J054042

Wavelet 基底に基づく VITA 法による乱流渦運動解析*

藤松 信義^{*1}

Analysis of Turbulent Vortex using VITA method based on Wavelet Transform

Nobuyoshi FUJIMATSU^{*1}^{*1} Toyo Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kujirai 2100, Kawagoe-shi, Saitama, 350-8585 Japan

The VITA method is one of the stochastic methods to investigate the coherent motion and the bursting phenomena in the turbulent boundary layer. Some researchers pointed out that the results analyzed by the VITA method contain the invalid detection of the bursting events and the VITA method can hardly capture the dynamic structures in the turbulent boundary layer. We proposed the stochastic technique which is incorporated the wavelet transform to the VITA quantities. The analyzed result shows that the erroneous detection is removed and the bursting phenomena are captured appropriately.

Key Words : Bursting phenomena, coherent structures, stochastic analysis, turbulent boundary layer, VITA method.

1. 緒 言

乱流渦運動を定量的に把握するために、速度変動波形や画像情報を用いた条件付測定が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。乱流速度変動の時系列データを用いる方法として、四象限法⁽³⁾⁽⁴⁾や VITA 法⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾が利用されている。VITA 法 (Variable Interval Time Averaging method) は、乱流の整構造であるバースティング現象を検出する方法の一つである。バースティング現象は乱れエネルギーの生成に関与しており、ejection や sweep といった大きな速度変動を伴う渦運動として断続的に観測される。速度変動波形からその現象を捉えるために、VITA 法では区分積分時間内における速度変動の局所分散値が計算される。局所分散値がある閾値以上となり、特定の渦運動の状態が検知されたときのみ、VITA 法ではバースティング現象として捉えられる。しかし、VITA 法により検出されるバースティング現象と実際の秩序構造の一致は芳しくないことが報告されている⁽⁷⁾。本研究では、その問題点を解決するために、Wavelet 変換に基づく VITA 法を提案してバースティング現象をより詳細に捉えることを目的とする。

2. 実験装置と乱流境界層速度分布

図 1 は本実験で使用した NPL 式ブローダウン風洞の測定部地面板の簡略図である。地面板前縁を原点に取り、流れ方向に X 軸、高さ方向に Y 軸、スパン方向手前側に Z 軸を取っている。軸にはカッコ書きで各軸に対応する速度変動成分を示してある。地面板前縁は長軸 40mm、短軸 5mm の楕円形状をしている。乱流境界層を人工的に安定発達させるために $X=100\text{mm}$ と 110mm の位置に直径 3mm 高さ 3mm の円柱をスパン方向に中心間距離 20mm で千鳥状に配列している。境界層計測は $X=1900\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$ の位置で行った。流速計測には I 型熱線プローブを用いた。サンプリング周波数は 10kHz で、各点 60 秒間計測した。単位長さ当たりのレイノルズ数は $Re = 5 \times 10^5$ である。

熱線流速計により得られた対数速度分布を図 2 に示す。図には粘性底層を表す $u^+ = y^+$ と対数領域を表す Patel の式 ($u^+ = 5.45 \log y^+ + 5.5$) も示した。粘性底層から乱流域に切り替わる遷移層の位置は $y^+ = 15$ 付近であり、十分発達した乱流境界層の傾向を捉えることが出来ている。

^{*1} 正員、東洋大学 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)
E-mail: fujimatsu@toyo.jp

図1 風洞装置

図2 対数速度分布

3. Wavelet 変換に基づく VITA 法の提案

Blackwelder は乱れエネルギーの生成に寄与する ejection や sweep 現象を捉えるために VITA(Variable Interval Time Averaging) 法を提案した. 実験で得られた速度変動波形から, それらの現象を捉えるために VITA 法では速度変動の区分時間平均値に基づいた統計処理が行われる. パースティング現象が起きると, 短時間で顕著な速度変動が生じるため乱れエネルギーが生成される. この乱れエネルギーを検出するために, 積分時間間隔 T に対して式(1)の局所分散値 $Var(t)$ を定義する.

$$Var(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u^2(t') dt' - \left[\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u(t') dt' \right]^2 \quad (1)$$

Blackwelder は ejection を検出するために検出関数 $D(t)$ を, 以下のように定義している⁽¹⁾.

$$D(t) = \begin{cases} 1 & Var(t) > ku^2 \text{ and } du/dt > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

図3 VITA 法により得られたパースティング波形

表1 VITA 法による乱流渦運動の検出頻度と個数

	F_{cp}	N_{bst}
VITA (I-probe)	4.25×10^{-3}	1107

本研究では Blackwelder の解析に従って, 閾値は $k=1$, 積分時間間隔は $T=10$ とした⁽¹⁾. 図3はパースティング波形(速度変動のアンサンブル平均波形)を示している. 平均速度より徐々に減速した後, 加速する ejection 運動を捉えていることが分かる. 表1は $y^+ \sim 15$ の測定結果を用いて VITA 解析した結果を示している. 表には無次元パースティング周波数 F_{cp} とパースティング検出個数 N_{bst} を示している. 無次元パースティング周波数は Blackwelder の補正式を用いて計算した⁽¹⁾.

図4は VITA 解析による ejection の検出結果を示している. 横軸は無次元時間 ($T^+ \equiv tu_\tau^2/\nu$), 縦軸は上から順に, 速度変動 u , 速度変動の局所分散 $Var(t)$, 検出関数 $D(t)$ を示している. Ejection の検出位置には図全体に縦線を示してある. 短時間で速度変動 u が大きくなると, 乱れエネルギーまたは速度変動の局所分散が増大する. このと

図4 乱流渦運動の検出結果(従来法)

き速度が負から正に時間変化していれば $D(t)$ は 1 となる. ここで $D(t)=1$ となるときを検出位置に着目してみる. $T^+=9791$ と 9803 で **ejection** を検出しているが, 変動速度波形を見ると同一の変化について検出しているように見える. これは短時間, 最初に検出された結果は **ejection** の誤検出である. これは VITA 法が単一の速度変動で渦運動を捉えようとしたためである. そこで, 変動速度 $u(t)$ に **wavelet** 変換の導入を試みる. その基礎式は式(3), 検出条件は式(4)のように書くことができる.

$$W[u(a,b)] = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt - \left[\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \right]^2 \quad (3)$$

$$D(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{if } W(u(a,b)) \geq 0 \text{ and } d(u\bar{\psi})/dt > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

ψ は Wavelet 関数であり, 本研究では Gabor 型を適用した. a はダイレーション, b はシフトである. 図 5 は変動速度を式(3), (4)により時間周波数解析した結果を示している. 乱れエネルギー分散は複数の周波数成分を含んでいることが分かる. 図 6 は提案手法による検出結果を示している. Wavelet 変換の Level が上がるにつれて, 単一の乱流渦運動を識別できるようになることが分かる.

図 5 乱れエネルギー分散の時間周波数解析

図 6 乱流渦運動の検出結果 (提案手法)

4. ま と め

従来の VITA 法は単一の乱流渦運動に対して, 複数の乱流渦運動として検出することがあることを示した. 乱流渦運動を正確に捉えるために, VITA 法に Wavelet 変換を導入した方法を提案した. その結果, 単一の乱流渦運動を複数の乱流渦運動と誤検出する問題点を解決することができた.

参 考 文 献

- (1) R.F. Blackwelder and H. Eckelmann, Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon, *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, pp.577-594, (1979).
- (2) R. J. Adrian, Hairpin vortex organization in wall turbulence, *Phys. Fluids*, Vol.19, 041301 (2007).
- (3) J. M. Wallace, H. Eckelmann and R. S. Brodkey, The wall region in turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 54, pp.39-48 (1972).
- (4) S.S. Lu, W.W. Willmarth, Measurements of the structure of Reynolds stress in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol. 60, pp.481-571 (1973).
- (5) R.F. Blackwelder and R.E. Kaplan, On the wall structure of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol.76, pp.89-112 (1976).
- (6) R. A. Antonia, S. Rajagopalan, C. S. Subramanian, and A. J. Chambers, Reynolds-number dependence of the structure of a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol.121, pp.123-140 (1982).
- (7) D.G. Bogard and W.G. Tiederman, Burst detection with single-point velocity measurements, *J. Fluid Mech.*, Vol. 162, pp.389-413 (1986).