

# 第 49 回理論応用力学講演会

## 講演論文集

NCTAM 2000

と き: 平成 12 年 1 月 25 日(火)~27 日(木)

と ころ: 日 本 学 術 会 議

### 主 催

日本学術会議メカニクス・構造研究連絡委員会

### 共 催

応用物理学会 ※	化学工学会	土木学会
資源・素材学会	日本海洋学会	日本気象学会
日本機械学会	日本計算工学会 ※	日本原子力学会 ※
日本建築学会	日本航空宇宙学会	日本数学会
日本数値流体力学会	日本造船学会 ※	日本物理学会
日本流体力学会 ※	日本レオロジー学会	農業土木学会

(※印幹事学会)

平成 12 年 1 月 25 日発行

# マイクロせん断応力イメージャーと離散ウェーブレット変換を用いた 壁面せん断応力の解析

## Analysis of Shear Stress on the Wall using Micro Shear Stress Imager and Discrete Wavelet Transform

木村元昭 (日大・理工) 武居昌宏 (日大・理工) 宮城徳誠 (日大・理工)  
Chih-Ming Ho (UCLA) 斎藤兆古 (法政大・工) 堀井清之 (白百合女子大)  
Motoaki Kimura, Masahiro Takei, Norimasa Miyagi (Nihon Univ.), Chih-Ming HO (UCLA),  
Yoshifuru SAITO (Hosei Univ.) Kiyoshi HORII (Shirayuri College)  
FAX: 03-3293-8254 E-mail: kimura@mech.cst.nihon-u.ac.jp

Shear stress stripe structure on the wall in turbulent boundary layer has been clearly visualized and analyzed by a combination of a shear stress sensor using MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) and discrete wavelets transform. The micro shear stress imaging chip is designed and fabricated by surface micro-machining technology, contributing to obtaining the time-space two dimensional shear stress data. The discrete wavelets transform is a software technique to decompose the frequency level with the time and space information of the waveform. In details, the structure in lower Reynolds number is shown clearly on lower frequency wavelets level, the structure in high Reynolds number is done clearly on higher frequency wavelets level. To improve the predicting result the high shear stress areas are identified more clearly by discrete wavelet transform using the multiresolution and recompose filtering effect. The filtering effect offers the possibility of predicting the high shear stress area on the wall.

### 1. はじめに

乱流境界層内の  $\delta$  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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

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. 実験装置

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イメージャー<sup>4)</sup>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 $\mu$ 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、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 level 0: (0) から level 6: (6) 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。

次に筆者の一人が行っている<sup>4)</sup>、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) で、そして、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線が鮮明になる。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。Oto5 以上ではほとんど元データと同じトレースとなる。Oto4 と Oto3 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、Oto1 や Oto2 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。

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  $\tau_{rms}$  より式(1)によって求められる閾値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<sup>4)</sup>。

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

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、Oto3 と Oto4 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。

#### 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対して、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ことができた。また、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。

#### 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た。

#### 参考文献

- 1) C.M. Ho, et al.: "Surface micromachined thermal shear stress sensor," ASME FED 197, 9-15(1994).
- 2) H. Li, et al.: "Application of Wavelet Cross-correlation Analysis to Plane Turbulent jet," JSME Int. Journal Fluids and Thermal Eng., 40, 1, 58-66(1997).
- 3) 斎藤 光古: "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 116A, 10, 833-839(1996).
- 4) M. Kimura, et al.: "Measurements of wall shear stress of a turbulent boundary layer using a micro-shear-stress imaging chip," Fluid Dynamics Research, 24, 6, 329-342(1999).

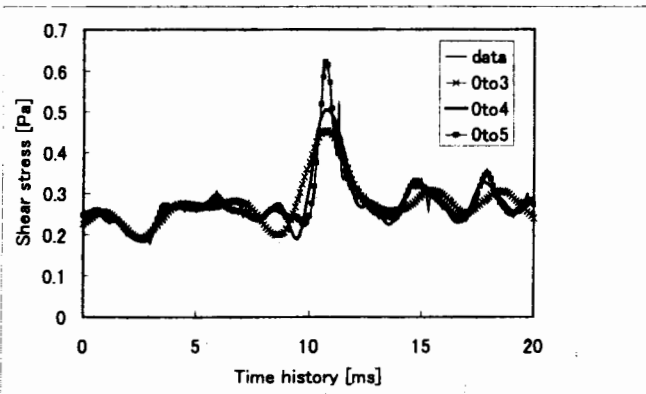


Fig.3 Sample data

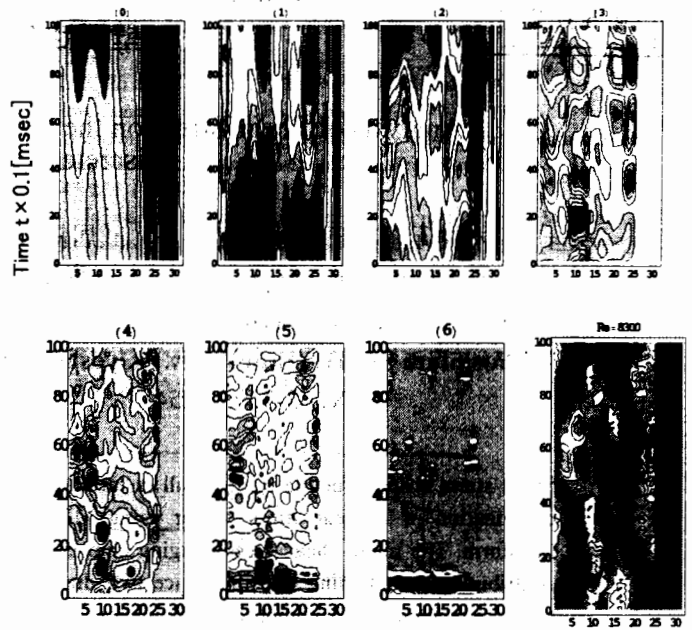


Fig.1 Original data at Re=8300 and multi resolved data

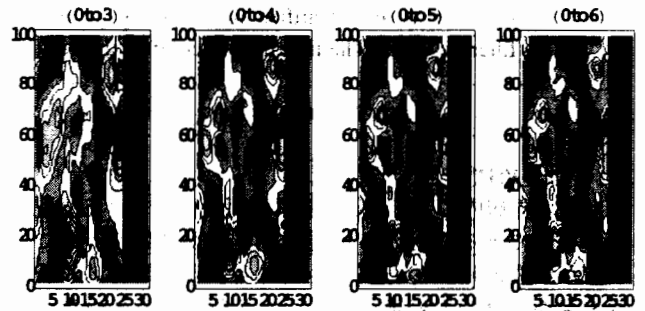


Fig.2 Multi-resolution filtering at Re=8300

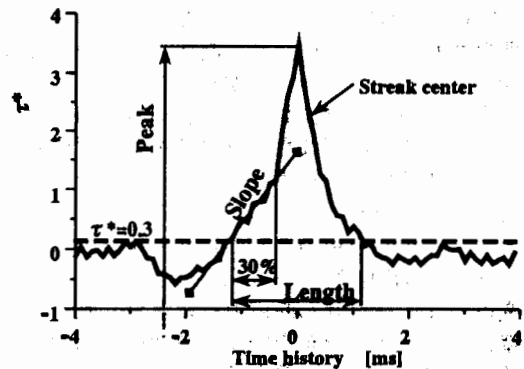


Fig.4 Peak, Length and Slope of streaks

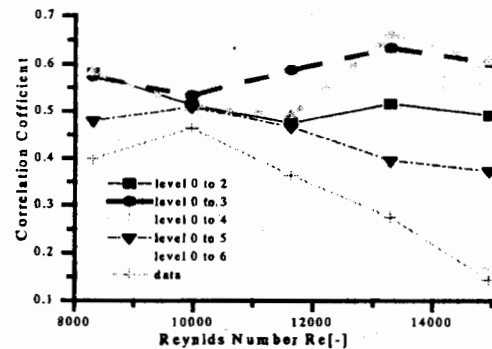


Fig.5 Correlation Coefficient of Peak-slope with Re