

微小重力環境下における  
物性値の測定 (第2報)

MEASURING SURFACE TENSION  
IN MICROGRAVITY ENVIRONMENT (No. 2)

清水盛生<sup>(1)</sup>      楠瀬智宏<sup>(1)</sup>      東 久雄<sup>(2)</sup>      松本甲太郎<sup>(2)</sup>  
Morio SHIMIZU   Tomohiro KUSUNOSE   Hisao AZUMA   Kohtarou MATUMOTO  
上村平八郎<sup>(2)</sup>      吉原正一<sup>(2)</sup>      井村貞治<sup>(3)</sup>  
Heihachirou KAMIMURA   Shouichi YOSHIHARA   Sadaji IMURA  
末続 靖<sup>(4)</sup>      熊谷 司<sup>(4)</sup>      山田一晴<sup>(4)</sup>      林 健一郎<sup>(4)</sup>  
Yasushi SUETSUGU   Tsukasa KUMAGAI   Kazuharu YAMADA   Kenichiro HAYASHI

(1) 宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

(2) 航空宇宙技術研究所

National Aerospace Laboratory

(3) 宇宙環境利用推進センター

Japan Space Utilization Promotion Center

(4) 日揮株式会社

JGC Corporation

ABSTRACT

As the Marangoni convection is governed by a difference in the surface tension, especially in microgravity environment, it is very important to examine the phenomenon of such a convection and evaluate its effects on alloys with high-grade and homogeneous composition, when carrying out experiments on the production of alloys. Therefore, We conducted a microgravity experiment in a parabolic flight, in order to develop technology for measuring the surface tension (as an important physical property value in connection with the Marangoni convection) in the microgravity environment. In the experiment, we levitated a droplet with in spherical acoustic levitation equipment and adopt the method of calculating the surface tension based on the proper frequency which is obtained by measuring the vibration of such a liquid droplet. As a result of this experiment, it was possible to retain the position of the droplet and to measure the variation in the diameter of this levitating droplet using a measuring instrument utilizing

laser beam, by combining the acoustic levitation equipment with the help of a supporting wire. In the experiment, we were unable to measure a highly reliable proper frequency or to confirm the effectiveness of this measuring technology. However, we have been encourage regarding the possibility of measuring the surface tension using the measuring technology, as a result of selecting a proper experimental liquid and improving the outside diameter measuring instrument.

## 1. 緒言

宇宙ステーション等の微小重力環境下では、熱対流等が大幅に減少することから、液体の表面張力の差に起因するマランゴニ対流が顕著になり、宇宙における低欠陥結晶、均一組成合金、均一複合材料等の製造に影響を及ぼすことが考えられる。

マランゴニ対流は、表面張力を駆動力として起こる現象であることから、表面張力はマランゴニ対流に関連する重要な物性値となっている。微小重力下で表面張力を測定する方法には種々のものが考えられるが<sup>(1)</sup>、液滴の表面張力はその固有振動数と相関関係を有することを利用して、液滴を浮遊させた状態で固有振動数を測定することにより、短時間で表面張力を精度良く求めることが可能と考えられる。

そこで本実験では、航空機の放物飛行により得られる微小重力環境下で球形音響浮遊装置を用いて液滴を浮遊・振動させることにより、液滴の表面張力を求める測定技術の開発を目的とした。

航空機実験は、平成2年9・10月期に航空機実験(その1)<sup>(2)</sup>を実施し、そこで摘出された問題点および技術的課題に基づき測定手法および実験装置に改良を施し、平成3年5・6月期に航空機実験(その2)を実施した。本稿では、この航空機実験(その2)について記述する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験項目

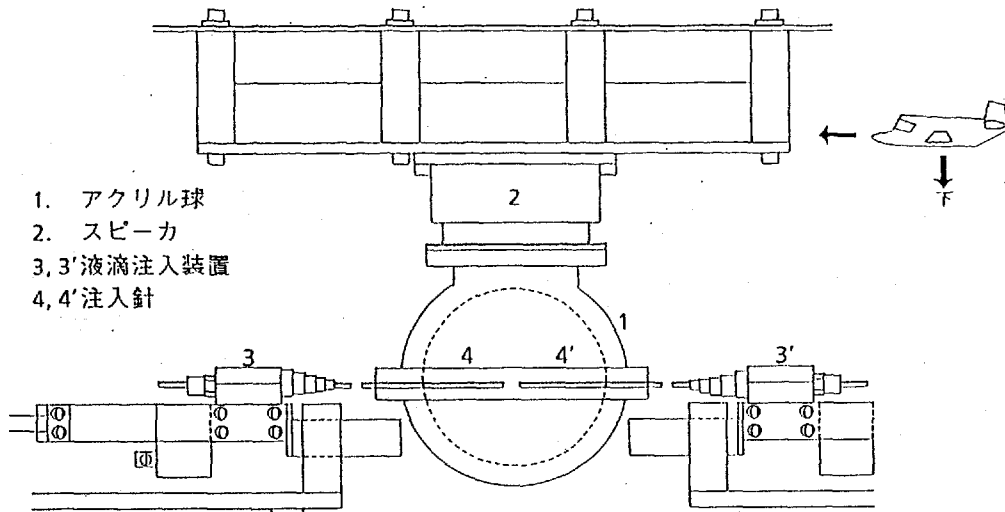
航空機実験では、球形音響浮遊装置内に注入した液滴を浮遊させた状態で液滴の振動状態を測定し、固有振動数を求めることにより表面張力を算出する。測定技術の開発のため、モデル物質としてグリセリン及びシリコンオイルを用いて以下の項目について確認することを目的とした。

- ①液滴の浮遊及び位置保持
- ②液滴の励振
- ③固有振動数の測定
- ④表面張力の算出

### 2.2 実験装置

本実験では、航空機の放物飛行によって作り出された微小重力環境下で、航空機の飛行方向に設置された複針式の液滴注入装置により、球形音響浮遊装置の亚克力球チャンバー内に実験溶液を注入し、複針をチャンバー内から素早く引き抜き、球形音響浮遊装置内

に発生する音圧を用いて液滴の浮遊及び位置保持を行う。そして、レーザ式外径測定器によって非接触で液滴の外径変化を測定する。なお、航空機実験（その1）の結果から航空機による微小重力環境下では、音圧のみによる液滴の位置保持が困難な傾向にあったことから、本実験では液滴が形成する部分にサポートワイヤーを張り、これに液滴を付着させて位置保持を行う方法を用いた。図1に液滴注入装置及び球形音響浮遊装置を示し、サポートワイヤー及びレーザ式外径測定器の設置位置を図2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1 液滴注入装置及び音響浮遊装置  
Fig.1 Liquid droplet generator and acoustic levitation device

レーザ式外径測定器

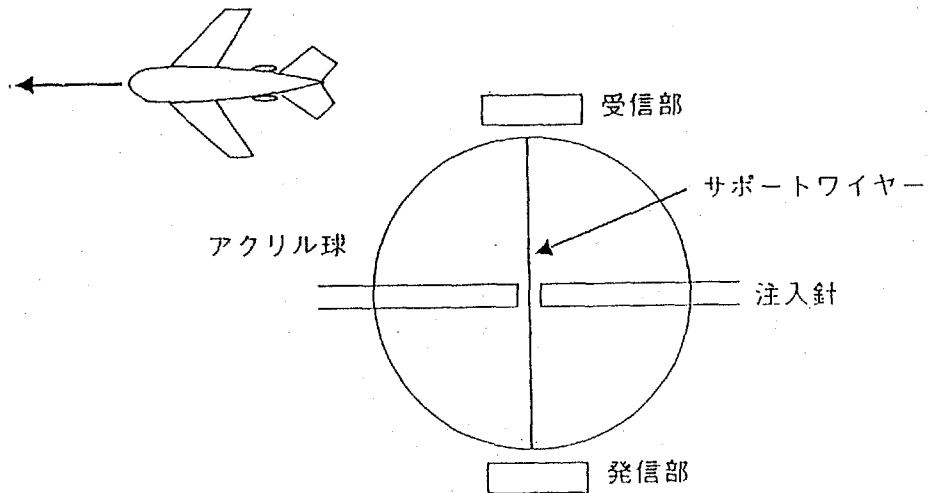


図2 サポートワイヤー及びレーザ式外形測定器の設置位置  
Fig.2 Alignment of the supporting wire and the diameter measuring instrument utilizing laser beam

また、実験機器はパーソナルコンピュータにより制御を行った。これらの実験使用装置の構成を図3に示す。本実験では、液滴外径値、音圧、実験装置の重力環境データを実験装置のパーソナルコンピュータで取得し、それらに加えてチャンバー内温度及び航空機内湿度、圧力、機体重力環境データを航空機支援システムのデータログで取得した。さらにCCDカメラによる画像データも取得した。データの種類は表1に示す通りである。

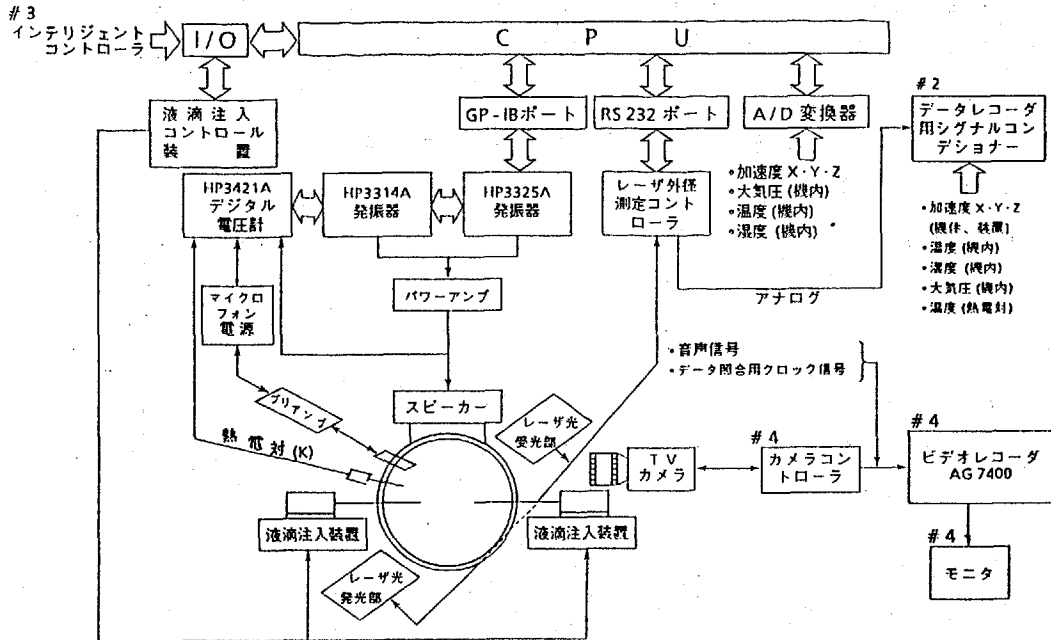


図3 実験使用装置の構成  
Fig.3 Experimental block diagram

表1 取得データ  
Table.1 Measuring data

収録装置	データ	測定範囲レンジ	単位	サンプリング時間
パソコン	機体 G	-1.2 ~ 1.2	G	1/20 ~ 1/60 sec <sup>-1</sup>
	音圧	0 ~ 165	dB	
	外径値	0 ~ 30	mm	
データログ	装置 G	-1.2 ~ 1.2	G	1/100 sec
	機体 G	-0.1 ~ 0.1	G	
	外径	0 ~ 10	mm	
	機内湿度	0 ~ 100	%	
	機内温度	0 ~ 50	℃	
	アクリル球温度	0 ~ 50	℃	
機内気圧	0 ~ 1	atm		
カメラ	映像	—	—	1/1000 sec

### 2.3 実験手順

実験手順は以下の通りである。

- ① 離陸後オペレータは実験準備を開始し、実験空域への到達約5分前に実験準備を完了する。
- ② 必要なパラメータを設定した後、実験装置は自動制御状態となり、音響浮遊装置の音圧が設定値に達した時点で準備を完了し、オペレータはパイロットへ完了報告する。
- ③ 実験準備完了約2分後、放物飛行を開始する。実験装置は重力変化に応じて自動的に液滴の注入及び計測を行う。
- ④ 放物飛行終了後、実験装置の亚克力球部分の清掃を行う。
- ⑤ 次の実験準備を開始する。

これらの実験手順のフローを図4に示す。

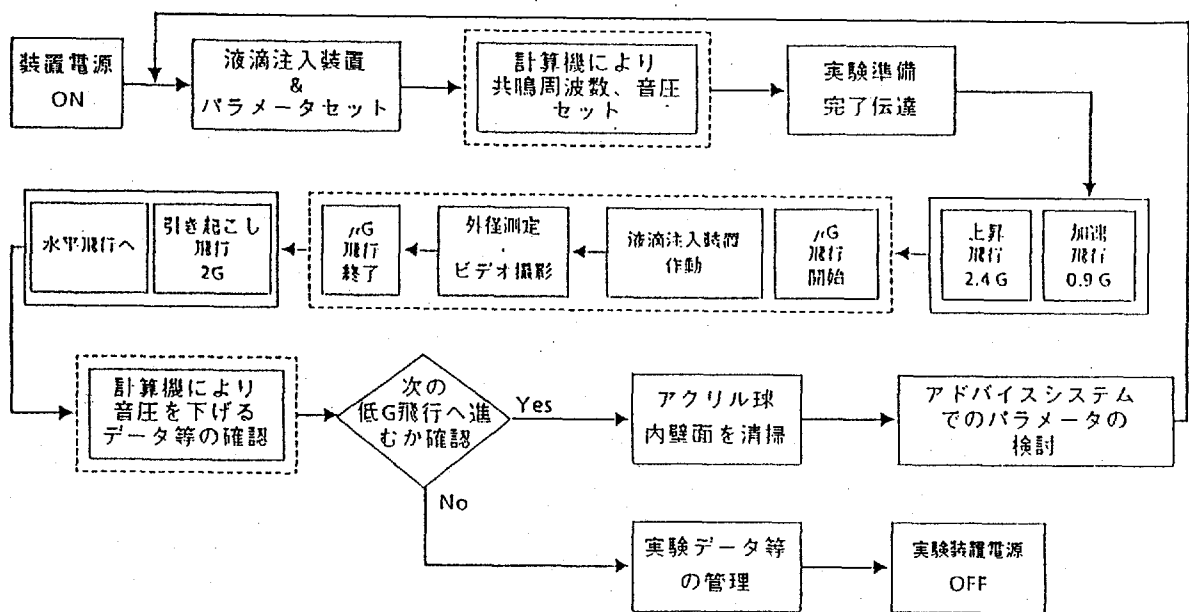


図4 実験手順

Fig.4 Experimental procedure

### 2.4 実験条件

本実験では、微小重力環境下での実験終了から次の実験開始までに、NALが製作したアドバイスシステムを起用することにした。これはパーソナルコンピュータに実験結果を入力すると、次の実験パラメータに対するアドバイスが出力されるシステムである。

なお、航空機実験での音響浮遊実験に当たっては、実験試料であるグリセリン及びシリコンオイルの最大限界音圧を設定するため予備実験を行った。実験条件を表2にまとめるとともに、液滴の注入から切り離しまでのタイムスケジュールを図5に示す。

表2 実験条件

Table.2 Condition of parameter for the experiment

注入装置	注入針	ステンレス製 テフロンコーティング 内径:0.8mm 外径:1.5mm
	針間隔	2~6mm
	液滴体積	0.1~0.4cc
液体試料		グリセリン
音圧		148~155dB
周波数(音響浮遊)		2290~2320Hz
周波数(液滴励振)		-

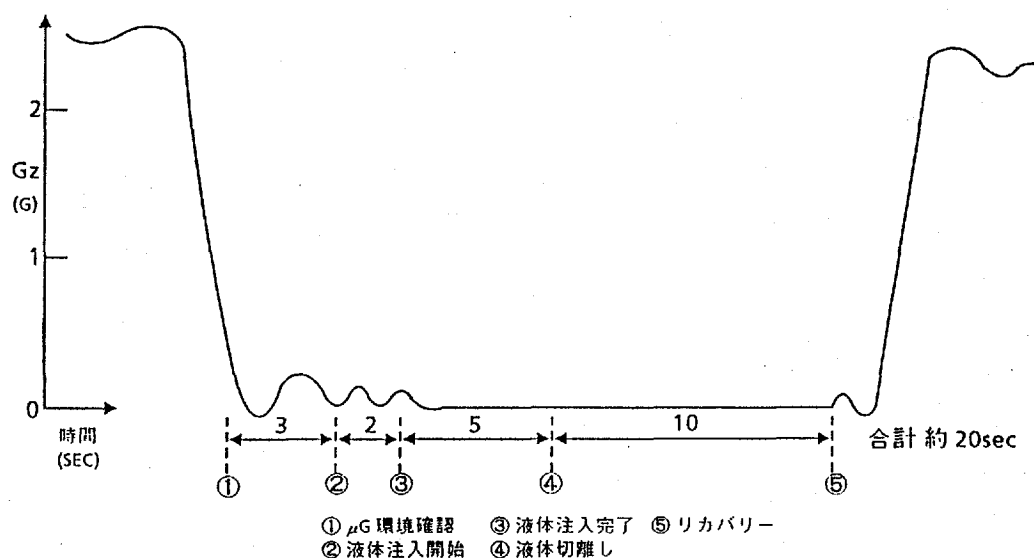


図5 実験タイムスケジュール

Fig.5 Microgravity flight experimentation sequence

### 3. 実験結果及び考察

航空機実験(その2)の放物飛行は6日間行い、計46回実施した。実験結果及び考察を以下にまとめる。

#### 3.1 機体重力と実験装置重力

本実験では、実験装置搭載ラックの上部に重力センサを取り付け、実験装置における重力変化と航空機の重力変化との比較を行った。航空機の機体重力センサー及び実験装置の重力センサーによる代表的な測定結果を図6、図7に示す。図7の実験装置GXデータには、注入針引き抜き時の衝撃によるピークが表れている。機体重力環境データも装置重力環境データも同様な傾向を示すが、両者で若干のバイアスが見られる。微小重力環境下でのバイアス値は、約0.01g、微小重力環境下以外では約0.02gとなっている。

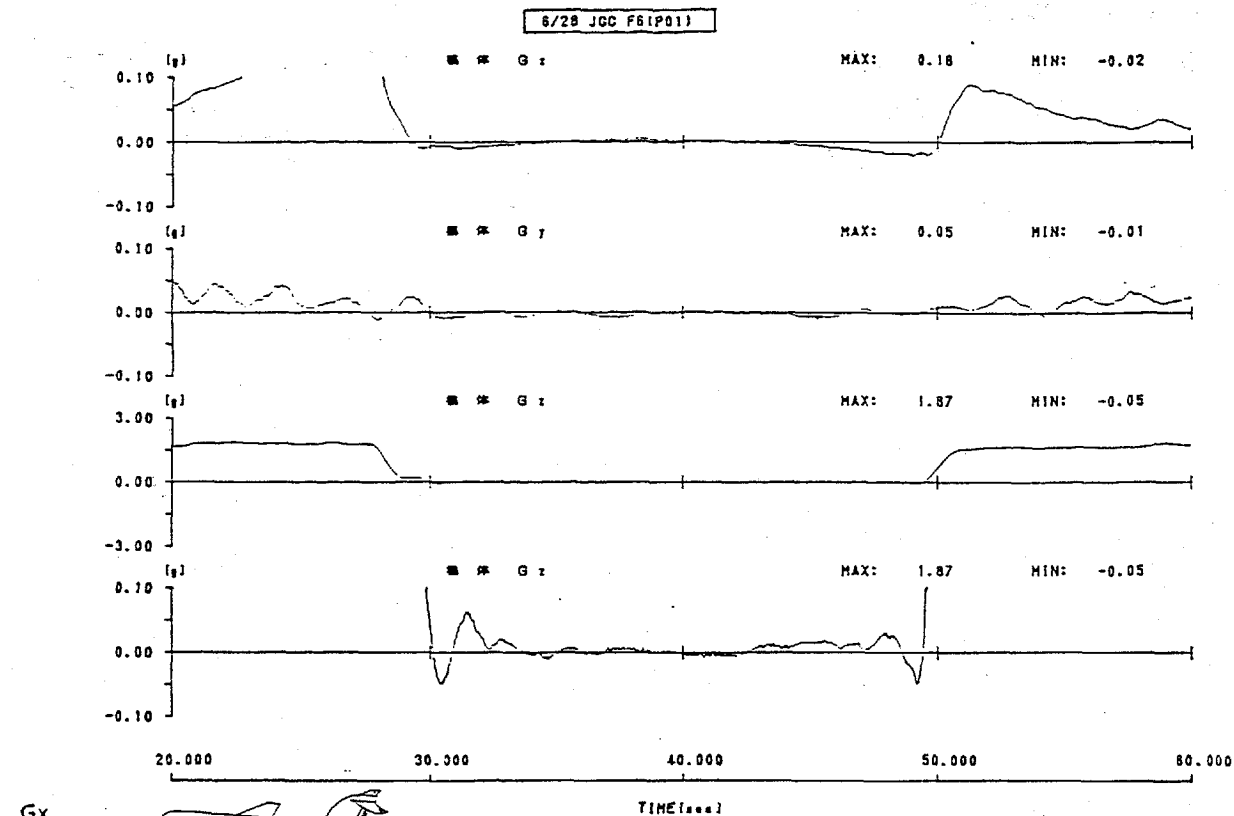


図6 機体重力センサー測定結果

Fig.6 Gravity variations of the aircraft during the parabolic flight.

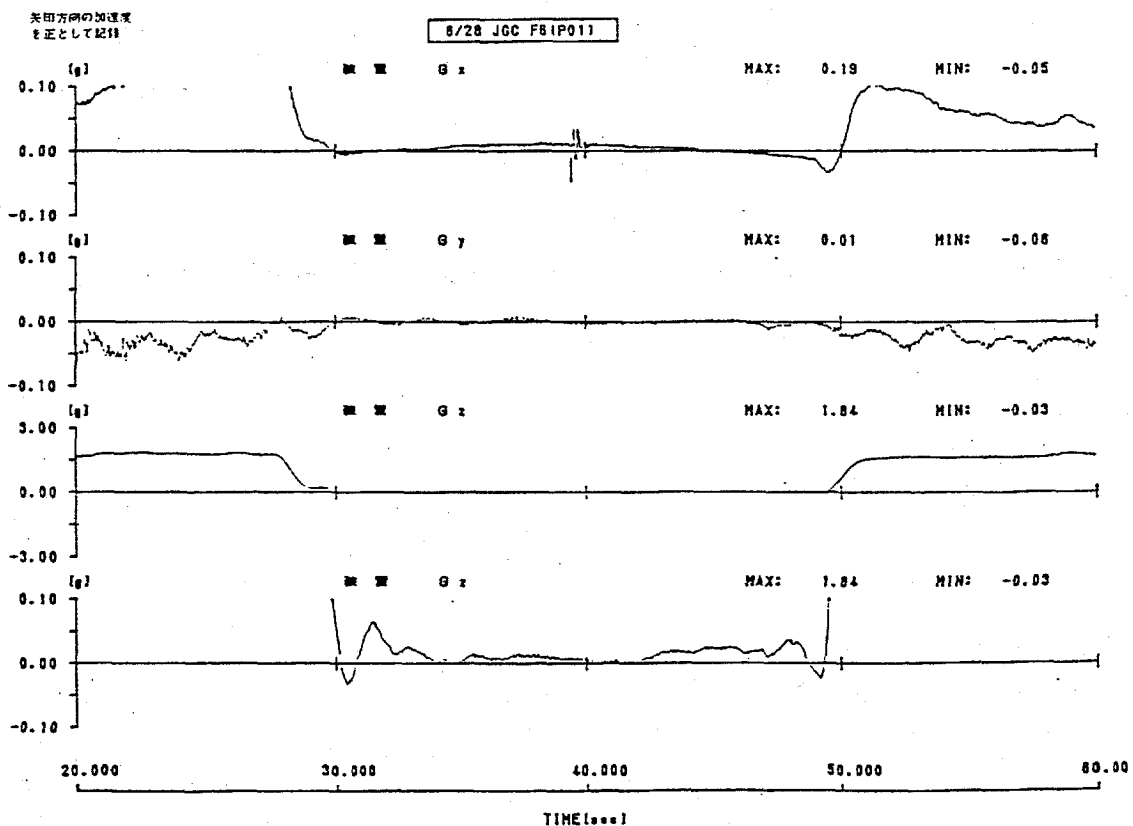


図7 装置重力センサー測定結果

Fig.7 Gravity variations of the experimental equipment during the parabolic flight.

### 3.2 液滴の浮遊及び位置保持

サポートワイヤー設置時及び音圧のみによる液滴の位置保持、浮遊状況を図8、図9に示す。

実験第6日目1回目  
液滴体積:0.07cc  
音 圧:154.1dB

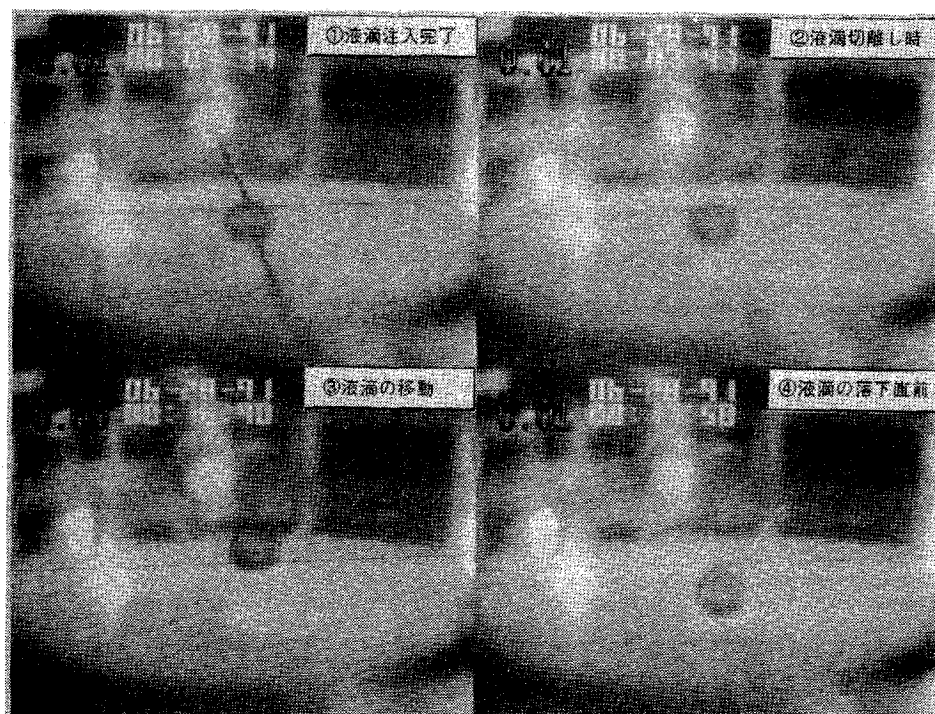


図8 サポートワイヤー設置時の液滴位置保持状況  
Fig.8 Pictures of the droplet levitating in the acoustic device with the help of supporting wire

実験第6日目10回目  
液滴体積:0.08cc  
音 圧:154.8dB

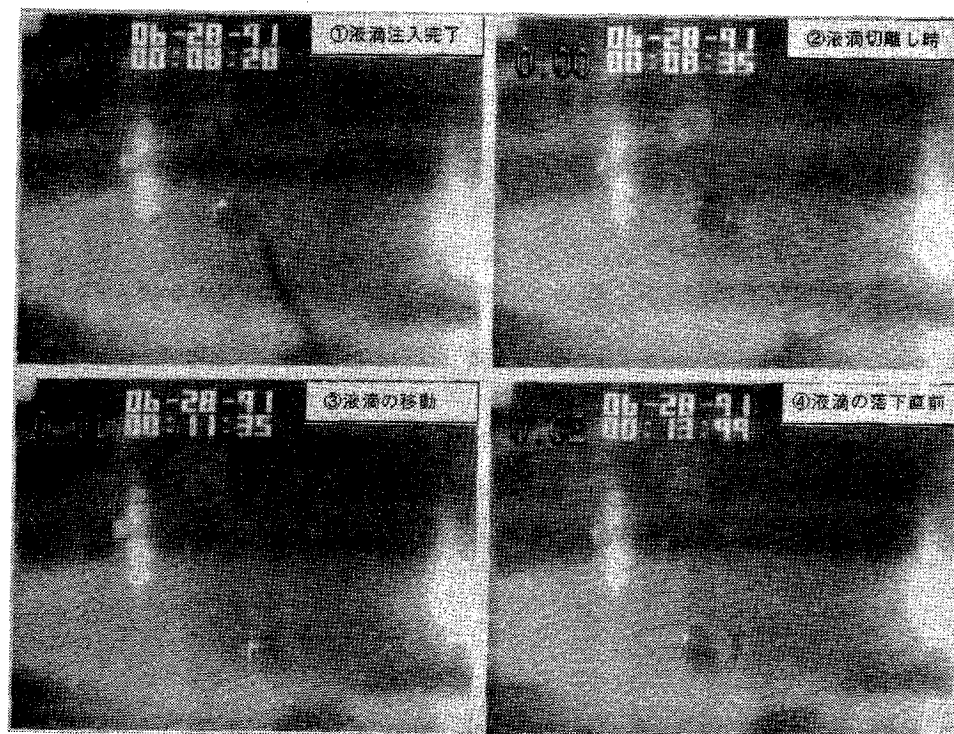


図9 音圧のみによる液滴位置保持状況  
Fig.9 Pictures of the droplet levitating in the acoustic device without the help of supporting wire



## (1) サポートワイヤーを設置した場合

### (a) グリセリン

グリセリンを実験試料に用いた場合、液滴の形成、注入針の切り離しは、ほとんどのケースで成功し、液滴は注入時からサポートワイヤーの下部に付着形成された(図8の①、②)。また切り離しが成功したケースの約7割の液滴については、その位置保持に成功した。位置保持が不十分な場合には、残存重力の影響による液滴の中心位置からのずれ又はサポートワイヤーから離脱が見られた。

### (b) シリコンオイル

シリコンオイルを実験試料に用いた場合、全ケースで液滴の形成に失敗した。液滴は注入時から激しく潰れ、飛散し、音圧を下げてても状況は改善されなかった。注入針およびサポートワイヤーに対するシリコンオイルの濡れ性は高く、注入された液は、注入針の根元方向に戻ってしまい、2本の針の間に液滴は形成されなかった。また飛散したシリコンオイルの一部がサポートワイヤーに付着したケースでは、液滴の中心部をサポートワイヤーが貫通していた。このように、シリコンオイルによる液滴の形成、切り離しには、針間隔を開ける方式は適当ではなく、注入針をずらし重複させる方式の方が良好な結果が期待できるものと考えられる。

## (2) 音圧のみによる液滴の浮遊

サポートワイヤーを除去し、音響浮遊のみでの液滴保持及び外径測定実験を4回実施した。いずれのケースでも中心部での位置保持には至らなかったものの、浮遊時間が5秒以上のケースが3回見られ、切り離し及び音響浮遊状況は航空機実験(その1)に比較してかなり改善された。切り離された液滴は、主に航空機の左右方向に振動しながら飛行方向に移動する傾向を示した。

### 3.3 液滴の励振

実験前の計画では、液滴を位置保持し、外径測定データを取得できることを確認した後、液滴を励振させて液滴の固有振動数を測定することを予定していた。しかしながら、主に外径測定システムの性能に十分でない点があったこと等により計画の変更が余儀なくされたため、今回は液滴の励振の実施にはいたらなかった。

### 3.4 固有振動数の測定

アクリル球中心部への位置保持が良好なケースのうち、外径測定器で液滴外径データが記録されたものは8回あった。外径測定データには、液滴の移動成分と振動成分の両者が重ね合わさっていると考えられるため、外径測定データが取得されているケースについてフーリエ解析により振動成分の分析を行った。この結果、分析を実施したケースの内の1ケースで、18 Hz付近に液滴の移動成分とは明らかに異なると思われる成分が認められた。

図10にそのケースの液滴外径測定結果を、図11にその周波数分析結果を示す。

この振動成分は、液滴の固有振動数の他に、実験装置の振動等により生じることと考えられるが、他の分析結果ではこのような成分が認められなかったため、この成分の妥当性について比較・検討を行うことはできなかった。

### 3.5 表面張力の試算

比圧縮性流体の液滴の固有振動数と表面張力の関係は、Rayleighの式の2次モードを用いて以下の式で表される。

$$\gamma = 3/8 \cdot \pi \cdot m \cdot f^2$$

$\gamma$  : 表面張力 (dyn/cm)

$m$  : 質量 (g)

$f$  : 振動数 (Hz)

この式に3.4項に示したケースの結果を代入すると表面張力 $\gamma$ は3.4 dyn/cmと求まる。

密度: 1.26 (g/cc)

体積: 0.071 (cc)

(ビデオ画像からの計算値)

振動数: 18 (Hz)

グリセリンの表面張力は常温で60 dyn/cmであること及び液滴の励振を特に行っていないことから、今回実験で得られた値はグリセリン液滴の固有振動数ではない可能性が高いと思われるが、ほかに検討の対象となる測定データが取得できなかったため、この判断は困難である。

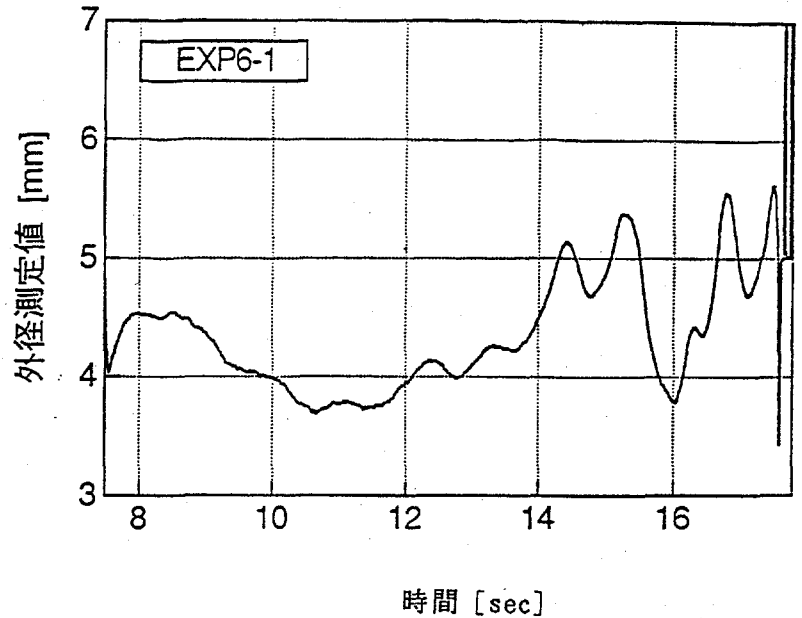


図10 液滴外径測定値-時間特性

Fig.10 Variation of the droplet outside diameters measured during parabolic flight

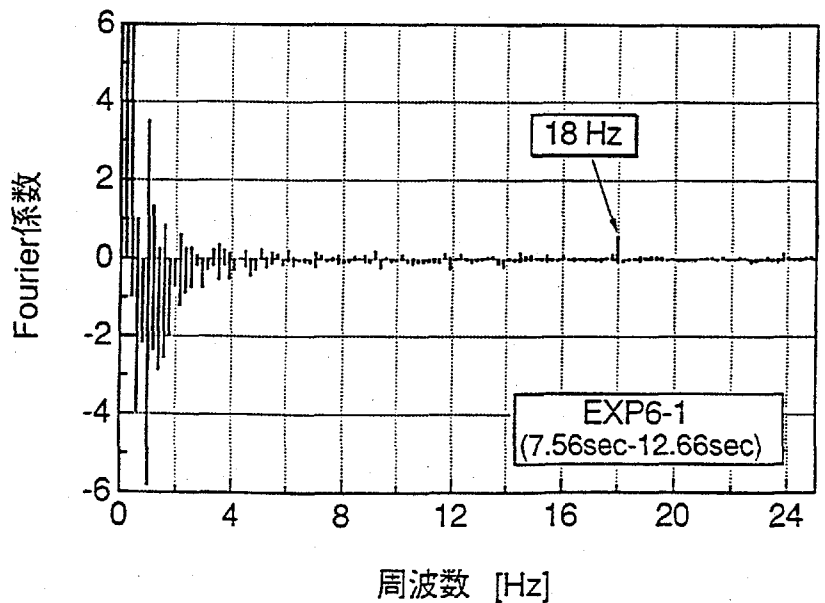


図11 周波数解析

Fig.11 Fourier transformation analysis on the outside diameter variation

ただし、グリセリンに着色剤を混合していること及び表面張力を算出したRayleighの式はグリセリンのような粘性の大きく、減衰率の高い液体にはこの式の適用が妥当でない可能性があることなどから、今回得られた固有振動数は完全な誤データであるとも即断はできない。

#### 4. 結言

航空機の放物飛行により得られる微小重力環境下で、球形音響浮遊装置を用いて液滴の浮遊状態及び位置保持を実現し、その外径変化の測定値から固有振動数を求め、液体の表面張力を算出する技術について開発することを目的として実験を行った結果を以下にまとめる。

- ①小口径の注入針により、液滴の良好な切り離し及び形成が可能であることが確認できた。
- ②音響浮遊に加えサポートワイヤーを用いることにより、航空機による微小重力環境下でもグリセリン液滴を位置保持し、その外径変化を測定することは可能であったが、今回は十分な信頼性を有する固有振動数の測定値を得ることができなかった。
- ③従って、本測定技術の有効性については確認できなかったが、今後より適切な実験試料の選定及び外径測定システムの改良によって、航空機による微小重力環境下でも、固有振動数の測定及び表面張力の算出は可能なものと思われる。
- ④音響浮遊のみによるグリセリン液滴の浮遊状況は前回の実験よりかなり向上したが、位置保持には至らなかった。これは、今回の制御方法の限界と考えられ、液滴の浮遊、位置保持性を向上させるためには、制御方法の改良が必要と考えられる。

#### 参考文献

- (1) A. Passerone, Microgravity Q. 1[2] (1991) PP.111
- (2) 宇宙開発事業団, (財) 宇宙環境利用推進センター, パラボリック フライト, 1[1](1991), PP. 58