

536. 423. 1 : 532. 542 : 532. 517. 6

## 蒸 発 管 系 の 不 安 定 流 動\*

(第 3 報, 並列管での実験結果)

小 沢 守\*\*, 中 西 重 康\*\*, 石 谷 清 幹\*\*  
垂 井 博 明\*\*\*, 山 路 克 彦\*\*\*\*, 菅 孝 雄\*\*\*\*

## 1. 緒 言

蒸気発生器などの沸騰二相流系における不安定流動は、機器の安全性や制御性などの点から重要な問題となっている。

通常の機器は多数の並列管で構成されていて、その多数管中の 1 本の管の流量が一時的に大きく増加、あるいは減少したとしても、その他の多数の管での流量の変動は非常に少なく、したがってヘッド間の差圧はほとんど変化しない。すなわちある 1 本の管での脈動は他の多くの管とは独立に生じると見なしうる。したがって大バイパスを有する単一蒸発管や、既報<sup>(1)(2)</sup>のように上流に圧縮性容積を有する単一蒸発管で、多数並列管中の 1 本の管に注目した形でのシミュレーションが可能である。

しかし少数並列管においては個々の管の間の相互干渉が特に重要になり、多数並列管(単管)とは別に検討しておく必要がある。

少数並列管を対象とした研究としては赤川ら<sup>(3)</sup>、Veziroglu ら<sup>(4)</sup>、Harvie<sup>(5)</sup>、有富ら<sup>(6)</sup>の研究などがある。赤川らの研究<sup>(3)</sup>は主として流量の再分配を対象としたものであり、その他の研究は実験範囲や対象とした不安定流動の種類が限定されていて、並列管での不安定流動の解明あるいは問題点のはあくが十分とは言えない状況である。

そこで本報では 2~5 本の並列蒸発管系で 2 種類の管径に対して得られた一連の実験結果について報告する。本報の主な目的は少数並列管で生じる脈動のモードと位相関係、圧力降下特性と脈動の種類の関係、流量の再分配や不安定流動発生域に及ぼす操作パラメータの影響などを明らかにすることにある。

本報で対象とした不安定流動は密度波振動、圧力降

下振動およびフローバタン遷移不安定で、前の二つの脈動のメカニズムは既報<sup>(2)(7)</sup>、その他<sup>(8)</sup>によって明らかにされているが、第 3 番めの脈動については研究も少なく<sup>(1)(9)</sup>、十分に解明されていない。また本実験装置もフローバタン遷移不安定を詳細に検討するには不適當であるので、本報ではそのメカニズムについての議論はしない。

## 記 号

$P$ : ドラム圧力 Pa  
 $G$ : 質量流量 kg/h  
 $G_m$ : 均等流量分配の場合の各管の質量流量 kg/h  
 $G_t$ : 全質量流量 kg/h  
 $G_0$ : ある圧力、入口サブクーリング、加熱量のもとで加熱部出口で飽和液になるときの流量 kg/h  
 $h'$ : 飽和液のエンタルピ J/kg  
 $h_{in}$ : 入口エンタルピ J/kg  
 $Q$ : 加熱量 kW  
 $Q_m$ : 均等加熱量分配の場合の各管の加熱量 kW  
 $\Delta T_{sub}$ : 入口サブクーリング K  
 $\Delta P_v, \Delta P_{v1}, \Delta P_{v2}$ : ベンチュリ管での差圧 Pa  
 $\Delta P_t$ : ヘッド管の差圧 Pa  
 $\Delta P_0$ : 流量  $G_0$  でのヘッド間差圧 Pa  
 $x$ : 出口乾き度  
 $\tau$ : 脈動の周期 s  
 $g$ : 加熱部流動時間 s

## 2. 実験装置と実験方法

実験装置は R113 を作動流体とした強制循環ループで、テスト部以外は既報<sup>(1)(2)</sup>と同一である。図 1 は実験に用いたテスト部で、入口ヘッド、出口ヘッド、並列 5 本の SUS304 垂直管からなっている。各管の入口と出口を閉じることによって 1~5 本管までの実験が可能である。各管の入口部と入口ヘッドの上流にベンチュリ流量計が取り付けられている。蒸発管には内径

\* 昭和 52 年 11 月 12 日 創立 80 周年記念講演会(大阪)および昭和 53 年 6 月 1 日 第 15 回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和 53 年 7 月 12 日。

\*\* 正員、大阪大学工学部(〒565 吹田市大字山田上)。

\*\*\* 准員、住友金属工業会社。

\*\*\*\* 学生員、大阪大学大学院。

6.03 mm, 外径 7.0 mm (以後これを ch. I と略記する) と内径 3.58 mm, 外径 5.98 mm (ch. II と略記する) の 2 種類がある. いずれの場合も加熱長は 2.8 m であり, 交流電力を直接通電することによって加熱される. テスト部は放熱をできるだけ少なくするためにグラスウールで保温されている.

単管実験では既報<sup>(1)(2)</sup>と同様に, 入口ヘッダの上流に設置されている  $N_2$  ガス封入のサージタンクを系に接続する. 並列管実験では各管の加熱量が一樣で, 非加熱状態での流量分配が一樣である場合についてサージタンクを用いずに実験するが, 系にサージタンクを接続することの効果についても調べる. なお非加熱状態の流量分配は蒸発管入口のオリフィスの口径を調節することによって一樣にされている. 加熱状態においても流量の再分配が生じていない一樣流量分配状態であるとみなされる範囲では, 各管の流量の平均流量に対する偏差は  $\pm 1\%$  程度である.

実験方法としてはドラム圧力, 入口サブクーリング, 流量を一定に保ち, 加熱量を順次増加する方法と, 加熱量を一定に保っておいて流量を順次変化させる方法を採用する.

ch. I では非加熱状態の蒸発管の抵抗係数は 20 程度であるのに対して, オリフィスやベンチュリ管を含

む入口部での抵抗係数は 14, 出口部では 1.4 程度である. また ch. II では蒸発管の抵抗係数は 30, 入口部で 2.2, 出口部で 2 程度である. ch. I の単管の圧力降下の静特性は本実験の範囲では重力成分が約 80%, 摩擦と加速成分がそれぞれ約 10% であって, 重力成分が最も支配的である. それに対して ch. II では摩擦成分が約 60%, 重力成分が約 30%, 加速成分が 10% 程度で, 摩擦成分が支配的である. したがって本実験の範囲では ch. I を用いると, 圧力降下-流量特性は正こう配のみであるのに対して, ch. II では流量の増加とともに圧力降下の減少する負こう配域を含む N 字形の特性になる.

### 3. 脈動のモードと位相関係

**3.1 脈動のモード** 図 2 に ch. I の 3 本管系で得られた脈動の周期  $\tau$  と流動時間  $\theta$  の関係の一例を示す (図 8 に対応). ここで流動時間  $\theta$  は二相流部を均質流とみなして算出した加熱部全体の通過時間である. 密度波振動には既報<sup>(1)</sup>の単管系と同様に, 周期が流動時間の約 2 倍の基本モードと流動時間よりも短い高次モードの 2 種類ある. 基本モードは低サブクーリング域, 高次モードは高サブクーリング域で発生する. 図 8 から明らかなように加熱量を増加していくと, 脈動のモードは高次から基本へと遷移する. また低乾き度域で発生するフローパタン遷移不安定においては, 周期と流動時間の相関は密度波振動ほどめいりょうではない. 単管系 (図 6 に対応) でも図 2 とほぼ同様の関係が得られる.

一般に流量が少なくなると高次モードの密度波振動は発生しなくなる. 図 3 は 2 本管系において, フロー

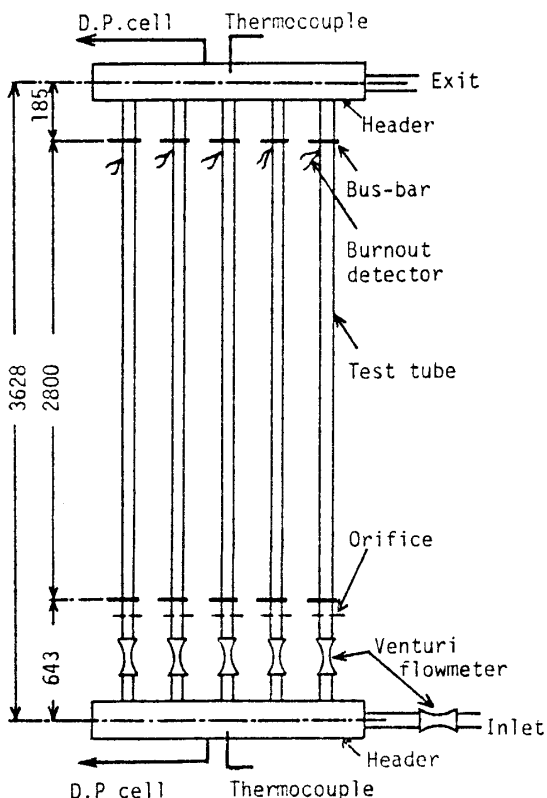


図 1 テスト部

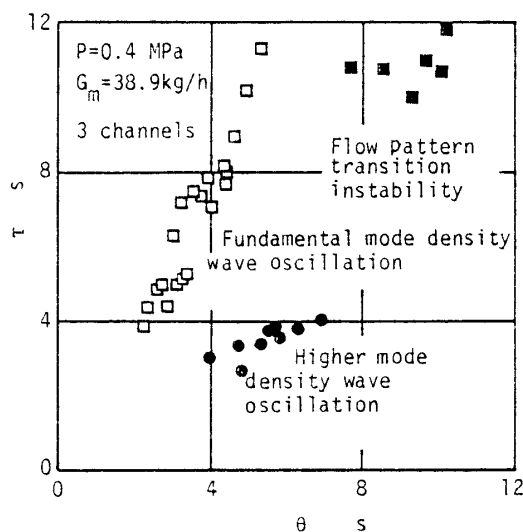


図 2 脈動周期 (ch. I, 3 本管系)

パタン遷移不安定と基本モードの密度波振動が発生した場合の周期と流動時間である(図7に対応)。図中の番号は図7中の番号に対応していて、1, 2, 3, ...の順に加熱量は大きくなる。周期と流動時間の関係は加熱量の増加とともに、フローパタン遷移不安定から基本モードの密度波振動へと連続的に遷移していく。またフローパタン遷移不安定の周期は13秒程度で、

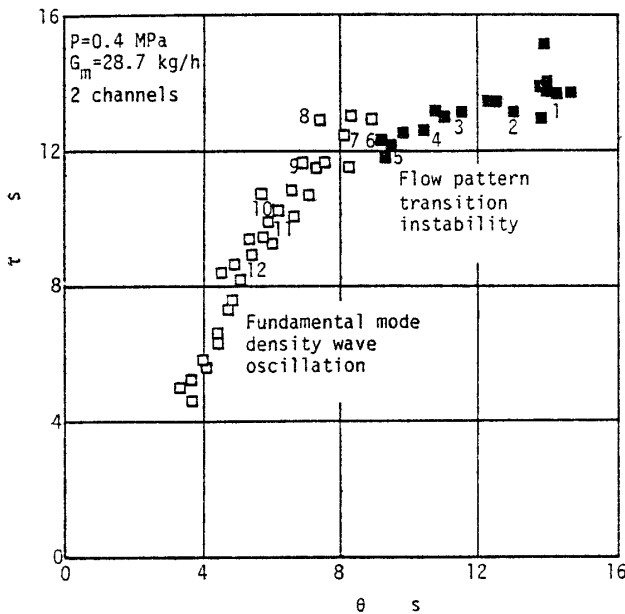


図 3 脈動周期 (ch. I, 2 本管系)

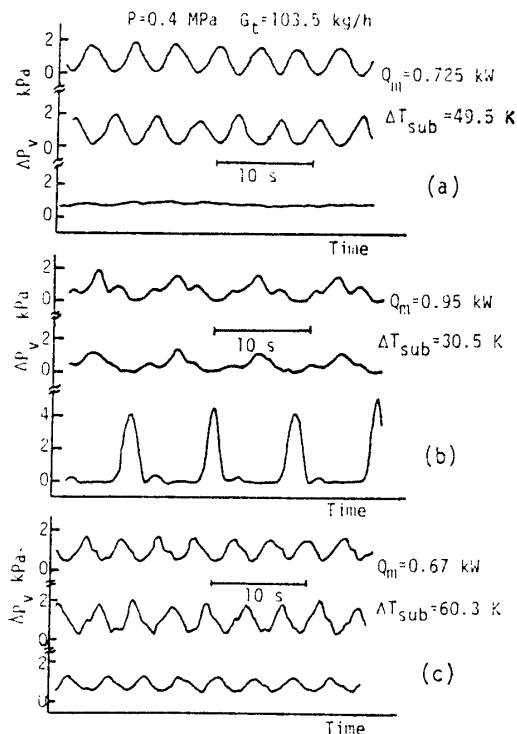


図 4 脈動の位相関係 (3 本管系, ch. I)

流動時間との相関はめいりょうではない。図では一応、フローパタン遷移不安定と密度波振動の記号を変えて示しているが、この境界については明確な根拠はない。

**3.2 脈動の位相関係** 系にサージタンクを接続していないときに発生する密度波振動やフローパタン遷移不安定などの脈動は、ヘッド間に限定されていて、

入口ヘッドへ流入する流量は一定で変動しない。またヘッド間差圧もほぼ一定に保たれている。そして2本管での流量脈動は同振幅で位相差は $180^\circ$ になる。3本管の場合には変動の自由度が2本管に比べて大きく、種々の位相関係が考えられるが、各管の熱・水力学特性が等しい本実験においては、各管流量の変動の位相が互いに $120^\circ$ ずつずれた脈動のみ発生する。4本管の場合には2本ずつが同振幅・同位相で対をなし、この二対が互いに $180^\circ$ の位相差で変動する。4本のうちの2本の管が対をなすかは不定である。5本管の場合には約 $72^\circ$ ずつ位相のずれた脈動となる。

各管の熱・水力学特性が異なる場合、たとえば3本管系で各管の入口オリフィスの口径を操作して流量を不均等に分配した場合には、脈動の位相関係は図4に示すように(a)

3本管のうち2本の管で同振幅・同周期の逆位相の脈動が存在し、残りの管では脈動がほとんどない、(b) 3本管のうち2本の管で同位相の脈動が存在し、残りの管ではそれら2本の管とは逆位相の脈動が生じている、(c) 各管の脈動がほぼ $120^\circ$ ずつの位相差を有する場合は観察される。これら3種の位相関係は従来報告されている位相関係<sup>(5)</sup>と一致する。4～5本管系で流量の不均等分配時の流量脈動の位相関係については実験しなかったが、かなり複雑な様相を呈すると思われる。

以上述べたように熱・水力学特性が各管で異なる場合には、種々の脈動の位相関係が成立するのに対して、各管の特性が一樣である場合には特定の位相関係しか存在しない原因は現在のところまだ不明で、今後さらに検討を要する。

図5はch. IIの2本管系にサージタンクを接続したときに発生する脈動波形の一例である。ベンチュリ管差圧 $\Delta P_{v1}$ ,  $\Delta P_{v2}$ は各管の入口流量に対応する。 $\Delta P_{v1}$ では過渡的に密度波振動が発生し、 $\Delta P_{v2}$ では既報<sup>(2)</sup>で詳述した圧力降下振動が発生している。 $\Delta P_{v2}$ の脈動波形の区間c-dでも過渡的に密度波振動が発生し

ている。このとき両方の管の作動状態は圧力降下-流量特性の低流量側の正こう配域にあるが、脈動のタイプが2本の管の間で入れ替わることはない。また  $\Delta P_{0.2}$  の波形の区間 a-b, c-d では圧力降下-流量特性の正こう配域にはほぼ一致して状態が変化しており、これは既報<sup>(2)</sup>の単管系での結果と一致している。

4. 不安定流動発生領域

ここでは加熱量を操作パラメータとして得られた実験結果について述べる。

4.1 重力圧力降下が支配的な場合の結果 (ch. I の実験結果)

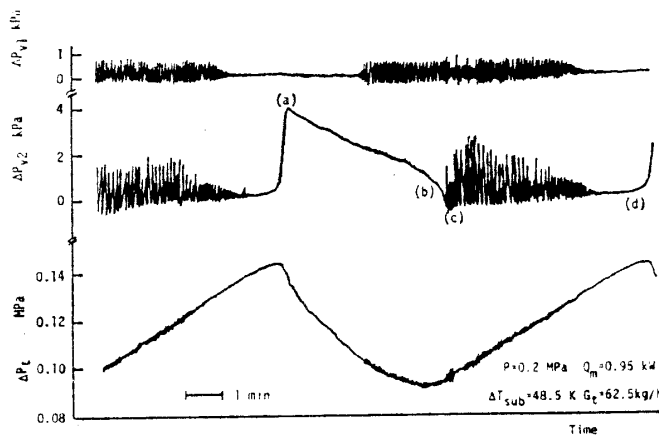


図5 脈動波形 (2本管系, ch. II)

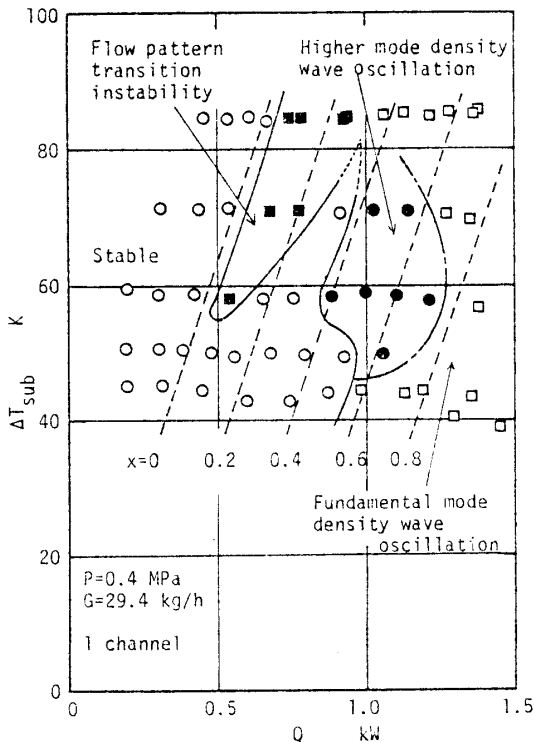


図6 重力圧力降下が支配的な場合 (ch. I) の単管系での不安定流動発生領域

定流動発生領域が入口サブクーリング  $\Delta T_{sub}$  と加熱量  $Q$  に対して示されている。破線は出口乾き度  $x$  が等しい状態を示す。  $x=0\sim 0.2$  の低乾き度域でフローパタン遷移不安定、乾き度が比較的高い領域で密度波振動が発生する。密度波振動にはすでに述べたように基本モードと高次モードの2種類がある。  $\Delta T_{sub}=85$  K 程度の高サブクーリング域では、加熱量の増加とともにフローパタン遷移不安定から密度波振動 (基本モード) へと連続的に遷移する。

図7は2本管系での実験結果である。図6と同様に低乾き度域でフローパタン遷移不安定、高乾き度域で基本モードの密度波振動が発生する。この場合には高次モードの脈動は生じていないが、流量がさらに大きくなると生じるようになる。  $\Delta T_{sub}=30\sim 50$  K の範囲では加熱量の増加とともに単相の安定域→フローパタン遷移不安定域→安定域→密度波振動域と変化し、  $\Delta T_{sub}>50$  K では二つの不安定域が連続している。

図8は3本管系での実験結果の一例である。これは単管系 (図6参照) と定性的に一致している。図中の一点鎖線は多数並列管系の密度波振動に対する安定解析<sup>(7)</sup>を適用して求めた安定限界である。パラメータは Zuber ら<sup>(9)</sup>の速度分布とボイド分布の影響を示すパラメータ (distribution parameter)  $c$  とドリフト速度  $w$  である。図から明らかなようにこの解析はフローパタン遷移不安定に対しては有効ではない。このことからフローパタン遷移不安定のメカニズムは

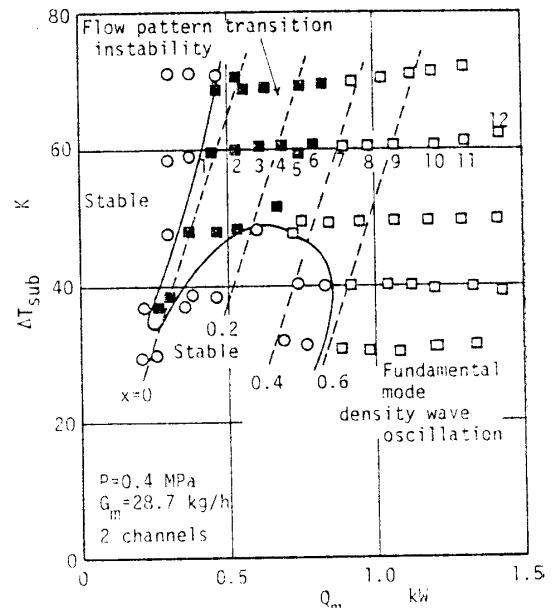


図7 重力圧力降下が支配的な場合 (ch. I) の2本管系での不安定流動発生領域

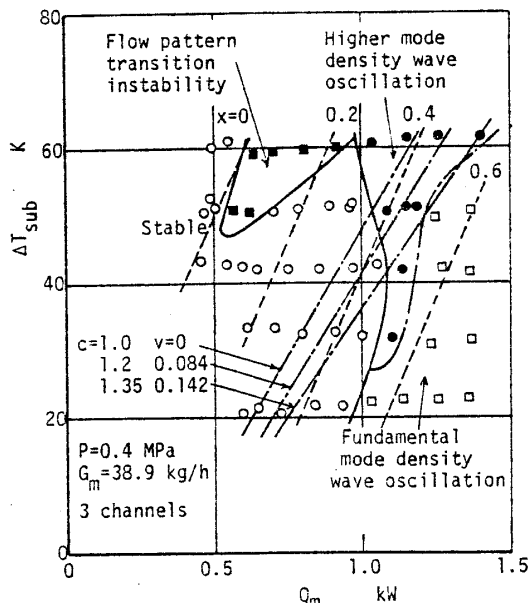


図 8 重力圧力降下が支配的な場合 (ch. I) の 3 本管系での不安定流動発生領域

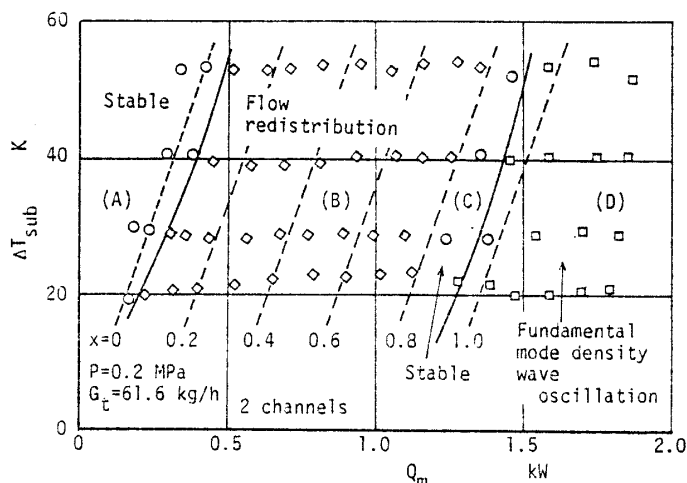


図 9 摩擦圧力降下が支配的な場合 (ch. II) の 2 本管系での不安定流動発生領域

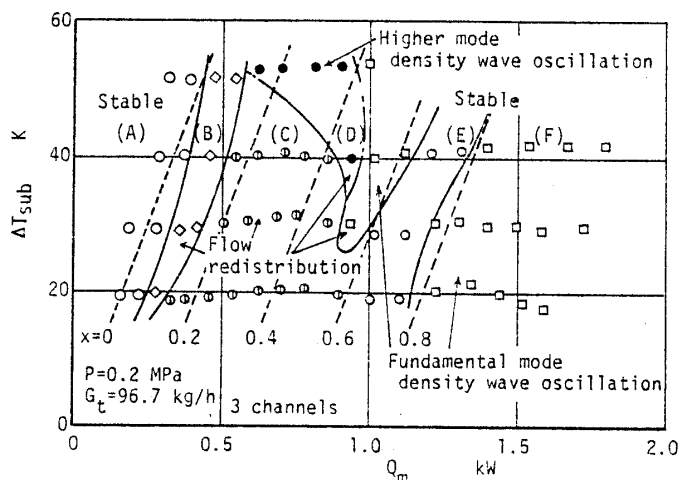


図 10 摩擦圧力降下が支配的な場合 (ch. II) の 3 本管系での不安定流動発生領域

密度波振動のそれとは異なり、解析では考慮されていない、たとえば圧力降下や気ほう発生などに関係した非線形性が作用しているものと推測される。4 本管や 5 本管系においても 1~3 本管系とはほぼ同様の結果が得られる。

なお、図 6 や 8 では図 2 のように、 $\tau$ - $g$  の関係がフローパタン遷移不安定と密度波振動とは明らかに異なっているため、それらの境界を決定することは容易である。しかし図 7 では図 3 から明らかなように  $\tau$ - $g$  の関係が連続して、それら二つの脈動域の境界を明確に定めることができない。ここでは一応、図 3 と一致するように設定しているが、境界そのものに明確な根拠があるわけではない。また図 6, 8 においてもさらに高サブクーリング域まで実験範囲を広げれば、それら脈動域の境界を決定することが困難になる。

4.2 摩擦圧力降下が支配的な場合の結果 (ch. II での実験結果)

ch. II の単管系では出口乾き度が比較的低い範囲での平均作動状態は圧力降下-流量特性の負こう配域にあり、圧力降下振動が発生する。高乾き度域では密度波振動が発生する。ch. I と ch. II で生じる脈動の種類が異なるのは、圧力降下特性の差異によると考えられる。

図 9 には 2 本管系で得られた実験結果が  $\Delta T_{sub}$  と  $Q_m$  に対して示されている。 $\Delta T_{sub}$ - $Q_m$  平面は 4 領域、すなわち出口で液単相の安定域 (A)、流量の再分配域 (B)、均等流量分配の安定域 (C) として密度波振動域 (D) に分割される。領域 (B) では平均流量に対する作動点が圧力降下-流量特性の負こう配域にあり、各管の間で互いに流れ逸走が生じて流量が再分配される。このとき脈動は生じない。不均等な流量分配は加熱量の増加とともに均等化され、領域 (C) へと連続的に遷移する。領域 (B) と (C) の境界は領域 (A) と (B)、(C) と (D) の境界ほどめりょうではなく、図 9 の場合では  $x=0.8$  付近である。領域 (D) の密度波振動は基本モードである。系にサージタンクを接続すると  $x=0.2 \sim 0.8$  の範囲で、図 5 のように 2 本管のうちの 1 本の管で圧力降下振動が発生し、残りの管では過渡的に密度波振動が発生する。本実験範囲においては両方の管で圧力降下振動が生じる場合はない。

図10は3本管系での実験結果である。3本管系の場合は2本管系に比べてかなり複雑で、低加熱量側から順に液単相の安定域(A), 流量の再分配域(B), (C), (D), 均等な流量分配の安定域(E), 密度波振動域(F)に分割される。流量の再分配には2モード、すなわち3本管のうち2本の管で流量が多く残りの1本の管で少ない場合(領域B)と、2本の管で流量が少なく1本の管で多い場合(領域C, D)がある。領域(B), (C)では流量脈動はないが、領域(D)では流量の少ない2本の管の間で互いに180°位相のずれた密度波振動が生じ、残りの管には流量脈動はなく安定である。低サブクーリング域には領域(D)はなく、領域(C)と(E)の境界はめいりょうではない。領域(F)で3本管の間で生じる密度波振動は基本モード

で、領域(D)の一部では高次モードの密度波振動が生じている。

系にサージタンクを接続すると、 $x=0.5\sim 0.65$ の付近で3本管のうち1本の管で圧力降下振動が発生し、他の2本の管では過渡的に密度波振動が生じる。2本管系の場合と同様に全管で圧力降下振動が発生することはない。

### 5. 並列管系の特性曲線

ここではch. IIの場合の圧力降下の静特性と、流量の再分配や脈動との関係について述べる。

図11(a)の曲線は単管の圧力降下-流量特性の実験結果の一例である。本研究では各管の熱・水力学特性が等しい場合を対象としているので、この曲線と同じ条件下の並列管を構成するすべての管の圧力降下-流量特性を表している。この曲線を用いて赤川ら<sup>(3)</sup>の方法で2本管系の圧力降下-流量特性を求めたのが図11(b)であり、そのときの流量分配は図11(c)で表される。図中にプロットされている点は、流量を操作パラメータとして高流量側から順次減少させることによって求めた実験結果である。逆に流量を増加させたときにも同じ曲線上を通る。破線で示している曲線は本実験で実現できなかった状態で、これは赤川ら<sup>(3)</sup>の結果と一致する。

図11(a)に示す単管の圧力降下-流量特性を高流量側から正こう配域 $\alpha$ , 負こう配域 $\beta$ , 正こう配域 $\gamma$ と分割すると、図11(b), (c)実線に沿って設定された領域(A)は、各管がの $(\alpha)$ と $(\alpha)$ ,  $(\beta')$ は $(\alpha)$ と $(\gamma)$ ,  $(\beta'')$ は $(\alpha)$ と $(\beta)$ , (C)と(D)は $(\gamma)$ と $(\gamma)$ の状態にある。なお(A)~(D)の各領域は図9の(A)~(D)にそれぞれ対応する領域である。サージタンクを系に接続したとき圧力降下振動が発生するのは領域(B'')で、2本管のうち1本の管が単管静特性の領域 $(\beta)$ にあり、しかも並列管全体の圧力降下-流量特性も負こう配域にある状態を実現できないので、両方の管で圧力降下振動が生じることはない。

図12は3本管系での特性曲線である。図11と同様に、流量を順次減少させることによって得られた実験結果が同時にプロットされている。実線に沿って設定された領域(A)~(F)は図10の(A)~(F)に対応する状態である。また領域(A)は各管が図11(a)の $(\alpha)$ ,  $(\alpha)$ ,  $(\alpha)$ , (B)は $(\alpha)$ ,  $(\alpha)$ ,  $(\gamma)$ , (C)と

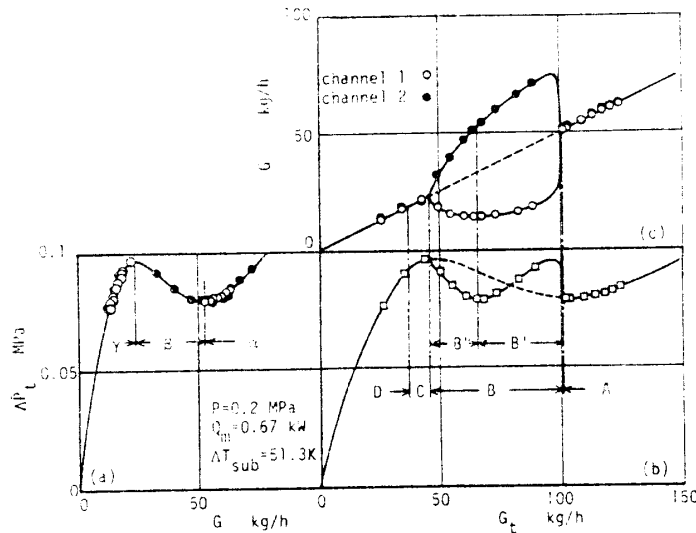


図11 摩擦圧力降下が支配的な場合(ch. II)の2本管系での並列管特性曲線

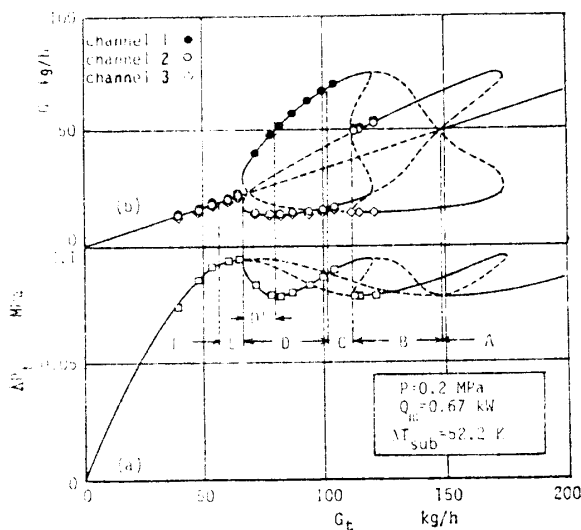


図12 摩擦圧力降下が支配的な場合(ch. II)の3本管系での並列管特性曲線

(D) の一部は、(γ), (γ), (α), (E) と (F) は (γ), (γ), (γ), そして (D') は (γ), (γ), (β) の状態にある。図中の破線で示されている部分は実現できなかった状態で、赤川ら<sup>(9)</sup>の結果とも一致している。系にサージタンクを接続したときに圧力降下振動が生じるのは領域 (D') のみで、3 本管のうち 1 本の管で圧力降下振動が生じる場合しかない。

図 9 や 10 のように加熱量を操作パラメータとした場合の流量の再分配特性や圧力降下-流量特性を調べるには、すべての加熱量に対して図 11 や 12 に示したような特性曲線を作成する必要がある。しかし加熱量と流量および圧力降下の静特性の関係を坂口ら<sup>(10)</sup>の方法で一般化すれば、1 枚の図で流量および加熱量の変化に対する流量の再分配や、圧力降下特性などを容易にはあくできる。

ある圧力、入口サブクーリング、加熱量に対して出口でちょうど飽和液になるときの流量  $G_0 = Q_m / (h' -$

$h_{in})$ , そのときの蒸発管での圧力降下を  $\Delta P_0$  とする。これら  $G_0, \Delta P_0$  で各流量  $G$ , 圧力降下  $\Delta P_i$  を無次元化し、圧力降下-流量特性を  $\Delta P_i / \Delta P_0 - G / G_0$  の関係で表す。たとえば  $P = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}} = 40.5 \text{ K}$  の場合について、 $Q = 0.3 \sim 1.2 \text{ kW}$  の範囲の 5 種類の加熱量に対して求めた圧力降下-流量特性の実験値から算出した  $\Delta P_i / \Delta P_0 - G / G_0$  の関係は、図 13(a) の曲線によって  $\pm 10\%$  程度の誤差で近似できる。流量が一定の状態では加熱量を順次増加することは図 13(a) においては  $G/G_0$  が順次減少することになる。図 13, 14 の 2~3 本並列管特性は有次元の図 11, 12 と同じ方法で作成したものである。図中の破線で示されている状態は、図 11, 12 および赤川ら<sup>(9)</sup>の結果と比較対照して実現できないと判断した状態である。図 9, 10 に従って特性曲線に沿う (A)~(F) の領域を設ける。各領域における流量の再分配、圧力降下特性は図 11, 12 のそれらと定性的に一致する。

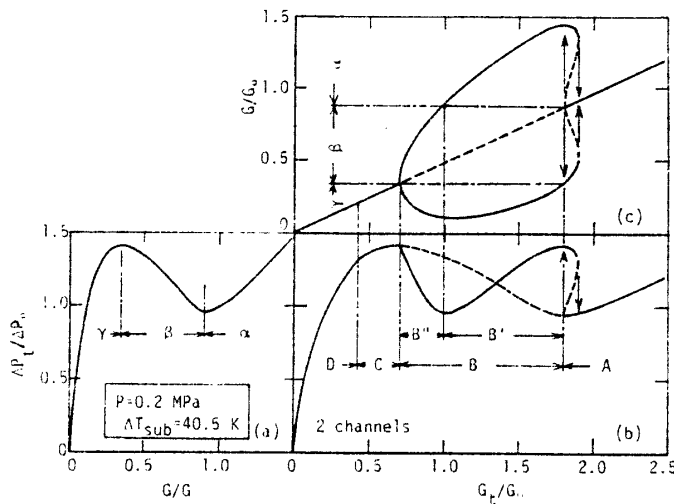


図 13 無次元並列管特性曲線 (ch. II, 2 本管系)

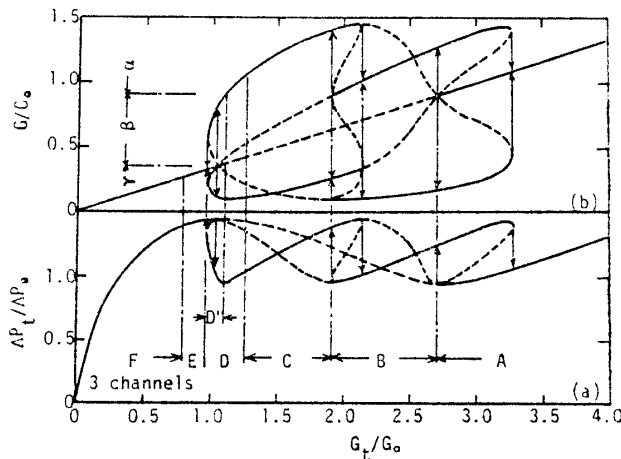


図 14 無次元並列管特性曲線 (ch. II, 3 本管系)

図 13 の領域 (A)-(B) の境界および図 14 の (A)-(B), (B)-(C), (D)-(E) の境界は、 $G/G_0$  が増加するときと減少するときとで異なり、ヒステリシスが存在する。これは加熱量を操作パラメータとした場合にも、上記境界にヒステリシスが存在することを意味している。

本研究においては単管の圧力降下-流量特性の実験値を用いて無次元特性曲線を求めたが、たとえば坂口ら<sup>(10)</sup>の圧力降下の無次元関係式を用いても図 13 や 14 のような特性曲線を作成できる。これと流量を操作パラメータとした場合の実験結果（たとえば図 11 や 12 あるいは赤川らの結果<sup>(9)</sup>）と比較対照することにより  $G/G_0$ , すなわち  $Q$  の変化に沿う流量の再分配特性や圧力降下特性を知ることができる。この方法は 4 本管系や 5 本管系など、より多数の並列管系に対しても拡張できるが、線図は 3 本管系に対するものよりもかなり複雑になる。またこの方法は各管の水力学的特性の異なる場合に対しても適用できる。

なお無次元特性曲線は流量の再分配や圧力降下特性についてはかなり明確な情報を与えるが、密度波振動や圧力降下振動については発生の可能性を示すだけであって、実際に発生するかどうかについては、既報<sup>(7)</sup>で述べたような別の判定条件を用いることが必要である。これは密度波振動や圧

力降下振動が、圧力降下-流量特性 だけではあくできない動的なメカニズムによる脈動であることに起因する。

ここでは ch. II を例として取り上げたが、ch. I の場合についても無次元特性線を作成することができる。しかし ch. I の単管の圧力降下-流量特性は正こう配域のみで、並列管の特性も正こう配域のみで流量の再分配は生じない。しかも密度波振動とフローパタン遷移不安定の発生域を圧力降下-流量特性 だけでは決定できないので、ch. II の場合のような無次元特性線図を作成してもあまり意味がない。

## 6. 結 言

2～5本の少数並列蒸発管系を用いて不安定流動に関する実験を行い、次の結論を得た。

(1) 熱・水力的特性が一樣な並列管でも発生する各管の流量脈動は、互いに  $180^\circ$  (2本管, 4本管),  $120^\circ$  (3本管),  $72^\circ$  (5本管) の位相差を有する。熱・水力的特性が一樣でない場合には種々の位相関係が成立する。

(2) 重力圧力降下が支配的な系においては、低乾き度域でフローパタン遷移不安定、高乾き度域で基本モードと高次モードの密度波振動が発生する。摩擦圧力降下が支配的な系では流量の再分配、上記2種のモードの密度波振動、圧力降下振動が発生する。

(3) 脈動に関しては並列管と単管の本質的な差はない。

(4) 無次元並列管特性曲線と流量を操作パラメータとした実験結果から、加熱量を操作パラメータとしたときの流量の再分配特性と圧力降下特性を予測でき

る。

以上の結果は本研究で対象としたような少数並列管系に対しては有効である。しかし実機の蒸気発生器のような多数の並列管系では、脈動の位相関係はかなり複雑で、本研究のようにめいりょうではないし、また脈動のモードも図5に示すようにいくつかの種類のものが共存しうる。したがって本研究結果だけから多数並列管系について議論することは困難である。しかも実機のすべての管に流量計を計装することが非常に困難で、不安定流動の検出がむずかしい。今後これら計装あるいは不安定流動の検出法も含めて、多数並列管の安定問題を検討する必要がある。

おわりに本研究の一部が昭和52年度文部省科学研究費(総合A)によったことを記し、謝意を表します。

## 文 献

- (1) Nakanishi, S., ほか4名, *Theoretical and Applied Mechanics*, **26** (1976-11), 421.
- (2) 中西・ほか4名, 機論, **45**-388, (昭 53-12), 4252.
- (3) 赤川・ほか3名, 機論, **36**-292 (昭 45-12), 2104.
- (4) Veziroglu, T. N. and Lee, S. S., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Pt. 3C, **184** (1969-70).
- (5) Harvie, J. D., *Multi-Phase Flow Systems*, *Inst. Chem. Engrs., Symp. Ser., Glasgow*, **38** (1974), E.1.
- (6) Aritomi, M., ほか2名, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **14**-2 (1977), 14.
- (7) Nakanishi, S., ほか3名, *Technology Reports of the Osaka Univ.*, **28**-1421 (1973-3), 243.
- (8) Bouré, J. A., ほか2名, *ASME Paper*, No. 71-HT-42 (1971), 1.
- (9) Zuber, N. and Findlay, J. A., *Trans. ASME*, Ser. C, **87**-4 (1965-11), 453.
- (10) Sakaguchi, T., ほか, *Mem. Facul. Engng., Kobe Univ.*, **20** (1974-3), 143.

## 討 論

〔質問〕 鈴 置 昭(日立製作所エネルギー研究所)

(1) 振動波形, 振幅, 位相関係など, 現象的に見て, 密度波振動とフローパタン遷移不安定の主な違いはどこにあるのか。また, フローパタン遷移不安定が (i) 図7にみられるように  $x < 0$  でも発生している, (ii) 重力圧力降下が支配的な場合のみ発生していることから, この不安定はサブクール沸騰ポイドによる浮力に起因するものと理解すべきように思われるがいかがか。

(2) 図8に安定限界に関する解析結果を実験結果と比較されているが, 解析結果は基本モードと高次モ

ードのどちらに対応しているのか。

(3) 水力的特性が互いに等しい  $N$ 本の並列管系では, 各管の振動の位相関係には,

(i)  $N$ が素数の場合には,  $360^\circ/N$

(ii)  $N$ が素数でない場合には,  $360^\circ/N$ のほかに  $360^\circ/N_i^*$  ( $N_i^*$ は  $N$ の約数) があると思われる。従って4本管系では,  $180^\circ$ のほかに理論的には,  $90^\circ$ 位相もあり得ると思われるが, 後者が実験で観測されなかったことについては, 何かの必然性があるのか。

〔回答〕 (1) フローパタン遷移不安定と密度波振動の現象的な差異としては, フローパタン遷移不安



定の方が周期が長い, 一般に振幅が小さいことなどがあるが, それほどめいりょうではない. 本研究では乾き度 0 の近傍で発生すること, および図 2 に示すように流動時間と周期の相関に基づいて両者を区別している. またその基本的メカニズムとしては質問者の意見が最も一般的 [たとえば文献(5)] であるようだ. この問題については別途検討する予定であるが, 目下のところ低乾き度域 (あるいはサブクール沸騰域) における気ほう発生過程, ポイド分布, 圧力降下などの非線

形性に関係した一種のし緩振動であろうと考えている.

(2) 解析結果はすべて基本モードに対応している.

(3) 可能性としては  $90^\circ$  位相差もあると思うが, 本実験ではいずれの場合も  $180^\circ$  位相差であった. その基本的要因については現在のところよくわからない. 今後さらに検討したいと思う.