

学位論文題名

楕円後流の乱流構造

学位論文内容の要旨

後流, 噴流および混合層などの自由せん断流には, それぞれ流れ場と同程度の長さスケールに相当する大きさを持つ構造が存在する. これが乱流における組織構造である. この組織構造には乱流の特徴である混合・拡散作用や乱流エネルギーやレイノルズ応力の生成に寄与する働きがあることが明らかになってきた. これ以降の乱流研究の中心は, 従来の乱流の統計理論による研究とともに, 組織構造の解明, 制御へと移ってきている. 乱流の組織構造は組織的渦構造(渦構造)とすることができる.

3次元物体の後流の研究についても組織的渦構造の解明が問題となっている. 3次元物体の後流の研究は, 球や円板といった軸対称物体を対象としてきた. これらの研究では, 後流における組織的渦構造, その渦放出周波数について研究されており, らせん状の渦構造が形成されること, その放出周波数などが明らかになっている. 一方, 線形安定理論による不安定計算が後流についても行われている. これによると, 物体近傍における速度分布に対して, 時間増幅する固有モードが存在し, 物体近傍の微小なかく乱のうち, この固有モードに対応する微小変動が時間増幅して組織的渦構造が形成される. また, 組織構造の詳細な研究により, 組織構造の渦放出周波数や循環などの物理量は一定ではなく, 時間的に変調を受けていることが明らかになってきた. 一般的にはこの変調は, その中心周波数が渦放出周波数より低い低周波数変調として現れる. このような組織的渦構造の非定常性は, 乱流の特性の一つであると考えられている.

本研究では, 楕円板の後流(以下, 楕円後流と呼ぶ)の組織的渦構造を解明することを目的としている. 楕円板は, 非軸対称物体としてはもっとも単純な形状であり, その長さスケールが長径と短径の2種類であること, 周上の曲率が滑らかに変化する点が特徴である. 物体から組織的渦構造が放出される場合, その渦放出周波数は物体の長さスケールによって, ある程度決定される. このため, 楕円後流にも組織的渦構造が放出されると考えられるが, 楕円後流には2種類の長さスケールに応じた複数の渦構造が放出されている可能性がある. この場合, 複数の組織的渦構造間の関連も問題となる. また, 楕円形や矩形ノズルからの噴流でみられた軸転換の現象が, 楕円板の後流にも起こっていることが考えられる. このように2種類の長さスケールを持つ物体の後流に関する研究は, これまでまったく行われていない. このような点から楕円後流の乱流構造の解明は流体力学的に重要である. 一方, 工学的には, 楕円板は自動車のサイドミラーの最も単純なモデルである. サイドミラーの後流がサイドウィンドウと干渉する際, その圧力変動によって空力騒音を作っている可能性がある. 楕円板の後流構造の解明により, この空力音の低減に役立つことが考えられる. このほかにも, パラシュートによる抵抗を効率的に増加させること, 3次元物体からの渦放出による振動の問題の解決といった点で貢献することが考えられ, 楕円後

流の乱流構造に関する研究は工学的な意義が大きい。

本論文は、結論を含めて全6章から構成されている。その概略は以下の通りである。

第1章は序論であり、自由せん断流、特に、軸対称物体の後流や非円形のノズルからの噴流の乱流構造について記すとともに、本論文の目的、構成について述べる。

第2章では、本研究で用いた風洞・水路および実験装置などについて述べる。特に、本研究での供試物体である楕円板は3次元物体であり、その支持方法には注意を要する。また、本研究では、測定域が物体近傍から遠方にまで及ぶため、3種類の異なる流速測定装置を用いている。本章では、これらの測定装置の誤差や逆流による測定誤差やこれに伴う測定範囲についての検討を行っている。

第3章では、楕円後流の基本特性について述べている。後流における基本特性として時間平均速度分布、乱れ強さの分布およびレイノルズ応力の分布の測定結果を示している。逆流率の分布から再循環領域の大きさについて議論している。また、楕円後流における流幅の変化から、軸転換の現象について検証した。遠方後流における速度欠損や乱れ強さの減衰が軸対称物体と同様であることを示している。

第4章では、楕円後流における組織的渦構造について述べている。可視化実験や風洞実験での速度変動のスペクトル解析から、楕円後流には短軸方向と長軸方向に異なる2種類の渦構造が形成されていることを示し、中でも短軸方向に形成される渦構造がより支配的であることを示す。また、渦構造の位相速度や積分長さスケールを示し、位相速度から求められる渦構造の間隔(波長)が可視化実験と一致していることも示している。後流において同時測定された2点間の速度変動から渦放出の位相を調べている。また、後流の各断面における平均スペクトルを定義し、この変化から、楕円後流における渦構造とその減衰についての考察を行っている。

第5章では、楕円後流における渦構造の低周波数非定常性について議論している。ここではまず、速度変動の解析に用いたwavelet変換について述べている。後流における速度変動に対して、wavelet変換による解析を行い、wavelet係数の絶対値 $|W|$ が渦放出周波数より低い周波数で変動していることを示している。wavelet基準波形としてMorlet waveletを用いている。渦放出周波数に対応するスケールでwavelet変換を行い、得られた $|W|$ に対してスペクトル解析を行い、低周波数変調の中心周波数を求めている。また、速度変動を後流の両端で同時測定し、同様の解析を行いこれらの相互相関係数から、楕円後流の低周波数変調が後流両側で同位相で起こっていることを示している。楕円板の長軸面上および短軸面上で速度変動を同時測定し、それぞれの渦放出周波数に対応したスケールでwavelet変換による解析を行い、楕円後流の長軸面および短軸面における渦構造は、逆位相で低周波数変調をしていることをあわせて示している。

第6章は結論であり、本研究で得られた主要な結果についてまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 木 谷 勝
副 査 教 授 井 上 良 紀
副 査 教 授 飯 田 誠 一
副 査 教 授 工 藤 一 彦

学 位 論 文 題 名

楕円後流の乱流構造

物体の後流は、ターボ機械をはじめとする流体装置・機器、高速車両など、流れが関連する多くの工学分野に現れる基本的な現象であり、ほとんど全て乱流の状態にある。後流の乱流構造、とくに組織的渦構造の解明は、物体に作用する非定常流体力、後流中における拡散・混合・熱移動の予測の高精度化、流体装置・機器の性能向上や設計の高度化のために不可欠の研究課題である。これまでの乱流後流に関する詳細な研究は、主として、円柱や角柱などの2次元物体、球や円板などの軸対称物体など、単一の代表長さをもつ物体について行われてきた。しかし、実際の流体装置・機器においては、物体の形状はもっと複雑である。例えば、高速車両、自動車のサイドミラー、パラシュートなどの形状は単一の代表長さでは規定できない。したがって、これらの物体の乱流後流の基本的な構造を解明するには、少なくとも2つの代表長さをもつ物体を対象としなければならない。

本論文は、このような観点から、流れに垂直に置かれた楕円板の後流（楕円後流）の乱流構造を、実験および数値シミュレーションによって明らかにし、多くの新知見を提示している。

第1章では、後流の乱流構造に関する既往の研究を展望し、これと関連させて本研究の目的および意義を明確にするとともに、本論文の構成について述べている。

第2章では、本研究で使用した楕円板の形状（長軸径と短軸径の比が2および3）と製作方法、風洞、水路、計測装置およびデータ処理システムについて説明している。楕円板の風洞および水路内における支持方法が測定結果に影響しないように工夫をこらしている。計測範囲が、間欠的な逆流をとともなう近傍後流領域から、渦構造の不規則性の高い遠方後流の領域にまたがることから、I形熱線、X形熱線およびスプリット熱線の3種類の速度センサーを用いて各領域で適切な計測を行っている。とくに、近傍後流の代表的な断面について、これら3種類のセンサーによる速度分布を測定し、逆流率が20%以下であれば、I形およびX形センサーが十分な精度をもつことを明確にしている。

第3章では、楕円後流の基本的特性を明らかにしている。近傍後流領域から遠方後流領域にわたり、長軸面（楕円板の長軸と主流方向が張る平面）および短軸面（楕円板の短軸と主流方向が張る平面）における時間平均速度、レイノルズ応力、逆流率などの分布を求めている。近傍後流では長軸面で大きく短軸面で小さい後流の幅が、楕円板の短軸径の4倍程度の下流で逆転する現象（軸転換）をはじめて明らかにしたことは大きな貢献である。また、遠方後流領域における速度欠損およ

び乱れ強さの分布が、2つの異なる楕円板について相似となることを示している。さらに、遠方後流において、各断面の速度欠損および乱れ強さの最大値ならびに幾何平均後流幅が、球や円板などの軸対称物体の後流と同一の減衰ならびに拡大法則にしたがうことを明らかにしている。

第4章では、流れの可視化、速度変動のスペクトルおよび2点相関の測定および直接数値シミュレーションによって、楕円後流の組織的渦構造を明らかにしている。

とくに、速度変動のスペクトルから楕円後流には短軸面および長軸面を中心とする領域でそれぞれ異なる周波数で組織的渦構造が形成され、下流に放出されること、これらの渦放出は後流の両側で交互に発生することを明らかにしたことは、特筆すべき新知見である。さらに、可視化実験により、短軸面における渦構造がヘアピン形の構造をもつことを明確にするとともに、その運動にもとづいて軸転換の発生機構を明らかにしている。また、長軸面の渦構造が可視化では明確でなかったため、数値シミュレーションを行い、この構造が確実に存在すること、これによってヘアピン形の渦構造が揺動することを示している。短軸面のヘアピン形の渦構造は、長軸面における渦構造よりも下流方向に長い間持続することも明らかにされている。

第5章では、楕円後流における組織的渦構造が低周波数変調をもつことを、Morletウェーブレットを用いたウェーブレット変換によって明らかにしている。すなわち、組織的渦構造の強弱がそれによる速度変動の振幅変調に対応すること、ウェーブレット係数の絶対値の変動波形が速度変動の包絡線となることに着目し、低周波数変調の中心周波数が、短軸面および長軸面において、それぞれ対応する渦形成周波数の1/5程度であることを明確にしている。また、低周波数変調は、それぞれの面の後流の両側で同位相であること、長軸面と短軸面では逆位相であることも明らかにしている。低周波数変調の存在は、円柱や平板などの二次元物体について知られていたが、楕円後流のような3次元後流について示されたのは、本研究が最初である。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、これまでの乱流後流の研究をさらに発展させ、2つの代表長さをもつ楕円後流の乱流構造について基本的な実験結果を蓄積し、多くの有益な新知見を示しており、流体力学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

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。