

審査の結果の要旨

氏名 福島 直哉

本論文は、「菱形管内乱流の運動量・熱輸送機構」と題し、6章より成っている。

資源・環境問題の高まりから、熱流体機器の更なる高効率化は急務となっている。タービンや熱交換器などの熱流体機器ではその性能向上のため、複雑な3次元形状をもつ翼や流路を用いている。また、これらの機器の多くでは伝熱増進や剥離防止の効果を期待して、乱流域で運用されている。近年の計算機の発達により、開発におけるコストや時間の軽減が期待できるCFDを用いた設計が普及しつつある。しかし、複雑形状壁が乱流熱流動へ与える影響についての理解、および、乱流モデル(RANS)による予測精度は不十分であり、CFD設計の利点を十分に生かせていない。一方、非円形管内乱流では、主流方向垂直断面内に平均的に第2種2次流れが存在し、伝熱・摩擦特性に大きな影響を与えることが知られている。主流方向垂直断面内壁面形状が乱流熱流動へ与える影響については、壁と壁が直角に交わる正方形管内乱流に関する研究が広く行われているが、直角以外の角に沿う乱流に関する知見は非常に少ない。本論文は、頂角角度の異なる菱形管内乱流の直接数値シミュレーション(DNS)を行い、交差角度が異なる壁が乱流運動量・熱輸送機構へ与える影響を系統的に明らかにすることを試みたものである。

第一章は序論であり、まず、壁乱流の熱流動について、過去の研究を概観している。まず、乱流に及ぼす固体壁の3つの効果(非透過性・粘着条件・大速度勾配)や一様な壁に沿う乱流に関する研究について概説している。次に、2次流れを有する主流方向垂直断面内に非一様な壁に沿う乱流に関しては、壁と壁が直交する正方形乱流に関する研究にほぼ限定されることを指摘し、その正方形管内乱流に関する高レイノルズ数域での実験や低レイノルズ数域での数値計算による幅広い知見について詳細に纏めている。また、乱流における運動量・熱輸送の促進効果は従来定性的に論じられているが、一様な壁に沿う乱流について層流と乱れの摩擦係数への寄与の定量的な評価手法が近年提案されたことを述べている。そして、このことから、交差角度が異なる壁が乱流運動量・熱輸

送機構へ与える影響を菱形管内乱流の DNS を通じて解明すること、乱れだけでなく 2 次流れによる運動量・熱輸送機構への寄与を定量的に評価すること、数値計算の利点を生かし実験では計測困難なレイノルズ応力などの輸送方程式に関する RANS 検証用のデータベースを構築すること、以上を本論文の目的とすることが述べられている。

第二章では、熱交換器性能評価に基づき、伝熱面の性能評価指標を定義している。隔壁型対向流熱交換器を仮定し、その性能（効率・小型化）へ与える様々な影響因子の中から、伝熱面形状が熱流動様式を変化させ、伝熱・摩擦特性に与える影響因子のみを評価することとし、熱交換器効率・小型化に関する伝熱面評価指標をそれぞれ無次元数の関数として定義している。さらに、従来提案されている評価指標との比較を行い、その利点を明らかにしている。

第三章では、一連の DNS を行うための、数学的な定式化と、数値解法について詳説している。菱形管という比較的複雑な流路形状内の乱流熱流動を対象とし、複雑な境界壁での伝熱・摩擦特性を高精度で計算する必要性から、一般座標系により構造格子を境界に沿って作成する境界適合格子が採用されている。また、RANS 検証用データベースとなる、レイノルズ応力・乱流熱流束・温度乱れの輸送方程式各項の計算を高精度で行うために、速度・圧力・温度を全てセル中心に配置するコロケート格子が採用されている。支配方程式の物理的意味をできるだけ忠実に再現する離散化法を採用し、その運動エネルギーなどの保存特性を明らかにしている。

第四章では、まず、頂角角度の異なる 5 種類の菱形管内乱流の DNS を行うに当たり、その計算条件について纏めている。温度場境界条件には対向流型熱交換器を想定し、等熱流束条件 (H1 条件) が課されている。計算領域や格子解像度は、従来の研究により妥当であると考えられる値に設定されている。その計算結果を用い、第二章で定義した伝熱面性能評価指標により、各菱形管の伝熱・摩擦特性を比較検討している。その結果、本条件下では、熱交換器効率向上・小型化の観点でともに、正方形管の伝熱・摩擦特性が伝熱面として最も優れ、局所伝熱・摩擦特性としては鈍角近傍が優れていることを明らかにしている。そのことから、熱交換器に用いる伝熱面としては、鈍角のみから成る断面管を用いるべき、との流路断面形状に関する一般的な設計指針を見出している。

さらに、一様な壁に沿う乱流における摩擦係数への層流・乱れの寄与を定量的に評価する手法を、菱形管内乱流に応用し、摩擦係数だけでなく、熱伝達ファ

クター，主流方向運動量・熱の輸送への層流・乱れ・2次流れの寄与を定量的に評価している．その結果，乱れは角近傍以外で伝熱・摩擦特性向上へと寄与し，主流方向運動量・熱を主に壁垂直方向へ輸送することを定量的に明らかにしている．また，2次流れのエネルギーは乱れエネルギーに比べ非常に小さいが，2次流れの運動量・熱輸送への寄与の大きさは乱れによる寄与と同程度であり，主流方向運動量・熱を主に壁接線方向へ輸送し，壁の局所伝熱・摩擦特性を均一化するように働くこと，また，平均伝熱・摩擦特性への寄与は数%程度と小さいこと，を定量的に明らかにしている．

第五章では，まず，平均主流方向渦度や平均2次速度の方程式中に存在する，レイノルズ応力の非等方性・非一様性に起因する2次流れの生成項を各菱形管について比較し，角度の異なる鋭角・鈍角，それぞれの角で2次流れが自律的に生成されることを明らかにしている．次に，瞬時場速度場の3次元可視化を行い，鈍角・鋭角側ともに，角近傍で乱流秩序構造の強度が，角から離れた壁近傍に比べ相対的に弱いことを確認している．さらに，レイノルズ応力の対角線近傍での特徴的な分布（小さな乱れエネルギー，角近傍での1成分乱れ，角から離れた対角線近傍での等方的な乱れ）を確認し，その特徴的な分布の鋭角・鈍角における角度依存性を明らかにしている．

最後に，レイノルズ応力が特徴的な分布を示す対角線上で，その輸送方程式各項を計算し，その生成・再分配機構を詳細に論じている．その結果から，角の効果を，角近傍での「対角線方向乱れへの再分配抑制および主流方向乱れの生成抑制，対角線垂直方向乱れへの再分配促進および対角線垂直方向2次流れの生成」と，側壁の効果を，角から離れた対角線近傍での「対角線垂直方向乱れの速度・圧力勾配相関項抑制と対角線方向乱れへの再分配の卓越，それらの寄与に依るレイノルズ応力の等方化，および，対角線方向2次流れの生成」と定義している．しかし，本論文のような低レイノルズ数条件では乱流構造のスケール分離が明確でなく，角の効果と側壁の効果を明確に分離できないので，高レイノルズ数域での検証が必要であるとも述べている．

第六章は結論であり，本論文で得られた成果をまとめている．

付録では，レイノルズ応力，乱流熱流束，温度乱れの各輸送方程式について，RANS 検証用データベースを構築し，各項の分布を明らかにしている．

以上，本論文では，菱形管内乱流の直接数値シミュレーションを行い，交差角

度が異なる壁が乱流熱流動へ与える影響を明らかにしている。各菱形管の伝熱・摩擦特性の比較により、伝熱面としての流路断面形状設計に関する指針を見出している。また、伝熱・摩擦特性や運動量・熱の輸送への乱れや 2 次流れの役割や寄与を定量的に明らかにしている。さらに、レイノルズ応力やその生成機構への角・側壁の効果を明らかにするとともに、RANS 検証用データベースの構築している。これらの結果は、熱流体機器の流路断面形状設計に関する基本的な指針を与えるとともに、複雑形状壁に沿う乱流における運動量・熱輸送機構について新たな知見を加え、それらの数値予測精度向上にも繋がるものであり、熱流体工学をはじめ機械工学の学術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。