

角柱まわりの非定常流れに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES OF UNSTEADY FLOWS AROUND RECTANGULAR PRISMS

溝 田 武 人*・岡 島 厚**

By Taketo MIZOTA and Atsushi OKAJIMA

1. 序 論

土木・建築構造物やその部材の耐風安定性の問題は、これらの構造物の長大化や軽量化の傾向に伴いますますその重要性を増している。しかし、このような剥離を伴う物体まわりの流れは逆流や非定常性および場所的に流速分布が急激に変化するというような流れ自身の複雑さのため、物体まわりの流れと作用する流体力に着目した研究は少ないように思われる。そこで前報¹⁾では種々の断面比や迎角を有する角柱を供試模型として、そのまわりの時間平均流れに限定して、流線模様などを定量的に求め、それをもとに抗力の特異な変化や揚力の方向に関する議論を行った。その結果、断面比の変化に伴う抗力の特異な変化と角柱背後の伴流よどみ点の位置の移動との間の対応が極めてよいこと、迎角の変化によって伴流よどみ点が移動することによりみられる循環の方向と揚力の変化の様子が一致していることなどがわかった。さらに角柱近傍の流れと表面圧力や揚力特性について吟味し、時間平均流れと平均抗力、揚力における対応関係が明らかとなった。

本論文では、これら前報で明らかにされた時間平均流れと流体力に関することがらを踏まえて、特に一様流中に静止させた角柱まわりの非定常な流れとその角柱に作用する変動揚力に絞って、研究を進めた結果を述べた。そして、角柱背後に生ずるカルマン渦による変動速度が角柱断面比や迎角によって変化する様子や、角柱の剥離点のごく近傍を含めた領域の位相速度等について検討を加えた。またこのように比較的高いレイノルズ数領域における流れのパターンを定量的に測定した例としては、現在までに D 字型物体まわりの流れに関して X 型プローブを使用して、物体代表長の 6~8 倍下流領域に限っ

て Davis²⁾ によって測定されているもの (レイノルズ数 $=3 \times 10^4$) がある。ここでは角柱に作用する変動揚力との位相関係において、種々の断面比の角柱まわりの瞬時の非定常流線を求め、角柱から渦が放出される過程を調べた。

2. 実験装置および条件

実験は九州大学応用力学研究所のエッフェル型風洞を使用して行った。測定部断面は幅×高さ×長さ $=0.7 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ で、主流方向の乱れ度は一様流速 U_∞ の 0.18% である。供試模型のスパン方向長さを L とし、諸元と C_{pb} 値, S_t 数, \hat{C}_L 値, R_e 数を表一に示す。角をおのおの、角 1, 2, 3, 4 とする。ここで p は角柱の背面圧力, p_∞ は上流の静圧, ρ は空気密度, f は後流渦の振動数, \hat{L} は角柱の単位スパン長に加わる変動揚力の振幅, ν は空気の動粘性係数とする。

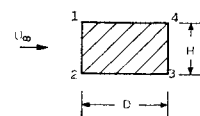
$$C_{pb} = (p - p_\infty) / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \right), S_t = fH / U_\infty$$

$$\hat{C}_L = \hat{L} / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 D \right), R_e = U_\infty H / \nu$$

はそれぞれ背圧係数, ストローハル数, 変動揚力係数, レイノルズ数である。風洞の幅は 700 mm であるが、角柱装着部の風洞壁面は両側とも 30 mm 凹地になっている。角柱端部には簡単な端板をつけて、スパン方向の

表一 供試模型の諸元と C_{pb} 値, S_t 数, \hat{C}_L 値, R_e 数

D/H	$D \times H \times L$ (mm)	C_{pb}	S_t	\hat{C}_L	R_e
0.4	60×150×700	-1.60	0.130	0.70	7.14×10^4
1.0	150×150×700	-1.64	0.125	1.40	7.14×10^4
2.0	300×150×700	-0.70	0.083	0.50	7.14×10^4
4.0	360×90×700	-0.35	0.118	0.07	4.28×10^4



* 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

流れの2次元性の向上を図っている。また $U_\infty=6.90$ m/s とした。実験結果の整理のために、水平方向を X 軸、それと直交方向を Y 軸とし、距離は H で流速は U_∞ でおのおの無次元化して整理する。 (X, Y) 点の時間 t における流速の X, Y 方向成分をおのおの u, v とすればその位置の非定常流速の値 ψ は

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

となる。ここで、 X_0, Y_0 は角柱表面の座標である。 u, v の時間平均値から求めた ψ の値は時間平均流線の値であり $\bar{\psi}$ と記す。

逆流を含む2次元の非定常流速を測定するために、タンデム型熱線流速計プローブを使用する。このプローブは、風洞内に設置したトラバース装置によって、角柱まわりの所定の測定点に 0.1mm の精度で位置決めできる。このプローブの Z 軸まわりの方向特性のみ 図-1 に示すが、他の諸特性と測定方法の詳細はすでに報告した⁹⁾ ので、ここでは省略するが注1)、角柱に加わる変動揚力と非定常流速の位相差を求める方法についてのみ簡単に述べる。まず実験では、おのおのの信号をデータレコーダに記録し、次に電子計算機でこれらのアナログ信号をデジタル変換する。データ解析には、後流に生ずるカルマン渦の $200\sim 300$ 周期分のデータを使用した。そしてスペクトル解析によって揚力のスペクトルが最大になる周波数を基本振動数 f として、この振動数における変動揚力と非定常流速のクロススペクトルから位相差 ϕ deg. を求める¹⁰⁾。 X 方向の距離 $4l$ cm だけ離れた2点における ϕ の差を 4ϕ とすれば、非定常流速の波長 λ cm はその付近で $\lambda=4l \times 2\pi/4\phi$ となる。また位相速度 C cm/s を $C=f \cdot \lambda$ とすれば、無次元位相速度 C/U_∞ は $C/U_\infty=f \cdot \lambda/U_\infty$ となる。

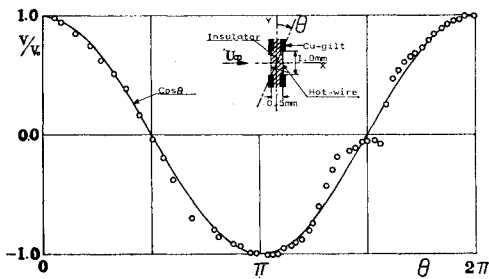


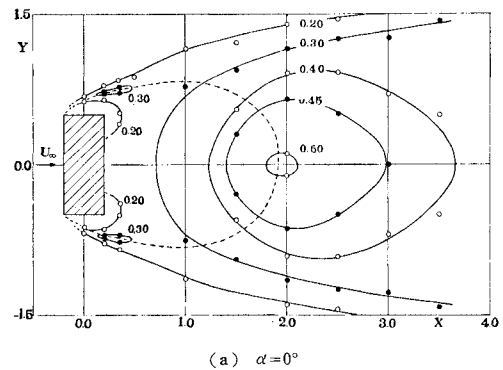
図-1 タンデム型熱線プローブの方向特性 (Z 軸は紙面に垂直方向とする)

注1) 図-1 に示すようにタンデム型熱線プローブの Z 軸まわりの方向特性は村上らの報告⁹⁾ と同様に迎角 θ に対してほぼ $\cos \theta$ を示す。したがってこのプローブの X 方向を $X(Y)$ 軸方向に固定して流速の測定を行うと、流速の $X(Y)$ 軸方向成分 $u(v)$ をそのまま直接求めることができる。また、 Z 軸まわりに回転させながら測定することによって変動流速の最大振幅⁹⁾ を検出することもできるので、その R.M.S. 値を \hat{u}_{MAX} とする。

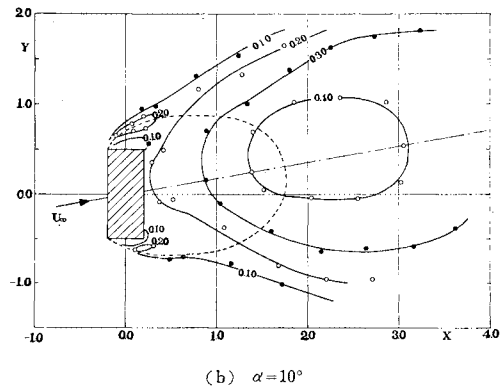
3. 実験結果と考察

(1) 変動流速

本実験で用いたタンデム型熱線プローブによれば、I 型熱線プローブと異なり、物体近くの流れが主流と逆方向に流れるいわゆる逆流域を含めて正確に変動流速を検出することができる。図-2~5 には角柱まわりのおおの場所における非定常流速の振幅の最大値の R.M.S. 値 \hat{u}_{MAX} を \circ, \bullet 印と実線で示す。図中、点線は文献1) で求めた時間平均流線から $\bar{\psi}=0$ を示す。まず図-2 (a), 3 (a) に迎角 $\alpha=0^\circ$ の $0.4, 1.0$ 角柱の \hat{u}_{MAX} の分布を示すが、これらの角柱は他と違って後流の中心軸上付近に最も激しく変動する領域があって 1.0 角柱では 0.7 にも達し、そこでは主流方向よりも Y 方向の変動流速成分が卓越している。また後縁に近い位置にも変動の大きい領域が認められる。迎角 $\alpha=10^\circ$ をつけると 0.4 角柱の \hat{u}_{MAX} 分布は 図-2 (b) に示すように $\alpha=0^\circ$ の場合に比べ、特別な変化は認められない。 1.0 角柱では、図-3 (b) のように、全域で \hat{u}_{MAX} は低下し、 $\hat{u}_{MAX}=0.55$ を示す部分は $\alpha=10^\circ$ の流れの中心線よりもさらに上方に移動して後流全域が上向きに傾斜して平



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=10^\circ$

図-2 $D/H=0.4$ 角柱まわりの変動流速 \hat{u}_{MAX}

均流の伴流よみ点 $X_{ws}(\bar{u}=\bar{v}\equiv 0)$ の移動と対応している。しかし実際には $\hat{u}_{MAX}=0.55$ の位置は X_{ws} より

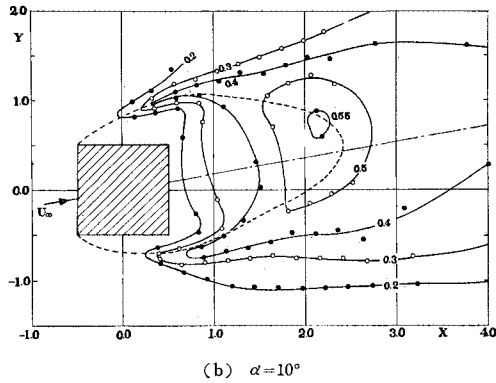
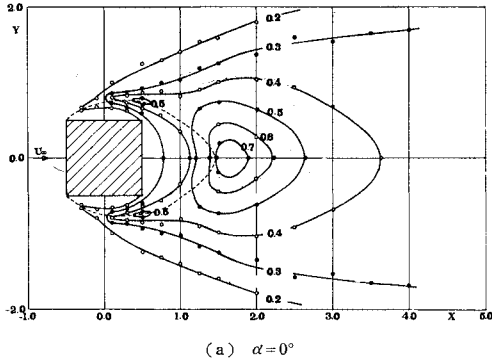


図-3 $D/H=1.0$ 角柱まわりの変動流速 \hat{u}_{MAX}

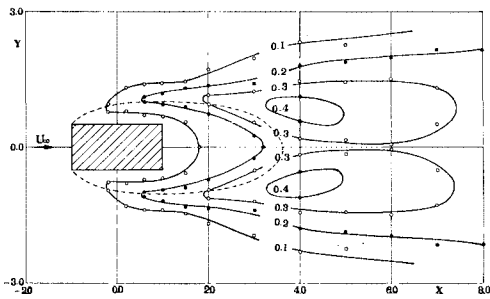


図-4 $D/H=2.0$ 角柱まわりの変動流速 $\hat{u}_{MAX}(\alpha=0^\circ)$

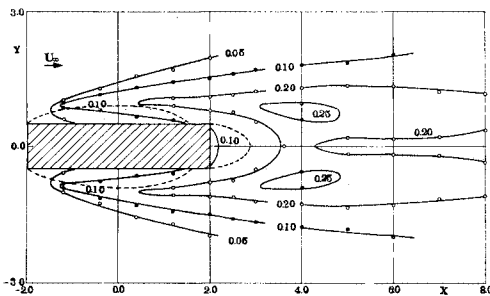


図-5 $D/H=4.0$ 角柱まわりの変動流速 $\hat{u}_{MAX}(\alpha=0^\circ)$

りさらに上方にある。いずれにしても 1.0 角柱の後流における変動流速の分布形状は Hanson ら⁵⁾による I 型プローブを用いて行われた円柱の場合と形状を異にしており、その値もかなり大きい。次に 2.0 角柱では、図-4 のように、変動流速の激しい部分が角柱の上下面中央から比較的遠方に存在し、X 軸を境にして対称に 2 つの最大値をとる領域が形成されている。かつその値も、1.0 角柱に比べて小さい。4.0 角柱は図-4 のように、再付着型角柱であるが、再付着点付近よりもさらに後方の $X=4.0$ で \hat{u}_{MAX} の値が最大となり、その値は 2.0 角柱よりさらに小さい。他方、各断面比の角柱に働く変動揚力係数 \hat{C}_L は表-1 に示すごとく 1.0 角柱が最も高い値を示す。これらの \hat{C}_L の値は、上述のごとく角柱まわりの変動流速の振幅の値が大きいものほど大きく、さらに最大となる位置が角柱に近いほど大きいことが明らかである。

(2) 位相速度

次に角柱まわりの非定常流れにおける変動成分の伝達の様子を調べるために位相速度 C/U_∞ を求める。これは角 1, 2 から発生する剥離せん断層が角柱背後で巻き込んで渦が形成され、さらに後方に流れ去る過程における流れの変動の伝達速度である。

まず、1.0, 4.0 角柱まわりの C/U_∞ を図-6, 7 に示す。図から 1.0 角柱では $X < 0.0, Y > 1.0$ の範囲で

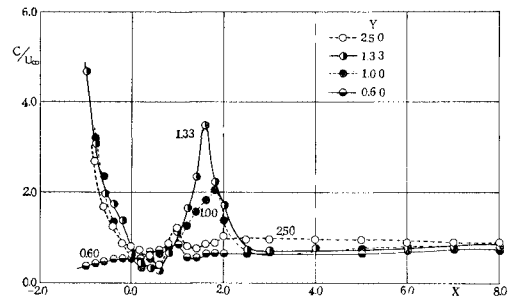


図-6 位相速度 $C/U_\infty(D/H=1.0)$

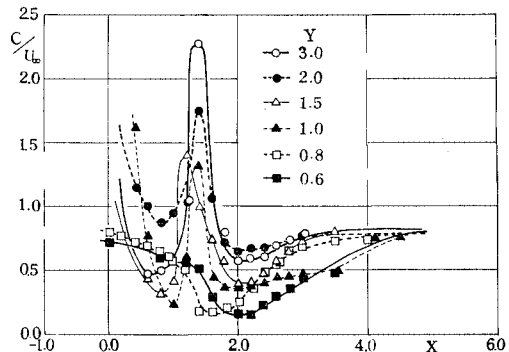


図-7 位相速度 $C/U_\infty(D/H=4.0)$

4.0 角柱では $X < 0.5$, $Y > 1.0$ における非回転流れと考えられる領域において, C/U_∞ が非常に大きくなる傾向がある. そして, 1.0(4.0) 角柱では $0.0 < X < 0.7(0.5 < X < 1.0)$ で C/U_∞ はいったん遅くなるが, $1.0 < X < 2.5, Y > 0.6(1.0 < X < 1.7, Y > 1.0)$ で極大値を有し, $X > 2.5(X > 4.0)$ で漸的に一定値となり, その値は 1.0, 4.0 両角柱とも $C/U_\infty \approx 0.75$ である. 2.0 角柱でも $C/U_\infty \approx 0.75$ であった. このような静止物体後方における位相速度は, D字型物体について, 2本の I 型熱線プローブを使用し Simmons⁶⁾ が, X 型熱線を使用して Davies⁷⁾ がともに $C/U_\infty = 0.8$ を, 円柱について, Disk 型圧力変換器を使って Ferguson ら⁷⁾ が, 2本の I 型熱線プローブを使って Bloor ら⁸⁾ がともに $C/U_\infty = 0.84 \sim 0.88$ の値をそれぞれ得ている. 測定方法は異なるけれども, いずれの場合も変動流速の位相速度を求めていることには変わりはない. これらの結果と比較すると, 角柱の後方の位相速度は他の物体のそれよりいくぶん遅い.

Simmons⁶⁾ は後縁剝離を示す D 字型物体の後縁の上下流で C/U_∞ を求め, 本実験と同様に, 上流で C/U_∞ が非常に大きくなり, 後縁付近でいったん遅くなり, 再び極大値を示した後, 下流で一定値を示すことを報告している. そして上流側で C/U_∞ が大きくなる事実をこの物体まわりの束縛渦 (bound vortex) の存在を考慮して説明している. すなわち束縛渦による誘起速度には場所的に位相差がほとんど生じないので, 物体の上流側の $Y > 0$ では C/U_∞ は無限大となるとしている. しかし, 前縁剝離する角柱では, 前縁から剝離せん断層が吐き出されるので, これによる位相速度への作用と束縛渦の作用の両者の影響が上下面近くでは存在するようと思われる. すなわち, 1.0(4.0) 角柱では $Y = 0.6(Y = 0.6, 0.8)$, $-1.0 < X < 0.0(0.0 < X < 1.0)$, で C/U_∞ が比較的遅い値を示していることが 図-6, 7 からわかる. 1.0 角柱の前縁付近の流速分布と位相速度については後述する. また, $0.0 < X < 0.7$ (1.0 角柱), $0.5 < X < 1.0$ (4.0 角柱) では, Y の値にかかわらず C/U_∞ はいったん低下する傾向があるが, これは吐き出し渦の作用と考えられる. Simmons⁹⁾ は非粘性渦点モデルによる計算結果と実験結果を比較して, D 字型物体の後縁を過ぎたところで C/U_∞ が極大値を示すことを指摘している. 1.0 角柱のこの $X = 1.0 \sim 2.2$ 付近は, 剝離せん断層が独立な渦に巻き込む領域と考えられ, このようなところで, C/U_∞ が大きくなるようである. 一方, 4.0 角柱の場合は, 1.0 角柱と異なり角柱上面の $1.0 < X < 2.0$ 付近で C/U_∞ が大きくなり初期の巻き込みはこの付近で発生している.

次に角柱に加わる変動揚力を基準にして求めた非定常

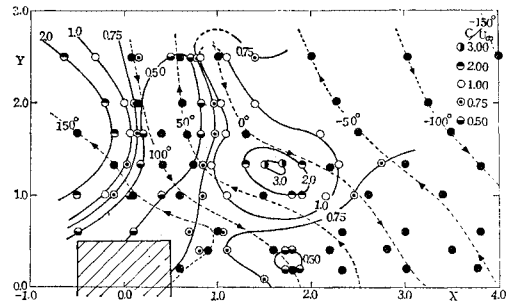


図-8 位相角 ϕ と位相速度 $C/U_\infty(D/H=1.0)$

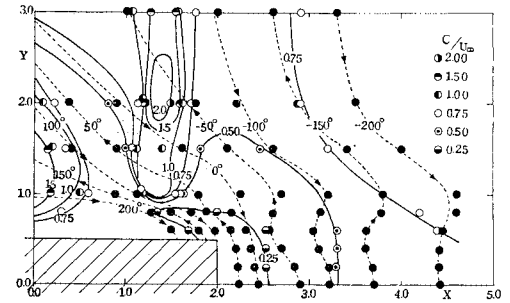


図-9 位相角 ϕ と位相速度 $C/U_\infty(D/H=4.0)$

流速の位相差 ϕ , および 図-6, 7 に示した位相速度 C/U_∞ を角柱まわりに 2 次元的に表示して, 図-8, 9 に位相角分布, 位相速度分布として示す. 位相角を示す線は, 両角柱とも角柱に比較的近いところでは傾斜しているが, 後方では徐々に Y 軸に平行に揃うようになる. 位相速度 C/U_∞ は 1.0 角柱で $X \approx 1.7, Y \approx 1.2$, 4.0 角柱では $X \approx 1.4, Y \approx 2.0$ の付近で大きくなる.

(3) 前縁付近の非定常流れ

すでに述べたように, 角柱の前面で作られた境界層は前縁において剝離し, 自由せん断層として, 角近くではいまだ空間的にほぼ連続性を保っている. 角柱前面の境界層で作られた渦が物体から吐き出される剝離点として, 前縁は非常に重要な位置である. ここでは, この付近に着目して流速分布等を調べた結果を述べる. まず, 図-10, 11 に 1.0 角柱の前縁剝離点付近における時間平均流速 $\bar{W} = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}$, 非定常流速の振幅の最大値の R.M.S. 値 \hat{u}_{MAX} の分布の様子を示す. 角柱前面の境界層の厚さ δ は非常に薄く, $\delta = 0.4 \text{ mm} \sim 0.75 \text{ mm}$ ($\delta/H = 0.0027 \sim 0.005$) である. \hat{u}_{MAX} の分布は, $X < -0.5, Y < 0.49$ における前面の境界層内において特別な変化を示さないが, $X < -0.5, Y = 0.50$ の線上の境界層内部において突然, 非常に大きな変動を示し, その値は $\hat{u}_{MAX} \approx 0.4$ にも達する. 図-10, 11 で A, B, C, ..., H と記入した位置は \hat{u}_{MAX} が最大となるところでそれらを連ねた点線は近似的に剝離せん断層が存在する

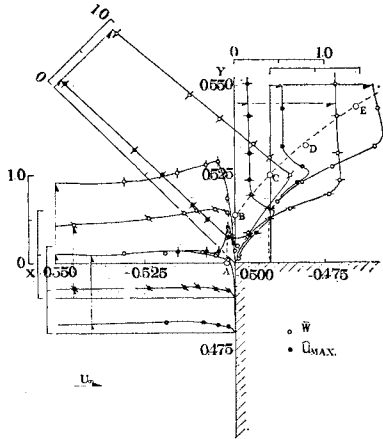


図-10 剥離点付近の流速分布 $\bar{W}, \hat{u}_{MAX}(D/H=1.0)$

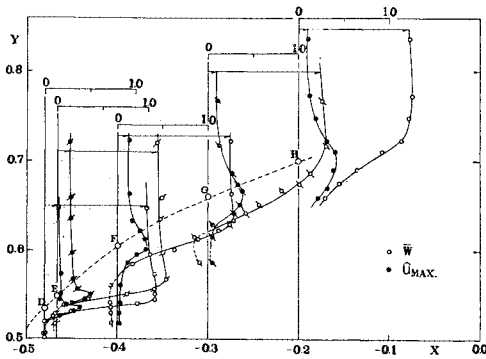


図-11 前縁近くの流速分布 $\bar{W}, \hat{u}_{MAX}(D/H=1.0)$

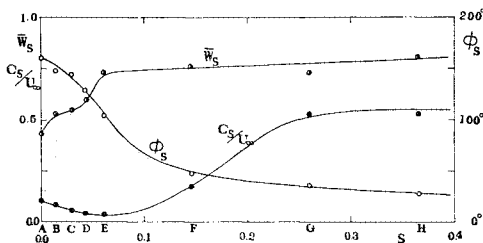


図-12 前縁近くの位相速度 C_s/U_∞ , 剥離せん断層に沿う流速 \bar{W}_s および位相角 $\phi_s(D/H=1.0)$

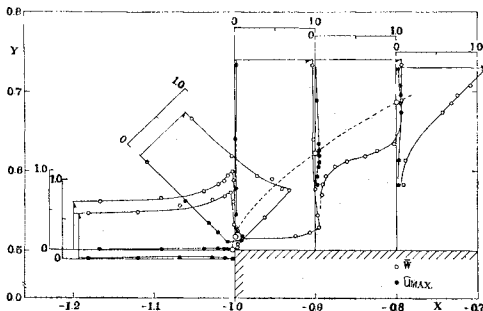


図-13 剥離点付近の流速分布 $\bar{W}, \hat{u}_{MAX}(D/H=2.0)$

平均的な位置を示すと考えられる。すなわち、前縁剥離点から、剥離せん断層は A, B, C, ..., H に沿って流れると考えられる。そこで、A 点を基点として A, B, C, ..., H に沿った距離を S と定義し、点 A, B, C, ..., H 上の時間平均流速 \bar{W}_s 、角柱に加わる変動揚力を基準にした非定常流速の位相差 ϕ_s 、および位相速度 C_s/U_∞ をまとめて図-12 に示す。 \bar{W}_s は E 点付近からはほぼ直線的になる。 ϕ_s も A~F の間での変化が著しい。 C_s/U_∞ は A~F の間で低い値となり、変動成分の伝達速度は E 点付近で極小値をとる。2.0 角柱の前縁付近の流れも同様に 図-13 に示す。1.0 角柱と比較して前面の境界層の厚さは同程度であるが、 \hat{u}_{MAX} の値は全体的に非常に低い。しかし、 $X < -1.0, Y = 0.5$ の境界層内で \hat{u}_{MAX} が突然大きな値を示す経過は 1.0 角柱と同様である。各測定点で \hat{u}_{MAX} が最大になる位置を点線で示す。1.0 角柱に比べ、2.0 角柱の剥離せん断層の平均的な位置は上面からより離れている。この点線の位置は両角柱とも、平均流速 \bar{W} のプロファイルの変曲点にほぼ一致しているようである。

(4) 非定常流線

まず、図-14 に示すように変動揚力 $C_L(t)$ が $C_L(t) = \hat{C}_L \cos 2\pi ft$ と変化することに対し、上向き最大の揚力が作用する瞬間を a とし、 $2\pi ft$ の値が 30° ごとに b, c, ..., g とする。なお、流線はアンサンブル平均された流れを示している。

1.0, 2.0 および 4.0 角柱について流れの半周期における非定常流線を描いた結果を 図-15 (a)~(g)、図-16 (a)~(g)、図-17 (a)~(g) に示す。まず完全剥離型の 1.0, 2.0 角柱のまわりの流れを比較して観察する。a, b, c, d は揚力が上向き最大に作用する瞬間から徐々に減少し $C_L(t) = 0$ になる過程の流れである。a では両角柱とも、角 1 からの流線 $\psi = 0$ (以後 $\psi_1 = 0$ と略記) は上面と背面に合計 2 個の循環流を取り囲んで背面下方で閉じている。次の b では、1.0 角柱の $\psi_1 = 0$ の流線は無限後流に連続する流れになり、a で $\psi_1 = 0$ に囲まれていた循環流がこの段階で背面付近から放出され、角 2 から流れる $\psi = 0$ (以後 $\psi_2 = 0$ と略記) の流線が循

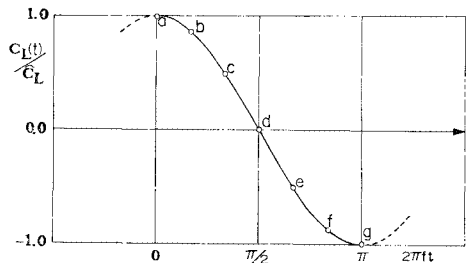
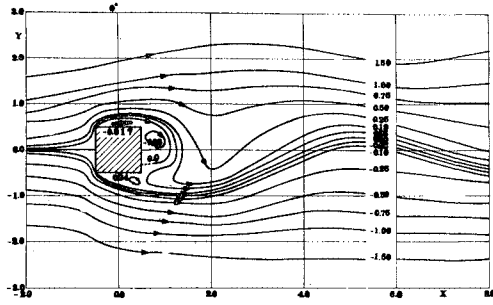


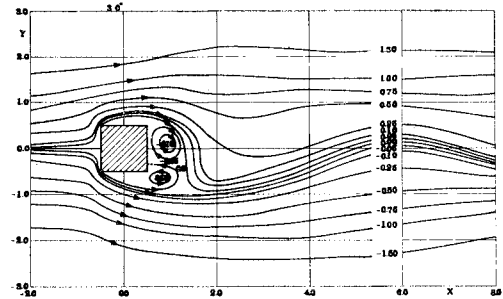
図-14 図-15~17 に示す流線の位相角

環流を1個囲んで背面下方で閉じるようになり、流れはaから著しく変化している。しかし2.0角柱のbでは、aに比べ $\psi_1=0$ の流線はさらに後方に及び拡張しているが、やはり背面下方で閉じており、aからの変化は顕著ではなくわずかにその近くに $\psi=0.05$ の循環流が新

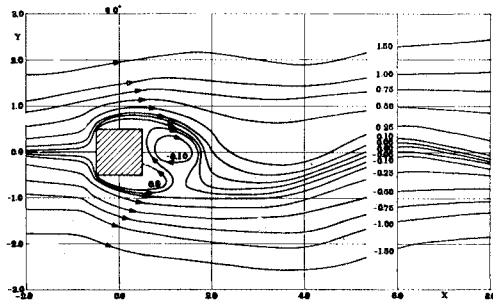
たに生じる程度である。流れがcになると1.0角柱では $\psi_2=0$ の流線が背面で閉じる位置が次第に上昇し背面付近の循環流は徐々に後方に移動する。2.0角柱ではbからcへの流れの変化が、1.0角柱のaからbへの流れの変化に相当している。すなわちcでは $\psi_1=0$ の流線が



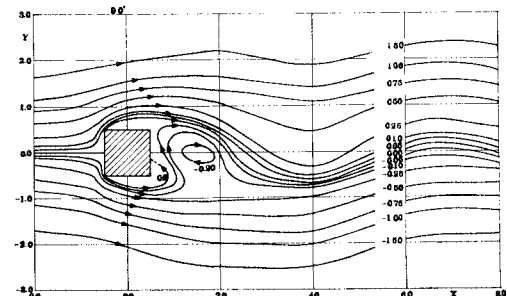
(a) $2\pi ft = 0^\circ$



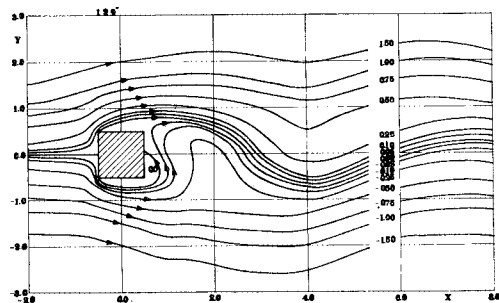
(b) $2\pi ft = 30^\circ$



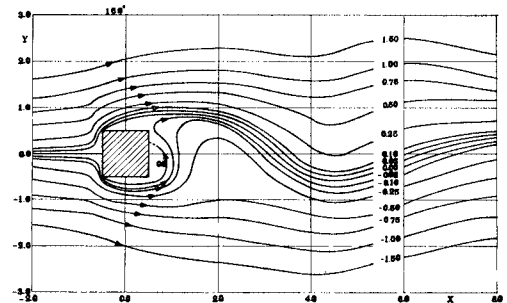
(c) $2\pi ft = 60^\circ$



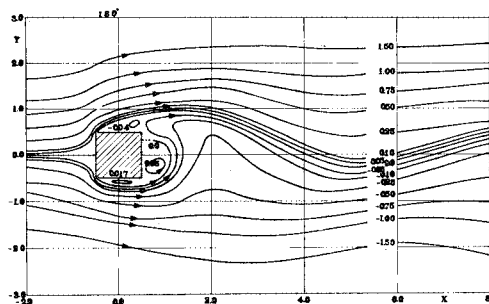
(d) $2\pi ft = 90^\circ$



(e) $2\pi ft = 120^\circ$



(f) $2\pi ft = 150^\circ$

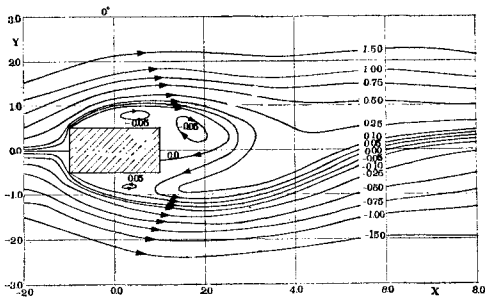


(g) $2\pi ft = 180^\circ$

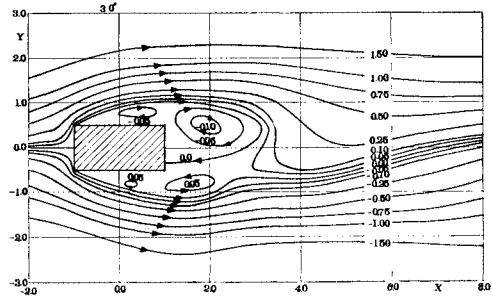
図-15 $D/H=1.0$ 角柱まわりの流線

無限後方に連続し、bで $\psi_1=0$ に囲まれていた循環流が放出される。この過程の流れの変化には角 2 から $\psi_2=0$ の流線が発達することも大きく寄与している。dで揚力は零であり、1.0角柱では背面付近の循環流がcよりさらに後方に移動し、 $\psi_2=0$ の流線が背面で閉じる位

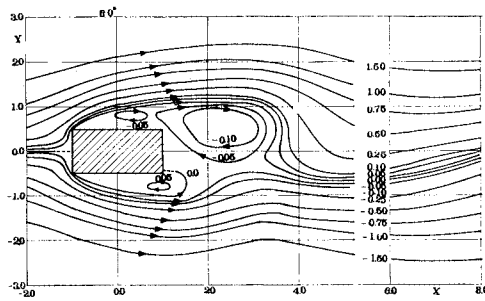
置も上昇する。e, f, gは揚力が下向きに増加する過程の流れであり、この間は1.0, 2.0角柱とも流れの変化は同様であり、 $\psi_2=0$ の流線に囲まれる領域が徐々に発達し、gではaとX軸に対称な流れになって半周期を完了する。



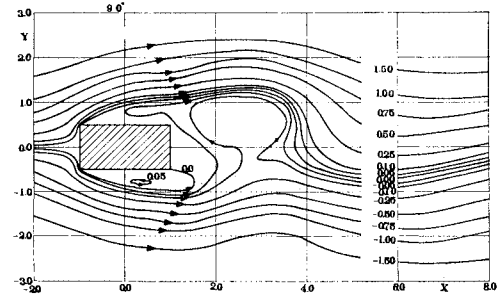
(a) $2\pi ft = 0^\circ$



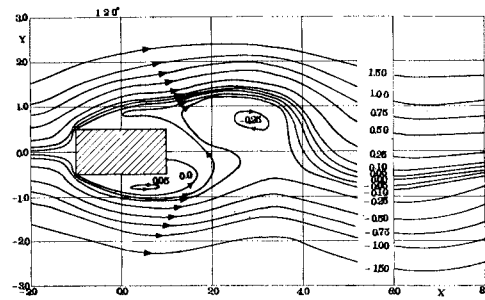
(b) $2\pi ft = 30^\circ$



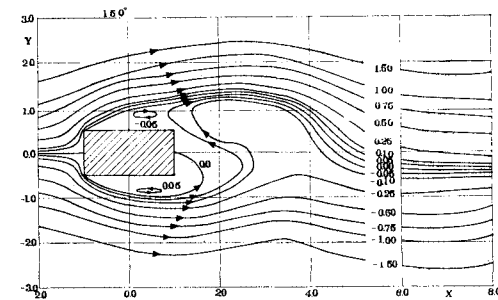
(c) $2\pi ft = 60^\circ$



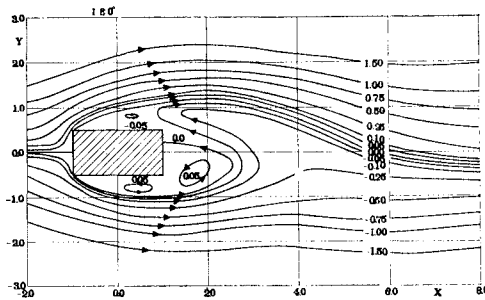
(d) $2\pi ft = 90^\circ$



(e) $2\pi ft = 120^\circ$



(f) $2\pi ft = 150^\circ$

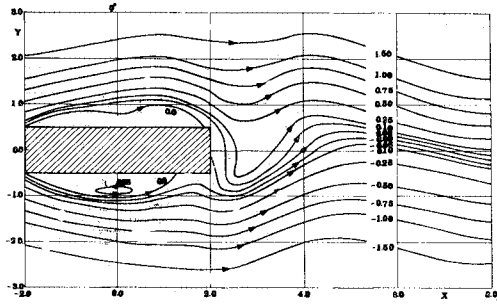


(g) $2\pi ft = 180^\circ$

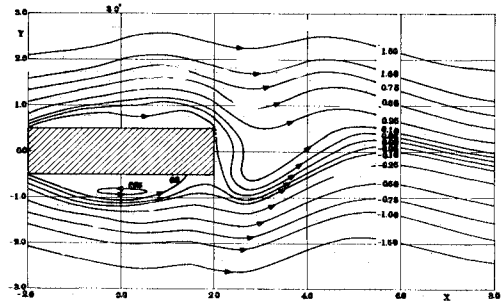
図-16 $D/H=2.0$ 角柱まわりの流線

これに対して、時間平均的には再付着型の流れを示す 4.0 角柱では、まず上向き最大の揚力が作用している a では、 $\psi_1=0$ の流線は上面の後縁付近の $X \approx 1.87$ で閉じ、 $\psi_2=0$ は下面の $X \approx 1.27$ で閉じている。揚力が減少する b, c 過程では $\psi_1=0$ は上面で閉じず、下面で

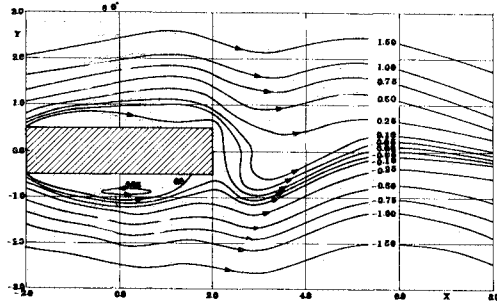
$\psi_2=0$ が閉じる位置が徐々に後退する。 $\psi_1=0$ 流線は a で $X \approx 0.0$ 付近において下に凸であって、上面に接近するが b, c では後退して、揚力が零となる d では後縁の近くの $X \approx 1.73$ で閉じる。 $\psi_2=0$ の流線は d で $\psi_1=0$ の流線が上面で閉じた X の位置とほぼ同じ $X \approx$



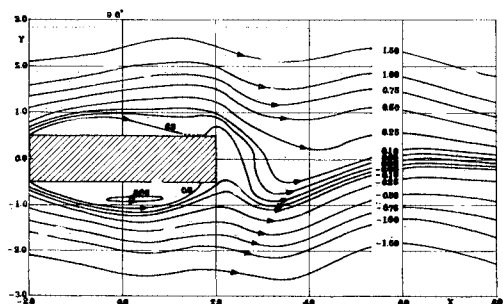
(a) $2\pi ft = 0^\circ$



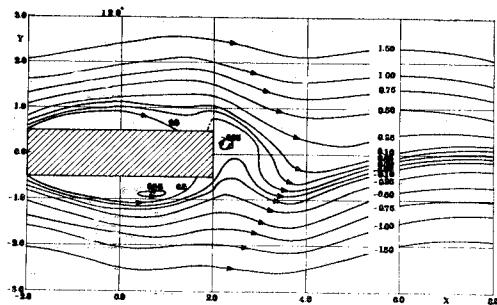
(b) $2\pi ft = 30^\circ$



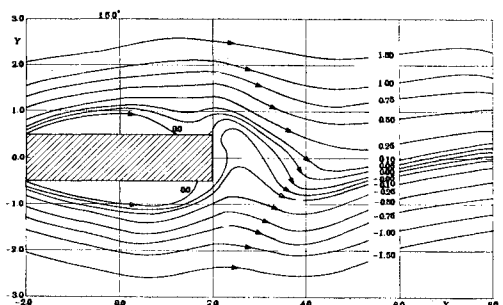
(c) $2\pi ft = 60^\circ$



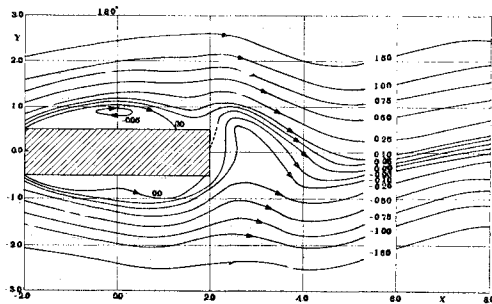
(d) $2\pi ft = 90^\circ$



(e) $2\pi ft = 120^\circ$

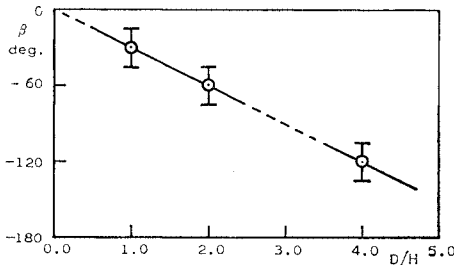


(f) $2\pi ft = 150^\circ$



(g) $2\pi ft = 180^\circ$

図-17 $D/H=4.0$ 角柱まわりの流線



図一18 角柱断面比 D/H と渦の離脱位相角 β

1.68 で閉じている。揚力が下向きに増加する e, f, g の過程では $\psi_1=0$ の再付着点位置はほとんど変化しないが、 $\psi_2=0$ の流線の再付着点は下面の表面上を後退する。以上によって、角柱に加わる揚力変動と流線模様の変化の様子が明らかになった。1.0, 2.0 角柱では、 $\psi_1=0$ の流線が角柱背面で閉じている限り、角1から連続的に放出される剥離せん断層が角柱背後で巻き込んでカルマン渦を形成するような渦の集中化が進行している過程と考えられる。そこで、 $\psi_2=0$ の流線の成長によって、 $\psi_1=0$ の流線が背面を離れるときに渦が放出される瞬間とみなす。4.0 角柱では、1.0, 2.0 角柱のように $\psi_1=0$ 、または $\psi_2=0$ の一方の流線のみが角柱背面で閉じるのではなく、渦放出の瞬間は明確ではないが、循環流が放出されるという意味では、図一17 (e) の前後がそのときと考えられる。そこで、変動揚力を基準にして上述のように見積った循環流が放出される位相角を β として、角柱断面比 D/H に対してプロットすると 図一18 のようになる。このように、循環流が角柱を離れる位相角は、角柱断面比に対してほぼ直線的に変化していることがわかる。円柱では渦が離脱する位相角は 60° であることが、Sarpkaya⁹⁾ の数値計算によって報告されている。

4. 結 論

本研究では、一様流中にある種々の断面比を有する角柱まわりの非定常流速を風洞実験により測定した。おもな結論は次のとおりである。

(1) 迎角 0° の断面比 0.4, 1.0, 2.0 および 4.0 角柱と 10° の 0.4, 1.0 角柱まわりの逆流域を含めた領域の変動流速が明らかになった。流速が最も激しく変動する部分は、0.4, 1.0 角柱では後流の中心軸にあり、円柱の場合とは著しく相違している。2.0, 4.0 角柱では中心軸を境に上下に分れて存在する。また迎角の変化に伴うその位置の移動の様子は、0.4 と 1.0 角柱で異なり、特に 1.0 角柱は流れの中心軸よりもさらに上方に大きく偏って位置する。

(2) 角柱前面の境界層は非常に薄く角柱高さの

0.27~0.5% 程度であり、非定常流速の振幅は角の剥離点において急激に増加する。境界層が剥離した後、激しく変動する場所を結んだ線は、平均流速分布の変曲点とほぼ一致している。

(3) 変動流速の位相速度は、剥離せん断層の近くで遅くなり、その剥離せん断層が巻き込んで集中化すると考えられる位置の外側では位相速度が急激に早くなる。

(4) 角柱に加わる非定常揚力との位相関係において、非定常流線が明らかとなった。これらの角柱からカルマン渦が放出される位相は角柱断面比の変化に対して、ほぼ直線的に変化する。

謝 辞：本研究を進めるにあたり終始ご助言下さった九州大学応用力学研究所 中村泰治教授、大分工業大学工学部 友成義正講師に厚くお礼申し上げる。また、終始ご激励下さった有明工業高等専門学校校長 吉村虎蔵教授（研究当時、九州大学工学部土木工学科教授）に謝意を表する次第である。実験結果の解析は九州大学応用力学研究所電子計算機システム FACOM 230-48, MELCOM COSMO 900 によった。研究の一部は文部省科学研究費によって行われた。

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 年 8 月。
- 2) Davies, M.E. : A Comparison of the Wake Structure of a Stationary and Oscillating Bluff Body, Using a Conditional Averaging Technique, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 75, pp. 209~231, 1976.
- 3) 溝田武人：はく離流中における非定常流速測定法の研究，土木学会論文報告集，第 278 号，pp. 53~60, 1978 年 10 月。
- 4) 村上周三・小峯裕己：タンデム型熱線風速計による変動流速の三次元的な測定，第 5 回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集，pp. 289~296, 1978 年 12 月。
- 5) Hanson, F.B. and P.D. Richardson : The Near-Wake of a Circular Cylinder in Crossflow, ASME Journal of Basic Engineering, Series D, Vol. 90, pp. 476~484, December 1968.
- 6) Simmons, J.E.L. : Phase-Angle Measurements between Hot-wire Signals in the Turbulent Wake of a Two-Dimensional Bluff Body, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 64, part 3, pp. 599~609, 1974.
- 7) Ferguson, N. and G.V. Parkinson : Surface and Wake Flow Phenomena of the Vortex-Excited Oscillation of a Circular Cylinder, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 89, pp. 831~838, 1967.
- 8) Bloor, M.S. and J.H. Gerrard : Measurements on Turbulent Vortices in a Cylinder wake, Proceedings of the Royal Society, London, Series A, Vol. 294, pp. 319~342, 1966.
- 9) Sarpkaya, T. : Vortex-Induced Oscillations A Selective Review, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 46, pp. 241~258, 1979.
- 10) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，pp. 231~234, 1978.