並列流路単相流自然循環の流動特性*

成合英樹^{*1}, 一瀬 中^{*2}, 小森谷 勲^{*3}Flow Characteristics of Single Phase Natural Circulation
in Parallel Channel

Hideki NARIAI, Ataru ICHINOSE, and Isao KOMORIYA

The flow characteristics of single phase natural circulation in parallel channel were investigated. Non-dimensional correlations were derived based on the assumption that the total pressure drop in each channel of parallel flow is completely the same as those of other channels, and diagrams for flow characteristics were proposed both for density governed conditions and for heat-flux governed conditions. The change of a very small flow rate can be explained in the diagram. And the validity of the diagram was confirmed through an experiment with three-channels apparatus. The existence of hysteresis in the flow characteristics for heat-flux governed condition was made clear. The hysteresis showed by Chato could be explained by using the diagram.

Key Words: Thermal Engineering, Natural Circulation, Parallel Channel, Flow Characteristics, Hysteresis

1. 緒 言

高速増殖炉の原子炉停止後における炉心崩壊熱除去に関連し、単相流自然循環特性を把握することは重要である。特にプール形高速炉では炉心上部に大容量のNaプールを有し、また、中間熱交換器とポンプが複数個設けられているため、プール内の温度成層化現象や各部における偏流現象(二次流れなど)の影響とともに下向き並列流路の特性把握が必要となる。しかし、並列流路に着目した自然循環特性の研究は従来それほど行われておらず、Chato⁽¹⁾、武田ら⁽²⁾の研究がみられるのみである。Chatoは、並列流路の自然循環特性を複雑な無次元式の形であらわし、入熱量の異なる三本並列流路での自然循環について実験および解析を行い、加熱条件、流路形状によって流動のヒステリシス現象が生ずることを示した。武田らも、高温ガス炉の炉心内の自然循環に関連し、四本並列流路間に発生する自然循環の実験および一次元流路での数値解析を行

い、Chatoが示したようなヒステリシス現象の発生を確認している。本研究は、このような並列流路の自然循環における各流路の流速特性をあらわす流速特性線図を提案し流動のヒステリシス発生などの並列流路の特徴を明らかにする。

記 号

$$A=2(\rho_1-\rho_2)/\rho_1$$

$$B=2(\rho_1-\rho_3)/\rho_1$$

C_p : 比熱 (水)

d : 流路内径

g : 重力の加速度

h : 流路高さ

m : 係数 [式(22)]

ΔP : 流路上下間の圧力差

Q : 加熱入力量

$$Q^*: \beta Q / (m Q \rho_m \sqrt{gh} S \xi)$$

Re : レイノルズ数

S : 流路断面積

$$S_{21}=S_2/S_1, S_{31}=S_3/S_1$$

u : 流速 (鉛直下向きを正)

$$u^*=u/\sqrt{gh}$$

* 昭和63年10月18日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年3月16日.

^{*1} 正員, 筑波大学構造工学系 (☎305 つくば市天王台1-1-1).

^{*2} 電力中央研究所横須賀研究所 (☎240-11 横須賀市長坂2-6-1).

^{*3} 筑波大学大学院.

β : 体熱膨張率

$$\varepsilon_{21} = \rho_2 / \rho_1$$

$$\varepsilon_{31} = \rho_3 / \rho_1$$

$$\varepsilon'_{21} = \rho_{in2} / \rho_{in1}$$

$$\varepsilon'_{31} = \rho_{in3} / \rho_{in1}$$

ζ : 形状損失係数

$$\kappa_{21} = \xi_2 / \xi_1$$

$$\kappa_{31} = \xi_3 / \xi_1$$

ξ : 摩擦圧力損失係数

ρ : 流路内冷却材の平均密度

ρ' : 流路内冷却材の局所密度

添 字

in: 流路への流入点

out: 流路からの流出点

1: 流路 1

2: 流路 2

3: 流路 3

2. 流速特性線図

2.1 基礎式 自然循環では圧力損失係数や温度分布などが精度よくわかれば流速特性を厳密に評価できるわけであるが、これらを理論的に求めることはいまだ行いえず実験定数などを用いるのが現状であり、したがって一般特性についての知見は十分とはいえない。そこで各流路の全圧力損失が一定という並列流路条件から並列流路における一般的流速特性を求めることを試みた。図 1 に三本管の例を示すような垂直な並列回路では上下ヘッド間の圧力差 ΔP は各流路すべて等しい。 ΔP は次で表される。

$$\Delta P = \rho_i g h - \xi_i \frac{1}{2} \rho_i u_i |u_i| \quad (1)$$

ここで ξ は圧力損失係数で次式で与えられる。

$$\xi = f \frac{h}{d} + \zeta \quad (2)$$

図 1 三本管並列流路の概念図

式(1)を次のように書き直してみる。

$$\frac{\Delta P}{\rho_i g h} = 1 - \xi_i \frac{1}{2} \frac{u_i |u_i|}{g h} \quad (3)$$

式(3)よりたとえば、 $h=1\text{ m}$, $u=0.1\text{ m/s}$, $\xi_1=2\sim 10$ では(左辺) $=1-(0.001\sim 0.005)$ となる。すなわち流速が小さい場合、右辺第2項の圧力損失項は非常に小さくなり圧力差はほとんどヘッド項の値となり、数 m/s の流れでようやく圧力損失項が支配的となる。したがって数 cm/s 程度のゆっくりとした流れの自然循環では、並列流路間の密度項の差がこの小さな圧力損失項と釣り合う形になる。このことは数値計算を行う場合精度上の問題を生じている。したがって流速特性を一般的に扱う場合、始めから流路間圧力差を扱うほうがわかりやすい結果を与える。

2.2 密度支配条件での流速特性 図1のような垂直な三本並列流路を考え各流路の平均密度に着目すると、流路上下間の全圧力差 ΔP は次のように与えられる。

$$\Delta P = \rho_1 g h - \xi_1 \frac{1}{2} \rho_1 u_1 |u_1| \quad (4)$$

$$= \rho_2 g h - \xi_2 \frac{1}{2} \rho_2 u_2 |u_2| \quad (5)$$

$$= \rho_3 g h - \xi_3 \frac{1}{2} \rho_3 u_3 |u_3| \quad (6)$$

ここで流速は下向き流れを正にとる。密度の局所値を ρ' とすると平均密度は

$$\rho_i = \frac{1}{h} \int_0^h \rho'_i dh \quad (7)$$

一方、連続の式より、

$$\rho_1 u_1 S_1 + \rho_2 u_2 S_2 + \rho_3 u_3 S_3 = 0 \quad (8)$$

式(4), (5)および式(4), (6)より

$$(\rho_1 - \rho_2) g h = \xi_1 \frac{1}{2} \rho_1 u_1 |u_1| - \xi_2 \frac{1}{2} \rho_2 u_2 |u_2| \quad (9)$$

$$(\rho_1 - \rho_3) g h = \xi_1 \frac{1}{2} \rho_1 u_1 |u_1| - \xi_3 \frac{1}{2} \rho_3 u_3 |u_3| \quad (10)$$

ここで無次元パラメータを次のようにとる。

$$u_1^* = \frac{u_1}{\sqrt{g h}}, \quad u_2^* = \frac{u_2}{\sqrt{g h}}, \quad u_3^* = \frac{u_3}{\sqrt{g h}} \quad (11)$$

これらを用いると式(9), (10)は次のようになる。

$$u_1^* |u_1^*| - \varepsilon_{21} \kappa_{21} u_2^* |u_2^*| = \frac{A}{\xi_1} \quad (12)$$

$$u_1^* |u_1^*| - \varepsilon_{31} \kappa_{31} u_3^* |u_3^*| = \frac{B}{\xi_1} \quad (13)$$

式(12), (13)より各流路の流速は流路間の密度差 A , B に依存していることがわかり、式(12)は u_1^* と u_2^* の関係を式(13)は u_1^* と u_3^* の関係を表す。図2はこの流速特性線図の概念図を示す。式(12)より求められた A が一定の場合の u_1^* と u_2^* の関係がわかる。また

式(8)を用いると式(13)は u_1^* と u_2^* の関係となり、同様に $B = \text{一定}$ の u_1^* と u_2^* の関係がわかる。

$A=0$ のとき

$$\tan \phi = \sqrt{\varepsilon_{21} \chi_{21}} \approx \sqrt{\chi_{21}} (\varepsilon_{21} \approx 1) \dots \dots \dots (14)$$

$B=0$ のとき

$$\tan \phi = \frac{S_{13} \sqrt{\chi_{13} \varepsilon_{13}}}{1 + S_{12} \sqrt{\chi_{13} \varepsilon_{13}}} = \frac{S_{13} \sqrt{\chi_{13}}}{1 + S_{12} \sqrt{\chi_{13}}} \quad (\varepsilon_{31} \approx 1) \dots \dots \dots (15)$$

となり、抵抗比により角度 ϕ , θ が決まることがわかる。一方 $A \neq 0$, $B \neq 0$ のとき、低流速域では線図はふくらみ、密度差の効果があらわれるのに対し高流速域では線図は $A=0$, $B=0$ の線に近づき、流速は抵抗比に依存していることがわかる。また、 u_3^* は図2に示すように原点を通る角度 θ の線と点 (u_1^*, u_2^*) との距離 L を用いて、

$$u_3^* = -L \frac{S_{13}}{\cos \theta}, \quad \tan \theta = S_{21} \dots \dots \dots (16)$$

として求めることができる。このようにして、各流路の形状と平均密度がわかれば、等 A 線と等 B 線の交点として、 u_1^* , u_2^* および u_3^* を求めることができる。平均密度から流速が定まることより、これを密度支配条件での流速特性線図と呼ぶことにする。なお以上の取扱いでは圧力損失係数 ξ を一定としたが、低流速域では摩擦損失係数 f が大きくなり、 ξ は一定とはならない。

図3に、流路を円管、流路面積は同じ、摩擦損失係数 f を流れが層流として

$$f = \frac{64}{Re} \dots \dots \dots (17)$$

とおいた流速特性線図を示す。これは後に示す実験体系のエルボの場合に対する2とした。 ξ が一定の線図とは流速が小さい範囲で定量的に若干の違いが出てくる

図2 密度支配条件での流速特性線図の概念図 ($\xi = \text{一定}$)

が、しかし本質的にはそれほど異なることにはならない。図3中の●印は過渡実験結果の例であり後に説明する。

2.3 熱流束支配条件での流速特性

Chato や武田らの実験のように各流路に一定の熱流束が与えられる場合、流速が零近傍になると流速特性が密度支配条件のものと異なる。すなわちこの場合、流路の出口温度が非常に高く（または低くなる）ためである。ここで熱流束支配条件のもとでの流速特性線図を考える。

各流路の全圧力差を次のように置く。

$$\Delta P_1 = \rho_1 g h - \xi_1 \frac{1}{2} \rho_{in1} u_1 |u_1| \dots \dots \dots (18)$$

$$\Delta P_2 = \rho_2 g h - \xi_2 \frac{1}{2} \rho_{in2} u_2 |u_2| \dots \dots \dots (19)$$

$$\Delta P_3 = \rho_3 g h - \xi_3 \frac{1}{2} \rho_{in3} u_3 |u_3| \dots \dots \dots (20)$$

流路に与える入熱量を Q とすると

$$Q = C_p (T_{out} - T_{in}) \rho_{in} |u| S \dots \dots \dots (21)$$

平均密度と出入口温度差の関係を係数 m と熱膨張率 β で次のように近似的に表す。密度と温度が線形関係で温度が直線状分布のとき $m=2$ となる。

$$\begin{aligned} \frac{\rho_1 - \rho_{in1}}{\rho_{in1}} &= -\beta \frac{T_{out} - T_{in1}}{m} \\ &= -\frac{\beta Q_1}{m C_p \rho_{in1} |u_1| S_1} = -\frac{\xi_1 Q_1^*}{|u_1^*|} \end{aligned} \dots \dots \dots (22)$$

ここで

$$Q_1^* = \frac{\beta Q_1}{m C_p \rho_{in1} \sqrt{g h} S_1 \xi_1} \dots \dots \dots (23)$$

他の流路についても同様の式が得られる。したがって、平均密度差を以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \rho_1 - \rho_2 &= (\rho_1 - \rho_{in1}) - (\rho_2 - \rho_{in2}) \\ &+ (\rho_{in1} - \rho_{in2}) \\ &= -\frac{\xi_1 \rho_{in1} Q_1^*}{|u_1^*|} + \frac{\xi_2 \rho_{in2} Q_2^*}{|u_2^*|} \end{aligned}$$

図3 密度支配条件での流速特性線図 (ξ の変化を考慮)

$$+(\rho_{in1}-\rho_{in2}) \dots\dots\dots (24)$$

式(18)～(24)などより、以下のような熱流束と流速との関係式が得られる。

$$u_1^*|u_1^*| + \frac{2Q_1^*}{|u_1^*|} - \varepsilon_{21}\varepsilon_{31}u_2^*|u_2^*| - \frac{2Q_2^*}{|u_2^*|} = \frac{2(1-\varepsilon_{21})}{\xi_1} \dots\dots\dots (25)$$

$$u_1^*|u_1^*| + \frac{2Q_1^*}{|u_1^*|} - \varepsilon_{31}\varepsilon_{21}u_3^*|u_3^*| - \frac{2Q_3^*}{|u_3^*|} = \frac{2(1-\varepsilon_{31})}{\xi_1} \dots\dots\dots (26)$$

熱流束が与えられたとき、式(25)、(26)を $u_1^*-u_2^*$ 平面に示しその2曲線の交点より流速を求めることができる。 $\varepsilon_{21}\varepsilon_{31}$ はエネルギー関係式から与えられる。これらを1とおいた例を図4(a)～(d)に示すが、等 (Q_1Q_2) 線、等 (Q_1Q_3) 線は、入熱量 Q_1, Q_2, Q_3 の正負によってそれぞれ線図の形が変わる。 Q_1^* と Q_2^*, Q_3^* が同符号（両方とも加熱または冷却）であるか、異符号であるかによって各流路の密度の関係より、各流路の流速 u_1^*, u_2^*, u_3^* が零近傍において線図が急激に

変化する。このような点を除けば密度支配条件（破線で示す）と同様な線図となり、(a)か(b)と(c)か(d)を組合せた二つの線の交点として各流路の流速が求まる。図5に密度支配条件と同様、摩擦損失係数 f を式(17)のようにおき、 $Q_1=-0.1$ kW, $Q_2=-1$ kW, として、 Q_3 を 0.05, 0.1, 0.2 kW と変えた場合の特性線図の例を示す。与えられた熱流束に対して、等 (Q_1Q_2) 線と等 (Q_1Q_3) 線の交点が三つあるときから一つしかないときへ変わることがわかる。すなわち、 Q_3 が 0.05 kW のときは Q_2 の強い下向き流れに引きずられる形で u_1^* も負（上向き流れ）となるが 0.1 kW → 0.2 kW へと上げていくと、正の交点のほうへ飛ぶことになる。同様に出力を下げると今度は Q_3 が 0.05 kW まで u_1^* は正となり、いわゆるヒステリシスが生ずる現象を説明できる。

3. 考 察

3・1 過渡流速特性 並列流路の1本を加熱管、2本を冷却管および上部にプレナムを有する実験装置

(a) Q_1^* と Q_2^* が異符号

(b) Q_1^* と Q_2^* が同符号

(c) Q_1^* と Q_3^* が異符号

(d) Q_1^* と Q_3^* が同符号

図4 熱流束支配条件での入熱量 Q_1, Q_2, Q_3 による線図の変化

を作成し、水による過渡特性実験を試みた。図6に実験装置の概念図を示す。高さ2mの三本並列管(内径29mm)の中央の1本(CH3)にヒータをおき、両側の2本(CH1, CH2)の上部1mに黄銅製の熱交換器を設けて冷却を行う。図6中の●印は熱電対の位置を示し、プレナム内は4~8本の熱電対を適当な場所へ配置し温度を測定した。流速は○印の点においてトレーサ法により測定した。また、プレナム出口は上下2箇所いずれかを選択できるようにした。

実験は、加熱と冷却が平衡して自然循環を行っている状態から急に加熱量を増大させるいわゆるホットショックや加熱量を減少させるコールドショック時における温度や流速などの過渡的变化を調べた。

図7に実験結果の例を示す。これは、一方の熱交換器(CH1)のみに冷却能力をもたせ、ヒータ出力を2kWから0kWへ落とすコールドショック時の各点の温度と流速の過渡挙動を示したものである。流速挙動をみると平衡時に冷却を行っていないCH2では冷却水は停止しており、CH3(加熱管)とCH1(冷却管)で循環を行っている。出力低下を行うと、その循環力は低下し、流速は減少していった。一方CH2では他の流路との平均密度の差により逆流方向への循環力が働き上向き流(負の流速)が生じた。100~120s後、密度差が減少して循環力そして流速は低下した。すなわち、流速のオーバーシュート現象がみられた。温度挙動をみるとオーバーシュート現象の生じたCH2の熱交換器の出入口部の温度挙動が特徴的である。すなわち、平衡時に流路内には、流路下部ほど温度が低いという温度分布なので逆流が生じると上部(入口部)にはその温度分布をもった冷却水が通過し温度の下がり方が下部(出口部)のそれに比べ鈍くなった。流路長による時間遅れ(100~120s)がこの温度挙動を示す。

以上の結果を密度支配条件の特性線図上で表したの

図5 熱流束支配条件での流速特性線図

が図3中の●印である。CH1, CH2の流速をそれぞれ u_1, u_2 とした。始め、 u_2 が逆流(上向き流れ)を生じ、その際CH1とCH2の平均密度差はほぼ一定で A = 一定の線に近い挙動を示す。次いで、CH1とCH3の平均密度差 B が一定の線に移り再び流速は零に近づく。このように過渡流速挙動を直観的にとらえられることがこの線図の特徴である。

3.2 ヒステリシス現象 Chato や武田らにより熱流束支配条件での並列流路自然循環では、加熱条件によって流動のヒステリシス現象が生ずることが示された。ここではヒステリシスに関して Chato の実験結果と特性線図との比較検討を行った。三本並列流路のCH2は非加熱、CH1, 3の加熱比 Q_1/Q_3 を増減させ、流速比 u_1/u_3 をみた。図8に流路をすべて同じとし、以上のような Chato の実験条件をもとにした流速特性線図を示す。図9に図8の線図より求めた流速を Chato 同様、加熱比-流速比平面にプロットした図を示す。Chato は加熱比 Q_3/Q_1 を増減させていき、臨界加熱比を超えると流速が負から正(または正から負)

図6 実験装置

図 7 実験結果

へジャンプすることを実験、解析により示したが図 9 は、この Chato の得た結果と一致している。図 8 で $Q_1/Q_3=0.04$ のとき等 (Q_1Q_2) 線と等 (Q_1Q_3) 線の交点が三つ (○印)、 $Q_1/Q_3=-0.25, 0.25$ のとき交点は一つ (■印, ▲印) となっておりヒステリシスの存在を示す。以上のように熱流束支配条件での並列流路自然循環におけるヒステリシス現象を特性線図を用い把握することができる。

4. 結 論

並列流路の自然循環の流速特性に関する研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) 並列流路の単相流自然循環の各流路の流速挙動を表す流速特性線図を提案した。
- (2) 熱流束が定まっている体系においては条件によりヒステリシスがあることを流速特性線図に

図 8 Chato の実験条件での流速特性線図

図 9 入熱量比 Q_1/Q_3 による影響

より説明した。

(3) 並列流路の過渡特性実験のデータを流速特性線図上で説明した。

(4) ヒステリシスを説明した Chato の線図が、流速特性線図上で表せることを示した。

文 献

- (1) Chato, J. C., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 85-4 (1963), 399.
- (2) 武田・ほか 2 名, 機論, 52-480, B (昭 61), 3035.