

外管加熱・内管冷却の場合における偏心した水平二重円管内の 自然対流熱伝達特性*

廣瀬 宏一^{*1}, 八戸 俊貴^{*2}, 大内 雅樹^{*3}

Characteristics of Natural Convection Heat Transfer in a Horizontal Cylindrical Eccentric Annuli for Heated Outer Tube and Cooled Inner Tube

Koichi HIROSE, Toshitaka HACHINOHE and Masaki OUCHI

This study was researched by a numerical analysis and experiment, on a natural convection heat transfer in a horizontal cylindrical eccentric annuli, which heated outer tube and cooled inner tube. The inner tube shifted to vertical upper side, slant upper side 45 degrees, horizontal side, slant lower side 45 degrees and vertical lower side, respectively. The numerical analysis was performed by changing the shift direction, eccentricity and Rayleigh number as parameters. Results obtained for different conditions are presented as temperature profiles, flow patterns, local Nusselt number and total heat transfer. It was presented that the heat transfer enhancement effect or heat transfer obstruction effect on the total heat transfer were affected by shift direction and eccentricity.

Key Words: Natural Convection, Eccentric Annuli, Heat Transfer, Numerical Analysis and Experiment

1. 緒 言

内管と外管を有する二重円管内の自然対流熱伝達は、熱交換器や様々な蓄熱システムにおいて現れてくる伝熱形態であり、容器内の自然対流熱伝達の基本となるものの一つである。二重円管内の自然対流熱伝達に関する研究は、実験及び数値解析により従来から数多く行われている^{(1)~(4)}が、従来の研究の大半は同心二重円管内の自然対流熱伝達を対象としており、偏心を考慮したものは少なく⁽⁵⁾、熱的には内管側を加熱し、外管側を冷却する場合を主としている。しかし、近年の冷房需要に対して、適当な融点を持つ相変化物質をパイプ内に封入しブラインドのように利用して熱負荷の平準化をはかるものや各種の水蓄熱装置の冷房運転モード時において外管側を加熱し、内管側を冷却する状況も多く出現しているものと考えられるが、こうした加熱条件における伝熱特性の研究はほとんど見あたらないのが現状である⁽⁶⁾。さらに二重円管相互の偏心に伴う伝熱特性の変化を明らかにする事は動力を用いない伝熱制御技術という観点においても基礎的な意

義を有するものと考えられる。

こうした観点に立ち、本研究においては重力方向を下向きにとり、作動流体を空気として、外管を加熱し、内管を冷却した場合の二重円管内の自然対流熱伝達について、内管を外管に対し相対的に垂直上方、斜め上方、水平、斜め下方、および垂直下方に偏心させ、実験ならびに数値解析を行い、偏心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。

記 号 表

α	: 温度伝導率	[m ² /s]
$B(\phi)$: 外管形状関数	
$F(\phi)$: 内管形状関数	
g	: 重力加速度	[m/s ²]
h	: 熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
\bar{k}_{eq}	: 平均等価熱伝導率	
L	: 液層厚さ ($L = R_o - R_i$)	[m]
Q	: 伝熱量	[J]
R	: 半径	[m]
r	: 半径方向距離	[m]

* 原稿受付 1997年10月20日.

^{*1} 正員, 岩手大学工学部(☎020-8551 盛岡市上田4-3-5).

^{*2} 正員, 岩手大学大学院.

^{*3} 正員, 鳥羽商船工業高等専門学校(☎517-8501 鳥羽市池上町1-1).

T	: 温度	[K]
t	: 時間	[s]
u, v	: r, ϕ 方向の速度	[m/s]
β	: 体膨張係数	[1/K]
ε	: 偏心量	[m]
η	: 独立変数	
λ	: 熱伝導率	[W/(m·K)]
ν	: 動粘性係数	[m ² /s]
ψ	: 流線関数	
Ω	: 渦度	
ϕ	: 角度	[deg]
ϕ_*	: 内管の偏心方向角度	[deg]
Nu	: ヌセルト数, $Nu = 2hR/a$	
Pr	: プラントル数, $Pr = \nu/\alpha$	
Ra	: レイリー数, $Ra = g\beta(T_o - T_i)(R_o)^3/(\alpha \nu)$	

$$Ra_i = g\beta(T_o - T_i)L^3/(\alpha \nu)$$

添字

+	: 無次元量
i	: 内管側
o	: 外管側
w	: 管壁

2. 数 値 解 析

本研究で用いた主な記号を記号表に示し、物理モデル及び座標系を図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、内管の偏心方向を表す角度 ϕ_* は内管の垂直上方から反時計回りにとった。さらに内管の中心と外管の中心との距離を偏心量 ε とし、内管の半径を R_i 、外管の半径を R_o 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、物理的には重力方向を下向きとして外管側を加熱、内管側を冷却した場合を想定した。解析を進めるにあたり次の仮定を用いた。

(i) 流れは層流である。

(ii) α , ν および λ などの物性値は一定である。

(iii) Boussinesq 近似が成立する。

本研究で用いた、無次元変数及び無次元化した基礎方程式を以下に示した。

無次元変数：

$$\begin{aligned} t^* &= \frac{\alpha t}{(R_o)^2} & r^* &= \frac{r}{R_o} & u^* &= \frac{u R_o}{\alpha} & v^* &= \frac{v R_o}{\alpha} \\ \phi^* &= \frac{\phi}{2\pi} & T^* &= \frac{T - T_i}{T_o - T_i} & \Omega^* &= \frac{\Omega (R_o)^2}{\alpha} & \psi^* &= \frac{\psi}{\alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

$$B^*(\phi) = \frac{B(\phi)}{R_o} \quad F^*(\phi) = \frac{F(\phi)}{R_o} \quad \phi_*^* = \frac{\phi_*}{2\pi}$$

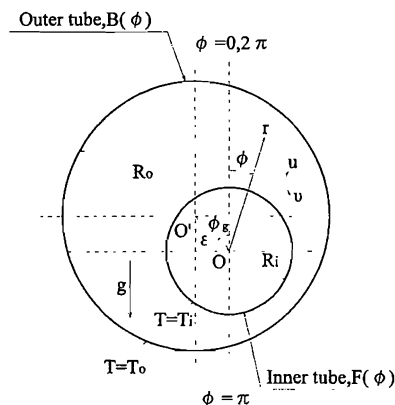


Fig.1 Physical model and coordinate system

無次元化した基礎方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega^*}{\partial t^*} + \frac{1}{2\pi r^*} \frac{\partial \eta^*}{\partial r^*} \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial \phi^*} \frac{\partial \Omega^*}{\partial r^*} - \frac{\partial \psi^*}{\partial r^*} \frac{\partial \Omega^*}{\partial \phi^*} \right) \\ = Pr \nabla^2 \Omega^* - Pr Ra \left[\frac{\cos(2\pi \phi^*)}{2\pi r^*} \left(\frac{\partial T^*}{\partial \eta^*} \frac{\partial \eta^*}{\partial \phi^*} + \frac{\partial T^*}{\partial \phi^*} \right) \right. \\ \left. + \sin(2\pi \phi^*) \left(\frac{\partial T^*}{\partial \eta^*} \frac{\partial \eta^*}{\partial r^*} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + \frac{1}{2\pi r^*} \frac{\partial \eta^*}{\partial r^*} \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial \phi^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} - \frac{\partial \psi^*}{\partial r^*} \frac{\partial T^*}{\partial \phi^*} \right) = \nabla^2 T^* \quad (3)$$

$$\Omega^* = -\nabla^2 \psi^* \quad (4)$$

なお、偏心に伴う境界面の位置の変化に対応するため、境界固定法を導入し、内管の形状関数を $F(\phi)$ 、外管の形状関数を $B(\phi)$ とした。式(2)～(3)中での η^* は境界固定法を用いるための独立変数であり、式(5)のように定義した。

$$\eta^* = \frac{r^* - F^*(\phi)}{B^*(\phi) - F^*(\phi)} \quad (5)$$

また解析における初期条件及び境界条件は以下のようにした。

$$t^* = 0 \quad ; \quad T^* = \psi^* = \Omega^* = 0 \quad (6)$$

$$\phi^* = 0, 1 \quad ; \quad T^*|_{\phi^*=0} = T^*|_{\phi^*=1}$$

$$\psi^*|_{\phi^*=0} = \psi^*|_{\phi^*=1}$$

$$\Omega^*|_{\phi^*=0} = \Omega^*|_{\phi^*=1} \quad (7)$$

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

$$\eta^* = 1 \quad , \quad T^* = 1, \quad \psi^* = \frac{\partial \psi^*}{\partial \eta^*} = 0, \quad \Omega^* = \Omega_{w,o}^*$$

数値解析には、差分法を用い、全周計算を行った。対流項には二次精度風上差分を用い、流線関数の計算にはSOR法を用

いた。計算終了における収束判定値Sには次式を用いた。

$$S = \frac{|\xi_{i,j}|^{n+1} - |\xi_{i,j}|^n}{|\xi_{i,j}|_{\max}^{n+1}} \cdot \dots \cdot (8)$$

式(8)において、 $\xi_{i,j}$ はそれぞれ温度、流線関数、渦度に相当し、収束判定値 S が $S \leq O(\Delta t)$ を満足した場合に収束したと判断した。

結果の整理に用いた局所 Nu 数、伝熱量はそれぞれ式(9)、式(10)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。

$$Nu_i = 2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_i} \dots \dots \dots (9)$$

$$Q_i = \oint_F \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \Big|_{r=r^*} ds \dots \dots \dots (10)$$

流れは層流であるとした仮定について、内管側を加熱し、外管側を冷却したKuehn and Goldsteinによる水平同心二重円管の自然対流熱伝達の研究¹⁾を用いて検討した。本解析で用いた Ra 数をKuehnらによる液層厚さを基準長さとする Ra_i で再評価した場合、層流として整理された Ra_i の範囲内にあり、外管加熱、内管冷却という加熱条件の相違、および偏心に伴う対流域の増減を考慮しても流れは層流であるとする仮定は十分成立していると判断した。

数値解析において、内管半径を $R_i^*=0.5$ と固定し、 Ra 数に関しては $Ra=5\times 10^4, 10^5, 5\times 10^5$ の3種類、内管の偏心方向角度 ϕ_i^* に関しては、 $\phi_i^*=0.5, 0.375, 0.25, 0.125, 0$ の5種類、偏心量 e^* に関しては、 $e^*=0\sim 0.4$ までを主に0.05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、計算における分割数は $n_r \times n_\phi = 30 \times 60$ 分割とした。分割数の採用においては $20 \times 40, 30 \times 60, 40 \times 80$ と変化させて計算を行い、 $30 \times 60, 40 \times 80$ 分割の場合にKuehnら⁽²⁾の実験結果とよく一致したため、計算効率が良い 30×60 分割を採用した。時間刻み Δt^* は、 $\Delta t^*=1.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-5}$ までを必要に応じて使い分けた。

3. 実験

実験装置の概略図を図2に示した。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)によって熱媒体の温度を所定の温度とし、恒温水槽⑦を用いることによってさらに水槽内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。熱電対移動装置②(読みとり顕微鏡, 位置精度0.1mm)によって熱電対を移動させ、データロガー④(ADVANTEST TR2724)によって内部の温度場を測定した。管壁温度測定用の熱電対は、外管側は外管の内面に、内管側は内管の表面に取り付けた。

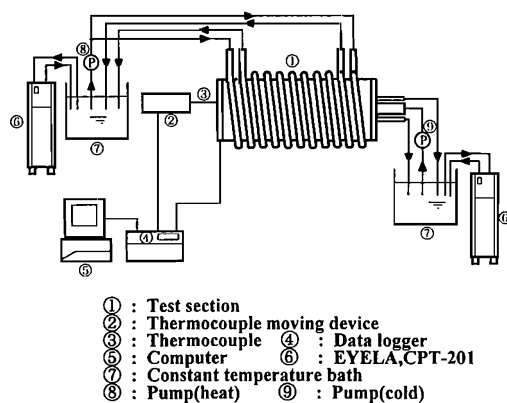


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

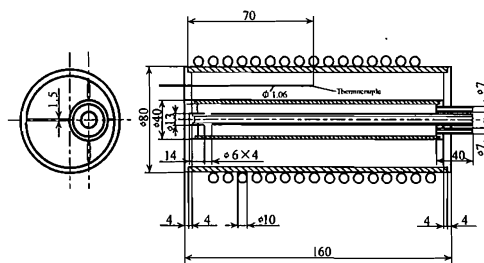


Fig.3 Details of test section

図3には供試二重円管の詳細図を示した。図に示すように、外管側は外径 $\phi 80[\text{mm}]$ 、肉厚 $3[\text{mm}]$ の銅管の外側に $\phi 10[\text{mm}]$ の銅パイプを二重らせんを描くように巻き付けてハンダ付けした。加熱用の熱媒体は互いに逆方向に流れるようになっており、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、中心に通した $\phi 13[\text{mm}]$ の亚克力パイプの先端部にあけた $\phi 6[\text{mm}]$ の4個の穴から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 $\phi 7[\text{mm}]$ のアルミパイプから流出させた。

管壁温度測定用の熱電対は、外管および内管とも周方向に8点、軸方向に2点配置した。測定には素線径0.2[mm]のT型熱電対（銅-コンスタンタン）を用いた。二重円管内部の温度測定用として前面の亚克力窓には角度90°ごとに幅1.5[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た。また内部温度測定用の熱電対はφ1.06[mm]のステンレスパイプの中を通し、読みとり顕微鏡に取り付けた保持装置に固定し移動させながら内部の温度分布を測定した。加熱、冷却用の熱媒体を試験部に約2〜3時間循環させ、外管及び内管において周方向、軸方向とも設定した管壁温度で一樣になったことを確認した後実験を行った。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。実験における偏心量は $\varepsilon=7 \times 10^{-3}[\text{m}]$ とし、外管側の温度 $T_o=40[^\circ\text{C}]$ 、内管側の温度 $T_i=21[^\circ\text{C}]$ と固定し $Ra=9 \times 10^4$ とした。偏心方向は、垂直上方、水平、垂直下方とした。

4. 結果及び考察

まず、本数値解析法の妥当性を調べる目的で内管加熱、外管冷却という加熱条件の場合の代表的な研究である同心二重円管内の自然対流熱伝達に関するKuehn and Goldstein⁽²⁾の数値解析結果との比較を行った。図4(a)にはKuehn and Goldsteinによる数値解析結果を示し、図4(b)に本数値解析結果を示した。 $Ra_L=10^3$ 及び 5×10^4 のそれぞれの場合における流線及び等温線の比較から両者には非常に良い一致が見られた。さらに外管側を加熱し、内管側を冷却した場合について、内管をそれぞれ垂直上方、水平、垂直下方に偏心させて実験を行い、二重円管内部の温度場を測定し、数値解析によって得られた温度分布と比較した。結果の比較のため、実験結果は無次元温度 T^* および無次元の独立変数 η^* を用いて整理した。

図5(a),(b),(c)には $Pr=0.71, Ra=9 \times 10^4$ とし、それぞれ内管を垂直上方、水平、垂直下方に偏心した場合の実験及び数値解析による温度分布の比較を示した。各図において、点は実験結果を表し、各種の線分で計算結果を示した。実験による温度測定は円管中心に対

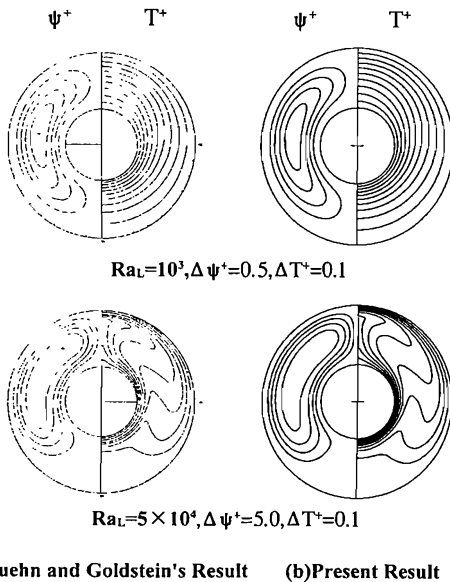
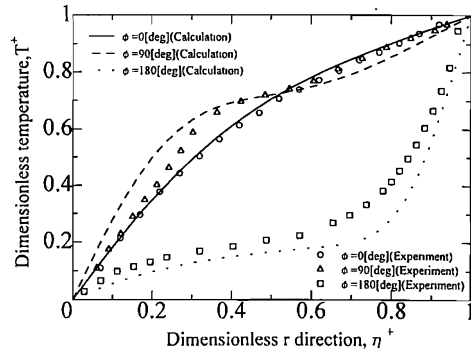
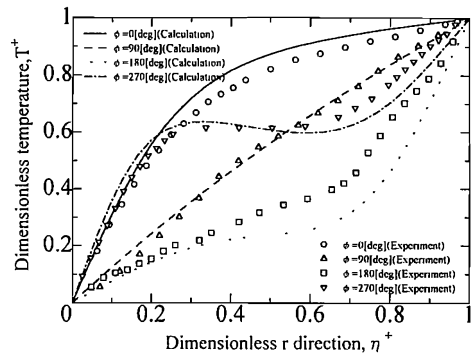


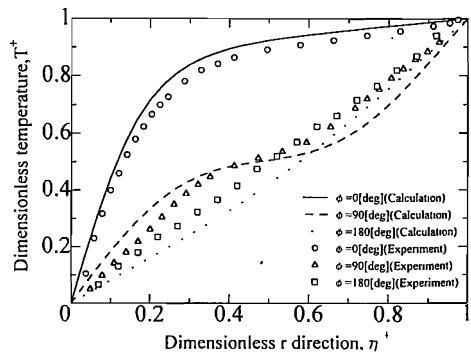
Fig.4 Comparison between Kuehn and Goldstein's result and present result ($Pr=0.706, Ri^*=0.385$)



(a) In the case of eccentricity to a vertical upper side($\phi_g^+=0.5$)



(b) In the case of eccentricity to a horizontal side($\phi_g^+=0.25$)



(c) In the case of eccentricity to a vertical lower side($\phi_g^+=0$)

Fig.5 Dimensionless temperature distribution ($Pr=0.71, Ra=9 \times 10^4, Ri^*=0.54, \varepsilon^*=0.189$)

して垂直上方から時計回りに 90° 毎に行った。図中に用いた η^* は式(5)によって定義した無次元変数であり、 $\eta^*=0$ で内管表面を、 $\eta^*=1$ で外管表面を表す。図5(a),(b),(c)から、数値解析による温度分布と実験による温度分布は、内管の偏心方向に関わらず定性的に良く一致していることがわかった。また水平方向偏心の場合を示した図5(b)では、 180° 方向において実験結果と数値解析結果に若干の差が見られた。これは水平方向偏心の場合、内管からの下降流のため温度測定が困難であり解析結果との間に差が出たものと思われた。

実験結果および数値解析結果の全体的な一致から、数値解析は重力方向が下向きの場合の外管加熱、内管冷却という加熱条件においても妥当であると判断した。これらをふまえて、本数値解析を用い偏心方向による伝熱特性の変化を調べた。主に偏心方向 ϕ_k^* および偏心量 ε^* の変化による影響を調べることが目的としたため、 $Ra=5 \times 10^5$ 、 $R_i^*=0.5$ と固定し、 ϕ_k^* 、および ε^* をパラメータとして変化させて計算を行った。

まず対比のため $\varepsilon^*=0$ とした同心二重円管の場合の流線及び等温線を図6に示した。さらに ϕ_k^* の変化による影響が顕著な場合として $R_i^*=0.5$ 、 $Ra=5 \times 10^5$ 、 $\varepsilon^*=0.4$ の場合の数値解析による流線および等温線を図7に示した。図7(a)～(e)において ϕ_k^* は内管の相対的な偏心方向を示しており、それぞれ内管を垂直上方($\phi_k^*=0.5$)、斜め上方 45° ($\phi_k^*=0.375$)、水平($\phi_k^*=0.25$)、斜め下方 45° ($\phi_k^*=0.125$)、および垂直下方($\phi_k^*=0$)に偏心した場合のものを示した。図6および図7(a)～(e)において左側の図は流線、右側の図は等温線を示し、 $\Delta\psi^*=3$ 、 $\Delta T^*=0.1$ とし、同じ値を用いて表現した。図7(a)から内管を上方に偏心させた場合、管内全体に対流域が広がり流れが強くなり大きな循環流が発生していることがわかった。図7(b),(c),(d)のように斜め方向および水平方向に偏心させた場合、流れ場、温度場とも左右非対称となり、下降流の傾きが見られた。さらに図7(c)においては偏心に伴い内管の右側で内外管の距離が狭まり、内管右側の渦が上下に分割されるような様子が見られた。また図7(d)から斜め下方に偏心させた場合、内管下部側に小さな渦が発生していることがわかった。これは外管加熱、内管冷却のため内管下部では下部加熱、上部冷却となり、密度的には上部が重く、下部が軽くなるという不安定状態によるものである。しかし、図7(e)では図7(d)で見られた内管下部の渦は見られなかった。これは垂直下方への偏心によって下部側の熱的不安定領域が狭められ、渦の発生が妨げられたためと考えられた。また、内管の上部側には安定した温度成層領域が広がり、全体的に対流領域が小さくなり、流れが弱まっていることがわかった。

図8には図7(a)～(e)の条件における内管周りの局所 Nu 数分布を偏心方向角度 ϕ_k^* をパラメータとして整理したものを示した。偏心方向によっては局所 Nu_i^* 分布が非対称になることに加え、下部側の渦の発生などから分布はかなり複雑なものとなった。全体的には内管下部で下降流が発生する部分における局所 Nu_i^*

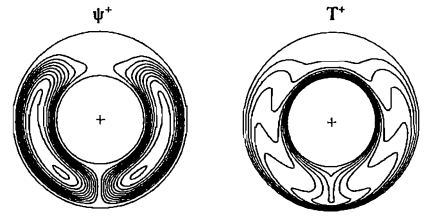


Fig.6 Streamlines and isotherms for concentric cylinder ($Pr=0.71$, $Ra=5 \times 10^5$, $R_i^*=0.5$, $\varepsilon^*=0$)

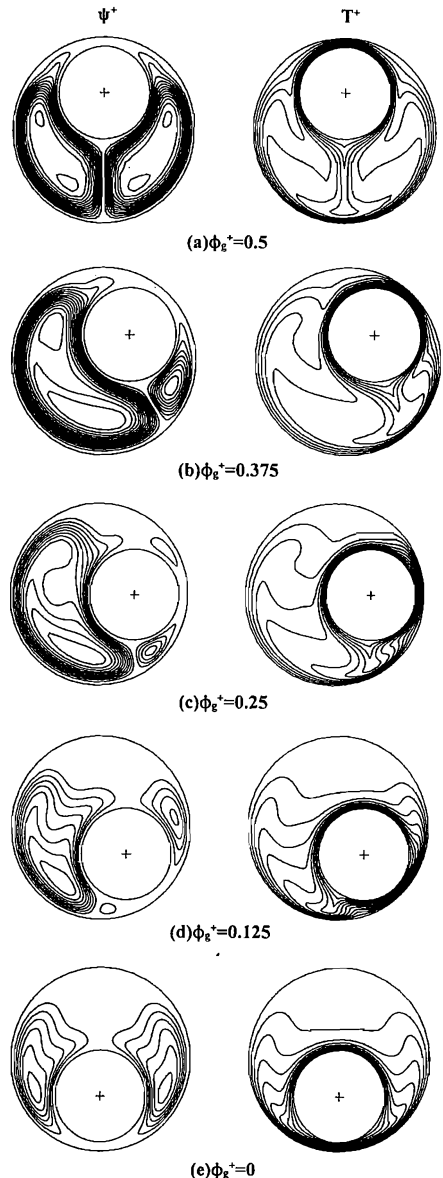


Fig.7 Streamlines and isotherms for eccentric annuli ($Pr=0.71$, $Ra=5 \times 10^5$, $R_i^*=0.5$, $\varepsilon^*=0.4$)

の低下および偏心によって内管と外管とが接近する部分における局所 Nu_i^* の増加という傾向が見られた。また、斜め下方偏心において内管下部側の渦が発生している部分で局所 Nu_i^* が急激に増大する傾向が見られた。

図9には $Pr=0.71, Ra=5 \times 10^5, R_i^*=0.5$ とした時の内管からの無次元伝熱量 Q_i^* の偏心量 ε^* による変化を偏心方向 ϕ_x^* をパラメータとして整理したものを示した。上方または斜め上方偏心の場合、偏心量の増加に伴い無次元伝熱量の増加が見られたこと、特に斜め上方偏心の場合には若干ではあるが極大値を有する様な分布となることがわかった。また水平方向偏心の場合、 $\varepsilon^* \leq 0.1$ 程度までは無次元伝熱量に大きな変化はないが、それを越えると徐々に減少しはじめ、偏心量の増加が熱移動を妨げることがわかった。さらに斜め下方および垂直下方偏心においては偏心量の増加に伴い伝熱量は一樣に減少してゆくが、 $\phi_x^* = 0.125$ の場合、 $\varepsilon^* \sim 0.3 \sim 0.35$ において、また $\phi_x^* = 0$ の場合、 $\varepsilon^* \sim 0.15 \sim 0.3$ 付近において無次元伝熱量 Q_i^* が急激に増加する領域が見られた。これは図7(d)に示したように内管下部側に熱的不安定による2次渦が発生した領域に相当し、こうした渦の発生により伝熱量が急激に増大することがわかった。また、偏心量が $\varepsilon^* \geq 0.3 \sim 0.35$ と大きくなると、無次元伝熱量 Q_i^* の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、結果として無次元伝熱量 Q_i^* が増大したものである。この場合、局所的に熱的負担が増大することになり、実用上は望ましくないとされた。

これから、外管加熱、内管冷却という加熱条件において円管の上半部への偏心は若干の伝熱促進が期待できること、下半部への偏心は2次渦の発生を伴う場合には大きな伝熱促進が期待できるが、2次渦の発生のない場合には伝熱を抑制することなどがわかった。

図9に示した無次元伝熱量 Q_i^* を平均等価熱伝導率 \bar{k}_{eq} を用いて整理した。 \bar{k}_{eq} は数値解析から得られた無次元伝熱量 Q_i^* をHahneら⁽⁷⁾によって示された形状係数を用いて、二重管の配置が同じ場合の熱伝導のみによる伝熱量に対する比の形で表現したものであり、熱移動に対する熱伝達の影響の大きさを表すものである。

図10には平均等価熱伝導率 \bar{k}_{eq} の偏心量 ε^* による変化を偏心方向 ϕ_x^* をパラメータとして変化させたものを示した。図10から上半部側への偏心の場合、 \bar{k}_{eq} は ε^* の増加に伴って若干ではあるが極大値を有し、その後単調に減少していることがわかった。これは二重円管内の熱移動に対する対流の影響が内管の上半部側への偏心においては同心から若干ずれた $\varepsilon^* \sim 0.035$ 付近で

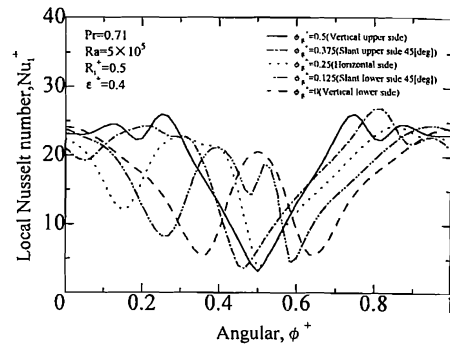


Fig.8 Variation of local Nusselt number profiles for various shift direction ($Pr=0.71, Ra=5 \times 10^5, R_i^*=0.5, \varepsilon^*=0.4$)

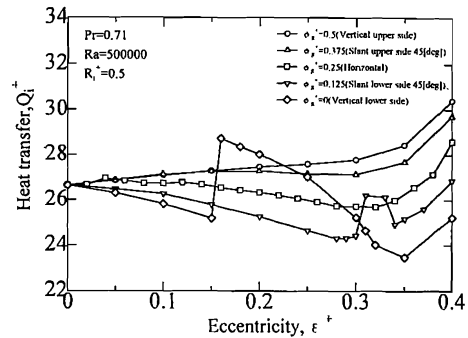


Fig.9 Variation of heat transfer profiles for various shift direction ($Pr=0.71, Ra=5 \times 10^5, R_i^*=0.5$)

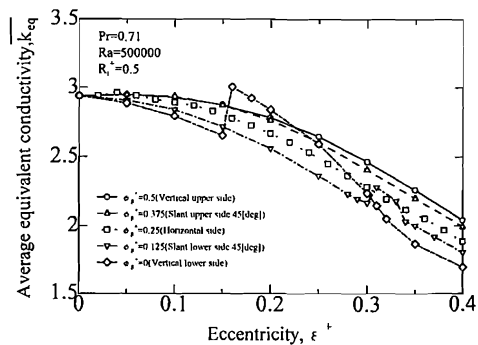


Fig.10 Variation of average equivalent conductivity profiles for various shift direction ($Pr=0.71, Ra=5 \times 10^5, R_i^*=0.5$)

極大となることを意味している。また斜め方向も含め、下半部側への偏心の場合は $\varepsilon^*=0$ の同心の状態から単調に減少しており、対流の効果が期待できないことを示している。下半部への偏心における ε^* の増加に伴う \bar{k}_{eq} の急激な増加は前述したように2次的な渦の発生によるものであり、下半部への偏心の場合、こうした

2次渦の発生を積極的に利用することが重要となることがわかった。このような偏心方向および偏心量による k_{eq} の変化は伝熱促進または伝熱抑制効果という点において、動力を用いないパッシブ型の伝熱制御技術の可能性を示すものとして重要であると思われた。

5. 結 言

重力方向を下向きとして、外管側を加熱し、内管側を冷却した場合の内管の偏心に伴う二重円管内の自然対流熱伝達特性について、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)内管側を加熱、外管側を冷却した同心二重円管についてのKuehnらの結果との比較、および外管側を加熱、内管側を冷却した偏心二重円管の実験結果との比較において、本数値解析はよい一致を示しており、解析手法として十分な妥当性を有している。

(2)外管加熱、内管冷却の場合、内管の上半部側への偏心は若干ではあるが伝熱を促進する効果があり、下半部側への偏心は逆に抑制する効果がある。こうした偏心に伴う伝熱促進や伝熱抑制効果の存在は動力を用いないパッシブな伝熱制御技術の可能性を示すものとして意味がある。

(3)上半部側への偏心において、ある偏心量で極大値を有しており、偏心量の最適値が存在すること、また下半部側への偏心の場合、偏心量によって内管下部側で熱的不安定による2次渦が発生する場合があります、これによって伝熱量が急激に増大する領域がある。

参 考 文 献

- (1)R.E.Powe,C.T.Carley,E.H.Bishop,J.Heat Transfer,67(1969),310-314.
- (2)T.H.Kuehn,R.J.Goldstein,J.Heat Transfer,74(1976),695-719.
- (3)T.H.Kuehn,R.J.Goldstein,J.Heat Transfer,100(1978),635-640.
- (4)C.H.Cho,K.S.Chang,K.H.Park,J.Heat Transfer,104(1982),624-630.
- (5)C.J.Ho,Y.H.Lin,J.Heat Transfer,110(1988),894-900.
- (6)廣瀬 宏一ほか2名,機論60-575,B(1994),2511-2517.
- (7)E.Hahne and Grigull,Int.J.Heat Mass Transfer,18,(1975),751-767.