

博士学位論文審査要旨

2012年1月10日

論文題目： 柱状物体を過ぎる流れの不安定性と遷移

学位申請者： 武本 幸生

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 水島 二郎

副査： 工学研究科 教授 千田 衛

副査： 工学研究科 教授 高岡 正憲

要 旨：

橋脚や電柱あるいは高い建造物などのまわりの流れは、物理モデルとして柱状物体を過ぎる流れとして近似される。また、熱交換器内の管群・風洞内のスクリーン・タービン内の翼列などを過ぎる流れは、規則的に配置された複数の柱状物体を過ぎる流れである。これらの流れは柱状物体の配置や流速などの条件によってさまざまに遷移し、機械の性能や騒音に大きく影響する。そのため、1本あるいは複数の柱状物体を過ぎる流れの遷移と性質を明らかにすることは物理的にも工学的にも重要である。

本論文では、数値シミュレーション・非線形微分方程式の解の分岐理論および流れの安定性理論を用いて柱状物体を過ぎる流れの遷移とその性質を調べ、その結果を可視化実験を行うことにより比較・検討している。また、数値シミュレーション・解の分岐理論および線形安定性解析によって得られた結果の物理的な意味とその工学的な応用についても議論を行っている。

第1章では、これまで行われてきた柱状物体を過ぎる流れの研究を紹介し、流れの安定性理論の発展と変遷について説明することによって、本研究の位置づけとその意義を説明している。

第2章では、1本の柱状物体を過ぎる流れが定常流から振動流へ遷移する機構について、パルス状攪乱の伝播と成長を調べた。その結果、流れ場中に振動発生し、その振動が維持されるのは、これまで考えられてきたような波束の群速度が0となる対流不安定性から絶対不安定性への遷移ではなく、波束の移流による減衰よりも流れの不安定性による攪乱の成長が卓越するためであることを明らかにし、カルマン渦列の発生と維持の機構を解明した。

第3章では、一様流と垂直方向に等間隔におかれた角柱列の間隙から噴き出すジェットとの相互作用を調べ、柱状物体の配置やレイノルズ数と流れのパターンの関係を明らかにした。その結果、ジェットの合流現象が発生することを見出し、その現象は非線形方程式の解のピッチフォーク分岐として理解できることを示した。

第4章では、円周上に配置された柱状物体列を過ぎる流れのパターンとレイノルズ数の関係を調べ、ホップ分岐およびナイマルク・サッカー分岐によって流れがさまざまな振動流へと遷移することを明らかにしている。

第5章では、柱状物体群を過ぎる流れの熱伝達について調べ、レイノルズ数が連続的に変化してもヌッセルト数には不連続なジャンプが生じることを示した。この不連続性は、複数の解が存在することによってヒステリシスを伴う複雑な分岐が起こることが原因であることを明らかにし、この分岐現象を利用して熱伝達を促進する方法を示した。

以上のように、本論文では柱状物体を過ぎる流れを、数値シミュレーション・非線形方程式の解の分岐解析・安定性解析および実験によって調べ、流れの遷移条件や遷移のメカニズムを明ら

かにしている。

本論文では、柱状物体と流れとの非線形相互作用を調べ、特に流れが振動流へと遷移する機構とその条件を明らかにした。これらの結果は、工学においては流体振動による柱状物体の破損の防止あるいは熱交換機の効率改善のための重要な指針となる。よって、本論文は博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2012年1月10日

論文題目： 柱状物体を過ぎる流れの不安定性と遷移

学位申請者： 武本 幸生

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 水島 二郎

副査： 工学研究科 教授 千田 衛

副査： 工学研究科 教授 高岡 正憲

要 旨：

本論文提出者は、2010年4月から本学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に在学し、各年度において優れた研究成果をあげている。また、英語の資格試験に合格し、ドイツ語についても十分な能力があることが認定されている。

本論文の主たる内容は *Journal of the Physical Society of Japan*、*Physics of Fluids*、*International Journal of Heat and Mass Transfer*、*Physical Review E* に4編の論文が公表されている他、いくつかの英文誌および和文誌に論文が掲載され、十分な評価を得ている。2011年12月24日午前10時より約1時間半にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開催され、種々の質疑応答がなされたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに、講演終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題について口頭試問を実施した結果、いずれも提出者が十分な学力を有することを確認した。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目：柱状物体を過ぎる流れの不安定性と遷移

氏名：武本 幸生

要旨：

島や山などの自然物や、ビルや橋などの人工構造物、船や飛行機などの輸送機械を過ぎる流れは、近似的に柱状物体を過ぎる流れとして取り扱うことができる。また、近接した自然物や輸送機械、人工的に複数の柱状物体が規則的に配置された熱交換器の管群、手摺子、ストレーナ、スクリーン、翼列などを過ぎる流れは、複数の柱状物体を過ぎる流れとみなすことができる。これらの流れは、柱状物体の配置や流速などの条件によってさまざまに遷移する。

柱状物体を過ぎる流れにおいて最も特徴的な現象と思われるベナール・カルマン渦列においては、この100年に非常に多くの研究がなされてきた。その結果、渦列の発生条件や渦の配置の安定性が明らかにされ、ホップ分岐によって定常流が不安定になって振動解へと遷移することが数学的に説明されている。しかし、渦列を誘起する振動が発生する理由や振動が維持されるメカニズムは未だ明らかではない。柱状物体が円柱のように幾何学的に単純な形状であっても、円柱を過ぎる流れはレイノルズ数によってさまざまに変化する。柱状物体を過ぎる流れは、円柱を過ぎる流れの振動としてモデル化して取り扱えることが多いので、円柱を過ぎる流れの振動現象は学術的にも工学的にも重要である。

複数の柱状物体を過ぎる流れの例として、柱状物体列を過ぎる流れがある。流れと直角方向に柱状物体を配置した場合、柱状物体の間隔が大ききときには柱状物体の間隙から噴き出すジェットは互いに平行であるが、間隔が小さくなると複数のジェットが1つに合流することが知られている。空間的に周期的に配置された物体を過ぎる流れを取り扱うときに、物体の配置と同じ周期性や対称性を仮定することは妥当ではない。たとえば、空間的に周期的な形状をもつ建築物や機械の設計では、流れは周期的であると仮定した検討をすることが多い。特に、数値シミュレーションを用いた場合、その計算機容量や計算時間を節約するために厳しすぎる周期性や対称性を仮定すると、物体の配置よりも大きな周期の相互作用を考慮しない設計となってしまう、品質を確保できないことがある。必要最小限の計算資源で妥当な結果を得るためには、流れの周期性やその遷移特性を十分に理解しておく必要がある。しかし、柱状物体列の間隙から噴き出すジェットが合流するメカニズムや条件は明らかではない。

柱状物体列を過ぎる流れには、柱状物体列を直線上ではなく曲線上に配置する場合がある。曲線上に配置する場合の代表例として、円周上に配置された柱状物体列を過ぎる放射状の流れがある。しかし、そのような流れについては、その工学的な応用分野の広さにもかかわらず、ほとんど研究がなされていない。柱状物体列を直線上に配置した場合と同様、曲線上に配置した場合にも相互作用による合流が生じると推測されるが、その発生メカニズムや条件は調べられておらず、直線上に配置した場合との違いについても不明であり、これらを明らかにすることは重要である。

柱状物体が多数列配置された例として、流れに平行な方向と直角な方向の両方に周期的に配置された円柱群を過ぎる流れがある。このような流れは熱交換器によく用いられるので、円柱群を過ぎる流れの熱伝達やヌッセルト数を予測するための実験式が提案され、広く利用されている。しかし、これらの実験式は流れが乱流となるようなレイノルズ数での実験結果を元にしており、流れが定常流から振動流へ遷移するレイノルズ数の範囲では、正確にヌッセルト数を予測することはできない。最近では、省スペースや省エネルギー化の要求から、小型の熱交換器が必要とされており、このような熱交換器内の流れは定常流や振動流となることがある。それゆえ、熱交換器の小型化のためには、定常流から振動流へと遷移するレイノルズ数での伝熱特性を予測することが重要であるが、柱状物体群を過ぎる流れの遷移による熱伝達への影響は明らかでない。

一般に、流体を取り囲む境界が対称性をもち静止している場合を考えると、レイノルズ数が十分小さいときには流れ場も境界と同じ対称性をもち、流れは定常である。レイノルズ数をゆっくりと大きくしていくと、レイノルズ数がある臨界値になったとき、流れは不安定となって対称性が破れ、元の流れとは異なる別の定常な流れや、振動流へ遷移する。こうして生じた新たな流れは、さらにレイノルズ数が大きくなると再び不安定となり、より複雑な流れ場のパターンをもつ流れへと遷移する。このような流れの不安定性と遷移が繰り返し生じることにより、空間的に複雑な構造をもち、乱雑な時間的変化をする流れへと遷移する。本論文では、このような流れの安定性を考えることによって、柱状物体を過ぎる流れの遷移を調べている。流れの数値シミュレーションおよび線形安定性解析によって解の分岐構造を調べ、解が持つ物理的な意味と、工学的な応用について議論している。また、同時に可視化実験を行い、数値計算結果との比較・検討も行っている。

本論文は、第1章から第6章までで構成されている。第1章では、柱状物体を過ぎる流れについて、柱状物体を過ぎる流れの研究の歴史と、流れの安定性理論を説明することによって、本研究の意義と位置づけを行っている。

第2章では、1つの円柱を過ぎる流れの振動が維持されるメカニズムについて数値的に調べている。流れ場のある点に衝撃力を与えると局所的な攪乱が発生するが、この攪乱は瞬時に円柱直後まで伝わり、そこで波束形の固有モードを誘起することが示されている。また、非平行な流れを平行流近似したときの古典的な対流不安定と絶対不安定の概念を拡張してパッシブ不安定とアクティブ不安定を定義し、それぞれのモードの増幅率を評価している。計算したモードの増幅率から、レイノルズ数が全体不安定の臨界レイノルズ数より小さいとき、円柱後方のある広さの領域はパッシブ不安定であるが流れ場全体はアクティブ安定であることと、レイノルズ数が臨界値を超えると、流れ場全体が同時にアクティブ不安定になることを説明している。このことによって、円柱を過ぎる流れの振動が維持されるのは、これまで考えられてきたような対流不安定領域と絶対不安定領域の共振ではなく、波束の移流による減衰に対して、不安定性による攪乱の成長が卓越するためであることを明らかにしている。

第3章では、一様流を横切るように配置された角柱列を過ぎる流れの安定性を数値的に調べている。間隔比が小さい角柱列の間隙から噴き出す複数のジェットが合流する現象を数値シミュレーションし、2つあるいは3つのジェットの合流は、ピッチフォーク分岐の結果生じることを明らかにしている。また、間隔比ごとにジェットが合流する臨界レイノルズ数を数値的に求め、その臨界レイノルズ数が正しいことを実験によって確認している。

第4章は、円周上に配置された柱状物体列の間隙から噴き出すジェットについての研究であり、ジェットの相互作用を数値シミュレーションと実験によって調べている。レイノルズ数が小さいときには、ジェットに合流は発生しないが、レイノルズ数に依存して、複数のジェットの合流や、同位相での振動などのさまざまな相互作用が発生することを示している。定常な複数のジェットの合流はピッチフォーク分岐によって生じ、同位相での振動はホップ分岐の結果生じることを明らかにしている。また、準周期的な振動はナイマルク・サッカー分岐によって生じることも示されている。これらの分岐の臨界レイノルズ数も数値的に求められている。

第5章では、マイクロ熱交換器を想定し、定常流から振動流への遷移が起こるレイノルズ数の範囲における円柱群を過ぎる流れの熱伝達を数値的に調べている。レイノルズ数を連続的に変化させても、ヌッセルト数と摩擦係数には不連続なジャンプが生じることが示されている。この不連続性は、複数の解が存在することによって、ヒステリシスを伴う複雑な分岐が起こることが原因であることを明らかにし、熱伝達を促進するための手法を議論している。また、温度場や圧力場の周期性に関する法則が、定常流から振

動流への遷移が起こるレイノルズ数の範囲では成り立たないことも示されている。

第6章は、第2章から第5章で得られた結果の総括である。

以上のように、本論文では流れの安定性理論を用いることによって、柱状物体を過ぎる流れに起こる遷移のメカニズムとその条件を明らかにしている。