

## 偏心二重直管および曲管形状の熱交換器における流動と熱伝達に関する研究

著者	渡邊 裕
号	635
発行年	1977
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9371">http://hdl.handle.net/10097/9371</a>

氏 名	わた なべ ゆたか 渡 邊 裕
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	偏心二重直管および曲管形状の熱交換器における流 動と熱伝達に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 武山 斌郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 武山 斌郎      東北大学教授 弓削 達雄 東北大学教授 大塚 芳郎

## 論 文 内 容 要 旨

二重管型熱交換器では，内管と外管の間の環状部分を流体が流れ，主に内管からの伝熱に主眼がおかれる。したがって強制対流による高熱伝達率を期待できる反面，流路抵抗が増大するという経済的理由から，特殊用途以外にはあまり多用されることはなかった。

しかしながら，BWR型原子炉の燃料棒まわりの伝熱のより効率的な問題に関連して，二重管モデルの熱交換器に関する研究が熱心におこなわれるようになってきた。ところが，これら多数の研究例は同心状二重直管に限定されており，内外管の偏心の影響を考察したものは，わずか数編にとどまる。しかも熱伝達特性についての統一された見解を得るにはいたっていない。

本論文はこの熱伝達の問題を実験的に考察し，内外管の偏心による流れ場と熱伝達の関係明らかにし，さらに，過去においてまったく研究例のない曲管形状の二重管における熱伝達特性問題をも実験的に考察しようとするものである。すなわち，これらは，今後開発されるであろう偏

心二重曲管型熱交換器について一つの指針を与え、曲りによる二次流れや速度分布偏倚と内外管の偏心の影響が、熱伝達特性とどのように結びついているかを考察することを目的としている。

本研究においてそのすべての特性が明らかにされたとは言えないが、今後の研究に有効な指針を与え得たと確信するものである。

また、偏心二重曲管型の熱交換器を、直接BWR型原子炉内のリアクター形状として応用するならば、かなり有効であることが示され、曲管形状に付随する製作の困難さを上回る利点が存在するものと思われる。

以下各章を要約する。

## 第1章 序 論

二重管型熱交換器に関する従来の研究結果を概説し、その問題点を指摘すると同時に、本研究の必要性を述べた。

## 第2章 偏心二重直管内の熱伝達特性

二重管型熱交換器において内外管の偏心の影響は未知なる点が多い。これは二重直管において、同心状のものが最良であるという通念から、この種の積極的研究が皆無に等しいためである。しかしながら、元来、二重円管はすべて偏心しており、その特殊な場合として同心状のものが存在すると考えることも可能であろう。本章では、偏心二重直管内乱流での詳細な流れ場と、流れ方向の静圧勾配より管摩擦係数を測定し、さらに、その結果を、外管断熱・内管熱流束一定の条件での加熱実験に対比させ考察を加えている。

実験は外管内径 ( $d_1$ )、38.4 mm に対して、内管外径 ( $d_2$ ) を 16.0, 20.0, 25.0 mm の三種類に変化させ管径比 ( $\bar{r}_0$ ) の影響も合わせて考察している。また作動流体には、水および空気を用いている。

内管の偏心は同心状から内外管接触まで数種類に変化させている。また、管路断面内の速度分布を測定し、この速度分布より内外管壁面上の局所剪断応力分布を求め、レイノルズのアナロジの簡単な仮説により、局所熱伝達率分布を推測した。その結果は加熱実験と比較的良好な一致をみている。とくに、同心状の場合には、この方法より求めた熱伝達の整理式は十分に実測値を整理し得るものであった。

以下、実験結果を紹介する。

〔圧力損失特性〕

偏心二重直管内の圧力損失特性を、外管壁に設置した静圧測定孔による管軸方向静圧勾配から得られる管摩擦係数 ( $\lambda_s$ ) により表示する。この場合代表長さには等価直径 ( $De = d_1 - d_2$ ) を用

いる。結果は次の(1)式によって示される。

$$\lambda_s = 0.348 \left(1 - \frac{e^2}{4}\right) \text{Re}^{-0.25} \quad (1)$$

$$(7 \times 10^3 < \text{Re} < 8 \times 10^4, 1.5 < \bar{r}_0)$$

$e$  は偏心率であり、 $\delta$  を偏心量とすれば、 $e = 2\delta / (d_1 - d_2)$ 、また、 $\bar{r}_0$  は内外管の管径比であり、 $\bar{r}_0 = d_1 / d_2$  となる。

(1)式は本実験結果を±4%の誤差範囲で包括するものである。とくに、同心状の場合には、ブラジウス式より10%過大であり、通常用いられる同心状二重直管の管摩擦係数式より2%過大であった。(1)式中には管径比 $\bar{r}_0$ の影響が含まれていないことが特徴であり、偏心の影響は偏心率の関数によってのみ示されることがわかる。偏心率の増加にともない管摩擦係数は減少しているが、これは壁面の影響を受けることの少ない流域面積が増大し、そこを多くの流体が流れ、いわゆる素通り効果によるためであると説明できる。

#### 〔偏心二重直管内速度分布〕

全圧法により管内の速度分布を測定し、偏心による素通り効果を明らかにした。また、管内の速度分布を平均流速にて無次元化すると、その分布状況は流速によらず、ほぼ同一であることが示された。

#### 〔熱伝達特性〕

内管表面上に厚さ30 $\mu$ のステンレス箔を均一に巻きつけ直流電源により通電し熱流束一定の加熱実験を試みた。加熱開始点より約400mm下流で箔下にアルメルクロメル熱電対を周方向に等間隔に埋めこみ局所表面温度を測定し局所および平均の熱伝達率を算出している。作動流体は空気であるが、テスト部での主流混合温度が室温より3°C以上高くないようにした。また、加熱部内管表面温度は主流温度より10°C以上高くないように制御して、熱膨張による極端な流速変化を防いでいる。

実験に先立ち、管内速度分布より得た局所壁面剪断応力とレイノルズのアナログによる簡単な仮説より、局所熱伝達率がある程度推測できることを示した。とくに、同心状の時に得られた次式は実験結果を十分に整理し得るものであった。

$$\bar{Nu} = 0.022 (\bar{r}_0)^{0.1} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.5} \quad (2)$$

実験は、 $2 \times 10^4 < \text{Re} < 8 \times 10^4$  の範囲で、内管径を三種類に変化させておこなっている。同心状の場合には、(2)式により整理できるが、偏心を与えた場合には、その影響は管径比 $\bar{r}_0$ により異なり、本実験範囲では平均ヌセルト数は次の実験式により整理された。

$$\bar{Nu} = 0.022 (\bar{r}_0)^{0.1} \left[1 - 1.2 \left(\frac{e}{\bar{r}_0}\right)^2\right] \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.5} \quad (3)$$

$$(2 \times 10^4 < \text{Re} < 8 \times 10^4)$$

(3)式は最大6%の誤差をとまうが、(1)式とは異なり( $\bar{r}_0$ )の影響が顕著であることが特徴である。

すなわち内管径が大きくなり、管径比が1に近づくほど、偏心による平均ヌセルト数の減少は急激となる。(1), (3)式を比較してみれば、本実験での管径比範囲 ( $1.5 < \bar{r}_0 < 2.4$ ) では、同心状のものが最良であり、とくに内管径の太いものは製作に注意を要することがわかる。

### 第3章 偏心二重曲管内の熱伝達特性

本章は過去において、まったく研究例を知見することのできなかつた二重曲管型熱交換器について一連の実験をおこない考察を加えるものである。そもそも二重曲管形状における偏心の有無に着目した理由は、第2章で述べた素通り効果による圧力損失の低減と、曲りにともなう二次流れによる熱伝達率の上昇を期待できるからである。装置は第2章で述べた直管部に180°の曲り管部を新たに設置したものをを用い、外管および内管の径は同一である。曲り部分外管は30mm厚さの亚克力板を上下2枚重ねとし、内部に曲率半径(R)が190mm、内径38.4mmの真円の穴がくり抜かれたものをを用いている。したがって、曲率半径比 ( $\bar{R} = 2R/d_1$ ) は約10となる。

以下、実験結果を紹介する。

#### 〔油膜法による管内二次流れの確認〕

油膜法により、曲り管内に発生する二次流れの存在を確認した。油膜法は壁面近傍の境界層内の流れ方向を示すものであり、主流における流れ方向とは直接関係はないが、偏心二重曲管内において、偏心および管径比の影響が流れ場にどのように与えられるかを定性的に把握するのに有効であった。

#### 〔偏心二重曲管内全圧分布〕

曲り管内では、同一断面内でも静圧分布が存在するため、全圧法による流速の測定はできない。したがって流速分布に準じた形での全圧分布を測定し、管内速度場の発達状況および速度分布偏倚と素通り効果を考察した。

その結果、速度場は曲り開始後90°以前に発達することを確認した。

#### 〔圧力損失特性〕

本章では、曲り部の上流および下流に誘起される損失をも含めた損失係数と第2章と同様に、ダルシーワイスバッハ式により定義される管摩擦係数 ( $\lambda_c$ ) の二つにより圧力損失特性を表示した。損失係数については、直接熱伝達特性と結びつかないのでここでは省略するが、曲り後流に誘起される損失が非常に大きいことが理解された。また  $d_2 = 16.0\text{mm}$  の場合には、速度場の発達が確認されなかったため、管摩擦係数 ( $\lambda_c$ ) は参考として示すにとどめた。

結果は次式により示される。

$$\lambda_c = \Gamma'' \cdot \Gamma_e \text{Re}^{-0.2} \quad (4)$$

$$1.5 \times 10^4 < \text{Re} < 6 \times 10^4$$

ただし,  $\Gamma' = 0.244 (\bar{r}_0 = 1.92)$ ,  $\Gamma' = 0.230 (\bar{r}_0 = 1.536)$

$\Gamma e$  は偏心の影響を示す係数で, 図 1 に示す。图中, 偏心率にマイナス表示してあるのは, 曲り内側への偏心を示す。これより, 曲り内側に内管が存在する場合, 圧力損失は素通り効果により減少するはずであるが, 強い二次流れを併発するためさほど急激には減少してはいない。また, 外側への偏心では, 速度分布は平均化され, 大きな素通り効果はないが二次流れによる損失もさほど大きくないための結果と言える。

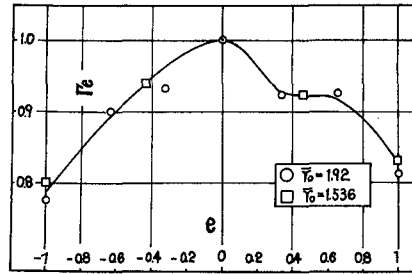


図 1  $\Gamma e$  の偏心率による変化

このように二重曲管においては, 素通り効果と二次流れ発生が相互に関連して, 圧力損失特性が決定されている。

(熱伝達特性)

第 2 章と同様に, 内管表面上にステンレス箔を巻きつけ, 箔下に埋めこんだ熱電対により局所表面温度を測定し, 熱伝達率を算出した。結果は次式により示される。

$$\bar{Nu} = A' \cdot Ae Re^\eta \quad (5)$$

$$2 \times 10^4 < Re < 7 \times 10^4$$

ただし  $A' = 0.0158, \eta = 0.85 (\bar{r}_0 = 1.92)$

$A' = 0.0270, \eta = 0.80 (\bar{r}_0 = 1.536)$

$Ae$  は偏心の影響を示す係数で, 図 2 に示す。これより熱伝達特性に与える偏心の影響は, 曲り内側と外側とでは大きく異なることがわかる。すなわち, 曲り内側に内管が存在する場合, 速度分布は大きく外側へ偏倚し, かつ, 強い二次流れが発生するものの, 内管からの熱伝達にはあまり寄与しない。この反面, 曲り外側へ内管が偏心した場合には, これらはともに熱伝達に大きく寄与することが判明する。また, 内管が比較的太い場合には, 壁面の影響が強く, 発生する二次流れは弱いため(5)式の  $\eta$  の値は 0.8 程度となる。

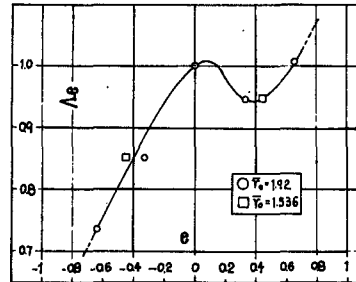


図 2  $Ae$  の偏心率による変化

(4)(5)式および図 1, 2 を比較すれば明らかなように, 二重曲管において, 曲り外側へ内管を偏心させることにより圧力損失を小さく, かつ, 熱伝達率を大きくとれるという熱交換器として大きな利点のある内管位配の存在することが明らかとなった。

#### 第 4 章 偏心二重直管と偏心二重曲管の比較

本章では, 第 2 章偏心二重直管の結果と, 第 3 章偏心二重曲管の結果を比較しており, 曲りに

ともなう特異性を明らかにするとともに、偏心二重曲管の熱伝達特性の優秀性を指摘している。

## 第 5 章 総 括

各章に述べた結論を総括したものである。とくに、内管加熱式で、管内に密度差の発生が顕著である場合には、偏心二重曲管型熱交換器の優秀性は一層すぐれたものとなることが予想されることを付記した。

## 審査結果の要旨

二重管式熱交換器は、過去に、ボイラの蒸発管に用いられた特殊な例があるにもかかわらず、最近では、小形の用途以外には、殆どその姿を消してしまった。これは主に製作が困難であるという技術的問題が原因であった。しかし、二重管式は耐圧性にすぐれ、また、強制対流による高熱伝達率を期待できるなどの観点にたてば、積極的に研究されなければならない問題の一つであろうと思われる。

現在、同心状二重直管に関し、その流れに対する偏心の影響を考察した研究論文のいくつかを挙げることは可能である。また熱伝達に関しても、統一された見解を得ることはできないが、数少ない研究を散見している。しかし、二重曲管の研究に至っては、殆ど知見することができないのが現状である。

本論文は、上に述べたような背景のもとに二重管形熱交換器の流動と熱伝達に与える偏心の影響を考察したもので、全篇五章よりなる。

第1章は序論である。

第2章は偏心二重直管に関するもので、圧力損失・速度分布・熱伝達の実験をおこない、二次流れや素通り効果を考察し、摩擦係数およびNusselt数についての整理式を提案している。これは、従来の研究に新たな知見を加えたものである。

第3章は本論文の重要な骨子である。すなわち、偏心二重曲管の流動と熱伝達に関する研究が、精密につくられた実験装置のもとにおこなわれている。まず、油膜法により、管内二次流れが確認され、ついで、全圧分布および圧力損失の測定より摩擦係数が求められ、これに与える偏心の影響が曲りの方向（内管の位置が曲り内側か外側か）によって異なることを考察している。さらに、熱伝達に関する実験がおこなわれ、偏心の与える複雑にして大きな影響すなわち特異性と優秀性を明確に把握している。これらは、興味のある重要な結果である。

第4章では偏心二重直管と曲管の特性を比較検討している。

第5章は総括である。

以上要するに、本論文は二重管形熱交換器の流動と熱伝達に対し、新たな知見を加えたもので、熱工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。