

1. 結論

下水汚泥のような懸濁液は固相と液相とに分けて問題を取扱うよりも均一な一相の流体として論ずる方が、問題を適確に処理できる場合が多い。しかし、その場合の一相としての流体はニュートン流体として取扱うことができない場合も少なくない。下水汚泥はその種類にもよるが、水分が96~98%位から非ニュートン流体として取扱う必要あるともいわれる。現在の下水道施設基準解説における、摩擦損失水頭の算定は、Greelyの場合の清水の1.5~4倍とほとんど同じで、2~4倍としている。その他、Hazen-Williamsの式の C_H 値を適当に選んで求めたり、 $C_H=100$ として、その値の200~400%としたりしている。またDarcy-Weisbachの式で求めた清水の場合の30%増とした例もある。このように下水汚泥の摩擦損失水頭の算定は理論的根拠に乏しく、場合によって様々である。

本論文は、余剰汚泥濃度が、如何に流動特性に影響するかを検討したものである。

一般に、流体のレオロジー的性質は図-1に示すように、変形速度(du/dy)とせん断応力(τ)との関係を示す曲線、すなわち、流動特性によってあらわされる。また、図-2および図-3はそれぞれの対数グラフである。流動特性の解析的表現、すなわち、流動方程式は一般に、

$$\frac{du}{dy} = f(\tau) \quad \text{--- (1)}$$

と書ける。この関数形については多くの人々によって

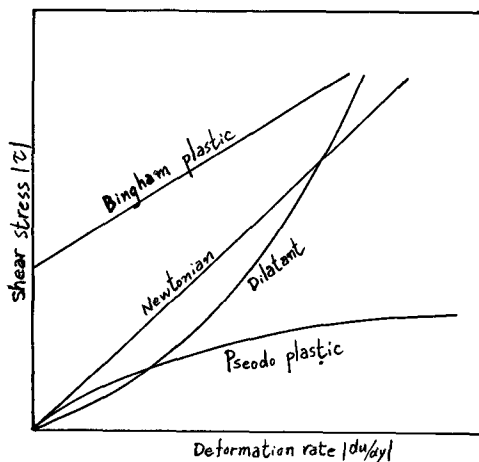


図-1 一般流体の流動特性

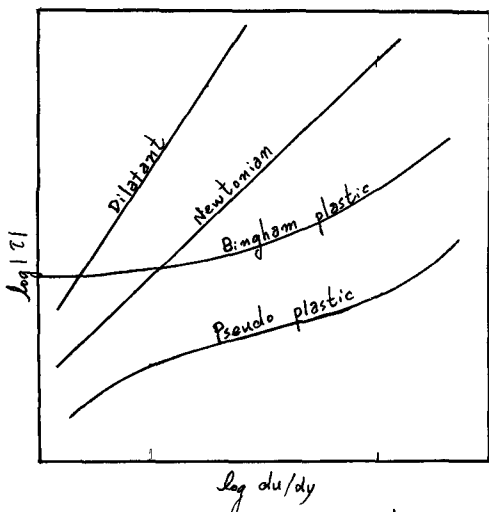


図-2 速度勾配とせん断応力との関係

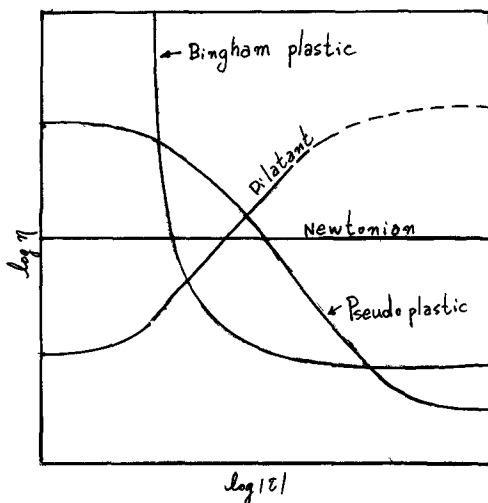


図-3 せん断応力と粘度との関係

種々の形を手えうれてゐるが、ここでは、簡単に比較的よく用ゐられてゐるものについて説明する。

a) 原糸を通る直線によつて示されるのニュートン流体である。せん断応力とせん断速度 $\frac{du}{dy}$ に比例するやうなもっとも単純な流体で、水、空気、各種の油など普通の流体はこれに属する。

$$\tau = \frac{\mu}{g_0} \frac{du}{dy} \quad \text{--- (2)}$$

τ : せん断応力 kg/m^2

$\frac{du}{dy}$: 速度勾配 1/sec

μ : 粘性係数または粘度 $\text{kg/m} \cdot \text{sec}$

g_0 : 重力換算係数 $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{sec}^2$

b) 非ニュートン流体、図-1において、原糸を通過して、曲つてゐる線を呼ぶが、場合によっては、原糸を通過しない流体をも含めることもある。ここでは、 τ と $\frac{du}{dy}$ の関数になり、 $\frac{du}{dy} = 0$ に対して $\tau = 0$ になるものという。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \tau g_0 &= f\left(\frac{du}{dy}\right) \\ \frac{du}{dy} &= 0 \text{ のとき } \tau = 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (3)}$$

非ニュートン流体では $\frac{du}{dy}$ の増加割合に対し、 τ の増加割合の小さくなるものと、その逆の傾向のものがある。前者を擬塑性流体または構造粘性流体といい、コロイド溶液やペイントまたはある種の高分子物質がこれに属する。後者をダイラタント流体といい、水を含んだ砂や、ある種の高分子物質がこれに属する。

(3) 式の $f\left(\frac{du}{dy}\right)$ なる関数の形は現在まで種々もの提案されてゐるが、数学的取扱いが簡単で便利なため、

$$\tau g_0 = f\left(\frac{du}{dy}\right) = \mu_p \left(\frac{du}{dy}\right)^n \quad \text{--- (4)}$$

n : 定数 [---]

μ_p : ニュートン流体の粘度に相当する定数 $\text{kg} \cdot \text{sec}^{n+1} / \text{m}$

の形が使用されることが多い。

$n = 1$ のときはニュートン流体、 $n < 1$ のときは擬塑性流体、 $n > 1$ のときはダイラタント流体と表わす。

c) ビンガム流体、この流体はせん断応力がある降伏値 τ_0 を越えたときにはじめて、流体層間にすれが起り流動をはじめ、塑性流体で τ と $\frac{du}{dy}$ の関数が直線になるものという、固体微粒子の懸濁液、スラット等がこれに属する。工学的には一種の理想的塑性流体である。

$$(\tau - \tau_0) g_0 = \mu_0 \frac{du}{dy} \quad \text{--- (5)}$$

τ_0 : 降伏応力 kg/m^2

μ_0 : 塑性粘度 或は Coefficient of rigidity $\text{kg/m} \cdot \text{sec}$

d) 非ビンガム流体、塑性流体で、 τ と $\frac{du}{dy}$ の関係が直線でないものという。スラリーなどは正確には非ビンガム流体に属する。したがって、

$$(\tau - \tau_0) g_0 = f\left(\frac{du}{dy}\right) \quad \text{--- (6)}$$

または、

$$\tau g_0 = f\left(\frac{du}{dy}\right)$$

$$\tau \leq \tau_0 \text{ にて } \frac{du}{dy} = 0$$

— (7)

とあらわされる。非ヒンガム流体はもっとも一般的な流動特性をもった流体で、他の流体はこれの特
殊なものを見ることのできる。

2 降伏応力、粘度、および密度

実際のスラリー或は汚泥などの輸送計画を立てるには予め所定
の流体の流動特性、降伏応力、粘度および密度等を決定する必要
がある。特に降伏応力と粘度の測定には、流体次の二種類がある。
すなわち、

1) 内管内の流れより決定する方法

2) 回転円筒型粘度計による測定

などがある。

回転円筒型粘度計は図-4のように内部円筒と外部円筒との間に
液を入れ、外部円筒を一定速度で回転せしめ、内部円筒の振り
角を鏡で読み、これから内部円筒に加わる力を計算して粘度を求
めることができる。また、円筒に一定のモーメントを加えて回転
せしめた時の回転数から粘度を計算するものなどいろいろな型が
ある。本実験では、上述の前者に相当する Universal Rheometer (I-Type)

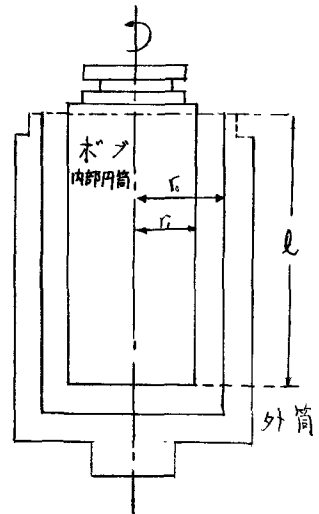


図-4 Couette 型粘度計本体

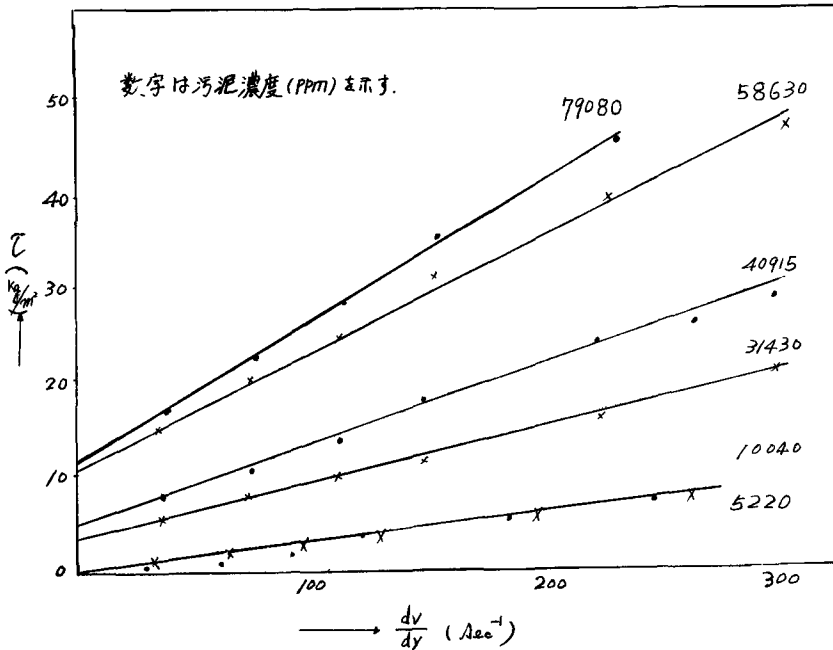


図-5 速度勾配とせん断応力

(島津製作所) を使用し、次の式で計算した。

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 l} \quad \text{— (8)}$$

$$-\left(\frac{du}{dy}\right) = \frac{4\pi N}{1-1/s^2} \left\{ 1 + K_1 (1/\alpha - 1) + K_2 (1/\alpha - 1)^2 \right\} \quad \text{— (9)}$$

$$S = \frac{r_o}{r_i} = \frac{2}{1.65} = 1.212 \quad \text{--- (10)}$$

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{S^2-1}{2S^2} \left(1 + \frac{2}{3} \ln S \right) \\ K_2 &= \frac{S^2-1}{2S^2} \ln S \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (11)}$$

$$\alpha = \frac{d(\log T)}{d(\log N)} \quad \text{--- (12)}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\left(-\frac{du}{dy} \right)_c} \quad \text{--- (13)}$$

η は測定値より $\log T$ と $\log N$ の勾配より求めた。

r_o : 外筒半径, cm

r_i : 内筒(ボア)半径, cm

l : ボア長さ, cm

N : 回転数, RPM

T : トルク, dyne-cm

τ : セン断応力, dyne/cm²

η : 非ニュートン流体の見掛け粘度, Poise

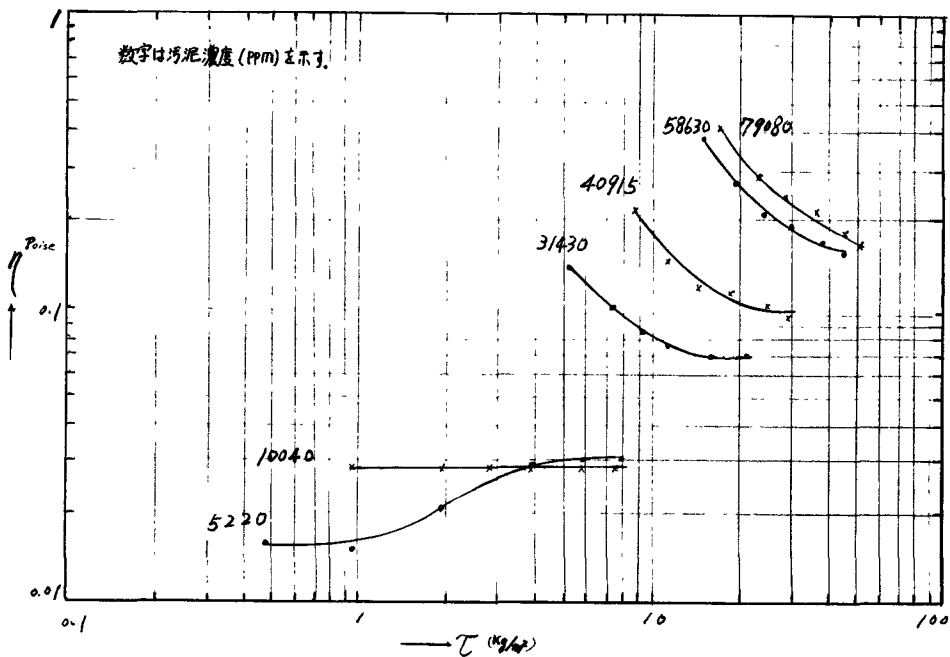


図-6 セン断応力と粘度

非ニュートン流体の流動を取扱う場合には、まず、 $\tau - du/dy$ の関係すなわち、流動特性をあらわす必要がある。そこで、汚泥の濃度 5,000 ~ 80,000 ppm までのものについて、 $\tau - du/dy$, $\log \tau - \log \frac{du}{dy}$, $\log \tau - \log \eta$ などの関係を求めて図-5、図-6、図-7 に示した。これらの関係に照合して、汚泥濃度と流体の流動特性を表-1 に示した。この表からわかるように、汚泥濃度 28,000 ~ 30,000 ppm 付近はニュートン流体、30,000 ppm 以上では、ビンガム流体であることが認められる。また汚泥濃度が小さい場合、例えば 5,000 ~ 10,000 ppm の範囲では、しばしば擬塑性流体的傾向も観察された。

おしなう、いずれにしても、28,000 ppm 以上では $\tau - dv/dy$ 曲線はすべて、原点を通過しているように考えられた。実際取扱われている汚泥濃度の範囲内では、近似的には、ニュートン流体かビンガム流体として取扱うこととできるといえよう。

結局、28,000 ~ 30,000 ppm 以上余剰汚泥の濃度懸濁液は塑性流体（ビンガム流体）と考えられる。濃度が低いときは、懸濁粒子が互に接触せず、水の場合と同じような特性を示す。濃度が大きくなって粒子が接触しあうようになると、流体内に速度勾配を形成させるためには、かなりの応力が必要になる。塑性流体では、速度勾配を形成するには少なくとも、降伏応力と呼ばれる τ_0 以上のせん断応力が必要である。図-8、図-9 は汚泥の水分により塑性粘度と降伏応力とどのようにかわっているかを示したものである。

図-8 に示した、水分と塑性粘度との間には次の関係が得られた。

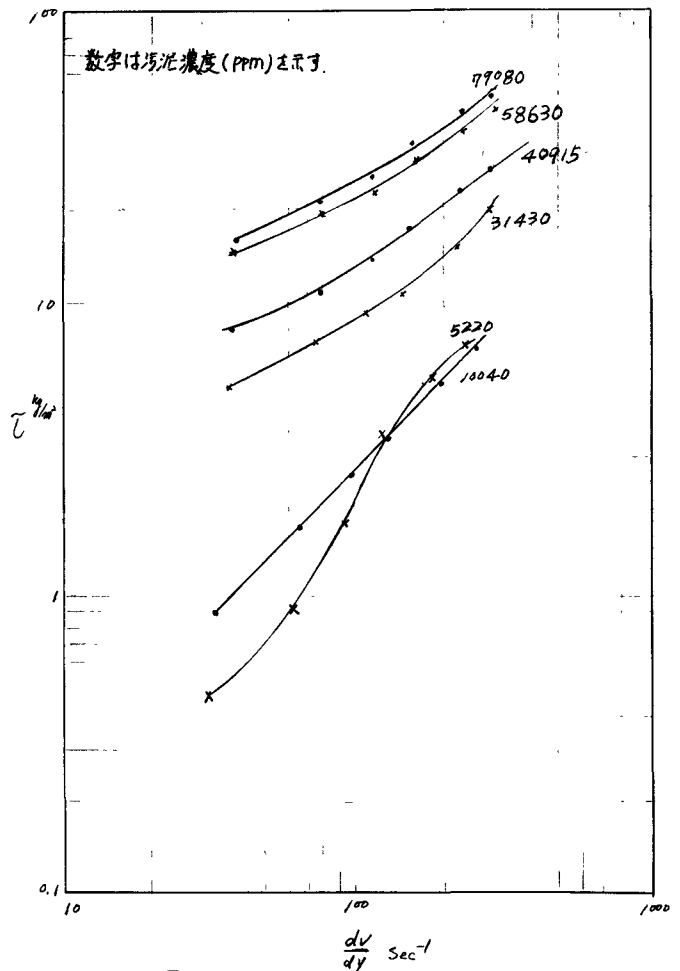


図-7 せん断応力と速度勾配

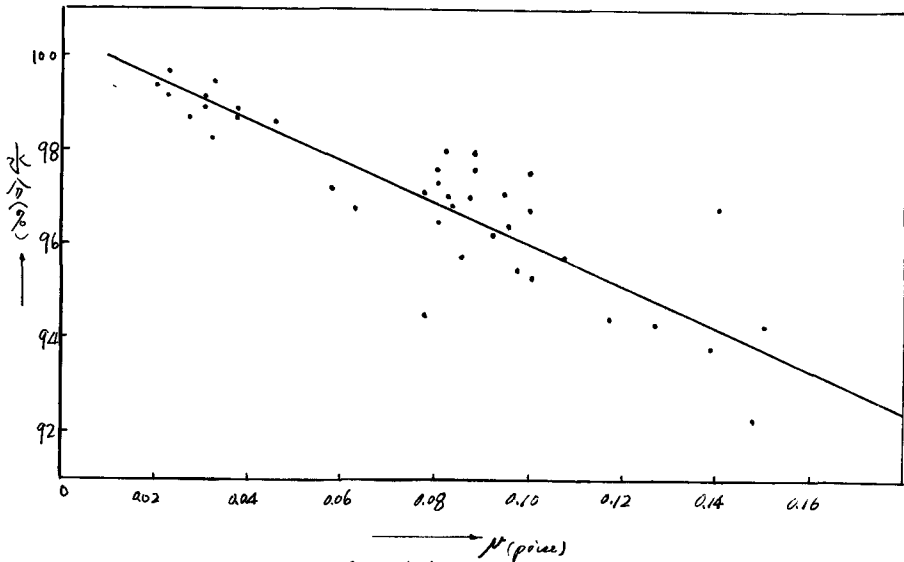


図-8 粘度と水分

表-1 汚泥濃度と流体の種類

SS ppm	$\log \tau \sim \log \frac{dv}{dy}$	$\log \tau \sim \log \eta$	$\tau \sim \frac{dv}{dy}$	流体の種類
79080	B	B	B	B
58630	B	B	B	B
54725	B	B	B	B
53610	B	B	B	B
45365	B	B	B	B
44740	B	B	B	B
40915	B	B	B	B
36650	B	B	B	B
36095	B	B	B	B
35290	B	B	B	B
32425	B	B	B	B
31430	B	B	B	B
31100	B	B	B	B
28990	N	B	B	B
27980	N	N	N	N
24150	N	N	N	N
19758	N	N	N	N
19310	N	N	N	N
13295	N	N	N	N
10040	N	N	N	N
5220	P.N	P.N	P.N	P.N
2860	N	—	N	N

B : ヒンガム流体

N : ニュートン流体

P : 擬塑性流体

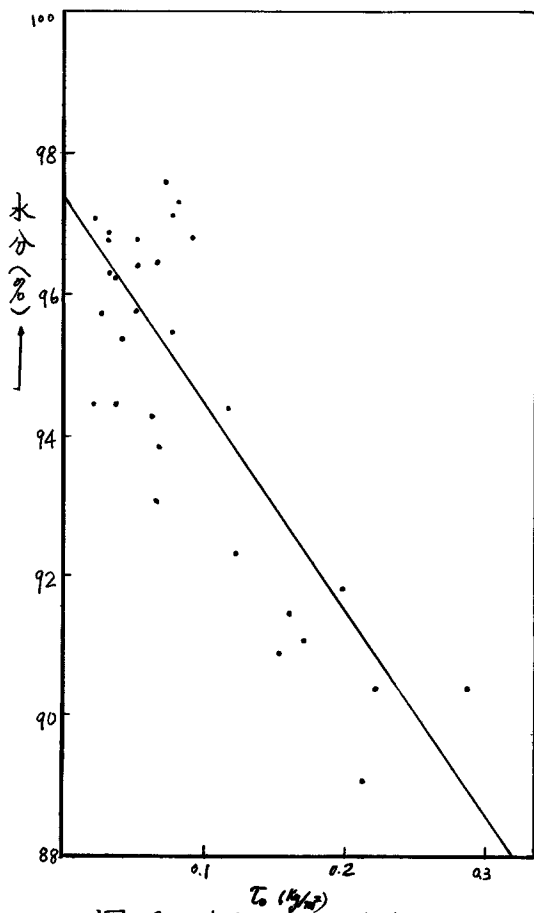


図-9 水分とせん断応力

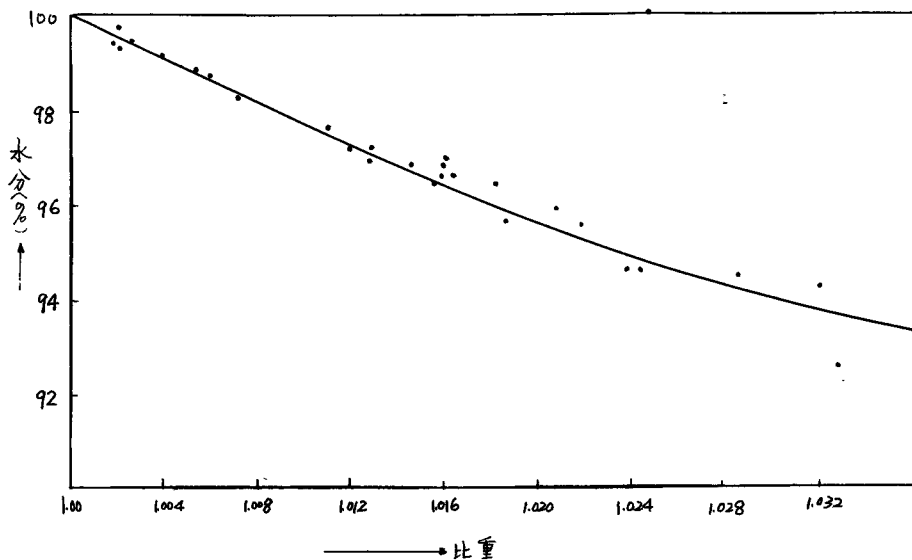


図-10 汚泥の水分と比重

すなわち、

$$w = -44.3P + 100.3$$

w : 水分, %

μ : 塑性粘度 (ポイズ)

降伏応力は水分の減少とともに増加し、両者の間には次の様な関係が得られた。すなわち、

$$w = -30.2\tau_0 + 97.3$$

w : 水分, %

τ_0 : 降伏応力 kg/cm^2

となる。図-9では限界水分は97.3である。このことは 前述のニュートン流体と塑性流体との境界は約28,000 ~ 30,000 ppmであることを一致する。

汚泥の密度は汚泥の種類や水分によって、かなり異なる。図-10は汚泥の水分と比重との関係を示したものである。汚泥の比重も水分の減少とともにほぼ直線的に増大することを確認された。

3 結論

汚泥の管路流動に関して、最も基本的なことは、流体の流動特性を明らかにすることである。本実験は、余剰汚泥を用い、その濃度が如何にその流体の性質に影響するかを検討したものである。現在までに得られた結論は下記の如くである。

1) 汚泥濃度による流体特性を明らかにし、限界水分は、97.3%である。つまり、27,000 ppm以下はニュートン流体、以上は非ニュートン流体である。実際上の問題として28,000 ~ 30,000 ppm 値を境界濃度のように考えられる。しかも非ニュートン流体はビンガム流体として取扱うことが出来る。

2) 汚泥の水分と降伏応力および塑性粘度との関係を導いた。

3) 汚泥の比重は水分が減少すると直線的に増大する。

おわりに、本実験に関して、種々有益な御助言ならびに貴重な文献をおかし戴いた都立大学教授左合正雄先生、岩波繁蔵先生また実験上の便宜を計って下さった東京都下水道局施設管理部長安田伊三郎、管理才二課長岩崎保久および落合下水道処理場長小沢勇太郎う各氏に感謝致します。

参考文献

1. Chow, T.L., "Resistance of Sewage Sludge to flow in pipes," S.E.D., A.S.C.E., SA5, PP1780-1~19, (1958)
2. Longwell, P.A., "Mechanics of fluid flow," PP 366~411, McGraw-Hill (1966)
3. Linnell, G.R., "Unit operation of Sanitary Engineering," PP 1~31 John Wiley & Sons, Inc. (1961)
4. Davis, C.V., "Hand Book of Applied Hydraulics," PP 1094~1098 McGraw-Hill (1952)
5. 藤田豊文, 東畑平一郎, "化学工学I" 132 ~ 258頁 東京化学同人 (1967)