

# ごみ焼却施設における煙突の耐風設計

## Design Method for Wind Load of RC Stacks in Incineration Plant

岡本 紀明 シビルエンジニアリング部 土木建築設計室  
 飯田 泰彦 シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 主査  
 吉田 勝利 シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 統括スタッフ

Noriaki Okamoto, Yasuhiko Iida  
 and Katsutoshi Yoshida

近年、ごみ焼却施設の煙突において、高強度コンクリートの採用などによる軽量化のため、外筒断面の決定要因は、地震荷重から共振時風荷重に移行する傾向にある。一方、2000年6月の建築基準法改正による仕様規定から性能規定への流れの中で、煙突の合理的設計として、共振時風荷重を適切に把握することがより重要となってきた。本稿では、典型的な平面形状を持つ煙突の風洞実験結果から、共振時の風力および風応答特性を明らかにするとともに、共振時風荷重と地震荷重との比較検討を行う。

In recent years, the wall thickness of RC stack in incineration plants has reduced considerably, mainly because of the adoption of high-strength concrete. As a result, across-wind load became a dominant design factor of RC stack, instead of seismic load. On the other hand, performance-based design was specified in the revised Building Standard Law of Japan enforced in June 2000, which tends to allow for various design methods inclusive of loading. In this context, exact evaluation of resonant wind load has become more and more important. This paper describes the result of wind tunnel tests for stacks of typical shapes, clarifies dynamic response characteristics of stack in across-wind direction, and finally compares the derived wind load with seismic load.

### 1. はじめに

ごみ焼却施設の煙突は、有害物を除去した燃焼ガスを外部へ排出するダクト機能を有する鋼製内筒と、暴風時や地震時に内筒を支持する機能を有する鉄筋コンクリート製(以下、RCと略記する)外筒から構成される。昭和50年代にそれまで主流だった鉄塔煙突は、周辺環境と調和する円形、正方形、三角形などの平面形状を持つデザイン重視のRC外筒に移り変わった。煙突の耐風設計の考え方は、各規準<sup>1),2)</sup>に示されているが、特に、共振時における風直角方向の渦励振および空力不安定振動の応答性状は、平面形状、剛性、質量および減衰などの構造特性、さらに風の特性に応じて複雑に変化するため、風洞実験などでの予測を必要とする。

一方、近年では、高強度コンクリートの採用による軽量化などのため、RC外筒断面の決定要因が地震荷重から共振時風荷重に移行する傾向にある。2000年6月の建築基準法改正による性能設計への流れの中で、煙突の合理的設計として、共振時風荷重を適切に把握することがより重要となってきた。

本報では、ごみ焼却施設のRC煙突における典型的な平面形状において、風力および応答の風洞実験を行い、動的風力特性と風応答特性を明らかにした。また、実設計に利用できるように、建築物荷重指針<sup>3)</sup>で規定されている荷重算定法に準拠した設計用風力係数から共振時風荷重を算出

し、地震荷重との比較検討を行う。

### 2. ごみ焼却施設の煙突

実験対象煙突の構造諸元をTable 1に示す。典型的な平面形状である正方形、円形、正三角形の3種類を選択した。平面の大きさは、2本の内筒と点検用階段を包含し、高さは、比較的良好に見られる60m級と、アスペクト比の違いを考察するために80m級を選択した。60m級の煙突の概要と諸元をFig.1に示す。

### 3. 動的風力実験

#### 3.1 実験概要

実験は、東京工芸大学所有のエッフェル型境界層風洞で行った。風洞の測定部断面は90cm×90cm、測定胴長さは12.4mである。実験模型の縮尺は、Table 1に示す6種類に

Table 1 Typical properties of RC stacks

Configuration	Height H(m)	Width D(m)	Ratio of aspect H/D	1st frequency $f_0$ (Hz)	1st generalized mass M( × 10 <sup>3</sup> kg)
	60	5.0	12.0	1.00	195
	80	5.4	14.8	0.63	293
	60	5.0	12.0	0.84	157
	80	5.4	14.8	0.53	231
	60	8.0	7.5	1.14	219
	80	8.6	9.3	0.70	337

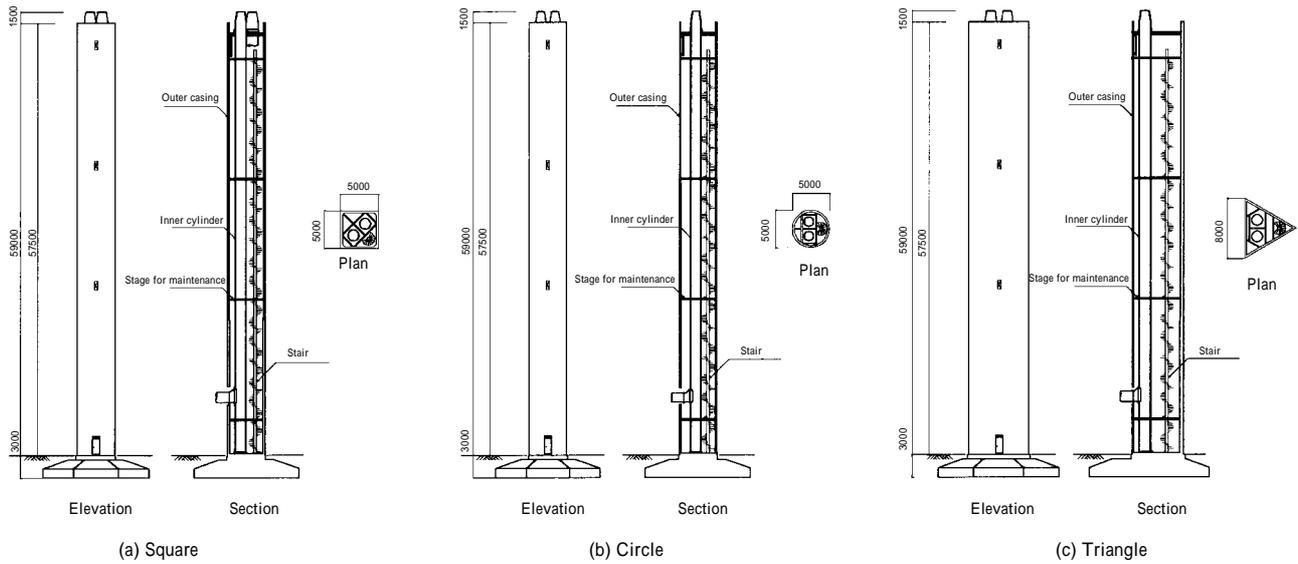


Fig.1 RC stacks in incineration plant (square, circle, triangle Height = 60m)

対して1/200とした(60m煙突は30cmの模型高さ,80m煙突は40cmの模型高さとなる)。Fig.2の実験装置を用い, Fig.3に定義した実験風向において,正方形断面模型については0~45°まで5°ピッチで,正三角形断面模型については0~60°まで5°ピッチで測定した。

実験気流は,平均鉛直分布のべき指数 =0.15(粗度区分相当)の勾配流を用いた。実験のサンプリング周波数は500Hz,計測時間はrms.値などの安定する100secとし,最大値なども含めて,100sec×3回のアンサンプル平均で実験結果を整理した。実験風速は,なるべく高い無次元周

波数まで計測できることを考えて,計測可能な風速領域でも比較的低風速の5m/s程度(頂部平均風速)とした。ただし,円形断面模型のみは,レイノルズ数の影響を考慮して,4m/sから12m/sの間で変化させた結果,渦成分を含む無次元風速まで計測できていることを確認した上で,抗力などの計測値が収束する高風速側の12m/sの結果を用いた。なお,円形断面模型の表面はパルサの滑面仕上げであり,高レイノルズ数を模擬するような特別な細工はしていない。

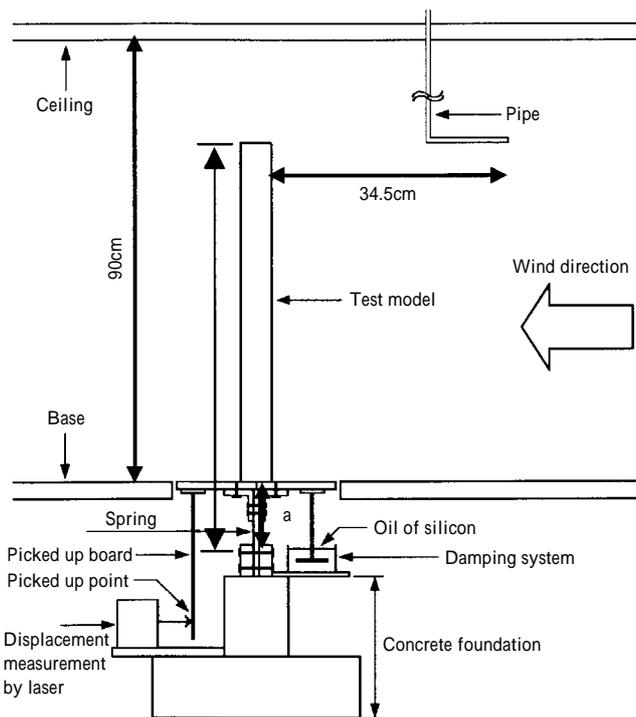


Fig.2 Testing configuration

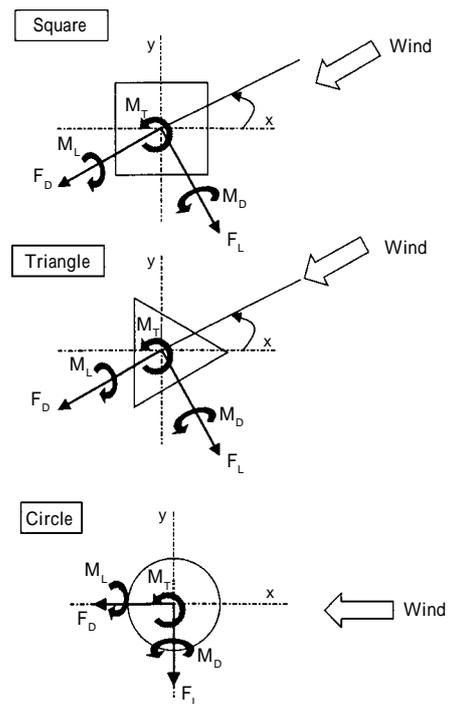


Fig.3 Wind forces and directions

3.2 風力係数の定義

各風力係数は、計測風力から以下のように算出される<sup>4)</sup>。

抗力係数

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}_H^2 \cdot D \cdot H} \dots\dots(1)$$

揚力係数

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}_H^2 \cdot D \cdot H} \dots\dots(2)$$

風方向転倒モーメント係数

$$C_{MD} = \frac{M_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}_H^2 \cdot D \cdot H^2} \dots\dots(3)$$

風直角方向転倒モーメント係数

$$C_{ML} = \frac{M_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}_H^2 \cdot D \cdot H^2} \dots\dots(4)$$

ねじれモーメント係数

$$C_{MT} = \frac{M_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}_H^2 \cdot D^2 \cdot H} \dots\dots(5)$$

ただし、

$V_H$  : 模型頂部での平均風速                      : 空気密度

3.3 実験結果

ここでは、高さ30cm模型を中心に、その結果を述べる。各方向のモーメント係数の風向きによる変化については、抗力係数と揚力係数に同じ傾向を示したことから考察を省略する。

3.3.1 風力係数

(1) 正方形断面

Fig.4(a)の最大抗力係数 $C_{Dmax}$ は、風向0°で最大となり、風向20°付近まで減少し、その後再び増加に転じる。変動抗力係数 $C_{Drms}$ は、風向による大きな変化は見られない。平均抗力係数 $C_{Dave}$ もあまり大きな変化はないが、風向45°で最大となる。Fig.4(b)の最大揚力係数 $C_{Lmax}$ は、風向5°付近で最大値となり、風向45°付近で最小となる。平均揚力係数 $C_{Lave}$ は風向15°付近で最大となる。

(2) 正三角形断面

Fig.5(a)の抗力係数は、最大抗力係数 $C_{Dmax}$ 、平均抗力係数 $C_{Dave}$ ともに風向20°付近から上昇し始め、風向60°付近で最大となる。変動抗力係数 $C_{Drms}$ に大きな変化は見られない。Fig.5(b)の揚力係数は、最大揚力係数 $C_{Lmax}$ 、平均揚力係数 $C_{Lave}$ ともに風向30°付近で最も大きな値をとり、風向に対して煙突形状が左右対称となる風向0°、60°付近で小さくなる。

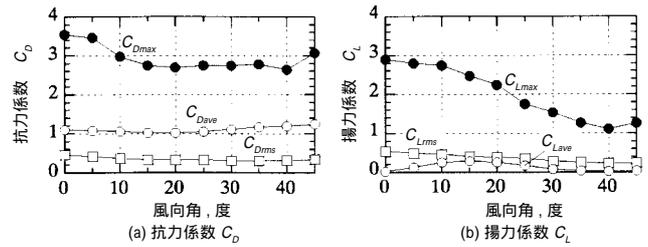


Fig.4 Wind force coefficient of square model (H=30cm)

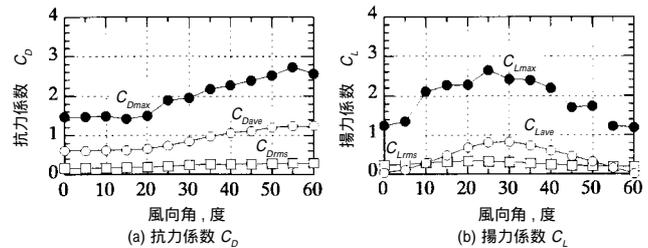


Fig.5 Wind force coefficient of triangle model (H=30cm)

(3) 円形断面

円形断面の風力係数の最大値、標準偏差、平均値、ピークファクターをTable 2に示す。高さ30cmと40cmを比較すると、40cm模型の方が大きめの値を示した。ただし、 $C_{MT}$ の値は30cmの方が大きな値を示した。

Table 2 Wind force coefficient of circle model (H=30cm)

	Height	Max.	Rms.	Ave.	Peak factor
$C_D$	30	1.37	0.16	0.65	4.5
	40	1.34	0.21	0.70	3.04
$C_L$	30	0.55	0.12	-	4.58
	40	0.57	0.18	-	3.16
$C_{MD}$	30	0.79	0.10	0.38	4.1
	40	0.75	0.10	0.38	3.7
$C_{ML}$	30	0.35	0.08	-	4.38
	40	0.34	0.08	-	4.25
$C_{MT}$	30	0.14	0.03	-	4.66
	40	0.11	0.03	-	3.67

4. 風応答実験

4.1 実験概要

実験は、風方向、風直角の2方向で応答を計測することとし、目標減衰定数は0.5%、1%、3%の3種類である。Fig.6に示すように、風向は0°を基準とし、正三角形断面については30°と60°の風向も実験した。実験模型はFig.2と同様、模型の剛性は板バネで、減衰はシリコンオイルダンパーで調整した。模型の応答はレーザー変位計で計測し、模型頂部の変位に換算した。模型の動的特性をTable 3に示す。ここでは、一次振動モードが直線で近似できる場合を想定して、ロッキングタイプの応答実験を行った。回転慣性モーメント比 $I_m/I_p$ は、実物の質量分布から換算した目標回転慣性モーメント $I_p$ に対する模型の回転慣性モーメント $I_m$ の比であり、ほぼ目標に一致させることができた。

実験風速は、平均風速0.5m/s から 15.0m/sの間を0.5m/sごとに变化させた。実験気流、計測時間およびサンプリング周波数は、動的風力実験と同じである。

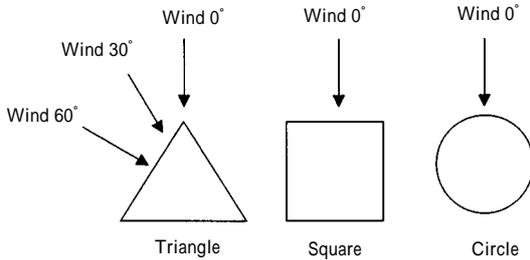


Fig.6 Wind direction for wind response test

Table 3 Test model properties

Model	H [cm]	Wind Dir.	f <sub>0</sub> [Hz]	Damping ratio [%]			I <sub>m</sub> / I <sub>p</sub>	S <sub>c</sub>		
				0.5 %	1 %	3 %		0.5 %	1 %	3 %
Square	30	0°	29.75	0.51	1.02	3.08	0.99	18.2	36.4	109.3
	40	0°	17.75	0.38	1.09	3.04	0.99	19.5	39.1	117.3
Circle	30	0°	23.88	0.52	0.95	2.96	0.98	19.8	39.7	119.0
	40	0°	21.50	0.48	1.06	3.00	0.99	20.6	41.3	123.9
Triangle	30	0°	29.75	0.50	1.04	3.21	1.01	19.9	39.9	119.6
		30°	27.38	0.47	0.97	3.04	0.9	18.9	37.8	113.3
		60°	29.75	0.47	1.09	3.09	1.01	19.9	39.9	119.6
	40	0°	16.75	0.51	1.01	2.87	0.98	20.3	40.7	122.1
		30°	16.75	0.50	0.96	3.05	0.98	20.3	40.7	122.1
		60°	16.75	0.49	0.95	2.80	0.98	20.3	40.7	122.1

4.2 実験結果

ここでは、風直角方向に着目して、頂部変位の最大値 y<sub>peak</sub> を代表長さ D (辺長または、直径) で除した無次元最大変位 Y<sub>peak</sub> = y<sub>peak</sub> / D の無次元風速 U = V<sub>H</sub> / f<sub>0</sub> D (V<sub>H</sub>: 平均風速, f<sub>0</sub>: 固有振動数) による变化を示す。

(1) 正方形断面模型 (Fig.7)

高さ30cmと40cmともに、減衰定数1%と3%の場合は、渦発生周波数と模型の固有振動数が一致する無次元風速 U 12付近で風直角方向変位が若干増加している。減衰定数0.5%の場合も同様にあまり明確なピークを示さず、応答はそのまま急激に大きくなり、渦励振からギャロッピングに移行していると考えられる。

(2) 正三角形断面模型

1) 風向き 0° の場合 (Fig.8)

高さ30cmと40cmともに、風速を大きくしてもピークは見られず、無次元風速 U 6付近で若干山が見られるが、

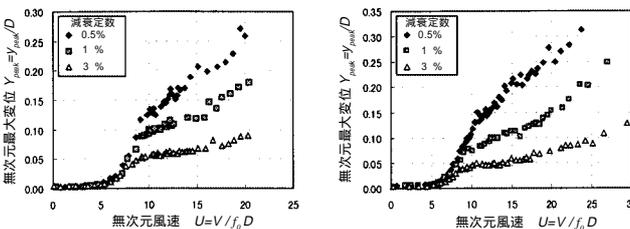


Fig.7 Non-dimensional max. across-wind displacement of square model (wind direction 0°)

高さ30cmと40cmともに応答は風速のほぼ2.2乗に比例して大きくなる。高さ40cmの場合は、減衰定数0.5%の結果と1%の結果にほとんど差が見られなかった。

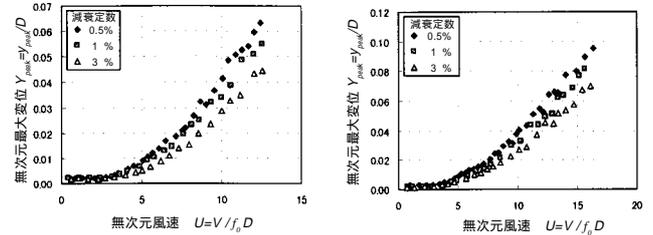


Fig.8 Non-dimensional max. across-wind displacement of triangle model (wind direction 0°)

2) 風向き 30° の場合 (Fig.9)

高さ30cmと40cmともに、風速を大きくしてもピークは見られず、応答は風速とともに大きくなるが、無次元風速 U 8付近で若干山が見られる。無次元風速 U 10付近以上では、高さ30cmの場合、応答は風速のほぼ1.7乗に比例して大きくなり、高さ40cmの場合、応答は風速のほぼ2.0乗に比例して大きくなる。高さ40cmの場合、減衰定数0.5%の結果と1%の結果にほとんど差が見られなかった。

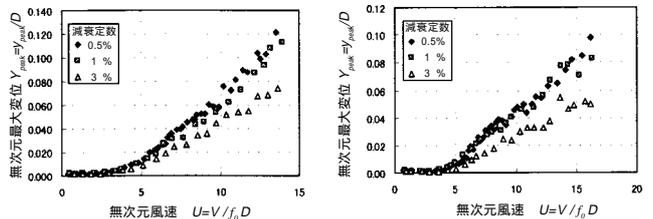


Fig.9 Non-dimensional max. across-wind displacement of triangle model (wind direction 30°)

3) 風向き 60° の場合 (Fig.10)

高さ30cmの場合、減衰定数0.5%と1%では、無次元風速 U 12付近で明瞭なピークを持ち、大振幅の限定振動が現れている。ただし、減衰定数0.5%の場合は、実験風速以上でさらに応答が増加する気配が現れているが、減衰定数1%の場合は応答が著しく低下している。高さ40cmの場合、減衰定数1%と3%の場合は限定振動型となっている。減衰定数0.5%に対する応答低下はこの場合も著しい。

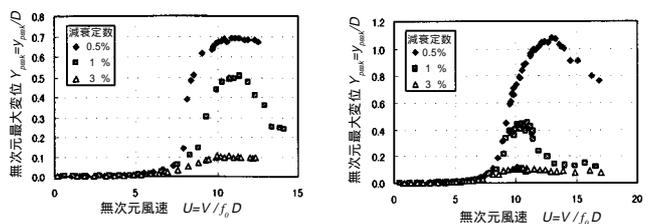


Fig.10 Non-dimensional max. across-wind displacement of triangle model (wind direction 60°)

(3)円形断面模型 (Fig.11)

高さ30cmと40cmともに、渦発生周波数と模型の固有振動数が一致する無次元風速  $U = 6 \sim 7$  付近で、風直角方向変位のピークが現れる。無次元風速  $U = 10$  付近まで、一度、応答が小さくなった後、再び増加に転じる。

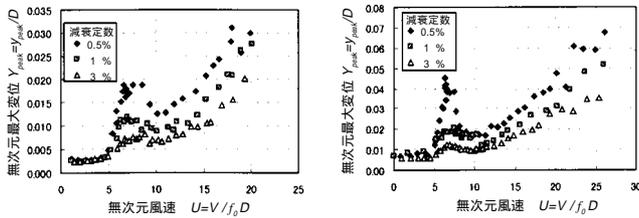


Fig.11 Non-dimensional max. across-wind displacement of circle model

5. 設計用等価風力係数

動的風力実験および風応答実験の結果から、文献3)で規定されている荷重算定法に準拠して、設計用風力係数を定める。

5.1 風方向の風力係数

文献3)によれば、風方向風荷重は式(6)で与えられる。

$$W_f = q_H \cdot C_f \cdot G_f \cdot A \quad \dots(6)$$

この場合の風力係数  $C_f$  は平均抗力係数である。

$$C_f = C_{f0} \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha} \quad \dots(7)$$

厳密には、文献2)では、ある高さ  $Z_0$  以下では一定値をとることとなっているが、上記を仮定して風力係数の実験値から  $C_{f0}$  を推定すると、若干大きめに  $C_{f0}$  が見積もられ、安全側となる。以下の関係式から、 $C_{f0}$  を決めることができる。

$$C_D H = \int_0^H C_{f0} (z/H)^{2\alpha} dz = C_{f0} H / (2\alpha + 1) \quad \dots(8a)$$

$$C_{MD} H^2 = \int_0^H C_{f0} (z/H)^{2\alpha} z dz = C_{f0} H^2 / (2\alpha + 2) \quad \dots(8b)$$

つまり、平均風速の鉛直分布べき指数  $\alpha = 0.15$  であるから、両者の平均をとって、基本風力係数  $C_{f0}$  は式(9)で得られる。

$$C_{f0} = (0.65 C_D + 1.15 C_{MD}) \quad \dots(9)$$

Fig.12およびFig.13に、それぞれ30cm、40cm高さの正方形断面と三角形断面の基本風力係数  $C_{f0}$  の風向変化を示した。円形断面の基本風力係数は、0.86 ( $H=30\text{cm}$ )、0.89 ( $H=40\text{cm}$ ) と得られた。

5.2 風直角方向の風力係数

5.2.1 最大風力係数の鉛直分布の推定

構造物の振動が、空気力やその分布形状に影響を及ぼさ

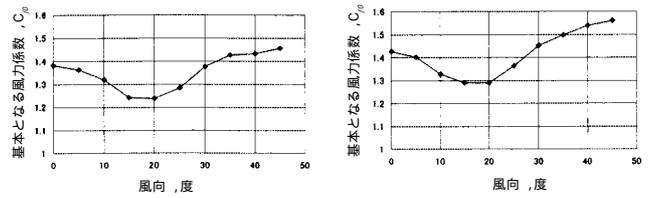


Fig.12 Fundamental coefficient wind force of square stacks

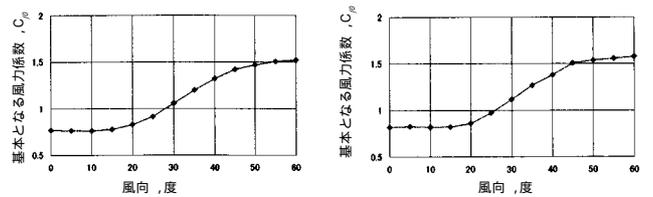


Fig.13 Fundamental coefficient wind force of triangle stacks

ないとき、風直角方向の設計用風力係数  $C_{LMAX}(z)$  は、動的風力天秤による実験値から推定できる。風直角方向風力の鉛直分布を、べき乗分布で与えられるものとし、式(10)のように仮定する。

$$C_{LMAX}(z) = C_0 \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \quad \dots(10)$$

この式から、

$$C_{LMAX} H = \int_0^H C_0 \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^\beta dz = \frac{C_0 \cdot H}{\beta + 1} \quad \dots(11a)$$

$$C_{MLMAX} H^2 = \int_0^H C_0 \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^\beta z dz = \frac{C_0 \cdot H^2}{\beta + 2} \quad \dots(11b)$$

つまり、最大揚力係数分布のパラメータは、

$$C_0 = \frac{C_{LMAX} \cdot C_{MLMAX}}{C_{LMAX} - C_{MLMAX}} \quad \dots(12a)$$

$$\beta = \frac{2C_{MLMAX} - C_{LMAX}}{C_{LMAX} - C_{MLMAX}} \quad \dots(12b)$$

と得られる。 $C_{LMAX}$  および  $C_{MLMAX}$  から  $C_0$  および  $\beta$  を Table 4 に示す。これは、あくまでも式(10)を仮定した場合の、煙突が静止しているか、あるいは、応答が小さい場合の便宜的な分布である。Table 4のように、30cm、40cmで  $C_0$  の値にばらつきが出るが、おおむね、 $C_0$  の値は、正方形断面で3、正三角形断面で1.3、円形断面で0.7程度となっている。図にすると、いずれも3角形分布に近い結果となる。

5.2.2 共振時等価風力係数の推定

文献3)では、煙突などの円筒状構造物の渦励振による等価静的風荷重を、式(13)で与えている。

Table 4  $C_0$  and  $C_r$  for Across-wind force coefficient

Shape	H	$C_0$	$C_r$
Square	30cm	3.2	1.0
	40cm	2.6	0.65
Triangle	30cm	1.5	0.62
	40cm	1.1	0.23
Circle	30cm	0.47	0.78
	40cm	0.87	0.52

$$W_r = 0.1 U_r^2(z/H)C_rA \quad \dots\dots(13)$$

つまり、頂部で最大となり、基部で0となる3角形分布の風荷重を与えている。頂部で応答が大きく、風力が振幅に依存して大きくなるとの仮定である。 $U_r$ は2H/3高さにおける共振風速であり、Aは見付面積である。そこで、設計用風荷重を式(13)の形で与えることとし、共振時の煙突模型の最大応答  $Y_{max}$  から、等価な共振時風力係数  $C_r$  を計算した<sup>6)</sup>。H=30cmの結果を、Fig.14 ~ 16に示す。本来は、いわゆる共振時の等価な風力係数を算出するためのものであるが、参考のためすべての風速時での値を求めた。渦励振のピーク風速付近で最大となり、高風速では低い値に収斂する。低風速での大きな値は、応答値が小さいための誤差によるものである。いずれの場合も、減衰定数の増加とともに共振風力係数  $C_r$  は小さくなっている。H=40cmにつ

いてはH=30cmとほぼ同様の傾向を示した。ただし、減衰定数0.5%において、正方形と三角形の共振風速はH=30cmのおよそ1.1倍となった。また、減衰定数1.0%において、共振風力係数の最大値は、正方形においてH=30cmのおよそ0.9倍、三角形においてH=30cmのおよそ0.8倍となった。

### 6. 共振時風荷重と地震荷重との比較

減衰定数を1%<sup>5)</sup>に、基本風速を30m/sと40m/sに仮定して、基本風力係数および共振時風力係数から風直角方向の共振時風荷重を求めた。Fig.17 ~ 19に、風方向と共振時における風直角方向の高さ方向曲げモーメント分布を、地震時によるものと比較して示す。なお、地震荷重の算出は、文献2)に準拠している。これによれば、共振時の風直角方向の曲げモーメントに着目すると、円形断面については、高さ60m、80mおよび基本風速30m/s、40m/sのすべてのケースにおいて、地震荷重を下回るが、三角形断面については、高さ80mで基本風速40m/sの場合に、地震荷重を上回る。正方形断面については、高さ60mで基本風速が30m/sの場合をのぞいて、すべて地震荷重を上回る結果となった。

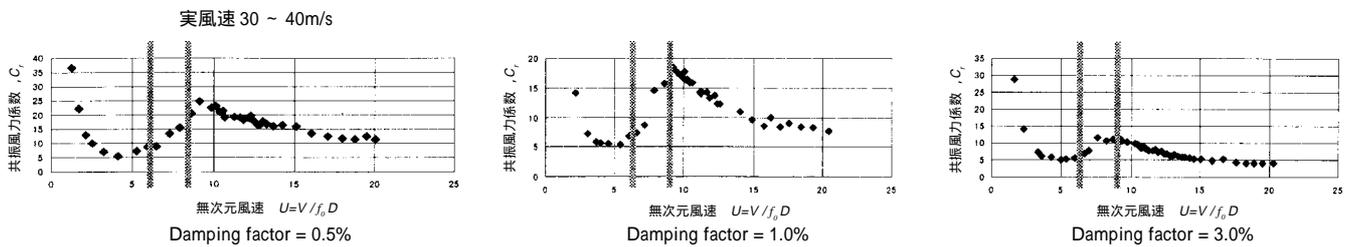


Fig.14 Resonant wind force coefficient of square stacks (H=30cm, wind direction 0°)

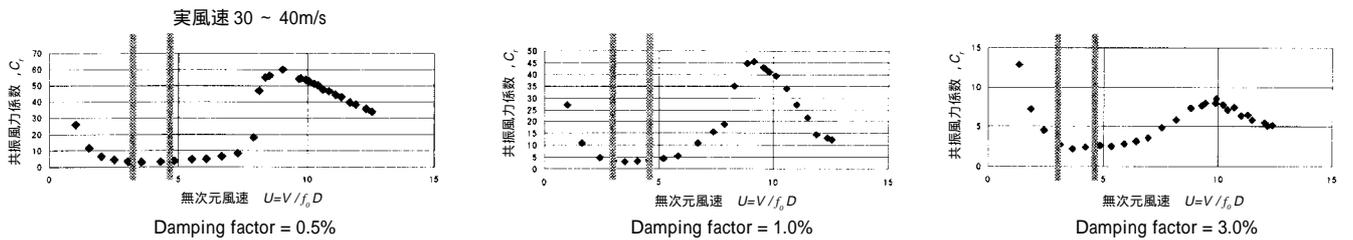


Fig.15 Resonant wind force coefficient of triangle stacks (H=30cm, wind direction 0°)

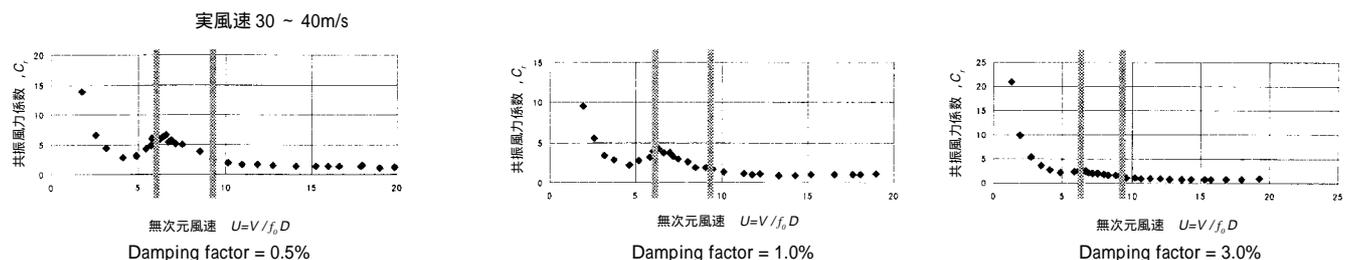


Fig.16 Resonant wind force coefficient of circle stacks (H=30cm)

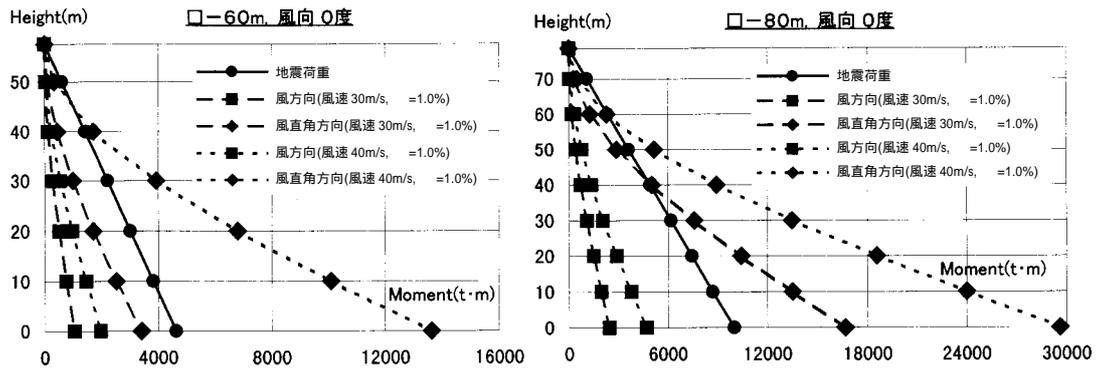


Fig.17 Bending moment distribution of stack for square shapes

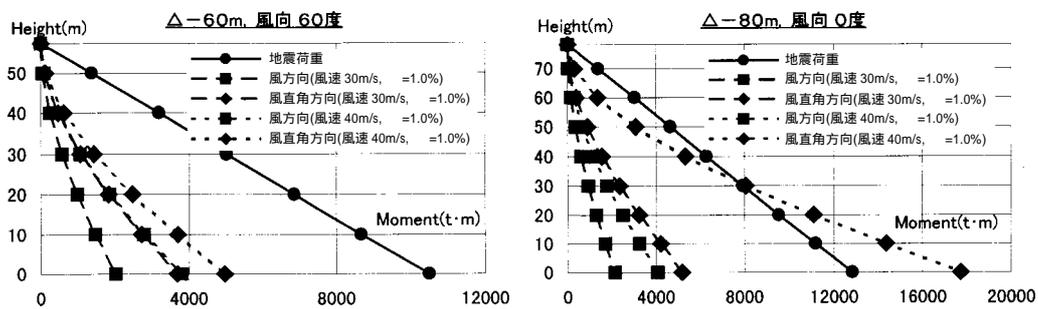


Fig.18 Bending moment distribution of stack for triangle shapes

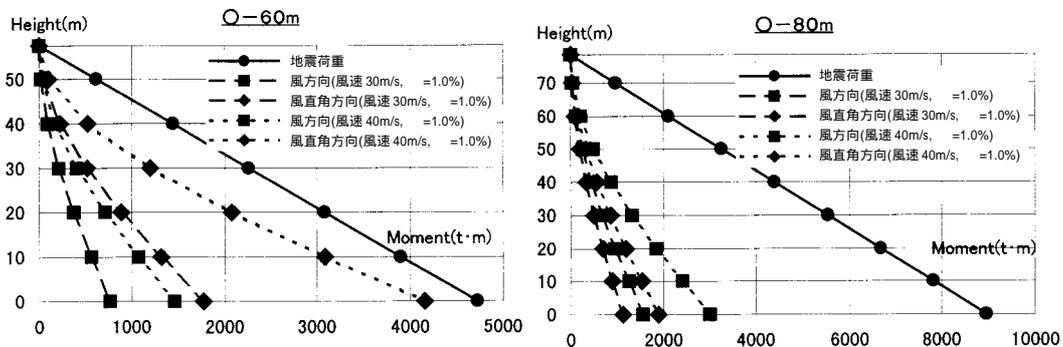


Fig.19 Bending moment distribution of stack for circle shapes

### 7. おわりに

ごみ焼却施設における煙突の典型的な平面形状において、動的風力実験と風応答実験を行い、動的風力特性と風応答特性ならびに実設計に用いる共振時風力の大きさを明らかにした。今回得られた結果から、以下に知見を述べる。

- (1) 風方向基本風力係数は、高さ60m(模型高さ30cm)の場合で、正方形1.46(風向45°),正三角形1.56(風向60°),円形0.86である。高さ80m(模型高さ40cm)の場合、おのこの平面形状において、高さ60mのおよそ1.05倍となる。
- (2) 無次元共振風速は、高さ60mの場合で、円形(U=7)が正方形と正三角形(U=9)より小さい。高さ80mの場

合は、正方形と三角形の減衰定数0.5%において、およそ1.1倍の風速となり、その他は高さ60mとほとんど同じである。

- (3) 共振風力係数は、減衰定数1%において、円形(C<sub>r</sub>=4)に比較して、正方形が4倍(C<sub>r</sub>=18),正三角形は11倍(C<sub>r</sub>=45)となる。高さ80mの場合、正三角形において高さ60mのおよそ0.8となり、その他は高さ60mとほとんど同じである。

- (4) 共振の再現頻度を考察するために、Fig.17~19に、短期設計用荷重で想定されるおおよその基本風速30~40m/sに相当する無次元風速を示す。共振の再現頻度は、円形,正方形,正三角形の順に大きい。

(5) 共振時における風直角方向の曲げモーメントは、円形断面については、高さ60m、80mおよび基本風速30m/s、40m/sのすべてのケースにおいて、地震荷重を下回るが、三角形断面については、高さ80mで基本風速40m/sの場合に、地震荷重を上回る。正方形断面については、高さ60mで基本風速が30m/sの場合をのぞいて、すべてのケースで地震荷重を上回る。

今後は、コストダウンを主眼において、地震荷重を上回る正方形断面の共振時風荷重の低減方策について、研究を進める予定である。最後に今回の風洞実験にあたり、ご協力とご指導をいただいた東京工芸大学の田村幸雄教授と田村研究室の各位、東洋テクノ(株)の各位に厚く謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本建築学会. 鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針. 1976.6.
- 2) 日本建築センター. 煙突構造設計施工指針. 1982.11.
- 3) 日本建築学会. 建築物荷重指針・同解説. 1993.4.
- 4) 日本建築センター. 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック. 1994.6.
- 5) 荒川利治ほか. “常時微動による鉄筋コンクリート高層煙突の減衰特性”. 日本建築学会技術報告集. No.7, pp.27-32, 1999.2
- 6) 飯田泰彦ほか. “ごみ焼却施設のRC煙突における風応答特性”. 日本建築学会技術報告集. No.12, pp.35-40, 2001.1.

< 問い合わせ先 >

シビルエンジニアリング部 土木建築設計室  
Tel. 045 (505) 7722 岡本 紀明  
okamotn@eng.tsurumi.nkk.co.jp