T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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 気流特性および風力特性の比較
Title(English)	Time history analysis of a high-rise building using wind force obtained from wind tunnel experiments and CFD Part1 Comparison of airflow and wind characteristics
著者(和文)	沖村将大, 佐藤大樹, 田中英之, 曽根孝行, 渡井一樹, 畔上泰彦
Authors(English)	Masahiro Okimura, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka, Takayuki Sone, Kazuki Watai, Yasuhiko Azegami
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 493-496
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 493-496
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2022年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2023年2月

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　気流特性および風力特性の比較

構造ー振動

超高層建物　風洞実験　CFD
風応答　多質点系モデル

正会員 ○ 沖村将大[*1]　正会員 佐藤大樹[*2]
〃 田中英之[*3]　〃 曽根孝行[*3]
〃 渡井一樹[*3]　〃 畔上泰彦[*3]

1. はじめに

近年の台風の激甚化や施工技術の発展に伴う建物のさらなる高層化によって，建物に作用する風力は増大していくことが予想される。そのため，耐風設計の重要性が増している。超高層建物における風荷重の評価には，一般的には風洞実験を用いているが，近年の計算能力の著しい向上に伴い，建築物の耐風設計への数値流体計算/Computational Fluid Dynamics (以下 CFD)の実用化が期待されている。風洞実験では模型や装置の規模により再現される現象に限界があるが，CFD は計算領域等に配慮すれば，さまざまなスケールの事象が再現可能である[1)]。実際に建築物荷重指針・同解説(2015)[2)]（以下，荷重指針）に CFD を用いた風荷重評価の項目が導入されており，建築物荷重指針を活かす設計資料 2—建築物の風応答・風荷重評価／CFD 適用ガイド—[1)]では，荷重を適切に算定するための CFD の適用方法が整備されている。また，既往研究において大規模な Large Eddy Simulation(LES)による建築物の風荷重評価の検討が行われている[3),4)]。しかし，これらは風洞実験と CFD の風圧係数の比較に留まっている。

そこで本報その 1 では，高さ H = 200 m である正方形断面を有する辺長比 $D / B = 1.0$，アスペクト比 $H / B = 5.0$（D，B：建築物の奥行，幅，$D = B = 40$ m）の超高層建物を想定した風洞実験および CFD から，気流特性および風力特性の比較を行う。その際，風洞実験の値を基準として CFD の値を評価するが，CFD の値のエラーバーの中に，風洞実験の値のアンサンブル平均値が含まれる層が半数以上ある場合を同等であるとして評価する。

2. 風洞実験概要[5)]

使用した模型高さは 300 mm，風向角は，B に正対する角度を 0°とし，反時計回りに 5°毎の 72 方向で計測した。層風力の測定点は，9 層とする。風洞実験は，閉鎖型回流境界層風洞を用いて行った。実験気流は荷重指針の地表面粗度区分IIIの気流を目標に，スパイヤーとラフネスブロックを用いて作成した。風圧の測定には多点同時風圧測定システムを使用した。風力係数および風圧係数を算定するための基準速度圧は，ピトー管により測定された境界層外の速度圧を平均風速の鉛直分布に基づき基準高さでの速度圧に換算した値を用いている。また，収録された風圧データはチューブ系の周波数応答特性に基づき補正した。風圧実験の測定条件はサンプリング間隔 1000 Hz，データ数 65536 個（測定時間 65.536 秒），ローパスフィルタ 500 Hz とした。

3. CFD 概要

CFD の計算手法と計算条件を表 1，表 2 にそれぞれ示す。

表 1 計算手法

解法	有限差分法
計算コード	Kazamidori®
流体式	Navier–Stokes 方程式
乱流モデル	Large Eddy Simulation (LES)
SGS モデル	コヒーレント構造 Smagorinsky
空間離散化	2 次精度中心差分
時間進行法	3 次 Adams-Bashforth method Crank -Nicolson method
圧力解法	残差切除法
格子システム	不等間隔直交格子法

表 2 計算条件

計算領域	風方向および風直交方向：37.5B 鉛直方向：5.25H
計算格子数	約 1500 万
最小格子幅	0.008B
評価時間	実時間 10 分間相当×5 波
時間刻み	1.00E-5 秒
流入境界	別途計算した流入変動風 (図 1(a)(b)) U_H=10.0m/s
流出境界	移流境界条件
側・上方境界	勾配 0 条件
床・壁面境界	壁関数 (2 層モデル)

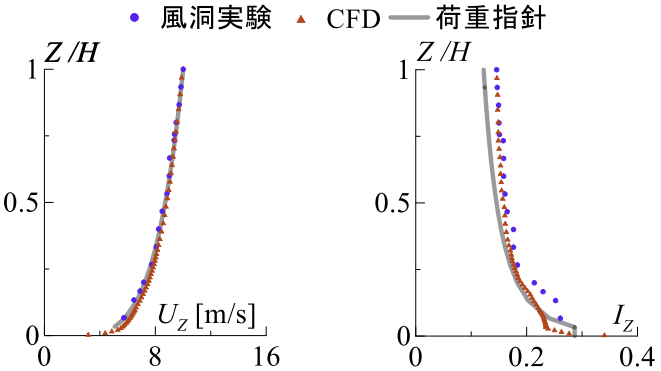
Time history analysis of a high-rise building using wind force obtained from wind tunnel experiments and CFD
Part1 Comparison of airflow and wind characteristics

OKIMURA Masahiro, SATO Daiki, TANAKA Hideyuki
SONE Takatuki, Watai Kazuki, AZEGAMI Yasuhiko

表 2 の計算条件は CFD 適用ガイド[1)]を満たすものとなっている。流入境界条件として与えた変動風はスパイヤーやラフネスブロック等を再現した風洞モデル[例えば文献 6)]における別途計算にて生成した。モデル高さは 400 mm で，風圧のサンプリング位置は風洞実験と同じ位置座標に設定し，サンプリング周波数も実験と同じ 1000 Hz とした。

4. 気流特性の比較

図 1(a)に風洞実験および CFD の平均風速 U_Z を示す。これ以降，添え字の T および C はそれぞれ風洞実験と CFD を意味する。



(a)平均風速　(b) 乱れ強さ

図 1 気流特性の比較

同図に併記している荷重指針[2)]に基づき算出した U_Z は式(1)で表される。

$$U_Z = U_H\left(\frac{Z}{H}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

ここで，U_H：基準高さ H における平均風速，Z：地表面からの高さ，α：風速の鉛直分布を表すパラメータを表し，本報では 0.2 を用いる。なお，模型上の基準高さでの平均風速はどちらも 10.0 m/s である。図 1(a)から CFD は荷重指針および風洞実験と精度よく一致していることが確認できる。

図 1(b)に風洞実験および CFD の乱れ強さ I_Z を示す。同図に併記している荷重指針[2)]に基づき算出した I_Z は式(2)で表される。

$$I_Z = \begin{cases} 0.1\left(\dfrac{Z}{Z_G}\right)^{-\alpha-0.05} & Z_b \le Z \le Z_G \\ 0.1\left(\dfrac{Z_b}{Z_G}\right)^{-\alpha-0.05} & Z \le Z_b \end{cases} \tag{2}$$

ここで Z_G [m]は風速の鉛直分布の上限高さ，Z_b [m]はべき指数分布が適応できる下弦の高さである。図 1(b)より CFD の乱れ強さは上層で荷重指針の乱れ強さを上回るが，風洞実験の乱れ強さとは概ね一致することが分かる。

図 2 に風洞実験および CFD の模型頂部高さでのある振動数 f における風速の変動成分の無次元パワースペクトル密度（PSD）$F_u(f)$を示す。荷重指針[2)]に基づく $F_u(f)$はカルマン型として，次式で表される。

$$F_u(f) = \frac{4\sigma_u^2(L_x/U_H)}{\{1+71(fL_x/U_H)^2\}^{5/6}} \tag{3}$$

なお，σ_u は変動風速の標準偏差，L_x[m]は乱れのスケールである。図 2 より，CFD による $F_u(f)$は風洞実験および荷重指針による $F_u(f)$と精度よく一致していることが確認できる。

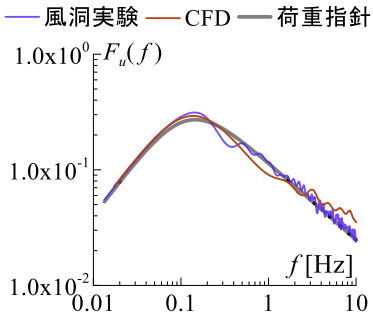


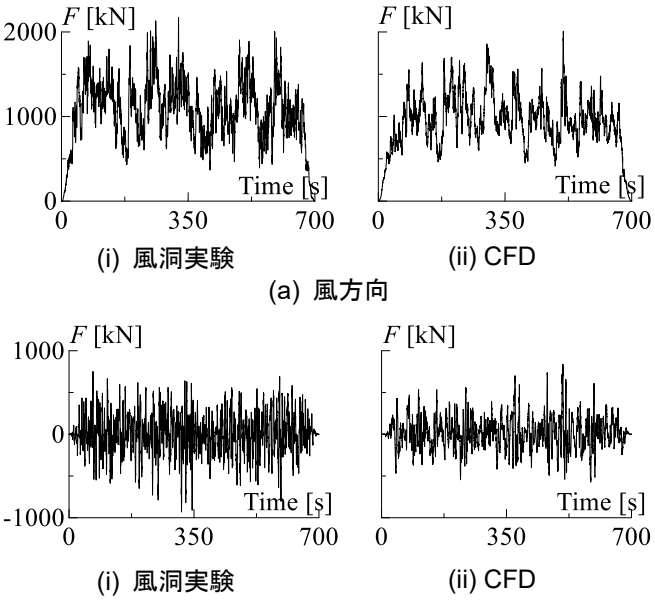
図 2 風速の無次元 PSD

5. 風力特性の比較

5.1 建物モデルおよび風力概要

本報では，高さ H = 200 m，$B = D$ = 40 m の超高層建物を対象とした 20 質点せん断型モデルを用いる。

風力は，風洞実験および CFD 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 36 m/s での再現期間 500 年風力へ変換を行った。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。また，風向角は 0°とし，1 組につき 20 質点分の波形を 0.05 秒刻み 14000（700 s）ステップとし，5 組取り出した。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 で風力特性の評価を行う。図 3 に風洞実験および CFD による風力を示す。図には代表して，最上層のかつ 1 組目の風力を示す。



(i) 風洞実験　(ii) CFD

(a) 風方向

(i) 風洞実験　(ii) CFD

(b) 風直交方向

図 3 最上層の風力波形

5.2 風方向風力の平均値および平均風力係数の比較

図 4(a)に風洞実験および CFD による風方向風力の平均値$\overline{F}$を示す。以降，風力評価は 5 波それぞれを入力した場合のアンサンブル平均（Ave.）とする。またエラーバーは 5 波の標準偏差（Std.）を表す。図 4(b)に風洞実験および CFD の平均風力係数$\overline{C_D}$を示す。i 層の平均風力係数$\overline{C_{Di}}$は平均風力$\overline{F_i}$ [kN]を速度圧 q_H [kN/m^2]と代表幅 B [m]，i 層の負担高さ Z_i [m]で基準化した指標であり，式(3)で表される。

$$\overline{C_{Di}} = \frac{\overline{F_i}}{q_H \cdot BZ_i} \tag{3}$$

同図に併記している荷重指針に基づき算出した$\overline{C_D}$は式(4)で表される。

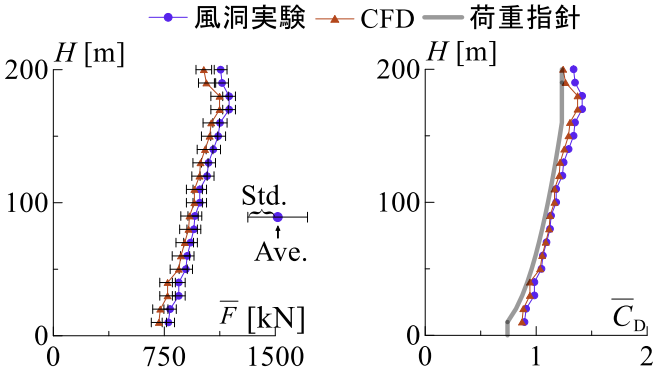
$$\overline{C_D} = C_{pe1} - C_{pe2} \tag{4}$$

ここで C_{pe1} は高さ方向分布係数 k_Z（表 3 参照）を用いて $0.8k_Z$ であり，C_{pe2} は-0.5（$B \geq D$ より）である。

表 3 高さ方向の分布係数 k_Z

$Z \leq Z_b$	$Z_b < Z < 0.8H$	$Z \geq 0.8H$
$(Z_b / H)^{2\alpha}$	$(Z / H)^{2\alpha}$	$0.8^{2\alpha}$

図 4(a)より，$\overline{F_C}$は$\overline{F_T}$と同等であることが確認できる。また図 4(b)より，$\overline{C_{DC}}$は荷重指針より少し大きい傾向はあるものの概ね一致し，$\overline{C_{DT}}$とは精度よく一致することが確認できる。



(a) 風方向風力の平均値　(b) 平均風力係数

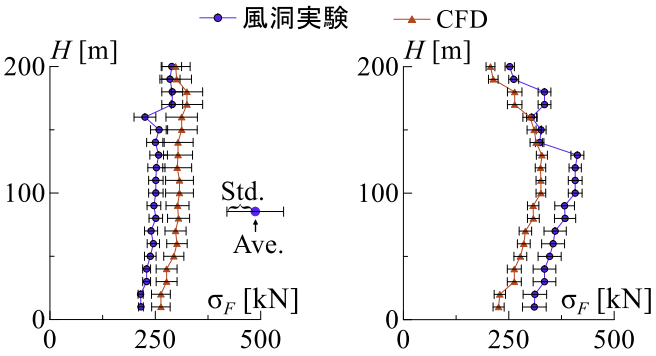
図 4 風方向風力の平均成分の比較

5.3 風力の標準偏差比較

図 5 に風洞実験および CFD による風力の標準偏差 σ_F を示す。図 5(a)より，風方向における σ_{FC} は σ_{FT} より大きいことが確認できる。また図 5(b)より，風直交方向における σ_{FC} は σ_{FT} より小さいことが分かる。

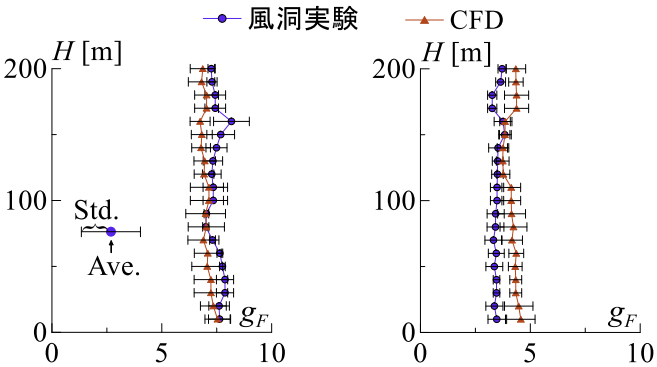
5.4 風力のピークファクター比較

図 6 に風洞実験および CFD の風力のピークファクター g_F を示す。図 6(a)より，風方向における g_{FC} は g_{FT} とほぼ同等であることが確認できる。また図 6(b)より，風直交方向において，g_{FC} は g_{FT} より大きいことが分かる。



(a) 風方向　(b) 風直交方向

図 5 風力の標準偏差比較

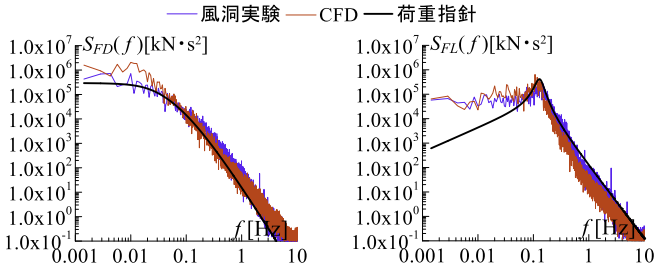


(a) 風方向　(b) 風直交方向

図 6 風力のピークファクター比較

5.5 1 次モーダル風力のパワースペクトル密度

図 7 に風洞実験および CFD の 1 次モーダル風力の PSD（風方向：S_{FD}，風直交方向：S_{FL}）を示す。



(a) 風方向　(b) 風直交方向

図 7 1 次モーダル風力の PSD

図 7(a)より，風方向において CFD による S_{FD} は低周波数帯において上回るものの，風洞実験および荷重指針による S_{FD} と一致することが確認できる。風方向風力の 1 次モーダル風力の標準偏差 $_1\sigma_F$ は，CFD が 186 kN，風洞実験が 121 kN，荷重指針が 99kN であり，本報 5.3 節に示す風方向風力の標準偏差と同様，CFD の値が風洞実験の値を上回った。なお，標準偏差はグラフの台形積分によって算出した分散の平方根である。また図 7(b)より，風直交方向において CFD による S_{FL} は風洞実験による S_{FL} とは全範囲，荷重指針による S_{FL} とピーク以降で概ね一致するこ

とが確認できる。風直交方向の ${}_1\sigma_F$ は，CFD が 158 kN，風洞実験が 145 kN，荷重指針が 167 kN であった。算出方法は風方向と同様である。本報 5.3 節に示す風直交方向風力の標準偏差と異なり，CFD の値が風洞実験の値を上回った。

6. おわりに

本報その 1 では検討に用いる CFD の気流特性について荷重指針および風洞実験の気流特性と，CFD の風力特性について風洞実験の風力特性と比較することで相違点について確認した。その結果，CFD の気流特性は荷重指針および風洞実験と概ね一致するが，CFD の風力特性は風洞実験との差が見られた。本報その 2 ではその 1 で用いた風力を用いて時刻歴応答解析を行い，風洞実験の風力と CFD の風力による応答の比較検証を行い，風力の傾向と応答の傾向の関係性などについての検討を行う。

参考文献および謝辞は，その 2 にまとめて示す。

附録 荷重指針に基づく 1 次モーダル風力の PSD[1),2)]

風方向において，ある振動数 f における $S_{FD}(f)$ は風方向スペクトル係数 $F_D(f)$ および ${}_1\sigma_F$ より次式で算出される。

$$S_{FD}(f) \simeq \frac{F_D(f) \cdot {}_1\sigma_F^2}{f} \tag{A1}$$

ここで $F_D(f)$ は以下のように算出される [1),2)]。

$$F_D(f) = \frac{I_H^2 \cdot F \cdot S_D \cdot \left(0.57 - 0.35\alpha + 2R\sqrt{0.053 - 0.042\alpha}\right)}{C'_g} \tag{A2}$$

ここに，I_H：対象とする建物の基準高さ H における乱れ強さ，α：風速の鉛直分布を表すパラメータ，F：風速のスペクトル係数，S_D：規模係数，α：風速の鉛直分布を表すパラメータ，R：風上面と風下面の風圧の相関係数，C'_g：風方向変動転倒モーメントに関する係数であり，それぞれ，式(A3)~式(A6)のように表す。

$$F = \frac{4 \cdot f \cdot L_H / U_H}{\left\{1 + 71\left(f \cdot L_H / U_H\right)^2\right\}^{5/6}} \tag{A3}$$

$$S_D = \frac{0.9}{\left\{1 + 6\left(f \cdot L_H / U_H\right)^3\right\}^{0.5}\left\{1 + 3\left(f \cdot L_H / U_H\right)\right\}} \tag{A4}$$

$$R = \frac{1}{1 + 20\left(f \cdot B / U_H\right)} \tag{A5}$$

$$C'_g = 2I_H \frac{0.49 - 0.14\alpha}{1 + \left\{0.63\left(\sqrt{B \cdot H} / L_H\right)^{0.56} / \left(H/B\right)^{0.07}\right\}} \tag{A6}$$

ここで，L_H：対象とする建物の基準高さ H における乱れのスケールを表す。続いて，${}_1\sigma_F$ は変動転倒モーメントの標準偏差 σ_L を用いて次のように表すことができる。

$${}_1\sigma_F = \frac{\sigma_L}{H} \tag{A7}$$

σ_L は式(A8) に示す通り，代表高さの速度圧 q_H，見付幅 B および代表高さ H で無次元化すると，変動転倒モーメント係数 C_g' が得られる。

$$C_g' = \frac{\sigma_L}{q_H B H^2} \tag{A8}$$

よって，風方向の ${}_1\sigma_F$ は式(A6)，式(A7)，式(A8)により算出される。風直交方向において，ある振動数 f における $S_{FL}(f)$ は風直交方向スペクトル係数 $F_L(f)$ および ${}_1\sigma_F$ より次式で算出される。

$$S_{FL}(f) \simeq \frac{F_L(f) \cdot {}_1\sigma_F^2}{f} \tag{A9}$$

ここで $F_L(f)$ は式(14)で表される [1),2)]。

$$F_L(f) = \sum_{j=1}^{m} \frac{4\kappa_j\left(1 + 0.6\beta_j\right)}{\pi} \cdot \frac{\left(f/f_{sj}\right)^2}{\left\{1 - \left(f/f_{sj}\right)^2\right\}^2 + 4\beta_j^2\left(f/f_{sj}\right)^2} \tag{A10}$$

ここで，

$$m = \begin{cases} 1 & D/B < 3 \\ 2 & D/B \geq 3 \end{cases} \tag{A11}$$

$$\kappa_1 = 0.85 \qquad \kappa_2 = 0.02 \tag{A12}$$

$$\beta_1 = \frac{(D/B)^4 + 2.3(D/B)^2}{2.4(D/B)^4 - 9.2(D/B)^3 + 18(D/B)^2 + 9.5(D/B) - 0.15} + \frac{0.12}{(D/B)} \tag{A13}$$

$$\beta_2 = \frac{0.28}{(D/B)^{0.34}} \tag{A14}$$

$$f_{s1} = \frac{0.12}{\left\{1 + 0.38(D/B)^2\right\}^{0.89}} \cdot \frac{U_H}{B} \tag{A15}$$

$$f_{s2} = \frac{0.56}{(D/B)^{0.85}} \cdot \frac{U_H}{B} \tag{A16}$$

風直交方向においても式(A7)は同様である。そして，σ_L から式(A8)と同様にして，変動転倒モーメント係数 C_L' を得る。

$$C_L' = \frac{\sigma_L}{q_H B H^2} \tag{A17}$$

荷重指針では C_L' を次のように定義している。

$$C_L' = 0.0082\left(\frac{D}{B}\right)^3 - 0.071\left(\frac{D}{B}\right)^2 + 0.22\left(\frac{D}{B}\right) \tag{A18}$$

よって，風直交方向の ${}_1\sigma_F$ は式(A7)，式(A17)，式(A18)により算出される。

*1 学生会員 東京工業大学 大学院生 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology*1

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士（工学） Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng*2

*3 株式会社竹中工務店 技術研究所 Research & Development Institute, Takenaka Corporation.*3