

台形断面開水路流の三次元乱流構造

Three-Dimensional Turbulent Structure in a Trapezoidal Open Channel Flow

群馬大学工学部 正 員 富 永 晃 宏

群馬大学工学部 正 員 江 崎 一 博

群馬大学工学部 学生員 中 村 悦 由

1. まえがき

直線の一様な開水路流では、側壁の存在によって三次元のせん断応力場が形成され、さらに乱れの不均一に起因する二次流が発生する。この側壁によるせん断と二次流の作用が、流れの三次元構造を決定する支配要素となる。このような三次元性の存在は、幅の狭い水路や側壁のごく近傍で重要であるだけでなく、幅の広い水路でも並列らせん流が発生する場合は水路全体に及び、輸送現象等にも少なからぬ影響を与えるものと考えられる。著者らはこれまでに、長方形断面の滑面および粗面の開水路流において二次流構造と三次元乱流構造を実験的に明らかにしてきた^{1)・2)}。しかし、実河川では側壁の傾斜した水路が一般的であり、実用的にはより重要と思われるが、このような台形断面の流れの三次元構造に関するデータは少ない。二次流を中心に考えるならば、側壁の傾斜は二次流の発生機構に何らかの変化をもたらすことは十分に考えられるため、台形断面についても特別に検討する必要性が生じてくる。そこで本研究は、台形断面における二次流構造およびこれと三次元乱流構造および壁面せん断応力との関係を明らかにしようとするものである。ここでは、滑面の長方形断面における結果（文献1に発表済）との比較を中心としてその相違点を示し、台形断面の特徴を明らかにする。

2. 実験装置および方法

実験水路は、長さ12.5m、幅40cm、高さ40cmの勾配可変水路を用い、台形断面とするために、塩化ビニル製の傾斜側壁を作製し両側岸に全水路長にわたって設置した。この側壁の傾斜角は今回は 43.8° のみとし、水路底の幅は20cmである。計測断面は水路上流端より7.5m下流に設けた。平均流速がほぼ一定となるように水深を3通り変化させ、それぞれの実験条件を表-1に示す。座標系は流下方向をx、鉛直方向をy、横断方向をzとしているが、z軸の原点は長方形の場合と異なり水路中央にとり、向きも逆になっている。流速の測定には、X型ホットフィルムプローブを用い、同一測点で $(U+u, V+v)$ および $(U+u, W+w)$ の2シリーズに分けて計測し、これらを合成することにより各特性値の分布が得られた¹⁾。計測点は後出の図-3の二次流ベクトルの始点の位置で示され、TS01, 02, 03でそれぞれ75, 70, 127点とした。データのAD変換におけるサンプリング周波数はTS01, 02が50Hz、TS03が75Hzとし、いずれも2048個のデータを得た。

3. 実験結果とその考察

(1) 流れの対称性

本実験では傾斜側壁を設置したため、まず流れの対称性について調べた。水深が約9cmのTS02とほぼ同一の実験条件において全水路幅にわたる計測を行った。その $y/H=0.5$ 付近の U, V, u' のz

表-1 実験条件

Case	Discharge Q (l/s)	Flow depth H (cm)	Bottom width B (cm)	Surface width T (cm)	Hydraulic radius R (cm)	Side angle θ ($^\circ$)	Mean velocity U_m (cm/s)	Maximum velocity U_{max} (cm/s)	Reynolds number $Re(=4RU_m/\nu)$ ($\times 10^4$)	Froude number Fr	Energy gradient I_e ($\times 10^{-3}$)	Kinematic viscosity ν (cm^2/s)
TS01	2720	3.36	20.0	13.50	2.66	43.8	35.21	42.72	3.59	0.614	1.381	0.01045
TS02	9945	9.05	20.0	19.44	5.77	43.8	37.33	45.63	8.76	0.396	0.594	0.00983
TS03	4590	5.01	20.0	15.22	3.67	43.8	36.92	44.36	5.59	0.527	1.000	0.00975

方向の分布を図-1に示す。 U , u' についてはほとんど対称な分布とみなすことができ、 V についても、この値の実験精度の低さを考慮すれば、分布の波状の傾向からほぼ対称とみなしてよいと思われる。これによって以後の計測は半断面のみとすることができる。

(2) 二次流の構造

二次流速の大きさは微小であるため、実測値はなかなか連続式を満足しないが、図-1に示したように空間的な変動が明確に認められる。そこで文献2に示したと同様に、質量保存則を満足するように V , W の補正を行った。まず長方形断面の構造と比較するために、アスペクト比4の場合の二次流ベクトルおよび流線を図-2に示す。 $y/H \approx 0.6$ の水平な面によって分けられる水面縦渦と底面縦渦が存在し、水面縦渦は幅が水深の2倍程度に達し、底面縦渦は水深程度である。これに対して、今回得られた台形断面の二次流ベクトル図を図-3に示す。台形断面の二次流構造は長方形断面のものと大きく異なることが明白であり、次のような特徴があげられる。まず第一に、長方形断面において発達した水面縦渦が台形断面では消滅している。台形では水面付近からコーナーに向かって流れ込み、底面に沿ってコーナーから中央に向かい、コーナーより水深程度の距離だけ中央へ寄ったところで上昇する水深規模の渦(図-4におけるA渦)が支配的であり、これは長方形における底面縦渦の発達したものと考えられる。また、水面と側壁ではさまれた領域では、水面から側壁に沿って下降し、側壁の中央付近で側壁から離れて上昇し、水面で側壁に向かって流れる、長方形の場合の水面縦渦とは逆向きの渦(図-4のB渦)の存在が認められる。そして、これらの渦の間にこれとは逆向きの渦(図-4のC渦)が存在しているようである。

第二に、長方形断面では鉛直方向の流速 V に比べて横断方向の流速 W の方が大きく支配的であったが、台形では V が W と同オーダーとなり渦構造がより明確になっている。 W は壁面近傍で大きい、水面近傍では小さくなっている。第三に、水深に比して水路幅が大きいとき、滑面の長方形断面においては水面縦渦の範囲より中央側の領域には顕著な二次流の存在が認められなかったが、台形断面では滑面においても並列せん流が発生しやすいようである。TS02およびTS03ではコーナー横の渦に隣接してこれと逆向きの渦(図-4のD渦)が現れ、水路中央で下降流が生じている。並列せん流の一つの渦の幅は一般にほぼ水深程度であり、TS03ではおよそこの通りであるが、TS02では幅が水深の1.5倍程度と大きくなり、結果的にTS03と同様の構造となっている。この点については渦の安定性の問題があって、さらに幅を変化させた実験が必要と思われる。長方形断面の場合でも粗面においては顕著な並列せん流が存在したが²⁾、これと考え合わせると側壁近傍の渦の鉛直方向の流速 V がある程度大きい場合に並列せん流が誘起されやすいのではないかと考えられる。以上の結果より、側壁の傾斜角が約 45° の台形断面の二次流構造を模式的に示したものが図-4である。

(3) 平均主流速分布

まず比較のために長方形断面の平均主流速 U の等値線を図-5に示す。平均主流速は二次流の影響を顕著に受けて、一般的に二次流の壁に向かうところで加速され、壁から離れるところで減速されるという特性がある。その結果、長方形では U の等値線は側壁に向かって突出した形状を示し、水面付近で著しく減速され $\partial U / \partial y < 0$ の領域が存在するのが特徴である。これに対して、今回の台形断面の U の等値線を図-6に示す。台形断面では先述の二次流構造の違いから予測されるように長方形断面の結果と異なっており、まず水面縦渦の消滅に伴い水面近くでの $\partial U / \partial y < 0$ の領域が存在しなくなる。代わって、台形断面における特徴はコーナーに向かう二次流に沿って等値線が張り出す点であり、この領域が加速されていることを示す。また、図-4のA渦の上昇部に当る位置で等値線は上に凸となり、この領域が減速されていることを示す。TS02ではこの効果が最も顕著であり、最大流速位置が水路中央でなく、 $z/H \approx 0.6$ 付近に現れる。TS01, TS03ではさらに並列せん流の下降部に当る水路中央が加速されている。TS01とTS03を比べると、TS01の方が上昇流による減速の効果がより強く現れているようである。ここで先に戻って図-3を見ると、TS01のA渦は水面にまで達しているが、TS03の

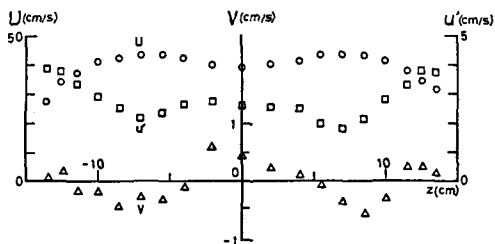


図-1 流れの対称性 (U, v, u')

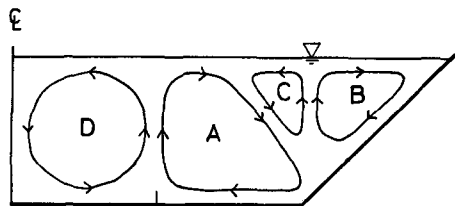


図-4 台形水路の二次流の模式図

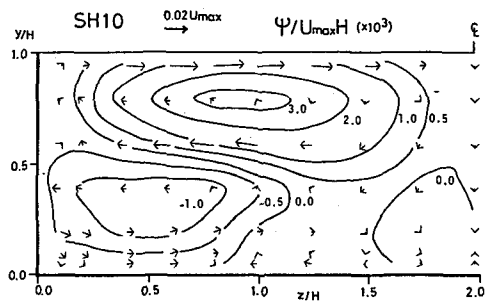


図-2 二次流速 (長方形断面)

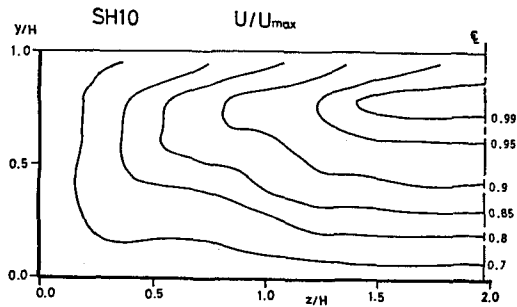


図-5 平均主流速 U の等値線 (長方形断面)

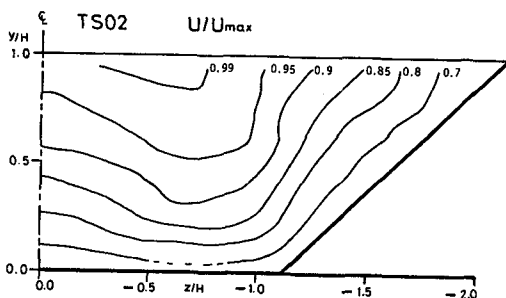
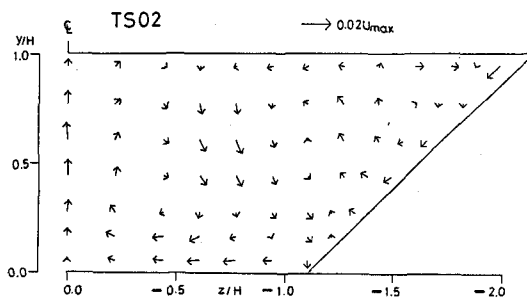
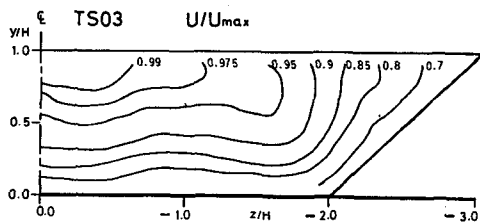
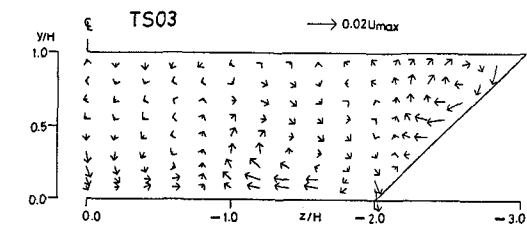
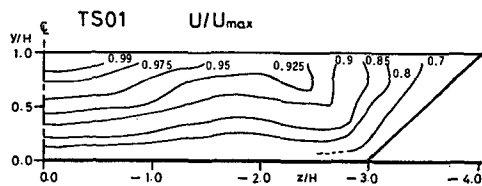
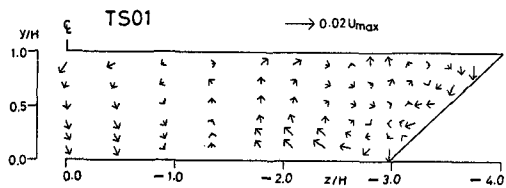


図-3 二次流ベクトル (台形断面)

図-6 平均主流速 U の等値線 (台形断面)

ものは水面にまで達していないようであり、幅と水深の比による差があるものと考えられる。一方、側壁と水面の間の領域では、等値線は側壁から離れるにつれて側壁にほぼ平行な状態から底面に垂直な状態へと順次変化している。二次流の影響はそれほど顕著ではないが、図-4のB渦によって側壁のほぼ中央付近の等値線が側壁に垂直上方に若干凸形状を示しているのが認められる。以上のように、三次元性において台形断面は長方形断面の延長とは考えられず、明確な区別が必要であることがわかる。

(4) 乱れ強度分布

長方形断面における乱れ強度 u' の等値線を図-7に示す。等値線の形はUと同様に側壁に向かって突出する傾向にあり水面付近に乱れの増大する領域があり、水面縦渦の影響を示す。TS02における u' , v' , w' の等値線を図-8, 9, 10にそれぞれ示す。 u' の等値線はUの等値線とほとんど同様の形状を示し、水面からコーナーへ向かって突出する特徴があり、乱れの最小となる位置は、最大流速の位置とほぼ一致している。また、水路中央で上に凸となる点はUと同様であるが、側壁のほぼ中央で側壁に垂直上方に凸となる傾向が著しくなる。これは側壁近傍の水面に沿って乱れの変化が小さくほぼ一定になる傾向にあるためと思われる。結局、 u' の分布と二次流との関係はよりいっそう明確となり、二次流の壁に向かうところで乱れが減少し、壁から離れるところで増大すると言える。また、長方形では側壁近くの u' の値は底面近くに比べて小さくなっているが、台形ではほぼ同程度となっている点に気付く。

次に、 v' , w' の等値線もコーナーへ向かっての張り出しが認められるが、 u' ほど顕著ではない。底面近傍では当然 $w' > v'$ であるが、側壁近傍では傾斜角がほぼ 45° であるため $w' \approx v'$ となっている。しかし、 v' は水面近くの等値線の間隔が密になっており、水面に向かって急激に減少していることを示している。このことは長方形断面においても認められた開水路流の特徴であり、まさにこれが水面縦渦の発達の原因と考えられるものである。そこで流下方向の渦度方程式において二次流発生の原因となる $(\overline{w^2} - \overline{v^2})$ の分布を比較するために、図-11に長方形の、図-12に台形の等値線を示す。側壁近傍の分布に違いが認められるが、この二次流の発生機構は複雑であって、これから直ちに二次流の構造の

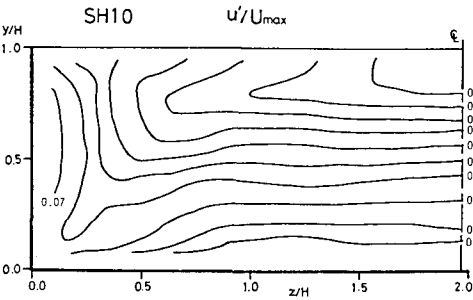


図-7 乱れ強度 u' の等値線 (長方形断面)

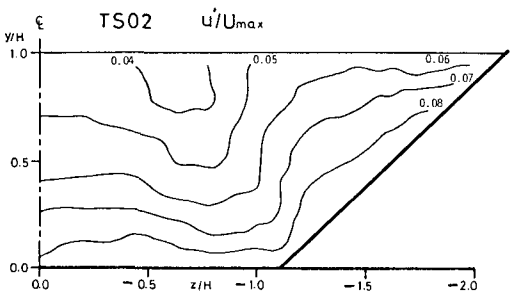


図-8 乱れ強度 u' の等値線 (台形断面)

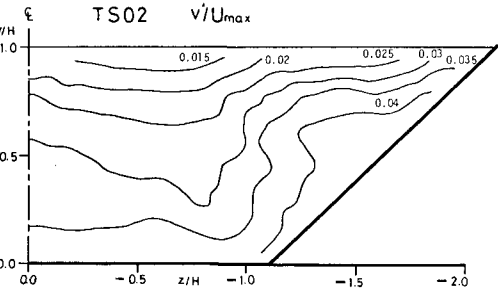


図-9 乱れ強度 v' の等値線 (台形断面)

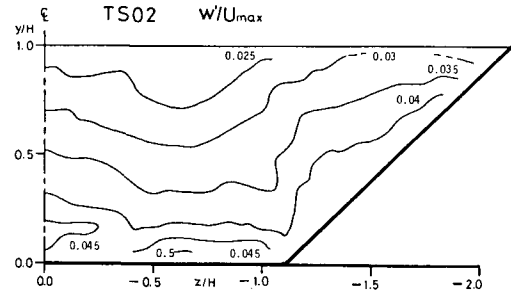


図-10 乱れ強度 w' の等値線 (台形断面)

違いを説明することは困難である。この点については今後の課題としたい。

(5) レイノルズ応力分布

長方形およびTS02におけるレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の等値線を図-13および図-14に示す。長方形では側壁が近づくにつれて緩やかに減少し、水面近くに負の領域が現れる。これに対し台形では、コーナーより中央側の分布は水面近くの負の領域が無い点を除いて長方形の場合とよく似ているが、側壁近傍ではその中央より少し水面よりのところに大きな値の領域が現れ、等値線が上に押し上げられている。結果的に、側壁のコーナー近くのところに向かって等値線が突出した形となる。

次に、長方形およびTS02の $-\overline{vw}$ の等値線を図-15および図-16に示す。長方形では側壁近傍で大きな値をとり急激に減少し、あとは緩やかな変動を示す。底面縦渦の影響を受けて $0.5 < z/H < 1$ 付近で小さな極小領域と極大領域が現れる。台形では、側壁の中央より下方に大きな値の領域が存在し、コーナーより中央よりのところで鉛直に密に並んでおり、この付近の鉛直面に働くせん断応力の z 方向の勾配が大きいことを示している。また、中央付近全体が負の領域となり、これは $\partial U / \partial z < 0$ となる領域とほぼ一致している。

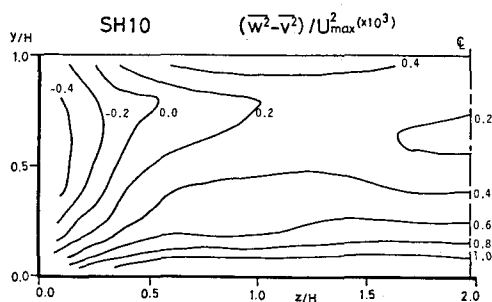


図-11 $(\overline{w^2} - \overline{v^2})$ の等値線 (長方形断面)

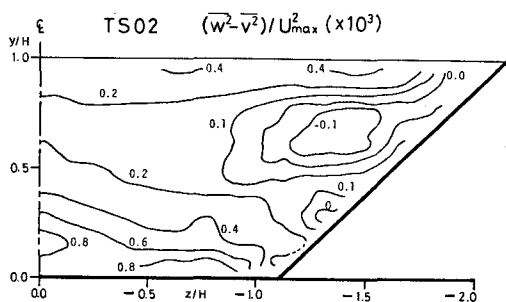


図-12 $(\overline{w^2} - \overline{v^2})$ の等値線 (台形断面)

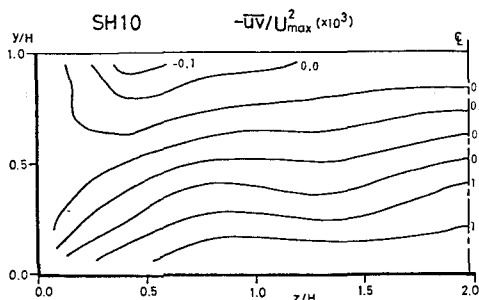


図-13 $-\overline{uw}$ の等値線 (長方形断面)

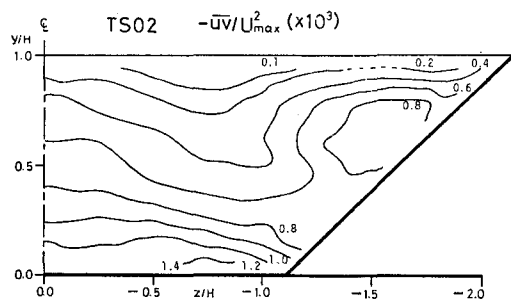


図-14 $-\overline{uw}$ の等値線 (台形断面)

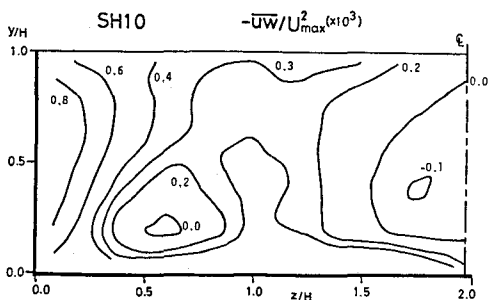


図-15 $-\overline{vw}$ の等値線 (長方形断面)

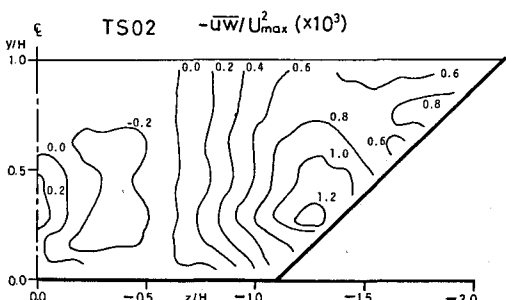


図-16 $-\overline{vw}$ の等値線 (台形断面)

(6) 壁面せん断応力分布

水工学的に最も重要な壁面せん断応力は、長方形断面の場合と同様に平均主流速 U に対数則を適用して摩擦速度 U_* を求めることによって得られた。滑面での対数則は次のようである。

$$U/U_* = 1/\kappa \cdot \ln \{U_* (y \text{ or } \eta) / \nu\} + C_s \quad (1)$$

ここに η は側壁に垂直な方向にとった座標であり、カルマン定数 κ と C_s は底面、側壁とも0.4および5.5とした。この底面および側壁の対数則分布の一例を図-17, 18に示す。側壁からの η に対する値は実験値からの内挿によって求めたものである。底面では図中の直線の式(1)によく一致するが、側壁では直線部分は存在するが傾きが一致しないようであり、 κ および C_s の値が異なると考えられるが、この検討は後に回し、これによる τ_w は参考値とする。得られた底面上の τ_b および側壁上の τ_w のそれぞれの平均値で無次元化したものを図-19～21に示し、長方形の τ_b も並示する。 τ_b は長方形ではコーナー近くが底面縦渦の影響により小さな値を示すのが特徴であるが、台形ではコーナー近くに下降流が生じるため $z/B=0.2\sim0.3$ 付近でピークをとる。TS02では水路中央が上昇流によって減少し横断方向の変化が大きい。TS03では、 $z/B\approx0.5$ で極小となり水路中央で再びピークをとる周期的な分布となる。なおTS01はTS03とほぼ同様の分布を示した。次に、 τ_w はコーナーのごく近傍で小さなピークをとり水面に向かって緩やかに減少し、水面近くで急激に減少するようである。水深が深くなるほど側壁の中央付近が一定となる傾向にある。台形の粗面においてGhosh & Roy³⁾がせん断応力の計測をしておりこれと比較すると τ_b はTS02において同じ傾向を示すが、 τ_w はGhoshらの結果の方が底面近くのピークが鋭くなっている。

(4) あとがき

台形断面では、二次流構造が長方形の場合と大きく異なることがわかり、これによって主流や乱流構造、せん断応力分布も変化する。今後は側壁の傾斜角の変化に伴う影響を検討していく予定である。

<参考文献> 1) 富永、江崎：土木学会論文集第357号/II-3, 1985, 2) 富永、江崎：第29回水理講演会論文集, 1985, 3) Ghosh, S. N. & Roy, N.: ASCE, HY4, 1970

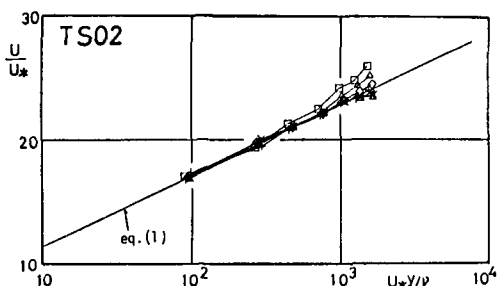


図-17 底面に対する対数則分布例

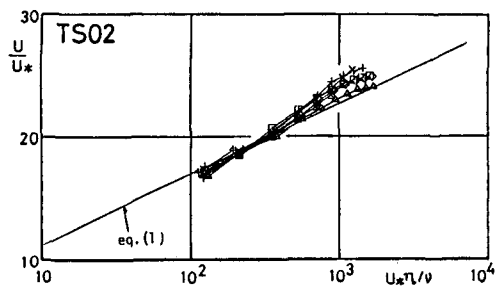


図-18 側壁に対する対数則分布例

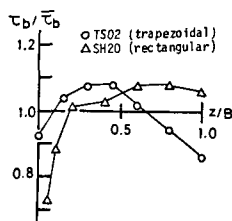


図-19

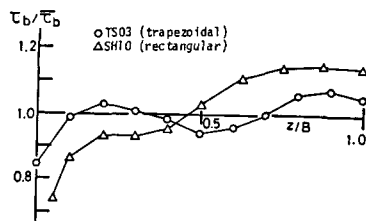


図-20 底面のせん断応力分布

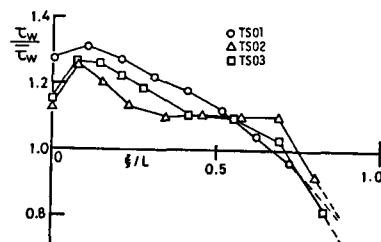


図-21 側壁のせん断応力分布