

II-203 汚泥の管路流動に関する基礎的実験

東京大学工学部 学生員 ○ 大垣真一郎

東京大学工学部 正会員 松尾友矩

1. まえがき

固体を混在させた流体を解析する方法は、二通りある。一つの方法は、混在流体を単一の流体とみなし、変形速度と剪断応力に関するレオロジー模型を基礎とする方法である。他の方法は、液体中に固体粒子が浮遊している固液混相流とみなし、液体中での固体粒子の内部力学機構を考察する方法である。衛生工学で取り扱われてきた活性汚泥を中心とする汚泥流体の解析は、主に単一の流体とみなす方法であった。^{1), 2)}しかし、個別の技術(例えば、輸送など)への適用から、より普遍的な解析へ進むためには、土砂浮遊流などで用いられている固液混相流体としての解析方法³⁾が必要である。

ここでは、ミルク活性汚泥フロックを含む流体を、直管路および急拡大管に流し、断面平均流速と圧力損失を測定した。直管路は、汚泥流体の摩擦エネルギー損失への、急拡大管は、汚泥流体の形状エネルギー損失への影響を考察するためである。実験結果をこの両エネルギー損失について整理し、汚泥流体の固液混相流としての取り扱いについて検討した。

2. 実験方法および装置

直管路の実験システムの概要を図-1. に示す。測定管路、貯留タンク(190ℓ)、ポンプからなる循環システムである。測定管は、内径 $D=2.5\text{ cm}$ の塩化ビニール管を使用した。圧力損失測定区間長は、539.7 cmである。助走区間長 l_1 は、100 cmの透明アクリル管部を含めて、約350 cm($l_1 \approx 140 \cdot D$)である。

急拡大管は透明アクリル製で、寸法は図-2 に示すものを使用した。急拡大実験時には、急拡大管を直管路システムの透明

アクリル管の位置に取り付けた。この時の助走区間長は、約205 cmである。

供試材料は、清水として水道水を、汚泥としてはミルク活性汚泥を使用した。ミルク活性汚泥は、スキムミルクを用いて実験室で育てたものである。沈殿濃縮および水道水による篩取によって、所定濃度の汚泥を得た。

断面平均流速の測定は、吐出流量を重量として測定し、体積に換算して求めた。圧力損失は、直管路、急拡大管路共に管路断面の頂部に圧力取出口を設けて、差動マノメーターにより、差圧として測定した。マノメーターへの汚泥の混入を防ぐため、圧力取出口とマノメーターをつなぐ導管の途中に沈殿ビンと設けた。汚泥の濃度の指標は、全蒸発残留物(T.S.)を用いた。方法はJ.I.S.による。

図-1. 実験装置

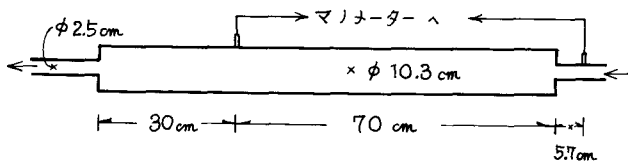
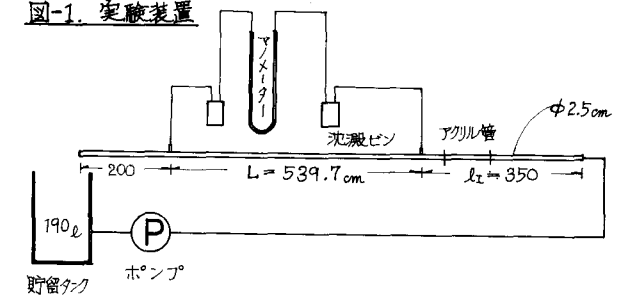


図-2. 急拡大管

3. 実験結果と考察

直管路の実験結果の基本的な指標（流速 V と損失水頭 h_f ）の関係を図-3. に示す。 $V \approx 9 \text{ cm/sec}$ 以下では、泥澱や閉塞によって不安定な流れ状態を示している。 $V \approx 9 \text{ cm/sec}$ 以上の流れでは、種々の汚泥について今までに得られた結果と同様に清水よりも大きな損失水頭を示し、特に層流的な領域において著しい。乱流域のデータは、図が煩雑になるので、代表として2種類の濃度についてだけ示した。

層流域に関しては、汚泥を含む流体を単一の流体のように取り扱えば、汚泥を含む流体は Bingham 流体としてのレオロジー模型が適用できる。^{2),3)} Bingham 流体の円管内層流流れにおける平均流速 V と壁面剪断応力 τ_w との関係は一般に次式であらわされる。

$$\frac{8V}{D} = \frac{\tau_w}{\eta} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4 \right]$$

ここに、 D : 管径、 η : Bingham 流体の粘性係数、

τ_y : Bingham 流体の降伏応力、

$1/3 (\tau_y/\tau_w)^4$ 項は無視できると考えれば、⁴⁾ 次式

$$\frac{8V}{D} = \frac{1}{\eta} \tau_w - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\eta}$$

を得ることができ、 $8V/D$ と τ_w は直線関係にあることがわかる。図-4. に示すように、本実験の層流域データも、直線関係を示し、使用した汚泥流体にも Bingham 模型が適用できることがわかる。

Bingham 流体の円管内乱流流れについては、伊藤の考察⁵⁾ などがあり、汚泥を含む流体も見掛けのレイノルズ数と見掛けの摩擦係数を用いれば、清水流の円管内滑面乱流抵抗則と一致させることができる。^{2),6)} し

かし、単一の流体としての取り扱いでは、乱流流れの見掛け上の現象を記述するだけに終る。そこで汚泥フロックを考慮した流体の流れの内部力学機構を探るために、固液混相流体としての解析をおこなってみた。清水流について求められた円管内滑面乱流抵抗則

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0.814}{K} \log_{10}(Re \sqrt{\lambda}) - \frac{0.814}{K} (\log_{10} \beta + 1.404) \quad \dots\dots (1)$$

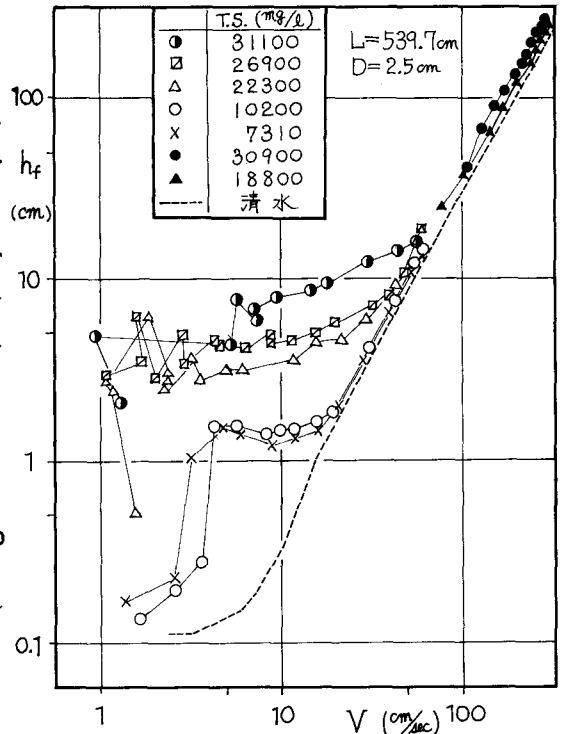


図-3. 流速と損失水頭

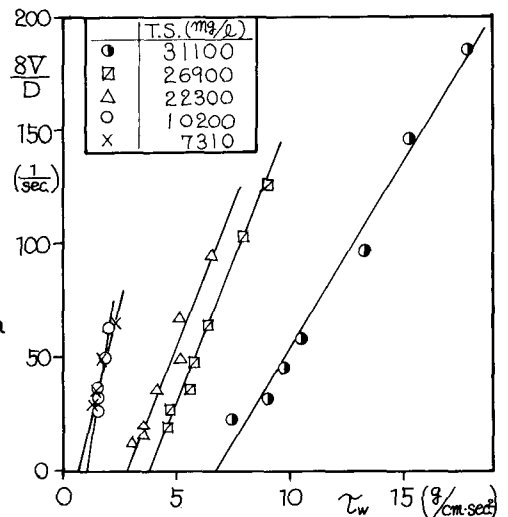


図-4.

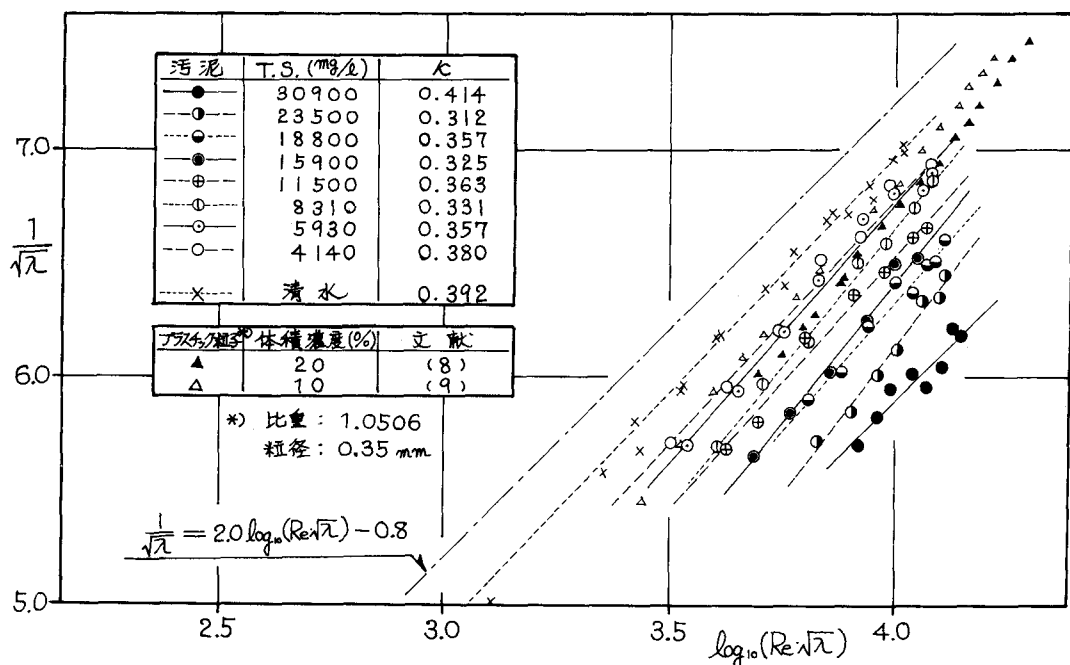


図-5. 円管内滑面乱流抵抗法則

ここに、 f : Darcy-Weisbach の摩擦係数、 K : カルマン定数。

Re : 清水の動粘性係数を用いたレイノルズ数、 β : 定数。

の形式を使用する。この式は、Darcy-Weisbach の摩擦係数 f が、レイノルズ数の関数であり、 $1/\sqrt{f}$ と $\log_{10}(Re\sqrt{f})$ が直線関係であることを示す。清水については、カルマン定数 $K=0.4$ であることが知られており、 $1/\sqrt{f} = 2.0 \log_{10}(Re\sqrt{f}) - 0.8$ という式が一般に認められている。乱流域の実験結果を(1)式の形に整理し、図-5. に示す。汚泥系においても、 $1/\sqrt{f}$ と $\log_{10}(Re\sqrt{f})$ が直線関係を示し、濃度の増加に伴い、摩擦係数 f が増加し、回帰直線が清水の直線から離れる傾向を示している。

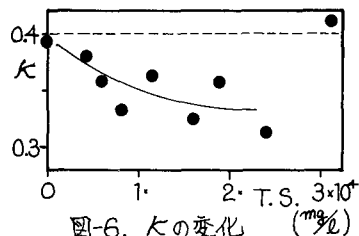


図-6. K の変化

Daily ら⁷⁾ は、パルプ繊維の管路流実験において、カルマン定数 K は、 $K=K(Re, C, l/D)$ の形で、レイノルズ数 Re 、濃度 C 、繊維の長さ l と管径 D の比、の3変数の関数であるとしている。汚泥フロクは、Daily らの報告の繊維のようにからまり合うことはないと考えられる。従って、 K は一応、 Re 数からは独立であるとして扱うことができる。又、 l/D は含まれる固体汚泥物の物理的性質を示す変数と考えられるが、ここでの対象はミルク汚泥だけであるから、省略できる。すると、 K は、濃度 C だけの関数となる。そこで、図-5. の各濃度の回帰直線から、実験定数としてカルマン定数 K を求めた。濃度との関係を図-6. に示す。T.S. = 30900 mg/l のものを除けば、 K は濃度の増加と共に減少する傾向を示している。カルマン定数が減少することとは、円管内の流速分布が清水のそれより細く鋭い形になることを示している。

M.I.T.^{8),9)} における球形プラスチック中立汚泥粒子の2インチ管路に関する実験結果の一部を、図-5. に重ねて示した。この結果は、平均粒径 0.35 mm、比重 1.0506 のものであるが、濃度の

変化による抵抗法則の変化は、本実験の汚泥フロックと同傾向を示している。Daily & Roberts⁸⁾は、中粒浮遊粒子（プラスチック）の粒径の乱流流れへの影響を調べ、“小さな粒子（ $d=0.1\sim0.15\text{ mm}$ ）”では、流速分布は清水の場合より細く鋭い形となるが、“大きな粒子（ $d=1.1\sim1.6\text{ mm}$ ）”では、丸まる方に變形すること、しかし、摩擦係数は、どちらの場合も清水よりも大きいこと、を報告している。本実験の汚泥フロックの結果とM.I.T.のプラスチック粒子流の結果を比べると、定性的に次の事が言える。汚泥フロックの粒径は、検鏡によれば、 $0.05\sim0.3\text{ mm}$ 位である。これは大きさとしては、Dailyらの“小さな粒子”に相当し、かつ、流速分布の變形、摩擦係数の増加なども“小さな粒子”の結果と同傾向である。汚泥流体も、プラスチック中粒粒子浮遊流体のように、多数の個々独立の粒子を浮遊させた混相流体としての特性を有していることを示唆している。

一方、急拡大管における形状エネルギー損失は、理論的には、

$$H_{eL} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \cdot \frac{V_1^2}{2g}$$

ここに、 H_{eL} : エネルギー損失水頭。
 A_1 : 細い管の断面積。
 A_2 : 太い管の断面積。
 V_1 : 細い管の流速。

と書きあらわせる。実験の形状エネルギー損失 H_{eL} としては、急拡大管実験で得られ

たエネルギー損失から、摩擦エネルギー損失（これは、上述したように清水と汚泥では明らかな差がある。）を差引いて補正したものを考察の対象とする。理論と実験の比 H_{eL}/H_{eL} を $V_1^2/2g$ に対して図-7に示した。清水と汚泥流体の結果は、ある流速以上では、両者とも理論値よりわずかに大きい。しかし、清水と汚泥流体とのエネルギー損失の差は認めることができない。この事実は、摩擦エネルギー損失では明らかな形で現われた汚泥浮遊の影響が、急拡大という形の形状エネルギー損失には現われないらしいということを意味し、興味深い結果である。

4. まとめ

汚泥フロックを含む流体の管路流れの実験結果を固液混相流体として検討してみた。その結果は、プラスチック粒子流などとの比較から、液体中に多数の独立粒子が存在した混相流として扱えそうであることを示している。本実験での測定項目は断面平均値だけであるので多くの事を語れないが、摩擦と形状の両エネルギー損失に対する汚泥フロックの影響の仕方が異なるらしいという結果は、汚泥流体の内部力学機構を探る上での手掛かりとなるであろう。最後に、いろいろお世話下さった杉本昭典教授、および、実験装置について示唆を与えて下さった早稲田大学工学部 遠藤郁夫助教授に感謝致します。

参考文献

- 1). 遠藤, 野; オ4回 行生工学討論会, 1967.
- 2). 萩野 et al.; オ8回 下水道研究発表会, 1971.
- 3). 日野; 土木学会論文集, 92号, 1963.
- 4). Behn; A.S.C.E., 86, 5A6, 1960.

- 5). 伊藤田郎; 塑性流体の流れ, 日刊工業新聞社.
- 6). 平井; 別冊化学工業, 12, 3, 1968.
- 7). Daily et al.; MIT. Hydro. Lab. Tech. Rep. No.35, 1959.
- 8). Daily, Roberts; MIT. Hydro. Lab. Rep. No.69, 1964.
- 9). Roberts et al.; MIT. Hydro. Lab. Rep. No.103, 1967.

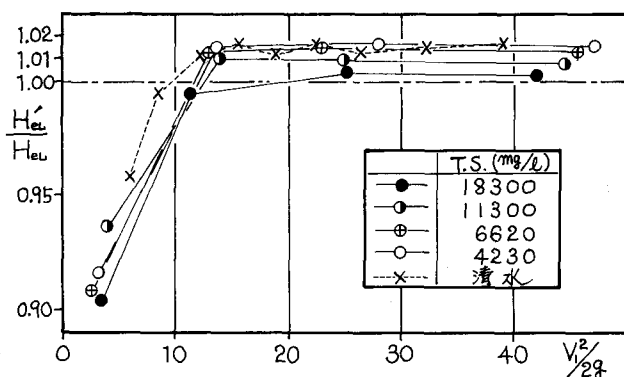


図-7.