

# 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

## EXPERIMENTAL STUDIES OF FLOW CHARACTERISTICS AROUND OSCILLATING RECTANGULAR PRISMS AND THEIR AERODYNAMIC FORCES

溝 田 武 人\*・岡 島 厚\*\*

By Taketo MIZOTA and Atsushi OKAJIMA

### 1. 序 論

土木・建築・海洋構造物およびその部材の断面形状は自然風や潮流等の流れに対して一般に非流線型である。したがって、このような構造物の周辺の流れは剝離しており、きわめて複雑である。一方、これらの構造物の静的・動的風荷重や種々の空力弾性的不安定振動の問題は非常に重要視されているが、流れの複雑さも加わって直接流れ自身と構造物に作用する流体力との関連性に注目した研究はわずかである。

そこで前報<sup>1), 2)</sup>まで、構造物の基本断面の1つである角柱を供試模型として、一様流中に静止させた場合の角柱のまわりの流れと流体力に関する実験的研究を行ってきた。すなわち角柱の断面比や迎角の変化に伴う伴流よどみ点の移動の様子を時間平均的な抗力や揚力との関連のもとに考察し、さらに非定常揚力に対する後流渦の放出の位相や、後流の変動流速の振幅が増大する位置が、角柱の断面比に応じて変化する様子等を明らかにした。

一方、振動する構造物断面に関しては、一様流中で振動する円柱<sup>3)~8)</sup>や角柱<sup>9)~13)</sup>等の構造物断面のまわりの流れや流体力について、主として空力弾性的不安定現象や後流の流体力学的構造に注目して研究されてきた。しかしながらこれらの振動する角柱の断面比の変化に伴う流体力の変化および流れの様相の変化との対応関係など基礎的な事柄についてもまだ明確になっていないようである。

このような背景のもとに、本研究では種々な断面比の角柱を振動させ、振動角柱に作用する背圧や抗力などの流体力を求め、さらに伴流よどみ点、後流の幅、角柱上下面への流れの再付着点、変動流速の場所的なパワース

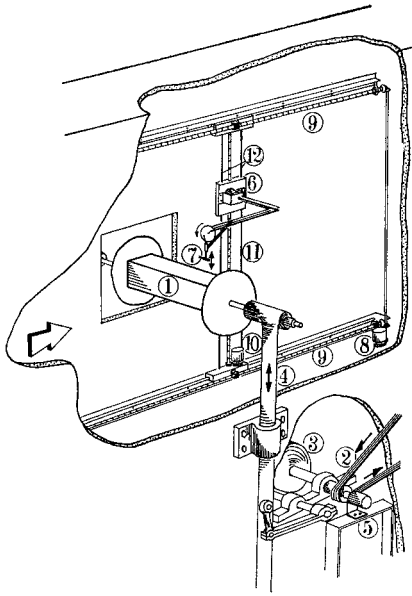
ペクトル密度分布などで表現される流れの特性が、加振振幅や無次元流速および角柱断面比によって変化する様子を調べた。そしてそれらの流れの特性と振動角柱の背圧や非定常揚力、抗力等の空力特性との対応関係について議論した。

### 2. 実験装置および実験条件

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。測定部の断面は幅 0.7 m×高さ 3.0 m×長さ 2.0 m であって、主流方向の乱れ度は一様流速  $U_0$  の約 0.18% である。供試模型は高さ  $H=150$  mm、長さ  $D$  の角柱断面でアスペクト比はすべて 4.67 である。角柱の断面比は  $D$  を変えることにより  $D/H=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.44, 0.5, 0.6, 1.0, 2.0$  とする。流速の測定には、角柱周辺の逆流域でも測定可能なタンデム型熱線プローブを使用するが、これを使った流速の測定法の詳細はすでに報告した<sup>14)</sup>のでここでは省略する。本実験では、角柱を一様流の方向に対して直角方向に並進振動させる。また熱線プローブも角柱と同じ加振片振幅  $A$  mm、振動数  $F_f$  Hz で同時に振動させることにより、振動角柱に対し、相対的には常に同一位置の流速を検出するように配慮した。したがって、測定された流速の値は角柱と一緒に動く動座標系における値である。図-1にはそのために製作したプローブ加振装置、角柱加振装置および熱線プローブ・トラバース装置を示す。風洞内に設置した角柱 ① は電動機から V ベルト ②、慣性プーリー ③ を介して、ピストン ④ によって上下に加振される。その加振振動数  $F_f$  と位相は 1 回転で 400 パルス発生するパルス発生装置 ⑤ によってパルス駆動モーター ⑥ に伝達され、熱線プローブ ⑦ の上下振動に変換される。このパルス駆動モーターと熱線プローブ一式はトラバース装置に装着されている。したがって、熱線プロ

\* 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



図一 風洞、模型と加振装置および熱線プローブ加振装置とトラバース装置

ブは  $X$  方向（主流方向）にはパルス駆動モーター⑧で上下にある 2 本の送りネジ⑨を回して移動させ、それと直交する  $Y$  方向には、もう 1 つのパルス駆動モーター⑩により送りネジ⑪を回し、2 本のガイドシャフト⑫に沿って移動させる。なお、以下位置  $(X, Y)$  の表示には実際の  $X, Y$  の値をそれぞれ角柱高さ  $H$  で除した値を用い、 $X=Y=0$  は模型角柱の中央位置を示す。 $\bar{X}_{w.s.}$  は角柱の下流で流速の  $X, Y$  方向成分の時間平均値が  $U=V=0$  となる伴流よどみ点位置である。 $\bar{X}_{R.P.}$  は角柱の上下面における流れの再付着点で、角柱の表面上 2.5 mm の位置から外挿して推定した。さらに  $\bar{D}$  を角柱に加わる単位スパン長当たりの  $X$  方向の時間平均抗力、 $\rho$  を空気密度とすれば  $\bar{C}_D = \bar{D} / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot H$  は抗力係数である。 $p_b$  を角柱背面中央の圧力、 $P_\infty$  を一様流の静圧とすれば、背圧係数は  $\bar{C}_{pb} = (p_b - P_\infty) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$  である。また  $A/H$  は角柱の加振振幅比、 $\bar{V} = U_\infty / (F_I \cdot H)$  は無次元流速とし、 $\bar{V}_{CR}$  は  $F_I$  が静止角柱後流に自然発生する渦振動数  $F_S$  と一致する無次元共振流速である。流速の  $X, Y$  方向の変動成分の振幅を  $\hat{u}, \hat{v}$  とし流速の測定値はすべて  $U_\infty$  で無次元化する。 $\hat{u}_{R.M.S.}$  は変動流速の振幅の 2 乗平均値を表す。流速や角柱に加わる非定常揚力のパワースペクトル密度は FFT 法を使って通常  $F_I$  の 200~250 波について解析を行った。 $F_I$  成分のパワースペクトル密度の大きさを  $P_I$ 、静止角柱後流の渦振動数  $F_S$  のそれを  $P_S$  と略記する。また、平均流速や  $\bar{C}_D, \bar{C}_{pb}$  を求めるための平均化の時間もパワースペクトル密度を算出する際と同様  $F_I$  の 200~250

波について解析した。以下、パワースペクトル密度を、パワーまたはパワースペクトルと略記する。レイノルズ数は  $Re = U_\infty H / \nu$  である。ここで  $\nu$  は風洞気流の動粘性係数である。実験の多くは  $Re = (3.52 \sim 7.14) \times 10^4$  の範囲で行った。

### 3. 実験結果と考察

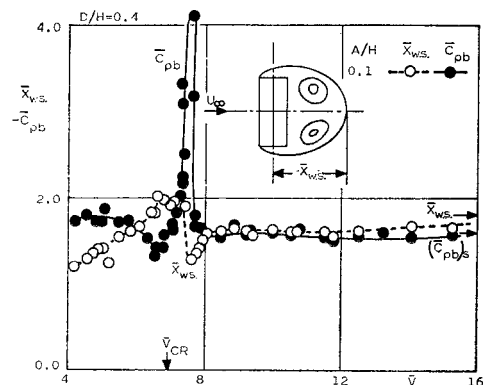
#### (1) 背圧係数 $\bar{C}_{pb}$ 、抗力係数 $\bar{C}_D$ 、伴流よどみ点 $\bar{X}_{w.s.}$ および再付着点 $\bar{X}_{R.P.}$ の変化

##### a) $D/H=0.4$ 角柱の場合

図-2 には  $D/H=0.4$  角柱を加振振幅  $A/H=0.1$  で、 $\bar{V}=4 \sim 16$  の範囲で振動数  $F_I$  を変えたときの  $\bar{C}_{pb}$  と  $\bar{X}_{w.s.}$  の変化を示す。この場合、 $\bar{V}_{CR}$  より少し高い流速域で  $\bar{C}_{pb}$  が極端に低下する狭い流速範囲が現われる。その  $\bar{C}_{pb}$  の最低値は図中右端に矢印で示す静止角柱の場合の 2.5 倍にも達する。またこのとき  $\bar{X}_{w.s.}$  は角柱背面に急激に接近している。そして  $\bar{V}_{CR}$  よりわずかに低い  $\bar{V}$  で  $\bar{C}_{pb}$  は静止角柱の値より若干回復し、 $\bar{X}_{w.s.}$  も静止角柱より後退している。このように  $\bar{V}$  の変化に対する  $\bar{C}_{pb}, \bar{X}_{w.s.}$  の変化の対応は、前報りの静止角柱の場合の断面比に対する変化と同様、非常によい。なお  $\bar{C}_{pb}$  が静止角柱の 2.5 倍の低い値を示すときでも、必ずしも流れは安定しておらず、振動周期の 10 倍近い比較的長い周期で  $\bar{C}_{pb}$  および  $\bar{X}_{w.s.}$  の値はゆっくりと変動している。しかも後流の渦列の振動数に常時同期しているわけではなく、 $\bar{C}_{pb}$  や  $\bar{X}_{w.s.}$  の変化に対応して同期したり、同期しなかったりしている。このような場合の  $\bar{C}_{pb}, \bar{X}_{w.s.}$  の値は振動周期の 300 倍以上の十分長い時間の時間平均から算出した。

##### b) $D/H=0.5$ 角柱の場合

図-3 には  $D/H=0.5$  角柱で、 $A/H=0.1$  の場合の



図二  $D/H=0.4$  角柱の背圧係数  $\bar{C}_{pb}$ 、伴流よどみ点位置  $\bar{X}_{w.s.}$  の無次元流速  $\bar{V}$  による変化

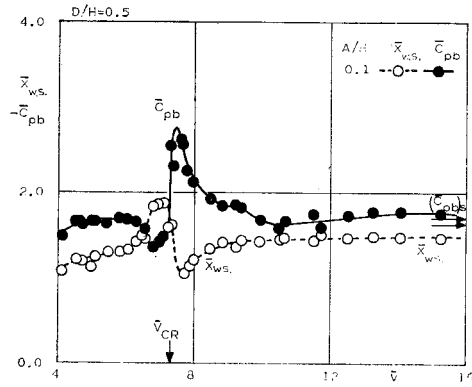


図-3  $D/H=0.5$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$  および  $\bar{X}_{w.s.}$  の  $\bar{V}$  による変化

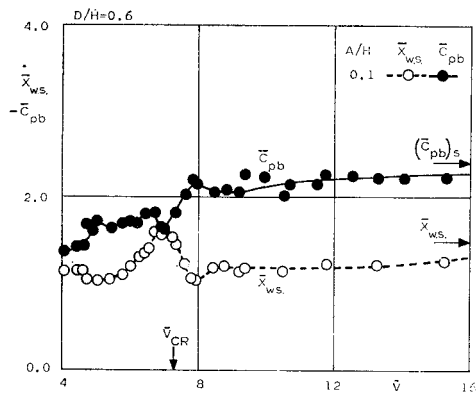


図-4  $D/H=0.6$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$  および  $\bar{X}_{w.s.}$  の  $\bar{V}$  による変化

$\bar{C}_{pb}$ ,  $\bar{X}_{w.s.}$  を示す。  $D/H=0.4$  角柱に比べ  $\bar{V}_{CR}$  付近での  $\bar{C}_{pb}$  の低下は顕著ではないがそれでも静止の場合の 1.5 倍以上低下している。そして  $\bar{C}_{pb}$  が低下および回復の様子と  $\bar{X}_{w.s.}$  が角柱に接近および後退するという対応関係は非常によい。

c)  $D/H=0.6$  角柱の場合

静止角柱の場合、 $\bar{C}_{pb}$  の値が最低となり、抵抗係数が最大となる  $D/H=0.62$  角柱に近い  $D/H=0.6$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$ ,  $\bar{X}_{w.s.}$  を図-4 に示す。図から明らかなように  $D/H=0.4, 0.5$  角柱におけるような  $\bar{V}_{CR}$  付近の  $\bar{C}_{pb}$  の低下現象はほとんど認められない。むしろ  $\bar{V}_{CR}$  以下の低流速域では  $\bar{C}_{pb}$  の回復がみられる。この場合にも、 $\bar{C}_{pb}$  の変化と  $\bar{X}_{w.s.}$  の移動はよく対応している。

d)  $D/H=1.0$  角柱の場合

図-5 には  $D/H=1.0$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$  の代わりに  $\bar{C}_D$  (注1) と  $\bar{X}_{w.s.}$ , 再付着点  $\bar{X}_{R.P.}$  の変化の様子を示す。この

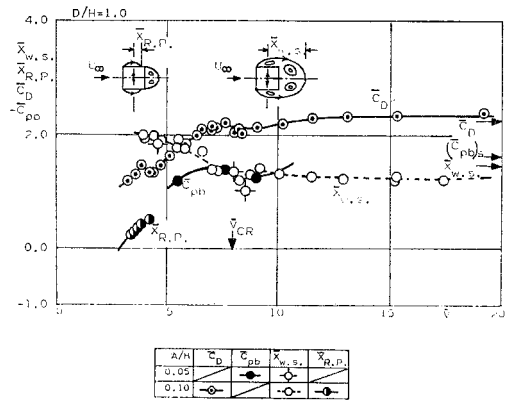


図-5  $D/H=1.0$  角柱の  $\bar{C}_D$ ,  $\bar{C}_{pb}$ ,  $\bar{X}_{w.s.}$  および再付着点  $\bar{X}_{R.P.}$  の  $\bar{V}$  による変化

角柱では  $D/H=0.6$  角柱におけると同様、 $\bar{V}_{CR}$  付近で  $\bar{C}_D$  がピーク値を示すことなく、むしろ  $\bar{C}_D$  は若干低下している。そのときの  $\bar{X}_{w.s.}$  は後退し、この場合にも  $\bar{C}_D$  と  $\bar{X}_{w.s.}$  の変化はよく対応している。他方、振動円柱の実験結果によれば、 $\bar{V}$  を  $\bar{V}_{CR}$  付近から下げると、まず  $\bar{V}_{CR}$  付近で  $\bar{C}_D$  が局所的に増大し、さらに  $\bar{V}$  を低下させるといった  $\bar{C}_D$  は低下した後、 $A/H$  に応じて一様に増大する<sup>4), 22)</sup>。角柱ではこのような傾向はみられず、1.0 角柱では逆に低下している。この場合、低流速域では上下面での流れの再付着が生じ、振幅が  $A/H=0.1$  のとき  $\bar{V}=4.2$  付近から再付着が始まり、 $\bar{V}$  の低下とともに再付着点位置は前縁側へと移動する。また Bishop & Hassan<sup>3)</sup> によって報告された円柱の  $\bar{V}_{CR}$  付近における  $\bar{C}_D$  のヒステリシス現象も、角柱では観察されなかった。これらのことから低流速域の振動角柱周辺流れは円柱の場合とかなり相違しているものと考えられる。

e)  $D/H=2.0$  角柱の場合

図-6 には  $D/H=2.0$  角柱の  $\bar{C}_D$ ,  $\bar{X}_{w.s.}$ ,  $\bar{X}_{R.P.}$  を示す。図中、 $\bar{V}=7.5\sim 12$  の範囲で●印 ( $Re=3.52 \times 10^4$ ) と◎印 ( $Re=7.14 \times 10^4$ ) の2種類のレイノルズ数における  $\bar{C}_D$  の値を示すが、ほぼ同一値を示す。 $\bar{C}_D$  は  $\bar{V}=23$  付近から徐々に低下し  $\bar{V}_{CR}$  付近の  $\bar{C}_D$  の値は静止の場合の約 86% に減少している。一方、 $\bar{X}_{w.s.}$  は  $\bar{V}=18\sim 19$  の狭い  $\bar{V}$  の範囲で  $\bar{X}_{w.s.}=4.0$  から  $X=2.5$  へと急激に減少し、 $D/H \leq 1.0$  角柱の場合に比べ  $\bar{V}$  の変化に伴う  $\bar{C}_D$  ( $\bar{C}_{pb}$ ) と  $\bar{X}_{w.s.}$  との対応関係は認められず、むしろ  $D/H \leq 1.0$  角柱において観察された結果とは逆の傾向を示している。すなわち、 $\bar{C}_D$ ,  $\bar{X}_{w.s.}$  の値はともに減少している。 $D/H=2.0$  角柱のような断面比の大きい角柱においては振動の影響は後流の流れのパターン変化には顕著に現われるが、抵抗には緩慢な変化しか生じない。この場合、伴流よどみ点の位

注 1)  $D/H=1.0$  角柱の背面の圧力分布は  $\bar{V}=5.48$ ,  $A/H=0.05$  で振動している場合でも、ほぼ平坦であり  $\bar{C}_{pb}$  と  $\bar{C}_D$  の変化はよく対応している<sup>15)</sup>。

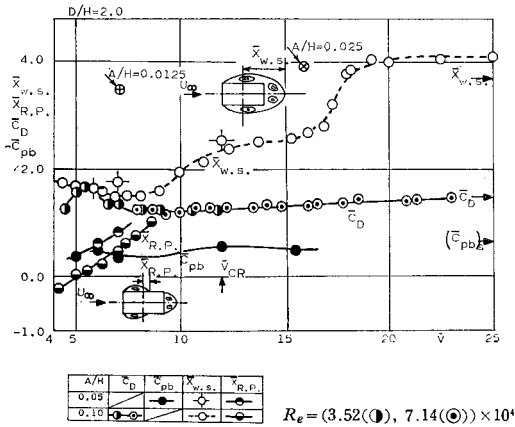


図-6  $D/H=2.0$  角柱の  $\bar{C}_D$ ,  $\bar{C}_{pb}$ ,  $\bar{X}_{w.s.}$  および  $\bar{X}_{r.p.}$  の  $\bar{V}$  による変化 (⊗印はおのこの  $A/H$  による  $\bar{X}_{w.s.}$  の値)

置はかなり後方にあることもその一因と考えられる。一方、流れの再付着は  $A/H=0.05$  では、 $\bar{V} \approx 7.5$  から始まり、加振振幅の大きい  $A/H=0.1$  では  $\bar{V} \approx 8.6$  で始まっている。 $D/H=1.0$  角柱の同一振幅と比べると、より  $\bar{V}_{CR}$  に近い流速で再付着が始まっており After body の影響が強く現われている。

(2) 背圧係数に対する加振振幅の依存性

前節で述べたように  $\bar{V}_{CR}$  付近で  $\bar{C}_{pb}$  が極端に低下するのは、 $D/H < 0.6$  の角柱に特有な現象である。ここではそのような  $D/H$  の範囲の角柱について、加振振幅が  $\bar{C}_{pb}$  に及ぼす影響を調べる。図-7 には  $D/H=0.1 \sim 0.6$  の振動角柱につき  $A/H=0 \sim 0.1$  の範囲で加振振幅を変えた際の  $\bar{V}_{CR}$  付近で生ずる  $\bar{C}_{pb}$  の最低圧の変化を示す。図には Bearman & Davies<sup>16)</sup> による流れに垂直におかれた平板の  $\bar{C}_{pb}$  の結果も記入してあるが本結果とほぼ一致している。そして  $A/H=0.025$  と比較的小振幅で振動させてもすでに  $D/H \approx 0.4$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$  にピークが現われ、 $A/H$  を増すにつれてその  $\bar{C}_{pb}$  の値は急激に低下する。さらに、ピーク値を示す  $D/H$  の値はほぼ一定値 0.4 である。角柱の前後縁に丸味を付けた断面<sup>17)</sup> や気流に乱れ度<sup>18)</sup> を与えることによって  $\bar{C}_{pb}$  のピークの値とそれを示す  $D/H$  の値は丸味や乱れ度の程度によって  $D/H \approx 0.62$  から連続的に変化することがすでに報告されているが、振動の効果はそれらの変化とは様相を異にしている。図-8 には、図-7 の  $\bar{C}_{pb}$  の結果をそれぞれの  $D/H$  における静止のときの背圧係数  $(\bar{C}_{pb})_s$  で除した値をプロットしたが、振幅  $A/H$  に応じてピークの値は変化するがピークの生ずる  $D/H$  の値は 0.4 でほとんど変化しない。しかも  $D/H=0.4$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$  は加振振幅の増加とともに  $\bar{C}_{pb}$  の低下する割合が最も大きく、 $A/H=0.1$  のとき、静止の際に  $D/H$

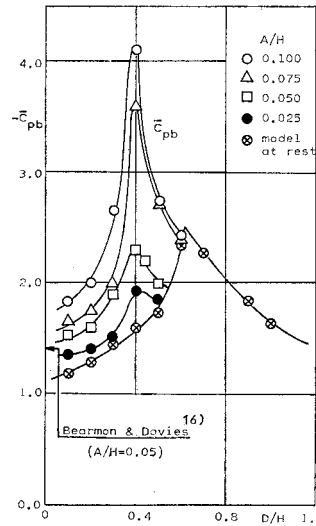


図-7  $D/H=0.1 \sim 1.2$  角柱の  $\bar{V}_{CR}$  付近における  $\bar{C}_{pb}$  の最低値に及ぼす加振振幅  $A/H$  の依存性

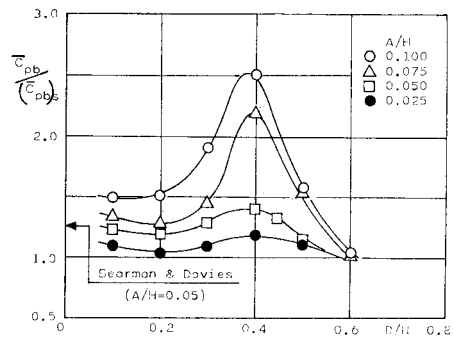
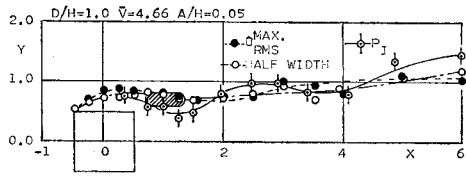


図-8  $D/H=0.1 \sim 0.6$  角柱の  $\bar{C}_{pb}$  の低下の割合 ( $(\bar{C}_{pb})_s$  は静止角柱の  $\bar{C}_{pb}$ )

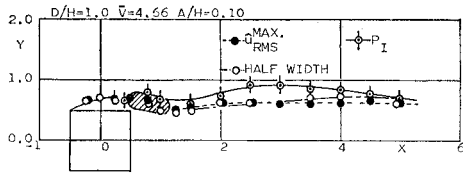
$= 0.6$  角柱で生ずる背圧値(背面中央の最大背圧)の 1.6 倍 ( $\bar{C}_{pb} = -4.1$ ) にも達する。

(3) 後流幅

前節では振動する角柱後流の  $X$  方向の長さ(伴流よみ点の位置  $\bar{X}_{w.s.}$ ) の変化と背圧係数等の対応に関して述べた。本節では、 $D/H=1.0, 2.0$  角柱の場合を例に取り上げて後流の  $Y$  方向の幅が、 $\bar{V}$  や  $A/H$  によって変化する様子を調べる。渦の形成領域における後流の幅を示すには、種々の表示方法がある。すなわち後流の時間平均速度分布  $U$  から求めた半値半幅<sup>23)</sup> や  $\hat{u}_{R.M.S.}$  が  $X$ —一定断面で最大値  $\hat{u}_{R.M.S.}^{MAX}$  を示す位置などによって表示される。さらに  $\hat{u}$  成分のパワースペクトルの  $F_I$  成分  $P_I$  が  $X$ —一定断面で最大となる位置も合わせて測定する。まず  $\bar{V}$  を一定とし  $A/H$  を変化させた場合の例として、図-9 (a), (b) に  $D/H=1.0, \bar{V}=4.66$  の  $A/H=0.05$  と  $A/H=0.1$  の結果を示す。両図において

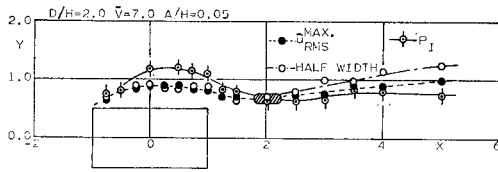


(a)  $D/H=1.0, \bar{V}=4.66, A/H=0.05$  の後流幅。斜線部は  $u$  によるパワースペクトル分布が後流中で最大となる位置

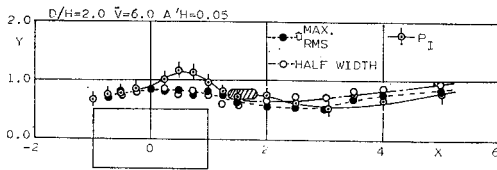


(b)  $D/H=1.0, \bar{V}=4.66, A/H=0.1$  の後流幅。斜線部は 図-9(a) に同じ

図-9



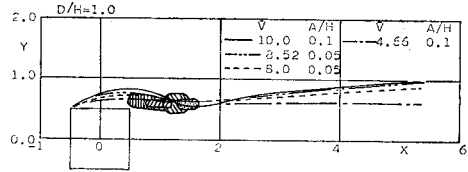
(a)  $D/H=2.0, \bar{V}=7.0, A/H=0.05$  の後流幅。斜線部は 図-9(a) に同じ



(b)  $D/H=2.0, \bar{V}=6.0, A/H=0.05$  の後流幅。斜線部は 図-9(a) に同じ

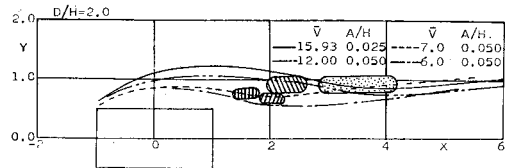
図-10

半値半幅,  $\bar{u}_{R.M.S.}^{MAX}$  および  $P_I$  の位置の変化の様子を互いに比較すると、いずれの表示結果も、(a)  $A/H=0.05$  より (b)  $A/H=0.1$  の方が  $X$  軸により接近しており、後流の幅は全域にわたり狭くなる。そして角柱の後方で後流の幅が局所的に狭くなるところで  $P_I$  は  $X$  方向で最も強くなる。次に  $D/H=2.0$  角柱では、 $A/H=0.05$  一定として  $\bar{V}=7.0$  および  $6.0$  の結果を 図-10 (a), (b) に示す。たとえば半値半幅で  $X=4.0$  の位置で比較すると、 $\bar{V}=7.0$  では  $Y \doteq 1.14$  であり、 $\bar{V}=6.0$  では  $Y \doteq 0.86$  と後流の幅は静止の場合<sup>23)</sup> に比べ狭くなり  $\bar{V}$  の低いものほど狭くなっていることがわかる。この結果は Griffin<sup>19)</sup> が行った振動円柱の後流の幅の変化とよく一致している。ただし、振動角柱上下面近傍において、純粋に加振振動数の  $F_I$  成分のみから成る  $P_I$  の最大となる位置と、多くの他のスペクトル成分を含む他の表示値とは相違がみられる。 $\bar{V}$  の低い振動条件では前縁で剥



(a)  $D/H=1.0$  の  $\bar{u}_{R.M.S.}^{MAX}$  による後流幅

$\bar{V}$	$A/H$	Line	Max. of $P_I$
10.00	0.10	—	●
8.52	0.05	- - -	○
8.00	0.05	- - -	○
4.66	0.10	- - -	○



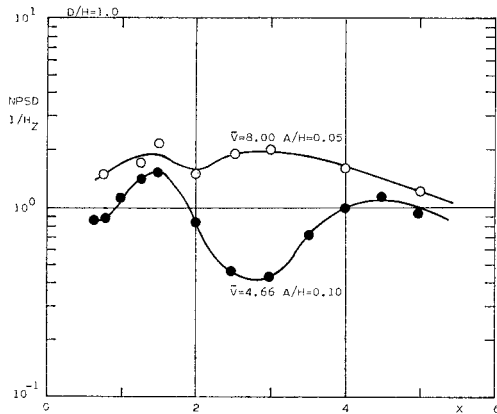
(b)  $D/H=2.0$  の  $\bar{u}_{R.M.S.}^{MAX}$  による後流幅

図-11

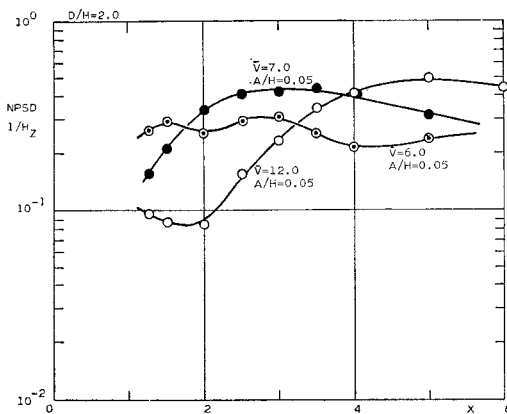
離した流れは後縁近くで再付着したりして、流速成分には加振成分  $F_I$  以外の高調波成分を多く含んでいるためと考えられる。また 図-9 の場合と同様に、角柱の後方で後流の幅が局所的に狭くなってくびれているところで  $P_I$  が大きくなり、かつ  $\bar{V}$  の低下とともに角柱の方へこの位置は接近している。そこで  $\bar{V}$  や  $A/H$  を変化させた他の振動条件における  $\bar{u}_{R.M.S.}^{MAX}$  の位置で示す後流の幅および角柱後方で  $P_I$  が最大になる位置を比較して 図-11 (a), (b) に示す。図から  $\bar{V}$  が低下するまたは  $A/H$  が増加すると、(1) 後流の幅が全域にわたって狭くなること、(2) 局所的に特に狭く、くびれる位置と  $P_I$  が最大になるところが一致すること、および、(3) その位置は角柱にしないで接近していくことなどがわかる。Griffin<sup>19)</sup> によれば、振動円柱の場合  $\bar{u}_{R.M.S.}^{MAX}$  の位置で示す後流の幅が  $\bar{V}$  の低下や  $A/H$  の増加に伴って全域にわたって狭くなり、かつ円柱背後の局所的に狭くなる位置が円柱に接近することと  $\bar{C}_D$  の増大<sup>4)</sup> とがよく対応するといわれている。振動による円柱後流の変化は角柱の場合も同一であるが、 $D/H=1.0$  角柱の場合の  $\bar{C}_D$  は円柱とは逆に  $\bar{V}_{CR}$  以下の流速域で低下している。この場合、両者の対応はよくない。一方伴流よどみ点  $\bar{X}_{W.S.}$  の位置は既述のごとく後退しており、 $\bar{X}_{W.S.}$  と  $\bar{C}_D$  の値の両者の変化はよく対応している。 $D/H=1.0$  角柱の場合、振動により逆流領域の形状自体が変形したためと考えられる<sup>20)</sup>。

(4) 後流の Y 方向変動流速  $\hat{v}$  によるパワースペクトル

前報<sup>2)</sup> で述べたように  $D/H=1.0$  静止角柱のまわりの変動流速の分布形状は、円柱についての多くの実験とは異なり、角柱背後の X 軸上で変動振幅が最大となるという特異な形状を呈した。しかもその領域では  $\hat{u}$  成分より  $\hat{v}$  成分による寄与が圧倒的であった。そこで 図-12 (a) には、 $D/H=1.0$  振動角柱の場合について X 軸上の  $\hat{v}$  のパワースペクトル  $P_I$  の変化を共振流速の  $\bar{V}=\bar{V}_{CR}=8.0, A/H=0.05$  と  $\bar{V}=4.66, A/H=0.1$  を比較して示す。この場合いずれも同期しているのでパワースペクトルのピーク値は  $F_I$  成分のみである。 $\bar{V}=4.66$  の振動条件は、 $\bar{V}=8.0$  の場合に比べ加振振動数は約 2 倍、振幅も 2 倍に増加させ、見掛けの迎角の振幅<sup>注 2)</sup> は 4 倍に増大したにもかかわらず  $\hat{v}$  の  $P_I$  はほぼ全域にわたって小さい。後流の変動流速  $\hat{v}$  のパワーが小さいことは、振動角柱から放出される渦の強さが小さいことに対応し、図-5 で示したように  $\bar{V}$  の低流速



(a)  $D/H=1.0$  の X 軸上に沿う  $\hat{v}$  のパワースペクトル分布



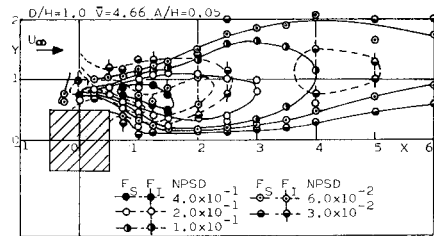
(b)  $D/H=2.0$  の X 軸上に沿う  $\hat{v}$  のパワースペクトル分布

図-12

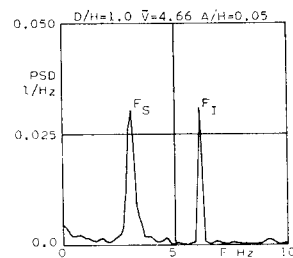
域で  $\bar{C}_{Dbb}$  が回復し  $\bar{C}_D$  が増大せずむしろ減少していることと定性的にはよく対応している。次に 図-12 (b) に示す  $D/H=2.0$  角柱の場合には  $D/H=1.0$  角柱に比べ  $\bar{V}=7.0, 6.0$  と  $\bar{V}$  を低下させるとともに  $P_I$  は若干減少しているが、最大値を示す位置は角柱背面により接近している。この角柱の場合は、図-6 で示したように  $\bar{C}_D$  は  $\bar{V}=7.0, 6.0$  と増大しており振動角柱から放出される渦の強さが強い位置が  $\bar{V}$  の低下に伴って角柱により接近することと対応している。このように、両角柱とも  $\bar{V}$  を低下させ  $A/H$  を増すことによって流れの見掛けの迎角を増しても、角柱背後の  $\hat{v}$  成分のパワースペクトルの増加は認められない。以上をまとめると、 $D/H=1.0$  角柱では  $\bar{V}$  の低下とともに  $\hat{v}$  成分が X の全域で低下するため  $\bar{C}_D$  は減少し、 $D/H=2.0$  の低流速域では、 $\hat{v}$  成分は  $\bar{V}$  の低下とともに、 $D/H=1.0$  と同様に減少するが、ピーク値を示す位置が角柱背面により接近するために、 $\bar{V}=5\sim 7$  の局所的な流速域で  $\bar{C}_D$  が増大していると考えられる。

(5) 変動流速のパワースペクトルの場所的特性と非定常揚力

静止角柱の後流は後流渦の自然発生振動数  $F_S$  で振動



(a)  $D/H=1.0$  の後流の  $\hat{u}$  のパワースペクトル分布、 $\bar{V}=4.66, A/H=0.05$



(b)  $D/H=1.0$  の角柱に作用する非定常揚力のパワースペクトル、 $\bar{V}=4.66, A/H=0.05$ 。图中  $F_I$  成分の揚力係数は 0.44 に相当する。揚力係数の定義は  $C_D$  に準ずる<sup>10)</sup>。

図-13

注 2) 振動角柱の振動の大きさの目安として、見掛けの迎角の変化は

$$\alpha = \tan^{-1}(\dot{y}/U_\infty) \div 2\pi \left(\frac{A}{H}\right) \frac{1}{\bar{V}} \sin 2\pi F_I t$$

と表わされる。

している。さらに角柱を一定の振動振幅  $A/H$  および振動数  $F_I$  で振動させると、振動角柱まわりの流れの  $F_S$  成分と  $F_I$  成分が同期したり、または  $F_S, F_I$  の両成分が混在する場合もあることが知られている<sup>6),7)</sup>。本節では後流中での  $F_I, F_S$  のおのおのの変動流速のパワースペクトル  $P_I, P_S$  の分布を分離して角柱に加わる非定常揚力のおのおののパワースペクトル成分との関連性に着目する。ただし本節の流速のパワースペクトルはすべて一様流方向成分  $\hat{u}$  についての解析結果である。

$D/H=1.0$  角柱まわりの流速のパワースペクトル (NPSD) のピーク値の等高線の解析例として、まず図-13 (a) に  $\bar{V}=4.66, A/H=0.05$  の場合を示す。図は  $\bar{V}_{CR}=8.00$  に対して約  $1/2 \cdot \bar{V}_{CR}$  に近い場合の分布であって、後流には  $P_I$  と  $P_S$  の両成分が同程度のパワーで混在しており、同期していない状態である。そして加振振動数成分の最も強い  $P_I=4.0 \times 10^{-1}$  となる領域は、 $X=0.0, Y=0.85$  を中心とする角柱のごく近傍にある。それに対して、静止角柱後流の渦周波数成分  $P_S=4.0 \times 10^{-1}$  は  $X=1.2, Y=0.8$  を中心とし、 $P_I$  よりも角柱から後方に離れているが近い範囲に及んでいる。 $1/2 \cdot \bar{V}_{CR}$  に近い場合の振動角柱においても、 $F_S$  成分の  $P_S$  は、静止角柱の場合の非定常流速の振幅が増大した位置、 $X=1.7^2)$  のような比較的近いところで、大きな値を示すことは興味深いことである。このときの角柱に加わる非定常揚力の PSD を図-13 (b) に示すが、両振動数成分の揚力はほぼ同程度の強さで角柱に作用している。次に図-13 (a) に比べ  $A/H$  を 2 倍に増加させた  $A/H=0.1$  の場合を図-14 に示す。この場合  $F_S$  成分はほとんど認められず、本測定域内では  $F_I$  成分のみであり、流れは角柱の振動と同期している。図中最も強い  $P_I=8.0 \times 10^{-1}$  は前縁近くの  $X=-0.25, Y=0.67$  付近の狭い範囲に現われ、 $P_I$  の比較的強い領域が流れ方向にいくつかのセルに分離している。すなわちそれぞれの位置は前縁近くの剝離せん断層、再付着が生ずる注3) 後縁付近、そして静止角柱でも後流渦による変動流速の

振幅が最大を示す領域である。これらはいずれも剝離せん断層と振動角柱が相互作用し、後流渦が形成されていく領域である。この振動条件における揚力の PSD はほぼ  $F_I$  のみの単一パワースペクトルになる<sup>2)</sup>。

次に  $D/H=2.0$  角柱まわりの流速の NPSD ピーク値分布の解析例として、 $\bar{V}_{CR}$  より大きい  $\bar{V}=15.93, A/H=0.025$  の場合を図-15 (a) に示す。この角柱が一様流中で静止している場合には、 $(X, Y)=(4.0, 0.7)$  付近で  $\hat{u}_{R.M.S.}$  は最も大きくなった<sup>2)</sup>。図-15 (a) の場合、静止の場合と同一位置の  $X=4.0$  のほかにさらに上流側の  $(X, Y)=(2.5, 1.0)$  付近にも  $P_S$  が強くなる場所が生ずる。一方、 $P_S=P_I=1.0 \times 10^{-1}$  に注目すると  $P_I$  が  $X=0.5 \sim 4.0, P_S$  が  $X=1.5$  以後の帯状の領域で現われている。この場合の揚力の PSD は図-15 (b) に示すように  $F_S$  より  $F_I$  成分が若干大きい。 $P_S=P_I=1.0 \times 10^{-1}$  の強さを示す位置で比較したように、 $P_I$  が角柱により近いところにあることが揚力に現われている。また図-16 に示すように、 $\bar{V}_{CR}$  に等しい  $\bar{V}=12.0, A/H=0.05$  の流速の NPSD ピーク値分布は  $P_I$  が大きい領域は  $(X, Y)=(2.0, 0.95)$  を中心

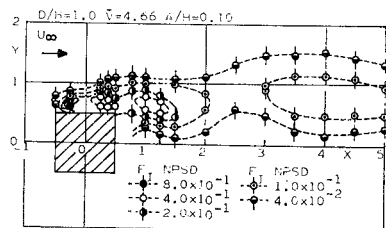
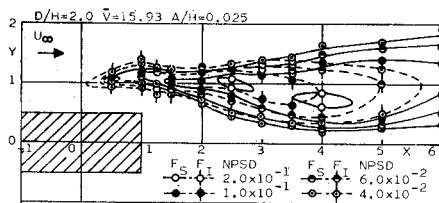
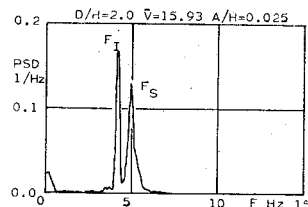


図-14  $D/H=1.0$  の後流の  $\hat{u}$  のパワースペクトル分布、 $\bar{V}=4.66, A/H=0.1$



(a)  $D/H=2.0$  の後流の  $\hat{u}$  のパワースペクトル分布、 $\bar{V}=15.93, A/H=0.025$



(b)  $D/H=2.0$  の角柱に作用する非定常揚力のパワースペクトル、 $\bar{V}=15.93, A/H=0.025$ 。  $F_I$  成分の揚力係数は 0.167 に相当する。

図-15

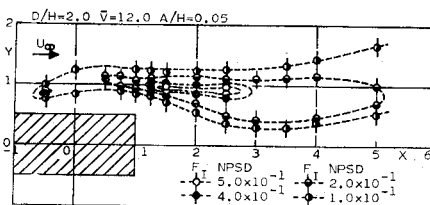


図-16  $D/H=2.0$  の後流の  $\hat{u}$  のパワースペクトル分布、 $\bar{V}=12.0, A/H=0.05$

注 3) 図-5 で明らかなように  $D/H=1.0$  角柱で  $A/H=0.1$  では  $\bar{V}=4.22$  から時間平均的な再付着が始まり、 $\bar{V}=4.66$  はその直前の流速である。

とし、静止角柱の場合の  $X \approx 4.0$  を包含して帯状に分布しているが静止の場合より角柱に接近し、 $\bar{V} = 15.93$ ,  $A/H = 0.025$  の 図-15 (a) に比べてもさらに上流側に移動している。この場合、すでに 図-6 で示したように伴流よどみ点  $\bar{X}_{w.s.}$  も静止時の  $\bar{X}_{w.s.} = 5.0$  から  $\bar{V}_{CR}$  付近では  $\bar{X}_{w.s.} = 2.5$  へと大きく変化した。 $\bar{V}_{CR}$  付近の伴流よどみ点の変化および変動流速の  $P_I$  分布の変化にみられるように振動によって  $D/H = 2.0$  角柱の  $\bar{V}_{CR}$  付近の後流の形状が静止時の場合<sup>2)</sup> に比べ大きく変化していることがわかる。なお、揚力のパワースペクトルは  $F_I$  に単一パワースペクトルピークを示す。

以上述べた、計測結果の3例は2次元的に表示したものであるが、NPSD の変化が最も大きい  $Y \approx 0.75 \sim 1.2$  の位置における NPSD のピーク値の  $X$  方向の変化を  $D/H = 1.0, 2.0$  角柱の場合につき、さらに多くの測定結果もまとめて、図-17, 18 に示す。まず両角柱とも  $\bar{V}$  や  $A/H$  に応じて  $P_I$  や  $P_S$  が  $X$  方向に種々変化しているが、共振流速の場合を除いて、 $X \approx 6.0$  より下流域で  $P_I, P_S$  のいずれかがほぼ  $10^{-1}$  に漸近している。すなわち、同期の状態では  $P_I$  成分が、同期していない状態では  $P_S$  成分のパワーがこの付近に至るまでの角柱周辺では振動角柱の影響を強く受け、種々変化しているが、 $X \approx 6.0$  付近ではいずれも  $10^{-1}$  に漸近して後流のパワーとしてほぼ同一な値を示す。しかし共振流速で振動させた場合のみ  $X \approx 6.0$  付近でもまだ振動の影響が強く残り、強い渦が生じている。

$D/H = 1.0$  角柱では、同期していない状態での  $P_I$  は角柱近傍の  $X = 0 \sim 0.5$  (T.E.) でのみ大きくなり以後減衰している。他方、そのときの  $P_S$  はさらに下流側の  $X = 0.8 \sim 2.0$  付近で大きくなり以後一様に減衰する。同期の状態では  $P_I$  は角柱周辺のほぼ上記2つの領域を含む比較的広い範囲で大きくなる。また  $\bar{V} = 4.66$  の場合に注目すると、 $A/H = 0.05 \rightarrow 0.1$  へと振幅を増すと、 $P_I$  が大きくなる位置が前方へと移動している。

次に  $D/H = 2.0$  角柱では、同期していない状態での  $P_S$  は  $X = 2.0 \sim 4.0$  で大きくなり、同期している状態では角柱の後方  $X = 1.8 \sim 2.8$  で  $P_I$  が大きくなる。 $\bar{V} \approx 7.0$  で加振振幅を  $A/H = 0.0125$  から  $A/H = 0.05$  へと4倍を増すと、 $P_I$  が大きくなる位置は  $X \approx 4.0$  から  $2.2$  へと大きく前進し、すでに述べたように角柱の振動の影響が強く現われている。そして非定常性をさらに増した  $\bar{V} = 6.0, A/H = 0.05$  では、 $X \approx 2.0$  へとその位置はさらに前進している。また上・下面で流れの再付着が発生した  $\bar{V} = 7.0, 6.0, A/H = 0.05$  では再付着点よりもさらに上流側で  $P_I$  が大きくなり、再付着点では変動が小さくなっている。このような流れの変化は 図-14 で述べたように、 $D/H = 1.0, \bar{V} = 4.66, A/H = 0.1$  の再

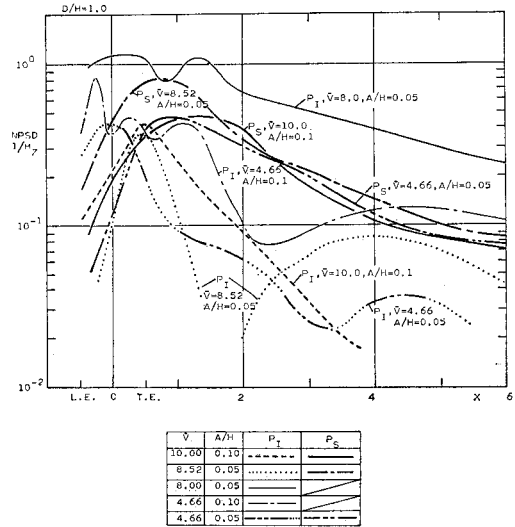


図-17  $D/H = 1.0$  の後流の  $Y = 0.75 \sim 1.2$  における  $\hat{u}$  のパワースペクトル分布

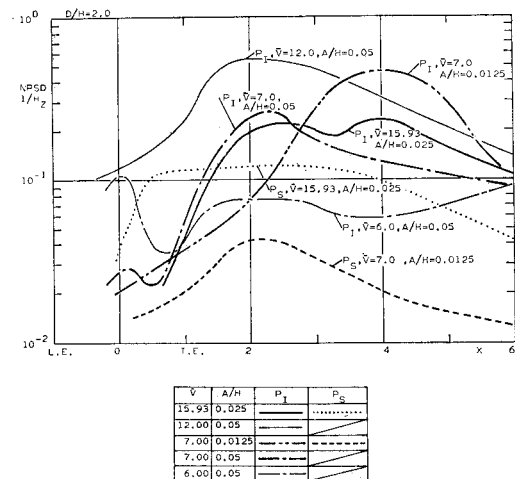


図-18  $D/H = 2.0$  の後流の  $Y = 0.75 \sim 1.2$  における  $\hat{u}$  のパワースペクトル分布

付着が始まる直前の流れと同様の傾向を示し、流れ方向に  $P_I$  が強くなるところがセル状に現われる。

#### 4. 結 論

風洞実験により一様流中で流れに直角方向に並進振動する  $D/H = 0.1 \sim 2.0$  角柱まわりの流速をタンデム型熱線流速計プローブで測定した。伴流よどみ点、後流幅および流速のパワースペクトル等の流れの特性を求め、特に背圧係数、抗力係数および揚力との対応性や円柱との比較、無次元流速  $\bar{V}$ 、断面比  $D/H$  および加振振幅  $A/H$  による流れの特性の変化に注目した。主要な結論は以下のとおりである。



(1)  $\bar{V}_{CR}$  付近の振動角柱の背圧係数は,  $D/H=0.4$  付近で急激に低下する特異な現象が見出された. しかも,  $A/H$  の増加に伴い, その背圧係数は急減するが, 加振振幅により, 最小値を示す断面比  $D/H=0.4$  はほとんど変わらない.

(2) このように,  $\bar{V}$  や  $A/H$  の変化に対して背圧および抗力係数は変化するが, それらの係数の変化の様子は, 静止角柱の場合と同様, After-body 効果の著しい  $D/H=2.0$  角柱を除いて, 伴流よどみ点の移動とよく対応する. すなわち, 振動角柱の場合にも, 伴流よどみ点が角柱に近づくとき背圧は減少し抗力は増加する.

(3) 振動角柱の背圧や後流の挙動を振動円柱の場合と比較すると,  $\bar{V}$  が  $1/2 \cdot \bar{V}_{CR}$  付近の低速領域になっても, 角柱の場合には円柱と異なり背圧の低下や抗力の増大の徴候はみられない. このことは  $\bar{V}$  の低下あるいは,  $A/H$  の増加により流れの見掛けの迎角が増加しても, 円柱と同様後流幅は狭くなるが, 伴流よどみ点の位置は後退し, しかも角柱背後の  $\phi$  成分のパワースペクトルの大きな変化がないことなど, 流れの特性変化とよく対応する.

(4) 角柱まわりの流れに加振振動数成分および静止角柱の後流渦の自然発生振動数成分の2種類のパワースペクトルが分布する場合, 揚力にもこれらの振動数成分が鋭敏に現われ, 流れのパワースペクトル分布と揚力のパワースペクトルとはよく対応する.

(5)  $\bar{V}=1/2 \cdot \bar{V}_{CR}$  付近で振動する角柱まわりの流速のパワースペクトルは, 前縁近くのせん断層付近, 後縁付近および角柱背後等のいくつかのセルに分かれて強くなる領域が現われる.

謝 辞: 本研究を行うにあたり九州大学応用力学研究所, 中村泰治教授ならびに千葉大学工学部機械工学第二学科, 中口 博教授, 東京大学工学部航空学科, 高田浩之教授には有益な議論を賜った. また, 研究費の一部は文部省科学研究費によった. データ解析には応用力学研究所の電子計算機システム MELCÔMCÔSMÔ 900 を使用した. ここに記して厚く御礼申し上げる.

#### 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) Bishop, R.E.D. and A.Y. Hassan: The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 277, pp. 51~75, 1964.
- 4) Taneda, S. and H. Honji: Determination of the drag on vibrating circular cylinders, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. XV, No. 50, pp. 83~92, 1967.
- 5) Sarpkaya, T.: Fluid forces on oscillating cylinders, ASCE Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, Vol. 104, No. WW 4, pp. 275~290, 1978.
- 6) Toebes, G.H.: The unsteady flow and wake near an oscillating cylinder, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, series D, Vol. 91, pp. 493~505, 1969.
- 7) 釜口展宏・田中博喜・高原 茂・松井友二: 振動円柱の非定常空気力に関する研究, 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集, pp. 153~160, 1970.
- 8) 岡島 厚・中村泰治: 高レイノルズ数範囲における円柱のうず励振, 第10回災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp. 67~70, 1973.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 松本 勝・白石成人: 二次元定常流れにおける正方形断面に作用する非定常揚力および応答特性, 土木学会論文報告集, 第205号, pp. 31~42, 1972.
- 12) 森光康夫・伊藤 学・宮田利雄: 空気力の非線型性を考慮した構造物の空力弾性振動, 土木学会論文報告集, 第219号, pp. 27~36, 1973.
- 13) 小松定夫・小林紘士: 調和振動中の長方形断面角柱に作用する動的圧力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第278号, pp. 15~23, 1978.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Bearman, P.W. and M.E. Davies: The flow about oscillating bluff structures, Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, Session 4-Dynamic Response II, 1975.
- 17) 林 正徳・大屋裕二・岩崎直道・榎本 隆: 二次元柱の抗力および後流に関する一実験, 九州大学工学部集報, 第50巻, 第6号, pp. 767~773, 昭和52年.
- 18) 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.
- 19) Griffin, O.M.: The unsteady wake of an Oscillating cylinder at low Reynolds number, Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME, Series E, Vol. 38, pp. 729~738, 1971.
- 20) 溝田武人・岡島 厚: 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, 土木学会論文報告集, 第327号, pp. 49~60, 1982.
- 21) 溝田武人・中村泰治: 矩形断面柱の非定常揚力と後流の速度変動について, 構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集, pp. 201~208, 1974.
- 22) Sarpkaya, T.: Vortex-induced oscillations, A selective review, Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME, Series E, Vol. 46, pp. 241~258, 1979.
- 23) 溝田武人: 角柱まわりの流れ(II), 一平均流および平均圧力の測定一, 九州大学応用力学研究所報, 第46号, pp. 129~145, 昭和52年.