振動するく形断面柱に作用する流体力特性* (流れと直角方向に振動する場合)

坂本 弘 志^{*1}, 羽二生 博 之^{*1}
小畑 芳 弘^{*2}, 沼田 一 哉^{*3}

Characteristics of Fluid Forces Acting on Oscillating Rectangular Cylinders (In the Case of Cross-Stream Oscillation)

Hiroshi SAKAMOTO, Hiroyuki HANIU,
Yoshihiro OBATA and Kazuya NUMATA

Measurements were made of the time-averaged and fluctuating fluid forces, vortex-shedding frequency and wake structures of rectangular cylinders forced to oscillate transversely at a maximum amplitude of 10% of the length of the front face. The ratio of depth (streamwise dimension) to height (cross-stream dimension) of the cross section ranged from 0.3 to 1.0. The nondimensional frequency $F_v H/U_0$ (F_v : frequency of forced oscillating cylinder, H : height of cylinder, U_0 : free-stream velocity) was varied from about 0.08 to 0.20, in which the lock-in region was included. It has been found that a critical depth where the fluid forces attain a peak in the oscillating cylinder is smaller than that of the stationary cylinder. Also, within the lock-in region in which the vortex shedding is perfectly synchronized with the force frequency F_v of the cylinder only, the fluid forces are found to attain a maximum. Furthermore, it is recognized that the work done by the fluctuating lift changes to positive work, which induces the generation of negative aerodynamic damping from negative work when the ratio of depth to height is smaller than 0.5.

Key Words: Unsteady Flow, Rectangular Cylinders, Transverse Oscillation, Lock-in Phenomenon, Fluid Forces, Vortex-Shedding Frequency, Wake Structures, Aerodynamic Damping

1. 緒 論

流れの中に置かれた円柱あるいは角柱のような Bluff Body の後方には極めて規則性の強い渦が交互に放出され、その結果物体には交番流体力(変動揚抗力)が生じ、振動することとなる。これは渦励振(Vortex-Induced Oscillation)現象と呼ばれ、各種構造物等に生ずるギャロッピング、フラッタ等の自励振動を発生させる要因の一つとなる。そのために工学的に重要な問題の一つとして位置づけされている。物体の振動時における流体力の特性に関する研究は多くなされてはいるが、物体の振動と流体力とは非線形な干渉を起こし、複雑な挙動を示すために理論的な考察はもちろんのこと実験的にも十分な解明には至っていない。このような渦励振や自励振動に代表される空力不安定振動現象の理解を得る方法の一つとしては、物体を強制振動させて、その周辺の流れおよび流体力特性を調べ、流れ場を支配する基本的要素を明確にすることである。したがって、これまで強制振動させた物体の流体

力特性に関する研究はいくつかなされている。その中で構造物要素として最も基本的形状を有する角柱を、流れと直角方向に振動(並進振動)させた場合の貴重な報告がある。正方形柱の流体力が Lock-in 時に増大することを見いだした Otuki ら⁽¹⁾、角柱の臨界断面形状に対する振動の影響を調べた Nakamura-Hirata⁽²⁾、角柱の変動揚力を調べた Nakamura-Matsukawa⁽³⁾、さらには角柱表面の変動圧力特性を調べた Bearman-Obasaju⁽⁴⁾等の研究がある。

このように流れと直角方向に振動する角柱の流体力特性に関してはある程度のデータの蓄積がなされ、明らかにされつつあるが、いまだ十分な解明がなされているわけではない。特に非定常流体力は渦励振現象を発生させる要因であるために、物体の振動時におけるその特性を知ることは極めて重要となる。しかし物体振動時における種々の流体力の測定はかなり困難であるために十分なデータの蓄積がなされておらず、不明の点も多く、その解明が強く望まれている。本研究は、臨界断面を含む各辺長比を有するく形柱を採用し、流れと直角方向に強制振動させた場合の Lock-in 領域を含めた各強制振動周波数における定常および非定常流体力特性を調べたものである。あわせて変動揚力に基づく仕事を算出し、並進振動時におけるく形柱の正

* 平成4年9月2日 北海道支部第33回講演会において講演、原稿受付 平成5年8月11日。

^{*1} 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

^{*2} 北見工業大学。

^{*3} 日本精工(株) (〒141 東京都品川区大崎1-6-3)。

の測定部を有する環流形風洞を使用した。く形柱は図 1 に示すように、その高さ H を 48 mm と一定とし、断面比 B/H を 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 および 1.0 の 7 とおりに変化させた。いずれもその内部に圧力変換器 (TOYODA PD104K) を取付けるために、アルミニウム板を張り合せた空洞構造となっている。く形柱の中央断面上に直径 0.8 mm の圧力測定孔を端部付近は狭い間隔 (最小で 1 mm)、そして中央部にいくにしたがって広い間隔 (最小で 3 mm) で多数設け、できるだけ短くしたビニルチューブで内蔵されている圧力変換器に接続してある。圧力変換器はく形柱の振動の影響を除去するために、図 2 に示すように物体から隔離したパイプに取付けてある。その結果、圧力変換器に対する物体の振動の影響をほぼ除去することができた。またスピーカのコーンを機械ならびに電気的方法によって振動させる検定装置を試作して調べた結果、圧力測定孔と接続した状態における圧力変換器の周波数特性は、0~100 Hz においてゲインファクタは 1 ± 0.05 、周波数の変化に対する位相差はなく極めて良好であった。く形柱の振動は、図 2 に示すように電磁式振動装置によって行った。この場合のく形柱の振動数および変位は、加振アームに取付けた差動トランス形変位計によって検出した。

実験に当たっては、辺長比 $B/H=1.0$ の正方形柱においては振幅比 a/H を $0.02\sim 0.10$ の範囲で5とおり、他の辺長比の場合には $a/H=0.1$ と一定として行った。また強制振動周波数は $5\sim 40$ Hz の範囲で種々変化させた。く形柱表面上の各点における時間平均圧力および変動圧力は、その表面に設けた多数の圧力測定孔によって測定し、それに基づいて各種流体力を算出した。特に変動流体力の算出は、振動に同期する成分

3. 実験装置および方法

The diagram shows a rectangular test cylinder of diameter B and height H . A pressure hole of diameter a is located at a distance X_s from the front face and Y_s from the top edge. The flow has velocity U_o and pressure P_o . The cylinder is labeled "Test cylinder". A hot wire probe is located at a distance $7H$ from the front face and $1.25H$ from the bottom edge. The coordinate system (X, Y) is centered on the front face.

Piezometric hole

Pressure sensor

Flow

Test cylinder

Vinyl tube

Sensor support pipe

To amp.

Displacement sensor

Shaker

Transverse oscillation

図 2 実験装置の概略

は変位計の電圧変動, 非同期成分は熱線流速計によって得られた変動速度をそれぞれ基準信号とし, 位相平均化された変動圧力に基づいて行った。また, 渦放出周波数はく形柱後方の $X/H=7.0$, $Y/H=-1.25$ の位置に設置した熱線プローブによって検出された変動速度のパワースペクトル解析から求めた。測定時における主流の速度 U_0 は, 7.0 m/s と一定として行った(ただし, 渦放出周波数の測定に当たっては $U_0=10 \text{ m/s}$ とした)。この場合のレイノルズ数 $Re(=U_0H/\nu)$ は 2.2×10^4 である。また風洞測定部における乱れ度は 0.4% , 閉そく比は 9.6% であったが, それに対する補正は行っていない。

4. 結果および考察

4.1 渦放出周波数 図3は辺長比 $B/H=1.0$ のく形柱を振幅比 $a/H=0.1$ で振動させた場合における後流の速度変動のスペクトル分布を示したものである。図3中に示す S_v は, く形柱の強制振動の周波数 F_v の無次元量である。 S_v が小さい領域では, 静止時の渦放出周波数とほぼ同一の周波数を有する自然放出渦のみが発生している。 S_v が增大するとスペクトル分布に二つのピーク値が現れ始める。この領域の初期では, 一つのピーク値は自然放出渦, 他の一つは強制振動に基づく後流のうねりによるもので, それは完全な渦とはなっていない。しかし Lock-in 領域に近い後半では, 一つのピーク値は同じく自然放出渦によるものではあるが, これは放出後直ちに他のピークを示す強制振動に基づいて生成される渦に取り込まれる形で流出する。さらに S_v が自然放出渦の周波数に近くなると強制振動周波数に引き込まれる形で渦放出が行われ

る, いわゆる Lock-in 現象に移行する。この Lock-in 現象は振幅比 $a/H=0.06$ を超えると明りょうに認められるが, これより小さい a/H の場合には強制振動放出渦は逆に自然放出渦の周波数に同期するものとなっている。したがって, Lock-in 現象はある程度の大きさの振動振幅を有する場合に初めて起こるものと考えられる。 S_v が自然放出渦の周波数を超えると, 再び自然放出渦と強制振動放出渦とに基づく二とりのスペクトルピーク値が現れ始める。この場合の渦放出は, 強制振動放出渦と自然放出渦との二とりのパターンで行われのではなく, 強制振動に基づいて放出された渦は移動の途中で合体し, Lock-in 領域の前とは逆に自然放出渦に取り込まれる形で後方に流出するものと考えられる。

次に図4は, 振幅比 $a/H=0.1$ として強制振動数 S_v を種々変化させた場合における辺長比 $B/H=0.5, 0.7$ および 1.0 の三とりに関する渦放出周波数 f_v を示したものである。縦軸に渦放出周波数 f_v を物体静止時における渦放出周波数 f_n に対する比として示してある。 S_v が小さい場合には, いずれの辺長比においても二とりの周波数が存在するが, それらは各辺長比に対応した Lock-in 領域では, これまでの研究でも明らかにされているように自然放出渦の周波数が強制振動のそれに同期していることがわかる。Lock-in 領域から離れると, 再び二とりの渦放出周波数が現れる。また Lock-in を開始する領域は各辺長比ごとの自然放出渦の周波数に対応して異なるが, その領域幅には大きな差異は認められない。

図5は, 上述した渦放出パターンを確認するために行った, 辺長比 $B/H=1.0$ のく形柱を振幅比 $a/H=0.1$ で振動させた場合の後流の可視化観測結果を示したものである。可視化観測は試験部が 0.3 m (深さ) $\times 0.3 \text{ m}$

図3 後流の変動速度のスペクトル解析
(辺長比 $B/H=1.0$, 振幅比 $a/H=0.1$ の場合)

図4 無次元強制振動数 S_v の変化に対する
渦放出周波数 f_v ($a/H=0.1$ の場合)

(幅), 長さ 1.5 m なる環流式開水路を用いて行った。この場合のレイノルズ数は 4.2×10^2 と風洞実験のそれよりかなり小さい。また Lock-in 領域の範囲は $S_v = 0.11 \sim 0.19$ と風洞実験における $S_v = 0.12 \sim 0.14$ よりも拡大している。しかし後流の変動速度のスペクトル解析を行った結果, 渦放出周波数 f_o と強制振動周波数 S_v との関係が図 4 に示すところの風洞実験のそれと極めて類似していたことから定性的な論議は可能であると判断して行った。図 5 (a) は静止時, 図 5 (b) は Lock-in 領域の前, 図 5 (c) は Lock-in 領域そして図 5 (d) は Lock-in 領域の後での渦放出パターンを示したものである。まず Lock-in 領域の前では, 図 5 (b) に示すように後方に交互に放出された自然渦は, 強制振動に基づく後流の大きなうねりに沿って流出している。この強制振動に基づく後流のうねりは, Lock-in 領域に近づくにしたがって自然放出渦を取り込む形で渦を形成し始めるものと考えられる。しかし個々の渦の巻き込みはいずれも弱く, あまり明らかな渦列を形成しない。次に Lock-in 領域では図 5 (c) に示すように強制振動は規則的な渦生成を促進させるために, かなり明らかな渦列が形成されている。さらに Lock-in 領域の後では図 5 (d) に示すように強制振動に基づいて放出された渦は, 流出途中で自然放出渦の周波数に一致する形で合体し, 結果的に自然放出渦の周波数と同一のそれを有する渦列となって後方に流出している。このような渦放出パターンは風洞実験の場合もほぼ同一であるものと判断される。

4.2 時間平均流体力特性 はく離を伴う物体の時間平均抗力は, その背面に作用する圧力に支配される。したがって, 物体の背圧を調べることによって間接的に抗力の変化を把握することができる。図 6 は振動振幅比を $a/H = 0.1$ と一定とし, 強制振動周波数 S_v を種々変化した場合のく形柱背面の中心における時間平均圧力係数 C_{pb} を示したものである。 S_v が小さ

図 5 S_v の変化に対する代表的な後流パターンの観測

い場合には, いずれの辺長比の C_{pb} も静止時のそれに近く, 物体振動の影響をほとんど受けていない。したがって, く形柱の振動は後流に低周波のうねりを生じさせるが, はく離せん断層の特性を変化させるまでに至らない。しかし S_v が増加し, Lock-in 領域に近づくにしたがって, $B/H = 0.5$ 以外のいずれの辺長比のく形柱においても C_{pb} は減少し, 静止時のそれよりもかなり小さくなる。これは, はく離せん断層が強制振動の影響を受けて乱流拡散するために, その巻き込み位置が後退すること, ならびに自然放出渦と強制振動による渦とが干渉し合い, 明らかな渦列が後方に形成されないことによるものと考えられる。次に S_v が Lock-in 領域に入ると C_{pb} は急激に増大し, 特に $B/H = 0.4, 0.5$ および 0.6 における C_{pb} は, 静止時のそれに比べてかなり大きくなっている。静止時におけるく形柱背圧に関しては, 中口ら⁽⁵⁾をはじめ, いく人かの研究者⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾によって調べられ, C_{pb} は $B/H = 0.6$ 付近で最も大きくなることが明らかにされている。これに関して中口らは, 可視化実験から $B/H = 0.6$ 付近において, はく離せん断層の巻き込み位置が最も背面に近づくことによるものとしている。また大屋⁽⁹⁾は, $B/H = 0.5$ における背圧は, $B/H = 0.4$ と 0.6 とにおけるそれらに等しい二とおりの値が発生することを明らかにし, $B/H = 0.5$ は, はく離せん断層の巻き込み位置が背面に近づく場合と後退する増合との二とおりに変化する過渡的な辺長比であるとしている。したがって, $B/H = 0.5$ における C_{pb} が最も大きくなるのは, 強制振動によって はく離せん断層の巻き込み位置が背面のごく近傍に近づくパターンに固定され, かつ巻き込み強さが強化されることによるものと考えられる。

図 6 無次元強制振動数 S_v の変化に対する背面圧 C_{pb}

図7は辺長比 $B/H=0.5$ と 0.6 における背面中心の圧力の変動波形を示したものである。静止時 ($S_v=0$) では変動値ならびに平均値とも大きい場合と、それらのいずれも小さい場合との二とおりが混在する形で出現している。しかし $B/H=0.5$ の Lock-in 領域内である $S_v=0.149$ では、 $S_v=0$ で認められた大きな圧力値の大部分がほぼ規則的に出現している。この結果からも明らかなように、 $B/H=0.5$ で C_{pb} が最も大きくなるのは、はく離せん断層の巻込み位置は変化することなく、背面に最も近づく形で規則性をもって巻き込むことによるものであると考えられる。また、 $B/H=0.6$ における Lock-in 領域 ($S_v=0.14$ が相当) での大きな値を有する圧力の発生割合は $S_v=0$ の場合よりも増大はするが、 $B/H=0.5$ の場合に比べて少ない。その結果 C_{pb} の増大は $B/H=0.5$ に比べて小さいものと考えられる。

次に図8は、Lock-in 領域での時間平均抗力係数 C_D の最大値を各辺長比について示したもので、あわせて静止時のそれも示してある。 B/H が 0.6 よりも小

図7 背面中心位置での圧力の変動波形

図8 各 B/H における Lock-in 領域での C_D の最大値

さいときは、いずれの C_D も静止時に比べかなり大きくなっている。特に $B/H=0.5$ において C_D は最大となり、静止時のその 30% 増となっている。しかし B/H が 0.7 よりも大きい場合には、 C_D は静止時とほとんど差異はなく、 $B/H=1.0$ においては逆に小さくなっている。前述したように Lock-in 領域での物体の振動は、はく離せん断層の曲率を増大させ、かつ巻込みの規則性を促進させる効果を生み出す。そのために辺長比が 0.6 よりも小さい場合には、巻込み位置がより背面に近づくために背圧を増大させることとなる。しかし B/H が 0.7 よりも大きくなると、はく離せん断層の曲率の増大は側面への再付着を生じさせる、いわゆる After-Body 効果のために、 C_D は逆に小さくなるものと考えられる。

4.3 変動流体力特性 く形柱に作用する変動揚力は、側面に作用する変動圧力に支配される。したがって、側面の変動圧力の特性を調べることによって、変動揚力の特性を間接的に評価できる。図9は振幅比を $a/H=0.1$ と一定とし、強制振動数 S_v を種々変化させた場合における側面中間位置の変動圧力係数 C_{pf}

図9 無次元強制振動数 S_v の変化に対する変動圧 C_{pf}

図10 側面中心位置での圧力の変動波形

の rms 値の分布を示したものである。\$S_v\$ が小さい場合にはいずれの辺長比の \$C_{pf}\$ も静止時のそれに近いが、Lock-in 領域に近づくにしたがって減少している。しかし、\$S_v\$ が Lock-in 領域に至るといずれの辺長比の \$C_{pf}\$ も静止時のそれよりも大きくなり、特に \$B/H=0.5\$ では最大となっている。

図 10 は辺長比 \$B/H=0.5\$ および \$0.6\$ の側面中間位置での変動圧力の波形を示したものである。静止時には、大きな振幅と小さな振幅とを有するものが混在する形で不規則に出現している。しかし Lock-in 領域では、大きな振幅を有するもののみが極めて規則性をもって出現している。特に \$B/H=0.5\$ は \$0.6\$ に比べて、その規則性はより顕著なものとなっている。このような Lock-in 領域での \$C_{pf}\$ の増大は、その後方に放出される渦が極めて規則的に生成されることによるものと判断される。しかし現在のところ、Lock-in 現象発生時における規則性のある渦の生成がいかなるメカニズムによって促進されるものであるかは定かではない。

次に図 11 は、Lock-in 領域で \$C_{Lf}\$ が最も増大すると思われる辺長比 \$B/H=0.5\$ のく形柱について、代表的な強制振動周波数 \$S_v\$ に対する \$C_{Lf}\$ の rms 値を示したものである。この場合の振動振幅比は \$a/H=0.1\$ とした。また \$C_{Lf}\$ の具体的な算定に当たっては以下の方法によって行った。すなわち、基準信号とした強制振動 (Lock-in 現象に基づく \$C_{Lf}\$ の算出) と後流の変動速度 (非 Lock-in 現象に基づく \$C_{Lf}\$ の算出) の波形の一周期を 60~80 に等分割し、側面上の同期加算平均された変動圧力 \$<C_{pf}>\$ を等分割した各位相 \$\theta\$ ごとに面上に沿って積分することによって、次に示す式 (1) に基づいて、まず \$C_{Lf}(\theta)\$ を算出した。

図 11 \$B/H=0.5\$ における \$S_v\$ の変化に対する \$C_{Lf}\$

$$C_{Lf}(\theta) = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \{ [< C_{pf}(\theta, X_s) >]_{\text{upside}} + [< C_{pf}(\theta, X_s) >]_{\text{downside}} \} dX_s \dots\dots\dots (1)$$

この \$C_{Lf}(\theta)\$ の一周期に関して、次式を用いることによって算出した結果を図 11 に示す \$C_{Lf}\$ とした。

$$C_{Lf} = \left\{ 1/(2\pi) \int_0^{2\pi} [C_{Lf}(\theta)]^2 d\theta \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

図 11 から明らかなように Lock-in 領域以外では、強制振動および自然放出渦に基づくいずれの \$C_{Lf}\$ も静止時に比べて小さい。しかし Lock-in 領域では \$C_{Lf}\$ は急激に増大し、領域の中間付近で最大となっている。

次に図 12 は、Lock-in 領域で最大となる \$C_{Lf}\$ を各辺長比に対して示したものである。図 12 にはあわせて静止時における \$C_{Lf}\$ も示してある。時間平均抗力の場合には、辺長比が \$0.7\$ を超えると Lock-in 領域でのその最大値は静止時よりも小さくなるが、\$C_{Lf}\$ の場合にはいずれの辺長比においても静止時の場合よりもかなり大きくなっている。特に辺長比 \$B/H=0.5\$ における \$C_{Lf}\$ は最大となり、静止時のその \$2\$ 倍程度増大している。これは、静止時ではなく離せん断層の巻き込み位置が不規則に変化して不安定であるが、Lock-in 時ではその巻き込み位置が物体背面に最も近づく形で固定され、かつ規則性のある渦放出が行われることによる。またごく限定された辺長比ではあるが、図 12 中には本結果と同一の振幅比 \$a/H=0.1\$ における Nakamura ら⁽³⁾の測定結果を合せて示してある。Nakamura らの結果はストレングージ法によるものであるが、両者はかなりよい一致を示している。さらに静止時において、\$C_{Lf}\$ が最大となる辺長比は \$B/H=0.6\$ 付近であるが、

図 12 各 \$B/H\$ における Lock-in 領域での \$C_{Lf}\$ の最大値

振動時のそれは 0.5 となり、物体が振動する場合には臨界面面が変化することとなる。このことに関して、Nakamura らは時間平均背面圧力の結果から振動時の臨界面面を $B/H=0.4$ としている。Nakamura らは C_{pb} のみの変化から臨界面面 B/H を決定したが、本測定で得られた C_{Lf} , C_D および C_{pf} のいずれも $B/H=0.5$ で最大となっている。したがって振動時の臨界面面比は 0.5 と考えるのが妥当であると判断される。ただ両者のいずれの結果も振幅比が $a/H=0.1$ の場合であり、振幅比をさらに大きくした場合には、また異なった結果を生じることが考えられ、今後の研究課題である。

4.4 変動揚力のなす仕事 流れの中にあるく形柱が直角方向に振動する空力不安定現象は、その発生要因によって自励振動と渦励振との二つに分けられる。自励振動であるギャロッピングは、Lock-in 領域以外でも発生するものであり、その発生機構ならびに評価方法はほぼ確立されつつある⁽¹⁰⁾。しかし Lock-in 領域のみで発生する渦励振現象は渦放出に基づく非定常流体力によって支配されるが、非定常流体力に関するデータが非常に少ないために、その評価方法はいまだ確立されていない。本節では渦励振の要因である変動揚力のなす仕事に注目し、物体振動の励振ならびに減衰特性について調べるものとする。物体の振動が発散(負減衰)または収束(正減衰)かの評価は、変動揚力のなす仕事でできる。並進振動するく形柱の変動揚力に基づく仕事は、変動揚力と振動変位との積となる。いま変動揚力として $C_{Lf}(\theta)$ 、変位として Y/H を用いると、1 サイクルの無次元仕事 W は

$$W = \int_{-a}^a C_{Lf}(\theta) \cdot d(Y/H) \dots \dots \dots (3)$$

となる。具体的な 1 サイクルにおける変動揚力のなす仕事の正負の判別は、図 13 に示すように縦軸に $C_{Lf}(\theta)$ 、横軸に振動変位 Y/H を採用したリサージュ

図 13 $C_{Lf} \sim a/H$ リサージュ図形と仕事との関係

図形を描くことによって容易にできる。この場合、 $C_{Lf}(\theta)$ および Y/H いずれも上向きを正とし、I ~ VI は、それぞれ図 13 に示す位置に対応している。まず I ~ II の領域では、 $C_{Lf}(\theta)$ と Y/H の変化方向が同一であるために面積 0 I II III' で表せる仕事は正となる。II ~ III では両者の方向が逆になるために面積 II III' III は負となる。さらに III ~ IV では再び両者の方向が同一になるために面積 0 III IV は正となる。結果的に面積 II III' III は相殺されるために、リサージュ図形の右半分では面積 I II III IV で表される正の仕事のみが残る。またリサージュ図形の左半分では同じく面積 I IV V VI で示される正の仕事のみとなる。したがって、時計回りのリサージュ図形は正の仕事で、反時計回りのそれは負の仕事として算定されることとなる。

図 14 は辺長比 $B/H=0.5$ および 1.0 のく形柱の振

図 14 無次元振動数 S_v の変化に対する仕事 W

図 15 各 B/H における Lock-in 領域での仕事 W の最大値

動時における変動揚力のなす仕事 W を、各強制振動数 S_0 に対して示したものである。この場合の W は振幅比 $a/H=0.1$ としたときの強制振動に基づく渦放出によるものである。 $B/H=0.5$ の場合には、Lock-in 領域の大部分で正の仕事となっている。しかし $B/H=1.0$ の場合には Lock-in 領域では負の仕事となっている。次に図 15 は各辺長比に関して、Lock-in 領域での最大仕事 W の分布を示したものである。辺長比が $B/H<0.5$ なる場合には変動揚力は励振力として作用するが、 $B/H>0.6$ の場合には逆に変動揚力は振動を減衰させるように作用することがわかる。ただ変動揚力と振動変位の位相のわずかの相違によって仕事 W は正から負、あるいは負から正へと変化することから、振動振幅比 a/H の相違によって、図 15 に示す結果とは異なることも予想される。また本論文で求めた仕事 W は、振動を開始した $a/H=0.1$ なる振幅でのく形柱の正負減衰の評価を与えるが、他の振幅でのそれは定かでない。したがって、今後振幅比を変化させたより詳しい検討が必要とされる。

5. 結 論

本研究はく形断面を有する $B/H \leq 1.0$ なる角柱を、高さ H に対する振動振幅 a をおもに $a/H=0.1$ とし、流れと直角方向に強制振動させた場合の流体力の特性を調べたもので、以下の結論を得た。

(1) 辺長比 $B/H=0.3 \sim 1.0$ なる範囲でのいずれのく形柱においても、自然放出渦の周波数が強制振動周波数に近づくとそれに引き込まれる形で Lock-in 現象が発生する。Lock-in 現象が発生するとはく離せん断層の巻込み強さは強化され、かつ渦形成は規則性をもって行われる。

(2) Lock-in 領域の前では放出された自然渦は

強制振動に基づく後流のうねりに沿って流出し、あまり明確な渦列は形成されない。また Lock-in 領域の後では強制振動に基づく渦は、放出後合体して自然放出渦の周波数とほぼ同一の周波数を有する渦列を形成して後方へ流出する。

(3) 辺長比 B/H が 0.6 より小さいく形柱では、Lock-in 現象が発生すると時間平均ならびに変動流力のいずれも増大し、特に辺長比 $B/H=0.5$ において各種流体力は最大となる。

(4) 静止時で流体力が最大となる臨界面 B/H は 0.6 付近であったが、Lock-in 時のそれは 0.5 付近に移行する。これは辺長比 $B/H=0.5$ において、はく離せん断層の巻込み位置が固定され、かつ最も背面に近づくことによる。

(5) 一定の振幅 ($a/H=0.1$) で振動するく形柱への流体のなす仕事は、辺長比 B/H が 0.5 より小さい場合には正(励振力として作用)、 B/H が 0.6 より大きい場合には負(減衰力として作用)となる。

文 献

- (1) Otuki, Y., ほか 3 名, *J. Sound Vib.*, **34**-2 (1974), 233.
- (2) Nakamura, Y. and Hirata, K., *J. Fluid Mech.*, **208** (1989), 375.
- (3) Nakamura, Y. and Matsukawa, T., *J. Fluid Mech.*, **180** (1987), 171.
- (4) Bearman, P. W. and Obasaju, E. D., *J. Fluid Mech.*, **119** (1982), 297.
- (5) 中口・ほか 2 名, 航空学会誌, **16**-168 (1968), 1.
- (6) 坂本・ほか 2 名, 機論, **55**-516, B (1989), 2310.
- (7) Bearman, P. W. and Trueman, D. M., *Aeronaut. Q.*, **23**-3 (1972), 229.
- (8) 五十嵐, 機論, **50**-460, B (1984), 3185.
- (9) 大屋, ながれ, **10**-3 (1991), 210.
- (10) Parkinson, G. V., *Philos. Trans. R. Soc., A*, **269** (1971), 395.