

航空機による微小重力実験  
二相流体式排熱システム用蒸発器  
二相流動観察実験（その2）

Evaluation of Evaporators for Two-Phase Fluid Loop Thermal Control System  
through Observation of Flow Pattern  
Under Microgravity Condition aboard Aircraft

古川正夫（1）	板垣春昭（1）、	石井康夫（1）、	山本隆宣（1）
Masao Furukawa	Haruaki Itagaki,	Yasuo Ishii,	Takanori Yamamoto
味村一樹（2）	古浜功吉（2）、	宮崎芳郎（2）、	小森 実（2）
Kazuki Mimura,	Kohkichi Furuhashi	Yoshio Miyazaki,	Minoru Komori

（1）宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

（2）（株）東芝

Toshiba Corporation

Abstract

Flow rate control methods for a two-phase fluid loop thermal control system, are studied under reduced gravity condition aboard MU-300 aircraft. Two types of evaporators, grooved double pipes and mesh wick pipes, are fabricated to examine the following three types of control logic;

- (1) one which controls quality at an outlet of an evaporator,
- (2) one which controls difference in temperature between evaporator surface (just below heat sources) and vapor, and
- (3) one which controls difference in pressure between vapor and liquid in an evaporator.

Evaluation of control logic is made through the behavior of excess liquid in the evaporators and the thermal performances of the evaporators under parallel operation. For this purpose every evaporator is equipped with the windows for flow pattern observation of evaporative surfaces. Although all of the logic exhibited potential for a in-orbit operation, the type (3) is recommended because of the simplicity of both control logic and hardware configuration.

1. 緒言

宇宙開発事業団では、次世代プラットフォーム型宇宙機に搭載する熱管理システムの技術構築の一環として、その基幹技術となる二相流体ループ式排熱技術の開発を進めている。図1に基本構成を示すように、二相流体ループは、搭載機器の熱をそれらに取り付けられ

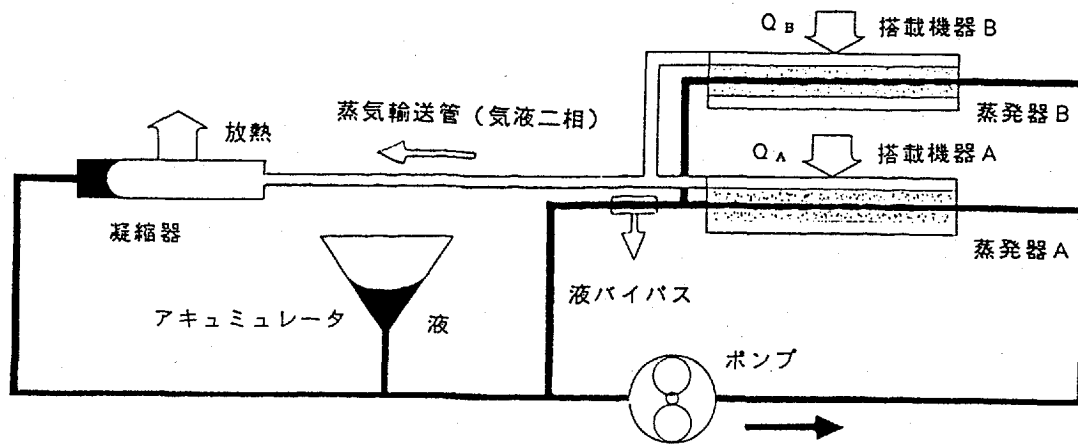


図1 二相流体ループ式排熱システムの基本構成

Fig. 1 Basic configuration of a two-phase Fluid Loop thermal control system.

た蒸発器（コールドプレート）を流れる冷媒の蒸発潜熱の形で除熱／輸送するシステムであり、大型宇宙機の要求する集中管理性、輸送効率、温度制御精度等多くの優れた特徴を持つ。現在、主要要素の技術開発を終え、制御技術の確立を目指している。

二相ループの制御では、蒸発器の温度を設定値に維持するために、アキュムレータによる圧力（温度）制御と蒸発器への冷媒循環量を決める流量制御を組み合わせで行う。何れの制御においても、対象である要素（図1のアキュムレータと蒸発器）が気液二相となる。微小重力環境における気液二相の挙動は、重力が支配的な地上では模擬することが難しく、制御方法を構築するには地上実験と並行して航空機実験や落下塔などで基礎データを取得する必要がある。これまでに、アキュムレータの航空機実験<sup>(1)</sup>によって、準静的な二相流体における気液分離技術と液保持技術を取得してきた。

この報告では、二相ループの制御で最もクリティカルとされている蒸発器への流量制御について述べる。平成3年10月期の同名の微小重力実験<sup>(2)</sup>では、蒸発器内の基本的な流動様式を把握しその課題を明確にした。今回（平成5年1・2月期）の微小重力実験では、それらに対する制御方式を検討／選出し、その実現性を評価した。本報告では、その結果について述べる。

## 2. 実験方法

### 2. 1 目的

この節では、これまでの地上実験や微小重力実験を通して判明した蒸発器／流量制御系における課題について述べる。

二相ループの流量制御は、搭載機器の発熱量変化や環境の変化に応じて冷媒流量を調節するもので

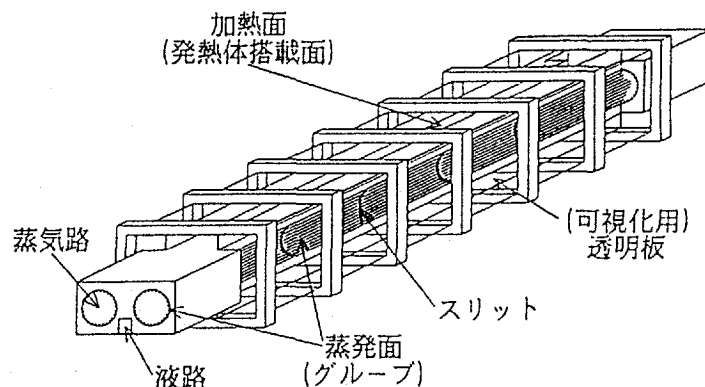


図2 二連グループ管の内部構造（蒸発面可視化用）

Fig. 2 Structure of Grooved-Double pipe.

あり、蒸発器は、

(A) 安定にかつ効率よく熱交換できなければならない。

このためには、蒸発面に毛細管構造（ウィック）を設けその力によって面全体に冷媒の液膜を形成すると同時に気液の分離もする方法が有力である。

この様な観点にたち、図2に示すグループ管型蒸発器（詳細は2.2節で説明する。）の微小重力場実験を、平成3年10月期にMU-300を、平成4年8月にJAMIC落下塔<sup>(3)</sup>を利用して行った。この実験によって、蒸発器内の基本的な流動パターンを取得した。以下に要点を示す。

- (ア) 理論流量（流量 $\sim$ 蒸発器熱負荷/蒸発潜熱）の時は、蒸発面に一様な液膜が形成され、十分な冷却能力を持つ。（地上より良くなる）
- (イ) 過剰流量（流量 $\gg$ 蒸発器熱負荷/蒸発潜熱）の時は、一様な液膜が形成されず、液膜が厚くなると同時に蒸発器の閉端部に液溜ができる。

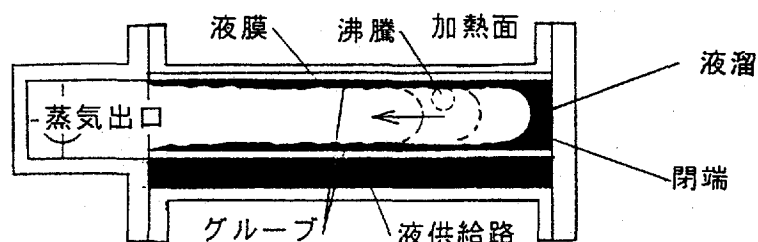


図3 蒸発器内閉端部における液溜の成長

Fig. 3 Growth of liquid block at a closed end of an evaporator.

この実験結果は、過剰流量が続くと、図3に示すように徐々に液溜が成長し、やがて沸騰が起こり始めて安定な運転ができなくなる可能性があること意味する。これを避けるためには、流量制御系/蒸発器は、

- (B) 起動時や負荷減少時に余剰液を排出できる
  - (C) 蒸発器の状態を検知/判断できる信号が容易に取得できる
- 等の機能要求を満足しなければならない。これらの、要求は、
- (D) 蒸発器を並列に運転した時にも成立しなければならない。

以上の流量制御/蒸発器に対する(A)～(D)の4要求の中で、(A)については、ヒートパイプで実績がある上述の技術を応用することで進めることができる。従って、(B)～(D)を満足する制御方針を得ることがこの実験の目的である。

表1にその候補とした3方式の概要を示す。この表では、上記要求(A)(B)(C)に対する思案がそれぞれ、蒸発器、制御方針、信号に対応する。

表1 流量制御方式

Table 1 Types of flow rate control

蒸発器 (A)	信号 (C)	流量制御方法 (B)
グループ管	クオリティ (ボイド率)	・蒸発器を、閉端が無い構造として、蒸発器出口のボイド率を一定になるように流量制御を行う。 (連続制御)
	温度差	・温度差 $\Delta T$ (= 蒸発器壁面温度 - 蒸気温度) がある設定値 $T_{ON/OFF}$ より大きくなった時に冷媒を供給する。(ON/OFF制御)
ステンジャー型 (多孔質)	圧力差	・圧力差 $\Delta P$ (= 蒸気圧力 - 液圧力) がある設定範囲に収まるよう流量制御を行う。(連続制御)

## 2. 2 蒸発器と実験項目

2. 1節表1で示した3制御方法により、本実験ではグループ管とステンジャー型の2種類の蒸発器を使用した。

### (1) グループ管型蒸発器と実験項目

クオリティ制御法とON/OFF(温度)制御法の検証を目的とする実験では、図2に示した二連グループ管と呼ばれる蒸発器を使用した。このグループ管は、2つの蒸気路と1つの液路から成り、液供給路から蒸発面への冷媒供給はスリットを通してグループの毛細管力で行う。表1のクオリティ法で述べた閉端無し構造における余剰液排出機能を確認するために、図3に示したタイプと蒸気出口を両側に設けたタイプ、2種のグループ管を用意した。何れのタイプも、蒸発面全体の液膜状態を観察できるように、蒸発面半分を切り取り可視化窓を設けてある。ON/OFF制御実験用の蒸発器の液供給路は、通常(連続制御)の蒸発管より大きく取ってある。

クオリティ制御法の実験では、センサは搭載せず、余剰液の排出機能を観察した。ON/OFF制御法の実験では、表1で示した制御方針を実行する簡易制御器を搭載した。

グループ管型蒸発器の実験では、実験項目を以下のようにまとめた。

- (G-1) 高・中・低クオリティにおける液膜の観察
- (G-2) 両側出口構造における余剰液の排出機能確認
- (G-3) グループ管並列運転におけるシステム特性の取得
- (G-4) ON/OFF制御(温度検知による)の検証

(G-1)は、運転可能なクオリティの下限を求めるもので、この時の冷却能力は、並列運転時に重要になる。(G-3)はクオリティ制御法/並列運転の検証が目的である。

### (2) ステンジャー型蒸発器と実験内容

表1で示したように圧力差制御法の実験には $\Delta P$ 信号を測定する必要がある。しかし、グループ管では毛細管力が不足し測定が困難であったので、ウィック有孔径がグループ管

のそれより1桁小さい多孔質を蒸発面とするステンジャー型蒸発器を使用した。その構造を図4に示す。この制御法では、蒸気圧が液圧より高くなるように流量を制御するので、何らかの原因で蒸気路に液が溢れ出てもその液はいずれは多孔質内に吸い込まれる。

今回の実験で使用したステンジャー型蒸発器には、液供給路とポンプ入り口を結ぶバイパスが設置されている。この目的は、余剰液と共に液供給路に発生する気泡も排出するためである。

以下のような項目が実験項目となる。

- (S-1)  $\Delta P \geq 0$  なる流量制御の検証  
(蒸発管2本並列も含めて)
- (S-2)  $\Delta P$  と流量等の関係の取得
- (S-3)  $\Delta P$  と伝熱特性の関係の取得

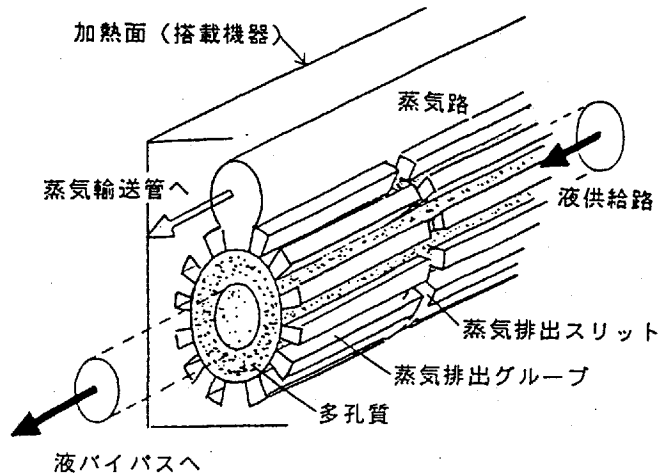


図4 ステンジャー型蒸発器の内部構造  
Fig. 4 Structure of mesh-wick pipe.

### 2. 3 実験装置

2. 2節で述べたように、本微小重力実験では2種の蒸発器に対し2種の実験ループを搭載したが、基本構成は図1に示したループと同じである。放熱は、電子冷却プレートを通して行う。

#### (1) グループ管型蒸発器用ループの構成

グループ管型蒸発器用ループの構成を図5に、ループ及びデータ取得に関する仕様を表2に示す。映像データは蒸発器正面から1点、側面からは3点取得できる。ポンプ出口には、蒸発器への冷媒供給を遮断(ON/OFF実験)するために、ポンプバイパスと電磁弁が設けてある。液バイパスは、この実験主旨には不要であったので設置されていない。

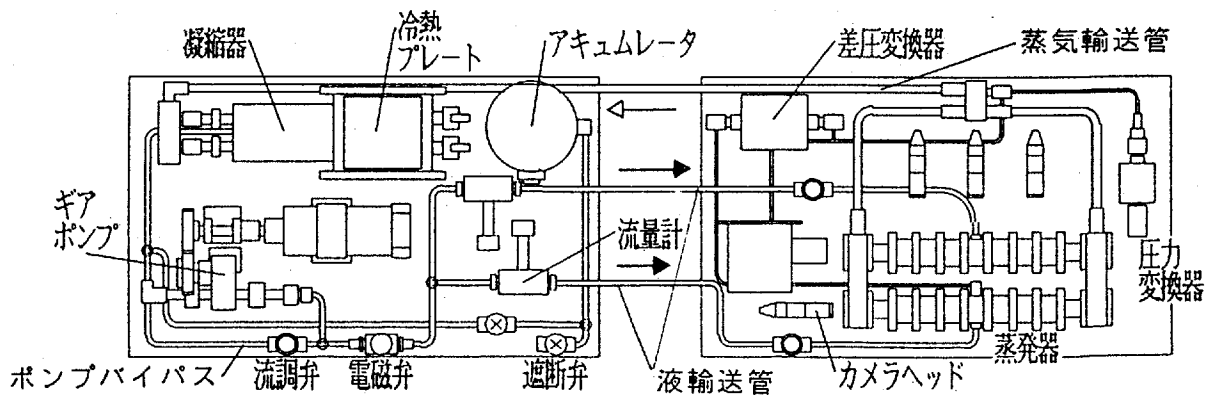


図5 グループ管型蒸発器用ループの構成

Fig. 5 Test loop configuration for Grooved-Double pipe evaporators.

表2 グループ管型蒸発器用ループの仕様

Table 2 Specification of the loop for the Grooved-Double pipe experiment.

ループ仕様		データ計測点	
蒸発器	グループ管(2)	温度	蒸発器(6)、凝縮器、サブクーラ 液冷媒、蒸気冷媒、アキュムレータ
冷媒	フロンR113	圧力	蒸発器出口
流量	3~30 cc/min	差圧	蒸発器出入口
熱入力	60 W/蒸発器	流量	蒸発器流量(2)
冷却	電子冷却プレート	電力	蒸発器ヒータ入力(2)
圧力	最大2 kg/cm <sup>2</sup>	映像	蒸発器(4)

(2) ステンジャー型蒸発器用ループの構成

ステンジャー型蒸発器用ループの構成を図6に、ループ及びデータ取得に関する仕様を表3に示す。2. 1節で理由を述べたように、このループには液バイパスを設けているが、その途中には過冷却度をつけるために容量の小さい電子冷却プレートが取り付けられている。

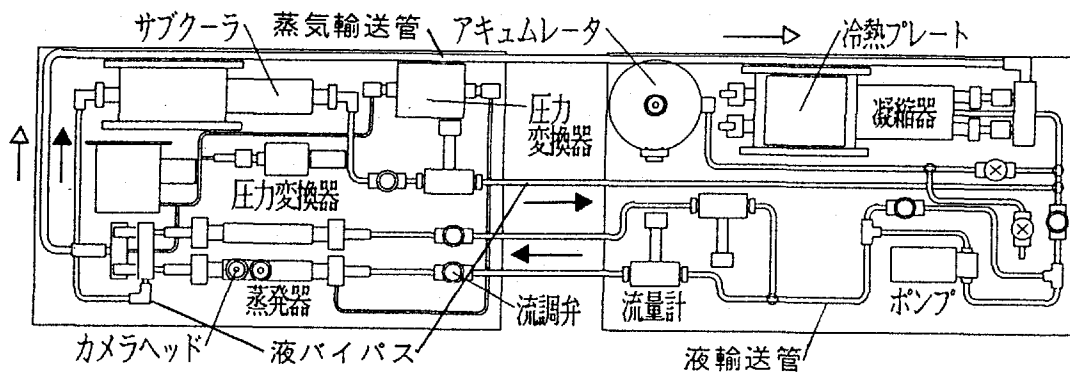


図6 ステンジャー型蒸発器用ループの構成

Fig. 6 Test loop configuration for mesh wick pipe evaporators.

表3 ステンジャー管型蒸発器用ループの仕様

Table 2 Specification of the loop for the mesh wick pipe experiment.

ループ仕様		データ計測点	
蒸発器	ステンジャー型(2)	温度	蒸発器(6)、凝縮器、サブクーラ 液冷媒、蒸気冷媒、アキュムレータ
冷媒	フロンR11	圧力	蒸発器出口
流量	6~60 cc/min	差圧	蒸発器出入口
熱入力	100 W/蒸発器	流量	蒸発器流量(2)
冷却	電子冷却プレート	電力	蒸発器ヒータ入力(2)
圧力	最大2 kg/cm <sup>2</sup>	映像	蒸発器(2)、アキュムレータ

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 実験結果

以下に、実験項目(G-1)～(S-3)に対する結果を述べる。

##### (1) グループ管方式蒸発器の実験結果

(G-1) 閉端がある構造(図3)においても、クオリティが1~0.75で薄い液膜がグループ内に保持され閉端部には液溜が発生しない理想的な運転が得られた。クオリティが0.25になると液がグループから溢れ出し液膜が厚くなる。液溜も形成されるが、加熱面では蒸気通路が確保された、環状流となる。

(G-2) に関する実験の流動パターンを図7に示す。パラボリックフライト(以後PFと略す)突入前に一方の蒸気出口に溜まっていた液が、PF突入後数秒間でスラグ流となり蒸発器外に排出され、その後は蒸発面に薄い液膜が残ることを示している。この結果により、両端出口構成には液を排出する機能があることを確認したと同時に、クオリティ信号による流量制御に見通を得ることができた。

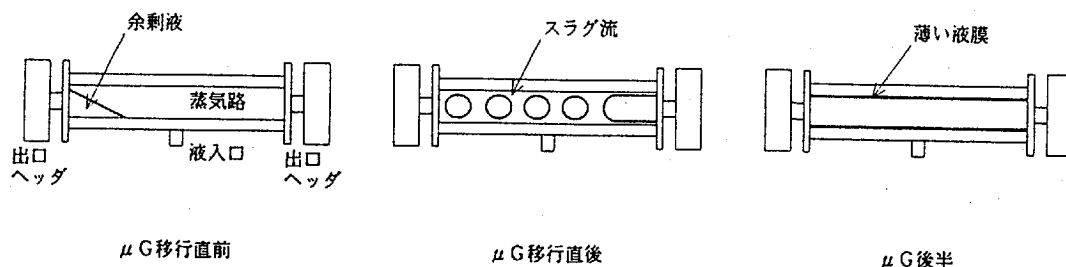


図7 両側出口構造蒸発器における流動様式

Fig. 7 Flow pattern of excess liquid in an evaporator without closed ends.

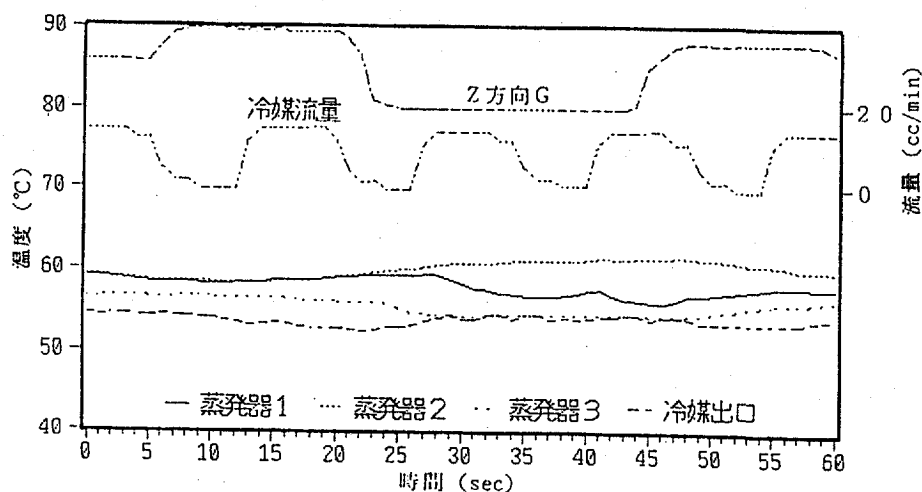


図8 流量ON/OFF制御実験の結果

Fig. 8 Experimental result under reduced gravity condition aboard aircraft, in which flow rate is controlled by on/off signals determined by the difference in temperature between evaporator surface and vapor.

(G-3) 流量は熱負荷によらず蒸発器2本に均等に配分される。このため、各蒸発器への流量制御が出来なければ最大熱負荷に合わせた流量を流す必要がある。

(G-4) 図8にON/OFF制御の結果を示す。この実験例では、蒸発器壁面温度が蒸気温度より4度高くなると7秒間冷媒を供給する制御を行っている。冷媒供給口に近い蒸発器温度(測定点1)が流量のON/OFFに敏感に呼応しているが、蒸発器と蒸気温度の差が4度以内に制御されている。

## (2) ステンジャー型蒸発器の実験結果

(S-1) ステンジャー型蒸発器の典型的な実験結果を図9及び図10に示す。図9は蒸発器単体、図10は蒸発器2本を並列に配置し不均一な熱負荷( $Q_A=28\text{ W}$ ,  $Q_B=50\text{ W}$ )をかけた場合のものである。何れの結果も、PF突入前に $\Delta P \geq 0$ の運転状態を設定したときのZ方向加速度と $\Delta P$ の時間的变化を示している。加速度が $2\text{ G} \rightarrow 0\text{ G}$ と変化するとき流量が増加し、これによって $\Delta P$ が減少する(流量を $G$ とすると $\Delta P \propto -\Delta G$ )が、 $\Delta P \geq 0$ という運転状態は維持される。この時、蒸発器内の蒸気路に液が混入することは無かった。尚、この流量変化は、ループを単相で運転しているときにも起こり、X方向の加速度変化が引き金となっている。

並列運転では、2本の蒸発器への流量が自動的に配分されることが分かった。

(S-2) 液バイパスを持つ蒸発器の圧力差 $\Delta P$ は、熱負荷 $Q$ 、流量(総流量) $G_{tot}$ 、総流量に対する液バイパス流量比 $r = G_{by}/G_{tot}$ で決まる。その傾向は地上でも微小重力場でも同じであり、運転範囲では、 $Q$ 、 $r$ を一定とすると $\Delta P \propto (-\Delta G_{tot})$ 、 $\Delta G_{tot}$ を一定とすると $\Delta P \propto \Delta G_{by}$ であることが分かった。

(S-3)  $\Delta P = 0$ における運転状態が最も高い熱伝達率を与え、グループ管型と同程度以上の熱伝達率を得た。

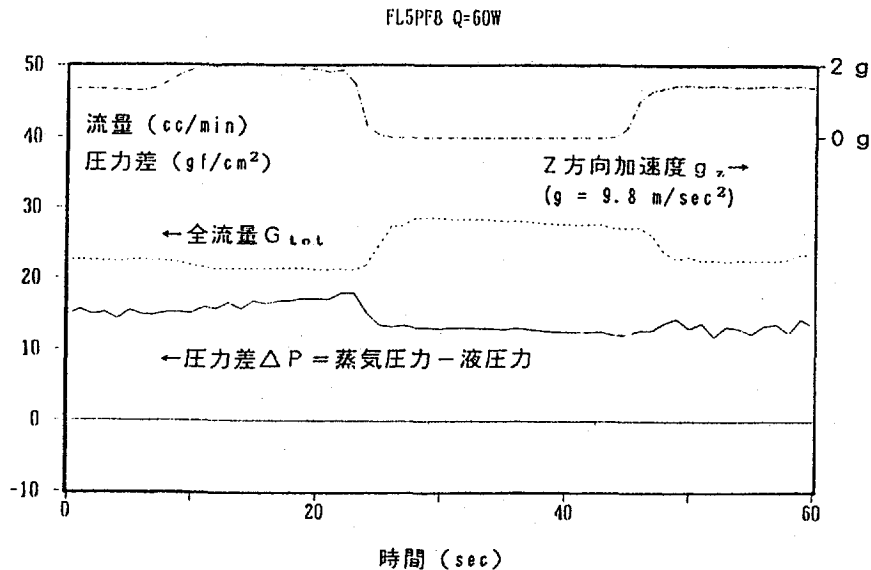


図9 圧力差制御実験の結果(蒸発器単体運転: 熱負荷 $Q = 60\text{ W}$ )

Fig. 9 An experimental result under reduced gravity condition aboard aircraft, in which flow rate is controlled by the difference in pressure between liquid and vapor in the evaporator.



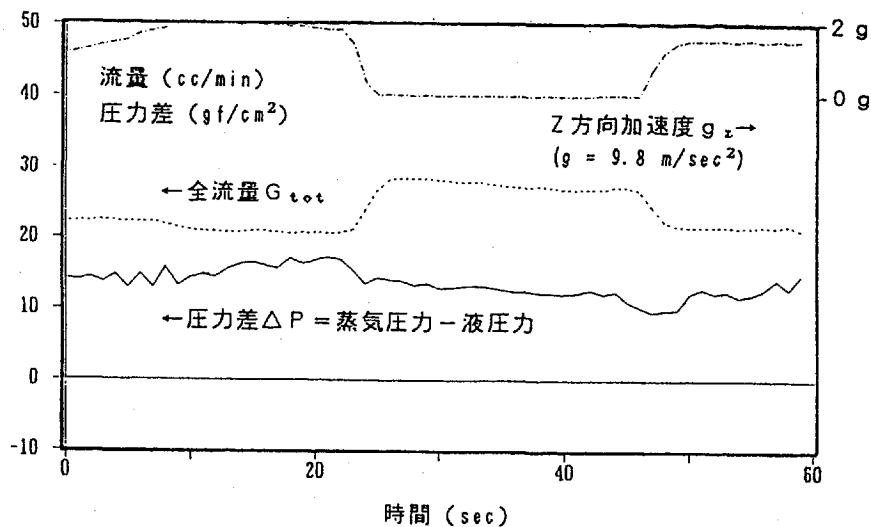


図10 圧力差制御実験の結果（蒸発器並列運転：熱負荷： $Q_A = 28\text{ W}$ 、 $Q_B = 50\text{ W}$ ）  
 Fig.10 Experimental result under reduced gravity condition aboard aircraft, in which flow rate is controlled by the difference in pressure between liquid and vapor near. In this example, two evaporators are connected in parallel.

### 3. 2 評価

3. 1節の結果は以下のように評価できる。

(1) (6-1)の結果において、クオリティが0.75になっても液膜がグループ内に保持されたのは過剰液が蒸気との摩擦で蒸発管外に排出されたためと考える。これにより、クオリティが0.75以上の運転が望まれるが、クオリティを0.25まで許容するクオリティ制御法も考えられる。しかし、地上と微小重力場での流動様式が異なるためにクオリティ・センサを微小重力場で校正（気液スリップ比の取得）する必要がある。

(2) ON/OFF制御では、熱負荷が一定であっても流量のON/OFFに同期する温度変動が起こる。

(3) グループ管型では、高クオリティで温度差、低クオリティでボイド率を信号とする連続的な流量方式も有力であるが、流量調整弁を蒸発器毎に取り付ける必要がある。

(4) 圧力差制御では、並列運転における流量調整が毛細管力で自動的に行われループ構成が簡略化できる。また、気液が分離されて（蒸気輸送管と液バイパス）輸送されるので、地上試験によるシミュレーションが容易にできるという利点も持つ。

クオリティ制御法、ON/OFF制御法、何れも実用化の見通しを得たが、(1)～(3)のような技術課題が残る。今後は、圧力制御方式の制御アルゴリズムを確立していく。

#### 4. 結言

二相流体式排熱システムの流量制御方法／蒸発器系として、クオリティ制御法／グループ管型蒸発器、温度制御（ON/OFF制御）法／グループ管型蒸発器、圧力差制御法／ステンジャー型蒸発器の3方式の組み合わせに対する評価を行った。結果は以下のようにまとめることができる。

(ア) グループ管型蒸発器では、蒸気出口を両端に設けることにより、クオリティを信号とする流量制御が可能であることを確認した。

(イ) 蒸発器壁面温度と蒸気温度の差を信号とする流量ON/OFF制御で運転が可能であることを実証した。

(ウ) グループ管を使用した場合中・低クオリティでボイド率、高クオリティで温度差を信号とする制御も可能である。

(エ) 圧力差 $\Delta P$ （=蒸気圧力-液圧力） $\geq 0$ での運転が可能であることを実証した。

(オ) 並列不均一熱負荷運転では、圧力差制御法を用いると流量が自動的に分配される。

総合的な評価としては、以下のように結論する。

(カ) (ア)～(オ)より、何れの制御法／蒸発器も、流量制御に対する要求を満足するが、3.2節で考察したようにループ構成が簡略になるという点で、圧力差／ステンジャー型蒸発器が有力である。

今後は、地上試験によって制御アルゴリズムの詳細を検討してゆくが、必要に応じて更に微小重力実験を行うことも考えている。

#### 謝辞

本航空機実験において深夜に及ぶ実験準備、雪の中でのフライトと全期間を通して御支援頂いたダイヤモンドエアサービスの皆様に深く感謝いたします。また、この装置の設計・製作・実験と終始御協力頂いた東芝研究開発センター機器試作部の皆様にも感謝致します。

#### 参考文献

- (1) 古川正夫、石井康夫、宮崎芳郎、飯田亨、山崎力、小森実、村田圭治、栗山義男  
パラボリックフライト Vol.1 No.2(1991) pp.27-35
- (2) 古川正夫、石井康夫、飯田亨、小森実、古浜功吉、川本浩一、宮地威、宮崎芳郎  
パラボリックフライト Vol.2 No.2(1992) pp.47-58
- (3) 古浜功吉、味村一樹、川本浩一、石井康夫、飯田亨、板垣春昭、第36回宇宙科学  
連合講演会予稿集 (1992) pp.133-134