

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	風洞実験より得られた層風力のサンプル数が高層建築物の時刻歴風応答評価に及ぼす影響
Title(English)	INFULUENCE OF NUMBERS OF EXPERIMENTAL WIND FORCE SAMPLES ON WIND RESPONSE ANALYSIS OF A TALL BUILDING
著者(和文)	平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 片桐純治, 鶴見俊雄, 北村春幸, 大熊武司
Authors(English)	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 18, No. 39, pp. 489-494
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 18, No. 39, pp. 489-494
発行日 / Pub. date	2012, 6
権利情報	日本建築学会
Relation	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/18/39/18_489/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/18/39/18_489/_article/-char/ja/</a>
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

# 風洞実験より得られた層風力の サンプル数が高層建築物の時刻 歴風応答評価に及ぼす影響

# INFULUENCE OF NUMBERS OF EXPERIMENTAL WIND FORCE SAMPLES ON WIND RESPONSE ANALYSIS OF A TALL BUILDING

平井宏幸 — \*1 吉江慶祐 — \*2  
佐藤大樹 — \*3 片桐純治 — \*4  
鶴見俊雄 — \*5 北村春幸 — \*6  
大熊武司 — \*7

Hiroyuki HIRAI — \*1  
Daiki SATO — \*3  
Toshio TSURUMI — \*5  
Takeshi OHKUMA — \*7

Keisuke YOSHIE — \*2  
Junji KATAGIRI — \*4  
Haruyuki KITAMURA — \*6

## キーワード:

風洞実験, 層風力, 時刻歴応答解析,  
変動係数, アンサンブル平均

## Keywords:

Wind Tunnel Tests, Layer Wind Forces, Time - History Analysis,  
Coefficient of Variation, Ensemble Average

In evaluation of wind-induced responses through time-history analysis based on stationary random process, its responsive value must be dealt with numerous numbers of statistics. However, the designing value is often determined from the small number of samples because of limited time and expense in practice. Therefore, it is important and necessary to grasp dispersion of wind response from small number of samples. In this paper, the dispersion of wind forces and wind-induced responses are investigated from wind tunnel tests. Then, the influence on wind responses due to the difference in the number of samples used as an ensemble average is elucidated.

## 1. 序論

高層建築物の風応答の特徴として、外力のパワーは一般に建築物の固有振動数より低振動数側で卓越するため、固有周期が長くなるほどその応答は大きくなること、地震に比べて継続時間が長く振動の繰り返し回数が多いこと、外力が変動成分のみではなく平均成分を有すること等が挙げられる。

現在の耐風設計では、想定される最大級の強風時においても構造体をほぼ弾性挙動範囲に留める設計が行われている。しかし近年、免震構造の高層化や低降伏点鋼を用いた履歴型制振部材の普及に伴い、風荷重によって免震・制振部材が塑性化することが考えられ、弾塑性範囲における風応答評価の必要性が高まってきている。そのため、上記のような建築物の耐風設計に当たっては、風洞実験から得られた風力データを用いた時刻歴応答解析による動的応答評価が不可欠となっている。

この観点から、風力や風応答特性に関する研究は数多く行われている<sup>(例えば1)~3)</sup>。しかし、設計の立場からの風力時刻歴波形のサンプル数による風応答のアンサンブル平均値のばらつき<sup>(例えば1)~3)</sup>の整理は、未だ不十分であると考えられる。風応答のようなランダムな変動を示すアンサンブル平均値は、サンプル数が多い場合には期待値に近づく

が、サンプル数が少ない場合には期待値からの偏差が常にあることに注意しなければならない<sup>4)</sup>。設計に用いる風応答値は少なくとも期待値であることが望まれるが、実務的には時間と費用の消費の面から、少ないサンプル数から設計値を決定することが少なくない。そのため、少ないサンプル数でのアンサンブル平均値が設計にどのように影響するのかを把握することが必要であり、重要となる。

これまでにも、サンプル数によるアンサンブル平均値のばらつきの変化に関する研究は行われている。文献5),6)では、変動風力のパワースペクトル密度を基に、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<sup>7),8)</sup>を用いて、サンプル数による応答およびエネルギー入力<sup>(例えば1)~3)</sup>のばらつきを検証しているものの、風力のばらつきや建物形状による風応答のばらつきを評価するには至っていない。

本報では、異なる風向や断面形状を有する建築物に対し、風洞実験により測定した層風力データを用いて、変動風力のばらつきが応答およびエネルギー入力<sup>(例えば1)~3)</sup>のばらつきに与える影響を検討し、時刻歴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。

本報の構成は、まず、風洞実験から得られた層風力から1次モーダル風力を算出し、変動風力のばらつきを変動係数とアンサンブル

\*1 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 大学院生  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

\*2 (株) 日建設計 構造設計部 主管・博士(工学)

\*3 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

\*4 (株) 泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 所長代理・博士(工学)

\*5 (株) 泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 副主任研究員・修士(工学)

\*6 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

\*7 神奈川大学工学研究所 客員教授・工博

\*1 Graduate Student, Department of Architecture,  
Tokyo University of Science.

\*2 Associate, Structural Engineering Dept.,  
Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.

\*3 Assistant Prof., Department of Architecture,  
Tokyo University of Science, Dr.Eng.

\*4 General Manager, Urban Environment Research Center,  
Izumi Sohken Engineering Co., Ltd., Dr. Eng.

\*5 Research Engineer, Urban Environment Research Center,  
Izumi Sohken Engineering Co., Ltd., M. Eng.

\*6 Professor, Department of Architecture,  
Tokyo University of Science, Dr. Eng.

\*7 Visiting Prof., Institute of Technology,  
Kanagawa University., Dr. Eng.

平均に基づいて評価する。次に、1 質点系モデルによる時刻歴応答解析を行い、風応答のばらつきを変動風力と同様の検討方法で評価する。なお、本研究では基本的な風応答特性を明らかにするために、解析モデルは弾性とする。

## 2. 風洞実験および検討対象建物の概要

実験は(株)泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所の室内回流式エッフェル型風洞を用いて行った。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」<sup>9)</sup>(以下、荷重指針と略記)の地表面粗度区分Ⅲ、Ⅳの気流を目標に作成された。図1に風洞実験結果と荷重指針値による平均風速  $U_z$ 、乱れ強さ  $I_z$  の鉛直分布を示す。実験模型は高さ  $H=50\text{ cm}$ 、平面積  $A=100\text{ cm}^2$  の角柱模型を用いて、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。実験風向は、壁面に正対する風向を  $0^\circ$  とし、辺長比  $D/B=1.0$  では  $0\sim 45^\circ$  の範囲を  $22.5^\circ$  ピッチで 3 風向とした。他の辺長比  $D/B=1.5, 2.0, 3.0$  では短辺側壁面に正対する風向を  $0^\circ$  とし、 $0\sim 90^\circ$  の範囲を  $22.5^\circ$  ピッチで 5 風向とした。層風力は 10 層分測定し、サンプリング周波数を 1000 Hz とした。本研究におけるその他の実験方法および実験条件については文献<sup>10)</sup>を参照されたい。

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  $H=250\text{ m}$ 、平面積  $A(=B\times D)=2500\text{ m}^2$ 、地上部質量は 109375 ton (高さ方向に一様)、固有周期  $1T=5.0$  秒と想定した。以下の検討での頂部風速  $U_H$  は再現期間 500 年相当の  $63.6\text{ m/s}$  としている。

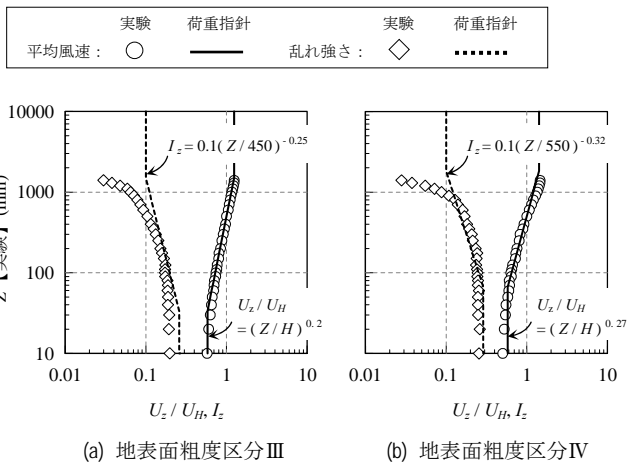


図1 平均風速、乱れ強さの鉛直方向分布

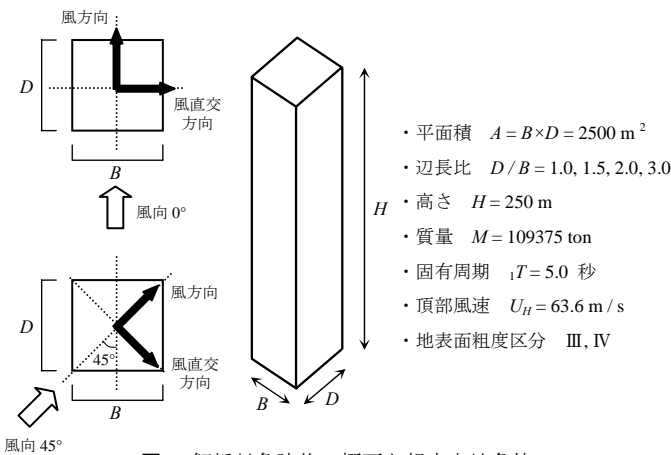


図2 解析対象建物の概要と想定立地条件

## 3. 風外力のばらつきの評価

本章では、風洞実験により測定された層風力から 1 次モーダル風力を作成し、辺長比、地表面粗度区分、風向、風力方向および振動モード形の違いによる 1 次モーダル風力のばらつきを変動係数を用いて評価する。

### 3.1. モーダル風力の作成

本検討に用いる風力は風洞実験結果の風向  $0^\circ$  と  $45^\circ$ 、地表面粗度区分ⅢとⅣ、辺長比  $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$  の風方向 (平均成分有り)、風直交方向風力とし、(1)式より風洞実験より得られた層風力係数の時刻歴  $C_{F_i}(t)$  を基に 1 次モーダル風力  ${}_1F(t)$  を作成した。

$${}_1F(t) = \sum_{i=1}^{10} {}_1\phi_i \cdot f_i \cdot h_i = \sum_{i=1}^{10} {}_1\phi_i \cdot C_{F_i}(t) \cdot q_H \cdot \sqrt{A} \cdot h_i \quad (1)$$

ここで、 ${}_1\phi_i$ : 1 次振動モード形、 $f_i$ : 層風力、 $q_H$ : 建物頂部での速度圧 ( $q_H = 1/2\rho U_H^2$ ,  $\rho$  は空気密度)、 $h_i$ :  $i$  層の支配高さを表す。

1 次振動モード形  ${}_1\phi_i$  は(2)式で表せるとし、高層建物の代表として逆三角形分布 (以下、 $\beta=1$ ) と免震構造のような一様分布 (以下、 $\beta=0$ ) の 2 種類とした。

$${}_1\phi_i = \left(\frac{Z_i}{H}\right)^\beta \quad (i=1\sim 10) \quad (2)$$

ここで、 $Z_i$ :  $i$  層までの高さを表す。

本報では 1 次のモーダル風力および風応答を対象としているため、以降、左添字の 1 は省略して表記する (例えば、 ${}_1F(t) \rightarrow F(t)$ )。

### 3.2. モーダル風力の変動係数

本研究で用いる評価時間は、600 秒 (10 分間) とし、風洞実験結果を基に作成したモーダル風力より、評価時間部分が重ならないように 60 波を抽出した。まず、抽出した各風力時刻歴波形ごとに変動風力係数  $C_F^{(j)}$  ( $j=1\sim 60$ ) を(3)式より算出する。なお、1 波ごとの速度圧  $q_H^{(j)}$  と全データ (60 波) での平均の  $q_H$  に殆ど差はなかったため、本報では、(3)式において、全データ (60 波) の平均の速度圧  $q_H$  を用いている。

$$C_F^{(j)} = \frac{\sigma_F^{(j)}}{q_H \cdot \sqrt{A} \cdot H} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_F^{(j)}$ : モーダル風力の標準偏差を表し、右上添字の  $j$  は風力番号を示す。

次に、60 波分の変動風力係数  $C_F^{(j)}$  の変動係数  $Cv_{C_F}$  を(4)式より定義する。

$$Cv_{C_F} = \frac{rms C_F'}{mean C_F'} \quad (4)$$

ここで、 $rms C_F'$ :  $C_F^{(j)}$  の標準偏差、 $mean C_F'$ :  $C_F^{(j)}$  の平均値を表す。

図3に地表面粗度区分Ⅲ、振動モード形  $\beta=1$ 、辺長比  $D/B=1.0$  における変動風力係数  $C_F^{(j)}$  ((3)式) を示す。図3(a)は風方向、(b)は風直交方向であり、それぞれの図において風向  $0^\circ$  と  $45^\circ$  を示している。図4に辺長比  $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$  時の風力方向 (風方向、風直交方向)、振動モード形 ( $\beta=0, 1$ )、地表面粗度区分 (Ⅲ、Ⅳ) ごとに変動風力係数  $C_F^{(j)}$  の変動係数  $Cv_{C_F}$  ((4)式) を比較したものを示す。図4(A)は風向  $0^\circ$ 、(B)は風向  $45^\circ$  を示している。図4より、辺長比、振動モード形、地表面粗度区分および風向によらず、風方向風力の  $Cv_{C_F}$  (●、◆印) は 7~12%、風直交方向風力の  $Cv_{C_F}$  (○、◇印) は、5~10% 程度となることが確認できる。これより、辺長比、

振動モード形, 地表面粗度区分, 風向および風力方向の影響は変動風力係数のばらつきに殆ど影響しないことが分かる。

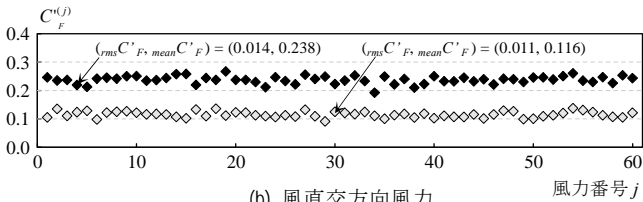
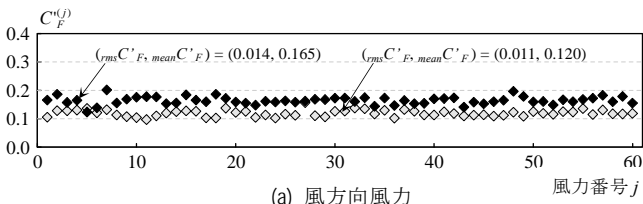


図3 モーダル風力の変動風力係数  $C'_F$  (地表面粗度区分Ⅲ,  $\beta = 1, D/B = 1.0$ )

	粗度区分Ⅲ	粗度区分Ⅳ
風方向風力	●	◆
風直交方向風力	○	◇

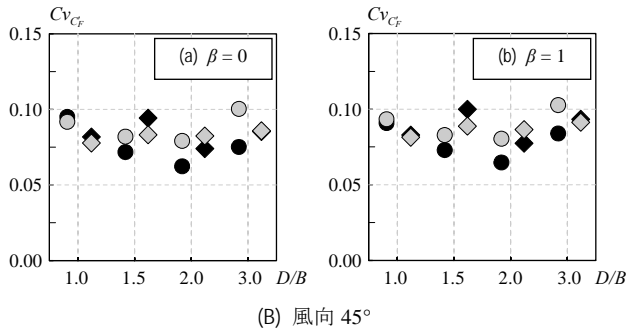
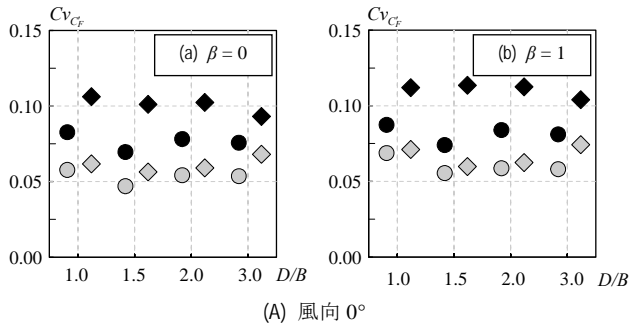


図4 モーダル風力の変動風力係数の変動係数  $Cv_{C_F}$

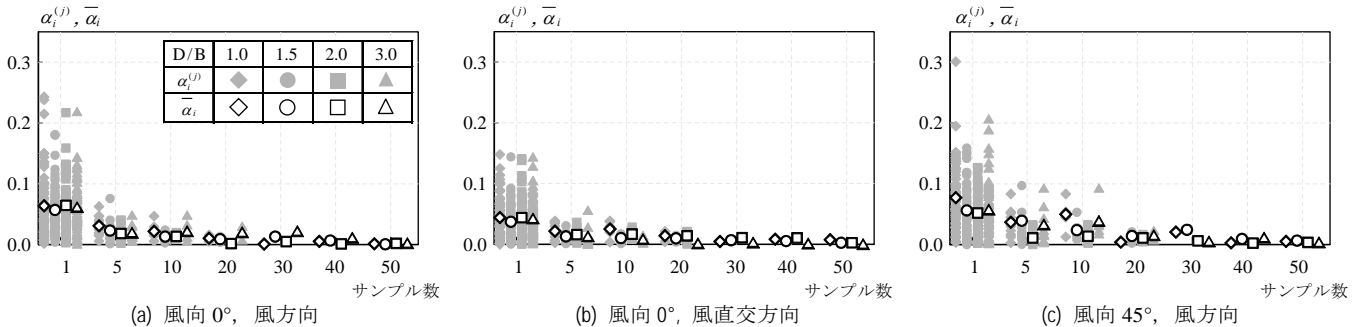


図5 サンプル数の違いによる変動風力係数のばらつき (地表面粗度区分Ⅲ, 振動モード形  $\beta = 1$ )

#### 4. サンプル数の違いによる風力のばらつき

本章では, サンプル数による変動風力係数のアンサンプル平均のばらつきを評価する。3章で作成したモーダル風力 (評価時間 600 秒  $\times$  60 波) を検用風力とし, 各サンプル数での変動風力係数を算出し, サンプル数 60 波での結果を基準として比較した (表 2)。なお, case とは 60 波から 1~60 波の各サンプル数  $n$  で抽出した標本集団を示す。例えば, サンプル数 ( $n =$ ) 5, case ( $m =$ ) 12 とは, 5 波でのアンサンプル平均を行った結果が 12 case 有るということである。但し, サンプル数  $n = 40$  の場合のみ, 風力番号  $j = 1 \sim 40$  および 20~60 での変動風力係数を用いて評価しており, 20 個の変動風力係数が重複している。

表2 サンプル数と case の関係

サンプル数 ( $n$ )	1	5	10	20	30	40	50	60
case ( $m$ )	60	12	6	3	2	2	1	1

図5に地表面粗度区分Ⅲ, 振動モード形  $\beta = 1$  のサンプル数  $n$  の違いによる変動風力係数のばらつきを示す。図5 (a)は風向  $0^\circ$  の風方向風力, (b)は風向  $0^\circ$  の風直交方向風力, (c)は風向  $45^\circ$  の風方向風力を示す。横軸はサンプル数  $n$ , 縦軸は基準となる変動風力係数 (60 波でのアンサンプル平均値) とのばらつき ((5)式) を示す。図中の白いプロット  $\bar{\alpha}_i$  は, (6)式により求められ, 各サンプル数でのばらつきの平均値を表す。

$$\alpha_i^{(j)} = \frac{|\bar{C}_{F,i}^{(j)} - \bar{C}_{F,60}^{(1)}|}{\bar{C}_{F,60}^{(1)}}, \quad \bar{\alpha}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_i^{(j)}}{m} \quad (i=1 \sim n) \quad (5), (6)$$

ここで,  $\bar{C}_{F,i}^{(j)}$ : サンプル数  $i$  波での平均値であり, 右上添字の  $j$  は, case 番号を意味する ( $j = 1 \sim m$ )。なお,  $n$  と  $m$  の組み合わせについては表2参照のこと。

図5 (a)より, 風向  $0^\circ$  の風方向風力に関して,  $n = 1$  では, 最大で  $\alpha_1^{(j)} = 25\%$ , 平均で  $\bar{\alpha}_1 = 8\%$  程度のばらつきを含む可能性があることが分かる。図5 (b)より, 風向  $0^\circ$  の風直交方向風力の場合,  $n = 1$  では, 最大で  $\alpha_1^{(j)} = 15\%$ , 平均で  $\bar{\alpha}_1 = 5\%$  程度となり, 風方向風力と比べ3~4割程度ばらつきが小さくなることが確認できる。図5 (c)より, 風向  $45^\circ$  に関して,  $n = 1$  では, 最大で  $\alpha_1^{(j)} = 30\%$ ,  $n = 5, 10$  では, 最大で  $\alpha_5^{(j)}, \alpha_{10}^{(j)} = 10\%$  程度となり, 風向  $0^\circ$  と比べて4~5割程度ばらつきが大きくなることが確認できる。 $n \geq 20$  だと風向の違いによる変動風力係数のばらつきは小さいことが確認できる。

## 5. 時刻歴風応答解析結果のばらつきの評価

### 5.1. 解析対象モデルの概要

本研究の検討に用いる解析モデルは1次モードのみの風応答に注目し、水平1自由度の1質点系モデルとする(図6)。図中のモーダル質量 $\tilde{M}$ およびモーダル剛性 $\tilde{K}$ は、振動モード形 $\beta=1,0$ のモーダル風力に対応するようにそれぞれ設定した。構造減衰 $h$ は1.0%と10.0%の2種類とした。検討用風力波形のサンプリング間隔は0.05秒刻み13000ステップとし、風洞実験結果から応答の評価時間部分が重ならないように650秒×60波を取り出した。本研究では、解析開始時の過渡応答の影響を避けるため、各風力波形の先頭50秒にエンベロープを設けた後、評価時間600秒(10分間)で応答を評価する。

### 5.2. 応答およびエネルギー入力の変動係数

本節では、風洞実験結果から抽出した風力波形による時刻歴応答解析を行い、応答の標準偏差およびエネルギー入力を算出し、応答値のばらつきを変動係数により評価する。なお、本研究でのエネルギー入力 $E_{inp}$ は1次モーダル風力 $F(t)$ を用いて、(7)式より算出する。

$$E_{inp} = \int_0^{t_0} \dot{q}(t) \cdot F(t) dt \quad (7)$$

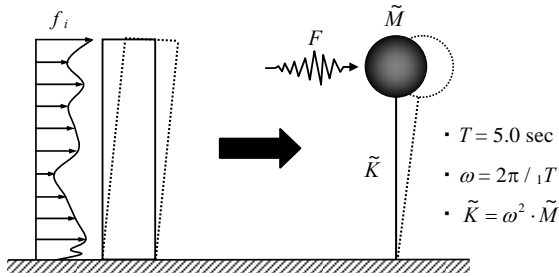


図6 解析モデル

	$h=1.0\%$	$h=10.0\%$	風力
風方向	■	●	◆
風直交方向	□	○	◇

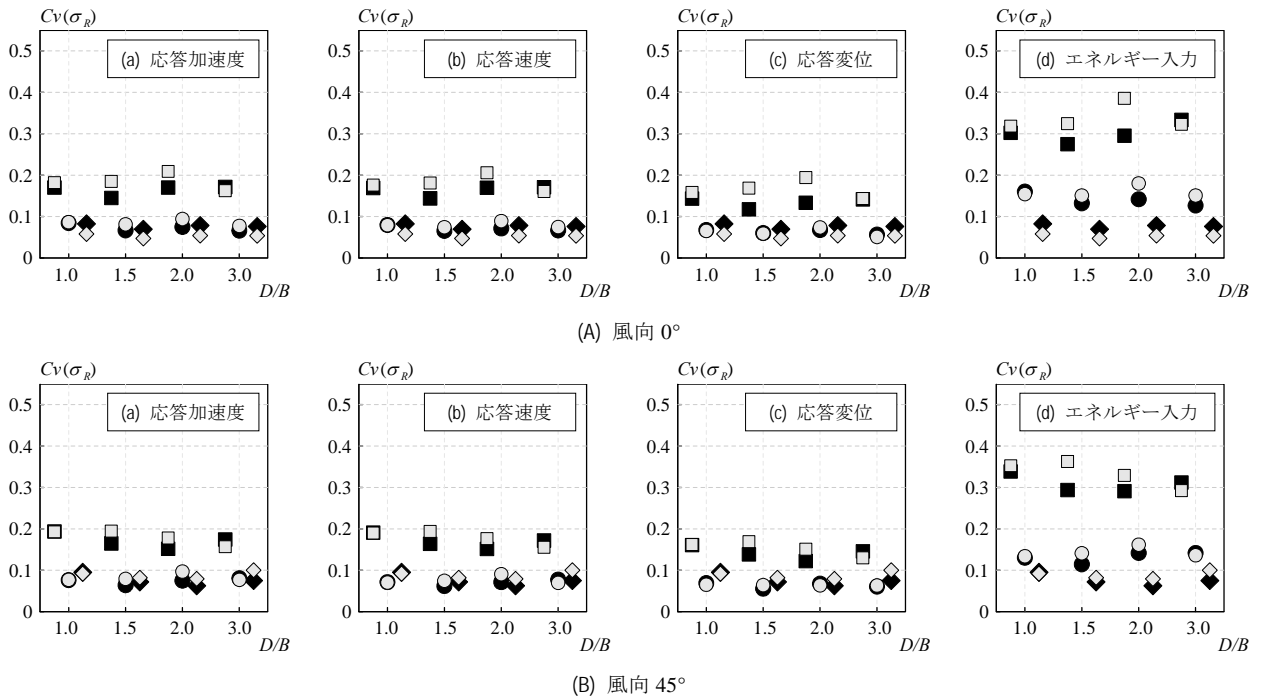


図7 頂部応答(標準偏差)およびエネルギー入力の変動係数(地表面粗度区分Ⅲ, 振動モード形 $\beta=1$ )

ここで、 $\dot{q}(t)$ :1次のモーダル応答速度を表す。応答またはエネルギー入力の変動係数 $Cv_{\sigma_R}$ は(8)式より求めることができる。

$$Cv_{\sigma_R} = \frac{rms \sigma_R}{mean \sigma_R} \quad (8)$$

ここで、 $rms \sigma_R$ : 応答の標準偏差またはエネルギー入力のサンプル数60波での標準偏差、 $mean \sigma_R$ : 応答の標準偏差またはエネルギー入力のサンプル数60波での平均値を表す。

3章より、地表面粗度区分および振動モード形によるモーダル風力のばらつきは小さかったので、以降、地表面粗度区分はⅢ、振動モード形では $\beta=1$ に対して、応答およびエネルギー入力のばらつきを検討する。

図7に地表面粗度区分Ⅲ、振動モード形 $\beta=1$ 、辺長比 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ 時の風力方向(風方向, 風直交方向)、減衰定数( $h=1.0, 10.0\%$ )ごとの頂部応答加速度, 速度, 変位(標準偏差)およびエネルギー入力の変動係数を示す。図7(A)は風向 $0^\circ$ , (B)は風向 $45^\circ$ を示している。なお、図中の風力の変動係数は3.2節に示した変動風力係数の変動係数 $Cv_{C_f}$ (4式)である。

図7より、減衰定数が等しい場合、風力方向、辺長比および風向の違いによる応答加速度, 速度, 変位とエネルギー入力の変動係数の差は小さいことが確認できる。 $h=1.0\%$ (■, □)に関して、応答加速度, 速度, 変位の變動係数は風力に比べて2倍, エネルギー入力は4倍程度上回っていることが分かる。一方、 $h=10.0\%$ での応答とエネルギー入力の変動係数(●, ○)は、 $h=1.0\%$ に比べ、3~5割程度ばらつきが小さくなり、変動風力の変動係数に近づくことが確認できる。これは、高減衰ほど、相対的に外乱の影響が顕著になるため、応答の変動は外乱の変動に収束していくためと考えられる。

## 6. サンプル数の違いによる応答のばらつき

本章では、時刻歴応答解析結果のアンサンブル平均に対する風力時刻歴波形数の違いによる応答のばらつきを評価する。解析モデル

と検討用風力は5章で説明したものととし、各サンプル数による応答を算出し、全体の60波でのアンサンブル平均値を基準として比較した(表2)。

図8に地表面粗度区分Ⅲ、風方向風力入力時、振動モード形 $\beta = 1$ における減衰定数および風向別のサンプル数 $n$ の違いによる頂部応答速度、変位の標準偏差およびエネルギー入力のばらつきを示す。横軸はサンプル数 $n$ 、縦軸は基準となる応答値(60波でのアンサンブル平均値)とのばらつき(9式)を示す。本報では、(9)式から算出した $R_i^{(j)}$ を風応答のばらつきの程度を表す指標として導入した。ここで、エネルギー入力のばらつきの縦軸は、他の応答値の2倍となっていることに注意されたい。図中の白いプロット $\bar{R}_i$ は、(10)式により求められ、各サンプル数でのばらつき $R_i^{(j)}$ の平均値を表す。

$$R_i^{(j)} = \frac{|\bar{x}_i^{(j)} - \bar{x}_{60}^{(j)}|}{\bar{x}_{60}^{(j)}}, \quad \bar{R}_i = \frac{\sum_{j=1}^m R_i^{(j)}}{m} \quad (i=1 \sim n) \quad (9), (10)$$

ここで、 $\bar{x}_i^{(j)}$ : サンプル数 $i$ 波での平均値であり、右上添字の $j$ は、case番号を意味する( $j=1 \sim m$ )。なお、 $n$ と $m$ の組み合わせについては表2参照のこと。

図8より応答速度、変位およびエネルギー入力ともに、辺長比の違いがアンサンブル平均値のばらつきに与える影響は小さいことが

確認できる。図8(A)-(a)より、減衰定数 $h = 1.0\%$ 、風向 $0^\circ$ の応答速度に関して、 $n = 1$ だけでは、最大で $R_i^{(j)} = 50\%$ 、平均で $\bar{R}_i = 10 \sim 15\%$ 程度のばらつきを含む可能性があることが分かる。 $n = 1, 5$ の場合、応答速度のばらつきは、変動風力係数と比べ最大、平均ともに $2 \sim 2.5$ 倍程度大きくなるが、 $n \geq 30$ だと変動風力係数のばらつきと差はないことが確認できる(図5(a))。 $n = 5$ では最大で $R_i^{(j)} = 20\%$ 、平均で $\bar{R}_i = 5 \sim 10\%$ 程度となり、 $n = 1$ の半分程度のばらつきに収束している。図8(A)-(c)より、エネルギー入力の場合、 $n = 1$ だけでは最大で $R_i^{(j)} = 90\%$ 、平均で $\bar{R}_i = 20\%$ 程度のばらつきを有するが、 $n = 5$ では最大で $R_i^{(j)} = 30\%$ 、平均で $\bar{R}_i = 10 \sim 15\%$ 程度となり、応答速度と同様、 $n = 1$ の半分以下のばらつきに収束していることが分かる。 $n = 1, 5$ の場合、エネルギー入力のばらつきは、変動風力係数と比べ最大、平均ともに4倍程度大きくなる(図5(a))。また、基準となる $n = 60$ でのアンサンブル平均値の5%以下とするためには、応答速度および変位は $n = 20$ 以上、エネルギー入力では $n = 30$ 以上とする必要があることが分かる(図8(A))。図8(B)より、減衰定数 $h = 10.0\%$ 、風向 $0^\circ$ の応答速度、変位およびエネルギー入力の最大、平均におけるばらつきは、サンプル数が同じ場合、 $h = 1.0\%$ に比べばらつきが半分程度となり、応答速度および変位にお

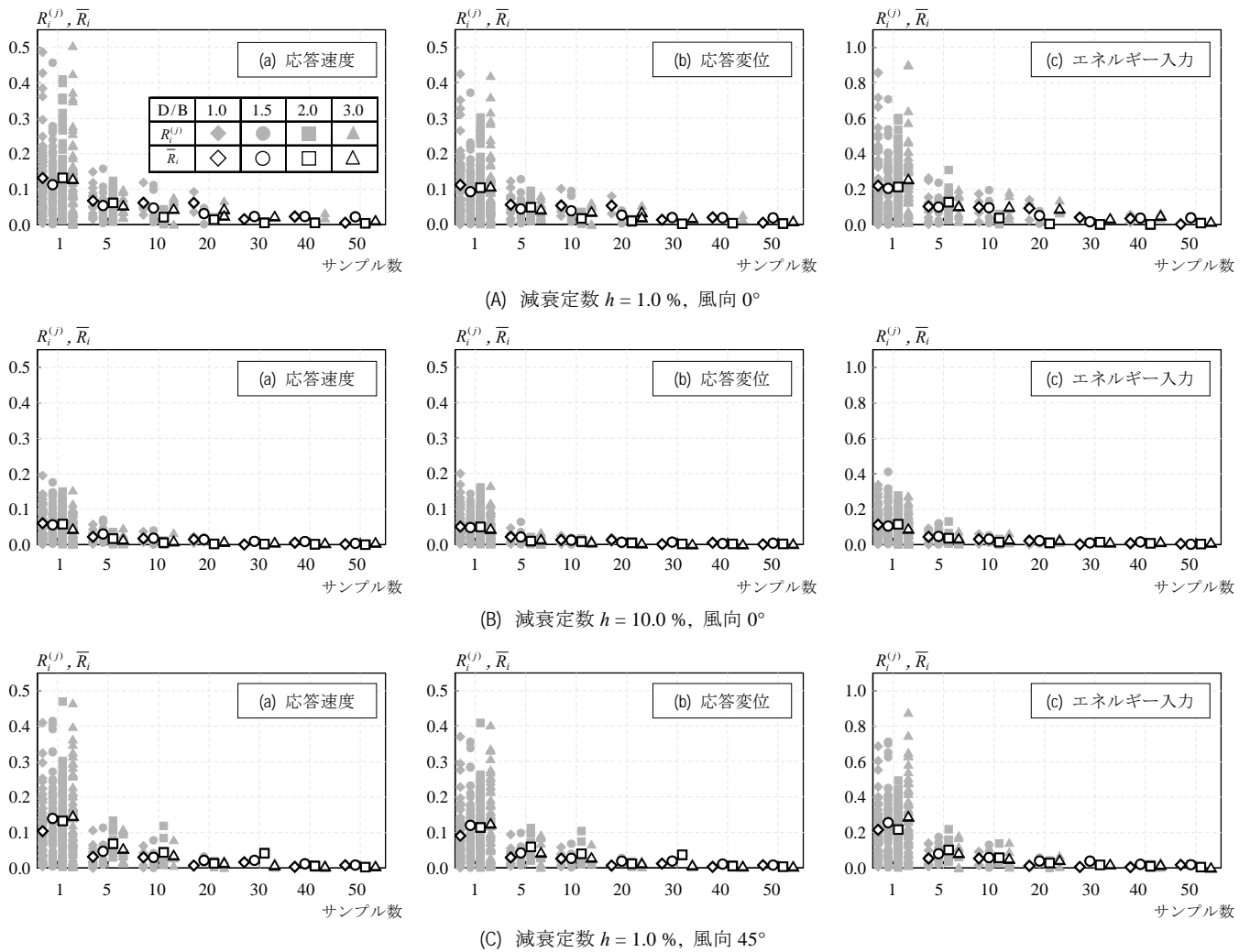


図8 サンプル数の違いによる応答値のばらつき(地表面粗度区分Ⅲ、風方向風力入力時、振動モード形 $\beta = 1$ )

いては、変動風力係数のばらつきと同様の傾向を示すことが確認できる (図 5 (a))。図 8 (C)より、風向 45°は風向 0°と同様の傾向を示すことから、風向の違いが応答およびエネルギー入力のアンサンブル平均値のばらつきに与える影響は小さいと考えられる。

図 9 に地表面粗度区分Ⅲ、風方向風力入力時、振動モード形 $\beta = 1$ 、辺長比 $D/B = 1.0$ の頂部応答速度およびエネルギー入力 $R_1^{(j)}$  (9式)の頻度分布を減衰定数別に示す。図 9 (A)より、応答速度に関して $h = 1.0\%$ では全サンプル数 (60 波) の 15% 程度が $R_1^{(j)} < 5\%$ となることが確認できる。一方、 $h = 10.0\%$ では全サンプル数の 40% 程度が $R_1^{(j)} < 5\%$ となっており (図 9 (A))、減衰定数の大きい方が応答値のばらつきは小さくなることを確認できる。図 9 (B)より、エネルギー入力の分布領域は応答速度と比べて 2 倍程度広くなり、1 波でエネルギー入力を評価した場合、大きくばらつく傾向が見られる。

減衰定数 $h = 1.0\%$ の場合、狭帯域の応答となり、固有振動数付近での変動風力のばらつきの影響を大きく受けるため、少ないサンプル数では応答のばらつきは大きくなると考えられる。しかし、サンプル数が $n \geq 30$ だと変動風力と応答のばらつきには、ほとんど差がないことを確認した。これより、少ないサンプル数から時刻歴応答解析により低減衰モデルの風応答を評価する際、風応答のばらつきは変動風力のばらつきよりも大きくなることに注意する必要があると考えられる。また、エネルギー入力は(7)式に示す様に、変動風力および応答速度との積から算出されたため、変動風力と応答速度のばらつきに比べ、ばらつきが大きくなったと考えられる。

## 7. 結論

本報では、風力と風応答のばらつきを変動係数とアンサンブル平均により評価し、以下の結論を得た。

- (1) 辺長比・振動モード形・地表面粗度区分の違いが変動風力のばらつきに与える影響は小さいことを示した。
- (2) 辺長比・風力方向 (風方向・風直交方向風力) および風向の違いが応答加速度・速度・変位およびエネルギー入力のばらつきに与える影響は小さいことを示した。
- (3) 減衰定数 $h = 10.0\%$ の場合、応答加速度・速度・変位およびエネルギー入力の変動係数は、 $h = 1.0\%$ に比べ半分程度小さくなり、変動風力の変動係数に近づくことを確認した。
- (4) 減衰定数 $h = 1.0\%$ の場合、1波のみで応答速度、変位を評価する場合、最大で 50% 程度ばらつく可能性があり、変動風力と比べ 2~2.5 倍程度ばらつきが大きくなることを確認した。エネルギー入力は 80% 程度ばらつき、変動風力と比べて 4 倍程度ばらつきが大きくなることを確認した。
- (5) サンプル数が 5 波の場合、応答速度・変位は最大で 20%、平均で 5~10% 程度ばらつき、エネルギー入力では最大で 30%、平均で 10~15% 程度ばらつく可能性があることを示した。
- (6) 応答速度・変位ではサンプル数 20 波、エネルギー入力では 30 波以上採ることで、ばらつきは 5% 以下に収束することを確認した。

なお、風向 22.5°でも風向 0°および 45°での結果と同様の傾向を示すことを確認している。今後は、本研究で得られた知見を基に、弾塑性範囲における多質点系モデルでの風応答のばらつきを検討していく予定である。

## 謝辞

本研究は、神奈川大学大熊武司教授、(株) 泉創建エンジニアリング、(株) 日建設計、東京理科大学北村研究室による新耐風設計法研究会の成果の一部です。特に、本研究を進めるにあたり、(株) 泉創建エンジニアリングの丸川比佐夫博士、(株) 日建設計の早田友彦氏からご指導を賜りました。また、データ整理には、東京理科大学北村研究室 (当時) の安田憲史君の協力を得ました。ここに記して、皆様には深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 上森康幹, 崔恒, 神田順: 基本断面角柱に作用する変動風力特性, 風工学シンポジウム pp.161-166, 1990
- 2) 浅見豊, 山田正明: 矩形断面高層建物の風振動に関する実験的研究, 風工学シンポジウム pp.209-214, 1990
- 3) 嶋田健司, 田村幸雄, 藤井邦雄: 高層建築物の断面形状による応答の比較: 日本風工学会誌, 第 41 号 pp.77-78, 1989
- 4) 西村宏昭, 高森浩治, 中川尚大: 外装材用ピーク風圧係数のばらつき, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.5-6, 2011.8
- 5) 吉江慶祐, 北村春幸, 大熊武司, 和田章: 時刻歴風応答解析におけるアンサンブル平均のばらつき, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.233-234, 2005.9
- 6) 佐藤大樹, 鈴木悠也, 吉江慶祐, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層免震建築物の応答評価に関する研究 (その 1), 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, pp.927-928, 2009.9
- 7) 星谷 勝: 確率論手法による構造解析, 鹿島出版会, 1973
- 8) 大熊武司, 丸川比佐夫, 丹羽秀聡, 寺本隆幸, 北村春幸, 吉江慶祐: 動的天秤データを利用した高層建物の風時刻歴応答解析, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.207-212, 1992. 12
- 9) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説(2004), 2004
- 10) 片桐純治, 大熊武司, 鶴見俊雄: 高層免震建築物の一般化風力特性, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.139-140, 2010.9

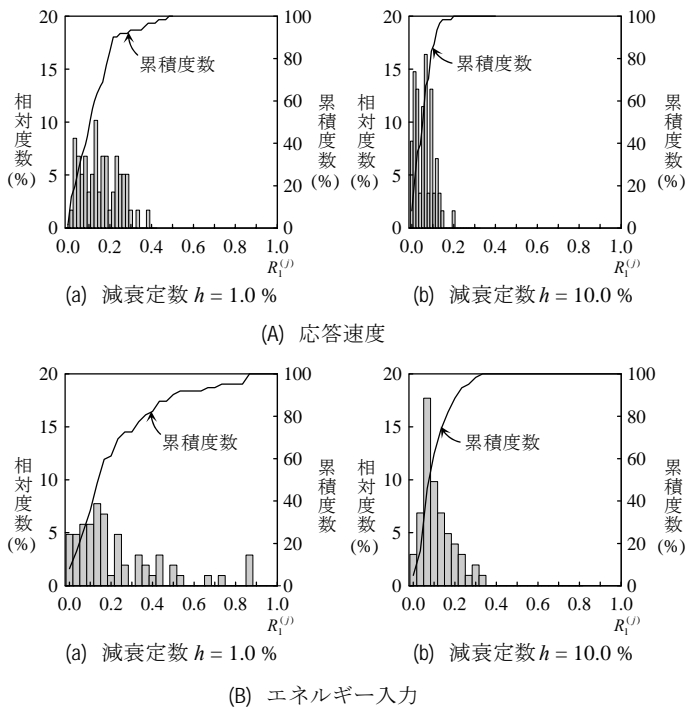


図 9  $R_1^{(j)}$  の頻度分布 (地表面粗度区分Ⅲ, 風方向, 風向 0°,  $\beta = 1, D/B = 1.0$ )