

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3675号

マイクロフィルム用資料

土木研究所資料

下水汚泥の管路輸送特性に関する 調査報告書

平成12年1月

建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室

Copyright © (2000) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

下水汚泥の管路輸送特性に関する 調査報告書

汚泥研究室	室 長	森田弘昭 尾崎正明 ¹⁾ 渡部春樹 ²⁾ 佐藤和明 ³⁾
	研究員	山下洋正 ⁴⁾ 松原 誠 ⁵⁾

要 旨

本調査では、汚泥管路輸送システムの適正かつ効率的な計画立案に資することを目的として、濃度6%程度までの実下水汚泥を用いた管路輸送実験を行い、汚泥の流動特性を考慮した送泥管の圧力損失の算定方法について検討した。

キーワード: 下水汚泥、擬塑性流体、管路輸送、圧力損失、摩擦損失係数、レイノルズ数、粘度、水理実験

- 1) 現 都市基盤整備公団都市施設交通部調査役
- 2) 現 日本下水道事業団東京支社次長
- 3) 現 土木研究所下水道部長
- 4) 現 都市局下水道部下水道企画課係長
- 5) 現 土木研究所下水道部下水道研究室主任研究員

ま え が き

下水道の普及に伴い、下水処理により発生する汚泥量は年々増加してきており、その適正な処理・処分・利用を行うことは極めて重要な課題である。これに対する有効な解決策の一つが汚泥の集約処理である。

汚泥集約処理が導入される理由としては、①一般に、汚泥処理設備の建設、維持管理にはスケールメリットが働くため、小規模な施設を処理場ごとに設置するよりも、汚泥を集約して大規模な施設を建設した方が、コスト面で有利であること、②汚泥処理施設は周囲に与える環境インパクトが大きく、市街地にある下水処理場内に汚泥処理施設を設置または存置することが難しいこと、③汚泥の再利用、資源化を図る場合においては、ある程度まとまった汚泥量が必要であること、などをあげることができる。近年では、処理場の改築・更新、もしくは高度処理施設導入のため処理場敷地を確保する必要から、既存の汚泥処理施設を廃止し、新たに集約処理場を建設する事例も見受けられる。

汚泥を集約処理する場合、汚泥輸送は必須の条件である。汚泥輸送には、輸送条件によりいくつかの方法が考えられるが、大量の液状汚泥を集約化する方法としては、管路輸送が一般的である。集約処理における管路輸送の実施事例も大都市を中心に20自治体を越えている。

汚泥管路輸送システムを計画する際には、送泥管の圧力損失を予測する必要がある。圧力損失は重要な設計因子であり、これを過小評価した場合、計画通りの送泥量が見込めず、場合によっては閉塞の危険もある。また、逆に過大評価した場合には、汚泥管路輸送システムの建設コストに影響する。

送泥管の圧力損失には、管路側の条件として、管径や粗度(管種)、送泥流速、また汚泥側の条件として、その多種多様な性状の違いが影響する。従来より、送泥管の圧力損失の予測は、汚泥側の条件として汚泥濃度のみを用いる簡便法により計算されてきた。しかし、汚泥濃度が高い場合や、送泥距離が長い場合は、特に入念な検討が必要であり、その正確な予測のためにはレオロジカルなアプローチが必要とされる。

このような背景のもと、汚泥研究室では、平成3年度から平成8年度までの6年間にわたり、「下水汚泥の高効率輸送システムの開発に関する調査」ならびに「中小都市における広域的な汚泥処理システムの開発に関する調査」の2つの課題の中で、汚泥管路輸送システムについての調査を実施した。

本調査では、集約処理の効率化を汚泥輸送の観点から検討することを目的としており、特に送泥計画に関する技術指針が策定されることを前提に、計画論で必要となる基礎データの収集と検討に重点を置いている。

また、本調査は大きく2つの部分に分けることができる。1つは回転粘度計による粘度測定を中心とした汚泥の流動特性に関する調査であり、もう1つは汚泥輸送実験を中心とした汚泥の管路輸送特性に関する調査である。これらのうち、前者については平成7年4月に、土木研究所資料²⁾として既にとりまとめられており、本報告書では、後者についての調査結果をとりまとめた。

目 次

1. 概 説	
1. 1 管路輸送特性調査の必要性	1
1. 2 汚泥の流動特性	1
1. 3 既存研究成果のレビュー	3
1. 4 調査の目的	7
2. 実験装置および実験方法	
2. 1 汚泥輸送実験装置	9
2. 2 実験方法	17
2. 3 汚泥性状の測定	19
3. 汚泥輸送実験(実験1)	
3. 1 実 験	21
3. 1. 1 実験方法	21
3. 1. 2 実験結果	22
3. 2 考 察	28
3. 2. 1 測定結果の妥当性	28
3. 2. 2 層流域の圧力損失と擬塑性流動モデル	28
3. 2. 3 乱流域の圧力損失と既存公式との比較	31
3. 3 まとめ	34
4. 汚泥輸送実験(実験2)	
4. 1 実 験	35
4. 1. 1 実験方法	35
4. 1. 2 実験結果	36
4. 2 考 察	36
4. 2. 1 層流域の圧力損失と管径、管種の影響	36
4. 2. 2 滑管乱流域の圧力損失	37
4. 2. 3 粗管乱流域の圧力損失	48
4. 2. 4 臨界レイノルズ数	50
4. 3 まとめ	51

5. 汚泥輸送実験(実験3)	
5.1 実験	53
5.1.1 実験方法	53
5.1.2 実験結果	53
5.2 考察	58
5.2.1 滑管乱流域の圧力損失	58
5.2.2 粗管乱流域の圧力損失	66
5.3 まとめ	69
6. 汚泥輸送実験(実験4, 5)	
6.1 実験	70
6.1.1 実験方法	70
6.1.2 実験結果	71
6.2 考察	80
6.2.1 粗管乱流域の圧力損失	80
6.2.2 臨界レイノルズ数	85
6.3 まとめ	86
7. 管路輸送特性に関するその他の検討	
7.1 汚泥倍率を用いた簡便法	87
7.2 最適輸送条件の検討	93
7.3 まとめ	95
8. まとめ	96
9. 参考文献	98
10. 使用記号一覧	99

付録 関連発表論文

- | | |
|---|-----------------------------|
| (1) 下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測方法 | 環境工学研究論文集・第30巻 |
| (2) 下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測 | 第32回下水道研究発表会講演集 |
| (3) Biosolids Rheology and Friction Losses in Pipes | WEFTEC ASIA, Singapore 1998 |

1. 概 説

1.1 管路輸送特性調査の必要性

汚泥管路輸送システムを計画する際には、送泥管の圧力損失を予測する必要がある。圧力損失は重要な設計因子であり、これを過小評価した場合、計画通りの送泥量が見込めず、場合によっては閉塞の危険もある。また、逆に過大評価した場合には、システムの建設コストに影響する。

送泥管の圧力損失には、管路側の条件として、管径や粗度(管種)、送泥流速、また汚泥側の条件として、その多種多様な性状の違いが影響する。従来より、送泥管の圧力損失の予測は、主に汚泥側の条件として汚泥濃度のみを用いる簡便法により計算されてきた。これは、長距離送泥の事例として汚泥濃度 1%を越えるような実績がほとんどなく、汚泥の流動特性を考慮せずとも実用面で問題が生じなかったためと考えられる。「下水道施設・計画設計指針と解説 (1994 年版)」においても、濃度 2%以下、流速 1m/s 以上で適用される簡便法を提示するにとどまっている。

しかし今後は、汚泥処理システムも多様化し、高濃度汚泥の管路輸送を必要とする場合も想定される。このような場合は、汚泥濃度だけで汚泥の流動特性を表現することは困難であり、また送泥条件によって層流が生じる可能性もある。そこで、汚泥の流動特性を考慮した入念な検討が必要となる。

汚泥の流動特性を考慮した送泥管の圧力損失の予測方法については、これまでにいくつかの研究成果が報告されているが、これらは必ずしも結論が一致しておらず、未解明な部分が多い。よって下水汚泥の管路輸送特性の調査は、適正かつ効率的な送泥計画を立案する上で非常に重要な課題である。

1.2 汚泥の流動特性

下水汚泥は、濃度のごく低い場合以外は非ニュートン流体としての挙動を示す。

ニュートン流体であれば、いわゆるニュートンの粘性の法則に従い、せん断応力 τ [Pa] と速度勾配(ずり速度) D [1/s] とは比例関係にあり、その流動曲線 (flow curve) は原点を通る直線となる。

$$\text{Newtonian} \quad \tau = \mu D \quad (1-1)$$

ここで μ は粘性係数 (coefficient of viscosity) である。

非ニュートン流体の場合は、流動曲線が原点を通る直線とはならず、見かけ粘度 $\theta (= \tau / D$ [Pa·s]) は速度勾配が大きくなるほど小さくなる。下水汚泥の流動特性を表現するために従来より用いられてきた流動モデルは、ビンガム流動 (Bingham Plastic) と擬塑性流動 (Pseudoplastic) の2つであり、ともに2つのレオロジー定数を必要とする。

$$\text{Bingham Plastic} \quad \tau = \tau_y + \eta D \quad (1-2)$$

$$\text{Pseudoplastic} \quad \tau = k D^n \quad (1-3)$$

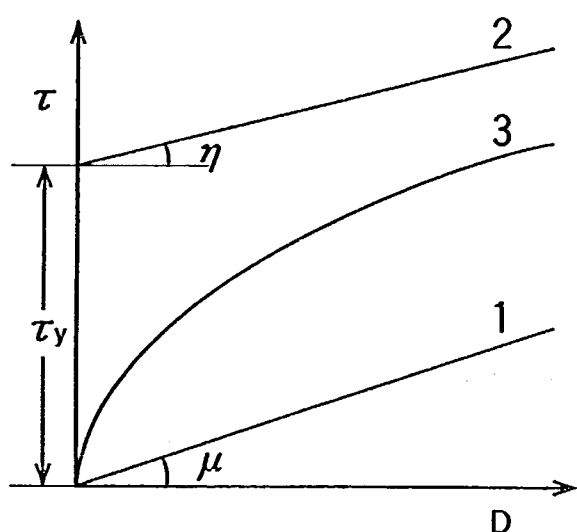
ここで τ_y [Pa] は降伏値 (yield stress)、 η [Pa·s] は塑性粘度 (coefficient of rigidity)、 k [Pa·s⁻ⁿ] は擬塑性粘度

(consistency index)、 n [-] は構造粘度指数 (flow behavior index) である。また n については $n < 1$ である。各流動モデルにおける流動曲線の形状を図 1-1 に示す。また、非ニュートン流動モデルの見かけ粘度について図 1-2 に示す。

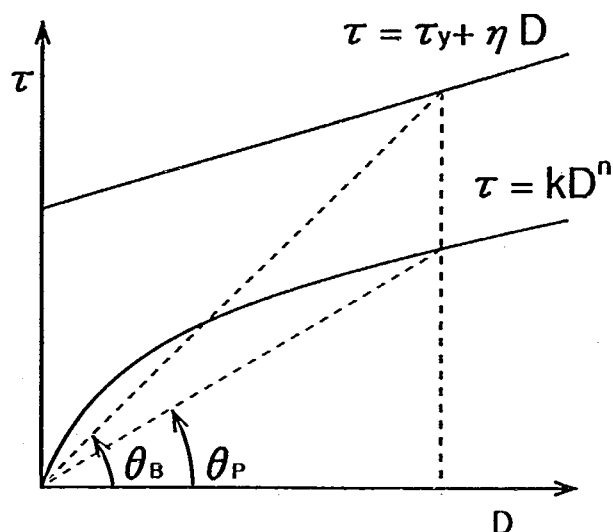
下水汚泥の流動特性を表現するのにどちらのモデルを用いるかについては定説がない。しかし、土木研究所におけるこれまでの調査 ①では、①下水汚泥の流動曲線を広い範囲にわたって精度よく表現できること、②表現形式が簡便であり計算上有利なことから、下水汚泥の流動特性を表現するには擬塑性流動モデルの方が適しているという結論が得られている。よって、本調査においても汚泥の流動特性を擬塑性流動モデルにより取り扱うものとする。ただし、これはビンガム流動モデルが不適切であるということではなく、あくまで相対的に有利ということから判断している。

下水汚泥のもつもう1つの重要な流動特性がチクソトロピー (thixotropy) である。これは、流動変形を受けると時間とともに見かけ粘度が低下していく性質(時間依存性)のことをいう。

下水汚泥の流動特性を回転粘度計にて測定した場合、一定速度勾配下では、応力の指示値が時間とともに減少し構造破壊が進行しなくなる平衡点に達するまで低下し続ける。また連続可変速では、加速時(上昇曲線)と減速時(下降曲線)が一致せず履歴曲線を描く。管路輸送時には、汚泥がポンプや破碎機を通過して流動化するため、回転粘度計による測定値として下降曲線を採用することが一般的である²⁴⁾。



1=Newtonian
2=Birgham Plastic
3=Pseudoplastic



$$\theta_B = \tau_y/D + \eta$$

$$\theta_P = kD^{n-1}$$

図 1-1 種々の流動モデル

図 1-2 非ニュートン流動モデルの見かけ粘度

1.3 既存研究成果のレビュー

以下に、下水汚泥の圧力損失についての主な研究成果についてとりまとめた。これらのうち、①は、層流域の圧力損失について検討したもの、②～⑤は乱流域の圧力損失を汚泥の流動特性から算出したもの、⑥～⑧は乱流域の圧力損失を汚泥濃度から算定したものである。また、各実験条件について表 1-1 にまとめた。

① Carthew ら (1983) : Development of Dynamic Head Loss Criteria for Raw Sludge Pumping⁴⁾

- ・流動特性 :ビンガム流体
- ・圧力損失 :層流域については、理論的に導出される公式により求めることができる。
- ・コメント : Colorado Springs 市の送泥計画立案に際して実施された実験。
汚泥の流動特性は処理場ごとに大きく異なるので、特に長距離送泥の場合は個別に流動特性を調査することが望ましいと指摘している。

② Caldwell ら (1941) : The Flow of Muds, Sludges, and Suspensions in Circular Pipe⁵⁾

- ・流動特性 :ビンガム流体
- ・圧力損失 :層流域については、理論的に導出される公式により求めることができる。
乱流域については、ニュートン流体のレイノルズ数(分散媒である水の粘度を用いたもの)を用いて、清水の場合と同様に求めることができる。これは、乱流域の圧力損失は主に流速と密度の影響を受けること、濃度の増加は密度が増加するだけで分散媒の粘度には影響しないこと、乱流においても壁面のごく近くには分散媒の層流底層が形成されることによる。
- ・コメント :臨界レイノルズ数は、ビンガム流体の見かけ粘度を用いたレイノルズ数に対して、下限 2000、上限 3000。

③ 吉田ら (1972): 下水汚泥の管路輸送特性⁶⁾

- ・流動特性 :ビンガム流体
- ・圧力損失 :ビンガム流体の広義のレイノルズ数を定義することにより、層流域、乱流域ともニュートン流体の場合と同様に求めることができる。
- ・コメント :完全に乱流域となる点としてレイノルズ数 3000 を採用(上限に相当)

④ 遠藤ら (1980): 下水汚泥の摩擦損失係数に関する基礎的研究⁷⁾

- ・流動特性 :擬塑性流体
- ・圧力損失 :擬塑性流体の広義のレイノルズ数を定義し、層流域はニュートン流体と同様にして、乱流域は実験から求めた指数式から摩擦損失係数を求める。また広義のレイノルズ数を構成するレオロジー定数や汚泥密度を汚泥濃度の関数として表現する。予測式の適用範囲は汚泥濃度で 0.4 ～ 3% である。
- ・コメント :臨界レイノルズ数として 2000。遷移領域として 2000 ～ 10000

⑤ 大阪市 (1995): 汚泥輸送に関する実験報告書⁸⁾

- ・流動特性 : 擬塑性流体
- ・圧力損失 : 層流域については、擬塑性流体の理論式を基本としつつ、管路輸送実験から求められたデータでこれを補正して実験式を算出。
乱流域については、擬塑性流体の広義のレイノルズ数を定義し、これを用いて摩擦損失係数を算出。広義のレイノルズ数と摩擦損失係数との関係は実験から求めた指数式。
- ・コメント : 大阪市の高濃度消化汚泥の管路輸送計画立案に際して実施された実験。
式中に実験に特有な係数を含んでいるため、汎用性には乏しいと考えられる。

⑥ Chou (1958) : Resistance of Sewage Sludge to Flow in Pipes⁹⁾

- ・流動特性 : ビンガム流体
- ・圧力損失 : Brisbin の実験値¹⁰⁾から、生汚泥の乱流域の圧力損失について Hazen-Williams 式の係数を汚泥濃度により補正する方法を提案
- ・コメント : 「下水道施設設計指針と解説 (1984 年版)」には、この予測式が用いられたため、日本においても広く浸透している。しかし、この補正係数は、限定的な送泥条件 (流速: 5.1fps、管径: 4in) における、生汚泥 (しかも国外の) を用いた実験から導出されていることに留意すべきである。
なお、論文中で Caldwell らの報告について言及し、「彼らの結果は非常に特殊なケースであり、通常の条件では、下水汚泥はこのような挙動を示さない」としている。

⑦ 東京都 (1982): 汚泥輸送に関する調査報告書(その3)¹¹⁾

- ・流動特性 : 擬塑性流体
- ・圧力損失 : 乱流域について Hazen-Williams 式を汚泥倍率により補正する方法(簡便法)
- ・コメント : 汚泥の流動特性についても調査しているが、最終的には実用面が重視されて、汚泥濃度で整理されている。他地区の汚泥を用いた場合でも同様な汚泥倍率で表現できるかどうか検証が必要。「下水道施設・計画設計指針と解説 (1994 年版)」には、この予測式が採用されている。

⑧ 金井ら (1992): 送泥システムの設計・維持管理に関する基礎調査¹²⁾

- ・流動特性 : レオロジーについての取り扱いなし
- ・圧力損失 : 乱流域について Hazen-Williams 式を汚泥倍率により補正する方法(簡便法)
- ・コメント : 日本下水道事業団が事業主体であるエースプラン(兵庫西)の送泥管路の設計・維持管理を行うための資料を得ることを目的として実施。当該地区には皮革工場が多く立地し、汚泥性状が他地区と大きく異なることが特徴。よって予測式の汎用性は低いと考えられる。

表 1-1 既往研究における汚泥輸送実験の概要

	Carthew ら(1983)	Caldwell ら(1941)	吉田ら (1972)	遠藤ら (1980)	大阪市 (1995)	Brisbin (1958)	東京都 (1982)	金井ら (1992)
配管長	ループ 185m	不明	ループ 100m	粗管: 33m 滑管: 11m	不明	18m	ループ約 50m	ループ 200m
管種・管径	強化塩ビ管 4in	鋼管 1/2, 1, 2, 3 (in)	配管用炭素鋼鋼管 50A, 100A	配管用炭素鋼鋼管 150mm 塩ビ管 24.6mm, 76.6mm	配管用炭素鋼鋼管 150A, 200A モルタルライニング ダクタイル鋳鉄管 150A, 200A	鋼管 4in, 6in	配管用炭素鋼鋼管 80A, 100A, 150A モルタルライニング ダクタイル鋳鉄管 75A, 100A, 150A	粉体エポキシ塗装 ダクタイル鋳鉄管 200A
圧力損失 測定部長さ	64m 直管	6m 直管	38.5m 直管	粗管: 25m 滑管: 6m	20m 直管	6m 直管	20m 直管	132m 曲管部含む
圧力損失 測定法	圧力ゲージ (中間剤封入)	圧力ゲージ	差圧計 (固液分離器付き)	マノメーター (圧力安定槽付き)	差圧計 (伝達部清水封入)	圧力ゲージ (空気チャンバー付)	差圧計 (伝達部清水封入)	差圧計
流量測定法	超音波流量計	重量法	電磁流量計	重量法	電磁流量計	・重量法 ・ストローク数× ポンプキャパシティ	電磁流量計	超音波流量計
粘度測定法	回転粘度計	改良 Stormer 粘度計	回転粘度計	回転粘度計	回転粘度計	測定せず*	回転粘度計	測定せず*
圧送方法	一軸ネジ式ポンプ	ロータリーポンプ	ヘッドタンク	ヘッドタンク	・スクリーウ渦巻きP ・一軸ネジ式ポンプ	・グイヤフラムポンプ ・プランジャーポンプ	スクリーウ式渦巻きP	スクリーウ式渦巻きP
流速範囲	～ 2m/s	0.1 ～ 10m/s	0.2 ～ 2m/s	0.1 ～ 2m/s	0.3 ～ 1.5m/s	0.2 ～ 1.5m/s	0.4 ～ 6m/s	0.2 ～ 1.3m/s
レイノルズ数 範囲	不明	～ 600,000	～ 30,000	～ 30,000	～ 40,000	不明	～ 30,000	不明
汚泥量	貯留槽: 17m ³	貯留槽: 8m ³	4m ³	不明	不明	不明	貯留槽: 9m ³	貯留槽: 10m ³
汚泥種類	Colorado Springs, CO 混合汚泥: ～ 5%	イムホフ汚泥: 14% 消化汚泥: 7.8%	大阪市 消化汚泥: 4 ～ 7%	川崎市 余剰汚泥: 0.2 ～ 2% 混合汚泥: 1.2 ～ 3%	大阪市 消化、余剰、濃縮 1 ～ 5%	Greenwich, CT 生汚泥: ～ 10%	東京都 余剰汚泥 0.8 ～ 3.3% 混合汚泥 1.6 ～ 2.9%	姫路市 混合汚泥 0.3 ～ 2.3%
その他					測定開始前に、最高 流速にて 30min の予 備圧送実施			

前述の通り、本調査では、下水汚泥の流動特性を擬塑性流動モデルにより取り扱うこととしている。擬塑性流体の円管内層流における圧力損失については理論的に導出されている¹³⁾¹⁴⁾。その導出過程は概ね以下の通りである。

半径 $r (=d/2)$ の円管を層流で流れる擬塑性流体を考え、その擬塑性粘度を k 、構造粘度指数を n とする。また、流れ方向の単位長さあたりの圧力損失を ΔP とする。

円管の中心から距離 y の地点の流速を u とすると、擬塑性流体の流動特性は、

$$\tau = -k (du/dy)^n \quad (1-4)$$

と表現される。また、半径 y の円筒に働く力の釣り合いから、

$$2 \pi y \cdot \tau = -\Delta P \cdot \pi y^2 \quad (1-5)$$

$$\tau = -\Delta P \cdot y/2 \quad (1-6)$$

が成り立つ。式 (1-4) と (1-6) から、次式が導かれる。

$$du/dy = (\Delta P/2k)^{1/n} \cdot y^{1/n} \quad (1-7)$$

これを、境界条件 ($y=r$ のとき $u=0$) のもとで積分すると、円管内の流速分布が求まる。

$$u = \frac{-n}{n+1} \left(\frac{\Delta P}{2k} \right)^{1/n} \cdot (y^{1+1/n} - r^{1+1/n}) \quad (1-8)$$

このとき、円管内の平均流速 V は、

$$V = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r 2 \pi y u dy = \left(\frac{\Delta P}{2k} \right)^{1/n} \cdot \frac{n}{3n+1} \cdot r^{1+1/n} \quad (1-9)$$

一方、Darcy-Weisbach 式の摩擦損失係数 f は、

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \cdot (l/d) \frac{V^2}{2g} \quad (1-10)$$

と表される。ここで、 ρ は擬塑性流体の密度、 g は重力加速度である。水の場合と同じように、 $f = 64/Re$ となるように、擬塑性流体のレイノルズ数 Rep を定義すれば、式 (1-9) と (1-10) から、

$$Rep = \frac{8 \rho V^{2-n} d^n}{k [(6n+2)/n]^n} \quad (1-11)$$

が導かれる。擬塑性流体の場合も、この Rep を用いれば、層流の圧力損失についてニュートン流体と同様に扱うことができる。

1.4 調査の目的

本調査では、汚泥管路輸送システムの適正かつ効率的な計画立案に資するため、送泥管の圧力損失予測式を構築することを目的とする。ここで、汚泥の流動特性は擬塑性流動モデルで扱えるものとし、かつそのレオロジー定数は既知であるものとする。またその流動状態は、チクソトロピーの影響のない平衡流動状態にあるものとする。検討のためのデータは、汚泥輸送実験装置を用いた送泥実験、ならびに共軸二重円筒回転粘度計を用いた粘度測定により取得する。また、管種・管径の影響、既存研究成果との比較、汚泥倍率による予測式、臨界レイノルズ数等についてもあわせて検討を行う。

ここで、流動特性は既知であることを前提として議論を進めるのは次のような理由による。つまり Carthew ら⁴⁾が指摘しているように、レオロジー定数は各汚泥ごとにばらつきが大きく、汚泥濃度のような一般的な指標からレオロジー定数を類推することは、誤差が大きく正確さを欠く恐れがある。よって、検討対象とする汚泥の流動特性は、原則として個々に測定することが必要であるという考え方に基づくものである。この方式によれば、圧力損失予測式がレオロジー定数の誤差を含まないため、圧力損失予測式を、予測精度が高く、かつ汎用性のあるものとして行うことができる。なお、流動特性の調査方法については既報⁵⁾にとりまとめているので参考にされたい。

その他、技術指針を策定する場合に必要な以下の項目については、本調査に含んでいない。これらについては、別途調査を実施する必要があると考えられる。

- ・実施に適用する場合に推奨される流速、管径について。
- ・送泥管の壁面の経時変化と、これが送泥に及ぼす影響について。
- ・汚泥のチクソトロピー性の定量的評価と、送泥計画への反映のさせ方について。

2. 実験装置および実験方法

2.1 汚泥輸送実験装置

送泥管の圧力損失を測定するための施設として、茨城県霞ヶ浦浄化センター内の湖北総合実験施設に汚泥輸送実験装置を設置した。本実験装置を用いて、平成3年度から8年度まで6年間にわたり実験を行った。実験装置は、研究の進展に伴い、実験目的に合致するように改良・増設を実施した。

①第1期(平成3～4年度:実験1に対応)

実験装置は図 2-1 に示すように、貯留タンク、送泥ポンプ、送泥管からなるループであり、供試汚泥を循環圧送した際の圧力損失を側管に設置した電子式差圧発信器により測定するものである。

貯留タンクは容量 200L で、タンクには汚泥の均質化を図るための攪拌機が設置されている。汚泥はタンク底部より引き抜かれ、送泥ポンプ、送泥管を経由して、タンク上部の戻り管より再びタンクに返される。送泥ポンプは一軸ネジ式ポンプで、高濃度汚泥であっても脈動なく一定流量で送泥することが可能である。送泥管には管径 37mm のステンレス鋼管(SUS)を使用した。圧力損失測定区間は直管部の 20m であり、その手前に 4m の助走区間を設けた。測定区間内はフランジを設けず、溶接により管を接合した。送泥管の全長は約 55m であり、送泥管全体が水平になるように設置した。差圧測定のため、側管にはあらかじめ清水を封入し気泡を除去した。差圧発信器の出力はペンレコーダーに記録した。実験には約 160L の汚泥を使用し、実験時の流速は 0.1 ～ 2 m/s の範囲にあった。各機器の仕様について表 2-1 に示す。また、第1期における実験装置の状況を写真 2-1 ～ 2-6 に示す。

表 2-1 各機器の仕様

送泥ポンプ: ヘイシンモノポンプ 2NE-40PA リングコーン無段変速機付き	
吐出量	0.9-6 m ³ /h
全揚程	6 kgf/cm ²
電子式差圧発信器: 山武ハネウエル JTD220 マニホールド弁付き	
測定スパン	25-10000mmH ₂ O 連続可変
出力	4-20mADC

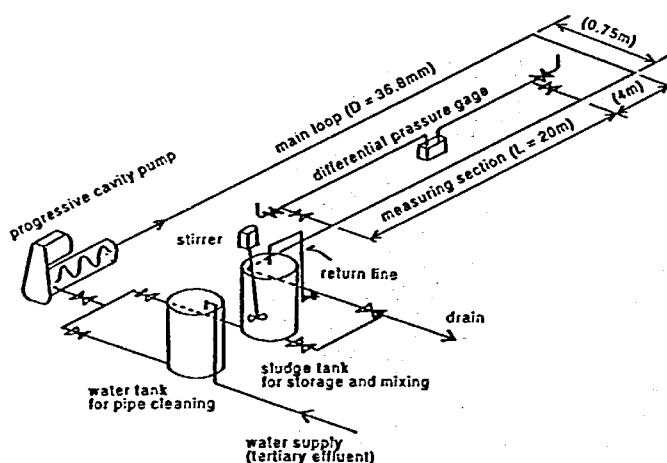


図 2-1 汚泥輸送実験装置(第1期)

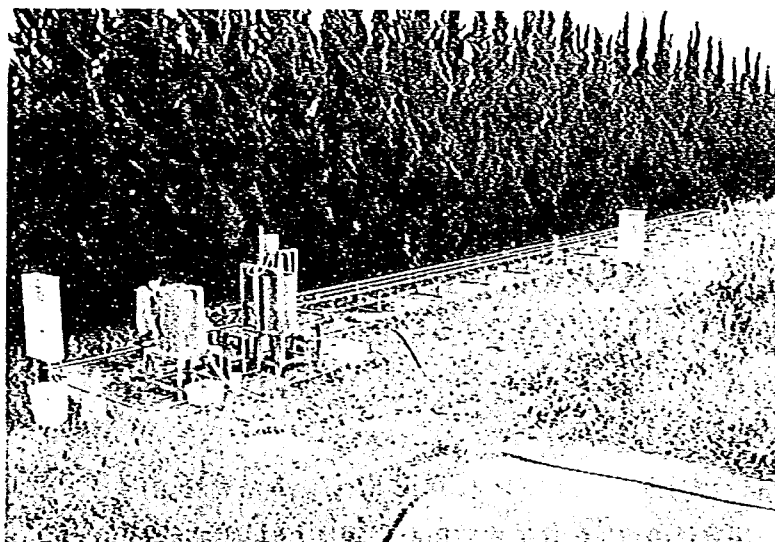


写真 2-1 汚泥輸送実験装置全景(第1期)

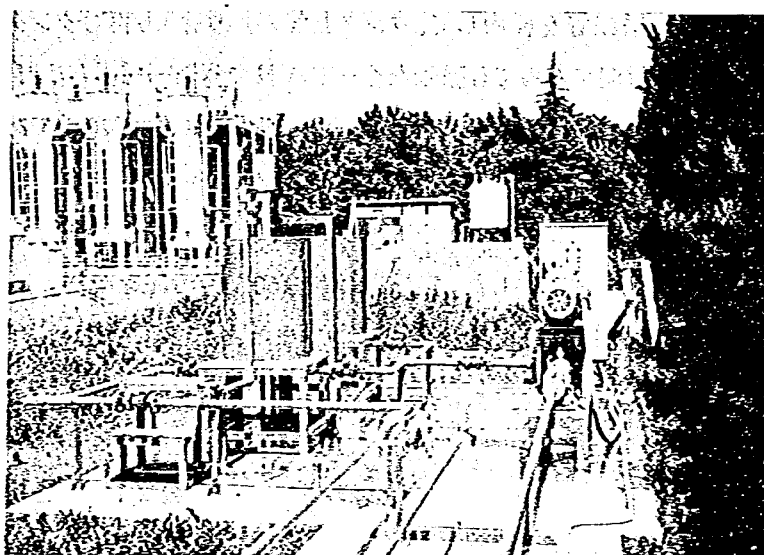


写真 2-2 送泥ポンプまわり配管

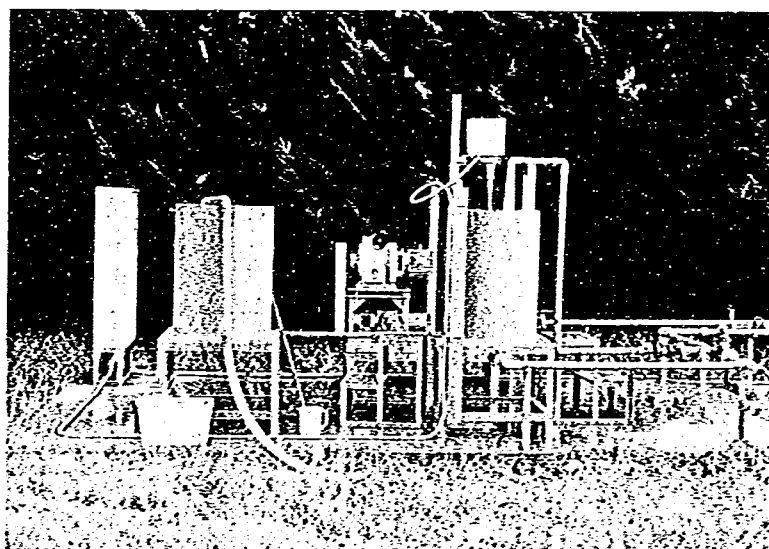


写真 2-3 貯留タンク

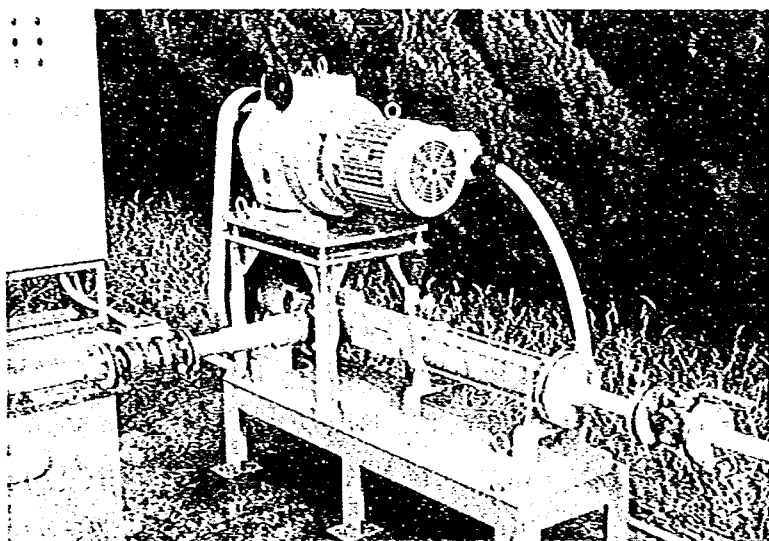


写真 2-4 送泥ポンプ(2NE40PA)

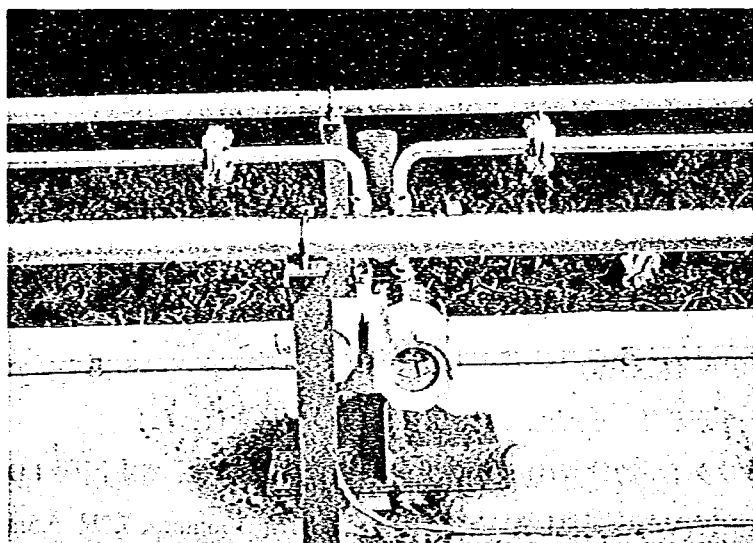


写真 2-5 電子式差圧発信器(JTD220)

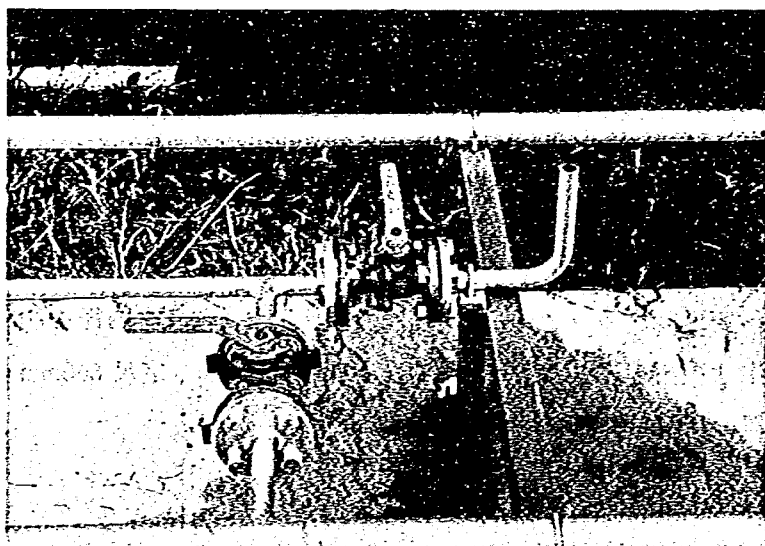


写真 2-6 側管末端部(エア抜き)

②第2期(平成5～7年度:実験2、3に対応)

第1期に設置した実験装置(LOOP1)を改造するとともに、新たに実験装置(LOOP2)を増設した。

LOOP1 については、管内の状況を観察するための透明アクリル管(32A)の設置、流量測定効率化のための電磁流量計の設置、管内流速を増すためのポンプのプーリー比変更($V_{max}:2\text{m/s} \rightarrow 3\text{m/s}$) の3点について改造を実施した。

LOOP2 は、呼び径 100A での汚泥輸送実験を実施することを目的に設置した。全長は LOOP1 と同じく 55m であり、圧力損失測定部2箇所(A,B)を有する。圧力損失の測定は LOOP1 同様に、側管に設置した電子式差圧発信器により行う。測定区間の延長はともに 20m、助走区間の延長はともに 2m である。LOOP2(A)には内径 94mm のダクタイル鋳鉄管(DIP)を、LOOP2(B)には内径 108mm のステンレス鋼管(SUS)を設置した。ダクタイル鋳鉄管は内面がモルタルライニングされており、定尺 4m のものを5本用いて、メカニカル継手により接続した。一方、ステンレス鋼管はフランジを用いず溶接により接続した。ループには管内観察用の透明アクリル管(100A)および電磁流量計を設置した。圧力損失測定区間および透明アクリル管部以外の送泥管の材質は炭素鋼鋼管(100A)である。ただし、電磁流量計設置区間は、機器の制約から管径を 50A に絞っている。また貯留タンクは LOOP1 と共通で容量は 1000L である。実験には約 800L の汚泥を使用し、実験時の流速は概ね 0.5 ～ 2 m/s の範囲にあった。

実験装置の概要は図 2-2 のとおりである。各機器の仕様について表 2-2 に示す。また、第2期における実験装置の状況を写真 2-7 ～ 2-11 に示す。

③第3期(平成7～8年度:実験4に対応)

圧力損失測定区間の管種を変更するとともに、差圧発信器の交換を行った。

測定区間 LOOP2(A)をダクタイル鋳鉄管(DIP)から炭素鋼鋼管(STPG)へ、測定区間 LOOP2(B)をステンレス鋼管(SUS)から硬質塩化ビニル管(VP)へ変更した。炭素鋼鋼管は内径 106mm、定尺 5.5m のものを4本用い、フランジにより接続した。また、内面はサンドブラスト処理し、人工的な粗度を形成した。硬質塩化ビニル管は、内径 100mm、定尺 4m のものを5本用い、フランジにより接続した。

差圧発信器については、管種の変更に伴い圧力損失の増加が予想されたため、LOOP2(B)測定用に設置していた JTD215 を、LOOP2(A)と同じ 10000mmH₂O まで測定可能な JTD220 に交換した。

④第4期(平成8年度:実験5に対応)

測定区間 LOOP2(A)を炭素鋼鋼管(STPG)からダクタイル鋳鉄管(DIP)へ、測定区間 LOOP2(B)を硬質塩化ビニル管(VP)から陶管(CP)へ変更した。ダクタイル鋳鉄管は内面ライニングなし、内径 103mm、定尺 4m のものを5本用い、メカニカル継手により接続した。陶管は、釉薬なしの内径 99mm、定尺 660mm のものを用いた。

第4期における実験装置の状況を写真 2-12 ～ 2-14 に示す。

表 2-2 各機器の仕様

送泥ポンプ(LOOP2): ヘイシンモノポンプ NE80KM バイエル無段変速機付き		電磁流量計:(LOOP2) 山武ハネウエル SMW10A 口径 50A	
吐出量	48 m ³ /h	測定スパン	最大レンジ 0-10m/s (50A)
全揚程	2 kgf/cm ²	出力	4-20mADC
電子式差圧発信器(LOOP2(B)): 山武ハネウエル JTD215 マニホールド弁付き		電磁流量計:(LOOP1) 山武ハネウエル SMW10A 口径 40A	
測定スパン	75-1250mmH ₂ O 連続可変	測定スパン	最大レンジ 0-10m/s (40A)
出力	4-20mADC	出力	4-20mADC

* LOOP2(A)に設置した電子式差圧発信器は JTD220 で、仕様は表 2-1 のとおり

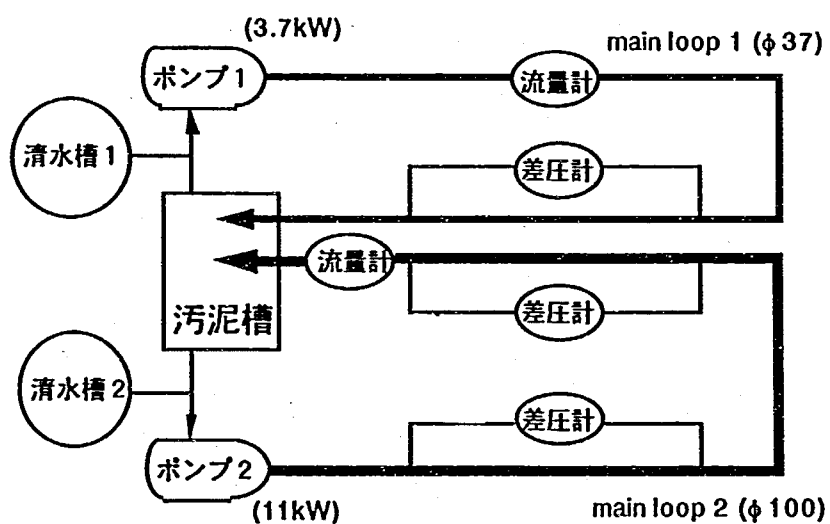


図 2-2 汚泥輸送実験装置(第2期)

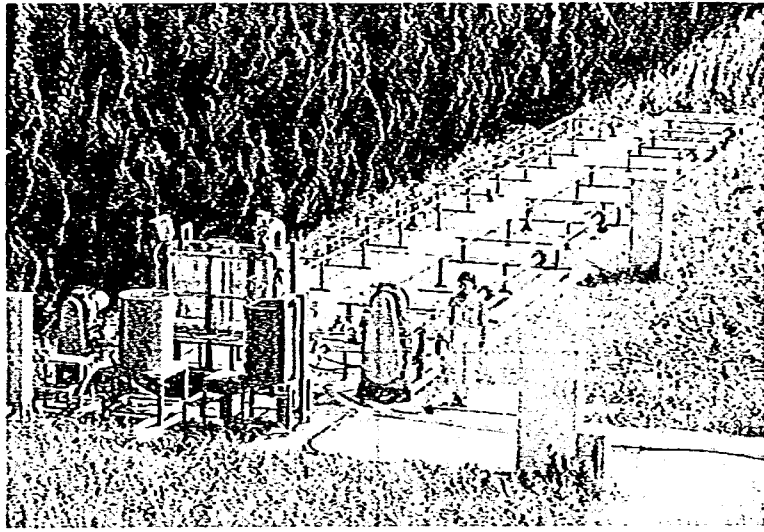


写真 2-7 汚泥輸送実験装置全景(第2期)

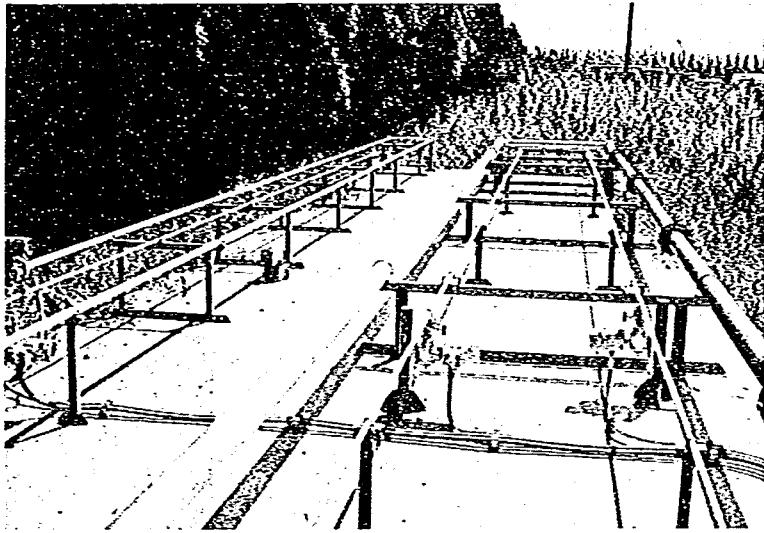


写真 2-8 側管と差圧計の設置状況

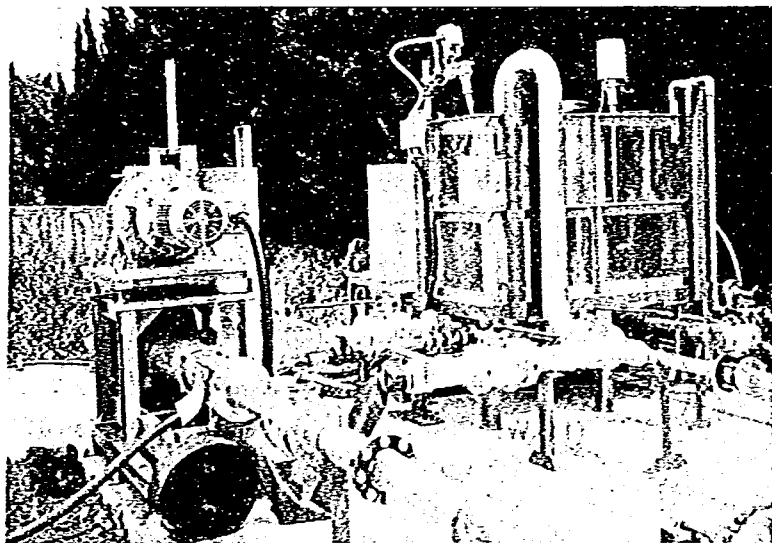


写真 2-9 送泥ポンプまわり配管

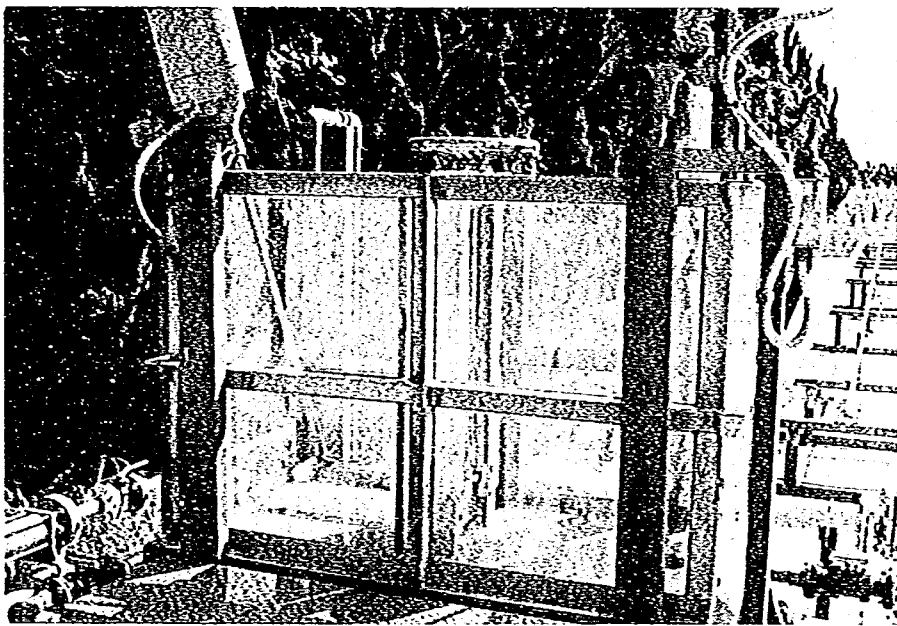


写真 2-10 貯留タンク(1000L)



写真 2-11 ペンレコーダー格納庫

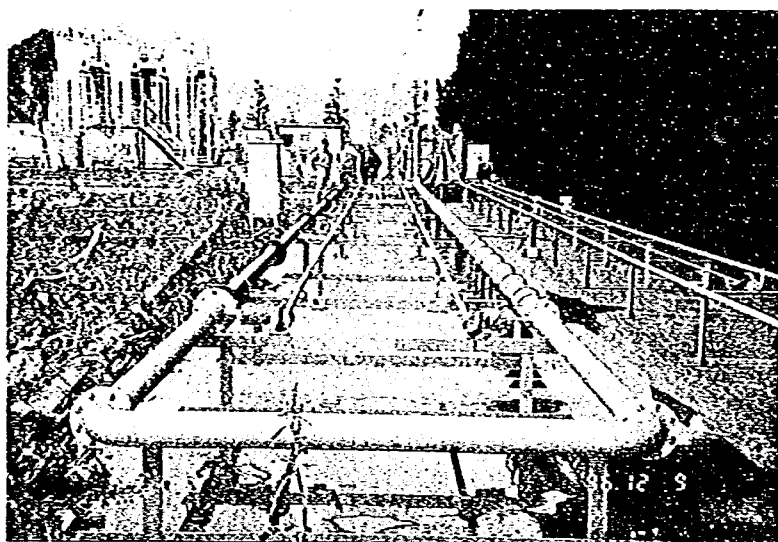


写真 2-12 汚泥輸送実験装置全景(第4期)

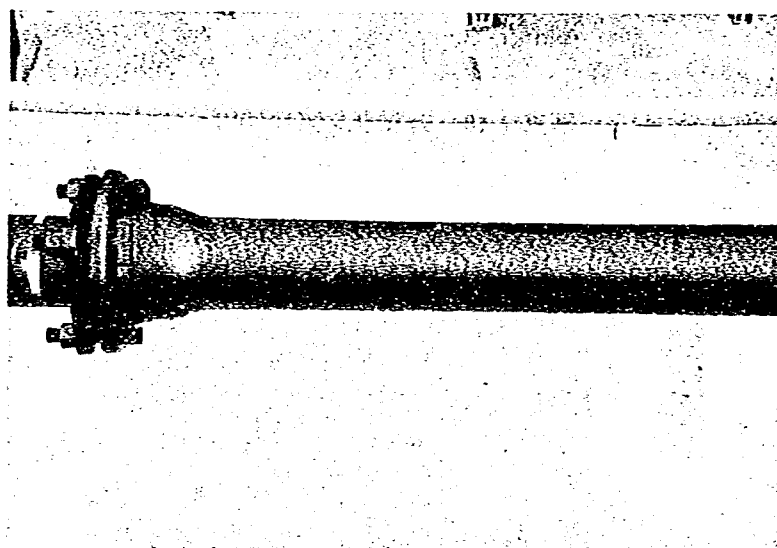


写真 2-13 ダクタイル鑄鉄管の状況

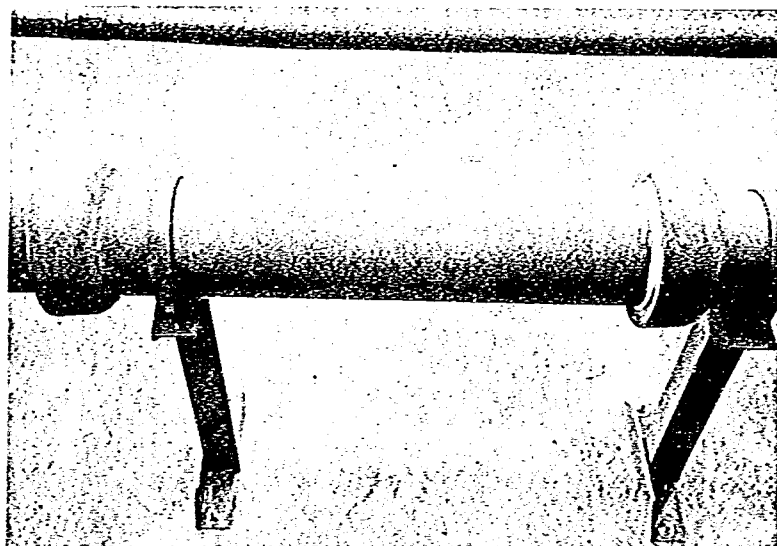


写真 2-14 陶管の状況

2.2 実験方法

実験開始時には、まずループ全体に清水を循環させて、圧力損失測定部の側管に清水を封入した後、メインループの清水を供試汚泥に置換する。

実施設における汚泥管路輸送では、チクソトロピー性がある汚泥の場合でも、汚泥は送泥中に流動変形を受けて最終的には平衡流動状態に達すると考えられる。よって、施設設計時にもこのような状態を基本に考える必要があり、本実験においても、チクソトロピーの影響のない平衡流動状態における圧力損失を測定することとした。このため、まず送泥ポンプの最大流速にて予備圧送を1～2時間実施し、平衡流動状態に達したことを確認してから、圧力損失の測定を開始した。なお平衡流動状態については、最大流速における圧力損失測定値がほぼ一定値となったことをもって判断した。

圧力損失の測定は、送泥ポンプの回転数を最小から最大へ10～20通り程度変化させて行った。その後、最大から最小へも変化させて測定し、測定値が流速の変化の方向に依存しないこと(チクソトロピーの影響を受けないこと)を確認した。ただし、実験1においては、ポンプ回転数は最大から最小への1方向のみの変化により圧力損失を測定した。

汚泥温度は貯留タンク内に設置した温度計により圧力損失測定中に数回測定し、これを平均して汚泥温度とした。圧力損失測定に要する時間は、1RUNにつき約1～1.5時間程度(予備圧送含まず)であり、この間の温度変化は概ね1℃程度であった。ただし、実験装置は屋外にあり温度を制御することができないため、各RUNごとの汚泥温度は天候、気温に左右され、夏場の実験と冬場の実験では約30℃の乖離が生じている。

第1期の汚泥輸送実験装置には電磁流量計が設置されていなかったため、汚泥流量については汚泥戻り部分において、メスシリンダーとストップウォッチを用いて実測を行った(実験1)。実測は1流量につき3回行い、これを平均したものをデータとして採用した。なお、第2期において電磁流量計を導入した際に、電磁流量計による流量測定値と、メスシリンダーを用いた流量実測値との比較を行ったが、両者はよく一致していた。

汚泥性状分析用のサンプルはすべて実験終了時に採取した。

実験終了後には、管壁への汚泥の付着、沈積防止のため、送泥管を清水にて洗浄する。特に冬期は凍結による送泥管破断防止のため、管内の水はすべて排水することとした。

供試汚泥には、霞ヶ浦浄化センターで発生する余剰汚泥、初沈汚泥、濃縮汚泥、消化汚泥を用いた。1回の実験に必要とされる汚泥量が大量であるため、高濃度の供試汚泥が必要な場合は、同処理場の脱水汚泥をこれらの汚泥に混合して使用した。また、低濃度の供試汚泥は、同処理場の高度処理水を希釈水として用いた。各種汚泥の混合、濃度調整は、汚泥輸送実験装置の貯留タンクを用いて、攪拌、圧送を行いながら実施した。

なお、本実験装置における汚泥の管内滞留量は、LOOP1で約65L、LOOP2で約440Lである。これらは、それぞれ供試汚泥量の40%、55%に相当する。

汚泥輸送実験の状況について、写真2-15～2-17に示す。

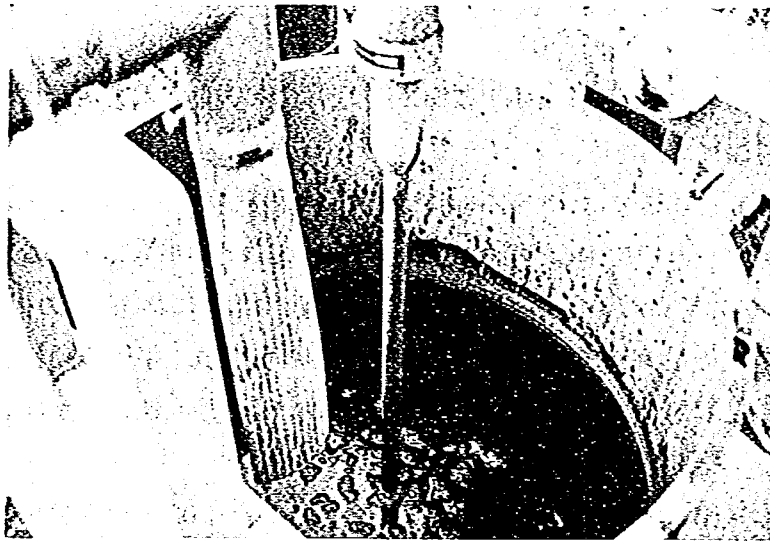


写真 2-15 貯留タンク内の汚泥の状況(実験1)

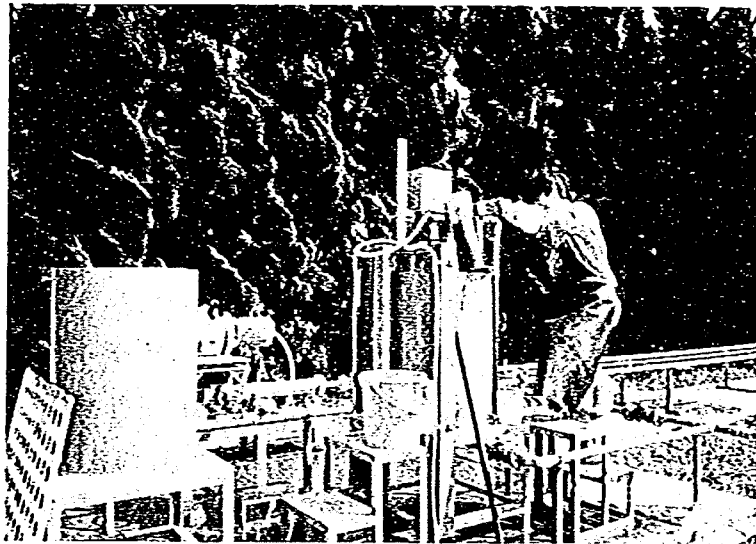


写真 2-16 メスシリンダーによる流量測定(実験1)

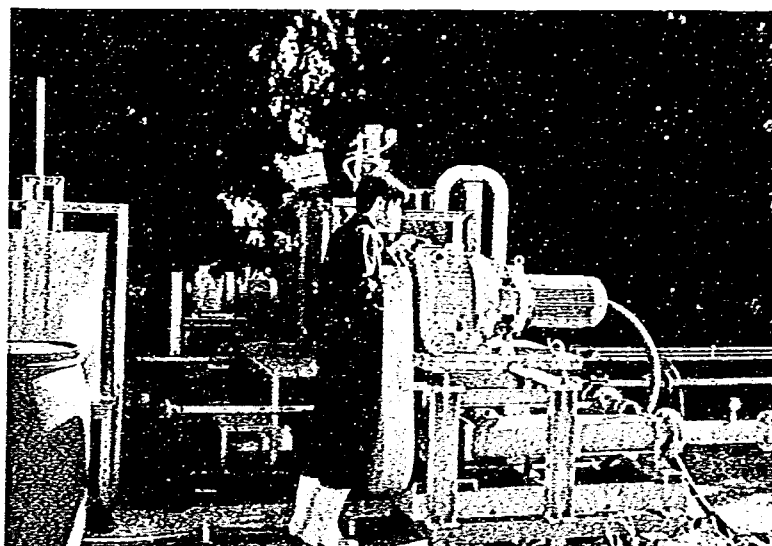


写真 2-17 送泥流速の変更(実験4)

2.3 汚泥性状の測定

供試汚泥の粘度(擬塑性粘度 k 、構造粘度指数 n)は、内筒回転型の共軸二重円筒型回転粘度計 (Haake Rotovisco RV12, RV20) を用いて測定した。サンプリングは輸送実験終了後に実施した。

送泥管の圧力損失をレオロジカルなアプローチにより予測する場合、汚泥の粘度が精度よく測定されることが前提条件となる。そこで、粘度測定を正確に行うためには、次のような点に対し留意する必要がある。すなわち、①汚泥のチクソトロピー性、②汚泥中の粗大粒子の影響、③汚泥温度、④想定される速度勾配、である。これらを考慮して、粘度測定条件は次のように設定した。

①輸送実験直後の汚泥はチクソトロピー性がほとんどみられないため、チクソトロピーを考慮した測定法は採用しない。

②輸送実験後の汚泥は粒子が微細化しているため粗大粒子の影響はほとんど受けない。よってギャップサイズが最も小さく、粘度を正確に測定できるローター MV1 を用いる。

③粘度測定の温度は輸送実験時の汚泥温度にあわせる。

④実験装置の管径および実験流速を考慮し、最大の速度勾配を $150 [1/s]$ または $300 [1/s]$ とする。

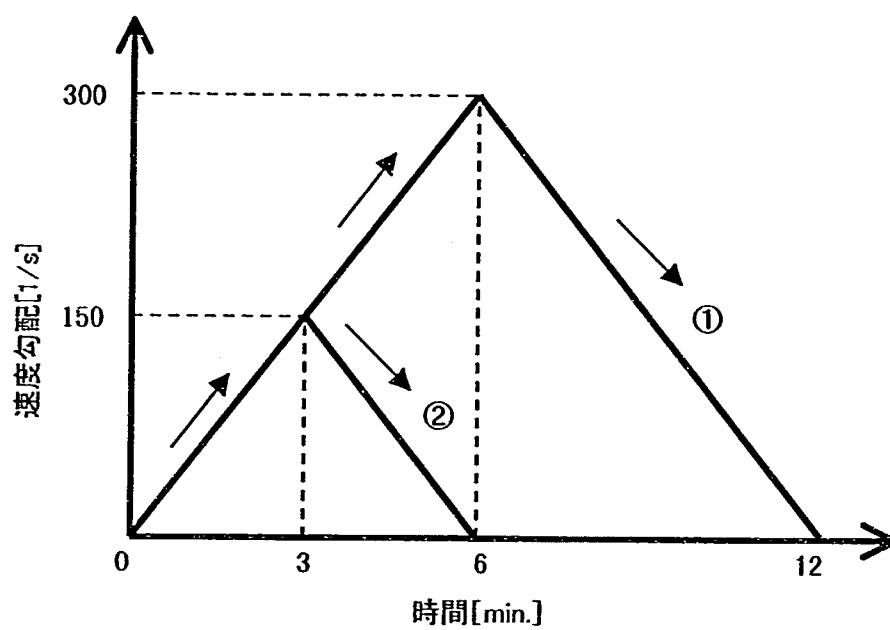
特に④についてであるが、管壁の速度勾配は平均流速を V 、管径を d としたとき、 $8V/d$ で表される¹³⁾。そこでこの関係式を用いて、実験時に想定される最大流速相当の速度勾配を、粘度測定時の最大速度勾配とほぼ等しくなるように設定する。図 2-3 に粘度測定時の速度勾配の制御方式について示す。また、汚泥の粘度測定については既報¹⁾に詳述しているので参考にされたい。

供試汚泥の汚泥濃度(TS)、強熱減量(VS)を下水試験方法により測定した。

汚泥比重を比重びんにより測定した。通常の水理計算では、水の密度を定数として扱うことが多いが、今回の実験においては高濃度の汚泥を使用すること、および実験時の温度を制御できないことの2つの要因から、汚泥密度の変動幅が数%程度に及んだ。しかし、これは汚泥粘度の変動幅やその測定誤差等を考慮した場合、定数として扱っても実用的には問題がないと考えられる。そこで、汚泥比重(密度)については、本報告書において測定値を記載しているが、解析には用いていない。

また、汚泥粒子径をレーザー回折・散乱式粒度分析計により測定した。事前の検討により、汚泥輸送実験においては、予備圧送の間に粒子径が低下し、これに伴い汚泥粘度が低下することが明らかとなった。しかし、供試汚泥の粘度と圧力損失との関係についてレオロジカルな考察を行う限りにおいては、圧力損失測定前の粒子径の低下は影響がないものとして扱ってよい。よって報告書ではとりまとめを行っていない。

なお汚泥比重と汚泥粒子径の測定に関する検討については、既報¹⁾にとりまとめている。



- ①: LOOP1 を用いて実験した場合 (実験1)
 ②: LOOP2 を用いて実験した場合 (実験2～5)

図 2-3 粘度測定時の速度勾配制御プログラム

3. 汚泥輸送実験（実験1）

第3章では、平成3、4年度に実施された実験1の結果をとりまとめた。実験1の目的は、次の3つである。

- ①測定装置が正しく機能しているか（清水による予備実験）
- ②擬塑性流動モデルにより取り扱うことの妥当性
- ③既存の圧力損失予測式による計算値との比較（層流域、乱流域）

3.1 実験

3.1.1 実験方法

（一般的事項） 第2章を参照。

（特記事項） 実験は、汚泥輸送実験装置 LOOP1 により行った。第2章で述べたとおり、実験1では、LOOP1に電磁流量計および透明管が設置されていなかった。このため、流量の測定は汚泥戻り部分において、メスシリンダーとストップウォッチを使用して汚泥流量を実測する方法をとった。また、流れの遷移を目視により確認することはできなかった。圧力損失測定部の概要を表3-1に示す。

汚泥は1回の実験につき約 160 Lを調整し、これを循環使用した。供試汚泥の粘度は、回転粘度計(RV12)により測定した。実験1では、清水を用いた予備実験3回を含めて、15回の輸送実験を実施した。表3-2に供試汚泥等の概要を示す。

表 3-1 測定部の概要

管材質	SUS
管延長	20 m
管内径	0.037 m
管壁	滑らか
相対粗度*	≈ 0
流速係数*	150
最大流速	2.0 m/s
最小流速	0.1 m/s

表 3-2 供試汚泥等の概要

RUN	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	温度 [°C]	密度 [kg/m ³]	擬塑性粘度** [Pa·s ^a]	構造粘度指数 [-]
1-a	清水	-	-	9	-	0.0013	1
1-b	清水	-	-	31	-	0.00078	1
1-c	清水	-	-	25	-	0.00089	1
1-1	消化	1.60	64.3	10	1008	0.163	0.546
1-2	消化+希釈	0.80	64.4	11	1004	0.0177	0.790
1-3	消化+脱水	2.01	68.3	9	1012	0.330	0.515
1-4	消化+脱水	2.72	69.8	20	1008	0.584	0.451
1-5	濃縮+脱水	4.24	75.4	30	1010	2.44	0.333
1-6	濃縮+脱水	5.52	73.2	27	1007	5.23	0.309
1-7	初沈	0.58	77.5	26	1000	0.0016	1
1-8	初沈+希釈	0.41	75.7	26	997	0.0011	1
1-9	消化	1.59	64.2	36	1000	0.155	0.481
1-10	消化+希釈	0.65	64.1	23	1001	0.0017	1
1-11	消化+脱水	5.47	66.9	29	1021	5.55	0.296
1-12	消化+脱水	6.18	67.2	32	1021	6.22	0.296

*：予備実験の結果から算出。

**：清水についての粘度は文献値。

3. 1. 2 実験結果

予備実験の結果について、表 3-3、図 3-1 に示す。また、本実験の結果について、表 3-4,3-5 および図 3-2, 3-3 に示す。

ここで Darcy-Weisbach の摩擦損失係数 f (実験値)は、汚泥の密度は水の密度と等しいと仮定し(2. 3参照)、式 (1-10)を用いて次のように求める。

$$f = (H_f / L) \cdot d \cdot (2g/V^2) \quad (3-1)$$

ここで、 H_f は管路長 L [m] あたりの損失水頭 [m] である。また、擬塑性流体のレイノルズ数 Re_p は、式 (1-11) から求める。このとき、汚泥密度は $1,000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (定数)とする。

表 3-3 予備実験の結果

Run 1-a

920317

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Re_p [-]
0.20	40	0.0364	5633
0.35	107	0.0311	9964
0.50	204	0.0291	14239
0.68	342	0.0269	19164
0.86	513	0.0248	24430
1.05	718	0.0235	29723
1.25	970	0.0224	35385
1.49	1240	0.0201	42178
1.74	1620	0.0193	49255
1.96	2010	0.0189	55483

Run 1-b

920605

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Re_p [-]
0.27	73	0.0361	12738
0.33	93	0.0308	15569
0.50	181	0.0261	23590
0.65	283	0.0242	30667
0.83	425	0.0222	39159
1.00	585	0.0211	47179
1.21	810	0.0200	57087
1.39	1075	0.0201	65579
1.57	1410	0.0206	74072
1.80	1830	0.0204	84923

Run 1-c

920625

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Re_p [-]
0.27	65	0.0322	11164
0.34	95	0.0296	14058
0.49	178	0.0267	20261
0.65	295	0.0252	26876
0.83	442	0.0231	34319
1.00	625	0.0225	41348
1.22	860	0.0208	50445
1.39	1140	0.0213	57474
1.61	1460	0.0203	66571
1.85	1880	0.0198	76494

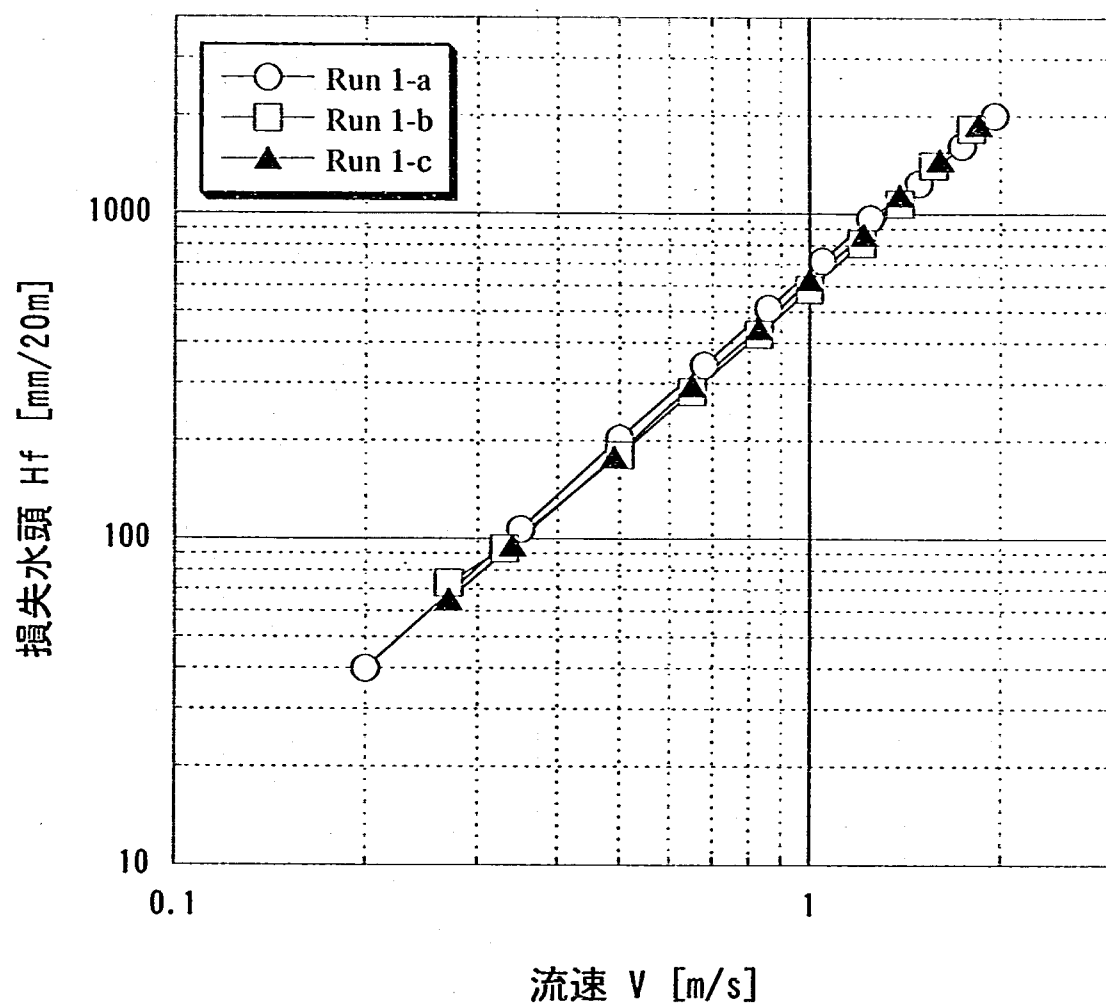


図 3-1 予備実験の結果

表 3-4 本実験の結果(1)

Run 1-1 920318

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.13	283	0.5858	123
0.21	333	0.2830	236
0.28	374	0.1720	368
0.34	400	0.1233	493
0.51	480	0.0663	883
0.68	730	0.0573	1332
0.86	875	0.0431	1870
1.05	1140	0.0373	2516
1.24	1400	0.0328	3205
1.45	1740	0.0298	4024
1.67	2140	0.0277	4941
1.94	2540	0.0243	6144

Run 1-2 920319

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.13	53	0.1223	494
0.19	67	0.0662	825
0.28	85	0.0397	1300
0.34	115	0.0357	1664
0.51	280	0.0385	2722
0.67	425	0.0341	3769
0.86	610	0.0301	5062
1.05	850	0.0278	6490
1.25	1110	0.0256	8015
1.44	1440	0.0250	9511
1.68	1830	0.0234	11462
1.93	2250	0.0218	13556

Run 1-3 920323

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.14	505	0.9993	70
0.20	580	0.5126	126
0.29	662	0.2919	212
0.35	720	0.2096	289
0.52	850	0.1142	512
0.68	1010	0.0785	769
0.84	1250	0.0634	1056
1.05	1430	0.0468	1462
1.23	1700	0.0405	1850
1.45	2040	0.0350	2362
1.66	2400	0.0314	2887
1.92	2750	0.0269	3584

Run 1-4 920324

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.13	820	1.8926	43
0.19	895	0.9132	81
0.28	995	0.4610	149
0.34	1050	0.3334	199
0.50	1180	0.1695	368
0.66	1290	0.1065	565
0.84	1540	0.0780	825
1.04	1650	0.0550	1140
1.23	1820	0.0434	1478
1.45	2050	0.0352	1908
1.68	2430	0.0311	2396
1.88	2800	0.0286	2852

Run 1-5 920330

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.13	2080	4.8008	15
0.19	2170	2.2866	29
0.25	2290	1.2801	49
0.32	2370	0.8193	73
0.49	2640	0.3917	147
0.66	2870	0.2369	239
0.83	3100	0.1615	351
1.04	3310	0.1104	509
1.25	3520	0.0812	692
1.43	3780	0.0667	866
1.66	4030	0.0527	1111
1.94	4270	0.0409	1440

Run 1-6 920331

V [m/s]	H_f [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.12	4090	10.0746	7
0.18	4310	4.6414	14
0.26	4590	2.4677	26
0.33	4800	1.5993	39
0.50	5240	0.7681	77
0.65	5520	0.4683	123
0.85	6000	0.3030	190
1.02	6440	0.2232	261
1.22	6850	0.1660	354
1.44	7270	0.1264	468
1.68	7660	0.0979	608
1.89	8020	0.0810	742

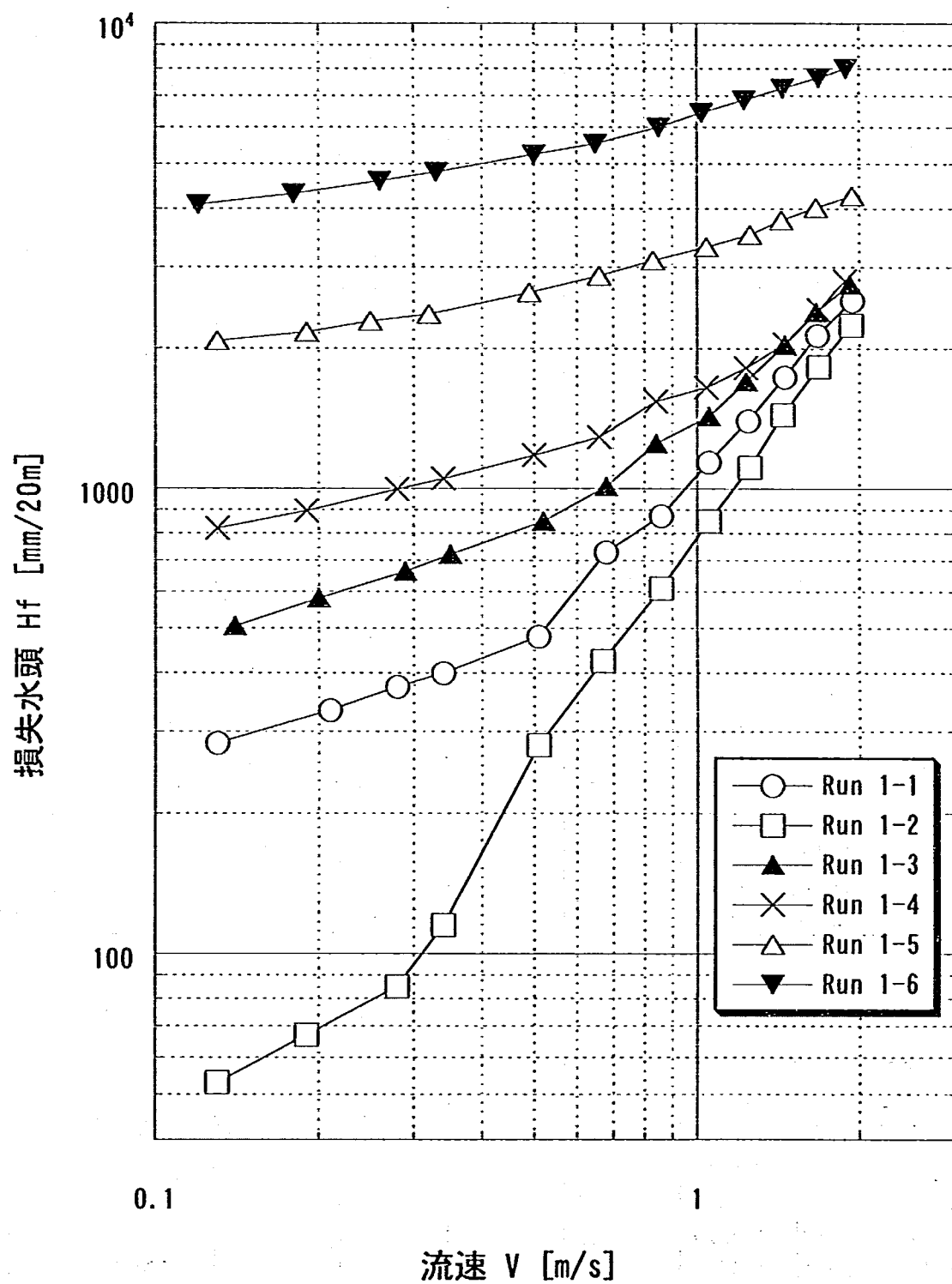


図 3-2 本実験の結果(1)

表 3-5 本実験の結果(2)

Run 1-7 920611

V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.18	41	0.0456	4140
0.26	70	0.0373	5980
0.33	105	0.0348	7590
0.49	205	0.0308	11270
0.65	345	0.0294	14950
0.82	513	0.0275	18860
1.01	723	0.0256	23230
1.20	975	0.0244	27600
1.38	1270	0.0241	31740
1.60	1640	0.0231	36800
1.85	2090	0.0220	42550

Run 1-8 920612

V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.18	37	0.0412	6022
0.26	73	0.0389	8698
0.34	112	0.0349	11375
0.49	213	0.0320	16393
0.66	345	0.0286	22080
0.84	515	0.0263	28102
1.02	730	0.0253	34124
1.21	960	0.0236	40480
1.43	1280	0.0226	47840
1.66	1640	0.0215	55535
1.90	2020	0.0202	63564

Run 1-9 920701

V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.17	240	0.2995	234
0.26	276	0.1472	447
0.33	300	0.0993	642
0.49	355	0.0533	1170
0.64	540	0.0475	1755
0.81	690	0.0379	2510
1.00	890	0.0321	3457
1.18	1130	0.0293	4445
1.40	1445	0.0266	5763
1.58	1800	0.0260	6925
1.87	2280	0.0235	8945

Run 1-10 920702

V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.19	48	0.0480	4113
0.27	87	0.0430	5845
0.34	133	0.0405	7447
0.49	272	0.0409	10607
0.65	385	0.0329	14071
0.82	545	0.0292	17751
1.01	740	0.0262	21864
1.17	980	0.0258	25327
1.38	1295	0.0245	29873
1.60	1640	0.0231	34635
1.81	2050	0.0226	39181

Run 1-11 920715

V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.19	4130	4.1259	15
0.27	4410	2.1816	27
0.35	4620	1.3601	43
0.50	5010	0.7227	78
0.66	5380	0.4454	126
0.84	5760	0.2944	190
1.02	6200	0.2149	264
1.21	6600	0.1626	353
1.41	6980	0.1266	458
1.61	7360	0.1024	575
1.87	7770	0.0801	742

Run 1-12 920716

V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.17	4680	5.8401	11
0.27	5040	2.4933	24
0.33	5240	1.7353	34
0.47	5720	0.9338	63
0.64	6140	0.5406	106
0.83	6500	0.3403	166
1.01	7090	0.2507	232
1.17	7510	0.1979	298
1.38	7990	0.1513	394
1.64	8460	0.1134	529
1.86	8980	0.0936	656

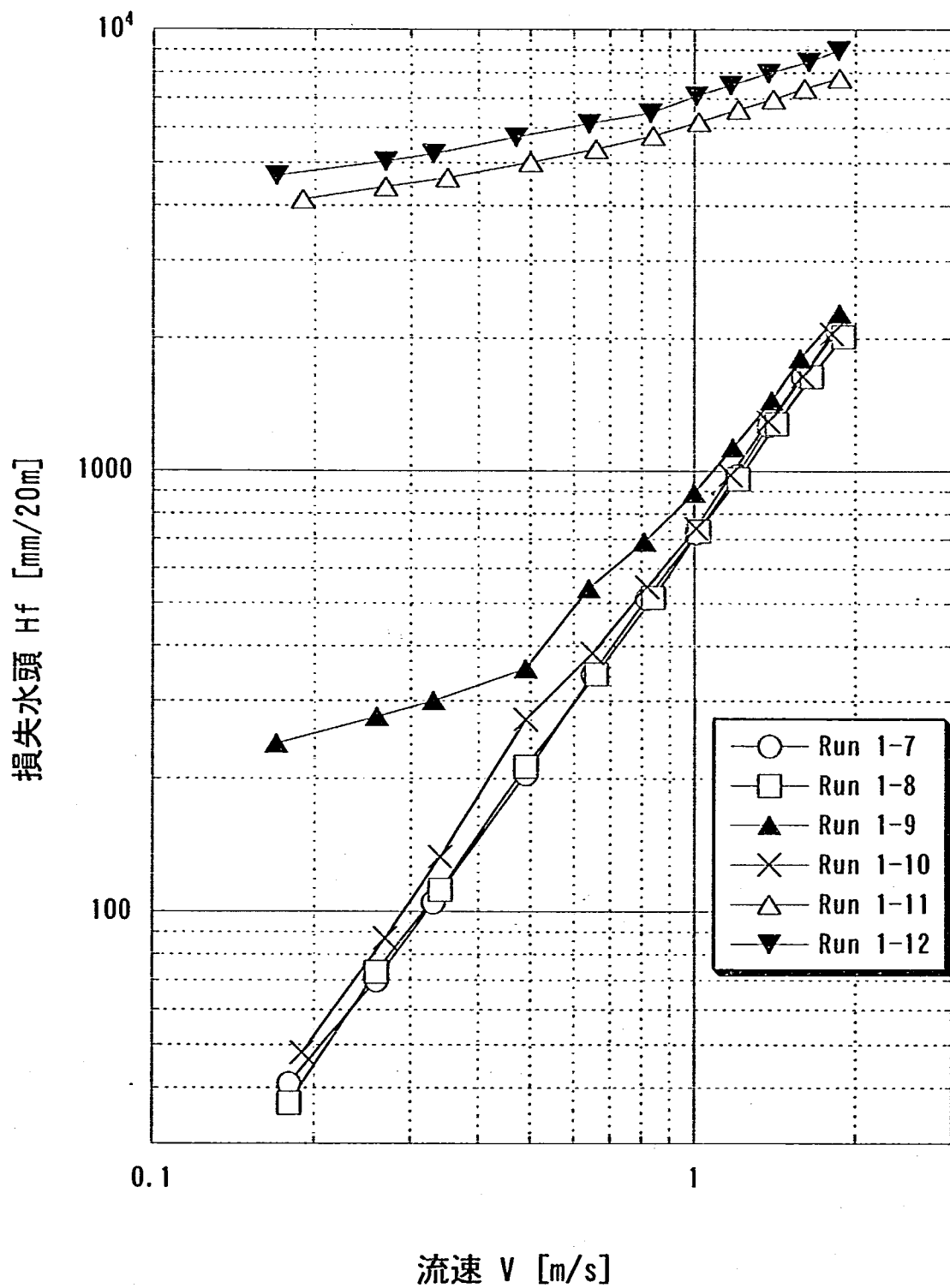


図 3-3 本実験の結果(2)

3. 2 考 察

3. 2. 1 測定結果の妥当性

予備実験におけるレイノルズ数は、いずれも 2100 以上であり、流れは乱流であったと考えられる。

乱流域の損失水頭を流速、管径、管種から算出する公式として、Hazen-Williams 式がある。

$$H_f = 6.82 L \cdot d^{(-1.17)} (V/CH)^{1.85} \quad (3-2)$$

ここで、 CH は流速係数で管種(管壁粗度)により異なる値をとる。損失水頭の実験値 H_f (20m あたり)と、 CH を 150 としたときの損失水頭の計算値を比較したものが図 3-4 である。両者はよく一致している。 $CH=150$ という値は管壁が極めて滑らかな場合に相当するが、実際、実験管路はステンレス鋼管の新管で、管壁は滑らかであると考えられる。

また、式 (3-2)では、両対数紙上における V と H_f の関係が傾き 1.85 の直線となる。一方 V と H_f の実験値を両対数紙上で表現した図 3-1 において、各 RUN の回帰直線の傾きは 1.70 ～ 1.72 であり、両者は概ね一致しているといえる。

次に、滑管乱流域における Darcy-Weisbach の摩擦損失係数 f をレイノルズ数から算出する公式として、Prandtl-Karman 式がある。

$$1/\sqrt{f} = 2.03 \log_{10} (Re \sqrt{f}) - 0.8 \quad (3-3)$$

式 (3-3)による摩擦損失係数 f の計算値を、式 (3-1)による f の実験値と比較したものが図 3-5 である。 f の大きい部分(レイノルズ数の小さい領域)で若干誤差が大きいものの、全体的には両者はよく一致している。なお、レイノルズ数が小さい領域で誤差が大きい原因として、この領域が流れの安定しない臨界領域にあること、圧力損失が小さく測定誤差が大きいこと等が考えられる。

以上、本実験装置により測定された清水の圧力損失は、既存の諸公式とよく一致している。よって、本実験装置による圧力損失の測定値は正しいものと考えることができる。

3. 2. 2 層流域の圧力損失と擬塑性流動モデル

1. 3で述べた層流域における擬塑性流動モデルの理論式より、構造粘度指数が n の擬塑性流体では、両対数軸上での流速と損失水頭の関係は傾き n の直線となることが導かれる。よってここでは、回転粘度計による n の測定値と、図 3-2, 3-3 の直線の傾きから得られる n の値を比較した。ここで、前述の通り、実験1では層流/乱流の判断を目視により行うことができなかったため、グラフ上で直線の傾きが変化する点を適宜判断して、層流域の範囲を決定した。また、直線の傾きは回帰分析により求めた。

表 3-6 にそれぞれの値をとりまとめた。両者はほぼ一致することが確認された。ただし n の小さい汚泥の場合、図 3-2, 3-3 の直線の傾きは、流速の小さい領域において、流速の大きい領域に比べ若干小さいことが読みとれる。これは、下水汚泥が厳密な意味での擬塑性流体ではなく、測定された流動曲線に対しどのように擬塑性流動モデルを適用するかによって n が変わりうることを示唆している。

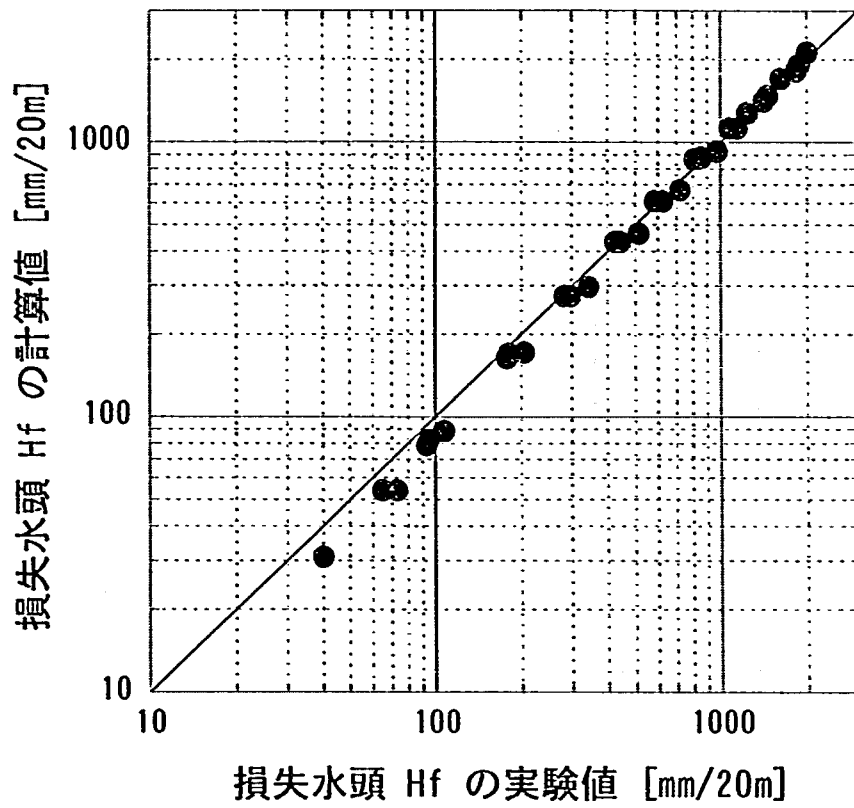


図 3-4 予備実験における損失水頭

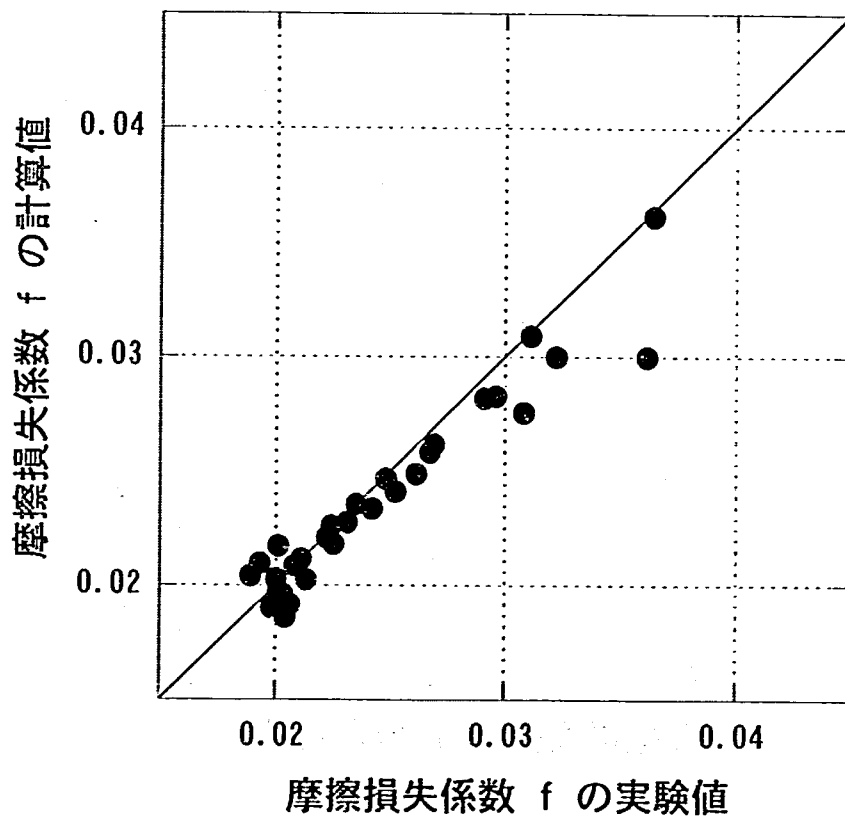


図 3-5 予備実験における摩擦損失係数

表 3-6 構造粘度指数 n の値の比較

Run No.	n 回転粘度計 による測定値	n 層流域の傾き から求まる値	Rep 層流域の 上限のデータ	乱流域の傾き
1-1	0.546	0.599	1,870	1.32
1-2	0.790	0.733	1,664	1.58
1-3	0.515	0.541	1,850	1.09
1-4	0.451	0.408	1,908	1.20
1-5	0.333	0.311	全て層流	-
1-6	0.309	0.284	全て層流	-
1-7	1	-	全て乱流	1.71
1-8	1	-	全て乱流	1.69
1-9	0.481	0.561	1,755	1.36
1-10	1	-	全て乱流	1.64
1-11	0.296	0.316	全て層流	-
1-12	0.296	0.312	全て層流	-

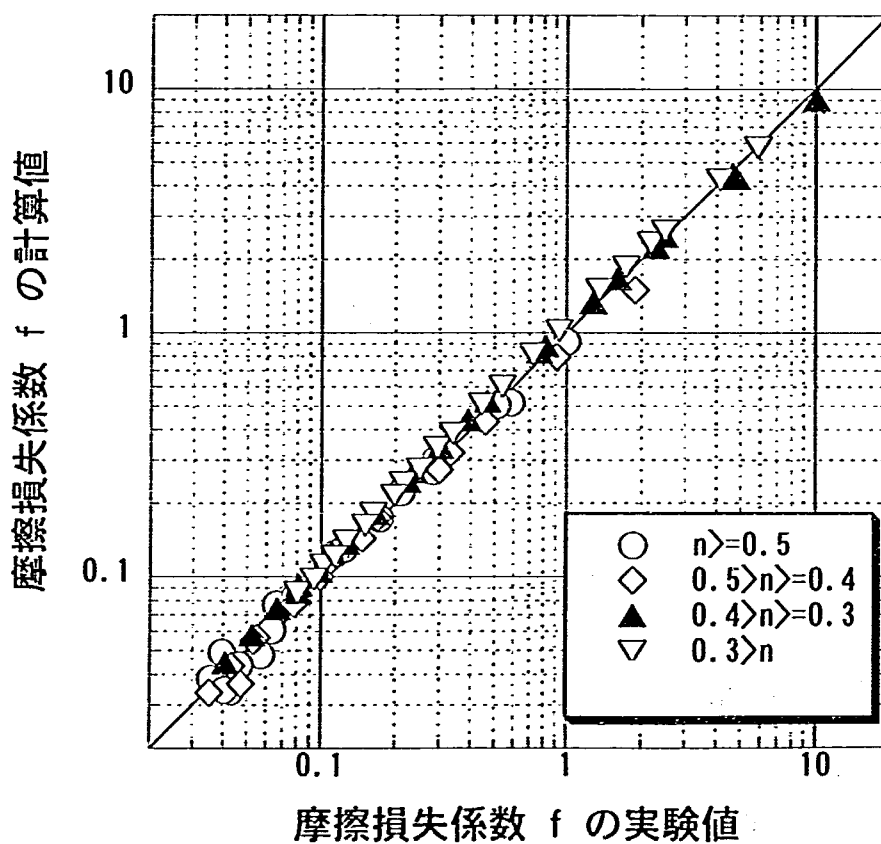


図 3-6 層流域における摩擦損失係数

擬塑性流体の理論式によれば、層流域の摩擦損失係数 f は擬塑性流体のレイノルズ数 Rep を用いて水の場合と同様に ($f = 64/Rep$) 求めることができる。理論式による f の計算値を、式 (3-1) による f の実験値と比較したものが図 3-6 である。両者は n の大小によらずよく一致している。

以上、回転粘度計による n の測定値と管路輸送実験から求まる n の値がほぼ一致すること、ならびに層流域の摩擦損失係数を擬塑性流体のレイノルズ数から求められることが明らかとなった。これらの結果から、管路輸送を考えた場合においても、下水汚泥の流動特性として、擬塑性流動モデルを適用できることが確認された。

3. 2. 3 乱流域の圧力損失と既存公式との比較

1. 3 で述べたとおり、乱流域の圧力損失については、これまでいくつかの計算方法が提案されている。そこでここでは、次の3つの計算方法を対象として、計算値と実験値との比較を行った。

① 分散媒である水の粘度を用いたレイノルズ数から、水の場合と同様の公式により摩擦損失係数を算出する。

(Caldwell ら)

② 擬塑性流体のレイノルズ数から、水の場合と同様の公式により摩擦損失係数を算出する。

(吉田ら; 吉田らはビンガム流体のレイノルズ数を用いているが、非ニュートン流体のレイノルズ数を水の公式に適用するという基本的考え方は同じもの。同様の趣旨の研究結果が他にもあり¹⁵⁾。)

③ Hazen-Williams 式の流速係数を汚泥濃度により補正する簡便法。(Chou)

これらの他、1. 3 ではいくつかの方法を紹介しているが、これらは、③の考え方をベースとしたもの(東京都、金井ら)、または特定の汚泥を対象とした実験式(大阪市、遠藤ら)であるため、ここでは比較検討の対象から除外した。

①の方法による摩擦損失係数の計算値を実験値と比較した結果が図 3-7 である。ここで、水の粘度は実験時の汚泥温度における文献値を用いた。また、摩擦損失係数の計算値の算出には式 (3-3) を用いた。図より両者の乖離が大きく、方法①は乱流域の圧力損失予測に適していないことが明らかとなった。Caldwell らが①の方法で予測可能と結論づけたのは、彼らの実験が、通常の管路輸送では想定されない高流速 (2 ~ 10m/s) で行われたことに起因すると考えられる。

②の方法による摩擦損失係数の計算値を実験値と比較した結果が図 3-8 である。摩擦損失係数の計算値は式 (3-3) の Re に汚泥の Rep を代入して算出した。下水汚泥をニュートン流体として取り扱うことのできる場合 ($n=1$) は、 f の大きい部分 (レイノルズ数の小さい領域) で若干誤差が大きいものの、全体的には両者はよく一致する。しかし、非ニュートン流体として扱われる場合 ($n<1$) には、計算値の方が安全側に算出され、両者の乖離が大きい。以上より、滑管乱流域の圧力損失は、擬塑性流体のレイノルズ数を用いたとしても、水と同様の公式では予測できないことが明らかとなった。

吉田ら等が、②の方法で予測可能と結論づけたのは、乱流域における非ニュートン流体のデータ不足、レイノルズ数と摩擦損失係数との関係についての検討の不足、さらに実験施設の管種の違い等に起因するものと考えられる。著者らも、ここまで滑管のみのデータにより検討を行い上記の結論を導いているため、今後粗管の場

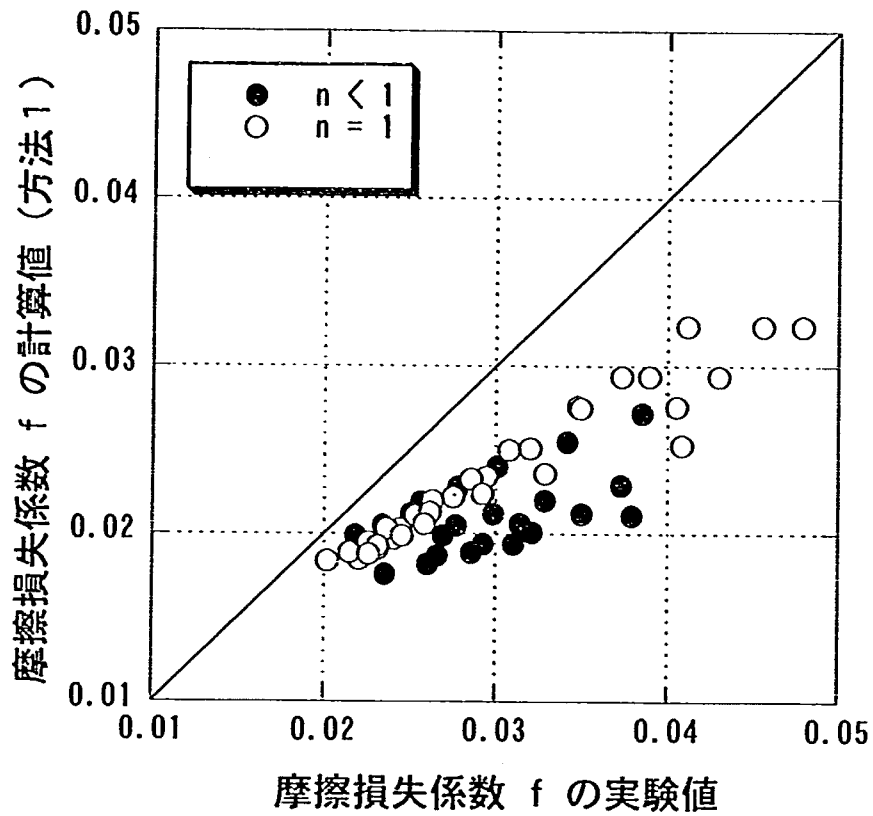


図 3-7 方法①による摩擦損失係数の計算値

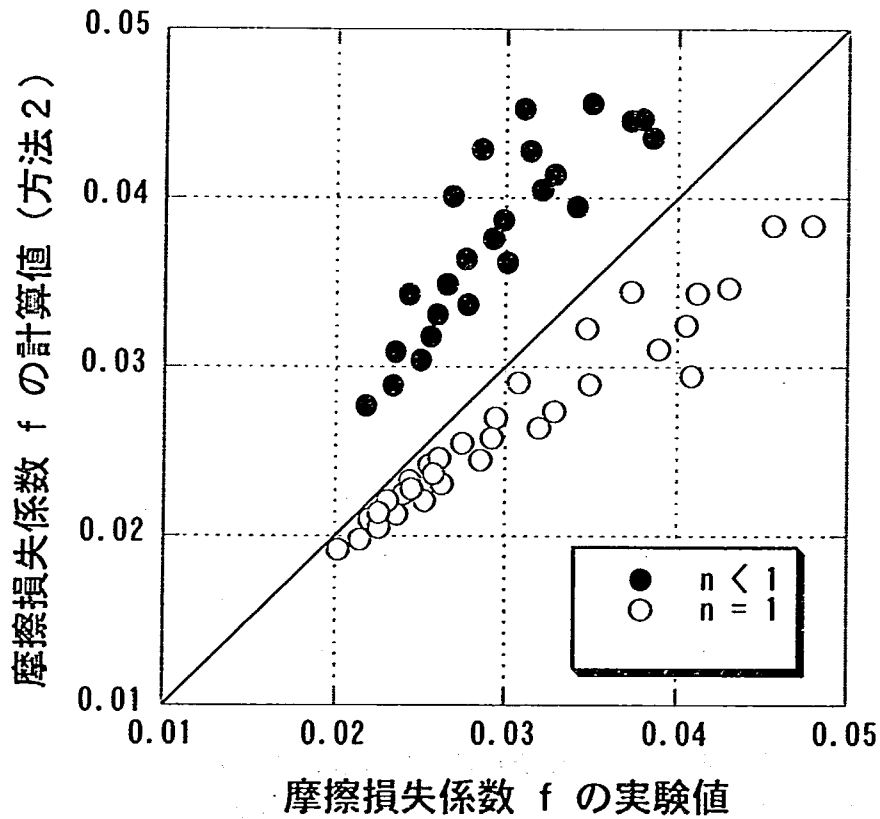


図 3-8 方法②による摩擦損失係数の計算値

合について検討を実施する必要がある。

③の方法は、Hazen-Williams 公式における流速係数 C_H を汚泥濃度により補正する方法であり、次式により表される。

$$H_f = 6.82 L \cdot d^{(-1.17)} (V/C_H')^{1.85} = \alpha [6.82 L \cdot d^{(-1.17)} (V/C_H)^{1.85}] \quad (3-4)$$

ここで、 $\alpha = (C_H/C_H')^{1.85}$ は汚泥倍率であり、汚泥の圧力損失が同一条件で流れる水の圧力損失の何倍に相当するかを表している。汚泥濃度と C_H' 、 α の関係は表 3-7 のように表される。

この方法を使用する場合には、1. 3で既に言及したとおり、流速係数を補正するチャート(表 3-7)の作成に当たって限定的な流速データのみが用いられたことに留意する必要がある。実際、今回の実験結果において、乱流域における流速と損失水頭の関係をみると(図 3-2, 3-3)、両対数軸上での回帰直線の傾きは表 3-6 (最右列)の通りであり、非ニュートン性が増すにつれ小さくなることが理解できる。これに対し Hazen-Williams 公式では、この値が 1.85 であり、また清水予備実験の結果も 1.7 程度であった(3. 2. 1参照)。これらの結果から、汚泥倍率について、Chou は汚泥濃度のみの関数として表現しているが、同じ汚泥濃度でも流速が違えば汚泥倍率が違ってくる(つまり、流速の関数でもある)ことが考えられる。

汚泥倍率の実験値(各 Run の損失水頭/同じ条件における水の損失水頭の計算値)と Chou による汚泥倍率の計算値を求め、これらの比と流速との関係を調べた(図 3-9)。その結果、汚泥倍率は確かに流速の影響を受けており、 $V=1.5\text{m/s}$ 付近で両者はよく一致するものの、流速の低い場合は計算値が危険側となることが明らかとなった。なお、著者らはこれらの結果から、汚泥倍率 α を汚泥濃度 C [%] と流速 V [m/s] から算出する、次のような予測式を既に提案している¹⁶⁾。

$$\alpha = 0.26C - 0.39V + 1.58 \quad (3-5)$$

なお、汚泥倍率を用いた予測手法については、別途第7章にて検討する。

表 3-7 Chou による汚泥濃度と汚泥倍率との関係

項 目	定 義						
汚泥濃度 C [%]		0	2	4	6	8	10
Chou による推奨値	$(C_H'/C_H) \times 100$	100	80	63	50	40	34
汚泥倍率 α [-]	$\alpha = (C_H/C_H')^{1.85}$	1.00	1.51	2.35	3.61	5.45	7.36

* 各個別汚泥濃度の汚泥倍率は、上表の数値を直線補間して求める。

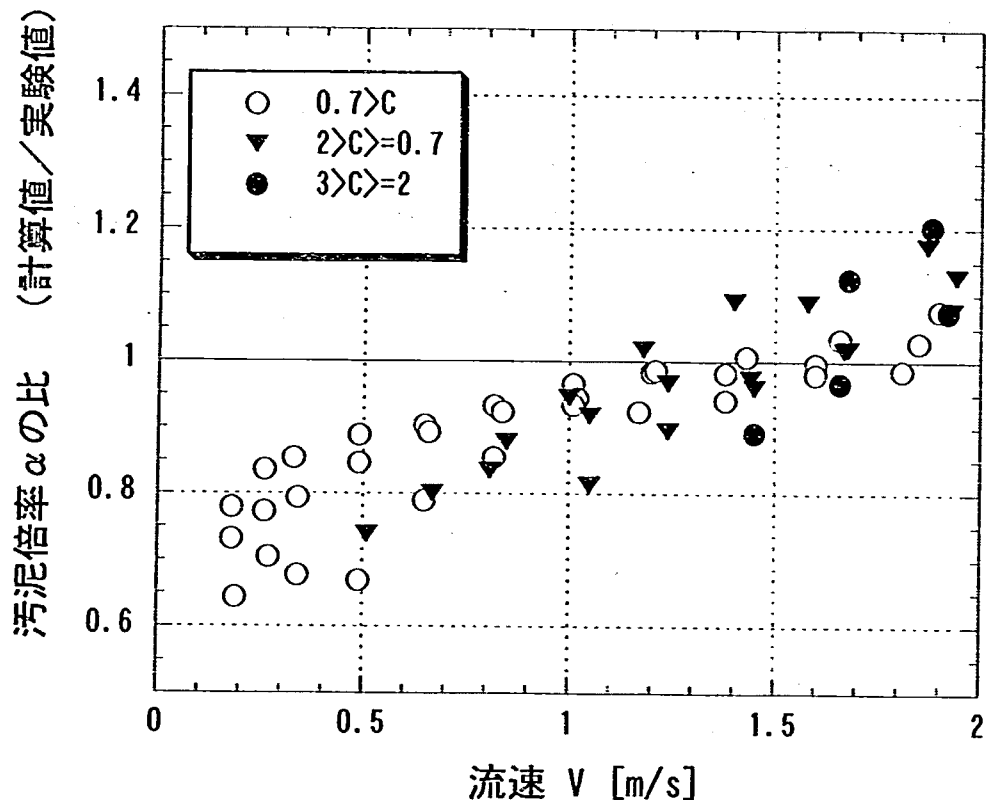


図 3-9 汚泥倍率 α に対する流速の影響

3.3 まとめ

- ①清水を用いた予備実験により、汚泥輸送実験装置の測定値が妥当なものであることを確認した。
- ②下水汚泥の流動特性として、擬塑性流動モデルを適用できることを確認した。また、層流域の圧力損失は、擬塑性流体のレイノルズ数を用いて、水の場合と同様にして求めることができる。
- ③乱流域の圧力損失は、既報による計算値とは一致しない。特に、擬塑性流体のレイノルズ数を用いても、清水と同様の公式 (Prandtl-Karman 式) で圧力損失を計算することはできない。また、Chou の方法では、その成立過程を鑑みて、適用流速を限定した場合は比較的よい結果が得られるが、低流速域では危険側の計算結果を与える。
- ④以上の結論は、限定された管種、管径のもとで行われた実験によるものであり、今後、管径、管種 (管壁の粗度) がどのように影響するか調査する必要がある。あわせてレイノルズ数の大きい (乱流が十分に発達する) 領域でのデータによる検証が必要である。

4. 汚泥輸送実験（実験2）

第4章では、平成6年度に実施された実験2の結果をとりまとめた。実験2では、実験1の結果を踏まえ次の内容について検討した。

- ①管径、管材質(管壁の粗滑)の影響
- ②乱流域における圧力損失予測方法の検討
- ③臨界レイノルズ数 Re_{pcr} について

4.1 実験

4.1.1 実験方法

(一般的事項) 第2章を参照。

(特記事項) 実験は、汚泥輸送実験装置 LOOP1、LOOP2 により行った。実験2では、各 LOOP に電磁流量計および透明管を設置した。実験1における流量計測方法と電磁流量計による測定値との比較を行い、両者は汚泥濃度によらずよく一致することを確認した。また、LOOP1 の測定流速範囲を広げるため、LOOP1 用ポンプのプーリー比を変更した。圧力損失測定部の概要を表 4-1 に示す。

汚泥は1回の実験につき約 800L を調整し、これを循環使用した。供試汚泥の粘度は、回転粘度計(RV12)により測定した。また、層流と乱流の境界である臨界流速 V_{cr} は、透明管の目視観察および V - H_f グラフの変曲点から判断した。実験2では、清水を用いた予備実験1回を含めて、9回の輸送実験を実施した(Run2-8 は LOOP1 のみの実験)。表 4-2 に供試汚泥等の概要を示す。

表 4-1 測定部の概要

	LOOP1	LOOP2 (A)	LOOP2 (B)
管材質	SUS	DIP	SUS
管延長	20m	20m	20m
助走部	4m	2m	2m
管内径	0.037m	0.094m	0.108m
管壁	滑らか	粗い	滑らか
相対粗度*	≈ 0	0.0015	≈ 0
流速係数*	150	130	155
最大流速	3.0 m/s	2.4 m/s	1.8 m/s
最小流速	0.2 m/s	0.6 m/s	0.4 m/s

*: 予備実験の結果から算出。

表 4-2 供試汚泥等の概要

RUN	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	温度 [°C]	密度 [kg/m ³]	擬塑性粘度* [Pa・s ^a]	構造粘度指数 [-]
2- a	清水(LOOP1)	-	-	28	-	0.00083	1
	清水(LOOP2)	-	-	32	-	0.00077	1
2- 1	余剰	0.77	67.1	39	996	0.0237	0.619
2- 2	余剰+希釈	0.59	68.0	36	997	0.0059	0.812
2- 3	濃縮	1.20	69.2	38	996	0.0410	0.622
2- 4	濃縮+希釈	0.90	68.3	35	996	0.0110	0.781
2- 5	余剰	1.42	68.7	31	999	0.128	0.506
2- 6	余剰+脱水	2.36	67.9	40	1003	0.362	0.406
2- 7	余剰+脱水	3.67	67.4	37	1007	0.997	0.337
2- 8	余剰+脱水	4.08	65.4	32	1011	2.07	0.341

*：清水についての粘度は測定値ではなく、文献値。

4. 1. 2 実験結果

実験結果について、表 4-3 ～ 4-5、図 4-1 ～ 4-3 に示す。ここで、摩擦損失係数 f の実験値は、実験1と同様に式 (3-1)により、擬塑性流体のレイノルズ数 Re_p は式 (1-11)から求める。また、臨界流速、臨界レイノルズ数の測定結果について表 4-6 に示す。臨界レイノルズ数 Re_{pcr} は、臨界流速 V_{cr} を式 (1-11)に代入して求めた。

圧力損失測定時の流速変化の方法は、2. 2で述べたとおりであり、測定値が流速の変化の方向に依存しないことを確認した上で、流速を増大させたときのデータのみを解析に用いた。ただし、層流／乱流の境界域付近においては、流れが安定せず、差圧計による圧力損失の測定値が大きく振動する現象が見られた。臨界流速についても、流速を増大させた場合(層流→乱流)の値と、流速を減少させた場合(乱流→層流)の値に、差が生じる場合が見られた。

4. 2 考 察

4. 2. 1 層流域の圧力損失と管径、管種の影響

層流域の摩擦損失係数 f について図 4-4 にとりまとめた。ここでは、臨界流速よりも流速が低い場合を層流域として扱った。図 3-6 と同様に、管路輸送実験から求まる f の実験値(式 (3-1)により計算)、および擬塑性流体のレイノルズ数から求まる f の計算値を比較したが、両者は管径、管種によらずよく一致している。

この結果は、実験1における結論を裏付けるものであり、下水汚泥の層流域の圧力損失について次のようにまとめることができる。つまり、「下水汚泥の層流域の圧力損失は、擬塑性流体のレイノルズ数を用いることにより、管種、管径、粘度(もしくは非ニュートン性)の大小によらず、水の場合と同様に算出することができる。」

次の課題としては、どのような条件で層流が生じるのか、つまり臨界レイノルズ数、もしくは臨界流速について検討し、これを明らかにする必要がある。

4. 2. 2 滑管乱流域の圧力損失

LOOP1 および LOOP2(B)の乱流域における摩擦損失係数 f と擬塑性流体のレイノルズ数 Rep との関係について図 4-5, 4-6 に示す。ここでは、流速が臨界流速以上の場合を乱流域として扱った。図中の実線は、Prandtl-Karman による f と Re の関係式(式 (3-3))であり、実験値はこの実線と一致しない。これは実験1と同じく、擬塑性流体のレイノルズ数を用いても、乱流域の摩擦損失係数を水の場合の関係式から求められないことを示している。このとき、計算値の実測値からのずれ(誤差率)は最大 50% 程度となる。

2つの図から、滑管乱流域における f と Rep の関係には、次のような特徴のあることがわかる。

① Prandtl-Karman 式とほぼ平行に推移(漸近する傾向がない)。

② 非ニュートン性が増すほど、Prandtl-Karman 式から外れる(n が小さいほど f が小さい)。

また、 n が小さい場合に若干管径による影響が生じているが、 f と Rep の関係は総じて n のみをパラメーターとして表現できそうである。

Dodge および Metzner¹⁷⁾は、擬塑性流体の滑管乱流域における摩擦損失係数の計算式として次式を提案している。

$$1/\sqrt{f} = An \log_{10} (Rep \cdot (f/4)^{1-n/2}) - Bn \quad (4-1)$$

$$\text{ここで、} An = 2.0/n^{0.75}, \quad Bn = 0.20/n^{1.2}$$

本式は、Prandtl-Karman 式の一般形として理論的に導かれており、管径によらず n のみをパラメーターとしている。 $n=1$ のときには Prandtl-Karman 式と一致する。ただし、係数 An , Bn は高分子溶液を用いた管路輸送実験から求められている。本式による f と Rep の関係式を図 4-7 に、係数決定の際の実験概要について表 4-7 に示す(ただし、図 4-7 における f は Fanning の摩擦損失係数で、Darcy-Weisbach の摩擦損失係数の 1/4 の値である。)。図から、下水汚泥の f と Rep の関係の特徴(上述の①、②)が読みとれるため、本式は下水汚泥に対しても適用可能であると考えられる。

図 4-8, 4-9 は、摩擦損失係数の実験値と、Dodge-Metzner 式による計算値を比較したものである。図から、管径によらず、Run 2-1 ~ 2-5 ($0.8 > n > 0.5$)のデータについては概ねよく一致していることがわかる。誤差率は最大でも 20%程度であった。層流/乱流の臨界領域 ($Rep < 4000$) については、本式によっても予測することができない。ただし、計算値は安全側に算出されるため、実用面では問題が少ない。

一方、非ニュートン性の大きい Run 2-6 ~ 2-8 ($0.4 > n > 0.3$)のデータについては予測精度が悪かった。特に管径の小さい LOOP1 においてその傾向が顕著であり、誤差率は最大約 50%程度となった。Dodge-Metzner 式と実験結果が乖離する理由として次のようなことが考えられる。

① Dodge-Metzner の実験において、 n の小さい領域のデータが少ないこと。

② Dodge-Metzner の用いた高分子溶液と下水汚泥の流動特性に差があること。

①については、係数 An , Bn を決めるための元データのうち、最も n の小さいものが $n = 0.4$ 程度で、データ数も1つのみである。今後は、 n の小さい領域のデータも含め、下水汚泥の実験結果に基づいて式中の係数の再評価を行い、同式による予測精度を高める必要がある。

表 4-3 LOOP1における実験結果

Run 2-A 940714				Run 2-1 940803				Run 2-2 940809			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.31	61	0.0238	13531	0.21	65	0.0525	1300	0.21	35	0.0297	2535
0.46	144	0.0244	20526	0.36	90	0.0249	2722	0.26	40	0.0217	3305
0.56	208	0.0240	24884	0.43	145	0.0279	3502	0.31	65	0.0245	4104
0.70	318	0.0233	31191	0.55	225	0.0267	4891	0.43	143	0.0275	6121
0.82	420	0.0225	36466	0.69	343	0.0259	6674	0.55	227	0.0269	8160
0.98	572	0.0216	43461	0.81	442	0.0243	8306	0.69	330	0.0253	10566
1.09	703	0.0214	48392	0.95	577	0.0234	10263	0.82	445	0.0242	12966
1.24	865	0.0205	54928	1.08	712	0.0223	12249	0.94	575	0.0236	15337
1.38	1055	0.0202	61006	1.23	885	0.0212	14754	1.07	712	0.0225	17871
1.54	1290	0.0198	68116	1.38	1085	0.0207	17293	1.22	895	0.0218	20884
1.68	1525	0.0195	74652	1.51	1260	0.0201	19568	1.38	1090	0.0209	24074
1.86	1825	0.0192	82335	1.66	1490	0.0195	22397	1.51	1295	0.0206	26894
2.01	2100	0.0189	89101	1.84	1765	0.0190	25628	1.66	1515	0.0199	30096
2.16	2400	0.0187	95752	1.97	2000	0.0186	28358	1.84	1810	0.0194	34034
2.31	2725	0.0185	102517	2.14	2300	0.0183	31585	1.99	2080	0.0190	37352
2.49	3140	0.0183	110544	2.30	2635	0.0181	35013	2.15	2365	0.0186	40835
2.69	3600	0.0181	119260	2.47	2985	0.0177	38649	2.31	2700	0.0184	44483
2.79	3825	0.0179	123617	2.64	3365	0.0176	42267	2.47	3025	0.0180	48180
				2.83	3810	0.0173	46560	2.65	3465	0.0179	52530
				2.98	4200	0.0172	50003	2.82	3850	0.0175	56568
								3.00	4320	0.0174	60777

Run 2-3 940810				Run 2-4 940811				Run 2-5 940906			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.21	110	0.0933	719	0.22	55	0.0423	1609	0.21	235	0.1897	363
0.31	132	0.0497	1257	0.32	75	0.0265	2587	0.32	275	0.0971	673
0.43	157	0.0302	1998	0.43	165	0.0317	3746	0.43	310	0.0596	1060
0.56	180	0.0209	2825	0.55	252	0.0299	5031	0.57	342	0.0383	1586
0.68	390	0.0304	3725	0.68	370	0.0288	6499	0.70	380	0.0283	2153
0.80	507	0.0286	4647	0.82	493	0.0268	8092	0.83	585	0.0310	2775
0.95	670	0.0271	5842	0.94	625	0.0259	9549	0.95	755	0.0306	3392
1.05	810	0.0267	6740	1.08	783	0.0243	11380	1.09	910	0.0280	4166
1.21	1015	0.0249	8247	1.23	965	0.0233	13264	1.23	1140	0.0273	5023
1.36	1235	0.0240	9681	1.37	1175	0.0227	15199	1.38	1390	0.0267	5931
1.52	1485	0.0233	11228	1.52	1400	0.0220	17250	1.54	1650	0.0252	7028
1.65	1710	0.0227	12619	1.66	1640	0.0215	19273	1.68	1900	0.0244	8000
1.82	2010	0.0219	14447	1.81	1910	0.0210	21409	1.84	2220	0.0238	9166
1.97	2285	0.0214	16049	1.98	2200	0.0203	23812	2.00	2540	0.0231	10344
2.12	2585	0.0209	17756	2.13	2505	0.0200	26027	2.15	2870	0.0226	11527
2.27	2900	0.0203	19571	2.30	2855	0.0196	28590	2.32	3220	0.0217	12966
2.45	3300	0.0200	21622	2.44	3175	0.0193	30719	2.47	3560	0.0211	14236
2.64	3720	0.0194	23987	2.65	3650	0.0189	33921	2.66	4000	0.0205	15914
2.79	4100	0.0191	25952	2.79	4020	0.0187	36196	2.82	4380	0.0199	17366
2.96	4550	0.0189	28095	2.97	4440	0.0183	38993	3.01	4920	0.0196	19153

Run 2-6 940907				Run 2-7 940908				Run 2-8 940909			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.21	385	0.3108	186	0.21	835	0.7081	83	0.21	1955	1.6579	40
0.32	445	0.1623	351	0.31	940	0.3543	164	0.32	2185	0.7967	80
0.43	500	0.0961	584	0.43	1070	0.2058	286	0.43	2375	0.4567	135
0.57	545	0.0611	898	0.56	1170	0.1361	435	0.56	2570	0.2990	205
0.70	585	0.0436	1244	0.69	1265	0.0956	622	0.69	2775	0.2129	290
0.83	635	0.0337	1631	0.82	1365	0.0742	818	0.82	2940	0.1598	386
0.95	840	0.0340	2020	0.92	1430	0.0612	998	0.94	3110	0.1274	488
1.08	1030	0.0323	2478	0.99	1515	0.0558	1131	1.08	3285	0.1030	609
1.23	1270	0.0307	3051	1.05	1570	0.0517	1241	1.23	3450	0.0833	757
1.37	1540	0.0298	3646	1.13	1650	0.0467	1408	1.37	3610	0.0697	911
1.53	1830	0.0285	4325	1.23	1800	0.0431	1617	1.53	3750	0.0585	1088
1.66	2110	0.0276	4973	1.38	2015	0.0386	1946	1.67	3925	0.0510	1265
1.82	2440	0.0266	5758	1.53	2350	0.0366	2311	1.84	4120	0.0444	1479
1.98	2790	0.0258	6557	1.66	2665	0.0351	2659	1.99	4280	0.0394	1685
2.13	3140	0.0251	7366	1.82	3055	0.0335	3100	2.13	4520	0.0361	1894
2.30	3580	0.0246	8299	1.97	3465	0.0324	3536	2.28	5030	0.0349	2128
2.47	4030	0.0239	9335	2.12	3915	0.0316	3995	2.46	5830	0.0349	2406
2.65	4500	0.0233	10416	2.28	4420	0.0307	4527	2.62	6450	0.0340	2672
2.82	5000	0.0228	11506	2.47	5000	0.0298	5139	2.80	7140	0.0331	2975
2.98	5470	0.0224	12567	2.64	5580	0.0291	5743	2.96	7800	0.0323	3264
				2.80	6130	0.0284	6335				
				2.96	6720	0.0278	6971				

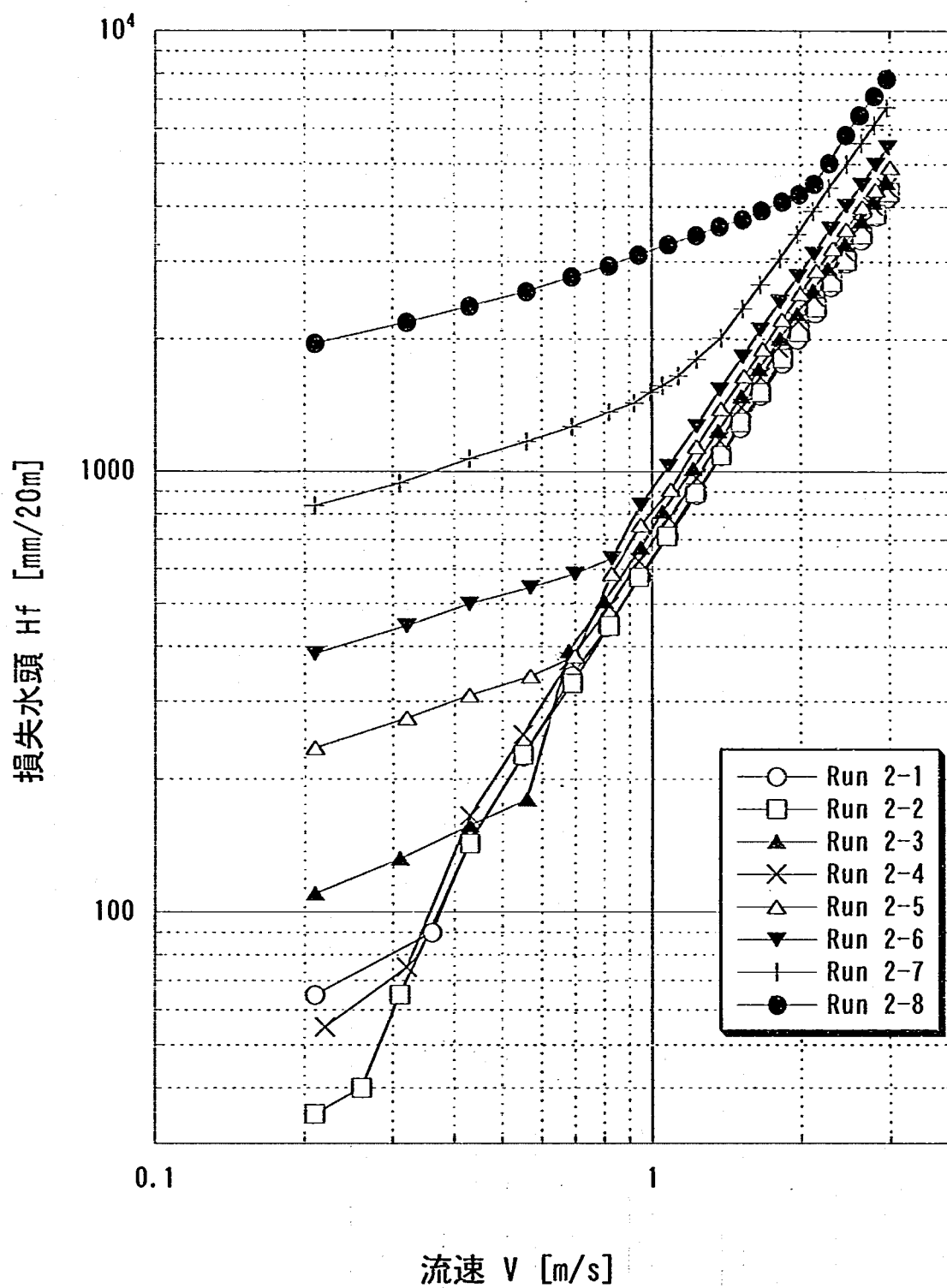


図 4-1 LOOP 1 における実験結果

表 4-4 LOOP2(A)における実験結果

Run 2-A 940804				Run 2-1 940808				Run 2-2 940809			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.61	100	0.0247	74994	0.62	98	0.0236	10124	0.61	105	0.0261	19478
0.66	118	0.0247	81186	0.67	110	0.0228	11285	0.65	120	0.0261	21088
0.76	153	0.0245	92882	0.75	145	0.0240	13159	0.74	153	0.0256	24587
0.87	203	0.0244	107331	0.86	193	0.0241	15967	0.86	200	0.0250	29300
0.97	250	0.0243	119371	0.97	250	0.0246	18844	0.96	250	0.0251	33439
1.07	298	0.0240	131067	1.07	303	0.0246	21534	1.07	305	0.0246	38017
1.23	385	0.0236	150332	1.16	358	0.0245	24240	1.16	358	0.0243	42080
1.37	480	0.0234	168564	1.26	418	0.0244	27031	1.27	423	0.0241	46696
1.58	623	0.0229	194021	1.41	513	0.0238	31632	1.42	518	0.0236	53381
1.68	698	0.0228	206061	1.55	620	0.0239	36064	1.57	628	0.0234	60201
1.81	805	0.0227	221886	1.70	738	0.0235	41025	1.73	748	0.0231	67275
1.94	925	0.0226	238398	1.84	833	0.0226	45868	1.86	865	0.0230	73548
2.09	1055	0.0223	256286	1.98	960	0.0226	50658	2.01	1000	0.0227	80707
2.22	1180	0.0221	272455	2.13	1123	0.0228	56086	2.16	1138	0.0224	87833
2.35	1318	0.0219	288623	2.27	1240	0.0223	61036	2.30	1275	0.0222	94503
2.44	1415	0.0218	299975	2.38	1375	0.0224	65248	2.43	1400	0.0218	101110

Run 2-3 940810				Run 2-4 940811				Run 2-5 940906			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.61	108	0.0268	5678	0.61	105	0.0264	11637	0.61	140	0.0345	2830
0.65	125	0.0272	6226	0.65	123	0.0267	12696	0.65	153	0.0332	3106
0.74	158	0.0265	7439	0.75	163	0.0265	15136	0.74	180	0.0303	3767
0.87	215	0.0264	9241	0.86	208	0.0261	17721	0.85	228	0.0289	4651
0.96	260	0.0261	10628	0.96	255	0.0257	20303	0.96	275	0.0274	5570
1.06	310	0.0256	12155	1.06	310	0.0253	23093	1.06	325	0.0267	6440
1.16	375	0.0255	13875	1.16	370	0.0252	25794	1.16	388	0.0266	7352
1.26	438	0.0253	15512	1.26	430	0.0249	28470	1.27	458	0.0262	8412
1.42	543	0.0248	18234	1.42	533	0.0245	32767	1.43	573	0.0259	10046
1.56	648	0.0245	20813	1.58	645	0.0239	37330	1.57	688	0.0257	11586
1.71	763	0.0240	23590	1.72	760	0.0238	41417	1.72	820	0.0254	13327
1.85	878	0.0236	26296	1.87	885	0.0232	46082	1.87	955	0.0251	15079
2.00	1020	0.0234	29362	2.01	1020	0.0232	50320	2.03	1098	0.0246	16971
2.14	1158	0.0232	32228	2.16	1165	0.0230	54797	2.18	1255	0.0244	18899
2.30	1308	0.0227	35524	2.30	1308	0.0228	59165	2.32	1400	0.0241	20707
2.43	1455	0.0226	38356	2.43	1443	0.0224	63413	2.44	1545	0.0238	22453

Run 2-6 940907				Run 2-7 940908			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.59	163	0.0428	1396	0.60	360	0.0930	665
0.64	173	0.0386	1590	0.64	373	0.0825	756
0.78	213	0.0318	2191	0.73	395	0.0675	939
0.95	290	0.0298	2958	0.84	418	0.0544	1176
1.04	340	0.0288	3446	0.95	453	0.0462	1441
1.15	400	0.0279	4024	1.05	483	0.0407	1689
1.24	463	0.0275	4569	1.15	518	0.0361	1977
1.40	570	0.0268	5503	1.26	588	0.0340	2308
1.54	693	0.0269	6408	1.41	688	0.0320	2768
1.70	823	0.0263	7481	1.55	795	0.0304	3261
1.84	943	0.0258	8491	1.70	915	0.0290	3807
1.98	1080	0.0253	9590	1.85	1053	0.0283	4363
2.12	1230	0.0252	10694	1.98	1188	0.0278	4892
2.26	1378	0.0248	11841	2.13	1355	0.0274	5529
2.38	1508	0.0245	12863	2.28	1513	0.0269	6159
				2.40	1650	0.0265	6711

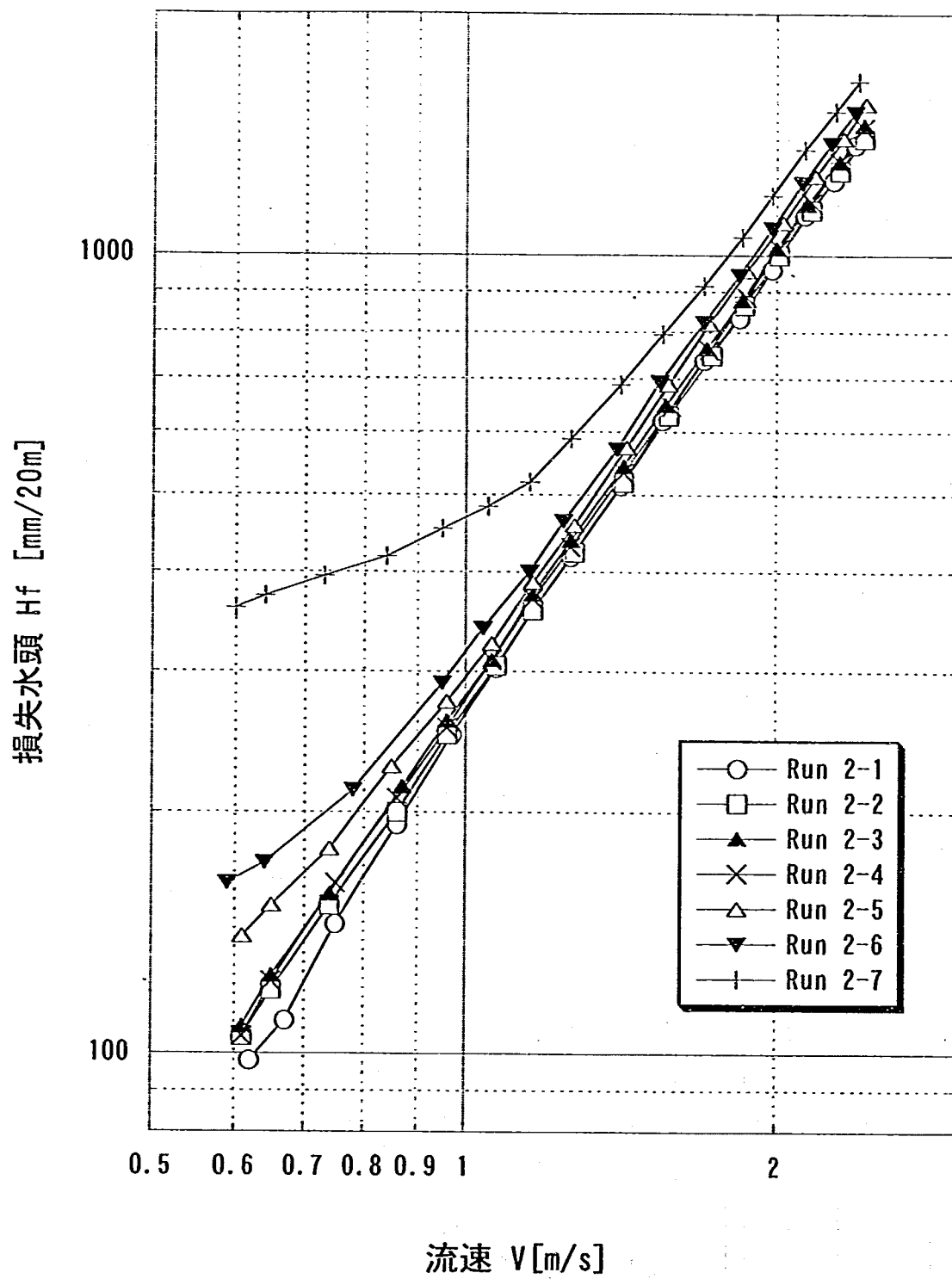


図 4-2 LOOP 2(A) における実験結果

表 4-5 LOOP2(B)における実験結果

Run 2-A 940804				Run 2-1 940808				Run 2-2 940809			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.46	40	0.0198	65272	0.47	47	0.0228	7518	0.46	45	0.0224	15676
0.50	47	0.0198	70662	0.51	53	0.0220	8381	0.49	50	0.0218	16972
0.57	60	0.0193	80842	0.56	66	0.0219	9772	0.56	62	0.0209	19788
0.66	77	0.0186	93417	0.65	83	0.0208	11858	0.65	81	0.0203	23581
0.74	92	0.0179	103897	0.73	102	0.0201	13995	0.73	100	0.0201	26913
0.81	110	0.0178	114077	0.81	121	0.0197	15993	0.81	120	0.0194	30596
0.93	140	0.0172	130844	0.88	140	0.0192	18002	0.88	139	0.0189	33867
1.04	172	0.0168	146713	0.95	160	0.0187	20075	0.96	160	0.0183	37582
1.20	221	0.0163	168870	1.07	192	0.0179	23491	1.08	194	0.0177	42962
1.27	245	0.0160	179350	1.17	227	0.0175	26783	1.19	231	0.0172	48451
1.37	282	0.0159	193123	1.29	264	0.0169	30467	1.31	267	0.0165	54144
1.47	321	0.0157	207495	1.40	303	0.0165	34064	1.41	303	0.0161	59193
1.58	365	0.0154	223064	1.50	344	0.0162	37621	1.52	342	0.0156	64954
1.68	409	0.0153	237137	1.61	392	0.0159	41652	1.64	387	0.0153	70689
1.78	454	0.0151	251209	1.72	434	0.0156	45329	1.74	430	0.0150	76058
1.85	487	0.0150	261090	1.80	471	0.0154	48456	1.84	468	0.0146	81375

Run 2-3 940810				Run 2-4 940811				Run 2-5 940906			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.46	52	0.0259	4222	0.46	50	0.0252	9245	0.46	98	0.0484	2005
0.49	60	0.0262	4629	0.49	58	0.0253	10087	0.49	100	0.0436	2201
0.56	74	0.0249	5532	0.57	74	0.0242	12026	0.56	103	0.0347	2669
0.66	100	0.0246	6871	0.65	92	0.0232	14079	0.65	111	0.0282	3295
0.73	118	0.0237	7903	0.72	111	0.0224	16130	0.73	137	0.0273	3947
0.80	139	0.0230	9038	0.80	132	0.0216	18347	0.80	160	0.0263	4563
0.88	162	0.0221	10317	0.88	154	0.0210	20493	0.88	183	0.0252	5209
0.96	185	0.0214	11535	0.96	174	0.0202	22619	0.96	213	0.0245	5960
1.07	222	0.0203	13558	1.07	211	0.0194	26033	1.08	258	0.0234	7118
1.18	260	0.0197	15476	1.19	251	0.0187	29658	1.19	301	0.0225	8209
1.30	302	0.0190	17541	1.30	292	0.0183	32905	1.31	349	0.0217	9442
1.40	350	0.0189	19553	1.42	338	0.0178	36612	1.42	400	0.0210	10683
1.52	400	0.0184	21833	1.52	388	0.0177	39979	1.54	451	0.0202	12024
1.62	450	0.0180	23964	1.64	437	0.0173	43536	1.65	510	0.0198	13390
1.74	500	0.0174	26415	1.74	484	0.0169	47006	1.75	562	0.0193	14671
1.84	548	0.0171	28521	1.84	525	0.0164	50381	1.85	613	0.0189	15908

Run 2-6 940907				Run 2-7 940908			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.45	127	0.0663	956	0.45	283	0.1478	436
0.49	131	0.0586	1081	0.49	286	0.1269	499
0.55	137	0.0476	1323	0.60	299	0.0882	701
0.64	144	0.0376	1662	0.72	314	0.0645	947
0.72	150	0.0310	2001	0.83	333	0.0509	1212
0.79	180	0.0305	2342	0.94	355	0.0423	1490
0.87	202	0.0282	2735	1.06	403	0.0378	1816
0.94	230	0.0274	3105	1.18	440	0.0335	2160
1.06	277	0.0261	3740	1.28	486	0.0312	2493
1.17	326	0.0254	4355	1.40	542	0.0292	2881
1.28	375	0.0240	5084	1.50	598	0.0282	3215
1.39	423	0.0231	5770	1.62	662	0.0268	3659
1.50	478	0.0224	6517	1.73	723	0.0255	4092
1.61	535	0.0219	7267	1.82	784	0.0252	4432
1.71	583	0.0210	8047				
1.81	632	0.0205	8742				

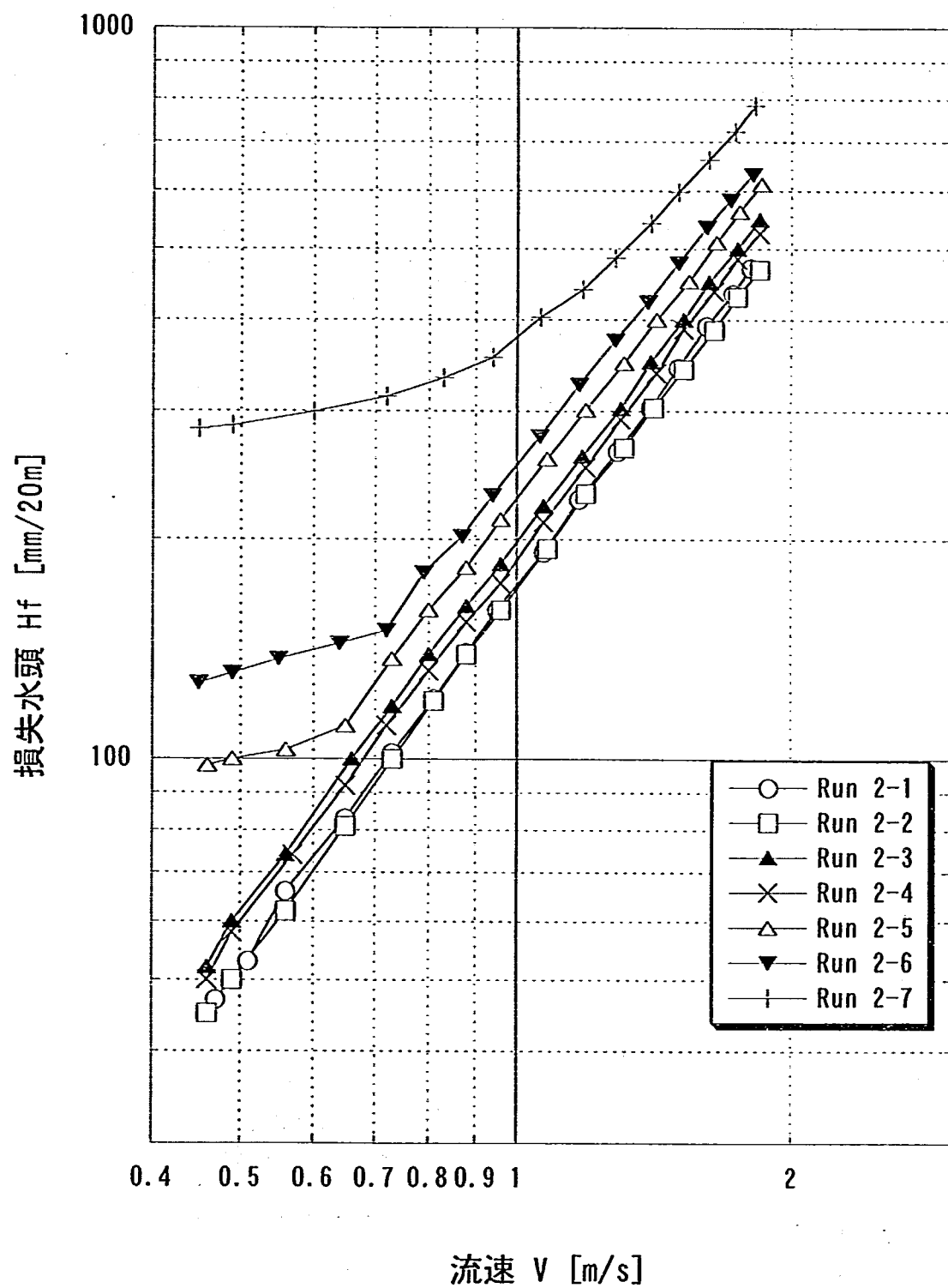


図 4.3 LOOP 2(B) における実験結果

表 4-6 臨界流速、臨界レイノルズ数の測定結果

Run No.	LOOP1			LOOP2(A)			LOOP2(B)		
	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考
2-1	0.36	2722		-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
2-2	0.26	3305		-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
2-3	0.56	2825	増速時	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
	0.43	1998	減速時						
2-4	0.32	2587		-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
2-5	0.70	2153		-	-	全て乱流	0.65	3295	
2-6	0.83	1631		0.78	2191		0.72	2001	
2-7	1.23	1617	増速時	1.15	1977	増速時	0.94	1490	増速時
	0.99	1131	減速時	0.95	1441	減速時	0.72	947	減速時
2-8	2.13	1894		-	-	データなし	-	-	データなし

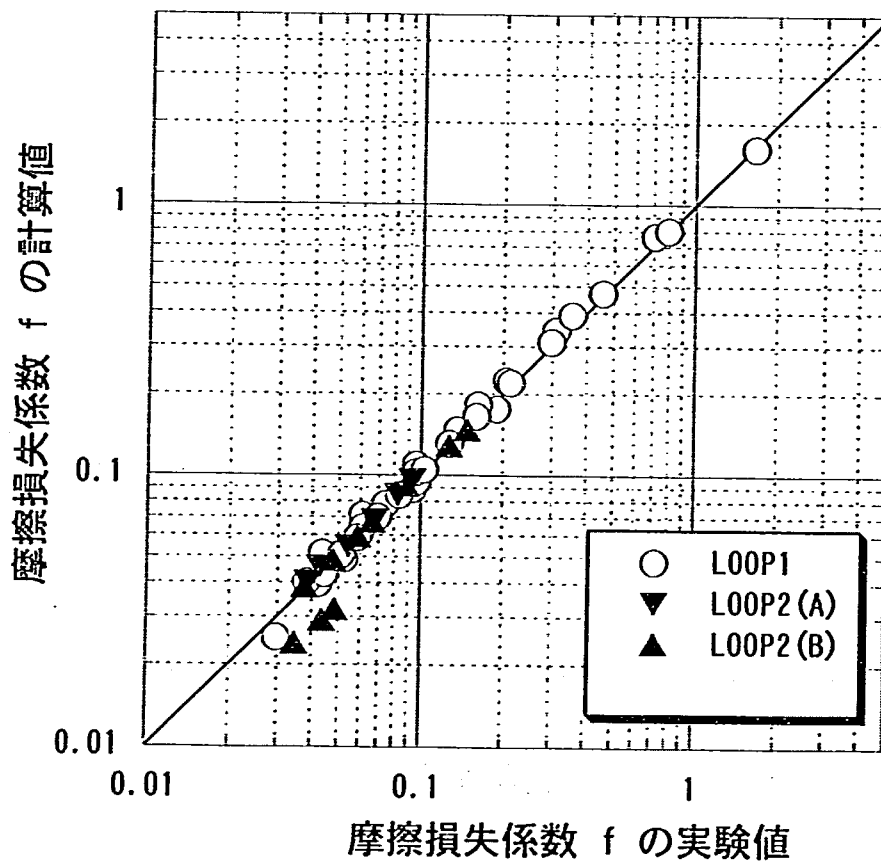


図 4-4 層流域における摩擦損失係数

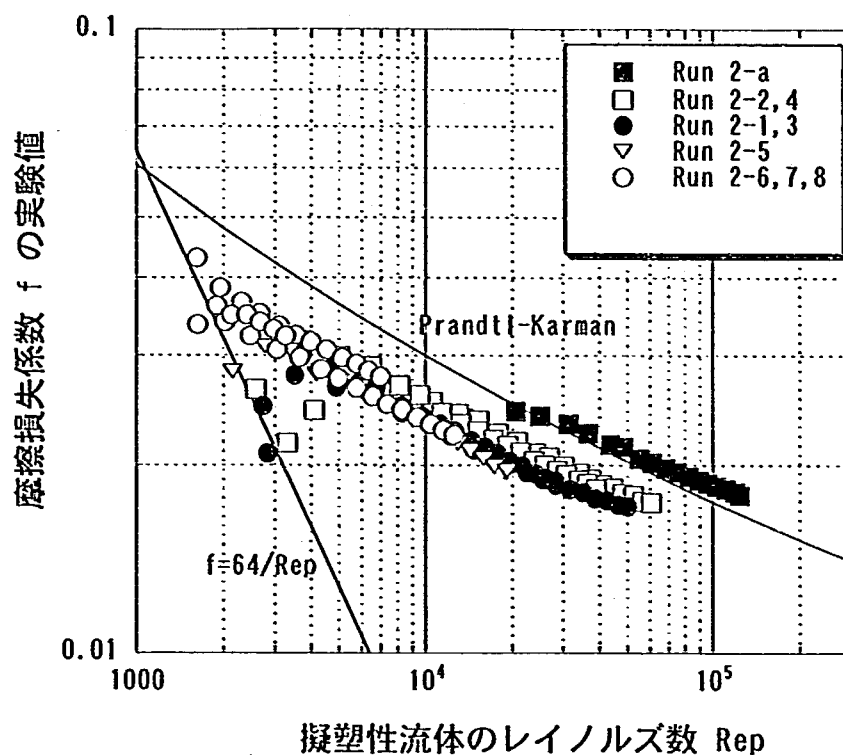


図 4-5 滑管乱流域における Re_p と f の関係 (LOOP 1)

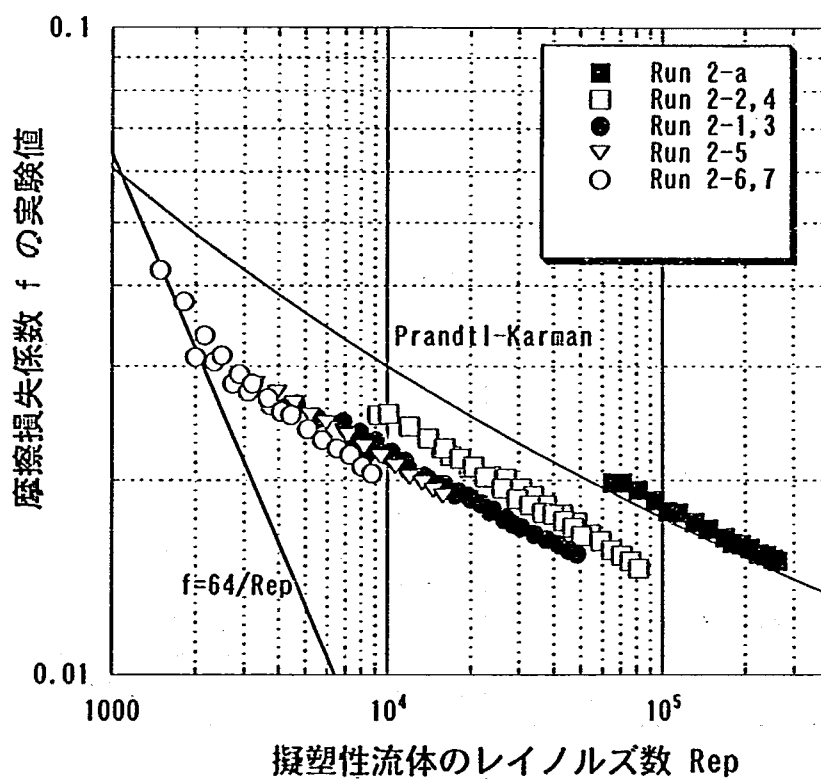


図 4-6 滑管乱流域における Re_p と f の関係 (LOOP 2(B))

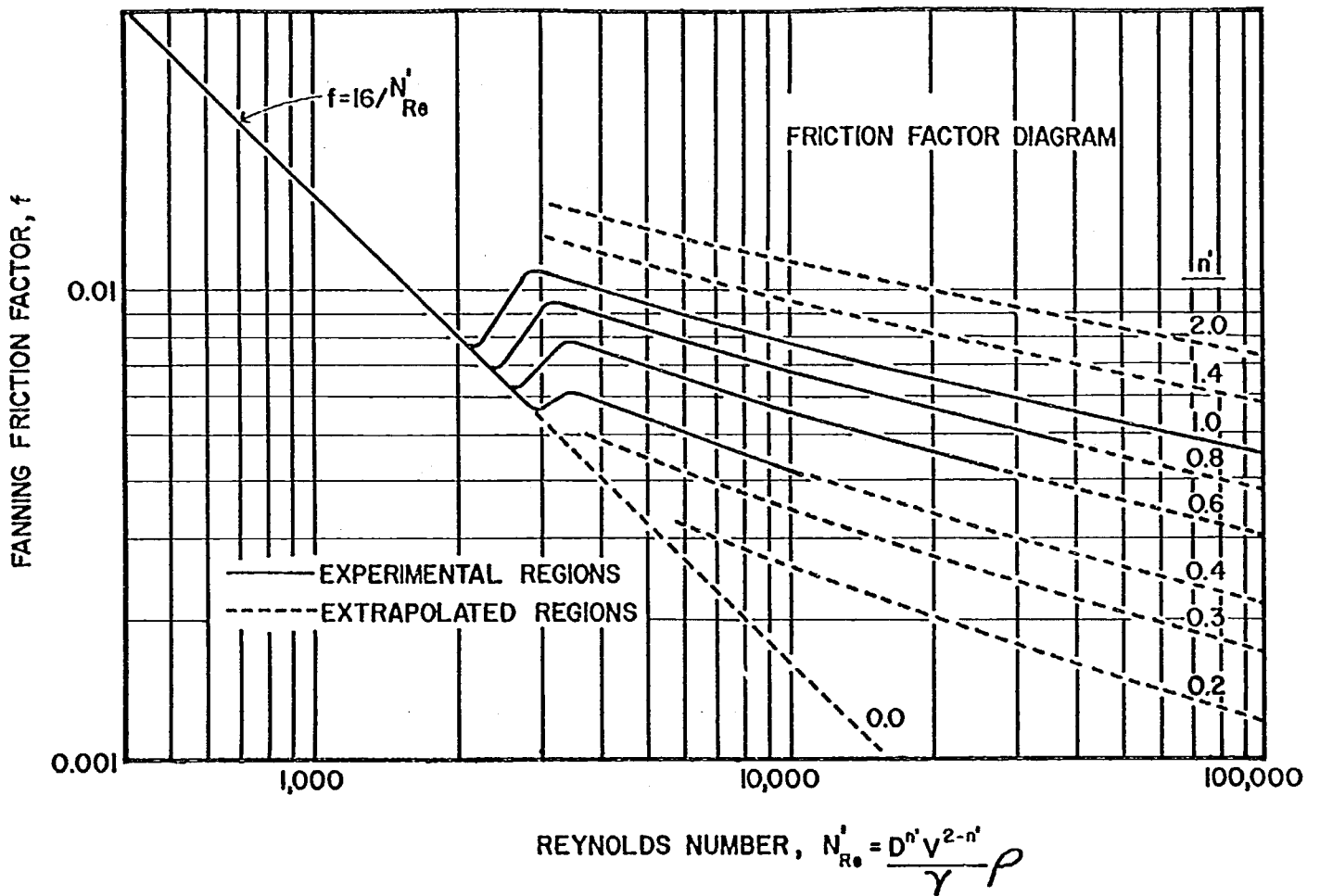


図 4-7 摩擦損失係数と擬塑性流体のレイノルズ数との関係¹⁷⁾

表 4-7 Dodge-Metzner の管路輸送実験の概要

配管長	不明	圧送方法	不明
管種・管径	真鍮管 1/2, 1, 2 in.	流速範囲	不明
圧力損失測定部長さ	不明	レイノルズ数範囲	～ 36,000
圧力損失測定法	マノメーター、圧力ゲージ	サンプル	高分子溶液 Carbopol
流量測定法	電磁流量計、重量法	n 範囲	0.43 ～ 0.73
粘度測定法	毛細管粘度計		

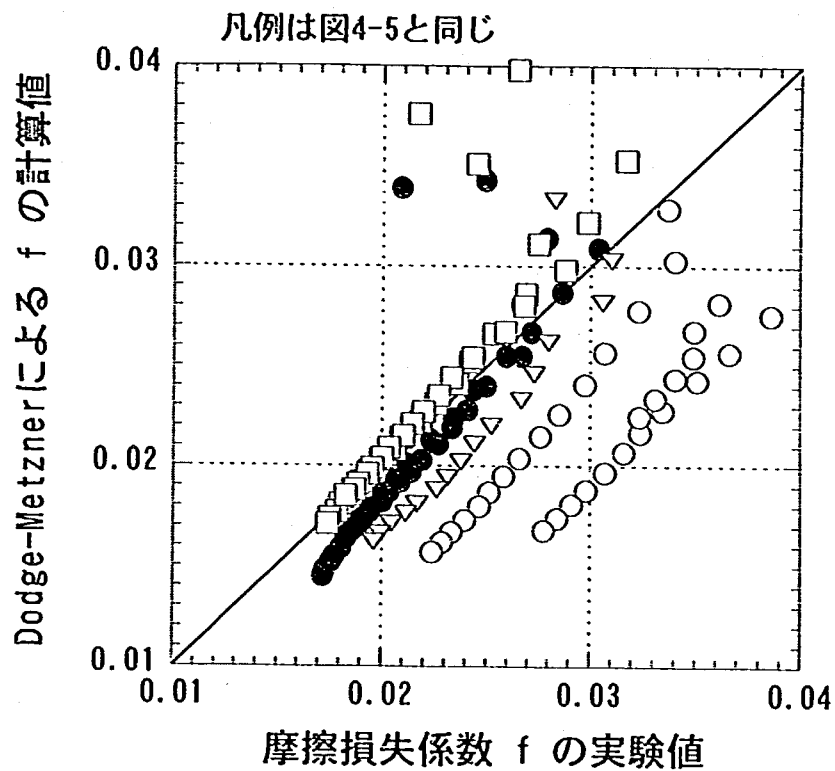


図 4-8 Dodge-Metzner 式による f の予測 (LOOP 1)

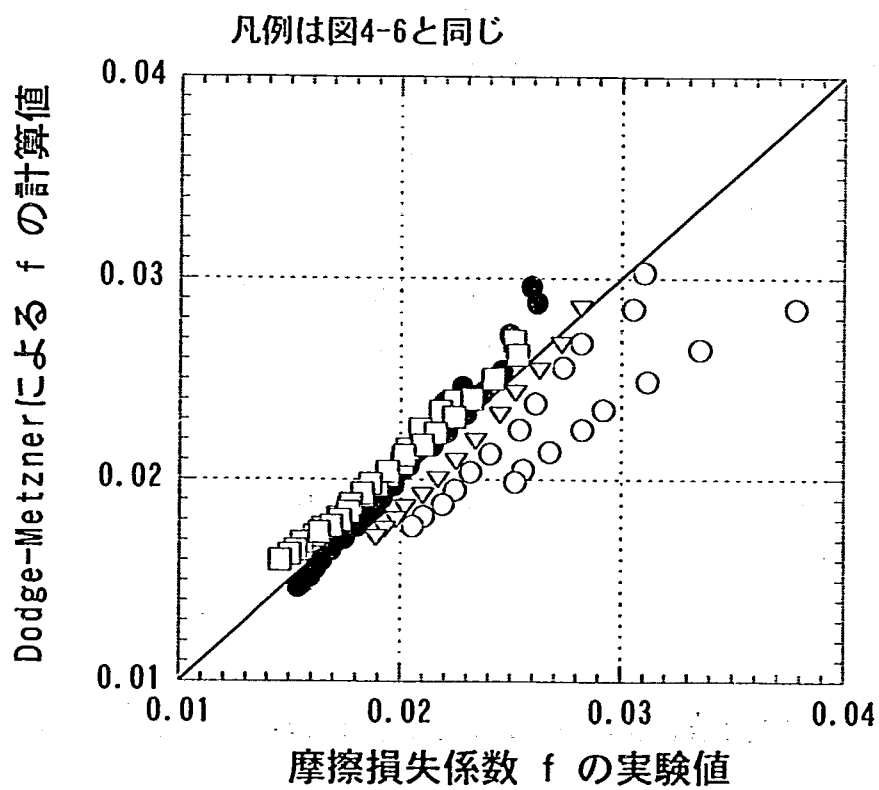


図 4-9 Dodge-Metzner 式による f の予測 (LOOP 2(B))

②については、高分子溶液が擬塑性流体であるのに対し、下水汚泥はあくまで擬塑性流動モデルによって表現できるが、厳密な意味の擬塑性流体ではないということである(3. 2. 2参照)。よって擬塑性流動モデルで近似する際に、流動曲線のどの部分を近似計算に用いるのかによって n の値が変わりうる。近似方法の違いによる n の変動は非ニュートン性が大きいほど大きいため、 n が小さい場合に実験値と計算値の乖離が大きくなっている可能性がある。

この問題を解決するための1つの手段として、対象とする速度勾配ごとにそれぞれ擬塑性流動モデルの定数を決めてやるという方法が考えられる。つまり、レオロジー定数を速度勾配の関数であるとする考え方である。このような方法によれば、レオロジー定数がより厳密に定義されるため、予測式との誤差を小さくできるものと考えられる。しかしこれは取り扱いが煩雑であり、またレオロジー定数をはじめから3つもつモデル(Plasticモデル)との比較を行う必要もある。これでは、簡便で計算上有利という理由から擬塑性流動モデルを採用した当初の趣旨(1. 2参照)に合わなくなるため、この点についての検討は実施しないこととした。

また、管径の影響については、同じ流速でも管径が小さい場合ほど管壁の速度勾配が大きくなることから、例えば上記の②の理由による乖離が、管径が小さい場合により大きく現れたということが考えられる。しかし、Run 2-1 ~ 2-5 における実験値と計算値が、管径によらずよく一致することを考えれば、乱流域の f と Rep の関係に対し、管径が直接的に影響することはないものと考えられる。

4. 2. 3 粗管乱流域の圧力損失

LOOP2(A)の乱流域における摩擦損失係数 f と擬塑性流体のレイノルズ数 Rep との関係について図 4-10 に示す。ここでは、流速が臨界流速以上の場合を乱流域として扱った。図中の実線は、次式で示される Colebrook-White による粗管乱流域(遷移領域)の f と Re の関係式である。

$$1/\sqrt{f} = 1.74 - 2.03 \log_{10} (2 k_s/d + 18.7 / (Rep \sqrt{f})) \quad (4-2)$$

ここで、 k_s は管壁の絶対粗度(k_s/d は相対粗度)である。

図より、実験値は Colebrook-White 式と一致しない。これは滑管同様、粗管の場合も、擬塑性流体のレイノルズ数を用いても、乱流域の摩擦損失係数を水の場合の関係式から求められないことを示している。ただし、滑管の場合に比べて n の影響は顕著ではなく、また f と Rep の関係は、 Rep が大きくなるにつれ Colebrook-White 式に漸近する傾向が見受けられた。

なお、著者らはこれらの結果から、粗管乱流域の f と Rep の関係を Blasius 式のごとく、指数関数により表わすことを試み、次のような関係式を得ている¹⁸⁾。

$$f = 0.0486 Rep^{-0.0672} \quad (4-3)$$

式 (4-3) と実験データの関係を図 4-11 に示す。式中の係数に汎用性を持たせるためには、各種の粗度に対する検討が必要である。

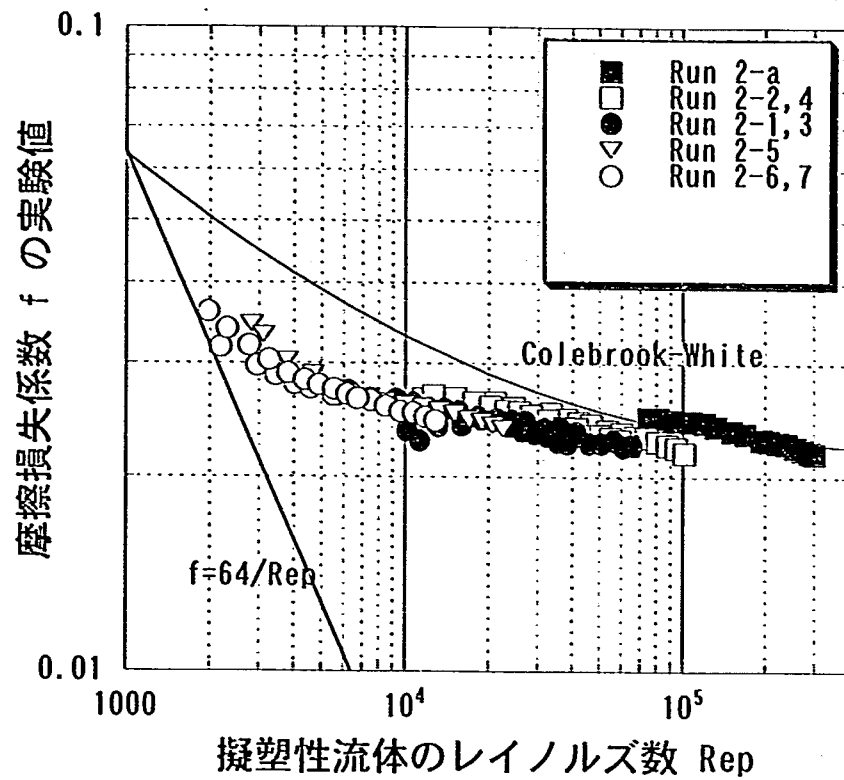


図 4-10 粗管乱流域における Re_p と f の関係 (LOOP 2(A))

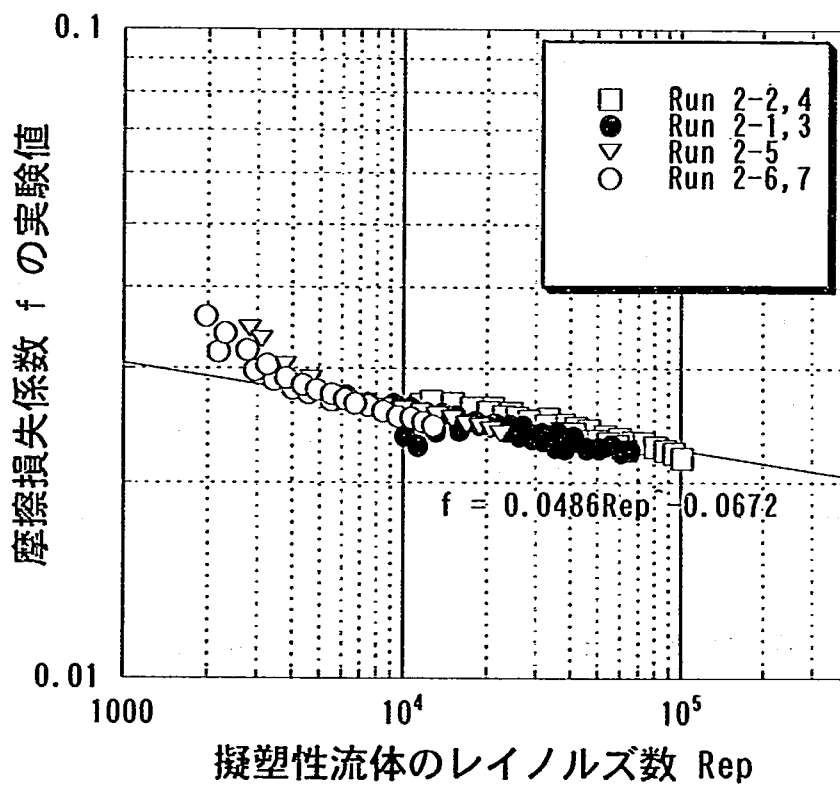


図 4-11 粗管乱流域における f の指数式による表現 (LOOP 2(A))

4. 2. 4 臨界レイノルズ数

臨界レイノルズ数の測定結果を n に対して整理すると図 4-12 のようになる。図より、 n が小さくなるほど臨界レイノルズ数も小さくなる傾向のあることがわかる。値の分布する範囲はおよそ $1500 < Re_{pcr} < 3000$ であり、特に n が 0.4 より小さい場合には、清水の臨界レイノルズ数 2100 を下回る場合が観測された。

下水汚泥の臨界レイノルズ数について言及している文献は少なく、1. 3 でまとめたように、2000 ~ 3000 をその範囲としている場合が多い。また Dodge-Metzner¹⁷⁾ も擬塑性流体に対して n が小さくなると臨界レイノルズ数(下限値)は水の場合より大きくなり、 $n = 0.38$ のとき $Re_{pcr} = 3100$ であったとしている。今回の実験結果は、これらの報告と必ずしも一致しておらず、更なるデータの積み重ねが必要と考えられる。

臨界レイノルズ数については、第6章にて再度とりまとめる。

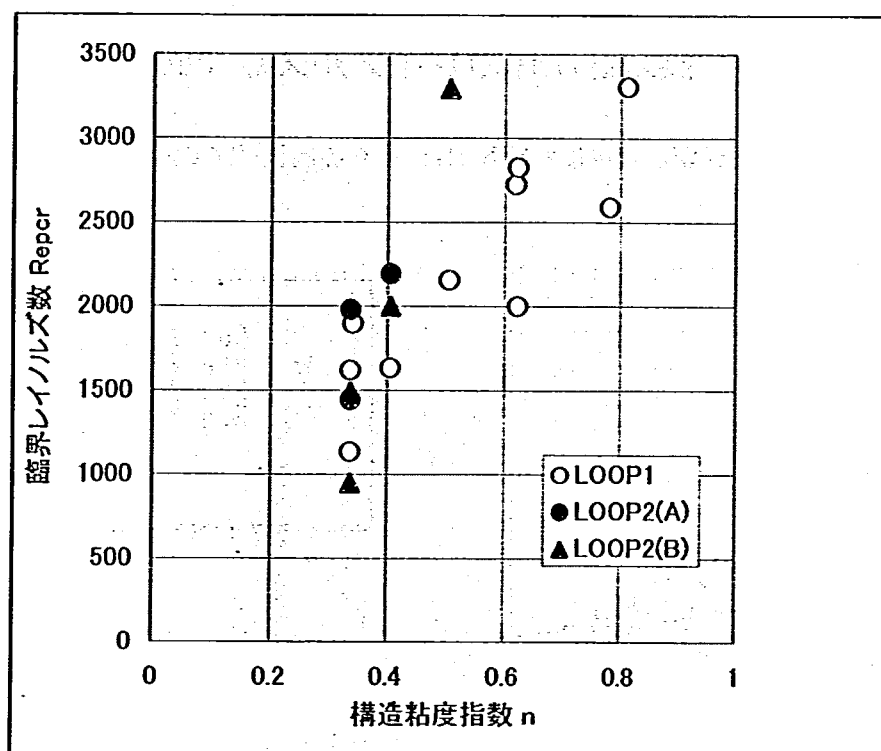


図 4-12 臨界レイノルズ数と構造粘度指数との関係

4.3 まとめ

- ①下水汚泥の層流域の圧力損失は、擬塑性流体のレイノルズ数を用いることにより、管種、管径、粘度によらず、水の場合と同様に算出することができる。
- ②乱流域の圧力損失は、管種、管径によらず、擬塑性流体のレイノルズ数を用いても水の場合と同様の公式では予測できない。
- ③滑管乱流域の圧力損失は、Dodge-Metzner の提案した式を用いることにより概ね予測可能である。ただし、 n の小さい領域 (特に管径の小さい場合) では予測精度が低い。予測精度を上げるためには、式中の係数を下水汚泥の実験値から再評価する必要がある。
- ④粗管乱流域の圧力損失は、滑管の場合と比べ n による影響が小さく、 f と Re_p の関係は、 Re_p が大きくなるにつれ、水の場合の予測式に漸近する傾向が見られた。ここでは、指数関数により表現を試みたが、式中の係数に汎用性を持たせるためには、各種の粗度に対する検討が必要である。
- ⑤臨界レイノルズ数については、 n が小さいほど小さくなる傾向がみられた。その値は、およそ $3500 > Re_{pcr} > 1000$ の範囲にあった。

5. 汚泥輸送実験（実験3）

第5章では、平成7年度に実施された実験3の結果をとりまとめた。実験3では、実験2の結果を踏まえ次の内容について検討した。

①滑管乱流域における Dodge-Metzner 式の係数の再評価

②粗管乱流域における予測方法の再検討

5. 1 実 験

5. 1. 1 実験方法

（一般的事項） 第2章を参照。

（特記事項） 実験は、汚泥輸送実験装置 LOOP2 のみにより行った。圧力損失測定部の概要は表 4-1 の通りである。汚泥は1回の実験につき約 800L を調整し、これを循環使用した。供試汚泥の粘度は、回転粘度計 (RV20)により測定した。また、臨界流速 V_{cr} は、透明管の目視観察および V - H_f グラフの変曲点から判断した。実験3では、清水を用いた予備実験1回を含めて、8回の輸送実験を実施した。表 5-1 に供試汚泥等の概要を示す。

表 5-1 供試汚泥等の概要

RUN	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	温度 [°C]	密度 [kg/m ³]	擬塑性粘度* [Pa·s ⁿ]	構造粘度指数 [-]
3-a	清水	-	-	14	-	0.0012	1
3-1	余剰	0.8	78.5	14	1001	0.0046	0.872
3-2	余剰+脱水	2.4	72.6	8	1010	0.171	0.447
3-3	余剰+脱水	3.4	72.2	15	1012	0.378	0.422
3-4	余剰+脱水	4.5	70.7	7	1014	1.17	0.366
3-5	余剰	0.7	71.7	14	1002	0.0049	0.898
3-6	余剰+脱水	2.5	73.4	16	1008	0.240	0.428
3-7	余剰+脱水	4.0	74.2	8	1013	0.929	0.401

*: 清水についての粘度は測定値ではなく、文献値。

5. 1. 2 実験結果

実験結果について、表 5-2 ～ 5-3、図 5-1 ～ 5-2 に示す。ここで f の実験値は実験1、2と同様に式 (3-1) により、 Rep は式 (1-11)から求める。また、臨界流速、臨界レイノルズ数の測定結果について表 5-4 に示す。臨界レイノルズ数 Re_{pcr} は、臨界流速 V_{cr} を式 (1-11)に代入して求めた。

表 5-2 LOOP2(A)における実験結果

Run 3-A 960116				Run 3-1 960117				Run 3-2 960118			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.65	119	0.0259	52153	0.64	122	0.0270	21416	0.65	158	0.0341	2941
0.80	177	0.0252	64430	0.81	185	0.0262	27561	0.81	225	0.0315	4111
0.97	253	0.0247	77948	0.97	262	0.0257	33925	0.97	306	0.0301	5416
1.13	336	0.0243	90467	1.12	347	0.0255	39985	1.13	393	0.0284	6881
1.28	425	0.0240	102547	1.28	441	0.0249	46309	1.28	512	0.0289	8338
1.44	536	0.0238	115584	1.44	551	0.0246	52934	1.44	626	0.0277	10072
1.59	641	0.0234	127400	1.59	665	0.0242	59343	1.59	744	0.0270	11736
1.74	762	0.0232	139505	1.74	791	0.0240	65741	1.74	863	0.0263	13423
1.89	891	0.0231	151305	1.88	924	0.0240	71800	1.89	996	0.0258	15258
2.04	1033	0.0229	163454	2.03	1069	0.0238	78342	2.04	1144	0.0253	17241
2.19	1181	0.0228	175320	2.19	1218	0.0235	84963	2.18	1282	0.0248	19124
2.33	1343	0.0227	187069	2.33	1374	0.0233	91341	2.35	1436	0.0240	21427
2.46	1486	0.0227	197017	2.45	1504	0.0230	96684	2.44	1570	0.0243	22762

Run 3-3 960118				Run 3-4 960119				Run 3-5 960123			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.65	204	0.0443	1459	0.65	401	0.0862	590	0.64	122	0.0271	18154
0.81	269	0.0380	2044	0.81	449	0.0624	841	0.80	183	0.0264	23084
0.97	347	0.0340	2734	0.98	506	0.0485	1141	0.96	261	0.0258	28378
1.12	436	0.0318	3447	1.14	568	0.0404	1456	1.12	347	0.0256	33357
1.28	547	0.0307	4241	1.29	656	0.0361	1796	1.27	440	0.0250	38504
1.43	658	0.0296	5053	1.45	794	0.0349	2156	1.43	548	0.0245	43943
1.58	783	0.0287	5933	1.59	922	0.0337	2504	1.58	652	0.0240	48906
1.72	915	0.0286	6723	1.74	1066	0.0325	2910	1.73	777	0.0239	54086
1.88	1066	0.0279	7750	1.89	1238	0.0318	3346	1.88	911	0.0237	59287
2.03	1222	0.0273	8769	2.05	1411	0.0310	3797	2.04	1056	0.0234	64673
2.20	1392	0.0266	9941	2.20	1584	0.0301	4277	2.19	1206	0.0231	70107
2.35	1578	0.0264	11013	2.34	1781	0.0299	4728	2.33	1359	0.0230	75114
2.45	1722	0.0264	11825	2.46	1940	0.0295	5130	2.46	1502	0.0228	79676

Run 3-6 960123				Run 3-7 960124			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.65	164	0.0363	2203	0.65	405	0.0884	642
0.80	233	0.0332	3118	0.81	453	0.0636	914
0.97	311	0.0303	4196	0.98	506	0.0487	1235
1.13	386	0.0281	5283	1.13	565	0.0405	1564
1.28	478	0.0270	6452	1.29	638	0.0352	1927
1.44	618	0.0276	7751	1.45	741	0.0325	2316
1.59	729	0.0267	9051	1.60	849	0.0306	2706
1.73	848	0.0261	10396	1.75	995	0.0299	3134
1.89	978	0.0253	11901	1.90	1141	0.0290	3576
2.04	1097	0.0244	13412	2.06	1297	0.0283	4047
2.18	1234	0.0240	14917	2.19	1452	0.0279	4483
2.32	1394	0.0238	16504	2.33	1610	0.0273	4952
2.46	1537	0.0234	18033	2.46	1760	0.0267	5412

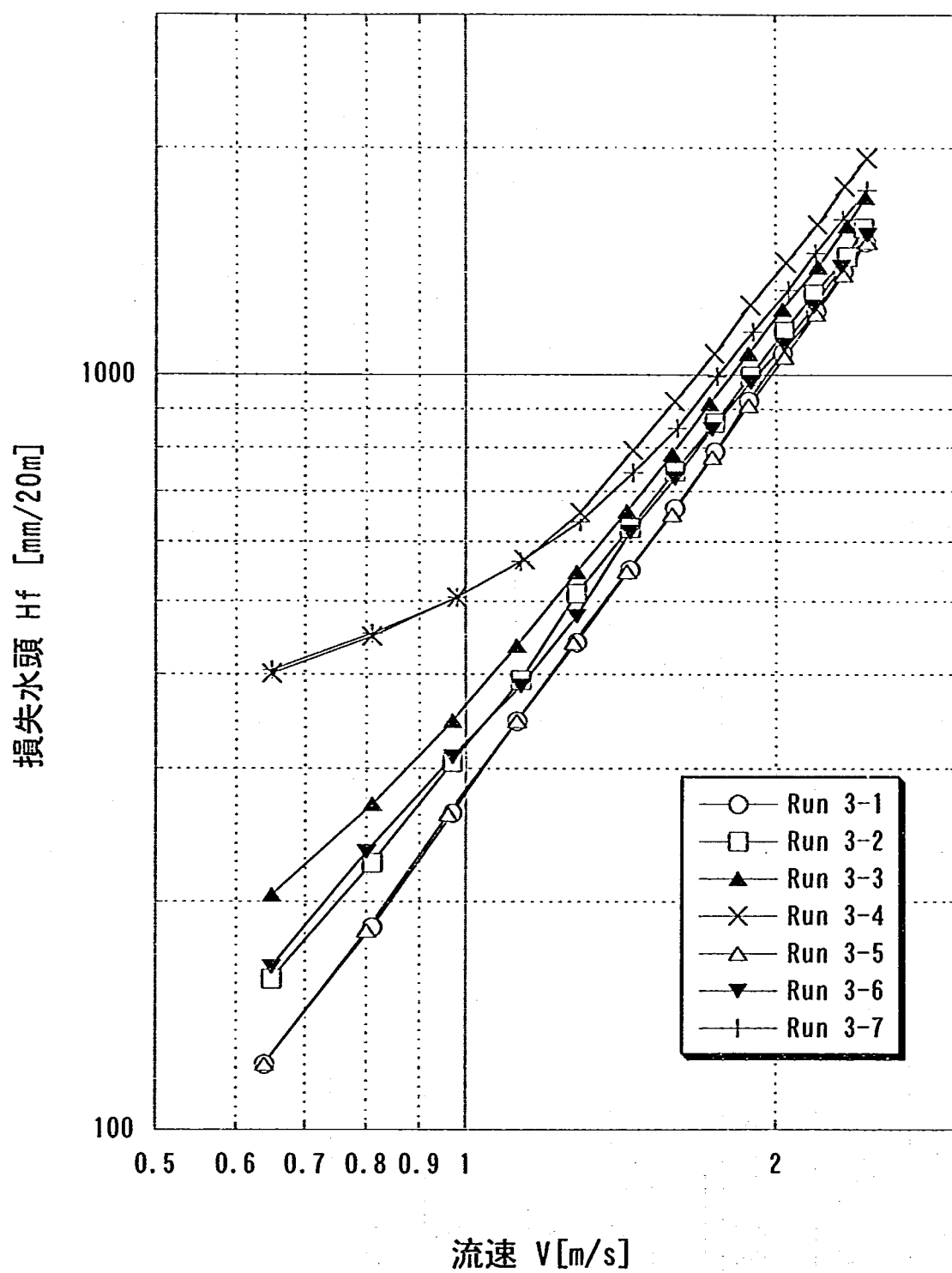


図 5-1 LOOP 2(A) における実験結果

表 5-3 LOOP2(B)における実験結果

Run 3-A 960116				Run 3-1 960117				Run 3-2 960118			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.49	36	0.0157	45392	0.49	45	0.0200	17674	0.50	66	0.0283	2033
0.61	58	0.0167	56078	0.61	75	0.0214	22746	0.61	103	0.0290	2842
0.74	87	0.0169	67844	0.73	105	0.0207	27998	0.73	158	0.0310	3744
0.85	117	0.0170	78740	0.85	136	0.0200	32999	0.86	190	0.0275	4757
0.97	150	0.0169	89254	0.97	173	0.0195	38218	0.97	242	0.0273	5764
1.09	189	0.0168	100601	1.09	214	0.0191	43686	1.09	289	0.0256	6963
1.20	228	0.0167	110885	1.20	256	0.0187	48975	1.21	336	0.0244	8113
1.32	270	0.0165	121421	1.32	303	0.0184	54255	1.32	384	0.0235	9280
1.43	316	0.0164	131691	1.43	350	0.0182	59255	1.43	434	0.0225	10548
1.54	364	0.0162	142266	1.54	400	0.0178	64655	1.55	489	0.0217	11919
1.66	415	0.0160	152593	1.66	454	0.0175	70119	1.65	552	0.0214	13221
1.77	468	0.0159	162820	1.77	508	0.0172	75383	1.78	609	0.0204	14813
1.86	515	0.0157	171478	1.86	554	0.0170	79792	1.85	659	0.0204	15736

Run 3-3 960118				Run 3-4 960119				Run 3-5 960123			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.49	128	0.0556	998	0.50	295	0.1267	394	0.49	46	0.0207	15140
0.61	142	0.0404	1398	0.62	321	0.0895	562	0.61	77	0.0222	19252
0.73	192	0.0377	1870	0.74	347	0.0665	763	0.73	107	0.0212	23667
0.85	231	0.0337	2358	0.86	372	0.0529	973	0.85	139	0.0205	27820
0.97	290	0.0326	2901	0.98	394	0.0434	1200	0.96	174	0.0199	32113
1.08	344	0.0309	3456	1.10	415	0.0365	1441	1.09	216	0.0194	36648
1.20	405	0.0298	4058	1.20	445	0.0326	1673	1.20	257	0.0189	40788
1.30	461	0.0289	4599	1.32	526	0.0321	1945	1.31	301	0.0185	45108
1.42	522	0.0273	5301	1.44	630	0.0324	2236	1.43	349	0.0181	49445
1.54	579	0.0259	5998	1.55	711	0.0313	2538	1.54	400	0.0178	53937
1.66	648	0.0247	6800	1.67	793	0.0302	2859	1.66	451	0.0173	58469
1.78	722	0.0242	7533	1.77	887	0.0298	3160	1.77	503	0.0170	62645
1.86	784	0.0240	8088	1.86	963	0.0293	3429	1.86	551	0.0168	66449

Run 3-6 960123				Run 3-7 960124			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.49	99	0.0438	1512	0.49	305	0.1331	435
0.61	107	0.0304	2139	0.61	331	0.0930	620
0.74	165	0.0322	2878	0.74	356	0.0687	837
0.85	199	0.0290	3624	0.86	377	0.0540	1061
0.97	241	0.0272	4426	0.98	398	0.0439	1306
1.09	304	0.0272	5317	1.10	415	0.0364	1571
1.20	352	0.0259	6209	1.21	429	0.0310	1835
1.31	402	0.0247	7132	1.33	458	0.0276	2125
1.43	454	0.0235	8164	1.44	549	0.0280	2425
1.54	505	0.0225	9201	1.56	634	0.0277	2744
1.65	558	0.0217	10233	1.66	705	0.0271	3040
1.76	611	0.0209	11321	1.77	776	0.0263	3358
1.86	664	0.0203	12370	1.87	845	0.0257	3670

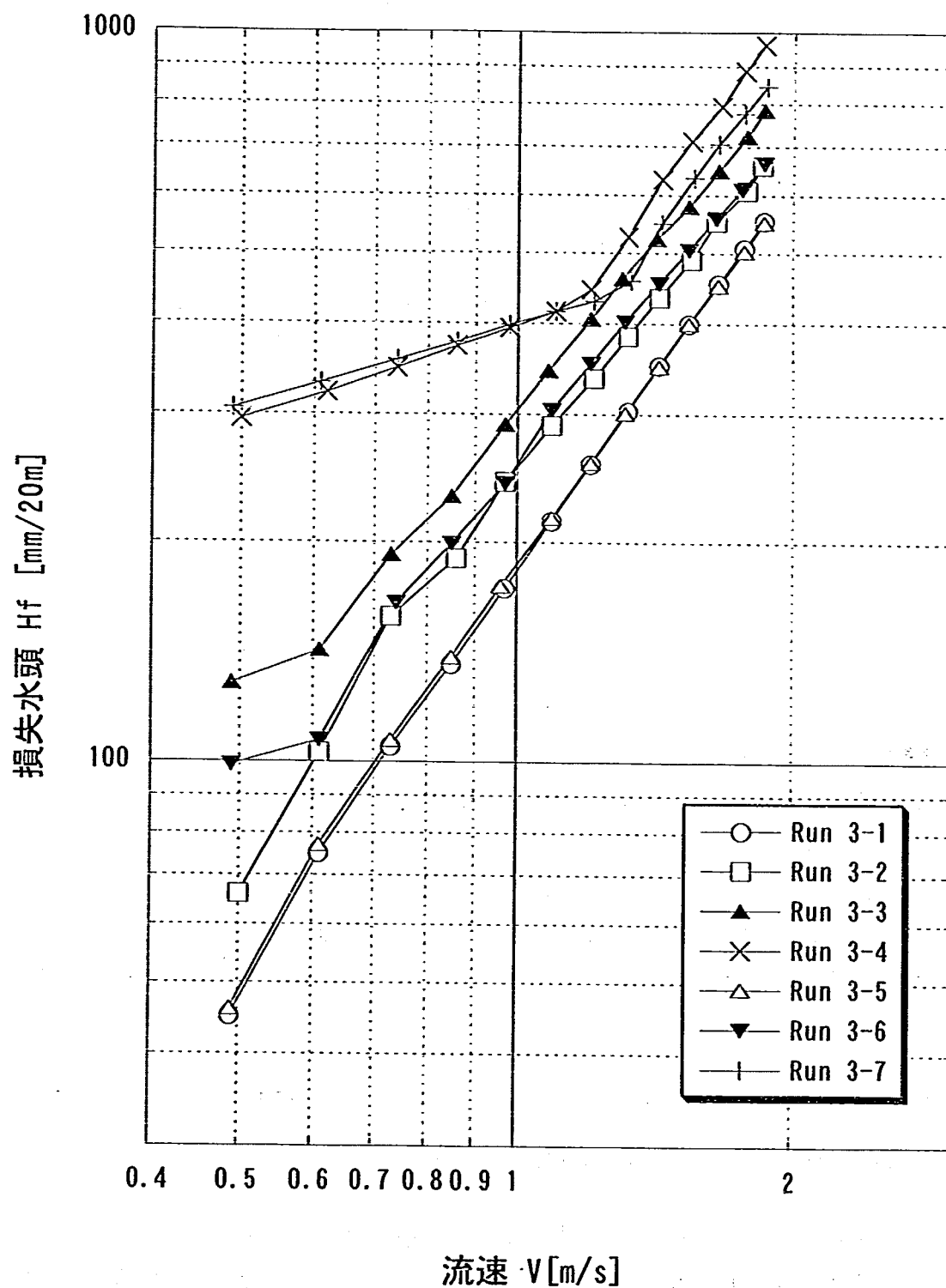


図 5-2 LOOP 2(B) における実験結果

表 5-4 臨界流速、臨界レイノルズ数の測定結果

Run No.	LOOP2(A)			LOOP2(B)		
	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考
3-1	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
3-2	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
3-3	-	-	全て乱流	0.61	1398	
3-4	1.29	1796		1.20	1673	
3-5	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
3-6	-	-	全て乱流	0.61	2139	
3-7	1.45	2316		1.33	2125	

5. 2 考 察

5. 2. 1 滑管乱流域の圧力損失

LOOP2(B)の乱流域における摩擦損失係数 f と擬塑性流体のレイノルズ数 Re_p との関係について図 5-3 に、また f の実験値と Dodge-Metzner 式による計算値を比較したものを図 5-4 に示す。これらの図から、実験3の結果も、実験2の結果と同様であることが理解できる。計算値と実験値との誤差率は、水の公式を用いた場合(図 5-3)は、最大 50%程度、Dodge-Metzner 式を用いた場合(図 5-4)、最大 20%程度であった。

本項では下水汚泥の管路輸送実験の結果を用いて Dodge-Metzner 式中の係数の再評価を行う。著者らは、実験3における実験結果のみを用いて再評価を行い、既に次のような予測式を提案している¹⁹⁾。

$$1/\sqrt{f} = An \log_{10} (Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2}) - Bn \quad (5-1)$$

$$\text{ここで、} An = 1.53/n^{0.642}, \quad Bn = (-1.96)/n^{(-1.34)}, \quad (0.2 < n < 0.9)$$

ここではさらに、実験3だけでなく、実験2の結果も加えて、Dodge-Metzner 式中の係数の再評価を行う。再評価の方法は、まず各 Run ごとに、 $\log_{10} (Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2})$ および $1/\sqrt{f}$ を計算し、回帰直線の傾きと切片を求める。これらがそれぞれ Dodge-Metzner の係数 An , Bn に相当する。ここで臨界領域のデータについては除外して回帰分析を行った。また Run 2-8, 3-4, 3-7 も乱流域のデータ数が十分でないため、検討から除外した。各 Run における $\log_{10} (Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2})$ と $1/\sqrt{f}$ との関係を 図 5-5 ～ 5-7 に示す。

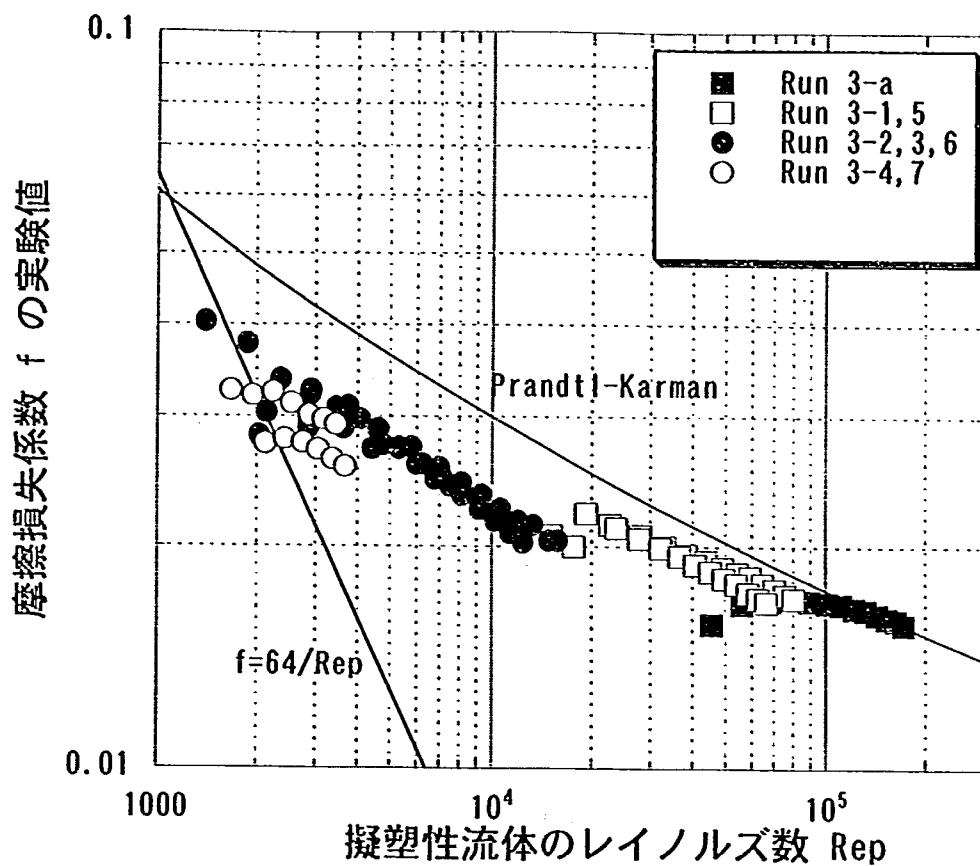


図 5-3 滑管乱流域における Rep と f の関係 (LOOP 2(B))

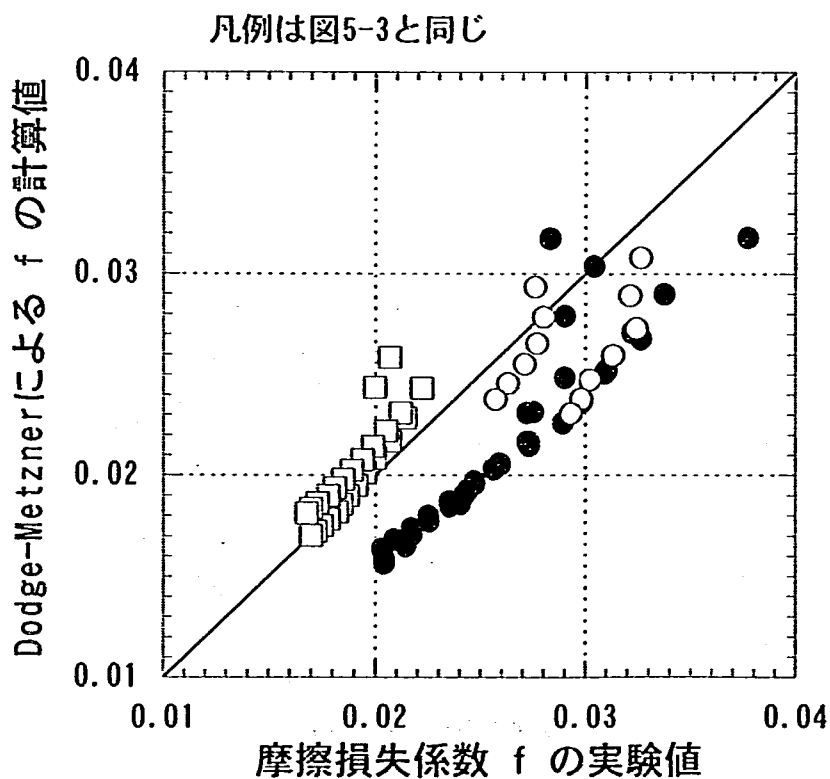


図 5-4 Dodge-Metzner 式による f の予測 (LOOP 2(B))

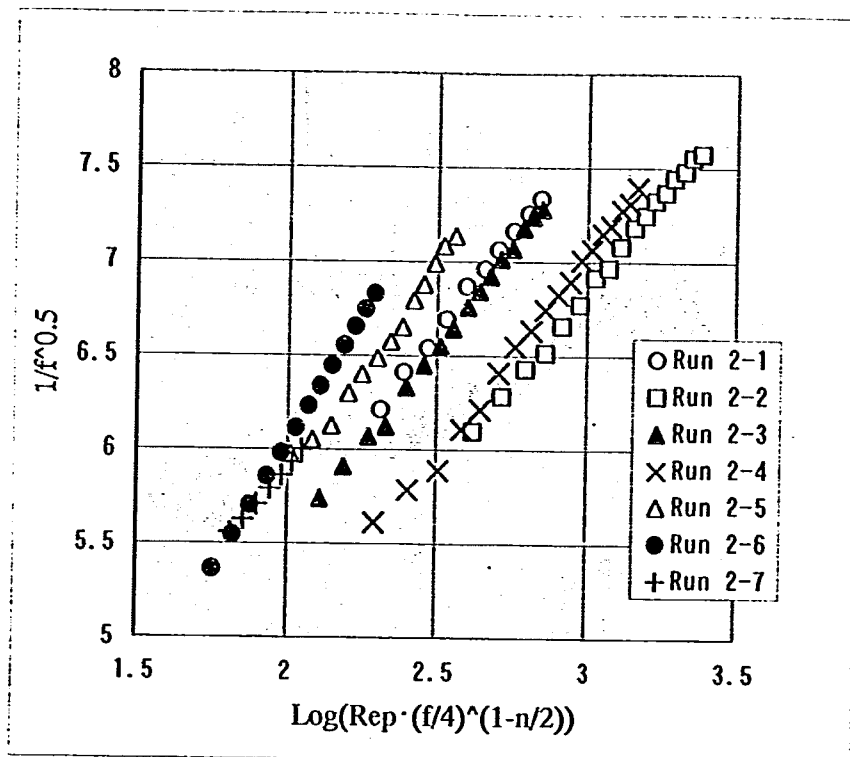


図 5-5 Dodge-Metzner 式の係数の算出 (実験2、LOOP 1)

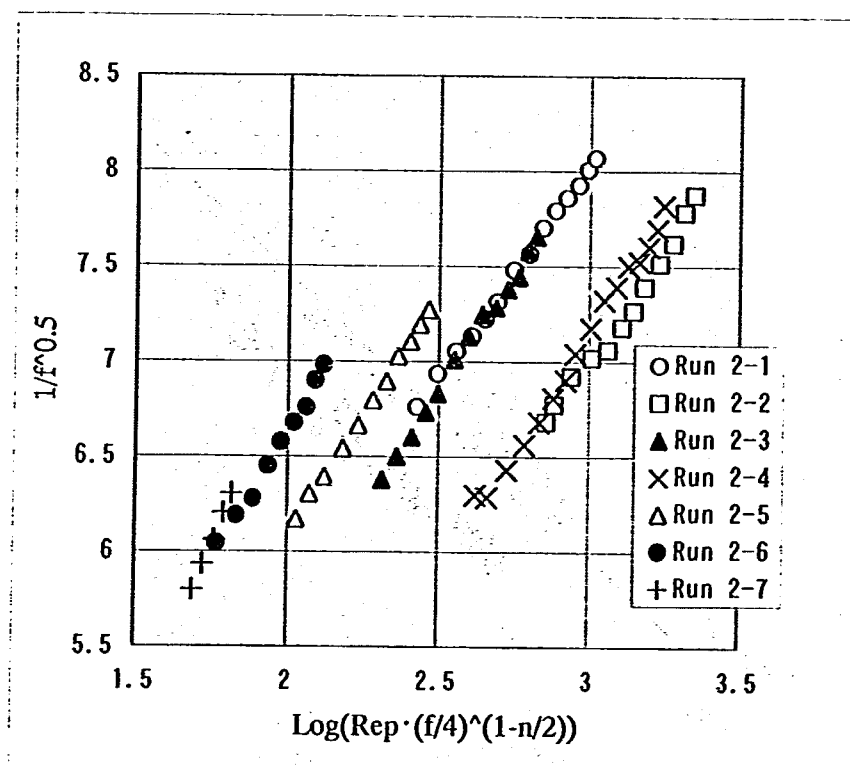


図 5-6 Dodge-Metzner 式の係数の算出 (実験2、LOOP 2(B))

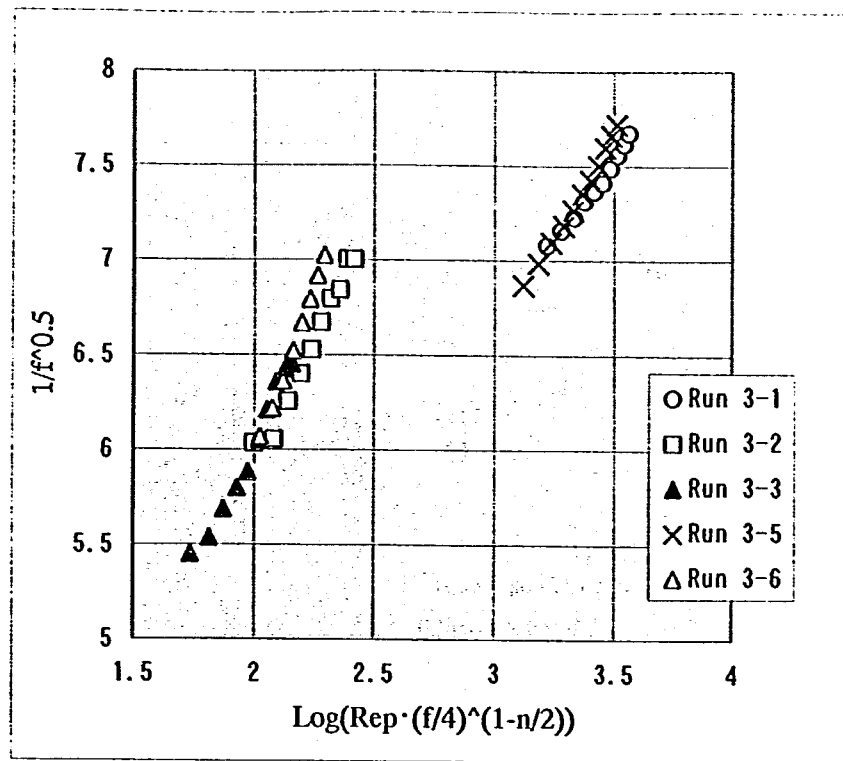


図 5-7 Dodge-Metzner 式の係数の算出 (実験3、LOOP 2(B))

次に、得られた係数 An , Bn を n で整理し、両者の関係を求める。 An , Bn と n との関係を図 5-8, 5-9 に示す。 An と n との関係については、Dodge-Metzner の方法と同様に、両者の対数をとって整理し、 $n = 1$ ($\log n = 0$) のときに $An = 2.0$ ($\log An = 0.30$) という条件を与えて回帰分析を行った。また、 Bn と n との関係については、値のばらつきが大きく、すべてのデータの対数をとることができなかったため、普通軸上で整理し、 $n = 1$ のときに $Bn = 0.20$ という条件を与えて回帰分析を行った。これらの結果、次のような関係式が得られた。

$$An = 2.0/n^{0.35}, \quad Bn = 1.8n - 1.6 \quad (5-2)$$

上式の係数を Dodge-Metzner 式に代入して摩擦損失係数を計算することとなる。また、この係数を用いた場合は、既提案の係数(式(5-1))と異なり、 $n=1$ のときに Prandtl-Karman 式と一致する。

係数の再評価により得られた式 (5-2)を用いる計算値と、Dodge-Metzner のオリジナルの係数(式 (4-1))を用いる計算値を比較したものが図 5-10 である。再評価式は、オリジナルに比べて n の値の変動による振れ幅が小さいものとなっていることが理解できる。

実験2, 3における f の実験値を、式 (5-2) を用いた f の計算値と比較したものが、図 5-11 ~ 5-13 である。いずれもオリジナルの係数を用いて計算した場合(図 4-8, 4-9, 5-4)より予測精度が向上しており、誤差率は概ね 10 %程度であった。(ただし臨界領域のデータを除く。また管径が小さく n も小さい場合は多少誤差が大きく、誤差率は 20%程度。)

以上の結果から、Dodge-Metzner 式の係数を汚泥輸送実験により再評価した予測式は、高濃度汚泥の場合でも、管径によらず精度よく滑管乱流域の圧力損失を予測できることが明らかとなった。

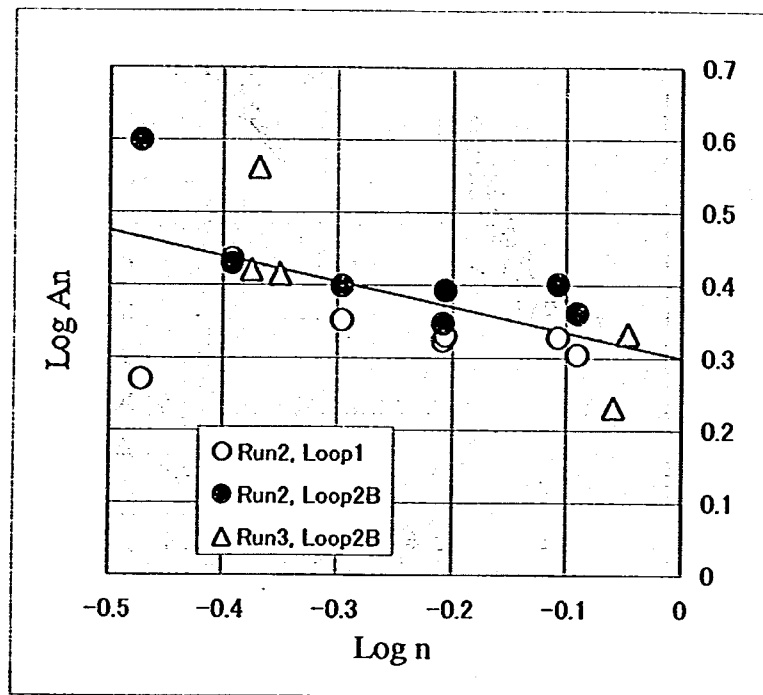


図 5-8 構造粘度指数 n と Dodge-Metzner 式の係数 A_n の関係

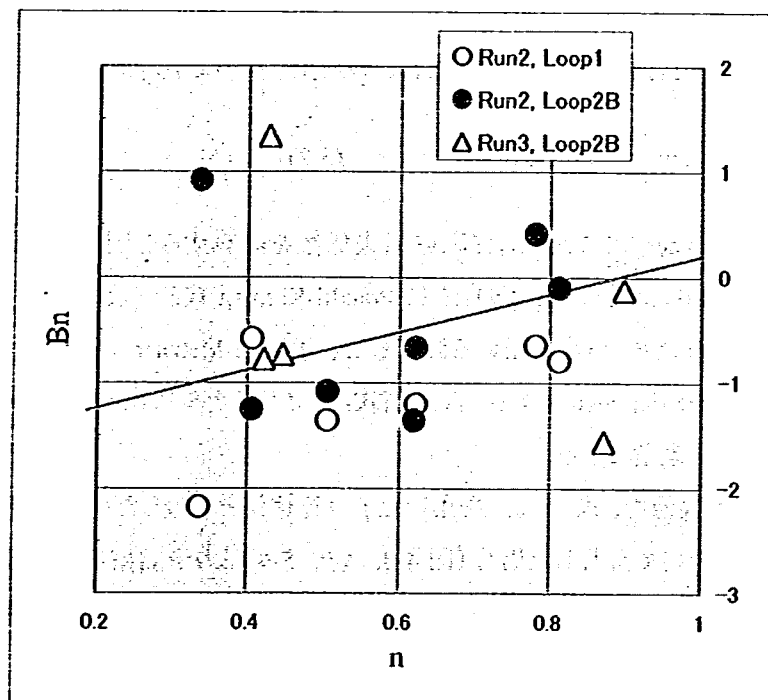


図 5-9 構造粘度指数 n と Dodge-Metzner 式の係数 B_n の関係

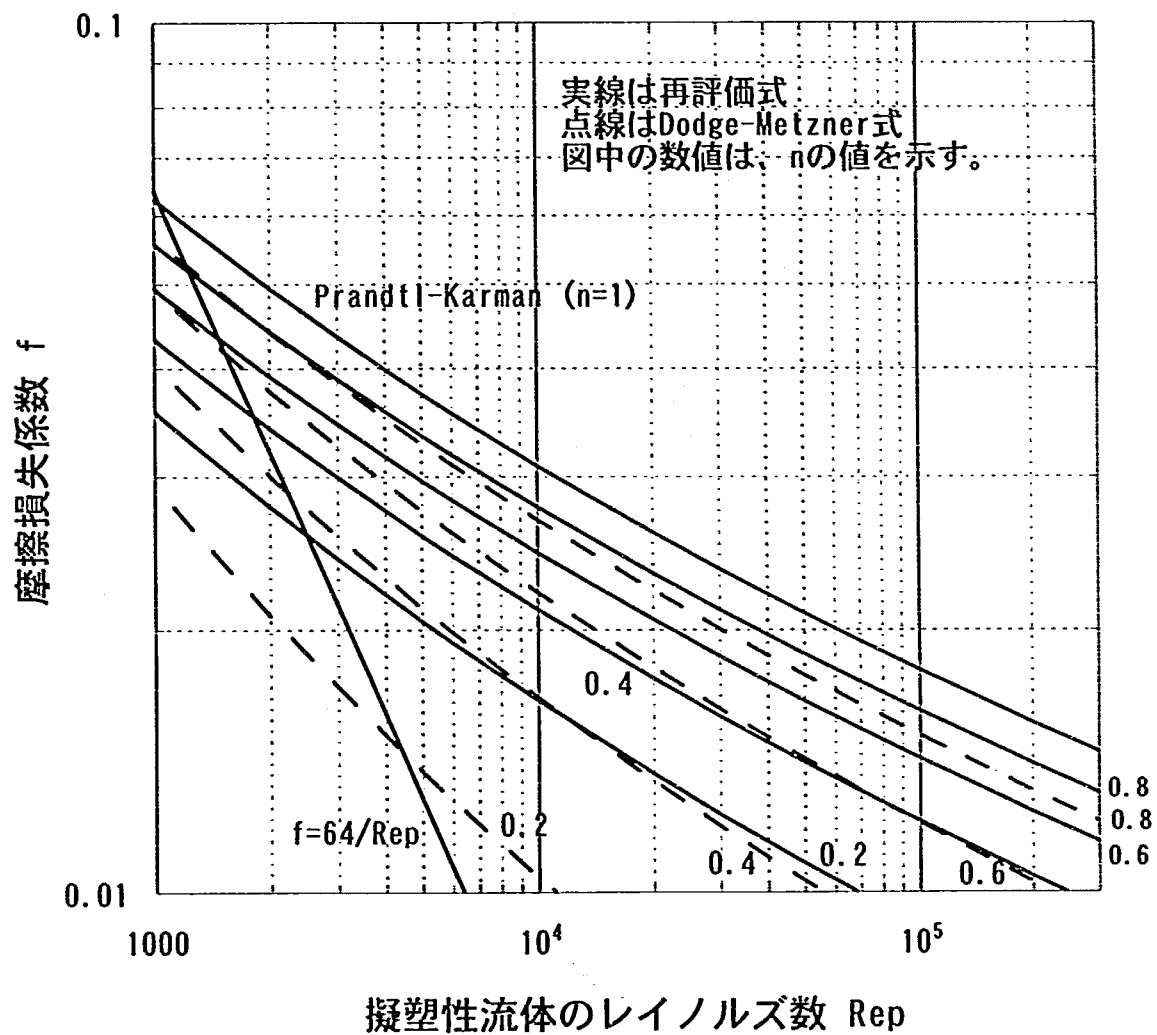


図 5-10 Dodge-Metzner 式の再評価式による摩擦損失係数の計算値

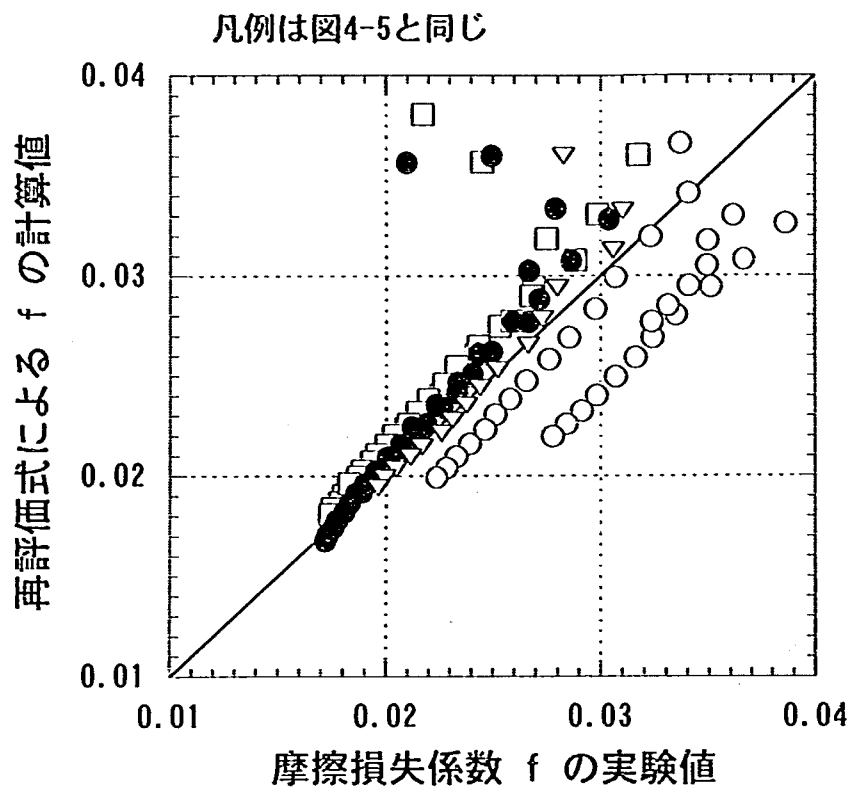


図 5-11 式 (5-2) による f の予測 (実験2、LOOP 1)

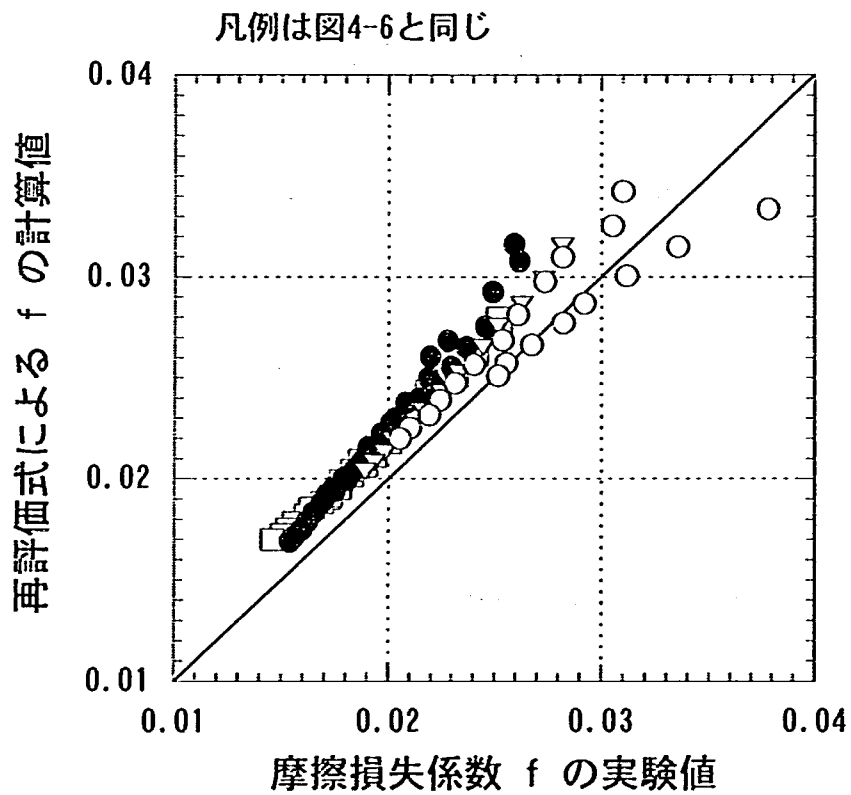


図 5-12 式 (5-2) による f の予測 (実験2、LOOP 2(B))

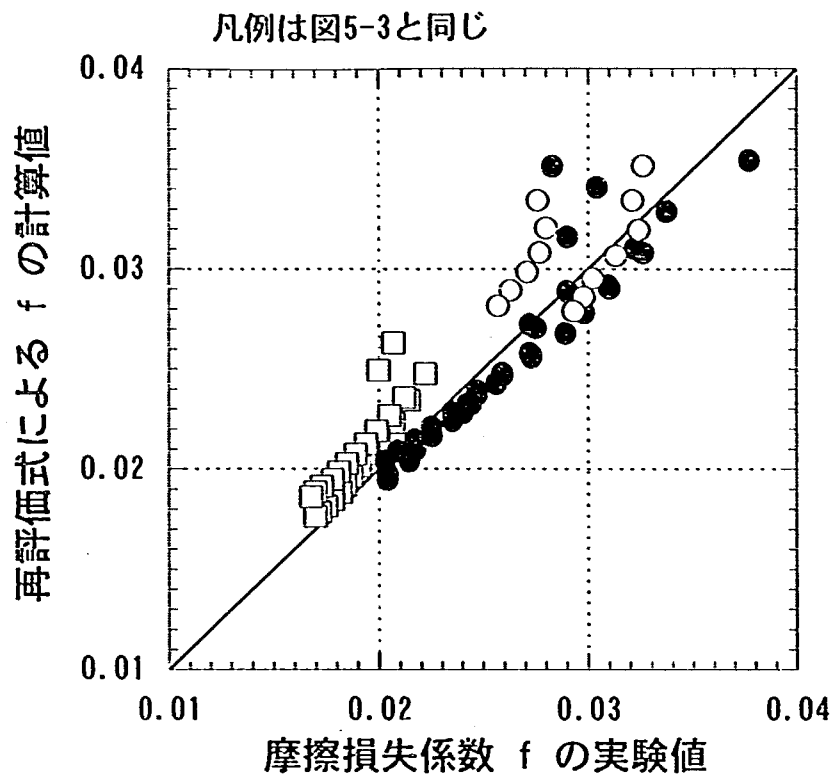


図 5-13 式 (5-2) による f の予測 (実験3、LOOP 2(B))

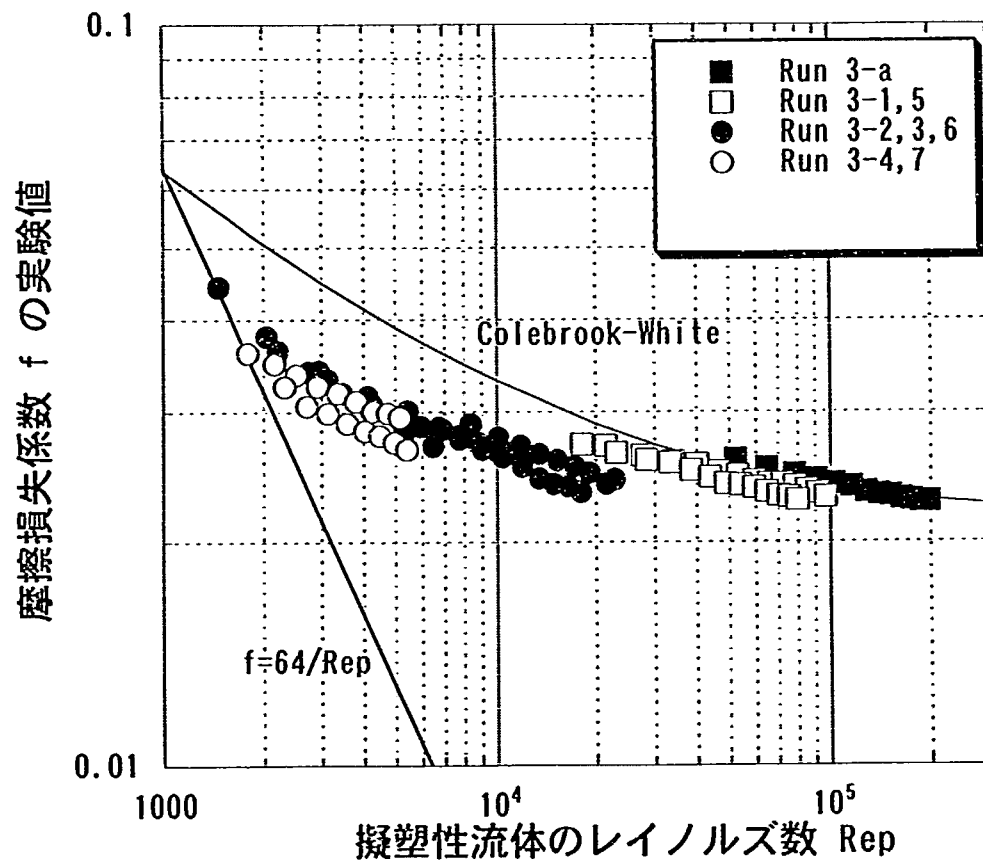


図 5-14 粗管乱流域における Rep と f の関係 (LOOP 2(A))

5. 2. 2 粗管乱流域の圧力損失

LOOP2(A)の乱流域における摩擦損失係数 f と擬塑性流体のレイノルズ数 Rep との関係について図 5-14 に示す。図から、実験3の結果も実験2の結果と同様であることが理解できる。

本項では、前項において滑管乱流域の予測式が導かれたことを受けて、これを粗管乱流域に適用することを考える。粗管乱流域における摩擦損失係数の実験値は n による影響を有しているものの、 Rep が大きくなるにつれ、清水の場合の予測式に漸近するという特徴を有している。そこで、清水の場合の Colebrook-White 式が、滑管乱流の式 (Prandtl-Karman 式) と完全乱流の式 ($1/\sqrt{f} = 1.74 - 2 \log_{10} (2 ks/d)$) の内挿形であることと同様に、下水汚泥の場合にも、滑管乱流の式と完全乱流の式の内挿式を用いることにより、摩擦損失係数が算出可能であると考えられる。

$Rep \rightarrow \infty$ のとき完全乱流の式、 $ks \rightarrow 0$ のとき滑管乱流の式 (式(5-2)) が得られるように式形を計算すると、次式が導かれる。

$$1/\sqrt{f} = 1.74 - 2 \log_{10} [(2 ks/d) + (Rep \cdot (f/4))^{1-n/2}]^{-An/2} \cdot 10^{0.87 + Bn/2} \quad (5-3)$$

$$\text{ここで、} An = 2.0/n^{0.35}, \quad Bn = 1.8n - 1.6$$

上式は式形が若干煩雑ではあるが、計算に当たって特段の支障はない。上式による $ks/d = 0.0015$ (DIP) の場合の f の計算値は図 5-15 のようになる。

実験2、3における粗管乱流域における f の実験値を、式 (5-3) による f の計算値と比較したものが図 5-16, 5-17 である。両者は概ね一致しており、誤差率は 10% 以下であった。

以上の結果から、粗管乱流域における圧力損失の予測は、既に得られている滑管乱流域の予測式と完全乱流の式から得られる内挿式により、管径によらず精度よく予測できることが明らかとなった。今後は各種の粗度に対する検証が必要である。

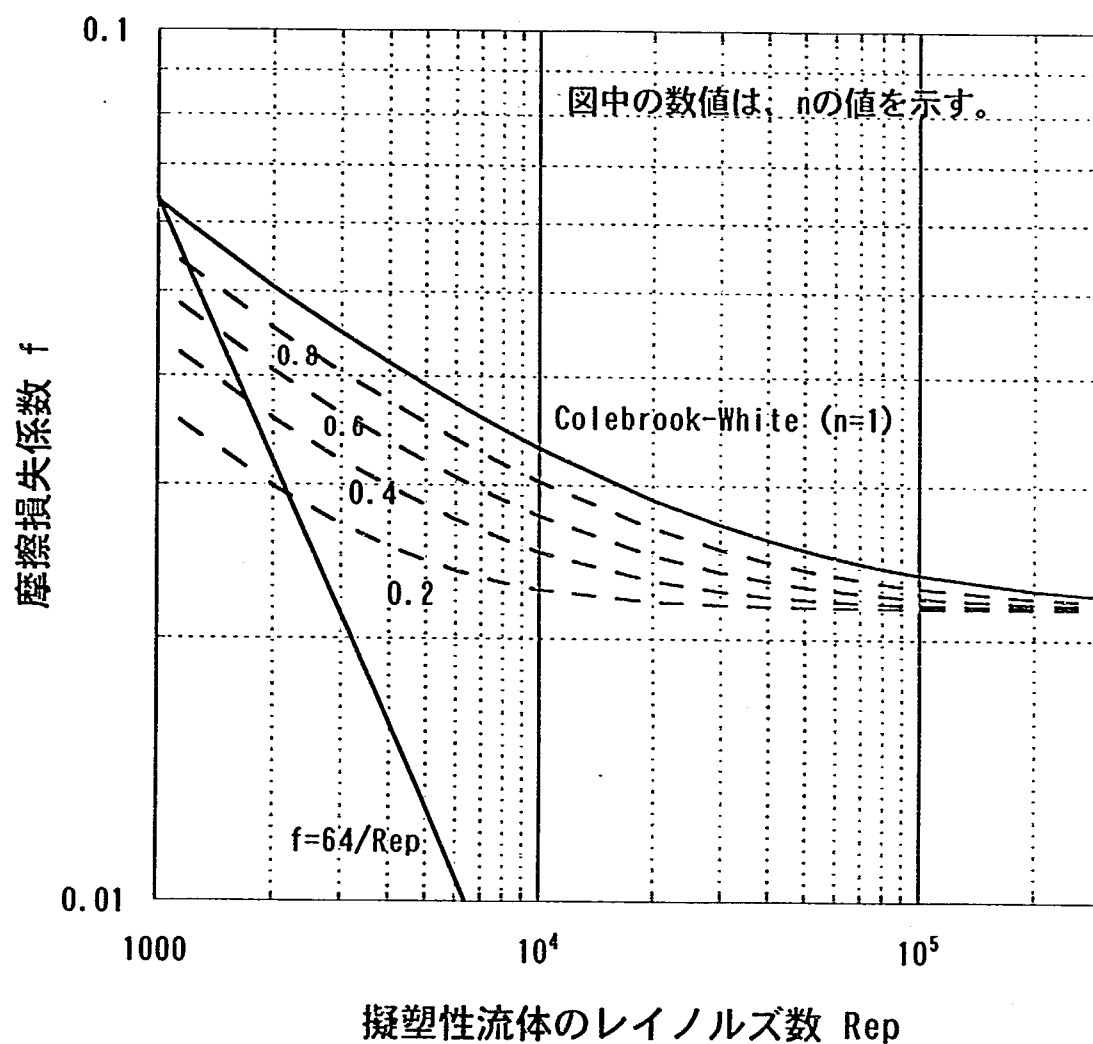


図 5-15 式 (5-3) による f の計算値 ($ks/d = 0.0015$ の場合)

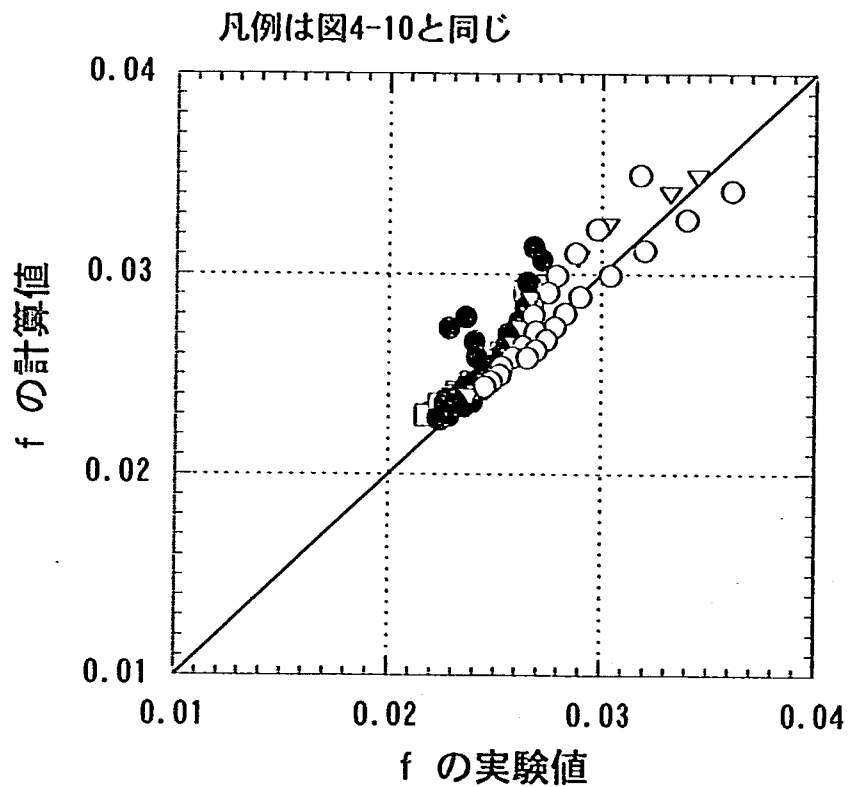


図 5-16 式 (5-3) による f の予測 (実験2、LOOP 2(A))

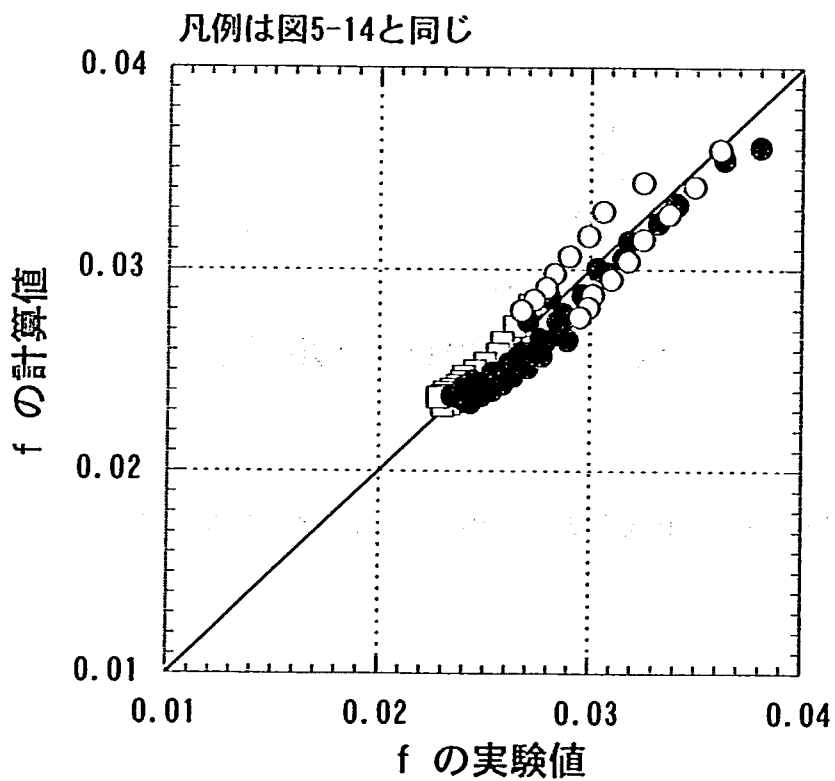


図 5-17 式 (5-3) による f の予測 (実験3、LOOP 2(A))

5.3 まとめ

① Dodge-Metzner 式の係数の再評価を行い、以下に示す圧力損失予測式を導いた。

$$\text{滑管乱流域} \quad 1/\sqrt{f} = An \log_{10} (Rep \cdot (f/4)^{1-n/2}) - Bn$$

$$\text{粗管乱流域} \quad 1/\sqrt{f} = 1.74 - 2 \log_{10} [(2 ks/d) + (Rep \cdot (f/4)^{1-n/2})^{-An/2} \cdot 10^{0.87 + Bn/2}]$$

$$\text{ここで} \quad An = 2.0/n^{0.35}, \quad Bn = 1.8n - 1.6$$

② 予測式は、高濃度汚泥の場合でも精度よく圧力損失を予測できる。その誤差率は概ね 10% 程度である。

ただし、層流と乱流の境界付近の圧力損失は正しく予測することができない。

③ 予測式は管径の影響を受けない。管種(粗度)の影響については、今後さらに検討が必要である。

6. 汚泥輸送実験（実験4, 5）

第6章では、平成7, 8年度に実施された実験4, 5の結果をとりまとめた。実験4, 5では、実験3までの結果を踏まえ次の内容について検討した。

①粗管乱流域における予測方法の再検討(管壁粗度の影響について)

②臨界レイノルズ数 Re_{pcr} について

6. 1 実 験

6. 1. 1 実験方法

(一般的事項) 第2章を参照。

(特記事項) 実験は、汚泥輸送実験装置 LOOP2 のみにより行った。圧力損失測定部の概要は表 6-1 の通りであり、実験4においては炭素鋼鋼管および硬質塩化ビニル管を、実験5においてはダクタイル鋳鉄管および陶管を用いた。

汚泥は1回の実験につき約 800L を調整し、これを循環使用した。供試汚泥の粘度は、回転粘度計(RV20)により測定した。また、臨界流速 V_{cr} は、透明管の目視観察および V - H_f グラフの変曲点から判断した。実験4では、清水を用いた予備実験1回を含めて、6回の輸送実験を実施した。実験5では、清水を用いた予備実験1回を含めて、9回の輸送実験を実施した。表 6-2 に供試汚泥等の概要を示す。

表 6-1 測定部の概要

	実験4		実験5	
	LOOP2 (A)	LOOP2 (B)	LOOP2 (A)	LOOP2 (B)
管材質	STPG	VP	DIP	CP
管延長	20m	20m	20m	20m
助走部	2m	2m	2m	2m
管内径	0.106m	0.100m	0.103m	0.099m
管壁	粗い	やや粗い	粗い	やや粗い
相対粗度*	0.01	0.0003	0.0045	0.0006
流速係数*	100	145	115	140
最大流速	1.9 m/s	2.2 m/s	2.0 m/s	2.2 m/s
最小流速	0.5 m/s	0.6 m/s	0.5 m/s	0.6 m/s

*: 予備実験の結果から算出。

表 6-2 供試汚泥等の概要

実験4

RUN	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	温度 [°C]	密度 [kg/m ³]	擬塑性粘度* [Pa・s ^a]	構造粘度指数 [-]
4-a	清水	-	-	22	-	0.00096	1
4-1	余剰	1.1	76.8	23	1004	0.0200	0.606
4-2	余剰+脱水	1.9	70.7	23	1009	0.0410	0.579
4-3	余剰+脱水	2.9	68.2	24	1013	0.194	0.463
4-4	余剰+脱水	3.9	68.3	30	1005	0.401	0.444
4-5	余剰+脱水	4.9	70.9	40	1006	0.590	0.471

実験5

RUN	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	温度 [°C]	密度 [kg/m ³]	擬塑性粘度* [Pa・s ^a]	構造粘度指数 [-]
5-a	清水	-	-	14	-	0.00117	1
5-1	余剰+脱水	1.1	72.3	14	1004	0.0146	0.795
5-2	余剰+脱水	2.0	70.0	12	1006	0.0366	0.678
5-3	余剰+脱水	3.0	69.2	16	1001	0.102	0.599
5-4	余剰+脱水	4.0	69.1	14	1015	0.454	0.475
5-5	余剰	0.3	77.3	15	1005	0.0194	0.597
5-6	余剰+脱水	1.6	74.3	6	1007	0.219	0.388
5-7	余剰+脱水	3.0	73.8	11	1009	0.405	0.379
5-8	余剰+脱水	4.0	73.2	11	1014	0.824	0.407

*: 清水についての粘度は測定値ではなく、文献値。

6. 1. 2 実験結果

実験4の結果について、表 6-3 ~ 6-4、図 6-1 ~ 6-2 に、実験5の結果について、表 6-5 ~ 6-6、図 6-3 ~ 6-4 に示す。また、臨界流速、臨界レイノルズ数の測定結果について表 6-7 に示す。

表 6-3 STPGにおける実験結果

Run 4-A 960709				Run 4-1 960709				Run 4-2 960710			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.51	102	0.0405	55892	0.51	99	0.0398	10364	0.51	97	0.0391	5539
0.63	152	0.0397	68993	0.63	154	0.0407	13874	0.63	157	0.0409	7544
0.75	215	0.0394	82491	0.75	217	0.0399	17854	0.75	219	0.0402	9675
0.88	289	0.0387	96331	0.87	292	0.0398	21984	0.88	295	0.0396	12078
0.99	365	0.0385	108672	1.00	381	0.0396	26550	0.99	377	0.0395	14382
1.11	455	0.0381	121964	1.13	483	0.0396	31348	1.12	470	0.0389	17030
1.23	555	0.0378	135070	1.23	575	0.0393	35583	1.23	566	0.0387	19490
1.35	659	0.0377	147442	1.35	688	0.0392	40335	1.35	676	0.0384	22239
1.47	782	0.0377	160704	1.47	809	0.0391	45289	1.47	784	0.0378	25004
1.58	900	0.0374	173076	1.58	930	0.0388	50167	1.59	914	0.0377	27909
1.70	1036	0.0372	186091	1.70	1065	0.0384	55487	1.70	1044	0.0373	30906
1.81	1175	0.0371	198463	1.81	1204	0.0380	60916	1.83	1182	0.0368	34110
1.90	1294	0.0374	207627	1.90	1321	0.0381	64858	1.93	1300	0.0364	36744

Run 4-3 960710				Run 4-4 960711				Run 4-5 960711			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.51	111	0.0447	1753	0.51	157	0.0634	901	0.50	303	0.1255	548
0.63	145	0.0379	2440	0.63	180	0.0475	1258	0.62	325	0.0884	756
0.76	209	0.0380	3222	0.75	210	0.0385	1671	0.74	354	0.0668	1000
0.88	283	0.0378	4075	0.87	248	0.0338	2096	0.86	384	0.0538	1255
0.99	363	0.0381	4913	0.99	299	0.0315	2565	0.98	420	0.0459	1518
1.13	461	0.0377	5943	1.11	369	0.0309	3068	1.10	452	0.0390	1820
1.24	553	0.0376	6861	1.23	442	0.0302	3598	1.21	495	0.0351	2114
1.36	669	0.0375	7960	1.35	549	0.0314	4131	1.32	546	0.0324	2419
1.48	785	0.0374	9015	1.46	654	0.0321	4653	1.44	605	0.0304	2748
1.59	912	0.0373	10133	1.57	771	0.0327	5215	1.54	688	0.0301	3056
1.70	1054	0.0379	11188	1.69	899	0.0326	5894	1.66	793	0.0300	3416
1.81	1198	0.0378	12367	1.79	1027	0.0333	6425	1.77	899	0.0297	3789
1.92	1316	0.0372	13458	1.88	1149	0.0336	6960	1.87	990	0.0293	4124

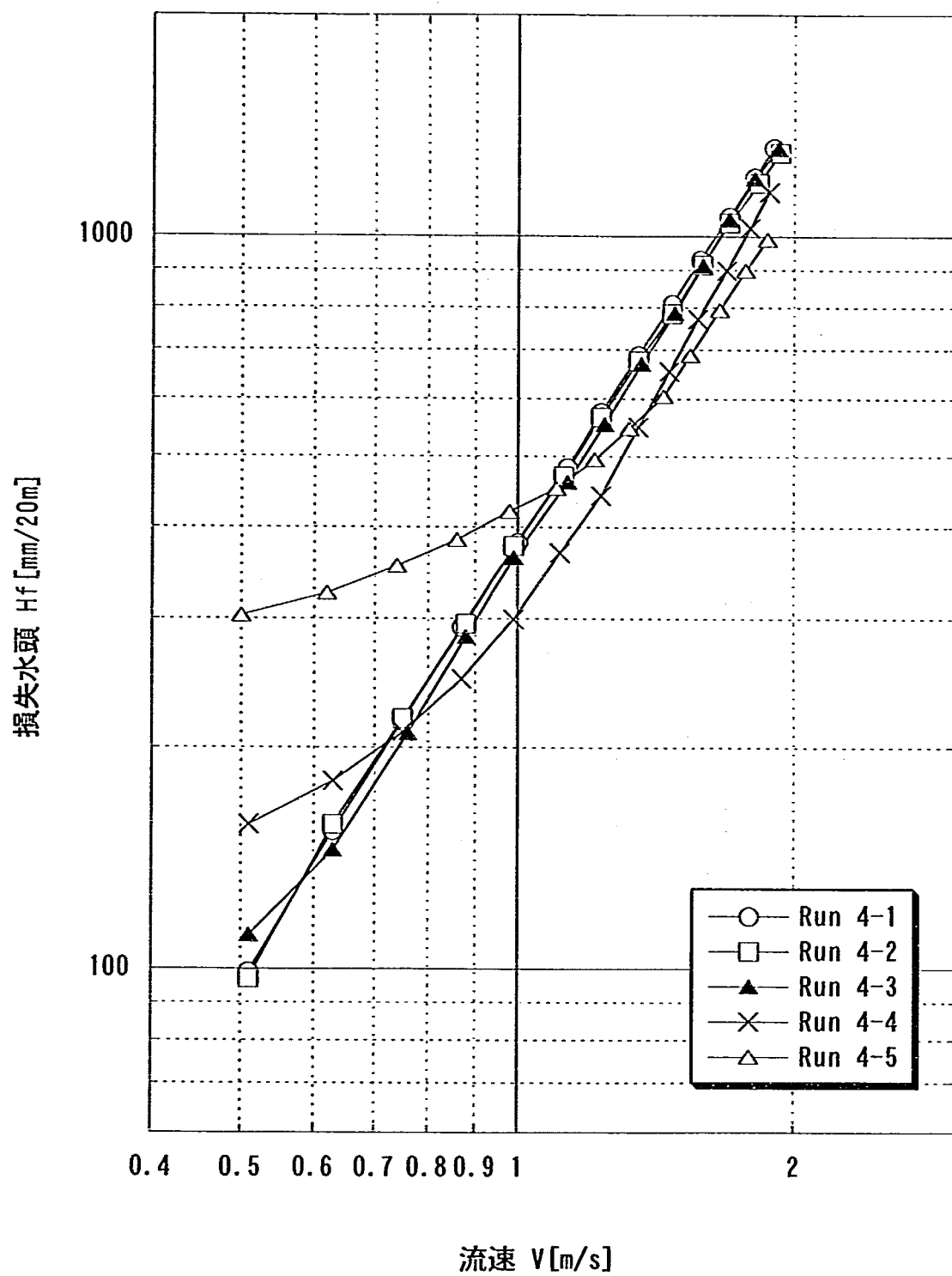


図 6-1 STPGにおける実験結果

表 6-4 VPにおける実験結果

Run 4-A 960709				Run 4-1 960709				Run 4-2 960710			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.57	74	0.0219	59246	0.57	83	0.0248	11769	0.57	94	0.0281	6319
0.71	107	0.0209	73133	0.71	122	0.0240	15754	0.71	139	0.0271	8607
0.85	147	0.0201	87440	0.85	171	0.0235	20274	0.85	199	0.0273	11038
0.99	196	0.0196	102111	0.98	221	0.0225	24963	0.99	242	0.0242	13780
1.12	242	0.0191	115193	1.12	275	0.0214	30149	1.12	300	0.0236	16408
1.25	300	0.0188	129282	1.27	335	0.0205	35597	1.26	374	0.0231	19429
1.39	359	0.0183	143174	1.39	388	0.0198	40406	1.38	440	0.0225	22236
1.51	422	0.0181	156289	1.52	447	0.0190	45802	1.52	511	0.0217	25373
1.65	494	0.0178	170346	1.65	515	0.0186	51428	1.65	574	0.0207	28527
1.78	564	0.0175	183460	1.77	583	0.0182	56967	1.78	649	0.0200	31841
1.91	645	0.0173	197256	1.91	656	0.0177	63007	1.92	723	0.0193	35261
2.04	728	0.0172	210371	2.04	731	0.0172	69172	2.05	798	0.0186	38916
2.13	786	0.0170	220085	2.13	792	0.0171	73649	2.16	866	0.0181	41920

Run 4-3 960710				Run 4-4 960711				Run 4-5 960711			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.57	114	0.0342	2041	0.57	228	0.0688	1053	0.56	470	0.1454	637
0.71	132	0.0257	2841	0.71	247	0.0487	1470	0.69	498	0.1012	879
0.85	220	0.0298	3751	0.85	266	0.0364	1952	0.83	521	0.0734	1163
0.99	279	0.0279	4745	0.98	285	0.0291	2448	0.97	547	0.0573	1459
1.12	343	0.0269	5721	1.12	315	0.0248	2997	1.10	570	0.0465	1766
1.27	418	0.0256	6920	1.25	403	0.0252	3584	1.23	595	0.0383	2116
1.39	477	0.0242	7989	1.39	482	0.0246	4203	1.36	619	0.0328	2458
1.53	553	0.0231	9269	1.51	562	0.0240	4826	1.49	643	0.0286	2813
1.66	636	0.0226	10497	1.63	642	0.0235	5436	1.61	676	0.0254	3195
1.79	719	0.0220	11798	1.76	724	0.0229	6092	1.73	742	0.0243	3553
1.91	813	0.0219	13027	1.90	815	0.0220	6885	1.86	838	0.0237	3973
2.04	907	0.0214	14399	2.01	902	0.0218	7506	1.99	914	0.0226	4405
2.15	982	0.0208	15670	2.12	983	0.0215	8130	2.11	1003	0.0222	4796

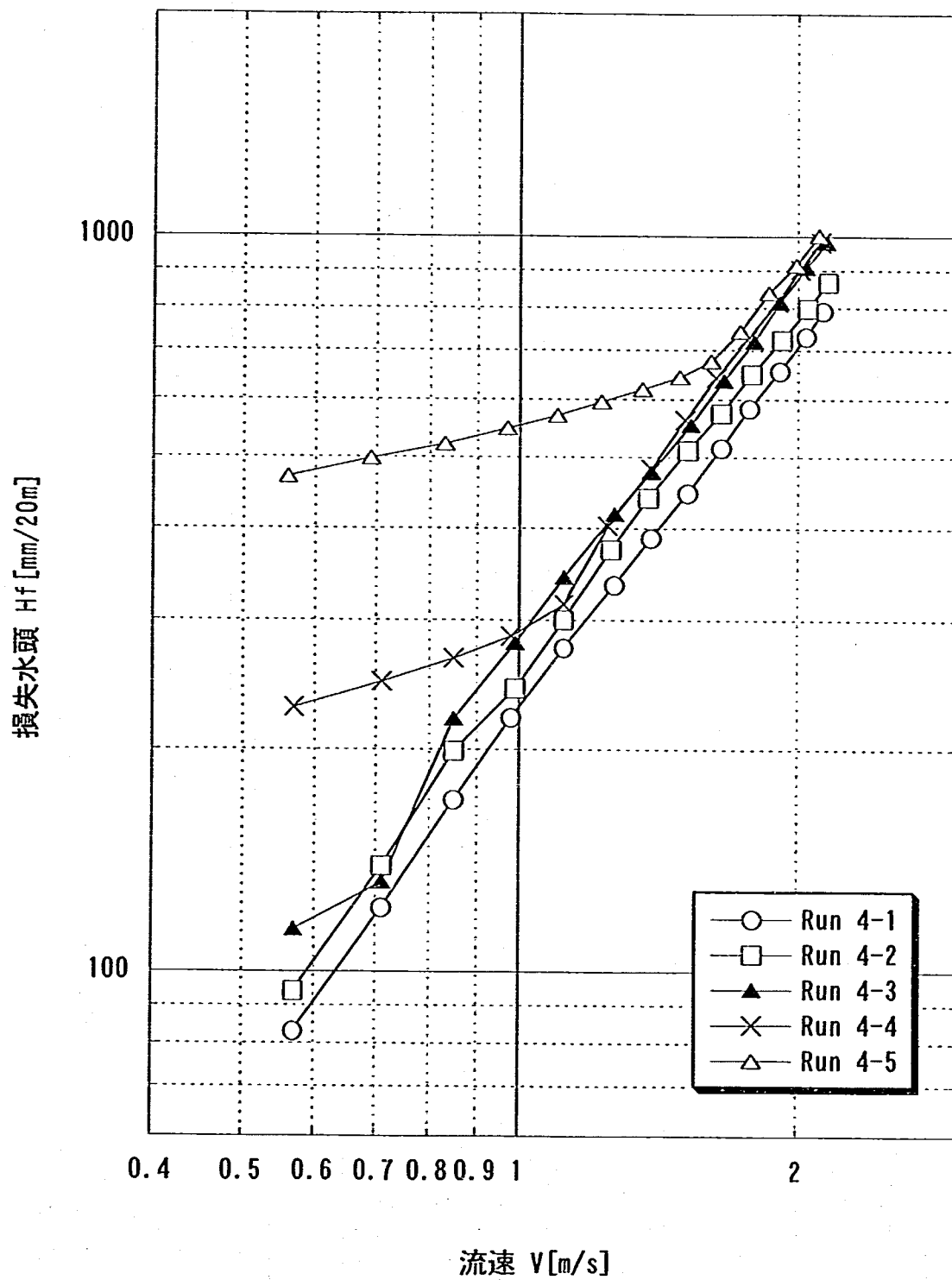


図 6-2 VPIにおける実験結果

表 6-5 DIPにおける実験結果

Run 5-A 970114				Run 5-1 961218				Run 5-2 961219			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.55	89	0.0297	47683	0.54	96	0.0332	7789	0.55	112	0.0379	4769
0.68	150	0.0330	58661	0.67	151	0.0338	10115	0.68	167	0.0369	6314
0.81	211	0.0325	70173	0.80	216	0.0338	12569	0.81	230	0.0351	8076
0.94	282	0.0321	81508	0.94	274	0.0314	15152	0.94	295	0.0334	9819
1.07	353	0.0314	92258	1.06	347	0.0311	17565	1.07	373	0.0329	11576
1.20	438	0.0307	103947	1.20	434	0.0306	20296	1.21	458	0.0316	13638
1.32	523	0.0303	114233	1.32	523	0.0304	22795	1.32	546	0.0315	15328
1.45	630	0.0304	125367	1.45	622	0.0300	25534	1.46	652	0.0310	17428
1.58	738	0.0298	136862	1.57	723	0.0296	28175	1.59	764	0.0305	19581
1.71	858	0.0298	147709	1.70	834	0.0291	31018	1.70	880	0.0305	21453
1.83	979	0.0296	158130	1.83	955	0.0288	33883	1.84	1006	0.0301	23665
1.96	1097	0.0290	169305	1.95	1076	0.0286	36575	1.99	1173	0.0299	26321
2.05	1215	0.0292	177544	2.05	1179	0.0282	38950	2.06	1245	0.0296	27557

Run 5-3 961219				Run 5-4 961220				Run 5-5 970114			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.55	120	0.0406	2249	0.55	224	0.0749	797	0.54	93	0.0324	11724
0.67	168	0.0375	3017	0.68	256	0.0559	1105	0.67	140	0.0317	15848
0.81	236	0.0365	3902	0.82	300	0.0452	1465	0.80	200	0.0314	20518
0.94	310	0.0354	4827	0.94	352	0.0404	1802	0.93	264	0.0306	25335
1.07	388	0.0346	5746	1.07	433	0.0382	2203	1.05	337	0.0305	30068
1.21	482	0.0332	6882	1.19	535	0.0379	2606	1.19	425	0.0302	35737
1.32	575	0.0332	7767	1.33	636	0.0363	3074	1.31	513	0.0302	40762
1.45	684	0.0327	8872	1.45	753	0.0364	3490	1.44	616	0.0300	46565
1.58	804	0.0326	9955	1.58	872	0.0351	4013	1.56	725	0.0299	52311
1.70	929	0.0324	11065	1.71	1001	0.0344	4520	1.69	838	0.0296	58264
1.82	1058	0.0321	12199	1.80	1132	0.0353	4875	1.82	959	0.0293	64487
1.96	1197	0.0313	13538	1.94	1278	0.0343	5467	1.93	1081	0.0291	70457
2.04	1315	0.0319	14291	2.04	1398	0.0340	5889	2.03	1201	0.0296	75104

Run 5-6 970116				Run 5-7 970116				Run 5-8 970117			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.54	105	0.0359	2222	0.54	145	0.0498	1240	0.54	293	0.1017	545
0.68	169	0.0366	3191	0.68	186	0.0411	1770	0.68	327	0.0715	787
0.81	231	0.0351	4251	0.81	256	0.0392	2380	0.82	368	0.0558	1055
0.95	296	0.0333	5410	0.94	331	0.0374	3045	0.95	414	0.0464	1343
1.07	377	0.0330	6623	1.07	400	0.0354	3717	1.07	464	0.0412	1615
1.21	463	0.0319	8044	1.20	481	0.0339	4462	1.20	560	0.0391	1956
1.33	544	0.0311	9341	1.32	578	0.0334	5245	1.32	647	0.0373	2280
1.46	642	0.0304	10874	1.45	682	0.0327	6098	1.45	756	0.0360	2650
1.56	743	0.0307	12162	1.58	798	0.0323	6993	1.58	880	0.0355	3028
1.74	902	0.0299	14487	1.71	917	0.0317	7962	1.70	1007	0.0351	3404
1.82	982	0.0299	15550	1.83	1049	0.0316	8905	1.83	1136	0.0343	3817
1.95	1106	0.0293	17382	1.95	1168	0.0310	9858	1.95	1288	0.0343	4219
2.05	1216	0.0292	18805	2.06	1276	0.0305	10733	2.04	1381	0.0335	4543

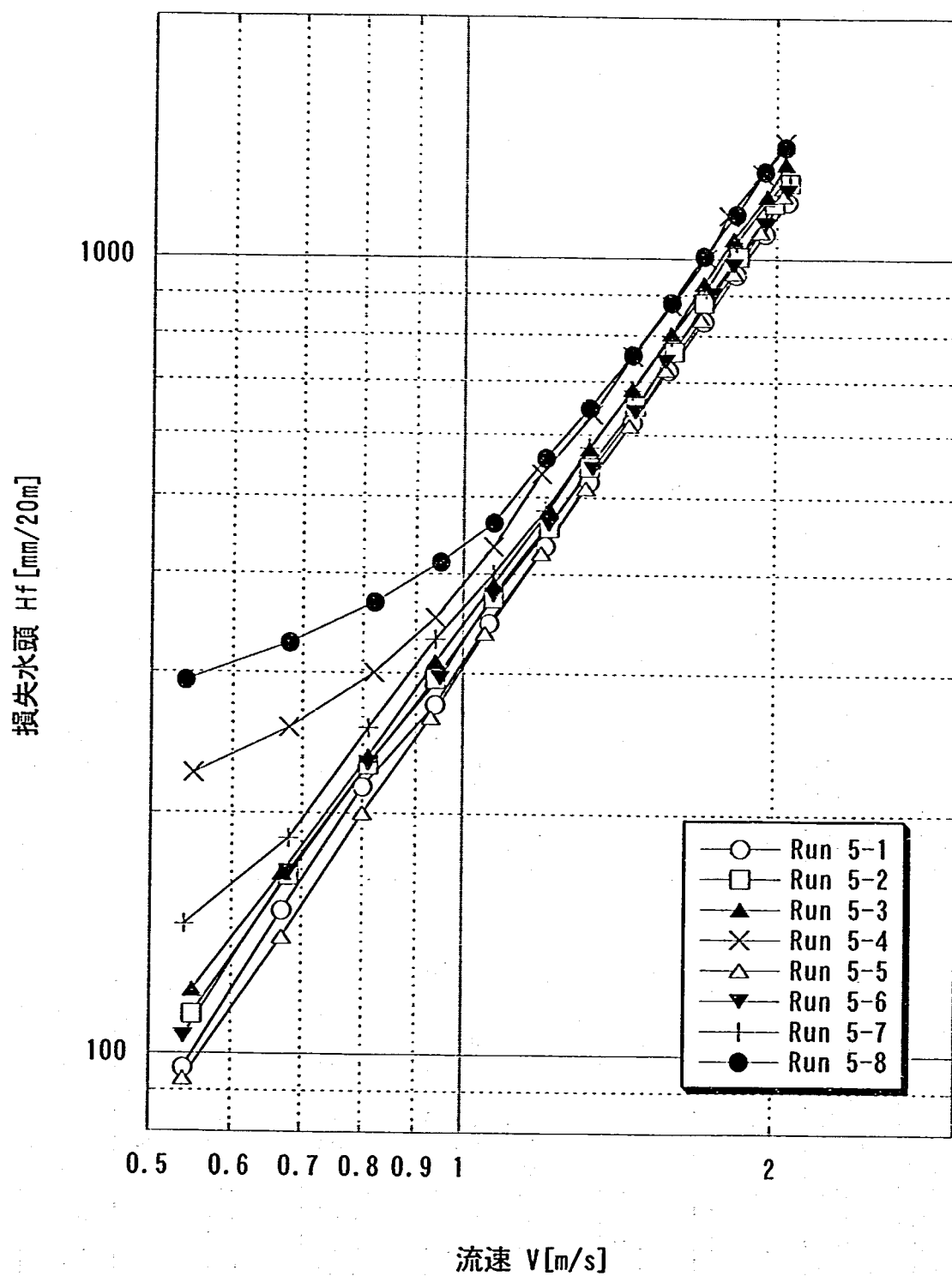


図 6-3 DIPにおける実験結果

表 6-6 CPにおける実験結果

Run 5-A 970114				Run 5-1 961218				Run 5-2 961219			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.60	119	0.0325	50111	0.58	98	0.0277	8304	0.59	121	0.0335	5155
0.73	153	0.0277	61647	0.73	146	0.0269	10784	0.73	179	0.0324	6826
0.88	188	0.0237	73745	0.87	206	0.0264	13400	0.88	236	0.0295	8731
1.02	242	0.0226	85658	1.02	256	0.0240	16154	1.02	295	0.0274	10614
1.15	295	0.0216	96955	1.15	316	0.0232	18726	1.16	361	0.0261	12514
1.30	360	0.0207	109239	1.29	391	0.0226	21638	1.31	443	0.0250	14743
1.43	425	0.0202	120049	1.43	461	0.0220	24301	1.43	519	0.0246	16569
1.57	509	0.0201	131749	1.57	544	0.0215	27222	1.58	605	0.0236	18840
1.71	594	0.0197	143830	1.70	629	0.0211	30038	1.72	698	0.0228	21167
1.85	687	0.0196	155229	1.84	715	0.0205	33068	1.85	794	0.0226	23191
1.98	780	0.0194	166181	1.98	806	0.0199	36123	1.99	896	0.0220	25582
2.12	862	0.0187	177925	2.11	901	0.0196	38993	2.15	1033	0.0216	28453
2.22	943	0.0186	186584	2.22	981	0.0193	41524	2.23	1092	0.0213	29789

Run 5-3 961219				Run 5-4 961220				Run 5-5 970114			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.59	117	0.0327	2455	0.59	247	0.0677	883	0.58	87	0.0248	12796
0.73	168	0.0308	3292	0.74	272	0.0486	1223	0.72	133	0.0246	17297
0.87	248	0.0314	4257	0.89	300	0.0371	1622	0.87	180	0.0231	22394
1.02	319	0.0298	5267	1.01	328	0.0309	1995	1.01	232	0.0221	27651
1.15	391	0.0286	6269	1.16	435	0.0315	2440	1.14	289	0.0216	32818
1.31	479	0.0270	7509	1.29	556	0.0323	2886	1.29	359	0.0209	39004
1.43	562	0.0267	8475	1.44	660	0.0309	3404	1.42	426	0.0205	44489
1.57	657	0.0258	9680	1.57	774	0.0307	3865	1.56	505	0.0202	50822
1.71	759	0.0253	10862	1.72	886	0.0292	4444	1.69	588	0.0199	57094
1.84	870	0.0249	12073	1.85	1010	0.0285	5006	1.83	692	0.0201	63591
1.97	979	0.0244	13311	1.95	1134	0.0290	5399	1.97	767	0.0192	70383
2.13	1093	0.0235	14772	2.10	1267	0.0279	6055	2.09	856	0.0189	76899
2.21	1193	0.0237	15594	2.21	1377	0.0275	6522	2.19	943	0.0190	81970

Run 5-6 970116				Run 5-7 970116				Run 5-8 970117			
V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]	V [m/s]	Hf [mm/20m]	f [-]	Rep [-]
0.59	82	0.0228	2486	0.59	153	0.0431	1389	0.58	329	0.0938	608
0.74	179	0.0319	3571	0.73	179	0.0324	1982	0.73	361	0.0648	878
0.88	235	0.0293	4757	0.88	278	0.0349	2666	0.88	391	0.0486	1177
1.02	295	0.0273	6052	1.02	348	0.0323	3411	1.03	419	0.0385	1500
1.16	368	0.0264	7410	1.16	416	0.0301	4164	1.15	447	0.0326	1803
1.31	455	0.0257	8999	1.29	488	0.0283	4997	1.30	528	0.0302	2184
1.44	530	0.0249	10451	1.43	573	0.0271	5875	1.43	652	0.0308	2545
1.58	611	0.0238	12166	1.57	663	0.0261	6830	1.57	772	0.0302	2958
1.69	696	0.0236	13608	1.71	764	0.0254	7833	1.71	895	0.0296	3380
1.89	821	0.0224	16209	1.85	865	0.0245	8918	1.84	1017	0.0290	3801
1.97	880	0.0220	17398	1.98	977	0.0241	9975	1.98	1139	0.0282	4262
2.11	977	0.0212	19448	2.11	1088	0.0237	11042	2.11	1260	0.0275	4711
2.22	1062	0.0209	21040	2.22	1188	0.0233	12023	2.21	1363	0.0271	5072

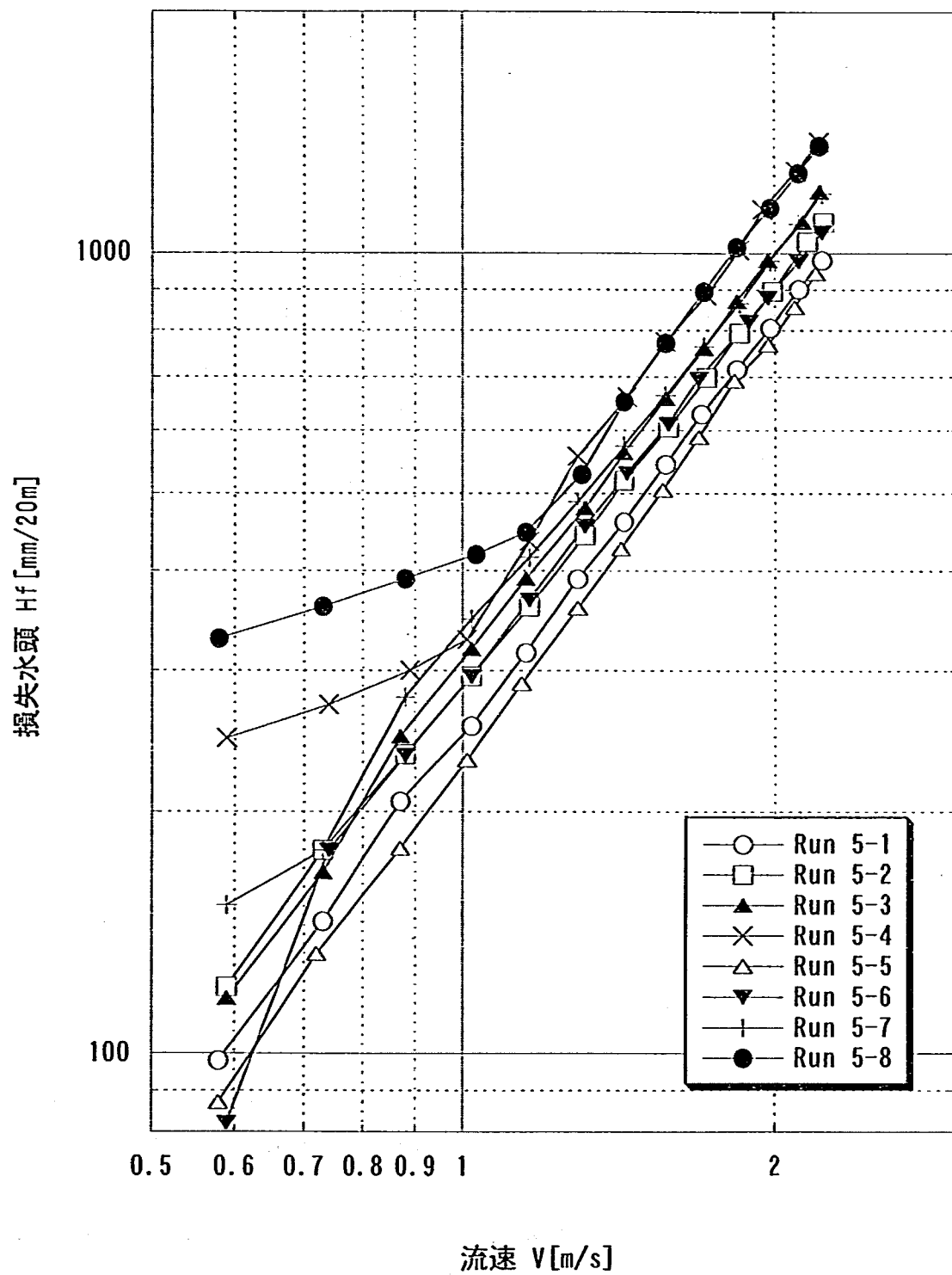


図 6-4 CPIにおける実験結果

表 6-7 臨界流速、臨界レイノルズ数の測定結果

Run No.	LOOP2(A)			LOOP2(B)		
	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考	V_{cr} [m/s]	Re_{pcr} [-]	備考
4-1	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
4-2	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
4-3	0.63	2440		0.71	2841	
4-4	0.99	2565		1.12	2997	
4-5	1.44	2748		1.61	3195	
5-1	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
5-2	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
5-3	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
5-4	0.94	1802		1.01	1995	
5-5	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
5-6	-	-	全て乱流	-	-	全て乱流
5-7	0.68	1770		0.73	1982	
5-8	1.07	1615		1.15	1803	

6. 2 考 察

6. 2. 1 粗管乱流域の圧力損失

実験4, 5における4通りの管種について、乱流域における摩擦損失係数 f (実験値)と擬塑性流体のレイノルズ数 Re_p との関係について図 6-5 ～ 6-8 に示す。図より n による影響は比較的小さく、 Re_p が大きくなるにつれ、清水の場合の予測式に漸近するという一般的な傾向が読みとれる。ただし VP の場合は、粗度が小さいため、滑管における実験結果に近い傾向を示している。

次に、第5章において導かれた粗管乱流域の予測式が、さまざまな管種(粗度)の場合に対しても適用可能かどうかを検証する。実験4, 5における粗管乱流域における f の実験値を、式 (5-3)による f の計算値と比較したものが図 6-9 ～ 6-12 である。両者は概ね一致しており、Run 4-4, 4-5を除き、誤差率は 10%以下であった。

Run 4-4, 4-5 において予測精度が悪かったことの原因として、これらのデータが臨界域にあって乱流の発達が十分でなかったことが考えられる。実際に STPG の Run 4-4, 4-5 においては、水の場合より f が小さく観測されており、他の実験結果と異なる状況であった。そこで、これら2つの Run については予測式の検証の対象からはずして考えることとすれば、粗管乱流域における圧力損失の予測は、式 (5-3) により管種(粗度)によらず精度よく予測できると結論づけられる。

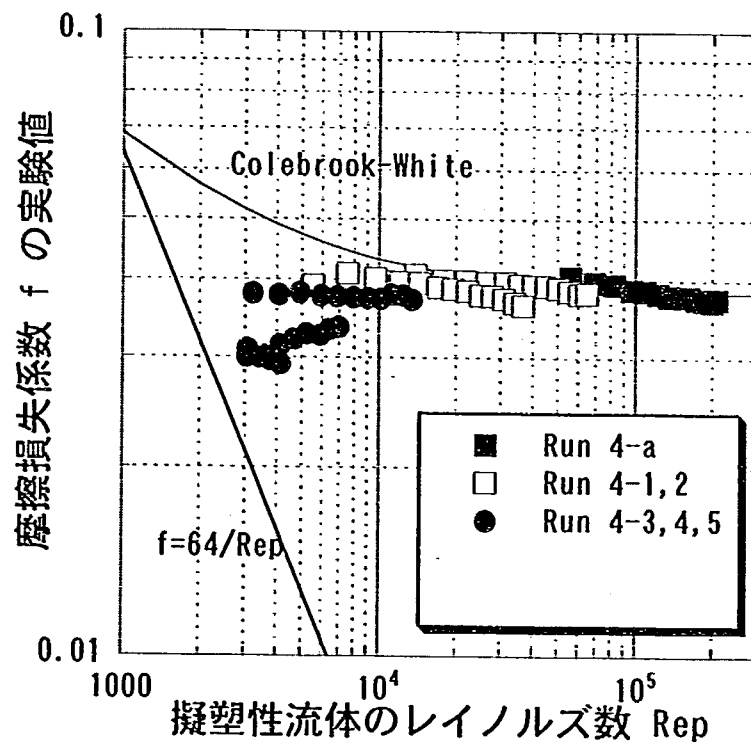


図 6-5 粗管乱流域における Rep と f の関係 (STPG)

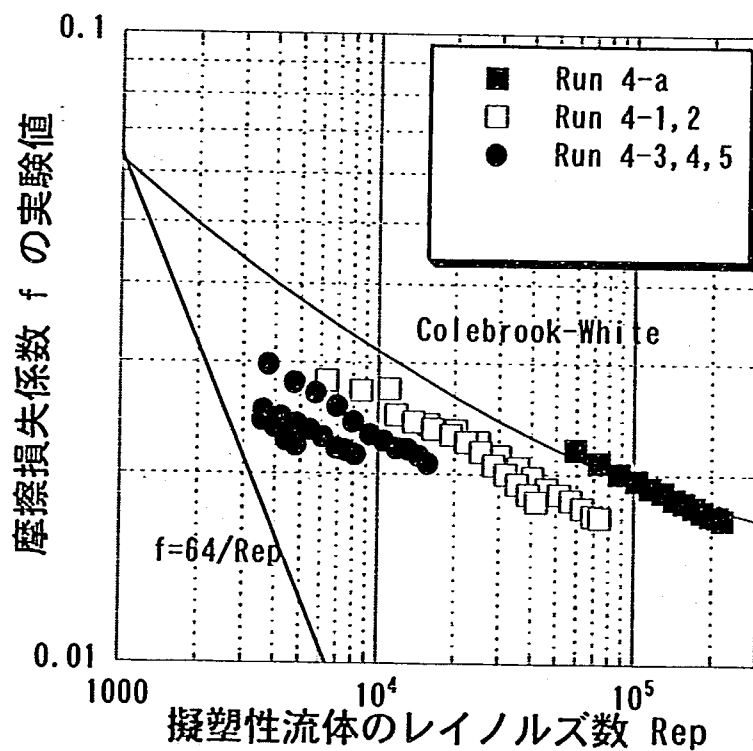


図 6-6 粗管乱流域における Rep と f の関係 (VP)

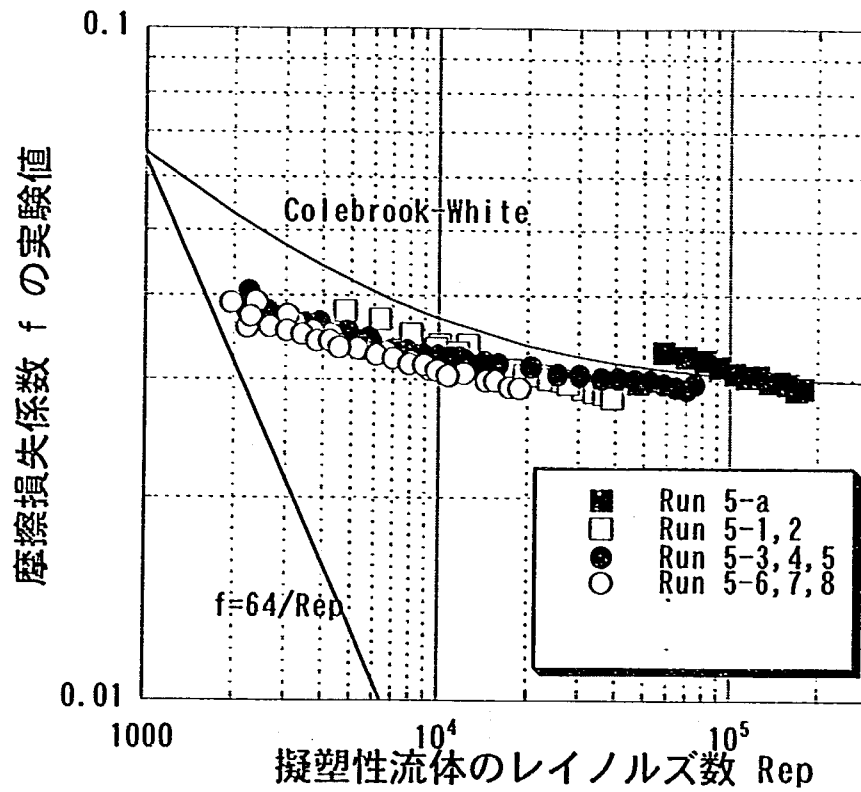


図 6-7 粗管乱流域における Rep と f の関係 (DIP)

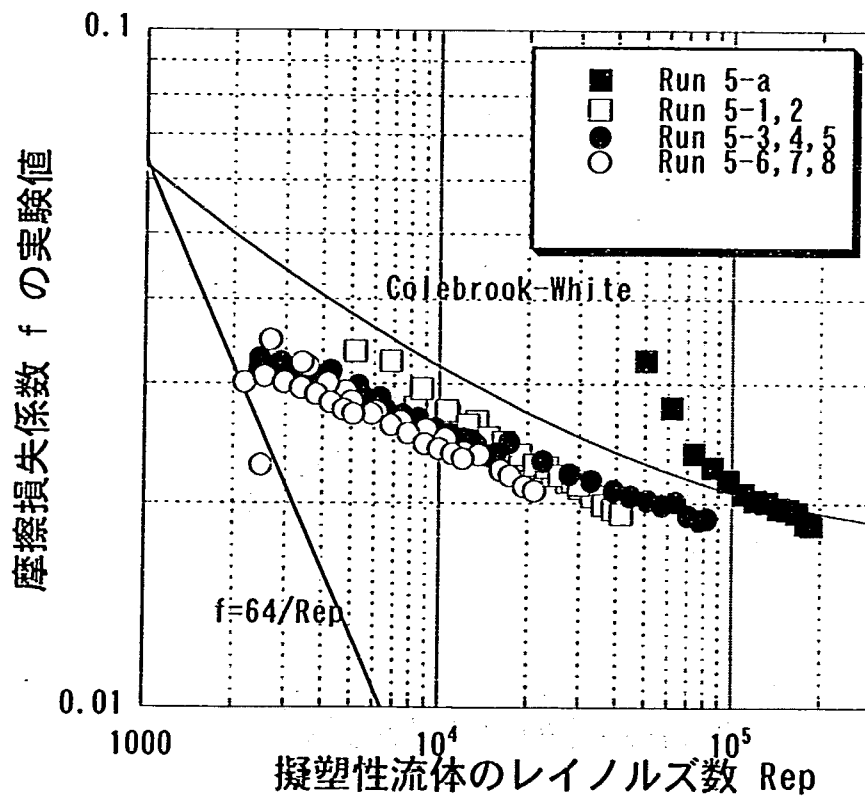


図 6-8 粗管乱流域における Rep と f の関係 (CP)

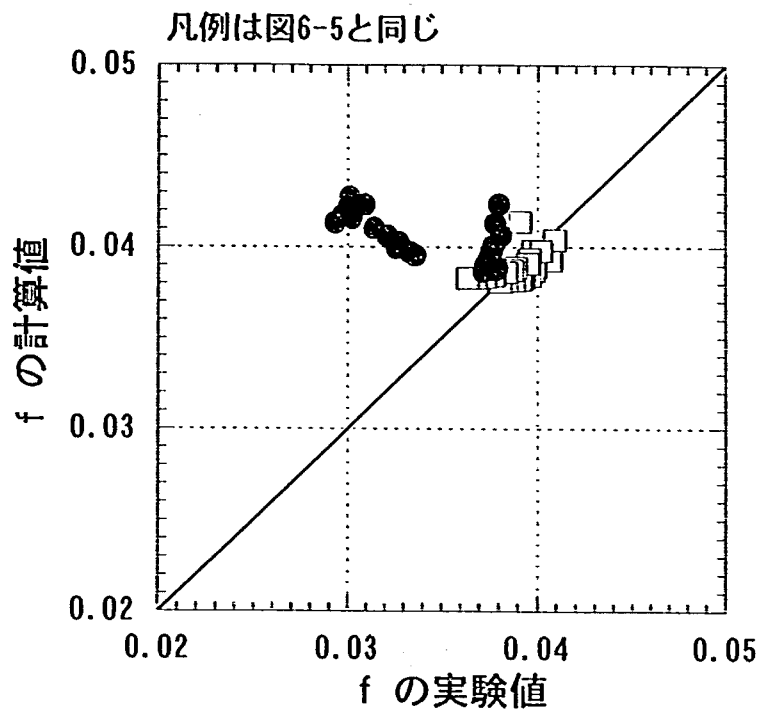


図 6-9 式 (5-3) による f の予測 (STPG)

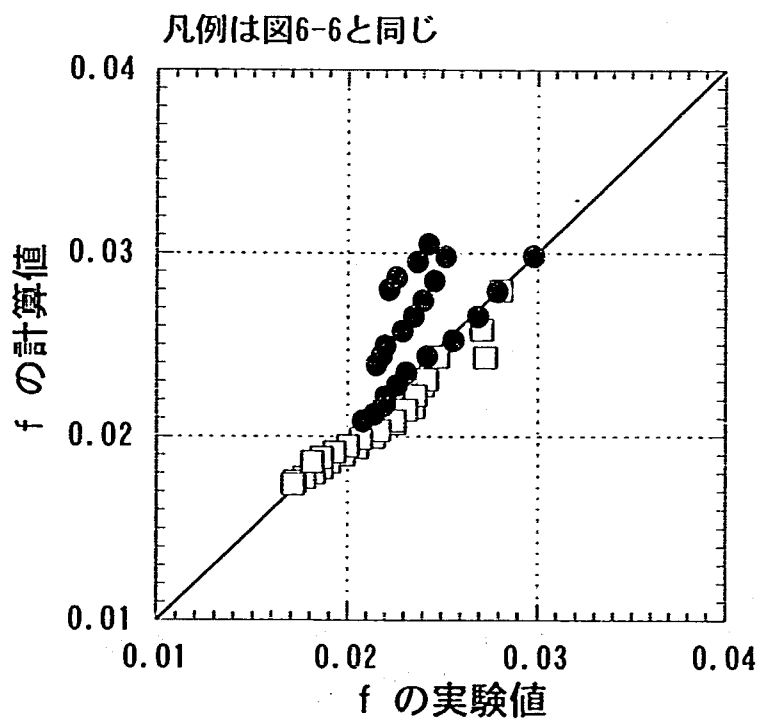
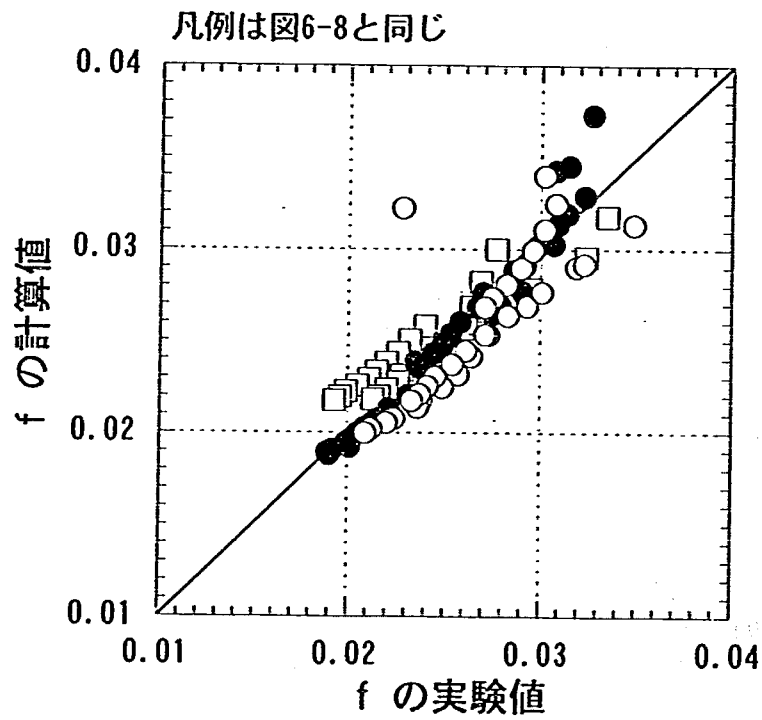
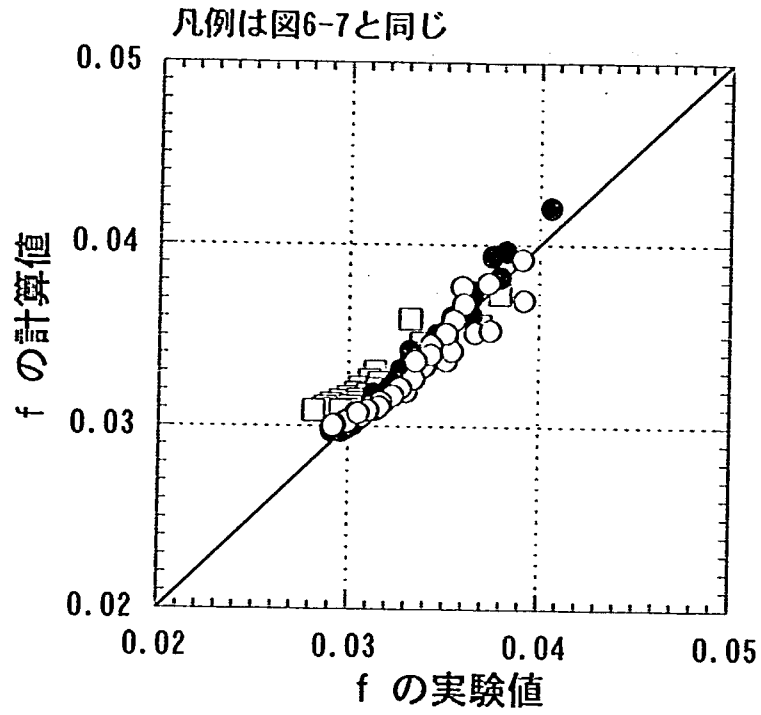


図 6-10 式 (5-3) による f の予測 (VP)



6. 2. 2 臨界レイノルズ数

実験2～5で得られた臨界レイノルズ数の測定結果を n に対して整理すると図 6-13 のようになる。臨界レイノルズ数はその大部分が $1500 < Rep_{cr} < 3000$ の範囲に分布しており、 n が小さくなるほど小さくなる傾向が見受けられた。ただし SUS37 のデータを除くと、 n によらず Rep_{cr} は $1500 \sim 3000$ の値をとると整理することもできる。

以上のように、臨界レイノルズ数はこれまでの実験結果から明確な結論を得ることができなかった。その理由として次のようなことが考えられる。

- ①実験時の流速設定はポンプの回転数の段階的な変化によっており、測定値が流れの状態が変化するポイントを厳密におさえているとは必ずしもいえないこと。
- ②臨界域では流れが安定しないため、管路輸送実験時の誤差が、他の領域に比べて大きいこと。
- ③レイノルズ数で整理しているため、上記のような管路輸送実験による誤差と、粘度測定による誤差の両方を含んでいること。

しかし、臨界レイノルズ数を精度よく予測することができたとしても、層流から乱流への臨界域の圧力損失そのものを精度よく予測することができないため、臨界レイノルズ数の検討のために更なる実験を実施することはあまり意味がないと考えられる。

そこで、実用的な判断として、下水汚泥の臨界レイノルズ数には水の場合と同じ 2100 という値を用い、これを境界として層流乱流の予測式を使い分けることが妥当と考えられる。なぜなら、仮に臨界レイノルズ数が 2100 以上であるとしても、この領域に対しては乱流の予測式が適用されるので安全側となるし、また 2100 以下の場合、図 5-10 や図 5-15 から明らかなように、乱流の予測式を用いた方が危険側となる場合があるためである。

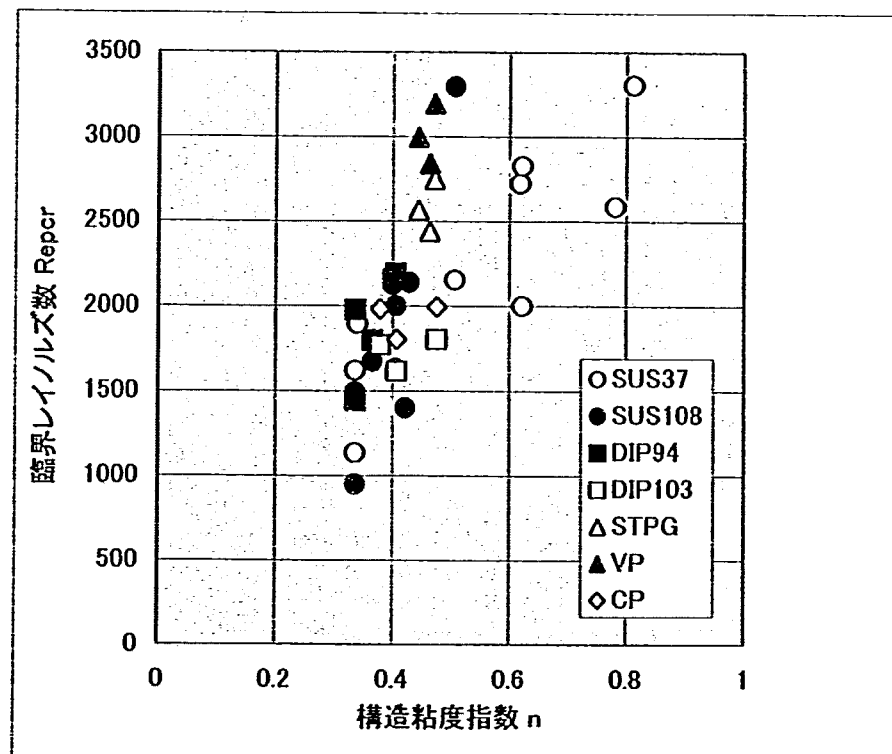


図 6-13 臨界レイノルズ数と構造粘度指数との関係(実験2～5)

6.3 まとめ

- ①第5章で導いた粗管乱流域の予測式を4種類の異なる粗度に対して適用した。予測式は精度よく圧力損失を予測できる。その誤差率は概ね 10 % 程度以下である。
- ②臨界レイノルズ数は 1500 ～ 3000 の範囲に分布していた。臨界レイノルズ数により層流乱流の圧力損失予測式を使い分けるためには、実用的判断として、水と同じ 2100 という数値を用いることが妥当である。

7. 管路輸送特性に関するその他の検討

第7章では、これまでの実験結果をもとに、汚泥倍率を用いた簡便法との比較を行う。これらの予測式は、はじめからレオロジー的な取り扱いをしていないもの、または特定の汚泥を対象として導かれたものであり、また一方で、我々の実験もレオロジー的な取り扱いを前提とした実験条件によりデータを取得している。よって、実験結果とこれらの予測式を比較するということは、我々の実験結果の相対的な位置づけを明確化するという点においてのみ意味があり、実験結果と予測値が一致しないことをもって、これらの予測式を棄却することには必ずしもならないことに留意する必要がある。

本章では、また輸送エネルギーの観点から見た最適輸送条件について検討する。

7.1 汚泥倍率を用いた簡便法

本節では、これまでの実験結果を、既に提案されている汚泥倍率を用いた簡便法による予測式と比較する。比較の対象とする簡便法は、Chouの方法(旧設計指針の方法)、東京都の方法(現行設計指針の方法)、および金井らの方法の3つである。表 7-1 に各簡便法についてとりまとめた。

既に述べたとおり、汚泥倍率は流速の影響を受けることが考えられるため、実験結果のうち、実験2～5の $V = 0.7, 1.0, 1.5$ [m/s] の3通りの流速(近傍のデータ)について汚泥倍率として整理した。汚泥倍率は、各 Run における損失水頭の実験値を、同じ条件で水を流した場合の損失水頭計算値(式 (3-3) または式 (4-2) により摩擦損失係数を求めて算出する)で割って求めた。結果を図 7-1 ～ 7-6 に示す。

表 7-1 汚泥倍率を用いた簡便法

簡便法	文献	汚泥倍率の算出	備 考
Chou	9),10)	表 3-7 による	
東京都	11)	$\alpha = 1 + 0.11C$	液温 10℃の換算汚泥濃度に対して適用する。 ただし、今回の比較検討ではこれを省略している。
金井ら	12)	$\alpha = 1 + 0.261C$	

α : 汚泥倍率 [-], C : 汚泥濃度 [%]

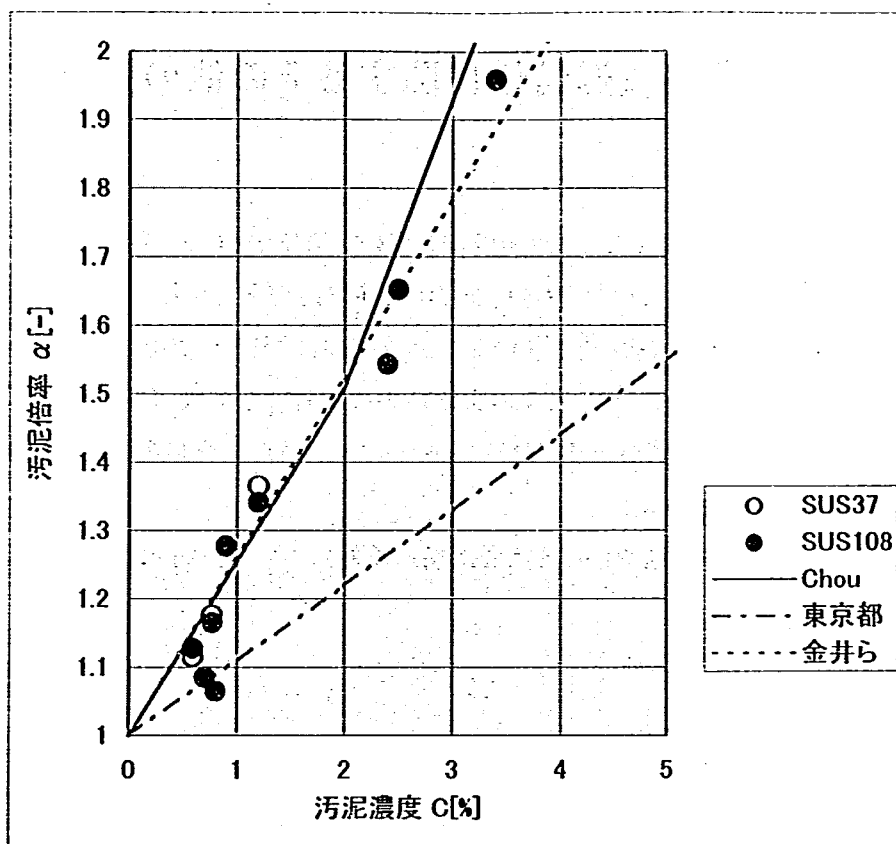


図 7-1 汚泥濃度と汚泥倍率の関係 ($V=0.7\text{m/s}$ 、滑管)

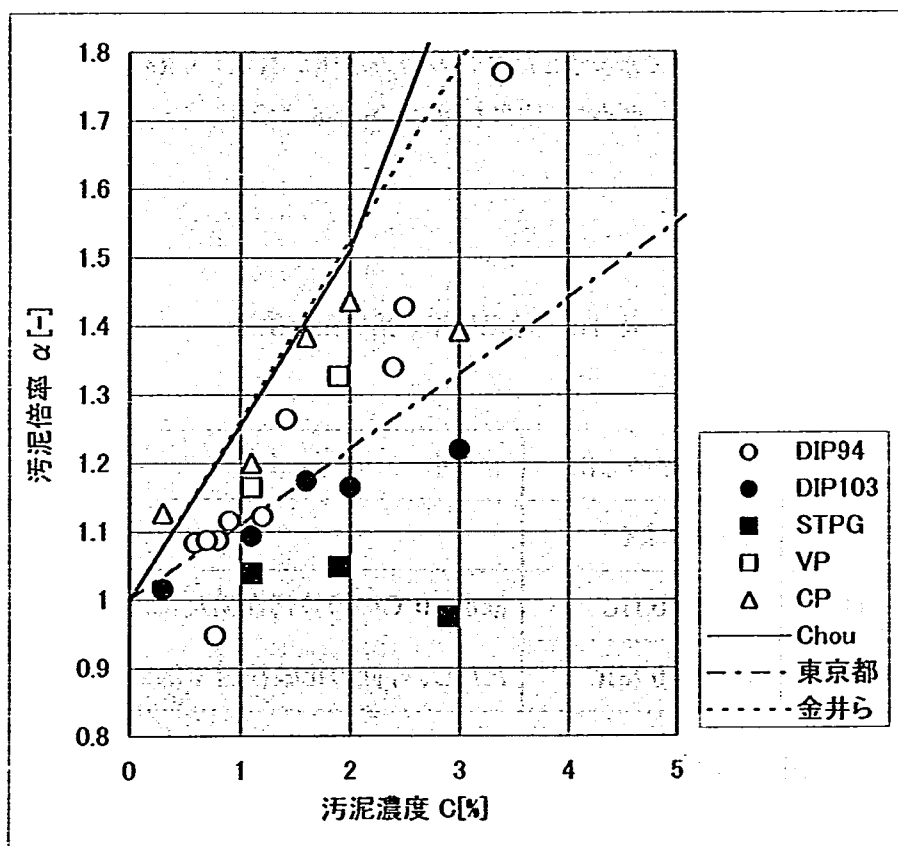


図 7-2 汚泥濃度と汚泥倍率の関係 ($V=0.7\text{m/s}$ 、粗管)

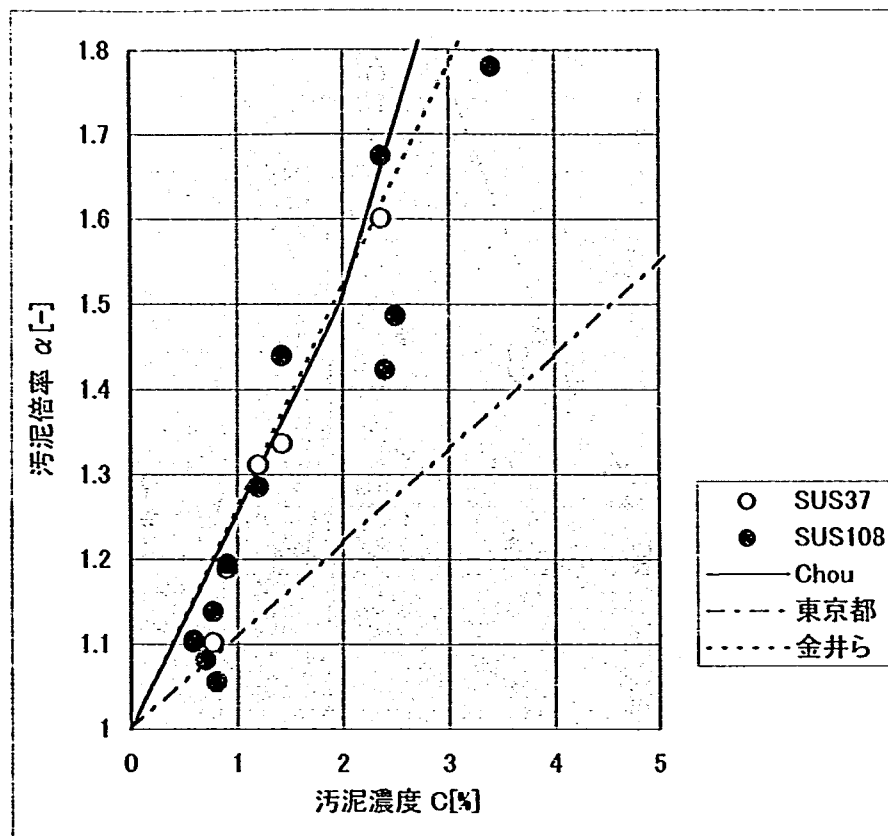


図 7-3 汚泥濃度と汚泥倍率の関係 ($V=1.0\text{m/s}$ 、滑管)

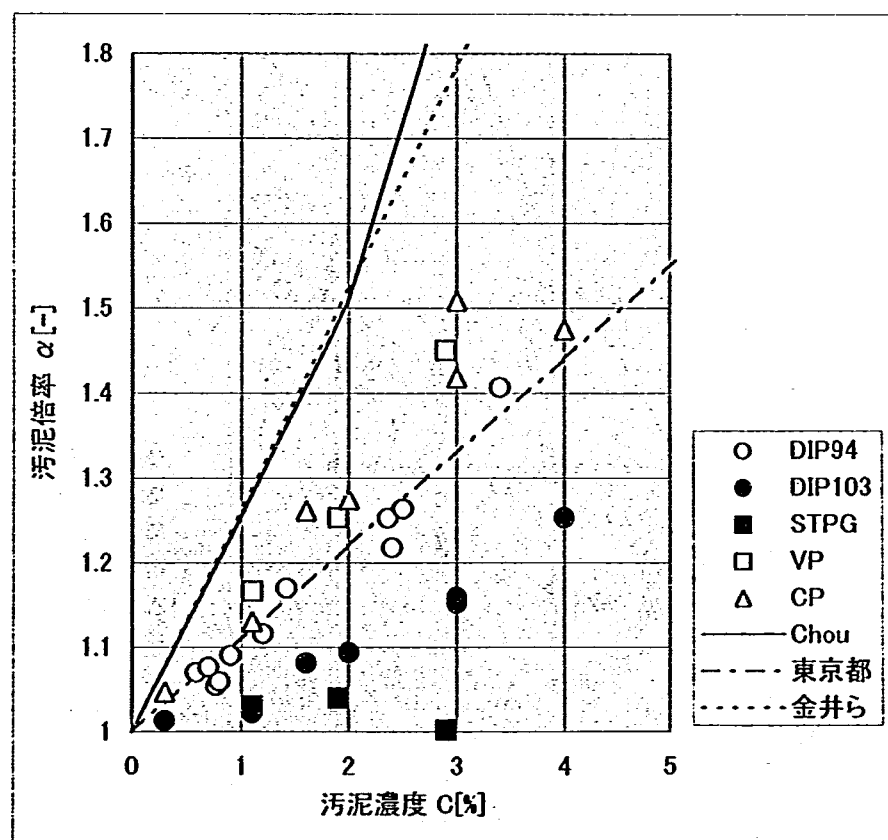


図 7-4 汚泥濃度と汚泥倍率の関係 ($V=1.0\text{m/s}$ 、粗管)

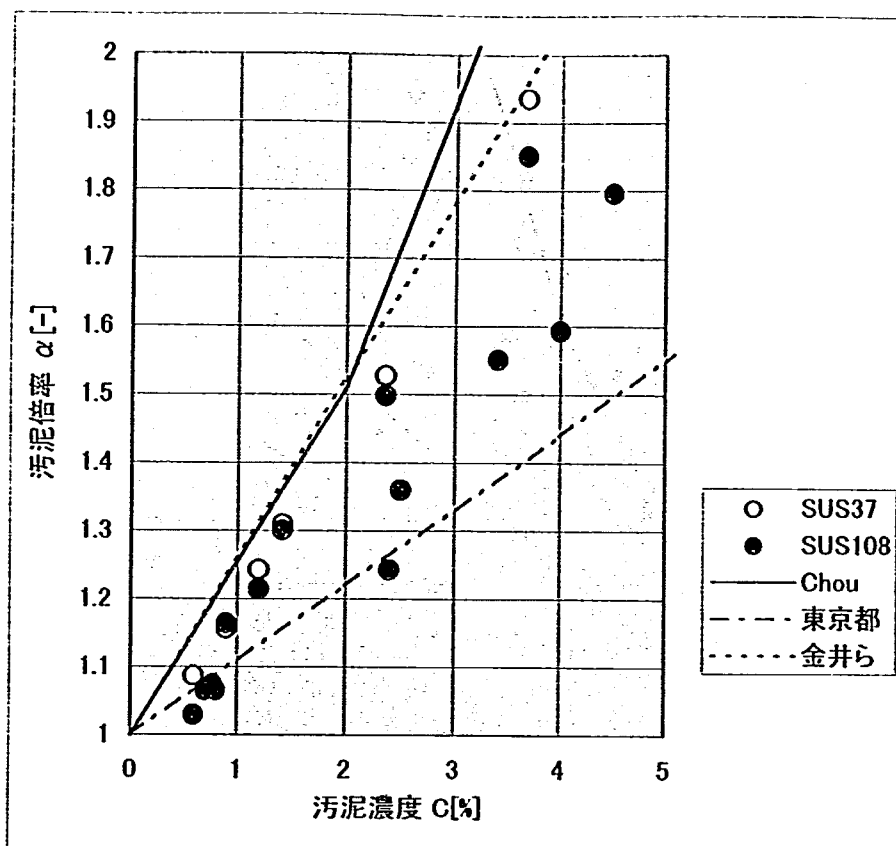


図 7-5 汚泥濃度と汚泥倍率の関係 (V=1.5m/s、滑管)

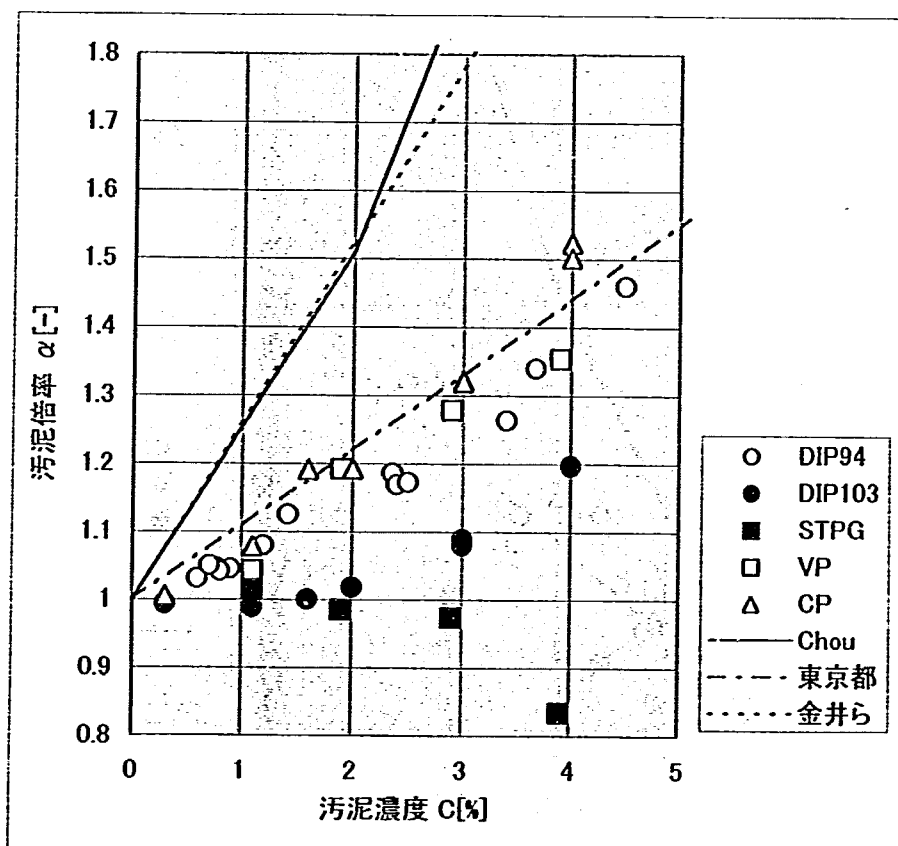


図 7-6 汚泥濃度と汚泥倍率の関係 (V=1.5m/s、粗管)

図から以下の点について明らかである。

- ①汚泥倍率は、流速が高くなるにつれ小さくなる傾向がある。(3. 2. 3の結果の再確認)
- ②汚泥倍率は、管壁が滑らかなほど(流速係数が大きいほど)大きくなる傾向がある。
- ③滑管における比較より、汚泥倍率に対する管径の影響は見受けられない。
- ④ Chou の予測式と金井らの予測式は、汚泥濃度 4%以下でよく似た傾向を示し、東京都の予測式はこれより小さい値を示す。また、Chou および金井らの予測式は滑管 ($CH = 150 \sim 155$) の実験結果と、東京都の予測式は粗管 ($CH = 130 \sim 140$) の実験結果と近い値を示した。
- ⑤各条件において、汚泥濃度と汚泥倍率の関係は、 $(C, \alpha) = (0, 1)$ を通る直線により近似できる。

文献によれば、東京都の予測式は $CH = 110 \sim 140$ の実験値を平均することにより導出されており、一方金井らの実験における流速係数は $CH = 154$ であったとしている。これらの事実は、④の内容と符合するものである。また⑤より、汚泥倍率を次のような形に整理することができる。

$$\alpha = 1 + \beta C \quad (7-1)$$

これは、東京都や金井らの予測式と同様の式形である。これらの考察より、我々の実験結果は、これらの先行する実験とほぼ同様の結果が得られていると考えてよさそうである。

ただし、既存の研究においては上記の①、②について言及されていない。そこで、汚泥倍率を用いた簡便法について、もう少し詳細な検討を加えることとする。ここで、我々の実験結果も特定の汚泥に対してのものであり、これをレオロジー定数を介さずに直接汚泥濃度で整理した場合は、必ずしも得られた結果が一般的な公式とはなり得ないことに留意する必要がある。

汚泥倍率の構成係数 β を各管種毎に回帰分析により求め、これを CH 、及び V により整理すると図 7-7 となる。 β は流速や流速係数の値により異なり、 $0 \sim 0.24$ の範囲で分布する。図から明らかなように、流速よりも流速係数による影響が大きく、管壁が粗くなると清水の場合との差が小さくなる。

図 7-7 の回帰直線より、我々の実験結果から得られた汚泥倍率は、次のように整理される。

$$\alpha = 1 + \beta C \quad (7-2)$$

$$\text{ここで、 } \beta = 0.0038 CH - 0.351 \quad (V = 0.7 \text{ m/s の場合})$$

$$\beta = 0.0036 CH - 0.355 \quad (V = 1.0 \text{ m/s の場合})$$

$$\beta = 0.0030 CH - 0.307 \quad (V = 1.5 \text{ m/s の場合})$$

また、実施設の送泥流速や送泥管の流速係数を考慮すると、設計指針において Chou 式が過大であるとして東京都の式が新たに適用されたことは妥当であると考えられる。しかし、厳密には東京都の式における $\beta = 0.11$ という値も、流速や流速係数の関数と考えられるため、適用可能範囲を明確にして公式を利用する必要がある。

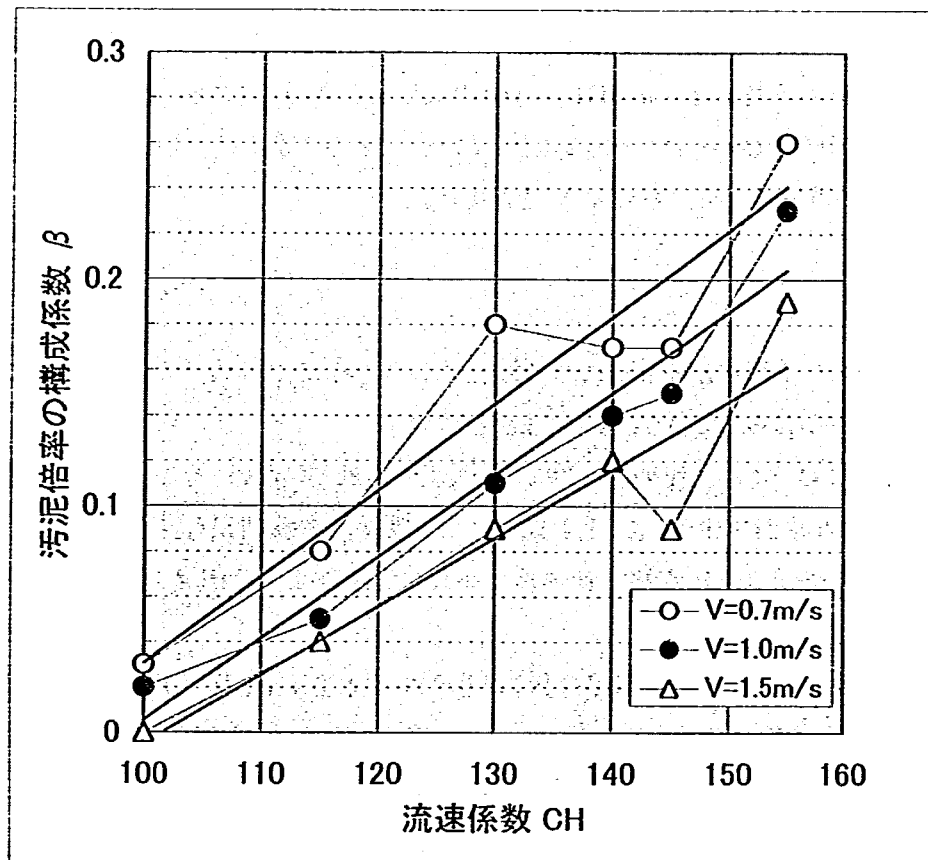


図 7-7 汚泥倍率と流速係数、流速との関係

7.2 最適輸送条件の検討

次のような例題により、輸送エネルギーを最小とする輸送条件の試算を行う。

<例題>

日発生汚泥量が $M = 20$ [DSI] の下水処理場において、管径 $d = 0.2$ [m] の送泥管を用いて、近傍の汚泥処理施設へ 24 時間の連続送泥を実施することとなった。このとき、単位送泥距離あたりの損失水頭が最も小さくなるような汚泥濃度 C [%] および流速 V [m/s] を求めよ。

ただし、対象とする汚泥の流動特性は擬塑性流体として扱えるものとし、擬塑性粘度 k [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$] と構造粘度指数 n [-] は、次のような汚泥濃度の関数で表されるものとする¹⁶⁾。

$$k = 0.0385C^{2.87}, \quad n = 0.682C^{-0.473} \quad (7-3)$$

また、汚泥密度は $\rho = 1000$ [kg/m^3] (C によらず一定)、管路の相対粗度は $ks/d = 0.003$ とする。

<解説>

汚泥の管路輸送における損失水頭を求めるためには、流れの状態により摩擦損失係数 f の算定式を使い分ける必要がある。層流域では水の場合と同じ $f = 64/Rep$ を、乱流域では粗管乱流域の式 (5-3) を用いる。流れが層流域にあるか、乱流域にあるかを判断するには、擬塑性流体のレイノルズ数の値を目安とし、ここでは Rep が 2100 以下の場合を層流として取り扱うこととする。

例題では、汚泥濃度と粘度との関係について式 (7-3) を用いているが、汚泥の流動特性はその種類や処理場ごとに様々であり、汚泥濃度の関数として一般的に表現できるものではない。よって、実際には対象とする汚泥ごとに流動特性を測定し、式(7-3)に代わる関係式を事前に把握しておくことが望まれる。

<解>

24 時間の連続送泥であるという条件から、 V と C の関係を求める。

$$\begin{aligned} (\pi/4) \cdot D^2 \cdot V \cdot (\rho \cdot C/100) \cdot (60 \times 60 \times 24) &= 1000 M \\ V &= 1.47M / (\rho \cdot C \cdot D^2) = 0.735 / C \end{aligned} \quad (7-4)$$

検討対象とする汚泥濃度の範囲を、実際の下水処理場で発生する液状汚泥の濃度範囲を参考に、0.5 ~ 5%と設定し、それぞれの条件において損失水頭を計算する。計算結果を図 7-8, 7-9 に示す。図より、単位送泥距離あたりの損失水頭が最も小さくなるのは、臨界流速で送泥した場合 ($V=0.46$ [m/s], $C=1.6$ [%]) であることがわかる。

実際の送泥システムの設計においては、これらの損失水頭に関する理論的な考察に加えて、汚泥の腐敗防止、閉塞防止、および送泥の前後のユニットプロセスも含めた効率性の観点等から、送泥流速、管径、送泥濃度を総合的に判断する必要がある。

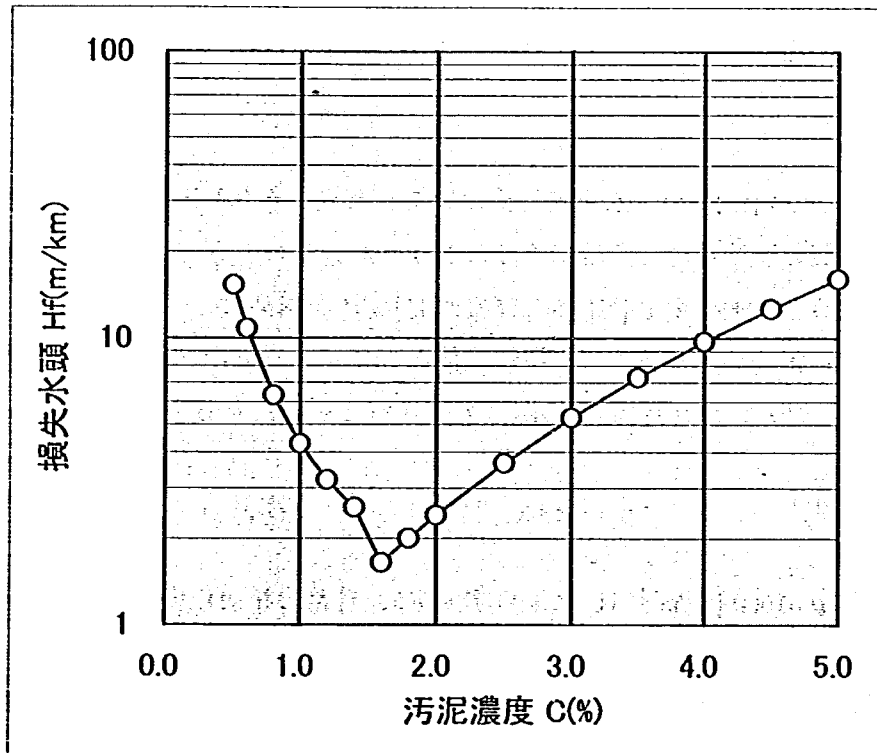


図 7-8 汚泥濃度と損失水頭との関係

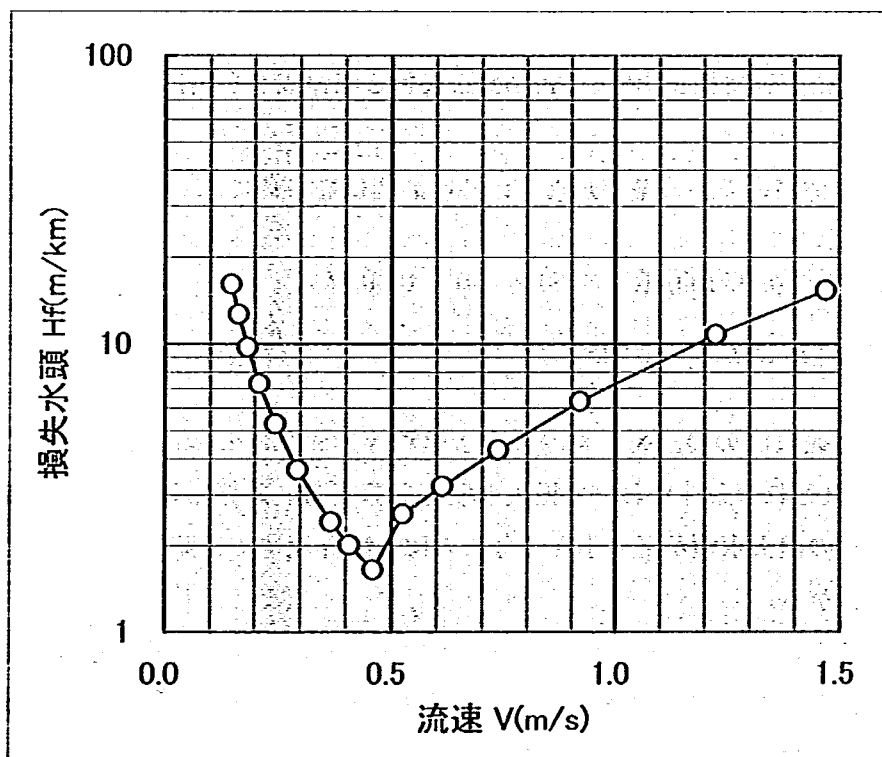


図 7-9 流速と損失水頭との関係

7.3 まとめ

- ①実験2～5のデータを汚泥倍率として整理した。汚泥倍率は、流速および流速係数(管壁の粗滑)の影響を受ける。特に流速係数の影響が大きかった。また管径の影響は見受けられなかった。
- ②実験結果から、汚泥倍率と流速係数、流速との関係について次のような式が得られた。

$$\alpha = 1 + \beta C: \quad \beta = 0.0038 C_H - 0.351 \quad (V = 0.7 \text{ m/s の場合})$$

$$\beta = 0.0036 C_H - 0.355 \quad (V = 1.0 \text{ m/s の場合})$$

$$\beta = 0.0030 C_H - 0.307 \quad (V = 1.5 \text{ m/s の場合})$$

- ③ Chou および金井らの予測式は滑管の実験結果と、東京都の予測式は粗管の実験結果と近い値を示した。
- ④一定の固形物量を送泥する場合、臨界流速程度で送泥されるよう、管径、汚泥濃度、送泥流速を設定するのが、送泥に要するエネルギーの観点からは効率的である。ただし、実際の送泥システムの設計においては、汚泥の腐敗防止、閉塞防止、および送泥の前後のユニットプロセスも含めた効率性の観点等から、送泥条件を総合的に判断する必要がある。

8. ま と め

本調査では、汚泥管路輸送システムの適正かつ効率的な計画立案に資することを目的として、濃度6%程度までの実下水汚泥を用いた管路輸送実験を行い、汚泥の流動特性を考慮した送泥管の圧力損失の算定方法について検討した。

以下に本調査で得られた成果の概要をまとめる。

<流動特性>

- ①下水汚泥の流動特性として、擬塑性流動モデルを適用することができる。
- ②測定された流動曲線を擬塑性流動モデルで近似する際に、対象とする速度勾配の範囲によってモデル定数が変わりうる。このため、流動曲線測定時の速度勾配、ならびに近似の対象とする速度勾配の範囲を、管路輸送時に想定される速度勾配の範囲にリンクしておくことが、精度よく圧力損失を予測するポイントとなる。

<層流域の圧力損失>

- ①擬塑性流体のレイノルズ数を用いることにより、管種、管径、粘度によらず、水の場合と同様に圧力損失を算出することができる。

<乱流域の圧力損失>

- ①擬塑性流体のレイノルズ数を用いても、水の場合と同様の公式 (Prandtl-Karman, Colebrook-White) では圧力損失を正しく予測することができない。
- ②滑管乱流域においては、Dodge-Metzner の方法により比較的精度よく圧力損失を予測可能であった。
- ③管路輸送実験の結果から Dodge-Metzner の式中の係数を再評価し、次の予測式を導出した。

$$\text{滑管乱流域} \quad 1/\sqrt{f} = An \log_{10} (Rep \cdot (f/4)^{1-n/2}) - Bn$$

$$\text{粗管乱流域} \quad 1/\sqrt{f} = 1.74 - 2 \log_{10} [(2ks/d) + (Rep \cdot (f/4)^{1-n/2})^{-An/2} \cdot 10^{0.87 + Bn/2}]$$

$$\text{ここで} \quad An = 2.0/n^{0.35}, \quad Bn = 1.8n - 1.6$$

- ④上式によれば、乱流域の圧力損失を、管種、管径、粘度によらず、概ね誤差 10% 程度以下で予測できる。ただし、層流と乱流の境界付近の値は、乱流が十分に発達しない場合があり、過大評価となる場合がある。

<臨界レイノルズ数>

- ①臨界レイノルズ数は 1500 ～ 3000 の範囲に分布しており、汚泥の粘度との明確な関係は見出せなかった。
- ②実用的には、水の場合と同じ値 2100 を用いて、層流と乱流の予測式の使い分けを行うことが妥当である。

<汚泥倍率を用いた簡便法>

- ①汚泥倍率は、流速および流速係数(管壁の粗滑)の影響を受ける。特に流速係数の影響が大きかった。また管径の影響は見受けられなかった。
- ②管路輸送実験の結果から、汚泥倍率と流速係数、流速との関係について次のような式が得られた。

$$\alpha = 1 + \beta C : \quad \beta = 0.0038 C_H - 0.351 \quad (V = 0.7 \text{ m/s の場合})$$

$$\beta = 0.0036 C_H - 0.355 \quad (V = 1.0 \text{ m/s の場合})$$

$$\beta = 0.0030 C_H - 0.307 \quad (V = 1.5 \text{ m/s の場合})$$

- ③ Chou および金井らの予測式は滑管の実験結果と、東京都の予測式は粗管の実験結果と近い値を示した。

<効率的な管路輸送>

- ①一定の固形物量を送泥する場合、臨界流速程度で送泥されるよう、管径、汚泥濃度、送泥流速を設定するのが、送泥に要するエネルギーの観点からは効率的である。ただし、実際の送泥システムの設計においては、汚泥の腐敗防止、閉塞防止、および送泥の前後のユニットプロセスも含めた効率性の観点等から、送泥条件を総合的に判断する必要がある。

以上、汚泥の流動特性が既知であれば、その圧力損失を精度よく予測することができることが明らかとなった。今回提案した予測式は、流動特性を対象とする汚泥ごとに測定することを前提としているため、汎用性が高いものとする。

高濃度汚泥の流動特性として今後調査が必要と考えら得る点は次の諸点である。

①実用的観点から

- ・実施に適用する場合に推奨される流速、管径について
- ・送泥管の壁面(粗度)の経時変化と、これが送泥に及ぼす影響について

②技術的観点

- ・汚泥のチクソトロピー性の定量的評価と、送泥計画への反映のさせ方について

高濃度汚泥の管路輸送に関する技術的な指針を策定するためには、これらについても明らかにしていく必要がある。

9. 参 考 文 献

- 1). 建設省土木研究所:下水汚泥の流動特性に関する調査報告書、土木研究所資料第 3363 号 (1995).
- 2). USEPA : Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal, 625/1-79-011 (1979).
- 3). Ross-Innes, I. H. and Nossel, S. : The Rheology and Pumping of Thickend Activated Sludge, Wat. Sci. Tech. Vol. 15, Capetown, pp. 59-76 (1983).
- 4). Carthew, G. A., Gochring, C. A. and Teylingen, J. E. : Development of Dynamic Head Loss Criteria for Raw Sludge Pumping, Journal WPCF, Vol. 55, No. 5, pp. 472-483 (1983).
- 5). Caldwell, D. H. and Babbitt, H. E. : The Flow of Muds, Sludges, and Suspensions in Circular Pipe, Trans. A.I.Ch.E., Vol. 37, pp. 237-266 (1941).
- 6). 吉田信之、荻野悦生、横川 明:下水汚泥の管路輸送特性、下水道協会誌、Vol. 9, No. 92, pp. 2-14 (1972).
- 7). 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)
- 8). 大阪市下水道局:汚泥輸送に関する実験報告書 (1995).
- 9). Chou, T. L. : Resistance of Sewage Sludge to Flow in Pipes, Proc. ASCE, SA5, Paper 1780 (1958).
- 10). Brisbin, S. B. : Flow of Concentrated Raw Sewage Sludges in Pipes, Proc. ASCE, SA3, Paper 1274 (1957).
- 11). 東京都下水道局:汚泥輸送に関する調査報告書(その3) (1982).
- 12). 金井重夫、伊原恒己、田中良穂:送泥システムの設計・維持管理に関する基礎調査、ダクタイル鉄管、No. 52, pp. 29-47 (1992).
- 13). Behn, V. C. : Derivation of Flow Equations for Sewage Sludges, Proc. ASCE, SA6, pp. 59-81 (1960).
- 14). Annen, G. : Zur Berechnung der Reibungsverluste von Klarschlamm, GWF, 104 Jahrg., Heft 12, pp.342-346 (1963).
- 15). 富田幸雄:非ニュートン流体の管内流れについて、日本機械学会論文集、Vol. 24, No. 141, pp. 284-294 (1958).
- 16). 松原 誠、渡部春樹、佐藤和明、笠井淳史:下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測方法、環境工学研究論文集、Vol. 30, pp. 257-266 (1993).
- 17). Dodge, D. W. and Metzner, A. B. : Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems, A. I. Ch. E. Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 189-204 (1959).
- 18). 松原 誠、渡部春樹、加藤一幸:下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測、第32回下水道研究発表会講演集、pp. 841-843 (1995).
- 19). Yamashita, H., Watanabe, H., Ozaki, M. and Matsubara, M. : Biosolids Rheology and Friction Losses in Pipes, WEFTEC Asia Singapore 1998, Vol. 2, pp. 633-640 (1998.3).

10. 使用記号一覧

A_n : Dodge-Metzner 式の係数1	α : 汚泥倍率 [-]
B_n : Dodge-Metzner 式の係数2	β : 汚泥倍率の構成係数 [-]
C : 汚泥濃度 [%]	η : ビンガム流体の塑性粘度 [Pa·s]
C_H : Hazen-Williams の流速係数	θ : 非ニュートン流体の見かけ粘度 [Pa·s]
C_H' : Chou による汚泥濃度により補正された C_H	μ : ニュートン流体の粘性係数 [Pa·s]
D : 速度勾配(ずり速度) [1/s]	π : 円周率
d : 管内径 [m]	ρ : 密度 [kg/m ³]
f : Darcy-Weisbach の摩擦損失係数 [-]	τ : セン断応力 [Pa]
g : 重力加速度	τ_y : ビンガム流体の降伏値 [Pa]
H_f : 管路長 L あたりの損失水頭 [m]	
k : 擬塑性流体の擬塑性粘度 [Pa·s ^{n}]	
k_s : 管壁の絶対粗度 [m]	
L : 管路長 [m]	
M : 日発生汚泥量 [DSI]	
n : 擬塑性流体の構造粘度指数 [-]	
ΔP : 単位長さあたり圧力損失 [Pa/m]	
r : $=d/2$ [m]	
Re : ニュートン流体のレイノルズ数 [-]	
Rep : 擬塑性流体のレイノルズ数 [-]	
Rep_{cr} : 擬塑性流体の臨界レイノルズ数 [-]	
$u = u(y)$: y における流速 [m/s]	
V : 管内平均流速 [m/s]	
V_{cr} : 臨界流速 [m/s]	
y : 円管の中心からの距離 [-]	

付録 関連発表論文

- 1 下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測方法 環境工学研究論文集, Vol.30, pp. 257-266, 1993.
- 2 下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測 第32回下水道研究発表会講演集, pp.841-843, 1995.
- 3 Biosolids Rheology and Friction Losses in Pipes WEFTEC ASIA, Singapore, pp.633-640, 1998.

下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測方法

PREDICTION OF PIPELINE PRESSURE DROP FOR SEWAGE SLUDGE

松原 誠* ・ 渡部春樹* ・ 佐藤和明* ・ 笠井淳史**

Makoto MATSUBARA*, Haruki WATANABE*, Kazuaki SATO*, Atsushi KASAI**

ABSTRACT ; Sewage sludge pumping experiments were conducted by using a loop pipeline to establish the methods of predicting pressure drop. To avoid changing sludge viscosity during pressure measurement and to measure the viscosity exactly by the rotational viscometer, sample sludge was fully circulated and sludge particles were disintegrated to some extent before the measurement. In case of laminar flow, experimental Darcy-Weisbach's friction loss factor f was successfully expressed by Reynolds number R_e for non-Newtonian fluid, such as Bingham Plastic and Pseudoplastic. The relationship between R_e and f became $f = 64/R_e$ like water. In case of turbulent flow, however, sludge did not have the same relationship as water except for dilute Newtonian sludge. The method proposed by Dodge and Metzner gave us a relatively good result. The applicable region of Chou's method, which has been used commonly in Japan and is based on sludge multiplication factor, turned out to be very limited. Then, we tried to improve on this method and proposed a new one to which the factor calculated with sludge concentration and average velocity was applied.

KEYWORDS ; Sludge Pumping, Viscosity, Friction Loss Factor, Reynolds Number, Sludge Multiplication Factor

1. はじめに

下水汚泥の管路輸送は、液状の汚泥を最も効率的にかつ経済的に輸送する方法として処理場内、処理場間の汚泥輸送に用いられている。送泥管の圧力損失は送泥システムを設計する際の最も重要な因子の1つであるが、Vesilind¹⁾も "Sludge pumping is not an exact science." と述べているようにその予測は容易ではなく、正確で適用範囲の広い予測方法はいまだに確立されていない。

汚泥の圧力損失を包括的に扱うためには層流と乱流の2つの予測式が必要である。これは、通常の水の管路内流れでは乱流のみを考慮すればよいが、濃厚な汚泥は粘性が高く、流速や管径が十分に大きくても層流が生じる可能性があるためである。予測式を流れの状態によって使い分けるためには、層流と乱流の境界条件を明確にしておく必要がある。

また、水はニュートン流体であるのに対し汚泥は希薄な場合を除いて非ニュートン流体であり、速度勾配の増加に伴い見かけ粘度が低下する性質をもつ。このため汚泥の流動特性は2つのレオロジー定数をもつビンガム流体 (Bingham Plastic) もしくは擬塑性流体 (Pseudoplastic) として扱われてきた。流体モデルの選択はおもに粘度測定の結果からなされており、管路輸送の観点から比較検討された例は少ない。

レオロジー定数を決定するためには正確な粘度測定が必要である。一般に汚泥の粘度は回転粘度計により測定されるが、汚泥中の粗大粒子が2筒間の間隙に引っかかる場合は測定ができない。また、汚泥は流動変

* 建設省土木研究所 (Public Works Research Institute, Ministry of Construction)

** 小野田ケミコ株式会社 (Onoda Chemico Co., Ltd.)

形を受けることにより粘性が低下する性質（チクソトロピー）をもつため、測定条件（回転数や回転時間）によって得られるレオロジー定数が変化する。既存の研究においても様々な測定結果が報告されており、例えばニュートン流体との境界濃度について、遠藤ら²⁾は0.4%、Mulbargerら³⁾は1%と報告しているのに対し、Chou⁴⁾や川島⁵⁾は4%としている。またチクソトロピーの境界濃度については、高田ら⁶⁾が7%としているのに対し、遠藤ら²⁾は0.5%でもチクソトロピーが生じたとしている。このような粘度測定の難しさとそれに起因する測定結果のばらつきも、予測方法により値が大きく異なる原因の1つであると考えられる。

そこで本研究では、圧力損失の予測方法確立のための基礎的段階として、粘度測定の障害となる粗大粒子やチクソトロピーの影響を排除した状態で汚泥の管路輸送実験と粘度測定を実施し、これまでに提案されている諸予測式の精度および流体モデルによる差異について検討を行った。さらに、現行の設計指針⁷⁾の予測方法について問題点を指摘し、その改良を試みた。

2. 実験装置および方法

2. 1 汚泥輸送実験装置

実験装置は Fig. 1 に示すように、貯留タンク、送泥ポンプ、送泥管からなるループであり、供試汚泥を循環圧送した際の圧力損失を、側管に設置した電子式差圧発信器により測定するものである。

貯留タンクは容量 200l で、タンク内の汚泥は均質化を図るため攪拌器により常時攪拌される。汚泥はタンク底部より引き抜かれ、送泥管を経由してタンク上部の戻り管から再びタンクに返される。送泥ポンプは1軸ネジポンプで、濃厚な汚泥でも脈動がなく一定流量で送泥することが可能である。送泥管は管径 36.8mm のステンレス鋼管で、管壁は滑らかであることを清水実験により確認した (Hazen-Williams 式の流速係数 $C_H = 150$)。圧力損失測定区間は直管部 20m で、その手前 4m を助走区間とした。測定区間内はフランジを設けず管の接合は溶接によった。送泥管の全長は約 55m であり、送泥管全体が水平となるように設置した。差圧発信器の測定スパンは連続可変であり、出力はペンレコーダーにより記録される。側管にはあらかじめ清水を封入して気泡を除去した。

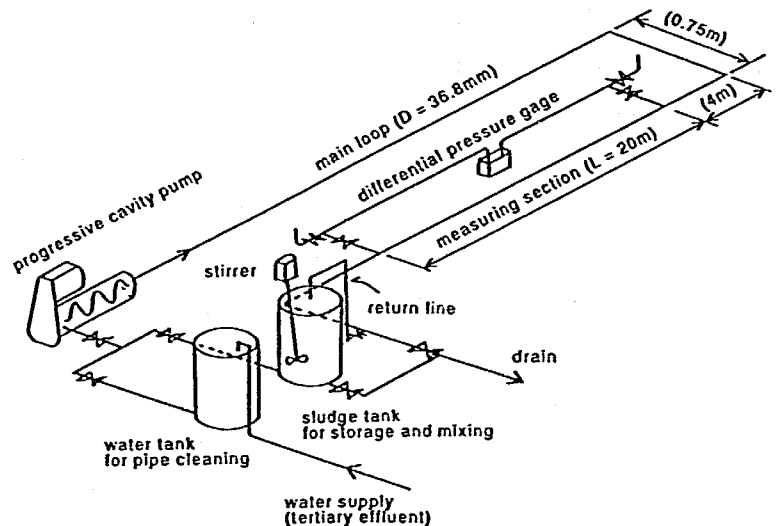


Fig. 1 Schema of Sludge Pumping Transportation Equipment

Table 1 Characteristics of tested sludges

Test No.	Type of sludge	TS [%]	VS [% of TS]	Temp. [°C]	Density [kg/m ³]
1	Digested	1.60	64.5	10	1008
2	Digested+W*	0.80	64.4	11	1004
3	Digested+D**	2.01	68.3	9	1012
4	Digested+D	2.72	69.8	20	1008
5	Thickened+D	4.24	75.4	30	1010
6	Thickened+D	5.52	73.2	27	1007
7	Primary	0.58	77.5	26	1000
8	Primary+W	0.41	75.7	26	997
9	Digested	1.59	64.2	36	1000
10	Digested+W	0.65	64.1	23	1001
11	Digested+D	5.47	66.9	29	1021
12	Digested+D	6.18	67.2	32	1021

* +W : mixed with Water (tertiary effluent)

** +D : mixed with Dewatered sludge (TS=80, VS=70)

Table 2 Dimensions and measurement program of Rotational Viscometer

Types of Viscometer	Haake, RV12
Sensor System	MV1
Rotor Height	60 mm
Rotor Radius	20.04 mm
Cup Radius	21.0 mm
Radii Ratio	1.05
Acceleration Region	6 min
Hold Region	0 min
Deceleration Region	6 min
Maximum Rotational Speed	128 rpm [= 300 s ⁻¹]

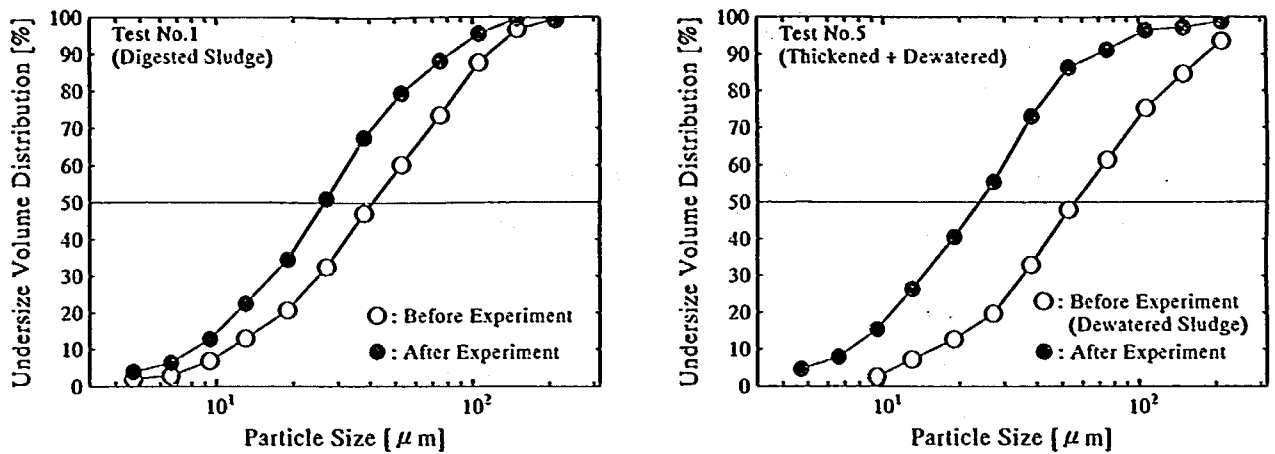


Fig. 2 Examples of particle size distribution

2. 2 実験方法

供試汚泥には霞ヶ浦浄化センターの初沈汚泥、混合濃縮汚泥、消化汚泥、およびこれらを貯留タンク内において脱水汚泥もしくは三次処理水と混合して濃度調整を行ったものを用いた。汚泥の固形物濃度の範囲は0.4~6.2%, 供試汚泥量は1回の実験につき約160lであった。供試汚泥の性状についてTable 1に示す。

本装置では汚泥を高速で循環圧送するため汚泥粒子の崩壊に伴う粘度低下が避けられず、また供試汚泥が濃厚な場合はチクソトロピーによっても粘度が低下するおそれがある。そこで、測定中の汚泥粘度を一定に保ち、かつ粗大粒子やチクソトロピーの影響を排除して粘度測定に支障がない状態を現出するため、測定時の最大流速にて1~2時間供試汚泥を循環圧送し、圧力損失がほぼ一定となってから測定を開始することとした。実験前と実験後の汚泥の粒度分布をレーザー回折・散乱式粒度分析計により測定した例がFig. 2であり、実験後の粒子の微細化が顕著にあらわれている。

測定は流速を大きい方から小さい方へ10点ほど変化させて行った。流速の範囲は0.1~1.9 m/sであり、これは設計指針で推奨されている流速範囲1~1.5 m/sを含んでいる。流速は戻り管部分において汚泥流量を実測して換算した。汚泥温度は貯留タンク内に設置した温度計により数回測定し、その平均を実験時の汚泥温度とした。測定中の温度変化は概ね1℃程度であった。しかし各実験ごとの汚泥温度は気温、天候に左右され、温度差は最大27℃に達した。供試汚泥の粘度は輸送実験後に実験時の汚泥温度のもとで回転粘度計を用いて測定した。粘度計の諸元および測定方法についてTable 2に示す。汚泥粒子の微細化を反映して粘度測定は円滑に行われた。汚泥密度はピクノメーターにより比重を測定し、実験時の温度の密度に換算した。

以上のように、本実験においては供試汚泥の粒子を強制的に微細化させており、また温度差も大きいので実験条件はいささか不備であるといわざるを得ないが、測定された粘度と圧力損失によりレオロジカルな考察を行う限りにおいては影響がないと考えられる。

3. 実験結果および考察

3. 1 供試汚泥の粘性

擬塑性流体およびビンガム流体においては、せん断応力 τ [Pa] と速度勾配 du/dy [s^{-1}] との関係は次のようになる。

$$\text{Pseudoplastic : } \tau = k (du/dy)^n \quad (1)$$

$$\text{Bingham Plastic : } \tau = \tau_y + \eta (du/dy) \quad (2)$$

ここで k [$Pa \cdot s^n$] は擬塑性粘度、 n [-] は構造粘度指数、 τ_y [Pa] は降伏値、 η [$Pa \cdot s$] は塑性粘度とよばれるレオロジー定数である。測定された流動曲線の16~128rpm ($37.5 \sim 300 s^{-1}$) のデータから求められる各

レオロジー定数を汚泥濃度 C [%] で整理すると Fig. 3 のようになり $C > 0.7\%$ においては C の関数として次のように表すことができた。

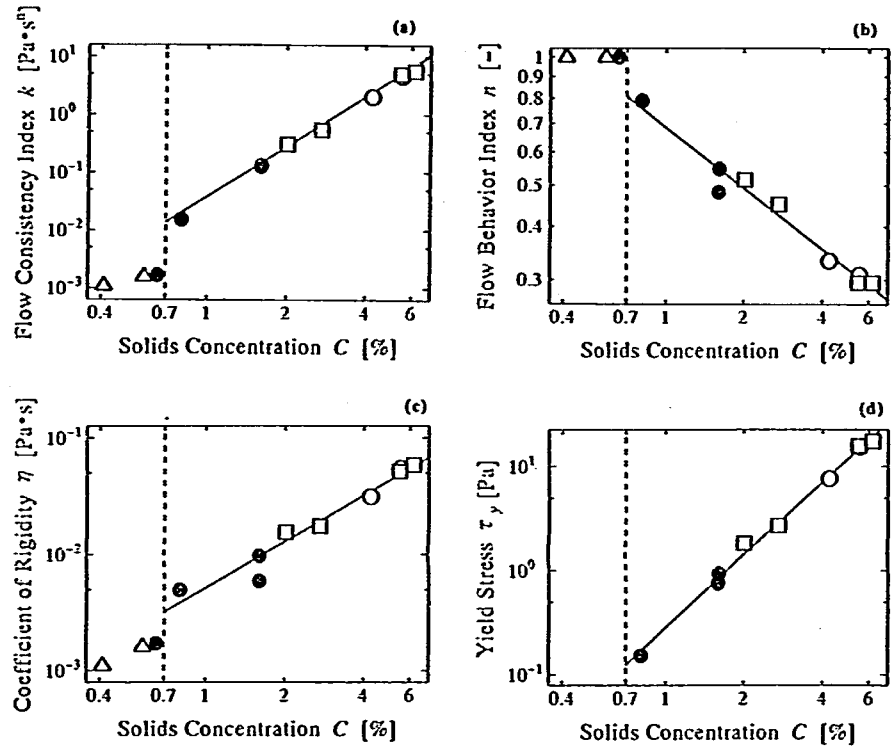
$$\text{Pseudoplastic : } k = 0.0385 C^{2.87} ; \quad n = 0.682 C^{-0.473} \quad (3)$$

$$\text{Bingham Plastic : } \tau_y = 0.283 C^{2.32} ; \quad \eta = 0.00516 C^{1.32} \quad (4)$$

汚泥の種類や温度が異なるにも関わらずレオロジー定数が C の関数として表されたことから、粒子の微細化に伴い汚泥性状が均質化されたこと、および濃度変化に比べて温度変化の影響が小さいことが推察される。また $C < 0.7\%$ ではニュートン流体として扱うことができた。

3. 2 層流域の圧力損失

層流域における非ニュートン流体の挙動についてはすでに理論的に導出されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。圧力損失の考え方は水の場合と同様で、管内の応力分布と各流体の流動特性から管壁の速度勾配 $(du/dy)_w$ を求め、これに対応する管壁の応力 τ_w により圧力損失が生ずるとしている。ここでは、圧力損失を Darcy-Weisbach 式の摩擦損失係数 f で表すこととし、さらに $R_e = 64/f$ とおくことにより非ニュートン流体の場合のレイノルズ数を定義すれば、流体モデルによらず水の場合と同じ式により圧力損失の予測が可能となる。下水汚泥の密度を ρ [kg/m³]、流速を V [m/s]、管径を D [m] とすれば、非ニュートン流体のレイノルズ数は次のように表される。



● : Digested sludge, VS = 64%, Temp. = 10~36℃
 △ : Primary sludge, VS = 76%, Temp. = 20~26℃
 □ : Digested sludge mixed with dewatered sludge, VS = 67~70%, Temp. = 9~32℃
 ○ : Thickened sludge mixed with dewatered sludge, VS = 73~75%, Temp. = 27~30℃

Fig. 3 The relationships between solids concentration and rheology coefficients

$$\text{Pseudoplastic : } R_{eP} = \frac{8 \rho V^{2-n} D^n}{k[(6n+2)/n]^n} \quad (5)$$

$$\text{Bingham Plastic : } R_{eB1} = \frac{\rho V D}{\eta} \left(1 - \frac{4}{3} a + \frac{1}{3} a^4\right); \quad a^4 - 4a + 3 = 24(\eta V/D \tau_y) a \quad (6)$$

$$R_{eB2} = \frac{\rho V D}{\eta + (\tau_y D)/(6V)} \quad (7)$$

ここで、ビンガム流体のレイノルズ数は R_{eB1} であるが、比栓半径 $a (= \tau_y/\tau_w)$ を求めるには4次方程式を解く必要があり実用的でない。そこで(6)式において $a \ll 1$ と仮定して求まる R_{eB2} が用いられることが多い。 f の予測値はこれらのレイノルズ数を用いて $f_{\text{PREDICTED}} = 64/R_e$ から求められる。伊藤¹¹⁾ や富田¹²⁾ は

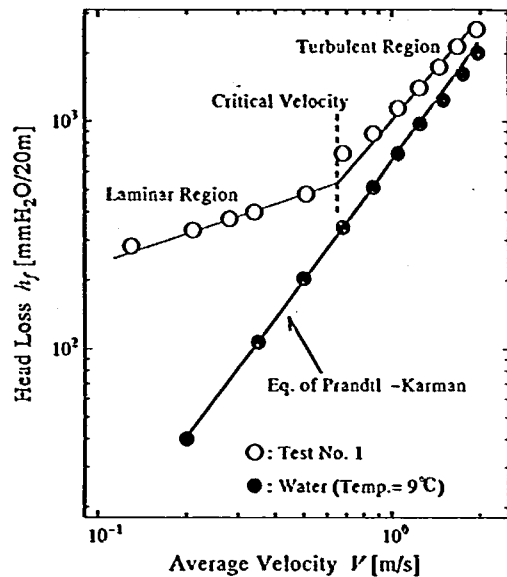


Fig. 4 An example of the relationship between average velocity and head loss

$R_{eB3} = R_{eB1} \cdot (1-a)$ なるレイノルズ数を用いる独自の方法を提案しているが、結局 R_{eB1} を用いた場合と同じ f が得られる。また、ヘッドストレーン数を用いる方法^{10),13)} も R_{eB1} の場合と同じ計算結果が得られる。

一方、損失水頭の測定値を h_f [m] とすれば f の実測値は次式により計算される。

$$f_{\text{EXPERIMENTAL}} = h_f \cdot \frac{\rho_w}{\rho} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{2g}{V^2} \quad (8)$$

ここで、 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $L = 20\text{m}$, $D = 0.0368\text{m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ である。汚泥の流れが層流であるかどうかの判断は、Fig. 4 のように V と h_f を両対数紙上にプロットしその傾きから判断した。

f の予測値と実測値とを比較したものが Fig. 5 である。流体モデルによる差異は小さく、どの方法によっても予測可能であることが明らかとなった。しかし、高濃度の場合には予測値が大きくなる傾向があり、流速を下げながら測定している間に粘度が回復した可能性のあることを示唆している。

また R_{eB2} はレイノルズ数の小さい領域において多少誤差が大きく、 R_{eB1} は計算が煩雑であることから、 R_{eP} が f の予測に最も適したレイノルズ数であるといえる。

3. 3 乱流域の圧力損失

乱流域の圧力損失を求めるためのアプローチは大きく2つに分けることができる。1つは、層流域と同様にレイノルズ数を用いるレオロジカルな方法で、もう1つは、汚泥の圧力損失が、同じ条件における水の圧力損失の何倍にあたるかを汚泥濃度などから求めようとする方法である。設計指針の方法は后者であり、こ

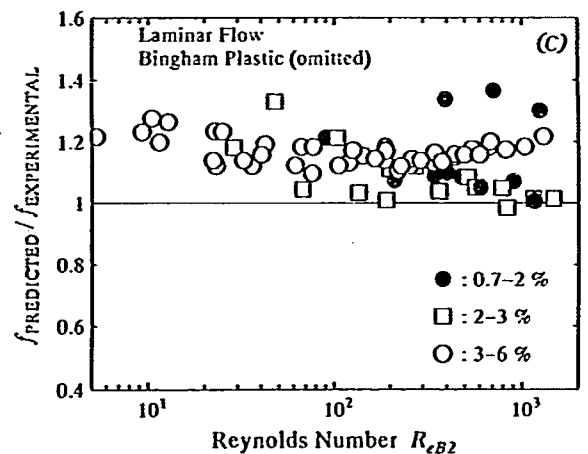
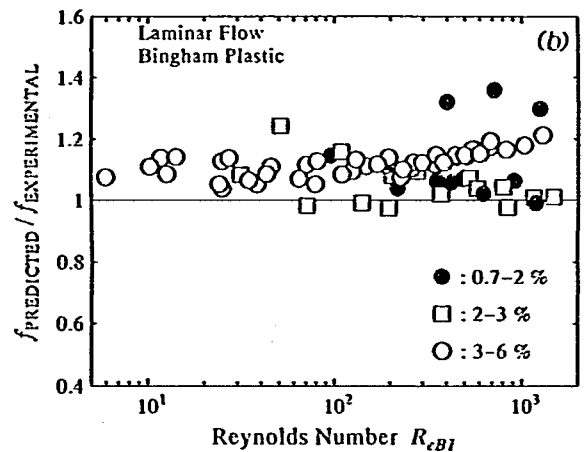
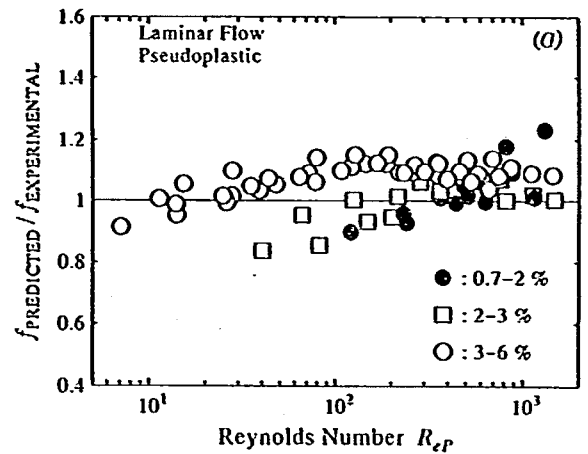


Fig. 5 Comparison between the prediction methods in laminar region

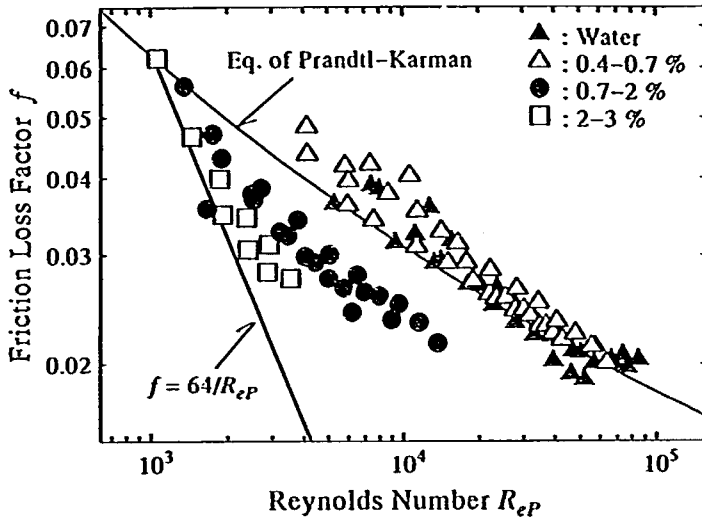


Fig. 6 The relationship between experimental friction factor and Reynolds number for pseudoplastic fluid

れについては後述することとし、ここではレイノルズ数を用いた予測方法について検討する。

非ニュートン流体の乱流域における挙動は十分に解明されておらず、既存の研究においては実験的考察により f と R_e の関係を求めたものが多い。例えば Caldwell ら⁸⁾ は、汚泥の分散媒である水の粘度 μ_w を用いたレイノルズ数 $R_{ew} = \rho V D / \mu_w$ により f が予測できるとしている。この方法では汚泥と水の圧力損失は等しいことになる。また、伊藤¹¹⁾ や富田¹²⁾ は前述の R_{eB3} を用いれば水の場合と同じ摩擦抵抗則が成り立つと述べている。遠藤ら²⁾ も f を広義のレイノルズ数の関数として表現している。

(8) 式から求まる乱流域における f の実測値を擬塑性流体のレイノルズ数 R_{eP} で整理したものが Fig. 6 である。図中には水の滑管摩擦抵抗則 (Prandtl-Karman 式) による計算結果も示したが、これと一致するのはニュートン流体として扱える希薄な汚泥のみであり、濃度が高くなるほど f は小さくなる傾向があった。この結果から、乱流域の摩擦損失係数はレイノルズ数のみにより表現できないことが明らかである。

既存の研究において f が R_e のみの関数とされた背景として実験条件の不備を指摘することができる。つまり、Caldwell らの実験は通常の管路輸送では用いられないような過大な流速 (2~10 m/s) で行われていること。伊藤の実験では、汚泥をはじめとする高濃度のデータは層流域だけで、乱流域のデータはほとんどニュートン流体として扱えるような低濃度のものしかないこと。遠藤らの実験においては汚泥濃度の範囲が限定されていること (滑管に対し 0.5~2 %) 等である。

これに対し Dodge ら¹⁴⁾ は擬塑性流体の乱流域の挙動について、その速度欠損は k には依存しないが n に依存すると仮定し、次元解析と管路実験から次のような n を含んだ摩擦抵抗則を提案している。

$$\sqrt{\frac{1}{F}} = \frac{4.0}{n^{0.75}} \log (R_{eP} \cdot F^{1-n/2}) - \frac{0.40}{n^{1.2}} \quad (9)$$

ここで F は Fanning の摩擦係数で、 $f = 4F$ の関係がある。(9) 式では、ニュートン流体の場合 ($n = 1$) は

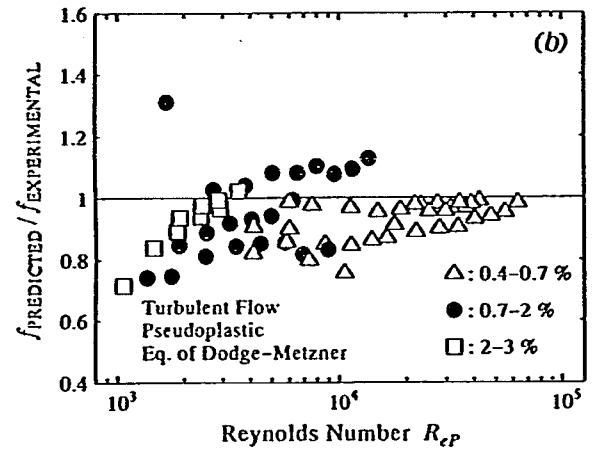
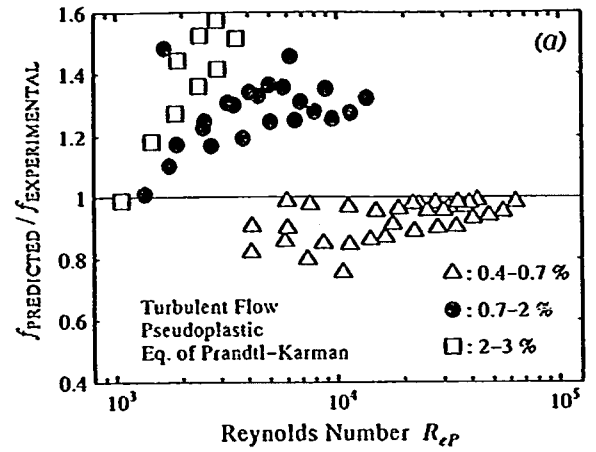


Fig. 7 Comparison between the prediction methods in turbulent region

Prandtl-Karman 式と同じ結果が得られるが、 $n \neq 1$ の場合は R_{eP} が等しくても n が小さいほど f の予測値も小さくなる。Fig. 7 に Prandtl-Karman 式および Dodge らの式による f の予測値と実測値とを比較した結果を示した。どちらも R_{eP} を用いているが、Dodge らの方法では $C > 0.7\%$ のときの誤差も小さく、レイノルズ数の小さい領域 ($R_{eP} < 2000$) を除けば層流域と同程度の予測精度が得られた。

3. 4 層流の生ずる条件

層流と乱流の予測式を使い分けするためには、層流の生ずる条件を明確にしておく必要がある。本実験においては濃度が 0.7~3% の場合に乱流から層流への遷移が生じた。 $V-h_f$ 線図の変曲点 (Fig. 4 参照) から求められる臨界流速 V_{cr} および擬塑性流体の臨界レイノルズ数 R_{ePcr} を汚泥濃度で整理したものが Fig. 8 である。臨界流速は汚泥濃度の上昇とともに増加し両者の間にはよい相関がみられた。臨界レイノルズ数は 1000~1700 の範囲にあり約 1500 とすることができた。濃度との関係は明確でなかった。

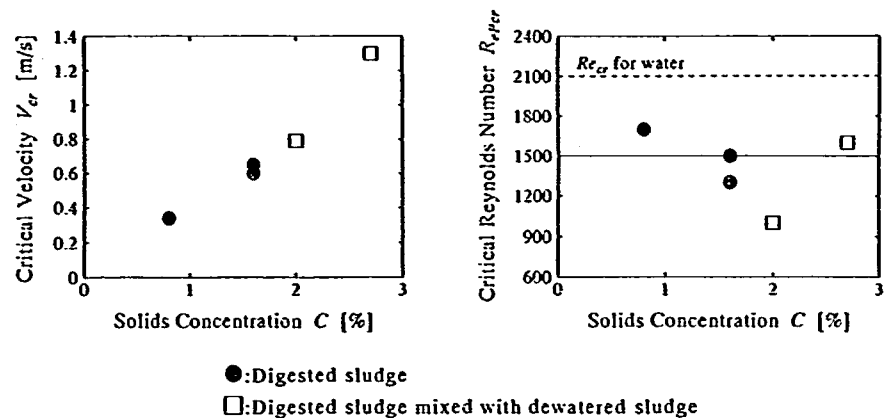


Fig. 8 Measured critical velocity and critical Reynolds number

のが Fig. 8 である。臨界流速は汚泥濃度の上昇とともに増加し両者の間にはよい相関がみられた。臨界レイノルズ数は 1000~1700 の範囲にあり約 1500 とすることができた。濃度との関係は明確でなかった。

水の臨界レイノルズ数は 2100 程度であり¹⁵⁾、今回の実験結果は水の値より幾分小さい値を示している。これに対し Caldwell ら⁸⁾ はビンガム流体の臨界レイノルズ数が 2000~3000 の範囲であることを実験と文献値により確かめている。Dodge ら¹⁴⁾ も n が小さくなるほど擬塑性流体の臨界レイノルズ数は増大し、 $n = 0.38$ のとき $R_{ePcr} = 3100$ であったと報告している。本実験においては、臨界流速付近の測定点が少なかったこと、流速を減ずる方向のみの測定であったこと、遷移域では圧力が変動しやすかったこと、および流れの状態を目視により観察していないこと等の理由によりこのような差が生じたと考えられ、正確な臨界レイノルズ数の測定は今後の課題である。しかし、いずれにしても水の臨界レイノルズ数と大きく異なることはないものと考えられる。

Table 3 Chou's suggestion for turbulent flow head loss

% Solids C	0	2	4	6	8	10
Recommended Percentage (C_H'/C_H) $\times 100$	100	80	63	50	40	34
Sludge Multiplication Factor $\alpha = (C_H'/C_H)^{1.85}$	1	1.5	2.4	3.6	5.4	7.4

3. 5 汚泥倍率に基づく簡便法

汚泥倍率 (Sludge Multiplication Factor) は、汚泥の圧力損失が同一条件で流れる水の圧力損失の何倍に相当するかを表したもので、粘度測定を行わずに汚泥濃度などから圧力損失を予測するため

の簡便法として用いられてきた。乱流域では層流域に比べ圧力損失に及ぼす粘度の影響が小さくなり、粘度を濃度で代用することによる誤差も小さくなるので、このような考え方も有効な方法の 1 つである。

設計指針の予測方法は、Chou⁴⁾ が Brisbin¹⁶⁾ の実験データをもとに提案したものであり、汚泥倍率の考え方に基づくものである。汚泥の損失水頭 h_f [m] は、Hazen-Williams 式の流速係数 C_H のかわりに、汚泥濃度 C [%] の増加に伴い C_H を Table 3 で示すような割合に減じた C_H' を用いて次のように計算される。

$$h_f = 6.82 \frac{L}{D^{1.17}} \left(\frac{V}{C_H'} \right)^{1.85} = \alpha \left[6.82 \frac{L}{D^{1.17}} \left(\frac{V}{C_H} \right)^{1.85} \right] \quad (10)$$

ここで、 $\alpha = (C_H'/C_H)^{1.85}$ は汚泥倍率、 L [m] は管長、 V [m/s] は流速、 D [m] は管径である。

しかし、Chou の方法はいくつかの問題点を含んでいる。Fig. 9 は、本方法による汚泥倍率と、今回の実

験における乱流域の損失水頭の実測値から計算された汚泥倍率を比較したものであるが、汚泥倍率は濃度だけでなく流速によっても影響を受けることがわかる。Chouの方法による予測値は過大評価であるとする報告^{17),18)}があるが、本実験における流速 1m/s 以下の場合には、むしろ過小評価であった。

次に、本方法だけでは流れが乱流であることを判断できないという問題がある。汚泥の流れが層流であっても同じ条件の水の流れは乱流と考えてよく、Fig. 4 の場合のように汚泥倍率は 10 倍にも達することがある。このような場合、本方法による予測値はかなり過小評価になると考えられる。また Chou は汚泥倍率について $C = 10\%$ まで言及しており、あたかも $C = 10\%$ でも本方法が適用可能であるかの印象を受けるが、わが国で 10% の汚泥といえばほとんど流動性がなく、乱流で流れる可能性は低い。

さらに、Chou が参考とした Brisbin の実験データにも問題が多い。実験条件が $V = 1.5\text{m/s}$, $D = 100\text{mm}$, $C_H = 100$ の場合に限定されており、供試汚泥についても $C < 4\%$ のデータが 1 つもない。また実験に用いられたポンプが脈動のあるタイプであり、圧力損失の測定に際して少なからず誤差を含んでいるものと考えられる。

以上の問題点を改良するために、レオロジカルな方法により汚泥倍率の試算を行った。試算に際しては次のような仮定をおいた。

- (1). 汚泥は擬塑性流体として扱い、レオロジー定数 k , n は (3) 式で表される。
- (2). 汚泥の圧力損失は、Dodge らの方法 (9) 式から求められる。
- (3). 乱流は $Re_P > 1500$ のときに生ずる。
- (4). 水の圧力損失は Prandtl-Karman 式により求める。
- (5). 汚泥と水の密度はともに 1000 kg/m^3 とする。
- (6). 試算の範囲は、通常の汚泥輸送を考えて $C = 1 \sim 6\%$, $V = 0.25 \sim 2\text{m/s}$, $D = 150 \sim 600\text{mm}$ に限定する。

試算した汚泥倍率を Chou の方法による汚泥倍率と比較した結果が Fig. 10 である。汚泥倍率は特に C , V の影響を大きく受け D の影響は小さかった。各濃度の臨界流速に対応する汚泥倍率を図中に点線で示したが、その値は 2~2.5 の範囲にあり、かつ C の影響をあまり受けないことから、層流との境界のめやすとして用いることができる。Chou の方法は、 $C = 0 \sim 3.5\%$, $V = 1.2 \sim 1.5\text{m/s}$ の範囲のみで適用され得るものと考えられ、これは Fig.

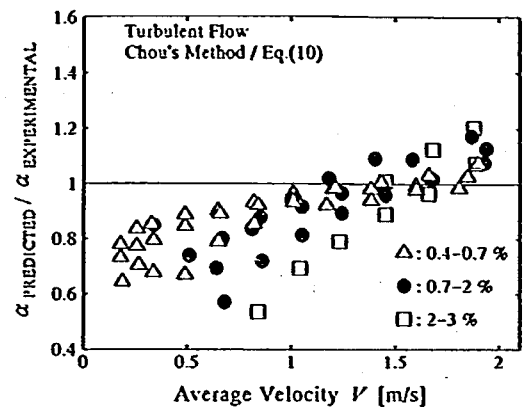


Fig. 9 Comparison of experimental sludge multiplication factor with those predicted by Chou's method

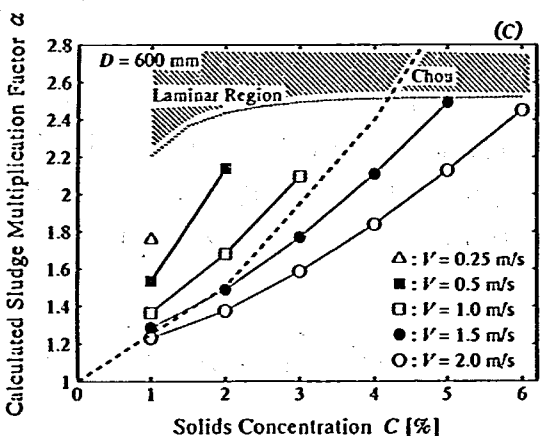
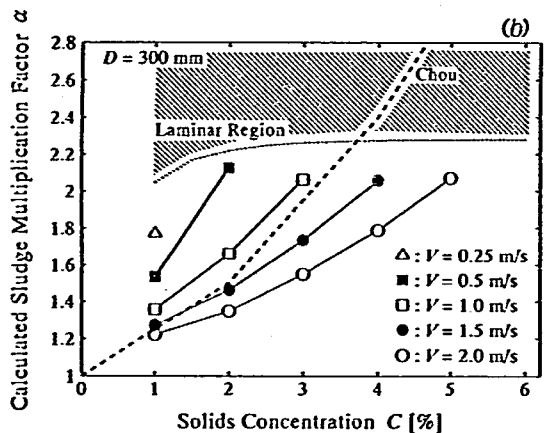
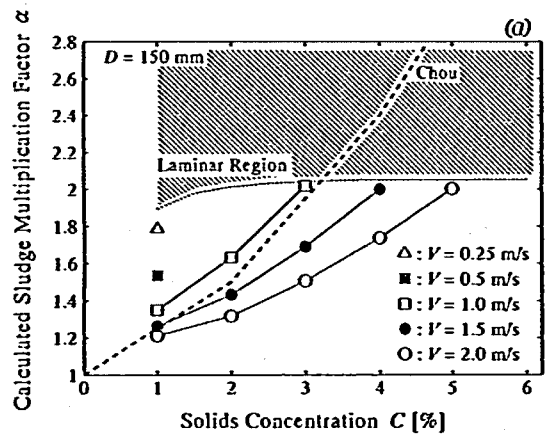


Fig. 10 Sludge multiplication factor calculated on Dodge's method

9の結果ともほぼ一致した。

以上の検討から、汚泥倍率 α は汚泥濃度 C [%] および流速 V [m/s] の2つの要素より予測することが妥当であると考えられ、Fig. 10における各計算値を用いて C , V を独立変数とした重回帰分析を行った結果、次の予測式を得た。

$$\alpha = 0.26C - 0.39V + 1.58 \quad (11)$$

本予測式による汚泥倍率の予測値と実測値とを比較したものが Fig. 11 である。実験は試算の範囲外の $D = 36.8\text{mm}$ で行われているが、 α に及ぼす D の影響が小さいことを反映して予測値と実測値は比較的よく一致している。しかし $Re_P < 2000$ に相当するいくつかの点については予測値が過小評価であった。

今回提案した汚泥倍率を汚泥濃度と流速から求める考え方は、通常の汚泥輸送の範囲全体をカバーすることができるため、Chouの方法よりも有用である。流れが乱流であることは、計算された汚泥倍率が $\alpha < 2 \sim 2.5$ であることをもって判断できる。しかし、(11)式の導出に際して粒子が微細化した汚泥の粘度を用いていること、および Dodge らの予測式は管壁が滑らかな場合のみに適用されることなどから、(11)式の各係数は多少修正を加える必要があろう。また、(11)式は非常に希薄な汚泥の場合は誤差が大きく、 $C = 0$ のとき $\alpha = 1$ とならないが、このような場合には汚泥倍率をほぼ1と考えてよく、実際上は水の予測値に適切な安全率をかけて用いれば問題ないと考えられる。

4. まとめ

本研究においては、正確に圧力損失と粘度を測定するために、汚泥粒子をいくらか微細化した条件のもとで汚泥輸送実験を行い、圧力損失の予測方法について検討した。以下に得られた結果を要約する。

- (1). 汚泥の流動特性を擬塑性流体とビンガム流体で近似した。各レオロジー定数は汚泥性状や実験温度が異なっていたが、濃度の関数として表すことができた。
- (2). 層流域において、非ニュートン流体のレイノルズ数から計算される摩擦損失係数を実測値と比較した。流体モデルによる差異は小さかった。擬塑性流体のレイノルズ数 Re_P が予測に適していた。
- (3). 乱流域においては、摩擦損失係数をレイノルズ数のみの関数として表現することはできなかった。Dodge らの Re_P と n を用いる予測方法が実測値とよく一致した。
- (4). 乱流から層流への遷移は、汚泥濃度によらず $Re_P = 1500$ 程度で生じた。
- (5). 設計指針の予測方法の抱える問題点について検討した。その適用範囲は $D = 150 \sim 600\text{mm}$ の場合、 $V = 1.2 \sim 1.5\text{m/s}$, $C = 0 \sim 3.5\%$ に限定されると考えられる。Dodge らの予測式と本実験における粘度測定の結果を用いて、汚泥倍率を C , V の2つの要素から求める新しい予測式を回帰分析により導いた。この方法は、汚泥が非常に希薄な場合をのぞけば、通常の汚泥輸送の範囲全体に適用可能である。

送泥時の圧力損失の予測方法を確立するためには、管径、管壁粗度、汚泥粒子の微細化、汚泥温度、チクソトロピー等の影響について明らかにしていく必要がある。また同時に、汚泥の粘度測定方法の確立も重要な課題である。

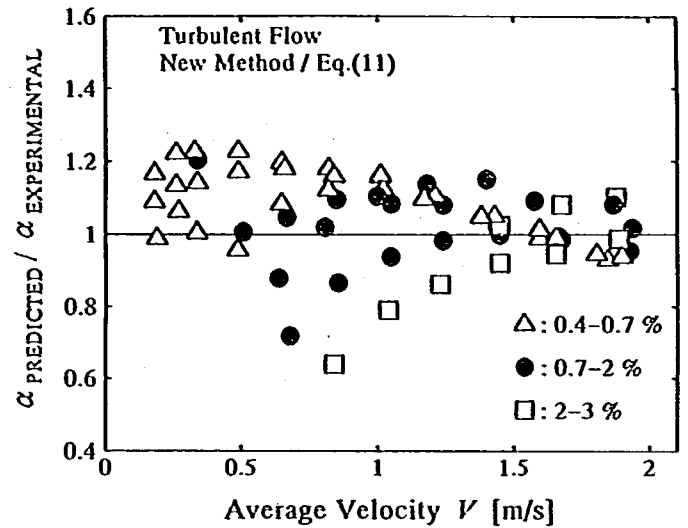


Fig. 11 Comparison of experimental sludge multiplication factor with those predicted by Eq. (11)

参考文献

- 1) Vesilind, P. A. :Treatment and disposal of wastewater sludges, Ann Arbor Science, 1980.
- 2) 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.
- 3) Mulbarger, M. C., *et al.* :Pipeline friction losses for wastewater sludges, Journal WPCF, Vol. 53, No. 8, pp. 1303-1313, 1981.
- 4) Chou, T. L. :Resistance of sewage sludge to flow in pipes, Proc. ASCE, SA5, Paper 1780, 1958.
- 5) 川島 晋 : 下水汚泥の管内塑性流動機構に関する考察, 大阪工業大学紀要, 理工篇, Vol. 8, No. 2, pp. 169-184, 1962.
- 6) 高田 巖, 川島 晋 : 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.
- 7) 下水道施設設計指針と解説 -1984年版-, 日本下水道協会, 1984.
- 8) Caldwell, D. H. and Babbitt, H. E. :The flow of muds, sludges, and suspensions in circular pipe, Trans. A. I. Ch. E., Vol. 37, pp. 237-266, 1941.
- 9) Annen, G. :Zur Berechnung der Reibungsverluste von Klärschlamm, GWF, 104 Jahrg., Heft 12, pp. 342-346, 1963.
- 10) Behn, V. C. :Derivation of flow equations for sewage sludges, Proc. ASCE, SA6, pp. 59-81, 1960.
- 11) 伊藤四郎 : 塑性流体の流れ, 新化学工学講座V, 日刊工業新聞社, 1961.
- 12) 富田幸雄 : 非ニュートン流体の管内流れについて, 日本機械学会論文集, Vol. 24, No. 141, pp. 288-294, 1958.
- 13) Process design manual for sludge treatment and disposal, Chap. 14 "Transportation", U. S. EPA, 625/1-79-011, 1979.
- 14) Dodge, D. W. and Metzner, A. B. :Turbulent flow of non-Newtonian systems, A. I. Ch. E. Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 189-204, 1959.
- 15) 水理公式集 -昭和 60 年版-, 土木学会, 1985.
- 16) Brisbin, S. B. :Flow of concentrated raw sewage sludges in pipes, Proc. ASCE, SA3, Paper 1274, 1957.
- 17) 東京都下水道局計画部技術開発課 : 汚泥輸送に関する調査報告書 (その 3) , 1982.
- 18) 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, 土木学会論文報告集, No. 324, pp. 73-82, 1982.

下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測

建設省土木研究所 ○ 松原 誠
渡部 春樹
岐阜県 加藤 一幸

1. はじめに

下水汚泥の管路輸送において、送泥管の圧力損失の算定は最も重要な設計因子の1つである。著者らはこれまで、送泥管に内径 37mm の滑管（ステンレス鋼管：SUS）を用いた実験により、圧力損失の計算には汚泥を擬塑性流体として扱うことが適していること等の結論を得ている¹⁾。今回はこの実験装置に改造を加え、内径 108mm の滑管 (SUS) と内径 94mm の粗管（ダクタイル鋳鉄管内面モルタルライニング：DIP）を増設して、送泥管の圧力損失の予測方法について更に検討を加えた。

2. 実験装置と実験方法

実験装置は2つの独立した送泥ループからなる。各ループは全長 55m で、直管部 20m の圧力損失を差圧計により、流速を電磁流量計により測定する。装置と測定手法について清水を用いた予備実験により確認した。表1に各送泥管の概要を示す。実験は、まず貯留タンク内で汚泥を攪拌、均質化させ、次にポンプを起動し流速を徐々に増加させて約 20 点の測定を行う。その後流速を減じ、各ループに設置された透明管で流動状態を観察しながら臨界流速付近を重点的に測定した。実験はループ2、ループ1の順で行った。

供試汚泥は8種類で、K 浄化センターの余剰汚泥、濃縮汚泥、およびこれらを脱水汚泥や処理水により濃度調整したものをを用いた。供試汚泥量は1実験につき 0.8m³ である。汚泥の流動特性は、実験時の温度で、共軸円筒型回転粘度計 (Haake, RV12) により測定した。汚泥が粗大粒子を含む場合には円筒間隙を広くとり、文献²⁾に示した方法により補正した。実験の前後における流動特性の変化は無視できる程度であり、チクソトロピーの影響もほとんどなかった。供試汚泥の性状について表2に示す。

3. 実験結果

3.1 摩擦損失係数と擬塑性流体のレイノルズ数の関係

圧力損失の実測値から得られる Darcy-Weisbach の摩擦損失係数 f_{EXP} と擬塑性流体のレイノルズ数 Re_p との関係を図1～3に示す。ここで Re_p は K, n, d, V , および汚泥密度 ρ [kg/m³] を用いて、

$$Re_p = 8 \rho V^{2-n} d^n K^{-1} [(6n+2)/n]^{-n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。 ρ の変動幅は小さく Re_p への影響も小さいので、計算はすべて $\rho = 1,000$ として行った。

図より、層流域については管種、管径によらず $f = 64/Re_p$ が成り立つことがわかる。この関係は清水の場合と同一である。しかし乱流域では、同一レイノルズ数の清水と比べ f は常に小さくなる。

表1 各送泥管の概要

送泥管	ループ1		ループ2	
	測定部1	測定部2	測定部3	
管種	SUS	SUS	DIP	
流速係数 CH	150	155	130	
相対粗度 k/d [-]	0	0	0.003	
内径 d [m]	0.037	0.108	0.094	
測定部長さ L [m]	20	20	20	
助走部長さ L' [m]	4	2	2	
最大流速 V_{max} [m/s]	3	1.8	2.4	
最小流速 V_{min} [m/s]	0.1	0.4	0.6	

表2 供試汚泥の性状

Run No.	汚泥種類	濃度 [%]	温度 [°C]	擬塑性粘度 K [Pa·s]	構造粘度指数 n [-]
1	余剰	0.77	39	0.024	0.62
2	1+処理水	0.59	36	0.006	0.81
3	濃縮	1.20	38	0.041	0.62
4	3+処理水	0.90	35	0.011	0.78
5	余剰	1.42	31	0.068	0.61
6	5+脱水	2.36	40	0.362	0.41
7	6+脱水	3.67	37	0.997	0.34
8	7+脱水	4.08	32	2.070	0.34

滑管乱流域では f と Re_p の関係が清水の場合とほぼ平行に推移し、かつ n が小さいほど f が小さくなる。Dodge ら³⁾ は、擬塑性流体（高分子溶液）を用いた管路輸送実験から同様な結果を得て、

$$1/\sqrt{F} = (4.0/n^{0.75}) \log(Re_p \cdot F^{1-n/2}) - (0.40/n^{1.2}); \quad f = 4F \quad \dots\dots\dots (2)$$

という半理論式を導いている。滑管乱流域（遷移領域を除く）の f_{EXP} を式 (2) による計算値 f_{PRED} と比較したものが図 4 である。構造粘度指数 n が 0.4 以上の場合は実測値と計算値がほぼ一致するが、 $n < 0.4$ の場合には予測精度が悪く、さらに管径の影響も生じてくることがわかる。これは Dodge らの実験において、この領域のデータが不十分で、予測式に反映されていないためと考えられる。よって、本予測式を高濃度汚泥にも適応しうる汎用性の高いものとするためには、 $n < 0.4$ のデータも含めて式中の係数を再評価する必要がある。またこのとき、管径の影響についても考慮しなければならない。

一方、粗管乱流域では滑管の場合ほど n の影響が顕著ではなかった。よって f と Re_p の関係を両対数紙上で直線近似することができる。今回の実験データからは次のような関係式が得られた。

$$f = 0.0486 Re_p^{-0.0572} \quad [4 \times 10^3 < Re_p < 10^5] \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中の係数に汎用性を持たせるためには、各種の粗度に対する検討が必要である。

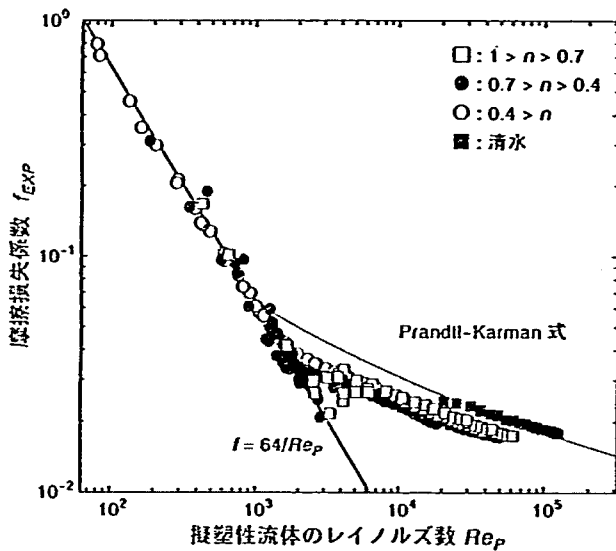


図 1 汚泥管路輸送実験の結果 (SUS, $d=0.037$)

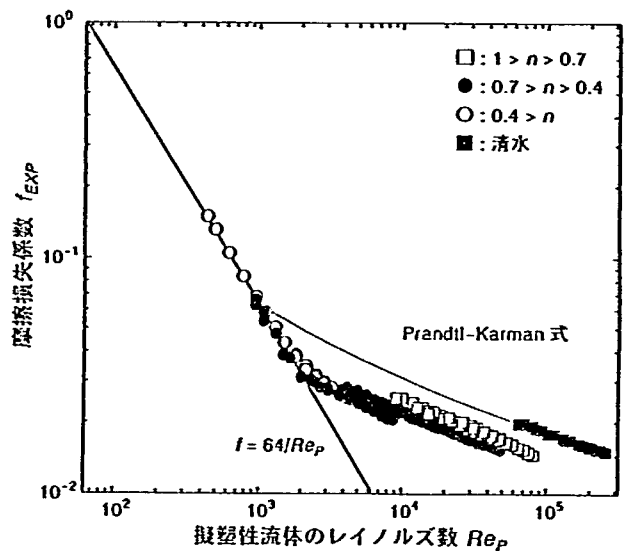


図 2 汚泥管路輸送実験の結果 (SUS, $d=0.108$)

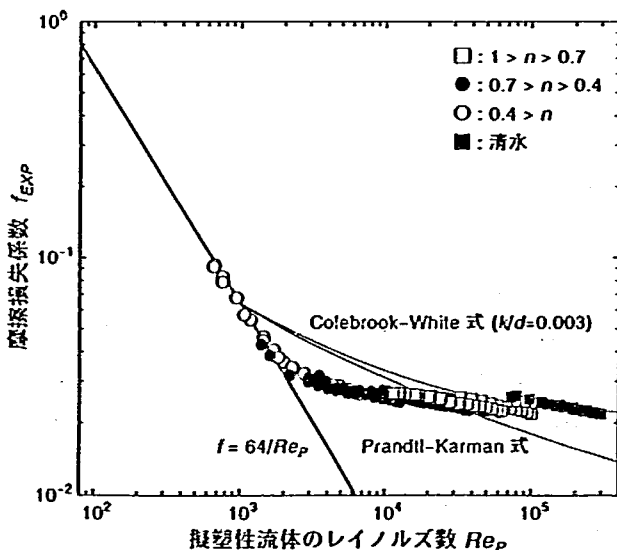


図 3 汚泥管路輸送実験の結果 (DIP, $d=0.094$)

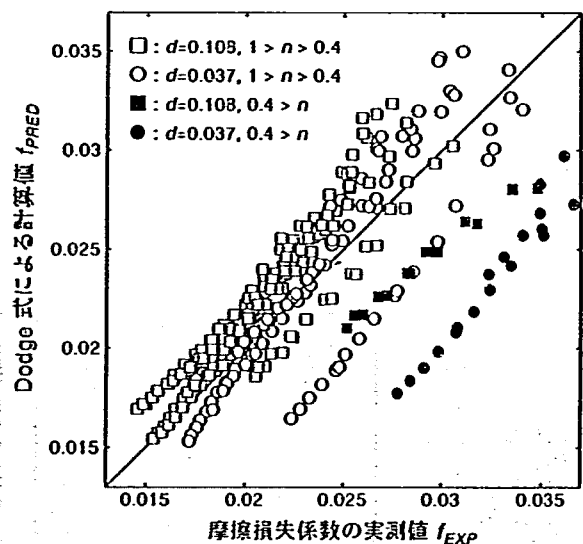


図 4 滑管乱流域の摩擦損失係数

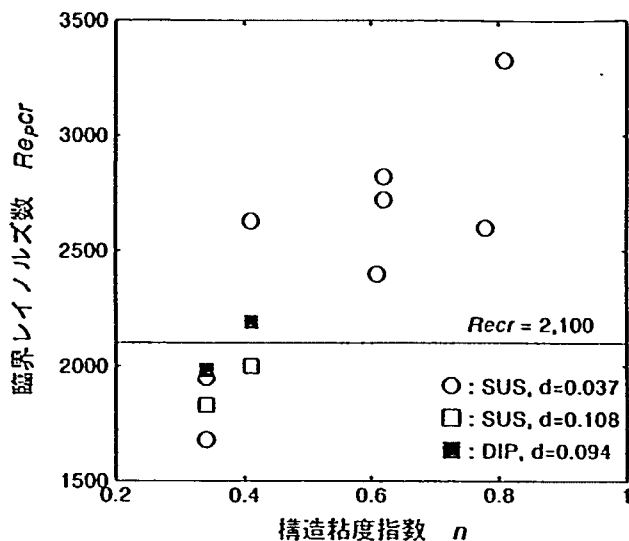


図5 臨界レイノルズ数の測定結果

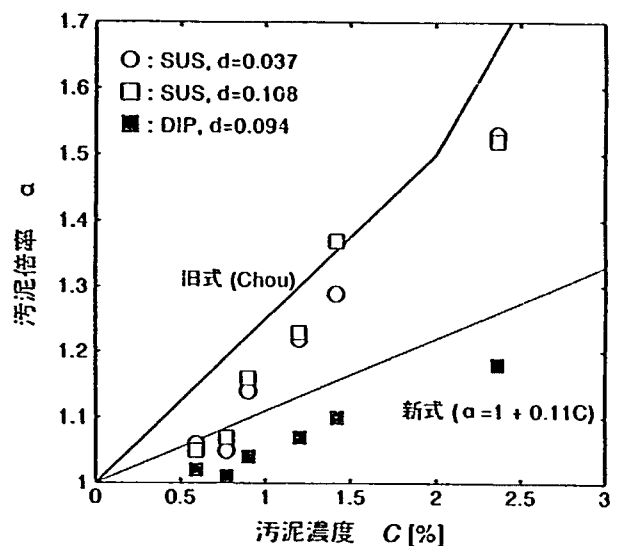


図6 汚泥倍率と汚泥濃度の関係

3.2 臨界レイノルズ数

臨界レイノルズ数 Re_{pcr} は透明管による管内流動状態の観察、および圧力損失の測定結果から判断した。 Re_{pcr} には層流から乱流、乱流から層流の2つの場合があるが、本実験において両者に大きな差はなかった。 Re_{pcr} を n で整理したものが図5である。 n が大きいときは Re_{pcr} が清水の臨界レイノルズ数 2,100 より大きい、 n の低下とともに Re_{pcr} も小さくなり、 $n < 0.4$ では $Re_{pcr} < 2,100$ となる。これは Dodge らの実験結果 (n が小さくなるほど Re_{pcr} は大きくなる) と全く結論を異にするものであった。

また臨界流速は Run 6, 7 の場合、管種、管径によらずほぼ同じであった。これは、式 (1) より n が小さいときには、 Re_p に及ぼす管径 d の影響が小さくなるためと考えられる。よって高濃度汚泥を送泥する際には、管径が大きくても層流が生じる場合があるということに十分留意しなければならない。

3.3 汚泥倍率による予測

汚泥倍率 (sludge multiplication factor) とは、清水の圧力損失に対する汚泥の圧力損失の比であり、汚泥濃度との関係式は簡便法として乱流域の圧力損失の予測に用いることができる。下水道協会の設計指針もこの考え方に基ついており、1994 年版では汚泥倍率と汚泥濃度との関係も新しいものに改められた。

本実験で得られた汚泥倍率を新旧の設計指針の関係式とともにプロットしたのが図6である。ここで滑管の場合流速によって倍率が変わるため、設計指針で推奨されている流速 1m/s の値を用いた。汚泥倍率は管径によらず滑管の方が粗管よりも大きく、また滑管のデータは旧式に、粗管のデータは新式により近かった。実施設が粗管であることを考えれば、現行の関係式の方が予測式として妥当であると考えられる。

4. ま と め

- (1). 層流域においては、管種、管径によらず $f = 64/Re_p$ の関係が成り立つ。
- (2). Dodge 式 (滑管乱流域) は $n < 0.4$ において予測精度が低く、式中の係数の見直しが必要である。
- (3). 粗管乱流域では n の影響が小さく、 f と Re_p の関係を両対数紙上で直線近似できる。
- (4). 臨界レイノルズ数は 1,500 から 3,500 の範囲にあり、 n が小さいほど小さくなる。
- (5). 汚泥倍率を用いる設計指針の予測式は、旧式が滑管の、新式が粗管の予測に適している。

参 考 文 献

- 1). 松原ほか：下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測方法，環境工学研究論文集，Vol. 30, 1993.
- 2). 中村ほか：回転粘度計による下水汚泥の流動特性の測定，第 31 回下水道研究発表会講演集，1994.
- 3). Dodge, et al. : Turbulent flow of non-Newtonian systems, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 5, No. 2, 1959.

BIOSOLIDS RHEOLOGY AND FRICTION LOSSES IN PIPES

Hiromasa Yamashita, Public Works Research Institute, Ministry of Construction*

Haruki Watanabe, Sewerage Division, Department of Public Works, Osaka Prefectural Government

Masaaki Ozaki, Sludge Management Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Makoto Matsubara, Tyubu Regional Construction Bureau, Ministry of Construction

*Wastewater System Division, Water Quality Control Department, Public Works Research Institute,
Ministry of Construction, Government of Japan, 1, Asahi, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

ABSTRACT

We conducted the rheology measurement and the pipeline transportation experiment of sewage biosolids. We obtained the equations of the rheological properties as a pseudoplastic fluid according to the biosolids quality. We also studied the relationship between the rheological properties of biosolids and the friction losses in pipeline. Integrating all equations, we obtained the estimation method of the friction losses in pipeline according to the biosolids quality. The estimation gave enough accuracy for engineering purpose.

KEYWORDS

biosolid, pipeline, transportation, friction loss, rheology, viscosity, pseudoplastic fluid

INTRODUCTION

The effective biosolids treatment and utilization are highly demanded to deal with the sewage biosolids which increase from year to year by the expansion of sewer service area in Japan. The pipeline transportation of concentrated biosolids has advantages of efficiency, economy and sanitary and also can reduce the load from the sidestreams at the branch plants. Although there are many biosolids pipeline transportation systems in Japan, most of them are operated in the empirical condition; low concentration (less than 1%) and medium velocity (around 1m/s). Friction loss in pipeline should be reduced in terms of the efficiency of transportation, but it is not easy to find the optimum operation condition. The general estimation of friction loss has been difficult, mainly because of its dependency on the biosolids quality which differ in each process in each wastewater treatment plant. Usually, it was estimated by the result of pilot scale pipeline experiment which was applicable only for certain biosolids or estimated by the Hazen-Williams formula, modifying its coefficients by the multiple factor according to the biosolids concentration, which is not adequate theoretically nor practically for the non-Newtonian fluids like the concentrated biosolids. Therefore, simple and accurate estimation method is demanded, which is based on the rheological study and covers different kinds of biosolids and does not require the viscometer measurement nor the pipeline experiment. This study aims to provide the accurate general estimation method of friction loss for the effective planning and operation of the biosolids pipeline transportation.

METHODOLOGY

Viscosity measurement experiment

We used primary biosolids, secondary biosolids and digested biosolids of a wastewater treatment plant and also used a lake sediment as the sample material. The samples of various concentration were prepared by centrifuge. We measured the viscosity of the samples with a rotational viscometer (Haake Rotovisco RV20-M5) at 20, 35 and 50°C, controlling the shear rate. (See Figure 1) We also measured each sample's TS, VS and specific gravity, following the JSWA methods (Japan Sewage Works Association, 1994). (See Table 1) Volumetric concentration factor kv was defined as follows: (See Equation 1)

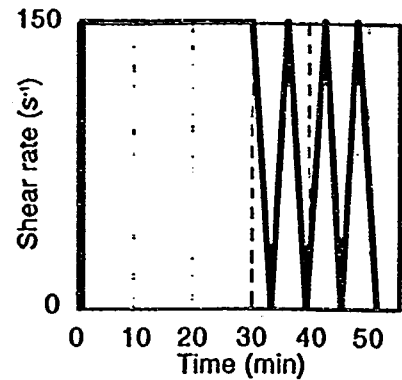


Fig. 1 Shear rate control program.

$$kv = (\text{sediment volume of 24 hour's settlement at } 20^{\circ}\text{C} / \text{total volume}) / \text{TS} \quad (1)$$

Table 1 Sample properties. (Viscosity measurement experiment)

Run	Material				Sample
	TS(%)	VS(%)	kv(-)	Specific gravity(-)	TS(%)
Primary 1	2.14	79.9	0.417	1.0071	0.61-7.20
Primary 2	2.13	78.7	0.503	1.0077	2.13-8.57
Primary 3	1.22	83.6	0.530	1.0065	1.22-9.22
Secondary 1	0.56	68.4	0.994	1.0041	0.56-4.24
Secondary 2	0.96	75.9	0.449	1.0038	0.96-6.39
Secondary 3	1.05	76.0	0.404	1.0045	1.05-6.19
Digested 1	2.03	62.5	0.527	1.0098	1.01-7.17
Digested 2	1.58	62.5	0.620	1.0091	0.76-5.99
Digested 3	1.75	62.9	0.631	1.0097	0.83-6.11
Lake sediment	8.16	15.0	0.091	1.0578	4.04-20.2

Pipeline transportation experiment

The experimental pipeline transportation system consisted of two loops. The volume of the slurry tank was 0.8m³. (See Figure 2) We used five different pipes for the experiment. (See Table 2) We used the secondary biosolids and the dewatered biosolids as the sample material. They were mixed to prepare the samples of various concentration.

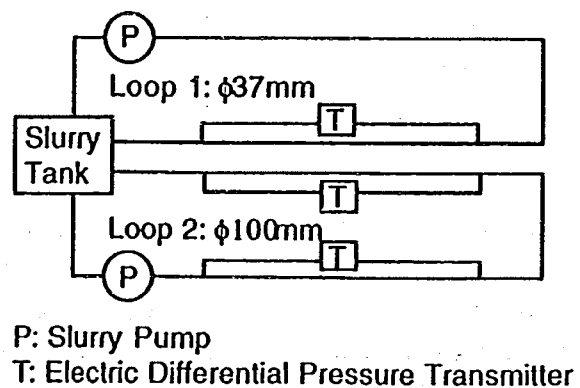


Fig. 2 Experimental pipeline transportation system.

Table 2 Characteristics of pipeline.

	Loop 1	Loop 2-a		Loop 2-b	
Material	SUS	SUS	DIP	VP	STPG
CH	150	155	130	145	135
k/d [-]	0	0	0.002	0.0003	0.0006
Diameter d [m]	0.037	0.108	0.094	0.1	0.106
Measurement span L [m]	20	20	20	20	20
Flow rate V[m/s]	0.1-3	0.4-1.8	0.6-2.4	0.6-2.2	0.5-1.9

SUS: stainless steel, DIP: ductile cast iron
VP: hard vinyl chloride, STPG: carbon steel

We measured the flow rate by the electromagnetic flow meter and the friction head loss by the electric differential pressure transmitter and the temperature of biosolids. We also measured each sample's TS, VS, specific gravity and kv as described above. (See Table 3)

Table 3 Sample properties. (pipeline experiment)

Run	Biosolids	TS(%)	VS(%)	kv(-)	K(Pa·s ⁿ)	n(-)	T(°C)
SUS-DIP 1	Sec	0.8	78.5	0.485	0.00457	0.872	14.0
SUS-DIP 2	Sec + Dew	2.4	72.6	0.277	0.171	0.447	7.6
SUS-DIP 3	Sec + Dew	3.4	72.2	0.280	0.378	0.422	14.8
SUS-DIP 4	Sec + Dew	4.5	70.7	0.271	1.17	0.366	7.3
SUS-DIP 5	Sec + Dew	5.5	70.8	0.221	2.17	0.364	10.5
VP-STPG 1	Sec	0.6	73.1	0.564	0.00362	0.878	17.5
VP-STPG 2	Sec + Dew	1.5	74.9	0.369	0.0213	0.647	14.5
VP-STPG 3	Sec + Dew	3.2	75.5	0.295	0.137	0.555	16.5
VP-STPG 4	Sec + Dew	4.3	75.4	0.267	0.507	0.465	22.1
VP-STPG 5	Sec + Dew	5.6	75.4	0.232	1.08	0.446	21.0

Sec: Secondary biosolids, Dew: Dewatered biosolids

RESULTS AND DISCUSSION

Estimation of K and n with TS , VS , and kv

All samples exhibited pseudoplastic fluid behavior: (See Equation 2)

$$\tau = K \cdot (D)^n \quad (2)$$

[τ : shear stress (Pa), D : shear rate (s⁻¹), K : fluid consistency index (Pa·sⁿ), n : flow-behavior index (-)]

Regression analysis for K and n with the explanatory variable TS , VS , and kv showed better correlation than the regression with TS which was described in several previous report (Rose-Innes and Nossel, 1983). (See Table 4).

Table 4 Regression analysis for K and n .

Explanatory variables						
TS			TS, kv, VS			
$K = 0.118 \cdot TS^{2.40}$			$K = 0.127 \cdot TS^{3.70} \cdot kv^{2.14} \cdot VS^{0.987}$			
SE	0.420	0.280	SE	0.145	0.119	0.223
R ²	0.590		R ²	0.954		
$n = 0.502 \cdot TS^{-0.373}$			$n = 0.492 \cdot TS^{-0.598} \cdot kv^{-0.218} \cdot VS^{-0.228}$			
SE	0.07	0.047	SE	0.05	0.038	0.072
R ²	0.551		R ²	0.814		

SE: standard error, R: coefficient of correlation

As a result, we obtained the estimation equations: (See Equation 3 and Equation 4)

$$K = 0.127 \cdot TS^{3.70} \cdot kv^{2.14} \cdot VS^{0.987} \quad (3)$$

$$n = 0.492 \cdot TS^{-0.598} \cdot kv^{-0.218} \cdot VS^{-0.228} \quad (4)$$

Verification of these equations with the present data plus the data of 11 kinds of biosolids from four wastewater treatment plants (matsubara *et al.*, 1994) showed that these equations covered various kinds of biosolids, including lake sediment, and were sufficiently accurate for engineering purposes. (See Figure 3 and Figure 4)

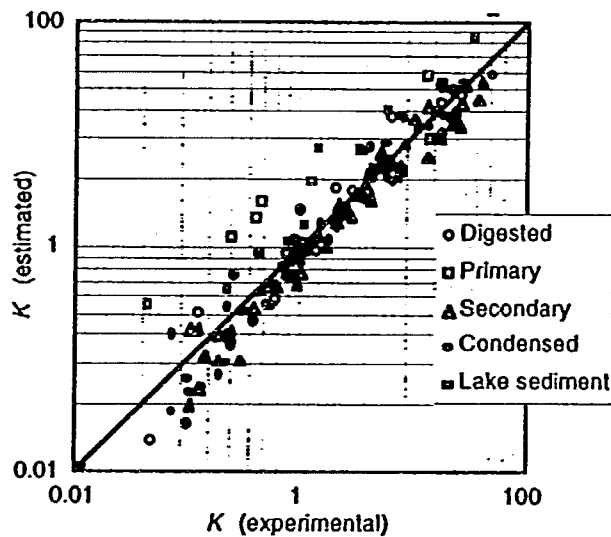


Fig. 3 Estimation of fluid consistency index K .

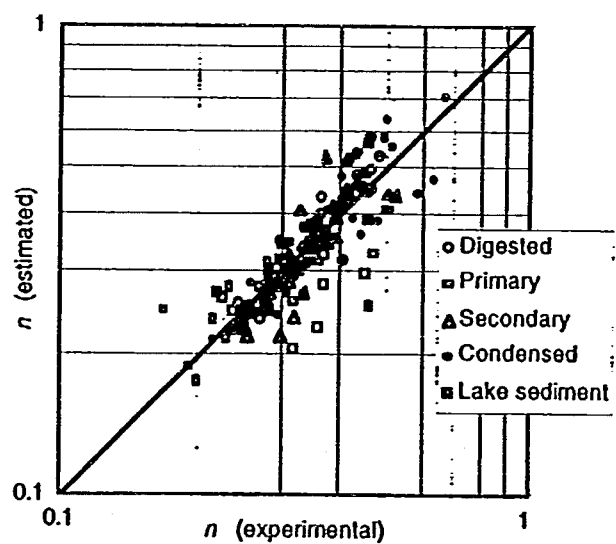


Fig. 4 Estimation of flow-behavior index n .

Temperature effect on K and n

According to the data of biosolids at 20, 35 and 50°C, K decreased exponentially with higher temperature: (See Equation 5 and Figure 5)

$$K_T = K_{20} \cdot \exp(-A(T-20)), \quad A = 0.0154 \cdot K_{20}^{0.158}$$

(T: Temperature [°C], K_{20} : K at 20°C, K_T : K at T°C)

(5)

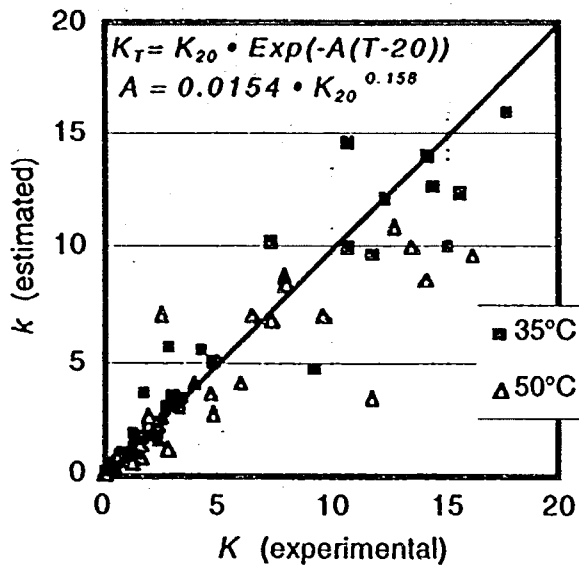


Fig. 5 Estimation of temperature effect on K .

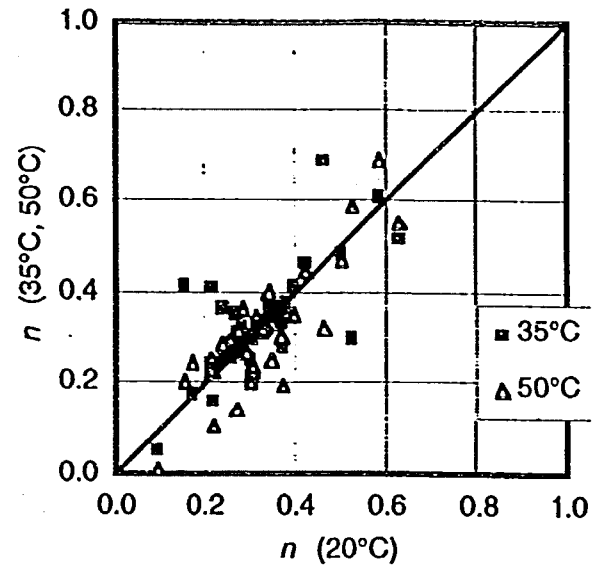


Fig. 6 Temperature-independence of n .

Figure 5 shows that K_T can be estimated from K_{20} in the range of 20-50°C. However, K of lake sediment did not follow this equation.

Flow-behavior index n was observed to be independent of temperature (See Figure 6), the same as several previous reports. (Manoliadis and Bishop, 1983)

Pipeline friction loss and rheological properties

We analyzed the pipeline experiment data in terms of the relationship between Darcy-Weisbach's friction loss factor f and pseudoplastic fluid Reynolds number Re_p . (See Equation 6)

$$Re_p = 8\rho \cdot V^{2-n} \cdot D^n / [K((6n+2)/n)^n] \quad (6)$$

The results (See Figure 7; the result of DIP) showed that, like pure water, pseudoplastic biosolids flow consisted of a laminar flow region, transient region and turbulent flow region that also consisted of a hydraulically smooth pipe region, transient region and extremely rough pipe (fully developed turbulent) region.

Under laminar flow conditions, the roughness of pipe had no effect on the pressure drop and the relationship between f and Re_p conformed to the

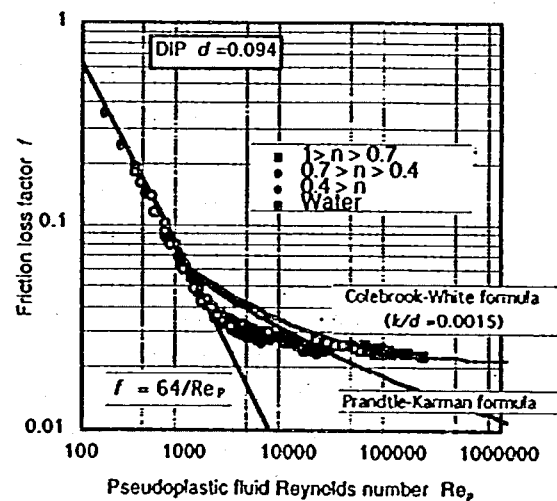


Fig. 7 Relationship between pseudoplastic Reynolds number Re_p and friction loss factor f .

formula of pure water: (See Equation 7)

$$f = 64 / Re_p \quad (7)$$

Under turbulent flow with smooth pipe, the Dodge's formula (Dodge and Metzner, 1959) are commonly used: (See Equation 8)

$$f^{-0.5} = A_n \cdot \log \{ Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2} \} + B_n \quad (8)$$

[$A_n = 4.0 / n^{0.75}$, $B_n = -0.40 / n^{1.2}$]

According to our experiment results, this formula required some improvement to its coefficients as follows: (See Equation 9)

$$f^{-0.5} = A_n \cdot \log \{ Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2} \} + B_n \quad (9)$$

[$A_n = 1.53 / n^{0.842}$, $B_n = 1.96 \cdot n^{1.34}$ ($0.2 < n < 0.9$)]

Although the improved equation is not theoretically correct at $n=0$ and 1 , showed better estimation at $0.2 < n < 0.9$. (See Figure 8)

Under turbulent flow with rough pipe, the following equation was proposed by interpolation of the improved Dodge's formula and the pure water formula in an extremely rough pipe: (See Equation 10)

$$f^{-0.5} = 1.14 - 2 \cdot \log \{ kd + \{ Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2} \}^{-An/2} \cdot 10^{0.57 \cdot Bn/2} \} \quad (10)$$

[kd : roughness(-)]

This equation showed accurate estimation in all roughness conditions. (See Figure 9)

Finally, the friction head loss was estimated depending on the sludge properties (TS, VS, kv and temperature) and pipe characteristics (diameter and roughness), according to the estimation equations (3), (4), (5), (7), (9) and (10). The estimation results (See Figure 10; the result of DIP) showed that this estimation method is sufficiently accurate for engineering purposes. Using this method, we can find the operation condition of the least friction loss easily; we can determine the biosolids concentration C (%), flow rate V (m/s) and pipe diameter d (m) to design the pipeline transportation system for the wastewater treatment plant which produce M (dry solid kg) of biosolids per year. For example, we demonstrated the calculation at $M=10^7$. (See Figure 11)

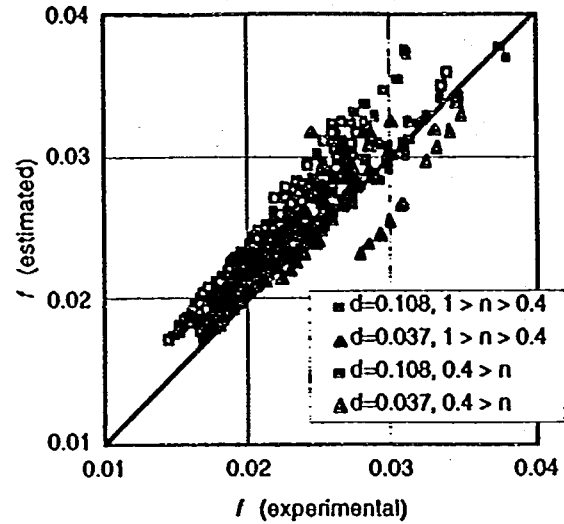


Fig. 8 Estimation of f with K and n of biosolids in smooth pipes.

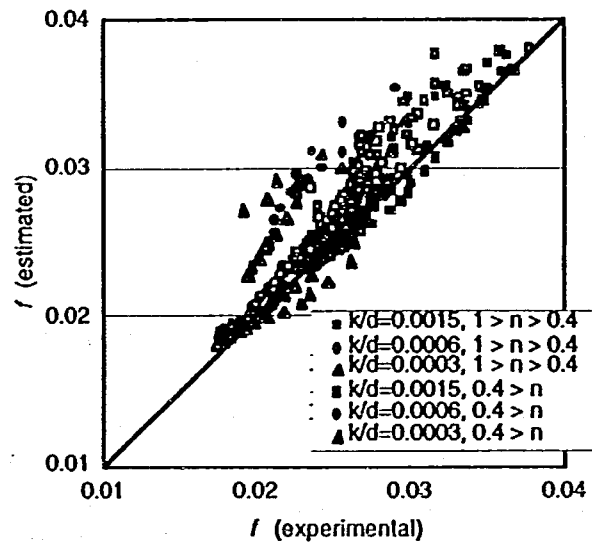


Fig. 9 Estimation of f with K , n and k/d in rough pipes.

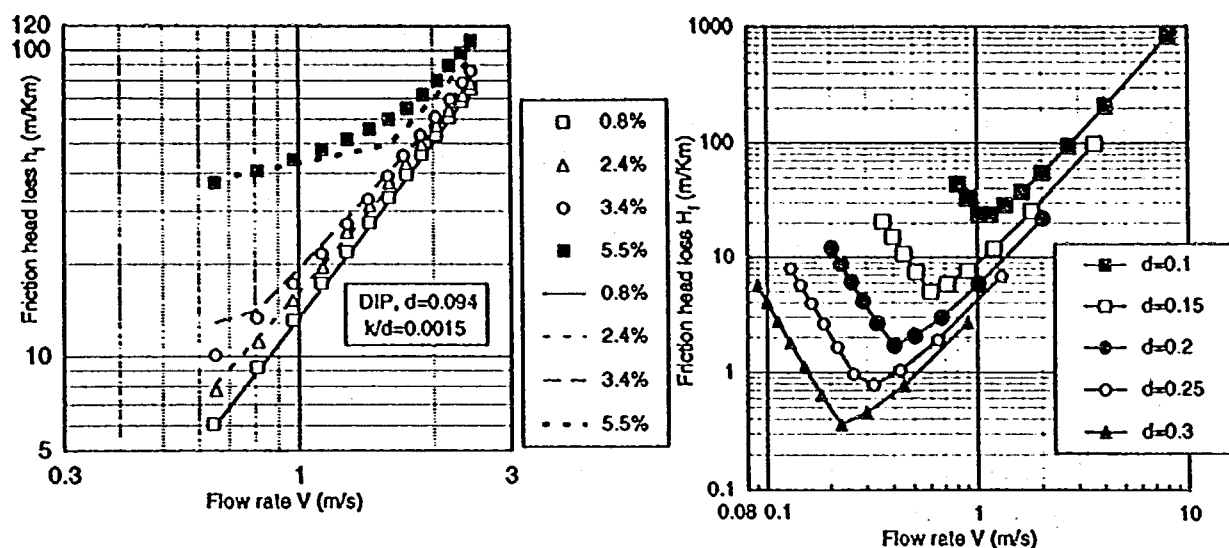


Fig. 10 Estimation of friction head loss with biosolids properties and pipe characteristics.

Calculation was conducted in the condition of $0.5 < C < 5$ and $0.1 < d < 0.3$. To simplify the calculation, continuous 24hour transportation is considered here. Limiting the flow rate V greater than 0.5 to prevent the sedimentation and the degradation in long transportation period, the condition of $d = 0.3$ and $V = 0.5$ gave the least friction loss $H_f = 1.0$ (m/km). The designed concentration was around 0.9 (%). Figure 11 showed that the optimum flow rate in each diameter and concentration was a so-called critical velocity, the transient point of laminar and turbulent region, the same as several previous reports (Anton, 1970). In actual planning and operation, we should determine the biosolids concentration, flow rate and pipe diameter, considering the friction loss calculation result, the construction cost, the process before/after the transportation and the load from the sidestreams

CONCLUSION

(1) The rheological coefficients of biosolids, the fluid consistency index K and flow-behavior index n , were expressed as the function of TS (total solid), VS (volatile solid) and kv (volumetric concentration factor), as follows:

$$K = 0.127 \cdot TS^{3.70} \cdot kv^{2.14} \cdot VS^{0.937} \quad (3)$$

$$n = 0.492 \cdot TS^{-0.538} \cdot kv^{-0.218} \cdot VS^{-0.228} \quad (4)$$

(2) Temperature changes affected the rheological properties of the biosolids. The fluid consistency index K decreased with higher temperature, according to the following equations,

$$K_T = K_{20} \cdot \exp(-A(T-20)), \quad A = 0.0154 \cdot K_{20}^{0.153} \quad (5)$$

(T : Temperature [$^{\circ}\text{C}$], K_{20} : K at 20°C , K_T : K at $T^{\circ}\text{C}$)

while the flow behavior index n was independent to temperature.

(3) Friction losses in pipeline transportation of biosolids were estimated as follows:

$$\text{Laminar flow: } f = 64 / Re_p \quad (7)$$

$$\text{Turbulent flow with smooth pipe: } f^{-0.5} = A_n \cdot \log \{ Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2} \} + B_n \quad (9)$$

$$\text{Turbulent flow with smooth pipe: } f^{-0.5} = 1.14 - 2 \cdot \log \{ kd + \{ Re_p \cdot (f/4)^{1-n/2} \}^{-n/2} \cdot 10^{0.57-8n/2} \} \quad (10)$$
$$\{ A_n = 1.53 / n^{0.842}, B_n = 1.96 \cdot n^{1.34} \} (0.2 < n < 0.9)$$

REFERENCES

Anton, E. S. (1970) "Pumping sludge long distances." *Journal WPCF*, Vol.43, No.8, pp.1702-1711

Dodge, D. W. and Metzner, A. B. (1959) "Turbulent flow of non-Newtonian systems." *A. I. ch. E. Journal*, Vol.5, No.2, pp.189-204

Japan Sewage Works Association (1984) Sewage test methods. (in Japanese)

Manoliadis, O. and Bishop, P. L. (1983) "Temperature effect on rheology of sludges." *Journal of Environmental Engineering*, Vol.110, No.1, pp.286-290.

Matsubara, M., Kato, K. and Watanabe, H. (1994) "Flow characteristics of biosolids." 32th Sewage Research Symposium. (in Japanese)

Rose-Innes, I. H. and Nossel, S. (1983) "The rheology and pumping of thickened activated sludge." *Wat. Sci. Tech.*, Vol.15, pp.59-76