

◇技術紹介 technical report

# 超高層建物の風応答基本特性 Wind-induced Response of High Rise Buildings

佐々木晶邦 Akikuni Sasaki  
川口 彰久 Akihisa Kawaguchi

## 1. はじめに

超高層建物の構造設計が風荷重によって決まるようになり、耐風性の検討<sup>1) 2)</sup>が求められるようになってきている。基本計画の時点からどのような形態が風荷重の面から有利であるかを把握しておくことは、合理的な設計を行うために重要である。そこで、様々な形状の超高層建物の設計用風荷重算定の基礎となるデータを得るべく、基本的な平面形状の建物模型を製作し、乱れ特性の異なる2種類の気流を用いて風洞実験を行った。そして、形状および気流の違いによる風応答特性を定量的に評価した。

さらに、正方形断面角柱について形状の異なる2種類の隅欠きを施して実験を行い、隅角部形状を工夫することにより風荷重が低減することを検証した。

風応答の計算は、耐風設計支援システム(WIND 96)<sup>3)</sup>を用いた。

## 2. 実験方法

実験は多目的大型風洞を用いて行った。風洞気流は、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」<sup>4)</sup>にある地表面粗度区分がIV(中層市街地, flow1)およびII(田園地帯, flow2)の2種類の気流をシミュレートした。作成した風洞気流の平均風速および乱れ強さの鉛直分布をFig 1に示す。模型に働く風力は、5分力天秤(日章電機製 LMC-5511-10HR)を用いて計測した。

模型は合計10種類作成した。模型の外観をPhoto 1に、模型の寸法諸元をTable 1に示す。模型作成にあたり、Table 2に示すように軒高600m、地上150階建てで延べ床面積は約850,000m<sup>2</sup>のプロトタイプを想定している。模型の縮尺は、1,000分の1である。

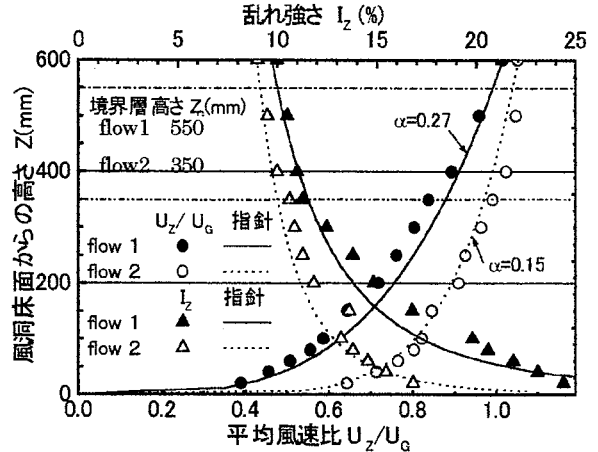


Fig. 1 風洞気流特性  
Wind Tunnel Flow

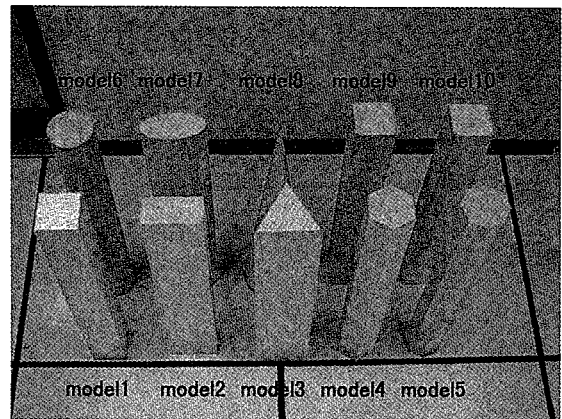


Photo 1 実験模型  
Experimental Models

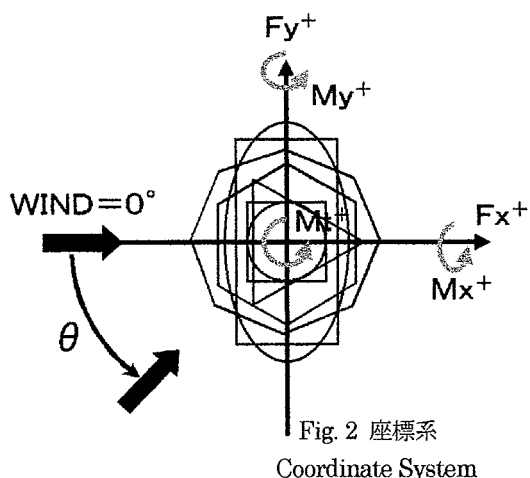
Table 2 プロトタイプ  
Prototype

諸元	プロトタイプの数値
高さ(m)	600
階数	150
延べ床面積(m <sup>2</sup> )	約850,000
1次固有周期(sec)	5.0~10.0

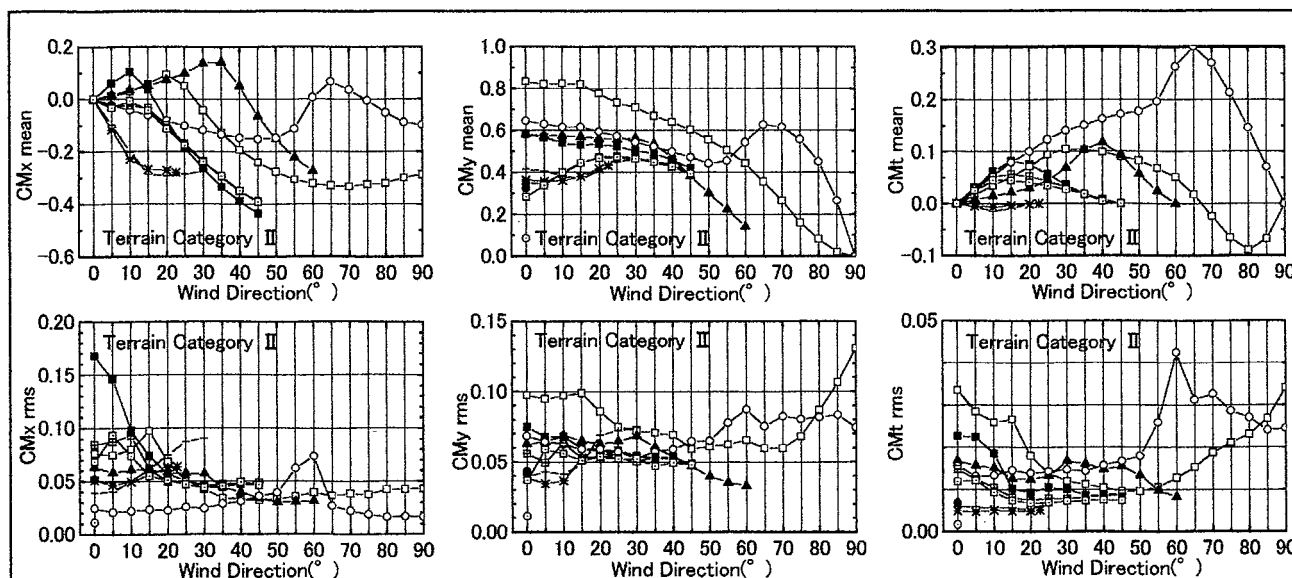
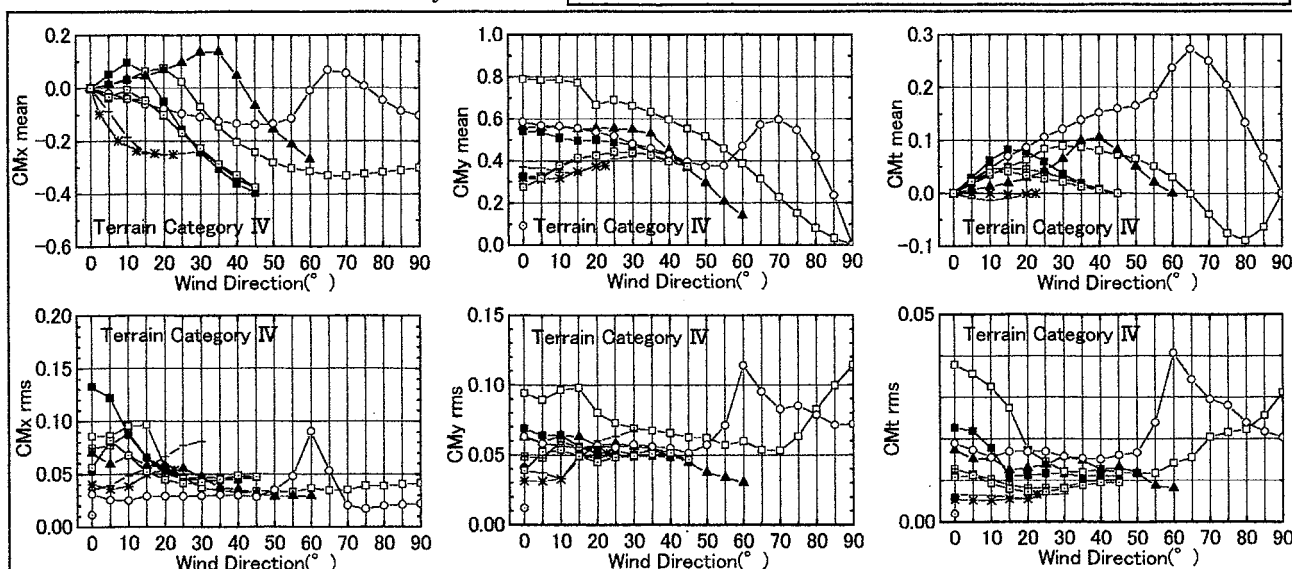
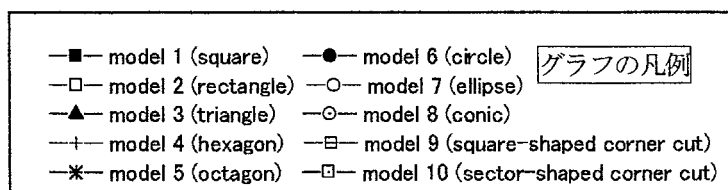
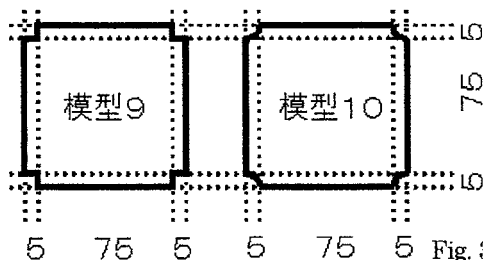
Table 1 実験模型の寸法諸元  
Dimensions of Experimental Models

模型番号	立面形状	平面形状	代表寸法(m)	$\theta(^{\circ})$	H(m)	B(m)	H/B	備考
model 1	角柱	正方形	0.075(1辺)	0~45	0.6	0.075	8.00	
model 2		長方形	0.053×0.105	0~90		0.075	8.00	辺長比1:2、 $B=\sqrt{(0.053 \times 0.105)}$
model 3		正三角形	0.114(1辺)	0~60		0.114	5.26	
model 4		正六角形	0.046(1辺)	0~30		0.080	7.50	
model 5		正八角形	0.034(1辺)	0~22.5		0.082	7.32	
model 6	円柱	円形	0.085(直径)	0		0.085	7.06	
model 7		楕円形	0.06×0.12	0~90		0.085	7.06	軸比1:2、 $B=\sqrt{(0.06 \times 0.12)}$
model 8	円錐柱	円形	0.145(底面径)	0		0.048	12.50	底部から2/3Hでの直径をBとした
model 9	角柱	正方形	0.075(1辺)	0~45		0.075	8.00	隅角部を正方形隅欠き
model 10		正方形	0.075(1辺)	0~45		0.075	8.00	隅角部を扇形隅欠き

設定した座標系と実験風向の関係を Fig 2 に示す。5 分力天秤の座標系は、模型の見付け幅 B と天秤の Y 軸を一致させた。実験風向  $\theta$  の刻み角度は  $5^\circ$  である。



model 9 および model 10 は、Fig 3 に示すように model 1 の隅角部に対して正方形および扇形の隅欠きをそれぞれ施したものである。



3. 実験結果

3.1 空気力係数

実験で測定した空気力は、以下により空気力係数として無次元化した。結果を Fig 4~5 に示す。

$$CM_x = \frac{M_x}{0.5 \rho U_H^2 A H} \text{ ----- (1)}$$

$$CM_y = \frac{M_y}{0.5 \rho U_H^2 A H} \text{ ----- (2)}$$

$$CM_t = \frac{M_t}{0.5 \rho U_H^2 A D} \text{ ----- (3)}$$

ここで、 $CM_x, CM_y, CM_t$  : X, Y 軸方向およびねじれの空気力係数、 $M_x, M_y, M_t$  : 天秤の時系列データ、 $U_H$  : 模型軒高の風速(m/s)、 $\rho$  : 空気密度(kg・sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)、 $A$  : 見付け面積(m<sup>2</sup>)、 $H$  : 模型高さ(m)、 $D$  : 代表幅(m)である。

見付け幅に対し奥行が長い model 2, 7 は風向により大きな係数値が見られる。model 7 では他の模型と比べて  $CM_t$  が特に大きい。flow 1 に対し気流乱れの小さな flow 2 では、平均値についてみると、最大値の増加が見られる(例えば、model 1 では  $CM_x$  の絶対最大値が約 10% 増加する)。変動値は、角部を有する model 1~5, 9, 10 では平均値と同様に各係数の最大値の増加が見られる一方、曲面を有する model 6~8 では逆に低下している。

3.2 変動空気力のパワースペクトル

Fig 6 に  $\theta = 0^\circ$  における変動空気力パワースペクトルを、Table 3 にストローハル数におけるスペクトル値の一覧を示す。ストローハル数  $St$  は、次式で表される。

$$St = \frac{n_v \cdot D}{U_H} \text{ ----- (4)}$$

ここで、 $n_v$  : 渦の放出周波数(Hz)、 $D$  : 代表長さ (m)、 $U_H$  : 頂部風速(m/s)である。

風直角方向のスペクトルには明確なピークが見られる。このときのストローハル数は、model 1~3, 9, 10 で約 0.09~0.1 であり、model 4~7 で約 0.13~0.17、model 8 では他の模型と比べて明確ではないが約 0.2 である。model 9, 10 ではピーク値が低減されている。model 7 では、 $\theta$  の増加に伴い明確なピークが見られなくなる一方で無次元周波数 0.1 以上の領域でスペクトル値が増加する。これは、壁面気流剥離と密接に関わる現象と推測される。

風向の影響は、Table 3 から  $\theta$  が増加すると  $M_x$  に代わり  $M_y$  のストローハル数が大きくなるのが分かる。 $M_t$  については、大きな変化は見られない。

気流の乱れの影響は、Table 3 からストローハル数付近では flow 2 の方がピーク値が大きい。また、無次元周波数 0.2 以上となる範囲では flow 2 のスペクトルがより強くなっている。

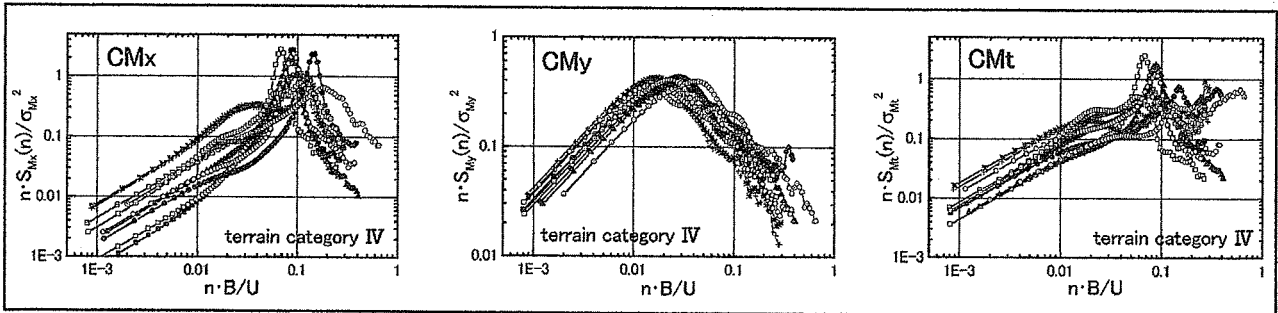


Fig. 6 変動空気力のパワースペクトル(Flow 1)  
Power Spectrum of Fluctuating Wind Force

Table 3 スペクトルピーク  
Peak Value of Power Spectrum

凡例	上段	$n \cdot B / U$
	下段	$n \cdot Sp(n) / \sigma^2$

	$\theta$	Flow 1			Flow 2			$\theta$	Flow 1			Flow 2		
		Terrain Category IV			Terrain Category II				Terrain Category IV			Terrain Category II		
		$M_x$	$M_y$	$M_t$	$M_x$	$M_y$	$M_t$		$M_x$	$M_y$	$M_t$	$M_x$	$M_y$	$M_t$
model 1	0	0.092	0.024	0.092	0.092	0.026	0.097	45	0.081	0.081	0.077	0.024	0.086	0.086
		2.733	0.373	1.527	3.054	0.390	1.161		0.525	0.415	0.826	0.350	0.390	0.827
model 2	0	0.068	0.014	0.068	0.072	0.022	0.072	90	0.023	0.081	0.057	0.023	0.077	0.038
		2.805	0.361	2.446	2.758	0.371	2.394		0.464	1.048	0.530	0.464	0.962	0.420
model 3	0	0.088	0.033	0.088	0.088	0.031	0.093	60	0.031	0.055	0.046	0.029	0.049	0.087
		1.874	0.379	1.737	1.916	0.404	2.115		0.334	0.369	0.397	0.337	0.349	0.447
model 4	0	0.117	0.015	0.110	0.124	0.014	0.124	30	0.098	0.098	0.098	0.104	0.104	0.104
		0.960	0.398	0.429	1.168	0.374	0.480		2.639	1.426	0.874	3.206	1.759	1.680
model 5	0	0.134	0.017	0.268	0.142	0.020	0.142	22.5	0.113	0.113	0.284	0.119	0.119	0.119
		0.936	0.425	0.913	1.400	0.403	1.200		2.539	0.599	0.614	2.958	0.814	0.785
model 6	0	0.149	0.028	0.149	0.149	0.024	0.335	-	-					
		2.354	0.432	0.739	2.367	0.370	0.445							
model 7	0	0.091	0.016	0.086	0.091	0.014	0.091	90	0.041	0.043	0.097	0.032	0.048	0.097
		2.367	0.364	1.176	2.102	0.361	1.005		0.329	0.446	0.364	0.340	0.449	0.449
model 8	0	0.179	0.042	0.605	0.240	0.042	0.538	-	-					
		0.651	0.393	0.667	0.821	0.391	0.592							
model 9	0	0.109	0.023	0.082	0.097	0.023	0.073	45	0.086	0.086	0.086	0.091	0.091	0.091
		1.107	0.366	0.665	1.093	0.501	0.698		0.661	0.697	1.283	0.601	0.691	1.400
model 10	0	0.109	0.023	0.058	0.073	0.027	0.054	45	0.086	0.086	0.081	0.091	0.091	0.091
		0.772	0.405	0.502	0.589	0.414	0.502		0.697	0.735	1.054	0.581	0.573	1.033

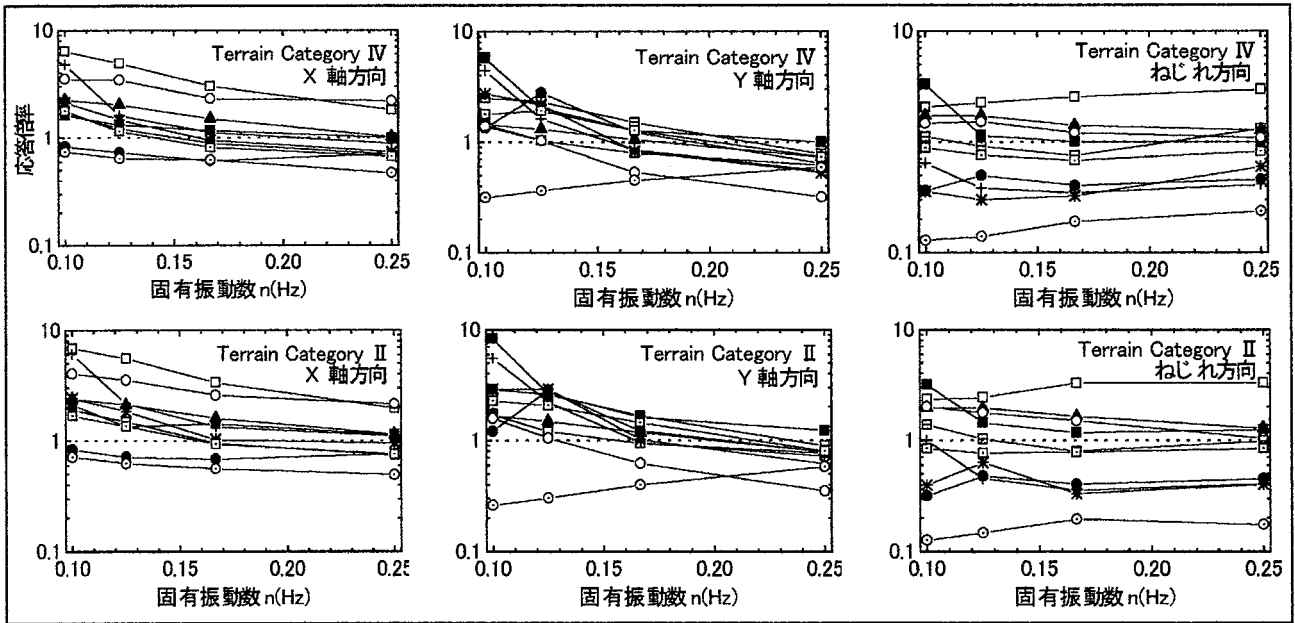


Fig. 7 応答倍率による評価 (上段: flow 1, 下段: flow 2) Response Factor

4. 空力特性評価

建物の挙動は、変動する風荷重に対して常に線形の関係にあることを前提とした。質点*i*での並進運動により生じる加速度および質点*i*の剛心からの水平距離*L*(m)におけるねじれ振動により生じる加速度は、X軸方向の場合次式により求められる。

$$\ddot{X}_i = g_x (2\pi \cdot n_{X0})^2 \left[ \sigma_{MX2} \cdot \mu_{Xi} \cdot Z_N / \left\{ (2\pi \cdot n_{X0})^2 m_x^* \cdot Z_N^2 \right\} \right] \quad (5)$$

変動空気力の共振成分 $\sigma_{MX2}$ は、次式で求められる。

$$\sigma_{MX2} = C_{MXrms} \cdot (0.5\rho \cdot U_H^2 \cdot A \cdot H) \sqrt{\frac{\pi}{4\eta_Y} \frac{n_{Y0} \cdot S(n_{Y0})}{\sigma_{MX}^2} \cdot \Phi_Y} \quad (6)$$

ここで、*g*: ピークファクタ、*n*: 1次固有振動数(Hz)、 $\mu$ : 振動モード、*m*\*: 一般化質量(t·sec<sup>2</sup>/m)、*C*<sub>MXrms</sub>: 変動空気力係数、 $\eta$ : 構造減衰、 $\phi$ : モード係数である。建物の固有振動数をパラメータにして、プロトタイプ(model 1, flow 1, n=0.25Hz)の応答加速度に対する倍率を算定した。結果をFig 7に示す。

図によると、X軸方向の応答倍率が最大となるのはmodel 2である。model 8は、他の模型と比べて応答倍率の値が最も小さい。model 1に対して、model 9はY軸方向の応答倍率が増加しているが、model 10では応答倍率はX、Y軸方向およびねじれ方向ともに低下している。固有振動数の低下に従って応答倍率は増加していくが、固有振動数が0.125Hz以下になるとY軸方向およびねじれの応答倍率が急に大きくなる傾向がみられ、特にmodel 1, 4で顕著である。このような形状の建物では、基本動特性を検討する際に注意が必要である。

地表面粗度の影響について考察する。flow 1に対して気流乱れが小さくなるflow 2では、角部を有する模型の応答倍率が増加する傾向が見られるが、曲面を有する模

型では応答倍率がほとんど増加しないかまたは減少している。これは、角部を有する模型では、地表面粗度IIでは気流の持つ乱れが小さくなるため、模型の風上側の角部から発生する剥離現象がより顕著になり、後流域の変動が増大するのに対し、曲面を有する模型では、流れの明確な剥離が起きないため強い負圧が発生しにくく、応答に対する気流の乱れの影響が支配的となるため、乱れの減少に比例して応答倍率が低下するとも思われる。

5. まとめ

基本形状模型を対象に天秤実験を行い、空気力特性の違いが共振応答に与える影響について考察を行った結果、1) 正方形角柱の空気特性は、今回考案した扇形の隅欠きにより安定して改善される、2) 円錐形状は、空気特性に対して有利な形状である、3) 角部を有する模型は、曲面を有する模型と異なり、気流乱れの減少に伴い応答倍率が増加する、といった知見を得た。

参考文献

- 1) 川口彰久他: 超高層RC煙突に作用する風力特性, 建築学会大会, (1997)
- 2) 川口彰久他: 超々高層建築物「ミレニアムタワー」の耐風性能に関する研究, 技術研究所報48号, (1994)
- 3) 川口彰久他: 耐風設計支援システム 超高層建物を対象とした設計用風荷重・風揺れ予測のためのデータベース (WIND96), 研究報告書, (1997)
- 4) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, (1993)