50 垂直環状空間での自然対流の可視化

東京電機大学理工学部 亀岡利行

Visualization of Natural Convection in Vertical Narrow Annular Gaps

by Toshiyuki KAMEOKA

The natural convection of water in the vertical narrow annular gaps is visualized by using black ink and temperature distributions of a inner pipe wall are measured. The following results are obtained:

- (1) A uniform temperature distribution along the circumferential direction remains unchanged until the Rayleigh number which defines the convection generation reaches the critical value.
- (2) When the critical Rayleigh number exceeds, a pair of large circulating flows becomes visible.
- (3) The gap distance d influences the value of the critical Rayleigh number, but the flow behavior does not change.

1. まえがき

高速増殖炉に使用される Na 弁の一部に配管系を流動している融解 Na を冷却、凝固させて Na 自身で軸封を行う方式(フリーズシール方式)の弁が使用されている。その部分の構造は基本的には二重円筒で囲まれた狭い環状空間となっている。配管系を流れる融解した高温 Na が狭い隙間を上昇し、Na の融点以下に冷却された所で凝固し、軸封されることになる。この部分での融解 Na の運動は下部加熱、上部冷却の自然対流によるものと考えられる。

この自然対流が、狭い環状空間の形状および上下方向の温度差によりどのようになり、フリーズシールの機能がどのように影響されるかを調べるのが本研究の目的である。

従来、密閉容器内流体の下部を加熱した場合に生ずる自然対流発生の問題はこれまで多くの研究者によって詳しく研究がされてきた⁽¹⁾。また、太陽エネルギー集熱器に関するの

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

研究がある⁽²⁾。更に、本研究に直接関連する研究として、高速増殖炉のNaポンプあるいは中間熱交換器での狭い環状空間に関する研究^{(3)~(6)}があり、解析および実験により対流発生限界を調べている。以下に報告するものは鳥居らが行った研究^{(3)・(5)}と同様のもので、可視化により流れの様子を調べたものである。

2. 実験装置および方法

本研究の目的が自然対流を可視化することにあるので、図1に示すような実験装置を用いて実験を行った。表1に環状空間の寸法を示す。

テスト部は外筒が透明アクリルパイプ、内筒がアルミニウムパイプで構成されており、内筒の外径を2種類とし、環状空間の隙間を2種類とした。ただし、テ

スト部高さは一定である。内筒表面には壁面温度測定のためにアルミニウムパイプ半径方向に孔をあけ、熱電対高温接点が入筒外表面に一致するように固定した。高さ方向に等分7箇所、円周方向に等分4箇所 合計28箇所の温度測定を行った。

テスト部上下方向に温度分布を付けるために、テスト部下面を電気ヒータで加熱し、上面は冷却水で冷却した。それぞれの面の温度を所定の温度に一定にするために、電圧調整器およびサーモスタットを使用した。なお、テスト部上下面は銅板(厚さ20 mm)にて製作されており、それぞれの面における温度むらは少ないものと考えられる。環状空間に入る流体としては水道水を沸騰後用いた。

実験は上下面の温度が設定値になるように電圧調整器、サーモスタットを調節し、代表的な場所の温度を打点記録計に連続記録させる。温度が30分以上定常状態であることを確認後、マイクロコンピュータにデータを取り込み計算させ、ディスクに記憶させる。また必要に応じてグラフをプリントアウトさせる。その後、流れを可視化するために、上面の2箇所から、その温度を上下面の平均温度に調整した黒インクをトレーサとして注入する。黒インクの動きがある程度一定になったところでカメラで撮影記録する。

Fig.1 Experimental Apparatus

Table 1 Geometry of Experimental Apparatus

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

3. 実験結果と考察

実験結果を以下に示す。写真1～3、図2～4 は隙間 $d=2\text{ mm}$ の場合に対する結果である。

写真1 は、自然対流が生じトレースが環状空間全域にわたり存在し、水の運動が明確に示された一例である。一對の循環流が存在しており、渦中心までほぼ同心状態で運動していることがわかる。写真(a)と(b)との関係は、(a)を右側90度から見たものが(b)となる

Fig.2 Temperature distribution along circumferential direction

(a) $Ra=3.80 \times 10^{10}$ (b)

Photo.1

Fig.3 Temperature distribution along circumferential direction

(a) $Ra=8.31 \times 10^9$ (b)

Photo.2

っている。

この時の内筒壁面の円周方向温度分布を示したものが図2である。これによると、高さ方向どの位置でも角度 0 の所で温度が低く、角度 π の所(角度 0 に対しちょうど裏側)で温度が高くなっている。流れはこの高温部分(角度 π)で上昇し、低温部分(角度 0)で降下する自然対流となっている。

写真2は、局部的な小さい動きはあるかも知れないが、上部から注入した黒インク(水より2.5%程度比重大)がテスト部下部に停滞している状態がわかる。この時の内筒周方向の温度分布を示したものが図3である。最下部で周方向に少し温度変化があるが、他の場所ではほとんど変動は見うけられない。

写真3は、対流運動はあるが、写真1のような大きな一対の循環流までの動きはない状態を示したものである。上部から注入したトレーサが下部まで達し、複雑な動きをしながら上昇している様子がわかる。これに対する温度分布が図4である。円周方向に対し高温部と低温部が存在してはいるが、その状態が最上部までは達しておらず、自然対流は一部存在するが全域にわたる状況ではない。

Fig.4 Temperature distribution along circumferential direction

(a) $Ra = 1.18 \times 10^6$ (b)

Photo.3

ここには示していないが、隙間 $d = 3\text{ mm}$ の場合も 2 mm の場合と同様であり、隙間 d の違いによる流れの様子の変化はなく、円周方向の内筒壁面温度分布が一様なときには自然対流は発生せず、温度分布の変化が大きくなれば全域にわたる一対の大きな循環流が発生する。その中間の状態では一部に自然対流が存在する状態となる。ただし、隙間 d の値により自然対流が発生する条件(臨界 Ra 数)は相違する。

図5は、自然対流の状況を示す無次元数 Ra と円周方向温度変動を示す無次元数 ϵ との関係を示したものである。なお Ra と ϵ との定義は次式で示される。

$$Ra = g \beta \Delta T L^3 / (\kappa \nu) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \left(\sum_{i=1}^7 (T_{i\max} - T_{i\min}) / \Delta T \right) / 7 \quad (2)$$

$$\Delta T = T_b - T_t \quad (3)$$

ここで、 g ：重力の加速度、 β ：体膨張係数、 ΔT ：式(3)、 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。この図から、環状空間の隙間 $d=2$ mm (○印) のときには $Ra \approx 1.0 \times 10^{10}$ で ε の値が急激に増加していることがわかる。 ε の値が増加するということは、円周方向の温度変動が増加することであり、前述のごとく自然対流が発生することにつながる。 $Ra \approx 1.0 \times 10^{10}$ が臨界 Ra 数であり、 Ra 数の増加と共に ε の値は急増し、 2.0×10^{10} 程度の Ra 数で最大値を持った後急速に減少する。 ε がピーク後減少することの内容は自然対流が激しくなり、それにより周方向温度変動が減少したということであり、対流が減少したということではない。

Fig.5 Relation between Ra and ε

環状空間の隙間 $d=3$ mm の場合

も上述の様子と同様であるが、臨界 Ra 数の値は小さくなり $Ra \approx 4 \times 10^9$ である。 ε の値は $d=2$ mm の場合と同程度の $\varepsilon_{\max}$ となり以降減少している。

臨界 Ra 数が小さくなったのは $d=3$ mm と大きくなったために環状空間の内外壁の影響が相対的に小さくなったためと考えられる。なお、これらの結果は臨界 Ra 数は相違するものの現象そのものは鳥居ら^{(3)・(5)}の結果と同様のものである。

4. まとめ

フリーズシール方式の弁のフリーズシール部の流体の運動を観察するために簡単な模型実験装置を用いて流れの可視化を行い、自然対流の様子を調べた。その結果以下のことが明確になった。

- (1) 自然対流が発生するまでは周方向温度変動はあまりない。
- (2) 自然対流が発生すると周方向温度変動が大きくなり、周方向に高温部と低温部が生

じ、高温部付近で上昇流となり、低温部付近で下降流となる大きな一对の循環流が発生する。

(3) 周方向温度分布が存在すると、当面の弁のフリーズシール部のみならず、鳥居ら⁽³⁾が問題にしている対象でもそうであるが、熱応力、歪が問題となる。構造設計の観点からは均一な温度分布が望ましいわけであるから、自然対流を発生させない臨界 Ra 数以下の Ra 数になるように設計するか、あるいは積極的に対流を生ぜしめ、温度変動を減少させることが必要となる。

なお、実際のフリーズシール部と本実験装置とでは一部相違点も存在するが、狭い密閉環状空間での自然対流の様子は確認できたものと考えられる。

参考文献

- (1) CATTON, I.、Proc. 6th IHTC、6(1978)、13.
- (2) 鶴崎・宮部、機論、51-469、B(昭60)、2931.
- (3) 鳥居・中山、機論、47-417、B(昭56)、812.
- (4) 鳥居・中山、機論、47-421、B(昭56)、1792.
- (5) 鳥居・中山、機論、49-447、B(昭58)、2418.
- (6) YAMAKAWA, M.、et al. J. Nucl. Sci. Technol.、Vol. 23 No. 5 (1986)、451.