

報告番号 <sup>\*</sup> 頁 第 3484号  
乙

# 主論文の要旨

題名

熱交換器における三次元流動および  
熱伝達に関する基礎研究

氏名 櫛田 玄 一 郎

# 主論文の要旨

報告番号	※ 乙第	号	氏名	榎田玄一郎
<p>熱交換器は工業上重要な機器であり、発電所のボイラから自動車のラジエータまた家庭用のエアコンに至るまで広く使用され、近年の世界のエネルギー情勢と関連してその高性能化が期待されている。熱交換器の高性能化を図るためには伝熱促進技術の発展が不可欠である。実際に用いられている伝熱促進法のうち、システムに外力を投入する必要のないものの中で基本的なものとしては以下の二つがある。一つは、流路自体を屈曲させることにより流体の混合・攪乱を行い伝熱促進を図るものであり、その例として屈折管がある。またもう一つは、コンパクト形熱交換器として広く用いられているプレートフィンとチューブを組み合わせたものである。これはプレートフィンの拡大伝熱面としての作用とチューブの乱れ促進体としての作用による伝熱促進を期待している。また、これらの二つのいずれにおいても、渦が非定常的に放出されることによる伝熱促進の効果もあるとされている。これらの方法によってさらに有効な伝熱促進を図るためには、流路内を流れている流体と流路壁面との熱伝達の機構について詳細に説明することが必要である。本論文では、以上の屈折管およびプレートフィンチューブ形熱交換器のモデルとしての平行平板間に角柱を設置した場合を取り上げ、流路内の流動および熱伝達機構について、主として数値計算により詳細な検討を行った。とくに、三次元的な現象および非定常的な挙動について系統的な検討を行った。</p> <p>本論文は、緒論と結論を含め、11章から構成されている。以下に各章の内容を要約する。</p> <p>第1章は緒論であり、本研究を行うに至った背景を述べ、本研究の目的と工学的意義を明確にするとともに、本論文の内容について概説した。</p> <p>第2章では、本論文中で使用する数値解析手法について概説し、また第3章～第10章における計算の準備として、基礎方程式を提示し、具体的な計算方法についての説明を行った。</p> <p>第3章では、屈折管内の流動および熱伝達の研究の第一段階として、折れ曲がりによる遠心力の効果の解明を目的とした。このため、遠心力による三次元流動が顕著に現われると考えられるアスペクト比<math>\alpha=1</math>の正方形断面をもつ屈折管を取り上げ、剝離・再付着が生じるような比較的大きい</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※乙第	号	氏名	櫛田玄一郎
<p>レイノルズ数<math>Re=300</math>の場合の定常状態における三次元流動の解析を行った。それによって得られた屈折管内の流動状態を、速度ベクトル、流跡線、等圧線および壁面せん断応力分布によって明示した。さらに、屈折部近傍の三次元流動について、とくに対向面へ衝突する流れ、剝離域内の流れおよび主流に垂直な断面内の二次流れの様相を示し、その複雑な挙動を明らかにした。また、屈折部近傍の圧力および壁面せん断応力の変化を示し、とくにこれらの極大点の存在および位置について明らかにした。以上の結果より、アスペクト比<math>\alpha=1</math>の屈折管においては、複雑な三次元剝離の様相を示すこと、また折れ曲がりによる遠心力が流動様相に与える効果が著しいことを指摘した。</p> <p>第4章では、前章の流動解析の結果に基づき、屈折管内の熱伝達の解析を行い、アスペクト比<math>\alpha=1</math>でレイノルズ数<math>Re=300</math>およびプラントル数<math>Pr=0.71</math>の場合について、全壁面熱流束一定条件での熱伝達機構について検討した。その結果、屈折管のような三次元流動場においては、局所ヌセルト数の定義を修正する必要があることを指摘するとともに、この修正局所ヌセルト数および断面平均ヌセルト数の複雑な分布を明らかにした。また、折れ曲がりによる影響は、下流側にはかなり広い範囲まで残り、断面平均ヌセルト数の値が高く、かなりの伝熱促進が期待できることを示した。さらに、局所ヌセルト数の分布は壁面せん断応力の分布と同様な傾向となるが、折れ曲がり部近傍において対向面へ衝突するような流れおよび二次流れにより極大点の位置が異なり、熱伝達は衝突した流れが加速され壁面せん断応力が極大となるまでの間で著しいことを示した。</p> <p>第5章では、屈折管内の三次元流動および熱伝達に対するアスペクト比およびレイノルズ数の影響について解析を行い、第3章および第4章のアスペクト比<math>\alpha=1</math>でレイノルズ数<math>Re=300</math>の場合における結果と比較検討を行った。アスペクト比としては、二次元流路となる<math>\alpha=0</math>、およびこれと前章で取り扱った正方形流路となる<math>\alpha=1</math>の中間的な流路として<math>\alpha=0.5</math>の場合を考えた。一方、レイノルズ数としては、剝離・再付着が起こらず二次流れがきわめて小さい<math>Re=10</math>から、屈折管では定常な層流を維持できなくなるような<math>Re=600</math>までの範囲を考えた。以上の場合について、速度ベ</p>				

# 主 論 文 の 要 旨

報告番号	※乙第	号	氏名	梶田玄一郎
<p>クトル，流跡線，二次流れの強さ，壁面圧力，壁面せん断応力，局所および断面平均ヌセルト数を明示し，流動および熱伝達に対するレイノルズ数およびアスペクト比の影響について明らかにした．とくに，アスペクト比 <math>\alpha = 0.5</math> の場合には，全体的にはかなり大きな二次流れが発生して流れは複雑な三次元流れとなり，この程度のアスペクト比の断面をもつ屈折管に対しては三次元解析が必要であることを指摘した．</p> <p>第6章では，最も基本的な要素である直角に一度折れ曲がる二次元屈折管について取り扱い，詳細な実験的および理論的検討を行った．実験では，圧力，流脈線および局所ヌセルト数分布に加え，流路内の平均速度，速度変動の強度とスペクトルについて調べ，折れ曲がりによる圧力損失係数とレイノルズ数の関係，層流および乱流の場合に対する平均速度および速度変動強度の分布，流脈線ならびに速度変動のパワースペクトル分布の流れ方向変化を示し，屈折管における流動特性を明らかにした．また，局所ヌセルト数 <math>Nu_x</math> の流れ方向分布を示し，局所ヌセルト数の極大値 <math>Nu_{max}</math> および漸近値 <math>Nu_{\infty}</math> とレイノルズ数の関係を明らかにした．一方，理論解析では，レイノルズ数を変えて定常解析を行った．その結果，折れ曲がり前では層流であるレイノルズ数が比較的小さい場合に対する定常解析結果は折れ曲がり後における流れの非定常化のために実験結果とは差異を生じた．また，折れ曲がり前から乱流であるレイノルズ数が大きい場合に対する乱流モデルを用いた解析結果も実験結果と完全には一致しなかった．この理由として，乱流モデルが流れの剝離の影響を正確に記述することができないことを指摘した．</p> <p>第7章では，二次元屈折管内の非定常的な変動および熱伝達について，流れの方程式を直接数値計算によって非定常解析を行い，前章の実験で示された屈折管内の非定常的な変動について理論的な考察を試みた．レイノルズ数として <math>Re = 600, 1000</math> および <math>2000</math>，プラントル数として <math>Pr = 0.71</math> の場合を扱った．<math>Re = 2000</math> の場合について，移流項に対して風上差分法を用いた非定常計算の結果は，数値粘性のために定常計算による結果とほとんど一致した．これに対して，移流項に対して中心差分法を用いることにより，第6章の実験結果を一応再現することができた．その結果より，流動およ</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※ 乙第	号	氏名	榎田玄一郎
<p>び熱伝達に関する特性量の時間軸波形，瞬間的な等値線および流れ方向分布を示し，屈折管内の流動および熱伝達に対して非定常的な変動が与える影響が大きいことを指摘した。Re=600および1000の場合について，人為的な攪乱を入れない場合，中心差分法を用いた非定常計算を行っても定常解が得られた。これに対して，人為的な攪乱を入れることにより，非定常的な変動が誘起される様子を調べ，特性量の等値線および時間軸波形を示した。本解析によって導かれた変動のストローハル数およびヌセルト数は，実験結果と完全には一致しなかったが，この原因として，流れの三次元性が考えられることを指摘した。</p> <p>第8章～第10章ではもう一つの課題として，プレートフィンチューブ形熱交換器の基本的な構成モデルを，プレートフィンとしての平行平板の間にチューブとしての角柱を垂直に設置した流路と考え，角柱まわりの流動および熱伝達機構を理論的に解析した。</p> <p>第8章では，角柱断面が正方形で流路幅がその辺長と等しい場合のモデルについて，レイノルズ数Re=200の定常状態の層流における流動の解析を行った。流路内部の速度ベクトル，流跡線，等圧線，壁面におけるせん断応力の分布および剝離線を示し，また流れの非定常性についても若干の考察を加え，従来の実験結果と比較検討を行うことにより，流路内部の流動機構について詳細に検討した。その結果，角柱まわりの流れについては，角柱前面の衝突部，背後の死水域および馬蹄形渦の様相を明示し，流れが三次元的なものとなることを示した。角柱まわりの壁面について，とくに壁面圧力分布および壁面せん断応力の様相を明示し，角柱によって圧力損失および流動抵抗が著しく増大することを示した。また，壁面における剝離線を示すことにより複雑な三次元剝離の様相をとらえ，従来 of 可視化実験による観察結果を理論的に説明することができた。非定常性の効果については，実際に非定常法で計算を行い，流路壁面の影響により非定常的なカルマン渦列の発生が抑制されることを指摘した。</p> <p>第9章では，平行平板間に正方形柱を設置した場合のモデルについて，前章のレイノルズ数Re=200の流動解析の結果に基づき，プラントル数Pr=0.71で熱流束一定条件での熱伝達についての解析を行った。流路壁面，</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※乙第	号	氏名	櫛田玄一郎
<p>角柱表面および流路内部の温度分布および局所ヌセルト数分布を示し、また、これらに対応する圧力分布およびせん断応力分布と比較しながら、その複雑な熱伝達特性を明らかにした。</p> <p>第10章では、平行平板間に正方形柱を設置した場合のモデルについて、非定常の流動および熱伝達に対する解析を行った。比較的大きなレイノルズ数<math>Re=1000</math>の場合について数値解析を行い、角柱まわりの非定常流動を時間軸波形、速度変動強度分布およびストローハル数によって示した。また、複雑な三次元流動の様相を速度ベクトル、流線、圧力分布および壁面せん断応力分布によって明らかにした。さらに、熱流束一定条件の場合における熱伝達特性を温度および局所ヌセルト数分布によって示し、熱伝達の機構を系統的に調べた。修正局所ヌセルト数分布は、速度変動強度分布および壁面せん断応力分布と同様な傾向となることを示し、レイノルズ数が比較的大きい場合、角柱まわりの非定常流動により流れの攪乱の効果が増加し、熱伝達が向上することを示した。</p> <p>第11章は結論であり、各章で得られた結果を総括した。</p> <p>本研究で取り扱った屈折管内の流動および熱伝達および平行平板間に角柱を設置した場合の流動および熱伝達についての研究は、流路内を流れている流体と流路壁面との間の熱伝達の最も基礎となるものであり、それによって得られた結果は一般に熱交換器における三次元流動および熱伝達の機構を理解する上で有用なものになると考えられる。</p>				