

論文の内容の要旨

論文題目 菱形管内乱流の運動量・熱輸送機構

氏 名 福島 直哉

正方形を含む 5 種類 (鋭角角度 $\theta = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$) の菱形管内完全発達乱流の直接数値シミュレーションを行った。速度・圧力場の支配方程式は連続の式・Navier-Stokes 方程式、温度場の支配方程式はエネルギー保存式である。バルクレイノルズ数 $Re_b = U_b D_h / \nu \approx 4470$, プラントル数 $Pr = 0.71$ とし、速度場境界条件として壁で粘着条件、主流方向に周期境界条件を、温度場境界条件として主流方向に等熱流束条件かつ主流方向垂直断面内壁に等温条件 (H1 条件) を課した。

速度・圧力・温度をセル中心に配置したコロケート構造格子による一般座標系計算手法を用いた。空間離散化として 2 次精度中心差分、時間離散化として対流項に低容量 3 次精度 Runge-Kutta 法、粘性項に 2 次精度 Crank-Nicolson 法、時間進行法はフラクショナル・ステップ法を用いた。

5 種類の菱形管内乱流について、平均・局所摩擦係数 f_0, f ・平均・局所熱伝達ファクター j_0, j , 平均主流方向速度、温度分布をはじめとし、2 次流れ、レイノルズ応力、乱流熱流束などの各種統計量の菱形管断面内分布を取得し、その角度依存性を調べた。

菱形管の伝熱面としての性能を評価するために、熱交換器性能 (効率・小型化) 評価に基づき、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のみを評価対象とする、伝熱面の性能指標を導出した。その伝熱面性能評価指標に基づき、菱形管の伝熱面性能を評価し、伝熱面としての流路断面形状に関する基本的な設計指針を得た。

Fukagata *et al.* (2002) の手法を応用し、菱形管内乱流において、層流・乱れ・2 次流れの摩擦係数 f , 熱伝達ファクター j への寄与を定量的に評価した。さらに、乱流拡散項・2 次流れによる対流項の各項により生成される、バルク平均が零の平均速度・平均温度をそれぞれ定義し、それらを主流方向運動量・熱の菱形断面内輸送の定量的な指標として用いた。

2 次流れおよびその生成機構への角度依存性を明らかにするため、主流方向平均渦度方程式、平均 2 次速度方程式の各項について菱形管断面内分布を調べた。また、レイノルズ応力およびその生成機構への側壁および角の影響、その角度依存性を明らかにするため、レイノルズ応力とその輸送方程式の各項について菱形管断面内分布を調べた。乱流熱流束の輸送方程式、温度乱れの輸送方程式の各項も計算し、複雑な断面形状内熱流動の RANS 予測精度向上のための乱流モデル検証用データベースを構築した。レイノルズ応力の輸送方程式、乱流熱流束およびそ

の輸送方程式、温度乱れおよびその輸送方程式の菱形管断面分布を、それぞれ付録に記した。

以下の結論を得た。

1. 熱交換器の効率（ポンプ動力あたり熱交換量）・小型化（伝熱面積・体積当たり熱交換量）への影響因子として、熱流動因子・幾何学因子・設計因子の3つを定義した。

1. 設計因子：伝熱面形状に依らず、熱交換器やシステムの設計条件に依る物性値や各種拘束条件、設計変数の影響

2. 幾何学因子：伝熱面の幾何学形状のみに依る影響

3. 熱流体因子：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

本研究では、伝熱面形状による伝熱・摩擦特性への影響を明らかにするため、熱流体因子のみを評価対象とした。伝熱面形状の評価指標として、熱交換器の伝熱・摩擦性能に対応する熱流体因子 Nu/fRe_b^3 、熱交換器の小型化に対応する熱流体因子 Nu をそれぞれ定義した。

2. バルクレイノルズ数 Re_b が等しい条件下での、熱交換器小型化に関する伝熱面評価指標、および、ポンプ仕事当たりの熱交換量（熱交換器効率向上）に関する伝熱面評価指標である、熱流体因子 $j, j/f$ をそれぞれ用い、5種類の菱形管の伝熱面性能を評価した。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・摩擦特性が最も優れている。また、鋭角近傍と鈍角近傍のそれぞれの局所伝熱・摩擦特性を評価すると、熱交換器効率・小型化の観点でともに鋭角より鈍角近傍の特性が優れている。以上から、熱交換器に用いる伝熱面形状としては、鈍角のみから成る断面形状管（例えば、六角形断面管）を用いるべきである、との設計指針を得た。

3. 鋭角側での伝熱・摩擦特性悪化は主に層流・乱れの寄与が原因である。角近傍、特に鋭角近傍での層流解の性能が悪化するのには、温度場境界条件として主流方向等熱流束条件を課したためである。乱れは角近傍以外では伝熱・摩擦特性向上へと寄与し、主流方向運動量・熱を管中心部分から角から離れた壁近傍へと主に壁垂直方向へ輸送する。

2次流れ速度エネルギーは乱れエネルギーに比べ非常に小さいが、主流方向運動量・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る。2次流れは、主流方向運動量・熱を角から離れた壁近傍から対角線近傍へ主に壁接線方向へ輸送し、壁での局所伝熱・摩擦特性を均一化するように働く。平均伝熱・摩擦特性への2次流れの寄与はいずれも数%程度である。

4. 5種類の全ての菱形管内乱流で、2次流れの大きさは最大値でバルク平均速度 U_b の約2%程度である。正方形管内乱流においては、従来の研究結果と同様に、2次流れにより、4つの対称

な渦対が形成された。鋭角近傍では θ が小さくなるにつれ、強く歪んだ渦対が現れ、その中心は角から離れる。一方、鈍角近傍では鋭角側の渦対に比べ、小さな丸い渦対が現れ、鋭角角度が大きくなるとその中心は角へと近づく。

2次流れにより形成される渦度、主流方向平均渦度の方程式には、対流項、粘性項に加えて、生成項として主流方向垂直断面内におけるレイノルズ応力の非等方性・非一様性に起因する項が存在する。これの生成項は、5種類の菱形管内乱流における全ての鈍角側、鋭角側で十分な値を持っており、それぞれの角で自律的に2次流れは生成されている。

5. 菱形管内乱流のレイノルズ応力 $\overline{u_i u_j}$ は対角線近傍で特徴的な分布を示す。鋭角側・鈍角側ともに、対角線近傍で乱れエネルギーが抑制され、鈍角側より鋭角側の対角線近傍で強く抑制される。また、角近傍では1成分乱れに近づき、対角線近傍で角から離れると急激に等方的な乱れへと移行する。鋭角角度 θ が小さくなると、鋭角側対角線近傍では、1成分乱れの領域が角から比較的広範囲に分布してゆく。 θ が小さくなると、鈍角側対角線近傍では、1成分乱れの領域は角極近傍に限定されてゆき、等方的な乱れの領域が角に近づいてくる。対角線から離れた領域では、レイノルズ応力 $\overline{u_i u_j}$ は、菱形管の境界条件である壁の非一様性から $\overline{u_1 u_3}$ が値をもつものの、他の成分については一様な壁に沿う乱流におけるレイノルズ応力と相似な分布を示す。

6. 鋭角側対角線近傍での乱れエネルギーの抑制は主流方向平均速度勾配の減少が主因である。鈍角側では平均速度勾配は一様な壁乱流と同程度に十分大きい、その平均速度勾配が大きい角近傍において対角線方向乱れへの再分配抑制が抑制される。平均速度勾配が大きい角近傍での対角線方向乱れへの再分配抑制が、鈍角側対角線近傍での乱れエネルギー抑制の主因である。鋭角側・鈍角側ともに対角線全域において、主流方向乱れから主流方向垂直断面内乱れへの再分配は抑制されている。

角の効果として、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」を、側壁の効果として、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」を定義する。しかし、本研究では計算負荷低減のため、レイノルズ数を低く設定している。低レイノルズ数域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することはできない。高レイノルズ数域での検証が必要である。

参考文献 Fukagata, K, Iwamoto, K. & Kasagi, N., 2002, "Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows," Phys. Fluids, 14, 11, L73-L76.