

# 対称・逆対称変動風圧場が変動風力に与える影響に関する研究

試験研究センター 環境部 耐風試験室 村上 智之

## 1. はじめに

高層建築物の構造骨組に対する耐風設計を行う際は、一般的に動的応答を評価するため、建築物に作用する変動風力の特徴を捉えることは重要です。著者らは、風洞実験により得られた変動風圧場の複素POD解析を行い、主要2モードの変動風圧場を対称・逆対称モードに分けてその特性を調べ、弾性模型・勾配流の変動風圧場は他のケースと傾向が異なることを示しました<sup>1)</sup>。POD解析<sup>2)</sup>とは、一見ランダムに見える変動場の組織的構造を見出す解析手法です。本稿では、対称・逆対称の変動風圧場が変動風力に与える影響を明らかにすることを目的として、対称・逆対称の変動風圧場から変動風力を算定した結果<sup>3)</sup>について報告します。

## 2. 風洞実験

高層建築物周りの変動風圧場は、模型を用いた風洞実験により測定しました。実験は、(一財)日本建築総合試験所のエッフェル型吹出式境界層風洞で行いました。実験模型には剛模型とロッキング振動を再現した弾性模型を用いました。模型の概要を図-1に示します。模型縮尺は1/400です。想定建築物と弾性模型の構造諸元の対応関係を表-1に示します。風圧測定点は、模型の各面の図-1に示す丸の位置に30点ずつ合計120点設けました。サンプリング周波数は800Hz、データ個数は129654個です。実験気流は図-2に示す一様流と勾配流(粗度区分Ⅲ)としました。実験風速は模型幅Bおよび $f_0$ で無次元化した換算風速 $V_T = U_H/Bf_0 = 4 \sim 17$ の範囲で等間隔の15段階としました。実験風速 $U_H$ は模型の頂部高さHで測定した基準速度圧qから換算しました。

## 3. 変動風力への対称・逆対称変動風圧の寄与率

対称・逆対称モードの変動風圧がX方向およびY方向の変動風力に与える影響の割合を調べるため、変動風力への変動風圧の寄与率を求めました。以降、太字のイタリックで示す英数字はベクトル、太字のローマン体で示す英数字は行列を表しております。

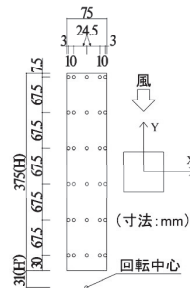


図-1 模型の概要

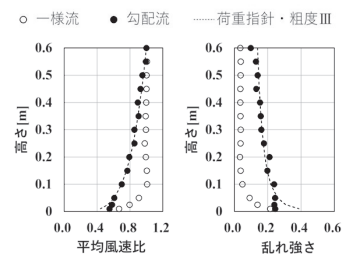


図-2 実験気流

表-1 想定建築物と弾性模型の構造諸元の対応関係

構造諸元	想定建築物	弾性模型
固有振動数 $f_0$ (Hz)	0.25	8.34
建物密度 (kg/m <sup>3</sup> )	300	307
一般化質量 (kg)	13,500,000	0.216
減衰定数 $h$ (%)	1	1
	2	2

## 3.1 変動風力

X方向の変動風力 $F_X(t)$ の解析信号 $\tilde{F}_X(t)$ は外向き法線ベクトルがX軸の逆向きになる面上の点に対応する要素が1、X軸の向きに一致する面上の点に対応する要素が-1、他の要素が0の列ベクトル $I_X$ により式(1)で表せます。

$$\tilde{F}_X(t) = I_X^T \mathbf{A} \tilde{\mathbf{p}}(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ は各点の負担面積を対角要素にもつ対角行列、 $\tilde{\mathbf{p}}(t)$ は各点の風圧の解析信号を要素としてもつ列ベクトル、 $T$ は行列の転置を表します。

## 3.2 変動風力の分散

$\tilde{F}_X(t)$ の分散 $\sigma_{\tilde{F}_X}^2$ は、各点の風圧の解析信号に関する共分散行列 $\tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{p}}} = \overline{\tilde{\mathbf{p}}(t)\tilde{\mathbf{p}}^T(t)}$ を用いて、式(2)となります。

$$\sigma_{\tilde{F}_X}^2 = \overline{\tilde{F}_X(t)\tilde{F}_X^*(t)} = I_X^T \mathbf{A} \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{p}}} \mathbf{A} I_X \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\bar{\cdot}$ は時間 $t$ に関する平均、 $+$ はエルミート共役、 $*$ は複素共役を表します。

## 3.3 変動風力における寄与分

$I_X$ をベクトル $\tilde{\mathbf{c}}_{1X}$ を用いて、複素POD解析<sup>3)</sup>で得られたモードの線形和として次式で表します。

$$\mathbf{1}_X = \tilde{\Phi} \tilde{\mathbf{c}}_{1X} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\tilde{\Phi}$ は、各次のモードを列要素としてもつモード行列であり、 $\tilde{\Phi}$ は式(4)のように規準化しています。

$$\tilde{\Phi}^{\dagger} \mathbf{A} \tilde{\Phi} = \mathbf{I} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ は単位行列です。式(3)、(4)より式(5)が得られます。

$$\tilde{c}_{1x} = \tilde{\Phi}^{\dagger} \mathbf{A} I_x \dots\dots\dots (5)$$

式(3)、(4)より、式(2)の $\sigma_{\tilde{F}_X}^2$ は式(6)で表されます。

$$\sigma_{\tilde{F}_X}^2 = \tilde{c}_{1x}^{\dagger} \tilde{\Phi}^{\dagger} \mathbf{A} \tilde{R}_p \mathbf{A} \tilde{\Phi} \tilde{c}_{\mu_X} = \tilde{c}_{1x}^{\dagger} \Lambda \tilde{c}_{1x} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\Lambda$ はPOD解析の $j$ 次の固有値 $\lambda_j$ を対角要素にもつ対角行列です。ベクトル $\tilde{c}_{1x}$ の $j$ 行要素 $\tilde{c}_{1xj}$ と $\lambda_j$ により、 $\sigma_{\tilde{F}_X}^2$ は式(7)のように表されます。

$$\sigma_{\tilde{F}_X}^2 = \sum_j |\tilde{c}_{1xj}|^2 \lambda_j \dots\dots\dots (7)$$

式(7)は、風力の解析信号 $\tilde{F}_X(t)$ の分散 $\sigma_{\tilde{F}_X}^2$ を $|\tilde{c}_{1xj}|^2 \lambda_j$ の和として表しており、 $|\tilde{c}_{1xj}|^2 \lambda_j$ は複素POD解析の $j$ 次モードの変動成分の変動風力への寄与分と考えられます。

### 3.4 変動風力への寄与率

変動風力への対称・逆対称モードの変動風圧場の寄与率 $\gamma_{1xs}$ 、 $\gamma_{1xa}$ を式(8)、(9)のように表すことができます。

$$\gamma_{1xs} = |\tilde{c}_{1xs}|^2 \lambda_s / \sigma_{\tilde{F}_X}^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\gamma_{1xa} = |\tilde{c}_{1xa}|^2 \lambda_a / \sigma_{\tilde{F}_X}^2 \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $|\tilde{c}_{1xs}|^2 \lambda_s$ 、 $|\tilde{c}_{1xa}|^2 \lambda_a$ はそれぞれ対称・逆対称モードの変動風圧場の変動風力への寄与分です。また、式(10)で表される振動モードベクトル $\mu_X$ を $I_X$ の代わりに用いることで、X方向の一般化変動風力への対称・逆対称モードの変動風圧の寄与率 $\gamma_{\mu_Xs}$ 、 $\gamma_{\mu_Xa}$ が求められます。

$$\mu_X = \mathbf{1}_X \mu \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\mathbf{1}_X$ は $I_X$ の各要素を対角要素にもつ対角行列、 $\mu$ は各測定点の回転中心からの高さ $z_k$ に対応する1次の振動モード $\mu_k = z_k / (H + H')$ を $k$ 行要素にもつ列ベクトルであり、 $k$ は測定点番号です。なお、Y方向もX方向と同様に考えることができます。

各測定ケースの $\gamma_{1xa}$ 、 $\gamma_{\mu_Xa}$ 、 $\gamma_{1ys}$ 、 $\gamma_{\mu_Xs}$ と $V_r$ の関係を図-3~図-5に示します。なお、 $\gamma_{1xs}$ 、 $\gamma_{\mu_Xs}$ 、 $\gamma_{1ya}$ 、 $\gamma_{\mu_Xa}$ は全測定ケースで最大0.03と小さな値であったため、同図には示していません。一様流の $\gamma_{1ys}$ 、 $\gamma_{\mu_Xs}$ は他のケースよりも低い値を示すことがわかります。また、一様流中の弾性模型・ $h = 1\%$ の場合、 $V_r = 10$ 付近での $\gamma_{1ys}$ 、

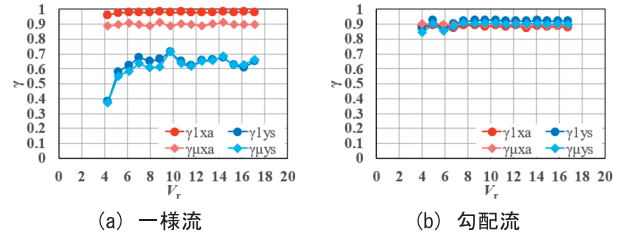


図-3 変動風力への変動風圧の寄与率 (剛模型)

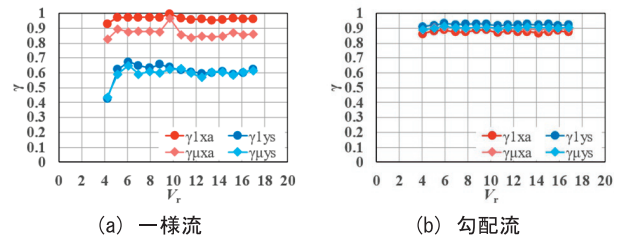


図-4 変動風力への変動風圧の寄与率 (弾性模型、 $h=2\%$ )

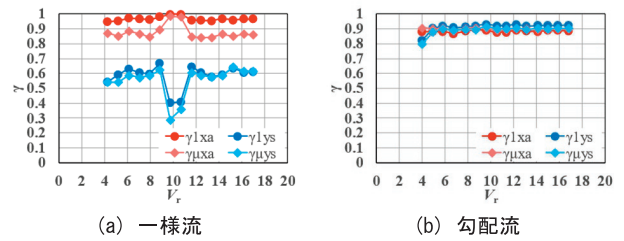


図-5 変動風力への変動風圧の寄与率 (弾性模型、 $h=1\%$ )

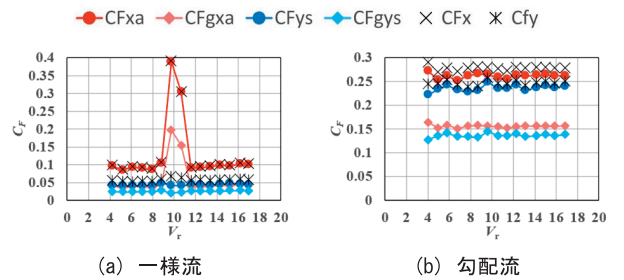


図-6 対称・逆対称モードの一般化変動風力 (弾性模型、 $h=1\%$ )

$\gamma_{\mu_Xs}$ が極端に低下しております。この詳しい原因は不明ですが、一様流中の弾性模型・ $h = 1\%$ の $V_r = 10$ 付近は、カルマン渦との共振により、振動変位が大きくなっているため、寄与率に影響を与えていると考えられます。

### 4. 対称・逆対称モードの変動風力係数

変動風力への対称・逆対称の変動風圧場の寄与率を用いて、変動風力係数を算定しました。

#### 4.1 算定方法

X方向の変動力係数 $C_{F_x}$ は、基準速度圧 $q$ 、側面積 $A$ を用いて一般に式(11)のように表されます。

$$C_{F_x} = \sigma_{F_x}/qA = \sigma_{\bar{F}_x}/qA\sqrt{2} \dots\dots\dots(11)$$

同様に、対称・逆対称モードの変動風圧場による変動風力係数 $C_{F_{xs}}$ 、 $C_{F_{xa}}$ を式(12)、(13)のように定義できます。

$$C_{F_{xs}} = |\tilde{c}_{1_{xs}}|\sqrt{\lambda_s}/qA\sqrt{2} \dots\dots\dots(12)$$

$$C_{F_{xa}} = |\tilde{c}_{1_{xa}}|\sqrt{\lambda_a}/qA\sqrt{2} \dots\dots\dots(13)$$

また、 $\tilde{c}_{\mu_{xs}}$ 、 $\tilde{c}_{\mu_{xa}}$ を用いることで、対称・逆対称モードの変動風圧場による一般化変動風力係数 $C_{F_{Bxs}}$ 、 $C_{F_{Bxa}}$ を算定できます。なお、Y方向もX方向と同様に算定できます。

#### 4.2 算定結果

弾性模型・ $h=1\%$ の $C_{F_{xa}}$ 、 $C_{F_{Bxa}}$ 、 $C_{F_{ys}}$ 、 $C_{F_{Bys}}$ 、 $C_{F_x}$ 、 $C_{F_y}$ と $V_f$ の関係を図-6に示します。勾配流中の $C_{F_{xa}}$ と $C_{F_{ys}}$ は、 $C_{F_x}$ と $C_{F_y}$ よりも少し小さいですが、図-5に示す寄与率は0.9付近と高く、勾配流中の対称・逆対称モードの変動風圧場が風方向・風直交方向の変動風力に与える影響は比較的大きいことがわかります。一方、一様流中の $C_{F_x}$ と $C_{F_{xa}}$ はほぼ同じ値を示していますが、 $C_{F_{ys}}$ は $C_{F_y}$ よりも小さいです。また、ここでは示していませんが、剛模型および弾性模型・ $h=2\%$ の場合も同様に、一様流中の $C_{F_{ys}}$ は $C_{F_y}$ よりも小さくなりました。

#### 5. まとめ

本研究により、逆対称モードの変動風圧場は、一様流中、勾配流中に関わらず、風直交方向の変動風力に大きな影響を与えていることがわかりました。また、一様流中の風方向の変動風力は、勾配流中と比較して、対称モードの変動風圧場による影響が小さいことがわかりました。今後は、この原因についてさらに調べたいと考えております。

#### 【参考文献】

- 1) 村上智之 他：高層建築物周りの対称・逆対称変動風圧場，日本風工学会年次研究発表会梗概集，pp.167-168, 2023.5
- 2) 田村幸雄：固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ，日本風工学会誌，No.65, pp.33-41, 1995
- 3) 村上智之 他：対称・逆対称変動風圧場の変動風力に与える影響，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），構造，pp.89-90, 2023.9
- 4) 谷口徹郎 他：変動場の組織的な構造を評価するための複素POD解析に関する研究，日本風工学会論文集，Vol.31, No.4, pp.123-130, 2006