

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	実在建物における平均風力推定の試みと風洞実験との比較による一考察
Title(English)	ESTIMATING THE MEAN WIND FORCE IN REAL BUILDING AND COMPARING THE WIND TUNNEL TEST
著者(和文)	普後良之, 佐藤大樹, 田村哲郎, 勝村章
Authors(English)	Yoshiyuki Fugo, Daiki Sato, Tetsuro Tamura, Akira Katamura
出典(和文)	第25回風工学シンポジウム論文集, Vol. 25, , pp. 271-276
Citation(English)	PROCEEDINGS OF THE 25th NATIONAL SYMPOSIUM ON WIND ENGINEERING, Vol. 25, , pp. 271-276
発行日 / Pub. date	2018, 12

実在建物における平均風力推定の試みと風洞実験との比較による一考察

ESTIMATING THE MEAN WIND FORCE IN REAL BUILDING AND COMPARING THE WIND TUNNEL TEST

普後 良之¹⁾佐藤 大樹²⁾田村 哲郎³⁾勝村 章⁴⁾Yoshiyuki FUGO¹⁾, Daiki SATO²⁾, Tetsuro TAMURA³⁾ and Akira KATSUMURA⁴⁾

ABSTRACT

In the design of a high-rise building, Wind load is calculated by wind tunnel test. Many previous studies conducted the accuracy verification of wind tunnel tests. However, there is no studies comparing the wind force coefficient observed at the building directly with the wind tunnel test. Because, it is difficult to observe wind force at the building. We observe the displacement of the seismic isolation layer, the wind direction and wind speed at the "J2" of the high-rise seismic isolated building. The wind force is calculated by the product of displacement and stiffness at the seismic isolation layer. Then we can calculate mean wind force coefficient and mean torsional moment coefficient by using observation record of wind direction and wind speed. In the wind tunnel test, we reproduced the topography and the surrounding buildings in detail, and conducted an experiment to confirm the effect of the topography and surrounding buildings. We compare observed data with wind tunnel test.

Key Words: High-rise seismic isolated building, Wind force coefficient, Torsional moment coefficient, Observed data

1. はじめに

一定規模を超える超高層建物や免震建物では、風荷重や風揺れ等の風応答に関する検討が構造設計の重要なウェイトを占める。このような建物は風洞実験により風応答を検討することが多く、風洞実験は現在、確立された手法として設計体系に組み込まれている。風洞実験には実際の強風時における風力を精度よく再現することが期待されるが、実現象には多くの不確定な要素が存在する。そのため風洞実験と実現象の整合の度合いやばらつきを知ることは構造安全性を検討する上で重要と考えるが、強風時における風力が実測された例はない。実建物全体に作用する風力の観測例がないのは、実建物の外壁面全体に風圧測定点を配置することや、実建物の基部における風力計測が困難なためである。既往研究における実建物を対象とした観測は風圧の計測、または建物頂部付近における加速度などの応答を対象とした計測が主である^{例えば 1)}。風圧観測の場合は測定点ごとの風圧または層風力を風圧実験と比較するものであり、検証の対象は建物の一部である。また応答観測の場合は振動実験または風力実験結果に基づく応答解析値と比較するが、構造特性の想定によって結果は大きな影響を受けるため、風力に対しては間接的な検証となる。

筆者らは東京工業大学すずかけ台キャンパス内の超高層免震建物(以下、J2棟)において地震および風応答を対

1), 4) 風工学研究所 (〒101-0051 千代田区神田神保町 3-29)

2) 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

3) 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 都市・環境学コース (同上)

象とした観測および解析を行っており²⁾、免震層における層間変位を計測している。免震層の剛性は微小振幅時に 2 次部材の影響が大きい一般の層と異なり、免震ゴムおよび鋼材ダンパーの 2 部材によってシンプルに決定される。また上部構造が免震層に比べて十分に剛性が高く、上部構造に作用する風力は免震層変位と層剛性の積によって推定できることに着目し、変位と同時計測された J2 棟頂部における風向風速の観測値を用いて風力係数およびねじりモーメント係数の算定を試みた。これは多くの誤差要素を含んだ状況下での推定値となるため、本報では最も基本的な統計量である平均風力係数および平均ねじりモーメント係数について着目し、風洞実験結果と比較する。

2. 観測概要

計測機器の配置を図 1 に示す。三杯式風速計および矢羽式風向計は J2 棟頂部北側角に設置され、3 秒毎に前 3 秒間の平均風速(以降、瞬間風速)および記録時における風向を記録する。風向計は軸部に正 16 方位に対応する非接触スイッチを内蔵しており各スイッチの通電状態から風向を判定する機構であり、各瞬間における風向も正 16 方位で記録される。風観測記録は 10 分毎に統計処理され、風速については 10 分間平均風速を得る。これを J2 棟頂部風速とし、以降、単に風速と記述する場合はこれを示す。風向については 360 度を 16 分割した 22.5 度以上の分解能を持たないが、後述するねじりモーメント係数は風向に対する変化が大きく、これを観測値と比較するためには詳細の風向を知る必要がある。風向は 10 分毎に正 16 方位別の出現度数を得るが、本報では風向変動は正規分布に従うと仮定し、図 2 に示すように最小二乗近似により得た正規分布の期待値を平均風向とした。なお風向計は真北を合わせるため設置の際に晴天を選び、設置工事日時および緯度から求めた太陽の理論位置と、現場において風向計位置から見た太陽方位を比較することで真北を割り出して設置した。次に変位計は、図 1 に示すように 1~2 階間にある免震層の層間変位を計測しており、建物端部付近に 2 か所設置されている。対象とした強風イベント時には Y 方向は風直交方向のため平均風力の検討には適さないため除外し、風方向である X 軸方向の観測値を検討対象とした。各々の観測値は 10 分毎に平均した。この観測値には X 軸方向成分とねじれ成分の両方が含まれるため、X 軸方向成分は 2 点の平均により算定し、ねじれ角は 2 点間の変位差と 2 点間の距離から算定した。

対象とする強風は、図 3 に示す 2007~2008 年における低気圧または台風通過に伴い観測された 5 イベントである。低気圧や台風の通過時には最大風速記録時付近の前後で風向が反転する場合も多いが、ここでは開始時刻から終了時刻までの間に風向反転が無い 5 つのイベントを選定した。観測記録の一例を図 4 に示す。長期計測される変位記録にはゼロドリフトが生じる。そこで、風速 5m/s 以下かつ風速が最小を記録した時刻は免震層が停止状態と見なせると仮定してイベント開始時刻と定義し、この時刻までの 10 分間平均値を 0 としてオフセット処理した。ただし低風速時は観測精度が低下するため、解析には風速 10m/s 以上のデータを用いた。イベント終了時刻は開始時刻と同様の条件で定義した。更に 10 分間中の風向変動が大きい場合も風洞実験とは単純な比較が難しいため、10 分間中の正 16 方位の出現度数を参照し、図 2 に示すように最多出現風向の出現頻度が 40%を超える場合を風向が安定しているとみなし、この条件を満たすデータを用いた。

3. 風洞実験概要

3.1. 模型概要

J2 棟は丘陵地の山頂付近を示す三角点の直近に位置し、免震上部構造の高さ 83m(1H とする)に対し J2 棟の平面中心位置から半径 300m(3.6H)の範囲において約 50m(0.6H)の標高差がある。計測対象とする建物に対し地形が起伏に富んでおり、複雑な形状を再現するため、国土交通省国土地理院の基盤地図情報を基に 3D プリンタを用いて作成した。基盤地図情報は 5m 間隔で標高が示されており、各ポイント間は直線で補間した。縮尺は 1/400 に設定し、半径 300m の円周上で最も標高が低い位置(風向角 0° 付近, TP+50m)を風洞床面とした。また模型化範囲と風洞床面とに段差が生じないよう、半径 300m より外側にテーパーを設置した。テーパーの端部は模型中心から 421m とし、半径 300m の円周上の各点から放射状に直線で結び作成した。テーパー角度は場所によって異なり、傾斜が最大となる位置の角度は半径 300m の円周上で最も標高が高い位置(風向角 270° 付近, TP+94m)における 20° である。模型製作に用いた 3D-CAD モデルを図 5 に示す。

周辺建物は、大半が学内の建物であり大学より提供を受けた図面を基に 3 階建て以上の建物を再現した。その塔

屋は省略し軒高で再現したが、隅欠き等の後流側の気流性状に影響を与える平面形状は再現した。2 階建て以下の建物は影響が小さいと判断し省略した。学外建物についても 3 階建て以上の建物を再現した。ただし J2 棟の南西に位置する工場は、平屋だが建物規模が大きいため再現した。学外建物は国土地理院の基盤地図情報を基に平面形状を作成し、高さは階数を基に推定した。なお再現範囲内において山林が占める面積は広いが、樹木の再現はしていない。J2 棟の模型再現の概要を図 6 および図 7 に示す。風力の算定は多点同時に測定した変動風圧を空間積分することによって行う。メンテナンスデッキはグレーチング等の開口率があり風が通る材料で構成されているため建物全体の風力に対する影響は小さいものと考え、省略した。また塔屋も受風面積が小さいため影響は小さいと考え省略した。高さ方向の測定点配置は図 7 に示すように J2 棟の 2 階分または 3 階分を模型の 1 層に対応させた。なお J2 棟は傾斜地に建ち 1 階部分の過半が地下にあるため、本報では 2FL より頂部までの高さを J2 棟の基準高さとした。

3.2. 実験条件およびケース

J2 棟周辺の地形は周囲数キロにわたり起伏が続くが風洞内に再現できる範囲が限られているため、観測値との比較に際してその影響度合いを確認することを目的として、図 8 に示すように J2 棟が単体の状況(Case-A)、地形のみ考慮する場合(Case-B)および周辺建物も考慮する場合(Case-C)の 3 ケースを実施した。実験気流の地表面粗度区分は文献 2)の検討を元に III とし、J2 棟頂部風速は図 9 に示す模型前縁で計測した。実験風向は図 6 に示すように J2 棟の北東面に正対する方向を 0° とし、 5° 刻みの 72 風向に加え、気象データとの対応を考慮し正 16 方位に対応する風向も併せて計測した。

4. 風力係数およびねじりモーメント係数

4.1. 風洞実験による平均風力係数および平均ねじりモーメント係数

風洞実験における i 層の X 軸方向平均層風力 $\overline{F_{Xi}}$ および平均層ねじりモーメント $\overline{M_{Zi}}$ は各風圧測定点で取得された風圧を層ごとに空間積分して求め、層風力係数 $\overline{C_{FXi}}$ および層ねじりモーメント係数 $\overline{C_{MZi}}$ を以下のように算定した。

$$\overline{C_{FXi}} = \overline{F_{Xi}} / \overline{q_H} B Z_i \quad (1)$$

$$\overline{C_{MZi}} = \overline{M_{Zi}} / \overline{q_H} B^2 Z_i \quad (2)$$

ここに、 $\overline{q_H}$: 模型前縁で計測された J2 棟頂部高さの速度圧、 B : J2 棟の長辺幅(図 1 参照)、 Z_i : i 層の高さである。

X 軸方向平均風力 $\overline{F_X}$ および平均ねじりモーメント $\overline{M_Z}$ は層風力およびねじりモーメントを高さ方向に積分して求め、平均風力係数 $\overline{C_{FXexp}}$ および平均ねじりモーメント係数 $\overline{C_{MZexp}}$ を以下のように算定した。

$$\overline{C_{FXexp}} = \overline{F_X} / \overline{q_H} B H \quad (3)$$

$$\overline{C_{MZexp}} = \overline{M_Z} / \overline{q_H} B^2 H \quad (4)$$

ここに、 H : J2 棟の代表高さ(図 1 参照)である。

4.2. 観測による平均風力係数および平均ねじりモーメント係数

鋼材ダンパーが弾性範囲かつ平均値のみ取り扱う場合はオイルダンパーなどの非線形要素の影響を無視できるとする。免震上部構造に作用する平均風力を免震層の剛性と平均変位の積とすると、風速の観測値から求めた速度圧 $\overline{q_H}$ を用いて平均風力係数 $\overline{C_{FXobs}}$ および平均ねじりモーメント係数 $\overline{C_{MZobs}}$ を以下のように推定できる。

$$\overline{C_{FXobs}} = K_x \overline{\delta_x} / \overline{q_H} B H \quad (5)$$

$$\overline{C_{MZobs}} = K_\theta \overline{\delta_\theta} / \overline{q_H} B^2 H \quad (6)$$

ここに、 K_x : 免震層の X 軸方向剛性で設計値、 $\overline{\delta_x}$: X 軸方向平均変位、 K_θ : 免震層のねじれ剛性で設計値、 $\overline{\delta_\theta}$: 平均ねじれ角である。

4.3. 実験ケースの比較による地形および周辺建物の影響の検討

$\overline{C_{FXexp}}$ の風向変化を図 10 に示す。併記した $\overline{C_{FXobs}}$ については次節に述べる。ここでは観測データが比較的多い風向(NW~N)について着目する。図 10 より $\overline{C_{FXexp}}$ の Case-A に対して Case-B は地形の影響で NW~N において 1~2 割大きな値を示す。次いで図 11 に示す風向 NNW の平均層風力の高さ方向分布を見ると、Case-A に対して Case-B は第 3 層以下の $\overline{C_{FXi}}$ が 2~3 割程度大きい。荷重指針によれば小地形は接近流を増速させる場合がある。この風向における風上側の地形は図 5(b)に示すように J2 棟の直近で谷状となっており、更に風上には J2 棟の 3 層付

近の高さの丘がある。ここで第2層の風向 NNW (287.5°) における平均風圧係数分布を図12に示す。Case-A に対し Case-B は風上である北西面で大きな差がなく、小地形による増速の影響は見られない。一方で背面である南東面の風圧分布は総じて負側にシフトした。これが $\overline{C_{FXi}}$ の増加の原因である。側面である北東面および南西面の風圧分布にも差がみられる。北東側には尾根上の地形があり、南西側には丘陵地の山頂付近を示す三角点があることから、これらの直近の地形により J2 棟下部付近の流れ場が変化し背面側(南東面)の風圧分布の変化が生じていると考えられる。ただし影響範囲は第3層(0.4H 付近)以下に留まり Case-A に対する Case-B の $\overline{C_{FXexp}}$ の増分は1割程度である。図5に地形との高さ関係を示す。次に周辺建物の影響を見ると、風上側には J2 棟の 0.5H 程度の校舎がおおむね風向に正対して一列に並んでおり、層風力分布(図11)を見ると Case-B に対して Case-C は風上側の校舎群よりやや高い第6層付近まで $\overline{C_{FXi}}$ が小さくなっている。以上より J2 棟の風向 NNW 付近では地形の影響度合いに比べて周辺建物の影響が大きいが、地形によって風上側の周辺建物は J2 棟より相対的に低い位置にあることから地形と周辺建物の相互作用が風力係数に影響を与えていると推測され、地形再現の精度は重要な意味を持つ。

次に $\overline{C_{MZexp}}$ の風向変化を図13に、風向 NNW の層ねじりモーメント係数の高さ方向分布を図14に示す。併記した $\overline{C_{MZobs}}$ については次節に述べる。 $\overline{C_{MZexp}}$ および $\overline{C_{MZi}}$ を比較すると Case-A に対して Case-B は大きな差が見られない。図12から地形の影響を受けているものの風圧分布形状の変化により相殺する部分もあるため影響が顕著には現れない。次いで Case-B に対して Case-C を比較すると、 $\overline{C_{MZi}}$ の高さ方向の分布(図14)は第4~6層では絶対値が大きくなる一方で第1~2層では絶対値が小さくなるため、 $\overline{C_{MZi}}$ の積分値である $\overline{C_{FXexp}}$ (図13)には大きな差が見られなかった。

4.4. 実験値と観測値の比較と誤差要素の考察

$\overline{C_{FXobs}}$ は 0.5 程度の幅でばらつきを示し、Case-C の $\overline{C_{FXexp}}$ と比較すると、風向 N 付近では差がみられるものの、風向 NW~NNW にかけて $\overline{C_{FXexp}}$ が $\overline{C_{FXobs}}$ のばらつきの上端をなぞるような対応関係となった。次に $\overline{C_{MZobs}}$ は 0.04 程度の幅でばらつきを示し Case-C の $\overline{C_{MZexp}}$ と比較すると、風向 NW 付近では $\overline{C_{MZexp}}$ より $\overline{C_{MZobs}}$ が負側の値を示し、風向 N 付近では $\overline{C_{MZexp}}$ より $\overline{C_{MZobs}}$ が正側の値を示し差がみられるが、風向 NNW 付近では $\overline{C_{MZexp}}$ が $\overline{C_{MZobs}}$ のばらつき幅に入った。実験値と実測値に差が生じた原因となる誤差要素については、まず観測と風洞実験とは風速の計測位置が異なることが挙げられる。また観測の風向風速は J2 棟自身の影響を受けている可能性がある。次に観測値からの平均風力係数およびねじりモーメント係数の算定に用いた免震層の剛性を設計値としたが、施工や製品のばらつきにより上下する可能性がある。また本報では免震層の剛性を線形としたが、図4においてイベント終了時刻に残留変位があり非線形性がみられ、これが影響している可能性がある。

5. まとめ

免震建物の強風時の免震層変位および建物頂部風向風速の観測記録から平均風力係数および平均転倒モーメント係数を推定し、風洞実験との整合や観測のばらつきの度合いを確認する目的で比較を行った。不整合の原因となりうる誤差要素を挙げたが、各々の誤差要素が平均風力係数および平均転倒モーメント係数に与える影響を個別に評価するには至っておらず、今後の課題である。

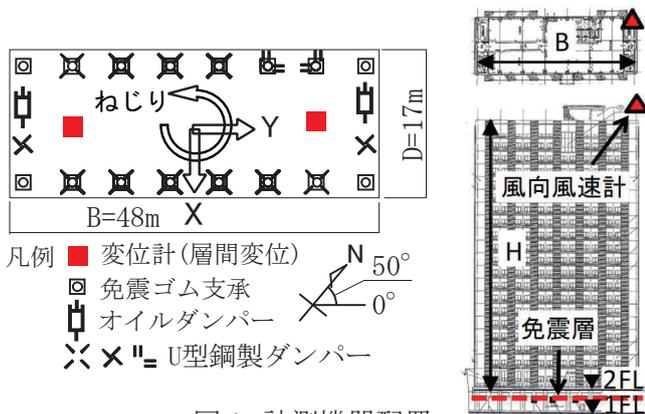


図1 計測機器配置

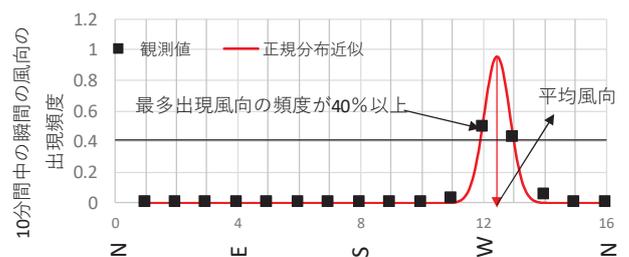


図2 10分間中の瞬間の風向の出現頻度の一例および平均風向の定義

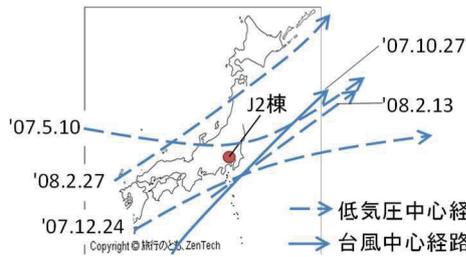


図3 対象とする強風イベントの低気圧および台風中心の経路

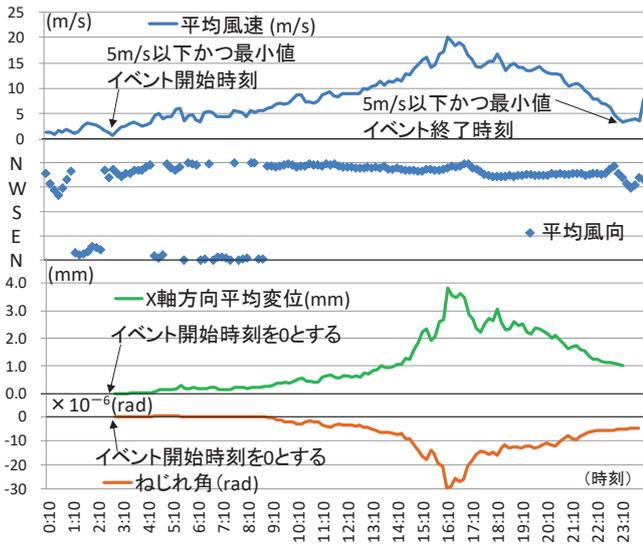


図4 観測記録の一例('07/10/27)とイベント開始時刻および終了時刻の定義

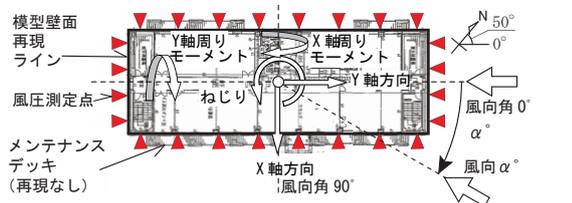


図6 J2棟平面形状および模型再現ライン

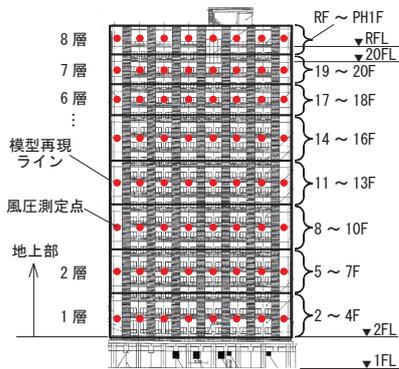
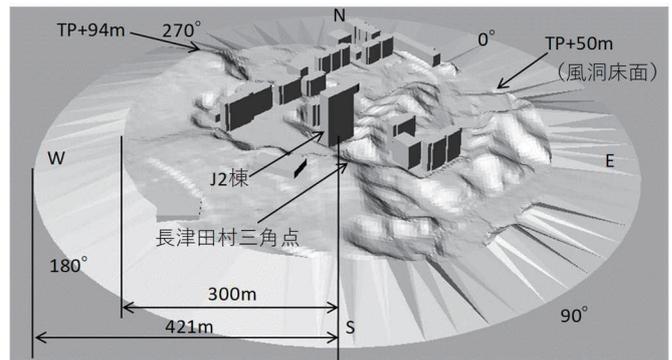
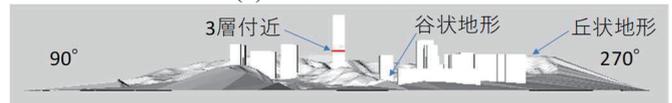


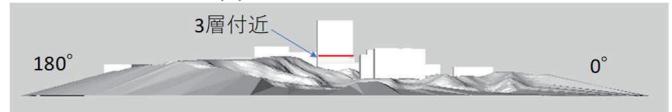
図7 J2棟立面の風圧測定点配置および模型再現ライン



(a) 南からの鳥瞰



(b) 0° 方向より望む



(c) 90° 方向より望む



(d) 180° 方向より望む



(e) 270° 方向より望む

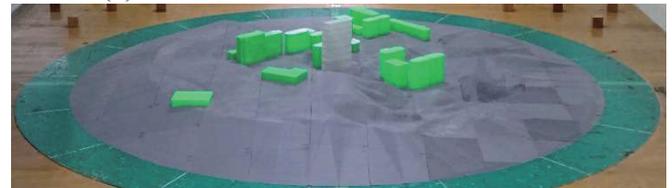
図5 模型製作に用いた3D-CADモデル



(a) Case-A J2棟単独の状況



(b) Case-B 周辺地形のみ考慮した状況



(c) Case-C 周辺地形と周辺建物を考慮した状況

図8 実験ケース(南からの鳥瞰)



図9 風洞実験頂部風速計測位置

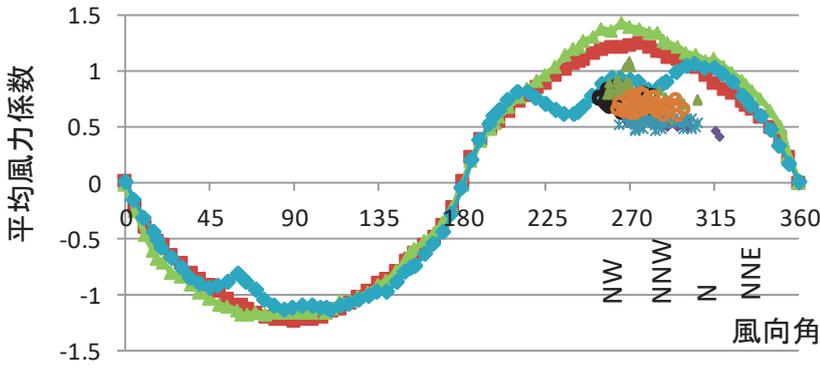


図 10 平均風力係数の風向変化

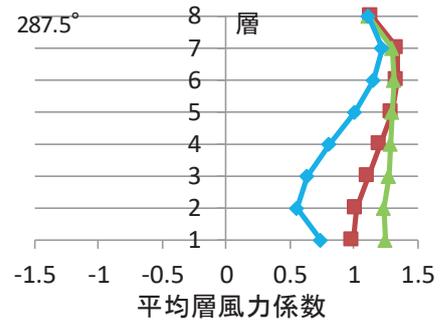


図 11 風向 NNW の X 軸方向平均層風力係数

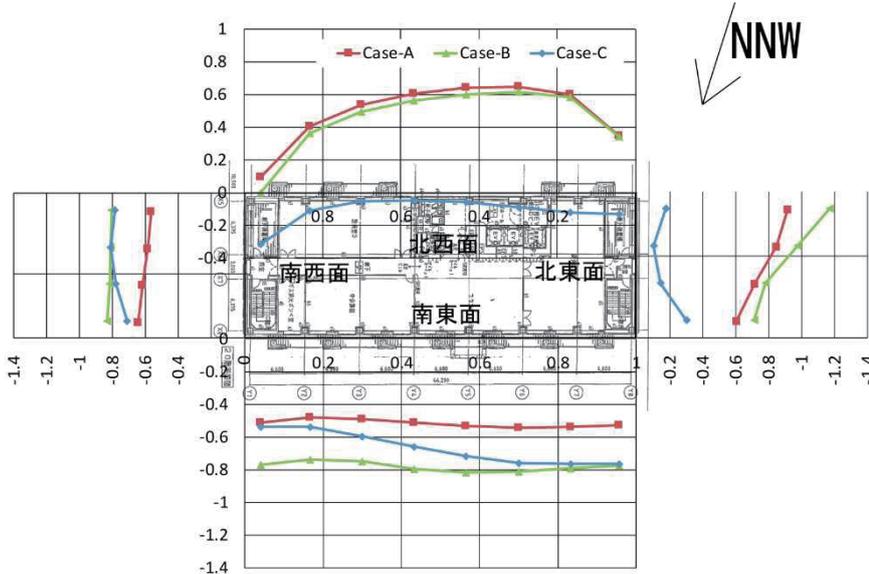


図 12 風向 NNW、第 2 層の平均風圧係数分布

- 凡例
- 実験値,case-A
 - ▲ 実験値,case-B
 - ◆ 実験値,case-C
 - 観測値07/5/10
 - ▲ 観測値07/10/27
 - ◆ 観測値07/12/24
 - × 観測値08/2/13
 - 観測値08/2/27
 - ※図 10～14 に共通

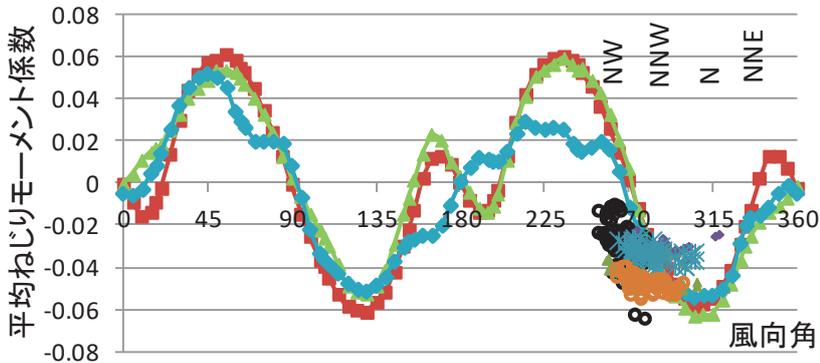


図 13 平均ねじりモーメント係数の風向変化

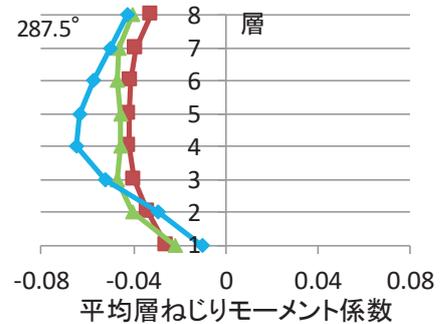


図 14 風向 NNW の 平均層ねじりモーメント係数

謝辞

本研究で用いた J2 棟の変位観測データは、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 3D プリンタによる模型製作は風工学研究所 中川智博氏の多大なる協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 栗田剛他, 高層建築物を対象とした風圧力と風応答に関する実測—その 4 実測と風洞実験の比較—, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.233-234, 1996.9
- 2) 普後良之他, 観測記録に基づく超高層免震建物の風応答評価 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.9