

W12-(1)

マイクロせん断応力計と離散ウェーブレット変換による壁面せん断応力の解析

宮城徳誠（日本大学院）、藤田 肇（日本大学）、木村元昭（日本大学）
 武居昌宏（日本大学） 斎藤兆古（法政大学）、堀井清之（白百合女子大学）

1. はじめに

乱流境界層内の Streak 構造は壁面近傍における支配的流れの構造であることから可視化、実験及び数値計算による研究が精力的に進められている。ところがレイノルズ数が高くなるに従いその構造のスケールが小さくなるため、従来のセンサでは測定が困難であった。UCLA とカリフォルニア工科大学では乱流境界層のせん断応力制御を念頭において、MEMS 技術による高空間分解能・高周波数応答のセンサが開発されており、壁面せん断応力分布の高度な可視化に成功している¹⁾。しかしながら、このような壁面せん断応力分布は、色々な周波数成分を合成した積分値で得られており、さらにこの周波数成分は時々刻々変化する。このような周波数特性を得る手段として、ウェーブレット解析が注目を集めている²⁾。本研究は、マイクロせん断応力計により乱流境界層における壁面せん断応力分布を空間-時間の準二次元的に測定し、その二次元データに離散値系ウェーブレット変換を用いて壁面せん断応力分布の特徴の抽出を行い、高せん断応力の推定に有効な情報を得ることを目的としている。

2. マイクロせん断応力カイメージチップを用いた壁面せん断応力データの取得

実験は高さ 25.4mm、幅 610mm の矩形断面、長さ 4877mm のチャンネル型風洞を用いた。マイクロせん断応力カイメージチップ¹⁾を上流端より 4267mm のところに表面に凹凸がないように装着し測定を行った。熱線流速計を用いた流速分布によれば、測定部では流路流れが完全に発達し乱流となっていることが確認されている。壁面せん断応力測定はセンサ中心間隔が 300 μ m で幅 7.5mm 間に 25 個のセンサが並ぶ、1 列のセンサ列の流れと直角方向に設置して行っている。センサの較正は、センサの時間平均出力と流路内の圧力勾配により求められた平均壁面せん断応力と比較することによって行った。センサの出力感度は 1V/Pa である。実験はチャンネル高さの半値と中央速度によるレイノルズ数 Re を 8300 として行われた。

3. ウェーブレット解析結果と考察

Fig. 1 に測定された $Re=8300$ の時空間準二次元せん断応力分布の元データとこれに離散値系ウェーブレット変換を施し、さらに、離散ウェーブレット逆変換を施し多重解像度解析を行った結果を示す。離散値系ウェーブレット変換は 2 のべき乗を対象とするため、26 から 32 までのデータは意図的に二次元データ内の最小値を代入した。時間軸は 102.4ms (1024sample) を変換の対象としたが、同図では 10ms (100sample) の範囲で示している。図中最大値を 1.0 に最小値を 0.0 に正規化して濃淡で示したものであり、せん断応力の高いところは淡色で、低いところは濃色で示されている。多重解像度解析を施すことにより level0 から level6 とレベルが高くなるに連れて、入力データは低周波成分から高周波成分に分解される。これらの図は一回のパースティングイベントが通過する数 ms オーダーの変動と、それに伴う流体変動、及び、高周波ノイズを示していると考えられる。

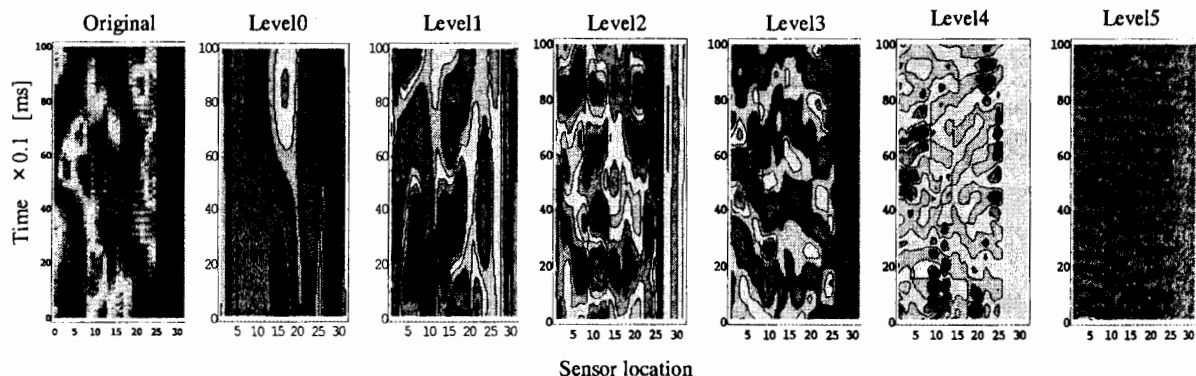


Fig.1 Original data at $Re=8300$ and multi resolved results

壁面せん断応力の制御を念頭においた高せん断応力領域予測³⁾の成績を改善するため離散値系ウェーブレット変換の応用として、元データの高周波ノイズに対するフィルタリングを試みた。Fig. 2 は先に示した多重解像度解析結果を重ね合わせたものである。図中最大値を 1.0 に最小値を 0.0 に正規化して濃淡で示したものである。せん断応力の低いところは濃色(濃い灰色)、高くなるに従い一旦淡色となり最も高い部分は黒色で示されている。

0 to 3 は level 0 から level 3 までを重ね合わせた結果であり、他も同様の計算を行っている。これより、高次のレベルを排除することにより、高せん断応力を示す縞が鮮明になる。また、1つのセンサが測定したサンプルデータの時間経過を Fig. 3 に示す。0 to 5 以上ではほとんど元データと同じトレースとなる。0 to 4 と 0 to 3 が示すように、高次のレベルを排除することにより、忠実な変動に対する追従性は犠牲となるが、細かな変動に妨害されずに高せん断応力の発生する位置および時間的な領域を把握することが可能となる。しかし、ここでは表示していないが、0 to 1 や 0 to 2 のようにフィルタを効かせ過ぎると時間的なずれが顕著となるので注意が必要である。

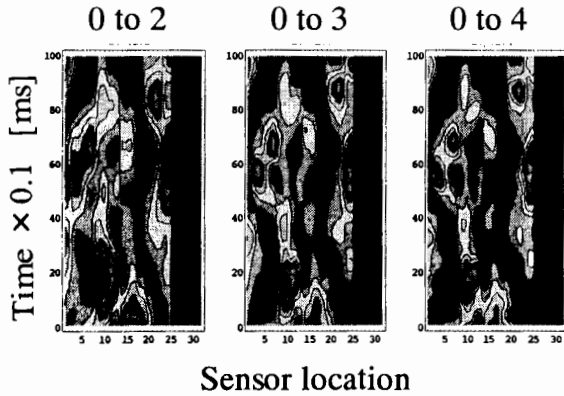


Fig.2 Multi-resolution filtering at Re=8300

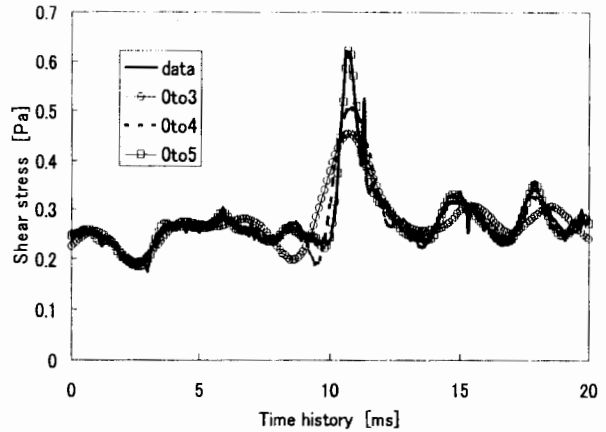


Fig.3 Sample data

ここで、Fig. 4 に示すように、時空間データ全体における平均値 $\bar{\tau}$ と実行値 τ_{rms} より求められる閾値: $\tau^* = (\tau - \bar{\tau}) / \tau_{rms} > 0.3$ を用いて高せん断応力領域を定義し、その領域における最大値 Peak と初期増加率 slope とを求めた³⁾。それぞれのレイノルズ数に対して高せん断応力領域を 250 以上抽出し、各レイノルズ数の Peak と Slope との相関係数を Fig. 5 に示す。元データ: data では相関係数が 0.45 から 0.1 であるのに対し、0 to 3 と 0 to 4 では各レイノルズ数において相関係数が 0.5 を越えており、相関係数が増加している。これは、壁面せん断応力の高周波成分が離散ウェーブレット変換によるフィルタリング効果によって除去されたものと考えられ、壁面せん断応力推定に良好な結果が得られているものと期待できる。

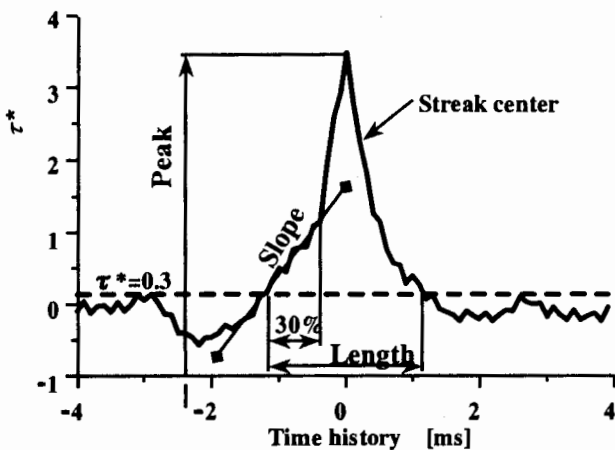


Fig.4 Peak, Length and Slope of streaks

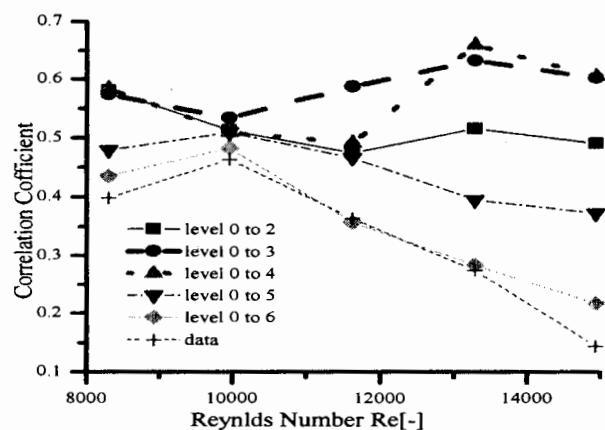


Fig.5 Correlation Coefficient of Peak-slope with Re

4. まとめ

マイクロせん断応力計による壁面せん断応力分布に離散ウェーブレット変換を試みた結果次のことが明らかとなった。周波数帯域別に壁面せん断応力分布を分離し、各周波数レベルおきに壁面せん断応力分布を示すと共に、離散値系ウェーブレット変換の多重解像度解析をフィルタリングに応用することによって高せん断応力領域における最大値と初期増加率との相関が高くなり、壁面せん断応力推定に役立つ可能性を見出すことができた。

参考文献

- 1) C.M. Ho, et al., ASME FED 197, 9-15(1994).
- 2) H. Li, et al., JSME Int. Journal Fluids and Thermal Eng., 40, 1, 58-66(1997).
- 3) M. Kimura, et al., Fluid Dynamics Research, 24, 6, 329-342(1999).