

氏名	櫻井 元康 <small>さくらい もとやす</small>
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博乙第127号
学位授与年月日	平成26年3月4日
学位授与の要件	学位規則第4条2項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)システム設計工学系専攻
学位論文題目	対称急拡大流路を通過する層流はく離流れの数値的研究
論文審査委員	主査 山口大学 教授 望月 信介 山口大学 教授 羽田野 袈裟義 山口大学 教授 加藤 泰生 山口大学 准教授 朝位 孝二 山口大学 准教授 田之上 健一郎

【学位論文内容の要旨】

流れのはく離は構造物や輸送機器周りの流れ, 生物体内の血流などの幅広い分野および広範囲のスケールにおいて見られる基本的な現象であり流体力学の基礎として重要である。また, はく離を伴う流れは速度分布や壁面せん断応力などを変化させ, エネルギー損失や物質の拡散・混合などに大きな影響を与える。したがって, その流れの制御は各種機器の性能向上や省エネルギーに関連し工学的に極めて重要である。典型的なはく離・再付着流れとして, これまで多くの後ろ向きステップ流における実験および数値計算結果が報告されているが, はく離せん断層は強い逆圧力勾配の影響により極めて複雑であるため, 流れに与える影響因子について一致した見解には至っていない。また, 後ろ向きステップ形状を流路の上下壁に設置した対称急拡大流路内の流れは非対称流れを形成することが報告されているが, 分岐レイノルズ数 Rec と流れの代表スケールおよび流路幾何パラメータとの関係などは不明である。一方, 現実の流れは三次元流であることが多いが, 三次元のはく離と再付着は二次元の場合とは全く異なる様相を示すため, 二次元流の結果からその流れを予測することは困難となる。三次元流路であるダクト内後ろ向きステップ流れでは, 側壁近傍を通過する流体粒子はその出発位置のわずかな変更が軌跡を大きく変えること, あるいは一部の流体粒子はステップ上流から循環渦内へ流入し渦内で螺旋運動しながら流出する挙動を示すことが報告されている。このような運動は二次元急拡大および軸対称急拡大流路内流れでは見られず, 三次元流を特徴付ける重要な運動形態であると考えられる。したがって, 三次元流に存在する dw/dy や dv/dz などの縦渦に関連する速度勾配が流れの変形や非線形性に及ぼす影響を調査することは重要である。

そこで本研究では, 急拡大を伴う二次元および三次元流路内の層流はく離流れを調査し, 拡大部下流に形成される循環渦領域の構造, 非対称流れおよび非定常流れへの分岐, 流れの制御の可能性について明らかにすることを目的とする。第一段階として二次元急拡大流路内の流れを差分法(流れ関数-渦度法)により解き, 流路拡大比 $\alpha=1.4\sim 4.0$, レイノルズ数 $Re=20\sim 1600$ の範囲の定常流を系統的に調査した。流れパターンと圧力勾配との関係および分岐レイノルズ数を調査し, はく離渦長と各パラメータとの間の相似性について検討した。また, 流路の局所的幾何形状変化として上下のステップ位置をずらすことにより拡大部下流の流れ方向および横断面方向圧力勾配を変化させ, はく離循環渦長さの制御の可能性を調査した。第二段階として正方形急拡大流路を通過する三次元層流の流れを OpenFOAM の有限体積法を用いて解き, 拡大比(面積比)4, $Re=20\sim 1900$ の範囲の定常流および非定常流を調査した。流れパターン, 拡大部下流に形成される循環渦領域の広がり, 流れ場の平均速度と圧力および渦度から流れ構造を調査した。また, 流体粒子のラグランジュ的な挙動の調査から三次元渦の挙動や形状を明らかにすることを試みた。さらに, 非定常流へ移行するレイノルズ数, 速度および変動速度から見た流れ構造パターン, および導入攪乱が流れに与える影響を調査した。

これらの調査結果を基にして検討を行った結果, 以下の結論が得られた。

二次元急拡大流路における主な結論

- はく離渦長さおよびステップ高さを用いて規格化したはく離流線の形状は, 下壁側ではレイノルズ数および上下ステップずれ間隔によらず一致しており相似性が見られる。
- 対称流れから非対称流れへの分岐レイノルズ数 Rec は流路拡大比 α によって異なり, $\alpha=1.4$ から 3 の間で大きく減少するが, $\alpha=3$ から 4 へと増加するに伴い Rec の値は緩やかに減少する。
- 対称流路におけるレイノルズ数に対するはく離渦長さの変化は, それぞれの拡大比 α における分岐レイノルズ数

Re_c と Re_c におけるはく離渦長さとで規格化すると、 α によらず相似性を示す。これより、いかなる α についてもはく離渦長の予測が可能となる。

正方形急拡大流路における主な結論

- (1) 拡大部下流の循環渦領域で螺旋運動をする挙動および循環渦への流入流出構造が見られる。螺旋渦の内側の領域にはリング状の三次元渦構造が存在している。
- (2) 流れ場には対称断面である二つの対角断面、水平・垂直断面および壁面で挟まれた領域に、それぞれ規則的な八つの構造が存在している。
- (3) 流れ構造はレイノルズ数で三分類できる。 $Re \leq 900$ の領域は定常対称流のみが存在し、 $900 < Re \leq 1300$ の領域は不安定な定常対称流と有限振幅流れのどちらかの構造が表れ、 $Re > 1300$ の領域は有限振幅流れのみが安定して存在する。
- (4) レイノルズ数を増加させることにより、有限振幅流れの崩壊開始位置、RMS 値が最大値をとる位置および崩壊終了位置を上流側へ移動させることが可能となるため、再付着点距離の制御が可能となる。

【論文審査結果の要旨】

流れのはく離は構造物や輸送機器周りの流れ、生物体内の血流などの幅広い分野および広範囲のスケールにおいて見られる重要な現象である。本論文は、剥離を伴う基本的な流れについて数値解析を行ないその構造を検討した。はく離を伴う流れは速度分布や壁面せん断応力などを変化させ、エネルギー損失や物質の拡散・混合などに大きな影響を与える。その流れを制御することは各種機器の性能向上や省エネルギーに関連し工学的に極めて重要である。典型的なはく離・再付着流れとして、これまで多くの後ろ向きステップ流における実験および数値計算結果が報告されているが、はく離せん断層は強い逆圧力勾配の影響により極めて複雑であるため、流れに与える影響因子について一致した見解には至っていない。また、現実の流れは三次元流であることが多いが、三次元のはく離と再付着は二次元の場合とは全く異なる様相を示すため、二次元流の結果からその流れを予測することは困難となっている。三次元流路であるダクト内後ろ向きステップ流れでは、側壁近傍を通過する流体粒子はその出発位置のわずかな変更が軌跡を大きく変えること、あるいは一部の流体粒子はステップ上流から循環渦内へ流入し渦内で螺旋運動しながら流出する挙動を示すことが報告されていた。このような運動は二次元急拡大および軸対称急拡大流路内流れでは見られず、三次元流を特徴付ける重要な運動形態であると推測された。したがって、三次元流に存在する縦渦とそれにより生じる付加歪みに関連する速度勾配が流れの変形や非線形性に及ぼす影響を調査する必要があった。

本論文では、急拡大を伴う二次元および三次元流路内の層流はく離流れを調査し、拡大部下流に形成される循環渦領域の構造、非対称流れおよび非定常流れへの分岐、流れの制御の可能性について明らかにすることを目的とした。第一段階として二次元急拡大流路内の流れを差分法（流れ関数-渦度法）により解き、流路拡大比 $\alpha = 1.4 \sim 4.0$ 、レイノルズ数 $Re = 20 \sim 1600$ の範囲の定常流を系統的に調査した。流れパターンと圧力勾配との関係および分岐レイノルズ数を調査し、はく離渦長と各パラメータとの間の相似性について検討している。また、流路の局所的幾何形状変化として上下のステップ位置をずらすことにより拡大部下流の流れ方向および横断面方向圧力勾配を変化させ、はく離循環渦長さの制御の可能性を調査している。第二段階として正方形急拡大流路を通過する三次元層流の流れを OpenFOAM の有限体積法を用いて解き、拡大比（面積比）4、 $Re = 20 \sim 1900$ の範囲の定常流および非定常流を調査した。流れパターン、拡大部下流に形成される循環渦領域の広がり、流れ場の平均速度と圧力および渦度から流れ構造を明らかにした。また、流体粒子のラグランジュ的な挙動の調査から三次元渦の挙動や形状を明らかにすることを試みた。さらに、非定常流へ移行するレイノルズ数、速度および変動速度から見た流れ構造パターン、および導入攪乱が流れに与える影響に着目した。

これらの研究結果を基に検討を行い、以下の結論が得られている。

二次元急拡大流路における研究成果

- はく離渦長さおよびステップ高さを用いて規格化したはく離流線の形状は、下壁側ではレイノルズ数および上下ステップずれ間隔によらず一致しており相似性が見られる。
- 対称流れから非対称流れへの分岐レイノルズ数 Rec は流路拡大比 α によって異なり、 $\alpha=1.4$ から 3 の間で大きく減少するが、 $\alpha=3$ から 4 へと増加するに伴い Rec の値は緩やかに減少する。
- 対称流路におけるレイノルズ数に対するはく離渦長の変化は、それぞれの拡大比 α における分岐レイノルズ数 Rec と Rec におけるはく離渦長さとして規格化すると、 α によらず相似性を示す。これより、いかなる α についてもはく離渦長の予測が可能となる。
- 上下ステップのずれ間隔の増加に伴い、下壁はく離渦長は $Re/Rec < 2.0$ の領域で対称流路の場合の渦長に比べ短くなる。

正方形急拡大流路における研究成果

- 拡大部下流の循環渦領域で螺旋運動をする挙動および循環渦への流入流出構造が見られる。螺旋渦の内側の領域にはリング状の三次元渦構造が存在している。
- 流れ場には対称断面である二つの対角断面、水平・垂直断面および壁面で挟まれた領域に、それぞれ規則的な八つの構造が存在している。
- 流れ構造はレイノルズ数で三分類できる。 $Re \leq 900$ の領域は定常対称流のみが存在し、 $900 < Re \leq 1300$ の領域は不安定な定常対称流と有限振幅流れのどちらかの構造が表れ、 $Re > 1300$ の領域は有限振幅流れのみが安定して存在する。
- レイノルズ数の増加により、有限振幅流れの崩壊開始位置、RMS 値が最大値をとる位置および崩壊終了位置を上流側へ移動させることが可能となるため、再付着点距離の制御が可能となる。

数値計算により、対称流路内の非対称現象を解明したこと、三次元で非定常な現象に至る非線形現象を解析し、これらの結論を導くに至った点が評価される。

本審査会においては、数値計算手法における精度検証と妥当性の説明、攪乱の詳細とその物理的解釈、研究の実用性に対する応用例の検討結果、および今後の展望が十分な調査研究資料に基づき説明された。公聴会においては、数値計算のみで非線形現象の解明をされたことに対する精度の確認方法、実験的な確認の必要性の有無について質問がなされた。いずれの質問に対しても、適切な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。