

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

自動車空調用熱交換器の高性能化に関する研究  
—最適設計手法の確立による開発効率の向上—

*Research on Performance Improvement of Heat Exchangers for Automobile  
Air Conditioning*

*—Improvement of Development Efficiency by Establishing  
Optimal Design Method—*

申請者

金子	智
Akira	Kaneko

環境・エネルギー研究科

環境・新エネルギー研究

2013年 2月

近年，自動車用空調分野は大きな技術転換期を迎えている．第一に，PHEV（Plug-in Hybrid Electric Vehicle）やEV（Electric Vehicle）の普及によるパワートレインの革新による空調システム自体のイノベーション，すなわちヒートポンプ空調，特に暖房への対応が求められ，その一方で地球温暖化をはじめとする環境問題の視点からは，現行の高いGWP（Global Warming-Potential）を持つ冷媒から低GWP冷媒への代替が喫緊の課題で，新冷媒HFO1234yfに対応したシステムを各社が開発している現状にある．また，一般の家庭用空調機についても近い将来，適用する冷媒について同様な課題を解決せねばならず，現在，議論が開始され緒についたばかりである．

このような状況を背景として，冷凍システムの大きな要素である熱交換器の果たす役割は益々大きくなっており，高性能化はもちろんのこと新熱交換器開発リードタイムの短縮も必須である．このためには熱交換器の性能予測シミュレーションが有効であり，シミュレーションによる事前検証を行うことで，最適化設計や試作工数の削減等が可能となる．したがって本研究では，熱交換器の性能を高精度で予測可能なシミュレーションツールの開発を最終の目的としている．

このツール開発には，熱交換器の伝熱特性や圧力損失特性の把握が重要で，中でも冷媒と空気の熱交換を考えた場合，熱抵抗は空気側の方がはるかに大きく，空気側の基礎的な伝熱流動特性把握がシミュレーションや最適設計を行う上でも重要な要素となる．そこで本研究では，熱交換器の空気側の伝熱特性及び圧力損失特性に着目し，従来からカーエアコン用の熱交換器として広く使われているコルゲートルーバフィンを用いたマルチフロータイプの熱交換器及び次世代熱交換器として期待されるフィンレス熱交換器についての基礎特性を明らかにして高性能化のため最適設計を実施している．本手法は，車載用空調機ばかりでなく，同様な課題解決迫られている一般空調機（ヒートポンプ）にも重要な手掛かりを提供しうる可能性を有する，極めて有用な研究である．

本論文は6章から構成されている．

第1章は序論であり，本研究の対象となる車載用の空調機についてパワートレインの変遷によるヒートポンプ化に求められる課題の整理が行われている．中でも研究の中心に位置付けられた熱交換器の歴史的な変遷を述べ，今後の開発の方向性にも言及している．加えて，自然冷媒や新冷媒も含め冷媒利用の世界的な動向を概観し，当面の代替冷媒についてその特徴を述べている．また，本研究に関連する従来実施された研究を概観するとともに研究課題の抽出ならびに研究の位置付けを明確にしている．

第2章では，現行熱交換器に広く用いられるコルゲートルーバフィン（定置用給湯器の室外熱交換器にも使用）について実験及びCFD（Computational Fluid Dynamics）解析を用いて，熱伝達率・圧力損失の基礎特性について検討している．実験計画法を用いたパラメータスタディにより， $j$ ファクター及び $f$ ファクターに与えるフィン形状の影響度合いを定性的に明らかにしている．加

えて各パラメータ間の交互作用について言及し、フィンピッチ、ルーバピッチ、ルーバ角度から決定される流路比が交互作用の主因であることを統計的に示している。すなわち、これらの交互作用を流路比  $\varepsilon=(F_p/L_p)\tan(L_a)$  によって整理し、相関式に組み込むことで、定性的かつ定量的なフィン性能の予測が可能になることを見出している。この結果は従来提案されている相関式を凌駕する予測精度の高い相関式の提案という成果に反映されている。また一方で、従来の熱交換器は細径化・高密度化により性能を向上してきた経緯があるが、これをさらに発展させることで、フィンレス化が可能になることを示唆している。

第3章では、新しいフィンレス熱交換器として表面に凹凸溝を有する扁平チューブを想定し、流れ方向に周期的な凹凸を有する平行平板間流れについて、実験及び CFD 解析を用いて、熱伝達率・圧力損失の基礎特性についての検討を行っている。実験では  $j$  ファクター、 $f$  ファクターに与える凹凸形状の影響をタグチメソッドによるパラメータスタディにより統計的に調査し、影響度合いを検討し、凸部高さが特に大きく影響することを示し、これらの最適化が高能力・低圧力損失な熱交換器を設計するために重要なファクターとなることを示唆している。加えて CFD 解析では、実験値との整合性の確認とともに、広範囲な凹凸形状について解析を実施している。その結果、従来提案されている臨界  $Re$  数の予測式が適用できない条件があることを明示している。この CFD 解析の結果を基に相関式の作成し、特に流路形状から決まる縮流比、膨張比、なす角を説明変数に加えることで、 $j$  ファクター、 $f$  ファクターともに、解析値を $\pm 15\%$ 以内で整理する予測式を提案している。

第4章では、熱交換器の性能予測手法について述べ、実験値との比較を実施している。同時にフィンレス熱交換器を試作してその蒸発特性実験を行い、同様に予測値との比較を行っている。空気側の熱伝達率、圧力損失の予測には第2章及び第3章で作成した相関式を適用することで、熱交換量については、高い予測精度が得られること、一方で通風抵抗の予測値は全体的に実験値よりも低い傾向を示しており、相関式の精度にはまだ改善の余地があることを示している。冷媒側圧力損失に関しても、ヘッドタンク内の分流による圧力損失やオイル循環量の影響を踏まえて更なる改良が必要であると述べている。ただし、フィンやチューブの仕様が変化した場合の定性的な予測値は実験値と良く一致しており、最適化検討に十分適用可能な予測手法であると判断している。この予測手法は、Visual C++言語を用いてプログラミングされており、平易なインターフェイスを通して誰でも解析が可能なシミュレーションツールとして、汎用性も担保している。

第5章では、第4章で確立した熱交換器の性能予測手法とタグチメソッドを併用することで、空気側、冷媒側それぞれの伝熱・圧力損失の影響を考慮した最適化検討について議論している。この手法を用いて、従来のコルゲート・ルーバフィンを用いたパラレルフロータイプの熱交換器とフィンレス熱交換器について、蒸発条件及び凝縮条件下における最適化検討を行い、それ

ぞれの熱交換器の性能について比較している。

熱交換器の最適化については、熱交換器の性能を実際のシステムで考えた場合、伝熱性能と冷媒側、空気側それぞれの圧力損失が相互に影響を及ぼす。従って、本論文では単純に伝熱性能だけでは良し悪しは判断できないことを指摘し、熱交換器の伝熱性能や圧力損失を同時に評価可能な指標を定義し最適化を実施している。この手法を従来熱交換器とフィンレス熱交換器に対して適用し、蒸発器条件、凝縮器条件それぞれについて実施した結果、いずれの場合にも性能の最大値は従来熱交換器の方が高いことを明らかにしている。ただしフィンレス熱交換器については、最適化が十分であるとは言えないため、さらなる検討が必要であることを示唆している。また、どちらの熱交換器においても、蒸発器と凝縮器における最適設計値には相違があり、この主因が冷媒側の圧力損失であることを明らかにしている。

第6章は、結論として本論文に関する成果を改めて概観し、総括するとともに今後の技術開発の方向として着霜現象の実験的、理論的解明とフィンレス化への更なる検証の必要性を謳っている。

以上要するに本論文では、車両の電動化によるヒートポンプ化への対応、環境規制による冷媒の変更など、大きな変革期を迎えているカーエアコンを対象に、その重要な要素である熱交換器の小型・高性能化に応えるための効率的な設計手法を確立している。この成果は、開発現場における伝熱工学、二相流技術、加えて最適設計法に多大の示唆と貢献をなすものであり、高く評価できる。よって、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2013年2月

(主査) 早稲田大学教授	工学博士 (早稲田大学)	勝田 正文
早稲田大学教授		大聖 泰弘
早稲田大学教授	博士 (工学) (早稲田大学)	草鹿 仁
早稲田大学教授	博士 (工学) (早稲田大学)	中垣 隆雄