

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超高層免震建物の最上階における風応答加速度記録の分析
Title(English)	Analysis of acceleration response based on wind observed records at the top floor of a seismic isolated high-rise building
著者(和文)	平島裕大, 呉嘉瑞, 佐藤大樹, 普後良之, 田村哲郎
Authors(English)	Yudai Hirashima, Kazui Go, Daiki Sato, Yoshiyuki Fugo, Tetsuro Tamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 225-228
Citation(English)	, , , pp. 225-228
発行日 / Pub. date	2020, 3

超高層免震建物の最上階における風応答加速度記録の分析

構造—振動

超高層免震建物 風応答観測記録 居住性能評価

正会員 ○ 平島裕大*¹// 吳嘉瑞*¹// 佐藤大樹*²// 普後良之*³// 田村哲郎*⁴

1. はじめに

近年、免震構造が積極的に採用され、超高層建物への適用も拡大し、今後もさらに増加することが予想される。しかし、超高層建物では地震力に対して相対的に風荷重が大きくなる傾向があり、免震建物ではその傾向が顕著である。また、風外力は地震力と比較して継続時間が長いという特徴があるため、その特徴を十分に考慮した設計が必要である。しかしながら、超高層免震建物の実観測記録について報告された例は国内外で殆ど無く、風に対する応答挙動についての不明な点は数多く残っている。

そのような背景を受けて、筆者らはこれまで、2005年に竣工した東京工業大学すずかけ台キャンパス（横浜市緑区）の扁平な平面形状を有する超高層免震建物であるJ2棟を対象に、強風時の実挙動の分析を実施してきた。J2棟では、複数階における加速度と免震層における変位が常時計測できるシステムが構築されている。筆者ら¹⁾により、扁平な平面形状を有する超高層免震建物では、建物端部の振動に対して十分な検討を行う必要があるという成果が報告された。その後、J2棟に連結する形でJ3棟が竣工し、2棟連結型の超高層免震建物（以後J2-3棟）となった（図1）。同一敷地内においてJ2棟、J3棟の2つの建物の実応答を比較することができる超高層免震建物は極めて稀である。また、扁平な平面形状を有するJ2棟にJ3棟が連結したことによる、風応答の変化については今後解明していく必要がある。

本研究は、J2棟とJ3棟の計測データを照らし合わせることで、連結後の超高層免震建物の応答挙動を解明することを目的としている。本報では、その第一段階としてJ2-3棟の観測の概要および、2018年台風24号と2019年台風15号がJ2-3棟に接近した際のJ3棟最上階における応答加速度の計測結果と、それらを基に振動の分析を行った結果を報告する。

2. 対象建物および観測記録の概要

J2-3棟は地上20階、棟屋2階、高さ91.35mで（図1）、1階と2階の間に免震層を有する超高層免震建物である。上部構造はCFT柱を用いた鉄骨造、基礎および1階は鉄筋コンクリート造である²⁾。図2に、J2-3棟6階の平面図を示す。J2棟とJ3棟は幅13.2mの共有空間を介して接続されており、6、10、14、18階には水平ブレースが設置

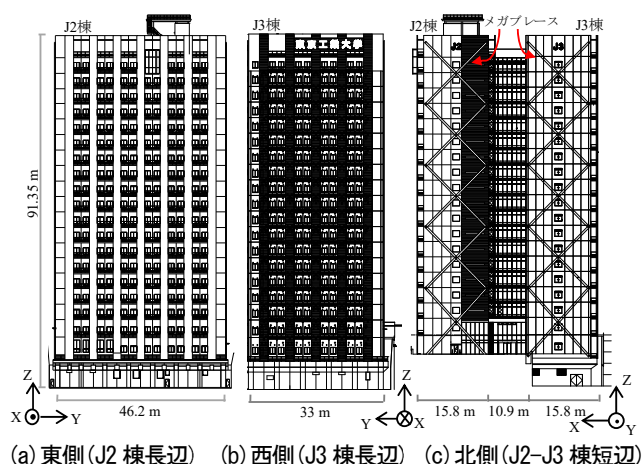


図1 J2-J3棟の立面図

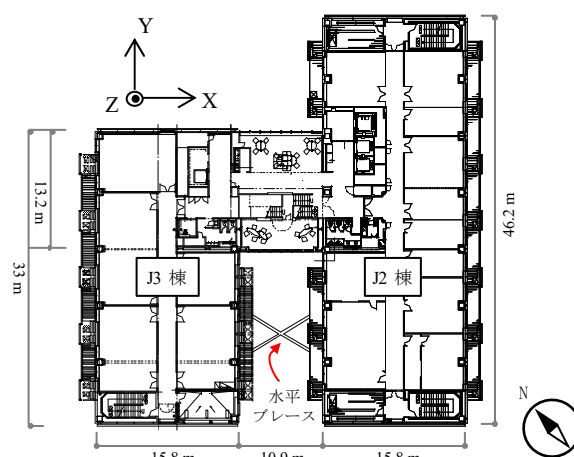


図2 J2-3棟の平面図(6階)

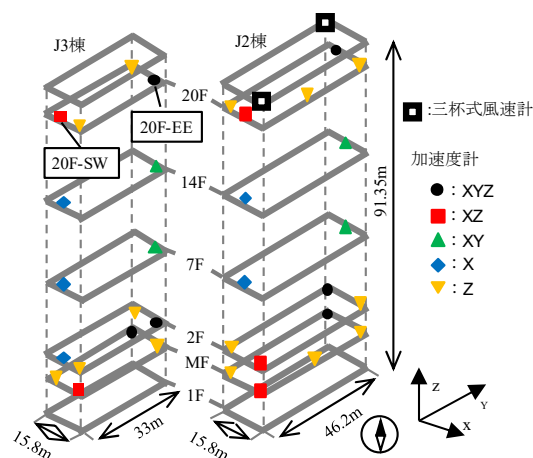


図3 加速度計と風速計の設置位置

されている。J2 棟、J3 棟共に上部構造は短手方向（X 方向）の塔状比が 5 を超える扁平な形状の建物であるため、X 方向には水平剛性を高めるために 4 層を 1 ユニットとして架け渡すメガブレースが設置されている²⁾。

図 3 に、J2-3 棟における加速度計と、J2 棟頂部の風速風向計の設置位置を示す³⁾。今回用いる J3 棟の加速度計は、30Hz のアナログローパスフィルタを介しており、100Hz で収録されている。風速と風向は、J2 棟頂部の北側と南側にそれぞれ設置した三杯式風速計により常時観測されている（図 3）。風速計は、屋上外壁の頂部から約 4m の高さ（地上 97m）に、設置されている⁴⁾。風速データは 3 秒ごとに平均し、瞬間風速として記録される。風向は正 16 方位で記録される。

図 4 に、免震層の免震装置と変位計の設置位置を示す³⁾。免震層には直径 1100 mm（鋼製ダンパー一体型）と 1200 mm の天然ゴム系積層ゴムを設置しており、J2 棟には計 16 基、J3 棟には J2-3 接続部直下に設置した直径 600 mm の滑り支承 2 基を含む計 14 基の免震装置がある。また、J2 棟には降伏変位 31.7 mm の置型鋼製ダンパー 2 基と、オイルダンパー 2 基（X 方向のみ）が別途設置してある。

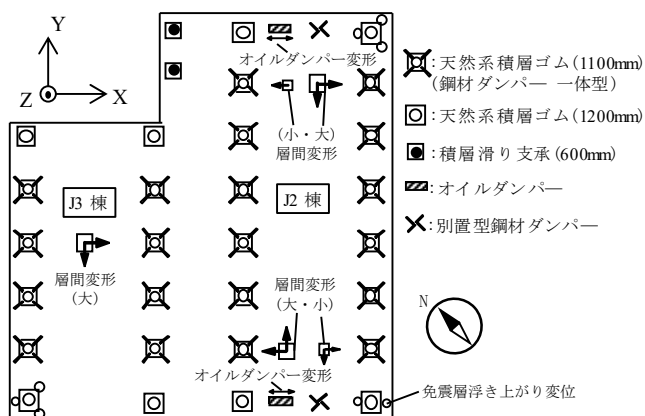


図 4 免震装置と変位計の設置位置

3. 風観測記録概要

本報では、2018 年台風 24 号（2018 年 9 月 30 日～10 月 1 日、以後 T1824）と 2019 年台風 15 号（2019 年 9 月 8 日～9 月 9 日、以後 T1915）の 2 つの台風が J2-3 棟に接近した際の観測記録を用いる。

図 5(a), (b)に、T1824 と T1915 の経路図をそれぞれ示す⁵⁾。図 5 より、2 つの台風はどちらも J2-J3 棟の近辺を通過しているが、J2-3 棟に対して、T1824 では西側、T1915 では東側と通過経路はそれぞれ異なることが確認できる。

図 6(a), (b)に、J2 棟頂部の風速計で観測した風速、風向データを基に 10 分間毎の平均風速、最大瞬間風速、最多風向の時系列変化を示す。図中には、最大平均風速を観測した 10 分間における J2-3 棟と風向きの関係を示している。なお、図 6(a)の T1824 では、北側と南側のそれぞれの風速計で計測した風速のうち大きい方を代表風速とし、

その風速計の風向を最多風向としたが、図 6(b)の T1915 では南側の風速計データが全ての時間帯で欠測していたため、北側の風速計のみのデータを用いている。図 6(a)より、T1824 では 10 月 1 日午前 0 時 30 分に最大平均風速 28.7 m/s、0 時 10 分に最大瞬間風速 51 m/s が観測され、図 6(b)より、T1915 では 9 月 9 日午前 3 時に最大平均風速 27.9 m/s、3 時 10 分に最大瞬間風速 41.4 m/s が観測されたことを確認できる。それぞれの台風の最大平均風速観測時の最多風向は、T1824 で南、T1915 で北北西であり、これらの 2 つの風向きは互いに逆向きであることが確認できる。また、図 6(b)より T1915 の最大平均風速観測時の風向は J3 棟の長辺方向に正対することが確認できる。最大平均風速が 30 m/s 近い大きな値をとり、風向の違いによる応答差を確認するために、本報では T1824 と T1915 の 2 つの台風を採用した。

荷重指針・同解説⁶⁾より算出した J2 棟風速計設置高さにおける再現期間 1 年風速は 24.8 m/s であり、両台風の最大平均風速は、荷重指針により求めた再現期間 1 年風速を上回ることが示される。

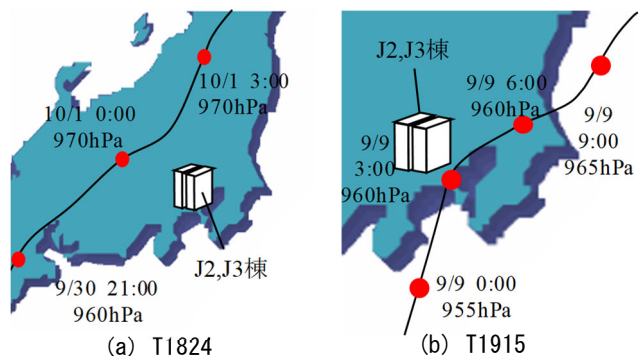


図 5 各台風の経路図⁵⁾

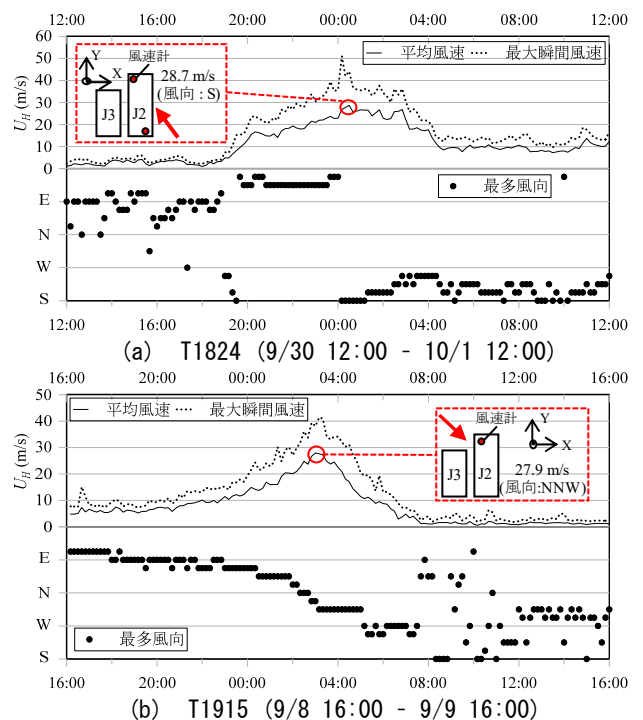


図 6 各台風の風速・風向

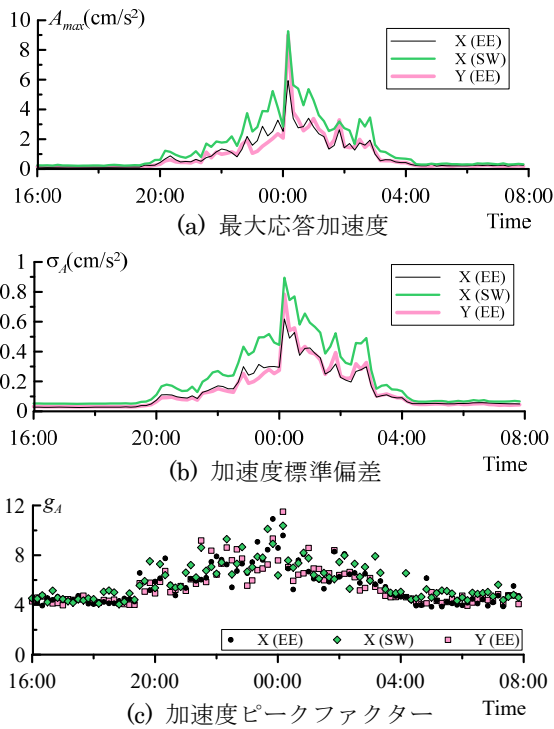


図 7 T1824 時の 20 階各加速度計-時系列変化
(9/30 16:00 -10/1 8:00)

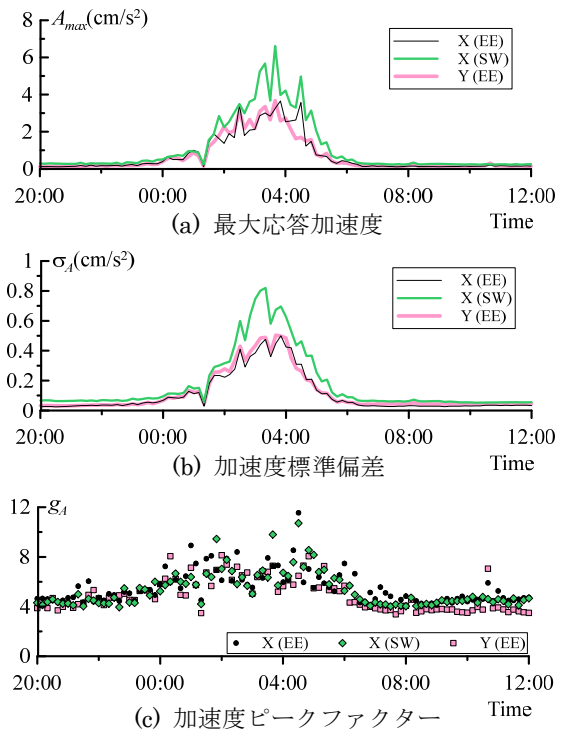


図 8 T1915 時の 20 階各加速度計-時系列変化
(9/8 20:00 -9/9 12:00)

4. 風応答特性の分析

4.1 加速度の応答特性

両台風接近時、J2 棟の全ての加速度・変位データと J3 棟の複数階における加速度データの欠測が確認された。そのため、本報では終始計測できた J3 棟の 20 階の 3 つの加速度計 (X(E), X(S), Y(E)) のデータを用いる (図 3)。J3 棟の加速度計で計測した生データは、10 分間毎にデータサーバに保存されている。10 分間毎の加速度生データに対して、10 分間の全データの平均値を除き、そのデータに対して更に 0.1 ~ 30 Hz の矩型のバンドパスフィルターをかける。

図 7(a)~(c)および図 8(a)~(c)に、それぞれ T1824 と T1915 における 20 階の 3 つの加速度計の最大応答加速度 A_{max} 、加速度標準偏差 σ_A 、ピークファクター g_A の時系列変化を示す。加速度ピークファクターは 10 分間の最大加速度を 10 分間の標準偏差で除すことで求められる。表 1 には、20 階の各加速度計における加速度最大値 A_{max} と計測時刻をそれぞれ示している。表 1 より、加速度最大値 A_{max} の大きさは位置によって差が生じることが確認できる。また、T1824 では最大瞬間風速を観測した時刻帯と加速度最大値 A_{max} を計測した時刻帯が概ね一致するのに対し、T1915 では最大平均風速、最大瞬間風速を観測した時刻帯と加速度最大値 A_{max} を計測した時刻帯には 30 分以上の差が生じている。図 7(a), (b) の T1824 より、Y(E) は長時間に渡り 3 つの加速度計の中で最も大きく応答している。また、最大瞬間風速が計測された 0 時 10 分に、3 つの加速度計全てにおいて、応答が局所的に大きくなっており、

表 1 各台風の 20 階加速度最大値 A_{max} (cm/s²) と計測時

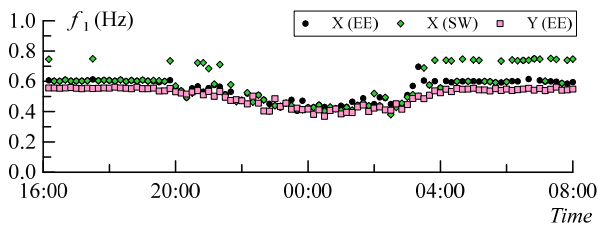
加速度計	T1824	T1915
X(E)	5.93 (10/1 0:10 - 0:20)	3.66 (9/9 3:50 - 4:00)
X(S)	9.27 (10/1 0:10 - 0:20)	6.61 (9/9 3:40 - 3:50)
Y(E)	9.02 (10/1 0:10 - 0:20)	3.68 (9/9 3:40 - 3:50)

特に X(S) の応答変化が顕著であることが確認できる。図 8(a), (b) の T1915 より、各加速度計の応答差は全体的に小さく、X(S) のみ T1824 と同様に応答が局所的に増大している。以上より、加速度応答の大きさと時系列変化の様子は位置により異なる。また、各位置の加速度応答の時系列変化の様子はそれぞれの台風において差が生じることが確認できる。

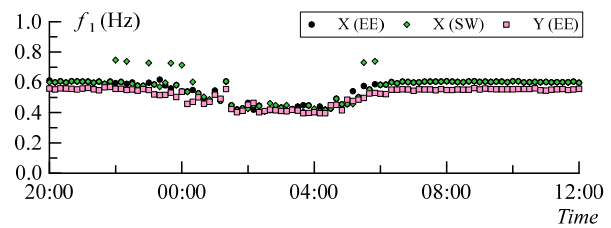
図 7(c), 図 8(c) より、T1824 と T1915 共に、台風通過前と通過後の加速度応答が小さくなる時間帯において、加速度ピークファクターは 3~4 程度の値をとり、台風が接近し、加速度応答が大きくなる時間帯においては 4~8 と大きな値をとることが確認できる。また、両台風において加速度応答が大きくなる時間帯の加速度ピークファクターは、T1824 の方が T1915 と比較して大きな値をとることが確認できる。

4.2 風応答時における固有振動数の変化

図 9 に、20 階の 3 つの加速度計における 1 次固有振動数の時系列変化を示す。1 次固有振動数 f_1 は 10 分間の加速度パワースペクトル密度のスペクトルピークにおける振動数とした。T1824 と T1915 共に、3 つの加速度計全てにおいて、台風通過前と通過後の加速度応答が小さい時間帯においては、固有振動数が 0.6 Hz 程度と概ね一定の



(a) 2018 年台風 24 号 (9/30 16:00 - 10/1 8:00)



(b) 2019 年台風 15 号 (9/8 20:00 - 9/9 12:00)

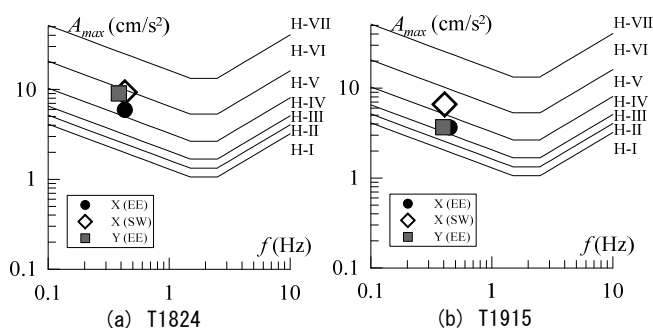
図 9 20 階各加速度計の固有振動数の時系列変化

値を維持するのに対して、加速度応答が大きくなる時間帯においては、固有振動数が 0.4 Hz 程度となり、2/3 程度低下することが確認できる。

4.3 居住性能評価

表 1 に示した J3 棟 20 階の 3 つの加速度計における加速度最大値 A_{max} と、その 10 分間における 1 次固有振動数 f_1 を用いて、J3 棟 20 階の居住性能評価を行う。加速度最大値 A_{max} と 1 次固有振動数 f_1 を居住性能評価規準・同解説^{*)}に示される水平振動に関する性能評価曲線に照らし合わせることで、その振動レベルを H-I から H-VII の計 7 つの評価レベルに区分けすることができる。各評価レベルは不安感、不快、知覚の 3 つの項目と対応しており、これらの項目により居住性能が評価される。

図 10 に、表 1 に示した 10 分間の加速度最大値 A_{max} と 1 次固有振動数 f_1 を性能評価曲線に照らし合わせた結果を示す。図 10(a), (b) より、T1915 時の X(EE) と Y(EE) は H-IV に、T1824 時の全加速度計と T1915 時の X(SW) は評価レベル H-V に区分けられた。H-IV の不安感は、”あまり不安を感じない”，不快は、”あまり不快でない”，知覚は”ほとんどの人が知覚する”である。H-V の不安感、不快の 2 つの項目は H-IV と同じ評価であるが、知覚に関する評価は、”大半の人が知覚する”である。これより、J3 棟 20 階の 3 つの加速度計でそれぞれ加速度最大値 A_{max} を計測した 10 分間における 20 階の振動の評価レベルは、両台風において概ね等しく、不安感や不快さはあまり感じないものの、知覚率が高いことが示された。



(a) T1824 (b) T1915
図 10 各台風の 20 階における居住性能評価

5. まとめ

本報では、T1824 と T1915 が超高層免震建物である J2-3 棟に接近した際の実測記録と、それを基に分析を行った結果を示した。以下に本報で得られた知見を示す。

- (1) 加速度応答の大きさと時系列変化の様子は位置により異なる。また、各位置の加速度応答の時系列変化の様子はそれぞれの台風で差が生じる。
- (2) 1 次固有振動数 f_1 は応答の大小により変化し、台風接近前と通過後の応答の小さい時間帯は 0.6 Hz 程度の値を維持するのに対し、台風接近時の応答が大きい時間帯は 0.4 Hz 程度と 2/3 程度低下する。
- (3) J3 棟 20 階の居住性能評価を行った結果、不安さや不快さはあまり感じないものの、振動の知覚率が高いことが示された。

謝辞

本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムおよび公益財団方針大林財団より助成を受けました。本研究で用いた J2 棟の観測データは、東京工業大学 GCOE プログラムから提供して頂いたものであります。また、J2-風応答観測研究会において、風工学研究所の勝村章氏より貴重なご意見を多数頂きました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 村上智一, 佐藤大樹, 田村哲郎, 普後良之, 吉江慶祐, 笠井和彦, 佐藤利昭, 北村春幸: 強風時の観測記録に基づく超高層免震建物の実挙動の分析, 構造工学論文集, 第 62 巻, pp.329-337, 2016.3
- 2) 菊地岳志, 藤森智, 竹内徹, 和田章: メガブレースを用いた超高層免震鋼構造建築物の設計, 日本建築学会技術報告集, 第 22 号, pp.217-222, 2005.12
- 3) 大木洋司, 山下忠道, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章: 超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み, 日本建築学会技術報告集, 第 21 号, pp.73-77, 2005.6
- 4) 佐藤大樹, 鈴木勇人, 田村哲郎, 普後良之, 中村修, 笠井和彦, 北村春幸: 超高層免震建物の観測記録に基づく風応答の分析, 風工学シンポジウム, pp.251-256, 2012.12
- 5) ウェザーニュース: <http://weathernews.jp/> (2018.9.30 - 10.1, 2019.9.8 - 9.9 参照)
- 6) 日本建築学会: 建築荷重指針同解説, 2015.2
- 7) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018.11

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 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) 風工学研究所

*4 東京工業大学環境・社会理工学院 教授・博士 (工学)

*Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology *1

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

* Wind Engineering Institute *3

* Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. *4