

京都大学大学院 学生員 森田 義則
 京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗
 京都大学工学部 正 員 綾 央郎

1. はじめに 河川における汚染物質の解析にあたっては、移流分散係数の推定が極めて重要な問題である。移流分散係数の推定が、平均流速、摩掀速度、水深、水路幅などの比較的計測しやすいパラメータにより行なわれると好都合である。本研究は、移流分散係数とそれらのパラメータ、ならびに流速分布特性との関連を Lagrangian Integral Scale を導入することにより、実験室内の開水路、および実河川における移流分散実験結果を用いて、次元解析により考察したものである。

2. 理論的考察 移流分散係数 D の定義は、乱流拡散係数 E と同様に、Lagrange の方法 $D_L = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \langle X^2 \rangle = \langle v^2 \rangle T_L$ (1) Euler の方法 $D_E = -\frac{1}{A} \int u'' c^2 dA$ (2) により定義される。 D_L と D_E の関係は難しい問題であるが、 $t \gg T_L$ で $D_L = \text{const.}$ のとき $D_L = D_E$ とすることが多く、本報でもひとまずそのように扱った。

i) Lagrange 的解析法; v_L は、流体粒子の Lagrange 的変動速度であり、一様流中の乱流拡散現象の場合、Lagrange 的乱れ速度であるが、移流分散現象の場合

$$v_L(\alpha, t) = u(X(\alpha, t), t) - \bar{u} + u'(X(\alpha, t), t) \quad (3) \quad \text{であり}$$

$$\langle v_L^2 \rangle = \frac{1}{A} \int \{u(X(\alpha, t), t) - \bar{u} + u'(X(\alpha, t), t)\}^2 dA = \frac{1}{A} \int \{ (u - \bar{u})^2 + \bar{u}^2 \} dA \quad (4) \quad \text{である。} T_L \text{ は (3) 式}$$

による v_L を用いて計算される Lagrangian Integral Scale である。(4) 式を用いて、(1) 式は

$$D_L = \frac{1}{A} \int \{ (u - \bar{u})^2 + \bar{u}^2 \} dA \cdot T_L = \bar{u}^2 \cdot J_A \cdot T_L \quad (5) \quad J_A = \frac{1}{A} \int \left(\frac{u}{\bar{u}} - 1 \right)^2 dA \quad (6) \quad \text{であらわれ、} D_L \text{ は、}$$

流速分布の非一様性をあらわすパラメータ J_A , T_L 、および平均流速 $\bar{u}$ を知ることにより、計算可能となるが、 T_L についてその直接測定例はなく、不詳な点が多く (5) 式による D_L の算出は實際上無理である。逆に、 D_L , J_A , $\bar{u}$ を既知とすると、 $T_L = D_L / \bar{u}^2 \cdot J_A$ (7) として T_L を検討することができる。

ii) 次元解析; 以下において、次元解析により D_L を定めた。また J_A , T_L についても水理量、幾何学的特性量の関係について調べる。 J_A に関係する水理量として $\bar{u}$, u_* , β , ρ , g , である。幾何学的特性量として、水路幅 B , 水深 d ,

表-1

Investigator	(1) Run-Number	(2) Velocity u (cm/s)	(3) Width B (m)	(4) Depth d (cm)	(5) Shear-Velocity u _* (cm/s)	(6) Re. x10 ³	(7) Fr.	(8) B/d	(9) u/u _*	(10) J _A x10 ⁻²	(11) D (cm ² /s)	(12) D/du _*	(13) T _L ¹⁾ (s)	(14) T _L ²⁾ / (d/u _*)	(15) River
(1) Author	Run-1	32.2	0.10	3.12	1.94	9.56	0.58	3.21	16.6	5.57	175 ¹⁾	28.9	3.03	1.88	┐
(2) Author	Run-2	44.1	0.10	5.02	2.21	19.40	0.63	1.99	20.0	5.68	106 ¹⁾	9.6	0.96	0.42	Lab. Flume
(3)	Run-3	27.4	0.10	2.05	1.69	4.70	0.71	4.88	16.2	5.23	98 ¹⁾	28.3	2.50	2.06	(St.)
(4)	Run-4	36.5	0.25	2.69	2.18	8.38	0.71	9.29	16.7	2.46	270 ¹⁾	46.0	8.24	6.68	┐
(5)	S-2	20.1	0.25	3.42	1.25	6.30	0.35	7.31	16.1	3.30	107 ²⁾	25.0	8.03	2.93	┐
(6)	S-7	22.4	0.25	5.52	1.49	11.30	0.30	4.53	15.0	2.30	93 ²⁾	11.3	8.06	2.18	Lab. Flume
(7) Fukuoka	S-9	38.4	0.25	5.67	2.17	19.40	0.52	4.51	17.7	1.90	126 ²⁾	34.4	4.50	1.72	(Cr.)
(8)	S-10	28.9	0.25	3.42	1.80	11.40	0.44	7.31	16.1	3.60	116 ²⁾	18.8	3.86	2.03	┐
(9)	R-5	22.6	0.25	5.67	2.41	9.78	0.32	4.41	9.38	4.40	200 ²⁾	14.6	8.90	3.78	┐
(10)	Test-1	21.9	15.94	44.80	7.83	99.00	0.11	35.6	2.80	25.5	195000 ²⁾	555.9	1590	277.9	Copper Creek (St.)
(11)	Test-2	22.2	48.46	93.30	6.71	222.0	0.08	51.9	3.31	18.8	139000 ²⁾	222.0	1500	107.9	Clinch River (St.)
(12) Godfrey	Test-3	14.1	18.65	38.40	11.46	54.80	0.07	48.6	1.23	12.8	92900 ²⁾	211.1	3650	1089.0	Copper Creek (Cr.)
(13) -Frederick	Test-4	13.2	35.36	86.90	5.18	124.0	0.05	40.7	2.55	10.1	94800 ²⁾	210.7	5390	321.4	Powell River (Cr.)
(14)	Test-5	28.7	29.57	69.50	4.88	221.0	0.11	42.6	5.88	19.0	80800 ²⁾	238.3	516	36.3	Clinch River (St.)
(15)	Test-6	53.3	18.29	80.80	10.27	329.0	0.19	22.6	5.19	45.1	214000 ²⁾	258.0	167	21.2	Copper Creek (St.)
(16)	Test-7	82.3	59.43	216.70	9.84	1171.0	0.18	27.4	8.36	14.1	539000 ²⁾	252.7	561	25.5	Clinch River (St.)
(17)	Test-8	65.8	24.69	157.30	3.96	1052.0	0.17	15.7	16.6	2.34	95700 ²⁾	153.7	945	23.8	Coachella Canal (St.)
(18)	Test-10	65.5	51.21	251.20	10.15	1633.0	0.13	20.4	6.45	15.4	464000 ²⁾	182.0	702	28.4	Clinch River (St.)

Note 1): By means of moment method 2): By means of routing method by Fukuoka and Fischer²⁾
 3): $T_L = D / (J_A \cdot \bar{u}^2)$

Abbreviations: Lab., Laboratory; St., Straight; Cr., Crooked

最大水深 d_{max} 、最大水深点から側壁までの距離 l が考えられる。これらの特性量を用いると、

$$JA = F\left(\frac{U}{u_*}, \frac{l}{d}, \frac{d_{max}}{d}, Fr, Re\right) \quad (8) \quad \text{となる。}(3) \text{式に示される}$$

ように、 U は断面内の位置に関する量であり、 U に関する水理量は、

$U, U_+, \bar{U}, \bar{W}, \sqrt{\frac{U}{d}}, \sqrt{\frac{U_+}{d}}$ であり、幾何学的特性量として B, d を用いると、

$$\frac{U}{(d/u_*)} = F\left(\frac{B}{d}, \frac{U}{u_*}, \frac{\bar{U}}{u_*}, \frac{\bar{W}}{u_*}, \sqrt{\frac{U}{d}}, \sqrt{\frac{U_+}{d}}\right) \quad (9) \quad \text{となる。ここで}$$

$$v \sim w \sim u, \frac{\bar{U}}{u_*} \sim \frac{\bar{W}}{u_*} \sim \frac{U}{u_*} \sim \frac{U_+}{u_*} \quad (10) \quad \text{と仮定すると、}(9) \text{式は、}$$

$$\frac{U}{(d/u_*)} = F\left(\frac{B}{d}, \frac{U}{u_*}\right) \quad (11) \quad \text{となる。以上の結果より } \frac{D}{du_*} \text{ は、}$$

$$\frac{D}{du_*} = F\left(\frac{B}{d}, \frac{U}{u_*}, \frac{l}{d}, \frac{d_{max}}{d}, Fr, Re\right) \quad (12) \quad \text{となる。実験結果より}$$

得られた移流分散係数 D とこれらの無次元量との関係を調べた。使用したデータは、若者および Fischer の直線水路における実験値³⁾、福岡の蛇行水路における実験値¹⁾、Godfrey-Frederick の奥河川における実験値⁴⁾、および Nordin-Sabol によってまとめられた実験値⁵⁾ である。主なデータの水理量、 D, JA (6) 式で計算される U 等について表-1 にまとめられている。

3 結果とその考察 水理量、幾何学的特性量の明らかな実験水路における値より、

傾向を調べると、図-1 より $\frac{D}{du_*}$ は $\left(\frac{B}{d}\right)^{1.5}$ に比例していることがわかる。この結果より

$\frac{D}{du_*}$ を $\left(\frac{B}{d}\right)^{1.5}$ で割り U との関係を調べたのが図-2 である。この図では、あまり明確な

関係は得られないが福岡の実験値より概ね $\frac{D}{(du_*)(B/d)^{1.5}} \sim \left(\frac{U}{u_*}\right)^{-0.5}$ と定め

$$\frac{D}{du_*} \sim \left(\frac{U}{u_*}\right)^{-0.5} \left(\frac{B}{d}\right)^{1.5} \quad (13) \quad \text{の関係を図-3 に示した。比例定数を } 2 \sim 10 \text{ に定}$$

めると、ほとんどの実験値がこの範囲に含まれる。 $\frac{l}{d}, \frac{d_{max}}{d}$ 、あるいは、より詳細な

流速分布を示すパラメータを用いることにより、比例定数がより正確

に定められることが期待されるが、これらの値は、定めにくく不詳

な場合が多い。図-4 は、表-1 に示した流速分布の明らかな実験

値について、 JA を同様に次元解析した結果である。実験水路の結果

と奥河川の結果を統合すると、 JA は $\left(\frac{B}{d}\right)$ にはさほど関係せず

$$JA \sim \left(\frac{U}{u_*}\right)^{-1.5} \quad (14) \quad \text{の関係が得られた。}$$

(7) 式、(13) 式、(14) 式 の関係を用いると

$$\frac{T_L}{(d/u_*)} \sim \left(\frac{U}{u_*}\right)^{-1} \left(\frac{B}{d}\right)^{1.5} \quad (15) \quad \text{の関係式を得る。表-1 のデ}$$

ータについて (15) 式の関係を示したものが図-5 である。この図より

比例定数を $2 \sim 4$ に定めることにより (15) 式の成立は、かなりよ

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

いものとなっている。

《参考文献》

- 1) Fukuoka, S. - Sayre, W.W. ASCE vol. 99 No. HY1 (1973)
- 2) Fischer H.B. ASCE vol. 94 No. SAS (1968)
- 3) Fischer H.B. Caltec. Report No. KH12 (1966)
- 4) Godfrey-Frederick. USGS Paper 433K (1970)
- 5) Nordin-Sabol USGS W.R.I. 20-74 (1974)

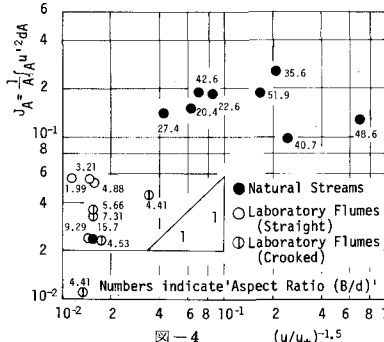


図-4

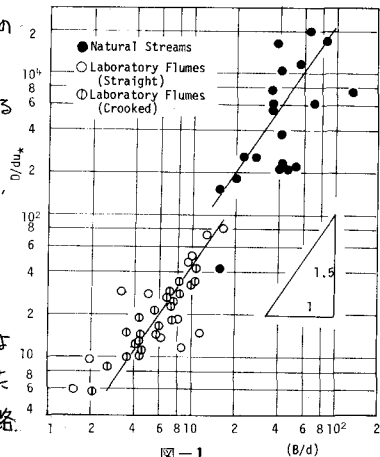


図-1

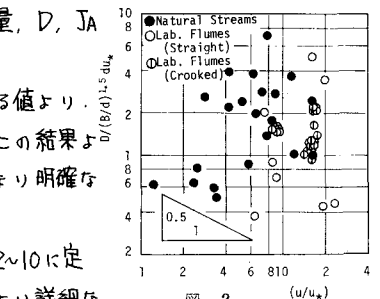


図-2

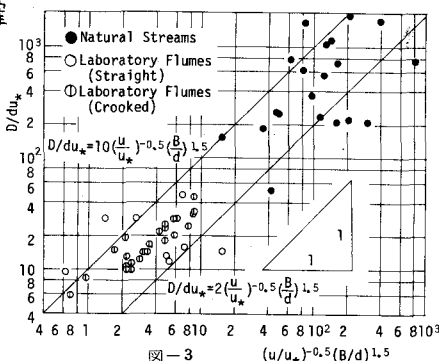


図-3

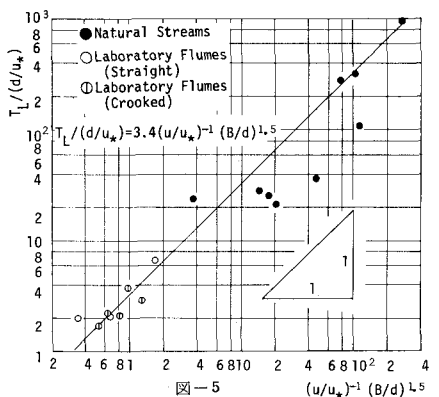


図-5