論

文

乱流風洞の研究 (その3) レイノルズ応力の再現

Control of Turbulence in a Multiple-Fan Wind Tunnel Part 3, Simulation of Reynolds Stress Coefficient

曹 曙陽*¹ 西 亮*² 宮城 弘守*³ 菊川 裕規*¹ 松田 雄二*¹
CAO Shuyang, Akira NISHI, Hiromori MIYAGI, Hironori KIKUGAWA, Yuji MATSUDA

SUMMARY

In an Atmospheric Boundary Layer, turbulent shear stress or Reynolds stress is one of the most important factors to express the turbulent characteristics. In this study, the Reynolds Stress was simulated in an actively controlled turbulent wind tunnel, in which the turbulence was controllable. The Reynolds Stresses were reproduced in a uniform shear flow with grids ①, in a turbulent shear flow with grids ②, and in a turbulent flow by controlling both fans and airfoils ③. As the results showed, the Reynolds stress could be simulated with any one of these methods, however the obtained other turbulent parameters, such as integral scale and power spectrum were different for individual method. Moreover the transitions of the mean velocity, turbulent intensity, integral scale and power spectrum along the mean flow direction in the case of controlling the fans and airfoils were also examined.

1. はじめに

構造物に対する強風の影響は構造物の安全性や耐久性を考える上で非常に重要である。この影響を詳しく調べるためには、自然に近い境界層を発生でき、さらに乱れを任意に変化させることもできる制御可能な乱流風洞の開発が望まれる。そのため、本研究室では、多数の送風機と風路の途中に振動翼を持ち、個々に独立に制御可能なアクティブ制御乱流風洞の研究を行っている。風洞内に大気境界層を模擬する場合、平均風

速や乱れ強度などの統計変数の分布のほかに、境界層中の渦の状況も大気境界層に近い状態を作り出す必要がある。これには、乱流特性として重要なレイノルズ応力を境界層内で再現することが必要である。境界層内では、下部の接地層でレイノルズ応力がほぼ一定値を持ち、レイノルズ応力係数が $C_{Re} = -0.3$ 近傍にあることが知られており^{1), 2)}、接地層の上部では高さが増えるとともに、レイノルズ応力係数が0まで減少していくと考えられる¹⁾。従って、大気乱流境界層を忠実

*1 宮崎大学大学院 工学研究科 博士後期課程
Dr. Candidate, Faculty of Engineering, Miyazaki University
*2 宮崎大学工学部 教授
Professor, Faculty of Engineering, Miyazaki University
*3 宮崎大学工学部 助手
Research Associate, Faculty of Engineering, Miyazaki University
(原稿受理: 平成11年2月15日)

に風洞内で再現するには、レイノルズ応力分布を創り出すことが必要である。これまでの研究から、2次元風洞の中に、流れ方向と鉛直方向の平均風速、乱れ強度、乱れスケール及びパワースペクトルの合計8個の統計パラメータの鉛直分布を目標値に精度よく再現できることを示した^{3)~7)}。今回はこれらに加えて2次元風洞内にレイノルズ応力の鉛直分布の再現を試みる。ここで用いている2次元風洞は、上下面および側面に境界層が発達しているが、中央部はよく2次元性を保っていることが分かっている。

今回の研究では、送風機と振動翼を制御せず、定常せん断流中のグリッドによる乱れで発生できるレイノルズ応力(ケース①)と、アクティブに制御した乱流せん断流中にグリッドを置く場合(ケース②)及び送風機と振動翼を共にアクティブに制御してレイノルズ応力を創り出す場合(ケース③)についての実験結果を示す。また、ケース③についてレイノルズ応力及び平均風速、乱れ強度、乱れスケール、パワースペクトルなど乱流パラメータの流れ方向への変化を調べ、測定部のどのぐらいの範囲がモデル実験に適するかを確かめる。

2. レイノルズ応力と乱流の制御方法

2. 1 風洞装置

これまで二次元および三次元風洞を試作し、実験を

行ってきたが、今回の実験は二次元風洞で行われた。Fig.1 に風洞の概要を示す。二次元風洞は前方に直径180mmの送風機を縦に11個配列した吹き出し型の風洞で、縦長の測定部(幅 $B=0.2m$ 、高さ $H=1.0m$ 、長さ $L=3.3m$)を持つ。送風機には高性能のACサーボモータを使用している。また、 $x_b/H=2.2$ の位置にコード100mmの振動翼を21枚設置しており、ステッピングモーターによって駆動される。ここに x_b は風路入り口から翼列の中央までの距離である。測定は熱線風速計で行われ、100mmの間隔で測定断面を変えることができる。ただし、振動翼を設置する場合は、測定部はその後で、長さが $2.4 < x_m/H < 3.3$ になる。ここに、 x_m は風路入り口から測定断面までの距離である。

送風機に変動入力を与えず一様定常流を流す時、乱れを発生させるため、乱流格子(グリッド)としてハニカム直後に直径12mmの円柱を10本設置した。また、これらの円柱は送風機から測定部入り口まで区切られている各風路から出てくる流れの運動量を交換させる役割も持つ。レイノルズ応力は速度の異なる二つの層が運動量の交換を通して生じるので、レイノルズ応力の分布を再現するには、風洞の各層の運動量を十分交換させる必要がある。Cermak らがこの考えに基づいて境界層風洞の中で二列の翼列を設置することによって、接地層のレイノルズ応力の再現を試みている⁸⁾。

Fig. 1 2次元風洞の概要
(Schematics of 2-dimensional wind tunnel)

2.2 レイノルズ応力と制御法

乱れ速度を考慮した N-S 方程式がレイノルズ方程式で、その中にレイノルズ応力が現れる。これは乱流中の渦粒子が運動量を交換することによって生じる乱流せん断応力であると説明され、基本的な物理量である。境界層中でのレイノルズ応力は、次式で与えられる。

$$\tau_t = -\rho \overline{u'w'} \quad (1)$$

これを係数の形で表現すると、次のようになる。

$$C_{Re} = \frac{\overline{u'w'}}{\sqrt{u'^2} \sqrt{w'^2}} \quad (2)$$

ここに u' 、 w' はそれぞれ流れ方向と鉛直方向の乱れ速度を表す。乱流場では、 $u'w'$ が負となる確率が正となる確率より高く、 $\overline{u'w'}$ が負の値となる、これは、レイノルズ応力が作用しているせん断乱流で必ずみられる結果である。

今回の実験でレイノルズ応力の再現には上述の三つの方法が用いられた。

方法①では、送風機を制御せず、変動なしの一樣せん断流を作り、グリッド円柱によりいわゆる格子乱流を発生させる。

方法②では、送風機の制御によって主流方向のみの乱れを持ったせん断流を作り、鉛直方向の乱れを方法①と同じようにグリッドによって発生させる。

方法③では、レイノルズ応力を乱流風洞内でアクティブ制御で再現する。レイノルズ応力係数が気流の変動成分の相互相関に依存することに着目し、 u' は送風機の制御によって与えられ、 w' は振動翼によって与えられるので、送風機と振動翼に与える入力信号を別々に作り、これを適当に組み合わせることによって目標のレイノルズ応力を創り出す方法を用いる。これまで用いてきた制御法によると、送風機と振動翼に与える入力信号は、流れ方向と鉛直方向の平均流速、乱れ強度、乱れスケールから求まるカルマン型パワースペクトルを逆フーリエ変換して時系列データを求めるもので、この際必要な位相の情報は同一のランダム関数によって与えてきた。送風機と振動翼の制御によってレイノルズ応力を調整するには、対応する送風機と振動翼の入力データ間の位相を少しずつずらすことによって、目標とするレイノルズ応力を作り出すことができる。この考え方は、プラントルによる流体塊の運動量交換過程をイメージし、流れ方向と鉛直方向の位相には相互に密接な関連があり、これが適当に組み合わせ

れているものと仮定している。しかし、自然の法則性がこの操作によってどの程度忠実に再現できているかは実測値を解明することで今後さらに検討する必要がある。

3. レイノルズ応力の再現

3.1 一樣流のレイノルズ応力分布 (ケース①)

送風機に変動を与えず、一樣せん断流または境界層流を流した時グリッドの後流中に得られるレイノルズ応力を測定した。本風洞では、異なる速度勾配を持ついろいろな一樣せん断流や境界層速度分布を作り出すのが極めて容易である。Fig.2 には目標平均風速の分布がシアである場合 (下: 3m/s ~ 上: 7m/s) に対して、三つの測定断面 ($x_m/H = 0.7$, $x_m/H = 1.7$, $x_m/H = 3.3$) で測定したレイノルズ応力係数の分布を示している。なお、この時、測定部入り口にグリッドを設置し、振動翼は設置していない。風路入り口のすぐ後ろ ($x_m/H = 0.7$) でのレイノルズ応力係数の分布がばらついているが、下流側へいくとともに、レイノルズ応力係数が負の一定値に近づいていく傾向が見える。 $x_m/H = 3.3$ の測定断面では、乱流が十分混合され、ほとんどの測定点でのレイノルズ応力係数が $-0.3 \sim -0.5$ の間に収まった。このときの $x_m/H = 3.3$ での平均風速分布の測定値を Fig.2 の左に点で示す。これ以外のシアフロー分布 (下: 1m/s ~ 上: 9m/s) の実験でも同じ傾向が見られる。単にシアフローを作ることによって、レイノルズ応力を作り出すことができるのが分かるが、このような制御していない場合には、十分長い風路がレイノルズ応力の再現に有利であることも示された。

ベキ乗境界層速度分布 ($\alpha = 0.3$) を持つ一樣流を流した時、グリッドの後流中に得られたレイノルズ応力の分布を Fig.3(b) に点で示す。 α はベキ乗分布を与える係数である。測定位置は $x_m/H = 3.3$ である。この

Fig.2 シアフローに対するレイノルズ応力係数の分布 (Profiles of C_{Re} in a shear flow)

(a) 平均風速 (Velocity profile) (b) レイノルズ応力係数 (C_{Re} profile)

Fig.3 境界層流れに対するレイノルズ応力係数の分布 (Profile of C_{Re} in a boundary layer flow)

ときの平均風速分布の目標値と実測値をそれぞれ Fig.3(a) に実線と点で示す。境界層下部における速度勾配の大きい範囲 ($z/H < 0.4$) でのレイノルズ応力係数が $-0.3 \sim -0.5$ の間に収まるに対して、速度勾配の緩やかな範囲 ($z/H > 0.4$) のレイノルズ応力係数の分布が不安定を持ちながら、0 まで落ちるといふ Fig.3(b) の直線で近似できる傾向が見られる。異なるべき乗係数 ($\alpha = 0.1$, $\alpha = 0.2$) の実験でもほぼ同じ傾向が現れた。

この様に、変動を与えず、せん断流中のグリッドによって目標とする大気境界層のレイノルズ応力を近似できることが明らかになった。しかし、この時得られた非正規化パワースペクトルが式 (9) で与えられるカルマン型の自然風のパワースペクトルより低く、小さな乱流エネルギーしか作れなかった。更に、乱れスケールが一樣せん断流に対して最大 0.2m、境界層流れに対して最大 0.15m しか得られなかったため、自然風を再現できているとは言いがたい。

3. 2 送風機を制御する時のレイノルズ応力 (ケース②)

次に、流路入口にグリッドを置き、振動翼を設置せず、送風機に変動入力を与え、送風機を制御することによってレイノルズ応力の再現を試みた。大気境界層の接地層をイメージして、Fig.4(a)の実線で示すような平均風速 (U)、乱れ強度 (I_u)、乱れスケール (L_u) の分布の目標値を設定した。測定断面が $x_m/H = 3.3$ で、流れ方向の目標パワースペクトルがカルマン型である。測定値のパワースペクトルが目標値と一致するように 3 回修正を繰り返して得られた流れのレイノルズ応力

(a) 乱流パラメータ (Turbulent parameters) (b) レイノルズ応力係数 (C_{Re} profile)

Fig.4 送風機の制御によるレイノルズ応力分布 (Profiles of C_{Re} and U , I_u , L_u obtained by controlling the fans only)

係数の分布を Fig.4(b) に点で示す。また、平均風速、乱れ強度、乱れスケールの測定値を Fig.4(a) の点で示す。風洞の天井と床面の付近の測定点を除いて、他の測定点のレイノルズ応力係数が -0.3 付近に分布しており、平均風速、乱れ強度、乱れスケールもほぼ再現されたのが分かる。従って、送風機だけを制御し、鉛直方向の乱れはグリッドによって発生することで、レイノルズ応力と主流方向の乱流統計量を再現できるのが分かった。しかし、この場合、振動翼を用いていないため、鉛直方向の乱れスケールの値が小さくて (最大 0.16m)、パワースペクトルも低い。

3. 3 送風機と振動翼を同時制御する場合のレイノルズ応力 (ケース③)

送風機と振動翼を同時制御することによって大気境界層分布を風洞内で実現するために、各乱流パラメータの鉛直分布を従来風工学の分野で使われる次の式で設定した。

主流方向：

$$U(z)/U_0 = (z/Z_0)^{\alpha} \quad (3)$$

$$I_u(z)/I_{u0} = (z/Z_0)^{-\alpha-0.05} \quad (4)$$

$$L_u(z)/L_{u0} = (z/Z_0)^{0.5} \quad (5)$$

鉛直方向：

$$W(z) = 0 \quad (6)$$

$$I_w(z) = \frac{1}{2} I_u(z) \quad (7)$$

$$L_w(z) = \frac{1}{4} L_u(z) \quad (8)$$

主流方向のパワースペクトル：

$$S_u(f) = \frac{4I_u^2 L_u U}{\{1 + 70.7(fL_u/U)^2\}^{5/6}} \quad (9)$$

鉛直方向のパワースペクトル：

$$S_w(f) = \frac{4I_w^2 L_w U \{1 + 188.4(2fL_w/U)^2\}}{\{1 + 70.7(2fL_w/U)^2\}^{11/6}} \quad (10)$$

ここに、 Z_0 は境界層の高さで、 U_0 、 I_{u0} 、 L_{u0} はそれぞれ高さ Z_0 での主流方向の平均風速、乱れ強度、乱れスケールを表す。 $U(z)$ 、 $I_u(z)$ 、 $L_u(z)$ はそれぞれ高さ z での主流方向の平均風速、乱れ強度、乱れスケールを表し、 $W(z)$ 、 $I_w(z)$ 、 $L_w(z)$ は鉛直方向の平均風速、乱れ強度、乱れスケールを表す。また α はベキ乗分布を与える係数である。

2. 2節で述べたように各送風機と振動翼への入力データ間の位相を少しずつずらすことによって目標とするレイノルズ応力の分布を作り出すことができる。ケース③の実験ではこの考えに基づいて、レイノルズ応力の再現を試みた。この場合の測定断面は $x_m/H = 2.9$ である。

3. 3. 1 位相差によるレイノルズ応力の違い

2次元風洞で高さ方向に一樣な平均風速を持つ乱流として、平均風速 $U = 5\text{m/s}$ 、乱れ強度 $I_u = 2I_w = 7\%$ 、乱れスケール $L_u = 4L_w = 2.0\text{m}$ を与え、送風機と振動翼に同一ランダム位相を与えて作った時系列データの互いの位相差を変化させたときのレイノルズ応力の違いをFig.5に示している。目標のレイノルズ応力は、位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ に対して、流れ方向と鉛直方向で変動の振幅が異なるが位相が同一であるので、 $C_{Re} = 1.0$ に近い値となる。逆に、 $\Delta\theta = 180^\circ$ に対しては $C_{Re} = -1.0$ に近い値をとる。これに対して実測値は、 $\Delta\theta = 90^\circ$ 近辺

Fig.5 位相差によるレイノルズ応力係数の変化
(Changes of Reynolds Stress Coefficient corresponding to phase difference)

ではほぼ対称で目標値とほぼ同じ値を取るが、 $\Delta\theta = 0^\circ$ 、 180° 近辺では目標値より絶対値が小さな値を取る事が分かる。この理由はレイノルズ応力が $C_{Re} = \pm 1.0$ のような極端な乱れの状態はアクティブな制御によっても創り出すのが困難であることを示している。この図から大気境界層のレイノルズ応力分布を再現するには、各送風機と振動翼間にどの程度の位相差を与えればよいかが分かる。

3. 2. 2 境界層流のレイノルズ応力

大気境界層のレイノルズ応力分布の一例として、茨城県つくば市の気象研究所での強風時に測定された分布をFig.6に示している。200mの気象観測塔で得られたデータからレイノルズ応力係数は、 $C_{Re} = -0.3$ 近

Fig.6 自然風のレイノルズ応力係数の分布
(Profiles of Reynolds Stress Coefficient in a natural ABL)

Fig.7 レイノルズ応力係数の分布の再現結果
(Comparison of target and measured C_{Re})

(a) 主流方向
(Longitudinal flow)

(b) 鉛直方向
(Vertical flow)

Fig.8 乱流統計パラメータの分布
(Profiles of turbulent parameters)

傍に分布し、 $C_{Re} = -0.2 \sim -0.4$ の範囲にある⁹⁾。風洞内でレイノルズ応力分布を再現するとき、境界層の下部のレイノルズ応力が $C_{Re} = -0.3$ と設定した¹⁾。大気境界層の接地層から境界層の上端までの気層での観測結果が少ないため、実測値に基づいて目標値を設定するのが困難である。そのため、今回は平板乱流境界層のレイノルズ応力係数の分布を参考にし^{10),11)}、一例として Fig.7 の実線で示す分布を仮定した。すなわち、レイノルズ応力係数の分布が $z/H < 0.4$ の範囲では-0.3

で、境界層上部で0になるように設定した。

この状況を風洞内に再現するために、主流の乱れ速度と鉛直の乱れ速度の位相を Fig.5 に従って調整し、レイノルズ応力を一致させるため2回繰り返し制御を行った。得られた結果を点で Fig.7 に示している。天井面と床面の近傍では正確な値が得られていないが、中央部では目標とよい一致を示している。レイノルズ応力と同時に得られた他の乱流パラメータの目標と実測値の比較を Fig.8 に示している。実線は目標値で点

Fig.9 測定値と目標値の時系列の比較
(Comparisons of velocity fluctuations of the target and the measured flows)

は実測を表す。この結果から、レイノルズ応力とこれらの変数がほぼ目標通りに得られたことになる。また、目標レイノルズ応力係数が -0.3 である測定点 $z/H = 0.321$ での時系列の目標と実測の比較をFig.9に示している。実測値と目標値の時系列の相関係数が主流方向と鉛直方向それぞれ 89.5% と 89.7% で、高い相関を示しており、速度変動の目標データがよく再現されたのが分かる。 u 成分と w 成分の位相のずれは約 120° となっている。

また、乱流の渦構造を定量化する簡単な方法として、一点で速度の変動成分 u' 、 w' の同時測定を行い、 (u', w') 平面内の四象限で現象を分類する手法がよく使われる。レイノルズ応力の発生に寄与するのは、第二象限におけるイジェクションと第四象限におけるスウィープで、前者は低速流体塊が下部から上方へ飛び出す

運動であり、後者は高速の流体塊が下層へと突っ込んでくる運動である。変動成分が第二、四象限になる確率が第一、三象限になる確率より高いと、 $\overline{u'w'}$ は負の値となり、低いと、 $\overline{u'w'}$ は正の値となり、同じ確率となると、 $\overline{u'w'}$ が 0 になる。Fig.7に示している3高度A, B, C ($z_A/H = 0.287$, $z_B/H = 0.524$, $z_C/H = 0.828$)でのレイノルズ応力係数に対応する散布図をFig.10に示している。各散布図の点数は2048個であり、各高さでの実測は目標に近い分布を示している。目標と実測の速度変動が各図に示されている負の傾きを持つ回帰線のまわりに散布して、レイノルズ応力係数が負の値を持っている。また、高さが増えるとともに、回帰線が横軸に近づいて、速度変動が第一、三象限になる確率が第二、四象限になる確率に近づくため、レイノルズ応力係数が大きくなる過程が見られる。

Fig.10 測定値と目標値の散布図の比較
(Comparisons of target and measured turbulent velocity associations)

3. 4 乱流統計量の流れ方向の変化

3. 3 節での結果は測定断面 $x_m/H = 2.9$ 、即ち振動翼の後ろ $\Delta x/H = 0.7$ で測定されたパワースペクトルとレイノルズ応力为目标値と合うように 2 回修正を繰り返して得られた結果である。ここに Δx は振動翼と

Fig.11 レイノルズ応力係数の流れ方向の変化
(Transition of C_{Re} along the flow direction)

(a) 主流方向の乱れ強度の流れ方向への変化
(Transition of I_u along the flow direction)

(b) 主流方向の乱れスケールの流れ方向への変化
(Transition of L_u along the flow direction)

(c) 主流方向の平均風速の流れ方向への変化
(Transition of U along the flow direction)

Fig.12 主流方向の統計パラメータの流れ方向の変化
(Transitions of the longitudinal turbulent parameters along the flow direction)

測定点の間の距離を示す。ほかの測定断面での乱流統計量の分布がどうなるかがモデル実験の際にモデルを設置する位置と関連して重要である。そのため、振動翼の後ろの $\Delta x/H = 0.3 \sim 1.1$ の間で 100mm 間隔に 9 断面で測定した。

Fig.11 には測定部の 5 断面のレイノルズ応力係数の分布を表す。レイノルズ応力係数は翼のすぐ後ろの測定断面 ($\Delta x/H = 0.3$) ではばらつきが現れ、いちばん後ろの測定断面 ($\Delta x/H = 1.1$) では高さが $z/H = 0.4$ の測定点から上は 0 となった。他の測定断面のレイノルズ応力係数の分布が $z/H < 0.4$ の範囲では $-0.2 \sim -0.4$ の間になって、 $z/H > 0.4$ の範囲では 0 まで減していくのが分かった。 $0.5 \leq \Delta x/H \leq 0.9$ の範囲では各断面でレイノルズ応力係数の目標分布をほぼ再現でき

(a) 鉛直方向の乱れ強度の流れ方向への変化
(Transition of I_w along the flow direction)

(b) 鉛直方向の乱れスケールの流れ方向への変化
(Transition of L_w along the flow direction)

(c) 鉛直方向の平均風速の流れ方向への変化
(Transition of W along the flow direction)

Fig.13 鉛直方向の統計パラメータの流れ方向の変化
(Transitions of the vertical turbulent parameters along the flow direction)

Fig.14 パワースペクトルの流れ方向の変化
(Transitions of power spectra along the flow direction)

るのが分かった。また、風洞の天井付近の測定点を除いて、同じ高さで測定されたレイノルズ応力係数の流れ方向の変化を見ると、測定断面 $\Delta x/H = 0.7$ で最大のレイノルズ応力係数の値を持つ、上下流側へいくと、次第に目標値と離れていくのが分かる。

Fig.12, Fig.13 にはそれぞれ主流方向と鉛直方向の乱れ強度、乱れスケール、平均風速の 5 測定断面での分布を示す。各測定断面で主流方向の各パラメータがほぼ目標値通りとなったが、風洞の床面の付近の乱れ強度 (Fig.12a) の分布が目標値と合っていない。同様に、鉛直方向の乱れ強度 (Fig.13a) も風洞の床面の付近で目標値より小さい。この結果は、乱れ強度や平均風速分布の勾配の大きい床面の付近に対して、対応する 2 個の送風機だけでは再現しにくいことを示している。また、鉛直方向の乱れ強度 (Fig.13a) の流れ方向への減衰が顕著である。Fig.14 に高さの違う三つの測定点 A、B、C での平滑化されたパワースペクトルの流れ方向への変化を示している。高さがそれぞれ $z_A/H = 0.287$, $z_B/H = 0.524$, $z_C/H = 0.828$ である。破線は目標値で実線は測定値である。同一高さでの主流方向と鉛直方向のパワースペクトルの流れ方向への変化を調べてみると、主流方向のパワースペクトルが 10Hz まであまり減衰しないに対して、鉛直方向のパ

ワースペクトルには大きな減衰がみられる。この結果から、今後鉛直方向の制御を改善する必要があることが分かる。鉛直方向のパワースペクトル、乱れ強度などをより広い範囲で再現することによって、レイノルズ応力もより広い範囲で再現できることになり、これが今後の課題である。

4. おわりに

多くの送風機と振動翼を組み合わせで個々に独立に制御することで、多くの異なる乱れを持つ流れを風洞内に実現できる。本研究では、①送風機へ変動入力を与えず格子乱流を作る方法、②送風機へ変動入力を与えて格子乱流を作る方法、及び③送風機と振動翼を独立に制御する 3 方法で、レイノルズ応力の再現を試みた。その結果以下の事が明らかとなった。

(1) 三つの方法でいずれもレイノルズ応力の分布を再現できる。しかし、①の方法で送風機に振動入力を与えず格子乱流を作る場合、流れ方向、鉛直方向共に目標値より乱れスケールが小さく、パワースペクトルも低いである。②の方法で送風機に変動入力を与えたときの格子乱流では鉛直方向の乱れスケールとパワースペクトルが実用上不足するという欠点がある。

(2) ③の送風機と振動翼を共に制御する場合には、

乱れ波形の位相を適当にずらせることで、レイノルズ応力係数を適当な値に再現できることを示した。この方法によって、全境界層でのレイノルズ応力係数の分布を再現できた。また、振動翼のすぐ後ろと測定部のいちばん後ろを除いて、測定部のほかの測定断面でこの分布をほぼ保持できることが分かった。さらに、レイノルズ応力を散布図で表現し、目標と実測がよく一致することを確かめた。

(3) ③の方法ではレイノルズ応力とともに、平均風速、乱れ強度、乱れスケール及びパワースペクトルの流れ方向及び鉛直方向の分布も同時に忠実に再現できることが分かった。しかし、鉛直方向のパワースペクトルが流れ方向での減衰が大きいことが示された。

本研究は2次元風洞を用いて行われたが、この風洞の中央部はよく2次元性を保っているため、通常の幅広い風洞においてもここで得られた特性が再現できるものと考えられる。今後大型の乱流風洞によってこの点を確認する必要がある。

参考文献

- 1) Teunissen H.W. : Characteristic of the mean wind and turbulence in the planetary boundary layer, UTIAS Review, Univ. of Toronto, Canada, 1970, pp.22-23.
- 2) 塩谷正雄 : 強風の性質, 開発社, 1992, pp.35-37
- 3) Nishi A., Miyagi H., Higuchi K. : A computer controlled wind tunnel, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 46/47, 1993, pp.837-846.
- 4) Nishi A., Miyagi H. : Computer controlled wind tunnel for wind-engineering applications, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 54/55, 1995, pp.493-504.
- 5) Nishi A., Kikugawa H., Matsuda Y., Tashiro D. : Turbulence control in multiple-fan wind tunnels, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 67/68, 1997, pp.861-872.
- 6) 西 亮, 菊川裕規, 松田雄二, 田代大悟 : アクティブ制御乱流風洞の研究, (その1) 流れ方向と鉛直方向の同時制御, 第14回風工学シンポジウム, 1996, pp.145-150.
- 7) 菊川裕規, 西 亮, 松田雄二, 田代大悟 : アクティブ制御乱流風洞の研究, (その2) 時間遅れ修正法による乱れの制御, 第14回風工学シンポジウム, 1996, pp.151-156.
- 8) Cermak, J. E. and Cochran, L. S. : Physical modeling of the atmospheric surface layer, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., 41-44, 1992, pp.935-946.
- 9) 内藤恵吉, 花房龍男, 藤谷徳之助 : 強風の空間的構造, 天然資源の開発利用に関する日米会議, 耐風耐震構造専門部会第15回合同部会, 筑波 (日本) 1983, pp.1-18.
- 10) Klebanoff. P.S. : Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, NACA Tech. Note No. 3178, pp.8-35.
- 11) Lu. S. S and Willmarth W. W. : Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., 60, 1973, pp. 481-511.