

鋼製煙突の振動測定について

石 崎 潑 雄・川 村 純 夫

ON THE VIBRATION EXPERIMENTS OF A STEEL STACK

by Dr. Eng. Hatsuo ISHIZAKI and Sumio KAWAMURA

Synopsis

Complete information of the dynamic behavior of tall steel stacks under the action of wind, has not been yet obtained. For instance, the explanations on the modes of wind-induced vibrations, the critical wind velocity, and the relation between the vibrations of stacks and the variations of wind velocities are not clarified. This paper sets forth the results of series of experiments on an actual gunite-lined, all-welded steel stack.

1. ま え が き

近年火力発電所などの設置にともなつて、高い鋼製煙突が多く建設されるようになってきた。しかし溶接鋼製煙突には、従来からも風により障害を生じた例が多い。いままでにも、この原因を知るために、実物あるいは模型についていろいろ実験的研究及び理論的研究が行なわれ、解明された点もある。しかしながらいまだ不明な点も多く、設計上統一された考え方はないようである。すなわち振動時の撓み分布、風の性状と振巾との関係などは、多く不明である。筆者らは、主としてこれらの解明を目的として、Fig. 1 に示すような実物の溶接鋼製独立煙突について、振動および振動と風圧の同時測定を行なつた。以下測定結果の概要とそれについての考察を報告する。

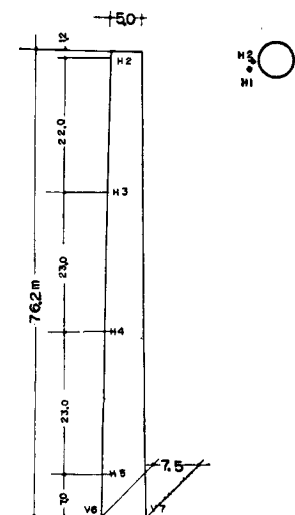


Fig. 1 The steel stack ; the symbols H and V show the stations where the horizontal vibrographs and vertical vibrographs are equipped

2. 測定煙突及び測定方法

2.1 測定煙突 全溶接鋼製独立煙突で、高さ 76.2 m、底部直径 7.5 m、頂部直径 5.0 m、底部板厚 22.0 mm、頂部板厚 6.0 mm、ガンナイトライニング厚 60 mm で、基礎底盤は、コンクリート杭上につくられている。

2.2 測定器械 測定に用いた器械は、振動計として、電磁式水平動微動計（固有周期 0.5秒）、電磁式上下動微動計（固有周期 0.5秒）、風圧計としては、抵抗線歪計式瞬間風圧計、記録装置としては、三栄測器製オツシログラフ（100-A型）である。また別に自記計付ロビンソン三杯風力計をも使用した。

2.3 測定方法 煙突の頂部において南北、東西方向に、水平動微動計 2 台、途中の踊場 3 カ所において南北方向に水平動微動計 1 台づつ、柱脚に上下動微動計 2 台をそれぞれ配置して、リード線を介して、オツシログラフにより自然状態の振動記録を得た。また頂部にワイヤを架けて隣接せる発電所の建物に取り付けた滑車を介して水平横方向に引張り、急激に水平力を開放してその時の自由減衰振動記録を得た。次に頂部に

瞬間風圧計を取り付け風圧と振動との同時記録を得た。またこれらとは別個に、頂部にロビンソン三杯式風力計を取り付けて、自記装置により、風速を観測した。これは現在なお継続中であり、頂部の風速の変化を知ること、頂部の変位を時々トランシットで観測することとあわせて風速と振巾との関係を長期間にわたって知る二つの目的からである。Fig. 1 に振動計、風圧計および風力計の配置を示す。

3. 測定結果

測定を大別して、自由振動、自由減衰振動および風圧と振動の同時測定の種類とした。

3.1 自由振動 この場合の測定記録の一例を示すと、Fig. 2 (A), (B) であり、これによつて高さ方向水平撓み分布を図示したのが Fig. 3 (A), (B) で、基礎の動きを示すと Fig. 4 (A), (B) のようであり、煙突頂部の運動は、Fig. 5 (A), (B) のように表わせる。なおこれらの記録および図のうち (A) の方は、自然状態、(B) の方は、測定中付近が工事中のものである。

(a) 周期；記録より判断すると Table 1 のようになる。

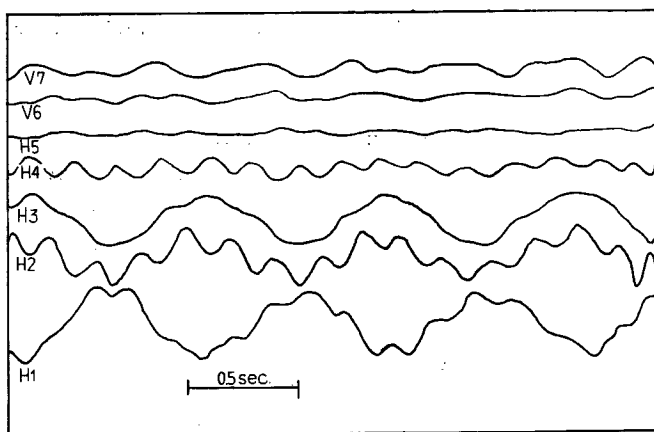


Fig. 2 (A) A record of the horizontal and vertical vibrations of the stack under the natural wind ; the two curves above in the figure show the vertical vibrations at the base of stack, and other five curves show the horizontal vibrations of stack

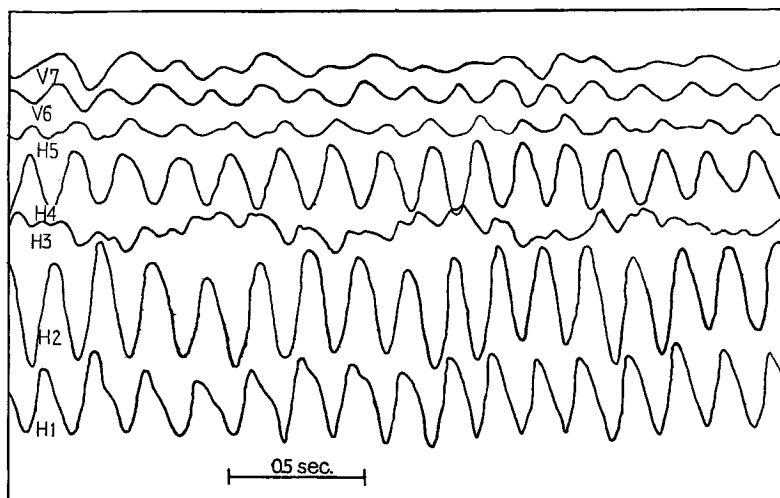


Fig. 2 (B) A record of the horizontal and vertical vibrations of the stack when the ground was disturbed by construction in the neighbourhood

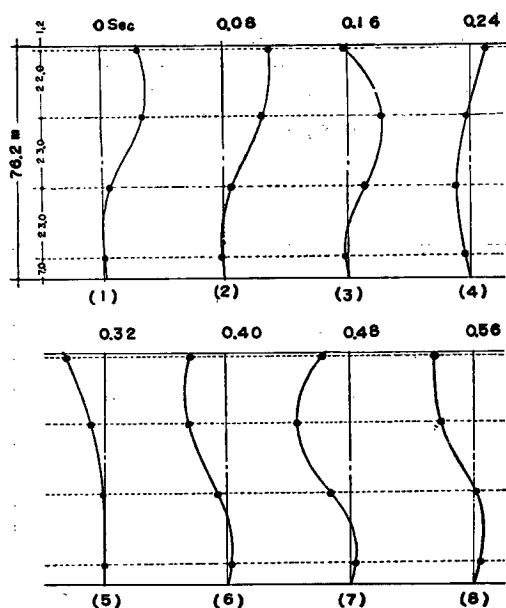


Fig. 3 (A) The distributions of horizontal displacements of the stack under the natural wind

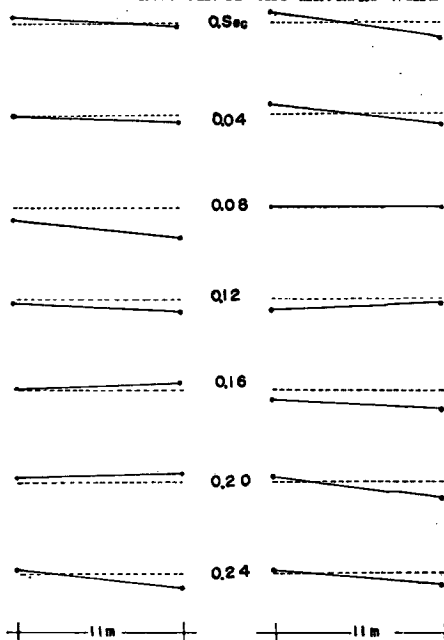


Fig. 4 (A) The distributions of the vertical displacement of the base of stack under the natural wind

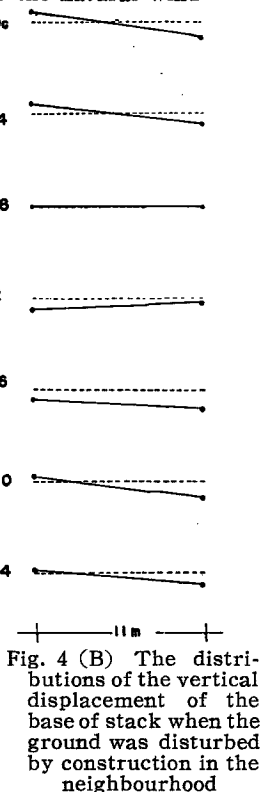


Fig. 4 (B) The distributions of the vertical displacement of the base of stack when the ground was disturbed by construction in the neighbourhood

Table 1 The measured periods of the stack

水 平 動	1 次	0.84~0.92 sec
	2 次	0.20 sec
上 下 動		0.48 sec
ロ ッ キ ン グ		0.20 sec

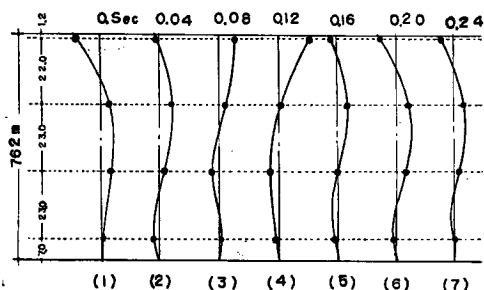


Fig. 3 (B) The distributions of horizontal displacements of the stack when the ground was disturbed by construction in the neighbourhood

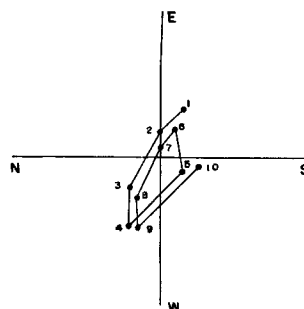


Fig. 5 (A) The movements of top of stack which vibrates under the natural wind

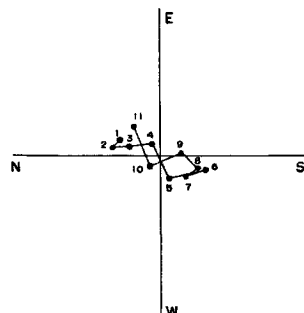


Fig. 5 (B) The movements of top of stack when the ground was disturbed by construction in the neighbourhood

(b) 最大半振巾；測定時最大半振巾を示すと Table 2 のようである。

3.2 自由減衰振動 頂部に 3 ton の引張力を加えて急激に開放した時の記録が Fig. 6 である。これより減衰の模様がわかる。対数減衰率 δ を一次振動について求めると、 $\delta=0.05\sim0.07$ 程度である。

3.3 風圧と振動 頂部の風圧と煙突の振動の同時記録の一部を Fig. 7, Fig. 8 に示す。

4. 測定結果に対する考察

(a) 固有周期；いま煙突を平均板厚，平均直径を有する等断面の片持梁とみなすと，その固有振動周期は，下式で求められる。

$$T_i = \frac{2\pi}{c_i} \sqrt{\frac{\rho A l^4}{EI}}, \quad (i=1, 2, 3, \dots)$$

ここに、 $c_1=1.875^2$ ， $c_2=4.694^2$ で，また ρ ：密度， A ：断面積， l ：高さ， E ：ヤング係数， I ：断面二次モーメント，である。

実際には 60 mm 厚のライニングが施されているが，比較のため鋼板のみの場合についても周期を算定してみると，以下のようになる。

Table 2 The measured amplitudes of the stack.

水 平 動	風方向	0.02 mm	風速 10~13m/sec 程度
	風直角方向	0.06 mm	
上 下 動		0.008 mm	

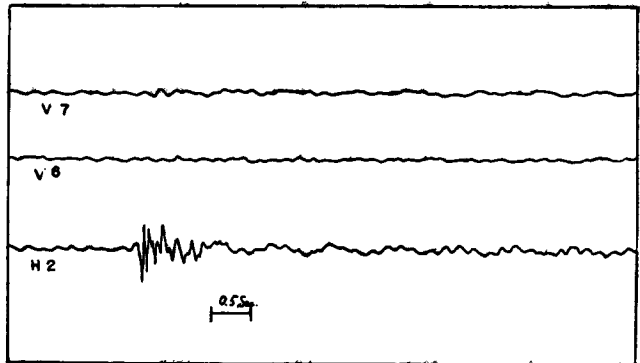


Fig. 6 A record of the horizontal and vertical vibrations of stack when the initial displacement is given at the top ; the two curves above in the figure show the vertical vibrations at the base of the stack, and the other curve shows the horizontal vibrations of the top of stack

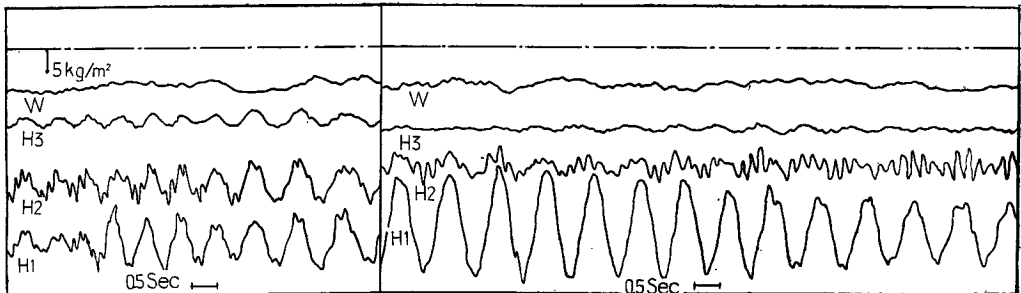


Fig. 7 A record of the horizontal vibrations of stack, and the variations of wind pressure ; the first curve above in the figure shows the variation of the wind pressure, and other three curves show the vibrations of the stack

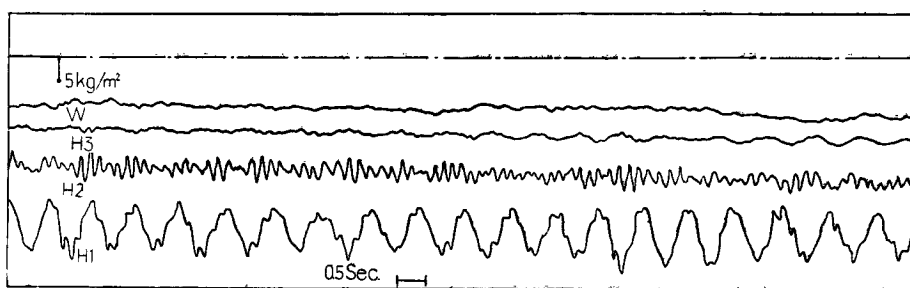


Fig. 8 A record of the horizontal vibrations of stack and the variation of wind pressure

(1) ライニングを考慮しない場合

平均直径 6.25 m 平均板厚 13.00 mm

$$A = 1.27 \times 10^8 \text{ cm}^2, I = 6.38 \times 10^7 \text{ cm}^4, l = 7620 \text{ cm}, \rho = 7.85/980 \frac{\text{gr} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}}$$

これらの値より $T_1 = 0.91 \text{ sec}$, $T_2 = 0.14 \text{ sec}$

(2) ライニングを考慮した場合

ライニングの等価剛比を10と仮定すれば,

$$T_1 = 1.08 \text{ sec}, T_2 = 0.18 \text{ sec}$$

となる。

これに対して測定による2次周期は、0.20 secでライニングを考慮した場合の計算値には近いが、1次周期は、記録によると一定ではなく、0.84~0.92 secで変化している。もちろんこれは、測定煙突が完全な等方性ではなく、Fig. 5に示された頂部の動きからもわかるように振動の方向によつて剛性の差などがもつとも現われやすい1次振動に顕著に影響したものであると思われるし、またこの煙突の高さ10 m付近に煙道が取り付けていたことも1次振動周期に変動を与える原因になったともいえるが、後で風圧と振動との関係の所で述べるように、空気力学的にも風速の変動によつて周期が変わるようにも考えられる。これは、従来の研究結果と異なる所である。

(b) 撓み分布; Fig. 2 (A), Fig. 3 (A)は、それぞれ自由振動記録および水平撓み分布図であるが、これからもわかるように、なかなか複雑である。すなわち Fig. 3 (A)のうち(4),(5)は、等断面の片持梁の自由振動による1次および2次の撓み分布の組合せで理解できるが、他の大部分は、そのみでは説明できない。53 mの付近がはらみだすような傾向がみられるがこの原因については今のところ不明である。

(c) 風圧と振動; 記録の一部は Fig. 7, Fig. 8に示した。このうち Fig. 8の方は風圧の変動が比較的少ない時の記録であり、Fig. 7は比較的著しい風圧の変動が記録された時のものであるが、測定全般を通じて風速は10~13 m/sec程度であつたので、風圧と振動とについての考察もこれら風速間のこのみを基礎に行なうものである。いままでにも、煙突は風に直角方向に主として振動し、しかも周期は、風速がいかに変化しても一定で固有振動周期に等しいといわれてきた。またいわゆる Kármán 渦の発生による周期が固有周期と一致して最大撓みを生ずる臨界風速の存在、あるいは、振巾は風速の増加にともなつて増加し共振現象は存在しないとする説もあつた。しかしこれらの説の根拠となつているのは、乱れのない風洞内の模型実験か、または、実物実験でも、煙突の振動周期に比較して長い時間での平均風速計、あるいは、望遠鏡などによる最大振巾のみの観測、あるいはまた歪計によるものが多く、自然風の変動と振動との関係を論じるのには、不充分と思われる。

次に筆者らの測定記録より得られた事実を述べる。

(a) 大体において風に直角方向の振巾が風方向の振巾より大きい(3~4倍)が、短い時間(1~2 sec)

では、逆の場合も認められる。

(b) 振動周期は、同一モードでも若干変動する。すなわち1次周期についていえば、0.84~0.92 sec 程度の変動がある。

(c) Fig. 7, Fig. 8 からわかるように、風に直角方向の振動には、一種のうなり現象のようなものがみられ、短いもので、1.6 sec~2.5 sec 位、また長いもので 14~20 sec 位の周期で振巾が増減している。またこの現象は Fig. 8 からわかるように、風圧の変動が比較的少ない場合でも明瞭に現われている。

(d) 風方向、風に直角方向ともに測定範囲内では、風圧の絶対値と振巾は、直接関係なく、Fig. 7 からわかるように、空間的、時間的にある規模をもつ風圧の変動があるとき、振巾は極値をとるようである。あまり短い時間の風圧の変動は、振巾の変化をもたらさないようである。以上述べた事項を説明するため、いま次のように考えてみる。煙突上部の平均直径を $D=5.8$ m, 風速を $v=10\sim13$ m/sec とし、空気の動粘性係数 $\nu=0.15 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$ (20°C , 980mb) とすると、この時の Reynolds 数 $R=4.2\sim5.4\times10^6$ となり、もし Kármán 渦の発生があると、その発生周期 T' は、 $T'=\frac{D}{sv}$ より算出される。いまここで $s=0.45$ と考える。この時渦の発生により生じる交替的な風に直角方向の周期は、同じく上の T' に等しく、1.01~1.29 sec となり、記録に表われたうなりの短い周期も、大体理解できる。また振動数のわずかに異なる二つの振動が重なった時、その振動数を n_1, n_2 とし、 $n_1>n_2$, $n_1-n_2=\Delta n$ とすると、 $\Delta n\ll n_2$ ならば、うなりの現象がみられ、その周期は、 $T=\frac{2}{\Delta n}$ となる関係がある。いま、煙突の振動数、渦の発生周期をそれぞれ n_1, n_2 とすると、 $\Delta n=0.08$ 、うなりの周期は 15 sec となり、記録に現われた 14~20 sec の周期も説明がつくと考えられる。これらのことから考えて、この場合のような Reynolds 数の高い($R=4\sim5\times10^6$) 領域で、しかも乱れを有する自然風で、周期的な渦が発生するとした考え方は一応問題があるとは思いが、少なくとも時々これに似たような状態を生ずるのではないかと考えられる。また煙突が振動することによつて渦の発生自体が影響を受けることもあり得ると思うし、いわゆる臨界風速は存在しないにしても、ある範囲の風速で風に直角方向の振巾は、一種の共振状態に入つて相当大きくなるのではないと思われる。

(e) 基礎の状況 Fig. 4 (A), (B) は、測定結果を図示したものであり、これより脚部の最大回転角 θ_{max} を求めると、

$$\theta_{max}=8.5\times10^{-8}$$

となる。

この回転に基づく、頂部の最大変位 δ'_{max} は、

$$\delta'_{max}=8.5\times10^{-8}\times7620\text{ cm}=6.5\times10^{-4}\text{ cm}=0.0065\text{ mm}$$

となり、頂部の最大半振巾 0.02 mm に比して一応無視でき、柱脚ではほとんど完全固定に近いといつてもよいであろう。

5. 結 論

今回の測定の結果、知られた事項を記すと次のようである。

1. 振動周期は風速の変動に従つて変化し1次周期についていえば、風速 10~13 m/sec の間で 0.84~0.92 sec の間を変動する。

2. 風による振動は、風方向よりも風に直角方向が一般には大きく振動し、またいわゆる Kármán 渦の発生により生じる起振力に近い周期で、振巾の変動がみられる。風方向の振動にも一種のうなりのような現象がみられるが、振巾は、風直角方向の 1/3 位である。

3. 対数減衰率 δ は、一次振動については、 $\delta_1=0.05\sim0.07$ で、この種構造物の通常値である。以上の事実から、煙突設計には、強風時の風圧による風方向の曲げ応力のほかに、風によつて生じる風に直角方向、風方向の動的応力を考慮しなくてはならないといえよう。

参 考 文 献

- 1) Walters Pagon, W. : Vibration Problems in Tall Stacks Solved by Aerodynamics, Eng. News Record, July 12, 1934, pp. 41-43.
- 2) Dickey, W. L. and Woodruff, G. E. : Vibration of Steel Stacks, Proc. ASCE, No. 540, Nov. 1954.
- 3) Dockstader, E. A., Swiger, W. F. and Ireland, Emory : Resonant Vibration of Steel Stacks, Proc. ASCE, No. 541, Nov. 1954.
- 4) Roshko, Anatol : On the Wake and Drag of Bluff Bodies, Journal Aero. Sciences, Vol. 22, No. 2, February 1955, pp. 124-132.
- 5) Stankiewicz, E. J. : Design and Comparative Costs for High Stacks, Combustion, February 1955, pp. 51-56.
- 6) Price, Peter : Suppression of the Fluid-induced Vibration of Circular Cylinders, proc. ASCE, Journal Eng. Mechanics Div., Paper 1030, July 1956.
- 7) Ozker, M. S. and Smith, J. O. : Factors Influencing the Dynamic Behavior of Tall Stacks Under the Action of Wind, Transactions ASCE, Vol. 78, No 6, August 1956, pp. 654-657.
- 8) Penzien, Joseph : Wind Induced Vibration of Cylindrical Structures, proc. ASCE, Eng. Mechanics Div., Paper 1141, Jan. 1957.
- 9) Farquharson, F. B. : Wind Forces on Structures, Structure Subject to Oscillation, Proc. ASCE, Vol. 34, No. ST 4, July 1958.
- 10) Kinoshita, Masao, Ono, Koji and Hirowatari, Tomoyuki : On the Vibration of Steel Stack (The First Interium Report), Proc. 5th Japan National Congress for App. Mech., 1955, pp. 415-417.
- 11) Hirowatari, Tomoyuki, : On the Vibration of Steel Stack (The Second Interium, Report), Proc. 6th Japan National Congress for App. Mech., 1956, pp. 539-542.
- 12) Nakamura, Kiyoshi, : Characteristics of Vibration of Reinforced Concrete Chimneys, Proc. 6th Japan National Congres for App. Mech., 1956, pp. 543-546.
- 13) Fujino, Tsutomu, Takahei, Tetsuo, Nakagawa, Kenji, and Arita, Yukio : The Dynamic Behavior of Tall Stacks Under the Action of Wind, Proc. 7th Japan National Congress for App. Mech., 1957, pp. 387-392.
- 14) 東京電力株式会社建設部建築課・三菱造船株式会社橋梁設計課 : 独立鋼製煙突の設計について, 建築雑誌, 4, 1959, pp. 7~11