

## 人工的に生成された風速変動の特性

ゴイト ジェイ プラカス<sup>†1</sup>, 亀田 孝嗣<sup>†1</sup>

## Characteristics of Artificially Generated Varying Wind Speeds

Jay Prakash GOIT<sup>†1</sup> and Takatsugu KAMEDA<sup>†1</sup>

### Abstract

The current study designed and fabricated multi-fin active wind variation devices (WVDs) and evaluated their wind speed characteristics with the long term aim of reproducing atmospheric flow in a lab environment. Two WVDs designed for the study are: (1) upwind WVD which consists of 24 square and triangular fins and is installed upwind from the test section and (2) downwind WVD which consists of 3 rectangular fins and is installed downwind from the test section. Experiments are conducted for several combinations of rotational speed and rotational angle and the amplitude of wind speed variation ( $u_A$ ) which is the difference between minimum and maximum wind speeds for each cycle is used to describe the characteristic of the WVDs. For the upwind WVD, values of  $u_A$  decrease significantly with downstream distance.  $u_A$  is large for larger rotational angle, but the effect of rotational speed is not very significant. For the downwind WVD, magnitude of  $u_A$  does not vary significantly with streamwise location and maintains strong correlation with the cyclic motion of the ATG fins.

**Keywords:** Wind variation device, Wind tunnel experiment, Wind speed response

### 1. はじめに

風車, 高層ビル, 橋梁など風からの荷重を受ける構造物の開発や設計の際, 自然風の平均風速及び乱流強度分布を正確に把握しておく必要がある. そのため, 風洞を用いた実験環境下において自然風と類似した風を生成し, 構造物の耐久性や空力特性の評価を行うことは工学的な観点から重要な課題である<sup>1)</sup>.

風洞を用いた実験環境下において, 自然風の乱流を生成する手法は, 以下の3つの手法が挙げられる. 1つ目は測定部上流側にスパイアー, フェンスとブロックを組み合わせたもので, 定常的な乱流境界層を生成して模型実験に用いる場合が多い<sup>2)</sup>. 2つ目は測定部入口に正方形格子<sup>3)</sup>やフラクタル型格子<sup>4)</sup>を用いて乱流生成する手法である. 3つ目は動的に乱流を生成する手法であり, 例えば蒔田が提案した多数の回転翼から構成された乱流生成装置が知られている<sup>5)</sup>. この乱流生成装置は風洞測定部上流側に設置され, 回転翼の規則的あるいは不規則的な回転によって乱流が発生させられる. これまでに開発された乱流生成装置のいくつかの例を表1にまとめる. これらの乱流生成装置は当初では等方性乱流の研究に用

いられていたが, 開発が進むことで乱流境界層の再現や近年では風車など構造物の性能試験 MAV の空力試験にも用いられるようになっている.

表1. 乱流生成装置の研究

文献	格子幅 (mm)	回転翼の枚数	$Re_\lambda$	備考
Makita <sup>5)</sup>	46.7	15x15	387	乱流生成装置の提案
Kang ら <sup>6)</sup>	152	7x5	716	乱流生成装置及びLESの比較
Bodenschatz ら <sup>7)</sup>	115	13x11	1500	個々の回転翼が独立に制御可能
Quinn ら <sup>8)</sup>	100	8x7	-	生物の飛行試験用
Kroger ら <sup>9)</sup>	140	20x20	14000	世界最大の乱流生成装置

格子幅: 回転翼が取り付けられた枠の幅.

$Re_\lambda$ : レイノルズ数,  $\lambda$ : Taylor microscale

<sup>†1</sup> 近畿大学工学部機械工学科

これらの乱流生成装置は大気乱流の模擬が必要な研究で広く用いられているが、自然風の統計的な特性(平均風速及び乱流強度)の再現しかされていない。さらに、乱流格子や乱流生成装置によって模擬された乱流場の減衰率が非常に高く、目標とする乱流場を風洞測定部に維持するのが難しい。また、三枚風速計や超音波風速計を用いて計測した大気風速の時系列を風洞内で再現する試みはなされていない。

本研究では自然界の風速時系列を実験環境で再現することを将来的な目標として掲げており、本報告では複数枚の回転翼から構成される風速変動装置 (WVD: Wind Variation Device) によって生じる風速の特性について述べる。風洞測定部の上流側及び下流側に設置される2種類の風速変動装置の回転翼の周期運動に着目し、回転翼の回転角度と回転速度による風速の変動幅とその乱流特性について考察する。将来的には、本報告の風速応答性に基づき、時間的に変動する自然風を再現するための風速変動装置の制御アルゴリズムの開発を行う。

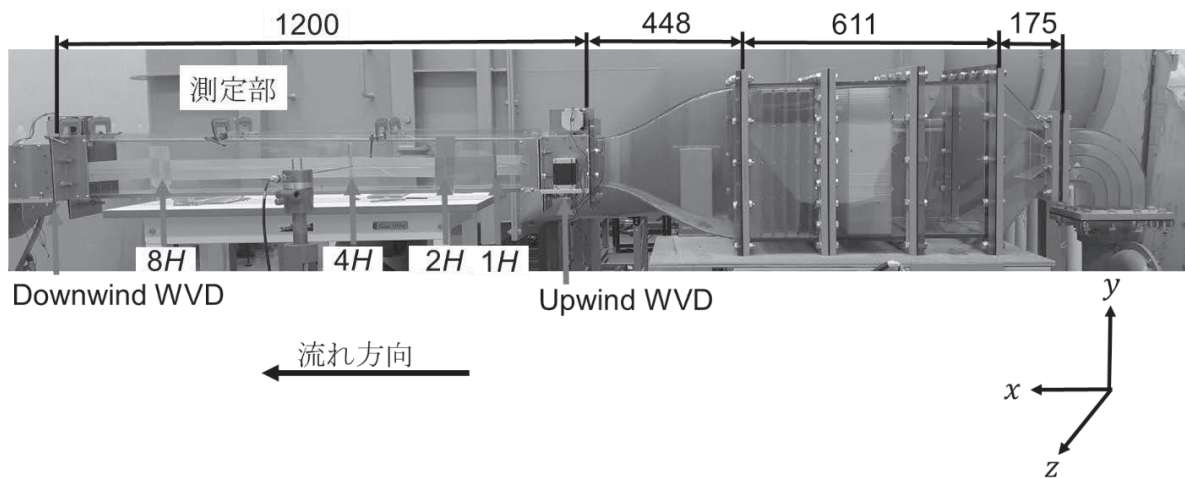
## 2. 実験装置および実験方法

図1に本実験で使用した風洞装置及び風速変動装置を示す。測定部長さは、正方形断面であるノズル出口の1

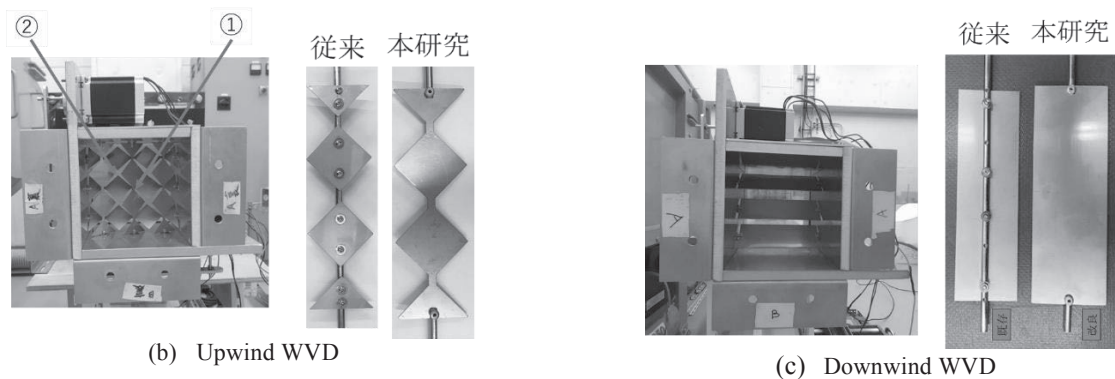
辺の長さ( $H = 120\text{mm}$ )の10倍(1200 mm)である。本研究で製作された2種類の風速変動装置(WVD: Wind Variation Device)は、測定部上流側及び下流側に設置された。測定部上流側に設置された風速変動装置(Upwind WVD)は四角翼と三角翼(回転翼)がそれぞれ12枚取り付けられている。一方、測定部下流側のもの(Downwind WVD)は3枚の長方形の翼で構成されている。従来の回転翼は羽根と軸の2部品から構成されるが、本装置では一体形成された回転翼(図1(b), (c)参照)を用い、軸による流れの乱れを抑えた。なお、回転翼は流れ方向の軸に対して平行な状態(流れを妨げない状態)を $0^\circ$ とした。本研究では個々の風速変動装置の特性を評価するため、どちらか一方を測定部に設置して実験が行われた。

表2. 風速変動装置の周期運動実験条件

回転角度 $\theta(^{\circ})$	回転速度 (rpm)		
-15 to 15	10	20	30
-30 to 30	10	20	30
-60 to 60	10	20	30



(a) 風洞装置



(b) Upwind WVD

(c) Downwind WVD

図1. 実験に用いた風洞及び風速変動装置

風速計測には、熱線流速計（KANOMAX 社製）と I 型プローブ（0248R-T5）が使用された。風速変動を生じさせる前の定常状態の主流方向（ $x$ ）の風速は 5 m/s とし、サンプリング周波数は 5 kHz、計測時間は 20 s とした。2 種類の風速変動装置の回転翼は表 2 に示した条件で周期運動をさせた。周期運動は計測開始から 5s 後に行った。計測は測定部上流から  $x = 1H, 2H, 4H, 8H$  と図 1(b) に示す点①と②の span ( $z$ ) および高さ方向 ( $y$ ) 位置で行われた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 Upwind WVD

図 2 に測定部上流に設置された風速変動装置 (Upwind  $x = 1H$

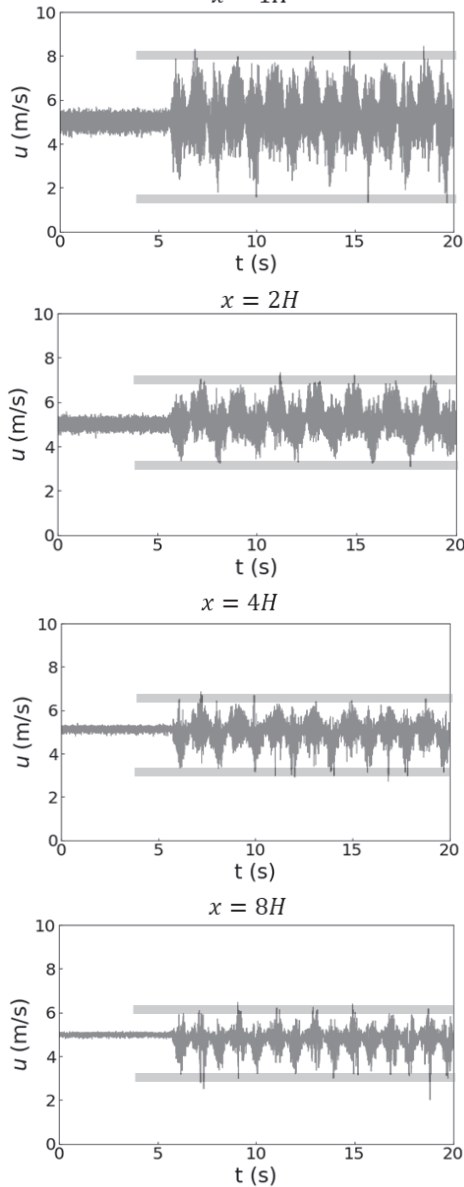


図 2. Upwind WVD の周期運動時の瞬間風速。回転角度幅  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、回転速度 20 rpm.

WVD) の回転翼を回転角度  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、回転速度 20 rpm で駆動させたときの測定位置  $x = 1H \sim 8H$  における風速の主流方向成分の時系列データを示す。時系列データは、回転翼による周期的な変動に不規則な変動が重なり合った変化をしている。風速変動幅は下流に行くにつれ減少している。

図 3 には図 2 の時系列のパワースペクトル(PSD)を示す。PSD のピークは回転翼の周期 ( $f_{WVD}$ )

$$f_{WVD} = \frac{2\pi N/60}{4\theta} \quad (1)$$

と同じ周波数であることが確認できる。ここで、 $N$  は回

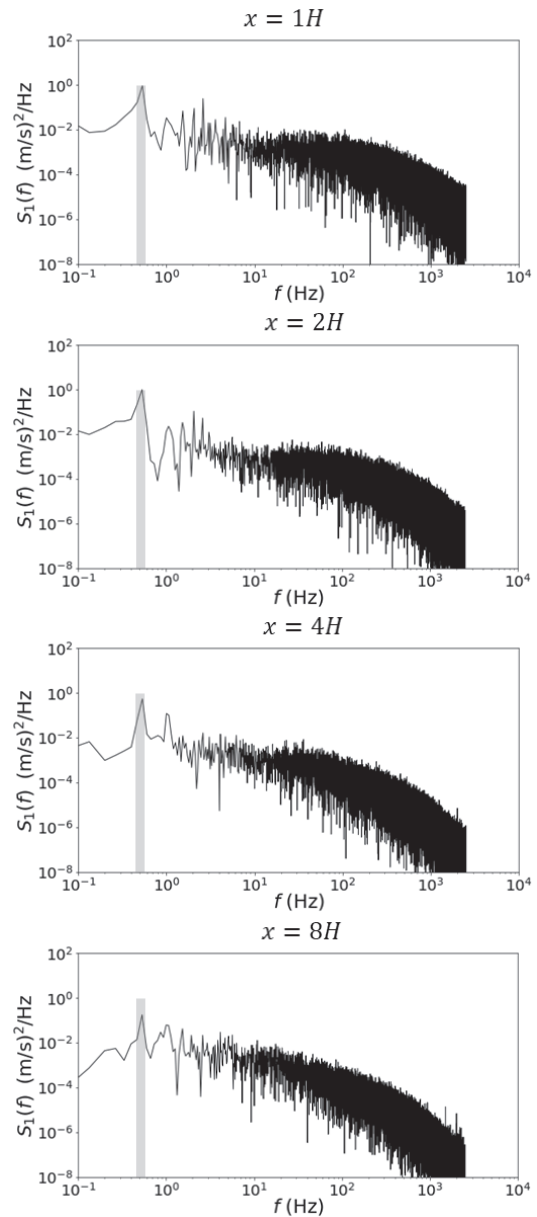


図 3. Upwind WVD の周期運動時のパワースペクトル。回転角度幅  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、回転速度 20 rpm.

転翼の回転速度であり、 $N=20$  rpm と  $\theta = 60^\circ$  の場合ピーク周波数は  $0.5$  Hz となる。  $x=4H$  と  $8H$  では、ピーク成分は上流での計測に比べて減衰している。一方、 $f_{WVD}$  よりも高周波である  $f \approx 1$  Hz の PSD が下流で増加している。しかし、PSD の高周波数成分に関して定量的な考察を行うには複数点で同時計測を行い、関連量等の統計的な評価をする必要がある。

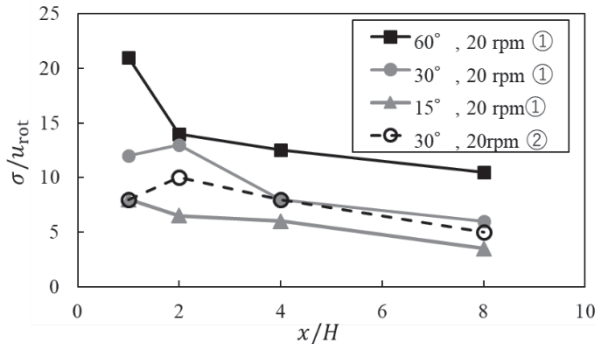


図 4. Upwind WVD の場合風速変動の標準偏差の主流方向の変化

図 4 に主流方向距離に対する Upwind WVD による風速変動の標準偏差の変化を示す。ここで、標準偏差  $\sigma$  は回転翼の周速度  $u_{rot} (= \omega r, \omega: \text{角速度}, r: \text{回転半径})$  で無次元化されている。  $u_{rot}$  は角速度 ( $\omega$ ) と回転半径 ( $r$ ) から式 (2) で与えられる。

$$u_{rot} = \omega r \quad (2)$$

$\sigma/u_{rot}$  値は回転角度の大きさに依存して変化し、その値は下流方向に減衰する傾向である。これは、風速変動装置が風速に加えた風速変動エネルギーは下流にいくにつれて小スケールの渦へエネルギーが輸送されて散逸するためである。将来的に制御システムを開発するために、無次元標準偏差が回転角度及び回転数に依存しない  $u_{rot}$  に代わる無次元パラメータの特定が必要となる。

### 3.2 Downwind WVD

本節では、測定部下流に設置された風速変動装置 (Downwind WVD) を駆動させた計測結果を示す。図 5 に測定部下流に設置された風速変動装置 (Downwind WVD) の回転角度  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、回転速度  $30$  rpm における風速の主流方向成分の時系列データを示す。Upwind WVD の結果に比べ、不規則な変動成分が極めて小さい。また、最大風速及び最小風速の差から算出される風速変動幅 ( $A_u$ ) に主流方向の測定位置に対する変化がみられない。

回転速度の影響を評価するために、図 6 に、回転角度  $-60^\circ \sim 60^\circ$  における回転速度  $10, 20$  と  $30$  rpm の風速の時系列データを示す。回転速度と同じ周波数の周期性がみ

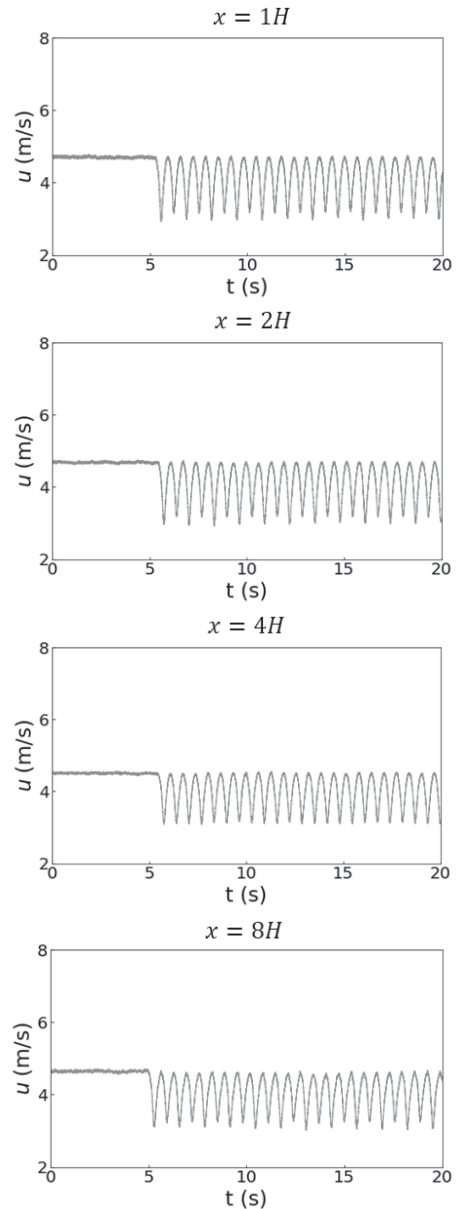


図 5. Downwind WVD の周期運動時の瞬間風速。回転角度幅  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、回転速度  $30$  rpm.

られるが、 $A_u$  は回転速度依存しない結果になっている。これを明確にするために、図 7 に図 6 の横軸である時間 ( $t$ ) を回転翼の周期 ( $T$ ) で無次元化した回転速度  $10, 20$  と  $30$  rpm の風速の時系列データを再度示す。ここで、 $T$  は

$$T = \frac{4\theta}{2\pi N/60} \quad (3)$$

である。無次元時間に対する風速の変化に対して、回転速度の影響は小さい。しかし、詳細に図 7 をみると、回転速度が大きくなると周期毎の風速の最小値が高くなり、 $A_u$  の値が小さくなっている。この要因として、回転速度が大きくなることで回転翼の駆動精度が悪化して目標の

回転角度まで回転してないことが挙げられる。今後、この点と周期毎の風速変動幅のばらつきを改善する必要がある。ここに示していないが、主流方向の測定位置に対する風速の時系列データの変化はみられなかった。

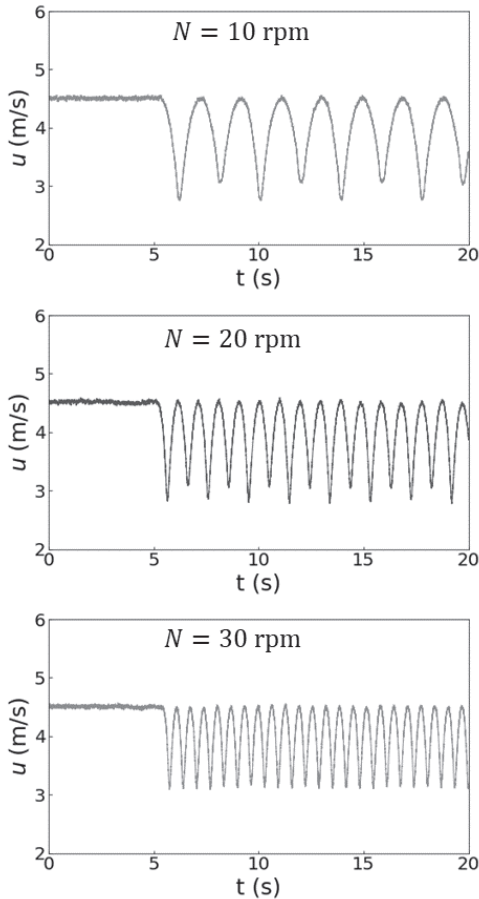


図 6. 回転速度 10, 20 と 30 rpm 時の瞬間風速. 計測位置  $x=4H$ , 回転角度幅  $-60^\circ \sim 60^\circ$ .

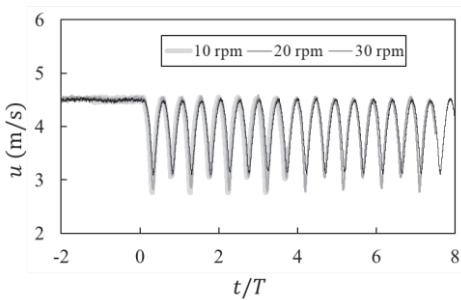


図 7. 回転速度 10, 20 と 30 rpm 時の瞬間風速の時系列. 時間は回転翼の周期で無次元化している. 計測位置  $x=4H$ , 回転角度幅  $-60^\circ \sim 60^\circ$ .

図 8 に最大風速及び最小風速の差から算出した風速変動幅 ( $A_u$ ) の回転角度に対する変化を示す。計測位置は  $x = 4H$  であり、図に示している  $A_u$  は全周期の変動幅の平

均值である。回転速度が 10 および 20 rpm のとき、風速変動幅は回転速度に依存してない。また、 $A_u$  は  $\theta$  の放物関数となる傾向を示している。これを確認するために、今後他の回転角度での計測も行う必要がある。ステッピングモータードライバの精度の関係で 30 rpm が大きすぎて正確な回転が出来てないため、風速変動幅が他の回転速度に比べて小さくなっている可能性がある。

以上の結果から、下流側に設置された風速変動装置は上流側に設置されたものと比較して風速変動へ与えるパラメータが少なく、変動特性のパターンも明確であるため、大スケールでの速度変動生成には Downwind WVD が魅力的であると思われる。

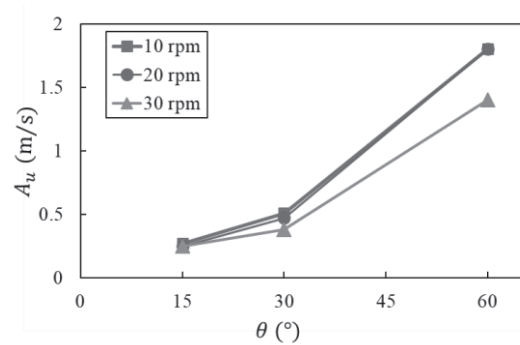


図 8. Downwind WVD の風速変動幅と回転角度の関係.

#### 4. 結言

- (1) 風洞測定部の上流側及び下流側に設置する 2 種類の風速変動装置 (Upwind WVD と Downwind WVD) の設計・製作を行った。
- (2) 測定部上流の風速変動装置 (Upwind WVD) では、風速の変動幅は下流に行くにつれ小さくなる。この変動幅は回転速度よりも回転角度への依存性が強い。
- (3) 測定部下流の風速変動装置 (Downwind WVD) では、風速変動は回転翼の周期運動に対応して変化する。回転翼の周期で無次元化した場合、風速変動幅は回転翼の回転数や下流方向の位置にほとんど依存しない。

#### 謝辞

風速変動装置の製作及び風洞実験を行う際、近畿大学工学部の学部生 (2022 年卒) であった内山 広大氏と原田 凱大氏に協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) L. Neuhaus, F. Berger, J. Peinke, M. Hölling. "Exploring the capabilities of active grids", *Experiments in Fluids*, **62**, no. 6, p. 1–12 (2021).



- 2) J. P. Goit, T. Ishihara, “Aerodynamic loads on wind turbine nacelles under different inflow turbulence conditions”, *Wind Energy*, **23**, no. 3, p. 645–659 (2020).
- 3) L. Bowen, A. Celik, M. Azarpeyvand, “Porous geometry effects on the generation of turbulence interaction noise”, *AIAA Aviation Forum*. Virtual Event, p. 1–14 (2021).
- 4) K. Nagata, Y. Sakai, T. Inaba, H. Suzuki, O. Terashima, H. Suzuki, “Turbulence structure and turbulence kinetic energy transport in multiscale/fractal-generated turbulence”, *Physics of Fluids*, vol. **25**, no. 6 (2013).
- 5) H. Makita, “Turbulence Wind Tunnel”, *Nagare*, **21**, p. 409–418 (2002).
- 6) H-S. Kang, S. Chester, C. Meneveau, “Decaying turbulence in an active-grid-generated flow and comparisons with large-eddy simulation”, *Journal of Fluid Mechanics*, **480**, p. 129–160 (2003).
- 7) E. Bodenschatz, G. P. Bewley, H. Nobach, M. Sinhuber, H. Xu, “Variable density turbulence tunnel facility”. *Review of Scientific Instruments*, **85**, no. 9 (2014).
- 8) D. B. Quinn, A. Watts, T. Nagle, D. Lentink, “A new low-turbulence wind tunnel for animal and small vehicle flight experiments”, *Royal Society Open Science*, vol. **4**, no. 3 (2017).
- 9) L. Kröger, J. Frederik, J-W Van Wingerden, J. Peinke, M. Hölling, “Generation of user defined turbulent inflow conditions by an active grid for validation experiments”, *Journal of Physics: Conference Series*, **1037**, no. 5, p. 1–10 (2018).