

振動する円筒の周りの流れについて

石崎 潑雄・川村 純夫・桂 順治

ON THE WIND STREAM AROUND A VIBRATING CYLINDER

by Dr. Eng. *Hatsuo ISHIZAKI, Sumio KAWAMURA*
and *Junji KATSURA*

Synopsis

Up to date a few papers on the vibration of cylinder by wind have been published, but we have still some problems on it. In this paper the wake behind the vibrating and fixed cylinders was observed through the behavior of vinyl chloride threads put on the surface of the cylinders. We found distinct difference between the wakes and the lift force coefficients of moving model and those of fixed one.

まえがき

高い煙突や鉄塔などが強風時、あるいはそれほど強い風でないときにも、振動する現象が見られている。特に風速 20~30 m/sec で大きく振動するのは煙突の場合が多く、その振動の方向は風向直角方向が主である。

鉄塔の方は水平断面が複雑で、振動を起こす外力の機構も異なると考えられ、煙突のような振動がそれほど顕著になつたことはないが、煙突の場合と似た現象を示すこともある。このような現象を基本的に解明するためには最も簡単な断面を持つ直円筒について 2 次元的に考えることが必要であると思われる。

直円筒が乱れのない流体中に置かれ、Reynolds 数が $40 \sim 1 \times 10^5$ 位の範囲内にある場合には、後流の中に規則的ないわゆる Kármán 渦が発生することが知られており、そのような場合、直円筒はその渦の発生数をもつた交番的な外力を風向直角方向に受けることになり、その発生数と直円筒の固有振動数とが一致するとき共振が起るといことが考えられる。しかし実際の煙突が振動する例をみると、たいていの場合は Reynolds 数が 10^5 を越えたいわゆる super critical 領域になつている。これまでの考え方によればこのような領域ではもはや Kármán 渦は発生しにくいといわれている。ここで考えられることは交番的に渦が発生する Reynolds 数の限界は円筒が静止した状態について示されたものであり、もし円筒が渦の発生数に近い固有振動数を持ち、渦によつて振動が誘起された場合には、その限界も変つてくるのではないかということである。

この問題を調べるために先ず同じ直円筒の両端の固定条件を変えることにより固有振動数を渦の発生附近の値として共振させたものと、両端を剛に固定して静止状態にしたものとの流れの状態を比較することとした。以下に述べるのはこの実験の概要である。

1. 実験装置及び方法

風洞は京都大学防災研究所宇治川水理実験所にある内径 80cm の吹き放し型風洞を用いた。

装置は Fig. 1 のようにアングルを用い、円筒の材料は振動系の固有振動数をできるだけ高くまで変えられるようにするため、軽いものを必要とし、アクリライト製とした。外径は 20cm、長さ 50cm である。

流れの追跡方法としては塩化ビニールの繊維を円筒の周りにやや円筒の後方に流し、それを観察した。

振動数の測定はストロボ装置を直読、あるいは写真で記録した。

共振状態を生じさせるために円筒を支えている鉄棒の両端につけられたナットを締めることによつて、鉄棒の張力を加減し、円筒の固有振動数を調節した。固有振動数が共振点近くなると小さい振巾の振動が起り、うなりを伴っている。共振点にさらに近くなるにつれて、振巾が大きくなり、うなりの周期も長くなつて、ついには共振状態になり、定常な振動が続いた。

2. 実験結果

Fig. 2 (a), (b), はそれぞれ静止している円筒と、振動している円筒の周りの糸の状態を写し取つたものである。

糸は同時に多数のものを流すことができれば理想的であつたが、もつれやすいので適当な位置に2本づつとし、位置を変えることによつて範囲を広くした後、写真を重ね合わせた。

明らかに静止している場合の方が円筒の後方にまわり込む空気量が大きく、乱れる範囲も広くなつていことがわかる。このときの風速はともに 19 m/sec であつた。

Fig. 3 は円筒の後方に1本の糸をとりつけて、糸の運動の仕方から渦の強さ、渦の発生数、後流の様子等を推察しようとしたものである。このときストロボの発生数 80 cps, シャッターの開放時間は 1/4 sec

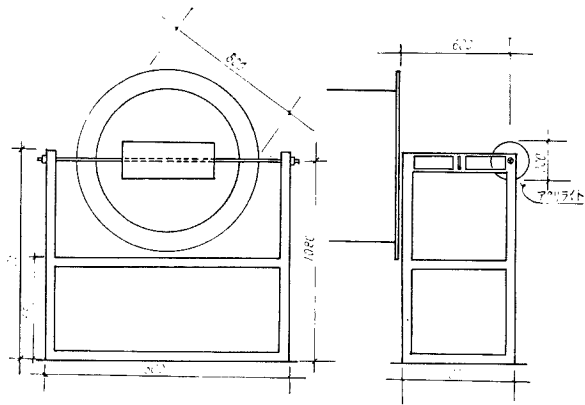


Fig. 1 The apparatus for the experiment

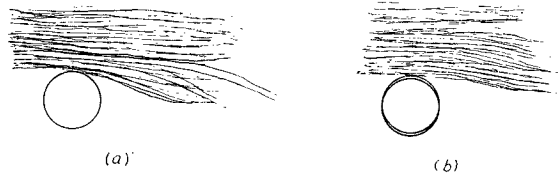


Fig. 2 The threads around the cylinders

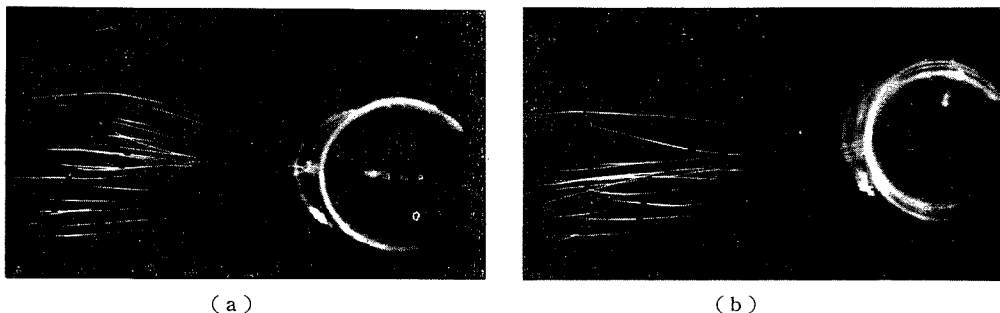


Fig. 3 A moving thread in the wake ($V=19\text{m/sec}$)

としたから、1本の糸の動きを20点でとらえたことになる。糸の途中にある黒い切れ目は糸の位置の時間的変化を調べるために、糸とカメラの間にシャッターを切ると同時に棒を円筒から後方へ走らせて、光を遮つたものである。従つて円筒に近い切れ目をもつ糸ほど先に写つたことになる。

Fig. 4 は横軸に時間、縦軸に糸の動きを風向方向からの角度で表わしたものである。この場合もまた静

止している場合の方が動きが激しく、周期性も不規則である。このときの Reynolds 数は 2.53×10^5 となり、限界 Reynolds 数附近であるから、規則的な渦が発生しにくいという事実と一致する。一方振動している場合は糸の変動は少なく、周期的になり、その振動数が円筒のものと大体一致している点は注目すべきことである。このときの円筒の振動数は 15.9cps であった。

3. 実験結果の考察

3.1 後流について

実験結果より明らかなように、円筒が振動している状態では糸と風向方向とのなす角は小さく、変動は規則的になつている。従つて後流の乱れの範囲が小さくなり、このような Reynolds 数の範囲でも円筒の振動数と一致した規則的な渦が発生していると思われる。いかえると円筒が振動することは Reynolds 数を低下させるような効果を生じさせていることになる。

3.2 Strouhal 数

これまでは渦の発生数 N 、風速 V 、円筒の径 D の間には $N=SV/D$ なる関係式が与えられ、Strouhal 数 S は同じ Reynolds 数では一定値を示すことが明らかにされており、この場合の Reynolds 数 2.53×10^5 に相当する Strouhal 数の値は N, P, L, の資料¹⁾によれば 0.2 である。ただしこの値は円筒が静止しているときのものである。実物煙突が振動している場合に Strouhal 数が小さくなることは、測定結果から明らかにされているが²⁾、この実験からも Strouhal 数をもとめてみると、0.167 となり、上述の値 0.2 より小さくなつている。

円筒の後につけた糸が wake の軸線を表わすものと仮定し、また wake の軸線の曲率の中心に渦の中心が存在するものと仮定すると、Kármán の渦の安定理論から Fig. 5 のような機構が考えられる。

振動している場合は wake 軸線の曲率が小さいから渦の中心は軸線から遠ざかり、渦相互の間隔も離れることになる。従つて Strouhal 数の値は減少すると考えられる。

3.3 円筒に働く力

円筒に働く力については風向方向の抗力と渦によつて生じる風向直角方向の揚力とに分けられる。揚力に関しては Birkhoff が Strouhal 数を求めるために考えたもの³⁾と同様に円筒の後方の空気塊を板状とみなすと Fig. 6 のようになる。この図で α は風向方向と wake の軸線とがなす角である。これに作用する揚力 L は次式で表わされる。

$$L = \pi \rho V^2 l \sin \alpha$$

ここで ρ は空気密度、 $2l$ は空気塊の長さで、翼弦長と考えられる量である。

円筒が振動すれば渦間隔が広がるので、長さ l は多少長くなる傾向はあるが、 α の振巾が小さくなることにより、揚力 L の絶対値は小さくなるであろう。

1 個の渦がもつ循環 Γ もまた同様に近似的に次式

$$\Gamma = 2\pi V l \sin \alpha$$

で表わされ、円筒が振動すれば循環 Γ は小さくなると思われる。

抗力に関しては円筒が振動すれば、乱れた後流の領域は小さくなるから抗力は減少するものと思われる。

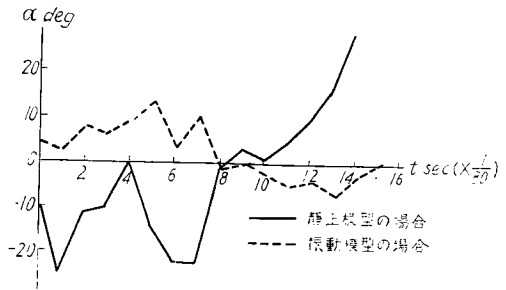


Fig. 4 The fluctuations of threads in the wakes

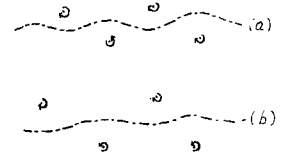


Fig. 5 Vortex streets by the statical and vibrational cylinders

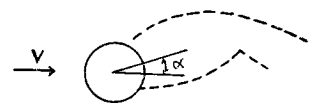


Fig. 6 Birkhoff's assumption for the wake

4. 実験結果の諸現象への適用

4.1 実物鋼製煙突の振動について

前述のように実物の煙突がいちじるしい振動を生じたときの Reynolds 数は限界値を越えている。それにもかかわらず振動を生じたということは、振動がその固有振動数に一致する渦の発生を誘起したものとみるべきであろう。ただし実物の煙突がある特定の風速のもとで振巾の極大値を示すことがあるという事実から、風速や径に無関係に渦が発生するものではないことは明らかである。また通常わが国の煙突はテーパをとつてあるから、従来静止状態における渦の発生数を表わす式 $N=SV/D$ に示された D は高さ方向に変化することになる。従つて渦の発生数 N も高さ方向に沿つて変化することになる。実物の煙突では高さ方向の風速分布も一様ではない。厳密なことは3次元的に考えなければならないが、そのような状態における煙突の共振というものは考え難い。しかし、実際にはいちじるしい振動を生じているのであるから、多少の風速分布の差、あるいは多少の径の変化があつても、固有振動数に一致した同一位相をもつ渦の剥離が高さ方向のかなりの範囲にわたつて起つていると考えられる。もちろん、この範囲内での高さ方向の渦度は一様ではなからうし、この範囲自体も風速によつて変わるだろう。しかし煙突を振動させるのに最も効果的な高さ方向の渦度分布と、その範囲を生じさず風速のもとで振巾の極大値が現われると考えられる。このような観点からすれば風速に対して振巾の極大値が2つ以上現われることも不可能ではない。

4.2 全模型実験の振巾の極値について

Fig. 7⁴⁾ は石崎・川村によつて行われた煙突の全模型の振巾と風速との関係を示したものである。この図で実線は振巾の風向直角方向の成分を表わし、点線は風向方向の成分を示す。図で明らかなように、風向直角方向の振巾が極大値を示す風速では風向方向成分は極小値を示し、風向方向の振巾が極小値を示しているときは風向方向の振巾は極大値を示している。風向直角方向の振巾が極大値を示しているときは、いわゆる共振状態であるから、後流の乱れが減少し、風向方向の力の変動が少なくなり、風向直角方向の振巾が極小値を示すときはその逆のことがいえる。このような事実は本実験の結果と一致する。

む す び

この実験の結果、特に煙突の振動についての2、3の興味ある現象を見出すことができたが、実験の風速19m/sec、円筒径20cm、すなわち Reynolds 数で示すと、 2.53×10^5 の場合に限られたため明確なことがいえなかつた。今後これらの現象が Reynolds 数の広範囲な変化につれて、どのように質的、あるいは量的に変つてくるかを検討したい。

参 考 文 献

- 1) NPL : Relf and Simmons, Aeronaut. Research Com. R & M. 917 (1924).
- 2) 石崎澄雄, 川村純夫 : 風による煙突の振動についての考察, 日本建築学会論文報告集, 第69号, 昭36.10, p.421.
- 3) Birkhoff, G. and Zarantonelli, E.H. : 「Jets, Wakes, and Cavities」, Applied Mathematics and Mechanics 2. Academic Press Inc. Publishers. New York 1957. p. 291.
- 4) 石崎澄雄, 川村純夫 : 風による煙突の振動性状について, 日本建築学会論文報告集, 第66号, 昭35.10, p.261.

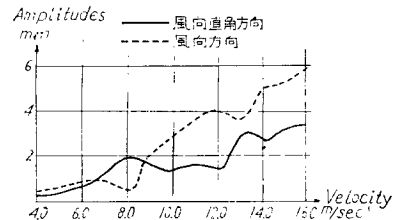


Fig. 7 Amplitudes in the direction of the wind and in the lateral direction of the wind for variable wind velocity