



# 宮崎大学学術情報リポジトリ

University of Miyazaki Academic Repository

ランダム位相法において入力周波数が乱流スケールに及ぼす影響に関する観察

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-10-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 若松, 祐亮, シン, B., Wakamatsu, Yusuke, SHIN, B. メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/00010067">http://hdl.handle.net/10458/00010067</a>

# ランダム位相法において入力周波数が乱流スケールに及ぼす影響に関する観察

若松 祐亮<sup>a)</sup>・B. シン<sup>b)</sup>

## Observation of the Effect of Input Frequencies on Turbulent Scale by Random-Phase Method

Yusuke WAKAMATSU, B. SHIN

### Abstract

Control of turbulence intensity and scale is fundamentally important in the study of turbulence. In this study, we used a random-phase method to investigate the effect of input frequencies on the turbulent scale. The method makes use of shear layers generated between the outflows from adjacent ducts, and is realized high intensity (12-16 %) and large integral scale (0.6-0.7 m). It is known that the vortex size depends on the size of the lattice in studies using lattice turbulence, while there is no equivalent in the random phase method. This study aims to clarify the dominant parameter for the integral scale in the random phase method, and examines its dependence using turbulence with different frequencies. As experimental results the scale depended on the frequencies of the input velocity signal. Thus, it is expected that the scale might be controlled by the frequencies.

**Keywords:** Multi-fan wind tunnel, Integral scale, Control of turbulent scale, Random-phase method

### 1. はじめに

乱流の研究において乱流の生成は非常に重要であり、また乱れの強度とそのスケールを制御することが必要である。乱流生成には、これまで静的な方法と動的な方法が試みられてきた。格子乱流やフラクタル格子<sup>1)</sup>などの静的な方法では、一様流を格子に通し後流に渦を放出させ、これを種として乱れを生成する。一方、動的な方法<sup>2)</sup>は格子による渦放出と平板などによる攪拌を組み合わせたものである。いずれの乱流生成でも初期の渦形成を起点としているようである。近年、池田らはマルチファン型風洞を使用し、“ランダム位相法”という運転方法によって強乱(12-16%)かつ大スケール(0.6-0.7m)の近似的一様等方性乱流生成に成功した<sup>3)</sup>。ランダム位相法とは、流れ場をファンの回転数により動的に制御して、各ファン間の流速差から生じる速度勾配だけで乱流を生成する方法で、風洞内に格子や矩型翼等の物体を置く必要がないため、スケールの制限を受けないより自由な乱流生成をすることができる。しかし古典的な格子乱流と比べて乱れ強度や積分スケールがなぜ大きな値をとりうるかはまだ明らかではない。格子乱流による研究では渦サイズが格子のサイズに依存

することが知られているが、マルチファン型風洞を用いたランダム位相法ではそれに相当するものはない。ランダム位相法においては入力振幅の依存性が報告されているが<sup>4)</sup>、スケールについてはまだ報告がない。従来の乱流生成法と同様に初期に渦形成を行うのであろうか、それとも異なるメカニズムが作用し渦形成が行われるのか疑問が残る。本研究では、前報<sup>4)</sup>に続き入力周波数に着目し、周波数帯を変化させ乱流スケールの変化を調査する。

### 2. 実験

#### 2.1 実験装置

##### 2.1.1 マルチファン型風洞

本実験で使用した本学部のマルチファン型風洞はエッフェル型である。風洞は縦 11 個×横 9 個=合計 99 個のファン(外径 270mm)で気流が起こされる(図 1)。それぞれ AC サーボモーター(出力 750W)に接続され、1 台のパソコンで互いに独立に回転数を制御することができる。測定部は 7 個の可搬洞を組み合わせで構成することができる。本実験は測定部を長さ 15.5m に設定した。測定部断面サイズは横 2540mm×縦 1800mm である。入力信号値に比例した回転数でファンが回転し、駆動された気流は四面を壁で囲まれた矩形断面のダクトを通り縮流され、最終的にハニカム(外径 30mm、長さ 212mm)で整流され吹き出さ

a) 工学専攻 大学院生

b) 機械設計システム工学科 教授

れる。座標軸は流れ方向に距離  $X$  を定義し、 $u$  は主流方向変動成分、 $v$  は水平方向変動成分である。ダクト出口の寸法は、水平長さ  $M_Y = 282\text{mm}$ 、鉛直長さ  $M_Z = 164\text{mm}$  であり、測定点の位置は  $M_D = (M_Y \times M_Z)^{1/2} = 215\text{mm}$  を用いて無次元化された。

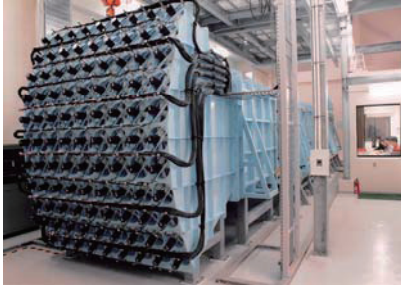


図 1. マルチファン型風洞の写真

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 変動流速計測方法

変動流速の計測には、熱線流速計 Kanomax Model 7000Ser を用いた。センサーは X 型プローブ (Kanomax0251R-T5) を使用し、風洞中心線上に沿ってトラバースし測定を行った。プローブの熱線の線径は  $5.0\mu\text{m}$ 、受感部長は  $1.0\text{mm}$  である。熱線流速計の信号はデータロガー (Keyence NR-600) で AD 変換しパソコンに収録した。サンプリング周波数は  $5000\text{Hz}$  とし、 $2\text{kHz}$  以下のローパスフィルターを通した。よって 1 ラン当たり  $204800$  個のデータを取得し、同じ条件で少なくとも 6 回の計測をおこなった。

乱流の積分スケール  $L_X$  は、ある点の変動風速 ( $u, v$ ) の時刻歴を X 型プローブにより計測した後自己相関係数  $\rho_u$  とテイラーの凍結仮説により求められた。自己相関係数  $\rho_u$  が零となる  $\tau_0$  までの領域を積分し、その値に平均風速  $U$  をかけて求めた。  $L_Y$  も同様に求められた。

$$L_X = U \int_0^{\infty} \rho_u d\tau = U \int_0^{\infty} \frac{\overline{u(\tau)u(t+\tau)}}{u^2} dt \quad (1)$$

## 2.3 乱流生成方法

### 2.3.1 ランダム位相法

ランダム位相法は次の二つのステップからなる。

ステップ 1: まず、入力スペクトル  $S_e(f_i)$  を以下のように仮定する。

$$S_e(f_i) = \begin{cases} C (f_{min} \leq f_i \leq f_{max}, i=1, \dots, J) \\ 0 \text{ (otherwise)} \end{cases} \quad (2)$$

ここで  $C$  はスペクトル密度であり、本論では  $15\text{m}^2/\text{s}$  に設定された。この  $C$  から入力信号  $u_e$  は以下のように定義される。

$$u_e(t) = U_e + u'_e(t) = U_e + \sqrt{\frac{2C}{T_0}} \sum_{i=1}^J \sin 2\pi f_i(t + \phi_i) \quad (3)$$

$t$  は時間、 $U_e$  は時間平均流速、 $J$  は正弦波の個数、添え字  $e$  は外部入力であることを示す。本風洞では定義区間  $[0, T_0] = [0 \text{ sec}, 40.96 \text{ sec}]$  をまず定義し、これを任意回数だけ繰り返して運転する。  $f_i$  は信号の変動成分を構成する  $i$  番目の入力周波数である。  $T_0$  から  $f_{min} = 1/T_0 = 0.024\text{Hz}$  であるので、  $\Delta f = 0.024\text{Hz}$  とし、  $f_i = i \times \Delta f$  と定義される。本風洞の応答性は  $1\text{Hz}$  以上で劣化することが分かっているので、  $1/0.024 \approx 50 = J$  とした。従って、  $f_i$  の範囲は次のようになる。

$$f_{min} (=0.024\text{Hz}) \leq f_i \leq f_{max} (=1.2\text{Hz}) \quad (4)$$

位相は  $-\pi \leq \phi_i \leq \pi$  の範囲で組み込み関数を使ってランダムに発生させた。時間平均速度  $U_e$  は  $4.67\text{m/s}$  を使用した。本論ではこの入力周波数  $f_i$  の範囲を 5 分割し周波数帯の異なる入力信号を作成した。(表 1)

ステップ 2: ステップ 1 で定義された信号  $u_e$  には 99 個の位相  $\psi(n_e)$  が与えられファンに入力される。整数  $n_e$  は図 2(a) のようにランダムに与えられる。これらを形式的に書くと次のようになる。

$$u_e(t) \rightarrow u_e(t + \psi(n_e)) \quad (5)$$

$$\psi(n_e) = \frac{T_0}{99} \times (n_e - 1) \quad (1 \leq n_e \leq 99) \quad (6)$$

図 2(b) に示すように、これら位相差は隣接するダクトからの吹き出し速度間に差を生み、せん断層を生じさせる。せん断層は相互作用により色々なスケールの渦を形成し、最終的に乱流に至ると思われる。

表 1. 入力信号一覧

入力信号	入力周波数帯 $f_i$ [Hz]
$f_A$	$0.024 \leq f_i \leq 0.24$
$f_B$	$0.264 \leq f_i \leq 0.48$
$f_C$	$0.504 \leq f_i \leq 0.72$
$f_D$	$0.744 \leq f_i \leq 0.96$
$f_E$	$0.984 \leq f_i \leq 1.2$

次に入力信号の変動成分の振幅を表すパラメータ  $I = u'_e/U_e$  を定義する。ここに  $u'_e$  は入力信号  $u_e(t)$  (式(3)) の rms 値である。  $I$  が増加するにつれて入力信号の振幅が増加する。全ての入力信号において  $I = 40\%$  と設定された。

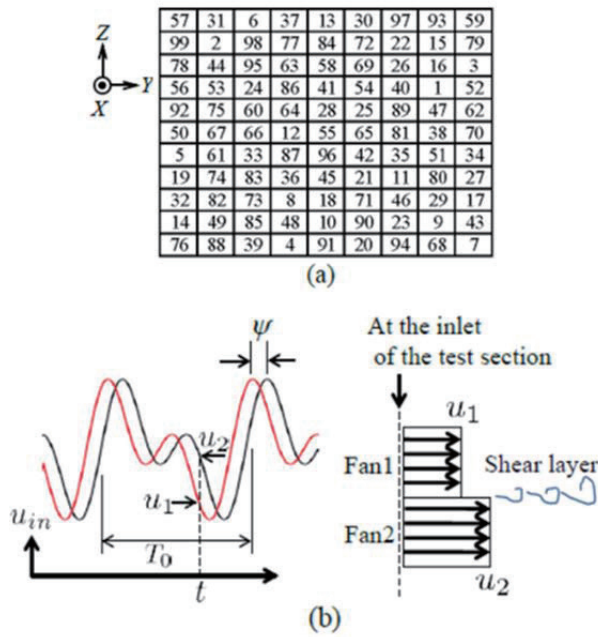


図 2 ランダム位相法の概念図

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 一様性と等方性

本研究のランダム位相法の一様性(主流方向平均速度分布)を図3に示す。全域において高い一様性を獲得している。通常入力振幅の高低により主流方向平均風速は異なるが、入力周波数においても同様のことが言える。しかしその差は非常に小さい。

等方性の指標として変動速度 r.m.s 値の比  $u'/v'$  を図4に示す。  $X/M_D=30$  を境に  $u'/v' \approx 1.0$  に漸近していき格子乱流と同等の等方性を示すが、 $f_A$ のみ異方性が高くなる結果となった。 $f_A$ の場合では流下方向に値が大きく変化し続けており、準等方状態に達するためには更なる流下距離が必要であると考えられる。

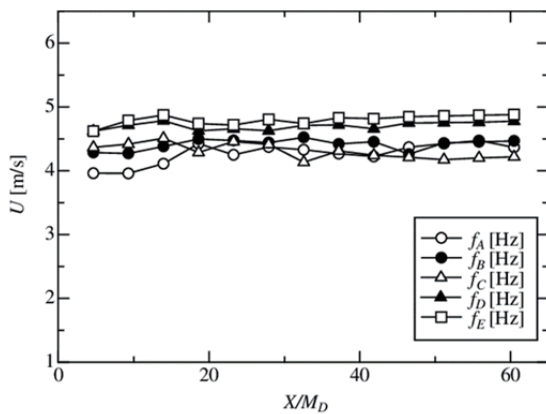


図 3 一様性

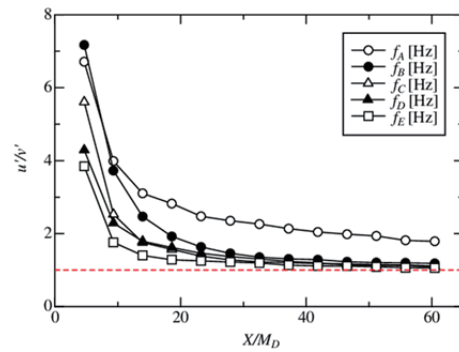
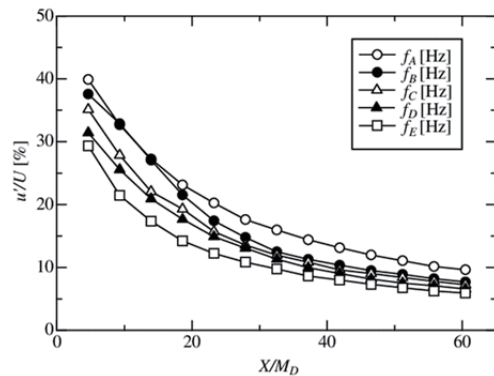


図 4 等方性

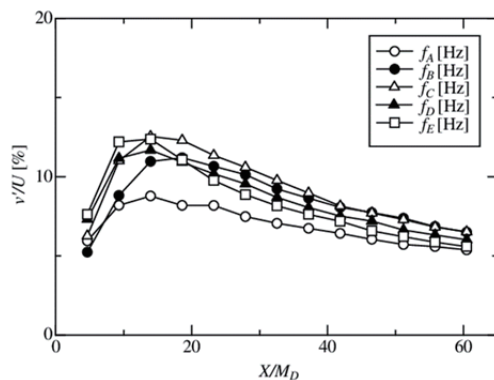
#### 3.2 乱流強度分布

主流方向成分の乱流強度  $u'/U$  の変化を図5(a)に示す。  $u'/U$  は流下とともに単調に減衰し、一般的な一様乱流の傾向を示した。いずれの乱流も下流においても強い乱れを保っている。乱流強度は、振幅を変化させた際は 20%程の大きな差が見られ、全域において入力信号強度の順位を満たした<sup>4)</sup>。入力信号は強度  $I=40\%$  に統一されているが、周波数の高低により 10%程度の変化が見られた。

図5(b)には水平方向成分の乱れ強度  $v'/U$  の流れ方向への変化を示す。  $u'/U$  に比べ小さい変動が見られる。



(a)



(b)

図 5 乱流強度

### 3.3 乱流スケール

主流方向成分の積分スケール $L_x$ の変化を図 6(a)に示す。測定されたデータのエラーバーは、95%信頼区間で計算された。格子乱流においては一般にスケールはメッシュサイズ  $M$  よりも小さな値をとる。これに対してランダム位相法の $L_x$ は、低周波数の乱流ほど大きな値を示し、ダクト面積 $M_D(=0.215\text{m})$ と比較しても十分大きなスケールを得た。入力周波数成分が少ない場合、乱流発達が比較的緩慢になることが報告されており<sup>5)</sup>、低周波数 $f_A$ の乱流が特に大きな値をとっているのは、低周波数では吹き出し直後でのせん断運動が小さく、混合が促進されなかったことが原因と考えられる。図 6(b)に水平方向成分の積分スケール $L_y$ の流れ方向の変化を示す。 $L_x$ の場合と同様に低周波数帯の $f_A$ の結果が大きいスケールを示した。等方性理論では $L_x/L_y=2$ が要求されるが、図 6(a)と(b)から本ランダム位相法によるスケールの比は高周波数帯のほぼ一定の値に漸近すると予測されるものの、 $f_A, f_B$ の周波数ではスケール比のばらつきが大きくなることも分かる。

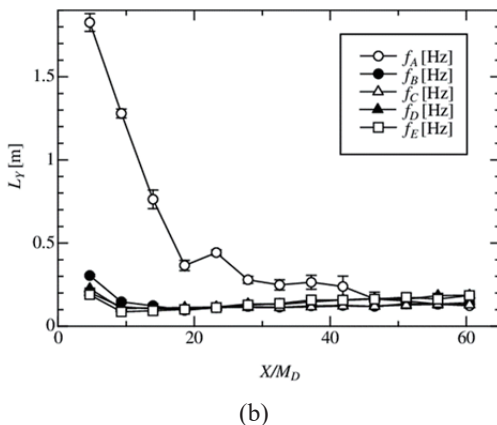
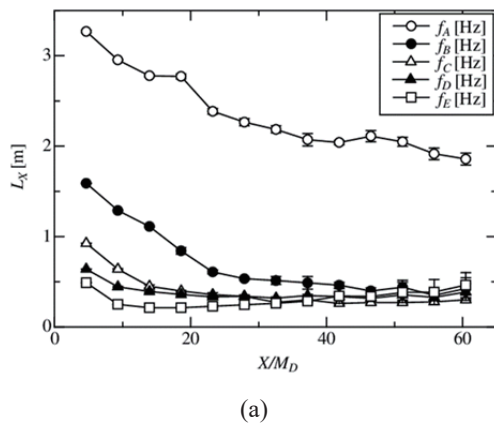


図 5 乱流スケールの流れ方向への変化

### 4. 結論

ランダム位相法による乱流場の生成において入力周波数の影響を調べるため、周波数帯域の異なる乱流を用いてスケールを観察し、以下の結論を得た。

- (1) ランダム位相法において入力周波数の変化は、高周波数乱流に対しては一樣等方的な値をとるが、 $f_A$ より低い周波数乱流においては異方性が見られた。
- (2) 流れ方向および水平方向の乱流は低い入力周波数ほど周波数依存性が高い。
- (3) マルチファン型風洞を用いたランダム位相法では、入力周波数の操作により乱流スケールを容易に制御できることを示した。

### 参考文献

- 1) D. Hurst and J.C. Vassilicos: Scalings and decay of fractal-generated turbulence, *Phys. Fluids*, Vol.19, 035103, 2007.
- 2) H. Makita: Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel, *Fluid Dyn. Res.*, Vol.8, pp.53-64, 1991.
- 3) 池田寛, 小園茂平: 低波数帯域に入力された擾乱の非線形干渉による一樣乱流の生成(ランダム位相法により生成される乱流の特性), 日本機械学会論文集, B 編, 第 79 巻, pp. 555-566, 2013.
- 4) 若松祐亮, 今井賢一郎, 小園茂平, B. シン: マルチファン型風洞による乱れ強度制御法の考察, 風工学シンポジウム, 第 25 回, pp. 181-186, 2018
- 5) 高牟礼光太郎, 小園茂平: 2 周波数から成る擾乱入力による高レイノルズ数一樣乱流の効果的な生成, 風工学シンポジウム, 第 23 回, pp. 367-372, 2014.