

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, 曾根孝行, 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, , , pp. 493-496
Citation(English)	, , , 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

## 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—振動			正会員 ○ 沖村将大 <sup>*1</sup>	正会員 佐藤大樹 <sup>*2</sup>
			〃 田中英之 <sup>*3</sup>	〃 曾根孝行 <sup>*3</sup>
超高層建物	風洞実験	CFD	〃 渡井一樹 <sup>*3</sup>	〃 畔上泰彦 <sup>*3</sup>
風応答	多質点系モデル			

## 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<sup>1)</sup>。実際に建築物荷重指針・同解説(2015)<sup>2)</sup>(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<sup>1)</sup>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<sup>3),4)</sup>。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<sup>5)</sup>

使用した模型高さは300 mm, 風向角は,  $B$ に正対する角度を $0^\circ$ とし, 反時計回りに $5^\circ$ 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 <sup>®</sup>
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)) $U_H=10.0$ m/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<sup>1)</sup>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<sup>(例えば文献6)</sup>における別途計算にて生成した。モデル高さは400mm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1000Hz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。

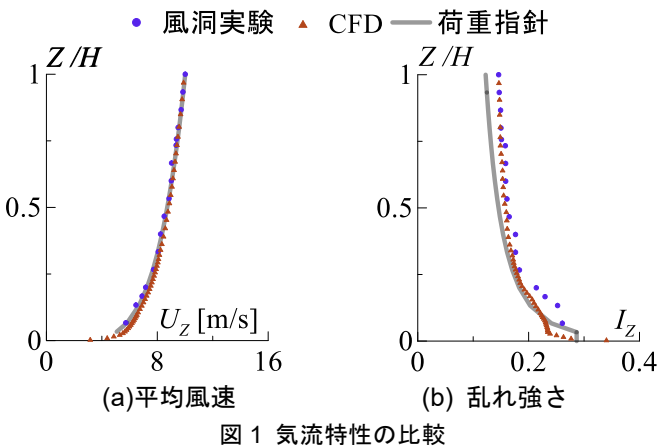


図1 気流特性の比較

同図に併記している荷重指針<sup>2)</sup>に基づき算出した $U_z$ は式(1)で表される。

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

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、 $\alpha$ : 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<sup>2)</sup>に基づき算出した $I_z$ は式(2)で表される。

$$I_z = \begin{cases} 0.1 \left( \frac{Z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z_b \leq Z \leq Z_G \\ 0.1 \left( \frac{Z_b}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z \leq Z_b \end{cases} \quad (2)$$

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<sup>2)</sup>に基づく $F_u(f)$ はカルマン型として、次式で表される。

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

なお、 $\sigma_u$ 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。

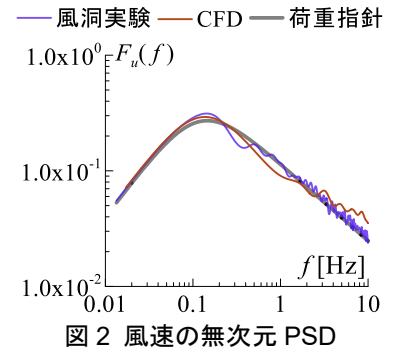


図2 風速の無次元 PSD

#### 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 $0^\circ$ とし、1組につき20質点分の波形を0.05秒刻み14000(700s)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50s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600s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。

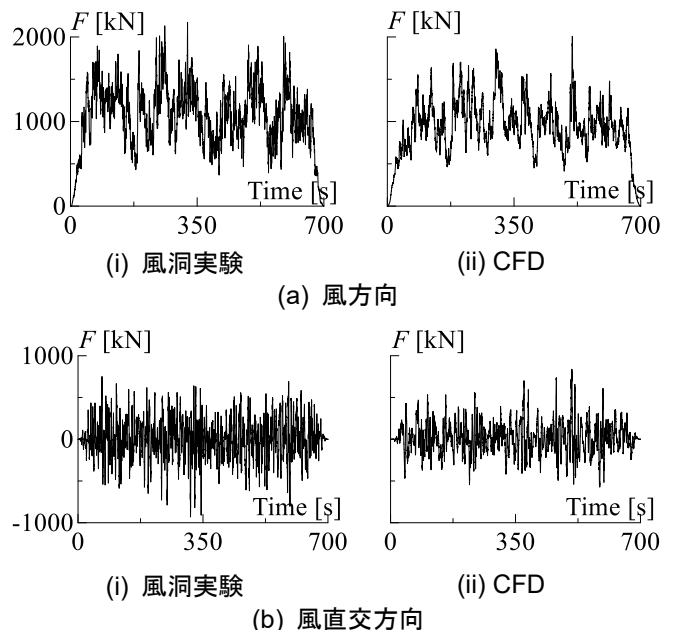


図3 最上層の風力波形

## 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  $\bar{F}$  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  $\bar{C}_D$  を示す。 $i$  層の平均風力係数  $\bar{C}_{Di}$  は平均風力  $\bar{F}_i$  [kN] を速度圧  $q_H$  [kN/m<sup>2</sup>] 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。

$$\bar{C}_{Di} = \frac{\bar{F}_i}{q_H \cdot B Z_i} \quad (3)$$

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

$$\bar{C}_D = C_{pe1} - C_{pe2} \quad (4)$$

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  $k_z$

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

図 4(a)より、 $\bar{F}_C$  は  $\bar{F}_T$  と同等であることが確認できる。また図 4(b)より、 $\bar{C}_{DC}$  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、 $\bar{C}_{DT}$  とは精度よく一致することが確認できる。

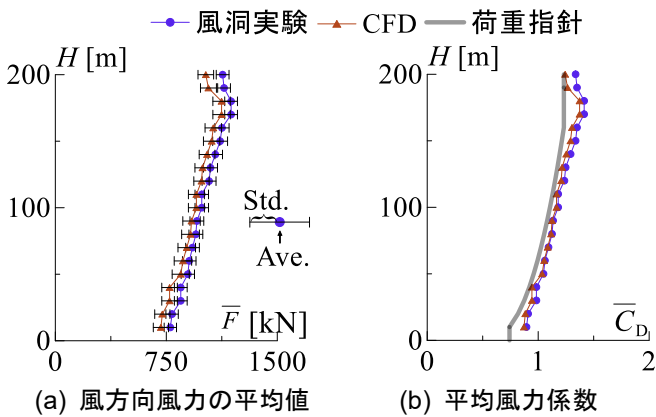


図 4 風方向風力の平均成分の比較

## 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  $\sigma_F$  を示す。図 5(a)より、風方向における  $\sigma_{FC}$  は  $\sigma_{FT}$  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  $\sigma_{FC}$  は  $\sigma_{FT}$  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。

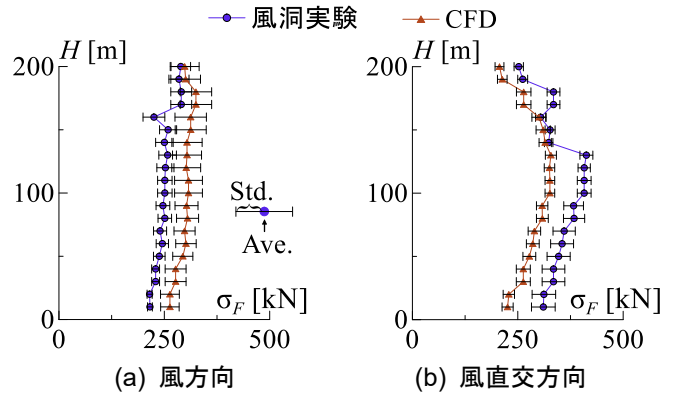


図 5 風力の標準偏差比較

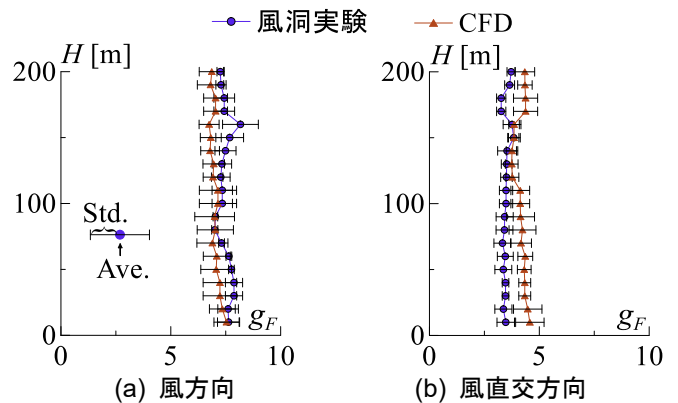


図 6 風力のピークファクター比較

## 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。

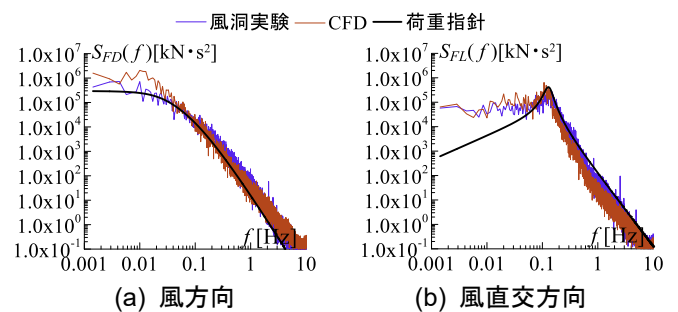


図 7 1 次モーダル風力の PSD

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 99 kN 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<sup>1),2)</sup>

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。

$$S_{FD}(f) \approx \frac{F_D(f) \cdot {}_{1}\sigma_F^2}{f} \quad (A1)$$

ここで $F_D(f)$ は以下のように算出される<sup>1),2)</sup>。

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

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、 $\alpha$ ：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、 $\alpha$ ：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。

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

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

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

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

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 $\sigma_L$ を用いて次のように表すことができる。

$${}_{1}\sigma_F = \frac{\sigma_L}{H} \quad (A7)$$

$\sigma_L$ 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。

$$C'_g = \frac{\sigma_L}{q_H B H^2} \quad (A8)$$

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。

$$S_{FL}(f) \approx \frac{F_L(f) \cdot {}_{1}\sigma_F^2}{f} \quad (A9)$$

ここで $F_L(f)$ は式(14)で表される<sup>1),2)</sup>。

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

ここで、

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

$$\kappa_1 = 0.85 \quad \kappa_2 = 0.02 \quad (A12)$$

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

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

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

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

風直交方向においても式(A7)は同様である。そして、 $\sigma_L$ 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。

$$C'_L = \frac{\sigma_L}{q_H B H^2} \quad (A17)$$

荷重指針では $C'_L$ を次のように定義している。

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

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

\*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 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 Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng\*2

Research & Development Institute, Takenaka Corporation.\*3