

(10) 固液混相流の乱れ特性と拡散特性

東京大学工学部 ○三村 信男
 〃 松尾 友矩

I. はじめに

土砂粒子をはじめ固体粒子を浮遊させた流れでは、カルマン定数が減少し、抵抗法則や乱れ特性も変化するなど、流動特性が変化することが知られている。さらに、浮遊している粒子の比重が1に近い、いわゆる中立浮遊状態にある固液混相流でも、流動特性の変化を生じる。こうした現象にたいして多くの研究がありとくに日野氏は、粒子浮遊流のエネルギー平衡式を導くことによって実験事実をよく説明する理論的解明を行なったが、なお粒子径の影響をどう評価するかなどの検討が残されている。

一方、衛生工学で扱う水も多くの場合、上水汚泥や活性汚泥を浮遊させた固液混相流であり、水と異なる抵抗法則を示す。また、活性汚泥濃度が酸素移動に影響を与えるなどの報告もあるが、基質の除去、水質変化のプロセスを考えた場合、これを左右する要因の一つに、フロックを浮遊させた流れの流動特性や物質移動・拡散特性があることは明らかである。しかし、この点に関しても現象自体が整理されていないし、体系的に十分解明がされているとはいえないのが現状であろう。

こうしたことから、筆者らは、中立浮遊状態にある固液混相流に着目し、その流動現象を整理し、乱れ特性、拡散特性を明らかにする目的で、ポリスチレン粒子浮遊流（以下、粒子流という）カオリンフロック浮遊流（フロック流）、活性汚泥浮遊流（汚泥流）という種類の異なる固液混相流をつくり、円管路を用いて流れの特性量を測定する一連の実験を行なったので、その結果を報告する。

II. 測定項目と実験装置、データの処理

（測定項目および算定した特性量）

マクロな流れの指標……抵抗係数

乱れ特性の指標……乱れの強さ

$$\frac{\tau}{\sqrt{\tau^2}}$$

自己相関係数 R_E

平均渦径 A

エネルギースペクトル $E(k)$

エネルギー逸散率 ε

拡散特性の指標……トレーサの濃度分布

（実験装置および実験条件）

実験は、図-1に示すような円管路系を用いて行なった。用いたパイプは、内径5 cm、長さ13 mのまっ

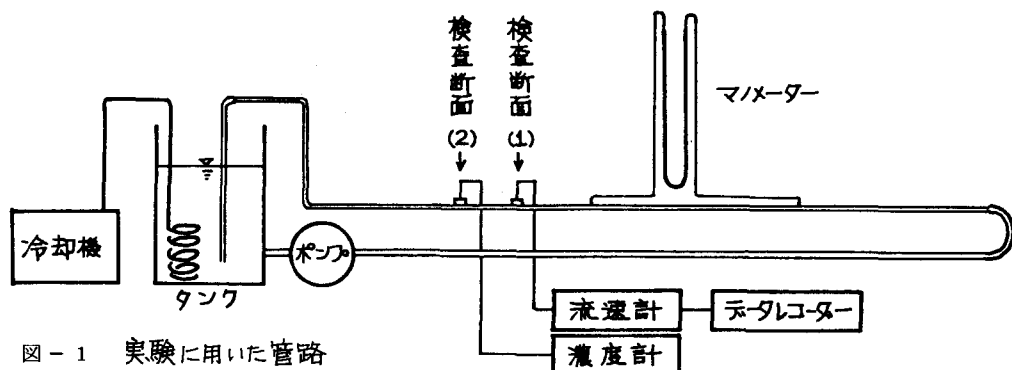


図-1 実験に用いた管路

すぐな硬質塩化ビニール製のもので、流入端から8.8 mのところに乱れ特性を測定するホットフィルム流速計のセンサー挿入口3.8 mのところに拡散特性を測定する濃度計センサー挿入口をつくってある。流れの損失水頭を測定するマンメータは、これらの検査断面の上流に4 mの区間をとってとりつけた。

実験に供した粒子、カオリンフロック、活性汚泥は表-1に示し、混相流体の種類および実験の水理量は表-2に示す。粒子はD社製の粒径の異なる三種類のポリスチレン粒子を用い、粒径による差を確かめると同時に、混合粒径の粒子流を作ってどの粒径の粒子が卓越した影響をもつかを確かめた。ポリスチレン粒子を水になじませるためにR社製の非イオン系界面活性剤を用いたがそのことによる影響はなかった。

カオリンフロック、活性汚泥は、実験の前に1時間パイプの中を流し、破壊されてほぼ平衡径に達している状態のものを用いた。

濃度は、粒子流については体積濃度を5%とした。フロック流、汚泥流については体積濃度が測定できないため24時間沈降体積率を用いたが、濃度として粒子流と大きな差はないと思われる。

測定した流速の範囲は、表-2に示した通り高速域と低速域（便宜上こう呼び分ける）の2つである。また、タンクの中に冷却機を入れ温度コントロールをしたので、同一種の流体の測定中の温度変化は小さかった。（乱れ特性の測定とデータ処理）

乱れ特性の測定は、N社製のホットフィルム流速計を用いて、管中心から管壁近くまで6点の位置で行ない、データはデータレコーダーに記録した。

データの処理にあたっては、まずデータレコーダーのデータをA/D変換した。このときのサンプリング間隔は、0.5 MSとしたものと0.25 MSとしたものの2種類あり、0.25 MSのものについては、同一データを2.5 MSの間隔でもサンプリングし低周波数領域を細かくみられるようにしてある。データ数は2000個である。このデータを用いて自己相関係数エネルギースペクトルEの計算を行なった。

平均管径A エネルギー逸散率εは、各々次の式から算出した。

$$A=\overline{U}\int_0^{\infty}Re\,d\tau \tag{1}$$

（ $\overline{U}$ 平均流速）

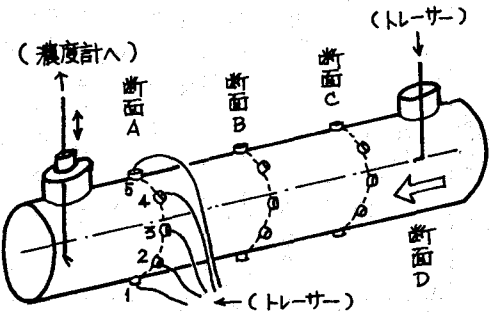


図-2 拡散実験 模式図

粒 子	比 重	粒 径(mm)
粒 子 S	1.08	0.12
粒 子 M	1.03	0.65
粒 子 L	1.03	1.30
フロック-1 (ALTE 0.024)	—	0.07
フロック-2 (ALTE 0.048)	—	0.07
活性汚泥	—	0.11

表-1 実験に用いた粒子

	RUN	流 体	温 度 (℃)	Re数 ($\times 10^3$)	体積濃度
高速域	1	清 水	29.0	1.20	—
	2	粒子 S	27.8	1.14	0.05
	3	粒子 M	28.8	1.18	0.05
	4	粒子 L	24.0	1.19	0.05
	5	S:L=1:4	23.7	1.18	0.05
	6	S:L=1:1	24.0	1.18	0.05
	7	フロック 1	24.1	1.22	0.07 (24時間沈降率)
	8	フロック 2	27.8	1.12	0.09
	9	活性汚泥	29.5	1.21	0.09 (24時間沈降率)
低速域	10	清 水	28.8	3.22	—
	11	粒子 S	27.8	3.26	0.05
	12	粒子 M	29.5	3.38	0.05
	13	フロック 2	27.8	4.30	0.09 (24時間沈降率)
	14	活性汚泥	30.0	3.42	0.09

表-2 実験の諸条件

$$\varepsilon = 2\nu \int_0^\infty k^2 E(k) dk \quad (2)$$

但し、活性汚泥については、汚泥フロックがセンサーに粘着し測定できなかった。

(拡散特性の測定)

固液混相流中における物質輸送の様子を明らかにするため NaCl 溶液をトレーサーとして注入し、下流における濃度分布を測定し、これを拡散特性の指標とした。図-2 に測定部の模式図を示した。検査断面から上流に 20 cm (A), 50 cm (B), 80 cm (C) の距離に注入断面を設定し、各断面毎に片断面を 5 等分した点 (点 1 ~ 5) からトレーサーを順次注入して各点毎の濃度分布をみると同時に、重ね合わせることも考えた。また、上流 1 m の点 (D) では、管中心線上でトレーサーを注入した。トレーサーとして用いた NaCl の濃度は 5 % である。

これにたいして、検査断面では、濃度計センサーを移動させ、管中央から管壁まで 7 点の位置で濃度分布を測定した。

但し、カオリンフロック流はもともとの電導度が高く拡散実験を行えなかった。

III. 結果と考察

(抵抗係数 f)

流れの抵抗係数 f は、 $f = h_f \cdot \frac{32D}{L U_0^2}$ (h_f 損失水頭, D 管径, L 測定区間) から求めた。これを Re 数に対してプロットしたものが図-3 である。清水の f は、流速分布に対数則を仮定して求めたものとよく一致する。図-3 の Re 数で、動粘性係数 ν は、全て清水のものをを用いてある。

固液混相流の f は、 $1.3 \times 10^5 \geq Re$ で水よりも大きく混相流の流動に付加的エネルギーが必要なことを示している。粒子流の場合、粒径の小さいものほど f を大きく増大させる。混合粒径粒子流においても粒子 S の割合の大きい程 f は大きい。また、フロック流、汚泥流の f はつねにいくらかづつ清水の f より大きくなっているのに対して、粒子流の f は、 $7 \times 10^4 \geq Re$ で急速に清水の f から離れる。

(乱れの強さ $\sqrt{u'^2}$)

乱れの強さ $\sqrt{u'^2}$ の断面内分布は、図-4 に示す。粒子流では、乱れの強さが増大し、とくに粒径が大きくなるにつれて乱れを増大させる効果が大きいことがわかる。これに対して、フロック流では清水とほとんど変わらない。

さて、粒子流に対するこの結果は f の測定結果と一見矛盾するように見える。すなわち、著しく乱れを増大させそのために付加的エネルギーをより多く必要すると思われる大きな粒子 L を浮遊させた流れの方が f でみれば、粒子 S 流よりも下まわっている。このことから、乱れの増大がすぐにはエネルギー消費の増加に結びつかないような構造が予想されるが、これを明らかにするには、乱れの内部構造にたち入った検討が必要

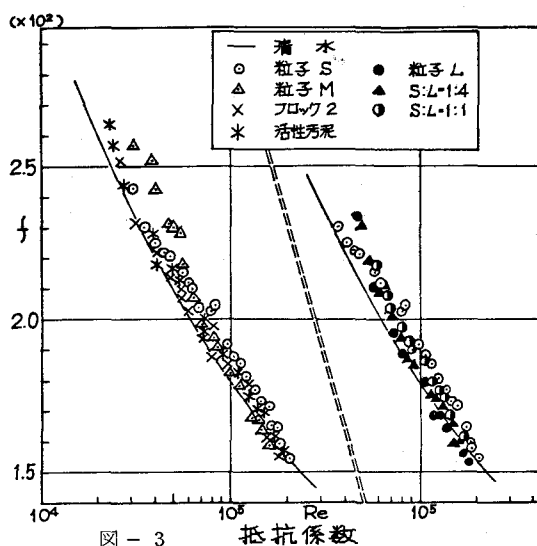


図-3

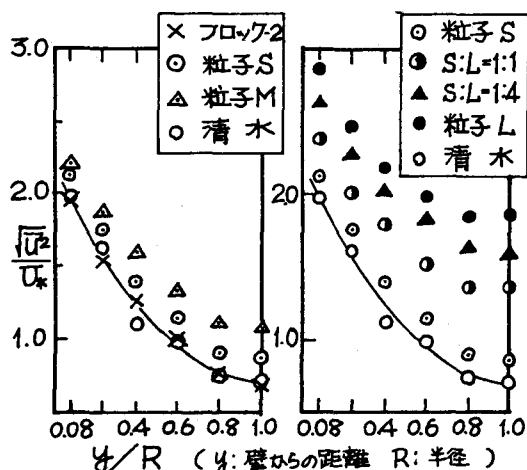


図-4 乱れの強さの断面内分布 (高速域)

要である。

(自己相関係数と平均渦径)

乱れのデータから求めた自己相関係数 R_E は図-5に示しこれから算出した平均渦径 l は、表-3に示した。

この2つの指標においても粒子径の影響は大きく、とくに粒子Lは、著しく平均渦径を小さくし従って、渦の寿命時間を短くする。

(エネルギースペクトルとエネルギー逸散率)

エネルギースペクトルは図-6に、このエネルギースペクトルから式-(2)を用いて求めたエネルギー逸散率を表-4に示す。

高速域での清水のエネルギースペクトルは $-5/3$ の勾配に合致する部分をもった形になっている。また、高速域、低速域とも管中心では粒子の影響が大きく現われているのに対して、管壁付近では顕著ではなく、管壁の効果が強いことを示している。一方、フロック流のスペクトルは清水のそれとほとんど重なっており、乱れという点ではフロックはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

次に、低速域のスペクトルの形はきわめて特徴的である。すなわち、粒子流のスペクトルは粒径に応じて特定の波数で"コブ"をもっており乱れのエネルギー逸散率は、この"コブ"のところで極大値をとっている。エネルギー逸散率が極大になる波数 k_E に相当する乱れのスケールを $l_E = 1/k_E$ として求めたものが表-4に示した逸散にかかわる渦径である。 l_E は粒径とほぼ同程度の大きさになっている。

しかも、波数の高い領域では、粒子M流のスペクトルと粒子S流のスペクトルが交叉している。こうした交叉がおきれば $\overline{u'^2} = \int_0^\infty E(k) dk$ という形で表わされる乱れの強さとしては、粒子M流の方が大きいけれど、

$E = 2\nu \int_0^\infty k^2 E(k) dk$ という形で表わされるエネルギーの関係を考えると、より高い波数に $k^2 E(k)$ の極大値をもつ粒子S流の方が大きなエネルギー逸散を行なうことが導かれる。

こうして、粒子浮遊流の粒子径による抵抗係数 f と乱れの強さ $\sqrt{u'^2}$ に対する影響の現われ方の間にあった矛盾は、定性的には説明されうる。しかし、表-4にみる通り、量的にエネルギーの収支を説明するには致っておらず、今後一層の検討が必要であると考えている。

(拡散特性)

拡散実験の結果は、図-7に示した。

壁面からトレーサーを注入した場合、粒子流、汚泥流とも清水と比べて管中心方向に大きな輸送-拡散を行う傾向がある。一方、管中心にトレーサーを注入した場合、粒子流と汚泥流とは清水をはさんで逆の傾向をみせる。管中心にトレーサーを注入した場合には移流の効果が大きく、粒子流では

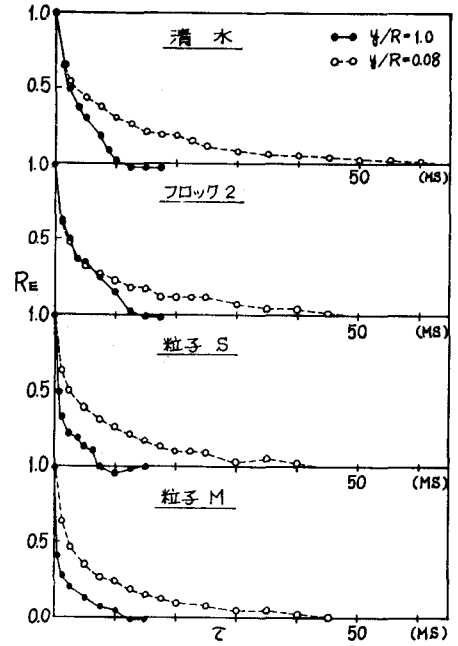


図-5 自己相関係数 (高速域)

流体	平均渦径 (cm)	
	$y/R=1.0$	$y/R=0.08$
清水	0.91	1.40
粒子 S	0.62	1.25
粒子 M	0.35	1.38
粒子 L	0.28	0.93
S:L=1:4	0.69	0.62
S:L=1:1	0.31	0.73
フロック 2	0.94	1.27

表-3 平均渦径 (高速域)

流体	y/R	$\epsilon \cdot D / U_*^3$	$l_E (cm)$
清水	1.0	0.19	0.15
	0.4	1.67	—
	0.08	2.15	—
粒子 S	1.0	18.1	0.022
	0.4	37.7	0.020
	0.08	27.4	0.019
粒子 M	1.0	10.3	0.066
	0.4	45.2	0.077
	0.08	50.5	—

表-4 エネルギー逸散率と逸散にかかわる渦径 (低速域)

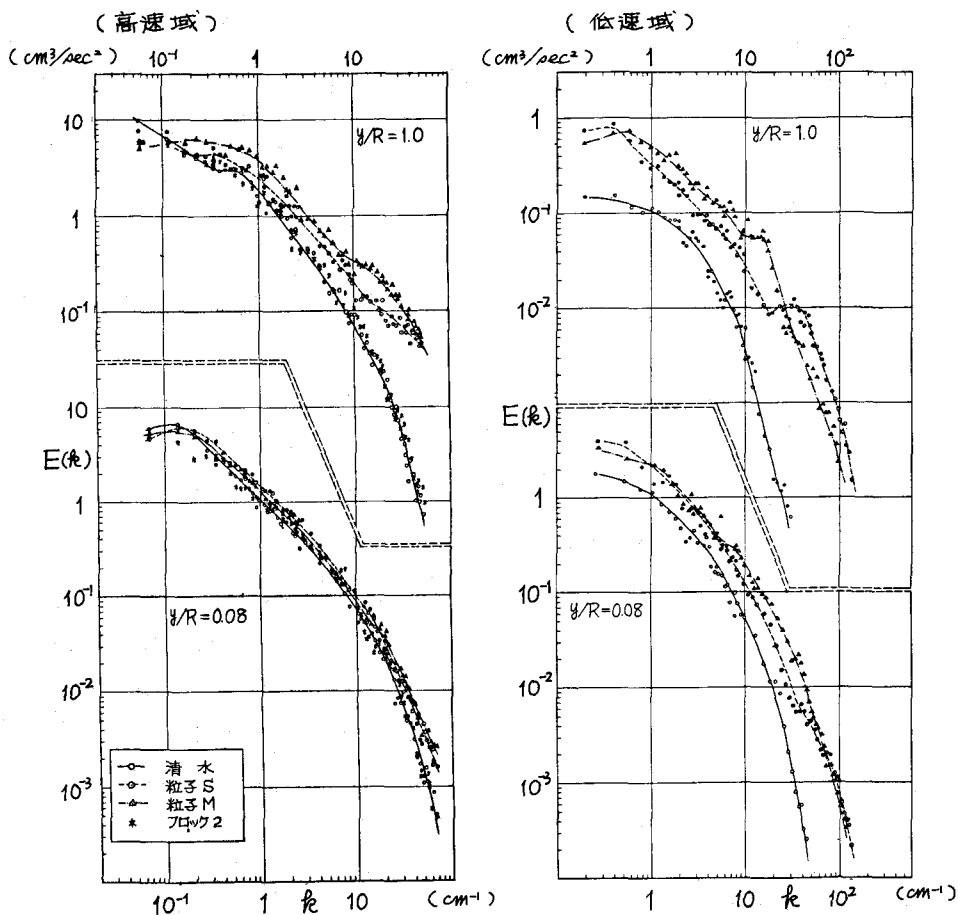


図 - 6 エネルギー スペクトル

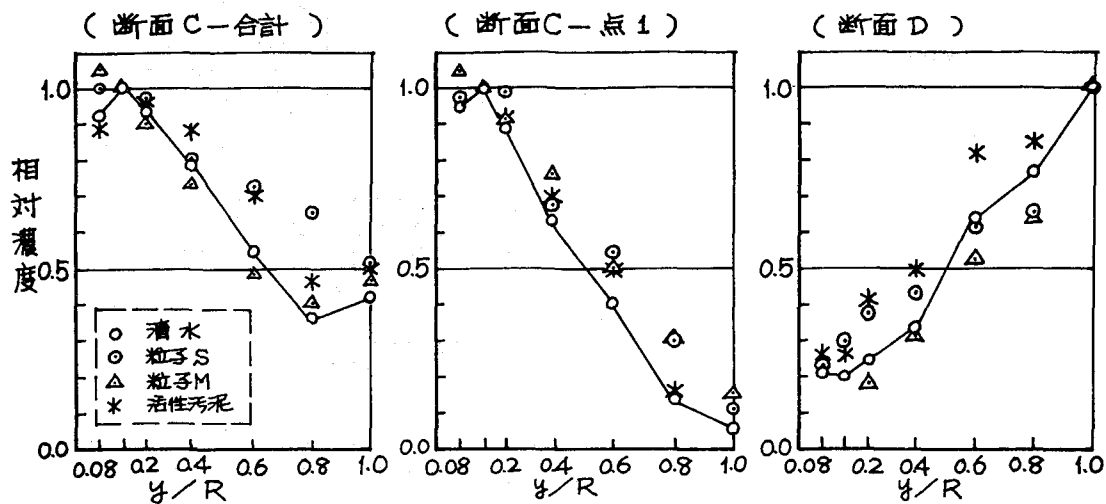


図 - 7 トレーサーの断面内濃度分布

※ 注入点 1, 2, ... からの濃度を $C_1, C_2, \dots$ とすると (合計) = $C_1 + 2 \times (C_2 + C_3 + C_4) + C_5$

清水と比べて流速分布が鋭い形になっていることがこうした結果をもたらしたと思われる。

拡散特性については端初的な実験結果が得られている段階であり、乱れ特性との整合等今後とも検討をすめたい。

IV. まとめ

以上みてきたことをまとめると次のようになる。

- ① 粒子流，フロック流，汚泥流の抵抗係数 f は増大する。粒子流においては粒径の小さい粒子流ほど f を大きく増大させる。
- ② 乱れの強さ $\sqrt{u'}$ は，粒子流では増大し，粒径の大きな粒子ほど $\sqrt{u'}$ を大きく増大させる。このとき，乱れの平均渦径は小さくなり，渦の寿命時間も短くなる。こうした粒子の影響は管中心でとくに大きく管壁に近づくにつれて壁の効果が支配的になる。
- ③ フロック流は乱れの強さにほとんど影響を与えない。
- ④ 粒子流のエネルギースペクトルは，特定の波数にコブをもち，この波数でエネルギー逸散率の極大値をもつ。この波数から求めた渦のスケールは，粒子径とほぼ同程度である。 f と $\sqrt{u'}$ に対する粒子径の影響の現われ方のちがいを説明するものとして，エネルギースペクトルの以上の特徴は興味深い。
- ⑤ 粒子流と汚泥流の拡散特性は，トレーサーを壁から注入した場合と管中心に注入した場合では異なる。
- ⑥ 固液混相流であっても，剛体粒子を浮遊させた粒子流と変形可能なフロック，汚泥を浮遊させた流れでは，とくに乱れ特性において大きな差があることがわかった。

筆者らは，固液混相流の基本的な流動現象を整理し，解明するために，一連の実験を行ってきたが，ここではその結果を列挙し，多くの方々のご検討をお願いしたい。問題の定量化，解析-理論化の点で多くの課題が山積しているが，今後とも努力していくつもりである。

V. おわりに

今回の計算を行うに際しては，東京大学工学部土木工学科のアナログ-デジタルコンピュータを利用させていただきました。土木工学科の松本教授，西岡助教授，交通研究室の皆様にご感謝いたします。また，数値計算は，東京大学大型計算機センターを利用しました。

(参考文献)

- 日野 幹雄 " 固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化 " 土木学会論文集 第92号 (1963)
J.O. Hinze " Turbulence "
ロッタ " 乱流 "