

# B D H 装置を用いた気泡注入および加振実験

## Injection of Bubbles and Bubble Dynamics Experiments using BDH Equipment

中村 富久<sup>(1)</sup>

依田 眞一<sup>(1)</sup>

鮫島 浩人<sup>(1)</sup>

Tomihisa Nakamura

Shin-ichi Yoda

Hiroto Samejima

石川 正道<sup>(2)</sup>

石井 伸也<sup>(3)</sup>

中川 昌幸<sup>(3)</sup>

御所園 利美<sup>(3)</sup>

Masamichi Ishikawa

Shin-ya Ishii

Masayuki Nakagawa

Toshimi Goshozono

### (1)宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

### (2) (株) 三菱総合研究所 先端科学研究所

Frontier Science Institute, Mitsubishi Research Institute, Inc.

### (3)三菱重工業 (株)

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

## ABSTRACT

Bubble dynamics experiments under reduced gravity were executed to confirm the experimental parameters for the next TR-1A flight(#2). Bubbles were injected into silicone oil using BDH (Bubble Dynamics Handling) system designed for rocket experiments. Capillary force of fluid disturbed continuous formation of bubbles at the beginning of air injection. Adequate injection parameters were determined by trial and error. Bubble oscillation were observed under external forcing using a electromagnetic vibrator between 0.01-0.7g in amplitude and 1.0-2.0Hz in frequency. A simplified physical model explained observed bubble displacement as a function of g-jitter. Further remarks are evaluated for the future flight experiment.

### 1. 緒言

微小重力維持技術実験装置 (BDH:Bubble Dynamics Handling) を使用する TR-1A 小型ロケット 2号機 (平成4年夏季) に於いて、シリンジ方式による流体実験セルへの気泡の注入および人工的に g-ジッターを発生させることによる気泡運動挙動の観察実験を計画している。本実験は、打ち上げ実験時における各種実験パラメータを設定するため、気

泡注入機構および人工g-ジッター発生機構を用いた航空機実験を行い同実験計画をより確度の高いものとするための基礎データを取得することを目的として行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1 実験項目

本航空機実験では、下記について実験を実施した。

#### (1) 気泡注入精度の向上

シリンジ全体とピストンをパルスモーターで駆動し、流体セル中にて気泡を作成する際の以下のパラメーターの精度を向上する。

- ・気泡数
- ・気泡間距離

#### (2) 大振幅用アクチュエータの動作試験

人工g-ジッターの発生源として用いる圧電型アクチュエータおよび電磁型アクチュエータについて以下の試験を行う。

- ・加振変位量の再現性と周波数との相関
- ・加振波形歪

#### (3) 気泡運動実験

平成2年度航空機実験で確認した気泡間相互作用に関する観察を行う。流体を媒介した相互作用を確認するため、トレーサーによる流れの可視化を図る。

### 2. 2 実験方法

#### (1) 試料流体

シリコンオイル（動粘性係数 50 cSt）を用いた。流れの可視化のためのトレーサーには、スチロール微粒子を用いた。

#### (2) 流体セルおよび気泡注入装置<sup>(1)</sup>

図1に、本航空機実験の実験システムのブロック図を示す。流体セルの寸法は、気泡注入の方向が80mmで、これと直行する方向の寸法は70×70mmで、それぞれの方向について加振とCCDカメラによる観察を行う。用いたシリンジは、内断面積20mm<sup>2</sup>、

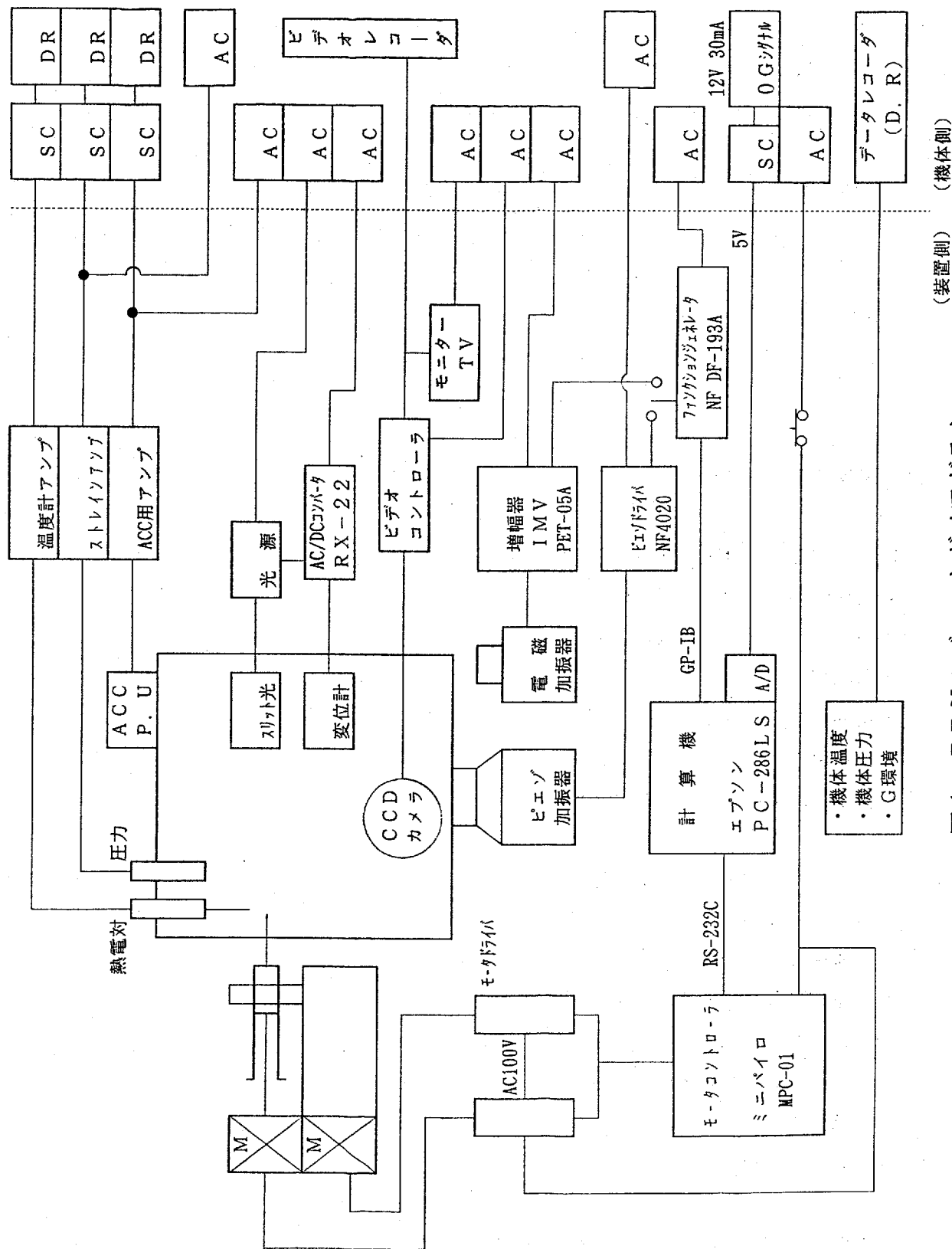


図1 BDHのブロックダイアグラム

Fig. 1 Block diagram of BDH

全容量1cc、針は内径0.18mm、外径0.52mmの横穴式とした。針穴は鉛直下方を向け、航空機残留重力による気泡の上昇を抑えるよう使用した。作成した気泡径は、直径2mmおよび4mmの2種類とした。

### (3) 加振用アクチュエータ

以下の2種類の大振幅用アクチュエータを用いた。

- ・圧電型アクチュエータ： 圧電素子を多段に積層し、変位増幅機構により最大600 $\mu$ mの変位をうることができる。
- ・電磁型アクチュエータ： IMV社パイプロペット（PET-05型）を長ストローク用に改造して用いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 気泡注入精度の向上

気泡作成時に気泡が分裂し易く、所定の数の気泡を作成することが困難であったため、以下のパラメータと気泡数との相関を検討した。

- ・気泡注入速度
- ・初期シリンジ容積
- ・残留重力ベクトルに対する針穴位置

その結果、以下についての知見を得た。

#### (1) シリンジを流体セルに挿入して、1つ目の気泡を作成する場合（大気泡と微小気泡生成のメカニズム）

試料流体は、毛管現象により、内圧とバランスする圧力になるまでシリンジ初期容積に応じた量が針穴に進入する。進入したシリコンオイルは、シリンジの押し込みに対して抵抗力を持つため、内部圧力を高め、一定の圧力に至るまで顕著な気泡の成長が見られず、その後、0.5秒程度の間一気に成長する。気泡が離脱した後に針穴には、穴径程度の気泡が残留するがこれはシリンジ内圧力の表面張力分の高まりによると推定され、針の抜き差しによって離脱することもある。

#### (2) 1つ目の気泡を作成した後、2つ目の気泡を作成する場合

連続してシリンジを挿入することによって第2気泡を作成する場合、流体試料の毛管圧

力はシリンジ内の圧力とバランスしている。このため流体は、針穴位置に留まっており、シリンジの挿入によって即座に気泡は成長を開始する。0.5秒 ( $33.6 \text{ mm}^3/\text{s}$ )の注入速度でも分離することなく成長する (図2)。

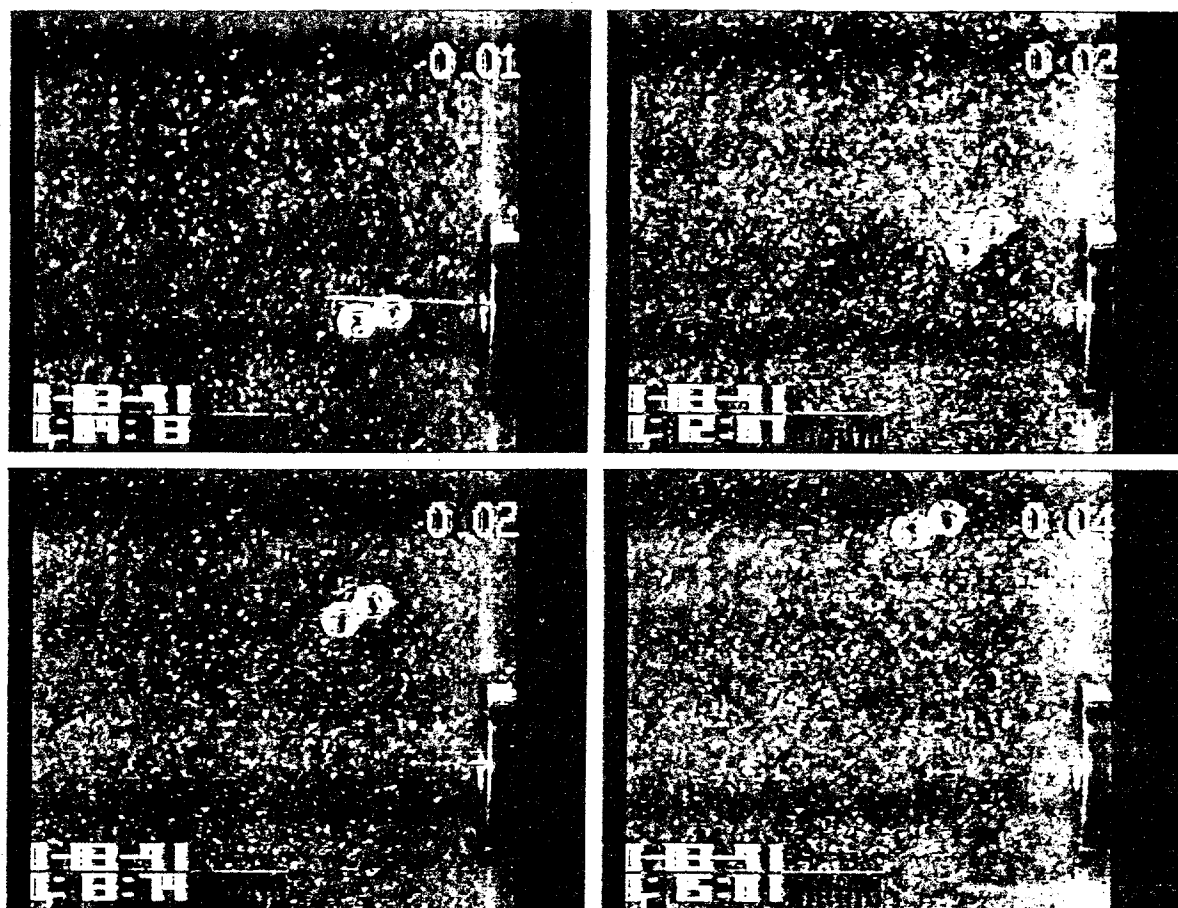


図2 気泡注入の例 (2気泡)

Fig.2 Example of bubble injection (2bubbles)

### (3) 大気泡が小気泡に分裂して生成する理由

注入速度が遅い場合、ある強度の残留重力に対応した径の気泡は浮力によって浮上しはじめ、気泡が離脱する。このため最初の気泡は概して大きくなる。いったん気泡が離脱すると、連続してシリンジを挿入しているため次の気泡が生成するが、はじめに離脱した気泡の動きによって引きずられ、径が小さいにもかかわらず離脱してしまう。

(4) 航空機実験の場合の最良値

第1気泡:

針挿入速度 26.7 mm/秒  
待ち時間 0.1 秒  
気泡注入速度 8.6~17.2 mm<sup>3</sup>/s  
待ち時間 1.5 秒  
切り放し 針の往復運動 (5 mm×2)

第2気泡:

待ち時間 0.1 秒  
気泡注入速度 67.2~33.6 mm<sup>3</sup>/s  
待ち時間 1.5 秒  
引き抜き速度 7.1 mm/秒  
(合計時間 11.1~11.6 秒)

3. 2 大振幅用加振アクチュエータの動作試験

(1) 圧電アクチュエータ

加振電圧を99Vと一定にした場合のフライト時、周波数と加振幅との関係を表1に示す。

表1 圧電アクチュエータの変位量試験

Table. 1 Displacement of piezo-actuator under reduced gravity

周波数 (Hz)	加振幅 (p-p、 $\mu\text{m}$ )
0.3	430~500
0.5	430~465
1.0	400

加振波形は、ほぼサイン関数状であったが、低い周波数で、加振幅の再現性が悪くなる傾向が見いだされた。加振支持位置が重心位置ではなくモーメントが働き、流体セルのガイドとの摩擦が大きく作用しているものと考えられる。

(2) 長ストローク電磁アクチュエータ

本航空機実験では、gレベルが0.0013~0.07gの範囲に対し、長ストローク

電磁アクチュエータ加振周波数が0.3 Hzから2.0 Hzまで変化した場合の変位量試験を実施し、その実験結果を表2に表す。

表2 電磁アクチュエータの変位量試験

Table. 2 Displacement of electromagnetic-actuator under reduced gravity

周波数 (Hz)	加振幅 (p-p, mm)
0.3	5.7~7.0
0.5	7.0~7.3
1.0	6.7~8.0
1.5	6.7~8.7
2.0	7.7~9.7

データのばらつきが大きく、航空機の重力ゆらぎが関与していることが分かる。また、流体セル上の加速度計による重力波形が、入力信号と比べて歪むことが観察された。圧電アクチュエータの場合と同様に、流体セルの並進運動をガイドするリニアスライドとの摩擦、および今回の試験周波数領域が低く、アクチュエータ自体の電磁力が弱まり、波形の整形性が低下していることが原因として考えられる。

### 3.3 気泡運動実験

本実験では、航空機の残留重力が $10^{-2}g$ オーダーとロケット実験に比べてバックグラウンド重力レベルが大きいことから、電磁加振機による人工g-ジッターを発生した。これによってジッターによる単離気泡の運動を予測する基本方程式が成り立つかどうかを検討した。

#### (1) 気泡運動解析モデルの検証

##### (a) 気泡運動を記述する基本方程式

気泡の運動を表す運動方程式は、気泡の変形がないものとして次式のように表すことができる<sup>(2)</sup>。

$$V \rho_B \frac{dU}{dt} = V (\rho_F - \rho_B) g(t) - F(U) \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、Vは気泡の体積、 $\rho_B$ 及び $\rho_F$ はそれぞれ気泡の密度及び環境流体の密度、Uは気泡の運動速度、gは残留重力強度、F(U)は速度Uの関数で表される抵抗力である。

簡単のために上記運動方程式が線形となるように  $F(U)$  として次の二つの抵抗力を考える。

①気泡のストークス力に基づく粘性力

$$-4\pi\nu\rho_F R U$$

ここで  $\nu$  は流体の動粘性係数、 $R$  は気泡の半径である<sup>(3)</sup>。

②気泡が流体中を運動するとき生じる抗力すなわち流体をかき分ける時に生ずる力は、

$$-\frac{2}{3}\pi R^3\rho_F\frac{dU}{dt}$$

と表される。

①及び②に表される抵抗力を(1)式に代入すると(2)式のようになる。

$$V\rho_B\frac{dU}{dt} = V(\rho_F - \rho_B)g(t) - \frac{2}{3}\pi R^3\rho_F\frac{dU}{dt} - 4\pi\nu\rho_F R U \quad \text{-----} \quad (2)$$

(2)式の両辺を  $V\rho_F$  で割ると、(3)式を得る。

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{\rho_B}{\rho_F}\right)\frac{dU}{dt} + \frac{3\nu}{R^2}U = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_F}\right)g(t) \quad \text{-----} \quad (3)$$

水ないしシリコンオイルでは  $\frac{\rho_B}{\rho_F} \approx 10^{-3}$  と無視できるために(3)式は結果的に

(4)式になる。

$$\frac{dU}{dt} + \frac{6\nu U}{R^2} = 2g(t) \quad \text{-----} \quad (4)$$

(b)測定結果との比較

航空機重力レベルの最も安定度の高い微小重力突入後、13秒から16秒の間の人工ゲージターによる気泡の変位を図3に示した。この時の気泡運動の山と谷位置の変位量を以下に示す。



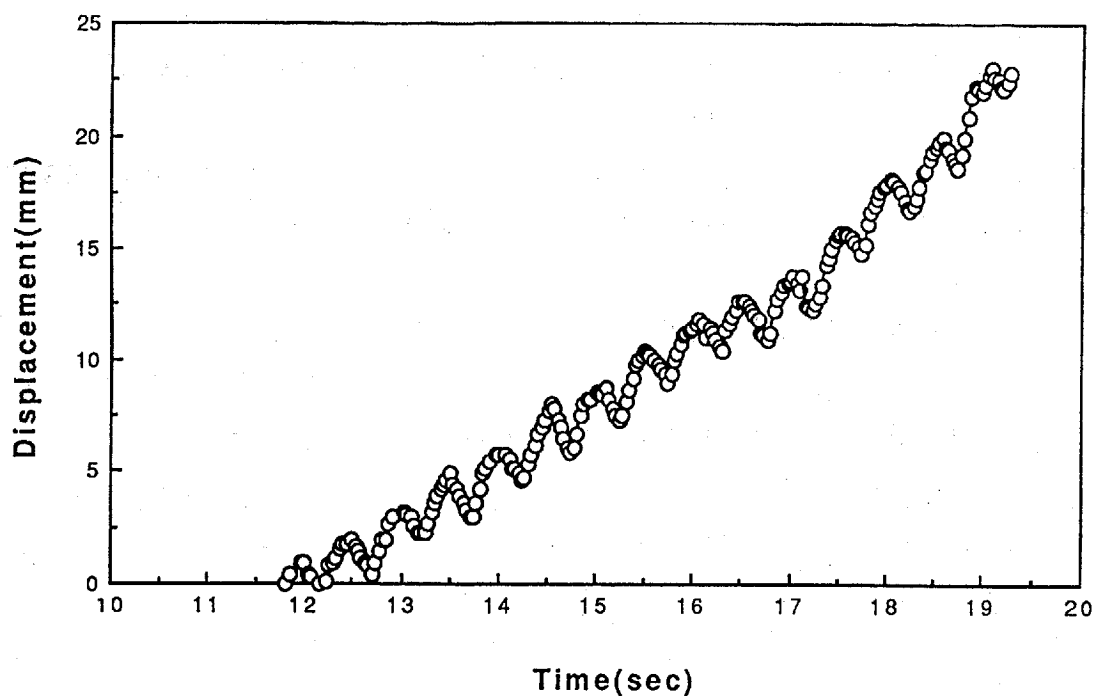


図3 人工  $g$ -ジッターによる気泡の周期的運動

Fig.3 Periodic displacement of bubbles by artificial  $g$ -jitter

実験条件：

試料流体 シリコンオイル

動粘性係数  $5.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

加振周波数 2 Hz

変調重力レベル  $0.63 \text{ m/s}^2$  (0.064 g)

気泡半径 2 mm

重力レベルの周期的変動による気泡の変位量：

1. 00 mm

2. 67 mm

1. 89 mm

2. 78 mm

1. 11 mm

2. 11 mm

2. 89 mm

1. 45 mm

1. 44 mm

上記の平均値 1.93 mm ( $\pm 0.95$  mm 航空機の残留重力変動による)

計算結果：

上述した気泡の運動方程式を上記実験条件のもとに積分し、以下の結果を得た。

1. 60 mm

計算結果は、実測値と比べて0.33 mm程小さいが、これは航空機の残留重力変動幅の範囲に納まっており、現実の運動を再現していると思なせる。

(2) 残留重力による環境流体の擾乱

航空機のz軸（鉛直）方向残留重力による気泡の動きに伴うトレーサー粒子を利用した環境流体の動きの例を図4のストリーク写真に示す。直径4 mmの二つの気泡が隣接した場合の結果であるが、気泡径の数倍の領域にわたって流体の動きが観察され、気泡の運動による環境流体の擾乱は無視できないことが分かった。

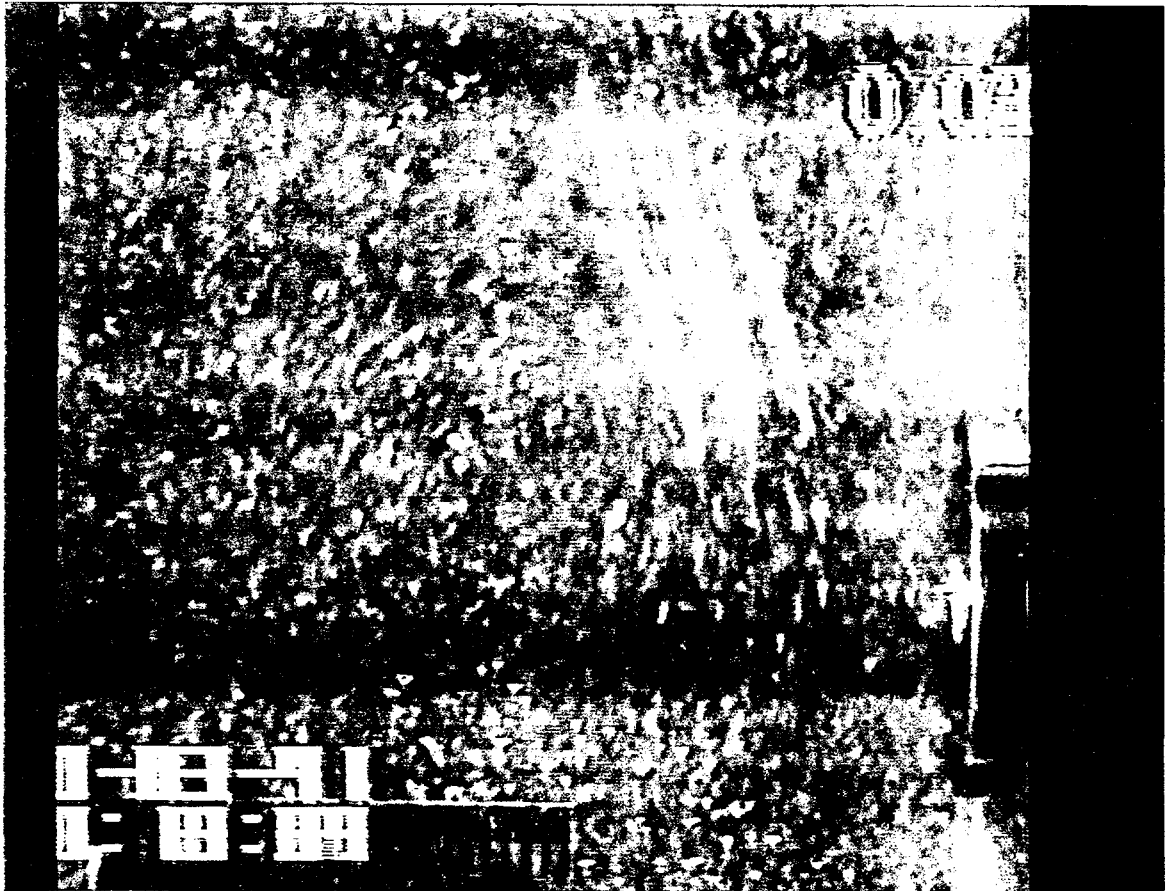


図4 気泡の移動に伴う環境流体のストリーク写真

Fig. 4 Streak photograph of fluid accompanied by bubble migration

#### 4. 結言

本実験は、TR-I A 2号機で実施が予定されている気泡実験において、最適な実験パラメータを決定するために必要な気泡のダイナミクスを支配する因子について調査することを目的として行われ、以下について明らかにした。

##### (1) 気泡作成パラメータの検討

第1回目にシリンジ針を挿入した時の気泡作成条件と、2回目以降に気泡を作成する条件とは、シリンジ内気体が圧縮される効果によって異なることが見いだされた。この原因は、微小重力時に毛細管現象によって針穴への流体の逆流があること、シリンジ内の圧力が2回目の気泡作成時に表面張力によって高まっていることに起因していると考えられる。このような状況を考慮し、複数気泡作成に対応した気泡注入の最適条件を決定した。その他航空機実験固有の状況として、航空機自体の重力ゆらぎによって気泡の形成が妨げられ、大気泡の作成が困難となることが明らかになったが、パイロットとの調整によってある程度は改善されることを確認した。

##### (2) 圧電アクチュエータの機能確認

ロケット搭載用の圧電アクチュエータにつき、微小重力時での変位振幅および変位波形が所定の条件を満たしていることを確認した。

##### (3) 長ストローク電磁アクチュエータによる気泡の加速度応答モデルの検証

ロケット実験パラメータを決定する上で基礎となる評価モデルの検証を行った。

##### (4) ロケット実験パラメータの見直し

今後、以下の条件につきフライト実験パラメータを検討する必要があると考えられる。

###### ・試料流体の選定

モデル計算により試料の物性値を変えることによって、最適な試料流体を選定する。この時、TA-I A小型ロケット固有の残留重力により、気泡が観察視野からはずれる時間および複数気泡作成時での隣接気泡間距離が制御できるように考慮する。

###### ・加振周波数の見直し

気泡の運動を観察するためには、ロケットのバックグラウンド重力レベルに比して、2ないし3倍以上の加振レベルが必要となるため、TR-I A 1号機の残留重力データに基づき必要な加振加速度を決定する。

## 謝辞

バテル・ヨーロッパ研究所 D.Langbein教授には、実験の計画および実施にあたって有益な議論と励ましを頂き感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 吉富進、名木稔、鮫島浩人、石川正道、石井伸也、御所園利美、松本浩明、「小型ロケット実験要素試作試験－微小重力下における気泡のダイナミクス－」、パラボリックフライト、第1巻2号（1991）pp20
- (2) Th. Dewandre, "Influence of Micro-g Disturbances on Fluid Experiments involving Bubbles or Drops: Theory." Appl. Microgravity Tech. 1 (1988) pp142
- (3) J. Happel and H. Brenner, Mechanics of Fluids and Transport Processes, Kluwer (1973)