

# 二次元風洞実験を対象とした乱流の アクティブシミュレーション

畑中章秀\*・小林紘士\*\*

本論文では、ACサーボモータにより動翼列を駆動させて、任意の乱れ特性を有する気流をシミュレートする手法について述べている。本研究のアクティブシミュレーション法により、目標とするパワースペクトル形状を有する乱れを再現することができた。また、乱れスケールは従来の格子乱流や境界層乱流と比べると一桁大きなものであった。シミュレートされた気流はほぼ二次元的な気流であることが確認された。

**Keywords:** active simulation, wind gust, 2D wind tunnel test, large scale turbulence

## 1. 概 説

橋梁の動的耐風安定性の照査のための風洞実験は風速変動のほとんどない様な気流中で行われることが多く、振動の定量的評価よりもむしろ設計風速内における振動の発生の有無によって安全性を判断することが多い。しかし、自然風は時間的にも空間的にも変動する乱流である。一般に乱流中では一様流中でみられる振動現象が抑制されるといわれているが、一方では高風速域において一様流中ではみられないガスト応答が発生するようになる。今後、より合理的で安全な耐風設計を実施するためには、自然風の変動特性を考慮した耐風安全性評価が重要になってくると思われる。

乱流中での風洞実験を行うためには風洞内に乱流を発生させる必要がある。風洞内に乱流を発生させる手法の代表的なものには次のようなものがある。粗度ブロックやスパイヤーを用いた境界層乱流発生法は三次元模型実験で用いられ、地表面上に生じた大気境界層を再現するのに適した良い方法である<sup>1),2)</sup>。しかしながら、自然風に近い境界層乱流を得るためには大きな測定断面と十分長い風路を必要とする。二次元模型実験では、もっぱら格子乱流発生法を用いている。この方法は比較的簡単に乱流を発生させることができるが、乱れのスケールが小さく、自然風の影響を考慮した風洞実験を行う点からみると不都合がある<sup>3)</sup>。アクティブ乱流発生法は、大きな乱れスケールを有する乱流をシミュレートすることが可能であり、さらに、乱れのパラメーターを任意にコントロールすることができる。現在までのところ2, 3の開発例<sup>4),5)</sup>はあるもののその特性については十分な調査がなく、多用されていない。

二次元模型による風洞実験は、風洞の規模がさほど大きくなくてよい、実験が比較的簡便である、基礎的な研究に適しているなど三次元模型実験に比べ多くの利点を有している。二次元模型を用いて乱流応答に関する基礎的な調査を行うことはまだなお重要な課題であると考えられる。このとき、模型に作用する乱流の各種乱れ特性を任意にコントロールできれば好都合である。このような観点から二次元風洞実験のためのアクティブ乱流発生装置の開発を試み、格子乱流よりも一桁大きなスケールを有する乱流を発生させることができた<sup>6)</sup>。そして、いくつかの改良を試みた<sup>7),8)</sup>。

自然風の乱れは本質的には三次元的なものであるが、二次元模型を用いた基礎的な研究のためには、まず取扱いの容易な二次元乱れによる風洞実験が重要であると考え、ここでは二次元的な乱れすなわち主流方向成分と主流直角方向成分のみの乱れをもつ気流を作り出すこととする。

本論文は、そのアクティブ乱流シミュレーション法の概要を示し、乱流発生装置の基本的特性およびそれを用いてシミュレートした気流の乱れ特性について示すものである。

## 2. 実験方法

### (1) 乱流シミュレーション法

二次元風洞実験で主として用いられる乱流の乱れ特性は、平均風速、乱れ強度、乱れのスケールおよびパワースペクトルである(ただし、乱れ強度、乱れスケールはパワースペクトルから計算することができる)。これらのうち平均風速、乱れ強度、乱れスケールを与えてパワースペクトルを定め、そのパワースペクトルをもとに時系列を発生させ、風洞内に乱流をシミュレートする。

自然風のパワースペクトルを表現する実験公式は種々ある<sup>9)</sup>。ここでは式(1)、(2)で示すKármánの式で

\* 学生会員 工修 立命館大学大学院 博士課程後期  
(〒603 京都市北区等持院北町)

\*\* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科

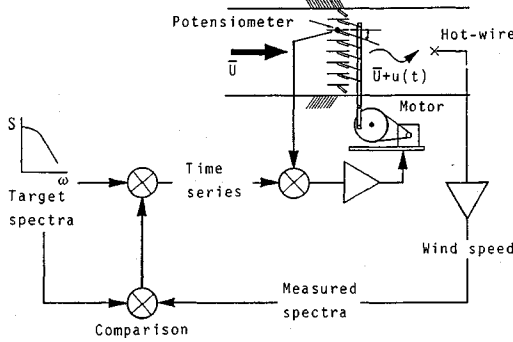


Fig.1 Schematic diagram of active turbulence simulation.

与える<sup>10)</sup>.

$$S_u(f) = 4I_u^2 \bar{U} L_{x,u} (1 + 70.8(fL_{x,u}/\bar{U})^2)^{-(5/6)} \dots (1)$$

$$S_w(f) = 4I_w^2 \bar{U} L_{x,w} \frac{1 + 755.2(fL_{x,w}/\bar{U})^2}{(1 + 283.2(fL_{x,w}/\bar{U})^2)^{(11/6)}} \dots (2)$$

ここに、

$$I_u = \sqrt{u^2}/\bar{U} : \text{主流方向成分乱れ強度} \dots (3)$$

$$I_w = \sqrt{w^2}/\bar{U} : \text{鉛直方向成分乱れ強度} \dots (4)$$

$S_u(f)$  : 主流方向気流変動のポワースペクトル密度関数

$S_w(f)$  : 鉛直方向気流変動のポワースペクトル密度関数

$f$  : 周波数 (Hz)

$\bar{U}$  : 主流方向平均風速 (m/s)

$L_{x,u}$  : 主流方向成分乱れスケール (m)

$L_{x,w}$  : 鉛直方向成分乱れスケール (m)

Fig.1に本研究に用いた乱流シミュレーション法のブロック図を示す。まず、平均風速  $\bar{U}$ 、乱れ強度  $I_u, I_w$ 、乱れスケール  $L_u, L_w$  を任意に設定し、式 (1), (2) より主流方向成分および鉛直方向成分の目標とするポワースペクトルを与える。ポワースペクトルには位相の情報がないので、一様乱数を用いて0から  $2\pi$  までのランダムな位相を与えて、複素フーリエ成分を決定する。複素フーリエ成分から逆フーリエ変換を利用して風速の時系列を作成する<sup>11)</sup>。この時系列をもとに乱流発生装置を駆動させ、風洞内に変動気流を作り出す。熱線流速計で測定された気流のポワースペクトルと目標とするポワースペクトルを比較し、各周波数ごとの両者の比を求める。この比を目標とするポワースペクトルに乘じ、装置を駆動させるための補正スペクトルを求める。補正スペクトルから再度、上述の方法で時系列を求め、乱流発生装置を駆動させる。これを繰り返すことにより最終的に目標とするポワースペクトルを有する乱流をシミュレートする。なお、2回目以降では測定気流のポワース

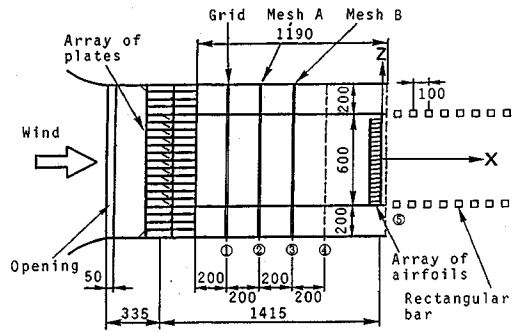


Fig.2 Experimental facilities.

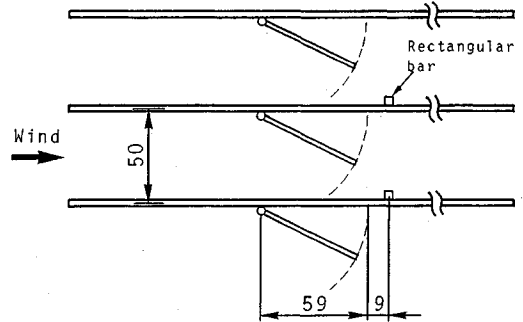


Fig.3 Installation of rectangular bars on plates.

ペクトルと目標とするポワースペクトルとの比を、前回の実験で求めた補正スペクトルに乘じることにより、新たな補正スペクトルを求めることになる。測定された風速のポワースペクトルが目標ポワースペクトルと一致すれば、他の乱れ特性値も目標値に一致することになる。

(2) 実験装置

実験に用いた風洞は測定部が幅 700 mm、高さ 1000 mm の吹出し型風洞である。Fig.2 に示すように吹出し口より 335 mm の位置に平板列を設け、この平板列を回転軸を中心に回転駆動させて風路の閉塞率を変化させることにより主流方向成分の流速を制御する。また、平板列の固定板の吹抜けとなる位置に  $5 \times 5$  mm 角材を設置し (Fig.3)、平板列による閉塞効果を高めた。さらに幅 700 mm、高さ 600 mm、長さ 1190 mm の風路を設け、風路の下流端に翼列を設置した。この翼列をすべて同位相に回転駆動させることにより、気流に傾斜角を与えて鉛直方向成分の気流変動を制御する。

翼列および平板列は AC サーボモータにより駆動し、パーソナルコンピュータによりランダム制御する。

平板列からの剝離による気流の乱れを整流するために、平板列より下流側 200 mm、400 mm、600 mm の位置にそれぞれ格子 (幅 5 mm の角材を 50 mm 間隔で縦横に組んだもの)、メッシュ A (メッシュ 1/8 インチ、ステンレス製)、メッシュ B (メッシュ 1/12 インチ、

ステンレス製)を設置する。格子およびメッシュはシミュレートする乱流特性値に応じて、設置位置、設置枚数、種類を適宜変化させる。翼列および平板列により制御できるのはせいぜい数 Hz までの気流変動であり、時系列データは 9.5 Hz 以上の高周波成分を取り除いたデータを用いる。数 Hz 以上の高周波成分の乱れは、格子やメッシュの種類等を変化させることにより補う。

本研究では、自然風に認められる空間的位相差を得ることを目標とする。測定部風路が密閉の場合、空気非圧縮性から風路全域で、同時に気流変動が生じ、この場合時間的にも空間的にも位相差のない流れとなる。これを避けるために、測定部の気流は、風路の出口から変動気流が自由噴流となって吹き出すような構造とし、測定部は床面と天井面を取り除いた開放風路となっている。ただし、気流の二次元性を確保するために側壁は取り付けられている。自然風では平均流方向、横方向、鉛直方向に風速変動の位相差が存在しているが<sup>12)</sup>、二次元剛体模型の風洞実験を対象としているので、平均流方向の位相差のみを発生させる。

さらに、バイパス部 (Fig.2 の上下の高さ 200 の部分) の流れが測定部近傍の気流に及ぼす影響を軽減させる目的で、風洞内に設けた高さ 600 mm の風路とバイパス部との境界レベルに断面寸法 10 mm × 10 mm、長さ 700 mm の角材を 100 mm 間隔で下流方向に並べる。

本装置は文献 7) で示したものに比べ、シミュレーション風路の入口部の構造が少し異なるほか、測定部の床面と天井面を取り除いてある点が異なる。

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 乱流発生装置の基本的特性

##### a) 翼列回転角と平均傾斜角の関係

まず、翼列を製作するにあたり、翼弦長や翼列間隔の違いによる気流特性の違いを調査した。そして、この調査をもとにして、気流の鉛直方向成分を制御するのに適した翼列について検討を加えた。

翼と翼の間隔を  $P=40, 80, 120$  mm、翼弦長を  $C=100, 150, 200$  mm に変化させたときの気流の平均傾斜角  $\bar{\alpha}$  を測定した。なお、この実験では、乱流発生装置の風路高さを 800 mm とし、測定部は全高 1000 mm となるように床と天井が取り付けられている。

Fig.2 に示すように、翼列の後流側の中央部を原点にとり、主流方向に  $X$  軸、主流直角水平方向に  $Y$  軸、鉛直方向に  $Z$  軸をとる。気流の測定点は  $(X, Y, Z)=(1000$  mm, 0, 0) の位置とした。

Fig.4 に翼列回転角  $\theta_a$  と平均傾斜角  $\bar{\alpha}$  の関係を示す。間隔が一定なら、翼弦長が大きいほど、同じ翼の回転角に対して大きな平均傾斜角  $\bar{\alpha}$  を得ることが可能となる。また、弦長が一定なら、翼列間隔が短いほど、同

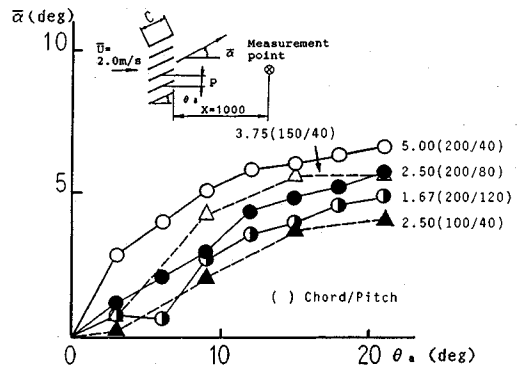


Fig.4 Mean wind angle versus angle of airfoils.

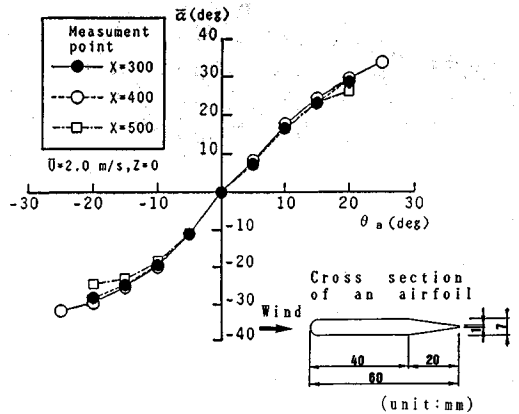


Fig.5 Mean wind angle versus angle of airfoils.

じ翼の回転角に対して大きな傾斜角が得られることがわかる。

以上の結果をまとめると次のようになる。

翼弦長および翼列間隔は、ともに大きな平均傾斜角を得るための重要な要因であり、翼弦長が長いほど、また翼列間隔が小さいほど同じ翼列回転角に対して大きな気流傾斜角を得ることができる。しかし、翼弦長については翼表面の層流境界層の発達による後流域の乱れを考慮すると、むやみに長くすることは望ましくない。また、翼弦長を長くして装置全体の慣性を大きくすると、入力に対する装置の追従性の低下を招くことにもなる。

これらのことを考慮して、Fig.2 の装置では翼弦長と翼列間隔がそれぞれ 60 mm と 30 mm の翼列を用いることとした。この翼列を用いてあらためて気流傾斜角特性を調査した。

模型の設置位置は  $X=300\sim 500$  mm の範囲となること が予定されているので、この範囲で気流を測定した。この調査での乱流発生装置は Fig.2 のとおりである。Fig.5 は翼列回転角  $\theta_a$  と平均傾斜角  $\bar{\alpha}$  の関係を示したものである。これより、測点による気流傾斜角の違いがほとんど認められず、本翼列により得られる気流傾斜角

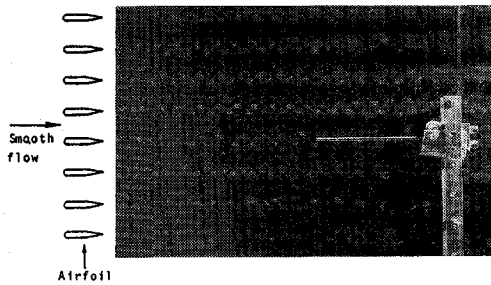


Photo 1 Flow visualization of the wake behind the array of airfoils.

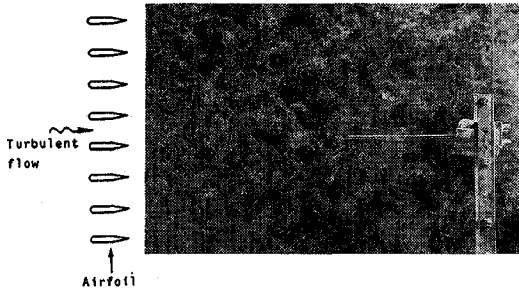
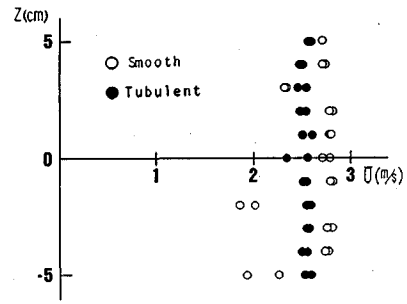


Photo 2 Flow visualization of the wake behind the array of airfoils.

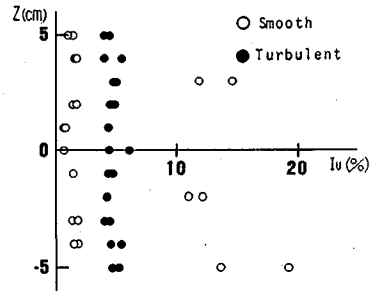
の値は翼列回転角の値の約 1.7 倍になっていることがわかる。そして、どの測点においても翼列回転角と平均傾斜角の関係はほぼ単調に増加する関係にあり、本翼列により鉛直方向成分を十分制御できることがわかる。なお、上述のように翼列により得られる気流傾斜角が、翼列回転角よりも大きな値となっている。この点については、実験を行い翼列後流側流速を詳細に調査した結果、翼の後流側の形状、すなわち、翼後流側に設けたテーパ (Fig.5) によるものであることがわかった。本装置は測定部の床面と天井面を取り除いた開放風路としているが、密閉風路とした場合には翼列から遠ざかるに従って気流傾斜角は低下し<sup>13)</sup>、その値も翼列回転角の値の約 0.5 倍 ( $X=500\text{ mm}$  の場合) と本翼列により得られる気流傾斜角の 1/3 以下の値となっていた。

b) 翼列の後流特性

翼列の下流の位置では、翼表面の層流境界層の後流が存在し、鉛直方向の風速分布が乱される。これを調べ、対策を講じるために、スモークワイヤー法により静止翼列の後流側の測点近傍の流れの可視化および流速の測定を行った。まず、翼列に一樣流を与えた場合の結果を示す。可視化実験の結果を Photo 1 に示す。気流は左から右に流れている ( $\bar{U}=2.0\text{ m/s}$ )。この写真をみると鉛直方向に一定の間隔で交番状の渦が発生していることがわかる。この間隔は翼のピッチと一致する。流速の主流方向成分の測定結果を Fig.6 に白丸印で示す。翼の後方



(a) Distribution of mean wind velocity



(b) Distribution of turbulence intensity of horizontal component

Fig.6 Vertical distribution.

で平均風速  $\bar{U}$  が極端に低下し、乱れ強度  $I_u$  が極端に増大していることがわかる。平均風速の極端な低下および乱れ強度の極端な増大は交番状の渦の影響であるといえる。このような渦は境界層制御によりある程度除去できるものと考えられる<sup>14)</sup>が、翼が小さくまた枚数が多いことから煩雑となるので、そのような方法はとらなかった。翼列上流側に格子 (格子の縦・横の寸法は 10 mm、格子間隔は縦・横とも 80 mm) を設置し、接近流に数%の乱れを与えて再度可視化実験を行った。その結果を Photo 2 に示す。この写真をみると、Photo 1 にみられた翼列からの交番状の渦は消えており、一樣な乱れとなっている。 $\bar{U}$  および  $I_u$  は Fig.6 の ●印で示してある。いずれも翼の影響がほとんど現れず、ほぼ一樣な値を示している。

本研究は乱流を発生することを目的とするもので、翼に作用する気流は常に多少なりとも乱れを含むため翼の後流は実用上問題とならない。しかし、十分小さな乱れの気流を用いるときは注意を要する。

c) 翼列回転中心による動的な気流特性の違い

翼列の回転中心を①上流側、②翼中央、③下流側の 3 種類設定し、それぞれの場合について翼列を正弦加振させたときの気流の動的な特性について調査した。その結果翼の運動が風速の主流方向成分に与える影響が最も小さくなる後縁を回転中心とする方法を採用することとした<sup>15)</sup>。

d) 平板列回転角と平均風速との関係

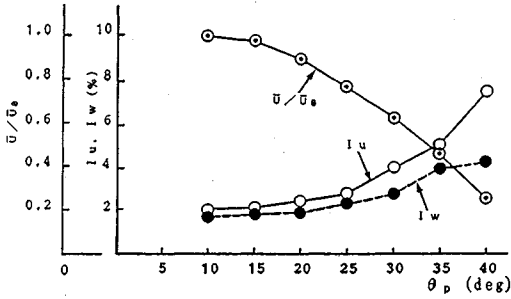


Fig.7 Rate of drop in mean wind velocity and turbulence intensity versus angle of plates.

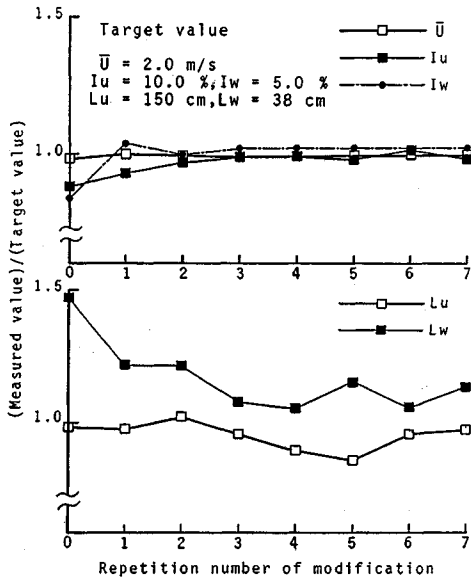


Fig.8 Convergence to target values of turbulence properties versus repetition number of modification.

平板列の回転角と平均風速との関係調べるために、平板列の回転角  $\theta_p$  を  $10^\circ \sim 40^\circ$  まで  $5^\circ$  きざみで変化させて、風速を測定した。測点は  $(X, Y, Z) = (300 \text{ mm}, 0, 0)$  である。Fig.7は平板列回転角  $\theta_p$  と主流方向平均風速  $\bar{U}$ 、乱れ強度  $I_u, I_w$  の関係を示したものである。縦軸はそれぞれの平板列回転角に対する風速を  $\theta_p = 10^\circ$  に対する風速  $\bar{U}_0$  で除した風速低減率および乱れ強度である。 $10^\circ \sim 35^\circ$  の間で平板列回転角の増大とともに平均風速がほぼ単調に低下しており、この間で平板列を駆動させることにより、主流方向変動を制御できることがわかる。

また、 $I_u, I_w$  については  $\theta_p$  の増加とともに増大する傾向を有している。

(2) 乱流シミュレーション結果

a) 乱流シミュレーション

乱流特性値を平均風速  $\bar{U} = 2.0 \text{ m/s}$ 、乱れ強度  $I_u = 10.0\%$ 、 $I_w = 5.0\%$  および乱れスケール  $L_w = 150 \text{ cm}$ 、

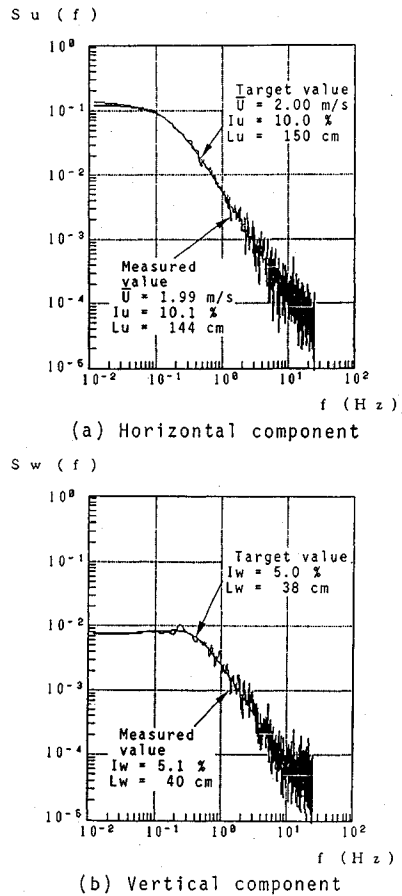


Fig.9 Measured and target spectra of turbulent velocity.

$L_w = 38 \text{ cm}$  としてパワースペクトル目標値を設定し、乱流シミュレーションを行った。測点は  $(X, Y, Z) = (400 \text{ mm}, 0, 0)$  とした。

Fig.8は補正繰返し回数と各乱流特性値の目標値への収束度を示したものである。 $I_u, I_w$  については2回の補正でほぼ目標値に近い値となっている。 $L_u, L_w$  も1回でほぼ目標値に近い値となる。ここで、 $L_u, L_w$  は流速変動のパワースペクトルからFFT法により求めた自己相関係数を積分して求めたものである。

Fig.9 (a), (b)に6回目補正後に測定された気流の主流方向成分および鉛直方向成分のパワースペクトルを示す。図中には目標としたKármánの式によるパワースペクトルも併記した。本システムにより得られた乱流は主流方向成分および鉛直方向成分ともに高周波数領域まで、目標パワースペクトルとよく一致している。

Fig.9よりも乱れ強度が小さい気流についてはメッシュサイズの小さいメッシュを用いることにより、目標とするパワースペクトル形状に一致する気流をシミュレートすることができる。

Table 1 Turbulence properties.

No.	Measured value(Target)					Grid & Mesh					
	$\bar{U}$ (m/s)	$I_u$ (%)	$I_w$ (%)	$L_u$ (cm)	$L_w$ (cm)	①	②	③	④	⑤	
Change of $I_u, I_w$	1	2.01 (20.0)	18.8 (10.0)	10.0 (7.5)	152 (150)	37 (38)	—	—	—	G2	—
	2	2.00	14.0 (15.0)	7.7 (7.5)	149	40	G1	1/4	1/6, 5	—	—
	3	2.10	9.6 (10.0)	5.1 (5.0)	149	42	G1	1/8	1/12	—	—
	4	1.98	5.1 (5.0)	2.7 (2.5)	145	38	G1	1/8	1/12	—	1/24
	5	2.04	3.1 (3.0)	1.8 (1.5)	129	38	G1	1/8	1/12	—	1/24
Change of $L_u, L_w$	a	1.98 (2.00)	10.0 (10.0)	5.1 (5.0)	450 (600)	145 (150)	G1	1/8	1/12	—	1/24
	b	1.99	9.4	4.8	268 (200)	80 (75)	G1	1/8	1/12	—	1/24
	c	2.03	9.8	5.0	78 (75)	21 (19)	G1	1/4	—	—	—
	d	2.00	9.9	5.3	52 (50)	13 (13)	G1	1/4	—	—	—
	e	2.08	9.4	5.4	23 (20)	6 (5)	—	—	—	G2	—

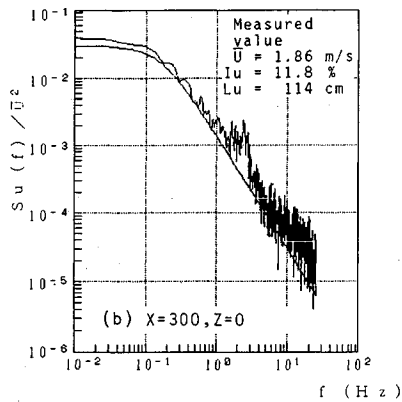
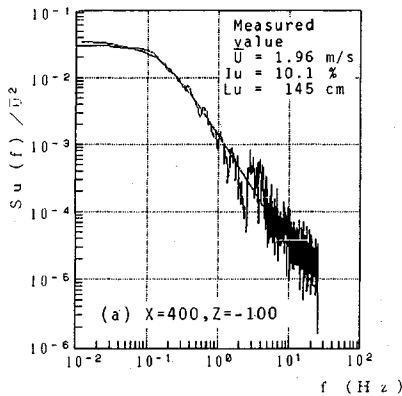


Fig.10 Spatial property of measured spectra.

乱れ強度および乱れスケールを各種変えて乱流シミュレーションを行った。シミュレートする乱流の特性値によってメッシュの種類、設置位置として枚数を変化させた。Table 1 に乱流シミュレーション結果を格子およびメッシュの有無、設置位置とメッシュサイズ(単位;インチ)とともに示す。表の①, ②...は Fig.2 に示した格子およびメッシュの取付け位置を示す。G1, G2 はそれ

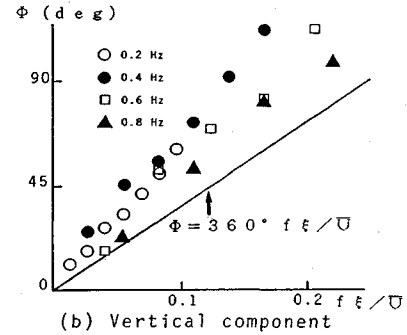
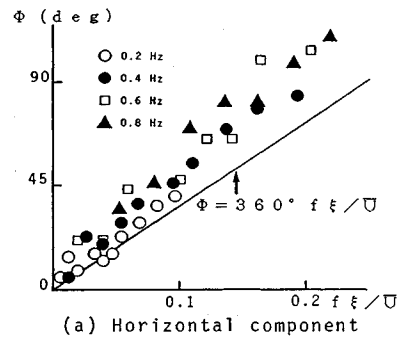


Fig.11 Longitudinal phase of horizontal and vertical velocity components.

ぞれ  $5 \times 5$  mm, 50 mm ピッチおよび  $10 \times 25$  mm, 100 mm ピッチの格子である。

シミュレートされた乱流特性値の範囲は、乱れ強度については  $I_u=3.1 \sim 18.9\%$ ,  $I_w=1.8 \sim 10.0\%$  となった。乱れスケールについては  $L_u=23 \sim 450$  cm,  $L_w=6 \sim 145$  cm となり、通常の格子乱流よりも一桁大きいものまでシミュレートすることができた。

b) 乱流の空間的特性

1) 測定気流パワースペクトルの断面内分布

上記の測点  $((X, Y, Z)=(400 \text{ mm}, 0, 0))$  でシミュレートした気流(目標値:  $\bar{U}=2.0 \text{ m/s}$ ,  $I_u=10.0\%$ ,  $I_w=5.0\%$ ,  $L_u=150 \text{ cm}$ ,  $L_w=38 \text{ cm}$ ) について鉛直方向および主流方向に測点を变えて、各位置におけるパワースペクトルを調べた。

Fig.10 (a) は、 $(X, Y, Z)=(400 \text{ mm}, 0, -100)$  の位置での主流方向成分のパワースペクトルを示したものである。

また、Fig.10 (b) は、 $(X, Y, Z)=(300 \text{ mm}, 0, 0)$  の位置での主流方向成分のパワースペクトルを示したものである。これらの図をみると乱流をシミュレートした測点以外では  $2.0 \sim 3.0 \text{ Hz}$  にかけてパワーの値が変化していることがわかる。これは吹出し部流れの空力的特性によるものであろうと推察される。

2) 主流方向の2点間における位相特性と相互相関係数

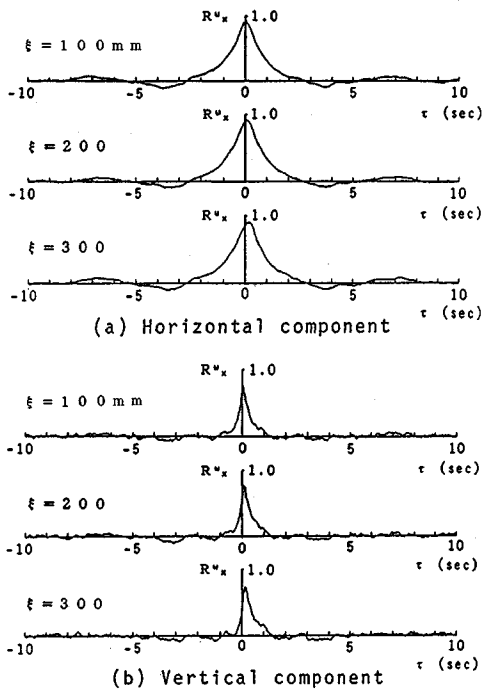


Fig.12 Cross correlation coefficient of longitudinal velocity component.

気流の主流方向成分に正弦的な変動を与えた。測点を (400 mm, 0, 0) とさらに  $\xi$  だけ後流側の 2 点にとり、両測点の主流方向および鉛直方向の気流変動の位相差  $\phi$  を求めた。その結果を Fig.11 に示す。図中の直線は正弦的な変動が平均流とともに流下すると仮定した理論上の位相差を示したものである。主流方向成分および鉛直方向成分ともに無次元距離に対する位相差の増加の割合 (傾き) は理論値と同様の傾向を有するが、実験値の方が大きくなっている。

次に、 $\bar{U} = 2.0$  m/s,  $I_u = 10.0\%$ ,  $I_w = 5.0\%$ ,  $L_u = 150$  cm,  $L_w = 38$  cm の乱流をシミュレートし、主流方向成分、鉛直方向成分について主流方向の 2 点間における相互相関係数  $R^u_x(\xi, \tau)$ ,  $R^w_x(\xi, \tau)$  を求めた。その結果を Fig.12 に示す。これより、主流方向成分および鉛直方向成分ともに 2 点間の距離が離れるに従って、相互相関係数のピークの位置が右方向に移動していることがわかる。これは自然風の主流方向の 2 点間における相互相関係数と類似したものである。

相互相関係数  $R^u_x(\xi, \tau)$ ,  $R^w_x(\xi, \tau)$  の  $\tau = 0$  の値をもとにして主流方向の 2 点間における空間相関係数  $R^u_x(\xi, 0)$ ,  $R^w_x(\xi, 0)$  を求めた。その結果を Fig.13 に示す。さらに、最小二乗法により指数関数  $R_x(\xi, 0) = \exp(-\xi/L_x)$  で近似し、図中に併記した。  $L_x$  は空間スケールを表すとみなすことができる。主流方向成分および鉛直方向成分の空間スケールは、それぞれ 183 cm, 26 cm

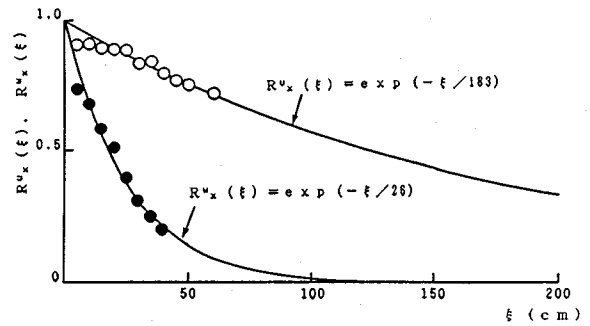
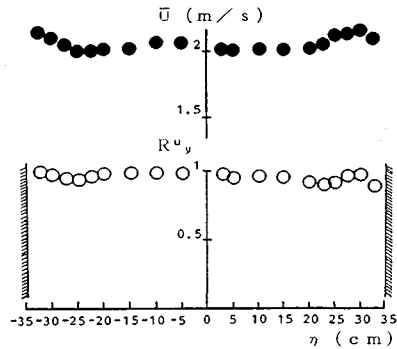
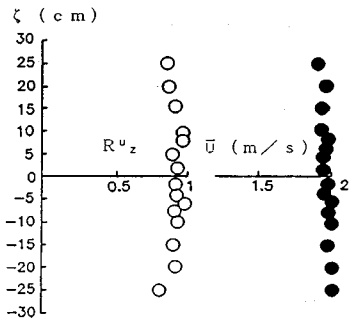


Fig.13 Space correlation coefficient of longitudinal velocity component.



(a) Lateral velocity component (Y direction)



(b) Vertical component (Z direction)

Fig.14 Space correlation coefficient of lateral and vertical velocity components.

となった。一方、自己相関係数から求めた積分スケールは、それぞれ 140 cm, 43 cm となり、主流方向成分については空間スケールの方が大きな値となり、鉛直方向成分については積分スケールの方が大きな値となった。また、主流方向成分の空間スケールと積分スケールの比は約 1 : 1.3 となり、大阪北港での観測データ (西風で 1 : 0.75 ~ 1.2)<sup>16)</sup> よりも若干大きめの値となった。

3) シミュレートされた気流の二次元性

シミュレートされた気流の二次元性を調べるために気流の水平成分について橋軸方向 (Y 方向)、鉛直方向 (Z

方向)の相互相関係数  $R_y(\eta, \tau)$ ,  $R_z(\zeta, \tau)$  の  $\tau=0$  の値をもとにして空間相関係数  $R_y^u, R_z^u$  を求めた。翼列や平板列で制御できるのはせいぜい数 Hz までの気流変動であり、数 Hz 以上の気流変動は翼列や平板列からの剝離や格子やメッシュによる乱れである。そこで、多項式適合法により数 Hz 以上の乱れの成分を除去し<sup>17)</sup>、解析を行った。  $\eta, \zeta$  は  $(X, Y, Z) = (300, 0, 0)$  から  $Y, Z$  方向への距離である。その結果を Fig.14 に示す。水平横方向については測定部の全幅にわたり、 $R_y^u$  はほぼ1となり、良い相関を示している。平均風速の分布もほぼ一定している。鉛直方向についても比較的良好な相関を示しており、平均風速についてもほぼ様な分布を示している。

#### 4. 結 論

翼列および平板列を用いて、自然風と相似な二次元乱流を吹出し型風洞内にシミュレートすることを試みた。その結果、以下のことがわかった。

(1) 本論文の方法によるアクティブ乱流シミュレーションにより目標とするパワースペクトル (Kármán の式) に十分近い乱流をシミュレートできた。乱れ強度を小さくした場合、メッシュサイズの小さいメッシュを翼列直後に設置することで、高周波数領域の乱れのパワーを小さくすることができ、目標とするパワースペクトル形状に近い乱流をシミュレートすることができる。

(2) シミュレートする乱流特性値に応じて格子やメッシュの種類、設置位置そして枚数を適宜変化させて、乱流シミュレーションを行った。その結果シミュレートされた乱流特性値の範囲は、乱れ強度については  $I_u = 3.1 \sim 18.9\%$ 、 $I_w = 1.8 \sim 10.0\%$ 、乱れスケールについては  $L_u = 23 \sim 450$  cm、 $L_w = 6 \sim 145$  cm となり、格子乱流によるスケールよりも一桁大きいものが得られた。

(3) 本装置によりシミュレートした気流の空間的な特性について調べた。その結果、以下のことがわかった。

1) 翼列からの距離により 2.0~3.0 Hz 付近のパワーの値が変化している。これは本装置の気流の空力的な特性によるものと考えられ、さらに本装置に対する基礎的な調査を行う予定である。

2) 主流方向の2点間における位相差は、主流方向成分および鉛直方向成分ともに理論的な位相特性と同様の傾向を示した。また、相互相関係数については自然風に類似したものとなった。

3) 鉛直方向および水平横方向の空間相関はともに比較的高い相関を示した。風速分布についてもほぼ様な分布であった。

謝 辞：本研究を遂行するにあたっていつも貴重な助言をいただきました大阪大学工学部 川谷充郎助教授に心より感謝いたします。また、有益な資料を提供して

いただいた大阪大学大学院の金 照憲氏、太田 圭氏 (現・三菱商事 (株)) に深く感謝します。

さらに、本研究の実験・解析等にご協力いただいた昭和 63 年度立命館大学卒業生 西川浩和君、美島雄士君、平成元年度立命館大学卒業生 井上重夫君、北潟晋一君、安川仁敏君に感謝の意を表します。

本研究の一部には、昭和 62~63 年度の文部省科学研究費補助金 (一般研究 B, 課題番号 62460151) の交付を受けた。記して謝意を表す次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 福田 誠・横山功一・佐藤弘史：自然風を相似させた境界層乱流の一発生方法について、第 41 回土木学会年次学術講演会概要集, I-348, 1986.
- 2) 木村超太郎・久保喜延・木谷博文・加藤九州男：自然風シミュレーションと強風特性について、第 43 回土木学会年次学術講演会概要集, I-357, 1988.
- 3) 森 武雄：格子により自然に相似な風洞気流を作る試み、第 5 回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集, pp.275~281, 1978.
- 4) Cermak, J. E., Bienkiewicz, B. and Peterka, J. A. : Active Modeling of Turbulence For Wind-Tunnel Studies of Bridge Models, Federal Highway Administration report No. FHWA/RD-82/148 (1988 2.2).
- 5) 渡辺洋八郎・斉藤 通・坂田 弘・本田明弘・稲室隆二：橋梁の耐風安定性 (その 1) —実験解析編一, 三菱重工技報, Vol. 24, No. 4, pp. 316~325, 1987.
- 6) 小林紘士・川谷充郎・中出 収・野村浩史・太田 圭・畑中章秀：2次元風洞におけるスケールの大きい乱流の発生, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, pp.163~168, 1988.
- 7) 小林紘士・畑中章秀：吹出し型風洞における乱流のアクティブシミュレーション, 立命館大学理工学研究所紀要, 第 48 号, pp. 34~54, 1990.
- 8) 畑中章秀・小林紘士・美島雄士：吹き出し型風洞における 2次元乱流シミュレーション, 第 44 回土木学会年次学術講演会概要集, I-402, 1989.
- 9) 塩谷正雄：強風の性質, 開発社, pp.72~82, 1981.
- 10) 小松定夫・小林紘士・川谷充郎・亀井正博：大阪北港における自然風の諸特性, 第 9 回風工学シンポジウム論文集, pp.13~18, 1986.
- 11) 星谷 勝：確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, 第 3 章, 1987.
- 12) 9) と同じ。
- 13) 7) と同じ。
- 14) 牧野光雄：航空力学の基礎, 産業図書, pp.160~161, 1987.
- 15) 畑中章秀：2次元風洞内における自然風乱流のアクティブシミュレーション, 立命館大学大学院修士論文, 1990.
- 16) 猫本善統：自然風の諸特性を考慮した長大橋の不規則振動解析, 大阪大学修士論文, 1987.
- 17) 南 茂夫編：科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社, pp.90~93, 1986.

(1990.8.20 受付)



## ACTIVE SIMULATION OF WIND GUST FOR TWO DIMENSIONAL WIND TUNNEL TEST

Akihide HATANAKA and Hiroshi KOBAYASHI

This study aims to develop an active simulation method of wind gust for a two dimensional wind tunnel test. Usually wind gust in a two dimensional wind tunnel test is produced by a grid, which is a passive simulation method. Grid turbulence has a too small turbulence scale. It is not easy to control the turbulence characteristics by a grid. Simulation of wind gust was tried by an active gust generator, which consists of arrays of plates and airfoils. By these facilities a large scale turbulence was obtained and spectram of wind turbulence well fitted a given spectram. A space correlation of longitudinal velocity component was similar to a natural wind.

---