

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超高層建物の応答に対する風力の影響評価指標 その2 評価指標の構築方法および検証
Title(English)	Index for evaluating the impact of wind force on the response of high-rise buildings Part2 Methods of constructing evaluation indicators and its validation
著者(和文)	沖村将大, 佐藤大樹, 田中英之, 曾根孝行, 渡井一樹, 畔上泰彦, 今野大輔
Authors(English)	OKIMURA Masahiro, SATO Daiki, TANAKA Hideyuki, SONE Takayuki, WATAI Kazuki, AZEGAMI Yasuhiko, KONNO Daisuke
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 469-472
Citation(English)	, , , pp. 469-472
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

超高層建物の応答に対する風力の影響評価指標
その 2 評価指標の構築方法および検証

構造一振動

風洞実験 CFD 超高層建物
時刻歴応答解析 1 次モード パワースペクトル密度

正会員	○ 沖村将大 ^{*1}	正会員	佐藤大樹 ^{*2}
〃	田中英之 ^{*3}	〃	曾根孝行 ^{*3}
〃	渡井一樹 ^{*3}	〃	畔上泰彦 ^{*3}
〃	今野大輔 ^{*3}		

1. はじめに

本報の目的は時刻歴応答解析を用いた超高層建物の風応答評価において、作用する風力はどのような応答を算出するのかを解析前に評価することが重要となること、現状の一般化風力のパワースペクトル密度（以下、PSD）の評価は定性的なものであることを背景に、応答への風力の影響を定量的に評価できる指標を提案することである。本報その 1 では、1 次モード風力の準静的成分および共振成分^{1),2)}に着目し、風力特性が風応答に与える影響を分析した。本報その 2 では風力の影響評価指標の構築および検証を行う。

2. 風力の共振成分の評価指標の提案

2.1 評価指標の提案

図 1(a), (b)に風方向および風直交方向の荷重指針による風力の PSD をそれぞれ示す。建物および風力の概要は本報その 1 を参照されたい。本報では共振成分^{1),2)}のみに注目するため、図は共振成分に該当する、境界振動数 f_b ($= 1f/3$, $1f$: 対象建物の 1 次固有振動数)^{1),2)}以降を拡大して示す。図 1 から、 $1f$ を中心として考えると、風方向では低振動数側に向けて PSD の値が増加していくことがわかる。風直交方向では低振動数側に向けてある振動数までは増加していくが、その後は減少することがわかる。

図 1 に示すように風力の PSD における f_b から $1f$ の範囲の分散を σ_{FR1}^2 , $1f$ 以降の分散を σ_{FR2}^2 とする。 σ_{FR1}^2 および σ_{FR2}^2 はそれぞれ以下の式となる。

$$\sigma_{FR1}^2 = \int_{f_b}^{1f} S_F(f) \cdot df \tag{1}$$

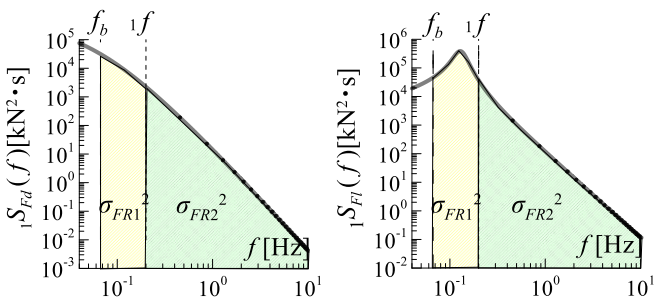
$$\sigma_{FR2}^2 = \int_{1f}^{\infty} S_F(f) \cdot df \tag{2}$$

ここで、 σ_{FR2}^2 に対する σ_{FR1}^2 の比 α_{FR} を次式で定義する。

$$\alpha_{FR} = \frac{\sigma_{FR1}^2}{\sigma_{FR2}^2} \tag{3}$$

この α_{FR} は、 $1f$ より高振動数域を基準にしたときの、PSD

の共振成分に対する $1f$ より低振動数域の影響を意味する。本モデルにおいて、 α_{FR} は風方向では 5.7、風直交方向では 9.6 であった。



(a) 風方向 (b) 風直交方向
図 1 荷重指針による風力の PSD（共振成分）

図 2 に式(4)で表される検討モデルでの機械的アドミタンス $|i\chi(f)|^2$ を示す。 $|i\chi(f)|^2$ は次式で表される。

$$|i\chi(f)|^2 = \frac{1}{iK^2 \left[\left\{ 1 - \left(\frac{f}{1f} \right)^2 \right\}^2 + 4i\zeta_f^2 \left(\frac{f}{1f} \right)^2 \right]} \tag{4}$$

風力の PSD と同様に共振成分のみに注目するため、図は共振成分に該当する、境界振動数 f_b 以降を拡大して示す。図 2 より、 $1f$ を中心として考えると、共振成分に該当する部分の $|i\chi(f)|^2$ は低振動数側にも高振動数側にも減少していくことがわかる。 $|i\chi(f)|^2$ における f_b から $1f$ の範囲の面積を Z_{R1} , $1f$ 以降の面積を Z_{R2} とすると、 Z_{R1} および Z_{R2} はそれぞれ以下の式となる。

$$Z_{R1} = \int_{f_b}^{1f} |i\chi(f)|^2 \cdot df \tag{5}$$

$$Z_{R2} = \int_{1f}^{\infty} |i\chi(f)|^2 \cdot df \tag{6}$$

ここで、 Z_{R2} に対する Z_{R1} の比 $\beta_{\chi R}$ を次式で定義する。

$$\beta_{\chi R} = \frac{Z_{R1}}{Z_{R2}} \tag{7}$$

この $\beta_{\chi R}$ は $|i\chi(f)|^2$ において、先ほどの α_{FR} と同様の意味を

Index for evaluating the impact of wind force on the response of high-rise buildings
Part2 Methods of constructing evaluation indicators and its validation

OKIMURA Masahiro, SATO Daiki, TANAKA Hideyuki
SONE Takayuki, WATAI Kazuki, AZEGAMI Yasuhiko,
KONNO Daisuke

持つ。検討モデルにおいて、 $\beta_{\chi R}$ はおよそ 1.0 であった。応答の共振成分の PSD は、 $|i\chi(f)|^2$ のピークの近傍であるため、風力の PSD ではなく、 $|i\chi(f)|^2$ に近い形状となる (図 2)。この α_{FR} と $\beta_{\chi R}$ に大きく差があることが 2 章で述べた応答の共振成分の大小関係と風力の共振成分の大小関係が異なる原因であることが考えられる。そこで、風力より求められる σ_{FR1}^2 に対象建物の振動特性の影響を考慮することで、風力の評価ができると考える。具体的には、 α_{FR} ($\sigma_{FR1}^2 / \sigma_{FR2}^2$) が $\beta_{\chi R}$ に近い値となるような補正を σ_{FR1}^2 にかけた指標 $i\sigma'_{FR}$ (式(8)) を提案する。

$$i\sigma'_{FR} = \sqrt{\frac{\beta_{\chi R}}{\alpha_{FR}} \sigma_{FR1}^2 + \sigma_{FR2}^2} \quad (8)$$

しかし、 α_{FR} は $i f$ によって積分範囲が変化することから、 $i f$ に依存する値であることが予想される。 $\beta_{\chi R}$ も $i f$ によって積分範囲が変化することに加え、 $|i\chi(f)|^2$ が $i f$ と $i\xi_f$ の関数であることから、 $i f$ と $i\xi_f$ に依存することが予想できる。そこで、次節にて α_{FR} および $\beta_{\chi R}$ の $i f$ や $i\xi_f$ による変化を確認する。

2.2 α_{FR} の 1 次固有振動数による変化

図 3(a), (b) に風方向および風直交方向における、 α_{FR} (式(3)) の $i f$ による変化をそれぞれ示す。横軸は、 $i f$ を代表幅 B と設計用風速 U_H で無次元化した無次元振動数 $i f^*$ (式(10)) とする。 $i f$ は $1 / i f (= i T_f)$ が 1~10 s までの範囲で、 $i T_f$ が 0.1 s 刻みとなるようにした。なお、 α_{FR} に風方向を表す d 、風直交方向を表す l の添え字を加える。図 3(a) から、風方向における α_{FRd} は $i f^*$ の増加に伴って増加していき、その増加量は徐々に緩やかになっていくことが確認できる。以上から、 α_{FRd} は対数近似により、以下の式で表すことができる。

$$\alpha_{FRd} = 3.95 \ln(i f^*) + 13.61 \quad (9)$$

ここで、 $i f^*$ は次式で表す。

$$i f^* = \frac{i f B}{U_H} \quad (10)$$

続いて図 3 (b) から、風直交方向における α_{FRl} は $i f^*$ の増加に伴って増加していくが、 $i f^*$ がおよそ 0.24 から、 α_{FRl} は減少していく。これは、 $i f$ の増加によって $f_b (= i f / 3)$ が風力の PSD のピーク付近を越えるためである。よ

って、 $i f^* = 0.24$ を境として、式(11)で風直交方向の α_{FRl} を与える。

$$\alpha_{FRl} = \begin{cases} -9765.4(i f^*)^3 + 4904.5(i f^*)^2 - 556.0 i f^* + 18.5 & \dots i f^* < 0.24 \\ -745.0(i f^*)^3 + 1260.4(i f^*)^2 - 709.7 i f^* + 143.4 & \dots i f^* \geq 0.24 \end{cases} \quad (11)$$

2.3 $\beta_{\chi R}$ の 1 次固有振動数および 1 次減衰定数による変化

図 4 に $i f$ および 1 次減衰定数 $i\xi_f$ による $\beta_{\chi R}$ (式(7)) の変化を示す。 $\beta_{\chi R}$ はその逆数が 1~6 s, 8 s, 10 s となるような 8 通りの $i f$ かつ、それぞれ 0.01 から 0.1 までの 10 通りの $i\xi_f$ を組み合わせた計 80 通りの $|i\chi(f)|^2$ から算出した。図 4 に示すように、 $i f$ による $\beta_{\chi R}$ の変化はほぼなかった。よって、 $\beta_{\chi R}$ への $i f$ による影響はほとんどないと考えられ、 $\beta_{\chi R}$ を $i\xi_f$ のみの関数として線形近似した次式を提案する。

$$\beta_{\chi R} = 3.31 i\xi_f + 1.04 \quad (12)$$

3. 評価指標およびその適用範囲の検証

3.1 評価指標検証の概要

本章では 2 章で提案した指標 (以下、提案指標) の検証を行う。検証は風洞実験および CFD から算出した評価指標 $i\sigma'_{FR}$ と荷重指針の $i\sigma'_{FR}$ の大小関係と風洞実験および CFD の風力による応答の標準偏差と荷重指針による応答の標準偏差の大小関係を比較することで行う。算出方法は次節で述べる。 $i\sigma'_{FR}$ が風力の共振成分の応答への影響を定量的に評価できる指標であり、風応答への影響に着目した風力の評価指標として有用であるならば、 $i\sigma'_{FR}$ と応答の大小関係は一致する。つまり、 $i\sigma'_{FR}$ が大きければ大きいほど、応答も大きくなる

以下に評価指標の算出方法についてまとめる。なお、 $i\sigma'_{FR}$ (式(8)) に風方向を表す d 、風直交方向を表す l の添え字を加える。まず、対象建物の 1 次固有振動数 $i f$ 、1 次減衰定数 $i\xi_f$ および 1 次固有モード $i\Phi_{f1}$ が既知であるとする。

- (1) 評価する層風力の時刻歴から 1 次固有モード $i\Phi_{f1}$ を用いて、1 次モードの風力の PSD を作成する。
- (2) 風方向であれば式(9)、風直交方向であれば式(11)を用いて、 α_{FR} を算出する。

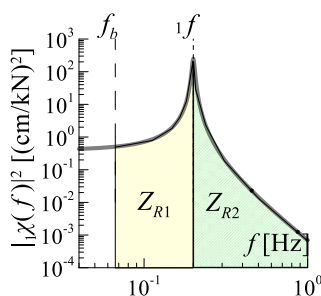


図 2 機械的アドミッタンス ($i f = 0.2$, $i\xi_f = 0.02$)

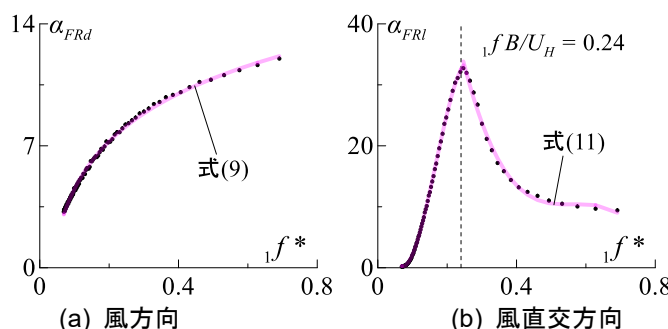


図 3 α の振動数による変化

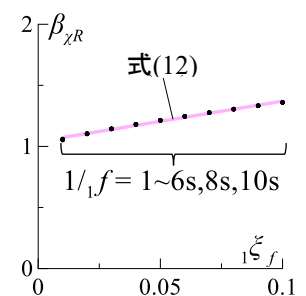


図 4 $i f$ および $i\xi_f$ による β の変化

- (3) 式(12)を用いて、 β_{xR} を求める。
- (4) 作成した1次モードの風力のPSD (1))について、求めた α_{FR} (2))と β_{xR} (3))を用いて式(11)から ${}_1\sigma'_{FR}$ を算出する。
- (5) 荷重指針を用いてPSDを算出し、同様の手順で荷重指針の ${}_1\sigma'_{FR}$ を算出する。
- (6) 評価対象風力の ${}_1\sigma'_{FR}$ と荷重指針の ${}_1\sigma'_{FR}$ を比較する。

3.2 評価指標用の解析モデルおよび風力概要

評価指標の検証は辺長比 $B/D = 1.0$ 、アスペクト比 $H/B = 5.0$ の超高層建物を対象とする。建物高さは $H = 150$ m, 200 m, 300 m の3通り、1次固有周期 ${}_1T_f$ は 3.0 s, 5.0 s, 6.0 s, 8.0 s の4通り、建物密度 $\rho_f = 175$ kg/m³ とし、質量 m_i は高さ方向に様であるとして想定した (図 5(a))。上記の建物を10質点せん断型モデルでモデル化した。構造減衰を剛性比例型とし、 ${}_1T_f$ に対して1次減衰定数 ${}_1\xi_f = 0.02$ を用いた。 i 層の剛性 k_{fi} は建物の1次固有モード ${}_1\Phi_{fi}$ が直線となるように次式³⁾により決定した (図 5(b))。

$$k_{fi} = \frac{{}_1\omega_f^2 \cdot m_i \cdot {}_1\Phi_{fi} + k_{fi+1} ({}_1\Phi_{fi+1} - {}_1\Phi_{fi})}{{}_1\Phi_{fi} - {}_1\Phi_{fi-1}} \quad (i = 1 \sim 10) \quad (13)$$

ここで、 ${}_1\omega_f$ は建物の1次固有円振動数を表す。ただし、 $k_{f11} = 0$ 、 ${}_1\Phi_{f0} = 0$ とする。なお、建物は弾性状態を保つものとする。

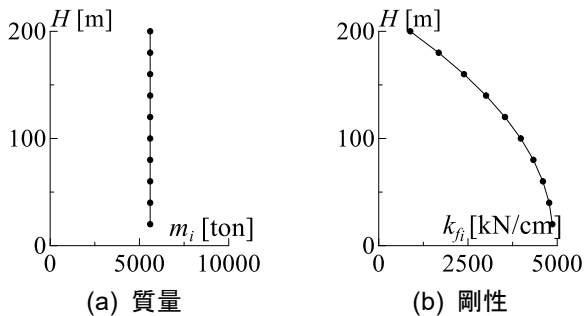


図5 解析モデルの諸元 ($H = 200$ m, ${}_1T_f = 5.0$ s)

建物に作用する風力は荷重指針⁴⁾に基づき、本報その1と同様の風洞実験⁵⁾およびCFD⁶⁾により得られた層風力係数データを対象建物における基準風速を 36 m/s として再現期間 100 年, 500 年, 1000 年の3通りの風力へ変換を行ったものを用いる。なお、小地形の影響、季節係数および風向係数の影響は考慮していない。風洞実験およびCFDの詳細はそれぞれ文献 5), 文献 6)を参照されたい。また、風向角は 0° とし、1組につき10質点分の波形を 0.05 秒刻み 14000 (700 s) ステップとして、5組ずつ取り出した。なお、取り出した風力の前後の 50 s に時刻歴応答解析における過渡応答の影響を避けるためのエンベロープを設けているため、中間の 600 s で各応答の評価を行う。図 6 に10層目風力の時刻歴波形を示す。以降、評価指標の構築に用いた建物高さ $H = 200$ m, ${}_1T_f = 5.0$ s, 風力の再現期間 500 年のケースを基本ケースと呼ぶ。

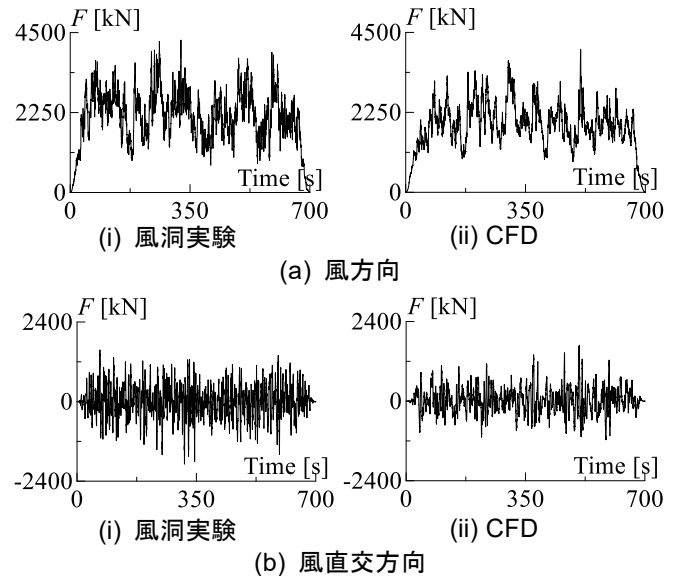


図6 風力の時刻歴波形 (10層)

3.3 評価指標の検証

表1に検証ケースの一覧を示す。式(9)と式(11)は対象建物の ${}_1f$ を代表幅 B と設計用風速 U_H で無次元化した無次元振動数 ${}_1f^*$ の関数となっている。そのため、 H や ${}_1T_f$ および風力の再現期間が異なるケース (${}_1f^*$ が異なるケース) においても提案指標が有用かどうかを確認する。検証は表1に示すように、基本ケースを除き、計7ケースで行った。また、各ケースは ${}_1f^*$ が大きい順にケース1からケース7と表す。以降、検証結果を示すが、結果は代表して基本ケースを示す。

表1 検証ケース一覧

ケース名	${}_1f^*$	H [m]	${}_1T_f$ [s]	風力の再現期間
基本ケース	0.138	200	5.0	500
ケース1	0.230	200	3.0	500
ケース2	0.191	300	5.0	500
ケース3	0.154	200	5.0	100
ケース4	0.132	200	5.0	1000
ケース5	0.115	200	6.0	500
ケース6	0.110	150	5.0	500
ケース7	0.086	200	8.0	500

表2に基本ケースにおける風洞実験、CFDの風力および荷重指針のPSDにおける ${}_1\sigma'_{FR}$ を、図7に基本ケースでの風方向および風直交方向の応答(変位、速度、加速度)の標準偏差(σ_D , σ_V , σ_A)の高さ方向分布をそれぞれ示す。風力および応答は5波のアンサンブル平均で評価する。図には荷重指針による応答の標準偏差を併記する。表2に示した風方向風力の ${}_1\sigma'_{FR}$ と図7(a)の(ii)および(iii)の σ_V および σ_A は同様の大小関係である。風直交方向でも風方向と同様、表2の風直交方向風力の ${}_1\sigma'_{FR}$ と図7(b)に示す σ_D , σ_V , σ_A の大小関係が一致した。風方向、風直交方向どちら

においても、指標と応答の関係が同様であったため、基本ケースでは本評価指標の有用性が確認できる。

表 2 風力の σ'_{FR}

	風方向 σ'_{FRd}	風直交方向 σ'_{FRl}
風洞実験	39.7	86.6
CFD	33.8	71.1
荷重指針	21.6	70.4

* 青字は荷重指針の値より大きい値、赤字は荷重指針の値より小さい場合を表す

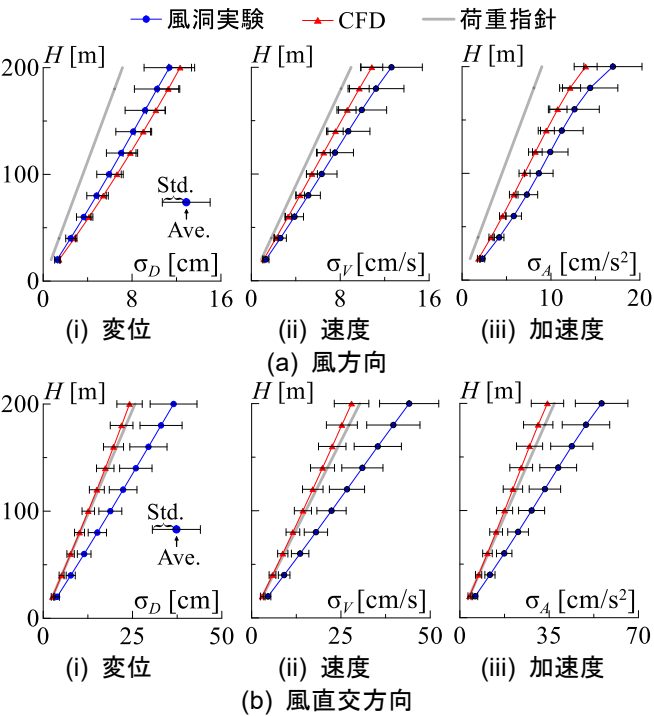


図 7 応答の標準偏差

3.4 評価指標の適用範囲

表 3 に各ケースの検証結果の一覧を示す。 σ'_{FR} と応答の大小関係が一致した場合は OK、一致しない場合は NG と表記する。表 3 に示す通り、風方向において、本指標は異なる建物高さ、建物周期、風力の再現期間でも有用であることを確認した。続いて風直交方向においては、 if^* が 0.1 以上で有用であることを確認した。これは、正方形平面 ($B = D$) での荷重指針における構造骨組用風直交方向荷重の適用範囲 ($U_H/1fB \leq 10$)⁴⁾と同様であるため、風直交方向での本指標の適用範囲は、建物の条件が荷重指針の適用範囲内であることだと言える。

4. 結論

風応答では 1 次モードが支配的になることに着目した、1 次モード風力のパワースペクトル密度 (PSD) の面積比

に基づく風力の共振成分の評価指標を提案した。以下にまとめを示す。

- 対象建物の 1 次固有振動数を境とした低振動数側と高振動数側の PSD の面積 (分散) の比を利用した風力の共振成分の評価によって、風方向速度および加速度と風直交方向変位、速度および加速度への影響に着目した風力評価が可能であり、分散の比をモデル化した式を用いた評価指標を提案した。
- 提案した評価指標は固有周期や建物幅さらには風速が異なる場合においても適用できることを確認した。ただし、風直交方向における提案指標の適用範囲は、荷重指針と同じく対象建物の 1 次固有振動数の無次元振動数が 0.1 以上である。

表 3 検証結果一覧

ケース名	if^*	風方向	風直交方向
基本ケース	0.138	OK	OK
ケース 1	0.230	OK	OK
ケース 2	0.191	OK	OK
ケース 3	0.154	OK	OK
ケース 4	0.132	OK	OK
ケース 5	0.115	OK	OK
ケース 6	0.110	OK	OK
ケース 7	0.086	OK	NG

参考文献

- 1) 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 鈴木悠也, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層建築物の高次モード応答特性, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 38 号, pp.79-84, 2012.2
- 2) 吉江慶祐, 大熊武司, 北村春幸, 和田章: 広帯域性の変動風力を受ける弾塑性構造物の応答変位振幅の確立分布, 日本建築学会構造系論文集, 第 604 号, pp.37-46, 2006.6
- 3) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 635 号, pp. 75-82, 2009.1
- 4) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 5) 平塚紘基, 佐藤大樹, 田中英之: 履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の弾塑性風応答予測, 日本建築学会技術報告集, 第 27 巻, 第 66 号, pp.662-667, 2021.6
- 6) 沖村将大, 佐藤大樹, 田中英之, 曾根孝行, 渡井一樹, 畔上泰彦: 風洞実験および CFD より得られた風力を用いた超高層建物の時刻歴応答解析 その 1 気流性状および風力特性の比較, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1, pp.493-496, 2023.2
- 7) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, 2004.6

謝辞

本報告は、株式会社竹中工務店、東京工業大学佐藤研究室との共同研究成果の一部である。また、本研究の一部は、文部科学省「富岳」産業機動的課題の一環としてスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受けて実施した (課題番号: hp210292)。ここに記して感謝の意を示す。

*1 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士(工学)

*3 株式会社竹中工務店 技術研究所

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology*1

Associate Prof., IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.*2

Research & Development Institute, Takenaka Corporation.*3