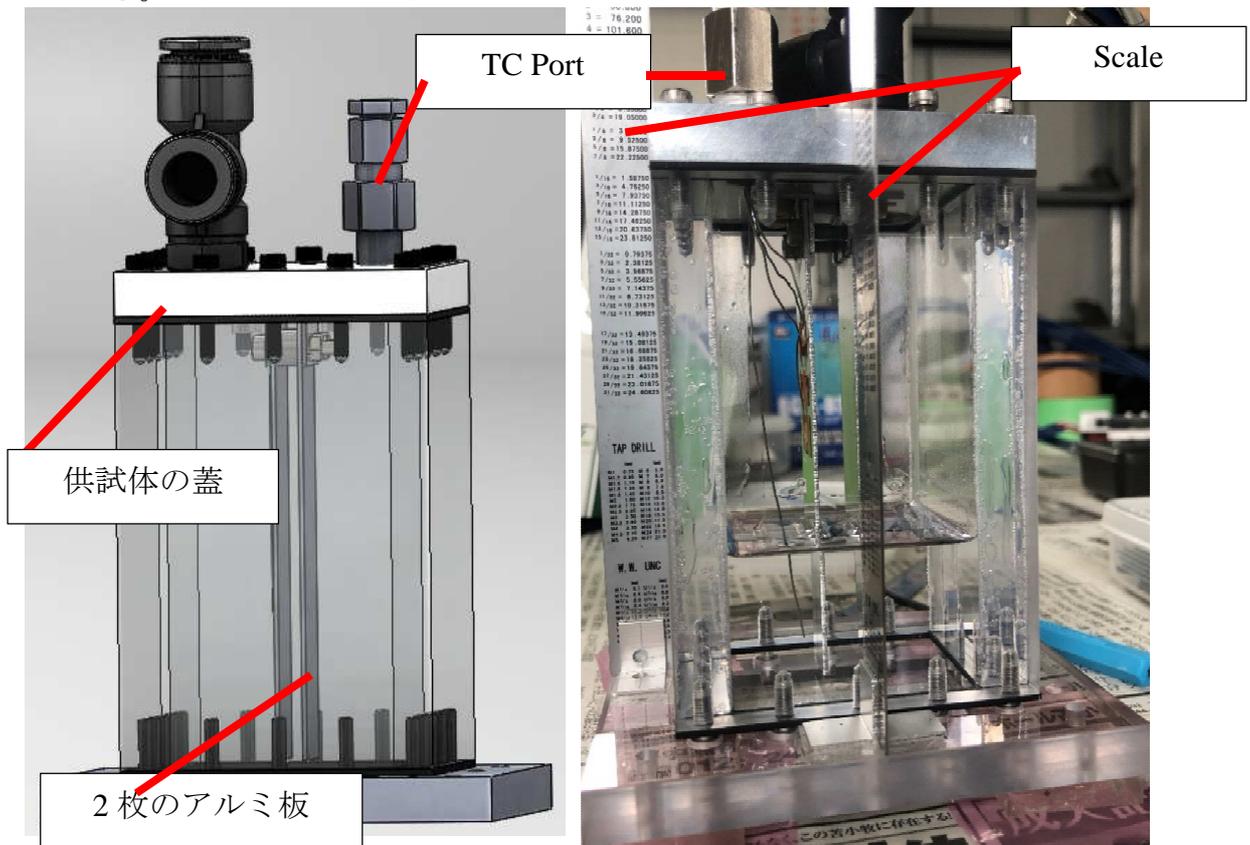


図 3-2-4-1 供試体

図 3-2-4-2 に供試体の上蓋を示す。上蓋には、熱電対用のポートと減圧のためのポートを取り付けてある。減圧ポートの先は圧力計に、また、電磁弁を経て真空引きした圧力容器(8ℓ)に接続されている。また、2枚のアルミ板を上蓋の中心に平行になるように取り付けている。これは、微小重力環境下における動的濡れ挙動をこの平行に取り付けたアルミ板間でとらえるためである。図 3-2-4-2 に示すようにそれぞれのアルミ板の外側の面には感温液晶 (KX1020, 日本カプセルプロダクツ社) と熱電対 (MSND0.5-300, MISUMI) を取り付けている。感温液晶の呈色温度域は 10~20[°C] である。熱電対の位置は供試体底面より、高さ 50mm, 60mm, 70mm に取り付けてある。また、液相の温度を計測するために、底面より高さ 10mm の位置に取り付けてある。

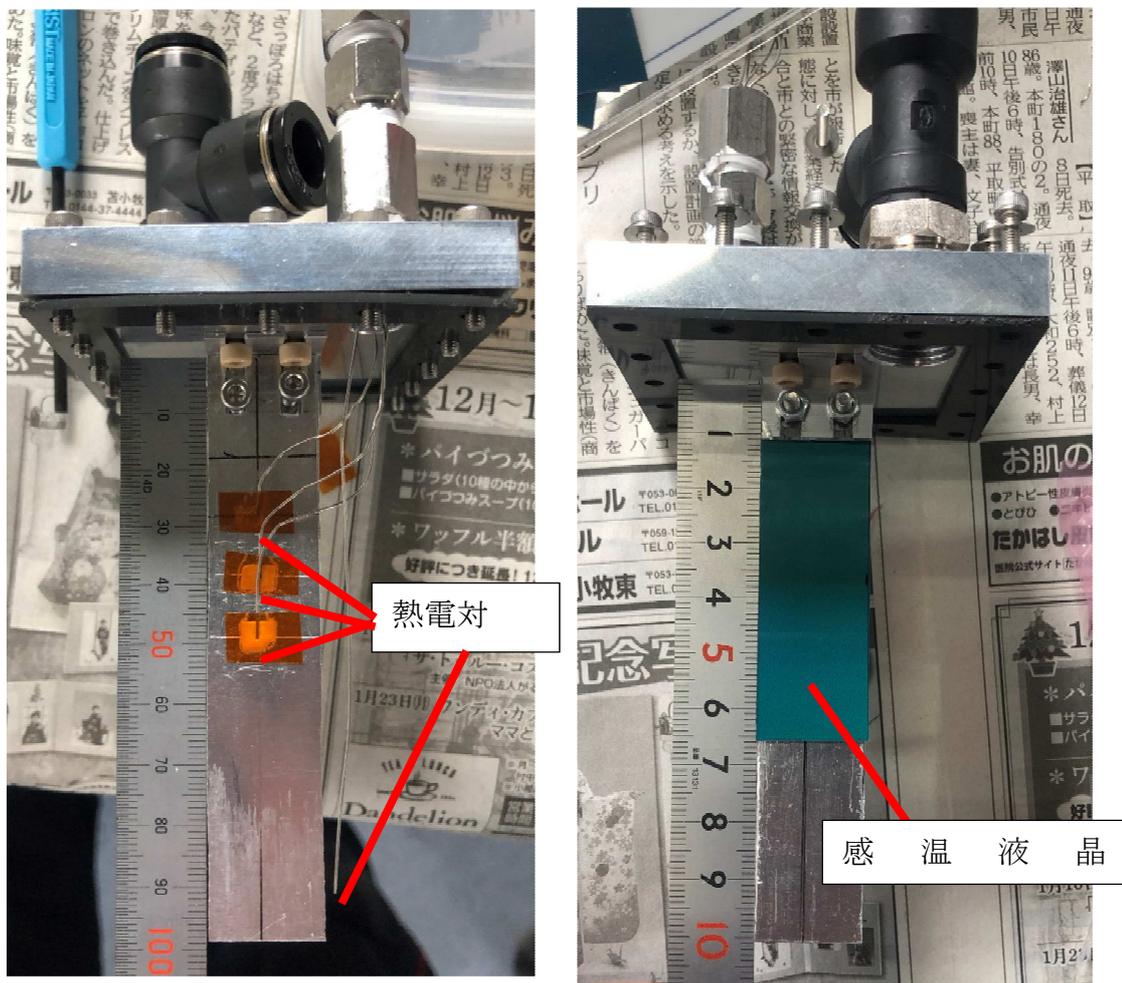


図 3-2-4-2 供試体の上蓋とアルミ板

コーティング剤

本研究では過去に我々が実施した実験で使用した供試体をベースに、また、M. Drayer らの研究 [3] を参考にして製作した矩形容器を使用している。先行研究で使用した 100mm 角の矩形供試体で内部における液体挙動を可視化した際に、矩形容器の四つ角における動的濡れ挙動によって容器の平面を上昇する薄液膜

により、矩形容器内における動的濡れ挙動が次第に不鮮明になってしまう問題が生じた [4]。そのため、この四つ角における動的濡れ挙動を抑制する必要があった。その抑制方法として、本研究ではエラー! 参照元が見つかりません。に示す、フッ素系コーティング剤エスエフコート (SFE-DP02H、SFE-B002H, :AGC セイメイケミカル社製) を容器の壁面に塗布することで、固体壁面の表面張力を変化させることにより、液体の固体とのなす角度、すなわち接触角を変化させる手法を採用した。

4-3 実験方法

4-3-1 学内切り離し式落下装置による微小重力実験

後述する落下塔による短時間微小重力実験を実施するに先立ち、前項で示したフッ素系コーティング剤の効果を確認するために学内所有の切り離し式落下装置にて、短時間微小重力実験を実施した。切り離し式落下装置では、微小重力環境 $10^{-2}G$ 、微小重力時間約 0.58sec を得ることが可能である。図 4-3-1-1 に使用した供試体 (50mm 角のプラスチック製容器) を示す。また、図 4-3-1-2 にフッ素系コーティング剤を塗布した面を赤く示したイメージ図を示す。容器の中心部に配置された黒い直方体は、図 3-2-4-2 に示したアルミ壁の代わりとして、プラスチック製デバイスを示す。

供試液体にはエタノール(99.5%)を使用した。液量は 30ml である。



図 4-3-1-1 プラスチック製 50mm 角の供試体

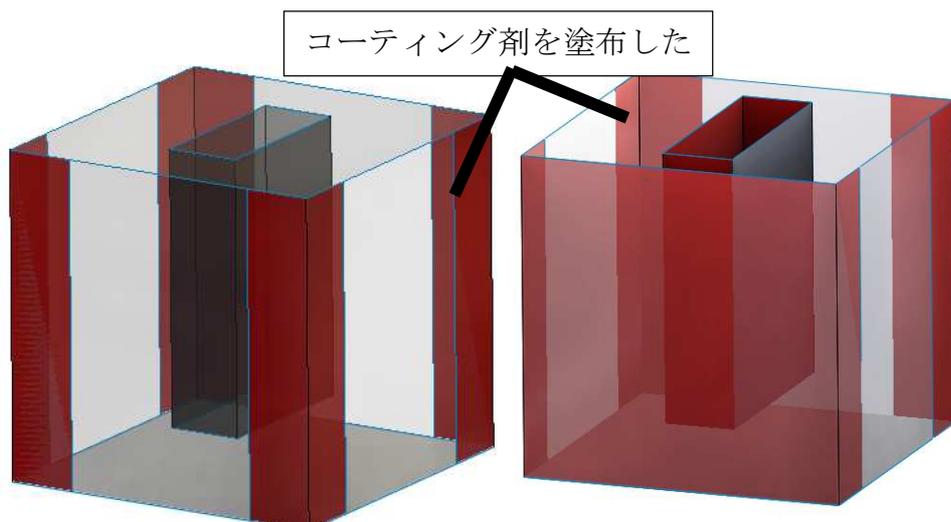


図 4-3-1-2 コーティング剤の塗布領域

4-3-2 落下塔による短時間微小重力実験

実験装置の概要

短時間微小重力実験には、株式会社植松電機が管理運用を行っている落下塔実験設備コスモトールを利用した。落下塔の概要としては、高さ約 50m、自由落下距離は約 40m、微小重力時間は約 2.5sec となっている。図 4-3-2-1 に示すように、落下カプセルは 2 重構造となっている。内側のラックに供試体などの実験装置を搭載する。外側のカプセルが落下による空気抵抗を直接受けるため、内部では、質の高い微小重力環境 $10^{-3}G$ を得ることができる。

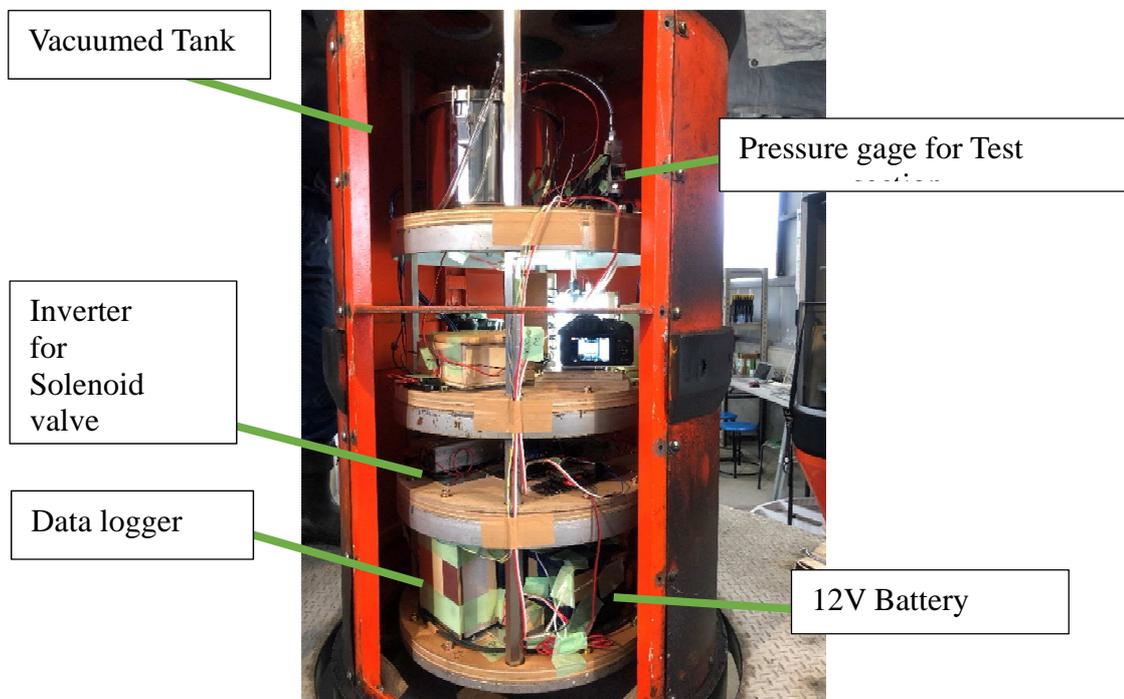


図 4-3-2-1 落下カプセル

図 4-3-2-2 に本研究の落下塔コスモトールにおける実験系統図を示す。この実験装置は、エラー！ 参照元が見つかりません。に示す供試体が電磁弁を介して、あらかじめ、地上で真空引きされた真空タンクと接続されている。落下が始ると同時に、電気回路が断線し、それがトリガーとなり電磁弁(ノーマルクローズ)が開放されることにより、供試体内が減圧される仕組みである。

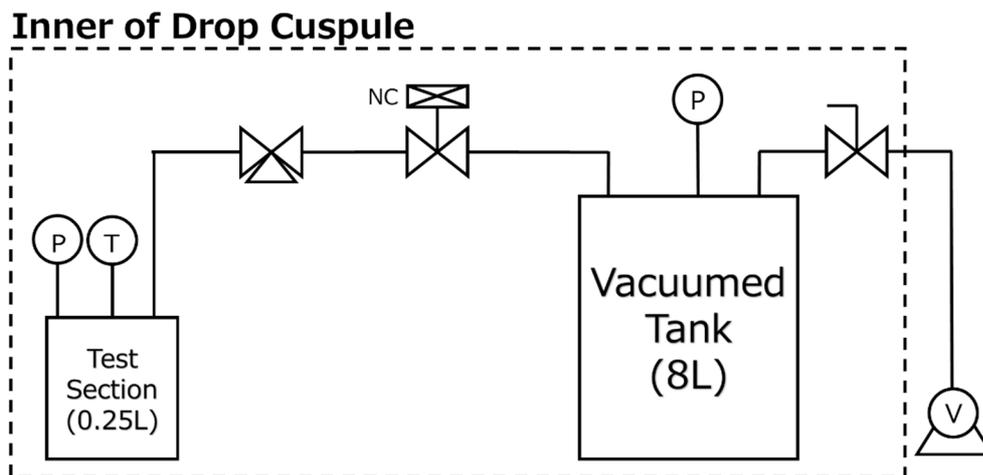


図 4-3-2-2 実験装置系統図

図 4-3-2-3 に実験装置のカプセルへの搭載の様子を示す。

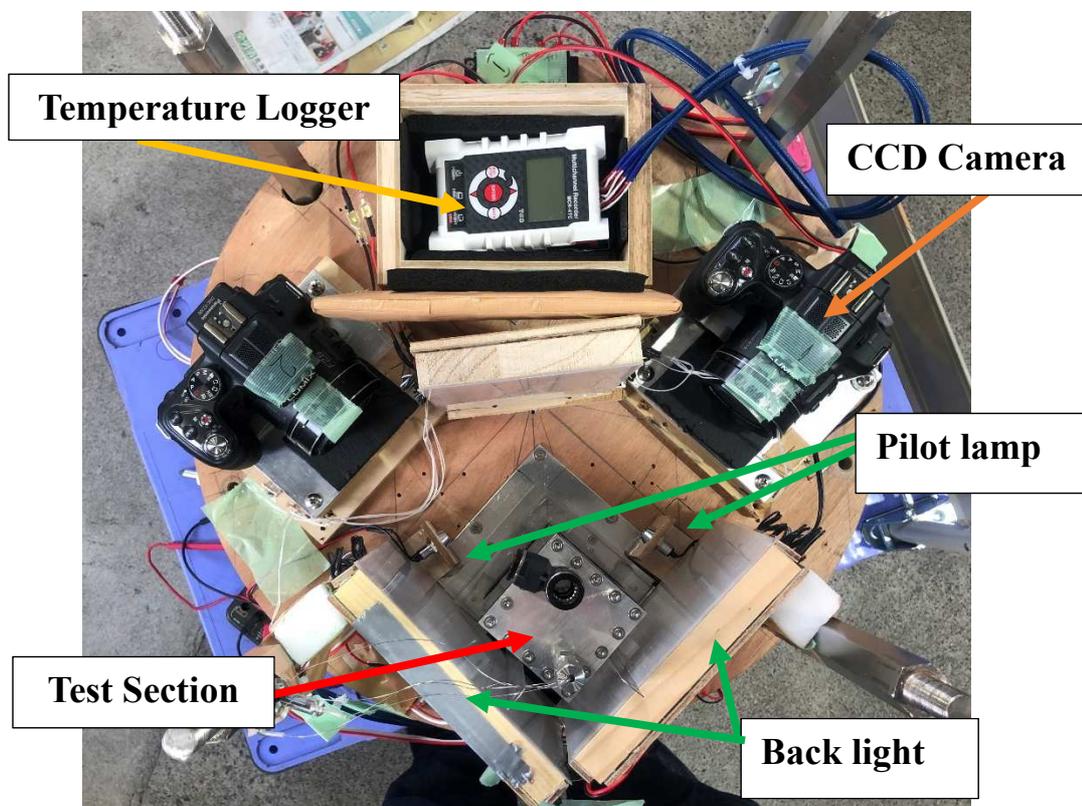


図 4-3-2-3 供試体とカメラの位置関係

実験条件

落下塔コスモトール実験における実験条件を表 4-3-1 に示す。本実験では全 9 回の落下を実施した。パラメータとして設定したのは、①2 枚のアルミ板の間隔、②真空引きの度合いである。①のアルミ板の間隔は、1 つは M. Dreyer_[3] による実験で使用された 5mm と、供試体の構造上設定可能な 9mm の 2 パターンである。また、圧力容器における真空引きの度合いをそれぞれ大気圧、 -95kPaG 、 -97kPaG の 3 パターンと、アルミ板幅 9mm については -100kPaG を追加し、微小重力実験を実施した。

すべての実験において液位の高さは底面より 30mm とした。

表 4-3-1 実験条件

Experiment No.	アルミ板の幅[mm]	真空タンクの真空度[kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増加 (対run007)
run009	5	0	B002H	参照用 (大気圧)

本実験の実験番号 run003 から run007 で使用する供試体には前述に示したものと同様のコーティングを施した。コーティング領域を図 4-3-2-4 図 4-3-2-4 供試体のコーティング領域に示す。“H”のかたちのような赤い帯状になるように、供試体の内部における 4 つ角と、4 面における液位上部（底面より約 30mm～50mm の間）にそれぞれに刷毛塗りを施した。帯の太さはおおよそ 10mm～15mm である。

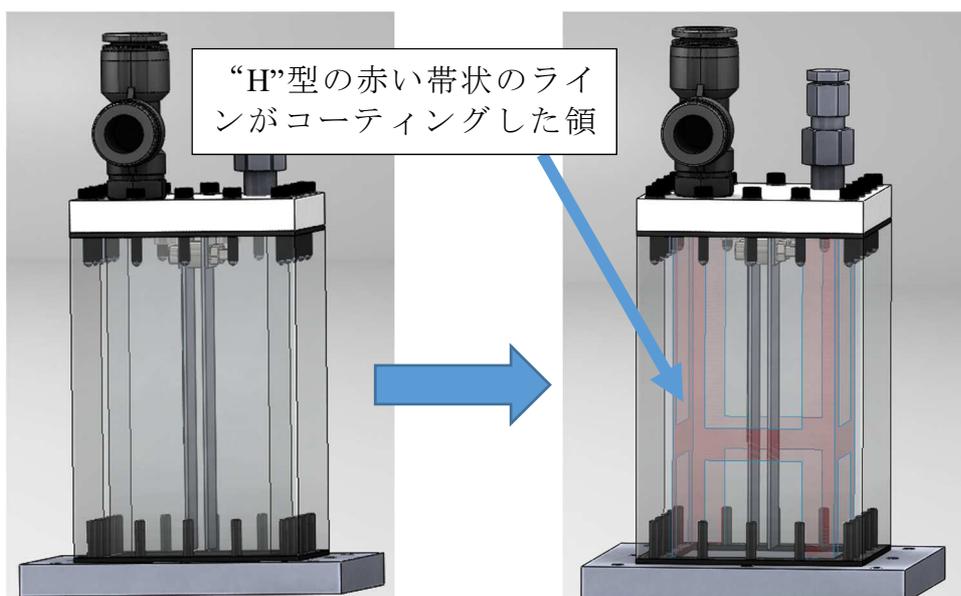


図 4-3-2-4 供試体のコーティング領域

4-4 実験結果と考察

4-4-1 学内切り離し式落下装置による微小重力実験結果

本研究で新規に取り入れたフッ素系コーティング剤の効果を検証するために、本学に設置した切り離し式落下装置による微小重力実験を実施した。

一般的にエタノールのプラスチックに対する濡れ性が良いため、動的濡れ挙動による気液界面の変形は大きい。

図 4-4-1-1 に実験結果を可視化映像のスナップショットで示す。なお、映像は落下塔実験で使用する CCD カメラ (Panasonic FZ200) を使用し 240fps で記録している。

図 4-4-1-1 では左から順に①コーティング無し, ②四つ角をコーティング塗布, ③供試体内部に配置した直方体の右側面以外の面と供試体の四つ角と前面を塗布, となっている。上から 0 秒, 0.15 秒, 0.5 秒である。①では微小重力環境に突入後 0.15 秒には、供試体の四つ角に液が集中し、上昇することで、気液界面の変形が生じている。また、内部に設置し直方体に沿っても気液界面が変形している。四つ角を上昇する濡れ挙動によって、供試体前面にも濡れ挙動により液膜の上昇が見られる。そして、0.5 秒の時には気液界面は湾曲している。そこで、②のように四つ角に対して、フッ素系コーティング剤を塗布する。すると、同 0.15 秒では、①とは異なり、四つ角において動的濡れ挙動による気液界面は多少上昇していると見受けられるが、大変形は認められない。つまり、固気液 3 相点の変位が①と比べると大きく抑えられている。しかし、供試体のコーティングしていない面 (全面や内部の直方体) においては、3 相点の変位しているものと見受けられる。そこで、③のように、コーティングの範囲に、供試体前面と内部の直方体の右側面以外の面を加える。すると、供試体前面においては、四つ角と同様に 3 相点の大変形は生じておらず、気液界面の上昇は小さい。そのため、供試体内部の直方体右側面における動的濡れ挙動が可視化されていると考えられる。

これら①から③の検証により、本研究でのフッ素系コーティング剤の効果が実証されたと考えられ、落下塔実験において本コーティング剤を使用する判断となった。

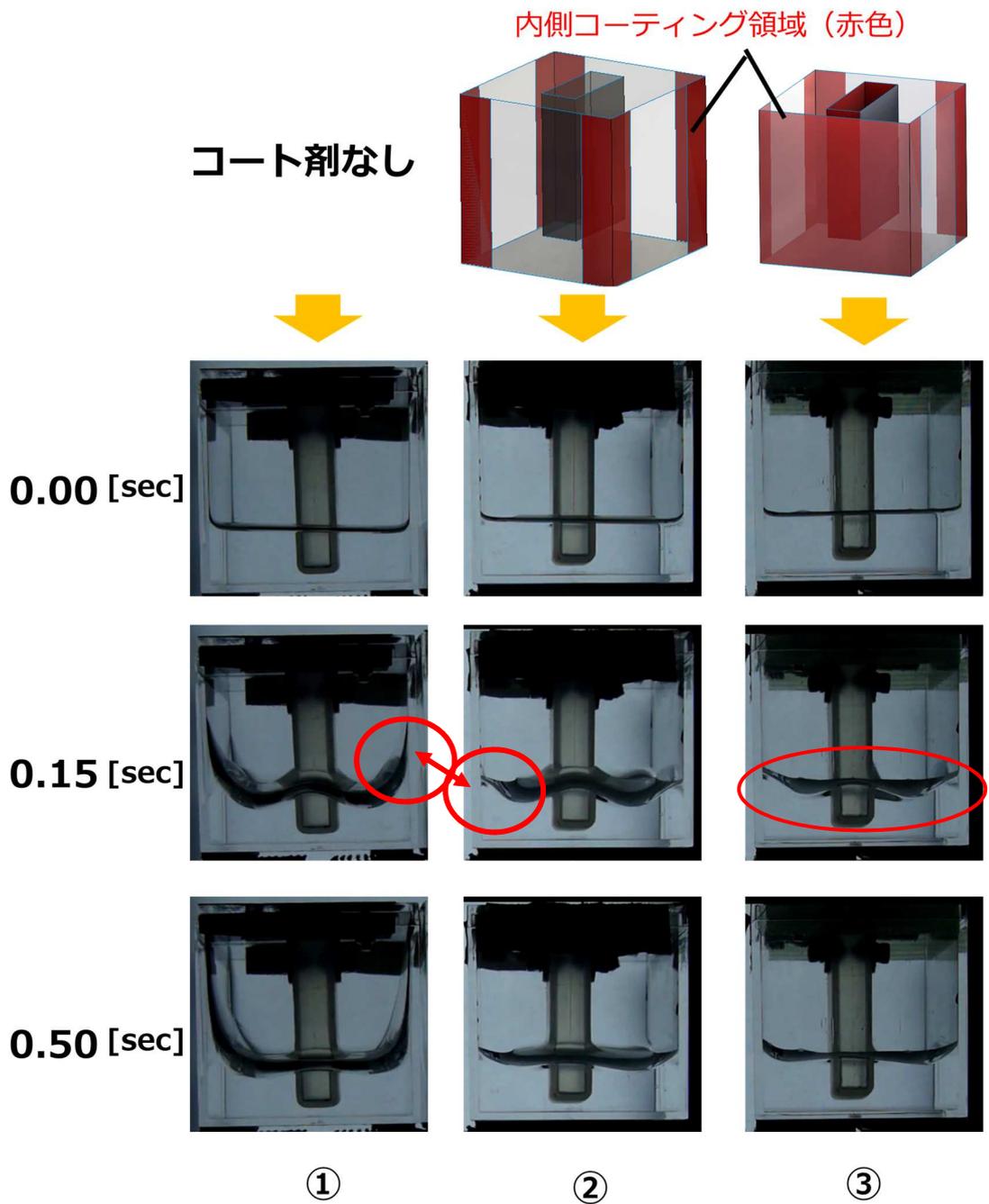


図 4-4-1-1 フッ素系コーティング剤の効果

4-4-2 落下塔による微小重力実験結果

次に図 4-4-2-1 に run005 の、図 4-4-2-2 に run009 の微小重力環境に突入する直前の映像を示す。両者とも気液界面が平坦である。



run005 - 00:00:00.000

図 4-4-2-1 条件 run005 での初期状態



run009 - 00:00:00.000

図 4-4-2-2 条件 run009 での初期状態

次に、1秒後の状態を図 4-4-2-3、図 4-4-2-4 にそれぞれ示す。

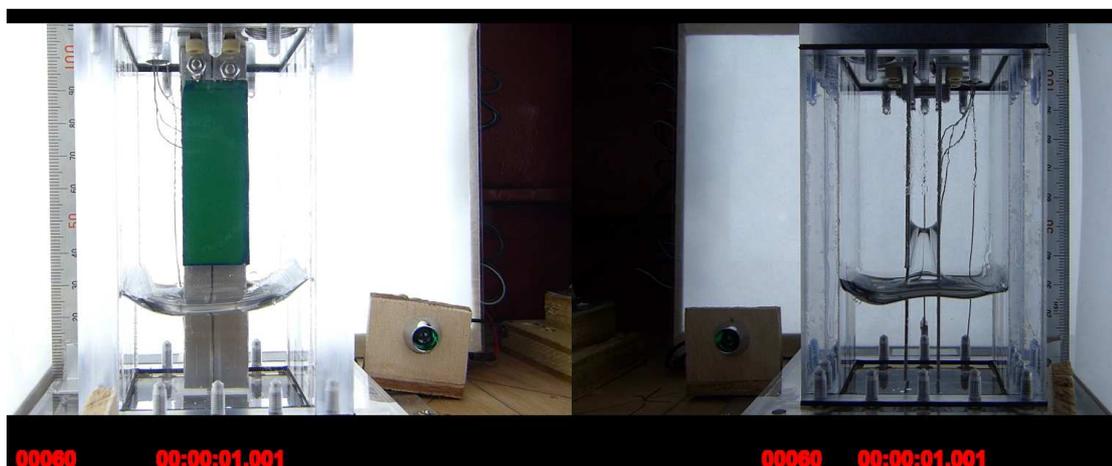


図 4-4-2-3 条件 run005 における 1 秒後の状況



図 4-4-2-4 条件 run009 における 1 秒後の状況

微小重力突入した1秒後では、まず、前章において述べているように、供試体内に塗布したコーティング剤の効果が本実験でも表れていることが図から読み取れる。すなわち、四つ角においての動的濡れ挙動を押されることができ、かつ、供試体の中心部に配置した、2枚のアルミ板の間でエタノールが動的濡れ挙動により、上昇していることがわかる。

また、run005 と run009 の大きな違いは、2枚のアルミ板の間隔である。run005 は9mm、run009 は5mm である。板間隔の狭い run009 では、run005 に比べ液体の上昇速度が大きいことがわかる。これは、人工衛星の燃料タンクで使用されているベーン型タンクと見られるように、板間隔が狭くなると液体に働く毛細管力が大きくなることで、液体を上へ釣り上げる力が大きくなったと考えられる。

次に、2 秒後の状態を図 4-4-2-5 条件 run005 における 2 秒後の状況図 4-4-2-5、図 4-4-2-6 にそれぞれ示す。



図 4-4-2-5 条件 run005 における 2 秒後の状況



図 4-4-2-6 条件 run009 における 2 秒後の状況

微小重力突入した 2 秒後には図 4-4-2-6 で示した run009 の右図において、アルミ板間を上昇する気液界面は、供試体の天井へ到達してしまい、画像からは一見液柱がないように見える。図 4-4-2-5 で示す run005 では、湾曲した気液界面の固気液 3 相点が、アルミ固体壁の高さ 60mm に設置した熱電対近傍に到達していることが読み取れる。

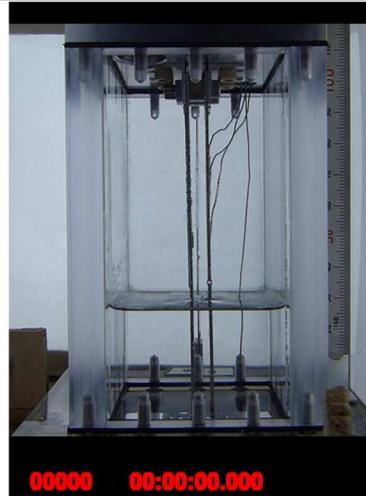
図 4-4-2-7 から図 4-4-2-21 に各実験条件における観測結果を示す。

run003

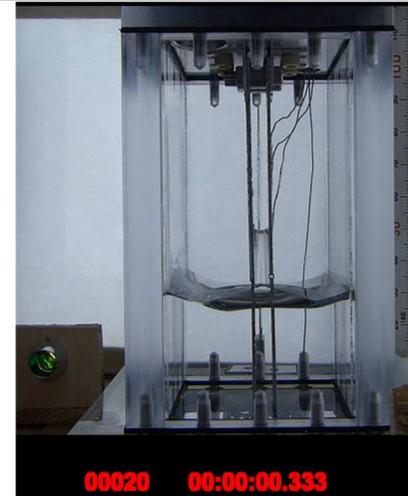
Experiment No.	アルミ板の厚[mm]	真空タンクの真空度[kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増加 (対run007)
run009	5	0	B002H	参照用 (大気圧)

スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象に変化がみられる時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

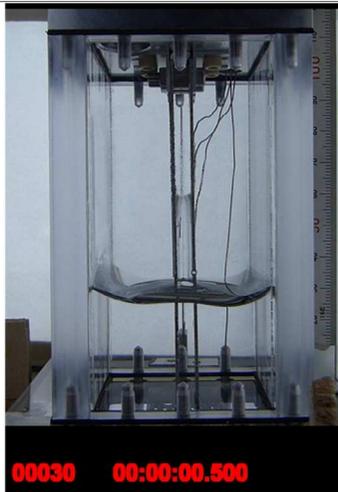
- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



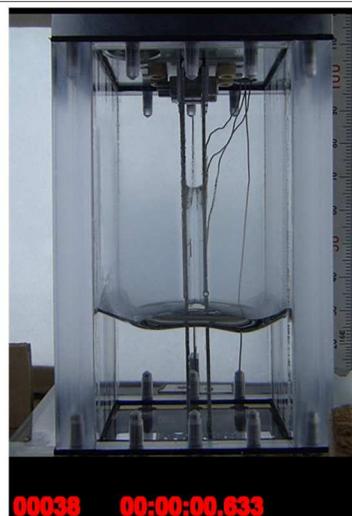
0 秒
落下直前の静定状態



0.33 秒
パイロットランプ点灯(電磁弁への電力供給開始)



0.5 秒



0.633 秒
電磁弁が開く(?音声から)。霧の発生



0.684 秒
霧に包まれる

図 4-4-2-7 条件 run003 における結果 (その1)

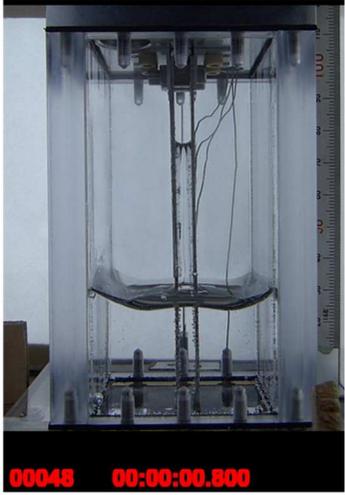
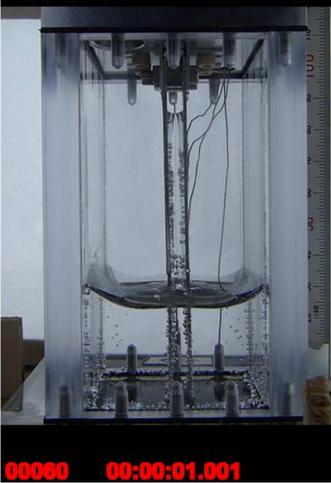
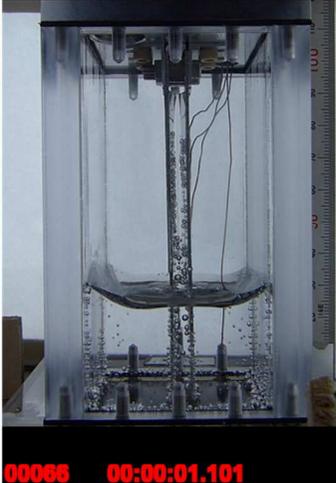
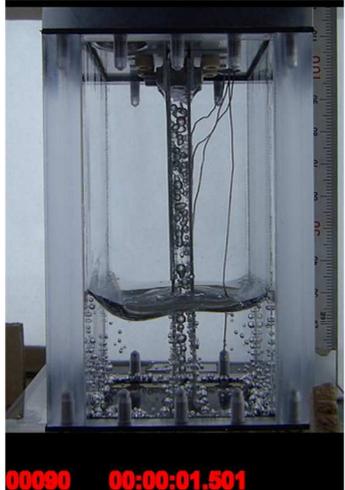
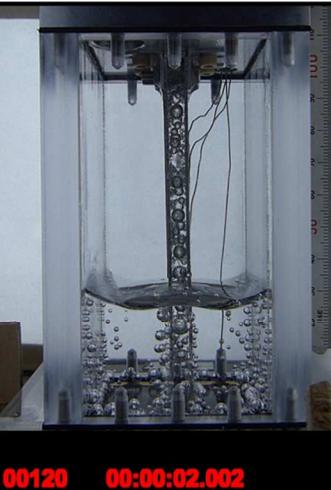
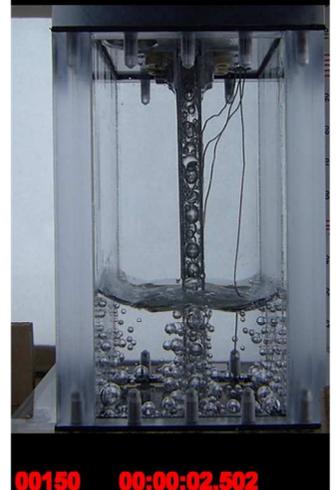
 <p>00048 00:00:00.800</p>	 <p>00060 00:00:01.001</p>	 <p>00066 00:00:01.101</p>
<p>0.800 秒 アルミ、ポリカーボネート上に微細な気泡が発生</p>	<p>1 秒 無数の気泡成長</p>	<p>1.1 秒 アルミチャンネル間の気液界面が天井到達の一步手前。 以降気液界面判断つかない</p>
 <p>00090 00:00:01.501</p>	 <p>00120 00:00:02.002</p>	 <p>00150 00:00:02.502</p>
<p>1.5 秒 気泡は成長。チャンネル間は気泡に占有される</p>	<p>2.0 秒 気泡成長</p>	<p>2.5 秒 以降着地。微小重力時間終了</p>

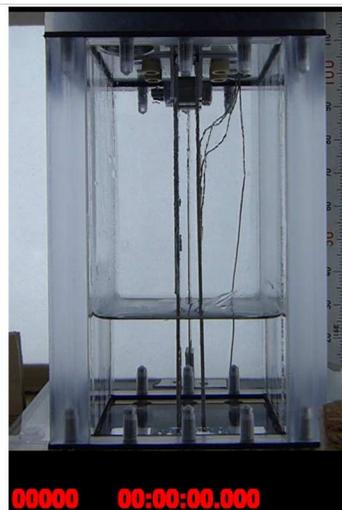
図 4-4-2-8 条件 run003 における結果 (その 2)

run004

Experiment No.	アルミ板の厚 [mm]	真空タンクの真空度 [kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DPQ2H	動作確認
run002	5	-95	DPQ2H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増加 (対run007)
run009	5	0	B002H	参照用 (大気圧)

スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象に変化がみられる時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

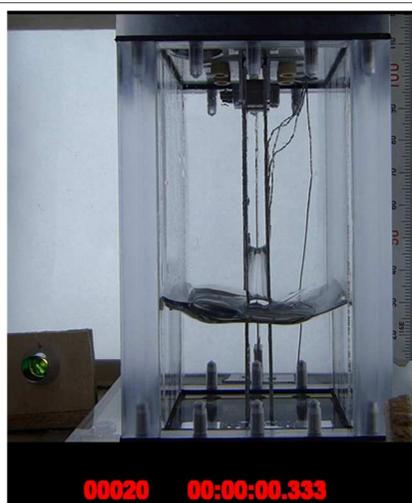
- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



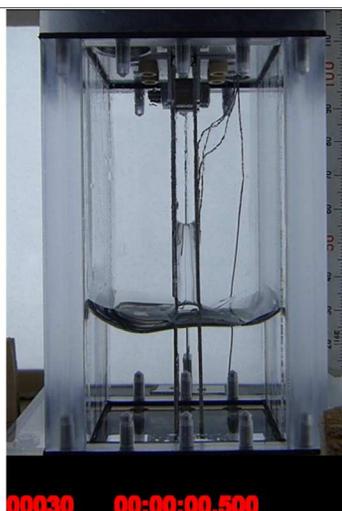
0 秒
落下前静定状態



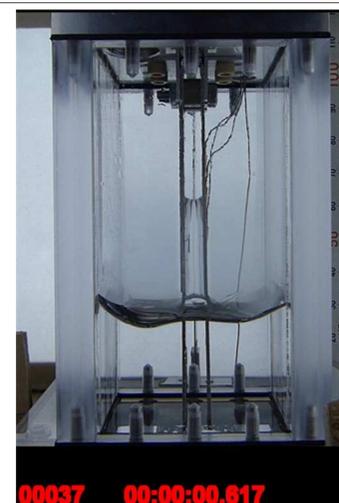
0.15 秒
チャンネル間の上昇がはっきりとする



0.33 秒
パイロットランプ点灯(電磁弁への電力供給開始)



0.5 秒



0.617 秒
電磁弁が開き (? 音声から判断)、霧が発生

図 4-4-2-9 条件 run004 における結果 (その 1)



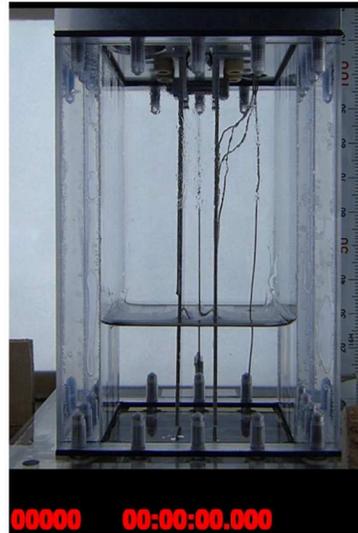
図 4-4-2-10 条件 run004 における結果 (その 2)

Run005

Experiment No.	アルミ板の幅(mm)	真空タンクの真空度(kPaG)	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増し (対run007)
run009	5	0	B002H	参照用 (大実証)

スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象に変化がみられる時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



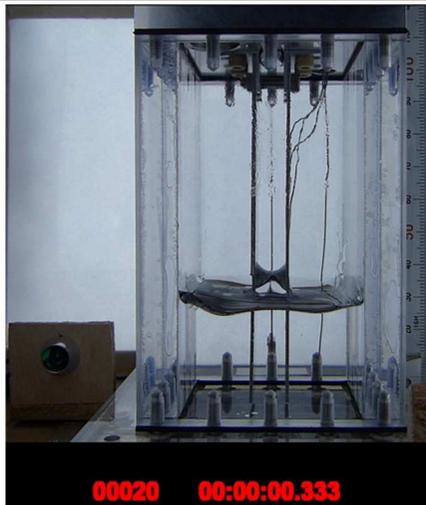
0 秒

微小重力環境下前 静定状態



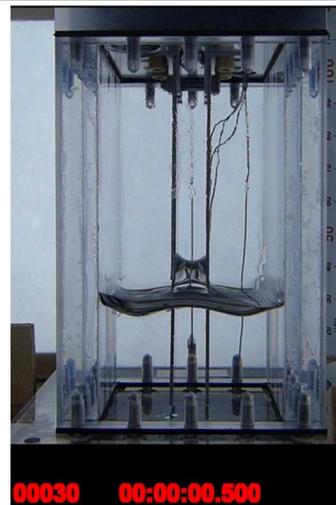
0.15 秒

アルミチャンネル間の濡れ挙動がはっきりする

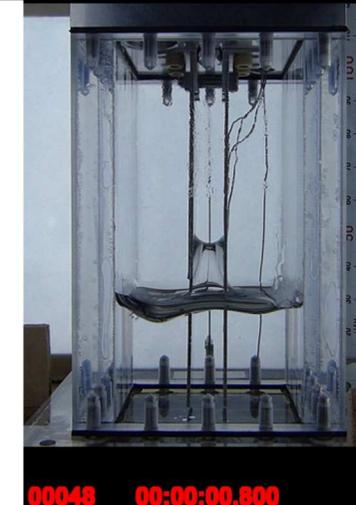


0.33 秒

断線検知を利用していないため、パイロットランプ点灯せず



0.5 秒



0.8 秒

図 4-4-2-11 条件 run005 における結果 (その1)

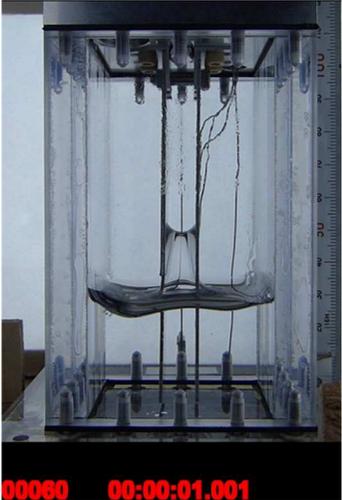
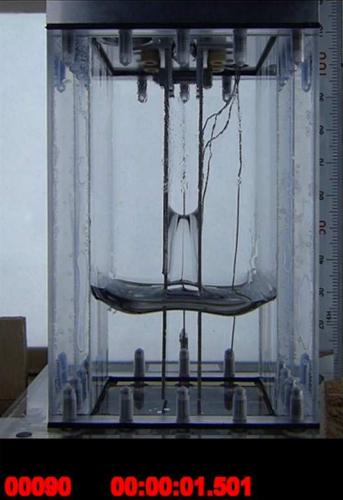
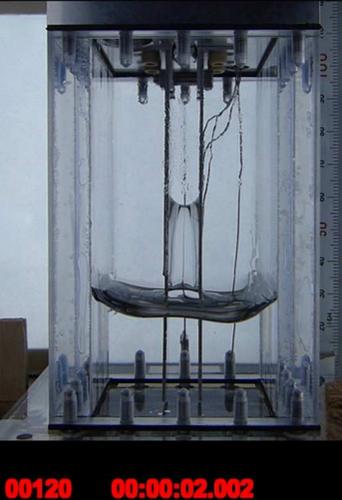
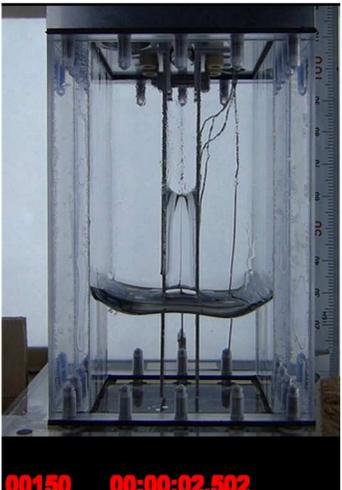
		
<p>1.0 秒</p>	<p>1.5 秒</p>	<p>2.0 秒</p>
		
<p>2.502 秒 微小重力時間終了</p>		

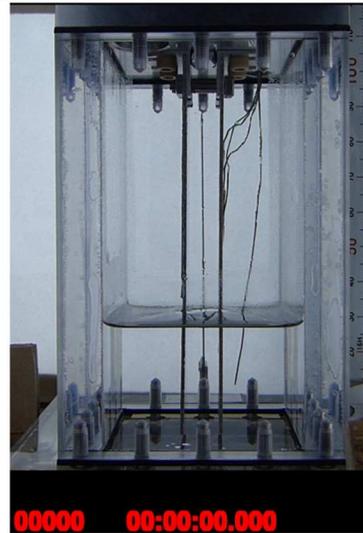
図 4-4-2-12 条件 run005 における結果 (その 2)

Run006

Experiment No.	アルミ板の幅(mm)	真空タンクの真空度[kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増加 (対run007)
run009	5	0	B002H	参照用 (大気圧)

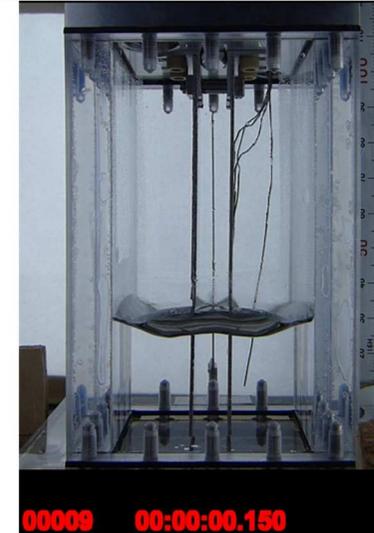
スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象に変化がみられる時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



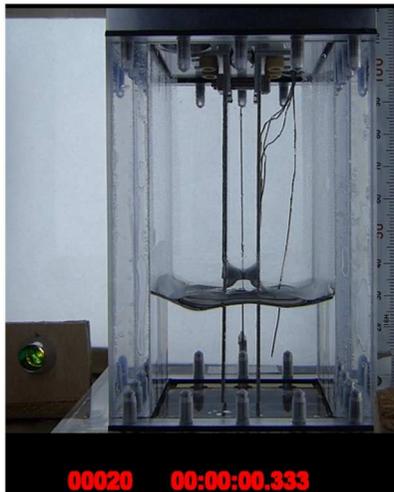
0秒

微小重力前静定状態



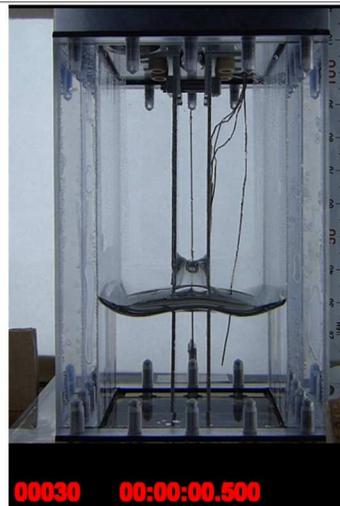
0.15秒

アルミチャンネル間の上昇がはっきりする

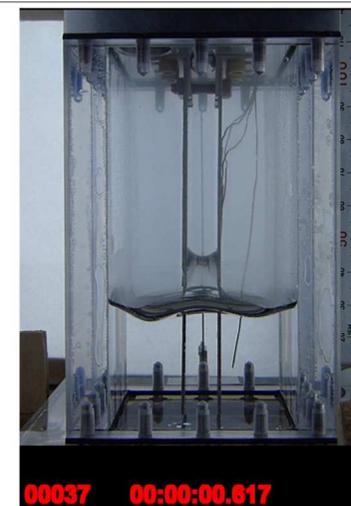


00.33秒

パイロットランプ点灯(電磁弁への電力供給開始)



0.5秒



0.617秒

電磁弁が開き(音声から判断)、霧が発生

図 4-4-2-13 条件 run006 における結果 (その1)

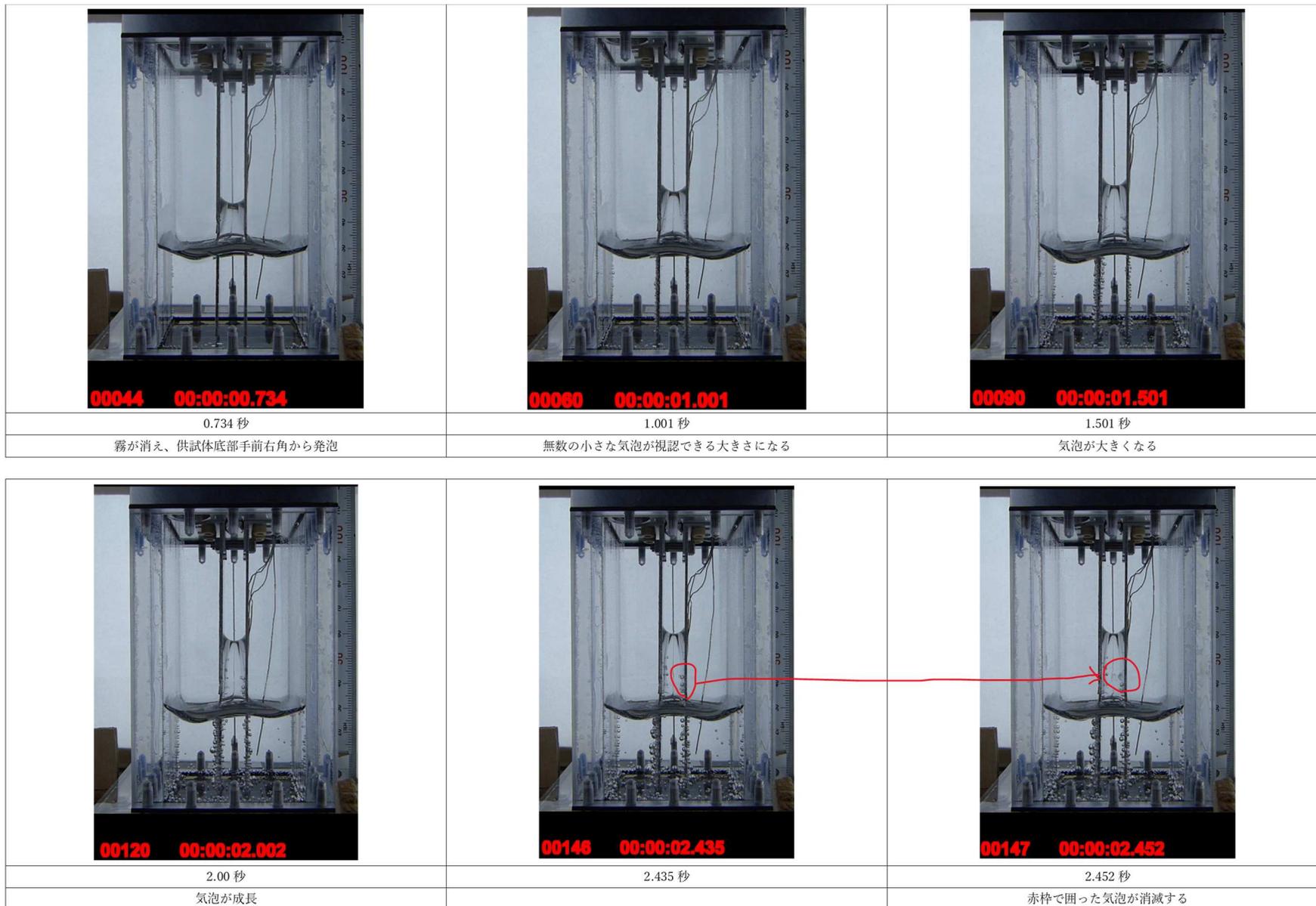


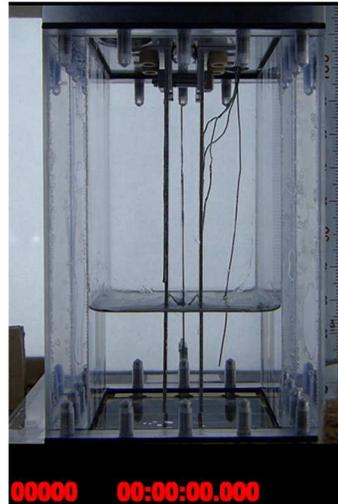
図 4-4-2-14 条件 run006 における結果 (その 2)

Run007

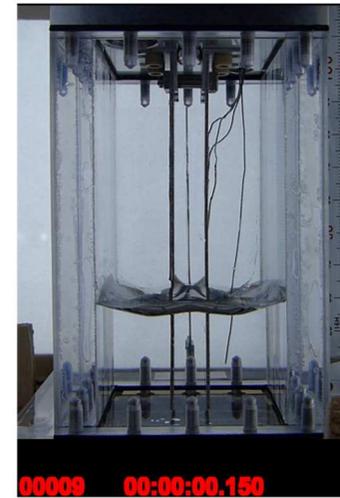
Experiment No.	アルミ板の積層 [mm]	真空タンクの真空度 [kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増加 (対run007)
run009	5	0	B002H	参照用 (大気圧)

スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象が変化する時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

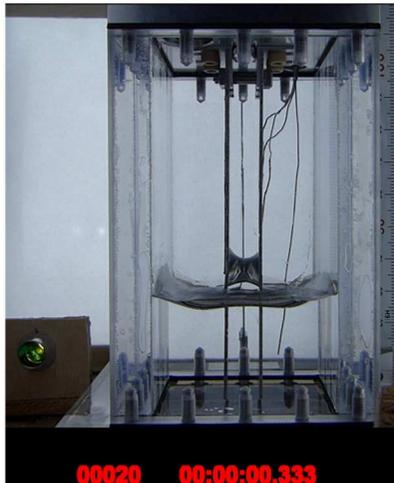
- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



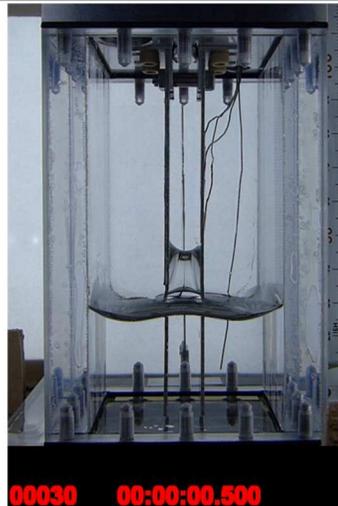
0 秒
微小重力前静定状態



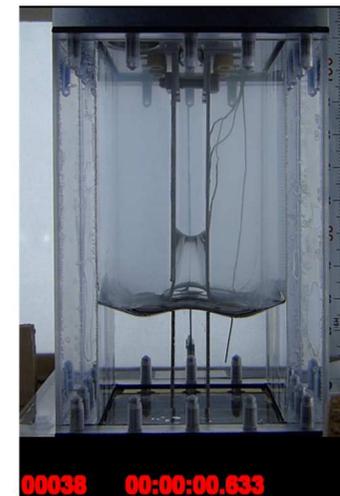
0.150 秒
アルミチャンネル間の挙動がはっきりする



0.33 秒
パイロットランプ点灯(電磁弁への電力供給開始)



0.5 秒



0.633 秒
電磁弁が開き (?音から判断)、霧が発生

図 4-4-2-15 条件 run007 における結果 (その 1)

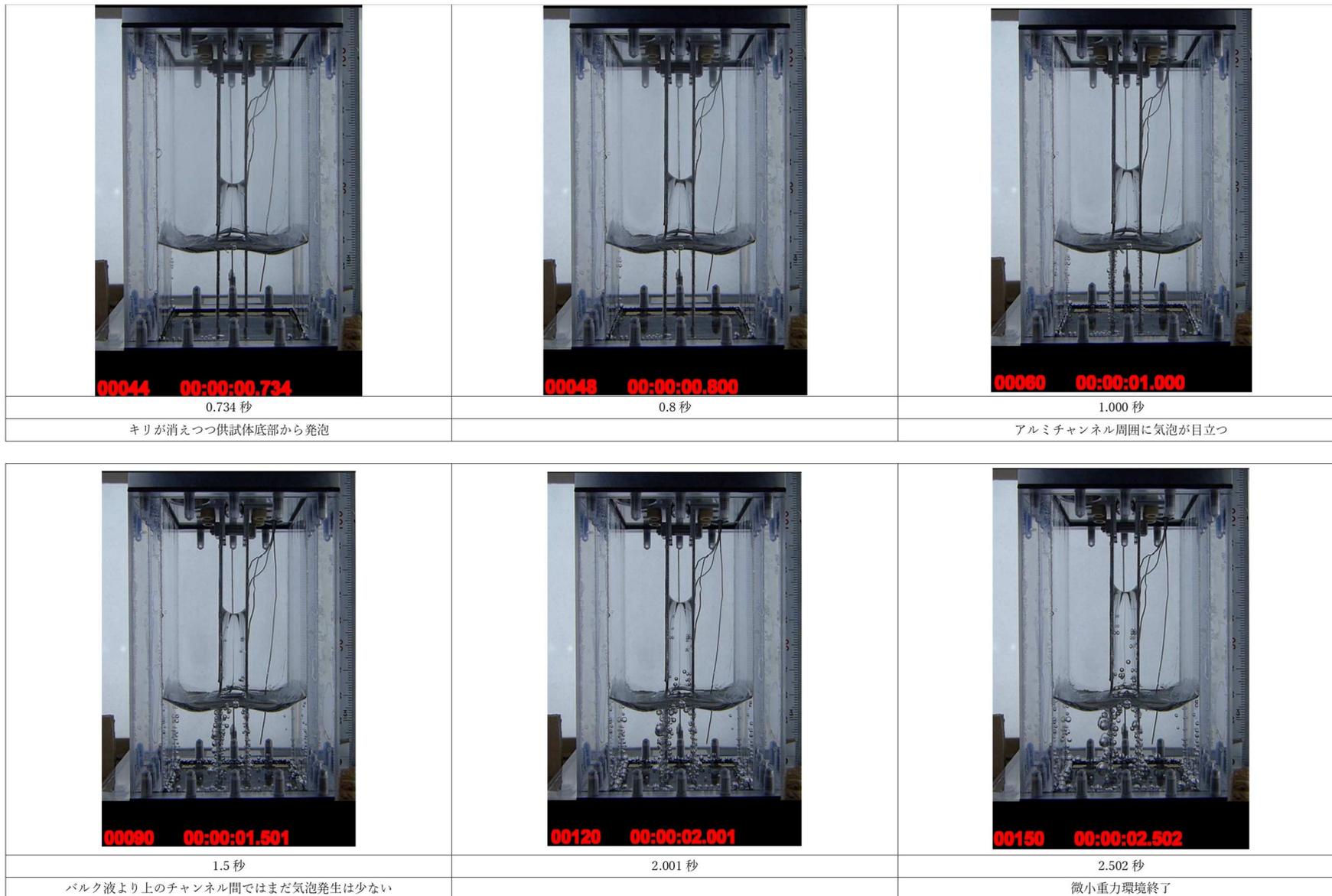


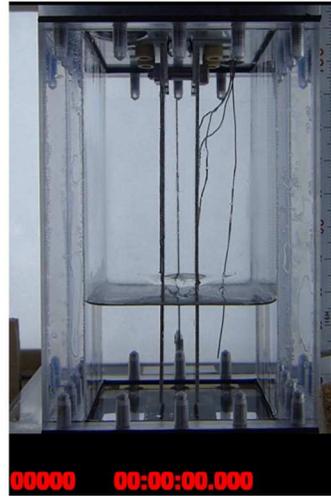
図 4-4-2-16 条件 run007 における結果 (その 2)

Run008

Experiment No.	アルミ板の幅[mm]	真空タンクの真空度[kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増し(対run007)
run009	5	0	B002H	参照用(大気圧)

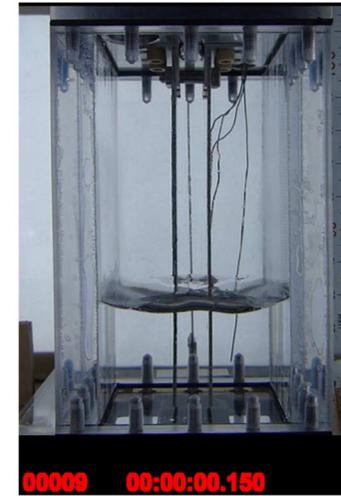
スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象に変化がみられる時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



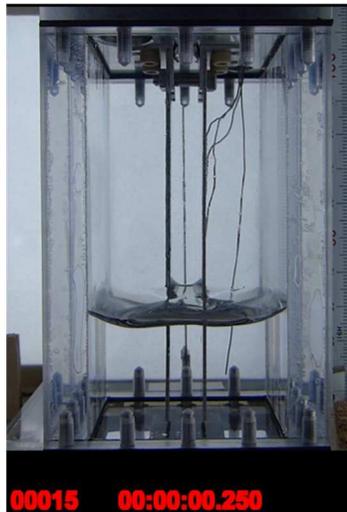
0 秒

微小重力前静定状態



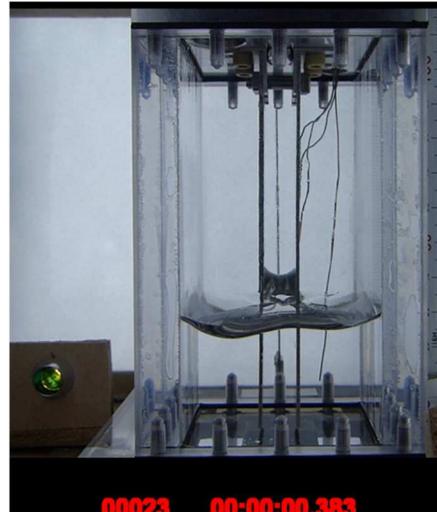
0.150 秒

アルミチャンネルでの濡れ挙動がはっきりしない



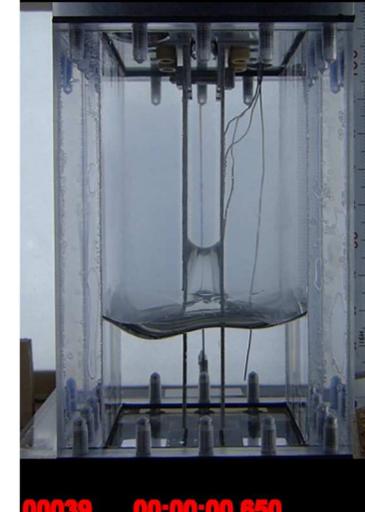
0.250 秒

アルミチャンネル間での濡れ挙動がはっきりする



0.383 秒

パイロットランプ点灯(電磁弁への電力供給開始)



0.650 秒

電磁弁が開き (? 音から判断)、霧が発生

図 4-4-2-17 条件 run008 における結果 (その 1)

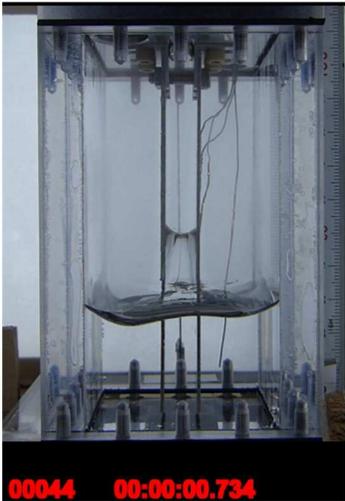
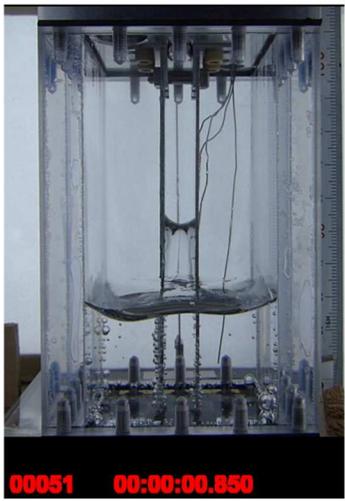
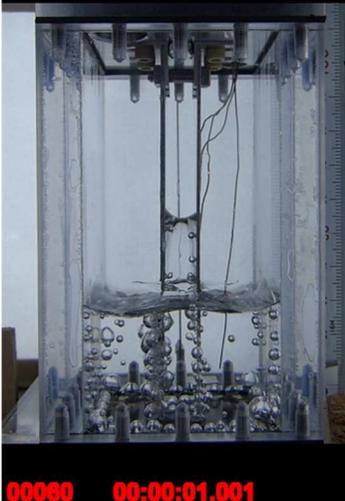
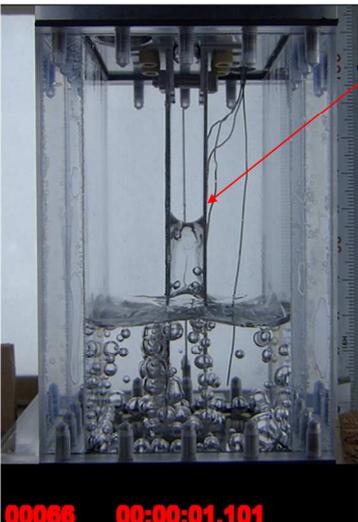
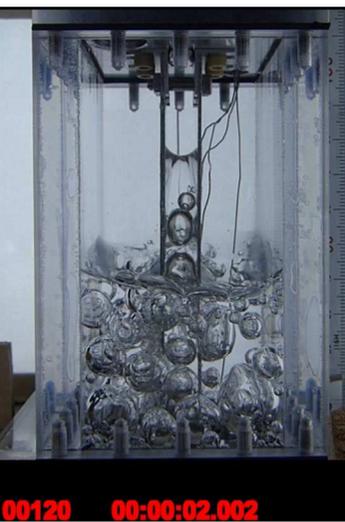
 <p>00044 00:00:00.734</p>	 <p>00051 00:00:00.850</p>	 <p>00060 00:00:01.001</p>
<p>0.734 秒 霧が消えだし、右手前角から発泡</p>	<p>0.85 秒 気泡の成長が早い</p>	<p>1.001 秒 更に気泡が成長。その場で揺らめきながら成長</p>
 <p>00066 00:00:01.101</p>	 <p>00090 00:00:01.501</p>	 <p>00120 00:00:02.002</p>
<p>1.101 秒 アルミチャンネル右上部の気泡が消滅</p>	<p>1.501 秒 気泡がさらに大きくなる。</p>	<p>2.002 秒 気泡はその場で大きくなる。液位が上昇している</p>

図 4-4-2-18 条件 run008 における結果 (その 2)

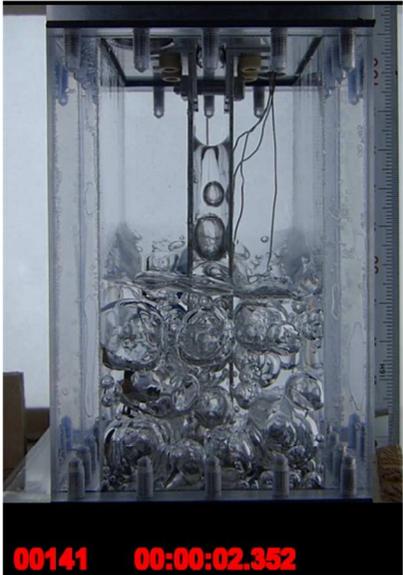
 <p>00141 00:00:02.352</p>	 <p>00150 00:00:02.502</p>	
<p>2.352 秒</p>	<p>2.502 秒</p>	
<p>アルミチャンネル間の気泡が成長している</p>	<p>微小重力時間終了</p>	

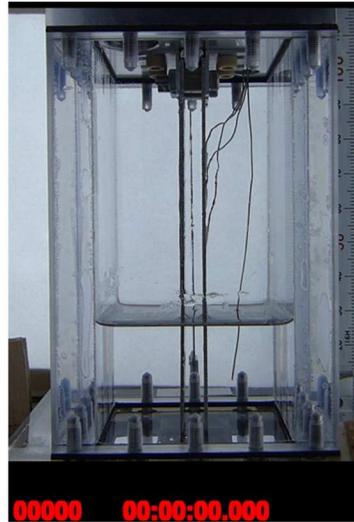
図 4-4-2-19 条件 run008 における結果 (その 3)

Run009

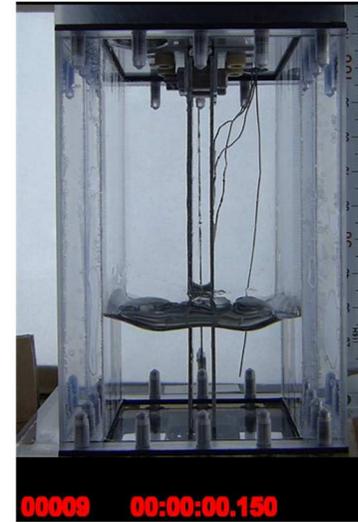
Experiment No.	アルミ板の厚[mm]	真空チャンクの真空度[kPaG]	コーティング剤	備考
run001	5	0	DP02H	動作確認
run002	5	-95	DP02H	動作確認
run003	5	-97	B002H	
run004	5	-95	B002H	
run005	9	0	B002H	run009との比較
run006	9	-95	B002H	run004との比較
run007	9	-97	B002H	run003との比較
run008	9	-100	B002H	真空度を増加 (対run007)
run009	5	0	B002H	撮影用 (大気圧)

スナップショットは、0秒から2.5秒までの0.5秒刻みの6枚と、現象に変化がみられる時間を掲載した。簡単なコメントアウトをしている。

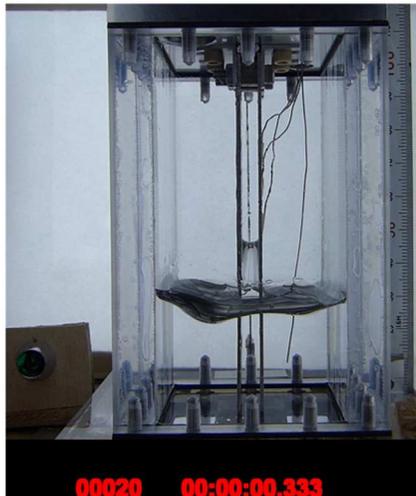
- ・撮影に用いたカメラは Panasonic FZ200
- ・撮影設定は、解像度 FHD1920×1080pixel
- ・フレームレートは設定上 60fps(実際には 59.94fps で記録されている)
- ・記録間隔は0.0166秒 (0.016683秒)



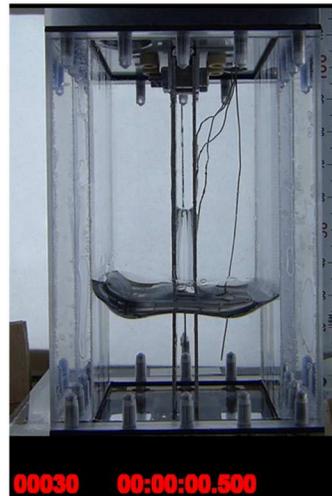
0 秒
微小重力前静定状態



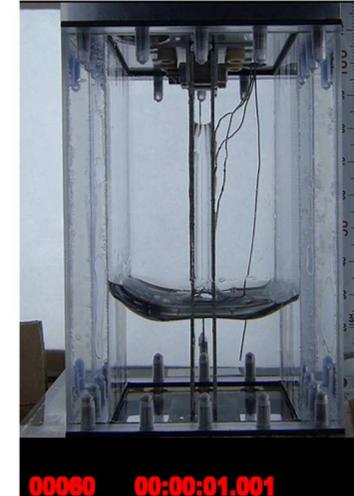
0.15 秒
チャンネル間の挙動がはっきりする



0.33 秒
断線検知利用していないため、パイロットランプ消灯



0.500 秒



1.001 秒

図 4-4-2-20 条件 run009 における結果 (その1)

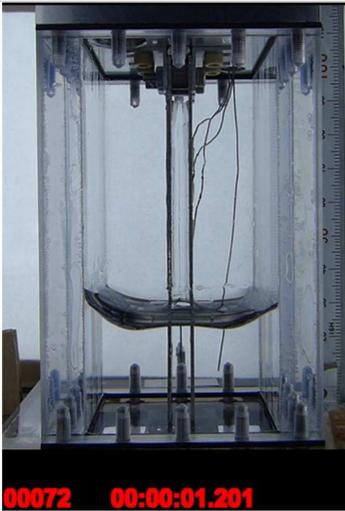
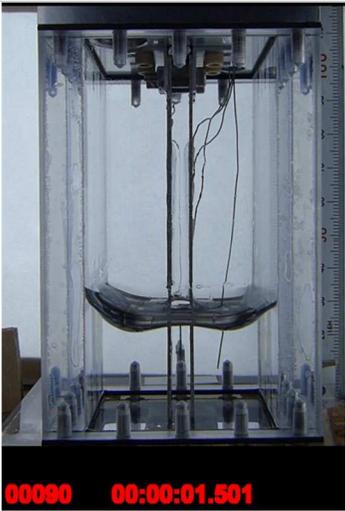
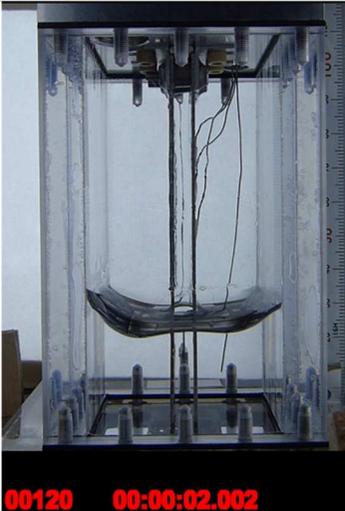
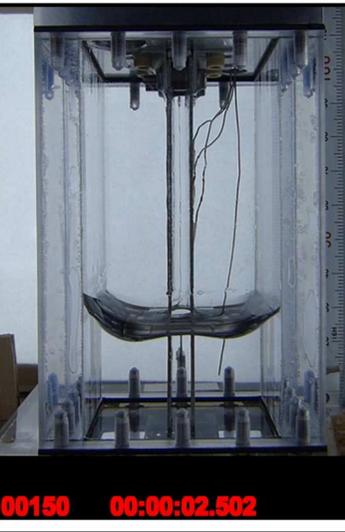
 <p>00072 00:00:01.201</p>	 <p>00090 00:00:01.501</p>	 <p>00120 00:00:02.002</p>
<p>1.201 秒 チャンネル間の気液界面が天井到達手前</p>	<p>1.501 秒 チャンネル間で液体が揺らいている</p>	<p>2.002 秒</p>
 <p>00150 00:00:02.502</p>		
<p>2.502 秒 微小重力時間終了</p>		

図 4-4-2-21 条件 run009 における結果 (その 2)

4-5 参照文献

- [1] 新津真行, H-IIA ロケットの高度化開発-2 段ステージ改良による衛星高寿命化への対応-, 第 巻 Vol.51, 三菱重工技報, 2014.
- [2] 姫野武洋, “第 5 章 人工衛星と宇宙輸送機における液体推進薬の挙動,” 著: 平成 17 年度宇宙環境利用の展望, 2005.
- [3] M. Dreyer, A. Delgado, H. Rath, “Experimental Study of Capillary Effects for Fluid Management under Microgravity Condition,” 著: *IUTAM Symposium Bremen 1991*, W-2800 Bremen 33,FRG, 1992.
- [4] 田村健一郎, 道原孟里, 今井良二 (室蘭工業大学), “微小重力環境下における入熱を伴う動的濡れ挙動の可視化実験と数値流体解析,” 著: 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2018.
- [5] 国土交通省気象庁, “過去の気象データ・ダウンロード,” [オンライン]. Available: <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>. [アクセス日: 19 4 2019].
- [6] NIST STANDARD REFERENCE DATA, “REFPROP,” [オンライン]. Available: <https://www.nist.gov/srd/refprop>. [アクセス日: 24 5 2019].

第5章 マイクロチャネル薄液膜蒸発現象を利用した高熱流束除熱の実証

5-1 薄液膜蒸発の伝熱特性

液膜が薄い部分では三相界面が形成され、蒸発潜熱が特異的に高くなり、高い熱流束が得られる。図 5-1-1 は水滴が偏り、右側の液面が薄くなっていることを示している。そこでは蒸発潜熱が高くなる。

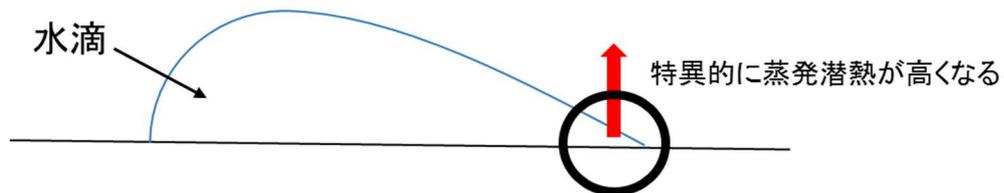


図 5-1-1 薄液膜蒸発特性

マイクロチャネルでは多くの三相界面が安定して形成できるため、高い除熱性能が期待できる。マイクロチャネルの構造を図 5-1-2, 5-1-3 に示す。電子デバイスに冷媒を熱し蒸発させ、それによる蒸発潜熱で電子デバイスを冷却する。また、マイクロチャネル流路両端のマニホールドより冷媒を供給する。

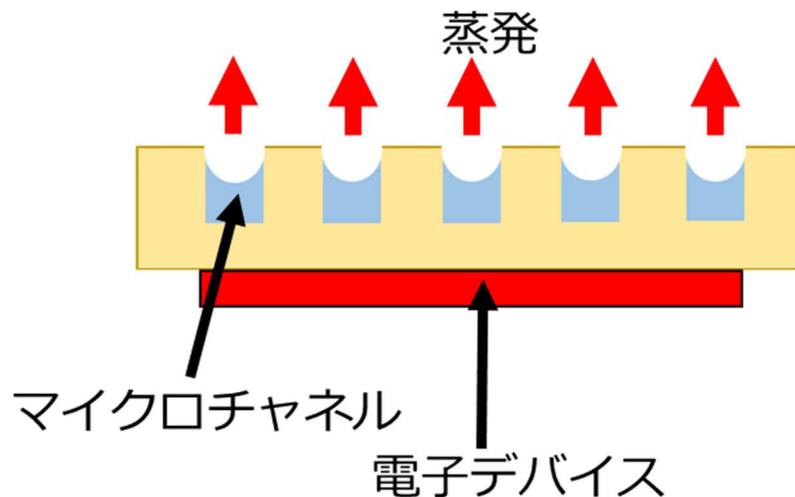


図 5-1-2 マイクロチャネルの構造

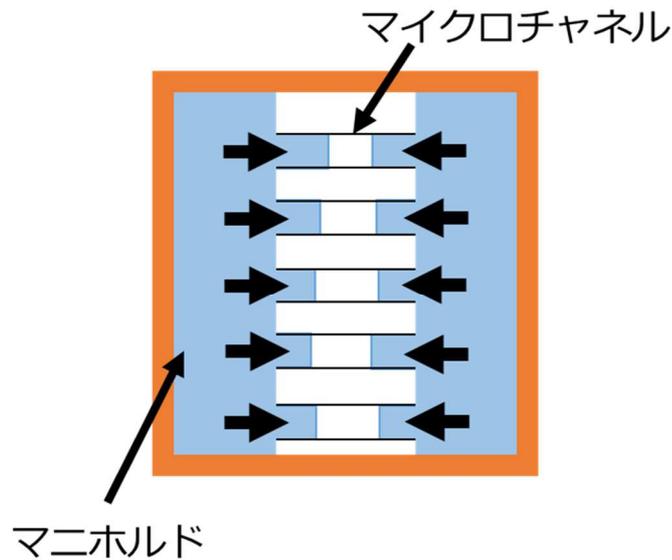


図 5-1-3 マイクロチャネル模式図

冷媒の供給はマイクロチャネル，マニホルドにおける空気と液体の圧力差の差が生じるにより行われる．図 5-1-4 に示す通り，マニホルドでは気圧 P_g と液体圧力 P_L が等しくつりあっているが，マイクロチャネルでは P_g と P_L' に差が生まれ，これにより液体が駆動する．この圧力差は

$$P_g - P_L = \frac{\sigma}{r} \quad (5-1)$$

によって示される．ここで， σ は表面張力を表す．

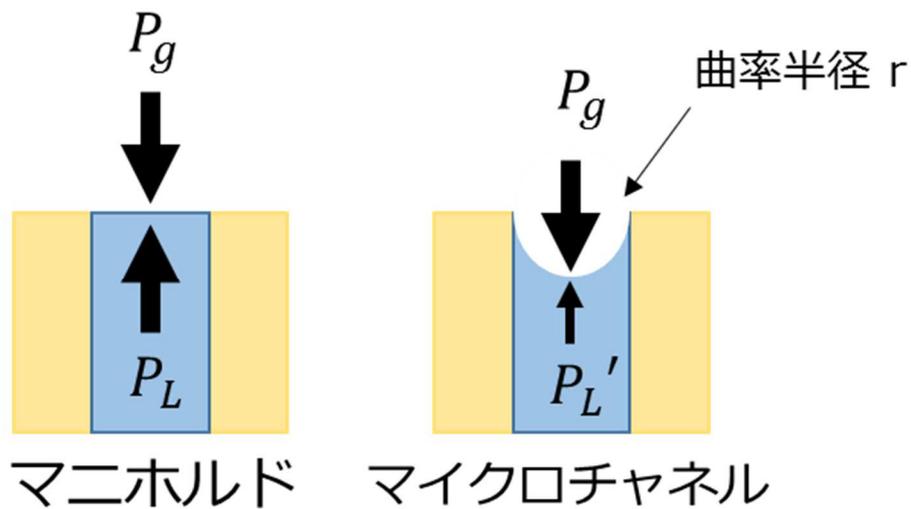


図 5-1-4 マイクロチャネル，マニホルドにおける空気と液体による圧力差

5-2 研究ターゲット

除熱性能の目標値を図 5-2-1 に示す高熱流束除熱のロードマップ⁽²⁾より 100[W/cm²]とし、これを満たすマイクロチャネルの開発を行う。

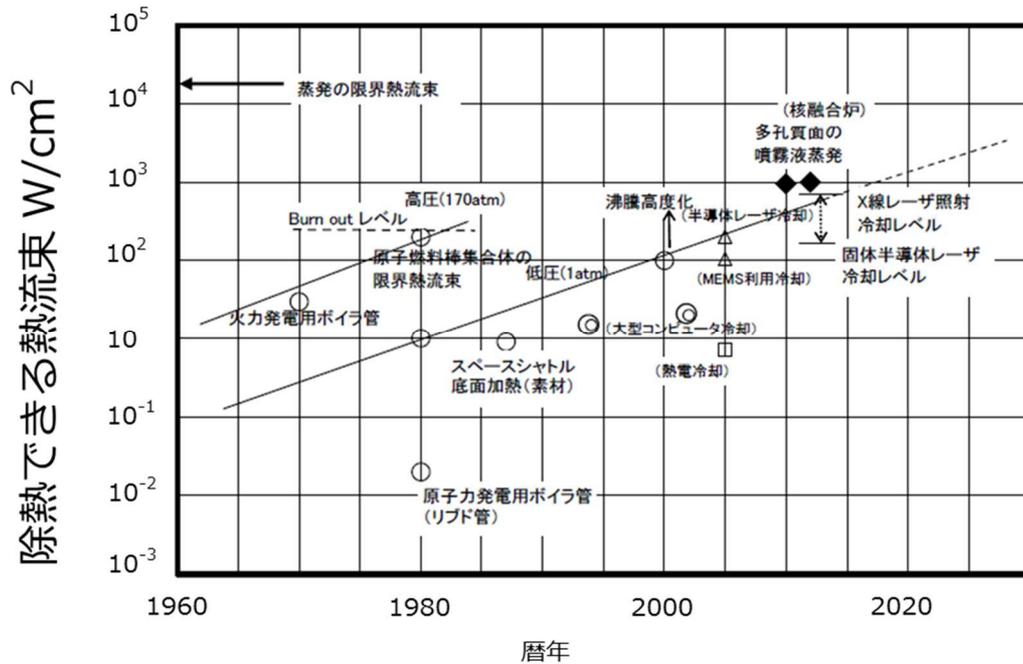


図 5-2-1 高熱流束除熱のロードマップ⁽²⁾

5-3 実験方法

5-3-1 実験概要

マイクロチャネルにおける薄膜液蒸発による高熱流束除熱特性を利用した電子機器等の冷却装置の開発のため、目標の徐熱性能 100[W/cm²]を達成するマイクロチャネル流路幅と冷媒の選定を行う。また、実際にマイクロチャネルを製作し計測値と計算値の比較を行う。

5-3-2 熱流束の算出方法

冷媒が蒸発することにより得られる熱流束は以下の計算式により求められる。

$$\Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{r_{x+dx}} - \frac{1}{r_x} \right) \quad (5-2)$$

$$\Delta P = 32 \frac{\mu u dx}{D_h^2} \quad (5-3)$$

以上の 2 式より

$$16 \frac{\mu Q l}{\sigma \rho A h_{fg} D_{hx}^2} = \frac{1}{r} \quad (5-4)$$

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{\sigma \rho h_{fg} A D_{hx}^2}{16 \mu l r_2} \\
&= \frac{\rho \sigma h_{fg}}{16 \mu} \times \frac{1}{l} \times \frac{2}{d} \times dh \\
&\quad \times \left(\frac{4dh}{2h+d} \right)^2 \\
&= \frac{\sigma \rho h_{fg}}{8 \mu} \times \frac{h}{l} \times \left(\frac{4dh}{2h+d} \right)^2
\end{aligned} \tag{5-5}$$

ここで,

$$q = \frac{Q}{2ld} \tag{5-6}$$

より

$$\begin{aligned}
q &= \frac{\sigma \rho H_{fg}}{16 \mu} \times \frac{h}{dl^2} \\
&\quad \times \left(\frac{4dh}{2h+d} \right)^2
\end{aligned} \tag{5-7}$$

また、熱量 Q の式変形には以下の式を用いる。

$$r_2 = \frac{d}{2} \tag{5-8}$$

$$D_h = \frac{4A}{L} \tag{5-9}$$

$$A = dh \tag{5-10}$$

$$L = 2h + d \tag{5-11}$$

5-3-3 実験条件

冷却時のマイクロチャネル表面温度 T_w を一般的な電子機器の上限温度である 120°C を上限とする。マイクロチャネル表面温度の算出は以下の式により行う。

$$T_w = T_{sat} + \frac{qh}{\lambda} \tag{5-12}$$

また、ボンド数が 1 を超えると表面張力の影響が弱まるのでボンド数を 1 以下とする。

ボンド数は以下の式により定義される。

$$B_o = \frac{\rho g d^2}{\sigma} \quad (5-13)$$

文字式が示す物性値，パラメータを表 5-3-3-1 に示す。

表 5-3-3-1 文字式が示す物性値，パラメータ

σ (N/m)	表面張力	d (m)	マイクロチャネル幅
μ (Pa s)	粘度	l (m)	マイクロチャネル長さ
u (m/s)	流速	h (m)	マイクロチャネル高さ
Q (W)	熱量	λ (W/m K)	液体の熱伝導
ρ (kg/m ³)	密度	g (m/s ²)	重力加速度
Hfg (J/kg)	蒸発潜熱	q (W/m ²)	熱流束
r (m)	曲率半径		

実験に使用する冷媒の候補として水，R123，R245fa を挙げ，上記で設定した条件を満たし，目標値に設定した熱流束 100 [W/cm²] に近づくようマイクロチャネルを変え比較を行った。ここで，R123，R245fa は冷媒としてよく利用される液体である。その結果，図 3-4 に示すように水を使用したときに最も目標値に近い値となるため水を冷媒とした。

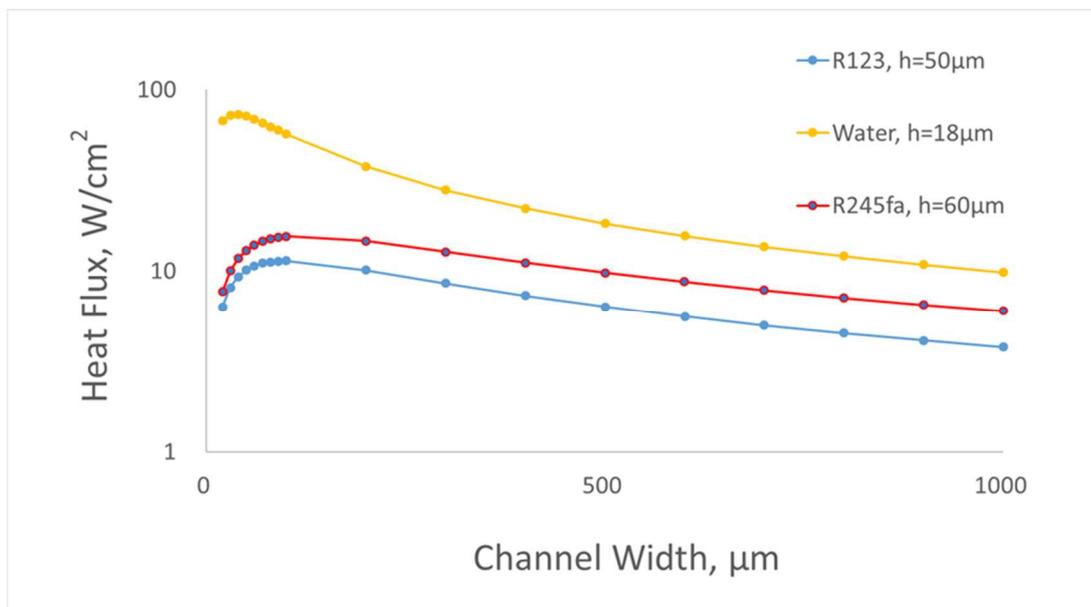


図 5-3-3-1. 各冷媒における熱流束

また，冷媒の候補として挙げた水，R123，R245fa の物性値を表 5-3-3-2 に示す。

表 5-3-3-2 各冷媒の物性値

冷媒	水	R123	R245fa
表面張力 [mN/m]	58.99	14.89	14.95
密度 [kg/m ³]	958.63	1457.58	1365.77
蒸発潜熱 [kJ/kg]	2257.44	170.34	196.23
粘性係数 [μ Pa s]	383	406	461
飽和温度 [K]	373	301	288
熱伝導率 [mW/mK]	677.06	75.73	91.29

冷媒を水とした場合得られる熱流束の最大値は 72.5 [cm²]で目標値を満たさない。そこで熱流束の目標値 100[W/cm²]をするためマイクロチャネルを減圧環境におくこととした。マイクロチャネルを減圧環境におくことで、冷媒の表面張力、密度、蒸発潜熱、粘度が変化するほか、マイクロチャネルの表面温度 T_{sat} [K]が下がることで条件を満たしやすくする。

目標値を満たすため 0.05[MPa]に減圧して計算した結果を図 5-3-3-2 に示す。マイクロチャネル深さ 23[μ m]とし、チャネル幅を除熱流束が最大となる 50[μ m]とした。このときマイクロチャネル表面温度は上限値である 120[$^{\circ}$ C]を超えていないことが分かる。また、計算に使用した物性値を表 5-3-3-3 に示す。

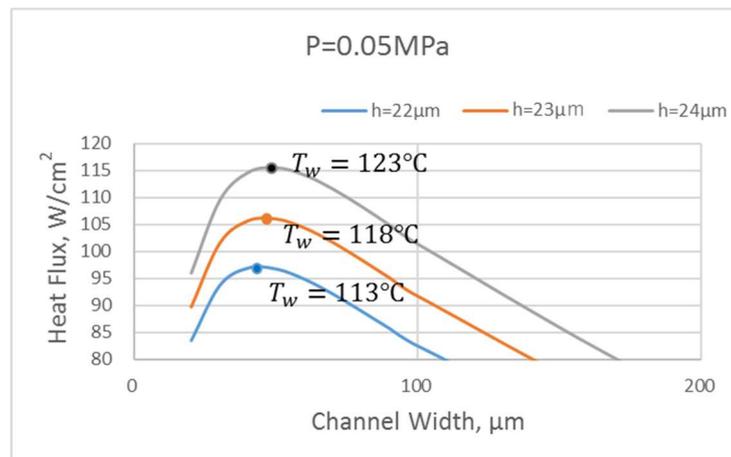


図 3-6 各マイクロチャネル幅における熱流束の比較

表 5-3-3-3 計算に使用した物性値

σ (mN/m)	0.018467
ρ (kg/m ³)	1531.4
Hfg (kJ/kg)	182290
μ (μ Pa s)	0.000581

5-3-4 マイクロチャネル

マイクロチャネルは図 3-7 のようにカートリッジヒーター挿入するブロックとマイクロチャネルブロックの2つより構成する。ブロックの材質は熱伝導性のよい銅とする。マイクロチャネルはブロックの最上面に作成する。カートリッジヒーターは冷却対象の電子デバイスの代わりとして挿入する。

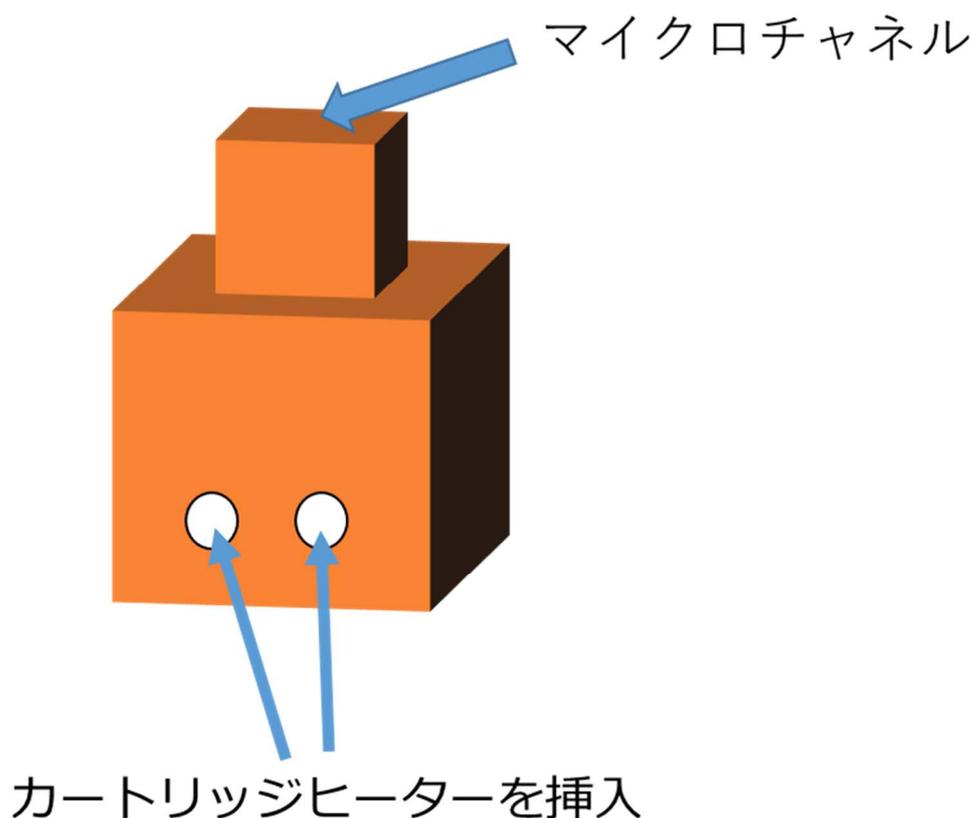


図 5-3-4-1 マイクロチャネルブロック

マイクロチャネルの加工を行う加工技術の制約上、マイクロチャネル長さは 24.2[mm]とする。また、マイクロチャネル流路は 50[μm]の半円形で、マイクロチャネル幅が 50[μm]、高さが 25[μm]の流路と近似して考える。マイクロチャネル下部でマイクロチャネルブロック側面に熱電対挿入用の穴をあけ温度を測定できるようにする。カートリッジヒーター挿入部のブロックにはカートリッジヒーター挿入用の穴を 4 か所あけ、マイクロチャネルブロックとは分離したものとなっている。

図 5-3-4-2 にマイクロチャネルブロックの外観示す。

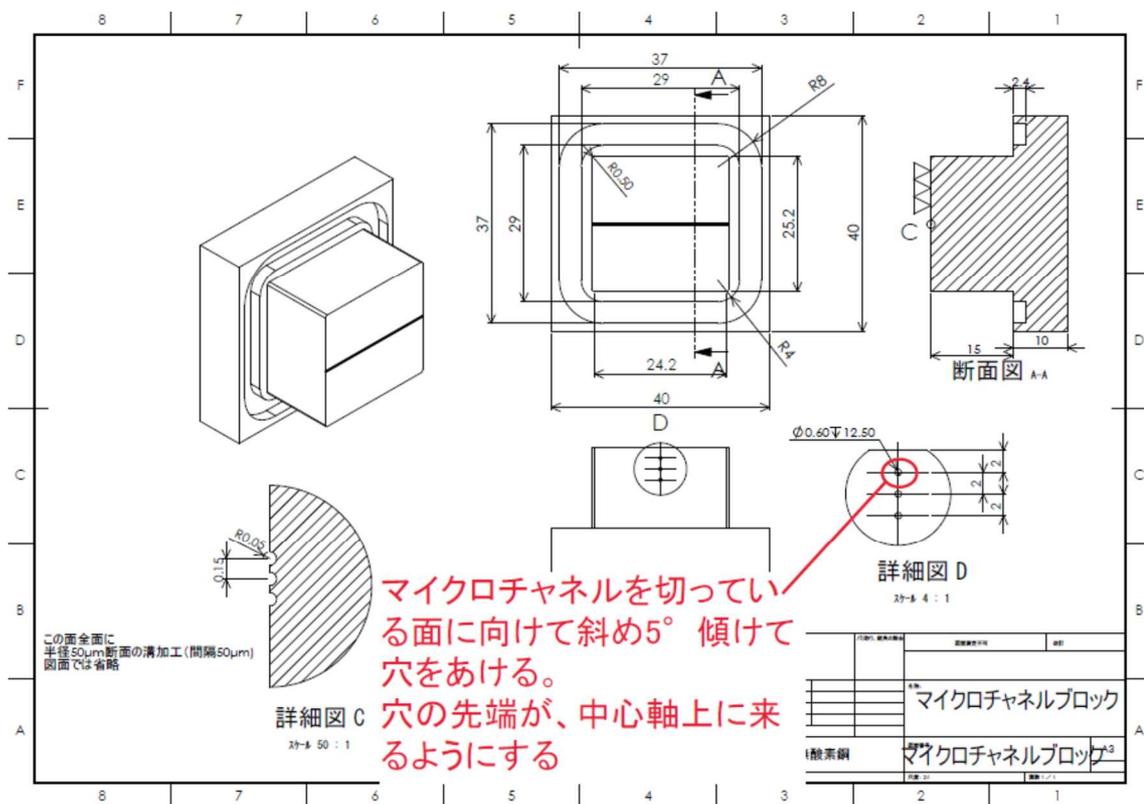
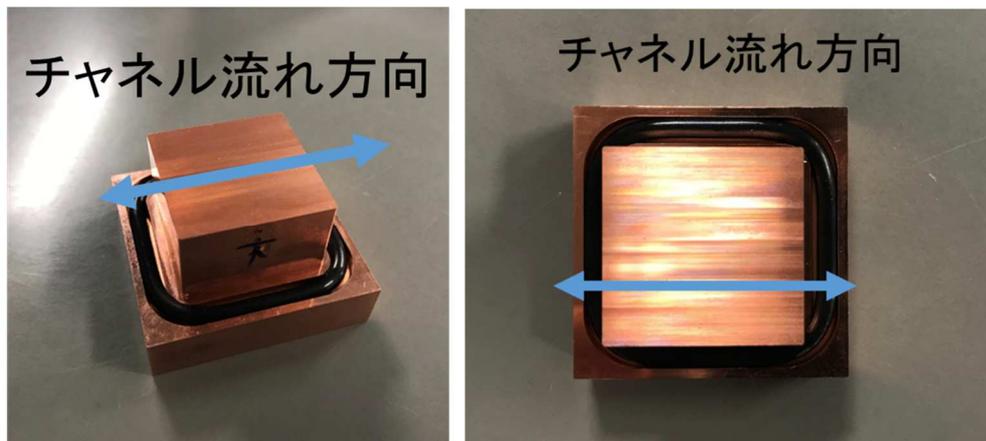


図 5-3-4-2 マイクロチャンネルブロック外観および寸法

5-3-5 実験装置

図 5-3-5-1 に実験装置外観, 図 5-3-5-2 に実験装置系統を示す.

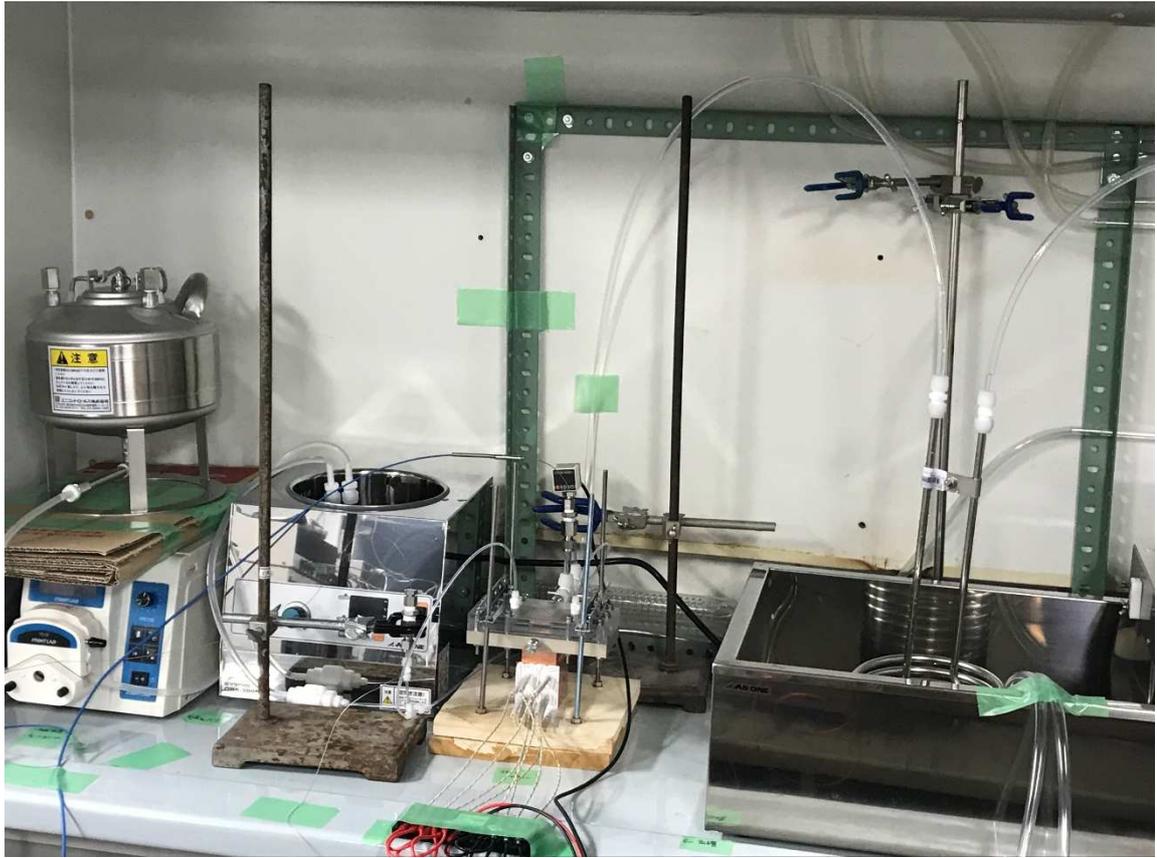


図 5-3-5-1 実験装置全体

実験装置の全体模式図を図 3-10 に示す

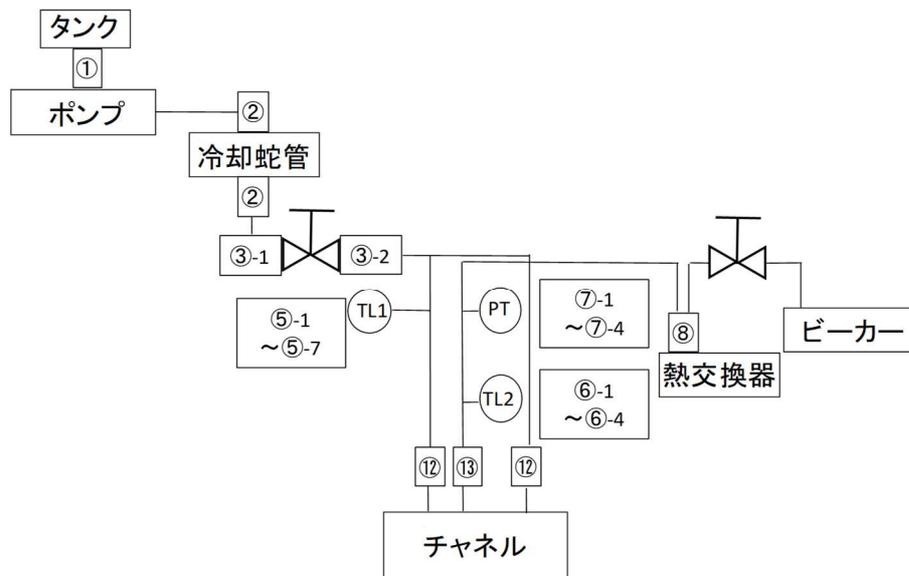


図 5-3-5-2 実験装置の全体模式図

5-4 実験結果

表 5-4-1 に実験条件を示す.

表 5-4-1 実験条件

液体種類	純水		
圧力	大気圧		
液流量 [mL/min]	3.9	5.3	7.9

図 5-4-2 に実験結果として得られた流量と熱流束の関係を示す. なお上記いずれの条件でもブロック表面温度は 120°C以下に維持されることを確認した.

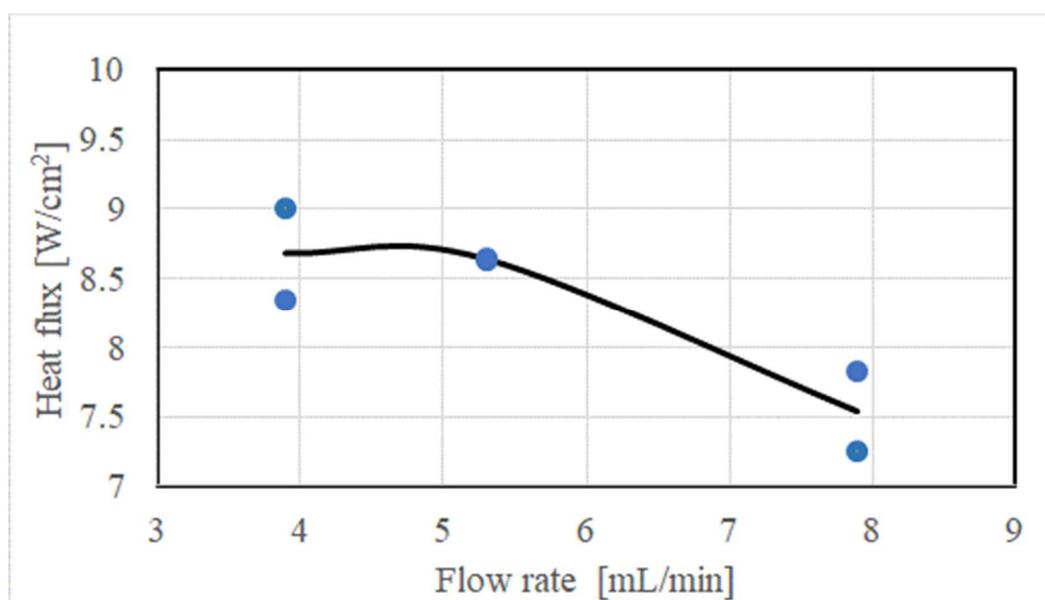


図 5-4-2 流量と熱流束の関係
(液体：純水)

5-5 矩形断面マイクロチャネルを用いた場合の結果

より高い除熱量を得ることを目的とし, より流路幅の小さいマイクロチャネルを製作し, 除熱特性試験を実施した. 新たに製作したマイクロチャネルを図 5-5-1 に示す. 本マイクロチャネルを用い, 除熱性能を計測した. 実験条件を表 5-5-1 に示す. また, 実験結果として得られた冷媒流量とチャネル表面温度および除熱熱流束の関係を図 5-5-2, 5-5-3 に示す. 図よりマイクロチャネル表面温度が 104°C以下に維持され, 除熱熱流束が 8~12[W/cm²]となることが分かった.

表 5-5-1 実験条件 (矩形断面マイクロチャネル)

No		Flow rate [ml/min]	Heat Input [W]
RUN	002	7.9	100
RUN	003	5	100
RUN	004	3.5	100
RUN	005	2	100
RUN	006	1.5	100
RUN	008	1.5	100
RUN	009	1	100
RUN	010	1	100
RUN	011	0.5	100
RUN	012	2	100
RUN	013	3.5	100
RUN	014	5	100
RUN	015	8	100
RUN	016	2	100
RUN	017	3	100

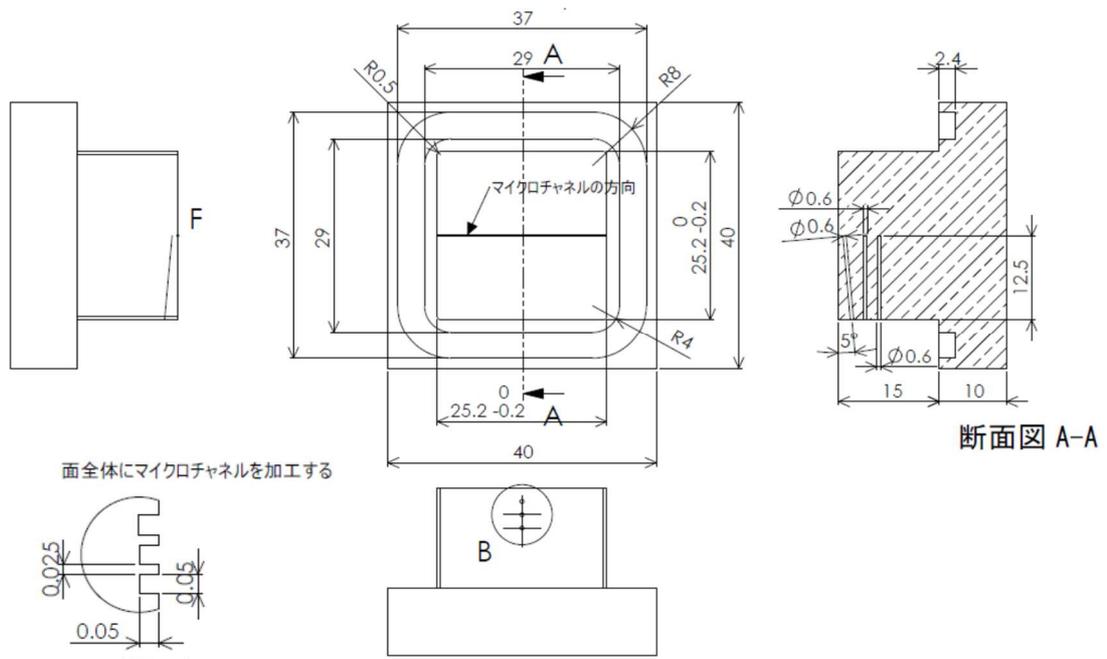


図 5-5-1 矩形断面マイクロチャネル (その1)

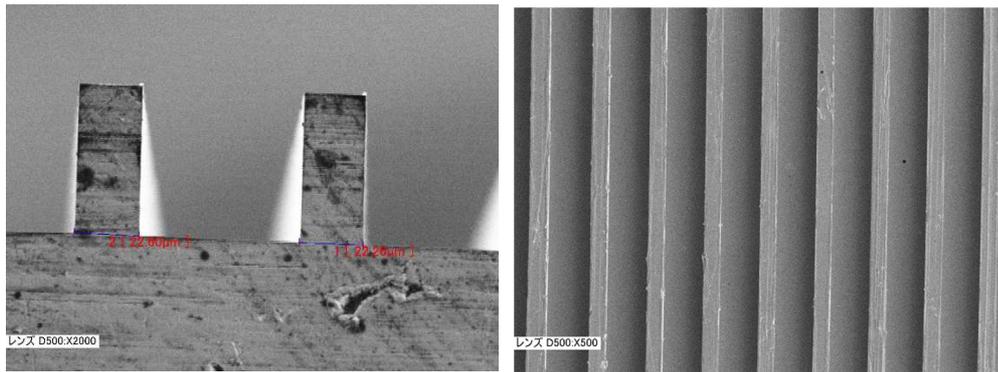


図 5-5-1 矩形断面マイクロチャネル (その2)

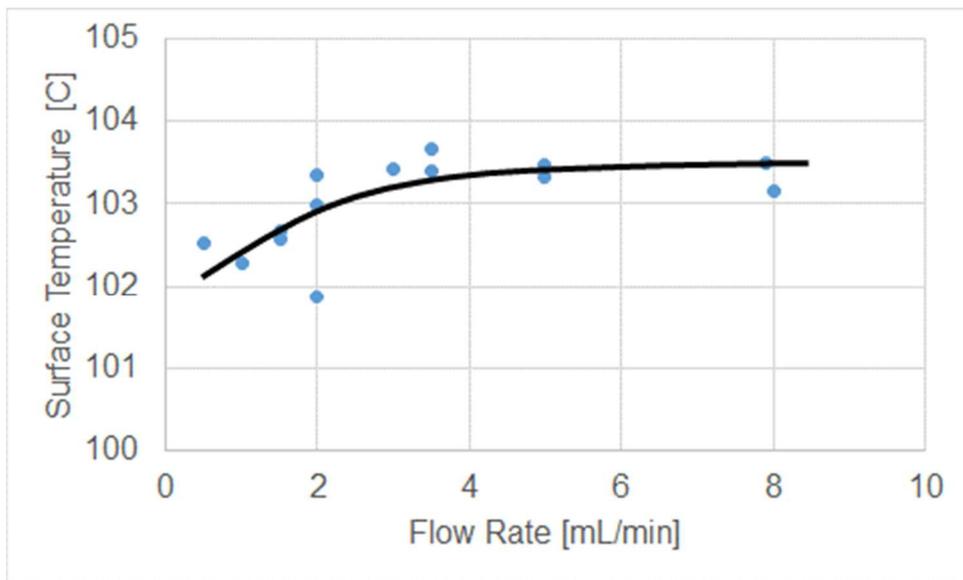


図 5-5-2 流量とマイクロチャネル表面温度の関係

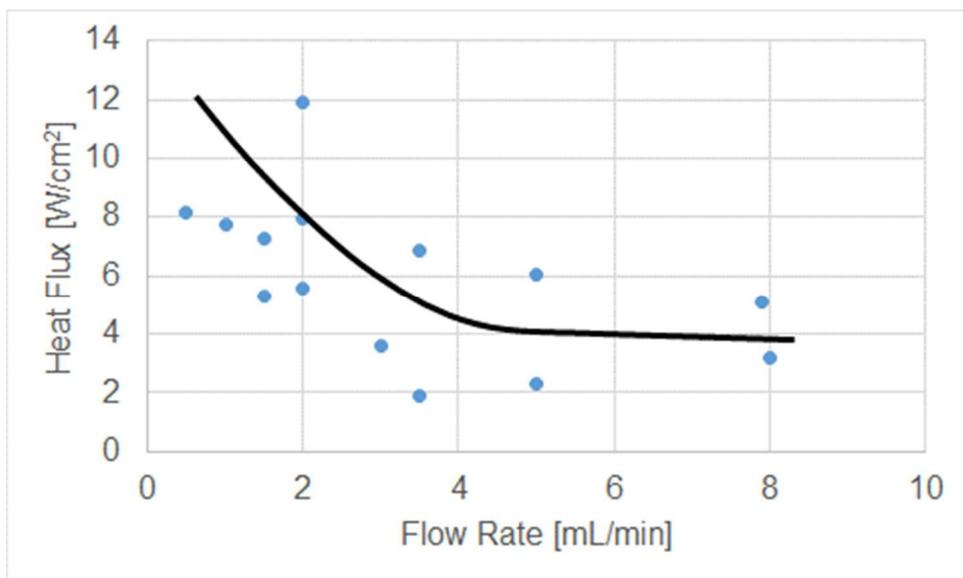


図 5-5-3 流量と除熱熱流束の関係