The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Hierarchy of Coherent Structures and Energy Cascade in Wall Turbulence
Author(s)	本告, 遊太郎
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/82309
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　本告　遊太郎　）	
論文題名	Hierarchy of Coherent Structures and Energy Cascade in Wall Turbulence (壁乱流中の秩序構造の階層とエネルギーカスケード)

論文内容の要旨

乱流はわれわれの身のまわりにあふれた現象であり、その予測と制御は多くのシステムで必須であるため、乱流の動力学の解明は重要である。乱流の維持機構は、大小さまざまなスケールの渦でよく説明される。例えば、乱流中のエネルギーは、大きな渦からより小さな渦へと順繰りに伝達される。これは「エネルギーカスケード」と呼ばれ、乱流の普遍性を予測した古典理論の起源となる重要な現象である。

しかし、壁近くの十分に発達した乱流中においては、大小さまざまな渦の実空間における様相さえわかっていない。そこで、本研究の第１の課題として、発達した壁乱流の大規模数値シミュレーションを実行し、エネルギーカスケードの物理を解明する。そのために「渦の階層」に着目する。具体的には、得られた乱流場をそのまま扱うのではなく、乱流場をスケール毎に分解することで、大小さまざまな渦を階層毎に抜き出す。この渦の階層を足がかりにすることで、エネルギーカスケードの物理機構を探る。

我々は、１枚の壁面上に発達する乱流境界層、および、２枚の壁面の間に発達する平行平板間乱流に潜む渦の階層を抜き出した。さらに、各階層の渦による乱流エネルギーの輸送量や渦の伸長率を評価することで、異なるスケールの渦同士の相互作用を定量化した。渦のスケールを σ とすると、各壁からの高さ y における大スケール（$\sigma \sim y$）の構造は、流れ方向を向く縦渦（もしくはヘアピン渦）および低速ストリークの組み合わせにより構成される。これらは、各高さで自己維持的に共存し、そのエネルギーの源は平均せん断流である。一方で、それより小さなスケール（$\sigma \ll y$）の渦は、スケール局所および空間局所的な渦伸長を通じた、エネルギーカスケードにより生成される。

ところで、乱流は、物質の混合の観点からも重要である。本研究の２つ目の課題は、発達した壁乱流による物質の輸送機構の解明である。平行平板間乱流中の微小で重い粒子（慣性粒子）の直接数値シミュレーションを実行し、粒子の輸送に秩序構造の階層が果たす役割を詳細に調べた。この結果は、雲乱流中の雨滴の形成過程やエアロゾル粒子の飛散現象等、多くのシステムに関連する。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　本告　遊太郎　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教　授	後藤　晋
	副 査　教　授	河原　源太
	副 査　教　授	杉山　和靖
	副 査　教　授（工学研究科）	梶島　岳夫

論文審査の結果の要旨

本論文には、固体壁面近くに発達する十分に大きなレイノルズ数の乱流に関する研究成果がまとめられている。コルモゴロフの古典論によれば、乱流は境界条件や維持機構によらず、その小スケールの統計性質は普遍的であるとされる。これまでの多くの実験や観測はこの普遍性を支持してきたが、その物理的起源はよく分かっていない。つまり、この普遍性はいわゆる「エネルギーカスケード描像」を用いて説明されるが、そもそも、エネルギーカスケードの具体的な物理描像自体が不明のままであった。本研究では、この根本的な問題に対して、大規模数値シミュレーションを用いた解析を行い、固体壁面近傍に発達する乱流の維持機構を、乱流中に存在する秩序構造の階層に着目することで明らかにするとともに、輸送現象におけるこれらの秩序構造の役割を明らかにした。具体的な研究成果は以下の通りである。（一）一様流がそれと平行な平板に当たったときに平板上に維持される乱流境界層の維持機構を明らかにした。とくに、十分に大きなレイノルズ数の乱流境界層中の秩序渦の階層の維持機構を明らかにした。より具体的には、壁面からの距離をｙとしたとき、ｙの程度の大きさの渦は、平均せん断流から直接生成されるのに対して、ｙよりも小さなスケールの渦は、それよりも大きなスケールの渦による渦伸長過程により維持されることを明らかにした。（二）平行な二枚の平板間で、圧力勾配により駆動される乱流の大規模数値シミュレーションデータを詳細に解析し、十分に大きなレイノルズ数であれば、この乱流も（一）の乱流境界層と同様の物理機構により維持されることを明らかにした。さらに、スケール間のエネルギー伝達を定量化することで、渦伸長過程がエネルギーカスケードを伴うことを確かめた。つまり、壁から十分に離れた領域における小スケールの渦は、確かにエネルギーカスケードにより維持されていることをはじめて明らかにした。（三）さらに、（二）で明らかにした平行平板間乱流中の秩序渦とそれに伴うストリーク構造の階層が乱流輸送現象に果たす役割を明らかにした。具体的には、重い微小な粒子のクラスタリング現象に着目し、そのストークス数（粒子の速度緩和時間）依存性を秩序構造の階層に着目することで系統的に説明した。以上、（一）から（三）のいずれの研究成果も乱流および乱流輸送現象に関する全く新しい視点を与えるもので、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。