バリアにより形成される乱流境界層のマルチファンによる再現

加藤 英明[1)]・上田 寛喜[2)]・宮城 弘守[3)]・小園 茂平[4)]

Simulation of the Turbulent Boundary Layer Generated by a Barrier in a Wind Tunnel of Multi- fan Type

Hideaki KATO , Hiroki UEDA, Hiromori MIYAGI, Shigehira OZONO

Abstract

In an attempt to simulate a turbulent boundary layer on the wall within a restricted entry length, a wind tunnel of multi-fan type is applied. The airflow is driven by an array of fans (9 rows× 11 columns), each of which is independently controlled by a computer. Since a barrier is representative of the elements for generating turbulent boundary layers, the characteristics of turbulence induced by a barrier are set to the target. A new driving mode is devised, where all the fans are driven steadily, without active control. To provide strong shear, a row of fans at the bottom are driven in the counter direction, while the rest of fans driven in the normal direction tuned to realize the target characteristics. The simulated flow reproduces most of the characteristics of the target boundary layer, such as profiles of mean velocity, turbulence intensity, integral scale, and Reynolds stress.

Key words:
Wind tunnel of multi-fan type, Barrier, Turbulent boundary layer

1．序論

工学では所要の乱流場を模擬的に生成したい場合が多い．風洞内で乱れを生成する方法には，障害物から発生する後流を利用する静的な方法と，駆動機などを利用して流れにエネルギーを与える動的な方法に大きく分けることができる．

特に大気境界層を生成する静的な方法の代表として，風路の上流にスパイアー，バリア，ラフネス等を配置し，その後流の乱れを利用する方法がある．しかし，これらを上流に固定する従来の方法では，風洞の限られた大きさの中で大気境界層の乱流特性を実現することは困難である．この限界を克服するために，何らかの攪拌機構によりエネルギーを注入する動的な乱流生成法が試みられてきた．

我々はこれまでにマルチファン型風洞を開発し，全てのファンに一様な変動命令を与えることで流れを制御する「一様アクティブ法」を，最も基本的な制御法と位置づけその特性を主に調べてきた．ついで，格子乱流生成法の自然な拡張である「擬似格子法」を試みた．これは，駆動ファンと非駆動ファンを格子状に配置し駆動ファンを定常運転する方法で，測定部吹き出し直後の剪断不安定により乱れが生成される．この方法は従来の格子乱流に近い特性を持ち一様アクティブ法と比較することでその空間構造を明らかにした[1)]．

本研究ではマルチファン型風洞を用い乱流境界層の再現を試みた．我々は最終的にはマルチファンの制御による自在な乱流境界層の再現をめざしている，ここではバリア下流の乱流境界層をマルチファンで再現させることに目標を絞った．動的な変動は与えず，空間的に自在に流速プロファイルが作れるマルチファンの特性を生かし静的に再現できる方法を採用した．特に工夫した点は駆動ファンの一部を逆回転させたことである．これにより正転ファンと逆転ファンの吹き出し直後の剪断勾配が大きくなり，強乱かつ大規模な乱れが生成されると考えた．

以前の研究では，バリアとラフネスを組み合わせて静的に生成された境界層をターゲットAとし「アクティブ法」や「擬似縦格子法」を用い再現を試みた[2),3)]．しかし，それらの方法では境界層特性を十分に再現できなかった．本研究では，まず，ラフネスを用いないで，単純にバリア下流に生成される乱流境界層を新たなターゲットBとして生成した．これを再現するようにマルチファンの信号の入力モードを決定した．次いで，その入力モードでラフネスを加え，当初のターゲットAと比較した．自然風

1) 材料物理工学科博士課程前期2年
2) 材料物理工学科4年
3) 東北大学流体研
4) 材料物理工学科助教授

は場所ごとに粗度特性が変化する．したがって，風工学では所要の乱流特性をファンの制御によって自在に達成することが重要である．境界層を再現するにあたって，従来のような風速分布のみならず，乱流特性値もターゲットへ近づけることを目標とした．

2．実験方法

2．1 風洞装置の概要

マルチファン型風洞の最大の特徴は，気流を複数のファンで駆動することである．縦11個x横9個=合計99個のファンがACサーボモーターに接続され，それぞれ独立にパソコンで制御される．ファンの直径は270mmで，風速はモーターの回転数にほぼ比例し最大18.0m/sまで可能である．それぞれのファンで駆動された気流は，接続した矩形断面のダクトを通り縮流され，最終的にはハニカムで整流され測定部に吐き出される．縮流比は1:1.83である．それぞれのダクトの縮流部出口の寸法はM_Y=282mm，M_Z=164mmである．

甲斐[4]によりX/M_Z=61.0の測定断面において，U=8.0m/sの一様流に対し風洞壁面近傍を除き平均風速は±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．

測定部は八つの可搬胴からなっており，測定部の断面の大きさは横2540mm×縦1800mmであり可搬胴を組み合わせて流れ方向に15.5mまで延長できる．風洞内には二次元トラバース装置が設置されており，断面内の所要の位置にプローブを移動することができる．

2．2 境界層生成法

座標は，図1に示し縮流部出口から流れ方向に向かい右下を原点とし下流方向にX，水平方向にY，垂直方向にZと定義する．(X,Y,Z)方向に対応する速度成分を$(U(z)+u,v,w)$として，この時$U(z)$は平均風速，(u,v,w)は変動成分である．

変動流速の計測は，熱線流速計SYSTEM-7000（KANOMAX）を使い，プローブはX型（Model 1241）を用いた．ホットワイヤーの受感部は1.0mmであった．データ収録にはNR－2000:14bit（KEYENCE）を用いた．また，本論文では測定部の風洞長は15.5m（最大），サンプリング周波数2kHz，サンプリング時間間隔5×10^{-4}s，データ長2^{17}=131072個と設定しX方向とZ方向気流の同時測定を行なった．

風洞測定部の吹き出し口からX=1.0mに厚さ1cm，横240cm，高さ12cmの平板を垂直に設置してバリアを作り，各送風機にU_{tar}=5.0m/sの目標となる定常信号を与えターゲットとなる境界層を生成した．以前の研究[2,3]で使用したバリアと同じ物である．X/M_Z=42.7地点の風洞中央でZ方向にトラバースし気流を測定し，得られた特性量をターゲットBとした．

マルチファンの特性を生かし床面に最も近い下一段のファンのみを逆転させ強い剪断を生成した．バリアによって形成される再循環領域をこのようなファンの吹き出しと吸い込みで代用する試みである．X/M_Z=30.5で気流を再現できるようファンへの信号を調整し，その風洞断面中央で鉛直方向にトラバースした．

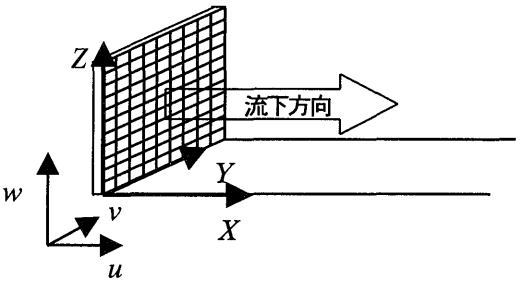


図1．座標系

2．3 運転モード

2．3．1 一様アクティブ法

一様アクティブ法では，まず目標となる乱れ強度I_{tar}，乱れスケールL_{tar}，平均風速U_{tar}を次のKármánの式に代入してパワースペクトルを求め，それを逆フーリエ変換することで時系列を作成する．

$$S(f)=4I^2L_xU\frac{1}{\left\{1+70.8\left(\frac{fL_x}{U}\right)^2\right\}^{5/6}}$$

ここに，

$S(f)$：主流方向気流変動のパワースペクトル密度関数

f：周波数

U：主流方向平均風速

L_x：主流方向成分乱れスケール

I：主流方向成分乱れ強度

代表的な運転モードは“一様アクティブ法”と呼ばれ，時系列データに比例する入力信号が99個のファンのモーター全てに0.02sの間隔で送られ，同位相で変動を起こす．先行する研究[1]で一様アクティブ法による乱流特性は調べられている．

2．3．2　擬似格子法

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，それぞれ独立に制御することができる．これまでに駆動・非駆動ファンを格子状に配置した擬似格子法という運転法が考慮されている．本論文でとりあげる擬似縦格子法はその方法の変種である．駆動ファンと非駆動ファンを，縦格子状に配置させたものである．この概念を図2に示す．

擬似縦格子法は吹き出しのみであったが，本論文では一部のファンを反転させる方法を適用した．正転ファン，逆転ファンを組み合わせることによってより大きな剪断勾配を作り擬似格子法よりも強い乱れを生成することが期待される．その概念を図4に示す．この方法は本論文の主題であるバリア下流に形成される乱流境界層のシミュレーションに主に適用された．

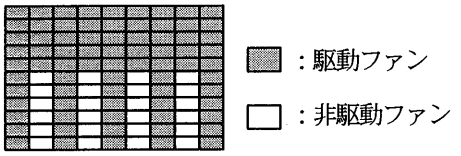


図2．擬似縦格子の概念図

3．擬似縦格子法とアクティブ法による境界層の再現

バリアとラフネスを組み合わせてターゲット A の境界層を生成した．この方法は大気境界層を生成するときに一般に用いられる．ターゲットAのプロファイル特性は図3に示されている．これらはX/M_z=42.7の風洞中央で計測したもので，境界層の厚さはδ=65.6cm，ベキ指数はn=1/6.5であった．この巾指数は実際の大気境界層では海岸線や林のような地形の巾指数に相当する．このターゲットAの流れ特性をアクティブ法や擬似縦格子法を用いて再現を試みた．

擬似縦格子は図2で示すように下6段で適用した．これはスパイアーのような効果を狙ったものである．このことで水平渦が生成され大気境界層で重要なレイノルズ応力が生じるものと考えた．測定部入口における各ダクトの中心高さZの風速値をターゲットAのベキ乗則より求め，これに対応する定常信号を各送風機に与えた．そして実験値と比較しながらターゲットAに近づくよう信号をチューニングした．

図3に擬似縦格子法を用いた境界層の特性を示す．計測はX/M_z=42.7で行なった．この方法による平均風速分布(図3.A)は床面近くでターゲットAより少し大きい．u'/U_∞，w'/U_∞(図3.D.E)は境界層内でターゲットAとの隔たりが大きい．無次元レイノルズ応力$-\overline{uw}/U_\infty^2$（図3.C）はかなり差があるが$-\overline{uw}/u'w'$（図3.B）は狙いどおりレイノルズ応力が生まれ，境界層内でほぼターゲットAに一致している．乱れスケール（図3.F）はターゲットAに近い結果が得られた．擬似縦格子法の使用により，アクティブ法による境界層[2]に比べはるかに小さな渦スケールを持った乱れ特性が実現された．

また，境界層内の乱れ強度が小さいことを改善するために，擬似縦格子法にアクティブ法を併用した（図4）．下1段目はI_{tu}=46%とかなり大きな値を用いたが，図3.Dに示すように乱れ強度をそれほど増加できなかった．その反面レイノルズ応力が小さくなる現象が目立った．しかし，アクティブ法を併用しても等方性（図3.G）はよく，脈動的ではないことが分かった．いずれの擬似縦格子法でもアクティブ法に比べるとはるかに動的特性の傾向はターゲットAに近づいた．しかし乱れ強度は境界層内でターゲットAにはるかに及ばない．

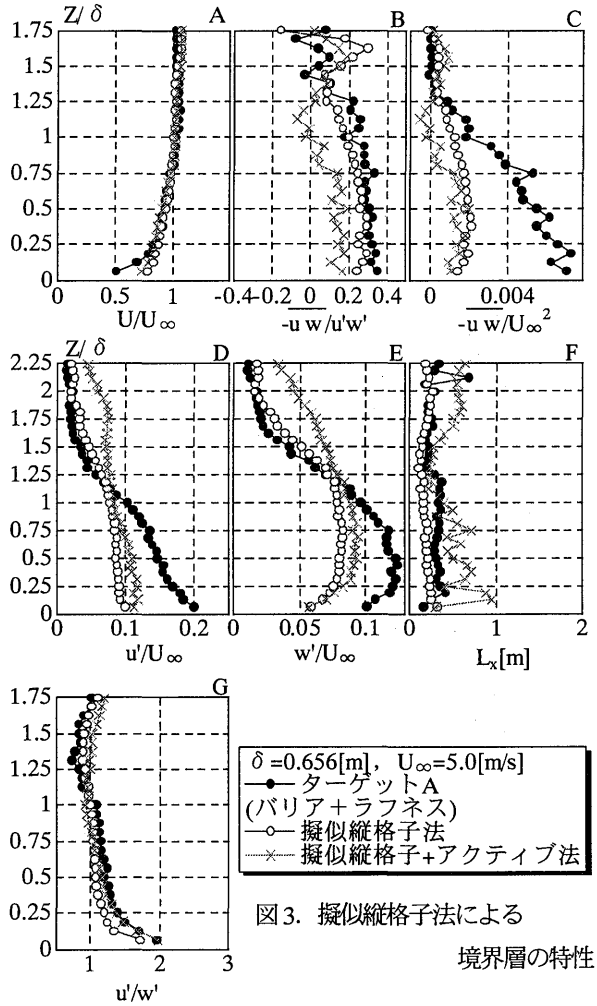


図3．擬似縦格子法による境界層の特性

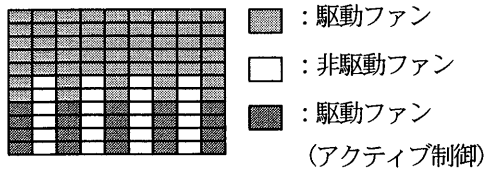


図4．擬似縦格子法とアクティブ法の組み合わせ

ターゲットAの境界層をもたらす要素のラフネスとバリアのうちラフネスの効果は床面の比較的近傍に限定されるようである．従ってラフネスの効果をマルチファンのみで再現させることは擬似縦格子法やアクティブ法を使っても容易ではないと考え，第一段階としてラフネスを省略し，バリアのみにより生成される境界層を生成し，これを改めてターゲットB（図6~図11）とした．

4．逆回転ファンを用いたバリア後方の境界層の再現

4．1　入力信号の決定

アクティブ法のような動的な変動は与えず，定常信号を入力し静的に気流変動を生成した．入力信号は図5のようにした．下から2段目横一列の入力信号をU_{tar}=8.0m/sにしたのは，流量を保ちつつ強い剪断をつくるためである．この方法では，ターゲットBの計測地点X/M_Z=42.7より近いX/M_Z=30.5を計測地点とした．鉛直方向は境界層厚さδ=65.6cmで無次元化した．

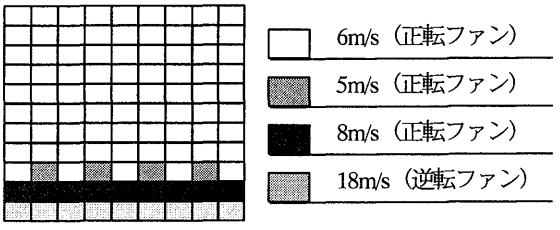


図5．逆転ファンを用いた入力信号

4．2　平均風速プロファイル

図6にそれぞれの平均風速の鉛直方向分布を示す．バリアのみでの境界層（ターゲットB）はバリアとラフネスを組み合わせた境界層（ターゲットA）（n=1/6.5）より，“太った”分布をとる．ターゲットBの境界層厚さδ=65.6cm，ベキ指数はn=1/13であった．この値を実際の大気境界層で考えると粗度がほとんどない滑らかな地形での境界層となる．

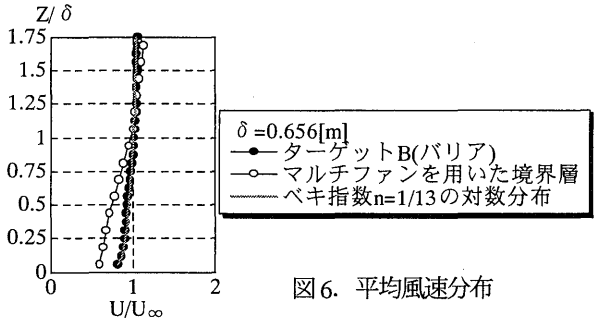


図6．平均風速分布

マルチファンで作り出した境界層はZ/δ=1より低層でターゲットBとの隔たりがある．この差を埋めようと様々な風速パターンを試みたが，他の乱流特性がターゲットBから大きく逸脱する傾向があり，これら特性を犠牲にしてまで平均風速分布を一致させることはしなかった．逆転ファンの吸い込み量を較正すれば改善できるかもしれない．較正ができれば測定部に流れ込む流量がわかり，剪断勾配も決まる．そうすれば風速プロファイルや乱流特性も試行錯誤でなくある程度は理論的に見積もられよう．しかし，複数ファンを隣接して同時運転することによる干渉作用が大きい状況では較正の意味があまりなく較正は行なっていない．従って本実験では逆転ファンに18m/sの命令信号を与えているが実際の吸い込み量は不明である．

4．3　乱れ強度

図7に乱れ強度の鉛直方向分布$u'/U(z)$，u'/U_∞，w'/U_∞を示す．マルチファンによる境界層の$u'/U(z)$はZ/δ=0.75より低層でターゲットBよりも大きな値が見られる．u'/U_∞に注目するとターゲットBはほぼ実地観測[5]の結果に近い値がでている．実際の大気乱流境界層を風洞中で模擬するためには上層でも強い乱れ強度を持った乱流場が要求され，このターゲットは定性的に妥当である．$u'/U(z)$，u'/U_∞はターゲットBによい一致を示した．w'/U_∞はZ/δ=0.5でピークが見られ，床面近傍で小さくなっている．床面近傍では平均風速が小さいことに加えて，床面の存在により特に鉛直方向の速度変動が抑えられるためである．

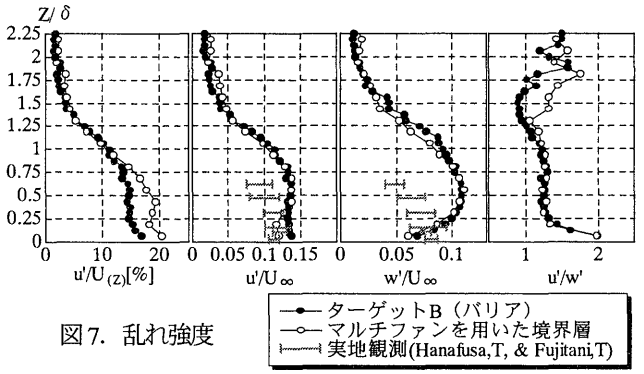


図7．乱れ強度

u'/w'の鉛直分布を図7に示す．床面近傍では床面の存在によって鉛直方向の変動が抑えられるため，主流方向の変動が目立ちu'/w'の値が大きくなっている．床面近傍を除いて境界層内ではほぼ一定のu'/w'=1.3を保っておりかなり等方的な乱流になっているようである．マルチファンによるu'/w'の分布はターゲットBの分布とほぼ一致している．実測では粗度の影響が強く高度もまちまちであるがTeunissenはu'/w'=1.25を，Counihanはu'/w'=1.3を適当としている．

マルチファンによる境界層もこれらに相当する値となっている.

4．4　乱れスケール

風洞実験で大気境界層をシミュレートするためには，単に平均風速や乱れ強度，レイノルズ応力分布のみでなく，乱れスケールの分布や実際の大気境界層のスケールと相似的に一致させることが必要である．乱れスケールは乱流場の大規模運動を規定するスケールである．佐々らによる実地観測結果ではL_x=47m という値も報告されており，できるだけ大きな乱れスケールを有する乱流場を風洞内に形成することは重要である.

本実験ではターゲット B の境界層のスケールを目標とした．乱れスケールL_xの鉛直分布を図8に示す．ターゲットBは床面近傍から境界層にわたって L_x=0.25~0.4m のあいだの値をとっている．マルチファンによる境界層のL_xはターゲットBにきわめて良く一致していることがわかる．境界層の外縁 Z/δ=1.25 の少し外側まで乱れスケールが増加している現象もよく再現されている．J. Counihan[9]による中立状態の大気境界層の計測では境界層厚さ δ=600m で境界層内の乱れスケールがL_x=200~300m というデータがある．境界層厚さと乱れスケールの比を見るとL_x/δ=1/3~1/2 となる．本実験も同様に算出するとL_x/δ=1/2.6~1/1.65 となり，同程度の結果が得られた.

また，図8に示しているX方向とZ方向の乱れスケールの比L_x/L_zはほぼターゲット B に一致している．一様等方性乱流ではL_x/L_z=2 となる．マルチファンによる境界層はほぼ全域にわたりL_x/L_z=2 に近い値となった.

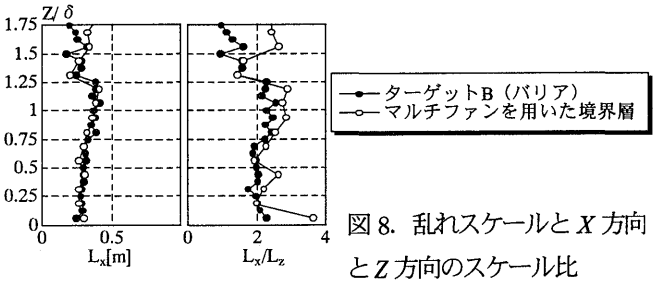


図8．乱れスケールとX方向とZ方向のスケール比

4．5　レイノルズ応力

大気拡散等の問題を議論するためには，レイノルズ応力の特性は特に重要である．本研究で得られた無次元レイノルズ応力の鉛直方向分布を図9に示す．大気境界層は下層の接地層（成層の状態によるが，例えば地表から数10m程度）では高さ方向にレイノルズ応力がほぼ一定値を有し，constant flux layer と呼ばれる．ターゲット B の Z/δ=0.5~1 はレイノルズ応力がほぼ一定で constant layer に相当する．マルチファンにより作り出した境界層はターゲット B の特徴を良く再現している.

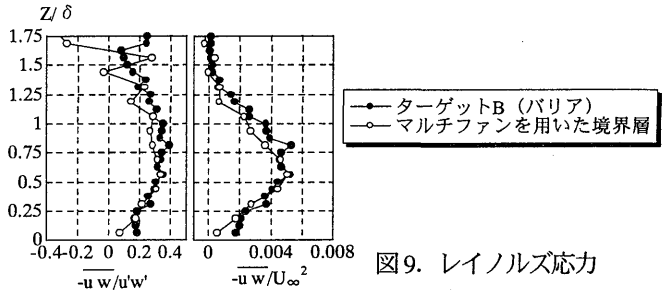


図9．レイノルズ応力

4．6　乱流レイノルズ数

大気乱流のR_λは10^3以上とされているのに対し，通常の格子乱流場の R_λは数十程度であり，乱流格子場中で大気拡散現象等の実験を行なっても正確な予測を行なうことはできない．したがって，大気乱流との相似性を示す重要なパラメータである．図10は乱流レイノルズ数R_λの鉛直方向分布である．マルチファンによるR_λはターゲットBのR_λを下まわるが分布の様子はよく似ている．R_λ=500~700 は実際の大気境界層の値には及ばないものの，逆回転ファンを用いる方法によりかなり大きなR_λが得られたことは注目に値する.

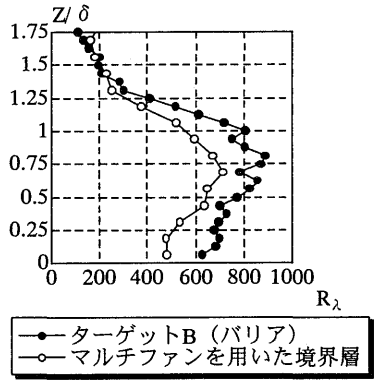


図10．乱流レイノルズ数R_λ

4．7　パワースペクトル

図11にバリアによる境界層（ターゲット B）とマルチファンによる境界層のZ/δ=0.56 における u 成分と w 成分のパワースペクトルを示す．バリアによる境界層とマルチファンによる境界層ともに乱流レイノルズ数R_λ=200 以上の値を示していることから Kolmogorov の-5/3 乗則に従う領域が有意に見られる．また，全周波数帯でマルチファンによる境界層の u 成分，w 成分のパワースペクトルはバリアによる境界層のそれとよく一致している．すなわち，乱れの高周波成分で

も特性がよく一致した.

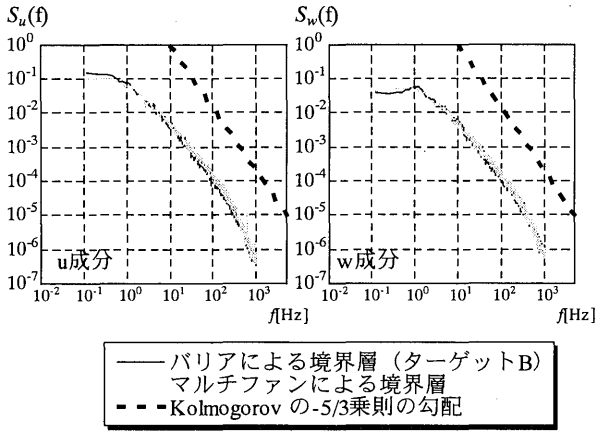


図11. パワースペクトル

5. マルチファンとラフネスによる境界層

さらにバリア下流の境界層（ターゲットB）にラフネスを加えてターゲットとした. マルチファンによるバリア下流の乱流境界層の再現では, 平均風速分布以外の特性は良く再現できた. 従ってラフネスを組み合わせることでバリアとラフネスによる境界層（ターゲットA）の特性に近い特性が得られるのではないかと考えた. ラフネスは以前の研究[2]で用いた, 設置時の高さが約2.5cmの鎖を吹き出し口から流れ方向に対して直角に30cm間隔で床面に蛇行させX=0~6mまで設置した. 計測はX/M_Z=30.5の風洞中央でZ方向にトラバースした.

図12にマルチファンとラフネスを組み合わせた境界層の特性とターゲットAとの比較を示す. マルチファンとラフネスを組み合わせた境界層の平均風速（図12.A）にはラフネスの効果が有意に見られる. 無次元レイノルズ応力（図12.F.G）の$-\overline{uw}/u'w'$はラフネスの効果により0.3に近づいている. $-\overline{uw}/U_\infty^2$はラフネスの効果により$Z/\delta$=0.45より下層でバリアとラフネスによる境界層（ターゲットA）の値に近づいている. 乱れ強度の特性（図12.B.C.D）はラフネスによって有意な改善が見られた.

ラフネスの効果は床面近傍で見られるものの無次元レイノルズ応力$-\overline{uw}/U_\infty^2$では隔たりが依然大きい. バリアとラフネスによる境界層(ターゲットA)の計測はX=7.0mで行い, ラフネス設置範囲がバリア直後X=1.0mからX=7.0mまで計6.0mあるが, マルチファンによる境界層にラフネスを加えた計測はX=5.0mで行い, ラフネス設置範囲は吹き出し直後X=0mからX=5.0mまで計5.0mであった. このような流下距離の違いや, マルチファンによる境界層の平均風速がバリアによる境界層（ターゲットB）より低く勾配がゆるやかなことなどが影響していると思われる.

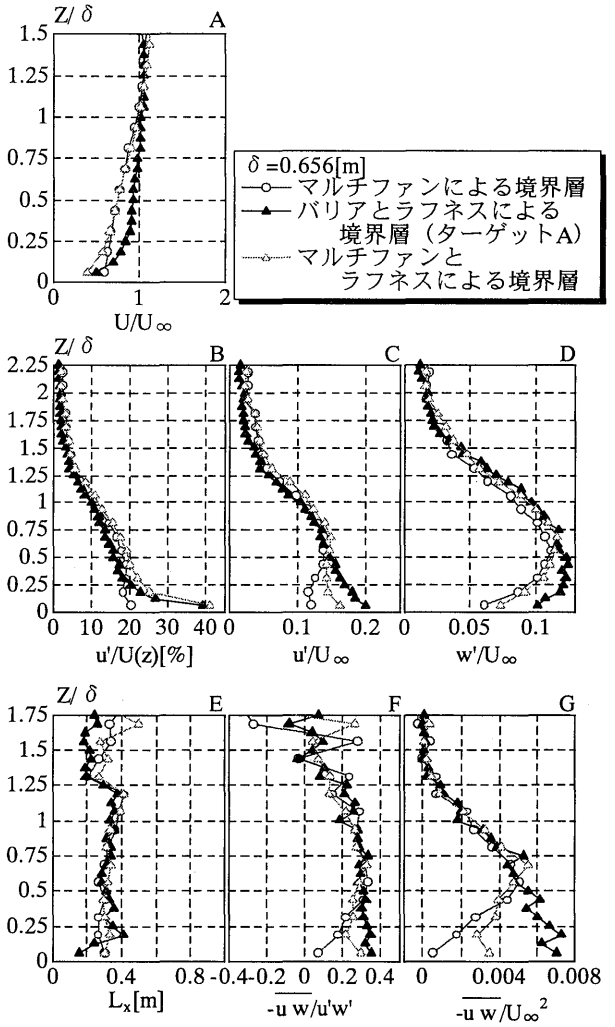


図12. マルチファンとラフネスによる境界層の特性

6. 結論

1) 擬似縦格子法とアクティブ法を用いてのバリアとラフネスによる境界層（ターゲットA）の再現

- 擬似縦格子法による境界層では乱れ強度はターゲットAより小さい. 乱れスケールL_xと無次元レイノルズ応力$-\overline{uw}/u'w'$はターゲットAに近い値を示したが擬似縦格子法にアクティブ法を併用しても乱れ強度をそれほど増加できず, その反面レイノルズ応力が小さくなった.

2) 逆転ファンを用いたマルチファンによるバリア下流に形成される境界層（ターゲットB）の再現

- 平均風速はターゲットBより低い風速値となった.
- 乱れ強度やu'/w'はターゲットBとほぼ一致した. 床面

近傍を除いて境界層内ではほぼ一定のu'/w' =1.3 を保っており接地境界層の実測に相当する値となった.

- 乱れスケールL_xはターゲットBによい一致を示し，中立状態の大気境界層に相当する値となった.
- 無次元レイノルズ応力$-\overline{uw}/u'w'$，$-\overline{uw}/U_\infty^2$はターゲットBの特徴を良く再現した.
- 乱流レイノルズ数R_λはターゲットBには及ばなかったが同様の傾向が見られ，R_λ=500~700の値となった.
- Z/δ=0.56におけるパワースペクトルはu成分とw成分ともにターゲットBによい一致を示した.

3) 2) のマルチファンによる方法にラフネスを加えてのターゲットAの境界層の再現

- 境界層近くで乱流特性の有意な改善が見られた.

参考文献

1) 義岡：一様アクティブ生成法と擬似格子法の比較，宮崎大学大学院工学研究科修士論文(2002).

2) 長友，小園，加藤：マルチファン型風洞による大気境界層の模擬生成，風工学シンポジウム(2002)107-112.

3) 加藤，小園，宮城：マルチファン型風洞による大気境界層生成の試み，日本機械学会鹿児島地方講演会(2003)191-192.

4) 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.

5) Hanafusa, T. & Fujitani, T.：Meteorology and Geophysics, 32-1 (1981) 19-35.

6) J. Counihan：Adiabatic atmospheric boundary layers : a review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment, 9 (1975) 871-905.