



低いレイノルズ数域におけるプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失性能に関する研究

瀬下, 裕

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1990-04-27

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1430

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001430>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	瀬 下 裕 (神奈川県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工博ろ第43号
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位授与の日付	平成2年4月27日
学位論文題目	低いレイノルズ数域におけるプレートフィンチューブ熱交換器の 伝熱・流動損失性能に関する研究

審 査 委 員	主査 教授 坂 口 忠 司
	教授 藤 井 照 重 教授 片 岡 邦 夫

論 文 内 容 の 要 旨

プレートフィンチューブ熱交換器は、コンパクト熱交換器として最も広範囲に実用されているものであり、その伝熱・流動損失特性は、それらの設計・計画において不可欠のものである。

近年、プレートフィンチューブ熱交換器は、その実用上の要望により、より一層の小型化と騒音の低減化が求められている。この要求を満たすため、その管列数を減らし、風速を低下させることが試みられている。しかし、このような形式のプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失特性は未知のものであり、従来のデータの援用では、所期の高性能熱交換器の設計は不可能である。

本研究は、このような未知の領域に対して実験的ならびに理論的に研究し、その伝熱・流動損失特性を明らかにすると共に、その成果を用いてプレートフィンチューブ熱交換器の設計を的確に行えるようにしたものである。

本論文は、全9章で構成されている。第1章序論では、本論文の目的、従来の研究、本論文の概要について述べた。以下にその大略を記す。

プレートフィンチューブ熱交換器は、管内外の熱伝達率の差異が大きい場合、フィンの寸法を変えることにより内外の面積比を任意に設定できることから、工業的に最も広範囲に使用されている熱交換器であって、一般に空気を冷却、または加熱するための、いわゆる空冷熱交換器として、主として空気調和機器に用いられている。

実際に空調機などの熱交換器またはそれを含む系を計画・設計する場合、与条件である設置スペース・送風機特性などを合理的に満足させながら目的を達成する必要がある。したがって、熱交換器の諸形態・通過風速・物質伝達の有無などが伝熱量や流動損失に与える影響を正確に知ることが不可欠

である。そのため、プレートフィンチューブ熱交換器の管外側（フィン側）の熱伝達率や流動損失性能についての研究は、従来から比較的多く行われている。しかし、それらは当該熱交換器のフィンおよび管群間の流動の複雑さのために、その熱交換器固有の断片的な技術資料として提供されているだけであって、系統的で有効な設計データベースとして整備されていない。したがって、最近、設計作業を系統的かつ合理的に進めるために、断片的な設計者の知識や経験的な勘を補うものとして一般化しつつある計算機援用設計システム用の系統的で広範な設計データベースとして用いられるまでに至っていない。一方、近年のプレートフィンチューブ熱交換器の小型化と騒音の低減化に対応できる熱交換器は、従来のものとその形態や使用範囲が異なるため、それらのための技術資料は存在しない。したがって、従来の当該熱交換器の研究成果を近年の低騒音・小型プレートフィンチューブ熱交換器の設計に用いることはできず、新しい研究が必要である。

本研究では、組織的な実験とその結果の詳細な解析により、当該熱交換器の現象の明確化と広範で正確な性能相関式の提案を行った。特に本研究では、前述の熱交換器の使用範囲や形態の変化に対応して、低いレイノルズ数域・小数列のプレートフィンチューブ熱交換器の管外側の伝熱・流動損失性能に焦点をあて、その現象の物理的イメージを明確に把握し、それに基づいた性能の相関式を提案した。さらに、本研究では、空気冷却熱交換器としては避けて通ることができない湿り空気中において凝縮を伴う場合の当該熱交換器の現象についても、実験的ならびに解析的に考察を加え、その場合の当該熱交換器の熱伝熱・物質伝達・流動損失性能を予測する新たな方式も提案した。

第2章では、広範で正確な伝熱性能相関式を得るために、従来の研究で分析が不十分であった熱交換器の熱抵抗を各種の抵抗に分解し、その特性を明確にして本研究結果の精度を高めることを意図し、平均熱伝達率を実験結果から導くための方式を詳細な解析と実験的評価によって細部にわたって明らかにした。すなわち、平均熱伝達率の定義、その算出に必要な移動単位数と温度効率の関係に関する解析と関係式の導出、その有効性の実験による確認、管内熱伝達率の評価、フィン効率や接触熱抵抗の算出法とその整合性の解析などを行った。

その結果、プレートフィンチューブ熱交換器の流れ形式は、管内側混合、空気側非混合の直交流の複合流れとして取り扱うことが合理的であることを解析および実験的評価により明らかにした。さらに、フィン効率の算出について、この問題を熱伝達率分布のある二次元平板の熱伝達問題として厳密に取り扱って解析を行い、従来明確でなかった一様熱伝達率・環状フィンを仮定した一般のフィン効率計算式が妥当であることなどを検証した。以上の結果より、合理的な平均熱伝達率の算出方式を提示した。

第3章では、上記方式に基づいて、全ての供試熱交換器の伝熱・流動損失性能に関する実験結果を整理し、各形態パラメータの変化がそれら性能に与える影響を評価し、特に少管列数の場合、管列数が性能に与える影響が大きいことなど従来の多管列数による研究結果との差異を明らかにした。

第4章では、現象を明確にするための検討について述べた。すなわち、従来の多くの研究例は、実験値の物理的解釈をすることなく、この段階から直ちに実験式の作成に移行しているが、それでは一般性のある相関式の誘導はできない。したがって、本研究では、現象の物理的イメージを明確にし、新しい性能整理方法を得ることを目的として、以下の検討を行なった。

すなわち、従来の慣習的な整理方法が少なくとも本研究範囲では合理的でないことを明らかにし、さらに、新しい整理方法に関する指針を得ることを目的として、管群の存在がフィンの伝熱性能に及ぼす影響、フィンの局所熱伝達率分布と流れの可視化実験結果などから現象の定性的な説明を試みた。つづいて、性能解析と現象の一層の明確化を行なうために、上記の検討結果を基に、単列、2列、3列以上の場合について解析モデルを作り、それによってプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱現象を定量的に評価した。その結果、従来行われていた熱伝達・流動損失の特性表示方法は、多数列でレイノルズ数が大きい場合の性能表示にはある程度の整合性を有しているが、それ以外のプレートフィンチューブ熱交換器の性能を合理的に表現することはできないことをはじめて明確にした。さらに、純粋な平行平板群の伝熱特性と比較検討結果から、単列の伝熱特性は、熱伝達率の絶対値とその通過風速に対する勾配の両面において平行平板群のそれに近いこと、さらに、複数列の伝熱特性は、低風速域では平行平板群に近いが、通過風速が増大するにつれ両者の差異は拡大し、かつ、その傾向は列数が多いほど顕著であることなどを明らかにした。このことから、列数あるいは通過風速が大きい場合には、別の現象支配因子が存在することを予測し、フィンの局所熱伝達率分布とフィン間の流れの可視化実験結果の検討から、それらが管周囲あるいは管後流ウェイク周囲に存在する渦領域の効果であることを示した。また、これらの結果に基づき、単列、2列、3列以上の場合について、フィンの伝熱解析のモデルを作り、それによりプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱現象を定量的に明らかにすることを試み、単列の場合あるいは低風速域の複数列の場合では、プレートフィンチューブ熱交換器の伝熱現象が助走区間と管間での流れの加速を伴う平行平板間の層流熱伝達として説明できることを明確にした。つづいて、一般に複数列における2列目の現象は、上述の低風速域の場合を除けば、助走区間を含む層流伝熱支配域と渦の存在による乱流伝熱支配域の混合領域として、さらに、3列目以降の現象は、上述の低風速域の場合を除いて、渦の存在による乱流伝熱支配域として、それぞれ取り扱うことが妥当であることを明らかにした。

第5章では、これまでに検討してきた検討結果に基づいて適切な無次元数を定義し、プレートフィンチューブ熱交換器性能に関する新しい無次元整理方式を提案した。さらに、その方式を用いて本研究で行った全ての実験結果を単列、2列、3列以上に分けて、各々の伝熱・流動損失性能を整理し、実験結果が合理的に整理できることを確認すると共に、伝熱・流動損失性能に関する無次元の実験式を提示した。

第6章では、上記の議論を発展させ、プレートフィンチューブ熱交換器の性能記述に関し、支配現象の異なる3種類の領域で構成されるモデルを提案し、各領域の伝熱・流動損失特性に関する合理的な無次元相関式を導き、当該熱交換器特性の統一的整理を行った。その結果、本研究の主題である小列数で低レイノルズ数域のプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失性能は、前記の3領域のひとつである助走区間領域の無次元相関式で記述できることを明らかにした。

第7章では、これまでに検討した物質伝達を伴わない場合のプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失特性に関する知見を利用して、湿り空気中において凝縮を伴う場合の当該熱交換器の性能を明らかにすることを試み、従来明確でなかった熱伝達と物質伝達のアナロジーの成立の有無、物

質伝達を伴う場合の熱伝達率を单相のそれとの差異を明らかにした。さらに、湿り空気中において凝縮を伴う場合の当該熱交換器の特性について、滞留凝縮水の存在を考慮した新しい予測方法を提案した。

すなわち、凝縮を伴う場合の管外側流動損失と熱伝達率とが凝縮を伴わない場合に比べ大幅に増加することを明らかにし、この現象が熱交換器伝熱面上の滞留凝縮水の存在に起因すると考えて滞留凝縮水の存在様相をモデル化し、等価的な水膜厚さを凝縮を伴う場合の流動損失の増加などから算出した。さらに、そのモデルを用いて実験値の伝熱性能を再整理し、滞留凝縮水の存在を考慮すれば、凝縮を伴う場合の伝熱性能が凝縮を伴わない場合のそれと同一のものとして取り扱えることをはじめて明らかにした。さらに、このように取り扱えば本研究範囲における、湿り空気中で凝縮を伴うプレートフィンチューブ熱交換器の熱伝達率と物質伝達率との間には、ルイスの関係が明確に成立することを確認し、前述の知見とあわせて、凝縮を伴う場合と当該熱交換器の熱伝達・物質伝達・流動損失性能の新しい予測方式を確立した。

第8章では、実際に熱交換器の計画・設計を行う場合に、本研究結果の実用上の便益について、空調和機における熱交換器設計を例に取り上げて説明した。

第9章では、本研究のまとめを行った。

論文審査の結果の要旨

プレートフィンチューブ熱交換器は、コンパクト熱交換器として最も広く実用されているものであり、その伝熱・流動損失特性に関する諸資料は、その設計・計画において不可欠のものである。近年、プレートフィンチューブ熱交換器は、より一層の小型化と騒音の低減化が求められている。そのため、管列数を減らし、風速を低下させることが試みられている。しかし、一般にこのような形式のプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失特性は未知のものであり、従来の管列数が多く風速の大きい熱交換器より得られたデータの流用では、目的とした熱交換器の設計は不可能である。本論文は、このような未知の領域の伝熱・流動損失特性を実験的ならびに理論的に研究し、その特性を明らかにすると共に、その成果を用いて当該熱交換器の設計を的確に行えるようにした結果を記したものである。

本論文は、9章から成り、第1章は、本研究の目的と概要、従来の研究状況を述べた序論であり、第9章は研究成果をまとめて記した結論である。

第2章では、幾何学的形状を系統的に変えた計35種類の熱交換器における実験結果と解析により、従来の研究において確定されていなかったプレートフィンチューブ熱交換器の流れ形式を、管内側混合・管外側非混合の直交流の複合流れであるとみなし、さらに熱交換器の伝熱特性を熱通過率で一括して取り扱っていたのを、熱通過率を構成している管内熱伝達率、フィン効率、フィンと管との接触部の相当熱伝達率、および熱交換器の温度差に関係する温度効率、移動単位数、熱容量流量比に着目し、その定量分析によって当該熱交換器の伝熱特性において重要な役割を果たすフィンおよび管と空気の

間の平均熱伝達率の広範で正確な算出方式を提示している。これによって、以下に述べる伝熱現象の定量的検討が可能になった。

第3章では、全供試熱交換器の伝熱・流動損失性能、すなわち上記の算出方法で求めたフィンおよび管と空気間の平均熱伝達率と熱交換器における圧力降下、に関する実験結果とフィンのピッチ、管径、管列数、フィン長さ等の形態パラメーターの関係を検討し、多数管列数の研究での“列数は伝熱性能に影響しない”との結果は、少管列数の場合には適用できず、管列数が性能に与える影響が大きいことを見いだしている。

第4章では、従来ならびに今回の実験結果を整理できる普遍性のある整理方法を得ることを目指して、プレートフィンチューブ熱交換器の構成を管群と平行平板群の組合せとするモデルを提示している。まずフィンの無い裸管群のみの熱交換器の伝熱性能を検討し、つい平行平板群の伝熱特性を基礎に、そこに管群が存在する場合をナフタリン昇華法による局所物質伝達率への置換と流れの可視化実験により検討し、単列の場合は、助走区間と各管の間での流れの加速を伴う平行平板群の層流熱伝達と見なせること、3列以上の場合は、管の後流周囲に存在する渦領域が管列数の多いほどまた空気流動の大きいほど拡大し、フィンの局所熱伝達率を増大させる乱流熱伝達が支配的であること、2列の場合はその中間で両熱伝達が混在していることを明らかにしている。

第5章では、以上の検討結果に基づいて、プレートフィンチューブ前面での空気速度を代表速度、熱交換器の見かけの全体積から管群とフィンの占める体積を差し引いた体積の4倍と全伝熱面積から求まる水力直径あるいはフィン寸法とフィンピッチに基づく量を代表寸法とするレイノルズ数、ヌッセルト数の無次元数を用いて、本研究の伝熱・流動損失性能に関する全実験結果をまとめ、それらが合理的に整理できることを確認すると共に、伝熱・流動損失性能に関する無次元の実験式を提示している。第6章では、プレートフィンチューブ熱交換器は、第4章で指摘した3領域で構成されるとして、各領域の伝熱・流動損失特性に関する無次元相関式を導き、当該熱交換器特性の統一的整理を行っている。

第7章では、湿り空気中において用いられる空冷熱交換器としては避けて通れない水の凝縮を伴う場合の当該熱交換器の性能を明らかにすることを試み、滞留凝縮水の存在をフィン及び管の寸法増加として捉えたと、凝縮を伴う場合の伝熱性能が凝縮を伴わない場合の伝熱性能と同じになることを明らかにしている。

第8章は、本研究結果の空気調和機器の熱交換器設計への適用例である。

本研究は、プレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失特性に関して実験・解析の両面から系統的な研究を行い多くの重要な知見を得ると共に価値ある集積をしたもので、工学上寄与するところ大である。

よって、学位申請者 瀬下 裕 は、工学博士の学位を得る資格があると認める。