

3次元角柱まわりの流れの可視化

奥田 泰雄・谷池 義人

FLOW VISUALIZATION AROUND 3-DIMENSIONAL SQUARE PRISMS

By Yasuo OKUDA and Yoshihito TANIKE

Synopsis

It has been suggested that studies on flows around an obstacle involve important problems from a fluid dynamics and engineering viewpoint. Most of them have dealt with 2-dimensional flows, but little with 3-dimensional flows. A flow visualization around 3-dimensional square prisms was conducted in a wind tunnel in order to clarify problems on the separated flows and the vortex formations around prisms. As a result, it was found that both aspect ratios of prisms and Reynolds numbers of flows changed the shapes of vortices in the wake.

1. ま え が き

物体まわりの流れに関する研究は、流体力学的な問題のみならず工学的見地からも極めて重要な問題であるためにこれまで数多くの研究はなされてきた。とりわけ、Kármán が物体の後流に形成される渦列を理論的に取り扱って以来、この渦列の発生機構や安定性、干渉など^{1)~3)}について多くの理論や実験的研究が報告されている。しかし、これらの研究は2次元的な流れを扱ったものがほとんどで、実際問題として我々がしばしば直面する3次元的な流れ、つまり、平面上に置かれた3次元物体まわりの流れを扱ったものは少ない。

最近、坂本ら⁴⁾は3次元物体の形状の変化によって後流に放出される渦がどのように変化するか実験的に調べ、正方形断面をもつ角柱のアスペクト比が2.0以上の細長い形ではKármán渦、アスペクト比が2.0以下のにぶい形ではアーチ形渦が放出される、と報告している。ところが、これは桂⁵⁾、谷池⁶⁾、西村⁷⁾が行った3次元角柱の後流に関する研究結果とは異なる結果となっている。

そこで、本研究ではこの原因をReynolds数の違いによるものと考え、角柱のアスペクト比を変えると同時にReynolds数を大きく変えて角柱まわりの流れを可視化し、後流に放出される渦がアスペクト比だけでなくReynolds数にも影響をうけるのかどうか調べた。

2. 実 験 方 法

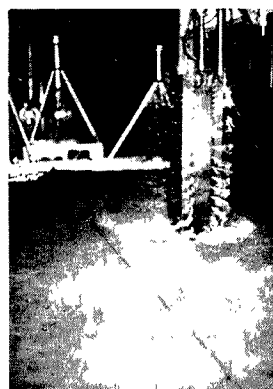
実験は断面2.0m×2.5m、長さ21mの測定洞を有する、防災研究所の境界層風洞でドライアイスのミストを使用して行った。測定洞の床面は滑らかで、実験にはできるだけ境界層の発達をおさえた一様流に近い流れを使用した。このときの境界層の厚さは、ドライアイスのミストの状態より2~3cmであった。実験に用いた模型は、1辺が4cmの正方形断面をもつ角柱と、同じく1辺が20cmの正方形断面をもつ角柱の2種類である。実験では模型の高さを変えることでアスペクト比(h/b ; h は模型の高さ、 b は模型の幅)を0.5~8.0の範囲で変化させ、また接近流の風速と模型の寸法を変えることでReynolds数($\bar{U} \cdot b / \nu$;

$\bar{U}$ は平均風速, b は模型の幅, ν は動粘性係数) を $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ の範囲で変化させた。境界層流中で模型の高さを変えると h/δ (h は模型の高さ, δ は境界層の厚さ) が変わり、角柱の Strouhal 数等、後流の flow pattern が変化することが知られているが、坂本ら⁴⁾ によると $h/\delta \geq 3$ では、境界層の影響が小さくなり Strouhal 数が変化しないことがわかっている。従って、今回の実験では接近流の境界層の影響は小さいとみなすことができる。

角柱まわりの流れの可視化には2種類の方法で行った。一つは角柱の上流約 2 m の床面に直径 100 mmφ の穴をあけ、その穴からドライアイスのミストを圧力差を利用してできるだけ流れを乱さないように流す方法 (Photo. 1(a)), もう一つは角柱の風上面にいくつもの直径 4 mmφ の穴をあけ、そこからドライアイスのミストを噴出させる方法 (Photo. 1(b)), である。このとき穴から吹出したドライアイスのミストによって角柱まわりの flow pattern が乱されて大きく変化しないように、ミストの吹出す圧力の調節に注意した。前者の方法は床面付近の流れの状態を、後者の方法は角柱からの剥離流の状態を観察するのに用いた。



(a)



(b)

Photo. 1. Flow visualization with dry-ice mist.

3. 実験結果

(1) 角柱の後流

Photo. 2 は Reynolds 数が 1×10^4 で角柱のアスペクト比を 4.0~0.5 まで変えたときに、角柱の後流に放出される渦の変化を撮ったものである。アスペクト比が 4.0~2.0 では角柱の後流に交互に Kármán 渦が放出されているのがわかる (Photo. 2 (a)-(i)~(iv))。アスペクト比が 1.5~0.5 では角柱の両側面からほぼ同時に渦が放出されている (Photo. 2 (b)-(ii)~(v))。これはアーチ形渦と呼ばれ、坂本ら⁴⁾ によると、角柱の頂部をこえる流れの運動量が大きくなったために両側面から放出される渦をひきこみ、一つにつながったアーチ形の渦と考えられている。アスペクト比が 2.0~1.5 の範囲では、Kármán 渦が放出される時もあればアーチ形渦が放出される時もあり、両者の渦が混在した状態になっている (Photo. 2 (a)-(iv) (v), (b)-(i)(ii))。

アーチ形渦と Kármán 渦の 3 次元的なスケッチを Fig. 1 (a) (b) に示す。M. S. Acarlar ら⁸⁾ は半球の後流に放出される hairpin vortex の 3 次元構造を詳しく調べているが、このアーチ形渦もほぼ同様の構造と考えられる (Fig. 2)。アーチ形渦はその側部の渦の軸が流れ方向に少し傾いた構造になっているが、Kármán 渦は上下方向に細長く伸びた構造で、渦の中に鉛直方向にかなり大きい速度成分を持っており (Photo. 3)、渦の軸はアーチ形渦とは逆方向に傾いている。P. S. Mason ら⁹⁾ は、このような渦軸の傾きの違いは物体の頂部から後方に放出される左右一対の trailing vortex (或いは trailing circulation) の回転方向に関係があると考えているが、これと後流に放出される Kármán 渦とアーチ形渦との関係はまだよくわかっていない。とくに、Kármán 渦の 3 次元構造を説明した研究は少なく Fig. 1 (b) のスケッチも角柱頂部付近の構造が不明瞭である。今後、より詳しい可視化実験から考察してみる必要があると思われる。

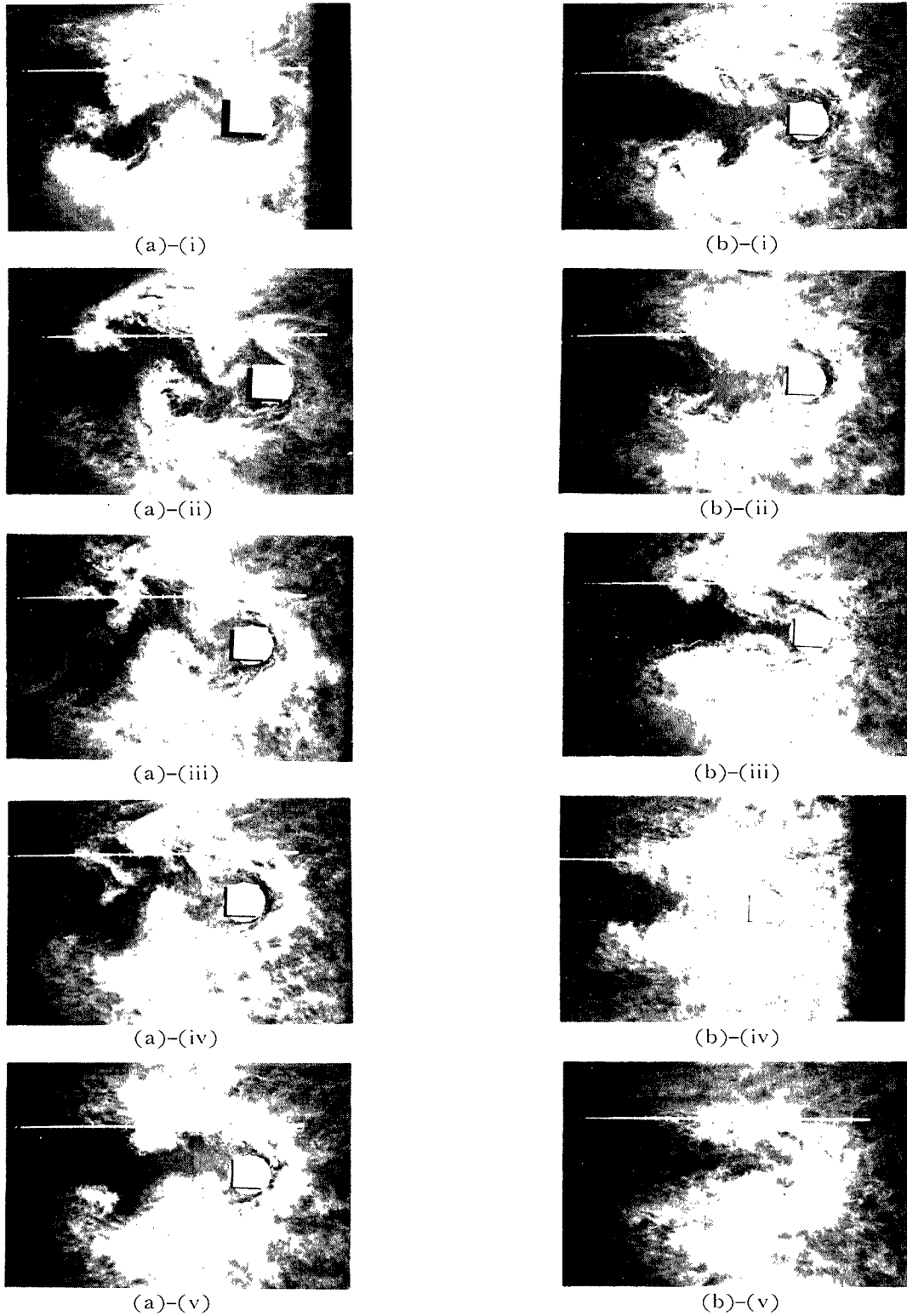


Photo. 2. Top view of vortex formations at Reynolds number 1×10^4 . (a) Wake vortices are Kármán vortices; (i) aspect ratio 4.0; (ii) 3.0; (iii) 2.5; (v) 1.5. (b) Wake vortices are arch-type vortices; (i) aspect ratio 2.0; (ii) 1.5; (iii) 1.3; (iv) 1.0; (v) 0.5.

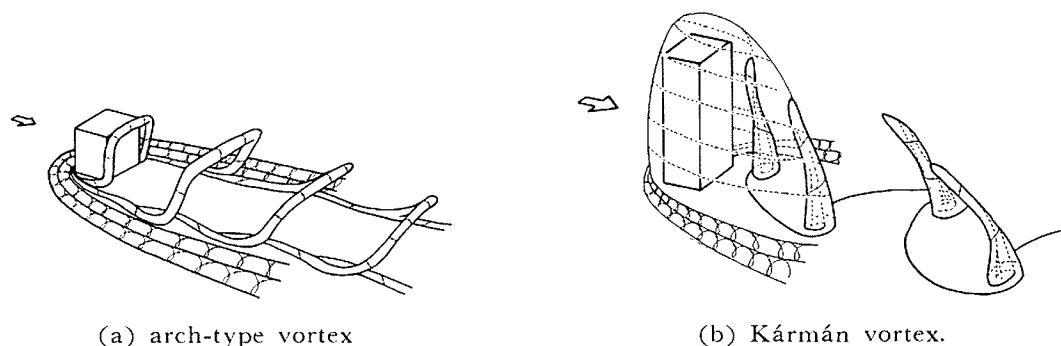


Fig. 1. Sketch of flow around prism.

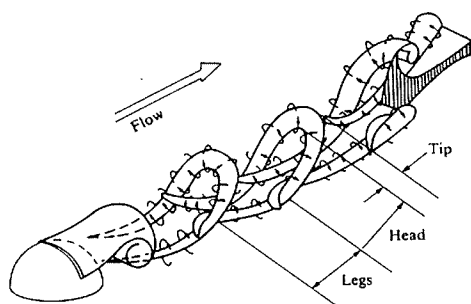
Fig. 2. Sketch of flow around hemisphere called hairpin vortex (M. S. Acarlar and C. R. Smith⁸⁾).Photo. 3. End view of vortex formation at Reynolds number 1×10^4 and aspect ratio 4.0.

Photo. 4 は角柱のアスペクト比が2.0で Reynolds 数を $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ の範囲で変えたときの後流に放出される渦の変化の様子である。Reynolds 数が $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ までの領域では、Kármán 渦とアーチ形渦が混在した状態 (**Photo. 4 (a)-(iii)(iv)**, **(b)-(i)(ii)**) で、この領域よりも小さい Reynolds 数ではアーチ形渦 (**Photo. 3 (a)-(i)(ii)**)、大きい Reynolds 数では Kármán 渦 (**Photo. 4 (b)-(iii)(iv)**) が放出されている。

上の結果をまとめたのが **Fig. 3** で縦軸にアスペクト比、横軸に Reynolds 数を対数で表示している。黒塗りの印はアーチ形渦、白抜きの印は Kármán 渦、半分黒塗りの印は両方の渦が混在して放出されている状態を表わしている。図は3つの領域に分けられ、中央の2本の平行な破線にはさまれる領域がアーチ形渦と Kármán 渦の混在領域、これより上の領域が Kármán 渦、下の領域がアーチ形渦の領域である。桂ら⁵⁾ は一様流中におかれた角柱の両側面に加わる圧力変動を測定して、角柱のアスペクト比と後流中に放出される渦の形態との関係を調べているが、この実験結果もほぼ **Fig. 3** の上にのる。また、これにはアスペクト比が1.0の、アーチ形渦と Kármán 渦が混在した状態での圧力変動の波形が示されており、両側面の圧力変動の波形が同相になったり逆相になったりしているのがわかる。谷池⁶⁾ は一様流中と一様乱流中におかれた角柱に加わる変動ローリングモーメントを測定し、角柱のアスペクト比と辺長比による Strouhal 数の変化を調べている。ここでは、一様流中に置かれた正方形断面をもつ角柱の結果を **Fig. 3** に示した。西村⁷⁾ は一様流中と一様乱流中におかれた角柱の側面の圧力変動を測定し、角柱の後方に放出される渦の状態を調べているが、アスペクト比1.0の場合を除くと **Fig. 3** にあてはまる。

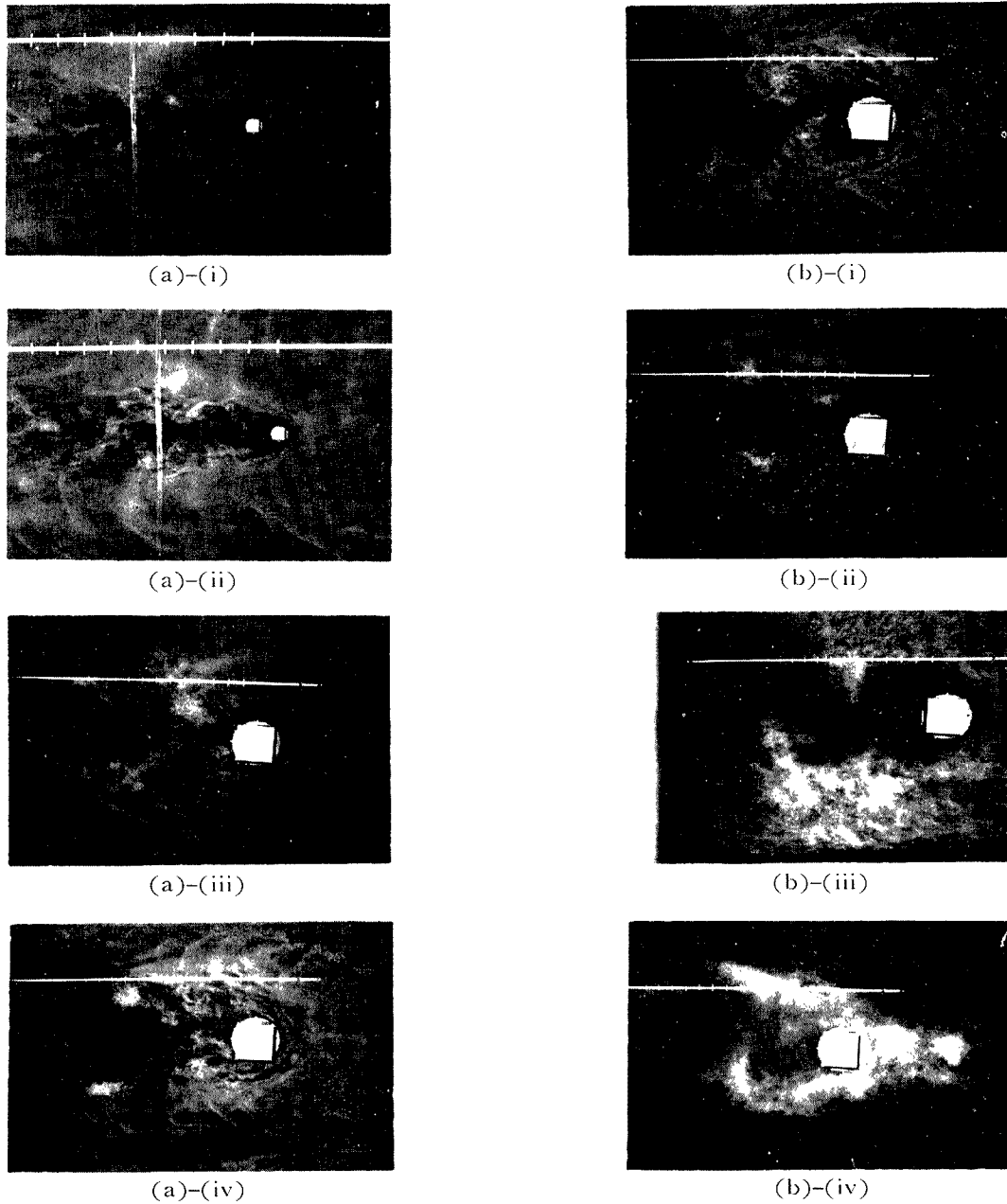


Photo. 4. Top view of vortex formations at aspect ratio 2.0. (a) Wake vortices are arch-type vortices; (i) Reynolds number 1×10^3 ; (ii) 2×10^3 ; (iii) 5×10^3 (iv) 1×10^4 . (b) Wake vortices are Kármán vortices; (i) Reynolds number 5×10^3 ; (ii) 1×10^4 ; (iii) 2×10^4 ; (iv) 5×10^4 .

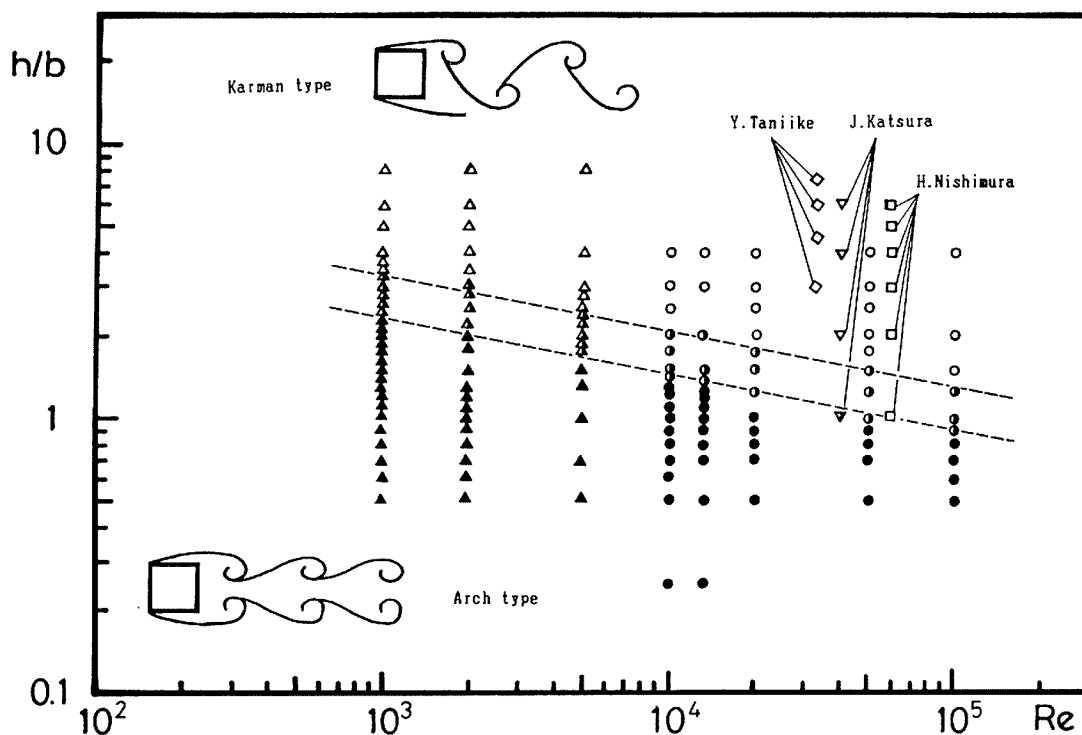


Fig. 3. Variation of wake of prisms by Reynolds number and aspect ratio.

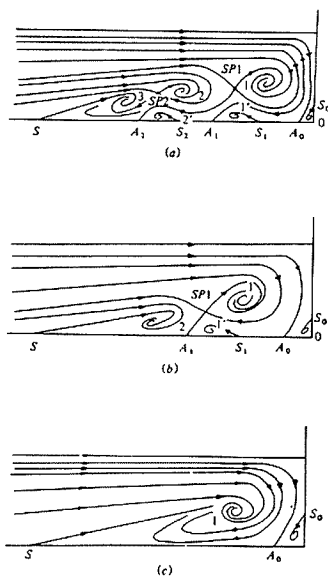


Fig. 4. Sketch of horseshoe vortex (J. C. Baker¹⁰⁾).



Photo. 5. End view of vortex formation at Reynolds number 1×10^3 and aspect ratio 2.0.

一般に、2次元角柱まわりの flow pattern は、高 Reynolds 数において剥離点が円柱のように移動しないために、Reynolds 数によってほとんど変わらないといわれているが、3次元角柱の場合には、剥離点は変わらないものの頂部を過ぎる流れの運動量が変わることにより、角柱の後方に放出される渦の形が変化することがわかった。

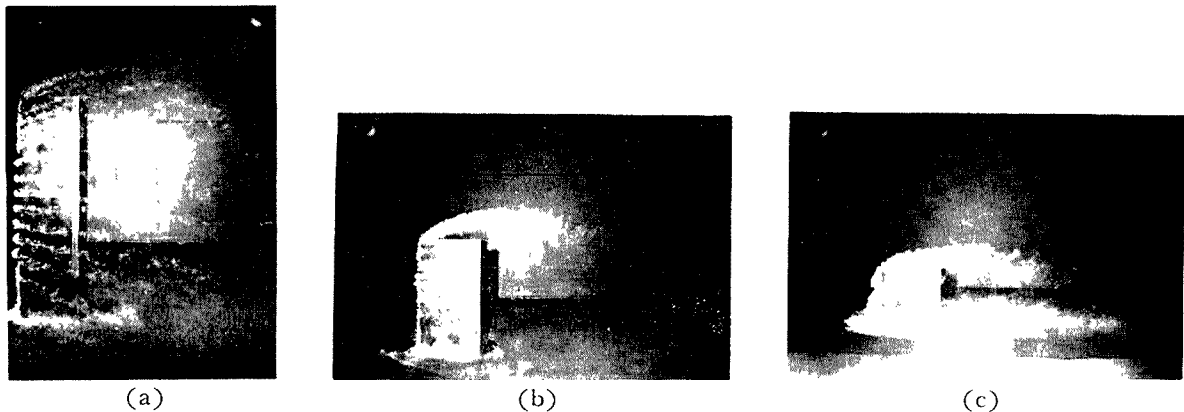


Photo. 6. Side view of separated flow at Reynolds number 1×10^4
 (a) aspect ratio 4.0; (b) 2.0; (c) 1.0.

(2) 角柱まわりの流れ

(i) 馬蹄渦

Photo. 5 は Reynolds 数 1×10^3 、角柱のアスペクト比の2.0の場合の角柱まわりの流れの様子を風下から撮ったものである。角柱まわりに3重の馬蹄渦が観察される。J. C. Baker¹⁰⁾によると **Fig. 4** のように6重、4重、2重の渦のパターンが考えられ、この渦の中心位置は Reynolds 数と D/δ (D は角柱の代表長さ、 δ は境界層厚さ)の関数になることがわかっている。**Photo. 5**での3種の渦の筋は6重の渦のパターンでの上側にある渦が見えているものと思われる。

今回の実験では、渦が不安定なものが多くアスペクト比や Reynolds 数によって明確な変化は見られず、後流に放出される Kármán 渦やアーチ形渦との関連性は確かめられなかった。

(ii) 角柱からの剥離流

Photo. 6 は Reynolds 数 1×10^4 、アスペクト比が4.0, 2.0, 1.0のときの角柱からの剥離流を可視化したものであり、後流に放出される渦のパターンは、それぞれ Kármán 渦、混在型、アーチ形渦のパターンである。

角柱の側面を過ぎる剥離流はアスペクト比が2.0, 4.0では流脈がはっきりしており、角柱の上層部では上昇流、中層部では平行な流れ、下層部では下降流となっているのがわかる。しかし、アスペクト比が1.0ではそのような流脈ははっきりとは見られない。また、頂部を過ぎる剥離流はアスペクト比が2.0, 4.0では、再付着をしないで後方に流れているが、アスペクト比が1.0では再付着をおこしているようである。つまりこの実験では、Reynolds 数が 1×10^4 と高いので後流に放出される渦がアーチ渦であるときは、頂部及び側面を過ぎる剥離流は再付着をおこし乱されて角柱の面に沿った流れになっている。それに対し、後流に放出される渦が Kármán 渦の場合は頂部及び側面からの剥離流は再付着せず、角柱の表面から大きく離れた流れになっているために、渦度の強い剥離流が生じ、Kármán 渦が後流中ではっきり確認できたものと考えられる。

4. ま と め

正方形断面をもつ角柱のまわりの流れについてドライアイスのミストを用いて可視化実験を行った結果を以下にまとめる。

- (i) 角柱の後流に放出される渦は角柱のアスペクト比と Reynolds 数によって Kármán 渦或いはアーチ形渦に変化する、
- (ii) 角柱の下層まわりに生じる馬蹄渦が観察されたが、J. C Baker の言うような Reynolds と D/δ によ

る明確な変化はみられない、

(iii) 角柱の頂部及び側面を渦ぎる剝離流の状態は、後方に放出される渦に大きく影響を及ぼしている、以上のことがわかった。

また、今後の課題としては、

(i) 角柱まわりの流れの3次元構造をより鮮明に可視化することにより、角柱の隅角部からの剝離流、P. J. Mason らが指摘している一対の trailing vortex, そして後流に放出される Kármán 渦やアーチ形渦との関係を明らかにする、

(ii) とくに、Kármán 渦の3次元構造を解明する、

(iii) また、今回の実験では定性的な面について調べたが角柱まわりの流れについて定量的な測定をする、等である。

最後に、本研究を行うにあたり多大の御助言をいただいた京都大学防災研究所桂順治教授に感謝の意を表します。また、角柱模型や可視化装置の製作ならびにその逐行に御協力して下さった同研究所羽野淳介技官と杉政和光技官に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 坂本弘志・谷口清一・森谷 優・有江幹男：乱流境界層の中にある 正方形柱周辺の 流れに関する 研究 (乱流境界層特性と抗力係数との関係), 日本機械学会論文集, 46巻408号B, 1980, pp. 1437-1446.
- 2) Castro, I. P. and A. G. Robins: The Flow around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, J. Fluid Mech., vol. 79-2, 1977, pp. 307-335.
- 3) Vickery, B. J.: Load Fluctuations in Turbulent Flow, Proc. ASCE, vol. 94, EM, 1968, pp. 31-46.
- 4) 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, 日本機械学論文集, 第49巻437号B, 1983, pp. 44-52.
- 5) 桂 順治・守光正幸：正方形断面をもつ角柱模型の側面における 風圧変動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1973, pp. 433-434.
- 6) 谷池義人：高層建築物の空力安定性に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1983.
- 7) 西村宏昭：3次元角柱の側面及び頂面における 圧力変動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986, pp. 77-78.
- 8) Acarlar, M. S. and C. R. Smith: A Study of Hairpin Vortices in a Laminar Boundary Layer. Part 1. Hairpin Vortices Generated by a Hemisphere Protuberance, J. Fluid Mech., vol. 175, 1987, pp. 1-41.
- 9) Mason, P. S.: Trailing Vortices in the Wakes of Surface-Mounted Obstacles, J. Fluid Mech., vol. 175, 1987, pp. 247-293.
- 10) Baker, J. C.: The Laminar Horseshoe Vortex, J. Fluid Mech., vol. 95-2, 1979, pp. 347-367.