

氏名	いたのともあきの 板野智昭
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2277号
学位授与の日付	平成13年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Coherent structure and turbulence production mechanism in wall turbulence (壁乱流における秩序構造と乱流生成機構)
論文調査委員	(主査) 藤 定義 教授 吉川 研一 教授 蔵本 由紀

### 論 文 内 容 の 要 旨

壁面上に発生する乱流(以下、壁乱流)は、自発的に乱れを生成し維持する。ここで言う乱れとは、系に内在する多数の小スケールの自由度が作りだす場の複雑な挙動のことを指す。壁乱流では、巨視的なスケールでのエネルギー注入を行わずとも、乱流は持続することができる。乱流一般に共通する大自由度による場の複雑な挙動は、壁乱流においては壁から離れた領域において顕著である。一方、壁近傍領域においては、秩序的な状態が間欠的に現れ、擬周期的な時間変動がしばしば観測される。これらの壁近傍での特徴は、乱流維持機構の存在を予見させるものである。申請者は、この壁乱流における乱流維持機構の解明を研究課題として取り上げた。

申請者は、壁近傍領域の秩序構造であるストリークや縦渦構造の振舞いを基に、壁乱流中の乱流維持機構の内、特に壁近傍の強い乱流生成を担う部分(乱流生成機構)を顕在化するための手法としてシューティング法を提案し、その妥当性や物理的根拠を論じている。

申請者はこの手法を用い、時間発展で得られた乱流生成過程が壁近傍に局在した定常進行波解を含む低次元位相空間での解軌道の振舞いにより理解できることを明らかにした。壁近傍での秩序構造は低次元化の現れであり、秩序構造の形成及び乱れの生成がそれぞれ、位相空間での固定点への安定多様体に沿っての漸近過程及び、固定点からの不安定多様体に沿っての離脱過程で記述できることを示した。この結果から、壁から離れた領域の乱れはこの低次元系と直交する空間にあり、発達した壁乱流系が壁近傍の低次元系と外部層の大自由度系の結合系として理解できると推測した。

実質的な乱流生成過程は、固定点からの離脱過程であるが、この過程において壁近傍に現れていた秩序構造は急速に崩壊し、壁近傍の場は非常に乱れた状態へと遷移する。また同時に、壁近傍から外部層へ向け乱れが運ばれる。この過程は、実際の乱流において間欠的に起こる流体の激しい移動(イジェクションやスウィープ)を伴う壁乱流に特徴的な乱流生成イベント(バースト)の理想的な過程と見做すことができる。これまで壁乱流の研究においてバーストという用語は定義が曖昧なまま使われ続けてきた経緯があったが、申請者の研究を通すことにより、この離脱過程は『バースト』として明確に定義された。

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

壁面上に発達する乱流(以下、壁乱流)の研究においては、壁乱流の維持機構(乱流維持機構)と、間欠的に生み出される乱流エネルギー生成のメカニズム(乱流生成機構)の理解が重要な課題となっている。壁乱流における乱流維持と生成の機構の解明は乱流制御などの技術的な応用面にも直結しているため、関係分野においても注目されている。しかし、直接数値計算で壁乱流が再現できるようになった今日でも、発達した乱流状態で乱流維持機構を物理的な視点から理解することは非常に難しい。申請者はシューティング法という独自の手法を通して、乱流維持・生成機構の素過程の解明に取り組んだ。

申請者の研究の方針は、系を単純化することにより乱流の生成機構の素過程を取り扱うものである。歴史的には、「系の

サイズを縮小する方法」と「系を記述する自由度を減らす方法」がある。前者は、90年代初頭に Jiménez と Moin によって提唱されたミニマルユニットと呼ばれる乱流を維持できる最小の計算領域を扱うものに代表される。彼らの結果では、壁近傍に現れる秩序構造が乱流維持機構と関わりを持つことを示唆するが、詳細は明らかにはならなかった。その後、Hamilton らは、この方法を低レイノルズ数のクエット流に応用し、流れ場の発展が擬周期的な軌道として記述できることを明らかにした。しかし、Hamilton らの扱った系は本質的に自由度が低く、発達した壁乱流での乱流生成機構を表していない。

一方、後者には、Lumley らの研究に代表されるモード打ち切りによる低次元力学系を用いた研究がある。彼らはダイナミクスを導出する段階で数多くの近似や仮定を用いており、低次元系と実際の乱流との差は乱れが発達した段階では大きくなる。彼らの研究は、定常解を結ぶホモクリニック軌道やヘテロクリニック軌道の存在を示し、乱流生成機構が乱流に内在する低次元力学系を反映する可能性を示唆するものである。

申請者は、Jiménez らのミニマルユニットよりもやや大きめのサイズの系を対象に独自の手法を用いて、大自由度の直接数値計算でも壁乱流の軌道は乱流生成ステージにおいて低次元的な挙動を示すことを示した。つまり、「系のサイズを縮小」することで、「系を記述する自由度を減らす」ことが出来ることを初めて示したことになる。具体的なダイナミクスは導かれていないが、相空間において低次元的な振舞いをする事、定義の曖昧だった秩序構造が定常進行波解と結び付くこと、壁近傍のダイナミクスと外部層のそれが弱く結び付いていること、などを明らかにした。壁乱流の物理学的手法による研究に先鞭をつけた申請者の研究は高く評価できると共に、壁乱流研究の今後の発展に大きく寄与すると思われる。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。