

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

# 博士論文概要書

## 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	
氏名	金子	智
	Akira	Kaneko

研究科・研究指導  
(課程内のみ)

環境・エネルギー研究科

2012年 11月

## 1. はじめに

自動車空調の分野において、近年、PHEVやEVの普及により空調システムの変化、つまりHP暖房への対応が求められている。一方で温暖化の観点からは、低GWP冷媒への代替が求められており、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。このような状況の中、熱交換器の果たす役割は益々大きくなっており、高性能化と開発リードタイムの短縮が同時に求められている。このような現状に対応する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。本研究は、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目的としている。そのようなツールを開発するためには、熱交換器の伝熱特性や圧力損失特性の把握が重要となる。特に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いいため、空気側の伝熱特性の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する。これにより、先述のシミュレーションツールを用いた従来熱交換器及び新型熱交換器の最適化が可能となる。

## 2. 論文の構成

本論文は全6章で構成される。第1章では序論として、本研究の背景及び目的について述べた。第2章では、現在、カーエアコン用の熱交換器のフィンとして広く用いられているコルゲートルーバフィンについて、熱伝達特性及び圧力損失特性について実験、CFD解析の両面から検討を行い、 $j$ ファクター、 $f$ ファクターに関する相関式の作成を実施した。第3章では、フィンレス熱交換器を対象として、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解析から熱伝達特性及び圧力損失特性についての基礎検討を行い、 $j$ ファクター、 $f$ ファクターについての相関式の作成を行った。第4章では、熱交換器の性能予測手法の開発について述べた。ここで第2章及び第3章で得られた相関式を用いることで、コルゲートフィンを用いた従来熱交換器及びフィンレス熱交換器の性能予

測を可能とした。第 5 章では、第 4 章で作成した性能予測ツールを用い、従来型熱交換器とフィンレス熱交換器について、最適化検証を実施し、それぞれの熱交換器の性能限界について検討を行った。最後に、第 6 章では結論として本研究で得られた知見をまとめた。

### 3. 研究の概要

本研究では、熱交換器の高性能化を目的として、カーエアコン用熱交換器として広く採用されているコルゲートルーバフィンと扁平チューブを用いた平行フロータイプの熱交換器及びチューブのみで構成されたフィンレス熱交換器を対象として、空気側の伝熱促進に着目して研究を行い、熱交換器の最適化についての検討を実施した。

コルゲートルーバフィンは、現在カーエアコン用のみならず、エコキュート等の定置用の室外熱交換器にも用いられているフィンであり、多くの研究例が示されているが、フィン形状と伝熱・圧力損失特性の関係を系統的にまとめた研究例は少ない。コルゲートルーバフィンの設計パラメータとして、フィンピッチ、フィン高さ、フィン幅、ルーバピッチ、ルーバ角度、ルーバ長さ等が挙げられるが、これらのパラメータが伝熱や圧力損失にどのように作用しているかを系統的に把握し、フィンの性能を予測しておくことは、フィンの最適設計を行う上で非常に重要となる。第 2 章では、数値解析と実験計画法を用いたパラメータスタディを実施し、各パラメータとフィン性能との関係を明らかにした。その中でルーバピッチ  $L_p$ 、ルーバ角度  $L_a$ 、フィンピッチ  $F_p$  間の相互作用の存在を統計的に明らかにした。これらの相互作用を流路比  $\varepsilon=(F_p/L_p)\tan(L_a)$  で整理し、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示した。

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と考えられる。第 3 章では、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、その空気側の伝熱・圧力損失特性について実験及び CFD 解析による検討を実施した。実験では凹凸平板間の空気流れについて、タグチメソッドを用いたパラメータスタディにより、凹凸の形状と伝熱・圧力損失特性の関係を明確にした。凹凸平板間の流れにおいて、 $j$ ファクター及び  $f$ ファクターのアナログ値

に対して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した．また，凹凸形状と伝熱・圧力損失特性の関係について，CFD解析を用いたパラメータスタディにより明らかにし，凹凸形状をパラメータとしたjファクター，fファクターの予測式の作成を行った．特に凹凸部高さ，テーパ角度等から定義した縮流比，膨張比，なす角を説明変数とすることでjファクター，fファクターを±15%以内に整理することが可能となった．

熱交換器の性能は，空気側の伝熱特性や圧力損失だけでなく，冷媒側の熱伝達・圧力損失等に左右される．特にフィンレス熱交換器のチューブの場合には，空気側のチューブ形状が冷媒流路の形状に制約を与えてしまうため，空気側の伝熱促進と熱交換器の高性能化が必ずしも一致しないことが考えられる．そこで，第4章では，冷媒側伝熱特性も含めた熱交換器の性能予測手法の開発を実施した．数種類の熱交換器に対して実機検証を行い，本予測手法を適用することで実験値を精度よく予測することが可能であることを示した．これにより本性能予測シミュレーションを用いることで，従来熱交換器のみならず，フィンレス熱交換器の性能予測及び熱交換器全体としての最適設計が可能となった．

第5章では，従来熱交換器及びフィンレス熱交換器を対象とした最適設計について検討を実施した．熱交換器の性能は，伝熱性能だけではなく，冷媒側・空気側それぞれの圧力損失によって複合的に決まる．そこでこれらの影響を加味した性能評価指標Yを定義することで，伝熱性能だけではなく，熱交換器の総合的な評価を可能とした．最適化検討では，第4章で構築した性能予測シミュレーションとタグチメソッドを用いたパラメータ設計を行った．熱交換器の性能は，冷凍サイクルの運転状態によって変化する．そこで，冷媒側の境界条件を誤差因子とすることで，運転状態によるYのばらつき(SN比)及び感度の評価を行った．園結果，本論文における条件範囲内では，従来熱交換器の方が最大性能は高いが，SN比を最大化した場合には，フィンレス熱交換器の方が高い性能を得ることが可能であることを示した．