速度成層形成装置の設計製作および流れ場の評価

小杉 淳* 榊田洋輔**

Design and making of the velocity stratification generator and estimates of the flow field.

Atsushi KOSUGI Yousuke SAKAKIDA

Abstract－ Design and manufactured of the velocity stratification generator for wind tunnel experiments was carried out. Champange type that it was divide test section into several flow channels in stratification direction and flow speed controlled by insertion resistance each channels was adopted velocity stratification generator. 7 kinds of perforated plates were used as resistance items. As a result of forming uniform turbulent shear flow field by these combining perforated plates, it was confirmed that mean velocity gradient profile can be controlled arbitrarily. So that, by combining velocity stratification generator with active turbulence generator, it becomes possible to made to operate as a shear turbulent generator.

Key Words **:** *shear flow, velocity stratified flow, wind tunnel, turbulence generator*

1. 緒言

主流の鉛直・水平方向に速度差（速度勾配）のある流れをせん断流れまたは速度成層流れという。このような流れは大気や海洋などの自然界の流れや，身近に存在するエアコンなどの家電製品や各種工学装置内の流れなど様々な流れの中に見られる。このためせん断流れに関する流体現象やせん断流れの性質そのものを調べることは工学的・物理的に重要である。

著者らの研究室では現在，動的な乱流発生装置(1)を装着した風洞を使用し，大気拡散現象に関する研究(2)(3)を行っているが，今後その発展として一様せん断流れや大気境界層中などで観測される，べき乗則速度分布(4)などの様々なせん断流れ場における拡散現象についても実験を行っていく計画がある。一般にモデル実験として風洞や水槽を用いてせん断流れの実験を行う場合には，任意の速度分布を測定胴内に形成できる速度成層形成装置が用いられる。しかし，通常の速度成層形成装置では試行錯誤的に任意の平均速度分布を得ることは可能であるが，乱流現象に直接寄与する乱れ強度分布の調整は一般的に難しい。このことは特に大気境界層内の流体現象などを再現する場合に問題となり，平均速度に加え乱れ強度についても成層方向に任意の分布を形成できる実験装置が必要となる。関下ら(5)は蒔田式の動的な乱流発生装置と Champegne 式(6)の速度成層形成装置を組み合わせることで，風洞内に任意の平均速度および乱れ強度分布を有する流れ場を形成することに成功し，この中において大気境界層内の乱流特性を詳細に調べ，大気境界層の実験的シミュレーションの可能性について報告している。そこで本研究では，関下らの方法と同様な手法を用い様々なせん断流れの場を風洞内に形成できる速度成層形成装置の設計および製作を行い，形成される一様せん断乱流場の評価を行うことを目的とした。

2. 流れ場に速度成層を形成する方法

風洞実験において速度成層流れを形成する場合，一般的に風洞測定胴の上流に速度成層形成部が設けられ

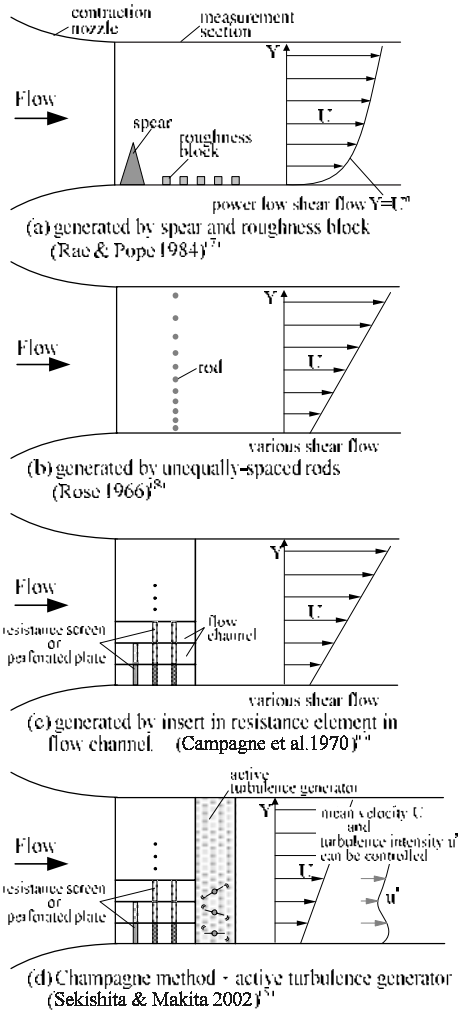


Fig.1 Technical methods of velocity stratification flow field.

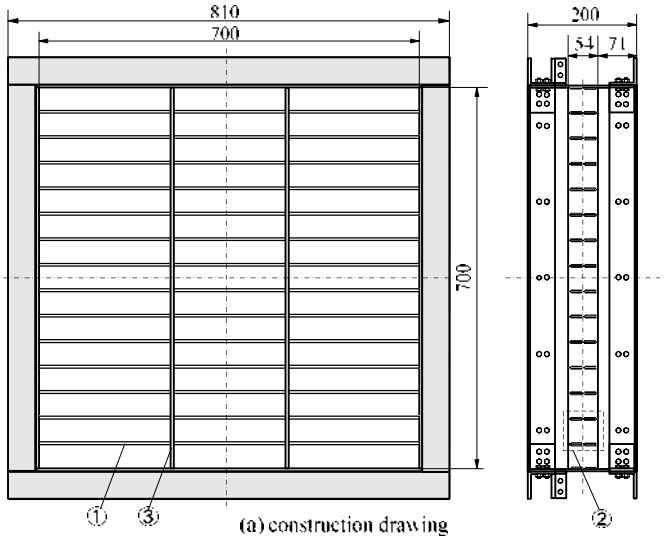
＊ 釧路高専 機械工学科
＊＊ 株式会社フルヤ金属(H20 年度卒業生)

る。Fig.1 に代表的な速度成層の形成手法を示した。図中(a)はスパイヤーと呼ばれる三角錐の抵抗体と粗度を組み合わせて測定胴上流の床面に配置し，それらより発生する厚い乱流境界層を利用して大気境界層に類似したべき乗速度勾配を有する流れ場を形成する手法[7]である。主に都市部における風環境問題に関する実験や汚染物質の拡散現象などのシミュレーション実験を行う際に用いられる。一方，一様せん断流れ場を形成する手法には，図中(b)に示す不等間隔格子を用いる方法[7]や，(c)に示す流路を成層の方向に分割しその各流路に抵抗体を挿入して調整する方法[5]，他に(c)の方法に準じた手法として抵抗体として開口比の異なる２枚の板を重ね合わせこれの重なり状態によって各流路の流量を調整する方法などが知られている[7]。(b)の方法は，丸棒を主流鉛直方向に不等間隔に複数配置して，そこを通過する流体に抵抗を与えて平均速度分布の勾配を形成するもので，設備自体が簡単なため多くのせん断流に関する実験に用いられている。しかし，乱れ強度と渦スケールが主流鉛直方向に一様にならないという欠点がある。(c)の方法は流路を成層方向に数段に分割して各段に開口比の異なる抵抗体を挿入することで，各段の流路における流体抵抗値に変化を持たせ任意の平均速度分布の勾配を得る方法である。本研究では前述したように平均速度分布に加え，動的な乱流発生装置の組合せにより乱れ強度分布についても任意の設定が行えるようにする必要があるため(d)に示す方法を採用し，速度成層形成部には(c)の Champagne 方式を適用することとした。

３．風洞の設計及び製作

３－１．設計仕様　速度成層形成装置の設計にあたり以下の項目を基本仕様とした。(1)速度勾配を形成する方法は Champagne 式とする。(2)流路断面寸法は速度成層形成装置の上下流に設置されるノズルおよび乱流発生装置と同じ 700×700mm とし，流れ方向の長さは 3 つの抵抗体を挿入することを考慮して 200mm とする。(3)流路の分割数は乱流発生装置の攪拌翼回転軸格子と同じく鉛直方向に 15 段とする（一段当たりの流路高さは 46.67mm）。(4)各流路は流れ方向に 200mm の長さを持つ仕切板で区切られ，この各流路にはその流れ方向に抵抗体を最大で 3 枚挿入できるスロット部を設ける。 (5)抵抗体には様々な開口比が用意され入手し易いアルミ製の有孔板を金属製のフレームに固定して用いる。

３－２．設計及び製作　仕様をもとに設計・製作を行った速度成層形成装置の全体図を Fig.2(a)と(b)に示す。装置本体の形成は上下左右壁板にアルミ板材(t=5,



(b) installation of velocity stratification generator on wind tunnel

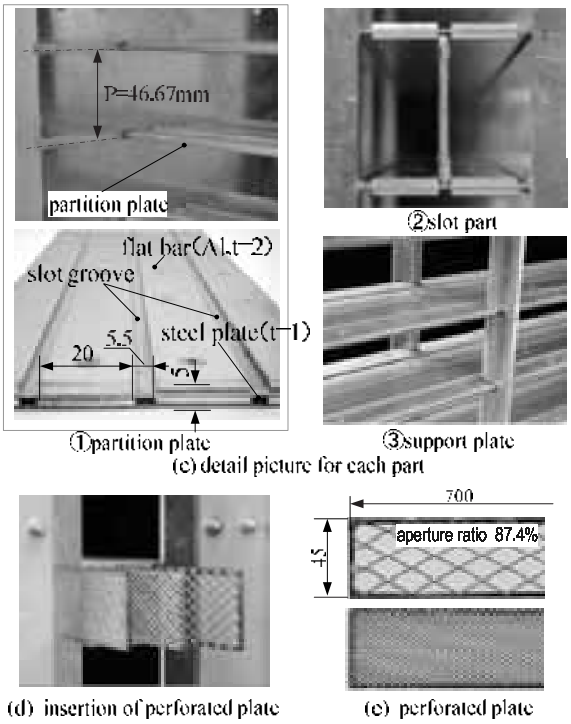


Fig.2 The details of manufactured velocity stratification apparatus.

AL6062)を用い，その外側に風洞ノズルおよび測定胴との接続を行うフランジ部(アルミアングル材：4×50×50)を設けている.アルミ板材およびアングル材はフライス盤等により規定寸法±0.2mm 程度に仕上げられ組立てられた。各部材の接合は溶接ではひずみが生じる恐れがあるため，ボルトとナットによる接合とした。

３－３．　流路分割部及びスロット部　流路分割部には厚さ 1mm の鉄板(SS 材)を基板として，その上下に抵抗体挿入のためのスロット溝を形成する厚さ 2mm のアルミフラットバー(幅 20mm)を取り付けた流路仕切板(Fig.2(c)－①)を用いた。抵抗体は流路仕切板上にフラットバーにより作られる 3 つのスロット溝(幅 5.5mm)から成るスロット部を通し挿入することができる((c)－②)。また流路仕切板の上下流端は流れに与える影響を可能な限り小さく抑えるため適度なR加工を施した。流路仕切板の装置内部への設置方法は，装置の左右側壁にマシニングセンタでピッチ 46.67mm の精密な溝加工を施し，これにはめ込む形で固定した((c)－①)。また流路仕切板のスパン方向のたわみを防止するため，流路仕切板の上下流に各々2 ヶ所支持棒を設けた((c)－③)。

３－４．抵抗体　抵抗体には金網やパンチングメタルなど様々なものが利用できるが，加工のし易さと開口率の種類が豊富という理由から本研究では抵抗体としてアルミ製の有孔板(エキスパンドメタル)を用いた。ただし，そのままでは線径が細く剛性がないため，本制作では真鍮パイプ(φ3)を高さ×幅＝45×700mm のフレームとして加工し，これにエキスパンドメタルを張付けて成形した(Fig.2(d))。このほか，速度微調整用の抵抗体としてステンレスバネ鋼(φ0.4)を 2 本スパン方向に取り付けた抵抗体の作成を行い，合計 7 種類の開口率の異なる抵抗体を作成した(開口率はFig.4参照)。

４．速度成層形成装置の評価実験

４－１．実験項目　本研究で製作した速度成層装置によりせん断流れが実現できるか確認するため以下の項目について評価実験を行った：①一様せん断乱流場における平均速度分布・乱れ強度分布およびその下流方向変化。②風路断面内および流れ方向の乱れの速度変動スペクトルの確認。

４－２.実験装置および方法　Fig.3 に実験装置の概要を示す。風洞は 0.7×0.7×5m³ の測定部を有する吹出し型で速度成層形成装置および乱流発生装置は測定胴の上流に設置されている。本実験では格子乱流場(Grid turbulence)および乱流発生装置を作動させた励起乱流場(Excited turbulence)において挿入する抵抗体の組み合わせを調整することで各々2 種類の異なる平均速度勾配を持つせん断乱流場を形成した．なお，乱流発生装置の攪拌翼の平均振れ角は 20° で一定とした。主流流速は測定胴断面中心での流速 Uc が 5m/s になるように設定し，流れ場の計測は乱流場の減衰が落ち着きほぼ平衡状態となる X/M=50（M：乱流発生装置のメッシュサイズ=46.67mm)を考慮して X/M=40~80 の範囲で行った。流れ場の測定にはＩ型プローブと定温度型熱線風速計(C.T.A.)を使用し，その出力は図中 (b) に示される各機器に入力されＹ方向平均速度分布や乱れ強度および乱流場の速度変動スペクトルを算出した。

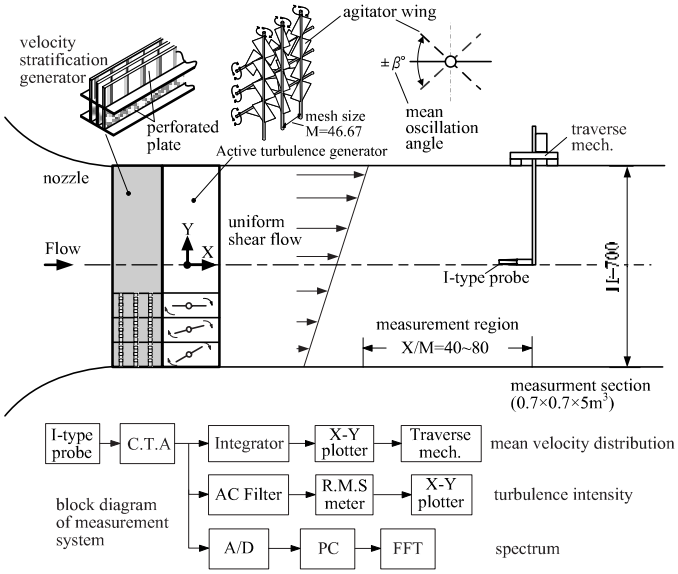


Fig.3 Experimental set-up and　measurement systems.

５．評価結果および考察

５－１．一様せん断乱流場の形成　有孔板挿入による速度の変化はその上下に配される有孔板との干渉による非線形現象となるため，有孔板の組み合わせでどのような速度分布が得られるかは理論的予測ができない。このため本研究では用意した 7 種類の抵抗体を試行錯誤的に組み合わせることで一様せん断乱流場の形成を試みた。Fig.4 は各乱流場において形成した一様せん断乱流場の平均速度勾配(dU/dY)の結果と使用した抵抗体の挿入状況を示したものである。本来は両乱流場で同一の速度勾配が得られるよう調整すべきであるが，用意した抵抗体の種類と枚数が限られたため実現できず，それぞれの乱流場で適当なこう配を持つ一様せん断乱流場を形成した。実験の結果，格子乱流場では平均速度勾配 $dU/dY(s^{-1})=3.5$(Case2)と 5.1(Case3)，また励起乱流場では 1.5(Case5)と 4.1(Case6)程度であることが確認された。なお，図中の Case1 と Case4 は各々比較実験として行った抵抗体を挿入していない一様乱流場を意味する。

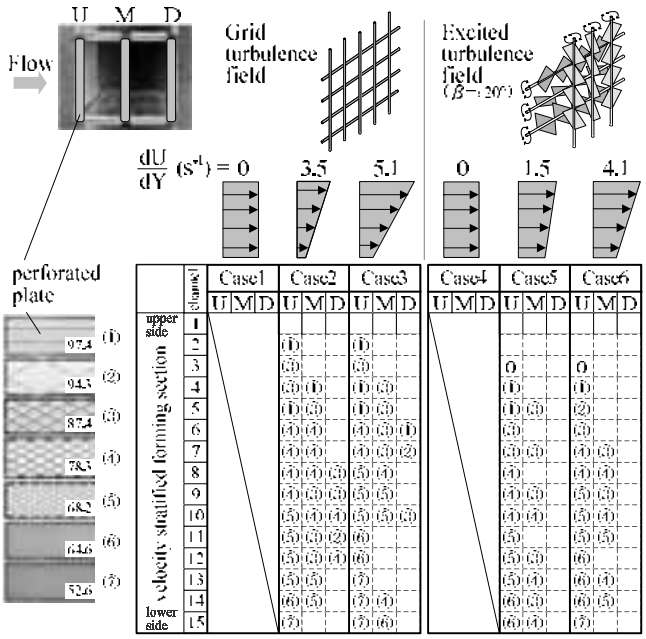


Fig.4 Results of mean velocity gradient for each uniform shear turbulent flow field and the insertion condition of perforated plate.

５－２．平均速度分布・乱れ強度分布　Fig.5 に形成された一様せん断乱流場の平均流速（U/Uc）と乱れ強度（u'/U，u'：変動速度の r.m.s 値）の Y 方向分布を示す。いずれの乱流場も多少のばらつきはあるが測定胴の鉛直方向長さの約 80%（Y/H=−0.4～0.4）の範囲で一様せん断流れが実現できている．また，乱れ強度はせん断流れの方が速度勾配に起因するレイノルズ応力が生じる分増加している．しかし，分布には一様性は認められず，特に Case3 では不均一性が大きい。これは流体運動を記述するナビエストークス方程式中で乱れの生成項が$-\overline{uv}$(dU/dY)（但し u,v：主流及び鉛直方向の変動流速）で表されることから，速度勾配の非一様性が主たる原因と考えられる。一様せん断流れに関する理論的研究との比較実験を行う上ではこの非一様性は大きいため，今後より精密な速度勾配を作り流れ場を評価する必要がある。なお，励起乱流場における速度勾配の不均一性については，乱流発生装置の平均迎え角が駆動モータの脱調により流れ場の計測中に若干変化してしまいこれが影響を与えている可能性もある。

５－３．速度勾配の下流変化　形成される一様せん断乱流場の速度勾配が下流まで維持されるか確認を行った。Fig.5 は Case3 および Case6 について形成された速度勾配の下流方向変化を示したものである。平均速度勾配の非一様性が比較的大きな Case3 の場合は風路中心部を除き下流への変化が若干大きいが，速度勾配の一様性が比較的良好な Case6 では測定範囲内でほぼ同じ速度勾配を維持できている。この傾向は他の速度勾配でも同じであり，このことからも速度勾配を下流方向へ維持するためにはより一様なせん断状態を確立する必要があると考えられる。

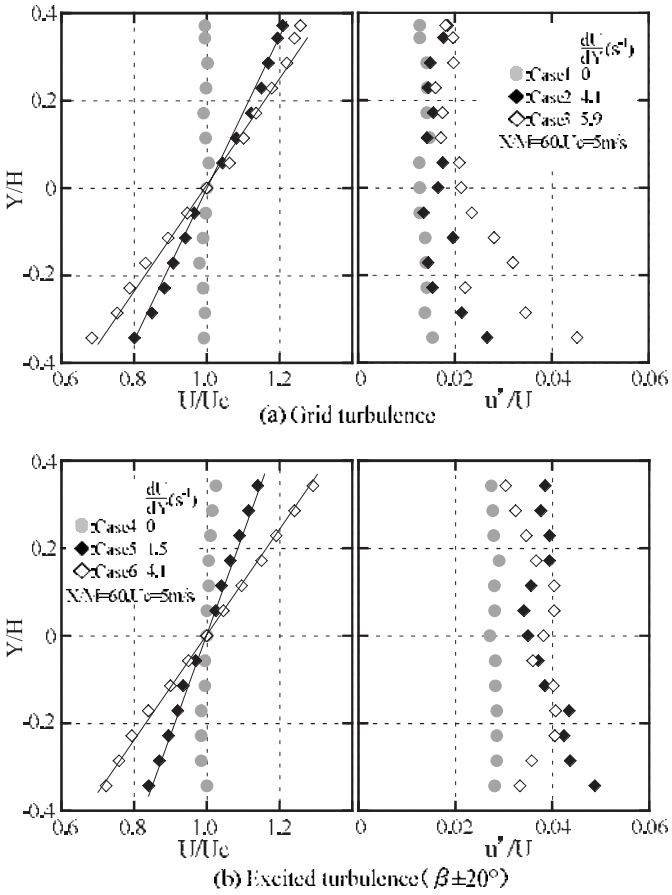


Fig.5 Vertical distribution of mean velocity and turbulent intensity in the each turbulent flow field (X/M=60).

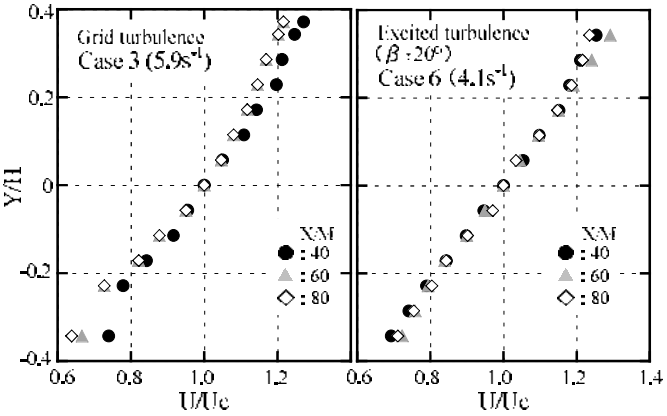


Fig.6 Downstream variation of the mean velocity distribution.

５－４．速度変動スペクトル　速度成層装置内部に挿入した有孔板により気流の速度変動に特定の卓越した周波数成分が存在しないか確認するため変動速度のスペクトルを求めた。Fig.7(a)(b)に X/M=60 における解析結果を示す．なお，測定は Y 方向位置によって挿入する有孔版の種類が異なるため Y/H= −0.75,

0，+0.75 の 3 ヶ所で行った。各乱流場とも乱れの増加によるエネルギーレベルの変化は見られるが，比較のため示した有孔板を挿入していない場合のスペクトル(Case1,Case4)とほぼ同じように特に目立つ卓越周波数は認められず，本製作で用いた有孔版でせん断流れを形成しても問題ないことが確認できる。

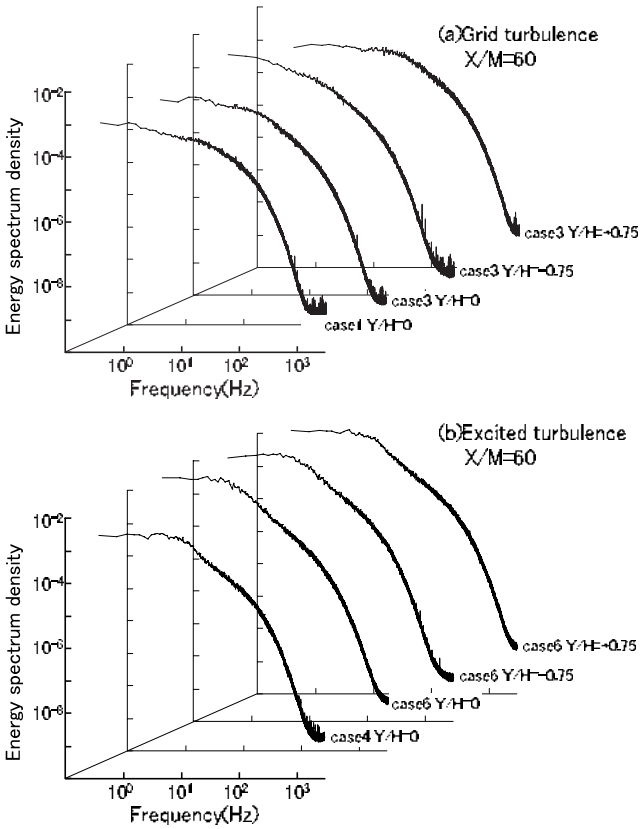


Fig.7 The comparison of velocity fluctuation energy spectrum of the each turbulent flow field.

６．結論

風洞実験用の速度成層形成装置の設計・製作および流れ場の評価を行い以下の結論を得た。

(1) 測定胴の鉛直方向長さの約 80%の範囲で比較的良好な一様せん断を有する流れ場が形成できた。

(2) 乱れ強度分布はバラツキが比較的大きく，流体運動を記述するナビエ・ストークスの方程式中の乱れの生成項より考えると，速度勾配の非一様性に起因すると思われるため，今後より精密な速度分布の調整を行い再度評価していく必要がある。ただし，励起乱流場においては乱流発生装置の攪拌翼回転軸を駆動するモータの制御不良も考えられるため，これについても今後検討していく必要がある。

(3) 速度勾配の一様性が良好であれば速度勾配の下流方向変化は少ない。

(4) 乱流場の速度変動スペクトルには有孔板による卓越したピーク等は見られないことから選定した抵抗体を組み合わせて実験を行っても問題がないことが確認できた。

謝辞　本研究を進めるにあたり，技術室の的野専門職員には多くの助言とご協力をいただいた。ここに記し感謝の意を表する。

参考文献

(1) Makita,H, Fluid Dynamics Research,8 (1991),53-64
(2) 小杉他 2 名,機構論(2000),No.002-1
(3) 小杉他 1 名, 機構論(2007),OS10-1,1001
(4) Davenport, A.G. : Proc. ASCE 86, Spr 5（1969）
(5) 関下他 2 名,機論 B 68-665（2002）55.
(6) Champagne, F. H. et.al., J. Fluid Mech. 41（1970）,81-139
(7) Rae, W.H, & Pope, A, Low-Speed Wind Tunnel Testing (1984), John Wiley & Sons.
(8) Rose, W.G., J. Fluid Mech., 25 (1966), 97