弾性支持円柱の下流に十字配置された円柱により誘起される異常振動*

袁 憲民^{*1}, 新井和夫^{*2},
水口一成^{*3}, 白樫正高^{*4}

The interference excitation of an elastically supported cylinder by
a criss-crossed circular cylinder located downstream

Heon Meen BAE, Kazuo ARAI,
Kazunari MIZUGUCHI, and Masataka SHIRAKASHI

In this work, the influence of a downstream cylinder on the oscillation of an upstream one was investigated. A new flow-induced excitation was found to occur due to the interference of the downstream cylinder as follows.

It is the major purpose of this paper to advise of this phenomenon since it is of practical importance from the engineering viewpoint. In a wind tunnel, a circular cylinder was fixed in a cruciform arrangement downstream of another elastically supported cylinder of an equal diameter. The oscillation of the upstream cylinder excited by the Karman vortex was depressed by the downstream cylinder in a certain range of the gap between the cylinders. However, in the same range, a new large oscillation was generated at a velocity several times higher than that of the Karman vortex excitation. Observation of the visualized flow showed that longitudinal vortices were periodically formed near the intersection of the cylinders. The origin of the newly found interference excitation mentioned above was attributed to this longitudinal vortex, because it occurred when the shedding frequency of the longitudinal vortex coincided with the natural frequency of the upstream cylinder.

Key Words : Unsteady Flow, Fluid Vibration, Interference Excitation, Criss-crossed Circular Cylinders, Karman Vortex, Longitudinal Vortex

1. 緒 論

弾性支持された柱状物体がカルマン渦の流出により大きな振動を起すことについては、多くの研究報告によりある程度まで現象が把握されている⁽¹⁾。しかしながら、実際の流れ中の物体は単独に存在することはまれで複数の物体が干渉し合っている場合が多い。特に、3次元的な配置の場合流れ場の複雑さから物体の振動の挙動は明確に把握されていない⁽²⁾。

富田らは一様流中に設置された単独円柱から発生するカルマン渦による騒音が、図1のように下流に交差して置かれた円柱により抑制されることを示した⁽³⁾。したがって、上流側円柱が弾性支持されている場合にも同様の機構によりその振動を抑制できることが期待

される。そこで、本研究では一様な流れに対して直角に弾性支持された円柱の下流に、それと同径の円柱を90°ねじれの位置に固定し、上流円柱の振動に対する影響を調べた。その結果、カルマン渦による励振は予期の通り、下流側円柱の接近とともに減少するが、その数倍の流速において下流円柱がない場合よりもはるかに大きな振動が生じることが見出された。

2. 記 号

0 - x, y, z :	座標系 (図1参照)
s :	2円柱間隙
U :	主流速度
u :	x方向の速度信号
z_{rms} :	円柱変位のrms値
f_{vk} :	カルマン渦の流出周波数
f_{vm} :	縦渦の流出周波数
f_z :	円柱の振動数
f_{nz} :	系の固有振動数
s_u :	速度変動のスペクトル (64回平均)

* 昭和63年10月18日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成元年3月6日。

^{*1} 准員, 長岡技術科学大学 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)。

^{*2} 長岡技術科学大学。

^{*3} ミノルタカメラ(株) (〒442 豊川市八幡町)。

^{*4} 正員, 長岡技術科学大学。

3. 実験装置および方法

実験に用いた風洞はノズル寸法 $\square 350\text{mm}$ 、測定部断面 $\square 320\text{mm}$ の吹き出し型である。風速は最大約 40m/s で乱れ強さは 0.4% 以内である。測定部に図1に示すように直径 d の2本の円柱が上流から見て十字にかつ流れに対して直角になるように設置されている。上流側円柱は変位が鉛直方向のみとなるように板バネで弾性支持されており、円柱貫通部の間隙の影響⁽⁴⁾をなくすためにつば状の薄い平板が取り付けられている。一方、下流側円柱は図1に示すようにトラバース装置で2円柱の間隙を調節し固定した。

風洞の主流速度は、円柱の影響を受けない上流部に取り付けたビト管により測定した。また、渦流出周波数はI型熱線プローブを用いて得られた x 方向の速度変動信号を周波数分析し、そのスペクトルから求めた。プローブは両円柱ともに固定されている場合につ

表1 円柱の弾性支持条件

	Oscillation System I	Oscillation System II
Cylinder diameter $d(\text{mm})$	26.0	26.0
Effective length $l(\text{mm})$	304	304
Effective mass $m(\text{kg})$	0.0858	0.0924
Spring constant $k(\text{N/m})$	980	2100
Natural frequency (f_{nz})	17 (Hz)	24 (Hz)
Logarithmic damping factor $\delta (-)$	0.0119	0.0166

図1 実験装置および座標系

いて、渦流出周波数が明確に検出される位置を探して設置した。円柱両端の変位 z_R 、 z_L はほぼ一致し、円柱の振動が並進運動であることが確認された。本研究では $(z_R+z_L)/2$ を変位信号とし、そのrms値により振動振幅を表わす。上流側円柱の弾性支持の条件を表1に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 振動振幅と流速および間隙の関係 2円柱の間隙 s が一定の場合の流速 U と円柱の無次元振幅 図2 振幅と流速の関係に対する間隙の影響
($d=26\text{mm}$ 、 $f_{nz}=24\text{Hz}$)

z_{rms}/d の関係を図 2 に示す。(f) の無次元間隙 $s/d = \infty$ すなわち、単独円柱の場合、 $U = 3.4 \text{ m/s}$ 付近でカルマン渦流出周波数 f_{vm} が系の固有振動数 f_{nz} と一致し、振幅極大となる。この極大値は下流側円柱の接近とともに低下し、 $s/d < 0.5$ の範囲ではピークの識別が困難になる。これはカルマン渦流出の 2 次元性及び周期性が下流側円柱により乱された結果であると考えられる。しかしながら、同じ円柱間隙の範囲においてカルマン渦による共振とは別の原因と思われる大きな振動が現れる(図 2 (a), (b), (c))。この振動はカルマン渦共振と比べると、振幅が極めて大きく、発生時の流速が 3 ~ 7 倍であり、そしてそれは 2 円柱間隙に依存するという点で性格が異なる。この異常振動においても円柱は U によらず常にその固有振動数で振動している。また、その振幅は図 2 (a) ~ (c) のように U の狭い範囲で大となることから、流れに特有の周期的な変動揚力が存在すると考えられる。流速 U を図 2 の矢印 a ~ e で示す一定値に保って間隙を変化させた場合の無次元振幅と無次元間隙の関係を図 3 (a) ~ (e) に示す。(a) のカルマン渦による共振が発生する流速の場合、下流円柱の接近により z_{rms}/d は著しく減少し、 $s/d < 0.5$ において振動はほぼ完全に抑制されている。図 2 (a) ~ (c) からわかるように異常振動が最大となるときの流速 U_m は $s/d = 0$ のとき約 11 m/s であり、 s/d の増加とともにわずかに減少し $s/d = 0.125$ で最小値 7.5 m/s となり、その後増加して $s/d > 0.5$ では明確に識別できなくなる。したがって、図 3 (b), (c) に見られるように、概略 $7.5 \text{ m/s} < U < 11 \text{ m/s}$ の範囲において、 $z_{rms}/d \sim s/d$ 曲線は 2 つの極大値をもつ。 U がこれより大きいとき図 3 (d), (e) のように極大値は 1 つとなる。図 3 の結果で注意すべき点は、 s/d の僅かの変化が振動振幅に非常に大きく影響することである。例えば (d) において $s/d = 0.2$ から 0.3 になると、振幅は 10 倍に増加している。

4.2 固定円柱のまわりの流れ 下流円柱により誘起される異常振動の原因を調べるため、両円柱ともに固定されている場合についてスモークワイヤ法で流れを可視化して観察した。図 4 はビデオ撮影された画像の写真である。同図において円柱交差部の上下の隅から主流に平行な軸をもつ渦が流出しているのが観察される。この縦渦は下流円柱の近くに出現し、次第に成長しながら上流円柱に沿って外側に移動し最大に達したのち下流に流れ去る、という過程を周期的に繰り返す。この縦渦の性質を調べるため、図 5 に示す 2 円柱交差部付近の 2 点において速度変動 u_1, u_2 または u_1, u_3 を同時に測定した。得られた速度変動(図 5 (a))のスペクトルは、図 6 のように明瞭な鋭いピークをもつ。このピークに対応する周波数 f_{vm} は前述のビデオにより観察された縦渦の流出周波数とほぼ一致し、同じ流速におけるカルマン渦流出周波数の 1/4 程度である。この成分の性質を調べるためバンドパスフィルターを使用して図 5 (b) を得た。この図から、周波数 f_{vm} の速度成分は 2 点が上流円柱の同じ側にある場合 (u_1 と u_2) は同位相、反対の位置にある場合 (u_1 と u_3) は逆位相である事がわかる。これらの

クをもつ。このピークに対応する周波数 f_{vm} は前述のビデオにより観察された縦渦の流出周波数とほぼ一致し、同じ流速におけるカルマン渦流出周波数の 1/4 程度である。この成分の性質を調べるためバンドパスフィルターを使用して図 5 (b) を得た。この図から、周波数 f_{vm} の速度成分は 2 点が上流円柱の同じ側にある場合 (u_1 と u_2) は同位相、反対の位置にある場合 (u_1 と u_3) は逆位相である事がわかる。これらの

図 3 振幅と間隙の関係に対する流速の影響
($d = 26 \text{ mm}$, $f_{nz} = 24 \text{ Hz}$)

結果は、図4に見られるような縦渦の流出の位相が上流円柱の上下で反転している事を示している。

4.3 縦渦の流出と異常振動の関係 前節で確認された縦渦の流出周波数 f_{vm} と異常振動の関係を、振動系Iについて図7に示す。上流円柱の振動振幅が、 f_{vm} が系の固有振動数 f_{nz} に等しくなる流速付近の極めて狭い範囲で著しく大きくなることから、この異常振動が縦渦の流出による共振であることが確認される。主流速度 U と縦渦の流出周波数 f_{vm} の関係を、振動系

と固定系を比較して図8に示す。同図によれば f_{vm} は概略 U に比例し、 f_{vm} と U の関係に対する振動の影響はあまり大きくない。図8から求めた f_{vm} と U の関係をストローハル数 $S_t=f_v d/U$ とレイノルズ数 $Re=U d/\nu$ (ν : 空気動粘度)に換算してプロットした結果を図9に示す。同図には、ビデオにより得た縦渦の流出周波数および富田ら⁽³⁾による音のスペクトルから得た結果を記した。この結果から図4のような縦渦はレイノルズ数の広い範囲で存在しその流出周波数は

図4 下流から見た縦渦 (両円柱固定、 $d=26\text{mm}$ 、 $s/d=0.0625$ 、 $U=2.0\text{ m/s}$)

図5 速度変動信号のパターンとプローブの位置 ($s/d=0.25$ 、 $U=4.28\text{m/s}$)

図6 速度変動スペクトルの関係 ($d=26\text{mm}$ 、 $f_{nz}=24\text{Hz}$ 、 $s/d=0.0625$ 、プローブ位置： $x/d=1.5$ 、 $y/d=1.5$ 、 $z/d=1.0$)

図7 速度変動スペクトルと振動の挙動 ($d=26\text{mm}$ 、 $f_{nz}=17\text{Hz}$ 、 $s/d=0.0625$ 、プローブ位置： $x/d=2.0$ 、 $y/d=1.5$ 、 $z/d=1.0$)

図8 流速と速度変動周波数の関係 [$d=26\text{mm}$, $s/d=0.0625$, プロープ位置 : $x/d=1.5$, $y/d=1.5$, $z/d=1.0$; Elastically Supported Cylinder ($\circ$: $f_{n_z}=17\text{Hz}$) ($\bullet$: $f_{n_z}=24\text{Hz}$) , Fixed Cylinder ($\odot$)]

s/d に依存することがわかる。

5. 結 論

円柱の下流に十字形に等径の円柱を配置すると、間隙が直径の50% 以下の場合に、交差部の隅から周期的に縦渦が流出する。この縦渦の流出は非常に広いレイノルズ数の範囲で観察され、その周波数が上流円柱の固有振動数と一致する時、共振現象が発生する。この結果は下流円柱によりこれまで知られていなかった振

図9 渦流出のストローハル数 (両円柱固定)
[Karman vortex: ($\circ$) $s/d=\infty$, ($\bullet$) $s/d=0.75$.
Longitudinal vortex: (Δ) $s/d=0.5$, ($\square$) $s/d=0.25$, ($\blacksquare$) $s/d=0.25$ by video image , ($\diamond$) $s/d=0.0625$]

動が誘起されることを意味しており、工学的にも重要である。

文 献

- (1) Bearman, P.W., Ann. Rev. Fluid Mech., 16 (1984), 195.
- (2) 山田・ほか3, 機論, 53-486 (1987) 333~ 340.
- (3) 富田・ほか3, 機論, 51-468 (1985) 2571~ 2580.
- (4) Shirakashi, M., Ishida, Y. and Wakiya, S., Trans. ASME, J. Fluids Eng., 107 (1985), 392.