

多孔立方体モデル周りの流れの可視化

(第2報 水平断面特性)

影山 芳郎*・大坂 英雄*・山田 英巳*・長谷川 秀**

Water Tunnel Visualization on Flow around the Perforated Cube Model

(2nd Report, Flow visualization in a horizontal plane)

Yoshiro KAGEYAMA, Hideo OSAKA, Hidemi YAMADA and Shigeru HASEGAWA

Abstract

Flow field around the perforated cube placed on the flat plate has been investigated using a water tunnel experimentally. Observation around a cube of various open area ratios has been made by the dye method and the hydrogen bubble method. The pattern are photographed from upper side, in order to make clear the mechanism of the change of patterns with varying the open area ratio. With increasing the open area ratio, the hydraulic shadow is narrow and an adverse pressure gradient upstream the model is weak. Furthermore the frequency of the vortex shedding from side wall of the cube are large with increasing the open area ratio.

1. まえがき

著者らは前報¹⁾において、層流境界層中に置かれた最も基本的な形状である立方体のモデル(多孔壁)の周辺の流れ場について、モデルの中心断面特性を測定した。これによると、立方体モデルの開口比の変化につれてモデルの上流の流れ場の逆圧力勾配の程度が変化し、これにともない中心断面の流体力学的諸特性が変化することが明らかとなった。

平面壁上に置かれた三次元物体周りの流れ場は境界層が三次元的に剥離する²⁾ため、高さ方向の特性(中心断面特性)に加え水平面内の剥離域のひろがり問題となり、モデルによる流れ場の水平断面特性の変化を調べることは重要である。このような点を考慮し、著者らは主として人工魚礁モデル周りの水理構造に関して風洞実験を行ない、平均速度、抗力及び乱れ強さ分布について若干の知見^{3)~7)}を得ている。ここで人工魚礁の水理構造に的をしぼって従来の研究を概観すると、水槽による実験が多く、黒木ら⁸⁾、高田ら⁹⁾のも

のがあげられるが、種々の基本的特性を定性的に説明するにとどまっております、人工魚礁の流体力学的機能を総合的に判断するためには資料が不足しており、なお系統的研究が願望されている¹⁰⁾。特に魚礁モデルの形状の差異(形及び面の開口比)、近寄り流れの特性および壁面上の境界層特性がモデルの周囲に形成される流体力学的陰影に及ぼす効果はほとんど知られていない。さらに複数魚礁モデル周りの流れ場は実際上重要で、人工魚礁間の有機的配置あるいは人工礁と自然地形との空間的配置等を適切に定めるために遭遇する問題である。

本報告では前報¹⁾に引き続き、層流境界層中に置かれた多孔壁立方体モデル周りの流れ場について、水平断面特性を調べることを試みた。そのためモデルの開口比が平均速度場、逆流域、流体力学的陰影に及ぼす影響を、染料法と水素気泡法とを併用して明らかにした。

本報告で用いる主要な記号は前報¹⁾と同一であり、新たに生じるものについては本文中でその都度定義する。

2. 実験装置及び方法

本実験で用いた装置は前報¹⁾と同様である。前報¹⁾

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

の Fig. 2 に示された供試モデル（4種の開口比 $\beta=0, 0.11, 0.19$ 及び 0.30 のもの）の周りの流れ場が、染料法及び水素気泡法により可視化され、水平断面特性が写真撮影あるいは 8mm 撮影により測定された。測定にあたり、水素気泡の大きさ、平行流の確認、所要流速等が詳細に算定された。実験は主として主流速度 3 cm/s で行なわれ、流れの方向 α は流れがモデルの前面に垂直に当たる場合 ($\alpha=0$ 度) に限って行なわれた。モデルの開口比 β は $0\sim 0.30$ の4種類である。

本報告で示す写真はいずれもシャッタースピードが $1/60$ 秒のものである。また立方体モデル周りの広い範囲を示すためにモデルの前方領域と後方領域とを分けて撮影しており、そのため染料フィラメントが必ずしも一致はしていないので注意を要する。

3. 実験結果及び考察

3.1 染料そう入高さによる流れ場の差異

Photo. 1~6 は、流れの方向が $\alpha=0^\circ$ の場合の開口比 β の相違による流れ場の変化を示したもので、 $y=$ 一定面内、すなわち水平断面内の様子を撮影したものである。説明のつごうにより、モデルの上流より近づく8本の染料フィラメントに上から順に番号を1から8と付し、簡単のため F1~F8 と書くことにする。

(1) $y/D=0.1$ の場合

Photo. 1 (a)~(d) は $y/D=0.1$ (D はモデル高さで 50 mm) の高さから染料をそう入した場合の結果である。全体的傾向をみると、モデルの上流側に馬蹄形渦が観察され、モデルの側面を通り下流へ流れ去っている。流線のモデルへの近寄り具合は、1渦⁶⁾ (馬蹄形渦のうち一番大きいスケールのもので、モデルに向かって下向きに巻く渦) よりモデルの近傍は可視化されていないため明らかではない。ただ F3 と F5 の染料のモデル側面への通過する径路からみると、 β が増大するにつれて径路が丸みを帯びなめらかになっている。これはモデル前方に形成される逆圧力勾配の減少によるものであろう。次にモデル側面からの剥離渦についてみると、可視化はされていない。ここでは馬蹄形渦の1渦のみがすべての β の場合について可視化されており、F2~F6 の染料が1渦を示す染料にからまっている。下流の後流域が狭まる位置をみると、 $\beta=0$ の場合モデル高さの3.5倍下流位置で生じており、開口比が増大するにつれ下流へ移動しました明瞭ではなくなる。これはモデル内を通過する流量が β の増加とともに増え、剥離逆流域が下流へ移動させられたためである。

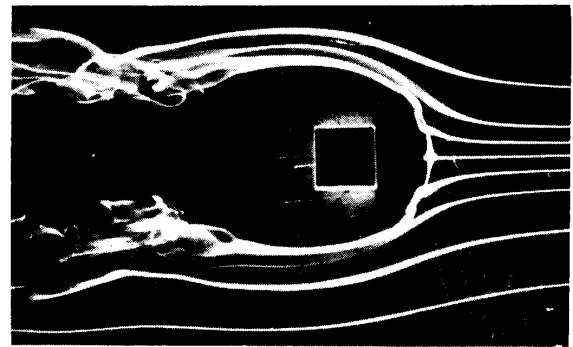
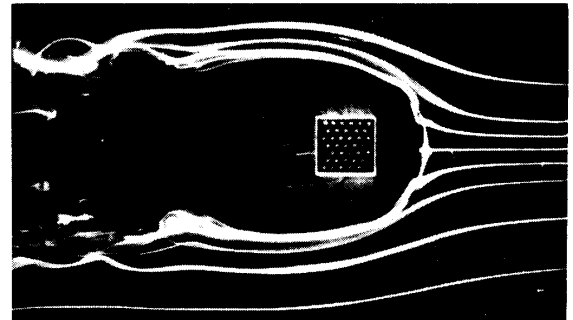
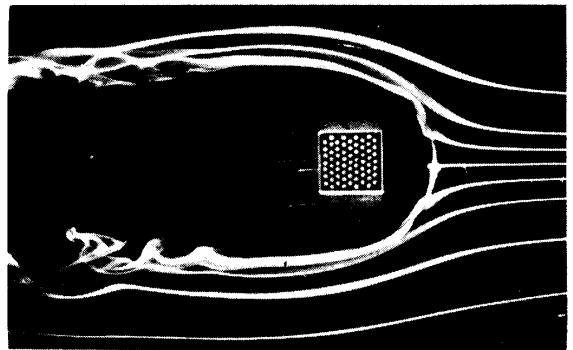
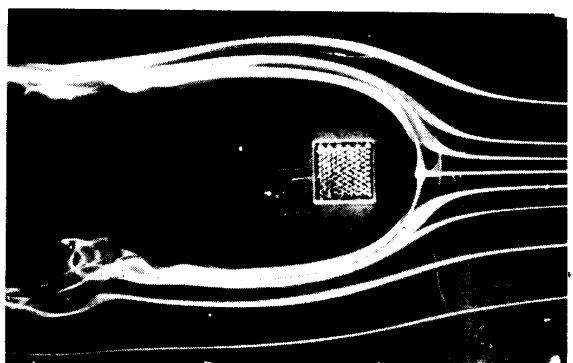
(a) $\beta = 0$ (b) $\beta = 0.11$ (c) $\beta = 0.19$ (d) $\beta = 0.30$

Photo. 1 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=0.1$).

(2) $y/D=0.3$ の場合

Photo. 2 (a)~(d) は $y/D=0.3$ の場合の結果である。この場合もすべての β の場合において、モデルの上

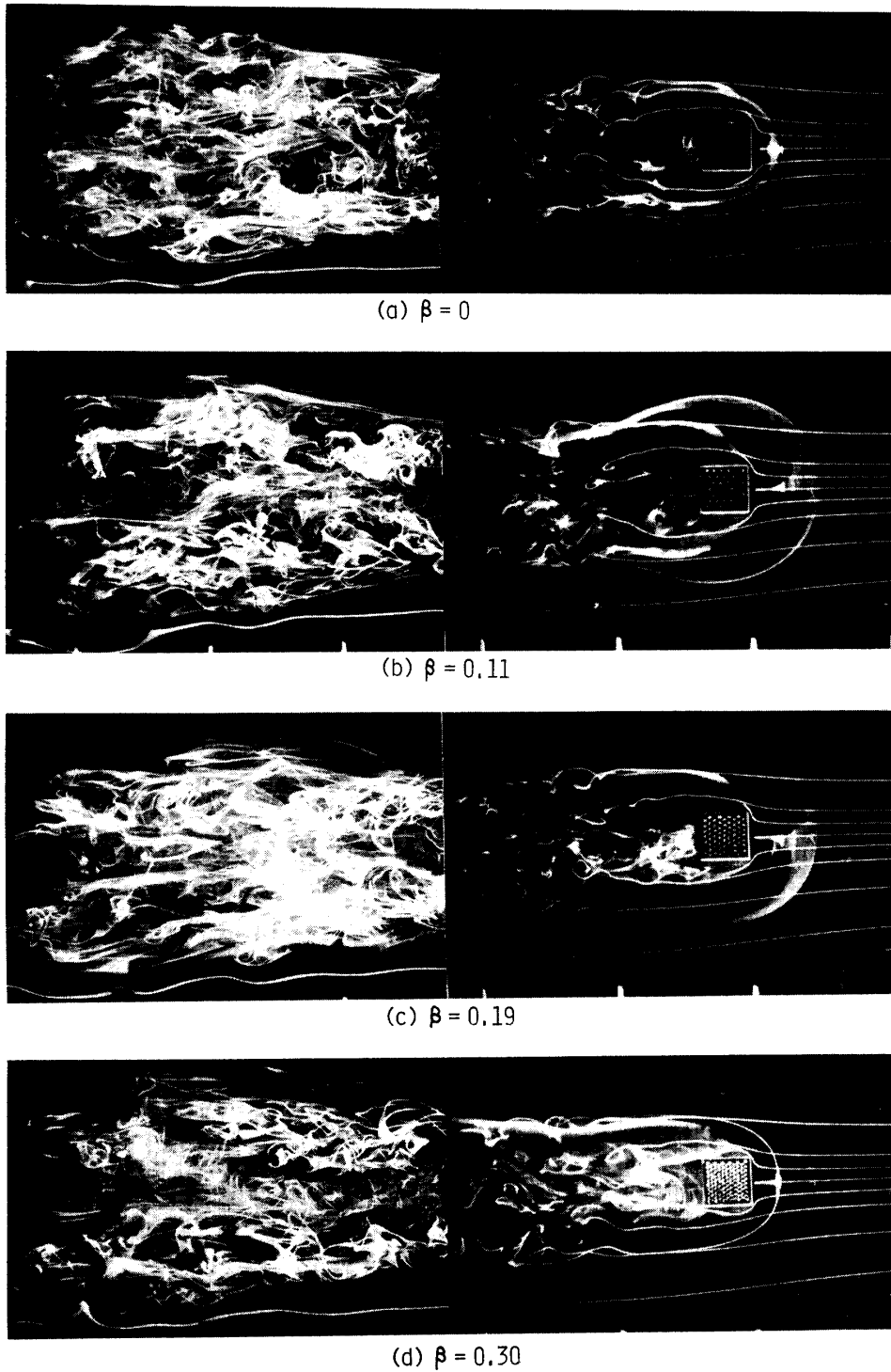


Photo. 2 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=0.3$).

流側に馬蹄形渦の渦管が可視化されている。流線のモデルへの近寄り具合は、F3とF5の染料フィラメントに注目した場合、開口比が増大するにつれモデルに近づいている。これは $y/D=0.1$ の場合と同様モデル前面の逆圧力勾配の減少によるものである。また $\beta=0\sim 0.19$ の場合 F3とF5の染料はF2とF6の染料の下をくぐり1渦の渦管まで達している。これは1渦の循環

によるためと思われる。なお1渦は $\beta=0$ の場合のみ可視化されている。 $\beta=0.30$ の場合、F3とF5の染料はモデル側壁からの剥離域を可視化している。後流乱流領域の狭まる箇所については、明瞭には観察できず主流の流体の巻き込みが弱められているものと思われる。後流乱流領域の幅を比較してみると、モデル高さの10倍下流の位置では β が増加するにつれわずかに狭くな

るようである。ただ $y=25\text{ mm}$ ($y/D=0.5$) の場合と比較しやや広い。

(3) $y/D=0.5$ の場合

Photo. 3 (a)~(d) は $y/D=0.5$ の場合の結果である。モデル前面に生じている馬蹄形渦は可視化されていない。全体の傾向はモデルの前方側面で剥離し、後流中に剥離乱流域を形成している。流線のモデルへの近寄り具合をみると、開口比が増大するとモデルに染料が近づくようであり、F3とF5の染料に注目すると良くわかる。このモデル上流側で染料が曲折するのはモデル前方の逆圧力勾配による流れの三次元剥離のためであり、 β の増大につれ染料がモデルに近づくことはモデル前方の逆圧力勾配の程度が減少することを意味する。次にモデル側面から生成される剥離渦の状態についてみると、渦はモデル前面両端から同時に放出されており、二次元円柱後方に見られるカルマン渦とは異なる。渦の発生間隔をみると中央断面特性¹⁾と同様、開口比 β が増大するにつれ小さくなっている。乱流域の狭まる様子はこの高さの断面においても観察される。開口比が零($\beta=0$)の場合最も狭く、開口比の増大につれ顕著ではなくなるが位置が下流側へずれる。これは前述のモデル中を通過する流体量が増すためである。なおここで述べている乱流域の狭まりは、モデル前面

両端の剥離からはじまる逆流域が閉じる領域をおおよそ示すものである。後流幅をみると、モデル高さの2倍下流では開口比による幅の差異はみられない。下流の一度狭まる位置から広がる領域の幅で比較すると、開口比の増大につれ小さくなっている。

(4) $y/D=1$ の場合

Photo. 4 (a)~(d) は $y/D=1$ の場合の結果である。モデルと同一高さの位置から染料を流しているが、染料はモデル上を通過している。この高さにおいても、流線のモデルへの近寄り具合をみると、F3とF5の染料の傾きから判断して、開口比 β が増大するにつれ傾きが小さくなっており、モデル前方の逆圧力勾配の減少を表わしている。モデル上面を通過して下流域でF2~F6の染料が作る渦は鎖状渦(chain vortex)であり、三次元的に巻き込む渦の形状をしている。開口比 $\beta=0$ の場合顕著であるが、開口比の増大につれ明白でなくなる。後流域については三次元的領域をした剥離域のうち比較的上方の位置をみているため、開口比による領域の狭まりの位置の差異は明らかではない。ただ後流域の幅をみると、開口比の増大につれ小さくなっており、かつ $y/D=0.5$ の位置と比べかなり狭い。

(5) $y/D>1$ の場合

Photo. 5 (a)~(d) は $y/D=1.2$ の場合、Photo. 6

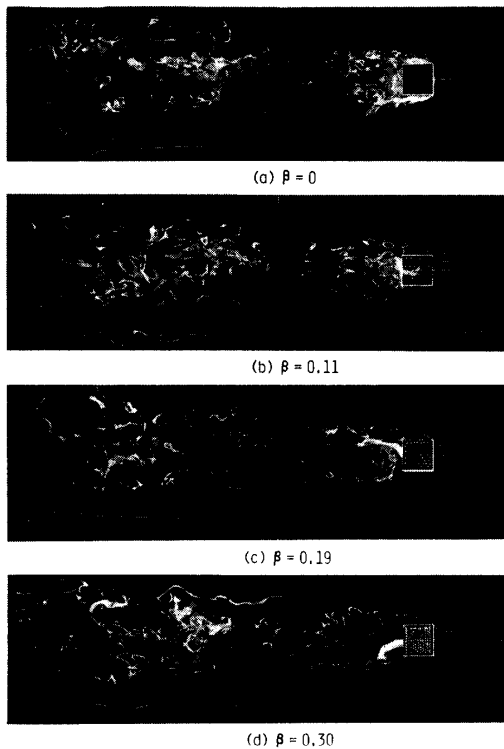


Photo. 3 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=0.5$).

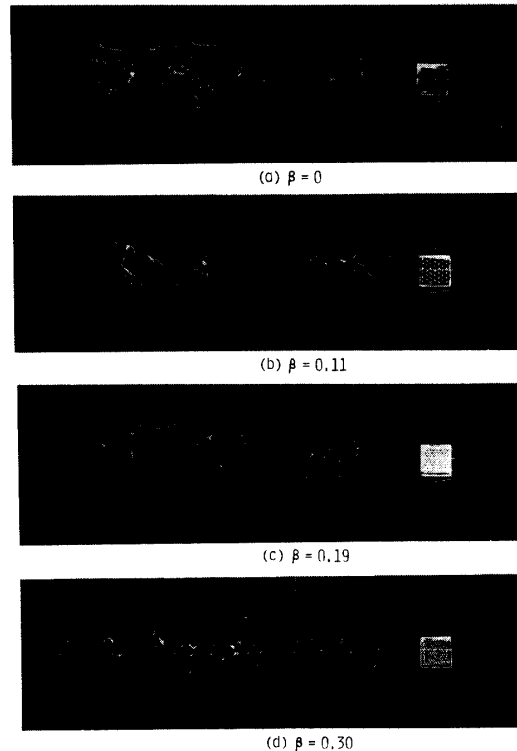


Photo. 4 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=1$).

(a)~(d) は $y/D=2$ の場合の結果である。撮影はモデル高さの約5倍下流までのみ行なっている。 $y/D=1.2$ の場合、モデルの下流で三次元的な巻き込みを示す染料の様子が可視化されているが、開口比の増大にともないその様子が明白でなくなる。 $y/D=2$ の場合、すべての開口比の場合とも染料は直線的径路をたどっており、モデルの影響が大きく及んではないことを示している。ただモデル高さの10~15倍下流の位置で5~10秒の周期を持つ間欠的巻き込みが観察された。

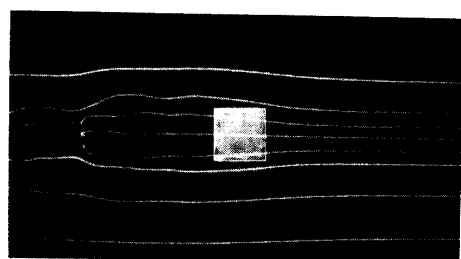
以上述べてきた結果から、モデルの流体から受ける抵抗の変化が開口比により異なることが推測できる。すなわち、モデルの周囲に形成される乱流域の体積変

化は物体に働く抗力の目安と考えてよいので、開口比の増大につれ上述の体積が減少することより、モデルに働く抗力も減少するとみなせる。

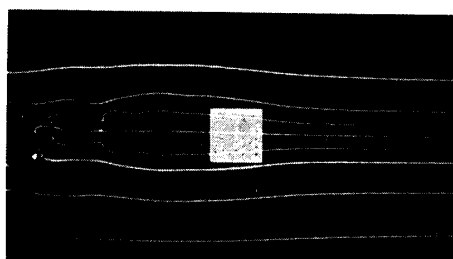
3.2 水素気泡法による水平断面の可視化

Photo. 7 (a)~(d) は、流れの方向が $\alpha=0^\circ$ の場合の開口比 β の相違による流れ場の変化について、モデルの上流及び下流をそれぞれ上段及び下段に併列して示す。すべての写真は水素気泡を発生するタンゲステン線の高さを $y/D=0.5$ に保って撮影したものである。

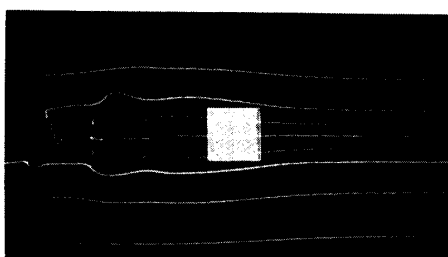
まずモデルの上流側について考察する。染料法の場合の結果 (Photo. 3) と同様、流れがモデルに滑らかに



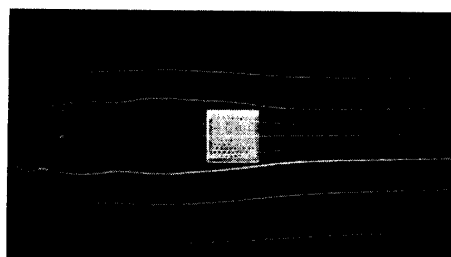
(a) $\beta = 0$



(b) $\beta = 0.11$

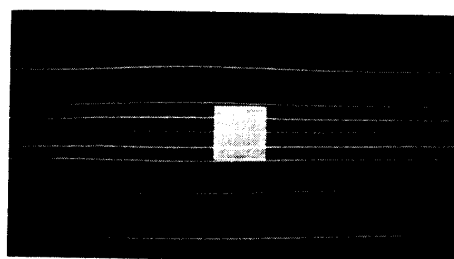


(c) $\beta = 0.19$

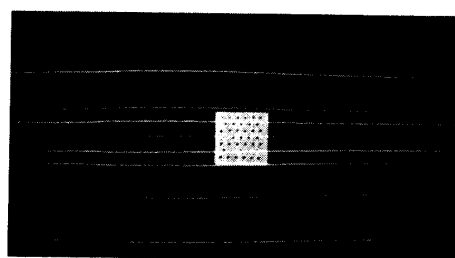


(d) $\beta = 0.30$

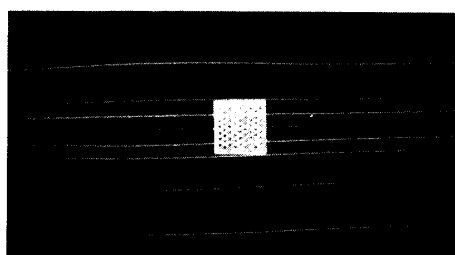
Photo. 5 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=1.2$).



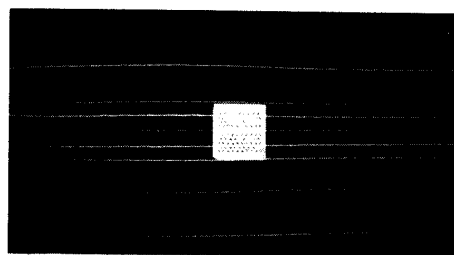
(a) $\beta = 0$



(b) $\beta = 0.11$



(c) $\beta = 0.19$



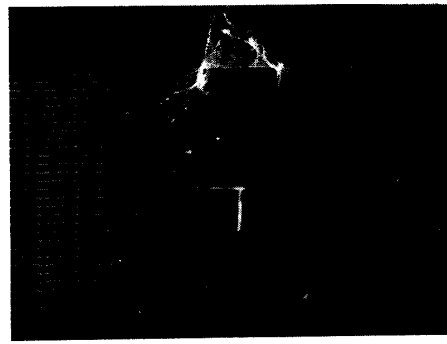
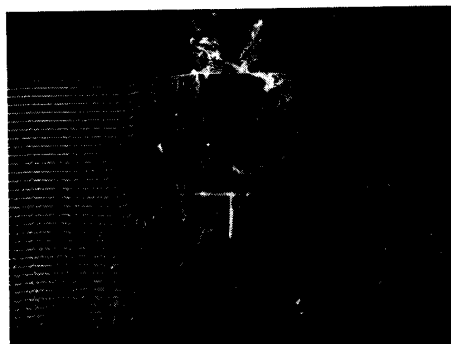
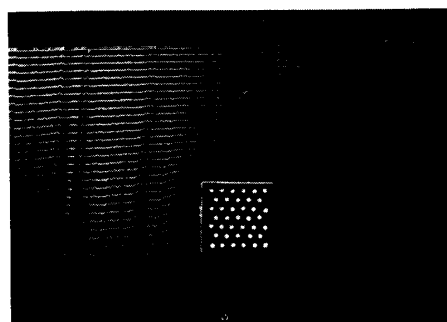
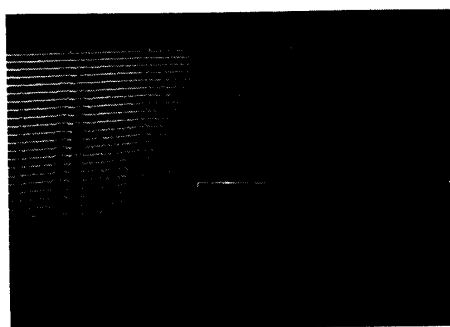
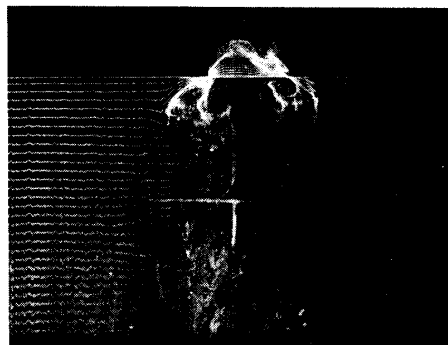
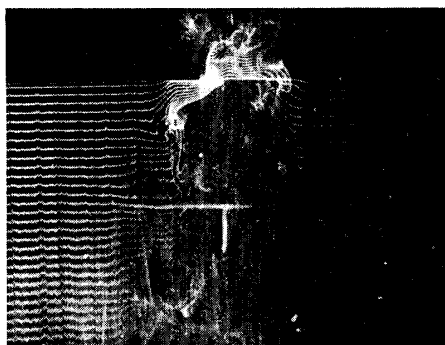
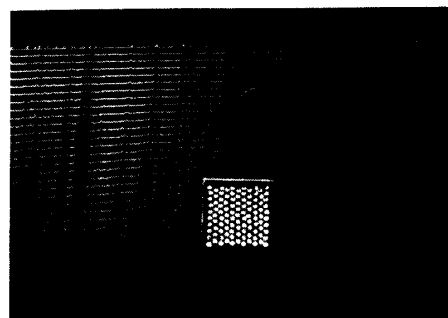
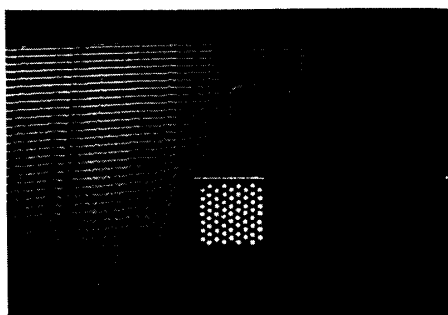
(d) $\beta = 0.30$

Photo. 6 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=2$).

衝突した後、モデル前面両端から剥離し剥離域を形成している。剥離域の内部は可視化されていないがその周辺に気泡が集中し、大きな速度勾配が存在することを示している。これは下流でスケールの大きい巻き込み渦と合体する。モデル前面の上流で気泡の間隔が小さくなっているのは、逆圧力勾配による流れの減速を

示すものである。モデル内部を通過する気泡は写真には観察されていないが、染料法の場合と同様目視観察により確認された。

次にモデルの下流域についてみると、剥離域の形状及び逆流の様子がよくわかる。 $\beta=0$ のとき、逆流域を示す気泡の時間線は比較的早くモデルの両側面方向

(a) $\beta = 0$ (b) $\beta = 0.11$ (c) $\beta = 0.19$ (d) $\beta = 0.30$ Photo. 7 Flow visualization in a horizontal plane ($y/D=0.5$).

に向かい、崩壊しているのが観察される。開口比が増大するにつれ、気泡は中央に集中するようになりかなり上流域まで達する。さらに開口比が増大すると、逆流域の幅がやや広くなり上流への伸びが押えられる。このとき時間線の間隔は次第に小さくなる。これはモデル内部を通過する流れのため逆流域の圧力が弱くなり範囲が広がるためである。また逆流域の形状は気泡の時間線を見ると横(z)方向に一様ではなく、モデル内部を通過する流れが太いフィラメントとして偏って通過するためと思われる。なお $\beta=0$ の場合は主流からの巻き込みが強く¹⁾、剥離域は小さいが強い逆流域を形成している。ここで強い速度のシアーによる水素気泡の再融解、拡散も考慮して流れを観察する必要があることを付言しておく。

3.3 流体力学的陰影

モデルがその周囲の流れ場に及ぼす影響範囲は、黒木ら⁸⁾により流体力学的陰影として定義されている。本報告ではモデルによる影響範囲が三次元的領域であるため明確に規定するのが難しく、したがって代表として $y/D=0.5$ の高さの水平断面特性より広がり範囲(陰影幅)を調べ、これで比較をすることにする。Fig. 1は開口比 β の変化による陰影幅 Z_w/D を示す。 $x \leq 200$ mm ($x/D \leq 4$) の範囲では、開口比の増大につれ陰影幅 Z_w/D が大きくなっている。下流の $x \geq 300$ mm ($x/D \geq 6$) の範囲では、上流の傾向とまったく逆転し、 β の増大につれ Z_w/D が小さくなっている。これはモデル内部を通過した流体量が β の増大につれ大きくなり、剥離逆流域内の圧力が低下し強い逆流域を維持し続けることが困難となったためであろう。

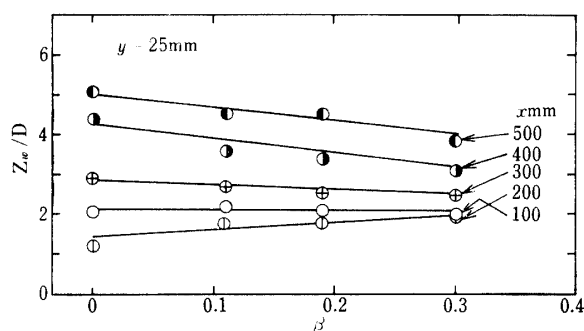


Fig. 1 Hydraulic shadow ($\alpha=0^\circ$).

4. ま と め

前報に引き続き、平面壁上に置かれた多孔壁立方体モデル周りの流れ場の水平断面特性を染料法及び水素気泡法を用いた可視化により解析した。これらの実験より明らかとなった点をひろいあげてみると、開口比 β の増加につれモデル上流の流れ場の逆圧力勾配が減少するため、流体力学的陰影の目安となる剥離幅 Z_w/D は $x/D \leq 4$ では大きくなっているが、下流の $x/D > 6$ の範囲では小さくなる。またモデルへの染料の近寄り具合は、開口比の増大につれ容易となりモデル前方に形成される剥離域が小さくなっていることが知られる。この領域で生成される馬蹄形渦は $y/D \leq 0.3$ で可視化される。一方鎖状渦は $y/D=1$ 付近の各開口比の場合に観察できる。モデル側壁からの剥離渦は壁面に近い $y/D=0.1$ では可視化されず、さらに $y/D=0.3$ においても流れが比較的なめらかにモデルに流入する $\beta=0.30$ の場合のみ可視化されている。 $y/D=0.5$ の場合から剥離渦の挙動を観察すると、剥離渦はモデル前面両端から同時に放出しておりカルマン渦とは異なる。渦の発生間隔をみると開口比の増大につれ小さくなっている。モデル下流に生じる後流域の幅が狭まる位置を比較すると、開口比の増大につれ下流へ移動している。これは閉じた剥離域が開口比の差異により異なる(下流へ移動)位置へ移動したためである。

本実験の遂行に当たり、三嶋英裕(神戸大院)、宮本直史(日産車体)、若林道男(日立工機)の三君に協力頂いた。またモデルを作製して頂いた徳山曹達 KK に対し深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 影山他 4 名, 山口大学工学部研究報告, **31**, 2 (1981)
- 2) Baker, C. J., J. Fluid Mech., **95**, 2 (1979)
- 3) 大坂他 5 名, 水産土木, **15**, 1 (1978)
- 4) 大坂他 3 名, 山口大学工学部研究報告, **29**, 2 (1979)
- 5) 大坂他 2 名, 山口大学工学部研究報告, **30**, 1 (1979)
- 6) 影山他 3 名, 機講論, No. 815-1 (1981)
- 7) 影山他 2 名, 水産土木, **17**, 1 (1980)
- 8) 黒木他 2 名, 北海道水産部, (1964)
- 9) 高田, 大野: 土木学会中部支部講演概要集 (1977)
- 10) 農業土木学会水産土木研究部会編, 水産土木ハンドブック, 緑書房 (1980)

(昭和 56 年 4 月 15 日 受理)