

線形剪断勾配に伴う流れの構造の変化

一木 武次郎¹⁾・北島 崇雄²⁾・小園 茂平³⁾・宮城弘守⁴⁾

Turbulence characteristics of uniformly sheared flow generated by a multi-fan wind tunnel

Takejiro ICHIKI, Takao KITAJIMA, Shigehira OZONO, Hiromori MIYAGI

Abstract

Uniformly sheared flows with different shear rates are achieved conveniently by using wind tunnels of multi-fan type, which have different configuration of fans, and different width-to-height ratios W/H of the test section, where W is the width, H is the height of the test section. The purpose of the present study is to investigate the spatial turbulence structure of the uniformly sheared flow. The flow structure around the middle layer remains unchanged after a certain non-dimensional time elapsed. A significant increase (“bump”) in the longitudinal fluctuation r.m.s. is found for the largest shear rate in the wind tunnel of $W/H = 5.6$, and this bump should be closely related to the emergence of three-dimensionality of the flow structure. Time traces show a distinctive feature in a layer on the lower velocity side close to the wall, and its probability distribution function indicates that bursting motion causes the behavior.

Key words:

Wind tunnel of multi-fan type, Uniformly, Turbulence.

1. 序論

我々が生活している大気境界層は流れと直角方向に速度勾配を持つ剪断流の一種である。本論文では最も単純な線形剪断流をとりあげる。

風洞内に鉛直方向の速度勾配を主なパラメータとする線形剪断流を生成するには層流内に平行板を設置し、その後流で線形剪断流を生成する方法がある。例えば、Phillipsら¹⁾は風洞内に平行板を多数設置し、それぞれの平行板間の距離は床面から天井面に向けて徐々に伸張させ線形剪断流の生成を試みた。しかし、この方法では目標とする線形剪断流を作成するには平行板間の距離の調整に時間がかかり、また勾配が急な線形剪断流を生成することができないので実用的ではない。

そこで我々はマルチファン型風洞を用いて線形剪断流を生成することにした。マルチファン型風洞とは多数の送風機を独立に制御することにより、風路内にいろいろな流れを発生することが可能な風洞である。今回はまず測定部幅の狭い二次元的な風洞を用い、風洞内にいろいろな剪断勾配の線形剪断流を生成した。剪断勾配の増加に伴う流れ特性の変化を調べた。また、風路幅の影響を考慮するため、三次元的な風洞でも同様の計測をした。この風洞で生成した線形剪断流は、二次元的な風洞で生成した剪断勾配と同じ勾配をもつ様に生成した。

過去の研究²⁾で、勾配が急な剪断流の床面近傍の乱流特性が、緩やかな剪断流と比較すると劇的に変化することが観測された。このことから勾配の急な剪断流の床面近傍で剥離などの大きなスケールの運動が考えられた。しかし、この時使用した風洞は気流の制御が十分な精度で行われていなかった。

本研究の目的は、剪断流が所要の特性を満たすようにチューニングを行ない、強制的に外部から与えられた線形剪断勾

- 1) 材料物理工学科博士課程前期2年
- 2) 材料物理工学部4年
- 3) 材料物理工学科助教
- 4) 東北大流体研究所助手

配が流れの乱流構造に及ぼす効果を検証することである。

2. 実験方法

2.1 風洞装置の概要

本研究では二種類のマルチファン型風洞を使用した。一つ目の風洞は縦 11 個の送風機を持つ押し出し開放型風洞で、それぞれの送風機はパソコンで独立に制御され 11 個の AC サーボモーターを使用している。これを“二次元風洞”と呼ぶ。送風機から押し出された気流はダクト内を通り縮流され、ハニカムで整流され測定部に吹き出される。縮流比は 1:2 である。吹き出し口には長さ 100 mm のハニカムが設置されている。吹き出し口のダクト水平境界直後には、平均風速プロファイルの平滑化を促進するために直径 15 mm の円柱を 10 本設置した。測定部は高さ 1005 mm、幅 180 mm、長さ 3800 mm である。測定部入口におけるダクトの大きさは水平方向に $M_x=180$ mm、鉛直方向に $M_z=91.4$ mm である。この風洞は、風速を 0~11 m/s の範囲で制御ができる。

次に使用した風洞は、縦 11 個×横 9 個の合計 99 個のファンをもつ押し出し開放型風洞である。これを“三次元風洞”と呼ぶ。この風洞も二次元風洞と同様の機構をもっている。ただし、二次元風洞とは異なり三次元風洞では平滑化促進のための円柱は設置しなかった。縮流比は 1:1.83 である。測定部入口におけるダクトの大きさは $M_x=282$ mm、 $M_z=164$ mm である。この風洞は、風速を 0~18 m/s の範囲で制御できる。測定部は高さ 1800 mm、幅 2540 mm であり流れ方向に 15.5 m まで延長できる。

2.2 実験方法

変動流速の計測は、熱線流速計 SYSTEM-7000 (KANOMAX) で行いプローブは X 型 (Model 1241) を用いた。ホットワイヤーの受感部長は 1.0 mm である。圧力の計測は、JIS 型ピトー管 (岡野製作所) を用いた。データ収録にはロガー (NR-2000, KEYENCE) を用いた。本論文では特に断りがない場合は基本的に、サンプリング周波数 2 kHz、サンプリング時間間隔 2×10^{-3} s、データ長 200000 個、有効桁 14 bit を用いた。また、パワースペクトルを求める際には計測データを 16384 データ長の 10 ブロックに分けた。それぞれのブロックで FFT 解析を行い、算術平均を行った。

計測地点の位置は、二次元風洞では主流方向に $X/M_x=36.1$ ($X=3300$ mm)、水平方向に $Y/M_y=0.5$ 、鉛直方向に $Z/M_z=0.5 \sim 10.5$ の範囲で $Z/M_z=0.5$ 刻みで計測した。三次元風洞では主流方向に $X/M_x=20.1, 36.1, 42.7, 79.3$ ($X=3300$ mm、

5900 mm, 7000 mm, 13000 mm)、水平方向に $Y/M_y=1.0, 2.4, 4.5$ で、鉛直方向に $Z/M_z=0.5 \sim 9.5$ の範囲で計測した。

2.3 風速較正

風速は回転数制御されている。まず、風速と回転数の関係すなわち較正を行なった。作業手順は以下の通りである。この時風速は各ダクトの中心から下流に水平に延長した位置で熱線流速計により測定した。測定されて得られた風速と目標風速の比を計算して、それにより修正された電圧を与える。その式は次のようである。

$$\text{修正電圧} = (\text{目標風速値} / \text{実測風速値}) \times \text{修正前電圧値} \quad \dots \quad (1)$$

目標風速プロファイルを各ダクト下流に設定し、式(1)により線形剪断流を容易に風洞内に生成できた。線形剪断勾配は以下の式で定義した。

$$\alpha = \frac{\partial U}{\partial Z} \quad \dots \quad (2)$$

それぞれの風洞でこのようなチューニングを行なった。二次元風洞では $U=5$ m/s の一様流時には $X/M_x=36.1$ の測定断面で壁面近傍を除き、平均風速は $\pm 2.0\%$ 以下の非一様性があり、乱れ強度は 2.5% 以内に収まり、菊川⁴⁾の結果に符合した。三次元風洞では、甲斐³⁾により $U=8.0$ m/s の一様流時に $X/M_x=61.0$ の測定断面において、風洞壁面近傍を除き平均風速は $\pm 2.0\%$ 以下の非一様性があり、乱れ強度は 2.0% 以下であることがわかっている。

3. 線形剪断流の特性

3.1 剪断勾配の効果

図1に今回生成した線形剪断流の平均風速プロファイルを示す。二次元風洞のプロファイルは勾配が最も急な $\alpha=9.8$ s⁻¹ の剪断流の床面近傍を除くと目標風速と 2% 以内の誤差におさまり、吹き出し口から比較的短い距離にもかかわらず滑らかな線形剪断流が生成できた。三次元風洞のプロファイルは平滑化促進のための円柱が無いので、形に凸凹があり、壁面近傍を除くと目標風速との誤差は最大 5% 程であった。

図2に乱れ強度のプロファイルを示す。 α が増加するにつれて低速側の乱れ強度が増加する傾向がある。 $\alpha=9.8$ s⁻¹ の剪断流は床面に近づくにつれて乱れ強度が著しく増加する傾向がある。ここには示していないが、この傾向は下流に行くにつれて増幅された。

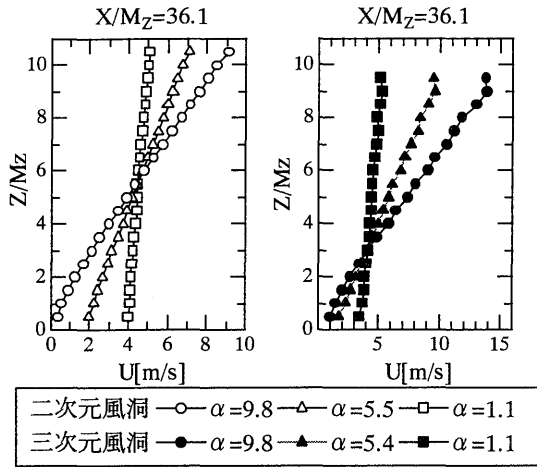


図1 平均風速プロファイル

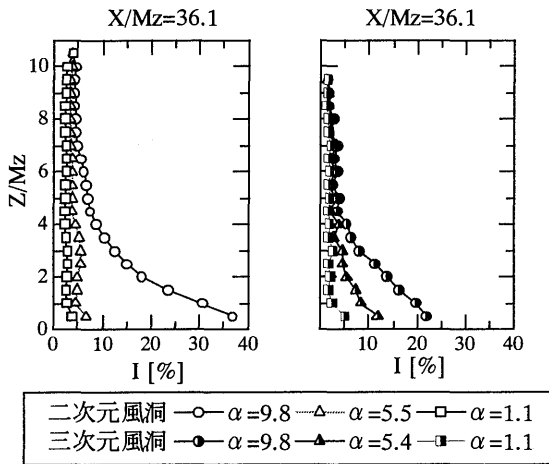


図2 乱れ強度プロファイル

図3に $\alpha=9.8s^{-1}$ に速度変動の各成分の r.m.s. 値の分布を示す。二次元風洞では勾配が比較的小さい $\alpha=1.1$, $5.5s^{-1}$ の剪断流の三成分はほぼ同じ値をとるが、 $\alpha=9.8s^{-1}$ では u' は他の成分より大きい値をとる。この傾向は三次元風洞でも見られた。三次元風洞に関して分布の形に着目すると、 $\alpha=9.8s^{-1}$ の剪断流では $Z/M_z=2.0$ 付近で u' の増加(バンパ)が見られた。同じ α に対し、二次元風洞ではこのようなバンパは生じておらず何らかの流れの構造上の違いがあるものと考えられる。

図4に二次元風洞の $\alpha=9.8$ の線形剪断流の圧力係数を示す。このグラフから分かることは基準点の動圧に対して最大でも4%しか差がなく、線形剪断流は鉛直成分がほとんどない平行流と考えられる。

図5(a),(b)に $Z/M_z=5.5$ における無次元化されたレイノルズ応力を示す。グラフの横軸は図5(a)では X/H で、図5(b)は以下の式で無次元化してある。

$$\tau = \frac{X}{U_c} \frac{\partial U}{\partial Z} \quad \dots\dots(3)$$

この τ は剪断流内に存在する流体微小要素が流下距離 X で受ける剪断の影響の積分量と解釈される。図5(a)では、 R_τ の値は大きく分けて0.3~0.4の間と0近傍に集まる二つの集団に分かれる。

図5(b)では、興味深い事に τ の値が約4以上で R_τ の値0.3~0.4のほぼ一定の値をとっている。このことは剪断勾配が異なる線形剪断流でも風洞中心付近の流れの構造はある程度の距離を移動すると同じ構造を持つことを意味する。 τ の値が大きくなるとレイノルズ応力が一定の値に漸近する傾向は Tavoularis ら³⁾の計測でも指摘されている。

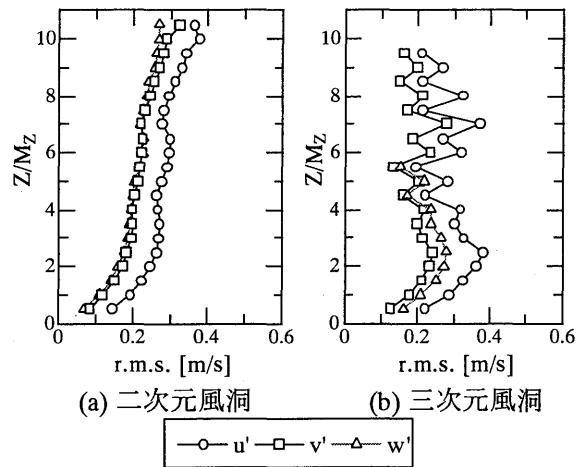


図3 速度変動 r.m.s. 値分布: $\alpha=9.8$ $X/M_z=36.1$

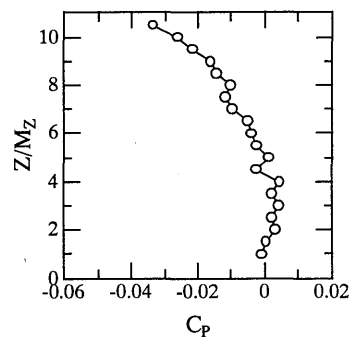
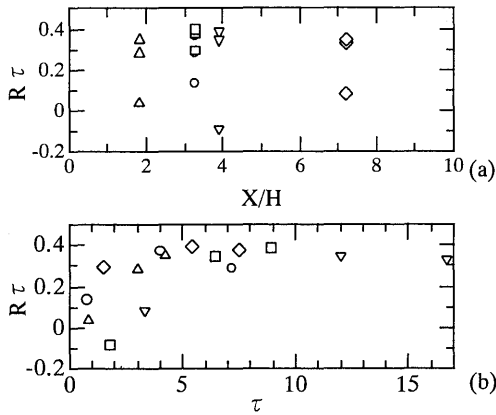


図4 圧力係数分布: 二次元風洞 $X/M_z=36.1$ $\alpha=9.8$

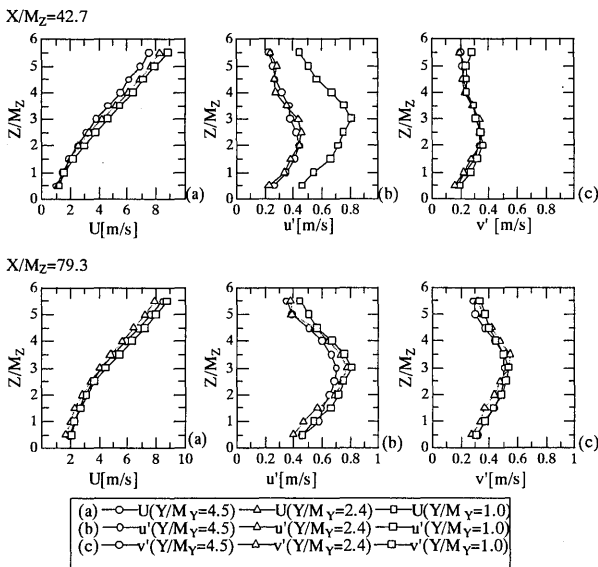


○ $X/M_z=36.1$ (二次元風洞) △ $X/M_z=20.1$ (三次元風洞)
 ◇ $X/M_z=36.1$ (三次元風洞) □ $X/M_z=42.9$ (三次元風洞)
 ▼ $X/M_z=79.3$ (三次元風洞)

図5 レイノルズ応力

3.2 スパン長の効果

図3(a),(b)に、同じ α に対して三次元風洞と二次元風洞の気流変動 r.m.s. 値分布の差が示された。そこで断面比 (W/H , ただし W はスパン長, H は風洞高さ) が気流特性に及ぼす影響を考慮することにする。三次元風洞における $\alpha=9.8s^{-1}$ の剪断流の水平方向特性変化を図6, 図7に示す。図6(a)では $X/M_z=42.7, 79.3$ のどちらの地点でも平均風速の水平方向の一様性は保たれている。(b)の速度変動 u' の値は $X/M_z=42.7$ では壁近く ($Y/M_y=1.0$) で他の二つ地点の2倍程度のかかなり大きな値をとり、著しい三次元性が見られる。しかし、さらに下流では二次元性がかかり回復している。(c)の v' の値では風洞全体にわたって三次元性が見られない。つまり、流れ方向に軸をもつ縦渦が特に鉛直壁近くで生じているとは考えにくい。



(a) ○ $U(Y/M_y=4.5)$ △ $U(Y/M_y=2.4)$ □ $U(Y/M_y=1.0)$
 (b) ○ $u'(Y/M_y=4.5)$ △ $u'(Y/M_y=2.4)$ □ $u'(Y/M_y=1.0)$
 (c) ○ $v'(Y/M_y=4.5)$ △ $v'(Y/M_y=2.4)$ □ $v'(Y/M_y=1.0)$

図6 水平方向特性変化: $\alpha=9.8s^{-1}$, 三次元風洞使用

図7に $\alpha=9.8s^{-1}$ に対する、風洞中央 ($Y/M_y=4.5$) と壁面近傍 ($Y/M_y=1.0$) での三方向成分の r.m.s. 値の分布を示す。どの地点でも変動は、 $u' > v' > w'$ の順に大きくなっている。このことは一般に乱流境界層内で見られるもので、線形剪断流中の流体要素は鉛直方向に制限を受け水平方向に乱れやすいことを意味する。しかし壁近くで特にスパン方向の v' が増加している傾向は見られない。図3(a),(b)で示した $\alpha=9.8s^{-1}$ の床面近傍 ($Z/M_z=0.5$) における変動速度の三成分の r.m.s. 値の比は、二次元風洞では $u':v':w' = 1:0.57:0.47$, 三次元風洞では $u':v':w' = 1:0.75:0.57$ の値をとり、三次元風洞の方が二次元風洞よりもスパン方向の v' の寄与が約30%大きいことがわかる。これは二次元風洞のスパン長が三次元風洞よりも狭いので気流変動は横方向に制限を受けるためであろう。しかし、図3(a),(b)が示すような気流変動の r.m.s. 値の分布の差、特にバンプが三次元風洞で生じる原因はこのことだけでは説明することができない。

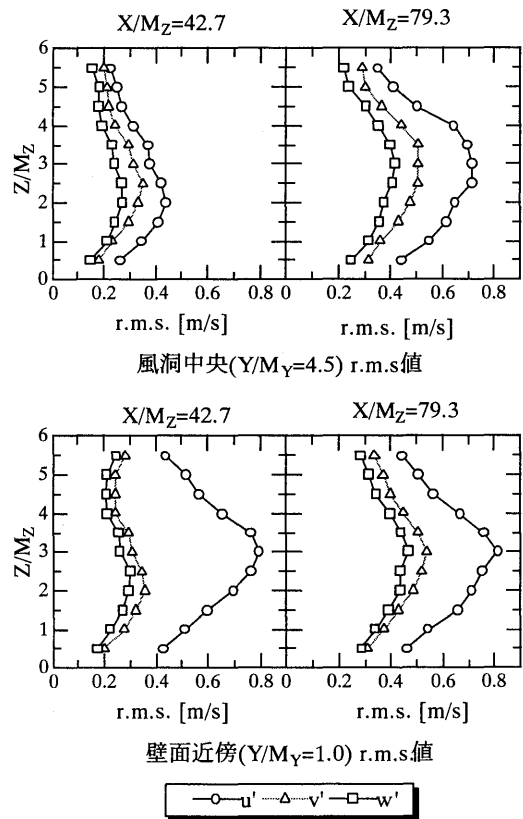
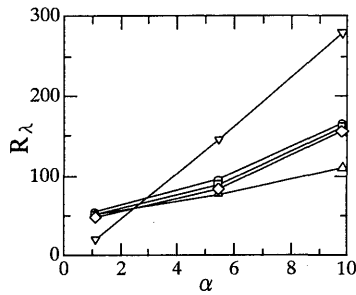


図7 風洞中央と壁面近傍の速度変動の r.m.s. 分布: $\alpha=9.8s^{-1}$, 三次元風洞使用

3.3 風洞中心と床面近傍の気流特性

図8に各風洞の中心 ($Z/M_z=5.5$) における乱流レイノルズ数の値を示す。いずれの地点でも勾配が急になるにつれて乱流レイノルズ数が増加している。同じ無次元距離 $X/M_z=36.1$ に

対し二次元風洞と三次元風洞($Y/M_z=4.5$)とはよく一致している。しかし、同じ $X=3300\text{mm}$ の距離に対しては α が大きくなる時、二次元風洞と三次元風洞の差が顕著になっている。無限に壁から離れた線形剪断流では同じ流下距離で乱流特性が一致するはずであるが、この差は風洞上下壁面の影響と考えられる。従って、距離 X は風洞高さ H で無次元化すると挙動が理解しやすい。



○ $X/M_z=36.10$ ($M_z=91.4\text{mm}$) △ $X/M_z=20.12$ ($M_z=164\text{mm}$)
 ◇ $X/M_z=36.10$ ($M_z=164\text{mm}$) □ $X/M_z=42.68$ ($M_z=164\text{mm}$)
 ▼ $X/M_z=79.26$ ($M_z=164\text{mm}$)

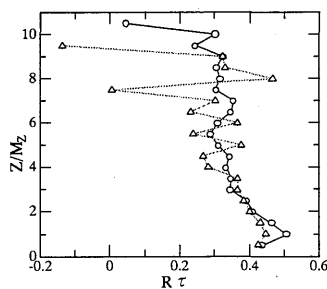
図8 乱流レイノルズ数変化

図9に $\alpha=9.8\text{s}^{-1}$ の剪断流のレイノルズ応力の鉛直方向分布を示す。二次元風洞では $Z/M_z=10.0$ の地点を除いて風洞コア領域で R_z の値は約0.3の値をとり床面に近づくにつれて0.4~0.5まで増加する傾向が見られた。三次元風洞では $Z/M_z=5.0$ 以上でファンのダクト壁の影響による凹凸があるが、分布の傾向は二次元風洞と同様である。

また、Townsendの構造パラメータ a_1 は以下の式で定義される。

$$a_1 = -\frac{\overline{uw}}{q^2} \quad (q^2 = u^2 + v^2 + w^2) \quad \dots\dots(4)$$

滑らかな境界層では $a_1 \approx 0.13$ の値をとることがわかっている⁹⁾。この剪断流では、どちらの風洞でも $Z/M_z \sim 2.0$ の高さまで a_1 の値が約0.13の値をとったので、この高さ程度まで床面境界層が発達しているものと思われる。



○—二次元風洞($X/M_z=36.1$) ◇—三次元風洞($X/M_z=36.1$)

図9 レイノルズ応力鉛直分布： $\alpha=9.8\text{s}^{-1}$

図10, 図11は各風洞における気流変動の u 成分の時系列を示す。二次元風洞の床面近傍($Z/M_z=0.5$)の時系列では、 α の値が増加すると平均風速は減少するので変動幅は減少している。 $\alpha=9.8\text{s}^{-1}$ の u 成分で、間欠的に正の値のピークがみられ、これを反映して歪度 $S_{(u)}=0.7$ となる。

三次元風洞でも同様に床面近傍で間欠的な正の値のピークが見られ歪度 $S_{(u)}=0.38$ となった。

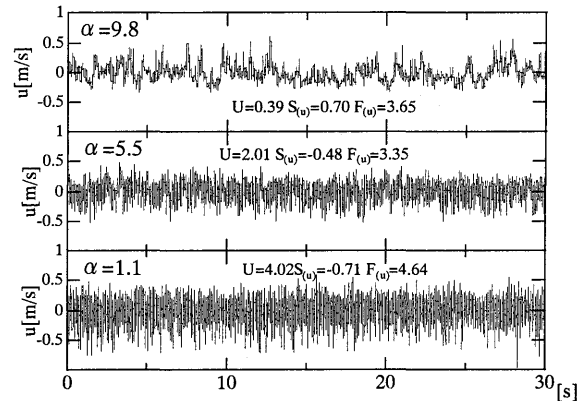


図10 床面近傍($Z/M_z=0.5$)の時系列 (二次元風洞)

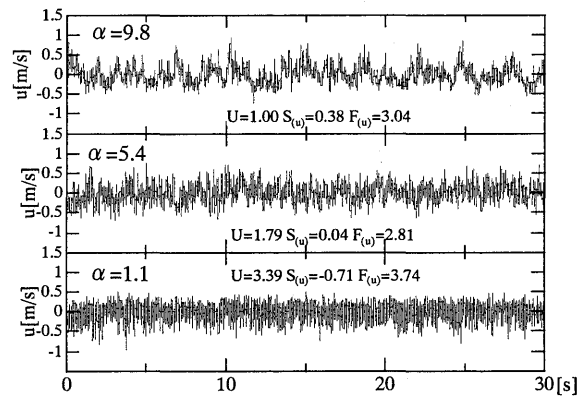


図11 床面近傍($Z/M_z=0.5$)の時系列 (三次元風洞)

図12, 13に二次元風洞における気流変動の (u, w) 成分の結合確率密度分布を示す。中心付近($Z/M_z=5.5$)では剪断勾配が小さくなるにつれて相関が小さい分布をとる。床面近傍($Z/M_z=0.5$)では $\alpha=5.5, 1.1\text{s}^{-1}$ の時、分布は第2, 第4象限に偏り、これは一般的な乱流境界層で見られる形である。しかし、 $\alpha=9.8\text{s}^{-1}$ では $(u/u', w/w') = (2, 0)$ 付近に頂点があり、第1, 第4象限に伸び木の葉状の特異な分布が見られた。また、第2象限の値が大きくバーストが支配的である。

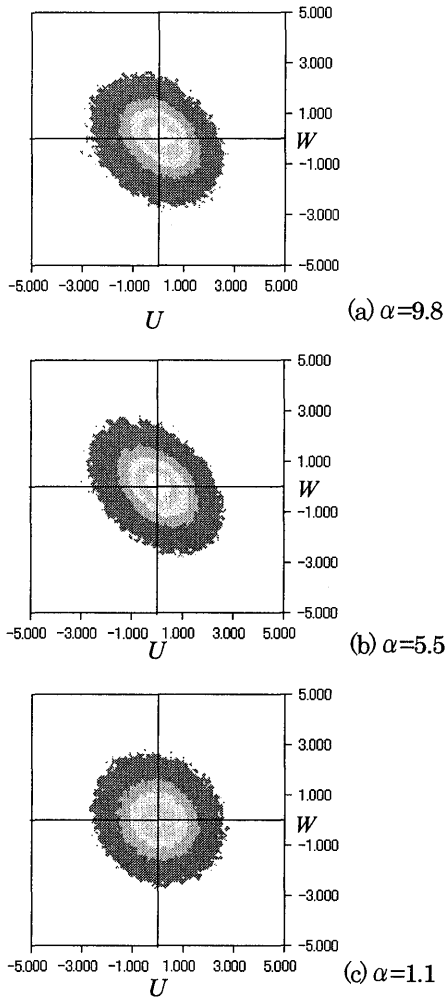


図12 風洞中心の確率密度分布

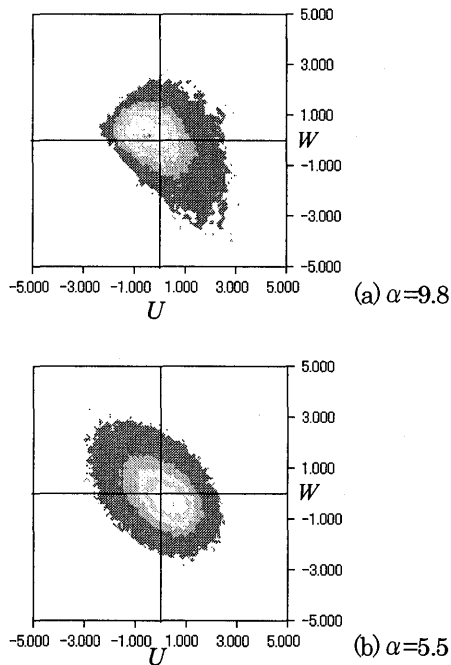


図13 床面近傍の確率密度分布

図14, 15に各風洞における床面近傍($Z/M_z=0.5$)と中心($Z/M_z=5.5$)の高さにおける u' 成分のパワースペクトル分布を示す。

二次元風洞の $Z/M_z=5.5$ では α の値が増加してもスペクトル分布にあまり変化は見られない。また、慣性小領域を示す傾きが $-5/3$ 乗則に従う領域は約1桁存在した。 $Z/M_z=0.5$ では、 α の増加につれて低周波数域の寄与が増加し、5Hz以下の低周波数側のスペクトル準位は逆転する傾向を示した。慣性小領域は判然としない。三次元風洞($X/M_z=36.10$)のスペクトルも二次元風洞と同様の傾向が見られた。

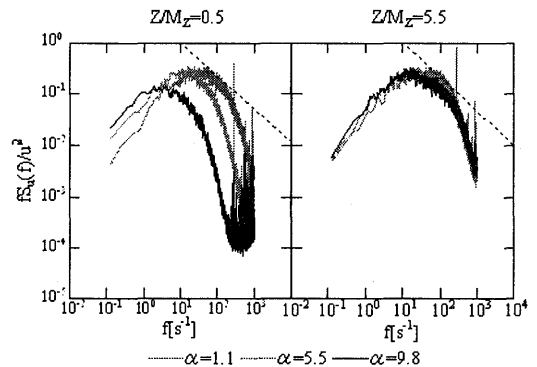


図14 二次元的風洞のパワースペクトル

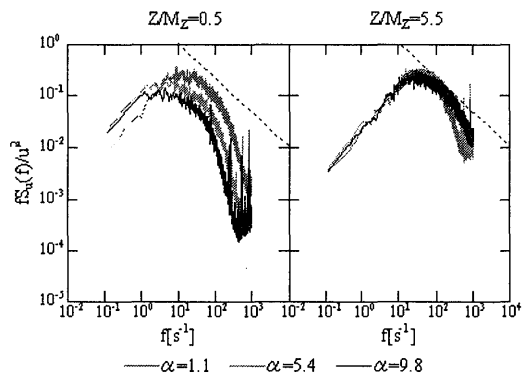


図15 三次元的風洞のパワースペクトル

4章 結論

- 1) マルチファン型風洞で最大で勾配が $\alpha=9.8s^{-1}$ 迄, 線形剪断流が極めて簡単に生成できる.
- 2) 乱流特性としては
 - ・三次元風洞の $\alpha=9.8s^{-1}$ の剪断流で $Z/M_z=2.0$ 付近において気流変動 r.m.s. 値 u' の増加 (バンプ) が見られた.
 - ・いずれの風洞でも線形剪断流において, 三方向成分の気流変動 r.m.s. 値は $u' > v' > w'$ の順に大きい. 境界近くでは, 三次元風洞の方が二次元風洞よりもスパン方向 v' の寄与がわずかに大きい.
 - ・二次元風洞の $\alpha=9.8s^{-1}$ の剪断流では床面近傍においてバーストが支配的である.
 - ・パワースペクトル分布では風洞中央においては剪断勾配 α の増加に伴う変化は見られないが, 床面近傍では剪断勾配 α の増加に伴い低周波数域の寄与が増加した.

謝辞

実験を進めるにあたって御協力いただいた, 博士後期課

程2年の小田純子さん, 博士前期課程2年の加藤英明君, 同1年の松尾忠輝君, 大瀬裕子さん, 学部の和田一洋君, 岩切広志君には深く感謝しております.

参考文献

- 1) J. C. Philips, N. H. Thomas, R. J. Perkins: Wind tunnel velocity profiles generated by differentially-spaced flat plates, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80 (1999) 253-262
- 2) 戸敷, 一木: 線形剪断流の境界層剥離, 宮崎大学工学部紀要 第31号 別冊(2002) 53-58
- 3) S. Tavoularis, U. Kamik: Further experiments on the evolution of turbulent stresses and scales in uniformly sheared turbulent, *J. Fluid Mech.* (1989), vol. 204, 457-478
- 4) 菊川: 宮崎大学学術論文, 乱流風洞の基礎的研究 (1999)
- 5) 甲斐, 西: 大型乱流風洞の開発研究, 宮崎大学工学部紀要, 28 (1999) 25-32.
- 6) A. A. Townsend: *The Structure of Turbulent Shear Flow*, Cambridge University Press (1976)