

乱流渦列後流中のレイノルズせん断応力生成に寄与する速度変動の特性

Characteristics of Velocity Fluctuation Produced Reynolds Shear Stress
in the Turbulent Vortex Street Wake

正 松村 昌典 (北見工大) 准 今村 祐輔 (日本製鋼所)

Masanori MATSUMURA, Kitami Institute of Technology, Kouen-cho 165, Kitami, 090-8507
Yuusuke IMAMURA, Japan Steel Works

The purpose of this investigation is to clarify the production mechanism of Reynolds shear stress in the vortex street wake. The space distributions of velocity fluctuation were shown by using ensemble average technique based on angular direction of velocity fluctuation vector at reference point where is maximum production point of Reynolds shear stress. As the result of this study, the relation between the space structure produced Reynolds shear stress and the angular direction of velocity fluctuation vector was revealed.

Key Words: Wake, Reynolds Shear Stress, Longitudinal Vortex, Velocity Fluctuation

1. はじめに

後流のような自由せん断乱流中には、大きなレイノルズせん断応力が生じ、これがせん断乱流の特徴である大きな混合・拡散作用の原因となっている。円柱から周期的に放出される二次元渦は、下流で渦列後流を形成し、後流中には大きなレイノルズせん断応力が生じる。このレイノルズせん断応力の生成には、渦列を構成する二次元渦に重畳してリブ構造を形成する縦渦群や、このリブ構造を原因とする渦列の三次元変形などが寄与していると考えられているが、その詳細⁽¹⁾⁽²⁾については不明な点が多い。

本研究は、渦列後流中でレイノルズせん断応力の生成に寄与する速度変動の方向とその寄与強さから、レイノルズせん断応力に寄与する速度変動構造の空間的な分布状態を明らかにすることを目的としている。すなわち、後流内に設けた基準点の速度変動ベクトルの方向を監視し、その方向毎に周辺速度場をアンサンブル平均することによって、基準点の速度変動の方向とその周辺の速度変動構造の空間的な分布状態との関係を明らかにし、レイノルズせん断応力の生成機構を理解しようとするものである。

2. 実験装置と方法

2-1 実験装置 実験の概要と主な記号の定義を図1に示す。実験には、試験部断面 700mm × 700mm の回流型風洞を用いた。実験時の主流速度は $U_0=12\text{m/s}$ 、主流の乱れ強さは 0.3% 以下であった。渦列後流形成物体として、直径 $d=20\text{mm}$ のアルミ合金製の円柱を用いた。円柱は、風洞壁を貫通するように固定した。座標は円柱中心を原点とし、主流方向に x 軸、主流と円柱に対して直角方向に y 軸、円柱スパン方向に z 軸とした。 x, y, z 軸方向の瞬時速度成分をそれぞれ U, V, W 、時間平均を $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ 、変動成分を u, v, w と表記する。円柱直径

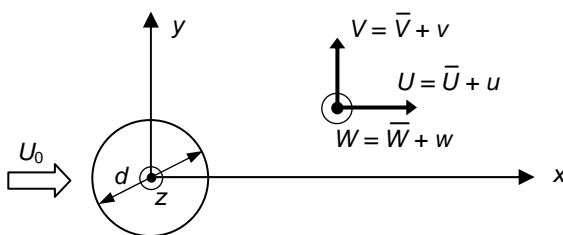


Fig. 1 Definition of main symbols

d と主流速度 U_0 に基づくレイノルズ数は約 15000 であった。

速度ベクトルの測定には、X型熱線プローブを用い、 U, V あるいは U, W の同時計測を行った。熱線プローブは、定温度型熱線流速計で作動させ、16bit 分解能の A/D 変換器によりサンプリング周波数 10kHz、1 測定点当たり 200,000 点 (20 秒) のデータ収録を行った。

2-2 アンサンブル平均 レイノルズせん断応力 $-\overline{uv}$ は、速度変動成分 u と v の速度相関 \overline{uv} と等価である。したがってレイノルズせん断応力は、速度変動ベクトル (u, v) の方向と密接な関係がある。ここで速度変動ベクトル角 $\theta = \tan^{-1}(v/u)$ と定義する。本研究では、レイノルズせん断応力に寄与する速度変動の θ に着目し、大きなレイノルズせん断応力の生じている $x/d=10, y/d=0.75, z/d=0$ (以後基準点と呼ぶ) の位置で得られる θ を監視しながら、周辺の数変動や速度相関などのデータ q を計測し、同じ θ が得られたときの q のアンサンブル平均を行った。その詳細は以下の通りである。

図2に示すように、時系列データ q と、同時刻の基準点での速度変動ベクトル角 θ が得られているとする。時間間隔 T における q の時間平均値は $\bar{q} = \frac{1}{T} \int_0^T q dt$ と表される。ここで基準点の速度変動ベクトル角が θ_1 であるときの q を q_1 とし、 θ_1 が検出されたときの q のアンサンブル平均を \bar{q}_{θ_1} とする。また \bar{q}_{θ_1} の確率密度関数を P とすると、 $\int \bar{q}_{\theta_1} P d\theta_1 = 1$ である。ここで q の平均値 \bar{q} に対する q_1 の寄与成分は $[q_1] = \bar{q}_{\theta_1} P_{\theta_1}$ と表され、このとき $\bar{q} = \int [q_1] d\theta_1 = 2 \int [q_1]$ となる。したがって $[q_1]$ は、基準点で θ_1 方向の速度変動をもたらす現象が q の平均値 \bar{q} に寄与する程度の大きさを意味してお

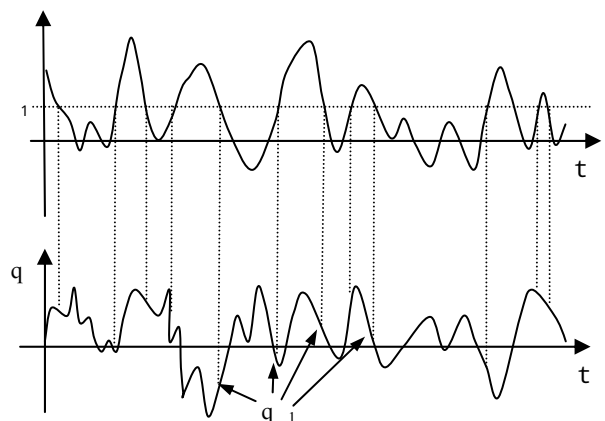


Fig. 2 Ensemble average based on vector angle

り、本研究では $[q]$ を、 q の時間平均値 \bar{q} に対する寄与強さと呼ぶことにする。

3. 結果と考察

3-1 時間平均とスペクトル特性 図3に、 $x/d=10$ における各種速度成分の時間平均特性を示す。速度相関 \overline{uv} の大きい $y/d=\pm 0.75$ 付近では、速度勾配 $d\bar{U}/dy$ は最も大きく、 x 軸方向の速度変動エネルギー $\overline{u^2}$ も最大となっている。したがってこの付近を渦列を構成する渦(以後この渦を後流渦とよぶことにする)の中心が通過しているものと思われる。また後流中心では、 $\overline{v^2}$ は $\overline{u^2}$ の2倍程度大きく、後流内の速度変動は v

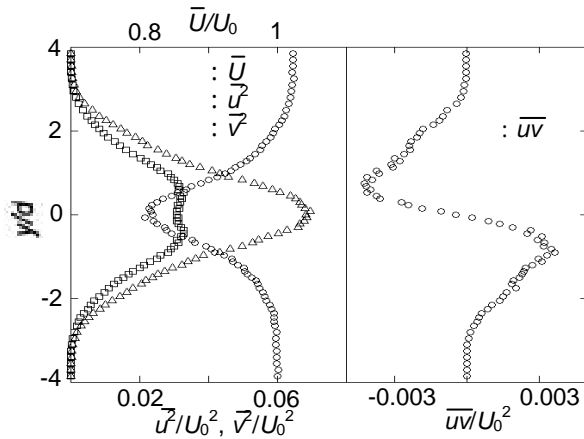


Fig. 3 Time mean characteristics in the vortex street wake

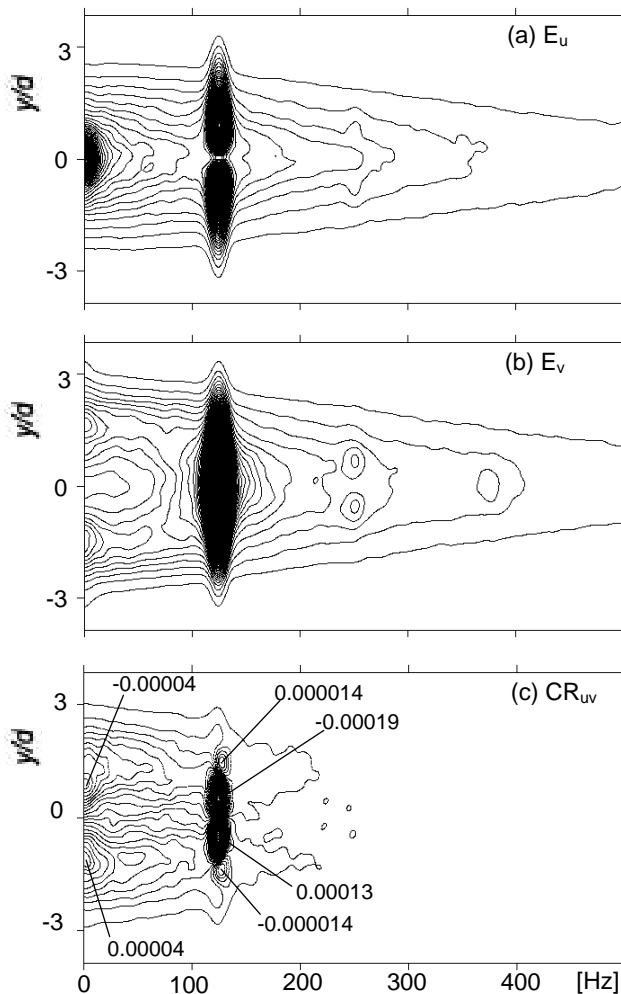


Fig. 4 Spectrum of velocity fluctuation

が圧倒的に支配的であることがわかる。

図4に速度変動のスペクトル分布を示す。図4(a), (b)は、それぞれ u, v のパワースペクトル E_u, E_v 、(c)は u と v のクロススペクトルの実数部(コスペクトル) CR_{uv} である。 CR_{uv} は、 u と v の周波数ごとの相関を意味しており、これを周波数軸方向に積分したものが速度相関 \overline{uv} となる。なお図中では、負の値の等値線を点線で表わしている。また円柱からの渦放出周波数は、 $f_k=125\text{Hz}$ であった。 E_u は $y/d=\pm 0.75$ 付近の f_k で最大となるが、後流中心では f_k の変動は小さく、低周波数成分のエネルギーが大きい。一方 E_v は、後流中心の f_k で非常に急峻な卓越的ピークをとっている。また CR_{uv} は、 $y/d=\pm 0.75$ 付近の f_k で極大値をとっているが、 $f_k/2$ 以下の低い周波数成分もかなり大きい。すなわち、レイノルズせん断応力の生成には、後流渦だけでなく、流れ方向のスケールが後流渦よりも長い構造も大きく寄与していることがわかる。

3-2 基準点における速度変動ベクトル角の確率密度関数とレイノルズせん断応力への寄与強さ 図5に、基準点における速度変動ベクトル角の確率密度関数 P_θ 、基準点の速度変動の方向が θ であるときの基準点の uv のアンサンブル平均値 $\overline{(uv)}$ 、および速度変動の方向が θ である基準点の速度変動が、基準点のレイノルズせん断応力に相当する \overline{uv} に対する寄与強さ $[(uv)]_\theta$ を示す。 P_θ は、 $\theta=\pm 90^\circ$ 付近が大きい。これは図3の結果で示されたように、後流内では $\overline{u^2}$ に比べ $\overline{v^2}$ の方が圧倒的に大きく、速度変動の方向は v に大きく支配されているためである。また P_θ は、 $\theta=90^\circ$ 付近よりも -90° 付近の方が大きい。これは、後流の中心から外側に向かう速度変動よりも、後流の外側から中心へ向かう変動の方が頻度が高いことを意味している。

$\overline{(uv)}$ は原理的には相関を意味するので、変動ベクトルの大きさが変わらなければ変動の方向が $+45^\circ, -135^\circ$ で正のピーク、 $-45^\circ, +135^\circ$ で負のピーク、 $\pm 90^\circ, \pm 180^\circ$ で0となるはずである。本実験で得られた $\overline{(uv)}$ の結果は、基本的にはその傾向を示すが、特に $+45^\circ$ で大きい。すなわち、加速した流れが後流の外側に向かうとき、大きな速度変動となっている。ただし $\theta=45^\circ$ の P_θ は小さいことから、この現象の起こる頻度は低い。

\overline{uv} に対する寄与強さ $[(uv)]_\theta$ は、 P_θ と $\overline{(uv)}$ の積である。したがって出現頻度の高い $\theta=\pm 90^\circ$ 付近の速度変動は、相関をもたない速度変動であるため、 \overline{uv} に対してほとんど寄与していない。一方、 $\theta=\pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ 付近では、 P_θ は小

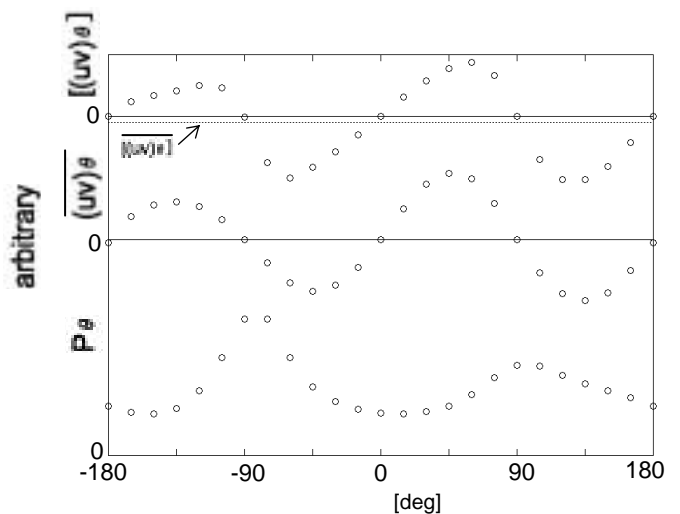


Fig. 5 PDF of angle of velocity fluctuation vector and contributory magnitude to Reynolds shear stress

さいが \overline{uv} が大きいため、 $[(uv)]$ は大きくなる。特に P が $\pm 90^\circ$ に近づくと大きくなることから、 $[(uv)]$ は -120° , $+60^\circ$ で正のピーク、 -60° , $+120^\circ$ で負のピークとなっている。図中の点線は $[(uv)]$ の平均値であり、レイノルズせん断応力の大きさに対応する。 $[(uv)]$ の正、負のピークは、この平均値に比べてはるかに大きい。またこれらの正、負のピークはほぼ対称で、その値の絶対値に大きな差は無い。しかしよく見ると -120° はやや小さいことがわかる。すなわちこのピークのわずかな非対称性が、 $[(uv)]$ 、すなわちレイノルズせん断応力の生成原因となっている。これを言い換えると、渦列後流内では、激しい速度変動によって後流の内側と外側で流体粒子の運動量交換が激しく行われているが、比較的出現頻度の低い現象が、この運動量の収支バランスにわずかな差を生じさせ、その結果としてレイノルズせん断応力が生成するものと考えられる。

3-3 基準点の速度変動ベクトル角とその周辺に生じるレイノルズせん断応力との関係 図6は、基準点($x/d=10$, $y/d=0.75$, $z/d=0$)にX型熱線プローブを固定して速度変動ベクトル角を監視し、もう1組のX型熱線プローブで基準点からz軸方向、あるいはy軸方向に離れた位置の uv を計測し、 \overline{uv} に対して $[(uv)]$ を求めたものである。すなわちこれは、基準点の速度変動の方向が θ である現象が、基準点周辺で生じているレイノルズせん断応力に寄与するの大きさの程度を表わしており、その分布状態からレイノルズせん断応力の生成に関わる構造の空間的スケールが推測できる。なお以後の等値線図では、負の値を点線の等値線で示している。

基準点に近い領域 ($z/d=0.75$ および $y/d=0.35$) では、図6の結果は図5の $[(uv)]$ とほぼ等しい分布状態になっている。すなわち $[(uv)]$ は、 $\theta = -60^\circ$, $+120^\circ$ で負のピーク、 -120° ,

$+60^\circ$ で正のピークとなっている。基準点での \overline{uv} は負であることから、負のピークはレイノルズせん断応力の増加に寄与し、正のピークはその減少に寄与する構造であるといえる。ここで基準点において、 $\theta = -60^\circ$, $+120^\circ$ 付近でレイノルズせん断応力の増加に寄与する構造をそれぞれ P_{60} , P_{120} 、 $\theta = +60^\circ$, -120° 付近でレイノルズせん断応力の減少に寄与する構造をそれぞれ N_{60} , N_{120} と便宜的に呼ぶことにする。これらの構造は、以下の特徴をもつ。

- P_{60} : 後流外側の速い流れを後流内側に取り込む
- P_{120} : 後流内側の遅い流れを後流外側に吐き出す
- N_{60} : 後流内側の速い流れを後流外側に吐き出す
- N_{120} : 後流外側の遅い流れを後流内側に取り込む

図6から、 P_{60} はy方向に比較的大きなスケールをもち、z方向の変化の少ない二次元的構造であることがわかる。したがって P_{60} には、二次元的な後流渦が寄与しているものと思われる。一方 P_{120} は、y方向もz方向もスケールは小さく、局所的構造であるといえる。また N_{60} は、y方向に長く分布していることから、基準点のx軸に対して対称な位置で生じるレイノルズせん断応力の増加に寄与している構造であり、 P_{60} と同等な構造であると思われる。

3-4 基準点の速度変動ベクトル角に基づいた周辺速度場のアンサンブル平均 図6で示した4つの構造を理解するために、基準点の速度変動ベクトル角 θ 毎に、周辺速度場の速度のアンサンブル平均を行った。図7, 8, 9に、それぞれ u , v , w のアンサンブル平均 \overline{u} , \overline{v} , \overline{w} を示す。また図10には、 \overline{u} , \overline{v} からなる速度ベクトル (\overline{u} , \overline{v}) を示す。

図7から、 \overline{u} のy方向の分布は、x軸をはさんで符号の反転することがわかる。これは回転方向の異なる後流渦が、x軸を中心に互い違いに流下するためであり、 u の変動の位相はx軸を境に 180° 変化するためである。また図8から、

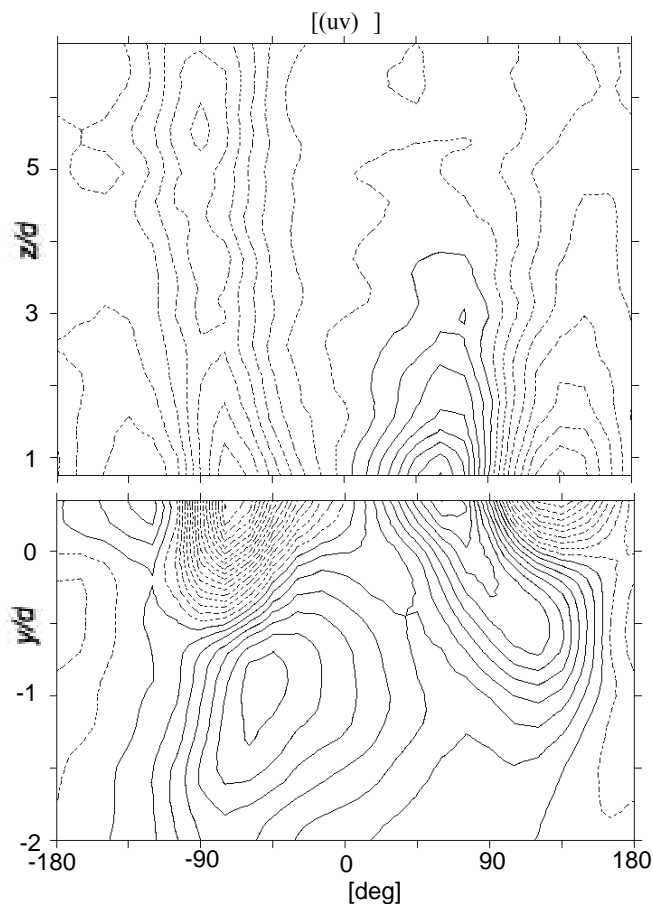


Fig. 6 Space distribution of contributory magnitude to \overline{uv}

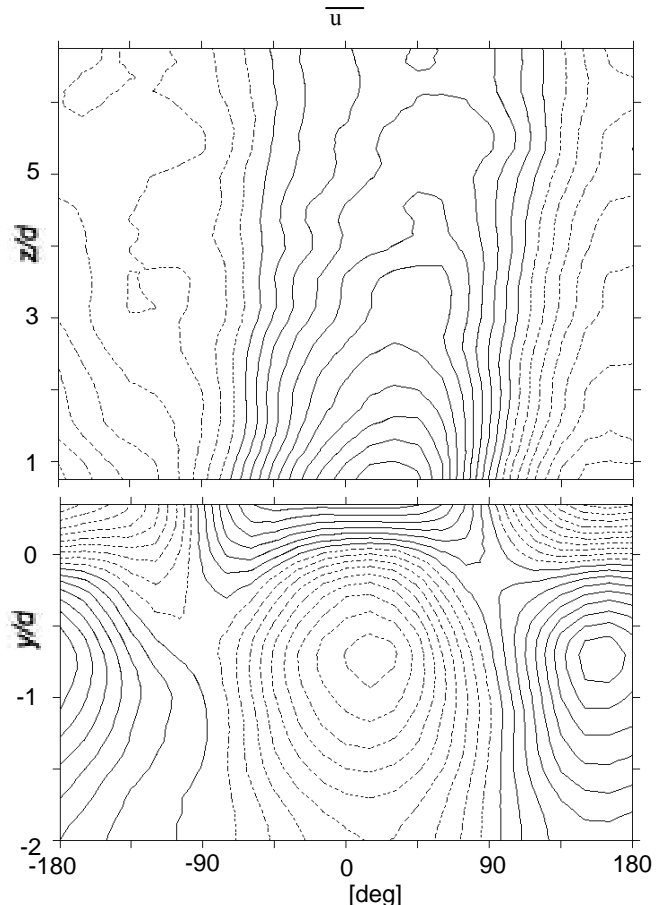


Fig. 7 Ensemble average of u at each angle

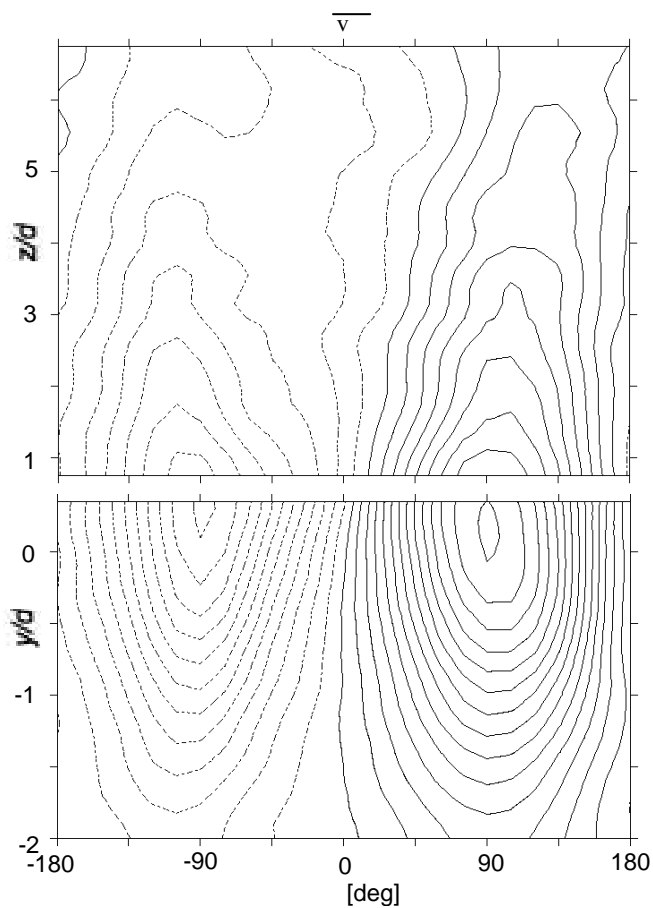


Fig. 8 Ensemble average of v at each angle

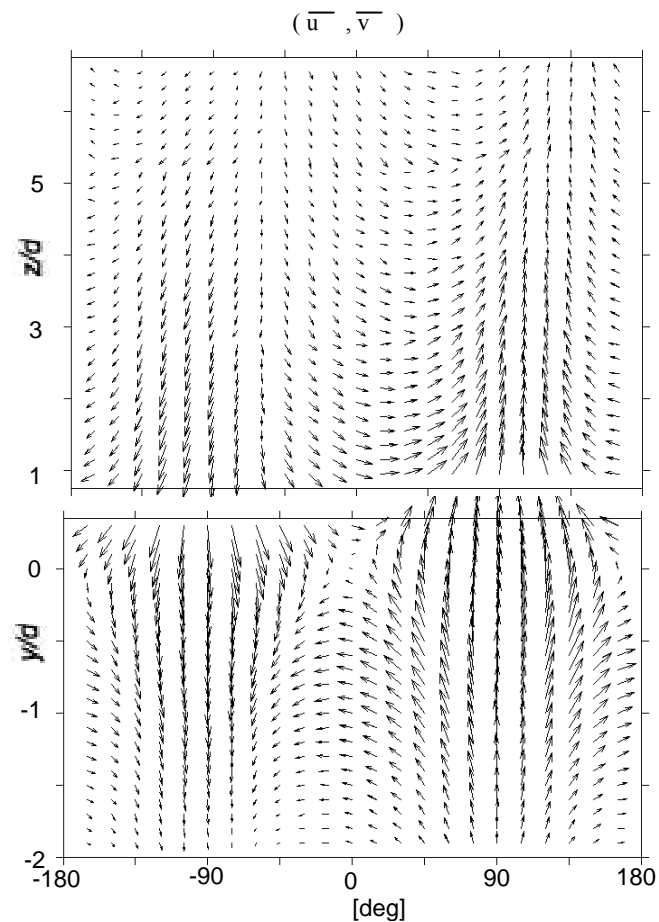


Fig. 10 Ensemble average of vector at each angle

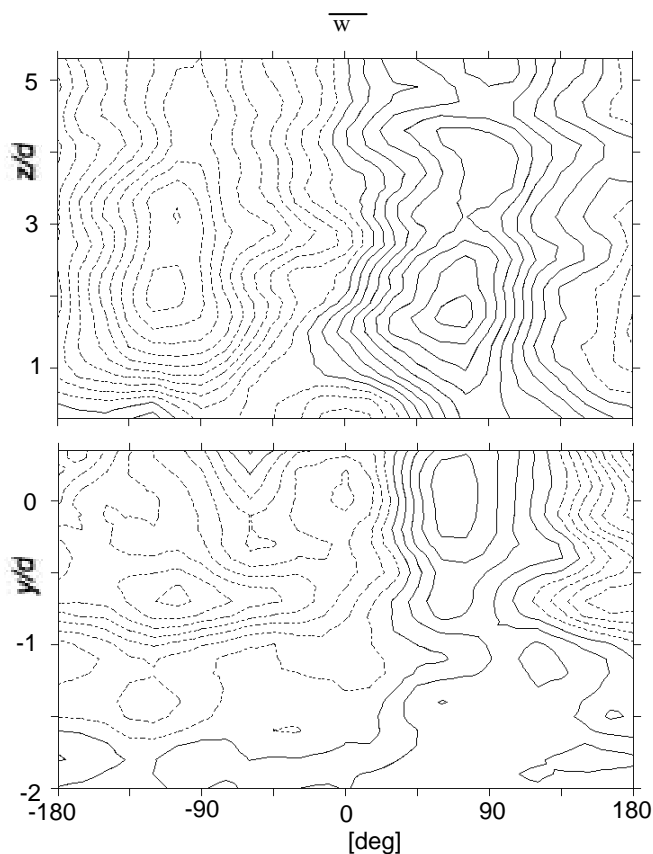


Fig. 9 Ensemble average of w at each angle

\bar{v} の y 方向の分布も後流渦の速度変動パターンに対応した結果が得られていることがわかる。このように後流渦の速度変動パターンに対応した結果の得られたことは、基準点の速度変動の方向は、後流渦が支配的であることを示している。しかし z 方向の分布をみると、 \bar{u} も \bar{v} も二次元性は必ずしも強いとはいえない。すなわち、 $x - y$ 面内で起こる現象は後流渦の構造に支配されているが、その z 方向の二次元性は弱いといえる。これはレイノルズせん断応力の生成には、後流渦の三次元性が大きく寄与していることを示唆していると思われる。

この後流渦の三次元性は、図9の結果からもわかる。すなわち \bar{w} は、基準点に近いところよりも、基準点から多少離れた位置に極大値が存在しており、基準点の周りには、三次元的な流れの存在することがわかる。特に N_{60} と N_{120} の領域に三次元流れが発生しており、興味深い。

4. おわりに

渦列後流中に生じるレイノルズせん断応力には、比較的少ない頻度で起こる後流外側の速い流れを後流内側に取り込む現象が大きく寄与していることがわかった。この現象を引き起こす構造は、後流渦と密接な関係があるが、そのスパン方向の構造はかなり三次元的である。後流渦の三次元性は、縦渦などが原因であるといわれている⁽³⁾が、本実験結果との関連は、まだ検討中である。

引用文献

- (1) Hussain & Hayakawa, J. Fluid Mech., 180(1987), 193-229.
- (2) Kiya & Matsumura, J. Fluid Mech., 190(1988), 343-356.
- (3) Williamson, Annu. Rev. Fluid Mech., 28(1996), 477-539.