

開水路流れにおける乱れ特性量の普遍関数表示について(2)

今本 博健・浅野 富夫・石垣 泰輔・今西 邦夫

ON THE TURBULENCE CHARACTERISTICS IN A FREE SURFACE SHEAR FLOW IN TERMS OF A UNIVERSAL FUNCTION(2)

by *Hirotake* IMAMOTO, *Tomio* ASANO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Kunio* IMANISHI

Synopsis

This paper describes an experimental investigation of the profiles of mean velocities and some turbulence properties in a two-dimensional free surface shear flow. The experiments were performed under the condition of greater aspect ratio than 10, to obtain the two-dimensional flow in a rectangular open channel.

The experimental results show that the mean velocity profiles are well described by the logarithmic distribution, and that the Kármán constant κ and the integral constant A_s , A_r may be treated as constants which are independent of the Reynolds number, the Froude number and the relative roughness height. However, the values of these constants in a free surface shear flow are somewhat different from these in a pipe flow, and the following values may be recommended, that is, $\kappa=0.33$, $A_s=2.2$ and $A_r=8.3$.

According to the Reynolds number similarity, the turbulence properties are normalized with the flow depth, the friction velocity and the local mean velocity. And the vertical distribution of the normalized turbulence properties, such as, the turbulence intensity, the Eulerian mean scale, the energy dissipation rate, the Taylor's dissipation scale, the Kolmogorov's local scale, the Lagrangian mean scale and the turbulent diffusion coefficient are described by the universal function of the relative depth, respectively.

1. はじめに

2次元開水路流れにおける乱れ特性量の鉛直分布特性については、従来より多くの検討が加えられ、種々の普遍関数表示法が提案されているが、それらは次のようにまとめられる。すなわち、2次元開水路流れの乱れ特性は乱れの強さ、平均スケールおよびエネルギー逸散率の3種の乱れ特性量によって記述されるが、これらの乱れ特性量間には、Taylor¹⁾によって提案されたように、エネルギー逸散率は乱れの強さの3乗と平均スケールとの比に比例するという関係があるため、3種のうちの2量についての普遍関数表示が与えられると残りの乱れ特性量についての表示も定められることになる。

著者らのうちの1人は、3種の基本的乱れ特性量の代表的な普遍関数表示法として、乱れの強さについては、大気乱流について提案された Monin-Obukhov²⁾の相似則を拡張適用し、摩擦速度による無次元量が、平均スケールについては、Engelund³⁾の提案を用いて、水深と摩擦速度との比による無次元量が、またエネルギー逸散率については、生成率に対する普遍関数表示より類推し、摩擦速度の3乗と水深との比による

無次元量がそれぞれ相対水深のみの関数になるという表示を用いた場合、既述の Taylor の関係式が満足されないことから、これら3種の乱れ特性量のうち2量についての普遍関数表示より Taylor の関係式を用いて残りの乱れ特性量についての普遍関数表示を求めるという手法により、3通りの普遍関数表示法が得られることを示している⁴⁾。これらの普遍関数表示法の違いは局所的平均速度と摩擦速度との比をどのように取り入れるかにあり、それぞれの表示法間の優位性を実験的に検討するには、局所的平均速度・摩擦速度比を大幅に変化させた広範囲の水理条件下における実験的検討が必要であるが、著者らの実験的検討によると平均スケールおよびエネルギー逸散率に関する既述の普遍関数表示に基づくものが最も優位とされている⁵⁾。

本報告においては、著者らによる従来の研究成果を再検証するため、2次元開水路流れの状態を規定するレイノルズ数、フルード数および相対砂粒粗度高を系統的に変化させた一連の実験により、定常等流状態の2次元開水路流れにおける乱れ特性量の鉛直分布特性について検討したものであって、流れの2次元性ならびに平均速度分布特性についての検討が加えられている。なお、著者らは、従来、平均速度分布へ対数則を適用することにより摩擦速度を推定してきたが、カルマン定数についての検討結果を考慮し、本報告では最も単純な水深および路床勾配より摩擦速度を算定するという手法が採用されている。

本研究で使用された実験水路は、長さ 13m、幅 40cm、深さ 20cm の長方形断面一様水路であり、速度計測にはホットフィルム流速計が使用されている。

2. 流れの2次元性

水路中央部における流れの2次元性について検討すると次のようになる。

Fig. 1 は、水路中央部における平均速度 U およびレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の鉛直分布を種々の水路幅・水深比 B/H について示したものであって⁶⁾、 U および $-\overline{uw}$ はそれぞれ摩擦速度 $U_f (= \sqrt{gHI_b})$ 、 g ：重力加速度、 H ：水深、 I_b ：路床勾配) および U_f^2 で無次元化されている。図にみられるように、 B/H が小さい場合、 U は自由表面上で最大値をとるとは限らず、また $-\overline{uw}$ は最大流速点より自由表面側で負となっており、2次元境界層乱流の場合とは著しく異なっている。このような分布特性を示す原因としては、側壁面と路床面あるいは自由表面との間の隅角部に形成される2次流の影響が水路中央部にまで及んだことによるなどの原因が考えられるが、詳細については不明である。なお、 $B/H \approx 1$ の場合、半水深付近に存在した最大流速点は、 B/H の増加とともに自由表面に近づき、 $B/H \geq 10$ となると U は自由表面上で最大値をとり、 $-\overline{uw}$ も路床面近傍を除き、自由表面上で0、路床面上で U_f^2 となる直線分布

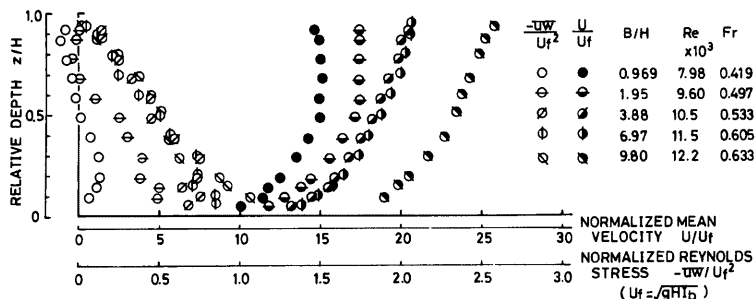


Fig. 1. Examples of profiles of mean velocity and Reynolds stress.

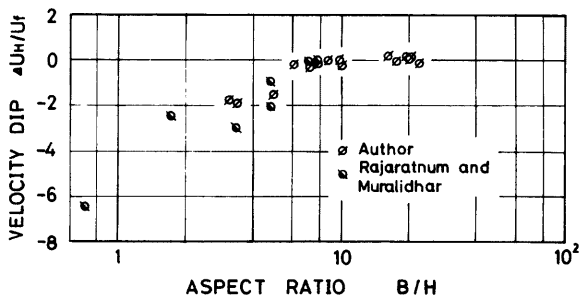


Fig. 2. Velocity dip in free surface region.

$$\frac{-\overline{uw}}{U_f^2} = 1 - \frac{z}{H} \quad \dots\dots\dots (1)$$

に近づき、2次元流れとして取扱われることが知れる。ここに、 z は路床面からの距離である。

Fig. 2 は、自由表面近傍における平均速度分布から推定した表面流速と、半水深付近の平均速度分布に対数則を適用して推定した表面流速との差を U_f で無次元化した $\Delta U_H/U_f$ と B/H との関係を示したものであって、Rajaratnam および Muralidhar⁷⁾による実験結果も併示されている。Fig. 2 にみられるように、 $B/H \geq 10$ のとき $\Delta U_H/U_f$ はほぼ0となり、これからも水路中央部における流れが2次的に取扱われるのは B/H が10程度以上であることが知れる。

3. 平均速度の鉛直分布特性

3.1 対数則の適用性

乱流境界層における平均速度分布は、経験的な指数則⁹⁾あるいは半理論的な対数則^{9),10)}によって表現されることが多い。ここでは、実用上の観点からもっとも一般的に用いられている対数則を取上げ、開水路流れへの適用について検討を行う。

対数速度分布式は、通常、つぎのように表される。すなわち、

$$\text{滑面: } \frac{U}{U_f} = A_s + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_f z}{\nu} \quad \left(\frac{U_f k_s}{\nu} < 5 \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{粗面: } \frac{U}{U_f} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} \quad \left(\frac{U_f k_s}{\nu} > 70 \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 U は路床面からの距離 z における平均速度、 $U_f (= \sqrt{gHI_s})$ は摩擦速度、 k_s は砂粒粗度高、 ν は動粘性係数、 κ はカルマン定数、 A_s および A_r は積分定数である。

Fig. 3(a) は開水路滑面上の流れにおける平均速度分布の計測例を示したものであって、いずれにおいても平均・摩擦速度比 U/U_f とレイノルズ数 $U_f z/\nu$ とは片対数紙上で直線関係を示しており、従来からよく指摘されている路床面近傍および自由表面近傍における直線関係からの離反あるいは半水深付近での直線の折曲がり現象はあまり顕著ではなく、対数則の適用性が確かめられる。

一方、粗面上の流れにおける平均速度分布の計測例を示すと Fig. 3(b) のようになる。なお、粗度要素としては標準ふるいによってふるい分けられた一様砂が用いられており、粗度高 k_s としては平均粒径 k_d (2種のふるい目の相乗平均)、路床基準面としては砂粒頂より $1/4 k_d$ 下側がそれぞれ採用されている。図より知れるように、粗面上の流れについても片対数表示における U/U_f と z/k_s との関係は直線的とみなされ、対数則の適用性が確かめられるが、路床面にきわめて近い領域における計測値はこの直線より若干大き

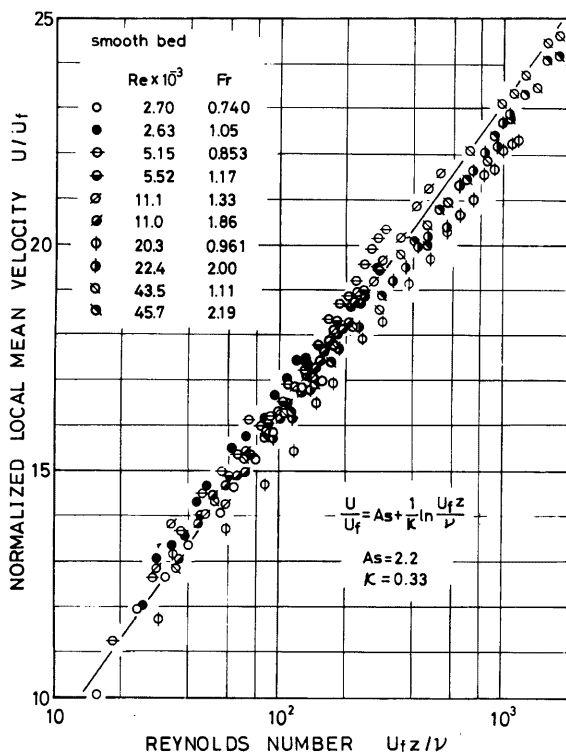


Fig.3(a). Examples of mean velocity profiles over a smooth bed.

くなる傾向が認められる。このような傾向は、粗度近傍の領域とそれより上層の領域では速度分布形が異なるという従来の結果とも一致しており、粗度要素近傍の流れは局所流として取扱う必要があろう。なお、粗度領域の厚さ δ について足立ら¹¹⁾は、 $\delta/k_s=0.85$ 、芦田ら¹²⁾は $\delta/k_s=0.8$ という値を提案しているが、本実験における δ もこれらとほぼ同程度となっている。

3.2 カルマン定数および積分定数

一般に、開水路流れに対数則 (2) あるいは (3) 式を適用する場合にも、カルマン定数 κ および積分定数 As 、 A_r としては、管路における $\kappa=0.4$ 、 $As=5.5$ 、 $A_r=8.5$ ¹³⁾ がそのまま転用されることが多い。しかしながら、開水路流れには自由表面が存在し、このため開水路流れにおけるカルマン定数あるいは積分定数が管路における値と一致するとは限らず、従来よりフルード数によってこれらは変化するという指摘がなされている^{14), 15)}。

ここでは、Fig. 3 に示した平均速度分布に対数則を適用し、カルマン定数 κ および積分定数 As あるいは A_r とフルード数 Fr との関係について検討を行うこととする。なお、 κ および As 、 A_r の算定にあたっては最小二乗法を用いているが、路床面近傍では路床面の不整あるいは z の値のものが小さいため計測

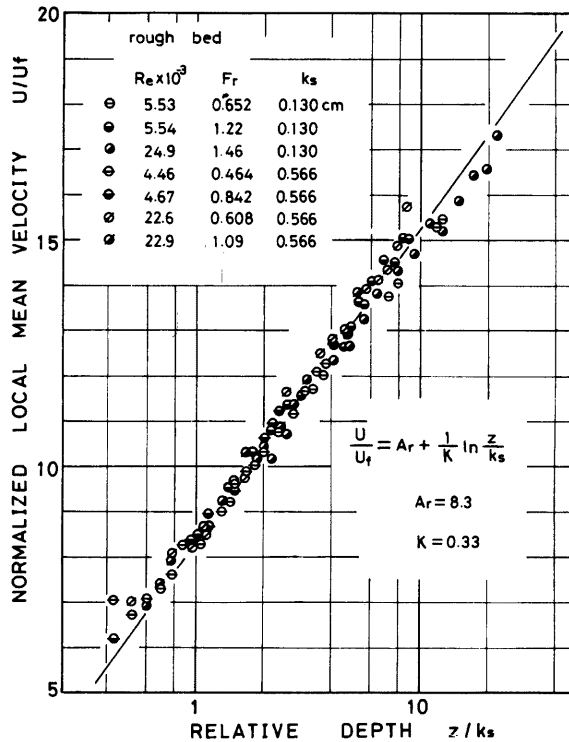


Fig. 3(b). Examples of mean velocity profiles over a rough bed.

点の設定誤差が若干大きいと予測されることおよび粗面においては上層と異なる速度分布形となること、さらに自由表面近傍では水面変動による影響が含まれると予測されるため、採用した計測値は相対水深が $0.2 < z/H < 0.8$ の領域のものに限られている。

まず、カルマン定数 κ とフルード数 $Fr (= U_m / \sqrt{gH})$ (U_m : 水路中央部での断面平均速度) との関係を示すと Fig. 4 のようになる。計測値に若干のばらつきがあるものの、滑面上の流れあるいは粗面上の流れのいずれにおいても、 κ は Fr に関係なくほぼ一定とみなすことができるようであり、図より $\kappa = 0.33$ と推定される。なお、粗面上の流れにおける積分定数を $A_r = 8.5$ として κ を算定した福岡ら¹⁵⁾と同様にして κ を評価すると、 $Fr = 1$ 付近で κ が極少となる傾向がうかがわれるが、Fig. 4(b) に比べ計測値のばらつきがかなり大きくなることを考慮すると、 κ を独立に評価した方がより妥当と考えられる。

一方、滑面上の流れに関する積分定数 A_s あるいは粗面上の流れに関する A_r とフルード数 Fr との関係を示したものが Fig. 5 である。従来より、 A_s あるいは A_r は射流において Fr とともに減少する^{14), 16)}とされてきたが、いずれにおいてもそのような傾向は顕著ではなく、むしろ A_s あるいは A_r も Fr に関係なくそれぞれ一定となつた方がより妥当のようである。しかし、その一定値は管路における値とは異な

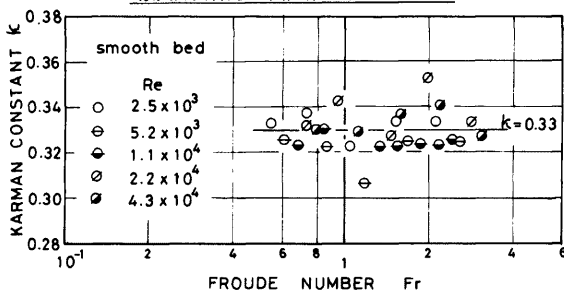


Fig. 4(a). Kármán constant over a smooth bed.

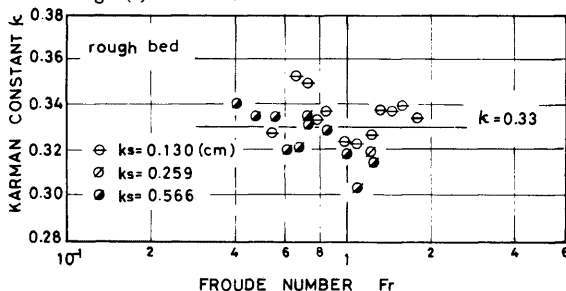


Fig. 4(b). Kármán constant over a rough bed.

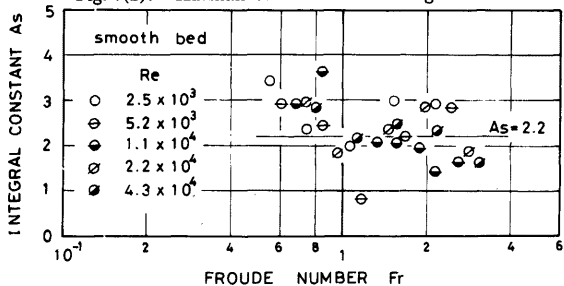


Fig. 5(a). Integral constant over a smooth bed.

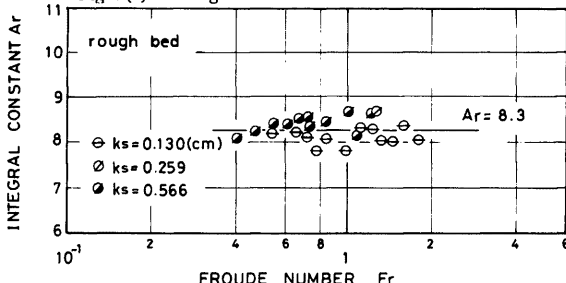


Fig. 5(b). Integral constant over a rough bed.

り、 $A_s=2.2$ 、 $A_r=8.3$ と推定される。なお、 A_s の計測値のばらつきは A_r に比べて若干大きい、これは、滑面上の流れに関する F_r が小さな実験ケースでは路床勾配が他のものに比べて比較的ゆるやか($I_b=1/800$)であること、 F_r が大きな実験ケースでは速度そのものが非常に大きくまた水面変動が著しいことなどに基づく計測誤差と考えられる。

以上のように、カルマン定数あるいは積分定数はフルード数に関係なくそれぞれ一定となるとともに、その一定値は管路における値とは必ずしも一致しないことが知れるが、カルマン定数あるいは積分定数の値そのものについては、計測精度あるいは粗面上の流れにおける粗度高の評価法および路床基準面のとり方などに関する問題点があり、さらに詳細な検討が必要である。

4. 乱れ特性量の鉛直分布特性

4.1 乱れ特性量の評価法

乱れ特性量を実験的に検討する場合、その評価法が重要な問題となる。すなわち、開水路流れの乱流場は多重構造的であって、計測スケールの選定、とくに平均値評価時間の選定には十分の考慮を払う必要がある、さらに乱れ特性量の解析にあたっては、できるだけ計測スケールに支配されない解析法を用いねばならない。例えば、相関係数は平均値評価時間により大きく変化するため、平均スケールを相関係数の積分により評価する方法は適切とはいえない。また、エネルギー逸散率をエネルギー・スペクトルの積分により評価するDryden¹⁷⁾の方法は、単一構造的な乱れに有効であって、開水路流れのような多重構造的な乱れには適用されない。したがって、本研究においては次のような方法により乱れ特性量を評価している。

一般に、開水路流れの乱流構造を支配する現象としてバースト現象が挙げられ¹⁸⁾、平均スケールはバーストの発生周期に関係すると推測される。Fig. 6は、水路幅・水深比が十分大きい場合のバーストの発生周期 T_d と平均スケール T_E との関係を示したものであって、 T_d は半水深付近における速度変動記録の卓越周期より算定され、 T_E は平均値評価時間を適切にした場合の相関係数、あるいは水深スケールの乱れに支配されるスペクトルが計測スペクトルより分離される場合の生成領域のスペクトルより算定されている。図において、 T_d と T_E とは比較的良好一致を示しており、平均スケール T_E はバーストの発生周期 T_d

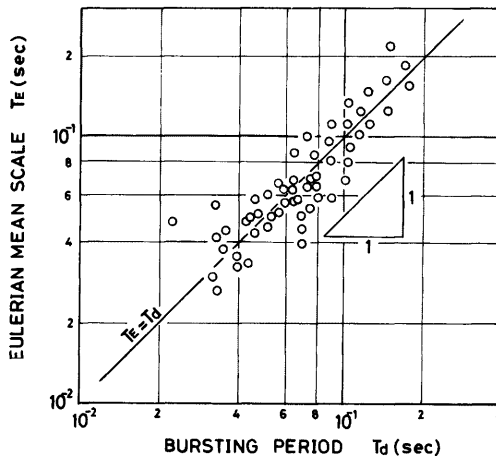


Fig. 6. Comparison of Eulerian mean scale with average period of bursting.

に一致するとみなされることが知れる。さらに、 T_d は相関係数の減衰過程で生ずる second mild maximum の発生遅れ時間からも算定されるため¹⁸⁾、本研究においては相関係数より T_d を読取り、繰返し計測された相関係数ごとに読取られた T_d の平均値より T_E を評価している。

一方、エネルギー逸散率 ϵ は、平均値評価時間と瞬間値評価時間との比が十分に大きい場合、計測スペクトルには計測スケールに影響されない領域が存在することより、水深スケールの乱れに支配されるエネルギー・スペクトルの慣性領域に Kolmogorov¹⁹⁾ の $-5/3$ 乗則を適用し、次式により評価している。すなわち、

$$S(f) = S_\epsilon \left(\frac{U\epsilon}{2\pi} \right)^{2/3} f^{-5/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 f は周波数、 S_ϵ は慣性領域のスペクトル定数であって、 $S_\epsilon = 0.47$ を用いている。

また、乱れの強さ u' に対する計測スケールの効果はそれほど顕著ではないため、本研究では平均値評価時間を T_E の 10^2 倍程度としたときの速度変動の r.m.s. より u' を算定している。

さらに、乱れの強さ u' 、平均スケール T_E およびエネルギー逸散率 ϵ を用いると、その他の乱れ特性量、例えば Taylor¹⁾ の逸散スケール λ 、Kolmogorov¹⁹⁾ の局所的スケール l 、ラグランジュ的平均スケール T_L および乱流拡散係数 D が次の関係式より算定される。

まず、Taylor の逸散スケール λ については

$$\lambda = \left(15 \nu \frac{u'^2}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、Kolmogorov の局所的スケール l は、

$$l = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と定義される。

さらに、ラグランジュ的平均スケール T_L は、Hay および Pasquill²⁰⁾ の関係式によりオイラー的平均スケール T_E と関係づけられ、 u' が U に比し小さい場合、

$$T_L = \alpha \frac{U}{u'} T_E \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表される。ここに、 α は比例定数であって、通常、 $\alpha = 0.41 \sim 0.47$ が用いられている^{21)~24)}。

一方、乱流拡散係数 D は拡散時間が十分大きい場合、

$$D = u'^2 T_L \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

4.2 乱れ特性量の普遍関数表示

乱れ特性量の普遍関数表示法としては、従来より2種の方法が提案されているが、既報^{4),5)}において示したように、局所的平均速度・摩擦速度比 U/U_f を考慮した表示法の方がより妥当であるとされている。すなわち、各種乱れ特性量は次のように普遍関数表示される。

$$\frac{u'}{U_f(U/U_f)^{1/3}} = \phi_w \left(\frac{z}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{T_E}{H/U_f} = \phi_{TE} \left(\frac{z}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\epsilon}{U_f^3/H} = \phi_\epsilon \left(\frac{z}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\lambda}{H(U_f H/\nu)^{-1/2}(U/U_f)^{1/3}} = \phi_\lambda \left(\frac{z}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{l}{H(U_f H/\nu)^{-3/4}} = \phi_l \left(\frac{z}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{T_L}{(H/U_f)(U/U_f)^{2/3}} = \phi_{TL}\left(\frac{z}{H}\right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{D}{U_f H (U/U_f)^{4/3}} = \phi_D\left(\frac{z}{H}\right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 ϕ は相対水深 z/H のみの関数である。

以上のような乱れ特性量の普遍関数表示式における関数形を、計測値に基づき決定すると次のようになる。ただし、本研究では定常等流状態の2次元開水路流れを対象としているため、2. の結果より水路幅・水深比は最低10程度とされており、また 3. で得られたようにカルマン定数が必ずしも管路における0.4と一致しないことを考慮して、摩擦速度は水深および路床勾配より算定されたものが用いられている。

(1) 乱れの強さ： u'

Fig. 7 は、乱れの強さ u' を摩擦速度 U_f および局所平均速度・摩擦速度比 U/U_f を用いて無次元化した $u'/U_f (U/U_f)^{1/3}$ を相対水深 z/H に対して示したものであって、一般に u' は路面近傍ほど大きくなる傾向がある。なお、本実験における計測点の路床面からの距離 z の有効最小値は計測プローブの大きさから0.1cm程度と考えられ、 $U_f z/\nu=15$ 付近において u' が最大となるという Laufer²⁵⁾あるいは Schu-bauer²⁶⁾らの提案結果を検討することは困難である。

また、図において、水理条件による計測値の差異は顕著ではなく、(9)式による普遍関数表示法の妥当性がうかがわれ、図より普遍関数 ϕ_w を決定すると次のようである。なお、 $u'/U_f (U/U_f)^{1/3}$ は相対水深 $z/H=0.6$ 付近を境にして異なる減少傾向を示しているため、それぞれの領域において異なる関数形を用いることとする。すなわち、相対水深が $0.1 < z/H < 0.6$ の領域では、 $u'/U_f (U/U_f)^{1/3}$ は z/H の増加とともに比較的ゆるやかに減少しており、 $u'/U_f (U/U_f)^{1/3}$ は z/H の $-1/3$ 乗に比例すると近似され、その比例定数は0.42程度と推定される。また、 $0.6 < z/H < 0.9$ の領域では、 $u'/U_f (U/U_f)^{1/3}$ はさらに急激な減少傾向を示しており、 $u'/U_f (U/U_f)^{1/3}$ は z/H の $-2/3$ 乗に比例するようであって、その比例定数は0.35程度と推定される。以上の結果を後述の各種乱れ特性量に関する普遍関数形も含めて示すと Table 1 のように

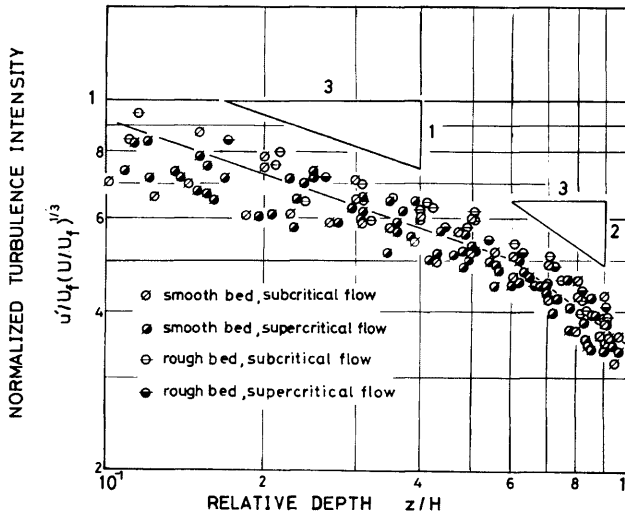


Fig. 7. Turbulence intensity in form of universal function.

Table 1. Universal functions of turbulence properties.

TURBULENCE PROPERTIES	$0.1 < z/H < 0.6$	$0.6 < z/H < 0.9$
TURBULENCE INTENSITY	$\frac{u'}{U_f(U/U_f)^{1/3}} = 0.42 \left(\frac{z}{H}\right)^{-1/3}$	$\frac{u'}{U_f(U/U_f)^{1/3}} = 0.35 \left(\frac{z}{H}\right)^{-2/3}$
EULERIAN MEAN SCALE	$\frac{T_E}{H/U_f} = 0.115$	$\frac{T_E}{H/U_f} = 0.115$
ENERGY DISSIPATION RATE	$\frac{\epsilon}{U_f^3/H} = 1.1 \left(\frac{z}{H}\right)^{-1}$	$\frac{\epsilon}{U_f^3/H} = 0.63 \left(\frac{z}{H}\right)^{-2}$
TAYLOR'S DISSIPATION SCALE	$\frac{\lambda}{H(U_f H/\nu)^{-1/2}(U/U_f)^{1/3}} = 1.55 \left(\frac{z}{H}\right)^{1/6}$	$\frac{\lambda}{H(U_f H/\nu)^{-1/2}(U/U_f)^{1/3}} = 1.71 \left(\frac{z}{H}\right)^{1/3}$
KOLMOGOROV'S LOCAL SCALE	$\frac{l}{H(U_f H/\nu)^{-3/4}} = 1.00 \left(\frac{z}{H}\right)^{1/4}$	$\frac{l}{H(U_f H/\nu)^{-3/4}} = 1.12 \left(\frac{z}{H}\right)^{1/2}$
LAGRANGIAN MEAN SCALE	$\frac{T_L}{(H/U_f)(U/U_f)^{2/3}} = 0.120 \left(\frac{z}{H}\right)^{1/3}$	$\frac{T_L}{(H/U_f)(U/U_f)^{2/3}} = 0.145 \left(\frac{z}{H}\right)^{2/3}$
TURBULENT DIFFUSION COEFFICIENT	$\frac{D}{U_f H(U/U_f)^{4/3}} = 0.022 \left(\frac{z}{H}\right)^{-1/3}$	$\frac{D}{U_f H(U/U_f)^{4/3}} = 0.018 \left(\frac{z}{H}\right)^{-2/3}$

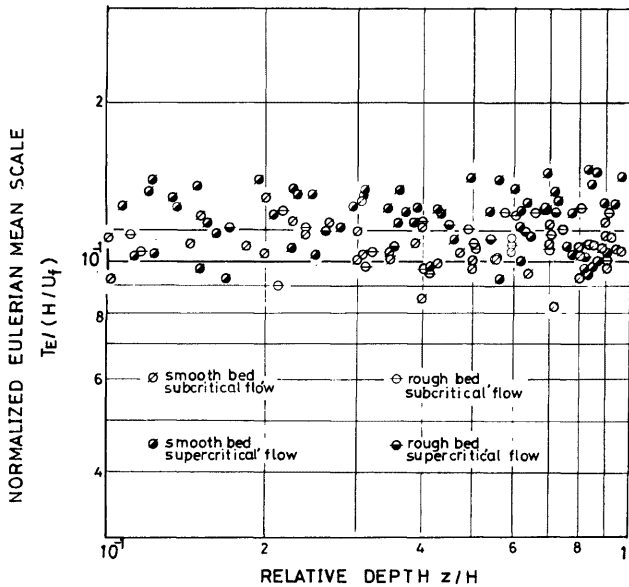


Fig. 8. Eulerian mean scale in form of universal function.

なり、従来の提案式^{5),27)}と比較して比例定数は若干大きいようであるが、これは摩擦速度 U_f の評価法の相異に基づくものである。

(2) 平均スケール： T_E

Fig. 8 は、平均スケール T_E を水深 H と摩擦速度 U_f との比 H/U_f で無次元化した $T_E/(H/U_f)$ を相対水深 z/H に対して図示したものであって、 $T_E/(H/U_f)$ については、 u' の場合とは異なり、 z/H による変化特性は認められず、 $T_E/(H/U_f)$ は一定となっている。これは、平均スケール T_E がバーストに支配されることおよび任意の高さにおけるバーストの通過周期は高さに関係しないことより推測されたことと一致しており、乱流構造に及ぼすバースト現象の重要性が知れる。なお、図において、計測値のばらつきは比較的小さく、(10) 式による普遍関数表示法の妥当性が確かめられるとともに、 $T_E/(H/U_f)$ の一定値を推定すると 0.115 程度となる。また、凍結乱流の仮定²⁸⁾を用いて T_E より得られる空間的平均スケール $L_E(=UT_E, U$: 局所平均速度) は、水深 H のほぼ 2 倍程度の大きさであり、Velikanov²⁹⁾ の提案した 1.4 倍よりは若干大きいようである。

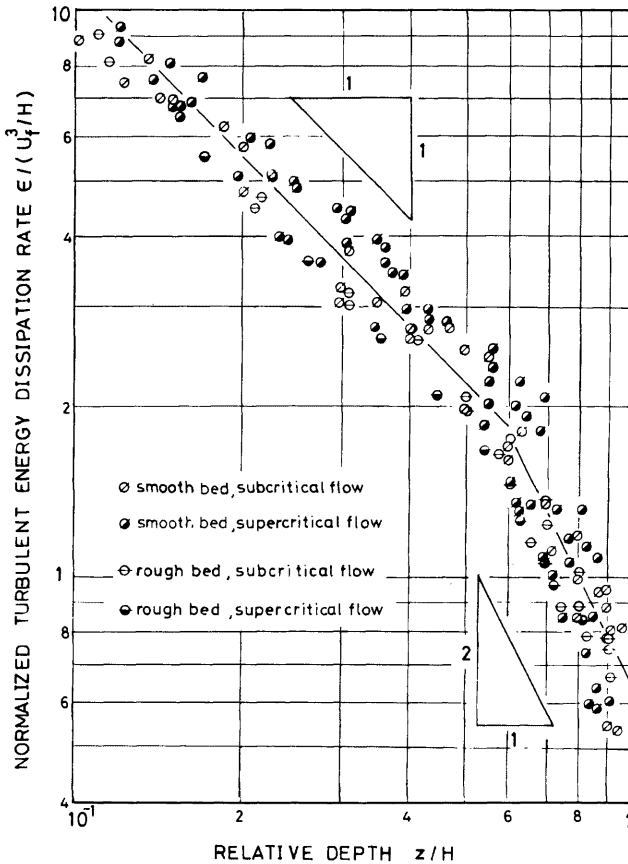


Fig. 9. Turbulent energy dissipation rate in form of universal function.

(3) エネルギー逸散率: ϵ

Fig. 9 は, エネルギー逸散率 ϵ を U_f^3/H で無次元化して示したものであって, $\epsilon/(U_f^3/H)$ と相対水深 z/H との関係は水理条件にあまり関係なく, (11) 式で示された普遍関数表示法の妥当性が確かめられるとともに, u' の場合と同様, $\epsilon/(U_f^3/H)$ は $z/H=0.6$ 付近を境として異なる減少傾向を示すことが知れる。すなわち, $0.1 < z/H < 0.6$ の領域で $\epsilon/(U_f^3/H)$ は z/H の -1 乗に比例して減少しているが, $0.6 < z/H < 0.9$ の領域では -2 乗に比例して減少している。なお, 比例定数は, $0.1 < z/H < 0.6$ に対して 1.1, $0.6 < z/H < 0.9$ に対して 0.63 程度と推定され, Table 1 に示されたような普遍関数形が得られる。

このようにして決定された普遍関数に基づき, エネルギー逸散率 ϵ と生成率 P との関係を検討すると次のようになる。

エネルギー生成率 P は, 対数速度分布則を用いると, 次式によって表される。すなわち,

$$P = -\overline{uw} \frac{dU}{dz} = \frac{1}{\kappa} \frac{U_f^3}{H} \left(\frac{H}{z} - 1 \right) \quad \text{i.e.} \quad \frac{P}{U_f^3/H} = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{H}{z} - 1 \right) \quad (16)$$

いま, カルマン定数として 3. の結果を用いて $\kappa=0.33$ とすると, 相対水深が $z/H=0.6$ 付近において, $\epsilon \approx P$ が成立し, 路床面側では $\epsilon < P$, 自由表面側では $\epsilon > P$ となることが知れる。さらに, 拡散率を D_f とすると, Kármán³⁰⁾あるいは Laufer^{25), 31)}らにより示されたように, 路床面近傍を除くと,

$$P \approx \epsilon + D_f \quad (17)$$

と表されるから, 拡散率 D_f は, $z/H=0.6$ 付近を境に, 路床面側で正, 自由表面側で負となり, 乱れエ

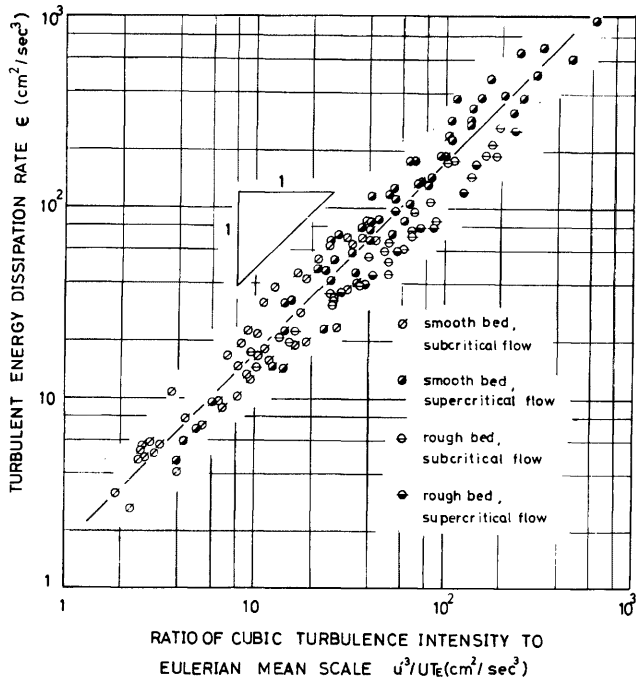


Fig. 10. Relation between turbulence intensity, Eulerian mean scale and turbulent energy dissipation rate.

エネルギーは路床面近傍より自由表面近傍へ向って若干拡散されていくことが知れる。

さらに、以上の3種の基本的乱れ特性量、すなわち、乱れの強さ u' 、平均スケール T_E およびエネルギー-逸散率 ϵ の間の関係を検討すると Fig. 10 のようになる。図は、エネルギー-逸散率 ϵ を乱れの強さの3乗と局所的平均速度および平均スケールの積との比 u'^3/UT_E に対して示したものであって、両者の比例関係が確認されるとともに、その比例定数は、水理条件あるいは相対水深に関係なく、1.7 程度と推定される。したがって、Taylor¹⁾の関係式は次のようになる。

$$\epsilon = 1.7 \frac{u'^3}{UT_E} \quad \dots\dots\dots(18)$$

なお、(18) 式は、Table 1 に示された u' 、 T_E および ϵ に関する普遍関数形からも導かれるとともに、慣性領域のエネルギー・スペクトル $S(f)$ の特性からも推定される。すなわち、慣性領域における $S(f)$ は次のように近似される³²⁾。

$$S(f) = \frac{4u'^2 T_E}{(1+6T_E f)^{5/3}} \quad \dots\dots\dots(19)$$

したがって、(4) 式と (19) 式を用いると (18) 式と同様の関係式が導かれる。ただし、この場合、比例定数は 1.77 となる。

(4) Taylor の逸散スケール： λ

Taylor の逸散スケール λ を (5) 式より算定し、(12) 式に基づき、 H 、 U 、 U_f および動粘性係数 ν を用いて無次元化して示すと Fig. 11 のようになる。無次元化逸散スケール $\lambda/H(U_f H/\nu)^{-1/2}(U/U_f)^{1/3}$ は、自由表面近傍ほど大きく、 $0.1 < z/H < 0.6$ で z/H の 1/6 乗に、 $0.6 < z/H < 0.9$ で 1/3 乗に比例して増加するとして差支えなく、また比例定数はそれぞれの領域で 1.55 および 1.71 と推定され、Table 1 のような普遍関数形が得られる。

(5) Kolmogorov の局所的スケール： l

Fig. 12 は、(6) 式により算定した Kolmogorov の局所的スケール l を、(13) 式に従って無次元化し

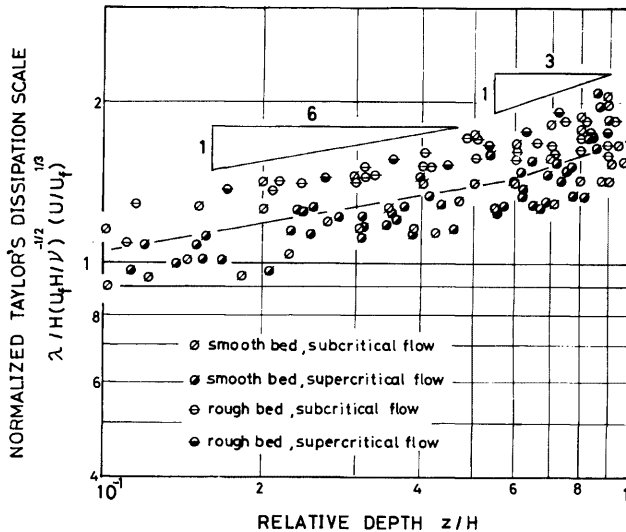


Fig. 11. Taylor's dissipation scale in form of universal function.

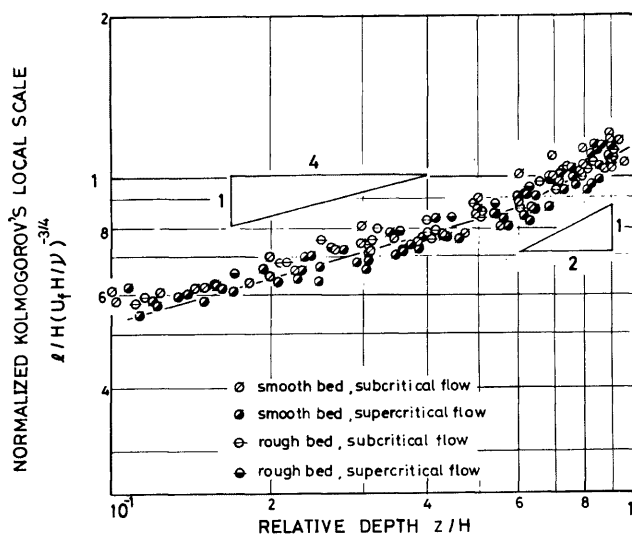


Fig. 12. Kolmogorov's local scale in form of universal function.

て示したものであって、無次元化局所的スケール $l / (U_f H / \nu)^{-3/4}$ についても、(6) 式およびエネルギー逸散率 ϵ の特性より知れるように、 $0.1 < z/H < 0.6$ で z/H の $1/4$ 乗に、 $0.6 < z/H < 0.9$ で $1/2$ 乗に比例する傾向が認められるとともに、比例定数として 1.00 および 1.12 が得られ、Table 1 のような普遍関数形が得られる。なお、図に示された l の計測値のばらつきは他の乱れ特性量に比してかなり小さいが、これは l が (6) 式に示されるように ϵ のみによってほぼ決定されるとともに、 ϵ の指数が $-1/4$ ということに由来している。また、粘性逸散の90%は $15l$ 以下の渦において行われる³⁹⁾から、 l あるいは上述の λ が路床面近傍ほど小さいということは、路床面近傍ほどより小さなスケールの乱れで粘性逸散が行われていることを意味しており、さらに、 ϵ の特性を考慮すると、路床面近傍ほど粘性逸散は著しいことになる。

(6) ラグランジュ的平均スケール: T_L

Fig. 13 は、Hay および Pasquill²⁰⁾ の関係式 (7) において $\alpha=0.45$ として算定したラグランジュ的平均スケール T_L を示したものであって、 T_L は (14) 式に示されたように H , U および U_f を用いて無次元化されている。図において、 $T_L / (H/U_f) (U/U_f)^{2/3}$ は、 $0.1 < z/H < 0.6$ で z/H の $1/3$ 乗に比例して増加するとともに、 $0.6 < z/H < 0.9$ で z/H の $2/3$ 乗に比例して増加しており、Table 1 に示されるように、0.120 および 0.145 を比例定数とする普遍関数形が得られる。なお、 T_L は路床面近傍ほど小さく、 T_E および λ , l の特性を考慮すると、バーストにより生成された渦は、路床面近傍ほど早く、さらに小さな渦にまで崩壊していくと推測される。

(7) 乱流拡散係数: D

乱れの強さ u' およびラグランジュ的平均スケール T_L より (8) 式を用いて乱流拡散係数 D を算定すると、Fig. 14 のようになる。無次元化乱流拡散係数 $D/U_f H (U/U_f)^{4/3}$ についても、 $0.1 < z/H < 0.6$ で z/H の $-1/3$ 乗に、 $0.6 < z/H < 0.9$ で $-2/3$ 乗に比例する傾向が認められ、 u' および T_L の普遍関数式を (8) 式に用いて得られる普遍関数形の妥当性が確かめられるとともに、その比例定数についても Table

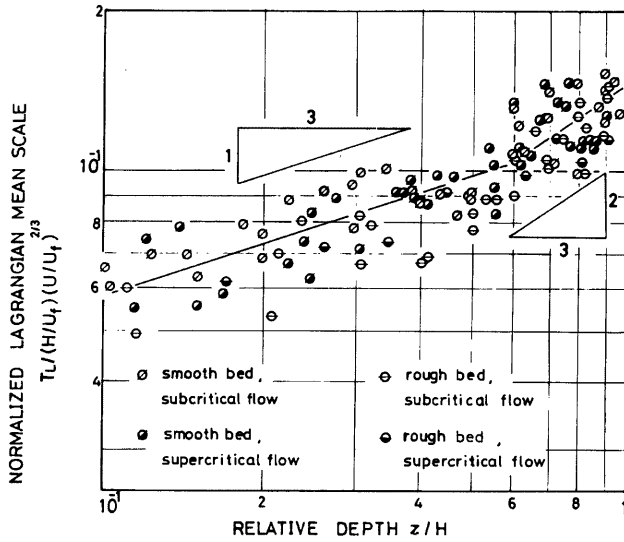


Fig. 13. Lagrangian mean scale in form of universal function.

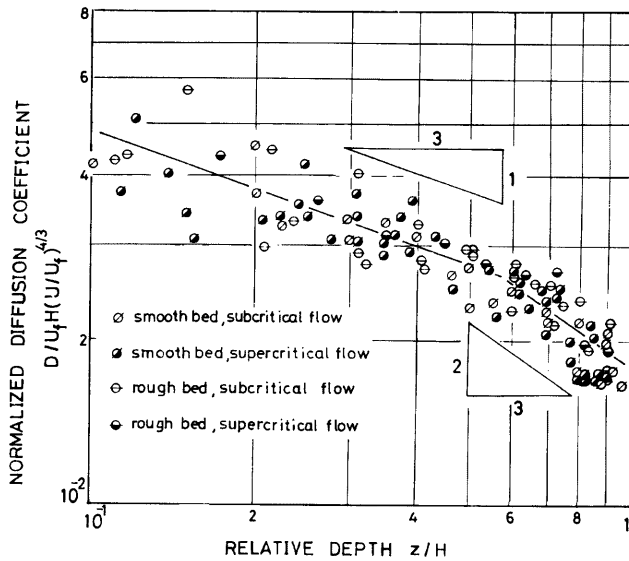


Fig. 14. Turbulent dissipation coefficient in form of universal function.

1 のように 0.022 および 0.018 とされることが知れる。また、局所平均速度・摩擦速度比 U/U_f を考慮しても、 D は 路床面近傍ほど若干大きく、乱流拡散現象は路床面近傍の方が著しいことになる。さらに、図より、一般に D は $U_f H$ 程度の大きさであることが知れるが、この値は渦動粘性係数より D を推定した Elder³⁴⁾ の断面平均的な値 $D/U_f H = 0.068$ と比べるとかなり大きいようである。

以上のように、種々の乱れ特性量の鉛直分布に対する普遍関数形が決定されたが、実験定数についてはさらに高精度の実験により検討する必要がある。なお、本研究に用いた乱れ特性量に関する計測値は付録に示されているとおりである。

5. おわりに

本研究は、2次元開水路流れにおける平均速度および乱れ特性量の鉛直分布について実験的検討を行ったものであって、種々の無次元化に用いられている摩擦速度は力学的釣合い条件より評価されている。

本研究によって得られた主な結果を列挙すると次のようである。

1) 水路中央部における流れが2次元のとみなされるためには、水路幅・水深比が少なくとも10程度以上であることが望ましく、2次元流れにおいては、路床面に極めて近い領域を除き、平均速度分布には対数則が適用され、またレイノルズ応力は自由表面上で0、路床面上で摩擦速度の2乗となる直線分布に従っている。

2) 2次元開水路流れにおける平均速度分布に対数則を適用した場合、カルマン定数 κ および積分定数 A_s あるいは A_r は、水理条件、すなわち、レイノルズ数、フルード数および相対粗度高に関係なく、それぞれ一定とみなされる。しかし、その値は管路におけるものとは若干異なり、本実験結果からは、

$$\kappa = 0.33$$

$$A_s = 2.2, A_r = 8.3$$

と推定される。

3) 開水路流れにおいては、摩擦速度を平均速度勾配およびカルマン定数 $\kappa = 0.4$ より評価する方法は不適当であり、むしろ定常・等流条件が満足されている場合には力学的釣合い条件、すなわち、 $\sqrt{g H I_b}$ (g : 重力加速度、 H : 水深、 I_b : 路床勾配) より摩擦速度を評価した方が妥当なようである。

4) レイノルズ数相似則に基づき、乱れの強さ、平均スケール、エネルギー逸散率、Taylor の逸散スケール、Kolmogorov の局所的スケール、ラグランジュ的平均スケールおよび乱流拡散係数は、それぞれ、水深、摩擦速度および局所平均速度・摩擦速度比を用いて普遍関数表示されることが確認され、さらにその関数形が決定された。

5) 乱れの強さ、平均スケールおよびエネルギー逸散率の間の関係式として Taylor の提案したものの妥当性が確かめられ、その比例定数としては 1.7 が得られた。

なお、実験定数についてはさらに検討が必要である。

以上が本研究によって得られたおもな結果であるが、計測の困難性より本研究では検討されなかった路床面あるいは自由表面に極めて近い領域における諸特性については、今後の研究に期待されるところが大きい。また、本研究においては、ラグランジュ的平均スケールおよび乱流拡散係数を乱れの強さ、平均スケールおよび局所平均速度より算定しているが、これらの乱れ特性量を直接計測して検討することも必要であろう。

参 考 文 献

- 1) Taylor, G.I.: Statistical theory of turbulence, Parts I-IV, Proc. Roy. Soc., A151, 1935, pp. 421-478.
- 2) Monin, A.S. and A.M. Obukhov: Basic regularity in turbulent mixing in the surface layer

- of the atmosphere, *Trudy Geophys. Inst. ANSSSR*, 24, 1954.
- 3) Engelund, F.: Dispersion of floating particles in uniform channel flow, *Jour. Hydr. Div., Proc. ASCE*, 95, HY4, 1969, pp. 1149-1162.
- 4) 今本博健：開水路流れにおける乱れ特性量の普遍関数表示について，京都大学防災研究所年報，14B, 1971, pp. 189-203.
- 5) 今本博健，浅野富夫：開水路流れにおける乱れの普遍的特性について，第19回水理講演会論文集，土木学会水理委員会，1975, pp. 161-166.
- 6) 浅野富夫，今本博健，石垣泰輔：開水路流れにおける乱れの多重構造的性について，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，II-217, 1976, pp. 398-399.
- 7) Rajaratnam, N. and D. Muralidhar: Boundary shear stress distribution in rectangular open channels, *La Houille Blanche*, 1969-6, 1969, pp. 603-609.
- 8) Blasius, H.: Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten, *Forschungsheft*, 131, Berlin, 1913.
- 9) Prandtl, L.: Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz, *Za.M.M.*, 5, 1925.
- 10) Kármán, Th. von: Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz, *Nachb. Gessels. Wiss. Göttingen, Math-Phy. Kl.*, Heft 1, 1930.
- 11) 伊藤紘慶，足立昭平：球状粗度の実験的研究，土木学会第23回年次講演会概要集，1968.
- 12) 芦田和男，大同淳之，高橋保，水山高久：急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究，京都大学防災研究所年報，16B, 1973, pp. 481-494.
- 13) Nikuradse, J.: Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren, *VDI Forschungsheft*, 356, 1932.
- 14) 岩垣雄一：滑面開水路における乱流の抵抗法則について——薄層流に関する研究（第4報）——，土木学会論文集，16, 1953, pp. 22-28.
- 15) Fukuoka, S. and H. Kikkawa: Characteristics of open-channel flow with sediment, Technical Report, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, 10, 1971, pp. 99-173.
- 16) Iwagaki, Y.: On the laws of resistance to turbulent flow in open channels, *Proc. of 2nd Japan NCTAM*, 1952.
- 17) Dryden, H.L.: A review of the statistical theory of turbulence, *Quart. Appl. Math.*, Providence, R.I., 1, 1943, pp. 7-42.
- 18) Kim, H.T., S.J. Kline and W.C. Reynolds: The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer, *Jour. Fluid Mech.*, 50-1, 1971, pp. 133-160.
- 19) Kolmogorov, A.N.: Dissipation of energy in locally isotropic turbulence, *Comptes Rendus (Doklady) de l'Academie des Sciences de l'U.R.S.S.*, 32, 1941, pp. 16-18.
- 20) Hay, J.S. and F. Pasquill: Diffusion from a fixed source at a height of a few hundred feet in the atmosphere, *Jour. Fluid Mech.*, 2, 1957, pp. 229-310.
- 21) Wandel, C.F. and O. Kofoed-Hansen: On the Eulerian-Lagrangian transform in the statistical theory of turbulence, *Jour. Geophy. Res.*, 67, 1962.
- 22) 余越正一郎：乱れの Lagrange 的特性について，農業土木学会講演会講演集，1969.
- 23) Iwasa, Y. and H. Imamoto: Dispersive characteristics of free surface flow in terms of Lagrangian descriptions, *Proc. 14th Congr., IAHR*, Paris, 1971.
- 24) 今本博健，浅野富夫，佐々木健：開水路流れにおける乱れの時空間構造について，土木学会第30回年

- 次学術講演会講演概要集, II-200, 1975, pp. 418-419.
- 25) Laufer, J.: The structure of turbulence in fully developed pipe flow, NACA Rep. 1174, 1954.
- 26) Schubauer, G.B.: Turbulent processes as observed in boundary layer and pipe, Jour. Applied Physics, 25, 1954, pp. 188-196.
- 27) Imamoto, H.: Universal representation of turbulence characteristics in free surface shear flow, Proc. 16th Congr., IAHR, São Paulo, 1975.
- 28) Taylor, G.I.: The spectrum of turbulence, Proc. Roy. Soc., A164, 1938, pp. 476-490.
- 29) Velikanov, M.A.: Large-scale turbulence and structure of the river-bed process, Izv. Akad. Nauk, SSSR (geo. ser.), 1, 1957.
- 30) Kármán, Th. von: The fundamentals of the statistical theory of turbulence, Jour. Aero. Sci., 4-4, 1937, pp. 131-138.
- 31) Laufer, J.: Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel, NACA Rep. 1053, 1951.
- 32) Pasquill, F. and H.E. Butler: A note on determining the scale of turbulence, Quart. Jour. Roy. Met. Soc., 90, 1964, pp. 79-84.
- 33) MacCredy, P.B.: The inertial subrange of atmospheric turbulence, J. Geophys. Rev. 67, 1962.
- 34) Elder, J.W.: The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, Jour. Fluid Mech., 5, 1959, pp. 544-560.

付 録

本研究に用いた乱れ特性量に関する実験の水理条件は **Table 2** のようであって, 各実験ケースにおける計測値は **Table 3~16** に示されているとおりである。

Table 2. Hydraulic conditions.

case	$H(\text{cm})$	B/H	U_m (cm/sec)	U_f (cm/sec)	ν (cm^2/sec)	R_e	F_r	k_s/H
S-1	1.61	24.8	31.2	1.99	1.17×10^{-2}	4.29×10^3	0.785	smooth
S-2	2.44	16.4	40.8	2.45	9.86×10^{-3}	1.01×10^4	0.834	smooth
S-3	3.84	10.4	52.2	3.86	1.17×10^{-2}	1.71×10^4	0.851	smooth
S-4	1.78	22.5	61.5	3.51	1.10×10^{-2}	9.91×10^3	1.47	smooth
S-5	1.62	24.7	67.8	3.98	1.10×10^{-2}	9.96×10^3	1.70	smooth
S-6	1.49	26.8	66.1	3.82	9.75×10^{-3}	1.01×10^4	1.73	smooth
S-7	1.45	27.6	75.8	4.48	1.10×10^{-2}	9.99×10^3	2.01	smooth
S-8	0.83	48.2	66.1	4.04	1.10×10^{-2}	5.02×10^3	2.31	smooth
S-9	1.29	31.0	85.0	5.03	1.10×10^{-2}	1.00×10^4	2.39	smooth
S-10	2.00	20.0	110.7	6.26	1.10×10^{-2}	2.01×10^4	2.50	smooth
R-1	3.86	10.4	52.2	6.88	1.14×10^{-2}	1.77×10^4	0.849	0.396
R-2	3.97	10.1	54.9	4.21	1.16×10^{-2}	1.88×10^4	0.880	0.0496
R-3	3.91	10.2	55.1	4.49	1.15×10^{-2}	1.87×10^4	0.890	0.0716
R-4	3.87	10.3	62.0	5.62	1.15×10^{-2}	2.09×10^4	1.01	0.194

$$U_m = Q/BH \quad (Q: \text{discharge}), \quad R_e = U_m H / \nu, \quad F_r = U_m / \sqrt{gH}$$

Table 3. Turbulence properties in case S-1.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.900	38.16	2.00	0.0958	2.66	0.514	0.0279	0.823	3.29
0.800	37.51	2.23	0.0750	4.13	0.460	0.0250	0.568	2.82
0.700	36.27	2.17	0.0948	5.10	0.403	0.0237	0.713	3.35
0.600	35.47	2.39	0.0896	7.84	0.358	0.0213	0.598	3.42
0.500	33.36	2.60	0.0813	9.65	0.351	0.0202	0.469	3.17
0.400	31.47	3.00	0.0938	13.3	0.345	0.0186	0.443	3.99
0.300	31.20	3.23	0.0917	15.6	0.343	0.0179	0.399	4.16
0.200	27.33	3.70	0.106	27.8	0.294	0.0155	0.352	4.82
0.150	26.86	4.10	0.0979	33.7	0.296	0.0148	0.289	4.85

Table 4. Turbulence properties in case S-2.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.963	50.12	2.40	0.103	4.87	0.418	0.0211	0.963	5.55
0.922	52.99	2.42	0.110	4.80	0.425	0.0211	1.08	6.35
0.881	54.10	2.45	0.105	5.60	0.398	0.0203	1.04	6.26
0.799	52.96	2.51	0.105	5.93	0.396	0.0201	0.997	6.28
0.553	49.20	3.43	0.101	14.7	0.344	0.0160	0.654	7.69
0.471	48.17	3.72	0.103	16.5	0.352	0.0155	0.601	8.31
0.389	46.48	3.50	0.108	19.0	0.309	0.0150	0.646	7.91
0.348	43.54	3.65	0.100	18.2	0.329	0.0151	0.688	9.16
0.307	41.20	3.65	0.128	22.5	0.296	0.0144	0.651	8.67
0.266	39.54	3.61	0.118	21.4	0.300	0.0145	0.579	7.55
0.225	38.55	3.72	0.119	30.6	0.259	0.0133	0.554	7.67
0.184	39.88	3.78	0.106	37.4	0.238	0.0127	0.505	7.21
0.143	38.47	4.25	0.106	41.9	0.253	0.0123	0.433	7.82
0.123	38.29	4.03	0.102	44.8	0.232	0.0121	0.436	7.08
0.102	37.41	4.22	0.0919	52.9	0.223	0.0116	0.367	6.53

Table 5. Turbulence properties in case S-3.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.900	68.41	3.67	0.138	7.12	0.581	0.0220	1.16	15.6
0.800	66.93	3.87	0.128	8.92	0.547	0.0208	0.996	14.9
0.700	64.56	4.12	0.134	10.1	0.547	0.0202	0.945	16.0
0.600	62.12	4.21	0.130	12.7	0.499	0.0191	0.863	15.3
0.500	58.81	4.89	0.121	18.8	0.476	0.0173	0.655	15.7
0.400	58.84	4.91	0.106	19.6	0.468	0.0171	0.572	13.8
0.300	55.53	5.70	0.125	23.2	0.500	0.0164	0.548	17.8
0.200	50.80	5.82	0.129	36.0	0.410	0.0147	0.507	17.2

Table 6. Turbulence properties in case S-4.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.901	71.32	3.60	0.0531	14.8	0.380	0.0173	0.473	6.13
0.817	70.54	3.77	0.0495	32.1	0.270	0.0143	0.417	5.92
0.732	69.69	4.02	0.0651	31.9	0.289	0.0143	0.508	8.20
0.648	68.70	4.35	0.0563	46.6	0.259	0.0130	0.401	7.57
0.563	65.78	4.68	0.0469	57.1	0.252	0.0124	0.297	6.50
0.394	63.18	5.93	0.0635	72.6	0.283	0.0116	0.304	10.7
0.310	59.64	5.88	0.0521	105	0.233	0.0106	0.238	8.22
0.225	56.44	6.29	0.0531	142	0.215	0.00982	0.214	8.48
0.169	52.74	6.23	0.0469	184	0.187	0.00921	0.179	6.94
0.113	48.66	6.98	0.0511	271	0.172	0.00837	0.160	7.81

Table 7. Turbulence properties in case S-5.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.867	82.47	4.27	0.0405	22.9	0.363	0.0155	0.352	6.42
0.774	80.89	4.39	0.0412	41.4	0.277	0.0134	0.342	6.58
0.681	79.52	4.81	0.0506	70.4	0.233	0.0117	0.377	8.71
0.619	77.27	5.31	0.0469	78.1	0.244	0.0114	0.307	8.66
0.557	75.58	5.20	0.0412	86.5	0.227	0.0111	0.270	7.29
0.433	73.03	5.90	0.0500	110	0.229	0.0105	0.279	9.70
0.371	74.42	6.47	0.0500	135	0.226	0.00995	0.259	10.8
0.310	68.40	6.33	0.0546	172	0.196	0.00937	0.266	10.6
0.248	66.25	7.25	0.0538	231	0.194	0.00869	0.221	11.6

Table 8. Turbulence properties in case S-6.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.899	78.71	3.50	0.0500	28.6	0.250	0.0134	0.506	6.20
0.832	76.43	3.65	0.0581	43.1	0.212	0.0121	0.548	7.30
0.698	80.22	4.73	0.0575	78.9	0.203	0.0104	0.439	9.82
0.631	75.56	4.90	0.0500	82.5	0.206	0.0103	0.347	8.33
0.564	70.37	4.82	0.0550	94.6	0.189	0.00992	0.361	8.39
0.497	69.35	5.03	0.0563	65.5	0.237	0.0109	0.349	8.83
0.430	68.49	5.12	0.0488	110	0.187	0.00955	0.294	7.69
0.362	66.71	5.61	0.0531	143	0.179	0.00894	0.284	8.95
0.295	66.30	6.23	0.0500	165	0.185	0.00861	0.239	9.29
0.161	60.86	6.23	0.0438	257	0.149	0.00769	0.192	7.46
0.148	60.53	6.44	0.0538	253	0.155	0.00775	0.227	9.43
0.134	61.61	7.08	0.0513	306	0.155	0.00740	0.201	10.1
0.121	63.78	7.00	0.0550	351	0.143	0.00714	0.226	11.1
0.107	61.13	7.04	0.0500	251	0.170	0.00775	0.195	9.68

Table 9. Turbulence properties in case S-7.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.828	92.37	4.67	0.0313	45.5	0.281	0.0131	0.279	6.07
0.759	91.30	4.32	0.0344	52.6	0.242	0.0126	0.327	6.11
0.690	90.29	4.51	0.0406	66.8	0.224	0.0119	0.366	7.44
0.552	87.00	5.38	0.0331	126	0.172	0.0101	0.241	6.97
0.345	80.48	6.00	0.0406	172	0.186	0.00937	0.245	8.82
0.276	78.78	6.85	0.0375	223	0.186	0.00876	0.194	9.11
0.207	73.00	6.91	0.0394	371	0.146	0.00769	0.187	8.95
0.138	70.28	7.97	0.0406	468	0.150	0.00727	0.161	10.2

Table 10. Turbulence properties in case S-8.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.840	76.82	3.73	0.0288	47.5	0.220	0.0129	0.267	3.71
0.720	74.55	4.23	0.0281	78.3	0.194	0.0114	0.223	3.99
0.600	71.83	4.71	0.0281	117	0.177	0.0103	0.193	4.28
0.360	65.89	6.01	0.0244	283	0.145	0.00824	0.120	4.35
0.240	60.48	6.89	0.0234	311	0.159	0.00805	0.0925	4.39
0.120	51.39	7.86	0.0281	692	0.121	0.00660	0.0827	5.11

Table 11. Turbulence properties in case S-9.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.851	108.23	5.49	0.0250	84.4	0.243	0.0112	0.222	6.69
0.773	107.16	5.14	0.0313	116	0.194	0.0103	0.294	7.76
0.696	104.89	5.97	0.0313	105	0.237	0.0106	0.248	8.82
0.619	101.97	6.19	0.0313	135	0.216	0.00996	0.232	8.89
0.541	99.42	6.76	0.0313	182	0.203	0.00921	0.207	9.47
0.464	98.05	6.85	0.0281	281	0.166	0.00828	0.181	8.49
0.387	95.28	7.34	0.0303	338	0.162	0.00790	0.177	9.53
0.309	91.53	7.83	0.0335	376	0.164	0.00769	0.176	6.33
0.232	87.81	8.48	0.0345	395	0.173	0.00758	0.161	6.69
0.155	82.83	8.56	0.0303	648	0.137	0.00669	0.132	9.67

Table 12. Turbulence properties in case S-10.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.851	142.36	7.55	0.0344	77.8	0.348	0.0115	0.292	16.6
0.650	136.08	8.11	0.0368	164	0.258	0.00949	0.278	18.3
0.350	125.23	10.94	0.0334	483	0.202	0.00721	0.172	20.6
0.250	117.83	12.23	0.0326	596	0.204	0.00685	0.141	21.1
0.150	106.98	12.71	0.0307	970	0.166	0.00601	0.116	18.8

Table 13. Turbulence properties in case R-1.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.915	69.29	5.78	0.0698	55.7	0.320	0.0128	0.377	12.6
0.832	67.35	5.90	0.0604	65.8	0.301	0.0123	0.310	10.8
0.746	65.05	6.57	0.0646	74.4	0.315	0.0119	0.288	12.4
0.661	64.58	6.74	0.0688	95.9	0.285	0.0111	0.297	13.5
0.492	55.76	7.93	0.0646	141	0.276	0.0101	0.204	12.9
0.401	52.09	8.29	0.0667	185	0.252	0.00946	0.189	13.0
0.321	48.12	7.80	0.0583	212	0.222	0.00915	0.162	9.84
0.238	42.40	8.10	0.0646	263	0.207	0.00865	0.152	9.99

Table 14. Turbulence properties in case R-2.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.902	73.39	4.15	0.0948	14.6	0.453	0.0181	0.754	13.0
0.804	71.21	4.58	0.0875	19.1	0.437	0.0169	0.612	12.8
0.703	71.42	4.90	0.100	22.9	0.427	0.0161	0.656	15.8
0.605	67.47	5.68	0.102	32.8	0.413	0.0148	0.545	17.6
0.506	62.31	6.10	0.102	38.9	0.408	0.0141	0.469	17.5
0.408	60.15	6.59	0.0917	51.5	0.383	0.0132	0.377	16.4
0.310	55.20	6.90	0.121	59.9	0.372	0.0127	0.436	20.7
0.210	48.89	7.16	0.0833	84.2	0.325	0.0117	0.256	13.1
0.111	44.57	7.80	0.106	170	0.249	0.00977	0.273	16.6

Table 15. Turbulence properties in case R-3.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.903	73.84	4.08	0.0958	17.3	0.408	0.0173	0.780	13.0
0.804	71.59	4.74	0.110	20.5	0.435	0.0165	0.748	16.8
0.706	67.19	5.54	0.0979	31.4	0.411	0.0149	0.534	16.4
0.606	66.61	5.63	0.106	34.1	0.401	0.0146	0.564	17.9
0.509	62.22	6.66	0.0927	45.0	0.413	0.0136	0.390	17.3
0.412	59.74	6.70	0.0833	60.3	0.359	0.0126	0.334	15.0
0.312	56.39	6.88	0.0854	70.9	0.340	0.0121	0.315	14.9
0.215	50.55	8.03	0.108	108	0.321	0.0109	0.306	19.7
0.115	42.64	8.98	0.0896	186	0.274	0.00952	0.192	15.4

Table 16. Turbulence properties in case R-4.

z/H	$U(\text{cm/sec})$	$u'(\text{cm/sec})$	$T_E(\text{sec})$	$\epsilon(\text{cm}^2/\text{sec}^3)$	$\lambda(\text{cm})$	$l(\text{cm})$	$T_L(\text{sec})$	$D(\text{cm}^2/\text{sec})$
0.907	78.02	5.46	0.0729	35.9	0.378	0.0143	0.469	14.0
0.817	75.42	5.80	0.0698	38.3	0.388	0.0141	0.408	13.7
0.724	76.10	6.48	0.0854	44.1	0.404	0.0136	0.451	19.0
0.630	72.58	6.83	0.0781	58.6	0.370	0.0127	0.374	17.4
0.540	69.47	7.32	0.0760	77.6	0.344	0.0118	0.325	17.4
0.447	66.84	7.35	0.0802	96.2	0.311	0.0112	0.328	17.7
0.354	60.69	8.18	0.0729	120	0.310	0.0106	0.243	16.3
0.261	52.22	8.40	0.0781	166	0.270	0.00974	0.219	15.4
0.171	48.81	9.66	0.0792	253	0.252	0.00876	0.180	16.8