特集

対称渦による円柱の流れ方向の流力振動

Flow-Induced Streamwise Oscillations of Circular Cylinders due to Symmetrical Vortices

岡島 厚*

Atsushi OKAJIMA

1. 緒論

一様流中の円柱に生じる流力振動、特に流れ方向流力振動 (Streamwise Oscillation, In-line Oscillation) は、カルマン渦のような交互渦によって誘起される振動のほかに、低流速域において一様流の軸に対して対称に形成される渦によって励振が生じる。本報では、自由振動や強制振動している円柱の近傍に形成される対称渦に注目して渦構造と円柱の流れ方向流力振動について述べる。

一様流中で円柱を流れ方向に強制加振すると円柱近傍に形成される対称渦はロックイン現象を起す。Griffin と Hall¹⁾は、 $f_c/f_k=2$ 付近 (f_c は振動円柱の振動数、 f_k は静止円柱後流の渦放出周波数) で円柱近傍に形成される対称渦の周波数 f_w が強制加振振動数 f_c にロックインする流速域は応答振幅に依存する。一方、King ら²⁾は水槽により円柱の流れ方向流力振動を調べ、換算流速 $V_r (=U/(f_k d))$ 、 U は一様流速、 d は円柱の直径) が 1~2.5 の範囲と 2.6~3.6 の範囲で二つの励振域が生じることを示し、前者の領域では対称渦が形成され、後者の領域では交互渦によって励振することを見出した。さらに、振動特性と対称渦の密接な関係についての興味ある研究として、Naudasher³⁾の解説によって紹介された Aguirre⁴⁾の流れ方向の流力振動の発生機構に関する水路実験がある。後流の息づき (wake-breathing) 運動による対称渦の流れパターン変化と Movement-Induced Excitation の関連を詳細に言及している。さらに、岡島ら⁵⁾、Okajima ら^{6,7)}、Nakamura ら⁸⁾、中村ら⁹⁾は、風洞や回流水槽によりスクルートン数 (換算減衰

率)、 $Cn=2m\delta/\rho d^2$ (m は円柱の単位長さあたりの質量、 ρ は流体の密度、 δ は円柱の対数減衰率) に対する円柱の振動特性などを詳細に調べ、2次元円柱やアスペクト比 $AR (=L/d)$ 、 L はスパン方向長さ) が 21 のような長い有限スパン長円柱では二つの励振域が生じるが、実際の温度計のようにアスペクト比が 5 や 10 のようにスパン長さが短い場合には一つの励振域のみ生じ、アスペクト比の小さいほど対称渦による振動の振幅が増大することを見出した。また、中村ら⁹⁾は、有限スパン長円柱の流れ方向の流力振動特性と対称渦との関係に注目して、振動円柱の渦構造のスパン方向変化を調べて、励振機構と有限端の影響を明らかにした。さらに下流にスプリッター板を挿入して振動する円柱近傍の後流渦構造を詳細に調べた。同様な下流域に挿入された物体の効果は、直列に配置された2円柱の場合、狭い間隔の上流側円柱の流力特性に顕著である。直列2円柱の上流側円柱¹⁰⁾は、低い流速領域で後流の息づき (wake-breathing) 運動による対称渦を伴う流れ方向の Movement-Induced-Excitation の単一励振域を呈する。

以下、それぞれについて説明する。

2. 流れ方向強制加振円柱の後流渦のロックイン現象¹⁾

図1は、Griffin と Hall¹⁾ による円柱を流れ方向に強制加振した際の振幅 $2\alpha/D$ と強制振動数比 f_c/f_k に対する円柱周辺に生じる対称渦流れがロックインする領域^{11)~14)}をまとめて示したものである。 $f_c/f_k=2$ を中心として強制振動数比の高低両側に円柱近傍に対称渦を伴うロックイン領域

* 金沢学院短期大学 教授
Professor, Kanazawa Gakuin College

Fig. 1, Rock-in region of an oscillating cylinder in the streamwise direction¹⁾

が見られるが、この場合、 $f_c/f_k > 2$ の早い振動数域（換算流速表示で低い流速域）側のロックイン領域が比較的狭いことが注目される。また、レイノルズ数 $Re (=Ud/\nu)$ 、 ν は流体の動粘度）= 80、 4×10^3 の流れ方向振動円柱に作用する流体力測定例¹²⁾もあるが、自由振動の応答特性とよく対応する。元来、流れ方向の流体力(抗力)の変動分は、流れに直角方向の流体力(揚力)の変動に比較して小さく、流体力の振幅および位相の実験値を精度よく計測することは容易ではない。そのため、精度のよい強制振動実験例はわずかである。

3. 円柱の流れ方向流体力振動特性⁷⁾

King²⁾は水槽により円柱の流れ方向振動を調べ、換算流速 V_r が 1~2.5 の範囲と 2.6~3.6 の範囲で二つの励振域が生じることを示した。その渦構造の観察から、最初の励振域では主として対称渦が放出し、第2の励振域では交互渦の放出を伴うことを述べた。岡島ら⁹⁾は円柱直角方向の渦励振に関する C. Scruton¹⁰⁾の風洞実験と同じ方式で、一樣流中に剛体円柱が流れ方向に並進振動するように両端弾性支持した場合の風洞実験を行った。その結果によれば、King の実験結果と同様、共振流速、 $V_{r\sigma} = U/(f_k d)$ の半分、 $V_{r\sigma}/2 = 2.5$ より低流速域の第1励振域($1.4 < V_r < 2.5$)と $V_{r\sigma}/2$ 以上の第2励振域($2.6 < V_r < 3.6$)の2つの励振域が存在する。そしてその振動特性は、図2に示すように、 C_n 値が大きくなるに従い2つの励振域の応答振幅はともに減少するが、 C_n 数に対してそれぞれ異なった振動特性を示す。 $V_{r\sigma}/2$ 以下の第1励振域の流れ方向変位の無次元最大振幅値、 ξ_{max} ($=x_{max}/d$ 、 x_{max} は円柱の流れ方向応答振幅の rms 値の最大値)の変化は第2励振域に比べ、 C_n 値の増加によって ξ_{max} の値は急激に減少する。そして、この

Fig. 2, The maximum response amplitudes of a circular cylinder versus Scruton numbers⁷⁾

(a) Symmetrical vortices, $V_r=2.3$ in the first excitation region.

(b) Alternate vortices, $V_r=3.2$, in the second excited region.

Fig. 3, Flow-patterns around an oscillating cylinder⁷⁾, $C_n=0.77$.

時の振動円柱後流の代表的流れパターンを図3に示すが、 $V_{r\sigma}/2$ 以下の第1励振域の $V_r=2.3$ では、図(a)に示すように振動円柱近傍では上下対称の渦配置パターンが形成され、 $V_{r\sigma}/2$ 以上の第2励振域では図(b)に示すような交互渦パターンが対応する。また第2励振域では後流渦の卓越ストローハル数 $St_w (=f_w d/U)$ (f_w は後流渦の周波数)は、円柱の強制振動数の半分、 $St_w/2$ に等しく、いわゆる後流渦のロックイン(lock-in)現象が生じるが、第1励振域では下流域の後流渦は非ロックイン(unlock)状態で、下流後流域の周波数は自然発生渦の $St_n (=f_n d/U)$ 成分が卓越する。このように $V_{r\sigma}/2$ 付近前後の2つの流速域で生じる流れ方向の励振にはそれぞれ振動特性に大きな相違が見られる。特に、低速側の第1励振域における応答振幅、 ξ_{max} は C_n

値の増加に対して極めて急激に減衰するのに対し、高速側の第2励振域の振動の C_n 値に対する ξ_{max} の変化は比較的緩慢で C_n 値が約 2.5 で ξ_{max} の値は 0.05 程度の小振幅振動まで減衰する。

4. Aguirre の実験⁴⁾

振動特性と対称渦の関係については、興味ある研究として Naudasher の解説³⁾によって紹介された Aguirre の流れ方向の流力振動の発生機構に関する水路実験がある。Aguirre は振動時の流れパターンと円柱の応答振幅の対応を詳細に調べて示唆に富む知見を得ている。第1励振域の非ロックイン領域では、円柱の流れ方向振動に対応して円柱表面から剥離した自由せん断層が接近したり離れたりして、後流幅が対称な形で円柱の振動数に一致して変動し、いわゆる後流の息づき(wake breathing)運動を呈する。この現象に注目して、図4のように振動円柱背面から下流にスプリッター板(直径の13倍の長さ)を挿入して下流域に交互渦の形成を抑制した実験を行った。図には、自由振動する円柱の周波数 f と f_c の相違を f_c/f で示し、円柱の応答振幅 a/d を示す。図中、破線で示すスプリッター板のない場合の応答と比較するが、第1励振域の大部分の領域では両者ほとんど同様な特性を示し、対称渦パターンを呈する。すなわち、第1励振域の振動は、円柱下流域の後流渦による影響が少なく、円柱運動自身により励起される後流の息づき運動に起因する自励振動によって生ずるものである。また、破線で示す単独円柱の場合、 $V_r=2.5$ 付近の急激な振幅低下は、このような後流の息づき運動による対称渦に対

Fig.4, Results of Aguirre's experiments⁴⁾

し、 V_r の増加に伴う交互渦の発生・成長による減衰効果によるものと考えられる。また、池田¹⁰⁾は、Aguirre による実験の第1励振域における後流渦構造において、a. 抗力倍調和励振、b. 後流渦再形成、c. ロックインの3つの流れパターンがあり、渦構造と振動メカニズムの密接な関係を説明している。

5. アスペクト比の変化による振動特性^{7,8)}

片端支持円柱において、アスペクト比を $AR=5, 10, 14, 21$ ($C_n=0.24\sim0.37$)に変化させた場合の振動特性を2次元円柱 ($C_n=0.77$)と比較して図5に示す。図から、いずれも $V_r = 1.2\sim2.0$ の流速範囲ではほぼ一致した振動特性を示すが、アスペクト比が最も小さい5の場合、 $V_r=2.5$ の高流速域まで振幅が急増し、 $V_r=2.5\sim3.2$ の間では緩やかに応答振幅が減少して対称渦を伴う励振域を形成する。すなわち、アスペクト比が10よりも小さい場合、第2励振域が消滅して単一励振域のみとなる。一方、アスペクト比の大きい $AR=14, 21$ の場合、 $V_r = 2.4$ 付近では振幅は減衰して谷を形成し、再び増加して $V_r=2.7$ 付近で最大振幅となる第2励振域を形成する。アスペクト比によって最も振動特性に差が見られるのは、 $V_r = 2.5\sim3.2$ の領域で、2次元円柱や $AR=14, 21$ 円柱に見られる第2励振域であり、この流速域がアスペクト比によって大きな影響を受ける。

次章以下、円柱近傍に形成される渦構造のspan方向変化に注目して、アスペクト比の影響について考察する。

Fig.5. Response amplitudes of a cantilevered cylinder with different aspect ratios of 5 to 21⁸⁾, $C_n=0.25$

6. 端板付きアスペクト比 21 振動円柱における渦構造の9) スパン方向変化

図 6 に、中村らによるアスペクト比 $AR=21$ の円柱先端に直径 60mm の端板をつけて端部の流れを抑制し、片持ち弾性支持した円柱の換算流速 Vr に対する応答振幅 ξ_{rms} を示す。この場合、先端部に端板を設置することにより 2 次元円柱の振動特性と同様な特性を呈する。そこで、図中、矢印をつけた換算流速において、円柱背後に上下対称の位置に設置した 2 本の熱線プローブによって計測した渦放出周波数 f_w および相互の位相差 ψ の円柱先端を $z=0$ としたスパン方向分布を図 7 に示す。図 6 の $Vr=1.2\sim 2.2$ は第 1 励振域、 $Vr=2.3\sim 2.4$ に谷を形成し、 $Vr=2.5\sim 3.2$ は第 2 励振域である。第 1 励振域の開始直後である図 7(a) $Vr=1.22$ では、円柱近傍の渦は円柱の振動数の 1/4 に同期して、位相差が 180° 近くの交互渦が観察される。第 1 励振域で応答振幅が増加する途中である(c) $Vr=1.79$ では、円柱の先端から 1/3 までの間は振動数に同期して位相差が 0° 近くの対称渦が生じている。これより根元側は静止円柱のカルマン渦放出周波数に近い周波数を持つ交互渦が生じている。応答振幅が第 1 励振域のピークに近い(d) $Vr=2.01$ では、渦放出周波数は円柱の振動数の 1/2 に近くなるが、完全には同期せず時間的に変動する不安定な状態となる。応答振幅が急激に減衰する(e) $Vr=2.24$ では、全スパンに亘ってロックインして円柱の振動数の 1/2 に同期する交互渦が形成される。応答振幅が急減して谷を形成する(f) $Vr=2.40$ では、渦放出周波数が円柱の振動数の 1/2 に同期する交互渦が生じる。第 2 励振域の $Vr=2.50\sim 3.30$ の間では、渦放出周波数は換算流速の影響をほとんど受けず、ス

Fig. 6, Response amplitudes of the AR21 cylinder with the end plate against reduced velocity at $Cn = 0.47$ ⁹⁾.

Arrows show the points when the vortex frequencies are measured.

Fig.7 Frequencies of vortex shedding in the wake with the oscillating AR21 cylinder with the end plate.⁹⁾

Table 1, Excitation regions and vortex structures against reduced velocity⁹⁾

	Reduced velocity	Oscillation region	Vortex frequency	Phase difference	Vortex Structure
(1)	$Vr \doteq 1.2$	First region	$f_c/4$	180°	Alternate
(2)	$1.4 < Vr < 2.2$		f_c	0°	Symmetrical
(3)	$2.0 < Vr < 2.2$		$f_c/2$,	180° ,	Alternate
(4)	$2.2 < Vr < 2.4$		Unstable	unstable	
(5)	$2.4 < Vr < 2.5$	Valley	$f_c/2$	180°	
(6)	$2.5 < Vr < 3.2$	Second region			

パン方向全体にロックインが生じて円柱の振動数の1/2に同期する交互渦が生じる。このように換算流速に対する変化から、第2励振域はロックインが生じて交互渦のみであることに対して、第1励振域はより複雑な挙動を示す。ここで最も興味深いことは、対称渦から交互渦への切り替わりは、 $V_r = 2.0$ 付近で生じ、振幅が急減する谷の $V_r = 2.5$ 前後では、円柱振動数の1/2にロックインして交互渦が放出されている。従って円柱の応答振幅の急減は交互渦の形成・成長によって生じる減衰特性によることがわかる。

表1には、上記に述べた端板付きスパン長さ21円柱の後流渦構造の変化を換算流速に対して整理して示す。このような励振域と渦構造の関係は、Aguirre による結論とよい一致を示す。

7. 有限スパン長さ（アスペクト比 $AR=10$ ）の振動円柱における渦構造のスパン方向変化⁹⁾

次に、短い有限スパン長さ円柱の例として $AR=10$ の円柱について換算流速に対する応答振幅変化を図8に示す。円柱スパン長さが短い $AR=10$ の場合、図のように $V_r = 1.2 \sim 3.2$ の範囲で一つの励振域を形成し、谷がなくなる。図8中の矢印で示した換算流速におけるスパン方向の渦放出周波数を図9(a)~(d)に示す。(a) $V_r = 1.41$ の場合は、先端から根元近傍まで渦放出周波数は円柱の振動数に同期して位相差が 0° に近く、対称渦が放出されている。端板付き $AR=21$ 円柱の図7(b) $V_r = 1.37$ の場合、先端 ($z=0$) から中央にかけて対称渦が放出されたことと異なる。図9(b) $V_r = 1.77$ の場合は、円柱先端近傍に円柱の振動数の1/2に同期した渦が生じ、円柱の根元にかけて円柱の振動数に同期した対称渦が見られる。端板付き $AR=21$ 円柱の図7(c) $V_r = 1.79$ の場合、円柱先端から中央までは対称渦、中央から根元では交互渦が形成されることに対し、 $AR=10$ 円柱で交互渦が認められないことが注目される。端板付き $AR=21$ 円柱では、図7(e) $V_r = 2.24$ からは対称渦が形成されないことに対し、 $AR=10$ 円柱では (c) $V_r = 2.19$ 、(d) 2.49 では対称渦は先端部に形成され、中央から根元側に円柱の振動数の1/2に同期する交互渦が生じる。すなわち、アスペクト比が小さくスパン長さが短くなることによって対称渦形成の流速範囲が広くなり、応答振幅が増大し、交互渦による第2励振域が現れなくなる。このような2次元円柱の特性に対し、 $AR=10$ 円柱の場合、先端部を越える流れにより交互渦の発生が抑制され、図8のように、対称渦による単一の励振域を呈する。

Fig.8. Response amplitudes of AR10 cylinder against reduced velocity at $C_n = 0.20$. Arrows show the points when the vortex frequencies are measured⁹⁾.

Fig.9. Frequencies of vortex shedding in the wake with the oscillating AR10 cylinder⁹⁾

8. 円柱後流にスプリッター板を設置したときの振動特性⁹⁾

円柱後流の渦構造を変えたときの振動特性を調べるため、図10のようにアスペクト比 $AR=10$ 円柱に直径60mmの端板をつけた場合と後流に長さ200mmのスプリッター板を挿入した。図11に、その流れ方向応答特性の実験結果を比較して示す。端板は、円柱先端を回り込む流れを抑制し、スプリッター板は後流を円柱の左右に分けて交互渦の発生を抑制して対称渦による励振だけで振動する。いずれの場合もスクレーン数値は約 $C_n = 0.3$ である。 $AR=10$ 円柱が単一励振域を形成するのに対し、端板付き $AR=10$ 円柱は $V_r = 2.2 \sim 2.4$ の範囲で応答振幅が減少して谷が生

じ、 $V_r = 2.5 \sim 3.3$ の範囲で第2励振域を形成する。一方、スプリッター板を挿入した $AR=10$ 円柱では、 $V_r = 1.2 \sim 3.2$ の範囲で単一の励振域を形成する。この場合、通常の $AR=10$ 円柱に比べて振幅はさらに増大し、励振域が高流速域へ拡大している。図11では、アスペクト比10円柱では振動開始直後の $V_r = 1.2$ 近傍でスプリッター板を設置した場合より応答振幅がわずかに増加する。この換算流速では図7(a)のように円柱の振動数の1/4に同期する交互渦が生じている。 $V_r = 1.2 \sim 2.0$ の範囲で応答振幅はいずれの場合も一致し、対称渦を伴う励振であることが分かる。 $V_r = 2.0 \sim 2.2$ の範囲では、スプリッター板設置による対称渦のみ生ずる場合に比べ、いずれも振幅が小さくなる。スプリッター板がない場合、図9(c), (d)のように先端部に対称渦が形成され、根元に近い部分には円柱振動数の1/2にロックインした交互渦が形成される。さらに端板付き $AR=10$ 円柱では $V_r = 2.2 \sim 2.4$ の範囲でさらに振幅が小さくなる。このことから端板付き $AR=21$ 円柱で図7(e), (f)のように、円柱振動数の1/2に同期する交互渦が有する流体力特性によ

Fig.10, AR10 cylinder with the end plate (left), and with the splitter plate in the wake (right)⁹⁾.

Fig.11, Response amplitudes of the AR10 cylinder against reduced velocity⁹⁾: ○, without end plate and splitter plate; ◇, with the end plate; △, with the splitter plate.

て減衰し、応答振幅の谷が現れる。 $AR=10$ 円柱とスプリッター板を設置した $AR=10$ 円柱では、交互渦に比べて対称渦を伴う励振が支配的であるため第2励振域が生じなくなる。一方、端板を設置すると流れの2次元性が増大し、端板付き $AR=10$ 円柱は、 $AR=21$ 円柱と同様、 $V_r = 2.5 \sim 3.3$ の範囲で第2励振域を形成するようになる。この場合、図7(g), (h)のように円柱振動数の1/2に同期する交互渦による励振である。

9. 狭い間隔 (円柱間隔 $s=0.3$) の直列2円柱の上流側円柱の流れ方向流体力振動¹⁰⁾

最後に、円柱下流側スプリッター板以外の物体を設置した例として、直列2円柱の上流側円柱の流れ方向流体力振動特性を図12に示す。図は、2円柱の無次元円柱間隔 $s (=S/d, S$ は2円柱中心間隔) $s=0.3$ の場合の応答特性を●印で示す。単独円柱の場合と同様に、 $V_r = 1.4$ 付近から振動が生じ、 $V_r = 2.7$ 付近で最大振幅 $\xi_{rms} = 0.057$ となり、その後、振幅は急激に減衰する。しかし振動は完全に減衰せず、 $2.7 < V_r < 3.2$ で $\xi_{rms} = 0.015$ 程度で振動し、 $V_r = V_{rc}/2 (=3.25)$ で振動がおさまる。また▲印で示すストローハル数は、大きな励振が起こる $1.5 < V_r < 2.7$ の範囲で $St_w = St_c$ と固有振動数にロックインして、 $2.7 < V_r < 3.2$ の小さな応答振幅の範囲では、 $St_w = St_c/2$ になり円柱振動数の1/2倍にロックインする。さらに振動がほとんど減衰した高流速域の $V_r > 3.2$ では $St_w = 0.15 \sim 0.16$ で一定となり、静止直列2円柱におけるストローハル数とほぼ一致する。図13は $s=0.3$ での換算流速 $V_r = 2.36, 2.90$ における円柱後流渦の可視化写真を示す。

Fig.12, Response amplitudes of the upstream cylinder and Strouhal number for two circular cylinders in tandem arrangement of $Cr = 0.99$ and $s = 0.3$ ¹⁰⁾

(a) $V_r=2.36$

(b) $V_r=2.90$

Fig.13, Visualized flow patterns around two circular cylinders in tandem arrangement of $Ch=0.99$ and $s=0.3^{10)}$.

図 13 (a) $V_r=2.36$ は、図 12 で示した励振のピーク付近の流れパターンであり、 $1.4 < V_r < 2.7$ の広い励振域で、上流側円柱の上下側面から同時に剥離し、物体後流では円柱の固有振動数にロックインした対称渦パターンとなる。この励振域は、対称渦を伴う Movement-Induced Excitation によって生ずる。このように単独円柱に比べて第 1 励振域の流速域が拡大し、最大応答振幅が大きくなる現象は、円柱間隔が近い場合、上述した振動円柱後方にスプリッター板を設置した場合と同様、下流側円柱が交互渦の発生を抑制し、対称渦による振動を促進するスプリッター板効果によるものである。次に、図 13 (b) $V_r=2.90$ は、図 12 で、ピークから一旦減衰した後、 $\xi_{ms}=0.015$ で振動している時の流れの様相を示す。円柱間では死水域を形成し、死水域の流体は上流側円柱の振動に一致して、下流側円柱背後に交互に渦を形成・放出している。この渦は円柱の振動ストローハル数 St_c の $1/2$ に同期している。

10. 結論

一様流中の円柱に生じる流体力振動、特に流れ方向流体力振動の一部は、低流速域において対称渦によって励振が生じる。本報では、振動する円柱の近傍に形成される対称渦に注目してその渦構造と円柱の流れ方向流体力振動について述べた。円柱の流れ方向振動に呼応して円柱表面から剥離した自由せん断層が接近したり離れたたりして、後流幅が対

称な形で円柱の振動数に同期して変動し、いわゆる後流の息づき(wake breathing)運動を呈して対称渦が形成される。流れ方向振動の第 1 励振域では、対称渦による Movement-Induced Excitation によって応答振幅は増大するが、丁度、共振流速の $1/2$ より低い流速域から始まる円柱下流域に形成される交互渦の減衰効果によって共振流速の $1/2$ 付近で応答振幅は極端に低下する。そして有限スパン長さ円柱ではスパン方向には交互渦と対称渦が混合して形成されるので、渦構造の相違による励振の様相は複雑である。そこで、種々なアスペクト比の有限スパン長円柱の流れ方向の流体力振動特性と渦構造分布に注目して、振動円柱の渦構造のスパン方向変化をアスペクト比による相違など詳細に調べて励振機構との関係を明らかにした。

さらに、下流にスプリッター板を挿入することにより対称渦形成を促進して円柱の流れ方向励振域の拡大と応答振幅の増大を確認した。

振動円柱の下流域に挿入した物体効果は、直列に配置された 2 円柱の場合、狭い間隔の上流側円柱の流体力特性にも現れる。直列 2 円柱の上流側円柱の応答特性には、低い流速領域で対称渦を伴う流れ方向の Movement-Induced-Excitation による単一励振域が現れる。このような対称渦を伴う物体の励振は、管群など下流域に他の物体によって交互渦の形成が抑制される際に現れ易いことは注目される。

参考文献

- 1) Griffin, O.M. and Hall, M.S., "Review-Vortex shedding Lock-on and flow control in bluff body wakes", J. Fluids Eng., Trans. ASME, 113, pp.526-536, 1991-12.
- 2) King, R., Prosser, M. J. and Johns, D. J., "On Vortex Excitation of Model Piles in Water", Journal of Sound and Vibration, 292, pp.169-188, 1973.
- 3) Naudasher, E., "Flow-induced streamwise vibrations of structures", Journal of Fluid and Structures, 1 pp.265-298, 1987.
- 4) Aguirre, J. E., "Flow-Induced, In-line Vibrations of a Circular Cylinder", Doctoral Dissertation, Imperial College of Science and Technology, London, 1977.
- 5) 岡島厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、"円柱および矩形柱の流れ方向流体力振動特性"、日本機械学会論文集 B65-635, pp.2196~2203, 1999
- 6) Okajima, A., Kosugi, T., Nakamura, A., "Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel", American Society of Mechanical Engineers, Journal of

- Pressure Vessel Technology, 124, pp.89~96, 2002.2.
- 7) Okajima, A., Nakamura, A., Kosugi, T., Uchida, H., Tamaki, R., "Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder", *European Journal of Mechanics*, B 23, pp.115~125, 2004.2.
 - 8) Nakamura, A., Okajima, A., and Kosugi, T., "Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder)", *JSME International Journal, Fluids and Thermal Engineering*, B44-4, pp.705-711, 2001-11.
 - 9) 中村晶、岡島厚、玉城怜士、木綿隆弘、"流れ方向振動する有限スパン長さ円柱周りの流れ(スパン方向の渦周波数分布)"、*日本機械学会論文集*、B71-707, pp.1813-1820, 2005.
 - 10) Okajima, A., Yasui, S., Kiwata, T., Kimura, S., "Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28, pp.552-560, 2007.
 - 11) Griffin, O. M. and Ramberg, S. E., "On vortex strength and drag in bluff body wakes," *Journal Fluid Mechanics*, 69, pp.721-728, 1975.
 - 12) Tanida, Y., Okajima, A., Watanabe, Y., "Stability of a circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake", *Journal of Fluid Mechanics*, 61-4, pp.769-784, 1973.
 - 13) 辰野正和, "流れ方向に振動する円柱後方の渦列", *九州大学応用力学研究所所報*, 36, pp.25-37, 1972.
 - 14) Barbi, C., Favier, D.P., Maresca, C.A. and Telionis, D.P., "Vortex shedding and lock-on of a circular cylinder in oscillatory flow", *J. Fluid Mech.*, vol.170, pp.527-544, 1986.
 - 15) Scruton, C., "On the Wind-excited Oscillations of stacks, towers and masts", *Proc. Intern. Conf. Wind Effects on Build & Structures* (Teddington), Her Majesty's Stationary Office, 1963.
 - 16) 池田孝志, "流れ方向流力振動に関する対称渦放出と後流周波数の関係", *日本原子力学会誌*, 43-10, 2001.