

マルチファン型風洞のプロファイル制御能を利用した境界層生成

上野 剛史¹⁾・小園 茂平²⁾

Generation of an Artificially Thick Boundary Layer Based on Profile-controllability of a Multi-fan Wind Tunnel

Takeshi Ueno, Shigehira Ozono

Abstract

A multi-fan wind tunnel was used for simulating thick neutral atmospheric boundary layers within a relatively short entry distance. While the multiple fans were driven mainly for forming target profiles of arbitrary shape, an array of cylinders (*cylinders method*) or suction fans (*suction method*) were used to obtain strong shear for providing turbulence energy. In the cylinders method, to attain a target profile, an iterative procedure was applied. Velocity profiles sufficiently close to the target profile were reproduced, although for the case of power exponent 1/7 by the array of rectangular cylinders, the profile was not precisely reproduced near the floor. The suction method provided turbulence of intensity 9-10% and the normalized Reynolds stress around 0.3 throughout the boundary layer, as observed in actual observations.

Key Words:

Multi-fan wind tunnel, Atmospheric boundary layer, Roughness, Rectangular cylinders, Suction fans

1. はじめに

汚染物質の拡散や強風時の構造物の荷重を予測するには、できるだけ忠実に実験室で大気境界層を再現する必要がある。この時、大気境界層の平均速度プロファイルのみならず乱れ強度やレイノルズ応力などの動的特性を再現することも重要である。

従来よりスパイヤー、ラフネス等の障害物を利用して自然に境界層を発生させる方法が用いられてきた。しかし、これらの方法では厚い境界層を形成するには長い流下距離が必要となり、通常の風洞では実現できる乱流特性に限界がある。例えば、測定胴入り口からの流下距離 X と境界層厚さ δ は次のような例がある。有江他¹⁾では流下距離 $X \sim 7\delta$ で、Farell 他²⁾では $X \sim 10\delta$ で、十分に発達した乱流境界層を得ている。

我々は新規に開発したマルチファン型風洞を用いて、角柱列とラフネスを併用し成り行きで境界層を生成した³⁾。しかし実用的には目標を与え、目標通りに境界層を制御できることが望ましい。マルチファン型風洞の特長は高いプロファイル制御能力を持つことであ

る。本研究の目的はプロファイル形成の役割をマルチファン型風洞に、乱れ供給の役割を角柱列などの外部擾乱に持たせ、短い流下距離で目標平均流速プロファイルを達成することである。乱れ供給は角柱列による場合（「柱列法」）と反転ファンによる吸い込みを利用する場合（「吸い込み法」）の2種類を調べた。本実験では、柱列法で $X \sim 7.0m \sim 5\delta$ 、吸い込み法で $X \sim 5.0m \sim 3.7\delta$ という非常に短い流下距離で目標流速プロファイルを設定した。そこで生成された境界層の乱れ特性がどの程度、中立大気境界層を模擬できているかを詳細に調べた。

2. 実験装置および方法

使用した風洞は室内開放型押し込み式のマルチファン型風洞である⁴⁾。この風洞の最大の特徴は気流を多数の小さなファンで駆動することである。送風部入り口の面内には縦11個、横9列合計99個のファン（外径180mm）が組み込まれている。ファンは750WのACサーボモーターに接続され、それぞれが独立にパソコンで回転数制御される。駆動された気流は隔壁で仕切られたダクトを通り縮流され、縮流部の終端のハニカムで整流され測定部に吐き出される。測定部の

.. 工学研究科 博士前期課程 応用物理学専攻 大学院生

.. 材料物理工学科 教授

断面の大きさは縦 (H) \times 横 (W) = 1800 \times 2540mm である。測定部入口におけるダクトの大きさは $M_y = 282\text{mm}$, $M_z = 164\text{mm}$ である。測定部長さ D は可搬洞を組み合わせで構成し、ここでは $D = 15.5\text{m}$ に設定した。

座標軸は測定部入口床中心を原点にとり、下流方向に X 、水平方向に Y 、鉛直方向に Z をとる。(X, Y, Z) に対する速度成分は ($U + u, v, w$) と定義する。ここに U は主流平均流速、 u, v, w は変動流速である。予備的に一様流を生成し、 $X = 10.0\text{m}$ の断面で風速分布を確認したところ、少なくとも壁面から 10cm 以上離れたコア領域で平均流速は $\pm 2.0\%$ 以下の非一様性があり、乱れ強度 $I (= u/U)$ は 2.0% 以下であった。回転数が約 4200rpm ($U = 16.0\text{m/s}$ に対応) まで良好な直線性が得られた。

風洞内には 2 次元トラバース装置が設置され遠隔操作でセンサー類を移動できる。その他の風洞の詳細は文献^{4), 5)} を参照されたい。

流速は熱線流速計 SYSTEM7000 (Kanomax, CTA-1011) で測定し、プローブは線径 5.0 μm 、受感部長 1.0mm の X 型 (同 Model 1241) を用いた。主に風洞中心のいろいろな流下距離で境界層特性を計測した。本実験では乱流を供給するため角柱列を上流に配置する方法 (柱列法) とマルチファンの一部に吸い込みを設ける方法 (吸い込み法) を適用した。角柱列の作用及び吸い込みの作用による流速プロファイルの 2 次元的な非一様性を確認するため、柱列法では $Y = 215\text{mm}$ および 430mm、吸い込み法では $Y = 282\text{mm}$ および 564mm の断面においても、いろいろな流下距離で境界層特性を計測した。

熱線流速計からの信号はロガー (NR-600, KEYENCE) によって AD 変換した。サンプリング周波数は 2000Hz を使用した。エイリアシングを防ぐためカットオフ周波数以上の成分はローパスフィルターで除去した。スペクトル解析は高速フーリエ変換 (FFT) を用いた。4096 個の時系列を 1 ブロックとし、15 ブロックで求められたパワースペクトルを算術平均した。

3. 境界層生成法

3.1 柱列法

図 1 に柱列法による境界層生成法を示す。角柱は高さ 1800mm、幅 90mm、奥行 45mm のものを使用し、 $X = 1.0\text{m}$ において 430mm 間隔で 5 本並列に設置した。柱体をスパイヤーのように有限長さにする方法もあるが柱体の上面から発生する渦が乱流特性に悪影響

を及ぼす可能性が指摘されている¹⁾。さらに本実験では風洞高さの 3/4 \sim 1350mm までを模擬的に境界層で満たそうと試みているので風洞高さいっばいに角柱を設置することにした。このような乱れ供給の方法を本論文では「柱列法」と呼ぶ。

床面付近の乱れを補うために高さ $k = 30\text{mm}$ のアングルを流下方向に敷き詰めた。ラフネスは $X = 2\text{m}$ から 7m まで等間隔に設置し、その間隔 d は $d = 120\text{mm}$, 240mm, 480mm の 3 種類を試した。この範囲では気流特性には大きな変化は見られなかったので、ラフネス間隔は最も狭い $d = 120\text{mm}$ の間隔だけを採用し、 $X = 11.5\text{m}$ まで敷き詰めた³⁾。

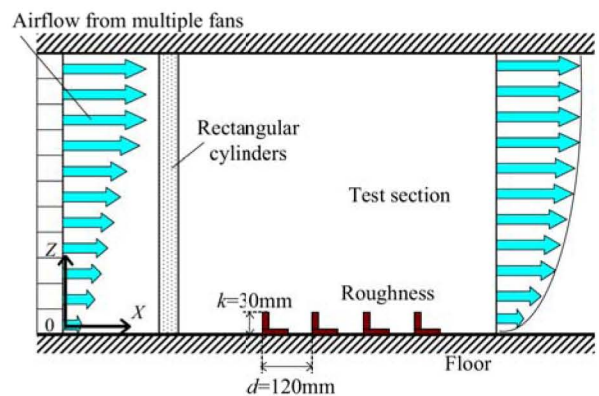


図 1: Experimental setup for the cylinders method.

3.2 角柱列の効果

図 2 はマルチファンに一様流 $U_{in} = 5.0\text{m/s}$ の入力信号を与えて、角柱列の有無によって境界層特性がどのように変わるかを調べたものである。角柱列の有無によらずラフネスを使用し、計測位置は $X = 7.0\text{m}$ とした。乱れ強度が増加し始める辺りが境界層外縁と考えられる。角柱列がある場合は角柱列が無い場合に比べ境界層の外で乱れ強度が 5.0% 程度増加している。角柱列がある場合は境界層厚さが約 50% 程度厚みを増している。

3.3 吸い込み法

マルチファン型風洞には 99 個のファンが設置されており、それぞれのファンは独立に正転 (吹き出し) も反転 (吸い込み) も可能である。吹き出しの中に反転ファンによる吸い込みがあると強い剪断勾配による不安定で乱れ生成が促進される。小園ら⁶⁾ によると吸い込みを格子状に並べて乱れを作るとき、混合作用を最大にする位置が上流に移動する傾向がある。本実験で

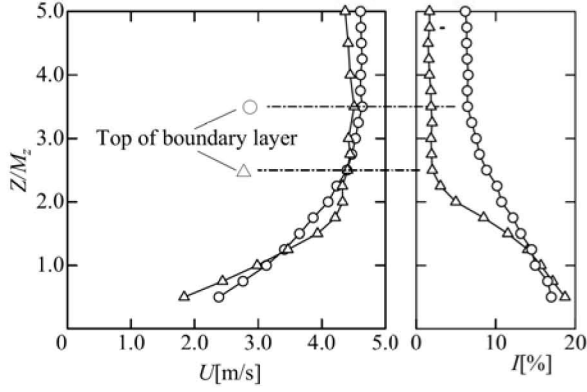


図 2: Boundary layer characteristics with and without cylinders at $X = 7.0\text{m}$. The input signals corresponding to uniform flow were fed to multiple fans. \circ , with cylinders; \triangle , without cylinders³⁾.

は、このことを考慮し吸い込みを利用する場合、より短い流下距離 $X = 5.0\text{m}$ での境界層生成を試みた。

図 3 に吸い込み法による境界層生成法の概要を示す。反転ファンによる吸い込みを利用する場合には、正転・反転ファンを図 4 のように配置した。白い部分が正転ファン、灰色の部分が反転ファンである。正転ファンには U_{in}^+ ($U_{\delta} = 5.0\text{m/s}$)、反転ファンには $U_{in}^- = -4.0\text{m/s}$ (一定) の入力信号を与えた。このような乱れ供給の方法を本論文では「吸い込み法」と呼ぶ。

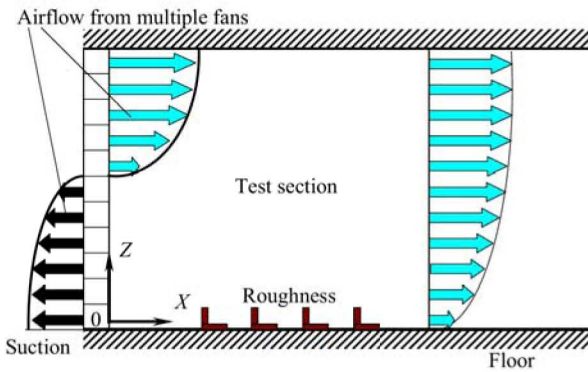


図 3: Experimental setup for the suction method.

3.4 プロファイル形成法

次のべき関数式で表されるプロファイル为目标とした。

$$U_{tar}(Z) = U_{\delta}(Z/\delta)^{\alpha} \quad (1)$$

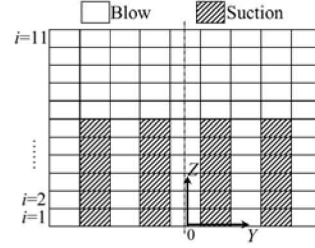


図 4: Arrangement of suction and blowing fans.

ここに U_{δ} は境界層外縁の平均流速、 δ は境界層厚さ、 α はべき指数である。柱列法で $\alpha = 1/4, 1/7$ 、目標流下距離 $X = 7.0\text{m}$ 、吸い込み法で $\alpha = 1/4$ 、目標流下距離 $X = 5.0\text{m}$ とし、生成法によらず $\delta = 1350\text{mm}$ と設定した。

本風洞のダクトからの吹き出し直後の流速は鉛直方向にスケールが M_z の階段状の分布をとるが流下とともに急速に連続的になるものと思われる。フィードバックに使われる風洞内に生成される気流の計測高さは次のようにした。

$$Z_i = M_z \left(i - \frac{1}{2} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, 11) \quad (2)$$

柱列法では、次式のように k 番目の入力による実測を $k+1$ 番目の入力にフィードバックさせることを繰り返し目標平均流速プロファイルに収束させた。

$$U_{in}^{(k+1)} = U_{in}^{(k)} + \left(1 - \frac{U_{out}^{(k)}}{U_{tar}} \right) U_{\delta} \quad (k \geq 1) \quad (3)$$

ここに、 $U_{in}^{(k)}$ は k 番目の入力信号、 $U_{out}^{(k)}$ は k 番目の出力信号 (風洞内で得られる実測値) である。

吸い込み法では、図 4 に示すように $i = 1 \sim 6$ 行目まで、交互の列に反転による吸い込み ($U_{in}^- = -4.0\text{m/s}$) を与えた。ゆえに、吸い込みファンへの入力信号は常に次のような式で表される。

$$U_{in}^{-(k)} = -4.0\text{m/s} \quad (4)$$

吹き出しファンは $k = 1$ 番目の入力を次式で仮定した。

$$U_{in}^{+(1)} = U_{tar}(Z_i) = U_{\delta} \left(\frac{Z_i}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (5)$$

$k = 2$ 番目以降の吹き出しファンのフィードバックは式 (3) に対応する次式を用いた。

$$U_{in}^{+(k+1)} = U_{in}^{+(k)} + \left(1 - \frac{U_{out}^{+(k)}}{U_{tar}} \right) U_{\delta} \quad (6)$$

いずれの方法でもプロファイルが目標に収束したかどうかは目視で判断した。

4. 柱列法による境界層生成の結果

4.1 柱列法 ($\alpha = 1/4$) による境界層

図5に目標プロファイルへの収束性を示す。 $k = 4$ 回で収束できた。線形剪断流のプロファイルでは2~3回のフィードバックで収束したが⁷⁾、本実験では角柱を介在させているため繰り返し回数が少し多くなったようだ。

図6にべき指数 $\alpha = 1/4$ の流速プロファイルの流下方向変化を示す。目標流下距離 $X = 7.0\text{m}$ において境界層内全体にわたりほぼ目標に近い流速プロファイルが生成できた。計測した $X \geq 3.0\text{m}$ の範囲で2次元性は良好である。 $X \geq 9.0\text{m}$ では上層部で目標よりも加速されつつある。

図7に乱れ強度 u'/U の鉛直分布の流下方向変化を示す。ここに u' は X 方向の変動流速のrms値である。 $X = 7.0\text{m}$ における強度は床面付近 ($Z/\delta \leq 0.2$) で14%程度であり、高度が増すにつれて減少し、 $Z/\delta \sim 0.4$ で最小になり、それ以上では少し増加し7~8%

に落ち着いている。床面付近ではラフネスの効果により強い乱れが生成されているものと思われる。流下に伴い上層部でわずかに強度が低下している。

図7と8では Hanafusa⁹⁾ らの実測を比較に用いた。 Hanafusa らは鉄塔に超音波流速計を設置し、六つのレベルで (10m ~ 200m) 3月の低気圧による強風の測定を行っている。強風のゆえに大気は中立状態に近いとしている。平均流速分布はべき指数 $\alpha \sim 0.3$ と見積もっている。 Hanafusa らは境界層厚さの見積もりを明記していないが、関下ら⁸⁾ は $200\text{m} \sim 0.6\delta$ としている。実測では $Z = 200\text{m}$ で $U \sim 20\text{m/s}$ であり、これらの値をべき乗則の式(1)に代入して境界層外縁の速度は $U_\delta \sim 25\text{m/s}$ と見積もられる。

実測では全ての高さで10%前後の強い乱れを維持している。本実験では床面付近で実測値以上の強さが得られているが、 $Z/\delta > 0.4$ の上層部では実測の10%前後よりも小さい。図8に無次元レイノルズ応力 $-\overline{uw}/u'w'$ の鉛直分布を示す。ここに w' は Z 方向の変動流速のrms値である。この無次元レイノルズ応力

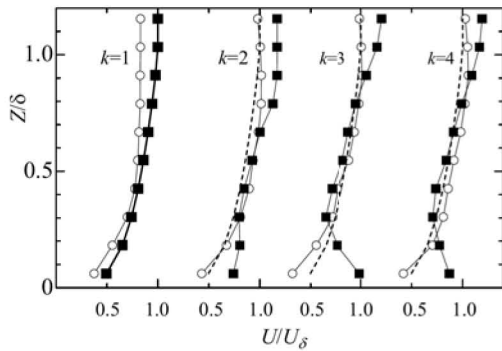


図5: Convergence of mean velocity profile to the target with $\alpha = 1/4$. Solid line, target; ■, U_{in} ; ○, observed at $Y = 0\text{m}$.

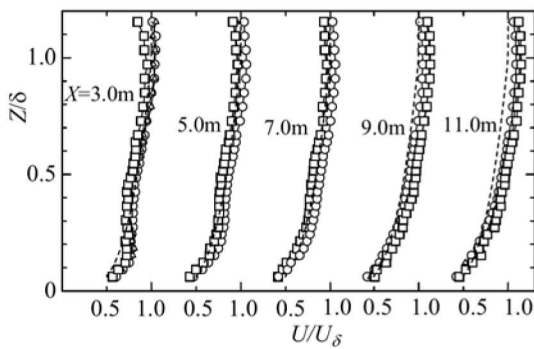


図6: Streamwise development of mean velocity profiles. $\alpha = 1/4$. Solid line, target; ■, input; ○, $Y = 0\text{m}$; △, $Y = 0.215\text{m}$; □, $Y = 0.43\text{m}$.

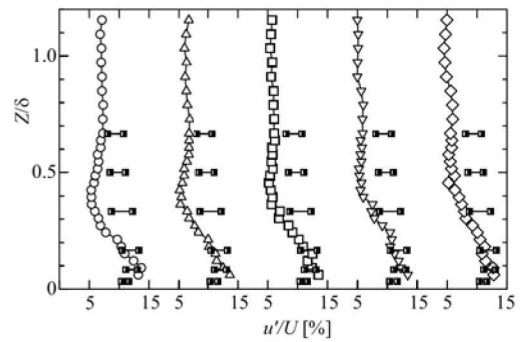


図7: Streamwise development of longitudinal turbulence intensity u'/U . $\alpha = 1/4$. Error bar, taken from Hanafusa⁹⁾; ○, $X = 7.0\text{m}$; △, $X = 8.0\text{m}$; □, $X = 9.0\text{m}$; ▽, $X = 10.0\text{m}$; ◇, $X = 11.0\text{m}$.

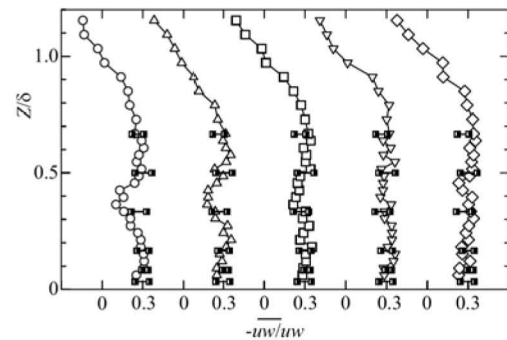


図8: Streamwise development of Reynolds stress $-\overline{uw}/u'w'$. $\alpha = 1/4$. See Fig. 7 for legend.

は一般的な接地境界層内で高さ方向に約0.3の一定値を示すことが知られており、比較した実測値もこの値に近い。本実験では境界層内の広い範囲 ($Z/\delta < 0.7$) で ~ 0.3 であり実測値に近い。

4.2 柱列法 ($\alpha = 1/7$) による境界層

目標プロファイルの収束は $k = 5$ 回まで繰り返し、 $Z \geq 0.2$ では十分収束させることができたが、床面付近ではいまだ隔たりがあった。局所的にさらに数回フィードバックを試みたものの目標との差を縮めることはできなかった。これはラフネスの影響やマルチファンの分解能の限界によるものと思われる。

図9にべき指数 $\alpha = 1/7$ の流速プロファイルの下流方向変化を示す。 $X = 7.0\text{m}$ で $Z/\delta \geq 0.2$ の上層部で目標に近い流速プロファイルが生成できた。角柱列の影響による2次元非一様性は $X = 3.0 \sim 5.0\text{m}$ で消滅した。生成されたプロファイルの上層部は $X = 11.0\text{m}$ まで目標から大きくずれることなく推移した。

図10に乱れ強度 u'/U の鉛直分布を示す。 $\alpha = 1/4$ と同様の分布を示し、 $X = 7.0\text{m}$ における強度は床面付近で16%程度、 $Z/\delta \geq 0.3$ の境界層内で7~8%である。 Hanafusa⁹⁾ の実測の α は約0.3と見積もられているので本実験の $\alpha = 1/7$ はかなり隔たりがある。しかし、実測データは現在でも不足しており $\alpha = 1/7$ の場合もこの実測結果を使用した。

図11に無次元レイノルズ応力 $-\overline{uw}/u'w'$ の鉛直分布を示す。 $X = 7.0\text{m}$ において床面付近 ($Z/\delta \leq 0.2$) で約0.3の一定値をとるが、それ以上の高さでは0.3より小さい値をとっている。

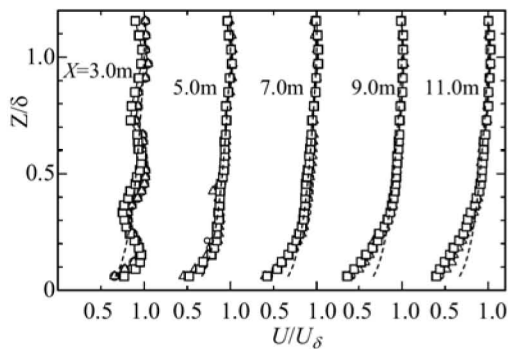


図9: Streamwise development of mean velocity profiles. $\alpha = 1/7$. \circ , $Y = 0\text{m}$; \triangle , $Y = 0.215\text{m}$; \square , $Y = 0.43\text{m}$.

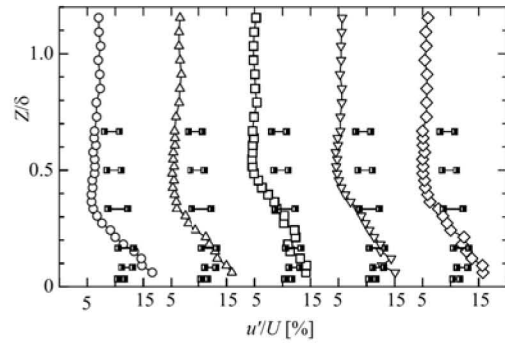


図10: Streamwise development of longitudinal turbulence intensity u'/U . $\alpha = 1/7$. See Fig. 7 for legend.

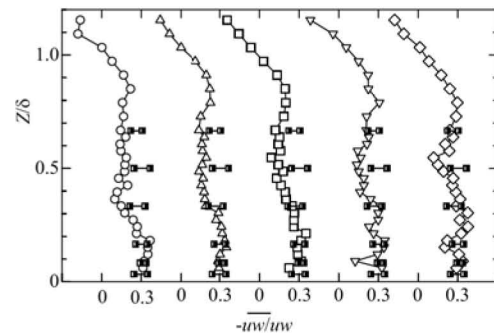


図11: Streamwise development of Reynolds stress $-\overline{uw}/u'w'$. $\alpha=1/7$. See Fig. 7 for legend.

5. 吸い込み法による境界層生成の結果

反転ファンによる吸い込みを使用して境界層生成を試みた。目標はべき指数 $\alpha = 1/4$ の流速プロファイルとした。図12に目標プロファイルの収束性を示す。 $k = 6$ 回まででほぼ目標に収束した。当然のことながら吸い込みファンのある下層部で入力信号 U_{in}^+ が大きくなっている。図13にプロファイルの流下方向変化

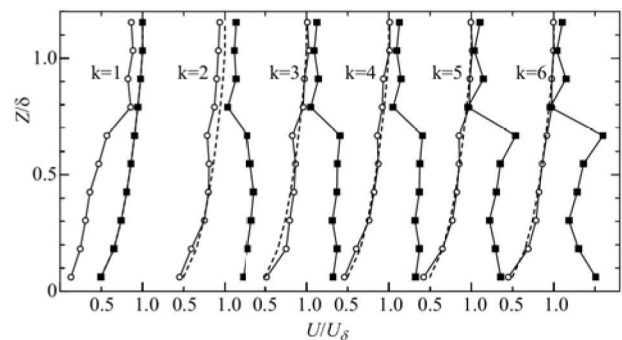


図12: Convergence of mean velocity profile to the target. $\alpha = 1/4$. Solid line, target profile; \blacksquare , U_{in}^+ ; \circ , $Y = 0\text{m}$.

を示す。目標流下距離 $X = 5.0\text{m}$ において境界層内全体にわたりほぼ目標に近い流速プロファイルが生成できた。いずれの流下距離でも、吸い込みによる流速プロファイルの2次元的非一様性はほとんど見られなかった。流下に伴うプロファイルの目標からのずれはほとんど見られず、目標に非常に近いプロファイル形状を維持して推移した。

図14に乱れ強度 u'/U の鉛直分布の流下方向変化を示す。 $X = 5.0\text{m}$ における乱れ強度は吸い込みが行われている高さ $Z/\delta \sim 0.6$ まで9~10%の強い乱れがあり実測値に近い。 $Z/\delta > 0.6$ では上層部に行くにつれて乱れが減衰している。流下とともに上層部の乱れが減衰する。

図15に無次元レイノルズ応力 $-\overline{uw}/u'w'$ の鉛直分布を示す。 $X = 5.0\text{m}$ で $Z/\delta < 0.6$ の広い範囲にわたって0.3に近い一定値をとっている。 $Z/\delta > 0.6$ では、このような傾向と異なり、高度とともにいったん乱れが弱まった後、風洞天井付近で極大値をとる。さらに下流でもこの傾向は変わらない。

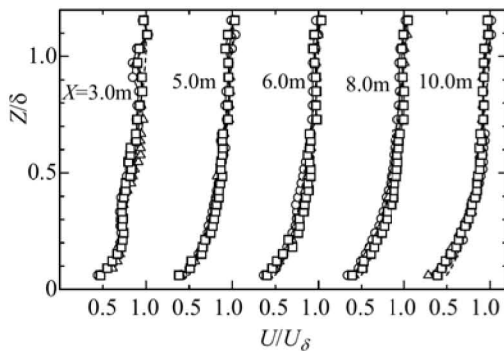


図13: Streamwise development of mean velocity profiles. $\alpha = 1/4$. Solid line, target profile; ■, Input; ○, $Y = 0\text{m}$; △, $Y = 0.282\text{m}$; □, $Y = 0.564\text{m}$.

6. 乱れスケール

乱れスケールを見積もるにはいろいろな評価方法がある。本実験では、まず対数パワースペクトル $fS(f)$ のピーク周波数 f_{peak} を求めた。これをTaylorの凍結乱流仮説に基づく次の関係式に代入して L_x を見積もった¹¹⁾。

$$6.87L_x = \frac{U}{f_{peak}} \quad (7)$$

図16に目標流下距離での各生成法による乱れスケール L_x の鉛直分布を示す。いずれの場合も L_x の値が大きくばらついているが、高さ方向の L_x の変化の傾

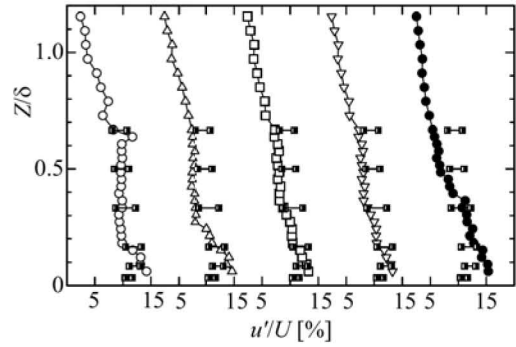


図14: Streamwise development of longitudinal turbulence intensity u'/U . Error bar, taken from Hanafusa;⁹⁾ ○, $X = 5.0\text{m}$; △, $X = 6.0\text{m}$; □, $X = 7.0\text{m}$; ▽, $X = 8.0\text{m}$; ◇, $X = 9.0\text{m}$; ●, $X = 10.0\text{m}$.

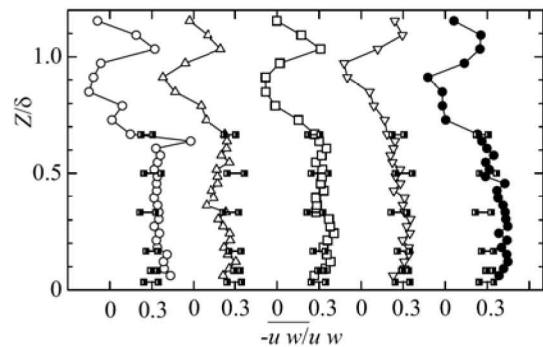


図15: Streamwise development of Reynolds stress $-\overline{uw}/u'w'$. See Fig. 14 for legend.

向はよく似ており、 $Z/\delta \sim 0.4$ 辺りで L_x が落ち込んでいることは興味深い。これは短い流下距離で平均流速プロファイルを強制的に達成したものの、ラフネスなどによる床面からの乱れと高層部の乱れの構造がこの付近で分離していることによるものと考えられる。

Hanafusa 他⁹⁾ の実測では $Z/\delta \sim 0.5$ で $1/3 < L_x/\delta < 1/1.5$ であった。本実験では図16より L_x の最大値は約0.4mであり $L_x/\delta = 0.4/1.35 \sim 1/3.4$ なので実験の乱れスケールは実測よりも相対的に小さいと言える。

有江他¹⁾ は Counihan¹⁰⁾ を参考に考案したスパイアーを用いた。彼らは風洞内に相隣るスパイアーの中間位置に円柱を、下流に床面粗度を設置することで静的に境界層を生成し、十分発達した境界層の厚さ $\delta = 0.43\text{m}$ を得た。この方法で得られた乱れスケールは $Z/\delta < 0.7$ で $L_x = 0.151Z^{0.164}$ に近似された。本実験では図16の $Z/\delta \sim 0.4$ 辺りの谷部を除いてほぼ境界層全体にわたり有江他の結果よりも乱れスケールが大きくなっている。

吸い込み法の乱れスケールは柱列法のそれと比べる

と、わずかに大きいようであるが、これが有意かどうかは本データだけでは判然としない。

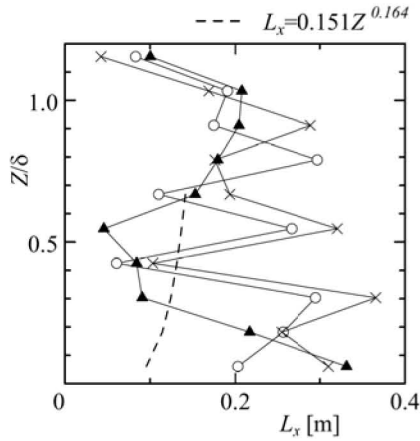


図 16: Longitudinal turbulence scale L_x . \circ , $\alpha=1/4$, $X = 7.0\text{m}$, case of cylinders; \blacktriangle , $\alpha = 1/7$, $X = 7.0\text{m}$, cylinders method; \times , $X = 5.0\text{m}$, suction method. Dotted line, fully developed boundary layer using spires⁸⁾.

7. パワースペクトル

図 17 はいろいろな生成方法による目標流下距離でのスペクトルである。計測点の位置は $Z/\delta = 0.66$ とした。いずれのパワースペクトルでも慣性小領域は 2 桁弱程度見られ、生成法によるスペクトルの変化はほとんど見られなかった。

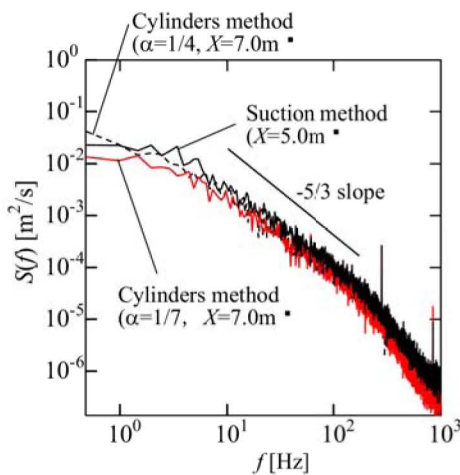


図 17: Comparison of power spectra due to different generating methods at $Z/\delta \sim 0.66$.

テーラーのマイクロスケール λ は次式で定義される。

$$\lambda^2 = \frac{u'^2}{\left\langle \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right\rangle} \quad (8)$$

ここに、 $\langle \cdot \rangle$ は平均操作を示す。テーラーの凍結乱流仮説より次式を使って時間微分を空間微分に置き換えて計算した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{U} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (9)$$

式 (8) を使い、乱流レイノルズ数 Re_λ を次の定義式から求めた。

$$Re_\lambda = u' \lambda / \nu \quad (10)$$

図 17 の各スペクトルに対応する乱流レイノルズ数は柱列法 ($\alpha = 1/4$) で $Re_\lambda = 438$ 、柱列法 ($\alpha = 1/7$) で $Re_\lambda = 310$ 、吸い込み法 ($\alpha = 1/4$) で $Re_\lambda = 391$ であり、実験室で作られた乱流としては比較的大きなものであった。

8. 結論

マルチファンの優れたプロファイル制御能に着目し境界層生成を行った。本研究の目的はプロファイル形成の役割をマルチファン型風洞に、乱れ供給の役割を角柱列などの外部擾乱に持たせ、短い流下距離で目標平均流速プロファイルを達成することである。乱れ供給は角柱列による場合（「柱列法」）と反転ファンによる吸い込みを利用する場合（「吸い込み法」）の 2 種類を調べた。得られた境界層の特性を過去の実測や実験と比較検討した。

1) 柱列法による境界層の特性

- i) 柱列法では $X \sim 7.0\text{m} \sim 5\delta$ の短い流下距離で、べき指数 $\alpha = 1/4, 1/7$ の平均流速プロファイルを生成した。 $\alpha = 1/4$ では、繰り返し回数は 4 回で、床面近くまでべき乗則分布を再現できたが、 $\alpha = 1/7$ では床面近くでべき乗則分布と差が生じた。
- ii) $\alpha = 1/4, 1/7$ とも、乱れ強度は床面付近で $u'/U \sim 15\%$ であり、 $Z/\delta \leq 0.2$ で実測に近い値が得られた。
- iii) $\alpha = 1/4, 1/7$ とも、無次元レイノルズ応力は $Z/\delta \leq 0.3$ において $-\overline{uw}/u'w' \sim 0.3$ の一定値をとり、実測値に近い値が得られた。

2) 吸い込み法による境界層の特性

- i) 吸い込み法では柱列法よりも短い流下距離 $X \sim 5.0\text{m} \sim 3.7\delta$ で境界層全体にわたり $\alpha = 1/4$ の平均流速プロファイルを生成できた.
- ii) 乱れ強度は境界層内にわたって $9 \sim 10\%$ の一定の強い乱れを示し, 実測に近い値が得られた.
- iii) 無次元レイノルズ応力は $Z/\delta \leq 0.6$ において $-\overline{uw}/u'w' \sim 0.3$ の一定値をとり, 柱列法に比べ広範囲にわたり実測に近かった.

3) 乱れスケール

- i) いずれの生成法でも L_x の値が大きくばらついたが, L_x のプロファイルはよく似ている. いずれの生成法とも $Z/\delta \sim 0.4$ 辺りで L_x が落ち込んだ. これは短い流下距離で平均流速プロファイルを強制的に達成したものの, ラフネスなどによる床面からの乱れと高層部の乱れの構造がこの付近で分離していることによるものと考えられる.
- ii) Hanafusa 他⁹⁾ の実測では $Z/\delta \sim 0.5$ で $1/3 < L_x/\delta < 1/1.5$ であった. 本実験では L_x の最大値は約 0.4m であり $L_x/\delta = 0.4/1.35 \sim 1/3.4$ なので実験の乱れスケールは実測よりも相対的に小さいと言える. $Z/\delta \sim 0.4$ 辺りの谷部を除いてほぼ境界層全体にわたり有江他¹⁾ の結果よりも乱れスケールが大きくなった.

4) パワースペクトル

乱れ供給方法によらずパワースペクトルの慣性小領域は 2 桁弱程度であった.

参考文献

- [1] 有江幹男, 木谷勝, 鈴木雍宏, 阪田一郎: 厚い乱流境界層の人工的生成とその特性, 機論, B 編, 46 巻, 410 号, pp. 1925-1934, 1980.
- [2] C. Farell, A. K. S. Iyengar: Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 79, pp. 11-35, 1999.
- [3] 上田寛喜: マルチファンと角柱による厚い境界層生成, 平成 17 年度宮崎大学大学院工学研究科修士論文.
- [4] 小園茂平, 西亮, 宮城弘守, 甲斐賢一郎, 尾澤健太, 義岡誠: マルチファン型大型風洞の開発, 機論, B 編, 70 巻, 690 号, pp. 311-318, 2004.
- [5] 小園茂平, 宮城弘守, 和田一洋: マルチファンの低周波数擾乱で駆動される乱流, 機論, B 編, 72 巻, 742 号, pp. 146-153, 2006.
- [6] 小園茂平, 松尾忠輝, 宮城弘守: マルチファンの非定常せん断を利用した乱流場生成, 日本機械学会, 年次大会講演論文集, pp. 299-300, 2005.
- [7] S. Ozono, T. Kitajima, T. Ichiki: The flow around rectangular cylinders placed in simple shear, Int. Conf. on Jet, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2005), pp. 427-432, 2005.
- [8] 関下信正, 蒔田秀治, 一郷正幸, 藤田唯介: 大気乱流境界層の実験的シミュレーション, 機論, B 編, 68 巻, 665 号, pp. 55-62, 2002.
- [9] T. Hanafusa, T. Fujitani: Characteristics of High Winds Observed from a 200m Meteorological Tower at Tsukuba Science City, Meteorology and Geophysics, 32-1, 19-35, 1981.
- [10] J. Counihan: An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, Vol. 3, pp. 197-214, 1969.
- [11] 日本建築センター, 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 1994.