

鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振発達に関する実測的検討

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博士後期課程

薄, 達哉
九州住宅保証株式会社

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

<https://doi.org/10.15017/19107>

出版情報：都市・建築学研究. 13, pp.59-66, 2008-01-15. 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渦励振発達に関する実測的検討

Evaluation of Vortex-induced Vibration of a Tower-supported Steel Stack under Strong Winds Based on Full-scale Measurement

藤村真弓*, 薄 達哉**, 前田潤滋***

Mayumi FUJIMURA, Tatsuya SUSUKI and Junji MAEDA

The wind-induced vibration behavior of a tower-supported steel stack is not yet clarified due to a lack of data from full-scale observations. Therefore, we performed a wind response measurement of a tower-supported steel stack in a long term, and studied the effects of strong winds on the stack using the data including large vortex-induced vibrations. In particular, the growth pattern of vortex-induced vibration varies widely in a block of 10-minute duration, which is the standard averaging time of a mean wind speed used in Japan. In this paper, we discuss the structural properties of the tower-supported steel stack, such as aerodynamic and structural damping, as well as the influences of the averaging time of wind speed on the evaluation of its vortex-induced vibration growth. Additionally, we focus on the negative aerodynamic damping force acting on the stack.

Keywords: *Averaging time, Lock-in phenomenon, Self-induced vibration, Aerodynamic damping*
平均化時間, ロックイン現象, 自励振動, 空力減衰

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に及ぶため、著しく細長い形状すなわち大きなアスペクト比になる場合が多い。風力は帯域の広い周波数成分を含む変動力であるため、構造物はその固有周波数域に一致する変動成分による共振現象を引き起こすが、その効果は固有周波数や減衰定数が小さい場合に大きくなりやすい。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、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、渦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、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算定する必要がある¹⁾。また、海外の煙突基準CICIND²⁾では渦励振による応答変位を1次減衰定数や質量等を用いたスクルートン数によって算定する。このように鋼製煙突の風による動的な応答特性を適切に評価するためには、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する必要がある。

一方、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、鉄塔支持型鋼製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」³⁾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。その理由の一つとして、自立型煙突の強風観測事例についてはHansen, S. O., et al.⁴⁾, Koten, H.⁵⁾やVerwiebe, C., et al.⁶⁾により数多く検討されているのに対して、鉄塔支持型鋼製煙突の実機による強風観測事例はKawamura, S.⁷⁾⁸⁾などの数例に留まっていることが考えられる。そのため、巻幡他⁹⁾、秋山他¹⁰⁾や植田他^{11),12)}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。しかしながら、自然風は、風洞実験のように安定した振動現象によるものとは異なるため、動的応答特性の評価に際しては注意が必要となる。

田村他¹³⁾は、風洞実験のように流速が比較的定常で、かつ充分長くその状態が保たれるような条件下で観測される応答値でなく、自然風のように広い周波数範囲に亘つ

* 都市共生デザイン専攻 博士後期課程

** 九州住宅保証(株)

*** 都市・建築学部門

て強い変動成分を含む流れのもとでは、いかなる観測値が対応するかということが重要な問題であることを指摘するとともに平均応答と平均流速の関係に対する評価時間を提案している。また「建築物荷重指針・同解説」¹⁾は、渦励振現象では10分間よりも短い時間内の風速が共振風速に一致したときでも、共振に近い大きな振動が発生することがあると指摘している。また、理論的にも共振振幅が成長して最大に達する時間は固有周波数や減衰定数などに影響されることが明らかである¹⁴⁾。以上のことから、自然風における渦励振現象を詳細に調査するためには、風速評価の平均化時間として通常採用される10分間ではなく、より短い平均化時間による検討が必要と考えられる。

筆者グループは、鉄塔支持型鋼製煙突の風による振動現象を明らかにする目的で、九州各地で稼動している火力発電所の高さ200mの1筒身煙突と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）、および2筒身煙突を含む筒身形態が異なる煙突について長期間の強風観測^{15)~23)}を実施してきた。この期間中、北部九州の高さ200mの鉄塔支持型の1筒身煙突では大きな渦励振現象を観測した^{24)~28)}。

本研究では、これら一連の強風観測結果から、特に、大きな渦励振現象が生じた1筒身煙突について、風速等の平均化時間をパラメータにして自然風による渦励振の成長過程を詳細に調べることにより、実機煙突の共振風速や空力減衰に関する検討を行って、渦励振発達のメカニズムを解析する。

2. 煙突の構造概要と観測体制

本報告で取り扱う1筒身煙突の構造概要を表1に、強風応答観測体制を図1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塔身方向の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が施されている。

観測煙突周辺の風況を、観測煙突から135m離れて隣接している多脚煙突のGL+185mに設置した2台のプロペラ式風向風速計W1、W2と発電所構内のGL+10mに設置されている超音波風向風速計W3によって観測した。煙突の全体振動を観測するために、鉄塔頂部GL+185m地点にXとY方向2成分用のサーボ型加速度計とGL+90.5m地点の各柱に歪ゲージを4点ずつ設置した(図1)。観測データは、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)により約16ヶ月間取得した。

表1 観測煙突の構造概要

筒身数	1本
筒身径	5.57m
筒身高さ	GL+200m
鉄塔高さ	GL+185m
鉄塔頂部開き	8.5m
鉄塔基部開き	36m
煙突総重量	約1700ton

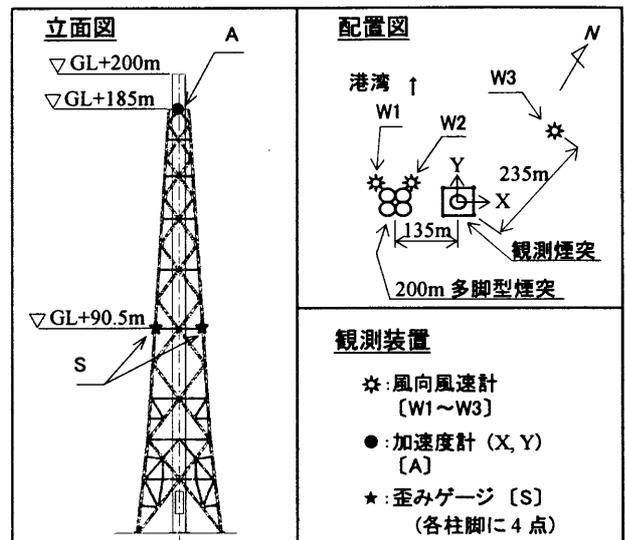


図1 1筒身煙突の観測体制

3. 煙突周辺の風況特性

観測煙突周辺の風況特性としてGL+185m地点の風向風速計の実測データから求めた風向別発生率を図2に、および風速階級別発生率を図3に示す。風向風速値は2台の風速計で観測されているため、発生率の検討に当たっては煙突自身の影響を受けていないと考えられる方の風向風速計の定時観測の値を用いている。

図2より観測煙突周辺では、ESE方位、E方位およびWSW方位が卓越していることが分かる。N方位からW方位は海側に面しており、当煙突で記録した大きな渦励振は海側からの風によって発生している。また図3より、平均風速10m/s以下の発生率は92%となっており、観測期間中では大きな渦励振を発生した平均風速18m/sを超える風はわずか0.3%程度しか発生していない。

4. 煙突の構造特性

煙突の構造特性を推定するために、Ranked Random Decrement法(Ranked RD法)²⁹⁾を用いて1次減衰定数および1次固有周波数を算出した。小サンプルの区切り方は時間平均型とし、小サンプルの長さは1次固有周期の約10倍の20秒とした。解析に用いた加速度波形は、後述の大きな渦励振が生じた期間を除いて、約14,000個の10分間データに対して1次固有周波数(0.56Hz)近傍の

0.3Hz~1.3Hzでバンドパスフィルター処理を行ったものを対象にした。1次減衰定数は、ランク幅 0.5gal 毎に、重ね合せ後の波形形状および 2000 個以上の重ね合せ回数によって求めた。

Ranked RD 法から1次減衰定数と1次固有周波数の加速度振幅との関係をそれぞれ図4と図5に示す。図より1次減衰定数はX方向とY方向で若干異なるが、いずれも人力加振試験で得られた 0.33%⁹⁾より小さな値であった。また、X方向では加速度振幅が大きくなるにつれて1次減衰定数が減少する傾向が見られるが、Y方向については明確な振幅依存性は見られなかった。1次固有周波数はXとY方向とも加速度振幅によらず 0.558~0.559Hz とほぼ一定であった。

5. 煙突の渦励振現象と平均化時間の影響

約 16 ヶ月の観測期間において大きな渦励振が観測されたが、これは Hansen, S. O. et al.⁴⁾が示す事例のように安定した冬季夜間の風によって発生したものである。その時の連続した 90 分間について、GL+185m の風向風速計 W2 で観測された風向風速、加速度の時刻歴波形および加速度のリサーチ図をそれぞれ図6~10に示す。また、図11~13に10分間、2分間、30秒間を平均化時間としたW2の風速、乱れ強さ、風向、X方向とY方向の合成加速度振幅をそれぞれ示す。

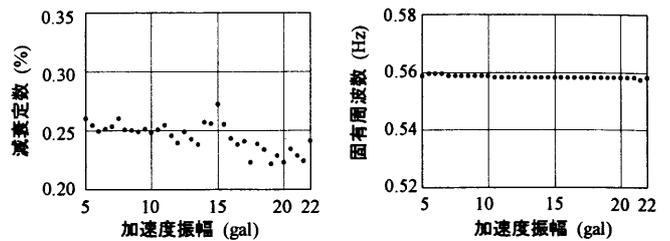


図4 X方向減衰定数と固有周波数

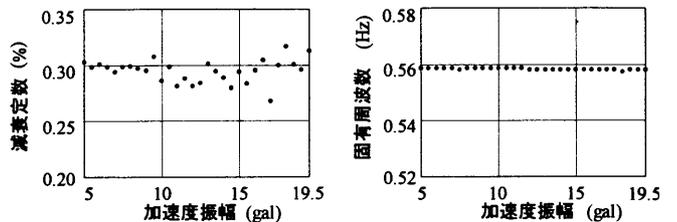


図5 Y方向減衰定数と固有周波数

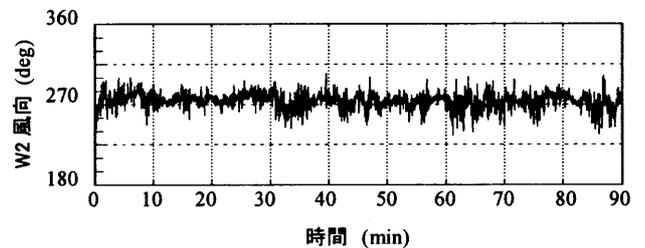


図6 風速計 W2 の風向

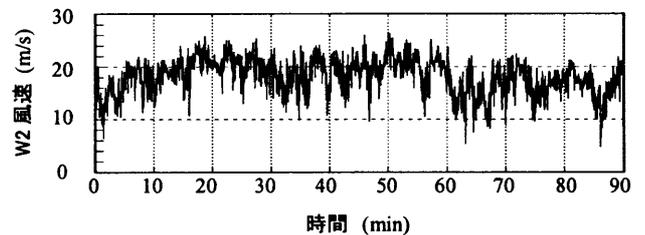


図7 風速計 W2 の風速

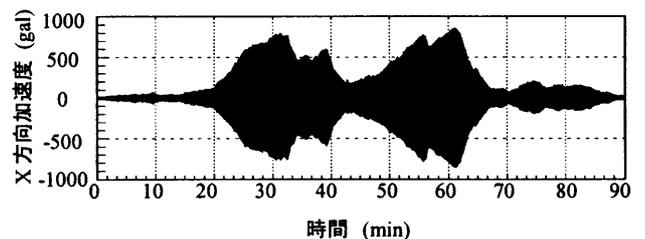


図8 X方向加速度

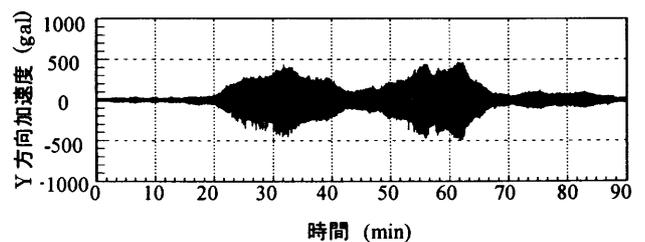


図9 Y方向加速度

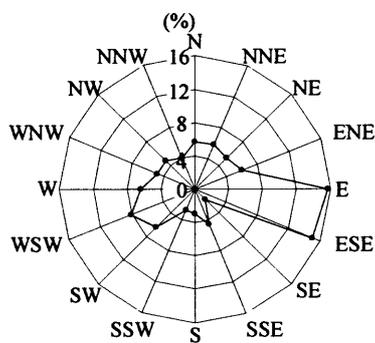


図2 風向別発生率

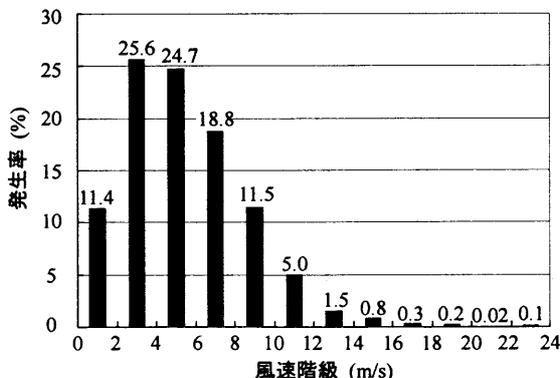


図3 風速階級別発生率

なお、風向風速計 W2 の風向風速は W1 の値よりもばらつきが小さいため、W2 の観測値を用いて以下の検討を行った。平均化時間の各ケースは、10 分間の他に田村他¹³⁾ が示した固有周期の 50~100 倍程度を参考にその中央値付近となる 2 分間およびその 1/4 となる 30 秒間を設定した。各図における縦軸の数値は、加速度(gal)、風向(deg)、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。

図に見られるように、煙突の加速度振幅は約 50 分間に増減を 2 回繰り返している。その間、10 分間平均では、風向 270~278deg、風速 15.3~20.4m/s、2 分間平均では、風向 265~284deg、風速 13.1~22.0m/s および 30 秒間平均では、風向 260~286deg、風速 10.4~23.5m/s を示しており、当然ながら、平均化時間が短くなるにつれて風向、風速の変動範囲が増大している。いずれの図も風速が 20m/s 付近で乱れの強さが小さい時に加速度振幅が増大しており、ピークに達した後その風速範囲からはずれて乱れ強さも大きくなると急激に減少している。また、加速度振幅のピーク近傍では風向の変化も若干見られる。

最大加速度振幅発生時の風速に着目すると、10 分間平均では 20.4m/s となるが、2 分間平均では 15.5m/s、30 秒間では 13.5m/s となっており、それぞれの発生時刻と共に風速値が異なっている。これは、風洞実験のように安定した状態での共振現象とは異なり、実機の強風観測で得られる風速や加速度振幅は 10 分間内で著しく変化しているため、10 分間平均では加速度振幅と風速の短時間で変化する関係を適切に表せないことを示している。すなわち、風洞実験の場合と異なり、渦励振時の共振風速は最大加速度振幅発生時の風速とは必ずしも対応しないことがわかる。

以下では、共振風速を明らかにするために、大きな渦励振が発生した 50 分間を含む連続した 12 時間について、平均化時間を 10 分間、2 分間、30 秒間とした風速と X 方向と Y 方向の合成加速度振幅の関係、及びそれぞれの平均化時間における風速と合成加速度振幅の傾きの関係を図 14~16 に整理した。

図 14~16 で明らかなように、図には加速度振幅の傾きが負すなわち振幅減少時のものが含まれているため風速との関係がばらついており、平均風速が 15m/s 付近から 20m/s を越える範囲で大きな加速度振幅が発生している。これは、加速度振幅がピークに達する近傍で風速が共振風速域から外れているにもかかわらず、加速度振幅はまだ大きな値を維持しているために、広い風速範囲で共振による大きな加速度振幅が発生しているように見えることを示している。

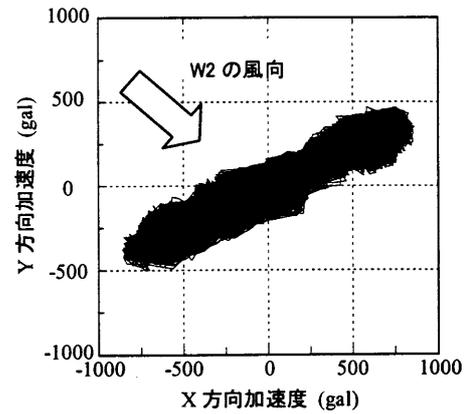


図10 90分間のリサーチ図

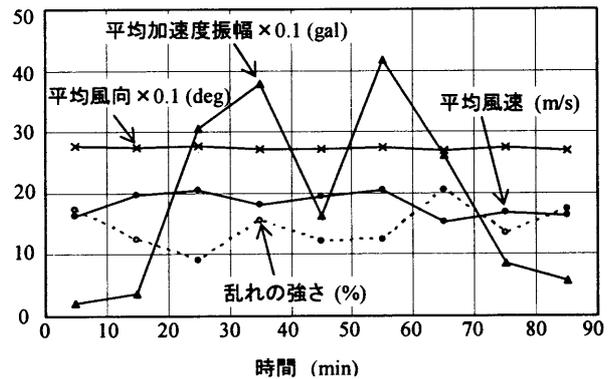


図11 10分間平均値の時系列

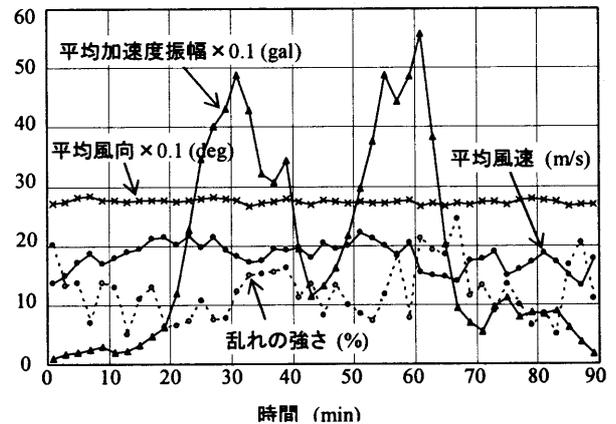


図12 2分間平均値の時系列

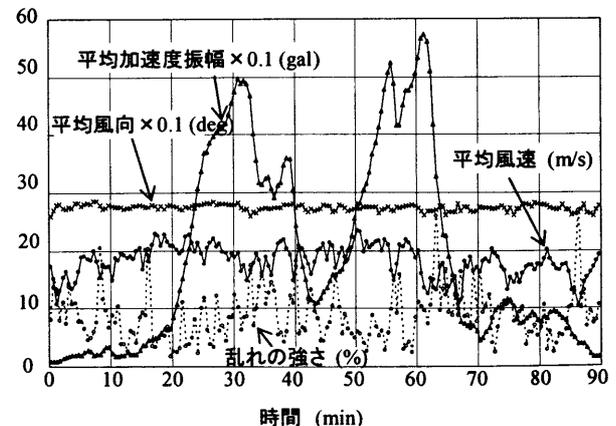


図13 30秒間平均値の時系列

一方、加速度振幅の傾きが大きい風速範囲は、加速度振幅が成長している本来の共振状態に限られているため、ばらつきは小さくなり平均風速は 20m/s 付近に集中している。また、加速度振幅の傾きが負のデータから、加速度振幅が急速に減少している間は共振風速域の風速であってもその減少傾向をすぐには止めることができないことや、風速が共振風速域から 15m/s 付近へ離れるにしたがって加速度振幅の減少割合が増大することがわかる。図 14 では加速度振幅の傾きの最大値と最小値はほぼ同じであるが、図 15 と図 16 に見られるように平均時間が短くなるほど最大値は最小値に比べて共振風速域で頭打ちになっている。これは、平均化時間を短くすることによって、共振風速域でロックイン現象による振動振幅が保持されるためと考えられる。ただし、平均化時間が 30 秒間まで短くなると風速範囲のばらつきが大きくなるため、2 分間平均による風速と加速度振幅の傾きの関係の方が共振風速域をより明瞭に示していると考えられる。図 14～16 より煙突の共振風速域は 19m/s から 23m/s 程度と推測されるが、この下限値はストローハル数を 0.18 とし算出した煙突高さ 2/3 地点の共振風速を観測で得られたべき指数 0.2 を用いて GL+185m 地点に換算した値 18.5m/s とほぼ同程度であった。このように、自然風においては共振状態が最大に達する近傍で風速が急激に減少しているにもかかわらず大きな加速度振幅を維持している場合があるので、共振風速は加速度振幅が成長している状態での平均風速と平均加速度振幅の傾きの関係を考慮する必要がある。また、1 次固有周期約 1.8 秒、1 次減衰定数約 0.3% の本煙突では、平均化時間を 2 分間にすれば 10 分間平均よりも渦励振現象を詳細に検討することができること、また、30 秒間平均よりもばらつきを少なくして共振風速域をより明瞭にできることがわかった。

6. 渦励振成長と空力減衰の関係

渦励振の成長には、風の力によって煙突が一方向的に振動させられる強制振動の場合と、風によって煙突が振動することで、新たな空気力を生み出し、振動振幅を大きくする自励振動の場合がある。自然風のように不規則な風速変化がある場合には強制的振動が卓越し、一様流の場合のように風速変化がない場合には自励振動が卓越することが多い³⁰⁾。言い換えれば、渦励振には大別してランダム渦発生に起因するランダム振動と、周期的渦発生に起因する周期的振動の 2 通りがあり、これらの振動は通常強制振動的であるが、共振風速近傍で振動がある程度以上大きくなると自励振動に発展し、場合によってはさらにロックインに至ることになる³¹⁾。

ここで、乱流中において強制振動となる場合の振動方程式は、煙突の質量を m 、構造減衰を c_s 、ばね定数を k および外力を $f(t)$ とすると次式で表される。

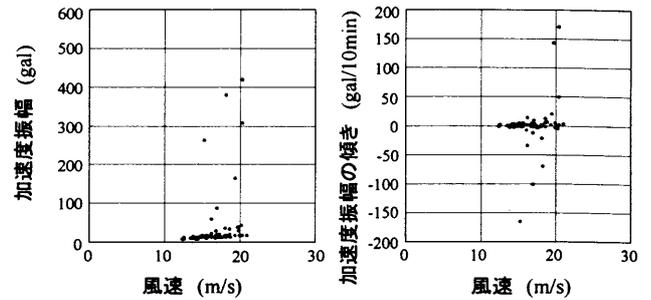


図14 10分間平均風速と加速度振幅・傾きの関係

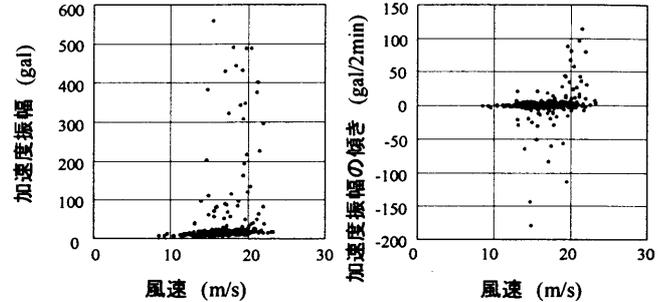


図15 2分間平均風速と加速度振幅・傾きの関係

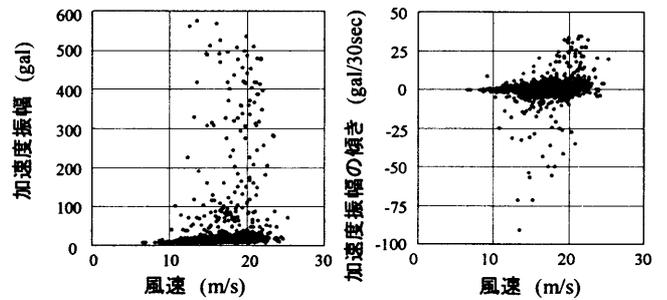


図16 30秒間平均風速と加速度振幅・傾きの関係

$$m\ddot{x} + c_s\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

この場合外力 $f(t)$ は、煙突の振動変位とは無関係に作用している。一方、自励的な渦励振の場合の振動方程式は、渦発生の影響を受けた振動依存風力として、弾性力成分 $k_a x$ と減衰力成分 $c_a \dot{x}$ が作用するため次のように表される。

$$m\ddot{x} + c_s\dot{x} + kx = f(t) + c_a\dot{x} + k_a x \quad (2)$$

しかし、空力弾性係数 k_a は、通常、剛性 k に比べて無視できることから省略し、右辺の c_a 成分を左辺に移項すると、振動方程式は結局式(3)となる³¹⁾。

$$m\ddot{x} + (c_s - c_a)\dot{x} + kx = f(t) \quad (3)$$

共振時は渦の発生円振動数 ω が煙突の減衰固有円振動数 $\omega_n \sqrt{1-h^2}$ に限りなく近づく場合と考えられるため、周期的な変動風直交方向力を $f(t) = F_0 \sin(\omega t)$ とすると、その時の煙突の応答変位は過渡項も含めて次式により表すことができる¹⁴⁾。

$$x(t) = \sqrt{C^2(t) + D^2(t)} \sin(\omega_n \sqrt{1-h^2} t + \phi) \quad (4)$$

ここに,

$$C(t) = \frac{hx_0}{\sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega_n t} + \frac{v_0}{\omega_n \sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega_n t} + \frac{X_{st}}{4-3h^2} (1 + e^{-h\omega_n t}) \quad (5)$$

$$D(t) = x_0 e^{-h\omega_n t} + \frac{X_{st}}{4-3h^2} \times \frac{2\sqrt{1-h^2}}{h} (e^{-h\omega_n t} - 1) \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1}(D(t)/C(t)) \quad (7)$$

また、式中の X_{st} は風直交方向力 F_0 が静的に作用した時の変位、 x_0 および v_0 は、変位および速度の初期値、 h は振動系全体の減衰定数である。

図 8、図 9 および図 12 を見ると、煙突は約 20 分経過後に大きな渦励振に成長し始めているが、その約 10 分後に一旦定常状態に落ち着いている様子がわかる。また、この区間の平均風速はおよそ 20m/s と共振風速域であり、乱れの強さはおよそ 10%以下で乱れが小さい。この 10 分間の X 方向と Y 方向の合成変位振幅(フィルター処理)の成長を図 17 に示す。なお、変位振幅は加速度振幅を $(-2\pi f)^2$ で除して算出している。

図 17 の波形に式(4)を当てはめ減衰定数を推定した結果を図 18 に示す。なお、合成変位の包絡線の傾きが 10 分の間に変化していることを考慮し、0~5 分、5~9 分および 9~10 分の区間ごとに減衰定数 h と風直交方向力 F_0 を再評価している。

図 18 から分かるように、式(4)より推定した減衰定数は、煙突の 1 次構造減衰定数は 0.33% を大きく下回っている。このことは、共振風速近傍で風速変化が小さい場合には、振動振幅の成長に伴って負の空力減衰力が働いて振動系全体の減衰定数が減少することを意味する。さらに、区間ごとの推定値は大きく変化しており、振幅成長過程で煙突に作用する負の空力減衰力は一定ではないことを示している。

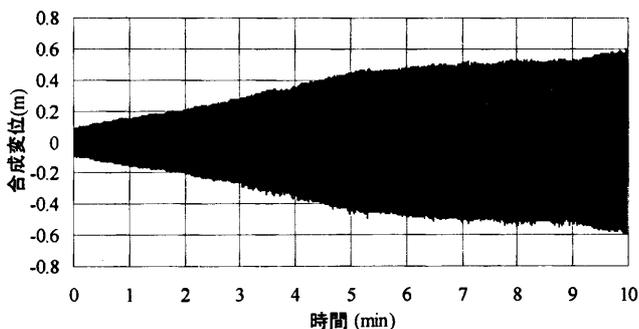


図17 合成変位の時刻歴波形

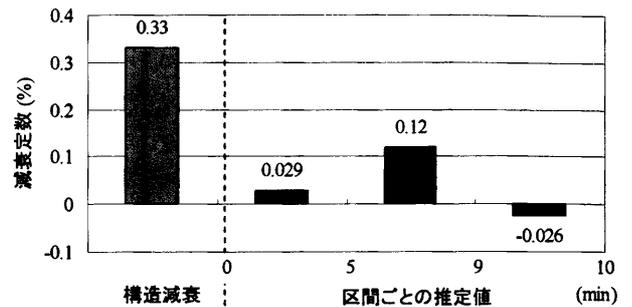


図18 減衰定数推定結果

7. まとめ

鉄塔支持型鋼製煙突の強風観測データを用いて、固有振動特性、減衰特性および渦励振成長に及ぼす平均化時間の影響と負の空力減衰力について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) Ranked RD 法によって算定した観測煙突の 1 次減衰定数は、X 方向と Y 方向で若干異なったが、いずれも人力加振試験で得られた値よりも小さかった。X 方向では、加速度振幅が増大するにつれて減衰定数が若干低減する傾向が見られた。1 次固有周波数は、X、Y 方向ともほぼ同じ値で観測範囲内では振幅依存性は見られなかった。
- (2) 煙突で発生した大きな渦励振は、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。
- (3) 観測された大きな渦励振時の加速度振幅や風速は 10 分間内で著しく変化しているため、10 分間の平均化時間では加速度振幅と風速の短時間での変化関係を適切に表せない。本検討では平均化時間を 2 分間程度にすれば、風速と渦励振成長の関係などが適切に評価できた。
- (4) 自然風においては、渦励振による加速度振幅の成長がピークに達する近傍で風速が急激に減少しても、大きな加速度振幅を維持している場合があるため、共振風速は加速度振幅が成長している状態での平均風速と平均加速度振幅の傾きの関係を考慮する必要がある。
- (5) 自然風においても共振風速近傍で風速変化が小さい場合には、振動振幅の成長に伴って負の空力減衰力が働き振動系全体の減衰定数が減少するために、渦励振の成長が急激に増大すると考えられる。適切な平均化時間による振幅成長の検討は、減衰定数や共振風速の評価において有効である。
- (6) 振動振幅成長時に煙突に作用する負の空力減衰力は、振幅成長過程において著しく変化する可能性がある。

本報は1筒身煙突で発生した渦励振時の強風観測データを用いたが、今後は固有振動特性や減衰特性の異なる1(2)筒身煙突、2筒身煙突の観測データも加えて、筒身形態の影響や渦励振成長に及ぼす平均化時間の影響および負の空力減衰力など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

本研究の一部は、九州大学21世紀COEプログラム「循環型住空間システムの構築」(「鉄塔支持型煙突の渦励振時の空気力特性及び応答特性の解明」,平成19年度若手研究者研究活動の助成,代表:藤村真弓)および九州大学大学院人間環境学府(「鉄塔支持型煙突の渦励振時の空気力特性及び応答特性の解明」,平成19年度学位取得(課程博士)に向けての研究助成,代表:藤村真弓)の援助を受けました。また、煙突の強風観測にあたり九州電力株式会社火力部および土木部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) CICIND(1999), Model Code for Steel Chimneys Revision 1.
- 3) 日本建築センター:煙突構造設計施工指針(1982版), 1982.11.
- 4) Hansen, S.O., Vortex-induced vibrations of line-like structures, Proceedings of CICIND's 50th Meeting, Oxford, , Vol.15, No.1, pp.15-23, 1998.9.
- 5) Koten, H., Vortex excitation of steel chimneys, Wind Effects on Buildings and Structures, Riera & Davenport (eds.), Balkema, Rotterdam, pp.209-219., 1998.5.
- 6) Verwiebe, C. and Berger, G.W., Measured damping decrements of steel chimneys and their dependence on design of the chimneys, Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, pp.599-605, 1999.6.
- 7) Kawamura, S., et al. : Full scale measurement on a triangular tower-supported stack with two flues, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp.2177-2186, 1992.10.
- 8) Kawamura, S. and Okazaki, M. : Full scale measurement on a rectangular tower supported stack with two flues, Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, pp.461-466, 1999.6.
- 9) 巻幡敏秋, 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.
- 10) 藤本盛久, 他: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.
- 11) 植田利夫, 他: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.
- 12) 植田利夫, 他: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.
- 13) 田村幸雄, 天野晶彦:円筒の渦励振に関する研究その3 連続体の渦励振モデル, 日本建築学会論文報告集 第337号, pp.65-72, 1984
- 14) 藤田勝久:振動工学, 森北出版株式会社, pp.60-65, 2006.8.
- 15) 宮嶋浩, 他: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.
- 16) 巻幡敏秋, 他: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.
- 17) 薄達哉, 他: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.
- 18) 本間真, 他: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.
- 19) 花田淳也, 他: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.
- 20) 本間真, 他: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.
- 21) 薄達哉, 他: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.
- 22) Susuki, T., et al. : Wind-induced Vibration of a 200m-high Tower-supported Steel Stack, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Seoul, pp.2442-2449, 2005.9
- 23) 薄達哉, 他: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, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第9号, pp.29-36, 2006.1.
- 24) Susuki, T., et al. : Wind-induced Vibration Control of a 200m-high Tower-supported Steel Stack, Journal of Wind and Structures, Vol. 9, No. 5, pp.345-356, 2006.9.
- 25) 薄達哉, 他:鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振の振幅成長評価に及ぼす風速平均化時間の影響—強風観測

データに基づく検討ー，第 19 回風工学シンポジウム論文集，pp.405-410，2006.11.

- 26) 本間真，他：鉄塔支持型煙突の渦励振に対する評価方法について，第 19 回風工学シンポジウム論文集，pp.465-470，2006.11.
- 27) 藤村真弓，他：鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振振幅成長過程における空力減衰の推移，日本風工学会会誌 Vol.32 No.2，pp.231-232，2007.7.
- 28) 藤村真弓，他：鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振振幅成長過程における空力減衰の推移ー実測データによる検証ー，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.123-124，2007.8.
- 29) 庄司豊，他：強風時の建築物の動特性の振幅依存性ーピーク値ランク分け RD 法ー，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.295-296，1995.8.
- 30) 日本鋼構造協会，構造物の耐風工学，pp.127-128，1997
- 31) 大熊武司，他，建築物の耐風設計，鹿島出版会，pp.174-180，1996

(受理：平成 19 年 12 月 6 日)