

# 板状超高層建物の風力特性に関する研究

## A Study on Wind Force Characteristics on Flat High-rise Buildings

作田 美知子 MICHIKO SAKUTA

野田 博 HIROSHI NODA

長谷川 功 KO HASEGAWA

平田 裕一 YUICHI HIRATA

これまで数多くの矩形平面建物の風力特性が検証されデータベース化されているが、辺長比(D/B)の大きな(あるいは小さな)板状超高層建物の風力データベースはあまり整備されていない。本研究では塔状高層建物から板状高層建物までの風力を系統的に測定し、一般化風力、層風力の特性ならびに各風力間の相関について検討した。実験の結果、以下の成果を得た。風方向の一般化風力は前面のみならず背面の風力特性にも依存している。D/B が小さい場合、風方向では他の風力間との相関は低い。

**キーワード**：板状超高層、風圧測定、一般化風力、層風力、風力間の相関

In order to investigate the effects of length to width ratio on the characteristics of wind forces acting on flat high-rise buildings, wind tunnel experiments have been carried out with varying length to width building ratios. It was indicated that, the along wind forces depend on not only the characteristics of wind forces on the windward face but also on the leeward face. Correlations between the along wind forces and other forces are fairly low when the ratio of side length is small.

**Key Words**: Flat High-rise buildings, Wind Tunnel Experiment, Modal Wind Force, Local Wind Force, Correlation of the components of wind force

### 1. はじめに

構造形式の高度化に伴い、板状建物の高層化が可能となった。これまで塔状超高層建物を想定した数多くの矩形平面建物の風力特性が検証されデータベース化されている(例えば<sup>1)</sup>) が、辺長比(D/B)の大きな(あるいは小さな)板状超高層建物の風力データベースはあまり整備されていない。本研究では塔状高層建物から板状高層建物までの風力を系統的に測定し、板状超高層建物の風力特性を塔状超高層建物のそれと比較しながら検討した。検討に際しては、多質点系時刻歴計算による弾塑性風応答への適用も視野に入れて、全体風力のみではなく層風力や風力間の相関についても検討した。

### 2. 実験方法

対象とした建物形状は、建物高さ H=300mm と建物奥

行D=60mmを固定し、建物幅B=60mm～420mmと変化させた5つの矩形平面建物である。実験ケースを表-1に示す。縮尺は1/300に設定した。実験では建物模型の風圧力を同時測定し、各測定風圧に負担面積を乗じて足し合わせて風力とした。風圧測定点は各ケースとも高さ方向に10層設け、測定点数はD/B=1で320点、その他は400点とした。風力、風向角の定義ならびに層の配置を図-1に示す。実験風向は0°～90°まで5°ピッチとした。実験気流はべき指数0.27の勾配流を用い、実験風速は模型軒高で約14m/sとした。実験気流の平均風速、乱れ強さならびに乱れスケールの鉛直分布を図-2に示す。図-2中には「建築物荷重指針・同解説(1993年改訂版)」(以下、荷重指針'93)の地表面粗度区分IVの値も併せて示す。風圧測定の時間間隔と評価時間は、模型スケールでそれぞれ1/600秒、約40秒とした。実験状況を写真-1に示す。

表-1 実験ケース

H[mm]	D[mm]	B[mm]	B:D	D/B
300	60	60	1:1	1.00
		120	2:1	0.50
		180	3:1	0.33
		300	5:1	0.20
		420	7:1	0.14

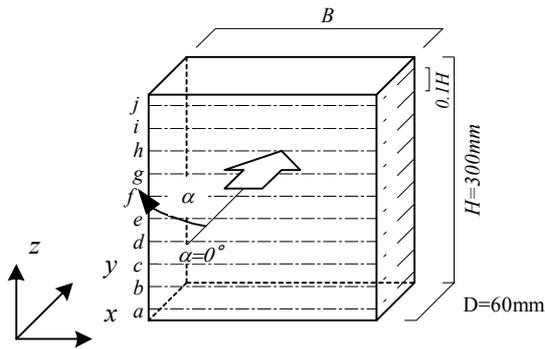


図-1 模型寸法，風向角ならびに風力の定義

### 3. 実験結果

#### (1) 一般化風力係数

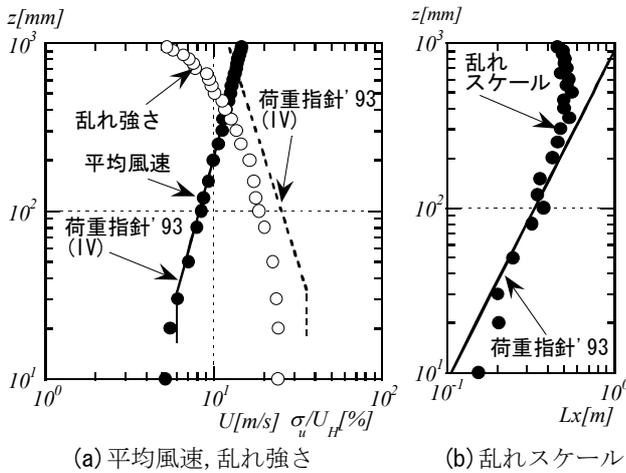
一般化風力係数を式(1)～式(3)に定義する。一般化風力を算出する際の振動モードは1次振動を想定した線形モード  $\mu(z)=z/H$  とした。風向角  $0^\circ$  の  $D/B > 1$  の値は各実験ケースの風向角  $90^\circ$  の値を用い、DをBに読み替えそれぞれ定義した。

$$\overline{C_{Fx}} = Fx / (q_H B H), \quad C_{Fx}' = \sigma_x / (q_H B H) \quad (1)$$

$$\overline{C_{Fy}} = Fy / (q_H B H), \quad C_{Fy}' = \sigma_y / (q_H B H) \quad (2)$$

$$\overline{C_{Mz}} = Mz / (q_H B^2 H), \quad C_{Mz}' = \sigma_z / (q_H B^2 H) \quad (3)$$

ここで、 $\overline{C_{Fx}}, \overline{C_{Fy}}$ : それぞれ x 方向, y 方向の一般化平均風力係数,  $\overline{C_{Mz}}$ : z 軸廻りの一般化平均モーメント係数,  $F_x, F_y, M_z$ : それぞれ x 方向の一般化風力, y 方向の一般化風力, z 軸廻りの一般化振りモーメントの平均値,  $C_{Fx}', C_{Fy}'$ : それぞれ x 方向, y 方向の一般化変動風力係数,  $C_{Mz}'$ : z 軸廻りの一般化変動モーメント係数,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ : それぞれ x 方向一般化変動風力, y 方向一般化変動風力, z 軸廻り一般化変動振りモーメントの標準偏差,  $q_H$ : 模型軒高速度圧



(a) 平均風速, 乱れ強さ (b) 乱れスケール  
図-2 実験気流の鉛直分布

風向  $0^\circ$  のときの y 方向 (風方向) の一般化平均風力係数  $C_{Fy}$  と一般化変動風力係数  $C_{Fy}'$  を図-3に示す。図中には前面のみの値 ( $C_{Fyf}, C_{Fyf}'$ ) と背面のみの値 ( $C_{Fyb}, C_{Fyb}'$ ) も示す。  $C_{Fy}$  は、  $D/B=0.5 \sim 1$  付近で最も大きくなり、  $D/B$  がそれより小さくなると若干値が小さくなる。また  $D/B=1 \sim 2$  で値が小さくなり、  $D/B > 2$  では大きな変化はない。  $C_{Fy}$  が  $D/B=0.5 \sim 1$  で最大となる傾向は2次元角柱で  $D/B=0.6$  付近で平均抗力係数が最大となる傾向<sup>2)</sup>に類似している。  $C_{Fyf}, C_{Fyb}$  も  $C_{Fy}$  と定性的には同様な性状を示しているが、  $D/B$  に対する変化は  $C_{Fyb}$  の方が大きく、  $C_{Fy}$  の  $D/B$  に対する性状は前面の風力よりも背面の風力の寄与が大きいことが分かる。

$C_{Fy}'$  は  $C_{Fy}$  と同じく  $D/B=1$  付近で最大となるが、  $D/B < 1$  の領域で異なり、  $D/B$  が小さくなるに従い風速の変動成分のスケールに対して見付け面のスケール (B) が大きくなる (規模効果) ため、値が小さくなる。  $C_{Fyf}'$  は、  $C_{Fy}'$  と比べて  $D/B > 1$  の領域で異なり、  $C_{Fy}'$  が  $D/B=1 \sim 2$  で値が小さくなるのに対し、  $C_{Fyf}'$  は  $D/B$  が1以上の範囲ではほぼ一定の値となっている。  $C_{Fyb}'$  は  $C_{Fy}'$  とほぼ同様な傾向であり  $D/B=1$  付近で最大となっている。

$C_{Fyb}'$  は建物背面に生じる交番渦に強く影響されているものと考えられ、  $D/B=1$  付近で最も強い交番渦が生じているものと思われる。  $D/B$  が大きくなると剥離渦が側面

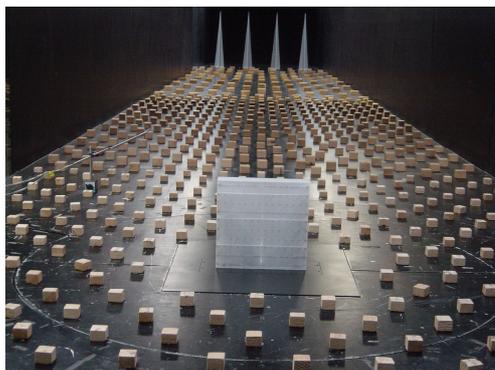


写真-1 実験状況 ( $D/B=0.2$ )

に再付着するため $C_{Fyb}$ 'は小さな値となる。

以上のことから、D/Bの違いによる風方向の一般化平均風力や変動風力の性状は前面に作用する風力のみならず背面に作用する風力にも依存しているものと思われる。

風向角 $0^\circ$ のときのx方向(風直角方向)の一般化変動風力係数 $C_{Fx}$ 'を図-4に、一般化変動モーメント係数 $C_{Mz}$ 'を図-5にそれぞれ示す。図-4、図-5には荷重指針'93の値も付記する。図-5中には荷重指針'93で対象としている $\mu(z)=1$ とした一般化変動モーメント係数も付記する。 $C_{Fx}$ 'はD/Bが大きくなるに伴い値も大きくなるが、その増加率はD/B=1付近の前後で異なり、D/Bが1より小さいときと比較するとD/B>2での増加率は緩やかである。一方 $C_{Mz}$ 'はD/Bの増加に伴い2次曲線的に値が増加している。

(2) 前面と背面の相互相関特性

相互相関係数、ルート・コヒーレンスを式(4)、式(5)に定義する。

$$R_{ij}(0) = \sigma_{ij}(0) / \sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2} \quad (4)$$

$$\sqrt{coh(n)} = |S_{ij}(n)| / \sqrt{S_i(n) S_j(n)} \quad (5)$$

ここで、 $R_{ij}(0)$  :  $i,j$ の相互相関係数、 $\sqrt{coh(n)}$  :  $i,j$ のル

ート・コヒーレンス、 $\sigma_{ij}(0)$  :  $i,j$ の共分散、 $S_{ij}(n)$  :  $i,j$ のクロススペクトル、 $S_i(n), S_j(n)$  : それぞれ $i, j$ のパワースペクトル密度、 $i, j$  :  $C_{Fyf}', C_{Fyb}'$

風方向の一般化平均風力の前面のみの値と背面のみの値の相互相関係数を図-6に、ルート・コヒーレンスを図-7に示す。相互相関係数はD/B=1付近で最大をとり、D/B<1では若干値が小さくなる。また、D/Bが1と2の間で値は小さくなり、D/Bが大きい場合は前面と背面の相関は低い。

ルート・コヒーレンスは浅見ら<sup>3)</sup>が示したのと同様に、D/Bが1以上では無次元振動数 $nB/U_H$ の増加に伴い相関が低くなるが、D/B<1では $nB/U_H$ の増加に伴い相関が高くなり、その後急に相関が低くなる傾向がある。

(3) 一般化風力のパワースペクトル密度

$C_{Fy}$ '(風方向)、 $C_{Fx}$ '(風直角方向)、ならびに $C_{Mz}$ '(揺れ)のパワースペクトル密度を図-8に示す。 $C_{Fy}$ '(風方向)のパワースペクトル密度は、D/Bが小さくなるに従い規模効果による高周波数側成分の減衰が大きくなるが、D/B>1ではほぼ同様な形状となっている。 $C_{Fx}$ '(風直角方向)は、 $0.33 < D/B < 2$ では交番渦によるものと思われる1つのピークを有するが、D/Bがそれより小さくなると高周波数側の成分が大きくなっている。D/B=3の場合、低周波数側に緩やかなピークと高周波数

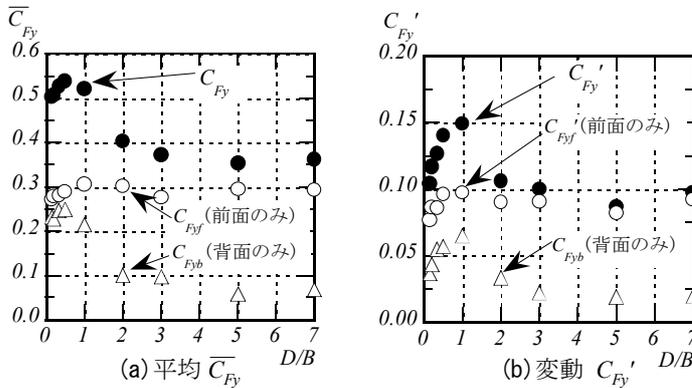


図-3 風方向の一般化風力係数

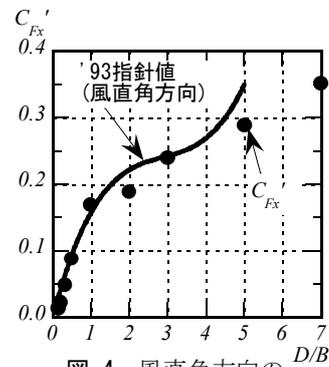


図-4 風直角方向の一般化変動風力係数

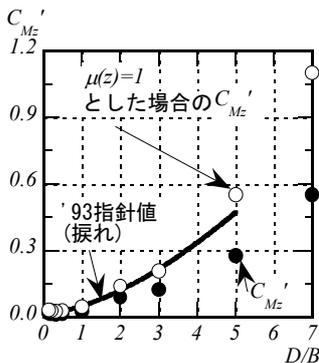


図-5 一般化変動モーメント係数

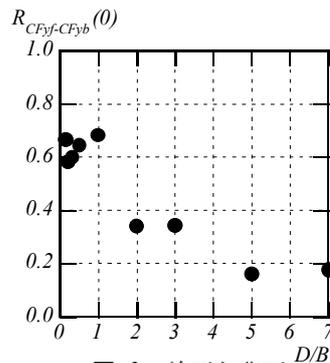


図-6 前面と背面の相互相関係数(風方向)

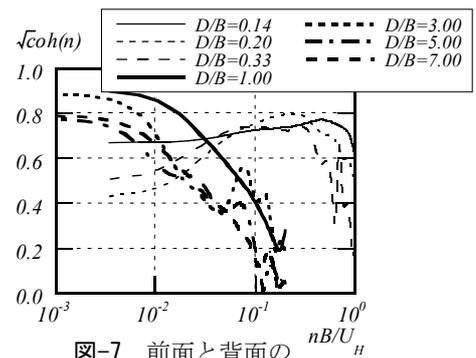


図-7 前面と背面のルートコヒーレンス(風方向)

側に2つめの小さなピークを有するが、それ以上D/Bが大きくなると高周波数側のピークはなくなる。 $C_{Mz}$ '(捩れ)のパワースペクトル密度は、D/B=1では2つのピークを有するが、それ以外では緩やかな1つのピークを有する形状となっている。ただし、D/Bが小さくなるに従い高周波数成分が大きくなっている。

(4) 層風力のパワースペクトル

風向角 $0^\circ$ のy方向の変動層風力係数 $C_{Fy}(i)$ '(風方向)、x方向の変動層風力係数 $C_{Fx}(i)$ '(風直角方向)、ならびにz軸廻りの変動層モーメント係数 $C_{Mz}(i)$ '(捩れ)のパワースペクトル密度の一例としてD/B=5,1,0.2の場合を図-9に示す。 $C_{Fy}(i)$ '(風方向)のパワースペクトル密度の形状は、いずれの辺長比においても各層でほぼ同じである。D/Bが小さい場合(D/B=0.2)、j層の高周波数成分

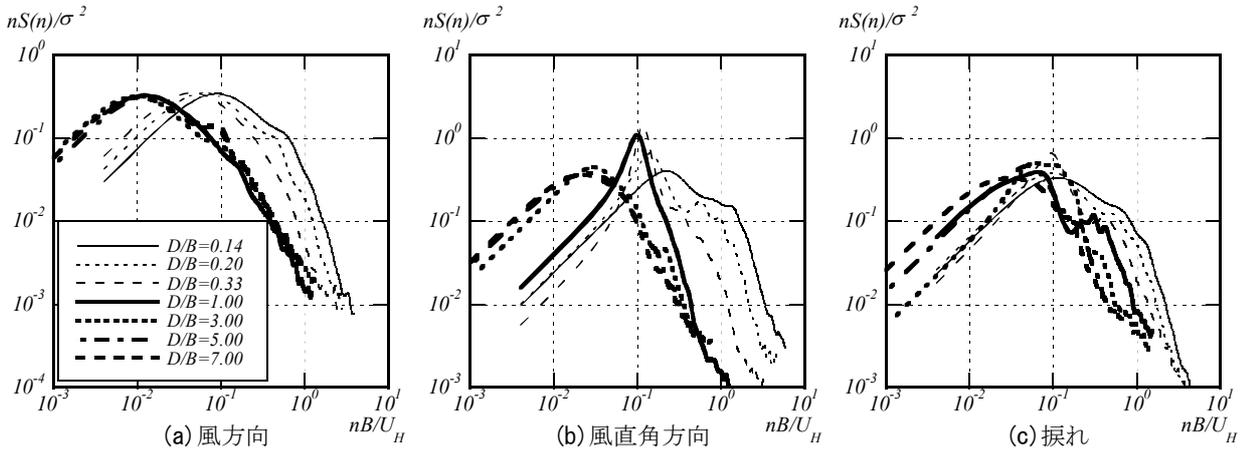


図-8 一般化変動風力、一般化変動モーメントのパワースペクトル密度

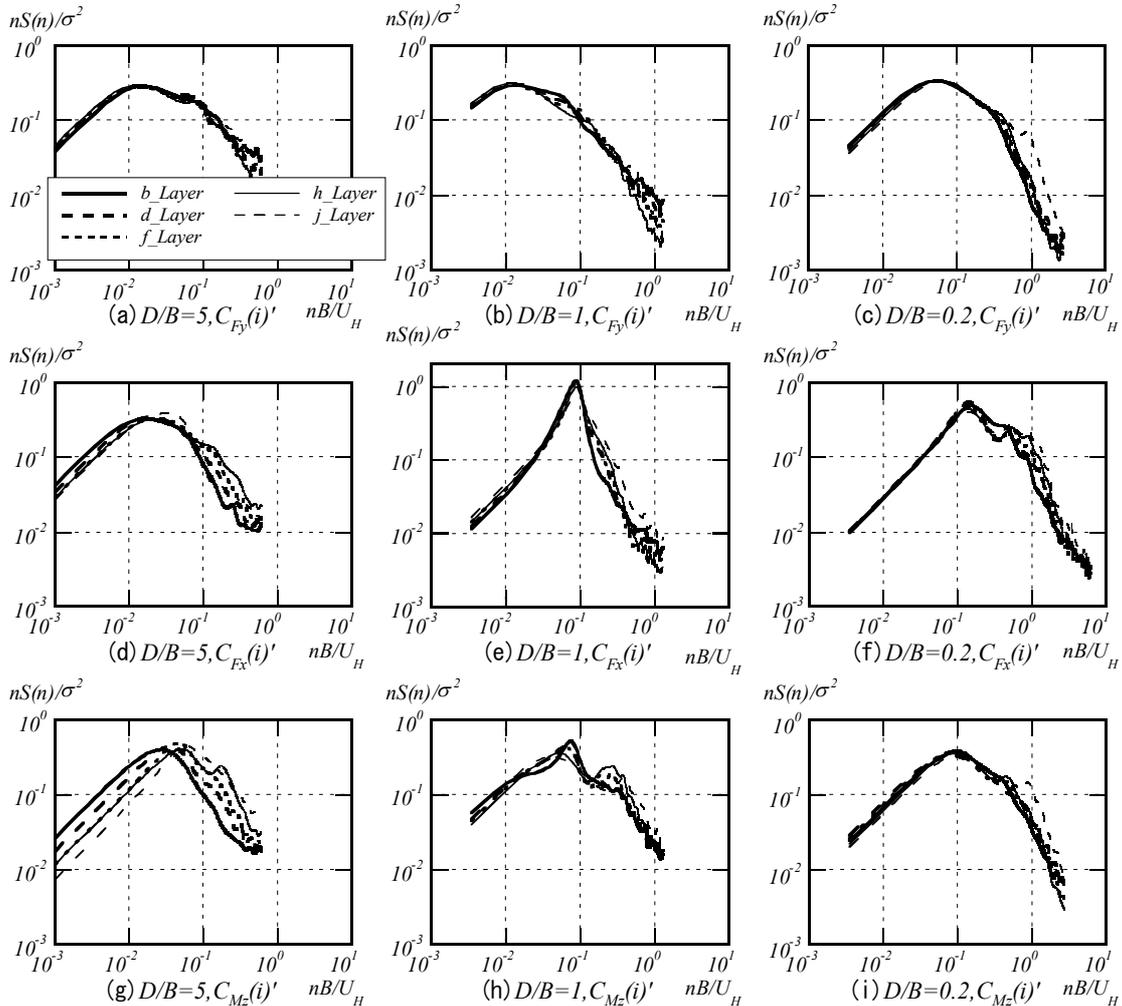


図-9 層風力、層モーメントのパワースペクトル密度(風向角 $0^\circ$ )

分が若干大きくなるが、いずれの層においても規模効果により高周波数成分の減衰が大きい。 $C_{Fx}(i)$ (風直角方向)のパワースペクトル密度の形状は各辺長比とも一般化風力のパワースペクトル密度の形状に類似しており、各層の形状おおむね同様である。ただし、ピーク以降の高周波数成分では高層部ほど成分が大きくなっている。

$C_{Mz}(i)$ (捩れ)のパワースペクトル密度はD/Bが小さい場合(D/B=0.2)、各層でほぼ同じ形状である。D/B=1では低層部ほど明確な1次ピークをもち、高層部ほど1次ピークは緩やかになり2次ピークが明確になる。また、D/Bが大きい場合(D/B=5)、各層の形状はほぼ同じであるが、高層部ほどピークの位置が高周波数側にシフトし、h層では高周波数成分で小さなピークをもつ。

(5) 層風力の相互相関特性

g層を基準とした風方向の変動層風力のルート・コヒーレンスと位相差の一例としてD/B=1,0.2の場合を図-10に示す。ここで、横軸の $\Delta h$ は2層間の距離を表す。ルート・コヒーレンスはD/B=1,0.2ともに無次元振動数 $n \Delta h/U_H$ の増加に伴い指数関数的に減衰するが、その程度は辺長比により異なり、D/B=1の方が減衰が大きい。位相差はルート・コヒーレンスが比較的高い場合(D/B=0.2では各層とも、D/B=1の場合は層間距離が小さいとき)には概ね $0^\circ$ であり、ルート・コヒーレンスが低い場合には位相差は $0^\circ$ を中心にはばらついている。

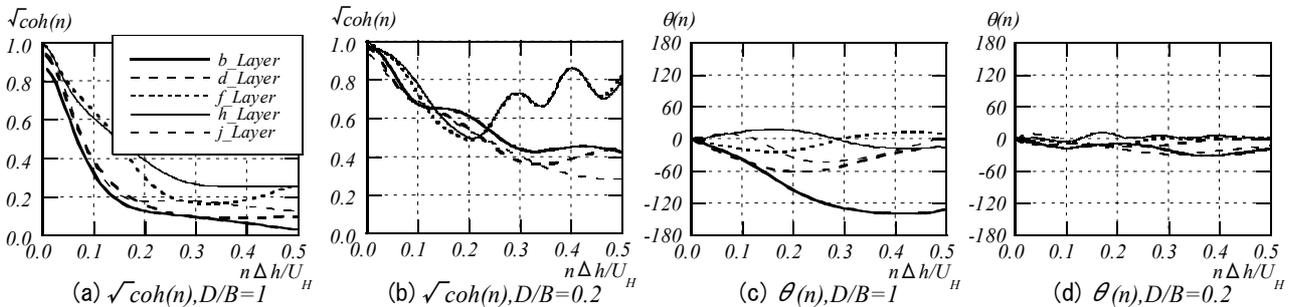


図-10 層風力間のルート・コヒーレンス、位相差(風方向)

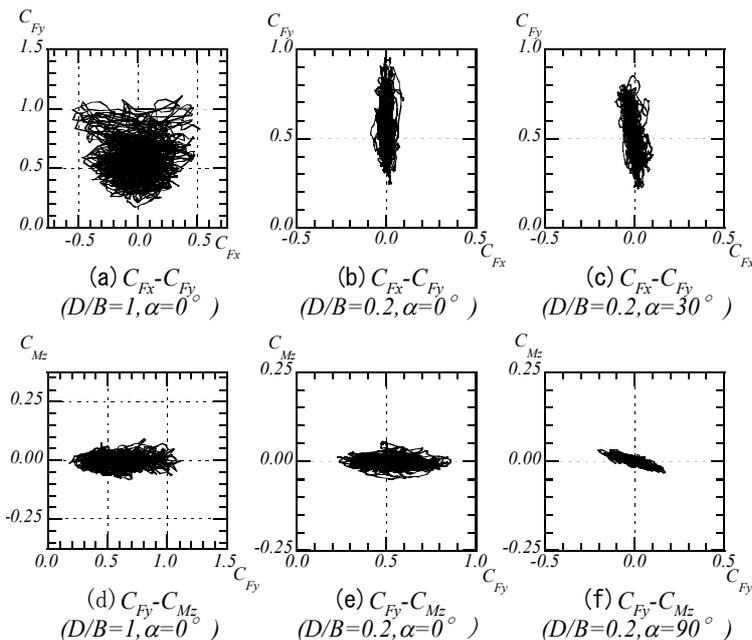


図-11 時刻歴風力のリサーチ波形

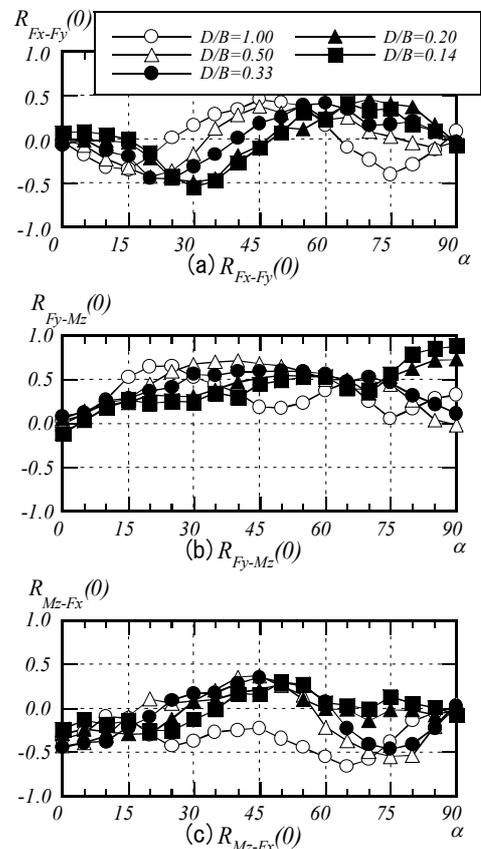


図-12 風力間の相互相関係数

### (6) 風力間の相互相関特性

D/B=1,0.2 の2つの時刻歴風力のxy平面表示(以下、リサーチ波形という。)の一例を図-11に、各風力間の相互相関係数を図-12にそれぞれ示す。

菊池ら<sup>4)</sup>が示す通り、風向角 $0^\circ$ のときD/B=1では $C_{Fx}$ - $C_{Fy}$ 間の相互相関係数 $R_{Fx-Fy}(0)$ は小さいにもかかわらず、 $C_{Fy}$ が最大のときに $C_{Fx}$ も大きな値となる(図-11(a), 12(a))。しかし、D/Bが小さい場合(D/B=0.2)ではその傾向はなくなり、 $C_{Fy}$ と $C_{Fx}$ が同時に大きな値となることはない(図-11(b))。風向角 $0^\circ$ のときの $C_{Fy}$ - $C_{Mz}$ 間の相関はD/B=1,0.2ともに低い(図-11(d), (e)), 図-12(a)よりD/Bが小さい場合(D/B=0.2)においても風力間の相関が高くなる風向角があることがわかる。また、図-12(b), (c)より風向角 $90^\circ$ の $R_{Fy-Mz}(0)$ , 風向角 $0^\circ$ の $R_{Mz-Fx}(0)$ の値が大きいことから建物に正対する風向角の場合、風直角方向と振れの相関が高いことがわかる。

図-12(a)でD/B=0.2において $R_{Fx-Fy}(0)$ が最大となる風向角 $30^\circ$ の場合のリサーチ波形(図-11(c))をみると、 $C_{Fy}$ が大きな値をとるときに $C_{Fx}$ も大きな値をとり、 $C_{Fx}$ - $C_{Fy}$ 間の相関が高いことがわかる。しかし、このときの $C_{Fy}$ は風向角 $0^\circ$ の $C_{Fy}$ よりも小さいこと、風向角 $30^\circ$ における $C_{Fx}$ は $C_{Fy}$ と比較して小さいことから、風向角 $30^\circ$ の $C_{Fy}$ と $C_{Fx}$ を合成したとしても風向角 $0^\circ$ のときの $C_{Fy}$ の方が大きい。 $C_{Fy}$ - $C_{Mz}$ 間についても同様であり、図-12(b)で $R_{Fy-Mz}(0)$ が最大となる風向角 $90^\circ$ の場合のリサーチ波形(図-11(f))より、風向角 $90^\circ$ では $C_{Fy}$ - $C_{Mz}$ 間の相関が高いことが認められるが、 $C_{Fy}$ ,  $C_{Mz}$ それぞれの値は小さい。

以上のことから、D/Bが小さい場合、風向角を変化させると $C_{Fx}$ - $C_{Fy}$ ,  $C_{Fy}$ - $C_{Mz}$ あるいは $C_{Mz}$ - $C_{Fx}$ の相関が高くなる風向角がみられるが、そのときの各風力あるいは合成された風力は必ずしも大きくはならない。y方向風力は風向角 $0^\circ$ (風方向)のときに、各風力間の相関は低いが、他の風向角に比べて大きな値となる。

## 4. おわりに

風洞実験により、一般化風力の性状、層風力の特性ならびに各風力間の相関を比較的広範囲の建物辺長比について考察し、以下の知見を得た。

- ①風方向の一般化風力は前面のみならず背面の風力特性にも依存している。ただし、前面風力と背面風力の依存率は気流の乱れ強さに影響されることが考えられ今後の検討課題である。
- ②風方向の一般化風力係数はD/B=1付近で最大にな

り、D/B<1ではD/B=1のときよりも小さな値をとる。

- ③風方向、風直角方向の層風力のパワースペクトル密度の各層の形状は高周波数成分で若干異なるが、ほぼ同じ形状である。層モーメントにおいてはD/Bが1より大きい場合各層で形状が異なる。
- ④風向角 $0^\circ$ の場合、D/B=1ではy方向(風方向)の風力が最大のときx方向(風直角方向)の風力も大きな値となる。
- ⑤今回は建物応答を考慮していない風力そのものの特性を検討したが、今後は建物応答を考慮した風力特性を調査する予定である。

### 参考文献

- 1)日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(1993年改訂版)
- 2)中口ほか：航空学会誌第16巻第168号,pp.1-5,1968.1
- 3)浅見ほか：風方向風荷重算定式の一提案,日本建築学会大会梗概集(2002.8),pp.195-196
- 4)菊池ほか：高層建物に作用する風荷重の組合せに関する研究,日本建築学会大会梗概集(2002.8),pp.197-198