

完全粗面領域における d 形粗面境界層の組織構造 (4 象限分割法による解析)

望月 信介*・大坂 英雄*

Coherent Structure of a d-Type Rough Wall Boundary Layer in a Fully Rough Regime (Results with the Four-Quadrant Analysis)

Shinsuke MOCHIZUKI and Hideo OSAKA

Abstract

Coherent Structure of a d-type rough wall boundary layer at a fully rough regime has been investigated with the four-quadrant analysis. Fractional stress contribution of the events associated with the bursting phenomenon was quantitatively analyzed and compared with the results at a low Reynolds number. The fractal stress contribution of the second quadrant (ejection event) decreases with increasing the Reynolds number. The contribution of the violent events was studied and the significant difference of the turbulent structure among d-type rough, k-type rough and smooth wall flows was found.

1. 緒 言

著者らは、前報⁽¹⁾において高レイノルズ数 $R_\theta=5000$ の場合の d 形粗面境界層を V I T A 法を用いて解析した。その中でバースト現象は存在するものの、レイノルズ数の増加によりエジェクション過程における集合平均波形の振幅及び観察される y 方向範囲が減少することを述べた。

しかし、バースト現象に関連する各事象のレイノルズ応力に対する寄与の変化については示していない。そのことは 4 象限分割法⁽²⁾を用いて各過程のレイノルズ応力への寄与率を定量的に評価することにより明らかにできると考えられる。一方、既報⁽³⁾の解析において大振幅変動の 2 象限の事象が乱流パルジの通過とよく対応することを報告した。本報においては、このことを利用して大振幅変動の事象の解析から外層の大渦構造を検出し、低レイノルズ数における結果との比較からレイノルズ数の効果を調査する。このことから、高次

モーメント量の変化から予想された粘性表層の挙動を通じてのレイノルズ数の効果が明らかになるものと思われる。

そこで本報においては、局所摩擦抵抗係数が一定値をとる $R_\theta=5000$ の d 形粗面境界層を 4 象限分割法を用いて解析し、特にレイノルズ応力への寄与率及び大振幅変動の事象の解析結果について報告する。

2. 実験装置および方法

測定平板は、前報⁽¹⁾と同じ粗さ要素高さ kr 、要素幅 b 及び溝部の幅 w がいずれも 3 mm の d 形粗面平板である。実験条件は、運動量厚さ θ に基づくレイノルズ数 $R_\theta(=\theta U_1/\nu)=5000$ とした。このとき、本 d 形粗面境界層は局所摩擦抵抗係数が $C_f=0.00404$ の一定値をとる⁽⁴⁾。速度成分の測定には、熱線センサの受感部長さ及び直径がそれぞれ 1 mm 及び $5\mu\text{m}$ のタングステン線を用いた X 型熱線プローブと定温度型熱線流速計を使用した。その時、受感部長さに基づくレイノルズ数は $l^+(=l u_\tau/\nu)=10$ であり、空間分解能は極めて良好である⁽⁵⁾。

*機械工学科

条件付解析には4象限分割法⁽²⁾を用いた。4象限分割法は瞬時レイノルズ応力 uv を $u-v$ 平面内の4つの象限に分割し、ホールサイズ H を用いてレイノルズ応力への寄与率を評価するものである。レイノルズ応力への寄与率は下式(1)で定義される。

$$\frac{-(\overline{uv})_i(H)}{|\overline{uv}|} = \frac{-1}{|\overline{uv}|} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T uv(t) S_i(t, H) dt \quad (1)$$

ここで $S_i(t, H)$ は間欠関数であり、以下のように定義される。

$$S_i(t, H) = \begin{cases} 1 : uv(t) > Hu_{rms} \cdot v_{rms} \text{で, } i \text{ 象限の時} \\ 0 : \text{その他} \end{cases}$$

$u-v$ 平面内の4つの象限は、1象限から4象限についてそれぞれ $i=1$ ($u>0, v>0$)；外向き相互作用過程, $i=2$ ($u<0, v>0$)；エジェクション過程, $i=3$ ($u<0, v<0$)；内向き相互作用過程, $i=4$ ($u>0, v<0$)；スweep過程と呼ばれている⁽²⁾。このうち2象限は低速流体塊の上昇を、4象限は高速流体塊の下降と対応しているといわれており、ともにレイノルズ応力に正の寄与をなすものである。本研究においては、上述の間欠関数を用いて各象限の間欠係数、継続時間及び平均発生周波数を求めた。これらの解析に際しては、熱線流速計からの速度信号を一旦データレコーダに記録し、その後A/D変換(10kHzのサンプリング速度で10秒間収納)して、大型計算機(ACOS 850)を用いて処理した。

3. 結果および考察

3.1 レイノルズ応力への寄与率 ($H=0$)

各象限からのレイノルズ応力への寄与を調べるため、 $H=0$ とした場合の寄与率、間欠係数及び継続時間を求めた。Fig. 1は層内における各象限のレイノルズ応力への寄与率を示す。全象限についてみると、2象限及び4象限からの寄与率が層内を通じて大きい。最も壁近傍における両象限からの寄与率の和は局所レイノルズ応力の1.4倍にもなる。なお、2象限と4象限の寄与率は内層($y/\delta \leq 0.12$)においてはほぼ同じ値である。一方、外層においては、層外端に向い2象限の寄与率は増加するのに対し4象限のそれは減少していき、2象限が優勢となっている。前述した内層において2象限と4象限とがほぼ同程度の寄与率をもつという結

果は、そこで2象限の寄与率が優勢であった低レイノルズ数の結果⁽³⁾と異なっている。これは2象限からの寄与率が低レイノルズ数のものに比べ減少しており、VITA法による結果⁽¹⁾と対応している。1象限及び3象限の両象限は他の2つの象限と比べ寄与率の絶対値が小さく、層内の位置及びレイノルズ数による差が小さい。

Fig. 2は各象限の時間的寄与の割合を表す間欠係数を示す。間欠係数についても2象限と4象限が層内を通じて大きく、最も壁近傍における両象限の時間的寄与の割合はほぼ60%である。内層においては、2象限と4象限は同程度でほぼ一定の間欠係数の値をとる。

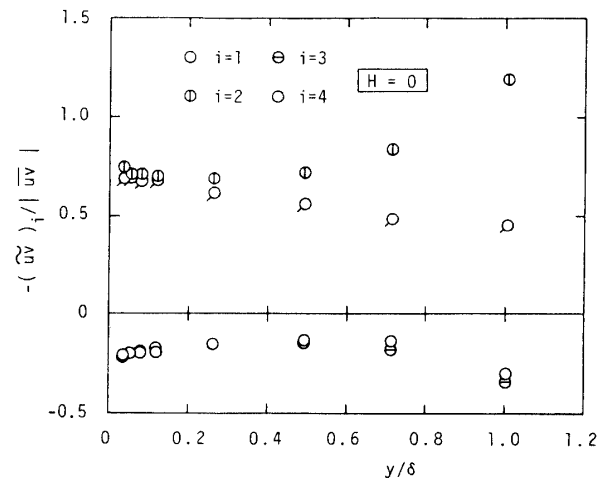


Fig. 1 Fractional contribution to the Reynolds shear stress ($H=0$).

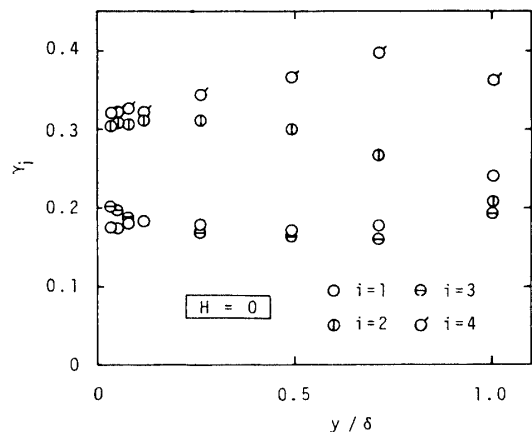


Fig. 2 Intermittency of the fractional contribution to the Reynolds shear stress ($H=0$).

外層においては層外端に向い2象限の間欠係数は減少するのに対し4象限のそれは増加傾向を示し、そこで4象限の時間寄与率が優勢になっている。 $y/\delta \approx 0.7$ において4象限からの時間寄与は全時間の40%を占める。低レイノルズ数の結果⁽³⁾と比較すると、内層で2象限の間欠係数の値が若干減少するものの、顕著な差異はみられない。一方、1象限及び3象限の層内における間欠係数の変化は小さい。

Fig. 3は各象限の1事象当りに寄与する時間間隔を表す事象継続時間を示す。ここで、継続時間の値は主流速度 U_1 及び境界層厚さ δ を用いて無次元化している。全象限についてみると、 $y/\delta \leq 0.7$ の広い範囲で2象限及び4象限の継続時間が大きく、1象限及び3象限のそれらのおよそ1.5~2倍である。内層においては、2象限と4象限がほぼ同程度の継続時間となっている。2象限は $y/\delta \approx 0.4$ で最大値をとる分布、4象限は $y/\delta \leq 0.7$ の範囲で y の増加とともに無次元継続時間の値は増加している。1象限と3象限は壁近傍を除き層内ではほぼ一定値をとっている。

2象限及び4象限の寄与率、間欠係数及び事象継続時間は高レイノルズ数の本流れ場においても層内で優勢であることがわかった。内層についてみると、2象限と4象限がレイノルズ応力に対しほぼ同程度の寄与をなしている。一方外層についてみると、寄与率では2象限、間欠係数では4象限が優勢である。また低レ

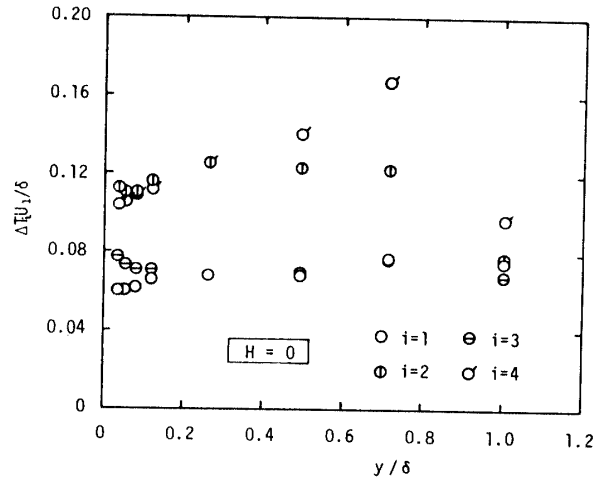


Fig. 3 Time duration of the fractional contribution to the Reynolds shear stress ($H=0$).

イノルズ数の流れ場と比較すると、2象限からの寄与率の値が減少していることが明らかとなった。

3.2 局所位置におけるレイノルズ応力への寄与

ここでは、ホールサイズ H を変化させた場合の局所位置におけるレイノルズ応力への寄与の変化について調べてみる。Fig. 4は層内の5つの局所位置における

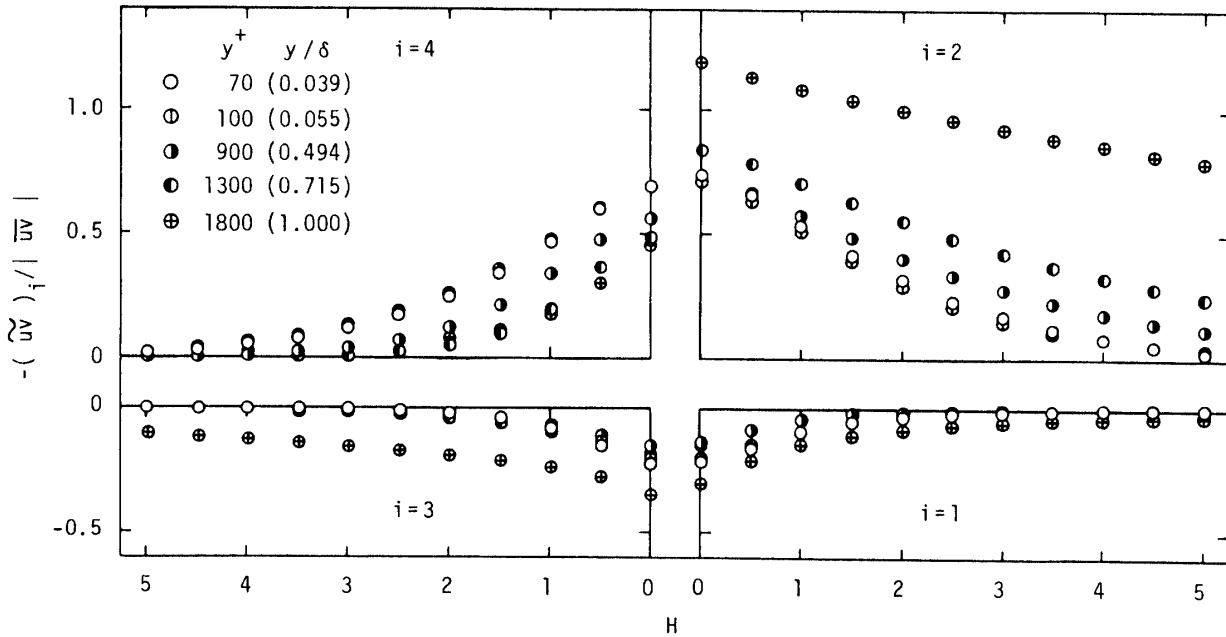


Fig. 4 Variation of the fractional stress contribution with the hole size H .

Hに対する寄与率の変化を示す。内層($y^+=70, 100$)では、任意のHに対し2象限と4象限とがほぼ同じ値をとる分布となっている。これは任意のHの値に対し2象限の寄与率が大きい低レイノルズ数の結果⁽³⁾と異なる。このことから、高レイノルズ数の本流れ場においては低レイノルズ数のものに比べ高振幅の2象限の事象による寄与率が減少していることが推測できる。一方外層においては、2象限からの寄与率はHの大きい場合に比較的大きな値を示すのに対し、4象限からの寄与率はHの大きい場合にほぼゼロとなっている。1象限及び3象限からの寄与率は層外端の3象限を除いて小さく、Hの大きな値($H \geq 4$)に対してはゼロとなっている。

Fig. 5は寄与率の変化を示したものと同一層内の5つの局所位置について、Hに対する平均発生周波数の変化を示す。平均発生周波数は主流速度及び境界層厚さを用いて無次元化している。内層についてみると、2象限と4象限の値は任意のHの値に対してほぼ同程度の値をとる分布となっている。これは $H \leq 2$ の範囲で4象限の平均発生周波数が2象限のそれよりも大きい低レイノルズ数の結果⁽³⁾と異なる。外層についてみると、 $H \leq 2$ の範囲では任意のHのとき2象限と4象限はほぼ同程度の発生周波数をとっている。H>2の比較的高振幅の範囲において2象限の発生周波数が極めて大きく、外層では2象限の高振幅の事象が圧倒的であることがわかる。1象限及び3象限は $y/\delta=1.0$ の結果を除いて、任意のHに対してほぼ同程度の値をとり、Hの増加による $\bar{f}_1\delta/U_1$ の値の減少の割合は2象限及び4象限のものに比べ大きい。

3.3 大振幅変動の事象 (H=4)

低レイノルズ数における解析から、H=4で検出される大振幅変動の2象限の発生周波数が外層における乱流バルジの通過時間とよく対応するという結果を得ている⁽³⁾。そのことから、本報においても大振幅変動の事象⁽⁶⁾を調べてみる。ここでは、寄与率及び間欠係数において優勢であった2象限と4象限の寄与率及び平均発生周波数の比をみてみる。Fig. 6は大振幅変動の事象における2象限の4象限に対する寄与率の比を示す。図中には他の流れ場との比較を行うため、Luら⁽²⁾の滑面境界層及びRaupach⁽⁷⁾のK形粗面境界層の分布を記入した。なお、Luら⁽²⁾の滑面境界層の結果は $R_\theta=4230$ のものである。一方、Raupach⁽⁷⁾のk形粗面境界層の結果は同じ寸法の高さと直径をもつ円柱粗さ要素による粗面上のものであり、粗さレイノルズ数は427である。

本d形粗面境界層についてみると、内層では $(\overline{uv})_2/(\overline{uv})_4 \approx 1.2$ の値をとり、大振幅変動の2象限と4象限とがほぼ同程度の寄与率となっている。寄与率の比は内層から外層にかけて増加し、外層においては2象限の寄与率が圧倒的になっている。但し、低レイノルズ数の結果⁽³⁾と比べるとその増加割合は小さい。例として $y/\delta \approx 0.8$ における寄与率の比の値をみると、本流れ場においては $(\overline{uv})_2/(\overline{uv})_4 \approx 70$ であるのに対し、低レイノルズ数の流れ場においては $(\overline{uv})_2/(\overline{uv})_4 \approx 400$ となっている。したがって、低レイノルズ数の流れ場と比較すると2象限の大振幅変動の事象からの寄与率が減少していることがわかる。k形粗面流の結果についてみると、壁近傍で $(\overline{uv})_2/(\overline{uv})_4=0.01$ の1よりかなり小さい値をとっており、そこで大振幅変動の4象限からの寄与率が圧倒的となっている。外層においては、 $(\overline{uv})_2/(\overline{uv})_4$ の値は層外端に向い増加し、そこで2象限の大振幅変動の事象からの寄与率が優勢となっている。一方、滑面流においては層内で2象限の大振幅変動の事象からの寄与率が優勢となっている。

Fig. 7は大振幅変動の事象における2象限の4象限に対する平均発生周波数の比を示す。本d形粗面流についてみると、内層においては $\bar{f}_2/\bar{f}_4 \approx 1.0$ となり寄与率と同様に大振幅変動の事象は2象限と4象限とで同じ頻度で発生している。外層においては、層外端に向かい \bar{f}_2/\bar{f}_4 の値は増加している。但し、発生周波数の比においても寄与率の比と同様に低レイノルズ数の場合に比べその増加割合は小さくなっている。例として $y/\delta \approx 0.8$ における発生周波数の比の値をみると、本流れ場においては $\bar{f}_2/\bar{f}_4 \approx 20$ であるのに対し、低レイノルズ数の流れ場においては $\bar{f}_2/\bar{f}_4 \approx 60$ であった。k形粗面流についてみると、壁近傍で $\bar{f}_2/\bar{f}_4=1.0$ であり、発生頻度においては大振幅変動の2象限と4象限がほぼ同程度である。このことは前述の寄与率の比と考え合わせると、壁近傍における4象限の事象が極めて高振幅であることがわかる。外層においては、層外端に向い \bar{f}_2/\bar{f}_4 の値は減少し、1よりも小さい値をとっている。一方滑面境界層についてみると、層内で2象限の大振幅変動の事象の発生周波数が優勢となっている。

上述のように3種の流れ場において大振幅変動の事象における2象限と4象限の寄与率と発生周波数の比を調べ、それらの差異を明らかにした。本d形粗面境界層においては高レイノルズ数の流れ場においても2象限の大振幅変動の事象からの寄与が優勢であった。このことはレイノルズ応力の生成に対して、滑面流のバースト現象のモデル化においてよく用いられている

ヘアピン渦構造⁽⁶⁾が本流れ場において重要であるということの証拠であろう。但し、優勢である 2 象限の 4 象限に対する寄与率及び発生周波数の比は、低レイノルズ数の場合と比べ減少している。この変化は三重速度相関分布の形状のレイノルズ数による変化⁽⁹⁾と対応して

いる。k 形粗面流においては、壁近傍で大振幅変動の 4 象限における事象が卓越することが特徴的であった。これは粗さ要素周りに生じる Necklace 渦による壁近傍へのレイノルズ応力フラックスが原因と考えられ⁽¹⁰⁾、k 形粗面と d 形粗面の乱流構造における重要な差異で

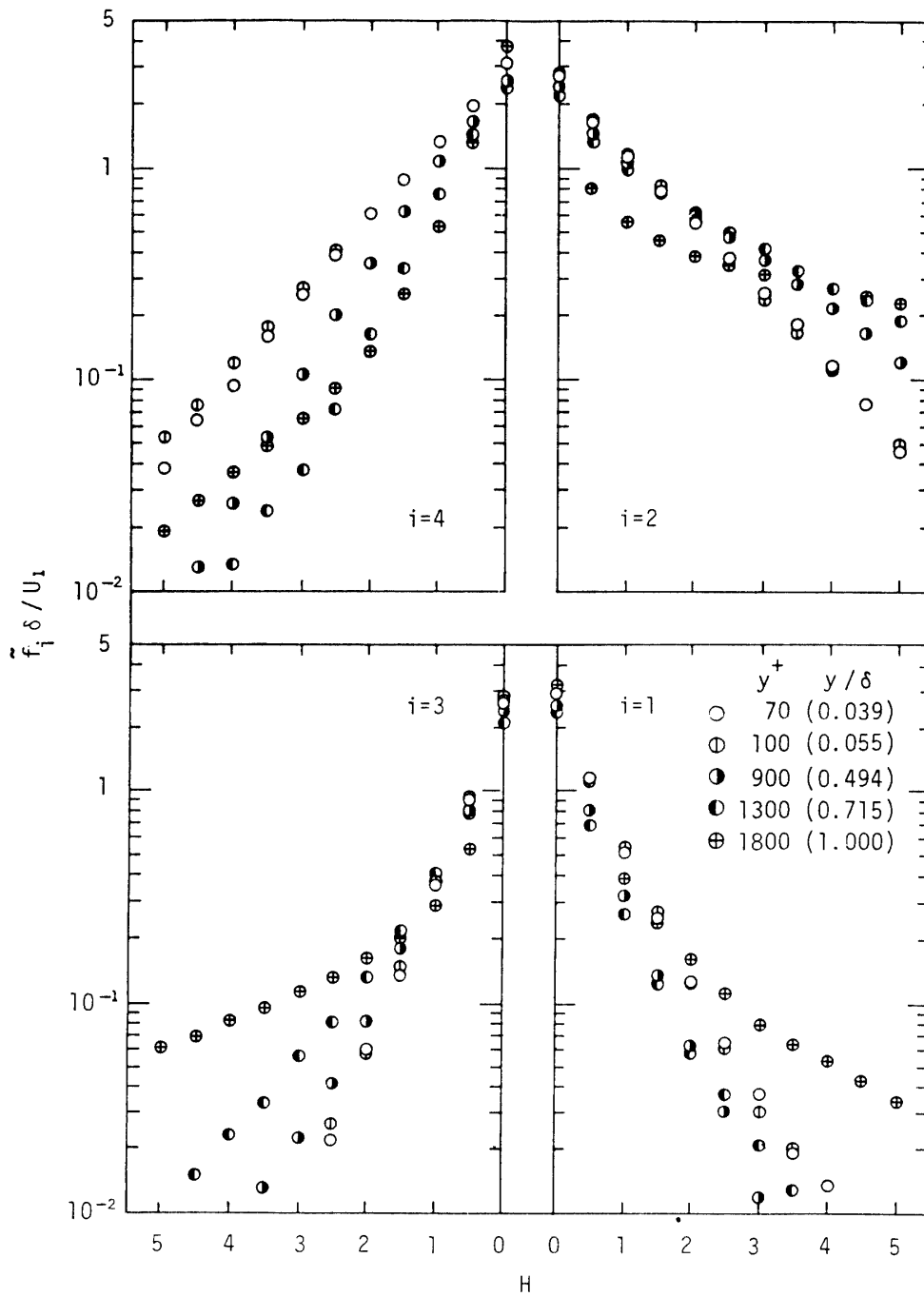


Fig. 5 Variation of the mean frequency with the hole size H.

ある。

Fig. 8は大振幅変動の事象の平均発生周波数の分布を示す。乱流バルジの平均通過時間とはっきりした対応がみられた2象限についてみると、外層の $y/\delta = 0.2 \sim 1.0$ の範囲で $\tilde{f}_2\delta / U_1$ は大きく変化せず、おおよかに $0.2 \sim 0.3$ の値をとっている。 $y/\delta = 0.8$ においては $\tilde{f}_2\delta / U_1 = 0.29$ である。この平均発生周波数から求めた乱流バルジの流れ方向の寸法 $\tilde{L} = U_1 / \tilde{f}_2$ は局所の排除厚さのおよそ20倍となっている。これらの値は低レ

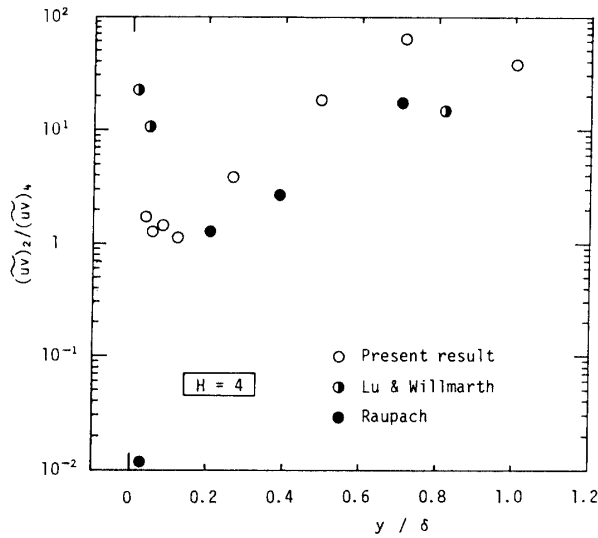


Fig. 6 Ratio of the stress contribution of the violent ejection to that of the violent sweep.

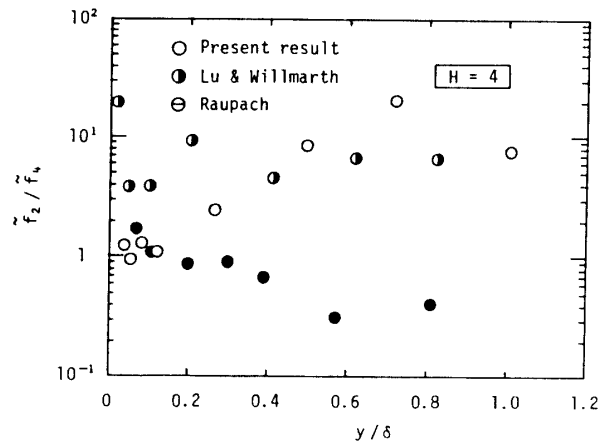


Fig. 7 Ratio of the mean frequency of the violent ejection to that of the violent sweep.

イノルズ数のd形粗面流における結果⁽⁹⁾及び種子田の可視化の結果⁽¹¹⁾と一致する。したがって、外層における大振幅変動の2象限の平均発生周波数はレイノルズ数によらず乱流バルジの流れ方向尺度の目安として考えることができることがわかる。

3.4 集合平均波形パターン

ここでは $H = 2$ の比較的高振幅の事象を検出し、各象限の集合平均波形パターンからレイノルズ応力への寄与の過程を調べてみる。前述の大振幅変動の事象を考慮して、Fig. 9は外層の $y/\delta = 0.5$ 及び 0.7 の結果を示す。まず $y/\delta = 0.5$ における結果をみている。全象限についてみると、象限によらず \tilde{u} のピークの幅が \tilde{v} のそれよりもかなり大きい。2象限においては、 \tilde{u} と \tilde{v} のピークの幅が最も近く、半値期間 t^* (ピーク値の半分の値をとる時間幅)の大きさはおよそ2:1である。 $\tilde{u}\tilde{v}$ 成分におけるピーク値は局所 $u_{rms} \cdot v_{rms}$ の2.6倍、半値期間は $t^* u^2 / \nu = 8.1$ である。この半値期間の値は本流れ場における積分特性時間程度⁽⁴⁾の大きさである。一方4象限においては、 $\tilde{u}\tilde{v}$ 成分におけるピーク値は局所 $u_{rms} \cdot v_{rms}$ の2.1倍、半値期間は $t^* u^2 / \nu = 6.8$ となっており、いずれの値も2象限のものよりも小さい。1象限及び3象限の分布は $t=0$ に対して非対称となっており、3象限の \tilde{u} 及び \tilde{v} 成分波形は $t=0$ 近傍を除いて2象限のものに類似となっている。 $y/\delta = 0.7$ の結果においても、象限によらず \tilde{u} のピークの幅が \tilde{v} のそれよりもかなり大きくなっている。2象限についてみる

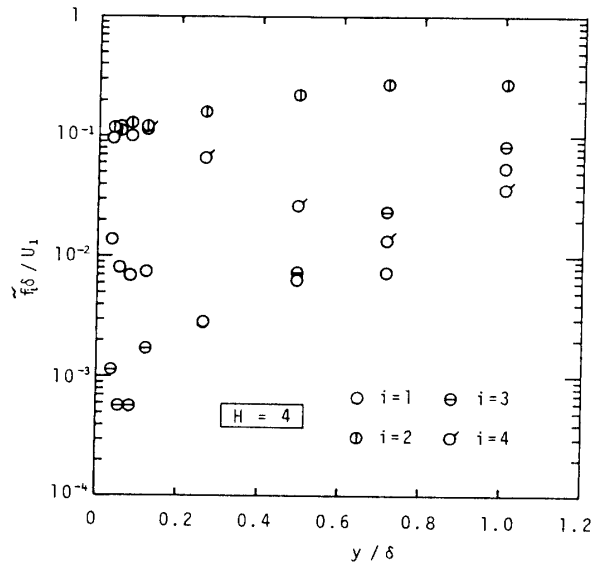
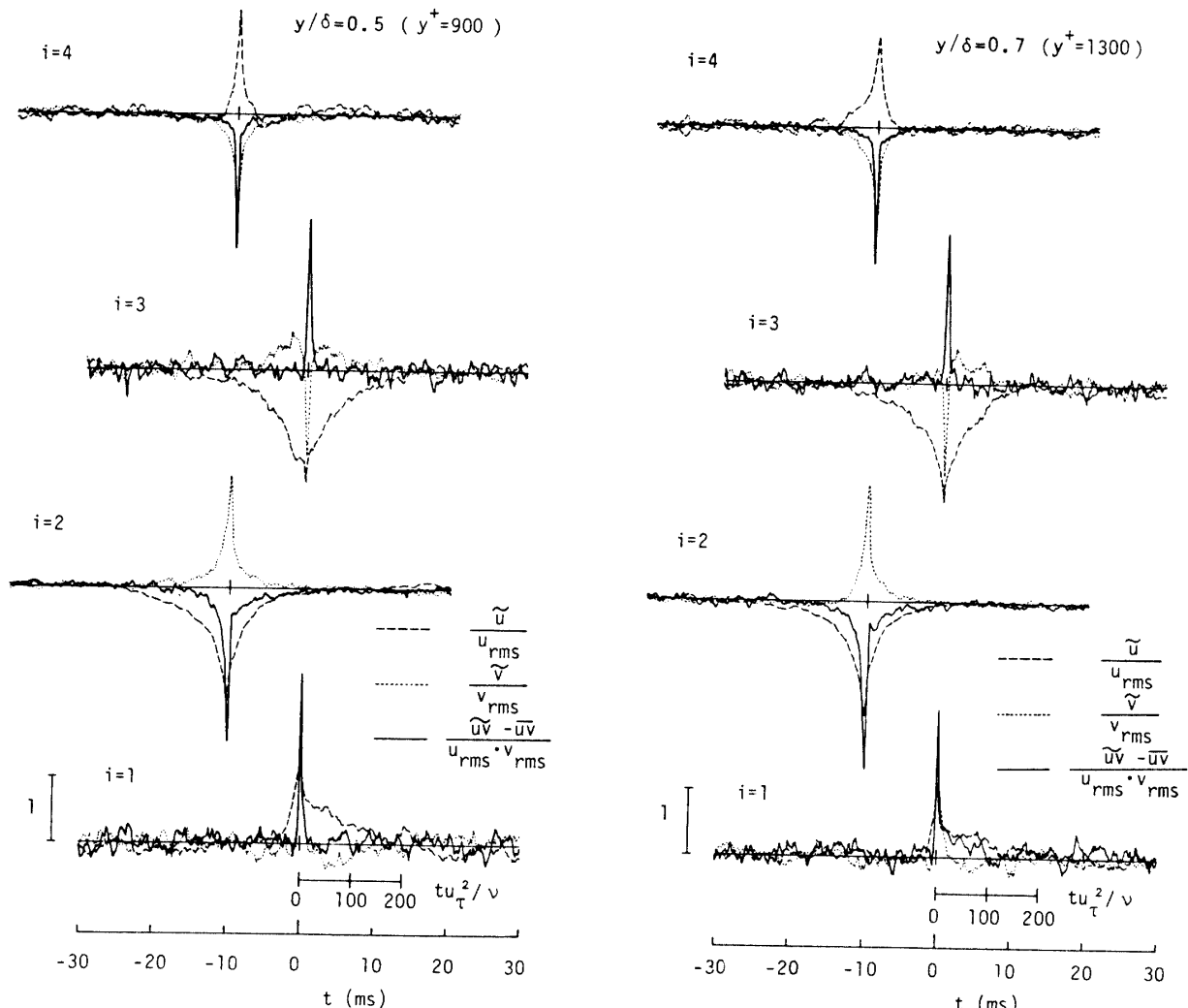


Fig. 8 Mean frequency of the violent events.

と、この位置においても \tilde{u} と \tilde{v} のピークの幅が最も近い。 \tilde{u} 成分におけるピーク値は局所 $u_{rms} \cdot v_{rms}$ の2.5倍、半値期間は $t \cdot u_{\tau}^2 / \nu = 11$ となっている。4象限においては、 \tilde{u} 成分波形が非対称性の強い分布となっている。 \tilde{v} 成分におけるピーク値は局所 $u_{rms} \cdot v_{rms}$ の2倍、半値期間は $t \cdot u_{\tau}^2 / \nu = 6.7$ となっており、2象限の値よりも小さい。1象限及び3象限の分布は非対称性が強く、特に1象限の \tilde{u} 成分及び3象限の v 成分でそれが顕著である。3象限の分布は $t=0$ 近傍を除いて2象限のものに極めて類似している。ここで低レイノルズ数の結果⁽³⁾と比較してみると、2象限及び4象限の \tilde{uv} 成分のピーク値はほぼ同程度であるものの、半値期間の値に差がみられる。低レイノルズ数の場合の外層 $y/\delta = 0.71$

における2象限及び4象限の半値期間は $t \cdot u_{\tau}^2 / \nu = 2 \sim 3$ であり、本流れ場の値の方が大きい。一方、外部尺度で表した半値期間は低レイノルズ数の場合 $t \cdot U_1 / \delta = 0.2 \sim 0.33$ 、本流れ場の場合 $t \cdot U_1 / \delta = 0.1 \sim 0.14$ であり、低レイノルズ数の方が大きい値となっている。これらの変化は、内部尺度を用いた場合にはレイノルズ数の増加により大渦から小渦への寸法の広がりが大きくなったことと、外部尺度を用いた場合には境界層外端の乱流-非乱流の界面の形状が変化したことに密接に関連するものと思われる。



(a) $y/\delta = 0.5$

(b) $y/\delta = 0.7$

Fig. 9 Conditional averaged signals.

4. 結 言

$R_\theta=5000$ の完全粗面領域におけるd形粗面境界層の組織構造を4象限分割法を用いて解析し、レイノルズ応力への寄与を評価した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 寄与率及び間欠係数については、層内全域で2象限と4象限が優勢である。内層では2象限と4象限がほぼ同程度の寄与率及び間欠係数をとるのに対し、外層では寄与率については2象限が、間欠係数については4象限が優勢である。
- (2) レイノルズ数の増加にともない、2象限の4象限に対する寄与率の比が相対的に減少している。これは特に高振幅の事象において顕著である。
- (3) 大振幅変動の事象における2象限の4象限に対する寄与率及び発生周波数の比を調べ、d形粗面流、k形粗面流及び滑面流の間の構造の差異を明確にした。また、外層における2象限の大振幅変動の事象の平均発生周波数は、乱流バルジの流れ方向の尺度の目安として考えることができる。
- (4) 外層における $H=2$ を用いて検出される比較的高振幅の事象の集合平均波形パターンを求め、各象限におけるレイノルズ応力への寄与の過程を調べた。

文 献

- (1) 望月・大坂, 山口大学工学部研究報告, 42-1, 1, (1991)
- (2) Lu, S.S. and Willmarth, W.W., J. Fluid Mech., 60, 481, (1973)
- (3) 望月・大坂, 日本機械学会論文集B編, 53-485, 27, (1987)
- (4) 望月・大坂, 山口大学工学部研究報告, 37-2, 1, (1987)
- (5) Ligrani, P.M. and Bradshaw, P., Exp. Fluids, 5, 407, (1987)
- (6) Sabot, J., ほか2名, Phys. Fluids, 20-10, S150, (1977)
- (7) Raupach, M.R., J. Fluid Mech., 108, 363, (1981)
- (8) Robinson, S.K., Ann. Rev. Fluid Mech., 23, 601, (1991)
- (9) 望月・大坂, 山口大学工学部研究報告, 40-1, 1, (1989)
- (10) Bandyopadhyay, P.R. and Watson, R.D., Phys. Fluids, 31-7, 1877, (1988)
- (11) 種子田, なかれ, 1-1, 29, (1982)

(平成3年9月18日受理)