

多孔立方体モデル周りの可視化

(第1報 中心断面特性)

影山芳郎*・大坂英雄*・山田英巳*・長谷川 秀**・中倉靖司***

Water Tunnel Visualization around the Perforated Cube

(1st Report, Flow Visualization in a Center Plane)

Yoshiro KAGEYAMA, Hideo OSAKA, Hidemi YAMADA,
Shigeru HASEGAWA and Yasushi NAKAKURA

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 lateral side, in order to make clear the mechanism of the change of patterns with varying the open area ratio and the Reynolds number. With increasing the open area ratio, the hydraulic shadow is narrow and an adverse pressure gradient upstream the model is weak. As the Reynolds number is increased, the strength and the frequency of the vortex shedding are large.

1 ま え が き

平面壁上に置かれた三次元物体周りの流れ場では、物体前方に逆圧力勾配が存在し境界層は三次元的に剝離する。その流体は剝離域内部で巻き上げられ、物体の側面を通り下流へ流出し、馬蹄形渦を形成する。さらに物体背後及び下流領域ではいわゆる剝離域が形成され、周囲の流体を巻き込む様子、物体上面剝離の様子、下流への発達過程等複雑な流れ場を呈する。このような流れ場は実際上しばしば見かけ、熱伝達率の向上、物質の拡散現象、高層建築物周りの流況、魚礁の洗掘及び流体力学的陰影等に関しその解明は工学上重要である。本研究の端緒となった人工魚礁の機能に対する流体力学的影響に的を絞ってみても、未知の事柄が数多く残されておりその解決が待たれている。

人工魚礁モデル周りの水理構造に関し、著者らは主として風洞実験を行ない、平均速度場、乱れ強さ分布及び抗力係数等について若干の知見を得ている^{1)~4)}。

一方水槽実験による魚礁の水理構造については、黒木ら⁵⁾の先駆的研究、高田ら⁶⁾によるものがあげられ種々の基本的特性が明らかにされている。しかしながら、これまでの研究を総合的に判断し、人工魚礁の流体力学的機能を議論するためには基礎的資料が依然として不足しており、系統的な研究が必要と思われる。特に魚礁モデルの形状の差異(形及び開口比)あるいは近寄り流れの特性、壁面上に発達する境界層厚さとの比等の影響について詳細に調べることが重要である。

以上のことから、本研究では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モデル周辺の流れ場について、水槽実験により明らかにすることを目的とした。実験ではモデルを構成している面の開口比を数種類変化させ、染料法及び水素気泡法を併用して流れ場を可視化した。観察結果から、平均速度場、逆流域及び後流領域からなる陰影、流れ特性を明らかにした。

記号

x, y, z : モデル前面が接する底面上の中心位置を原

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

*** 機械工学科学生

- 点とする直角座標
- U : x方向平均速度
 - U_1 : 主流速度
 - u'_y : 乱れ強さ
 - H : 境界層の形状係数 (δ^* は排除厚さ)
 - D : モデルの高さ
 - Re : レイノルズ数 ($Re = U_1 \cdot D / \nu$)
 - Y_h : モデル上面から測った剥離域の高さ
 - Zw : Z方向の陰影の幅
 - α : モデル前面の垂線と流れの方向とのなす角度
 - β : 開口比 (モデルの一面について、孔の総面積の一面の面積に対する比)
 - D_0 : $\alpha = 0^\circ$ の場合のモデル幅
 - \bar{x} : 試験部入口から下流方向に測った距離 (\bar{x}_0 は仮想原点までの距離)

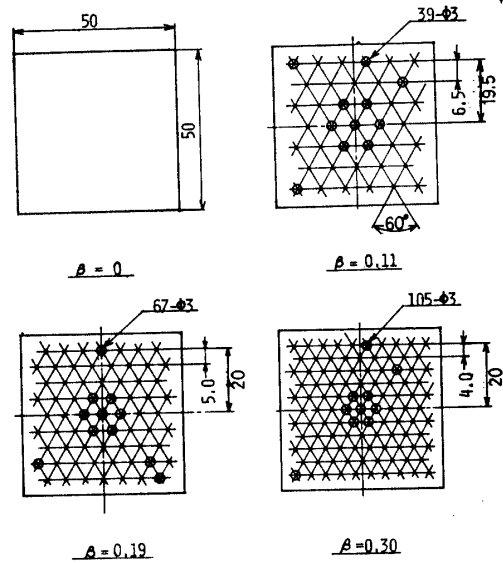


Fig. 2 Cube Model

2. 実験装置及び方法

2.1 水槽

流路系の全体図は省略しているが、ヘッドタンクからオーバーフローした流水はメインタンクで滞留した後、整流部、絞り部を通り、幅0.4m、高さ0.4m、全長2mの試験部水路に入る系である。試験部の概要と流れ場の座標系を Fig. 1 に示す。試験部水路の水深はほとんどの実験を通じておよそ0.3mで行なっただが、この調節は水路末端に設けた多孔のせき板で行なっただ。試験部水路は可視化のため厚さ15mmの透明アクリル板で構成した。水路の横断面内の速度分布を一樣にするため、絞り部比約1/3の三次元絞り部を設け、その上流の平行部に3枚のメッシュの細かい金網とフィルターを設置した。

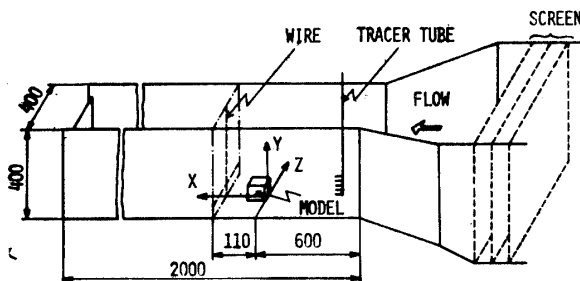


Fig. 1 Water tunnel and arrangement

2.2 供試モデル

Fig. 2 は本実験で用いた多孔立方体モデルを示す。モデルは板厚3mmのアクリル板で1辺が50mmの立

方体に構成されたもので、各々の面には直径3mmの孔が開口比によりそれぞれの個数だけあけてある。構成部材の板厚とモデル寸法の関係、開口比をより広範囲に変化できること等を考慮し、直径3mmの孔を多数あけたモデルを採用した。孔の配列はまず一面の中心に孔をあけ、それを基準にして千鳥型配列(正三角形ではない)としたが、これは孔がそれぞれの面に均一に分布し、かつ方向性を持たない配列とすることを考慮している。本測定で用いるモデルの開口比 β は、0 (無孔)、0.11、0.19、0.30の4種類であり、比較的開口比が小さい場合に相当している。なお以後の説明で開口比という言葉を用いる際は、一面についての開口比の値をもって代表として使用する。

2.3 可視化方法及び測定範囲

染料法では注入する色素としてローダミン B(赤色)とフルオレセイン(緑色)を用い、直径1mmのステンレス管の先端を扁平に整形したトレーサチューブ(8本を適当な間隔に組み合わせている)から流れ場に注入した。注入する際にはピンチロックで流量を適切に定め、流れ場になめらかに導入されるように注意を払った。

水素気泡法については原理は種々の文献⁷⁾にあるので省略する。水素気泡を発生させるための電極は、陽極として直径20mmの銅棒を、陰極として直径50 μ mのタンゲステン線を使用し、両極間距離を600mm一定にした。発生する水素気泡の大きさは浮力に影響されないようにできる限り細かくし、測定開始前に十分平行流に追随することを確認した。

測定範囲は y 方向特性を見るため、中心断面 (z=0) をモデルの上流約 100mm (x/D=-2) から下流約750mm (x/D=15) について行なった。ただ逆流領域の可視化のために x=110mm の一定位置にタングステン線を設置し、水素気泡法により観察した。流れ場の速度は水路の 1 mの区間を染料が通過するに要する時間をストップウォッチで計測し、その 5 回の平均値から算出した。

撮影にあたっては、照明として950W のハロゲンランプを光源とするスリット光線を用いた。写真撮影の条件はシャッタースピードを 1 秒と 1/60秒, f 値をそれぞれ16と 2 の 2通りとした。

2.4 実験条件

実験条件として、流れの方向、モデルの開口比及び流れの速度を以下に示すように変化させ測定を行なった。ただし流れの速度は主として 3 cm/s で実験を行なったが、レイノルズ数の影響 (流速の変化による影響) を調べるときは以下の値の範囲で変化させた。

- 1) 流れの方向 α (度) … 0 度 (流れがモデルの前面に垂直), 45度
- 2) 開口比 β … 0, 0.11, 0.19, 0.30
- 3) 流速 U_1 … およそ 2 cm/s ~ 4 cm/s

3. 基礎的考察

3.1 次元解析

本実験で着目する量、すなわちモデル前面から対称平面上の渦核の中心までの距離 X_v , およびモデル後方の陰影の幅 Z_w 等が流れ場の諸因子により影響されることが考えられる。ここでは次元解析を用いて、着目する物理量と流れ場の諸因子間の関係調べてみる。

Baker⁹⁾ を参照すれば、それらの間の関係は

$$X_v, Z_w = f_1(D_0, D, \delta^*, H, u_y', U_1, \beta, \alpha) \quad \dots\dots ①$$

として与えられ、これを無次元で表わせば

$$\frac{X_v}{D_0}, \frac{Z_w}{D_0} = f_2\left(\frac{D}{D_0}, \frac{\delta^*}{D_0}, H, \frac{u_y'}{U_1}, \frac{U_1 D}{\nu}, \beta, \alpha\right) \quad \dots\dots ②$$

となる。本実験の立方体モデルでは $D/D_0 = 1$ のみを取り扱っており、また $\delta^*/D_0, H$ は一種類のみにつき実験を行うため②式より除外する。さらに層流境界層についての実験であるため、 u_y'/U_1 の因子も無視できる。したがって

$$\frac{X_v}{D_0}, \frac{Z_w}{D_0} = f_3\left(\frac{U_1 D}{\nu}, \beta, \alpha\right) \quad \dots\dots ③$$

となる。

以下③式に基づき、流れ場の様子の開口比による変化と流れの方向による変化に注目して調べるが、本報では $\alpha = 0^\circ$ の場合に限って議論する。またレイノルズ数による変化にも若干ふれる。なお実際の人工魚礁周りの流れ場は乱流であるが、本実験は層流境界層に限って行っている。しかしながら低レイノルズ数における流れのパターンは相対的にレイノルズ数の大きい乱流における時間平均パターンと良く似ていることから、粘性係数を渦動粘性係数に置き換えれば層流による実験から乱流場におけるそれを推定できると今井は推論している。ただこの際に渦動粘性係数の正確な予測が重要となってくるが、モデル周りの流れ様子を各実験条件の場合について検討することは十分可能であると考えてよい。

3.2 流れ場の基本特性

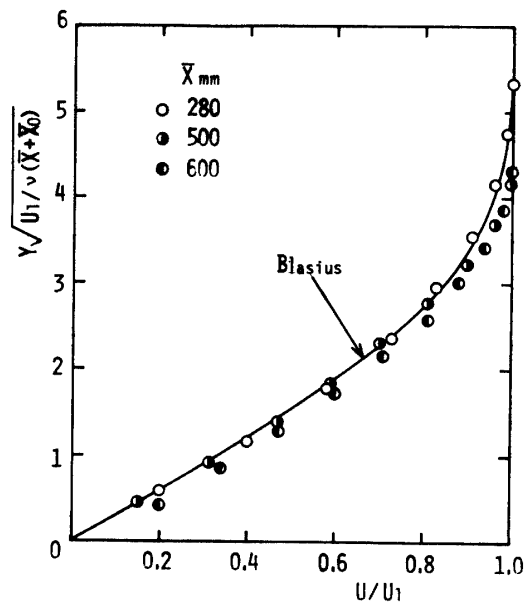


Fig. 3 Velocity distribution in the boundary layer

水槽試験部の層流境界層の特性について調べる。

Fig. 3 は水槽試験部の入口から 280, 500 及び 600mm の各位置で水素気泡法により測定した速度分布図である。仮想原点 (試験部入口より約 120mm 上流位置) を考慮して得られた結果である。 $X = 280 \sim 600$ mm において層流の Blasius 型分布に非常に良く一致しており、層流境界層が実現できている。このときの境界層 δ は 20mm 程度であり、主流の二次元性 (y 方向及び z 方向) も良好である。

4. 結果及び考察

4.1 染料法による中心断面特性の可視化

Fig 4 (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を示したものである。撮影条件はシャッタースピードが1/60秒と短い露光時間であるため、瞬時の流体粒子の動きをよく表わしている。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（流跡線を示す）に底面側から順に番号を1から8と付し、簡単のためF1～F8と書くことにする。

$\beta = 0$ の場合、F1, F2によりモデル前方に明瞭な2つの反時計方向回りの渦（モデルに近い方を第1渦、上流側を第2渦と呼ぶ）が可視化されている。これはモデル周辺の底面近くで生ずる馬蹄形渦を表わしており、その大きさ、方向、位置が明確にみてとれ

る。F1により可視化されている第2渦はいずれの開口比 β の場合についても観察できるが、その生成位置が β の増加に伴いだいたいモデルに近づいている。これは開口比が増加するにつれ、モデル前方の流れ場に生じている逆圧力勾配が減少していることを示す。この現象はF2, F3の挙動をみるとさらに明らかとなる。 β が0.11より大きい場合には、開口比の増加に伴う逆圧力勾配の減少のため渦の生成位置が $\beta = 0$ の場合よりモデル前面に近づき、したがってF2は第1渦の最外殻を通ることになり第1渦内に染料を補給しなくなり可視化されていない。F3をみると、 $\beta = 0$ の場合モデル前面で下方に大きな曲率（急激に曲り）で降下し、第1渦と逆方向の渦、すなわち第0渦を可視化している。その後、F3はモデル側面にまわり込み、そこで滞留、浮上をした後下流域へと流れている。しかしながら $\beta = 0.11$ になると、F3はモデル前

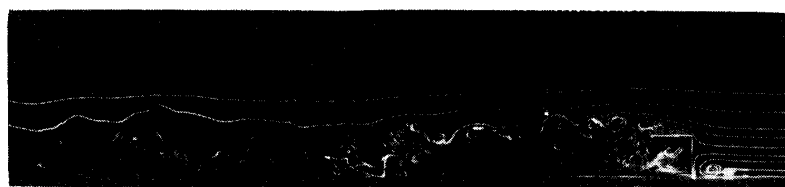
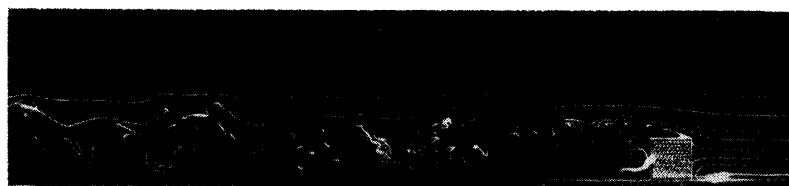
(a) $\beta = 0$ (b) $\beta = 0.11$ (c) $\beta = 0.19$ (d) $\beta = 0.30$

Fig. 4 Flow visualization using a dye method in a center plane (shutter speed 1/60 sec)

方で下方に曲げられるものの比較的底面に近い低い位置でモデル内部に流入している。さらに開口比が増加するにしたがって、この流入位置は高くなっている。

次にモデル内部を通過する流れについて F3 によって調べる。 $\beta=0.11$ の場合モデルの内部へ流入した流れはモデルの後面の圧力が高いため後方に流出しにくく、四方に拡散するため、F3 による可視化ではモデルの上面、側面及び後面からしみ出るように流出しているのがわかる。 $\beta=0.19$ の場合 F3 はモデル後面から大量に流出しており、もはや上面及び側面からの流出は少なくなっている。さらに開口比の大きい $\beta=0.30$ の場合はモデルの後面の圧力が低下し流れ易くなり、モデル内部から F3 は太いフィラメントとなって流出している。

モデル上面近くの流れについては F4 の挙動から観察できる。 $\beta=0$ の場合、F4 はモデル前面で大きく上方に曲げられ、モデルの上面先端で剝離した剝離流線よりわずかに高い経路を通過して後方へ流れる。この F4 のモデル前面での曲がりの曲率は開口比が増加するにつれ小さくなり、 $\beta=0.11$ の場合は前述の剝離流線にはほぼ近く、 $\beta=0.19$ ではモデル前面の最上部で分岐し、一方は内部へ流入し直ちにモデル上面から流出するものに、他方はモデル上面の剝離流線に近いものとなるが、モデル上面先端の近傍で合体して流れていく。 $\beta=0.30$ の場合はすべてモデル前面の最上部から内部に流入し、直ちに上面から流出した後剝離域の外側の経路をたどって流下する。いずれの開口比の場合にも、モデル上部先端で剝離した流線のすぐ上部をたどる染料フィラメントは巻き込み渦を形成して流下する。その渦の発生及び放出の様子は、 $\beta=0$ 、 0.11 の場合スケールと間隔が大きく、開口比の大きい $\beta=0.19$ 、 0.30 の場合はスケール、間隔とも小さくなっている。

モデル後方の陰影について調べてみる。モデル後方のモデル高さの15倍下流位置では、いずれの開口比の場合とも流跡線がかなり乱れておりモデルによる影響が強く残っていることがわかる。ただ開口比による影響の差は明確ではない。次にモデルの上方の影響範囲について調べてみる。これはモデルにより底面近くの流体とモデル上方の流体との運動量交換の活発さの一つの日安としてみることができよう。本結果のみから明確な影響範囲を述べることはできないが、F8 の流

跡線のひずみ（速度勾配）から考えると、いずれの開口比の場合も明らかにモデルの影響を受けて上方に曲げられている。したがって少なくともモデル高さの2倍程度上方の位置まではモデルの影響が及んでいることがわかる。ただこれについても、開口比の差による流跡線の違いは明瞭ではない。

Fig. 5 (a)~(d) は Fig. 4 と同じ条件と同じ断面の場合の結果であるが、シャッタースピードが2秒のものであり、時間平均的な流れ構造を知る上で新たに手がかりを与える。ここでは、Fig. 4 から判断できなかった事柄についてのみ説明を加える。モデル上面の剝離域についてみると、 $\beta=0$ と 0.11 の場合のみが染料で満たされており逆流領域を形成しているのがわかる。これに対し、 $\beta=0.19$ と 0.30 の場合ではモデル先端で分岐した流跡線の下方に染料が逆流して入り込む様子は一部分のみに見られ、モデル上面の全域が剝離領域とはなっておらず、先端からいく分下流の位置に剝離点に相当する箇所があるものと推察できる。

モデルの下流面近傍に注目すると、 $\beta=0$ の場合逆流による染料がモデル下流面にまで到達し剝離域を形成していることが推察できる。 $\beta=0.11$ の場合には染料がモデルの中を通過して、モデル上面、側面及び下流面からしみ出るように流出しているのがわかる。 $\beta=0.19$ の場合にはモデル内部を通過した染料はモデルの下流面の全域から流出しているが、モデル後方の逆流領域の圧力のためモデルの下流面のすぐ近傍まで流出した後拡散している様子が見られる。 $\beta=0.30$ の場合にはモデル内の流れの透過性がよくなり、F3 をみるとほぼ直線状にモデル内を通過し太いフィラメントとなってモデル下流面から流出している。その時モデル上面及び下流面の近傍では染料が可視化されておらず、流れはモデル内部を通過、あるいはモデル周りを沿うように流れていることが推察される。

モデルの後方域をみると、いずれの開口比の場合とも染料がぼけて可視化されており、その領域内で流れ場が乱されていることが明瞭に観察できる。

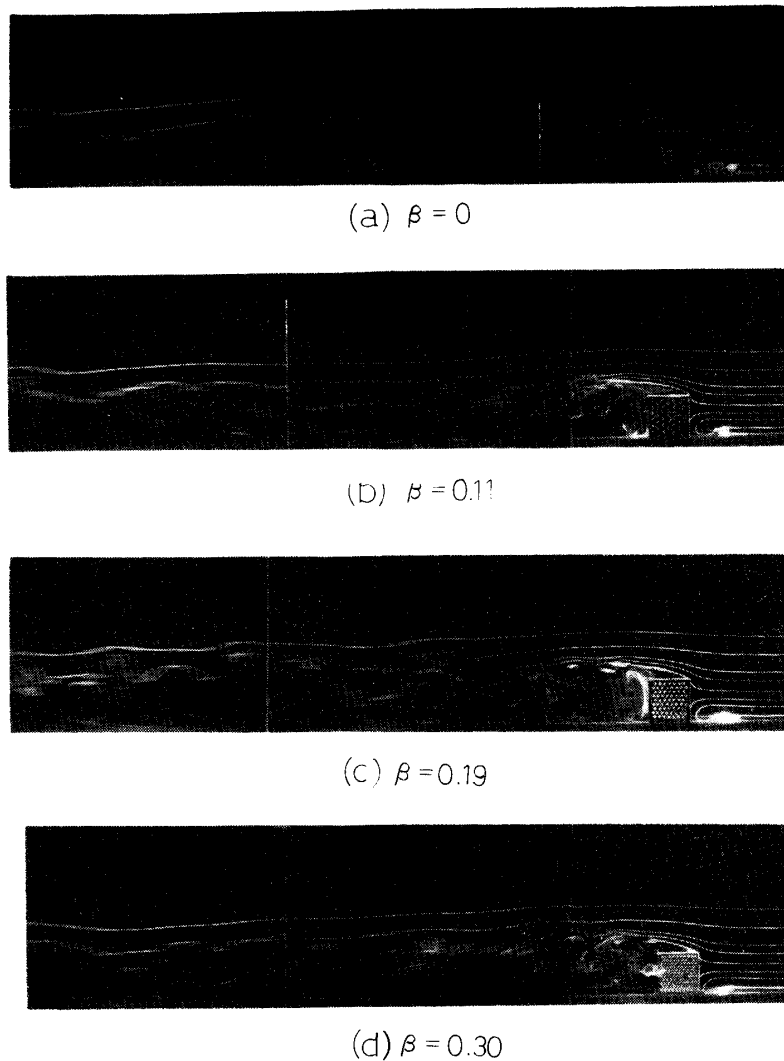


Fig. 5 Flow visualization using a dye method in a center plane (Shutter speed 2 sec)

4.2 水素気泡法による中心断面特性の可視化

Fig. 6 (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、上面及び下流域について示したものである。図中の水素気泡は 0.2 秒間隔に発生させている。モデルの上流域についてみると、十分上流で前述した Blasius 型の速度分布を示していた水素気泡は、下流になるにつれモデル前方に生じた逆圧力勾配の発生によりモデル前面に剥離域を形成しているため底面の近傍では可視化されず、剥離域の大きさを示すようにその外殻に気泡が集中している。その付近に大きな速度勾配を示すシア領域が存在しているのが観察できる。また第 1 渦も観察されており、開口比の増加に伴うその渦のスケール及び位置の変化がみてとれる。これは開口比の差異によるモデル上流域に生成される逆圧力勾配の差に基づくもので、およそ開口比が大きい

場合ほど逆圧力勾配が小さく、第 1 渦のスケール及びモデル前面からの距離が小さくなる。しかし剥離域の上方側の速度分布（正確には瞬時の分布）の開口比による差は明らかではない。

モデル上面に注目すると、 $\beta = 0$ の場合モデル先端から流れが剥離しており、水素気泡は観察されない。 $\beta = 0.11$ の場合ではモデル上面において内部から流出した水素気泡がみられ、モデル上面の全域が剥離域とはなっていないことがわかる。ただモデル先端から生じている強い速度勾配を示すシア領域は明瞭に観察でき、下流でスケールの大きい巻き込み渦となっている。 $\beta = 0.19$ の場合、さらに流れがモデル内部を通過し易く、かつモデル表面に沿って流れ易くなるため、モデル上面全域で内部から流出する水素気泡が観察される。モデル先端から生じる強いシア領域を示す水素気泡は、下流でスケールが小さく、間隔の小さい巻

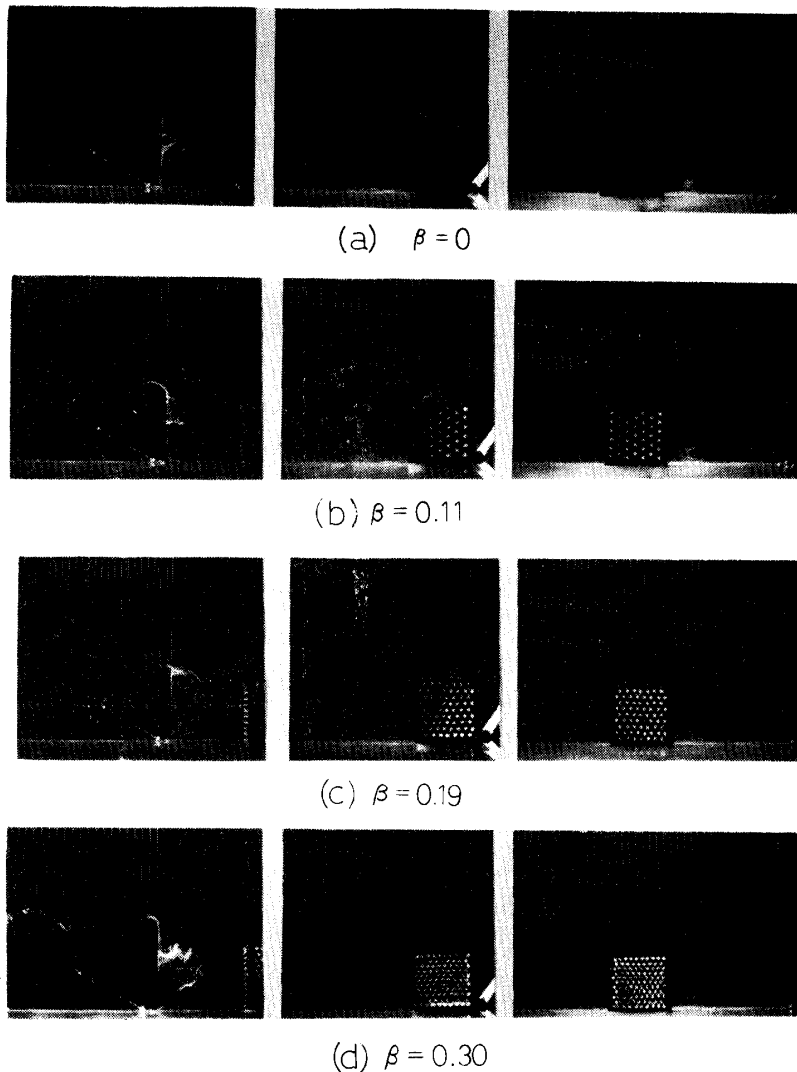


Fig. 6 Flow visualization using a hydrogen bubble method in a center plane

き込み渦を形成する。 $\beta=0.30$ の場合、モデル内部を流れた水素気泡は上部全域から面にほぼ垂直方向に流出し、上面において剥離域が形成されていないことが推察される。

モデル後方の逆流領域の様子をみる。 $\beta=0$ の場合水素気泡の時間線の発達割合から逆流領域が狭いことがわかる。また、タングステン線を設置した位置は底面上で、水素気泡の時間線はほとんど移行していないことから再付着点となっていることが推測される。これは $\beta=0$ の場合主流からの巻き込みが強く、剥離域は規模は小さいけれども強い逆流域を形成しているためと考えられる。ただ、強いシアーによる水素気泡の再融解あるいは拡散等により写真観察が困難となっていることも見逃せない。開口比がゼロでない場合にはモデルの内部を通過してくる流れのためモデル後方の

逆流領域の圧力が弱くなり、範囲は広がっているようである。ただ逆流領域の形状は水素気泡の時間線を詳細に検討すると y 方向に一樣ではなく、モデル内部を太いフィラメントとして通過してくる流体が直面する位置では時間線の伸びが極端に抑えられており、かなり凹凸した形状であるものと思われる。

4.3 流体力学的陰影

モデルが流れ場に及ぼす影響範囲として流体力学的陰影という言葉で定義されることがある。ここではその領域を明確に区別することができないため、代表的な物理量を取り出しそれを各開口比の場合について比較することにより調べてみる。

Fig. 7 は各開口比の場合について F4 が可視化されているモデル上面の流跡線のモデル上面からの高さ

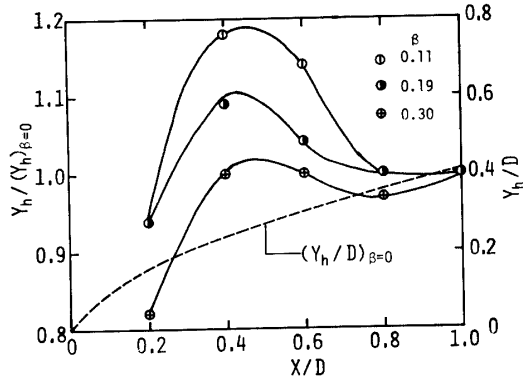


Fig. 7 Y_h/D vs. x/D for several open area ratios

Y_h/D を示したものである。図中破線は $\beta = 0$ の場合の結果であり、モデル先端でやや急激に増加した Y_h/D は $x/D = 2$ 以降傾きの小さいほぼ直線の増加傾向となる。モデル下流端で $Y_h/D = 0.4$ の値をとる。 β がゼロでない場合の結果は $\beta = 0$ の場合の値に対する比として示している。全ての開口比の場合について比較すると、 Y_h/D の高さはモデル上面の中央部付近で最も大きくなる。その値は $\beta = 0.11$ の場合が最も大きく、開口比が大きくなるにつれ小さくなり、 $\beta = 0.30$ の場合には $\beta = 0$ の場合とほぼ近い。モデル中

央部付近から下流に行くにつれ β の値が小さいほど急激に減少し、モデルの下流端では全ての開口比の場合についてほぼ同じ値をとるに至る。

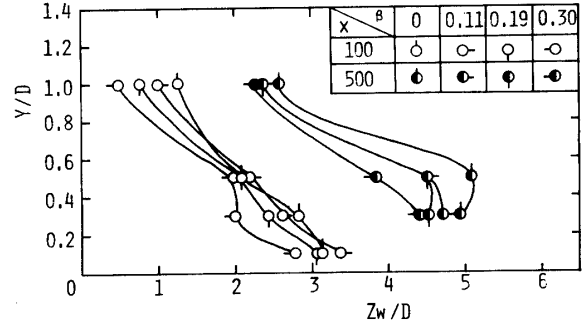


Fig. 8 Hydraulic shadow

Fig. 8 は各開口比の場合の底面から測った代表高さ位置における陰影幅 Z_w/D を $x = 100$ 及び 500 mm の断面について示したものである。全体の傾向についてみると、 $x = 100$ mm 断面では底面に近いほど陰影幅が広く、上方に向かって幅が狭くなっている三角形に近い分布である。一方下流の $x = 500$ mm 断面では、底面近くの陰影幅の発達モデル周辺に生じた馬蹄形渦により抑えられ丸みをもつ分布形状となっているが、

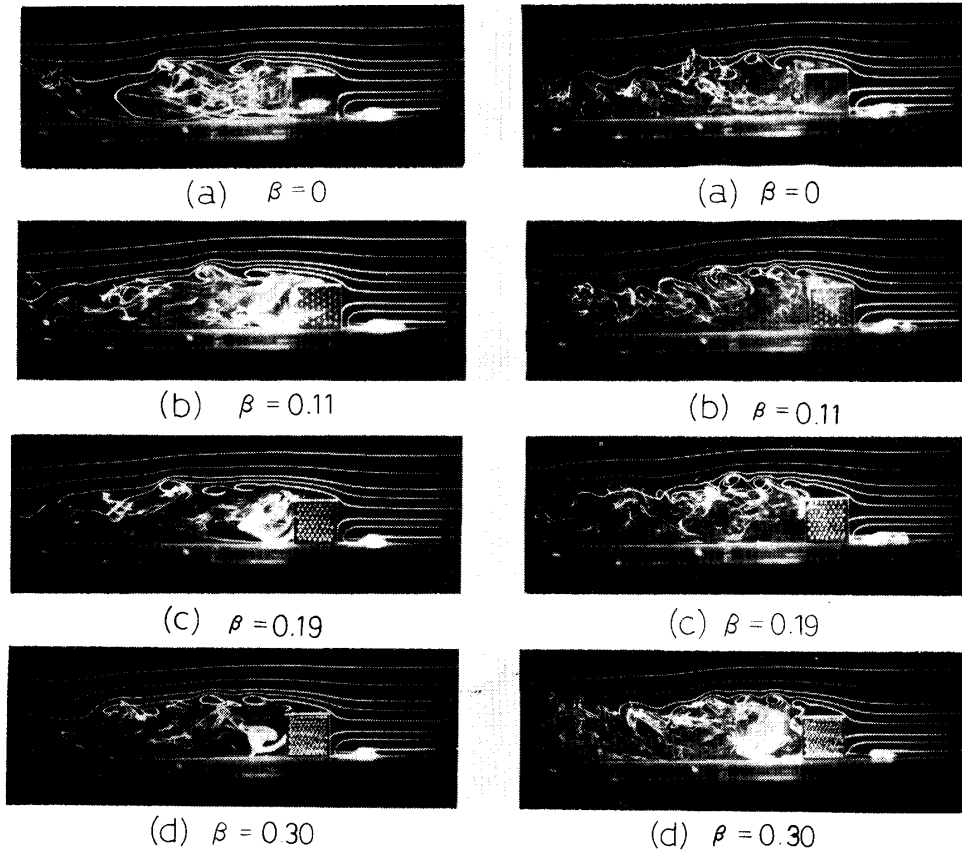


Fig. 9 The effect of Reynolds number ($Re = 760$)
Vol.31 No.2 (1981)

Fig.10 The effect of Reynolds number ($Re = 1470$)

それより上方では前方の分布と似た形状をしている。開口比別にみると、 $\beta = 0$ の場合の結果が $x = 100$ 及び 500mm 位置について Z_w/D が最も大きく、モデルによる影響は開口されていないモデルの場合に最も大きいことがわかる。開口比が大きくなるにつれ、 $x = 100$ 及び 500mm 位置の結果とも Z_w/D が小さくなっており、モデルによる影響を示す陰影幅が次第に小さくなっていくことがわかる。

4.4 レイノルズ数の影響

モデル周りの流れ場に対しレイノルズ数が及ぼす影響を調べてみる。Fig. 9 及び10は各開口比の場合に対する $Re = 760$ と 1470 についての結果である。両レイノルズ数の場合の結果を全体的に比較してみると、モデル後方の渦領域における乱れた様子がレイノルズ数が高い場合に激しいということがわかる。ただ $\beta = 0$ の場合については明確な差異はないようである。 β がゼロでない場合、モデル前端から放出される渦列の間隔が異なるようであり、レイノルズ数の増加につれ渦列間隔が小さくなる。またモデル上流に形成される剝離域、したがって逆圧力勾配はレイノルズ数の増加につれ、 $\beta = 0$ の場合に比べて他の開口比の場合小さくなっていることがわかる。このことはモデル内部を通過する流れ及びモデル後方に形成される逆流領域の大きさにも関連しており、レイノルズ数が増加するにつれモデル内部の流れの透過性がよくなり、逆流領域は小さくなるようである。

5. 結 論

多孔立方体周りの流れ場の中心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結果、以下の点が明らかとなった。

(1) 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、第1渦の大きさは小さくなり、生成位置はモデルに近くなる。

(2) 開口比 β の変化につれ流体力学的陰影の大きさ及び形状が対応して変化する。その様子は β が大きいほど陰影 (y 方向及び Z 方向) が小さくなる。下流方向の影響範囲は $15D$ でいぜんとして強く残っており、一方高さ方向には $2D$ の位置で流跡線の上方向への変化がみられ、モデルの影響が及んでいると推察される。

(3) モデル上面の剝離領域を示す流跡線の高さ Y_h/D は、 $\beta = 0.11$ のとき最も高く、 β の増加につれ小さくなる。モデルの後端では開口比による Y_h/D の差異はほとんどみられない。

(4) $Re = 760 \sim 1470$ の範囲では、レイノルズ数の影響は $\beta = 0$ の場合それほど顕著ではないが、 β がゼロでない場合モデル前縁からの放出渦列の大きさと間隔、モデル内部の通過し易さ及びモデル上流の逆圧力勾配の程度に違いがみられる。

(5) 開口比の変化によりモデル後方に形成される剝離領域の大きさ及び位置が異なるようである。

本実験の遂行に当り卒論実験として協力頂いた、三嶋英裕 (神戸大院)、宮本直史 (日産車体)、若林道男 (日立工機) の三君に謝意を表します。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。

文 献

- 1) 大坂 他5名, 水産土木, **15**, 1 (1976)
- 2) 大坂 他3名, 山口大学工学部研究報告, **29**, 2 (1979)
- 3) 大坂 他2名, 山口大学工学部研究報告, **29**, 2 (1979)
- 4) 大坂他2名, 山口大学工学部研究報告, **30**, 1 (1979)
- 5) 黒木・他2名, 北海道水産部 (1964)
- 6) 高田・大野, 土木学会中部支部講演概要集 (1977)
- 7) 浅沼編, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉 (1977)
- 8) Baker, C. J., J. Fluid Mech., **95**, 2 (1979)

(昭和55年10月15日受理)