

早稲田大学理工学部 学生員 安藤明宏

早稲田大学理工学部 学生員 三木陽介

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫

1. 緒言 下水汚泥は広い濃度範囲において擬塑性流体の挙動を示すことが一連の研究によって明らかになっている。下水汚泥は多量のSSおよび夾雑物を含んでおり、擬塑性流体の流動特性を測定するのによく用いられる回転粘度計での測定が困難であるため、毛細管粘度計の理論に着目して、実験管路に直接汚泥を流し、層流領域より流体構造粘度指数 n' および流体粘稠度指数 k' 等を求めた。また、人工的に粗度を変えて、粗滑管の乱流領域における広義のReynolds数 Re_G と摩擦損失係数 f との関係式を求め、実際の汚泥管路輸送に適用できる粗滑遷移領域式を誘導した。

2. 実験方法 塩化ビニル製で全長6.0mである実験管路の相当直径および相対粗度について表-1に示した。滑らかな管は円形断面管路および正方形断面管路を用い、粗い管は上蓋を取り外すことのできる正方形断面管路を用いて、内面に均一に金剛砂を付着させて人工的に粗度を作った。圧力測定は汚泥が入り込まないようにしたマンオメータで、流速は重量法で測定した流量から求めた。汚泥はS処理場の混合汚泥（最初沈殿池汚泥+余剰汚泥）を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1. 下水汚泥の流動特性 流速の広範囲で層流領域が得られる $D=0.9\text{cm}$ 円形断面管路の層流領域より、下水汚泥濃度 C と n' および Kp' ($=8^{n'-1} \cdot k'$) との関係は、各々図-1, 2 のようになり、次の関係式で表された。

・下水汚泥濃度 C と n' との関係

ニュートン流体: $C \leq 1500\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ $n' = 1$

非ニュートン流体: $C \geq 1500\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ $n' = 7.15 \times C^{-0.270}$ ---- (1)

・下水汚泥濃度 C と Kp' との関係

$C \geq 4000\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ $Kp' = 2.49 \times 10^{-8} \cdot C^{1.72}$ ---- (2)

$1500 \leq C \leq 4000\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ では、 Kp' はニュートン流体と非ニュートン流体との遷移領域と考えることができた。図-1, 2 から、(1) 式および (2) 式は異なる管径 ($D=1.3\text{cm}$ 円管)、断面形状 ($D=1.3\text{cm}$ 正方形管) および汚泥を用いてもよく一致することが実験的に認められた。

3.2. 滑らかな管 Metzger 等によると、滑らかな管路の場合、塑性流体の乱流領域における Re_G と f との間には次の関係がある。

$$1/f = A_n \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) + B_n \text{ ---- (3)}$$

$D=1.3\text{cm}$ 円形断面管路の乱流領域より、下水汚泥濃度 C と A_n および B_n との関係は図-3, 4 のようになった。図-3 から、 $4000 \leq C \leq 15000\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ の範囲では、 A_n は下水汚泥濃度すなわち粘性の影響を受けずに一定であることが認められた。図-4 から、 B_n は濃度の影響を受けることが認められた。従って、下水汚泥濃度 C と A_n および B_n との関係は各々 (4) 式と (5) 式で表すことができた。

$4000 \leq C \leq 15000\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$

$$A_n = 1.85 \text{ ---- (4)} \quad B_n = 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \text{ ---- (5)}$$

以上のことから、滑らかな管における乱流領域の Re_G と f との関係は (6) 式で表すことができた。

$4000 \leq C \leq 15000\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ $Re_G > 5000$

$$1/f = 1.85 \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \text{ ---- (6)}$$

図-5 は異なる汚泥および断面形状 ($D=1.3\text{cm}$ 正方形管) を用いて (6) 式について実証性を検討したものである。断面形状による差異はなく、10% 以内の相対誤差であることが認められた。

表-1 実験管路の相当直径及び相対粗度

実験 管路	管径 (mm)	管壁 R/D	相当直径 (mm)	相対粗度 (mm)	備 考
I	0.90	0	3.0	2.5	滑らか (円管)
II	1.30	0	3.0	2.5	滑らか (円管)
III	2.00	0	3.0	2.5	滑らか (正方形管)
IV	1.96	5.6×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.500 (正方形管)
V	1.93	2.1×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.240 (正方形管)
VI	1.95	2.5×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.60 (正方形管)
VII	1.88	5.3×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.500+No.36 (正方形管)
VIII	1.95	5.5×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.36 (正方形管)
IX	1.92	5.8×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.24+No.36 (正方形管)
X	2.39	1.2×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 No.24 (正方形管)

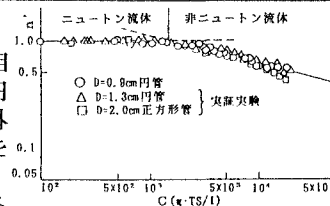


図-1: 下水汚泥濃度 C と構造粘度指数 n' との関係

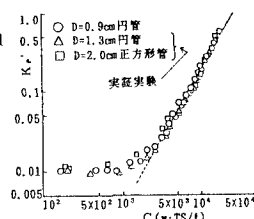


図-2: 下水汚泥濃度 C と n' との関係

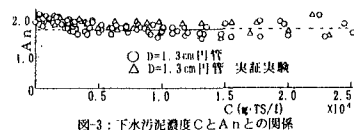


図-3: 下水汚泥濃度 C と A_n との関係

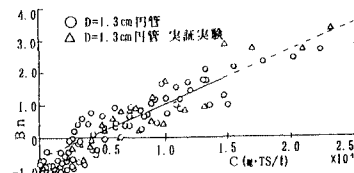


図-4: 下水汚泥濃度 C と B_n との関係

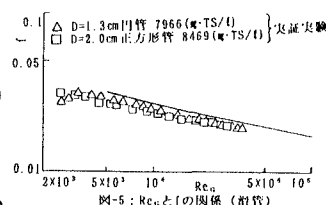


図-5: Re_G と f の関係 (前管)

3.3 粗い管

3.3.1 完全乱流領域 Moody図表を参照し、ニュートン流体としての清水において完全乱流領域が得られる粗度について実験的検討を加えた。Re>30000においてColebrook-White式より求めた $2K/D$ と $1/f$ との関係を図-6に示した。図-6より、水の完全乱流領域における $2K/D$ と $1/f$ との関係式とよく一致していることが認められた。従って、 $K/D=0.12, 0.058, 0.055, 0.053$ および 0.025 の管路ではRe>30000において完全乱流領域であることが判った。下水汚泥の場合、 $Re_G>30000$ における汚泥濃度Cと $1/f$ との関係を図-7に示したが、 $1/f$ すなわちfは汚泥濃度(粘性)の影響を受けていないことが認められた。従って、図-8に示した $2K/D$ と $1/f$ との関係から、下水汚泥の完全乱流領域におけるfと K/D との関係は(7)式で表すことができた。

$$4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l} \quad Re_G > 30000$$

$$1/f = 1.75 - 1.73 \log \frac{2K}{D} \quad (7)$$

3.3.2 粗滑遷移領域 下水汚泥においても、水の場合のColebrook-White式と同じ誘導方法で粗滑遷移領域の式を導くことができると考えられる。従って、滑管の乱流領域を表す(6)式と粗管の完全乱流領域を表す(7)式とを内挿して下水汚泥の粗滑遷移領域(8)式を誘導した。

$$4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l} \quad Re_G > 30000$$

$$1/f = 1.75 - 1.73 \log \left\{ \frac{10^{(1.75 - B_n) / 1.73}}{(Re_G \cdot f^{1-n'/2})^{An/1.73}} + \frac{2K}{D} \right\} \\ = 1.75 - 1.73 \log \left\{ \frac{23.9 \times 0.999779^C}{(Re_G \cdot f^{1-n'/2})^{1.07}} + \frac{2K}{D} \right\} \quad (8)$$

実際の汚泥管路輸送では、表-2に示した条件で実施されていることが多い。 k/D と Re_G とを考慮すると、実際の汚泥管路輸送では、粗滑遷移領域であると考えられた。本実験では実用範囲と考えられる $k/D=0.00056, 0.0021$ を用いて下水汚泥の粗滑遷移領域について異なる汚泥を用いて実証的検討を加え、図-9に実験結果を示した。また、表-2より、実際の汚泥輸送 Re_G は36300~69600であるので、本実験の Re_G を考慮して、本実験で得られる最大 Re_G における実測値fと(8)式の計算値fと比較して図-10に示した。図-10より、(8)式は実験値とよく一致していることが認められた。したがって、実際の汚泥管路輸送における k/D とfとの関係は(8)式で計算できることが認められた。

4. 総括及び結論 非ニュートン流体としての下水汚泥の管路輸送に際し粗滑管に関する、層流領域、粗滑遷移領域、および乱流領域において、 Re_G とfとの関係式を求めた。その関係式を用い、異なる下水処理場の汚泥を用いて、それぞれの場合の実験的検証を行ない、次のような結論を得ることができた。

- (1) 下水汚泥の流動特性を示す n' および Kp' について、 $D=0.9 \text{ cm}$ の管径を用いて、層流領域より汚泥濃度Cと n' および Kp' との関係をそれぞれ求めた。また、異なる下水処理場の汚泥を用いて、 $D=1.3 \text{ cm}$ 、相当直径 $D=2.0 \text{ cm}$ 正方形断面の管路において実証実験を行なった。
- (2) 滑らかな管において、乱流領域における Re_G とfとの関係は管路の断面形状に関係なく(6)式で表すことができた。
- (3) 粗管の場合、完全乱流領域における Re_G とfとの関係は(7)式で表すことができた。
- (4) 粗滑遷移領域における Re_G とfとの関係は(8)式で表すことができた。また、実際の汚泥管路輸送における k/D とfとの関係は(8)式で計算できることを示した。

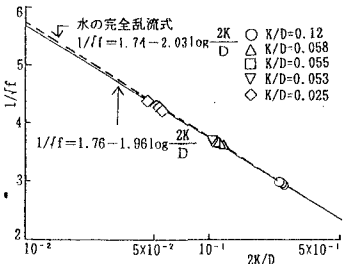


図-6：水における $2K/D$ と $1/f$ との関係 ($Re > 30000$)

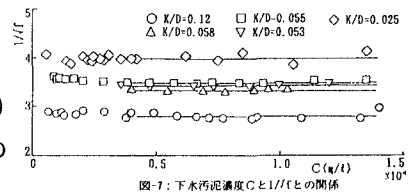


図-7：下水汚泥濃度Cと $1/f$ との関係

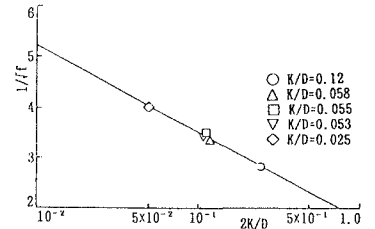


図-8：下水汚泥における $2K/D$ と $1/f$ との関係 ($Re > 30000$)

表-2 実際の汚泥管路輸送

内径 D (mm)	絶対粗度 k (mm)	相対粗度 k/D	Re_G (C=8000mg TS/l) V=1.0m/s V=1.5m/s	
300	0.3	0.001	36300	63200
	1.0	0.003		
350	0.3	0.0009	40000	69600
	1.0	0.0029		

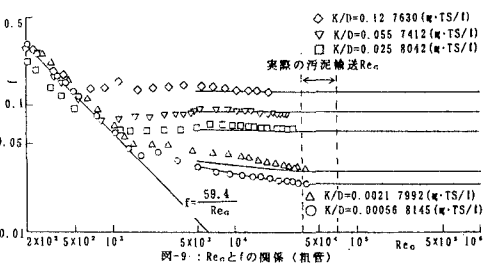


図-9： Re_G とfの関係(粗管)

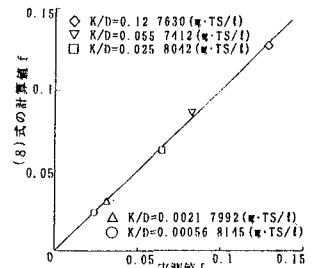


図-10：実測値fと(8)式の計算値fとの比較