

試作した風向変動風洞の特性と検討

Characteristics of fluctuating wind direction tunnel manufactured on trial

木村吉郎*, 才木孝裕**, 中島紘志**, 加藤九州男***, 久保喜延****
Kichiro Kimura, Takahiro Saiki, Koji Nakashima, Kusuo Kato, Yoshinobu Kubo

* Ph.D., 九州工業大学大学院准教授, 工学研究院建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**九州工業大学大学院工学府建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***九州工業大学大学院助教, 工学研究院建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

****工博, 九州工業大学大学院教授, 工学研究院建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

The possibility of reproducing the wind direction fluctuation is studied by a new type wind tunnel, which is called as a fluctuating wind direction tunnel (FWDT). The FWDT consists of eight inflow and eight outflow wind ducts with shutters, which are radiately located around the test section. By opening only one or two sets of inflow and outflow ducts, wind blows in that direction. Now this FWDT is installed with 10 shutters that can be controlled by a computer, and 90 degree wind direction change can be made at most. Wind characteristics in FWDT and the best shutter opening and closing timing with smaller wind speed fluctuations during the wind direction change were studied. Better shutter timings were found to be that with the simultaneous closing and opening of the inflow ducts of the pre- and post- wind direction change.

Key Words: Fluctuating Wind Direction Tunnel, Natural wind, Wind Tunnel Test, Shutter

キーワード: 風向変動風洞, 自然風, 風洞実験, シャッター

1. はじめに

自然風は風向変動を伴うものであるが、風向変動については、再現する実験手法の開発が試みられた例はある¹⁾ものの、確立した手法は存在していない。また、この風向変動という非定常な現象が構造物に及ぼす影響については、これまでの研究も少なく不明な点が多い。

自然風の風向変動は、構造物に作用する局所的な風圧特性に影響²⁾したり、工場等の排ガス拡散の問題において、下流地域のガス濃度分布に大きな影響を及ぼす³⁾といった例が知られている。もし自然風の風向変動特性を再現できる実験手法を確立することができれば、より精度の高い風荷重の算定や、ガス濃度分布の予測につながると考えられる。

風向変動を実現する風洞に関する既往の研究では、放射状に配置した複数ファンからの吹き出し風により風向変動を再現しようとした試みがある¹⁾。しかしこの手法では、二つの風洞の中間の風向を再現するにあたって、両風洞から吹き出される風の干渉により大きな乱れが

発生するため、精緻な風向制御が困難であるという難点があった。

一方、著者らが試作した「風向変動風洞」では、放射状に多数配置した流入風路と流出風路の圧力差を利用して風を生じさせ、圧力勾配の向きを変化させることで風向を変化させている⁴⁾⁻⁹⁾。風向の変化を圧力勾配の向きで生じさせる本手法では、吹き出しジェット干渉のような大きな乱れは生じないと考えられ、また自然風と同じ風向変化のメカニズムを用いているので、自然風の風向変動をうまく再現できる可能性が高いと考えている。

本研究では、試作した風向変動風洞で生成される基本的な気流特性を明らかにするとともに、大きな風向変化時に安定した風速のまま風向変化を生じさせることが可能なシャッター開閉タイミングや、風向を往復で変化させた場合の風向変化の特性を検討した。

2. 試作した風向変動風洞

2.1 風向変動風洞の概要

風向変動風洞の平面概念図を図-1 に示す。測定部を中心として、それを囲むように放射円状に配置された流入風路と流出風路により構成されている。測定部への風の流入、および流出は、個別に開閉可能なシャッターを介して行われる。開放するシャッターの位置を変えるこ

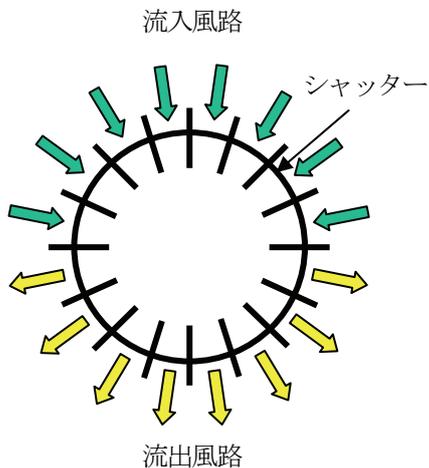


図-1 風向変動風洞の平面概念図

とにより、測定部に作用する風向を 180°近くまで変動可能である。一つの風路についてみると、本風向変動風洞ではそれぞれ鉛直回流型となっており、流入風路と流出風路は測定部の下方に設けられた半円柱形の空間を介してシロッコファンの吹出口と吸込口に接続されている。

試作した風向変動風洞では、流入風路と流出風路に各 8 個ずつ、計 16 個の風路を設けている。流入風路に設置したシャッターは、長方形の亚克力板を上下させる単純なものである。そのうち、それぞれ 5 台ずつ、計 10 台については、アクチュエーター (THK VLA-ST 形) をコンピューター制御することにより、開閉タイミングおよび開閉スピードのコントロールが可能となるようにしている。

2.2 風向変動風洞の諸元

図-2 に風向変動風洞平面図を、図-3 に風向変動風洞側面図を示す。風向変動風洞の平面図の外形は正 16 角形である。また、図-4 にシャッター部の平面図、図-5 にシャッターおよびコーナーベーン部の側面図を示す。一つの風路幅は 195.1mm、高さは 150mm である。なお、シャッターから測定部中央までの距離は 586mm である。

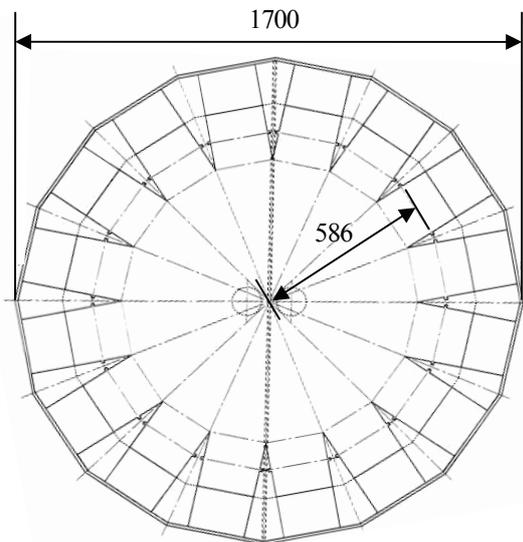


図-2 風向変動風洞平面図 (単位: mm)

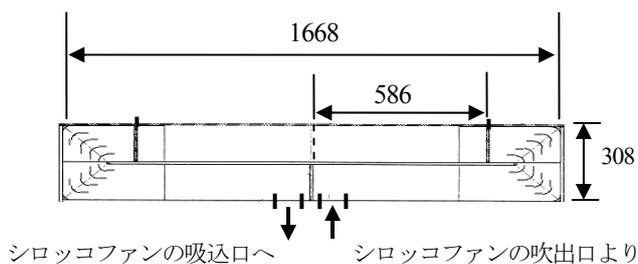


図-3 風向変動風洞側面図 (単位: mm)

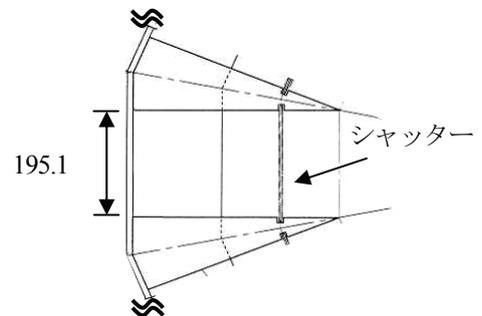


図-4 風向変動風洞シャッター部の平面図 (単位: mm)

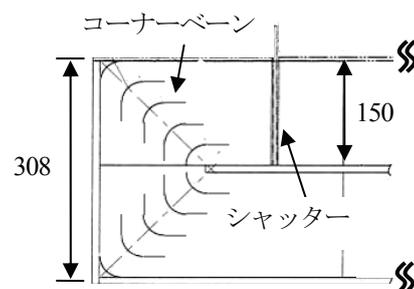


図-5 風向変動風洞シャッター及びコーナーベーン部の側面図 (単位: mm)

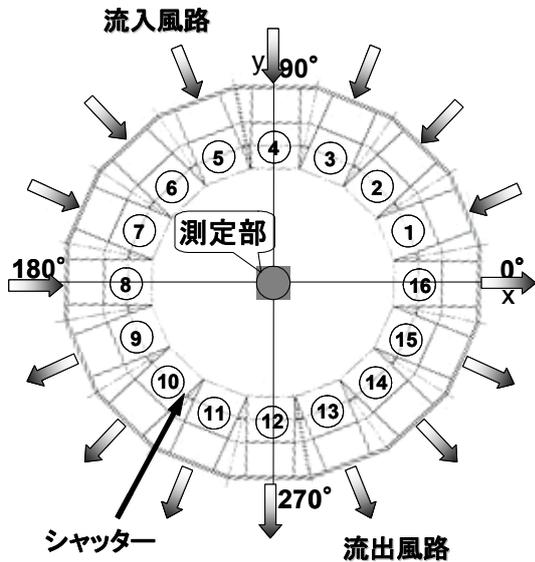


図-6 風向の定義

3. 実験方法

3.1 風向の定義

図-6 に風向の定義を示す。図中の番号は風路番号を示す。風路①から⑧が流入風路，風路⑨から⑯が流出風路となっており，例えば流入出風路を1組ずつ開放するケースは「②-⑩」，隣り合った流入出風路を2組ずつ開放するケースは「⑤⑥-⑬⑭」のように表すこととする。

風向の定義は⑧-⑯の風路の中心線を x 軸に取り， x 軸方向を 0° とし，反時計回り方向に正をとって示すこととした。

3.2 風向風速測定の方法

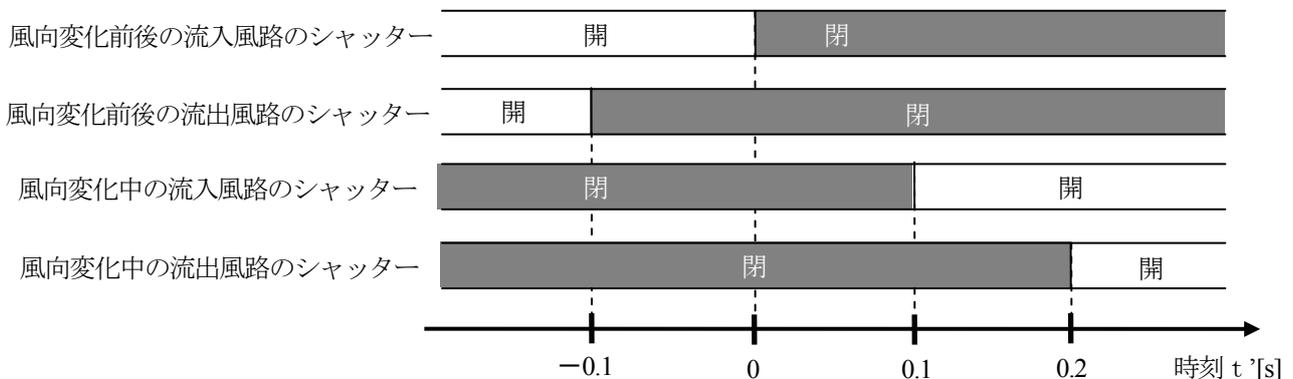
まず，各風路において生成される風の特性把握を目的とし，風速分布はIプローブと熱線流速計を用いて測定した。

次に，シャッターの開閉により風向を変動させた際の風速と風向の変動特性は，スプリットフィルムプローブと熱線流速計を用いて風速と風向を同時に測定した。測定は，②-⑩の風路から⑥-⑭の風路，②-⑩の風路から⑤-⑬の風路，③-⑪の風路から⑥-⑭の風路への「単風路の風向変化」と，②③-⑩⑪の2つずつの風路を開けた状態から⑤⑥-⑬⑭を開けた状態への「2風路の風向変化」について，シャッター開閉タイミングを種々変化させて行った。この測定は，同じ条件で5回ずつ試行した。

測定時のファンのモーターの回転数は，単風路の時は1000r/min，2風路の時は1600r/minとし，Low pass フィルタのカットオフ周波数を200Hzとしてデータを収録した。

3.3 開閉タイミングと無次元標準偏差の定義

本研究でパラメータとしているシャッターの開閉タイミングは，表-1，表-2 に示されているが，表中の数値の説明を図-7 に示す。風向変化前の流入風路のシャッターを閉じるタイミングを時刻の基準 ($t=0$) とし，それ以外のシャッターの開（風向変化後の流入出風路）開（風向変化後の流入出風路）の時刻が，表中には実験ケースごとに縦に並べて記載されている。本研究では，安定した風速のまま風向変化できるシャッター開閉タイミングを明らかにすることを目的としている。風向変化時に生じる風速変動の程度を表す指標として，変動風速の時系列データから，「無次元標準偏差」を求めた。無次元標準偏差とは，風速から平均風速を引いた風速変動成分の標準偏差 σ_u を求め，それを平均風速で除したものである。通常の風速データにおける乱れ強さと対応するものであるが，本研究の測定では，風向変化前と変化後で異なる風路を用いており，定常ではないデータを対象としていることから，無次元標準偏差と呼んで区別することとした。



(基準とするシャッター (風向変化前の流入風路のシャッター) が閉まる時刻を0とする)

図-7 シャッター開閉タイミングの説明図

(表-2のケースN-9 (開閉タイミングが上から0.0, -0.1, 0.1, 0.2s) を例として)

なお、この無次元標準偏差は、60秒間の測定データのうちの、風向変化時刻 ($t=30$ 秒) を中心とした 2 秒間のデータに対して求めた。無次元標準偏差を算出する際の平均風速は、2 秒間のデータの平均値をそのまま用いている。また、試行によって無次元標準偏差の値にばらつきがあるため、5 回の試行の平均値をとって示すこととした。

4. 実験結果および考察

4.1 風向変動風洞の各風路で生成される風の特性

風向変動風洞の各風路で生成される風の特性把握を目的とし、平均風速と乱れ強さの鉛直、および水平分布を求めた。測定では、コンピューター制御可能なシャッターが設置してある風路(②-⑩, ③-⑪, ④-⑫, ⑤-⑬, ⑥-⑭)を対象とした。

4.1.1 風速・乱れ強さの鉛直方向分布

風洞測定部の中心位置 ($(x, y) = (0, 0)$) で、高さの異なる位置における風速をそれぞれ測定し、平均風速と乱れ強さ I_u を算出した。測定高さは、底面を 0mm と定義し、10mm~140mm まで 10mm 間隔の 14 ケースとした。

図-8 に単風路の平均風速および乱れ強さの鉛直分布を示す。風速については、高さ 30mm から 120mm までほぼ 2.8m/s と一定であった。乱れ強さは、底面と上面に近い 10mm と 140mm の位置では 14~19%前後の大きな値となった。

図-9 に隣り合う 2 風路を用いた場合の平均風速および乱れ強さの鉛直分布を示す。2 風路の風速は、高さ 10mm から 80mm までの測定位置で 2.9m/s 程度となり、それ以上から上面付近の 140mm にかけて低くなっていく傾向があった。乱れ強さについては、10mm から 130mm までの測定位置で 8%以下となった。2 風路を用いたケースでは、単風路に比べ、中央高さ位置や、底面、上面の近くまで乱れの少ない気流となっているが、その理由は明らかではない。

4.1.2 風速・乱れ強さの水平方向分布

測定位置を風向直角水平方向に変化させ、風速の風路幅方向の分布を測定し、平均風速と乱れ強さの分布を算出した。風路幅方向位置は風路⑩側を+、風路⑧側を-として表記することとした。測定位置の高さは、75mm とした。

図-10 に単風路の平均風速および乱れ強さの水平方向分布を示す。平均風速については、風路中心位置である風路幅方向位置 0mm で最も風速が高く、風路中心位置から遠ざかるにしたがい平均風速は低下している。風路幅は 195.1mm であるが、壁面に近い 80mm の位置では風速は 2.2m/s となり、風路中心位置と比較すると風速は

約 20%減少した。乱れ強さは、風路中心位置から遠ざかるにつれ増加し、風路中心位置の 9%に対して風路幅方向位置 80mm 位置では約 19%となった。

図-11 に 2 風路の平均風速および乱れ強さの水平方向分布を示す。単風路と比較すると、平均風速については、風路ごとの風速の違いによる差は見られるが、風路幅方向 120mm の位置でも風路中心位置とあまり変わらない。乱れ強さは、風路中心位置から遠ざかるにつれ増加しているが、風路幅方向位置 80mm の乱れ強さは 7%であり、風路中心位置の 6%とあまり変わらない。2 風路を用いた場合、単風路に比べ風洞中心部から風路幅方向に遠ざかることによる平均風速の低下および乱れ強さの増加が小さく、単風路に比べて 2 倍程度以上広い幅を測定部として用いることができると考えられる。

4.1.3 風速のパワースペクトル

変動風速 u 成分について、パワースペクトルをとったところ、用いる風路が異なっても、概ね同様の特性であった。例として、単風路 (④-⑫, 図-12 (a)) と 2 風路 (③④-⑪⑫, 図-12 (b)) におけるパワースペクトルを示す。高周波数では単風路と 2 風路でほとんど同じ値をとっているが、単風路では 3~4Hz 付近においてパワースペクトルがやや大きな値をとっている。試作した風向変動風洞では乱れが大きくなっているが、この単風路で見られる 3~4Hz 付近のピーク以外には、特異な特性は見られない。このピークは、4.1.4 でも述べる風向変動風洞の測定部の下方に設けられた半円柱形の空間から 1 つの流入風路に気流が流入する際の乱れによって生じた可能性があるが、詳細は明らかでない。

4.1.4 風の特性のまとめ

図-8 から図-11 を見てもわかるように、どの風路を用いるかによって、平均風速や乱れ強さはある程度異なる結果となった。風向変動風洞において風向を変化させた場合、風向のみが変化して、それ以外の風の特性は変化しないことが望ましいと考えられるため、こうした風路ごとの風の特性のばらつきは好ましくない。そうしたことから、ファンから風向変動風洞への流入部や、ファン流出部に設置する部材の形状等について検討し、改良も試みてきたが、そうした上での結果がここで示した特性である。理想的な状態で検討するためには、さらに改良を加えて各風路における特性を一致させることが望ましいが、本研究では、まずはどういった風向変化を生じさせることができるか、また、好ましい風向変化を生じさせることのできるシャッターの開閉タイミングを明らかにすることを優先することとし、さらなる流れ特性の改良に向けた検討は実施しないこととした。なお、単風路に比べて 2 風路を用いた方が乱れ強さが小さくなっている。これは、シロッコファンの吹出口からの気流が入る、風向変動風洞の測定部の下方に設けられた半円

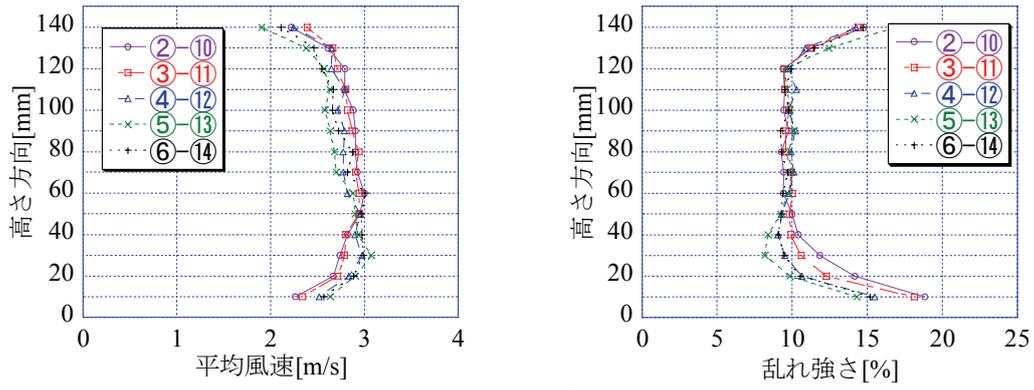


図-8 単風路の風速および乱れ強さ

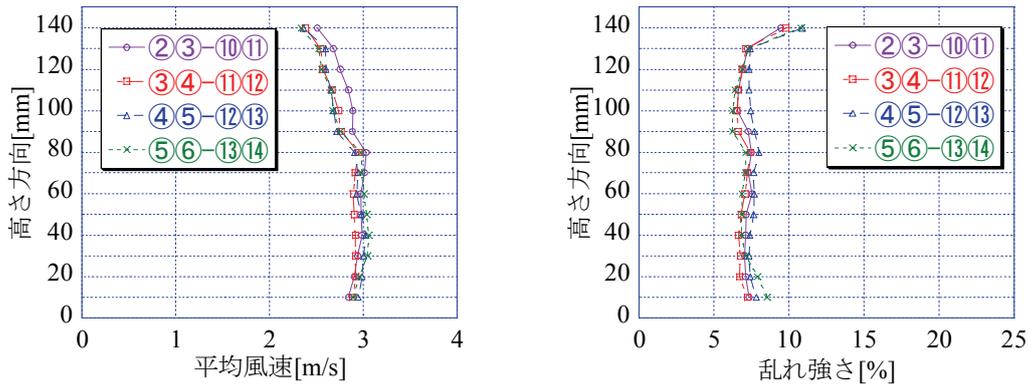


図-9 2風路の風速および乱れ強さ

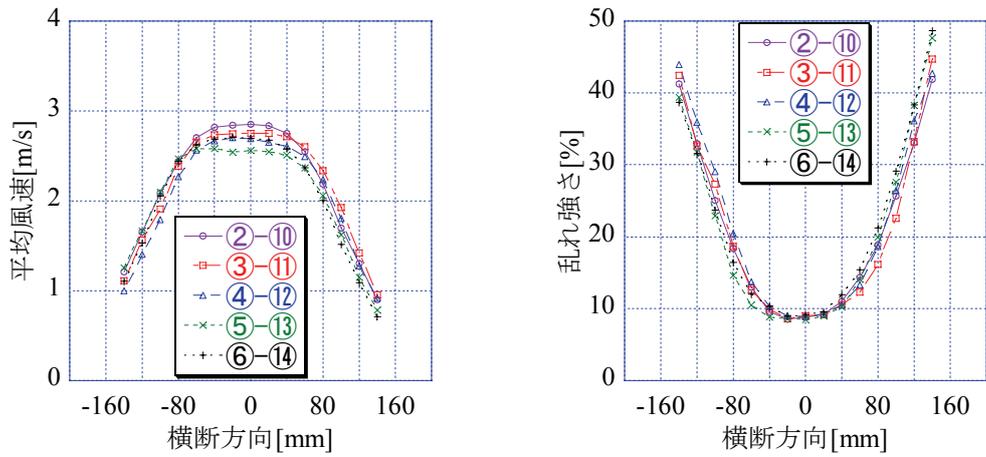


図-10 単風路の風速および乱れ強さ

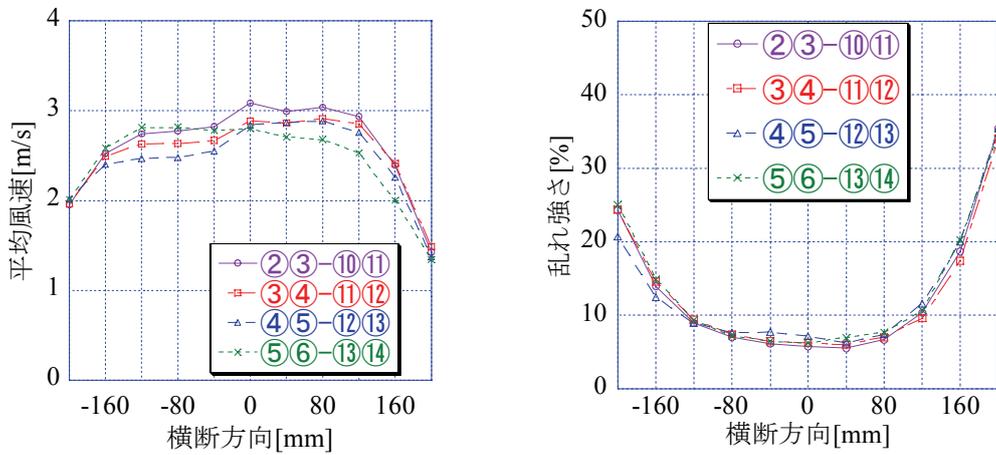
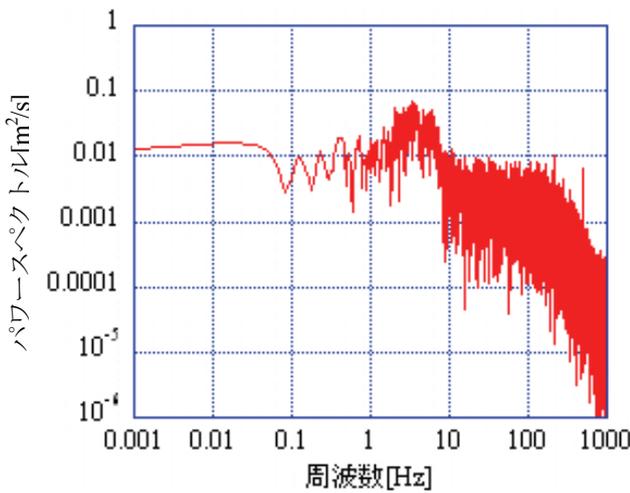


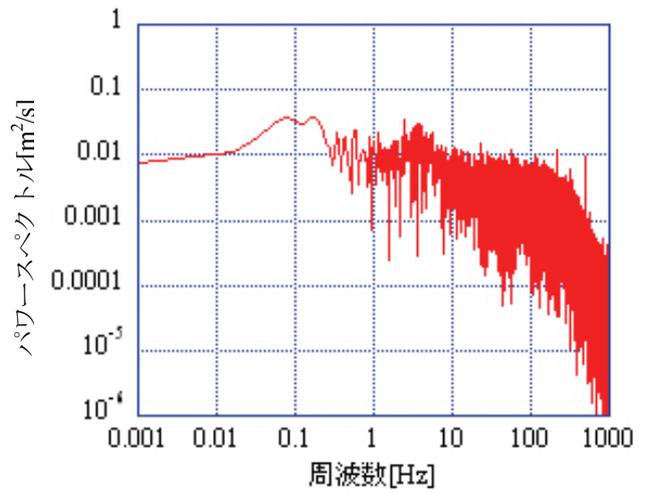
図-11 2風路の風速および乱れ強さ

表-1 同時開閉した場合の実験ケースと無次元標準偏差

	パターンに 対応する風路				実験ケース									
	A	B	C	D	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	
シャッター 開閉	②	②	③	②③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
タイミング [s]	⑩	⑩	⑪	⑩⑪	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	⑥	⑤	⑥	⑤⑥	0.3	0.2	0.1	0.05	0.0	-0.05	-0.1	-0.2	-0.3	
	⑭	⑬	⑭	⑬⑭	0.3	0.2	0.1	0.05	0.0	-0.05	-0.1	-0.2	-0.3	
同時開放時間[s]					-0.3	-0.2	-0.1	-0.05	0.0	0.05	0.1	0.2	0.3	
無次元 標準偏差 [%]	パターンA				22.7	25.9	17.6	16.1	14.1	21.7	27.0	31.0	34.8	
	パターンB				19.6	20.0	18.6	16.4	13.2	21.5	22.3	26.9	31.1	
	パターンC				21.4	21.7	20.8	18.2	14.4	21.6	23.9	28.5	30.1	
	パターンD				28.8	26.3	19.4	15.0	6.5	15.3	18.0	22.9	24.4	



a) 単風路④-⑫



b) 単風路③④-⑪⑫

図-12 パワースペクトル

柱形の空間から、シャッターを開放した流入風路に気流が流れ込む際に、単風路の場合よりも2風路の場合の方が、半円柱形に対する流入部の面積が大きくなり、スムーズに流れ込んでいることが原因と考えられる。気流の乱れを小さくしたり、風速分布をより一様に近づけたりするためには、縮流胴を設けたり、スクリーンをより多く用いたりすることが有効と考えられるが、そうした対策については、より実用的な風向変動風洞を製作する際の課題としたい。また、さらに3風路等を用いることも考えられるが、それについても今後の課題としたい。

4.2 シャッター開閉タイミングの検討

流入風路とその対角線上にある流出風路を対として、風向変化を生じさせた場合の最適なシャッターのタイミングを検討した。なおここで「最適」とは、風向変化時に生じる瞬間的な風速変動が最も小さいものと本研究では定義した。これは、図-13(a), 14(a), 15(a)に示し

た風向変化時の風速の時刻歴の例を見てもわかるように、風向変化時には、瞬間的な風速変動が生じることが多いが、この風速変動は、シャッター開閉により風向変動を生じさせているために起こると考えられるからである。また、実際に風向変動風洞を用いて、風向変化の影響のみを検討したい場合に、こうした風速変動が同時に生じるのは不都合であるという理由もある。なお、本論文で結果を示す測定においては、シャッターの開閉タイミングの計測は、風向・風速変化の測定と厳密には同期させていない。そのため、風向変化の厳密なタイミングを図-13 から図-15 において示すことはできず、約30秒付近で風向変化が生じているものと理解する必要がある。

実験では②-⑩の単風路から⑥-⑭の単風路(パターンA)、②-⑩の単風路から⑤-⑬の単風路(パターンB)、③-⑪の単風路から⑥-⑭の単風路(パターンC)、②③-⑩⑪の2風路から⑤⑥-⑬⑭の2風路(パターンD)の

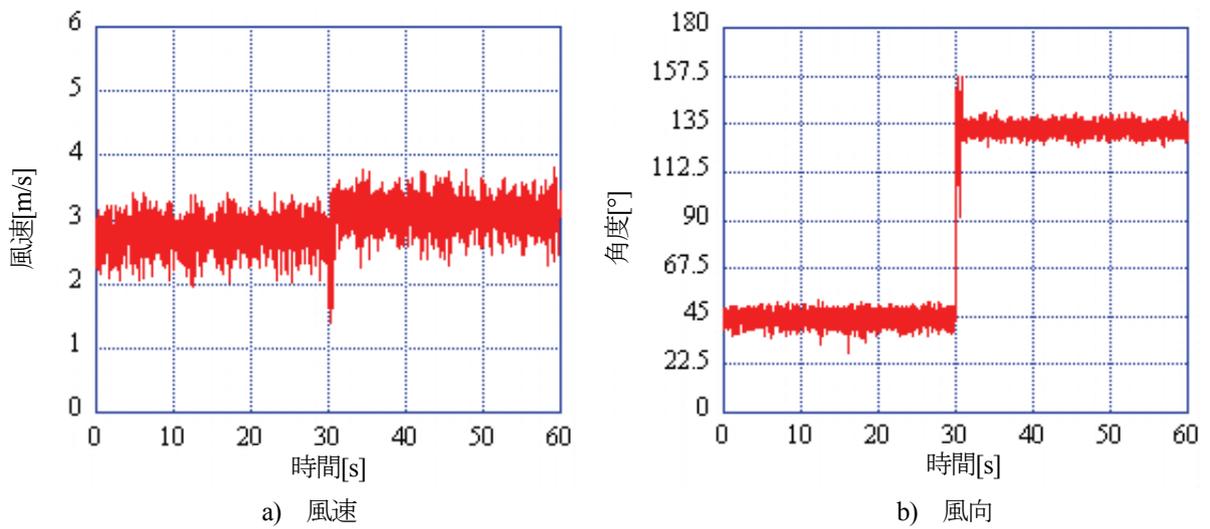


図-13 同時開閉した場合の時刻歴の例
(case-S5, パターン A (②⑩→⑥⑭))

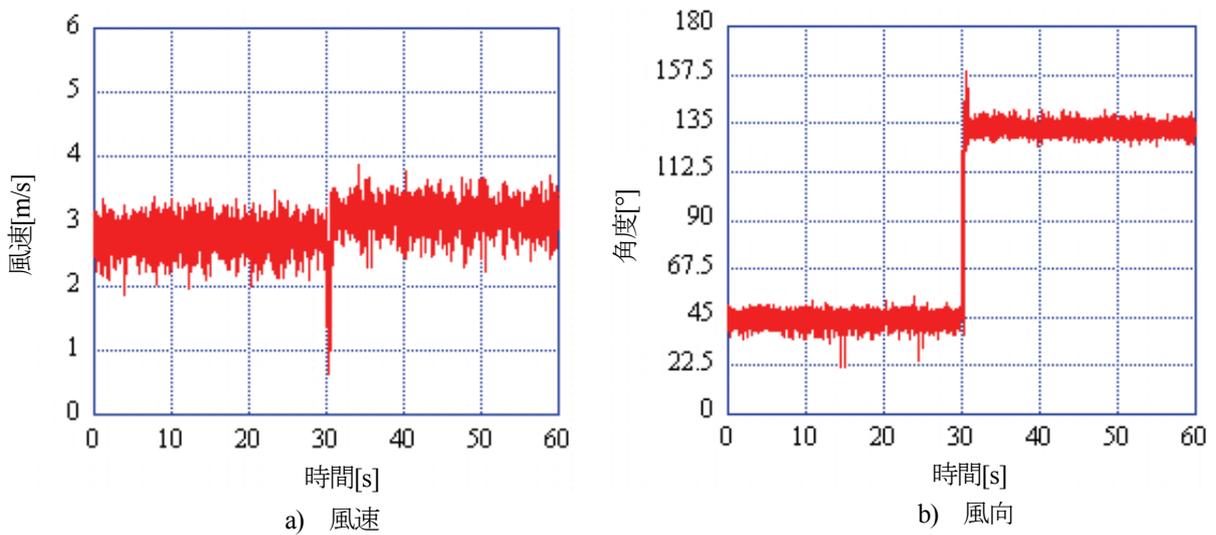


図-14 同時開閉した場合の時刻歴の例
(case-S3, パターン A (②⑩→⑥⑭))

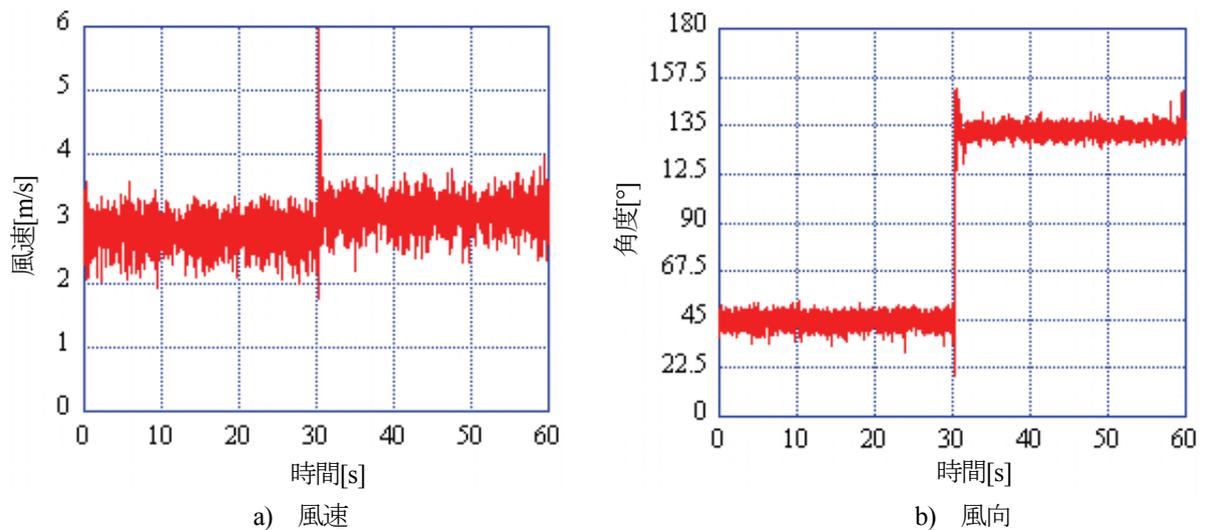


図-15 同時開閉した場合の時刻歴の例
(case-S7, パターン A (②⑩→⑥⑭))

計4パターンの風向変化において測定を行った。これらの風向変化のパターンは、単風路または2風路において、コントロール可能なシャッターを用いて生じさせることのできる最も風向変化の角度(=90°)の大きなパターンと、2風路の場合と同じ変化角度(=67.5°)を生じさせる単風路の風向変化のパターンである。

4.2.1 流入出風路のシャッターを同時に開閉した場合

まず、②-⑩や②③-⑩⑪といった、対となる流入出風路のシャッターの開閉を同時に行う場合の特性について検討した。

もともと開放されていた風向変化前の流入出風路のシャッターを閉じる時刻を基準とし、風向変化後の流入出風路のシャッターを開けるタイミングを0.05s, 0.1s, 0.2s, 0.3s ずつ変化させて、風向変化を生じさせ、2回ずつ測定を行った。表-1に、対となる流入出風路を同時に開閉した場合のシャッター開閉タイミング、同時開放時間と無次元標準偏差を示す。なお、ケースを表すために同時開放時間をパラメータとして用いている。同時開放時間とは、もともと開放されていた風路と風向変化後の風路のシャッターが同時に開放状態にある時間を示している。この場合のマイナス表現は同時開放時間が存在せず、もともと開放されていた流入出風路のシャッターが閉じた後に風向変化後の流入出風路のシャッターが開くことを示す。実験ケースは計9ケースである。

無次元標準偏差が最も小さくなるのは、全てのパターンで同時開放時刻が0.0sの時(=case-S5)で、Aが14.1%、Bが13.2%、Cが14.4%、Dが6.5%である。図-16に同時開放時間と無次元標準偏差の関係を示す。なお、図-16の凡例では、例えば風路②③-⑩⑪から⑤⑥-⑬⑭への風向変化のケースを表すのに、省略して②③-⑤⑥などと示している。以下の図-17でも同様の表記を用いている。図-16を見ると、同時開放時間が-0.05よりも大きい場合は、単風路のパターンA~Cよりも、2風路のパターンDの方が無次元標準偏差が小さくなってお

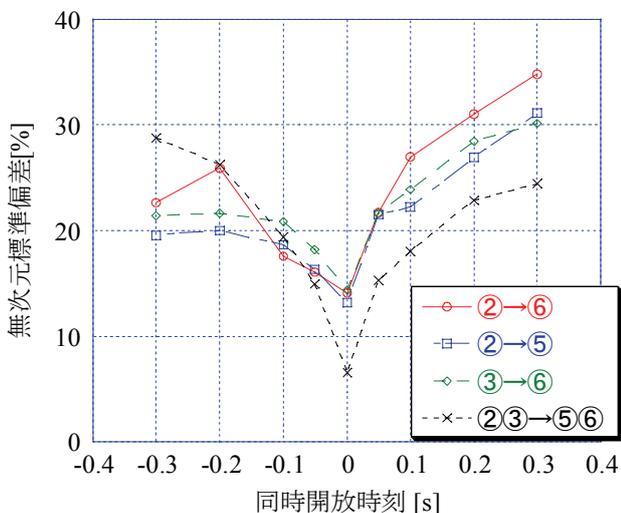


図-16 同時開放時刻と無次元標準偏差の関係

り、全ての中で「最適」と考えられるケースは、同時開放時間が0.0s (case-S5)の2風路(パターンD)のケースである。一方、同時開放時間が-0.1s以下の場合、2風路の方が単風路よりも無次元標準偏差が大きくなることが多い。

4.2.2 非同時開閉の場合

次に、対となる流入出風路のシャッターを異なるタイミングで開閉させる、「非同時開閉」のケースについて検討した。実験ケースは風路②(③)のシャッターを閉じる時刻を基準とし、風路⑩(⑪), ⑥(⑤), ⑭(⑬)のシャッターを閉じるまたは開けるタイミングを0.1秒ずつ変化させた計27ケースと、0.05秒ずつ変化させた3ケースの計30ケースとした。表-2にシャッター開閉タイミングの実験ケースと無次元標準偏差を示し、無次元標準偏差は図-17にも示す。

無次元標準偏差が小さくなったケースを3つずつ順番にあげると、単風路の結果では、無次元標準偏差はパターンAではcase-N22が14.1%、case-N14が14.3%、case-N13が14.4%、パターンBはcase-N22が12.1%、case-N23が12.4%、case-N28が12.4%、パターンCはcase-N13が13.2%、case-N23が13.3%、case-N14が13.8%である。同様に2風路のパターンDでは、case-N14が8.1%、case-N13が8.7%、case-N15が9.1%である。

図-17を見ると、4つのパターン全体として、case-N4, N5, N6, case-N13, N14, N15, case-N22, N23, N24, case-N28のケースで無次元標準偏差が小さくなっている。これらはいずれも、流入風路②(③)が閉まると同時に、流入風路⑥(⑤)が開放されるケースで、無次元標準偏差を小さくするためには、この条件を満たす必要があると考えられる。ただし、単風路のcase-N6については、無次元標準偏差が比較的大きい。これは風向変化後の流出風路が開くタイミングが、風向変化前の流出風路が閉じるタイミングより0.2秒も遅いことが原因

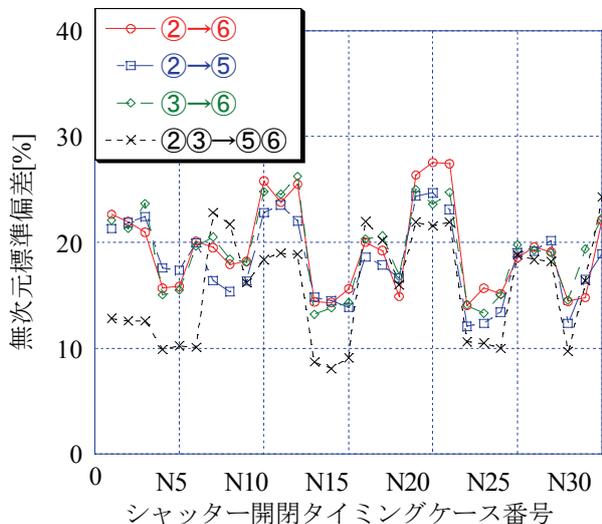


図-17 非同時開閉タイミングにおける無次元標準偏差

表-2 非同時開閉タイミングの場合の実験ケースと無次元標準偏

	パターンに 対応する風路				実験ケース								
	A	B	C	D	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
シャッター 開閉 タイミング [s]	②	②	③	②③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	⑩	⑩	⑪	⑩⑪	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	⑥	⑤	⑥	⑤⑥	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
	⑭	⑬	⑭	⑬⑭	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2
無次元 標準偏差 [%]	パターン A				22.7	22.0	20.9	15.7	15.8	20.1	19.5	17.9	18.2
	パターン B				21.3	21.9	22.5	17.6	17.4	19.9	16.4	15.4	16.3
	パターン C				22.1	21.3	23.7	15.0	15.5	19.7	20.5	18.4	18.2
	パターン D				12.8	12.6	12.6	9.9	10.2	10.1	22.8	21.7	16.2

	パターンに 対応する風路				実験ケース								
	A	B	C	D	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18
シャッター 開閉 タイミング [s]	②	②	③	②③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	⑩	⑩	⑪	⑩⑪	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	⑥	⑤	⑥	⑤⑥	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
	⑭	⑬	⑭	⑬⑭	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2
無次元 標準偏差 [%]	パターン A				25.8	23.8	25.5	14.4	14.3	15.6	20.0	19.2	14.9
	パターン B				22.8	23.5	22.0	14.8	14.5	13.9	18.6	17.9	16.6
	パターン C				24.8	24.6	26.2	13.2	13.8	14.3	20.4	20.6	16.8
	パターン D				18.4	19.0	18.9	8.7	8.1	9.1	22.0	20.2	16.0

	パターンに 対応する風路				実験ケース								
	A	B	C	D	N19	N20	N21	N22	N23	N24	N25	N26	N27
シャッター 開閉 タイミング [s]	②	②	③	②③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	⑩	⑩	⑪	⑩⑪	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	⑥	⑤	⑥	⑤⑥	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
	⑭	⑬	⑭	⑬⑭	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2
無次元 標準偏差 [%]	パターン A				26.4	27.5	27.4	14.1	15.7	15.2	18.6	19.5	19.1
	パターン B				24.4	24.7	23.1	12.1	12.4	13.4	19.0	19.2	20.2
	パターン C				25.0	23.6	24.7	14.1	13.3	15.1	19.8	19.3	19.1
	パターン D				21.9	21.6	21.9	10.6	10.5	10.0	18.8	18.4	18.2

	パターンに 対応する風路				実験ケース		
	A	B	C	D	N28	N29	N30
シャッター 開閉 タイミング [s]	②	②	③	②③	0.00	0.00	0.00
	⑩	⑩	⑪	⑩⑪	0.05	0.05	0.05
	⑥	⑤	⑥	⑤⑥	0.00	0.05	0.10
	⑭	⑬	⑭	⑬⑭	0.05	0.10	0.15
無次元 標準偏差 [%]	パターン A				14.4	14.8	22.1
	パターン B				12.4	16.5	19.0
	パターン C				14.6	19.4	22.3
	パターン D				9.7	16.4	24.3

となっている可能性があるが、同じ case-N6 の 2 風路の場合とは特性が違うなど詳細は明らかではない。

また、4.2.1 の同時開閉の場合と同様に、これらのケースでは 2 風路を用いたパターン D が、単風路のパターンよりも無次元標準偏差が小さくなっている。4.1.2 で述べたように、2 風路を用いた方が測定部として利用できる幅が広がることもあり、風向変動風洞を用いる際には、隣り合う 2 風路を適切なタイミングで開閉させることが実用的であると考えられる。

また、単風路、2 風路の 4 つのパターンの中で共通して無次元標準偏差が最も小さい値となるケースを考えると、パターン A、C、D の 3 パターンで最も小さい値をとる case-N14 または case-N13 のシャッター開閉タイミングがあげられる。これらのケースは、パターン B において 6 または 7 番目に小さい無次元標準偏差をとる case-N14 はもともと開放されていた風路と風向変化後の風路の開閉時の時間差が無く、同時開閉実験における同時開放時間 0.0s のシャッタータイミング (case-S5) と同じものである。ただし、case-N14 と case-S5 では、測定された風速データから算出された無次元標準偏差は、特に 2 風路のパターン D において、case-N14 の方がやや大きい値となっている。同時開放のケースと、非同時開閉のケースで、実験を実施した日が異なっており、何らかの測定条件の違いが影響したものと考えられるが、詳細は明らかにできなかった。

4.3 往復の風向変化させた場合の特性

風向変動風洞において自然風の風向変動を再現するためには、自然風の連続的な風向変化を再現する必要がある。ここでは風向変化を連続的に生じさせるための第一段階として、全てのケースの中で、風向変化時の無次元標準偏差が最も小さかった 2 風路の case-S5 (=case-N14) のシャッタータイミングを用いて、「往復変化」させる実験を行った。風向変化間隔は 0.5s とした。ここで風向の往復変化と呼んでいるのは、図-18 に示すように 1 度風向変化をさせ、その後、風向変化間隔 (=0.5s) だけ経過した後、また元の風向に戻すという風向変化のことである。図-19 に風向を往復変化させた場合の風速と風向の時刻歴の例を示す。図-20 には、同じケースの別の試行で得られた風向の時刻歴を示す。

図-19 を見ると、風向変化時に風速の変動が生じているが、その特性は、風向が②③-⑩⑪→⑤⑥-⑬⑭に変化する時と、逆の⑤⑥-⑬⑭→②③-⑩⑪に変化する時では、かなり異なっている。また風向変化の時刻歴についてみても、異なる試行の図-19 (b) と図-20 では、特に、⑤⑥-⑬⑭→②③-⑩⑪への風向変化時の特性が、図-20 の方が緩やかに風向変化しているといった違いが見られる。このように「往」と「復」で風速や風向変化の特性が異なる原因は、「往」の風向変化後に生じる風の乱れによって、「復」の風向変化が影響を受けているためと考えられるが、詳細については風向変化の立ち上がり時間を定量的に検討するなどして明らかにしていく必要がある。

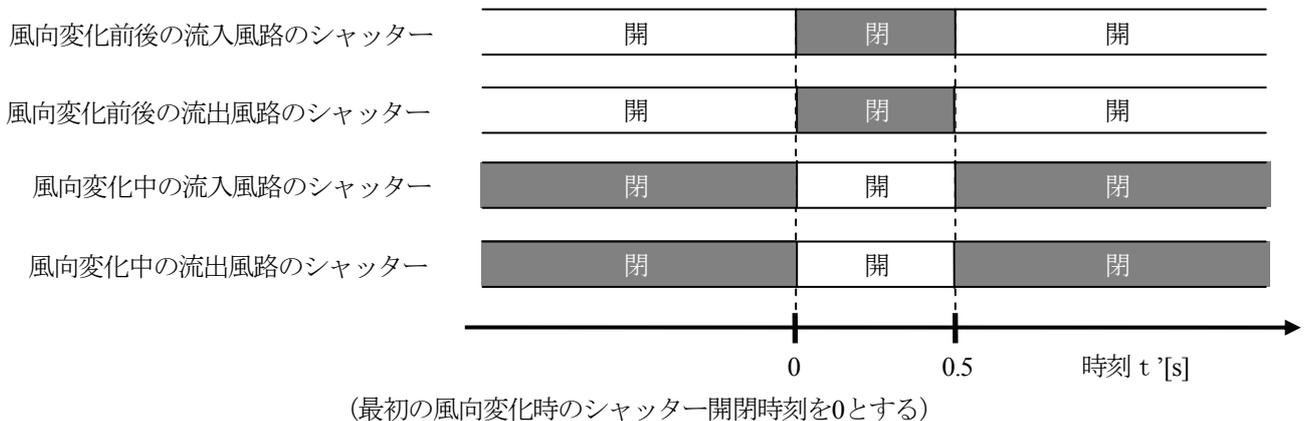


図-18 往復の風向変化におけるシャッター開閉タイミングの説明図 (風向変化間隔=0.5s)

5. まとめ

本研究では、試作した風向変動風洞において生成される気流特性の把握や、安定した風速のままに風向変化を生じさせることのできる最適なシャッター開閉タイミングを検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 定常の風を吹かせた状態での風速測定の結果、隣り合う2風路の組を用いた場合の方が、単風路の組を用いる場合よりも、乱れ強さが小さかった。また、2風路を用いた場合、風路ごとの風速の違いによる影響はあるものの、平均風速が一樣となる水平方向の幅は、単風路の2倍程度以上となった。
- (2) 90° または 67.5° の風向変化を生じさせた際に、風速に大きな変動を生じさせないシャッタータイミングは、風向変化前の流入風路のシャッターを閉じると同時に、風向変化後の流入風路のシャッターを開放するものであることがわかった。その中でも、流入出風路の開閉を全て同時に行うタイミングが、検討したケース全ての中で、風速の変動を最も小さくするものであった。
- (3) 風向変化時の風速の変動を表すパラメータとして、無次元標準偏差を用いたが、(2) の前半で述べた風速の変動の小さいケースでは、単風路の場合よりも2風路を用いた方が無次元標準偏差が30%程度小さくなった。
- (4) どれくらいの速さで風向変化を連続的に生じさせることができるかを検討するための第一段階として、2風路を用いたパターンで、0.5s 間隔で67.5° の往復の風向変化を生じさせたところ、往路と復路で、生じる風速変動や風向変化の特性が異なった。特性は試行ごとでもばらつきがあるため、一般的な特性を明らかにするためには、さらに検討が必要である。

本研究では、無次元標準偏差をベースとした議論を中心としたが、「好ましい」風向変化特性としては、風向変化がよりシャープに生じるといった視点もある。今後は、風向変化の立ち上がり時間に着目した検討などを行う予定としている。

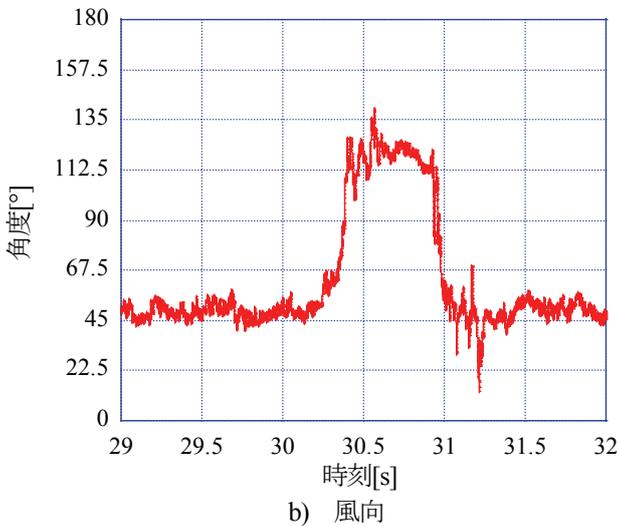
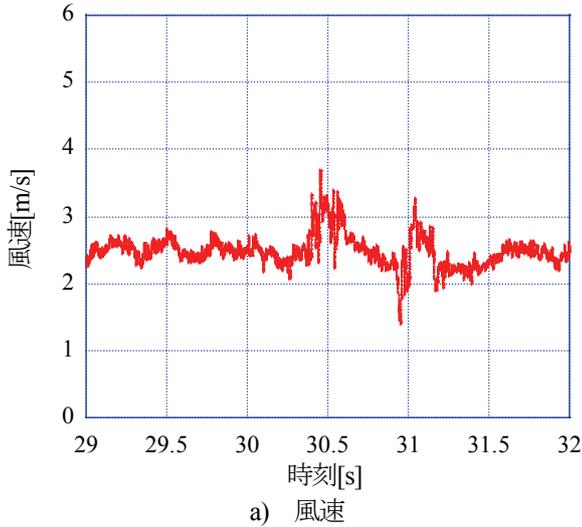


図-19 往復変化させた場合の風速と風向の時刻歴の例

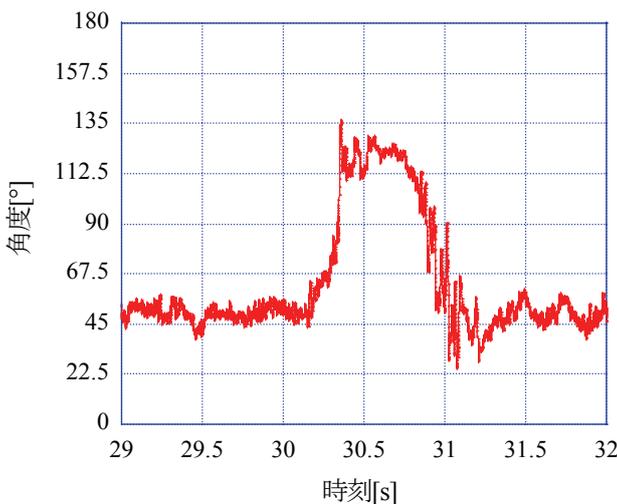


図-20 往復変化させた場合の風向の時刻歴の例
(図-19 とは別の試行)

参考文献

- 1) 野村卓史, 山縣大樹, 木村吉郎, AC サーボモータでファンを制御する風洞による風速風向変動の生成, 第15回風工学シンポジウム, 1998年.
- 2) 池内淳子, 谷口徹郎, 丸山敬, 谷池義人, 自然風中における非定常な風向の解析方法について, 第18回風工学シンポジウム, 2004年.
- 3) 永井清之, 可動翼列による大気拡散風洞実験の研究, 九州大学大学院 博士論文, 2004年.
- 4) 森暁一, 中富亮介, 木村吉郎, 久保喜延, 加藤九州男, 風向変動の風洞の改良と特性把握の試み, 土木学会第61回年次講演会講演概要集, I-114, pp.227-228, 2006. 業大学 卒業論文, 2006年.
- 5) 瀧山泰士, 森暁一, 木村吉郎, 久保喜延, 加藤九州男, 風向変動風洞の風向変化性能の検討, 日本風工学会誌, Vol. 32, No.2, (No.111), pp.221-222, 2007.
- 6) Kichiro Kimura, Yoshinobu Kubo, Kusuo Kato, A trial manufacture and its characteristics of fluctuating wind direction tunnel, The Third Int. Symp. on Wind Effects on Buildings and Urban Environment, Tokyo, pp.321-329, March 4-5, 2008.
- 7) 中島紘志, 木村吉郎, 久保喜延, 加藤九州男, より大きな風向変化時の風向変動風洞の特性, 土木学会第63回年次講演会講演概要集, I-289, pp.577-578, 2008.
- 8) 木村吉郎, 中島紘志, 久保喜延, 加藤九州男, 風向変動風洞の試作とその特性, 日本流体力学会年会2008講演論文集 (CD-ROM版), 論文番号16032, 2008.
- 9) Kichiro Kimura, Yoshinobu Kubo, Kusuo Kato, A trial manufacture of a wind tunnel that can simulate the direction fluctuation of natural wind, 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Nov. 19-21, 2008, Taipei, TAIWAN, CD-R.

(2009年9月24日受付)