

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 2096 風洞実験に基づく多層層風力を用いた超高層建物の風応答性状：<br>(その1)風洞実験により得られた風力性状の評価(構造)                                      |
| Title             |                                                                                                        |
| 著者(和文)            | 安田 憲史, 吉江慶祐, 佐藤 大樹, 平井 宏幸, 早田 友彦, 北村春幸                                                                 |
| Authors           | daiki sato, Haruyuki Kitamura                                                                          |
| 出典 / Citation     | 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 81, No. 0, 2096                                                                  |
| Citation(English) | , Vol. 81, No. 0, 2096                                                                                 |
| 発行日 / Pub. date   | 2011, 2                                                                                                |
| rights            | 日本建築学会                                                                                                 |
| rights            | 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである                                                                       |
| relation          | isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730336">http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730336</a> |

## 風洞実験に基づく多層層風力を用いた超高層建物の風応答性状

(その1) 風洞実験により得られた風力性状の評価

準会員○安田憲史<sup>\*1</sup> 正会員 吉江慶祐<sup>\*2</sup> 同 佐藤大樹<sup>\*1</sup> 同 平井宏幸<sup>\*1</sup>  
同 早田友彦<sup>\*2</sup> 同 北村春幸<sup>\*1</sup>

構造・荷重・信頼性

風洞実験 層風力

モーダル風力 確率密度関数

## 1. はじめに

現在、建物は風荷重に対して弾性範囲で設計が行われている。しかし近年、免震建物の高層化や低降伏点鋼を用いた履歴型制震部材の普及や実用化に伴い、風荷重に対して、弾塑性範囲における応答評価の必要性が高まっている。

時刻歴応答解析による風応答評価は、定常確率過程のモンテカルロ法による評価であり、応答値は多数の統計量として扱う必要がある。風応答評価手法として、文献<sup>1), 2)</sup>では、三角級数モデルによりシミュレートして作成した模擬風力波形を用いて、アンサンブル数が応答評価のばらつきに及ぼす影響について検討している。しかし、風力のばらつきが応答及びエネルギー入力に及ぼす影響を詳細に検討した例は少なく、不明な点も多い。また、信頼性の高い風応答評価を行うためには、模擬風力波形に比べ、空間的な相関の分布が自然風により近い風洞実験結果を用いる必要があると考えられる。

そこで本報では、風洞実験により得られた風力データを直接用いて、風力のばらつきが応答に与える影響を検討し、時刻歴風応答解析による風応答評価を行うための基礎資料を提示することを目的とする。本報その1では、風洞実験により得られた層風力からモーダル風力を算出し、その性状を調べる。本報その2では、本報その1の風洞実験で得られた層風力の時刻歴波形を直接用いた時刻歴応答解析により、風応答性状を評価する。

## 2. 風洞実験概要

実験模型は、高さ  $H=50\text{ cm}$ 、平面積  $A=100\text{ cm}^2$ 、アスペクト比  $H/\sqrt{A}$ 、縮尺  $1/300$  の角柱模型とした。辺長比  $D/B$  ( $D$ : 奥行き,  $B$ : 幅) は  $1.0, 1.5, 2.0, 3.0$  の4種類とした。実験気流は「建築物荷重指針」<sup>3)</sup>の粗度区分Ⅲの気流を目標に作成された。図1に平均風速、乱れ強さの鉛直分布を荷重指針値と共に示す。層風力は10層分測定した。サンプリング周波数を  $1000\text{ Hz}$  とし、設計風速に対応する実験風速  $U_0$  を  $10\text{ m/s}$  に設定した。なお、設計風速  $U_H$  を再現期間500年相当の  $60.8\text{ m/s}$  とした。本研究におけるその他の実験方法及び実験条件については文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

## 3. 対象建物

図2に本検討に用いる対象建物を示す。本研究では、対象建物を高さ  $H=200\text{ m}$ 、幅  $B=50\text{ m}$ 、奥行き  $D=50\text{ m}$ 、地上部質量は  $87500\text{ ton}$  (高さ方向に一樣)、固有周期  $T_1=5\text{ sec}$  と想定した。

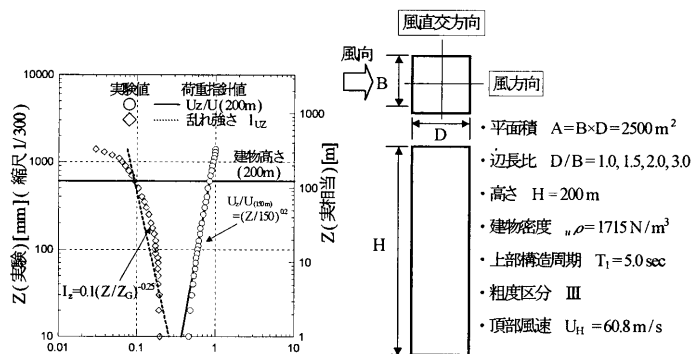


図1 平均風速、乱れ強さの鉛直方向分布

図2 対象建物と想定立地条件

## 4. 層風力及びモーダル風力の作成

## 4.1 層風力の作成方法

本研究では風方向、風直交方向の2方向成分を用いている。層風力  $f_i(\tilde{t})$  は、風洞実験で得られた無次元時間  $\tilde{t}$  での  $i$  層の層風力係数  $C_{f,i}(\tilde{t})$  をもとに、以下(1)~(5)式で算出できる。

$$f_i(\tilde{t}) = C_{f,i}(\tilde{t}) \cdot q_H \cdot \sqrt{A} \cdot h_i \quad (i=1 \sim 10) \quad (1)$$

ここで、 $A$ : 平面積 ( $=B \cdot D$ ) ( $\text{m}^2$ ),  $h_i$ :  $i$  層の支配高さ ( $\text{m}$ ),  $q_H$ : 建物高さ相当における速度圧 ( $\text{kN/m}^2$ ) であり、 $q_H$  は次式で表される。

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ : 空気密度 ( $=1.22\text{ kg/m}^3$ ),  $U_H$ : 高さ  $H$  での頂部風速 ( $=60.8\text{ m/s}$ )

なお、風洞実験で得られた層風力係数  $C_{f,i}(\tilde{t})$  は無次元時間の刻み  $\Delta\tilde{t}$  によるものであるため、実時間へ変換する必要がある。ここで、無次元時間  $\tilde{t}$  は、風洞実験での建物高さ相当における風速  $U_0=10\text{ (m/s)}$ 、代表長さ  $\sqrt{A}$  ( $=B \cdot D=0.1^2\text{ (m}^2\text{)})$  を用いて、次式により与えられる。

$$\Delta t = \frac{\Delta U_H}{\sqrt{A}} = \frac{10}{1000\sqrt{0.1^2}} = 0.1 \quad (3)$$

次に、設計風速、設計代表長さを用いて、実時間に換算する。

$$\Delta t = \frac{\Delta t \sqrt{A}}{U_H} = \frac{0.1 \cdot \sqrt{50^2}}{60.8} = 0.0822 \text{ (s)} \quad (4)$$

(1)~(4)式より、実時間での層風力  $f(t)$  は次式で表される。

$$f_i(t) = C_{f,i}(t) \cdot q_H \cdot \sqrt{A} \cdot h_i \quad (i=1 \sim 10) \quad (5)$$

#### 4.2 1次モーダル風力の作成方法

(1)~(5)式で作成した層風力  $f_i(t)$  を用いて 1 次モーダル風力  $F_s(t)$  を以下(6)~(9)式より算出した。

なお、 $\{f_i(t)\}$  は、(5)式より求めた外力ベクトルである。

$$\{f_i(t)\} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_{10}(t) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $s$  次固有振動モード  $\{u_s\}$  を用いて、モーダル風力  $F_s(t)$  を表すと、

$$F_s(t) = \{u_s\}^T \{f(t)\} = \sum_{i=1}^n u_i \cdot f_i(t) \quad (7)$$

となる。上に(5)式を代入すると  $F_s(t)$  は、次式で表される。

$$F_s(t) = \sum_{i=1}^n u_i \cdot C_{f,i}(t) \cdot q_H \cdot \sqrt{A} \cdot h_i \quad (8)$$

図3に本研究で検討する振動モード形を示す。高層建物の代表として逆三角形分布( $\beta=1$ )と、免震構造のような一様分布( $\beta=0$ )の2種類とし、 $\beta=1$ をロッキングモード、 $\beta=0$ をスウェイモードとする。ここで、1次モード  $\{u_1\}$  は次式で表せる。

$$u_i = \left( \frac{z_i}{H} \right)^\beta \quad (i=1 \sim 10) \quad (9)$$

検討用風力は、風洞実験結果の風力時刻歴波形から振動モード形を  $\beta=0, 1$  とし、上式より作成されたモーダル風力時刻歴波形とする。

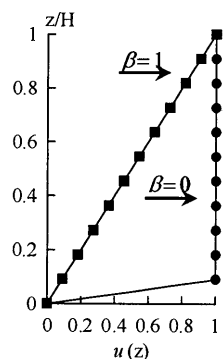


図3 想定振動モード形概要

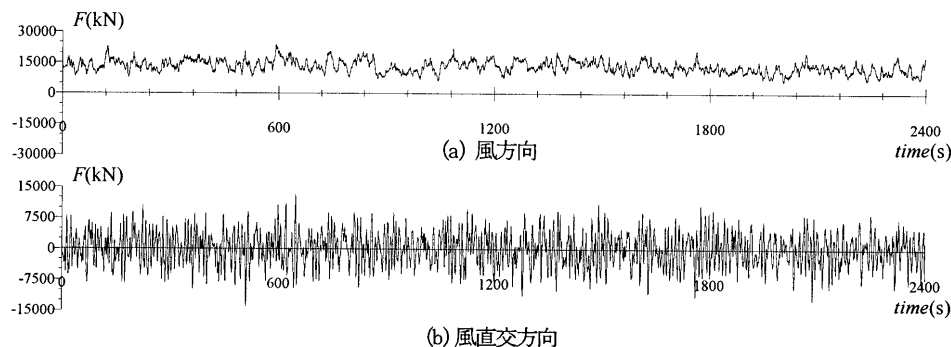


図4 モーダル風力の時刻歴波形例(評価時間  $t_e=600$  秒,  $\beta=1$ ,  $D/B=1.0$ )

なお、検討用風力は粗度区分Ⅲ、風向  $0^\circ$ 、辺長比  $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$  の風方向、風直交方向の2方向成分とする。図4にモーダル風力の時刻歴波形例を示す。また、辺長比  $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$  における振動モード形  $\beta=1$ 、風向  $0^\circ$  でのモーダル風力のパワースペクトル密度を図5にそれぞれ示す。

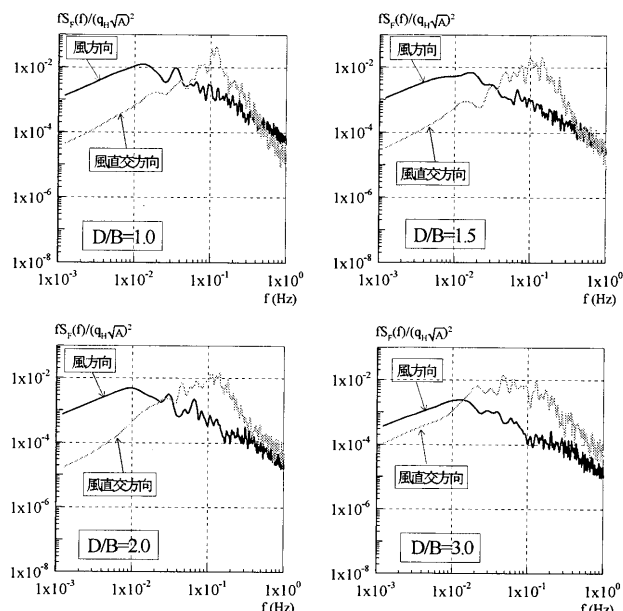


図5 モーダル風力のパワースペクトル密度  
(振動モード形  $\beta=1$ 、風向  $0^\circ$ )

#### 5. モーダル風力性状

本研究で用いる評価時間は、検討対象建物の固有周期  $T_1 (= 5.0 \text{ sec})$  の120倍の評価時間  $t_e = 600 \text{ sec}$  (10分間)と240倍の  $t_e = 1200 \text{ sec}$  (20分間)とし、評価時間  $t_e = 600 \text{ sec}$  では70 case、 $t_e = 1200 \text{ sec}$  では30 case 取り出した。(10)式より、モーダル風力の風力係数  $C_{F1}(t)$  (以下、風力係数とする)を求める。

$$C_{F1}(t) = \frac{F_s(t)}{q_H \cdot \sqrt{A} \cdot H} \quad (10)$$

図6に風力係数  $C_{F1}(t)$  の風力時系列での標準偏差  $\sigma_{CF,n}$  (評価時間  $t_e = 600 \text{ sec}$  では  $n=1 \sim 70$ ,  $t_e = 1200 \text{ sec}$  では  $n=1 \sim 30$ )を示す。

ここで、 $\sigma_{CF,n}$  は変動成分の風力係数を意味している。なお、横軸はデータ番号  $n$  を示している。

図 6(A), (B) より、評価時間  $t_e = 600 \text{ sec}$ ,  $t_e = 1200 \text{ sec}$  共に、風方向では、辺長比が大きい程、風力係数（変動成分）が小さくなることが確認できた。一方、風方向と比べて、風直交方向では、辺長比による風力係数（変動成分）の違いはほとんど見られなかった。

次に風力係数のばらつきを変動係数を用いて評価する。風力係数の変動係数を(11)式より求める。

$$Cv(\sigma_{CF,n}) = \text{rms}(\sigma_{CF,n}) / \mu(\sigma_{CF,n}) \quad (11)$$

ここで、 $\text{rms}(\sigma_{CF,n})$ : 変動成分の風力係数のばらつき、 $\mu(\sigma_{CF,n})$ : 変動成分の風力係数の平均値を表す。

変動係数  $Cv(\sigma_{CF,n})$  は評価時間  $t_e = 600 \text{ sec}$  ではデータ番号  $n=1 \sim 70$ ,  $t_e = 1200 \text{ sec}$  では  $n=1 \sim 30$  の風力係数のばらつきを評価している。

図 7 に辺長比  $D/B = 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$  における風力成分（風方向、風直交方向）、振動モード形 ( $\beta = 0, 1$ )、評価時間 ( $t_e = 600 \text{ sec}, 1200 \text{ sec}$ )

別の風力係数の変動係数をそれぞれ示す。

図 7(A) より、評価時間  $t_e = 600 \text{ sec}$  において、風方向では、辺長比及び振動モード形に関係なく 5% 程度のばらつきを含む可能性があることが確認できる。この傾向は、振動モード形  $\beta = 1$  の風直交方向でも同様であった。一方、振動モード形  $\beta = 0$  の風直交方向では、風力係数の変動係数が、辺長比  $D/B = 1.0, 2.0$  で風方向よりも 2% 程度大きな値となっている（図 7(A)）。

図 7(B) より、評価時間  $t_e = 1200 \text{ sec}$  において、風方向及び風直交方向共に、辺長比に関係なく  $t_e = 600 \text{ sec}$  に比べ 2~3% 程度、風力係数の変動係数が小さな値であることを確認できた。

## 6. 確率密度分布

図 8 にモーダル風力の確率密度分布を示す。図中の曲線は、(12)式によるガウス分布  $p_{\text{Gauss}}(x)$  を示す。

$$p_{\text{Gauss}}(x; \sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (12)$$

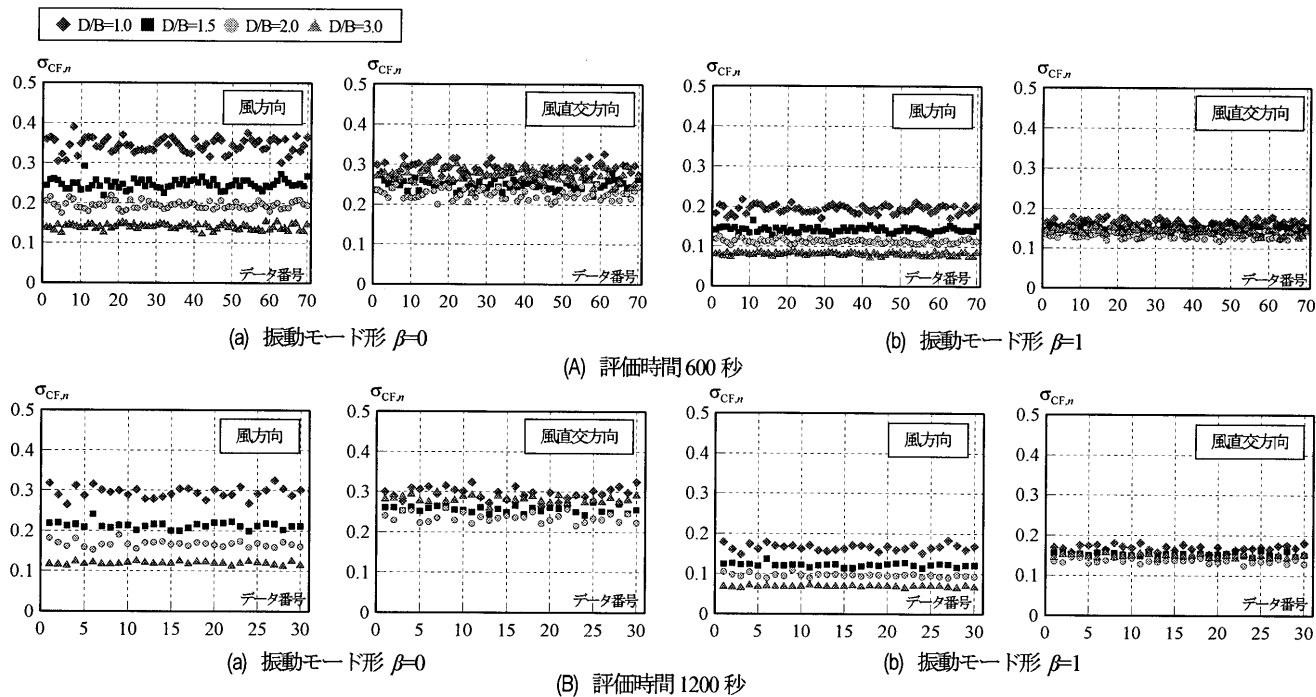


図 6 モーダル風力（変動成分）の風力係数

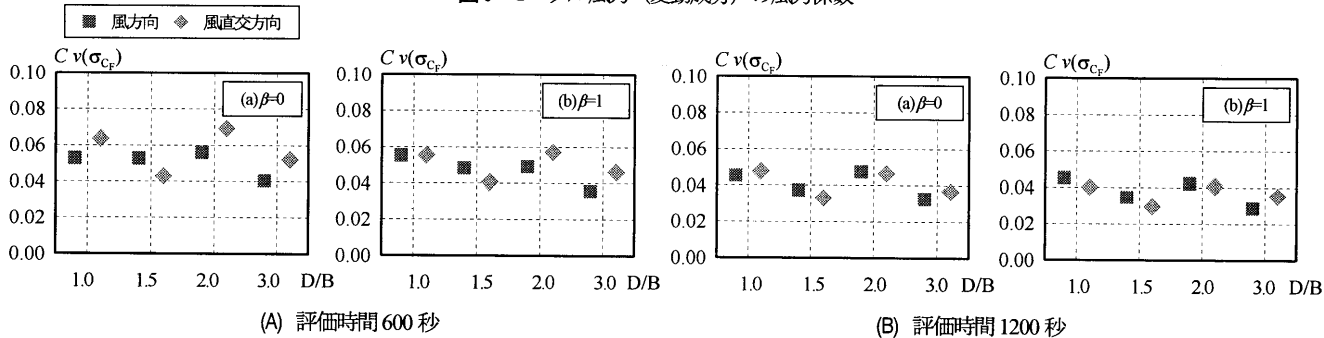


図 7 モーダル風力（変動成分）の風力係数の変動係数

ここで、 $\mu$  は平均値を表す。

図9にモーダル風力の極大値の確率密度分布を示す。図中の曲線は、(13)式による理論式 $p(x_p)$ を示す。パワースペクトル密度が $S_x(\omega)$ である定常ガウス過程 $x$ の極大値 $x_p$ の確率密度関数 $p(x_p)$ は(13)式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$p(x_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{x_p^2}{\sigma_x^2}\right) + \sqrt{1-\varepsilon^2} \frac{x_p}{\sigma_x} \exp\left(-\frac{x_p^2}{2\sigma_x^2}\right) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\sqrt{2}} \frac{x_p}{\varepsilon^2 \sigma_x}\right) \right] \right] \quad (13)$$

ただし、 $\sigma_x$  は $x$ の標準偏差、 $\operatorname{erf}(r)$ は誤差関数を示す。また、 $\varepsilon$ はパワースペクトル密度の特性を表すパラメータを表す<sup>5)</sup>。

なお、図8,9(b)は(a)から平均成分を除いた(平均値 $\mu=0$ とする)変動成分のみを示している。図8(a),(b)より平均成分の有無に関わらず、風方向では、モーダル風力の確率密度分布はガウス分布((12)式)と概ね一致することが分かった。図8(c)より風直交方向では、 $x=0$ でモーダル風力の確率密度分布とガウス分布((12)式)に違いが見られた。図9(a)~(c)より、風方向及び風直交方向共に、モーダル風力の極大値分布は理論式((13)式)の傾向を捉えていた。

## 7. まとめ

風洞実験により得られた層風力からモーダル風力を算出し、その性状を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 評価時間 $t_e=600$  secの風直交方向では、辺長比によって変動係数の値に多少の差があるが、風方向では、辺長比によって変動係数の値にほとんど差がないことが確認できた。また、評価時間 $t_e=600$  secでは、 $t_e=1200$  secに比べ風力係数の変動係数が大きな値であることを確認できた。
- (2) モーダル風力の確率密度分布は、風方向において、平均成分の有無に関わらずガウス分布と概ね一致することが分かった。風直交方向では、 $x=0$ でモーダル風力の確率密度分布とガウス分布に違いが見られた。また、モーダル風力の極大値分布は、風方向及び風直交方向共に、理論式の傾向を捉えていた。

## 参考文献

その2にまとめて示す

- \*1 東京理科大学
- \*2 株式会社日建設計

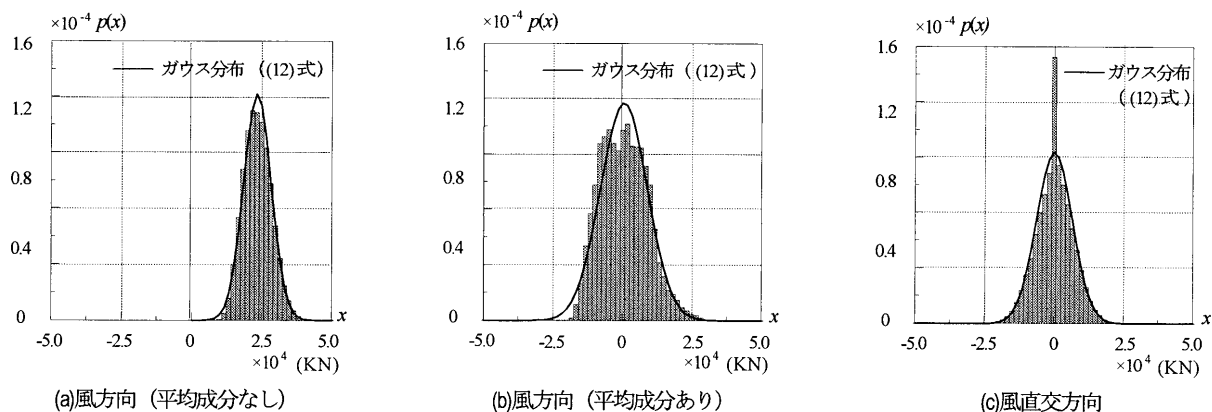


図8 モーダル風力の確率密度分布 (評価時間 $t_e=600$  秒, 振動モード形 $\beta=1$ )

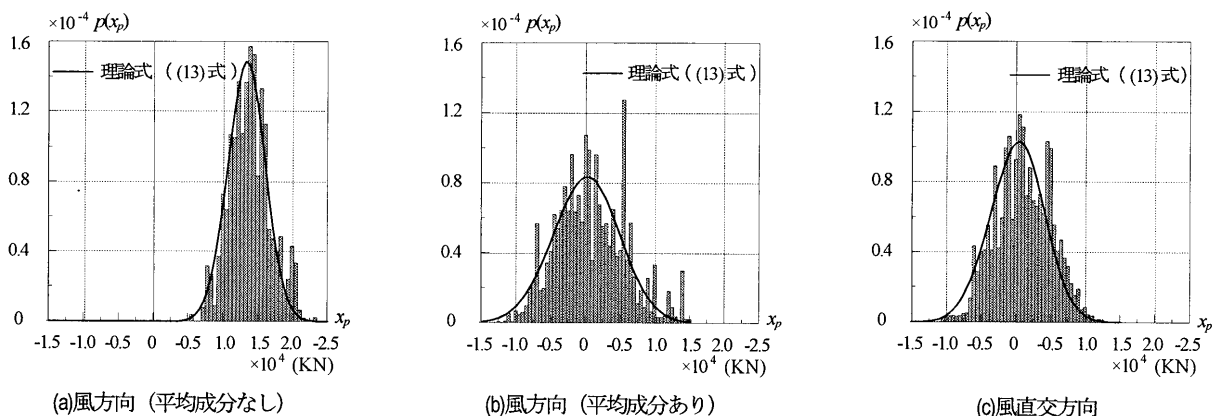


図9 モーダル風力の極大値分布 (評価時間 $t_e=600$  秒, 振動モード形 $\beta=1$ )