直列2角柱の流れ方向流力振動に関する研究*

岡島 厚^{*1}, 安井 聡^{*2}, 森 快貴^{*3}
木村 繁男^{*4}, 木綿 隆弘^{*5}Flow-Induced In-Line Oscillation of Two Square Cylinders
in Tandem ArrangementAtsushi OKAJIMA^{*6}, Satoru YASUI, Yoshiki MORI,
Shigeo KIMURA and Takahiro KIWATA^{*6} Kanazawa Gakuin College, 10 Sue-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1392 Japan

Flow-induced in-line oscillation of two tandem rectangular cylinders has been experimentally studied by free-oscillation tests in a wind tunnel. Only one cylinder of two cylinders was elastically supported easily to move in the in-line direction for reduced mass-damping parameter $Cn \approx 1.5$; the other was fixed to the tunnel sidewalls. The gap between two tandem cylinders was changed from $s=0.3$ to 3. We measured the response amplitudes of the oscillatory cylinder in the in-line direction and the vortex-shedding frequency in the wake. The flow around the tandem cylinders was visualized by the smoke-wire method. As a result of the upstream cylinder, an excitation appeared in a wide region of reduced velocity, $Vr=2.5$ to 5 at gap ratios of $s=0.3$ to 2. This excitation was mainly induced by symmetric vortex shedding, the other excitation of $Vr=4.5$ to 6.5 at wide gap ratios of $s=0.75$ to 1.5, was induced by alternate Karman vortex shedding, accompanied with unstable limit-cycle. The downstream cylinder had an excitation region in a wide range of $Vr=3$ to 5.5 for the narrow gap distance of $s=0.3$ to 0.75, which also seems to be induced by alternate Karman vortex shedding. Furthermore, the downstream cylinder oscillated as a buffeting phenomenon influenced by wake-fluctuation of the upstream cylinder, when gap distance was greater than $s=1$.

Key Words: Flow-induced Vibration, In-line Oscillation, Two Square Cylinders, Tandem Arrangement, Flow Visualization

1. 緒 論

流れ方向流力振動が引き起こす典型的事例としては1995年に起こった高速増殖炉「もんじゅ」の温度計さや管破損事故がある。

質量比 $M (=m/\rho D^2 L)$, m : 構造物の質量, ρ : 密度, D : 構造物の代表長さ, L : 構造物のスパン長さ) が水や金属ナトリウムなどの液体流中では小さく, しかも構造減衰比が極めて小さい場合, 質量比と対数減衰率の積からなる換算減衰率 $Cn (=2M\delta)$, δ : 構造物の対数減衰率) は小さくなって流れ方向振動が発生しやすくなる。岡島ら⁽¹⁾ は, 換算減衰率 Cn が比較的小さい場合の円柱および種々な断面形状をもつ矩形柱の流れ方向流力振動特性について一連の研究を行った。それによると矩形柱の流れ方向応答特性は, 断面比 B/H (B : 矩形柱の流れ方向長さ, H : 矩形柱の流れに直角方向断面高さ) によって大きく異なり, 特に断面比

$B/H=1$ の角柱の場合, 円柱の流れ方向振動特性ほど明確ではないが, 共振流速の半分の流速を境にして前後2箇所にも励振域が認められ, 低い流速の励振域は角柱後流に対称渦, 高い流速の励振域には交互渦が発生することを示した。

そして構造物が複数個ある場合, すなわち, 熱交換器, ケーブル群, 冷却炉, 多脚煙突, 橋りょう, 海洋構造物など複数の構造物が近接して置かれた場合には, 単独のときと比べて流れ特性ははく離領域の干渉等によって複雑になる。特に, 矩形断面形状による再付着などの特有の流れ現象が生じ, 配列によって流れパターンが変化し, 応答特性が大きく異なることが予想される。複数構造物として最も基本的である2角柱の流れ振動に関する研究は, おもに静特性⁽²⁾⁽³⁾や流れに直角方向振動に注目したもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾はあるが, 流れ方向振動に関するものはあまり行われていない。

本研究ではその最も基本的な場合として, 流れに直列におかれた断面比 $B/H=1$ の2本の角柱を取扱い, 一様流中に直列に置かれた2角柱のうち注目する試験体を弾性支持し, もう一方を固定して2角柱の間隔を変化させて流れ方向の振動振幅と角柱後流の渦放出周波数を測定した。またスモークワイヤ法を用いた流れの可視化から流れ方向振動と角柱周りの流れとの関連

* 原稿受付 2006年6月15日。

^{*1} 正員, フェロー, 金沢学院短期大学(〒920-1392 金沢市末町10)。^{*2} 学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 金沢市角間町)。^{*3} 金沢大学大学院工学部。^{*4} 正員, 金沢大学自然計測応用センター。^{*5} 正員, 金沢大学自然科学研究科。

E-mail: a-okaji@kanazawa-gu.ac.jp

について考察し、直列2角柱における上・下流側角柱の流力振動特性に及ぼす間隔の影響を明らかにする。

2. おもな記号

- B : 矩形柱の流れ方向長さ m
 C_n : 換算減衰率 $= 2m\delta/\rho BHL$
 f_c : 角柱の固有振動数 Hz
 f_n : 静止角柱の自然渦放出周波数 Hz
 f_w : 振動角柱の渦放出周波数 Hz
 H : 矩形柱の流れに直角方向断面高さ m
 L : 矩形柱のスパン長さ m
 m : 系の質量 kg
 Re : レイノルズ数 $= UH/\nu$
 s : 直列に配置した2角柱の無次元間隔 $= S/H$
 S : 直列に配置した2角柱の間隔 m
 St_c : 角柱の無次元振動数 $= f_c H/U$
 St_n : 静止角柱後方の自然渦放出ストローハル数
 $= f_n H/U$
 St_w : 振動角柱後方の渦放出ストローハル数
 $= f_w H/U$
 U : 一様風速 m/s
 Vr : 換算流速 $= U/(f_c H)$
 Vr_{cr} : 共振換算流速 $= U/(f_n H) = 1/St_n$
 x : 角柱の流れ方向位置 m
 x_{rms} : 角柱の流れ方向変位の二乗平均値 (root mean square) m
 δ : 角柱の対数減衰率
 ν : 流体の動粘度 m^2/s
 ρ : 流体の密度 kg/m^3
 ξ_{rms} : 角柱の流れ方向変位の二乗平均値の無次元振幅 $= x_{rms}/H$

3. 実験装置と実験方法

実験は、図1のような断面0.3~1.2 mの測定部をもつ吹流し形風洞装置で行い、測定部に2本の角柱膜型を流れ方向直列に配置する。図2に角柱模型の配置図を示すが、供試模型には断面比 $B/H=1$ の振動角柱(流れに直角方向断面高さ $H=0.12$ m, 流れ方向長さ $B=0.12$ m, スパン長さ $L=0.293$ m)と固定角柱($H=B=0.12$ m, $L=0.3$ m)の模型を用いた。この場合の測定部における模型の閉そく率は0.1で比較的大きいが、単独角柱実験の後流渦放出周波数はストローハル数 $St_n=0.13\sim0.14$ となり、閉そく率の小さい文献(2)のストローハル数値とほぼ一致するため閉そく率による補正は行わなかった。また振動模型の両端にはさまざまな模型端部効果を低減するため、直径0.24

Fig. 1 Wind tunnel and test section for experiments

(a) The oscillatory model of upstream cylinder Hot-wire probe

(b) The oscillatory model of downstream cylinder

Fig. 2 Arrangement of tandem rectangular cylinders

m, 厚さ0.5 mmの円形の亚克力樹脂製の端板を取付けた。そして風洞外側に設けた支持台に両側で合計8本のコイルばねを用いて弾性支持した。振動角柱の固有振動数は $f_c=3.6$ Hz, 対数減衰率 δ は、5回の打撃試験結果を平均して求め、換算減衰率は、上流側角柱振動実験では $C_n=1.32\sim1.63$, 下流側角柱振動実験では $C_n=1.27\sim1.67$ である。上流側角柱と下流側角柱の間隔 S は、無次元間隔として $s(=S/H)=0.3\sim3.0$ の範囲で変化させた。風速 U の測定には熱式風速計を使用し、 $U=0.6\sim3.0$ m/s の範囲で実験を行った。この風速範囲の換算流速は、 $Vr=2.0\sim7.0$, レイノルズ数は $Re=(0.7\sim2.4)\times 10^4$ である。模型の流れ方向振動振幅 x は、模型支持台に取付けられたレーザー変位計を用いてサンプリング周波数1 kHzで40 s, 40 000点を測定し、無次元応答特性 $\xi_{rms}(=x_{rms}/H)$ を算出した。図2に示すように上流側角柱振動実験では上流側角柱と下流側角柱間の中心と下流側角柱中心から $3H$ 後方に、静特性実験と下流側角柱振動実験では下流側角柱中心から $3H$ 後方にI形熱線プローブを

設置して角柱後流の変動流速計測し、FFT解析から渦放出周波数 f_w を求めた。

交互渦の発生を抑制するために用いたスプリッタ板は、幅0.3 m、長さ1.25 m、厚さ5 mmの亚克力製で、振動角柱に接触しないように角柱から20 mm後方に設置した。流れの可視化には多線式スモークワイヤ法を用いた。上流側角柱の上流に1本、角柱間に3~4本、下流側角柱後流に1本のステンレス線の流れに直交させて張り、流動パラフィンとアルミニウム粉末を2:1の割合で混合した液体を塗布し、加熱したステンレス線から発生する白煙の流れのようすをカラーCCDカメラで撮影した。

4. 直列2角柱の静特性

上流側、下流側の両角柱を固定し、2角柱の間隔 s を変えて静止直列2角柱の周りの流れの変動周波数を計測して求めたストローハル数 St_n の変化を図3に示す。実験は $Re=(1.0\sim 2.0)\times 10^4$ の亜臨界域で行った。図3中の破線は岡島ら⁽²⁾($Re=3.0\times 10^4$)による実験結果である。角柱間隔が近いところ($s\leq 0.5$)では、レイノルズ数によらず岡島らの結果に近く、 $s=0.5\sim 2.5$ では若干低い。間隔が広い $s=2.25\sim 2.75$ の場合は後流のスペクトル分布は広帯域の分布を示し、複数の卓越 St_n 数が見れるようになり、2番めに卓越するストローハル数 $St_n=0.13\sim 0.17$ の値もプロットした。

5. 上流側角柱の流れ方向応答特性

図4~6に上流側角柱を弾性支持、下流側角柱を固定した場合の角柱間隔 $s=0.5, 1.0, 2.0$ における換

Fig. 3 Strouhal number St_n versus gap ratio s of two stationary tandem cylinders

算流速 Vr に対する応答特性 ξ_{rms} と渦放出ストローハル数 St_w の関係を示し、図5, 6に矢印で示す各換算流速における流れの可視化写真を示す。なお、図中に示した破線は、いずれも $St_w=St_c, St_c/2$ の曲線である。

5.1 単独角柱の場合 振動角柱単独での応答特性 ξ_{rms} はいずれの図においても実線で示してある。換算減衰率 $Cn=1.32$ である単独角柱の場合、円柱の場合ほど明確ではないが、換算流速 $3.0 < Vr < 3.5$ と $3.6 < Vr < 4.4$ の2箇所での励振域が生じる。単独角柱の共振換算流速の1/2の $Vr_{cr}/2=3.6$ 付近で振動は一度減衰し、二つの励振域の励振機構は円柱の場合と同様、低流速域の励振域は対称渦が、高流速域の励振域は交互渦が支配的である⁽¹⁾。

5.2 スプリッタ板を設置した場合 角柱後方にスプリッタ板を設置した応答特性を図4の□印で示す。この場合は $3.2 < Vr < 4.7$ で一つの励振域が現れる。この励振域は単独角柱の第1励振域と同様に対称渦によるMovement-Induced Excitation⁽⁶⁾に起因しており、角柱背後にスプリッタ板を設置することによって交互渦の発生を抑制し、対称渦による自励振動を促進する。

5.3 角柱間隔 $s=0.5$ の場合 下流側に角柱を置いて角柱間隔 $s=0.5$ 、換算減衰率 $Cn=1.63$ にした場合の応答特性を図4に示す。換算流速 $Vr=2.7$ から振動が発生し $Vr=Vr_{cr}/2(=3.98)$ 付近から急激に振動振幅は増加し、 $Vr=4.7$ で最大振幅 $\xi_{rms}=0.074$

Fig. 4 Response amplitude of upstream cylinder and Strouhal number against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $Cn=1.63$ with gap ratio $s=0.5$

(a) The response amplitude and Strouhal number

(b) Visualized flow-patterns

Fig. 5 (a) Response amplitude of upstream cylinder and Strouhal number against reduced velocity and (b) Visualized flow-patterns ($Vr=4.17$, 5.25) for reduced mass-damping parameter $Cn=1.44$ with gap ratio $s=1.0$

をとる。その後振動は減衰し、 $Vr=5.0$ で振動は止まる。図4中、スプリット板を角柱背後に挿入した場合と比較すると、 $Vr=3\sim 3.8(=Vr_{cr}/2)$ の範囲では応答特性 ξ_{rms} はほぼ一致し、さらに $Vr=3.8\sim 5$ の流速域では、応答特性 ξ_{rms} は極端に相違することが注目される。この応答特性の相違については6章で考察する。また図4(a)添図に示す上下流側角柱の下流位置で卓越するストローハル数をそれぞれ▲, ▽で示した。振動角柱近傍では $2.7 < Vr < 5.0$ の励振域全域において $St_w = St_c$ にロックインして渦放出し、下流側角柱後方でも $3.2 < Vr < 4.8$ で同様に St_c にロックインする。そして $4.0 < Vr < 4.8$ では、小さい▲で示す2番めの卓越ストローハル数は $St_w = St_c/2$ にロックインする。

5・4 角柱間隔 $s=1.0$ の場合 角柱間隔 $s=1.0$, 換算減衰率 $Cn=1.44$ の振動特性を図5(a)に示す。 $3.0 < Vr < 4.7$ の範囲では固有振動数に同期した励振域が、 $5.1 < Vr < 6.3$ の範囲では固有振動数の1/2に

(a) The response amplitude and Strouhal number

(b) Visualized flow-pattern ($Vr=4.28$)

Fig. 6 (a) Response amplitude of upstream cylinder and Strouhal number against reduced velocity and (b) Visualized flow-pattern ($Vr=4.28$) for reduced mass-damping parameter $Cn=1.36$ with gap ratio $s=2.5$

同期した励振域が生じる。低速流域の励振は、間隔が小さいときに見られた $Vr_{cr}/2=4.14$ 付近からの変化の増大は見られず、スプリット板挿入時の場合に近い特性を示す。図5(a)中、見られる高速流域の励振は、ほぼ0.02程度の初期変位を与えた場合に応答振幅が増大し、それ以下では減衰する不安定なリミットサイクル⁽⁴⁾の励振である。

図5(b)に $s=1.0$ における換算流速 $Vr=4.17$, $Vr=5.25$ における可視化写真を示す。 $Vr=4.17$ では角柱間に対称渦が明確に形成され、対称渦による Movement-Induced Excitation である。 $Vr=5.25$ では上流側角柱の片側前縁からはく離れたせん断層が振動角柱背後で交互渦を形成し、それを後方に放出して交互渦パターンとなる。角柱間隔の広い $s=0.75\sim 2$ の高速流域で見られる1/2ロックイン現象を伴う励振域は、交互渦による励振である。この励振はある程度以上の振幅を与えることにより角柱間に渦が交互に形成されて、不安定なリミットサイクルの励振が発生する。

5・5 角柱間隔 $s=2.5$ の場合 さらに間隔の広い角柱間隔 $s=2.5$, 換算減衰率 $Cn=1.36$ の振動特性

を図6(a)に示す。 $3.5 < Vr < 4.6$ で一つの励振域が現れ、 $Vr_{cr}/2 = 4.30$ で最大振幅 $\xi_{rms} = 0.035$ をとる。図6(a)に示す単独角柱の振動応答特性に類似している。そしてこの励振域のピーク付近 $4.2 < Vr < 4.5$ では1/2 ロックイン現象が見られる。

図6(b)に $s = 2.5$ における換算流速 $Vr = 4.28$ における可視化写真を示す。写真のように交互に生じる渦パターンが支配的であり、交互渦による励振が生じる。したがって角柱間隔が広がり下流側角柱の影響が小さくなるため、単独角柱と類似した応答特性となる。

5・6 上流側角柱流れ方向振動の角柱間隔の影響

上流側角柱の流れ方向応答特性 ξ_{rms} について、一つの励振域のみ現れた $s = 0.3 \sim 0.75$ とスプリット板を設置した結果を図7にまとめて示す。また不安定なリミットサイクルを伴う励振域が現れた $s = 0.75 \sim 2.0$ を図8に示し、単独角柱の応答に近づく $s = 2.0 \sim 3.0$ を図9にまとめて示す。さらに図10には、角柱間隔 s の変化による発振する流速 Vr の範囲を示す。縦線部は対称渦による励振域、横線部は交互渦による励振域、特に $s = 0.75 \sim 2.0$ の横線部は不安定なリミットサイクルを伴う振動の範囲を示し、 $\triangle$ 印は図4, 7などで示した励振の増加率が急変する点、 $\times$ 印は共振流速の半分、 $Vr_{cr}/2$ を示す。また図10には、単独角柱の励振域を右端に、スプリット板設置時の励振域を左端に示す。対称渦による励振域の流速範囲は、角柱間隔によってあまり大きな変化はないが、リミットサイクルを伴う不安定振動は、角柱間隔が広がるにつれて徐々に励振域が小さくなる。角柱間隔 $s \geq 2.5$ になると上流

Fig. 7 Response amplitude of upstream cylinder against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $Cn = 1.32 \sim 1.63$ with gap ratio $s = 0.3$ to 0.75

Fig. 8 Response amplitude of upstream cylinder against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $Cn = 1.32 \sim 1.63$ with gap ratio $s = 0.75$ to 2.0

Fig. 9 Response amplitude of upstream cylinder against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $Cn = 1.32 \sim 1.63$ with gap ratio $s = 2.0$ to 3.0

Fig. 10 Excitation regions of upstream cylinder as functions of gap distance s and reduced velocity Vr

Fig. 11 Peak response amplitude of upstream cylinder against gap distance ($C_n=1.32\sim1.63$)

側角柱の流れ方向振動に及ぼす下流側角柱の影響が小さくなり、単独角柱の励振範囲とほぼ同様となる。また励振の増加率が変化する点が $V_{r_{cr}}/2$ にほぼ一致することは注目される。次に、最大応答特性の変化に注目して、応答振幅のそれぞれの励振域のピーク値の角柱間隔 s に対する変化を図 11 に示す。●印は対称渦励振域の $V_r < V_{r_{cr}}/2$ の範囲における最大振幅、○印は $V_r > V_{r_{cr}}/2$ の範囲における最大振幅であり、右端には単独角柱の値を示した。間隔が近い場合には、単独角柱の2倍程度までは応答振幅が大きくなり、 $s=0.75$ では2箇所の対称渦による励振域、不安定なリミットサイクルを伴う交互渦による励振域の最大振幅はともに単独角柱の場合より大きくなる。間隔が広がるにつれて $V_r > V_{r_{cr}}/2$ の範囲における最大振幅は減少し、間隔が $s > 2.5$ では単独角柱の振動振幅に近くなる。

6. 角柱の応答特性に及ぼす種々なスプリッタ板の影響

角柱後流渦の形成を制御することによる角柱の応答特性の変化を調べる。図 12 には、振動角柱後方に間隔を $s=0.5$ あけてスプリッタ板を設置した場合、同様に、スプリッタ板前方に $0.12\text{ m} \times 0.28\text{ m}$ のアルミニウム板を取付けた T 字スプリッタ板を設置した場合、そして角柱間隔 $s=0.5$ の応答特性を比較して図 12 に示す。スプリッタ板を設置した場合は、 $2.8 < V_r < 3.6$ で振動するが直列2角柱の場合とは異なり、 $V_r=3.7$ 付近から応答振幅は低下する。一方、T 字スプリッタ板を設置した場合、 $V_r=2.7$ から振動が発生し、 $V_r=3.8$ 付近から反対に急激に振動振幅は増加し $V_r=4.8$ で最大振幅をとり、直列2角柱の $s=0.5$ の場合とほぼ同じ応答特性を示す。このことから $V_{r_{cr}}/2$ 前後で応答振幅が急激に増大する現象は、振動角柱背面に形成される渦に及ぼす下流流体による影

Fig. 12 The comparison with response amplitude of upstream cylinder against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $C_n=1.63$ with gap ratio $s=0.5$, splitter plate and T-type plate

Fig. 13 Visualized flow-patterns ($V_r=3.37, 4.39$) for reduced mass-damping parameter $C_n=1.63$ with gap ratio $s=0.5$, splitter plate and T-type plate

響であることがわかる。

そこで、図13に換算流速 $Vr=3.37, 4.39$ における下流側物体が角柱の場合、スプリット板の場合、そしてT字スプリット平板の場合の後流渦の可視化写真を示す。 $Vr=3.37$ の可視化写真は、下流側物体形状にかかわらず $\xi_{rms}=0.022\sim0.028$ 程度の振動をしているところであり、いずれも下流側で振動角柱後流近傍に対称渦を形成している。 $Vr=4.39$ の可視化写真は、角柱とT字スプリット板の組合せの場合、 $\xi_{rms}=0.06$ まで増加しており、平板スプリット板の場合は逆に $\xi_{rms}<0.01$ まで振幅が減少しており、流速が大きくなることによって角柱背面から離れた下流で渦が形成されるようになって応答振幅が小さくなると考えられる。それに対して下流側に角柱やT字スプリット板のある場合、下流側物体間に上流側振動角柱前縁からはく離れたせん断層が入り込み、すきま内で渦が形成されるようになる。これにより振動角柱の背圧変動が大きくなり、振幅が増大する。さらに図12には、直列2角柱の間隔 $s=0.5$ において、流速を $Vr=6.0$ から減速させた場合と $Vr=2.25$ から増速させた場合の振

動特性を比較した。減速させた場合、振動は $Vr=4.6$ まで発振せず、 $Vr=4.3$ から流速を増加させた場合と同程度の応答振幅になる。これより直列2角柱でもヒステリシス現象が起こり、 $Vr=4.4\sim5.0$ では増速の場合のみ大きな振動が発生する。このようなヒステリシス現象の発生は、初期振動振幅がある程度以上に達しないと振動角柱前縁からはく離れたせん断層がすきま内に入り込まないため、流速を減速させた場合は $Vr=4.4\sim5.0$ の範囲で振動が起こらないものと考えられる。

7. 下流側角柱の流れ方向応答特性

下流側角柱を弾性支持、上流側角柱を固定した場合で、角柱間隔 $s=0.3, 1.0$ における換算流速 Vr に対する応答特性 ξ_{rms} と渦放出ストローハル数 St_w の関係を図14, 15に示す。なお、図14, 15中に示した破線は、 $St_w=St_c/2$ の曲線である。

7・1 角柱間隔 $s=0.3$ の場合 流れの上流側に固定角柱を置き、角柱間隔 $s=0.3$ で下流側に角柱を弾性支持した直列2角柱の特性(換算減衰率 $Cn=1.63$)を図14(a)に示す。換算流速 $Vr=3.5$ から振動し始め、 $Vr=4.0$ で $\xi_{rms}=0.037$ となり緩やかに減衰し、 $Vr=Vr_{cr}/2=4.08$ 付近から増加し始める。 $Vr=4.9$ で第2のピーク $\xi_{rms}=0.040$ に達した後、減衰して $Vr=5.3$ で完全に振動が止まる。ストローハル数は、大きな励振が起こる $3.7<Vr<4.7$ の範囲で $St_w=St_c/2$ と固有振動数の1/2にロックインしているが、 $Vr>4.7$ ではロックからはずれ、自然渦放出ストローハル数に近い渦が生ずる。図14(b)に $s=0.3$

(a) The response amplitude and Strouhal number

(b) Visualized flow-pattern

Fig. 14 (a) Response amplitude of downstream cylinder and Strouhal number against reduced velocity and (b) Visualized flow-patterns ($Vr=3.93, 4.72$) for reduced mass-damping parameter $Cn=1.63$ with gap ratio $s=0.3$

Fig. 15 Response amplitude of downstream cylinder and Strouhal number against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $Cn=1.29$ with gap ratio $s=1.0$

Fig. 16 Response amplitude of downstream cylinder against reduced velocity for reduced mass-damping parameter $Cn=1.27\sim1.67$ with gap ratio $s=0.3$ to 3.0

Fig. 17 Excitation regions of downstream cylinder as functions of gap distance s and reduced velocity Vr

での換算流速 $Vr=3.93, 4.72$ における直列 2 角柱の流れのパターンを示す。 $Vr=3.93$ の可視化写真は、図 14 での低流速側の励振のピーク付近の流れのようすであり、2 角柱は一つの物体のように振る舞い、上流側固定角柱の前縁からはく離れた流れは、下流側角柱後方で巻き込み、交互渦となって放出される。 $Vr=4.72$ の可視化写真は、図 14 に示す第 2 ピーク付近の流れのようすである。 $Vr=3.93$ と同様に下流側角柱後方で交互渦パターンが見られる。

7.2 角柱間隔 $s=1.0$ の場合 角柱間隔 $s=1.0$ ($Cn=1.29$) の下流側円柱の特性を図 15 に示す。どちらも $Vr=Vr_{cr}/2$ で $1/2$ ロックインに伴う励振が発生するが、すぐに減衰して小さな振動が高流速域まで続く。この振動は上流側角柱の後流渦によって発生する強制振動、パフエッティング振動の様相を呈

Fig. 18 Peak response amplitude of downstream cylinder against gap distance ($Cn=1.27\sim1.67$)

す。

7.3 下流側角柱流れ方向振動の角柱間隔の影響

下流側角柱の流れ方向応答特性 ξ_{rms} を図 16 にまとめる。さらに角柱間隔 s の変化による発振流速域の範囲を図 17 に、応答振幅のそれぞれの励振域の最大値の角柱間隔 s に対する変化を図 18 に示す。間隔が小さい場合には交互渦による励振が支配的であり、2 角柱は一つの物体のような挙動を示し、単独角柱より励振範囲も広く、最大振幅も大きい。 $s \geq 1.0$ では共振換算流速付近でのみ振動し、高速域ではパフエッティング振動が生じる。

8. 結 論

一様流中に直列に 2 角柱を置いて注目する試験体を弾性支持し、もう一方を固定して 2 角柱の間隔を変化させて流れ方向の振動振幅と角柱後流の渦放出周波数を測定した。さらにスモークワイヤ法によって流れの可視化を行い、振動特性と後流渦構造との関係を調べ、以下の結果を得た。

(1) 上流側角柱流れ方向振動

(i) 角柱間隔 $0.3 < s < 1.5$ で $Vr_{cr}/2$ 付近で発生する励振域は対称渦による励振であり、下流側角柱が近接しているためスプリット板と同様の効果を持ち、対称渦の発生を促進し交互渦の発生を抑制する。 $0.3 < s < 0.75$ で $Vr > Vr_{cr}/2$ における励振域での応答特性の急激な増加は、上流側角柱前縁からはく離れたせん断層が角柱間のすきまに対称に入り込むことによるものである。この場合、ヒステリシス現象が存在することも明らかにした。

(ii) 角柱間隔 $s=0.75\sim1.5$ では不安定なリミットサイクル励振が発生し、間隔が広がるにつれて応答振幅、励振範囲ともに小さくなる。

(iii) 角柱間隔 $s \geq 2.5$ では、下流側角柱の影響が小さくなり、単独角柱の応答特性に近づく。

(2) 下流側角柱流れ方向振動

(i) 角柱間隔が狭い場合 ($s \leq 0.75$)、交互渦による励振域が発生し、 $s \leq 0.5$ では単独角柱より振動振幅および励振範囲ともに非常に大きい。

(ii) 角柱間隔が広い ($s \geq 1.0$) の場合、パフエーティング振動が生じる。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号 18560184)による。

文 献

- (1) Okajima, A. et al., In-line oscillation of structure with a circular or rectangular section, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 65, No. 635 (1999), pp. 2196-2203, (in Japanese).
- (2) Okajima, A. and Kiwata, T., Aerodynamic characteristics of two rectangular cylinders in a tandem arrangement, *Journal of Structure Engineering, JSCE*, 36 A (1990-3), pp. 849-857, (in Japanese).
- (3) Takano, A. et al., An experiment on the flow around a group of square prisms, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 47, No. 418 (1981), pp. 982-991, (in Japanese).
- (4) Okajima, A. and Kiwata, T., Aeroelastic instability of two rectangular cylinders in a tandem arrangement, *Journal of Structure Engineering, JSCE*, 36 A (1990-3), pp. 859-864, (in Japanese).
- (5) Takeuchi, T., Matsumoto, M. and Shiraishi, N., Vortex-induced oscillations of rectangular bluff bodies in tandem arrangement, *Proceedings of National Symposium on Wind Engineering*, No. 12 (1992), pp. 375-380, (in Japanese).
- (6) Naudasher, E. and Wang, Y., Flow-induced vibrations of prismatic bodies and grids of prisms, *Journal of Fluids & Structures*, Vol. 7 (1993), pp. 341-373.