

高レイノルズ数乱流場生成ツールとしてのマルチファン型風洞

佐々浩司（高知大理） 宮城弘守（宮崎大工）

Multi-fan wind tunnel as a tool generating high Reynolds number turbulence fields

K. Sassa

Dept. of Natural Environmental Science, Kochi University

H. Miyagi

Dept. of Applied Physics, Miyazaki University

ABSTRACT

We tried to generate quasi-isotropic homogeneous turbulence fields with high Reynolds numbers in the multi-fan wind tunnel. The fans making flow and counter flow were arranged like a checkered pattern and they were driven by a fluctuating signal transformed from continuous spectra with $-5/3$ slope. The Reynolds number of the resultant turbulence fields ranged from 330 to 560. The turbulence fields realized in the multi-fan wind tunnel are expected to be very useful to study high Reynolds number turbulence, though their uniformity and isotropy were not so good.

Key Words: turbulence, Reynolds number, multi-fan wind tunnel

1. 序論

一様等方性乱流は、エネルギー生成の欠落した不完全な乱流であるが、乱流の本質である非線形性によって形成される普遍的な構造を理解する上で最もシンプルで有用な乱流場でもあり、今もなお高レイノルズ数の一様等方性乱流場のデータを得ることは重要である。世界トップ5にランクされる地球シミュレータを用いたDNSでは $R_\lambda \sim 1200$ の一様等方性乱流場を実現している¹⁾が、高精度の解を得るにはまだ格子点が不十分であり、 $R_\lambda > 1000$ となる一様等方性乱流を実現できる風洞に期待がかかる。そのような挑戦の例として最も成功しているのは動的乱流発生装置²⁾であり、すでに米国にて、 $R_\lambda \sim 1200$ の乱流場が実現されている³⁾。しかし、国内で $R_\lambda > 1000$ を実現するような動的乱流発生装置を備えた大型風洞はなく、測定部の大

きい本マルチファン型風洞に期待している。これまでの研究では、正転ファンと逆転ファンを格子状に配置する擬似格子法によって $R_\lambda \sim 500$ の準一様等方乱流場を得た^{4,5)}。ここでは、擬似格子法を基本とし、個々に位相を変えた変動風速を与えることによってさらに高レイノルズ数の一様等方性乱流場の形成を試みた結果について報告する。

2. 実験

マルチファン型風洞を図1に示す。測定部は、断面が縦1.8m横2.5m、長さ15mである。吸い込み口には図2に示すようにACサーボモータを取り付けたファンを縦11列横9列の計99個配列してお

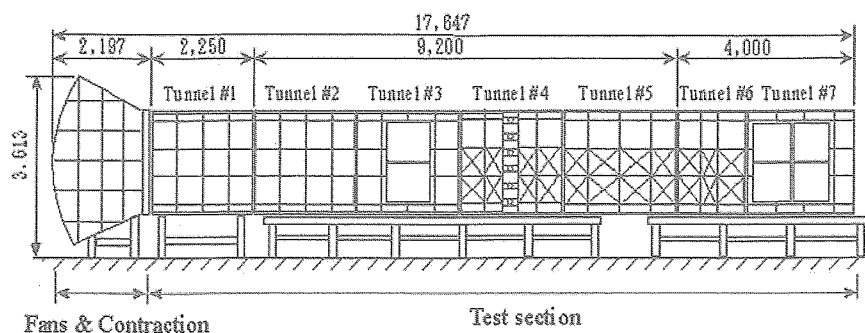


図1 マルチファン型風洞（宮崎大学工学部）

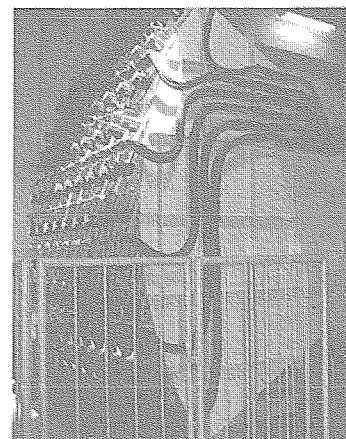


図2 吸い込み口に並ぶファン

表1 ファン設定パターン

U_{gri} (m/s)	市松格子	中市松格子	中市松格子バラ
-5 ± 5	a		
-10 ± 5	b		
-15 ± 5	c	d	e

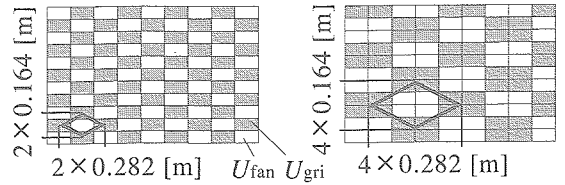
り、各ファンを独立に任意の運転命令で動作させることが可能なため測定部内に様々な流れ場を形成することができる。今回は、擬似格子パターン^{4,5)}のうち、隣り合うファンを逆転させて局所速度勾配を大きくする図3に示すような2種の市松格子パターンを基本とした。各格子パターンは図中に太線で示したような乱流格子を模擬しており、格子が作るひとつの菱形と同じ面積の正方形の一辺をメッシュサイズとすると、市松格子が $M=0.30m$ 、中市松格子が $M=0.61m$ となる。図中の白抜きダクトは吹き出し運転とし、風速を $U_{fan}=15 \pm 5$ m/sに設定した。グレーダクトは吸い込み運転である。図4は擬似格子法⁴⁾における、各風速設定値と測定部において期待される平均風速を示す。例えば、 $U_{fan}=11$ m/s、吸い込み風速 $U_{gri}=-5$ m/sと設定すると、測定部における平均風速は右下がりの線で表されるような $U=5$ m/sとなる。本実験では吸い込み風速の変動幅を ± 5 m/sとし、平均 $U_{gri}=-5, -10, -15$ m/sの3パターンで実験を行った。各ケースをまとめたものを表1に示す。平均風速は $a > b > c, d, e$ となるが、各ダクト間の速度勾配は c, d, e の3ケースが最も大きくなるものと期待できる。

風速変動は0.00305~4Hzまでの周波数帯で図5に示すようなカルマン型のスペクトルから生成した50Hz8192点(163.84秒)の変動波形(図6)を運転命令として、位相を6secずつずらして各ファンに与えることによって作った。ここでケースdは中市松格子を構成する各4つごとのファンの位相は同じに設定したもの、ケースeはすべてのファンの位相をずらしたものを表す。

計測にはKanomaxのX型熱線流速計を用い、 $X=5 \sim 12$ mの各風洞断面中心および、 $X=10$ mにおけるY, Z断面内において流れ方向および鉛直方向の速度変動 u, w を計測し、16bitA/D変換をもつデジタルレコーディングユニットに24kHzサンプルで運転命令の3~4周期分ずつ記録し、解析を行った。

3. 実験結果

図7に $X=10$ mの測定部断面内における平均風速の一様性を示す。ケースaの側壁近傍を除いてはいずれも一様性は良好であり、擬似格子法^{4,5)}に比べて混合がうまく行われていることがわかる。流れ方向については、図8に示すようにケースa, bがほぼ同様であったが、平均風速の小さいケースc, d, eは下流方向にわずかに加速した。マルチファン風洞は測定部組み替えの便宜を考えて測定部断面が一定であるため、境界層の厚い低速の実験では境界層発



(a) 市松格子 $M=S^{0.5}=0.30$ [m] (b) 中市松格子 $M=S^{0.5}=0.61$ [m]

図3 擬似格子パターン

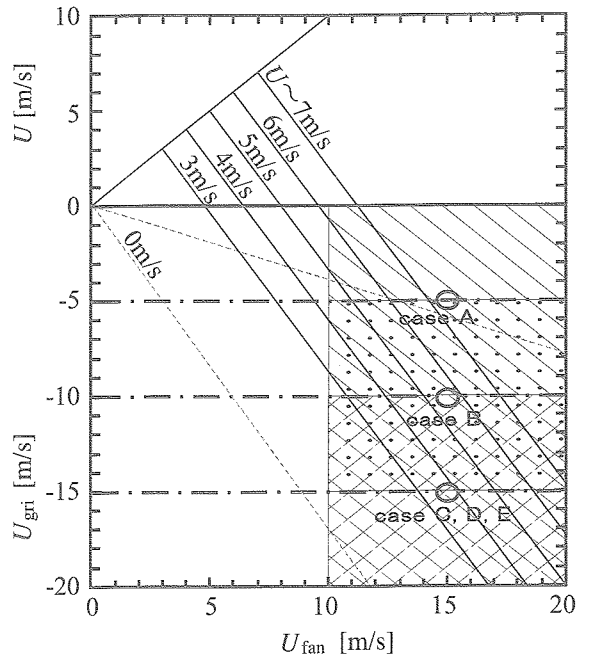


図4 送風機の運転速度と風速の設定

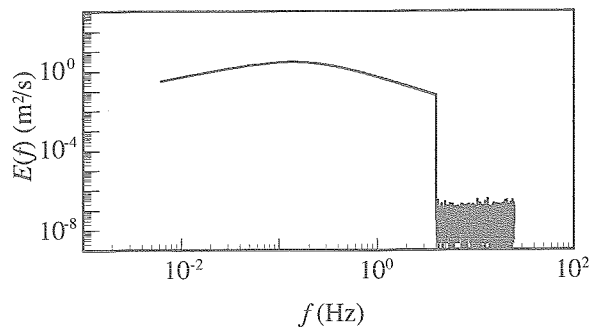


図5 ファン運転信号のスペクトル

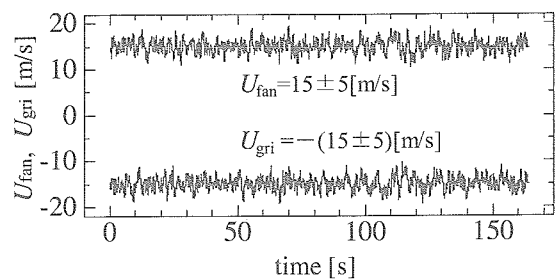


図6 ファン運転信号の波形

達に伴って断面が縮流されたものと思われる。ただし、図7に示したように断面の一様性が大きく崩れるほど境界層の発達とは顕著ではなく、極めて大きな乱流渦が側壁ぎりぎりまで運動量輸送を行っていることが伺える。

乱流変動エネルギーの減衰を図9に示す。一般的に減衰則を考える際は仮想原点を設定するが、本風洞の測定部長は中市松格子などを考えると乱流場が平衡状態に達するのに十分な長さではないため、縮流ダクト出口を原点としたまま整理している。中市松格子を用いたケース a, b, c はほぼ減衰の勾配が

流れ方向の-1乗であるが、中市松格子を用いた d, e ではやや緩やかな減衰となった。これは先述の縮流効果によって壁面との間にあらたな乱流生成が生じたためではないかと思われる。

主流方向乱流変動成分と鉛直方向乱流変動成分との比の流れ方向変化を図10に示す。いずれも下流に向けて等方化している様子がわかるが、中市松格子を用いたケース d, e では $X=8\text{ m}$ までに等方化が終了し、最下流まで $u'/w' = 1.3$ 程度が維持されている。これは、本方式における乱流生成法によって達成し得る等方度の限界を示しているように

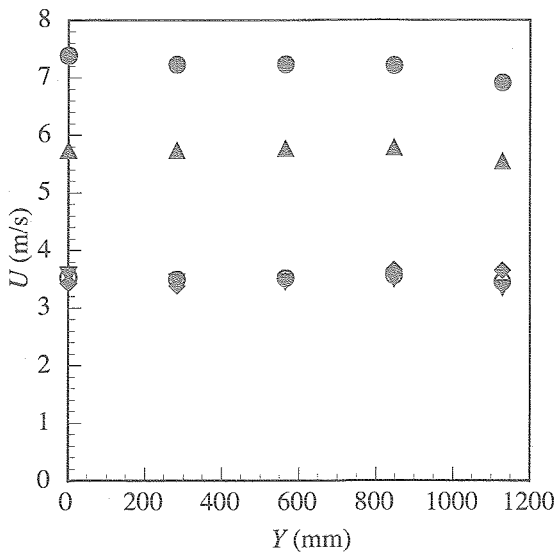


図7 平均風速の一様性($X=10\text{ m}$)
●: a, ▲: b, ◆: c, ▼: d, ○: e

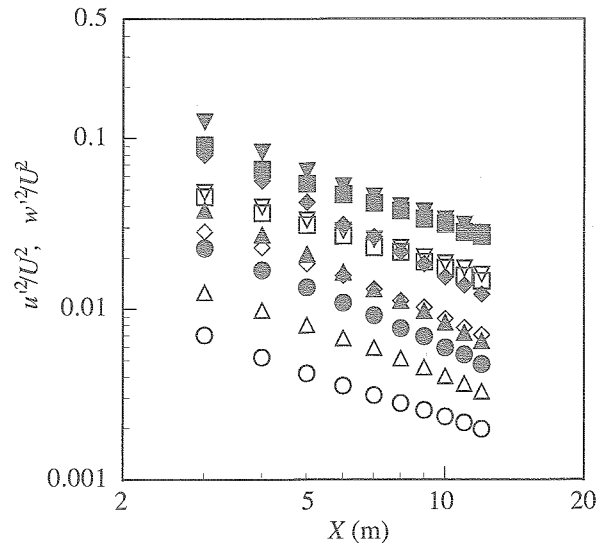


図9 乱流エネルギーの減衰

●: a u' , ▲: b u' , ◆: c u' , ▼: d u' , ■: e u'
○: a w' , △: b w' , ◇: c w' , ▽: d w' , □: e w'

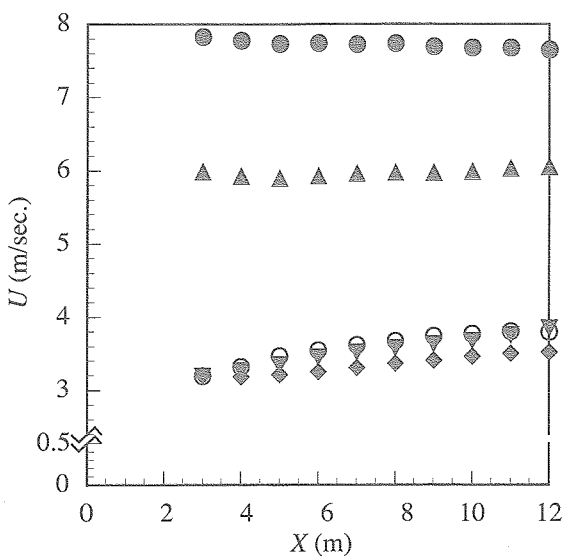


図8 平均流速の流れ法王変化
記号は図7参照。

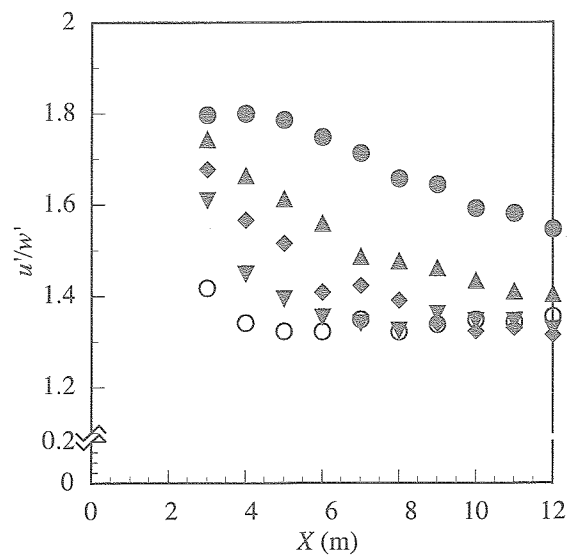


図10 異方性の流れ方向変化
記号は図7参照。

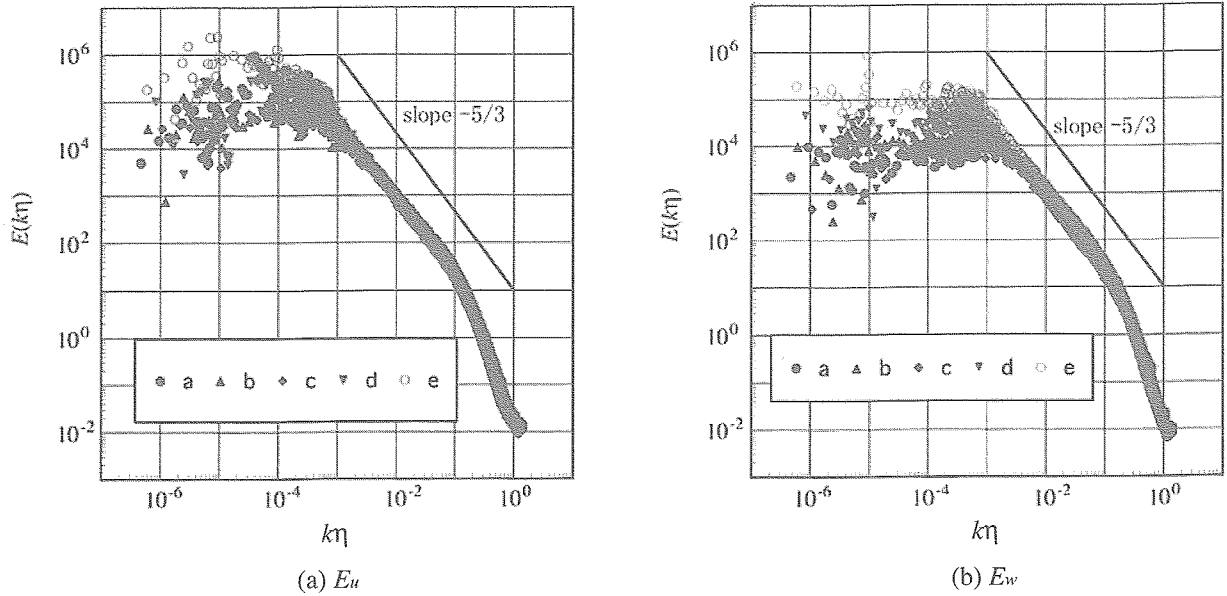


図11 一次元パワースペクトル

表2 乱流場の統計特性 ($X=10\text{ m}$)

case	U (m/s)	u'/U	w'/U	u'/w'	ϵ (m^2/s^3)	η (mm)	λ (mm)	R_λ
a	7.68	0.077	0.048	1.6	0.179	0.38	0.0164	489
b	5.99	0.092	0.063	1.4	0.165	0.38	0.0165	480
c	3.46	0.124	0.092	1.3	0.152	0.39	0.014	336
d	3.67	0.183	0.136	1.3	0.347	0.32	0.0144	533
e	3.77	0.178	0.133	1.3	0.311	0.32	0.0152	560

思える。これはエネルギーを含む渦の規模が測定部断面に対してかなり大きいためと思われる。

図 11 に $X=10\text{ m}$ における速度変動の一次元スペクトルを示す。各ケース、 u, w 成分ともに特定のピークはなく、明確な慣性小領域の存在が認められるような発達した乱流場のスペクトルを示した。このうち最も効果的にエネルギーが励起されているのはケース e であり、平均流速よりも横方向の空間スケールを大きくする工夫が乱流場のエネルギーを高めていることがわかる。これは表 2 の乱流レイノルズ数を見ると明らかである。同じ格子サイズでは平均流速の大きいものほどレイノルズ数は大きくなるが、格子サイズを大きくすると、ほぼ同じ平均流速でもレイノルズ数は 200 以上大きくなる。ただし、このようなスペクトル分布は乱流場が十分に発達した地点でのものであり、測定部上流では運転命令として与えた低波数のエネルギー成分のみが卓越するような分布となる。これは、マルチファン型風洞の乱流励起の特性である。つまり、運転命令とファンの設定パターンは基本的に比較的大規模な変動成分しか励起することなく、あとは局所速度勾配による混合に期待するという方式である。これに対し、動的乱流発生装置²⁾は、各振動翼が構成する開口比の空間的变化による大規模スケールの励起から、各振動翼間の吹き出し、はく離などによる小規模スケールの励起までが同時励起される点が大きく異なっている。マルチファン型風洞は速く平衡

状態に達するような乱流場の形成に不向きであるが、大気乱流の残存層⁶⁾に見られるようなおだやかな乱流を再現できるなど、特異な乱流場の形成が期待できる。

4. まとめ

マルチファン型風洞により最大 $R_\lambda \sim 560$ の準等方的乱流の実現に成功した。平衡状態となる領域を確保するための測定部延長、中間規模の変動励起のための工夫、運転パターンの改良など今後検討すべき問題は多くあるが、その後に $R_\lambda \sim 1000$ に達する乱流場が実現されるものと期待している。

参考文献

- 1) Kaneda et al. (2003) *Phys. Fluids* 15 L21.
- 2) Makita, H. & Sassa, K. (1991) *Advances in turbulence* 3 497
- 3) Larssen, J.V. & Davenport, W.J. (2002) *AIAA-2002-2861*.
- 4) 宮城弘守、他 3 名 (2004) 日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集 332.
- 5) 宮城弘守、他 2 名 (2004) 第 18 回風工学シンポジウム講演論文集 211.
- 6) Stull, R.B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Acad. Pub.