九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

# 鉄塔支持型煙突の空力特性に及ぼす煙突附設物と風 向角の影響

高瀬, 賢佑 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

大坪, 和弘 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

**鶴, 則生** 九州大学大学院人間環境学府

竹内, 崇 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

他

https://doi.org/10.15017/1485048

出版情報:都市・建築学研究.25, pp.49-54, 2014-01-15. 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:

# 鉄塔支持型煙突の空力特性に及ぼす煙突附設物と風向角の影響

Wind Force Acting on Tower-supported Steel Stack Affected by its Accompanied Structures and Attack Angle

高瀬賢佑\*, 大坪和広\*, 鶴 則生\*\*, 竹内 崇\*\*\*, 友清衣利子\*\*\*\*, 前田潤滋\*\*\*\* Kensuke TAKASE, Kazuhiro OTSUBO, Norio TSURU, Takashi TAKEUCHI, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

Wind forces acting on a tower-supported steel stack affected by its ancillary equipment, such as a steel tower and stairway, were investigated by a wind tunnel test. A one-hundredth-scale rigid model of upper half of a tower-supported steel stack of 200m in height was used and the wind pressure on the surface of stack model was measured under a uniform flow. As a result, it was found that the drag coefficient and fluctuating lift coefficient of the model stack with the ancillary equipment were smaller than those on a pure stack model, especially near the top of the stack. Fluctuating lift coefficient was dependent to wind direction, and the coefficient at attack angle of 45 degrees was smaller than those at the angle of 0 degrees.

Keywords: Wind Tunnel Experiment, Tower-supported Steel Stack, Accompanied Structure, Attack Angle, Wind Force 風洞実験,鉄塔支持型煙突,附設物,風向角,風力

# 1. 序

火力発電所の鋼製煙突はその筒身の高さから強風の 影響を受けやすく、筒身下流へのカルマン渦の放出によ り風直角方向に周期的な外力が作用する.この渦の放出 周波数と煙突の1次固有周波数が一致するとき,一般に 減衰が小さい高煙突は風直角方向に大きな振動いわゆる 渦励振が発生するため、実大煙突を対象とした観測<sup>1,2)や</sup> 風洞実験 3,4)による研究が行われ、その空力特性が調べら れてきた. 筒身を鉄塔型架構で支える鉄塔支持型煙突に おいても渦励振現象が観測 5,6,7,8)されているが、煙突とそ のまわりに附設する支持鉄塔や維持管理用の階段などか ら構成される鉄塔支持型煙突は形状が非常に複雑である ため、その空力特性はほとんど検討されていない、著者 らは鉄塔支持型煙突に対する風洞実験を行い、支持鉄塔 の正面に風を受ける場合に、附設物が煙突の空力特性に 及ぼす影響を報告している<sup>9,10,11)</sup>が、実際の観測<sup>5,6,7,8)</sup>で は支持鉄塔正面に対して一定の風向角がある場合に煙突 に大きな渦励振が発生している。本報告は鉄塔支持型煙 突の空力特性に及ぼす風向角の影響を風洞実験で検討

- \* 都市共生デザイン専攻修士課程
- \*\* 人間環境学府

\*\*\* 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

\*\*\*\*都市·建築学部門

するとともに、その空力特性の変化に寄与する煙突附設物の影響を個々に整理する.

## 2. 実験概要及び試験体概要

実験は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェ ル型吸込式風洞を用いて行った.風洞断面内での各計測 器の配置状況を図1に示す.実験で用いた鉄塔支持型煙 突模型は煙突,支持鉄塔,鉄塔裏打ち材,および階段か ら構成されている.図2(a)に示すように模型は塔高200m の鉄塔支持型煙突の上半分を実物の1/100スケールで作 成した.図2(b)に示すように、煙突部の高さは980mm, φ56mmで,鉄塔部の高さは830mm,上部開きは85mm, 下部開きは210mmで,階段幅は8.6mmである.また, 煙突に附設する支持鉄塔と階段が空力特性に及ぼす影響 を確認するため,煙突単体の場合,支持鉄塔のみを取り 付けた場合および支持鉄塔と階段を取り付けた場合の3 ケースで実験を行った.鉄塔モデル,鉄塔+階段モデルの 写真をそれぞれ図2(c),(d)に示す.

図3に示すように階段は真鍮棒と網板で模擬され,煙 突にらせん状に取り付けられているため,各断面は風向 方向に非対称となる.煙突部模型には図2(b)に示すよう に鉛直方向に断面Aから断面Sまで15箇所,図4に示 すように各断面で円周方向に8点,計120点の圧力計測 孔を設けた.また,実観測に対応した高いレイノルズ数 の流れ場を風洞実験で再現するため,図3に示すように, 煙突部周りに φ1mm の丸鋼を2.75mm 間隔で貼付し,粗 度をつけた<sup>5)</sup>. 煙突模型の円周方向の計測点は8点のみ であるため,煙突を5度間隔で回転させながら10回の 計測を行うことで,円周方向72点でデータを取得する. 圧力計測には3台の多点圧力スキャナを用い,サンプリ ング周波数は250Hz,計測時間は20秒である.

実験風向は図4に示すように支持鉄塔正面に風が当た る風向角0°と45°の2通りとし、実験風速は12m/sであ る.風洞内の風速は試験体上部に設置した超音波風速計 で確認した.風速計のサンプリング周波数は1000Hzで、 計測時間は圧力計測と同じ20秒とした.

#### 3. 煙突に作用する風力

## 3.1 風力および風力係数の算出

風洞実験で取得した風圧力をもとに下式により,単位 長さあたりの抗力と横力を求めた.図4に示すように抗 力は風流れ方向の風力,横力は流れ直交方向の風力とす る.風力の算出には45度間隔で8点(0度,45度,…, 315度)での風圧力を用いた.



(単位長さ当りの抗力)  $\frac{Drag(t)}{dz} = \sum_{i=1}^{n} \int_{\theta_{i}-0.5\Delta\theta}^{\theta_{i}+0.5\Delta\theta} p_{i}(t) \cos\phi \cdot rd\phi$ 

(単位長さ当りの横力)  $\frac{\text{Side}(t)}{dz} = \sum_{i=1}^{n} \int_{\theta_i - 0.5\Delta\theta}^{\theta_i + 0.5\Delta\theta} p_i(t) \sin \phi \cdot rd\phi$ ここで, dz:単位長さ, i:チャンネル番号(1~8), n: チャンネル数,  $p_i$ : i番目の計測点のt秒時の圧力(Pa),  $\theta_i$ : i番目の計測点の角度(rad.),  $\Delta\theta$ :計測点の間隔(rad:= $\pi/4$ ) である. 求めた単位長さあたりの抗力と横力を煙突の直 径および平均風速での速度圧で除した値をそれぞれ抗力 係数, 横力係数とし,単位長さあたりの横力の標準偏差 を煙突の直径および速度圧で除した値を変動横力係数と した.

#### 3.2 煙突に支持鉄塔のみを取り付けた場合

煙突単体モデルと鉄塔の風向角が 0 度と 45 度の場合 の支持鉄塔のみを取り付けたモデルの各断面での抗力係 数,横力係数,変動横力係数をそれぞれ図 5(a), (b), (c) に示す.

図 5(a)の抗力係数の比較では、鉄塔上部の位置におい て支持鉄塔を取り付けたモデルの抗力係数は煙突単体モ デルよりも小さい値を示した.また、支持鉄塔付きモデ ルの抗力係数を鉄塔の風向角で比較すると、多くの断面 で鉄塔風向角 0 度時の抗力係数の方が 45 度の場合より も大きいことがわかる.抗力係数の高さによる違いに着



— 50 —

目すると,支持鉄塔の有無や風向角の違いにかかわらず, 煙突頂部の断面Sでの抗力係数が最大となる.

図 5(b)の横力係数では多少のばらつきはあるが,いず れのモデルも 0.07 以下と非常に小さい値を示した. 煙突 も支持鉄塔も風向に対して左右対称であるため,横力の 平均値がほぼ 0 になるためである.

図 5(c)の変動横力係数の比較では、鉄塔上部の位置に おいて支持鉄塔を取り付けたモデルの変動横力係数は煙 突単体モデルよりも著しく小さい値を示した.また、支 持鉄塔付きモデルの変動横力係数を鉄塔風向角で比較す ると、鉄塔風向角 0 度時の変動横力係数の方が 45 度の 場合よりも小さいことがわかる.

支持鉄塔で囲まれた断面はすべて煙突単体の場合より抗力係数が同様に小さくなるので、代表して断面 E での煙突単体モデルと支持鉄塔付きモデル(鉄塔風向角0,45度)の抗力の時刻歴波形を図6-1に示す.一方、変動 揚力係数は鉄塔の有無で著しく変化し、とくに鉄塔上部 位置断面 O を境にその特性が変わるので、断面 O での 変動横力係数に着目して、煙突単体モデルと支持鉄塔付 きモデル(鉄塔風向角0,45度)の横力の時刻歴波形を 図 6-2 に示す.図 6-1 では煙突単体モデル、支持鉄塔付 きモデル鉄塔風向角0度,45度となるにつれ抗力の平均



値が小さくなっていることが確認され,図 6-2 では横力 の平均値はすべてのモデルでほぼ0であるが,煙突単体 モデル,支持鉄塔付きモデル鉄塔風向角 45 度,0 度とな るにつれ横力の変動が小さくなっていることが確認でき, 支持鉄塔によって煙突の風直交方向の振動が抑えられる が,鉄塔風向角 45 度の場合はその抑制効果が小さくな る.

図7に図5(a)で抗力係数が最も大きな値を示した断面 Sと,他断面位置を代表して断面Eでの抗力係数の算出 に使用した8点での風圧力の抗力方向成分を示す.断面 Sは煙突単体モデルでの結果,断面Eは煙突単体モデル と煙突+鉄塔モデル(鉄塔風向角0度,45度)での結果 である.図7から,煙突単体モデルの2つの断面を比べ ると断面Sは断面Eより断面位置0度での風圧の抗力成 分は小さいが,断面位置135度,180度,225度ではかな り大きく,断面Sでは煙突背面での負圧が大きいために 図5(a)のように断面Sの抗力係数が大きくなる.また,

断面 E において煙突単体モデルと煙突+鉄塔モデル(鉄塔 風向角 0 度,45 度)を比べると、煙突+鉄塔モデルは煙突 単体モデルより煙突正面(断面位置 0,45,315 度)での 圧力が小さくなり鉄塔の影響が顕著にみられるが、煙突 背面(断面位置 135~225 度)では、圧力はほとんど変わら



ず鉄塔の影響はほとんど見られない. 断面 E において煙 突+鉄塔モデルの風向角の違いを比べると, 断面位置 45 度, 315 度において鉄塔風向角 0 度のときの風圧力の絶 対値が小さくなっている.

図8には図7で着目した断面での風圧係数の円周方向 分布を示す.モデル正面を0度とし、反時計回りに5度 間隔72点での風圧力を速度圧で除した値である.図8(a) は煙突単体モデルの断面Sと断面Eの比較を、図8(b)は 支持鉄塔を取り付けたモデルの断面 E での,鉄塔風向角 0 度と 45 度の比較を示す. 図 8(a)の煙突単体モデルでは 煙突背面全体で、断面 E よりも断面 S の風圧係数が大き い. 煙突最上部である断面 S は, 他の断面とは風の流れ が違い、三次元的な渦が作用していると考えられる.図 8(b)の鉄塔風向角による比較を見ると、煙突正面(断面位) 置0度,360度)付近で鉄塔風向角45度の風圧係数が鉄 塔風向角 0 度の場合より小さいが、鉄塔風向角 45 度で はモデル正面の風上に鉄塔主柱材が位置するためと考え られる.また、鉄塔風向角0度と45度では、風圧係数が 極小となる角度が変化するが、鉄塔風向角によって取り 付けられた鉄塔部材の位置が異なり、煙突周りに発生す る渦の剥離の位置が変化したためと考えられる。

#### 3.3 煙突に支持鉄塔と階段を取り付けた場合

風向に対して非対称に設置された階段が煙突周りの風 力特性に及ぼす影響を検討するため、煙突に支持鉄塔お よび階段を取り付けたモデルの各高さ断面での抗力係数, 横力係数,変動横力係数をそれぞれ図 9(a), (b), (c)に示 す.

図 9(a)から,階段と鉄塔を取り付けたモデルの場合も 図5での比較と同様に,多くの断面で鉄塔風向角0度の 抗力係数は45度の場合よりも大きい.図9(b)に示すよう に,横力係数は風向角の違いによっていくつかの断面で 大きな差が生じた.また,図9(c)で変動横力係数につい てほとんど階段の影響は確認されなかった.

図 10(b)で風向角により横力係数の値に大きな差が生じた支持鉄塔と階段付きモデル(鉄塔風向角 0,45 度)



135°180°225°270°315°360° 断面位置(角度)

(a) 煙突単体モデル風圧係数(断面 S, E)

-1.0 -1.5

 $0^{\circ}$ 

45°

90°

図8 煙突の風圧係数分布

の断面 M の横力の時刻歴波形を示す. どちらのモデルで も変動の大きさはほとんど同じであるが,図 10 から,鉄 塔風向角 0 度のとき,横力の平均値が 0 から大きくシフ トしていることがわかる.

図 11 に横力係数の算出に使用した 8 点の風圧力の横 力方向成分を示す.支持鉄塔および階段を取り付けた場 合の横力係数に風向角の影響が大きく表れた断面の一例 として断面 M の結果に着目する.図 11 において,鉄塔 風向角 0 度の場合に着目すると,風方向に対して対称に 位置する 90 度と 270 度の計測点での値は,絶対値がほ ぼ等しく正負が異なるために横力方向成分をほぼ打ち消 す。鉄塔風向角 45 度の場合には,断面位置 90 度と 270 度および 135 度と 225 度の計測点で同様に,互いに圧力 の横力方向成分をほぼ打ち消している.しかし,その他 の角度では風方向に対して対称な位置の計測点での圧力 値が異なっており,横力方向成分を打ち消すことができ ない.鉄塔風向角 0 度の場合の方が鉄塔風向角 45 度の 場合よりも,正側の横力方向成分が大きいため,図 9(b) で示したような差が生じたものと考えられる.

図 12 に図 10 と図 11 で着目した断面 M での風圧係数

の分布について、支持鉄塔および階段を取り付けたモデ ルの鉄塔風向角0度と45度の場合の結果を示す。鉄塔 風向角の違いにかかわらず、断面位置 80 度と 280 度付 近で生じる風圧係数の極小値に差が生じた。特に鉄塔風 向角 0 度の場合でその差が顕著で、断面位置 80 度付近 の風圧係数が大きい、鉄塔風向角の変化と共に階段の位 置が 45 度変化したため、煙突の左右の風圧係数の極小 値に違いが生じたものと考えられる.鉄塔風向角0度と 45 度の場合の、断面 M の鉄塔主柱材と階段、煙突の略 断面図をそれぞれ図 13(a)と(b)に示す. 鉄塔風向角 0 度 の場合は断面位置 45 度から 90 度付近に階段が位置し、 断面 M とは断面位置約 70 度で交差する. 鉄塔風向角 45 度の場合,階段は断面位置 90 度から 135 度付近に位置 し、断面 M とは断面位置約 115 度で交差する。この階段 が断面位置 0~180 度側の渦の剥離に影響を及ぼし、断面 位置 80 度付近に生じる風圧係数の絶対値は、鉄塔風向 角 45 度よりも風向角 0 度の場合が小さくなったと考え られる.

4. まとめ

鉄塔支持型煙突の煙突部分の風力特性に及ぼす支持鉄





塔や階段等の附設物および風向角による影響を明らかに するため、風洞実験を行ったところ、以下の所見が得ら れた.

- (1) 煙突単体に比べて支持鉄塔を取り付けると主に鉄塔 上部で抗力係数と変動横力係数が小さくなる.
- (2) 支持鉄塔を取り付けた煙突モデルの抗力係数は鉄塔 風向角0度の場合に比べて鉄塔風向角45度の場合の 方が小さいが,変動横力係数は鉄塔風向角0度の場合 に比べて鉄塔風向角45度の場合の方が大きい.
- (3) 鉄塔風向角 45 度の場合には支持鉄塔の主柱材が煙突 正面の風上に位置するため, 煙突正面付近の風圧係数 が小さくなる.
- (4) 支持鉄塔のみを取り付けた場合,鉄塔の風向角によっ



図 11 各断面位置での風圧力の横力成分









※破線は断面 M と階段が交差している箇所を示す

(a) 鉄塔風向角 0 度 (b) 鉄塔風向角 45 度

図 13 断面 M 略断面図

て煙突周辺に発生する剥離渦の位置が変化するため, 風圧係数が極小となる位置が異なる.

(5) 支持鉄塔と階段を取り付けると,風向に対してモデル が非対称となる断面で横力係数が大きくなる.

(6)

(7) 断面位置 70 度の辺りに階段が取り付けられている場合には,階段が付いている側の風圧係数の極小値が抑えられ,附設物の影響が大きい.

参考文献

- 丸川比佐夫,田村幸雄,眞田早敏,中村修,大型 RC 煙突に作用する揚力と振動応答,日本風工学会誌,第 19 号, pp.37-52, 1984.
- 2) 巻幡敏秋,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,pp457-462,2002
- Buresti, The effect of surface roughness on the flow regine around circular cylinders, Jaournal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, pp105-114, 1981
- 4) 片桐純治,丸川比佐夫,中村修,田村幸雄,大熊武司, 円柱構造物に作用する空気力特性に関する研究,第9 回風工学シンポジウム論文集,pp.103-108, 1986.
- 5) 薄達也,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発表会 第 42号・1,pp217-220,2003.
- 6) 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,B-1, pp211-212,2003
- 7)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.
- 8) 薄達哉,前田潤滋,藤村真弓,花田淳也,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,第19回風工学シンポジウム論文集, pp.406-410,2006.
- 9) 竹内崇, 薄達哉, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 高煙 突の空力特性に及ぼす附設物の影響に関する検討, 2012 年度日本建築学会大会 (東海) 学術講演梗概集, pp. 191-192, 2012.9.
- 竹内崇,前田潤滋,薄達哉,大坪和広,鶴則生,高 煙突の空力特性に及ぼす付帯物の影響に関する実 験的研究,第22回風工学シンポジウム論文集, pp.167-172,2012.12.
- 11) Takeuchi, T., Maeda, J., Otsubo, K., Susuki, T., Experimental Studies of Properties of Wind Force Acting on a Tower-Supported Steel Stack, Proceedings of 19th Conference on Electric Power Supply Industry, USB 8pages, 2012.10.

(受理:平成25年11月14日)