

1)まえがき 前報¹⁾においてカオリン粒子(中央粒径 $d=6\mu$,比重 $\gamma=2.67$,沈降速度 $\bar{v}_p=0.03\text{cm/s}$)を用いた固液混相流の乱れ計測結果を示したが、本研究ではポリスチレン粒子($d=235\mu$, $\gamma=1.05$, $\bar{v}_p=0.15\text{cm/s}$)を用いた実験結果を合わせ示す。さらに日野²⁾により導かれた混相流の乱れ特性に対する式を、粒子の相対運動によるエネルギー逸散項を入れ修正し、これにより得られた実験結果を説明する。

2)実験結果 用いた実験装置、乱れ計測法、データ処理は前報と全く同じである。ここでは省略する。表-1に実験の物理量を示す。求めた乱れ特性量は乱れの強さ $\sqrt{u'}$ 、最大乱りの径 λ 、パワースペクトル、エネルギー逸散率などであるが、後の二つは結果がばらつき一定の傾向が見られなかったため省略し、図-1,2に乱れの強さを、図-3,4に最大乱りの径を示す。

3)日野の理論式の修正 日野は固体微小粒子を浮遊した流れの乱れのエネルギー方程式として

$$\rho_a \cdot \bar{u}^3 \cdot (d\bar{u}/dy) \cdot \int_{y/h}^1 \rho_f \cdot \{1 + C(\gamma-1)\} / \rho_a \cdot d(y/h) = \alpha_1 (1 - d^3 C) \rho_f \cdot \bar{u}^3 / L + \rho_f \cdot (\gamma-1) C \bar{v}_p g W_p + L \cdot \text{diffusion} \dots$$

(1) を導いた。ここで ρ_a ; 断面平均密度、 $\bar{u}$; 局所平均流速、 $\hat{u} = \sqrt{u'}$ 、 y ; 底からの高さ、 α_1, α ; 比例定数($\alpha \approx 1$)、 g ; 重力の加速度、 W_p ; 粒子の相対運動によるエネルギー逸散項で、粒子1つ当りのそれを w_p とすると $W_p = C_f / (\pi d^3/6) \cdot w_p$ で、 $w_p = 9\pi\mu d (\bar{v}_p - \bar{v}_p^2) = 9\pi\mu d \bar{v}_p^2 \cdot (1-b^2)/(2\lambda^2+1) \dots$ (2)

である。ここで $a=36\mu/(2\rho_p+\rho_f)$, $b=3\rho_f/(2\rho_p+\rho_f)$, λ ; ラグランジュのタイムスケール、また順序 ρ_f はそれぞれ粒子、流体を示す。式(1)の右辺は、乱れが平均流から獲得するエネルギーで、

右辺第一項は乱れのエネルギー逸散量、第二項は粒子の沈降によるエネルギー逸散量である。つぎに $\lambda^* = \alpha \cdot L_E / \hat{u} = 0.4 L_E / \hat{u}^3$ [L_E ; オイラーの積分スケール]で、 $L_E/25 = L$ より $\lambda^* = 0.16 L / \hat{u}$ となる。 $\hat{u} = \bar{u}$ と仮定し式(2)は $w_p = 75/8 \cdot (1-b^2) \cdot (2\lambda+1) \rho_f \cdot (\pi d^3/6) \cdot (\hat{u}^3/L) \dots$ (3) となる。

一方粒子と同体積の乱れのエネルギー逸散量 D は、式(1)の右辺第一項を用い、 $\alpha_1 \approx 2.75$ とし $D = 2.75 \rho_f \cdot (\pi d^3/6) \cdot (\hat{u}^3/L) \dots$ (4) である。式(3), (4)より、中立粒子($b=1$)の場合 $b=1$ で、 $w_p = 0$ となるが

$\rho_p = 2.5 \rho_f$ とすると $b=1/2$ で $D < w_p$ となる。乱れ計測には現在でもかなりの誤差を含んでいまし、またいろいろの仮定を設けてゐるので、必ずしも $D < w_p$ とは言えないかも知れない。

しかし、日野のように w_p は D に比し小さいと無視することは誤りである。また、式(2)の $\bar{v}_p$ の計算にLumleyの方法を用いると、 $w_p = (38+2/3 \cdot d^2 \rho_f / \mu \cdot \hat{u} L / \lambda_E) \cdot \rho_f \cdot (\pi d^3/6) \cdot \hat{u}^3 / L \dots$ (5) となり $\gamma=1$ の時でも $D < w_p$ となる。

この式の括弧内は後の解析を容易にするため一定と仮定し、さらに流れは多数の粒子を含み、これらが影響し合いエネルギー逸散量は増加すると考えられる。この増加に対する割増係数を α とて式

表 - 1								
実験番号	1	2	3	4	5	6	7	8
粒 子	清水	カオリン	清水	カオリン	ポリスチレン	ポリスチレン	ポリスチレン	ポリスチレン
流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$	20.6	20.6	20.8	22.2	21.4	20.8	34.7	35.2
体積濃度 $C(\%)$	0.0	1.12	2.76	9.0	0.55	1.10	2.31	5.12
水深 $h(\text{cm})$	9.2	9.1	9.2	9.5	9.3	9.2	9.3	9.3
平均流速 $\bar{u}(\text{cm/s})$	74.6	75.3	75.4	77.1	75.6	75.1	125.2	126.7
径深 $R(\text{cm})$	5.7	5.7	5.7	5.8	5.8	5.7	5.7	5.7
フレド数	1.00	1.01	1.01	1.03	1.01	1.00	1.32	1.33
水温 $(^\circ\text{C})$	25.0	30.3	28.5	24.1	26.1	24.3	21.0	9.3
動粘性係数 $\nu \times 10^{-4}(\text{cm}^2/\text{s})$	3.97	7.99	8.30	9.15	5.77	7.01	9.33	13.35
静粘性係数 $\eta \times 10^{-4}(\text{poise})$	—	3.03	3.65	—	3.59	9.20	10.00	15.00
$\nu/\lambda \times 10^{-4}$	4.74	5.32	5.07	4.75	4.90	4.63	7.16	4.34
径深 R に対する λ の比	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.35	0.55
フレド数 Re_{10}	0.34	2.30	2.29	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32
割増係数 α	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15

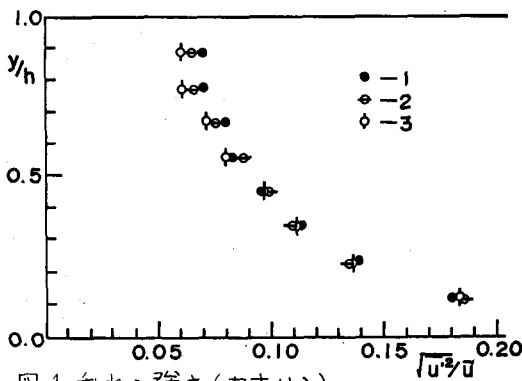


図-1. 乱れの強さ(カオリン)

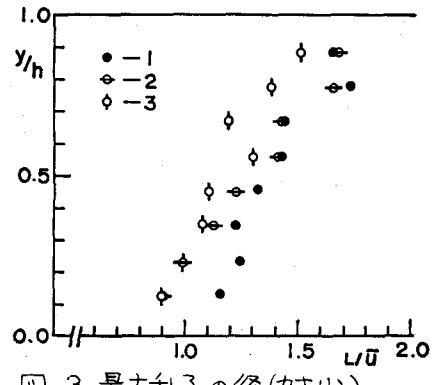


図-3. 最大乱子の径(カオリン)

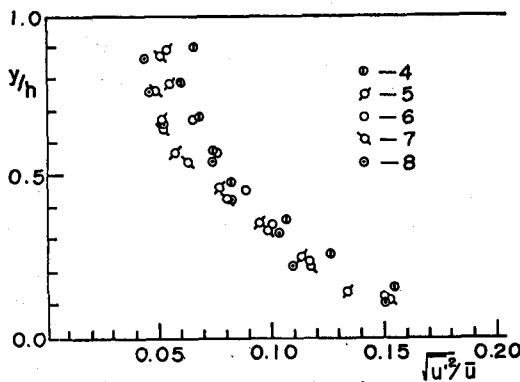


図-2. 乱れの強さ(ポリスチレン)

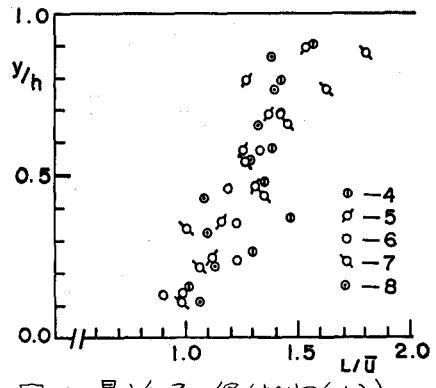


図-4. 最大乱子の径(ポリスチレン)

5)の括弧内を e とすると、 $W_p = eC\beta_s \cdot \hat{u}^3/L$ となる。この後の解析は W_p を考え、式(1)の左辺第一項を $\alpha_1(1-\alpha_1^3 C + eC/\alpha_1) \cdot \hat{u}^3/L$ と置き換えるだけで、日野の場合と全く同じで、結果を $\hat{u}$ について記すと、 $L/L_m = (1+\beta Ca)/2 \cdot [1 + \{1 + 4BK(1+\beta Ca)S_1\}] \dots (6)$ $\hat{u}/\hat{u}_m = \sqrt{u}/\sqrt{u_m} = \{1/(1-\alpha_1^3 C + eC/\alpha_1)\}^{1/3}$ 、 $(\rho_a/\rho_f) \cdot [1 - 4K\delta S_1/(1+\beta Ca) \cdot \{1 + (1 + 4BK(1+\beta Ca)S_1)\}^{1/2}] \dots (7)$ である。ここに β 、 B ；定数、 Ca ；断面平均濃度、 K ；静水流のカルマン定数、 $\alpha_1 = \alpha \{1 + \int_0^h (C-C_a)/Ca \cdot dy\}$ 、 $\delta = \ln(h/\delta)/[\ln(h/\delta)-1]$ 、 δ ；粘性底層の厚さ、 $S_1 = \rho_f(\delta-1)W_p \cdot (h-\delta)$ 。添字 m は混相流を示す。

4)実験結果の説明 表-1 および図-1〜4より全般的傾向としてつぎのことが言える。a)乱れの強さは、両方の混相流とも清水流のそれに対し、粒子の体積濃度の増加につれ減少する。b)同じことが最大乱子の径、およびこれと比例関係にあると考えられるカルマン定数について言える。式(6)、(7)において S_1 は両方の粒子とも非常に小さいので、 S_1 のかかっている項は無視して上の結果を考慮してみる。b)は $\beta > 0$ であるので、式(6)により説明できる。式(6)で $\hat{u}_m < \hat{u}$ となるのは、 $eC/\alpha_1 > 1$ の時、これは $\alpha_1 = 1$ 、 $\alpha_1 = 2.75$ であるので十分可能である。しかし日野が導いた式では、 W_p すなわち $eC\alpha_1$ 項を小さいとして無視しているため、 $\alpha_1 = 0$ の時はずう $\hat{u}_m > \hat{u}$ となり、a)の結果は説明できない。しかし上の実験も多少の問題点を含んでいるので、今後なお一層の検討を必要とする。

5)参考文献 1)余越・富所；固液混相流の乱れ特性について2，年報，Ⅱ-13，1974， 2)M. Hino；Turbulent flow with suspended particles, Proc. ASCE, HY4, 1963. 3)今本；間水路の乱れ特性，水工師修会講義集，Aコース，1976 4)余越・富所・松井；混相流に関する二，三の考察，中部支部年報，Ⅱ-2，1974