複数のフローパターンをもつ 隣接複開口部を介した浮力駆動置換流*

鶴 大 悟^{*1}, 岡 本 孝 司^{*1}
班 目 春 樹^{*1}, 文 沢 元 雄^{*2}

Buoyancy-driven Exchange Flow through Double Openings with Having Multi Flow Patterns

Daigo TSURU, Koji OKAMOTO,
Haruki MADARAME and Motoo FUMIZAWA

Buoyancy-driven helium-air exchange flow through double small openings was investigated. The double openings with rectangular cross section were settled side by side, in order to evaluate the interaction between the flow through the double opening. In the exchange flow experiment, the exchange flow rate and the flow pattern around the openings were simultaneously measured. Two flow patterns were formed even in the same boundary condition, i. e., (a) uncaptured flow pattern with larger exchange flow rate, and (b) captured flow pattern with smaller exchange flow rate. The entrainment effect caused the two flow patterns. In order to clarify the mechanism, characteristics of the entrainment was evaluated in the forced flow experiment. Only (b) flow pattern was observed in forced flow experiment. The relationship between the entrainment ratio α and flow rate q were measured for the flow patterns (b). A new correlation for the exchange flow rate was proposed with considering the entrainment. With applying the α - q relationship for flow pattern (b) to the correlation, the exchange flow rate was predicted. It agreed with the measured value better than the conventional prediction without consideration of the entrainment.

Key Words: Fluid Dynamics, Internal Flow, Flow Visualization, Buoyancy, Exchange Flow, Double Opening, Multi Flow Patterns, Entrainment, Exchange Flow Rate

1. 緒 言

密度の異なる流体が、小開口部を介して密度差によって交換する流れは密度差駆動置換流と呼ばれる。上部領域に重い流体、下部領域に軽い流体がある状態で上下の領域を小開口部で接続すると、小開口部を介して、密度差によって二流体は交換を始める。このような流れ場は、工業上さまざまな場所で観測される。例えばヘリウム冷却形の新形原子炉である高温ガス炉のスタンドパイプ破断事故時に発生する⁽¹⁾と考えられる。そのため、密度差駆動置換流における流量予測は、高温ガス炉の安全解析において重要である。

Epstein⁽²⁾ は、円筒形の単一小開口部を介した水-塩水置換流に関して実験的検討を行った。上昇する軽い流体と下降する重い流体とが小開口部内部において干渉するため、置換流量は開口部形状の影響を強く受ける。開口部の高さ H と内径 D のアスペクト比 H/D が 0.01 から 10 の範囲における実験を行い、その結果から単一小開口部における密度差駆動置換流を四つの

領域に区分した。おのおのの領域において、無次元化した置換流量が、 H/D によって決定されることを示した。さらに、Fumizawa ら⁽³⁾ は密度差の大きなヘリウム-空気置換流に関して実験的検討を行い、Epstein⁽²⁾ の実験結果とよく一致していることを確認している。

複数小開口部を介した密度差駆動置換流は、単一小開口部を介した密度差駆動置換流と比較して、上昇、下降する二流体が別々の流路を流れることができるため、開口部内における損失は小さくなる。二つの小開口部が互いに離れた位置にあるような体系における置換流は、管路網モデルを用いて置換流量を予想することができる。しかしながら、二つの小開口部が近接した体系における置換流は、開口部出口近傍における二流体の相互作用の影響が相対的に増大し、現象が複雑となる。単一小開口部を介した密度差駆動置換流に関しては多くの知見が得られているのに対して、このような近接した複数小開口部を介した密度差駆動置換流に関してはわずかに少数の研究例があるだけである。Epstein⁽²⁾ は、近接する 2 開口部における密度差置換流の実験を実施しているが、その実験範囲はアスペクト比 0.12 から 0.52 の限られた領域についてのみの検討を行っており、一般的な傾向を得るには至っていない

* 原稿受付 1997 年 4 月 21 日。

^{*1} 正員、東京大学工学部附属原子力工学研究施設(〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22)。

^{*2} 正員、日本原子力研究所(〒319 11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)。

い。姜ら⁽⁴⁾は、アスペクト比が0.05から10といった広い範囲について2開口部における密度差置換流に関する実験的検討を行った。開口部としては、円筒形単一小開口部の中心軸上に仕切りを設け、近接した2流路を形成した。作動流体としてヘリウム-空気をを用い、アスペクト比の大きな領域では仕切りのある場合は開口部内を二流体が別々に流れるため、仕切りのない場合と比較して置換流量が大きくなることを示した。管路網モデルによる流量予測を実施し、複雑な出口近傍における二流体の相互作用の影響が重要であることを指摘した。また、この相互作用を圧力損失により評価し、 $K_r=4.8$ という比較的大きな圧力損失係数を仮定した。

一方、著者ら⁽⁵⁾は、出口近傍の二流体相互作用を調べるため、姜と同様の実験を水-塩水体系で実施し、可視化により上昇流体が出口近傍で下降流に巻き込まれる巻込みと呼ばれる現象を観測した。これは、二流体の相互作用として、圧力損失だけではなく、質量移行を考慮する必要があることを示している。

本研究では、開口部近傍の二流体の相互作用を詳細に調査し、置換流量予測に反映することを目的として実験的検討を行った。開口部出口付近および、開口部内の流況の可視化による特性把握を行うため、矩形開口部を対象とし、ヘリウム-空気による置換実験を実施した。

2. おもな記号

Fr : フルード数 [式(2)]

Re : レイノルズ数 $= \nu D_{eq} / \nu$

q : 置換流量 m^3/s

Q : 流量 m^3/s

H : 開口部長さ m

D : 開口部面積等価直径 $= 2\sqrt{ab}/\pi$ m

D_{eq} : 開口部水力等価直径 $= 2ab/(a+b)$ m

ρ : 密度 $= \text{kg}/\text{m}^3$

ρ_m : 平均密度 $= (\rho_h + \rho_l)/2$ kg/m^3

$\Delta\rho$: 密度差 $= \rho_h - \rho_l$ kg/m^3

x : 体積分率

g : 重力の加速度 m/s^2

ν : 速度 m/s

ΔP : 圧力損失 kg/m^2

a : 開口部奥行き ($= 0.01$ m)

b : 開口部幅 ($= 0.005$ m)

ν : 動粘度 m^2/s

β : 吸込流中のヘリウムモル分率

α : 巻込み率

添字

h : 重流体、または開口部上部周辺

l : 軽流体、または開口部下部周辺

d : 下降流

u : 上昇流

3. 密度差駆動置換流実験

3.1 実験装置および方法 本実験で用いたヘリウム-空気置換実験装置の概略図を図1に示す。本研究で対象とする小開口部は実験容器の上部に設置されている。小開口部は高さ100 mm、断面は10 mm×10 mmの矩形で、中心線を厚さ0.5 mm薄板で仕切ることにより、10 mm×4.75 mmの断面をもつ2流路となっている。開口部外壁、および中央仕切りは透明アクリル板製であり、開口部内部の可視化が行えるようになっている。実験容器は、材質は開口部と同じく透明アクリル板製、容積は200×200×200 mmの立方体形状(0.008 m^3)であり、これは開口部の容積と比べて十分大きい。

初期状態において、実験容器内をゴム製ストッパにより密閉し、ヘリウムガスを満たす。開口部上部のストッパを開放すると、重力により、開口部を介して容器内からヘリウムが噴出するとともに、空気が容器内に流入して、置換流が生じる。この置換流の置換流量およびフローパターンを測定する。

開口部出口近傍のフローパターンをHolographic干渉計⁽⁶⁾、またはMach-Zehnder干渉計⁽⁶⁾を用いて可視化する。これらの干渉計を用いると、視線方向の密度分布の積分値が、干渉しまの移動というかたちで可視化される。可視化結果から、開口部周辺におけるヘリウム流の二次元的なフローパターンが観測される。

電子てんびんを用いて、実験容器全体の質量の時間変化を測定する。容器内の軽いヘリウムが重い空気に置換されるため、実験容器全体の質量 w が増加する。

Fig.1 Apparatus for the helium-air exchange flow experiment

この質量の時間微分をとることにより、置換流量 q を求める。

$$q = \frac{1}{\rho_h - \rho_l} \frac{dw}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_h , ρ_l は空気、および実験容器内気体の平均密度である。

置換流量を表す無次元数として、Fumizawa ら⁽³⁾, 姜ら⁽⁴⁾と同様に慣性力と重力の比である密度フルード数 Fr を導入する。

$$Fr = q \sqrt{\frac{\rho_m}{D^3 g \Delta \rho}} \dots\dots\dots (2)$$

なお、置換流量は開口部形状(H/D 等)の影響を受けることがわかっている。しかしながら、本研究では開口部近傍の二流体の相互作用を明らかにすることを目的とし、図1に示す近接した2流路をもつ開口部を対象とする。

3・2 実験結果 図1に示す実験装置により置換実験を実施した。容器重量の差分を体積で割って得られふ容器内気体の平均密度 ρ の時間変化を図2に示す。図2には同一条件で実施した5回の実験結果をそれぞれ示している。平均密度 ρ は初期状態において、ヘリウムの密度に等しいが、置換が進むにつれ増加し、やがて空気の密度に収束する。このことは、容器内の

Fig. 2 Variation of average density in the helium tank

Fig. 3 Froude number of the helium-air exchange flow

ヘリウムが徐々に空気に置き換わる様子を表している。密度変化の5回の測定結果は、図2に示すように速く置換するものと遅く置換するものの2種類の結果に分かれた。密度変化の測定結果より、式(2)によって密度フルード数を算出し、容器内のヘリウム体積分率 $x_l = (\rho_{Air} - \rho_l) / (\rho_{Air} - \rho_{He})$ に対してプロットしたものを図3に示す。 x_l は、初期状態には1で、交換が進むにつれ減少し零に近づく。 x_l が1に近い値のときは、 Fr は大きな値をとり、 x_l が減少するにつれ、 Fr も減少する、という傾向が得られた。この傾向は姜らの実験結果とも一致している。

しかし、図3に示すように、 x_l が同一にもかかわらず、置換流量(Fr)は高流量と低流量の二通りの値をとっている。つまり、同一の実験条件にもかかわらず、2種類の置換状態が存在することがわかる。なお、この二通りの流量は $x_l \approx 1$ (実験初期)から観測され、二つの状態は互いに遷移しない。初期状態から状態が変わらないことは、実験開始時のストップ除去方法などが関与していると考え、何とおりか実験を繰返したが、初期のストップ除去手法にかかわらず観測された流量は二通りのみであり、なおかつ、意図的にどちらかの流量を選択することはできなかった。それぞれの状態に対して、開口部近傍を干渉計により可視化した結果を図4(a), (b)に示す。いずれも置換開始後90s後における画像であり、容器内の流体はほぼヘリウムである($x_l \approx 1$)。画像中の干渉じまがひずんでいる部分にヘリウムが存在することを示している。開口部内は、仕切りによってヘリウムが流出する流路と空気が流入する流路に分けられる。開口部出口近傍においては、流出する上昇ヘリウム流と、流入する下降空気流の相互作用が生じる。同一の実験条件に対しても出口近傍において2種類の異なったフローパターンが観測された。すなわち、各図の横に模式的に示したように、流出ヘリウム流が流入空気に引き寄せられない

(a) Uncaptured flow pattern (b) Captured flow pattern

Fig. 4 Flow patterns of the helium-air exchange flow

場合 [図 4 (a)] と、流出ヘリウム流の一部が流入空気流に引き寄せられる場合 [図 4 (b)] と二つの場合が存在する。置換流量との同時計測結果と比較すると、ヘリウム流が空気流に引き寄せられない場合 [図 4 (a)] は、置換流量が大きい条件で、引き寄せられない場合 [図 4 (b)] は、置換流量が小さい条件であることが観測された。二つのフローパターンを定性的に考察すると、図 4 (b)と比較して上昇流と下降流が離れている図 4 (a)のほうが、上昇ヘリウム流と下降空気流との相互作用は小さいと考えられる。つまり、図 4 (a)のほうが相互作用による損失が小さくなり、結果として置換流量が大きくなると考えられる。

なお、開口部仕切りに垂直な方向、すなわち上記の可視化画像と 90°異なる方向から可視化を行ったところ、上記のいずれの置換流量状態においても、ヘリウムの上昇流のフローパターンが開口部中心に対して左右対称であることを確認した。つまり、二つのフローパターンは仕切り方向には同一であり、図 4 に示すような二次元的なフローパターンである。

この 2 種類の流れが生じるメカニズムには、上昇流と下降流との干渉が深くかかわっているものと思われる。著者ら⁽⁵⁾は、水-塩水を用いた 2 流路による置換実験を行い、可視化結果から流路内への巻込みを観測している。ここで巻込みとは、ノズルの上端において、ノズルから流出した上昇流の一部がノズルへ流入する下降流に捕そくされて再びノズル内へ流入する現象のことである。ノズルの下端でも、ノズルから流出する下降流とノズルへ流入する上昇流の間で、同様に巻込みが生じている。本研究におけるヘリウム-空気実験でも開口部出口における上昇流と下降流との干渉により、同様の巻込み現象が発生していると予測される。強く巻込みが起こった場合、ノズル内の下降空気流、上昇ヘリウム流にそれぞれヘリウム、空気が混入する。その結果、上昇流と下降流との密度が小さくなり、置換流の駆動力が減少し、結果的に流速が小さくなる。一方巻込み量は流速および二流体おのおのの密度に依存しているものと考えられる。流速の変化に応じて巻込み量は変化し、最終的に巻込み量と流速とが互いにバランスのとれたところへ落ち着く。2 種類の置換流量状態がある、ということはこのバランス点が二つ存在する、ということになる。

まとめると、同一の条件で置換実験を行い安定な二つのフローパターンを発見した。これらは、ヘリウム噴流の可視化に基づき、空気とヘリウムとの相互作用を考慮すると、流量の違いが定性的に説明できた。ただし、なぜ二つの安定パターンが形成されるのかは不

Fig. 5 Apparatus for the forced flow experiment

Fig. 6 Relation between flow-in rate and entrainment ratio

明である。このパターンの形成には、相互作用の結果として生じる巻込みが重要であると考えられる。しかし、置換実験では置換流量と巻込み量は相互に強く依存している。また、二つのフローパターンの原因が不明のため、自由にこれらのパターンを形成できない。そこで、二流体の相互作用による巻込み量に注目し、置換流量を独立に外部から制御する実験を行った。

4. 強制置換流実験

4・1 実験装置および方法 開口部近傍における二流体の相互作用を調べるため、強制流における実験を行った。図 5 に本実験で使用した実験装置を模式的に示す。2 本の矩形ノズルにより置換実験で用いた開口部出口部の 2 流路を模擬している。吹出しノズルからヘリウム流を噴出させ、隣接する吸込ノズルから空気を吸入することにより、上昇流と下降流とを干渉させる。このとき吸入された空気に巻込まれたヘリウム量を測定することにより、上昇流と下降流との干渉による巻込み量を定量的に評価する。吹出し、吸込み各ノズルには、従来の密度差駆動置換流実験と同じ断面形状 10 mm×5 mm のステンレス製ノズルを使用している。ステンレス厚さを 0.2 mm とすることによりノズル間距離は 0.4 mm と置換実験とほぼ同じに

なるように設定した。吹出し部では、ヘリウムタンクから供給されるヘリウムをフロート式流量計を介して吹出しノズルから噴出させる。吸込部では、真空ポンプを用いて気体を吸引する。吸引した気体は、フロート式流量計を用いて流量を測定するとともに、吸入した気体の一部を酸素濃度計に導いて、酸素濃度を測定することにより、吸入気体中のヘリウム濃度を算出する。さらに Mach-Zehnder 干渉計を用いて、ノズル周辺のフローパターンを可視化する。

4・2 実験結果 ヘリウム流量 $Q_{out}=0.63$ l/min に固定し、吸込流量を変化させた場合の吸込気体中のヘリウムモル分率 β の変化を図 6 に示す。吸込流量 Q_{in} を増大させるに従い、巻込まれるヘリウムの量が增加している。図 6 中に Q_{in} を増加させた場合と減少させた場合のデータを併記しているが、流量に対する

ヒステリシスはみられない。 $Q_{in}/Q_{out}>1$ の領域では、 Q_{in} の増加に伴って、巻込み率が減少している。これは、 β が Q_{in} 中のヘリウムの割合を表しているためであり、ヘリウム量に換算すると、単調に増加している。

図 6 中の点 A から点 D におけるノズル出口近傍の可視化画像を図 7 に示す。ノズル脇にはノズル固定用のブロックが附属しており実際のノズルはノズルの影の中心部分のみである。吸込流量 Q_{in} が小さいときには、ヘリウムはほぼ真上に噴出している (A)。 Q_{in} が増加するにつれ、噴流は吸い込まれる流れと干渉し、傾いていく (B)。さらに Q_{in} を増加させると、上部の干渉じまのずれが少なくなり、上部のヘリウムが減少することがわかる。また、B および D に流量増加と流量減少の場合の同一条件におけるフローパターンを示すが、両者はほぼ同一であり、流量に対するヒステリシスがないことがフローパターンからも確認できる。

置換実験では、ヘリウム噴出量と吸込流量は同一となる。本実験では、おのおのの流量を独立に制御できる。実験方法は、ヘリウムの吹出し流量をある一定値 Q_{out} に固定し、吸込流量 Q_{in} を零から順次増加させる。流量 Q_{in} を変化させた場合は、そのままの状態でも 2~3 min 待ち酸素濃度計の指示値が安定してからその値を記録した。同時に干渉計の画像を VTR に記録した。十分大きな Q_{in} まで計測を繰返した後、今度は流量を順次減少させ、計測を繰返した。これは、流量に対するヒステリシスを確認するためである。なお流量計は、校正実験によって密度、流量の影響を補正している。酸素濃度計の読みから、吸込流中のヘリウムのモル分率 β が算出できる。実験は、 $Q_{out}=0.3\sim 3.1$ l/min の範囲で実施した。

置換実験で観測されたフローパターン (図 4) と比較すると、本実験で観測されたフローパターンは、置換実験の図 4 (b) 空気流に捕そくされるフローパターンと同等なものと思われる。なお、図 4 (a) 空気流に捕

Fig. 7 Observed flow patterns

Fig. 8 Entrainment rate with $Q_{in}=Q_{out}$

そくされないフローパターンは、強制流実験では再現することができなかった。

本実験では流入出流量を強制的に制御するため、流入流量 Q_{in} と Q_{out} とを独立に変更できた。しかしながら、本研究で対象としている2開口部からの置換流においては $Q_{in}=Q_{out}$ が成立し、その値は密度差による駆動力と、圧力損失との釣合いから決定される。本実験で得られた巻込み率のデータのうち、 $Q_{in}=Q_{out}$ の条件におけるものを求め、これを Q に対してプロットしたものを図8に示す。 $Q_{in}=Q_{out}$ の条件の元では、吸込気体中のヘリウムモル分率 β は、流出ヘリウム流量に対する巻込まれたヘリウム流量の割合に等しい。この条件のときの β を巻込み率 α と呼ぶ。 Q が小さい条件では、二流体の相互作用が小さく、浮力の影響が大きいため巻込みはほとんどない。しかしながら、 Q の増加に伴い下降流速が増加し、巻込み率が増加する。この関係は、ヘリウム-空気の $a=0.01$ m, $b=0.005$ m の隣接2流路における巻込み量と流量の関係を表す特性曲線である。なお、この特性曲線は図4(b)のフローパターンのみに適用できる。図4(a)のフローパターンは本実験では得られなかったため、これに対応する関係は求められなかった。

なお、強制流実験とは置換流実験は初期条件が異なっている。置換流実験においては、ストッパをはがすことによりノズル開放を行い、流れを発生させていた。その際ノズル周辺の空気に乱れが生じるとともに、置換流量は短時間のうちに所定の値に落ち着く。一方、強制流実験においては吹出し量を固定し、吸込流量 Q_{in} を徐々に調整した。この初期条件の違いによって、図4(a)パターンが再現できていない可能性がある。

Fig. 9 Concept of entrainment ratio

5. 考 察

従来の姜ら⁽⁴⁾による置換流量予測では巻込みの影響が考慮されておらず、実験結果をよく説明できていなかった。また、巻込みを考慮した置換流量予測モデルも存在しない。本研究では、巻込みを考慮しつつヘリウム-空気実験における置換流量を予測する新しい予測式を提案する。仕切りによって分けられた開口部を、それぞれをヘリウムおよび空気が分離して流れたとすると、修正ベルヌーイ式は以下ようになる。

$$(\rho_d - \rho_u)gH = \sum \Delta P \dots \dots \dots (3)$$

左辺は密度差による駆動力を表し、右辺は下降流、上昇流の圧力損失の総和である。一般に圧力損失は管内流速 v の関数であり、式(3)を解くことにより置換流量を算出できる。

本研究では、巻込みの効果を導入するため、開口部上下の巻込み率 α_h , α_l を以下のように定義する。

$$\rho_u = \alpha_l \rho_d + (1 - \alpha_l) \rho_l \dots \dots \dots (4)$$

$$\rho_d = \alpha_h \rho_u + (1 - \alpha_h) \rho_h \dots \dots \dots (5)$$

図9に巻込み率 α の概念を示す。下降流の密度 ρ_d は、上昇流の密度 ρ_u と、空気の密度 ρ_h とを巻込み率 α_h で混合したものであると考える。 $\alpha_h=0$ は巻込みがないことを示し、 $\alpha_h=1$ はノズルから流出したすべての流体が巻込まれることを示す。

簡単のため、ここでは開口部上部周辺と下部周辺の巻込み率が同じであると仮定すると、 $\alpha (= \alpha_h = \alpha_l)$ を用いて開口部内の密度は以下のように表すことができる。

$$\rho_u = \frac{\rho_l + \alpha \rho_h}{1 + \alpha} \dots \dots \dots (6)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_h + \alpha \rho_l}{1 + \alpha} \dots \dots \dots (7)$$

すなわち、開口部内の密度は α の関数として表せ、式

Fig. 10 Froude number predicted by the presented model

(3)の左辺は α の関数となる。

次に、式(3)右辺の圧損項として管内摩擦損失と形状損失を考慮し、本実験の範囲内では開口部内の流れは層流であることから、次式が与えられる⁽⁷⁾。

$$\Delta P = \left(\lambda_u \frac{H}{D_{eq}} + K \right) \frac{\rho_u v^2}{2} \left(\lambda_d \frac{H}{D_{eq}} + K \right) \frac{\rho_d v^2}{2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\lambda = \frac{62.2}{Re} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$K = 1.5 \quad \dots\dots\dots (10)$$

v は開口部内の平均流速を、 D_{eq} は流路の水力等価直径を示す。なお、形状損失($K=1.5$)は、急拡大(1.0)、急縮小(0.5)を考慮している。

以上のモデルに従えば、 α を仮定することによって、上式を解いて開口部内の流速 v が算出できる。

なお、置換流量 q と開口部内流速 v との関係は、流路断面積(ab)を用いて次式で表される。

$$q = (1 - \alpha)abv \quad \dots\dots\dots (11)$$

以式より、置換流量 q は、 α の関数として与えられる。

以上の式を本置換流実験で用いたノズル [図1 ($a=0.01, b=0.005, H=0.1$)] に適用すると、 α をパラメータとした本ノズルに対する Fr 数特性曲線は図10のように与えられる。フルード数は、 $\alpha=0$ のときに最大値をとる。 α が増加するに従い、フルード数は減少し、 $\alpha=1$ のときに、最小値零となる。

一方、 $a=0.01, b=0.005$ の近接ノズルにおける100%ヘリウム-空気に対する流量-巻込み特性曲線は強制流実験により図8のように得られている。この特性曲線を変形し、図10の特性曲線に当てはめると、その交点が本モデルによる予測値となる。巻込み率 $\alpha=0.18$ 、フルード数 $Fr=0.20$ と予想できる。

この結果を、図1の体系での密度差駆動置換流において実際に計測したフルード数と比較する。先に述べたように、本実験で再現したフローパターンは密度差駆動置換流実験の(b)のパターンに相当する。(b)パターンのフルード数は、図3において $x_l=1$ としたときの値であり、 $Fr=0.12$ であった。それに対して、本モデルで得られたフルード数の予測値は、 $Fr=0.20$ であり、精度よく予想できているとはいえない。しかしながら、フルード数予測において巻込みの効果を考慮しなかった場合には、図10において、 $\alpha=0$ とした値である $Fr=0.34$ となり、実測値と大きく異なる値となる。このことから、フルード数の予測のためには、巻込みの効果を考慮することが必要であるという知見が得られた。

本モデルで得られたフルード数の予測値の予測精度が低い原因を考察する。本モデルを構築する際には、モデルの単純化のため、さまざまな仮定を用いている。より精度のよい予測のためには、現象をより詳細に分析し、これらの仮定を見直す必要があると思われる。本モデルにおいては、圧力損失として摩擦損失と形状損失のみを考慮している。上昇流と下降流との干渉に関して本モデルでは、物質移動という形で現れる巻込みについては考慮しているが、圧力損失については適切なモデルが存在しないため考慮していない。この圧力損失を考慮した場合、全体的な圧力損失が増加することにより、ノズル特性曲線が低フルード数側にシフトする。また、本モデルにおいては、ノズル上部における巻込み率と、ノズル下部における巻込み率とが等しい、と仮定している。巻込み率は、流量の関数であるだけでなく、気体密度の関数でもあると考えられるので、ノズル上下端での巻込み率は違う値であると思われる。また、強制流実験において得られた特性曲線は、純粋ヘリウム-空気によるものであるのに対して、置換流実験においては、ノズル下部での巻込みのため、上昇ヘリウム流には空気が混入している。先に述べたように、巻込み率は気体密度の関数でもあるので、特性曲線が異なっていると考えられる。より詳細な検討のためには、巻込み率に対する気体密度の影響を調べる必要がある。

6. 結 論

空気-ヘリウム置換流実験を行い、同一の体系で2種類の安定なフローパターン、(a)流出ヘリウム流が流入空気流に引き寄せられないパターン、(b)流出ヘリウム流が流入空気流に引き寄せられるパターンを発見した。この2種類の流れが生じるメカニズムには、上昇流と下降流との相互作用の結果として観測される巻込みが重要であると考えられる。そこで、置換流実験と同一の断面をもつノズルを用いて、強制的に流量を与えたときの巻込み率を測定した。このときに観測されたフローパターンは、置換流実験で観測された(b)と同じものであり、(a)と同じフローパターンは観測されなかった。管路網の式を変形し、巻込みの効果を考慮して置換流量を予測する式を導出した。この式に、強制流実験で得られた巻込み率のデータを代入することによって、置換流量の予測値を算出した。流量予測の精度はいまだ十分ではないが、巻込みを考慮しない場合と比較すると大きく改善されており、置換流量の予測のためには、巻込みの効果を考慮する必要があることを示した。

文 献

- (1) 日本原子力研究所, 高温ガス炉, (1992), 27-30.
- (2) Epstein, M., Buoyancy-Drive Exchange Flow Through Small Openings in Horizontal Partitions, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **110**(1988), 885-893.
- (3) Fumizawa, M., Ogawa, M., Hishida, M. and Okamoto, K., *Proc. FLUCOME'91*, (1991), 333-338.
- (4) 姜泰一・岡本孝司・班目春樹・文沢元雄, 仕切りのある開口部におけるヘリウム-空気置換流, *機論*, **59**-566, B (1993), 3106-3112.
- (5) 鶴大悟・佐藤泰・班目春樹・岡本孝司・文沢元雄・菱田誠, 仕切りのある開口部における水-塩水置換流, 日本原子力学会 1995 年秋の大会予稿集, (1995), E38, 344.
- (6) 池田耕・岡本孝司・加藤文武・清水勲・文沢元雄, 光導電プラスチックによる過渡 3 次元密度分布の計測, 第 24 回可視化情報シンポジウム講論集, **16**-1(1996), 101, 15-18.
- (7) 機械工学便覧, A5(1986), 73-88, 丸善.