

# 粗・滑面水路における水路幅方向の乱流拡散係数

岩佐 義朗・細田 尚・野口 好夫

## TRANSVERSE MIXING COEFFICIENT IN OPEN-CHANNEL FLOWS

By *Yoshiaki IWASA, Takashi HOSODA and Yoshio NOGUCHI*

### Synopsis

This paper describes the transverse mixing process for mass and heat injected continuously from a point source in open-channel flows. In order to derive the transverse mixing coefficient of concentration and temperature, experimental studies with use of salt and heated water have been made. The empirical relation between the transverse mixing coefficient  $D_z$  and hydraulic parameters is discussed.

Judging from experimental results, it is concluded that  $D_z$  can not be correlated with the aspect ratio  $B/h$  but with the ratio of mean velocity to friction velocity  $U/u_*$ , that is to say, Reynolds number on smooth bed and relative roughness on rough bed.

### 1. 緒 論

本研究は、開水路流れにおける、点源による、物質・熱の乱流拡散機構について、実験的に検討したもので、まず、濃度、温度の断面内分布の伝播特性について調べ、その後、水路幅方向の乱流拡散係数と水量の関係について考察した。

点源により連続的に放出された物質の乱流拡散機構については、Okoye<sup>1)</sup>の研究以来、多くの研究がなされてきている。とくに、水路幅方向の乱流拡散係数  $D_z$  と水量の関係を示明かにすることが、研究の主目的であり、 $D_z/hu_*$  と Aspect-Ratio  $B/h$  との関係に着目されてきた。しかし、本研究では、濃度が、水深方向に一様となる領域が存在する、 $B/h$  が10程度以上を対象とすると、 $D_z/hu_*$  は  $B/h$  にほとんど依存しないことを示し、今本<sup>2)</sup>が、乱れ特性量、水表面上の固体粒子の乱流拡散係数の整理に用いている  $U/u_*$  との関係について検討を加える。さらに、滑面では Reynolds 数、粗面では相対粗度  $k/h$  を用いて、 $D_z/hu_*$  との関係を考察する。

熱の乱流拡散機構については、トレーサーとして、温水を用いるが、放出点付近では浮力効果を見ることができない。しかし、放出点の温度と循環水温度との差がそれほど大きくないときには、トレーサーの流下とともに、水温が水深方向に一様となるような領域が存在する。そのとき、濃度と同様に、温度の水路幅方向の乱流拡散係数と水量との関係について検討を加える。

### 2. 物質の水路幅方向の乱流拡散機構

#### 2.1 実験の概要

実験は、京都大学土木総合館地階水理実験室において、長さ 10m、幅 25cm と長さ 5m、幅 80cm の長方形断面を有する水路で行った。水路床は、滑面・粗面のどちらかとし、粗度としては、直径 1mm、2mm のガラス球を用いた。なお、水路床こう配は、1/500、1/200である。

トレーサーとしては、食塩水（メチルアルコールで比重1.0に調整）を用い、水路上流端より3.0mの地点

Table 1 Hydraulic variables for test runs of mass transfer.

(a) Smooth bed

|          | Width<br>$B$ (cm) | Depth<br>$h$ (cm) | Mean<br>Velocity<br>$U$ (cm/s) | Shear<br>Velocity<br>$u_*$ (cm/s) | Aspect<br>Ratio<br>$B/h$ | Slope | Froude<br>Number | Reynolds<br>Number |
|----------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------|------------------|--------------------|
| Run s 1  | 25.0              | 1.52              | 25.90                          | 1.63                              | 16.45                    | 1/500 | 0.67             | 3660               |
| Run s 2  | 25.0              | 1.97              | 29.63                          | 1.83                              | 12.69                    | 1/500 | 0.67             | 5590               |
| Run s 3  | 25.0              | 2.71              | 36.71                          | 2.09                              | 9.23                     | 1/500 | 0.71             | 8150               |
| Run s 4  | 25.0              | 2.58              | 35.44                          | 2.05                              | 9.69                     | 1/500 | 0.71             | 8750               |
| Run s 5  | 80.0              | 1.54              | 21.81                          | 1.71                              | 51.95                    | 1/500 | 0.56             | 2910               |
| Run s 6  | 80.0              | 2.10              | 26.85                          | 1.98                              | 38.10                    | 1/500 | 0.59             | 5010               |
| Run s 7  | 80.0              | 3.19              | 40.26                          | 2.41                              | 25.06                    | 1/500 | 0.72             | 11260              |
| Run s 8  | 25.0              | 1.39              | 41.39                          | 2.48                              | 17.99                    | 1/200 | 1.12             | 4490               |
| Run s 9  | 25.0              | 1.72              | 48.77                          | 2.72                              | 14.53                    | 1/200 | 1.19             | 6510               |
| Run s 10 | 25.0              | 2.02              | 53.93                          | 2.91                              | 12.38                    | 1/200 | 1.21             | 8570               |
| Run s 11 | 25.0              | 2.32              | 62.94                          | 3.10                              | 10.78                    | 1/200 | 1.32             | 11430              |
| Run s 12 | 25.0              | 2.49              | 64.23                          | 3.19                              | 10.04                    | 1/200 | 1.30             | 12580              |
| Run s 13 | 25.0              | 2.67              | 64.50                          | 3.28                              | 9.36                     | 1/200 | 1.26             | 13360              |
| Run s 14 | 10.0              | 5.02              | 44.05                          | 2.21                              | 1.99                     | 1/500 | 0.63             | 19380              |

(b) Rough bed

|        | Width<br>$B$ (cm) | Depth<br>$h$ (cm) | Mean<br>Velocity<br>$U$ (cm/s) | Shear<br>Velocity<br>$u_*$ (cm/s) | Aspect<br>Ratio<br>$B/h$ | Slope | Froude<br>Number | Reynolds<br>Number | Diameter<br>of Glass<br>Beads<br>(mm) | Relative<br>Roughness<br>Height<br>( $k/h$ ) |
|--------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------|------------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| Run r1 | 25.0              | 1.93              | 24.73                          | 1.81                              | 12.95                    | 1/500 | 0.54             | 3800               | 1.0                                   | 0.052                                        |
| Run r2 | 25.0              | 2.16              | 26.18                          | 1.90                              | 11.57                    | 1/500 | 0.54             | 4500               | 1.0                                   | 0.046                                        |
| Run r3 | 25.0              | 1.44              | 17.44                          | 1.59                              | 17.36                    | 1/500 | 0.40             | 2010               | 2.0                                   | 0.139                                        |
| Run r4 | 25.0              | 1.62              | 19.30                          | 1.68                              | 15.43                    | 1/500 | 0.42             | 2470               | 2.0                                   | 0.123                                        |
| Run r5 | 25.0              | 1.86              | 21.04                          | 1.78                              | 13.44                    | 1/500 | 0.44             | 3120               | 2.0                                   | 0.108                                        |
| Run r6 | 25.0              | 2.05              | 22.91                          | 1.86                              | 12.20                    | 1/500 | 0.46             | 3750               | 2.0                                   | 0.098                                        |

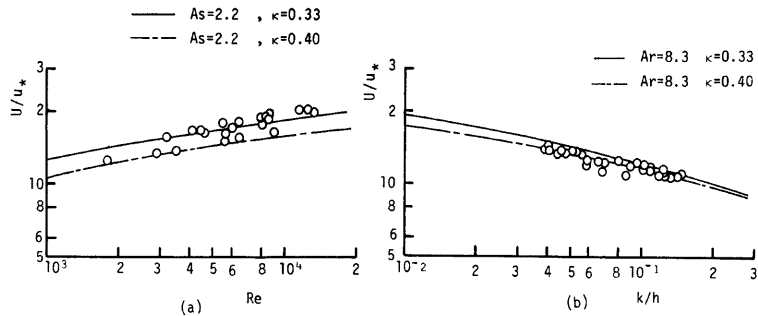


Fig. 1 (a), (b) Resistance law.

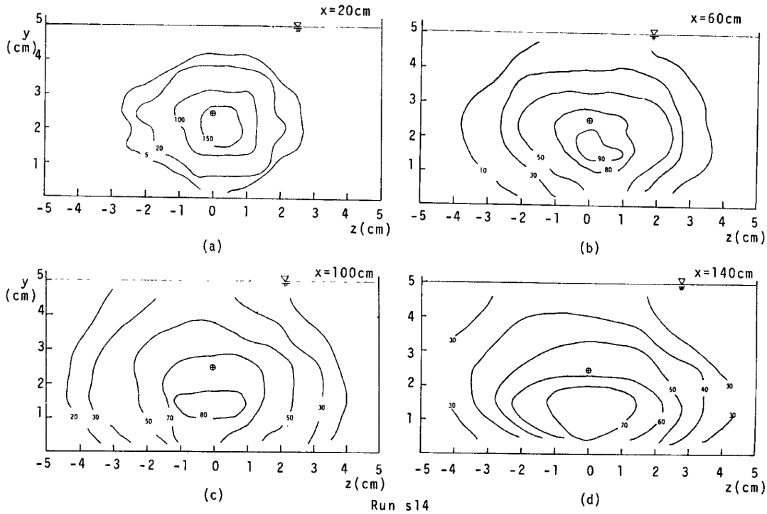


Fig. 2 (a), (b), (c), (d) Concentration distribution.

の  $1/2$  水深の位置に点源を設け、一定水頭の容器から連続放出を行なった。放出流速は、ほぼ、断面平均流速となるように調節している。

濃度測定には導電率計を用い、得られた電圧を、濃度-電圧検定曲線により濃度に変換した。

測定断面は、点源より、 $20\text{cm} \sim 80\text{cm}$  下流の断面から、 $20\text{cm}$ 、または、 $40\text{cm}$  の間隔であり、水深方向、水路幅方向に多点測定を実施した。

実験の水理諸量を **Table 1** に示す。粗面では、粗度高として粒径  $d$  を用い、路床基準面として粒頂より  $(1/4) \cdot d$  だけ下った位置を用いた。

滑面、粗面上の抵抗則は、通常、次式で表わされる<sup>3)</sup>。

$$\text{滑面} \quad \frac{U}{u_*} = A_s - \frac{1}{\kappa} + \frac{2.3}{\kappa} \log \left( \frac{u_*}{U} \cdot R_e \right) \quad \dots\dots\dots (1-a)$$

$$\text{粗面} \quad \frac{U}{u_*} = A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{2.3}{\kappa} \log \left( \frac{h}{k} \right) \quad \dots\dots\dots (1-b)$$

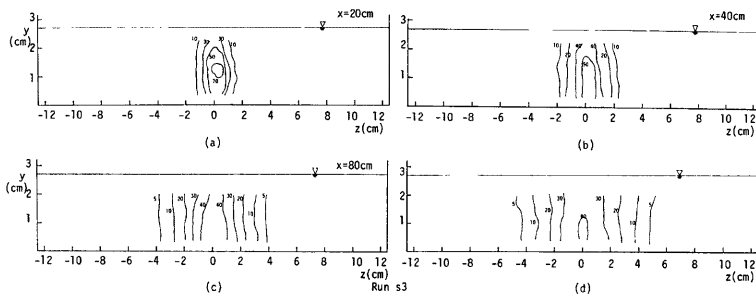


Fig. 3 (a), (b), (c), (d) Concentration distribution.

ここに、 $\kappa$  ; Karman 定数,  $A_s, A_r$  ; 積分定数。(1-a) 式において、 $A_s$  として浅野<sup>4)</sup> の提案する 2.2 を、 $\kappa$  として、0.4 と浅野の提案する 0.33 を、本実験で用いた水路上の流れの実験値とともに **Fig. 1 (a)** に示した。これより、実験値は、(1-a) 式ではほぼ表わされる。同様に、(1-b) 式で、 $A_r$  として浅野の提案する 8.3 を用い、 $\kappa$  として 0.4, 0.33 を用い、本実験とともに **Fig. 1 (b)** に示したが、実験値は、(1-b) 式とはほぼ、一致している。

## 2.2 濃度分布の伝播特性

まず、三次元的な濃度分布の伝播について、**Fig. 2, 3** に示した。**Fig. 2** は、Aspect Ratio  $B/h \approx 2$  のときで、トレーサーが流下しても、三次元的な濃度分布をもちつづける。しかし、**Fig. 3** のように、 $B/h$  が大きくなり、 $B/h \approx 10$  程度となると、点源近くでは、三次元的な濃度分布を示すものの、トレーサーの流下とともに、濃度は水深方向に一様となり、水路幅方向、流れ方向の濃度分布だけが問題となる。

このように、水深方向に濃度が一様となり、濃度の平面的な分布だけを対象とできるときには、乱流拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(-\overline{u'c'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{u'c'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\overline{w'c'}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

を、平面流れのコントロール・ボリューム<sup>5)</sup> で積分すれば、次式となる。

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(chU)}{\partial x} + \frac{\partial(chW)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( h D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $x, y, z$  ; それぞれ、流れ方向、水路床に垂直上方、水路幅方向を表わす。また、 $D_x, D_z$  ; 乱流拡散係数。

実際問題では、(3) 式を数値解析することが多い。しかし、本実験の条件下では、 $h=h_0$  (等流水深)、 $U=U_0$  (断面平均流速)、 $W=0$  とみなしうするため、(3) 式の連続源の解<sup>6)</sup> として、

$$c(x, z) = \frac{\dot{m}}{2\pi\sqrt{D_x D_z}} \exp\left(\frac{Ux}{2D_x}\right) K_0\left[\frac{U}{2D_x}\sqrt{x^2 + \frac{D_x}{D_z}z^2}\right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

を用いることができる。ここに、 $\dot{m}$  ; 連続源の放出量、 $K_0$  ; 0 次の変形 Bessel 関数。

(4) 式の  $c_p(x)=c(x, 0)$  を  $D_z/D_x$  をパラメータとして、無次元座標  $xU/D_x$  に対して示したのが **Fig.**

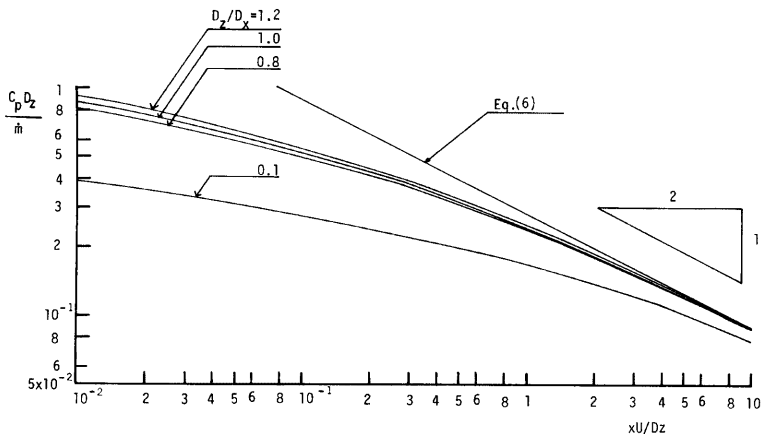


Fig. 4 Relation between  $C_p$  and  $x$ .

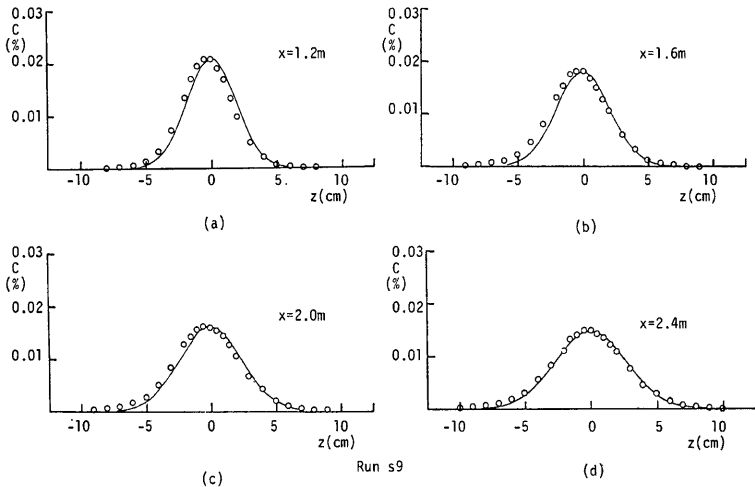


Fig. 5 (a), (b), (c), (d) Transverse concentration distribution.

4 であり, (4) 式は,  $0.1 < D_z/D_x < 1$  の範囲では,  $xU/D_z > 10$  となると,  $x$  方向の乱流拡散項が無視され,

$$c(x, z) = \frac{\dot{m}}{\sqrt{2\pi U D_z x}} \exp\left(-\frac{U z^2}{4 D_z x}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で近似される。このとき, ピーク濃度は,

$$c_p(x) = \frac{\dot{m}}{2\sqrt{\pi x U D_z}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

のように,  $c_p \propto x^{-1/2}$  となり, 分散  $\sigma_z^2 = \int_{-B/2}^{B/2} c z^2 dz / \int_{-B/2}^{B/2} c dz$  は

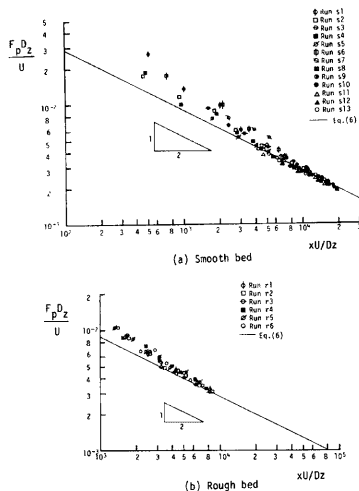
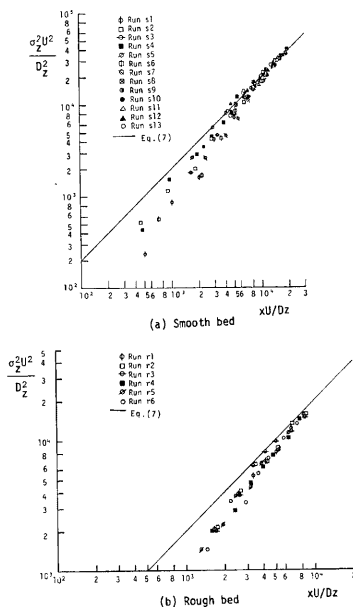
$$\sigma_z^2 = 2 \frac{D_z}{U} x \quad \dots\dots\dots (7)$$

に示され,  $\sigma_z^2 \propto x$  となる。ただし, 以上の結果は, 濃度分布が水路側壁の影響をうけない領域に限られている。

**Fig. 5** に, 濃度が水深方向に一樣となっている領域の, 水路幅方向の濃度分布の一例を示した。図中, 実線は(5)式であり, 実験値は, (5)式の Gauss 分布で十分近似できる。また, 規格化ピーク濃度  $F_p = C_p / \int_{-B/2}^{B/2} c dz$  を無次元化した  $F_p D_z / U$  を, 無次元化距離  $xU/D_z$  に対して示したのが **Fig. 6** である。これより, どの実験値も, トレーサーの流下とともに, (6) 式に漸近しているのがわかる。次に分散  $\sigma_z^2$  を無次元化した  $\sigma_z^2 U^2 / D_z^2$  を無次元化距離  $xU/D_z$  に対して示したのが **Fig. 7** であり, この図から, トレーサーの流下とともに, 実験値は (7) 式に漸近していることがわかる。ここで,  $\sigma_z^2$  の推定には, ピーク濃度  $C_p$  の  $1/e$  倍となる濃度をとる  $z$  座標を  $z_{0-}$ ,  $z_{0+}$  として, Gauss 分布のときに成立する  $\sigma_z^2 = \left( \frac{|z_{0-}| + |z_{0+}|}{2} \right)^2$  を用いて求めた。また,  $D_z$  の推定法については, 次節で述べる。

### 2.3 水路幅方向の乱流拡散係数と水理量の関係

水路幅方向の乱流拡散係数  $D_z$  は, Okoye<sup>13)</sup> によって, 乱流拡散方程式の  $z$  方向のモーメント方程式を用いて

Fig. 6 (a), (b) Relation between  $F_p$  and  $x$ .Fig. 7 (a), (b) Relation between  $\sigma_z^2$  and  $x$ .

$$D_z = \frac{U}{2} \frac{d\sigma_z^2}{dx} \quad \dots\dots\dots(8)$$

で求められることが示されたが、(8) 式は、(7) 式からも明らかである。

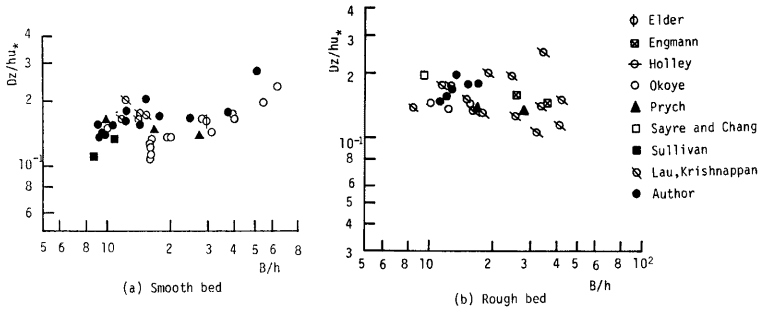
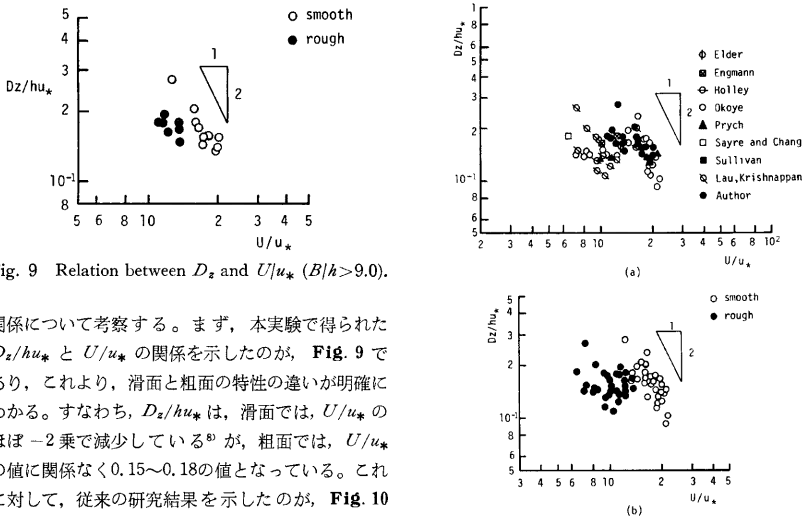
(8) 式により推定された  $D_z$  を  $hu_*$  で無次元化した  $D_z/hu_*$  を、Table 2 に示した。

$D_z/hu_*$  と水理量の関係については、Okoye により、 $D_z/hu_*$  と  $B/h$  との関係が指摘されている。しかし、その後の多くの研究結果を Lau, Krishnappan<sup>7)</sup> が表示したデータと、著者の実験結果を示した Fig. 8 をみると、 $D_z/hu_*$  と  $B/h$  の間には、定性的な関係を見出すことはできない。ただし、示されたデータは  $B/h > 9$  のものだけである。

本研究では、 $B/h$  が、10程度以上では、 $D_z/hu_*$  は  $B/h$  に関係しないと考え、乱流拡散係数と  $U/u_*$  との

Table 2 Transverse mixing coefficient of concentration.

|            | Run s1  | Run s1  | Run s3  | Run s4 | Run s5 | Run s6 | Run s7 | Run s8 | Run s9 |
|------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $D_z/hu_*$ | 0.205   | 0.179   | 0.155   | 0.142  | 0.278  | 0.179  | 0.164  | 0.170  | 0.156  |
| $U/u_*$    | 15.89   | 16.23   | 17.56   | 17.31  | 12.79  | 13.57  | 16.71  | 16.72  | 17.93  |
| Run s10    | Run s11 | Run s12 | Run s13 | Run r1 | Run r2 | Run r3 | Run r4 | Run r5 | Run r6 |
| 0.157      | 0.155   | 0.140   | 0.136   | 0.168  | 0.148  | 0.180  | 0.178  | 0.195  | 0.162  |
| 18.53      | 20.30   | 20.14   | 19.65   | 13.68  | 13.79  | 10.96  | 11.51  | 11.81  | 12.33  |


 Fig. 8 (a), (b) Relation between  $D_z$  and  $B/h$  ( $B/h > 9.0$ )

 Fig. 9 Relation between  $D_z$  and  $U/u_*$  ( $B/h > 9.0$ ).

関係について考察する。まず、本実験で得られた  $D_z/hu_*$  と  $U/u_*$  の関係を示したのが、Fig. 9 であり、これより、滑面と粗面の特性の違いが明確にわかる。すなわち、 $D_z/hu_*$  は、滑面では、 $U/u_*$  のほぼ -2 乗で減少しているが、粗面では、 $U/u_*$  の値に関係なく 0.15~0.18 の値となっている。これに対して、従来の研究結果を示したのが、Fig. 10

である。Fig. 10 (a) は、研究者の区別を示し、(b) は、滑面、粗面の区別を示している。滑面では、本実験結果と同様に、 $D_z/hu_*$  が  $U/u_*$  の、ほぼ -2 乗で減少しているが、粗面では、ばらつきが大きく、明確な特性を見出すことができず、全体として、0.1~0.2 の間の値となっている。これは、研究者によって、用いられた粗度が、Wooden Block, Metal Lath, Glass Beads 等、多種類にわたっているためと考えられる。

滑面の実験値について、これらのデータを  $10 < B/h \leq 20$ ,  $20 < B/h \leq 40$ ,  $40 < B/h$  にわけて示したのが Fig. 11 (a), (b), (c) であり、どの  $B/h$  の範囲のデータも、 $U/u_*$  とともに減少して、同様な特性を示し、 $B/h$  によって影響されないことが確認される。

次に、滑面、粗面のばあいを別々に検討する。前節でも述べたように、滑面では、 $U/u_*$  と Reynolds 数が一義的に関係づけられるため、 $D_z/hu_*$  と Reynolds 数の関係を調べたのが、Fig. 12 である。この図より、 $D_z/hu_*$  は Reynolds 数のほぼ -1/3 乗で減少しており、 $U/u_*$  で整理したときよりも、ばらつきが小さい。

同様に、粗面についても、 $U/u_*$  と  $k/h$  が関係づけられるので、 $D_z/hu_*$  と  $k/h$  の関係を調べる。 $k/h$  が

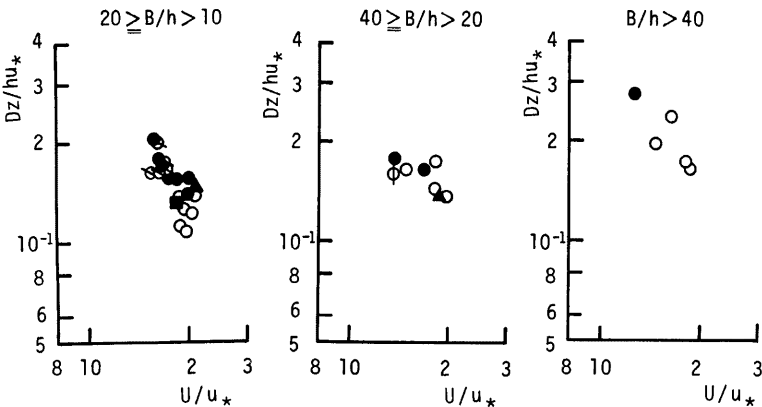


Fig. 11 Relation between  $D_z$  and  $U/u_*$ .

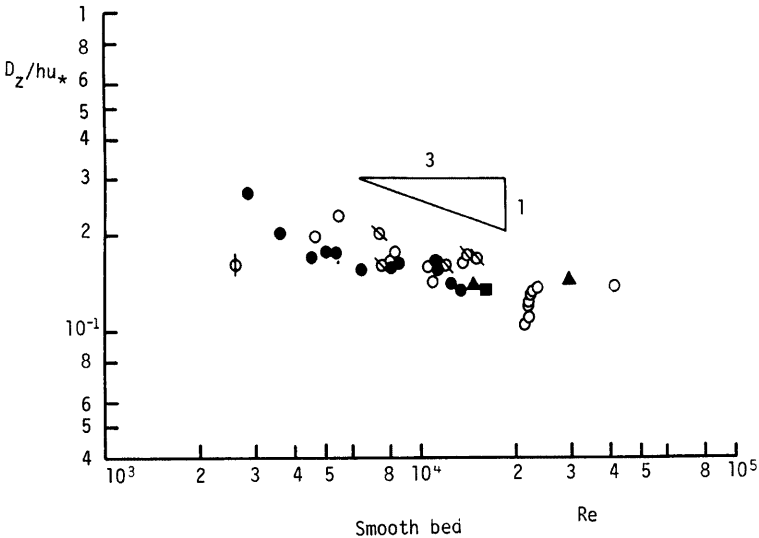


Fig. 12 Relation between  $D_z$  and Reynolds number ( $B/h > 9.0$ ).

求められるのは著者のデータのみであり、図示すると、Fig. 13 になる。この図では、 $D_z/hu_*$  は  $k/h$  とともに、わずかに増加しているが、より広範囲の  $k/h$  でのデータを集積する必要がある。

### 3. 熱の水路幅方向の乱流拡散機構

#### 3.1 実験の概要

この実験に使用された水路は、第2章で述べたものと同じである。実験装置を Fig. 14 に示す。すなわち、一定水頭の第一水槽から一定流量の水を第二水槽へ送り、その中で、ヒーターによって加熱した  $25^\circ\sim 35^\circ\text{C}$  の温水（循環水水温  $10^\circ\text{C}\sim 15^\circ\text{C}$ ）を水路へ放出した。長時間放置して、放出点水温が一定となってから計測を始めた。計測時間は2～3時間であり、その間の循環水の水温変化は  $0.01\sim 0.03^\circ\text{C}$  であるから、無視される。

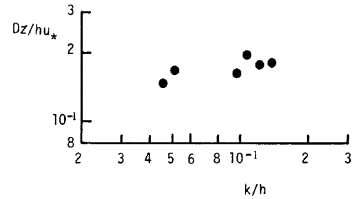


Fig. 13 Relation between  $D_z$  and relative roughness.

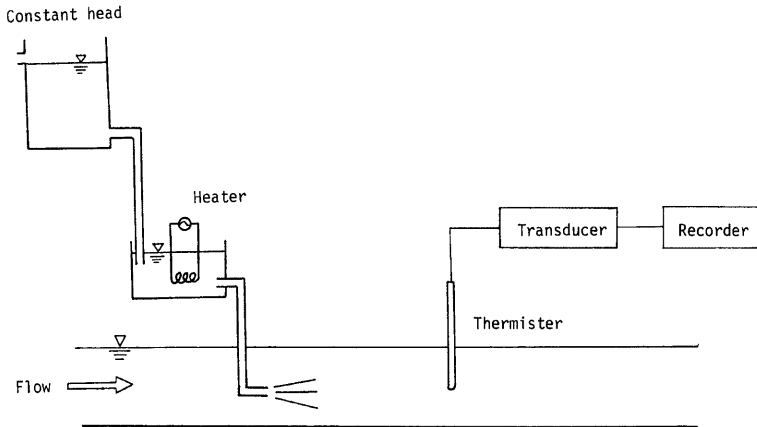


Fig. 14 Experimental Setup.

Table 3 Hydraulic variables for test runs of heat transfer.

(a) Smooth bed

|        | Width<br>$B$ (cm) | Depth<br>$h$ (cm) | Mean<br>Velocity<br>$U$ (cm/s) | Shear<br>Velocity<br>$u_*$ (cm/s) | Aspect<br>Ratio<br>$B/h$ | Slope | Froude<br>Number | Reynolds<br>Number |
|--------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------|------------------|--------------------|
| Run s1 | 25.0              | 1.55              | 25.73                          | 1.64                              | 16.13                    | 1/500 | 0.66             | 3220               |
| Run s2 | 25.0              | 1.80              | 29.12                          | 1.76                              | 13.89                    | 1/500 | 0.69             | 4140               |
| Run s3 | 25.0              | 1.99              | 29.86                          | 1.83                              | 12.56                    | 1/500 | 0.68             | 4700               |
| Run s4 | 25.0              | 2.30              | 32.92                          | 1.95                              | 10.87                    | 1/500 | 0.69             | 6030               |
| Run s5 | 25.0              | 1.51              | 46.04                          | 2.57                              | 16.56                    | 1/200 | 1.20             | 5550               |
| Run s6 | 25.0              | 1.93              | 53.80                          | 2.86                              | 12.95                    | 1/200 | 1.24             | 8130               |
| Run s7 | 25.0              | 1.97              | 54.53                          | 2.89                              | 12.69                    | 1/200 | 1.24             | 8480               |

## (b) Rough bed

|        | Width<br>$B$ (cm) | Depth<br>$h$ (cm) | Mean<br>Velocity<br>$U$ (cm/s) | Shear<br>Velocity<br>$u_*$ (cm/s) | Aspect<br>Ratio<br>$B/h$ | Slope | Froude<br>Number | Reynolds<br>Number | Diameter<br>of Glass<br>Beads<br>(mm) | Relative<br>Roughness<br>Height<br>( $k/h$ ) |
|--------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------|------------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| Run r1 | 25.0              | 1.70              | 20.41                          | 1.71                              | 14.71                    | 1/500 | 0.47             | 2870               | 1.0                                   | 0.059                                        |
| Run r2 | 25.0              | 2.07              | 24.80                          | 1.86                              | 12.08                    | 1/500 | 0.53             | 4290               | 1.0                                   | 0.04 <sub>L</sub>                            |
| Run r3 | 25.0              | 2.47              | 28.04                          | 2.01                              | 10.12                    | 1/500 | 0.55             | 5800               | 1.0                                   | 0.041                                        |
| Run r4 | 25.0              | 1.42              | 17.12                          | 1.58                              | 17.61                    | 1/500 | 0.39             | 1920               | 2.0                                   | 0.141                                        |
| Run r5 | 25.0              | 1.59              | 18.08                          | 1.66                              | 15.72                    | 1/500 | 0.40             | 2260               | 2.0                                   | 0.126                                        |
| Run r6 | 25.0              | 1.85              | 20.28                          | 1.78                              | 13.51                    | 1/500 | 0.42             | 2990               | 2.0                                   | 0.108                                        |
| Run r7 | 25.0              | 2.07              | 23.68                          | 1.87                              | 12.08                    | 1/500 | 0.47             | 3920               | 2.0                                   | 0.097                                        |

実験は、前章と同様、滑面、粗面のどちらかで行ない、水路床こう配は、1/500、1/200の2通りである。水理諸量を **Table 3** に示した。

水温計測には、サーミスタ（東亜電波工業製 TD-02 型）を使用した。このサーミスタの電気抵抗変化を変換器（東亜電波工業製 PB-11A）を通して、温度に変換している。さらに実験毎に、0.1度きざみの水銀温度計を用いて計測精度を確めた。

測定断面は、濃度測定と同様に、点源より、20cm～80cm 下流の断面から、20cm または、40cm の間隔であり、水深方向、水路幅方向に多点測定を行なった。

## 3.2 温度分布の伝播特性

断面内温度分布の例を、**Fig. 15** に示した。この図から、温度分布は、わずかに上に開いた形を示すが、濃度のばあいと同様に、トレーサの流下とともに、水深方向に一樣となる領域が存在している。このような領域が存在すれば、前章と同様の解析を行うことができる。

水深方向に水温が一樣なところで、水路幅方向の温度分布を示したのが、**Fig. 16** であり、各断面の温度分布はどれも、Gauss 分布で近似できることがわかる。

そこで、計測範囲内の流下方向の熱量の保存について調べる。**Fig. 17** は、水温の水路幅方向の分布の 0 次モーメント  $M_0 = \int_{-B/2}^{B/2} (T - T_a) dz$  ( $T_a$ : 循環水水温) を示したもので、この図から、どのデータも、 $M_0$  は流下距離によらず、ほぼ一定とみなされ、計測範囲内では、熱量は保存されている。

次に、放出点水温の相異による影響について検討し、そののちに、温度分布の特性量の、流下方向の伝播について考察する。 $\sigma_z^2$ ,  $D_{1z}$  は、前章と同様に、

$$\sigma_z^2 = \int_{-B/2}^{B/2} (T - T_a) z^2 dz / \int_{-B/2}^{B/2} (T - T_a) dz \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$D_{1z} = \frac{U}{2} \frac{d\sigma_z^2}{dx} \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表わされる。

Run s2 で、放出点水温を、25.1°C, 28.9°C, 34.6°C の3通りに変化させたときの、 $\sigma_z^2$  と  $x$  の関係を、**Fig. 18** に示した。(循環水水温 11.9°C) この図より、 $D_{1z}$  は、各々 0.181 cm<sup>2</sup>/sec, 0.180 cm<sup>2</sup>/sec, 0.180 cm<sup>2</sup>/sec となり、上記の放出点水温の範囲では、乱流拡散係数に影響を与えていない。放出点の内部 Froude 数  $F_{rD}$  を

$$F_{rD} = \frac{U}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} g h}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

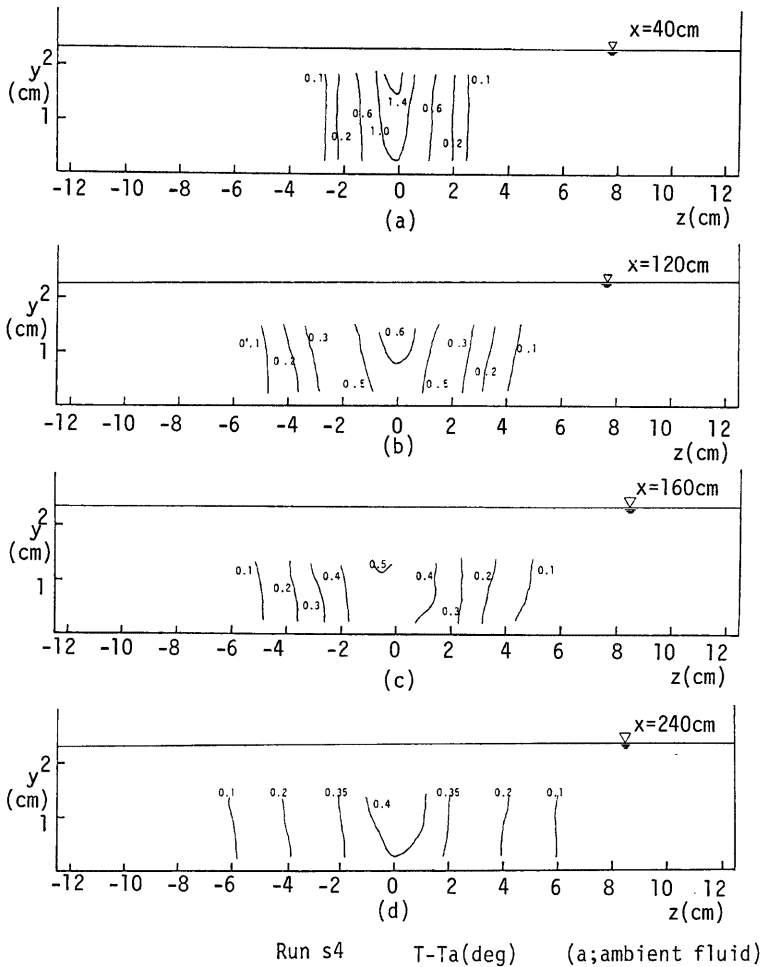


Fig. 15 (a), (b), (c), (d) Temperature distribution.

Table 4 Densimetric Froude Number.

|                           | Run s1 | Run s2                 | Run s3 | Run s4 | Run s5 | Run s6 | Run s7 |
|---------------------------|--------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Densimetric Froude Number | 11.11  | 8.89<br>11.62<br>13.07 | 11.74  | 11.21  | 15.77  | 16.27  | 21.81  |
|                           | Run r1 | Run r2                 | Run r3 | Run r4 | Run r5 | Run r6 | Run r7 |
| Densimetric Froude Number | 8.25   | 8.51                   | 9.82   | 7.68   | 7.83   | 6.80   | 7.89   |

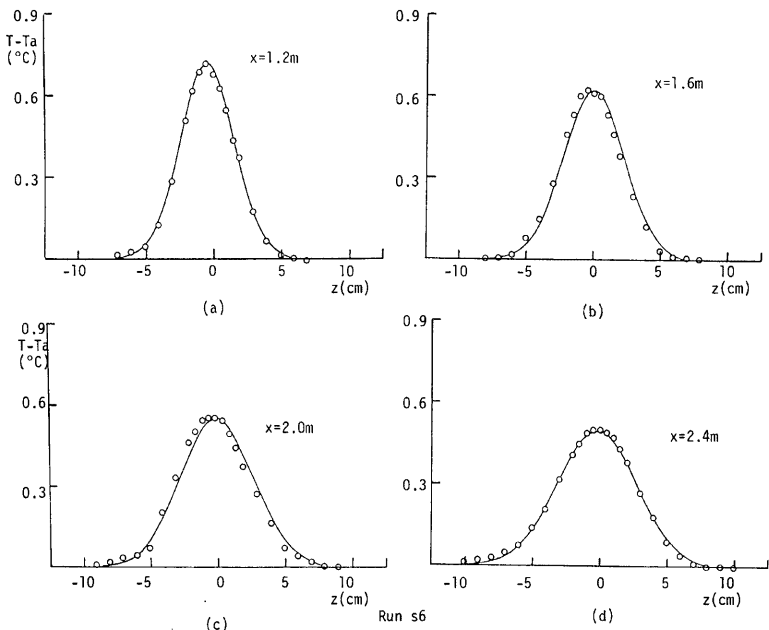


Fig. 16 (a), (b), (c), (d) Transverse temperature distribution.

で定義する。ここに、 $\rho_0$ ；放出水の密度， $\rho_a$ ；循環水の密度， $U$ ；断面平均流速。このとき，上記，三種類の放出水温での  $F_{TD}$  は，各々，13.07，11.62，8.89であり，実験，全ケースの  $F_{TD}$  を，**Table 4** に示したが，ほぼ，上記の範囲内にあり，浮力効果は無視される。得られた乱流拡散係数を **Table 5** に示す。

次に，温度分布の特性量の流下方向への伝播について考察する。規格化ピーク温度  $F_{tp}=(T_p-T_a)/\int_{-B/2}^{B/2}(T-T_a)dz$  を無次元化した  $F_{tp}D_{tz}/U$  を，無次元化距離  $xU/D_{tz}$  に対して示したのが，**Fig. 19** であり，どのデータも，無次元化距離の増加とともに， $-1/2$ 乗で減衰し，(6) 式に漸近しているのがわかる。

また， $\sigma_z^2$  を無次元化した， $\sigma_z^2U^2/D_{tz}^2$  を，無次元化距離  $xU/D_{tz}$  に対して示したのが，**Fig. 20** であり，

Table 5 Transverse mixing coefficient of temperature.

|               | Run s1 | Run s2 | Run s3 | Run s4 | Run s5 | Run s6 | Run s7 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $D_{tz}/hu_*$ | 0.218  | 0.181  | 0.174  | 0.174  | 0.179  | 0.171  | 0.156  |
| $U/u_*$       | 15.65  | 16.58  | 16.28  | 16.88  | 17.92  | 18.80  | 18.88  |
|               | Run r1 | Run r2 | Run r3 | Run r4 | Run r5 | Run r6 | Run r7 |
| $D_{tz}/hu_*$ | 0.148  | 0.139  | 0.159  | 0.166  | 0.154  | 0.160  | 0.157  |
| $U/u_*$       | 11.94  | 13.30  | 13.96  | 10.83  | 10.87  | 11.41  | 12.69  |

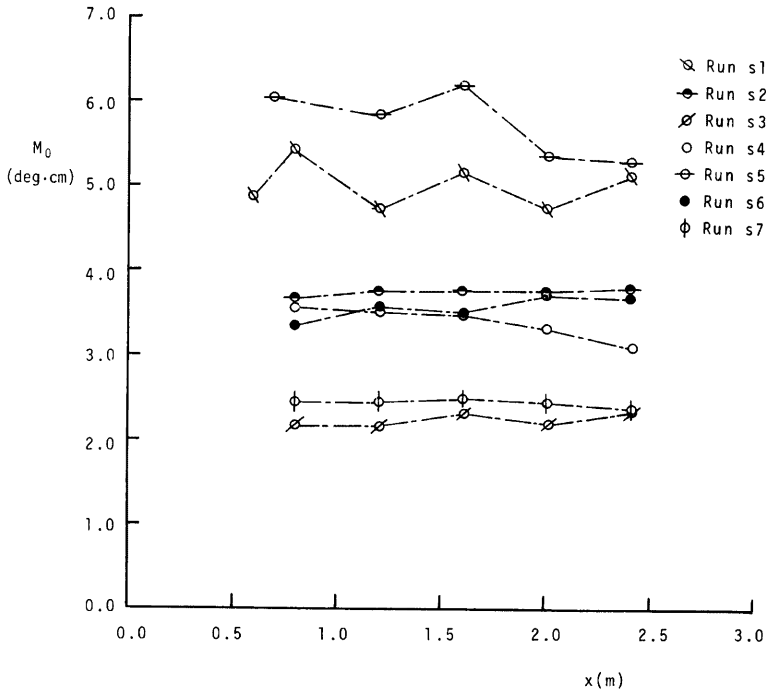


Fig. 17 Heat conservation in the downstream course.

どのデータも、無次元化距離の増加とともに、 $x$  に比例して増加し、(7) 式に漸近している。

### 3.3 水路幅方向の乱流拡散係数と水理量の関係

前節で述べたように、本実験の範囲では、水深方向に水温がほぼ一様とみなせる領域が存在し、その領域で、温度の、水路幅方向の乱流拡散係数を定義した。そこで、本節では、第2章と同様に、温度の乱流拡散係数と水理量の関係について考察する。

$D_{1z}/hu_*$  と  $U/u_*$  の関係を示したのが Fig. 21 である。これより、滑面と粗面での特性の違いは明確であり、滑面では、濃度のばあいと同様に、 $D_{1z}/hu_*$  が  $U/u_*$  のほぼ -2 乗で減少する領域が存在しているが、粗面では、 $U/u_*$  の値によらず 0.15~0.17 の値をとっている。また、Fig. 21 (b) より、濃度と温度の乱流拡散係数の値は、ほぼ同一と考えられる。

滑面において、 $D_{1z}/hu_*$  と Reynolds 数の関係を示したのが Fig. 22 であり、 $D_{1z}/hu_*$  が、Reynolds 数の増加とともに減少していく様子うかがわれる。一方、粗面において、 $D_{1z}/hu_*$  と  $k/h$  の関係を、Fig. 23 に示したが、 $D_{1z}/hu_*$  は  $k/h$  には、ほとんど依存せず、0.15~0.17 の値となっている。

以上の考察より、温度の乱流拡散係数も、濃度のばあいと同様の傾向を示すことがわかるが、データ数が少なく、より広範囲の実験条件でのデータを集積する必要がある。とくに、放出装置の改良によって、より広範囲の放出温度での実験が望まれる。

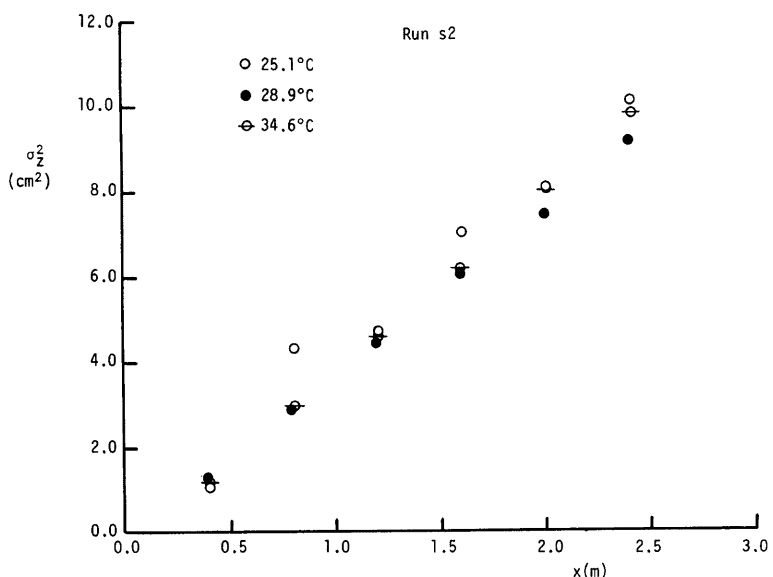


Fig. 18 Relation between  $\sigma_z^2$  and  $x$ .

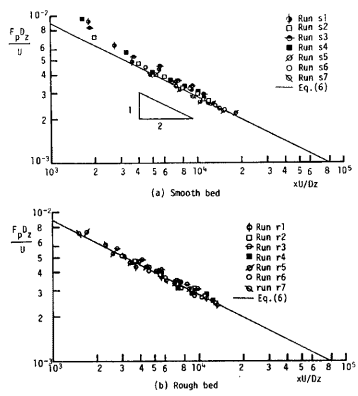


Fig. 19 (a), (b) Relation between  $F_p$  and  $x$ .

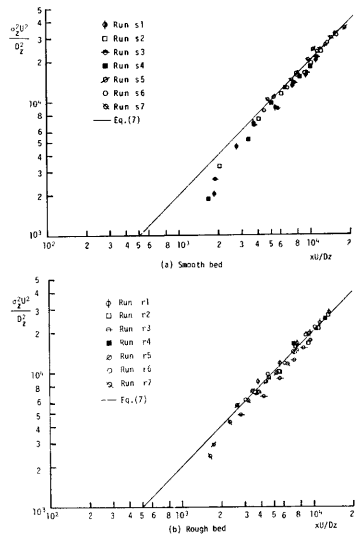
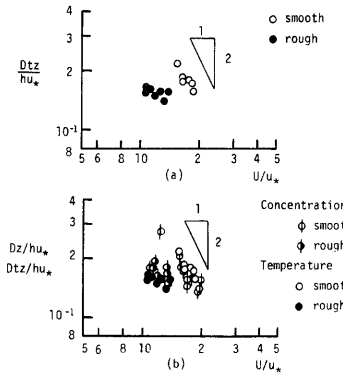


Fig. 20 (a), (b) Relation between  $\sigma_z^2$  and  $x$ .

Fig. 21 (a), (b) Relation between  $D_z$  and  $U/u_*$ .

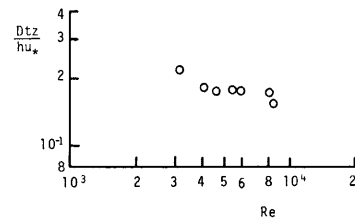
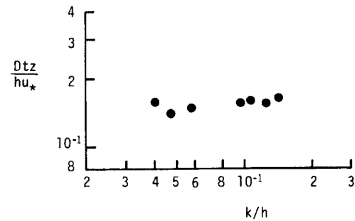
#### 4. 結 語

長方形断面の開水路流れにおいて、点源より連続的に放出されたトレーサーの挙動について、実験的に検討した。トレーサーは、食塩水と、温水である。得られた結果をまとめた、次のようになる。

- ① 本実験の範囲では、トレーサーとして、食塩水、温水を用いたとき、濃度分布、温度分布の特性量の伝播、および、水路幅方向の乱流拡散係数と水流量の関係について、トレーサーの違いによらず同様の結果が得られた。よって、以下に述べることは、食塩水、温水のどちらにもあてはまるということができる。
  - ② 濃度、温度の分布形は、放出点直後では、三次元的であるが、Aspect Ratio が10程度以上になると、トレーサーの流下とともに、水深方向に、濃度・温度の一樣となる領域が存在し、各断面での水路幅方向の分布は、Gauss 分布で近似される。
  - ③ 水路幅方向の濃度、温度分布のピーク値  $F_p D_z/U$  は、無次元化距離  $xU/D_z$  の増加とともに、(6) 式に漸近し、分散  $\sigma_z^2 U^2/D_z^2$  は、(7) 式に漸近する。
  - ④ 滑面では、 $D_z/hu_*$  は、 $U/u_*$  のほぼ-2乗で減少する領域が存在し、粗面では、 $U/u_*$  との定性的な関係は明確でない。
  - ⑤ 滑面では、 $D_z/hu_*$  は、Reynolds 数の増加とともに減少する傾向を示し、 $D_z/hu_* - U/u_*$  で整理したときよりも、実験値にばらつきが少ない。
  - ⑥ 粗面では、著者らの実験の範囲で、 $D_z/hu_*$  は、相対粗度  $k/h$  によらず、ほぼ、0.15~0.18の値をとる。
- 以上の結果をふまえて、今後の研究課題として、次のことが、あげられよう。
- ① 粗面領域の乱流拡散係数について、より広範囲の相対粗度での実験を行い、データを集積するとともに、河床波上の流れにおいて、乱流拡散係数を検討する。
  - ② 熱の乱流拡散では、放出温度をより広範囲に変化させたときの、温度分布の伝播について、検討する。

最後に、本研究を行うにあたって、協力をおしめなかった、現鹿島建設、風間優氏、京都大学大学院学生大久保清久君に、心から、感謝します。

本研究の一部は、昭和56年度文部省科学研究費補助金（一般研究）によって行なわれたものであることを付記する。

Fig. 22 Relation between  $D_{tz}$  and Reynolds number.Fig. 23 Relation between  $D_{tz}$  and relative roughness.

## 参 考 文 献

- 1) Okoye, J. K.: Characteristics of Transverse Mixing in Open Channel Flows, Report No. KH-R-23, California Institute of Technology, 1970.
- 2) 今本博健：開水路流れの乱れに関する水理学的研究，京都大学学位論文，1971.
- 3) 岩佐義朗：水理学，朝倉土木工学講座 3，朝倉書店，1969.
- 4) 浅野富夫：開水路流れにおける乱れの時空間構造に関する研究，京都大学学位論文，1980.
- 5) 岩佐義朗：開水路流れのモデリング法，水工学シリーズ，80-A-3，土木学会水理委員会，1980.
- 6) Hinze, J. O.: Turbulence, McGraw-Hill, 1959.
- 7) Lau, Y. L. and Krishnappan, B. G.: Transverse Dispersion in Rectangular Channels, Proc. ASCE, Vol. 103, No. HY10, 1977.
- 8) 岩佐義朗・細田尚・野口好夫：開水路流れにおける乱流拡散機構に関する研究，第36回土木学会年次学術講演会概要，II-241，1981.