

振動する角柱まわりの流線と非定常流体力に 関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES OF FLOW PATTERNS AROUND OSCILLATING RECTANGULAR PRISMS AND THEIR UNSTEADY AERODYNAMIC FORCES

溝 田 武 人*・岡 島 厚**

By Taketo MIZOTA and Atsushi OKAJIMA

1. 序 論

地上または海中構造物の基本的な断面形状の1つである角柱の耐風安定性に関する研究の一環として、角柱まわりの剝離した流れの様相と流体力に注目して実験的研究を行った。すでに前報までに一様流中で静止させた角柱の断面比や迎角の変化に基づく、時間平均的な流れと流体力¹⁾ および後流に生ずる渦による変動流速や非定常流れ²⁾ を求め、さらに流れに直角方向に並進振動する角柱まわりの時間平均流れや非定常流れの特性と抗力・揚力との対応関係を求めた³⁾。

一方、共振流速付近の渦励振現象やさらに低い流速域における空力弾性的不安定現象については、たとえば後流の速度変動の位相特性と揚力との関係⁴⁾、前縁で剝離した剝離せん断層と上下面に沿う流れとの対応性⁵⁾、角柱の振動に伴って後縁で発生する二次渦との関連性⁶⁾、後流に入れたスプリッタープレートの角柱の応答振幅に及ぼす影響⁷⁾ など種々な観点から研究されている。

しかしながら、角柱が振動しているときの流れの様相はいまだ正確には知られておらず、特に無次元流速および加振振幅の変化に基づく流れの変化および流体力との対応関係についても明らかではない。

そこで本研究では、種々の無次元流速と加振振幅で一様流に対して直角方向に振動する断面比 1.0 および 2.0 角柱のまわりの非定常流線およびそれらの時間平均流線、さらに流速の位相差および角柱表面に作用する圧力を実験的に求めた。そして主として後流渦との共振流速域およびそれ以下の低流速域における角柱まわりの流れと流体力の相関に注目して考察した。

2. 実験装置および実験条件

実験に使用した風洞は、前報までと同様に高さ 3.0 m、幅 0.7 m、長さ 2.0 m の測定部をもつ九州大学応用力学研究所のエッフェル型風洞である。流速および揚力測定用の $D/H=1.0$ 角柱は長さ $D=150$ mm、高さ $H=150$ mm、 $D/H=2.0$ 角柱は $D=300$ mm、 $H=150$ mm の寸法である。圧力測定用 $D/H=1.0$ 角柱は $D=H=200$ mm、 $D/H=2.0$ 角柱は $D=360$ mm、 $H=180$ mm である。圧力測定用模型を大きくした理由は、無次元流速 $\bar{V}=U_{\infty}/F_1 H$ の低い流速域で圧力を精度よく測定できるため、および角柱内部の導圧管の配管など模型製作の都合のためである。ここで U_{∞} m/s は一様流速、 F_1 Hz は角柱の加振振動数である。しかし角柱の寸法を変えたため、 $D/H=1.0$ 角柱では静止角柱の後流渦 F_S Hz との共振流速 $\bar{V}_{CR}=U_{\infty}/F_S H$ が、 $D=H=150$ mm 角柱の $\bar{V}_{CR}=8.0$ から $D=H=200$ mm 角柱の $\bar{V}_{CR}=7.63$ へと若干相違した。角柱の閉塞率 (5%, 6.7%) やアスペクト比など実験条件の差と考えられるが、 $D/H=2.0$ 角柱では両角柱とも $\bar{V}_{CR}=12.0$ と同じであった。揚力や圧力の測定方法や結果はすでに文献 4) および 8) に詳述した。図-1 (a) には角柱の角の名称番号や角柱長さ D および高さ H 、角 1, (2) から剝離する $\psi_{1,2}=0$ の流線、再付着点 $X_{R.P.}$ 等を示す。さらに振動角柱と一緒に振動する動座標上における流速を測定するため、タンデム型熱線流速計プローブを角柱と一緒に振動させる加振装置を使った³⁾。角柱の振動変位 $Y_H(t)=A \cos 2\pi F_1 t$ に対して座標 (X, Y) 点の時間 t の流速は

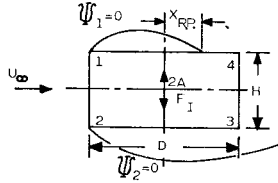
$$u, v(X, Y, t) = U, V(X, Y) + \hat{u}, \hat{v}(X, Y) \cos\{2\pi F_1 t + \phi_u, \phi_v(X, Y)\}$$

である。ここで A は角柱の加振振幅、 (X, Y) は位置でのおおの H で無次元化して $A/H, (X, Y)$ と記す。 $u,$

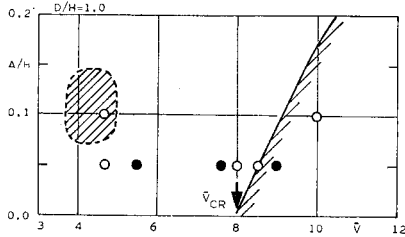
* 正会員 工修 九州大学助手 応用力学研究所
** 正会員 工博 九州大学助教授 応用力学研究所

表-1 振動角柱の流線の測定条件

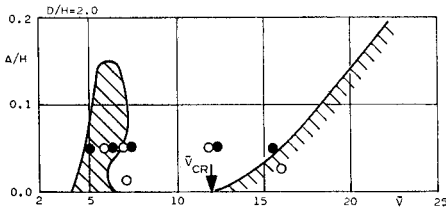
D/H	1.0					2.0				
	\bar{V}	10.0	8.52	8.00	4.66	4.66	15.93	12.0	7.0	7.0
A/H	0.10	0.05	0.05	0.10	0.05	0.025	0.05	0.05	0.0125	0.05
U_∞ m/s	6.90	6.95	6.90	4.19	4.19	9.56	6.75	6.90	6.33	5.40
F_I Hz	4.60	5.44	5.75	6.00	6.00	4.00	3.75	6.57	6.00	6.00
$R_e \times 10^4$	7.14	7.19	7.14	4.33	4.33	9.88	6.98	7.14	6.55	5.59
図番号	8, 17	8, 17	2, 8, 13	3, 8	4, 8	9	5, 9, 14	6, 9, 15	9	7, 9, 16



(a) 角柱の D, H, 角番号 1~4, $\psi_1 = \psi_2 = 0$ 流線, 再付着点 $X_{R.P.}$, 加振振幅 A, 加振振動数 F_I



(b) D/H=1.0 角柱の自由振動法による応答特性と流線 (○), 圧力分布 (●) の測定条件. 図中, 点線で示す不安定域は文献(4)に基づく推定領域.



(c) 同じく D/H=2.0 角柱の場合

図-1

v は X, Y 方向の流速, U, V は時間平均流速で十分上流の一様流速 U_∞ で無次元化する. \hat{u}, \hat{v} は F_I 成分の流速の振幅, ϕ_u, ϕ_v は u, v の変動流速の $Y_H(t)$ の運動を基準とした位相差であり, $Y_H(t)$ の約 50 周期分の u, v の測定データからフーリエ解析して求めた. $Y_H(t)$ の $2\pi F_I t$ における流線の値 $\psi(X, Y, t)$ は

$$\psi(X, Y, t) = \int_{Y_0}^Y u(X, Y, t) dY - \int_{X_0}^X v(X, Y, t) dX$$

により求める. ここで (X_0, Y_0) は角柱表面の座標を示す. ψ = 一定の位置を連続的に結んで非定常流線図が求まる. ただし, 実際の流線に

は u, v に高調波成分 \hat{u}, \hat{v} も加算されなければならないが, 求めた流線は平均流速と角柱の振動数成分の流速によって画かれていることを注意しなければならない. \bar{v} は時間平均流速 U, V から求めた時間平均流線である. 求められた時間平均流線から角柱後流で $U=V=0$ となる位置 $\bar{X}_{w.s.}$ を伴流よどみ点と称する. 表面圧力は $c_p(t) = \bar{c}_p + \bar{c}_p \cdot \cos(2\pi F_I t + \phi_p)$ と表わされるが, \bar{c}_p は平均圧力係数, \bar{c}_p は F_I 成分の振幅の圧力係数でおのこの $\bar{c}_p = (\bar{p} - p_\infty) / (1/2) \rho U_\infty^2$, $\bar{c}_p = \bar{p} / (1/2) \rho U_\infty^2$ と無次元化してある. ここで \bar{p} は平均圧力, p_∞ は一様流の静圧, \bar{p} は圧力の F_I 成分の変動振幅, ϕ_p はその位相差である. 流速の場合と同様に実際の表面圧力にはさらに高調波成分が加わっている.

なお参考までに, 本実験で行った加振振幅 A/H および無次元流速 \bar{V} の実験条件をすでに報告した自由振動法⁴⁾による角柱の応答特性図上に記して図-1(b), (c) に示す. 図には, 角柱を強制的に振動させて求めた圧力分布 (図中●印), 流線 (○) のおのこの A/H と \bar{V} を記入する. なお図の斜線部は角柱が空力弾的に不安定な領域である. レイノルズ数は $R_e = U_\infty H / \nu$ とし, ν は風洞気流の動粘性係数である. 流線および圧力分布の測定条件と図面番号をおのこの表-1, 2 にまとめて示す.

3. 実験結果

(1) 振動角柱まわりの流線

a) D/H=1.0 角柱まわりの流線

図-2(a)~(g) には D/H=1.0 角柱が加振振幅 A/H = 0.05 で, かつ静止角柱の後流渦との共振流速 $\bar{V}_{CR} = 8.0$ で振動しているときの流線 ψ を, 角柱振動の半周期

表-2 振動角柱の圧力分布の測定条件

D/H	1.0			2.0				
	\bar{V}	9.0	7.63	5.48	15.5	12.0	7.0	6.0
A/H	0.05			0.05				
U_∞ m/s	7.20	6.10	4.38	11.2	8.64	5.04	4.32	3.60
F_I Hz	4.0			4.0				
$R_e \times 10^4$	9.93	8.41	6.03	13.9	10.7	6.26	5.36	4.47
図番号	11	11, 13	11	12	12, 14	12, 15	12, 16	12

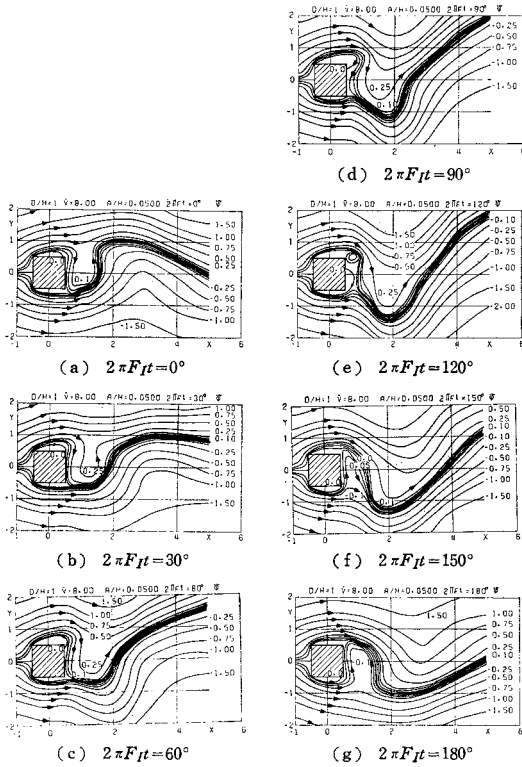


図-2 $D/H=1.0$ 角柱, $\bar{V}=\bar{V}_{CR}=8.0$, $A/H=0.05$ の流線

期 $2\pi F_I t=0^\circ\sim 180^\circ$ について 30° ごとに示す注1)。角柱振動の上死点 (a) $2\pi F_I t=0^\circ$ で角1から剥離した流れは、 $\psi_1=0$ 流線で示すように角4近くの上面で再附着しているが $2\pi F_I t=(c) 60^\circ, (d) 90^\circ$ と時間経過とともにその再附着点 X_{RP} は角4をまわり背面側へ移動し、 $\psi_1=0$ 流線で囲まれる領域は拡大する。(e) 120° では角4の後方に循環流が形成され、 $\psi_1=0$ は後流へ伸びており、 $\psi_2=0$ 流線が背面の角4側で閉じる。そして後流は大きく波打っている。

次に、共振流速 \bar{V}_{CR} の約 $1/2$ 付近の流れの例として、図-3 (a)~(g) に $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.1$ の流線を示す。共振流速からかなり低い流速域であるが、加振振幅が $A/H=0.1$ の場合には後流全域で角柱の振動数 F_I に同期しており³⁾、後流での流線の波打ちも激しく、角柱の振動の半周期内で上下面への流れの再附着が顕著に発生する。 $\psi_1=0$ の流線は、(a) $2\pi F_I t=0^\circ$ で $X_{RP} \approx 0.3$ の上面で再附着し、その再附着点は (b) $30^\circ\sim (d) 90^\circ$ と時間経過とともに角4側へと上面を移動し、(e) 120° では角4をまわって背面側へと移動する。一方角2からの $\psi_2=0$ 流線は、(c) $60^\circ\sim (d) 90^\circ$ では背面から離れて

注1) 図-2 の流線の値は角柱表面上を $\psi=0$ とし、それから順に $\psi=0, \pm 0.25, \pm 0.50, \pm 0.75, \pm 1.00, \pm 1.50$ について示す。後掲の時間平均流線 $\bar{\psi}$ についても同様である。

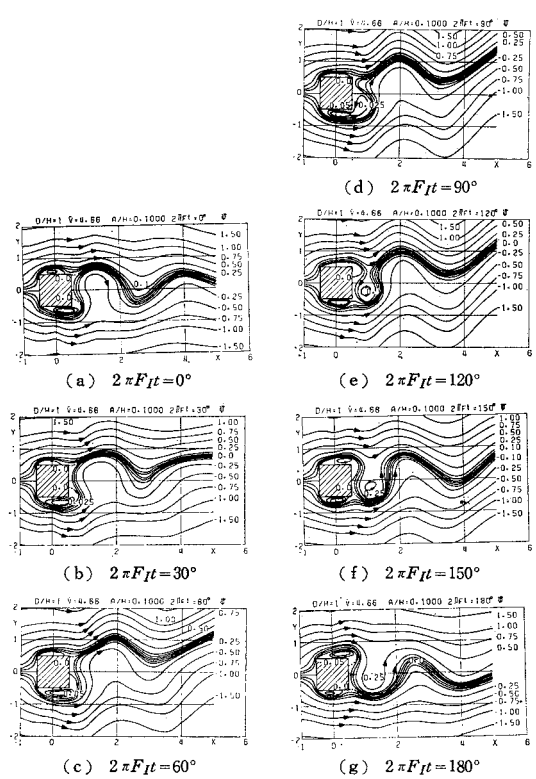


図-3 $D/H=1.0$ 角柱, $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.1$ の流線

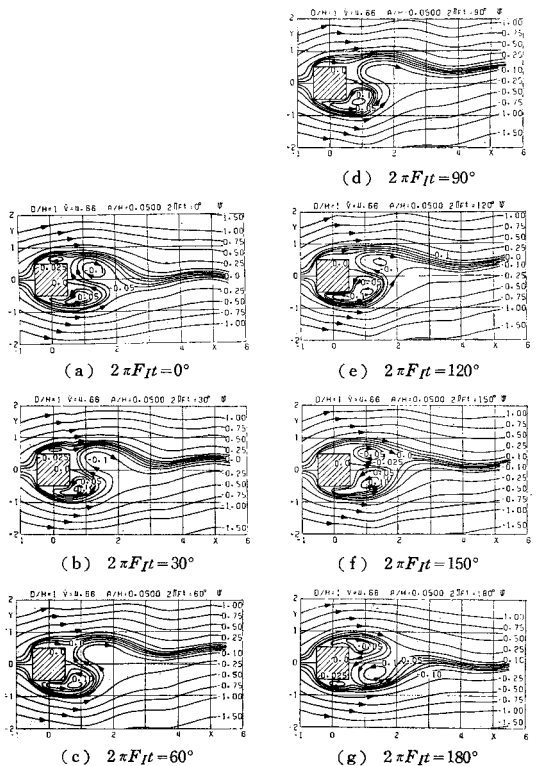


図-4 $D/H=1.0$ 角柱, $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.05$ の流線

下流側へ伸び、その内部の循環流は角柱背面側へ流れ出して、(e)120°~(f)150°の間に、後流へ吐き出されている。

次に、無次元流速は同一の $\bar{V}=4.66$ で加振振幅を1/2に減じた $A/H=0.05$ の流線を図-4(a)~(g)に示す。この振動条件では変動流速と角柱に加わる揚力の両者に、角柱の振動数 F_I と静止角柱後流の振動数 F_S の2つの振動数成分が存在し、 $X=2.5$ より後方の角柱の振動数成分のパワースペクトルは減衰していることはすでに報告した³⁾。流線 $\psi_1=\psi_2=0$ の上下面における再付着の発生は、前図の $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.1$ の場合とは異なり認められない。この場合まず (a) $2\pi F_I t=0^\circ$ で角4後方の $\psi=-0.1$ で表わされる循環流は (b)30°~(d)90°では上流および下流の $\psi=-0.1$ 流線と連続しているが、(e)120°では再び独立な循環流が現われる。そして (f)150°~(g)180°ではこの循環流の中心はむしろわずかに上流側へと逆に移動している。 $A/H=0.1$ の前図では循環流は角柱の振動に伴って下流側へ移動したが、図-4の $A/H=0.05$ では、角柱背面側、上下の循環流は前後に振動しながら渦を放出している。なお、この場合は非同期的場合の流れであって図-4は純粋に加振振動数 F_I 成分の流速のみからなる流線であり、実際の流れはさらに F_S 成分の流速によるものがこれに加算されていることに注意を要する。

b) $D/H=2.0$ 角柱まわりの流線

図-5(a)~(g)には $D/H=2.0$ 角柱の共振流速 $\bar{V}_{CR}=12.0$, $A/H=0.05$ の流れを示す。(a) $2\pi F_I t=0^\circ$ で $\psi_1=0$ 流線は角4の下方の角柱背面で閉じており、(b)30°, (c)60°と時間経過とともに背面を角3の方向へ下がる。それとともに (c)60°では角4の後方に明確な循環流が形成され、(e)120°では $\psi=-0.10$ の循環流にみられるように大きく発達する。そして (c)60°~(f)120°の間では、角柱背面から角4を上流側へ逆流する流れによって角4には上面側に後縁剝離が生じており、その剝離領域は角4後方の循環流が最も大きく発達する (e)120°でほぼ最大になる。

さらに、低流速域の流れとして図-6(a)~(g)に $\bar{V}=7.0$, $A/H=0.05$ の流線 ψ を示す。まず角2からの $\psi_2=0$ 流線は、(a)0°で背面に付着していたが (b)30°で下流側へ伸び、角3の後方 $(X, Y)=(1.27, -0.3)$ に中心をもつ小さな循環流を形成している。(c)60°では角3をまわる流れによってその循環流はさらに大きく発達し、(d)90°では $(X, Y)=(1.52, -4.2)$ へと移動し、(e)120°~(f)150°で角柱後方へと放出される。このとき (e)120°では、 $\psi_2=0$ 流線は角3近くの下面で再付着し、(f)150°~(g)180°ではその再付着点 $X_{R.P.}$ は下面を前縁側へと移動する。そしてこの振動条件では、上・下面の $\psi_1=\psi_2=0$ の流線のうち少なくとも一方または

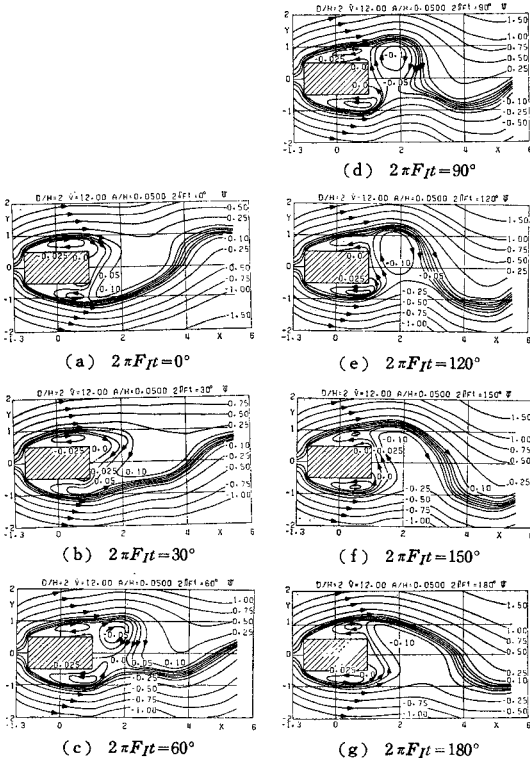


図-5 $D/H=2.0$ 角柱, $\bar{V}=12.0$, $A/H=0.05$ の流線

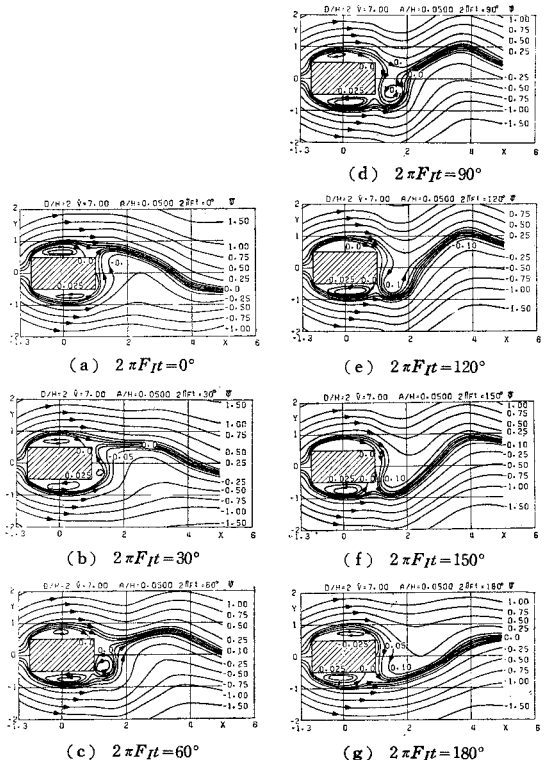


図-6 $D/H=2.0$ 角柱, $\bar{V}=7.0$, $A/H=0.05$ の流線

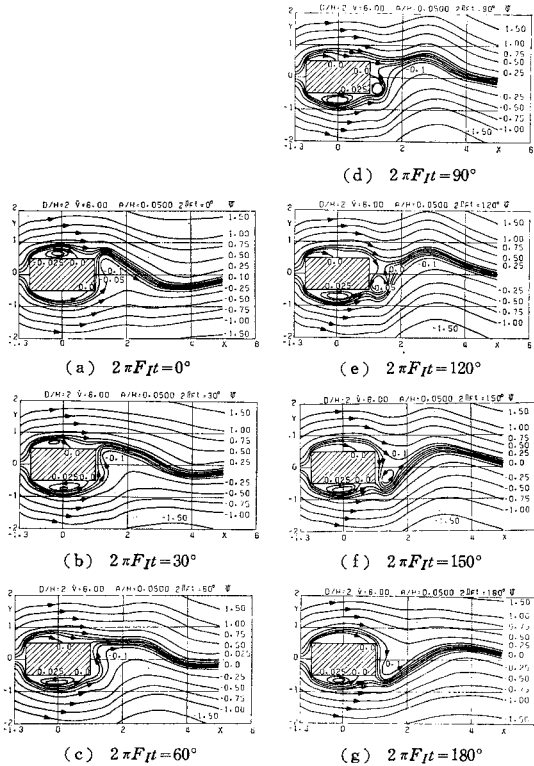


図-7 $D/H=2.0$ 角柱, $\bar{V}=6.0$, $A/H=0.05$ の流線

両方が角柱振動の1周期中で必ず上・下面で再付着している。

次にさらに低流速域で共振流速のちょうど1/2の流速である $\bar{V}=6.0$, $A/H=0.05$ の流線 ψ を図-7(a)~(g)に示す。このように低い \bar{V} では、角柱の振動に伴って一様流の相対迎角の最大値 α' は、(d) $2\pi Ft=90^\circ$ のとき、 $\alpha' = \tan^{-1} \frac{2\pi}{\bar{V}} \cdot \frac{A}{H} \approx 3^\circ$ の吹上げ角となるが、流れは図-7(d)で示すように、この迎角による準定常的な流れではなく、非定常性の増加により大きな位相遅れを呈している。

このように、振動角柱のまわりの非定常流線の観察¹⁹⁾から、 \bar{V}_{CR} 付近の流速域で、角柱背後に循環流が形成され、それらが角柱後方へと放出される過程と、 $1/2 \bar{V}_{CR}$ 付近の流速域で A/H が増すと上下面での流れの再付着が発生し、角柱振動に伴ってその再付着点が移動する様子および角柱後方の循環流の挙動などが明らかとなった。

c) 時間平均流線

$D/H=1.0$ 角柱まわりの時間平均流線：振動角柱まわりの時間平均流速から求めた時間平均流線 $\bar{\psi}$ について、 $D/H=1.0$ 角柱の $\bar{V}=10.0 \sim 4.66$, $A/H=0.1 \sim 0.05$ の場合を図-8(a)~(e)にまとめて示す。無次元流速 $\bar{V}=10.0$, 加振振幅 $A/H=0.1$ の図-8(a)によ

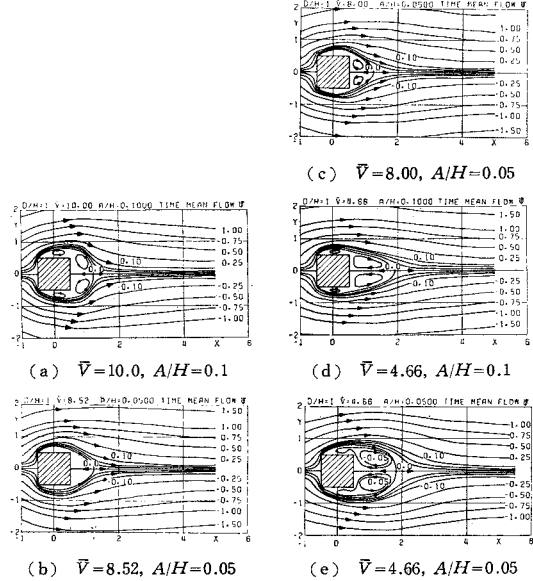


図-8 $D/H=1.0$ 角柱の時間平均流線 $\bar{\psi}$

れば静止角柱の伴流よどみ点 $\bar{X}_{w.s.}=1.50$ に比べ、 $\bar{X}_{w.s.}=1.20$ へと少し前進して、振動の影響はまず X 方向の剝離領域の長さの変化に現われるが、 $\bar{\psi}=0$ で示す Y 方向の最大幅は静止角柱 (1.58)¹⁾ とほぼ同一であり変化しない。図-8(b),(c)の $\bar{V}=8.52, 8.00$ の $A/H=0.05$ では、 $\bar{X}_{w.s.}=1.23, 1.25$ であり $\bar{V}=10.0$ とほぼ同一値を取り、 $\bar{\psi}=0$ で示す剝離領域の形状は変化して、角3, 4近くで曲率が減少し、この領域が狭くなるように Y 方向の幅に角柱の振動の影響が現われる。このような剝離領域の幅への振動の影響は、図-2に示したように $\bar{V}=8.0$, $A/H=0.05$ の非定常流線 ψ が上下面の後縁近くで角柱振動の1周期の中で再付着が生ずるためと考えられる。次に $\bar{V}=4.66$ の $A/H=0.10$ および 0.05 の場合には図-8(d),(e)に示すごとく剝離領域は $\bar{X}_{w.s.}=1.90, 1.80$ となり下流方向に伸びている。そして加振振幅を $A/H=0.1$ に増すと Y 方向の幅が狭くなる。 $A/H=0.1$ のまま $\bar{V} \approx 4.22$ まで流速を低下させると上下面の角3, 4付近から時間平均的に流れの再付着が始まる²⁾。 $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.05$ の場合は、図-4に示したごとく角柱振動の1周期中、上下面における流れの再付着はまったく認められないので、図-8(e)のように時間平均流線 $\bar{\psi}=0$ の Y 方向の幅は $\bar{V}=10$ と同様に静止角柱の値とほぼ同一である。しかし、図-3の流線変化で示したように、 $A/H=0.1$ では角柱振動の1周期のうち上・下面の後縁付近での流れの再付着時間が長くなるために、図-8(d)のように $\bar{\psi}=0$ の Y 方向の幅が著しく狭くなって現われる。

$D/H=2.0$ 角柱まわりの時間平均流線：次に断面比

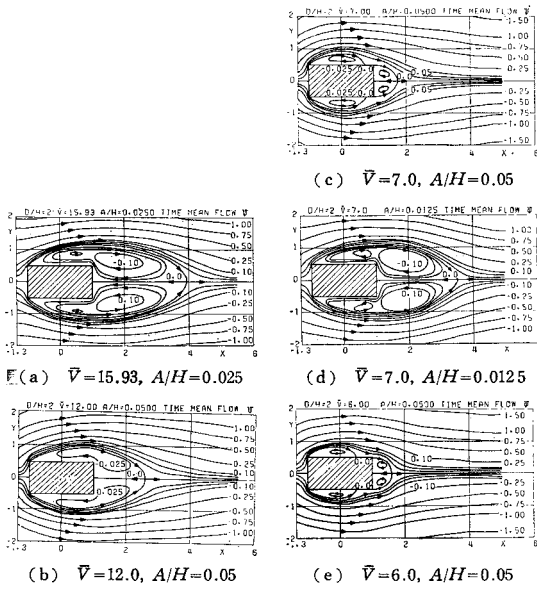


図-9 $D/H=2.0$ 角柱の時間平均流線 $\bar{\psi}$

$D/H=2.0$ 角柱の $\bar{V}=15.93\sim 6.0$, $A/H=0.0125\sim 0.05$ の時間平均流線 $\bar{\psi}$ を図-9(a)~(e) に示す。後流渦との共振流速 $\bar{V}_{CR}=12.0$ より高い $\bar{V}=15.93$, $A/H=0.025$ の図-9(a) は、 $\bar{\psi}=0$ で示す剥離領域の Y 方向の最大幅および X 方向の長さが静止角柱の値 (最大幅 2.22, $\bar{X}_{w.s.}=3.70$)¹⁾ とほぼ同一であることを示すが、 $\bar{V}_{CR}=12.0$, $A/H=0.05$ では図-9(b) のように X 方向の長さが $\bar{X}_{w.s.}\approx 2.54$ と急激に減少している。しかしさらに $\bar{V}=7.0$ と流速を低下させても $A/H=0.0125$ と加振振幅が小さいと、図-9(c) のように、 Y 方向の幅は $\bar{V}=12.0$ とあまり変わらず、 X 方向の長さは $\bar{X}_{w.s.}\approx 3.46$ と逆に静止角柱の値に近づく。 $\bar{V}=7.0, 6.0$, $A/H=0.05$ と流速をさらに低下させると図-9(c),(e) に示すごとく、角柱の上下面で時間平均的にも流れの再付着が発生し、 $\bar{\psi}=0$ で示す剥離領域の Y 方向の幅は狭くなる。上下面で時間平均的な再付着が発生するこの流速域での流速の低下に応じて、図-9(d), (e) の $A/H=0.05$ では $\bar{X}_{w.s.}$ は若干減少しているが、 $A/H=0.1$ で \bar{V} を細かく変化させた結果³⁾, $\bar{X}_{w.s.}$ は $D/H=1.0$ 角柱と同様、後退している。

このように、 $D/H=1.0$ および 2.0 振動角柱の時間平均流線の観察から、 $\bar{\psi}=0$ で示す剥離領域の形状が \bar{V} や A/H によって変化する様子がわかった。両角柱に共通する結論は、 \bar{V}_{CR} 付近では、剥離領域の X 方向長さが短くなること、 $\bar{V}_{CR}\sim 1/2\bar{V}_{CR}$ 付近では、振動の 1 周期中に後縁近くにおいて再付着が発生すると剥離領域の Y 方向の幅が狭くなること、さらに $1/2\bar{V}_{CR}$ 付近で、 \bar{V} の低下または A/H の増加により後縁で時間

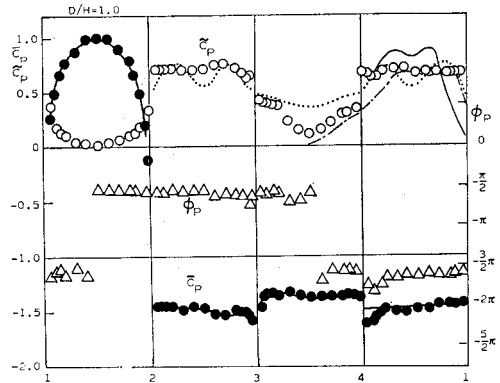
平均的な再付着が始まると、剥離領域の Y 方向の幅が狭くなり同時に X 方向長さは伸びる。

(2) 角柱表面の圧力分布

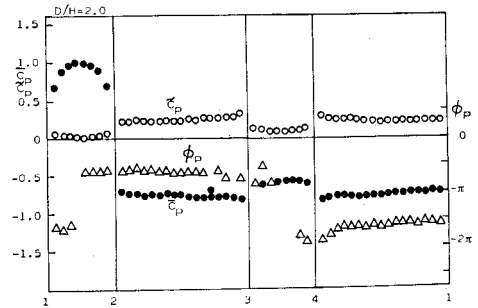
a) 静止角柱の圧力分布

まず図-10(a), (b) に $D/H=1.0$ および 2.0 角柱が静止している場合の平均圧力 \bar{c}_p , 変動圧力の振幅 \bar{c}_p および位相差 ϕ_p を示す。ただし位相差 ϕ_p は角柱後縁の角 3 から下方へ角柱高さ H だけ離れた位置、すなわち $D/H=1.0$ 角柱では $(X, Y)=(0.5, -1.5)$ で、 $D/H=2.0$ 角柱では $(X, Y)=(1.0, -1.5)$ における変動流速を基準とした。 \bar{c}_p と \bar{c}_p については 2 種類の Re 数 ($D/H=1.0$ 角柱では $6.9\times 10^4, 1.38\times 10^5$, $D/H=2.0$ 角柱では $6.2\times 10^4, 1.24\times 10^5$) について測定したが、本実験範囲では両角柱とも Re 数の違いはほとんど認められず、この程度の Re 数の違いによる影響はほとんどないといえる。

$D/H=1.0$ 角柱の \bar{c}_p は上下面では前縁から後縁に向け緩やかに低下し、後縁近くでは局部的にさらに低下する。上下面では全体として背面より 低圧である。 \bar{c}_p の値は上下面で大きくほぼ平坦な分布を示すが後縁付近で少し変化する。前面、背面の \bar{c}_p は中央部付近で低下す



(a) $D/H=1.0$ 角柱, $Re=6.9\times 10^4$



(b) $D/H=2.0$ 角柱, $Re=6.2\times 10^4$

図-10 静止角柱の表面圧力分布 (x 軸の番号は角番号を示す)

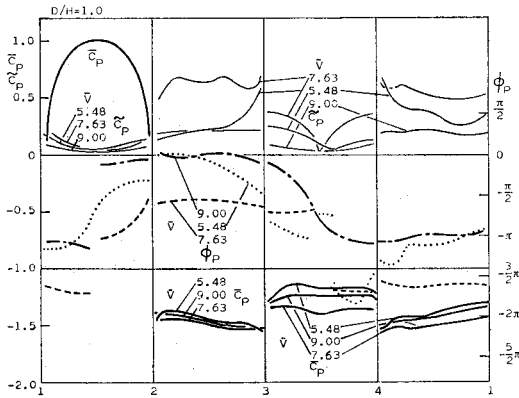


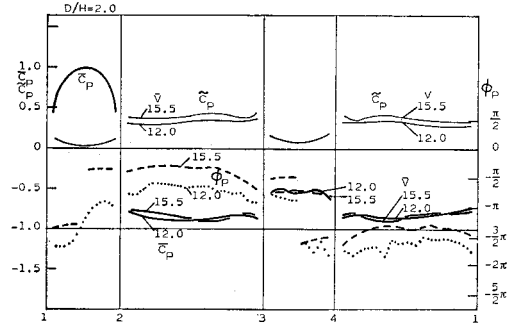
図-11 $D/H=1.0$ 角柱の表面圧力分布, $\bar{V}=9.0, 7.63, 5.48, A/H=0.05$

る。 ϕ_p は上下面で前縁から後縁に向け約 20° 遅れている。 これらを他の実験結果と比較すれば、 \bar{c}_p は Lee の値⁹⁾に近く、 Parkinson & Brooks¹⁰⁾ の値より少し高い。 そして Nakamura & Tomonari¹¹⁾ の値とは後縁付近で若干異なる。 \bar{c}_p は Chaplin & Shaw¹²⁾ の結果に近い。 次に $D/H=2.0$ 角柱の \bar{c}_p も $D/H=1.0$ と同様に前縁から後縁に向けわずかに低下しており、背面での値より全域として低い。 $D/H=1.0$ に比べ \bar{c}_p の値は回復しており、 \bar{c}_p の値も減少している。 上下面での ϕ_p は前縁から後縁に向け約 50° 遅れている。 両角柱とも背面での \bar{c}_p や \bar{c}_p と ϕ_p から求めた変動揚力の振幅を従来の実測値^{4), 13), 14)}等と比較した結果よく一致しており本圧力測定法は十分妥当といえる。

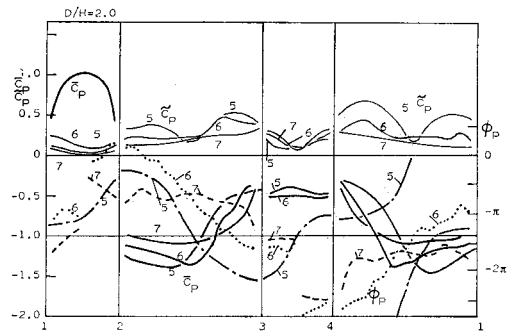
b) 振動角柱の圧力分布

図-11 には $D/H=1.0$ 角柱の共振流速付近の $\bar{V}=\bar{V}_{CR}=7.63, A/H=0.05$ における \bar{c}_p, \bar{c}_p および ϕ_p を $\bar{V}=9.0, 5.48, A/H=0.05$ の場合の値と比較して示す。 ただしこの場合静止角柱とは異なり位相差 ϕ_p は角柱の振動変位 $Y_H(t)$ を基準としたものである。 $\bar{V}=7.63$ の \bar{c}_p, \bar{c}_p はともに静止角柱の 図-10(a) のそれらの値および分布形状ともあまり大きな変化は認められない。 前面、背面での ϕ_p は、中央位置を境にほぼ 180° 変化している。 また上下面での前縁から後縁に向かう位相差の場所的变化は、 $\bar{V}=7.63, 9.0$ とともにあまり大きくない。 そして、 $\bar{V}=7.63, 9.0$ 両者比較して ϕ_p は上下面で局所的に変化するのではなく、 \bar{V} の変化に対し一様に 100° 程度平行移動している。 しかし、無次元流速の低い $\bar{V}=5.48, A/H=0.05$ の ϕ_p は上下面の前縁から後縁に向け 75° 程度遅れ、しかも局所的な遅れを呈する。 \bar{c}_p も前縁および後縁近傍で増大するように、 \bar{V}_{CR} 付近とは様相を異にする。

次に $D/H=2.0$ 角柱の共振流速 $\bar{V}=\bar{V}_{CR}=12.0$ と $\bar{V}=15.5$ の $A/H=0.05$ における \bar{c}_p, \bar{c}_p および ϕ_p を



(a) $\bar{V}=15.5, 12.0, A/H=0.05$



(b) $\bar{V}=7.0, 6.0, 5.0, A/H=0.05$

図-12 $D/H=2.0$ 角柱の表面圧力分布

図-12(a) に示す。 $\bar{V}=12.0$ では静止角柱 (図-10(b)) に比べ \bar{c}_p の値はほとんど変化しないが、 \bar{c}_p は上下面で 30% 程度増大している。 $\bar{V}=15.5$ の場合に比べ、 ϕ_p は上下面で一様に 70° 程度遅れている。 この様相は共振流速付近の $D/H=1.0$ 角柱の場合と同様である。 さらに共振流速よりも低い流速域の \bar{c}_p, \bar{c}_p および ϕ_p として、 図-12 (b) に $\bar{V}=7.0, 6.0, 5.0$ の $A/H=0.05$ の結果を示す。 \bar{V} の低い、 $\bar{V}=7.0$ の \bar{c}_p 分布は、 $\bar{V}=12.0$ のように平坦な分布ではなく、上下面中央付近から後縁に向け圧力回復の傾向を示す。 $\bar{V}=6.0$ では上下面前縁から中央付近の \bar{c}_p はさらに低下し、それ以後、後縁に向け急激な圧力回復を生じる。 一方 \bar{c}_p は $\bar{V}=7.0$ では上下面の前縁から下流に行くに従い徐々に増大し、 $\bar{V}=6.0$ では前縁と後縁に近いところの2か所に増大するところがあり、ほぼ再付着点付近 (図-9 (e)) で \bar{c}_p は小さくなる。 ϕ_p は \bar{V} を下げると、前縁から後縁に向け大きく遅れ、 $\bar{V}=6.0$ では 300° 以上の遅れを呈する。 このように低流速域で \bar{c}_p が上下面の中央付近から急激に回復し、 \bar{c}_p が上下面上の2か所で増大し、さらに ϕ_p が上下面上で大きな遅れを生ずる傾向は、 $\bar{V}=5.0$ ではさらに顕著になる。 図中、角 $2\sim 3, 1\sim 4$ ではおのおの $\phi_p=(\pi\sim 0, -\pi\sim -2\pi), (0\sim -\pi, -2\pi\sim -3\pi)$ となる範囲の \bar{c}_p と位相差 ϕ_p が角柱に正の仕事をする、いわゆる不安定側に寄与する。 その範囲は、

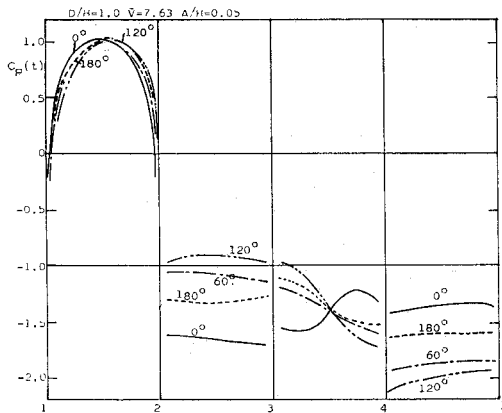
$\bar{V}=7.0$ では後縁側の一部であり、 $\bar{V}=6.0$ では前縁の狭い範囲と、 $X=(0.22\sim 0.29)\sim 1.0$ がこれに相当する。最後に、これらの圧力の測定結果から求めた角柱に加わる揚力の振幅、および振動変位からの揚力の位相差の値は、角柱に加わる揚力を直接測定した結果に比べ揚力の振幅が 20% 程度大きく、位相はほぼ一致していることを指摘しておく。両方の測定に使用した角柱の断面寸法の差によるアスペクト比の違いおよびスパン方向の圧力の相違のためであると考えられる。

$D/H=1.0$ および 2.0 振動角柱の圧力分布の測定結果から、両角柱に共通して以下のことがわかった。 \bar{V}_{CR} 付近では、 \bar{c}_p 、 \bar{c}_p および ϕ_p の上下面に沿う値の変化は小さく、平坦な分布形状を示し、この付近のわずかな \bar{V} の変化によってこれらの値は上下面上で平行に移動するごとく一様に変化する。 $1/2\bar{V}_{CR}$ 付近では上下面の \bar{c}_p は後縁に向け回復傾向を生じ、 \bar{c}_p は前後縁近くの 2 か所で増大し、 ϕ_p は後縁に向け大きな遅れを呈する。すなわち、 \bar{V} の低下に伴い、 \bar{c}_p 、 \bar{c}_p 、 ϕ_p の諸値は局所的に大きく変化する。

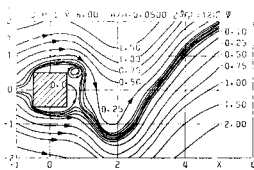
4. 考 察

(1) 流線と圧力分布の対応

図-13(a) には $D/H=1.0$ 角柱の共振流速 $\bar{V}=7.63$ 、 $A/H=0.05$ の場合につき、角柱の振動変位 $Y_H(t)=A/$



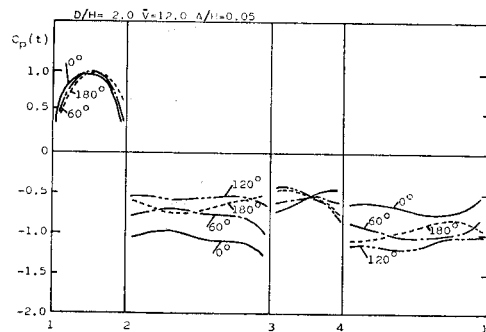
(a) 表面圧力分布の変化



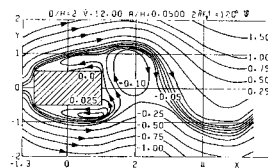
(b) $2\pi F_1 t=120^\circ$ の流線

図-13 $D/H=1.0$, \bar{V}_{CR} , $A/H=0.05$

$H \cdot \cos 2\pi F_1 t$ の位相角 $2\pi F_1 t=0^\circ\sim 180^\circ$ の間の 60° ほどの表面圧力係数 $c_p(t)=\bar{c}_p+\bar{c}_p \cdot \cos(2\pi F_1 t+\phi_p)$ の変化を示す。 $2\pi F_1 t$ の変化とともに上下面の圧力には局所の変化は認められず、ほぼ一様に平行移動するとき変化がみられる。これは 図-2 に示した角柱まわりの流線の、上下面に沿う大きな変化がないことと対応している。また、背面の上半分側(角 4 側)と下半分側(角 3 側)の圧力は上・下の値が逆転する。そして $2\pi F_1 t=120^\circ$ のとき、下面で圧力が回復し逆に上面で最低圧力に達し、結果として上向き最大の揚力が作用している。圧力分布から求めた揚力は振動変位から約 120° の位相遅れを呈しており、一方直接揚力を測定した結果によると 110° の位相遅れであり、両測定結果はほぼ一致している。そこで $2\pi F_1 t=120^\circ$ の流線を 図-13(b) に示し、そのときの圧力分布と比較する。この場合、角 4 の直後に明確な循環流が形成され、その付近の背面圧力および上面の圧力が低下していることとよく対応している。次に $D/H=2.0$ 角柱の共振流速 $\bar{V}=12.0$ 、 $A/H=0.05$ における $c_p(t)$ を 図-14(a) に示す。 $2\pi F_1 t$ の変化とともに上下面の圧力分布はほぼ一様に移動し、前面・背面も 図-13(a) の $D/H=1.0$ 角柱と同様の変化を示す。 $2\pi F_1 t=120^\circ$ では下面の $c_p(t)$ が最も回復し上面は逆に最低圧力となり、結果として上向き最大の揚力が作用しており、この場合にも直接測定した揚力の結果との一致はよい。このときの非定常流線を比較のため 図-14(b) に示す。すでに述べたように角 4 の後方に大きな循環流が形成されており、その循環流に最も近い背面の角 4 側の圧力が著しく低下しており、この場合にも非定常な圧力分布と流線のパターンがよく対応している。



(a) 表面圧力分布の変化



(b) $2\pi F_1 t=120^\circ$ の流線

図-14 $D/H=2.0$, \bar{V}_{CR} , $A/H=0.05$

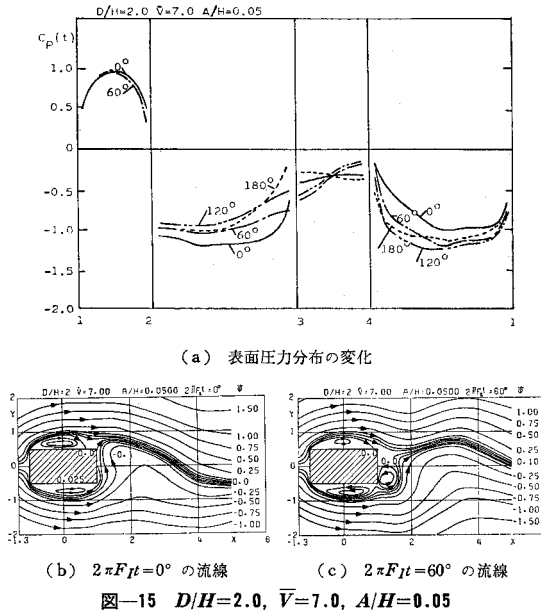


図-15 $D/H=2.0, \bar{V}=7.0, A/H=0.05$

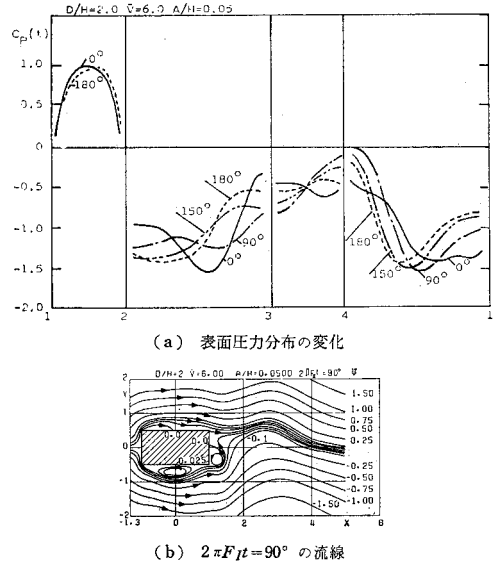


図-16 $D/H=2.0, \bar{V}=6.0, A/H=0.05$

ことがわかる。さらにこの $2\pi F_1 t = 120^\circ$ のときに背面から上面に逆流する流れにより、角4に生ずる剝離の規模は最も大きく、上面の圧力が最低になることとよく対応している。そしてこの循環流は $X=1.5\sim 2.5$ で生じているが、この位置は後流の変動流速のパワースペクトルの F_1 成分の大きさが最も大きくなる位置とほぼ一致している³⁾。

次に図-15(a)に $D/H=2.0$ 角柱の共振流速の $1/2$ 流速に近い $\bar{V}=7.0, A/H=0.05$ における圧力分布 $c_p(t)$ を示す。まず、 $2\pi F_1 t = 0^\circ$ の瞬間では上下面の圧力分布は上面の後縁側である角4に近い表面で回復が著しく、上下面の圧力差から揚力は下向き最大となる。このときの流線は、図-15(b)のごとく、上面での再付着点が最も上流側にあり、圧力分布にみられるように再付着点付近から下流側で圧力が回復していることとよい対応を示している。また角柱背面の圧力分布は $2\pi F_1 t = 60^\circ$ では、角3側で圧力は低下しており、このときの流線は図-15(c)のようにその近くに循環流が形成され圧力の低下とやはりよい対応をなしている。

さらに共振流速のちょうど $1/2$ の流速である $\bar{V}=6.0, A/H=0.05$ の $c_p(t)$ を図-16(a)に示す。 $2\pi F_1 t = 90^\circ$ のとき、上面の中央より後縁側での圧力回復が著しく、下向きの揚力が最大になる。また角柱背面の $c_p(t)$ は角3側で低下している。すなわち、角3後方に循環流が形成され、背面のその付近の圧力は低下しても、下面の角3付近の圧力は大きく低下していない。この場合、角3近くの下面に再付着の徴候があるためである。このような上面での圧力回復は、再付着点が上流側に移動していること、背面下側の圧力の低下はその近く

に循環流が形成されていることとそれぞれよい対応を示すことが図-16(b)からわかる。

(2) 流れの変化と揚力

まず共振流速 \bar{V}_{CR} に比較的近い流速域での流れの変化について、 $D/H=1.0$ 角柱の場合を示す。図-17(a)は共振流速に近い $\bar{V}=8.52, A/H=0.05$ 、図-17(b)は $\bar{V}=10.0, A/H=0.1$ の場合でそれぞれの角柱に上向き最大の揚力が作用しているときの流線図である。両図は、角2からの $\psi_2=0$ 流線が角3をまわって背面で閉じていること、および角4後方の流れは角柱の下面側からの流線の大きなまわり込みによって構成されているなどの点で共通しており、流線模様は \bar{V} が相違しているにもかかわらずほぼ相似な形状である。しかしそれぞれの流線の図に対する $2\pi F_1 t$ の値は、 $\bar{V}=8.52$ のとき 60° で $\bar{V}=10.0$ は -30° である。また揚力の位相は前者で $60^\circ\sim 80^\circ$ の遅れ、後者は $30^\circ\sim 40^\circ$ の進みを示し、流れの様相全体の $\bar{V}=10.0$ から $\bar{V}=8.52$ への遅れと、揚力の位相遅れがよく一致している。なお、図-1(b)に示したごとく、空力弾性的には、前者(a)は安定および後者(b)は不安定である。

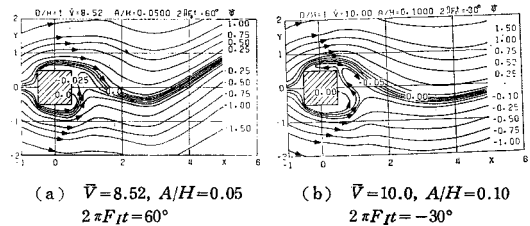
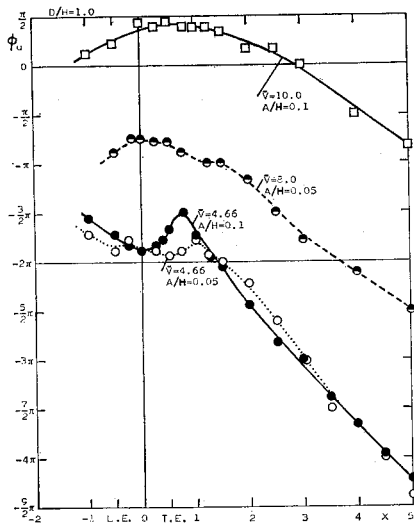


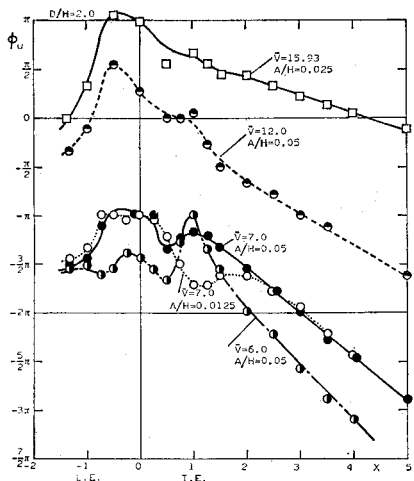
図-17 $D/H=1.0, \bar{V}_{CR}$ 付近の流線

渦励振現象時の特徴の1つとして、共振流速付近のわずかな流速の変化によって揚力の位相差が急変すること、角柱後流の適当な場所の1点における流速の位相差の急変がよく対応することをすでに報告した⁴⁾。また、低レイノルズ数 ($Re=80$) であるが並進振動する円柱まわりの流れにつき、数値計算による流れのパターンと揚力変化のよい対応を報告した¹⁵⁾。さらに非粘性渦点モデルによる角柱まわりの流れの数値解析によっても、共振流速付近のわずかな流速の変化に伴う流れのパターンの急変の様相が明らかにされた^{16), 17)}。本結果から、角柱の場合にも、 \bar{V}_{CR} 付近の \bar{V} の変化に対し、角柱まわりの流れ全体の位相が急変していることが明らかになった。

次に角柱の振動変位に対する流速の位相差 ϕ_u の変化



(a) $D/H=1.0$ 角柱



(b) $D/H=2.0$ 角柱

図—18 $Y=0.75$ における流速 u の位相差 ϕ_u の X 方向推移

を 図—18 (a), (b) に示す。図には剝離せん断層や後流域の u の振幅 \hat{u} が比較的大きい $Y=0.75$ 上における流速変化の位相差 ϕ_u を示す。 $D/H=1.0$ および 2.0 の両角柱とも、後流の $X=2.5\sim 5.0$ で ϕ_u は、加振振幅 A/H によらず、直線的に変化し、この勾配から定まる位相速度は一定である。角柱の上下面や $X=2.0$ 付近までの角柱に比較的近いところについては、まず $D/H=1.0$ 角柱では、 $\bar{V}=10.0$ と $8.0(=\bar{V}_{CR})$ での ϕ_u は $X=-0.5$ (前縁) ~ 1.0 の範囲の全域で \bar{V} の違いによって 180° 以上一様に平行移動しているごとく遅れている。そして $1/2 \bar{V}_{CR}$ に近い、 $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.05$ では、全体的にはさらに遅れは大きくなる。局所的にみれば $X=0.25\sim 0.5$ (後縁) ~ 1.0 の範囲で ϕ_u は比較的平坦かまたは後縁付近でわずかに他の部分より遅れを示す分布であるが加振振幅を2倍の $A/H=0.1$ に上げると、後縁付近の $X=0.25\sim 1.0$ の範囲のみ ϕ_u は最大 90° の進みを示す。ここで指摘した $X=0.25\sim 1.0$ 以外の範囲では、 $A/H=0.05, 0.1$ とほぼ同一の ϕ_u を呈している。 $\bar{V}=4.66$, $A/H=0.05$ では角柱後流は同期しておらず、 $A/H=0.1$ では同期している。このように、非同期時であっても後流の加振成分の位相差 ϕ_u は、同期の場合とほぼ同じ挙動を呈する。また流線の変化をみると、この \bar{V} 付近で $A/H=0.1$ に加振振幅を増すと後縁付近で再付着が発生しており、再付着は局所的に流速の位相を進ませる効果があることがわかる。この場合、図—1(b)のごとく $A/H=0.05$ のとき角柱は空力弾性的に安定、 $A/H=0.1$ のとき不安定であり、後縁付近の流れの再付着によって生ずる揚力の位相差の変化が角柱の不安定性に大きく寄与しているといえる。

さらに $D/H=2.0$ 角柱の場合には、図—18(b) に示すように、まず $\bar{V}=15.93$ から $\bar{V}=12.0(=\bar{V}_{CR})$ へと流速を低下させると、 \bar{V} の相違により $X=-1.0$ (前縁) ~ 1.0 (後縁) の全域で ϕ_u は約 90° 一様に遅れている。さらに低流速域の、 $\bar{V}=7.0$ で $A/H=0.0125$ と、 $A/H=0.05$ を比較すると、図—18(a) の $D/H=1.0$, $\bar{V}=4.66$ の A/H の変化に対する ϕ_u の変化と同様な傾向が認められる。すなわち後縁付近の $X=0.6\sim 2.0$ の範囲で、 $A/H=0.0125$ の場合の ϕ_u は $X=1.0$ (後縁) 付近で若干の遅れを示す分布形状から、 $A/H=0.05$ に加振振幅を増すと、後縁付近のみ他の部分より位相進みを呈し、他の X の範囲ではほとんど A/H による変化がみられない。この場合、流線変化をみると、 $\bar{V}=7.0$, $A/H=0.0125$ で後縁付近で再付着が発生せず、 $A/H=0.05$ で $X_{R,P}=0.75\sim 1.0$ の範囲で再付着が発生している。そして前者で角柱は安定、後者で不安定であり、 $D/H=1.0$ の $\bar{V}=4.66$ の場合と同様である。さらに低流速の $\bar{V}=6.0(=1/2 \bar{V}_{CR})$, $A/H=0.05$ では $X=0.6$

~2.0 において ϕ_u が進み側へと大きく変化し、他の X の範囲では、 ϕ_u は $\bar{V}=7.0$ での値に対してほぼ一様に 90° 程度遅れている。 $\bar{V}=6.0$ では時間平均的な後縁付近での流れの再付着点は、 $\bar{V}=7.0, A/H=0.05$ に比べ、さらに前縁側へと移動することにみられるように、再付着する範囲が増大し、この範囲での ϕ_u の進み側への変化も大きい。すでに、図-12(b) の圧力分布で示したように、 $\bar{V}=6.0, 7.0, A/H=0.05$ で空力弾性的に不安定になるのは、上下面の後縁付近の圧力の位相差 ϕ_p による寄与であった。 $D/H=1.0, 2.0$ 角柱の低流速域では、このように角柱振動の一周期中に起こる後縁付近での流れの再付着によりその付近の流速の位相差が変化し、圧力の位相が遅れることによって、不安定現象が発生していることが明らかとなった。

(3) 再付着点の移動と揚力変化

前節では $\bar{V}_{CR} \sim 1/2 \bar{V}_{CR}$ における流れの位相の変化と角柱の空力弾性的安定・不安定に関する議論を行った。そして低流速域においては角柱の振動振幅 A/H や \bar{V} の変化による後縁付近の流れの変化が特に重要であることがわかった。そこで、後縁付近で再付着を起こすような流れの場合につき再付着点 $X_{R.P.}$ の移動と揚力変化に注目した考察を行う。図-19 には $D/H=1.0$ 角柱の $\bar{V}=4.66, A/H=0.1$ と $D/H=2.0$ 角柱の $\bar{V}=7.0, 6.0, A/H=0.05$ の振動条件における上下面の再付着点位置 $X_{R.P.}$ の時間的変化を示す。図中 $Y_H(t)$ は角柱の振動変位、 $L(t)$ は揚力変化を示し、おのおの振動変位および揚力の振幅で無次元化して Y, L と記してある。

まず $D/H=1.0$ で $1/2 \bar{V}_{CR}$ より少し高い流速の $\bar{V}=4.66, A/H=0.1$ の上面での $X_{R.P.}$ の動きを \square 印で示す。図中点線で示す揚力 $L(t)$ は変位 $Y_H(t)$ に対して $\phi_L=175^\circ$ 位相進みである。上面での再付着は $2\pi F_{It} = -30^\circ$ で後縁から始まり、 $0^\circ, 30^\circ$ の間で角柱の中央方向に、 $X_{R.P.} \approx 0.5$ まで前進し、 30° を過ぎると再び

後退して再付着点は後縁から離脱する。 $X_{R.P.}$ の上面での上流方向への動きと $L(t)$ の位相関係は $X_{R.P.}$ の方が若干遅れているがほぼ対応している。次に、 $D/H=2.0$ の $1/2 \bar{V}_{CR}$ より少し高い流速の $\bar{V}=7.0, A/H=0.05$ の上面での $X_{R.P.}$ の動きは \blacksquare 印で示すように $2\pi F_{It}=0^\circ$ で $X_{R.P.} \approx 0.7$ と最も角柱中央側に接近しており、 $L(t)$ の $Y_H(t)$ に対する位相差は $\phi_L=+180^\circ$ で $X_{R.P.}$ とほぼ対応している。さらに同じ、 $D/H=2.0$ 角柱で $X_{R.P.}$ の動きが顕著な $\bar{V}=6.0, A/H=0.05$ の上面での移動の様子を \bullet 印で、下面のそれを \circ 印で示す。 $2\pi F_{It} = -60^\circ$ 付近で後縁近くから再付着が始まり、時間の経過とともに $2\pi F_{It} \approx 70^\circ$ では角柱の中央よりもさらに前縁側へ移動する。 $2\pi F_{It} \approx 110^\circ$ では $X_{R.P.} \approx -0.22$ の最も前縁に近い位置まで前進し、その後、再び後縁へと後退する。そして、 $X_{R.P.}$ が前縁側へ移動する際には、揚力の変化に比べ比較的遅い速度で移り、最も前縁側に接近した後、後縁側へは比較的すみやかに移動する。揚力が下向き最大となっても $X_{R.P.}$ はさらに前縁側へと移動するため、揚力の方向と $X_{R.P.}$ の移動の位相関係は、 $D/H=2.0, \bar{V}=7.0$ や $D/H=1.0, \bar{V}=4.66$ の場合に比べると多少悪い。 \bar{V} の低下とともに流れの非定常性が増し、瞬間の流線から揚力の方向を推定することも $\bar{V}=1/2 \bar{V}_{CR}$ 以下の流速域ではしだいに困難になる。

5. 結 論

一様流中で流れに直角方向に振動する断面比 $D/H=1.0$ および 2.0 角柱のまわりの純粋に加振振動数成分のみから成る非定常流線 ψ を求め、また、その時間平均の流線 $\bar{\psi}$ を求めた。同時に振動角柱表面に作用する非定常圧力を測定した。そして無次元流速 \bar{V} や加振振幅 A/H の変化に伴う流れと流体力との相関性について議論した。その結果、循環流や再付着点などの挙動にみられるような流れの変化と圧力とがよく対応することがわかった。得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) \bar{V}_{CR} 付近において振動角柱の後流に生ずる循環流と揚力の対応関係がわかった。そして、わずかな \bar{V} の変化に伴い循環流の発生位相差が急変することにみられるごとく、流れ場全体が一様に位相変化することが明らかになった。

(2) $1/2 \bar{V}_{CR}$ 付近においても、 \bar{V} の低下に伴って、角柱まわりの流れ場の位相差は全体的に変化するが、さらに後縁での再付着の影響が加わり、位相差は場所的に一様な変化を示さなくなる。

(3) $1/2 \bar{V}_{CR}$ 付近において \bar{V} が一定の場合、 A/H の増加に伴い、後縁付近で流れの再付着が発生し、その

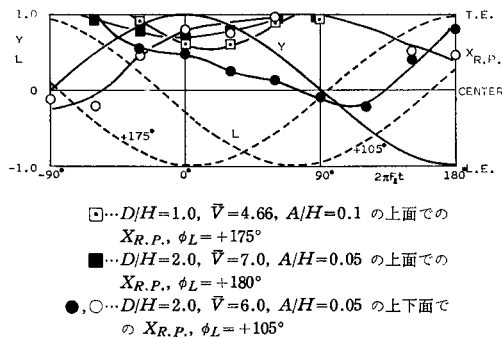


図-19 $1/2 \bar{V}_{CR}$ 付近の再付着点 $X_{R.P.}$ の動きと揚力 (L.E. 前縁, T.E. 後縁)

付近のみ流速の位相差が局所的に進み、圧力は後縁付近で進み側に移ることがわかった。

(4) $1/2 \bar{V}_{CR}$ 付近では再付着点以後の上下面上の圧力回復が著しく、再付着点の移動と揚力変化にはよい対応関係が認められた。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、終始ご指導下さった九州大学応用力学研究所、中村泰治教授に厚く御礼申し上げます。また有益な議論をして下さった東京大学工学部航空学科、高田浩之教授に謝意を表します。

一連の本研究遂行の間、終始ご激励賜わった東京大学、故鷺津久一郎名誉教授に深く感謝の意を表するとともに先生のご冥福を祈ります。

さらに研究遂行に際し、ご協力下さった九州大学応用力学研究所流体工学研究室の諸氏に深く感謝致します。研究費の一部は、文部省科学研究費により、データ解析は応用力学研究所の電子計算機システム MELCÔM-CÔSMÔ 900 を使用したことを記し、関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 溝田武人・岡島 厚：角柱まわりの時間平均流れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 312 号，pp. 39～47，1981.
- 2) 溝田武人・岡島 厚：角柱まわりの非定常流れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 312 号，pp. 49～57，1981.
- 3) 溝田武人・岡島 厚：振動する角柱まわりの流れの特性と流体力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 327 号，pp. 39～47，1982.
- 4) Nakamura, Y. and T. Mizota : Unsteady lifts and Wakes of oscillating rectangular prisms, ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 101, No. EM 6, pp. 855～871, 1975.
- 5) 小林紘士：風による長大橋の限定振動に関する研究，大阪大学学位論文，昭和 53 年 11 月.
- 6) 白石成人・松本 勝：充実構造断面の渦励振特性に関する基礎的考察，第 6 回風工学シンポジウム論文集，pp. 317～324，1980.
- 7) 中村泰治・渡辺公彦・藤本 聡：矩形断面柱の低風速励振とうず励振について，土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，pp. 606～607，昭和 55 年.
- 8) 岡島 厚・溝田武人・高田浩之：一様流中で並進振動する矩形柱の圧力分布，日本機械学会創立 80 周年記念関西支部学術講演会，講演論文集，No. 774-13，pp. 81～83，昭和 52 年.
- 9) Lee, B.E. : The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 69, Part 2, pp. 263～282, 1975.
- 10) Parkinson, G.V. and N.P.H. Brooks : On the aeroelastic instability of bluff cylinders, Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Series E, Vol. 28, pp. 252～258, 1961.
- 11) Nakamura, Y. and Y. Tomonari : The effect of turbulence on the drags of rectangular prisms, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 19, No. 44, pp. 81～86, 1976.
- 12) Chaplin, J.R. and T.L. Shaw : Flow-induced dynamic pressures on square-section cylinders, 14th Congress of the International Association for Hydraulic Research, pp. 25～32, 1971.
- 13) 中口 博・橋本貴久裕・武藤真理：矩形断面の柱の抗力に関する一実験，航空学会誌，第 16 卷，第 168 号，pp. 1～5，1968.
- 14) Bearman, P.W. and D.M. Trueman : An investigation of the flow around rectangular cylinders, The Aeronautical Quarterly, Vol. 23, pp. 229～237, 1972.
- 15) 岡島 厚：並進振動する円柱まわりの流れの数値計算，構造物の耐風性に関する第 3 回シンポジウム論文集，pp. 147～154，1974.
- 16) 溝田武人：非粘性渦点モデルによる角柱まわりの流れの数値解析，第 5 回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集，pp. 155～162，1978.
- 17) 永野三郎・内藤政彦・高田浩之：うず点法による長方形柱まわりの流れの解析，日本機械学会論文集（B 編），47 卷，413 号，pp. 32～43，昭和 56 年.
- 18) Vickery, B.J. : Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross section in a smooth and in a turbulent stream, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 25, part 3, pp. 481～494, 1966.
- 19) 溝田武人・岡島 厚：一様流中で並進振動する角柱まわりの流れ模様，九州大学応用力学研究所所報（寄書），第 57 号，昭和 57 年 9 月.

(1982.1.25・受付)