

フラクタル配置されたファン駆動法による乱流生成

吉田 英司¹⁾・坂口 直義²⁾・小園 茂平³⁾

Turbulence generation by fractal arrangement of blowing fans

Eiji Yoshida, Naoyoshi Sakaguchi, Shigehira Ozono

Abstract

The purpose of the present study is to make the Reynolds number of homogeneous turbulence as high as possible using a multi-fan wind tunnel. The wind tunnel can provide different fluctuations due to the independence of an array of small fans. We applied a number of driving modes with different conditions; 1) fractal arrangement of driving fans, and 2) random input signals. The measurements revealed that as turbulence convected downstream, a spectrum gap was filled for the modes using random signals.

Key Words:

Multi-fan wind tunnel, Homogeneous turbulence, Fractal, Random input signal

1. はじめに

高レイノルズ数の一様等方的な乱流の生成は工学的にも乱流統計理論の検証のためにも重要である。我々は宮崎大学の大型乱流風洞を使って、強く大きな乱れを持つ気流の生成を目指してきた¹⁾⁻³⁾。この風洞はマルチファン型風洞と称され、多数の小さいファンのそれぞれに運転命令をデジタル信号により与えることで、気流を時間的・空間的に制御できることが特長である。しかし、このようにして与えられる命令は主流方向への変動なので、主流直角方向への効果を考えずに運転命令を作成すると、気流の異方性が強まるうえに、予想ほど乱れは強くない。

マルチファン型風洞では多数のファンが独立に制御されるので、吹き出しと吸い込みの配置を自由に設定できる。これまでに規則的な格子状の駆動ファンの配置で乱流生成を試みてきたが、一様性は満たされるものの高いレイノルズ数は達成されなかった。

本報告では、吹き出しのマルチファンの配置をフラクタル状にし、強乱大スケールすなわち高レイノルズ数を持つ一様等方性乱流を生成することが目的である。予備的な実験³⁾でフラクタル状配置ではあるが定常信号を使った場合には、乱れのスケールは測定部吹き出し口のダクトのスケール程度であり十分大きいとはいえず、そこで、本報告では運転命令を擬似ラン

ダム信号にすることにより、気流変動が増幅され大きな乱れが生成されることを期待した。ここで、擬似ランダム信号とは、実測された速度変動に基づく入力信号である。この擬似ランダム信号とフラクタル配置を組合せることにより生成された乱流の基本的な特性を調べ強乱大スケール乱流の生成を試みた。

2. 実験装置および方法

本実験では室内開放型押込式のマルチファン型風洞を使用した。この風洞の特長は、気流を複数の小さなファンで駆動することである。ファンの最大径は270 [mm]で、縦11個×横9個=合計99個が空気取入口に配置されており、それぞれ独立に制御することができる。99個のファンはパソコンから0.02 [s]毎に送られる信号により回転数制御される。パソコンで作られた信号に従いファンが回転し生じた気流は、隔壁で四面を囲われたそれぞれのダクトを通り独立して縮流され、最終的にハニカム（外径30 [mm]、長さ212 [mm]）で整流され測定部に至る。測定部吹き出し口におけるダクトの寸法は鉛直長さ $M_z=164$ [mm]、水平長さ $M_y=282$ [mm]である。

¹⁾ 応用物理学専攻 大学院生

²⁾ 材料物理工学科 学部生

³⁾ 材料物理工学科 教授

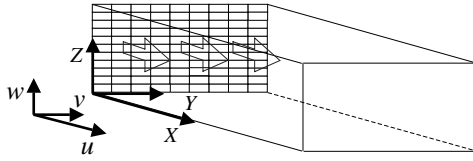


図 1: Frame of reference.

座標軸は図 1 のようにとり、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。測定部吹き出し口から $X=10.0$ [m] の流下距離の基準断面において気流が一様となるように調整され、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。回転数が約 4200 [rpm] ($U=16.0$ [m/s]) まで風速は線形に増加し、非常に良好な線形性が得られている。本風洞は八つの可搬洞をそなえており、断面の大きさは全て縦 1.80 [m] \times 横 2.54 [m] である。それらを組み合わせて測定部長さ G を最大 15.5 [m] まで延長でき、本実験では測定部長さ $G=15.5$ [m] にした。

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⁾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 1.0 [mm] の X 型 (同 Model 1241) を用いた。全ての実験方法に関して、計測点は風洞中心を通る水平線上 ($Z/M_z=5.5$) と、鉛直線上 ($Y/M_y=4.5$) で気流をトラバース計測した。また、 $X/M_x=18.3$ ($X=3$ [m]), 30.5 (5 [m]), 42.7 (7 [m]), 54.9 (9 [m]), 61.0 (10 [m]), 67.1 (11 [m]), 79.3 (13 [m]) の位置で計測した。

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 5000 [Hz] を使用した。スペクトル解析は高速フーリエ変換 (FFT) を用いた。7500 個の時系列を 1 ブロックとし、40 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。

テーラーのマイクロスケール λ は次式で定義される。

$$\lambda^2 = \frac{u'^2}{\left\langle \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right\rangle} \quad (1)$$

ここに、 u' は変動速度 u の rms 値、 $\langle \cdot \rangle$ 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空間微分を時間微分に置き換えて計算した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{U} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

式 (1) を使い、乱流レイノルズ数 R_λ を次の定義式から求めた。

$$R_\lambda = \frac{u'\lambda}{\nu} \quad (3)$$

ここで、 ν は空気の変動粘性係数であり、 $\nu = 1.5 \times 10^{-5}$ [m^2/s] を用いた。

4. 乱流生成法

4.1 運転モード 1

第 1 の運転モードでは、図 2 のように、駆動ファンと非駆動ファンをフラクタル状に配置した。図中 U_{in}^+ は吹き出し、 U_{in}^- は停止の入力信号を示す。本報告では $U_{in}^+=7.0$ [m/s]、 $U_{in}^-=0$ [m/s] の定常信号を使用した。風洞の上下壁近くで平均流速に勾配が見られたのでこれを改善するために幅 10 [cm] のバリアーを設置して一様性を改善した。

図 2 の配置は、厳密にはフラクタル形状ではないが、ここでは以下のようにしてフラクタル次元を求めた。

もし、ある図形が全体を $1/a$ に縮小した相似形 b 個によって成り立っているならば、フラクタル次元 D は

$$D = \frac{\log b}{\log a} \quad (4)$$

となる。本実験では、図 2 のように全体を $1/3$ に縮小した相似形 5 個から成り立っているので、

$$D = \frac{\log b}{\log a} = \frac{\log 5}{\log 3} \cong 1.46 \quad (5)$$

と見積もられる。

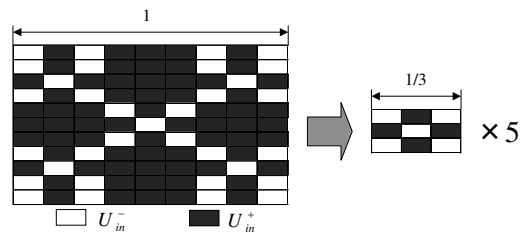


図 2: Arrangement of fans used in mode 1.

4.2 運転モード 2

2 番目の運転方法は擬似ランダム信号を利用する。本実験で使用した入力信号 (図 3) は、次のようにして求めた。自然風をよく記述していると言われる次のカルマンの式を目標のスペクトルとする⁵⁾。

$$S(f) = 4I^2 L_x U \left[1 + 70.8 (f L_x / U)^2 \right]^{-5/6} \quad (6)$$

適当な平均風速 U , 乱れスケール L_x , 乱れ強度 I の値を上式に代入し, パワースペクトルを求め, それを逆フーリエ変換し流速時系列が生成される. パワースペクトルでは位相情報が欠落しているため, 区間 $[-\pi, \pi]$ の範囲で擬似乱数を発生させこれを位相成分として与え, 時系列を決定した.

その信号はデータ長 2048, サンプリング時間間隔は 0.02 [s] (50 [Hz]), パワースペクトルは図 4 のとおりである. 平均風速値 $U_1 = 2.6$ [m/s], r.m.s. 値 $u' = 0.92$ [m/s] であった. u' を元に必要分だけ定数倍して入力信号の乱れ強度を調節した. 本実験では乱れ強度が 20% になるように入力信号を作成した.

横方向の乱れを誘発するため各ファンの入力信号の位相をシフトさせた. まず 2048 個の時系列をサイクリックに使って 1 セットの信号を作り, それを周期的に繰り返し所期の信号を得た.

2 番目の運転モードでは, 駆動ファンと非駆動ファンを図 5 のように配置した. 駆動ファンは擬似ランダム信号の平均値を $U_{in}^+ = 7.0$ [m/s] とした (非駆動ファンは $U_{in}^- = 0$ [m/s]). 図 5 に示すように, 駆動ファンに $N = 1, 2, 3, \dots, 65, 66$ と番号を付し, N 番目のファンは $(N - 1) \times 0.4$ [s] だけ位相をずらした.

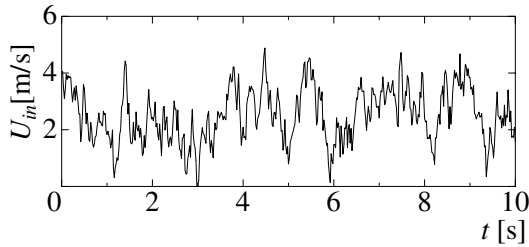


図 3: The time history of the quasi-random signal.

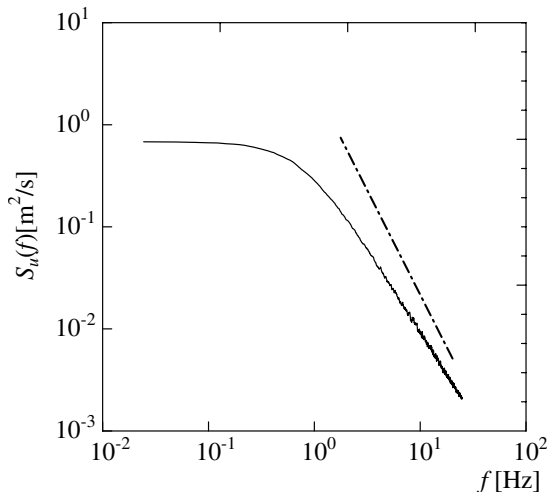


図 4: Power spectrum of the input signal.

4.3 運転モード 3

3 番目の運転方法は全ファンに平均値 $U_{in}^+ = 4.7$ [m/s] の擬似ランダム信号を与えた. 図 6 に示されるように全てのファンは吹き出しで, 全ファンに $N = 1, \dots, 99$ の数を擬似乱数を用いて与え, N 番目のファンは $(N - 1) \times 0.4$ [s] だけ位相をずらした.

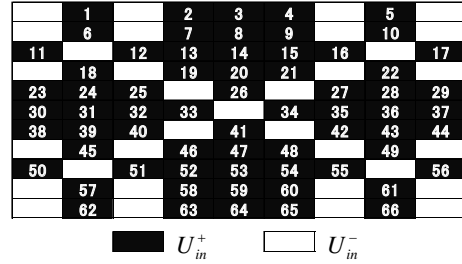


図 5: Arrangement of fans used in mode 2.

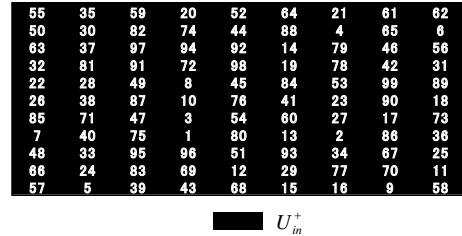


図 6: Arrangement of fans used in mode 3.

4.4 市松モード

以上のような三つの乱流生成のための運転モードを説明したが, これらとは別に, 市松格子モードを考えた. この方法では吹き出しファンと停止ファンを市松格子状に配置し乱流を生成する. その乱流の特性値を表 1 に示す. 過去の論文^{2), 3)} でその運転モードによる乱流の特性は十分調べており, 古典的な方法である格子乱流に相当すると思われ, 標準的な乱流として比較の対象になりうる.

Table 1: Checkerboard mode.

U	9.24[m/s]
u'/U	4.1% ($X/M_z = 42.1$) 3.0% ($X/M_z = 67.1$)
L_x	11[cm] ($X/M_z = 42.1$) 12[cm] ($X/M_z = 67.1$)

4.5 運転モードのまとめ

全ての運転モードに関して、測定部の1断面に流れ込む名目の流量は $21.4 \text{ [m}^3/\text{s]}$ に統一した。表1の三つの運転モードにより乱流を生成し、その特性を調べる。欄中に条件の有無を記している。

Table 2: Driving modes. ○, applied; ×, not applied.

	Fractal	Random
Mode-1	○	×
Mode-2	○	○
Mode-3	×	○

5. 実験結果

5.1 一様性

図7に平均風速 U の鉛直分布の流下方向変化を示す。運転モード1, 運転モード2は, 上流の風洞のコア領域 ($4 < Z/M_z < 7$) では流速が低下しているが, 流下するにつれて改善されている。運転モード3は, 上流から下流に至るまで高い一様性を示している。

図8に u' の鉛直分布の流下方向変化を示す。運転モード1, 運転モード2は, 上流のコア領域では吹き出しファンの下流に相当する領域で u' が大きい。全モードとも流下するにつれて u' が減衰し, 一様性が増している。

図9に u'/w' の鉛直分布の主流方向変化を示す。比較的, 下流 ($X/M_z=67.1$) のコア領域では, 運転モード1は $u'/w' \sim 1.2$, 運転モード2は $u'/w' \sim 1.3$, 運転モード3は $u'/w' \sim 1.4$ であり, 全モードでほぼ同等である。

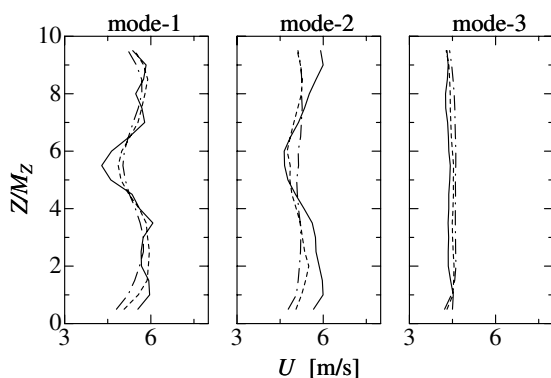


図7: Streamwise development of time-mean velocity. Solid line, $X/M_z=18.3$; Broken line, $X/M_z=42.7$; Dash-dotted line, $X/M_z=67.1$.

5.2 減衰特性

図10に風洞中心 ($Z/M_z=5.5, Y/M_y=4.5$) の乱れ強度 u'/U の減衰特性を示す。

フラクタル配置の効果を考えるため, 運転モード1と市松モードを比較すると, ピーク値に差はほとんど見られないが, フラクタル状配置で生成した乱流 (運転モード1)の方が減衰が緩慢である。

擬似ランダム信号を使用した運転モード2と3を比較すると, 運転モード2の方が乱れのピーク値が高い。運転モード2と3は他のモードと比較し乱れの減衰が緩慢で, 十分下流でも乱れ強度が維持されている。

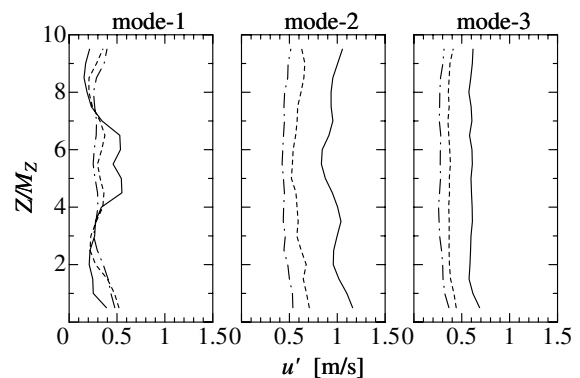


図8: Streamwise development of u' -profile. Solid line, $X/M_z=18.3$; Broken line, $X/M_z=42.7$; Dash-dotted line, $X/M_z=67.1$.

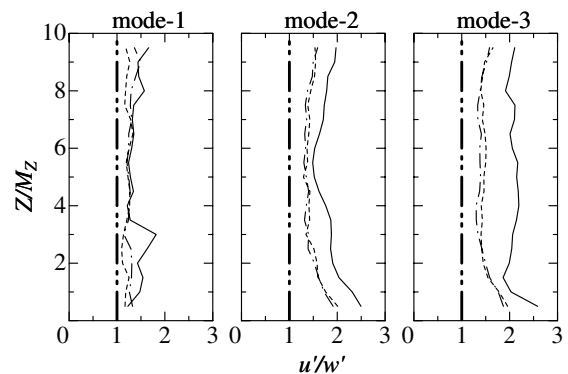


図9: Streamwise development of u'/w' -profile. Solid line, $X/M_z=18.3$; Broken line, $X/M_z=42.7$; Dash-dotted line, $X/M_z=67.1$.

5.3 乱れスケール

図11に風洞中心の乱れスケール L_x の主流方向変化を示す。

フラクタルの効果を考えるため, 運転モード1と市松モードを比較すると, 乱れスケールはほぼ同様な特性を示した。

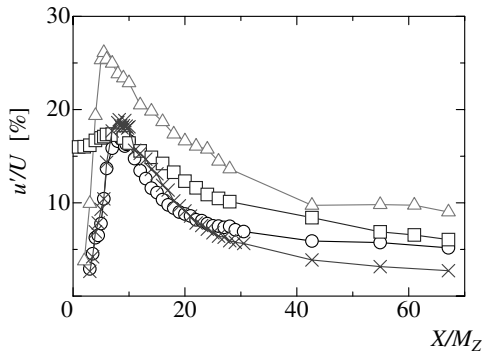


図 10: Decay of turbulence . \circ , Mode-1; \triangle , Mode-2; \square , Mode-3; \times , Checkerboard mode .

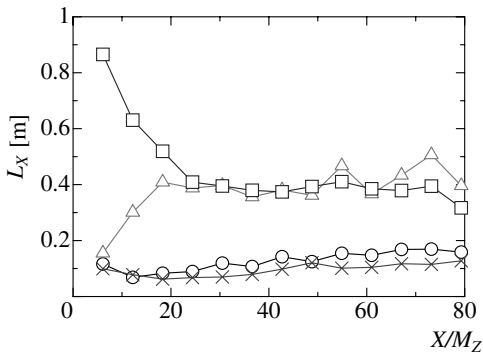


図 11: Streamwise variation of turbulence scale . \circ , Mode-1; \triangle , Mode-2; \square , Mode-3; \times , Checkerboard mode .

ランダム信号の効果を考えるため、運転モード 1 と 2 を比較すると、 $X/M_z \sim 80$ 迄の全域で、ランダム信号で生成した乱流（運転モード 2）の方が L_x は大きい。運転モード 2 は $X/M_z \sim 20$ まで L_x は急に増加し、その後の主流方向の変化は小さい。ランダム信号で生成した乱流（運転モード 2）の L_x は流下距離とともに比較的大きく変動しており平均化誤差によるものと思われる。

運転モード 3 は測定部吹き出し口付近で L_x が他の運転モードと比較し非常に大きい。そこでは、入力信号の変動の直接的影響が及んでいると思われる。

5.4 乱流レイノルズ数

乱流運動のスケールに関して相似則を定義するものが乱流レイノルズ数である。なかでもテラーのマイクロスケールは実験的に容易に求めることができるため、乱流場のスケールの比較を行なうのに適している。

図 12 に風洞中心の乱流レイノルズ数の主流方向変化を示す。

$X/M_z \sim 80$ の十分下流では、運転モード 1 で $R_\lambda = 217$ 、運転モード 2 で $R_\lambda=351$ 、運転モード 3

で $R_\lambda=285$ 、市松で $R_\lambda=114$ であった。ランダム信号で生成した乱流は、十分下流でも大きい R_λ を示している。

運転モード 3 の R_λ は、測定部入口付近で異常に大きい。乱れスケールの特性で述べたように、そこでは、入力信号の変動の直接的影響が及んでいると思われる。

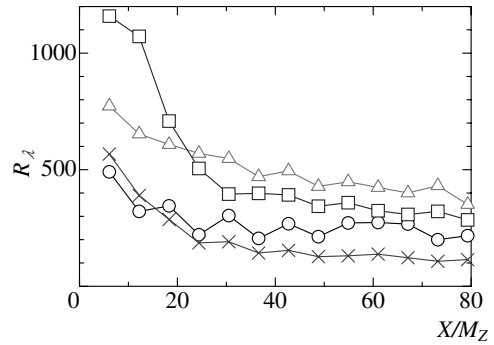


図 12: Streamwise variation of turbulence Reynolds number . \circ , Mode-1; \triangle , Mode-2; \square , Mode-3; \times , Checkerboard mode .

5.5 パワースペクトルの測定部吹き出し口付近の変化

擬似ランダム信号を使用する方法では、吹き出し直後の気流は入力信号のパワー構成に近いはずである。それが流下するにつれてどのように乱流化するかという点に注目した。図 13 に風洞中心のパワースペクトルの主流方向変化を示す。図のような吹き出し直後のパワースペクトルには低周波数と高周波数にギャップが見られる。

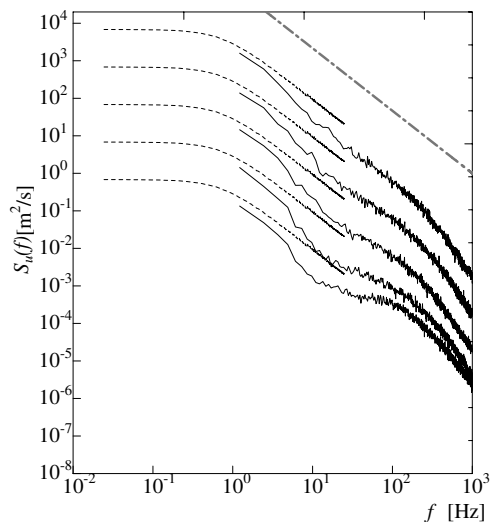


図 13: Streamwise development of power spectra . Mode 3 . $X/M_z=9, 7, 5, 3, 1$ from the top. Each of the curves is successively shifted by one decade.

低周波数の山はマルチファンから与えられる強制的な変動成分であり，高周波数の山は自然に生成された乱流成分からなっていると思われる．流下するにつれて，この二つのピークのギャップがもりあがりつつあり， $X/M_z = 9$ ではスペクトルがかなり連続的な形に変化している．

5.6 パワースペクトルの流下方向変化

図 14 にパワースペクトルを示す．市松モードによる乱流は古典的な格子乱流に近い様性を示すと思われるので u スペクトルと w スペクトルが高周波数域で近いのは十分予想される．しかし，強制的に信号を入力して生成した運転モード 2 や 3 による乱流でも，本報告で下流の $X/M_z = 67.1$ では高周波数で u スペクトルと w スペクトルが近い値をとっている．十分上流では図 13 に示されるように低周波数と高周波数にギャップが見られる．流下によって低周波数のパワーが高周波数に拡大しそのギャップが埋められたように見える．

慣性小領域が少なくとも 2 桁程度の波数領域に渡って存在するには， $R_\lambda > 200$ が必要と言われている⁶⁾．本実験ではこれを満たしており，運転モード 1,2,3 とともに乱流スペクトルには，たしかに 2 桁程度の慣性小領域が認められる．

6. 結論

本研究の目的は，マルチファン型風洞を使用して強乱大スケールの一様等方性乱流を生成することである．フラクタル状配置のファン駆動法と擬似ランダム信号を用いて生成した乱流の特性を調べ，以下の結果を得た．

- 1) 一様性の指標 u'/w' は十分下流で運転モード 2 で $u'/w' = 1.3$ ，モード 3 で 1.4 であり，準等方的な乱流である．
- 2) 強制的に信号を入力して生成した運転モード 2 や 3 の乱れ強度 u'/U の減衰は緩慢である．乱流レイノルズ数 R_λ は，最下流 ($X/M_z=79.3$) でモード 2 で $R_\lambda = 351$ ，モード 3 で $R_\lambda = 285$ であり，パワースペクトルの慣性小領域に相当する部分が 2 桁程度見られた．
- 3) 強制的に信号を入力して生成した運転モード 2 や 3 による乱流でも，下流では高周波数で u スペクトルと w スペクトルが近い値をとっている．十分上流では低周波数と高周波数にギャップが見られ

るが，流下によって低周波数のパワーが高周波数に拡大しそのギャップが埋められたように見える．

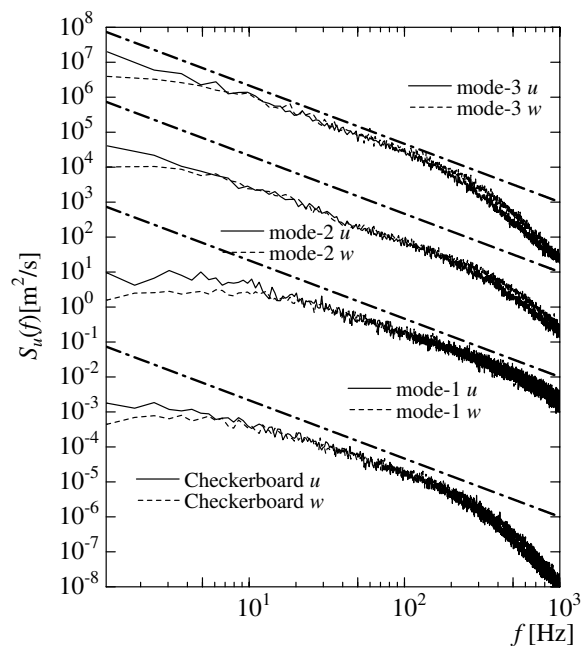


図 14: u and w power spectra at $X/M_z=67.1$. Mode 3, Mode 2, Checkerboard mode from the top. Each of the curves is successively shifted by two decades.

参考文献

- [1] S. Ozono, H. Miyagi, K. Wada: Turbulence Generated in Active Grid Mode Using a Multi-Fan Wind Tunnel, *J. of Fluid Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, 643-654, 2007.
- [2] 宮城弘守, 小園茂平他: マルチファンによる擬似格子乱流の減衰特性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 332-335, 2004.
- [3] 吉田英司, 小園茂平: フラクタル配置のファン駆動法による一様乱流の生成, 平成 19 年度宮崎大学工学部, 卒業論文.
- [4] 小園茂平, 西亮, 宮城弘守他: マルチファン型大型風洞の開発, 機論, B 編, 70 巻, 690 号, 311-318, 2004.
- [5] Von Karman, *Progress in the statistical theory of turbulence*, "Proc. Nat. Acad. Sci.", Washington D. C., McGraw-Hill, 530-539, 1948.
- [6] 時田秀治, 飯田明由: 高レイノルズ数乱流場の統計的性質 (第 1 報), 日本機械学会論文集, B 編, 55 巻, 515 号, 1847-1854, 1989.