

# 航空機による微小重力実験 リキッド・ブリッジ法による 固液界面の濡れ挙動観察

宇宙開発事業団

(財)宇宙環境利用推進センター

長岡技術科学大学工学部

轟産業(株)

清水盛生、楠瀬智宏、木村秀夫

大山 勝、井村貞治、石倉精三

福沢 康、岡田昌章、山口憲司、岩里直久

田中健男

## 1. 緒言

宇宙環境下において溶融材料と固体との界面を持つ系での材料開発実験を行うには、あらかじめ固液界面の反応・濡れ挙動を評価しておく必要があることがこれまでのいくつかの宇宙実験で明らかにされている。

本実験では、宇宙環境下（ここでは $\mu g$ を主に考えている）における固液界面の濡れ性評価方法の開発及び重力による濡れ挙動の変化を調べることを目的とした。

濡れ性評価法については、これまでも多くの方法が提案されているが、航空機環境の20秒程度という限られた $\mu g$ 継続時間及び狭く限られたスペースで行うに適したシステムが必要であり、操作性、実験精度等の検討からリキッド・ブリッジ(Liquid Bridge)法が適当であると考えられる。

この方法は固体平行平板間に液柱を形成したのち、平板を引離し（または圧縮する）、液体と平板間にできる液柱の形状から濡れ性を評価するものであり、微小重力環境下では上下同一形状が期待できるので、同時に2つの値の計測が可能になる。また、上下平板に異なる材料を用いれば、濡れ性の相対的な比較ができる利点を有している。

本実験では基礎的なデータ収集を目的とするため、通常の液体と金属、アクリル、テフロン等の固体との固液界面の濡れ性を測定し、 $\mu g$ 下での実験に対する問題点等について地上実験結果と比較検討した。

## 2. 実験装置

### (1) リキッド・ブリッジ(Liquid Bridge)法

リキッド・ブリッジ法の原理を図1に示す。この方法は2枚の平行平板の間に液柱（リキッド・ブリッジ）をつくり、平行平板を上下運動（引張、圧縮）や回転運動させたときの液柱の形状変化から固液界面の濡れ性を評価するものである。平行平板を引き離すとき（引張）は後退接触角が、圧縮するときは前進接触角が評価できる。更に、平行平板を回転させることにより、液柱にかかる横 $g$ を自由に制御することができるので、液柱の保持性（付着性）を調べることができる。また、液柱をつくらずに上下の平行平板それぞれに液滴をつくれれば、押出液滴実験と押出懸滴実験が同時にできるという利点を有している。

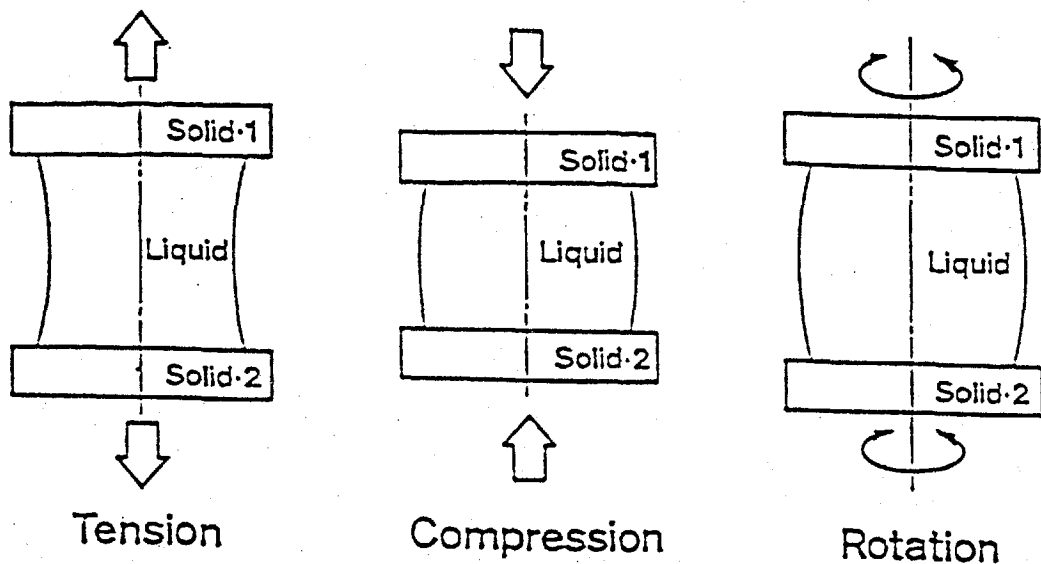


図1 リキッド・ブリッジ法

## (2) 実験装置

上記の特性を生かし、航空機に搭載可能な実験装置を製作した。本実験装置の系統図を図2に示す。実験装置は液体試料押出装置、液柱形成装置、制御装置、観察装置および電源装置の5つのユニットから構成される。押出装置は2個のシリンダを持ち、ステッピング・モータにより様々な押出（引抜き）条件の設定・制御が可能である。液柱形成装置は押出装置からの液体で液柱をつくり、平行平板を上下運動（引張、圧縮）や回転運動させる装置である。押出装置と同様に、駆動源にステッピング・モータを用いているので、自由な実験条件の設定・制御が可能である。また、地上実験を考慮して、水平調整機能も兼ね備えている。制御装置は押出装置と液柱形成装置それぞれのステッピング・モータを制御するものである。ワンボードマイクロコンピュータ（CPUはZ80）を6セット（今回は4セット）使用し、各ステッピング・モータが独立して動作可能な一括管理システムである。観察装置は液柱の形状を観察するためのもので、CCDカメラ、光源装置からなる。X、Y方向の $g$ の影響を調べるため、CCDカメラをX、Y方向それぞれに設置した（地上実験では1方向のみから観察した）。得られた映像はビデオテープに記録する。電源装置はそれぞれのユニットに電力を供給する装置である。

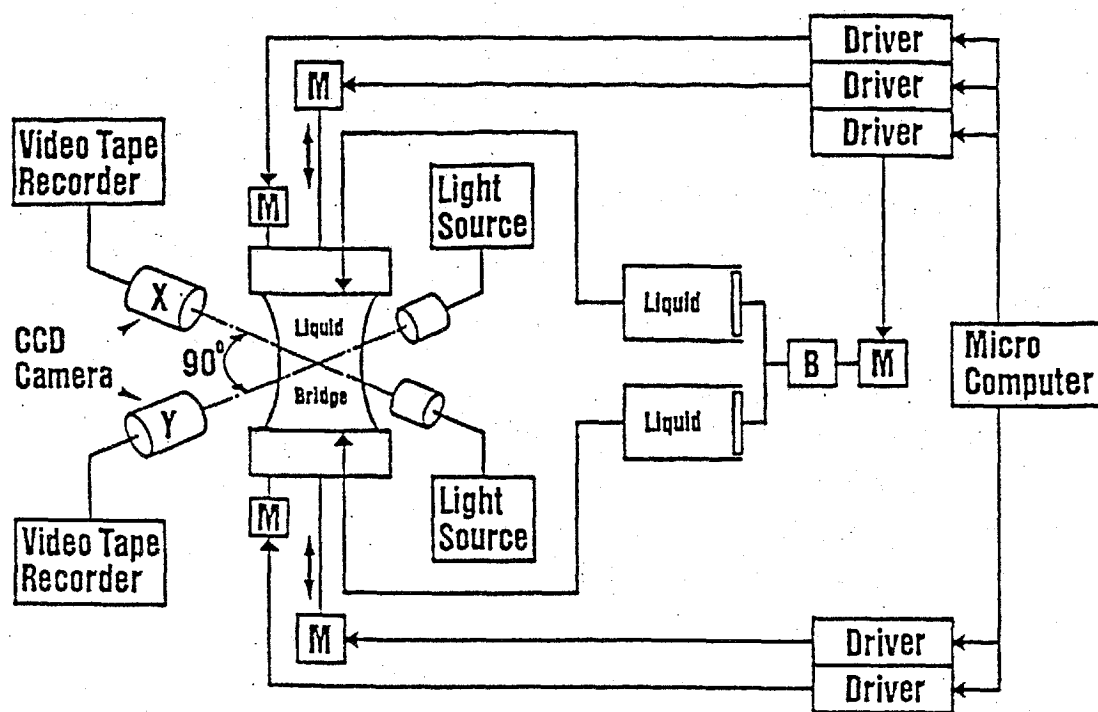


図2 リキッド・ブリッジ実験系統図

### 3. 実験方法

本実験では、航空機実験回数が少ないため、回転運動は行わず、上下運動のみとし、液柱形成後平行平板を引き離し、ある距離に到達した時点で平行平板を停止させた。

#### (1) 液体試料

本実験では、液体試料として市販のグリセリンを用いた。グリセリンは揮発、吸湿しにくく、洗浄が容易であることなど取扱が比較的容易なため、従来から濡れ挙動を調べる実験に多く用いられている<sup>1-6)</sup>。また、航空機実験ではエンジン等からくる機体振動が避けられないが、グリセリンは水と比べると粘性が大きいため、機体振動の影響が少ないのでこの点からも航空機実験に適している。

#### (2) 固体試料

固体試料は、グリセリンとの濡れ性を考慮し、濡れの悪い系として(a)テフロン、濡れのよい系として(b)純ニッケル(純度99.7%)更に、テフロンと純ニッケルの中間程度の系(接触角が $90^\circ$ 付近を示す)として(c)アクリルを用いた。固体試料の表面性状は固液界面の濡れ挙動に大きな影響を与えるので、試料表面は、耐水エメリー紙で研磨した後、粒径 $0.05\mu\text{m}$ のアルミナ研磨材でパフ研磨を行い鏡面に仕上げ、研磨表面は脱脂及びゴミの除去をするため、アセトン(アクリルは除く)、エチルアルコール浴中にて超音波洗浄を行った。

#### 4. 実験結果及び考察

$\mu g$ での実験結果の一例を図3及び図5に示す。図3は上部アクリル；下部アクリル、図5は上部テフロン；下部純ニッケルにおける実験結果を示している。なお、平行平板上下部それぞれの移動速度は $0.27\text{mm/sec}$ とした。また、引き離し開始後、約 $6\text{sec}$ で待機状態になるようにセットした。

図4、6、7、8に実験開始後の経過時間 (sec) と接触角 $\theta$  (degree) の形状変化を示す。 $\theta$ は上部、下部それぞれの左右接触角の平均値 $\theta_{\text{ave}}$ である。なお、地上実験の結果も同時に示した。

図4 (上部：アクリル、下部：アクリル) は $0\sim 18\text{sec}$ において $0.00\sim 0.04\text{g}$  (重力レベル) の範囲での結果を示す。経過時間 $6\text{sec}$ までは平行平板が引き離し中であり、その後、 $6\sim 18\text{sec}$ まではほぼ一定の液柱形状に保たれ、その時の上部及び下部双方の $\theta$ 値は、 $40\sim 53^\circ$ であった。図7より地上実験における $\theta$ 値は、上部は約 $45^\circ$ 、下部は約 $18^\circ$ を示した。航空機実験、地上実験とも実験中に液柱が分離することはなく、微小重力下において鉛直方向上下に同一の固体試料を用いて液柱を成長させた場合、固液界面はほぼ上下対称な液柱形状に成長することが分かった。このことから、もし引き離し距離を次第に大きくした場合、上下部固液界面の $\theta_{\text{ave}}$ 値もそれにつれて大きくなり、約 $90^\circ$ 近傍に落ち着き、それ以上引き離した場合、液柱は分離に至るものと考えられる。これは濡れの良いものになるほど分離させるまでの引き離し距離は大きくなるものと思われる。

図6 (上部：テフロン、下部：純ニッケル) での一定の液柱形状に保った時間は、実験開始後 $6\sim 20\text{sec}$ 間である。テフロン側固液界面の $\theta_{\text{ave}}$ 値は約 $90^\circ$ 、純ニッケル側固液界面の $\theta_{\text{ave}}$ 値は $20^\circ\sim 35^\circ$ となっている。これに対して同様の条件における地上実験結果 (図8) では、テフロン側で実験開始後 $6\text{sec}$ で液柱はすでに分離してしまっている。このことから微小重力下での濡れ挙動を調べる際、濡れ性の悪い固体試料ほど地上実験との差異が顕著に現われることが分かった。しかしいずれの実験も、固液界面の付着面積が変わることと、地上実験 ( $1\text{g}$ 環境下) の場合、分離点 (Breaking Point) が固液界面の界面張力と液体の表面張力とだけでなく、液柱に作用する重力 (液柱の重力) とのバランスに影響されるため、液柱の体積が一定でなく、厳密な意味での正確な評価であるとはいえない。

以下に図4～8の結果を基に、リキッド・ブリッジ法による濡れ挙動評価の問題点及び接触角の重力による影響について考察する。

##### ①引き離し過程における液柱形状と接触角の関係

引き離し開始直後において、接触角は図4と図7を比較すると、上下板とも地上実験の結果が低くなる。これに対して図5と図8では、濡れの悪いテフロンでは逆になる。このように引き離し直後において濡れの挙動は不安定であることが分かる。

また、引き離しは $6\text{sec}$ 前後で静止させるので、それまでの接触角の変化を調べると、重力の有無にかかわらず濡れの良い場合の方が短時間でほぼ安定した接触角に到達する傾向にあることが分かる。更に安定状態への到達時間は地上の方が長くなる傾向も認められる。これは液柱形状が濡れ及び重力の影響を受けていることを示しており、リキッド・ブリッジ法で濡れ挙動を評価する場合は、安定した測定のできる液柱のアスペクト比を濡れ性の良否から予め推定でき、静的な場合の実験に必要な時間も決定できること

を示している。このことは航空機の短い $\mu g$ 時間で実験を行うためには重要なことである。また $\mu g$ において短時間で安定する理由は、液柱形状への濡れの影響が重力項がない分だけ早く現われるためであると考えられる。

### ②重力による影響

濡れの良くない場合(図4、7)、 $\mu g$ での接触角は、地上実験の上下接触角の間に位置し、上板の値に近くなる。これに対し図5、8に示す濡れの良い純ニッケルでは、地上と $\mu g$ とでほぼ同程度の接触角を示すが、濡れの悪いテフロンでは地上より $\mu g$ の場合の方が接触角が大きくなった。このことから、接触角への重力の影響は濡れ性の良い場合には小さく、濡れ性が悪くなるにつれて大きくなる傾向にあることが分かる。断定はできないが、濡れ性の悪い材料の場合には接触角に与える重力の影響を考慮しなければならないことを本実験結果は示唆している。

### ③評価法の問題

濡れの良くない材料どうしの場合、安定した接触角を測定できるまでの時間が長いので、引き離し速度の安定性への影響を考慮した実験条件の決定が必要となる。また本実験では影響が観察できなかったが、流量によっても安定領域に到達する時間が変化するものと考えられるので、これについても検討する必要がある。他にも固体表面の性状、雰囲気等も濡れ挙動評価には大きな因子となる。今後はこの方面からの検討も必要である。その他接触角の測定も、画像処理解析等、更に詳細な検討を要する。液体試料としては、グリセリンは粘性が大きいため液量(液体の体積)の制御が難しいが、モデル物質と考えた場合機体振動を伴う航空機実験ではグリセリンでも妥当な実験の実施が可能である。

## 5. 結言

本実験より以下のことが結言される。

- (1)安定した接触角に到達するまでの時間は、平行平板の引き離し距離により推定できる。
- (2) $\mu g$ での接触角は、地上実験での上下板での接触角の中間の値に位置し、 $\pi/4$ 方向の値に近い値となった。
- (3)微小重力下での液柱の形状挙動は、濡れ性が悪いものほど重力の効果が現われる。

### <謝辞>

本実験を実施するにあたり、貴重なご助言を頂いた長岡科学技術大学工学部小島陽教授に深謝いたします。

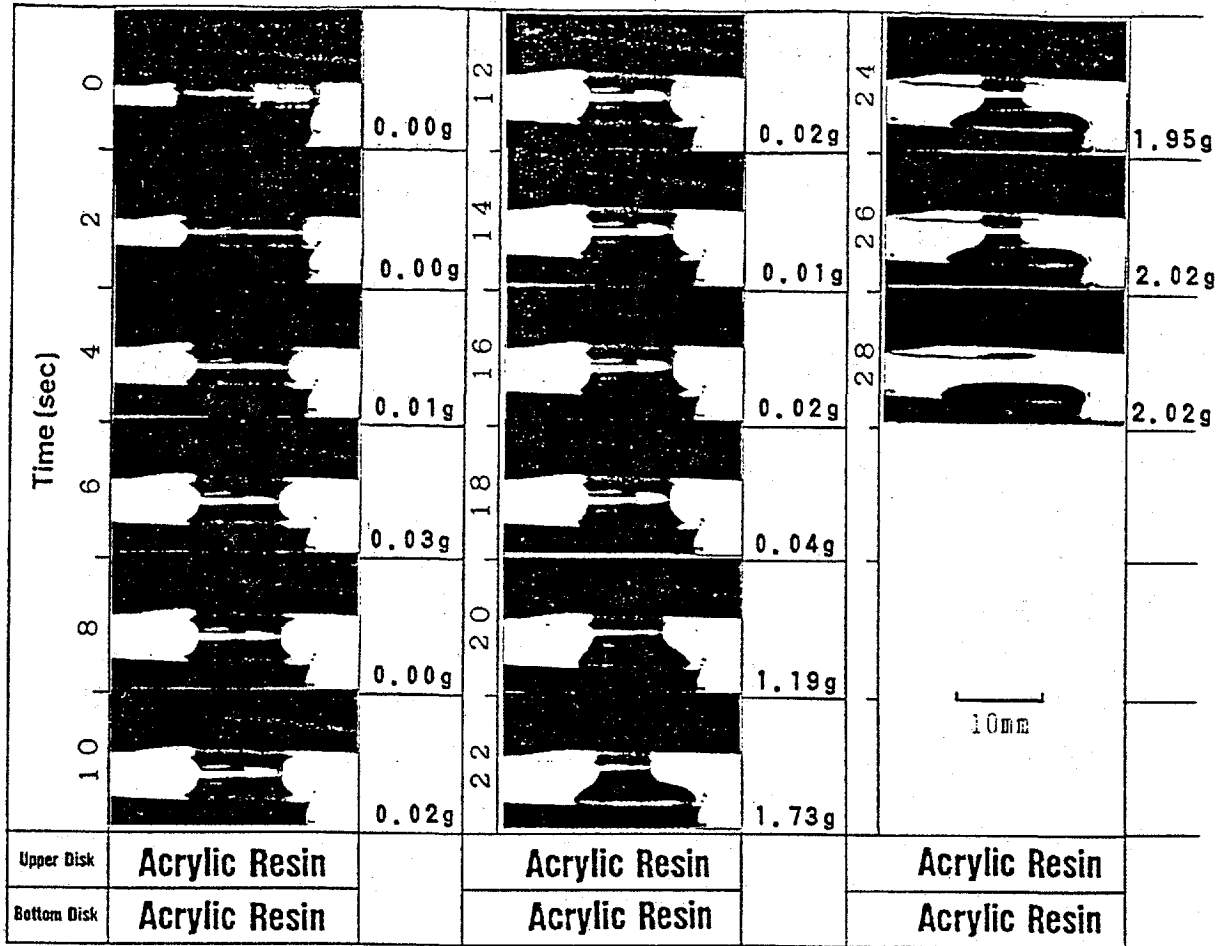


図3. 液柱の形状変化(アクリル&アクリル)

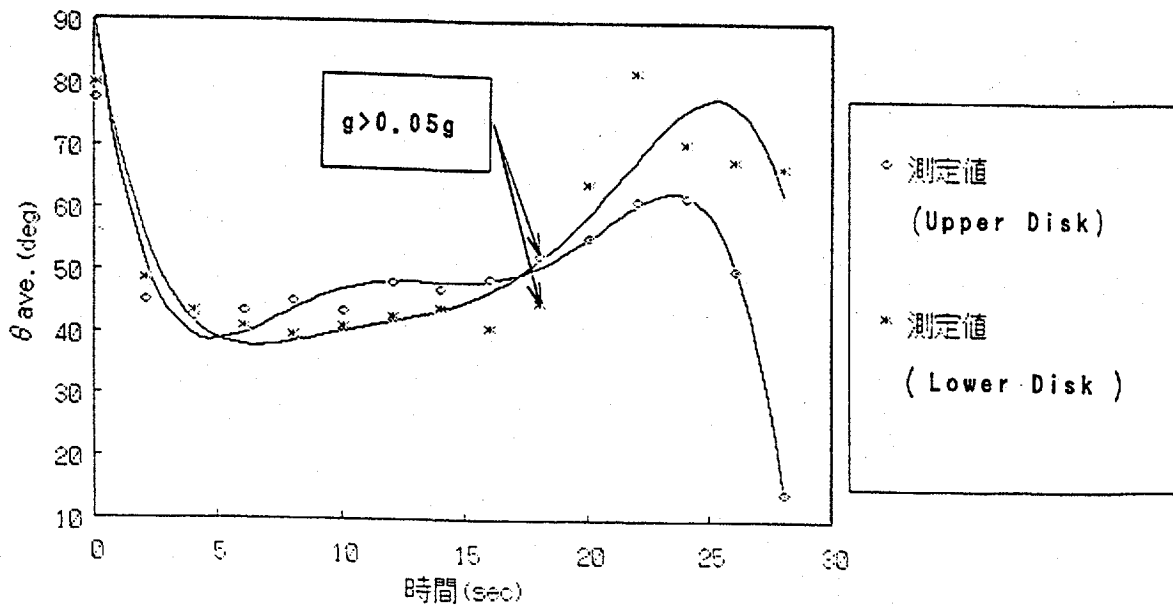


図4. 経過時間と接触角の関係(アクリル&アクリル)

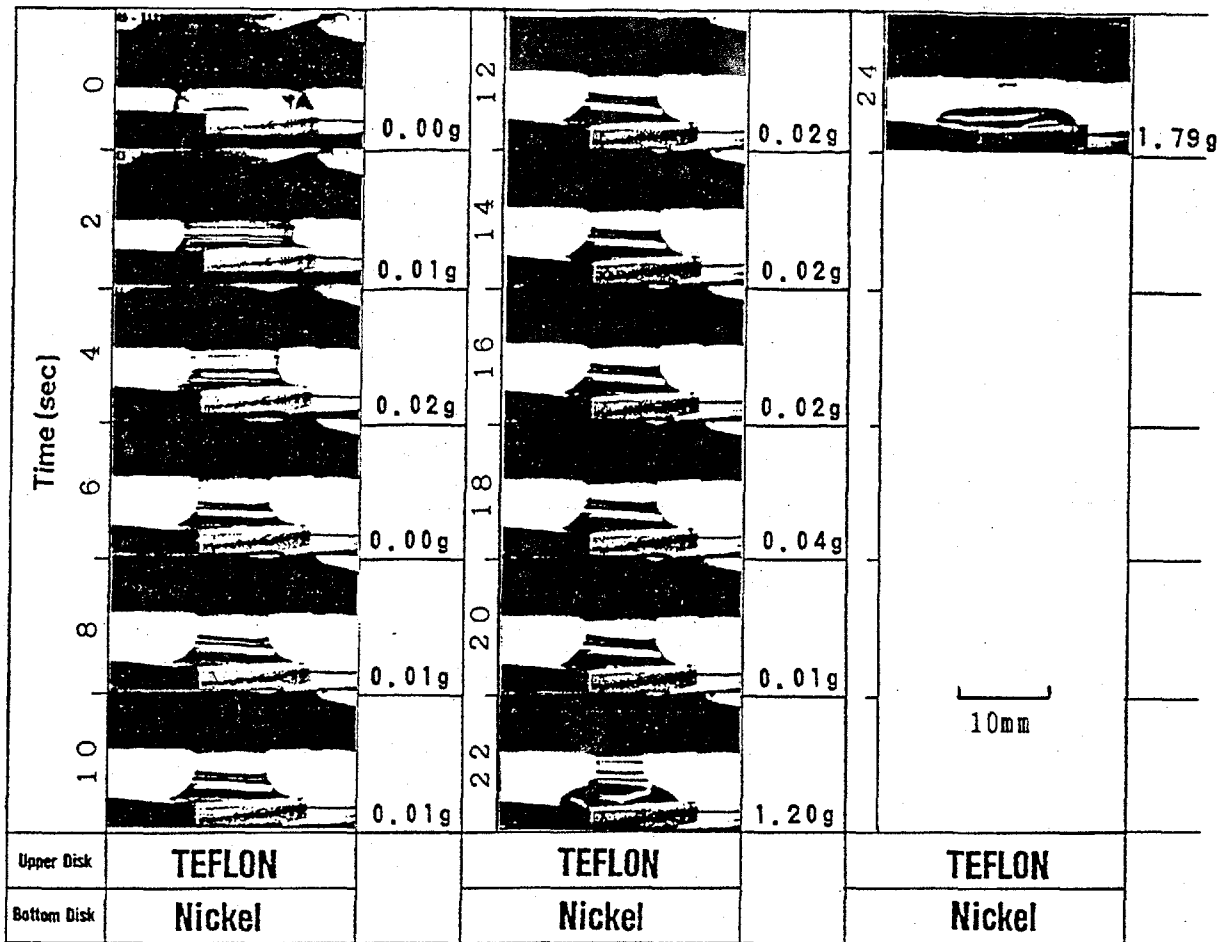


図5. 液柱の形状変化(テフロン&Ni)

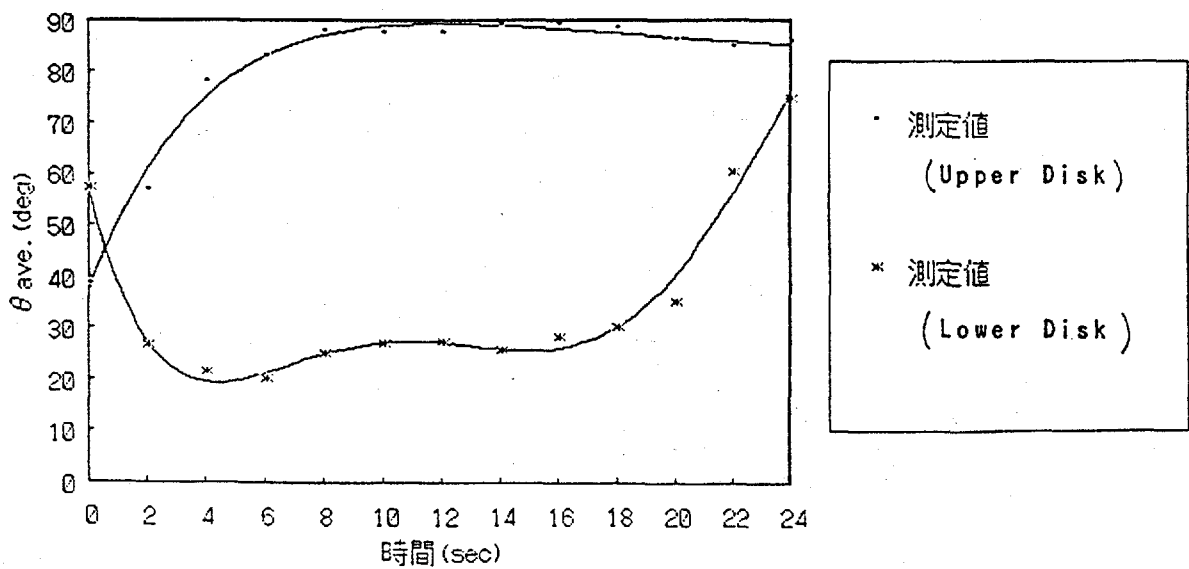


図6. 経過時間と接触角の関係(テフロン&Ni)

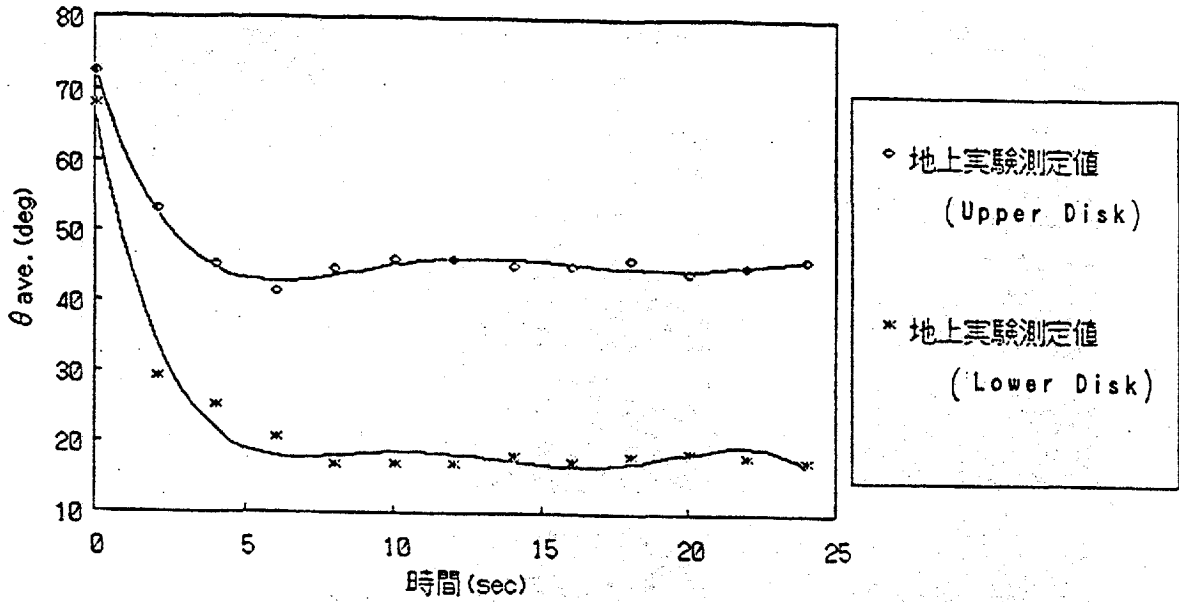


図 7. 経過時間と接触角の関係 (アクリル&アクリル)

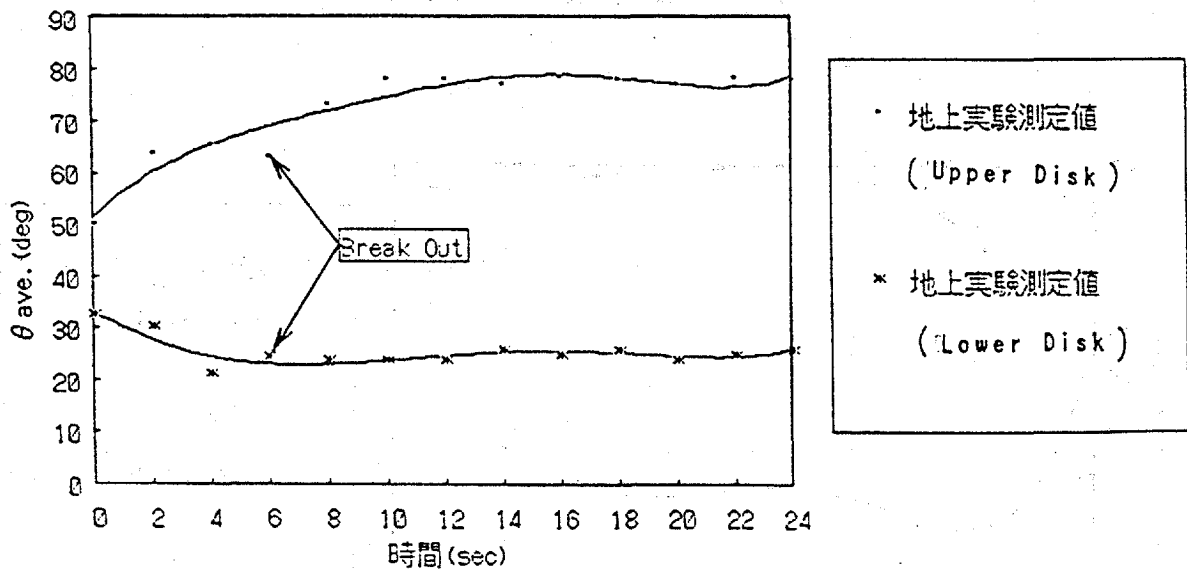


図 8. 経過時間と接触角の関係 (FeO&Ni)



<参考文献>

- 1) J. MESEGUER: J. Crystal Growth 62(1983)577
- 2) ANGEL SANZ and ISIDORO MARTINEZ: J. Colloid Interface Sci. 93(1983)235
- 3) D. RIVAS and J. MESEGUER: J. Fluid Mech. 138(1984)417
- 4) ANGEL SANZ: J. Fluid Mech. 156(1985)101
- 5) JOSE MESEGUER and ANGEL SANZ: J. Fluid Mech. 138(1985)83
- 6) 福沢、岡田、岩里、小島、神吉、柳川、御所園、上田：第7回宇宙利用シンポジウム予稿集(1990年)90-95