- 38) NENNI, J. P. and GLUYAS, G. L.: Aerodynamic Design and Analysis of an LFC Surface, *Astronautic & Aeronautics*, Vol. 4, No. 7 (1966), pp. 52-57.
- 39) THELANDER, J. A., ALLEN, J. B. and WELGE, H. R.: Aerodynamic Development of Laminar Flow

Control on Swept Wing Using Distributed Suction through Porous Surfaces, *Proc. 13th ICAS* (1982), pp. 182-189.

- 40) PEARCE, W. E.: Progress at Douglas on Laminar Flow Control Applied to Commercial Transport Aircraft, *Proc. 13th ICAS* (1982), pp. 811-817.

一 解 説

角 柱 の ま わ り の 流 れ*

高 野 暉**・新 井 勲**
松 坂 正 芳**

Key words: Boundary layers; viscous flows; bluff bodies

1. ま え が き

高層ビル、送電線鉄塔、大型クレーン等に働く風圧荷重、それらの建造物への周辺建造物、丘陵、森林等によって誘起される乱気流の影響等の建築設計上の問題、ビル付近に発生する大気汚染物の後流による拡散、ビル周辺の地面近くの高い乱気流の歩行者を含む地上物件への影響等の環境工学上の問題、あるいは、空港滑走路近くにある高い管理塔、空港ビル、大型ハンガー、さらには空港周辺の山地や森林によって誘起される平均風速の局所的急変、大規模な渦の離着陸時の小型機、VSTOL、ヘリコプタに対する影響等の航空工学上の問題等、きわめて広い分野にわたる工学の実践問題に関連して、円柱や角柱のまわりの流れについて多くの研究が行われてきている。一方、その形状が簡単であることから、剝離、渦の放出機構、後流の構造等の流れの微細にまで至る空気力学的特性に関する基本的問題として、実験的あるいは数値解析的な研究も続けられている。

円柱や角柱(柱状物体)のような下流側に大きな剝離領域—後流を伴う、いわゆる bluff body の抗力、表面圧力分布、後流の構造等についての研究は、二次元形状についてのものが多いが、地表面上の建造物のような実際問題をシミュレートした実験、すなわち、地面上におかれた円柱や角柱のまわりの三次元流れについての風洞による実験的研究も多く行われている^{1)~3)}。また、複数の柱状物体が配列されている場合には、とくにその間隔が小さいと、物体単独の場合と

はまったく異なった流れの様相を呈し、異常な圧力分布、空気力を生ずる。このような気流の干渉の問題もビル群等の実際問題に関連して、複数円柱⁴⁾、複数角柱についての研究も行われている。

本稿では、円柱のまわりの流れについては割愛し、角柱のまわりの流れの挙動、それに伴う角柱の空気力学的特性について、その概略を述べる。まず、二次元角柱、地面板上におかれた三次元角柱それぞれが1本だけの場合、つづいて2本の角柱が配列されている場合について記すが、これらについて、従来の代表的な研究結果を紹介するとともに、著者らの行った実験結果について概略する。一般に、柱状物体の空気力学的特性は、それにあたる主流の乱れの強さはもちろん、その表面の粗さ、とくに角柱の場合にはその角の丸味によって著しく変わるが(たとえば文献1)参照)、ここでは表面は滑かで角は十分に鋭い角柱を取り扱う。二次元の場合には一般的に長方形断面の角柱を考えるが、三次元の場合には複雑さを避けるために正方形断面の角柱に限定する。また、建造物の振動に関連して、非定常流—円柱や角柱のフラッターの問題も重要であるが、ここでは触れないことにする。

2. 二次元単独角柱

二次元角柱の風洞実験は、ふつう十分に長い角柱の両端に十分に大きな平板(端板—風洞壁で代用することもある)をつけて行われる。単独角柱の場合については、角柱表面の圧力分布、角柱に働く空気力の測定、後流内の平均流速、乱れ強さ、放出渦の周期等の測定、さらに可視化による流れの観察等詳細にわたる多くの実験的研究が行われている。

一辺が—様流に平行におかれた角柱の場合、その縦横比によって剝離流、後流の様相が顕著に変わり、したがって、その空気力学的特性も縦横比によって変化

* 昭和57年10月18日、第14回流体力学講演会にて講演。
昭和58年1月22日原稿受理 Flow around Rectangular Cylinders

** 東京大学工学部航空学科 Akira TAKANO, Isao ARAI and Masayoshi MATSUZAKA

第1図 抗力係数 C_D 、背面圧力係数 $-C_{p,b}$ およびストローハル数 St の縦横比 d/w による変化 (2次元角柱)^{5), 6)}

する。第1図* は縦横比 d/w による抗力係数 C_D (基準面積は正面面積)、背面中央における圧力係数 $C_{p,b} = (p_b - p_\infty) / (1/2) \rho U^2$ (p_b および p_∞ はそれぞれ背面圧力および一様流静圧, U は一様流速, ρ は密度) およびストローハル数 $St = n w / U$ (n は単位時間に放出される後流渦の数) の変化を示す^{5), 6)}。図からわかるように, C_D および $C_{p,b}$ は d/w に対して同じような変化をしており, $d/w = 0.7$ 付近に顕著なピークがある。 $d/w < 0.7$ の C_D および $-C_{p,b}$ が増加している範囲では, d/w の増加とともに後流の角柱背面への巻き込みが強くなり, $d/w \approx 0.7$ を越えると逆に弱くなること が気流の観察から知られており⁵⁾, そのために C_D および $-C_{p,b}$ は $d/w \approx 0.7$ で最大値をもつようになる。第2図は $d/w = 0.2, 0.6$ および 1.0 の場合の背面圧力分布を示すものであるが⁶⁾, 上記の巻き込みの強い $d/w = 0.6$ の場合には, 他の場合と違って, 負圧は全般的に大きく中心部で著しく最大値をもっている。また, $d/w = 0.7$ 付近では剥離流の挙動は本質的には変わらないので St は d/w の増加とともに滑らかに減少しているが, 第1図のように $d/w \approx 2.8$ で急激に増

* 参考文献より引用した図においては, 用いられている記号は本稿では統一するように修正してある。

第2図 背面圧力係数 $-C_{p,b}$ の横方向の分布 (2次元角柱)⁶⁾

第3図 背面圧力係数 $-C_{p,b}$ のレイノルズ数 Re による変化 (2次元角柱, $d/w = 0.6$)⁶⁾

加する。これは前面の角からの剥離流が $d/w \approx 2.8$ 以上になると側面に再付着し, 背面の角から新たに剥離して後流を形成するためである⁵⁾。

角の鋭い角柱の場合, その角から必ず剥離するので, 円柱の場合のようなたとえば抗力係数の急変する臨界レイノルズ数はないが, わずかにレイノルズ数 $Re = wU/\nu$ (ν は動粘性係数) の影響を受ける。たとえば第3図⁶⁾ のように背面圧力係数 $-C_{p,b}$ は Re の増加に従ってわずかに大きくなる。

また, 前記のような剥離-再付着の挙動, したがって角柱の空気力学的特性は, それにあたる主流に含まれている乱れの強さ (たとえば後述の地面板に沿う境界層流れ) の影響も受けることが示されている^{7), 8)}。

3. 三次元角柱 (地面板上におかれた有限高さの角柱)

高層建造物の風圧荷重やそのまわりの気流等の実際問題に関連して, それをシミュレートした実験, すなわち, 地面板 (一様流に平行におかれた平板) 上に有限高さの角柱をおいた風洞実験が行われている。この

ような風洞実験では、上流に乱流格子を設けたり地面上に表面粗さをつけたりして、地面上に沿う境界層流れが実際の地表風（自然風）と同質になるように工夫されているが、風洞の気流は自然風に比べて乱れが小さいばかりでなく、乱れの強さの分布（局地的に異なる）等地表風には未知の点があり、風洞実験で地表風を再現するには困難な問題が多い。

両端が気流に露出している有限長さ、すなわち、三次元物体の場合、同じ断面形をもつ柱状二次元物体に比べて、その後流の規模が小さく、したがって抗力係数も小さいことはよく知られているが（たとえば文献1）参照）、ここでは上記のような地面上におかれた有限高さの角柱、とくに、従来の多くの実験で取り扱われている正方角柱（ $d/w=1$ ）を対象とする。しかし、二次元の場合と同様に、角柱の縦横比も流れを特性づける重要なパラメータであることはいままでのない。地面上におかれた有限高さの角柱の周辺の流れは、角柱の上端では端末効果（気流の三次元性）を受けるとともに、下部では地面上に沿う境界層流（乱れの強い剪断流、一般に乱流境界層）の影響を受ける。したがって、角柱の高さ h 、模型付近における境界層の厚さ δ 、したがってそれらの比、たとえば h/d あるいは h/δ もまた流れを特性づける重要なパラメータである。とくに、角柱が低く境界層が厚い、すなわち h/δ が小さいときには、上記の端末効果や境界層流れの影響が顕著であるばかりでなく、それらの効果と剝離流、後流とが強く干渉して特異な流れの様相を呈する。

第4図*は地面上の角柱（A: $h=16$ cm, B: $h=8$ cm, C: $h=4$ cm）のまわりの中心面内の流れ（右方が上流）のスモーク・ワイヤ法による写真である（普通照明により撮影）。いずれの角柱においても、その前面の中央付近に淀み点があり、それより下方では流れは地面向かって下降して前面底部に剝離領域を形成し、淀み点より上方では前面に沿って吹き上り上部陵線で剝離している。前者の気流は角柱前面底部の剝離領域からさらに地面向近くを上流に向かって逆流し、主流と衝突して渦を生じ、それが角柱底部をまわる馬てい形渦を形成する。一方、後者の前面上部の剝離領域の自由流線は、 $h>\delta$ である角柱AおよびBの場合には、角柱上面を超えてから下降し、写真からは明らかではないが角柱後方約 $2\sim 3h$ の位置で地面向

第4図 地面上の単独角柱の中心面内の気流のスモーク・ワイヤ法写真

第5図 地面上の角柱周辺の流れ場のスケッチ^{13), 15)}

に達し、そこで角柱背面に向かう逆流と下流に向かう気流とに分かれる。しかし、 $h<\delta$ の角柱Cの場合には、前方陵線からの剝離流は上面で再付着し、後方陵線で改めて剝離し、その後流の自由流線は角柱A, Bの場合と同様に下降して地面向に達する。また、角柱背面では、上記の地面向に沿う逆流と底部前方からの剝離流の背面への巻き込みとが干渉して縦のアーチ形渦が形成されることが知られている^{13)~15)}。第5図^{14), 15)}はこのような馬てい形渦やアーチ形渦の形成機構の説明図である。また、図には、側面および上面に予想される再付着線が破線で示されている。

第6図は、角柱（B: $h=8$ cm, $h/\delta=1.14$ ）の上面、側面中心線上および底部に添付された流糸のストロボ

* 引用文献番号のない図は、筆者らによる実験結果^{11)~12)}である。使用模型は $d=4$ cm の正方角柱。高さは A: $h=16$ cm, B: $h=8$ cm, C: $h=4$ cm。模型付近における境界層厚さ $\delta \approx 70$ mm（地面向前縁近くにそれに平行に高さ 6 mm の角材使用）。したがって、A: $h/\delta=2.29$, B: $h/\delta=1.14$, C: $h/\delta=0.57$, $Re=dU/\nu=3\sim 5\times 10^4$ 。

第6図 地面板上の角柱の表面近くの流れの流系写真
(角柱 B: $h=8\text{ cm}$, $h/\delta=1.14$; ストロボフラッシュにより撮影)

第7図 地面板上の角柱背面の気流のスモーク・ワイア法写真

フラッシュによって撮影した写真である。いずれの場合の流系も1本であるが、その揺れが明らかで気流の変動の様子がわかる。とくに、底部では前方角からの剝離流が背面にまわり込み、縦形の渦が形成されているのが認められる。しかし、側面に沿う気流は、第5図に画かれているほど単純ではないようである。上面では剝離領域に流系が捲き込まれているだけで、再付着は認められない。さらに、角柱背面の底部近くに水平にスモーク・ワイアを張って発煙させたときの写真が第7図である。いずれの角柱の場合でも、背面に上昇する気流が観察され、縦形の渦の存在を示唆している。また、角柱Bでは煙は上面の剝離領域にまで侵入しているが(再付着をしていない)、角柱Cでは煙の領域—後流領域は上端までで、上面で再付着—後方稜線での剝離が起きていることを示している。また、角柱Aの場合には、縦形渦は境界層の外までは延びていない。第8図は各角柱周辺の地面板上の油膜法写真である。上流側から角柱をまわっている放物線状の白

第8図 角柱周辺の地面板上油膜法写真

い線は馬てい形渦の位置に相当するが、低い角柱ほど馬てい形渦は角柱の前面および側面に近づいており、後流の幅も小さい。また、前方の角からの剝離領域(油のたまっている白い部分)と、その流れの角柱背面へのまわり込みと、背面のアーチ形渦の立ち上がり部(1対の白い部分)が観察される。この白い油の吹きだまりでは、時間の経過とともに油量が増し、油が間欠的に飛び上り、渦の立ち上がり部では大きな負圧になっており、気流がまき上がっていることがわかる。この渦の立ち上がり部は角柱が高くなるに従って接近し、角柱Aではほとんど一つの縦形渦のように見える。このような現象は円柱の場合にも存在することが示されており^{16), 17)}、とくに、馬てい形渦についてはその微細な構造等が調べられている¹⁶⁾。第9図は、角柱周辺の地面板よりの各高さにおける気流のストロボフラッシュを用いて撮影したスモーク・ワイア法による写真の一例である(角柱 A: $h=16\text{ cm}$, $h/\delta=2.29$)。角柱より十分に離れた場所の白煙の縞の間隔は一樣流の流速に比例すると考えてよい。写真(a)からわかるように、角柱上端付近($z/h=0.75$)では、端末効果のために後流の規模は小さい。中間($z/h=0.50$)では、後流が左右に揺れており気流は非対称になっているが、底部($z/h=0.25$)では境界層($z/\delta=0.60$)の影響でこのような揺れは穏やかになっている。第8図の油膜法による気流写真では気流はほぼ対称になっているが、これは油膜法写真は長時間経過した後撮影したものであるため、気流が平均化されてしまうためである。

第9図 角柱Aの地面板よりの各高さ ($z=12$ cm, 8 cm, 4 cm) における気流のスモーク・ワイヤ法写真 (ストロボフラッシュにより撮影)

各角柱 (A: $h=16$ cm, B: $h=8$ cm, C: $h=4$ cm) の上流側および下流側の地面板上の中心線に沿っての圧力係数 $C_p = (p - p_\infty) / (1/2) \rho U^2$ (p は地面板上の静圧) の分布を第10図に示す (x は前面あるいは背面からそれぞれ上流あるいは下流に向かっての距離)。上流側では、角柱前面に近づくに従って C_p (正圧) は上昇して前面の淀み点圧力に近づく。この前面直前の圧力は、境界層内であるので主流の淀み点圧力 ($C_p=1$) より低く、また、角柱が低いほど小さい。角柱前面 $x/d \approx 0.3 \sim 0.5$ で C_p の分布がやや平坦になっている部分は、馬蹄形渦の位置にあたる (第8図参照)。下流側では角柱背面近くに負圧の谷があるが、第8図の油膜法写真と対照すると、角柱BおよびCではアーチ形渦の立ち上がり部の中間、角柱Aでは1本に見える縦形渦の立ち上がり部にあたり、とくに後者の場合には、その測定値には著しい変動がある。さらに後方には C_p の最大値があるが、この位置は角柱上端からの下降気流が地面板に達して上流および下流に分流して

第10図 角柱の上流側および下流側の地面板上中心線に沿う圧力分布

いる位置を示し、とくに最も低い角柱Cの場合には明瞭である。角柱Bでもその傾向が認められるが、いずれの場合も C_p 最大の位置は、 $x/h \approx 2$ と考えることができる。

各角柱の前面、上面および背面の中心線と、側面の各高さの水平線上の圧力係数 C_p の分布を第11図に示す。角柱 A ($h/\delta=2.29$) の場合、境界層外に出ている上半分で前面の C_p はほぼ1で、ほとんど主流の淀み点に達しているが、ほとんどが境界層内に入っている角柱 B ($h/\delta=1.14$)、さらに境界層内にまったく埋没している角柱 C ($h/\delta=0.57$) の場合には前面の C_p は小さくなる (第10図上流側圧力分布参照)。また、上面および側面の圧力分布 (負圧) からわかるように、角柱Cの場合には下流にいくに従って圧力が回復 (上昇) しており、前方稜線からの剥離流が表面に再付着していることを示している。このようなことは角柱Aではまったく認められず、角柱Bでは側面にのみ現われている (境界層の影響)。これに伴って、背面の負圧は剥離一再付着一後方稜線での剥離をしている角柱Cの場合が最も小さく、側面でのみ再付着が起きている角柱Bでは下部で負圧は小さくなっている。第12図は、地面板上におかれた立方体 ($h/d=1$, 角柱Cに相当) の種々の δ/h の値の場合の上面中心線に沿っての圧力分布を示す¹³⁾。図中の x は上面中央に原点をおき下流に向かって正にとった座標である。この図からも δ/h が大きい場合 (角柱Cでは $\delta/h=1.75$) には下流にいくに従って圧力が上昇しており、再付着が起きていることを示しているが、 $\delta/h \approx 0.6$ の場合には C_p はほぼ一定で再付着が起きていないことを示している。また、図中×印は主流が一樣である場合の C_p の分布を示すが、この場合にも再付着は認められない。以上の結果から、境界層流一乱れの多い剪断流は再付着現象を促進することが確認できる。

第11図 角柱の前面、上面、背面中心線上および側面水平線上の圧力分布

第12図 地板上におかれた立方体の上面中心線に沿う圧力分布の境界層厚さ (δ/h) による変化¹³⁾

各角柱の抗力は、上面、側面の摩擦抗力を無視して、前面および背面の圧力（中心線上のみではない）を積分して求められ、A、BおよびCの抗力係数 C_b はそれぞれ 1.40、1.20 および 0.81（第19図参照）で、低い角柱ほど C_b は小さい（二次元角柱— $d/w=1$ に相当— $C_b=2.05$ ，第1図参照）。また、抗力係数ばかりでなく、ストローハル数も h/δ によって、すなわち境界層の影響によって顕著に変わることが示されている¹⁸⁾。

4. 複 数 角 柱

複数柱状物体が配列されている場合についての研究は、二次元円柱についてのものが多く、各円柱の表面圧力分布、抗力係数、横力係数、円柱群周辺の流れの挙動等が調べられている（たとえば文献4）。主流に平行におかれた直列2円柱の場合^{19)~21)}，その中心間の距離が直径の約3.8倍を境にして、それより広い場

合と狭い場合とで流れの模様、とくに、前方円柱の後流と後方角柱とのかかわりや全体としての後流の規模等がまったく異なり、各円柱の圧力分布、抗力係数等も上記の間隔近くで急変することが見いだされている^{19), 20)}。また、主流に垂直におかれた並列2円柱の場合には、両円柱の後流は強くかつ複雑に干渉し、左右に激しく揺れて非対称な流れになり、また両円柱を引き離すような横力が生ずることが調べられている⁴⁾。このような現象は、円柱の数がさらに多いといっそう複雑になり、たとえば3本の円柱を三角形に配列した場合²²⁾，あるいは数本の円柱を並列にならべた場合²³⁾ について、その後流のふるまい等が研究されている。

複数角柱の場合も角柱間の干渉、後流の挙動等は基本的には複数円柱の場合に類似している。まず、二次元角柱の場合の空気力学的特性について述べる。直列2角柱の各角柱の抗力係数 C_x^* の縦横比 d/w および角柱間の距離 L による変化²⁴⁾，直列および並列2角柱の各角柱の抗力係数 C_x ，横力係数 C_y (Y は主流に直角方向の角柱に働く力の成分) の間隔 L (直列の場合) および H (並列の場合) による変化が調べられている⁹⁾。直列の場合、円柱の場合と同様に、前後各角柱の C_x は $L/d=3$ 付近で不連続的に変化する（三次元の場合の第19図参照）。前方角柱の C_x は L/d が大きくなるに従って減少するが、 $L/d \approx 3$ に達するとそこで不連続的に増加してそれ以上の間隔では角柱単独の場合 ($C_x=2.05$) に近づく。後方角柱の C_x は $L/d \approx 3$ 以上の間隔では正 ($C_x \approx 0.4$) であるが、 $L/d \approx 3$ 以下では負 ($C_x \approx -0.3$) になる。並列2角柱の場

* 以下では、横力係数 C_y に対応して、抗力係数を C_b ではなく C_x で表わす。基準面積はいずれの配列の場合も1本の角柱の正面面積 ($d \times h$) とする。

第13図 直列2角柱の中心面内の気流のスモーク・ワイア法写真 (角柱 B: $h=8$ cm, $h/\delta=1.14$)

第14図 直列2角柱の周辺の地面板上の油膜法写真 (角柱 B: $h=8$ cm, $h/\delta=1.14$)

合には、円柱の場合と違って、両角柱を引きつけるような横力が働き、とくに間隔が小さい場合 ($H/d=1$) には、気流の激しい揺れに伴って横力係数の値もかなりばらつくが、その付近で鋭いピークをもち、その平均値は約 0.4 に達する⁹⁾。さらに、並列2角柱の前後にさらに1本の角柱を加えた3本の角柱の場合についても実験が行われ、並列2角柱の後流に対する他の角柱の存在の影響が調べられている⁹⁾。

地面板上に配列された複数角柱の場合^{10)~12)} には、角柱上端の端末効果と底部の境界層の働きに加えて、角柱間の気流の干渉により、前述の馬蹄形渦や縦の

第15図 並列2角柱の周辺の気流のスモーク・ワイア法写真 (角柱 A: $h=16$ cm, $h/\delta=2.29$, $z=8$ cm; ストロボフラッシュにより撮影)

アーチ形渦等の流れの特性は著しく変わる。第13図は、直列2角柱 (B: $h=8$ cm) の中心面内のスモーク・ワイア法による写真である。 $L/d=2$ および4のときには、前方角柱からの吹き下ろし気流が後方角柱の前面上部にあたり、前方角柱の背面に向かって逆流しており、したがって、第14図に見られるように、前方角柱の背面にあるアーチ形渦は単独の場合 (第8図参照) とあまり変わらない。第13図の $L/d=1$ のときには、前方角柱の上端からの剝離領域の自由流線は後方角柱の上部を通過しており、角柱間には閉じ込められた渦領域をもつ。したがって、後方角柱の周辺では、第14図のように、 L/d が大きいときには単独角柱の場合と同じように (定性的に) 馬蹄形渦もアーチ形渦も現われているが、 L/d が小さいと両方の渦が消滅している。ここでは紙面の都合上掲載はしないが、角柱 A, $L/d=2$ の場合の気流写真は、角柱 B, $L/d=1$ の場合 (ともに $L/h=0.5$) に、また、角柱 A, $L/d=4$ および角柱 C, $L/d=1$ の場合には角柱 B, $L/d=2$ の場合 (ともに $L/d=1.0$) に類似している

第16図 直列2角柱の両角柱の前面、上面および背面の中心線上の圧力分布

ことを付記しておく。

並列2角柱 (A: $h=16$ cm) のまわりの気流のSmoke-Wire法, ストロボフラッシュによる写真 (地面より8 cmの高さの水平面内の気流) を第15図に示す。いずれの間隔の場合でも両角柱間を通り抜ける強い気流があり, また, 角柱単独の場合にも観察された後流の揺れ, 非対称性 (第9図参照) は, この場合にも見られ, とくに, H/d が小さいほど激しい。並列の場合には, 前述の馬蹄形渦, 縦のアーチ形渦の様子は, 干渉のために各角柱のまわりがやや非対称になっているだけで, 角柱単独の場合とほとんど同じで, 間隔によってもあまり変わらない。

直列2角柱 (角柱A, B, C) の前後各角柱の前面, 上面および背面の中心線上の圧力分布¹²⁾ を第16図に示す。どの角柱の場合でも, 前方角柱の前面および背面の圧力分布は角柱単独の場合 (破線で示されている, 第11図参照) とほとんど同じであり, 背面の負圧は後方角柱の存在—後流領域の閉じ込め, 後方角柱前面よりの逆流等—のために, 単独の場合よりわずかに小さい。このことは, 前方角柱の抗力はこの間隔 ($L/d=1\sim4$) では角柱単独の場合も小さくなる (第19図参照) ことを示唆している。後方角柱の各面の圧力分布は前方角柱からの吹き下ろし気流 (第13図参照) のあたり具合によってかなりの差異が現われる。角柱A, Bの場合, $L/d=4$ のときには吹き下ろし気流が当たる前面上部で大きな正圧を示すが, 下部は底

第17図 地面上に並列2角柱の内側面および外側面の中心における圧力係数 C_p の変動 (角柱A: $h=16$ cm, $h/\delta=2.29$; 測定点の高さは8 cm, H1等は $H/d=1$ 等を表す)

第 18 図 並列 2 角柱の一方の角柱の内側面および外側面の中心線上の圧力分布

部剥離領域に入っているので C_p は小さくなっている。 $L/d=1$ および 2 では角柱間に閉じ込められた渦領域を形成しているために、後方角柱前面の C_p が負になる。また、後方角柱の背面圧力（負圧）も、第 14 図のように縦の渦が背面に密着している（むしろ小規模な後流渦となっている）ので、いずれの角柱の場合でも単独のときに比べてその絶対値は小さい。以上の結果は、後方角柱の抗力は L/d が小さいときには負になることを示している（第 19 図参照）。

並列の場合には、前述のように角柱間の気流が激しく揺れているので、とくに背面や内側面の圧力も著しく変動する。第 17 図は並列 2 角柱の内側面および外側面の中心点における圧力係数 C_p の時間的変動をペンレコーダに記録した一例（角柱 A； $H/d=1, 2$ および 4）である。このように、とくに間隔が小さいときには内側面の圧力の変動は顕著である。また、負圧は内側面のほうが外側面より大きく、このことから並列角柱には互いに引き付けるような横力が働くことが予測できる（第 21 図参照）。第 18 図は並列 2 角柱（角柱 A, B, C）の一方の角柱の内側面および外側面の中心線上の C_p の分布であるが、 C_p の値は上記のように変動する値の平均値である。図からわかるように、いずれの角柱でも、外側面の負圧の分布は単独の場合（破線で示されている）に比べて小さく、逆に内側では著しく大きくなっている。この傾向はとくに $H/d=1$ のときに著しいが、境界層に埋没している角柱 C ではあまり顕著ではない。第 18 図の結果から、並列各角柱に働く横力は、角柱が高いほど、その間隔が狭いほど大きいことが予測できる（第 21 図参照）。

角柱 A の場合には、それに働く空気力は風洞天秤によって測定されたが^{10), 11)}、低い角柱 B および C の場合には、抗力は前述のように前面および背面の圧力から、横力は両側面の圧力から算出される¹²⁾。第 19 図は直列 2 角柱の前後の各角柱の抗力係数 C_x の間隔 L/d による変化を示し、第 20 図および第 21 図は並列 2 角柱の一方の角柱の抗力係数 C_x および横力係

 第 19 図 直列 2 角柱の前後各角柱の抗力係数 C_x の間隔 L/d による変化

 第 20 図 並列 2 角柱の一方の角柱の抗力係数 C_x の間隔 H/d による変化

第21図 並列2角柱の一方の角柱の横力係数 C_y の間隔 H/d による変化

数 C_y の間隔 L/d および H/d による変化を示す。角柱Aの場合も圧力分布から抗力、横力を求めたが、その結果は風洞天秤による測定値（各図に破線で示されている）によく一致している。

直列の場合、前方角柱の C_x は、前述のように $L/d = 1 \sim 4$ では角柱単独の場合（一点鎖線で示してある）よりも小さく、角柱Aでは $L/d = 3$ で最小値をもっている。境界層内に入っている割合の大きい角柱Bではその最小値は顕著ではなく、境界層内に完全に埋没している角柱Cでは最小値はほとんど認められない。後方角柱の C_x は、 L/d が小さいときには、予測されたように負になるが、角柱の高さが大きいほど C_x の負になる距離は大きい。3次元角柱の場合には、第19図のように、前方角柱でも後方角柱でもその C_x は $|L/d| = 3$ 付近で比較的ゆるやかな変化をしているが、2次元角柱の場合には、前述のようにこのあたりで不連続的に大きく変化する。

並列の場合、前面および後面の圧力分布については述べなかったが、間隔 H/d が小さいときには前面の正圧は角柱単独の場合よりやや小さく、 H/d が大きいときには後面の負圧が小さくなっている。この傾向は角柱が高いほど顕著で、したがって、第20図のように、並列2角柱の C_x は H/d が増加するに従って大きくなる。また、前述の圧力分布から予測されるように、並列2角柱には互いに引き付けるような横力が働くが、第21図からわかるように、いずれの角柱でも $H/d = 1$ 付近で横力係数 C_y は顕著なピークをもち、その値は高い角柱ほど大きく、とくに、角柱Aの場合には C_y の最大値は2次元の場合（ここでは割愛した）よりも大きい^{10), 11)}。

並列2角柱の前後にさらに1本の角柱をおいた三角形配列の場合についても、各角柱の C_x , C_y 等が求められ、可視化による流れの観察もなされているが^{10), 11)} ここでは割愛する。

5. あとがき

角柱のまわりの流れについて、渦、後流等の気流の様相を主体にして、その空気力学的特性の概略を述べ

てきたが、とくに地面板上におかれた有限高さの角柱の場合には、縦横比、配列法、迎え角（ここでは前面が主流に垂直の場合のみ）等の幾何学的パラメータのほかに、境界層厚さ、気流中の乱れの強さとその分布等流れを支配するパラメータは非常に多い。ここではそれらのうち代表的なものを取り上げてきたが、角柱周辺の流れの平均速度分布、乱れ強さの分布等さらに詳細にわたる実験も必要であろう。実際的な問題として、実物建造物を用いた野外実験⁸⁾ もあるが、地面風を十分にシミュレートするような実験状況を工夫することも重要なことである。また、最近の大型計算機の発達と数値計算法の開発に伴って、二次元角柱のまわりの気流については数値解析—数値実験—が行われているが（たとえば文献25)), 今後このような流体力学の数値実験の進歩が望ましい。

参考文献

- 1) HOERNER, S. F.: Fluid-Dynamic Drag, Published by the Author (1965).
- 2) SACHS, P.: Wind Forces in Engineering, Pergamon Press, Oxford (1972).
- 3) BEARMAN, P. W.: Review-Bluff Body Flows Applicable to Vehicle Aerodynamics, Trans. ASME, Ser. I. Journ. Fluid Eng., Vol. 102, No. 3 (1980), pp. 265-274.
- 4) ZDRAVKOVICH, M. M.: Review-Review of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Various Arrangements, Trans. ASME, Ser. I. Journ. Fluid Eng., Vol. 99, No. 4 (1977), pp. 618-633.
- 5) 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, 日本航空学会誌, 第16巻, 第168号 (1968), pp. 1-5.
- 6) BEARMAN, P. M. and TRUEMAN, D. M.: An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders, Aeron. Quart., Vol. 23 (1972), pp. 229-237.
- 7) LEE, B. E.: The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism, Journ. Fluid Mech., Vol. 69, Part 2 (1975), pp. 263-282.
- 8) FROST, W. and SHAHABI, A. M.: A Field Study of Wind over a Simulated Block Building, NASA CR-2804 (1977).
- 9) 高野 暉, 新井 勲, 松坂正芳: 角柱群のまわりの気流についての風洞実験 (第1報, 2次元角柱群), 日本機械学会講演論文集, No. 790-10 (1979), pp. 89-91.

- 10) 高野 暉, 新井 勲, 松坂正芳: 角柱群のまわりの流れについての風洞実験 (第2報, 地面上の角柱群), 日本機械学会講演論文集, No. 790-15 (1979), pp. 94-96.
- 11) 高野 暉, 新井 勲, 松坂正芳: 角柱群のまわりの流れの実験的研究, 日本機械学会講演論文集, No. 800-14 (1980), pp. 72-79; 日本機械学会論文集 (B編), 第47巻, 第418号 (1981), pp. 982-991.
- 12) RINOIE, K., YAMASHITA, N., ARAI, I., MATSUZAKA, M. and TAKANO, A.: Wind Tunnel Experiments for the Rectangular Cylinders Arranged on the Ground Plate, Proc. 1982 Joint Conference on Experimental Mechanics, Soc. Exper. Stress Anal. and Japan Soc. Mech. Eng. (1982).
- 13) CASTRO, I. P. and ROBINS, A. G.: The Flow around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, Journ. Fluid Mech., Vol. 79, Part 2 (1977), pp. 307-335.
- 14) Woo, H. G. C., PETERKA, J. A. and CERMAK, J. E.: Wind-Tunnel Measurements in the Wakes of Structures, NASA CR-2806 (1977).
- 15) HUNT, J. C. R., ABELL, C. J., PETERKA, J. A. and Woo, H.: Kinematical Studies of the Flows around Free or Surface-Mounted Obstacles; Applying Topology of Flow Visualization, Journ. Fluid Mech., Vol. 86, Part 1 (1978), pp. 179-200.
- 16) BAKER, C. J.: The Laminar Horseshoe Vortex, Journ. Fluid Mech., Vol. 95, Part 2 (1979), pp. 347-367.
- 17) 谷口清一, 坂本弘志, 有江幹男: 乱流境界層の中に存在する直立円柱周辺の流れ (円柱の直径と高さが異なる場合), 日本機械学会講演論文集, No. 790-15 (1979), pp. 58-65; 日本機械学会論文集 (B編), 第46巻, 第405号 (1980), pp. 802-812.
- 18) 坂本弘志, 森谷 優, 有江幹男: 乱流境界層の中にある角柱および円柱からの放出渦, 日本機械学会講演論文集, No. 820-3 (1982), pp. 144-151.
- 19) 高野 暉, 新井 勲, 松坂正芳: 2本の直列円柱の抵抗, 日本機械学会講演論文集, No. 710-15 (1971), pp. 77-79.
- 20) 五十嵐 保: 直列2円柱まわりの流れの特性 (第1報), 日本機械学会講演論文集, No. 790-15 (1979), pp. 80-87; 日本機械学会論文集 (B編), 第46巻, 第406号 (1980), pp. 1026-1036.
- 21) THOMAS, D. G. and KRAUS, K. A.: Interaction of Vortex Streets, Journ. Appl. Phys., Vol. 35, No. 12 (1964), pp. 3458-3459.
- 22) ZDRAVKOVICH, M. M.: Smoke Observation of the Wake of a Group of Three Cylinders at Low Reynolds Number, Journ. Fluid Mech., Vol. 32, Part 2 (1968), pp. 339-351.
- 23) AUGER, J. L. and COUTANCEAU, J.: On the Complex Structure of the Downstream Flow of Cylindrical Tube Rows at Various Spacing, Mech. Res. Comm., Vol. 5, No. 5 (1978), pp. 297-302.
- 24) 東 昭, 井内松三郎, 渡部 勲, 藤井邦雄, 斎田和男, 渡辺 潔: 建築物の風洞実験, 日本航空宇宙学会誌, 第22巻, 第245号 (1974), pp. 290-295.
- 25) DAVIS, R. W. and MOORE, E. F.: A Numerical Study of Vortex Shedding from Rectangles, Journ. Fluid Mech., Vol. 116 (1982), pp. 475-506.

一解 説一

航空機搭載品の熱解析について*

遠 藤 和 敏**・海 老 原 英 明**

Key words: Safety and reliability

1. は じ め に

航空機搭載品の電子化の進展は目覚ましいものがあり, それまでの機械部品に取って代わるに足る電気/電子部品の品質向上がその一端を担っている。しかし, 電気/電子部品は万能ぶり (すべてにおいて万能ではないが) を発揮する代償として, 熱という扱いにくい副産物を発生する。航空機搭載品の電子化の波と, 小型化への要求が熱への対応をより慎重にせざるをえなくなったといっても過言ではなからう。事実,

BOEING 757/767旅客機では, 計器パネルを二重にして冷却を行う方式を採用している報告¹⁾ がすでになされている。

本稿では, BOEING 757 搭載用サーボ気圧高度計の開発過程で実施した熱解析をモデルとして, 熱への応用についてその概要を紹介したい。

2. 熱 解 析 の 意 義

電気/電子部品を使用した航空機搭載品だけに限らず, 民生品についてもいえることだが, 開発, 設計の段階で熱解析を技術者のそれまでの経験のみで取り扱ったまま試作量産する場合に, 時として電気/電子部品が周囲温度と自己発熱によって使用限界を越え, 不具合を発生する。あるいは, 使用限界を越えないまで

* 昭和57年8月26日原稿受理 Thermal Analysis for Aircraft Instrument

** 東京航空計器(株) Kazutoshi ENDO and Hideaki EBIHARA