

沙漠環境風洞の特性計測（定常風と脈動風）

林 農・原 豊・康 仁勝・加藤 優・藤本 裕己

若 良二^{*1}・田川 公太郎^{*2}・神近 牧男^{*3}

鳥取大学工学部応用数理工学科

^{*1}鳥取大学国際交流センター・^{*2}鳥取大学地域学部・^{*3}鳥取環境大学

Measurements of the Wind generated by Desert Environment Wind Tunnel (Constant Speed Wind and Periodically Varying Wind)

Tsutomu HAYASHI, Yutaka HARA, In-Seung KANG, Masaru KATO, Yuuki FUJIMOTO

Ryoji WAKA^{*1}, Kotaro TAGAWA^{*2} and Makio KAMICHIKA^{*3}

Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering

Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: hayashi@damp.tottori-u.ac.jp

^{*1} Center for International Affairs of Tottori University

^{*2} Faculty of Regional Sciences, Tottori University

^{*3} Tottori University of Environmental Studies, Tottori, 689-1111 Japan

Abstract: Wind characteristics generated by the wind tunnel named Desert Environment Wind Tunnel, which can generate arbitrary pattern of wind speed variation by changing the angle of pitch of the blower blades, were investigated with both of a hot-wire anemometer and a ultrasonic anemometer. Distributions of the wind velocity components (v , w) in a plane perpendicular to the mainstream (u -direction), whose wind speed varies like a sine wave, were measured downstream at $x = 1.5\text{m}$ from the exit of wind tunnel nozzle. The experimental results revealed that the flow expands when it accelerates and, in reverse, the flow contracts when slowing down.

Key Words: Measurement, Wind tunnel, Periodically varying wind, Wind turbine, Desert environment

1. はじめに

2006 年は国連により定められた「砂漠と砂漠化に関する国際年」であり、グローバルな環境問題の一つである砂漠化とその対処に世界の注目が集められている。平成 12 年度－14 年度に科学研究費補助金（地域連携推進研究費）「砂漠化防止・砂漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」によって、沙漠環境風洞と名付けた変動風を発生可能な風洞を設置した[1]。この風洞によって、沙漠環境で予想される激しく変動する風の中における風車の運転特性を調べることが可能となった。この風洞の導入が契機となって、鳥取大学の 21 世紀 COE プログラム「乾燥地科学プログラム」のなかに、乾燥地において健康的な人間生活の営みを保障するために自然エネルギーを利用する研究グループが誕生した。自然エネルギー利用グループでは、乾燥地に生活する人々の生活向上や、砂漠化防止・砂漠緑化を推進するために、乾燥地に豊富に

存在し環境に優しい風力や太陽エネルギーを利用した技術パッケージを構築することを目的として、農学と工学の融合を目指している。これまでに乾燥地における砂漠化防止・緑化支援技術の一つとして沙漠環境で活躍する乾燥地に適した風力タービンの研究開発を行っている[2]－[9]。

本研究では、この沙漠環境風洞が発生する変動風の特性を明らかにすることを目的とし、風速分布および風向変化について熱線流速計と超音波風速計を用いた計測を行う。

2. 沙漠環境風洞の概要

本研究で使用した沙漠環境風洞の主要部分の写真を図 1 から図 3 に示す。また、図 4 に風洞の概略寸法を示す。沙漠環境風洞は吹出し型であり、吹出し口サイズ(図 3 (a))は $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、最大風速は 25 m/s 以上が可能であり、風速 0 m から 25 m の任意の風速を発生させることができる。ただし、



図 1 沙漠環境風洞本体



図 2 吸込みベルマウスと軸流送風機

通常は異物の混入を防ぐため、吸込み口に防塵フィルタ（PS/300，日本バイリーン株）を取付けて実験を行なっており，この場合の最大風速は約 20m/s となる．表 1 に沙漠環境風洞の主な仕様を示す．この沙漠環境風洞の最大の特徴は，ピッチ可変機構（可変範囲： $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ）を備えた軸流送風機（図 2 参照，ローターブレード数 16 枚）を有していることである．送風機駆動用のインバータ周波数 f_B [Hz]（送風機回転数： n_B [rpm]） $\doteq 0.983 \times 120f_B/6$ と最大ピッチ角および最小ピッチ角とピッチ角変化の周期を適宜与えることで，風速一定の定常風（図 5 (a)）のほか，周期的に風速が変化する脈動風（図 5 (b)），急激に風速が変化する突風（図 5 (c)），瞬間的に風速が変化する瞬間風（図 5 (d)）などの任意の風パターンを発生可能である．

風洞吹出し口には，大きさが 1.5m(幅) × 1.5m(高さ) × 3.0m(長さ)の着脱式のテストセクション（図 3 (b) および図 4 の赤色部分）が接続可能であり，これはレール上に載せられていて容易に移動可能である．本論文で行なう風洞特性計測や風車の特性計測を行う場合には，テストセクションは吹出し口から取り外して移動させ，図 3(a)の



(a) (b)

図 3 (a) 風洞吹出し口と 2 軸トラバース装置，
 (b) テストセクション

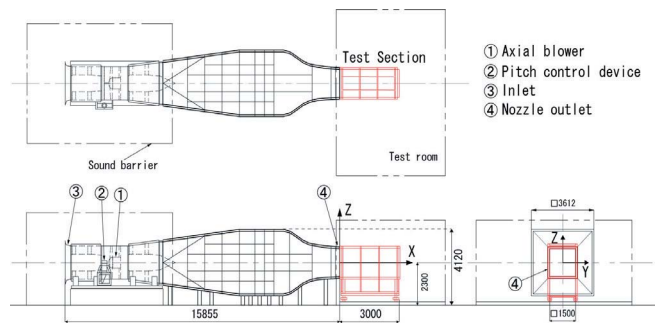


図 4 沙漠環境風洞の概略図

表 1 沙漠環境風洞の仕様

型 式	吹出し型風洞
吹出し口寸法	1.5m × 1.5m
風速可変範囲	1 ~ 25m/s 以上
軸流送風機	口径： $\phi 1.8\text{m}$ ， 定格回転数：1180rpm， 風量： $3800\text{m}^3/\text{min}$ ， 全圧：980Pa.TP
送風機用電動機	3 相交流，200V，6 極，90kW
縮流ノズル	縮流比：1:5.138， 縮流曲線：Rose & Hassen 式
脈動風の範囲	変動幅：平均風速の $\pm 30\%$ 最短周期： $T=2\text{s}$
突風の範囲	最低風速： $V_1=2\text{m/s}$ 最大風速： $V_2=15\text{m/s}$ 最短変化時間： $T=1\text{s}$
瞬間風の範囲	瞬間最大風速：一定風速 $\times 1.5$ 最短変化時間： $T=2\text{s}$

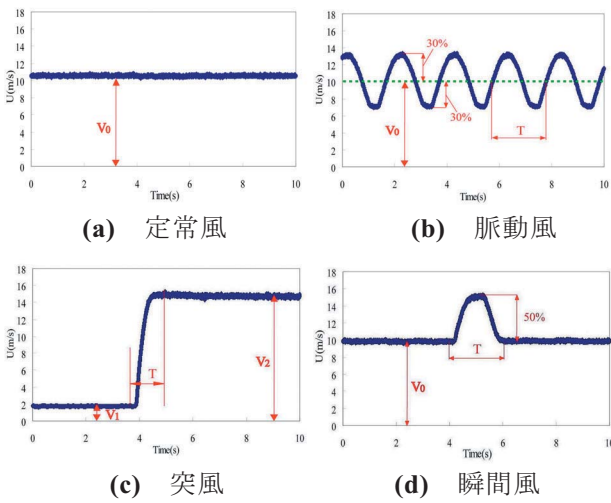


図5 発生可能な風パターン

ように吹出し口からオープンスペースに直接噴き出してくる噴流を実験に使用する。

本風洞装置に設置してある2軸トラバース装置(図3(a))の移動可能範囲は縦および横方向にそれぞれ1500mmであり、位置精度は±0.75mm以下である。

本風洞で調査すべき課題は次の事項である。

- ① 4種類の風パターンの制限値を超えた限界値を見極める。
- ② 突風の逆ステップ(高速から低速へ)を可能にする。
- ③ 変動流の平均速度特性について解析する。
速度分布の捩れ特性、静圧、動圧、全圧、速度偏向特性。
- ④ 変動流の乱流特性について解析する。
- ⑤ 各種の砂漠対応風車の特性試験。

3. 実験装置と計測方法

図4に示すように、座標系は風洞吹出し口の中心に原点をとり、主流方向にX軸、それに垂直な面内において水平方向にY軸、垂直方向にZ軸をとった。

本研究ではまず定常風の風速分布と乱れ度分布の計測を行った。この計測ではI型熱線プローブを使用し、これを2軸トラバース装置に取付け主流に垂直な平面内(Y-Z面)で移動させた。トラバース装置は吹出し口からの距離Xが0m, 1.5m, 3mの3ヶ所(図6参照)に設置した。各位置においてプローブをY-Z面内で移動させて計測点に位置決めした。各計測点における計測データ数は

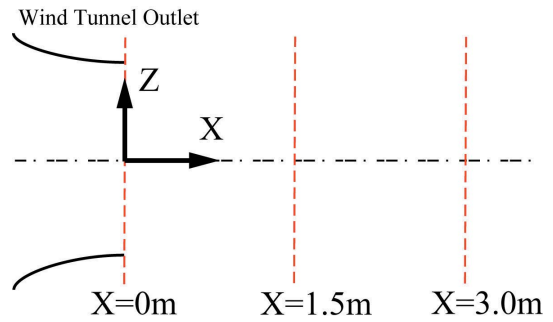


図6 定常風の測定位置



図7 超音波風速計

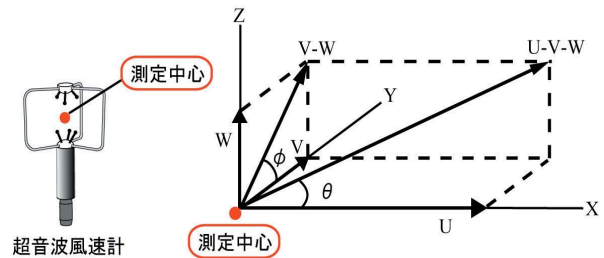


図8 偏向角 θ と方位角 ϕ

30,000個、サンプリング周波数は約4kHzとして主流方向(風速U成分)の風速データを計測した。

次に吹出し口後流における定常風の風向分布を把握するために、超音波風速計(図7参照, Model 81000, YOUNG社製)を使用して風速3成分の計測を行なった。図8に座標XYZと風速3成分U, V, Wの関係を示す。本研究では、風速3成分の合成ベクトル(U-V-W)が主流方向(X軸)と成す角度を偏向角 θ 、主流に垂直な風速2成分(V, W)の合成ベクトル(V-W)がY軸方向と成す角度を方位角 ϕ と定義する。熱線プローブによる計測と同様に、X=0m, 1.5m, 3mの3ヶ所のY-Z面内で超音波風速計を移動させて計測を行った。サンプリング周波数は

表 2 脈動風発生条件

No.	平均中心風速： U_A	回転数： n_B
1	1.4 m/s	197 rpm
2	3.0 m/s	393 rpm
3	4.9 m/s	590 rpm
4	6.9 m/s	786 rpm
5	8.8 m/s	983 rpm
6	10.3 m/s	1180 rpm

32Hz（時間間隔：0.03125 s），各計測点における取得データ数は300個（計測時間：10秒）とした。

沙漠環境風洞が発生する脈動風の特徴を調べるために、超音波風速計を使用して、上記と同様の計測を行なった。脈動風発生条件は、軸流送風機のピッチ角を最大振幅となる 0° から 60° の間において変化させ、脈動風周期は実際の運転上における最短周期と考えられる $T=1.29$ 秒とした。この条件下において送風機回転数を変え、表2に示す6つの平均中心風速状態で脈動風を発生させた。この実験では、 $X=1.5$ mの位置における $Y-Z$ 面内の風速分布（風速3成分）の計測を行なった。サンプリング周波数は32Hz，各計測点における取得データ数は3840個（計測時間：120秒）である。

4. 実験結果と考察

4. 1 定常風の風速分布と乱れ度分布

図9から図11に、中心風速15m/sの定常風を発生させたときの、 $X=0$ m, 1.5m, 3mの位置における各 $Y-Z$ 面内で熱線流速計を用いて計測した速度分布を示す。各図の(a)は Z 座標を固定して Y 方向にプローブを移動させて計測した風速 U 成分の Y 方向分布をグラフで表したものであり、(b)は Y 座標を固定して Z 方向に計測した結果得られた風速 U 成分の Z 方向分布のグラフである。図9～11ではグラフが重ならないように、隣り合うグラフのデータは5m/sの間において上下方向にスライドさせて表示してある。これらの結果より、風洞吹出し口の直後では、噴流のコアに相当する速度一定領域は広いが、下流に進むにつれてコアの領域が狭くなることがわかる。また、吹出し口直後では、ノズル内壁($Y=\pm 750$ mmと $Z=\pm 750$)の位置の外側で急激に風速は減少しているが、下流側では速度減少の勾配は小さくなっており、より広い範囲まで噴流が広がっている様子が理解される。図9から図11の各図における(a)と(b)を比較すると、

それほど大きな違いは見られないので、本風洞が発生する噴流は Y および Z 方向に関してほぼ対称な風速分布になっていると考えられる。なお、吹出し口直後(図9)において顕著であるが、噴流コア内において中央部分が相対的に速度が遅くコアの境界において若干速度が増加する傾向が見られる。

次に定常風の噴流コア内において、より詳細な風速分布と乱れ度の分布を計測した。計測手段はI型熱線プローブである。計測断面は図6に示した3ヶ所とし、計測点は各 $Y-Z$ 断面内において $-700\text{mm}\leq Y\leq 700\text{mm}$, $-700\text{mm}\leq Z\leq 700\text{mm}$ の範囲における100mm間隔の格子点上とした。定常風の平均風速は約5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/sの4種類で計測を行った。図12から図15に $X=0$ mにおける計測結果を、図15から図19に $X=1.5$ mにおける計測結果を、図20から図23には $X=3$ mにおける計測結果を示す。各図の(a)には、噴流のコアを含むと考えられる $-500\text{mm}\leq Y\leq 500\text{mm}$, $-500\text{mm}\leq Z\leq 500\text{mm}$ の範囲における平均風速を基準とした各計測点の風速の偏差をカラーマップ表示している。図の下に記載している平均偏差とは、平均風速を算出している上記領域内における偏差の絶対値の平均である。一方各図の(b)には、乱れ度の分布をカラーマップ表示してある。ここで乱れ度とは、各計測点における時系列風速データから算出される平均風速からの各計測データの偏差の二乗平均の平方根(R. M. S.)を平均風速を基準とする百分率で表したものである。なお、図の下に記載している平均乱れ度とは、 $-500\text{mm}\leq Y\leq 500\text{mm}$, $-500\text{mm}\leq Z\leq 500\text{mm}$ の範囲における乱れ度の平均である。 $X=0$ mの断面の結果(図12～15)を見ると、風速分布は噴流中心部分において偏差がマイナスとなっており、逆にコア周辺において偏差がプラスになっていて、図9～11で見られた風速分布の傾向がより明瞭になっている。この断面におけるコア領域の乱れ度はほとんど一様になっており、乱れ度の値も1.3～1.8%の低い値が得られている。

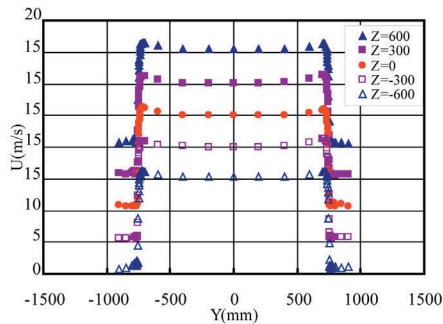
$X=1.5$ mの断面の結果(図16～19)を見ると、風速分布はいぜんとして中心部が相対的に低くなる傾向が見られるが、平均偏差の値を参考にすると、風速15m/s以下では、 $X=0$ mの断面よりも中心部における風速の一様性は増加していると言える。しかし、 $|Y|>600\text{mm}$ および $|Z|>600\text{mm}$ の領域では、急激に偏差が増加しており、噴流コア領域が狭くなっている様子がうかがえる。また、乱れ度の分布をみると、風速分布以上に一様な領域が狭くなっていることが分かる。

$X=3\text{m}$ の断面の結果 (図 20~23) を見ると, 風速分布からは風速が一様と言える領域はおおよそ, $-500\text{mm} \leq Y \leq 500\text{mm}$, $-500\text{mm} \leq Z \leq 500\text{mm}$ の範囲と考えられる. しかし, 乱れ度の一様領域はさらに小さく, せいぜい $-400\text{mm} \leq Y \leq 400\text{mm}$, $-400\text{mm} \leq Z \leq 400\text{mm}$ の範囲と考えられる.

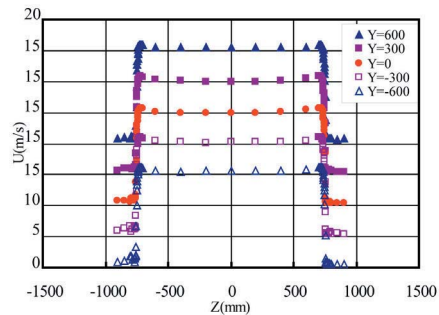
4. 2 定常風の偏向分布

定常風の偏向状態を調べるために, 超音波風速

計を用いて風速の3成分(U, V, W)の計測を行った. 計測対象とした定常風の中心風速は約 5m/s, 10m/s, 15m/s の3種類である. 計測断面は図6に示した3ヶ所とし, 計測点は各Y-Z断面内において $-700\text{mm} \leq Y \leq 700\text{mm}$, $-700\text{mm} \leq Z \leq 700\text{mm}$ の範囲における 100mm 間隔の格子点上とした. 図24から図26に $X=0\text{m}$ における計測結果を, 図27から図29に $X=1.5\text{m}$ における計測結果を, 図30から図32には $X=3\text{m}$ における計測結果を示す. 各図の (a) には, 主流に垂直な風速成分の合成ベクトル

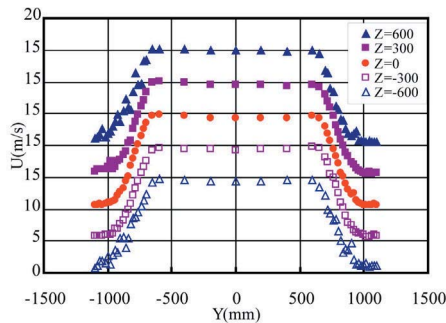


(a) 風速 U 成分の Y 方向分布

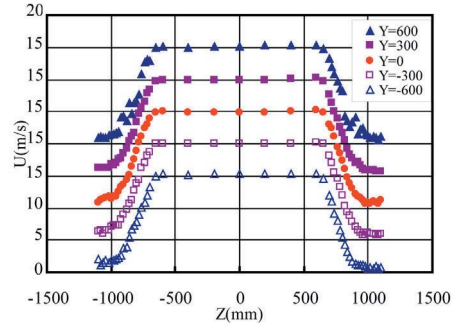


(b) 風速 U 成分の Z 方向分布

図9 中心風速 15 m/s の定常風 ($X = 0\text{ m}$)

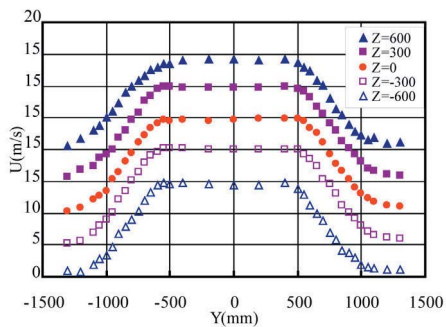


(a) 風速 U 成分の Y 方向分布

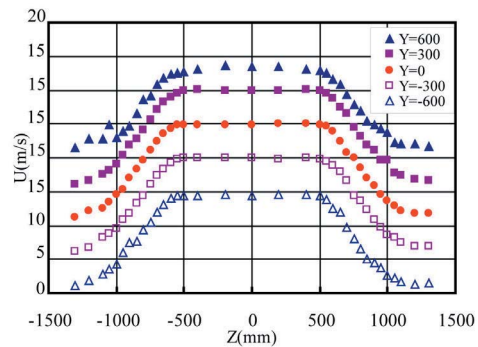


(b) 風速 U 成分の Z 方向分布

図10 中心風速 15 m/s の定常風 ($X = 1.5\text{ m}$)

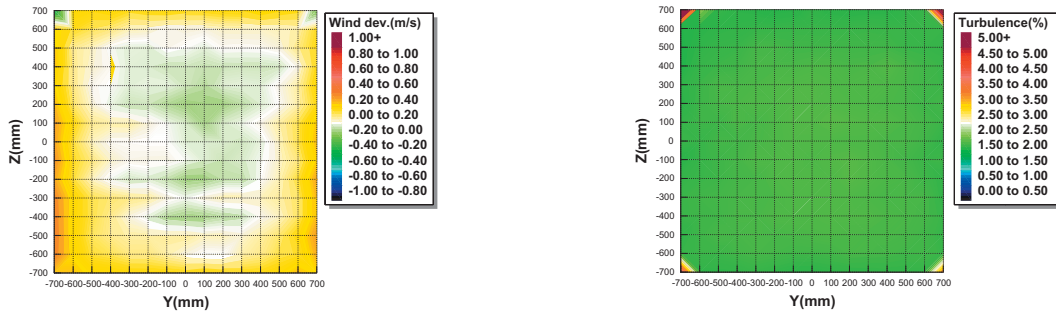


(a) 風速 U 成分の Y 方向分布



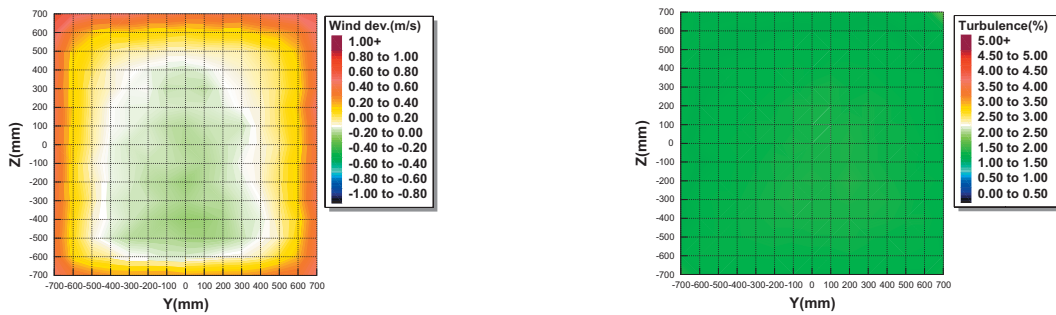
(b) 風速 U 成分の Z 方向分布

図11 中心風速 15 m/s の定常風 ($X = 3\text{ m}$)



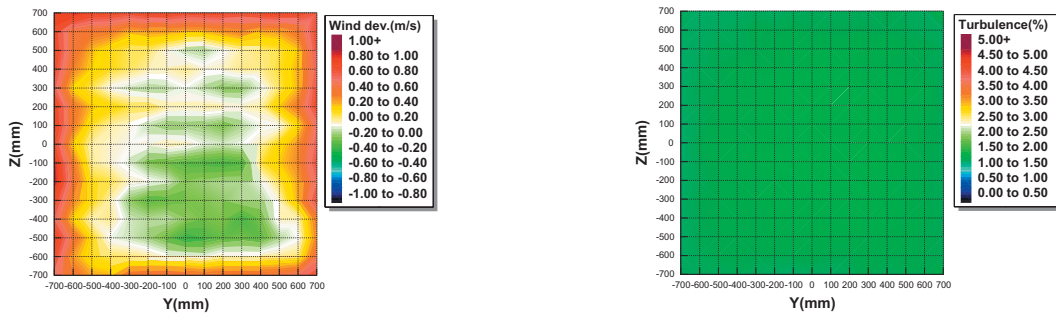
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.046 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：1.8 %）

図 12 平均風速 5.3 m/s の定常風（X=0m）



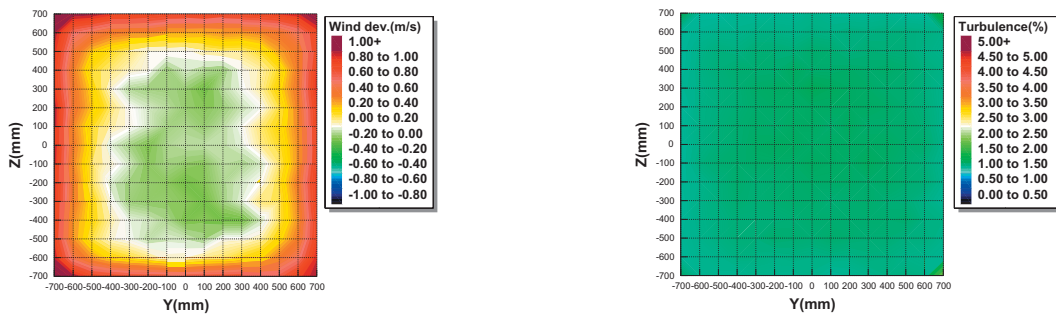
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.055 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：1.6 %）

図 13 平均風速 10.4 m/s の定常風（X=0m）



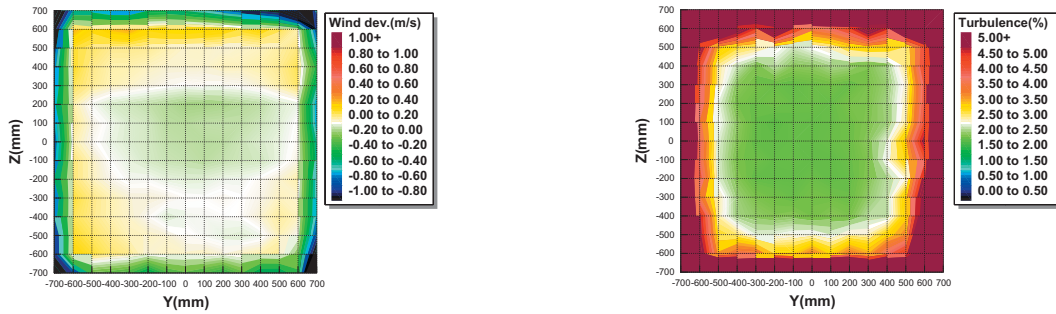
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.109 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：1.4 %）

図 14 平均風速 15.3 m/s の定常風（X=0m）



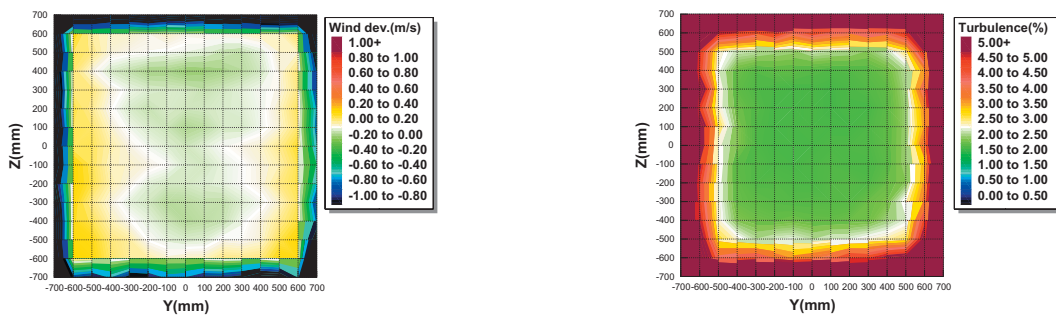
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.099 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：1.3 %）

図 15 平均風速 19.0m/s の定常風（X=0m）



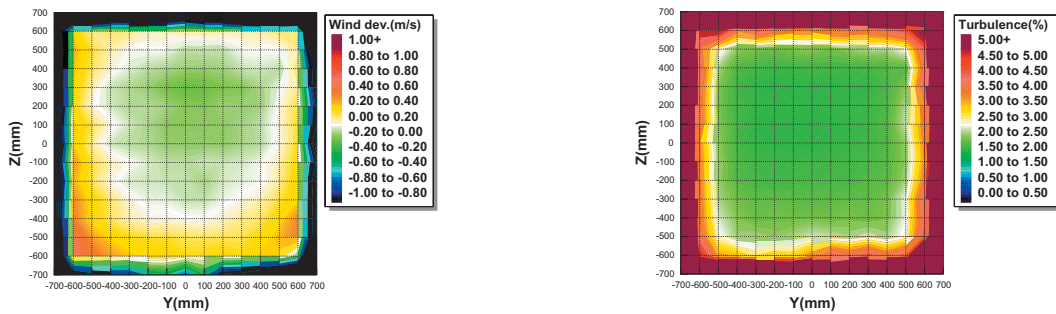
(a) 平均風速からの偏差 (平均偏差 : 0.042 m/s) (b) 乱れ度 (平均乱れ度 : 2.3 %)

図 16 平均風速 5.1 m/s の定常風 (X=1.5m)



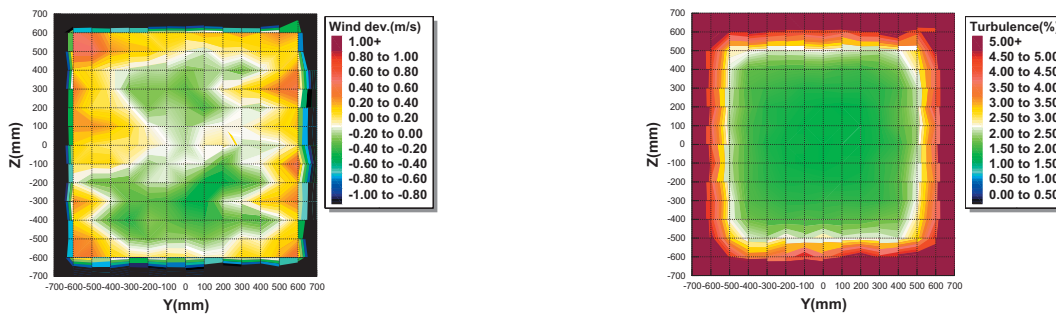
(a) 平均風速からの偏差 (平均偏差 : 0.046 m/s) (b) 乱れ度 (平均乱れ度 : 2.1 %)

図 17 平均風速 10.1 m/s の定常風 (X=1.5m)



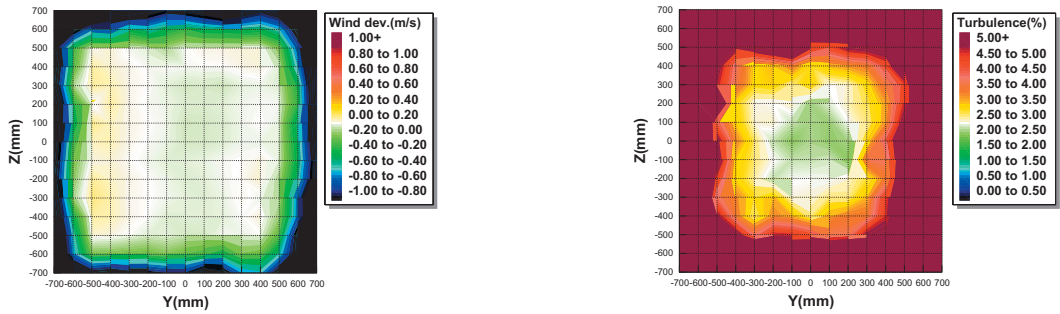
(a) 平均風速からの偏差 (平均偏差 : 0.085 m/s) (b) 乱れ度 (平均乱れ度 : 2.0 %)

図 18 平均風速 15.1 m/s の定常風 (X=1.5m)



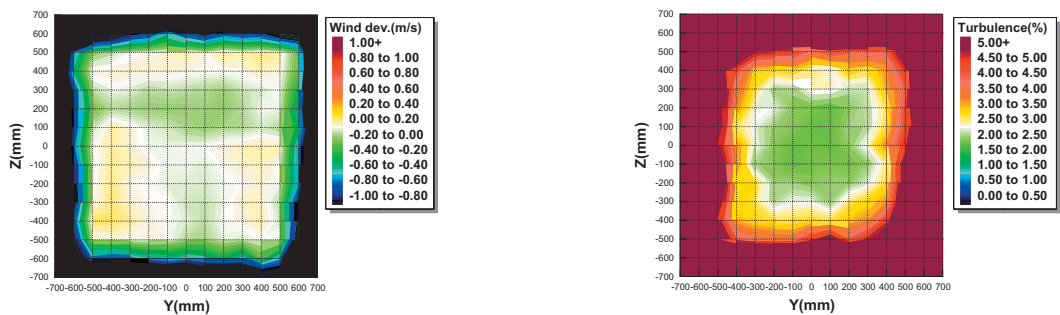
(a) 平均風速からの偏差 (平均偏差 : 0.154 m/s) (b) 乱れ度 (平均乱れ度 : 2.0 %)

図 19 平均風速 19.6 m/s の定常風 (X=1.5m)



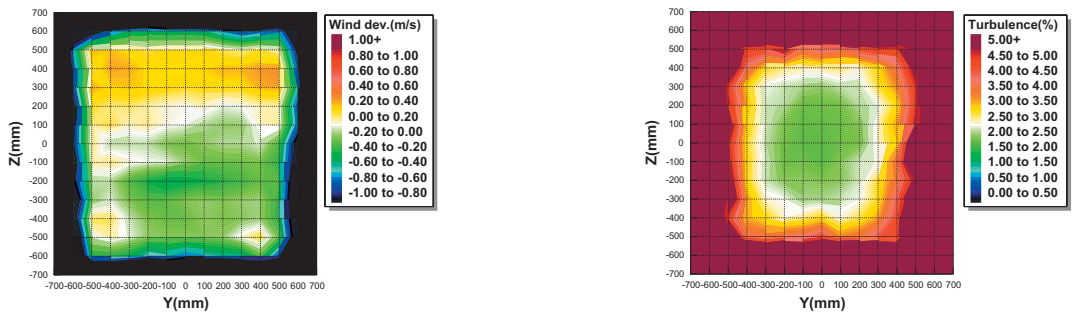
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.029 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：3.9 %）

図 20 平均風速 5.6 m/s の定常風（X=3.0m）



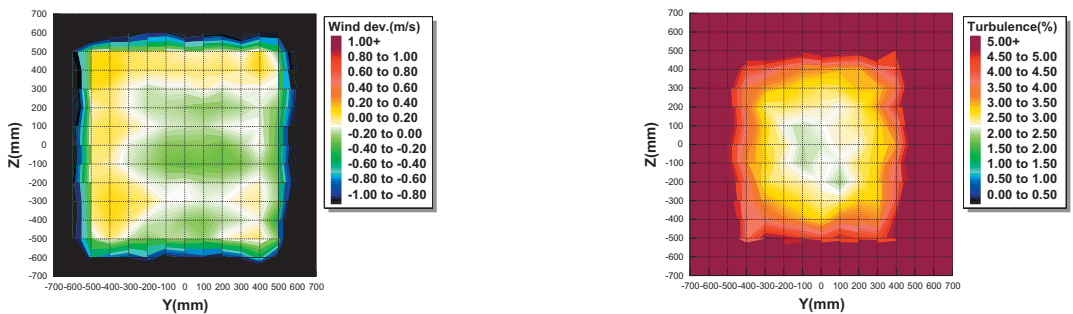
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.047 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：3.6 %）

図 21 平均風速 10.8 m/s の定常風（X=3.0m）



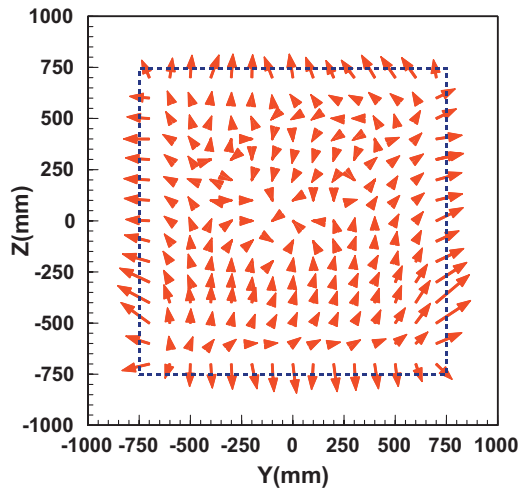
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.160 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：3.6 %）

図 22 平均風速 15.5 m/s の定常風（X=3.0m）

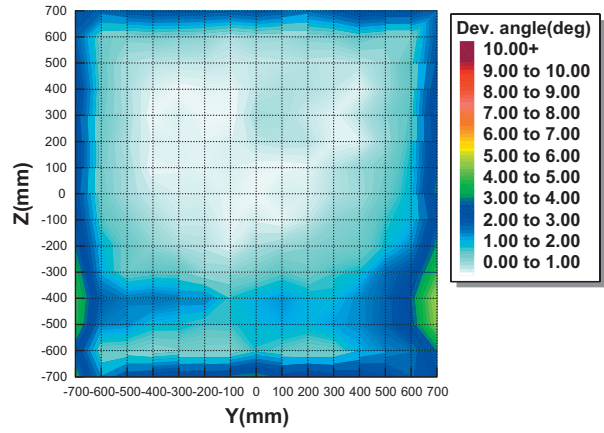


(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.094 m/s） (b) 乱れ度（平均乱れ度：4.2 %）

図 23 平均風速 19.6 m/s の定常風（X=3.0m）

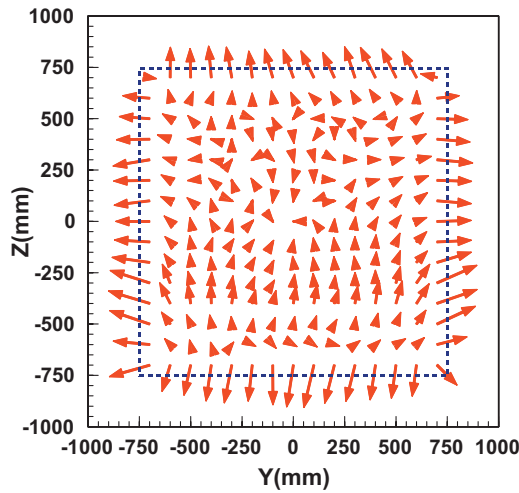


(a) V-W 合成ベクトル

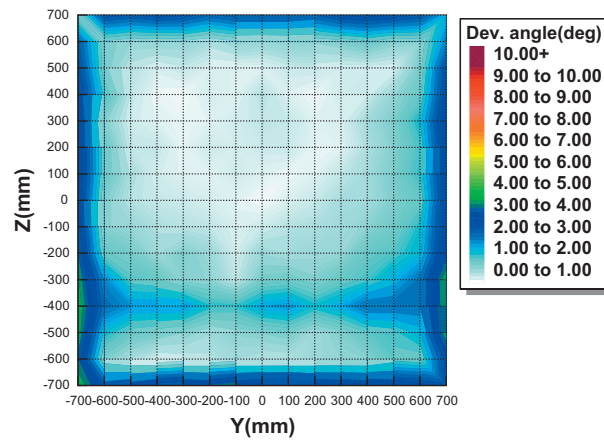


(b) 偏向角 θ の分布

図 24 中心平均風速 4.8 m/s (X = 0 m)

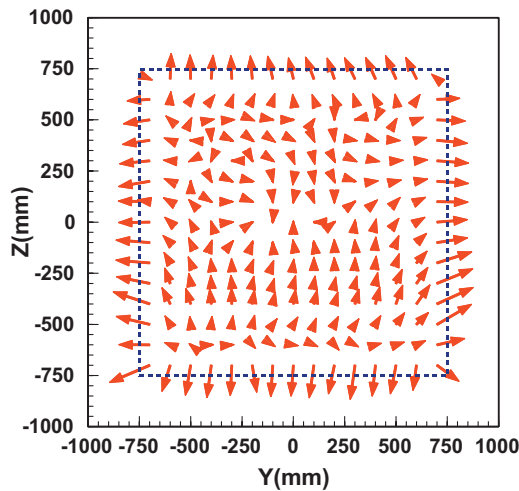


(a) V-W 合成ベクトル

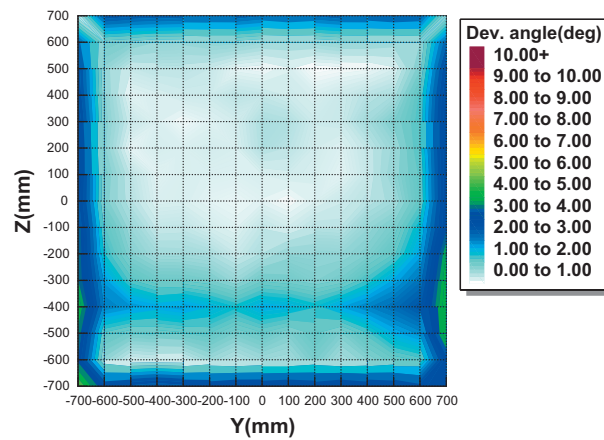


(b) 偏向角 θ の分布

図 25 中心平均風速風速 10.1 m/s (X = 0 m)

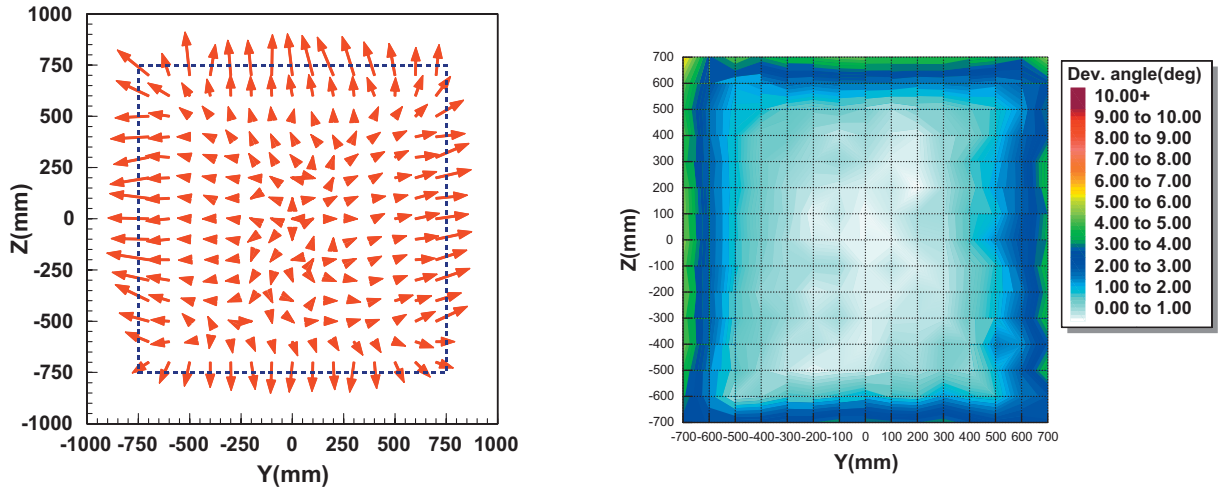


(a) V-W 合成ベクトル



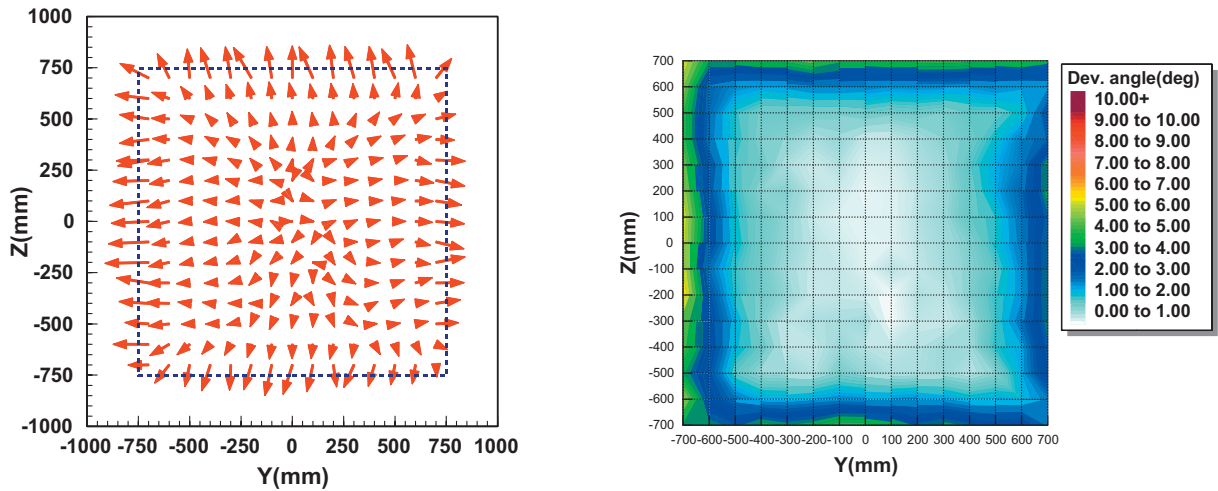
(b) 偏向角 θ の分布

図 26 中心平均風速風速 14.9 m/s (X = 0 m)



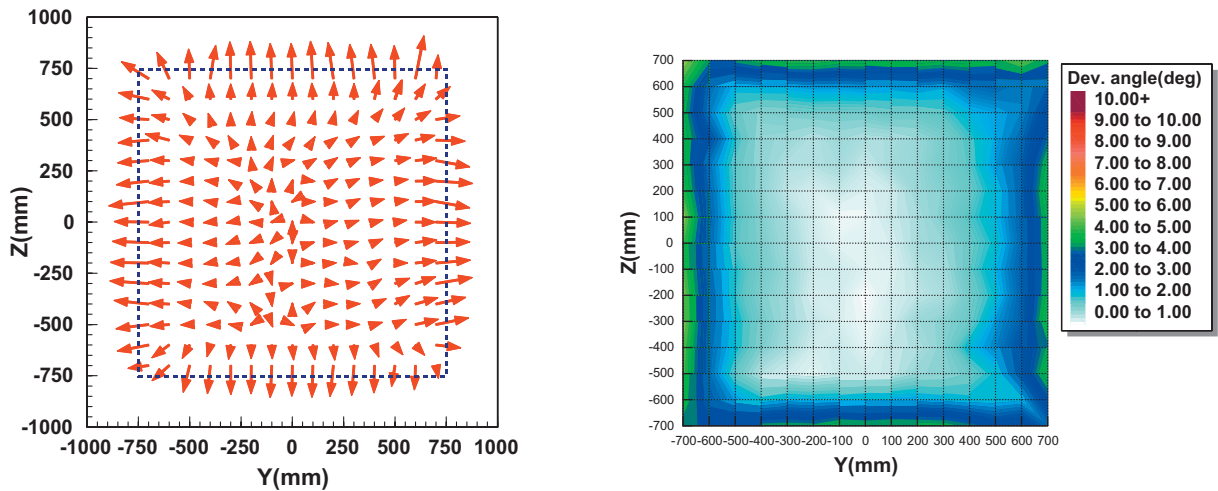
(a) V-W 合成ベクトル (b) 偏向角 θ の分布

図 27 中心平均風速風速 5.0 m/s (X = 1.5 m)



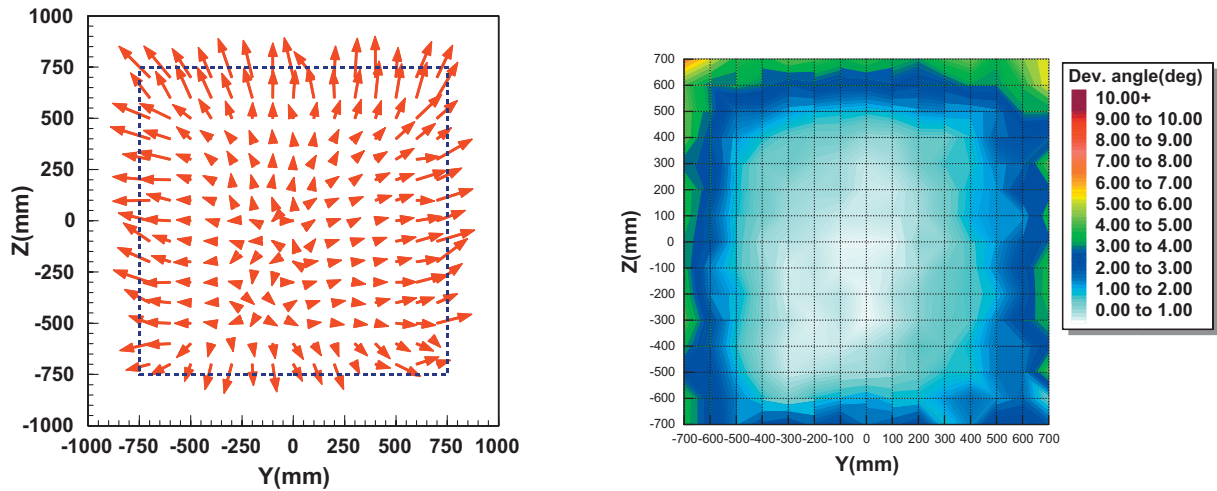
(a) V-W 合成ベクトル (b) 偏向角 θ の分布

図 28 中心平均風速風速 10.0 m/s (X = 1.5 m)



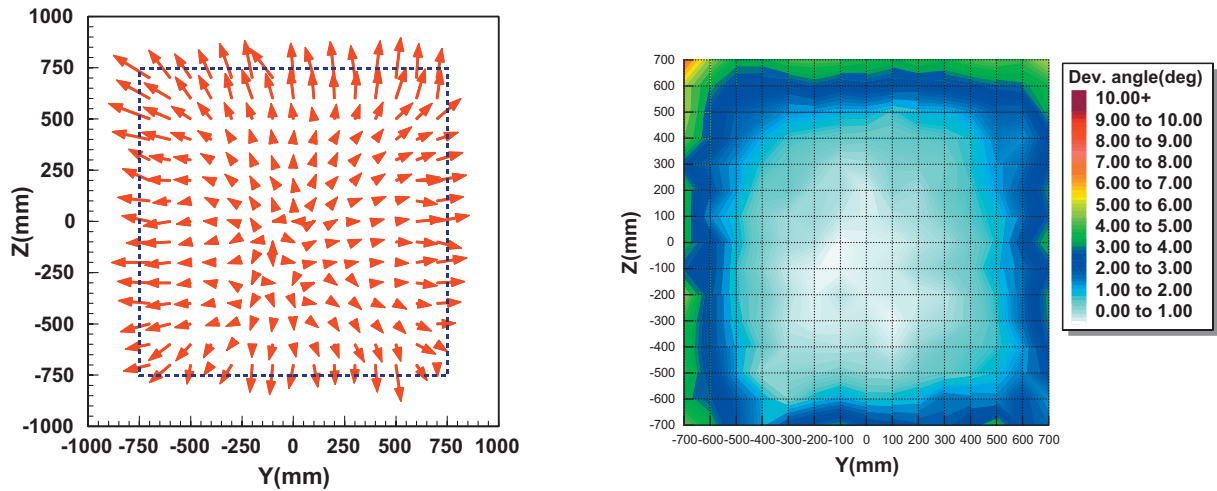
(a) V-W 合成ベクトル (b) 偏向角 θ の分布

図 29 中心平均風速風速 14.9 m/s (X = 1.5 m)



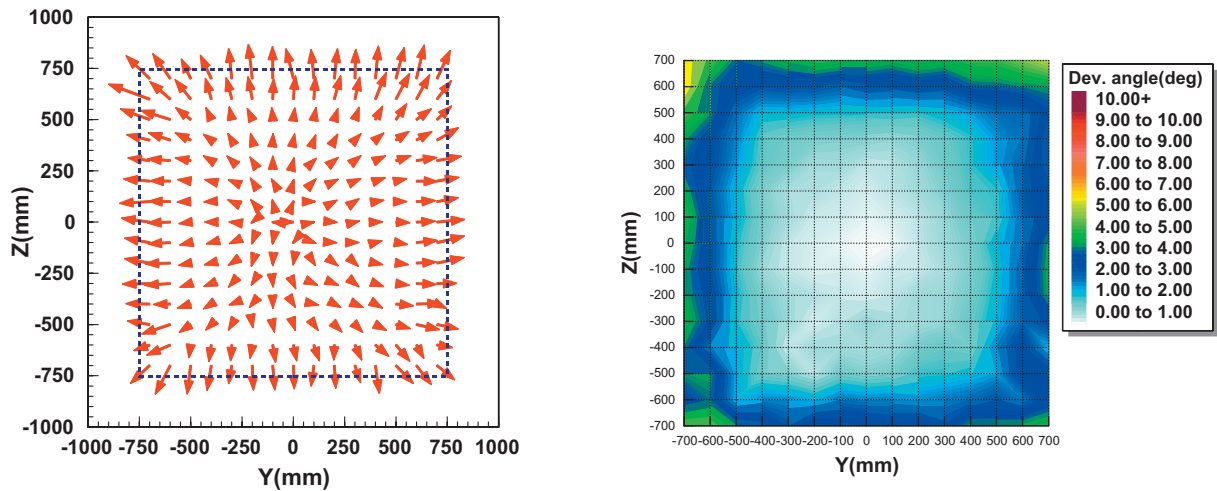
(a) V-W 合成ベクトル (b) 偏向角 θ の分布

図 30 中心平均風速風速 5.0 m/s (X = 3.0 m)



(a) V-W 合成ベクトル (b) 偏向角 θ の分布

図 31 中心平均風速風速 10.0 m/s (X = 3.0 m)



(a) V-W 合成ベクトル (b) 偏向角 θ の分布

図 32 中心平均風速風速 14.6 m/s (X = 3.0 m)

(V-W)を図示する. 図中の点線の四角形は吹出し口の内壁に相当する位置を示す. 各図の(b)は, 図8で定義した風速ベクトル(U-V-W)が主流方向(X軸)と成す偏向角 θ (deg)をカラーマップ表示したものである.

$X=0\text{m}$ の断面(図24~26)では, 風速によらず, 噴流のコア内ではおおよそ主流方向に向って平行に風が流れていることが分かる. ただし, コア領域の境界と考えられる $|Y|=700\text{mm}$ および $|Z|=700\text{mm}$ のライン上では外向きにV-W合成ベクトルが向いており, この場所における偏向角は約2~3度となっている. $X=0\text{m}$ の断面では, $Z=-400\text{mm}$ のラインに沿って, 周囲に比較して上向きに大きな偏向角を示す領域が見られる. 原因は明らかでないが, これは計測プローブの移動方向を変えて再計測を行った結果でも同様であり, 本風洞の構造に起因するかもしれない.

$X=1.5\text{m}$ の断面(図27~29)では, $-500\text{mm}\leq Y\leq 500\text{mm}$, $-500\text{mm}\leq Z\leq 500\text{mm}$ の範囲において, 偏向角は2度未満となっており, ほぼ平行で一様な流れが形成されている.

$X=3\text{m}$ の断面(図30~32)でも, $X=1.5\text{m}$ の場合と偏向角の分布において大きな差は無く, $-500\text{mm}\leq Y\leq 500\text{mm}$, $-500\text{mm}\leq Z\leq 500\text{mm}$ の範囲において, 偏向角は2度未満である. また, 偏向角の分布に関しては, 風速の大きさはあまり影響が無いようである.

4. 3 脈動風の計測結果

表2に示した6種類の脈動風に対する超音波風速計を使用した計測を行った. 図33に示すグラフは各脈動風の中心部分で計測した93周期分の風速データをアンサンブル平均した結果である. これより, ピッチ角変化の条件を同一として, 送風機の回転数を増加させ平均風速を大きくする時, 発生する脈動風の最大風速と最小風速は増加し, 風速変化が大きくなることがわかる.

図34は図33のグラフを, 縦軸を各脈動風の最大振幅($U_{\max}-U_{\min}$)で規格化し, 横軸は脈動風周期で規格化したグラフである. 図34より, 平均風速1.4m/sの場合は高周波成分が見られるが, 平均風速を増加し脈動風の最大風速を大きくした場合には, 風速に依らずほぼ相似の風速変化パターンが得られている.

図35~40は図34に示したそれぞれの脈動風のA点からD点までの各位相におけるV-W成分の合成ベクトルの分布図である. 計測は $X=1.5\text{m}$ の位

置にあるY-Z断面内の $-400\text{mm}\leq Y\leq 400\text{mm}$, $-400\text{mm}\leq Z\leq 400\text{mm}$ の範囲における200mm間隔の格子点上とした. 各図の上部の矢印は測定箇所25点の風速U成分の平均値に相当する長さを示したものである. 計測データは各計測点において93周期分の風速3成分のデータを取得し, 各成分について周期を基準としたアンサンブル平均をとった結果に基づいてV-W合成ベクトルを求めている.

例えば, 平均風速 $U_A=4.9\text{m/s}$ の脈動風において得られたV-W合成ベクトルの分布図(図37(a)-(d))を見てみると, 加速流となる図37(a)(図34のA点に相当)では風は放射状に外向に向かって拡がっており, 吹出し口の外側に近いほど偏向角が大きくなることがわかる. 最大風速に到達した図37(b)(図34のB点に相当)では, 偏向角はほぼ 0° となる. 減速流となる図37(c)(図34のC点に相当)では各V-W合成ベクトルは中心方向を向いており流れが収縮していると考えられる. 最小風速に到達した図37(d)(図34のD点に相当)では風は全体的に多少左方向に偏

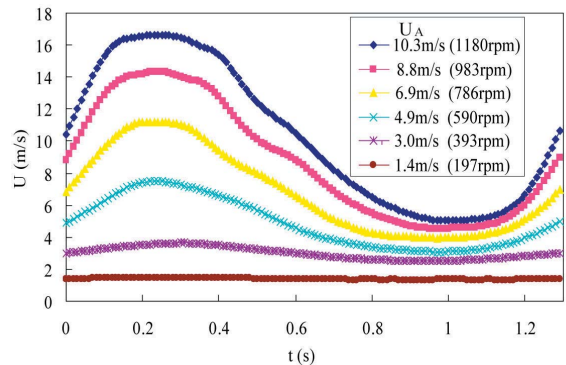


図33 中心風速U成分(アンサンブル平均)

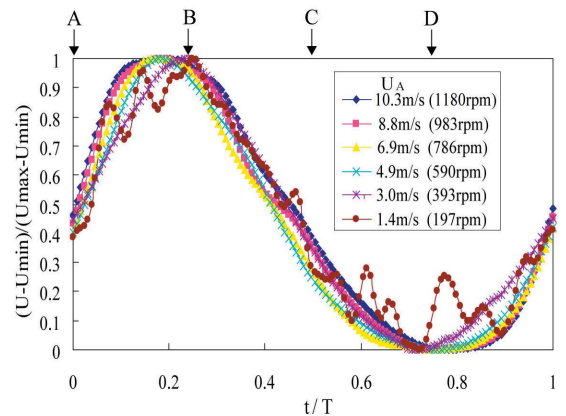


図34 中心風速U成分(規格化)

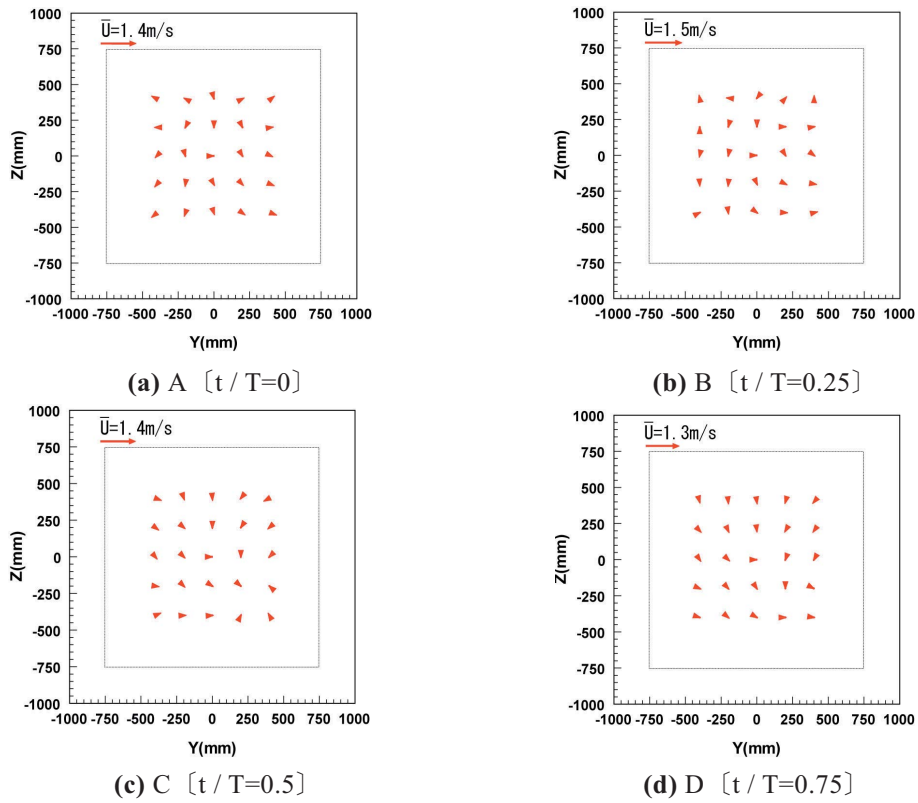


図 35 V-W 合成ベクトル ($U_A=1.4\text{m/s}$, 197rpm)

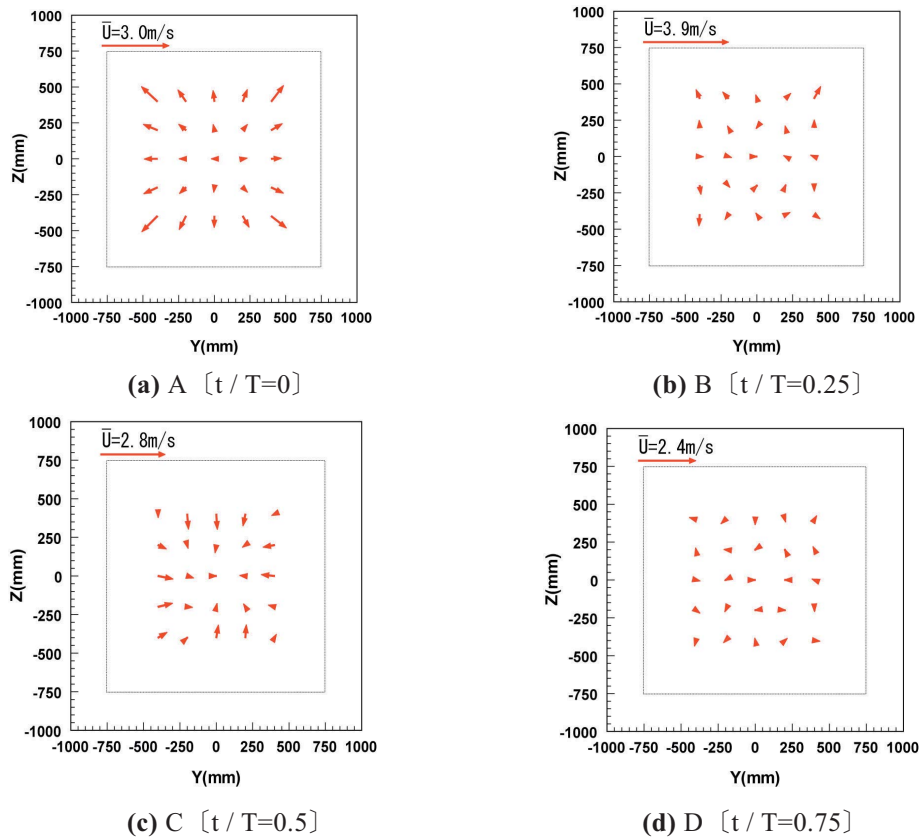


図 36 V-W 合成ベクトル ($U_A=3.0\text{m/s}$, 393rpm)

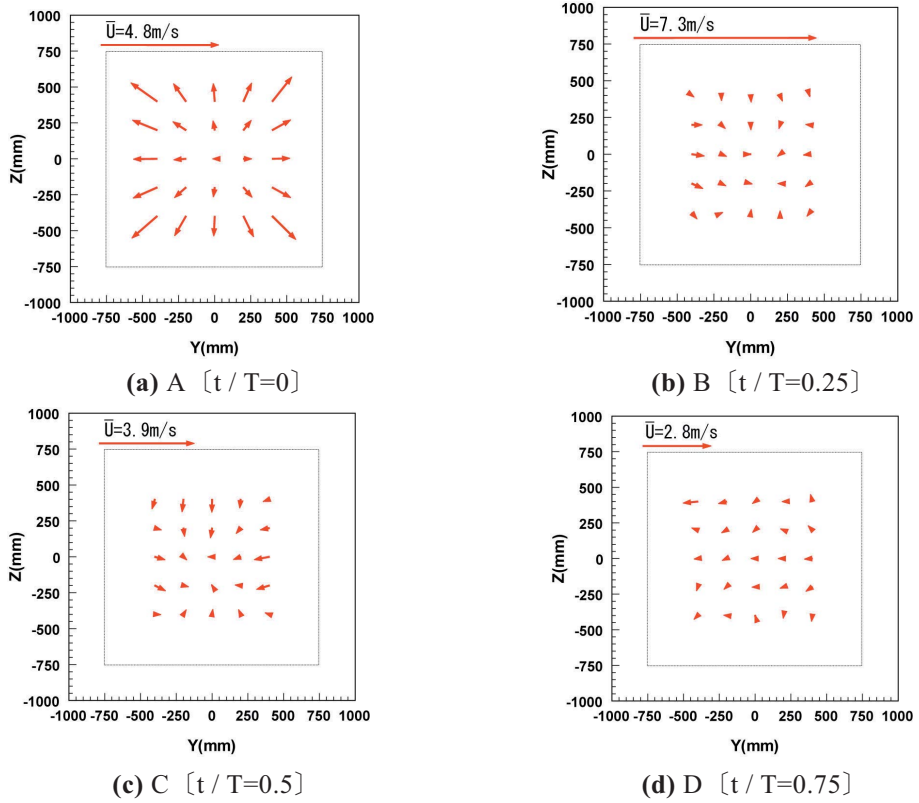


図 37 V-W 合成ベクトル ($U_A=4.9\text{m/s}$, 590rpm)

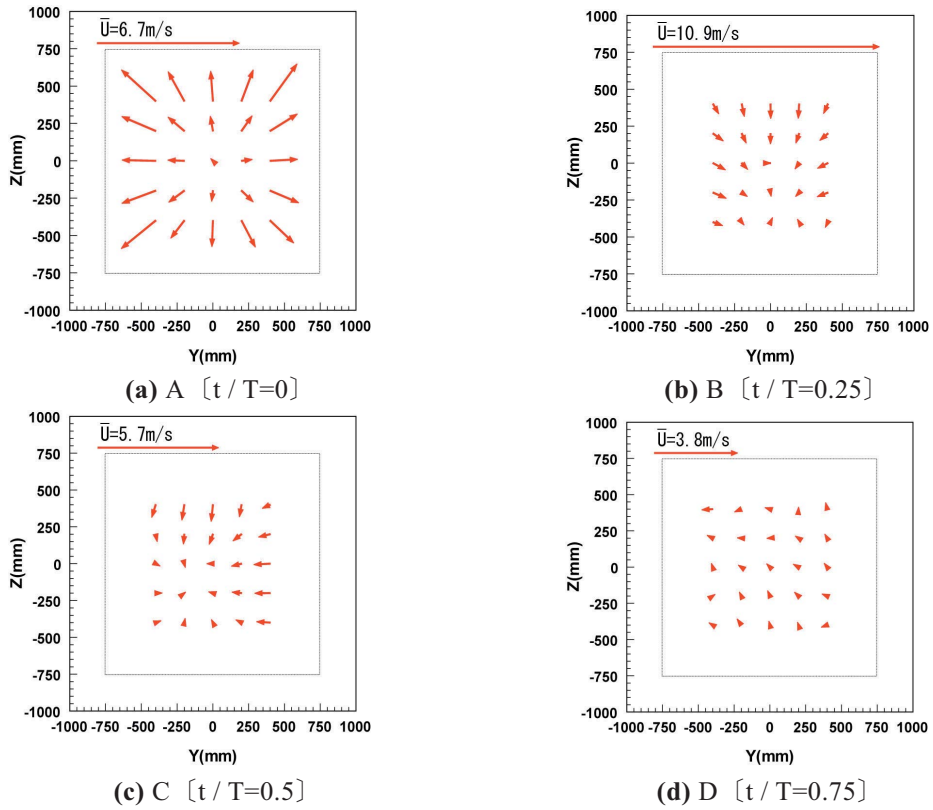


図 38 V-W 合成ベクトル ($U_A=6.9\text{m/s}$, 786rpm)

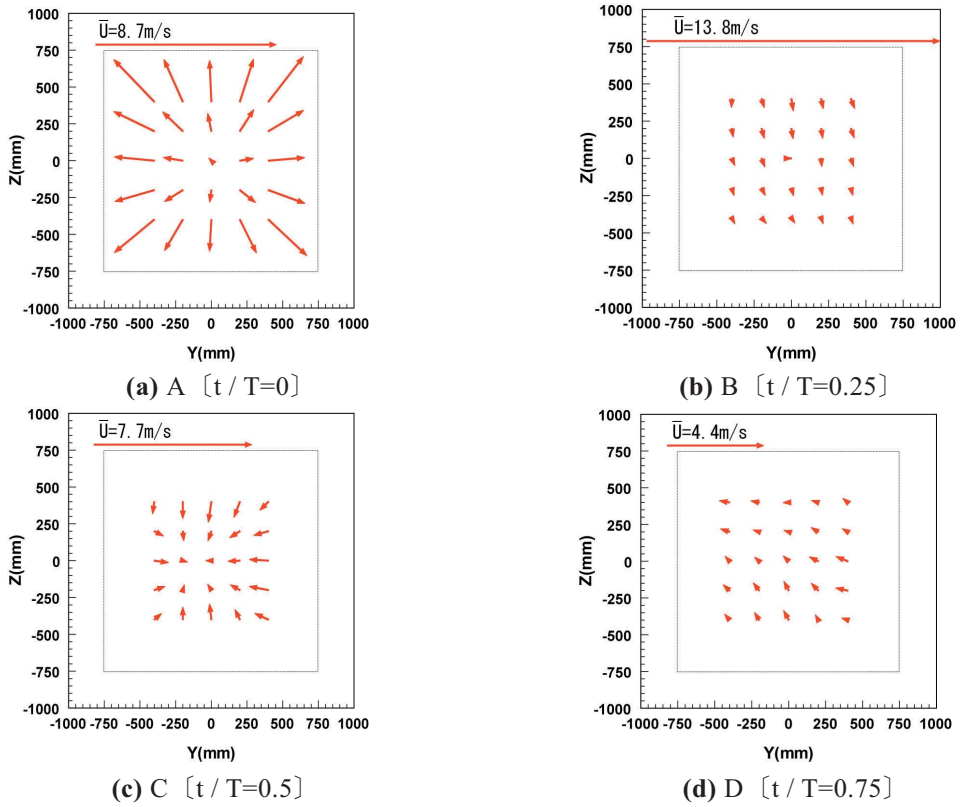


図 39 V-W 合成ベクトル ($U_A=8.8\text{m/s}$, 983rpm)

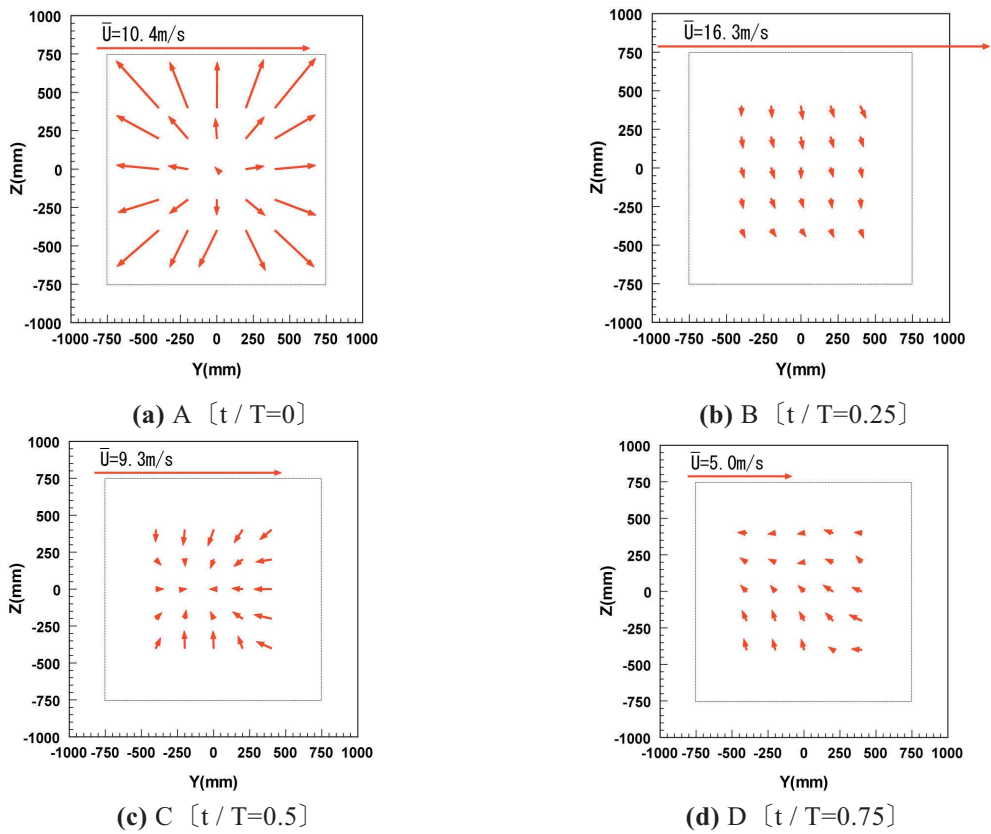


図 40 V-W 合成ベクトル ($U_A=10.3\text{m/s}$, 1180rpm)

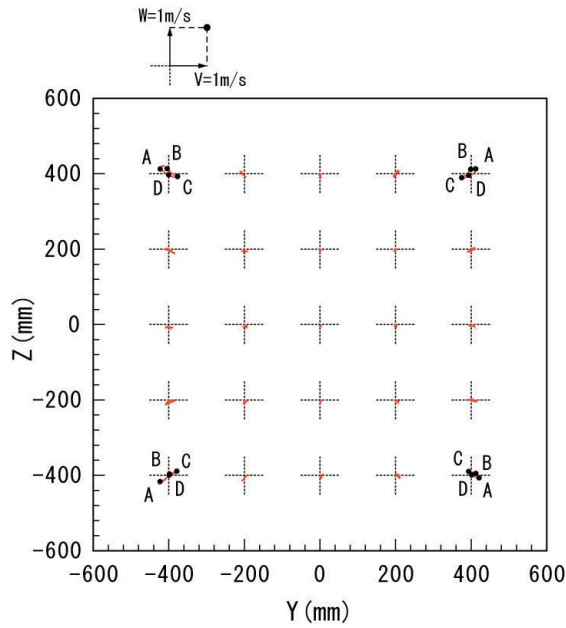


図 41 V-W 合成ベクトルの軌跡
 ($U_A=1.4\text{m/s}$, 197rpm)

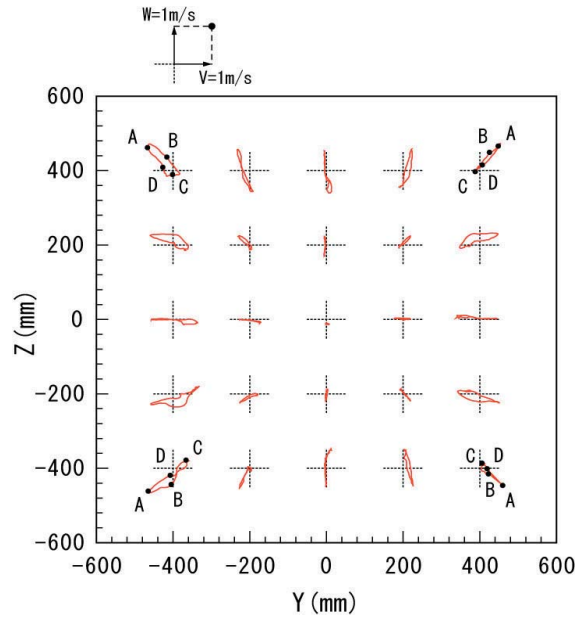


図 42 V-W 合成ベクトルの軌跡
 ($U_A=3.0\text{m/s}$, 393rpm)

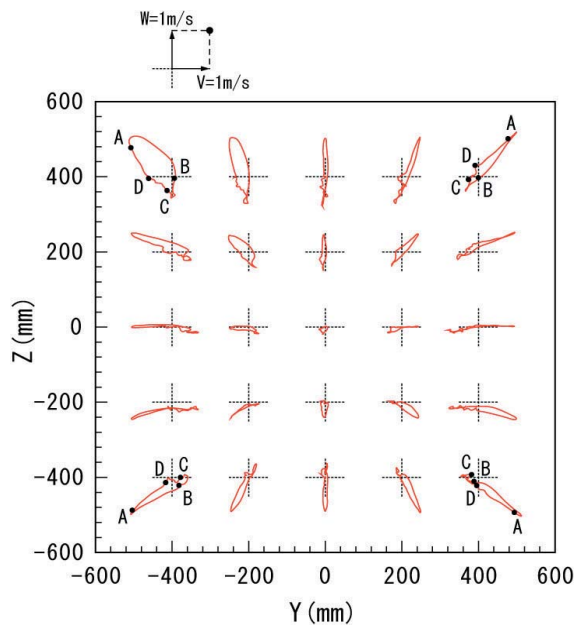


図 43 V-W 合成ベクトルの軌跡
 ($U_A=4.9\text{m/s}$, 590rpm)

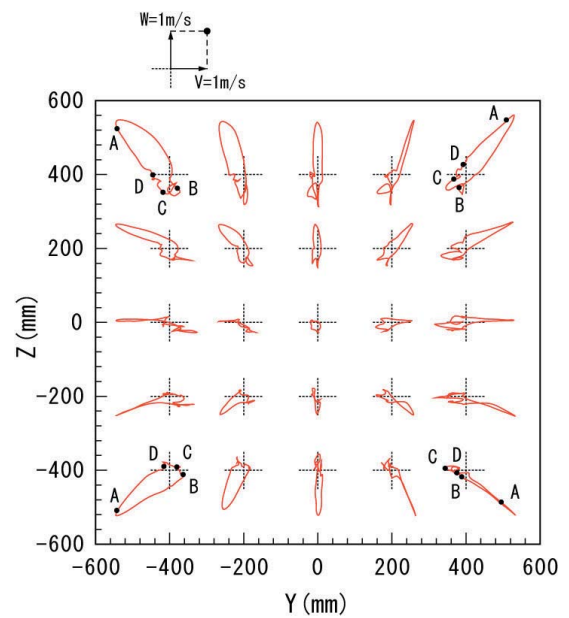


図 44 V-W 合成ベクトルの軌跡
 ($U_A=6.9\text{m/s}$, 786rpm)

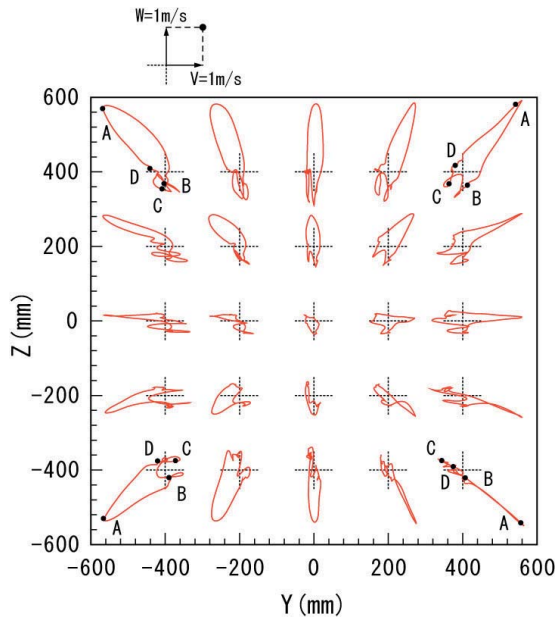


図 45 V-W 合成ベクトルの軌跡
($U_A=8.8\text{m/s}$, 983rpm)

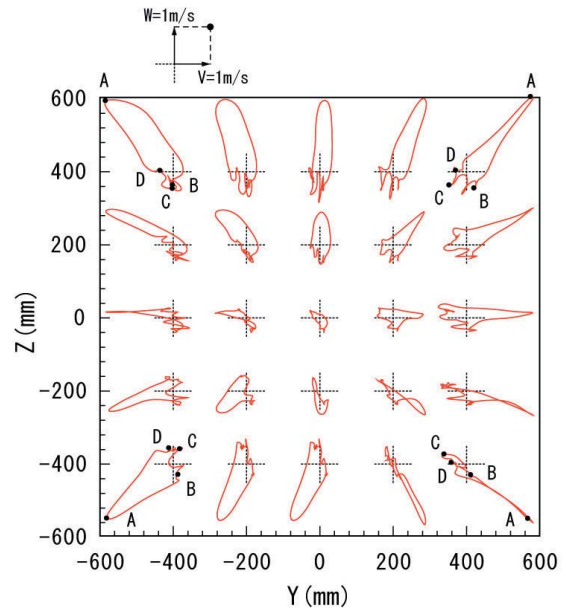


図 46 V-W 合成ベクトルの軌跡
($U_A=10.3\text{m/s}$, 1180rpm)

向している。他の平均風速をもつ脈動風でも、A 点に相当する V-W 合成ベクトルの分布は中心から外向きであり、C 点におけるベクトルは内側を向く傾向が見られている。したがって大きなピッチ角度変化 ($0^\circ \sim 60^\circ$) によって発生した脈動風の特徴として、風速が加速するときは吹出し口後流において流管は膨張し、逆に風速が減速するときには流管は収縮するといえる。

次に脈動風 1 周期中の V-W 合成ベクトルの連続的な変化を見るために、図 4 1～4 6 に V-W 合成ベクトルの軌跡を示す。図中に示す各 + 印を原点として、この位置で計測された V-W 合成ベクトルの始点を + 印に置いた時のベクトルの終点が 1 周期の間に移動する軌跡を描いている。図 4 1～4 6 に示した点 A～D はそれぞれの計測位置における脈動風の主要位相点 (図 34 の A～D) の V-W 合成ベクトルの終点に相当し、点 A-B-C-D-A とたどるならば、それは風速ベクトルの方位角 ϕ の変化を表す。

平均風速が $U_A=1.4\text{m/s}$ の場合 (図 41)、方位角はほとんど変化していないが、平均風速 $U_A=3.0\text{m/s}$ になると (図 42)、ほとんどの場所の軌跡はひしゃげた形状となり、風向が噴流中心から外向きと内向きの 2 方向の間で周期的に変化していることがわかる。平均風速が $U_A=4.9\text{m/s}$ の場合のベクトル軌跡 (図 43) を見ると、左上の隅に近い所では

軌跡はループ状に広がって方位角が 1 周期の間に回転しており、螺旋状に風が吹いていることを示している。平均風速が増加すると (図 44～46)、この現象はより顕著になり、その他の隅近傍でも方位角の回転が明瞭になってくる。方位角変化の回転方向は、平均風速が $U_A=4.9\text{m/s}$ 以上の脈動風では (図 43～46)、ベクトル軌跡の明らかな広がり観測される左上、左下、右上の隅近傍において、それぞれ下流側から見て時計方向、反時計方向、時計方向になっているが、その回転方向に関する規則性は存在しない。

5. おわりに

本研究では、沙漠環境風洞が発生する定常風と脈動風の特徴を、熱線風速計と超音波風速計を用いて調査した。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) 定常風は、風速がほぼ一定となるコア内において、噴流中心付近で相対的に風速が低く、コア境界で風速が高くなる傾向が観測された。
- (2) 軸流送風機のピッチ角変化により発生した脈動風は、ピッチ角の変化条件が同一の場合、送風機回転数に依らずほぼ相似な風速パターンとなる。
- (3) 脈動風は加速流ではコア領域の流管が膨張

し、減速流では収縮する。

(4) 正方形の吹出し口から発生した脈動風は吹出し口の隅に近い場所では螺旋状に風向が変化し渦を形成している。

謝辞

沙漠環境風洞は平成 12～14 年度の文部科学省科学研究費補助金(地域連携推進研究費)「砂漠化防止・沙漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」によって設置された。また、本研究は 21 世紀 COE プログラム“乾燥地科学プログラム”の一部として実施された。ここに付記し、謝意を表す。

参考文献

- [1] 林 農：平成 12 年度－14 年度科学研究費補助金(地域連携推進研究費)「砂漠化防止・沙漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」研究成果報告書，2003
- [2] T. Kawamura, T. Hayashi and K. Miyashita : Application of the Domain Decomposition Method to the Flow around the Savonius Roter, 12th International Conference on Domain Decomposition, Methods, Edited by: Tony Chan, et.al., Olivier Pironneau, pp.393-400, 2001
- [3] Kawamura, K. Ootsuki and T. Hayashi : Numerical Study of the Flow around the Cross Flow Turbine of Many Blades Type with Accessories for Improvement of its Performance, Proc. World Wind Energy Conference, Berline, 2002
- [4] T. Kawamura, A. Nagaoka and T. Hayashi : Numerical Simulation and Visualization of the Flow around High-Speed Wind Turbine, Proc. World Wind Energy Conference, Berline, 2002
- [5] 林 農, 李 岩, 原 豊：新型サボニウス風車のトルク計測, 第 20 回西日本乱流研究会シンポジウム, 2002
- [6] Yutaka HARA, In-Seung KANG, Tsutomu HAYASHI and Ion PARASCHIVOIU : Measurements of Torque Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine with Inclined Straight Blades, Proc. of the EXPO World Conference on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell (WCWRF 2005), Hamamatsu, Japan, CD-ROM, 2005
- [7] T. HAYASHI, Y. LI, Y. HARA : Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor, JSME International Journal, Series B, Vol. 48, No. 1, pp.9-16, 2005
- [8] 有安健一, 康 仁勝, 原 豊, 林 農：風速変化に対する直線翼垂直軸風車の応答特性, 日本機械学会第 83 期流体力学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集, CD-ROM, No. 1817, 2005
- [9] 有安健一, 康 仁勝, 原 豊, 林 農, イオン パラシブイユ：脈動風中における直線翼垂直軸風車の特性計測, 中国四国支部第 43 期総会・講演会講演論文集, No. 055-1, pp. 123-124, 2005

(受理 平成 18 年 11 月 30 日)