13 狭い垂直環状空間での自然対流の可視化 (主に定常になるまでの流動状態)

東京電機大学 理工学部

亀岡 利行

Visualization of Natural Convection in Vertical Narrow Annular Gaps (Flow Patterns during Unsteady State)

Toshiyuki KAMEOKA

The natural convection of water in vertical narrow annular gaps is visualized by using polystyrene particles and temperature distributions of a inner wall are measured. The present study shows mainly flow patterns during unsteady state. Several local circulating flows occur near the high temperature surface after a few minutes of heat beginning and that flows combine and large circulating flow occurs. The two pair of circulating flows are formed along the circumferential and vertical direction with the passage of time and change one pair after the long time.

1. まえがき

垂直の2重円筒内の狭い環状空間に流体が存在し、下面加熱、上面冷却の状態では上下面に温度差が存在すると自然対流が発生し、円筒周方向に温度変化が生じ、それにより円筒に熱応力、変形の起こる危険性が考えられる。これに関連した研究として、高速増殖炉のナトリウムポンプあるいは中間熱交換器に対する研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾がある。これらの研究は自然対流の発生に関連する因子の影響に言及し、実験・解析によりそれらの影響を調べ、自然対流の発生限界、温度分布などを明らかにしている。また、ナトリウム弁フリーズシール部を模擬した可視化実験^{(4)・(5)}がある。これらは自然対流を可視化し、その時の温度分布、局所流速などを明らかにしている。

前報⁽⁵⁾においては狭い垂直環状空間での自然対流の可視化を水中でポリスチレン粒子を用い、上下面の温度設定をした後、定常状態になったところでの流動パターン、局所流速、内筒表面の温度分布、自然対流の発生限界などを明らかにしたが、本報は前報と同じ実験装置による同様の実験の定常になるまでの流れの様子を観察について主に述べる。

Faculty of Science and Engineering, Tokyo Denki University,
Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama, 350-03 Japan

2. 実験装置および実験方法

実験装置概要を図1に示す。これは前報と同じであり、実験方法も同様である。半日程度食塩水に浸し、比重合わせをしたポリスチレン粒子(結果的に比重 1.108)をトレーサとして使用する。表1に示すように高さ 300mm 隙間 2mm または 3mm の環状空間にトレーサ粒子を含んだ食塩水を満たし、下面加熱、上面冷却で実験を行う。

実験は上下面の温度を設定し、加熱冷却を開始後、対流が発生する頃から連続的に対流がある程度落ち着くまで写真撮影する。これとともに内筒壁面の温度測定を行う。流れの様子は印画紙に焼付け、トレーサ粒子の流跡をディジタイザーで計算機に入力し、それぞれの粒子の位置と流速を計算し、図に表示する。環状空間による曲がりの位置補正を計算機により行う。

3. 実験結果とその考察

実験条件は環状空間の隙間が 3mm、下面温度 61.7℃、上面温度 19.1℃である。

図2-(1)は実験開始(加熱冷却開始)後 10分経過したときの対流の様子を示したものである。加熱面(下面)付近で多数の小さな対流の発生が見られる。また、環状空間全体としては流体の動きはほとんどなく、一部に局所的に動いている粒子が見られる。12分後の(2)になると、小さな対流の合体、それによる複雑な流動、空間全体の流体の動きが見られる。13分後の(3)では上下面にわたる対流の発生、局所的な強い動き、上下方向に分割された対流、周方向に二対の対流など複雑な流動状態が見られる。14分後の(4)では上下方向 2段、周方向 4分割の様子となる。(5)では複雑に凹凸のある長軸の曲がった上下面にわたる流動、上下に 2段となった流動とその間の局所的な流動がある。(6)では正面に対称的なシャモジ状の一对の流動、下面にも小さな流動がある。(7)では長軸がほぼ垂直となり、(8)では右側の流動が上下に分裂している。(9)では正面に一对の流動が見られる(周方向の温度分布から推測すると裏側にも一对の流動が存在することになる)。

最後に定常状態の流動を(10)に示す。正面に一つの大きな流動が存在する。実際の観察により裏側にも同様の動きがあり、環状空間全体に大きな一对の流動が存在する。

図3は内筒周方向の温度分布の時間経過を示したものである。図3-(1)は実験開始後 10分経過したときの温度を示しており、下面(加熱面)近くと上面(冷却面)から少し離れたところで周方向に温度変動が見られる。これは写真(1)のときの温度分布に対応しており、下面付近での多数の小さい対流の発生と関連あるものである。(2)は 20分経過した時の温度分布を示しており、写真(7)に対応している。上下面ともに温度分布にピークが 2箇

Fig.1 Experimental Apparatus

Gap Height	L (mm)	300	300
Gap Distance	d (mm)	2	3
Mean Diameter	D (mm)	127.3	125.3

Table 1 Geometry of Experimental Apparatus

所見られる。写真に示されているように一対の対流が撮影されており、温度分布とともに考えると裏側にも一対の対流の存在が推測される。

(3)は対流状態が定常となった時の温度分布を示している。加熱面の温度が少し他の測定位置における分布と相違しているが、“N”付近で高温，“S”付近で低温という状態となっている。実際の観察から高温部分“N”付近で上昇流である。これに対する写真が(10)であり、正面に大きな対流が見られる。この裏側に逆に運動する対流が存在する。

図4は自然対流の平均流速の時間経過を示したものである。10分から20分くらいまでは流速は直線的に増加しており、時間経過とともにある値に漸近する様子が見受けられる。この実験条件で最終的な定常状態で平均流速は4.7mm/sとなっている。これに対し、周方向の温度変動率 ε は早い時点で大きな値を示しているが、全体の傾向としては、小さくなる様子がわかる。時間の早い時にその値が大きくなるのは、上下面の温度差が小さいのに周方向の温度変動が大きいためである。最終的に周方向の温度変動率は約4.5%となる。

図5は自然対流の平均速度とRa数との関係を示したものである。Ra数の増加とともに流速が増加していく様子がわかる。なお、Raと ε の定義式は次式である。

Fig.2 Flow patterns

$$Ra = g \beta \Delta T L^3 / (\kappa \nu) \quad (1) \quad \varepsilon = \left(\sum_{i=1}^7 (T_{i,max} - T_{i,min}) / \Delta T \right) / 7 \quad (2)$$

ここで、 g ：重力加速度、 β ：体膨張係数、 $\Delta T = T_b - T_t$ 、 L ：環状空間高さ、 κ ：温度伝導率、 ν ：動粘性係数、 $T_{i,max}$ ：内筒壁面 i 番目の周方向最高温度、 $T_{i,min}$ ： i 番目の周方向最低温度、 T_b ：環状空間下面温度、 T_t ：環状空間上面温度 である。

4. まとめ

環状空間の隙間 3mm の実験で、定常状態になるまでの自然対流の様子 の時間経過について主にその流動状態の観察結果について述べたが、周方向 4 分割、上下 2 段など非常に複雑な流動の様子が観察された。温度変動の絶対値では定常状態に比べて小さいものの変動率では定常時よりも大きい場合が存在した。

5. 文献

(1) 鳥居・中山，機論，47-417，B(昭56)，812。(2) 鳥居・中山，機論，47-421，B(昭56)，1792。(3) 鳥居・中山，機論，49-447，B(昭58)，2418。(4) 亀岡，流れの可視化，Vol.7，No.26 (1987)，345。(5) 亀岡，流れの可視化，Vol.8 Suppl.(1988)，29。

Fig.3 Temperature distributions along circumferential direction

Fig.4 Relation among velocity, ε and the time elapsed during unsteady state

Fig.5 Relation between velocity and Ra during unsteady state