

(別紙2)

審査の結果の要旨

氏名 森本 賢一

本論文は、「高性能コンパクト熱交換器の形状最適設計に関する研究」と題し、4章より成っている。近年、省エネルギー・環境低負荷を実現する高効率エネルギーシステムへの期待が高まり、重要な要素機器である熱交換器の高性能化に対する要請が増している。本論文では、マイクロガスタービンの中核とする小型分散エネルギーシステムへの適用を想定し、コンパクト再生熱交換器の形状最適設計が行われている。従来、様々なタイプのコンパクト熱交換器が提案されているが、ガスタービン用の再生熱交換器として、波状に折り曲げた隔壁を重ねることで流路を構成するプライマリー・サーフェス型熱交換器が有望視される。しかし、熱交換器内部の熱流動は流線曲率や2次流れにより極めて複雑な様相を呈するため、伝熱・圧力損失特性の向上に寄与する熱と流れの構造に対する基本的な知見は乏しい。本論文では、コンパクト熱交換器の高性能化・小型化に向けた有効かつ一般性の高い設計指針を得ることを目的としている。

第1章は、「序論」であり、従来に関連研究を概観し、本研究の目的を述べている。従来知られている伝熱促進機構が分類され、ガスタービン用のコンパクト再生熱交換器としては、複雑形状流路内に生じる2次流れの効果を用いて伝熱促進を行うプライマリー・サーフェス型熱交換器が有望視されることが述べられている。このとき、想定されるレイノルズ数範囲は500以下であり、層流域において圧力損失の増加を抑制しつつ伝熱促進を達成する新たな伝熱促進技術が必要であることが指摘されている。また、近年の計算機性能の飛躍的な向上により、計算負荷の大きな変分法を用いた形状最適化が現実的になりつつあり、特に、随伴方程式系を用いた形状最適化法が、局所の熱流動構造に基づいた理論的な最適化を可能にする設計手法として期待されることが述べられている。

第2章は、「斜め波状壁を用いた再生熱交換器」と題され、本論文で提案する斜め波状壁を用いた熱交換器の熱流動特性について詳細な熱流動解析が行われている。まず、本論文で構築された数値計算手法について述べられており、計算コードの検証が行われている。次に、隔壁により高温・低温流体を千鳥状に配置する対向流型熱交換器の計算モデルが示され、斜め波状壁熱交換器の形状パラメータが熱流動特性に及ぼす影響が系統的に評価されている。その結果、本熱交換器では、斜め波状壁により強度な2次流れ(流れ方向に軸を持つ上下逆回転の渦構造対)が形成され、変形を加えない正方形断面直管ダクトを用いた場合に比べ、層流域 ($Re \sim 200$) における伝熱・圧力損失特性が顕著

に向上することが明らかにされている。特に、対向する高温・低温場の温度連成を考慮した伝熱解析により、流路配置により伝熱特性が有意に変化することが定量的に示されている。また、熱交換器内部の詳細な熱流動構造に基づき、伝熱・圧力損失特性向上のメカニズムが考察され、本熱交換器では熱と流れの非相似性が顕在化することに言及している。さらに、レイノルズ依存性、コンパクト性が評価され、既存のコンパクト熱交換器に比べ、本熱交換器の j/f 因子が極めて大きく、コンパクト性に優れていることが述べられている。

第3章は、「熱流動の随伴解析に基づいた熱交換器の形状最適設計」と題され、運動量・熱輸送の同時最適化を実現することを目的とし、随伴解析を用いた熱交換器の形状最適設計手法の構築が行われている。まず、本最適化計算の制約条件が示され、伝熱・圧力損失特性の重み付き線形和として評価関数が定義されている。次に、随伴解析を用いた既存の最適化手法が拡張され、連続の式、ナビエ・ストークス方程式とともにエネルギー方程式を取り入れた本形状最適化の定式化が行われている。そして、第2章で得られた斜め波状壁流路に本最適化手法が適用され、本手法の妥当性が示されている。まず、形状最適化に対する格子数依存性が評価され、本最適化で用いる格子解像度が十分妥当であることが述べられている。 j/f 因子は繰り返しとともに増加し、圧力損失と総伝熱量の線形和で定義される評価関数を用いて、 j/f 因子が初期形状に対してさらに増大されることが示されている。このとき、本最適化による流路形状変化の様子が示され、剥離を抑制しつつ圧力損失に占めるせん断応力の寄与を増加させるよう形状変形が進行する最適化過程が明らかにされている。また、本最適化の初期形状依存性、レイノルズ依存性が論じられている。

第4章は結論であり、本論文で得られた成果がまとめられている。

以上要するに、本論文では、斜め波状壁を用いた新たな熱交換器形状を提案し、層流域における伝熱・圧力損失特性を顕著に向上できることを示している。また、運動量・熱輸送の同時最適化を実現する観点から、熱流動の随伴解析に基づく形状最適化手法を新たに構築し、伝熱・圧力損失特性の更なる向上を達成している。従来、熱交換器内部の詳細な熱流動に基づいた形状最適化手法は存在しなかったが、本研究により構築された形状最適化法は、理論的に最適な熱交換器設計を可能にし、高性能熱交換器の開発に対して極めて有効な設計手法を提供するものである。従って、本論文は、熱流体機器の最適設計に関する新たな知見を加えるもので、熱流体工学における学術的価値とともに工業的な利用価値が極めて高く、機械工学の上で寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。