

第3章 管形状を楕円管とし、作動流体として空気を使用した場合の偏心に伴う二重管内の自然対流熱伝達

3. 1 緒言

二重管内の自然対流熱伝達の研究は従来から数多くなされており、Grigull and Hauf⁽¹⁾は内管側を加熱した同心二重円管について実験的研究を行い、流れの可視化および熱伝達特性を調べた。またPoweら⁽²⁾は内管側を加熱した同心二重円管内の流動パターンを分類するFlow pattern chartを示した。Kuehn and Goldstein⁽³⁾は同心二重円管について実験及び数値解析を行い、詳細な比較を行った。さらに偏心した二重円管内の自然対流熱伝達について実験的研究を行った⁽⁴⁾。またChoら⁽⁵⁾は偏心した二重円管について曲線直交座標系を用いた数値解析を行い、Kuehn and Goldsteinら⁽⁴⁾の実験結果と比較した。またHo and Lin⁽⁶⁾は偏心した二重円管について熱媒体を水として水の密度反転の影響を考慮した数値解析を行った。こうした従来からの研究のほとんどは内管側を加熱し、外管側を冷却した場合の同心または偏心二重円管内の自然対流熱伝達を対象とするものであった。

一方、近年エネルギーの有効利用が進められるにいたり、トロンブ壁のような実用上駆動力を使わないパッシブな伝熱技術の重要性が増している。相変化物質(Phase Change Materials)を管内に封入して太陽熱の吸収、放出を利用し、エネルギーの需給に時間的整合性を持たせる試みなどが報告されている^{(7),(8)}。蓄エネルギー技術の一つとしての蓄熱過程に関連して、外管側を加熱し、内管側を冷却する偏心した二重円管の数値解析が廣瀬ら⁽⁹⁾により行われ、偏心に伴う伝熱促進効果なども報告されている。また日射による蓄熱を考えると、日射の有効面積の観点から集熱管形状を従来の円管から楕円管などにすることが考えられ、基礎的な研究として外管側を加熱した水平同心二重楕円管内の自然対流熱伝達に対する数値解析を行った廣瀬ら⁽¹⁰⁾の研究や内管側を加熱した二重楕円管の楕円率および偏心量を変化させた場合の数値解析を行ったChengら⁽¹¹⁾の研究などが報告されている。このように近年の管の加工技術の進歩に伴い、任意の形状における二重管内の自然対流熱伝達の研究はこうしたパッシブな伝熱制御技術を確立する基礎としても有効であると思われる。

こうした観点に立ち、本研究においては基礎的な研究という意味と、温度変化に対する密度変化が単調な流体の代表的なものという意味で作動流体を空気として、外管を楕円管、内管を円管とし、外管を加熱、内管を冷却した場合の二重管内の自然対流熱伝達について、二重管全体を様々な角度に配置して実験及び数値解析を行い、二重管の配置角度および偏心量に伴う伝熱特性の変化を明らかにしたのでそれを報告する。

3. 2 数値解析

3. 2. 1 基礎方程式の導出

本研究で用いた物理モデル及び座標系をFig.3.1に示した。本研究では内管の中心を原点とする極座標系を用い、角度 ϕ は内管の垂直上方から時計回りにとり、管の配置角度を表す角度 ϕ_g は内管の垂直上方から反時計回りにとった。内管の中心と外管の中心との距離を偏心量 e とし、内管の半径を R_i とした。さらに、境界固定法を用いるため、内管側の形状関数を $F(\phi)$ 、外管側の形状関数を $B(\phi)$ とした。また、内管の温度を T_i 、外管の温度を $T_o(T_o > T_i)$ とし、外管側を加熱、内管側を冷却した場合を想定した。

数値解析における仮定、基礎方程式などは第2章で説明したものとほぼ同様のため、ここでは無次元変数、無次元化した基礎方程式、初期条件、境界条件のみを記す。

<無次元変数>

$$\begin{aligned}
 t^+ &= \frac{at}{(\overline{R}_o)^2} & r^+ &= \frac{r}{\overline{R}_o} & u^+ &= \frac{u\overline{R}_o}{a} & v^+ &= \frac{v\overline{R}_o}{a} \\
 \phi^+ &= \frac{\phi}{\pi} & T^+ &= \frac{T - T_i}{T_o - T_i} & \Omega^+ &= \frac{\Omega(\overline{R}_o)^2}{a} & \Psi^+ &= \frac{\Psi}{a} \\
 B^+(\phi) &= \frac{B(\phi)}{\overline{R}_o} & F^+(\phi) &= \frac{F(\phi)}{\overline{R}_o} & \phi_g^+ &= \frac{\phi_g}{\pi}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

境界固定法による独立変数 η^+ は以下のように定義した。

$$\eta^+ = \frac{r^+ - F^+(\phi)}{B^+(\phi) - F^+(\phi)} \tag{3.2}$$

<無次元化した基礎方程式>

$$\begin{aligned}
 \Omega^+ &= -\nabla^2 \Psi^+ \tag{3.3} \\
 \frac{\partial \Omega^+}{\partial t^+} + \frac{1}{\pi r^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} &\left(\frac{\partial \Psi^+}{\partial \phi^+} \frac{\partial \Omega^+}{\partial \eta^+} - \frac{\partial \Psi^+}{\partial \eta^+} \frac{\partial \Omega^+}{\partial \phi^+} \right) \\
 &= Pr \nabla^2 \Omega^+ - Pr Ra \left\{ \frac{\cos(\pi \phi^+)}{\pi r^+} \left(\frac{\partial T^+}{\partial \eta^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial \phi^+} + \frac{\partial T^+}{\partial \phi^+} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \sin(\pi \phi^+) \left(\frac{\partial T^+}{\partial \eta^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} \right) \right\} \tag{3.4}
 \end{aligned}$$

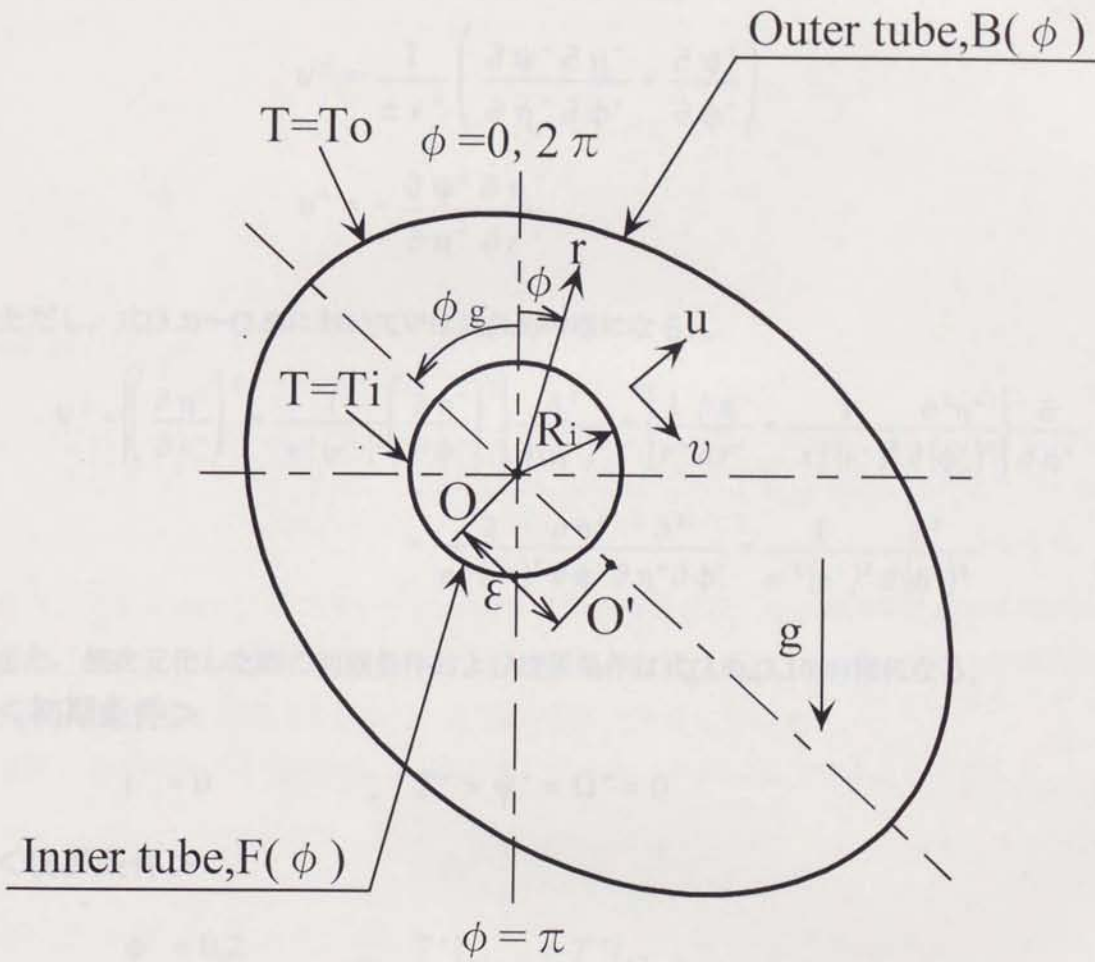


Fig.3.1 Physical model and coordinate system

$$\frac{\partial T^+}{\partial t^+} + \frac{1}{\pi r^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} \left(\frac{\partial \Psi^+}{\partial \phi^+} \frac{\partial T^+}{\partial \eta^+} - \frac{\partial \Psi^+}{\partial \eta^+} \frac{\partial T^+}{\partial \phi^+} \right) = \nabla^2 T^+ \quad (3.5)$$

半径方向速度 u^+ ,周方向速度 v^+ は次のように定義した.

$$u^+ = \frac{1}{\pi r^+} \left(\frac{\partial \Psi^+}{\partial \eta^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial \phi^+} + \frac{\partial \Psi^+}{\partial \phi^+} \right) \quad (3.6)$$

$$v^+ = - \frac{\partial \Psi^+}{\partial \eta^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} \quad (3.7)$$

ただし, 式(3.3)~(3.5)において ∇^2 は式(3.8)のようになる.

$$\begin{aligned} \nabla^2 = & \left\{ \left(\frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2 (r^+)^2} \left(\frac{\partial \eta^+}{\partial \phi^+} \right)^2 \right\} \frac{\partial^2}{\partial (\eta^+)^2} + \left\{ \frac{1}{r^+} \frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} + \frac{1}{\pi^2 (r^+)^2} \frac{\partial^2 \eta^+}{\partial (\phi^+)^2} \right\} \frac{\partial}{\partial \eta^+} \\ & + \frac{2}{\pi^2 (r^+)^2} \frac{\partial \eta^+}{\partial \phi^+} \frac{\partial^2}{\partial \phi^+ \partial \eta^+ \partial \phi^+} + \frac{1}{\pi^2 (r^+)^2} \frac{\partial^2}{\partial (\phi^+)^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

また, 無次元化した際の初期条件および境界条件は式(3.9),(3.10)のようになる.

<初期条件>

$$t^+ = 0 \quad ; \quad T^+ = \Psi^+ = \Omega^+ = 0 \quad (3.9)$$

<境界条件>

$$\begin{aligned} \phi^+ = 0, 2 \quad ; \quad T^+|_{\phi^+=0} = T^+|_{\phi^+=2} \\ \Psi^+|_{\phi^+=0} = \Psi^+|_{\phi^+=2} \\ \Omega^+|_{\phi^+=0} = \Omega^+|_{\phi^+=2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\eta^+ = 0 \quad ; \quad T^+ = 0, \quad \Psi^+ = \frac{\partial \Psi^+}{\partial \eta^+} = 0, \quad \Omega^+ = \Omega_{w,i}^+$$

$$\eta^+ = 1 \quad ; \quad T^+ = 1, \quad \Psi^+ = \frac{\partial \Psi^+}{\partial \eta^+} = 0, \quad \Omega^+ = \Omega_{w,o}^+$$

さらに, 内管および外管側の管壁における渦度 $\Omega_{w,i}^+, \Omega_{w,o}^+$,内管側の形状関数 $F^+(\phi)$, 外管側の

形状関数 $B^+(\phi)$ は以下のように表現される。

$$\Omega_{w,i}^+ = - \left\{ \left(\frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2 (r^+)^2} \left(\frac{\partial \eta^+}{\partial \phi^+} \right)^2 \right\} \frac{\partial^2 \psi^+}{\partial (\eta^+)^2} \Bigg|_{\eta^+=0} \quad (3.11)$$

$$\Omega_{w,o}^+ = - \left\{ \left(\frac{\partial \eta^+}{\partial r^+} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2 (r^+)^2} \left(\frac{\partial \eta^+}{\partial \phi^+} \right)^2 \right\} \frac{\partial^2 \psi^+}{\partial (\eta^+)^2} \Bigg|_{\eta^+=1} \quad (3.12)$$

$$F^+(\phi) = \frac{R_i}{R_o} \quad (3.13)$$

$$B^+(\phi) = \frac{2\varepsilon \cos(\phi - \phi_g)}{2\bar{R}_o \{ \alpha^2 \sin^2(\phi - \phi_g) + \cos^2(\phi - \phi_g) \}} + \frac{\sqrt{\{ -2\varepsilon \cos(\phi - \phi_g) \}^2 - 4 \{ \alpha^2 \sin^2(\phi - \phi_g) + \cos^2(\phi - \phi_g) \} (\varepsilon^2 - b^2)}}{2\bar{R}_o \{ \alpha^2 \sin^2(\phi - \phi_g) + \cos^2(\phi - \phi_g) \}} \quad (3.14)$$

なお、それぞれの式で用いた \bar{R}_o は相当平均半径を示し、ある楕円率における楕円の円周長さと等しい円周長を持つ円の半径とした。また、式(3.14)中における α は楕円の長径/短径で定義される楕円率を示し、 b は楕円の長径を示している。

また、基礎方程式を無次元化する際に用いた Pr 数、 Ra 数は以下のように定義した。

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.15)$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_o - T_i) (\bar{R}_o)^3}{a \nu} \quad (3.16)$$

結果の整理に用いた無次元温度勾配、伝熱量はそれぞれ式(3.17),(3.18),(3.19)の様に定義した。流れが定常になる場合、伝熱量は理論的には内管側と外管側とで等しい値を持つため、伝熱量の評価においては、簡単のため内管側を用いることにした。

$$D_i = 2 \frac{\partial T^+}{\partial r^+} \Bigg|_{w,i} \quad (3.17)$$

$$Q_i^+ = \oint_F \frac{\partial T^+}{\partial r^+} \Bigg|_{w,i} ds \quad (3.18)$$

$$Q_o^+ = \oint_B \left. \frac{\partial T^+}{\partial r^+} \right|_{w,o} \cos \gamma ds \quad (3.19)$$

なお、式(3.19)における γ は外管における補正角である。本研究では内管の中心を原点とする極座標系を使用したため、楕円形状である外管表面においては計算格子が直交しないことになる。そのため、外管側における伝熱量を算出する際には式(3.19)で表現したように補正分として $\cos \gamma$ を掛ける必要がある。

3. 2. 2 数値解析手法

これまで述べてきた基礎方程式を用いて実際に計算を行う際には差分法を使用し、全周計算を行った。時間項に対しては1次精度前進差分、その他の項には4次精度多点差分法を用いた。流線関数の計算には4次精度多点SOR法を用いた。

計算は任意の点における温度、渦度の値がほぼ定常になる無次元時間まで行った。

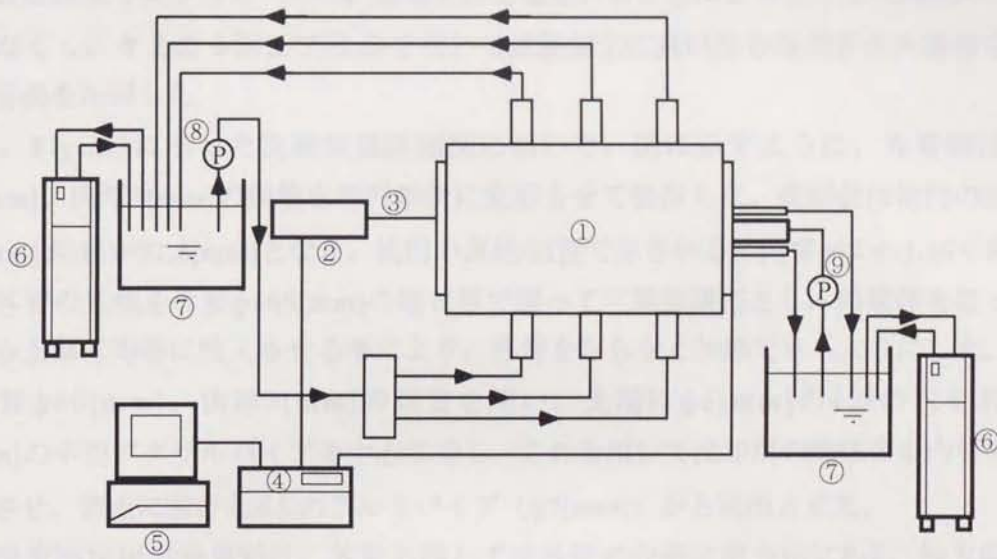
計算における分割数の採用においては $\eta \times \phi = 20 \times 40, 30 \times 60, 40 \times 80$ と変化させて計算を行い、それぞれにおいて内管側の伝熱量 Q_i^+ と外管側の伝熱量 Q_o^+ を比較し、どの程度一致するかを検討した。その結果、全ての場合において内外管の伝熱量は比較的良く一致したため、計算効率が良い 20×40 分割を採用した。

実際の計算におけるプログラムのフローチャートは前章で示したFig.2.4とほぼ同様である。計算を行う際には、まず初期条件、境界条件、形状関数などの算出を行い、その後エネルギー方程式、運動量方程式、流線関数の導出を行う。そして、得られた流線関数から半径方向速度 u 、周方向速度 v 、壁面の渦度を計算する。その後、順次時間を進めて各計算を行い、場がほぼ定常になる無次元時間に到達した時点で結果を出力した。

数値解析においては実験装置および実験条件を考慮して、 Ra 数は $Ra=10^5$ 、内管半径は $R_i^+=0.3, 0.42, 0.5, 0.6$ 、楕円率は $\alpha=1.16, 1.2, 1.4, 1.6$ とし、偏心率は $e^+=0 \sim 0.4$ までを主に 0.05 刻みで、二重管の配置角度 ϕ_k に関しては、 $\phi_k=0 \sim 180^\circ$ までを主に 45° 刻みで、それぞれパラメータとして変化させて計算した。また、時間刻み Δt^+ は、 $\Delta t^+=2.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-5}$ までを必要に応じて使い分けた。

3. 3 実験方法

実験装置の概略をFig.3.2に、実験装置の詳細図をFig.3.3にそれぞれ示した。まず、Fig.3.2の実験装置概略図に示すように、実験装置は大別して、試験部、恒温水循環部、温度測定部に分けられる。まず、恒温水循環装置⑥(EYELA, CTP-201)によって熱媒体の



- ① : Test section
- ② : Thermocouple moving device
- ③ : Thermocouple
- ④ : Data logger
- ⑤ : Computer
- ⑥ : EYELA,CPT-201
- ⑦ : Constant temperature bath
- ⑧ : Pump(heat)
- ⑨ : Pump(cold)

Fig.3.2 Schematic diagram of experimental apparatus

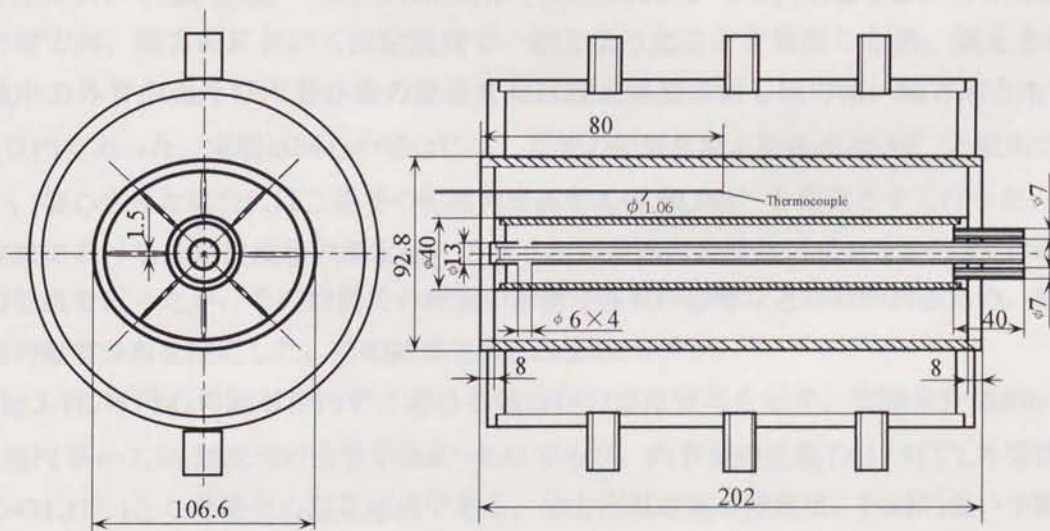


Fig.3.3 Detail of test section

温度を設定温度でコントロールし、恒温水槽⑦を用いることによってさらに熱媒体の温度変化を少なくし、ケミカルポンプ⑧、⑨を用いて試験部①に熱媒体を循環させ外管側を加熱し、内管側を冷却した。

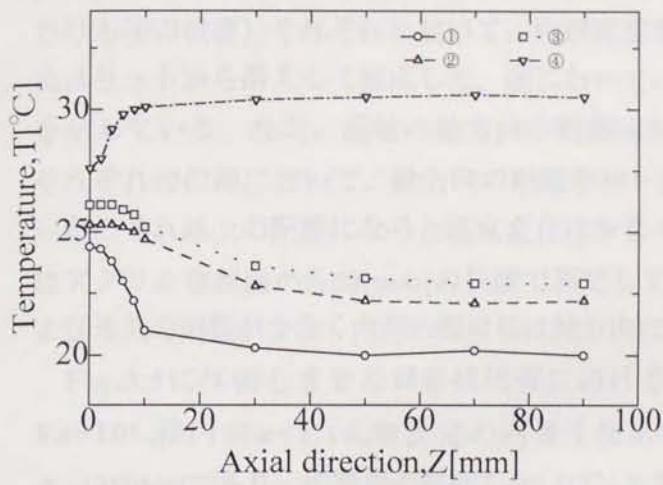
次に、Fig.3.3に示した実験装置詳細図において、図に示すように、外管側は外径 $\phi 100[\text{mm}]$ 、肉厚 $3[\text{mm}]$ の銅管を楕円形状に変形させて製作した。変形後は楕円の長径が $106.6[\text{mm}]$ 、短径が $92.8[\text{mm}]$ となり、楕円の長径/短径で示される楕円率 α は $\alpha=1.16$ であった。さらに外管の外側を外形 $\phi 165[\text{mm}]$ の塩ビ管で覆って三重管構造とし、熱媒体を塩ビ管の下部から上部に均等に流入させる事により、外管をむらなく加熱できるようにした。内管側は外径 $\phi 40[\text{mm}]$ 、肉厚 $3[\text{mm}]$ の銅管を用い、先端に $\phi 6[\text{mm}]$ の4個の穴をあけた $\phi 13[\text{mm}]$ の中空アクリルパイプを中心に通し、これを用いて冷却用の熱媒体を内管の内側に流入させ、背面に設けた4本のアルミパイプ($\phi 7[\text{mm}]$)から流出させた。

管壁温度測定用の熱電対は、外管に関しては外管の内面に周方向に8点、軸方向に2点、内管に関しては、内管の表面に周方向に8点配置した。内部温度場の測定では、熱電対を $\phi 1.06[\text{mm}]$ のステンレスパイプに通し、熱電対移動装置②(読みとり顕微鏡、位置精度 $0.1[\text{mm}]$)に取り付けた保持装置に固定し、移動させながらデータロガー④によって内部の温度場を測定した。測定には素線径 $0.2[\text{mm}]$ のT型熱電対(銅-コンスタンタン)を用いた。楕円管内部の温度場測定用として前面のアクリル窓には角度 45° ごとに幅 $1.8[\text{mm}]$ のスリットを設け、切り込みを入れたサランラップを貼り付け、外気の影響が入らないようにした。

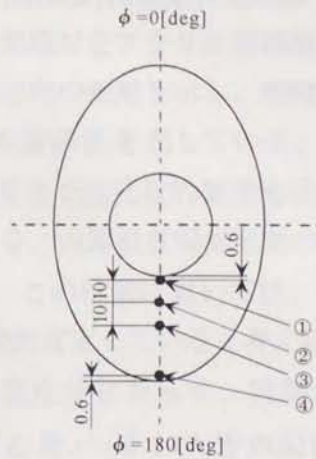
実験においては、加熱・冷却用の熱媒体を試験部に約2~3時間循環させ、外管及び内管共に周方向、軸方向において設定温度で一樣となったことを確認した後、測定を行った。実験中の外管内面及び内管表面の温度変化は設定温度に対し周方向、軸方向とも $\pm 0.1[^\circ\text{C}]$ 以内であった。実験は同心の場合には二重管の配置角度 ϕ_0 を $\phi_0=0, 45, 90^\circ$ と変化させて行い、偏心させた場合には二重管の配置角度 ϕ_0 を $\phi_0=0, 90, 180^\circ$ と変化させて行った。

実験における内部温度場の測定は、アクリル窓前面に設けたスリットから約 $80[\text{mm}]$ 程度の位置で行ったが、その位置での端面の影響や外気の影響などを確かめるため、管の軸方向の温度分布を測定した。その結果をFig.3.4, 3.5に示す。

Fig.3.4には同心の縦形楕円管における軸方向の温度分布を示す。実験条件は $Ra=1.1 \times 10^5$ 、楕円率 $\alpha=1.16$ 、無次元の内管半径 $R_i^+=0.42$ であり、内管側の温度 $T_i=19.9[^\circ\text{C}]$ 、外管側の温度 $T_o=31.1[^\circ\text{C}]$ とした場合の測定結果である。軸方向温度場の測定は、比較的強い下降流が生じる方向である角度 $\phi=180[\text{deg}]$ において、内管から $0.6[\text{mm}]$ 程度離れた位置((b)における①の位置)、内管から $10.6[\text{mm}]$ 程度離れた位置((b)における②の位置)、内管から 20.6

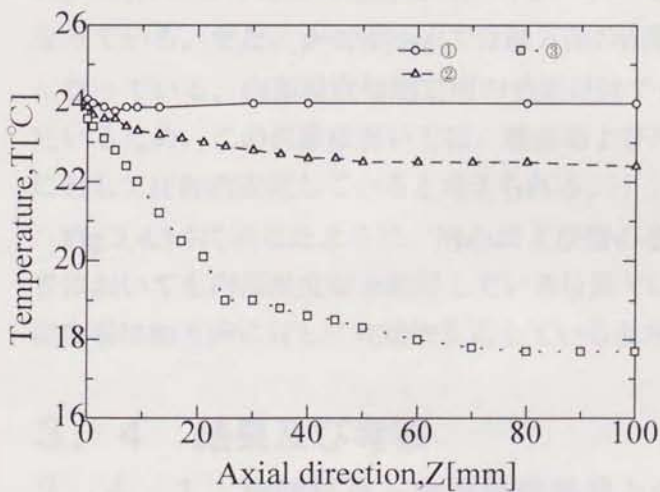


(a) Temperature distribution

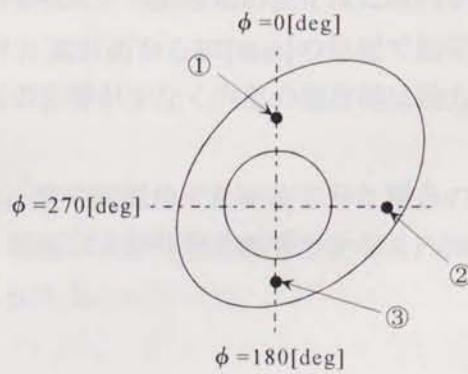


(b) Physical model

Fig.3.4 Axial direction temperature distribution for concentric elliptical annulus
 $(Pr=0.71, Ra=1.1 \times 10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42, \phi_s=0[\text{deg}])$
 $(T_i=19.9[^\circ\text{C}], T_o=31.1[^\circ\text{C}])$



(a) Temperature distribution



(b) Physical model

Fig.3.5 Axial direction temperature distribution for eccentric elliptical annulus
 $(Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42, \epsilon^+=0.15,$
 $\phi_s=135[\text{deg}], T_i=15.8[^\circ\text{C}], T_o=25.3[^\circ\text{C}])$

[mm]程度離れた位置 ((b)における③の位置), 外管から0.6[mm]程度離れた位置 ((b)における④の位置) それぞれにおいて, 内部温度場測定用の熱電対をアクリル窓前面に設けたスリットから挿入して測定した. 図において, 横軸は軸方向の距離を示し, 縦軸は温度を示している. なお, 横軸の軸方向の距離は0でアクリル窓前面を表している. 図より, それぞれの位置において, 軸方向の距離が20~30[mm]程度までは比較的溫度変化が大きいが, それ以上の距離になると溫度変化は少なくなっている. 内部溫度場測定用の熱電対はアクリル窓前面から80[mm]の位置で測定しているため, この位置においては, 端面および外氣の影響が少なく内部の溫度場は軸方向に対して比較的安定していると考えられる.

Fig.3.5には偏心させた斜形楕円管における軸方向の溫度分布を示す. 実験条件は $Ra=10^5$, 楕円率 $\alpha=1.16$, 無次元の内管半径 $R_i^+=0.42$, 偏心量 $\varepsilon^+=0.147$, 管の配置角度 $\phi_s=135[\text{deg}]$ であり, 内管側の溫度 $T_i=15.8[^\circ\text{C}]$, 外管側の溫度 $T_o=25.3[^\circ\text{C}]$ とした場合の測定結果である. 溫度場測定は角度 $\phi=0, 90, 180[\text{deg}]$ それぞれの角度で行った. $\phi=0[\text{deg}]$ では内管と外管の中間付近の位置 ((b)における①の位置), $\phi=90[\text{deg}]$ では外管付近の位置 ((b)における②の位置), $\phi=180[\text{deg}]$ では内管と外管の中間付近の位置 ((b)における③の位置) それぞれにおいて, 内部溫度場測定用の熱電対をアクリル窓前面に設けたスリットから挿入し, 軸方向における溫度分布を測定した. 図より, $\phi=180[\text{deg}]$ では軸方向の距離が20[mm]付近まで比較的溫度変化が大きいが, それ以上の距離になると溫度変化は少なくなっている. また, $\phi=0, 90[\text{deg}]$ では軸方向の距離の変化による溫度場の変化は比較的小さくなっている. 内部溫度場測定用の熱電対はアクリル窓前面から80[mm]の位置で測定しているため, この位置においては, 端面および外氣の影響が少なく内部の溫度場は軸方向に対して比較的安定していると考えられる.

Fig.3.4,3.5に示したように, 同心および偏心させ, 管の配置角度を変化させた場合の両者においても内部溫度場を測定している位置では, 端面および外氣の影響が少なく内部の溫度場は軸方向に対して比較的安定していると考えられる.

3. 4 結果及び考察

3. 4. 1 実験結果と数値解析結果との比較

まず, 作動流体は空氣で $Pr=0.71$ とし, Ra 数は $Ra=10^5$, 偏心量は $\varepsilon^+=0, 0.15$ の2つの場合について実験結果と数値解析結果の比較を行った.

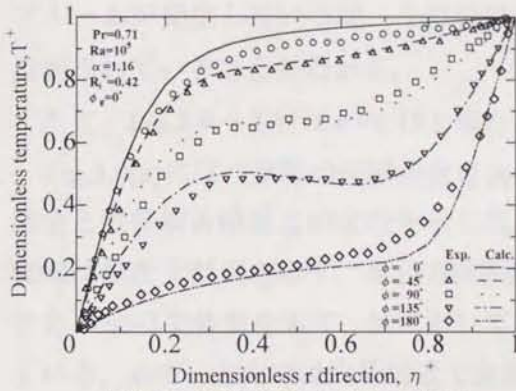
Fig.3.6~3.8に同心の場合の結果を示した.

Fig.3.6(a)には二重管の配置角度 $\phi_s=0^\circ$ としたときの半径方向溫度分布の実験結果と数値解析結果との比較を示した. 図において, 横軸は無次元距離を示し, 縦軸は無次元溫度を示す. 半径方向距離については独立変数 η^+ を用いて整理し, $\eta^+=0$ で内管を, $\eta^+=1$ で外管を

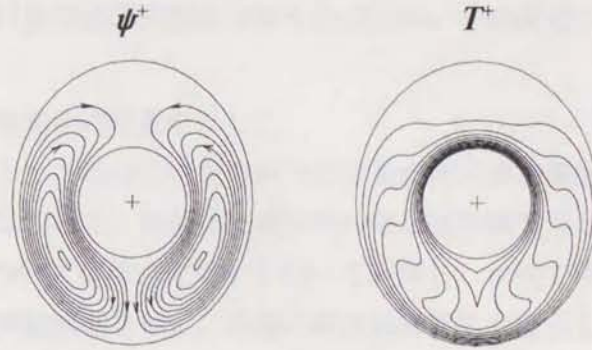
表す。図において点は実験結果を示し各種の線分は計算結果を示している。 $\phi=0^\circ$ 方向では内管付近で急激な増加が見られ、 180° 方向では $\eta^+=0.8$ 付近から急激に増加してゆく様子が見られる。各方向の温度分布とも流れが衝突流となり等温線分布が密になる部分などを除いて実験結果と数値解析結果との差は実温度で $0.1\sim 0.4[^\circ\text{C}]$ 以内であり非常に良い一致が見られた。Fig.3.6(b)には $\phi_k=0^\circ$ とし縦形楕円形状の場合の数値解析による流線および等温線を示した。Fig.3.6(b)の左の図には流線を $\Delta\psi^+=\pm 2$ として示した。また右の図には等温線を $\Delta T^+=0.1$ として示した。流線の図から流れは外管に沿って上昇し、内管に沿って下降する単一渦流れとなっていることがわかる。また、図のような縦形楕円形状の場合、 $\phi=90, 270^\circ$ 方向で環状部の距離が若干狭くなり、 $\phi=180^\circ$ 方向で環状部の距離が若干広くなるため、全体的な流れは垂直方向に細長くなり、渦の中心が二重管の下半部側になることがわかる。等温線の図から内管の垂直下方側でブルームが発生しており、 180° 方向の実験結果と対応していることがわかる。

Fig.3.7(a)には二重管の配置角度 $\phi_k=45^\circ$ とし、外管が斜形楕円形状の場合の温度分布の実験結果と数値解析との比較を示した。測定は 45° 毎に行なったが、図の煩雑さを避けるため、結果は 90° 毎で表示した。Fig.3.6(a)と同様に、等温線分布が密になる部分を除いて実験結果と数値解析結果との差は実温度で $0.1\sim 0.5[^\circ\text{C}]$ 以内であり良く一致していることがわかる。Fig.3.7(b)には $\phi_k=45^\circ$ とし斜形楕円形状の場合の流線および等温線を示した。 $\Delta\psi^+$ 、 ΔT^+ はFig.3.6(b)と同様の値を用いた。流線の図から、 $\phi_k=45^\circ$ とした場合、流れは左右非対称になり、左側の渦の勢力が強くなる事がわかる。一方、等温線の図より、流れ場が非対称になる事に伴い、温度場も非対称になる事がわかる。また、内管下部側にブルームが発生しており、 180° 方向の実験結果と対応しているが、Fig.3.6(b)と比較すると、環状部の距離が若干狭くなることもあり、その発達が抑制されている事がわかる。

Fig.3.8(a)には二重管をさらに回転させ、 $\phi_k=90^\circ$ とし、外管が横形楕円形状の場合の温度分布の実験結果と数値解析との比較を示した。Fig.3.6(a)と同様に 45° 毎の結果を表示した。 $\phi=180^\circ$ 方向で若干差が大きくなっているが、これはこの部分で内外管の距離が狭まるとともに、内管下部側に下降流が生じており、内部温度は外管の管壁付近で急激に変化するため測定結果に誤差が入りやすくなったためと思われる。こうした等温線分布が密になる部分を除いて実験結果と数値解析結果との差は実温度で $0.1\sim 0.5[^\circ\text{C}]$ 以内であり比較的良い一致が見られた。Fig.3.8(b)には横形楕円形状の場合の流線および等温線を示した。流線の図より、 $\phi_k=90^\circ$ とした場合、流れは左右対称になることがわかる。さらに、Fig.3.6(b)の場合とは逆に $\phi=90, 270^\circ$ 方向で環状部の距離が若干広くなり、 $\phi=180^\circ$ 方向で環状部の距離が若干狭くなるため、全体的な流れは水平方向に発達する事になり、渦の中心が二重管の中心部付近になることがわかる。また、等温線の図より、内管下部において

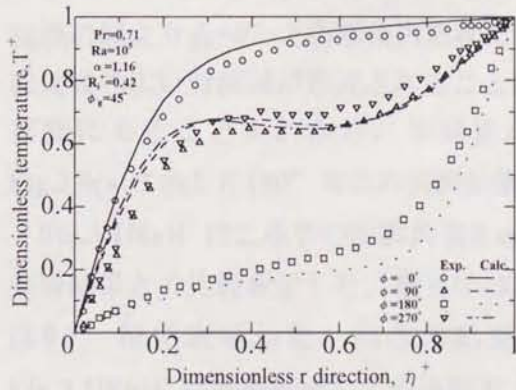


(a) Dimensionless temperature distribution

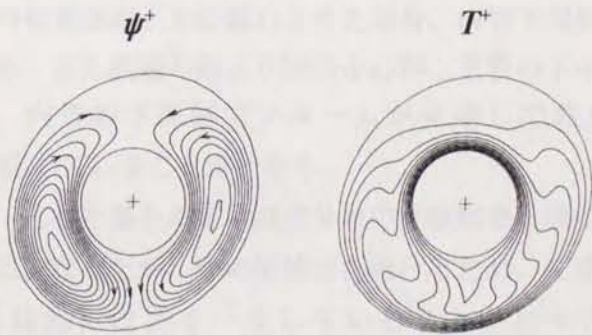


(b) Stream lines and isotherms ($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)

Fig.3.6 Comparison between experimental and numerical result for oriented angle $\phi_g = 0^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42$)

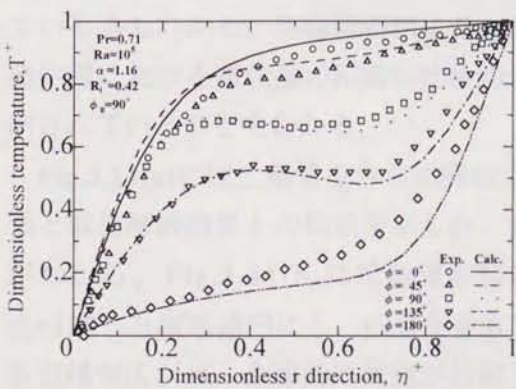


(a) Dimensionless temperature distribution

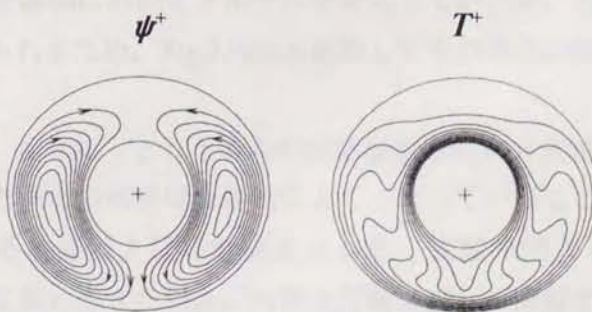


(b) Stream lines and isotherms ($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)

Fig.3.7 Comparison between experimental and numerical result for oriented angle $\phi_g = 45^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42$)



(a) Dimensionless temperature distribution



(b) Stream lines and isotherms ($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)

Fig.3.8 Comparison between experimental and numerical result for oriented angle $\phi_g = 180^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42$)

ブルームが発生しているが、その位置における環状部の距離が狭くなるため、その発達が抑制されていることがわかる。

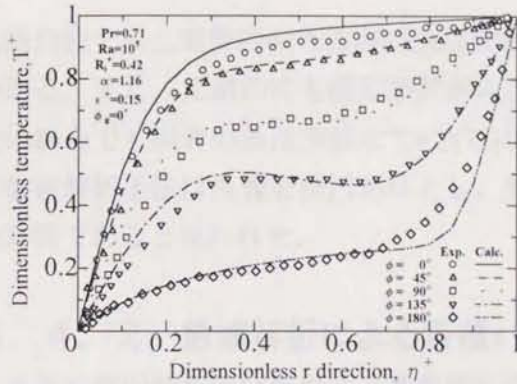
次に、Fig.3.9～3.11に $\varepsilon^+=0.15$ と偏心させた場合の結果を示した。

Fig.3.9(a)には二重管の配置角度を $\phi_s=0^\circ$ とした場合の半径方向での定常温度分布の実験結果と数値解析結果との比較を示した。図において、横軸は半径方向の無次元距離を示し、縦軸は無次元温度を示す。半径方向距離については独立変数 η^+ を用いて整理し、 $\eta^+=0$ で内管を、 $\eta^+=1$ で外管を表す。図において点は実験結果を示し、各種の線分は計算結果を示している。 $\phi=0^\circ$ 方向では内管付近で急激な増加が見られ、 180° 方向では $\eta^+=0.8$ 付近から急激する傾向を示した。各方向の温度分布とも実験結果と数値解析結果の間には非常によい一致が見られた。Fig.3.9(b)には数値解析による流線および等温線を示した。Fig.3.9(b)の左の図には流線を $\Delta\psi^+=\pm 2$ として示した。また右の図には等温線を $\Delta T^+=0.1$ として示した。流線の図より $\phi_s=0^\circ$ と縦形楕円形状にし、内管を垂直上方に偏心させた場合、内管下部側に比較的広い対流領域が形成されることになる。また流線の図より渦の中心が二重管の下半部側にあることがわかる。等温線から、内管の下部側でブルームが発生しており、Fig.3.9(a)に示した 180° 方向の実験結果と対応していることがわかる。

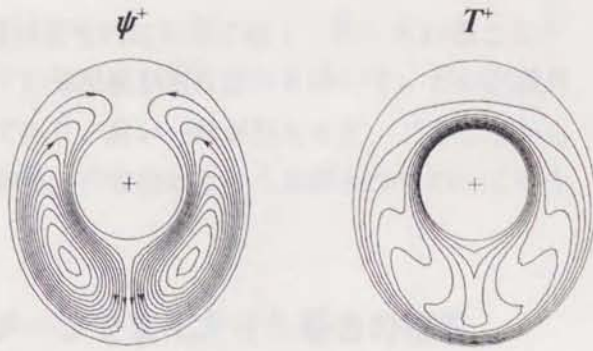
Fig.3.10(a)には二重管の配置角度を $\phi_s=90^\circ$ とした場合の定常温度分布の実験結果と数値解析結果との比較を示した。測定は 45° 毎に行なったが、図の煩雑さを避けるため、結果は 90° 毎で表示した。両者の結果は全体的には良く一致していることがわかる。Fig.3.10(b)には数値解析による流線および等温線を示した。 $\Delta\psi^+$ 、 ΔT^+ はFig.3.9(a)と同様の値を用いた。流線の図より $\phi_s=90^\circ$ と横形楕円形状にし、内管を水平方向に偏心させた場合、偏心に伴い内管の右側の領域が拡大し、左側の領域が縮小されるため、流れ場、温度場ともに非対称性が見られた。また、それぞれの渦の中心は二重管の中心部付近になっている事もわかる。等温線の図より、内管下部側においてブルームが発生しているが、この位置における環状部の距離が比較的狭められるため、Fig.3.9(b)と比較してその発達が抑制されていることもわかる。

Fig.3.11(a)には二重管をさらに回転させ、 $\phi_s=180^\circ$ とした場合の定常温度分布の実験結果と数値解析結果との比較を示した。図から両者の結果は全体的によく一致していることがわかる。Fig.3.11(b)には数値解析による流線および等温線を示した。流線の図より、 $\phi_s=180^\circ$ と縦形楕円にし、内管を垂直下方に偏心させた場合、内管上部側に流れが滞留する領域が広がり、全体的に対流が抑制される様子が明確に示された。また、等温線の図より、内管下部にブルームが発生していることがわかるが、その位置における環状部の距離が比較的狭いため、その発達が抑制されていることがわかる。

実験結果と数値解析結果の比較から、同心および偏心させた場合の両者において、どの

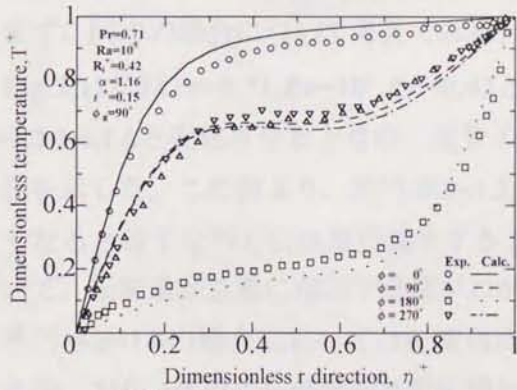


(a) Dimensionless temperature distribution

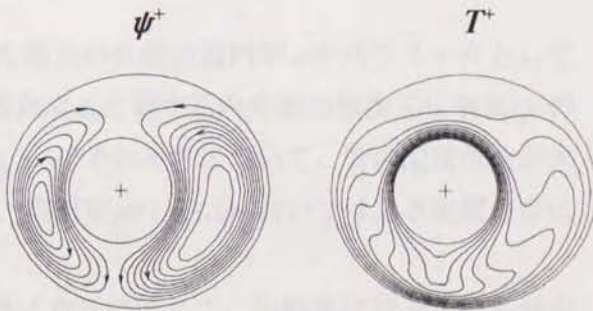


(b) Stream lines and isotherms
($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)

Fig.3.9 Comparison between experimental and numerical result for oriented angle $\phi_g = 0^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42, \epsilon^+=0.15$)

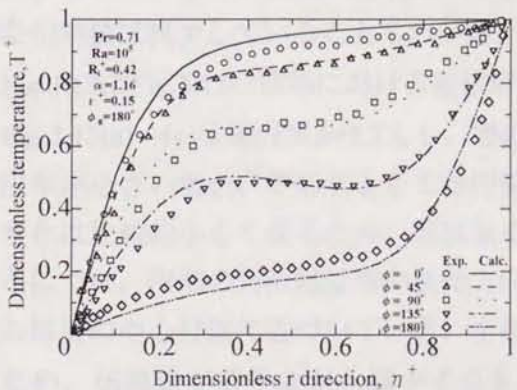


(a) Dimensionless temperature distribution

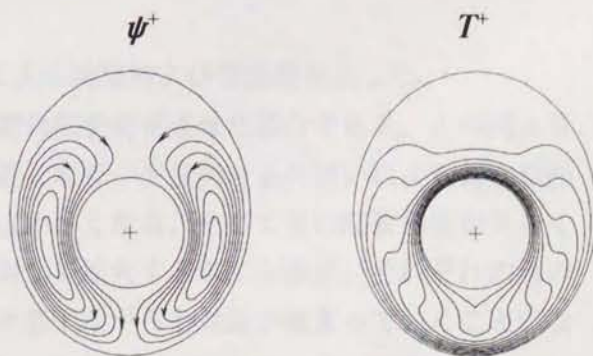


(b) Stream lines and isotherms
($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)

Fig.3.10 Comparison between experimental and numerical result for oriented angle $\phi_g = 90^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42, \epsilon^+=0.15$)



(a) Dimensionless temperature distribution



(b) Stream lines and isotherms
($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)

Fig.3.11 Comparison between experimental and numerical result for oriented angle $\phi_g = 180^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.16, Ri^+=0.42, \epsilon^+=0.15$)

配置角度でも二重管内の各方向の温度分布特性は定性的に非常に良く一致していることがわかる。また、定量的にも測定誤差が入りやすい等温線が密な部分を除いて、どの配置角度の場合でも両者の差は実温度で $0.5[^\circ\text{C}]$ 以内であり、良い一致が見られた。このことから本数値解析手法は外管を楕円形状とし、外管加熱、内管冷却という加熱条件においても十分妥当であると思われた。

3. 4. 2 数値解析による各種パラメータを変化させた場合の結果

外管に楕円管を用いた場合、その流れの形態および伝熱特性に影響をおよぼすパラメータとして考えられるものとして、 Ra 数、内外管の管径比、偏心量の他に新たに楕円の長径と短径の比で表される楕円率、二重管全体の配置角度が考えられる。ここでは主に楕円率、内外管の管径比、管の配置角度による伝熱量変化に関して検討する。

まず、同心の場合について考えてみる。

Fig.3.12には $Pr=0.71, Ra=10^5, Ri^+=0.42$ とした場合の外管の楕円率 α をパラメータとして $\alpha=1.2, 1.4, 1.6$ と変化させたときの二重管の配置角度 ϕ_k に対する内管側の無次元伝熱量 Q^+ の変化を示した。この図より、楕円率 $\alpha=1.2, 1.4, 1.6$ のそれぞれにおいて、管の配置位置が大きくなると若干ながら伝熱量が減少すること、楕円率 $\alpha=1.4, 1.6$ においてはある配置角度において、伝熱量が急激に増加する事がわかる。

楕円率 $\alpha=1.4$ の場合においては配置角度が多くなるにつれて、伝熱量は若干ながら減少するが、 $72[^\circ]$ 付近で伝熱量が急激に増加し、その後はあまり変化しないという傾向を示した。また、楕円率 $\alpha=1.6$ の場合においても配置角度が多くなるにつれて、伝熱量は若干ながら減少するが、 $60[^\circ]$ 付近で伝熱量が急激に増加し、その後緩やかに増加するという傾向を示した。また、配置角度 $\phi_k=0\sim 60[^\circ]$ の範囲では楕円率が増加するのに伴い、全体的な伝熱量は減少していることもわかる。

Fig.3.13にFig.3.12の状態における数値解析による流線および等温線を示した。

Fig.3.13(a)~(c)は楕円率 $\alpha=1.2$ とし、管の配置角度を変化させた場合である。この図より、楕円率が小さい場合、管形状としては円管に近くなり、配置角度 ϕ_k の違いによる対流形態の変化は比較的小さくなるため、伝熱量変化は小さくなる。そして管の配置角度が大きくなるにつれ、内部の対流域は管の長軸方向に対して拡大する事になるが、それぞれの渦の中心は管の中心付近に近づいていき、全体的に若干ながらも対流が弱まっていくことになるため、伝熱量が若干ながら減少すると考えられる。Fig.3.13(d),(e)は楕円率 $\alpha=1.4$ とし、管の配置角度を変化させた場合である。楕円率が比較的大きい場合、配置角度 $\phi_k=90[^\circ]$ 付近では内管下部側に2次渦が発生するため、伝熱量が急激に増加したと考えられる。また、Fig.3.12において伝熱量が急激に増加した後は配置角度が増加しても伝熱量がほとんど変化

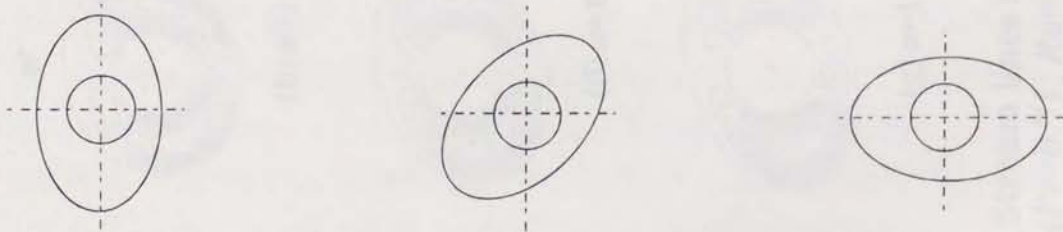
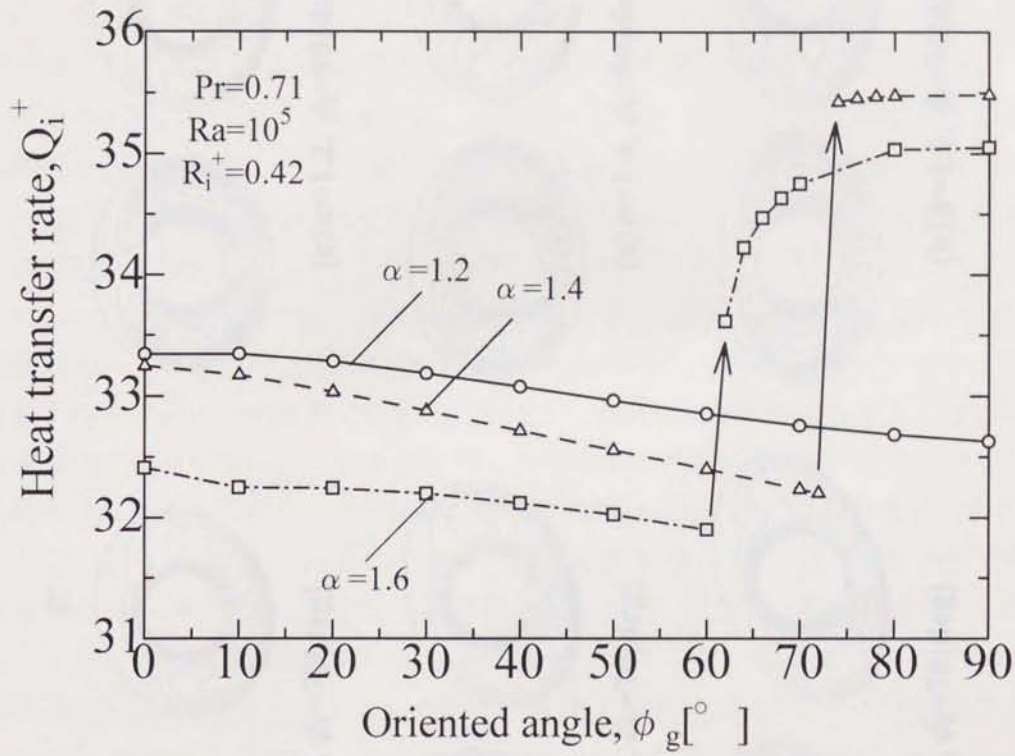


Fig.3.12 Variation of heat transfer rate($Pr=0.71, Ra=10^5, Ri^+=0.42$)

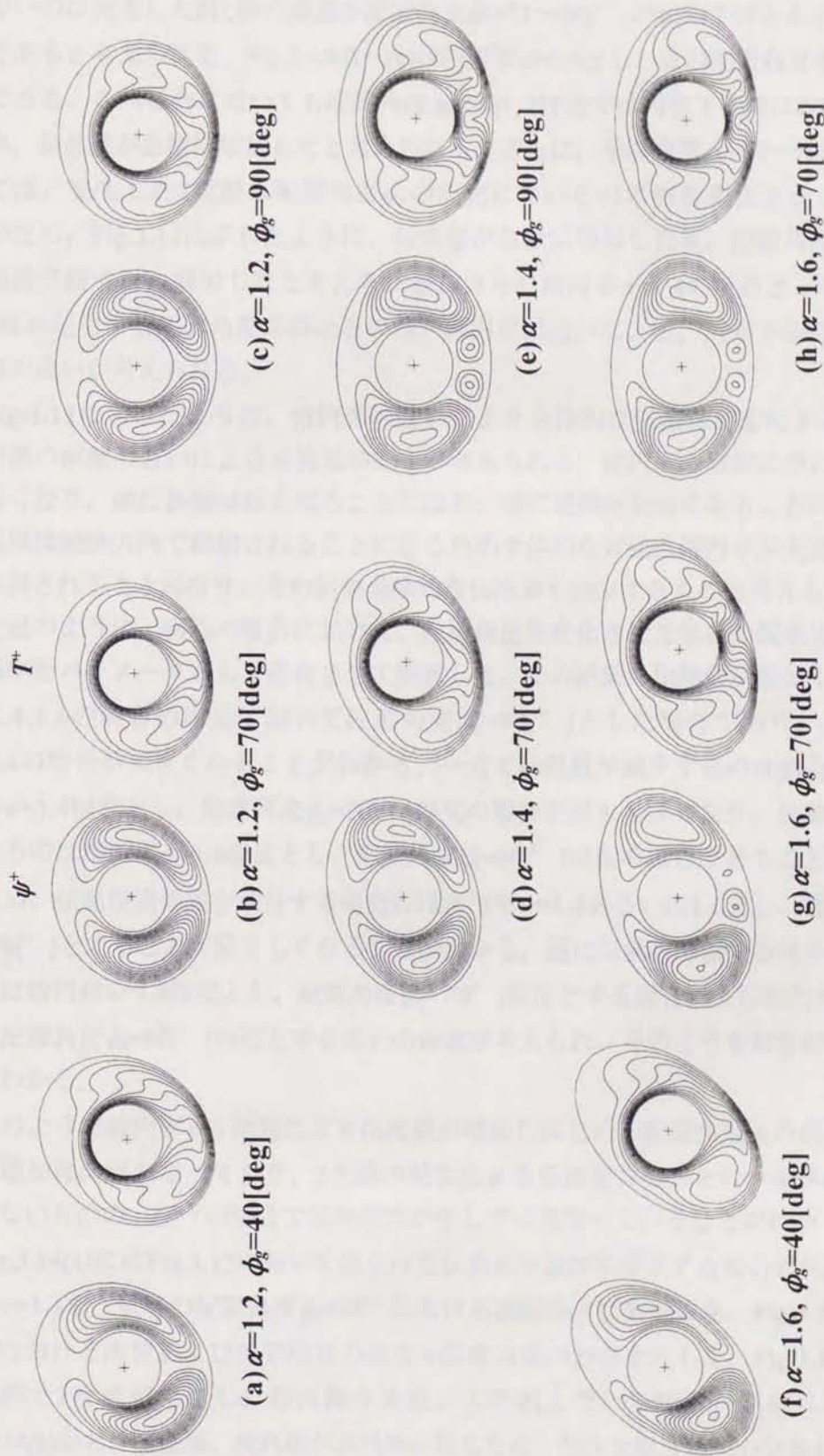


Fig.3.13 Stream lines and isotherms
 ($Pr=0.71, Ra=10^5, R_t^+=0.42, \Delta\psi^+=\pm 2, \Delta T^+=0.1$)

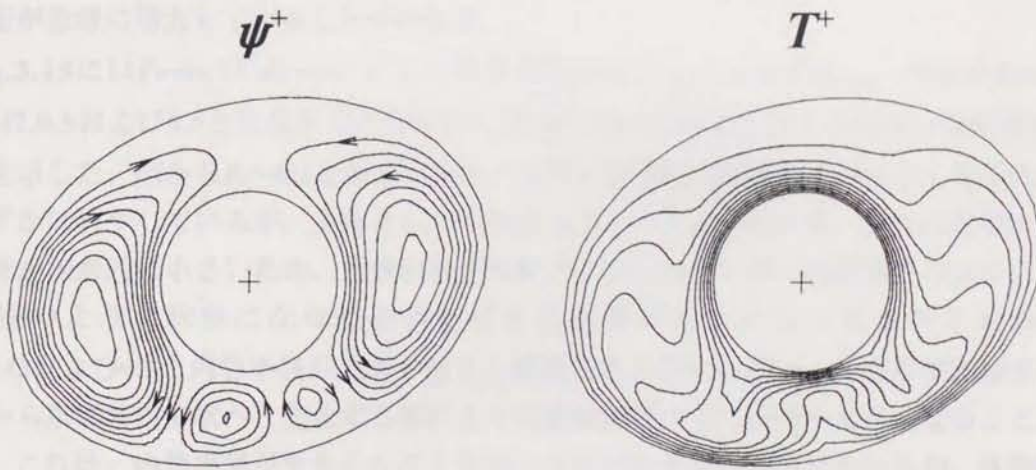
しないのは発生した2次渦の形態が配置角度 $\phi_k=72\sim 90^\circ$ の範囲でほとんど変化しないためであると考えられる。Fig.3.13(f)~(h)は楕円率 $\alpha=1.6$ とし、管の配置角度を変化させた場合である。この場合においても配置角度 $\phi_k=90^\circ$ 付近では内管下部側に2次渦が発生するため、伝熱量が急激に増加したと考えられる。さらに、配置角度 $\phi_k=60\sim 90^\circ$ の範囲においては、発生した2次渦は配置角度 ϕ_k の変化に伴いその形態を変化させることもわかる。そのため、Fig.3.12に示したように、伝熱量が急激に増加した後、配置角度の増加に伴い伝熱量が緩やかに増加したと考えられる。さらに楕円率 $\alpha=1.4$ の場合と $\alpha=1.6$ の場合とで2次渦が発生する配置角度が異なるのは、楕円率の違いによる、円管下部側での平行部の距離の違いが考えられる。

Fig.3.12に示したように、楕円率の違いにより全体的な伝熱量が変化する理由としては、環状部の距離の違いによる対流域の変化が考えられる。楕円率の増加に伴い、楕円の短軸は短くなり、逆に長軸は長くなることになる。特に短軸側が短くなることにより、内部の対流域は短軸方向で抑制されることになるため全体的な対流は楕円率が大きくなるにつれて抑制されることになり、その結果全体的な伝熱量も減少するものと考えられる。

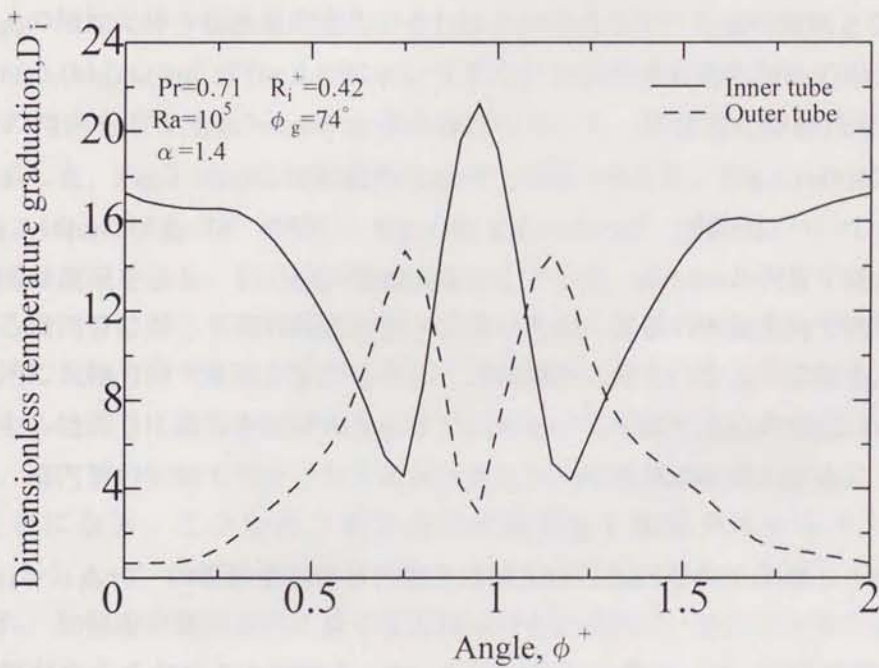
上記のように、同心の場合において、配置角度を変化させた場合の伝熱量変化に対して楕円率をパラメータとして変化させて検討した。その結果、伝熱量が増加するのは楕円率 $\alpha=1.4, 1.6$ の両者の場合において配置角度 $\phi_k=90^\circ$ とした場合であり、伝熱量自体は $\alpha=1.4$ の場合が大きくなるのがわかる。一方で伝熱量が減少するのは割合で考えると楕円率 $\alpha=1.4$ 程度とし、配置角度 $\phi_k=70^\circ$ 程度の場合が最も大きくなり、伝熱量自体が小さくなるのは楕円率 $\alpha=1.6$ 程度とし、配置角度 $\phi_k=60^\circ$ 程度の場合であることがわかる。このため、伝熱促進効果を期待する場合には楕円率 $\alpha=1.4$ あるいは 1.6 とし、管の配置角度を $\phi_k=90^\circ$ とすることが望ましくなることがわかる。逆に伝熱を抑制する効果を期待する場合には楕円率 $\alpha=1.4$ 程度とし、配置角度 $\phi_k=70^\circ$ 程度とする場合および楕円率 $\alpha=1.6$ 程度とし、配置角度 $\phi_k=60^\circ$ 程度とする場合の両者が考えられ、そのような状態が望ましいことがわかる。

このように楕円率 α の相違により伝熱量が増加しはじめる配置角度 ϕ_k の値、さらにその後の増加傾向が異なっており、2次渦の発生による伝熱量の増加という全体的な傾向は変わらないものの、個々の場合で伝熱特性が少しずつ異なっていることがわかった。

Fig.3.14(a)にはFig.3.12において見られた伝熱量が急激に増大する場合の代表的なものとして $\alpha=1.4$ で二重管の配置角度 $\phi_k=74^\circ$ における流線および等温線を、Fig.3.14(b)にはその場合における内管および外管周りの無次元温度勾配の分布を示した。Fig.3.14(a)から内管下部側で2次渦が発生し、等温線が複雑に入り組んでいる様子が明確にわかる。また、Fig.3.14(b)から、温度場、流れ場が非対称になるため、無次元温度勾配の分布も非対称になる



(a) Stream lines and isotherms ($\Delta \psi^+ = \pm 2, \Delta T^+ = 0.1$)



(b) Dimensionless temperature graduation

Fig.3.14 Stream and temperature graduation on the numerical result for oriented angle $\phi_g=74^\circ$ ($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.4, R_i^+=0.42, \phi_g=74^\circ$)

こと、およびFig.3.14(a)において内管下部側の2次渦が発生している部分における無次元温度勾配が急激に増大していることがわかる。

Fig.3.15には $Pr=0.71, Ra=10^5$ として外管の楕円率を $\alpha=1.4$ と固定し、内管半径 R_i^+ を0.3, 0.42, 0.5および0.6と変化させたときの二重管の配置角度 ϕ_k に対する無次元伝熱量 Q_i^+ の変化を示した。図から $R_i^+=0.3$ と小さい場合、無次元伝熱量は配置角度が大きくなるにつれてわずかに減少しているが、全体としての変化は小さいことがわかる。これは外管に比べて内管が相対的に小さいため、外管形状の影響が小さくなり、単一円管周りの流れによる熱伝達のような状態になり配置角度による影響が小さくなったものと思われる。 $R_i^+=0.42$ および0.5と内管半径が大きくなると配置角度の増加に伴い、外管形状が縦形楕円形状から横形楕円形状へと変化する事により伝熱量が減少する傾向が大きくなることがわかる。これは、内管半径が大きくなると管内の対流域はある程度狭められるが、外管形状の違いによる対流形態の変化が大きくなり、その結果伝熱量が変化したものと考えられる。また配置角度がある値になると伝熱量が急激に増加する。これはFig.3.13において示したように、内管下部側に発生する2次渦によるものである。 $R_i^+=0.6$ とさらに内管半径を大きくすると ϕ_k の増加に伴う伝熱量の変化がそれ以下の場合と比べて逆の傾向となっている。

Fig.3.16(a),(b),(c),(d)にはFig.3.15において見られた伝熱量の変化が他の場合に比べて定性的に逆の傾向を有する $R_i^+=0.6$ のときの場合について、代表的な配置角度における流線、等温線を示した。Fig.3.16(a)には配置角度 $\phi_k=0^\circ$ の場合を示し、Fig.3.16(b)には $\phi_k=50^\circ$ の場合、Fig.3.16(c)には $\phi_k=74^\circ$ の場合、Fig.3.16(d)には $\phi_k=90^\circ$ の場合について示した。各図とも左の図は流線を示し、右の図は等温線を示している。 $R_i^+=0.6$ と内管半径が大きい場合、外管である楕円管に対して相対的に内管が大きいため、外管の短軸方向で内外管の距離が狭まり、逆に長軸方向で距離が拡がるため、対流域が二分されたようになる。そして二重管全体を中心軸周りに適当な配置角度 ϕ_k まで回転させて配置するためFig.3.16(a)~(d)に示すように、楕円管の短軸で二分された領域と重力方向の関係は配置角度 ϕ_k によって大きく異なることになる。このため二重管内の対流形態も配置角度により大きく異なる。Fig.3.16(a)から $\phi_k=0^\circ$ の縦形楕円形状の場合に対流域は楕円管の上部側と下部側とに大きく分けられ、加熱面が重力方向に長くなる利点が生かされず、流れが十分に発達しないため、伝熱量が小さくなることわかる。Fig.3.16(b)に示した $\phi_k=50^\circ$ の斜形楕円形状の場合、内管の左右に主要な流れが発達していることがわかる。また図からわかるように、内管下部側では下部加熱、上部冷却という加熱条件となり、密度的な不安定状態による2次渦の発生が見られた。さらにFig.3.16(b)の等温線分布に示すように、楕円の短軸部で流れが妨げられることなく加熱面に沿う主要な流れの発達にともなって、Fig.3.16(a)と比べ等温線が密な領域が内管の上部側で拡大していることがわかる。これらが伝熱量の増加につなが

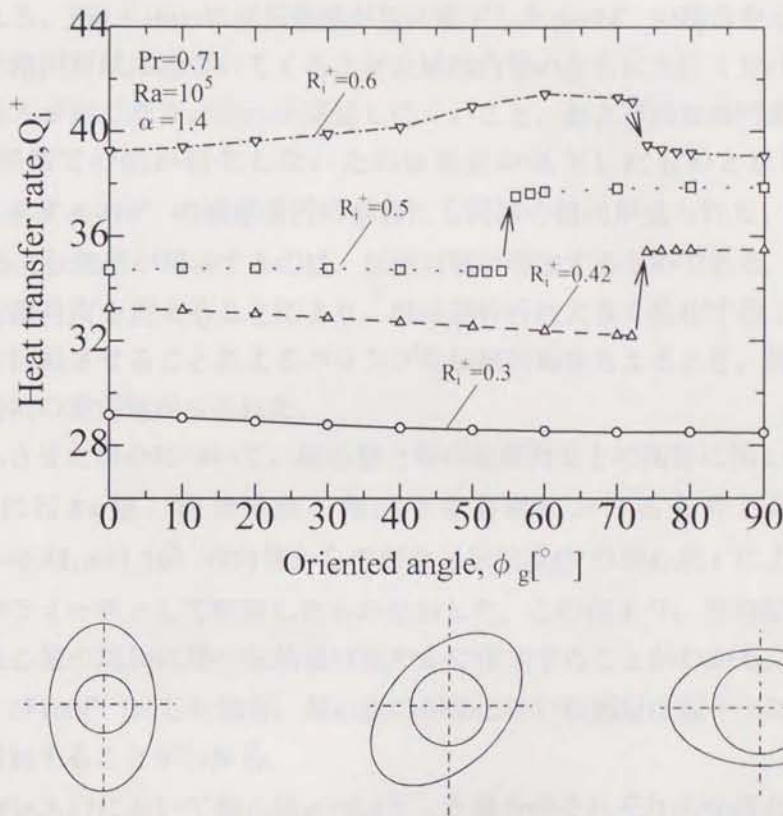


Fig.3.15 Variation of heat transfer rate
($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.4$)

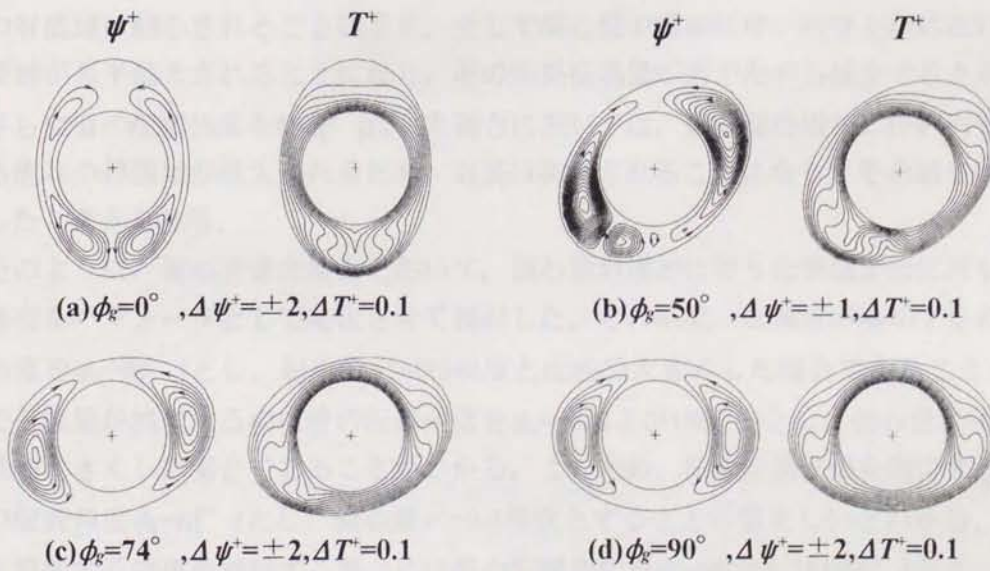


Fig.3.16 Stream lines and isotherms
($Pr=0.71, Ra=10^5, \alpha=1.4, R_i^+=0.6$)

ったと思われる。Fig.3.16(c)には伝熱量が急に低下した $\phi_k=74^\circ$ の場合を示した。 ϕ_k が大きくなり、横形楕円形状に近づいてくると対流域は内管の左右に大きく分けられ、重力方向の加熱面の長さが短くなり、流れが発達しにくいこと、および斜形楕円形状の場合に見られた内管下部側での渦が発生しないため伝熱量が低下したものと思われる。さらにFig.3.16(d)に示す $\phi_k=90^\circ$ の横形楕円の場合にも同様の傾向が見られた。また全体として R_i^+ が増加すると伝熱量が増加するのは、伝熱面積が増加するためである。このように内管半径および配置角度を変えることにより、熱伝達特性は大きく変化することが明らかになり、二重管を回転させることによるパッシブな伝熱制御を考えると、用途に合わせたパラメータの選択の重要性が示された。

次に、偏心させた場合について、偏心量と管の配置角度との関係に関して検討する。

Fig.3.17には Ra 数、内管半径、楕円率を実験における条件と同じくした場合($Ra=10^5, R_i^+=0.42, \alpha=1.16$)の内管からの無次元伝熱量 Q_i^+ の偏心量 ϵ^+ による変化を管の配置角度 ϕ_k をパラメータとして整理したものを示した。この図より、管の配置角度を 0°]にした場合、偏心量の増加に伴い伝熱量は緩やかに増加することがわかる。一方、管の配置角度を 90 および 180°]にした場合、偏心量の増加に伴い伝熱量は緩やかに減少し、その後若干ながら増加することがわかる。

Fig.3.18にFig.3.17において偏心量 $\epsilon^+=0.3$ とした場合のそれぞれの配置角度における流線および等温線を示した。管の配置角度を 0°]にした場合、偏心量の増加に伴い内管下部側の対流域が拡大するため伝熱量が増加したと考えられる。一方で管の配置角度を 90°]にした場合においては、偏心量の増加に伴い管の右側の対流域は拡大されることになるが、左側の対流域は縮小されることになる。そして偏心量の増加に伴い内管上部における流れの停滞域が若干拡大されることになり、その結果伝熱量が若干ながら減少すると考えられる。さらに管の配置角度を 180°]にした場合においては、偏心量の増加に伴い円管上部における流れの停滞域が拡大されるため、対流は抑制されることになり、その結果伝熱量が減少したと考えられる。

上記のように、偏心させた場合において、偏心量の増加に伴う伝熱量変化に対して管の配置角度をパラメータとして変化させて検討した。その結果、伝熱量が増加するのは管の配置角度を $\phi_k=0^\circ$]とし、偏心量 $\epsilon^+=0.3$ 程度と比較的大きくした場合であることがわかる。一方で伝熱量が減少するのは管の配置角度を $\phi_k=90$ および 180°]とし、偏心量 $\epsilon^+=0.35$ 程度と比較的大きくした場合であることがわかる。このため、伝熱促進効果を期待する場合には管の配置角度 $\phi_k=0^\circ$]とし、偏心量 $\epsilon^+=0.3$ 程度とすることが望ましいとわかる。一方で伝熱を抑制する効果を期待する場合には管の配置角度を $\phi_k=90$ および 180°]とし、偏心量 $\epsilon^+=0.3$ 程度とする事が考えられ、特に管の配置角度を $\phi_k=180^\circ$]とした場合の方が効果が

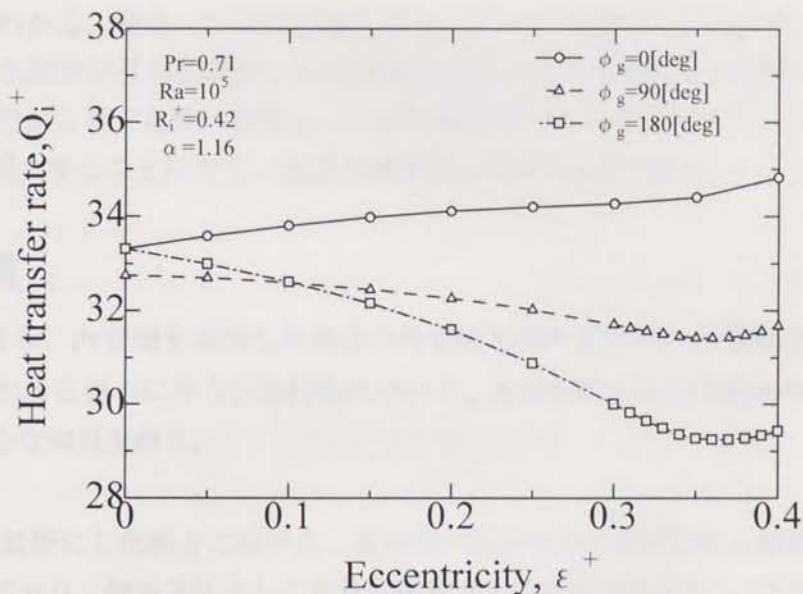


Fig.3.17 Heat transfer rate for various oriented angle by numerical calculation ($Pr=0.71, Ra=10^5, Ri^+=0.42, \alpha=1.16$)

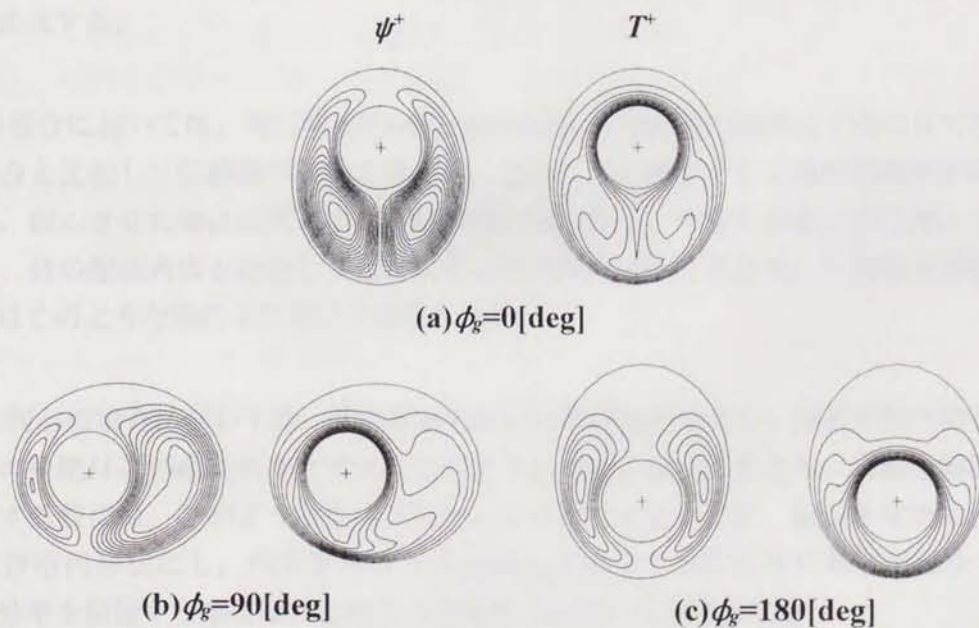


Fig. 3.18 Stream lines and isotherms for various oriented angle ($Ra=10^5, Ri^+=0.42, \alpha=1.16, \epsilon^+=0.3$) ($\Delta \psi^+=\pm 2, \Delta T^+=0.1$)

きくなることがわかる。また、いずれの場合においても、偏心量が $e^+ \geq 0.35$ と大きくなると、伝熱量が増加する傾向が見られたが、これは偏心に伴い内管と外管との距離が接近したため、局所的に温度勾配が大きくなり、結果として伝熱量が増大したものである。この場合、局所的に熱的負荷が増大することになり、実用上は好ましくないとされた。

3.5 結言

外管側を加熱し、内管側を冷却した場合の外管側を楕円形状管、内管側を円管として異なる配置角度における偏心に伴う伝熱特性について、数値解析および実験の両面から研究を行い、以下のような知見を得た。

- (1)外管を楕円形状管にした場合における二重管内の温度分布の実験結果と解析結果の比較は良い一致を示しており、解析手法として本数値解析は十分な妥当性を有している。
- (2)作動流体として、空気のように温度変化に対する密度変化が単調な流体を使用し、管形状を楕円管にした場合、同心の場合においては、内管半径が小さいとき外管の配置角度が増加しても伝熱特性はあまり変化しないが、内管半径が大きいとき外管の配置角度により伝熱特性は大きく変化する。
- (3)同心の場合においては、楕円率 α が $1.4 < \alpha < 1.6$ の範囲で横形楕円形状にすることで他の配置角度の場合と比較して伝熱量が増大するため、このような条件下で伝熱促進効果が期待できる。また、偏心させた場合に関しては、縦形楕円形状にし、内管を垂直上方に偏心させることにより、他の配置角度と比較して偏心に伴い伝熱量は増加するため、伝熱促進効果を期待する際にはこのような条件下において有効になる。
- (4)一方で同心の場合においては、楕円率を1.4あるいは1.6程度とし、斜め形楕円形状と横形楕円形状の中間付近の配置角度にすることにより伝熱量が減少するため、伝熱を抑制する効果を期待する際には、このような条件下において有効になる。また、偏心させた場合においては、縦形楕円形状にし、内管を垂直下方に偏心させることにより伝熱量が減少するため、伝熱抑制効果を期待する際には、このような条件下において有効になる。
- (5)外管を楕円形状管とし、偏心させた場合、その配置角度および偏心量の変化による伝熱量の変化は、外管を円管とし、偏心させた場合よりも大きくなる。そのため、管の配置角度および偏心量を変化させて伝熱制御を行う場合には円管の場合よりも有利になる。

参考文献

- (1)U. Grigull and W. Hauf, "Natural convection in horizontal cylindrical Annuli", Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf. (1966) 182-195.
- (2)R. E. Powe, C. T. Carley and E. H. Bishop, "Free convection flow pattern in cylindrical annuli", Journal of Heat Transfer, **91** (1969) 310-314.
- (3)T. H. Kuehn and R. J. Goldstein, "An experimental and theoretical study of natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders", J.Fluid Mech., **74-4** (1976) 695-719.
- (4)T. H. Kuehn and R. J. Goldstein, "An experimental study of natural convection heat transfer in concentric and eccentric horizontal cylindrical annuli", Journal of Heat transfer, **100** (1978) 635-640.
- (5)Jun Young Cho and Moon-Uen Kim, "Three-dimensional linear stability of natural convection flow between concentric horizontal cylinders", J.Heat Mass Transfer, **36 - 17** (1993) 4173-4180.
- (6)C. J. Ho and Y. H. Lin, "Natural convection heat transfer of cold water within an eccentric horizontal cylindrical annulus", Journal of Heat Transfer, **110** (1988) 894-900.
- (7)関 信弘, "蓄熱工学 1基礎編", 森北出版 (1995) 215-217.
- (8)関 信弘, "蓄熱工学 2応用編", 森北出版 (1995) 13-41.
- (9)廣瀬 宏一, 齊藤 二三, 大内 雅樹, "二重円管内の自然対流熱伝達の研究 (対称軸上での偏心による伝熱促進効果)", 日本機械学会論文集(B編), **60-575** (1994) 2511-2517.
- (10)廣瀬 宏一, 齊藤 二三, 大内 雅樹, "水平同心2重楕円管内の自然対流熱伝達の研究", 岩手大学工学部研究報告, **45** (1992) 27-34.
- (11)Chin-Hsiang Cheng and Chih-Chung Chao, "Numerical prediction of the buoyancy-driven flow in the annulus elliptical cylinders", Numer. Heat Transfer(Part A), **30** (1996) 283-303.