

並列2角柱の空力静特性におよぼす迎え角の影響

EFFECT OF ANGLE OF ATTACK ON AEROSTATIC CHARACTERISTICS
OF TWO RECTANGULAR CYLINDERS ARRANGED SIDE-BY-SIDE岡島 厚^{*} 上野久儀^{**} 木綿隆弘^{***} 恵上浩一^{****}

By Atsushi OKAJIMA, Hisanori UENO, Takahiro KIWATA and Koichi EGAMI

The effects of angle of attack on aerostatic characteristics of two rectangular cylinders arranged side-by-side in a uniform flow has been studied experimentally. Measurements of surface pressures and Strouhal frequencies of two cylinders with a cross section of a width/height ratio, B/H of 1, 2 and 3, an angle of attack of $\alpha = 0^\circ$ to 10° and a gap/height ratio, S/H of 0.25 to 1 are presented. Aerostatic characteristics of two cylinders are discussed, compared with flow patterns visualized by the smoke-wire technique, and the detailed behavior of flow around the two cylinders; the impingement and the reattachment of separated shear layers on outer side surfaces and the gap flow accompanied by separation bubbles are described. A slope of the the normal force against an angle of attack of the models with the B/H ratio of 2 or 3 and with a certain gap ratio is negative, $(\partial C_n / \partial \alpha) < 0$, at the angle of attack of 0° to 5° .

1. 緒論

円柱や長方形断面などの Bluff body は構造物の構成基本要素材として多用されているが、特に、長方形断面の場合には、単独の場合でもその断面形状によって、周辺流れやその空力特性が大きく変化する。さらに、それらが複数個配置された場合には、相互干渉も加味され、空力特性は断面辺長比、隙間間隔、迎え角などに対して複雑に依存する⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。流れが並列2角柱に直角に当たる迎え角 $\alpha = 0^\circ$ の場合の流れパターン、静圧分布や後流ストローハル数に対する断面辺長比、隙間間隔の影響については、既に文献1、2で報告した。しかし、並列2角柱まわりの空力特性における迎え角の影響は、その空力弾性的不安定振動とも関連して興味ある重要な事柄である。

そこで、本研究では風洞実験により一様流中に並列に置かれた同一形状の2つの模型につき、迎え角、断面辺長比および隙間間隔を種々変え、物体表面上の静圧分布や後流の速度変動のストローハル数を測定し、各空力係数を静圧分布から算出する。また、スモーク・ワイヤー法により流れの可視化観察を行う。そして並列に配置された物体まわりの流れに特有の偏り流れの様相、2角柱間の隙間流れにおける前縁剝離バブルの挙動および前縁剝離せん断層の角柱側面との干渉などに注目して、並列2角柱の空力静特性におよぼす迎え角の影響について考察する。また、得られた静特性からギャロッピング振動など空力弾性的振動との関連について若干の検討を加える。

* 工博 金沢大学教授 工学部機械システム工学科 (〒920 石川県金沢市小立野2丁目40番20号)
 ** 工博 金沢大学助教授 工学部機械システム工学科
 *** 工修 金沢大学助手 工学部機械システム工学科
 **** 工修 川崎重工業(株) 岐阜技術研究所

2. 実験方法

実験は測定部断面 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 、流れ方向長さ 5m の金沢大学土木建設工学科のゲッチンゲン型風洞を使用し、レイノルズ数 $Re (= U \cdot H / \nu)$ 、ここで U は一様流速、 H は模型の前面辺高さ、 ν は空気の動粘性係数は 2×10^{-4} で一定とした。乱れ強さは 0.3% 以下である。供試模型には断面辺長比 B/H (B は模型の流れ方向長さ) $= 1, 2, 3$ の角柱(それぞれ $H = 40, 40, 30\text{mm}$)を用い、図1の風洞測定部模型設置の概略に示すように、一様流中に流れに対して並列に2個の供試模型を配置した。並列2角柱の流れに対する迎え角は $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ とし、模型間の隙間間隔 S は $S/H = 0.25 \sim 1$ の範囲で変化させた。静圧 p は、各模型表面上16~20個設けた $\phi 0.5\text{mm}$ の静圧測定孔からビニール管、スキャニバルブを介して測定され、圧力係数 $C_p (= (p - p_0) / (1/2 \rho U^2))$ 、 p_0 は一様流の静圧、 ρ は空気密度)を求める。そして C_p 分布から模型に働く接線力係数 C_t 、法線力係数 C_n を求める。さらに、2角柱の法線力係数の総和は C_{nt} とする。なお、各係数の正の方向は図2のように定義する。特に、 C_n は互いに反発する方向を正とする。後流渦の周波数 f は模型背面から $4H$ 、上下角柱の外側面からそれぞれ $2H$ だけ上下に離れた位置に2本の熱線プローブを挿入して検出し、FFT周波数解析を行い、後流速度変動のストローハル数 $St (= fH/U)$ を求める。また、風洞測定部に対する模型のブロックージ比は模型高さ $H = 40\text{mm}$ の場合、 10% で若干大きい、ここではその補正は施していない。

3. 実験結果

3.1. 静圧分布

一様流中に並列に配置された断面辺長比 $B/H = 1, 2, 3$ の2角柱について、迎え角 $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ における2角柱表面のアンサンブル平均した静圧分布を示す。

(1) $B/H = 1$ 角柱の場合： 比較的小さい迎え角($\alpha = 0^\circ, 2.5^\circ$)で、隙間間隔 $S/H = 0.25 \sim 1$ の場合、文献1、2 ($\alpha = 0^\circ$)で報告したような、上下角柱間で静圧分布が間欠的に入れ替わる非定常な偏り流れ現象が生じるが、迎え角の増加により偏り流れは安定化する。外側面(BC)における圧力回復は、 $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ の何れの場合にも認められず、後述のスモークワイヤ法による流れの可視化観察によっても剥離せん断層は再付着しないことが確認される。図3、4に、 $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$ で隙間比 $S/H = 0.25, 1$ の静圧分布を例示するが、狭い隙間の場合、前縁A点近傍に形成される比較的小さい剥離バブル内はかなり低圧となる。 α の増加に伴い、上下角柱とも前面よどみ点は互いに内側Aへ移動し、外側面(BC)および背面(CD)で、静圧低下が見られる。隙間面(AD)における流れの再付着による剥離バブルの大きさは上方角柱で小さく、下方角柱で若

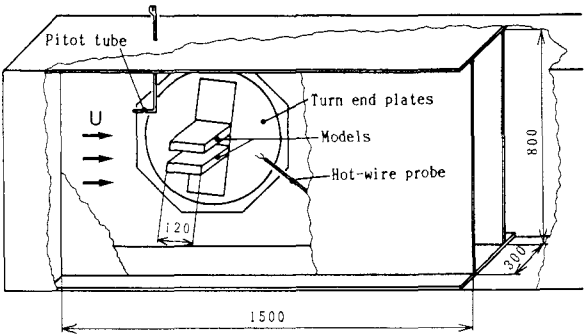


図1 風洞測定部模型設置の概略

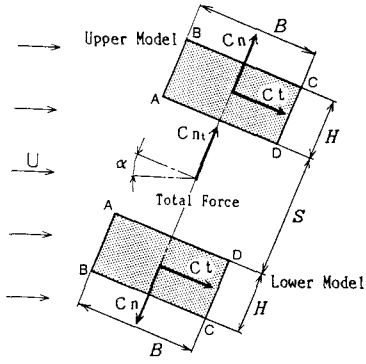


図2 法線力 C_n 、接線力 C_t 、迎え角 α 、 B/H 、 S/H などの定義

干大くなる。隙間の広い $S/H = 1$ の場合、 $\alpha = 5^\circ$ では、隙間流れは下方角柱に偏った静圧分布を呈するが、 $\alpha = 10^\circ$ (7.5°)では、後述のストローハル数の急激な変化を伴って、流れは上方角柱に偏ることがわかる。

(2) $B/H = 2$ 角柱の場合：隙間 $S/H = 1$ 、 $\alpha = 5^\circ$ 、 10° の静圧分布を図5、6に示す。外側面(BC)における上下角柱間の圧力差は、 α の増加に伴い拡大し、下方角柱の外側面では、 $\alpha = 5^\circ$ の後縁側Cから圧力回復し、 α の増加とともに圧力回復点は前縁B側へ移動し、 C_p 値は一様に低下する。狭い隙間間隔($S/H = 0.25$)の隙間(AD)面における C_p 分布は、上下角柱共に前縁A付近に低圧域を持ち、ほぼ同一の C_p 分布形状である。隙間が広がると($S/H = 0.5 \sim 1$)、図のように、 α の増加に伴い上下角柱の圧力回復点は、それぞれ前縁A方向および後縁D方向へ移動し、隙間内の静圧分布の非対称性が顕著となる。

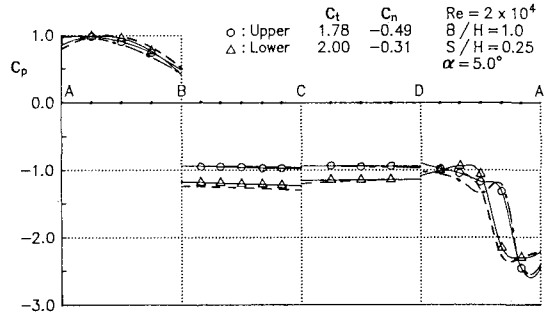


図3 並列2角柱の静圧分布
($B/H = 1, S/H = 0.25, \alpha = 5^\circ$)
- - - - , Upper; - - - - , Lower; $\alpha = 10^\circ$)

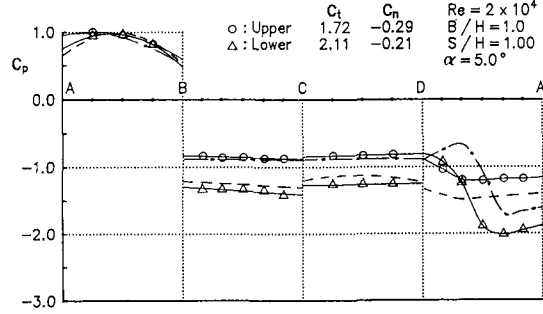


図4 並列2角柱の静圧分布
($B/H = 1, S/H = 1, \alpha = 5^\circ$)
- - - - , Upper; - - - - , Lower; $\alpha = 10^\circ$)

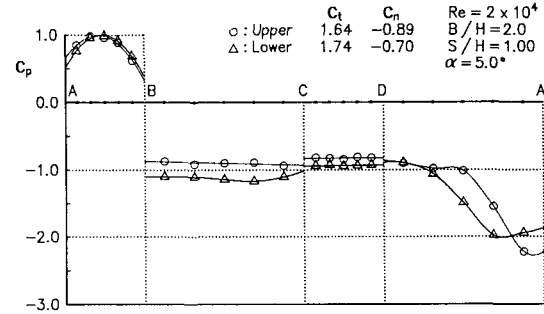


図5 並列2角柱の静圧分布
($B/H = 2, S/H = 1, \alpha = 5^\circ$)

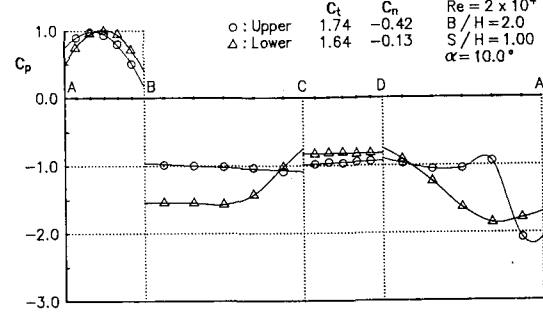


図6 並列2角柱の静圧分布
($B/H = 2, S/H = 1, \alpha = 10^\circ$)

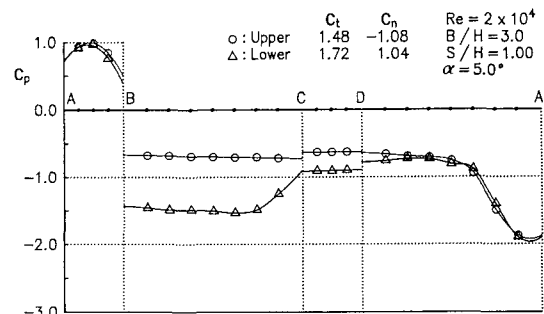


図7 並列2角柱の静圧分布
($B/H = 3, S/H = 1, \alpha = 5^\circ$)

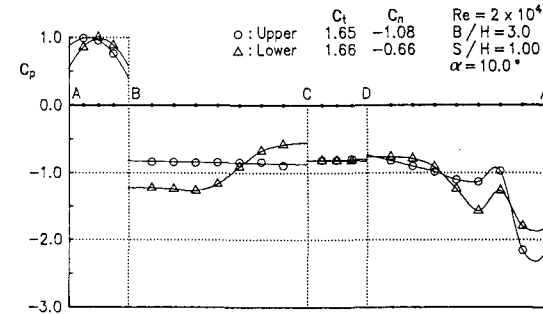


図8 並列2角柱の静圧分布
($B/H = 3, S/H = 1, \alpha = 10^\circ$)

(3) $B/H = 3$ 角柱の場合：この角柱の場合、 $\alpha = 0^\circ$ では $S/H = 1$ でも偏り流れは発生せず、上下角柱の静圧分布はほぼ一致する。図7, 8に $S/H = 1$ 、 $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$ の静圧分布を示す。隙間の両AD面の静圧分布は $\alpha = 5^\circ$ の場合でもほぼ一致し、前縁剥離バブルが定在していると考えられる。 $\alpha = 10^\circ$ の場合、下方角柱の低圧域が広がる。一方、 α の増加に伴って、外側BC面の静圧分布は、下方角柱の後縁近傍で圧力回復が進むとともにBC側面全域にわたり静圧は回復する。また、上下角柱の背面CDの背圧値は $\alpha = 10^\circ$ ではほぼ等しくなる。

3.2. 法線力係数 C_n と接線力係数 C_t

$B/H = 1, 2, 3$ 角柱の接線力係数 C_t 、法線力係数 C_n 、さらに2角柱の法線力係数の総和 C_{nt} の値の間隔 S/H と迎え角 α に対する変化を図9(a), (b), (c) に図示する。

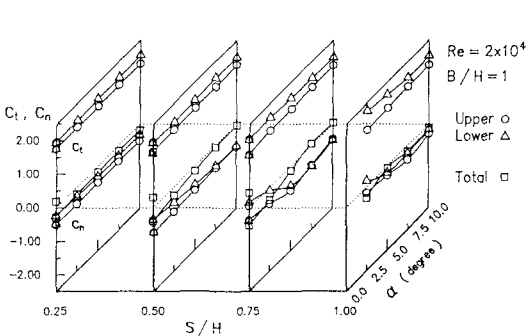


図9(a) 法線力 C_n と接線力 C_t ($B/H = 1$)

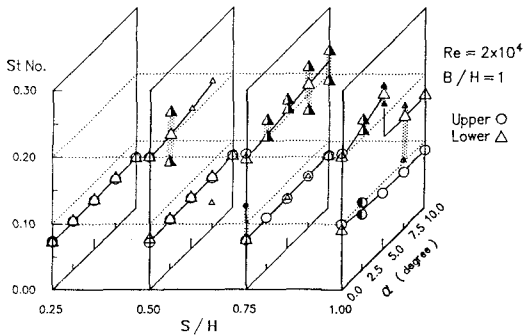


図10(a) ストローハル数 St ($B/H = 1$)

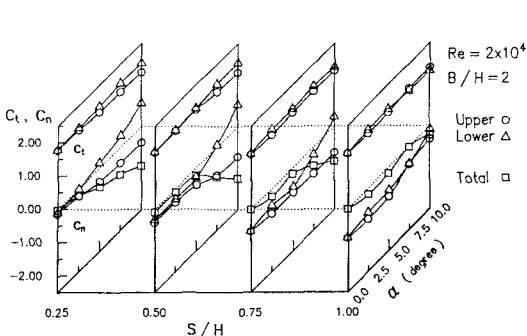


図9(b) 法線力 C_n と接線力 C_t ($B/H = 2$)

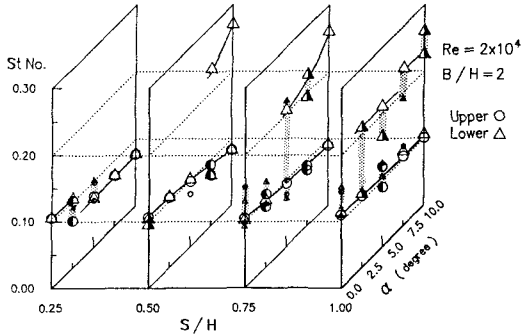


図10(b) ストローハル数 St ($B/H = 2$)

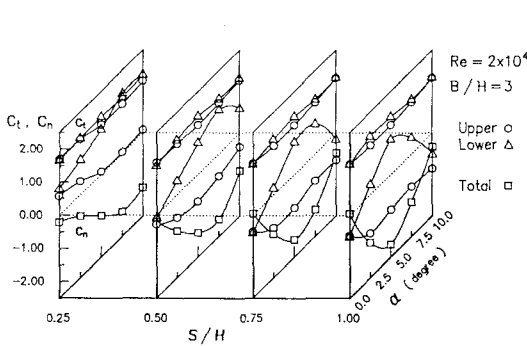


図9(c) 法線力 C_n と接線力 C_t ($B/H = 3$)

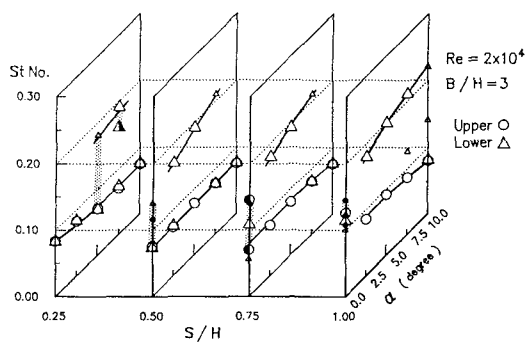


図10(c) ストローハル数 St ($B/H = 3$)

(1) $B/H = 1$ 角柱: $\alpha = 0^\circ$ において、明確な偏り流れが生じる $S/H = 0.25 \sim 1$ の場合、 C_t および C_n はそれぞれ相異なる 2 つの値を示す。図から、 $\alpha \leq 10^\circ$ 程度の迎え角変化による各空力係数の変化値は小さく、むしろ、偏り流れの入れ替わりに伴う C_t 、 C_n の変化値の方が大きい。 C_t 値は、 $\alpha > 0^\circ$ の場合いずれも上方角柱は 1.7 (図中 ○印)、下方角柱は 2~2.2 程度 (図中 △印) を示し、常に下方角柱の C_t の方が大きい。一方、 C_n は上下角柱共に吸引する方向 ($C_n < 0$) で、しかもその吸引する力がほぼ同値であることから、2 角柱全体に作用する法線力の総和 C_{nt} (図中 □印) は 0 に近い。

(2) $B/H = 2$ 角柱: 隙間の狭い $S/H = 0.25$ の場合、迎え角 α の増加に従い、上方角柱の C_n は吸引力 (< 0)、下方角柱に排斥力 (> 0) の値が漸増するが、隙間が広くなると両角柱ともに $C_n < 0$ の吸引力が作用する。従って、法線力の総和 C_{nt} の α に対する傾斜は S/H と α に依存し、 $(\partial C_{nt} / \partial \alpha) < 0$ になるのは、 $S/H = 0.25$ では $\alpha \geq 0^\circ$ 、 $S/H = 0.5$ では $\alpha \geq 5^\circ$ の領域で生じ、 $S/H = 1$ では、 $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ で $(\partial C_{nt} / \partial \alpha) \approx 0$ である。一方、迎え角に対する C_t の変化には大きな変化は見られない。

(3) $B/H = 3$ 角柱: この角柱の場合、下方角柱の C_n の α に対する変化は顕著となり、 $\alpha = 5^\circ \sim 7.5^\circ$ の範囲で極大値をとる。一方、上方角柱の C_n の α に対する変化は小さいので、総和 C_{nt} は極小値をとる。従って、 $\alpha = 0^\circ$ における $(\partial C_{nt} / \partial \alpha)$ の値は、いずれも負の値で、 S/H の増加に伴って大きい負の値を示す。

3.3. ストローク数

後流の速度変動の St 数を図 10 (a), (b), (c) に示す。図中、記号の大小は複数の卓越成分のうちのスペクトル強さの大小を表示し、広帯域 (網掛け) の幅を ●▲ などで表示した。まず、 $B/H = 1$ 角柱の場合、隙間の狭い $S/H = 0.25$ では、上下角柱共に $St = 0.07$ を示す。 $S/H = 0.5, 0.75$ では、 $\alpha = 0^\circ$ において、偏り流れによって生ずる高低 2 種類 (0.2, 0.07) の St 数があり、 α の増加に伴い、それぞれ上下両角柱後流の St 数値へ連続的に継がっている。 $S/H = 1$ の場合、 $\alpha \approx 5^\circ$ で下方角柱の St 数の値は $St = 0.22$ から 0.17 へステップ状に急変する。この変化の様相については 4.1 で詳述する。 $B/H = 2$ 角柱の場合、 $S/H = 0.25$ における St 数は両角柱で等しいが、 $\alpha = 2.5^\circ \sim 5^\circ$ で 0.11 から 0.08 へと変化する。 S/H が増加すると下方角柱の St 数には、0.2 を越える高い St 数成分も現れる。 $B/H = 3$ 角柱の場合、 $S/H = 0.25$ 、 $\alpha = 5^\circ \sim 7.5^\circ$ の下方角柱に高 St 数成分が生じ、 S/H が広がるにつれ、 $\alpha = 2.5^\circ \sim 7.5^\circ$ で、下方角柱後流で高 St 数成分が卓越するが、 $\alpha = 10^\circ$ で、2 角柱の St 数値がほぼ一致して低い値となる。図 9 (c) の 2 角柱の法線力 C_n 値の両者が近づくことと呼応している。

4. 考察

4.1 並列 $B/H = 1$ 角柱まわりの流れパターン

並列 $B/H = 1$ 角柱まわりの流れを、図 11, 12 の可視化写真と図 4 などに例示する静圧分布と比較する。 $B/H = 1$ 角柱のいずれの場合も外側面 (BC) の静圧分布には、圧力回復の徴候は認められず、並列 2 角柱の外側面の流れは図 11 (a), 12 (a) のような前縁からの完全剝離流れパターンである。特に、隙間が小さい ($S/H = 0.25$) 場合、上下角柱の St 数は、 $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ で、ほぼ 0.07 で等しく、2 角柱を一体の構造物と見なした場合の流れの様相を呈している。図 11 の $S/H = 0.5$ 、 $\alpha = 5^\circ$ の流れパターンは、文献 2 の $\alpha = 0^\circ$ の偏り流れパターンと類似し、安定して形成される。この場合、下方角柱に幅が狭く、高い St 数の後流域が形成される。一方、隙間の広い $S/H = 1$ 、 $\alpha = 5^\circ$ では、図 4 に示した静圧分布や St 数の変化および図 12 (a) および隙間流れの拡大写真の図 12 (b), (c) の可視化流れパターンに示すように、隙間内に生じる偏り流れは上下に間欠的に変動し、図 (b) では下方角柱に、図 (c) では上方角柱側面に接近して付着している。すなわち、 $\alpha \approx 5^\circ$ 付近で隙間流れの偏りパターンが間欠的に変動し、 $\alpha > 5^\circ$ では隙間流れは上向き流れに変化し、下方角柱まわりの流れは完全剝離流れパターンとなる。これらの可視化観察結果は、図 10 (a) の隙間 $S/H =$

1で、 $\alpha = 0^\circ \sim 2.5^\circ$ で2種類の St 数値が認められ、 $\alpha = 5^\circ$ 付近で St 数値が α に対して臨界的に変化することに対応している。

4.2 並列 $B/H = 2$ 角柱まわりの流れパターン

角柱断面が流れ方向に長い $B/H = 2$ 角柱になると、 $\alpha = 0^\circ$ の場合には外側前縁Bからの剥離せん断層は剥離したままであるが、 α の増加に伴い、下方角柱の後縁C近傍で再付着するようになる。このような流れのパターン変化は、図10(b)に示した後流 St 数において、低い St 数成分(≈ 0.1)の他に、高い St 数成分(α により、0.2, 0.24)が卓越することに対応している。図13(a), (b)に、隙間流れの可視化写真を示すが、(a) $S/H = 0.5$ の場合、剥離バブルは前縁付近に限定されて形状は小さいが、(b) $S/H = 1$ になると、剥離バブルは大きく成長する。図5の静圧分布に示した隙間部の低圧域は、このような剥離バブルの形成に一致している。また、そのバブルがAD面の広い領域を占め、両角柱共に強い吸引力が作用する要因ともなっている。

4.3 並列 $B/H = 3$ 角柱まわりの流れパターン

図14(a), (b)に $\alpha = 5^\circ$ 、 $S/H = 1$ の並列2角柱まわりの流れとその隙間流れを示す。図(a)から、下方角柱の外側後縁近傍では再付着が認められ、剥離バブルが下方角柱BC面で閉じることによって図7の静圧

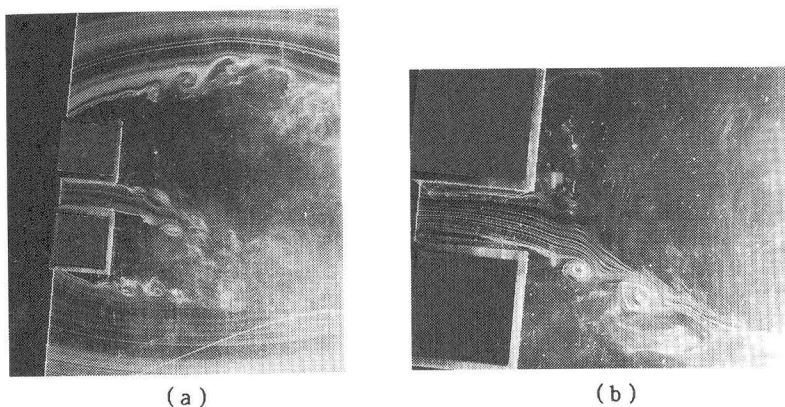


図11 並列2角柱まわりの流れパターン
($B/H = 1$, $S/H = 0.5$, $\alpha = 5^\circ$, $Re = 0.4 \times 10^4$)

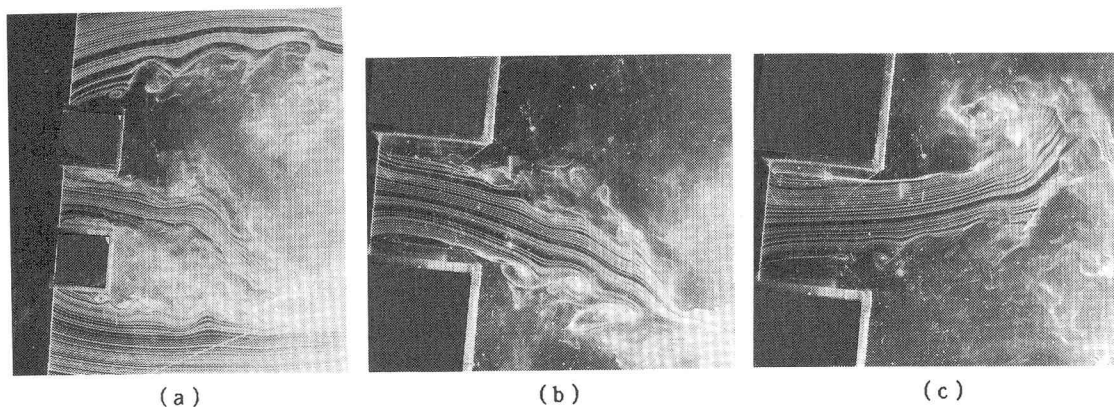


図12 並列2角柱まわりの流れパターン
($B/H = 1$, $S/H = 1$, $\alpha = 5^\circ$, $Re = 0.4 \times 10^4$)

分布に示したごとく剝離バブル内が一様に低圧となり、後縁C近傍で圧力回復する分布形状となる。従って、下方角柱には下向きの大きな排斥力が作用する。また、上下角柱の後流幅はかなり異なり、図10(c)に示した St 数値の相違($St=0.2, 0.1$)とよく対応する。図14(b)の隙間流れパターンから、隙間内の両側面上にはほぼ同じ大きさの前縁剝離バブルが観察され、図7の上下角柱の静圧分布には大きな差がないことに対応する。

4.4 法線力係数と迎え角の関係

並列2角柱を一体の構造物として見た場合、ギャロッピング振動などの空力弾性的不安定振動の発生と密接に関係する特性値に2角柱の法線力の総和 C_{nt} の迎え角に対する勾配がある。すなわち、 $(\partial C_{nt}/\partial \alpha)$ の正負は、並列2角柱のギャロッピング振動発生の重要な指標である。 $B/H=1$ 角柱の場合には、図9(a)に示したようにいずれの S/H でも $(\partial C_{nt}/\partial \alpha) \geq 0$ であるが、 $B/H=2, 3$ 角柱のある迎え角範囲では、 $(\partial C_{nt}/\partial \alpha) < 0$ であり、この場合並列2角柱のギャロッピング振動発生の可能性を示唆している。まず、 $B/H=2$ 角柱の場合、 $(\partial C_{nt}/\partial \alpha) < 0$ となる迎え角 α の領域は隙間 S/H によって異なり、隙間 S/H が狭いほど、小さい α から $(\partial C_{nt}/\partial \alpha) < 0$ となる。狭い隙間の場合には、隙間の C_p 分布は上下ほとんど変わらず、迎え角の増大にともない、下方角柱外側後縁付近で剝離せん断層の再付着の徴候が生じると共に上下角柱の外側面の C_p 分布に差異が生じ、 $C_{nt} < 0$ となる。さらに、断面の細長い $B/H=3$ 角柱の場合には、下方角柱外側後縁における再付着が益々容易となり、図9(c)に示すごとく、いずれの S/H の場合でも、

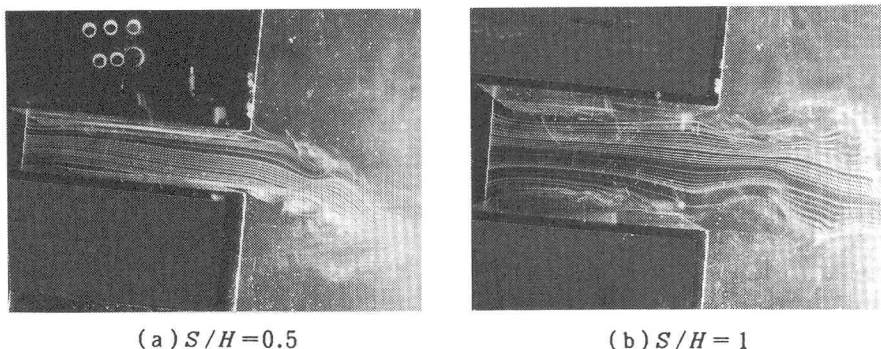


図13 並列2角柱隙間流れパターン
($B/H=2, \alpha=5^\circ, Re=0.4 \times 10^4$)

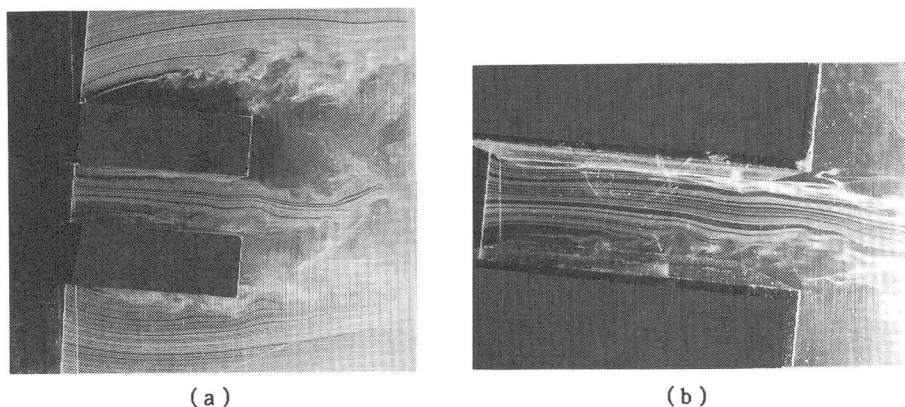


図14 並列2角柱まわりの流れパターン
($B/H=3, S/H=1, \alpha=5^\circ, Re=0.4 \times 10^4$)

迎え角 $\alpha = 0^\circ$ で $(\partial C_{nt} / \partial \alpha) < 0$ となるが、 $(\partial C_{nt} / \partial \alpha)$ の値は S/H の増加に伴い、極端に負の大きい値となる。図7に例示したごとく、隙間AD面の C_p 分布は上下ほとんど変わらないが、上下角柱の外側BC面の C_p 分布に大きな相違が認められ、結果として C_{nt} は負の値となる。しかし、広い隙間で大きい迎え角の場合、図8のようにAD面に形成される剥離バブルの大きさに差異が現れ、隙間流れに偏りが生じて C_p 分布が変化し、 $(\partial C_{nt} / \partial \alpha) > 0$ に転ずる。 $(\partial C_{nt} / \partial \alpha)$ の値の α や S/H に対する変化は、剥離バブルを伴った隙間流れパターンの変化や外側BC面における剥離せん断層の再付着の様相変化などと密接に関連することがわかる。

5. 結論

一様流中に並列に配置された2角柱について、断面辺長比 $B/H = 1, 2, 3$ 、隙間 $S/H = 0.25 \sim 1$ 、迎え角 $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ の範囲で各角柱の静圧分布、空力係数、後流 St 数について風洞実験とスモーク・ワイヤー法による可視化観察を行い、並列2角柱の空力静特性に及ぼす迎え角の影響を明らかにした。

得られた主な結論は次の通りである。

1. 断面辺長比 $B/H = 1$ 角柱では、迎え角の小さい ($\alpha = 0^\circ, 2.5^\circ$)、隙間 $S/H = 0.25 \sim 0.75$ で、間欠的に変動する隙間の偏り流れが生じ易い。広い隙間 $S/H = 1$ では、 $\alpha \approx 5^\circ$ 以上で偏り流れは安定化する。 $B/H = 1$ 角柱の外側面流れは、本実験 ($\alpha \leq 10^\circ$) の範囲では、いずれも完全剥離パターンである。

2. 細長い断面の $B/H = 2, 3$ 角柱の場合、隙間の両面に剥離バブルが形成され、隙間 S/H と迎え角 α の変化によって、その大きさが変化し、静圧分布の相違が生じる。一方、下方角柱の外側面では、 α の増加に伴い、後縁付近で剥離せん断層の再付着による低圧を伴う閉じた剥離バブルが形成され、法線力傾斜 $(\partial C_{nt} / \partial \alpha)$ が負となる要因となる。同時に、下方角柱の下流域に高い St 数の後流渦が形成される。

3. 迎え角 α による静圧分布や後流渦形成への影響は、剥離バブルを含む隙間流れの挙動と前縁剥離せん断層の下方角柱外側面との間の干渉によって生じる。

参考文献

- (1) 岡島厚, 杉谷賢一郎, 溝田武人, "一様流中に置かれた並列2長方形断面柱まわりの流れ", 機械学会論文集, 51-472 B, (1985), pp. 3877~3886.
- (2) 岡島厚, 杉谷賢一郎, 溝田武人, "一様流中に置かれた並列2長方形断面柱の空力静特性", 九大応力研所報, 60, (1984), pp. 59~87
- (3) 大屋裕二, "一様流中に並列配置された複数物体の後流干渉に関する研究", 航空宇宙学会誌, (1983), pp. 12~36.
- (4) Y. Ohya, A. Okajima, M. Hayashi, "Wake Inteference and Vortex Shedding", Encyclo. Fluid Mech., Gulf Pub. Co., vol. 8, Ch. 10, (1989), pp. 323~389.

(1991年9月30日受付)