

微小重力下における 加振に伴う気液界面の挙動観察

宇宙開発事業団 清水 盛生、長岡 俊治、宇佐美 論
東京都立大学 奥山 典生
三菱重工業（株） 高沖 宗夫、上村 一秀、小林 次郎
（財）宇宙環境利用センター 大山 勝、福井 正洋、石倉 精三

1. 緒言

人間をはじめとする各種の生物が宇宙環境から受ける影響を調査するための各種の実験を宇宙ステーションで実施する計画が進められている。そのようなライフサイエンス分野で実施される実験操作のかなりの部分は溶液の取扱で占められているため、微小重力環境下での溶液操作方法を確立しておかなければならない。宇宙ステーション内での溶液取扱の主な問題点は以下の2点である。

- 1) 重力が微小であるため液体に気体が混入すると容易に分離できない。
- 2) 地上では危険性のない液体でも容器から漏れてはならない。

この主要な2点を回避する方法として地上の注射器に似た器具と伸縮性のある容器が従来の宇宙実験で使われてきた。宇宙ではこれらの器具を用いることでライフサイエンス分野の溶液操作のうちかなりの部分をカバーすることができるが、操作性、保管量、微量の溶液の取扱、あるいは細胞などの激しい液流に耐えられない微妙な生物試料に対する影響など改善すべき点も数多くある。一方地上の一般的な実験操作においてはピペット操作が主体でありこれらの点はあまり問題とはならない。

地上で溶液を取り扱う場合は重力によって形成される空気と液体の界面を無意識の内に利用していることがほとんどである。微小重力下ではこの界面が安定しないと考えられがちである。ところが微量の溶液を取り扱う際は重力より表面張力が支配的になり上下を逆にしてもある程度の操作が可能なのは経験的に知られている。このことは水に対して濡れ性のよいガラスなどの細管（直径4mm程度まで）についても成り立つ。この現象を利用すれば宇宙での溶液操作の可能性が広がり、より質の高い宇宙実験が計画できるようになる。さらにグローブボックスなどの隔離封入装置を併用することによって地上操作に類似の開放系操作にも発展する可能性を持つ。

しかしこれらの気液界面は界面に平行方向からの衝撃に対して弱い。上述の倒置した細管（気液界面が上側が液体）では軽く指で弾くだけで界面が崩れる。微小重力下ではその中間的な現象が予想されるが、手による通常の操作で生じる加速度（0.2G程度）で気液界面を保持できなければ実質的に役に立たない。そこで微小重力下での横方向からの加速度に対する気液界面に安定性を調べる必要がある。このような動的な過程について微小重力下で検証されたシミュレーション解析コードがなく、現在のところ微小重力下での実験を実施しデータを収集しておく必要がある。

これらの実験には慣性の影響を除くため10秒程度の微小重力持続時間が必要であること、 10^{-2} Gレベルの重力加速度で気液界面に変化が期待されることから実験手段としては航空機が適切であると考えられる。また、リアルタイムで観察、パラメータ変更等が可

能なので検証データの収集にも有利であることから航空機実験を実施した。

2. 実験

2. 1 実験項目

微小重力下で、円筒管に入れた溶液を加振（加速度を加えた）ときの気液界面の挙動を観察し、以下のデータを取得する。

- 1) 加振時に気液界面を保持できる管の径を求める。
- 2) 加振によって生じるスロッシングの波高を測定し、Gレベル、管内径等との関係を明らかにする。

2. 2 実験試料

ライフサイエンス実験で使用される溶液は生理食塩水、細胞培養液、緩衝液などほとんどが水溶液である。これらの水溶液の密度、表面張力等の物性値は同程度なので、その代表として本実験では組成の簡単な生理食塩水を用いた。

また、表面張力の影響を調べるため、表面張力が生理食塩水より小さいのが特徴である70vol%エタノールを用いた。これはライフサイエンス実験で滅菌、消毒によく使用される。

生理食塩水及び70vol%エタノールの主な物性値の実測値を表-1に示す。

表-1 溶液の物性値

項目 試料名	密度 (g/cm ³)	粘度 (cSt)	表面張力 (dyne/cm)	接触角 (°)	
				ガラス	アクリル
生理食塩水	1.0052	0.9595	76.4	26±3.7	70±2.8
70Vol%エタノール	0.8826	2.622	26.8	0	27±3.3

注1) 測定温度は20℃である。

注2) データは地上での測定値である。

※) 液滴を形成せず

2. 3 実験装置

実験装置の系統図を図-1、全体図を図-2に示す。装置は大別すると(1)供試体部、(2)加振部（単軸アクチュエータ）、(3)観察部（カメラ及び照明）、よりなる。

(1) 供試体部

供試体部を図-3に示す。4本の円筒管を垂直に立てる150mm角のアルミ製枠に観察及び照明のため前後面に透明アクリル板を取り付けてある。円筒管は任意に組み合わせることができ、様々な条件を設定できるようになっている。前面アクリル板の両端に1mm

図-1
実験装置系統図

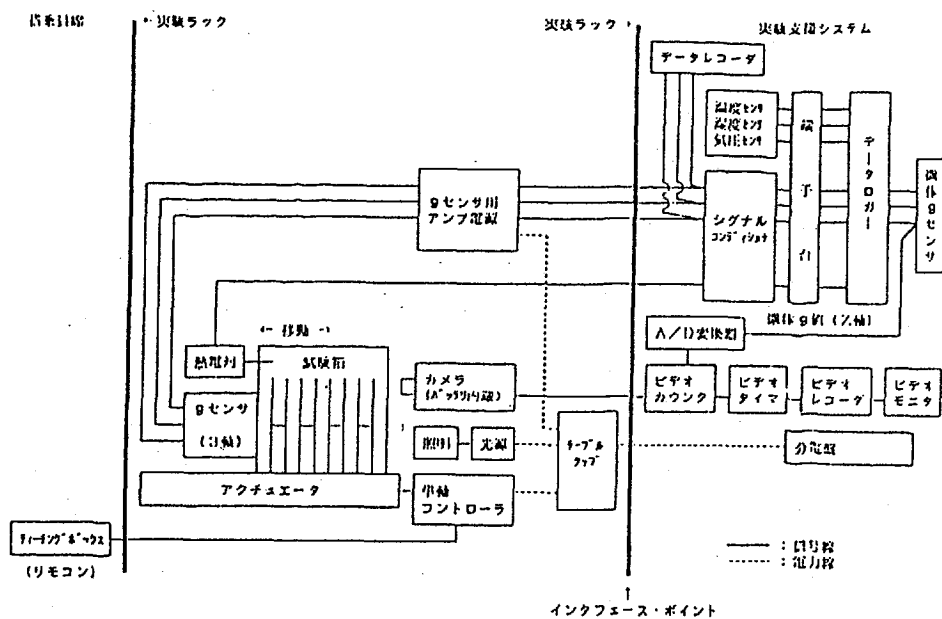


図-2
実験装置全体図

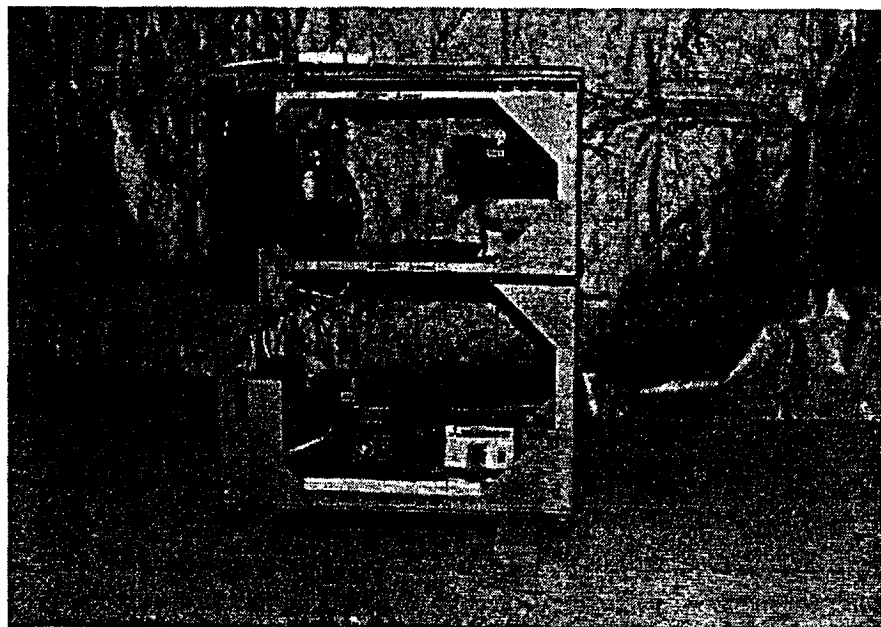
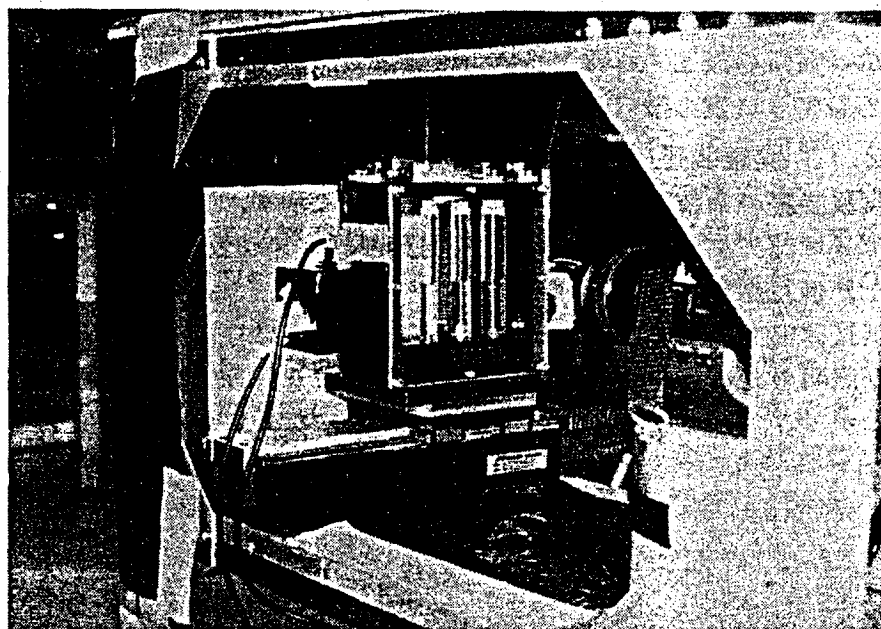


図-3
実験装置供試体部



間隔にスケールが刻まれており、加振によるスロッシング波高を測定できるようになっている。

(2) 加振部

供試体部を観察方向に対して横方向に加速度を加える単軸アクチュエータである。単軸アクチュエータは駆動源としてDCサーボモータを用いボールねじで直線運動に変換している。加速度の制御はDCサーボモータの回転数と加減速時間を制御部でコントロールすることにより、0～1 Gの加速度を得ることができる。

駆動系にボールねじを用いているため、可動時にG-jitterを発生するが、供試体部との間に高ダンピング性の防振材(シリコンゲル、厚さ10mm)を敷くことにより、供試体部へのG-jitterの影響を取り除いている。

(3) 観察部

撮像素子として1/2" CCD (41万画素)を有するビデオムービーをビデオカメラとして使用した。観察画像は、航空機搭載のビデオレコーダに時間データ(1/100秒単位)及びZ軸方向(上下方向)加速度データ(1/100G)とともに記録される。尚、再生時の画像分解能は、約1 mmである。

2. 4 実験条件

表-2に実験条件を示す。

表-2 実験条件

使用した溶液	生理食塩水(0.86%(w/w)NaCl水溶液) 70 Vol%エタノール
加振加速度	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 G
円筒管	脱脂洗浄したガラス管及びアクリル管 内径:3.4, 5.0, 7.0, 10, 12, 15, 18, 20mm
温度 (機内)	11～19 °C
湿度 (機内)	11～22 %
気圧 (機内)	0.9±0.02 atm.

2. 5 実験方法

円筒管に溶液を管底より60 mm入れ、試験箱に固定した後単軸アクチュエータで加振し、気液界面をビデオカメラで撮影した。録画された画像から加速度に対する気液界面形

状のパラメータとしてスロッシング波高データを取得した。尚、画像、加速度、温度、湿度、気圧データの収録は航空機実験支援システムを利用した。

3. 実験結果

3. 1 管内径による変化

生理食塩水をガラス製円筒管に入れた場合、静止時の重力変化に伴う気液界面形状変化を図-4、-5に示す。図では円筒管内の黒い影の部分が気液界面を示す。

重力加速度が1 Gから微小重力下($10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ G}$)へ変化すると溶液の表面張力が卓越してくるため、濡れ性によって溶液は管壁を上昇した。しかし、この現象は管内径が小さい程、変化量は小さくなり、管内径が5 mm以下になると顕著な変化はみられなかった。

表面張力と重力の相対的な大きさはボンド数(B_o)⁽¹⁾⁽²⁾と呼ばれる無次元のパラメータで表すことができる。すなわち、 $B_o < 1$ となる条件では表面張力が支配的であり、重力の顕著な影響はみられない。この実験で用いた条件(生理食塩水)についての計算結果を表-3に示す。

$$\text{ボンド数} : B_o = g \rho r^2 / \sigma \quad (\text{重力} / \text{表面張力})$$

但し g : 重力加速度 ρ : 液体密度 r : 管内半径
 σ : 表面張力

表-3 生理食塩水のボンド数計算結果

2 r (mm)	3.4	5.0	7.0	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
B_o	0.37	0.81	1.58	3.22	4.64	7.25	10.4	12.8

$$g (\text{重力加速度}) = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho (\text{液体密度}) = 1.005 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\sigma (\text{表面張力}) = 76.4 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

管内径が7 mm以上の場合には $B_o > 1$ であり、気液界面が重力の支配を受けて変形していることが示されている。重力の影響を取り除くと気液界面は表面張力の支配による形状へと変化する。5 mm以下の管径では地上でも、もともと重力の支配を受けていない($B_o < 1$)ため、微小重力下に移行しても気液界面形状は変化しないと説明できる。

加振加速度に伴う気液界面形状変化は図-6、-7に示す。

微小重力下に突入しGレベルが安定した後横方向に加振した。左方向へ加速度がかかると溶液は反作用で右側の管内壁を上昇する。管内径が10 mm以上の場合、上昇した高さは1 G下の場合と同様に管内径に比例しているが、圧倒的に高く、気液界面形状も全く異なっている。ところが、管内径が7 mm以下になると液の上昇は極端に減少し、気液界面形状は1 G下の場合(図-8)に近くなってくる。

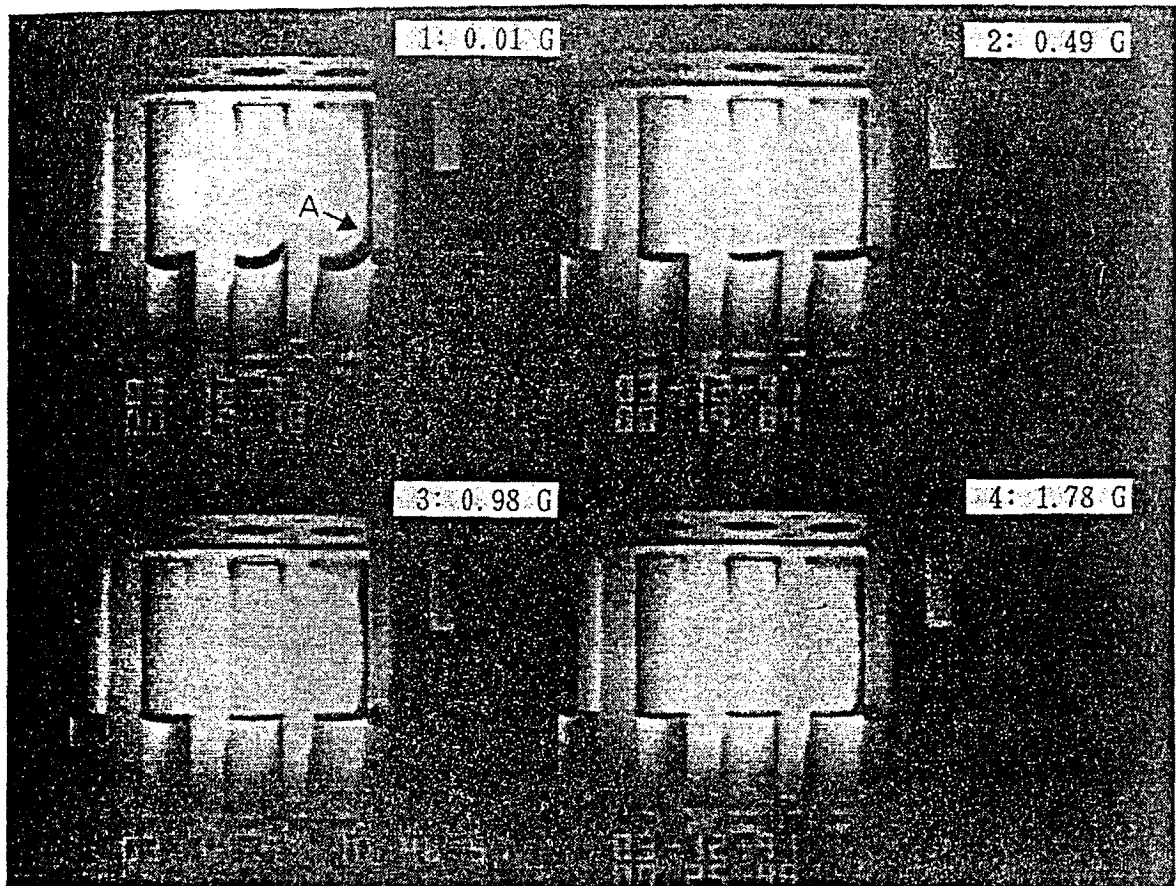


図-4 重力変化による気液界面形状変化（生理食塩水-ガラス管）
 重力加速度は図中に示す。管内径は左から12, 15, 18, 20mm。（A）重力の減少に伴い溶液が管壁を上昇。（この写真では各管の左側が照明のハレーションで写っていないが、実際の液面は対称形）

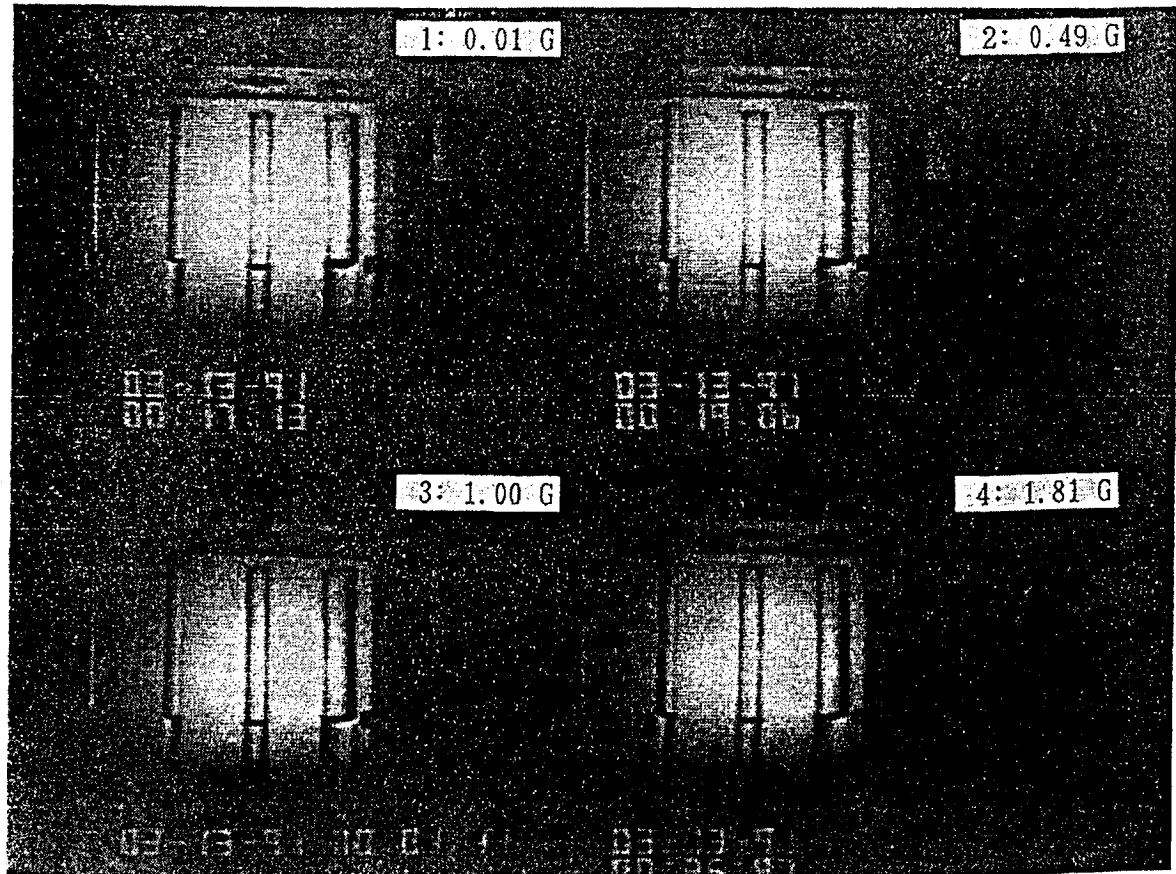


図-5 重力変化による気液界面形状変化（生理食塩水-ガラス管）
 重力加速度は図中に示す。管内径は左から3, 4, 5, 7, 10mm。細管（3.4mm, 5mm）内の気液界面には顕著な変化はない。

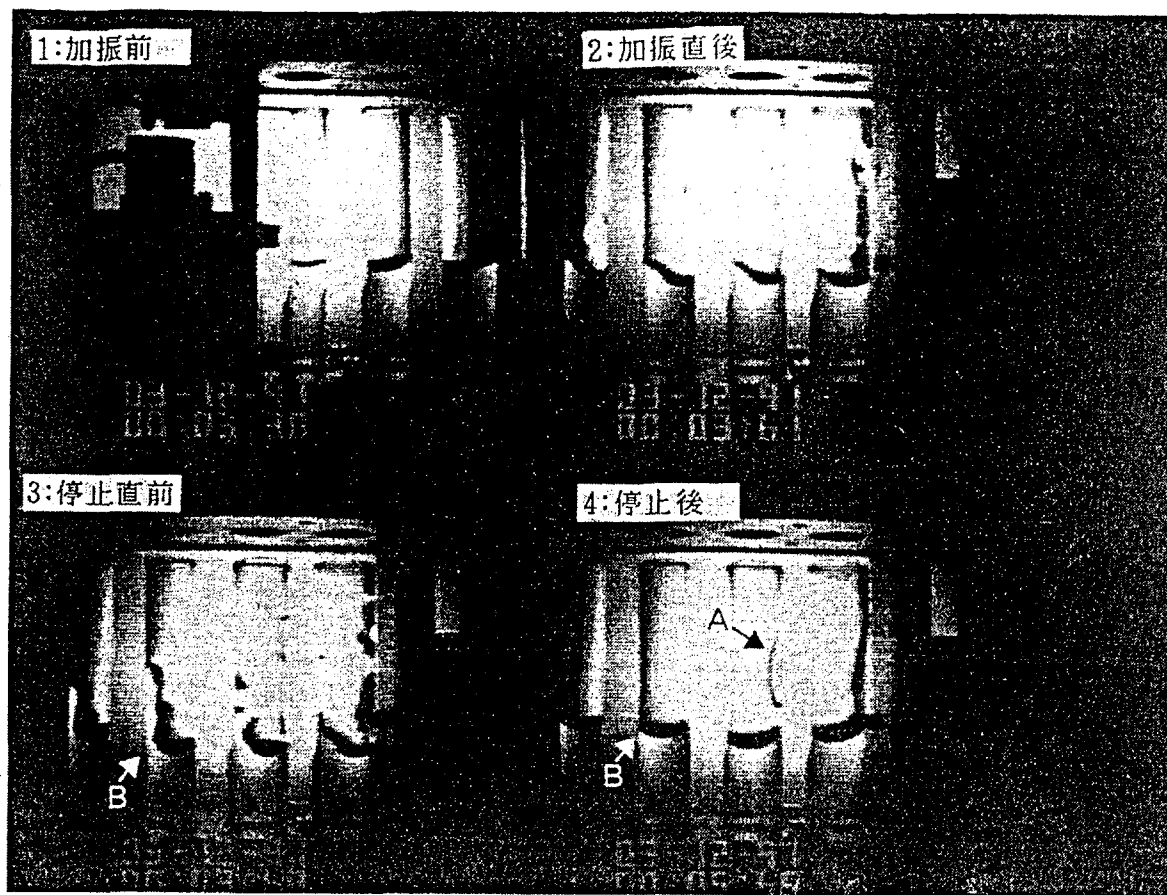


図-6 微小重力下での加振による気液界面形状の経時変化（生理食塩水-ガラス管）
 加振加速度は1 G。管内径は左から12, 15, 18, 20mm。（A）加振によって液がちぎれ管壁に付着した。（B）加振により液がちぎれそうだが、停止後液面は元に戻る。

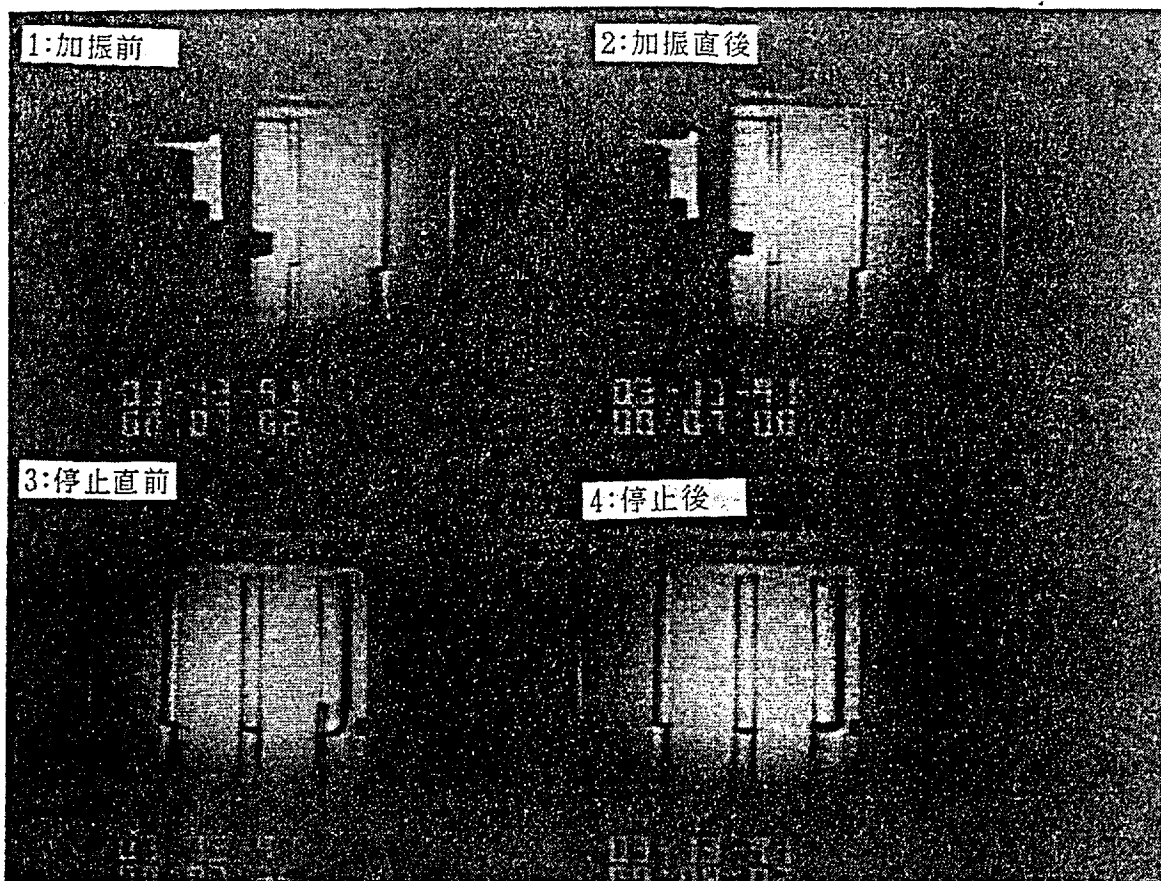


図-7 微小重力下での加振による気液界面形状の経時変化（生理食塩水－ガラス管）
加振加速度は1 G。管内径は左から3.4, 5, 7, 10mm。細管では地上での変化（図-8）と大きな差はない。

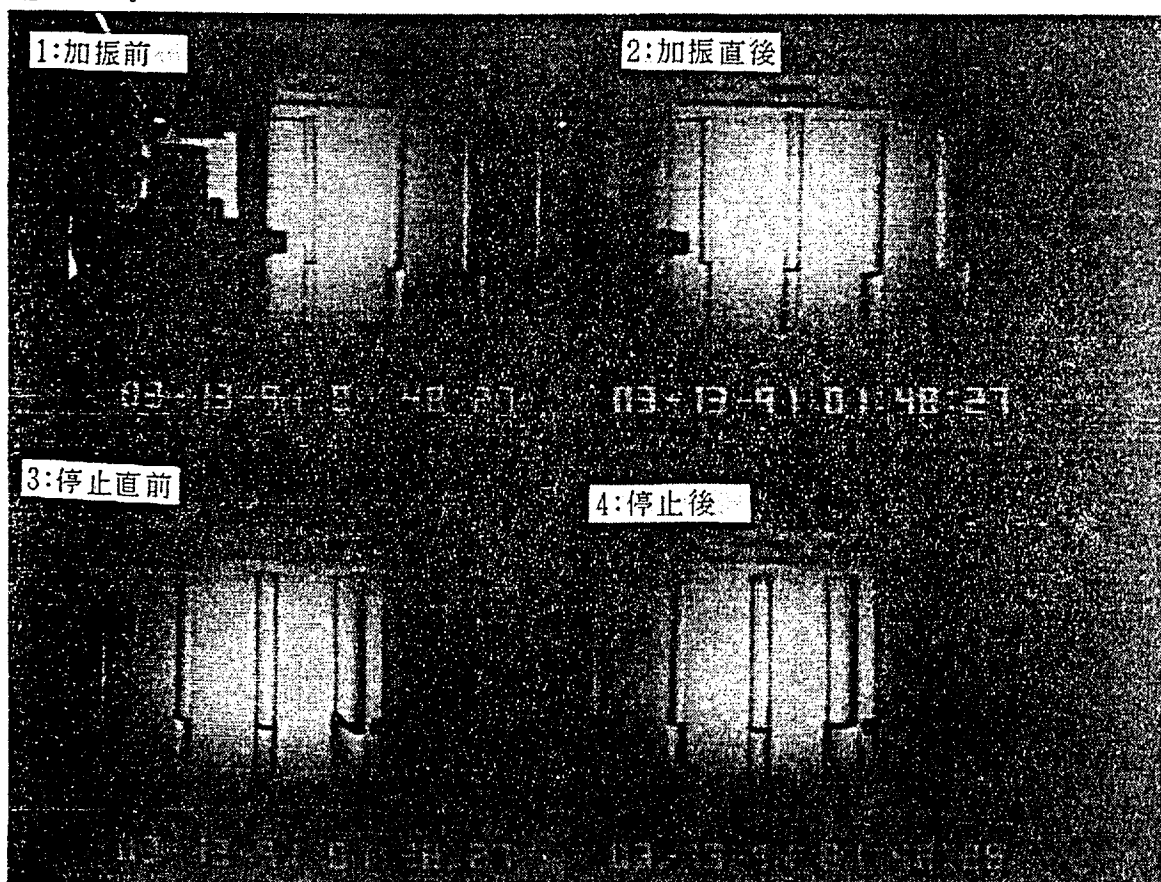


図-8 地上での加振による気液界面形状の経時変化（生理食塩水－ガラス管）
加振加速度は1 G。管内径は左から3.4, 5, 7, 10mm。

次に右方向へ加速度をかけ（減速）停止した時、溶液は地上では見られなかった挙動を示した。その挙動は大別すると3種類に類型化できる。管内径が大きい20、18mmの円筒管では上昇した溶液はちぎれ、液滴となり管壁に残った（パターンA）。15、12、10mmでは溶液はちぎれそうになるが停止後左右にスロッシングしながら安定した気液界面に戻った（パターンB）。さらに管内径が7mm以下の場合、加振時の気液界面形状変化は微小重力下にもかかわらず地上でみられた形状（図-8）とおおよそ変わらなかった（パターンC）。これらの3パターンで各加振加速度での気液界面挙動を類型化した結果を表-4に示す。

表-4 気液界面挙動の類型化

内径 加振	3.4 mm	5 mm	7 mm	10 mm	12 mm	15 mm	18 mm	20 mm
0.1 G	C	C	C	C	—	—	—	—
0.2 G	C	C	C	C	—	—	—	—
0.4 G	C	C	C	C	B	B	A	A
0.6 G	C	C	C	C	B	B	A	A
0.8 G	C	C	C	B	B	B	A	A
1.0 G	C	C	C	B	B	B	A	A

溶液：生理食塩水、円筒管：ガラス

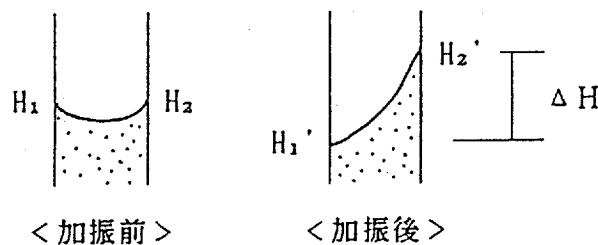
パターンA：液がちぎれて管壁に付着

パターンB：ちぎれそうになるが元に戻る

パターンC：地上の挙動と同様

注） 空欄はデータなし

図-9に示すように加振によって生じた最初のスロッシングの最大波高を定義し、表-4のパターンCの場合について、1 G下と微小重力下でのスロッシング波高差を加振加速度に対してプロットしたグラフを図-10に示す。



$$\text{スロッシング波高 } \Delta H = H_2' - H_1'$$

図-9 スロッシング波高の定義

管内径が7 mm以下の場合、スロッシング波高は微小重力下でも、1 G下と同レベルであることがわかった。特に管内径が3.4 mmでは1 Gで加振しても全く変化せず、非常に安定していた。一方、管内径が10 mmの場合には加振加速度が0.4 Gを越えるとスロッシング波高差は急に大きくなり、不連続な挙動を示している。これは溶液の挙動が表面張力支配から加振による慣性力支配に変化したことを示唆している。従って、この点が加振に対して気液界面を安定に維持できる限界であると考えられる。

以上の結果より、微小重力下で加振をした場合、管内径が小さくなると気液界面は表面張力によって安定することが分かった。また、加振に対する溶液の挙動は不連続であり、気液界面を安定に維持できる限界が存在することを実験的に確かめられた。生理食塩水とガラス管の場合、加振時に気液界面を安定に維持できる管内径は7 mm以下であった。

3. 2 濡れ性の違いによる変化

濡れ性は、一般に液滴を水平な固体表面においた時、液体の端で固体表面と液体表面が成す角度、接触角で評価され、負の相関を持つ。通常、接触角が大きいほど濡れ性が悪いと言う。

生理食塩水との組合せでガラスより濡れ性の悪いアクリルの場合の気液界面の変化を図-11、-12に示す。静置時、接触角が90°付近になると重力変化に伴う気液界面形状変化は小さくなることは知られている⁽³⁾が、本実験においても濡れ性の悪いアクリルの場合(図-11)、気液界面の変化はほとんど見られなかった。

加振時(図-12)の気液界面挙動はガラスの場合と同様に3種類に類型化できる。その結果を表-5に示す。また、表-5のパターンCについて、1 G下と微小重力下でのスロッシングの最大波高差を加振加速度に対してプロットしたグラフを図-13に示す。

スロッシング波高差がほぼ"0"である管内径は、濡れ性のよいガラスと比較すれば10 mmと大きく、濡れ性が悪くなると気液界面は安定してくると言える。

濡れ性は、微小重力下での気液界面挙動に大きく影響する因子であり、濡れ性が悪くなると気液界面はより安定することを本実験で確認できた。しかし、本実験で使用したアクリルは接触角が70°であり、90°より大きくなった場合に気液界面が安定してくるかどうかは今後の検討課題である。

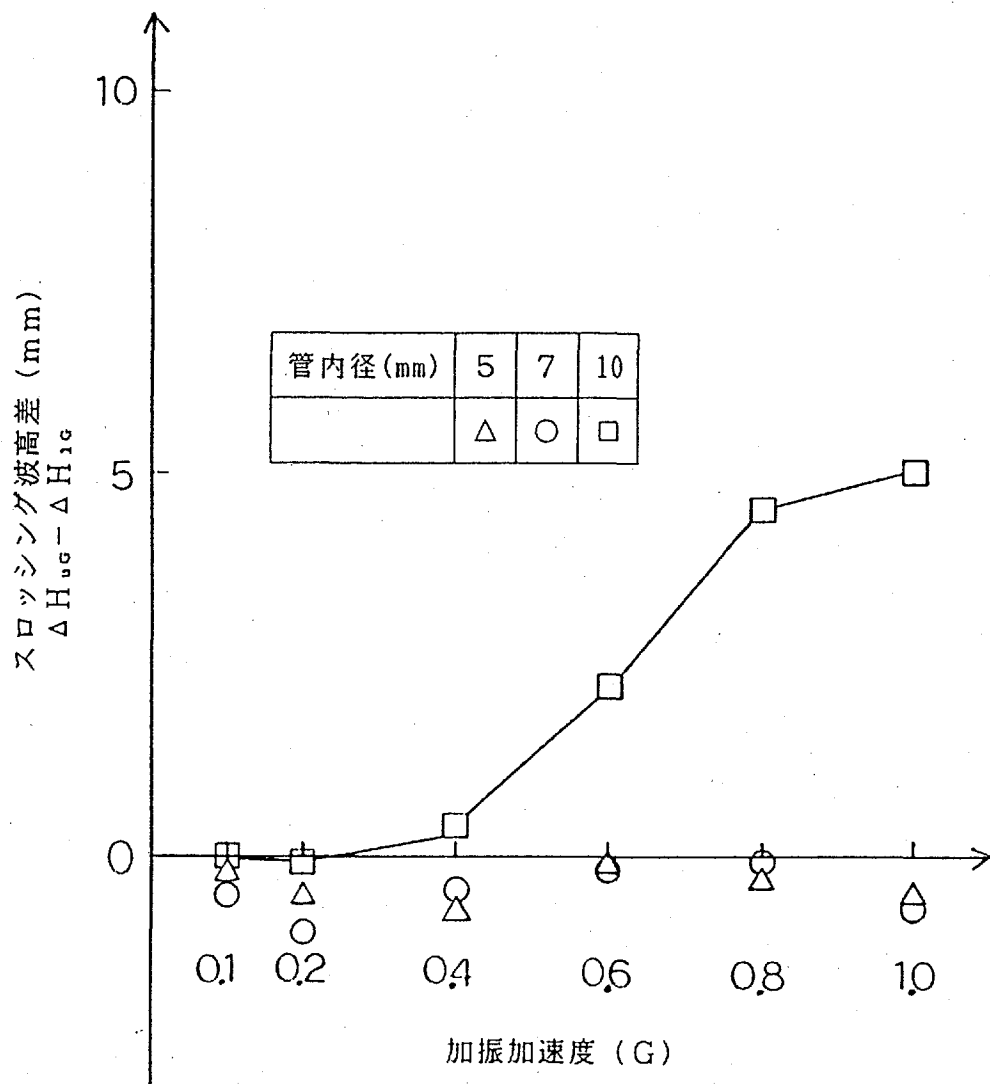


図-10 1G下と微小重力下でのスロッシング波高差
 溶液：生理食塩水 円筒管：ガラス
 $\Delta H_{\mu g}$ ：微小重力下でのスロッシング波高
 ΔH_{1g} ：1G下でのスロッシング波高

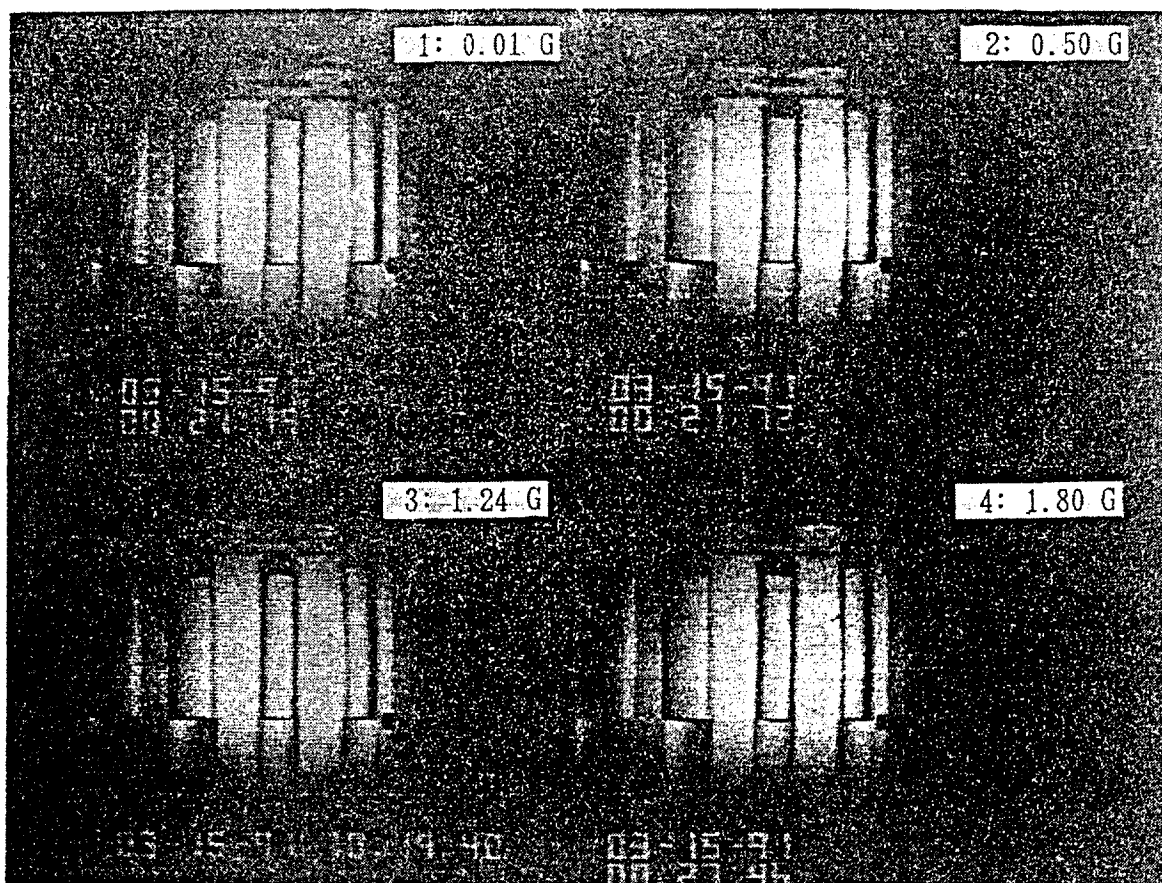


図-1 1 重力変化による気液界面形状変化（生理食塩水－アクリル管）

重力加速度は図中に示す。管内径は左から18, 15, 12, 10mm。濡れ性が悪いと気液界面形状の変化は小さい。

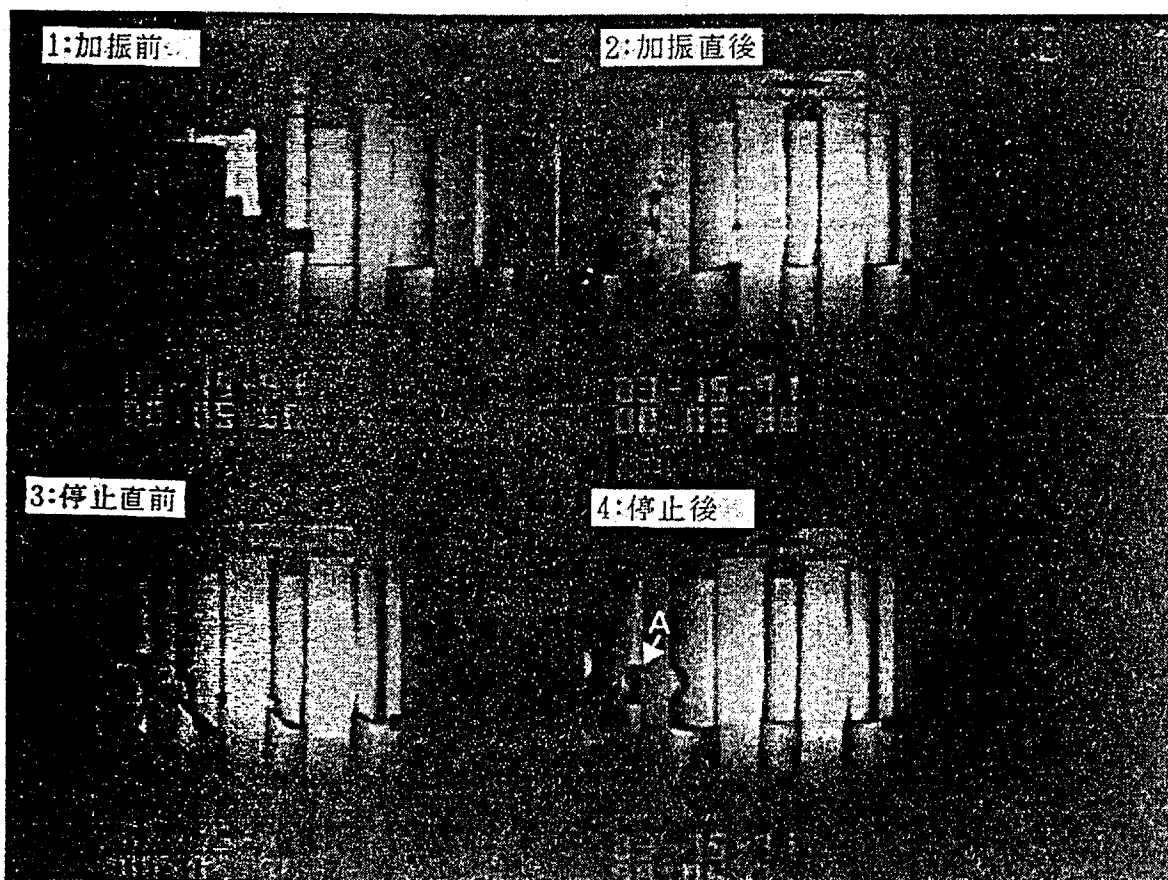


図-1 2 微小重力下での加振による気液界面形状の経時変化（生理食塩水－アクリル管）

加振加速度は1 G。管内径は左から18, 15, 12, 10mm。（A）加振により液がちぎれて、半球形の液滴が管壁に付着。

表-5 気液界面挙動の類型化

内径 加振	10 mm	12 mm	15 mm	18 mm
0.2 G	C	C	C	C
0.4 G	C	C	C	B
0.6 G	C	C	B	B
0.8 G	C	C	B	A
1.0 G	C	B	A	A

溶液：生理食塩水, 円筒管：アクリル

パターンA：液がちぎれて管壁に付着

パターンB：ちぎれそうになるが元に戻る

パターンC：地上の挙動と同様

3. 3 マイクロピペットによる溶液の移送

これまでの航空機実験の結果から、微小重力下ではあまり安定しないと思われがちな気液界面は、内径5 mm程度の細管であれば加振でも表面張力によって地上と同様に安定することが確かめられた。そこで、同航空機実験において地上で使われているマイクロピペットを用いて微小重力下で微量溶液(40 μ l程度)の移送を行い、その様子をビデオカメラで撮影した。溶液の移送操作の様子を図-14に示す。

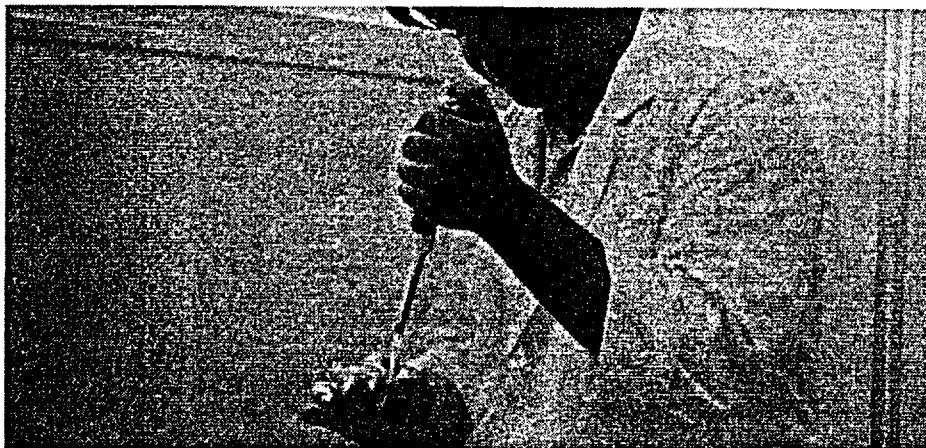


図14 溶液の移送操作

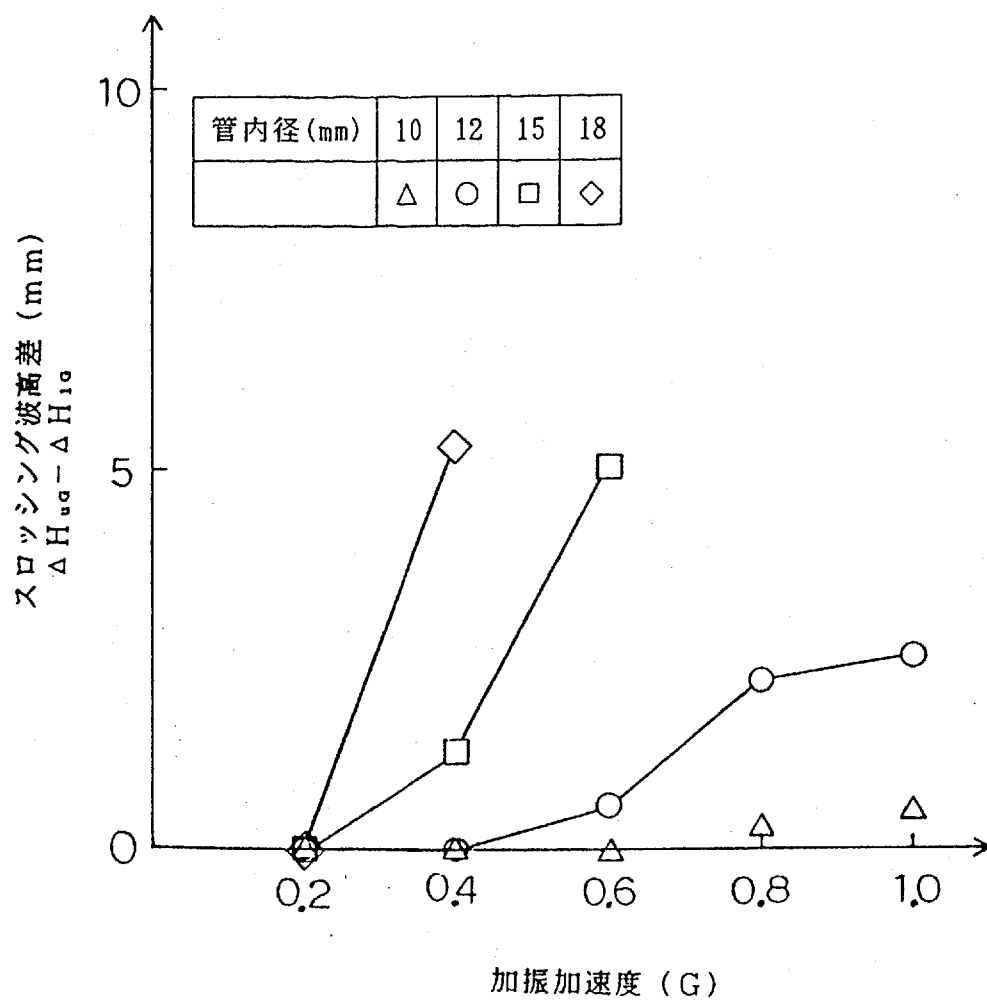


図-13 1 G下と微小重力下でのスロッシング波高差
 溶液：生理食塩水 円筒管：アクリル
 ΔH_{0g} ：微小重力下でのスロッシング波高
 ΔH_{1g} ：1 G下でのスロッシング波高

片手にマイクロ遠心管を2個持ち、その内1個に予め入れてある生理食塩水を、他方の手に持ったマイクロピペットで移送した。尚、溶液がこぼれ航空機内に飛散するの防止するため、操作はビニール袋内で行った。

移送操作に使用できた時間は約15秒と短いため、少し慌ただしい操作になったが、溶液をこぼすことなく移送することが出来た。また、気液界面の乱れ、溶液の飛沫形成、気泡混入等、微小重力下で問題と考えられていた現象は見られなかった。尚、本移送操作は地上でマイクロピペットを使用した経験のある者が行い、地上とはほぼ同様な感覚的で操作が可能であることを確認した。

以上、微量の溶液の取扱に関しては微小重力下で溶液操作を行ったが、特に問題なかった。但し、操作ミスによって溶液がこぼれる可能性はあるため、宇宙実験室ではグローブボックス等の隔離封入装置を併用すれば、地上操作同様の操作が可能であると考えられる。今後、この溶液操作技術が確立できればより質の高い宇宙実験が可能になると思われる。

4. 結言

本航空機実験の結果を以下にまとめる。

- 1) 静止時、微小重力下でも地上と気液界面形状が変化しない管内径はボンド数により評価できる。
- 2) 加振時、管内径が細い場合(φ7mm以下)の気液界面挙動は微小重力下と1G下で顕著な変化はない。
- 3) 濡れ性が悪いほど気液界面は安定となる。
- 4) 微量の溶液の取扱は、微小重力下においても地上と同じ感覚で操作できる。

参考文献

- (1) William C Reynolds, High M. Safferlee
"Liquid Propellant Behavior at Low and Zero G" pp391
- (2) 庄司 正弘 "表面張力に関連した熱、流体問題(2)"
機械の研究 第26巻 第7号、1974, P. 83
- (3) 小野 周 "表面張力" 共立出版