

微小重力下における物性値の測定

宇宙開発事業団
航空宇宙技術研究所
(財)宇宙環境利用推進センター
日揮㈱

藤森義典、清水盛生、楠瀬智宏、木村秀夫
東久雄、松本甲太郎、吉原正一
大山勝、井村貞治、石倉精三
牧野正彦、末続靖、河野漢彦、山田一晴

1. 緒言

微小重力環境下では、熱対流等が大幅に低減し、液体表面の表面張力の差によって発生するマランゴニ対流が顕著となり、宇宙における低欠陥結晶、均一組成合金、均一混合複合材料等の創製に影響を与えることがある。このためこの現象の解明・評価は重要である。

マランゴニ対流の大きさを予め評価する方法として、マランゴニ数の検討がある。マランゴニ数は表面張力、粘性係数、熱拡散係数および温度の関数であるが従来表面張力に関するデータが不足しておりマランゴニ数検討の障害となっている。

表面張力を測定する方法には種々あるが、液滴を浮遊させた状態で液滴の固有振動数を測定し表面張力を求める方法は、非接触であるため不純物の混入がなく精度が高いと考えられている。¹⁾

液滴が浮遊状態で自由振動している時の固有振動数は液体の表面張力との間に以下のような相関関係がある。

$$\gamma = (3/8) \pi m \omega^2$$

ここで γ ：表面張力、 m ：液滴の質量、 ω ：固有振動数。

地上での浮遊では、対流の影響等により精度の良い測定は不可能で微小重力環境での測定が望まれる。

また地上での測定は、電磁浮遊による方法が一般的であるが、試料が導電体である必要があり、かつ電磁力による攪乱が大きいなどの問題点がある。さらに装置自体も大がかりなものであるため微小重力環境を用いた実験には適用困難である。電磁浮遊に比較して音響浮遊は、種々の試料を比較的簡単に浮遊させることが可能である。

そこで今回航空機の放物飛行によってつくり出された微小重力環境で球形音響浮遊装置を用いて、液滴の浮遊状態を作り出す実験を行い、表面張力を非接触で測定する手法・問題点について検討を行なった。

最終的には宇宙ステーションにおける表面張力測定が望まれる。

今回の航空機実験ではモデル物質を用いて以下の事項について確認を行うことを主目的とした。

- (1) 液滴の浮遊
- (2) 液滴の励振

2. 実験方法

実験は2つのラックA、Bを航空機に搭載して行なった。図1に実験装置搭載図を示す。

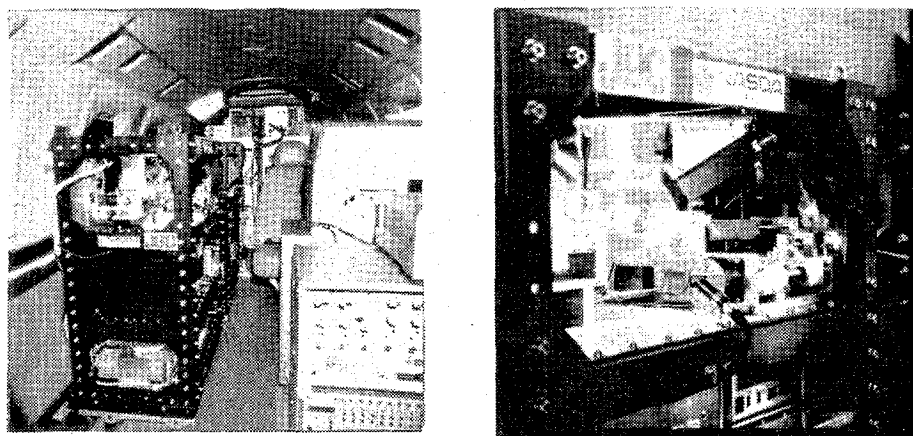
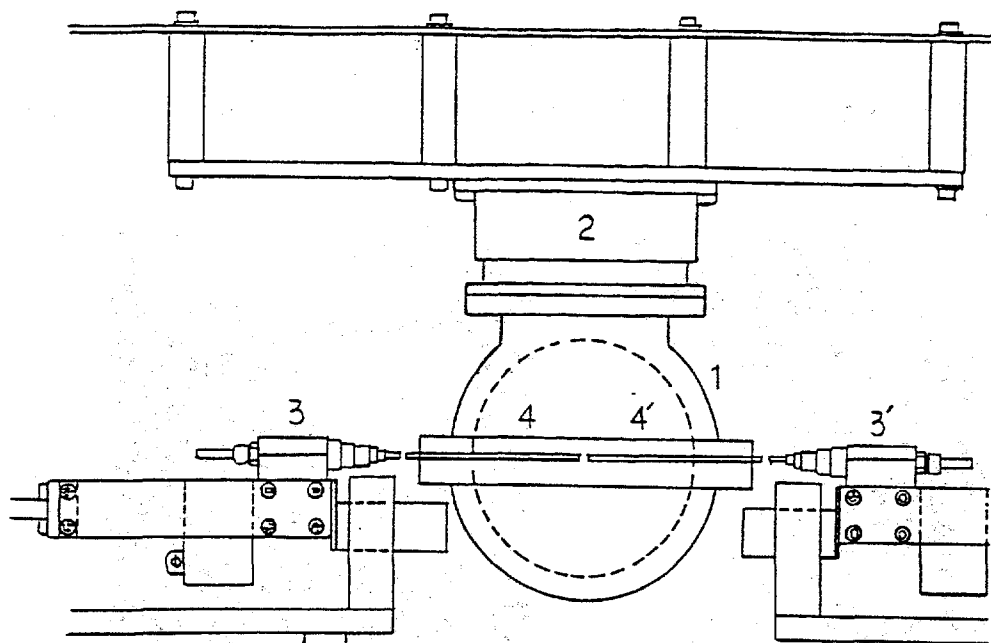


図1 実験装置搭載図

音響浮遊装置内の音場内に音波の波長に比べて十分小さな物体をおくと、その物体は粒子速度の節から腹（音圧の腹から節）に向かう音響放射圧と呼ばれる圧力を受ける。この力はきわめて微弱であるが、微小重力環境下では各種の材料を保持するのに十分な大きさを有する。図2に本実験で用いた音響浮遊装置を示す。また以下に実験システムの特徴を示す。

- (1) 球形音響浮遊装置は $\phi 100\text{mm}$ のアクリル球上部にスピーカーを有していて周波数発振器により球内に所定の音圧を発生させる。
- (2) 複針式の液滴注入装置は、注入量、注入時間、遅延時間が設定できる。これにより液滴の注入を行い、アクリル球内で液滴の浮遊、保持を行う。図3に実験システムを示す。
- (3) 液滴の外径は球の両側に配したレーザ式外径測定器により測定する。また画像解析による外径測定についても試みる。
- (4) パーソナルコンピュータによりこれらの装置を制御し、条件設定、液滴の注入等はすべて自動で行う。実験手順を図4に示す。



- 1. アクリル球
- 2. スピーカ
- 3,3' 液滴注入装置
- 4,4' 注入針

図2 球形音響浮遊装置

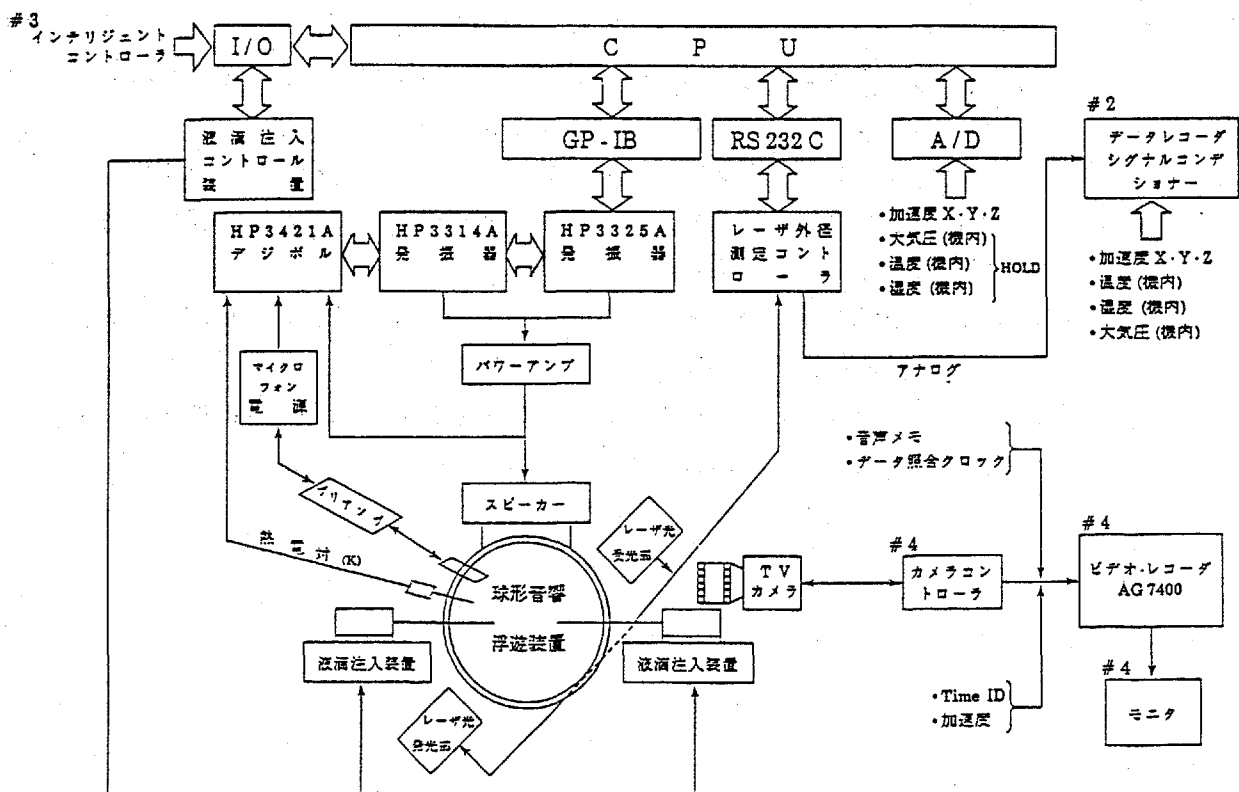


図3 実験システム

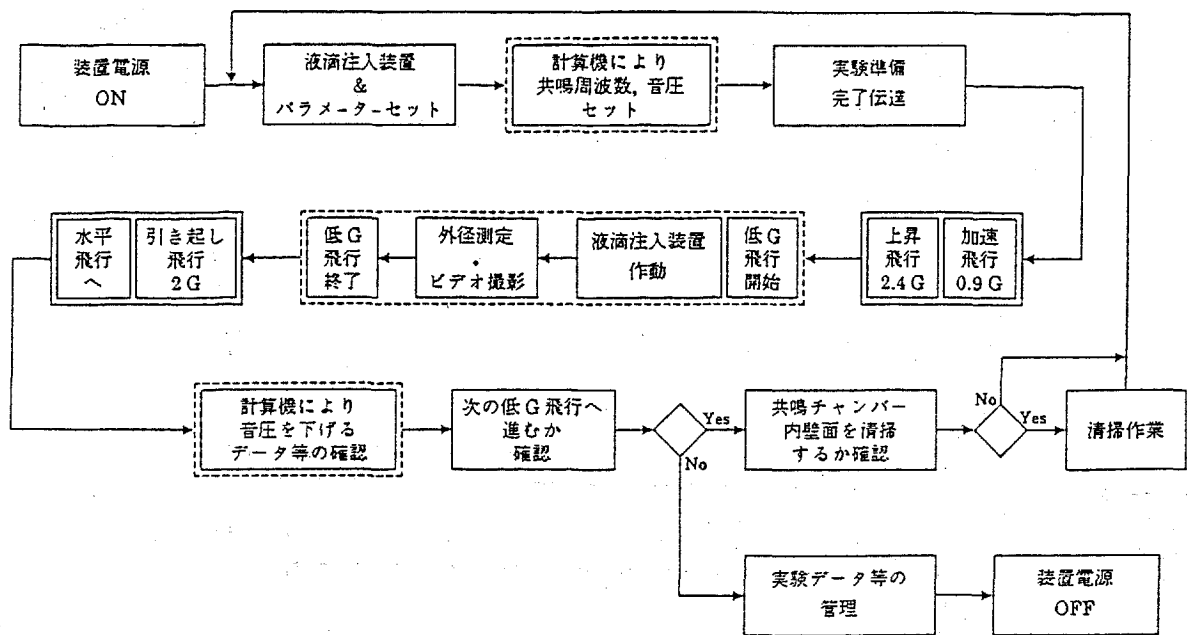


図4 実験手順

予め行った予備実験からモデル物質、注入針を以下のように決定した。

- (1) モデル物質としてグリセリンを用いる。
- (2) 注入針としてテフロンコーティングしたステンレス製のものを用いる。

今回の航空機実験の実験条件を表1に示す。

また液滴の注入から切り離しまでの過程は図5に示すタイムスケジュールで行なった。

ここには機体上下方向の重力レベル (G_z) の模式図を同時に示してある。5秒間の待機時間を設けたのは μg エントリー直後は若干の重力変動があるためである。

表1 実験条件

注入装置	注入針	ステンレス製 先端；テフロンコーティング 内径；1.5mm
	針間隔	4~6mm
	注入速度	0.05~0.5cc/sec
	注入量	0.1~0.3cc
液体試料		グリセリン(98.5wt%)
音 圧		148~155dB

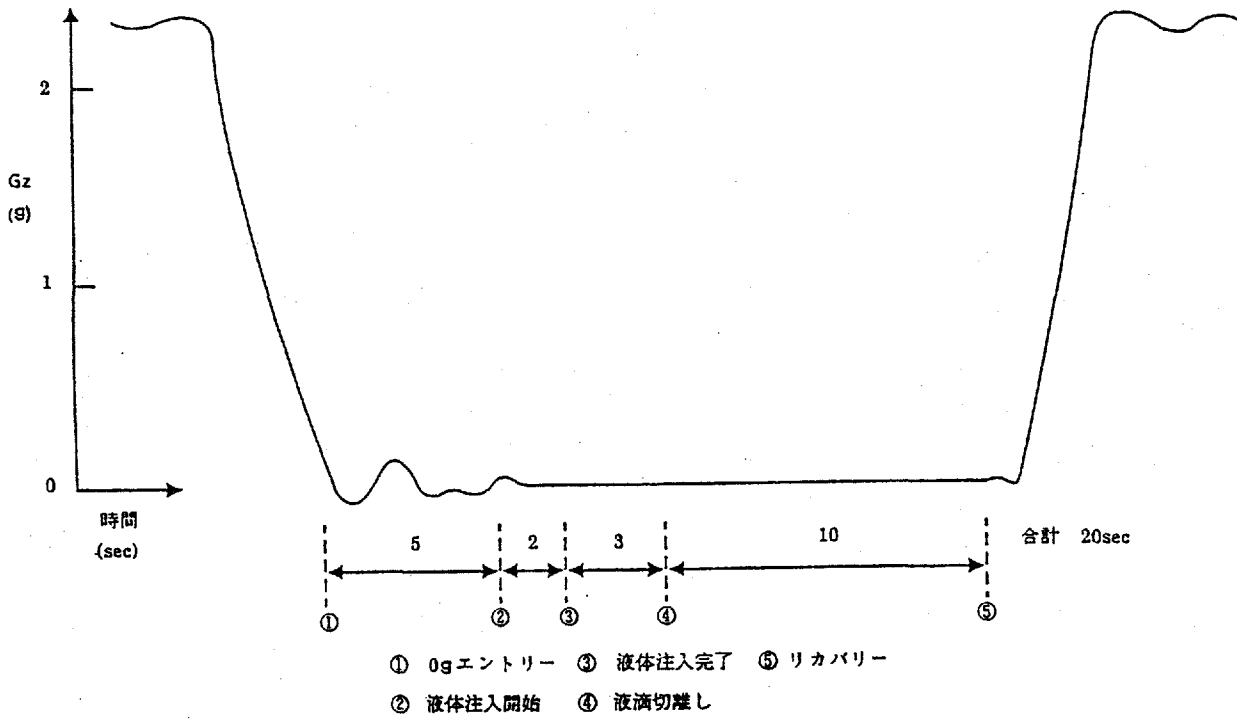


図5 実験概要

3. 実験結果および考察

実験は4日間にわたり、計30回の放物飛行を行った。図6にGz方向の典型的な航空機実験重力環境経時変化を示す。時間軸は任意の時間からとっている。

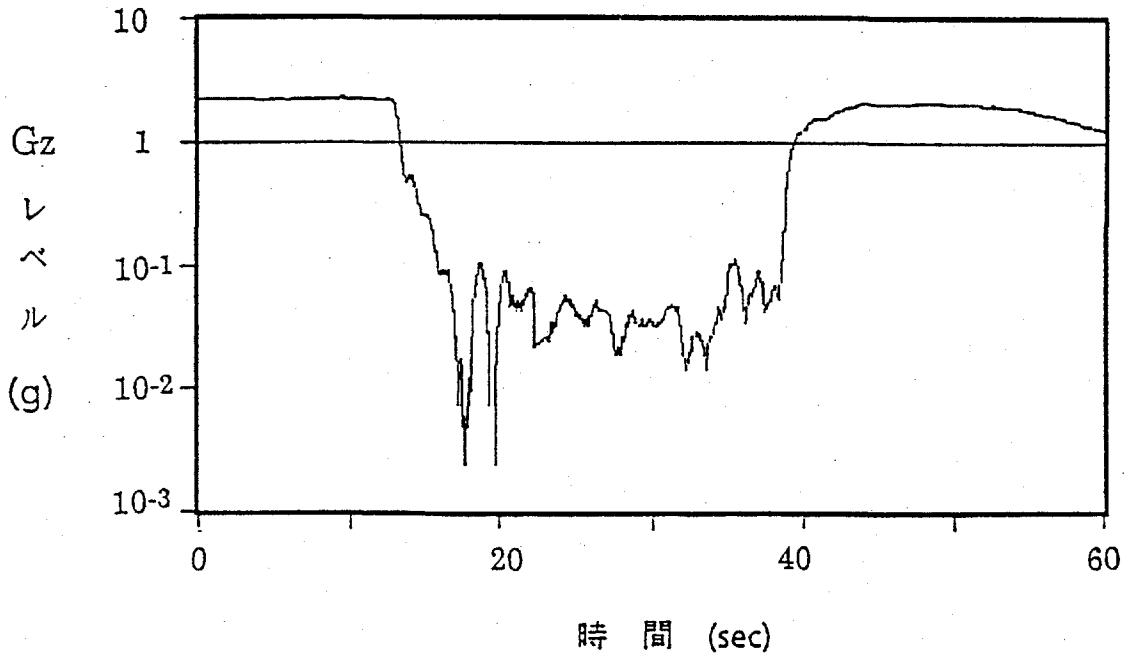


図6 重力環境 (Gzレベル) 経時変化

Gzは最も高いレベルであるが0.05以下のレベルを約20秒間維持していた。またGx(進行方向)、Gy(左右方向)は全体を通じ 10^{-2} 程度でGzよりもよいレベルである。

図7には以下に示す液滴の形成から浮遊までの代表的な挙動を示す。

(1) 液滴の形成

液滴の形成はほとんどの実験で成功した。液滴は2本の針の間で所定の大きさで形成され分裂することはなかった。針間隔は4~6mmの範囲では液滴形成には影響を及ぼさなかった。また、液滴の形成には以下の事項が重要であることがわかった。

1. 複針のセンタリングを精密にとること
2. 液体試料が針に濡れないこと
3. 音圧レベル(SPL)が高すぎないこと

注入速度、注入量については今回の実験範囲ではそれぞれ0.05cc/sec 0.1ccが適していた。今回の実験では音圧設定値が155dBの場合、液滴が扁平となりまた激しく振動して不安定な状態となった。155dBでは液滴形成が困難であると推定できる。

(2) 液滴の複針からの切り離し

液滴が形成された場合の約7割のケースで液滴の切り離しに成功した。切り離しが不十分な場合があったが理由は次の2点であった。

1. 複針のいずれかの先端に液送出前に液がにじみでて、針の下部に残留するためににじみでた針側に液滴が引っ張られてしまう。
2. 針から液を拭き取る際にコーティングが部分的にはがれその箇所に液が付着するようになってしまう。この場合も液が付着した針側に液滴が引っ張られてしまう。

(3) 液滴の浮遊、チャンバー中心への位置制御、励振および外径測定

液滴が形成された実験のうち約7割のケースでさらに液滴の浮遊が数秒観察された。この場合の音圧152~153dBであった。浮遊した液滴は切り離し直後は中心にあるがすぐに動き出し位置制御は困難であった。その結果全ての場合で液滴の上下、左右動が大きく微小重力環境継続中にアクリル球の壁面に接触した。

このためレーザ外径測定器あるいはビデオ画像処理による液滴外径の経時変化データを採取することはできず、固有振動数の測定には至らなかった。

また液滴の励振は観察できなかった。

表2に各回の実験の結果を以下の5点に対する成否に着目しまとめたものを示す。

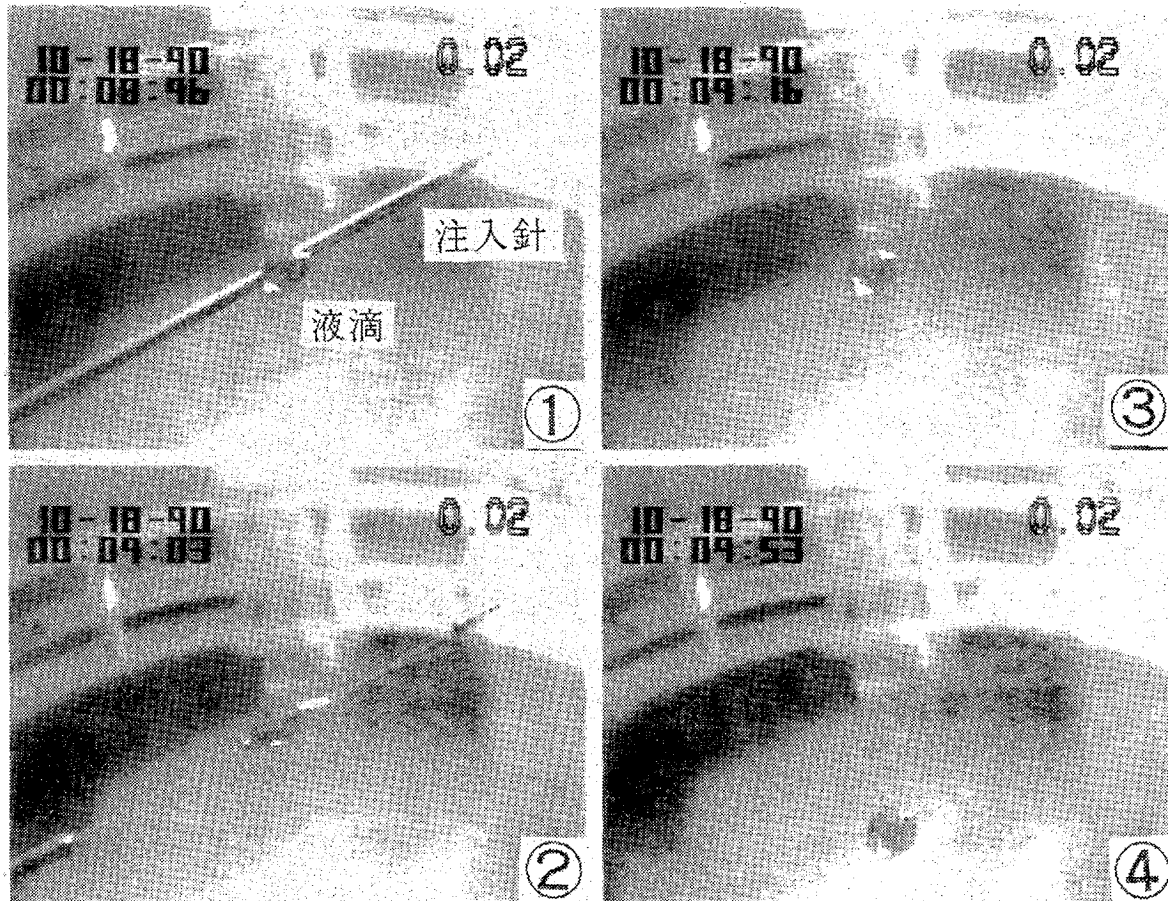


図7 液滴の挙動

- ① 液滴の針間での形成 ③ 液滴の浮遊 (切り離し直後)
 ② 液滴の切り離し ④ 同上 (0.37sec後)

表2 実験結果

		回数
全実験		30回
各項目の成功回数	(1) 液滴の針間での形成	25回
	(2) 液滴の複針からの切り離し	17回
	(3) 液滴の浮遊	12回
	(4) 液滴のチャンバー中心への位置制御	0回
	(5) 液滴の励振及び外径測定	0回

4. まとめ

本実験により明らかになったことを以下に示す。

- (1) 複針の液滴注入装置により液滴の切り離しが可能であった。
- (2) 球形音響浮遊装置により液滴の浮遊が可能であった。浮遊を助けるための音圧レベルの範囲は152～153dBが適していることがわかった。しかし液滴の位置保持は困難で浮遊法の再検討が必要である。

今後は浮遊法の検討を行い外径測定、ビデオ画像処理により表面張力を測定する場合の問題点を明らかにし、解決を試みる予定である。

参考文献

- 1) "The Temperature Coefficient of the Surface Tension of Pure Liquid Metals" K.Nogi, K.Ogino, A.Mclean, and W.A.Miller:
Metall. Trans. B, 1986, vol.17B, pp163-169