

# 平面上に置かれた透過性三次元物体周りの 流れに関する研究

(第三報 速度分布の変化と渦放出)

山田 英巳\*・古屋 雅啓\*\*・大坂 英雄\*・影山 芳郎\*

An Investigation of the Flow around a Permeable Three-dimensional  
Body on the Plate

(3rd Report, The Variation of Velocity Profile  
and the Vortex Shedding)

Hidemi YAMADA\*, Masahiro FURUYA\*\*, Hideo OSAKA\*  
and Yoshiro KAGEYAMA\*

## Abstract

Measurements were made of the velocity vectors and the power spectra around the permeable wall cube placed in the turbulent boundary layer. The aim was to investigate the effects of the open area ratio of cube and the boundary layer characteristics on both the mean velocity field and the aspects of the vortex-shedding.

The range of open area ratio for which the separation bubble attaches to the permeable wall cube, was smaller in the case of the thin boundary layer thickness than the thick one. The research of the peak spectrum at a prominent frequency, its value in the power spectra and the flow visualization using the smoke wire method, clarified the structure of the vortex shedding from the permeable wall cube. The vortex-shedding frequency was independent of the value of open area ratio for each boundary layer, but the values of the power spectrum at the shedding frequency were different in the various positions around the cube.

## 1. まえがき

著者らは、これまでに平面上に存在する透過流れを伴う三次元物体（立方体）に作用する平均流体力およびこの周りの平面圧力分布について調べてきた<sup>1)2)</sup>。一方、透過性物体周囲の詳細な平均速度場の把握や物体からの渦放出に基づく変動流体力の評価も、地表面上の各種機械プラントや海底床上の人工礁等周りのフローパターンおよび流体関係振動に関し重要である。透過性を考慮しない場合におけるこれらの特性についてはこれまでに多くの研究<sup>3)~5)</sup>があるが、本研究で

扱っている透過流れを伴う三次元物体に関するものは極めて少ない<sup>6)</sup>。

そこで本報告では、既報<sup>1)2)</sup>に引き続きできるだけ均一な開口比を得るため比較的小径の多数の円孔をもつ壁から成る立方体を用い、この周りのフローパターンと渦放出に及ぼす開口比と境界層厚さの影響を明らかにすることを試みた。

## 主な記号

$h$  : 立方体の一辺の長さ

$\delta$  : 境界層厚さ

$\beta$  : 開口比 (= 一個の円孔面積/円孔の中心間距離の二乗)

$U$  : 流れ方向平均速度

$U_1$  : 主流速度

\* 機械工学科

\*\* 大学院工学研究科機械工学専攻

- $u$  : 流れ方向変動速度
- $E_{uu}$  :  $\bar{u}^2$  のパワースペクトル ( $\bar{u}^2 = \int_0^\infty E_{uu} df$ )
- $\alpha$  : 円筒型ピトー管の淀み点と  $x$  軸とのなす角度
- $\theta$  : 淀み点からの角度
- $\theta_c$  :  $(P - P_1)$  となる淀み点からの角度
- $P$  : 円筒型ピトー管表面圧力
- $P_1$  : 主流静圧
- $P_0$  : 淀み点の全圧
- $P_c$  :  $\theta = \theta_c$  における全圧
- $f$  : 変動速度の周波数
- $f_p$  : 卓越周波数
- $S_r$  : ストロークハル数 ( $= f_p \cdot h / U_1$ )

2. 実験装置および方法

実験に用いた風洞, 供試透過壁立方体および2種の平板乱流境界層の条件とも既報<sup>1)2)</sup>と同一である。物体周りの平均速度ベクトルの測定には図1に示す

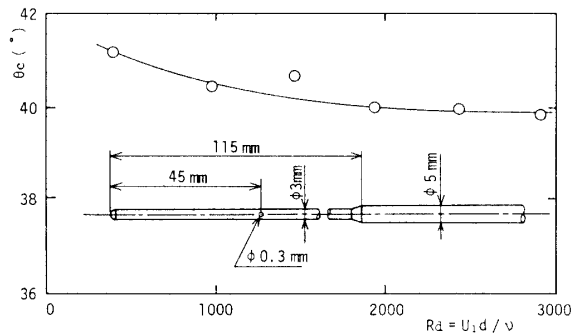


Fig. 1 Cylindrical pressure probe.

直径 3 mm の円筒型ピトー管を用いた。円筒型ピトー管については、あらかじめ検定実験により  $(P - P_1) = 0$  となる淀み点からの角度  $\theta_c$  が求められており (図1), 測定は所定の位置で円筒型ピトー管を回転し淀み点の方向  $\alpha$  を決定した後, 淀み点圧力  $P_0$  と  $\theta_c$  点での圧力  $P_c$  を読み取り,  $\alpha$  および  $(P_0 - P_c)$  より円筒型ピトー管の回転面内における速度ベクトルを算出した。

スモークワイヤ法による可視化では, 所定の位置に張られた直径 0.1 mm のニクロム線に流動パラフィン塗布し, これにスモーク発生装置 (菅原研究所製 MS-405) より電流を通じて発生させたスモークに適当な時間遅れ (10~16 ms) をもって発光させたストロボを照射して写真撮影した。図2は使用した自作の遅延回路を示す。遅延時間は可変抵抗  $R_T$  を変化させることにより最大で1.1秒までとることができる。なお, 可視化実験の際には主流速度は 5 m/s あるいは 2 m/s

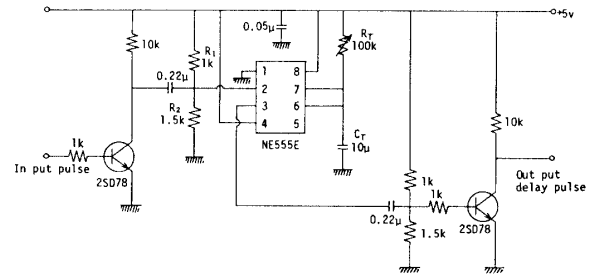


Fig. 2 Delay circuit.

に下げている。

変動速度のパワースペクトルは, I 形熱線風速計からの信号をデジタル形相関計 (三栄測器製 7T08) に直接入力して求めた。デジタル形相関計へのデータの取り込み間隔は 1 ms, 全データ長は61.44秒とした。

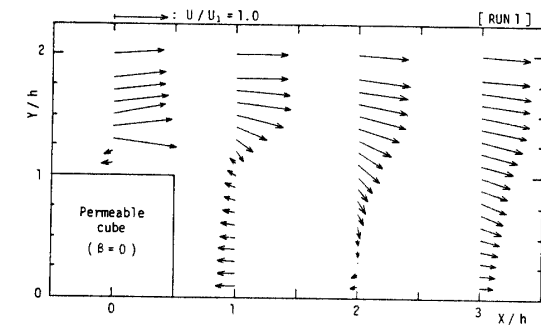
3. 実験結果および考察

3.1 速度分布

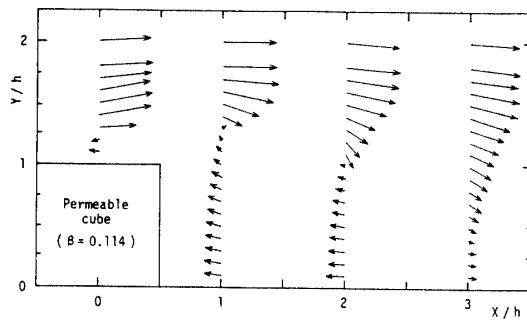
図3, 4はそれぞれ RUN 1 および RUN 2 の場合における対称面 ( $z=0$ ) 速度ベクトルを示す。立方体の上方および背後で逆流が観察され, 剝離泡が形成されているのが分る。RUN 1, 2 の場合とも  $\beta=0$  のとき剝離泡は立方体上面の先端から生じ立方体の背後にまで達しているが,  $\beta$  が大きくなるにつれだいに立方体上方の剝離泡と背後の剝離泡が分離してくる傾向が見られる。この分離が生じる明確な開口比の値は不明であるが,  $x/h=1$  位置の速度ベクトルに注目すると, 透過流れの増加に伴い RUN 1 の場合  $\beta=0.349$  で, RUN 2 の場合  $\beta=0.456$  で速度ベクトルはすべて下流方向に向いており, これらの開口比の場合には明らかに剝離泡の分離が生じていると判断できる。このような開口比の増加に伴う剝離泡の分離は榎木ら<sup>7)</sup> による有孔正方形体 (二次元) の場合においても観察されている。しかしこの場合の正方形体は各面に1個の単一の二次元透過孔を有するものであり, かつその周りのフローパターンは空隙率により分類されているので本実験結果と直接対比させることは困難である。

図5, 6は, それぞれ図3, 4に対応する場合のスモークワイヤ法による流れの可視化の結果を示す。加熱細線はそれぞれ主流速度が 2 m/s の場合  $x/h=0.5$  の位置に, 5 m/s の場合1.5の位置に張られている。

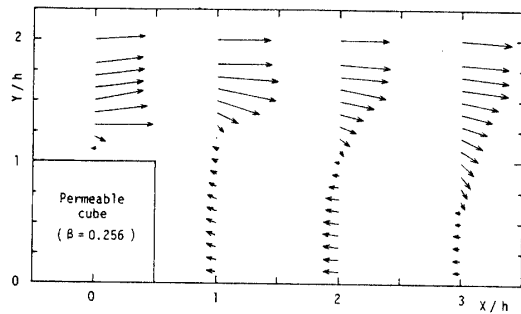
RUN 1, 2 の場合とも立方体後面から流出する透過流れが  $\beta$  の増加につれ多くなっていくのが分る。詳細を見ると,  $\beta$  が小さい場合 ( $\beta=0$ ) 透過流れは立方体後面の上部と下部から主として流出し,  $\beta$  の増加につ



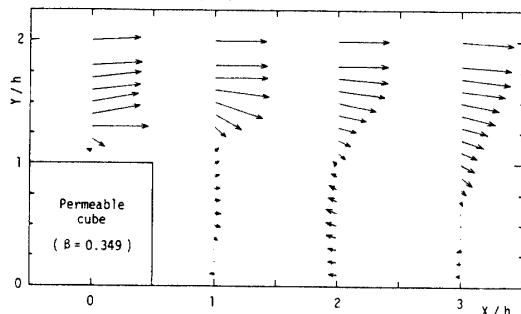
(a)  $\beta = 0$



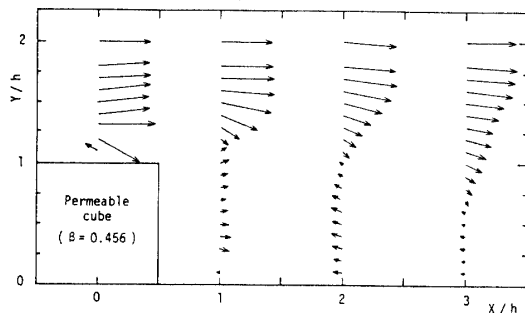
(b)  $\beta = 0.114$



(c)  $\beta = 0.256$

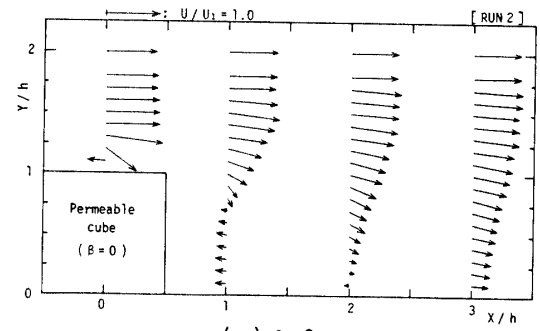


(d)  $\beta = 0.349$

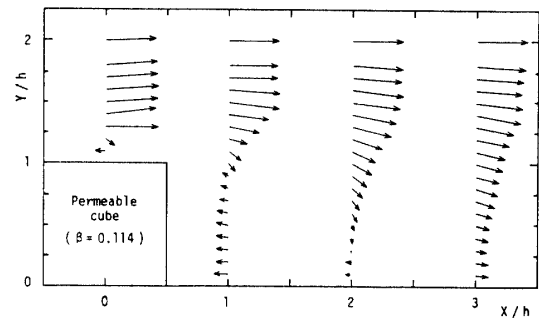


(e)  $\beta = 0.456$

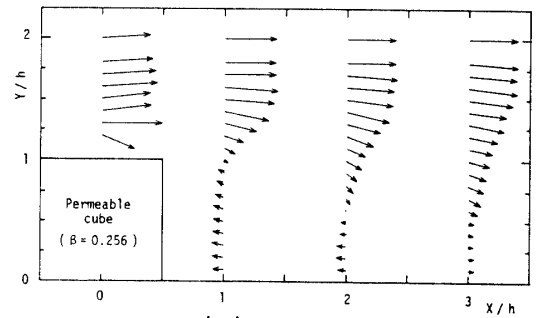
Fig. 3 Velocity vector profiles (RUN 1).



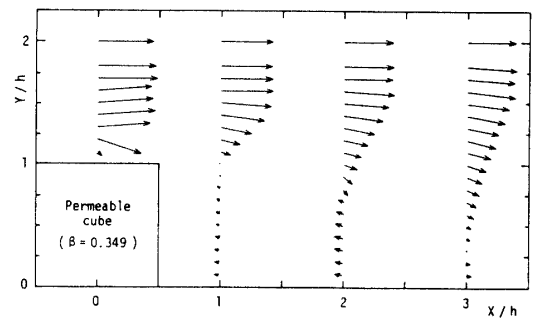
(a)  $\beta = 0$



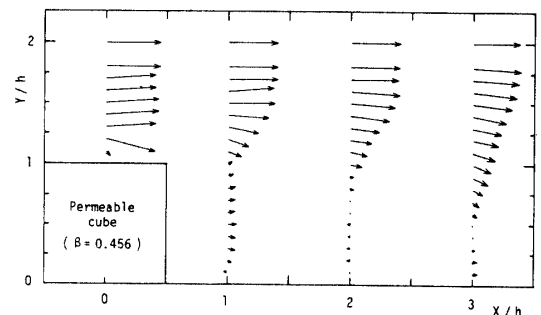
(b)  $\beta = 0.114$



(c)  $\beta = 0.256$



(d)  $\beta = 0.349$



(e)  $\beta = 0.456$

Fig. 4 Velocity vector profiles (RUN 2).

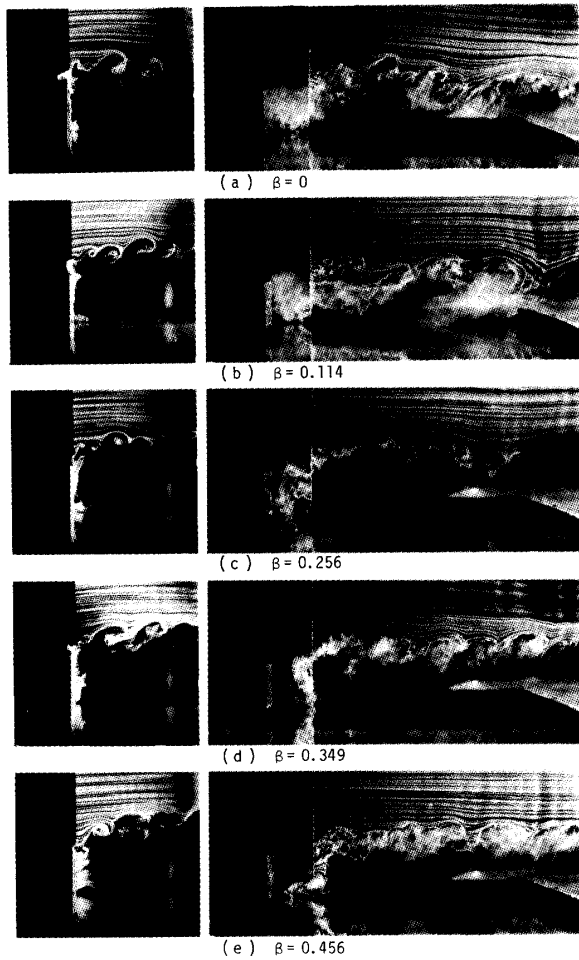


Fig. 5 Flow pattern in the symmetric plane.  
(RUN 1, left:  $U_1=2$  m/s, right:  $U_1=5$  m/s)

れこの領域が後面全体に広がっている。この現象により  $\beta$  の小さい場合立方体後面に付着していた剥離泡が物体から後方へ移動させられるものと思われる。しかしながら立方体背後の剥離泡の前縁部分は RUN 1 の場合  $\beta=0.256$  まで、RUN 2 の場合  $\beta=0.349$  まで立方体後面の透過流れのない部分に付着しているように観察され、RUN 2 の場合の方が付着している  $\beta$  の範囲が広いものと考えられる。これは前述の速度ベクトルの結果からの推察と一致する。 $\beta=0.456$  の結果を見ると、剥離泡のスケールが RUN 1 より RUN 2 の場合の方が小さいことが分る。すなわち、 $x/h=0.5$  位置ではスモークは RUN 1, 2 の場合とも下流方向に流れているが、 $x/h=1.5$  位置では RUN 1 の場合およそ  $y/h \approx 0.5$  を境にスモークの移動方向が反転し、一方 RUN 2 の場合にはすべて立方体の方向（逆流方向）に向かっている。このことは RUN 1 の場合  $x/h=1.5$  位置が剥離泡の内部に当たること、および RUN 2 の場合剥離泡が  $x/h=0.5 \sim 1.5$  の間にあることを示している。 $x/h=0.5$  位置から発生するスモークを見ると、

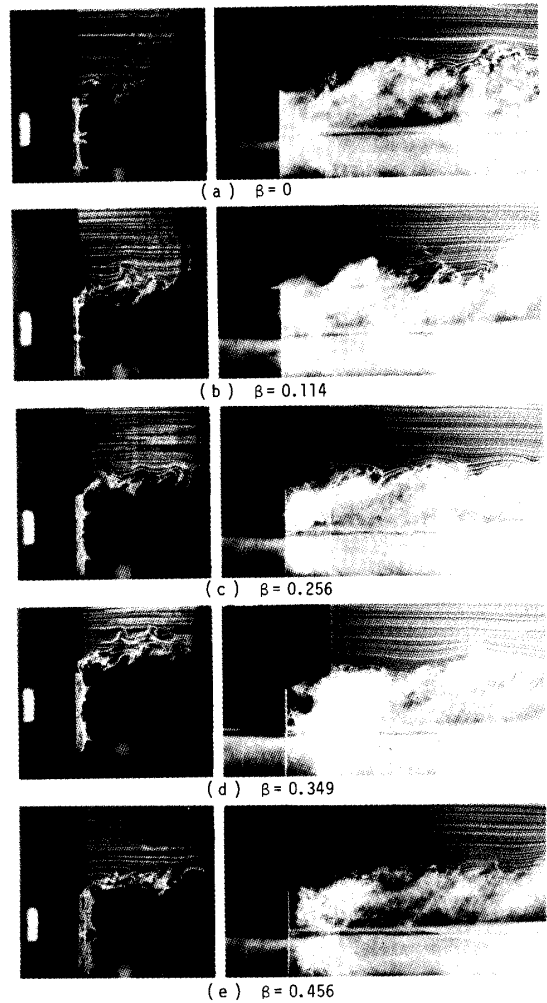


Fig. 6 Flow pattern in the symmetric plane.  
(RUN 2, left:  $U_1=2$  m/s, right:  $U_1=5$  m/s)

物体上方の剥離せん断層は RUN 2 より RUN 1 の場合の方がかなり厚くなっている。また剥離せん断層は RUN 2 の場合  $\beta$  が小さいとき ( $\beta \approx 0$ ) に最も厚く、 $\beta$  の増加につれしだいに薄くなる傾向が見られる。一方 RUN 2 の場合  $\beta$  に対するこの傾向はあまり明白ではない。

図 7 は前述の速度ベクトルより求めた流れ方向速度成分の RUN 1 と RUN 2 の場合の分布を比較して示したものである。いずれの開口比の場合も RUN 1 より RUN 2 の場合の方が速度欠損が小さくなっている。これは前述したように剥離泡のスケールが RUN 2 の場合の方が小さいためと考えられる。また後流の速度欠損は、たとえば  $x/h=3$  断面について見ると  $\beta$  が増加するほど大きく、従って影山ら<sup>6)</sup> が示したように通常の乱流境界層への回復は本実験の範囲内では  $\beta$  が大きい場合の方が遅いことが予想される。

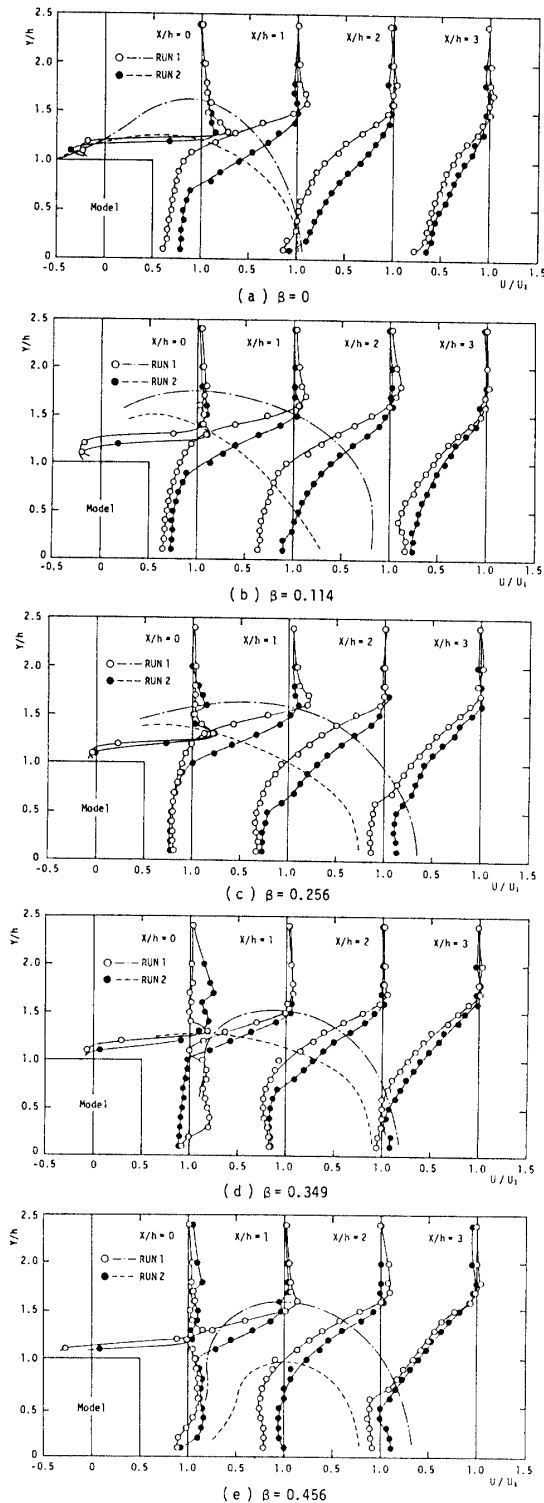


Fig. 7 Streamwise velocity profiles.

3.2 渦放出

立方体背後の  $x/h=1.5$  断面内の3箇所 (A~C) に熱線プローブを設置した場合の変動速度のパワースペクトル分布を図8 (a)~(c)に示す。渦放出に関与するパワースペクトルの卓越性を示す周波数  $f_p$  は、位置 A では開口比および境界層厚さの差によらずほとん

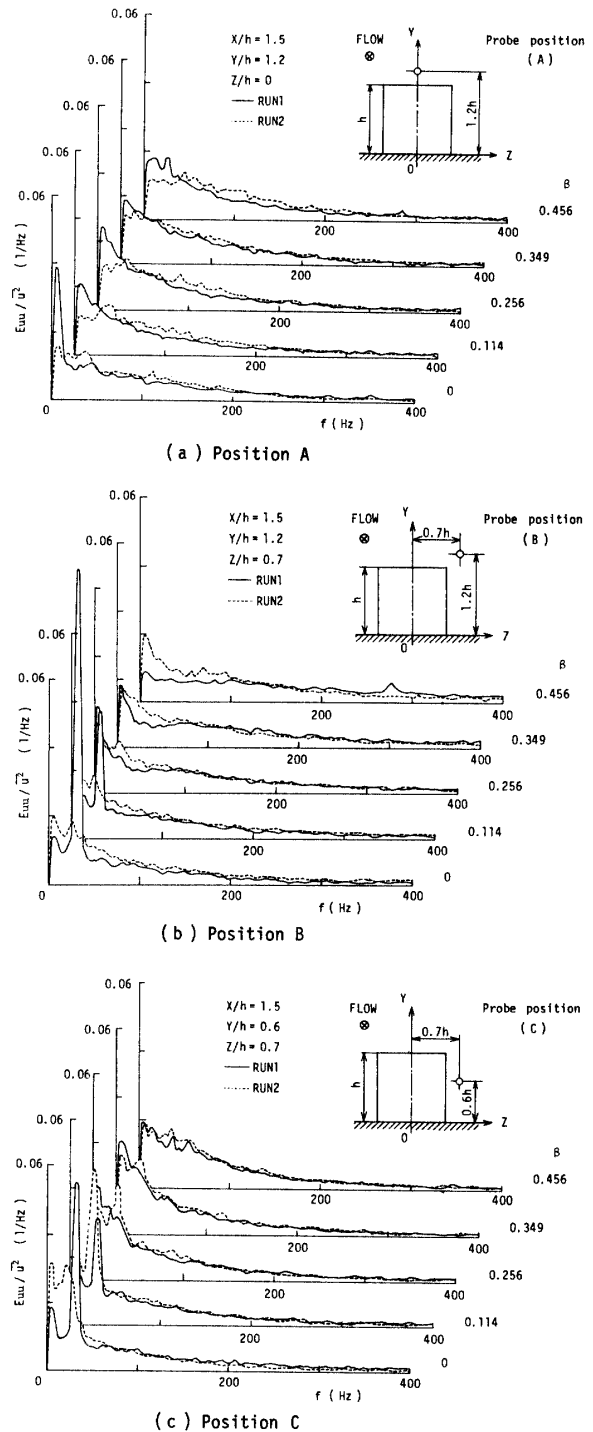


Fig. 8 Power spectra at each location.

ど観察されない。一方位置 B, C の場合には比較的  $\beta$  の小さい範囲で卓越したパワースペクトルが明瞭に認められる。この卓越周波数域のパワー値 (以後ピークパワーと呼ぶことにする) はほぼ境界層厚さと  $\beta$  が小さい場合ほど大きくなる傾向がある。ただ位置 C の開口比  $\beta=0.114$  の場合は例外を示し、渦放出の強さが  $\beta$  および  $\delta/h$  の組み合わせにより複雑に変化することを暗示している。また、卓越周波数の値は境界

層厚さ  $\delta/h$  の差 (RUN 1 と RUN 2) により異なるが、開口比  $\beta$  にはよらず一定であり、RUN 1 の場合約  $f_p=30\text{Hz}$ 、RUN 2 の場合約  $f_p=24\text{Hz}$  である。これらの値を用いて算出されたストローハル数  $St$  の値を

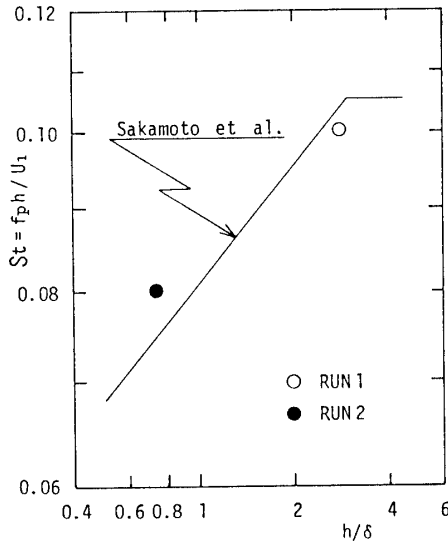


Fig. 9 Strouhal number.

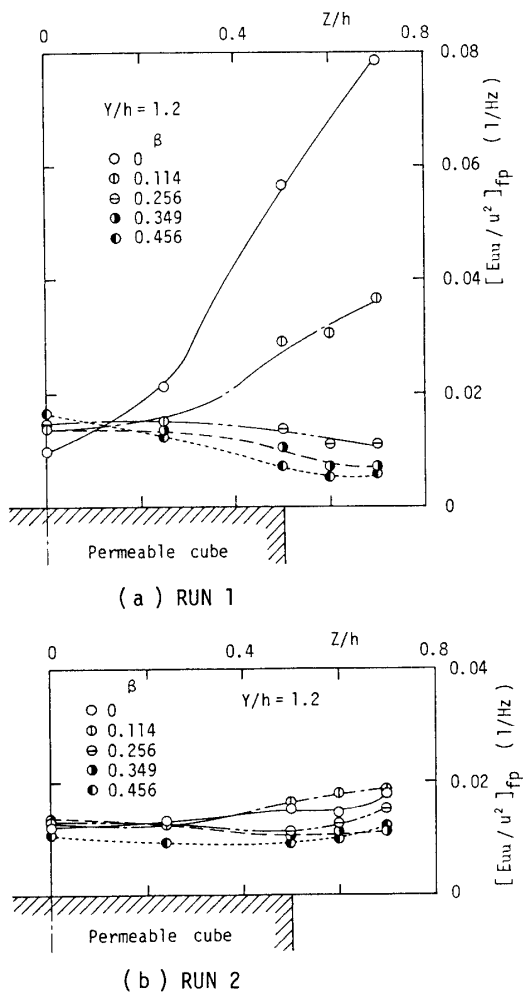


Fig. 10 Peak power profiles along the z direction.

図 9 に示す。ストローハル数は境界層厚さの変化に対し無孔の立方体について坂本ら<sup>4)</sup> が示した結果と同様の傾向にあることが分る。

図 10 (a), (b) および図 11 (a), (b) はそれぞれ  $x/h=1.5$  断面において立方体の上面および側面に平行な位置 ( $y/h=1.2$  と  $z/h=0.7$ ) に沿ってピークパワーの変化を調べたものである。同一の境界層厚さおよび開口比の場合においても、物体周りの位置の違いによりピークパワーがかなり異なることが分る。z 方向分布を見ると、RUN 1 の場合ピークパワーは中心 ( $z=0$ ) 位置では  $\beta$  によりあまり差がないが、z 方向にいくなつて  $\beta$  が小さいほど著しく大きくなっている。これに対し RUN 2 の場合各  $\beta$  の分布は小さい値で接近し、z 方向にやや増加傾向をとる。

一方、y 方向分布は境界層厚さによる差が顕著であ

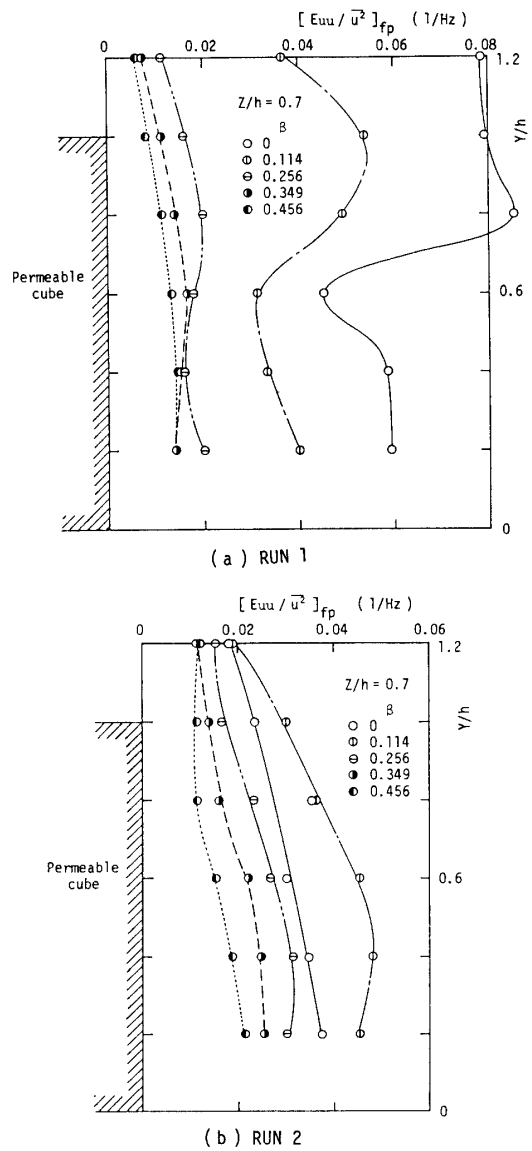


Fig. 11 Peak power profiles along the y direction.

る. *RUN 1* の場合  $\beta$  の大きい範囲のピークパワーの分布は小さい値で接近し,  $y$  方向にほとんど変化が見られない.  $\beta$  の小さい範囲の分布は他の  $\beta$  の大きいときに比べ大きく, さらに境界層の外側で著しく大きくなっている. これは境界層内では速度勾配があるため渦放出が抑制されたため<sup>4)</sup> と解釈される. 境界層厚さの大きい *RUN 2* の場合, ピークパワーは  $\beta$  によらず  $y$  方向に減少する傾向をとっている. ただこのとき  $\beta=0$  の場合の値が最大とはならず,  $y$  方向全域について  $\beta=0.114$  の場合より小さい. これは既報<sup>1)</sup> の圧力分布で見られたように, *RUN 2* の場合  $\beta=0.114$  よりも  $\beta=0$  のときの背圧の方が高く, 渦放出が抑制

されているためと考えられる.

次にスモークワイヤ法で可視化した渦放出のパターンを図12, 13に示す. このときの主流速度は 2m/s であり, 加熱細線は  $x/h=0.5$  断面内の  $y/h=0.5$  および 0.8位置に張られている. 図8 (c) のパワースペクトル分布では *RUN 1, 2* の場合とも  $\beta$  が大きいとき卓越周波数の存在があまり明確ではなかったが, 図12より *RUN 1* の場合には  $\beta$  の大きいときにも渦放出が存在することが明瞭に分る. これはパワースペクトル分布では透過流れと物体を越える流れとの干涉のため他の周波数成分の寄与が高まったためと考えられる. また立方体の両側面から放出する渦の位相関係は  $y/h=0.5$

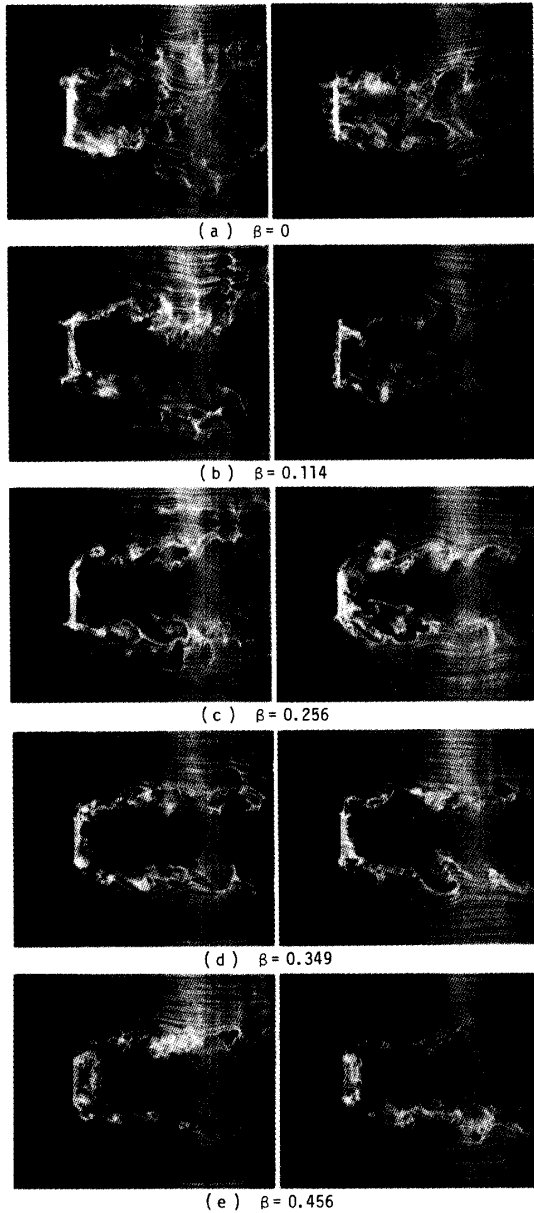


Fig. 12 Visualization of the shedding vortex.  
(*RUN 1*, left:  $y/h=0.5$ , right:  $y/h=0.8$ )

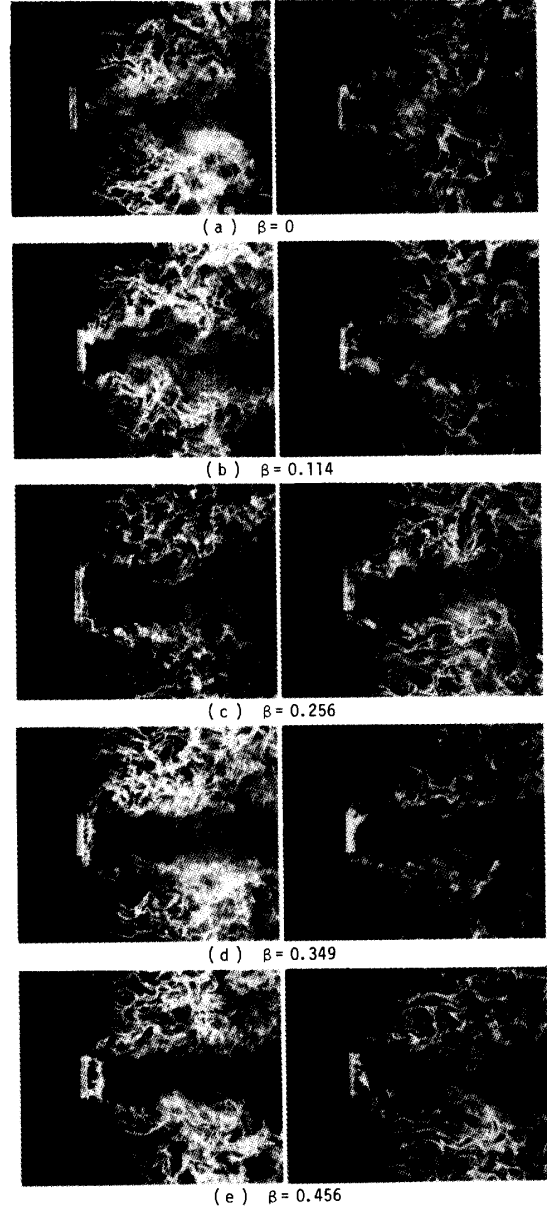


Fig. 13 Visualization of the shedding vortex.  
(*RUN 2*, left:  $y/h=0.5$ , right:  $y/h=0.8$ )

では等しいが、 $y/h=0.8$ になると若干ずれてきているように観察される。一方、図13の *RUN 2* の場合加熱細線が  $y/h=0.5$  位置にあるときにはスモークの乱れが大きくいずれの  $\beta$  の場合も渦放出のパターンは明瞭ではないが、加熱細線が  $y/h=0.8$  位置にあるときにはスモークの乱れのため判定し難いが *RUN 1* の  $y/h=0.8$  の場合と同様の渦放出のパターンがすべての開口比の場合に対して観察できるとみなせる。

#### 4. 結 論

速度ベクトル、パワースペクトルの測定および流れの可視化より、厚さの異なる二種の乱流境界層中に置かれた透過壁立方体周りの速度場および渦放出のパターンを調べ、以下の点を明らかにした。

(1) 立方体後方の剝離泡は *RUN 1* の場合  $\beta=0.256$  まで、*RUN 2* の場合  $\beta=0.349$  まで立方体後面に付着しており、乱流境界層が厚い場合の方が付着している  $\beta$  の範囲が広い。また  $\beta$  の増加につれ剝離泡は物体の上方と背後とに分離する傾向が見られる。

(2) 剝離泡のスケールは境界層厚さ  $\delta$  が厚い場合の方が小さい。このためいずれの開口比の場合にも  $\delta$  が厚い場合の方が速度欠損が小さい。

(3) 後流の速度欠損は開口比が増加するほど大きく、通常の乱流境界層への回復も本実験の範囲内では遅い

と考えられる。

(4) 渦放出周波数は境界層厚さの差により異なるが、開口比にはよらず一定である。

(5) ピークパワーは、 $\beta=0$  の場合を除くと境界層厚さと開口比が小さい場合ほど大きくなる傾向がある。境界層が厚い場合における  $\beta=0$  の背圧上昇は渦放出を抑制する。

(6) 同一の境界層厚さおよび開口比の場合でも物体周りの位置によりピークパワーがかなり異なる。とくに  $y$  方向分布には境界層の速度勾配のため渦放出の抑制が見られる。

終わりに本実験装置の製作に当り協力頂いた井上忠義技官、並びに実験に協力頂いた卒研究生影浦哲二、佐藤弘一の両君に感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) 山田・他 3 名：山口大学工学部研究報告, **34**, 1 (1983)
- 2) 山田・他 3 名：山口大学工学部研究報告, **34**, 2 (1984)
- 3) 岡本・八木田：機論, **38**, 313 (1972)
- 4) 坂本・他 2 名：機論 (B), **49**, 437 (1983)
- 5) 坂本・他 3 名：機論 (B) **48**, 433 (1982)
- 6) 影山・他 3 名：機講論, No. 810-15 (1981)
- 7) 榎木・他 2 名：第29回海岸工学講演会論文集 (1982)  
(昭和 58 年 10 月 15 日受理)