

微小重力下での熱駆動流の研究 (CAPILLARY)

代表研究者： 古川正夫^{*1}

共同研究者： 二俣亮介^{*1}、大井田俊彦^{*2}、宮崎芳郎^{*3}、山崎 力^{*3}

^{*1} 宇宙開発事業団 システム技術研究部、^{*2} 宇宙開発事業団 宇宙実験グループ、^{*3} (株)東芝

Details of thermally driven flow experiments, performed last July as a mission of IML-2 (Second International Microgravity Laboratory), are reported mainly from an engineering viewpoint. Described in this connection is a thermal accumulator model, named TDFU (Thermally Driven Flow Unit); which was designed and fabricated for the experiments. A way of liquid transfer in TDFU is depicted in the figure for comprehension of operational principles. Hardware design specifications, the process of experiments, and imposed vibrational conditions are stated and then are summarized in the tables. Photographs including some critical scenes are presented to demonstrate that liquid/vapor phase separation, liquid positioning, and liquid transfer were satisfactorily done in TDFU aboard space shuttle. Experimental results show that the observed liquid travel distance was such as theoretically estimated and that the measured vessel temperatures were similar to predicted ones. A conclusion of technical importance is thus drawn that thermally driven flows are instrumental in fluid management under microgravities. Also presented are numerical results of simulation analyses of fluid behaviors in a TDFU vessel in preflight experiments aboard the airplane.

実験の目的、意義

熱駆動流とは、濡れ面／液膜の加熱／冷却によって生じた蒸発／凝縮蒸気流のことで、容器内で気液が分離された(液面が存在する)状態では、この蒸気流に起因する圧力増減によって液面を変化させることができる。このような原理／機能は、熱管理、環境制御、エネルギー供給、化学工業等のシステムにおいて有用で、小型軽量のアキュムレータ、可動部のない流熱制御機器(サーマル・ポンプ、サーマル・ダイオード等)の開発がこれにより可能となる。さて、将来宇宙機用熱管理システムとしては、重量軽減／電力低減の観点から、単相流体ループ(顕熱利用、従来技術)ではなく二相流体ループ(潜熱利用、新規技術)が採用される見込みである。この場合、アキュムレータは、単なるサプライ・リザーバではなく調圧器(設定温度に対応した飽和蒸気圧となるようにループ圧損も補償して印加圧力を制御する)として動作させるので、システム上のクリティカル要素となる。そしてどのような方式を採用するにしても、調圧機能は液高を変化させることに基づいている。作動方法には機械式(開発済)と熱式(開発中)とがあるが、重量／容積／信頼性の点で、宇宙用アキュムレータとしては熱式の方が優れている。IML-2で実験した熱駆動流実験ユニット(TDFU)は、二相流体ループ用熱式アキュムレータの原理モデルで、その実験目的は、微小重力下での気液分離／液保持および発生熱駆動流による液面の上下移動を観測・確認し、熱式アキュムレータの成立性を実証することにある。

実験の方法と装置

図1は、TDFUの動作概念図であり、加熱側ベッセルから冷却側ベッセルに液が蒸気圧差(熱駆動)により移動する様子を示している。図2はTDFUの断面図である。各ベッセルはヴェイバ・スペースとティバード・コア(4つのコアより構成)とからなり、両ベッセルは連結されており、約10 cm³の蒸留水が作動流体として封入されている。加熱/冷却用ペルチエ素子は、図2に示されているようにヴェイバ・スペースの背面に取付けられている。TDFUは、ハードウェアとしては二つのパッケージより構成されており、図3に示したような外観を有する。

表1は、TDFUの主要仕様をまとめたものであり、大きさ、重量、加熱/冷却能力、ヴェイバ・スペース容積、最大液充填量、ティバード・コア・ファクタが記載されている。TDFUの供試体部分の大きさは、幅140 mm、高さ92 mm、奥行28 mmである。最も重要な設計パラメータは、 θ/W^2 で定義されたティバード・コア・ファクタである。ここで θ はティバード角(rad)、 W はコア幅(mm)であり、液保持上/液移動上妥当な θ/W^2 値の範囲が表1に示されている。最適なコア形状は、試作した5種類の θ/W^2 値の異なるコアに対して航空機上で気液分離/液保持実験を行い、その結果が最良なものをベースとして決定した。

飛行実験の結果

熱駆動流に及ぼす振動の影響を調べるため、TDFU全体をVIBES内に設置して実験を実施した。図4は、IML-2における熱駆動流実験のコンフィギュレーションであり、制振状態では3 Hz以上の高周波振動が遮断される。

本実験で最初に得られたリアル・タイム・ビデオ画像は、全液がベッセル2に

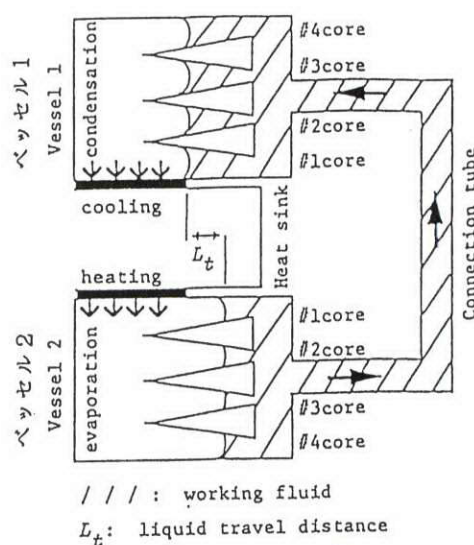


図1 TDFUの動作概念

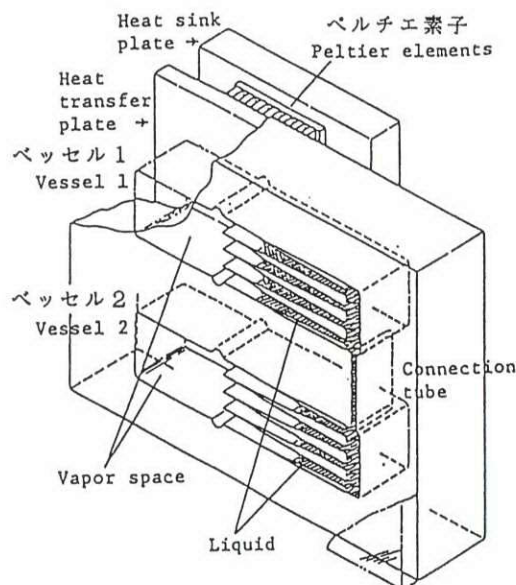


図2 TDFUの断面

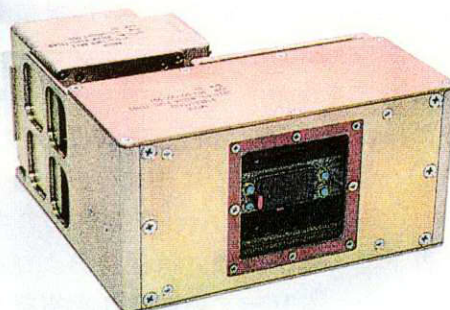


図3 TDFUの外観

集まっていてベッセル 1 には液がないというシーンであった。そのため、ベッセル 2 をまず加熱することにした。実験はケース 1、2 を MET 3 に、そしてケース 3 を MET 11 に実施した。ケース 1 では、非制振状態で 10 分間ベッセル 2 を加熱(ベッセル 1 を冷却)した。ケース 2 では、制振状態で 11 分間ベッセル 2 を加熱(ベッセル 1 を冷却)し、引き続き 7 分間ベッセル 1 を加熱(ベッセル 2 を冷却)した。ケース 3 では、非制振状態でケース 2 と同様なモードの加熱/冷却を 20 分間、10 分間行った。表 2 は実験実施のサマリである。

ケース 1～3 のいずれの実験においても、概要にすでに記したように、

表 1 TDFU の主要設計仕様

大きさ：主パッケージが 200mm×100mm×85mm 供試体が 140mm×92mm×28mm
重量：主パッケージが 2.0kg
ペルチェ素子：加熱 3.85W, 冷却 1.28W
蒸気空間：24cm ³
最大封入液量：20cm ³
ティバード・コア・ファクタ：0.0011rad/mm ² ～0.014rad/mm ²

表 2 実験結果のサマリ

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
日	MET 3	MET 3	MET 11
時	15:29	17:07	23:15
制振	オフ	オン	オフ
ラン 1	2 加熱 / 1 冷却 10 分間	2 加熱 / 1 冷却 11 分間	2 加熱 / 1 冷却 20 分間
ラン 2	—— ——	1 加熱 / 2 冷却 7 分間	1 加熱 / 2 冷却 10 分間
バッテリー	0.31A・h	0.96A・h	0.82A・h

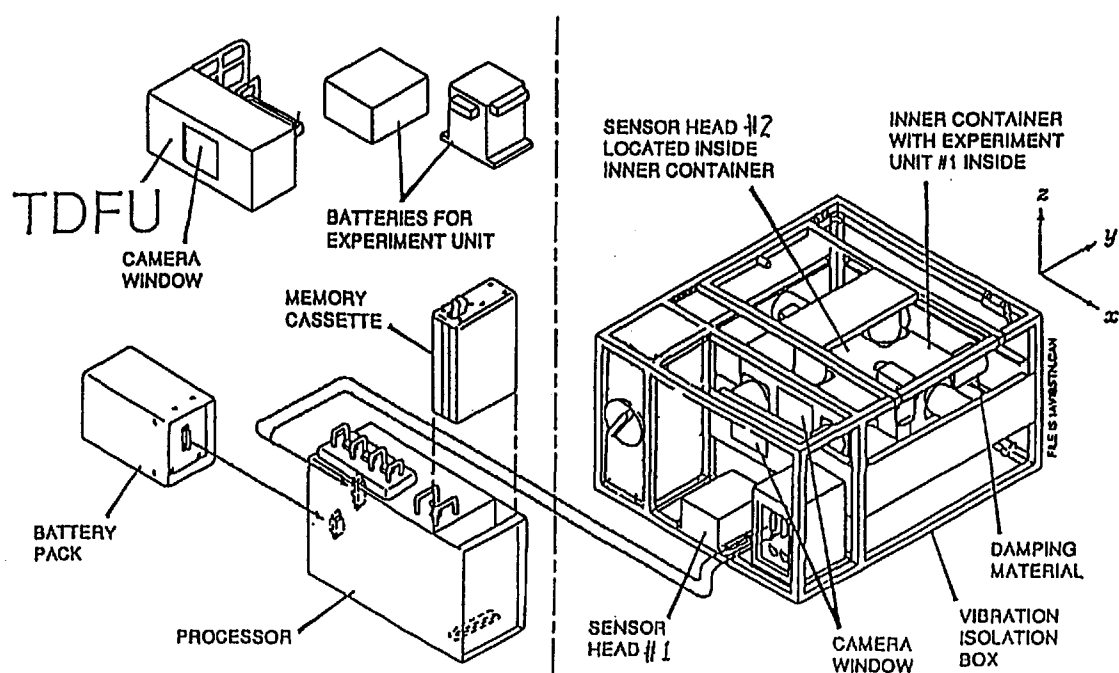


図 4 熱駆動流実験のコンフィギュレーション

(1) 気液分離、(2) コア内液保持、(3) 加熱側ベッセルから冷却側ベッセルの液移動の3機能の視覚確認ができた。図5は、ケース1で得られたリアル・タイム・ビデオ画像で、熱駆動によるベッセル間液移動の実証例である。図5に示されているように、ケース1ではベッセル1の第1コア(最内側)には液が到達しなかった。これはコア最狭部と連結間との間にバブルがトラップされたためであり、この状況はケース2でも同様であった。このバブルはケース3の実験で放逐され、最終的に各ベッセル内の液高はほぼ等しくなった。

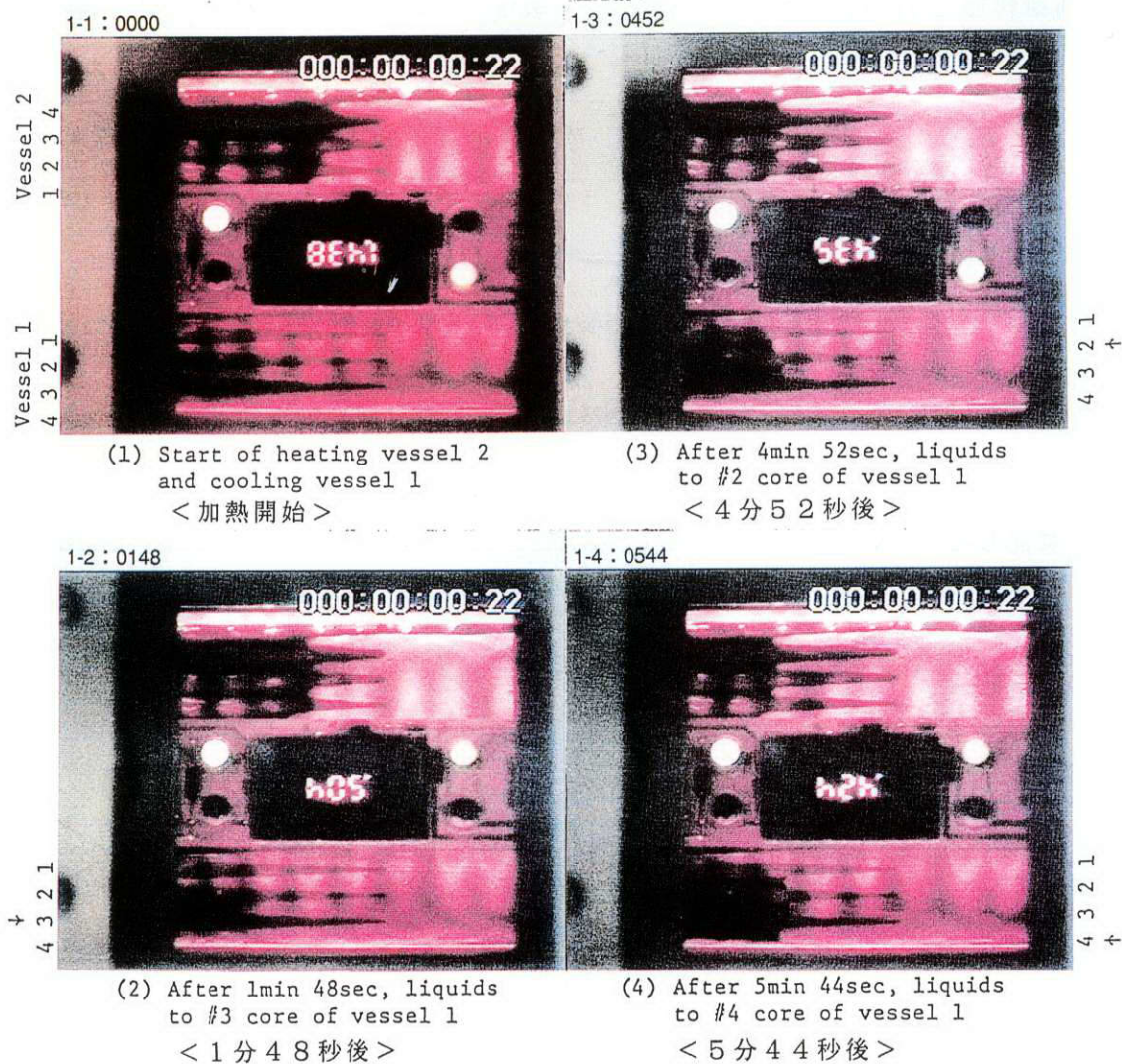


図5 ケース1の熱駆動流実験におけるビデオ画像

液移動距離 L は、ダルトンの分圧の法則と液量保存の関係とから算定できる。この算定値に及ぼす影響が最大の因子は、侵入ガス量 P_g であり、その量は液充填からの経過日数 t_e に依存する。図 6 は t_e に対して P_g を、 P_g に対して L をプロットしたものである。図中の曲線 #1、2 は L 対 P_g の、曲線 #3、4 は P_g 対 t_e の関係を表している。パラメータは、曲線 #1、2 では液充填量、曲線 #3、4 ではガス侵入に対する補修の有無である。本実験では t_e は 60 日であるので、図 6 の曲線 #3、4 から P_g は 40 torr ~ 110 torr と見積もられる。 P_g を 70 torr として曲線 #1、2 から L を見積ると、 L は約 30 mm となる。この値は、ケース 1 ~ 3 の実験で観測した液移動量とほぼ一致する。

図 7a ~ c は、ケース 1 ~ 3 の実験におけるベッセル温度の実測値(実線)と予測値(点線)とをプロットしたものである。予測温度は、節点数 30 の熱数学モデルをもとに計算した値であり、実測温度と類似の変化をしている。このことは TDFU が熱的に正常に動作したことを示している。表 3 は本実験中の振動環境のサマリであり、実験は $10^{-4}g$ のレベルで実施されたことを示している。バッテリー容量については、初期充電量が 2.69 A·hr、全放電量が 2.09 A·hr で、残りが 0.60 A·hr であった。以上により、原理面だけでなく、熱/機械/電気設計の点からも熱式調圧器の成立性が実証された。

解析と考察

概要

IML-2 で実施する熱駆動流装置(TDFU)の軌道上実証実験の運用手順等に反映するため、微小重力環境での TDFU 内部の液分布・自由表面形状に関する知見を得ることを目的とし、非圧縮流れ解析用のコンピュータ・コードを使用して、流体挙動シミュレーション解析を実施した。特に、今回は軌道上実験の成功に不可欠なコア部の液体保持能力に主眼を置いて解析を行った。

今回のシミュレーション結果により、微小重力環境では表面張力の影響のみならず、壁面固着力に相当する力の影響も付加するなどの新たな解析手法が必要であることが解った。

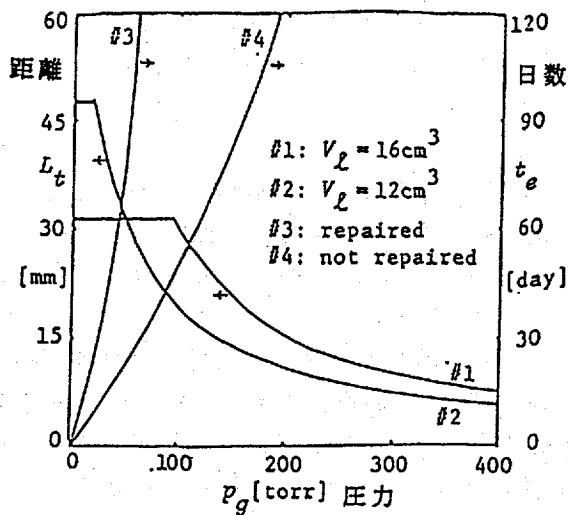
本解析では、壁面固着力をモデル化することで、微小重力環境での液体挙動の現象をある程度は説明することができたが、その壁面固着力の定量化については検討が必要である。

解析対象

平成 2 年度に航空機による TDFU のコア部での液体捕捉能力の評価試験を実施した。

このときの試験方法は、まず、 $1g$ 環境で供試体コア部分を逆重力方向に向けて設置し、液体を無コア部分に集めておく。その後、バラボリックフライトを行い、微小重力環境に移行させる。そして、微小重力環境やその前後における流体挙動をビデオで録画し、コア部での液体捕捉状況を評価した。この試験において、微小重力環境へ移行と同時に液体がコア部へ移動し始め、数秒の後に、液体の大部分がコア部に集められる現象が確認されている。

今回は、この現象(コア部の液体捕捉能力)に着目し、微小重力環境でのコア部の液体捕捉状況(航空機微小重力実験におけるビデオ映像)の数値シミュレーションを試みた。



L_t : liquid travel distance
 t_e : time elapsed since liquid charge
 p_g : soaked noncondensable gas inventory
 V_l : charged liquid inventory

図 6 予備液移動距離

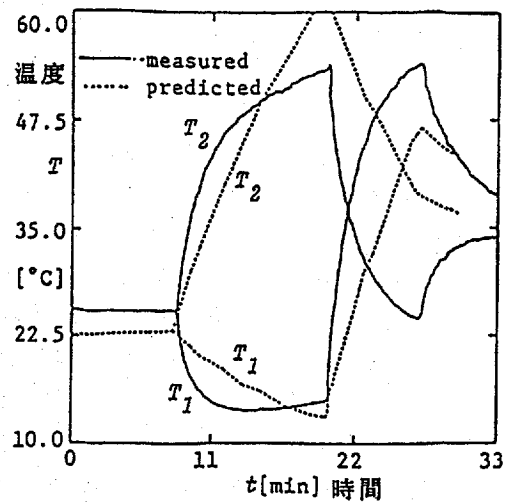


図 7b ケース 2 におけるベッセル温度

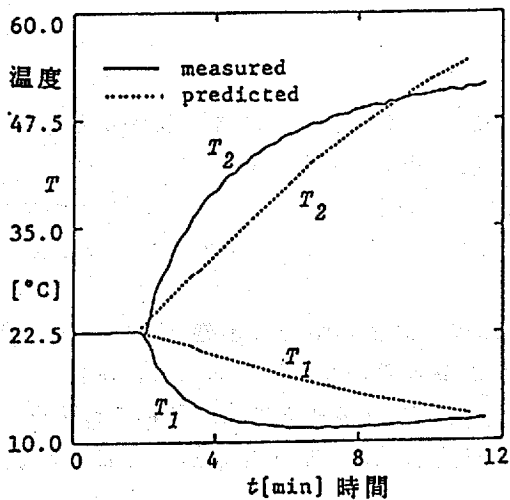


図 7a ケース 1 におけるベッセル温度

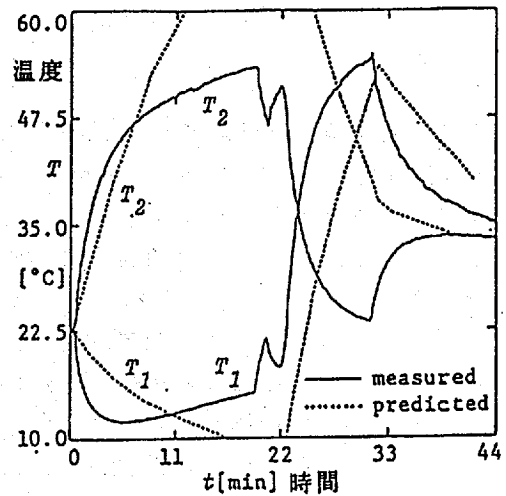


図 7c ケース 3 におけるベッセル温度

表 3 振動環境のサマリ

	x-axis	y-axis	z-axis
Case 1: sensor 1	±5.43	±6.48	±3.47
sensor 2	±10.2	±10.4	±4.08
Case 2: sensor 1	±3.93	±5.44	±3.27
sensor 2	±4.32	±5.21	±4.69

x-, y-, z-axis: along the width,
the depth, the height

expressed in $10^{-4}g$

流体挙動解析コード

本プログラムは、VOF法 (Volume-of-fluid : 流体の体積率) を用いた自由表面を持つ2次元非圧縮流れを解析するプログラムである。以下に基礎方程式を示す。

質量保存式

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (1)$$

運動量保存式

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} + \nu \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} + \nu \frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + g + f_y \quad (3)$$

体積率の移流方程式

$$\frac{\delta F}{\delta t} + u \frac{\delta F}{\delta x} + v \frac{\delta F}{\delta y} = 0 \quad (4)$$

ここで、変数の意味は以下のとおりである。

- u : x 方向流速 (m/s)
- v : y 方向流速 (m/s)
- p : 圧力 (N/m²)
- ρ : 密度 (kg/m³)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- f_x : x 方向外力による加速度 (m/s²)
- f_y : y 方向外力による加速度 (m/s²)
- F : 流体体積率 (m/s²)

なお、流体体積率 F は 0 と 1 の間の値をとり、 $F = 1$ の時セルは液体で満たされており、 $F = 0$ の時は液体が存在しない気体セルとみなす。それら以外の時は表面セルである。

また、本プログラムは斜めの境界を取り扱う FAVOR 法 (Fractional Area / Volume Obstacle Representation) が組み込まれている。図 8 の流体占有率 θ_f と流体通過率 A_x 、 A_y を用いて、例えば質量保存式 (1) を書き直すと

$$\frac{\delta (\theta_f p)}{\delta t} + \frac{\delta (A_x u)}{\delta x} + \frac{\delta (A_y v)}{\delta y} = 0 \quad (5)$$

となる。他の保存式も同様である。

式 (1) あるいは式 (5) に現れる左辺第一項すなわち密度の時間微分項は非圧縮とする時は 0 となって不必要となるが、以下のように簡単な修正で圧縮性の効果を組み込むことができる。

$$\begin{aligned}\frac{\delta p}{\delta t} &= \frac{\delta p}{\delta p} \cdot \frac{\delta p}{\delta t} \\ &= \frac{1}{\rho C^2} \cdot \frac{\delta p}{\delta t} \quad (6)\end{aligned}$$

ここで C は音速である。非圧縮では圧力波は無限大の速度で伝わるが、上式のような修正(限定圧縮性)により圧力波が音速で伝わることを疑似的に表すことができる。この改良により、計算速度が飛躍的に向上し、結果も非圧縮による計算結果と変わらないことを確認した。

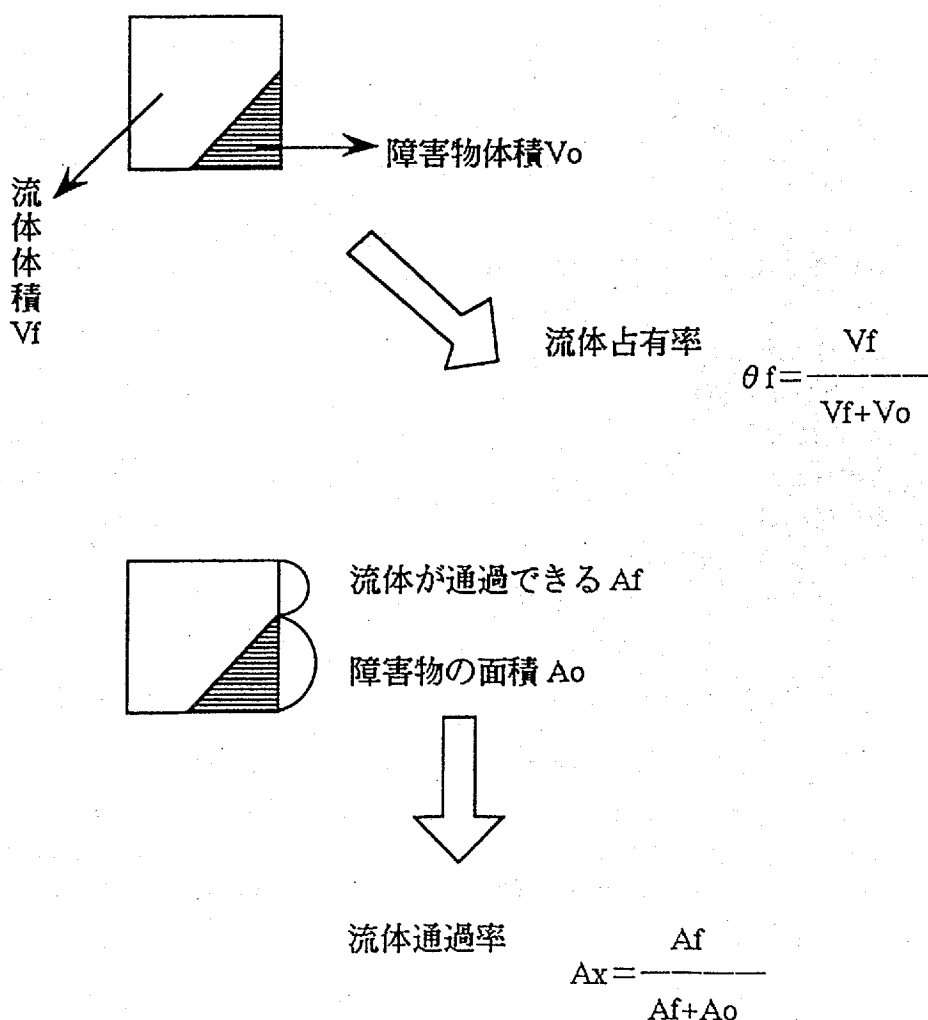


図 8 流体占有率と流体通過率

物理モデル

微小重力環境での流体挙動については以下の物理モデルが重要であることが予想される。

- ・ 表面張力
- ・ 接触角
- ・ 毛細管現象
- ・ 壁面固着力

以下に、これらのモデル化について、コードでの取り扱いを中心に述べる。

1) 表面張力

図9に示すように、実際の水面の形状は階段状として模擬することになる。ここで、左側の図にあるベクトルが表面張力による力である。図中のベクトルのx軸とのなす角を $\beta_E \beta_W$ とした時、WとEではさまれた液体部分にかかる表面張力による力を圧力(すなわち鉛直方向)に換算すると、

$$\Delta P = -\sigma(\sin \beta_E - \sin \beta_W) / \Delta x \quad (7)$$

となる。ここで σ は表面張力を表わし、本解析では一貫して72.0 dyn/cmを使用した。

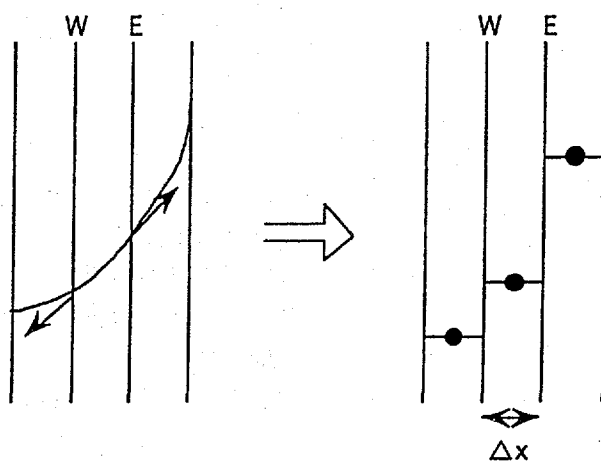


図9 表面張力の取り扱い

2) 接触角

接触角は、図10の固体と液体の接触面から液体と気体の接触面への角度で、これを θ とした。コード上は接触角は表面形状の境界条件として用いている。すなわち、例えば図9のE側が固体と接触している時、式(7)の $\sin \beta_E$ を $\cos \theta$ に置き換える。

接触角は図11のような力のつり合いにより決定されるので、重力加速度が変化すれば当然変化するが、本解析では固定した値(10度)を用いた。前述したように、コード内では $\sin \beta_E$ を $\cos \theta$ として用いているので、 $\cos 10^\circ$ から $\cos 0^\circ$ の変動は2%以下であり影響が少ないと判断した。

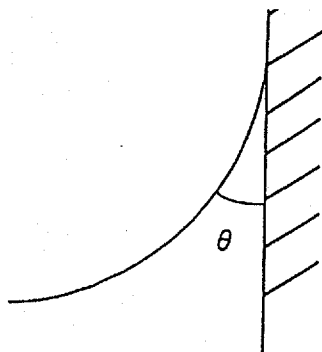


図10 接触角

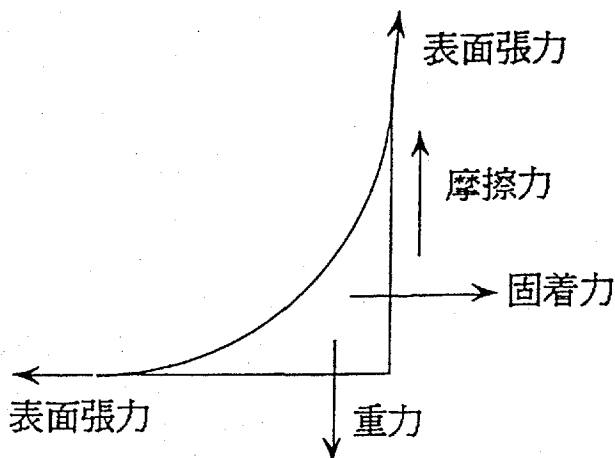


図11 接触角を決める力の釣合

3) 毛細管現象

図 12 の上昇する高さを h として鉛直方向の力のつり合いを考えると

$$\sigma \cdot 2\pi R \cdot \cos \theta = \rho g h \cdot \pi R^2 \quad (8)$$

となる。左辺が表面張力による力の鉛直成分、右辺が上昇分の液体の質量である。この式から分かるように、重力加速度が小さくなっていくと管内部の液体は加速度を持った上昇流となる。コード内では表面張力と接触角が考慮されているので、毛細管現象は特にモデル化していない。

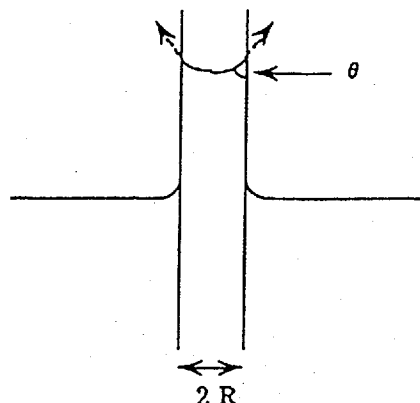


図 12 毛細管現象

4) 壁面固着力

ここでは、流体表面分子と固体表面分子との凝集力に着目し、それを『壁面固着力』としてモデル化した。

表面張力は、流体表面での流体分子間の凝集力によるもので、微小重力環境になると顕著に影響が現れてくる。よって、微小重力環境では、この壁面固着力も表面張力と同様に、具現化されてくるものであると仮定した。

今回の解析では、表面形状の壁側の境界条件として接触角を用いているので、壁面固着力は陰にモデル化されていることになる。しかしながら、図 9 および 式 (7) に示したように表面張力はコード内で圧力に換算して用いているため、表面形状の認識によっては壁面固着力の向きや大きさが曖昧になってしまう。例えば、図 13 の右側の認識では境界とはみなされず固着力そのものが考慮されないし、左側の認識では壁に平行な成分のみとなってしまう。従って、これらを補正するために次式で壁面固着力を定義した。

$$F_x = -C (\delta \theta f / \delta x) \quad (9)$$

$$F_y = -C (\delta \theta f / \delta y) \quad (10)$$

ただし、 F_x 、 F_y は x 方向、 y 方向の壁面固着力、 θf は流体占有率、 C は比例定数である。

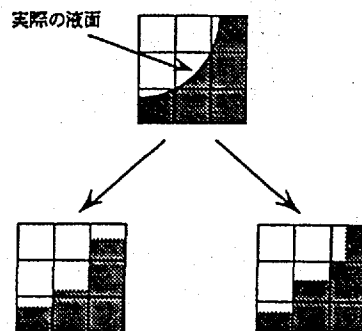


図 13 液面形状の取り扱い

解析結果

表面張力や壁面固着力の感度解析を目的として、まず単純な体系による解析を行い、次に、その結果を実際の TDFU の形状に適用して解析を行った。

1) 単純な体系による解析結果

以下の 3 種類の解析を実施した。

ケース A …… 壁面固着力を θ とした表面張力のみによる解析

ケース B …… 障害物のない体系での壁面固着力のパラメーター解析

ケース C …… 壁面固着力を固定して障害物を変えた解析

全解析に共通する条件は

体 系 10 mm × 18 mm
 メッシュサイズ..... 10 × 18
 初期水面 6 mm
 重 力 1.0 g → 0 g(0.01 秒後)
 表面張力 常に考慮、値は 72.0 dyn/cm

であり、シミュレーション時間はほぼ定常になったと思われる 0.15 秒とした。

まず、ケース A すなわち表面張力のみによる解析結果を図 14 と図 15 に示す。図中の*印は障害物(壁)を表わし、数字は流体体積率 F の大きさを表わす。例えば、数字の 3 は、 $0.3 \leq F < 0.4$ であることを表している。

図 14 から分かるように表面張力だけでは流体は昇っていかない。また、図 15 は内部の障害物を外側の壁に近付けて隙間を 1 セルとして、毛細管力の効果が顕著になるようにした場合である。この図では、毛細管力が働いて流体が壁の上端まで到達していることが分かる。ただし、流体が数ヶ所でちぎれている。実際の物理現象としては考えにくいので、これは数値解析上の問題点であると考えられる。

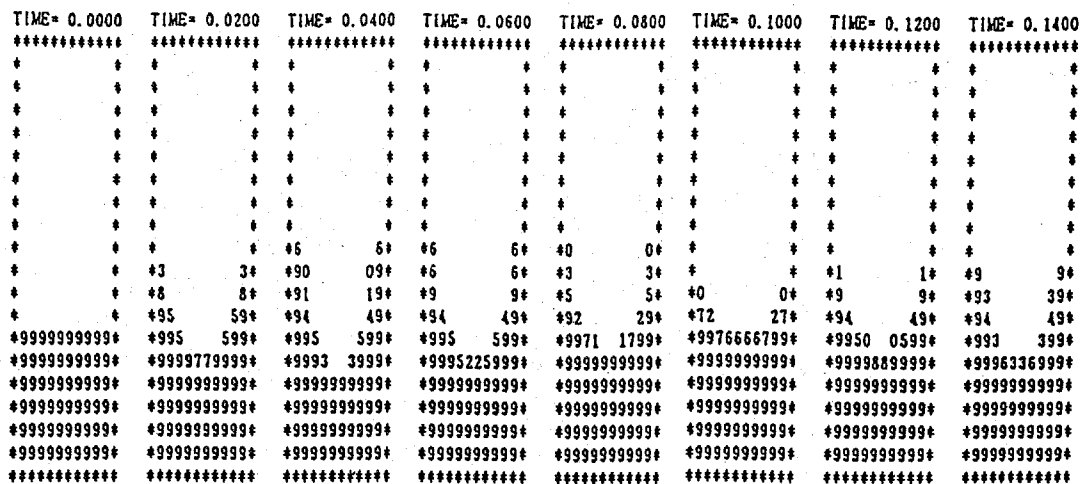


図 14 表面張力だけの解析結果

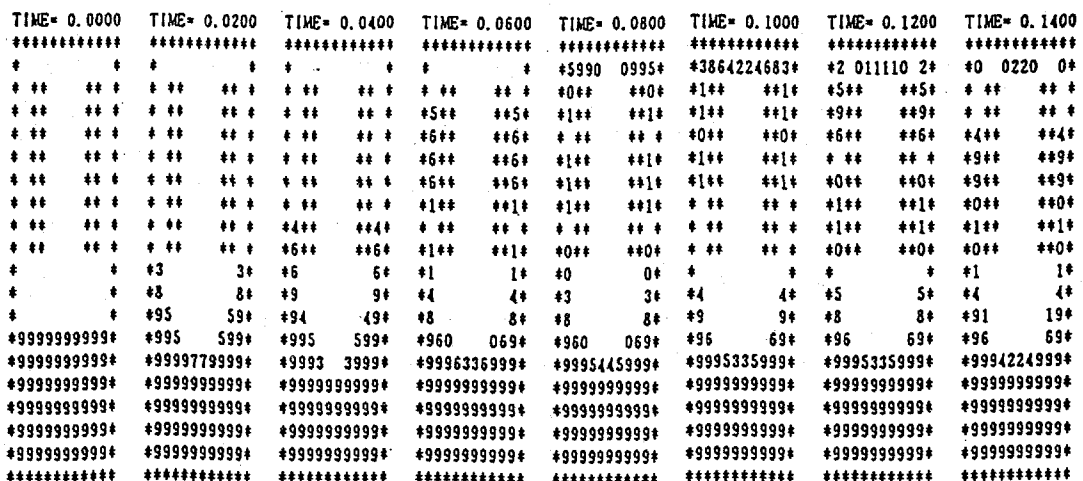


図 15 表面張力だけの解析結果
(内部障害物有り)

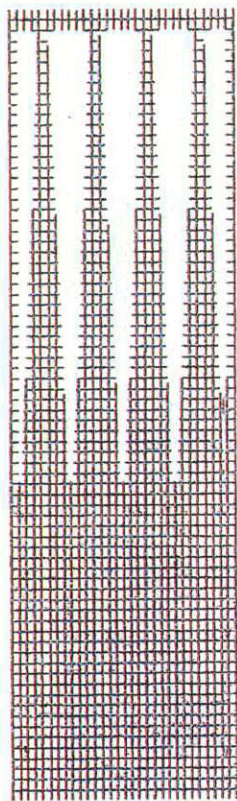


図 19 メッシュ図(縦置き)

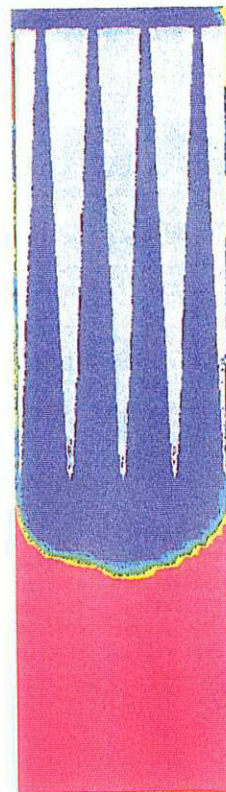


図 20 解析結果(縦置き：0.15 秒後)

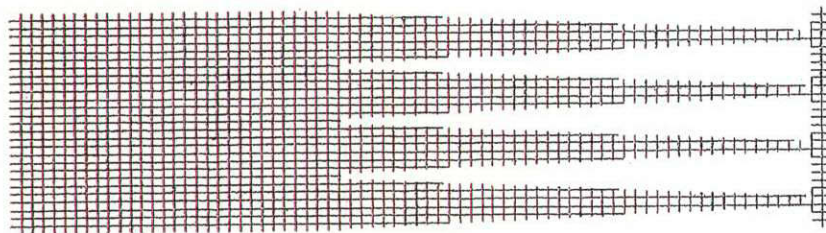


図 21 メッシュ図(横置き)

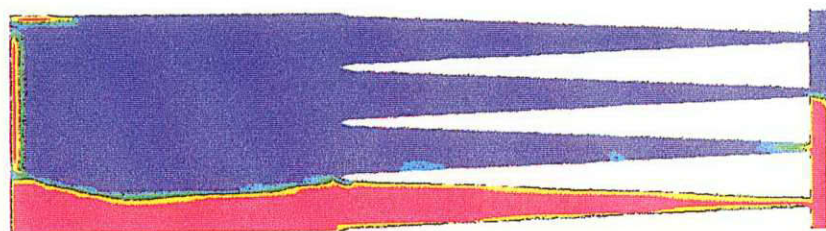


図 22 解析結果(横置き：0.10 秒後)

ミュレーション結果(0.1秒後)をそれぞれ示す。これらの結果から流体がコア部に集まっていける傾向があることは分かるものの、これらは航空機実験のビデオを再現しているとは言いがたい。この原因の一つとして、単純な体系と比較してメッシュが多くなったため、壁面固着力の影響を及ぼす範囲の全体に対する割合が小さくなったことがある。(壁面固着力は壁に接したセルのみに働く)従って、壁近傍の流体は上昇するための駆動力を直ちに得るが、壁から離れた流体は駆動力を得るのに時間を要する。(粘性による拡散のスピード)しかも、前述したように単位系の問題があり、初期圧力に打ち勝つための駆動力は数値的に大きな値が必要である。

参考として、壁から離れた流体に壁からの距離に反比例するような駆動力を与えて解析した例を図 23(縦置き)と図 24(横置き)に示す。これらの解析結果が示すように、現状の解析手法では、何らかの駆動力を強制的に付加させないと、航空機微小重力実験で取得したビデオ映像のような現象は再現できない。

結論

IML-2では、打上げ後3日目にケース1および2の実験が、11日目にケース3の実験が実施された。いずれのケースにおいても制振の有無にかかわらず、熱式調圧器として必要な(1)気液分離、(2)コア内液保持、(3)ベッセル間液移動の基本3機能が実証された。液移動距離の目測値は約30mmで、この値は予測値とほぼ一致した。また、ベッセル壁温の計測値も予測値とトレンドにおいて大略一致した。なお、ケース1および2において、ベッセル1の第1コア(最内側)に捕捉されていたバブルはケース3の実験開始後約20分で放逐され、ベッセルごと全コアの液高がほぼ均一になった。

ベッセル内液挙動の事前把握のために実施した液体挙動シミュレーション解析の結果、表面張力だけでは、航空機微小重力実験での流体挙動の説明はできないことが分かった。しかし、今回は、微小重力環境では『表面張力』と同様に無視できない(具現化する)力として、『壁面固着力』をモデル化することにより、TDFUのコア部が液保持能力を持つことを定性的に確認した。ただし、壁面固着力は壁に接した1セルのみに、壁に垂直な方向だけ与えている。これらの手法の妥当性および壁面固着力の定量化については検討を要する。また、液体がちぎれないための数値解法上の工夫及び無次元化も今後の課題である。

熱駆動流実験が上述のように所期の目的を達成して終了したので、二相流体ループ用熱式調圧器の成立性が微小重力下で実証されたと結論できる。

外部発表

- 1) Furukawa, M., Miyazaki, Y., and Yamazaki, T. Thermally Driven Flow Experiments Aboard Space Shuttle. 30th AIAA Thermophysics Conference, San Diego, CA (June 19-22, 1995). AIAA 95-2069.

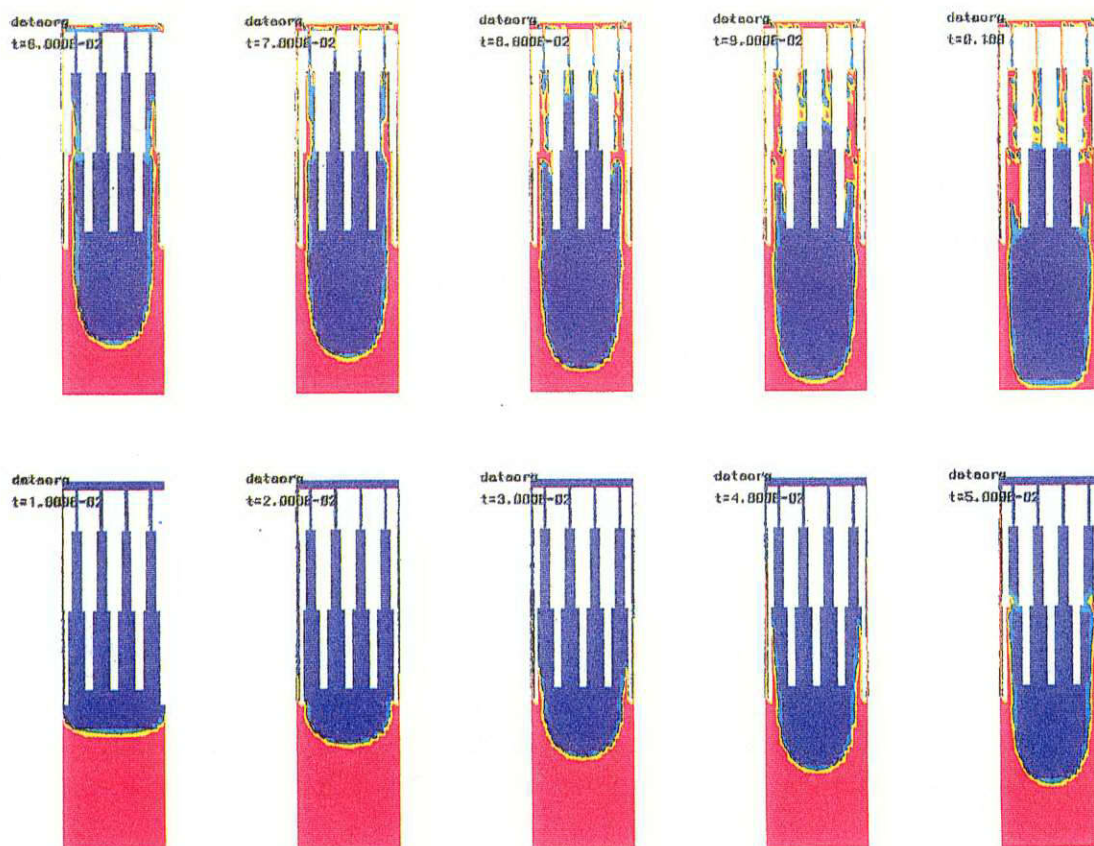


図4.5.10 駆動力を与えた流体挙動（縦置き）

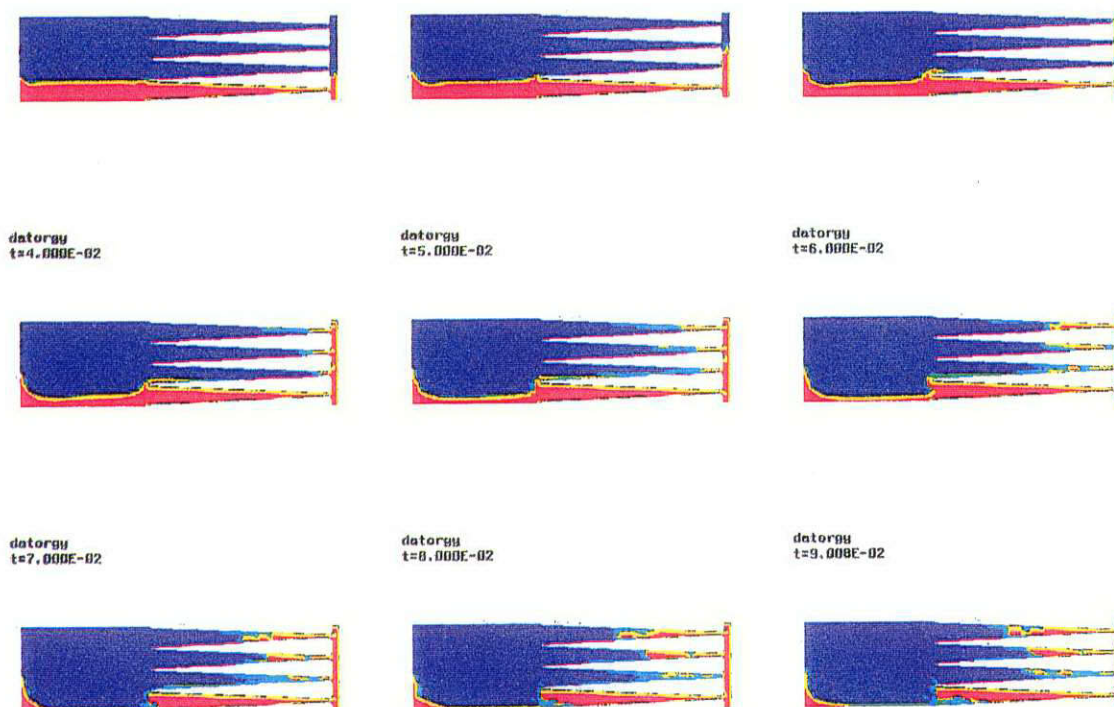


図4.5.11 駆動力を与えた流体挙動（横置き）