

分散雲の発達過程に関する実験的研究

京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗
 京都大学大学院 学生員 戸田 圭一
 京都大学大学院 学生員 薬師寺公文
 京都大学大学院 学生員 〇牛島 省

1. はじめに

本研究は開水路流れにおけるトレーサー実験において観測される分散雲の挙動について検討したものであって、特に2次モーメントの挙動についてLagrange的統計理論に基づき考察するとともに、2次・3次モーメントと距離の関係、ピーク濃度とその生起時刻との関係について両対数紙上において検討し、無次元化時間により領域区分を行った。

2. 実験データ

表-1 水理諸量

実験は長方形断面を有するアクリル製滑面直線水路を用いて行い、アスペクト比を広範囲に変化させた。(水路長約32m) 食塩水をトレーサーとして、濃度を導電率計により同時多点測定(1断面3~15点)し、流速分布の測定はホットフィルム流速計を使用して断面内で50~100点の計測を行った。

各実験における水理諸量を表-1に示す。

3. 2次モーメントの挙動

Taylorの古典的乱流拡散理論と流下方向に等質な速度場をもつせん断乱流場における分散現象との相似性より、

$\sigma_y^2 = \langle (x - \bar{x})^2 \rangle = 2 \langle v^2 \rangle \int_0^t (t - \tau) R_L(\tau) d\tau$ (1)
 とすることができる¹⁾。ここに $\bar{x}$ は

粒子の平均位置(分散雲の重心)である。(1)式において、 $\langle v^2 \rangle$ (粒子のLagrange的乱れ強さ)は

$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{A} \int (u^2 + v^2) dA$ (2) で与えられるが、 $R_L(\tau)$ については未知である。流速の変動強さをEuler的乱れ成分 $\langle \bar{u}^2 \rangle \equiv \frac{1}{A} \int \bar{u}^2 dA$, 鉛直方向の変動成分 $\langle u_{y,z}^2 \rangle \equiv \frac{1}{A} \int (\bar{u}(y,z) - \bar{u})^2 dA$, 水路幅方向の変動成分 $\langle \bar{u}^2 \rangle \equiv \frac{1}{A} \int (\bar{u}(x) - \bar{u})^2 dx$ の3成分について実験値より求めると、表-2のように示される。ここに $\bar{u}^2 = \frac{1}{A} \int \bar{u}(y,z)^2 dy$ である。これらの変動成分のうち、第3成分に着目して次式のような自己相関係数の近似式

Run No.	Velocity $\bar{u} (=Q/A)$ (cm/s)	Discharge Q (cm ³ /s)	Width B (cm)	Depth d (cm)	Shear Velocity $u_* = \tau_0 / \mu$ (cm/s)	B/d	$\bar{u}/u_*$	Re. $\times 10^3$	Fr. $\times 10^{-1}$
Run-111	28.3	643	10.0	2.27	1.75	4.41	16.2	4.42	6.00
Run-112	21.5	294	10.0	1.37	1.45	7.30	14.8	2.32	5.86
Run-121	27.6	805	20.0	1.46	1.58	13.7	15.4	3.09	6.42
Run-122	22.3	530	20.0	1.19	1.44	16.8	15.5	2.36	6.52
Run-911	32.2	1000	10.0	3.12	1.94	3.21	16.6	9.56	5.80
Run-912	44.1	2210	10.0	5.02	2.21	1.99	20.0	19.4	6.30
Run-913	27.4	562	10.0	2.05	1.69	4.88	16.2	4.70	7.10
Run-921	36.5	2450	25.0	2.69	2.18	9.29	16.7	8.38	7.10

表-2 流速分布特性量と時間スケール

Run No.	D (cm ² /s)	$\langle v^2 \rangle$ (cm ² /s ²)	$\langle \bar{u}^2 \rangle$ (cm ² /s ²)	$\langle u_{y,z}^2 \rangle$ (cm ² /s ²)	$\langle \bar{u}^2 \rangle$ (cm ² /s ²)	J_{A1} $\times 10^{-2}$	J_{A13} $\times 10^{-2}$	T_{SL} (sec)	T_1^* (sec)
Run-111	114	65.6 (100%)	5.46 (8.3%)	32.8 (50.0%)	27.3 (41.6%)	3.41	-1.69	1.74	4.17
Run-112	137	38.3 (100%)	3.26 (8.5%)	18.3 (47.8%)	16.7 (43.6%)	3.62	+1.91	3.57	8.22
Run-121	214	45.6 (100%)	3.39 (8.6%)	15.0 (32.9%)	26.7 (58.6%)	2.54	-1.35	4.69	14.3
Run-122	194	37.3 (100%)	2.79 (7.5%)	25.1 (67.3%)	9.42 (25.3%)	1.90	-1.10	5.19	20.6
Run-911	175	73.4 (100%)	6.97 (9.5%)	26.6 (36.2%)	39.8 (54.2%)	3.84	-2.35	2.38	4.40
Run-912	106	119 (100%)	14.5 (12.2%)	28.1 (23.6%)	76.4 (64.2%)	3.93	-2.34	0.889	1.39
Run-913	165	49.9 (100%)	5.26 (10.5%)	18.3 (36.7%)	26.3 (52.7%)	3.50	-2.27	3.30	6.28
Run-921	270	108 (100%)	9.51 (8.8%)	72.7 (67.3%)	25.8 (23.9%)	1.94	-1.05	2.49	10.4

$$T_{SL} = D / \langle v^2 \rangle$$

$R_L(t) = e^{-\frac{x}{T_L^*}} \quad (3)$ (ここに $T_L^* = D/[U^*] \quad (4)$) を用いて (1) 式を $x = \bar{u}t$ により変換した、

$\sigma_t^2 / 2J_{Ae} T_L^{*2} = \exp(-\chi_e) + \chi_e - 1 \quad (5)$ (ここに $\chi_e = x/T_L^* \bar{u} \quad (6)$) による 2 次モーメントの挙動を実験結果とあわせて示したものが図-1 であり、(5) 式は実験値を適切に表現していると考えられる。

4. 3 次モーメントおよびピーク値の挙動

断面平均 3 次モーメント m_3 と距離 x との関係をも 2 次モーメントの場合に準じて J_{Ae3} , T_L^* を用いて無次元化して示したものが図-2 である。ここに、

$$J_{Ae3} \equiv \frac{1}{6} \int_0^{\infty} (1 - \frac{\bar{u}}{U} z)^3 dz \quad (7) \quad \text{である。}$$

正規化された断面平均濃度のピーク生起時刻 t_p と正規化されたピーク濃度 C_{np} の関係を絞ら²⁾に準じて無次元化して $2C_{np} T_L^* \sqrt{\pi J_{Ae}}$ と t_p/T_L^* の関係として示したものが図-3 である。

これらのことより、開水路流れにおける分散雲の挙動の特性は $\bar{E}/T_L^*$ により領域区分され表-3 のようにまとめられる。

5. おわりに

分散雲の 2 次モーメントの挙動は相関係数の近似形として (3) 式を用いた場合に適切に表現できた。なお、相関関数形については現段階では未知な点が多く、3 次元の Lagrange 的数値実験を行うことなどにより、その特性を明らかにする必要がある。

また、分散雲の挙動の特性は T_L^* を導入することにより、従来より明確に領域区分して表現することができた。

最後に本研究を遂行するにあたって御協力いただいた京都大学綾史郎助手に謝意を表します。

表-3 分散雲の挙動の領域区分

	$\bar{E}/T_L^* < 1.5$	$1.5 < \bar{E}/T_L^* < 3$	$3 < \bar{E}/T_L^* < 8$	$8 < \bar{E}/T_L^*$
$\sigma_t^2 \propto x^{H_1}$	$H_1 = 1.5 \sim 2$		$H_1 = 1$	
$m_3 \propto x^{H_2}$	$H_2 = 2$	$H_2 = 1.5$		$H_2 = 1$
$C_{np} \propto t_p^{H_3}$	$H_3 = 1$	$H_3 = 0.67$		$H_3 = 0.5$

1) Taylor, G.I.; The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe, Proc. Royal Society of London, A 213, 1954

2) 岩佐・綾・戸田; 河川における移流分散実験データの解析, 第25回水理講演会論文集, 1981

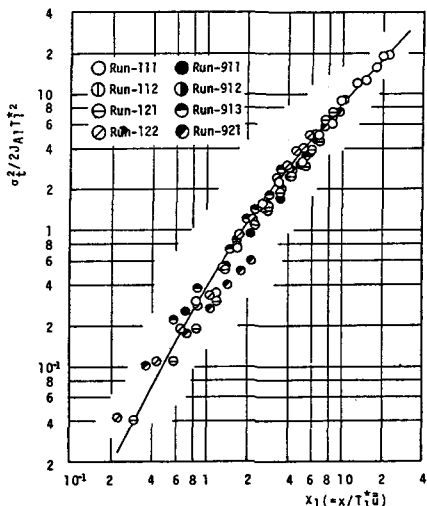


図-1 2次モーメントの挙動

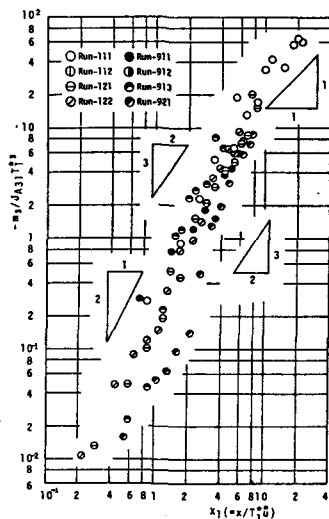


図-2 3次モーメントの挙動

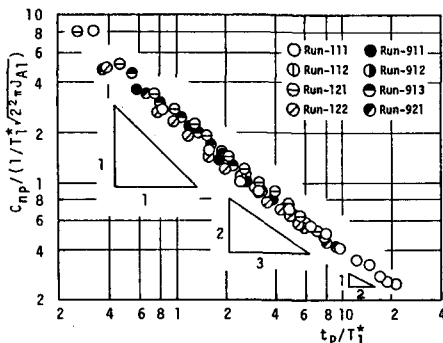


図-3 ピーク濃度値の挙動