

類似の振動特性を持つ直列 2 円柱構造物の流体関連振動現象に関する研究

47-096726 堀田 周作
指導教員 染矢 聡 准教授

In this study, we experimentally examined the vibration response characteristics of two tandem circular cylinders of uniform diameter (d) and relatively low structural damping. Experiments were carried out with inline tandem cylinders in a water channel with two degrees-of-freedom, varying the natural frequency ratio of upstream cylinder to downstream cylinder. The cylinders were cantilever mounted with a low natural frequency in the inline and cross-flow directions (around 50Hz). The spacing between the cylinders was $4.0d$. The Reynolds number of the experiments was from 3000 to 22000, varying the reduced velocities up to about 5. The oscillating frequencies of the cylinders and the surrounding flow were measured simultaneously using high temporal resolution particle image velocimetry (PIV), which is non-intrusive with respect to the flow and has high spatial and temporal resolutions. As a result, the closer the value of natural frequencies, the stronger the influence from the upstream cylinder to downstream cylinder was. Also, it was changed by the difference of structural damping.

Key words: Flow-induced Vibration, Cylinders, Two-degree-of-freedom, Dynamic PIV, Structural Damping

1 緒言

流れによって誘起される振動は機械装置の運転異常や騒音の原因となる。特に、原子力発電、火力発電等の工業プラントの配管内における管群等の柱状物体の流体関連振動に関しては、安全性の面から多くの研究が行われてきた。配管内部に設置された温度ウェルのような円柱構造物は、流れに対して In-Line 方向と Cross-Flow 方向の両方に自由度を持つため、円柱構造物の振動特性を 2 自由度で調べることは重要である。また、BWR 下部プレナム内には円管状の炉内構造物が多数存在し、再循環ポンプから吐き出される流れがこれらの構造物を横切って上昇する際に流体力が作用するため、円管構造物の流体関連振動に対する健全性の評価が必要とされている。そして、これらの構造物間距離は小さく類似の振動特性を持つため、複数管相互作用の振動への影響を評価する必要がある。

2 自由度の単独円柱構造物に関して、安濃田ら⁽¹⁾は流れに対して垂直な方向に片持ち梁状の円柱構造物(カンチレバー)を置いた自由振動実験を行っており、また、Moe, Sarpkaya⁽²⁾は、In-Line 方向と Cross-Flow 方向に異なる固有振動数を持つ両持ち梁円柱構造物の振動実験を行っている。その結果、2 自由度の円柱構造物も King ら⁽³⁾の実験と同様に、換算流速(V_r) 2.5 を境に 2 つの励振域があることを明らかにした。しかし、複数円柱が存在する場合に着目した研究は限られている。2 円柱に関する研究としては、円柱の中心間距離を変えて後流の flow pattern を調べたもの⁽⁴⁾や、実験や数値解析によって円柱周りの圧力分布や抗力・揚力、および渦放出周波数などについて調べたものがある⁽⁵⁾が、多くは片方もしくは両方の円柱が固定または 1 自由度の条件で行われたもので、2 円柱ともが 2 自由度を持つ場合の振動特性についてはこれまでほとんど調べられていない。そこで、本研究では BWR 下部プレナム内の構造物健全性評価への適用に向け、複数円柱の基本的な系である類似の振動特性を持つ 2 自由度の直列 2 円柱を用い、複数管相互作用の振動への影響について詳細に調べることとする。

2 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。モデルとなる円柱は長さ 1500mm 高さ 50mm 幅 50mm の角流路内部に置かれている。流路にはポンプにより水(水温 20 度)が流される。流路の前後には大きなタンクが取り付けられ、流路内の水にポンプなどによる振動の影響が出ないように配慮している。円柱は上部タンクから $24D$ (D は流路の幅: 50mm) 下流に取り付けられている。また、整流板を設置して試験部の流れを整流し、各種測定は水流が定常状態になってから行っている。照明装置には高周波ダブルパルスレーザー装置(New Wave Research 社製 PegasusPIV)を使用した。 527nm のパルス光を円柱レンズでシート型に整え、下方から試験部に照射した。

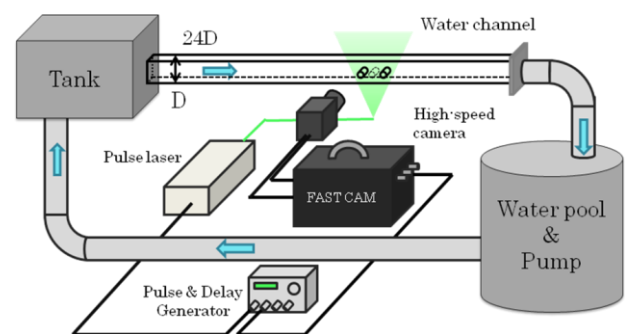


Figure1. Experimental setup

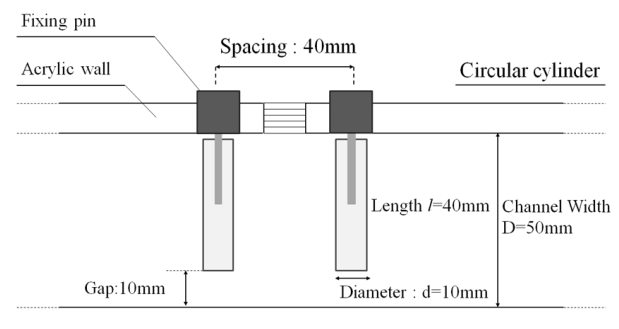
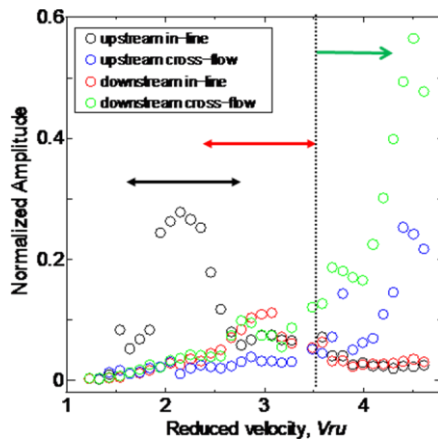


Figure2. Schematic of test section

Figure.3 Normalized Amplitude in cross-flow($\eta = 1.1$)

流路を流れる水にはトレーサー粒子として 63~150 μ m の粒径のイオン交換樹脂を混ぜ、パルスレーザー装置の照明によって円柱周りの流れ場を可視化し、これを高速度カメラ FASTCAM-SA1(Photron Co.,Ltd)で撮影した。高速度カメラはパルスレーザーと同期しており、円柱の振動状況と円柱の周囲流動状況を同時計測する。

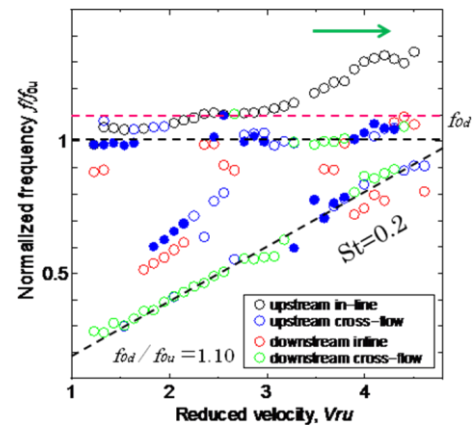
実験に用いた円柱構造物の概要を Fig.2 に示す。円柱は、外径 $d=10\text{mm}$ 、長さは主に $l=40\text{mm}$ のものを用意し、壁面と円柱先端との隙間は 10mm 空いている。円柱は片側が金属のピンで壁面に固定された片持ち梁状になっている。使用する金属によって、換算減衰率(C_n)と固有振動数(f_0)を変えることができる構造であり、固定ピンにはチタン、銅、真鍮、ステンレスを用いた。

2.2 測定方法

実験は大気圧下で行われ、流速を 0.40m/s から 2.25m/s までの範囲で 0.05m/s ずつ変えて行った。円柱周囲の流れ場は高速度 PIV で測定し、各時刻の画像中の円柱位置をパターンマッチングで求めて円柱の振動を評価した。また、実験は上流側円柱と下流側円柱の固有振動数の比、 $\eta = f_{0u} / f_{0d}$ を変えて、その条件における 2 円柱の振動特性および周囲流動状況について調べた。Table.1 にそれぞれの試験体の振動特性と実験条件について示す。

Table1. Experimental condition

$\eta (=f_{0u}/f_{0d})$	試験体	f_0	C_n	換算流速範囲(V_{ru})	レイノルズ数
1	チタン1	33.7	0.39	0.89 ~ 4.30	$3.0 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$
	銅	48.8	1.24		
1.1	真鍮	54.6	1.46	0.91 ~ 4.11	$5.0 \times 10^3 \sim 2.2 \times 10^4$
	チタン4	38.1	0.71		
1.2	ステンレス2	45.9	1.74	1.02 ~ 4.61	$4.0 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$
	ステンレス2	45.9	1.74		
0.83	チタン4	38.1	0.71	0.87 ~ 3.92	$4.0 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$
	チタン3	41.0	0.64		
1.3	銅2	52.7	2.14	0.95 ~ 3.61	$5.0 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^4$
	銅2	52.7	2.14		
0.77	チタン3	41.0	0.64	1.25 ~ 4.74	$5.0 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^4$
	チタン2	41.0	1.56		
1.5	ステンレス	58.6	1.44	0.94 ~ 3.22	$5.0 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$
	ステンレス	58.6	1.44		
0.67	チタン2	41.0	1.56	1.40 ~ 4.86	$5.0 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$
	チタン2	41.0	1.56		

Figure.4 Normalized frequency in cross-flow($\eta = 1.1$)

3 実験結果

3.1 円柱振動特性

Fig.3, Fig.4 に $\eta=1.1$ 、Fig.5, Fig.6 に $\eta=1.2$ 、Fig.7, Fig.8 に $\eta=0.67$ の場合における、振動振幅比および振動周波数比の結果をそれぞれ示す。図中の白抜きの丸(\circ)は振動周波数のピークを、塗りつぶされた丸(\bullet)はセカンドピークをそれぞれ表す。また、下流側も上流側換算流速 V_{ru} および上流側固有振動数 f_{0u} を用いて表している。

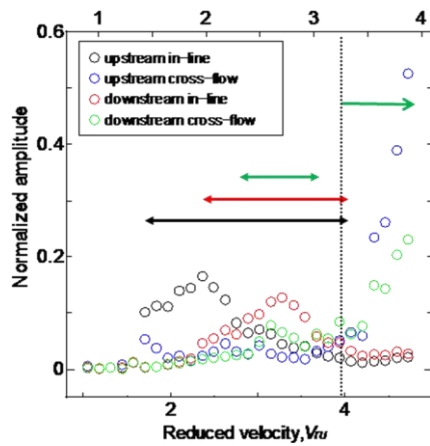
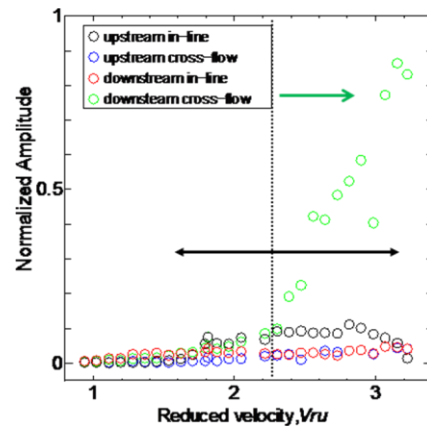
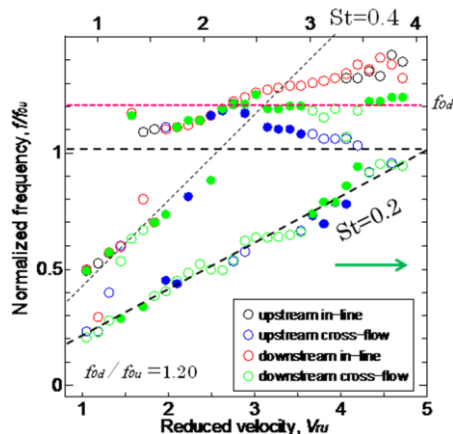
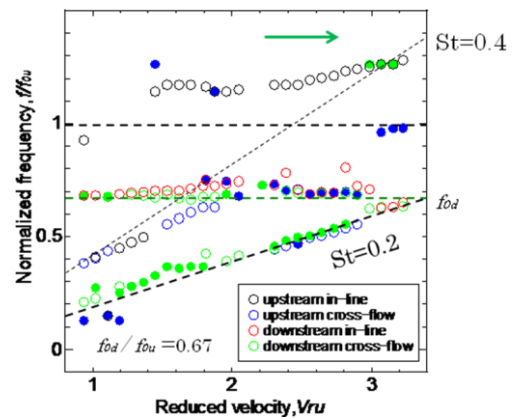
(1) $\eta = 1.1$ の場合

振幅比については、In-line 方向では下流側がより大きな流速域で励振域を持ち、最大振幅は上流側より小さかった。Cross-flow 方向では、上流側の最大振幅が円柱径の 25%であったのに対し下流側は 56%であり、下流側の円柱が上流側の 2 倍以上の振幅を記録した。振動周波数に関しては、下流側の振動周波数についても上流側固有振動数に近い値で推移し、 $4.3 < V_{ru}$ ではストローハル数 (St)=0.2 に一致する周波数と上流側固有振動数が近付くところにロックインしていた。したがって、 $\eta=1.1$ の場合、2 円柱間に大きな相互作用があり、上流側円柱の振動周波数が下流側円柱に対して支配的になると考えられる。

(2) $\eta = 1.2$ の場合

振幅比については、In-line 方向では上流側は換算流速 $1.8 < V_{ru} < 4.2$ 、下流側は $2.0 < V_{ru} < 4.2$ の比較的広範囲で励振域を持ち、上流側がより大きな振幅を持っていた。Cross-flow 方向では上流側は $4.0 < V_{ru}$ で急激に振幅が成長し、最大 52%の振幅を記録した。下流側では $V_{ru}=3.0$ まで緩やかに成長し、 $2.8 < V_{ru} < 3.6$ の範囲で小さな励振域が見られた後、 $3.7 < V_{ru}$ において大きく成長し、最大 23%の振幅が見られた。

振動周波数について、In-line 方向では上流側円柱は $V_{ru} < 1.5$ で $St = 0.4$ に近い値を持ち、 $1.5 < V_{ru} < 3.4$ で上流側固有振動数よりも 10%程度大きい値から徐々に増加、最大流速では 40%程度大きい振動周波数で振動している。下流側では、 $V_{ru} < 2.0$ では $St = 0.4$ に近い値がピークとなり、 $2.0 < V_{ru}$ では上流側円柱と同様に、上流側固有振動数より

Figure.5 Normalized Amplitude in cross-flow($\eta=1.2$)Figure.7 Normalized Amplitude in cross-flow($\eta=0.67$)Figure.6 Normalized Frequency in cross-flow($\eta=1.2$)Figure.8 Normalized Frequency in cross-flow($\eta=0.67$)

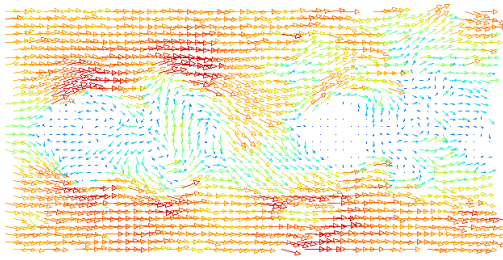
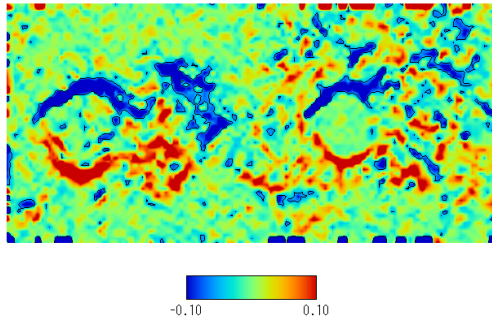
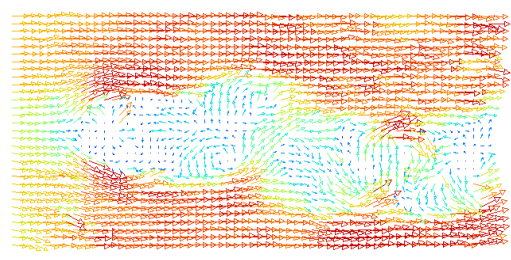
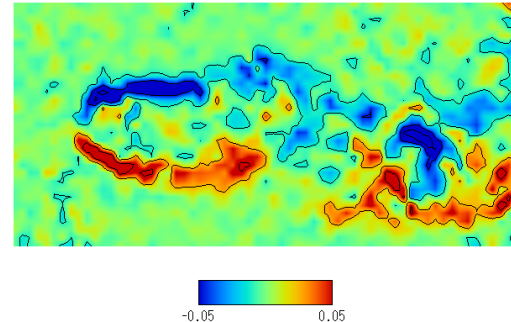
10%程度大きい値から徐々に上昇している。Cross-flow 方向について、上流側は $V_{ru} < 2.2$ では値が分散し、非常に複雑である。下流側は全体を通じて主に $St=0.2$ に一致する周波数が卓越し、セカンドピークに $St=0.4$ に一致する周波数や下流側固有振動数に近い周波数を持つ。また、 $2.2 < V_{ru} < 3.0$ 、 $3.0 < V_{ru} < 3.6$ 、 $V_{ru} < 4.3$ の範囲はおおよそ振動の励振域と重なり、それぞれ上流側固有振動数の 50%、60%、90%程度にロックインしている様子が見られた。そして、この条件では支配的な振動をしている円柱が流速の変化に従って入れかわる現象が見られた。 $\eta=1.2$ の場合、下流側円柱は上流側からの干渉を受けるが、影響の大きさは下流側の減衰の大小で変わるものと考えられる。

(3) $\eta=0.67$ の場合

振幅比について、In-line 方向では上流側円柱は換算流速 $1.6 < V_{ru} < 3.2$ で励振したのに対し、下流側では特に $2.8 < V_{ru}$ の範囲で Cross-flow 成分の影響でやや増加した他、微弱ながら $1.5 < V_{ru} < 3.0$ で In-line 方向振動に励振域を持っていた。Cross-flow 方向の振幅比については、上流側では換算流速 $2.2 < V_{ru}$ の条件でわずかに振幅が成長したもの、最大で 4.7%とその振幅は非常に小さかった。下流側では、低換算流速域から徐々に振幅が増加し、換算流速 $2.2 < V_{ru}$ において急激に成長して、最大振幅が 86%に達する非常に激しい振動が観察された。

振動周波数について、In-line 方向では上流側は低換算流速域で $St=0.4$ 程度の値をピークに持ち、 $1.5 < V_{ru}$ では上流側固有振動数よりやや大きい値をとっていた。一方、下流側は低換算流速域から最大計測範囲までほぼ一貫して下流側固有振動数に近い値を取り、In-line 方向にはそれぞれの円柱が独立して振動していた。Cross-flow 方向では、上流側円柱は $V_{ru} < 1.9$ では $St=0.4$ に近い値で振動し、 $2.0 < V_{ru} < 3.0$ で $St=0.2$ に近い値をとった後、下流側固有振動数に近い値にロックインしている。下流側は、ほぼ一貫してピークに下流側固有振動数に近い値を、セカンドピークに $St=0.2$ と一致する値を持つ。また、 $3.0 < V_{ru}$ では、 $St=0.2$ に一致する値が下流側固有振動数に近づいたところでロックインしている。In-line 方向ではそれぞれの固有振動数に近い値で振動し、Cross-flow 方向ではより振幅の大きい下流側の振動が支配的になっている様子が分かる。 $\eta=0.67$ の場合、上流側が下流側の振動に与える影響は小さいと考えられる。

以上、固有振動数に近い $\eta=1.1$ では上流側が支配的になる強い干渉が見られ、 $\eta=1.2$ では支配的になる円柱が流速域によって入れ替わり、換算減衰率の差が影響する様子が見られたものの、上流側の振動が下流側に与える影響が確認されたのに対し、 $\eta=0.67$ 程度まで固有振動数の差が大きくなると、上流側から下流側への影響は小さくなり、より振幅の大きい円柱振動が支配的になった。

Figure.9 Flow field, $V_{ru} = 2.36$ ($\eta = 1.2$)Figure.10 Vorticity distribution, $V_{ru} = 2.36$ ($\eta = 1.2$)Figure.11 Flow field, $V_{ru} = 3.16$ ($\eta = 0.67$)Figure.12 Vorticity distribution, $V_{ru} = 3.16$ ($\eta = 0.67$)

3.2 流動状況と上下流相互作用

Fig.9～Fig.12 に固有振動数比 $\eta = 1.2$ の場合の In-line 方向励振域内と $\eta = 0.67$ の場合の Cross-flow 方向励振域内における円柱周り流れ場の瞬時速度分布、瞬時渦度分布を示した。

(1) In-line 方向振動による影響

Fig.9, Fig.10 から、上流側円柱の後流が一对の双子渦を形成している様子が分かる。2 円柱間の流れ場における周波数を調べたところ、 $St = 0.2$ と 0.4 に近い値が卓越し、このとき下流側は両方向に同程度に振動していた。Fig.9 の瞬間には上流側で剥離した渦によって 2 円柱間に下流側円柱上方から下方へ入り込む流れが生じているが、これが下流側の振動に影響を与えていると考えられる。

(2) Cross-flow 方向振動による影響

Fig.11, Fig.12 から、上流側円柱の後流が強い渦を形成し、その対をなす渦が下流側円柱の手前で鉛直方向の強い流れを誘起している様子が分かる。

また、流れ場の周波数を調べたところ、上流側後方、下流側後方のいずれにおいても y 方向については $St = 0.2$ に近い 36.9Hz であった。ここで、この条件における流れ場の平均流速は 1.85m/s であるため、変動がその $40\% \sim 60\%$ 程度で伝わると推定すると、円柱中心間における流れの伝搬時間は $35 \sim 54\text{ms}$ 程度になる。それに対し、周波数 36.9Hz に一致する両円柱の振動成分の位相差は上流側と下流側で約 2.2π であったため、円柱中心間では約 30ms の時間遅れとなり、伝搬時間とほぼ一致する。これより、上流側円柱の振動により励起された流動変動が下流側に主流速度の約 $60 \sim 70\%$ で伝搬し、下流側円柱の振動を増幅する役割を果たしていたと考えられる。

4 結言

流れ方向に直列に置かれた、異なる固有振動数を持つ 2 円柱について、固有振動数の比を変えて 2 次元振動状況、周囲流動状況を測定した結果、以下の知見が得られた。

(i) 片持ち梁支持の 2 円柱は In-line 方向と Cross-flow 方向でそれぞれ 1 つずつ励振域を持つ。(ii) 円柱はいずれかの固有振動数および $St = 0.2, 0.4$ に一致する周波数で振動し、2 円柱の振動特性によって支配的な周波数は変わる。(iii) $\eta = 1.1$ の場合、上流側円柱の振動が下流側に対して支配的になり、強い干渉がある。(iv) $\eta = 0.67$ では上流側円柱の影響はかなり小さい。(v) $\eta = 1.2$ では下流側の換算減衰の大小関係するものの、上流側円柱振動の影響を受ける。

また、以上から BWR 下部プレナム内などの隣り合う 2 円柱の振動を抑制する方法としては、2 円柱の固有振動数比を 1.5 倍程度に離すことが考えられる。

参考文献

- 1) 安濃田良成、黒田猛、他：「もんじゅ温度計ウエルの流動励起振動に関する水流実験」(1997)
- 2) Sarpkaya, T: A Critical Review of the Intrinsic Nature of Vortex-Induced Vibrations, Journal of Fluids and Structure. 19, pp.389-447 (2004)
- 3) King, R., John, D.J.: "Wake interaction experiments with two flexible circular cylinders in flowing water" J.Sound & Vibr., 45(2), pp.259-280 (1976)
- 4) M.M.Zdravkovich: "The effects of interference between circular cylinders in cross flow" Journal of Fluids and Structures 1, 239-261 (1987)
- 5) D. Sumner: "Two circular cylinders in cross-flow: A review" Journal of Fluids and Structures 26 849-899 (2010)