

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	観測記録に基づく2棟連結型超高層免震建物の風応答挙動の分析
Title(English)	Analysis of wind response behavior of two conjoined seismic isolated high-rise buildings based on observation records
著者(和文)	平島裕大, 佐藤大樹, 普後良之, 田村哲郎, 呉嘉瑞, 柳屋早延
Authors(English)	Yudai Hirashima, Daiki Sato, Yoshiyuki Fugo, Tetsuro Tamura, Kazui Go, Sono Yanagiya
出典(和文)	風工学シンポジウム講演梗概集, , No. 26, pp. 126-131
Citation(English)	National Symposium on Wind Engineering Proceeding, , No. 26, pp. 126-131
発行日 / Pub. date	2020, 11

## 観測記録に基づく2棟連結型超高層免震建物の風応答挙動の分析

Analysis of wind response behavior of two conjoined seismic  
isolated high-rise buildings based on observation records

平島裕大<sup>1)</sup> 佐藤大樹<sup>2)</sup> 普後良之<sup>3)</sup> 田村哲郎<sup>4)</sup> 呉嘉瑞<sup>5)</sup> 柳屋早延<sup>6)</sup>  
Yudai HIRASHIMA<sup>1)</sup>, Daiki SAT<sup>2)</sup>, Yoshiyuki FUGO<sup>3)</sup>,  
Tetsuro TAMURA<sup>4)</sup>, Jiarui WU<sup>5)</sup>, and Sono YANAGIYA<sup>6)</sup>

### ABSTRACT

Recently, seismic isolation structures are becoming widely adopted for high-rise buildings but there are only few studies on the wind response of such buildings. The authors aim to address this matter by studying the actual behavior of two conjoined seismically isolated high-rise buildings (J2-3) based on wind response observation records. This complex-shaped conjoined buildings were constructed in two phases: (1) the flat-shaped J2 building was completed earlier, and (2) later followed by the construction of the conjoining J3 building. The wind response record for the J2 building alone in phase (1) has been reported in the past. However, actual wind response of the completed J2-3 building is not yet well investigated. This study aims to grasp the influences of conjoining buildings and the change of the building shape on wind response behavior. In this paper, as the preliminary stage, the authors report the detailed response analysis of the conjoined buildings during typhoon.

Key Words: Wind response observation, Seismic isolated high-rise building, Typhoon record, Peak factor

### 1. はじめに

近年、超高層建物に免震構造が積極的に採用されるようになり、風揺れに対する応答評価が重要となっている。しかし、超高層免震建物の実観測記録が報告された例は少なく、風に対する応答挙動には不明な点が数多く残る。

そのような背景を受けて、佐藤ら<sup>1)</sup>や大熊ら<sup>2)</sup>は超高層および中層の免震建物における強風時の実挙動を分析している。これらの免震建物の観測記録に基づくピークファクターは4～8程度の値となることが報告されている。耐風設計時においては、風外力および応答が定常（ランダム）ガウス過程であることを前提とした式によりピークファクターは3～3.5程度の値が用いられる<sup>3)</sup>。それに対して、上述した免震建物で観測された値（4～8程度）は設計時の値（3～3.5程度）と比較して大きな値となる。

本研究は、東京工業大学すずかけ台キャンパスに建つ2棟連結型超高層免震建物（J2-3棟：図1）を対象に、その風応答挙動を解明することを目的としており、文献4)では速報的にT1824号とT1915号接近時の建

1), 5), 6) 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生, 元大学院生, 研究生 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

2), 4) 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授, 教授 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

3) (株)風工学研究所 (〒401-0304 山梨県南都留郡富士河口湖町河口 395)

物最上階における加速度応答結果を報告した。本報では、これらの台風時における J2-3 棟の加速度応答結果とピークファクターについて詳細に分析を行い、観測値に基づく値が設計時の値と乖離する要因を追及した結果を報告する。



図 1 J2-3 棟の外観

## 2. 建物および風応答観測概要

### 2.1 建物および観測システムの概要

J2-3 棟は地上 20 階、棟屋 2 階、高さ 91.35 m で (図 2)、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。J2 棟と J3 棟は幅 13.2 m の共有空間を介して連結されており、6, 10, 14, 18 階には水平ブレースが設置されている。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<sup>5)</sup>。

J2-3 棟では、両棟の免震階、2 階、7 階、14 階、20 階において常時、加速度が計測されている。本報で扱う J3 棟の加速度計は、30 Hz のアナログローパスフィルタを介しており、100 Hz で収録されている。図 3 に、J3 棟の 20 階における加速度計設置位置を示す。図 3 に示すように、J3 棟 20 階では、X 方向 2 成分 (X(EЕ), X(SW)) と Y 方向 1 成分 (Y(EЕ)) の計 3 成分が計測されている。

風速と風向は、J2 棟屋上階の北側と南側にそれぞれ設置された三杯式風速計により常時観測されている。風速計は、屋上外壁の頂部から約 4 m の高さ (地上 97 m) に設置されている<sup>5)</sup>。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。

### 2.2 風観測記録の概要

図 4(a), (b) に、T1824 と T1915 の台風の目の経路をそれぞれ示す<sup>6)</sup>。図 5(a), (b) に、J2 棟頂部の風速計で観測された風速、風向データを基に平均風速、瞬間風速、最多風向の時系列変化を示し、風速計設置位置と最大平均風速を計測した 10 分間の最多風向を併記する。なお、図 5(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。図 5(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、北側の風速計のデータのみを用いる。

図 4 より、J2-3 棟に対して T1824 では西側、T1915 では東側を通過している。また、T1915 は T1824 と比較して台風の目が建物の近くを通過していることが分かる。この経路の違いにより、風速・風向き変化が大きく異なり、T1824 では 10 m/s 以上の風速が一日にかけて観測され、風向が SE から SW に時計回りに 90° 変化する。それに対して、T1915 では、10 m/s 以上の風速が観測された 6 時間程度の間、風向が E から W に反時計回りに 180° 近く変化している。また、図 5(a), (b) にそれぞれ示した最大平均風速観測時の風向も T1824 で南、T1915 で北北西と概ね逆向きであることが確認できる。最大平均風速の値は、T1824 で 28.7 m/s、T1915 で 27.9 m/s であり、最大瞬間風速は T1824 で 51 m/s、T1915 で 41.4 m/s であった。また、文献 7) 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、この風速を上回ることが分かる。

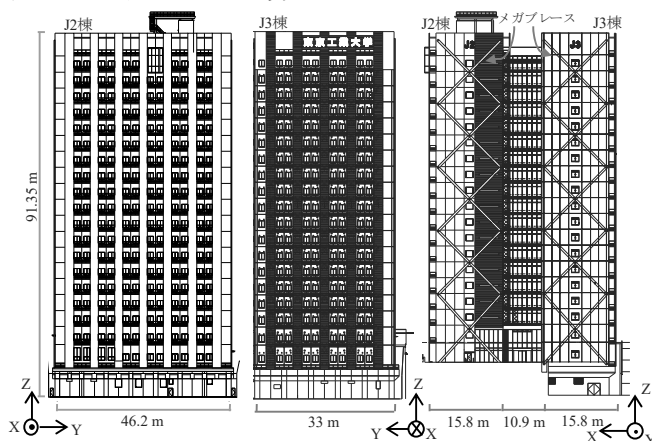


図 2 J2-3 棟立面

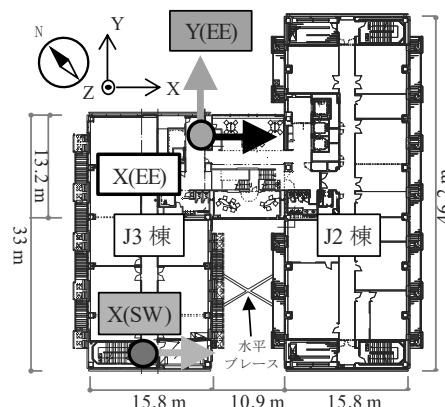


図 3 J3 棟 20 階加速度計設置位置



図4 各台風経路<sup>6)</sup>

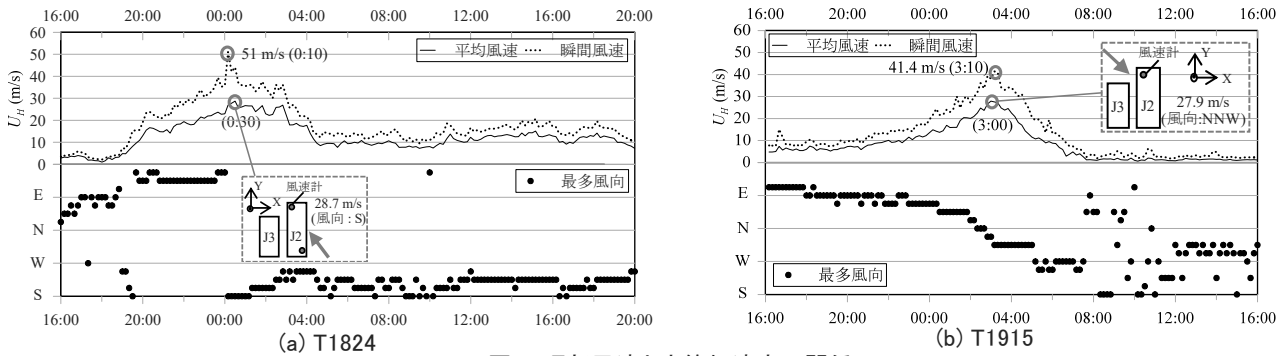


図5 頂部風速と応答加速度の関係

### 3. 建物最上階における加速度応答記録の分析

#### 3.1 加速度記録のデータ処理方法

本報では、J3 棟 20 階の 3 つの加速度計 (X(E), X(SW), Y(E)) のデータを用いる。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。図 6 に、T1824 時の 3 つの加速度計全てにおいて加速度最大値  $A_{max}$  を計測した 10 分間のパワースペクトル密度を示す。図 6 より、全加速度計において、1.0 Hz 付近に 1 次と 2 次モードの谷が確認される。応答の 1 次モードに着目するため、各加速度計の生データに対して、その平均値を除いたうえで、0.1 ~ 1.0 Hz の矩型のバンドパスフィルター処理を行う。

#### 3.2 J3 棟 20 階の加速度応答特性

図 7(a), (b) に、T1824 と T1915 において 20 階の 3 つの加速度計で計測された 10 分間の最大応答加速度  $A_{max}$  の時系列変化をそれぞれ示す。図 7 中には、各加速度計における最大加速度計測時の最多風向を併記しており、両台風の最大応答時の風向は概ね逆向きであることが確認できる。図 8(a), (b) に、加速度ピークファクター  $g_A$  の時系列変化を示す。 $g_A$  は  $A_{max}$  を 10 分間の加速度標準偏差  $\sigma_A$  で除すことで求めている。表 1 に、各加速度計の加速度最大値  $A_{max}$  と計測時刻帯を示す。

図 7 より、 $A_{max}$  の時系列変化は、図 5 に示した最大平均風速の時系列変化の様子と概ね一致していることが確認できる。また、各加速度計で加速度の最大値を計測した時間における風向は両台風共に Y 軸方向に概ね正対しており、表 1 より、その値は全加速度計において T1824 の方が T1915 の時より大きい。

図 8 より、T1824 と T1915 共に、図 5 の J2 棟屋上階における平均風速が 10 m/s 以下となる微風時において、加速度ピークファクターは 4 程度の値をとる。一方で、平均風速が 10 m/s 以上となり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。

図 9 に、両台風で最大応答加速度が計測された 10 分間における X(E) と Y(E) の応答加速度リサージュをそれぞれ示し、その時の最多風向と計測位置を併記する。図 9(a), (b) より、両台風時において風直交方向の振動が風方向より大きく、風方向毎の応答の差を確認できる。

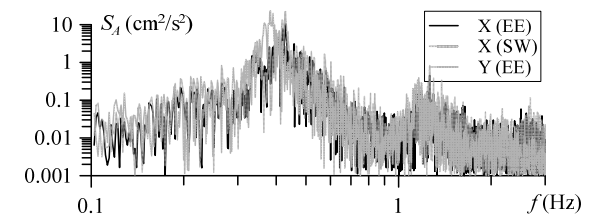
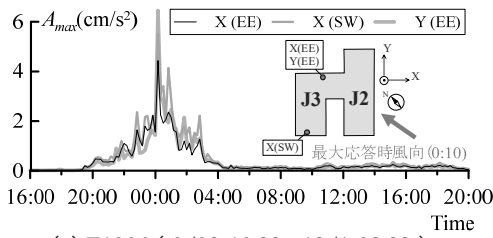


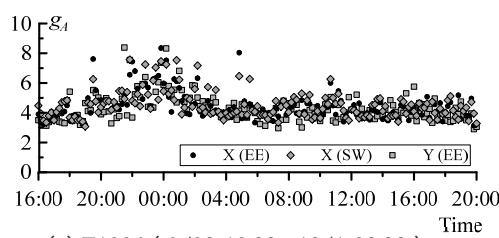
図6 パワースペクトル密度(T1824・最大応答10分間)

表 1 各台風の 20 階加速度最大値  $A_{max}$ ( $\text{cm/s}^2$ ) と計測時刻

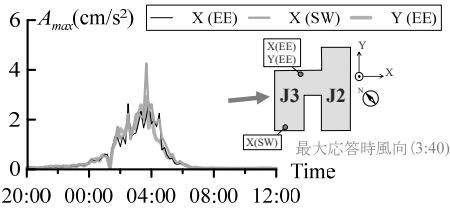
加速度計	T1824	T1915
X(E)	4.44 (10/1 0:10 - 0:20)	2.68 (9/9 3:50 - 4:00)
X(SW)	5.53 (10/1 0:10 - 0:20)	4.26 (9/9 3:40 - 3:50)
Y(E)	6.46 (10/1 0:10 - 0:20)	2.92 (9/9 3:40 - 3:50)



(a) T1824 ( 9/30 16:00 -10/1 20:00 )

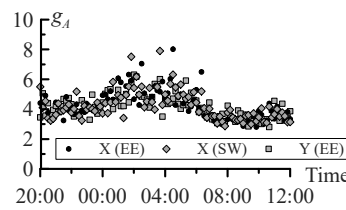


(a) T1824 ( 9/30 16:00 -10/1 20:00 )



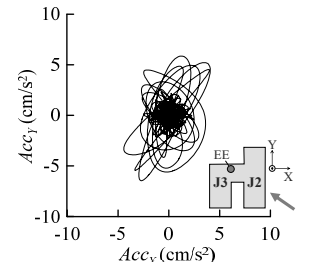
(b) T1915 ( 9/8 20:00 -9/9 12:00 )

図 7 最大応答加速度の時系列変化

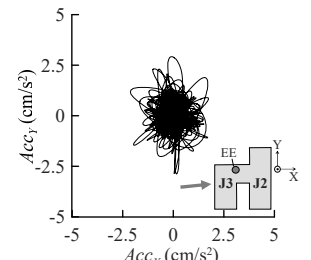


(b) T1915 ( 9/8 20:00 -9/9 12:00 )

図 8 ピークファクターの時系列変化



(a) T1824 ( 10/1 0:10 - 0:20 )



(b) T1915 ( 9/9 3:40 - 3:50 )

図 9 応答加速度リサーチ

#### 4. 加速度ピークファクターの検討

##### 4.1 1分間毎に分割した場合の標準偏差の評価

本節では、3.1節のデータ処理を施した T1824 の X(SW)における 10 分間のデータを 1 分間に分割し、1 分間毎の標準偏差を調査する。本節において、1 分間毎、10 分間毎で算出した標準偏差をそれぞれ  $\sigma_1$ 、 $\sigma_{10}$  とする。なお本節では例として、加速度最大値  $A_{max}$  およびピークファクター  $g_A$  の値のレベルの異なる 2 つの時間帯について示す。Time-A (2019 年 9 月 30 日 20 時 00 分 ~ 20 時 10 分) は  $g_A$  の小さい時間帯である。一方で、Time-B (10 月 1 日 0 時 10 分 ~ 0 時 20 分) は最大応答値を示し、 $g_A$  の大きい時間帯である。各時間帯の  $A_{max}$  と  $g_A$  は、Time-A において  $A_{max} = 0.304 \text{ cm/s}^2$ 、 $g_A = 4.38$  であり、Time-B においては  $A_{max} = 5.53 \text{ cm/s}^2$ 、 $g_A = 7.25$  である。

図 10(a), (b)に各時間帯における加速度時刻歴波形、図 11(a), (b)に 1 分間毎の標準偏差の時系列変化をそれぞれ示す。図 11(a), (b)には  $\sigma_1$  の平均値  $\mu_{\sigma_1}$  (赤破線) と 10 分間算出値  $\sigma_{10}$  (青実線) を併記し、 $\sigma_1$  の変動係数  $CV_{\sigma_1}$  の値も記す。

まず、各時間帯の波形の特徴を述べる。図 10(a)の Time-A では概ね同じレベルの応答が 10 分間に渡って続いている。一方、図 10(b)の Time-B では 240 s ~ 360 s にかけて応答が局所的に増大し、10 分間中の応答レベルが大きく変化している。次に、1 分間毎に評価した標準偏差について述べる。図 11(a), (b)より、両時間帯共に  $\sigma_1$  は 1 分間毎に変動しているが、特に図 11(b)の Time-B (最大応答時) におけるバラつきは顕著であり、Time-A と比較して Time-B の変動係数  $CV_{\sigma_1}$  は 4 倍程度大きい。上述したように Time-A、Time-B にお

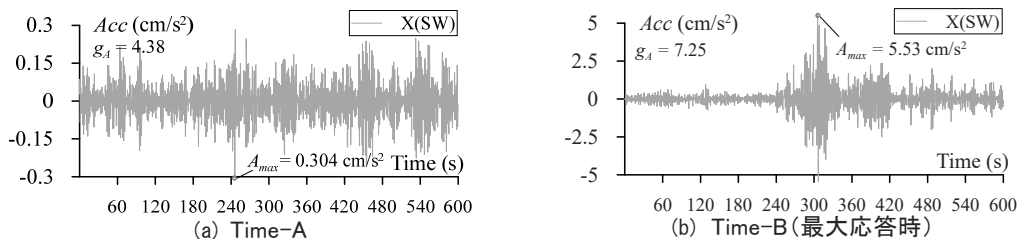


図 10 加速度時刻歴波形(T1824)

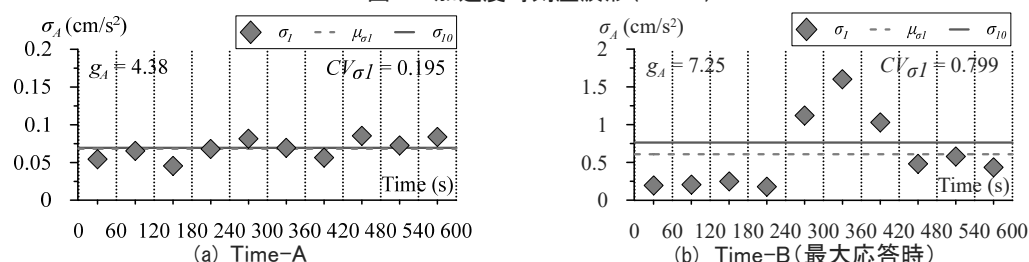


図 11 1分間毎の標準偏差(T1824)

ける  $g_A$  はそれぞれ 4.38, 7.25 であり, 1 分間毎の標準偏差のバラつきが大きくなる (応答の非定常性が顕著になる) とピークファクターが増大する傾向にあることが確認された. 次節では応答の非定常性と  $g_A$  の関係性を分析するため, 振幅分布の正規分布との比較を行う. なお, 今回別途 1 分間毎のピークファクター (以下  $g_i$  とする) を評価した結果,  $g_i$  は 1 分間毎で概ね一定の値をとることを確認した (付録).

#### 4. 2 10分間加速度データと正規分布の比較

$q(t)$  を次式により定義する.

$$q(t) = \frac{A(t)}{\sigma_A} \quad (1)$$

ここで,  $A(t)$  は 10 分間の加速度時刻歴データ,  $\sigma_A$  は 10 分間の加速度標準偏差とし, 10 分間中の  $q(t)$  の最大値がピークファクター  $g_A$  である. 本節では, 10 分間で全 60000 個の  $q(t)$  を振幅レベル毎に分けて (階級値を  $q_i$  とする), 式(2)より求まる正規分布 (ガウス分布) の確率密度関数  $f_n$  と比較を行う.

$$f_n(q_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_q^2}} e^{-\frac{(q_i - \mu_q)^2}{2\sigma_q^2}} \quad (2)$$

ここで  $\mu_q, \sigma_q$  はそれぞれ,  $q(t)$  の 10 分間における平均, 標準偏差とする.

本節ではそれぞれの台風時において最大応答 10 分間と, その 2 時間前と 2 時間後を調査対象時間とする. 図 12, 13 に両台風時の各時間帯における分布の比較を示し, 加速度最大値  $A_{max}$ , 観測記録の頻度分布と正規分布の誤差を表す残差二乗和 (RSS) および 10 分間で算出したピークファクター  $g_A$  を併記している. RSS は式(3)より求まり<sup>8)</sup>, 0 に近い程誤差が小さいことを示す.

$$RSS = \sum_{i=1}^N (f_o(q_i) - f_n(q_i))^2 \quad (3)$$

ここで,  $i$  番目の階級値  $q_i$  における観測記録の確率密度を  $f_o(q_i)$ , 正規密度関数を  $f_n(q_i)$  とする. 図 12(b), 13(b) より, 最大応答時の分布は正規分布と大きく乖離していることが確認できる. また, 最大応答の 2 時間前・後の分布は正規分布に概ね乗っており, RSS 値より最大応答時と比較して誤差が小さいことが分かる.

図 14 に RSS とピークファクターの関係性をプロットし, 最小二乗法により導いた対数近似曲線を併記する. 表 3 に, 図 14 中に併記した近似曲線の決定係数  $R^2$  を示す. なお, T1824 と T1915 の各 2 日間のうち, J2 棟屋上階における平均風速が 10 m/s 以上となる時間帯 (全 148 個) をプロット対象時間とする. 図 14 より, プロットの概形が右肩上がりとなることが分かる. また, 表 3 の  $R^2$  より, 全ての加速度計で概ね 0.4 ~ 0.5 程度であり, 近似の精度として高くはないが, RSS と  $g_A$  が対数比例の関係性にあることが確認できる.

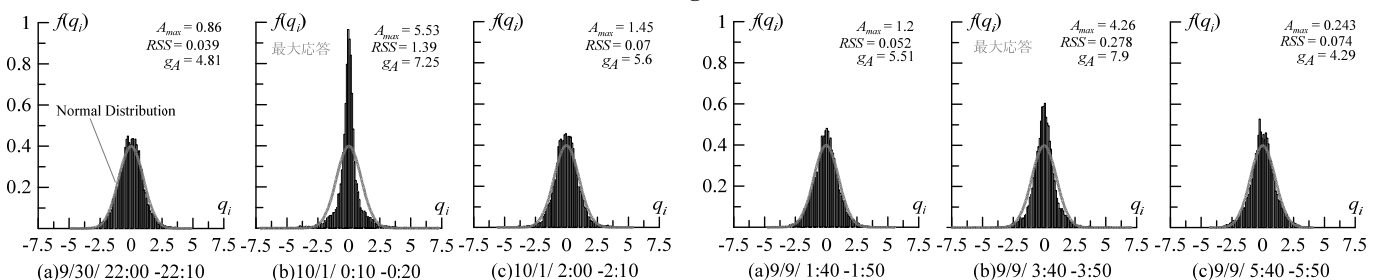


図 12 各時間帯の頻度分布(T1824)

図 13 各時間帯の頻度分布(T1915)

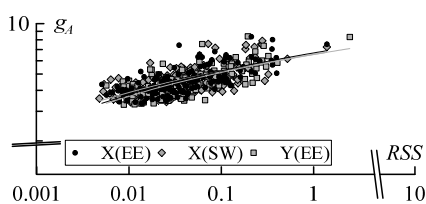


図 14 RSS と  $g_A$  の関係 (T1824・T1915)

表 3 決定係数  $R^2$

加速度計	X(E)	X(SW)	Y(E)
決定係数 $R^2$	0.48	0.43	0.48

## 5. まとめ

本報では、2 棟連結型超高層免震建物において台風が接近した際の加速度応答記録を基に、建物最上階における加速度のピークファクターについて詳細に検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 台風が接近し建物頂部の平均風速が 10 m / s 以上となる時間帯においては、加速度のピークファクターが 4~8 程度となる。
- (2) 10 分間の加速度応答を 1 分間毎に区別した結果、標準偏差は 1 分間毎で変動しており、そのバラつきが大きくなる程、ピークファクターは増大する傾向にある。
- (3) 加速度記録の振幅頻度分布を正規確率密度関数と比較した結果、加速度応答が大きくなる時間帯の分布は正規分布と大きく乖離する。また、観測記録と正規分布の誤差を残差二乗和 (RSS) で評価し、RSS とピークファクターの関係を分析した結果、両者は対数比例の関係にあることを確認した。

## 謝辞

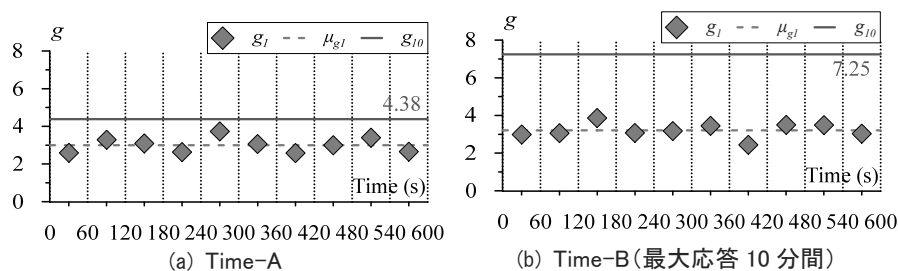
本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムおよび公益財団法人大林財団より助成を受けました。本研究で用いた J2 棟の観測データは、東京工業大学 GCOE プログラムから提供して頂いたものであります。また、J2-風応答観測研究会において、日建設計の吉江慶祐氏と風工学研究所の勝村章氏より貴重なご意見を多数頂きました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 普後良之, 佐藤大樹, 田村哲郎, 中村修, 勝村章, 笠井和彦: 観測記録に基づく超高層免震建物の風応答評価 その 4 長期観測記録による応答加速度の非超過確率分布予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.199-200, 2013.8
- 2) 大熊武司, 安井八紀, 下村祥一, 小賀伸一: 23 号館の強風時実挙動観測, 地震・台風災害の制御・低減に関するシンポジウム, pp.69-80, 2002.3
- 3) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, pp.123-130, 2004.6
- 4) 平島裕大, 佐藤大樹, 呉嘉瑞, 普後良之, 田村哲郎: 2 棟連結型超高層免震建物の強風観測記録に基づく実応答挙動の分析 その 2 建物最上階における加速度応答記録の分析と居住性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, 20037, pp.71-72, 2020.9
- 5) 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
- 6) ウェザーニュース:<http://weathernews.jp/> (2018.9.30 - 10.1 , 2019.9.8 - 9.9 参照)
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 8) 東京書籍: 統計・OR 活用辞典, p.174, 1984

## 付録

付図 1(a), (b)に Time-A および Time-B (4.1 節) の 1 分間毎に評価したピークファクター  $g_l$  と 10 分間で算出したピークファクター  $g_{10}$  ( $=g_A$ ) を示す。また図中の破線は  $g_l$  の平均値 ( $\mu_{g_l}$ ) である。図より、1 分間毎のピークファクターは概ね一定の値となることが分かる。



付図 1 1 分間毎のピークファクター(T1824)