

報告番号 * 甲 第 2734 号

主 論 文 の 要 旨

題 名 乱流境界層のフラクタル特性に
関する研究

氏 名 辻 義之



主論文の要旨

報告番号	※甲第 号	氏名	辻 義之
<p>乱流境界層中の諸性質をカオス・フラクタル的な観点から解析した。まず、境界層中の瞬時速度信号から、等速度点集合を定義し、そのフラクタル性を調べた。従来の研究では明確にされていなかった自己相似性の成立する領域を決定し、ボックス法と確率密度関数を用いる方法の二種類を併用して解析をおこなった。等速度点集合は局所平均速度付近を除き、コルモゴロフ・スケールと自己相関係数から決定される最大渦スケールの範囲でフラクタル性を示し、その次元は$0 < D < 0.4$であった。</p> <p>等速度点集合がフラクタル構造を構成するメカニズムについては、まだ明確には分らない。しかし、等速度点集合の物理的意味を解釈し、境界層中のいかなる物理量と関連するかを調べる必要はある。そこで、各点確率密度関数 (fine grained probability density function) をもちいて、<i>N. S.</i> 方程式と等速度点集合との関連を導き、物理的意味づけを与えた。また、四象限分割法を用いて条件付き解析をおこなった。その結果、等速度点集合は境界層中の物理量としてはレイノルズ応力と関連し、瞬時レイノルズ応力が正となる第二象限と第四象限にしかフラクタル構造が存在しないことを明らかにした。</p> <p>境界層中でレイノルズ応力を生成する現象には、整構造 (組織構造) の通過がある。特に、壁近傍ではバーストと呼ばれる一連の過程が存在する。そこで、等速度点集合とバーストの関連及びバースト構造そのものをフラクタルを用いて解析した。</p> <p>乱流境界層中には、時間・空間的に一定の相関を持った構造 (整構造、組織構造) が存在することが可視化実験等で確認されている。特に、壁近傍での整構造はバーストと呼ばれ、主に低速流体の主流方向への放出 (エジェクション) と高速流体の壁方向への流れ込み (スweep) の過程であり、活発なレイノルズ応力の生成を担っている。バースト現象の抽出には多数の方法が提案されているが、今回は四象限分割法と <i>VITA</i> 法を採用した。</p> <p>乱流境界層は圧力勾配の無い平板境界層で、基準レイノルズ数 (U_0/ν) を 3.16×10^5 に設定して実験をおこなった。ただし、U_0 は主流速度、ν は動粘性係数である。この時、境界層厚さ及び運動量厚さは、各々 40.0, 4.80 (mm) であった。まず、本境界層におけるバースト現象が妥当なものであるかを確認するため、バースト平均発生周期、集合平</p>			

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	辻 義之
均波形、発生間隔の確率密度関数等を計算し、過去の研究との比較をおこなった。				
なお、VITA法の検出基準は最も信用されているBlackwelderらの基準に一致させた。四象限分割法については抽出されるバーストの大きさを明確にしたいため、パラメータ H を変化させて調べた。 H が大きいことは、抽出されるバーストが強いことに対応する。これまでの研究で等速度点集合の性質については詳細に研究をおこなってあるので、この中からフラクタル構造を持つ代表的な集合を選び、前述の方法で抽出されたバーストとの関わりを調べた。具体的には条件付き平均によって、フラクタル構造を持った等速度点集合をバースト領域に含まれる等速度点集合と、含まれない等速度点集合に分割し、フラクタル性がいずれの領域から影響を受けているかを調べた。ただし、解析した等速度点集合は予めフラクタル構造を持つものである。				
四象限分割法によって抽出されたバースト（以後、Qバーストと呼ぶ）で条件付けをおこなった結果、バースト領域に含まれる等速度点集合にはフラクタル性が依然確認されたが、バースト領域に含まれない等速度点集合にはフラクタル性は認められなかった。この傾向はパラメータを $0 \leq H \leq 2.0$ で変化させても同様であり、フラクタル次元は壁近傍ではほぼ一定の値 $D=0.4$ であった。この値は無条件の元の等速度点集合の値よりも幾分小さな値を持っている。その理由については前論文で説明がなされているので省略した。これに対して、VITA法で抽出されるバースト（以後、Vバーストと呼ぶ）で条件付けをおこなった結果、バースト領域、非バースト領域のいずれに含まれる等速度点集合にもフラクタル性は確認された。元の等速度点集合がフラクタル構造を備えていることを考えると、Vバーストは等速度点集合のフラクタル性には独立であるといえる。ただ、バースト領域に含まれる集合の方が、次元が幾分大きかったことは興味ある結果であった。				
次にバースト現象そのものを解析することをおこなった。各々のバースト領域は、その定義関数によって評価できる。定義関数は0又は1のランダム列で、バースト検出領域で1それ以外で0の値をとる。この一次元パルス列の統計的性質を解析すれば、バースト構造の一次元的な大きさを含めた分布を知ることができる。平均周波数(壁変数で無次元化)				

主 論 文 の 要 旨

報 告 番 号	※ 甲 第	号	氏 名	辻 義之
<p>はVバーストで約250 なのに対し、Qバーストでは約30 と遙かに小さかった。これはQバーストが連続して起こる小さなバーストも検出するからであり、バースト間隔の確率密度関数を計算することによっても確認できた。定義関数の平均として定義される間欠係数はVITA法、四象限分割法で各々0.024 ,0.11 であった。次に定義関数のパワースペクトルを計算した。仮に、パルス列の間隔の分布がポアソン分布のような指数型であれば、スペクトルはローレンツ型となる。つまり、低波数側では一定の値をとり、高波数側では-2 乗に比例して減衰する。Vバーストのスペクトルは、まさにローレンツ型であった。しかし、Qバーストのそれは、低波数でまったく異なっていた。高波数では-2 乗程度の傾きで減衰している様に見えるが、この点についてはフラクタルとの関連で、後半に議論をおこなった。なお、スペクトルの計算にはコサイン型のウィンドーをかけてある。ここまでの解析では、Qバーストは四象限分割法で第二象限内の事象、すなわちエジェクションとしてきた。しかし、瞬時レイノルズ応力が正となる第四象限内の事象、すなわちスweepも境界層壁近傍では重要な過程であり、解析の対象に含めることとした。平均発生周期はパラメータ H が小さな時には、スweepの方が小さく、間欠係数はエジェクションの方が低い。しかし、この傾向はH が4.0 付近で逆転する。即ち、壁近傍では小規模な現象としては、スweepが卓越するものの、大規模な現象としては、エジェクションが優勢であるといえる。</p> <p>次に、バースト構造そのものをフラクタルを用いて解析をおこなった。Vバースト、四象限分割方のエジェクション、スweepの定義関数を Box Counting Algorithm を用いて解析をおこなった。Vバーストの定義関数にはフラクタル構造は確認されなかったが、エジェクション、スweepいずれの定義関数にもフラクタル性は存在した。フラクタル次元は壁領域でほぼ一定で、$H=2.0$ の場合約0.6 であった。ただし、H が小さな時にはスweepのフラクタル次元の方が大きく、H が増すと逆にエジェクションの次元の方が大きくなる。フラクタル次元を複雑さを示す一つの指標とすれば、この結果は、前段落で述べた統計的性質と良く対応している。</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	辻 義之
<p>定義関数の分布がフラクタルの場合、そのパワースペクトルは指数 $-(2-D)$ で減衰する。仮に $D=0.6$ とすると、指数は -1.4 となる。しかし、スペクトルの形から実際にローレンツ型との違いを見い出すことは困難であり、本解析の様に Box Counting Algorithm を用いた方が有効といえる。</p> <p>バースト平均発生周波数、間欠係数、バースト間隔の確率密度関数等から判断して、Vバーストは規模の大きな構造を持つのに対して、四象限分割法は連続的に起こる規模の小さなものから大きなものまで抽出する。この検出基準が、定義関数の自己相似な構造を形成したものと考えられる。</p> <p>カオス的な観点からは、境界層外縁の乱流/非乱流域の間欠的な分布に注目した。流れをオイラー的に観測した場合、壁からの距離をコントロール・パラメータにとると、パラメータの変化によって、層流から乱流への遷移を確認できる。このような遷移過程は低自由度カオスの観点から解析が試みられている。そこで間欠性カオスを構成する一次元写像を一般化し、物理現象との対応を考察した。カオス的一次元写像からは、乱流/非乱流の間欠的な分布が生み出される。その非乱流領域の長さの確率密度関数は、ベキ乗則を満たし、コントロール・パラメータの変化に対して、その指数は不変である。一方、実験から測定される非乱流領域の確率密度関数もベキ法則を満たし、その指数は壁からの距離によって不変である。一次元写像の確率密度関数には、スケーリング関数が存在することを解析的に導き、これは実験より求まる確率密度関数にも良く当てはまることを確認した。また、両者の対応をより詳細に考察するために、特異点スペクトル、コルモゴロフ・エントロピー、オーダーパラメータ等を計算した。特異点スペクトルからは、外層ほどゆらぎが大きいく、内層ほどコルモゴロフ・エントロピーが増加することが明かとなった。これは内層ほど予測不可能性が増大することを表し、実際の物理現象でも内層ほど乱流状態が増大することを良くとらえている。以上の結果は境界層外縁の間欠的な現象が、間欠性カオスを生み出す一次元写像と類似のメカニズムに従っていることを強く示唆している。</p>				