

学 位 論 文 題 名

自由剪断乱流の組織構造とその低周波数変調

学位論文内容の要旨

最近の乱流研究は、「組織構造」の解明を主題としておこなわれている。乱流の「組織構造」とは、Kline et al. (1967)によって発見された乱流境界層のバースティングのような、流れ場と同程度の大きさを持つ構造的な乱流運動のことをいう。従来までは統計理論の確立に重きをおいていた乱流研究が、次第に組織構造解明に移行していったのは、組織構造こそが乱流の本質である混合・拡散作用やエネルギーの生成に大きな役割を果たしているからにほかならない。

その後、組織構造の詳細が明らかになるにつれ、組織構造自体に非定常な性質（いわゆる間欠性、不規則性）に注目が集まってきた。例えば乱流後流のカルマン渦列は、その生成（放出）が周期的におこなわれることで知られる代表的な乱流組織構造であるが、実際には放出渦一つ一つの個性（循環、中心位置、渦核半径など）はそれぞれ異なっている。極端な例としては渦が消失する場合もある。非定常性は比較的長い時間スケールの変動、すなわち低周波数変調として現れることが多く、これこそが高レイノルズ数の乱流の本質的な特性と考えられている。この低周波数変調を明らかにすれば、より高精度の乱流の予測が可能になる。

これまで用いられてきた乱流の解析手法（例えば条件付抽出法や位相平均法等）では、その基礎理論が時間平均の原理によるために、非定常性に関する情報は失われることが多かった。本研究では、ウェーブレット変換とPOD(Proper Orthogonal Decomposition, 固有関数展開法)という2つの新しい解析方法を採用した。ウェーブレット変換は信号処理手法の一つであり、解析対象信号の様々な周波数成分について、その時間軸情報を失うことなく抽出できるという大きな特徴をもつ。PODは乱流場を一度、固有値・固有関数に表現される構成成分に展開し、任意の成分を用いてもとの乱流場の再構成が可能となるものである。どちらも組織構造抽出が可能であり、さらにはその非定常性にも追従できる次世代の解析方法である。

本論文は、代表的な自由剪断乱流である、乱流後流と乱流混合層の速度変動をウェーブレット変換とPODという2つの方法を用いて解析をおこない、大規模渦による組織構造の抽出を試みる。さらに高レイノルズ数乱流の組織構造の本質的な特性とされる非定常性について、その低周波数変調を明らかにすることを目的とする。また2つの方法の結果の比較をおこない、得られる構造の差異についても検討する。このことはウェーブレット変換とPODが乱流研究において、ともに新しい知見を得られる方法と期待されるので、その工学的意義も大きい。

本論文は、第1章から第7章までの全7章で構成されている。各章の内容については、

以下の通りである。

第1章は序論であり，自由剪断乱流の組織構造と本論文の目的および構成について述べている。

第2章では，本研究で使用した風洞，実験装置および実験方法について述べている．特に，乱流後流に関してはカルマン渦列による組織構造を対象としている．よって速度変動の測定は，カルマン渦列が明確に規定できる中間後流領域でおこなうのが望ましい．よって測定されたデータから中間後流領域の定義をおこなっている．

第3章では，本研究で解析方法として採用したウェーブレット変換と POD の基礎理論について述べている．またそれぞれの既存の研究を紹介している．

第4章では，乱流後流の組織構造，すなわちカルマン渦列とその低周波数変調について議論している．カルマン渦列を含む速度変動に対し，特定スケール(カルマン渦列のスケール成分に相当する)のMorletウェーブレット変換の結果の絶対値 $|W|$ を時系列としてスペクトル解析をおこなうことで，低周波数変調の程度を明らかにしている．またサンプル波形に対し前述の解析をおこなうことで，その有効性を検討している．その結果，乱流後流の速度変動には，カルマン渦列の放出周波数の $1/25$ の低周波数変調が存在することを明らかにした．またその発生要因が乱流後流中に発達する 3 次元構造であるとの考察をおこなっている．

第5章では，乱流混合層の組織構造である横渦について議論している．POD による解析では，まず支配的構造(エネルギー寄与がもっとも大きい)を抽出するために固有値，固有関数の評価をおこなっている．その結果，固有関数の第1項目のみによる再構成(POD 1 mode)で支配的な構造，すなわち組織構造を抽出できることを明らかにした．さらにPOD 1 mode の再構成波形と原波形による構造の差異を，r.m.s. 値や瞬時渦度場から比較検討している．ウェーブレット変換による解析では，渦度場の時系列変化に対して横渦のスケールに相当する周波数成分の解析をおこない，横渦構造の低周波数変調の様子を観察している．

第6章では，乱流混合層の横渦スパン方向の構造と，それに重畳する非定常構造について議論している．POD による解析では，第5章同様に固有値の評価をおこない，再構成した速度変動から時空間構造を求めた結果，混合層外層領域では POD 1 mode で横渦による良好な2次元構造が抽出されるが，混合層中心領域では POD 9 modes (固有関数の最初の9項による再構成)でも明瞭な構造が抽出できないという結果をえた．また外層領域では POD のモードを段階的に上げていくことで分岐構造や終端構造と呼ばれる非定常構造が重畳することを明らかにしている．ウェーブレット変換による解析では，ウェーブレットのスケールを横渦構造のスケールに固定して解析することで，POD 1 mode では抽出できなかった混合層中心領域でのスパン方向の横渦構造を抽出している．また，第4章と同様な特定スケールのウェーブレット変換による低周波数変調の解析をおこない，乱流混合層にも渦通過周波数の約 $1/6$ の低周波数変調が存在することを明らかにしている．

第7章は結論であり，本研究でえ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

自由剪断乱流の組織構造とその低周波数変調

流体を取り扱う機械・装置内の流れはほとんど全て剪断乱流であり、組織的な大規模渦構造をもつことが知られている。工学的に問題となるレイノルズ数の高い剪断乱流では、大規模渦構造それ自体が低周波数変調とよばれるゆらぎをもっている。これまで大規模渦構造の実験的解明には、条件付き抽出法が広く用いられてきたが、これにはあらかじめ条件そのものを設定するという問題点がある。条件を設定しないで大規模渦構造を抽出する方法として、最適直交関数展開法や線形統計推定法などが提出されているが、最近ではウェーブレット変換が新しい展開を与えるものと期待されている。

本論文は、剪断乱流の代表的なものとして、乱流後流および乱流混合層をとりあげ、その大規模渦構造と低周波数変調を最適直交関数展開法およびウェーブレット変換によって実験的に明らかにしたものである。あわせて大規模渦構造の抽出におけるこれら二つの方法の特徴を明らかにしており、7章から構成されている。

第1章は序論であり、自由剪断乱流の組織構造とその低周波数変調ならびにこれらの解析方法に関する既往の研究について概観し、本論文の意義と構成について述べている。

第2章では、円柱の後流における乱流カルマン渦列の低周波数変調に関する実験装置および実験方法について述べている。本実験装置で実現された円柱の乱流後流は、標準的な統計的構造をもつことを明らかにし、低周波数変調を研究するのに適切な後流領域を定めている。

第3章では、最適直交関数展開法およびウェーブレット変換の基礎理論を取りまとめ、それぞれの特徴ならびに剪断乱流の組織構造とその低周波数変調の解析における有用性について述べている。

第4章では、円柱の後流における乱流カルマン渦列の低周波数変調をウェーブレット変換によって明らかにしている。後流中の速度変動を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解析し、ウェーブレット変換の実数部がカルマン渦列に起因する速度変動の振幅変調に対応していること、ウェーブレット変

換の絶対値の変動波形が実数部の変動波形の包絡線になっていること、したがって絶対値の変動成分がカルマン渦列の低周波数変調に対する重要な情報であること、などを明らかにしている。これらの結果にもとづいて、ウェーブレット変換の絶対値の変動波形のパワースペクトルを求め、低周波数変調の中心周波数が渦通過周波数の約 $1/25$ であることを明らかにしたことは重要な貢献である。さらに、この低周波数変調に対応するカルマン渦列の変形について考察している。

第5章では、乱流自由混合層の大規模渦構造とその低周波数変調を最適固有関数展開法およびウェーブレット変換によって明らかにしている。まず、解析対象とした乱流混合層のデータベースについて説明し、本章では混合層のスパン方向に直角な面内における大規模渦構造を議論することを述べている。最適固有関数展開法によって得られた固有値の大きさにもとづいて、大規模渦の基本構造が展開の第1固有関数によって表現できること明らかにし、これによる渦度の分布を求めている。また、渦度の変動波形のウェーブレット変換を求め、渦度が低周波数の変調を受けていることを明らかにしている。

第6章では、乱流自由混合層のスパン方向と主流方向を含む面内における大規模渦構造とその低周波数変調を明らかにしている。混合層の外層領域における速度変動の最適固有関数展開法による解析から、大規模渦の基本構造が展開の第1固有関数によって表現できること、この構造がスパン方向の軸をもつ渦管であることを明らかにするとともに、ウェーブレット変換によってこの大規模渦構造が低周波数変調を受けていること、その中心周波数が大規模渦の通過周波数の約 $1/6$ であることをはじめて明らかにしている。これは乱流混合層に対する重要な知見である。さらに、混合層の中心領域における大規模渦構造が、最適固有関数展開法によっては抽出できないにもかかわらず、ウェーブレット変換は明確な構造を抽出できることを示し、乱流構造研究におけるこれら二つの方法の有効性と限界を論じている。

第7章は結論であり、本論文で得られた結果を総括している。

これを要するに、本論文は、自由剪断乱流の大規模渦構造およびその低周波数変調を最適直交関数展開法およびウェーブレット変換によって明らかにし、もって自由剪断乱流の構造解明ならびに制御に対する重要な新知見を与えたものであり、流体力学の進歩に寄与するところ大である。

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。