

# 高層建物での実測に基づく外装材の風荷重評価

染川 大 輔      上 田 博 嗣      原 嶋      寛  
 岸 上 昌 史      矢 部 周 子

## Evaluation of Wind Loads for Cladding and Components in Tall Building Based on Field Measurements

Daisuke Somekawa      Hirotugu Ueda      Hiroshi Harashima  
 Masashi Kishiue      Chikako Yabe

### Abstract

The evaluation of the design wind loads for a cladding and components using a wind tunnel test has two important problems. One of these is how to estimate the internal pressure. The internal pressure cannot be measured in the wind tunnel test. The other problem is the estimation of the spatial wind-pressure fluctuation. The evaluation of wind loads is performed in an area where the pressure simultaneously fluctuates. This paper discusses a comparison between field-measurement and wind-tunnel-test results for a tall building. The internal pressure and spatial wind pressure fluctuation are estimated from the observed data. The estimated results are compared with the values specified by the standards for wind loads. As a result, the validity of the standard is clarified.

### 概 要

風洞実験により外装材の風荷重を評価するためには、実験で測定できない室内圧と、小さな測定孔でとらえた室外の風圧変動がどの程度の範囲に影響を及ぼしているかの2点が重要な問題となる。本報では自然換気孔を利用した実測を行い、風洞実験結果との比較からこれらの評価の検証を行った。その結果、①最近の高層建物においても内圧係数が従来とほぼ同じであること、②風圧変動の評価に用いる減衰定数は、風向や風速が安定した条件で行われる風洞実験とそうではない実測では相関の高くなる方向（鉛直もしくは水平）が異なることが分かった。しかし一般に用いられる値の範囲に収まっていることから、①の結果と合わせて、現在の風荷重の評価の妥当性が示された。

### 1. はじめに

高層建築物の外装材の耐風設計では、設計用風荷重を風洞実験によって求めることがしばしば行われる。建築基準法や建築物荷重指針<sup>1)</sup>では、①周辺の建物が計画建物の風荷重に与える影響は評価されず、②庇やルーバーと言った計画建物の細かな部材に作用する風荷重を求めることが出来ない等の、個々の建物固有の詳細な荷重設定に関しては問題がある。風洞実験ではこれらを実測することが可能であるため、建築基準法等では過小評価となる部位に関してはより安全性の高い適切な荷重値を、逆に過大評価となっている部位には合理的に荷重を低減しコストダウンを図ることも可能となる。

しかし風洞実験では、建物表面の風圧を測定する場合、直径約1mmの風圧測定孔を介して行う（Photo 1）。風圧測定孔は通常数百点（縮尺1/400の模型で200～350点程度）設けるが、各測定孔の間隔は実スケール上で数m～数十mとなり、その間の風圧変動がどうなっているかは厳密にはわからない。

また、縮尺模型を用いるため、対象建物の外形のみを

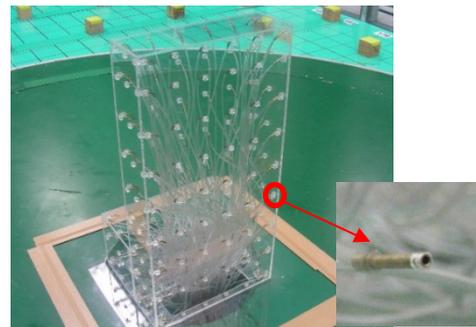


Photo 1 風圧実験模型の例  
 Example of Wind Pressure Test Model

再現し、内部を再現することはほとんど無い。そのため室内側の風圧がどのような値になっているかがわからず、通常、風荷重の評価の際には建築基準法等に示されている室内圧の値を用いる。

現在の建築基準法等による風荷重の評価では、室内圧の値をニューマチックアベレージャーの考え方に基づいて、隙間の変動圧伝達特性から算出されたものが与えられている<sup>2)</sup>。その妥当性について、シミュレーションや

風洞実験によって検証されている例<sup>3)</sup>はあるが、風速や風向の変化のある自然風中での高層建築物の実測データから検証されたものは少ない。一方で風圧変動の空間的な広がりについては、空間的な変動を時間平均で表す方法としてTVL法がよく用いられている。TVL法はLawsonが野外実測結果に基づいて提案した手法である<sup>4)</sup>が、以降の研究でそのパラメータの設定についてより詳細に検証する必要性が示されている<sup>5) 6)</sup>。

そこで本報では高層建築物を対象とした実測と、同じ建物を対象とした風洞実験を実施した。実測では風荷重評価で必要となる代表風速の測定を合わせて行う。代表風速の検討を行った後、風圧測定の結果から、①近年の高層建築物の室内圧がどの程度の値となるか、②一般に風洞実験で用いられているTVL法の風圧変動の空間的な広がりを表すパラメータが実際の建物における値と整合性がとれているかについての検討を行い、現在の風洞実験による外装材設計用風荷重の設定方法の妥当性について検証を行う。

## 2. 測定概要

実測を行った建物は、大阪市内にある22階建て高さ約110mの建物である。7階から上の高層階は6階以下に比べてセットバックした形状になっている。高層階の平面形状は約55m×30mの長方形で、内部は共用部以外の空間が概ね一つにつながった大空間のオフィスとなっている。オフィス部分の東西および北面の床に近い部分に自然換気孔が設置されている。

### 2.1 実測

圧力の測定は、自然換気孔を利用して行った(Fig. 1)。自然換気孔に風圧測定用のチューブ(内径4mm)を差し込んで室外に出し、室外と室内の圧力の差圧として測定した。サンプリングは常時10Hzで行った。圧力の測定点は、Fig. 2に示す8階と14階の合計11点である。なお、14階の測定点I, J, Kは8階の測定点B, C, Dとそれぞれ平面的には同じ位置である。

風速は、屋上に風向風速計を3台とドップラーライダーを1台設置し、測定した。風速計の配置はFig. 3に示すとおりである。ドップラーライダーは屋上レベルに設置したが、風向風速計は1フロア分上にあるゴンドラレールの手すりに設置した。屋上設備機器の目隠し壁の天端と比べると、風向風速計の設置高さは約2m下がった位置になる。風向風速計は1Hzで測定し、ドップラーライダーは高さ方向に30m間隔で約400mまで、サンプリングは10分間平均値で測定を行った。

### 2.2 風洞実験

風洞実験は一般財団法人日本建築総合試験所所有のエッフェル型吹出式境界層風洞で行った。対象建物を縮尺1/500でモデル化し、半径400mの範囲の周辺の建物につい

ても同様にモデル化した。実験気流は建築物荷重指針<sup>1)</sup>の地表面粗度区分IIIを目標とした気流であり、対象建物のモデル頂部高さでの風速を10.3m/sとした。測定風向は建物北面の風向を0度として5度間隔で72風向とした。なお、建物北面は真北に対して約10度西に傾いている。サンプリング周波数を800Hz、1風向あたりの測定時間を40秒とした。再現期間100年の風速に対して換算すると、風荷重評価に用いられる評価時間の10分間はモデル時間で6.1秒となる。

また風洞実験においても、熱線風速計と風向計を用いて屋上の風向と風速を測定した。測定位置についてはFig. 3に示した場所と同じである。

## 3. 代表風速の評価

風荷重の評価では、壁面に作用する風外力を、建物頂部高さでの風速(設計風速、あるいは代表風速)を用いて無次元化して用いる。そのため実測で得られたデータを告示等との比較に用いるには、屋上の目隠し壁などの影響を受けない代表風速を適切に評価することが重要となる。ここでは現状の代表風速の評価方法として、実測や風洞実験で測定された風速データと気象庁のデータを比較し、それぞれの課題点の抽出を試みる。

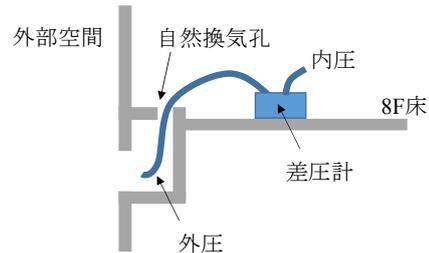


Fig. 1 風圧測定状況

Wind Pressure Measurement System

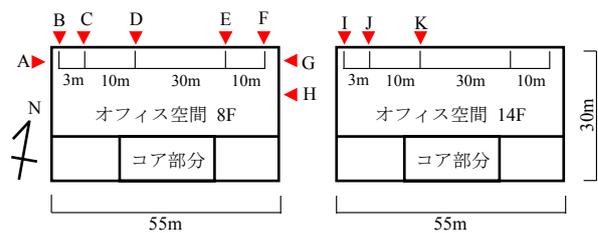


Fig. 2 風圧測定点配置

Location of the Pressure Taps

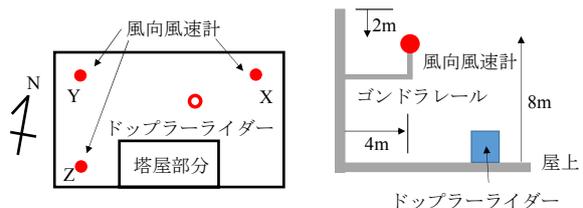


Fig. 3 風向風速測定点配置

Location of the Wind Direction and Velocity Measurement Points

### 3.1 風洞実験による屋上の風向風速

風洞実験によって得られた屋上の風向風速と実験の流入気流の風向との比較をFig. 4に示す。風速に関しては、流入気流の建物頂部高さでの風速(代表風速に相当する)に対する比で表してある。風速比が1であれば、その流入風向での風速を正しく評価できることを意味する。ゴンドラレールに設置した風向風速計に対応する各測定点位置での風速は、風速計Xでは比較的1に近い風向が多いが、風速計Y,Zでは、ほとんどの風向で風速比が1とはならず、0.4~0.5程度となった。これは風上側に屋上目隠し壁や塔屋がある風向では、それらによって風速が低減されてしまうからである。また測定位置が対称な風速計XとYについてみても、流入風向に対する風速比は対称とはならない。この建物の南及び東側に同規模かそれよりも大きな建物が立っているためであり、周辺の影響によっても得られる風速が大きく異なることがわかる。流入風向と測定された風向を比較しても、全く対応しておらず、正しい風向を得ることが困難であることがわかる。

建物の設備の制御や屋上への立ち入りに屋上の風速計を利用する例がしばしばみられるが、風向風速計の設置位置によっては、ここで示したように、屋上の風速計が建物に接近する風速(風洞実験における流入気流の風速に相当する)や風向を正しく評価できない可能性があることに注意する必要がある。

### 3.2 ドップラーライダーの風速との比較

ドップラーライダーで測定された風速は、対象建物の屋上周りの影響を直接受けることが少ないため、代表風速として最も適切であると考えられる。

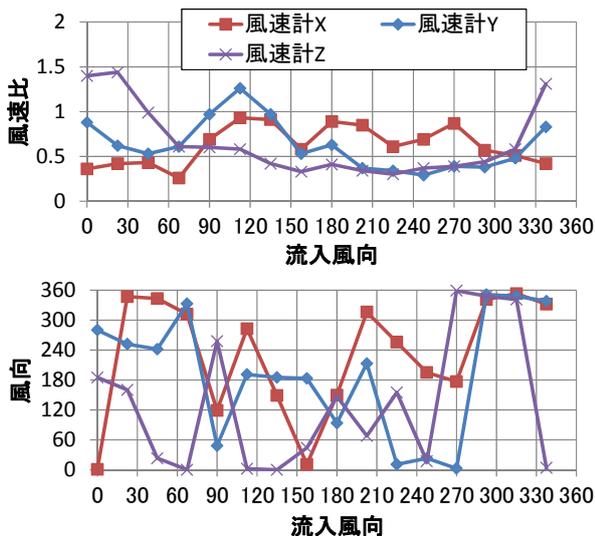


Fig. 4 流入風の風向と屋上での風向風速の関係 (風洞実験)

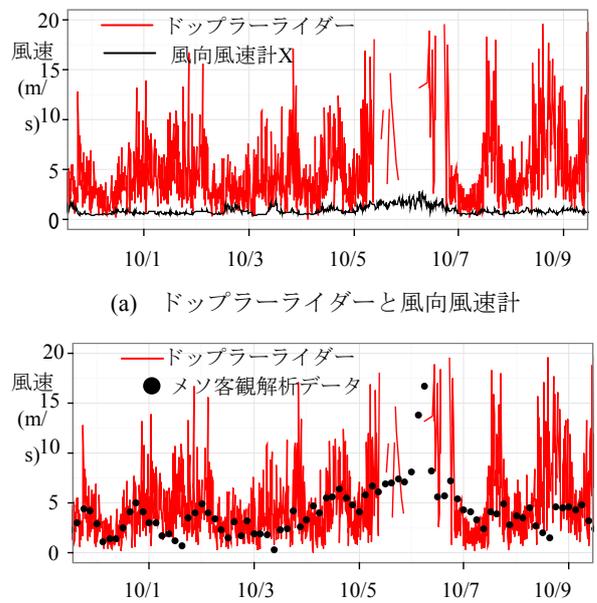
Comparison between the Inflow Angle and the Wind Velocity, and the Wind Direction at the Height of the Building by Wind Tunnel Test

しかしドップラーライダーは降雨時など気象条件によっては測定ができない点が問題として挙げられる。

ドップラーライダーと屋上に設置した風向風速計の風速の比較をFig. 5(a)に示す。Fig. 3に示したように、風速計の設置高さは102m、ドップラーライダーの風速は130mの高さの値である。ここではFig. 4の結果から、比較的どの流入風向に対しても風速の安定している風向風速計Xのデータを示している。ドップラーライダーの風速に比べると、風向風速計の風速はかなり小さく値としてはほとんど一致しない結果となった。しかしこの期間中の風速変動の相関係数は0.61であり、風速の強くなる時間帯など、相対的な風速の変動としては捉えることができていると考えられる。ドップラーライダーのデータが一部欠測しているのは降雨の影響である。

気象庁から出されているデータの一つに、メソ客観解析データがある<sup>7)</sup>。これは気象台などの観測データを元に、上空の状況をメソスケールの気象モデルによって再現し、日本全域のグリッドデータとして出力したものである。周辺の建物の影響や地形の影響は含まれないが、その地域全体の風速を評価するのに有力な手がかりの一つとして考えられる。

ドップラーライダーの風速と、対象建物の位置かつ頂部高さでの風速に換算したメソ客観解析データの風速値の比較をFig. 5(b)に示す。メソ客観解析データは3時間毎の10分間平均値であり、データ数は少ない。ドップラーライダーの風速と比較すると瞬間的な大きな風速は評価できていないが、平均的な風速の変動は捉えられていると考えられる。



(a) ドップラーライダーと風向風速計

(b) ドップラーライダーとメソ客観解析データ

Fig. 5 建物頂部高さ付近でのドップラーライダーの風速と観測データおよびメソ客観解析データの比較

Comparison with the Wind Velocity Measured by Doppler Lidar at the Height of the Top of the Building

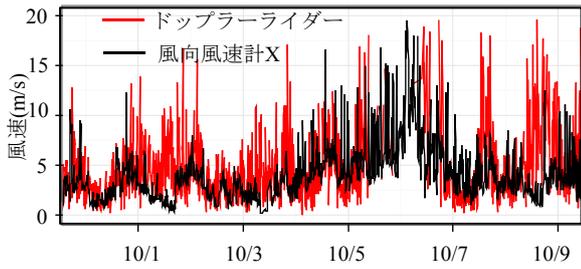


Fig. 6 補正した風向風速計の風速と  
ドップラーライダーの風速の比較  
Comparison with the Correction Wind Velocity  
and Doppler Lidar Data

風向風速計では瞬間的な風速の変動が、メソ客観解析データでは平均的な変動が捉えられているとして、3時間毎の平均値がメソ客観解析データの風速と同じになるよう風向風速計のデータを補正した結果をFig. 6に示す。なお風向風速計のデータは、Fig. 4の風洞実験結果に基づき補正している。風速の大きさとみると両者の結果は比較的よく一致している。しかしピークとなる時刻がずれていることが散見される。そのため瞬間的な風速の評価としてではなくある程度の期間の統計的な風速の評価として用いることができると考えられる。この手法により、ドップラーライダーの欠測時のデータのある程度補間することができる。

#### 4. 風荷重評価の検証

##### 4.1 内圧係数

内圧係数の評価は2014年9月9日から10月31日の約2ヶ月間とした。期間中のメソ客観解析データの風速と風向をFig. 7に示す。期間中の風速は3~5m/s程度であったが、10月6日には台風18号が、10月13日には台風19号が接近している。期間中最大の風速は、10月6日の朝6時の16.7m/sであった。また風向は概ね北~北東を中心とした風向であり、西からの風は少なかった。

ここでは、実測で得られた風圧を係数化するために、メソ客観解析データの風速を用いることとした。そのため、風圧データについてもメソ客観解析データの値が存在する時刻での10分間の風圧の平均値を用いる。

風荷重の評価で用いる風力係数 $C_f$ は以下の式で与えられる。

$$C_f = C_{pe} - C_{pi} \quad (1)$$

$C_{pe}$  : 外圧係数  
 $C_{pi}$  : 内圧係数

風洞実験では外圧係数が得られるが、今回の実測では室内外の差圧を測定しているため、これを係数化したものは風力係数に相当する。

風洞実験で得られた平均外圧係数と実測で得られた平均風力係数をFig. 8に示す。外圧係数は実時間10分相当6組のアンサンブル平均値であり、風力係数は風速4m/s以

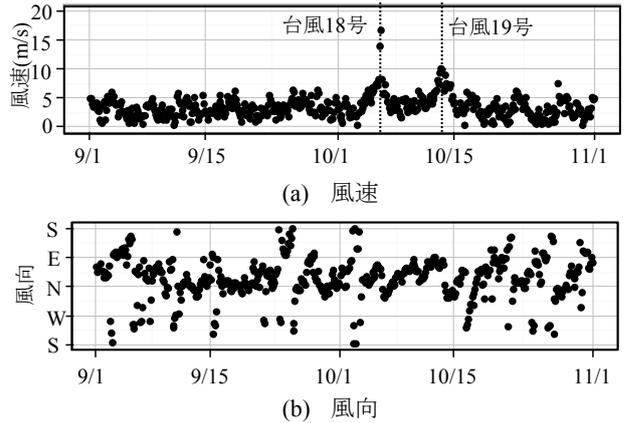


Fig. 7 メソ客観解析データで得られた風向風速  
Wind Velocity and Wind Direction  
from JMA-Meso Analysis

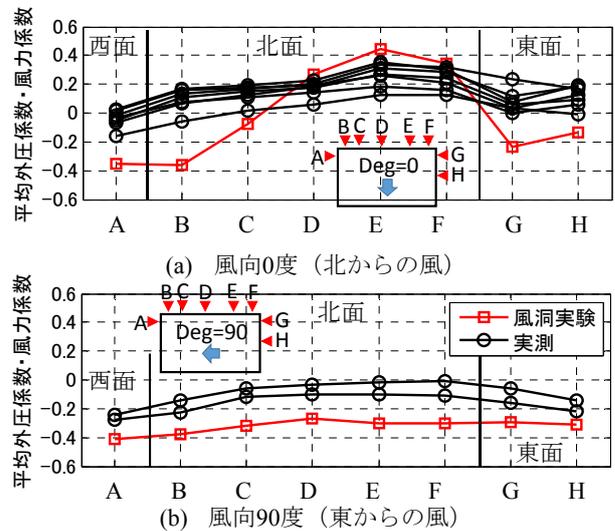


Fig. 8 風洞実験で得た平均外圧係数  
と実測で得た平均風力係数

Mean External Pressure Coefficients (Wind Tunnel Test)  
and Mean Wind Force Coefficients (Field Measurement)

上の結果のみ示している。線で結んである点が同時刻の点であることを表す。建物北面からの風向である $0^\circ$ と東面からの風速について示してある。

多少のばらつきはあるが、別の時間帯のデータであっても同程度の風力係数となっており、実測データの係数化の手法としては概ね問題はないと考えられる。本来、直接比較は出来ないが内圧を一定とし、風洞実験で得られた外圧係数と実測で得られた風力係数の傾向が同じであると考へ比較を行う。外圧係数と比較すると風向 $0^\circ$ で北面の中でもより風上側となる測定点Eの値が大きくなる点や、風向 $90^\circ$ で測定点A,Bの絶対値が大きくなる点など、風洞実験と同様の風圧分布が得られていると考えられる。なお風向 $90^\circ$ で風上側となる東面では、近隣の建物の影響を受けるため正の値ではなく負となっている。

風速4m/s以上での実測の風力係数と風洞実験の外圧係数から式(1)を用いて内圧係数の算出を行った。自然風の

風向変動を考慮して、風洞実験の風向に対し $\pm 2.5^\circ$ の範囲に入る風力係数を、外圧係数から差し引いて内圧係数を求めた。その結果を風洞実験の外圧係数が正であった時と負であった時に分けてFig. 9に示す。指針等に示されている0, または $-0.5$ のピーク内圧係数と比べて最大値・最小値が概ね近い値となった。Fig. 9の正圧の場合(a)では $-0.5$ を概ね下回ることがなく、負圧の場合(b)では0を超える観測結果は限られるため、現在の設計で安全側であることが示された。

ここで示した内圧係数は、外圧係数と風力係数の平均値から求めたため、内圧係数の平均値に相当する。しかしこの建物は、Fig. 2に示したように室内のオフィス空間が大きな1つの空間となっている。そのため内圧の変動成分は静圧化され、内圧係数の平均値が概ね変動成分を考慮したピーク内圧係数に等しいと考えられる。

解析を行った期間中の自然換気孔の開閉状況を、建物のBEMSデータから確認した所、ほぼ全期間で平均5ヶ所程度換気口が開いていた。換気孔の面積と床面積から求めた隙間相当面積は $2.4\text{cm}^2/\text{m}^2$ であり、換気孔は開いていたものの、隙間を有する閉鎖型建物として考えることができる。

#### 4.2 風圧変動の空間的な広がり

風圧変動の空間的な広がりを評価する際に、ある二点間の風圧変動のルートコヒーレンスが用いられる。ルートコヒーレンスは2つの波形の周波数ごとの相関を表しており、風圧変動を評価する場合には一般に次式のような指数関数で近似される<sup>8)</sup>。

$$\sqrt{\text{Coh}} = \exp\left[-k \frac{nL}{U}\right] \quad (2)$$

- $k$  : 減衰係数(decay factor)
- $nL/U$  : 2点間の距離 $L$ と風速 $U$ で無次元化された周波数

ルートコヒーレンスの値を無限大の周波数まで積分した場合の面積 (Fig. 10の斜線部分) が $1/k$ であることから、仮にルートコヒーレンスを1で一定とみなしたとき、長方形の面積が $1/k$ となる無次元周波数 ( $n_c L/U$ ) は、拡がり $L$ の空間で同時に作用する変動とみなすことができる。

TVL法ではこの周波数を限界無次元周波数として用いている。限界無次元周波数が決定されれば、ある風速 $U$ のときに、同じ風圧変動が生じているとみなすことのできる距離 $L$ が計算できることになる。そのため、2点間の相関が低くルートコヒーレンスの値が小さい場合には、減衰係数 $k$ が大きくなり、同じ風圧変動が生じているとみなすことのできる範囲は小さくなる。建築物では、建物隅角部付近において剥離によって生じた渦の影響を受ける部分と受けない部分などで測定点の位置が近い場合でも減衰係数が大きくなる傾向が見られる。

4.1項で述べたように、室内圧の変動がほぼないものと考え、実測で得られた風圧変動は外圧の変動に起因すると考えることができる。そこで2014年10月13日の20

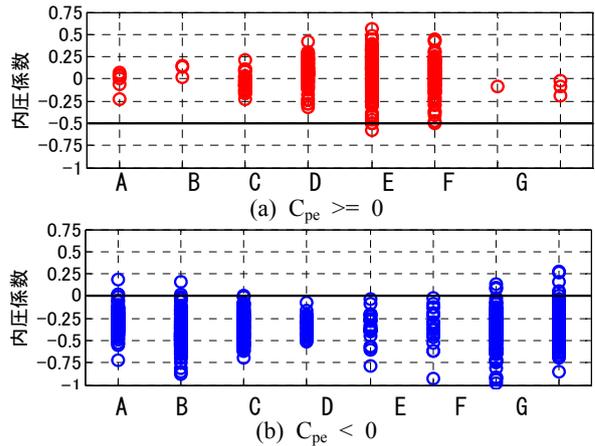


Fig. 9 平均内圧係数  
Mean Internal Pressure Coefficients

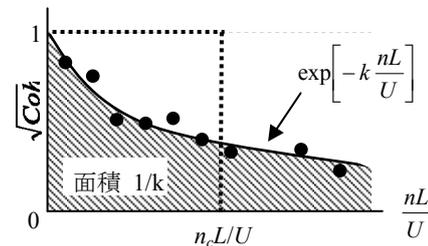


Fig. 10 変動風圧の限界無次元周波数 $n_c L/U$   
Critical Non-Dimensional Frequency of Fluctuating Pressure

時30分から21時30分、台風19号通過に伴う強風時の1時間のデータを対象とし、各測定点間のルートコヒーレンスを求めた。なお、メソ客観解析データの21時の該地点でのデータは風向5度(建物北面に対して15度)、10分間平均風速は $11.0\text{m/s}$ であった。

得られたルートコヒーレンスをFig. 11に示す。個々の測定点間の減衰係数はTable 1に示した値であり、Fig. 11ではその平均値を用いて近似曲線も描いている。いずれのケースにおいてもルートコヒーレンスは指数関数による近似曲線に近い分布となっている。最終的な評価は、近似曲線そのものを用いるわけではなく、等価な面積を用いる。そのためルートコヒーレンスの勾配と近似曲線の勾配が概ね合っていれば良く、特に面積への寄与が大きい、近似曲線の勾配が大きく変化する周波数帯付近までが重要であると考えられる。

水平方向では、実測で得られた風圧変動は距離が離れても比較的高い相関を示している。E-F以外の測定点間の減衰係数は $4.2\sim 5.5$ であり、Lawsonの示した値 ( $k=4.5$ )に近い。一方、風洞実験の結果では比較的距離の近いE-F、E-Dでは実測と同様に高い相関があるが、E-CやE-Bでは実測に比べ相関が低い。減衰係数では通常用いられる $k=4\sim 8$ の範囲に含まれる結果となった。

鉛直方向では、実測ではいずれの測定点間においても大きな違いは見られないが、水平方向に比べて相関が低い。逆に風洞実験では測定点間の相関が水平方向よりも

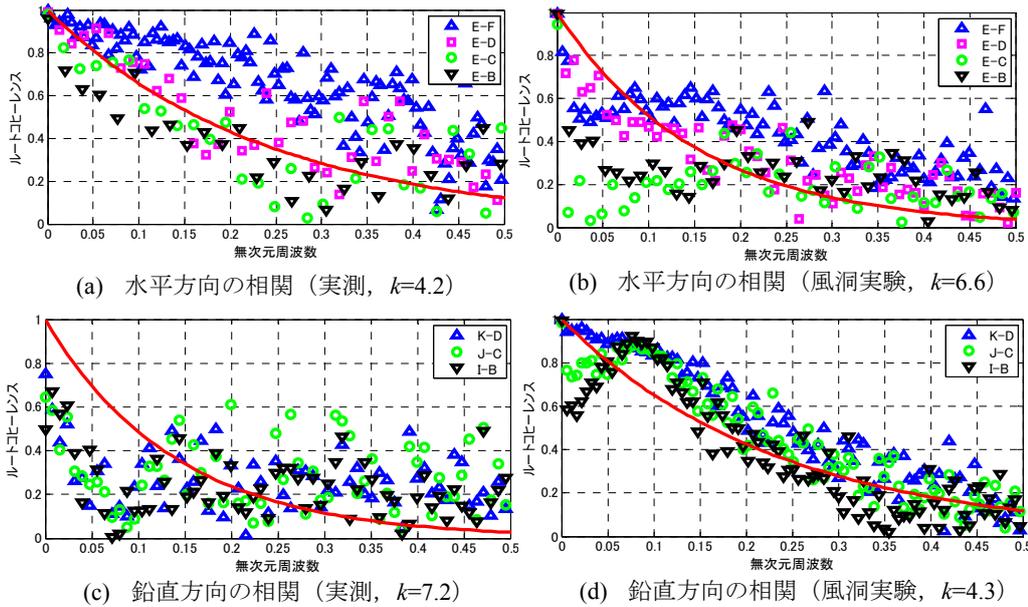


Fig. 11 風圧変動のルートコヒーレンス  
Coherence of Wind Pressure Fluctuation

Table 1 各測定点間の減衰係数の減衰係数  
Decay Factor between Each Measurement Points

	実測	風洞
E-F	3.0	4.8
E-D	4.2	5.9
E-C	5.1	8.5
E-B	5.5	7.1
平均	4.2	6.6

	実測	風洞
K-D	8.1	3.8
J-C	6.6	4.2
I-B	6.9	4.8
平均	7.2	4.3

高い。特にJ-CやI-Bでは無次元周波数が0に近い範囲よりも、0.08付近での相関が特に大きい。

測定点BとIのパワースペクトルをFig. 12に示す。風洞実験の結果では実測に比べて特定の周波数でのピークが卓越しており、高さ方向に細長い剥離渦の影響を受けていたと考えられる。そのため水平方向よりも鉛直方向の相関が高かったと思われる。それに対し実測ではよりブロードなスペクトル形状となっており、接近風の変動が支配的であったと考えられる。

実測でこのような剥離渦の影響が見られなかった理由として、台風通過時であったが平均風速としては極めて大きいということではなかったことから、風向が十分に安定しておらず、周期的に発生するような渦の影響が小さくなったと考えられる。

傾向の違いはあるが、一般に用いられる減衰係数とTVL法を用いて風洞実験の結果から実建物の壁面に作用する風圧変動を評価することは可能であると考えられる。

## 5. まとめ

風洞実験に基づく高層建築物の外装材設計用風荷重評価について、実測で得られたデータを用いて、その妥当性の検証を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 対象建物の屋上に設置した風向風速計では、建物自身の影響をうけることがあるため、代表風速を適切に評価できない場合がある。メソ客観解析データを用いた補正を行うことにより、一定期間の風速の最大値を得ることができる。
- 2) 風洞実験と実測で得られたデータから算出した内圧係数の最大値・最小値は、通常的设计で用いられる値とほぼ同等である。

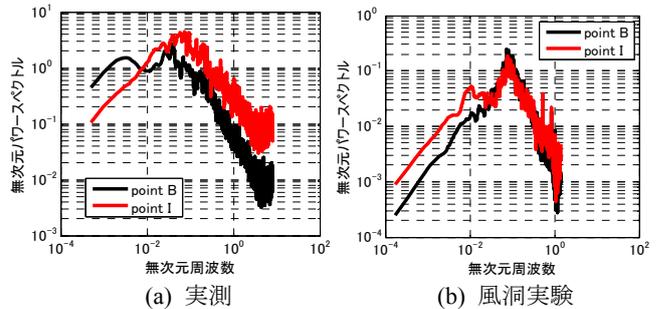


Fig. 12 風圧変動のパワースペクトル  
Power Spectra of Wind Pressure Fluctuation

- 3) 風圧変動の空間的な広がりを表す減衰係数は、通常設計時に用いる値とほぼ同等であった。これらの結果から、現在の風洞実験に基づく風荷重評価は適切なものであると判断される。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針, 2015.2
- 2) 岡田恒,他：耐風設計における建築物の室内圧に関する研究, 日本風工学会誌, 第58号, pp.43-53, 1994.
- 3) 上田宏, 他：高層建築物の風による室内圧の性状, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.676, pp.833-842, 2012.6
- 4) T. V. Lawson : Wind effects on building, Vol.2, Applied Science Publishers LTD, 1980
- 5) J. D. Holmes : Equivalent time averaging in wind engineering, 9<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, pp.1849-1858, 1995.1
- 6) Y. Uematsu et al : Wind pressure acting on low-rise buildings, J. of Wind Engineering and Ind.

Aerodynamics 82, pp.1-25, 1999.6

- 7) 大塚清敏, 他: 気象庁メソ客観解析データの特性について, 日本風工学会誌, 第127号, pp.87-88, 2011.4

- 8) 大熊武司, 他: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, 1996.3