

## 鉄塔支持型鋼製煙突の風応答特性に及ぼす筒身形態の影響

薄, 達哉

九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻博士後期課程

前田, 潤滋

九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

藤村, 真弓

九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

花田, 淳也

九州電力株式会社

<https://doi.org/10.15017/19071>

---

出版情報：都市・建築学研究. 9, pp.29-36, 2006-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン：

権利関係：

## 鉄塔支持型鋼製煙突の風応答特性に及ぼす筒身形態の影響

### Some Effects of Stack Shell Configuration on Wind Response Properties of Tower-Supported Steel Stacks

薄 達哉\*, 前田潤滋\*\*, 藤村真弓\*\*\*, 花田淳也\*\*\*\*

Tatsuya SUSUKI, Junji MAEDA, Mayumi FUJIMURA and Naoya HANADA

Ultra-high steel stacks are heavily impacted by strong winds because their natural frequency and damping ratio is small. Especially, it is well known that cylinder steel stacks require caution against vortex-induced vibration. However, the wind-induced vibration behaviors of tower-supported steel stacks are not clarified due to a lack of full scale observation. We conducted wind response observations of three 200m-high tower-supported steel stacks with different stack shell configurations. This paper presents some effects of the stack shell configurations on the structural properties and the wind response properties of the tower-supported steel stacks.

*Keywords: Tower-supported steel stack, Wind response observation, Stack shell configuration, Vortex-induced vibration*

鉄塔支持型鋼製煙突, 風応答観測, 筒身形態, 渦励振

#### 1. はじめに

近年の大規模火力発電所の鋼製煙突は、発電機能上また環境対応上からその高さは200mにも及ぶため、著しく細長い形状になる場合が多い。風力は広い周波数成分からなる変動力であるため、構造物はその固有周波数に等しい変動成分による共振を引き起こすが、その効果は固有周波数および減衰定数が小さい場合に大きくなる。一般にアスペクト比が大きな鋼構造の煙突は固有周波数や減衰定数が小さくなり、風の影響を大きく受けやすく、特に、円形断面を持つ煙突は、その後流に周期的なカルマン渦が放出され、この放出周波数と煙突の1次固有周波数が一致するとき、風直角方向に大きな振動いわゆる渦励振が発生する。そのため、「建築物荷重指針・同解説」<sup>1)</sup>が指摘するように、渦励振による風荷重を1次固有周波数や1次減衰定数などを用いて風荷重を見積もる必要がある。そのためには、卓越する1次振動の固有周波数や減衰定数などの構造特性を正確に把握し、鋼製煙突の風による動的な応答特性を適切に評価しなければならない。

また、鋼製煙突の種類には、筒身自身で荷重に耐える「自立型煙突」のほか、1本または複数の筒身の周りに鉄塔型架構を設け、煙突の自重以外の水平力は主として鉄塔部分に負担させる「鉄塔支持型煙突」などがあるが、観測事例が少ないこと等から煙突の風による動的な応答特性は未解明な点が多い。例えば、「煙突構造設計施工指針」<sup>2)</sup>では、自立型煙突のみを対象に風直角方向風荷重の算定式を定めており、「鉄塔支持型煙突のような場合でも、断面形状や鉄塔部分の充実率等によっては、この種の風直角方向風荷重を考慮しなければならないことがあるので注意が必要である」とあるが、筒身周りにある鉄塔や筒身形態の影響などの具体的解説は示されていない。また、巻幡他<sup>3)</sup>、秋山他<sup>4)</sup>、植田他<sup>5),6)</sup>のように、鉄塔や筒身形態等が風応答特性に与える影響を風洞実験によって検討する場合も少なくない。鉄塔支持型鋼製煙突の実機による風応答観測事例は木内他<sup>7)</sup>や小谷他<sup>8)</sup>などの数例に留まっている。

筆者グループは、北部九州にある高さ200mの鉄塔支持型の1筒身煙突で大きな渦励振が発生したのを機に、九州各地に存在する高さ200mの1筒身煙突、2筒身のうち1筒身が先行建設されたままの煙突（以下、1(2)筒身煙突）、2筒身煙突という筒身形態が異なる3基の煙突について長期間の風応答観測<sup>9)~15)</sup>を実施してきた。本研

\* 都市共生デザイン専攻博士後期課程

\*\* 都市・建築学部

\*\*\* 都市共生デザイン専攻修士課程

\*\*\*\* 九州電力株式会社

究は、これら一連の風応答観測結果から、筒身形態の異なる鉄塔支持型鋼製煙突の1次固有周波数や1次減衰定数を既往の観測データと比較検証すると共に、それらの構造特性や筒身形態が渦励振などの風応答現象に与える影響を明らかにすることを目的としている。

## 2. 煙突の構造概要と観測体制

本報告で取り扱う1筒身煙突、1(2)筒身煙突、2筒身煙突の構造概要を表1に、各煙突の観測体制を図1～3に示す。

鉄塔支持型鋼製煙突は、筒身およびラチス構造の支持鉄塔からなる複合構造物である。筒身の水平力は高さ方向に位置するいくつかの支持点を介して鉄塔に伝えられるが、筒身の排ガスによる熱膨張を拘束しないように筒身と鉄塔の間にはクリアランスを設けている。筒身内側には排ガスによる熱影響、腐食等を防ぐためにガナイトライニングを用いている。発電所の出力に応じて各煙突の筒身径は異なるが、いずれの煙突も筒身高さは200mで、鉄塔高さは185mである。また、1(2)筒身煙突と2筒身煙突は筒身数が違うだけで、鉄塔は同じ2筒身用の構造である。表1に示すように、筒身径、筒身数および鉄塔構造の違いにより各煙突の総重量は大きく異なる。

渦励振を主体とした煙突の全体振動を観測するために、いずれの煙突にも鉄塔頂部GL+185m地点に図1～3中に示すX,Y方向2成分用のサーボ型加速度計を、さらにプロペラ式風向風速計2台を設置した。その他の観測機器は各煙突の観測目的に応じてそれぞれ別途設置した。観測データは、いずれの煙突も定時観測(毎正時10分間で24回/日)と強風時観測(GL+185mの風速または加速度をトリガーとした10分間)により取得した。なお、観測データは1筒身煙突と2筒身煙突を50Hz、1(2)筒身煙突を100Hzでサンプリングした。観測期間は、1筒身煙突16ヶ月、1(2)筒身煙突19ヶ月、2筒身煙突15ヶ月である。

表1 各煙突の構造概要

	1筒身	1(2)筒身	2筒身
筒身数	1本	1本	2本
筒身径	5.57m	6.37m	6.37m
筒身高さ	GL+200m	GL+200m	GL+200m
鉄塔高さ	GL+185m	GL+185m	GL+185m
鉄塔頂部開き	8.5m	17m	17m
鉄塔基部開き	36m	45m	45m
煙突総重量	1689ton	2059ton	3128ton

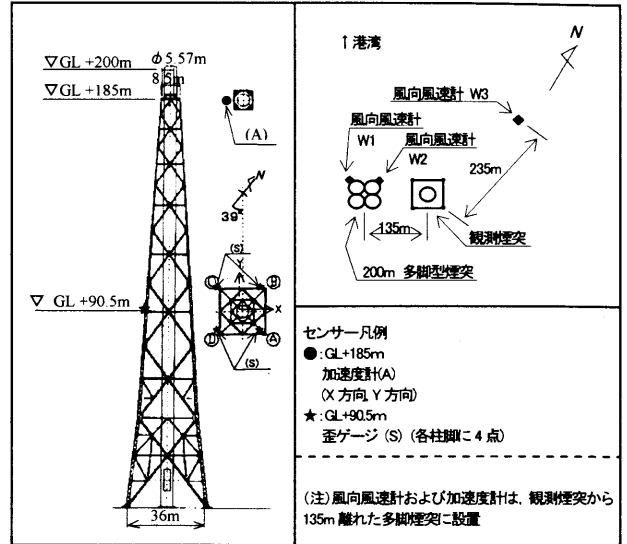


図1 1筒身煙突の観測体制

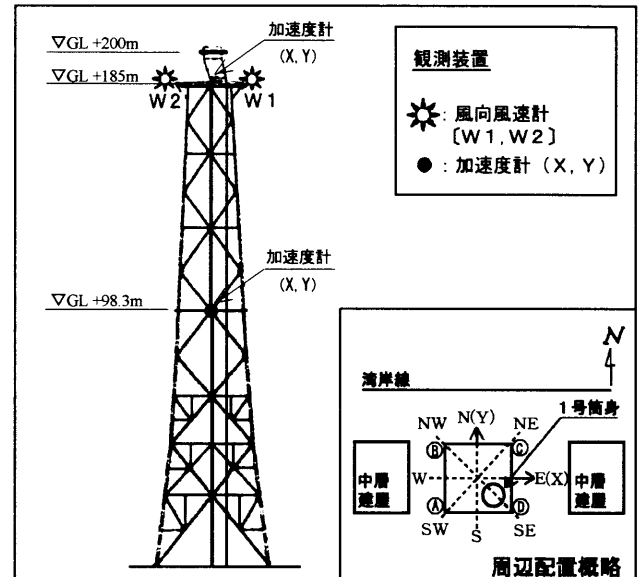


図2 1(2)筒身煙突の観測体制

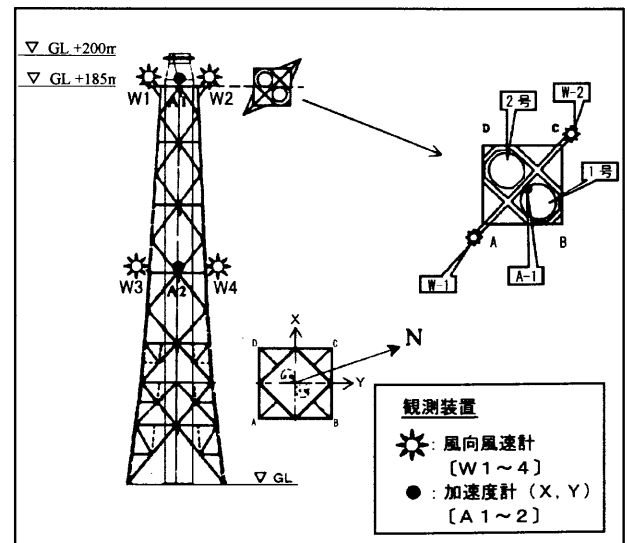


図3 2筒身煙突の観測体制

### 3. 煙突の構造特性

#### 3.1 煙突の固有振動特性

各煙突において最大加速度が観測された時の 10 分間の X 方向加速度時系列波形から AR 法により求めたパワースペクトルを図 4~6 に示す。また、各煙突の 1 次固有周波数を表 2 に示す。

1 筒身および 1(2)筒身煙突は同じ 1 筒身ではあるが、1(2)筒身煙突の鉄塔は 1 筒身煙突の鉄塔より大きく剛性が高いことから、1(2)筒身煙突の方が 1 筒身煙突よりも 1 次固有周波数大きい。また、2 筒身煙突と 1(2)筒身煙突は同じ 2 筒身用の鉄塔ではあるが、筒身数の違いで 1(2)筒身煙突の方が 2 筒身煙突よりも重量が小さいため 1 次固有周波数大きい。いずれの煙突も X 方向、Y 方向共 1 次固有周波数は同じ値であった。

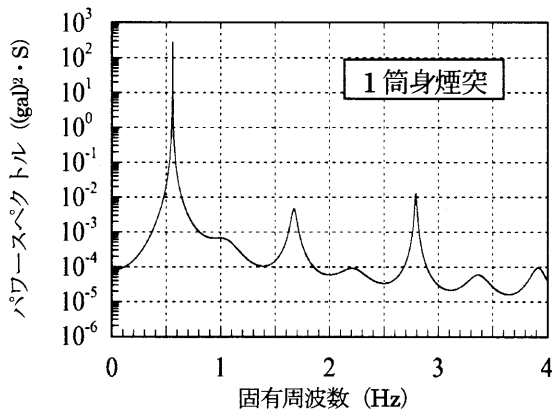


図 4 1 筒身煙突の X 方向加速度パワースペクトル

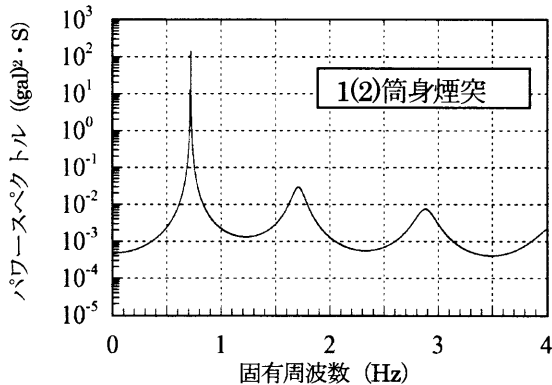


図 5 1(2)筒身煙突の X 方向加速度パワースペクトル

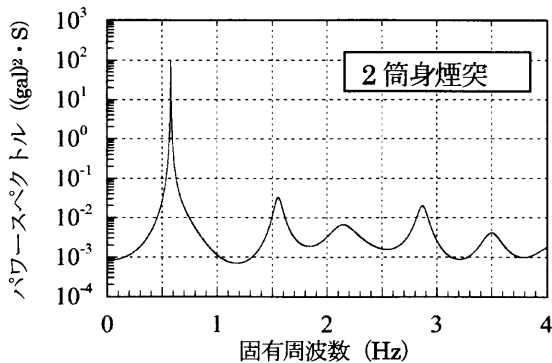


図 6 2 筒身煙突の X 方向加速度パワースペクトル

各煙突の立体解析モデルを用いた固有値解析で得られた 1 次固有周波数の計算値は、実測値より若干大きめであるがほぼ同等である。

表 2 各煙突の 1 次固有周波数

	1 次固有周波数 (Hz)	
	実測値	計算値
1 筒身煙突	0.56	0.58
1(2)筒身煙突	0.72	0.78
2 筒身煙突	0.58	0.62

既往の鉄塔支持型煙突の実測データ 7),8),16)~18) 11 個に本報告で加えた計 14 個のデータを用いて、煙突の高さと 1 次固有周波数および 1 次固有周期の関係を図 7 と 8 に示す。煙突の固有振動特性は、筒身数、鉄塔構造等に影響されるが、概ね煙突の高さが高くなるにつれて 1 次固有周波数は減少する。「建築物の減衰」<sup>18)</sup>では 4 個のデータを用いて、1 次固有周期  $T_1$  と煙突の高さ  $H$  の関係を  $T_1=0.011H$ 、相関係数  $r=0.80$  と求めているが、今回の 14 個のデータを用いて計算すると  $T_1=0.009H$ 、 $r=0.58$  であった。

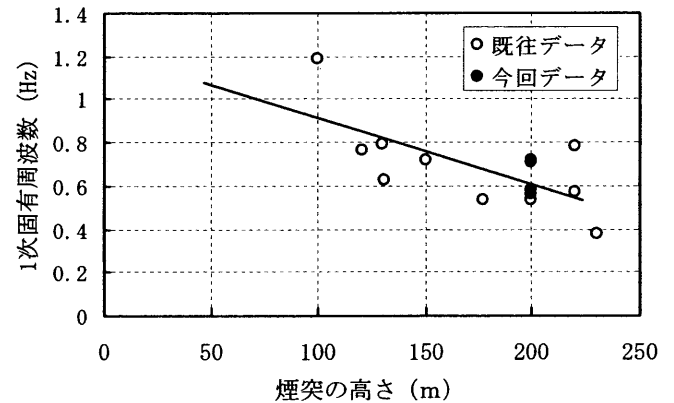


図 7 煙突の高さと 1 次固有周波数の関係

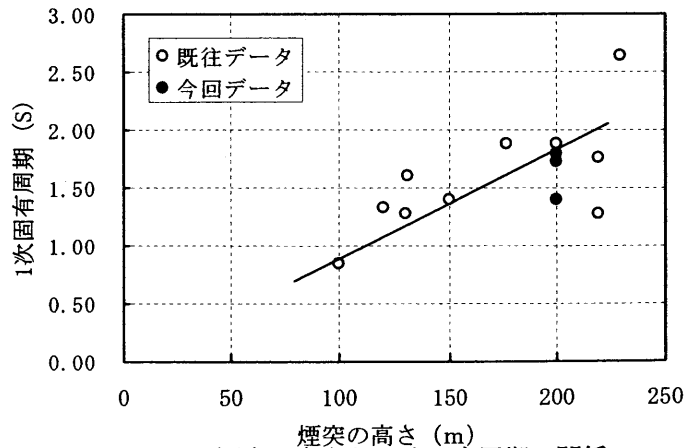


図 8 煙突の高さと 1 次固有周期の関係

#### 3.2 煙突の減衰特性

各煙突の減衰特性を調べるために、1 筒身および 1(2)

筒身煙突は人力加振試験を行って 1 次減衰定数を求めた<sup>19)</sup>。2 筒身煙突は風応答観測期間中に得られた 2000 年 2 月 17 日天草灘の地震 (M4.1) 時の自由減衰振動波形から算出した<sup>20)</sup>。

人力加振試験では、鉄塔頂部の高さ 185m にある踊り場の手すりを煙突の 1 次固有周波数に合わせて数名が同時に揺ることによって加振しその後の自由減衰振動を測定した。図 9 に 1 筒身煙突の自由減衰振動波形と対数減衰率算定の元にしたピーク値の包絡線を示す。片振幅で最大約 5gal の波形が得られた。各煙突の自由減衰振動波形から得られた 1 次減衰定数を表 3 に示す。1 次減衰定数は振幅にも依存すると考えられるが、今回の検討では 1 筒身煙突, 1(2)筒身煙突, 2 筒身煙突の順に大きくなった。これらの値は、いずれも設計時の地震応答解析で採用している 1% より小さかった。

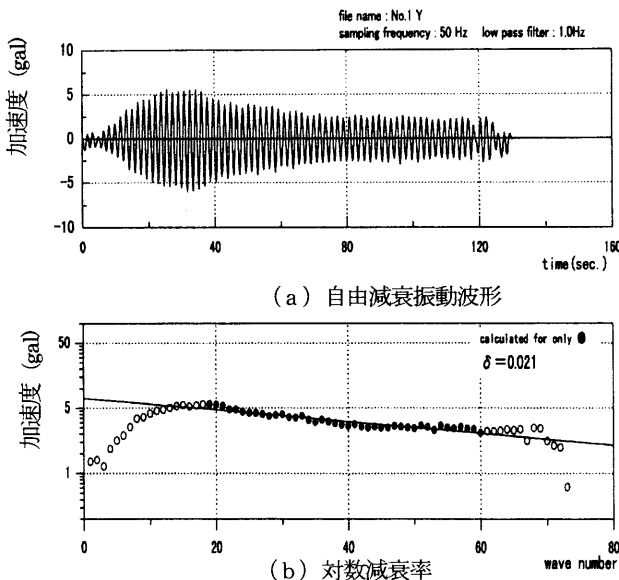


図 9 自由減衰振動波形および対数減衰率

表 3 各煙突の 1 次減衰定数

	1 次減衰定数 (%)
1 筒身煙突	0.33
1(2)筒身煙突	0.54
2 筒身煙突	0.88

1 次減衰定数が示されている既往の鉄塔支持型鋼製煙突の実測データ<sup>7,16~18)</sup> 9 個に今回のデータを加えた計 12 個のデータを用いた煙突の高さと 1 次減衰定数の関係を図 10 に示す。ばらつきは大きい煙突の高さが高くなるに従って 1 次減衰定数が増大する傾向が若干見られる。また 1 次固有周波数と 1 次減衰定数の関係を示す図 11 では、1 次固有周波数が増大するに従って 1 次減衰定数は減少する傾向が見られる。この関係を固有周期で整理すると、図 12 のように、1 次固有周期が増大するに

従って 1 次減衰定数も増大することになるが、ばらつきは大きいながら、これらの結果は「建築物の減衰」<sup>18)</sup>における S 造独立型煙突および S 造支持型煙突データの傾向と同様であった。

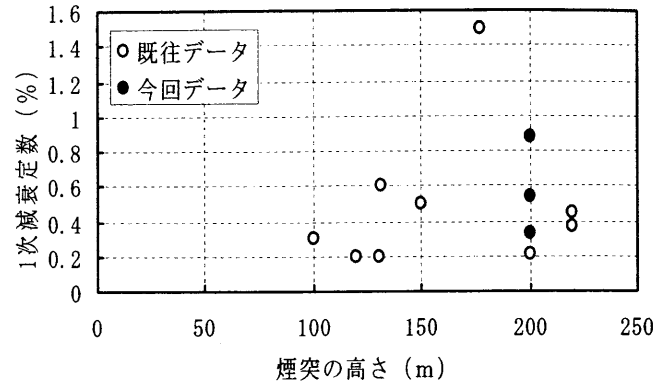


図 10 煙突の高さと 1 次減衰定数の関係

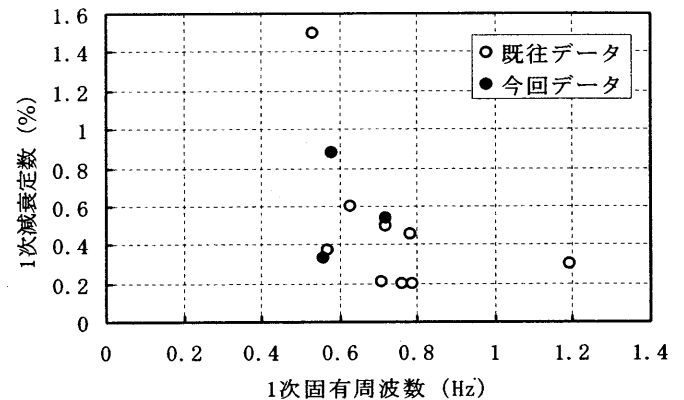


図 11 1 次固有周波数と 1 次減衰定数の関係

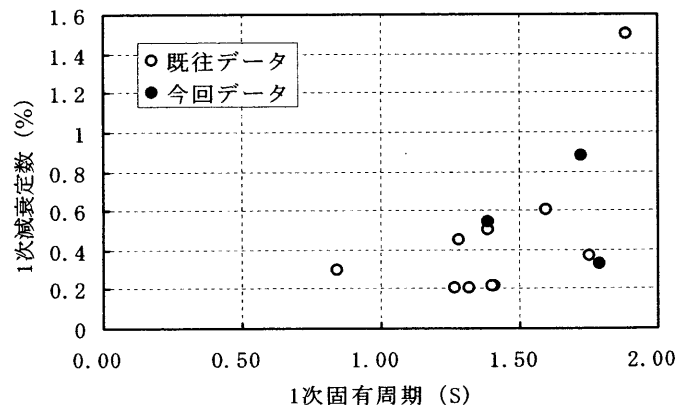


図 12 1 次固有周期と 1 次減衰定数の関係

#### 4. 煙突の風応答特性

##### 4.1 風速と最大加速度の関係

1 筒身および 1(2)筒身煙突ではすべての観測データについて、また 2 筒身煙突では大きな加速度が発生した観測データについて、平均風速と最大加速度片振幅 (X 方向, Y 方向) の関係を図 13~15 に示す。1 筒身煙突では、ほとんどの最大加速度片振幅が約 200gal 以下であ

るが、平均風速が 20m/s 付近で共振現象が生じており、最大加速度片振幅は約 800gal となっている。1(2)筒身煙突では、ほとんどの最大加速度片振幅が約 200gal 以下となっている。また、2 筒身煙突ではさらに小さく最大加速度は約 50gal 以下となっている。

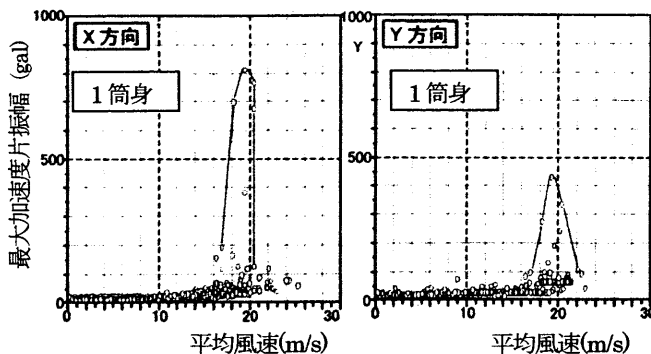


図 13 1 筒身煙突の平均風速と最大加速度の関係

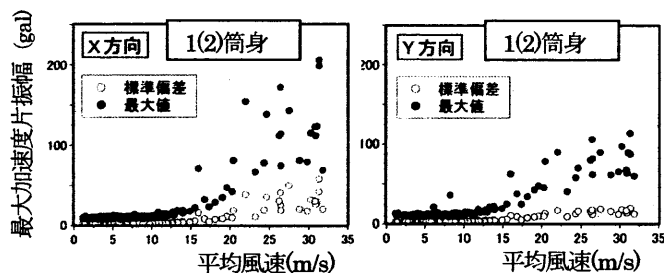


図 14 1(2)筒身煙突の平均風速と最大加速度の関係

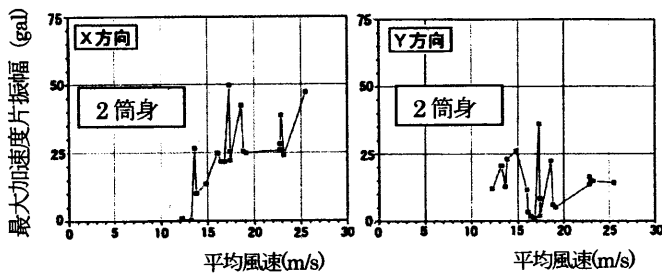


図 15 2 筒身煙突の平均風速と最大加速度の関係

#### 4.2 加速度のリサージュ図

各煙突の観測期間中に最も大きな最大加速度が発生した時の加速度のリサージュ図を図 16～18 に示す。

リサージュ図より各煙突はすべてほぼ風直角方向に振動していることがわかり、これらの振動現象は渦励振と考えられる。1 筒身煙突では平均風速約 20m/s の風がほぼ西方向から吹いた時に大きな渦励振が生じている。1(2)筒身および 2 筒身煙突では 1 筒身煙突のような大きな渦励振を発生しなかったが、その理由の一つとして 1(2)筒身および 2 筒身煙突の 1 次減衰定数や質量が 1 筒身煙突よりも大きいことが考えられる。

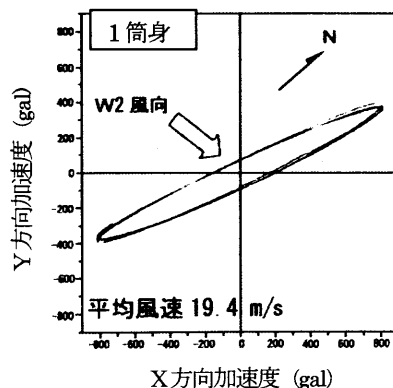


図 16 1 筒身煙突のリサージュ図

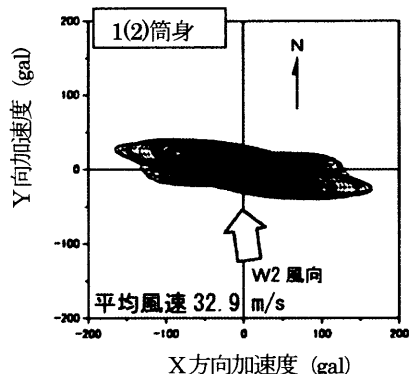


図 17 1(2)筒身煙突のリサージュ図

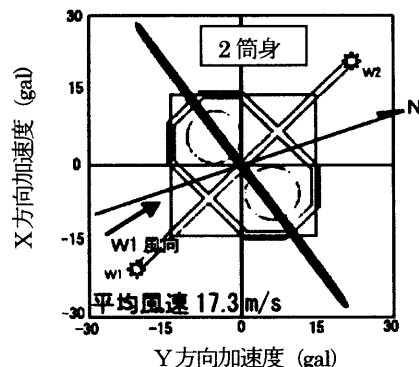


図 18 2 筒身煙突のリサージュ図

#### 4.3 共振風速と最大変位片振幅

表 4 は各煙突の共振風速時での最大変位片振幅の計算値である。ただし、共振風速  $V_r$  は 1 次固有周波数  $f_1$  と筒身径  $D$  およびストローホール数  $St = 0.18$  として、 $V_r = f_1 \cdot D / St$  により算出し、最大変位片振幅  $\delta_{max}$  を 1 次固有周波数による単振動現象とみなして最大加速度片振幅観測値  $A_{max}$  から  $\delta_{max} = A_{max} / (2\pi f_1)^2$  により推定した。

推定した 1 筒身煙突の共振風速は観測時の最大加速度発生時の平均風速約 20m/s (185m 地点) よりも若干小さな値となっている。また推定した最大変位片振幅を用いた変形角は最大の 1 筒身煙突の場合でも 1/300 程度になる。

表4 共振風速と最大変位片振幅

	共振風速	最大加速度	最大変位
	推定値 Vr (m/s)	片振幅観測値 Amax (gal)	片振幅推定値 $\delta$ max (cm)
1 筒身煙突	17.3	810	65
1(2)筒身煙突	25.5	193	9
2 筒身煙突	20.5	56	4

5. 煙突の渦励振現象

5.1 1 筒身煙突の渦励振

1 筒身煙突で大きな渦励振が発生した時の連続した 4 時間について、風向風速計 W2 で観測された平均風速、乱れの強さ、平均風向、風向のばらつきおよび X 方向最大加速度片振幅の 10 分間データを図 19 に示す。また、X 方向加速度時系列波形を図 20 に示す。図 19 の縦軸の数値は加速度(gal)、風向(deg)、平均風向に対する風向変動の標準偏差の比(%), 風速(m/s), および乱れの強さ(%) を示すための指標で、各物理量に係数を掛けて示した。同図に見られるように、時間軸 110 分付近から加速度片振幅は約 200gal を超えて急速に増大し、約 10 分間で 800gal 近く一度目のピークに達している。その後、平均風速が少し下がり、乱れの強さが増大した時点から 10 分間程度振幅が減少するが、再び約 20 分間で 800gal を超える二度目のピークに達している。さらにその後、一

度目のピークと同様に平均風速が下がると共に乱れの強さが増大して最大加速度片振幅は急速に減少し、約 5 分間で二度目のピークから 200gal を下回り、振幅がピークに向かう時の所要時間より短時間で減少している。増減を繰り返してはいるが、200gal を上回る大振幅状態は 45 分程度続き、その間平均風向はほぼ西方向で平均風速は約 18~20m/s であった。特に、加速度振幅が増加状態にある間 (100~120 分および 130~150 分の間) の平均風速は 20m/s 付近に安定しており、また乱れの強さは 9.2~12.4%、風向のばらつきは 1.7~2.5% と他の 10 分間データに比べて小さな値であった。一方 30~50 分および 60~70 分の間にも平均風速 20m/s 付近の状態があるが、30~50 分の間は乱れの強さが 15.2~15.7%、風向のばらつきが 3.0~3.1% と共に大きく、また 60~70 分の間は乱れの強さは 7.8% と小さいが、平均風向が変化しておりばらつきも 3.1% と大きかったことから、加速度振幅は増大しなかったと考えられる。

以上のことから、大振幅に発達する渦励振は、共振風速域で乱れの強さが小さく、かつ風向が安定してばらつきが小さいときに発生すると考えられる。なお、風向、風速と最大加速度の関係は、10 分間の中でも変化しているため、さらに短い平均時間での風速や風向との関係に着目する必要がある。

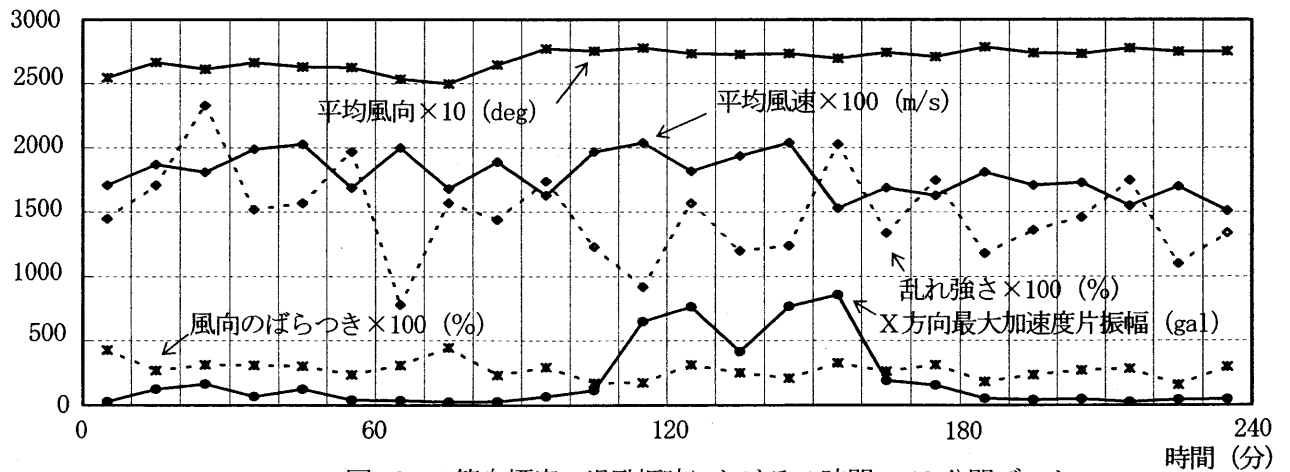


図 19 1 筒身煙突の渦励振時における 4 時間の 10 分間データ

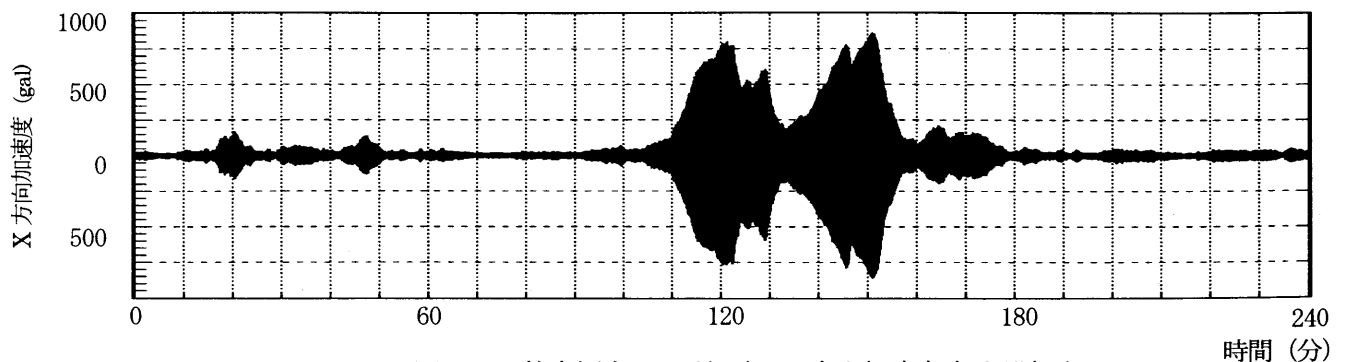


図 20 1 筒身煙突の渦励振時の X 方向加速度時系列波形

## 5.2 2筒身煙突の渦励振

前述の図 18 は 2 筒身煙突の平均風速 17.3m/s 時のリサーチ図であるが、同様に大きな最大加速度が発生した風速 25.5m/s 時のリサーチ図を図 21 に示す。図 18 と図 21 を比較するとどちらも風直角方向に渦励振が生じているが風向によって最大加速度が発生した風速が異なっている。図 21 の風向で平均風速 17~18m/s 付近のデータでは図 18 ほど大きな最大加速度は発生していないことから、植田他<sup>5)</sup>による風洞実験結果と同様に 2 筒身煙突では風向によって共振風速とその時の最大応答は異なると判断される。この理由として、2 筒身煙突では風向によって筒身周りの流れや筒身見付け幅等が変化するため、カルマン渦の放出周波数や筒身に作用する空気力等が風向によって異なることが考えられる。

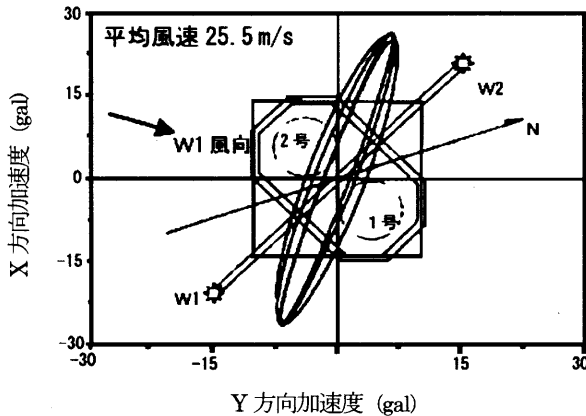


図 21 2筒身煙突のリサーチ図

## 6. まとめ

九州管内で稼働している筒身形態の異なる 3 基の鉄塔支持型鋼製煙突の風応答観測記録を用いて、各煙突の固有振動特性、減衰特性、渦励振現象について比較検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 各煙突の 1 次固有周波数は、1 筒身煙突と 2 筒身煙突ではほぼ同様の振動特性を有するが、1(2)筒身煙突は 1 筒身で 2 筒身用の鉄塔を持つため他の煙突より 1 次固有周波数が大きい。
- (2) 既往の実測データも含めて検討した結果、煙突の固有振動特性は、筒身数、鉄塔構造等に影響されるが、概ね煙突の高さが高くなるにつれて 1 次固有周期は大きくなる。
- (3) 3 タイプの煙突の 1 次減衰定数を人力加振試験または地震時の自由減衰振動波形から求めた結果、1 筒身煙突、1(2)筒身煙突、2 筒身煙突の順に従って大きな値が得られた。ただし、減衰特性は振幅にも依存するので、さらに検討が必要である。
- (4) 既往の実測データも含めて検討した結果、ばらつきは大きいと煙突の 1 次減衰定数は、煙突の高さや 1

次固有周期が増大すると大きくなる傾向があった。

- (5) 1 筒身煙突の大きな渦励振は、ストローハル数を 0.18 として算出した共振風速を少し上回る平均風速 20m/s 付近 (GL+185m) で発生しており、乱れの強さが小さくかつ風向が安定しているときに加速度振幅が短時間で著しく増大する。
- (6) 2 筒身煙突の渦励振は、風向によって共振風速が異なると推測される。
- (7) 1(2)筒身および 2 筒身煙突では、1 筒身煙突のような大きな渦励振は発生しなかったが、その理由の一つとして 1(2)筒身および 2 筒身煙突は 1 筒身煙突よりも 1 次減衰定数や質量が大きかったことが考えられる。

今回は 3 基の煙突の風応答観測記録を用いたが、今後は他の煙突の観測記録も参照して、減衰定数の振幅依存性や 10 分間より短い時間内での風向・風速と加速度の関係などを整理し、鉄塔支持型鋼製煙突の構造特性や風応答特性に関する検討を続ける必要がある。

## 謝辞

各煙突の風応答観測に当たり、日立造船株式会社の皆様に多大なるご協力を得ました。厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説 (2004)，2004.9.
- 2) 日本建築センター：煙突構造設計施工指針 (1982 版)，1982.11.
- 3) 卷幡敏秋，予口正敏：大形鉄塔支持型煙突の空気力学的特性に関する風洞実験，日立造船技報第 34 巻第 1 号，pp.44-49，1973.2.
- 4) 秋山茂雄，藤本盛久，小林幸次郎，大熊武司，天野輝久，牧野俊雄：鉄塔支持型集合煙突の耐風性に関する風洞実験 (その 1. 静的実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.803-804，1976.10.
- 5) 植田利夫，予口正敏，山口映二，砂田博幸：2 筒身並列型鋼製煙突の空力特性，第 15 回風工学シンポジウム論文集，pp.293-298，1998.12.
- 6) 植田利夫，予口正敏，砂田博幸，山口映二，卷幡敏秋，柏原正和，辰巳俊雄：鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振に関する風洞実験，日立造船技報第 60 巻第 4 号，pp.82-87，2000.1.
- 7) 木内龍彦，川村純夫，中井重行，伊藤真二：3 脚鉄塔支持型 2 筒身煙突の耐風性に関する実測一常時微動と筒身に加わる平均風圧力一，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.43-44，1990.10.
- 8) 小谷直，川村純夫，木内龍彦，谷口徹郎：複合高煙突に加わる風力とその応答に関する実測 (その 1 実



- 測方法と応答加速度) , 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.299-300, 1995.8.
- 9) 宮嶋浩, 多田泰輔, 前田潤滋, 本間真, 卷幡敏秋: 鉄塔支持型鋼製煙突の強風による振動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.141-142, 2002.8.
  - 10) 卷幡敏秋, 前田潤滋, 多田泰輔, 宮嶋浩, 本間真: 鉄塔支持型鋼製煙突の風応答に関する実機観測, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.457-462, 2002.12.
  - 11) 薄達哉, 花田淳也, 前田潤滋, 大森睦, 本間真, 卷幡敏秋: 鉄塔支持型鋼製煙突の振動特性および風応答の観測, 日本建築学会九州支部研究報告第42号, pp.217-220, 2003.3.
  - 12) 本間真, 薄達哉, 遠藤修, 花田淳也, 大森睦, 卷幡敏秋, 前田潤滋: 鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振およびガスト応答に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, pp.687-694, 2004.3.
  - 13) 花田淳也, 薄達哉, 前田潤滋, 本間真, 大森睦, 卷幡敏秋: 鉄塔支持型鋼製煙突の振動特性と風応答観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.211-212, 2003.9.
  - 14) 本間真, 薄達哉, 花田淳也, 前田潤滋, 大森睦: 鉄塔支持型煙突における鉄塔構成部材の動的風応答, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp.479-484, 2004.12.
  - 15) 薄達哉, 花田淳也, 前田潤滋: 鉄塔支持型鋼製煙突(2筒身型)の風応答特性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.243-244, 2005.9.
  - 16) 釣谷年勝, 三浦正彰: 鋼製煙突の振動実験結果とその耐震性について, 日本建築学会北陸支部研究報告集第24号, pp.17-20, 1981.6.
  - 17) 日本建築学会: 塔状鋼構造設計指針・同解説, 1980.10.
  - 18) 日本建築学会: 建築物の減衰, 2000.9.
  - 19) 池田健一郎, 本間真, 前田潤滋: 鉄塔支持型煙突の動特性に関する考察—人力加振試験による振動解析精度の検証—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.213-214, 2001.9.
  - 20) 船本憲治, 直野明治, 本間真, 卷幡敏秋: 実測データに基づく鉄塔支持型煙突の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.569-570, 2001.9.

(受理:平成17年12月1日)