

学位論文題名

オフセットフィンの低レイノルズ数域における伝熱・流動特性

学位論文内容の要旨

各種熱エネルギーシステムの高効率化をはかるためには、要素となる熱機器の高性能化が必要である。特に熱交換プロセスは、システム性能を左右する要素機器としての重要な役割を担っている。例えば、次世代高効率発電システムとして注目される熔融炭酸塩型燃料電池においては、内部のガス流れ、温度分布と電流密度分布との間には密接な関係がある。ここでは、主として燃料ガス側の電極付近で発生する反応熱を電極・電解質板や構造材を通して酸化剤ガス側と熱交換させている。なお、この場合の燃料ガスは酸化剤ガスと比べ1桁程度低い低流量域で使用されるのが特徴である。また、宇宙ステーションの熱制御系の主要機器として位置づけられる熱交換器には、打ち上げ時の制約により小型・軽量化が要求される。また、軌道上での低消費動力運転が前提であり、ポンプ動力を削減した低流量域における伝熱促進が重要な課題である。

このように、低流量域における伝熱促進は熱交換器の性能向上に欠くことのできない技術となりつつある。矩形フィンを千鳥状に配置したオフセットフィンでは、フィン前縁から形成される境界層をフィン後縁で中断することによって境界層の発達を抑え、下流域にわたって境界層の周期的な更新による薄膜化を狙ったものである。これは伝熱面の拡大効果と共に作用し、熱伝達特性の向上が期待できることから、宇宙ステーション用熱交換器や熔融炭酸塩型燃料電池の構造材においてもその使用が検討されている。

しかしながら、オフセットフィンの伝熱・流動特性に関する従来の実験式は、フィン後流の乱流化によって境界層が攪乱されて薄膜化する中・高レイノルズ数域において、空気、ガス系媒体に適用されるものであり、熱物性値の異なる液系媒体へ適用できる十分な実用式とはなっていない。また、従来より行われてきた2次元数値解析では、低レイノルズ数域で顕著となる流路底面より発達する境界層とフィン伝熱との関係の評価は不可能であり、3次元的な熱伝達機構に対する考察と各種形状・条件下でのフィン特性に関する研究が必要となってきた。

以上のことを鑑みて、本論文では低レイノルズ数域におけるオフセットフィン流路内の定量的な熱伝達機構および流動特性を明らかにすることを目的として、3次元数値解析および実験を行った。

第1章では、本研究を開始するに至った経緯や、この分野で従来行われてきた研究の主要結果について触れるとともに本研究の目的と概要を述べた。

第2章では、熱移動を伴う流れの現象を記述するために必要な質量、運動量、エネルギーの各保存則を示すとともに、コントロールボリューム法を用いた離散化手法とSIMPLE法を用いた数値解析法について詳細に述べた。

第3章では、対流場とフィンの熱伝導が連成するオフセットフィン流路の複合伝熱機構とフィン面および底面からの温度境界層の発達状況に着目し、3次元数値解析によりフィンの材質が熱伝達特性に影響を及ぼす機構およびその定量的効果を評価した。加えて、解析の妥当性を確認するために実験結果と比較検討した。主要な結果は以下の通りである。

(1) 水を作動媒体とし、フィン材にステンレス鋼を用いた場合には、アルミニウムフィンを用いた場合と比較してフィン面のヌセルト数が低下することがわかった。これはフィン内部の熱伝導特性が悪いことに加えて、底面から発達する温度境界層がフィン面に垂直な方向の流体側の温度勾配を緩和するためであり、底面温度境界層の発達によるフィン面の熱伝達抑制効果といえることができる。

(2) 熱的に十分発達した領域における底面の平均ヌセルト数は、矩形ダクト流の値にほぼ等しく、レイノルズ数の影響は僅少である。一方、フィン面の平均ヌセルト数は、レイノルズ数の減少にともない低下する。

(3) オフセットフィン流路の上下面をヒータ加熱した条件下において伝熱流動実験を行った結果、熱伝達および圧力損失特性の実験結果は解析結果とよく一致し、解析の妥当性が確認できた。

第4章では、オフセットフィン流路断面のアスペクト比、フィン長さ、フィン厚などの形状パラメータと、流体とフィンの熱伝導率比、プラントル数などの熱物性パラメータが熱伝達特性に与える影響を数値解析により調べ、各種条件下で主として働く伝熱促進機構について考察を試みた。主要な結果は以下の通りである。

(1) フィン面近傍の境界層は各フィンが独立なオフセットフィン特有の助走域的特徴を有しており、フィンに対する流体の熱伝導率比が大きい場合、あるいはプラントル数が小さい場合に熱伝達特性は低下する。

(2) 流路断面のアスペクト比（フィン高さ／フィンピッチ）には、主に流体とフィンの熱伝導率比によって最適値が存在し、加熱面ベースのヌセルト数が最大となるアスペクト比は、この熱伝導率比が大きくなるほど小さくなる。

(3) 流体とフィンの熱伝導率比を大きくしていくと、伝熱促進機構は、オフセットフィンに特有な境界層更新によるフィン面熱伝達特性の向上効果がなくなり、フィン設置による単なる伝熱面積の拡大効果へと変化していくが、その境界は流路断面のアスペクト比に大きく影響される。

(4) レイノルズ数域の低下に伴い、オフセットフィンの摩擦損失係数は、同じアスペクト比を有する矩形ダクトの発達域での値に近づき、流れ方向のオフセットフィン長さが大きいほどこの傾向は大きい。

第5章ではフィンの成形性の問題に着目した。流路の水力直径を小さくしていくと、製造上の限界からフィンの配置が完全な千鳥状ではなく、どちらか一方に寄った配置上のずれが生じる。本章では、フィン配置のずれが熱伝達および圧力損失特性におよぼす影響を数値解析により調べた。主要な結果は以下の通りである。

(1) フィンの位置が隣接フィン間の中央からずれるにしたがって、フィン片面の平均ヌセルト数は、流路幅が広がる側ではこれに面した流路における平均流速が増加して極大値が表れる。一方、狭くなる側は、これに面した流路における平均流速の低下に伴い、平均ヌセルト数が減少するが、流路が非常に狭くなると、隣接領域の低温の主流の影響を受け、ヌセルト数が少し上昇するため極小値が表れる。

(2) オフセットフィンを設置した底面に相当する加熱面ベースのヌセルト数は、フィン位置が隣接フィン間の中央からずれると減少するが、流体とフィンの熱伝導率比が大きいと、その影響は小さい。最大伝熱性能の95%以上を確保できるフィン位置の横方向のずれの許容範囲は、本解析条件においては、水-ステンレス鋼フィンの場合はフィンピッチに対して $\pm 15\%$ 、水-アルミニウムフィンの場合は $\pm 7\%$ であった。

(3) フィン配置が中央からずれるにしたがって、摩擦損失係数は減少するが、この減少割合は、流路断面のアスペクト比が大きい場合ほど大きい。

第6章は結論であり、本研究において得られた結果を要約したものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 伊 藤 献 一
副 査 教 授 工 藤 勲
副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎

学 位 論 文 題 名

オフセットフィンの低レイノルズ数域における伝熱・流動特性

矩形フィンを千鳥状に配置したオフセットフィンは、熱伝達特性の向上が期待できることから、宇宙ステーション用熱交換器や熔融炭酸塩型燃料電池の構造材においてもその使用が検討されている。しかしながら、オフセットフィンの伝熱・流動特性に関する従来の実験式は、中・高レイノルズ数域において、空気、ガス系媒体に適用されるものであり、熱物性値の異なる液系媒体へ適用できる十分な実用式とはなっていなかった。また、従来より行われてきた2次元数値解析では、低レイノルズ数域で顕著となる流路底面より発達する境界層とフィン伝熱との関係の評価は不可能であり、3次元的な熱伝達機構に対する考察と各種形状・条件下でのフィン特性に関する研究が必要となってきた。以上のことを鑑みて、本論文では低レイノルズ数域におけるオフセットフィン流路内の定量的な熱伝達機構および流動特性を明らかにすることを目的として、3次元数値解析および実験を行っている。

本論文では、対流場とフィンの熱伝導が連成するオフセットフィン流路の複合伝熱機構と、フィン面および底面からの温度境界層の発達状況に着目した3次元数値解析を行った結果、水を作動媒体とし、フィン材にステンレス鋼を用いた場合には、底面温度境界層の発達によるフィン面の熱伝達抑制効果により、アルミニウムフィンを用いた場合と比較してフィン面のヌセルト数が低下することを明らかにしている。またこの解析と同じ条件で実験を行い、その結果を解析結果と比較し、解析の妥当性を確認している。

次に、各種形状パラメータと、熱物性パラメータが熱伝達特性に与える影響を数値解析により調べ、各種条件下で主として働く熱伝達促進機構について考察を試みた結果、フィンに対する流体の熱伝導率比が大きい場合、あるいはプラントル数が小さい場合に熱伝達特性は低下すること、流路断面のアスペクト比には、主に流体とフィンの熱伝導率比によって最適値が存在することを明らかにしている。

最後にフィン配置にずれが生じた場合、このずれが熱伝達および圧力損失特性におよぼす影響を数値解析により調べ、オフセットフィンを設置した底面に相当する加熱面ベースのヌセルト数は、フィン位置が隣接フィン間の中央からずれると減少するが、流体とフィンの熱伝導率比が大きいと、その影響は小さく、最大伝熱性能の95%以上を確保できるフィン位置の横方向のずれの許容範囲は、本解析条件においては、水-ステンレス鋼フィンの場合はフィンピッチに対して $\pm 15\%$ 、水-アルミニウムフィンの場合は $\pm 7\%$ であることを見いだしている。またフィン配置が中央からずれるにしたがって、摩擦損失係数は減少するが、この減少割合は、流路断面のアスペクト比が大きい場合ほど大きいことを示している。

これを要するに著者は、低レイノルズ数域におけるオフセットフィン流路内の定量的な熱伝達機構および流動特性を明らかにすることにより、熱工学上有益な多くの知見を得ており、熱工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。