

微小重力下での二相流動観察実験

Observation of two-phase flow patterns in the evaporator under microgravity environment

古川 正夫⁽¹⁾ , 石井 康夫⁽¹⁾ , 飯田 亨⁽¹⁾
Masao Furukawa Yasuo Ishii Toru Iida
小森 實⁽²⁾ , 古浜 功吉⁽²⁾ , 川本浩一⁽²⁾ ,
Minoru Komori Kookichi Furuhashi Kooichi Kawamoto
宮地 威⁽²⁾ , 宮崎 芳郎⁽²⁾
Takeshi Miyaji Yoshiro Miyazaki

(1) 宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan.

(2) (株) 東 芝

Toshiba Co. Ltd

ABSTRACT

NASDA (National Space Development Agency of Japan) makes studies on a two-phase fluid loop as a thermal management system for future space platforms.

A key component of this system is an evaporator of the cold plate which absorbs the heat from equipment.

It is therefore required to control fluids so that the evaporator can operate without dry-out or excess liquid flooding.

Operation conditions and fluid behaviors under μ -g environment are particularly important for the evaporator control.

From this view-point, μ -g experiment using a simplified loop model is performed to observe flow patterns in an evaporator.

Various types of evaporators are prepared for this experiment.

This paper presents the flow patterns observed by video movies.
The test results are:

- (1) A liquid film was observed in the evaporative surface within the test range of liquid flow rate
- (2) Under excess liquid flow rate the liquid film thickness increases with the time elapsed in microgravity.
- (3) At the nearly theoretical flow rate the liquid film was kept relatively thin during the test.

1. 緒言

宇宙開発事業団では、将来宇宙機用熱制御システムとして二相流体ループ式排熱技術の研究開発を進めており、現在は地上モデルによる自動運転制御の段階にある。

この二相流体ループ方式の排熱システムは、単相ループ方式等、他の排熱システムと比較して単位排熱量当りの必要動力が小さく、一様な温度制御が可能であるなど、大容量排熱システムとしての多くの長所を備えている。しかしながら、密度の違う蒸気と液体が混在する二相流の微小重力下での挙動は、地上のそれとは様相が異なることが知られており、二相流体ループを有効に動作させるためには、微小重力下での気液挙動観察が不可欠となっている。これまでには、アキュムレータの原理モデルの微小重力実験を行い、微小重力下での気液分離技術、液保持技術の取得を行って来たが、二相流体ループの制御技術に関しても微小重力下での流動変化状態を考慮したものとする必要がある。

特に、二相流挙動変化が要素性能に及ぼす影響の大きなものとしてコールドプレート（蒸発器）があり、この要素の性能を十分に発揮させるためには、まず、微小重力下でのコールドプレート（蒸発器）内の二相流動変化状態を把握し、安定な運転をするための情報を得ることが重要になる。

本実験はこの様な観点に立ち、二相流体ループの作動液循環量、供給熱量、蒸発器形状を変えたときの微小重力下での二相流動変化状態を観察記録するとともに、二相流動が安定となる条件を取得することを目的として実施した。

2. 実験方法

2. 1 実験装置

図2.1-1に搭載実験装置の全体構成を、図2.1-2に二相ループ部分の系統図を示す。

搭載実験装置はラック搭載時の重心位置、実験時の操作性を考慮して図の様な配置構成とした。二相ループは基本的には地上モデルと同等であり、蒸発器、凝縮器、蒸気輸送管、アキュムレータおよびポンプより構成される。但し蒸発器は流量配分のバラツキの影響を除くため一本の構成にするとともに、アキュムレータは単なるリザーバとしての機能を持たせるだけにし、実験中はループと切り離す形とした。従って実験中は、ループの圧力調整は行わない方式である。テストセクションとなる蒸発器は取換え可能な構造にするとともに内部の可視化が可能な様に、その両端部に透明なポリカーボネート製フランジを設けている。蒸発器の加熱は表面に張付けたヒータにより行い、その入力、コントローラにより0~70Wまで調整可能である。

凝縮器は、二本の管から構成され、その冷却は合計で最大90Wの冷却能力を有するペルチェ素子によって行われる様になっている。蒸気輸送管は内部が可視化できるように透明なポリカーボネートパイプで構成されている。従って、画像データとしては蒸発器内部と蒸気輸送管内のふたつのデータ取得が可能である。

作動液の流量はインバータによりポンプの回転数をかえると同時に、バイパス流路、及び蒸発器への流路に設けた流量調整弁により調整できる様にしている。

流量、圧力、温度は各々タービンメータ、圧力/差圧変換器および熱電対で測定されるとともに、圧力を除く上記値とヒータ入力はコントローラ前面にデジタル表示され、実験条件の調整はその表示をみながら出来る様になっている。尚、圧力は安全弁付ブルドン管圧力計でも確認することができ、異常時には安全弁の働きによりループ圧力上昇を押さえる構成となっている。

尚、作動液としては動作温度範囲内での圧力が低い(70℃/2Kg/cm²abs)フロン-113を用いた。

2. 2 蒸発器

テストセクションとなる蒸発器は実験の目的に応じて表2.2-1に示す5種類のものを用意した。いずれの蒸発器も径の大きい蒸気路と径の小さい液路が隣接する断面構造となっており、このふたつの流路は、蒸気路周方向に設けた複数のスリットにより接続されている。蒸気路の軸方向には細い溝(グループ)が設けられスリットを介して、液路より送られる作動液はこのグループにより軸方向に広がり、薄い液膜の蒸発面を形式する様になっている。種別記号TP1は、現在地上実験モデルに使用されている形のもので、この形を基本に他の4種類の蒸発器は微小重力下での動作を安定させるため以下の様な工夫がなされている。

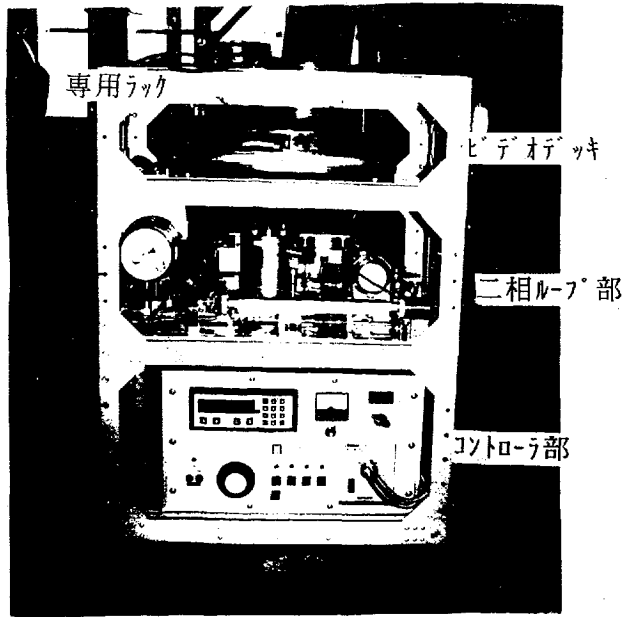


図 2. 1 - 1 搭載実験装置全体構成

Fig 2.1-1 Flight Experiment Apparatus

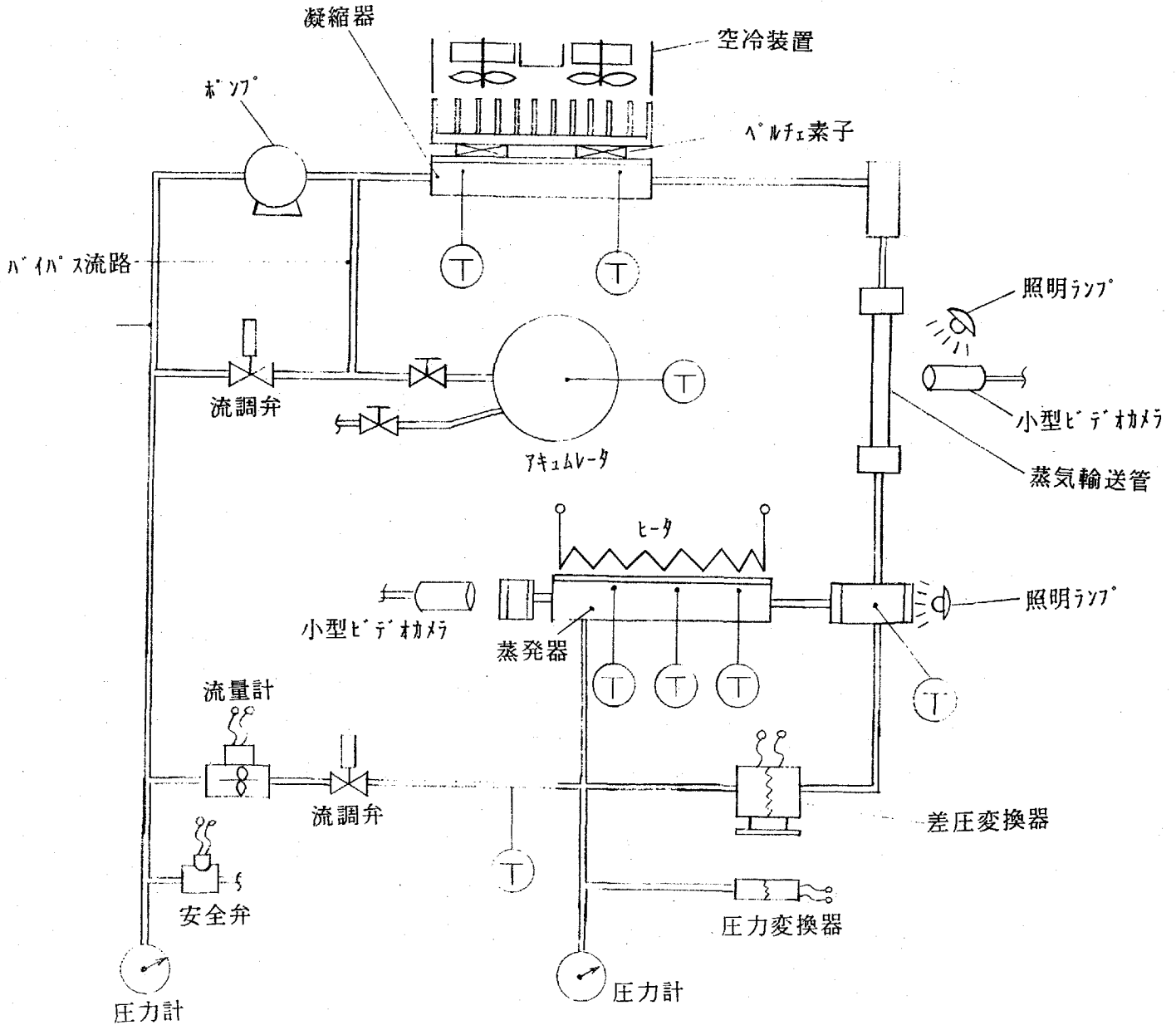


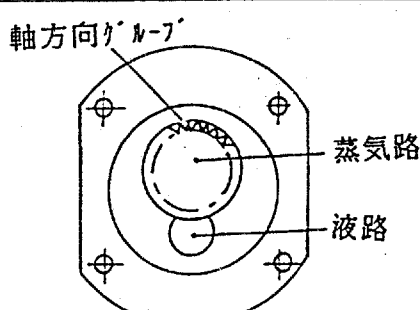
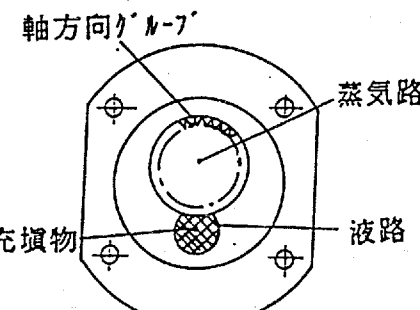
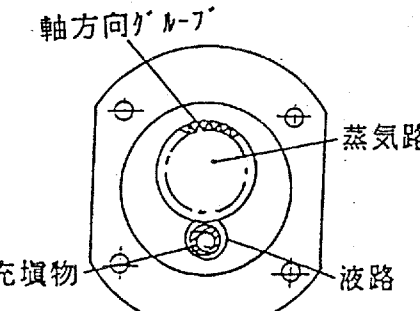
図 2. 1 - 2 二相ループ部系統図

Fig 2.1-2 Two Phase Fluid Loop Schematic diagram

- TP2, TP3 蒸発器 蒸気路への液流入変動を制御
- TP4 蒸発器 毛細管力を強化し蒸発面への作動液の
広がりを促進
- TP5 蒸発器 液路への熱入力を小さくして液路での
気泡発生抑制

表 2. 2 - 1 使用蒸発器の種類

Table 2.2-1 Major Specification of Evaporator

| 種別 | 蒸発器名 | 蒸発器形状 | 備考 |
|-----|----------|--|---|
| TP1 | 従来型 |  | <ol style="list-style-type: none"> 1. 周方向スリットによる蒸気路内周面への液供給 2. グループによる軸方向への液供給 |
| TP2 | 液路改良型 I |  | <ol style="list-style-type: none"> 1. 同 上 2. 同 上 3. 液路に充填物、蒸気路への液流入変動抑制 |
| TP3 | 液路改良型 II |  | <ol style="list-style-type: none"> 1. 同 上 2. 同 上 3. 液路に充填物、蒸気路への液流入量変動抑制 |

| 種別 | 蒸発器名 | 蒸発器形状 | 備考 |
|-----|---------|-------|---|
| TP4 | ファイバ充填型 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 同上 2. 同上 3. ファイバ充填による毛细管力の強化 |
| TP5 | 二連型 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 周方向スリットによる蒸気路内周面への液供給 2. グループによる軸方向への液供給 3. 加熱面と蒸発面の熱抵抗減 |

2. 3 実験条件

表2.3-1に実験条件を示す。本実験では、微小重力下での蒸発器の性能を左右する蒸発面近傍の液膜形成状態が、どの様に変化するかを観察するために、各ヒータ入力に対し以下の様に、作動液流量を変化させた。

- ・ 作動液流量 > 理論流量
- ・ 作動液流量 ≈ 理論流量
- ・ 作動液流量 < 理論流量

$$\text{理論流量} = \frac{\text{ヒータ入力}}{\text{作動液潜熱} \times \text{比重量}}$$

表 2. 3 - 1 実験条件

Table 2.3-1 Test Conditions

| 蒸発管種別 | 作動液流量 | ヒータ入力 |
|-------|--------------|-----------|
| TP1 | 4 ~ 20 cc/m | 35 W |
| TP2 | 2.0 ~ 4 cc/m | 20 ~ 40 W |
| TP3 | 3 ~ 20 cc/m | 50 W |
| TP4 | 3 ~ 16 cc/m | 70 W |
| TP5 | 0 ~ 60 cc/m | 70 W |

3. 実験結果および考案

3. 1 実験結果

図3.1-1に従来型蒸発器(TP1)のパラボリックフライト時の二相流動状態変化を示す。a)が理論流量より多い作動流体量を供給した場合で、b)が理論流量に近い作動流体を供給した場合である。

1-g下において蒸気路内に液だまりが見られる様な流量、すなわち理論流量より大きい流量を流している場合には、 μ -gになると同時に蒸気路蒸発面上に、液膜が形成される。しかも、その液膜は速い速度で成長して行き最終的には、蒸気路内をほぼ埋めつくし单相流に近い状態となる。

一方、1-g下における作動液流量が理論流量に近い場合には、 μ -g下で蒸気路周壁に形成される液膜が薄く、また、その成長もゆるやかである。特にこの場合、初期の液膜形成に時間を要し、液膜が成長しはじめたあとの変化の速さは、流量が大きい場合とそれほど大差ない。

更に、作動液流量が理論流量に等しいかそれ以下の場合には、形成される液膜の初期の状態がそのまま保持されることが確認された。

図3.1-2には、液路での流量変動で蒸気路への作動液流入量に与える影響を抑制する様にした蒸発器の、パラボリックフライト時の流動変化を示す。図は液路内に空げき率の大きい物質を挿入した場合のものである。図にみられる様に、流路内に発生する気泡は充填物内に保持されその変動は何もない場合に比べて小さいが、 μ -g下での液膜生成状態、及びその成長の様子は、図3.1-1の場合とほとんど同じである。

図3.1-3には、ファイバ充填型蒸発器の μ -g下での流動変化を示す。この蒸発器はファイバを充填することによりキャピラリ力が強化されている。キャピラリ力を強化することにより、液膜成長速度は遅くなることが確認された。しかし理論流量以上の場合の最終的な液膜成長の様子は、従来型蒸発器と相違ない。

図3.1-4に二連管型蒸発器の μ -g下での流動変化を示す。この2連管型蒸発器は蒸発面積が広く、従来型と比較して加熱面から蒸発面までの熱抵抗が小さいことから、液路内での気泡等による流量変動が小さくなると期待されたが、液膜生長を抑制するという面ではほとんど効果がなく、作動液流動範囲に対する流動変化現象は、他の蒸発器と同様である。図に示したのは、作動流量がほぼ理論流量の場合で、この場合は薄い液膜の状態がかなり長く保持されている。

図3.1-5に μ -g下での蒸発器表面温度、蒸気温度、作動液流量の変化例を示す。 μ -gになるに従い作動液流量が大きく変化する。その変化割合は設定流量が小さいときほど大きく2倍以上になることもある。従って、設定時の流量が、理論流量より小さくても、実際に μ -g下においては、理論流量より大きくなっていることがある。

3. 2 考 察

以上の実験結果から、 μ -g下において蒸発面上の液膜成長を防止し、蒸発器の性能を維持するためには、熱負荷に対する理論流量付近で作動液供給量をコントロールすることが必要となる。しかし液膜が成長して蒸気路を埋め尽くす速度から推定できる流量は実際の作動液供給量よりはるかに多く、この供給量で観察結果通りの液膜成長を達成する事は考えにくい。

従って、実際には蒸気路内で液膜が成長していく場合の過程は、一時的に蒸発器内の端部に作動液が多く保持され、その後この液保持部から液膜が生成しはじめ、徐々に全体的に厚い液膜を形成して行くようになっているものと思われる。

この場合、蒸発器端部以外の部分でしばらくの間薄い液膜の状態であれば蒸発性能はかなりの部分で正常に保持されるので問題は少ない。この液膜成長の過程が蒸発器内で実際どの様になっているか観察することが今後の課題である。

いずれにしても μ -g下で蒸発器性能を維持するためには、理論流量付近での精度の高い流量コントロールをする必要があり、地上において安定な蒸発器性能を維持する場合の条件より、狭い流量範囲で運転しなければならないと考えられる。

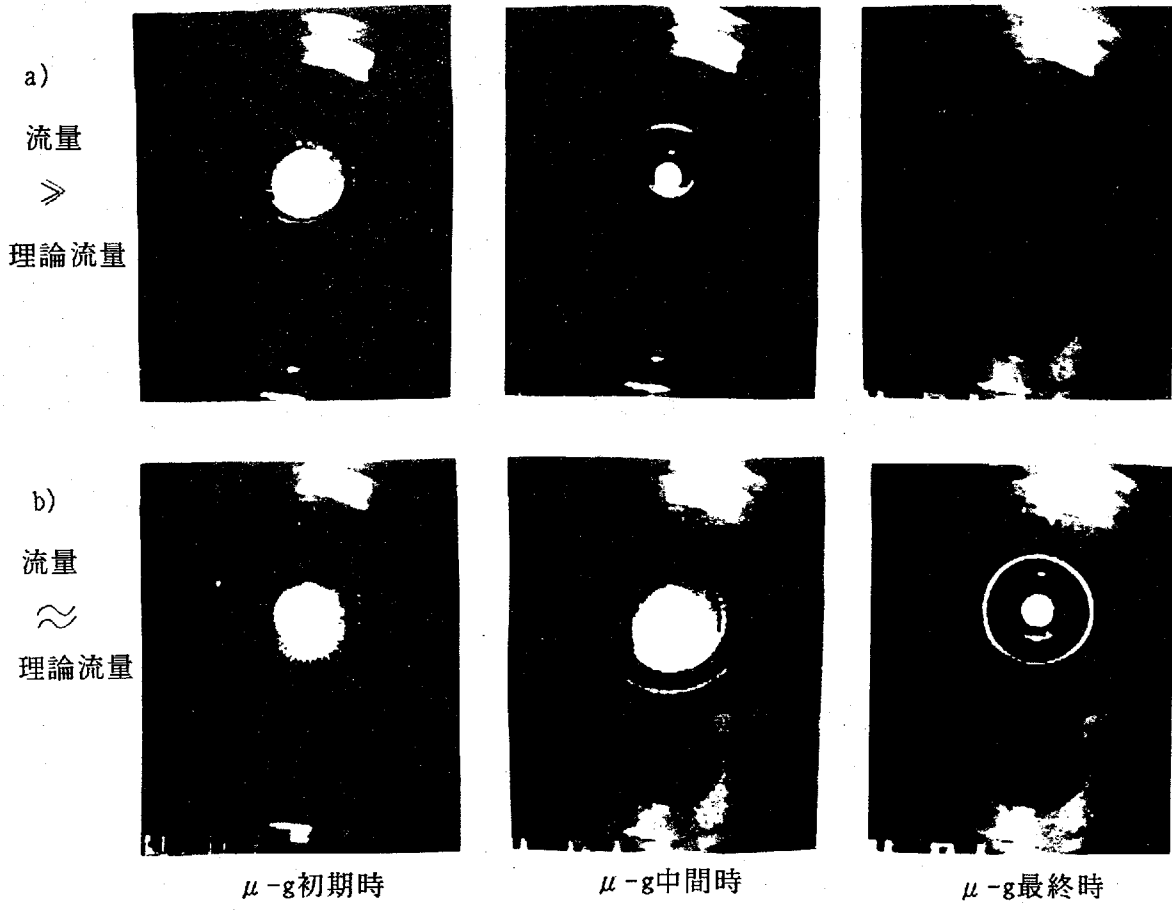


図 3. 1 - 1 従来型蒸発器 (TP-1) の二相流動変化状態
 Fig 3.1-1 Fluid Behaviors of Standard Evaporator

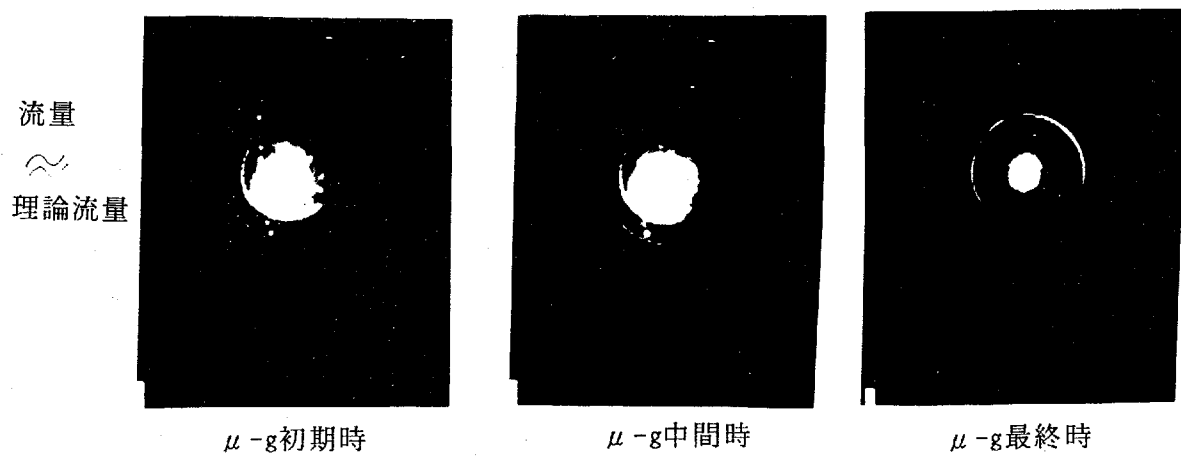
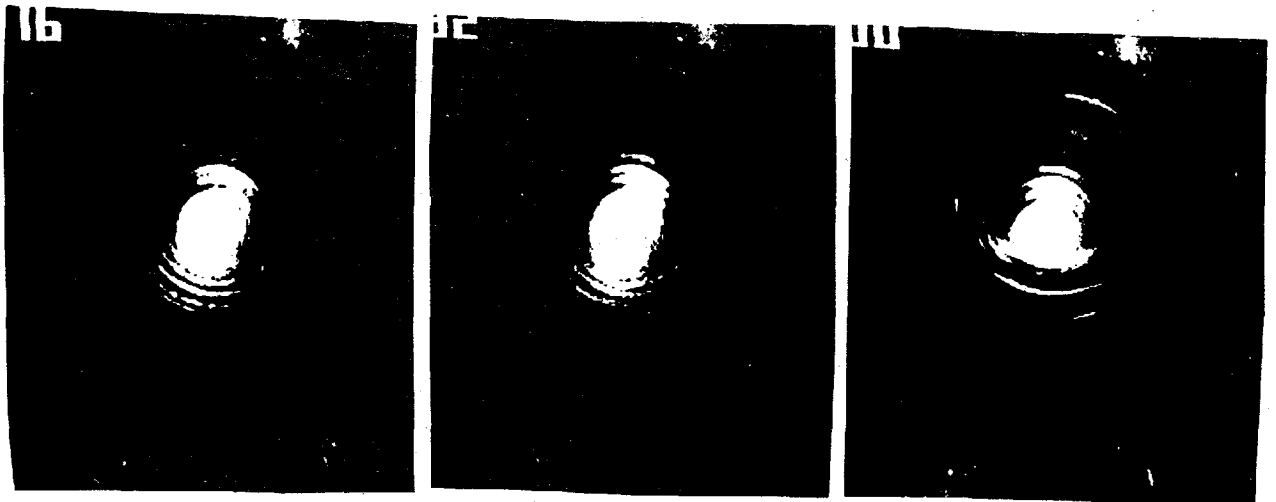


図 3. 1 - 2 液路改良型 II (TP3) の二相流動変化状態
 Fig 3.1-2 Fluid Behaviors of Modified Evaporator I



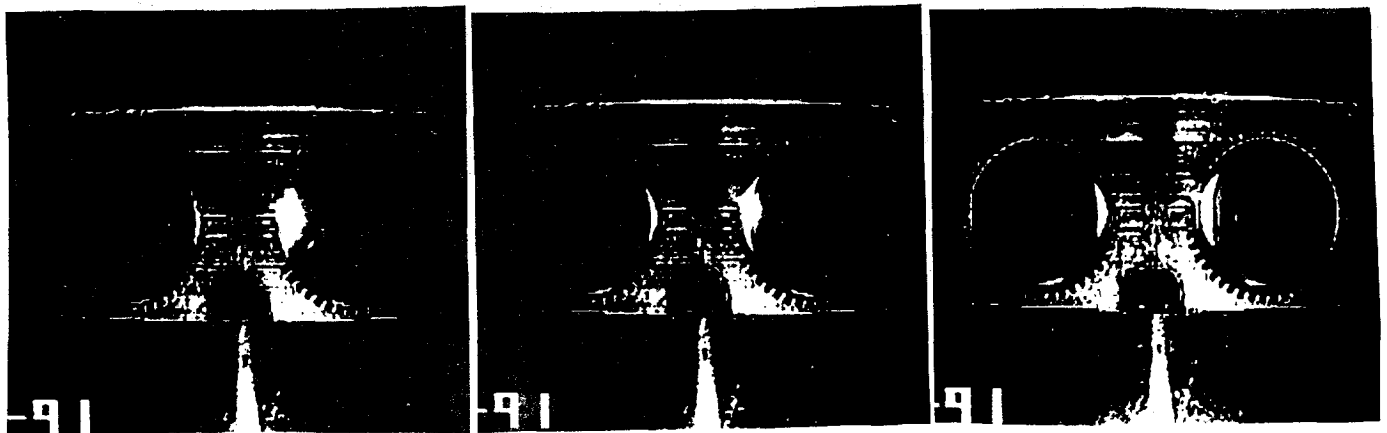
μ -g初期時

μ -g中間時

μ -g最終時

図3.1-3 ファイバ充填型(TP4)の二相流動変化状態
(流量 \approx 理論流量)

Fig 3.1-3 Fluid Behaviors of Modified Evaporator II



μ -g初期時

μ -g中間時

μ -g最終時

図3.1-4 二連管型(TP5)の二相流動変化状態
(流量 \approx 理論流量)

Fig 3.1-4 Fluid Behaviors of Modified Evaporator III

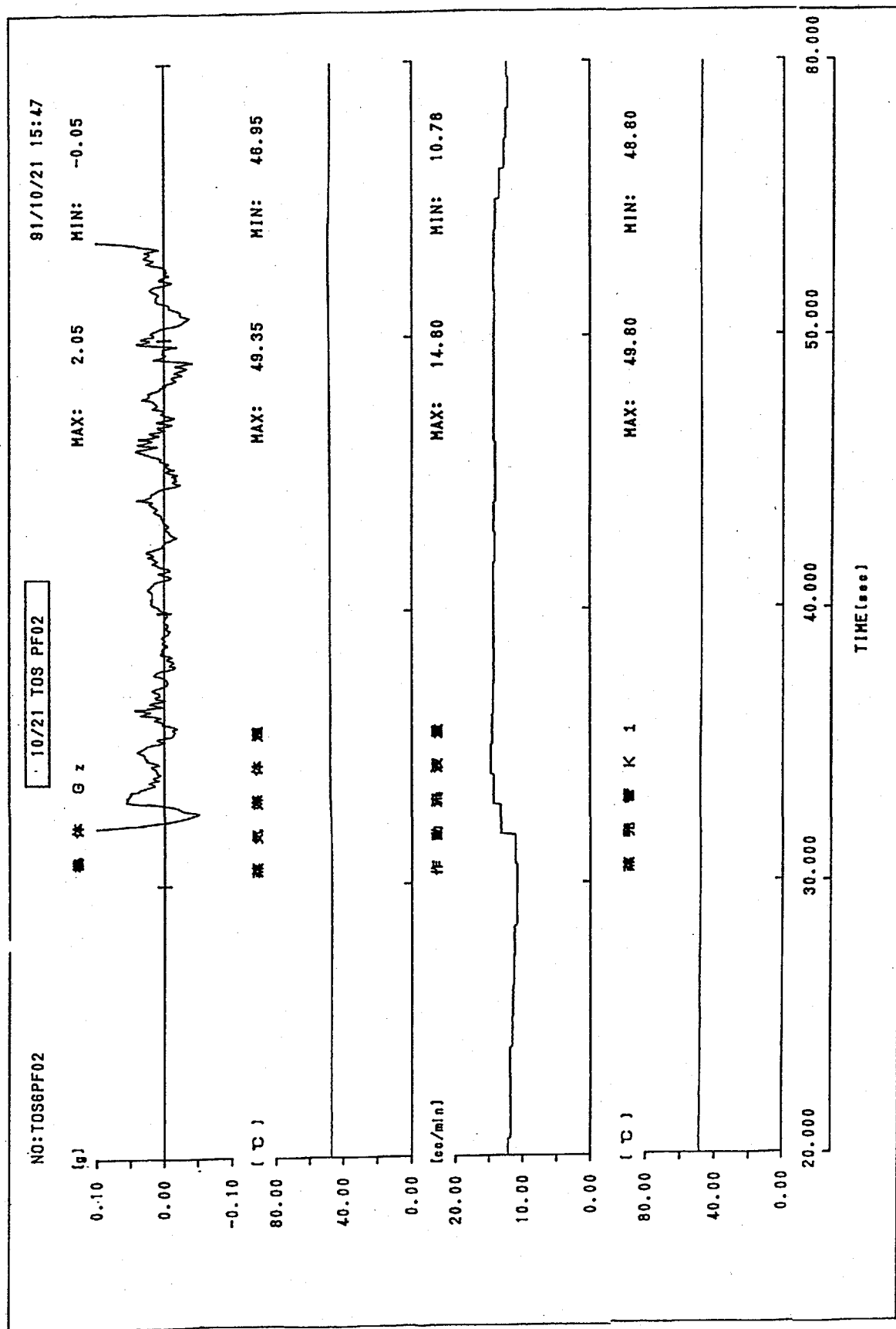


図 3. 1 - 5 温度, 流量の μ -g 下変化状態

Fig 3.1-5 Experiment Results

4. 結 言

微小重力環境下における蒸発器の性能を維持するための情報を得ることを目的として航空機を利用した二相流動観察実験を行い以上の結果を得た。

- 1) 微小重力環境下では蒸発面に沿って液膜が形成され、供給量が理論流量を上回る場合には液膜の成長が見られる。
- 2) 液膜を成長させず、蒸発器性能を維持するためには、理論流量付近でのコントロールを行う必要がある。
- 3) 液路での液流量変動の液膜成長への影響は小さいと考えられる。

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御支援、御協力を頂いたダイヤモンドエアーサービス [株] の皆様に深く感謝致します。