

## 下水汚泥の管路輸送に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE PIPE LINE  
TRANSPORTATION OF SEWAGE SLUDGE遠藤 郁夫\*・金成 英夫\*\*  
By Ekuo ENDO and Hideo KANARI

## 1. 緒 論

下水汚泥の管路輸送は 1897 年に England の Manchester で下水汚泥の海洋投棄に使用されたのを最初として<sup>1)</sup>、その後、多くの都市で下水汚泥の海洋投棄や下水処理場間の輸送手段として用いられている<sup>2)~5)</sup>。わが国の代表的な例としては、東京都の三河島処理場から砂町処理場までの約 14.8 km、および落合処理場から小台処理場までの 10.6 km 等の下水汚泥の長距離輸送がある<sup>5), 6)</sup>。

下水汚泥の管路輸送の場合、送泥ポンプや輸送管路の設計に際して、輸送流速の決定ならびに摩擦損失の算定は最も基本的な課題である。下水汚泥は多量の固形物を含んでおり、粘度や摩擦損失水頭はニュートン流体の場合と異なる。このため、下水汚泥の流動特性や粘度についての実験的研究や<sup>7)~17)</sup>、下水汚泥の摩擦損失水頭を実験的に求め清水と比較検討した研究<sup>3), 9), 18)~21)</sup>、および下水汚泥の流動特性と粘度から摩擦損失水頭を算定しようとする研究も行われた<sup>22)~26)</sup>。

しかし、下水汚泥の摩擦損失水頭は、たとえば、わが国では Hazen-Williams の式で係数を適当に選んで決定するか、清水の 2~4 倍にするのがよいとされているのみである<sup>27)</sup>。一方、輸送流速は固形物の沈殿堆積による管路の有効断面積の減少と管路の閉塞を防止する観点から、0.4 m/s から 0.5 m/s 程度の流速を保つ必要があるとされ<sup>28), 29)</sup>、一般的な流速は 0.9~2.4 m/s とされている<sup>19), 28), 30), 31)</sup>。わが国では、1.0 m/s から 1.5 m/s を標準とし、特に、長距離輸送の場合、摩擦損失を小さくするために、1 m/s 前後とするとされているが<sup>27)</sup>、その根拠は、いまだ十分に研究されていないのが現状である。

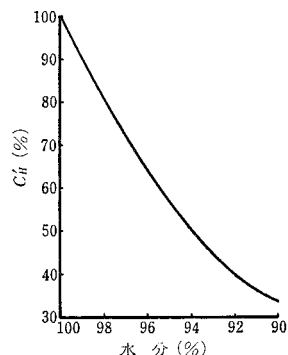
本研究は下水汚泥の摩擦損失水頭の算定法として提唱されている 3 つの方法、すなわち、Hazen-Williams の式を用いる方法、Abwassertechnik による方法、および遠藤・金成の式 (I) を用いる方法の計算値と実験値について比較検討し、さらに、下水汚泥の輸送流速について考察を加え、摩擦損失水頭の設計値を示したものである。

## 2. 摩擦損失水頭の算定法

下水汚泥の摩擦損失水頭の算定法は Hazen-Williams の式を用いる方法、Abwassertechnik に示された方法、および遠藤・金成の式 (I) を用いる方法とがある。次に、これらの算定法を示す。

(1) Hazen-Williams の式を用いる方法<sup>10)</sup>

Chou<sup>10)</sup> は Brisbin<sup>9)</sup> の実験結果をもとに、下水汚泥の乱流領域の摩擦損失水頭の算定法として Hazen-Williams の式の係数を汚泥の含水率によって適当に決定して計算する方法を示した。図-1 は生汚泥の水分と Hazen-Williams の係数の補正係数  $C_H'$  との関係を示したものである。摩擦損失水頭は下水汚泥の水分に対応

図-1 下水汚泥の水分と  $C_H'$  との関係<sup>10)</sup>\* 正会員 工博 早稲田大学教授  
\*\* 正会員 工修 国士館大学助教授

する補正係数  $C_H'$  を図-1 で求め、次式で算定する。  
すなわち、

$$h_f = 6.82 \frac{L}{D^{1.17}} \left( \frac{V}{C_H} \right)^{1.85} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C_H = C_H' \times C_{Hw}$ ,  $h_f$ : 摩擦損失水頭 (m),  $L$ : 管長 (m),  $D$ : 管径 (m),  $V$ : 流速 (m/s),  $C_{Hw}$ : 清水の場合の Hazen-Williams の係数

(2) Abwassertechnik の方法<sup>29)</sup>

Annen は下水汚泥の流動特性を擬塑性流体で近似できるとして、摩擦損失水頭を算定する方法を提案した<sup>22)</sup>。この方法は、下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係を回転粘度計で求め、摩擦損失水頭を算定するものである。すなわち、下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係は式(2)で近似できる。

$$F_b = k(G(F_b))^n \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $F_b$ : せん断応力 (N/m<sup>2</sup>),  $G(F_b)$ : 速度勾配 (s<sup>-1</sup>),  $n$ : 構造粘度指数,  $k$ : 流体粘稠度指数 (N・s<sup>n</sup>/m<sup>2</sup>)

この場合、摩擦損失係数は次の関係式から求める。

層流領域:

$$\lambda = 8 \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n \cdot \frac{1}{Re_n} \dots\dots\dots (3)$$

乱流領域:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \left( \frac{1}{n} \right)^{0.70} \log(Re_n \cdot \lambda^{1-(n/2)}) - 0.8n \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$Re_n = \frac{D^n \cdot V^{2-n} \cdot \rho}{k} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\lambda$ : 摩擦損失係数,  $\rho$ : 汚泥の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

図-2 は式(3)および式(4)の  $Re_n$  と  $\lambda$  との関係を示したものである。

下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係を回転粘度計の測定結果から求め、これらの関係から式(2)の  $n$  と  $k$  を決定する。次に、式(5)の  $Re_n$  を算定し、式(3)または式(4)あるいは図-2 から  $\lambda$  を決定し、次式の Darcy-Weisbach の式で摩擦損失水頭を算定する。すな

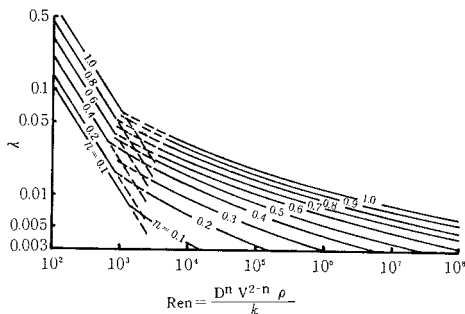


図-2  $Re_n$  と  $\lambda$  との関係<sup>24)</sup>

わち、

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (6)$$

(3) 遠藤・金成の式(I)を用いる方法

著者らは下水汚泥の流動特性について検討を加え、下水汚泥は擬塑性流体で近似できることを示した。さらに、下水汚泥中には粗大粒子や繊維状物質などが存在し、回転粘度計で下水汚泥の構造粘度指数および流体粘稠度指数を求めることが非常に困難であることから、実験管路を用いて下水汚泥の諸物性を明らかにし、摩擦損失係数を算定する方法を示した。すなわち、下水汚泥の層流領域の管内流動は式(7)で表わすことができる。

$$\log \left( \frac{D \cdot \Delta P}{4L} \right) = \log k' + n' \log \left( \frac{8V}{D} \right) \dots\dots (7)$$

ここに、 $\Delta P$ : 圧力損失 (kg/m<sup>2</sup>)

下水汚泥の  $n'$  (flow behavior index) は實際上、温度依存性はなく、汚泥濃度が高くなるに従って小さくなる。一方、 $k'$  (fluid consistency index) は温度の上昇とともに減少し、汚泥濃度とともに指数関数的に大きくなる。さらに、下水汚泥の密度と汚泥濃度との関係および広義のレイノルズ数と摩擦損失係数との関係を実験的に求め、これら一連の関係式(式(8)~式(14))を遠藤・金成の式(I)とした<sup>32)</sup>。すなわち、

1) 広義のレイノルズ数:  $Re_e$

$$Re_e = \frac{D^{n'} V^{2-n'} \cdot \rho}{K'_p} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、下水汚泥の  $n'$

$$n' = 10.35 C^{-0.329} \dots\dots\dots (9)$$

下水汚泥の  $k' \times 8^{n'-1} = K'_p$

$$K'_p = k' \times 8^{n'-1}$$

$$= 1.76 \times 10^{-22} C^{1.75} \exp \left( \frac{4850}{T} \right) \dots\dots\dots (10)$$

下水汚泥の密度:  $\rho$

$$\rho = \frac{3.9038 \times 10^{11} \rho_w}{C \rho_w (131 + 1.67 P_v) \times 10^3 + 390.38(10^6 - C)} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $C$ : 汚泥濃度 (mg/l),  $K'_p$ : N・s<sup>n'</sup>/m<sup>2</sup>,  $\rho$ : kg/m<sup>3</sup>,  $T$ : 絶対温度 (K),  $\rho_w$ : 水の密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $P_v$ : 揮発性物質含有率 (VS/TS)(%)

2) 摩擦損失係数:  $\lambda$

層流領域:  $Re_e \leq 2000$

$$\lambda = \frac{64}{Re_e} \dots\dots\dots (12)$$

遷移領域: 滑らかな管  $Re_e = 2000 \sim 5000$ , 粗い管  $Re_e = 2000 \sim 10000$

若干精度は悪くなるが、滑らかな管および粗い管でそれぞれ式(13)および式(14)を適用することができる。

乱流領域

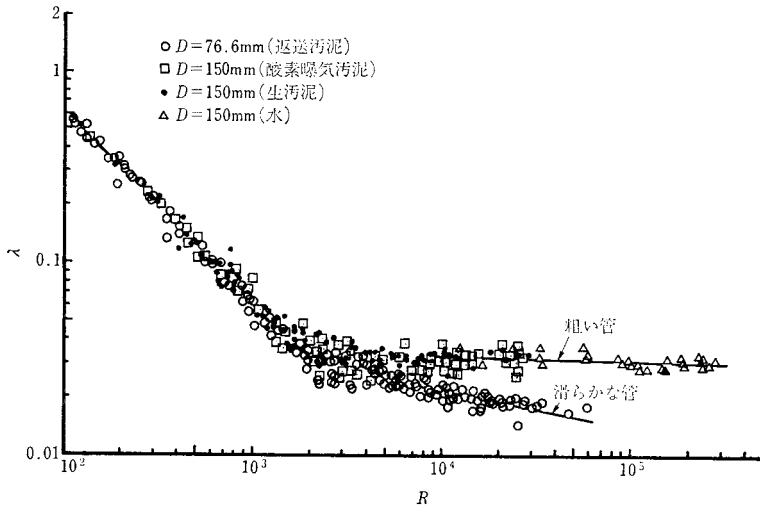


図-3  $R_e$  と  $\lambda$  との関係<sup>22)</sup>

滑らかな管:  $R_e \geq 5000$

$$\lambda = 0.134 R_e^{-0.197} \dots\dots\dots (13)$$

粗い管:  $R_e \geq 10000$

$$\lambda = 0.0383 R_e^{-0.0171} \dots\dots\dots (14)$$

広義のレイノルズ数と摩擦損失係数との関係を 図-3 に示す。

3) 摩擦損失水頭は以上のようにして求めた  $\lambda$  を用いて式(6)で算定する。

### 3. 摩擦損失水頭の計算法の比較

前章に示した下水汚泥の摩擦損失水頭の計算値と実験管路から求めた実験値について比較検討を加えた。摩擦損失水頭の実験値は管径 76.6 mm および 150 mm の実験管路で求めた。実験管路の概要を 図-4 に示す。管径 76.6 mm の管路は塩化ビニールの管を使用しており、管壁は滑らかである。一方、管径 150 mm の管路はガス管用鋼管を用いており、管壁は粗である。清水を用いて、これらの管路の Hazen-Williams の係数  $C_{Hw}$  を求め、表-1 に示した。表-2 に、これらの管路の諸元

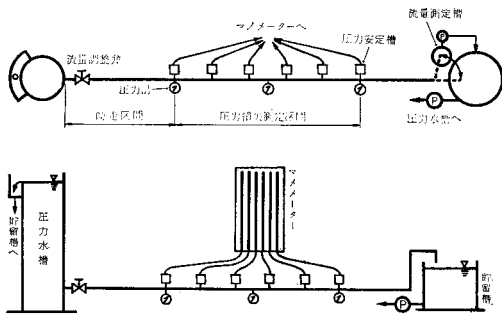


図-4 実験管路の概要

を示した。

摩擦損失水頭の比較検討に用いた下水汚泥の性質を表-3 に示した。次に、これらの計算法による計算値と実験値について比較検討を加えた。流速が小さい場合、流れが層流状態となることがあるため、層流領域は記号Lで示した。

#### (1) Hazen-Williams の式を用いる方法 (HW 法)

図-5 は Hazen-Williams の式の方法で算定した摩擦損失水頭の計算値と実験値とを示したものである。層流領域はこの方法の適用範囲外であるが、一応、計算して 図-5 に示した。管径 76.6 mm の滑らかな管および管径 150 mm の粗い管のいずれの場合とも、層流領域や流速が低い場合、計算値は実験値よりも小さな値を示している。しかし、流速が大きくなるにつれて、計算値は実験値に比べて大きな値を示すことが認められる。

表-1 実験管路の Hazen-Williams の係数

V (m/s)	D=76.6 mm		D=150 mm	
	$h_f(E)$ (m/100 m)	$C_{Hw}$	$h_f(E)$ (m/100 m)	$C_{Hw}$
1.0	1.32	149	1.00	113
1.2	1.80	151	1.43	112
1.4	2.36	152	1.90	112
1.6	2.98	153	2.46	112
1.8	3.65	155	3.07	111
平均	—	152	—	112

表-2 実験管路の諸元

D (mm)	助走区間 (m)	圧力損失 測定区間 (m)	管壁の 粗滑	k (m)	$C_{Hw}$	管の種類
76.6	5.0	6.0	滑らか	$5 \times 10^{-6}$ 以下	152	塩化ビニール
150	7.5	25.0	粗い	$7.5 \times 10^{-4}$	112	ガス管用鋼管
24.6	5.0	6.0	滑らか	$5 \times 10^{-6}$ 以下	—	塩化ビニール

k: 管壁の絶対粗度,  $C_{Hw}$ : 清水の場合の Hazen-Williams の係数

表-3 供試汚泥の性質

D (mm)	C (mg/l)	$P_v$ (%)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	n	k ( $N \cdot s^2/m^2$ )	温度 ( $^{\circ}C$ )	備考
76.6	5 550	80.1	1002	0.878	0.006 12	19.0	A下水処理場
	10 300	79.5	1003	0.703	0.029 9	20.0	返送汚泥
	15 400	77.3	1004	0.614	0.090 2	18.0	(活性汚泥法)
150	6 680	79.5	1001	0.858	0.008 03	29.0	B下水処理場
	11 200	76.6	1002	0.775	0.029 0	23.0	
	14 700	86.4	1007	0.597	0.125	28.0	返送汚泥 (酸素曝気汚泥)
	22 100	86.0	1009	0.515	0.242	17.2	
C下水処理場 第1沈殿池汚泥 + 余剰汚泥 (生汚泥)	12 800	68.0	1005	0.757	0.026 4	16.7	
	20 500	57.7	1008	0.666	0.077 0	30.0	
	29 100	68.0	1012	0.573	0.186	26.7	

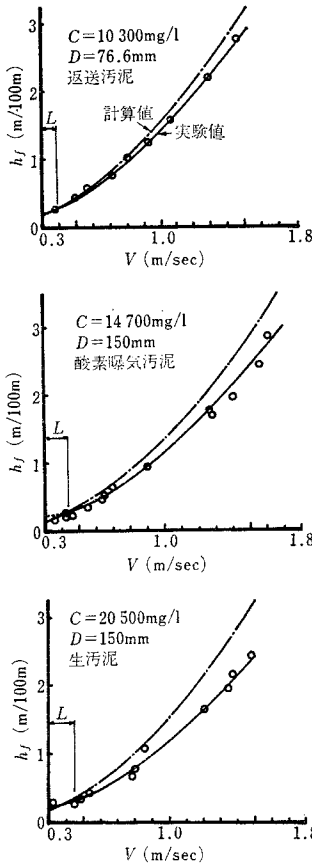


図-5 下水汚泥の摩擦損失水頭の実験値と計算値 (HW 法)

したがって、Hazen-Williams の式を用いる方法の計算値は管壁の粗滑にかかわらず、実験値よりも大きな値を示す。

(2) Abwassertechnik の方法 (AT 法)

Abwassertechnik の方法を用いて摩擦損失水頭を算定する場合、回転粘度計で下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係を知る必要がある。図-6 は下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係である。粘度測定に使用した回転粘度計は外筒回転型で、外筒半径、内筒半径および内筒の長さは、それぞれ 1.50 cm, 1.25 cm および 7.0 cm である。回転数は 0 rpm~500 rpm である。下水汚泥の速度勾配  $G(F_b)$  およびせん断応力  $F_b$  は次式で算定した。すなわち、

$$G(F_b) = \frac{4\pi N}{1-1/S^2} \left[ 1 + k_1 \left( \frac{1}{n''} - 1 \right) + k_2 \left( \frac{1}{n''} - 1 \right)^2 \right] \dots\dots\dots (15)$$

$$F_b = \frac{M}{2\pi R_b^2 l} \dots\dots\dots (16)$$

ただし、

$$S = R_c / R_b$$

$$k_1 = \frac{S^2 - 1}{2S^2} \left( 1 + \frac{2}{3} \ln S \right)$$

$$k_2 = \frac{S^2 - 1}{6S^2} \ln S$$

$$n'' = \frac{d(\log M)}{d(\log N)}$$

ここに、 $N$  : 回転数 (rps),  $R_c$  : 外筒半径 (m),  $R_b$  : 内筒半径 (m),  $l$  : 内筒の長さ (m),  $M$  : トルク (N・m)

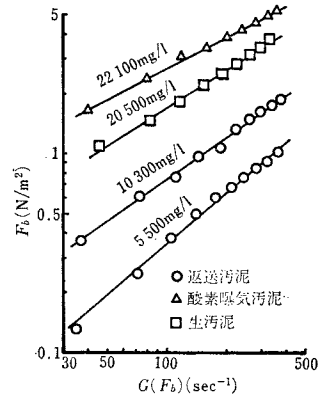


図-6 下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係

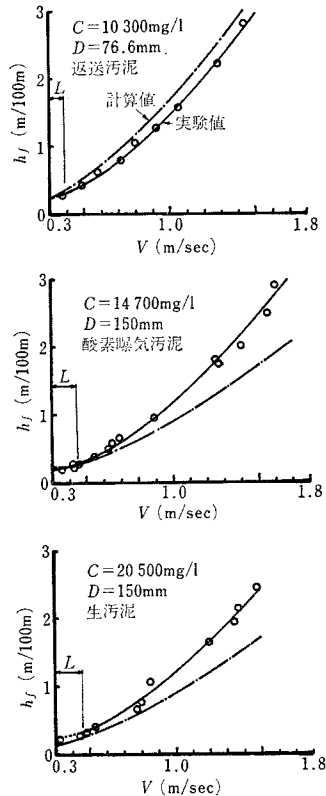


図-7 下水汚泥の摩擦損失水頭の実験値と計算値 (AT 法)

下水汚泥の速度勾配とせん断応力との関係は 図-6 に示すように両対数グラフに示した場合、直線で表わせるため、式 (2) で  $n$  および  $k$  を求め、表-3 に示した。

図-7 は Abwassertechnik の方法で算定した摩擦損失水頭の計算値と実験値を示した。管径 76.6 mm の滑らかな管の場合、計算値は実験値に比べて大きな値を示すのに対して、管径 150 mm の粗い管では計算値は実験値に比べて小さな値を示している。さらに、流速が大きくなるにつれて、かなり小さな値を示していることが認められる。

したがって、Abwassertechnik の方法による計算値は滑らかな管の場合、実験値よりも大きな値となるが、粗い管では小さな値を示す。

(3) 遠藤・金成の式 (I) による方法 (EK 法)

表-3 に示した下水汚泥の濃度および温度から、遠藤・金成の式 (I) を用いて摩擦損失水頭を算定し、図-8 に示した。図-8 から、遠藤・金成の式 (I) を用いた計算値は管径 76.6 mm の滑らかな管の場合も、管径 150 mm の粗い管の場合とも、実験値にかなりよく一致しているのが認められる。

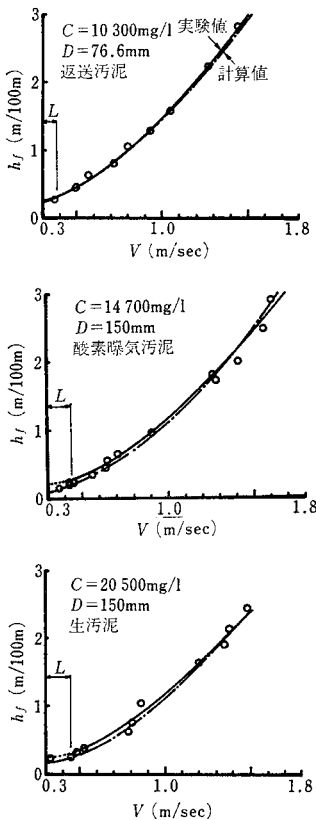


図-8 下水汚泥の摩擦損失水頭の実験値と計算値 (EK 法)

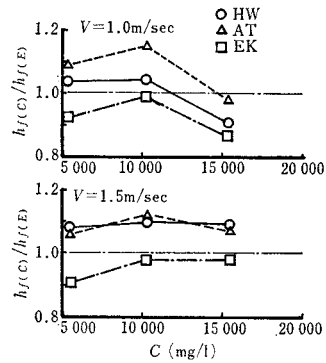


図-9 滑らかな管の汚泥濃度と  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  の関係

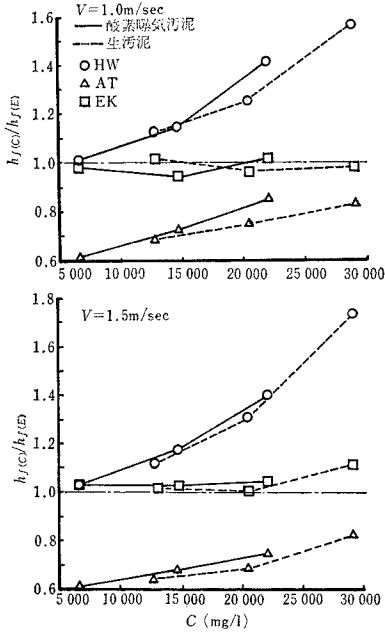
以上のことから、遠藤・金成の式 (I) による計算値は管壁の粗滑にかかわらず、実験値によく一致する。

(4) 流速 1.0 m/s および 1.5 m/s における比較検討

下水汚泥を長距離輸送する場合、摩擦損失を小さくするため、輸送流速は 1 m/s 前後とするのがよいとされている<sup>27)</sup>。また、汚泥輸送における最大流速は 4. に示すように 1.5 m/s 程度と考えることができるため、流速 1 m/s および 1.5 m/s における各計算法の計算値と実験値について比較検討を加える。

図-9 は管径 76.6 mm の滑らかな管における摩擦損失水頭の計算値 ( $h_{f(C)}$ ) と実験値 ( $h_{f(E)}$ ) の比 ( $h_{f(C)}/h_{f(E)}$ ) と汚泥濃度との関係である。流速 1.0 m/s の場合、HW 法の  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  は汚泥濃度 10 000 mg/l 以下では約 1.05 程度であるが、15 000 mg/l では約 0.9 と小さな値を示している。AT 法の  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  は汚泥濃度 10 000 mg/l 以下では 1.0~1.15 の範囲内にあるが、15 000 mg/l では、0.97 と小さな値となっている。一方、EK 法の  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  は汚泥濃度 10 000 mg/l 以下では 0.9~1.0 の範囲内にあるが、15 000 mg/l 以上では約 0.85 と小さくなっている。次に、流速 1.5 m/s の場合、HW 法および AT 法のいずれの場合とも、汚泥濃度 15 000 mg/l 以下では  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  はほぼ 1.05~1.15 の範囲内にある。EK 法では、 $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  はほぼ 0.9~1.0 の範囲内にある。

図-10 は管径 150 mm の粗い管における汚泥濃度と  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  との関係である。流速 1.0 m/s および 1.5 m/s のいずれの場合とも、HW 法では  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  は汚泥濃度 5 000 mg/l 以上で 1 より大きな値を示し、さらに、汚泥濃度が高くなるに従って、かなり大きな値を示している。AT 法では、 $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  は汚泥濃度 30 000 mg/l 以下では、いずれの流速の場合とも 1 以下であり、かつ、汚泥濃度が低くなるに従って、かなり小さな値を示している。これに対し、EK 法では、いずれの流速の



図—10 粗い管の汚泥濃度と  $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  の関係

場合とも、 $h_{f(C)}/h_{f(E)}$  は汚泥濃度にかかわらず 0.95~1.1 の範囲内にある。

以上の検討結果から、摩擦損失水頭の計算法を要約すると次のようになる。すなわち、滑らかな管では、HW 法、AT 法および EK 法のいずれの計算法の場合とも、計算値は実験値によく一致するのに対し、粗い管では、HW 法の計算値は実験値に比べてかなり大きな値となるのに対し、AT 法ではかなり小さな値となる。これに対し、EK 法では計算値は汚泥濃度にかかわらず、実験値とよく一致する。

#### 4. 輸送流速

下水汚泥の管路輸送を行う場合、管路内での固形物の沈殿堆積等により、管路の有効断面積の減少を招く恐れがある。このことを防止するには、ある程度以上の流速で汚泥を輸送することが大切である。しかし、流速を大きくすると、損失水頭も増大し、揚程の大きなポンプが必要となる。特に、長距離輸送を行う場合、損失水頭が非常に大きくなるため、汚泥輸送量、建設費および維持管理費等を含めた経済性を勘案し、輸送流速をいかにすべきかを慎重に検討すべきである。

本章は下水汚泥の管路輸送における標準流速および臨界流速について実験的に検討を加え、さらに、輸送流速について考察したものである。

表—4 下水汚泥の管内流動状態

D (mm)	C (mg/l)	V (m/s × 10 <sup>-2</sup> )	$h_{f(E)}$ (m/100m)	管内の流動状態の観察結果
24.6	2890	4.04	0.60	固液分離しており、上澄水のみ流れる。管の下部は上部より汚泥濃度が高い。ほぼ均一な流速分布となる。汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		11.2	1.65	
		18.0	2.10	
	5500	10.4	2.70	固液分離しており、上澄水のみ流れる。汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		17.2	3.03	
	1520	4.68	0.10	固液分離しており、上澄水のみ流れる。汚泥濃度の分布はほぼ均一となる。管底部の流速はほぼ0である。汚泥濃度、流速分布ともほぼ均一な状態となる。
		8.70	0.11	
		26.2	0.78	
	3520	4.92	0.14	固液分離しており、上澄水のみ流れる。汚泥濃度の分布はほぼ均一となる。管底部の流速はほぼ0である。汚泥濃度、流速分布ともほぼ均一な状態となる。
		10.8	0.29	
		22.8	0.64	
	5210	8.95	0.62	汚泥濃度の分布はほぼ均一である。管上部の流速は下部より大きい。流速分布はほぼ均一となる。汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		15.0	0.75	
		18.7	0.76	
76.6	7540	7.99	0.83	固液分離しない。管上部の流速は下部より大きい。流速分布はほぼ均一となる。汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		15.6	1.00	
		18.7	1.35	
	9860	5.17	0.83	固液分離しない。管上部の流速は下部より大きい。流速分布はほぼ均一となる。汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		10.6	1.05	
		13.3	1.15	
	11300	2.26	1.25	固液分離せず、汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		10.8	1.92	
		22.5	2.23	
	16500	7.05	2.63	固液分離せず、汚泥濃度、流速分布とも均一な状態となる。
		16.3	3.43	
		25.5	3.95	

#### (1) 標準流速

汚泥のような懸濁液の輸送においては、固液分離して上澄水のみが流れる状態、ある濃度分布をもった浮遊状態で流れる場合、さらに、均一な濃度分布で流れる場合とがある。流れをこのような状態に分類した場合、流速はそれぞれ限界流速 (limiting velocity)、最小流速 (minimum velocity) および標準流速 (standard velocity) とよばれている<sup>33)</sup>。

下水汚泥の管路輸送では、少なくとも、標準流速以上で輸送する必要がある。表—4 は水理公式集<sup>33)</sup>を参考にして、下水汚泥の管内流動状態の観察結果を示したものである。観察方法は図—4 に示すような実験管路において、圧力損失測定管路の末端部に長さ 1m の透明なアクリル管を設置し、各流速ごとに管内の流動状態を観察したものである。汚泥濃度 10 000 mg/l 以上では、ほとんど沈殿せず、均一な状態で流動している。以上の観察結果から、管が均一な状態となる流速、すなわち、標準流速となる場合の摩擦損失水頭 (表—4) から、壁面せん断強度  $\tau_{ws}$  を求め、汚泥濃度との関係を図—11 に示した。ここで、 $\tau_{ws}$  は式 (16) で求めた。これらの関係

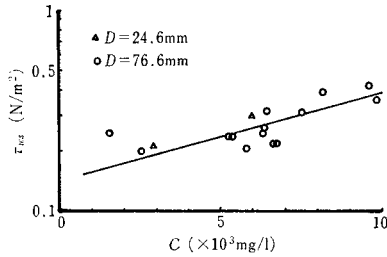


図-11 汚泥濃度と標準流速における壁面せん断強度との関係

は管径に関係なく次の式で表わすことができる。すなわち、

$$\tau_{ws} = 0.140 \exp(1.03 \times 10^{-4} C) \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $\tau_{ws}$ ：標準流速における壁面せん断強度 ( $N/m^2$ )、適用範囲：汚泥濃度 ( $C$ ) 10 000  $mg/l$  以下

下水汚泥の標準流速は式 (17) および遠藤・金成の式 (I) を用いて算定できる。すなわち、壁面せん断強度は、

$$\tau_{ws} = \frac{D \cdot \Delta P}{4L} = \frac{\rho_w}{8} \lambda V_s^2 \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 $V_s$ ：標準流速 ( $m/s$ )、 $\rho_w$ ：水の密度 ( $kg/m^3$ ) となる。したがって、標準流速は次式で表わすことができる。

$$V_s = \sqrt{\frac{8 \tau_{ws}}{\lambda \rho_w}} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、式 (19) の  $\lambda$  に式 (12) から式 (14) (遠藤・金成の式 (I)) を代入すると、次のようになる。

1) 層流領域： $Re \leq 2000$

摩擦損失係数は式 (12) で表わせるから、

$$V_s = \left( \frac{\tau_{ws}}{8 K'_p} \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{n'}} \cdot D \dots\dots\dots (20)$$

となる。

2) 遷移領域および乱流領域： $Re > 2000$

㊤ 滑らかな管

摩擦損失係数は遷移領域および乱流領域とも同一の関係式、すなわち式 (13) で与えられるため、

$$V_s = \left\{ 59.7 \frac{\tau_{ws}}{\rho_w} \left( \frac{D^{n'}}{K'_p} \right)^{0.197} \right\}^{\frac{1}{1.606 + 0.197 n'}} \dots\dots (21)$$

となる。

㊦ 粗い管

遷移領域および乱流領域とも、摩擦損失係数は式 (14) で表わせるため、

$$V_s = \left\{ 209 \frac{\tau_{ws}}{\rho_w} \left( \frac{D^{n'} \cdot \rho}{K'_p} \right)^{0.0171} \right\}^{\frac{1}{1.9658 + 0.0171 n'}} \dots\dots\dots (22)$$

となる。

表-5 は管径 150 mm, 300 mm および 500 mm の場合について、式 (20) から式 (22) を用いて算定した標

表-5 下水汚泥の標準流速  $V_s$  と臨界流速  $V_c$  (温度 20°C)

C (mg/l)	D (mm)	滑らかな管		粗い管		$V_c$ (m/s)
		$V_s$ (m/s)	$Re$	$V_s$ (m/s)	$Re$	
4 000	150	0.276	9 210	0.227	7 100	0.087
	300	0.291	15 800	0.227	11 400	0.061
	500	0.302	23 500	0.228	16 200	0.047
6 000	150	0.289	5 100	0.250	4 170	0.149
	300	0.303	8 210	0.251	6 320	0.111
	500	0.313	11 700	0.252	8 570	0.090
8 000	150	0.308	3 510	0.277	2 990	0.210
	300	0.322	5 420	0.277	4 360	0.163
	500	0.332	7 470	0.278	5 760	0.135
10 000	150	0.334	2 740	0.306	2 410	0.270
	300	0.347	4 120	0.307	3 420	0.214
	500	0.358	5 560	0.308	4 430	0.181

準流速である。表-5 にみられるように、標準流速の範囲は 0.3  $m/s$  から 0.4  $m/s$  程度であり、汚泥濃度、管径および管の粗滑にほとんど影響されない値であると考えられる。したがって、下水汚泥の管路輸送における標準流速は 0.4  $m/s$  とすることができる。しかも、この値は、一般に汚泥の管路輸送で必要とされている流速に一致している。

(2) 臨界流速

臨界流速は流れが層流と乱流の境界状態となる流速である。この臨界流速は遠藤・金成の式 (I) を用いて、次のように算定できる。すなわち、広義のレイノルズ数は式 (8) に示すように、

$$Re = \frac{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{K'_p}$$

であり、臨界レイノルズ数は 2000 とすることができる<sup>32)</sup>。したがって、臨界流速  $V_c$  は

$$V_c = \left( \frac{2000 K'_p}{D^{n'} \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2-n'}} \dots\dots\dots (23)$$

となる。

この式 (21) に式 (9), (10) および (11) (遠藤・金成の式 (I)) を代入すると、臨界流速の計算値  $V_{c(C)}$  が求まる。一方、臨界流速の実験値  $V_{c(E)}$  は図-12 に示すように、層流領域と乱流領域の交点から求めた。図-13 に臨界流速の計算値と実験値との関係を示した。図-13 から、遠藤・金成の式 (I) から誘導した式 (23) による臨界流速の計算値は実験値にほぼ一致していることが認められる。

(3) 輸送流速

下水汚泥の輸送流速は理論的には (1) で述べたように標準流速以上、すなわち、0.4  $m/s$  以上とすべきである。しかしながら、汚泥中には、大きささまの砂粒子が含まれているものと考えられ、これらの粒子の管路内

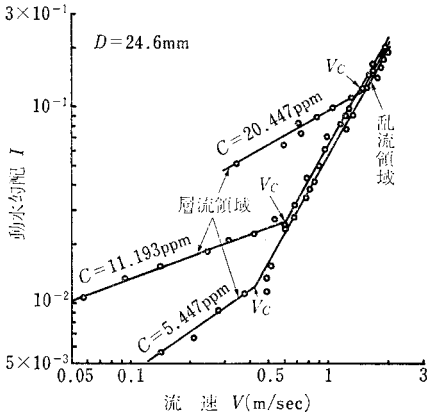


図-12 下水汚泥の臨界流速

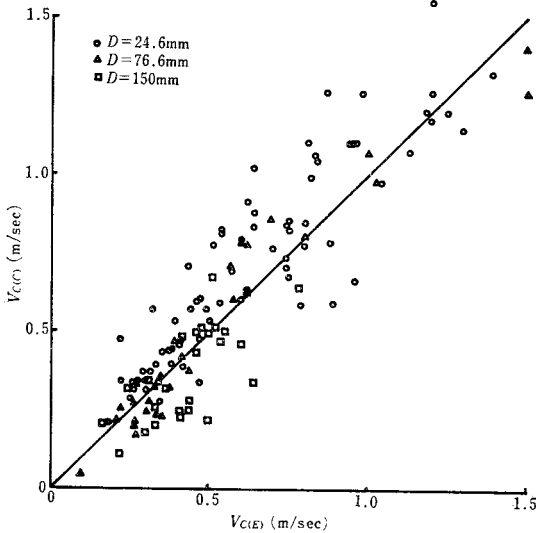


図-13 臨界流速の計算値  $V_{c(C)}$  と実験値  $V_{c(E)}$

の沈殿堆積を防止するために、最小流速は雨水管渠あるいは合流式下水道の管渠の場合と同様に、0.8 m/s 以上とすべきであると考えられる<sup>34)</sup>。このことは、理論的に求めた標準流速の2倍(0.4 m/s × 2)に相当する流速でもある。一方、最大流速は土砂類を含む場合は、砂の粒子による管渠の損傷を考え、3 m/s を限度としている<sup>34)</sup>。この考え方を踏襲すれば、種々の砂粒子をかなり含むと考えられる汚泥の場合の最大流速は砂粒子による管壁の損傷を防止するため、安全率を考えて 1.5 m/s (3 m/s ÷ 2) 程度と考えることもできる。

以上の結果から、汚泥の輸送流速は 0.8 m/s から 1.5 m/s とすることはきわめて妥当な範囲であろう。このことは、下水道施設設計基準で経験的に決定された 1 m/s から 1.5 m/s の範囲とほとんど一致するものである。

一方、レイノルズ数が等しければ、流れは力学的に相似になるとされている<sup>35)</sup>。したがって、レイノルズ数の

表-6 管径、汚泥濃度および流速と広義のレイノルズ数

D (mm)	C (mg/l)	$Re$		
		V=0.8 m/s	V=1.0 m/s	V=1.5 m/s
150	5 000	△ 27 700	△ 37 600	△ 65 600
	10 000	△ 10 190	△ 14 300	△ 26 200
	20 000	△ 3 600	△ 5 140	△ 9 850
200	5 000	△ 33 200	△ 45 000	△ 78 600
	10 000	△ 11 800	△ 16 400	△ 30 200
	20 000	△ 4 030	△ 5 760	△ 11 000
300	5 000	△ 42 800	△ 58 100	△ 101 000
	10 000	△ 14 400	△ 20 100	△ 37 000
	20 000	△ 4 740	△ 6 780	△ 13 000
400	5 000	△ 51 300	△ 69 600	△ 121 000
	10 000	△ 16 600	△ 23 300	△ 42 700
	20 000	△ 5 310	△ 7 600	△ 14 500
600	5 000	△ 66 100	△ 89 800	△ 157 000
	10 000	△ 20 400	△ 28 500	△ 52 300
	20 000	△ 6 240	△ 8 930	△ 17 100

○ :  $Re \geq 10000$ , △ :  $Re \geq 5000$

観点から輸送流速を考えれば、固形物の沈殿堆積を防止するためには、管内の流動状態は完全な乱流状態とすべきである。すなわち、図-3 にみられるように、乱流領域は粗い管の場合、広義のレイノルズ数 10 000 以上、滑らかな管では 5 000 以上である。管径 150, 200, 300, 400 および 600 mm, 汚泥濃度 5 000, 10 000, および 20 000 mg/l, さらに、流速 0.8, 1.0 および 1.5 m/s の各条件について広義のレイノルズ数を求め表-6 に示した。表-6 にみられるように、流速 0.8 m/s では、汚泥濃度 20 000 mg/l になると管径 300 mm 以下では広義のレイノルズ数が 5 000 以下になるので、たとえ、滑らかな管でも輸送管として使用できない。流速 1.0 m/s では、20 000 mg/l 付近の汚泥濃度で滑らかな管を使用すれば、輸送管として管径 150 mm 以上の管路が使用できる。流速 1.5 m/s では、汚泥濃度 5 000 mg/l から 20 000 mg/l の範囲で管径 200 mm から 600 mm の滑らかな管と粗い管のいずれの場合も、輸送管として使用できることが認められる。

結局、輸送流速は管径および汚泥濃度に関係があり、標準流速から考察した最小流速、広義のレイノルズ数および表-6 を総合的に検討すれば、下水汚泥の輸送流速は次のように要約することができる。

広義のレイノルズ数

粗い管 :  $Re = 10000$  以上

滑らかな管 :  $Re = 5000$  以上

管径 200 mm 以上

流速 1.0 m/s ~ 1.5 m/s

① 流速 1.0 m/s の場合

汚泥濃度 5 000 mg/l から 10 000 mg/l では、滑らかな管および粗い管のいずれの管も使用できる。汚泥濃度 10 000 mg/l から 20 000 mg/l では、滑らかな管のみ使



用できる。

② 流速 1.5 m/s の場合

汚泥濃度 5 000 mg/l から 20 000 mg/l の範囲で、滑らかな管および粗い管のいずれの管も使用できる。

すなわち、汚泥濃度が 10 000 mg/l 以下の場合には、輸送流速は 1.0 m/s 以上あれば十分であり、濃度が 10 000 mg/l 以上の場合には 1.5 m/s 付近の輸送流速が必要となる。また、管径は 200 mm 以上が輸送流速から考えられる望ましい管径とも考えられる。

5. 摩擦損失水頭的设计値

3. に示したように、遠藤・金成の式 (I) による摩擦損失水頭の計算値は、他の 2 つの計算法に比べて、滑らかな管および粗い管のいずれの場合とも、実験値にかなりよく一致していることが確認された。このため、本章は遠藤・金成の式 (I) を用いた場合の摩擦損失水頭的设计値について検討を加えた。

図-14 は管径 76.6 mm および 150 mm の実験管路において、汚泥濃度 5 000 mg/l から 30 000 mg/l まで、流速 0.3 m/s から 1.8 m/s の範囲で、遠藤・金成の式 (I) を用いて算定した摩擦損失水頭の計算値と実験値との誤差率  $E$  と式 (8) で示される広義のレイノルズ数  $Re$  との関係である。ここで、誤差率  $E$  は次式で算定した。

$$E = \frac{h_{f(C)} - h_{f(E)}}{h_{f(E)}} \times 100 \dots\dots\dots(24)$$

ここに、 $h_{f(C)}$  : 摩擦損失水頭の計算値、 $h_{f(E)}$  : 摩擦損失水頭の実験値

図-14 から、層流領域 ( $Re \leq 2000$ ) では、 $E$  はほぼ  $\pm 30\%$  以内にあり、遷移領域 (滑らかな管  $Re = 2000 \sim 5000$ , 粗い管  $Re = 2000 \sim 10000$ ) で  $E$  は  $\pm 20\%$  以内にあり、さらに乱流領域 (滑らかな管  $Re \geq 5000$ , 粗い管  $Re \geq 10000$ ) では、 $E$  はほぼ  $\pm 10\%$  以内にあることが認められた。

下水汚泥の輸送流速は 4. に示したように乱流領域でなければならないので、以上の検討結果から、遠藤・金成の式 (I) による誤差率は 10% 以内であることが認

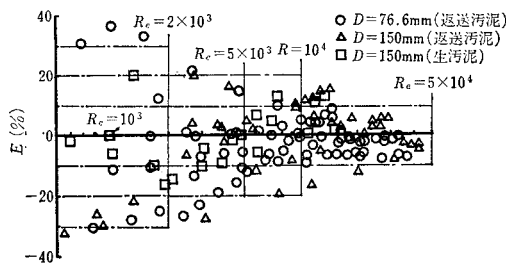


図-14 広義のレイノルズ数と誤差率との関係

められる。このことから、遠藤・金成の式 (I) を用いた下水汚泥の摩擦損失水頭的设计計算では、次のように要約することができる。すなわち、乱流領域では、 $E$  は  $\pm 10\%$  以内にあるので、式 (24) から、

$$\frac{h_{f(C)} - h_{f(E)}}{h_{f(E)}} = \pm 0.1$$

となる。そこで、摩擦損失水頭的设计値  $h_{f(D)}$  を

$$h_{f(D)} = 1.3 h_{f(C)} \dots\dots\dots \text{遠藤・金成の式 (II)}$$

とすれば、遠藤・金成の式 (I) で求めた計算値  $h_{f(C)}$  が実験値よりも小さくなった場合でも 20% の、さらに、大きく計算された場合では 40% の余裕をもつことになる。したがって、遠藤・金成の式 (II) は设计値の計算式とすることができるものと考えられる。

6. 総括および結論

下水汚泥の管路輸送における摩擦損失水頭および輸送流速について検討を加えた結果、次の結論が得られた。

(1) 下水汚泥の摩擦損失水頭的设计法について、Hazen-Williams の式を用いた方法、Abwas-sertechnik の方法、および遠藤・金成の式 (I) を用いた方法について検討を加えた結果、滑らかな管および粗い管のいずれの場合とも、遠藤・金成の式 (I) による計算値は実験値とよく一致する。

(2) 下水汚泥の標準流速および臨界流速の計算式を示した。

(3) 下水汚泥の輸送流速と管径は次のようになる。

広義のレイノルズ数

粗い管:  $Re = 10000$  以上

滑らかな管:  $Re = 5000$  以上

管径: 200 mm 以上

流速: 1.0 m/s ~ 1.5 m/s

(4) 摩擦損失水頭的设计値  $h_{f(D)}$  は

$$h_{f(D)} = 1.3 h_{f(C)} \dots\dots\dots \text{遠藤・金成の式 (II)}$$

ここに、 $h_{f(C)}$  : 遠藤・金成の式 (I) の計算値と表わすことができる。

参考文献

- 1) Clifford, W.: Friction of Sewage Sludge in Pipes, Proc. ASCE, pp. 821~825, 1930.
- 2) Annen, G.: Bau einer 3200 m Lange Klärschlammleitung, GWF, 100 Jahrg, Heft 40, pp. 1025~1027, 1959.
- 3) Wirts, J.J.: Pipe Line Transportation and Disposal of Digested Sludge, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 28, No. 2, pp. 121~131, 1956.
- 4) 土木学会: 下水汚泥の処理・処分および利用に関する研究報告書, pp. 33~35, 昭和 43 年.
- 5) 野中八郎: 下水処理プロセスとプラントの設計, 日本下水道協会, pp. 212~216, 昭和 47 年.
- 6) 田島保雄: 汚泥の長距離輸送について, 下水道協会誌,

- Vol. 2, No. 8, pp. 33~35, 1965.
- 7) Rudlfs, W. and L.E. West : Properties of Sewage Sludge Which Affect its Discharge through 24-Inch Pipes, Sewage Works Jour., Vol. 12, No. 1, pp. 60~72, 1940.
  - 8) Walfs, J.R. : Factors Affecting Sludge Force Mains, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 22, No. 1, pp. 1~10, 1950.
  - 9) Brisbin, S.G. : Flow of Concentrated Raw Sewage Sludge in Pipes, Proc. ASCE, pp. 1274-1~1274-12, 1957.
  - 10) Chou, T.L. : Resistance of Sewage Sludge at Flow in Pipes, Proc. ASCE, pp. 1780-1~1780-19, 1958.
  - 11) Hatfield, W.D. : The Viscosity or Pseudo-Plastic Properties of Sewage Sludge, Sewage Works Jour., Vol. 12, No. 1, pp. 60~72, 1940.
  - 12) Buzzell, J.C. and N.C. Sawyer : Biochemical vs. Physical Factors in Digester Failure, Jour. WPCF, Vol. 35, No. 2, pp. 205~221, 1963.
  - 13) Dick, R.I. and B.B. Ewing : The Rheology of Activated Sludge, Jour. WPCF, Vol. 39, No. 4, pp. 543~560, 1967.
  - 14) 遠藤郁夫・鄭 俊錫 : 汚泥の管路輸送に関する実験的研究, 衛生工学研究討論会講演論文集, 第4回, pp. 122~128, 1967.
  - 15) 遠藤郁夫・伊藤三郎 : 汚泥の流動性に関する研究, 衛生工学研究討論会講演論文集, 第5回, pp. 176~181, 1968.
  - 16) 高田 巖・川島 普 : 下水汚泥のチキソトロピー挙動, 下水道協会誌, Vol. 11, No. 123, pp. 21~29, 1974.
  - 17) 高田 巖・川島 普 : 下水汚泥の流動特性, 下水道協会誌, Vol. 13, No. 146, pp. 54~59, 1976.
  - 18) Friction of Sewage Sludge in Pipes, Proc. ASCE, Vol. 55, No. 7, pp. 1773~1797, 1929.
  - 19) Sparr, A.E. : Pumping Sludge Long Distance, Jour. WPCF, Vol. 43, No. 8, pp. 1702~1711, 1971.
  - 20) LaFrage, A.X. : Pumping Heavey Sludge Helps Solves an Air Pollution Problem, Water and Sewage Works, No. 10, pp. 335~337, 1971.
  - 21) Imhoff, K. and G.M. Fair : Sewage Treatment, John Wiley & Sons, p. 178, 1956.
  - 22) Annen, G. : Zur Berechnung der Reibungsverluste von Klärschlamm, GWF, 104 Jahrg, Heft 12, pp. 342~346, 1963.
  - 23) Caldwell, D.H. and H.E. Babbitt : Flow of Muds, Sludges and Suspensions in Circular Pipe, Ind. Engi. Chem., Vol. 33, No. 2, pp. 249~256, 1941.
  - 24) Vesilind, P.A. : Treatment and Disposal of Wastewater Sludge, Ann Arbor Science, pp. 58~66, 1975.
  - 25) 遠藤郁夫・金成英夫 : 汚泥の管路流動に関する基礎的研究(1), 衛生工学研究討論会講演論文集, 第9回, pp. 217~223, 1973.
  - 26) 遠藤郁夫・金成英夫 : 下水汚泥の管路輸送に関する実験的研究, 衛生工学研究討論会講演論文集, 第16回, pp. 133~138, 1980.
  - 27) 日本下水道協会編 : 下水道施設設計指針と解説, p. 419, 昭和47年.
  - 28) 岩井重久・申 丘激・名取 真 : 下・廃水汚泥の処理, コロナ, pp. 169~175, 昭和43年.
  - 29) Pallasch, O. and W. Triebel : Lehr-und Handbuch der Abwassertechnik III, Wilhelm Ernst & Sohn, pp. 212~217, 1969.
  - 30) Rayness, B.C. : Economic Transport of Digested Sludge Slurries, Jour. WPCF, Vol. 42, No. 7, pp. 1379~1386, 1970.
  - 31) Fisichell, A.P. : Raw Sludge Pumping—Problems and Interdisciplinary Solutions, Jour. WPCF, Vol. 42, No. 11, pp. 1916~1921, 1970.
  - 32) 遠藤郁夫・金成英夫 : 下水汚泥の摩擦損失係数に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 301, pp. 71~82, 1980.
  - 33) 土木学会編 : 水理公式集, pp. 451~455, 昭和46年.
  - 34) 日本下水道協会 : 下水道施設設計指針と解説, pp. 99~101, 昭和47年.
  - 35) 藤本武助 : 流体力学, pp. 26~30, 養賢堂, 昭和45年.

(1981.6.15・受付)