142 ヘリウム・空気置換流の流量測定と傾斜管内の 流れの可視化

原研 文沢元雄[○]、 原研 菱田 誠

Flow Rate Measurement and Visualization in Inclined Pipe of Helium-Air Exchange Flow

Motoo FUMIZAWA and Makoto HISHIDA*

This paper deals with experimental investigation on buoyancy-driven exchange flow through an inclined tube. The effect of the density at the tube top end and density difference between light and heavy gases on exchange flow rate were investigated and discussed. Smoke wire method was applied to visualize the flow in the tube, and compared with the mass change method.

1. はじめに

異種流体の置換流は工業機械で多く見られる現象である。例えば、ガス冷却原子炉の配管が破断した場合には、配管の位置によっては、炉内の冷却材（二酸化炭素あるいはヘリウム）と炉外の空気の置換流が破断したパイプ内に生じる¹⁾。円管を通しての置換流の研究は、これまで幾つか行われているが、そのほとんどは異種液体（例えば、水と塩水）に関する研究であり^{2) 3) 4)}、異種気体の置換流に関する研究は少なく、パイプ内の置換流の可視化観察は試みられているものの⁵⁾、パイプ内の流速分布の観察はほとんど行われていない。本研究では、傾斜した円管内を対向して流れる異種気体の置換流に関し、質量変化法による置換流の流速測定とパイプ内の流速分布の可視化観察について述べる。

2. 実験装置及び実験方法

質量変化測定実験装置をFig.1に示す。実験装置は、試験体を高精度の電子天秤の上に乗せたものである。試験体は、アクリル製の円筒容器と試験流路から構成されており、円筒容器の上蓋の中央に試験流路が取り付けられている。円筒容器の直径(d)と高さ(l)はともに350mmである。試験流路の内径(D)は20mm、長さ(L)は200mm、傾き角 θ は60度である。実験は次の手順で行った。まず、試験体内の空気をヘリウムで置換し、電子天秤による重量測定によって試験体内の空気が完全にヘリウムで置換されたことを確認した後、試験流路の先端に取り付けた盲フランジを除去する。盲フランジを除去すると、試験体内のヘリウムと空気の置換流が発生し、試験体全体の質量が増加する。電子天秤で試験体に働く浮力の変化($=[(\rho_H - \rho_L) - (\rho_{H0} - \rho_{L0})]Vg$)を測定することにより置換流の質量流量差(重い気体の質量流量-軽い気体の質量流量= $\Delta M / \Delta t (= \Delta \rho_L V / \Delta t)$)を求めた。 Δt は17~1680秒程度であるので、その間の ρ_H (空気の密度)は一定であると見なして差し支えない。実験は室温、大気圧の下で行った。

* Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Ibaraki

Fig.1 Experimental apparatus and exchange flow pattern in an inclined tube

Fig.2 Schematic arrangement for visualization by smoke wire method

スモークワイヤー法を用いた試験流路内可視化実験装置をFig.2に示す。可視化実験方法は以下のとおりである。試験流路の中央部に流れに直交して油（CRC-556）を塗布した0.2mmφの金属細線を張り、その両端にスモークパルスジェネレーター（菅原研究所製MS-405）を接続し瞬間的に高電圧をかけて煙を発生させた。次に暗室内でシート状のハロゲン光を2箇所から撮影部にあてて、スモークワイヤーと流れに垂直方向からCCDカメラで撮影した。

3. 解析検討

流れは上昇流と下降流の分離流であり、下降流の平均流速(U)と流路面積(A_H)は、いずれも上昇流のそれらに等しいと仮定すると次式が得られる。

$$U = (\Delta M / \Delta t) / (A_H(\rho_H - \rho'_L)) \quad (1)$$

また置換流の体積流量 Q は $Q = UA_H$ で得られる。ここで、 ρ'_L は試験流路先端（大気への開放端）における上昇流の気体密度である。 ρ'_L 、 ρ_H 、 ρ_L は以下解析検討で求める。

1次元解析では、上昇流及び下降流とも管軸に直角な断面内では一様な流速分布である（ピストン流）と仮定し、更に、上昇流と下降流の間では分子拡散によってのみ異種気体の移動があると仮定して、拡散方程式を解いて上昇流と下降流中の濃度分布を求めると、それらは以下の式で表される。なお、計算を簡単化するため、試験流路の断面形状は一辺が D の矩形流路であるとした。

$$0 < y/D < 0.5: x_H = 2/\pi \cdot \sum \exp \{ -[(2n-1)\pi]^2 D_{AB} z / D^2 U \} \sin \{ (2n-1)\pi y / D \} / (2n-1) + 0.5 \quad (2)$$

$$-0.5 < y/D < 0: x_H = 2/\pi \cdot \sum \exp \{ -[(2n-1)\pi]^2 D_{AB} (L-z) / D^2 U \} \sin \{ (2n-1)\pi y / D \} / (2n-1) + 0.5 \quad (3)$$

3次元解析では、試験流路を実験と同様に円筒形状とし、流路方向流速の半径方向分布を放物状と仮定し、拡散は半径方向のみであると仮定して行った。

4. 結果

実験開始後時間の経過とともに円筒容器内の気体は空気とヘリウムの混合気体となるが、円筒容器内では空気とヘリウムは十分混合されていると見なしてよいかどうかを検討するため、円筒容器内の初期気体として以下の5種類の気体を用いた場合について置換流量を測定し、比較を行った。5種類の円筒容器内初期気体は(1) $x_{he}=1$ 、 $\rho_{L0}=0.17\text{kg/m}^3$ 、(2) $x_{he}=0.90$ 、 $\rho_{L0}=0.29\text{kg/m}^3$ 、(3) $x_{he}=0.80$ 、 $\rho_{L0}=0.40\text{kg/m}^3$ 、(4) $x_{he}=0.49$ 、 $\rho_{L0}=0.74\text{kg/m}^3$ 、(5) $x_{he}=0.2$ 、 $\rho_{L0}=1.03\text{kg/m}^3$ である。5種類の初期気体について測定した質量流量差と $(\rho_H - \rho_L)$ との関係を図3に比較する。質量流量差と $(\rho_H - \rho_L)$ との関係はいずれの初期気体についても同じである。その結果、円筒容器内のヘリウムと空気は十分混合されていると見なして差し支えなく、試験流路の両端に接続されている空間内の異種気体の密度差として、電子天秤で測定される値 $(\rho_H - \rho_L)$ を用いて良いと考えられる。

スモークワイヤー法による傾斜試験流路内の可視化写真を図4に示す。この図は経過時間が約90sec後の試験流路内流動状況を示しており、上下の分離流と放物型流速分布が観測され、各流路面積はほぼ等しいことが分かった。流速は2枚の可視化写真の時間差より求めた。その結果得られた最大流速 U_{max} を図5に示す。最大流速は上昇流の場合が下降流の場合より高い値となるが、これは流体と煙の温度差による浮力の影響と考えられる。

傾斜試験流路における空気の実率の測定結果を図6に示す。測定位置は空気側出口より20mm内側の最上点で、測定計器は酸素濃度計を使用した。上昇流の空気の実率は開口直後から急激に上昇し、時間の経過とともに空気の実率 $(x_{air}=1)$ に近づいて行く。

Fig.3 Relation $\Delta M / \Delta t$ between and $(\rho_H - \rho_L)$ for various initial gases in the cylindrical container

Fig.4 Visualization by smoke wire method of helium-air exchange flow through an inclined long tube of $L/D=10$ and $\theta=60^\circ$, where t is elapsed time after tube opening

したがって、下降流の平均流速を求めるためには(1)式の ρ_L を正確に算定しなければならない。1次元解析で得られた下降流のモル分率分布から求めた空気のマール分率を同図に示すが、開口時から5000secまでは実験値より若干高いが実験値とは比較的良好一致する。同図に放物型流速分布を仮定した3次元解析結果も併せて示すが、空気のマール分率は1次元解析結果と比較的良好一致する。1次元と3次元の解析結果は類似しているの、簡便な1次元解析で得られた ρ_L を用いて算出した下降流の平均流速 U をFig.5に示す。可視化観察による最大流速は質量変化法と1次元解析を組合せた方法で得られた分離流の平均流速の約2倍であることが分かった。円管内の層流の場合放物型分布の最大流速は平均流速の2倍であることを考慮すると、質量変化法と1次元解析を組合せた方法で得られた分離流の平均流速はほぼ妥当な手法であるといえる。

5. まとめ

傾斜した試験流路内の流れは上側を軽い気体、下側を重い気体が流れる分離流を形成することが分かった。また可視化観察による最大流速は、質量変化法と1次元解析を組合せた方法で得られた分離流の平均流速の約2倍であることが分かった。

なお、本実験の遂行に当たりお世話になった、原子力エンジニアリング(株)の浜野隆氏に感謝いたします。

主な記号 g :重力加速度, U :下降流及び上昇流の各流路断面内の平均流速, V :試験体体積, x :気体のマール分率, ΔM : Δt における試験体気体の質量増加量, Δt :時間間隔, ρ_H :試験体外気体(空気)の密度, ρ_L :円筒容器内気体の混合平均密度,

添字 H:重い気体,L:軽い気体,o:初期値,he:ヘリウム,max:最大値

参考文献: 1)文沢元雄、他:原子力誌, 31, No.10, 1127 (1989). 2)Epstein,M., Trans.ASME J.Heat Transfer, 110, 885 (1988). 3)Leach,S.J., Thompson,H., J.Br.Nucl.Energy Soc., 14, 243 (1975). 4)Mercer,A., Thompson,H., J.Br.Nucl.Energy Soc., 14, 327(1975). 5)川橋正昭、他:可視化情報、14, No.54, 37 (1994).

Fig.5 Comparison between maximum velocities of upward and downward flow measured by smoke wire method (SWM) and average velocity in each flow area evaluated mass change method with 1D analysis

Fig.6 Comparison of X_{air} between analysis and experiment at 20mm below the open end