

微小重力下における気泡移動の観察

Observation of Bubble Behaviour under Microgravity Condition

高田 吉昭 ⁽¹⁾	浅井 滋生 ⁽²⁾	小西 貴明 ⁽³⁾
Yoshiaki Takata	Shigeo Asai	Takaharu Konishi
齊藤 稔 ⁽⁴⁾	加藤 健治 ⁽⁴⁾	松山 治邦 ⁽⁴⁾
Minoru Saitoh	Kenji Katoh	Harukuni Matsuyama

- (1) 宇宙開発事業団
National Space Development Agency of Japan
- (2) 名古屋大学
Nagoya University
- (3) (財) 宇宙環境利用推進センター
Japan Space Utilization Promotion Center
- (4) 日立造船株式会社
Hitachi Zosen Corporation

ABSTRACT

The technology to remove bubbles from molten materials under microgravity condition are being developed by National Space Development Agency of Japan.

We chose the electromagnetic force in various methods for driving bubbles and have investigated the applicability

This report provides the result of the microgravity experiment in the aircraft to observe bubbles motion in the flow led by the rotating magnetic field.

In this experiment, we used a cylindrical vessel filled with nonconductive silicon oil to observe the bubbles motion in the aircraft. It simulated the flow in real materials that the aluminium ring forced to revolve by the rotating magnetic field was inserted in that vessel.

The bubbles were found to be driven towards the rotating flow field along with the axis of rotation different from the ground experiment result in which bubbles moved upwards by the effect of bouyancy.

Through this experiment and analysis, the efficiency of this method was confirmed and the fundamental data of the bubbles motion was obtained.

1. 緒言

宇宙の微小重力環境下においては、地上と異なり浮力や沈降などの効果が小さいため、大きく密度の異なる2相の混合物が、特定方向に片寄らずに分散した安定な状態で存在し得る。この状態は微小重力環境下での高機能複合材料の製造に大きな可能性を与えるものであるが、反面、気泡が分離せずに液中にとどまり結晶中に取り込まれる等、高品質結晶の育成という立場からみると不具合が生じる場合がある。このように、材料製造中に生じた気泡の分離除去は、宇宙実験において重要な課題となっている。

このため宇宙開発事業団では、微小重力下において材料実験をするに当たり、取り扱う熔融材料中に混入あるいは発生した気泡を除去する技術の開発を、共通実験技術開発の一環として取り組んでいる。

材料系の場合は、気泡をある特定の場所に移動し集めた後凝固すれば、気泡は生成試料と分離でき得る。したがって、気泡除去技術では、気泡移動技術が最も重要になる。そこで、熔融試料中に存在する気泡を移動する技術の一つとして、回転磁場によって生じる電磁力を用いた方法の検討を進めている。平成5年6月に、部分的に与えた回転磁場によって生じる流れ中における気泡移動の観察を目的として、航空機による微小重力実験が実施された。本稿では、その実験結果およびその1次解析結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 気泡移動技術の概要

電磁力を用いて気泡を移動する手法の概念を図1に示す。

回転磁界を材料融液周辺の一部に与え、その結果発生される電磁力により融液が旋回される。その旋回角速度は、磁束密度が大きい磁石部分が最も大きくなるため、容器（坩堝）の長手方向に旋回速度差が生じ、旋回角速度が大きい箇所への流れが生じる。その長手方向の流れならびに旋回による遠心力が加わり気泡は旋回角速度が大きい付近に移動する。容器の端部にて回転磁界を与えれば、その箇所に気泡は移動すると考えられる。また、容器が長い場合は、回転磁界の付加部分を長手方向に移動すれば全体の気泡を集めることが可能である。

今回の実験では、回転磁場を容器端に与える場合における流れ中の気泡挙動を観察する。

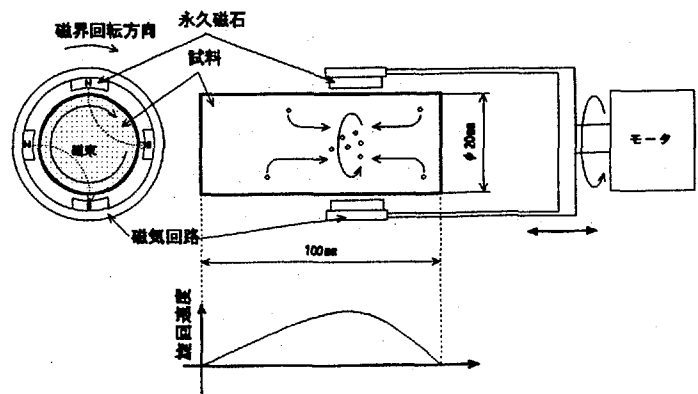


図1 気泡移動の概念

Fig.1 Concept of driving bubbles

2. 2 実験内容

材料溶融状態の実験では、気泡移動の観察が困難であり、さらに凝固後の観察では、凝固時の温度分布によって生じる気泡移動の影響ならびに引け巣と気泡との区別等の問題があり、本手法の効果だけを把握することは困難である。

そこで、本航空機実験では、常温で可視化できる透明液体を用い、気泡移動の観察に主眼を置いた。さらに、電磁力を作用させるためには使用液体が良導体でなくてはならないが、透明液体で電磁力の効果を作用させ得る液体が見当たらないため、擬似透明液体の中に良導体であるアルミ製のリングを挿入し、そのリングが電磁力を受け旋回し、液体をも旋回させることで流れの状況を模擬することとした。なお、模擬した流れと水銀を用いた場合の流れとの比較を行った結果、傾向が一致していることを地上において確認した。

この擬似液体中に気泡を注入し、その移動状況、集合状況、合体状況を液体粘度、リング回転数等の条件を変えて観察し本手法の有用性を評価する。

2. 3 実験装置

図2に実験装置の外観図を、図3に気泡移動観察部の概略図を示す。さらに実験装置の系統図を図4に示す。

気泡の挙動を観察するための容器は、アクリル製の円筒型容器（内径41mm、長さ60mm、80mm）で、容器内左端にアルミ製の円筒リング（外径38mm、厚み3mm、幅20mm）を設置している。リングの回転軸は水平に置かれており、針状のストッパーにより横方向の位置を固定している。このリングを旋回するための回転磁場は、SmCo磁石（最大残留磁束密度1.06T）4個をモータで回転することによって発生される。

気泡は、マイクロシリンジから気泡注入針を通じて液体内に注入される。マイクロシリンジのピストン操作にはシリンジポンプを用い、モータ回転と共にノート型パーソナルコンピュータで制御される。

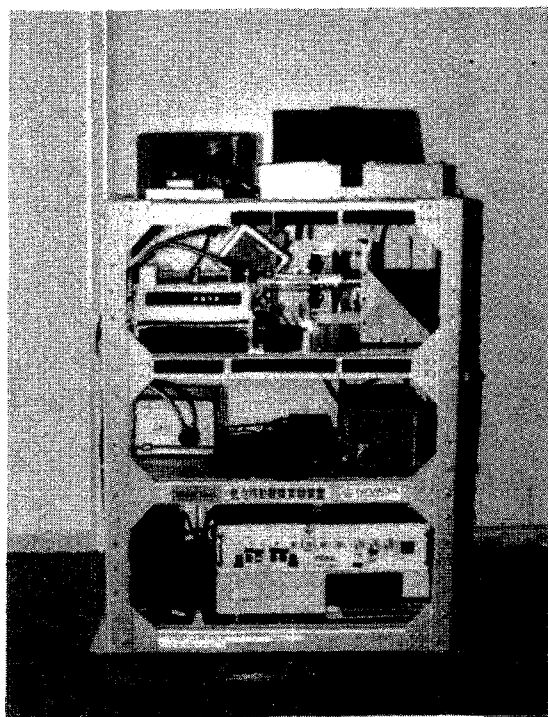


図2 実験装置外観図

Fig.2 Photograph of experimental apparatus

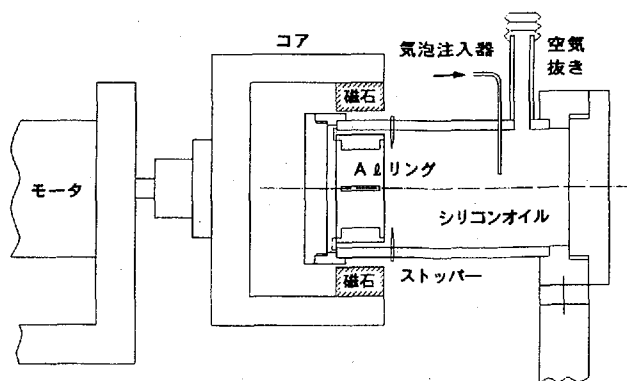


図3 気泡移動観察部

Fig.3 Section for observation of bubbles motion

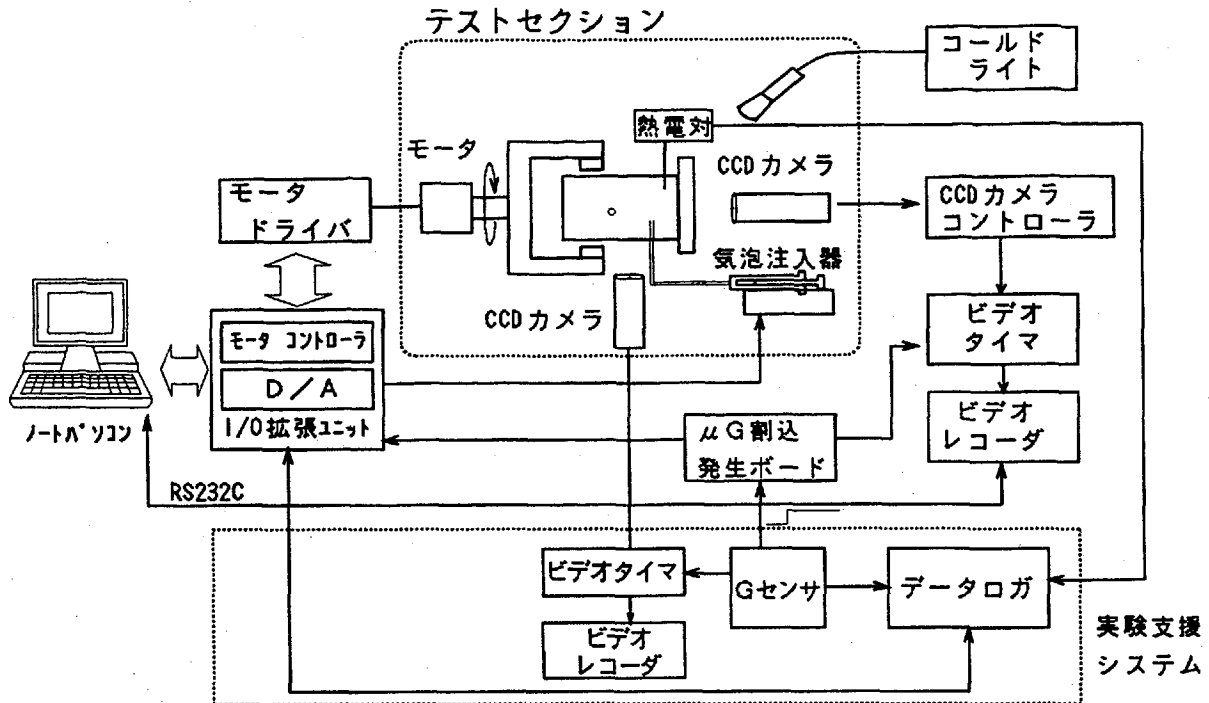


図4 実験システム系統図
Fig.4 Schematic diagram of experimental system

また、2方向からCCDカメラを用いて気泡挙動を観察（ビデオ撮影）する。

これらの実験装置の操作は、ラックに搭載したノートパソコンにて行われる。定常重力中にパソコン上でモータ回転条件、気泡注入器の動作条件を設定し、実験支援システム側から出力される μG 信号により起動される。

2.4 実験条件

実験条件を表1に示す。また流れの可視化のために、液体中にアルミ微粉末をトレーサとして入れた実験も行った。

表1 実験条件
Table 1 Experimental condition

使用液体	シリコンオイル（信越シリコンKF96） 動粘度 10, 50, 100cSt
磁界回転数	100 ~ 600 rpm （リング回転数：約20 ~ 500 rpm）
気泡注入	気泡 : 空気 シリンジ : 全容量 1 ml 針 : 内径 0.18mm, 外径 0.35mm 注入速度 : 1, 3, 5 ml/h 注入場所 : 容器左端より 40, 50, 60mm位置

3. 実験結果と考察

6日間にわたり計60回の放物飛行が実施され、最初の2日間で気泡発生条件の把握、残りの4日間で粘度・回転数を変えての気泡挙動の観察を行った。

3.1 気泡の移動

一部を除き気泡はアルミリングの方に移動することが確認できた。地上実験で見られたように浮力の効果による気泡の上昇が少なく、気泡発生位置が遠くても気泡は軸方向に沿ってアルミリングへ移動した。また、アルミ粉のトレーサーによって流れの把握ができその流れに気泡がのっていることが確認できた。

動粘度 50cStの液体中における気泡移動状況例を図5に示す。図中の番号は時間経過を示しており1から8へ時間が経過している。また、画像からある気泡の移動状況を測定した結果を図6に示す。上左図が容器を横からみた場合、上右図が正面からみた場合、その下にZ軸（容器軸）方向の気泡位置の時系列を表している。横軸は μG になってからの時間を表しており、最初の○が気泡が注入された時点の時間・位置を示している。なお、気泡位置の算出に際しては、横からと正面からとの2画像の計測値から、カメラの視野による誤差を補正した。

気泡移動速度は、主にリング回転数に依存しており、回転数が高い程気泡移動速度も大きくなり、微小重力下の20秒間内でアルミリングまで到達できる気泡の初期位置も遠くなった。

粘度の違いによる気泡移動速度への影響は、明確には現れなかったが、粘度が高い場合はリングに近くなるほど移動速度が大きくなるのに対して、10cStのように粘度が低い場合には、リングの手前から移動速度が小さくなる傾向がある。さらに、粘度が低い場合、回転数を高くすると気泡はリングの手前まで移動し、その場所に集合する現象が見られた。動粘度 10cStの液体中における気泡の移動状況例を図7に示す。さらに、回転数が高い場合は、初期の頃はリング方向に移動するが、時間が経つと気泡は軸に沿って逆戻りし容器軸上に留まっていた。これは粘度が低く高回転になると、リング近くでは液体もリングと同様に旋回しており旋回速度差が生じ難くなるためと考えられる。さらに、回転数を上げると液体が一様に旋回する状態に近くなり、遠心力の効果により気泡が回転軸に留まると考えられる。

また、同じリング回転数でも粘度が低い程気泡が旋回しながらリング方向へ移動する様子がみられ、その旋回半径が大きくなる傾向がみられた。これは、粘度が低いと残留Gの影響を受け浮上し易いために容器軸からの半径距離が大きくなり、そのまま旋回しながら移動するためと考えられる。さらに、粘度が高いと旋回しながらリング方向へ容器軸に近くなるような流れが生じるのに対して、粘度が低いと流れが旋回しながら容器軸に平行な流れになるため、容器軸まで気泡は移動せず、その旋回半径のまま回転しながらリングに向かうためと考えられる。

気泡径の違いによる容器軸に沿う移動速度への影響は観察できず、気泡が流れにのって移動している。

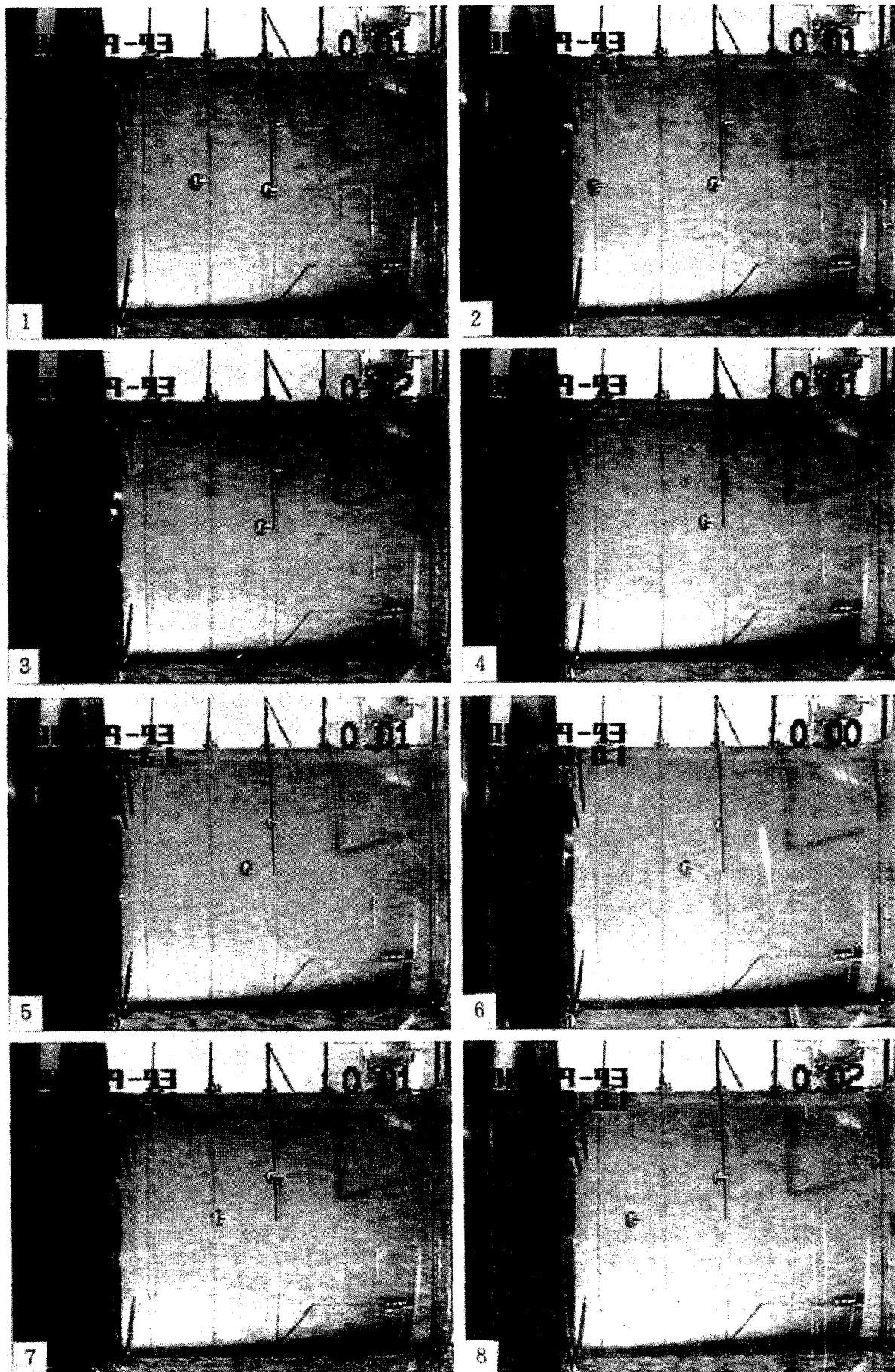


図5 気泡移動状況 (液体動粘度: 50cSt, リグ回転数: 約110rpm)
 Fig.5 Photograph of bubbles motion

50cSt 161rpm 2 (4-5); BUBBLE DIAMETER 1.7(mm)

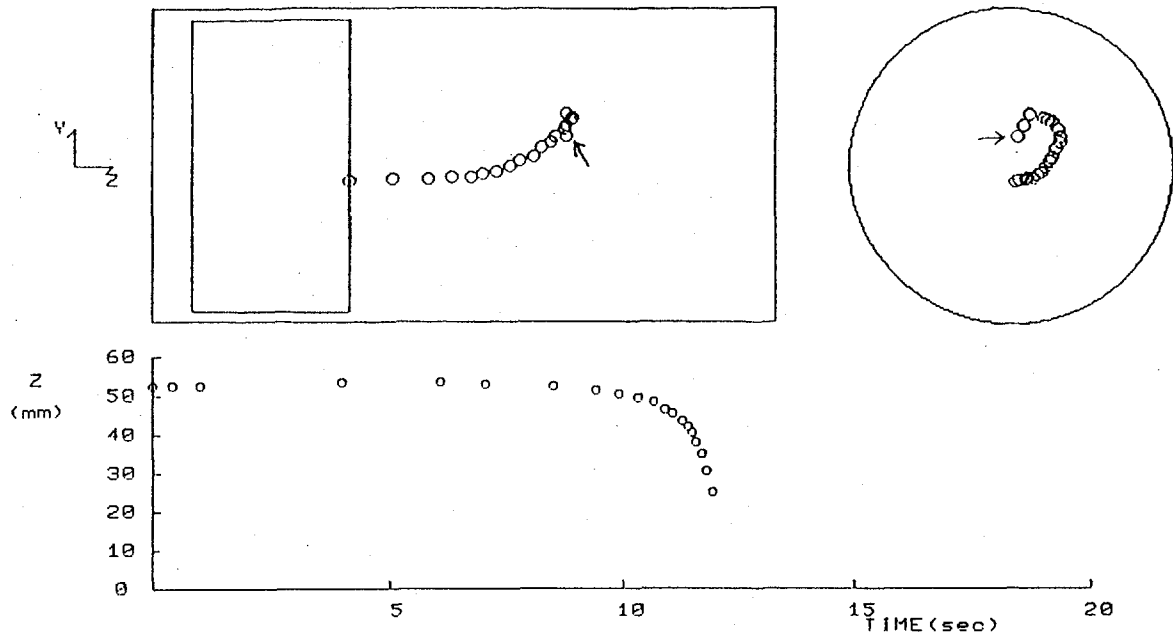


図6 気泡移動測定結果 (液体動粘度:50cSt, リング回転数:約275rpm)
Fig.6 Observed bubble motion

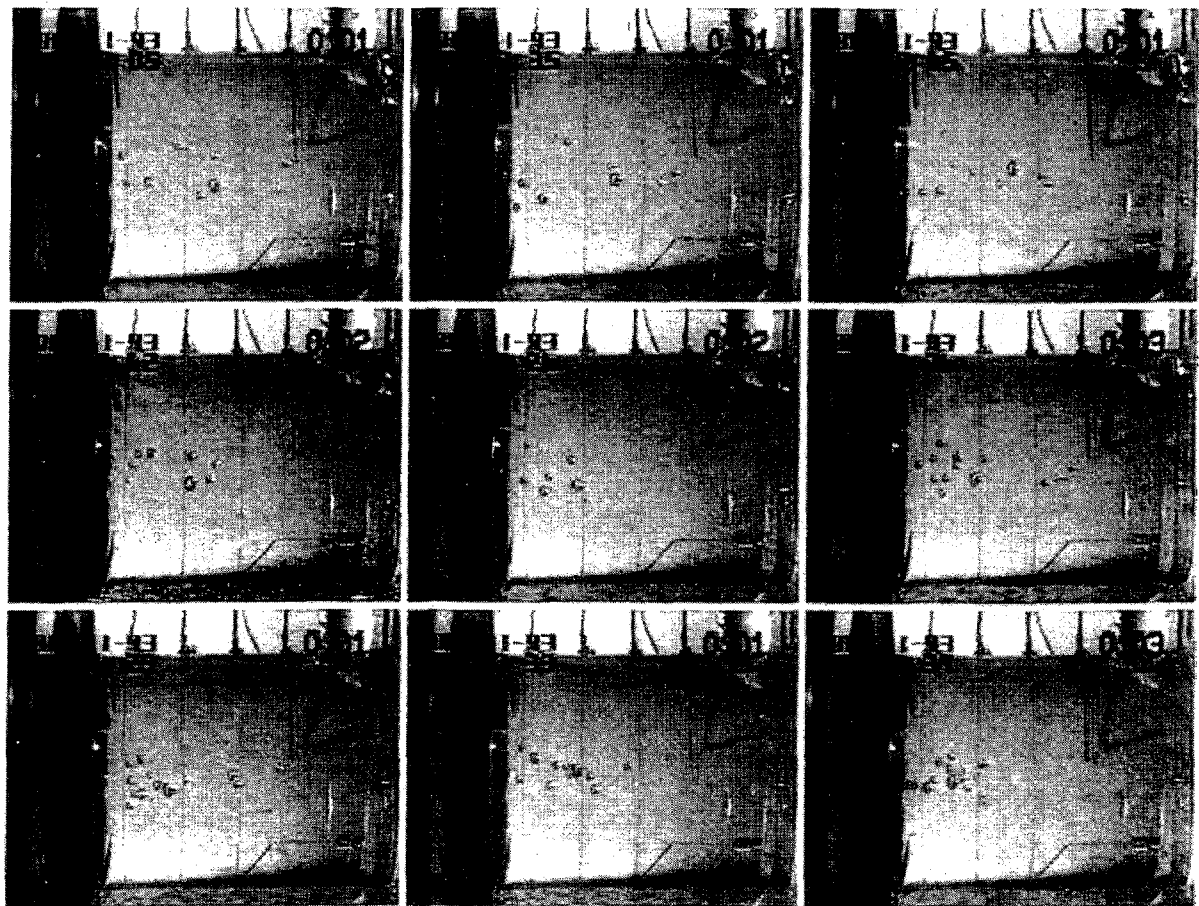


図7 気泡移動状況 (液体動粘度:10cSt, リング回転数:約475rpm)
Fig.7 Photograph of bubbles motion

1	2	3
4	5	6
7	8	9

3. 2 気泡の集合・合体

リング内に到達した気泡は、リング内で外へ広がりながら旋回し、既にリングの奥に入っていた気泡を除いては回転中心へ移動する現象は見られなかった。

その後は、地上実験同様再びリング手前に吐き出される気泡とリング内部で旋回する気泡とがあった。リング内部に留まっている気泡は、旋回半径がほぼ同じ状態で回転している様子が、比較的径が大きい気泡が多い傾向にある。吐き出された気泡もすぐにリング内部に引き込まれるが、中に入ったり出たりの繰り返しである。

また、リングの外側と容器の内側に入った小気泡が、かなりの速度で旋回しながら円筒壁面に沿って吐き出される現象が見られた。実際にはその場所において戻る流れがあることからその流れにのっていると考えられるが、計算結果から比較すると実験結果の移動速度は大きく、その気泡挙動はリングと容器の接触により潰される等リングを用いて流れを模擬していることから生じるとも考えられる。

さらに、回転中は観察しにくいですが、実験終了であるG回復後多くの小気泡がリング手前で浮上する現象が観察された。この現象は放物飛行前において容器の上部に、特にリングと容器壁面の間に、気泡が多数残っている場合に観察されることから、浮上する小気泡は実験開始以前に残っていた気泡と思われる。さらに、壁面近くから浮上することから、前述のリングと容器壁面との間に残っていた気泡が吐き出されたものと考えられる。

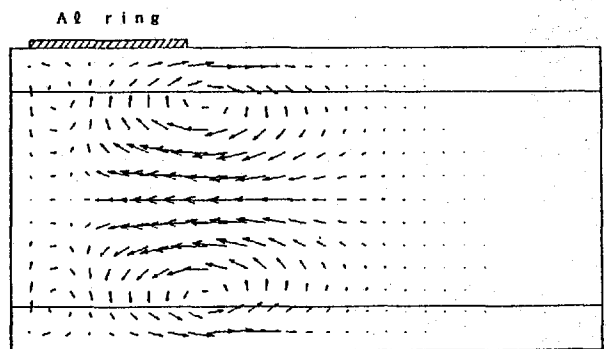
気泡の合体に関しては、20秒間内に気泡が互いに接触する機会が少なく、今回の実験では観察されなかった。しかし気泡の合体のし易さは、表面張力に依存するのでシリコンオイルでは合体し難くても、熔融材料ではより容易に合体すると思われる。

以上のように、気泡の移動は確認できたが気泡の集合に関してはまだ不十分な点がある。しかし、リングの中に気泡をとどめたり、前節で述べたように適切な回転数を選ぶとリング手前に気泡が集合するような現象も観察されており可能性を確認した。

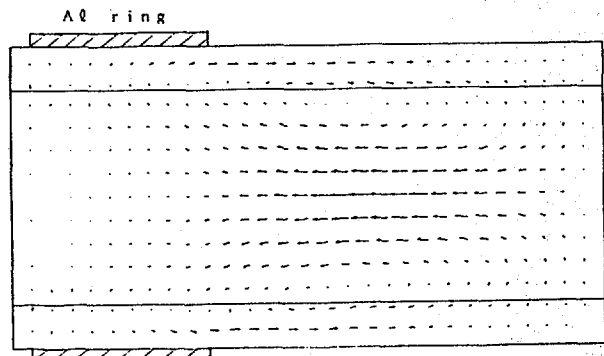
3. 3 数値計算結果

リングの代わりに円筒容器の境界の一部だけを回転しその他の部分はすべりなしの条件を適用することにより流れ場の数値計算を行った。その結果の一例を図8に示す。横断面における速度ベクトルを表している。

動粘度 50cStの計算結果から旋回速度に比べて1/3程度の軸に沿った流れが生じており、実験での気泡の動きをよく表している。この図より気泡がリングに入ったり出たりするのは、図上で渦に見える箇所を



→ 3.170E-02 (m/s)
(a) 液体動粘度:50cSt, リング回転数:95rpm



→ 1.509E-01 (m/s)
(b) 液体動粘度:10cSt, リング回転数:165rpm

図8 液体流れの数値計算結果
Fig.8 Calculated fluid flow

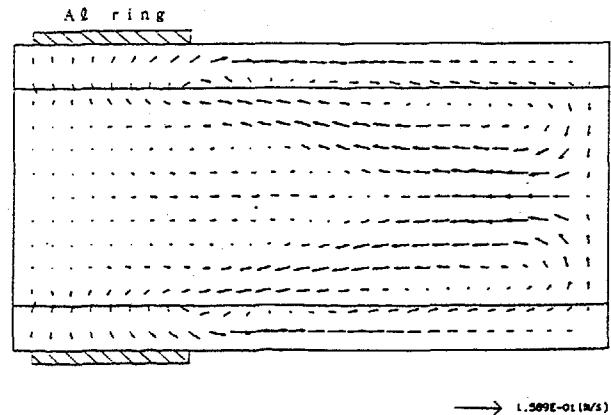
移動していると考えられる。またリングの中で気泡が同一半径で旋回しているのは、外にいく流れと旋回によって生じる遠心力とが釣りあっているからと思われる。

低粘度 (10cSt) の計算結果では、速度が大きい箇所がリングとは反対側に移動しており、リング手前にて軸方向の速度が低くなっているのが確認できる。また、容器軸付近では、比較的平行な流れとなる。

さらに、高回転時の流れの様子を図9に示す。回転初期の頃は容器軸に沿ってリング方向に流れがあるが、時間が経つと図のようにリングからの流れが生じており、この両者の流れの衝突点に気泡が留まると考えられる。

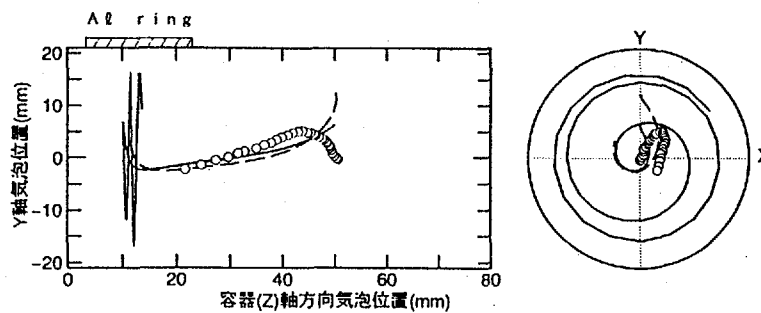
次に、この流れにおける気泡挙動の計算結果を図10に示す。計算では、Gの変動を考慮していない上に、リングが初期状態から一定回転するものとして行っているのに対し、実験ではリング回転数が定常になるまでに時間を要するため、それぞれの結果をこのまま比較するのは難しいが、気泡移動の様子ならびに移動速度は大略一致している。

以上により、この数値計算結果は実験結果をよく表しており、気泡移動の予測に有効であることが確認された。



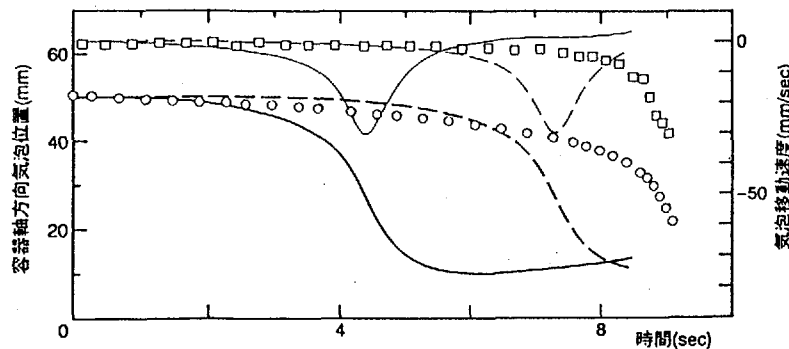
→ I.509E-01 (19/2)

図9 液体流れの数値計算結果
(動粘度:10cSt, リング回転数:450rpm)
Fig.9 Calculated fluid flow



(a) 側面から見た気泡移動 (b) 正面から見た気泡移動

気泡位置 : ○ } 実験値
気泡速度 : □ } 計算値



(C) 容器軸(Z)方向気泡位置と速度

図10 気泡移動数値計算結果 (動粘度:50cSt, リング回転数:95rpm, 気泡径:1.4mm)
Fig.10 Comparison of observed and calculated bubble motion

4. 結言

回転磁場によって生じる流れを模擬して、微小重力下での気泡移動を観察した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 微小重力環境下において、電磁力で生じると考えられる流れ場において気泡の移動が観察され、本技術の有用性が確認された。
- (2) それぞれの気泡発生位置に対する気泡移動に必要なリング回転数（液体回転数）を大略把握できた。
- (3) 気泡移動速度は、主にリング回転数に依存し、粘度の違いによっては、速度分布が異なり、粘度が低くなると最大速度位置がリングより離れる傾向にある。
- (4) リングに引き込まれた気泡は、その後リングから出たり入ったりする場合は観察された。気泡の集合という点ではまだ不十分であるが、リングの中に気泡が留まったり、適切な回転数を選ぶとリング手前に気泡が集合するような現象も観察されており、気泡集合に関する可能性も確認した。
- (5) 気泡の合体に関しては、20秒の時間では短すぎて気泡が接触する機会が少なく、今回の実験では観察できなかった。
- (6) 流れ場および気泡移動の数値計算結果は、実験結果をよく表しており、本数値計算が予測に有効であることが確認された。

謝 辞

本航空機実験を行うにあたり、多大なご協力をいただいたダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様方に深く感謝いたします。