

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2097 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2)風力特性が応答およびエネルギー入力に与える影響(構造)
Title	
著者(和文)	平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 安田憲史, 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, 2097
Citation(English)	, Vol. 81, No. 0, 2097
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: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730337

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2) 風力特性が応答およびエネルギー入力に与える影響

正会員○平井宏幸^{*1} 同 吉江慶祐^{*2} 同 佐藤大樹^{*1} 準会員 安田憲史^{*1}
正会員 早田友彦^{*2} 同 北村春幸^{*1}

構造・荷重・信頼性

風洞実験 モーダル風力 時刻歴風応答解析

エネルギー入力 アンサンブル数

1. はじめに

本報その1では、風洞実験により得られた層風力から1次モーダル風力を算出し、その性状を調べた。引き続き、その2では、本報その1で算出されたモーダル風力を用いて、時刻歴弾性応答解析を行い、アンサンブル平均に用いる風力時刻歴波形数の違いによる応答値のばらつきを調べる。

2. 解析モデルと検討用風力

本検討は、その1の測定結果から風向 0° 、 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ のモーダル風力を用いて行う。検討対象建物は、その1と同様である。

解析には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1)。解析モデルの質量と外力は、建物の1次モードを頂部を1とした振動モードであると仮定して、1次のモーダル質量とモーダル外力として与えた。本研究での解析パラメータを表1に示す。振動モードは、その1と同様に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、構造減衰は初期剛性に対して減衰定数 $\zeta=0.01, 0.10$ の2ケースを用いる。風外力は、風洞実験結果の風方向、風直交方向の風力時刻歴波形から振動モード形を $\beta=1, 0$ として、その1で作成したモーダル風力時刻歴波形を直接用いる。応答の評価時間 t_e は、その1と同様に解析モデルの固有周期 $T_1=5.0$ secの120倍の $t_e=600$ sec(10分間)と240倍の $t_e=1200$ sec(20分間)とし、解析開始時の過渡応答の影響を避ける為、応答は各風力波形の先頭50 secにエンベロープを設けて評価した。検討用風力波形のサンプリング間隔は0.05 sec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 $t_e=600$ secでは70波、 $t_e=1200$ secでは30波を取り出した。図2, 3に評価時間 $t_e=600$ sec, 1200 secのモーダル風力の抽出方法を示す。

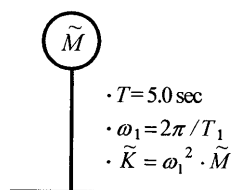
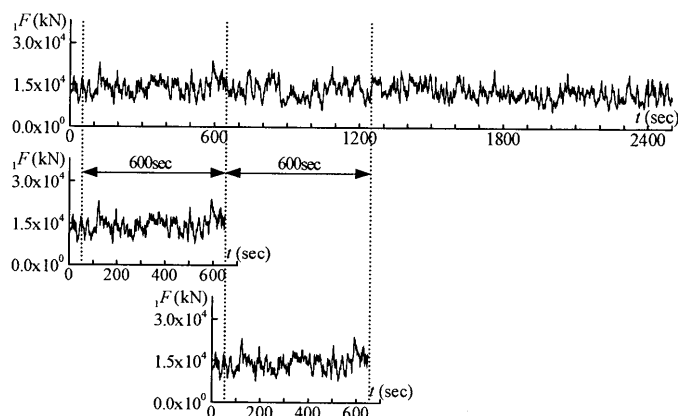
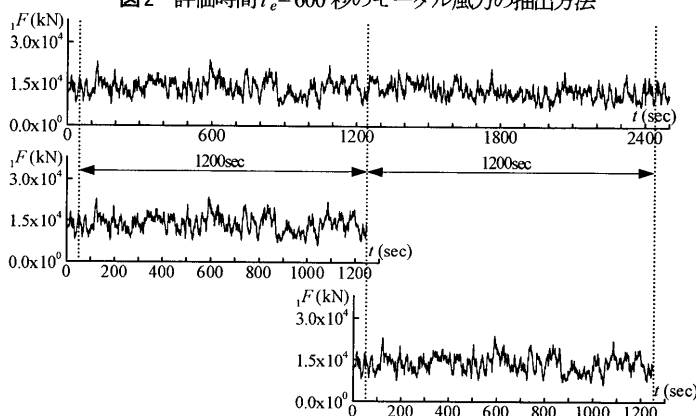


図1 解析モデル概要

表1 解析パラメーター

D/B	1.0, 1.5, 2.0, 3.0
β	0, 1
ζ	0.01, 0.10
t_e	600 sec, 1200 sec

図2 評価時間 $t_e=600$ 秒のモーダル風力の抽出方法図3 評価時間 $t_e=1200$ 秒のモーダル風力の抽出方法

3. 応答及びエネルギー入力の変動係数

応答の変動成分のばらつきを変動係数を用いて評価する。ここで、変動係数 $Cv(\sigma_R)$ は(1)式より算出され、本研究では、評価時間 $t_e=600$ secでは70波、 $t_e=1200$ secでは30波での応答およびエネルギー入力のばらつきを評価している。

$$Cv(\sigma_R) = \frac{rms(\sigma_R)}{\mu(\sigma_R)} \quad (1)$$

ここで、 $rms(\sigma_R)$: 応答の標準偏差のばらつき、 $\mu(\sigma_R)$: 応答の標準偏差の平均値を表す。

なお、風方向、風直交方向風力および振動モード形による変動係数の変化は見られなかったため、以降、風方向風力入力時の振動モ

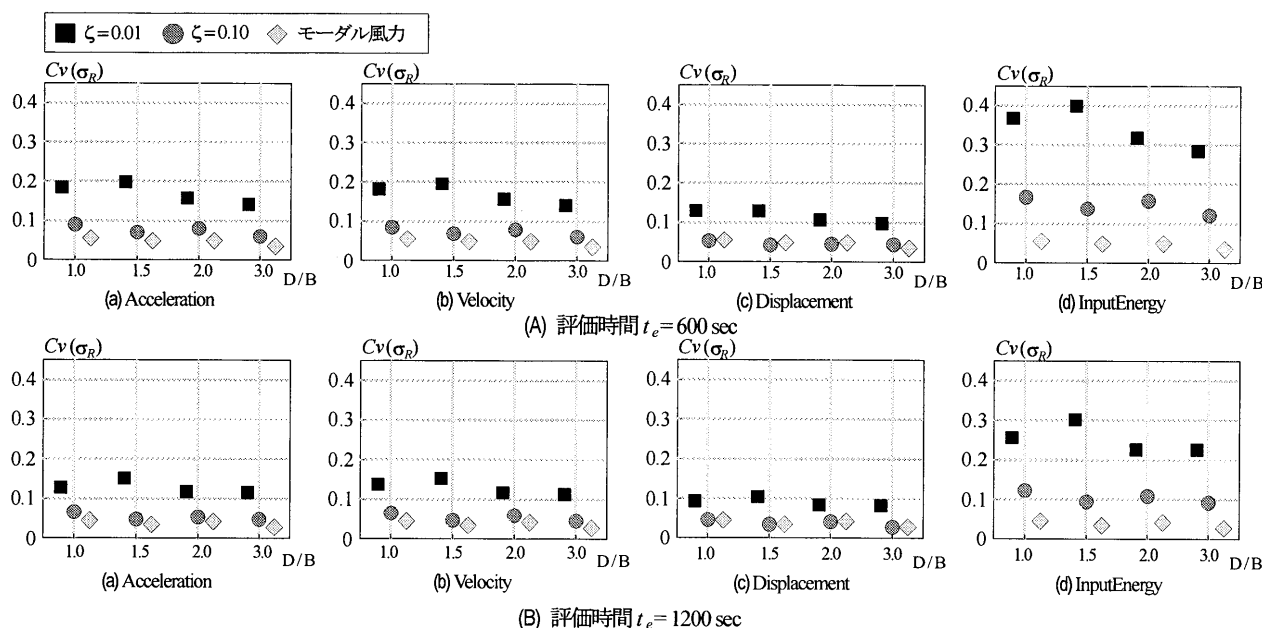


図4 減衰定数、評価時間の違いによる変動係数の変化（風方向風力入力時、振動モード $\beta=1$ ）

ード形 $\beta=1$ を代表として、減衰定数および評価時間による変動係数の変化を注目していく。図4に振動モード形 $\beta=1$ 、辺長比 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ 時の減衰定数（ $\zeta=0.01, 0.10$ ）・評価時間（ $t_e=600$ sec, 1200 sec）毎に応答加速度、速度、変位およびエネルギー入力の変動係数を比較したものを示す。図中のモーダル風力の変動係数はその1の結果である。なお、本研究でのエネルギー入力 E_{inp} は(2)式より算出する。

$$E_{inp} = \int_0^{t_0} {}_1\dot{q}(t) \cdot {}_1\phi_1 \cdot F(t) dt \quad (2)$$

ここで、 ${}_1\dot{q}$: 1次のモーダル応答速度、 ${}_1\phi_1$: 1次の振動モード形、 ${}_1F$: 1次のモーダル風力を表す。

図4より、評価時間、減衰定数が同条件下では、辺長比の違いによる変動係数の変化は殆ど見られないことが分かる。図4(A)より、評価時間 $t_e=600$ sec、減衰定数 $\zeta=0.01$ では、応答加速度、速度で15~20%、変位で10~15%、エネルギー入力では30~40%程度の変動を有することが分かる。モーダル風力の変動係数に比べて応答加速度、速度は2.5~3.5倍、変位は1.5~2.5倍、エネルギー入力では5.0~6.5倍程度大きくなっている。これは評価時間 $t_e=1200$ sec、減衰定数 $\zeta=0.01$ でも同様の結果となった。これより、評価時間が長いほど応答の変動係数は小さくなるが、モーダル風力の変動係数に対する応答の変動係数の割合は評価時間に関係なく、殆ど同値に収束すると考えられる。エネルギー入力の変動係数は応答速度と比較して、2.0~2.5倍程度大きくなっていることが分かる。エネルギー入力は応答速度の標準偏差の2乗に比例する⁹⁾ので、この関係からエネルギー入力の変動係数が応答速度の変動係数より大きくなったと考えられる。 $\zeta=0.10$ の変動係数は、 $\zeta=0.01$ に比べ30~50%程度小さ

くなり、モーダル風力の変動係数に近づくことが分かる。この傾向は評価時間 $t_e=1200$ secでも確認できる（図4(B)）。

図5に風方向風力入力時の減衰定数 $\zeta=0.01, 0.10$ の応答変位およびモーダル風力のパワースペクトル密度（以下、PSD）を示す。図5より、高減衰ほど固有振動数 f_1 付近での共振効果によって応答が増幅された部分（共振成分）が減少し、外乱の影響が支配的となるので、応答の変動は外乱の変動に収束していくと考えられる。

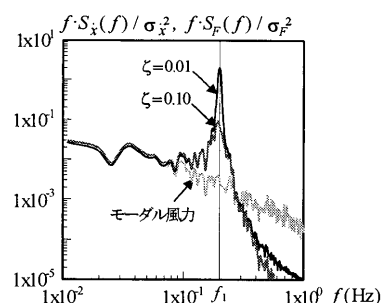


図5 応答変位、モーダル風力のPSD

4. アンサンブル平均に用いる風力波形数の検討

4.1. 解析概要

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。そのため、現行の耐風設計では、時刻歴応答解析結果により風応答を評価する場合、何らかの統計処理を用いていると言える。文献^{1),2)}では、「建築物荷重指針」による変動風力のパワースペクトル密度をもとに、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を用いて、アンサンブル数が応答のばらつきに及ぼす影響を評価している。しかし、風洞実験結果に基づいて、アンサンブル数の違いによる応答およびエネルギー入力のばらつきを詳細に検

討した例は少なく、不明な点も多い。そこで、風洞実験により得られた風力データを直接用いて、それが応答量に及ぼす影響を評価する必要がある。

検討に用いる風力時刻歴波形のアンサンブル数 n は、評価時間 $t_e=600$ sec で $n=70$ 、 $t_e=1200$ sec では $n=30$ とした。 $t_e=600$ sec の場合、 $n=5$ は14case、 $n=10$ は7case、 $n=20$ は4case、 $n=30$ は3case、 $n=40, 50$ は2case、 $n=60$ は1case のアンサンブル平均を取り、全体の $n=70$ のアンサンブル平均値を基準とし、 $t_e=1200$ sec の場合、 $n=5$ は6case、 $n=10$ は3case、 $n=15, 20$ は2case のアンサンブル平均を取り、全体の $n=30$ のアンサンブル平均値を基準としてそれぞれ比較した。

4.2. 解析結果

図6に風方向風力入力時の振動モード形 ($\beta=1, 0$)・減衰定数 ($\zeta=0.01, 0.10$)・評価時間 ($t_e=600$ sec, 1200 sec) 別の風力波形のアンサンブル数 n の違いによる応答速度、変位の標準偏差およびエネルギー入力量のばらつきを示す。X軸はアンサンブル数 n 、Y軸は基準となる応答値 (評価時間 $t_e=600$ sec では $n=70$ 、 $t_e=1200$ sec では $n=30$ でのアンサンブル平均値) とのばらつき (4式)を示す。なお、エネルギー入力のY軸は他の応答値の2倍となっている。図中の白いプロットは、(5)式により求め、各アンサンブル数でのばらつきの平均値を示す。

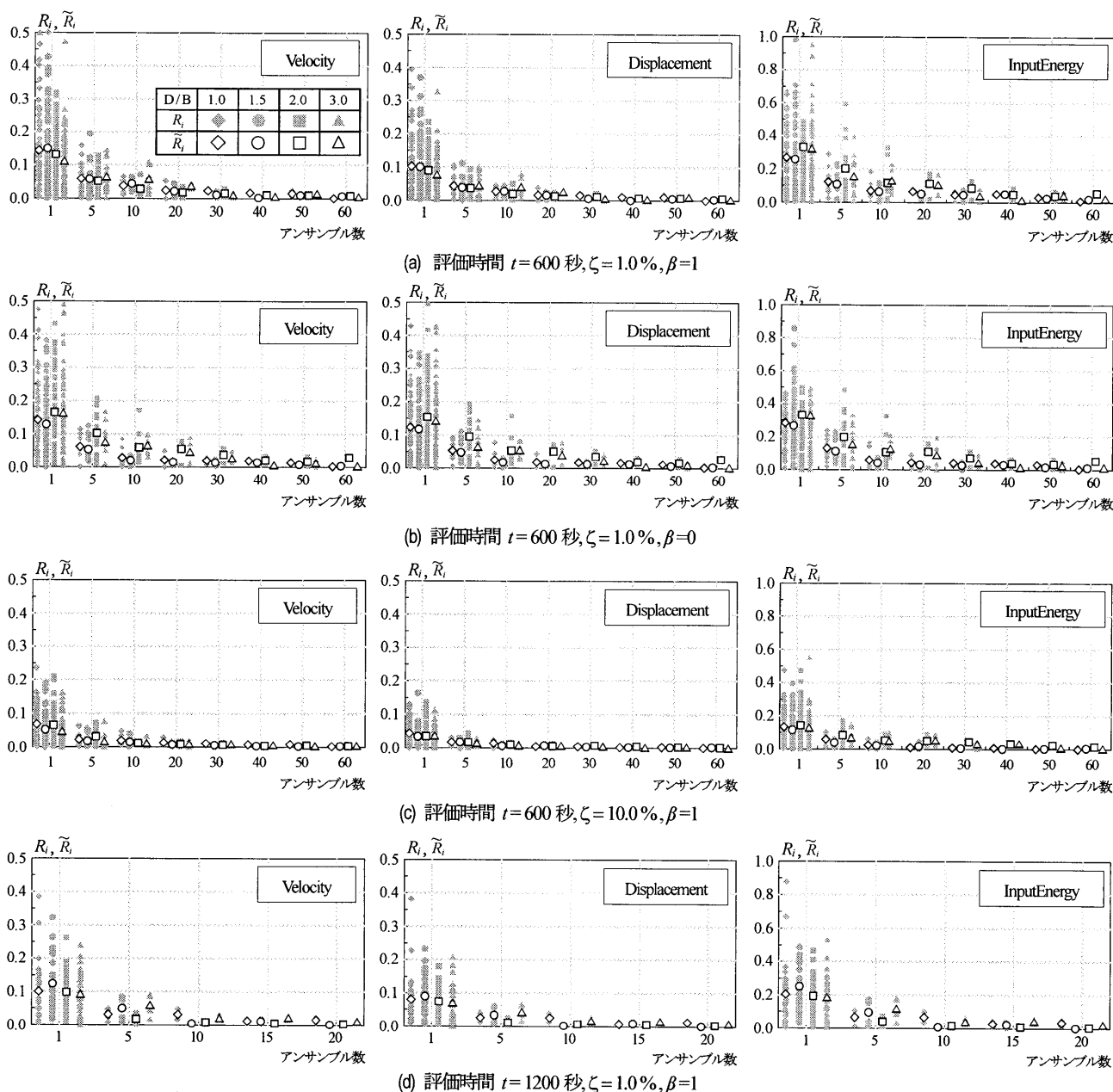


図6 アンサンブル数の違いによるばらつきの変化 (風方向風力入力時)

$$R_i = \frac{|x_i - \tilde{x}|}{\tilde{x}} \quad (i=1 \sim n) \quad (4)$$

$$\tilde{R}_i = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (5)$$

ここで、 x_i : n 波でのアンサンブル平均値、 $\tilde{x}$: $t_e=600$ sec では $n=70$ 、 $t_e=1200$ sec では $n=30$ でのアンサンブル平均値、 n : アンサンブル数を表す。

図6より評価時間、減衰定数が同条件下では、辺長比の違いはアンサンブル平均値のばらつきに影響しないことが分かる。図6(a)より、評価時間 $t_e=600$ sec、減衰定数 $\zeta=0.01$ の応答速度に関して、 $n=1$ だけでは、最大で50%、平均で10~15%程度のばらつきを含む可能性があることが分かる。しかし、 $n=5$ では最大で25%、平均で5~10%程度となり、 $n=1$ の40~60%程度のばらつきに収束している。アンサンブル数 $n=10$ で評価すると、最大で10~15%、平均で5%程度のばらつきとなることが分かる。エネルギー入力の場合、 $n=1$ だけでは最大で70~98%、平均で30%程度のばらつきを有するが、 $n=5$ では最大で60%、平均で15~20%程度となり、応答速度と同様、 $n=1$ の半分程度のばらつきに収束している。アンサンブル数 $n=10$ では、最大で30~40%、平均で10%程度のばらつきとなることが分かる。応答速度、変位はアンサンブル数 $n=20$ 以上、エネルギー入力は $n=30$ 以上で、基準となる $n=70$ でのアンサンブル平均値とほぼ5%程度以内に収まることが分かる。図6(a)、(b)より、振動モードの違いはアンサンブル平均値のばらつきに影響しないことが分かる。図6(a)、(c)より、減衰定数 $\zeta=0.10$ の応答速度、変位およびエネルギー入力の最大、平均でのばらつきは $\zeta=0.01$ に比べて、半分程度に収束することが分かる。図6(a)、(d)より、アンサンブル平均に用いる風力波形数が同じ場合、評価時間 $t_e=1200$ sec は $t_e=600$ sec と比べて、30%程度ばらつきが小さいことが分かる。評価時間 $t_e=1200$ sec では、応答速度、変位はアンサンブル数 $n=10$ 以上、エネルギー入力は $n=15$ 以上で、基準となる $n=30$ でのアンサンブル平均値とほぼ5%程度以内に収まることが分かる。以上の傾向は、応答加速度でも確認できた。

図7に評価時間 $t_e=600$ sec、減衰定数 $\zeta=0.01$ 、振動モード形 $\beta=1$ 、風方向風力入力時の辺長比 $D/B=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ 時の応答変位のピークファクター g_x を比較したものをそれぞれ示す。ピークファクターは、応答の標準偏差に対する最大値の比を示す。X軸はアンサンブル数 n 、図中の白いプロットは、(6)式により求め、各アンサンブル数でのピークファクターの平均値を示す。図7より、アンサンブル数 $n=20$ 以上で、ファクターは辺長比に関係なく概ね $g_x=3.0$ 程

$$\tilde{g}_{x,i} = \frac{\sum_{i=1}^n g_{x,i}}{n} \quad (i=1 \sim n) \quad (6)$$

ここで、 $g_{x,i}$: n 波でのアンサンブル平均値度であり、これまで設計などにおいて一般的に考えられてきた値³⁾と概ね同値に収束することを確認した。これは、振動モード形状および風力方向が変化しても同様の結果となった。アンサンブル数 $n=1$ だけでは、 $g_x=2.5 \sim 4.5$ 程度となり、値にばらつきがあることが分かった。

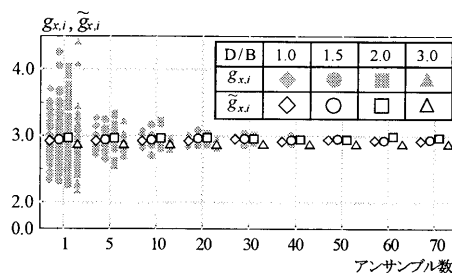


図7 アンサンブル数による応答変位のピークファクターの変化

6. まとめ

1次モードのみの風応答に注目し、風洞実験により得られた層風力から算出したモーダル風力を直接用いて、時刻歴弾性応答解析を行った。そして、アンサンブル平均に用いる風力時刻歴波形成の違いによる応答値のばらつきを評価し、以下の結論を得た。

- (1) 5波のアンサンブル平均により応答評価することで、1波の半分程度のばらつきに収束することを確認した。
- (2) 風力方向（風方向、風直交方向）、辺長比および振動モード形状の変化は応答のアンサンブル平均値のばらつきに殆ど影響せず、高減衰かつ評価時間が長いほど、応答のアンサンブル平均値のばらつきが小さいことを確認した。

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、東京理科大学による新風洞設計研究会の成果の一部です。特に、本研究を進めるにあたり、大熊武司教授、(株) 泉創建エンジニアリングの丸川比佐夫様、片桐研治様、鶴見俊雄様からご指導を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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 pp.233-234, 2005.9
- 2) 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 pp.927-928, 2009.9
- 3) 日本建築学会：建物荷重指針・同解説(2004)、2004
- 4) 丸川比佐夫、大熊武司、北村春幸、吉江慶祐、鶴見俊雄、佐藤大樹：風洞実験に基づく高層建築物の多層風力によるエネルギー入力性状(その2) 日本建築学会学術講演梗概集 pp.193-194, 2010.9
- 5) 岡田功、伊藤孝、宮田利雄：耐風構造、丸善株式会社、1977
- 6) 吉江慶祐、北村春幸、大熊武司、和田章：エネルギーの釣合に基づく平均成分を有する広帯域性変動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法、日本建築学会構造系論文集第608号 pp.21-28, 2006.10

*1 東京理科大学

*2 株式会社日建設計