

航空機による微小重力実験
遠心力による気泡移動観察基礎実験

Experiments on Bubble Behavior
under the Effect of Centrifugal Force

依田 真一 ⁽¹⁾	木村 秀夫 ⁽²⁾	浅井 滋生 ⁽³⁾	石倉 精三 ⁽⁴⁾
Shinichi YODA	Hideo KIMURA	Shigeo ASAI	Seizo ISHIKURA
		中井 誠一 ⁽⁶⁾	齊藤 稔 ⁽⁵⁾
		Seiichi NAKAI	Minoru SAITO

- (1) 宇宙開発事業団
National Space Development Agency of Japan
- (2) 金属材料技術研究所
National Research Institute for Metals
- (3) 名古屋大学
Nagoya University
- (4) (財) 宇宙環境利用推進センター
Japan Space Utilization Promotion Center
- (5) 日立造船(株)
Hitachi Zosen Corporation

ABSTRACT

The purpose is to study the feasibility of application of centrifugal force to remove the bubbles from molten material for the advanced material development in space.

The microgravity experiments in an aircraft were carried out to observe the bubbles motion under centrifugal force in a rotated cylinder, by means of a acrylic cylindrical cell filled with silicone-oil to simulate the experimental cartridge in space, a motor to rotate the cell, CCD cameras to record the motion and a computer to control the system.

The good agreement was obtained between the observed bubbles motion and the numerical analysis under the less effect of secondary and inertial flows which occurred with the decrease in rotating speed.

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技術は、宇宙実験において重要な技術開発課題となっている。

この技術開発を、JEMで行われる宇宙実験を目標とした共通実験技術開発の中で実施しており、現在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、遠心力を用いた方法の検討を進めている。ここでは、気泡が観察可能な液体を用いて、回転によって生ずる遠心力の気泡移動への影響、特に地上では観察し難い回転減速後の気泡の挙動等基礎的なデータを得ることを目的として航空機実験を実施した。

なお、航空機実験を、平成3年6月に、三菱式MU-300を用いて実施した。

2. 実験内容

2.1 実験項目

試料カートリッジを軸回りに回転させて遠心力を起こすことを想定するが、材料熔融状態の実験では、気泡移動の把握が困難であるため、気泡移動の観察に主眼を置き、常温で可視化できる液体を用いた実験とした。

液体の入った密閉容器をモータで回転することにより、遠心力を発生し、気泡を回転中心に移動させる。遠心力による気泡挙動への影響を観察すると共に、地上においては観察し難い回転減速後の気泡の挙動にも注目した。

この実験を下記の4点に関して実施し、特に第1, 2項目に重点を置いた。

(1) 単一気泡移動の観察

遠心力の発生による単一気泡の動きを観察し、それに対応する地上実験結果及びシミュレーション結果との比較により遠心力の効果を確認する。また液体粘度、回転数、気泡径等の違いによる気泡の挙動差を観察するとともに、回転減速方法の相違による影響も観察する。

(2) 多数気泡の集合状態観察

多数の気泡を予め注入しておき、遠心力による気泡の集合状態を観察する。また、回転減速パターンを変えても観察する。これより複数気泡の影響、回転減速時の影響について検討データを得る。

(3) 偏心容器内の気泡挙動の観察

気泡の集合位置は、材料中心部よりも壁付近にある方が生成材料の歩留まり上都合がよい。回転軸と容器中心軸とが異なる偏心容器では、容器内壁へ気泡を移動することが可能であり、この状態における気泡の集合状態を観察する。

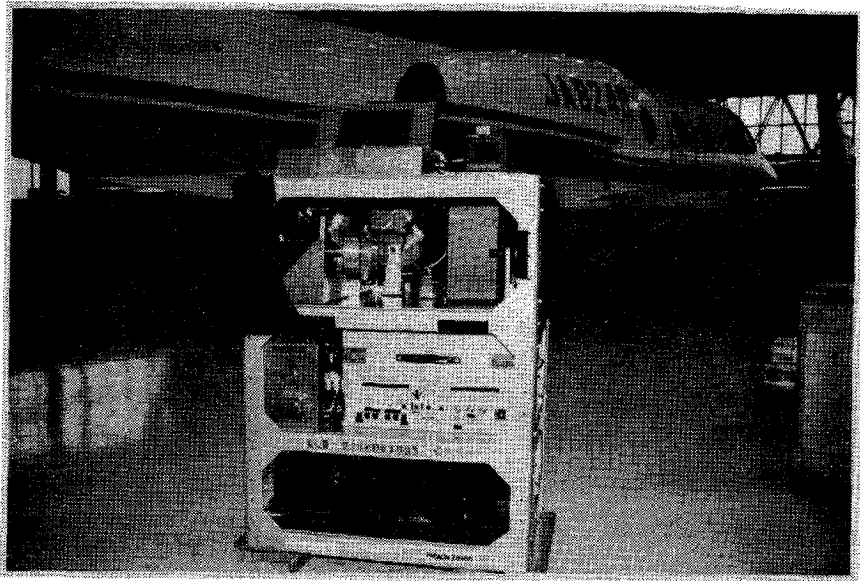


図 2. 実験装置全体図

Fig. 2 Photograph of Experimental Apparatus

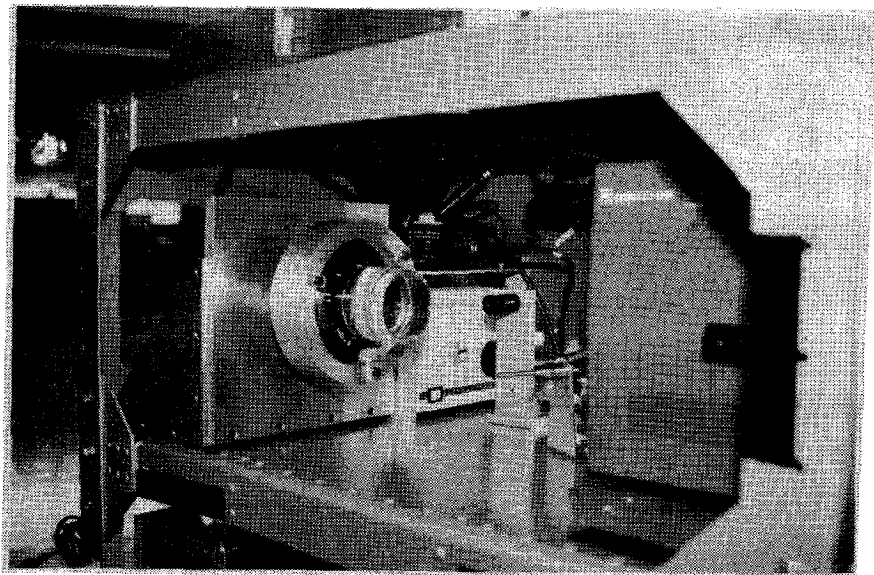


図 3. テストセクション

Fig. 3 Photograph of Test Section

2. 3 実験条件

表1に実験条件を示す。その他、微小重力下での回転減速後の気泡挙動を観察するためにその減速率もパラメータに加えた。

表1. 実験条件
Table 1 Test Condition

容 器	アクリル製円筒容器 同時容器： 長さ50mm, 内径50, 20mm 偏心容器： 長さ50mm, 内径50mm
使用液体	シリコン油（信越シリコーンKF96） 動粘度： 10, 100 cSt
容器回転数	33, 60, 104, 189 rpm 〔回転軸からの距離25mm位置における発生加速度〕 0.03, 0.1, 0.3, 1 G

3. 実験結果及び考察

6日間にわたり計44回のパラボリックフライトが実施され、その回数の実験を行った。

3. 1 気泡移動結果

回転軸と容器軸とが一致した同軸容器内における定常回転中の気泡の移動状況を図4に示すが、時間とともに気泡が回転軸へ移動する全体状況が分かる。また回転数・Z方向加速度とともに、液体動粘度100, 10cStの場合の気泡移動測定結果を数値計算結果と比較できる形で、図5, 図6に示す。

回転軸への気泡移動は、粘度、回転数、気泡径を変えても計算とよく一致し、次のようにまとめられた。なお、高粘度（100cSt）の液体では大小の気泡が同位相で回転軸に集合する様子が確認された。

① 液体粘度の違い

10cStの方が速く回転軸に移動する。回転軸に移動する時間は、100cStと10cStとでは、約10倍異なり、動粘度にはほぼ比例する。

② 気泡径の違い

気泡径の大きい方が速く回転軸に移動する。回転軸に移動する時間は、気泡径が2mm程度以下の範囲では、大略気泡径の2乗に反比例する。

③ 回転数の違い

回転数の高い方が、気泡は速く回転軸に移動する。回転軸へ移動する時間は、大略回転数の2乗に反比例する。

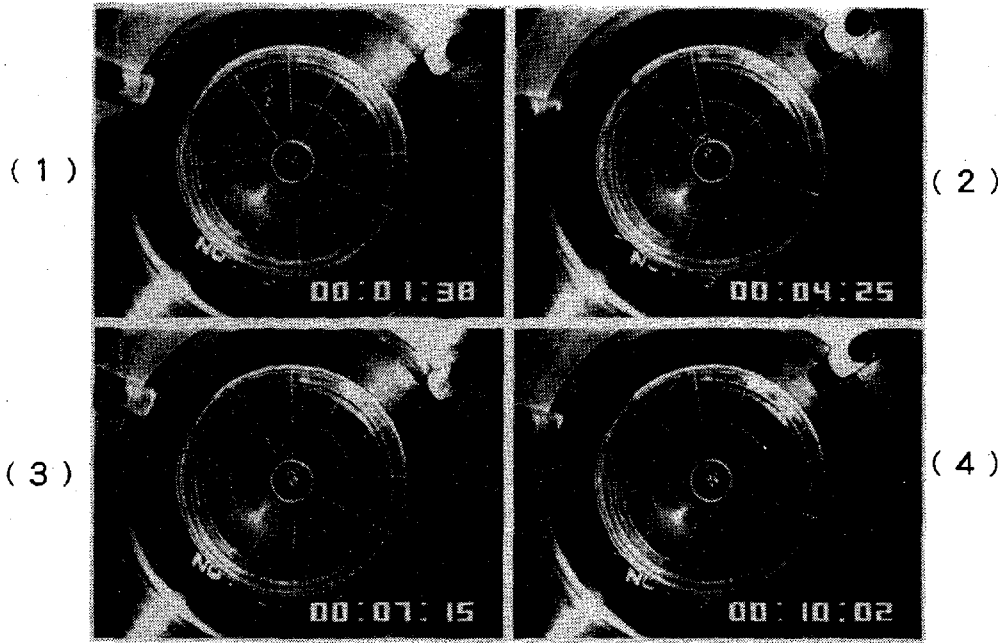
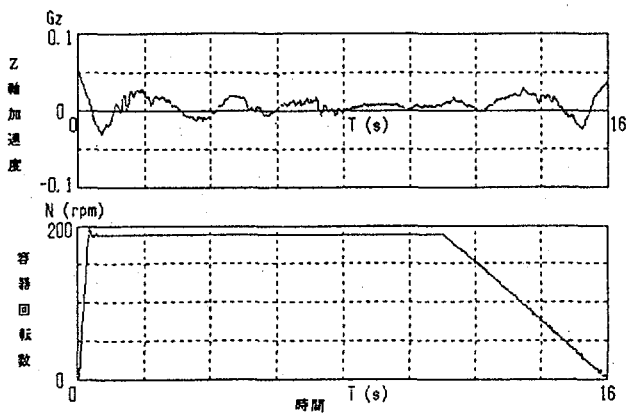


図4. 気泡移動状況 (液体動粘度: 100cSt, 回転数: 104rpm)

Fig. 4 Photograph of Bubbles Motion
(Kinematic Viscosity: 100cSt, Speed of Rotation: 104rpm)



気泡径 = 0.31 (mm) 動粘度 = $1.0E-04$ (m²/s) 回転数 = 189.0 (rpm)

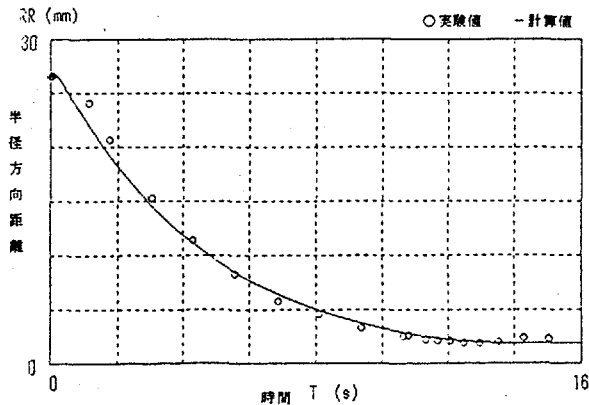
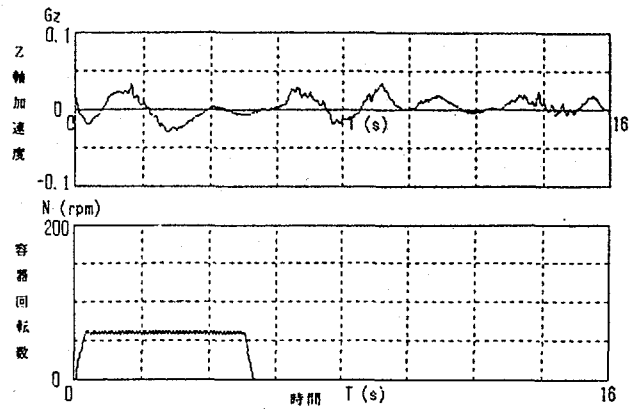


図5. 気泡移動測定結果
(液体動粘度: 100cSt, 回転数: 189rpm)

Fig. 5 Comparison of the Observed and Computed Bubble Motion
(Kinematic Viscosity: 100cSt
Speed of Rotation: 189rpm)



気泡径 = 0.32 (mm) 動粘度 = $1.0E-05$ (m²/s) 回転数 = 60.0 (rpm)

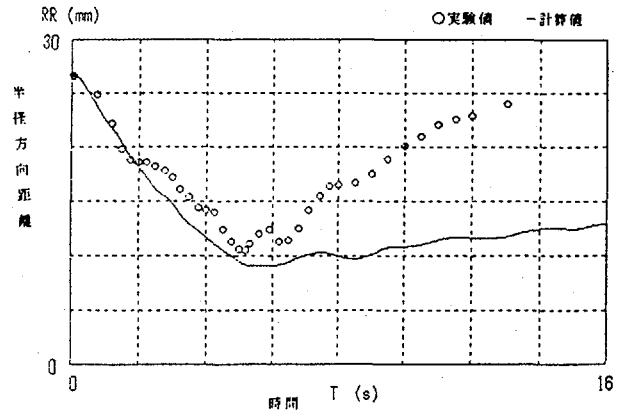


図6. 気泡移動測定結果
(液体動粘度: 10cSt, 回転数: 60rpm)

Fig. 6 Comparison of the Observed and Computed Bubble Motion
(Kinematic Viscosity: 10cSt
Speed of Rotation: 60rpm)

これらは、気泡の回転軸への移動時間が、 $\frac{\nu}{R^2\omega^2}$ (ν : 液体動粘度, R : 気泡半径, ω : 容器回転角速度) にほぼ比例するという結果であり、基礎式の簡略化から推測される関係と一致している。即ち、ほぼ気泡径が同じで、動粘度100cSt、回転数189rpmの場合と、動粘度10cSt、回転数60rpmの場合とは、気泡が同じ軌跡をたどって移動する。

容器回転が停止した後の容器内は、残留流れにより容器壁から離れている液体はまだ回転している。計算ではソリッド状態で流れを計算しているため、回転停止後の気泡挙動は実験値とは異なっている。

3. 2 気泡の合体

高粘度(100cSt)では、気泡が回転軸へ移動する時、あるいは回転軸に集合している時、いずれにおいても地上実験と同様に気泡が合体する現象は観察できなかった。なお、低粘度(10cSt)では、多数気泡が接する実験ができなかったため、気泡の合体を観察する機会がなかった。

地上実験では、回転中に何らかの振動を与えると気泡が合体する現象が見られたが、実際の材料生成時でも、気泡を合体するためには、回転だけでなく、何らかの振動を必要とするであろう。

3. 3 回転減速・停止後の気泡の移動

容器回転中に、既に回転軸付近まで移動した気泡は、回転減速時もしくは停止後に容器の軸方向に沿って中央部へ移動する現象が観察された。これは、液体回転の減速が、容器回転の減速に対して遅れが生じるため、容器壁、特に、円筒容器の天板・底板付近の液体旋回角速度と容器中央部の液体旋回角速度とに差異が出て、その差によって生ずる2次流れによるものと考えられる。

そこで、回転軸付近に移動した気泡が、2次流れにより軸に沿って両端から中央部へ向かって流れるとの想定の下に、容器回転減速後の2次流れによる軸方向の移動距離及び速度を測定した。その結果の1例を図7に示す。

高粘度液体(100cSt)を用いた実験では、回転減速率を189rpm/sec, 38.7rpm/sec, 18.9rpm/secの3種類として比較した。減速率が小さくなると、気泡が回転軸を移動する速度は小さくなるが、移動時間が長くなるため、総移動距離にはあまり差がなく、この減速率の範囲では、どの場合でも、容器の軸方向中央部(気泡位置25mm地点)まで、移動するように思われた。ただし、容器を惰性で回転減速する等さらに減速率を小さくした場合は、2次流れが小さくなることも考えられる。全体の流れを考えると、気泡が容器中央部に集まるだけでなく、さらにその後、容器円筒壁(半径)方向に広がる可能性があるが、実験では中央部に集まる現象だけが観察された。

低粘度液体(10cSt)を用いた実験では、回転減速率を189rpm/sec~5rpm/secとして比較した。気泡はGの変動に敏感に反応し、特に気泡径が2~3mm以上になると、2次流れによる移動よりもGの変動による挙動の方が大きいと思われる。また、大きな気泡は、Gの変動により移動することで、2次流れを乱していると考えられ、そのために解析はかなり困難であった。小気泡に関しては100cStの場合と同様に、気泡は軸に沿って容器中央部に移

動する現象が見られた。

また、 $\phi 20$ の径の小さい容器では、 $\phi 50$ の容器に比べて残留流れが続いている時間が短い、気泡の軸方向移動については大差がないように思われた。

3. 4 偏心容器内の気泡の移動

図8に、偏心容器内における気泡移動測定結果の1例を示す。

上図は回転軸を中心とした気泡の半径方向距離、中央に容器軸を中心とした気泡の半径方向距離、下図に容器回転軸から見た気泡の旋回回転数を、容器の回転数とともに示している。なお、回転軸と容器軸は15mm離れている。

容器の定常回転中は、同軸の容器と同様に気泡は回転軸位置に移動する。しかし、回転を減速し始めると、気泡は回転軸中心から離れているのが分かる。回転減速後、容器中心から気泡が約15mm付近位置にいること、容器軸まわりの気泡旋回回転数がある一定の回転数を一時期維持していることから、気泡は、容器軸回りに旋回していると考えられる。これは、容器回転を減速し始めると、容器内の流れが、容器回転と同一である回転軸回りの流れから残留流れにより容器軸回りの流れに移行するためであり、気泡はその流れに乗って移動する。旋回停止後に気泡の集まった場所が推定できないだけでなく、集合した気泡が分散する可能性もある。

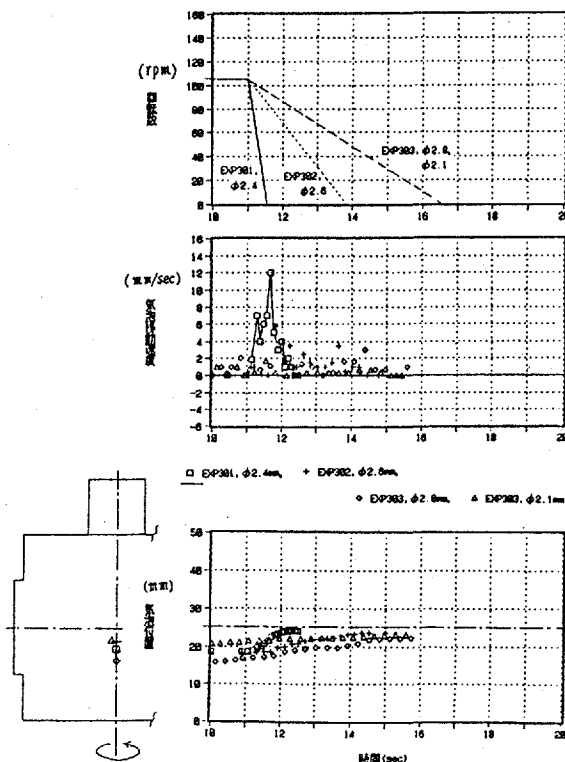


図7. 減速時の軸方向気泡移動測定結果
(液体動粘度:100cSt, 回転数:189rpm)

Fig. 7 Bubble Motion along the Axis with the Decrease in Rotation
(Kinematic Viscosity:100cSt
Speed of Rotation:189rpm)

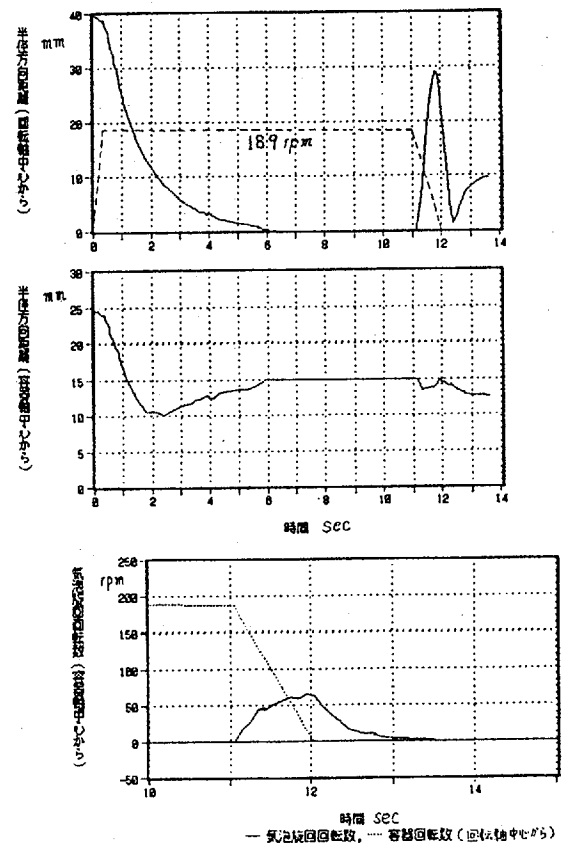


図8. 偏心容器内における気泡移動測定結果
(液体動粘度:100cSt, 回転数:189rpm)

Fig. 8 Bubble Motion in the Eccentric Cell
(Kinematic Viscosity:10cSt
Speed of Rotation:60rpm)

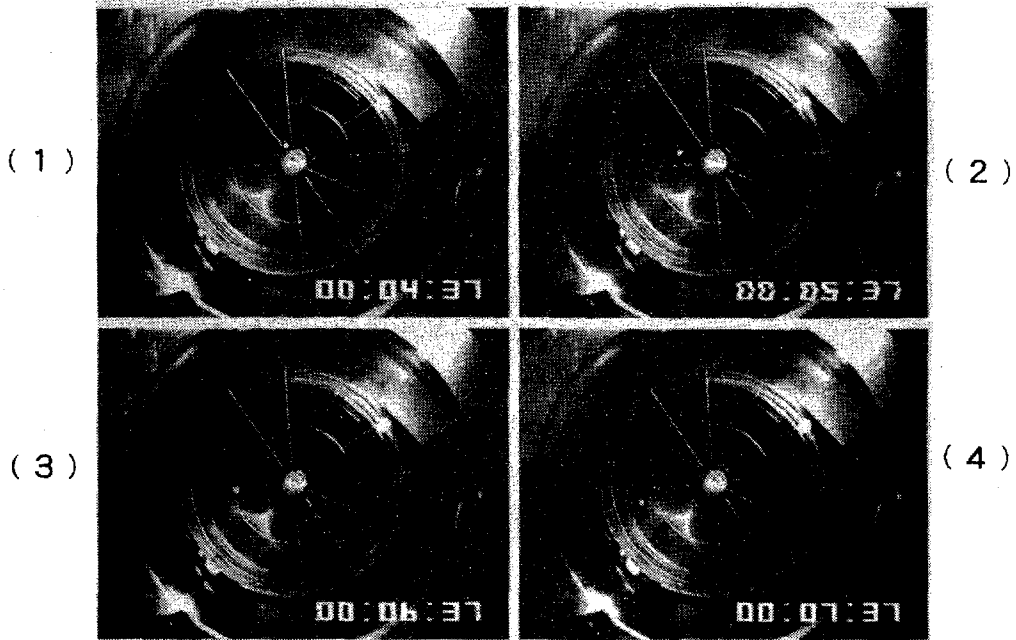


図9. 粒子移動状況 (液体動粘度: 10cSt, 回転数: 60rpm)

Fig. 9 Photograph of Particle Motion
(Kinematic Viscosity; 10cSt, Speed of Rotation; 60rpm)

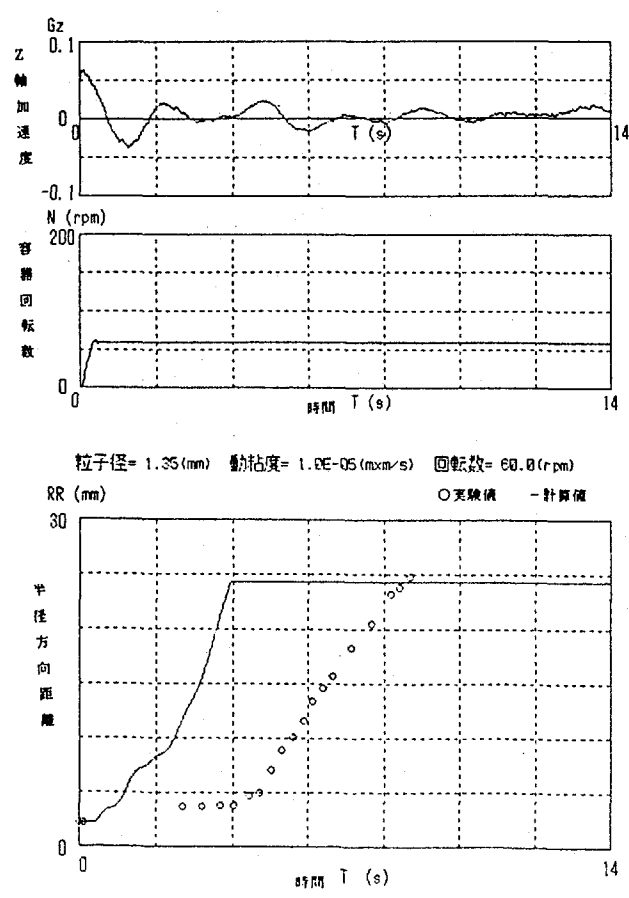


図10. 粒子移動測定結果 (液体動粘度: 10cSt, 回転数: 60rpm)

Fig. 10 Comparison of the Observed and Computed Particle Motion
(Kinematic Viscosity; 10cSt, Speed of Rotation; 60rpm)

今回は、回転軸が容器内にある偏心容器だけを用いて実験したが、容器外に回転軸を持つ場合にも同様の現象が起きると考えられる。したがって、回転減速後に集まった気泡を移動させないような気泡溜まり等の工夫が必要となるであろう。

3. 5 粒子の移動

液体より重いものは、回転中、半径方向に広がっていく。そのため実験では、粒子を回転軸付近に設置する必要がある。航空機微小重力実験の場合、 μG 以前に1 Gあるいは2 G等のG変化があるため、回転軸にアクリル丸棒を設置し、その丸棒に溝を掘り、その溝に粒子としてガラス球を置いて実験を行った。図9に粒子の移動状況、図10に粒子の移動測定結果を示す。

実験においてガラス球が溝から離れ難く、離脱するまで約4秒程度の時間を費やしたために計算値とは異なる結果ではあるが、溝から離脱後の発散状況は計算値とはほぼ一致している。したがって本計算によって粒子の移動は推測できると考えられ、気泡の移動と粒子移動との比較検討が可能となった。

溝から離れにくい要因としては、粒子の初期位置が回転軸付近であるために発生する遠心力が非常に小さいうえ、溝があるためにガラス球は1部分だけがアクリル軸回りの流れに接しているだけで、その流れのためにガラス球が溝から出るのを抑える力が働くこと、または、ガラス球がアクリル棒に接しながら自転するためにアクリル棒に押し付ける力が生ずることが考えられる。さらに、ガラス球を観察し易くしようと表面に水性塗料を塗ったことにより、アクリル棒と塗料の間に付着力が生じたことも考えられる。実際、塗料に油性を用いた場合には、100cStでの粒子移動の観察実験で、アクリル棒とガラス球が付着し μG 中には溝から離れなかった例がある。

4. 結言

航空機実験の結果を以下にまとめる。

- (1) 航空機実験を実施することにより微小重力環境下において、遠心力による気泡の移動が観察され、本技術の有用性が確認された。
- (2) 気泡の移動速度は、粘度及び回転数を変えても計算予測値と良く一致した。したがって、本計算が予測に十分有効であることが確認された。
- (3) 容器を回転することによる気泡の合体は観察されず、合体するためには何らかの振動を必要とするであろう。
- (4) 回転軸を容器軸に対して偏心させた容器では、同軸容器同様、気泡が回転軸に移動することが確認されたが、回転減速時の残留流れにより気泡が回転軸から移動するため、移動した気泡を閉じこめる等工夫が必要なことが分かった。
- (5) 回転減速・停止後の2次流れによる気泡の移動は、容器中央部への移動だけが観察された。
- (6) 粒子挙動の実験において、計算結果との一致性が見られ、本計算によって気泡の移動と、粒子移動との比較検討が可能となった。