

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

(第一報, 圧力分布及び抗力の評価)

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

(1st Report, The Pressure Distribution and the Estimation of the Drag)

Hidemi YAMADA, Masahiro FURUYA, Hideo OSAKA and Yoshiro KAGEYAMA

Abstract

Measurements were made of the surface pressure around the permeable three-dimensional body having a various open area ratio set into a flat plate turbulent boundary layer, and flow patterns also have been observed by the oil film method and the smoke wire method. The value of open area ratio β were varied for $0 \leq \beta \leq 0.456$ and the boundary layer characteristics were changed for two cases.

The stagnation point on the front surface of the body was found to be depend on the value of boundary layer thickness. The strength of horse-shoe vortex was weakened with increasing the value of open area ratio. A tendency of the drag coefficient evaluated from the pressure difference acting on both front and rear permeable walls showed an abrupt change at a β of about 0.25.

1. まえがき

平面壁に沿って発達する乱流境界層中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剝離領域が形成され、その内部で流体を巻き込むような、いわゆる馬蹄形渦が存在する。一方、物体背後では剝離した流れの回り込みにより形成されるアーチ形渦や逆流域が存在するため、物体周りの流れ場は極めて複雑な様相を呈する。このような流れ場は実際においてもよく見かけられ、しかもそこで対象となる構造物は透過性のものが多く、従ってこの種の流れ場を解析することは工学上重要である。例えば高層建築物による周辺の環境変化、物質の拡散現象、熱伝達率の向上などに関する問題等が挙げられるが未だに解明されておらず、開口比が三次元物体周りの流れ場に及ぼす効果についても依然として不明な点が多い。

最近これらの問題に対して流体力学的見地から種々の研究が進められ、人工魚礁については黒木ら¹⁾や

高田ら²⁾による水槽実験、大坂ら^{3) 4) 5)}による風洞実験によりその基本的特性が明らかにされている。また透過壁立方体についても、影山ら^{6) 7) 8)}による可視化実験等により物体周辺の流れ場の様子が明らかにされている。しかしこれらは流体力の予測や流れ場の定量的な評価を行なったものに過ぎず、定量的な評価を含む総合的な検討を行なうためには物体の開口比及び開口形状、主流速度、境界層厚さなどを系統的に変化させて、その影響をより詳細に調べる必要がある。

そこで本研究では平面壁上に透過性三次元物体を設置し、物体の開口比と境界層厚さをパラメータに選んでこれを変化させることにより、物体周辺の流れ場の様子を調べた。本報では物体表面及びその周辺の圧力分布について実験を行ない、可視化実験を併用して流れ場の様子を観察した。又物体に働く圧力から抗力を評価し開口比、境界層厚さとの関連について報告した。

記号

X, Y, Z: 物体設置位置中心を原点とする直交座標系
h : 物体高さ
 β : 物体一面の開口比

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

- U_1 : 主流速度
- u : 変動速度
- Re : レイノルズ数 ($Re = U_1 h / \nu$)
- C_p : 物体表面圧力係数 (式②)
- C_{pw} : 物体近傍壁面圧力係数 (式①)
- C_D : 抗力係数 (式③)
- C_{Df} : 物体前面板抗力係数
- C_{Db} : 物体後面板抗力係数

2. 実験装置及び方法

2.1. 風洞

実験には送風機部, 拡がり部, 整流部, 絞り部及び測定部より成る吹出し型風洞を使用した. 測定部は入口断面が $340\text{ mm} \times 900\text{ mm}$ で長さが 2400 mm であり, 屋根を調節することにより圧力勾配零の流れ場を実現している. 測定平板には中心断面上の前縁より 525 mm の位置を中心として, $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ の真鍮製平板が取り付けられている. Fig. 1 に測定部のモデル及び座標系を示す.

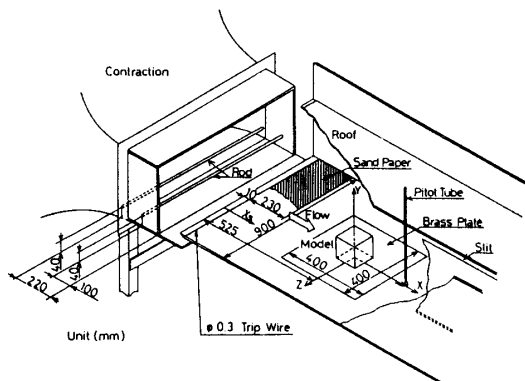


Fig. 1 Sketch of the model placed in the measuring section, showing coordinate system.

2.2. 供試物体

本実験で用いた供試物体は, Fig. 2 に示すように三次元物体としては最も基本的な形状と考えられる一辺

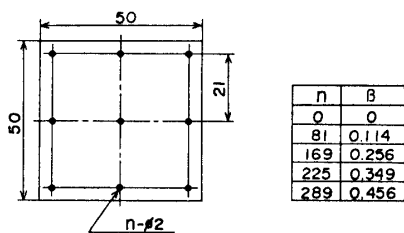


Fig. 2 Permeable body model and its value of open area ratio.

が 50 mm の立方体で, 厚さ 1.5 mm の真鍮製平板により構成されている. 全ての面には, 開口部形状が一様となるよう考慮し, 各々直径 2 mm の円孔を縦横規則正しく開け, 孔の数を変化させることにより開口比の異なる5種類のモデルを用意した. この時開口比 β は, 円孔の中心間距離の二乗に対する一つの円孔の面積の割合と定義した. 物体は底面の中心が原点と重なるよう, また前面が流れ方向と直角になるよう設置した. この時測定部断面に対する物体の閉塞率は 0.0082 で, 測定上支障は無いものと思われる.

2.3. 圧力測定

物体周りの流れ場の様子や物体に働く流体力を調べるため, 物体近傍壁面及び物体表面の圧力分布を測定した. 物体近傍壁面の圧力測定には, 真鍮製平板に多数開けられた直径 0.5 mm の圧力検出孔に注射針を整形した受圧管を差し込み, ゲッチングン型マンオメータで静圧ヘッドを読み取った. 物体表面の圧力測定は, 円孔に直径 2 mm のステンレス製受圧管を差し込み壁面圧力と同様に行なった.

2.4. 可視化法

物体周りの流れの様子を理解する補助的手法として可視化法があるが, 本実験では油膜法とスモークワイヤー法を行なった. 油膜法には油として流動パラフィン, 顔料として二酸化チタン, 添加剤としてオレイン酸を適当な割合に混合した油膜を, 測定平板上に設置した可視化用平板に均一に塗布し, 通風後形成された油膜パターンを写真撮影した. スモークワイヤー法では, 真鍮製平板の圧力孔と屋根のスリット状の孔の間に, 直径 0.1 mm のニクロム線を壁面と垂直になるよう注意深く張り, 煙発生装置に接続した. そしてニクロム線に流動パラフィンを塗布し, 瞬間的に電流を流して発生させた白煙をトレーサーとして用い, ストロボスコープを作動させながら写真撮影しその挙動を観察した.

3. 実験結果及び考察

3.1. 流れ場の基本特性

実験は先ず非攪乱の場合の流れ場の乱流境界層特性について調べた. 試験乱流境界層は平板前縁より発達した薄い境界層を $RUN1$, 風洞絞り出口にロッドを装着して形成した厚い境界層を $RUN2$ として, 二種類変化させた. その時の速度分布と乱れ強さ分布を Fig. 3 に, 物体設置位置での主な特性値を Table 1 に示す.

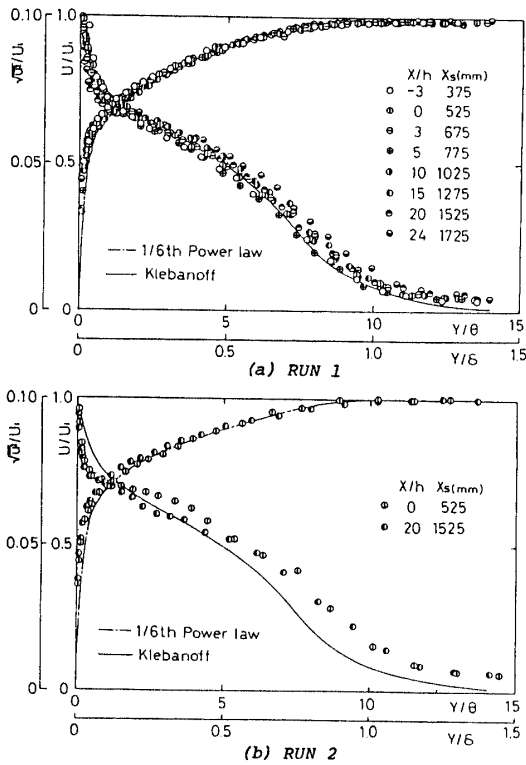


Fig. 3 Velocity and turbulence intensity distributions in the turbulent boundary layer.

Table 1 Characteristics of the turbulent boundary layer

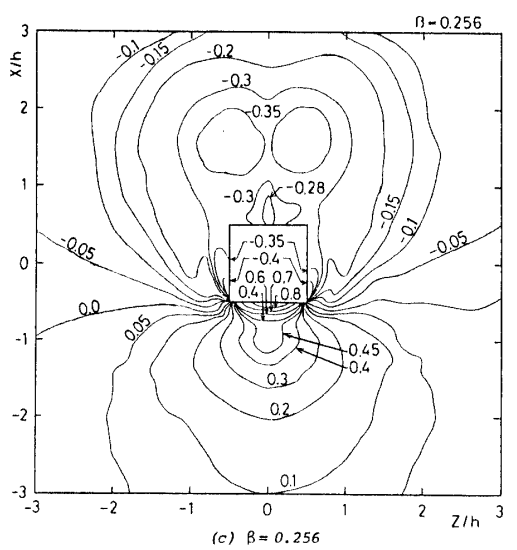
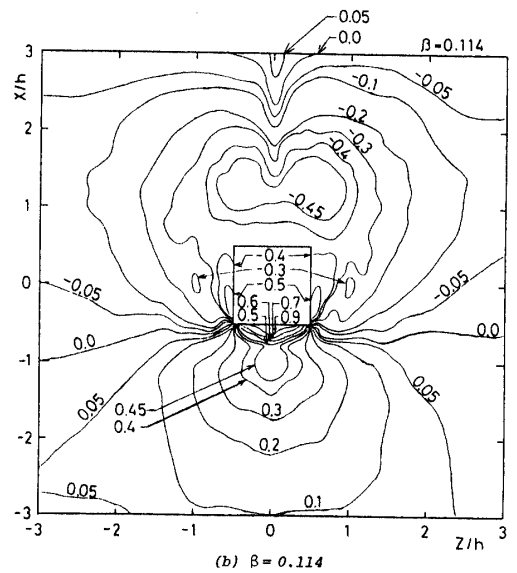
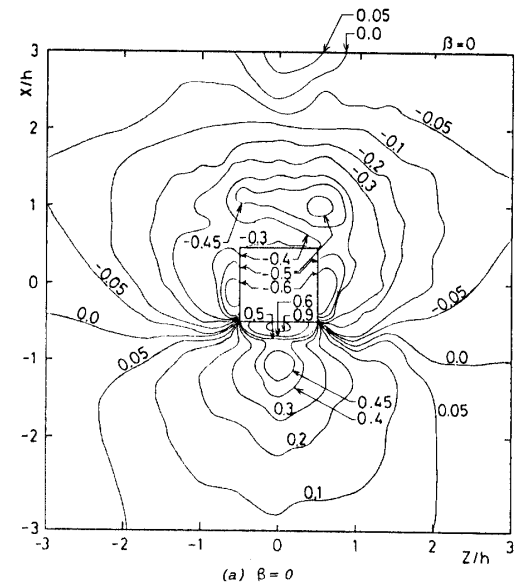
Parameter	RUN1	RUN2
Freestream velocity U_1 (m/s)	15.0	15.0
Boundary-layer thickness δ (mm)	1.75	69.1
Displacement thickness δ^* (mm)	2.55	10.47
Momentum thickness θ (m)	1.82	7.82
Shape factor H	1.41	1.34
Shear velocity U_τ/U_1	0.044	0.037
h/δ	2.86	0.72

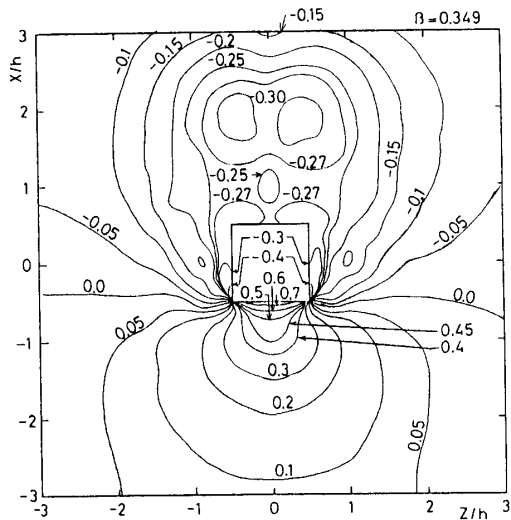
これより乱流境界層は十分に発達しており実験を行なうのに妥当であると見なせる。尚、この時物体高さを代表長さとするレイノルズ数は、 $R_e \doteq 5.0 \times 10^4$ である。

3.2. 壁面圧力分布

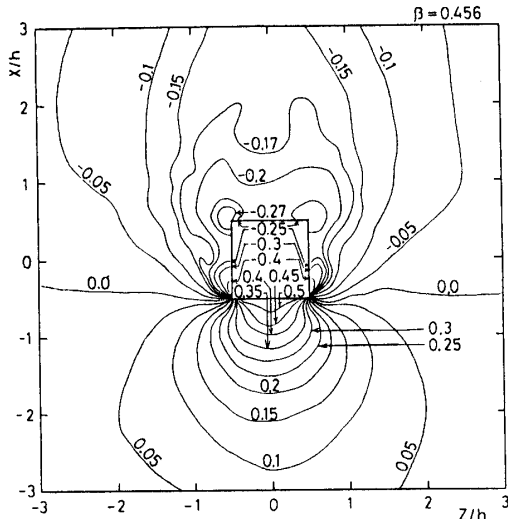
Fig. 4 (a)~(e) は RUN1 の場合における物体近傍の壁面上の圧力を式①に従って無次元化し、等圧力係数線図として示したものである。

$$C_{pw} = (P_w - P_s) / \frac{1}{2} \rho U_1^2 \quad \left(\begin{array}{l} P_w: \text{壁面上の圧力} \\ P_s: \text{主流静圧} \end{array} \right) \quad \text{①}$$





(d) $\beta = 0.349$



(e) $\beta = 0.456$

Fig. 4 Isobaric coefficient curves on the wall.

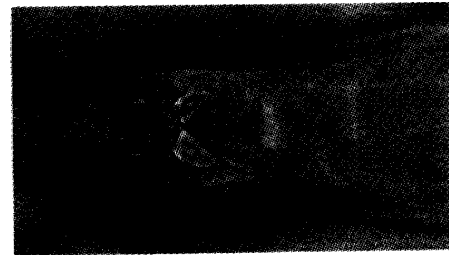
$\beta=0$ の場合を見ると、 X 軸上 ($Z/h=0$) の $X/h=-1.0$ の位置で正の極大値をとっており、さらにその位置の下流側から物体をとり囲むような圧力の谷が認められる。これは馬蹄形渦がこの極値をとる位置から谷に沿って下流へ流れていることを示すものと思われる。また $X/h=1.0, Z/h=\pm 0.5$ 付近には負の極小値が見られ、これは物体背後の速度分布が逆流する領域、すなわち逆流域に形成されたアーチ形渦の根元を表わしていると思われる。他の研究結果と比較すると、坂本ら⁹⁾ は $X/h=-1.2$ に正の極大値、及び $X/h=0.9, Z/h=\pm 0.4$ に負の極小値が認められると報告している。両者の相違は主に物体高さと同境界層厚さとの比、 h/δ の差による効果と考えられる。

β の増加に従い、物体前方の正の極大値はその値を小さくしつつ、またその位置は物体へ近づき、透過流

れに伴う馬蹄形渦の変化が推察出来る。すなわち馬蹄形渦は徐々に衰弱しながら物体に接近していくものと思われる。物体後方のアーチ形渦もその絶対値を小さくしつつ、位置も下流側へ移動しているのがわかる。 $\beta=0.349$ 以上になると物体の角部付近にも極値が認められるようになるが、これは側面と後面との稜線部分に、これを囲むような小さな剥離領域が形成されるためと思われる。



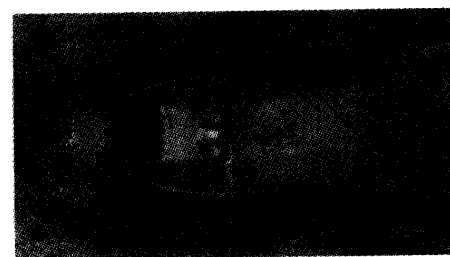
(a) $\beta = 0$



(b) $\beta = 0.114$



(c) $\beta = 0.256$



(d) $\beta = 0.349$



(e) $\beta = 0.456$

Fig. 5 Flow patterns on the wall (Oil film method)

ここで、 $|C_{pw}| > 0.1$ の領域を物体の及ぼす影響範囲と定義し β の増加に伴う変化に注目する。物体前方では $\beta = 0.256$ までその範囲はあまり変化が認められないが、 $\beta = 0.349$ 以上では縮小している。物体後方では $\beta = 0.256$ までは X 方向及び Z 方向に領域が拡大しているが、 $\beta = 0.349$ 以上では Z 方向に縮小し徐々に細長い形状に変化している。この範囲の X 方向の移動は、物体内部を通過する流量、すなわち透過流量の増加により逆流域が下流へ移動するためと考えられる。一方 $\beta = 0.256$ 付近で Z 方向範囲の極大を示すような移動は、物体背後とその周囲との圧力差によるエントレイメント量の違いによるものであろう。

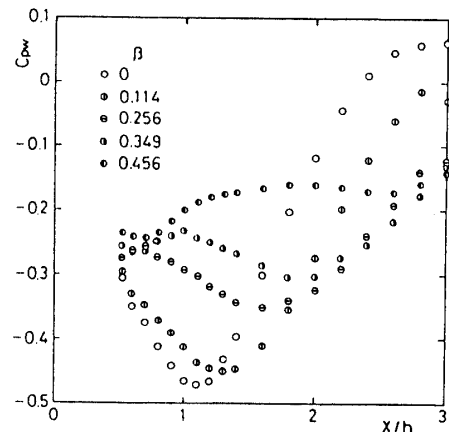
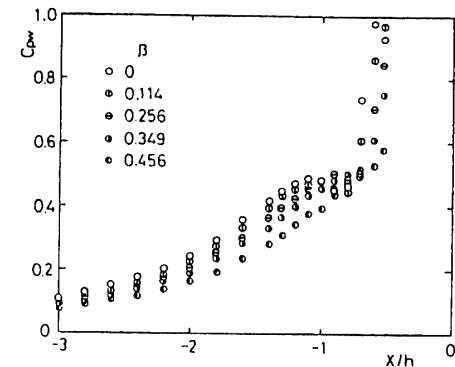
Fig. 5 (a)~(e) は油膜法による物体周りの流れの様子を可視化し写真撮影したものである。 β が増加するに従い物体前方の剥離線や馬蹄形渦の跡は物体に接近し、物体後方のアーチ形渦は下流へ移動している。 $\beta = 0.456$ では馬蹄形渦の跡はほとんど見られず、アーチ形渦もわずかに観察出来る程度である。これらの様子は物体近傍の壁面圧力分布とよく対応している。また β が小さい時、物体前方からの剥離線がアーチ形渦の後方でくびれているのが認められる。以上述べた現象は β が大きくなるにつれて物体を透過する流量が増加し、物体前方の剥離領域が縮小するためと考えられる。従って馬蹄形渦やアーチ形渦が β 増加につれて下流側へ移動し、ついには消滅すると思われる。

3.3. 境界層厚さの影響

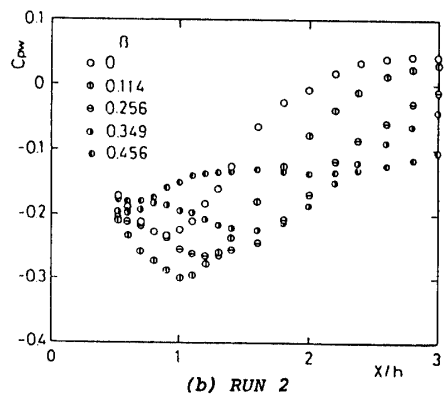
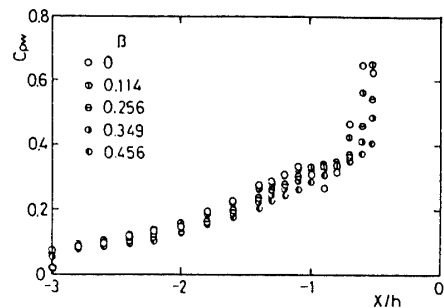
3.3.1. 中心断面壁面圧力分布

Fig. 6 (a) (b) は RUN1 及び RUN2 における中心断面の壁面圧力を、物体前方と物体後方に分けて図示したものである。前方では上流側から物体に近づくにつれて C_{pw} は徐々に増加するが、 β が小さい時には馬蹄形渦の影響により $X/h = -1.0$ 付近に極値が存在する。しかし β が大きい場合、分布は単調増加の傾向を示している。RUN1 では β の増加に伴い C_{pw} は全体的に減少し、 $\beta = 0.456$ では馬蹄形渦の減衰により明確な極値が認められなくなる。RUN2 では C_{pw} は RUN1 と同様の傾向を示すが少し小さい値となっている。これは物体前方の逆圧力勾配の差により生じる近寄り流れの速度差によって、RUN2 の方が物体前面の下方へ巻き込む流量が少なくなるためと考えられる。

物体後方では RUN1 の場合、 $\beta = 0$ で $X/h = 1.1$ 付近に極小値 ($C_{pw} = -0.47$) が存在する。 β の増加に従い C_{pw} は全体的に高くなり、この極小値をとる位置



(a) RUN 1



(b) RUN 2

Fig. 6 Wall pressure coefficients on the X-axis

は徐々に下流へ移動している。これは物体背後の逆流域の、 β の増加によるエントレイメント量の減少によるものであり、さらにその領域の下流側への移動の結

果として生じた現象と解釈できる。β=0.349 及び β=0.456 の場合には物体の部材要素による剥離泡のため、X/h=0.7 付近に別の極小値が生じているのが認められる。また RUN2 の場合は RUN1 に比べ極小値が多少大きく、その位置にも相違がある。これは RUN2 の方が物体前後の圧力差が小さいので、逆流域が縮小し上流側に存在するためと考えられる。β による変化は RUN1 と同様の傾向を示すが、注目すべきことは β=0 の場合に C_{p,w} の極小値が最小とならない点である。このことは抗力の値に重要な結果を生じるものと思われる。

3.3.2. 物体表面圧力分布

式②に従って求めた物体前面の Z/h=0 における圧力係数 C_p の Y 方向分布を、RUN1 及び RUN2 について Fig. 7 (a) (b) に示す。

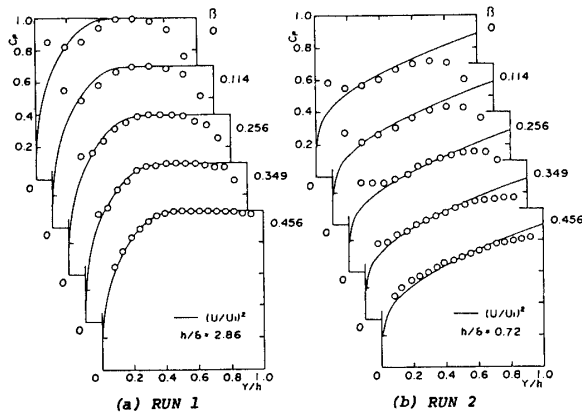


Fig. 7 Pressure coefficient distributions on the front surface of model.

$$C_p = (P_m - P_s) / \frac{1}{2} \rho U_1^2 \quad \left(\begin{array}{l} P_m: \text{物体表面圧力} \\ P_s: \text{主流静圧} \end{array} \right) \quad \text{②}$$

分布の極小値は物体前方に形成される馬蹄形渦の影響と思われる。C_p の値は全ての Y/h に対して RUN1 の方が RUN2 より大きい、これは物体への近寄り流れの速度の違いによる効果と考えられる。β の増加に伴い物体前方の逆圧力勾配は減少するので、圧力分布は徐々に (U/U₁)² の曲線に一致していくのがわかる。一方、分布の極大値は物体前面におけるよどみ点位置をほぼ示している。この位置は RUN1 では Y/h ≒ 0.6, RUN2 では Y/h ≒ 0.75 であり、速度勾配の相違から生じる流線の曲がりの違いによる効果と考えられる。坂本ら⁹⁾ は h/δ が変化してもよどみ点位置は変化しないと報告しているが、彼らの実験は h/δ の範囲が0.14~1.44であり十分広い範囲の結果が得られていないものと思われる。従って本研究より、よどみ

点位置は h/δ に対して変化すると考えた方が妥当であろう。

Fig. 8 はスモークワイヤー法によって、中心断面上の流れ場の様子を可視化し写真撮影したものである。β の変化に伴う馬蹄形渦のスケールの変化及びよどみ点位置が流線より観察出来、物体表面圧力分布並びに物体近傍壁面圧力分布からの推察と対応しているようである。

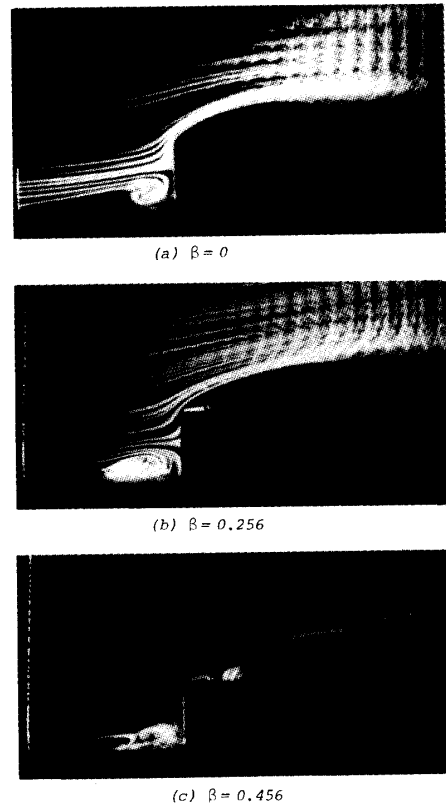


Fig. 8 Flow patterns around the model (Smoke wire method)

Fig. 9 は物体表面及び内面の圧力係数を、式②に従って求め図示したものである。物体前面 (FRONT OUT) の Z 方向分布を見ると、近寄り流れの速度の違いにより、RUN1 の方が RUN2 よりも全体的に高い値を示している。β の増加に伴い両方とも平坦な形状へ変化しているが、これは物体の開口比が増加すると透過流れが増加し、流線の側壁方向の曲げがゆるやかになるためと思われる。物体側面 (SIDE OUT) の X 方向分布を見ると、RUN1 の方が RUN2 より負圧が高いが、これは側面を通過する流線の違いに起因している。また両者とも β の増加に伴い極小値が上流へ移動しているのは、透過流量が増加するため流線の曲率半径が大きくなり、側面の剥離泡が衰弱するためと考えることができる。物体後面 (REAR IN) の圧力

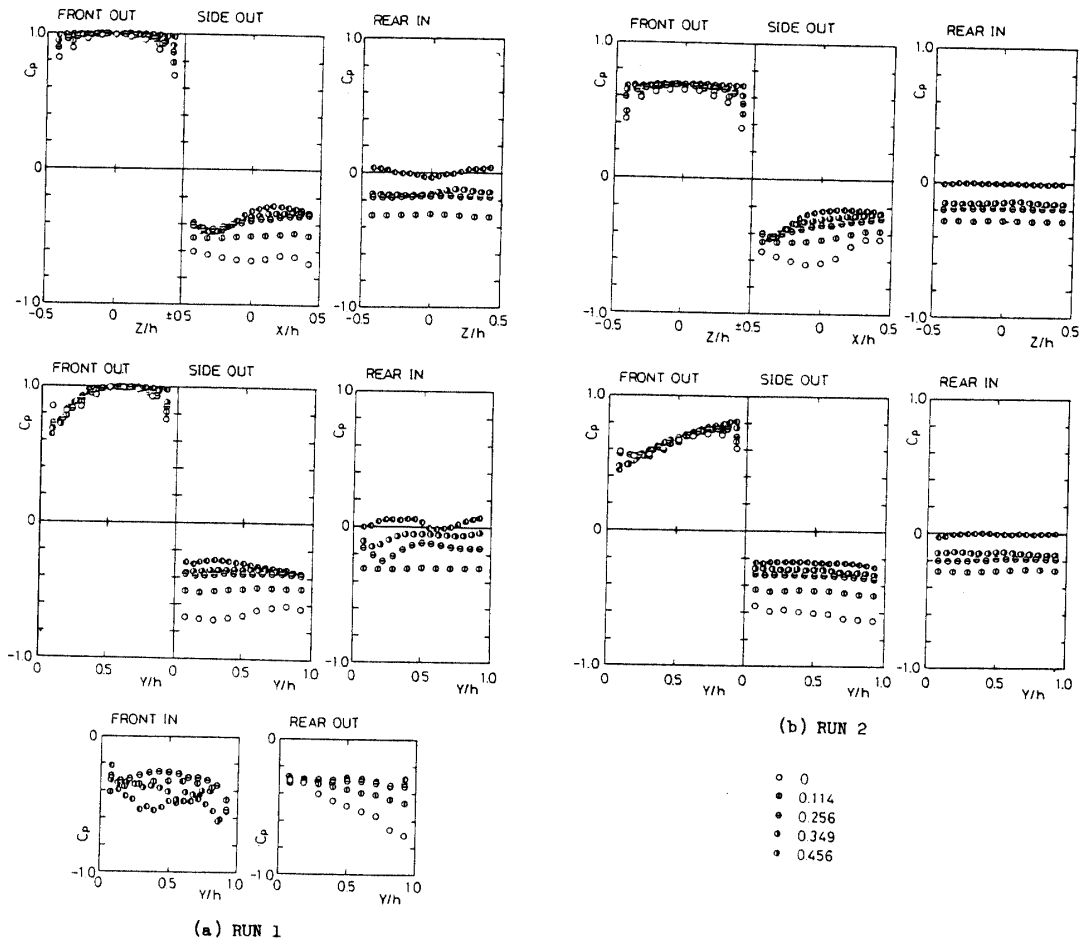


Fig. 9 Pressure coefficient distributions on the surface of model.

分布では、 β の増加に伴う透過流量の増加により下流面に衝突する動圧が上昇し、 C_p の値が増加している。物体前面内部 (FRONT IN) の Y 方向分布は $\beta = 0.256$ で極大を示している。 β がこれより小さい場合は透過面積の減少に伴う内部圧力の増加、他方大きい場合は透過流れにより部材背後に死水領域が形成され、それに伴う圧力の減少が考えられる。物体後面 (REAR OUT) の Y 方向分布は $\beta = 0$ と $\beta = 0.114$ の場合、Y 方向に高くなるにつれて C_p は減少している。一方 $\beta = 0.256$ 以上では C_p の Y 方向変化は逆に徐々に小さくなっていく。これは β が増加するにつれて、物体背後に位置する逆流域が下流へ移動し、 $\beta = 0.256$ 以上でその影響がほとんどなくなったためと考えられる。

3.4. 抗力の評価

Fig. 10 は流れ方向に働く圧力の圧力係数を、各々の面について積分し h^2 で無次元化したものである。全体的な傾向は前述した物体表面圧力分布の様子とほぼ同じである。すなわち前面外部は β の増加に伴い増加すること、前面内部は $\beta = 0.256$ で極大となるこ

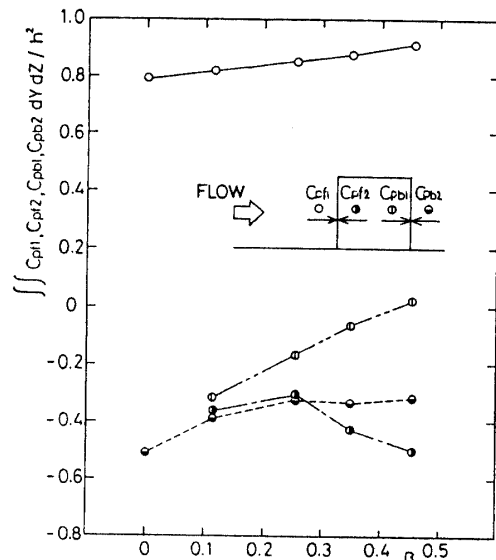


Fig. 10 Integrated pressure coefficients for both front and back surfaces of model

と、後面内部は β の増加に伴い増加すること、及び後面外部は $\beta = 0.256$ まで上昇し以後一定値となることである。このうち抗力には、前面内部において $\beta =$

0.256 を境とする変化が大きく寄与するものと考えられる。そこで次に抗力係数の算出を試みた。

一般に透過性物体は流れ場の複雑さから抗力を算出することは難しいが、次の仮定を用いることにより近似した。

- (i) 側面及び上面からの透過流れによる抗力成分を無視する。
- (ii) 表面摩擦を無視する。
- (iii) 前面板の抗力と後面板の抗力の単純な和として表示する。

以上の仮定に基づいて抗力係数 C_D を式③のように定義する。

$$\begin{aligned}
 C_D &= C_{Df} + C_{Db} \\
 &= \iint_A (C_{pf1} - C_{pf2}) dYdZ/h^2 \\
 &\quad + \iint_A (C_{pb1} - C_{pb2}) dYdZ/h^2 \\
 &= \iint_A (C_{pf1} - C_{pf2} + C_{pb1} - C_{pb2}) dYdZ/h^2 \quad \text{③} \\
 &\quad (\text{但し } \beta=0 \text{ の場合 } C_{pf2} = C_{pb1})
 \end{aligned}$$

Fig. 11 は式③に従って算出した抗力係数を図示したものである。尚、横軸は $1/\beta^2$ 及び β の対数表示としている。分布を見ると、全体の抗力係数の傾向は $\beta = 0.25$ 付近を境にして分類することができる。すなわち $\beta=0$ から $\beta=0.25$ 付近まで C_D は徐々に減少し、 $\beta=0.25$ 以上では逆に増加している。 $\beta=0.25$ 付近での極小値は前面板の抗力が $\beta=0.25$ 付近で極小となる

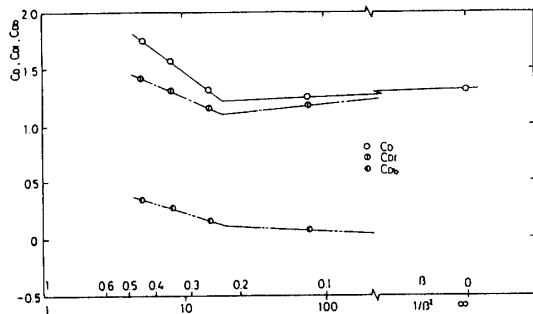


Fig. 11 Drag coefficients against open area ratio.

ためであり、これは前面板の内部圧力が $\beta=0.256$ において極大を示すことに起因している。従って、透過性物体に働く抗力は主として前面板の内面圧力の変化により影響されると思われる。

4. 結 論

乱流境界層中に置かれた透過性三次元物体周りの流れについて、物体に働く流体力及び流れの様子を、圧力測定及び流れの可視化法により調べた結果、以下の点を明らかにした。

- (1) 物体前方に形成される馬蹄形渦や後方の逆流域に形成されるアーチ形渦は、開口比の増加に伴いその強さ及び尺度とも減衰しながら下流側へ移動する。
- (2) 物体前面のよどみ点位置は h/δ の違いにより変化する。これは、 h/δ の値により物体前方の速度勾配 dU/dY が異なり、流線の曲がりに差異が生じるためと思われる。
- (3) 透過性物体に働く抗力を、その前面板に働く抗力と後面板に働く抗力の単純な和として定義すると、抗力係数は $\beta=0$ から $\beta=0.25$ 付近までわずかに減少するが、 $\beta=0.25$ 以上になると増加する。

本研究の遂行に当たり、実験に協力して頂いた岡本成恭君（九州大院）に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 黒木他 2 名：北海道水産部 (1964)
- 2) 高田・大野：土木学会中部支部講演概要集 (1977)
- 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 4 名：山口大学工学部研究報告, **31**, 2 (1981)
- 7) 影山他 3 名：山口大学工学部研究報告, **32**, 1 (1981)
- 8) 影山他 2 名：水産土木, **18**, 2 (1982)
- 9) 坂本他 3 名：機論, **46**, 408 (1980)

(昭和 58 年 4 月 15 日 受理)