

乱流組織運動の統計処理に関する考察

Investigation on Stochastic Method for Coherent Motion in Turbulent Flow

藤松信義*

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. 結論

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古くから提案されている^(1,2)。これらの手法の基本は乱流速度変動の時系列データを用いる方法であり、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 bursting 現象を検出する方法の一つである。bursting 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乱れエネルギーの局所分散値を適用している。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 bursting 現象として捉えられる。しかし、VITA 法により検出される bursting 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おり⁽⁷⁾、近年、乱流渦構造を適切に捉える方法が多く研究者により提案されている⁽⁸⁻¹²⁾。本論では、乱流渦運動の特徴に着目して VITA 法を改良した手法について紹介する。

2. 実験装置

Fig. 1 は本実験で使用した NPL 式ブローダウン型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 Fig. 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ている。

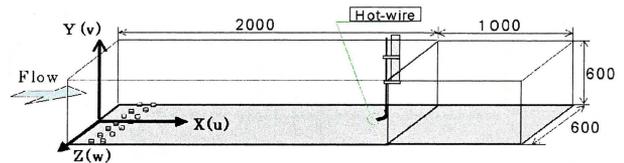


Fig.1 Schematic of wind tunnel.

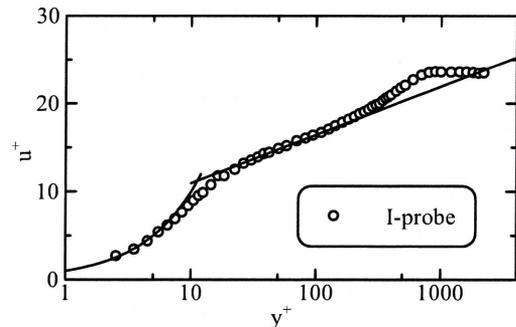


Fig. 2 Logarithmic velocity profile.

3. 統計処理と乱流渦構造解析

3. 1 乱流組織構造

乱流現象は壁面近傍における渦運動に特徴があり、組織構造や秩序構造と呼ばれる。これまで乱流の渦構造について、様々な提案がなされている^(2,9)。基本的な乱流渦構造の模式図を Fig. 3 に示す。

乱流境界層の壁近傍では、流れ方向に回転軸を持った筋状の渦構造が存在する。その中でも乱れエネルギーの生成に

寄与するのは、渦運動における ejection, sweep と呼ばれる過程である。乱流境界層における速度変動 u, v の正負を区別して分類した図が Fig. 4 である。Ejection と sweep は第 2, 第 4 象限に対応しており、レイノルズ応力 $-\rho uv$ が正となる。そのため、乱れエネルギーの生成に寄与する。第 1, 第 3 象限は outer interaction, inner interaction と呼ばれており、乱れエネルギーの生成には寄与しない。

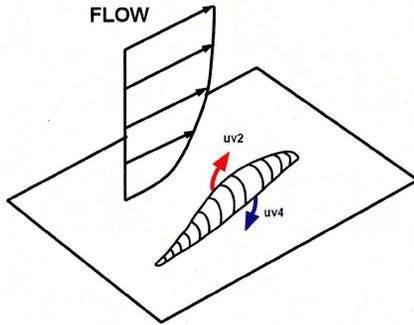


Fig. 3 Coherent structure in turbulent boundary layer.

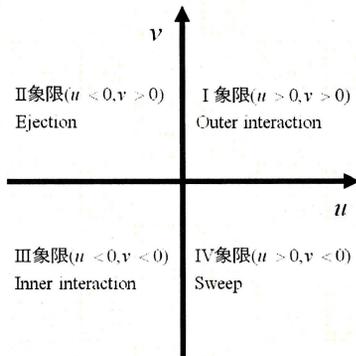


Fig. 4 Classification of vortex motion in four quadrant plane.

3. 2 VITA 法

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。乱流渦運動は断続的に生じており、Ejection や sweep といった bursting 現象を検出するために、VITA 法では以下の量が導入される。

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

例えば、Ejection の検出では以下の条件が適用される。

- (I) $var_{uu}(t) > ku^2$ かつ $u < 0$
- (II) Ejection から sweep へ移行するとき $du/dt > 0$ 。

k は閾値であり、乱れエネルギーを基準に定められる。VITA 法では条件(I), (II)を満たすとき ejection が発生した

ものと識別され、それ以外は検知されない。

乱流渦構造の検出関数 $D(t)$ は以下のように定義される。

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

本研究では多くの解析事例^(1,5,7,9-12)に従って、閾値は $k=1$ 、積分時間間隔 T は無次元時間 $T^+=10$ に定めた。

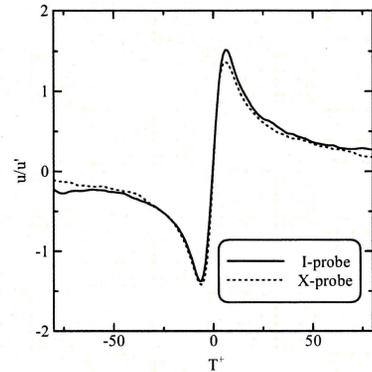


Fig. 5 Ensemble averaged waveform of bursting phenomena measured by I-type and X-type probes.

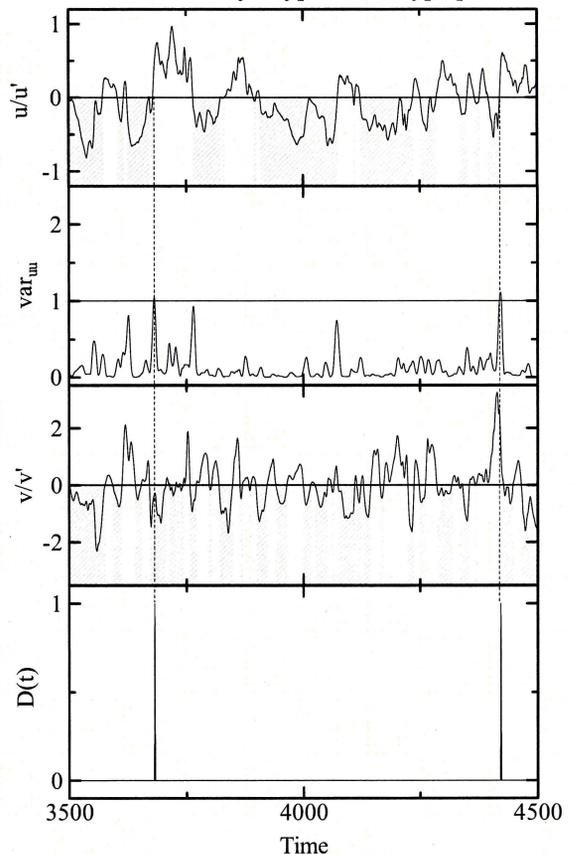


Fig. 6 Time histories of fluctuation velocities, VITA results and detection function.

Fig. 5 は I 型プローブと X 型プローブによる実験結果から得られた速度変動のアンサンブル平均波形を示してい

る。平均流(速度変動 $u=0$)から減速していく結果から ejection を生じていることが確認できる。その後、 $T^+ = -5 \sim +5$ で流れは加速しており、sweep が生じている。I型プローブと X 型プローブにより得られたアンサンブル平均波形はよく似ている。

Fig. 6 は X 型プローブで測定した速度変動 u, v と乱れエネルギーの局所分散値, VITA 解析による検出結果の時間履歴を示している。横軸は無次元時間($\equiv tu_r^2/\nu$)、縦軸は上から順に、速度変動 u 、速度変動の局所分散 $var_{uu}(t)$ 、速度変動 v 、検出関数 $D(t)$ を示している。Ejection を識別するために、速度変動 u が負になる領域を斜線でハッチしてある。Ejection の検出位置は図中に縦線を示してある。

乱れエネルギーの局所分散値が増大するとき速度が負から正に時間変化していれば Ejection が発生しており $D(t)=1$ となる。ただし、 $var_{uu}(t)$ が大きく、速度変動が $u>0$ から減速するときは sweep 現象と識別され、 $D(t)=0$ となる。

ここで $D(t)=1$ となったときの速度変動の符号に着目してみる。速度変動 u の符号は二つの検出位置において $u<0$ である。速度変動 v の符号は、初めの検出位置では $v<0$ であり、次の検出位置では $v>0$ となる。Ejection は $u<0, v>0$ の渦運動であるから、最初に検出された結果は ejection を誤検出していると考えられる。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。

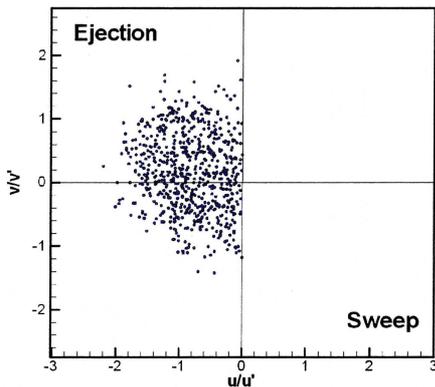


Fig. 7 VITA analysis results in four quadrant plane.

Fig. 7 は VITA 法による検出結果と速度変動の関係を示している。横軸と縦軸は速度変動成分 u, v である。Ejection が検出されているので、 $u>0$ 側の情報は存在しない。一方、ejection は第 2 象限の現象である。しかし、 $v<0$ となる検出

結果が多数含まれていることが分かる。上記の誤検出は、VITA 法が単一の速度変動を基に提案されているためである。誤検出を減らすには、速度変動 u, v を同時測定して、bursting 現象を適切に捉えることができるように VITA 法を改良する必要がある。次節では VITA 法を拡張して乱流渦構造の捕獲を行う。

3. 3 VITA 法の拡張

乱流境界層における bursting 現象はレイノルズ応力生成に寄与しており、単一の速度変動のみでは識別することができない。一方、X プローブ測定であれば速度変動成分 u, v から ejection と sweep を区別することができる。ここでは VITA 解析を拡張して、X プローブを用いた乱流渦構造の捕獲を行う⁹⁾。Ejection は速度変動 u, v が $u<0, v>0$ となる現象である。そこで、VITA 解析の条件を以下のように拡張する。

- (I) $var_{uu}(t) + var_{vv}(t) > k(u'^2 + v'^2)$ かつ $u<0, v>0$
- (II) Ejection から sweep へ移行すると $du/dt > 0, dv/dt < 0$

従来法との違いは、(I)の条件が 2 次元乱れエネルギーで評価されており、速度変動による ejection の識別を加えていることである。その結果、ejection と異なる第 3 象限の現象を捉えることがなくなると考える。

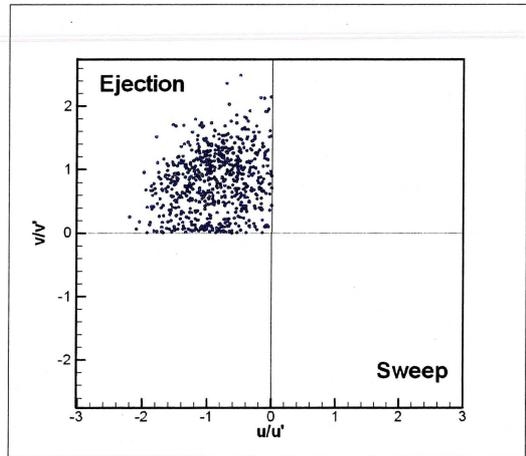


Fig. 8 QVITA analysis results in four quadrant plane.

Fig. 8 は QVITA 法による ejection の検出結果と速度変動の関係を示している。QVITA 法では第 3 象限の誤検出がなくなっていることが分かる。また、Fig. 7 と比べると速度変動 v の影響が加わることで、VITA 法では捉えられなかった ejection を捉えていることも確認できる。

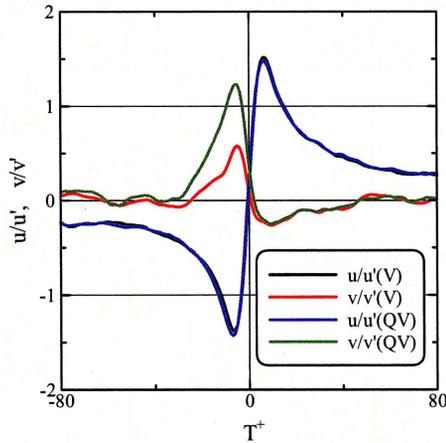


Fig. 9 Time histories of ensemble averaged velocity fluctuation.

Fig. 9は VITA 法と QVITA 法のアンサンブル平均波形を示している。(V)が VITA 法による結果であり、(QV)は QVITA 法による結果である。アンサンブル平均波形から、 $T < 0$ では ejection, $T > 0$ では sweep の渦運動が確認できる。速度変動 u に関する波形は、補正前後であまり違いはみられない。しかし、ejection 発生時における速度変動 v の波形は QVITA 法の方が強くなっている。従来の VITA 法は u 成分のみに着目しているため、第 3 象限が誤検出されて平均化された波形により、速度変動 v の成分が弱められていたが、QVITA 法は誤検出をしないため、適切に捉えることができています。

4. まとめ

従来の VITA 法は単一の乱流速度変動に着目しているため、乱流渦運動を誤検出することを示した。乱流渦運動を正確に捉えるために、VITA 法に乱流渦の速度変動成分を考慮した QVITA 法を提案した。その結果、乱流渦運動を誤検出する問題点を解決することが可能となり、乱流組織構造を適切に捉えることができた。

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).
- (8) J. Lin, J. P. Laval, J. M. Foucaut and M. Stanislas, Quantitative characterization of coherent structures in the buffer layer of near-wall turbulence, *Exp. Fluids*, 45, pp.999-1013, (2008).
- (9) 藤松 信義, 三栖 功, 乱流組織運動を考慮した VITA 法および 4 象限解析の改良, *実験力学*, 10(1), pp.82-88, (2010).
- (10) A. Drozd, W. Elsner, S. Drobnik, Application of VITA technique for detection of the organized structures present in a turbulent boundary layer under an adverse pressure gradient, *Arch. Mech.*, 63, 2, pp.183-199, (2011).
- (11) A. Drozd and W. Elsner, Detection of coherent structures in a turbulent boundary layer with zero, favourable and adverse pressure gradients, *J. of Phys.*, 318(2), (2011).
- (12) R. Nagaosa, Prediction of Turbulent Scalar Fluxes at Shear-free Gas-Liquid Interface Based on Surface Divergence, *Int. J. of Offshore and Polar Eng.*, pp.29-35, (2011).