

## 開水路における障害物の移流分散 への影響に関する研究

荒木正夫\* 富所五郎\*\* 山本 恵\*\*\*

(昭和55年5月28日受理)

### Longitudinal Dispersion Affected by Obstructions in Open Channels

Masao ARAKI, Goro TOMIDOKORO and Megumu YAMAMOTO

This paper presents a method to predict the rate of longitudinal dispersion affected by obstructions in open channels. A salt solution which has the same density as the flowing water is used in the experiment. A line source supplies the solution onto the flow in the flume, and the time-concentration curves are measured at several locations downstream. The obstruction used in the experiment is a column and it is placed in the center of the flume. The experimental results in the flume having an obstruction are compared with the ones in the flume free of obstructions. Longitudinal dispersion is controlled by placing an obstruction in the center of the flume. The coefficient of longitudinal dispersion is approximately proportional to the inverse of the column diameter for the distance of about eighty times the diameter downstream from the obstruction, and then it shifts to the value in the flume free of obstructions. The mean arrival time of the solution is hardly related to the existence of obstructions.

From the results mentioned above, it is possible to estimate the effect of obstructions, such as sand bars and bridge piers in river channels, on longitudinal dispersion.

### 1 序 論

最近の環境問題の中で、河川や開水路の汚染物質の希釈、拡散能力の推定が重要な問題となって来ている<sup>1)</sup>。

河川の移流分散(以下分散と省略する。)の研究の基礎となるのは開水路における分散の研究であり、Elder<sup>2)</sup>やFischer<sup>3)</sup>による、水深方向の流速分布や水路幅方向の流速分布

---

\* 土木工学教室 教授

\*\* 土木工学教室 講師

\*\*\* 大学院修士課程修了(現在(株)建設技術研究所)

に基づく分散についての研究が有名である。また、河川の床や岸が平坦でなく、多くの死水域が存在するが、これらが分散に及ぼす影響についての研究<sup>3)4)5)6)</sup>もなされている。

河川には、砂州や橋脚などのように流れの中にある障害物も多くある。これらの近傍では流れが著しく乱れており、局部的とは言え、これらが河川の分散に及ぼす影響は無視できないと思われ、河川の分散能力の推定には、このことを考慮しなければならないであろう。しかし、これらに関する研究はほとんどなされていない。

本論文は、このような障害物の分散への影響を実験によって明らかにしようとするものである。開水路の等流に障害物として円柱を水路中央に設置した場合としない場合について、上流よりトレーサを瞬間面源で投入し、下流の各測定点で、その濃度と時間の分布曲線を測定する。これを解析することにより分散過程を把握し、障害物のない場合とある場合との比較、検討を通して、障害物の分散への影響を考察する。まず、分散を表わす方程式と特性値について述べ、続いて実験方法と実験条件、その結果と考察、最後に結論をのべる。

## 2 分散を表わす方程式と特性値

開水路における分散は、一般に(2.1)式のように Fick 型の一次元拡散方程式<sup>7)</sup>で示される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial c}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \{ (D_L + D_t) \} \frac{\partial c}{\partial X} \quad (2.1)$$

ここで  $c$  はトレーサの断面平均濃度、 $U$  は断面平均流速、 $D_L$  は分散係数、 $D_t$  は乱れによる拡散係数、 $X$  は流れ方向座標でトレーサ投入点からの距離、 $t$  は投入後の時間である。 $D_t \ll D_L$  で、 $(D_L + D_t)$  を改めて分散係数  $D$  とする。しかし、このままでは(2.1)式の解は簡単に求まらない。そこで  $D$  を定数と仮定し、等流、瞬間面源、さらに濃度のピークが断面平均流速で移動すると言う条件下で解くと

$$c(X, t) = \frac{W}{wA} \cdot \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left\{-\frac{(X - Ut)^2}{4Dt}\right\} \quad (2.2)$$

となる。ここで  $W$  は分散物質重量、 $w$  は水の単位体積重量、 $A$  は流水断面積である。

実験では測定点での濃度と時間の分布曲線(以下、 $c-t$  曲線と書く。)を測定する。この  $c-t$  曲線の特性値として、その時間平均  $\bar{t}$ 、時間についての分散  $\sigma_t^2$  を求める。(2.2)式より

$$\bar{t} = \frac{\int c \cdot t \cdot dt}{\int c \cdot dt} = \frac{X}{U} + \frac{2D}{U^2} \doteq \frac{X}{U} \quad (2.3)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\int c \cdot (t - \bar{t})^2 \cdot dt}{\int c \cdot dt} = \frac{2DX}{U^3} + 8\left(\frac{D}{U^2}\right)^2 \doteq \frac{2DX}{U^3} \quad (2.4)$$

となる<sup>8)</sup>。ここで、上式の各々第2項は第1項に比し小さいので無視している。 $\bar{t}$  はトレーサの平均到達時間で  $\sigma_t^2$  はトレーサの広がりを目安となる。さらに測定点間の  $\sigma_t^2$  の変

化から分散係数  $D$  が求められる<sup>3)</sup>。(2.4)式より

$$D = \frac{U^3}{2} \frac{d\sigma_x^2}{dX} = \frac{U^3}{2} \frac{(\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x1}^2)}{(X_2 - X_1)} \quad (2.5)$$

添字の 1, 2 は上流側, 下流側測定点を示す.

### 3 実験方法と実験条件および測定結果の処理

本研究に用いた水路は Fig. 1 に示すように幅 29.3cm, 長さ 10.31m, 水路勾配 1/2000 Manning の粗度係数 0.01 のペンキ塗布の鉄製水路である. 一方, 実験条件は, 流量 5.0 l/s の等流とし, その時の水深は 6.3cm で断面平均流速は 27.1cm/s であった. 障害物は, 直径  $d$  が 4.8cm, 3.5cm, 2.6cm のパイプで, Fig. 2 に示すように水路断面中央に 1 本設置した.

トレーサは, 食塩, イオン交換樹脂を用いてつくった純水, 比重調整用のメチルアルコールを用いて, 塩分濃度 6.0%, 比重がほぼ 1.00 になるように調整したものである. このトレーサ 100cc を瞬間面源になるように半円形の樋に入れ, これを瞬間に回転させ, さらに 5mm 幅のガイドで流れを一様にして流水面に落とした. なおガイド端から水面までは 1cm とした<sup>9)</sup>.

投入されたトレーサの各測定点の塩分濃度 (以下濃度と省略する.) の測定には, 温度補償付導電率計 (MK106, 計測技研) と多点ペンレコーダを使用した. ペンレコーダの零線

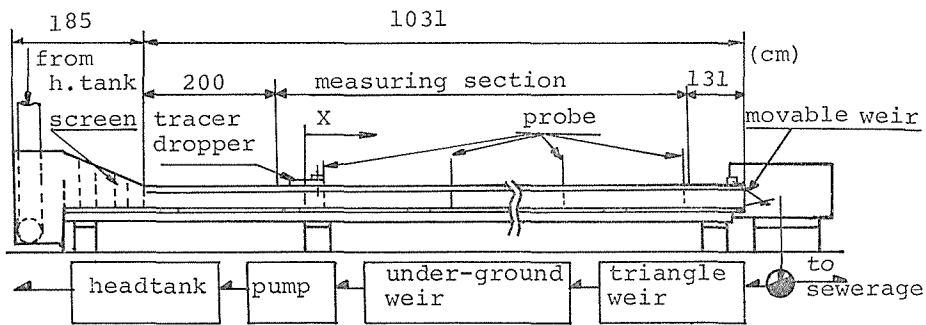


Fig. 1 Experimental flume

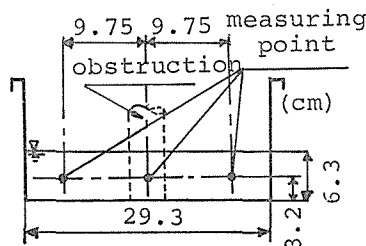


Fig. 2 A cross-section of the flume and measuring points

は流水の導電率に定め、トレーサの投入によって増加する導電率を測定した。こうして得られた値から、濃度と導電率の対応関係を用い各測定点の  $c-t$  曲線が得られる。X方向の測定断面は、Fig. 1 に示すプローブの位置で、その測定点は Fig. 2 に示すような3点である。測定は、計測器の数に制限があるため、1回のトレーサの投入に対して各断面に1本ずつのプローブをX方向の同一直線上に設置して行なった。これを測定断面の別の点に対してくり返し、全測定点の  $c-t$  曲線を得た。ここで、測定の信頼性を増すため、同一測定を3回実施し、各測定点につき3回分の  $c-t$  曲線、したがって各測定断面で9個の  $c-t$  曲線を得た。これらの曲線より同一時刻の濃度の9個の平均を求め、これを断面平均濃度とした。こうして求められた断面平均の  $c-t$  曲線より  $\bar{t}$ 、 $\sigma_t^2$  を求め、さらに二点間のトレーサ中心の移動速度

$$U_B = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} \quad (3.1)$$

を(2.5)式の  $U$  の代りに用いて二点間の平均的分散係数  $D_S$  を求めた。また  $D_S$  を初期値として、上流側の  $c-t$  曲線を入力とし(2.2)式の重ね合わせ計算によって下流側の  $c-t$  曲線を求め、実測の  $c-t$  曲線との差の平方和が最小となる  $D$  を求めるルーティング法による分散係数  $D_R$  も求めた。

なお、障害物の下流  $5d$  から  $10d$  の間は流れが著しく乱れているので濃度測定点からはずした。またプローブは直径  $4\text{ mm}$  と細いので、流れに対するこの影響は無視した。以上の測定、解析を障害のない場合とある場合について行なった。

## 4 実験結果および考察

### 4.1 流速分布

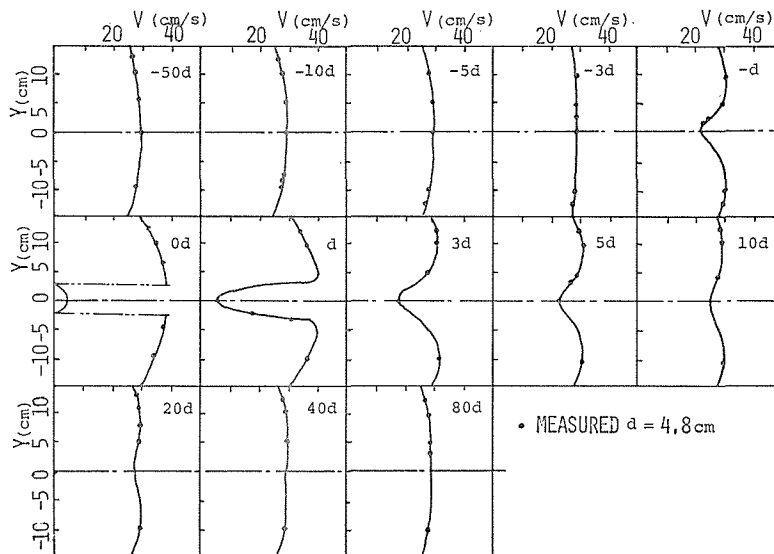


Fig. 3 Relation of the velocity distribution with width (diameter  $4.8\text{ cm}$ )

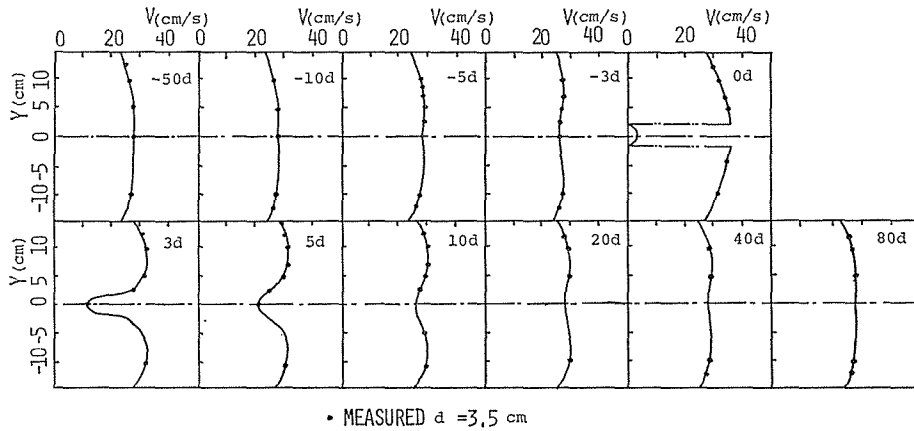


Fig. 4 Relation of the velocity distribution with width (diameter 3.5cm)

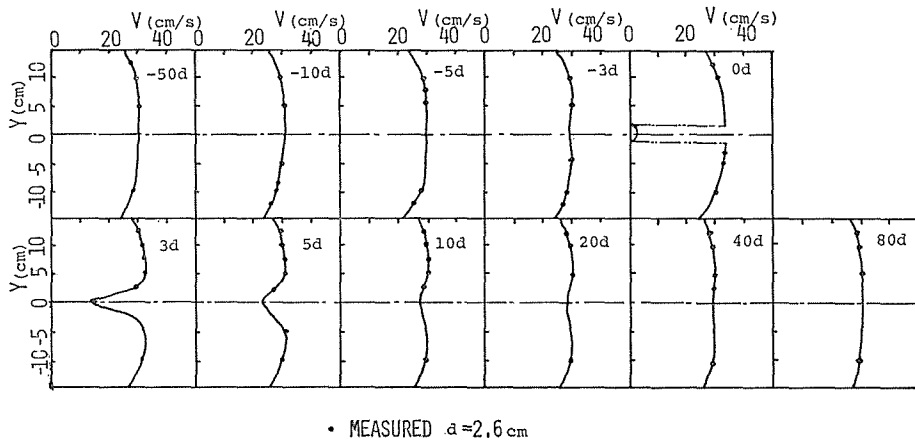


Fig. 5 Relation of the velocity distribution with width (diameter 2.6cm)

分散が流速分布に依存すると考えられるので Fig. 3～Fig. 5 に水路幅方向の流速分布を示す。この値は、水深方向の3点(底より1.5cm, 3.2cm, 4.3cmの点)の流速の平均値である。測定断面は障害物設置を原点とし、障害物直径  $d$  の倍数の点で、下流を正方向としている。Fig. 3～Fig. 5 よりつぎのことが言える。

- (1) 障害物直径の倍数で表わした距離で同じ位置の流速分布は、障害物の直径の大小に関係なくほぼ同じ形状を示す。
- (2) 障害物の影響は、直径の50倍付近から見られるが、水路中央部が両側より遅くなるのは障害物付近である。障害物設置点ではその両側の流速が大きく、これは直径の80倍付近まで続き、次第に障害物のない状態へと移行する。なお、障害物直後は死水域が生

じ、後流は激しい乱流となっている。

障害物の設置によって生じた流速分布の変化は局所的とは言え、相当大きいものである。これらが分散に及ぼす影響も同様にかなり大きいものと思われる。

#### 4.2 $X$ と $\bar{t}$ の関係

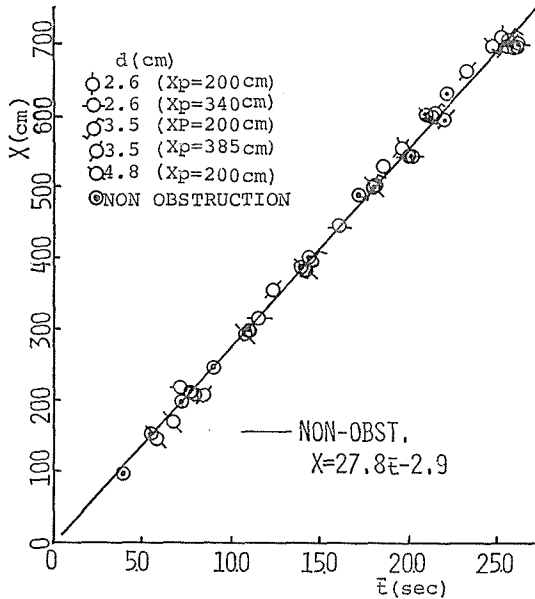


Fig. 6 Relation of mean arrival time  $\bar{t}$  with the distance  $X$  from the dropping point of salt solution

#### 4.3 $\sigma_t^2$ と $X$ , $\bar{t}$ の関係

Fig. 7 に  $\sigma_t^2$  と  $X$ ,  $\bar{t}$  の関係を示した。ここで、 $X$  は Fig. 6 の  $X$  と  $\bar{t}$  の関係式より求めたものである。また実線は  $\sigma_t^2$  と  $X$  を両対数紙上にプロットし、 $\sigma_t^2$  と  $X$  の関数形を決め、これより求めたもので、実測値を最も良く近似する近似曲線である。Fig. 7 からつぎのことが言える。

- (1) 障害物設置点上流側の  $\sigma_t^2$  は、障害物の影響をほとんど受けない。しかし下流側では、その増加が抑制される。
- (2) 障害物のある場合の  $\sigma_t^2$  の変化は、障害物設置点が不連続点となる曲線によって示される。また、障害物設置点の  $\sigma_t^2$  の値 (これを  $\sigma_{tP}^2$  とする) は、障害物のない場合の障害物設置点の  $\sigma_t^2$  の値としてよい。

Fig. 8 は、横軸に障害物設置点からの距離  $X_a$  を障害物直径  $d$  で除した無次元距離  $X_{an}(=X_a/d)$  をとり、縦軸に障害物設置からの  $\sigma_t^2$  の増加量  $\sigma_{ia}^2(=\sigma_t^2 - \sigma_{tP}^2)$  をとり、測定結果をプロットしたものである。図より  $\sigma_{ia}^2$  と  $X_{an}$  が強い直線関係にあることがわかる。この直線関係を表わすと

$$\sigma_{ia}^2 = \alpha \cdot X_{an} + \beta = 0.01365 X_{an} + 0.0875 \quad (4.1)$$

Fig. 6 に  $X$  と  $\bar{t}$  の関係を示した。ここで、 $X_p$  はトレーサ投入点から障害物設置点までの距離を示す。この図よりつぎのことが言える。

- (1)  $X$  と  $\bar{t}$  は障害の有無、直径の大小にほとんど関係せず、ほぼ直線関係にある。
- (2)  $X$  と  $\bar{t}$  の関係からトレーサ中心の平均移動速度が求まる。障害物のない場合のこの値は 27.8 cm/s で、流水断面の平均流速 27.1 cm/s にほぼ等しい。

これらのことから、トレーサ粒子が水粒子と全体的に同じような挙動をすると考えられる。つまり、(2.3) 式が十分成り立つ。

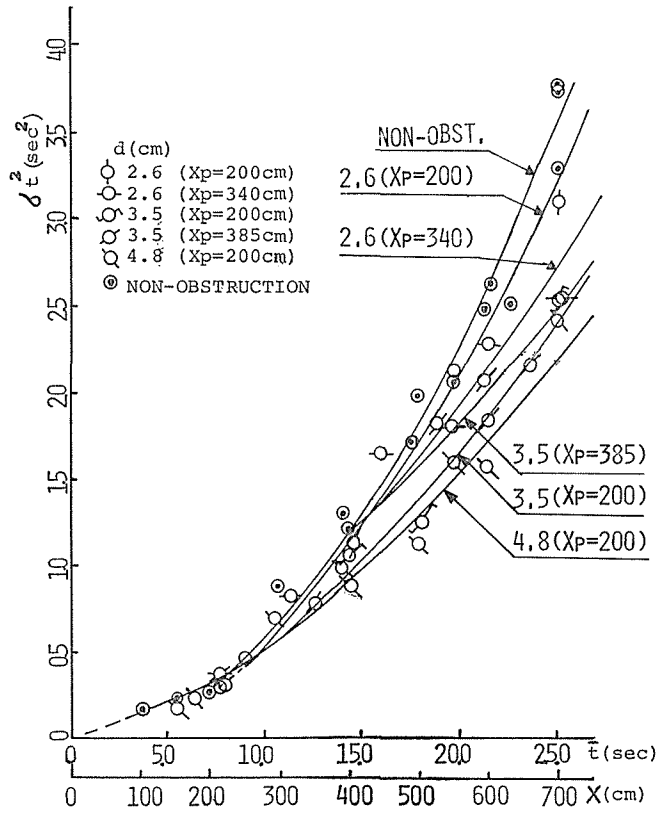


Fig. 7 Relation between  $X$ ,  $\bar{t}$  and  $\sigma_t^2$

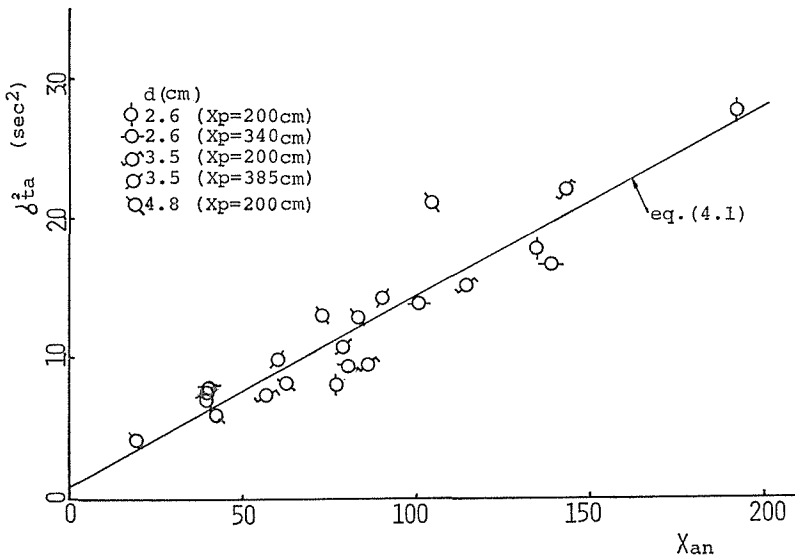


Fig. 8 Relation between  $\sigma_{ta}^2$  and  $X_{an}$

となる。ここで $\alpha$ 、 $\beta$ は定数としたが、この値は流量、流速、水深、水路幅、粗度などにより変化する。ちなみに流量 2.0 l/s (水深 3.8cm, 平均流速 8.4cm/s) の場合では、 $\alpha = 0.0280$ 、 $\beta = 0.174$  であった。

#### 4.4 分散係数

Fig. 7 の実線において $\sigma_t^2$  と  $X$  は、原点に近づくにつれ直線関係からのはずれが大きくなる。つまり分散係数が $X$ の関数となる。これは本実験の全測定点が Fischer の言う移流過程に属するためである<sup>3)</sup>。ここで、分散係数が一定値でないことは、(2.2) 式が成り立たないこととなり、本実験の結果より(2.5)式やルーティング法を用いて分散係数を求めることはできなくなる。しかし、多少の誤差を許すならば、狭い区間で $\sigma_t^2$  と  $X$  は直線関係にある。つまり分散係数は定数であるとして上に述べた方法によりこれを求めることができる。つぎに分散係数を求める方法について比較を行なってみる。

Fig. 9 に障害物のない場合の分散係数を示す。ここで $D_S$ 、 $D_R$  に対する $X$ の値は、分散係数を求めた区間の中央点の $X$ としている。また実線は、Fig. 7 の障害物のない場合の実線より流速 $U$ を変化させて求めたものである。ここで、流速 $U$ はトレーサの移動速度の上下限值および平均値である。この図より $D_R$ は、 $D_S$  や  $U = 27.9\text{cm/s}$  の実線より小さい値を示す傾向にあることがわかる。しかし、 $D_S$ 、 $D_R$  のばらつきは、流速の違いによる分散係数の変化をはるかに越える非常に激しいもので、一般的にはともかく<sup>9)</sup>、ここでは $D_S$ 、 $D_R$  を求める方法の優劣はつけ難い、また実線は、 $X$ の大きいところで $D_S$ 、 $D_R$  の値からはずれず。これは Fig. 7 の近似曲線が、 $X$ の大きいところで実測値からはずれずるため、この方法の問題点である。これらのことより以下では $D_S$ 、 $D_R$  の二つの

分散係数について考える。なお $D_S$ 、 $D_R$  は $X$ の大きいところで一定値になる傾向を示している。

障害物のある場合、障害物設置点の下流で、障害物の直径 $d$ と分散係数 $D$ の積 $d \cdot D$ は、(2.5)式と(4.1)式より

$$\begin{aligned} d \cdot D &= 0.01365 \cdot \frac{U^3}{2} \\ &= \text{const.} \quad (4.2) \end{aligned}$$

となる。いま障害物の分散係数の影響として上式をとり挙げてみる。Fig. 10 にそれを示す。ここで、横軸は分散係数を求めた区間の中央点の障害物からの距離を $d$ で除した無次元距離を示す。また実線は、Fig. 9 の平均流速に対する(4.2)式より求めた $d \cdot D$ である。

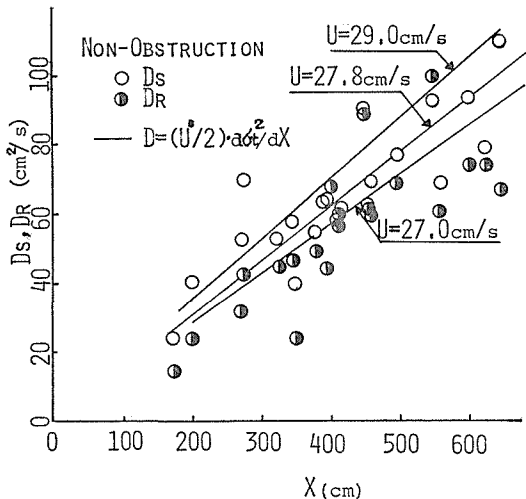


Fig. 9 Relation between longitudinal dispersion coefficient  $D_S$ ,  $D_R$  and  $X$



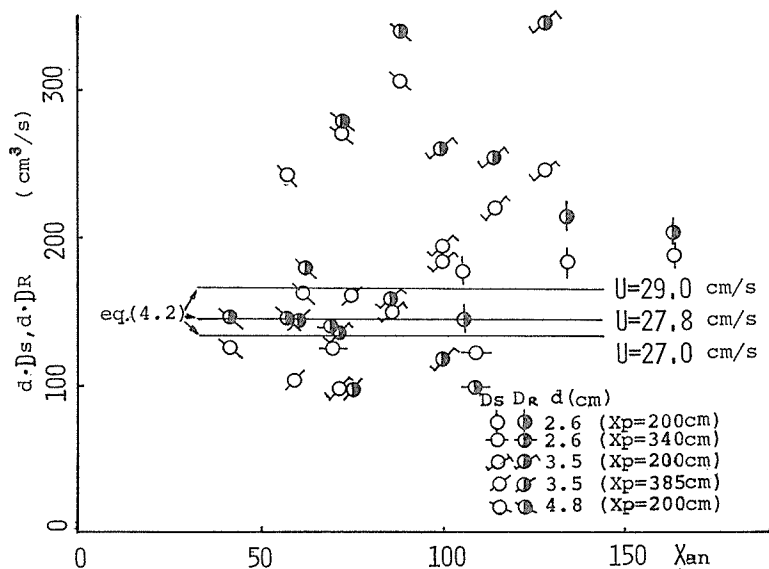


Fig. 10 Relation between  $d \cdot D_s$ ,  $d \cdot D_R$  and  $X_{an}$

一方、障害物の影響が殆んどなくなる値として、Fig. 9 の障害物のない場合の  $X = 600\text{cm}$  附近の分散係数  $80\text{cm}^2/\text{s}$  を用いると  $d = 4.8\text{cm}$  で  $d \cdot D = 384\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $d = 3.5\text{cm}$  で  $d \cdot D = 280\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $d = 2.6\text{cm}$  で  $d \cdot D = 208\text{cm}^3/\text{s}$  となる。これらを考慮して Fig. 10 を見ると、 $X_{an} = 80$  付近まではほぼ  $d \cdot D$  が一定の関係がつづく。つまり、分散係数が障害物直径の逆数に比例した定数となる。そして、その後、次第に障害物のない状態へ移行することがわかる。これは、Fig. 3～Fig. 5 の流速分布が、障害物の直径の倍数で表わした距離で同じ位置でほぼ同形状となること、 $80d$  付近より障害物の影響がなくなり流速分布が障害物のない場合へと移行することに対応する。このことは、分散現象が流速分布に大きく依存していることを明確に示していると言える。さらに流速分布が示すように、投入されたトレーサは、障害物設置点まで水路中央部トレーサが先行することにより、その分散が促進されるが、障害物設置点を通過すると、水路中央部トレーサが遅くなり、逆にその両面のトレーサが速くなり、かつ、充分発達した乱流域のため、濃度分布が水路幅方向に一様となり、結果として分散が抑制される。

流量が  $5\text{ l/s}$  である Fig. 10 の  $U = 27.8\text{cm/s}$  の実線は  $d \cdot D = 147\text{cm}^3/\text{s}$  である。障害物のない場合の分散係数を Fig. 9 より  $80\text{cm}^2/\text{s}$  とすると、分散係数に影響を与えない障害物直径  $d_0$  は  $1.8\text{cm}$  となる。一方、流量  $2.0\text{ l/s}$ 、 $U = 18\text{cm/s}$  で障害物のある場合は  $d \cdot D = 105\text{cm}^3/\text{s}$  であり障害物のない場合分散係数は  $47\text{cm}^2/\text{s}$  であった。この時  $d_0$  は  $2.2\text{cm}$  となり、上の  $5\text{ l/s}$  の  $1.8\text{cm}$  より大きい。

## 5 結 論

本論文は、開水路において水路中央に設置された障害物の(移流)分散への影響について述べたもので、障害物の分散への影響は次の通りである。

- (1) トレーサの測定点への平均到達時間は、障害物の有無に関係しない。トレーサ中心の平均移動速度は、流水断面平均流速にほぼ等しい。
  - (2) 濃度一時間分布曲線の分散  $\sigma_t^2$  は障害物を水路中央に設置することによって、その上流側ではほとんど変化はないが、下流側では  $\sigma_t^2$  の値、およびその増加割合は小さくなる。このことは障害物の水路中央設置によって分散が抑制されることである。下流側の  $\sigma_t^2$  の障害物設置点からの増加分は、障害物からの距離を障害物直径で除した無次元距離にほぼ正比例する。
  - (3) 分散係数は障害物を水路中央に設置することにより小さくなる。その値は、障害物設置点より下流側へ、障害物直径の80倍位まではほぼ直径の逆数に比例した定数になるが、その後、次第に障害物がない場合の分散係数に移行する。よって、これより(2)の正比例する範囲は直径の80倍位までと考えるのが妥当である。
  - (4) 分散が抑制されるのは、その流速分布による。障害物設置点までは水路中央部のトレーサが先行することにより分散が促進されたが、障害物設置点からは水路中央部が遅く外側が速くなり、かつ、後流が十分発達した乱流のため、結果的に分散が抑制される。
- 以上であるが、本研究の問題点は上で得られた関係が、各種の水理条件でも同様に成立するか否かである。一方分散の測定技術の向上、分散係数の算定方法の統一など、分散の研究全体に関連した基本的な問題も残されている。しかし、これは今後の研究課題としたい。

最後に本研究に多大な努力をしていただいた元水工研助手中村勝郎氏、および元卒研究生有泉毅君に感謝いたします。なお、本研究の数値計算は信州大学データステーションを通じ東京大学大型計算機 HITAC8800/8700 で行なった。

## 参 考 文 献

- 1) 玉井信行；水域における混合問題への水理学的アプローチ(I)，水理科学，No.106，p.2～61，1975.
- 2) J. W. Elder；The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow，J. Fluid Mech.，vol. 5，1959.
- 3) H. B. Fischer；The Mechanics of Dispersion in Natural Streams，ASCE，HY6，Nov.，1967.
- 4) G. V. Sabol and C.F. Nordin；Dispersion in Rivers as Related to Storage Zones，ASCE，HY5，May，1978.
- 5) E. M. Valentine and I. R. Wood；Longitudinal Dispersion with Dead Zones，ASCE，HY9，Sep.，1978.
- 6) 村本嘉雄・道上正規・中川芳一；開水路流れの縦分散に関する考察，第20回水理講演会論文集，1976.
- 7) 椿東一郎；水理学II，p. 173～p. 195，森北出版，1974.
- 8) 道上正規・村本嘉雄・伊丹正紀；縦分散における移流域の特性，第22回水理講演会論文集，1978.
- 9) 山本 恵；開水路における障害物の後流分散への影響に関する研究，信州大学修士論文，1980.