

# 毛細管力を利用した気液分離実験

宇宙開発事業団 古川正夫、石井康夫、宮崎芳郎、飯田亨

(株)東芝 山崎 力、村田圭治、小森 実、栗山義雄

## 1. 緒言

宇宙開発事業団では1985年より二相流体ループの開発を進めており、現在地上試験モデルを用いて自動運転制御試験を実施している。二相流体ループの開発は微小重力下に於ける二相流の挙動に関するデータの取得が不可欠な開発フェーズとなっている。中でも、二相流体ループの構成要素であるアキュムレータ、コールドプレート等は微小重力下での気液分離技術、液保持技術の確立が特に重要である。

宇宙開発事業団は微小重力環境下でのこれらの技術を確立するため、1994年4月に予定されているIML-2計画(第二次国際微小重力実験室計画)でTDFU(熱駆動流実験ユニット)をシャトルに搭載し、軌道上で熱駆動流実験を実施することを計画している。現在、TDFUは機能確認モデル、振動試験モデルおよび航空機実験モデルを用いて設計確認を完了している。本文で紹介する気液分離実験はTDFUの設計確認モデルの一環として製作した航空機実験モデルを用いて、微小重力下での流体挙動を観察したものである。本実験はTDFUのフライトモデル(FM)の設計を進めるにあたり、微小重力下での(1)流体挙動の確認、(2)コア形状による気液分離機能の確認を目的として実施した。

## 2. 実験方法

### 2.1 航空機実験モデル

図2.1-1に航空機実験モデルの概略を示す(以下ベッセルと言う。)。このベッセルはTDFU FMと同等の寸法とした。ベッセル内には作動液として蒸留水が封入されている。ベッセル容器は銅でできており、濡れ性が良くなるように表面処理を施している(蒸留水との接触角は10~30deg)。また、観察窓と照明窓は水との濡れ性は悪いが機械的強度を考慮して、ポリカーボネート樹脂で製作している。容器内はガス部とコア部からなっており、微小重力下ではコアの毛細管力を利用して、ガス部に気相、コア部に液相がそれぞれ気液分離されるよう設計している。実験ではコア形状による気液分離機能の相違を調べるため表2.1-1に示す6種類のコアを用いた。コアは多数の垂直な板材で構成された毛細管構造をしており、ベッセル内に充填された作動液は毛細管力によってコアに集められ、コア間に保持される。各コア間隙は端部で連通しており、コア内に保持された作動液は互いにコア間を行き来できるようになっている。

### 2.2 実験装置

航空機実験で使用した実験装置を図2.2-1に示す。実験装置は供試体であるベッセル、ベッセル内の気液分離現象を記録するビデオカメラ、照明装置および共通ラックから構成さ

れている。本実験装置では1回のフライトで同時に4通りの気液分離現象を記録できるように、4台のベッセル、4台のビデオカメラを配置している。また、本実験では気液分離

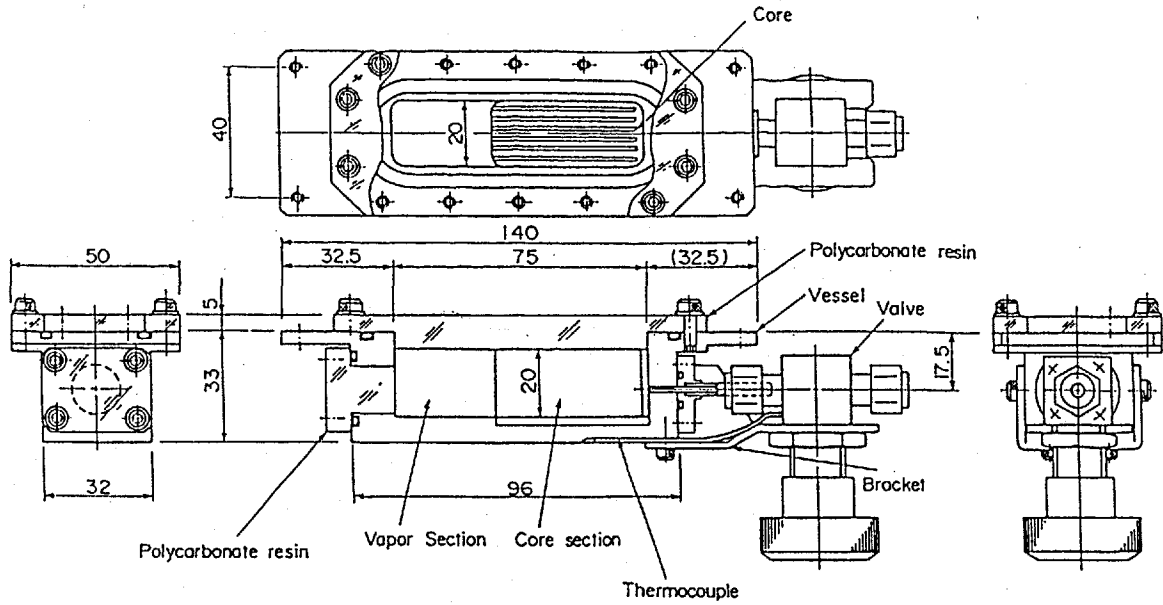
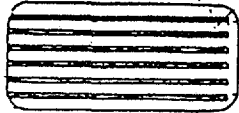

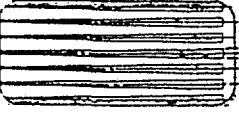


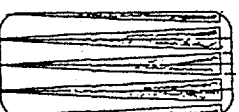


図2.1-1 航空機実験モデル

表2.1-1 コア形状

コア名	コア形状	テーパ角 (rad)	コア間隔 (mm)
P 1		0	2.0
MT 1		0.028	2.5
MT 2		0.028	3.0
MT 3		0.028	3.5
MT 4		0.028	5.0
MT 5		0.086	5.0

の映像データのほか、実験装置および機体のGデータ、ベッセルと機内の温度も同時に取得した。

### 2.3 実験ケース

航空機実験は、微小重力環境下におけるベッセル内の二相流の観察を通して、(1)流体挙動の確認、および(2)コア形状による気液分離機能の確認を目的として実施した。表2.3-1に実験ケースを示す。

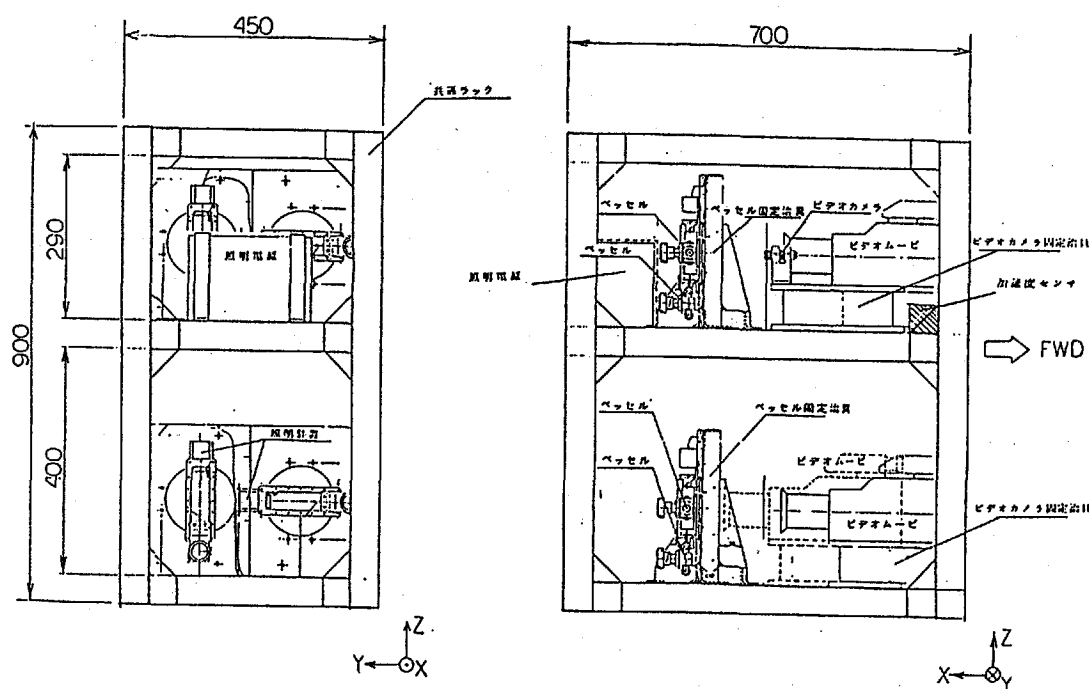


図2.2-1 実験装置

表2.3-1 実験ケース

	取り付け姿勢	充填液量	気相状態	コア
Case 1	-Z方向	少量	飽和蒸気	P1 MT1 MT2 MT3 MT4 MT5
Case 2	-Z方向	多量	空気封入	P1 MT1 MT2 MT3 MT4 MT5
Case 3	-Z方向	多量	飽和蒸気	P1 MT2
Case 4	-Z方向	微量	飽和蒸気	MT3, MT3(浸透板) MT5
Case 5	+Z方向	少量	飽和蒸気	MT4
Case 6	+Y方向	少量	飽和蒸気	P1 MT1 MT2 MT3 MT4 MT5

(注) 充填液量の定義



多量



少量



微量

(1) 実験の確認項目

表2.3-1に従い各試験ケースの主たる確認事項を以下に示す。

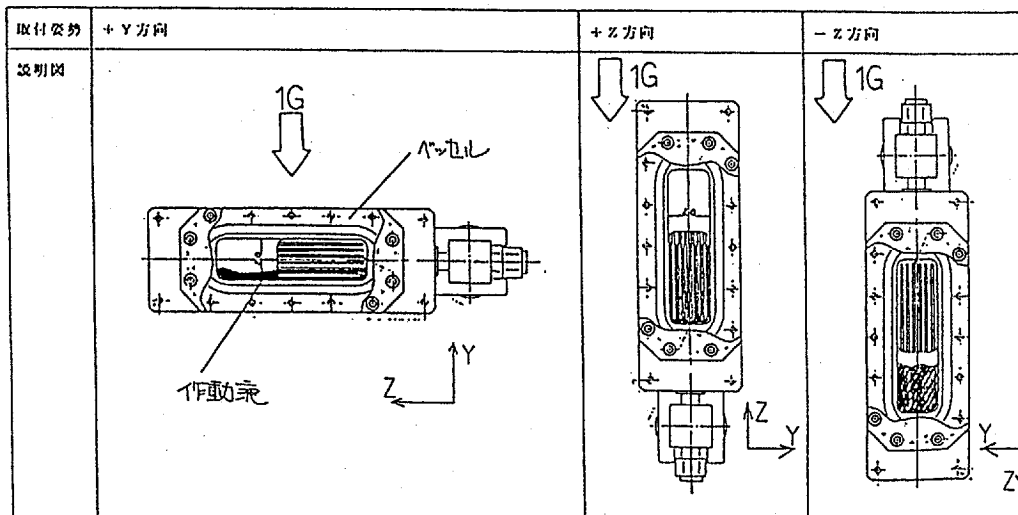
- (a) Case 1 : 微小重力下での流体挙動の把握をする。
- (b) Case 2 : コア部に気泡（不凝縮ガス）が存在していても、コア部から気泡を排出し、液を集めることを確認する。コア内の気泡排出が一番困難なケースである。
- (c) Case 3 : 気泡が飽和蒸気の場合である。
- (d) Case 4 : コア部から十分離れた所に存在する液をコア部に集めることを確認する。
- (e) Case 5 : コア部に集められた液が、G-ジョッターの影響を受けずにそのまま保持されることを確認する。
- (f) Case 6 : パラボリックフライト直前の加速度方向が液挙動に与える影響を確認する。

(2) 実験パラメータの選定

上記の目的のため、実験パラメータを以下のように選定した。

- (a) パラボリック飛行投入前の加速度方向（表2.3-2を参照）  
 パラボリック飛行投入前の加速度方向に関係なく気液分離することを確認する。パラメータは、±Zと+Yの3ケースを選定した。
- (b) コア形状  
 コア形状による気液分離機能への影響を確認する。コア形状は表2.1-1に示すように、平行コア1種とテーパコア5種を選定した。
- (c) 液量  
 液量に関係なく、コア部に液が集められることを確認する。パラメータは多量、少量、微少量の3種を選定した。
- (d) 不凝縮ガスの有無  
 コア部内に気泡が存在していても、液が気泡をガス部へ押し出すことを確認する。実験パラメータとしては、飽和蒸気圧と空気封入（1 atm）の2ケースを選定した。

表2.3-2 ベッセル取付姿勢



### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 実験結果

航空機実験による実験結果の概要を表3.1-1に示す。

微小重力下での気液分離実験結果を図3.1-1～図3.1-5に一例として示す。それぞれパラボリックフライト直前の2G状態、 $\mu$ G突入直後、 $\mu$ G状態5秒経過後、そして $\mu$ G崩壊直前を示している。

図3.1-1～図3.1-3はテーパコアMT5の実験結果の一例であり、取付姿勢-液量-ベッセル内はそれぞれ-Z-微量-飽和蒸気圧、+Y-少量-飽和蒸気圧、-Z-多量-空気封入の実験ケースについて示した。図3.1-4はテーパコアMT3の実験結果の一例であり、-Z-少量-飽和蒸気圧の場合であり、また図3.1-5は平行コアP1--Z-液少量-飽和蒸気圧の実験結果である。

表3.1-1 実験結果の概要

取付方向	液量	気相状態	平行コア	テーパコア					備考
			PI	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	
-Z	少量	飽和蒸気	× 気液分離確認 界面不均一 液が浸透しない コアあり	○ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布均一 液面状態安定	○ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布均一	△ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布不均一	△ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布不均一 毛細管力小	○ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布均一 液面状態安定	Case1 気液分離機能確認
	多量	空気封入	× 気液分離せず ガス排出せず 流体挙動なし	○ 気液分離確認 ガス排出確認	○ 気液分離確認 ガス排出確認	○ 気液分離確認 ガス排出確認	△ 気液分離確認 気泡がコア内に 残存	○ 気液分離確認 ガス排出確認	Case2 ガス排出機能確認 (不凝縮ガス)
	多量	飽和蒸気	× 気液分離、ガス 排出できない場 合あり		○ 気液分離確認 ガス排出確認				Case3 ガス排出機能確認 (飽和蒸気)
	微量	飽和蒸気				× 液が浸透しない コア間隙あり 界面分布不均一		○ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布均一 液面状態安定	Case4 液量による気液分離 機能の違い
	微量	飽和蒸気				△ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布不均一 浸透効果あり			Case4 浸透効果の差
	少量	飽和蒸気					○ 液保持機能確認		Case5 液保持機能確認
+Y	少量	飽和蒸気	× コア間隙、連通 流路に液が浸透 しない箇所あり 界面分布不均一	△ コア間隙、連通 流路に液が浸透 しにくい箇所あ り 界面不均一	× コア間隙、連通 流路に液が浸透 しない箇所あり 界面分布不均一	△ 全てのコア間隙 に液が浸透する 界面分布不均一	△ 全てのコア間隙 に液が浸透する 界面分布不均一 毛細管力小	○ 気液分離確認 ガス排出確認 界面分布均一	Case6 微小重力環境突入前 の加速度方向

#### (1) 微小重力下での流体挙動

微小重力下での流体挙動は以下に示すように界面エネルギーが小さくなる方向への挙動が観察された。

(a) 気相は濡れ性の悪いポリカーボネート面側に、液相は濡れ性の良い銅容器側に集まろうとする挙動が見られた。

(b) パラボリックフライト投入前、コア部から十分に離れていた液は、 $\mu$ G状態突入後銅表面に沿ってコア部まで移動し、コア間隙に集められた。特に、テーパコアではコア間隙が狭い端部からコア間隙が広いガス部側へ液が移動する現象が見られた。

(c) こうした流体の挙動は比較的早く、航空機実験で得られる $\mu G$ 時間内(約20秒)で十分確認できるほどであった。

(d) 液量がコア部の容量よりも少ない場合、ほとんど全ての液はコア部に集められた。また、液量がコア部容量よりも多い場合は、コア部全ては液で満たされ、ガス部にも液が残存していた。このときガス部内の気相は液に囲まれず、濡れ性の悪いポリカーボネート面に接触する形で存在していた。

## (2) コア形状による気液分離特性

各実験ケース毎の結果を以下に示す。

(a) Case 1 : -Z方向、液少量、飽和蒸気圧、P1, MT1, MT2, MT3, MT4, MT5

全種類のコアで液がコア部に集められることが確認された。テーパコアでは、液はコア間隙の狭い端部からガス部方向へ液が満たされて行くのが観察できた。特に、テーパコアMT1, MT5は気液界面位置制御機能が良好であり、MT3(図3.1-2), MT4については気液界面が不均一となっていることが観察された。

また、平行コアではテーパコアの様にコア間隙の狭い端部からガス部方向へ液が満たされて行くといったコアへの液浸透に方向性がなく、コア内の液中に気相が存在していたり、液界面も不均一となっていた。(図3.1-5)

(b) Case 2 : -Z方向、液多量、空気封入、P1, MT1, MT2, MT3, MT4, MT5

テーパコアでは、コア内に閉じこめられた不凝縮ガス(空気)が容易に押し出し、液をコア内に集めることができた。但し、MT4については液排出機能が十分ではなくコア内のポリカーボネート面に接触した気泡を排出することはできなかった。

平行コアでは毛細管力とコア内の不凝縮ガス圧が釣り合い、コア内に閉じこめられた不凝縮ガスを排出することができなかった。

(c) Case 3 : -Z方向、液多量、飽和蒸気圧、P1, MT2

テーパコアMT2では、Case 2との違いは(空気封入と飽和蒸気圧との違い)見られなかった。平行コアP1では、飽和蒸気圧が空気封入の場合に比べはるかに小さいのでコア内に閉じこめられた気相を排出することができたが、液界面が依然として不均一の状態であった。

(d) Case 4 : -Z方向、液微量、飽和蒸気圧、MT3, MT3(空気封入+浸透板), MT5

テーパコアMT3において浸透板の効果を見た場合、浸透板がある方が液のコア部への到達時間が短くなることが観察された。Case1(少量)と比較すると液微量の場合は気液界面分布は顕著となり、MT3は液面分布が不均一となり液を満たさないコアもあることが観察された。しかし、MT5については液が微量であるにも関わらず気液界面が均一な気液分離を得ることができた。

(e) Case 5 : +Z方向、液少量、飽和蒸気圧、MT4

コア部内に保持された液は、 $\mu G$ 状態でもコア部内に保持されることが確認された。また、G-ジッターによる影響も見ることができなかった。

(f) Case 6 : +Y方向、液少量、飽和蒸気圧、P1, MT1, MT2, MT3, MT4, MT5

テーパ角の大きいT5を以外は、液が浸透しないコアが存在し(+Z方向のコアが特に顕著である。)、また気液界面分布が不均一となった。

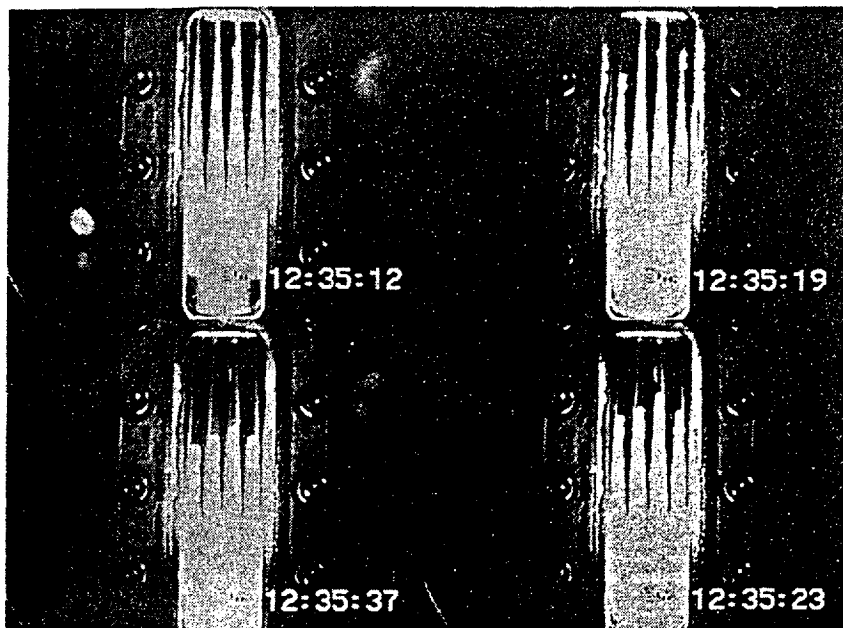


図3.1-1  
MT5-(-Z)-(微量)-  
飽和蒸気圧

図3.1-2  
MT5-(+Y)-(少量)-  
飽和蒸気圧

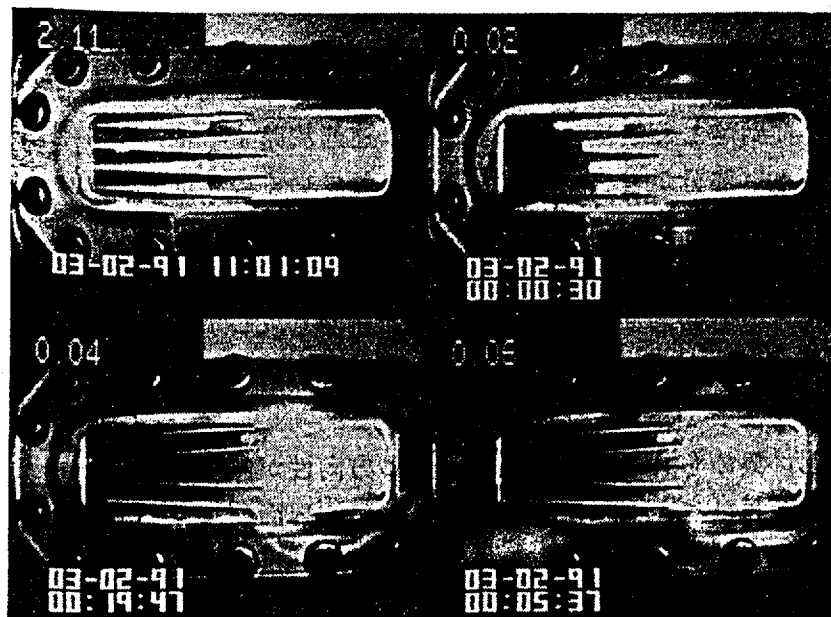
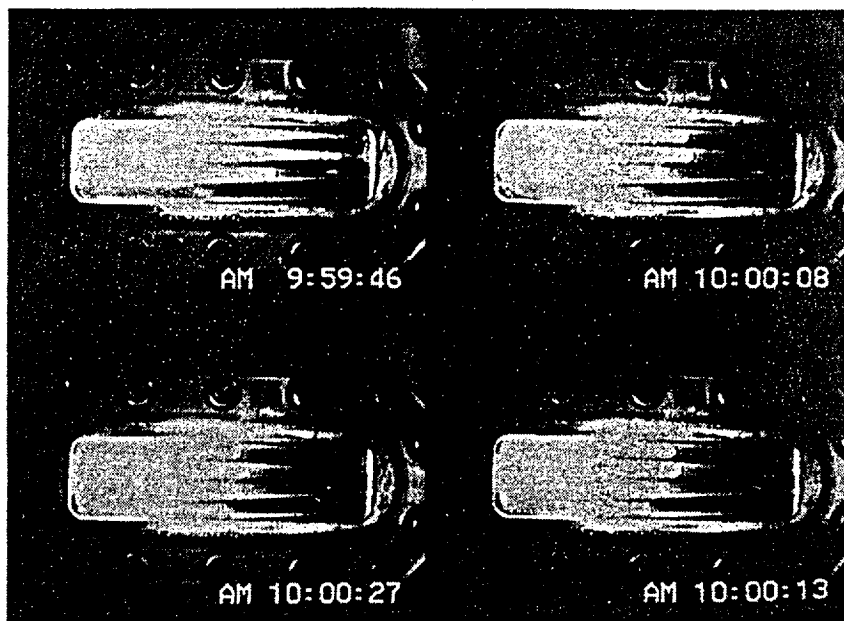


図3.1-3  
MT5-(-Z)-(多量)-  
空気封入

図3.1-4  
MT3-(-z)-(少量)-  
飽和蒸気圧

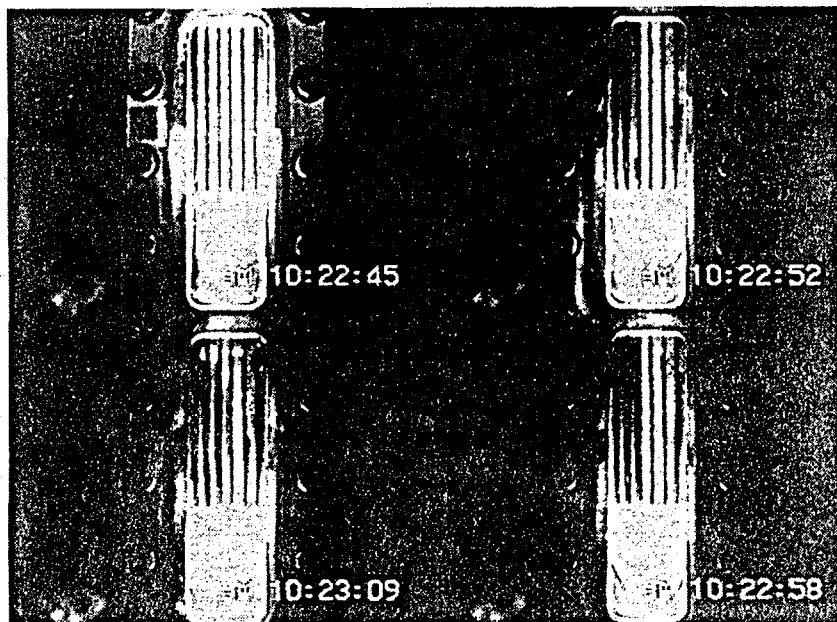
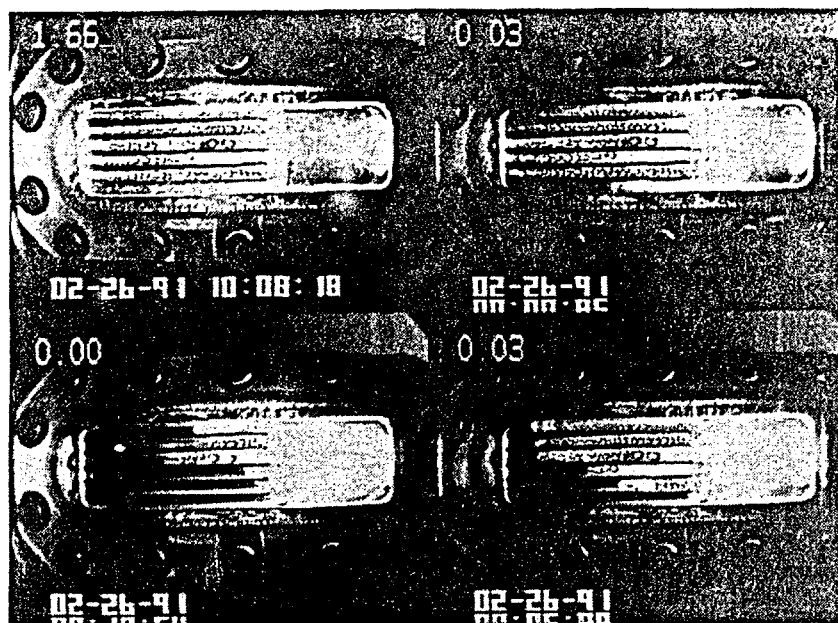


図3.1-5  
P1-(-Z)-(少量)-  
飽和蒸気圧

### 3. 2 考察

前節の実験結果に関する考察を以下に示す。

#### (1) テーパーコア

テーパーコアはガス部方向に行くに従いコア間隙が広くなり、コア間の毛細管力が小さくなる構造をしているため、コアに到達した液はまずコア端部の連通路路まで浸透し（毛細管機能）、その後コア間隔の小さい部分から次第に液が満たされていくのが観察された。このような決まった方向性を持つ浸透濡れが、コア部からガスを押し出す機能（ガス排出機能）を生じさせることが分った。また、各コア間隔の界面位置が均一になる効果（界面の位置制御機能）も確認できた。この機能はコアのテーパー角に比例し、コアの間隔の二乗に反比例し大きくなる。

#### (2) 平行コア

毛細管力によって液がコア部に集められるものの毛細管力に方向性が無く、コア部に閉じこめられたガスを押し出す効果は見られなかった。また、気泡界面位置は不均一かつ不安定で、少しの加速度変化で大きく変動した。閉じこめられたガスを押し出す効果は



見られなかった。また、気泡界面位置は不均一かつ不安定で、少しの加速度変化で大きく変動した。

#### 4. 結言

微小重力環境下での気液分離技術、液保持技術を確立するために1994年4月に予定されているIML-2計画を対象にしてTDFUの開発を進めている。現在、TDFUの機能確認モデル、振動試験モデルおよび航空機実験モデルによる一連の設計確認試験を完了したところである。本文で紹介した気液分離実験はTDFUの航空機実験モデルによる流体挙動の観察を通して、微小重力下での(1)流体挙動の確認、(2)コア形状による気液分離機能の確認を目的として実施した。

気液分離実験は四つのパラメータ、即ち(1)パラボリック飛行投入前の加速度方向、(2)コア形状、(3)液量および(4)不凝縮ガスの有無をかえて、6フライト、24ケースの実験を実施した。これらの実験結果から微小重力下での流体は界面エネルギーが小さくなる方向へ移動することが確認できた。また、並行コアに比較してテーパコアの気液分離機能、液保持機能が優れていることが確認できた。実験ではこれらの機能がコアのテーパ角に比例し、コアの間隔の二乗に反比例して大きくなるという理論予測を補強するデータを取得することができた。以上の実験結果および評価を通して貴重な知見を得ると共に上記実験目的を達成した。今後、この成果をTDFUのFMの設計に反映することを予定している。

#### 5. 謝辞

本航空機実験を実施するにあたり、実験準備、フライト、撤収作業の全期間を通して本実験の成功のため御支援、御協力戴いたダイヤモンド・エア・サービス株式会社の関係各位の皆様方に深く感謝いたします。