柱状物体の断面形状がカルマン渦励振に与える影響*

小出 瑞康^{*1}, 高橋 勉^{*2}, 白 檉 正 高^{*2}

Influence of Cross-Sectional Configuration on Kármán Vortex Excitation

Mizuyasu KOIDE^{*3}, Tsutomu TAKAHASHI, Masataka SHIRAKASHI^{*3} Life Engineering Research Center, Niigata Sangyo University,
4730 Karuigawa, Kashiwazaki-shi, Niigata, 945-1393 Japan

The influence of cross-sectional configuration on Kármán vortex excitation was investigated experimentally using a circular, a semi-circular and a triangular cylinder with an equal height. The cylinders were supported elastically in a wind tunnel for a cross-flow oscillation test, with virtually equal effective mass, spring constant and damping factor. Although the “lock-in” of Kármán vortex shedding has been confirmed to occur on all three cylinders when a certain oscillation amplitude and frequency are given, the Kármán vortex excitation behavior of the elastically supported systems differs drastically among the three cylinders. The mechanism for the effect of the cross-sectional configuration on the Kármán vortex excitation is attributed to the movement of the separation point. In the case of the circular cylinder, the separation point moves forward and backward around the maximum height position synchronizing with the cylinder oscillation, thus the alternating lift force becomes higher. On the other hand, movement of the separation point is limited to the upstream arc for the semicircular cylinder and fixed at the downstream edge for the triangular cylinder.

Key Words: Vortex, Separation, Flow Induced Vibration, Kármán Vortex Excitation, Cross-Sectional Configuration, Lock-in

1. 緒 言

流れの中に円柱のような鈍い断面形状の柱状物体を置くと、カルマン渦が柱状物体の両側から交互に周期的に流出するため、柱状物体には流れと垂直な方向に周期的な流体力が作用する。柱状物体を支持する構造物の減衰が比較的小さく、このカルマン渦の周期的な流出に起因する流体力の周波数がその系の固有振動数に一致する時、柱状物体には大きな振動が発生する。この現象はカルマン渦励振と呼ばれ、基本的には線形系の共振現象の性格を有している。しかしながら、柱状物体の振動振幅が比較的小さい場合でも渦の流出に大きな影響を与える場合があり、この流れと柱状物体の振動との相互作用がフィードバックループを構成し、カルマン渦励振に非線形で自励振動的な性格を与えている。

このような自励的な振動発生メカニズムとして、船川⁽¹⁾は振動している物体表面の境界層の剥離点が物体の振動とともにその表面上を前後に振動することに着

目した。そして、一様な流れの中に弾性支持された円柱の励振機構について、フィードバックループの中に円柱の振動による後流の死水領域の強制振動が含まれるために共振状態のときにのみ正のフィードバックとなる自励振動であることをBirkhoffモデルを用いて論じている。

先に述べたように、カルマン渦励振は、周期的な渦流出に起因する流体力による構造物の振動と、その振動が渦流出に作用して変動流体力に与える影響とから構成されるフィードバックループにより生じる非線形的自励振動である。著者らは後者の作用のうち特に同期現象に着目し、機械的な加振装置を用いて柱状物体に任意の振動を与え、剥離点の移動状態が異なる円柱、半円柱、正三角柱を用いて断面形状が同期現象に与える影響を調べ、次のような結果を得た⁽²⁾。

流れの中で静止しているときには円柱の剥離点はほとんど移動せず、三角柱については下流の頂点に固定されている。しかしながら、柱状物体が流れと直交する方向に振動しているときには、剥離点の移動の様子が異なる。円柱では、剥離点は円柱の幅が最大になる点を含む範囲を円柱の振動に同期して前後に移動する。半円柱でも剥離点は半円柱の振動に同期して移動する。

* 原稿受付 2002年8月28日。

^{*1} 正員, 新潟産業大学生活工学研究所(☎945-1393 柏崎市経井川4730)。^{*2} 正員, 長岡技術科学大学工学部(☎940-2188 長岡市上富岡町1603-1)。

E-mail: mkoide@life-eng.nsu.ac.jp

が、その移動範囲は半円柱の上流側の円弧上に限られる。三角柱の場合は、正三角柱に振動を与えても、静止しているときと同様に剥離点は下流側の頂点に固定されている。そして、剥離点が固定している正三角柱でも、流れの中で振動させることで円柱の場合と同様に同期現象が発生することから、剥離点の移動は同期現象による結果であって同期現象の原因ではないことを示した。また、一定の振動数と振幅で柱状物体を振動させ流速を変化させたとき、流速の増加と減少による同期領域の違い、すなわちヒステリシス現象は見られなかった。

本研究では、カルマン渦励振のフィードバックループを構成する周期的な渦流出に起因する物体に作用する流体力に主眼を置いて実験を行う。剥離点の移動が柱状物体に作用する流体力に与える影響を調べるために、円柱、半円柱、正三角柱を片持ち梁の板ばねで弾性支持し、その振動挙動を調べた。このとき、柱状物体の代表長さ、固有振動数、構造減衰をほぼ等しくして実験を行った。

2. 主な記号

A	: 柱状物体の振幅 [m], $=\sqrt{2}Z_{rms}$
C_{Lo}	: 固定支持された柱状物体の揚力係数
C_{LR}	: 共振時揚力係数
d	: 柱状物体の代表長さ [m]
F_L	: 揚力 [N]
f_c	: 柱状物体の振動数 [Hz]
f_v	: カルマン渦流出周波数 [Hz]
f_{v0}	: 固定支持された柱状物体から流出するカルマン渦の流出周波数 [Hz]
m_e	: 有効振動質量 [kg]
$O-x,y,z$	: 直交座標系 (図1参照)
Re	: レイノルズ数, $=Ud/\nu$
U	: 主流速度 [m/s]
U_0	: $f_{v0}=f_c$ のときの流速 [m/s]
U_{Amax}	: カルマン渦励振による柱状物体の振動振幅が最大になる流速 [m/s]
u	: 柱状物体後流の流れ方向速度変動成分
Z	: 柱状物体の変位 [m]
δ	: 対数減衰率
ϕ_{uZ}	: u と Z の間の位相差
ρ	: 密度 [kg/m^3]
σ_ϕ	: ϕ_{uZ} の標準偏差

3. 実験装置および実験方法

実験で使用した風洞は吹き出し型で、測定部の寸法

は320(H)×320(W)×1000(L)である。主流速度 U は1.5～40 m/sで、測定部中央での相対乱れ強さは、 U が2 m/sのとき0.6 %以下、 U が10 m/sのとき0.4 %以下である。柱状物体は、図1に示すように、その中心軸が主流に対して直角になるように測定部中央に水平に設置される。

本研究で使用した円柱、半円柱、正三角柱を表1に示す。これらの柱状物体は、表1において左側を上流として風洞内に設置される。各柱状物体の代表長さ d は等しく ($d=26\times 10^{-3}$ m)、測定部に設置したときのブロック比はおよそ8 %である。

柱状物体を弾性支持する装置は、図1のように測定部の側壁の穴を貫通して外に出ている柱状物体の両端を片持ち梁の板ばねで支持する単純な構造である。測定部の側壁の穴を通る流れの影響は、柱状物体の両端に取り付けられたエンドプレートによって抑えられる^③。この支持方法において、板ばねの長さを z 方向の変位に比べて十分に大きくすれば、柱状物体の振動を鉛直方向 (z 方向) の並進運動と見なすことができ、減衰率、振動質量を低く抑えることができる。このように測定部に支持された柱状物体を静止空气中で自由減衰振動させ、固有振動数 f_n 、有効振動質量 m_e 、対数減衰率 δ を求めた。表1に各柱状物体の m_e を示す。

柱状物体の変位 Z はレーザー変位計で測定した。 Z のR.M.S.値 Z_{rms} を求め、これを $\sqrt{2}$ 倍して振動振幅 A とした。本実験では柱状物体の両端を板ばねによって弾性支持しているため、柱状物体の振動に並進運動だけでなく横揺れの回転運動が含まれる可能性がある。したがって、柱状物体の両端でその変位を測定し、両者が常に一致していることから回転運動が含まれていない

Fig. 1 Arrangement of the experimental apparatus and the coordinate system

Table 1 Cross-sectional configuration and effective mass of the test cylinders ($d = 26 \times 10^{-3}$ m)

	Circular cylinder	Semi-circular cylinder	Triangular cylinder
Effective mass [kg]	53.7×10^{-3}	50.1×10^{-3}	50.7×10^{-3}
Cross-sectional configuration			

Flow direction: from left to right

ことを確認した。

固定支持された柱状物体に働く変動揚力 C_L を測定するために荷重変換器を用いた。荷重変換器の最大測定荷重は0.98 Nである。柱状物体は、その両端を測定部の外側で二つの荷重変換器によって固定支持される。二つの荷重変換器によって得られた信号を加算回路に通して加算し、柱状物体に働く変動揚力のR.M.S.値 $(F_L)_{rms}$ を測定した。

風洞の主流速度 U の測定には、特に低流速域での再現性を保証するためにリング流速計⁽⁴⁾を用いた。柱状物体から流出するカルマン渦の流出周波数、周期性などを調べるために、柱状物体後流でカルマン渦の流出にともなう主流方向(x 方向)の速度変動 u を二つの熱線流速計を用いて測定した。各熱線プローブの位置は、表1に示される各柱状物体の原点 O から x 方向(主流方向)に $2d$ 、 z 方向(柱状物体の振動方向)に $1d$ である。また、二つのプローブの間隔は $4d$ である。

カルマン渦の流出周波数 f_v を調べるために、熱線流速計で測定された u をFFT解析する。 u には乱れに起因する変動が多く含まれるため、FFT解析で得られた速度変動スペクトル S_u を周波数成分ごとに20データの平均をとる。その中で卓越した成分を f_v とした。同様に、 u と Z の位相差 ϕ_{uz} の平均値とその標準偏差 σ_ϕ も20データから求めた。

二つの熱線プローブから得られる速度変動信号から相互相関係数 R_{uu} を求めた。各柱状物体によってその傾向は異なるが、同期現象の発生にともなって R_{uu} は増加し、カルマン渦の2次元性が向上したことを示す⁽²⁾。本論文では R_{uu} の増加を4章でのカルマン渦励振発生の判断基準の一つとした。

4. 実験結果および考察

4.1 カルマン渦励振挙動 図2~4に、円柱、半円柱、三角柱を図1に示すように流れに向かって配置した一枚板ばねで弾性支持し、主流速度 U を変化させた場合の実験結果を示す。この実験では、柱状物体の固

Fig. 2 f_v , A/d , ϕ_{uz} and σ_ϕ versus U for the circular cylinder. $f_n = 16.93$ Hz, $\delta = 0.00958$. (Closed symbols: U increased, open symbols: U decreased)

有振動数 f_n と柱状物体が固定されている場合のカルマン渦の流出周波数 f_{v0} が一致するときの流速 U_0 を含む範囲で、 U を増加させてから減少させた。図2~4の(a)にカルマン渦流出周波数 f_v と無次元振動振幅 A/d を示す。また、比較のために f_{v0} も示した。図中の U_{Amax} は、柱状物体の振動振幅が最大になる流速を表している。図2~4の(b)には、柱状物体後流での流れ方向速度変動 u と柱状物体の変位 Z の位相差 ϕ_{uz} とそのばらつきを標準偏差 σ_ϕ で示した。図中、黒塗りプロットが U を増加させたとき、白抜きプロットが U を減少させたときの結果を表している。また、灰色に塗りつぶした部分は U を増加させたときの同期領域を示している。

図2は円柱の実験結果を示している。図2(a)に見られるように、 U の広い領域で f_v が f_n にほぼ一致し続ける同期現象が発生している。この同期現象が発生する流速範囲では柱状物体が大きく振動しており、円柱の振動変位 Z の卓越周波数成分が f_n であることから、この振動がカルマン渦励振であることが確認される。

円柱のカルマン渦励振による振幅はきわめて大きく、 A/d は0.4に達する。また、 U を増加させると $U = U_0$ で円柱が振動しはじめ、 U の増加にともなって A/d が増加しカルマン渦励振が発生する流速領域のほぼ中央で最大

Fig. 3 f_v , A/d , ϕ_{uZ} and σ_ϕ versus U for the semi-circular cylinder. $f_n = 16.86$ Hz, $\delta = 0.0116$. (Closed symbols: U increased, open symbols: U decreased)

に達する。線形の振動系では系の固有振動数と外力の周波数が一致するとき振動振幅が最大になる。しかしながら、図2の円柱のカルマン渦励振では、 $f_n = f_{v0}$ となると、すなわち、 $U = U_0$ で円柱の A/d は最大にならない。これは円柱に働く揚力が U^2 に比例することを考慮しても説明できず、円柱の振動がカルマン渦の流出に影響することで、カルマン渦励振発生時に円柱に働く流体力と静止円柱に働く流体力が異なるためだと考えられる。

U を増加させた場合、円柱は $U = U_0$ で振動しはじめ、 U をさらに大きくするとカルマン渦励振は終息する。続けて U を減少させた場合、 U を増加させたときにカルマン渦励振が終息した U よりも低い U でカルマン渦励振が発生するヒステリシス現象が見られる。 U をさらに減少させると $U = U_0$ でカルマン渦励振が終息し、 U の低い側ではヒステリシス現象は見られない。円柱を機械的な加振装置によって振動させた場合、同期現象は U_0 をはさんで低流速側と高流速側で発生する⁽²⁾が、円柱のカルマン渦励振は $U \geq U_0$ でのみ発生する。

図2(b)に速度変動 u と円柱変位 Z の位相差 ϕ_{uZ} 、およびその標準偏差 σ_ϕ を示す。 ϕ_{uZ} は U_{Amax} 付近でおよそ π 変化しており、円柱の振動に対する渦流出のタイミングが

Fig. 4 f_v , A/d , ϕ_{uZ} and σ_ϕ versus U for the triangular cylinder. $f_n = 17.03$ Hz, $\delta = 0.0141$. (Closed symbols: U increased, open symbols: U decreased)

反転したことを示している。 σ_ϕ は ϕ_{uZ} のばらつきを表しており、カルマン渦の流出と円柱の振動の関係がどの程度安定しているかを示している。カルマン渦励振が発生している流速領域では σ_ϕ が大きく減少する。これは ϕ_{uZ} がほとんど変化しないことを表しており、直接的に円柱の振動とカルマン渦の流出が「同期」していることを示す。 U に対する ϕ_{uZ} の変化を見ると、 ϕ_{uZ} は同期領域内の $U < U_{Amax}$ で連続的に、滑らかに減少し、およそ π 変化しているように見える。しかし、この ϕ_{uZ} の変化と同時に σ_ϕ は増加し、 ϕ_{uZ} が時間的に一定でないことを示している。したがって、 U に対する ϕ_{uZ} の変化は図2(b)に見られるような安定した連続的な変化ではないと考えられる。 $U > U_{Amax}$ では σ_ϕ は非常に小さく、カルマン渦の流出と円柱の振動の関係が非常に安定していることを示している。

図3に半円柱の実験結果を示す。半円柱でも円柱の場合と同様に、ある U の範囲で A の増大にともなう f_v の f_n への一致が見られ、カルマン渦励振が発生している。しかしながら、その代表長さ d 、有効振動質量 m_e 、対数減衰率 δ 、レイノルズ数 Re が円柱とほぼ同じであるにもかかわらず、半円柱の A/d は円柱の1/3である。

U を増加させた場合、 U_0 と U_{Amax} が一致しないことは

円柱の場合と同じである。カルマン渦励振時の U に対する A/d の変化は円柱と大きく異なり、 A/d が最大に達した後に振動が急に停止する。また、半円柱のカルマン渦励振は $U \leq U_0$ で発生して $U \geq U_0$ で終息しており、カルマン渦励振の発生領域が円柱の場合と大きく異なる。

U を増加させた場合には $U \geq U_0$ までカルマン渦励振が継続するが、 U を減少させた場合には同期領域のほぼ中央である U_0 までカルマン渦励振が発生しない。この半円柱のヒステリシス現象は円柱のそれよりも顕著で、円柱の場合に比べて再現性が非常に高い。

図3(b)に見られるように、位相差 ϕ_{uz} は同期領域内でほぼ一定であり、カルマン渦励振の終息とともに急激に変化する。これが同期領域の中央付近で位相変化が見られる円柱の場合と同じ現象であるかどうかは判断できない。 U が増加、減少の両方の場合について、振幅が大きい領域では、 α_ϕ が減少し、半円柱の振動とカルマン渦の流出がよく同期していることを示している。

三角柱も半円柱と同様に、実験条件は円柱とほぼ同じである。しかしながら、図4に示されるように、三角柱の A/d は円柱の約1/10である。三角柱のカルマン渦励振が発生する流速領域は円柱と半円柱に比べると狭く、明確ではないが、その同期領域は U_0 よりも低流速側にあるように見える。また、三角柱の場合には A が小さく、カルマン渦励振が発生する流速領域も狭いためヒステリシス現象の発生を確認できない。

図4(b)に見られるように、三角柱の ϕ_{uz} は U に対して直線的に変化しており、円柱、半円柱で見られた ϕ_{uz} の変化とは異なる。三角柱の場合、振幅が小さく振動の発生する流速範囲も狭いが、 α_ϕ が振動の発生とともに減少しており、同期現象が発生していることを示している。

このように、 U_0 に対するカルマン渦励振が発生する流速領域やその広さと振動振幅が最大となる流速は柱状物体ごとに大きく異なる。

4.2 柱状物体に働く揚力

4.2.1 固定支持された柱状物体に働く揚力 荷重変換器を用いて、固定支持された円柱、半円柱、三角柱に働く変動揚力 F_L を、主流速度 U を増加させながら、それぞれ測定した。測定した F_L から固定支持した柱状物体の揚力係数 C_{Lo} を求める。 F_L はカルマン渦流出周波数と等しい周波数で変動するが、その振幅は一定でなく、常に時間的に大きく変化している。したがって、 F_L のR.M.S.値 $(F_L)_{rms}$ を計算し、以下の式を用いて $(C_{Lo})_{rms}$ を求めた。

Fig. 5 Lift coefficient on stationary cylinder $(C_{Lo})_{rms}$ versus Reynolds number Re , Vickery; ——— , Bishop and Hassan; - - - , Keefe; for circular cylinder⁽⁵⁾. Shaded region shows range of Kármán vortex excitation experiments for circular cylinder in this study.

$$(C_{Lo})_{rms} = \frac{(F_L)_{rms}}{\frac{1}{2}\rho U^2 dl} \quad \text{..... (1)}$$

ここで ρ は空気密度、 d は柱状物体の代表長さ、 l は柱状物体の有効長さ($=0.318$ m)である。

図5に $(C_{Lo})_{rms}$ をレイノルズ数 Re に対してプロットした。灰色で塗りつぶした領域は、図2の円柱のカルマン渦励振実験を行った範囲を示している。比較のため、Vickery, BishopとHassan, Keefeが測定した円柱の $(C_{Lo})_{rms}$ を同時に示した⁽⁵⁾。本研究で測定された円柱の $(C_{Lo})_{rms}$ は、これらとよく一致していると言える。

半円柱と三角柱の $(C_{Lo})_{rms}$ が、 Re が増加してもほとんど変化しないのに対して、円柱の $(C_{Lo})_{rms}$ は Re の増加とともに増加し、 $Re \approx 8000$ で半円柱と三角柱の2~3倍になる。

4.2.2 カルマン渦励振発生時に柱状物体に働く揚力 カルマン渦励振発生時の F_L を評価するために、次に示す方法により共振時揚力係数 $(C_{LR})_{rms}$ を求めた。

弾性支持された柱状物体を線形の質量・ばね・減衰系と仮定し、 Z を柱状物体の変位量として運動方程式をたてると(2)式のように表される。

$$m_e \ddot{Z} + c\dot{Z} + kZ = F \quad \text{..... (2)}$$

ここで、 m_e は有効振動質量、 c は減衰係数、 k はばね定数である。 F はカルマン渦の流出にともなって柱状物体に作用する流体力であり、ここでは正弦的な交番力が作用していると仮定する。すなわち、

$$F = F_0 \sin(2\pi f_v t) \quad \text{..... (3)}$$

ここで、 f_v はカルマン渦の流出周波数である。(2)式と

(3)式から、同期現象発生時の強制振動の応答振幅 A を求める。ここで、同期領域内において厳密には f_v が f_n に一致していない⁽⁶⁾ことに注意する必要がある。本研究の柱状物体支持装置の減衰率が極めて小さいため、図6にみられるような共振点付近($f_v \approx f_n$)でのわずかな周波数のずれが $(C_{LR})_{rms}$ に大きな影響を与えと考えられる。したがって、 $f_v \neq f_n$ であることに注意し、(1)式を適用すれば、

$$(C_{LR})_{rms} = \frac{8\pi^2 m_c f_n^2 A \sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\zeta\eta)^2}}{\sqrt{2\rho U^2 dl}} \dots (4)$$

ここで、 η は振動数比 f_v/f_n 、 $\zeta (= \delta/2\pi)$ は減衰比である。(4)式を用いて4-1で示したカルマン渦励振発生時の円柱、半円柱、三角柱に働く $(C_{LR})_{rms}$ を求めた。

柱状物体の無次元振動振幅 A/d に対して、 U を増加させたときの $(C_{LR})_{rms}$ をプロットしたものを図7に示す。図中の矢印は、円柱の場合についての測定の順を示している。また、○と□はKhalakら⁽⁶⁾と林ら⁽⁷⁾がカルマン渦励振発生時に円柱に働く揚力を直接測定して求めた $(C_{LR})_{rms}$ である。

本研究の線形解析で得られた円柱の $(C_{LR})_{rms}$ とKhalakらと林らの実測値は、 U の増加にともなって振幅が増加する領域の $A/d < 0.2$ でよく一致している。しかしながら、 $A/d > 0.2$ では差が大きくなり、 $A/d > 0.4$ でこれらの三者は大きく異なる。この原因として、(4)式のような線形の仮定には限界があると考えられるが、物体と流体の質量比および揚力の測定方法が異なることも考えられる。

図5に示した柱状物体が固定支持されているときの $(C_{L0})_{rms}$ に比べて、円柱、半円柱の $(C_{LR})_{rms}$ が振幅の増加にともなって大きくなっていることがわかる。三角柱の $(C_{LR})_{rms}$ にはほとんど変化が見られない。固有振動数 f_n と対数減衰率 δ はどの柱状物体でもほとんど同じであるが、各柱状物体の $(C_{LR})_{rms}$ の最大値はそれぞれ大きく異なる。円柱の $(C_{LR})_{rms}$ の最大値は三角柱の10倍程度である。

$(C_{LR})_{rms}$ の最大値は三角柱、半円柱、円柱の順に大きくなっているが、これは振動している柱状物体のまわりの流れを可視化して得られた各柱状物体の剥離点の移動状態⁽²⁾とほぼ対応している。剥離点移動が大きい円柱では $(C_{LR})_{rms}$ 、 A/d が共に大きくなるが、剥離点がほとんど移動しない三角柱ではそれらはきわめて小さい。

4.3 カルマン渦励振の発生領域 弾性支持された柱状物体のカルマン渦励振の発生領域を調べた。各柱状物体でカルマン渦励振の規模が大きく異なるため、

Fig. 6 Details of vortex shedding frequency f_v and oscillation frequency f_c of circular cylinder in Kármán vortex excitation region

Fig. 7 Lift coefficient C_{LR} for oscillating cylinder versus non-dimensional oscillation amplitude A/d under Kármán vortex excitation, when U increases. —○—, Khalak and Williamson⁽⁶⁾, —□—, K. Hayashi et al.⁽⁷⁾

カルマン渦励振の発生と判断基準を明確にする必要がある。本研究では振動の発生だけでなく、渦流出の周波数、カルマン渦の軸方向の2次元性、およびカルマン渦の強さと柱状物体の振動の関係を考慮した次の四つの条件をカルマン渦励振の発生の判断基準とした。すなわち、1) 柱状物体の振動振幅の増加、2) $f_v \approx f_n$ 、3) 後流速度変動 u と柱状物体変位 Z の相互相関係数の増加、4) 柱状物体の長手方向に離れた2点での u の相互相関係数の増加である。この四つのすべての条件が満たされた場合をカルマン渦励振の発生、すなわち”Lock-in”，四つの条件がどれも満たされなかった場合を”No Lock-in”，それら以外の場合を”Transition”とした。三角柱では、条件の2)と3)をみたすが、振幅の増加が円柱、半円柱に比べて非常に小さく、また振動も安定しないことから、条件の1)をみたさない。したがって、三角柱では”Transition”のみとした。

実験結果を図8に示す。横軸は固定支持されている

Fig. 8 Lock-in region on a plane of frequency ratio f_{v0}/f_c , f_{v0}/f_n and non-dimensional amplitude A/d . Elastically supported {●: Lock-in, ▲: Transition, +: No Lock-in}; Controlled oscillation⁽²⁾ {○: Lock-in, △: Transition, ×: No Lock-in}

柱状物体における渦流出周波数 f_{v0} に対する柱状物体の振動数の比、縦軸は無次元振幅 A/d である。円柱の弾性支持実験では渦電流ダンパーを用いて、減衰率を変えて行ったいくつかの実験結果をプロットした。また、比較のために柱状物体を機械的な装置で加振した場合の同期領域⁽²⁾を同時に示した。柱状物体を加振した場合、 f_{v0}/f_c と A/d に対してどの柱状物体でもほぼ同じ範囲で同期現象が発生しているのに対して、柱状物体を弾性支持したときのカルマン渦励振の発生領域は柱状物体ごとに大きく異なる。

弾性支持円柱の場合、半円柱と三角柱に比べて、カルマン渦励振の発生領域がきわめて広く、また、振幅も大きい。しかしながら、その発生領域は $f_{v0}/f_n > 1$ のみに見られる。また、カルマン渦励振の発生領域は加

振実験で得られた同期領域よりも広い。一方、半円柱と三角柱では弾性支持実験のカルマン渦励振発生領域は加振実験で得られた同期領域内にあり、予測された結果であると言える。カルマン渦励振の発生領域が加振実験で得られた同期領域よりも広い原因として次のようなものが挙げられる。(1)弾性支持実験の U が一定でなく加振実験とは異なる、すなわち、レイノルズ数 Re が異なる。(2)加振実験では振幅一定の安定した正弦振動であるのに対し、弾性支持円柱の場合振動振幅のゆらぎが大きい。(3)柱状物体を片持ち梁で支持すると柱状物体の振動には柱状物体の迎え角変動が重畳する、などが考えられるが、本報告ではこの原因を明らかにするには至っていない。

5. 結 論

カルマン渦励振は、周期的な渦流出に起因する流体力による構造物の振動と、その振動が渦流出に作用して変動流体力に与える影響とから構成されるフィードバックループにより生じる非線形的自励振動である。前報⁽²⁾において、著者らは機械的な加振装置を用いて柱状物体に任意の振動を与え、振動が渦流出に与える影響について調べた。剥離点の移動状態が異なる円柱、半円柱、正三角柱を用いて断面形状が同期現象に与える影響を調べ、剥離点の移動は同期現象による結果であって同期現象の原因ではないことを示した。

本論文では、カルマン渦励振のフィードバックループを構成する周期的な渦流出に起因する物体に作用する流体力に主眼を置いて実験を行った。剥離点の移動が流体力の柱状物体への作用に与える影響を調べるために、前報⁽²⁾で用いたものと同じ円柱、半円柱、三角柱を片持ち梁の板ばねで弾性支持し、柱状物体の代表長さ、固有振動数、構造減衰などの実験条件をほぼ等しくしてその振動挙動を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 弾性支持されたすべての柱状物体でカルマン渦励振が発生した。柱状物体に機械的な装置で振動を与えた場合、どの柱状物体でもほぼ同程度の同期現象が発生する⁽²⁾。しかしながら、代表長さ、固有振動数、減衰率などの実験条件がほぼ同じであるにもかかわらず、これらの物体の振動挙動は大きく異なる。すなわち、カルマン渦励振時の半円柱の最大振幅は円柱の1/3、三角柱は1/10程度である。また、カルマン渦励振が発生する流速 U の範囲はこの順に狭くなり、円柱の場合、カルマン渦励振は固定支持された円柱から流出するカルマン渦の流出周波数と固有振動数が一致する流速 U_0 よりも高い流速範囲であるのに対し、半円柱ではカ

ルマン渦励振は U_0 の前後で発生し、三角柱の場合、 U_0 よりも低い流速でカルマン渦励振が発生する。

- (2) 柱状物体の変位とカルマン渦流出の位相差の評価に標準偏差 σ_ϕ を用い、カルマン渦励振時の位相の変化を明らかにした。カルマン渦励振の発生にともなう σ_ϕ が減少し、柱状物体の変位とカルマン渦の流出が同期することを直接的に示した。振幅が小さく同期の判別が難しい三角柱でも σ_ϕ の減少が見られ、カルマン渦励振が発生することを示した。
- (3) 流れの中に固定支持された円柱の場合、レイノルズ数の増加にともなう変動揚力係数が増加するが、半円柱と三角柱の変動揚力係数は円柱の場合よりも小さく、レイノルズ数によらずほぼ一定である。カルマン渦励振発生時における各柱状物体の最大揚力係数の差は固定支持よりも大きくなる。これは、その断面形状により振動による揚力係数の増加作用が異なるためである。すなわち円柱の場合は、振動により剥離点の移動が大きくなり、流出するカルマン渦の強さ、2次元性が向上する⁽²⁾ことで励振力が増加するが、半円柱の場合はこの効果が小さく、三角柱の場合は剥離点が移動せず変動揚力が大きくなる。
- (4) 柱状物体を加振した場合⁽²⁾、どの柱状物体でもほぼ同様な同期現象が発生するのに対して、柱状物体を弾性支持したときのカルマン渦励振の発生領域は柱状物体ごとに大きく異なる。半円柱と三角柱の場合、カルマン渦励振の発生領域は加振実験で得られた同期領域内にあり、妥当な結果であるといえる。しかしながら、円柱の場合はカルマン渦励振の発生領域が加振実験で得られた同期領域よりも広くなる。

最後に、本論文を執筆するにあたり、László

BARANYI氏にはアブストラクトの校閲をしていただいた。実験を遂行するにあたり当時学生の富田将司君に多くの協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 船川正哉, “流れの中の弾性支持円筒の励振機構”, 日本機械学会論文集, **35**, 270, (1969), pp.303-312
- (2) Mizuyasu KOIDE, Shouji, TOMIDA, Tsutomu TAKAHASHI, László BARANYI, Masataka SHIRAKASHI, “Influence of Cross-sectional Configuration on the Synchronization of Kármán Vortex Shedding with the Cylinder Oscillation”, Japan society of Mechanical Engineers International Journal, Series B, **45**, 2, (2002), pp.249-258
- (3) Ishida Y., Wakiya S. and Shirakashi M., “Higher velocity resonance of circular cylinder in cross flow”, Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering, **107**, (1985), pp.392-396.
- (4) 小出瑞康, 高橋勉, 白樫正高, “風洞実験における低流速測定を目的としたリング流速計の試作”, 日本機械学会論文集B編, **67**, 657, (2001), pp.1105-1111
- (5) Gartshore, I. S., “Some Effects of Upstream Turbulence on the Unsteady Lift Forces Imposed on Prismatic Two Dimensional Bodies”, *Journal of Fluids Engineering*, **106**, (1984), pp.418-424
- (6) Khalak A. and Williamson C. H. K., “Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping”, *Journal of Fluids and Structures*, **13**, (1999), pp.813-853
- (7) 林建二郎, 田中克也, 藤間功司, 重森利幸, “一様流中で渦励振動している円柱に作用する流体力に関する実験的研究”, 防衛大学校理工学研究報告, **34**, 2, (1997), pp.11-23