

スパイアーにより生成される乱流境界層のマルチファンによる再現

小園 茂平¹⁾・上田 寛喜²⁾・加藤 英明³⁾・宮城 弘守⁴⁾

Simulation of the Turbulent Boundary Layer Generated by Spires Using a Multi-Fan Wind Tunnel

Shigehira OZONO, Hiroki UEDA, Hideaki KATO, Hiromori MIYAGI

Abstract

In an attempt to simulate the planetary boundary layer within a restricted entry length, an innovative wind tunnel “of multi-fan type” is applied. The airflow is driven by an array of fans (11 rows×9 columns), each of which is independently controlled by a computer. To efficiently obtain the average flow speed profile similar to the planetary boundary layer, we devise a spire especially for the cases without roughness and regard the resulting turbulence as a target. To aim at the target turbulence characteristics, turbulence is passively generated by a multi-fan wind tunnel with activated and inactivated fans, vertically grid-like arranged near the floor, and the results show good agreement with the target characteristics.

Key Words :

Turbulent boundary layer, Multi-fan wind tunnel, Spire, Roughness element

1. はじめに

大気境界層とは地球大気の最下層にあり、地表面や海面付近の風が摩擦や熱輸送の影響を直接的に受ける層のことである。一般的な境界層を扱うときは、中緯度の平均の状態として地表約 1km 程度のものを考える。このような境界層の中で生活する我々にとって、地上構造物の設計においてはあらかじめその周辺の気流特性を知っておく必要がある。しかし実測は技術的にも、経済的にも困難であるので、代わりに風洞を用いて小さなスケールで実際の流れをシミュレートし、必要な情報を得る場合が多い。風洞による流れのシミュレーションはこれまでに静的(passive)方法や動的(active)方法^{1) - 4)}が試みられている。静的方法では上流にスパイアーや粗度要素を配置し、風洞内で自然

に境界層を生成する⁵⁾。しかし、風洞の大きさには限度があるので、実現できる乱流特性も制限される。そこで風洞内にスパイアーや粗度要素を置かずにマルチファンのコントロールのみで乱流境界層特性が再現できれば、多様な境界層流れが風洞だけで効果的にシミュレートできることになり、実用性がいっきに広がる。本研究では、まず、風洞内に乱流生成の基本要素であるスパイアーを設置してターゲットとなる乱流境界層を生成する。次にマルチファンの特性を生かし、駆動・非駆動ファンの適当な配置パターンによる擬似縦格子法を用いてターゲットの乱流境界層の再現を試みることを目的とした。

2. 実験方法

本風洞装置の風洞本体は、室内開放型押し込み式(エッフェル型)である。送風機は、750WのACサーボモータによって駆動される外形270mmの軸流型送風機、横9列、縦11段の計99個で構成されている。また、旋回流除去用ステーターを付属している。風速の設定は送風機の回転数

1) 材料物理工学科助教授

2) 材料物理工学科4年

3) 材料物理工学科博士課程前期2年

4) 材料物理工学科技官

制御により行なうものとし、最大風速 18.0m/s が可能である。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、縮流部の後端のハニカムで乱れの除去が行われている。縮流比は 1.83 である。測定洞は最大長 15.5m、測定部の幅 2.54m、高さ 1.80m であり、可搬胴の組み合わせにより、長さを変更可能である。各ファンのダクトの出口での大きさは水平に $M_y=28.2\text{cm}$ 、鉛直に $M_z=16.4\text{cm}$ である。

座標は下流方向に X、それに垂直な水平方向を Y、鉛直方向を Z と定義する。(X, Y, Z) に対する風速変動は $(U+u,v,w)$ と定義する。ここに U は平均風速、 u,v,w は変動風速である。乱れ強度は u'/U で定義され、 u' は u の r.m.s. 値を意味する。

ターゲットとなる境界層は、吹き出しから $X=1\text{m}$ にスパイアーを設置し、定常一様流の信号 $U_n=5\text{m/s}$ の気流により生成した。ここに U_n は入力信号から想定される流速を示す。計測のため製作したスパイアーは図 1 に示す 3 タイプである。縦 90cm、横 20cm の三角型をしたスパイアー(タイプ A)と縦 90cm、横 40cm で三角型をし、側面部分に滑らかな傾斜を付けたもの(タイプ B)。そして縦 90cm、横 15cm の下半分が太めの形をしたスパイアー(タイプ C)である。今回の実験では、やや乱れ強度が小さかったものの、タイプ C の時、比較的短い流下距離で最も大気境界層の特性に近い結果が得られたので、これを再現実験のターゲットに決定した。大気境界層の下部では風速鉛直分布は理論的に対数分布で表わされるが、風工学分野では経験的に求められたべき関数分布の式(1)が用いられる。

$$U(Z)/U_\infty=(Z/\delta)^\alpha \quad \dots (1)$$

ここに、 U_∞ は境界層外部の平均流速、 δ は境界層厚さ、 α はべき乗を表す。マルチファンによる乱流境界層生成は下四段にわたり駆動ファンと非駆動ファンを縦格子状に配置する擬似縦格子法を使い、 $X=9\text{m}$ で測定を行った。(図 7 参照)。

3. スパイアーによる境界層

3.1 スパン方向一様性

タイプ A のスパイアーを使い、 $ZM_z=2.7$ のレベルでスパン方向に 5 点測定した。図 2 に示すように $X/M_z=18.3$ と 30.5 では測定位置により、風速、乱れ強度にばらつき

があったが、 $X/M_z=30.5$ より下流ではほぼ一様になっていることが確認された。これによりスパン方向の一様性が成り立つ $X/M_z>30.5$ の地点で測定を行なうことにした。

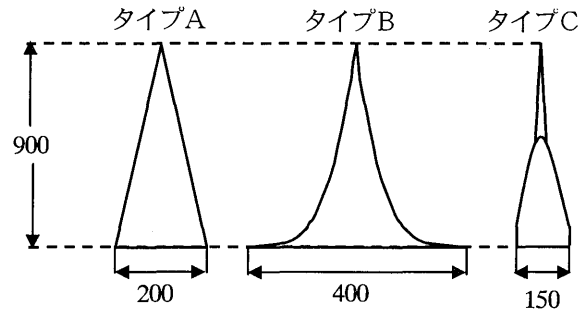


図 1 スパイアーの立面図

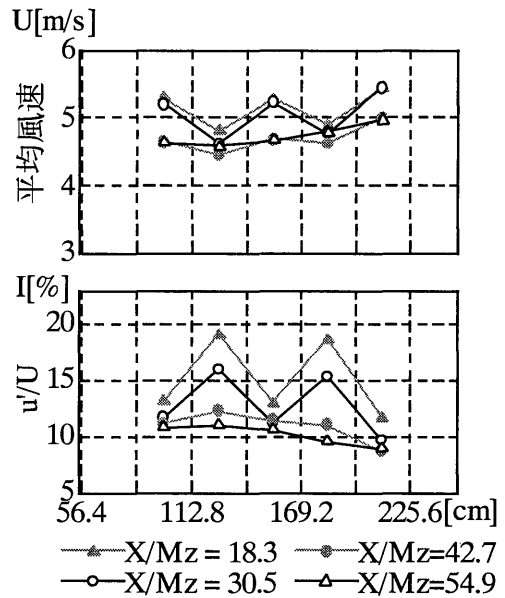


図 2 スパン方向の一様性

3.2 タイプ A の境界層特性

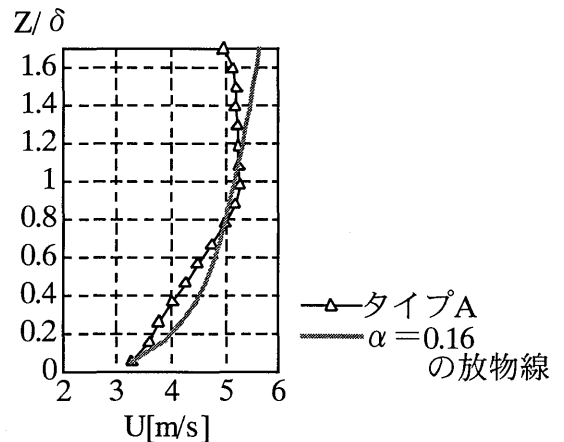


図 3 タイプ A の平均風速分布 ($X/M_z=42.7$)

タイプ A のスパイアーで生じた境界層気流特性を X/M_z

=42.7で測定した。図3は平均風速分布を示す。べき指数 $\alpha=0.16$ の放物線と比較してみると、境界層内での分布が線形的になり、大気境界層の特性と異なる。

3.3 タイプBの境界層特性

平均速度プロファイルを改善するためタイプBのスパイアーを試みた。タイプBをタイプAと同様に $X/M_z=42.7$ で気流特性の測定を行なった。図4にその特性を示す。タイプAとBを比較するとBのほうはAに比べて傾斜を付けた分やや境界層の厚さが薄くなったものの、まだ線形的なプロファイルが維持されている。そのため、さらなる流下により乱流が発達することを期待して測定位置を7mから12mへと移動することにした。

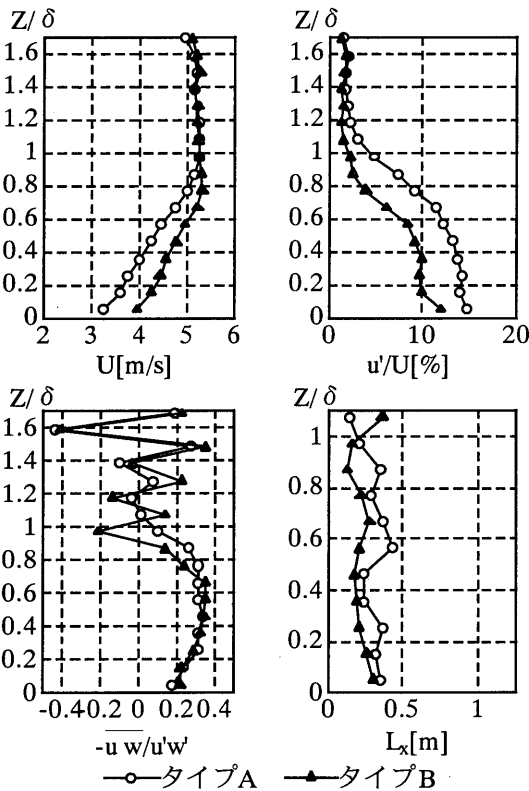


図4 タイプAとBの境界層特性の比較 ($X/M_z=42.7$)

3.4 タイプBの下流地点での特性

タイプBのスパイアーを使った実験の計測点を、 $X/M_z=42.7$ と73.2で比較したところ、レイノルズ応力と乱れスケールにはほぼ変化は無かった。測定位置を5m下流に移動させたことにより、乱れ強度はやや小さくなったものの、平均速度分布は丸みを帯び、この時の平均速度分布のべき

指数は、 $\alpha=0.074=1/13.5$ であった。 $X/M_z=42.7$ ではスパイアー後流に固有の乱れが残存し、線形的な風速プロファイルが生じたものと考えられる。したがって $X/M_z=42.7$ では境界層の平均速度分布を模擬するのは容易ではないと判断し、以後 $X/M_z=73.2$ で測定を行なうことにした。

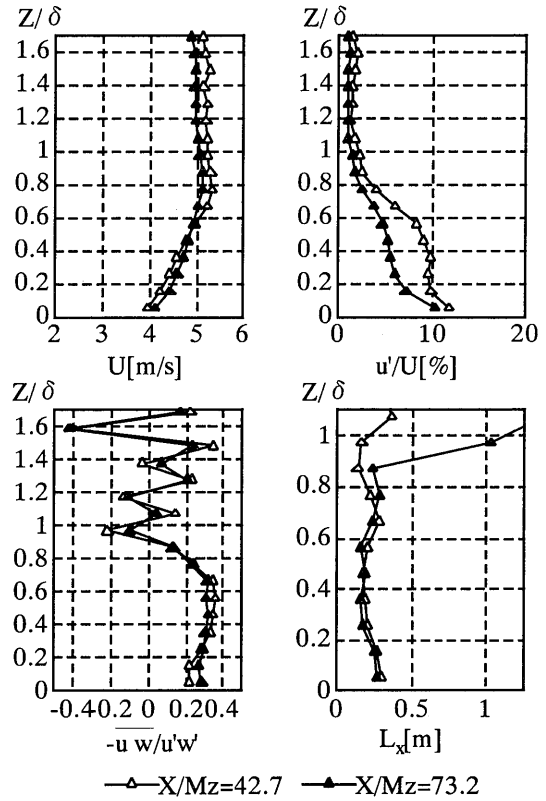


図5 タイプBの境界層の2地点での比較

3.5 タイプCの境界層特性

タイプBのスパイアーの形状では平均速度分布がべき乗則に沿った形になったものの、乱れが小さかった。そのためタイプCはスパイアーに当たった気流が水平に剥がれ、床面近くで大きく乱れるような設計にした。

測定の結果、図6のような平均速度分布が得られた。これより、べき乗則のべき指数を求めると、 $\alpha=0.104=1/9.65$ であった。平均風速プロファイルはタイプBとほぼ同様なべき乗則に従う形をとった。このべき指数は粗度のほとんどない海上のそれに相当する。タイプBもCも境界層内の無次元レイノルズ応力は一般的な大気境界層に見られる0.3~0.4に分布している。乱れの強さも大きくなり、タイプCのスパイアーから、最も一般的な大気境界層に近い結果が得られたと考えこれを今回の再現実験の

ターゲットに決定した。

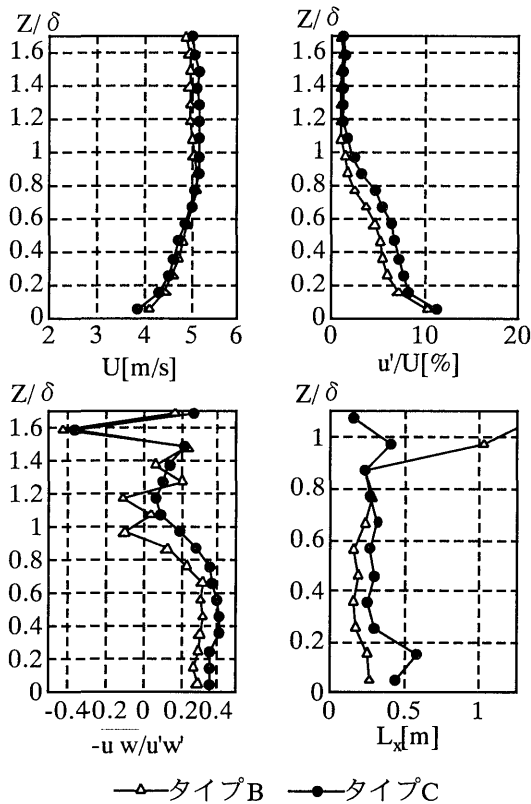


図6 タイプBとCの境界層特性の比較 ($X/M_z = 73.2$)

4. 擬似縦格子法による境界層

次にスパイアーにより作られた境界層をマルチファンだけを使うことにより再現する事を試みた。ファンの下から四段目までを縦格子状に交互に風を吹かせ、駆動ファンにはターゲットCの特徴に近づくような信号を与え、これを擬似縦格子法と呼ぶことにする。図7は擬似縦格子法のファンの配置を示している。

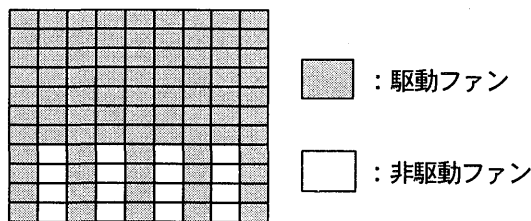


図7 擬似縦格子の駆動・非駆動ファンの配置

図8は擬似縦格子法による気流特性をターゲットのそれと比較したものである。擬似縦格子法により、平均速度分布と乱れ強度は境界層内で非常によく一致した。レイノルズ応力と乱れスケールは若干の差があるものの、ほぼタ

ーゲットと一致した。当然ながら、擬似縦格子法による乱流境界層内の無次元レイノルズ応力は一般的な大気境界層に見られる0.3という値近くに分布している。

今回の再現実験ではターゲットの境界層特性をターゲット計測地点の3m上流である $X/M_z = 54.9$ で再現できた。このことはマルチファンを使えば、より短い流下距離で所要の乱流特性が得られることを意味しており、効率化の可能性を提示しえたと考える。

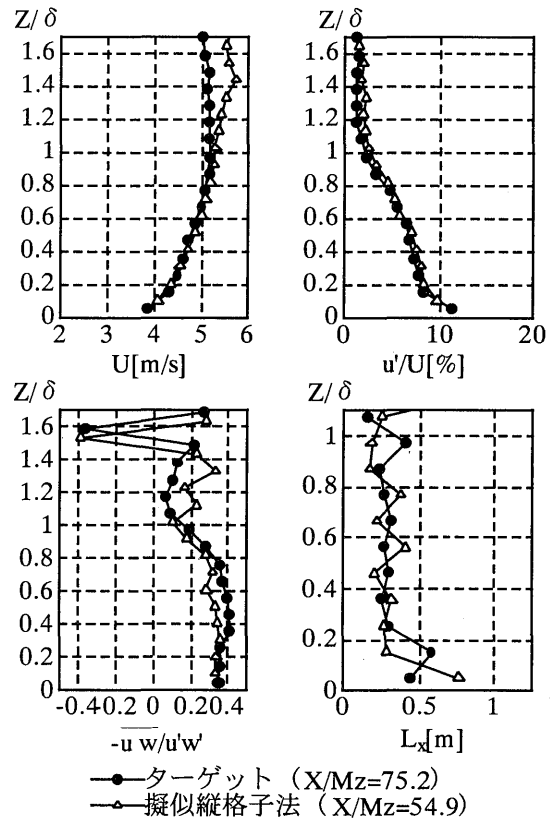


図8 ターゲットと擬似縦格子による境界層特性の比較

5. 結論

スパイアーで生成される乱流境界層をターゲットにし、マルチファン型風洞の駆動ファンの信号を擬似縦格子状に適宜配置して乱流境界層を再現した。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 下半分を太めにしたタイプCのスパイアーが最も効率的に乱流境界層をシミュレートできる。
- 2) 擬似縦格子法というマルチファンの運転モードを使うことにより、ターゲットの乱流境界層の気流特性を非常によい精度で再現できた。

参考文献

- 1) 藤村信宏, 齊藤通, 本田明弘, 平井滋登, 1994, アクティブ制御による三次元自然風シミュレーションに関する基礎的研究, 日本風工学会誌, 61, pp.11-20.
- 2) H. W. Teunissen, 1975, Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel, Atmospheric Environment, 9, pp.145-174.
- 3) 関下信正, 蒔田秀治, 一郷正幸, 藤田唯介, 2002, 大気境界層の実験的シミュレーション, 日本機会学会論文集, B, 68, No. 665, pp.55-62.
- 4) 長友誠, 小園茂平, 加藤英明, 2002, マルチファン型風洞による大気境界層の模擬生成, 第17回風工学シンポジウム, pp.107-112.
- 5) P. A. H. Irwin: Design and use of spires for natural wind simulation, National research Council of Canada, NAE Report LTR-LA-233, August 1979.