平面壁上の有限幅直立平板まわりの流れに及ぼす迎え角の影響*

岡本 史紀^{*1}, 小林 正人^{*2}, 門野 司^{*3}
加賀谷 春幸^{*4}, 島根 淳^{*4}

Influence of Attack Angle on Flow Past a Flat Plate of Finite Width Placed Vertically on a Ground Plane

Shiki OKAMOTO^{*5}, Masato KOBAYASHI, Tsukasa KADONO,
Haruyuki KAGAYA and Atsushi SHIMANE^{*5} Department of Mechanical Engineering, Shibaura Institute of Technology,
3-9-14 Shibaura, Minato-ku, Tokyo, 108-8548 Japan

This paper describes the influence of attack angle on the flow past a flat plate of finite width placed vertically on ground plane. The experiment was carried out in the 800 mm diameter Eiffel type wind tunnel having the working section of 1.5 m length at Reynolds number of 5.1×10^4 mainly. The surface pressure distributions on the flat plate and on the ground plane around the flat plate were measured, and the drag coefficient and lift coefficient were determined from them. The power spectrum of the X component of fluctuating velocity was measured to check the arch vortices shedding behind the flat plate. The vortices generated in the flow field around a flat plate have also been observed by flow-visualization. Consequently, it is found that the disappearance of shedding arch vortices is in the range of $\alpha \geq 45^\circ$ for $W/H=2$ and 4, while the drag coefficient decreases and lift coefficient attains maximum near $\alpha=45^\circ$ for $W/H \geq 4$.

Key Words: Pressure Distribution, Vortex, Flow Visualization, Separation, Flat Plate, Finite Width

1. 緒 言

近年、環境問題に関連して建築物、土盛りされた高速道路、または防音へい等の二次元模型についての風洞実験がしばしば行われている。この種の二次元平板の実験的研究としては、平面壁上の境界層厚さと直立平板の高さの比率を変えて実験した Good-Joubert⁽¹⁾の研究、坂本ら⁽²⁾の研究があげられる。しかし実際に多く見られる防風フェンス、航空機のスポイラなどは平板でも有限幅であるため、その周辺の流れは平面壁上の二次元平板の結果をそのまま用いることはできない。このような有限幅の三次元平板では平板側面から背後への流れ込みが存在するため、平板上方から背後への流れ込みのみしか存在しない二次元平板とは周辺の流れ特性は大きく異なることが予想される。

坂本ら⁽³⁾⁽⁴⁾は平板幅 W の平板高さ H に対する比、すなわち有限幅比 W/H の増減が平板の表面圧力、抗力係数、平面壁上の圧力分布、渦放出パターンを変化

させることを報告した。また岡本⁽⁵⁾はすでに有限幅比が1の正方形平板について、平板の表面圧力、抗力係数、平面壁上の平板周辺のフローパターン、遠隔後流について報告し、正方形平板からはアーチ渦が流出することを明らかにした。この渦生成について、坂本ら⁽⁴⁾は平板の有限幅比をパラメータとして、系統的に渦生成のようすを調べ、有限幅比が0.8を境にしてカルマン渦($W/H \leq 0.8$)からアーチ渦($W/H > 0.8$)へと流出渦の形態移行を明らかにした。しかしながらこれらの報告は平板がすべて主流に対して正面に面している(迎え角がない)場合の報告である。岡本らは前報において従来、フェンスやスポイラなどに見られる有限幅比1以上となる平板の場合ではアーチ渦の生成と消滅など、アーチ渦の生成限界となる有限幅比、およびアーチ渦消滅前後での平板まわりの流れの変化などについて実験的に明らかにした⁽⁶⁾。

本報では、有限幅平板の迎え角をパラメータとして、一様流中の有限幅直立平板まわりのアーチ渦生成と消滅のようすを可視化観察し、アーチ渦消滅と生成限界への迎え角の影響および限界付近での有限幅直立平板の表面圧力、抗力・揚力係数、平面壁上のフローパターンへの迎え角の影響について明らかにする。

* 原稿受付 2005年3月22日。

^{*1} 正員、芝浦工業大学工学部(☎ 108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)。^{*2} キヤノンファインテック(株)。^{*3} 正員、(株)本田技術研究所栃木研究所。^{*4} 学生員、芝浦工業大学大学院工学研究科。

E-mail: okamoto@sic.shibaura-it.ac.jp

記 号

 C_D : 平均抗力係数

$$= \int_0^1 \int_{-0.5}^{0.5} (C_{p1} - C_{p2}) \cos \alpha d(S/W) d(Z/H)$$

 C_L : 平均揚力係数

$$= \int_0^1 \int_{-0.5}^{0.5} (C_{p1} - C_{p2}) \sin \alpha d(S/W) d(Z/H)$$

 C_p : 圧力係数 $= (P - P_{s\infty}) / (1/2) \rho U_\infty^2$ C_{p1}, C_{p2} : 平板前面, 背面圧力係数 H : 平板高さ α : 主流に対する迎え角 n : 振動数 P : 静圧 $P_{s\infty}$: 主流の静圧 Re : レイノルズ数 $= HU_\infty / \nu$ U_∞ : 主流速度 W : 平板幅

X, Y, Z, S : 平板の前面底面中央を原点とする座標軸, 流れ方向に X 軸, 水平方向に Y 軸, 鉛直方向に Z 軸, スパン方向に S 軸をとる。

 ν : 空気動粘性係数 ρ : 空気密度

2. 実験装置および実験方法

本実験では平板および平面壁上の表面圧力測定, 平板後方の変動速度の X 方向成分のパワースペクトルの測定, 流れの可視化観察に際して 2 種類の実験装置を用いた。まず表面圧力測定や平板まわりの実験に使用した風洞は吹出し口直径が 800 mm の Eiffel 形風洞で測定部の長さは 1500 mm である。地面板として幅 1000 mm, 長さ 1500 mm, 厚さ 4 mm のアルミニウム板を用い, その前縁は前縁はく離を防ぐため流線形に削り, 図 1 に示すように風洞吹出し口壁面から上方に離して取付けた。平板の取付位置は前縁から 500 mm 下流のところである。平板の取付位置における境界層特性を表 1 に示す。この実験では境界層厚さに対する平板高さの割合は $H/\delta = 4.81$ である。平板の幾何学的形状は高さ $H = 50$ mm, 縦横比 $W/H = 1, 2, 4, 7, 10$ の 5 種類の平板をおのおの迎え角 $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$ の 5 種類に変え実験を行った。静圧孔は平板表面では幅方向には両端を含み $Z/W = 0.1$ 間隔, 高さ方向にも $Y/H = 0.2$ 間隔で 55 箇所, 平板まわりの平面壁上には平板近くは細かく, 平板から離れるにつれ粗くなるよう不等間隔にとり総数 300 箇所前後設け

Table 1 Boundary layer

Boundary layer thickness	δ (mm)	10.4
Momentum thickness	θ (mm)	1.13
Displacement thickness	δ^* (mm)	1.46
Shape factor	H^*	1.30
H/δ		4.81

Fig. 1 Schema of apparatus and nomenclature

た。平板の表面圧力, 地面板上の平板まわりの静圧の測定には精密微差圧計を用いた。さらに等静圧線図を描く際には上下あるいは左右に 2 点の圧力値から補間法によって線図を描くのに必要な圧力値の位置を求めた。平板後方の変動速度の X 方向成分のパワースペクトルの測定には定温度形熱線流速計を使用した。実験は主流速度 $U_\infty = 15$ m/s 付近とし, 平板高さを代表長さにとるとレイノルズ数 $Re = HU_\infty / \nu = 5.1 \times 10^4$ のもとで行った。

次に流れの可視化観察の実験に使用した回流水槽は幅 400 mm, 深さ 300 mm, 測定部の長さ 1000 mm である。平板の幾何学的形状は $H = 30$ mm, 縦横比 $W/H = 2, 4, 7$ の 3 種類の平板をおのおの迎え角 $\alpha = 0, 45, 60^\circ$ の 3 種類に変え, 実験は速度 $U_\infty = 3$ cm/s, $Re = 8.96 \times 10^2$ のもとで行った。

3. 実験結果および考察

3・1 平板表面圧力分布 図 2~4 に $W/H = 2, 4, 7$ の各迎え角に対する平板の前面と背面の表面圧力分布を示す。まず, $W/H = 2$ の場合について調べる。前面圧力を見ると, $\alpha = 0^\circ$ では平板中心部分で静圧は最大となっているが, 迎え角が大きくなるに従い最大圧力に達する位置は, 徐々にスパン方向のマイナス側に移動している。さらに, 迎え角が大きくなると $Z/H = 0.85$ の圧力が徐々に低くなっており, 特に迎え角の大きい $\alpha = 45, 60^\circ$ では $Z/H = 0.85$ が最も低くなっている。これは, 迎え角が大きくなると平板上方を乗り越えようとする流れが強まっているためである。一方, 背面圧力分布を見ると, $\alpha = 0^\circ$ では, 高さ方向およびスパン方向ともに, あまり大きな変化は見られない。しかし, $\alpha = 30^\circ$ から徐々に圧力が低下し, 特に $\alpha = 60^\circ$

Fig. 2 Surface pressure distribution on flat plate ($W/H=2$) Fig. 3 Surface pressure distribution on flat plate ($W/H=4$) Fig. 4 Surface pressure distribution on flat plate ($W/H=7$)

では大きな変化が見られる。 $S/H=-1\sim 0$ (上流側半分)にかけて $C_p=-1.15$ と、圧力が急激に低下し、かつ高さ方向に変化がない部分が存在する。これは上流側に移動した側端からはく離れた渦の流出が活発になって渦度が強まり圧力が低下したものである。

次に図3の $W/H=4$ では前面圧力を見ると、 $W/H=2$ と同様に迎え角が大きくなるにつれて最大圧力に達するスパン方向位置が、マイナス側の上流側側端付近に移動する。一方、背面圧力分布を見ると、 $\alpha=0^\circ\sim 30^\circ$ までは、迎え角が大きくなるに従いスパン方向分

布に変化はあるが、それぞれ高さ方向の変化はないようである。 $\alpha=45^\circ$ では大きな変化が見られ、 $S/H=-2\sim -0.8$ の範囲においては $C_p=-1.15$ 程度に急激に圧力が低下し高さ方向の変化がない部分がある。これは、前述したように側端から剥離した渦の流出が活発になり渦度が強まり圧力が低下したものである。また、圧力が低下し、一定となる部分は平板幅が広い場合 $W/H=2$ のときよりはやく $\alpha=45^\circ$ の場合で現れた。そして、高さ方向の低い位置の $Z/H=0.05, 0.25$ において $S/H=-0.5\sim 0$ の位置で圧力が急に高くな

山形分布になる。これは平板の低い位置つまり平面壁付近のこの位置に圧力の山があることを示唆している。 $\alpha=60^\circ$ では $\alpha=45^\circ$ より、高さ方向の変化がなくスパン方向に一定な分布の部分が $S/H=-2\sim-1.1$ となり、さらに狭まっている。また、山形分布になる部分についても、 $\alpha=45^\circ$ では低い2列 $Z/H=0.05, 0.25$ のみだったが、 $\alpha=60^\circ$ では $Z/H=0.45$ でも圧力が高くなる山形分布になる。そして、 $Z/H=0.05, 0.25$ における圧力も $\alpha=45^\circ$ のときよりさらに高くなっている。これは、平板の低い位置に存在する圧力の山が、迎え角が大きくなるに従って、さらに高い位置まで広がるためと考えられる。そして、この圧力の山の存在を確認するために、可視化実験および地面板上静圧測定を行ったので後述する。

図4の $W/H=7$ の場合では前面圧力を見ると、他の場合と同様、迎え角が大きくなるに従い最大圧力に達するスパン方向位置は、マイナス側の上流側側端付近に移動している。また、迎え角が大きくなるに従い、 $Z/H=0.85$ の圧力が徐々に低くなっており、特に $\alpha=60^\circ$ では最も低い。このように前面圧力に関しては、 $W/H=2, 4$ と同様な傾向であることがいえる。一方、背面圧力分布を見ると、 $\alpha=0\sim30^\circ$ までは、迎え角が大きくなるに従い高さ方向の変化はないが、スパン方向分布に大きく変化が見られる。 $\alpha=15, 30^\circ$ と迎え角

がつくことで、上流側の側端からのはく離渦が支配的になるため、 S/H のマイナス側である上流側側端のほうが圧力が低くなり、下流側の側端へ向かって圧力が高くなるようにスパン方向の圧力分布が変化している。また、 $\alpha=45^\circ$ ではさらに大きな変化が見られる。 $S/H=-3.5\sim-2.7$ の範囲において $C_p=-1.15$ 程度に圧力が低下し高さ方向の変化がない部分がある。これは、 $W/H=4, \alpha=45^\circ$ の場合と同様に、側端からのはく離渦により渦度が強まり圧力が低下したためである。そして、平板幅が $W/H=4$ より広いため $W/H=4, \alpha=45^\circ$ のときよりこの部分がさらに狭まったのである。 $Z/H=0.05, 0.25$ の高さ方向の低い位置において $S/H=-2$ 付近で圧力が急に高い山形分布になる。これは $W/H=4, \alpha=45^\circ$ のときと同様に、平板の低い位置に圧力の山が存在する。さらに $\alpha=60^\circ$ では $\alpha=45^\circ$ の場合と同じような分布形となっているが、山形の分布については、 $\alpha=45^\circ$ では $Z/H=0.05, 0.25$ のみだったが、 $\alpha=60^\circ$ では $Z/H=0.45$ も圧力が高くなる山形分布となる。

3・2 抗力係数・揚力係数 図5は、測定した平板前面および背面の圧力から求めた迎え角に対する抗力係数の変化を示す。図中には岡本⁽⁵⁾および山田⁽⁷⁾の迎え角 $\alpha=0^\circ$ 、 $W/H=1$ における結果を同時に示した。図5を見ると、迎え角が増加するに従い抗力係数は減少している。しかし、 $W/H=1$ の平板は、 $\alpha=0\sim60^\circ$ にかけ急激に抗力係数が小さくなるが、 $W/H=2\sim10$ の平板では、 $\alpha=0\sim15^\circ$ において抗力係数はあまり小さくならず、むしろ抗力係数が若干、大きくなっており、 $\alpha=30^\circ$ から急激に抗力係数が小さくなっている。また本実験の結果は、岡本⁽⁵⁾および山田⁽⁷⁾の結果より抗力係数が小さい。これは平板高さと境界層厚さの比 H/δ の違いに起因するものである。

Fig. 5 Drag coefficient

Fig. 6 Lift coefficient

 Fig. 7 Pressure distribution and flow pattern on ground plane ($W/H=2$)

Fig. 8 Pressure distribution and flow pattern on ground plane ($W/H=4$)

図6は、迎え角に対する揚力係数の変化を示す。図を見ると各平板とも、迎え角 α が大きくなるに従い、揚力係数も増加するような傾向が見られる。 $W/H=1, 2$ では迎え角が大きくなるに従い、徐々に揚力係数も大きくなっている。しかし、 $W/H=4$ 以上の平板では $\alpha=45^\circ$ 以上の迎え角になると、揚力の変化が小さくなる。このことより、 $W/H=4$ より大きい W/H の平板では、 $\alpha=45^\circ$ 以上になると揚力係数はピークに達し、 $\alpha=60^\circ$ では若干減少する傾向がうかがえる。

3.3 平面壁上の平板まわりのフローパターン

平面壁上の平板まわりのフローパターンを明らかにするために、3.1節で述べたように平板の圧力分布で迎え角に対して大きく変化した背面圧力分布を等静圧線図で描き詳細に調べ、併せて歯磨き粉の溶液を用い表面塗布法によって可視化された平面壁上の平板まわりのフローパターンを調べ、さらに平面壁上の平板周辺の等静圧線図を描き全体的な流れのようすを調べる。

まず図7の $W/H=2$ の場合の平板背面の等静圧線図(上図)を示す。 $\alpha=0^\circ$ の場合では左右に一对の低压領域が見られる。 $\alpha=0^\circ$ に比べて迎え角が大きくなるに従って一对の低压領域は崩れ、非常に複雑な等静圧線を示している。しかし全体的に、迎え角が大きくなるにつれ、徐々に圧力は低くなっている。特に、 $\alpha=60^\circ$ では、平板の左半分は $C_p=-1.1$ のように、圧力が非常に低く、かつ変化がない部分が存在することが等静圧線図からも見られる。このような低压の一定部分が現れるのは、平板の上流側の側端からはく離渦が支配的になるためである。

可視化観察によるフローパターン(流れ方向は左から右)では、 $\alpha=0^\circ$ で平板の後方に対称な一对の白い粉だまりが確認できる。これは平板後方に生成されるアーチ渦の下端部であり、アーチ渦が生成されていることが示されている⁽⁶⁾。しかし、 $\alpha=45^\circ$ では、粉だまりは一对ではなく、上流側に移動した側端の後方の粉だ

 Fig. 9 Pressure distribution and flow pattern on ground plane ($W/H=7$)

まり一つだけであり、アーチ渦がほぼ消滅し上流側に移動した側端からはく離渦のみになっている。さらに $\alpha=60^\circ$ になると、このはく離渦も $\alpha=45^\circ$ のときより小さくなる。そのため平板背面全体は、このはく離渦に覆われず、等静圧線図においても左側のみに低圧の一定な部分が現れる。等静圧線図において平板の左側の低圧で一定となる領域は写真中の a の部分に相当する。写真からも見えるが a 部には発達した渦が存在していると思われる。また、a の部分の平板に沿って下流側には、渦が途切れており、それが等静圧線図では圧力が高くなる山形の分布のピークの位置に相当し、写真では b の部分であり、下流にはしが見える。

次に図 8 の $W/H=4$ の場合では、背面を見ると $\alpha=0^\circ$ では $W/H=2$ の場合と同様に左右に一对の低圧領域が見られる。さらに迎え角が大きくなるにつれ、一对の低圧領域は崩れ徐々に圧力は低くなっているようである。また、 $\alpha=45^\circ$ ではほぼ左半分で $C_p=-1.1$ の低圧で一定な部分が現れているのが等静圧線図からもわかる。また、 $S/H=0$ の平面壁付近の低い位置で圧力が高くなる部分が見られる。

可視化観察によるフローパターンでは、 $\alpha=0^\circ$ では平板後方に対称な一对の粉だまりが確認でき、アーチ渦が生成されている⁽⁶⁾。しかし $\alpha=15^\circ$ では $\alpha=0^\circ$ のとき、対称であった平板後方の一对の粉だまりが非対称になり、迎え角をつけたことで上流側に移動した側端の後方の粉だまりが大きくなっているのが見られるが、これは上流側に移動した側端からはく離渦が支配的なアーチ渦になっている。 $\alpha=30^\circ$ でも、上流側に移動した側端後方の粉だまりが大きく、上流側の側端からはく離渦のみになりつつあるが、わずかに下流

側端からはく離渦も見られるため、アーチ渦が消滅していない。

しかし、 $\alpha=45^\circ$ では、粉だまりは上流側に移動した側端の後方の一つのみである。したがって $W/H=4$ の場合では $\alpha=45^\circ$ でアーチ渦は消滅してしまい、上流側端からはく離渦のみである。この上流側の側端における a の部分の一つの粉だまりの位置は、平板背面圧力分布において $C_p=-1.15$ でほぼ一定な低圧の部分と位置が一致しており、上流の側端からはく離渦により渦度が強まり圧力が低くなることが可視化写真からも示されている。さらに、一つの粉だまりの下流側からは、一すじのしが見て取れる。このしまより手前の平板背面側の b の位置は、背面圧力が高くなる山形分布のピークになる位置と一致する。このことから、上流側端からはく離渦後方で、平面壁には c の部分の一すじのしまに対応して圧力の谷があるのではないかと考えられる。この平面壁にある圧力の谷の存在を確認するため平面壁上の等静圧線図において後述する。

平面壁上の等静圧線図では、 $\alpha=0^\circ$ では $Y/H=0$ の線に対して対称な位置に閉じた等圧線で示される一对の最小圧力領域が見られる。これは先に示した平面壁上のフローパターンにおいて歯磨き粉の白い粉だまりの位置に相当し、平板後方に生成されるアーチ渦の根元にあたるものと思われる。迎え角がさらに増して $\alpha=15, 30^\circ$ の場合になると、この一对の最小圧力領域は一つの最小圧力領域へと変化する。さらに $\alpha=45^\circ$ では上流側の側端付近に $C_p=-1.1$ 程度の一つの最小圧力領域がある。また、この位置はフローパターンの上流側の側端に見られる一つの粉だまりの位置(図の a の部分)とも、よく一致している。これらのことか

ら、 $W/H=4$ の平板では $\alpha=45^\circ$ でアーチ渦は消滅しており、上流側の側端からの活発な離渦により、渦度が強まり $C_p=-1.1$ 程度に圧力が低下する。さらに、上流側の側端に見られる一つの最小圧力の平板に沿ってスパン方向(図の斜め上方)へ等圧線がしま状に現れている。この等静圧線図の谷間はフローパターンで述べた、一つの粉だまりの後方に見られる一すじのしま(図のcの部分)と位置がよく一致している。また、このしま状に見える等圧線の出発点と見られる平板背面側の位置(図のbの部分)は、平面壁付近で圧力が急激に高くなり、山形分布になる位置ともほぼ一致し、その圧力もほぼ等しい。

最後に図9の $W/H=7$ の場合では、背面を見ると $W/H=2, 4$ と同様、 $\alpha=0^\circ$ では左右に一对の低圧領域が見られ、迎え角が大きくなるにつれ、徐々に圧力は低くなる。 $\alpha=45^\circ$ では $W/H=4$ の場合と同様、平板の左半分の部分では $C_p=-1.1$ 程度で一定部分がある。そして、 $S/H=-2$ 付近の平板の平面壁付近の低い位置に、圧力の高い部分が存在する。

可視化観察によるフローパターンでは、図9から、 $\alpha=0^\circ$ では平板後方にスパン方向に離れた一对の粉だまりが確認できる。しかし $\alpha=45^\circ$ になると、上流側端からはく離渦のみである。aの部分である上流側の側端における一つの粉だまりの位置は、写真からもわかるように発達した渦が存在し、平板背面圧力分布において $C_p=-1.15$ 前後の圧力が低く一定となる部分と一致している。これは上流側端からはく離渦により渦度が強まり圧力が低くなることを裏付けている。しかし、 $W/H=4$ 、 $\alpha=45^\circ$ の場合よりaの部分は小さくなるのが写真から見られる。そのため背面圧力

分布においても圧力が低く、一定となる部分は狭い。さらに、一つの粉だまりの下流側からは、cの部分に一すじのしまが見れる。このしまの平板背面側の位置であるbの部分は、背面圧力において圧力が高くなる山形分布になる位置と一致する。このことから、 $W/H=7$ 、 $\alpha=45^\circ$ で上流側の側端からはく離渦後方での平面壁上には、この一すじのしまに対応して圧力の谷がある。

平面壁上の等静圧線図では、 $W/H=4$ の場合と同様、 $\alpha=0^\circ$ では平板の後方に対称な位置に閉じた等圧線で示される一对の最小圧力領域が見られる。これは平面壁上のフローパターンで現れた白い粉だまりの位置に相当する。さらに迎え角がついた $\alpha=45^\circ$ の場合になると、その最小圧力領域は上流側の側端付近の1箇所となり、上流側の側端からの渦のはく離が活発なため、 $C_p=-1.1$ 付近まで圧力が低下し、この位置では先に示したフローパターンにおいても渦の存在が見られた。また、最小圧力領域の下流側の斜め下方には周囲に比べて圧力が低くなる等静圧線図の谷間が下流側の斜め上方に沿って存在するが、これは先に述べたようにフローパターンでは一すじのしま(図のcの部分)となって現れている。

3・4 渦の生成と消滅 前報⁽⁶⁾では迎え角がない場合、 $W/H=2, 4$ の有限幅平板では平板の上端、側端からの流れは同時にはく離し、はく離渦が一体となるアーチ渦が生成され、周期的に下流へ流出するようすが確認された。一方、 $W/H=7$ の平板では平板の上端、側端から同時にはく離し、一体となるはく離渦は生成されるが、平板側端からはく離した縦渦(渦糸の方向がZ軸方向のもの)が平板上端からはく離した横

Fig. 10 Power spectra ($W/H=2$, $Z/H=0.5$)

Fig. 11 Power spectra ($W/H=4$, $Z/H=0.5$)

Fig. 12 Visualization of vortices ($\alpha=45^\circ$)

渦(渦糸の方向が Y 軸方向のもの)と比べて弱く、両渦の合体・成長によってアーチ渦は崩れ、消滅することを明らかにした。ここでは $W/H=2, 4, 7$ の平板について、迎え角をつけた場合のアーチ渦の生成と消滅、さらに平板の左右の両側端からはく離渦の挙動について調べる。図 10, 11 は平板の左右の側端後方のパワースペクトルを示す。パワースペクトルは流出渦の振動数に相当する周波数で鋭いピークをもつことが知られている。したがってパワースペクトル曲線においてピークの存在の有無は周期的な流出渦の有無を意味する⁽⁶⁾。ピークがある位置は太線の○印で番号を囲んで示している。図を見ると $W/H=2, 4$ の平板で $\alpha=0, 30^\circ$ の場合では、平板の左右の両側端後方ではパワースペクトル曲線にピークが見られ、周期的な流出渦、すなわちアーチ渦が流出していることが明らかである。しかし迎え角が 45° の場合、平板の下流側の側端後方ではピークが確認されたが、上流側の側端後方ではピークは消滅し、したがってアーチ渦は流出していないことが明らかである。これを回流水槽においてメチレンブルー水溶液を用いた注入トレーサ法により可視化観察を行った。

平板内部を空洞にして、平面壁の下から流路を設け、トレーサを供給した。さらに平板側面、上面には複数の穴を設け空洞部までつなぎ、トレーサが平板内部から周囲に流出するように圧力を負荷した。圧力はトレーサの器を上下に移動することにより負荷がかかり、トレーサが表面から染み出る方法を用いた。図 12 は $W/H=2, 4, 7$ の平板において迎え角が 45° の場合の流出する渦のようすの写真を示す。これらの写真からは迎え角が 45° の場合では $W/H=2, 4$ の平板でも上端からはく離した横渦のみしか見られず、側端からはく離した縦渦は弱まり消滅し、両渦が一体化したアーチ渦は生成されず、いずれも平板の下流側の側端からのみいゆる随伴渦のような渦が流出しているようすが明らかである。さらに $W/H=7$ の平板では平板の上端からはく離した横渦のみしか見られず、横渦が支配的であることが明らかである。また $W/H=4, 7$ の平

板では平板前面の等静圧線図に見られたように平板先端付近で圧力は急激に低下したがその影響を受けて平板上端を越す流れが、平板上流側の側端よりスパン方向に軸をもつ横渦が生成されるが、すぐ削減している。さらに迎え角が 60° の場合では $W/H=2, 4$ の平板でも左右の両側端後方でピークが見られなかった。

4. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 迎え角が増すにつれて、前面圧は最大圧力をとる位置が上流側へ移動し、背面圧は上流側の側端からはく離渦により過度が強まり圧力が低下し、上流側の側端の背面では低圧領域が現れる。

(2) 抗力係数は迎え角の増加に伴い減少する。揚力係数は迎え角の増加に伴い増加するが、 $W/H=4$ 以上の平板では $\alpha=45^\circ$ でピークに達し、その後減少する。

(3) 平板まわりのフローパターンでは $W/H=2, 4$ の平板の場合、平板後方に一對の粉だまりが確認でき、アーチ渦が生成されるようすが確認できた。しかし迎え角が大きくなるにつれて、平板後方の一對の粉だまりは非対称になり上流側に移動した側端後方の粉だまりが大きくなる。すなわち上流側側端からの過度が強まり、そこからはく離渦のみとなるアーチ渦消滅のようすが明らかになった。

(4) 迎え角が $\alpha=0\sim 30^\circ$ までの平板においては、 $W/H=4\sim 7$ の範囲内にアーチ渦の生成限界があるが、 $\alpha=45^\circ$ 以上では $W/H=2, 4$ の場合でもアーチ渦が生成されず、下流側の側端より流れ方向に軸をもつ随伴渦のような渦が生成される。

文 献

- (1) Good, M. C. and Joubert, P. N., The Form Drag of Two-Dimensional Bluff-Plates Immersed in Turbulent Boundary Layers, *J. Fluid Mech.*, **31**-3 (1968), 547-582.
- (2) 坂本弘志・森谷優・有江幹男, 乱流境界層内におかれた鈍い物体周辺の流れに関する研究 (第1報, 垂直平板の抗

- 力), 機論, 41-342, B (1975), 526-535.
- (3) 坂本弘志・有江幹男・森谷優・谷口清一, 乱流境界層内に埋没する有限幅平板周辺の流れ (第1報, 平板に作用する圧力および抗力), 機論, 48-433, B (1982), 1674-1682.
- (4) 坂本弘志・有江幹男・森谷優・谷口清一, 乱流境界層内に埋没する有限幅平板周辺の流れ (第2報, ストローハル数およびフローパターン), 機論, 48-433, B (1982), 1683-1691.
- (5) 岡本史紀, 平面上の正方形断面をもつ鈍い物体を過ぎる流れの実験的研究, 機論, 50-457, B (1984), 2068-2076.
- (6) 岡本史紀・小林正人・門野司・加賀谷春幸・島根淳, 平面壁上の有限幅直立平板まわりの流れ, 機論, 71-711, B (2005), 2663-2670.
- (7) 山田英巳・大板英雄・影山芳郎・古屋雅啓, 平面壁上に直立する有限幅多孔平板まわりの流れ (第1報, アスペクト比が1の多孔平板の場合), 機論, 53-490, B (1987), 1696-1703.
-