

離散値系ウェーブレットを用いた乱流境界層壁面剪断応力分布解析

Discrete Wavelet Analysis on Wall Shear Stress of Turbulent Boundary Layer

○ 学 宮城徳誠 (日大院) 正 庄司秀夫 (日大) 正 木村元昭 (日大) 正 武居昌宏 (日大)
Chin-Ming Ho (UCLA) 正 斉藤兆古 (法大) 正 堀井清之 (白百合女子)

Norimasa Miyagi, Department of Mechanical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University,
Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo
Hideo SHOJI, Motoaki KIMURA, Masahiro Takei, Nihon University
Chih-Ming Ho, UCLA
Yoshifuru Saito, Hosei University Kiyoshi Horii, Shirayuri College

Wall shear stress distribution in turbulent boundary layer has been clearly visualized by discrete wavelet transform based on the shear stress data using MEMS. The characteristics of high shear stress streaks were described with statistics. We found out that a high correlation exists between the peak shear stress level and front-end shear stress gradient of high shear stress area filtering by multi-resolution of discrete wavelet.

Key words : Turbulent Boundary layer, MEMS, Shear Stress Sensor, Discrete Wavelet Transform

1. 緒言

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 Cal-tech では乱流境界層の剪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、壁面剪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、このような壁面剪断応力分布は、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。従ってさらなる解析には別の手段が必要である。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^{2,3)}。このウェーブレット解析は主に連続ウェーブレットを用いたものだが、筆者の一人は、電磁気学の分野で離散値系ウェーブレットを応用している⁴⁾。本研究では、マイクロ剪断応力計により、乱流境界層における壁面剪断応力分布を空間-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行い、壁面剪断応力分布の特徴の抽出を行い、その特徴から高壁面剪断応力の推定に役立つ情報を得ることを目的としている。

2 実験

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。マイクロ剪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う。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。測定にはセンサが中心間隔 300 μ m で 25 個並んだ幅 7.5mm のセンサ列 1 列を用いて行っている。

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剪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、周波数応答は矩形波によれば 25kHz 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 が 8300 から 15000 の間で行っている。

離散値系ウェーブレット変換を行う二次元データは、センサ列により幅 7.5mm における流れと直角方向の壁面剪断応力時間変動を測定することによって得ている。Fig.1 には測定された、時空間準二次元剪断応力分布を示したものである。この図において、センサから得られる流れと直角方向のデータは 25 であり、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入れた。時間軸は 102.4ms(1024sample)を変換の対象としたが、図では 10ms(100sample)の範囲で示している。

3. ウェーブレット解析結果と考察

Fig.1 に対して離散値系ウェーブレット変換を施し、その後多重解像度解析を行い、それぞれに離散ウェーブレット逆変換を施した結果を Fig.2 に示す。この図においては level0 から level7 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示されている。これらの図は一回のバ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。これらの解析には熱線流速計などを用いて、壁面付近の風速変動と比較する必要がある。離散値系ウェーブレットは正規直交するので、各 level をすべて合成すると Fig.1 に示す元のデータとなる。

次に筆者の一人が行っている⁵⁾、壁面剪断応力の制御を念頭においた高剪断応力領域予測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またはスムージングを試みた。Fig.3 は先に示した多重解像度解析の結果を重ね合わせた場合の結果を示す。"0 to 3"は level0 から 3 までを重ね合わせた結果であり、他同様の計算を行っている。これより、だんだんと高次のレベルを排除していくことにより、高せん断応力を示す縞が鮮明になり、二次元流動などによ

る歪が小さくなっていることがわかる。さらに高次レベルを排除し"0to2"となると、縞が引き伸ばされるような形となり不鮮明となった。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 rms 値 τ_{rms} によって式(1)によって求められる閾値を用いて高剪断応力領域を定義し、その領域における最大値 Peak と初期変動率 slope とを求めた。

$$\dot{\tau} = (\bar{\tau} - \tau) / \tau_{rms} > 0.3 \quad (1)$$

それぞれのレイノルズ数に対して高剪断応力領域を 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。各レイノルズ数において"0to3"と"0to4"における相関係数が 0.5 を越えており、"data"の場合の 0.45 から 0.1 と比較して、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壁面剪断応力推定に良好な結果が得られていると考えられる。

4. 結論

マイクロ剪断応力計による壁面せん断応力分布に対して、離散ウェーブレット変換を試みた結果次のことを明らかにすることができた。

- (1) 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剪断応力分布を示すことができた。
- (2) 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剪断応力領域における最大値と初期変動率との相関が高くなり、壁面剪断応力推定に役立つ可能性を見出した。

謝辞

本研究は、平成 11 年度日本大学理工学部特別推進研究費の支援を受け、進められている。

参考文献

- 1) Ho, C.-M., et al.: Surface micromachined thermal shear stress sensor, FED Vol. 197, 9-15 ASME(1994)
- 2) Li.H., et al.: Application of Wavelet Cross-correlation Analysis to Plane Turbulent jet, JSME Int. Journal Fluids and Thermal Eng. Vol.40, No.1,(1997) 58-66
- 3) 田村祐二ら:Wavelet 解析を用いた乱流境界層再層流化過程におけるバースト現象の可視化、可視化情報 Vol.18,Suppl. No1(1998) 23-166s
- 4) 斉藤兆古:離散値系ウェーブレット変換の電磁界計算への応用、電気学会論文誌 A, Vol. 116A, No10 (1996) 833-839
- 5) Kimura, M., et al.: Measurements of wall shear stress of a turbulent boundary layer using a micro-shear-stress imaging chip. Fluid Dynamics Research Vol. 24 329-342 (1999)

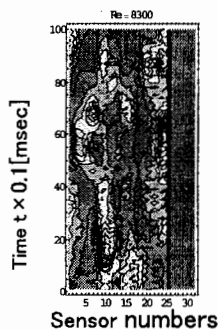


Fig.1 sample data

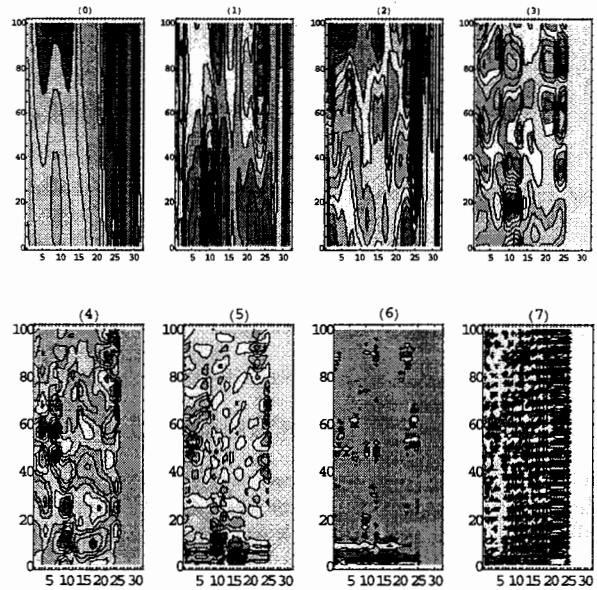


Fig.2 Multi Resolved data Re=8300

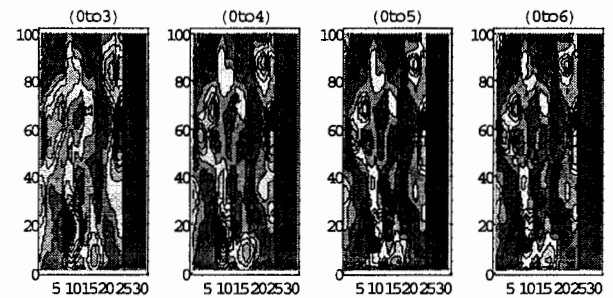


Fig.3 Multi-resolution filtering in Re=8300

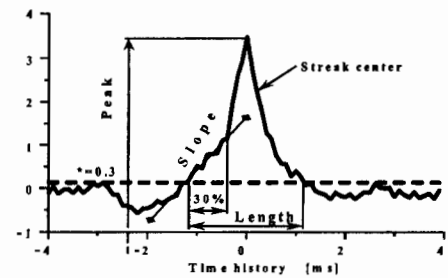


Fig.4 Peak, Length and Slope of streaks

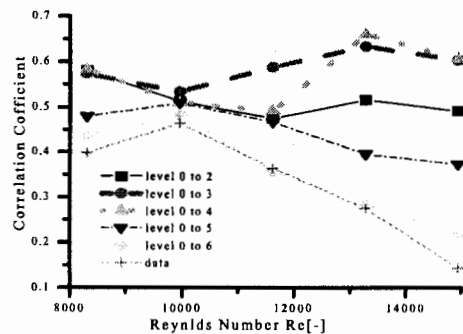


Fig.5 Correlation Coefficient of Peak-slope with Reynolds Numbers