

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560481  
 研究課題名（和文） 新形式風洞による自然風の風向変動の再現特性と構造物に及ぼす影響の検証  
 研究課題名（英文） The reproducibility of wind direction fluctuation of the natural wind and the verification of its effects on the forces on structures by fluctuating wind direction tunnel  
 研究代表者  
 木村 吉郎（KIMURA KICHIRO）  
 九州工業大学・大学院工学研究院・准教授  
 研究者番号：50242003

研究成果の概要：自然風の風向変動を再現することを目指して試作してきた「風向変動風洞」において、90°の風向変動をコンピュータ制御で生じさせることができるようにし、そうしたより広い範囲で風向変化させても、不自然な風速変動を生じることなく風向変化させられるシャッタータイミングを明らかにした。また、風向急変時に風車模型に作用する空気力特性について検討し、定常時とは異なる空気力のオーバーシュートが生じる場合があることがわかった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：風工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：風工学、風向変動、風洞実験、構造工学、自然災害、自然風、空気力、シャッター

## 1. 研究開始当初の背景

自然風においては、風向が変動する。一方、乱流に含まれる風速変動の風向直角水平成分により生じる高周波の風向変動以外の、比較的ゆっくりとしたいわゆる「風向」の変動は、通常の風洞実験装置においては、再現することができない。

こうした風向の変動が種々の現象に及ぼす影響のメカニズムについては、今までほとんど検討されてこなかった。これは、上述のように、風向変動を正確に再現する実験手法

が存在しないことが、大きな要因となっていると考えられる。

しかし、自然風における風向変動は、その中に置かれた構造物に作用する空気力特性に、影響を及ぼすと考えられる。すなわち、自然風中に設置される実際の構造物に作用する空気力を、正確に予測するためには、自然風の風向変動特性も再現した状態で実験を行い、そのメカニズムを明らかにしていく必要がある。

また、工場からの排ガスなどの拡散問題に

おいては、風向が排ガスの濃度分布に大きな影響を及ぼすため、その影響を取り入れた簡易な数値モデルで濃度分布のアセスメントが実施されることが多い。風洞実験によって定量的に予測するために、風洞床面近くに設置した可動翼列を用いて風向変動を再現する手法の研究も行われているが、その手法には限界がある。

野村ら (1998) は放射状に配置した複数の風洞からの吹出し風により、風向変動の実現を試みているが、2つの風洞の中間の風向を生成しようとすると、2つの風洞から吹出される風の干渉により大きな乱れが発生するといった問題がある。

以上の背景に基づき、本研究グループでは、自然風の風向変動と同じメカニズムを用いて風向を変動させることのできる風洞を試作した。この「風向変動風洞」は、実験を行う中央の円盤状の測定部と、それを囲むように放射状に配置された多数 (現試作装置では計 16) の風路により構成される。風路の半分は測定部に風を吹き込む流入風路、残りの半分は流出風路である。流入風路及び流出風路は、個別に開閉可能なシャッターを介してシロッコファンの吹出口及び吸込口にそれぞれ接続されている。本風洞は、シャッターを開放する流入及び流出風路の位置を変化させることによって、測定部に作用する風の風向を  $180^\circ$  近くにわたって変動可能とするものである。自然風の風向変動は、地表面の高圧部と低圧部の位置が変動することによって生じており、本風洞ではそれと同様のメカニズムを用いて風向変動を生じさせている。

研究開始前は、16のうちの4台のシャッターはコンピュータ制御で開閉できるようにしてあった。シャッターを1枚ずつ開閉した場合 (「case1」とする) は  $45^\circ$ 、連続する2枚のシャッターを同時に開閉 (「case2」とする) に対応する場合は  $22.5^\circ$  の風向変動を生じさせた場合、シャッター開閉のタイミングを詳細に調整することによって、風速をほぼ一定としたままで、0.5秒程度の短時間内に風向変動を生じさせることができていた。なお、case2の方が、case1よりも使用できる測定部の範囲も大きく、風速もより安定した状態で風向変動を生じさせることが可能であることがわかっていった。

## 2. 研究の目的

(1) 自然風の実測データを分析した結果、顕著な風向変動のケースとして、1分程度間に  $60^\circ$  もの風向変化が生じる場合があることが明らかとなった。試作している風向変動風洞が、こうした顕著な自然風の風向変動特性を再現できるかどうかを検証することが第一の目的である。具体的には、コンピュー

タ制御されるシャッターの数を増やし、 $60^\circ$  程度までの自然風の風向変動を再現できることを検証する。

(2) 既往の研究で指摘されてきたような、風向変動が空気力特性に及ぼす影響について、風向変動風洞で再現できるかどうかを検証し、風向変動風洞の有用性を明らかにする。具体的には、風向変動風洞内に設置した構造物模型に作用する空気力が、風向急変時どのように変動するかを測定し、その特性を明らかにするとともに、それが定常風向時の特性では表現できないものであることを示す。

## 3. 研究の方法

### (1) 対象とする自然風の風向変動特性

自然風の風向の実測データには、 $15 \sim 20\text{m/s}$  という高風速時に、1分程度の時間内に、平均風向が  $60^\circ$  変化をするといった、急激に風向が変化するケースがみられた。また一方で、乱流に含まれる風速変動の風向直角水平成分の影響が支配的であると考えられるが、 $10\text{m/s}$  前後の高風速時に、1秒よりも短い時間内に  $40^\circ$  程度の風向変動が生じたケースも既往の研究で報告されている。ここでは、気象的要因で生じたと考えられる前者を単に「風向変動」、乱流の特性が主な原因となって生じたと考えられる後者は区別して「短時間の風向変動」、と呼ぶこととする。

基本的には、本研究で用いる風向変動風洞 (図1: 概念図) が対象としているのは、比較的ゆっくりとした「風向変動」であり、「短時間の風向変動」は、アクティブ乱流生成装置など、他の研究で開発されてきた装置を、別途適用することにより再現することを前

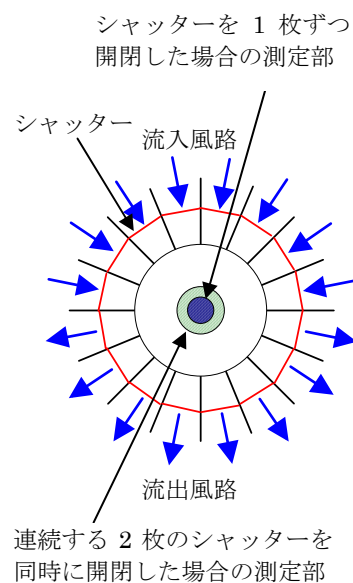


図1 風向変動風洞平面図

提としている。また、主として乱流により生じる短時間の大きな風向変動の再現においては、アクティブ乱流生成装置だけでは十分でなく、風向変動風洞本体の機能も併用して用いる必要が生じる可能性がある。

そこで本研究においては、実現象において1分間に平均風向が $60^\circ$ 変化をするといった急激な風向変化を基本的には対象とするが、どこまで速い風向変動を生成可能であるかについても視野に入れて、検討していくものとする。

#### (2) コンピュータ制御のシャッターの増設

研究開始前の風向変動風洞には、コンピュータ制御のシャッターが4台設置してある。これを6台増設して、計10台とし、case1のシャッターを1組ずつ開閉した場合で $90^\circ$ 、case2の連続する2組のシャッターを同時に開閉した場合で $67.5^\circ$ までの風向変動を生じさせることができるようにする。

#### (3) 風向変動特性の再現性の検証

対象とする $60^\circ$ の風向変化に近い、 $67.5^\circ$ の風向変化を、コンピュータ制御のシャッターを開閉することによって生成する。またその際の、最適なシャッター開閉のタイミングを明らかにする。さらに一般的な風向変動を再現するために、 $0^\circ \rightarrow 22.5^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 67.5^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 22.5^\circ \rightarrow 0^\circ$  や、 $0^\circ \rightarrow 67.5^\circ \rightarrow 0^\circ$  といった風向変動を生じさせた場合の特性を検査し、最適なシャッター開閉のタイミングを明らかにする。これらについては、いずれもcase1及びcase2の両方について実施する。

#### (4) 風向変動が構造物に作用する空気力に及ぼす影響の検討

風車模型(図2)を対象として、風向急変時に作用する空気力の時間変化の特性を明らかにすることを目的として、実験を行った。

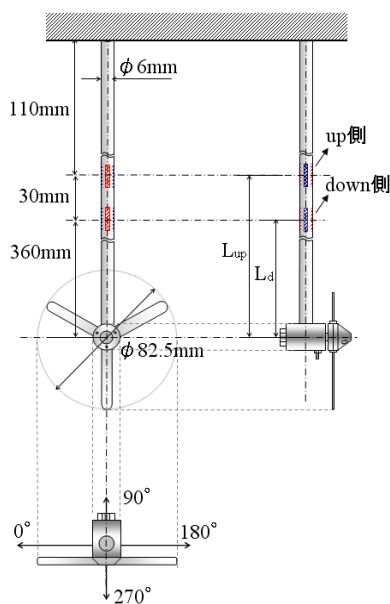


図2 用いた風車模型

## 4. 研究成果

### (1) コンピュータ制御のシャッターの増設

風向変動風洞には、コンピュータ制御のシャッターが4台設置されていたが、さらに6台増設して計10台とし、シャッターを1枚ずつ開閉した場合で $90^\circ$ 、連続する2枚のシャッターを同時に開閉した場合で $67.5^\circ$ までの風向変動を生じさせることができるようにした。シャッターを増設した後の風向変動風洞の写真を図3に示す。

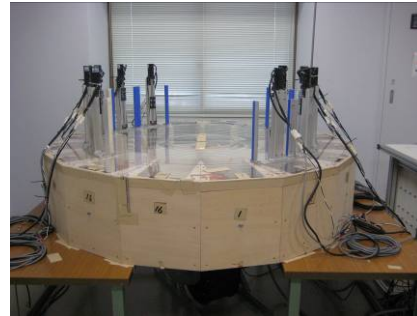


図3 風向変動風洞とコンピュータ制御のシャッター

### (2) 各風路の風速分布

コンピュータ制御でシャッターを開閉できる風路の、鉛直方向および水平方向の風速及び乱れ強さの分布を測定した。1つの風路の高さは150mm、幅は195mmである。

単風路(case1)の場合の鉛直分布については、風速については、高さ30mmから120mmまではほぼ一定であった。しかし、底面と上面に近い10mm、140mmの位置では風速が若干低くなった。乱れ強さは、底面と上面に近い10mmと140mmの位置では17%前後の大きな値となった。隣合う2つの風路を同時に用いる2風路(case2)の場合の鉛直分布については、高さ10mmから80mmまではほぼ一定で、それ以上から上面付近の140mmにかけて低くなって行く傾向があった。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。すなわち、case2はcase1に比べ、高さ方向に対し底面、上面の近くまでより一様で変動の少ない風速となった。

case1の水平方向の分布については、風速については、風路中心位置で最も風速が高く、風路中心位置から遠ざかるにしたがい風速は低下している。風路幅方向位置80mmでは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%となり、風洞中心位置と比較すると47%増加した。Case2の水

平方向の分布については、風路幅方向位置80mmの風速は、風路中心位置からの減少は0.01%で、case1に比べ低下が少ない。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、風路中心位置からの6%と比べた増加の割合は、単風路に比べ少ない。また2風路を用いたcase2の場合には、風路幅方向位置-120mmから120mmまで、風路中心位置からの風速の低下が1割以下だった。ただし風路幅方向位置160mmでは、風速が急激に低下し、乱れ強さも増加した。

### (3)最適なシャッター開閉タイミング

最適なシャッター開閉タイミングは、風向変化時に生じる風速変動が小さいケースと考え、風向変化時前後2秒間の風速の標準偏差を平均風速で無次元化した、無次元標準偏差を基準に最適なタイミングを明らかにすることとした。流入出風路のシャッターを同時に開閉した際の、同時開放時間と無次元標準偏差の関係を図4に示す。無次元標準偏差が最も小さくなるのは、同時開放時間が0.0sの時で、case1が14.1%、case2が6.5%となった。なお、case1の②-⑩から⑤-⑬や③-⑪から⑥-⑭のケースのように、case2と同じ量の角度だけ変化させた場合は、②-⑩から⑥-⑭のケースに比べて無次元標準偏差が小さくなるケースが多いが、最小値をとる同時開放時間が0.0sの場合はほぼ同じ位で、case2に比べると7.4%程度大きな値となっている。

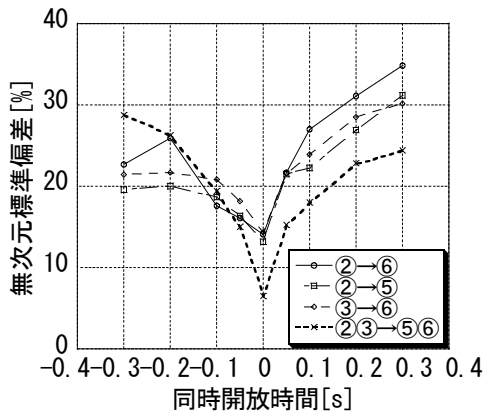


図4 シャッターの同時開放時間と無次元標準偏差

さらに、様々なシャッター開閉タイミングを変化させた場合について測定を繰り返し、無次元標準偏差が小さくなるケースを求めた。「最適」なシャッター開閉タイミングは、上記の同時開閉時間が0秒の場合であったり、それから0.1秒など若干流入出風路のシャッターの開閉タイミングに差

を設けた場合であったりしたが、それらの無次元標準偏差の値は、ほとんど差がなかった。しかし、風向を往復させる「往復の風向変化」をさせた場合には、流入出風路のシャッター開閉タイミングを多少ずらせた方が、風向変化の立ち上がりがシャープになる結果も得られた。

これらの検討を通じて、0.4~0.5秒程度で、大きな風速変動を生じさせることなく風向変化を生じさせられるようなシャッターの開閉タイミングを明らかにすることができた。こうしたシャッターの開閉タイミングを用いることにより、実験における0.4~0.5秒以上の時間に対応するような自然風の風向変動を、風向変動風洞において生じさせることができると考えている。

### (4)風向急変時に風車に作用する風荷重

風向を急変させた際に風車模型に作用する風荷重により生じるモーメントの時刻歴の一例を図5に示す。風向が変化した瞬間に、定常時とは異なる空気力が作用する、オーバーシュートが生じている。このオーバーシュートが生じる向きは、実験ケースにより異なり、風向を反対向きに変化させた場合には、オーバーシュートの向きも逆になる傾向が見られた。しかし、そうした特性の詳細や、それらが生じる原因については、さらに検討を進めていく必要があると考えられる。

また、以上のような風向急変時に構造物に作用する空気力の特性を明らかにするためには、本研究で試作しているような風向変動風洞装置を用いることが必要である。

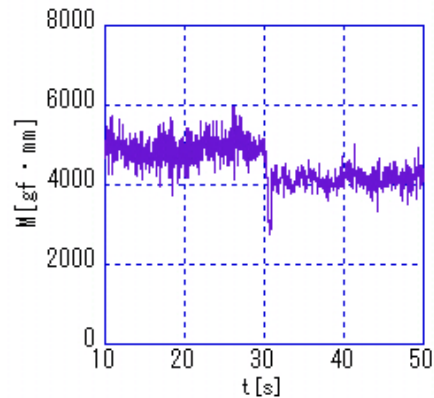


図5 風向急変時 (t=30s 付近) に風車模型支持部で測定されたモーメントの時刻歴

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5件)

① 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, 2008.

- ②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, 論文番号 16032, 日本流体力学会年会 2008, 9/4-9/7 (9/4), 神戸大学六甲台キャンパス.
- ③中島紘志, 木村吉郎, 久保喜延, 加藤九州男, 豊田邦弘, 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.
- ④Kichiro 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
- ⑤松田三央子, 才木孝裕, 木村吉郎, 久保喜延, 加藤九州男, 風向急変時に風車に作用する風荷重の特性解明に関する研究, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-060, pp.119-120, 2009.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 吉郎 (KIMURA KICHIRO)  
九州工業大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：50242003

### (2) 研究分担者

久保 喜延 (KUBO YOSHINOBU)  
九州工業大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：70093961  
加藤九州男 (KATO KUSUO)  
九州工業大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：60039138

### (3) 連携研究者

なし