

I S S N 0386-5878

土木研究所資料第3363号

土 木 研 究 所 資 料

下水汚泥の流動特性に関する 調査報告書

平成7年4月

建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室

Copyright © (1995) 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。

下水汚泥の流動特性に関する 調査報告書

汚泥研究室 室長 渡部 春樹
研究員 松原 誠*

*現、建設省都市局下水道部公共下水道課係長

要 旨

下水汚泥の管路輸送は、液状の汚泥を効率的に輸送する手段として処理場内、処理場間の汚泥輸送に広く用いられている。送泥管の圧力損失は、送泥システムの設計における最も基本的かつ重要なファクターであり、これを予測するためには正確な粘度測定が必要である。しかし下水汚泥は非ニュートン性、チクソトロピー性に代表される複雑な流動特性を示すとともに、粘度測定への妨げとなる粗大な粒子を含む場合も多い。このため、下水汚泥の流動特性についての知見は、性状が複雑で変化しやすいこともあいまって、十分とはいえないのが現状である。

そこで本調査では、共軸円筒型回転粘度計を用いて、固形物濃度6%程度までの下水汚泥を対象とした粘度測定を行い、管路輸送時の圧力損失予測を目的とした粘度測定方法、非ニュートン流動モデルの適用、チクソトロピー挙動、腐敗・温度の影響等について検討を行った。本報告書はこれらの調査結果をとりまとめたものである。

キーワード：下水汚泥、非ニュートン流体、チクソトロピー、管路輸送、回転粘度計

ま え が き

近年の下水道整備の進捗や高度処理の推進、流入水質強度の高まり等により、下水汚泥の発生量は増加の一途をたどっている。汚泥の処分地の確保も年々困難になる中で、安定した汚泥の処理処分法の確立は重要かつ緊急の課題である。また今後、中小都市ならびに町村への下水道普及を図るにあたっても、将来的な汚泥処理処分やその利用についての対応を用意することが求められている。これらの課題を解決する方策の一つとして注目されているのが、日本下水道事業団による下水汚泥広域処理事業（エースプラン）をはじめとする汚泥の集約処理である。

集約処理を実施する際には汚泥を輸送する必要があるが、最も効率的かつ衛生的な方法は管路輸送である。もちろん、汚泥管路輸送は処理場間の長距離輸送に限ったものではなく、処理場内での各プロセス間の輸送には欠かせないものである。送泥システムの設計において最も基本的かつ重要なファクターは送泥管の圧力損失の予測であり、特に送泥距離の長い場合や汚泥濃度の高い場合は、工学的、経済性および操作運転上の観点から圧力損失予測の入念な検討が必要とされる。

送泥管の圧力損失を正しく予測するためには、レオロジカルなアプローチが不可欠であり、一般に用いられている汚泥濃度から算出する簡便法では不十分である。しかし、下水汚泥の流動特性は水のようなニュートン流体とは異なり非常に複雑であり、また、流動特性の時間依存性（チクソトロピー）や汚泥中の粗大粒子の影響により、流動特性の測定そのものが難しい。このため、現状においては下水汚泥の流動特性についての知見は十分に得られているとはいえず、既存の研究においても測定結果のばらつきが大きい。

このような背景から、汚泥研究室では平成3年度より「下水汚泥の高効率輸送システムの開発に関する調査」を実施し、汚泥管路輸送システムの水理学的検討を中心として調査を進めている。本報告書は、これまでに得られた調査結果のうち、汚泥の流動特性に関する部分を取りまとめたものである。

FLOW PROPERTIES OF SEWAGE SLUDGE

Haruki WATANABE and Makoto MATSUBARA

Sludge Management Division,
Water Quality Control Department
Public Works Research Institute,
Ministry of Construction

ABSTRACT

The sludge generated in Japan has increased in parallel with the spread of sewerage. Shortage of ultimate disposal area and increase of treatment cost become problematic for municipalities, so the centralized treatment of sludge is attracting their attention as a solution to those problems. This treatment system, which was normally performed previously in large cities such as Tokyo and Nagoya, will be spread to small cities. For instance, the regional sewage sludge treatment project (ACE Plan) has been initiated by JS.

We consider that pipeline transportation is one of the best way to transport condensed sludges effectively and sanitarily. It is important to measure the viscosity of sludge precisely when they plan a pipeline system. But the measurement is so difficult because of bad influences by thixotropy or big particles in the sludge. Then flow properties of sewage sludge are not fully understood.

In this research, we measured viscosity of the sludge using the rotational viscometer (Haake RV12 and RV20). And we investigated about the measuring method of sludge viscosity, the application of Non-Newtonian fluid models, thixotropic character, the effect of temperature, the influence of decomposition caused by storage, and so on. Concentration of sludge which we treated in the research was up to 6% dry solids.

KEY WORDS

Sewage Sludge, Non-Newtonian Fluid, Thixotropy, Pumping, Rotational Viscometer, Pseudoplastic, Rheology

目 次

1. 概 説	1
1.1 汚泥輸送の現状と課題	1
1.1.1 送泥技術の概要	1
1.1.2 集約処理の現状	1
1.1.3 液状汚泥輸送の特徴	7
1.1.4 今後の管路輸送の展望と流動特性調査の必要性	12
1.2 汚泥の流動特性とその測定	15
1.2.1 非ニュートン流体	15
1.2.2 チクソトロピー	18
1.2.3 回転粘度計	20
1.3 調査の概要	23
1.3.1 調査目的	23
1.3.2 調査項目	23
1.3.3 調査に用いた回転粘度計の仕様	23
2. 非ニュートン流動モデルの適用	26
2.1 管路輸送実験後の汚泥を用いた検討	26
2.1.1 流動曲線の形状による比較	26
2.1.2 管路輸送の観点からの比較	29
2.2 結 論	32
3. 回転粘度計を用いた粘度測定方法の検討	33
3.1 粗大粒子を考慮した測定方法	33
3.1.1 回転粘度計内での擬塑性流体の流れ	33
3.1.2 回転粘度計内試料の流動状態の実測	34
3.1.3 代表粘度による補正	41
3.1.4 いくつかの測定例	45
3.2 チクソトロピーを考慮した測定方法	48
3.2.1 測定条件の違いによる影響	48
3.2.2 回転数一定による測定	50
3.2.3 回転数制御方法の決定	53
3.2.4 管路輸送実験による補正	54
3.3 結 論	56

4. 流動特性に影響を及ぼす各因子についての検討	57
4.1 温度の影響	57
4.1.1 レオロジー定数と温度	57
4.1.2 チクソトロピーと温度	64
4.2 粒子径の影響	66
4.2.1 管路輸送に伴う流動特性の変化	66
4.2.2 ホモジナイザーを用いた実験	69
4.3 汚泥貯留と流動特性(1) ―腐敗の影響―	72
4.3.1 目的と実験方法	72
4.3.2 実験結果	74
4.4 汚泥貯留と流動特性(2) ―チクソトロピーの回復過程―	85
4.4.1 目的と実験方法	85
4.4.2 実験結果	87
4.4.3 その他	92
5. まとめと今後の課題	93
6. 謝 辞	95
7. 参考文献	96
 <u>付 録 (A) 関連するいくつかの調査結果について</u>	
A1. 汚泥比重の測定方法	99
A2. 粒子径の測定方法	102
 <u>付 録 (B) 参考資料</u>	
B1. 複数処理場有都市における汚泥集約処理の実施状況 (平成4年度)	105
B2. 汚泥集約処理における液状汚泥輸送の実施状況 (平成4年度)	108
 <u>付 録 (C) 関連発表論文</u>	
C1. 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
C2. 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
C3. 回転粘度計による汚泥の粘度の測定	第49回土木学会年次講演集
C4. 下水汚泥の流動特性について	第32回下水道研究発表会講演集

1. 概 説

1. 1 汚泥輸送の現状と課題

1. 1. 1 送泥技術の概要

下水汚泥を処理、処分、再利用していく過程において、各単位プロセス間および処理場、処分場等は汚泥輸送により連結される。汚泥輸送システムの停止は、たとえそれが部分的であっても、汚泥処理処分システム全体の機能を停止させるおそれがあるため、安定かつ効率的な輸送手段の確保は重要なテーマとして捉える必要がある。

表1-1に汚泥輸送技術の概要について示す^{1)~4)}。汚泥輸送には輸送条件（汚泥の種類、形状、輸送距離、輸送量等）に対応して最も適切な方法が用いられる。これらのうち管路輸送は液状汚泥を効率的かつ衛生的に輸送できる方法であり、処理場内、処理場間の汚泥輸送に広く用いられている。脱水汚泥の輸送にも管路輸送が適用されているが、脱水汚泥は流動性に乏しいため、場内の短距離輸送に限定されている。一方で送泥管の内壁に注水することにより脱水汚泥輸送時の圧力損失を低減させる方法も提案されており⁵⁾、現在金沢市において実施が建設中である。また同様に、圧力損失の低減とポンプの長寿命化をねらって送泥管を加温して輸送している例もみられる⁶⁾。ここでは、加温水の熱源として焼却炉スクラバー排水が用いられていることが特徴である。

写真1-1に液状汚泥車両輸送の様子を、写真1-2に液状汚泥の管路輸送について示す。また写真1-3に脱水汚泥の輸送例について示す。

1. 1. 2 集約処理の現状

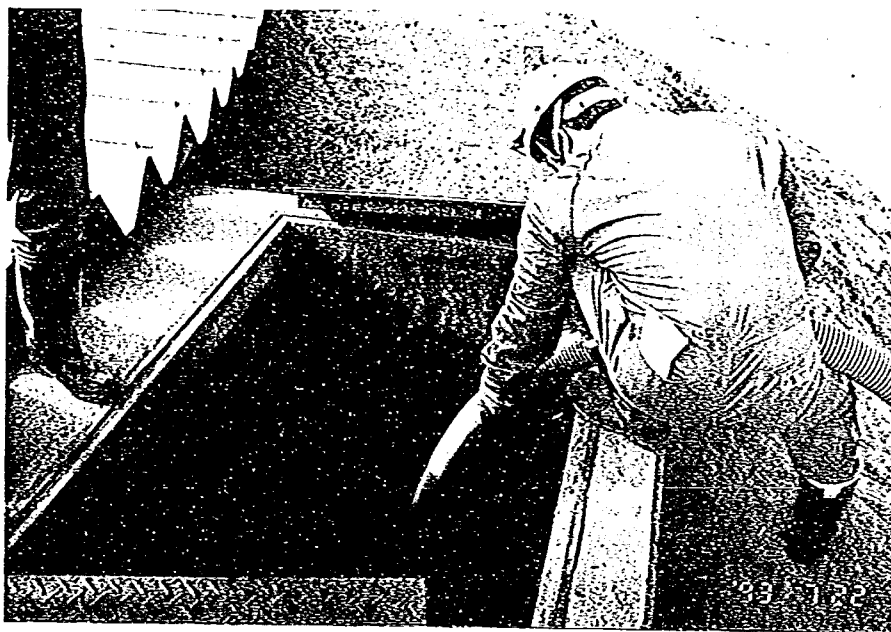
複数の下水処理場から発生する汚泥を一括して処理する方式が集約処理である。従来の下水道事業においては、汚泥処理は水処理と一体的に行うことが通例であったが、減量化・有効利用の推進、処理場用地の不足などを背景として、近年では集約処理を採用する事例が増加しつつある。

集約処理に関する最近の話題は、行政区界を越えた集約処理（広域処理）が本格的に実施され始めたことである。これには近畿圏で4施設が稼働中であるエースプラン（日本下水道事業団）をはじめとし、移動脱水車の導入（鳥取県日吉津村ほか）、広域処理計画の策定を促進するマニュアル⁷⁾の発行（日本下水道協会）などを挙げることができる。

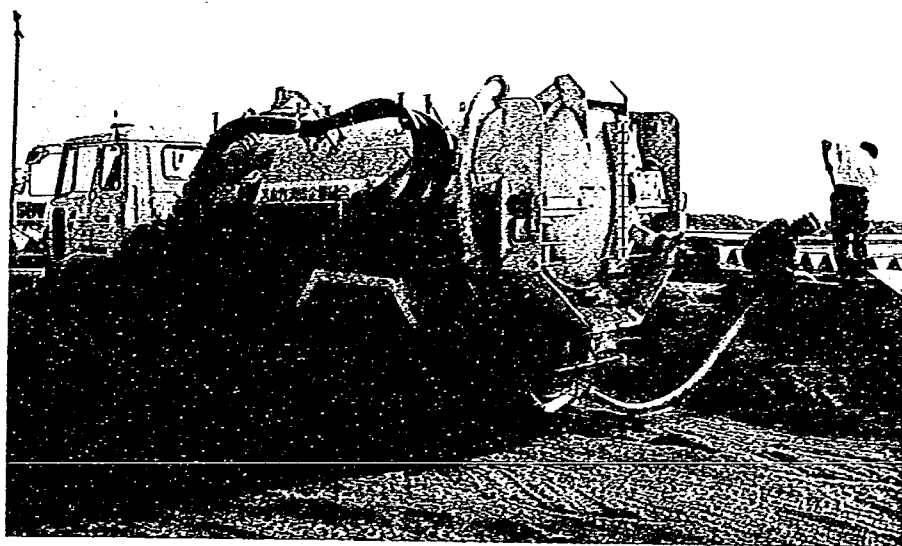
表1-2に汚泥集約処理実施状況の推移について示す^{8)~10)}。表中の都市数などは下水道統計の汚泥処理施設概要の項を中心として調査し、必要に応じて電話聴取等で情報を補ったものである。表より集約処理は着実に進展していることが読みとれる。各輸送方法ごとの推移については、これまで液状汚泥を車両輸送していた処理場において、汚泥量の増加に伴い脱水汚泥の車両輸送に変更した例がいくつかみられた。その一方で、広域処理の導入により脱水汚泥輸送から管路輸送へ変更した例もあった。

表 1-1 汚泥輸送技術の概要

輸 送 方 法		適 用		特 長	備 考
		液状	脱水		
処 理 場 間	1. 管 路	○		・単純かつ効率的、衛生的な方法 ・維持管理が容易で所用人員も少ない ・大量輸送に適する	・初期投資額が大きく、ルートが固定される ・送泥管の腐食、閉塞、漏洩への対策 ・必要に応じ、ドラムスクリーン、破砕機、液体サイクロン等を設ける
	2. 車 両	○	○	・初期投資額が小さくてすむ ・輸送ルート、集約先の変更に柔軟に対処できる ・集約処理の導入期および過渡期に適当な方法	・環境衛生、交通問題に配慮が必要 ・液状汚泥の場合タンクローリー ・脱水汚泥の場合ダンプトラック ・輸送費用の多くは人件費 ・長距離大量輸送には不適
	3. 船 舶	○	○	・長距離大量輸送に適する	・脱水汚泥の集約処理（東京都） ・消化汚泥の海洋還元（北九州市）
	4. 鉄 道	○	○	・長距離大量輸送に適する	・現在の日本では一般的な方法でない
処 理 場 内	1. 管 路(1)	○		・場内での液状汚泥輸送はもっぱら管路輸送によっている	・主に渦巻ポンプ、濃厚な場合は一軸ネジポンプ
	2. 管 路(2)		○	・においやこぼれの問題がない ・レイアウトが自在で省スペース	・焼却炉への投入に多く用いられる ・一軸ネジポンプまたは二連式ピストンポンプ ・ケーキホッパの構造に工夫が必要 ・摩耗による維持管理費の増大
	3. ベルト コンベヤ		○	・単純かつ確実な方法 ・粗大異物が混入していても輸送可能 ・低含水率の汚泥でも輸送可能	・におい、こぼれの問題 ・急勾配がとれず、設置面積が大きい ・処理場の景観上も問題
	4. フライト コンベヤ		○	・勾配、方向を輸送途中で変えられる ・急勾配でも輸送可能 ・垂直搬送も可能（ケースコンベヤ）	・エンドレスチェーンにかき板を取り付けたもの ・構造が複雑で消耗部品が多い ・ケーシング内に納められているため保守点検に難あり
	5. スクリュー コンベヤ		○	・静穏で確実、経済的な方法 ・輸送方向の転換が可能	・輸送可能距離は最大でも 6m 程度 ・粗大物は輸送困難 ・断面下部が半円型のトラフ中を回転するスクリューの推進力による
	6. パイプ コンベヤ		○	・におい、こぼれを抑止できる ・レイアウトの自由度が高い	・ベルトが汚泥を円筒型に包み込む ・トラフ型のベルトコンベヤに比べ、ローラの数が多い

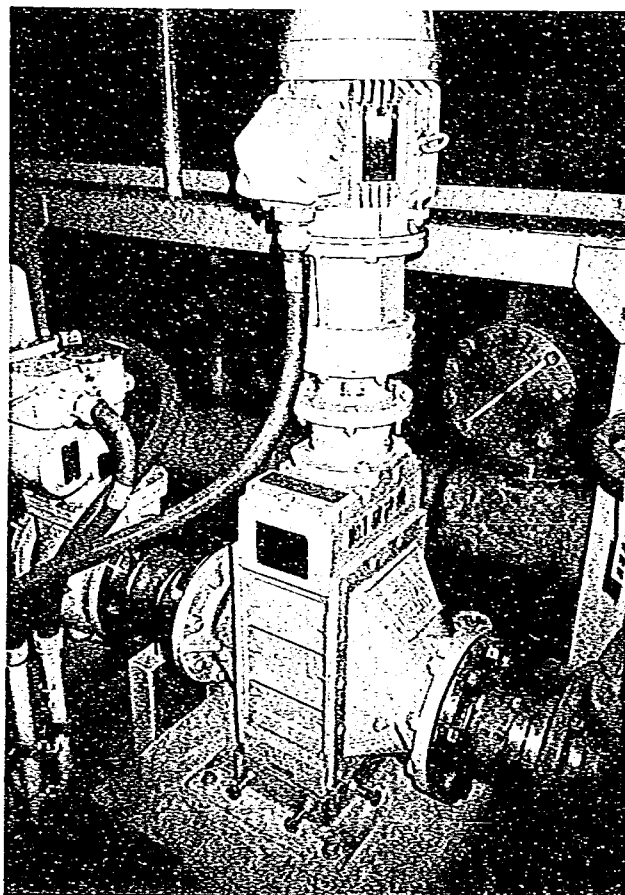


給泥作業の様子

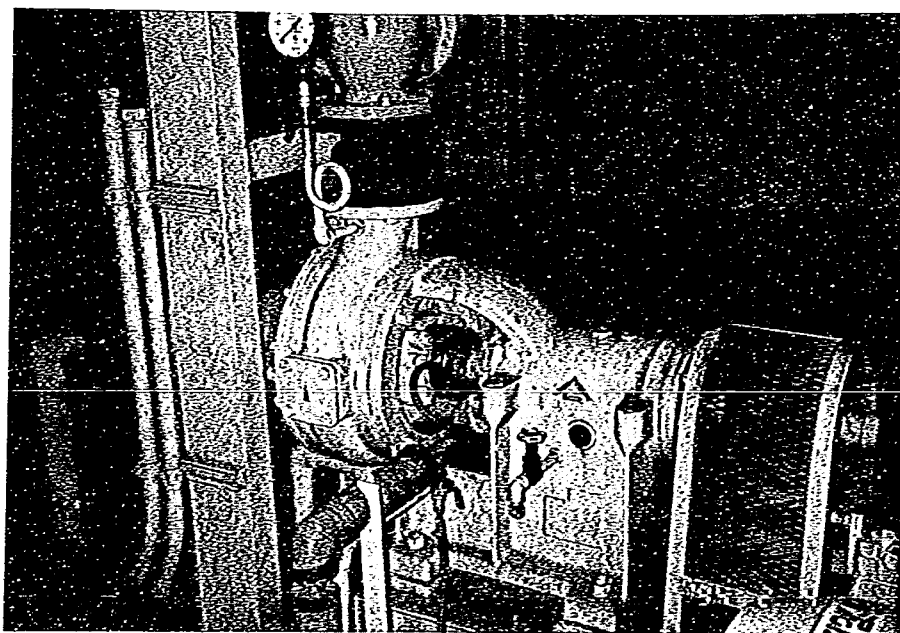


輸送車両（6 tバキューム）

写真 1－1 液状汚泥の車両輸送

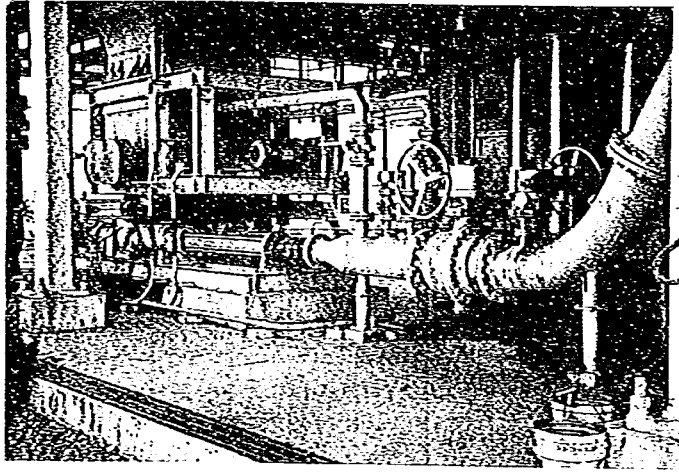


破砕機

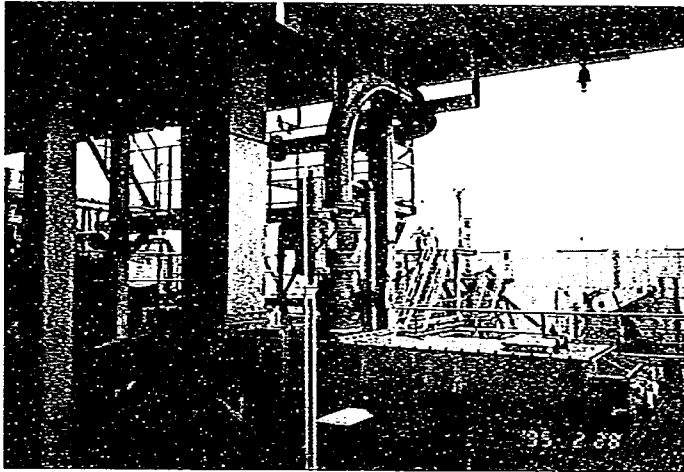


送泥ポンプ（スラリーポンプ）

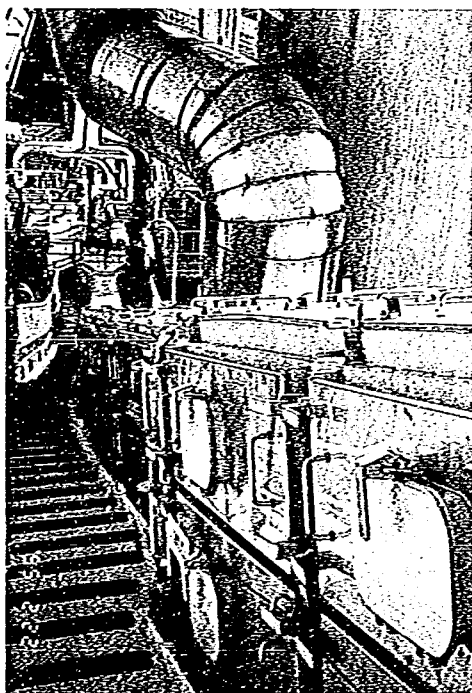
写真1-2 液状汚泥の管路輸送



一輪ネジポンプ



スクリーコンベヤ



パイプコンベヤ

写真1-3 脱水汚泥の輸送

表1-2 汚泥集約処理の推移

年 度		1984	1988	1990	1992
集約処理実施都市数		39	55	71	83
液状汚泥 輸送	管路	—	19	24	24
	車両	—	24	33	44
脱水汚泥輸送		—	11	23	26
単独処理実施都市数		—	40	41	43

* 集約処理実施都市数： 汚泥集約処理を実施している市町村数。ゴミ処理場、し尿処理場等において集約処理される場合を含まない。1都市で複数の輸送方法を採用している場合があるため、各輸送方法別の総和とは必ずしも一致しない。1処理場しか有しないが他都市の処理場で集約処理される場合（エースプラン等）も含む。

* 単独処理実施都市数： 複数の処理場を有するが、個別に汚泥処理を行っている市町村数。

* 1984年度データ : 文献 8) より

* 1988年度データ : 文献 9) より

* 1990年度データ : 文献 10) より

1.1.3 液状汚泥輸送の特徴

平成4年度に、液状汚泥輸送により集約処理された汚泥量は汚泥総発生量のうちおよそ 17% を占め、そのほとんどが管路輸送によるものであった（平成4年度の汚泥総発生量：DS ベースで 1,496千DS¹¹，管路輸送：247千DS¹，車両輸送：4千DS¹）。

図1-1は送泥距離と送泥量の関係を輸送方法別に整理したものである。いくつかの処理場を中継点として集約処理場へ輸送される場合には、各処理場の送泥量と集約処理場までの距離を対応させて整理した。図より、送泥距離によらず送泥量の多い場合に管路輸送が用いられていることが明らかである。管路輸送と車両輸送の境界送泥量はおよそ 20,000m³/年 であった。ただし、輸送距離がごく短い場合は境界送泥量以下であっても管路輸送が用いられる場合がある。

EPAのマニュアル¹¹では汚泥輸送方法の経済性について言及しており、輸送距離 30km 以下でかつ年間送泥量が 38,000～57,000m³ より少ない場合には車両輸送が適しており、年間送泥量が 110,000～260,000m³ を越える場合には管路輸送が適しているとしている（図1-2）。また下水道協会のマニュアル^{11・12}では送泥に関わる各種の費用関数が示されており、これらを用いて車両輸送と管路輸送の経済性比較を行うと図1-3のようになる。ただし計算に際してはマニュアル中に明記されていないいくつかの条件を設定している（人件費単価、軽油単価、労働時間等）。これらの図からも、管路輸送は輸送距離によらず送泥量の多い場合に有利であることがわかる。境界送泥量は、実態調査の結果もふまえて約2～4万m³/年と考えることができる。また、ここでは人件費単価を 500万円/人・年として計算したが、車両輸送費の 70～80% は人件費で占められているため、人件費をより高く設定した場合には境界送泥量が更に低下し、管路輸送が有利となる範囲が広がる。

図1-4は費用関数を用いて計算した結果、境界送泥量における送泥費用と車両必要台数をまとめたものである。この図から、たとえば輸送距離が 10km で6台の車両を用いて液状汚泥を車両輸送しているような場合は、管路輸送に切り換えた方が送泥費用が安くなるということがわかる。

図1-5は図1-1を送泥側処理場の処理水量で整理し直したものである。処理場規模が日量1万tを越えるような場合に管路輸送が適用されていることがわかる。図1-6は送泥濃度と送泥量の関係をまとめたものである。車両輸送では輸送量を減らすために濃度の高い汚泥を扱っているのに対し、管路輸送では濃度1%以下の希薄な汚泥の場合が多い。管内閉塞の防止や連続送泥のために敢えて濃度を低くして送泥している場合もある。以上の結果を反映して、送泥側処理場の処理水量と送泥量の関係は、車両輸送の場合と管路輸送の場合で明確に傾向が分かれる（図1-7）。

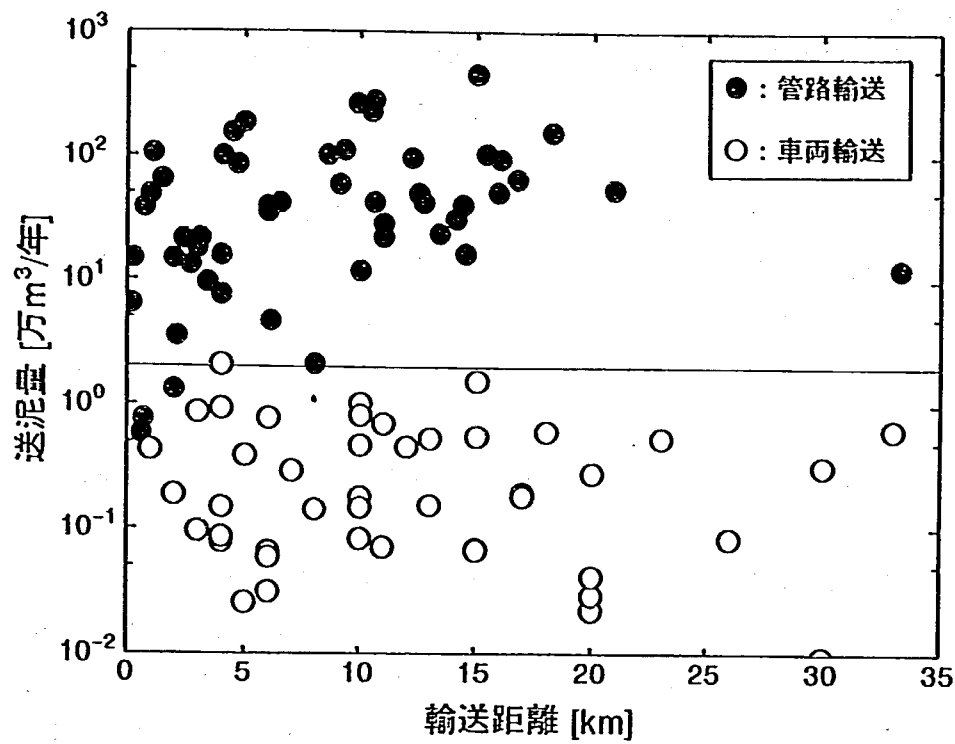


図1-1 液状汚泥輸送の実態 (1992年度)

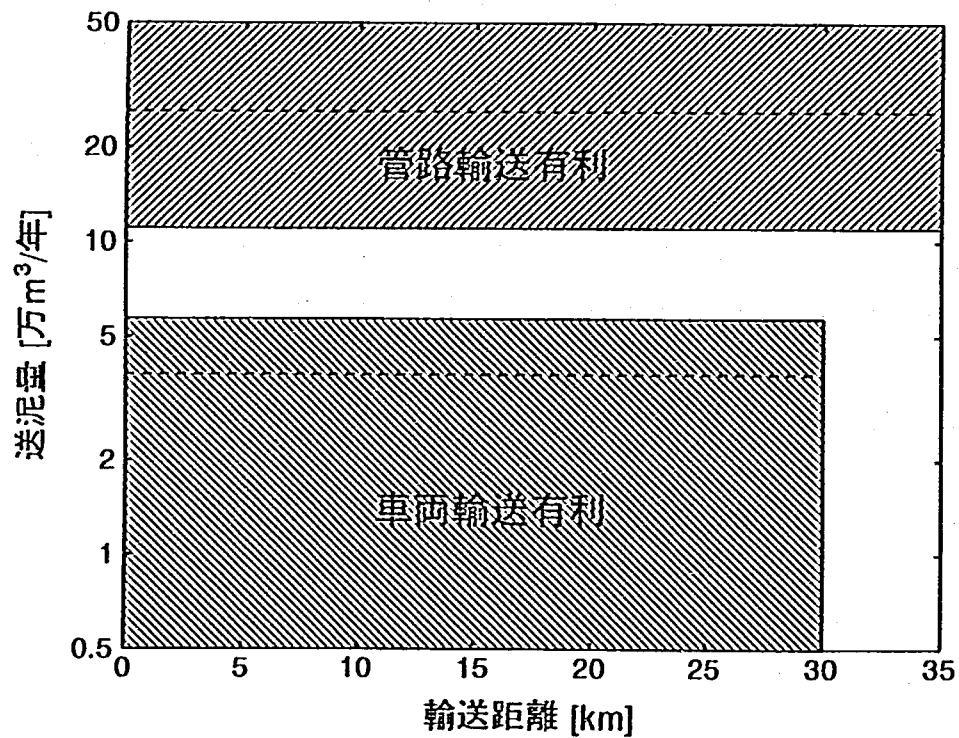


図1-2 経済性の比較 (EPAマニュアルによる)

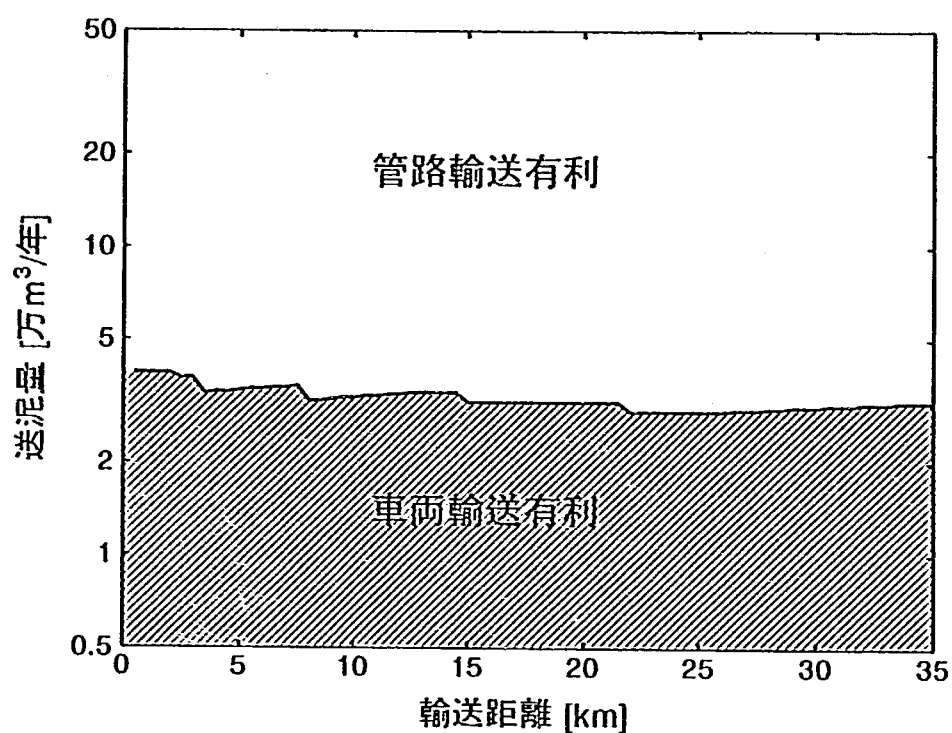


図1-3 経済性の比較（下水道協会マニュアルによる）

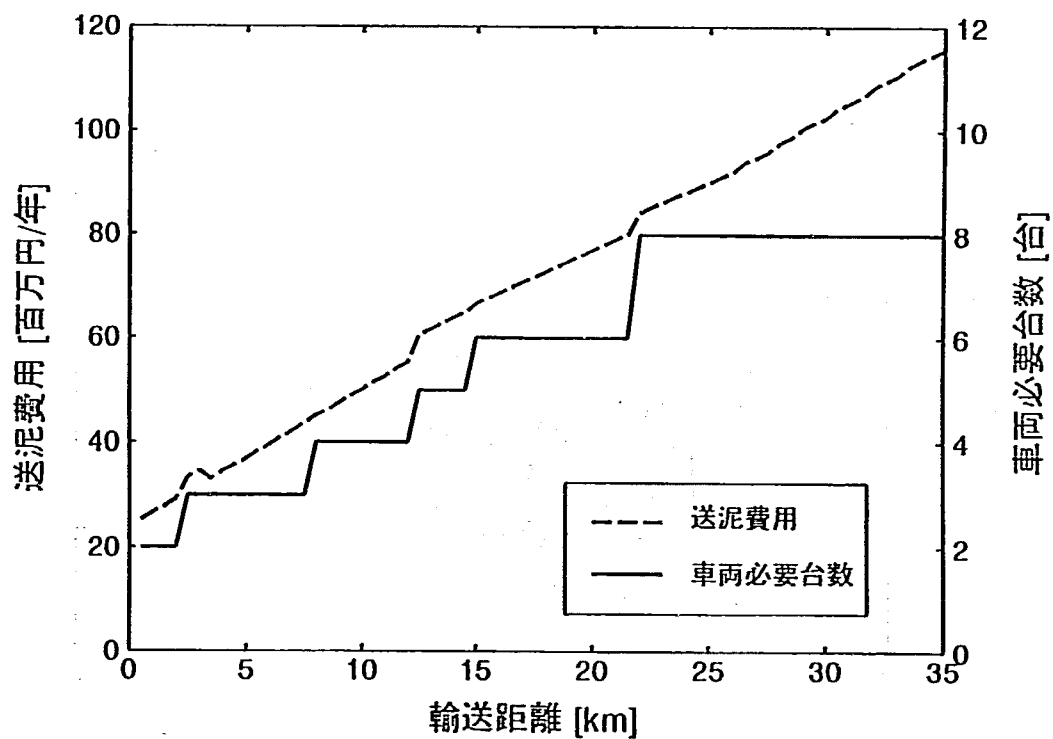


図1-4 車両輸送費と管路輸送費が等しくなる場合

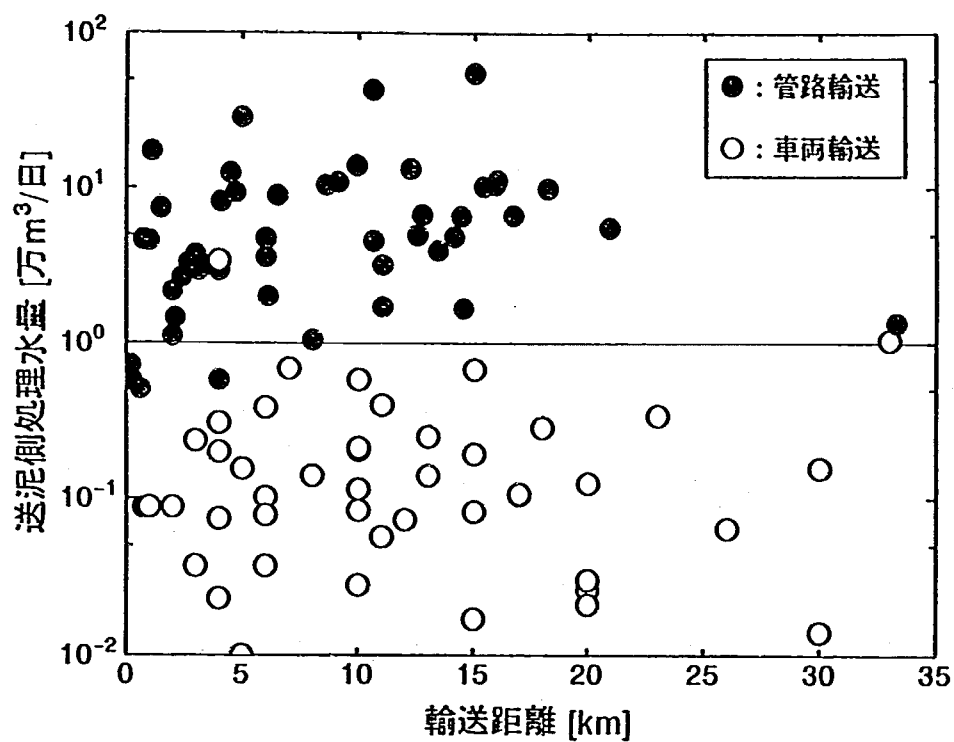


図 1-5 送泥側処理水量と液状污泥输送方法

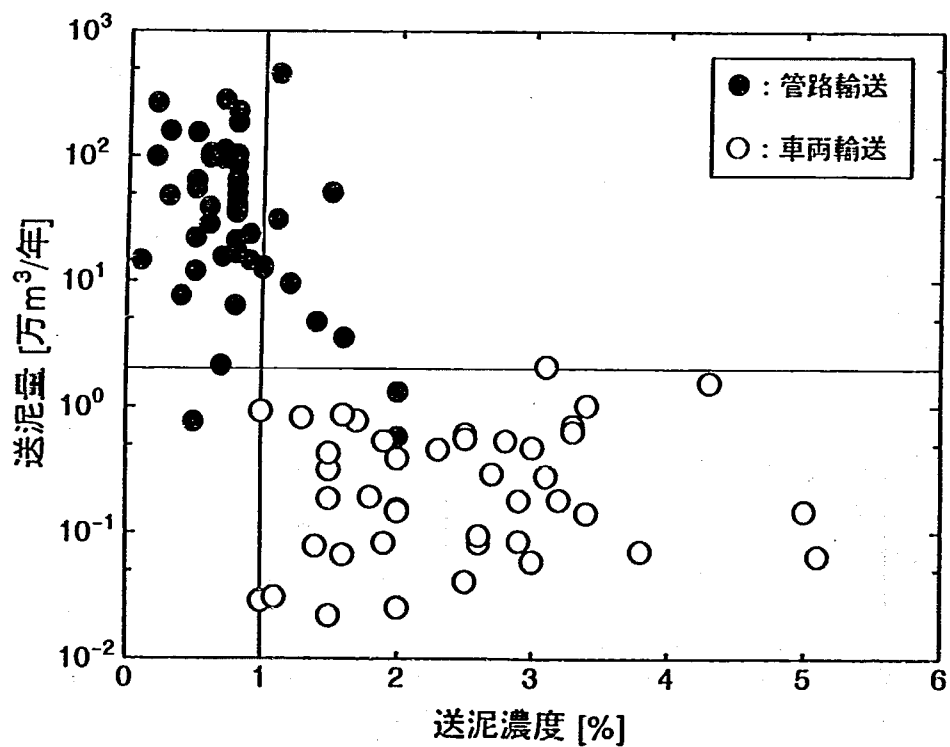


図 1-6 送泥濃度と液状污泥输送方法

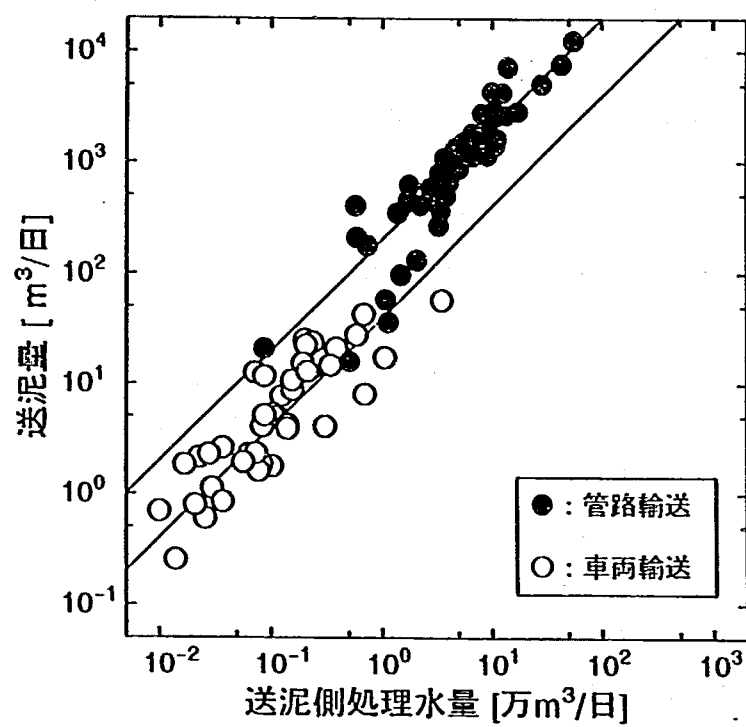


図1-7 送泥側処理水量と送泥量

1.1.4 今後の管路輸送の展望と流動特性調査の必要性

集約処理の進展に伴い汚泥管路輸送が実施されるとすれば次のような場合が考えられる。

まず大都市においては、高度処理を導入するために処理場用地が不足すること、処分地の不足から高度な減量化プロセスを導入する必要があること、また資源化を推進するためにはまとまった汚泥量が必要であること等の理由から、いわゆるスラッジセンターを新たに建設して管路輸送による集約処理を導入することが考えられる。

中小都市で液状汚泥を車両輸送している処理場の場合は、発生汚泥量の増加に伴う輸送コストの増加により、管路輸送に切り換えた方が経済的となる場合がある。ただしこの場合は、代替案として汚泥を脱水してから車両輸送するという方法も考えられる。

また、現在集約処理を行っていない処理場や今後計画される処理場の場合、エースプランの導入等により行政区域を越えて集約処理が導入される場合もある。特にこれから普及の進む中小市町村の場合は、各処理場の発生汚泥量が少ないと考えられるため、中継基地を設けて一定量の汚泥を車両により集め、ここから集約処理場まで管路輸送するといった形態も考えられる。

以上のように、今後も汚泥管路輸送を採用する自治体が増加していくものと見込まれるが、確実かつ効率的に送泥を行うためには、解決すべき課題も多く残されている¹⁰⁾。例として、送泥中の腐敗の防止、夾雑物対策、閉塞や漏洩時の安全対策、イニシャルコスト低減のための管種、工法の開発などを挙げることができる。しかし、これらのうち送泥システムの設計において最も基本的かつ重要なファクターは圧力損失の予測であり、特に送泥距離の長い場合はレオロジカルな方法を用いるべきとされている¹³⁾。しかし、わが国においては送泥濃度が低かったことや、圧力損失の計算方法そのものが十分に確立されていないこともあり、レオロジカルなアプローチにより送泥システムが設計された例は非常に少ないと考えられる。

設計指針¹⁴⁾では、汚泥の管路内の流れは乱流とし、流速は 1.0~1.5 m/s が推奨されている。しかし、土木研究所で実施した送泥の実態調査によれば、実施設では高濃度の場合に層流が生じたり、長距離輸送の場合には流速が推奨値に満たない場合のあることがわかった(表1-3)。これは逆に、流速が 1.0 m/s 以上でなくても十分送泥が可能であることを示唆している。

表1-4は、これまで国内で行われた主要な汚泥管路輸送実験^{15)~16)}の概要をまとめたものである。これらの実験結果をもとにそれぞれ圧力損失の計算方法が提案されているが、供試汚泥の性状の違いなどを反映してその計算方法は汎用性に乏しい。汚泥種類や濃度に広く対応でき、かつ精度の高い圧力損失予測式を構築するためには、汚泥の流動特性を正確に把握することが必要となる。

また、汚泥の流動特性は水のような単純なものではなく、流動特性の時間依存性や汚泥中粗大粒子の影響なども受けるため測定そのものが難しい。Vesilind もその著書¹⁹⁾の中で "Sludge pumping, obviously, is not an exact science." と述べており、汚泥の流動特性、輸送特性についてはいまだに未解明の部分も多い。

よって、汚泥の流動特性について詳細に調査し、把握していくことは、送泥管の圧力損失の計算方法の構築に寄与するとともに、汚泥の物理的性状の1分野を体系づけてまとめるという点からも重要な意味を持つものと考えられる。

表 1 - 3 汚泥管路輸送の実態調査結果

処理場	輸送形態	対 象 汚 泥				送 泥 管					ポンプ	
		汚泥種類	TS [%]	VS [%]	比重 [-]	距離 [m]	管径 [mm]	流速 [m/s]	流れの 種類	閉塞	型式	揚程 [m]
KK	場内	初沈濃縮	5.3	67	1.018	50	100	1.8	-	あり	渦巻・リフト	15
	場内	余剰濃縮	4.9	75	1.016	50	100	2.1	層流	なし	水中	18
CC	場内	混合濃縮	2.5	62	1.013	150	150	2.5	-	あり	渦巻	14
	場内	消化	1.8	58	1.009	100	200	1.5	乱流	なし	渦巻	6
FS	場内	初沈濃縮	3.5	-	-	100	200	0.9	-	あり	渦巻・スクルー	5
	場内	混合濃縮	3.6	-	-	350	200	0.5	-	なし	一軸ネジ	30
TT	集約	混合生	1.0	80	1.004	2,700	200	0.7	乱流	なし	渦巻	22 * 2
IK	集約	混合生	0.7	83	1.003	11,000	250	0.6	乱流	なし	渦巻・スクリュー	42
NM	集約	混合生	-	-	-	3,900	250	0.5	-	なし	渦巻	40

表1-4 これまでに行われた汚泥輸送実験の概要

研究機関	日立造船(1972)	早稲田大学(1980)	東京都(1982)	下水道事業団(1992)
配管長	ループ: 100m	粗管: 33m (片道) 滑管: 11m (片道)	ループ: 約 50m	ループ: 約 200m
管種・管径	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 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 測定長さ	水平直管部: 38.5m	粗管: 25m 滑管: 6m	水平直管部: 20m 曲管部の損失	曲管部を含む 132m
圧力測定	差圧変換器 3種類: max 15mH ₂ O 固液分離器付き	マノメーター: 6点 圧力安定槽	差圧変換器 6種類: max 15mH ₂ O 清水の封入	差圧変換器
流量測定	電磁流量計 2種類: max 80m ³ /h	重量法	電磁流量計 2種類: max 180m ³ /h	超音波ドップラー型 流量計
圧送方法	ヘッドタンク	ヘッドタンク	スクリー式渦巻き ポンプ	スクリー式渦巻き ポンプ
流速範囲	0.2~2m/s バルブによる流量調節	0.1~2m/s バルブによる流量調節	0.4~6m/s ポンプの回転数制御	0.2~1.3m/s
汚泥量	4m ³ (貯留槽: 5m ³)		貯留槽: 9m ³	貯留槽: 10m ³
汚泥種類	消化汚泥: 4~7% (大阪市)	余剰汚泥: 0.2~2% 混合汚泥: 1.2~3% (川崎市)	余剰汚泥: 0.8~3.3% 混合汚泥: 1.6~2.9% (東京都)	混合汚泥: 0.3~2.3% (姫路市)
その他				

1. 2 汚泥の流動特性とその測定

1. 2. 1 非ニュートン流体

水の流動特性はいわゆる Newton 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] とは比例関係にある。従って、その流動曲線 (flow curve) は原点を通る直線となる。

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

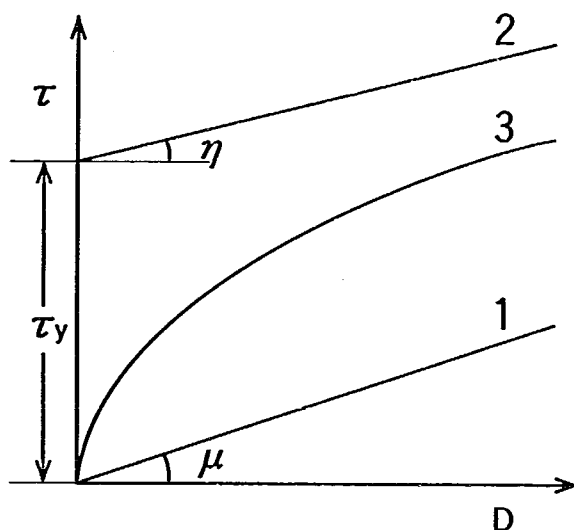
ここで μ は粘性係数 (coefficient of viscosity) である。

しかし下水汚泥の場合は、濃度のごく低い場合をのぞいて非ニュートン流体 (non-Newtonian fluid) としての挙動を示す。非ニュートン性は流動曲線の形状から判断され、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。

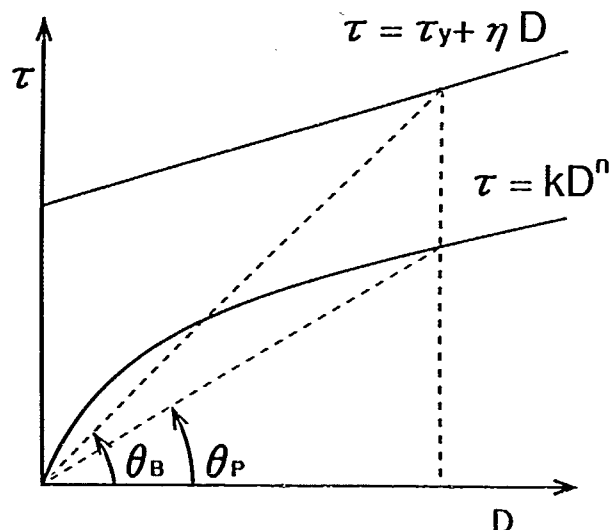
$$\text{Bingham Plastic} \quad \tau = \tau_y + \eta D \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Pseudoplastic} \quad \tau = kD^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

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·sⁿ] 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1-8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1-9に示す。



1=Newtonian
2=Birgham Plastic
3=Pseudoplastic



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

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

図1-9 非ニュートン流動モデルの見かけ粘度

図1-8 種々の流動モデル

Annen²⁰⁾ が示しているように、厳密に言えば、下水汚泥の流動特性はこれら2つのモデルでも表現することはできないため、測定された流動曲線の対象とする速度勾配範囲に、これらのモデルをうまくフィットさせることが重要である。

さらに精度よく流動曲線をモデル表現するためには、レオロジー定数をもう1つ増やす必要がある。

$$\text{Plastic} \quad \tau = \tau_y + kD^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

これは、式(2)、(3)を組み合わせた形のモデルであり、水理公式集²¹⁾において塑性流体（非ビンガム流体）と説明されている。しかし、式の取り扱いが実用的でないため、既存の研究においてこのモデルが用いられた例は見あたらない。

表1-5^{16), 17), 22)-31)}は、下水汚泥の流動特性について調査された既存のおもな文献の概要をまとめたものである。ここで特に流動特性の扱いに注目すると、最近の研究ほど擬塑性流動モデルを用いる例がふえていることがわかる。これは、粘度測定技術の改良により速度勾配を連続的に変化させて粘度測定ができるようになったこと（リピート／無段変速）が大きな原因であると考えられる。

一方、おもな公式集、参考書等においては、下水汚泥をビンガム流体として扱っている場合が多い。例えば、水理公式集、下水道ハンドブック³²⁾、EPAのマニュアル、Metcalf and Eddy¹³⁾などである。擬塑性流体として扱っているのは Vesilind などごく一部である。また先頃改訂されたばかりの設計指針ではレオロジカルな扱いが十分になされておらず、流動モデルについての記述はなされていない。

また、ニュートン流動と非ニュートン流動の境界濃度についてみると、0.1～4% まで様々な値が報告されている。このような測定結果のばらつきは、供試汚泥の性状の違いもさることながら、粘度測定方法の違いが大きく影響していると考えられる。

以上のように、下水汚泥の流動特性を表現する流動モデルについては定説がないため、どのモデルを選択するかをまず検討する必要がある。選択に際しては、流動曲線の形状による判断はもちろんのこと、管路輸送の観点からの検討も重要である。

表1-5 既存の研究における下水汚泥の流動特性調査の概要

研究者	文献	流動 特性	粘度測定法	機 種	間 隙 [mm]	速度勾配 [1/s]		供 試 汚 泥			非ニュートン 境界濃度	温度 制御
						最大値	制御方法	種 類	濃 度 [%]	試 料 調 整		
Chou (1958)	22)	B	Babbittら(1939), Keefer(1940)のデータより.					消化汚泥など	~14		4%	
川島 (1962)	23)	B	回転粘度計 (単一円筒)	BH型				消化汚泥など	~15		4%	○
Dickら(1967)	24)	B	回転粘度計 (内筒回転)	Brookfield を改造	8.5	—	ホールド	余剰 (3処理場)	0.1~0.9	1mmふるい	0.1%でも 非ニュートン	×
吉田ら(1972)	25)	B	回転粘度計 (内筒回転)	スイスE社	—	530	ホールド (9点)	消化, 初沈 (2処理場, 3種類)	消化: ~8 初沈: ~13	1.5mmふるい	消化: 1% 初沈: 2%	×
高田ら(1974)	26)	B	回転粘度計 (外筒回転)	自 作	19.5 17.0	185rpm	ホールド・ リピート	初沈 (1処理場)	5.6~11.4	2mmふるい, 遠沈, 水道水希釈		×
高田ら(1976)	27)	P	回転粘度計 (外筒回転)	自 作	4.0	50	ホールド (8点)	初沈, 消化, 混合 (4処理場, 5種類)	8.4~15.0	粗大夾雑物除去, 遠沈, 水道水希釈		×
遠藤ら(1980)	16)	P	回転粘度計 (外筒回転)		2.5	350	リピート (10点)	余剰 (1処理場)	0.3~2.0		0.4%	×
Mulbargerら (1981)	28)	B	Babbittら(1939), Chou(1958)ほか, 過去50年の 主要な文献のデータより.					消化汚泥など	1~12		1%	
東京都(1982)	17)	P	回転粘度計 (内筒回転)	Contraves RM30	1.5	400	リピート (無段変速)	余剰, 混合 (2処理場, 3種類)	余剰: 0.8~3.3 混合: 1.6~2.9	粗大物除去	0.8%でも 非ニュートン	○
Rose-Innesら (1983)	29)	P	回転粘度計 (内筒回転)	Haake RV12	2.6 (MV2P)	260	リピート (無段変速)	余剰, 消化, ヒューズ (5処理場, 10種類)	1~8	ろ過, 希釈調整, 撹拌によらない.	1%でも 非ニュートン	○
Carthewら (1983)	30)	B	回転粘度計 (内筒回転)	Haake	1.0 (MV1)		リピート (無段変速)	混合	2.5~4.8			○
岩森ら(1994)	31)	P	管路実験	自 作	(管径) 9~24			混合 (1処理場)	0.05~1.5		0.13%	×

* 流動特性について B: ビンガム流動, P: 擬塑性流動

1.2.2 チクソトロピー

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。チクソトロピーとは、本来、流体が流動変形を受けるとゾル化し静置するとゲル化するという、等温可逆のゾル-ゲル変換を表す用語であるが、通常は広義に解釈され、流動変形を受けると内部構造が破壊されるが、静置するとその構造が再生され元の粘度に回復するという流体の性質に対して用いられる^{33), 34)}。特に前段の、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）が強調されることが多い。チクソトロピーの訳語としては揺変性という用語があり、またチキソトロピー、もしくはシキソトロピーと表記される場合もある。

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（ホールド）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（リピート）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。

このような下水汚泥のチクソトロピックな挙動が、その流動曲線の測定を非常に複雑にしている。つまり、せん断応力 τ は速度勾配 D の関数だけでなく、測定前の攪拌状態や測定中の流動変形の履歴によっても左右されるため、ある D に対する見かけ粘度は一義的に決定できないのである。具体的には、回転粘度計の測定パターン（回転数の制御、最大回転数など）によって得られる流動曲線の形状が異なってくる。

表1-5に、既存の研究におけるチクソトロピーの扱いについてまとめた。これによれば、多くの研究者が下水汚泥のチクソトロピー性を認めており、管路輸送を扱う場合には流動化した状態での粘度測定が必要であるという見解を示しているが、その扱い方は様々であることがわかる。チクソトロピー性が現れる境界濃度についても、非ニュートン性の境界濃度と同様に各研究結果に大きな隔たりがある。また、チクソトロピー性の大きさを評価する方法として、一定速度勾配下でのせん断応力の低下量・低下率、履歴曲線内の面積、またはある速度勾配における上昇曲線と下降曲線のせん断応力の比などが用いられるが、これを定量的に評価している研究は少ない。よって今後は特に、

- ・チクソトロピーを考慮した流動曲線の測定方法（流動平衡の判断基準）。
- ・チクソトロピー量の定量的把握
- ・測定結果の評価（チクソトロピーをどのように汚泥輸送へ反映させるのか）。

の3点について検討が必要であると考えられる。

表1-6 既存の研究におけるチクソトロピーの扱い

研究者・書名	測定時のチクソトロピーの扱いなど	チクソトロピー境界濃度
Dickら(1967)	余剰汚泥はせん断により破壊される内部構造を有する。 ホールド：数分で平衡に達する。	0.5%でも チクソトロピック
吉田ら(1972)	ホールド：5分で平衡に達する。 汚泥種類により構成粒子の凝集力に差がある。	消化：3~4% 初沈：7~8%
高田ら(1974)	ホールド：濃度9.5%以上の場合、5~10分では平衡に達しない。 履歴曲線による検討も。	初沈：7%
高田ら(1976)	ホールド：10分では平衡に達しないが、これを平衡とみなして議論。 有機物含有量の小さいほどチクソトロピー性は大きい。 チクソトロピーによるせん断応力の低下率は速度勾配によらない。	
遠藤ら(1980)	トルクが一定になる状態を真溶液と定義。 初期トルクはポンプ駆動時に、真溶液は圧力損失予測に適用できる。 濃度2%以下では、5回のリピートで真溶液状態に達する。	0.5%でも チクソトロピック
Mulbargerら(1981)	チクソトロピーによる粘度の変化もあまり大きくなく、濃度8%以下であればチクソトロピーを問題にする必要はない。	
東京都(1982)	管摩擦損失水頭を安全側に見積もる必要から、上昇曲線を採用。	
Rose-Innesら(1983)	速度勾配 10[1/s] における上昇時と下降時のせん断応力の比が約1.5程度であるので、送泥計画時に1.25程度の安全率を見込む。 うける速度勾配が大きいほど、粘度の低下は大きくなる。 一度測定された汚泥は、20時間静置しても元の粘度まで回復しない。	
Carthewら(1983)	汚泥がポンプや破砕機を通過することを考えれば、下降曲線の方がより厳密に流動化した汚泥の性質を表す。	
EPA Manual(1979)	汚泥輸送計画を立案する場合には、ポンプ通過時に汚泥が流動化することを考慮し、下降曲線を採用するのがよい。	
ハンドブック(1982)	Mulbargerら(1981)の考え方を引用。	
水理公式集(1985)	Mulbargerら(1981)の考え方を引用。	
設計指針(1994)	チクソトロピーについての記述なし。考え方は東京都(1982)のもの。	

1.2.3 回転粘度計

JIS Z 8803（液体の粘度－測定方法）に規定されているように、粘度計にはいろいろな方式のものがあるが、測定対象の特性や必要とされる精度等、測定の目的にあわせて適切な粘度計を使い分ける必要がある。下水汚泥は、非ニュートン性に加えチクソトロピー性も有するため次のような測定内容が要求される。

- ・速度勾配を変化させて測定することにより、流動曲線が得られること。
- ・経時変化をみるために、同一サンプルの測定を長時間継続できること。

これらの条件を満たし、下水汚泥の粘度測定に最も適していると考えられるのが回転粘度計である。

回転粘度計には、単一円筒型（B型）と共軸（二重）円筒型の2種類がある。単一円筒型は、構造が簡単で粗大粒子の影響も受けにくいなどの特長を有しており、実プロセス中でも汚泥濃度計として応用されている。しかし最大の欠点は、理論的に速度勾配の確定が困難なため、見かけ粘度を定義できないことにある。つまり、単一円筒型を用いた測定結果は、下水汚泥の非ニュートン性およびチクソトロピー性の判断や、試料間の相対粘度評価には利用できるが、それを見かけ粘度として扱うことができないということである。粘度測定の目的によってはこの程度で十分な場合もあるが、管路輸送への適用を目的とした場合は、速度勾配の定義された絶対的な粘度値を求める必要がある。よって本調査の場合には、共軸円筒型の回転粘度計を使用しなければならない。

■ 測定原理

共軸円筒型回転粘度計は、Newton の粘性の法則の説明に用いられる平行平板モデルの2枚の板を曲げて円筒状にしたものと考えることができる。その測定原理は以下の通りである^{34) - 36)}。図1-10のように、内筒半径 R_1 、外筒半径 R_2 の共軸二重円筒を考え、その間に粘度 μ のニュートン流体を満たし、内筒のみを一定の角速度 Ω [rad/s] で回転させるものとする。このとき次の条件は満足されているものとする。

- ・円筒間の試料の流れが層流であること。
- ・両円筒は無限に長いこと（上下両端面の効果が無視できること）。
- ・円筒表面でのすべりが無いこと。

任意の半径 r における流体の速度を v 、角速度を ω とすれば $v = r\omega$ であり、このときの速度勾配 D は、

$$D = dv/dr = r d\omega/dr + \omega \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。しかし、これらのうち第2項の ω は、両円筒および試料全体が相対的に固定しつつ、全体として同一の角速度で回転するときの項にあたるから粘性抵抗を生じる速度勾配とはならない。そこで粘性抵抗に有効な速度勾配として、改めて $D = r d\omega/dr$ と書き直すものとする。

ここで両円筒間に厚さ dr の薄肉円筒を考えると、その内面および外面にはそれぞれ次のような内部応力によるモーメント M が作用する。

$$M(r) = \mu D \cdot 2\pi r^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$M(r+dr) = \mu (D + dD) \cdot 2\pi (r + dr)^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

2つの円筒はその間に試料をはさんで平衡の状態にあるため、薄肉円筒は加速も減速もせず、作用するモーメントの総和はゼロである。よって試料の慣性によるモーメントおよび高次の微小項を無視すれば、

$$M(r+dr) - M(r) = rdD + 2Ddr = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。これを積分すれば、 $D = C/r^2$ となる。ここで C は積分定数である。これに $D = rd\omega/dr$ を代入し、境界条件 $\omega(R_1) = \Omega$ 、 $\omega(R_2) = 0$ のもとで解くと、半径 r における角速度 $\omega(r)$ および速度勾配 $D(r)$ は以下のようになる。

$$\omega(r) = \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \Omega \left[\left(R_2 / r \right)^2 - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$D(r) = \frac{-2 R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \Omega (1 / r)^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで負号は、内筒の回転方向と速度勾配の方向が逆になることを意味する。内筒の受けるモーメント（トルク）は $r = R_1$ を代入して、

$$M(R_1) = -4 \pi \Omega \mu \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。よって角速度 Ω およびトルク $M(R_1)$ から、流体の粘度 μ を計算することができる。

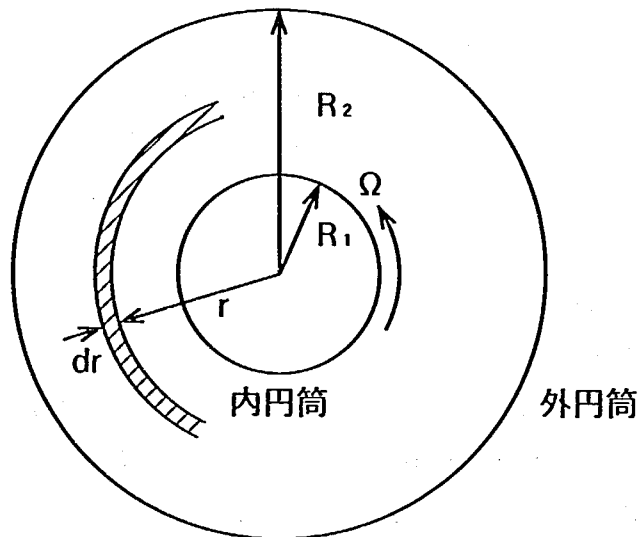


図1-10 共軸二重回転円筒

■ 非ニュートン流体への適用

2円筒間の速度勾配 D は (10) 式より一定ではなく、内筒に近い部分ほど大きくなることから、速度勾配が2円筒間で変化することは、ニュートン流体では何ら問題がないが、非ニュートン流体の場合、その見かけ粘度が速度勾配によって変わるために、 μ が一定のもとで計算された (11) 式が成り立たない。よって厳密には、非ニュートン流体の見かけ粘度は、共軸円筒型の回転粘度計を用いても正しく測定できないことになる。

しかしここで、円筒の半径に対して両円筒間の間隙（ギャップサイズ）を非常に小さくすれば $R_2 \approx R_1$ となるから、その間隙内における速度勾配の変化および内部応力の変化は無視できるようになる。そこで、このようなギャップサイズの小さい共軸円筒型回転粘度計を用いれば一定の速度勾配に対する見かけ粘度を求めることができる。JIS や DIN によれば、2円筒の半径比 $\delta (= R_2/R_1)$ を 1.10 以下程度とすれば、非ニュートン流体の場合でも十分な精度で見かけ粘度が測定できるものとされている。

しかし、ギャップサイズが広いときには上記のような仮定が成り立たなくなるため、測定誤差は大きくなる。具体的には、ニュートン流体用に計算されている回転粘度計の装置定数を用いて見かけ粘度を求めると、速度勾配の過小評価により粘度が大きめに算出されることになる。粗大粒子の引っかかりを防止するためにギャップサイズを広くとった場合には注意が必要である。粗大粒子を考慮した粘度測定方法については第3章で詳しく検討する。

■ 粘度測定時の留意事項

実際に回転粘度計を用いて汚泥の粘度測定を行う場合には、(11) 式を導くための仮定が満足されるような条件のもとで測定が行わなければならない。

まず、両円筒間の試料の流れは層流でなければならない。乱流は円筒の回転数が過大な場合に発生するため、回転数の制御方法を決定する際にこの点を考慮する。

次に円筒上下端面の影響を考慮しなければならない。実際の粘度測定においては無限に長い円筒を用いることは不可能であり、上下両端面もトルクを受けるために測定誤差を生じる。これを end effect と呼んでいる。市販の回転粘度計では、この end effect を取り除くために内円筒の形状がいろいろと工夫されている。

さらに、円筒表面ではすべり (slippage) があってはならない。既存のいくつかの研究において円筒表面のすべりが考慮されており、円筒表面にラバーマット²⁴⁾、水ペーパー²⁶⁾などを貼り付けて測定を行っている。しかし、両円筒の表面に金網のスリーブをつけた遠藤らの実験¹⁶⁾においては、金網の有無による測定結果の差異は認められなかったとしている。

また当然のことであるが、供試汚泥の性状が測定中に変化することは最も避けなければならないことである。特に留意すべき点は、測定中の汚泥温度を一定に保つこと、測定中に汚泥中の粒子が沈降しないこと、および円筒の回転により汚泥粒子の物理的破壊が生じないことなどである。

1. 3 調査の概要

1. 3. 1 調査目的

本調査では、集約処理をはじめとする汚泥管路輸送システムの効率化、適正化に資するため、送泥管の圧力損失算定の基礎となる汚泥の流動特性を対象とし、その測定方法や各種因子の影響などについての検討より、汚泥の流動特性を体系的に把握することを目的とする。調査の対象とした汚泥は、水処理系より引き抜かれその後脱水されるまでの液状汚泥とした。固形物濃度はおよそ 0.5～6% である。

なお、汚泥管路輸送システムのうち、送泥管の圧力損失の予測についての検討も並行して行っており、湖北総合実験施設内に設置した汚泥輸送実験装置（ループ長 55m、管径 37mm および 100mm）において、実下水汚泥を用いた輸送実験を行っている^{36)～38)}。

1. 3. 2 調査項目

上記の目的を達成するために実施した調査のうち、本報告書では以下の項目についてとりまとめた。

- (1). 流動曲線の形状、および管路輸送の観点からの非ニュートン流動モデルの適用についての検討。
- (2). ギャップサイズが広い場合の汚泥の粘度測定方法。
- (3). チクソトロピー性を考慮した汚泥の粘度測定方法。
- (4). 流動特性に及ぼす、温度および粒子径の影響。
- (5). 流動特性に及ぼす、汚泥貯留の影響。

1. 3. 3 調査に使用した回転粘度計の仕様

本調査では、非ニュートン流体の場合でも正確に粘度を測定できる内筒回転型の共軸二重円筒回転粘度計 Haake Rotovisco RV12 および RV 20 を用いた。RV 12, RV 20 とともにセンサーシステム（円筒部分）は共通であり、その仕様について表 1－7 にまとめた。表に示すとおり、本調査では3種類の半径の異なる内筒を用いており、これらのうち非ニュートン流体の粘度を最も正確に測定できるのは、半径比 δ が最も小さくなる MVI である。また各内円筒とも end effect をのぞくために下端面がへこんでおり、円筒を試料中に沈めたときに空気が封入されるようになっている。さらに空気の封入だけでは誤差を完全には除去できないので、装置定数にも補正がなされている。外筒（試料カップ）は恒温水の循環を行う保温容器により固定され、測定中の試料の温度を一定に保つことができる。円筒部分の断面図を図 1－11 に示す。

回転数の制御は RV12, RV20 とともにプログラムによる自動制御で、回転数の連続的変化や保持、繰り返し測定などが可能である。測定可能な最大トルクは、搭載しているドライブユニットが異なるため RV 12 で 1.47 Ncm, RV 20 で 4.9 Ncm である。測定データのハンドリングについては、RV 12 がアナログ出力をレコーダーに書き出すのに対し、RV 20 ではデジタル出力をコンピューターに取り込むことができる。

測定粘度の下限は 10 mPa・s であり、これは清水 (20℃) の粘度の 10 倍に相当する。希薄な汚泥の粘度はこの下限値を下回る場合があるが、本調査においてはこのような場合についても測定を行いデータとして取り上げている。これらの値については測定誤差が大きいということに留意しておく必要がある。

写真 1－4 に調査に用いた回転粘度計、内外円筒について示す。

表 1-7 回転粘度計の各センサーシステムの仕様

センサーシステム	MV I	MV II	MV III
内円筒 (Rotor, Bob) 半径 R_1 [mm] 長さ L [mm]	20.04 60	18.4 60	15.2 60
外円筒 (Stator, Cup) 半径 R_2 [mm]	21	21	21
ギャップサイズ $R_2 - R_1$ [mm] 半径比 $\delta = R_2 / R_1$	0.96 1.05	2.6 1.14	5.8 1.38
サンプル必要量 [cm ³] 速度勾配換算係数 [s ⁻¹ /rpm] 測定粘度範囲 [mPa·s]	40 2.34 10-10 ⁵	55 0.9 20-4・10 ⁵	70 0.44 60-10 ⁶

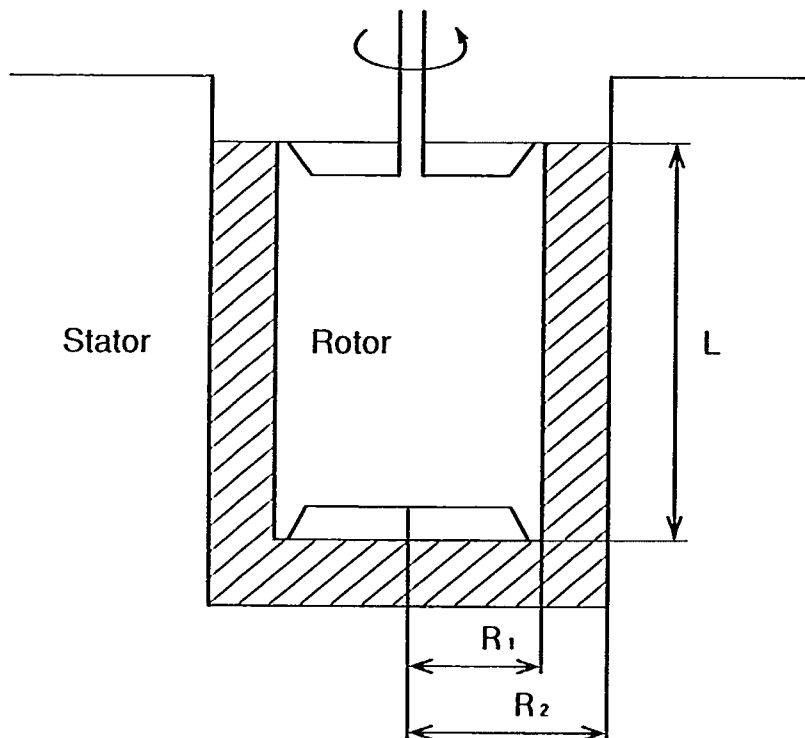
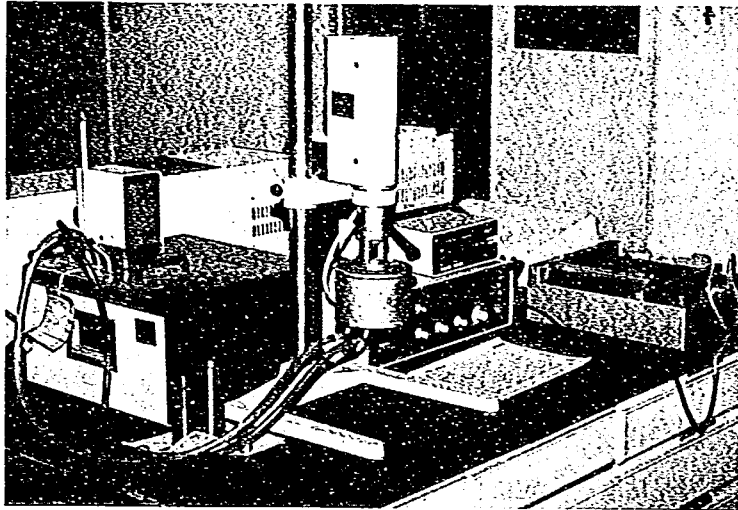
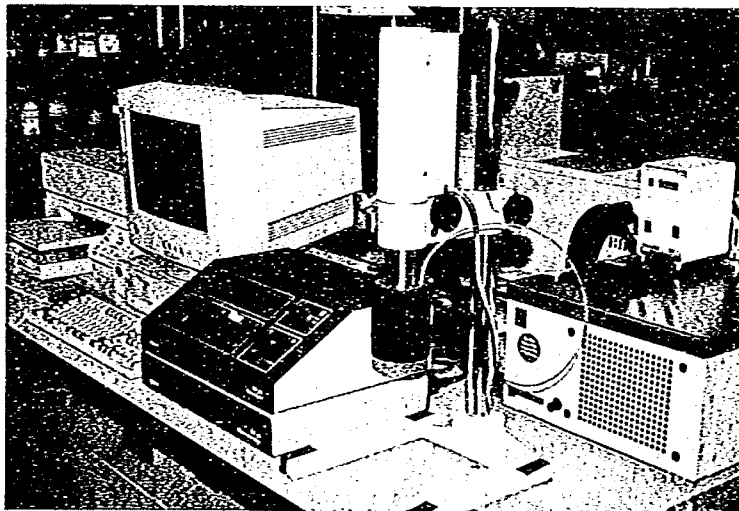


図 1-11 センサーシステムMVの断面図



RV12



RV20



センサーシステム 左よりMVⅠ、MVⅡ、MVⅢ、外円筒

写真1-4 調査に使用した回転粘度計

2. 非ニュートン流動モデルの適用

下水汚泥は濃度のごく低い場合をのぞいて非ニュートン流体としての挙動を示すが、その流動モデルの適用については表1-4に示したように研究者によって様々であり定説がない。特に管路輸送の観点から比較検討された例は少ない。

そこで本章では、2つの非ニュートン流動モデル（ビンガム流動、擬塑性流動）のどちらが下水汚泥の流動モデルとして適しているかを、測定された流動曲線の形状、および管路輸送の観点の両面から比較検討した。検討の対象として、管路輸送実験³⁾に供試後の汚泥を用いた。輸送実験においては、チクソトロピーの影響を排除して測定中の汚泥粘度を一定に保つために、測定前にあらかじめ流速約 2 m/s で 1～2 時間供試汚泥を循環圧送するという手法をとっている。そのためこれらの汚泥は、粒子が幾分微細化し、かつ流動平衡に達していると考えられる。よって粗大粒子やチクソトロピーの影響を考慮することなく粘度の測定が可能である。

2. 1 管路輸送実験後の汚泥を用いた検討

2. 1. 1 流動曲線の形状による比較

実験に用いた汚泥は、茨城県霞ヶ浦浄化センターの初沈汚泥、混合濃縮汚泥、消化汚泥、およびこれらに脱水汚泥、もしくは三次処理水を混合して濃度調整を行ったものである。その性状について表2-1に示す。汚泥密度はピクノメーターにより比重を測定し、各温度の密度に換算した。粒子径は、レーザー回折・散乱式粒度分析計 (LEEDS & NORTHRUP, MICROTRAC SRA 7995-10) により測定した。なお、比重および粒子径の詳細な測定方法に関しては、本報告書の付録 (A) にまとめている。

粘度の測定には、回転粘度計に RV12、センサーシステムに MV I を用いた。回転数制御は図2-1のように行った。ここで、最大速度勾配 300 [1/s] は管路輸送実験における最大流速 (1.9 m/s)、管径 (37 mm)、および回転粘度計の円筒間の流れが乱流とならないこと等を考慮して決定した。また測定時の試料温度は輸送実験時の温度とした。

得られた流動曲線は、上昇曲線と下降曲線がほぼ一致し、粒子の引っかかりによるノイズも少なかった。このことから、粗大粒子やチクソトロピーの影響を受けずに測定がなされたものと判断した。また、粘度測定前後において供試汚泥の粒子径には変化がなく、内円筒の回転による汚泥粒子の物理的破壊は生じていないことが確認された。

管路輸送実験における最小流速 (0.1 m/s) を考慮し、測定された流動曲線の 37.5 ～ 300 [1/s] の範囲に最小自乗法を適用して、各流動モデルにおけるレオロジー定数を求めた。これを汚泥濃度 C [%] で整理すると図2-2のようになる。各レオロジー定数は汚泥種類や温度が異なっていたにも関わらず、 $C > 0.7\%$ において C の関数として次のように表すことができた。

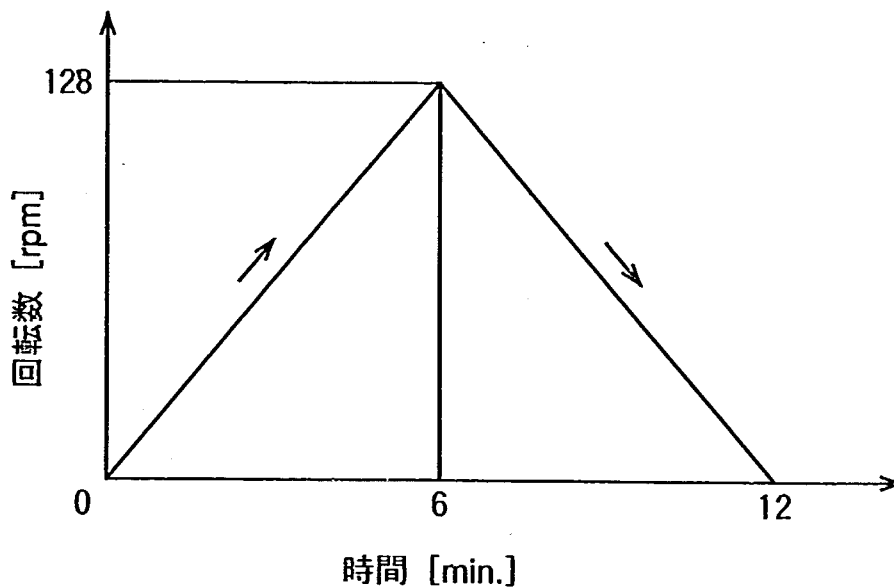
表 2-1 供試汚泥の性状

Run No.	汚泥種類	T S [%]	V S [%]	温度 [°C]	密度 [kg/m³]	粒径 [μm]
1	消化	1.60	64.5	10	1.008	20.4
2	消化+W	0.80	64.4	11	1.004	19.9
3	消化+D	2.01	68.3	9	1.012	33.1
4	消化+D	2.72	69.8	20	1.008	36.3
5	濃縮+D	4.24	75.4	30	1.010	33.4
6	濃縮+D	5.52	73.2	27	1.007	27.5
7	初沈	0.58	77.5	26	1.000	52.1
8	初沈+W	0.41	75.7	26	997	49.6
9	消化	1.59	64.2	36	1.000	35.3
10	消化+W	0.65	64.1	23	1.001	26.6
11	消化+D	5.47	66.9	29	1.021	39.0
12	消化+D	6.18	67.2	32	1.021	35.1

* V S は T S に対する％，粒径は体積平均径，温度は粘度測定時の試料温度

* +W：三次処理水と混合，希釈

* +D：脱水汚泥（T S = 80%，V S = 70%）と混合



* 128rpmは速度勾配 $D = 300 [1/S]$ に相当

図 2-1 粘度測定時の回転数制御プログラム

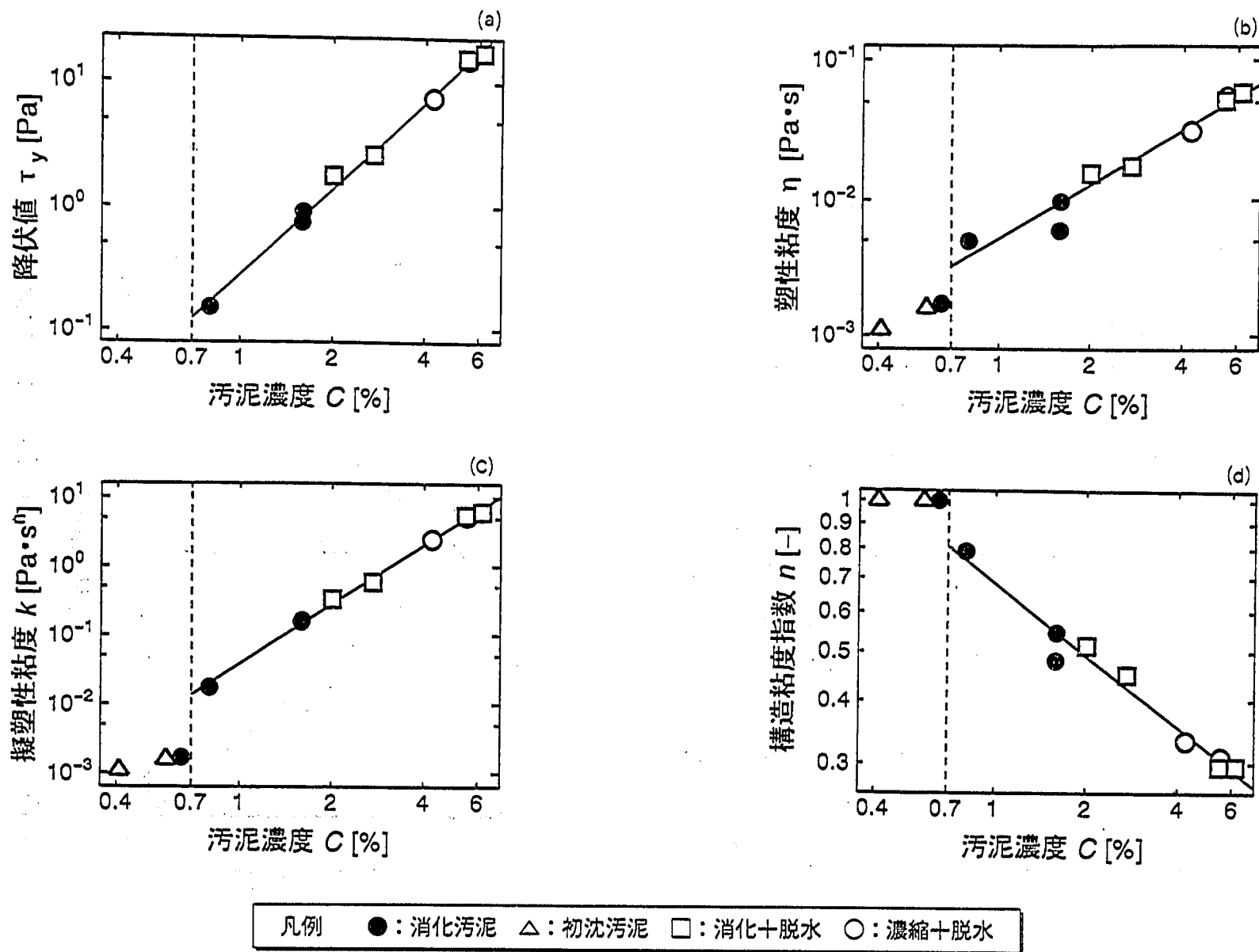


図2-2 汚泥濃度とレオロジー定数の関係

$$\text{Bingham Plastic} \quad \tau_y = 0.283 C^{2.32} ; \eta = 0.00516 C^{1.32} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{Pseudoplastic} \quad k = 0.0385 C^{2.87} ; n = 0.682 C^{-0.473} \quad \dots\dots\dots (13)$$

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。

以上のことから、各レオロジー定数を汚泥濃度の関数として表す場合には、どちらの流動モデルを用いてもほとんど差異がないと考えられる。さらに、粒子の微細化に伴い汚泥性状が均質化されたこと、および粘度への影響は温度変化よりも濃度変化の方が大きいことも推察される。

次に、測定された流動曲線の形状への流動モデルの適合性について、回帰計算における相関係数 R^2 の大小から検討した。ここでは実施設での管径および流速を考慮して、近似計算の範囲を 10 [1/s] にまで広げた場合についても検討した。計算された各レオロジー定数と相関係数について表 2-2 に示す。

これによると、回帰計算の範囲が 37.5 ~ 300 [1/s] の場合は、 R^2 に関して 2 つの流動モデルには大きな差はないが、10 ~ 300 [1/s] の場合にはビンガム流動モデルの R^2 が低下することがわかる。図 2-3 には、両者の R^2 に大きな差がある Run No. 11 の流動曲線について、各流動モデルとともに示した。

以上より、流動曲線へのモデルのあてはめという点において、擬塑性流動モデルの方が優れているといえることができる。ビンガム流動モデルは、低速度勾配領域において流動曲線とのずれが大きく、 R^2 が擬塑性流動モデルに比べて小さい。

2.1.2 管路輸送の観点からの比較

層流域におけるビンガム流体、擬塑性流体の挙動については既に理論的に導出されており^{20), 39), 40)}、その圧力損失は各レオロジー定数と管径、流速、密度から求まる非ニュートン流体のレイノルズ数を用いれば、水の場合と同様に計算することができる。管路輸送実験による圧力損失の実測値と非ニュートンレイノルズ数から計算される理論値とを比較したところ、ビンガム流動と擬塑性流動のどちらのモデルを用いても十分な予測精度が得られた³⁷⁾。実測値と理論値がよく一致するということは、供試汚泥の粘度が十分な精度をもって測定されたことを意味しており、例えば円筒表面のすべりの影響などは無視できる程度であると考えられる。

しかし、ビンガム流体のレイノルズ数を計算するためには 4 次方程式を解く必要があり、取り扱いが非常に煩雑である。このため、近似的に簡便なビンガムレイノルズ数が用いられることもあるが、特にレイノルズ数の小さい領域で実測値と一致しない。よって、予測精度および計算上の取り扱い性から判断して、擬塑性流動モデルを用いる方が管路輸送の観点から適していると考えられる。

実際、擬塑性流動モデルは、 n が整数とならないため k の次元が合理的でないこと、 $D \rightarrow 0$ のとき見かけ粘度が無限大となることなどの難点を有しているにもかかわらず、その表現形式の簡便さのため、複雑な工学上の流れの諸問題の解析に広く利用されており⁴¹⁾、このことから考えても、擬塑性流動モデルを用いる方が好都合であろう。

表 2-2 各レオロジー定数と近似範囲、相関係数

近似計算の範囲 37.5~300 [1/s]						
Run	ビンガム流動モデル			擬塑性流動モデル		
No.	τ_y [Pa]	η [Pa·s]	R^2	k [Pa·s ⁿ]	n [-]	R^2
1	0.928	0.0097	0.996	0.163	0.546	0.993
2	0.153	0.0050	0.998	0.0177	0.790	0.999
3	1.825	0.0155	0.991	0.330	0.515	0.999
4	2.691	0.0175	0.988	0.584	0.451	0.999
5	7.688	0.0312	0.992	2.44	0.333	0.992
6	15.34	0.0551	0.990	5.23	0.309	0.995
7	0	0.0016	—	0.0016	1	—
8	0	0.0011	—	0.0011	1	—
9	0.754	0.0059	0.997	0.155	0.481	0.993
10	0	0.0017	—	0.0017	1	—
11	15.62	0.0516	0.984	5.55	0.296	0.997
12	17.45	0.0588	0.989	6.22	0.296	0.994
近似計算の範囲 10~300 [1/s]						
Run	ビンガム流動モデル			擬塑性流動モデル		
No.	τ_y [Pa]	η [Pa·s]	R^2	k [Pa·s ⁿ]	n [-]	R^2
1	0.767	0.0105	0.989	0.197	0.509	0.994
2	0.117	0.0051	0.997	0.0219	0.748	0.998
3	1.472	0.0171	0.984	0.402	0.477	0.997
4	2.202	0.0197	0.977	0.685	0.419	0.998
5	6.661	0.0359	0.972	2.80	0.307	0.994
6	13.75	0.0623	0.978	6.46	0.268	0.988
7	0	0.0016	—	0.0016	1	—
8	0	0.0011	—	0.0011	1	—
9	0.636	0.0065	0.986	0.192	0.439	0.994
10	0	0.0017	—	0.0017	1	—
11	13.86	0.0597	0.967	6.52	0.264	0.994
12	15.58	0.0673	0.973	7.42	0.262	0.991

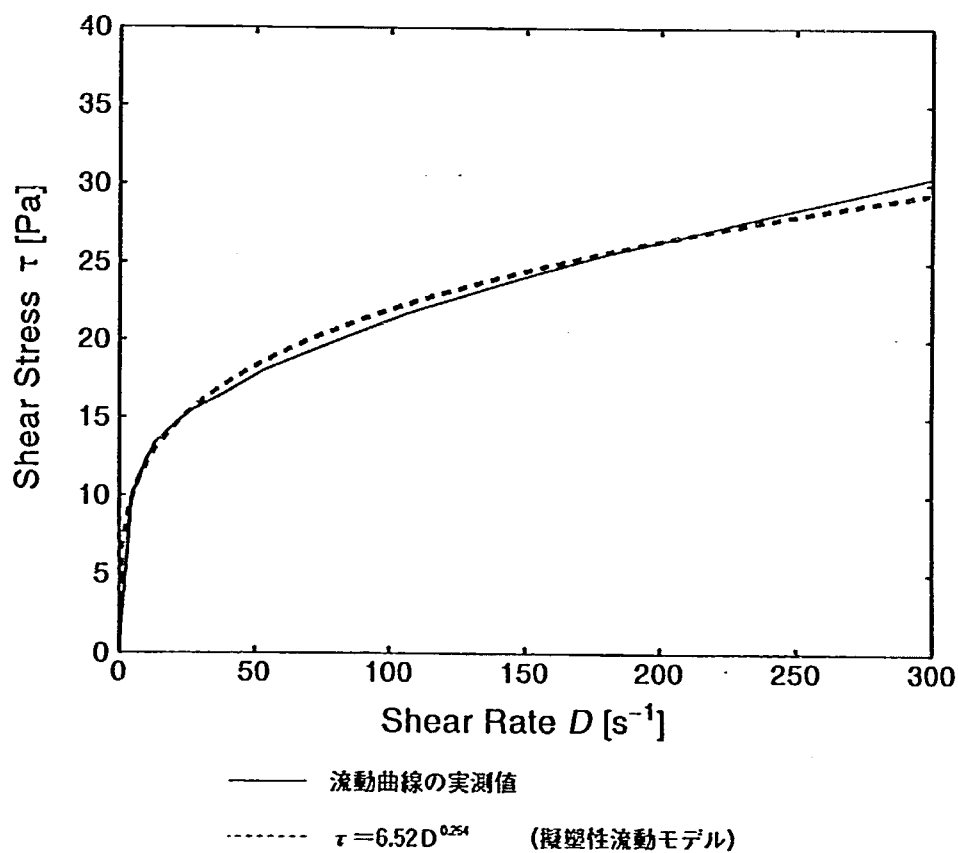
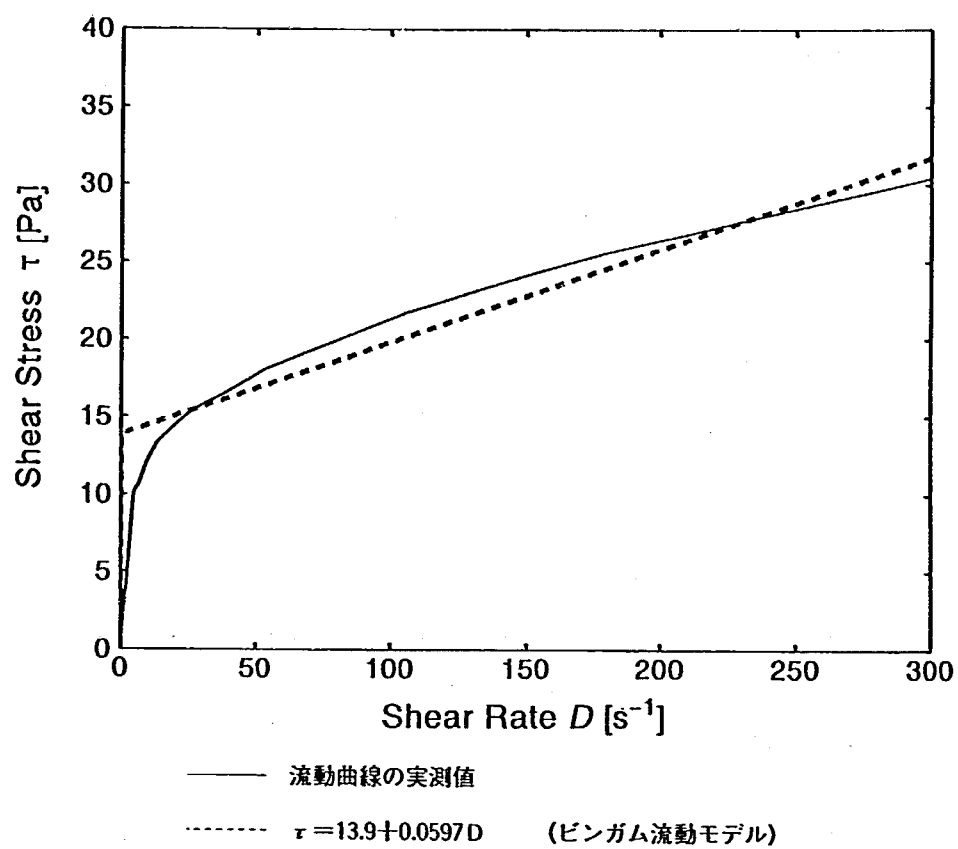


図2-3 流動曲線への各流動モデルのあてはめの例 (Run No.11)

2. 2 結 論

ここでは、粗大粒子やチクソトロピーの影響を無視できる平衡流動状態に達した汚泥を用いて流動曲線を測定し、ビンガム流動と擬塑性流動の2つの非ニュートン流動モデルのどちらが、汚泥の流動特性を表現するのに適しているかを検討した。その結果、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、および表現形式が簡便であり計算上有利なことから、擬塑性流動モデルが適しているという結論が得られた。

擬塑性流動モデルを用いると、実際に降伏値を有する場合であってもこれを無視してしまうことになる。しかし管路輸送を目的とした場合は、あくまでも汚泥が流動している状態が対象であり、流動するかどうかの境目である降伏値そのもの、もしくはそういった汚泥の性質（塑性）については正確に把握する必要がない。また低速度勾配領域（およそ 10 [1/s] 以下）の挙動についても、実際の管路輸送で生じるであろう速度勾配の範囲から考えて、その対象外と考えてよい。これらのことから、下水汚泥の管路輸送における流動特性として、擬塑性流動モデルを用いることは妥当であると考えられる。

逆に、管路輸送以外の現象、例えば汚泥の沈降などを考える場合には、対象とすべき速度勾配が非常に小さく、低速度勾配領域での挙動が重要となる。また管路輸送であっても、脱水汚泥のように流動性の乏しい汚泥を対象とする場合には、降伏値の影響を無視できないと考えられる。このような場合の流動特性については、改めて検討が必要であろう。

第3章では、本章で先送りにした2つの問題、粗大粒子とチクソトロピーについての検討を行う。

3. 回転粘度計を用いた粘度測定方法の検討

前章までに、管路輸送を目的とした場合の下水汚泥の流動特性は、擬塑性流動モデルを用いることが妥当であることが明らかとなった。しかし、実際の汚泥は mm オーダーの粗大な粒子を含む場合も多く、またチクソトロピーという時間依存の性質も持ち合わせている。これらを考慮した汚泥の粘度測定方法は未だに確立されておらず、このことが既存の粘度測定結果のばらつきに反映している。

下水試験方法⁴²⁾の中には下水汚泥の粘度測定方法が付録として説明されているが、これは管路輸送を目的としたものではなく、また記載内容にも誤りがあり（共軸二重円筒式を用いることとしているが、試験操作の説明および図示されている粘度計は単一円筒式についてである）、有効な試験方法ではない。

そこで本章では、粗大粒子対策としてギャップサイズが広い場合（ $\delta > 1.10$ ）の測定方法、および汚泥がチクソトロピー性を持つ場合の測定方法について検討し、管路輸送を目的とした汚泥の粘度測定方法の提案を行う。また、いくつかの測定例や管路輸送実験の結果を元にその検証も行った。

3. 1 粗大粒子を考慮した測定方法

3. 1. 1 回転粘度計内での擬塑性流体の流れ

2つのレオロジー定数 k, n が既知の場合、擬塑性流体の回転粘度計内の流れはニュートン流体の場合と同様な方法で計算することができる。

図1-10と同じ内筒半径 R_1 、外筒半径 R_2 、内筒角速度 Ω [rad/s] の共軸二重円筒を考える。半径 r における流体の角速度を $\omega(r)$ 、粘性抵抗に有効な速度勾配を $D(r)$ とおけば、 $D(r) = r d\omega(r)/dr$ である。ここで厚さ dr の薄肉円筒を考えると、その内面および外面にはそれぞれ次のようなモーメント M が作用する。

$$M(r) = kD^n \cdot 2\pi r^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$M(r+dr) = k(D + dD)^n \cdot 2\pi (r + dr)^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

高次の微小項を無視して、

$$M(r+dr) - M(r) = nD^{n-1}rdD + 2rD^n dr = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

これを積分すれば、 $D = C/r^{2/n}$ となる。ここで C は積分定数である。これに $D = r d\omega/dr$ を代入し、境界条件 $\omega(R_1) = \Omega$ 、 $\omega(R_2) = 0$ のもとで解くと、 $\omega(r)$ および $D(r)$ は2円筒の半径比 $\delta = R_2/R_1$ を用いて次のように表される。

$$\omega(r) = \frac{1}{\delta^{2/n} - 1} \Omega \left\{ (R_2/r)^{2/n} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$D(r) = \frac{2/n}{1 - \delta^{2/n}} \Omega (R_2/r)^{2/n} \quad \dots\dots\dots (18)$$

(17) 式および (18) 式のそれぞれに $n = 1$ を代入すると、ニュートン流体の関係式 (9), (10) を得ることができる。実際には n が未知であるから、これらの式から擬塑性流体の見かけ粘度は求めることができない。

図 3-1 に (17) 式による 2 円筒間の角速度の分布を、図 3-2 に (18) 式による 2 円筒間の速度勾配の分布を示した。構造粘度指数 n が小さくなるほど、またギャップサイズが広がるほどニュートン流体の場合との差が大きくなる。ここで特に重要となるのは、トルクを検出する内円筒壁面 ($r=100$) における速度勾配であるが、 n が小さく非ニュートン性が大きい試料をセンサーシステム MVⅢのようにギャップサイズの広い状態で測定した場合、速度勾配がニュートン流体の 2~5 倍程度となることがわかる。このような場合に回転粘度計の装置定数をそのまま用いると、見かけ粘度を 2~5 倍大きく見積もることになる。

図 3-3 は同一試料を異なるギャップサイズで測定した場合の流動曲線である。ここで見かけ粘度は装置定数をそのまま用いて計算している。試料はともに粗大粒子を含まず MVI でも十分測定可能な消化汚泥と余剰汚泥である。消化汚泥はチクソトロピー性が無かったため、回転数制御プログラムを図 2-1 と同様に最大回転数までの 1 往復 (リピート) とした。余剰汚泥についてはチクソトロピー性を有していたため、図 2-1 を 3 回繰り返すプログラムとし (リピート 3 回)、3 回目の下降曲線を対象とした。また、各センサーシステムの最大回転数は適宜変更した。図より、ギャップサイズの広い (δ が大きい) ほど見かけ粘度が大きめに評価されることが理解される。

実際の粘度測定においては、粗大粒子の引っかかりを防ぐためにギャップサイズを広くとらなければならない場合がしばしばある。しかし、上述の通りギャップサイズが広い場合には見かけ粘度が過大評価されてしまう。そこで以下では、これを補正する方法として、回転粘度計内試料の流動状態を実測する方法⁴³⁾、および代表粘度を用いる方法⁴⁴⁾ の 2 つについて検討する。

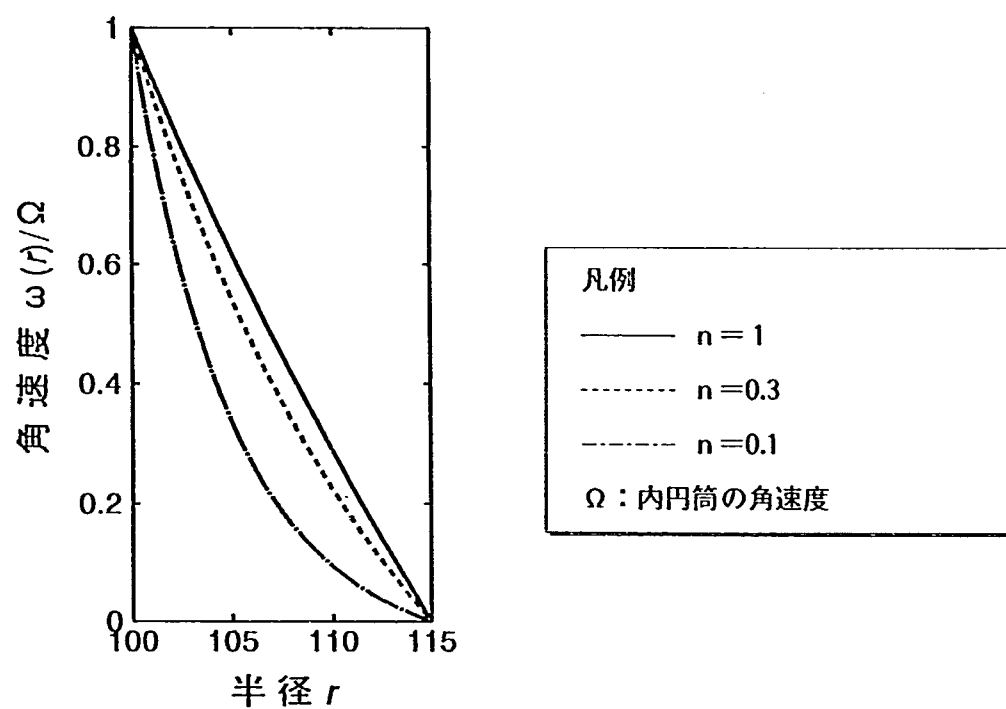
3.1.2 回転粘度計内試料の流動状態の実測

回転粘度計の内円筒壁面の速度勾配 $D(R_1)$ を測定することができれば、擬塑性流体であっても正しい見かけ粘度を得ることができる。ここでは、コンクリートの粘度測定の事例⁴⁵⁾を参考に、ビデオ撮影による回転粘度計内試料の流動状態の実測を試みた。

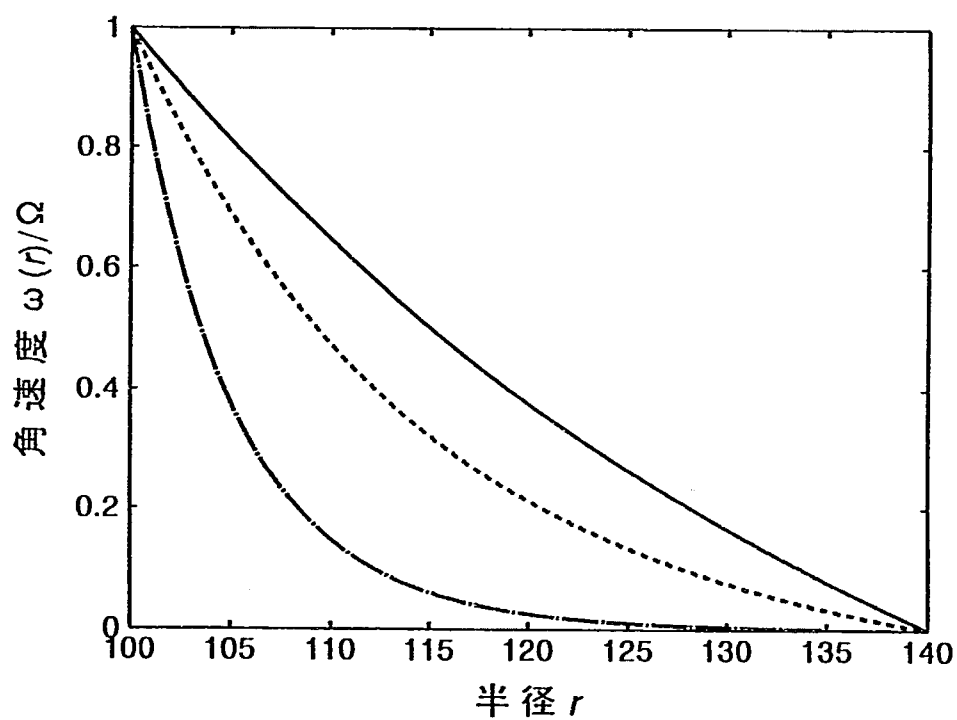
センサーシステム MVⅡ および MVⅢ の 2 円筒間の試料水面に、トレーサーとして約 0.2mm 角の紙片を数個浮かべ、これを市販の 8mm ビデオカメラ (30 フレーム/秒) を用いて近接撮影した。このビデオを低速再生し、画面上で解析を行うことにより、2 円筒間でのトレーサー位置 ($Q = r - R_1$ [mm]) とその回転数 $N(Q) = \omega(Q)/2\pi$ [rps] を求めた。内円筒の回転数 $N_0 = N(0)$ は一定とし、1.5, 2, 2.5, 3 [rps] の 4 通りについて測定を行った。試料には図 3-3 (1) と同一の消化汚泥を用いた。写真 3-1 に解析に用いたビデオ画面の例を示す。

図 3-4 に測定結果を示す。図中の実線はニュートン流体 ($n = 1$) の場合の回転数の分布である。 N/N_0 の値は内円筒の回転数 N_0 によらずほぼ一定であり、流動状態の実測は比較的精度よく行われたものと考えられる。図より $0 < Q < 1$ の区間はほぼ直線とみなせるため、この区間の勾配を用いて内円筒壁面の速度勾配を求めることとした。

図より、 $N(1)/N_0$ の値は MVⅡ, MVⅢともに 0.3 とすることができる。よって勾配は、

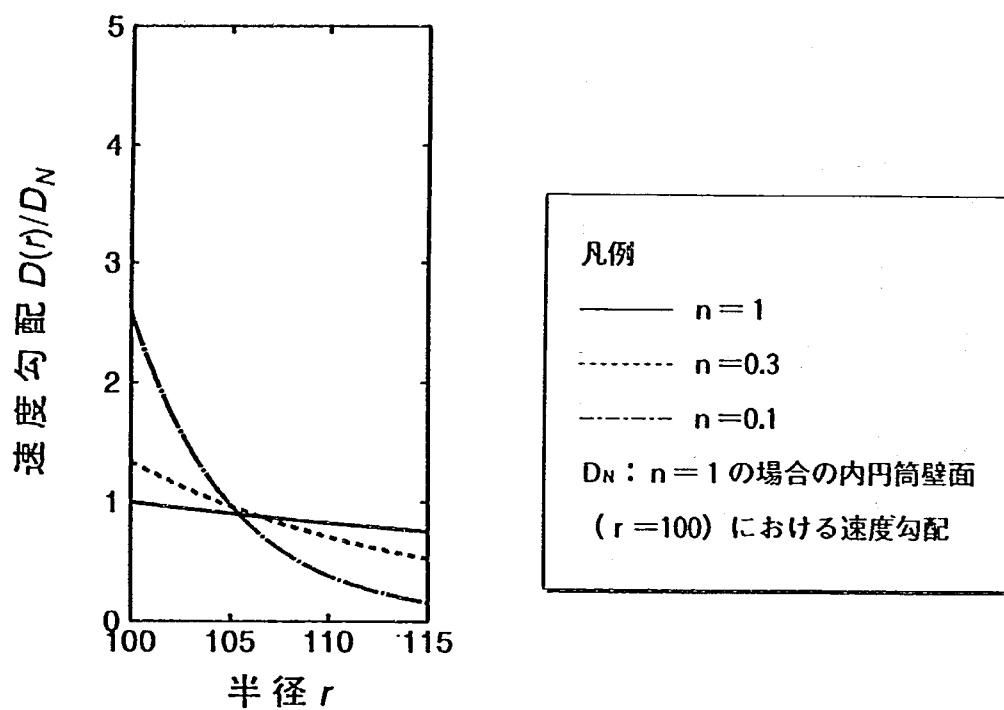


(MV II 相当)

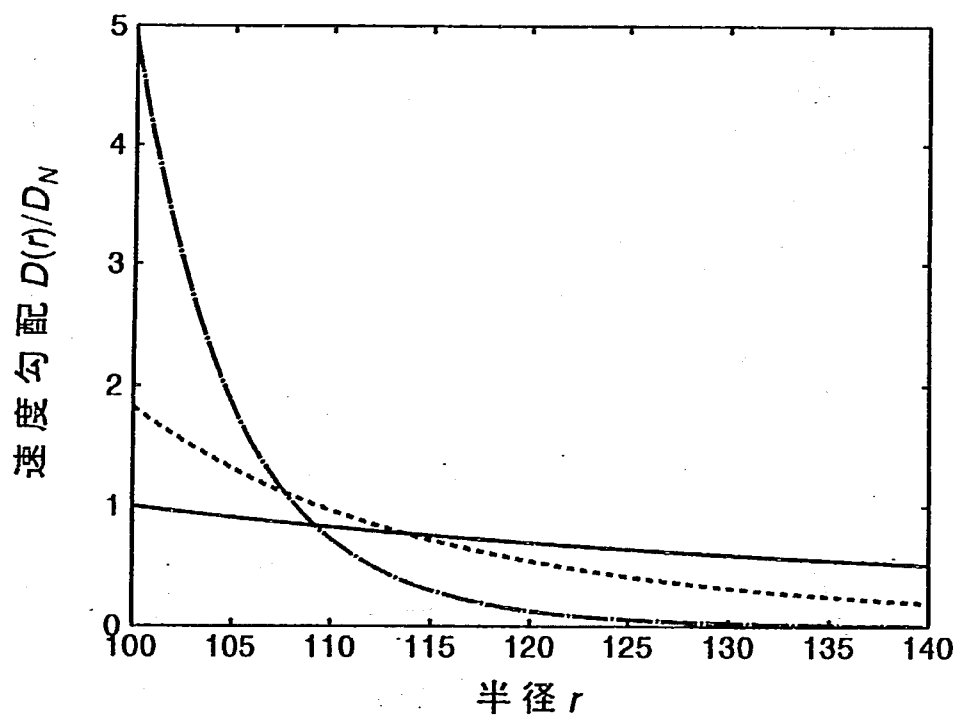


(MV III 相当)

図 3-1 2円筒間の角速度の分布

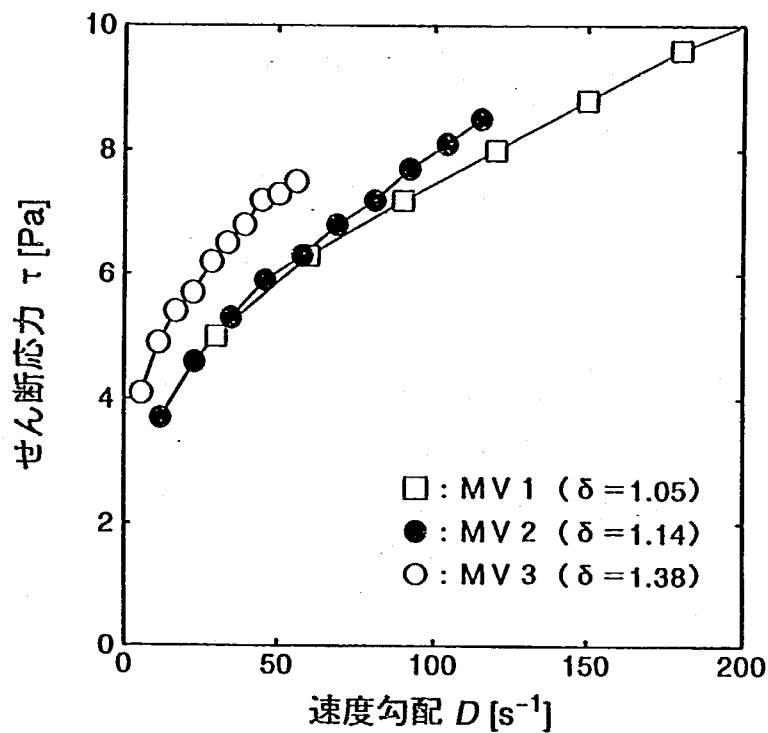


(MV II 相当)



(MV III 相当)

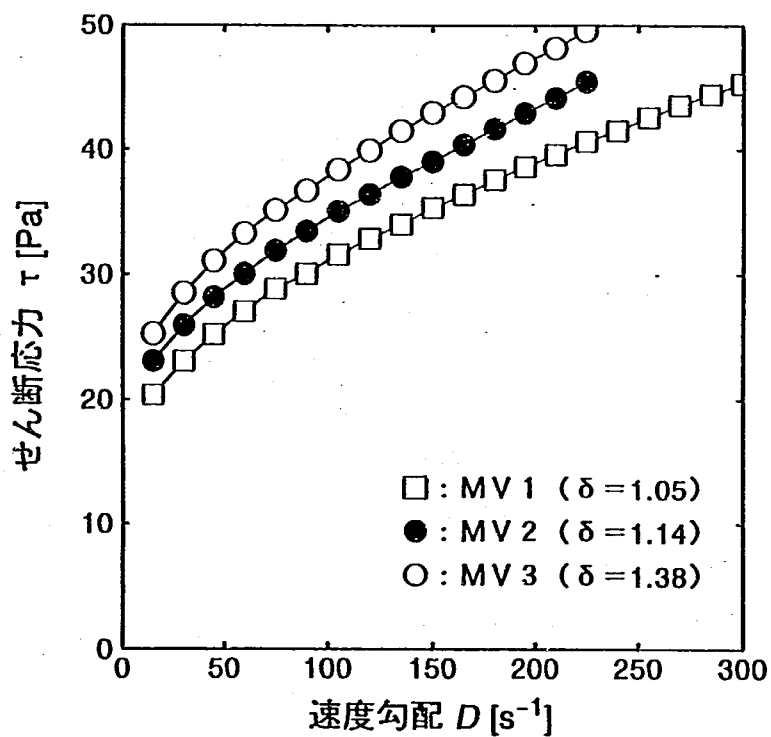
図3-2 2円筒間の速度勾配の分布



(1)消化汚泥の流動曲線の測定例

試料：消化汚泥

TS=1.5%、20℃

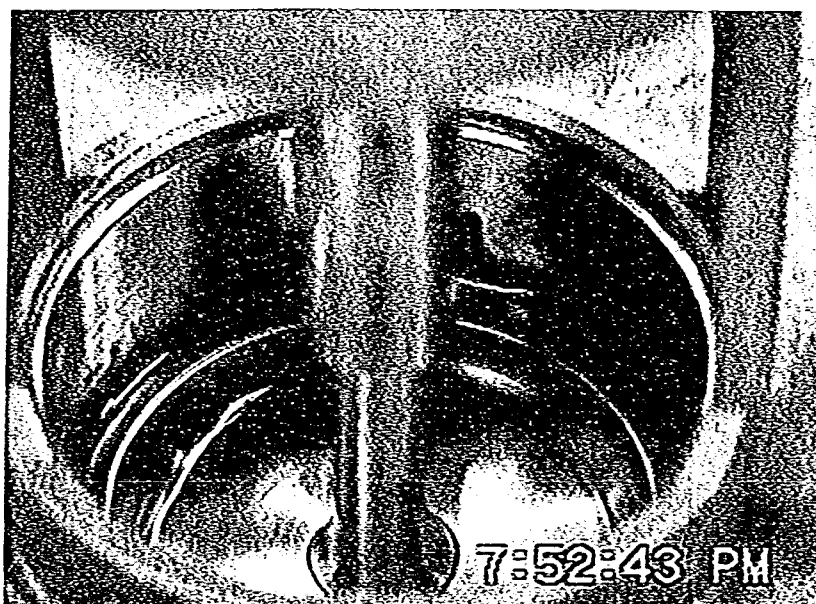


(2)余剰汚泥の流動曲線の測定例

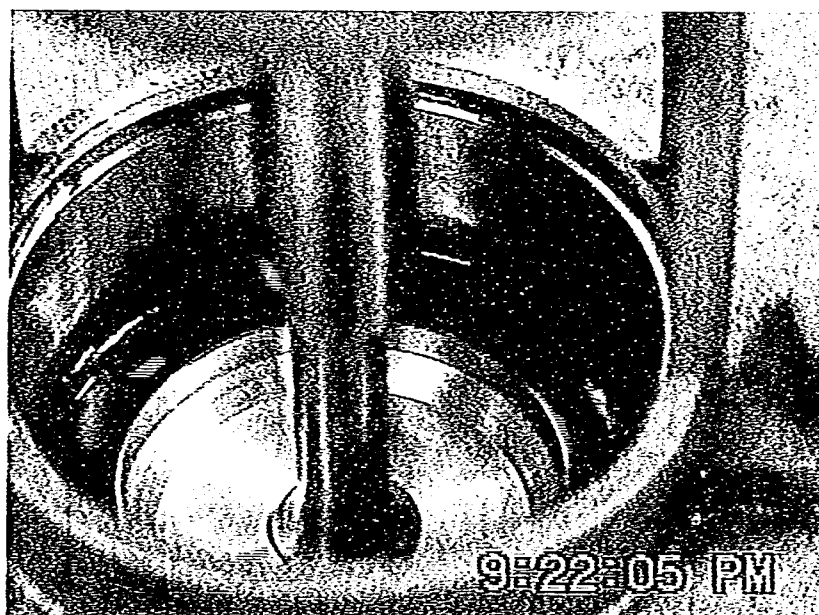
試料：余剰濃縮汚泥

TS=4.8%、20℃

図3-3 ギャップサイズの影響

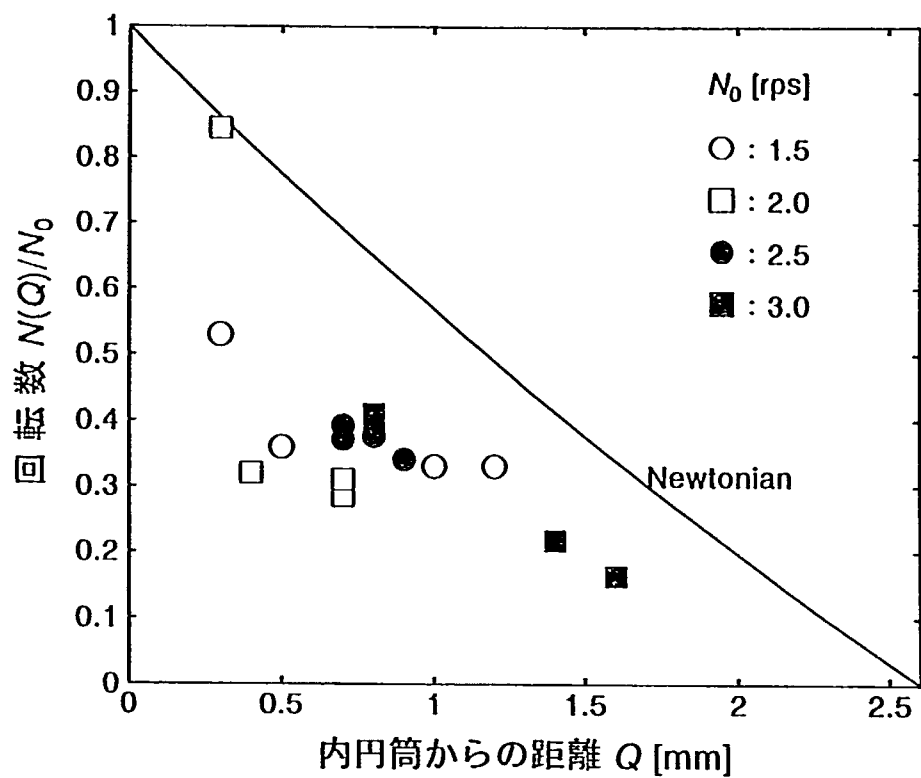


MV II

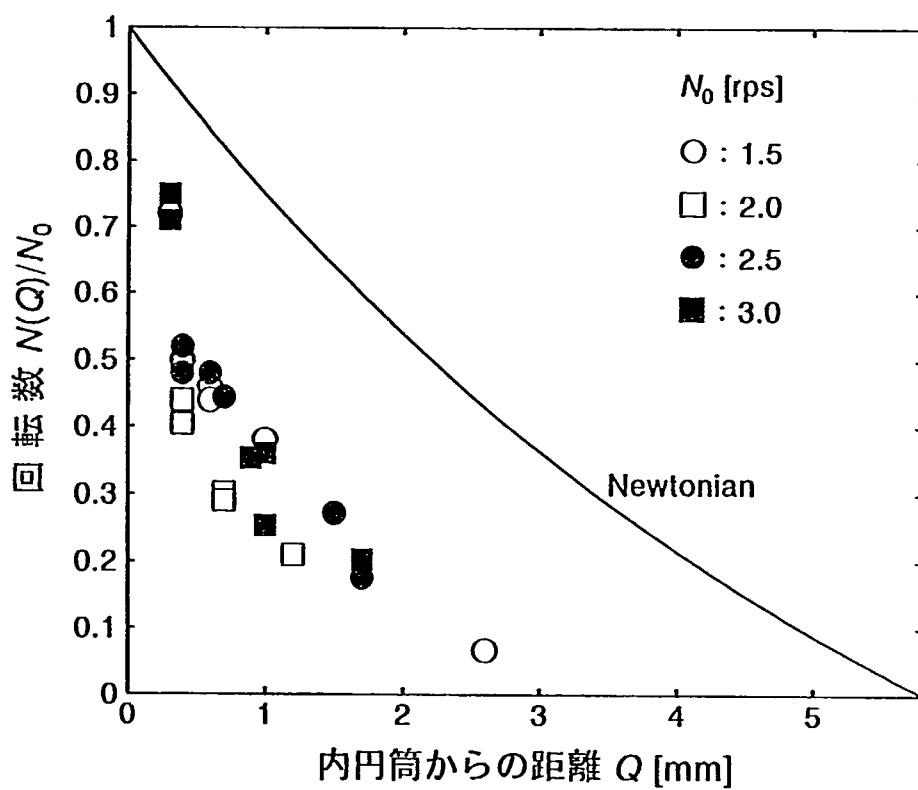


MV III

写真 3-1 回転粘度計内試料の流動状態 (ビデオ画面)



(1) MV II の場合



(2) MV III の場合

図 3-4 回転粘度計内試料の流動状態

$$\frac{\Delta N/N_0}{\Delta Q} = \frac{N(1)/N_0 - 1}{1 - 0} = -0.7 \text{ (MVII)}, -0.7 \text{ (MVIII)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。ここで、

$$\frac{\Delta N/N_0}{\Delta Q} = \frac{\Delta (\omega/2\pi)/(\Omega/2\pi)}{\Delta (r - R_1)} = (1/\Omega) \cdot (d\omega/dr) \quad \dots\dots\dots (20)$$

であるから、内円筒壁面の速度勾配の実測値 $D(R_1)_{Exp}$ は、

$$D(R_1)_{Exp} = R_1 \cdot (d\omega/dr) = R_1 \Omega \frac{\Delta N/N_0}{\Delta Q} \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。これに対して装置定数である $n = 1$ の場合の速度勾配 $D(R_1)_{Theo}$ は、(18) 式もしくは (10) 式から、

$$D(R_1)_{Theo} = [2\delta^2 / (1 - \delta^2)] \Omega \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる。これらの速度勾配の比は、

$$\frac{D(R_1)_{Exp}}{D(R_1)_{Theo}} = \frac{1 - \delta^2}{2\delta^2} R_1 \frac{\Delta N/N_0}{\Delta Q} \quad \dots\dots\dots (23)$$

として表され、これは内筒の回転数によらず一定となる。(19) 式および δ , R_1 を代入すれば、

$$D(R_1)_{Exp} / D(R_1)_{Theo} = 1.5 \text{ (MVII)}, 2.5 \text{ (MVIII)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

という値を得ることができる。これがすなわち補正係数であり、測定された流動曲線の速度勾配について、それぞれ 1.5 倍、2.5 倍することにより正しい流動曲線を求めることができる。

図 3-5 は図 3-3(1) のうち MVII, MVIII による流動曲線を上記の係数を用いて補正したものである。補正によりこれらの流動曲線をかなり MVI の流動曲線に近づけることができた。しかし、ここで留意しなければならないのは、これらの補正係数はここで用いた試料に対してのみ有効であり、本方法を用いるためには各試料ごとに流動状態を実測して (19) 式の勾配を算出しなければならない。

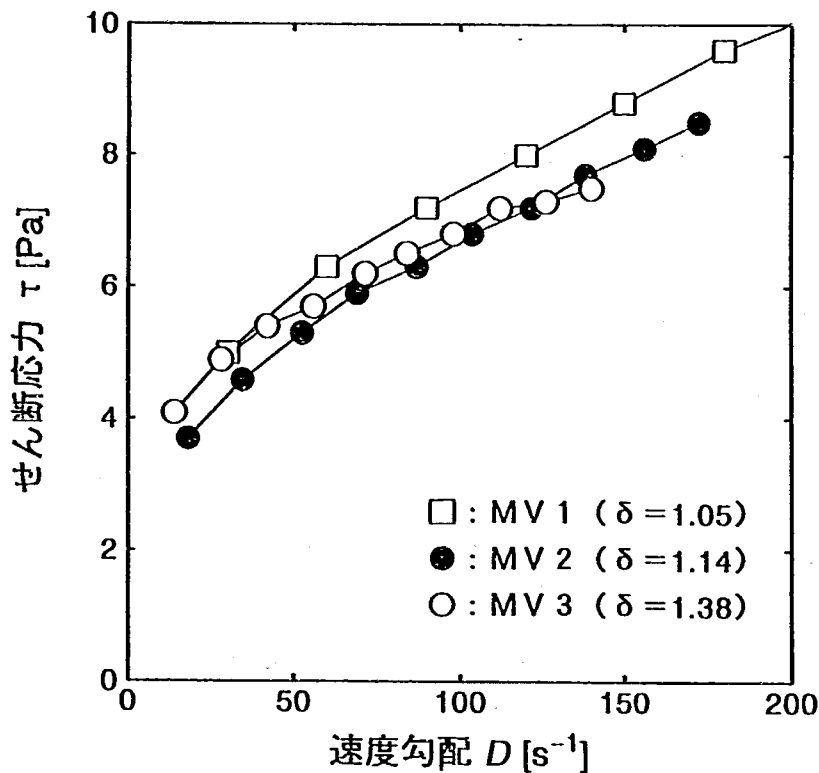


図3-5 流動状態の実測による図3-3(1)の補正

3.1.3 代表粘度による補正

流動状態を実測する方法はせん断応力一定で速度勾配を補正する方法であったが、ここでは見かけ粘度を一定としてせん断応力、速度勾配をともに補正する方法について考える。

汚泥の流動特性が $\tau = kD^n$ なる擬塑性流動であるとする。これをギャップサイズの大きい回転粘度計で測定すると、速度勾配が過小評価され流動曲線が図3-6の点線のようなものとする。内円筒の角速度が ω_i のときのせん断応力を τ_i とすれば、これに対応する真の速度勾配 D_p が D_i として測定されたことになる。このときの見かけ粘度を代表粘度 $\theta_{rep} = \tau_i / D_i$ とおく。

$$\tau_i = kD_p^n = \theta_{rep} D_i \quad \dots\dots\dots (25)$$

ギャップ内における擬塑性流体の見かけ粘度 θ の分布を考えると、図3-2に示したギャップ内の速度勾配の分布から理解できるように、内円筒壁面では $\theta < \theta_{rep}$ 、外円筒壁面では $\theta > \theta_{rep}$ となり、ギャップ内には必ず $\theta = \theta_{rep}$ となる $r = R_{rep}$ が存在する。この位置におけるせん断応力 τ_{rep} と速度勾配 D_{rep} を代表粘度 θ_{rep} に対する正しい値と考えることができる。 (D_{rep}, τ_{rep}) は図3-6において、直線 $\tau = \theta_{rep} D$ と放物線 $\tau = kD^n$ の交点として表されるから、

$$\tau_{rep} / D_{rep} = \theta_{rep} = kD_{rep}^{n-1} \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。(25), (26) 式より, $D_{rep} = (D_p^n / D_i)^{1/(n-1)}$ であるから,

$$D_{rep} / D_i = (D_p / D_i)^{n/(n-1)} \quad \dots\dots\dots (27)$$

と表される。ニュートン流体 $\tau = \theta_{rep} D$ の内円筒壁面の速度勾配 D_i は (10) 式より,

$$D_i = 2\omega_i \delta^2 / (1 - \delta^2) \quad \dots\dots\dots (28)$$

となる。同様に、擬塑性流体 $\tau = kD^n$ の内円筒壁面の速度勾配 D_p は (18) 式より,

$$D_p = 2\omega_i \delta^{2/n} / n (1 - \delta^{2/n}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。ここで δ は半径比, ω_i は内円筒の角速度である。よって, (27), (28), (29) の各式より,

$$D_{rep} / D_i = \frac{1}{\delta^2} \cdot \left\{ \frac{1 - \delta^2}{n (1 - \delta^{2/n})} \right\}^{n/(n-1)} \quad \dots\dots\dots (30)$$

D_{rep} / D_i は内円筒の回転数によらず δ と n のみで決まることが示されたが、実際には n が未知であるため (30) 式を用いることはできない。そこで D_{rep} の値として、代表粘度 θ_{rep} をもつニュートン流体 $\tau = \theta_{rep} D$ の両壁面の速度勾配の平均値を用いるものとする。すなわち,

$$D_{rep, Ave} = \frac{D(R_1) + D(R_2)}{2} = \frac{D_i + D_i / \delta^2}{2} = \frac{1 + \delta^2}{2\delta^2} D_i \quad \dots\dots (31)$$

$$D_{rep, Ave} / D_i = (1 + \delta^2) / (2\delta^2) \quad \dots\dots\dots (32)$$

となる。(32) 式は n が未知であっても用いることができる。(30) 式の代わりに (32) 式を用いることの妥当性は両式の比を計算することによって確認される。両式の比は,

$$D_{rep, Ave} / D_{rep} = \frac{1 + \delta^2}{2} \left\{ \frac{1 - \delta^2}{n (1 - \delta^{2/n})} \right\}^{n/(1-n)} \quad \dots\dots\dots (33)$$

と表される。これを各センサーシステムに対応する δ ごとに, $0.1 \leq n \leq 0.9$ の範囲で計算すると, 表 3-1 のようになる。比の値はほぼ 1 であるから, D_{rep} の値として両壁面の平均値 $D_{rep, Ave}$ を用いることは妥当であると考えられる。よって補正係数は,

$$D_{rep} / D_i = \tau_{rep} / \tau_i = 0.885 \text{ (MVII)}, 0.763 \text{ (MVIII)} \quad \dots\dots\dots (34)$$

となり, 測定された流動曲線の速度勾配とせん断応力をそれぞれ 0.885 倍, 0.763 倍することにより正しい流動曲線を求めることができる。

図 3-7 は図 3-3 (1), (2) のうち MVII, MVIII による流動曲線を上記の係数を用いて補正したものであるが, 3 つの流動曲線がほぼ一致することがわかる。この方法は各試料ごとに流動状態を実測する必要がないので, 前述の補正方法に比べて簡便で実用的であるといえる。

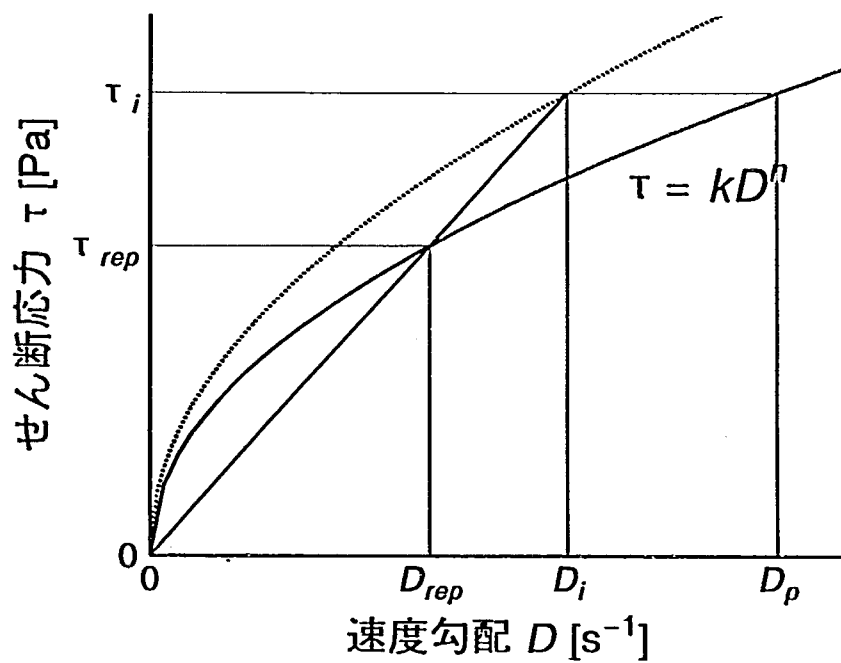
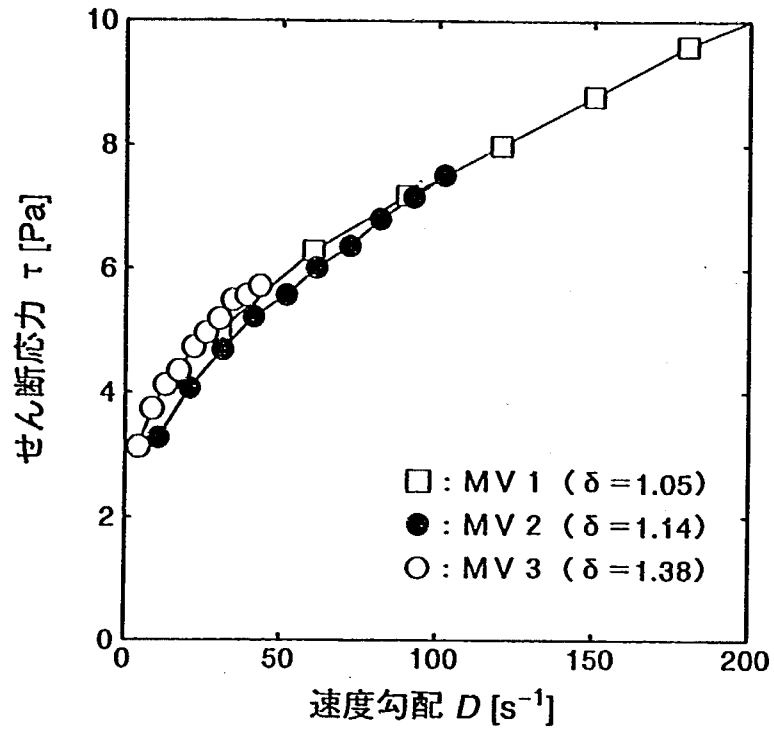


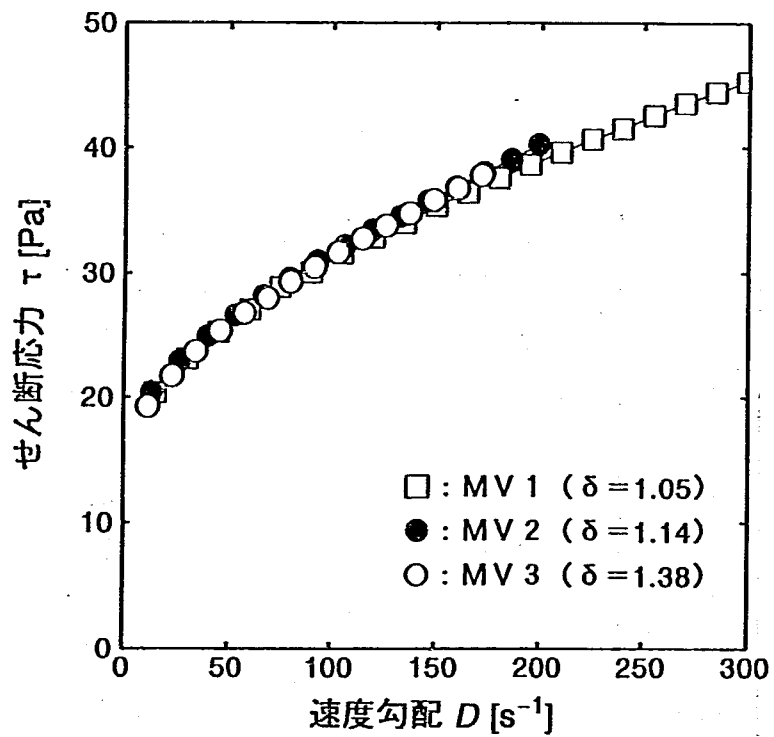
図 3-6 代表粘度による流動曲線補正の考え方

表 3-1 (3)式の計算結果

n	$\delta = 1.05$ (M V 1)	$\delta = 1.14$ (M V 2)	$\delta = 1.38$ (M V 3)
0.9	1.000	1.003	1.015
0.8	1.000	1.002	1.013
0.7	1.000	1.002	1.009
0.6	1.000	1.001	1.005
0.5	1.000	1.000	1.000
0.4	1.000	0.999	0.992
0.3	0.999	0.996	0.979
0.2	0.999	0.992	0.956
0.1	0.997	0.979	0.907



(1) 図 3 - 3 (1) の補正結果



(2) 図 3 - 3 (2) の補正結果

図 3 - 7 代表粘度による流動曲線の補正

3.1.4 いくつかの測定例

粗大粒子を含まず MVI でも測定可能ないくつかの汚泥について、代表粘度による流動曲線の補正を試みた。供試汚泥の性状を表 3-2 に示す。Run 1 の汚泥以外はチクソトロピー性が見られたため、上昇曲線と下降曲線が一致するまでリピート法を適宜くり返して測定した。測定結果を図 3-8~11 に示す。補正により 3 本の曲線はかなり収束してくるが、チクソトロピーの問題もからみ、必ずしも精度が高くない場合も見られた。

これらのことから、ギャップサイズの大きいセンサーシステムを用いて測定した流動曲線は、代表粘度を用いた補正を行ってもギャップサイズが小さい場合ほどの精度は得られないものと考えられる。よって、汚泥が粗大粒子を含む場合でもギャップサイズの大きいセンサーシステムを使用することは極力避けた方がよい。そこで、測定前に試料をふるい分けすることが考えられる。

EPA のマニュアルでは、汚泥中にわずかに存在する粗大粒子はレオロジー定数に大きな影響を与えないことから、汚泥をふるい分けしても測定誤差は生じないとしている。このマニュアル中にはふるいの目については具体的に述べられていないが、粘度計のギャップサイズ、汚泥の粒径分布、ふるい分けに要する時間等を勘案して、2mm メッシュのふるいを用いるのが適当と考えられる。具体的には、MVI でも十分測定可能な消化汚泥と余剰汚泥についてはふるいを通さずに測定し、初沈汚泥を含む汚泥の場合はふるい分けを行い、それでもなお MVI で粒子が引っかかる場合についてのみ MVII, MVIII を使用するようにするとよい。なお、粗大粒子のふるい分けは、粘度計の内外円筒の壁面を保護するという意味からも重要である。

表 3-2 供試汚泥の性状

Run No.	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	Thix.*	流動曲線の測定方法 (リピート)					Fig. No.
					回数	加速 [min]	減速 [min]	Dmax [1/s]	温度 [°C]	
1	消化 (原汚泥)	1.6	65.5		1	3	3	MV1 : 300 MV2 : 230 MV3 : 113	20	3-8
2	消化 (遠心濃縮)	2.3	65.3	○	1	3	3	MV1 : 300 MV2 : 230 MV3 : 165	20	3-9
3	混合 (遠心濃縮)	3.8	77.0	○○	3	1.5	1.5	150	20	3-10
4	消化 (遠心濃縮)	5.2	66.6	○○○	5	3	3	75	20	3-11

* チクソトロピーの程度を○の数で表したもの

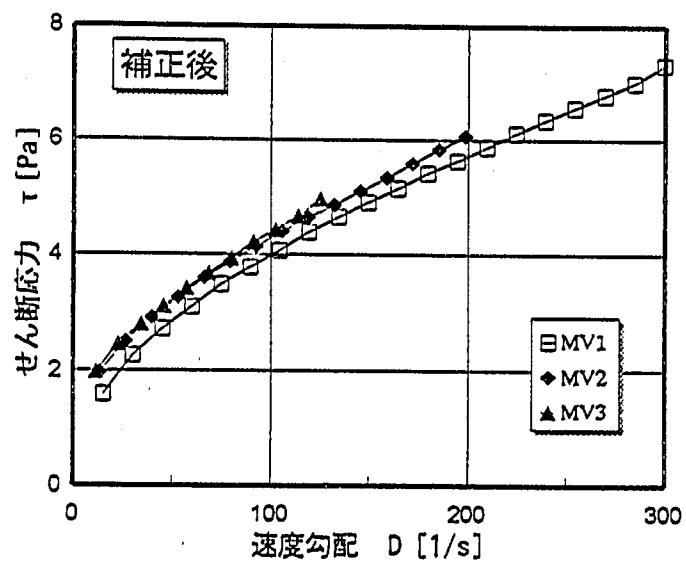
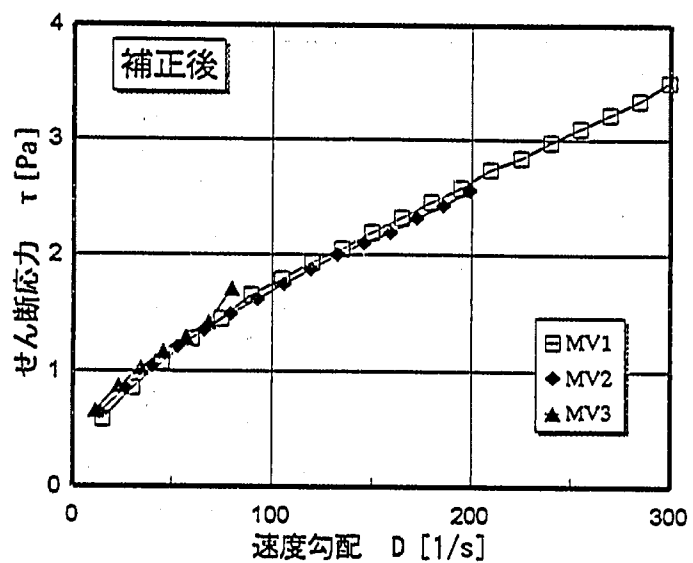
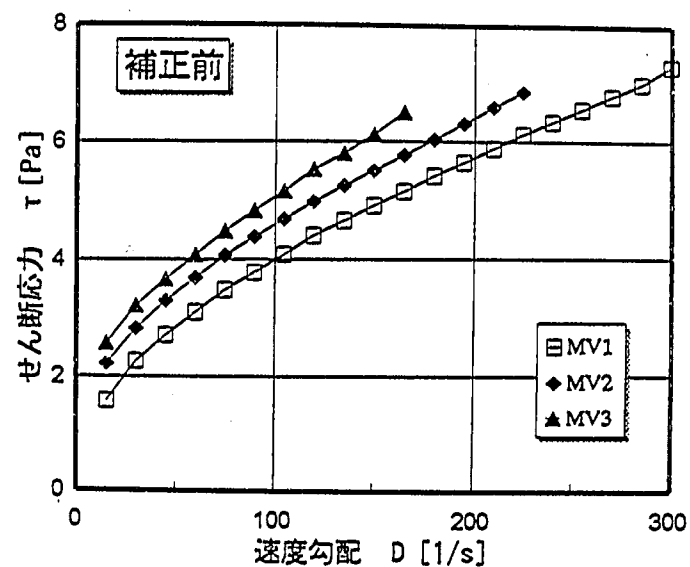
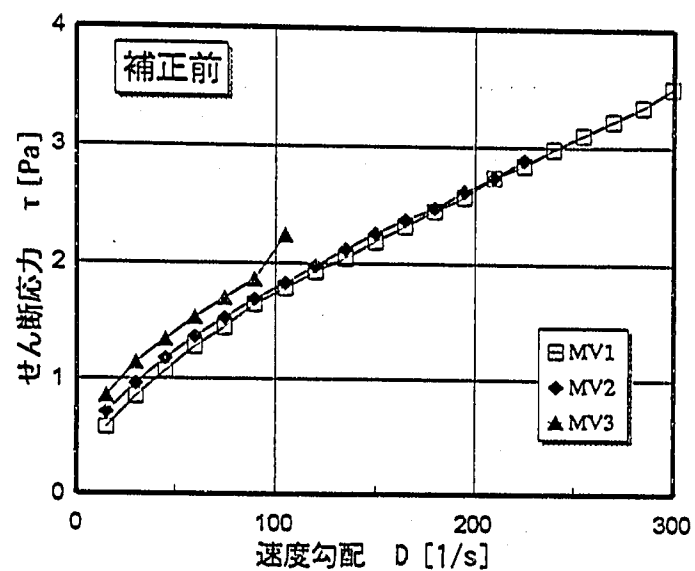


図 3-8 流動曲線の補正例(1)

図 3-9 流動曲線の補正例(2)

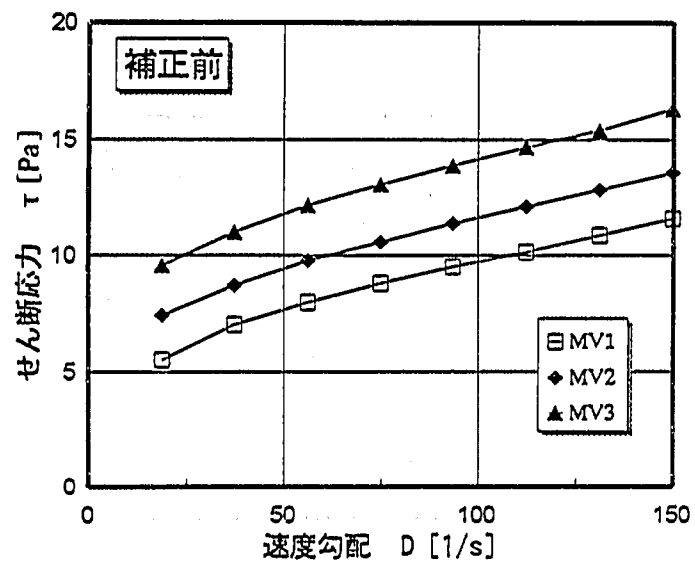


図 3-10 流動曲線の補正例(3)

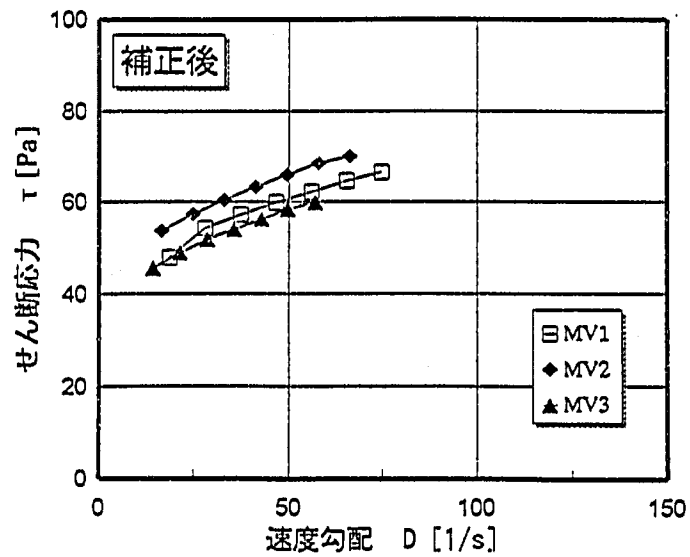
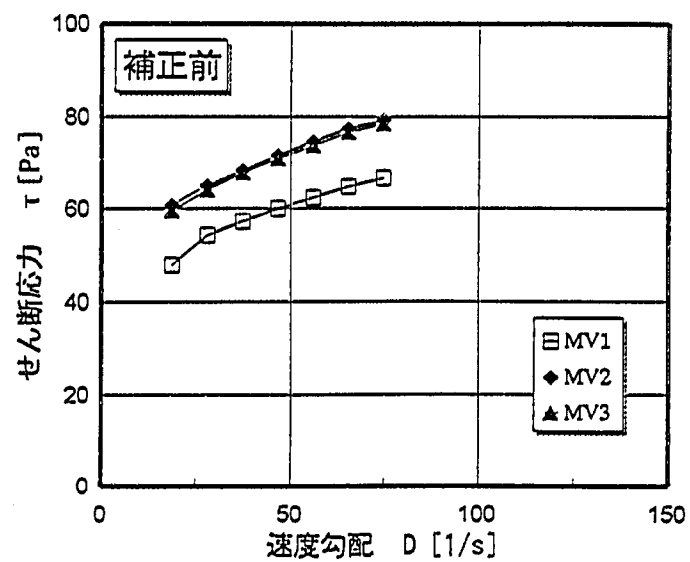
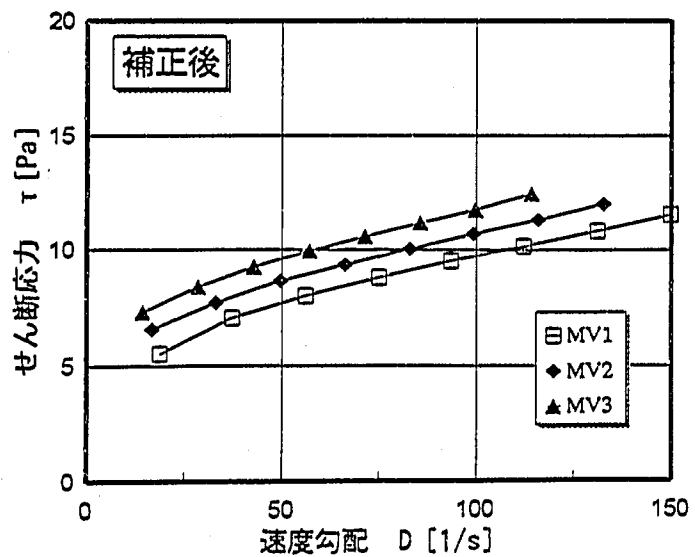


図 3-11 流動曲線の補正例(4)

3. 2 チクソトロピーを考慮した測定方法

3.2.1 測定条件の違いによる影響

試料がチクソトロピー性を持たない場合は、どのような回転数制御プログラムを設定してもほぼ同一の流動曲線を得ることができる。これに対し、試料にチクソトロピー性がある場合は、回転数、回転時間等の違いにより試料の流動化の程度が異なり、得られる流動曲線の形状が異なってくるものと考えられる。

そこで、粗大粒子は含まずチクソトロピー性を持つ消化汚泥 (TS = 3.9%, VS = 66.2%) を供試汚泥として、回転数、回転時間が流動曲線に及ぼす影響について検討した。測定方法は図 2-1 に準ずるリピートとした。各 Run において、リピートの繰返しは 3 回でほぼ上昇曲線と下降曲線が一致したので 3 回目の下降曲線を評価対象とした。測定条件について表 3-3 に、測定結果について図 3-12 に示す。

同一条件で測定した Run 1, 2, 3 において測定の再現性について確認した。上昇、下降に要する回転時間を変えて測定した Run 4, 5 を Run 1 と比較したところ、多少回転時間の長い方が流動化の度合いが大きいものの大きな誤差とはならなかった。ところが Run 6, 7 のようにリピートにおける最大回転数 (速度勾配) が異なる場合は得られる流動曲線も異なり、最大回転数が高いほど流動化の程度が大きいことがわかった。

これらの結果から、流動化に及ぼす回転数と回転時間の影響は等価ではなく、十分な回転時間を与えた場合最終的な流動状態は回転数によってのみ規定されるものと考えられる。これは、ある回転数でどれだけ十分な回転時間を与えても、それより高い回転数で得られる流動状態までには到達しないことを意味している。このように、汚泥がチクソトロピー性をもつ場合には流動曲線が 1 通りに決まらないので、管路輸送時に汚泥どの程度流動化するかを考慮し、その流動状態を粘度測定時に再現することが重要である。

表 3-3 流動曲線の測定条件と見かけ粘度

Run No.	流動曲線の測定方法 (リピート)					測定結果 (見かけ粘度)	
	回数	加速 [min]	減速 [min]	Dmax [1/s]	温度 [°C]	at 300 [1/s] [mPa·s]	at 75 [1/s] [mPa·s]
1	3	3	3	300	20	118	284
2	3	3	3	300	20	117	289
3	3	3	3	300	20	117	279
4	3	1.5	1.5	300	20	121	296
5	3	6	6	300	20	114	280
6	3	1.5	1.5	150	20	—	324
7	3	0.8	0.8	75	20	—	364

* 供試汚泥：消化汚泥, TS 3.9%, VS 66.2%.

** 使用センサーシステム：MV1

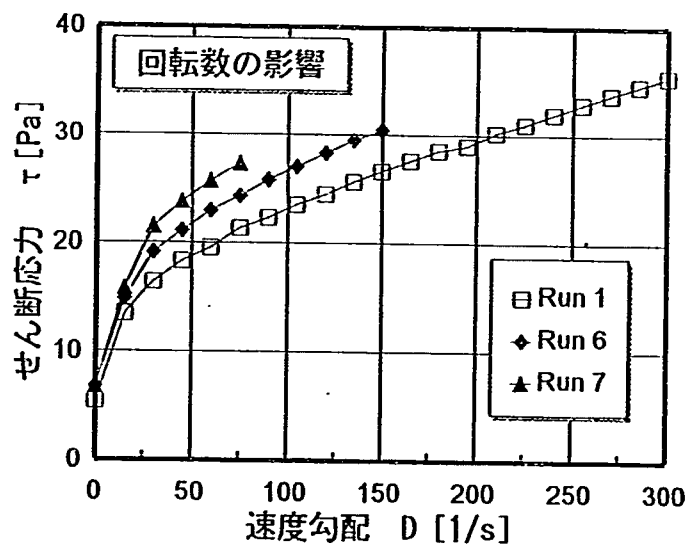
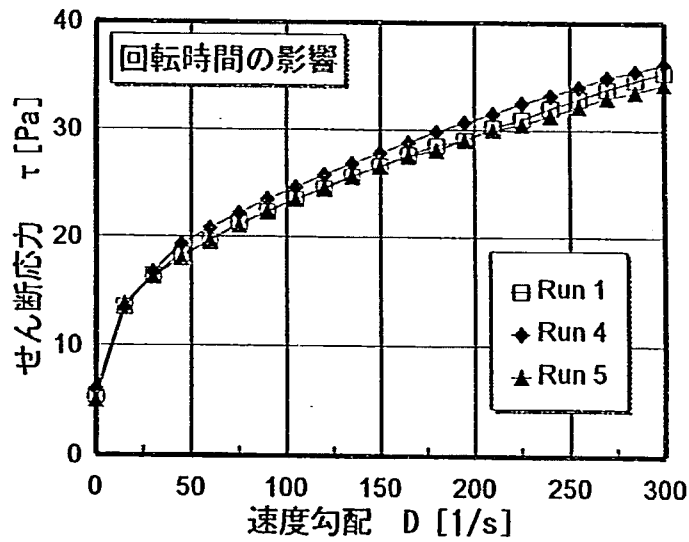
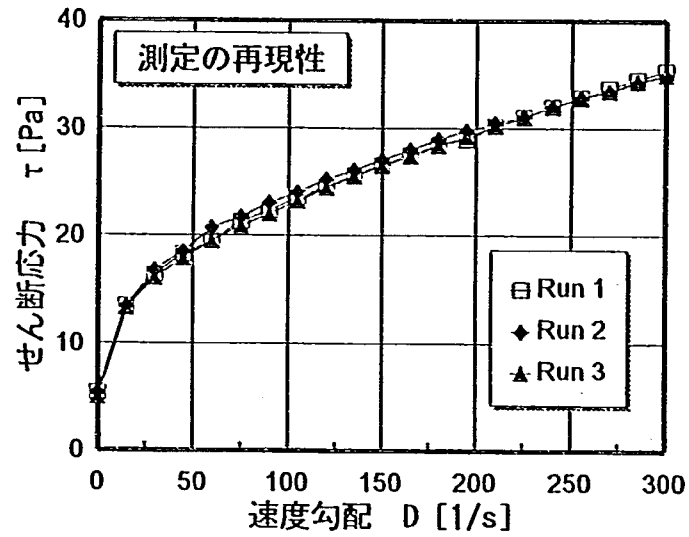


図 3-12 流動曲線の測定条件の違いによる影響

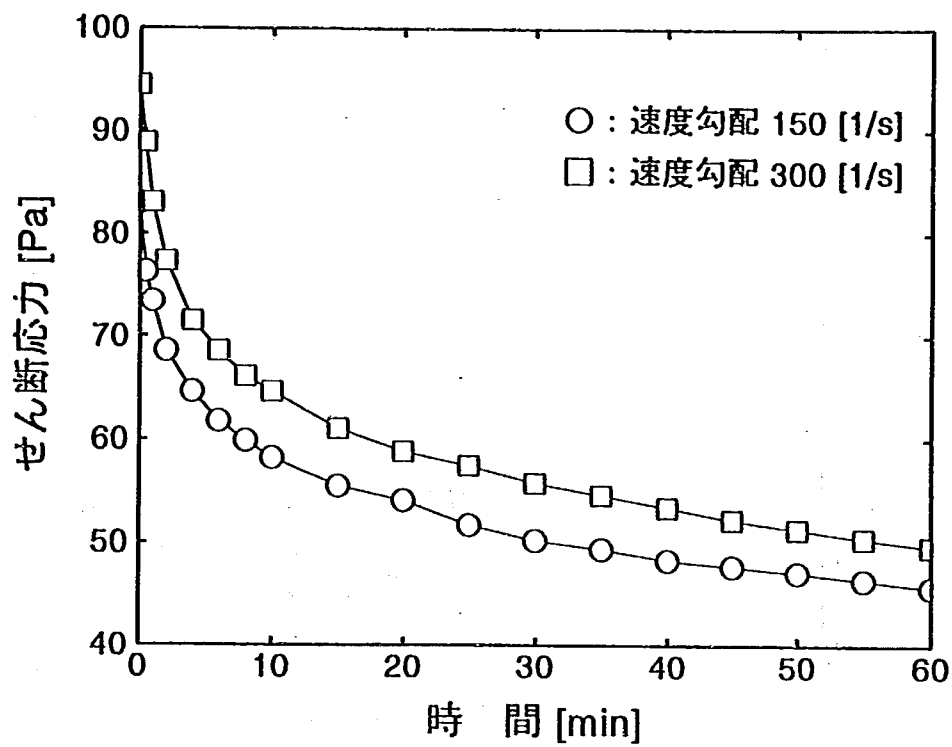
3.2.2 回転数一定による測定

流動が平衡に達するまで回転数を一定に保ち測定する方法（ホールド）は、従来より汚泥の粘度測定に用いられてきた（表1-5, 6 参照）。この方法によれば、ある1つの速度勾配における値しか得ることができないが、見かけ粘度およびチクソトロピー量の指標となる応力の低下量が同時に測定可能である。

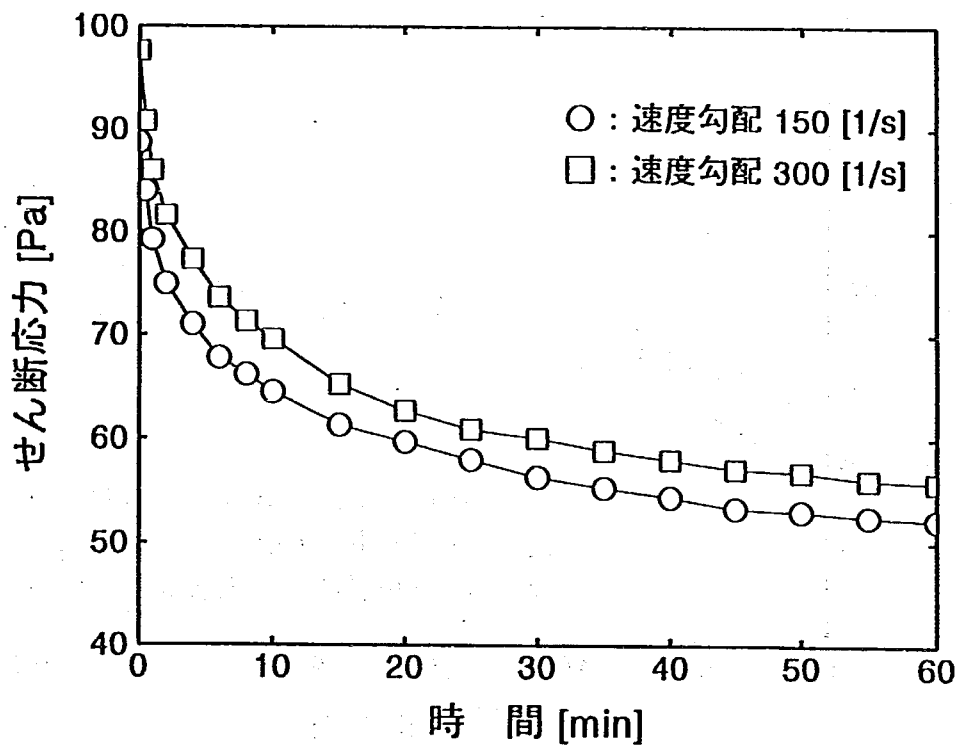
供試汚泥に消化汚泥（TS = 4.6%, VS = 67.2%）、混合濃縮汚泥（TS = 6.2%, VS = 79.1%）を用いた場合の、速度勾配 150, 300 [1/s] におけるホールドの測定結果が図3-13である。従来の文献では5~10分のホールドにより流動平衡に達するとされているが、ここでは60分経過後もせん断応力が低下する傾向が見られた。そこで、30分経過すれば低下率が小さくなりグラフがほぼ直線となることや測定の実際面を勘案して、本調査の範囲における汚泥（濃度 6% 程度まで）の場合、ホールドによる測定値として30分後の値を用いることが妥当と判断した。

別の供試汚泥（消化汚泥：TS = 4.2%, VS = 67.1%）を用いて、ホールドとリピートの測定結果の比較を行った。ここでホールドの測定値は30分後の値とし、速度勾配ごとに新しい供試汚泥を用いて測定した。リピートは加速 3分、減速 3分を1サイクルとし、上昇曲線と下降曲線がほぼ等しくなるまでくり返した（5回）。

測定結果を図3-14に示す。ホールド開始時のせん断応力とリピート1回目の上昇曲線を比較すると、速度勾配が大きくなるほどリピートの方が小さくなる。これは、リピートの場合回転を徐々に上げていくため、最大回転数に達するまでに既にチクソトロピーによる流動化が生じるためと考えられる。ゆえに、リピート法による流動曲線からは、チクソトロピーに起因する応力低下量を正しく評価することができない。また、ホールド30分後のせん断応力とリピート5回目の下降曲線を比較すると、リピートの最大回転数の付近では両者のせん断応力がよく一致する。しかし、回転数の小さい部分においてはリピートの方が小さくなる。これらは図3-12と同じ現象で、最終的な流動状態が回転数によって規定されることを表している。

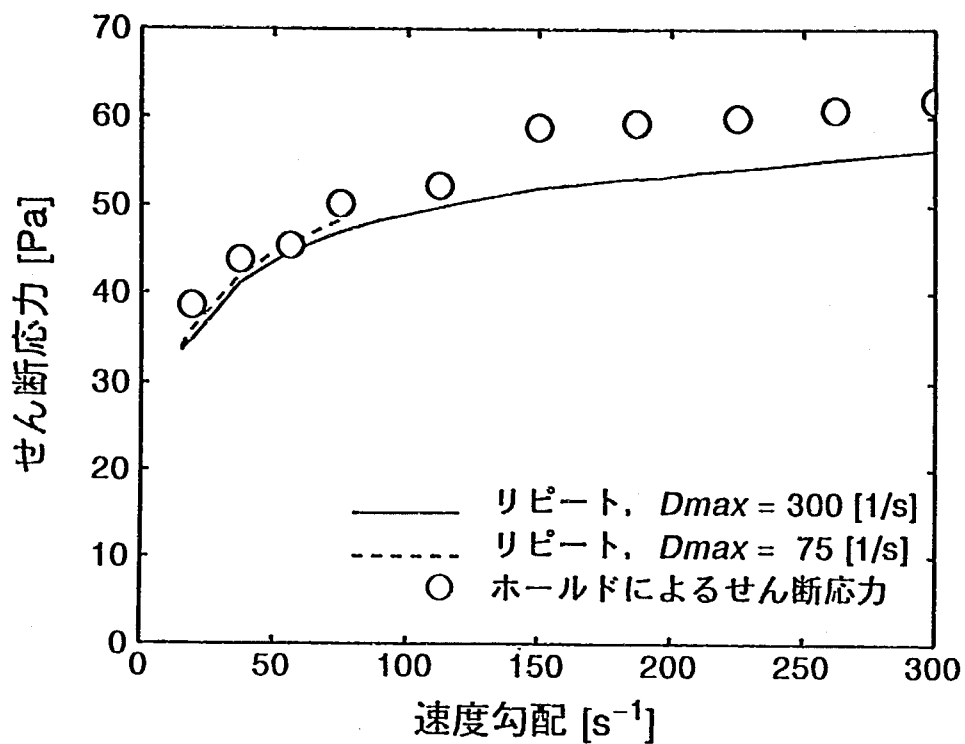


(1) 消化汚泥, TS = 4.6%

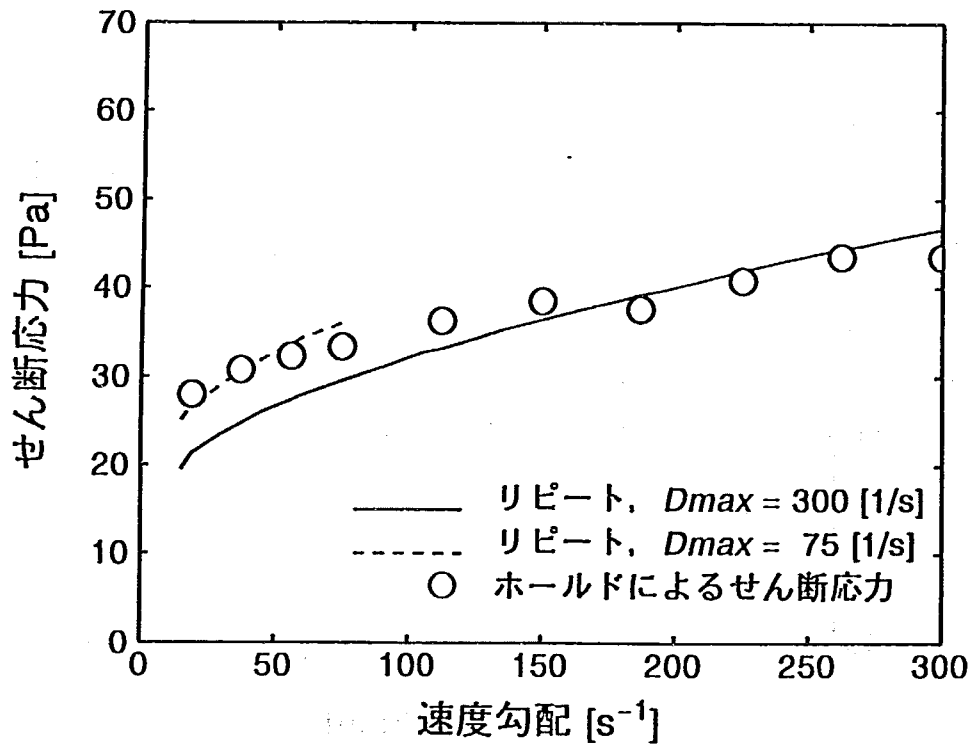


(2) 混合濃縮汚泥, TS = 6.2%

図3-13 ホールドにおけるせん断応力の経時変化



(1) ホールド開始時とリピート 1 回目の上昇曲線の比較



(2) ホールド 30 分後とリピート 5 回目の下降曲線の比較

図3-14 ホールドとリピートの比較

3.2.3 回転数制御方法の決定

流動平衡の状態が最大回転数により決定されるため、リピートでは最大回転数の近傍でしか正しい流動状態を表現できないことを考慮すれば、ホールドによる測定値を複数つなげたものが、管路輸送を対象とした流動曲線として理想的である。しかしこの方法では、1つの流動曲線を得るために多くの時間を要し実用的でないことや、多くのサンプルを用いるため誤差が大きくなるという欠点がある。そこで、問題となる速度勾配の大きさがあらかじめ把握できるのであれば、リピートによって測定してもよいと判断した。また、リピートでは正確な応力低下量が測定できないが、ホールドとリピートを組み合わせた図3-15のような形に回転数制御プログラムを組めば、応力低下量と流動曲線を同時に測定することが可能である

この回転数制御プログラムにおいて最も重要なのは、最大速度勾配 $D_{\max}$ の設定である。前述の通りリピートによる測定では、この $D_{\max}$ の近傍においてのみ正確な流動曲線が得られるため、これを管路輸送時の条件に合うように決定しなければならない。ニュートン流体が層流で管路内を流れる場合の管壁の速度勾配は、流速を V 、管径を d として $8V/d$ であることから、 $D_{\max}$ は予想される $8V/d$ の値を考慮して決定するのが妥当である。本調査においては、汚泥輸送実験装置の管径が $d = 0.037, 0.1$ [m]、流速が $V = 0.1 \sim 2$ [m/s] であることから、 $D_{\max}$ を 150 ないし 300 として測定を行っている。実施設ではこれよりも管径が大きいため、実施設を対象とした場合には $D_{\max}$ をもう少し小さくとる方がよいと考えられる。ただし、 $D_{\max}$ が小さすぎると粘度計が応力を検知できないため、チクソトロピー性がない場合は、予想される $8V/d$ の値と無関係に $D_{\max}$ を大きくとって構わない。

上昇下降時間 t は流動曲線に大きな影響を及ぼさない。本調査では 3 ないし 6 とした。

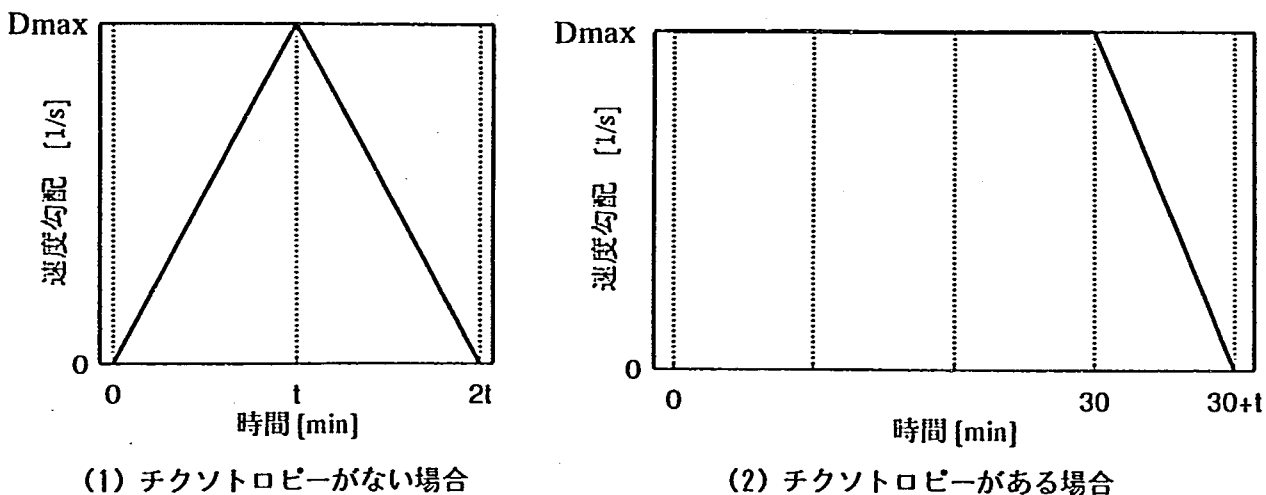


図3-15 回転数制御方法の決定

3.2.4 管路輸送実験による補足

図3-15で示した回転数制御プログラムの妥当性を確認するために、粘度測定時の最大速度勾配 $D_{\max}$ を $8V/d$ としたときに到達する流動状態と、流速 V で管路輸送した場合の流動状態とを比較するための実験を行った。

実験の概要について表3-4に示す。供試汚泥にはチクソトロピー性があり、かつ粗大粒子は含まない余剰濃縮汚泥 (TS = 4.7%, VS = 82.6%) を 200L 用いた。実験には汚泥輸送実験装置³¹⁾ (管径: $d = 0.037\text{m}$) を用い、流速を段階的にあげて各流動化レベルにおける圧力損失の経時変化を測定した。流速は各流動化レベルにおいて圧力損失がほぼ一定となるまで保持した。また本実験の流速の範囲内では、汚泥の流れは常に層流であった。なお管路輸送のみに起因する流動化の程度を観察するため、輸送実験前の予備圧送は実施せず、また貯留タンクの攪拌機も使用しなかった。実験開始前の汚泥と流動化レベル4終了後の汚泥において粒径を比較したところ大きな差は見られなかったが、これは予備圧送を行わなかったためと考えられる。

粘度測定用の汚泥のサンプリングは各流動化レベルの前後で行った。実質的には、ある流動化レベルの「後」のサンプルと次の流動化レベルの「前」のサンプル (例えば, After 1 と Before 2) は同一のものである。粘度測定時の最大速度勾配 $D_{\max}$ は各流動化レベルにおける流速 V に対応する値 $8V/d$ に設定し、「前」のサンプルはホールドにて、「後」のサンプルは繰り返し1回のリピートで測定を行った。 $D_{\max}$ における両者のせん断応力 (または見かけ粘度) がほぼ等しければ、流速 V 、管径 d の管路輸送において達成される流動化の程度が、 $D_{\max}$ を $8V/d$ と設定した回転粘度計によっても再現されたと考えられる。

図3-16に、回転粘度計により流動化させた場合のせん断応力 (ホールドによる測定結果) と、管路輸送により流動化させた場合のせん断応力 (リピートによる測定結果)、および管路輸送における 20m あたりの圧力損失との関係を示す。せん断応力を比較すると両者はほぼ等しく、また圧力損失についてもその増加率がせん断応力の増加率とほぼ等しい。これらのことから、回転粘度計において $D_{\max}$ を $8V/d$ と設定することが妥当性が確認されたものと考えられる。流動平衡に達するまでの時間であるが、例えば流動化レベル1の場合、管路輸送では 120分、回転粘度計 (ホールド) では 90分であった。管路輸送の方が所要時間が長かったのは、回転粘度計では両円筒間の試料は常に流動しているのに対し、管路輸送においては貯留タンクの攪拌機を使用しなかったため、汚泥が貯留タンク内で滞留している間はほとんど流動変形を受けないためと考えられる。

表 3-4 管路輸送と回転粘度計における流動化状態の比較

流動化 レベル	管 路 輸 送				回 転 粘 度 計			
	流速 V [m/s]	管壁の 速度勾配 8V/d [1/s]	温度 T [°C]	20m での 圧力損失 [mmH ₂ O]	サンプ リング *	測定 方法 **	D _{max} [1/s]	D _{max} での 見かけ粘度 θ [mPa·s]
1	0.55	120	20	5,600	Before 1	ホールド	120	277
					After 1	リピート	120	277
2	0.81	176	25	5,680	Before 2	ホールド	176	188
					After 2	リピート	176	202
3	1.07	233	27	5,950	Before 3	ホールド	233	144
					After 3	リピート	233	159
4	1.62	352	25	7,000	Before 4	ホールド	352	116
					After 4	リピート	352	118

- * 各流動化レベルの前にとられたサンプルが回転粘度計による流動化を、
後にとられたサンプルが管路輸送による流動化を表す。
- ** ホールドは、応力低下が平衡に達するまで回転時間を適宜設定した。
リピートは、回数1回で上昇下降時間は、5～3.5分の間で適宜設定した。
- *** 供試汚泥：余剰濃縮汚泥，TS = 4.7%，VS = 82.6%

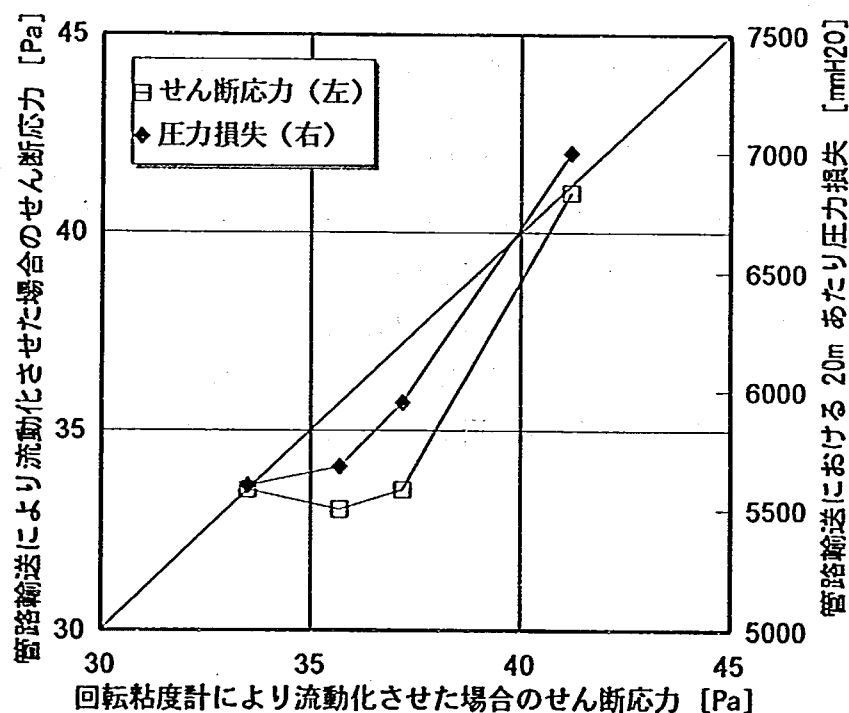


図 3-16 管路輸送と回転粘度計における流動化状態の比較

3. 3 結 論

本章では、下水汚泥の流動特性の測定を困難かつ不正確にしている2つの要因、粗大粒子とチクソトロピー性について検討し、これらを考慮した流動特性の測定方法の提案を行った。

初沈汚泥のように粗大粒子を含む場合の対策としてギャップサイズを広くとって測定することが考えられるが、この場合には見かけ粘度を大きめに評価してしまうことを、実験および計算により明らかにした。これを補正する方法として、回転粘度計内試料の流動状態をビデオカメラにより実測する方法、および代表粘度を用いる方法の2つを検討した。前者については各試料ごとに実測が必要であるため、後者の代表粘度を用いる方法が簡便で実用的である。

ギャップサイズの広いセンサーシステムの使用をできる限り避けるためには、ふるい分けの積極的利用が効果的である。ふるい目については定説がないが、ふるい分けを迅速に行い粗大粒子のみを除去するためには2mmメッシュが適当と考えられる。

汚泥が高濃度になるとチクソトロピー性を持つようになるが、チクソトロピーによる流動化の程度は、測定時の最大速度勾配により規定されることを実験から明らかにした。この場合流動曲線が1通りに決まらないので、管路輸送時に汚泥がどの程度流動化するかを考慮して最大速度勾配を決定する必要がある。また流動曲線からレオロジー定数を求める際の近似計算の範囲の観点からも適切な速度勾配の設定が重要である。

ここではニュートン流体の管壁の速度勾配 $8V/d$ を最大速度勾配 $D_{\max}$ として用いることを提案した。実際に流速 V 、管径 d で管路輸送した場合の流動化の度合いは、回転粘度計の最大速度勾配 $D_{\max}$ を $8V/d$ としたときの流動化の度合いとほぼ等しく、前述の設定が妥当であることが確認された。また、チクソトロピーによる応力低下量を測定するにはホールドによる測定が必要であるが、その保持時間を30分とすることが妥当であると判断した。

これらの結果より、チクソトロピー量と流動曲線を同時に測定する回転数制御方法として、図3-15の方法を提案した。 $D_{\max}$ ($8V/d$) の値は対象とする管路輸送条件に合わせて適宜設定する。本調査では150ないし300を採用しているが、実施設を対象とする場合は50~100程度とすればよいと考えられる。

以上検討してきたように、下水汚泥の流動曲線は、①ギャップサイズ、②回転数保持時間、③最大速度勾配の影響を受けるため1通りに決まらない。ここで最も重要なことは、これらを無理矢理1つの測定方法で統一することではなく、対象としている管路輸送の条件に見合った測定方法を適宜設定することである。よって流動特性測定時はこれら3つの条件を常に明確にしておく必要がある。

第4章では、流動特性に影響を与えるその他の因子についてさらに検討を進める。

4. 流動特性に影響を及ぼす各因子についての検討

前章において、チクソトロピーを考慮した下水汚泥の流動特性の測定方法について提案した。本章では、この測定方法を用いて、温度、粒子径、汚泥貯留が流動特性に及ぼす影響について検討を行った。

4. 1 温度の影響

4. 1. 1 レオロジー定数と温度

表1-5でとりまとめたように、下水汚泥の流動特性を調査した既存の研究において汚泥温度を制御して測定を行っている例は多くない。Mulbarger ら²⁹⁾は、既存の文献にあるレオロジー定数を、汚泥濃度で整理したときに値が大きくばらつく原因として、測定汚泥の性質の相違、粘度測定方法の問題、そして水温の相違を挙げている。仮に汚泥のレオロジー定数も水と同じ温度依存性をもつものとすれば、プロットされたデータに 10℃の測定温度の差がある場合には、温度の相違のみを原因としてレオロジー定数は約 30% 増減することを指摘している。

そこで、供試汚泥に消化汚泥を用いて、温度が流動特性に及ぼす影響について検討を行った。測定サンプルは同一の原汚泥から濃度調整により4種類作成した。測定温度は 20, 35, 50 [℃] の3通りとした。これらはそれぞれ、室内、中温嫌気性消化、高温嫌気性消化の温度に相当する。設定温度は外円筒を支持する保温容器内に恒温水を循環させることにより維持した。流動特性の測定方法は図3-15に準じ、 $D_{\max} = 150$ [1/s], $t = 3$ に設定した。センサーシステムには MV1 を用いた。供試汚泥の性状と測定結果について表4-1にまとめた。

表4-1 供試汚泥の性状と流動特性の測定結果

Run No.	TS [%]	VS [%]	Non-N.	*Thix. **	温度 T [℃]	擬塑性粘度 k [Pa·s]	構造粘度指数 n [-]	初期応力 τ_0 [Pa]	30分後応力 τ_{30} [Pa]
1	2.0	66.6	○	-	20	0.27	0.494	3.3	-
					35	-	-	-	-
					50	0.21	0.444	1.9	-
2	3.2	66.6	○	○	20	3.21	0.285	21.3	14.0
					35	2.62	0.292	18.9	11.7
					50	1.34	0.356	15.5	7.9
3	4.3	66.6	○	○	20	11.45	0.241	62.7	39.5
					35	9.05	0.278	58.2	35.8
					50	6.55	0.354	54.5	36.0
4	5.2	66.9	○	○	20	27.76	0.219	128	85
					35	23.71	0.251	123	82
					50	15.56	0.327	118	75

* 非ニュートン性をもつサンプルに○

** チクソトロピー性のあるサンプルには○

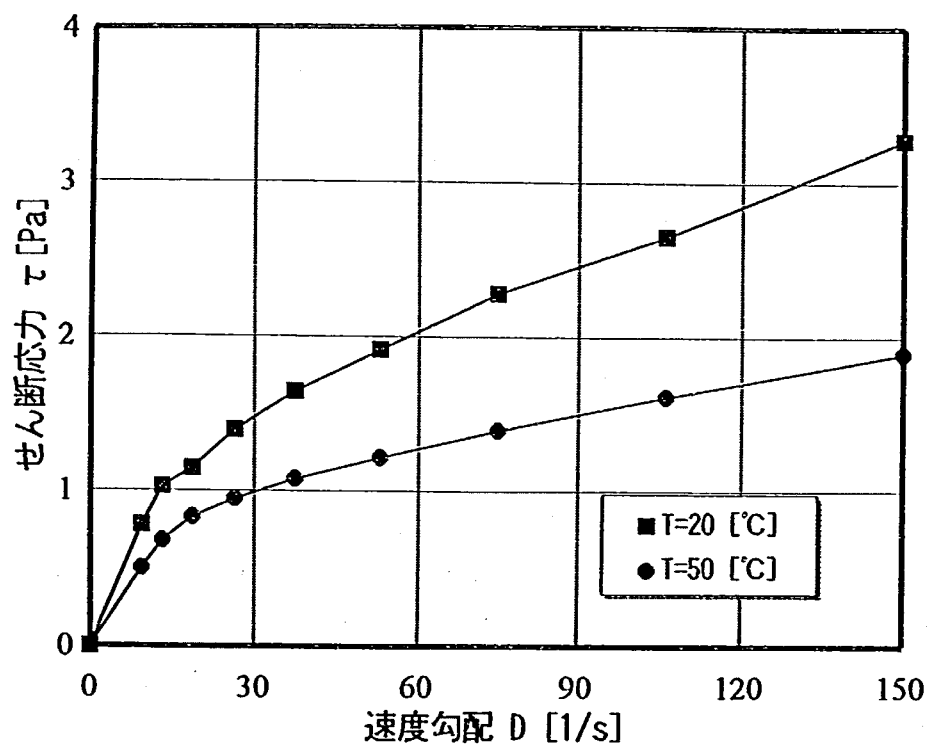


図4-1 供試汚泥の流動曲線(1)

Run 1 (TS=2.0%)

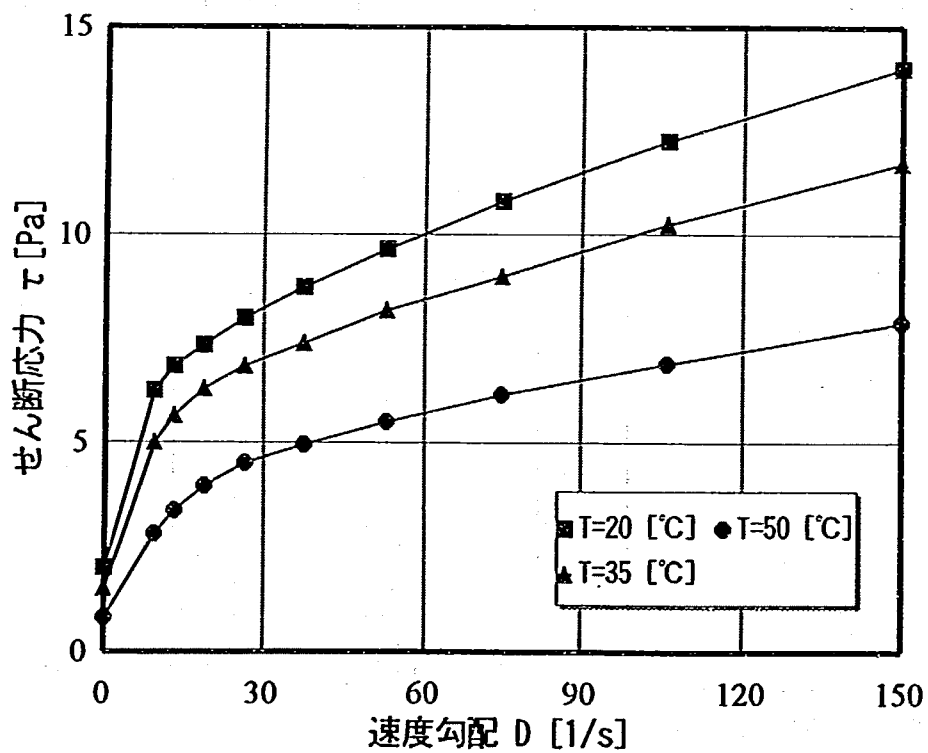


図4-2 供試汚泥の流動曲線(2)

Run 2 (TS=3.2%)

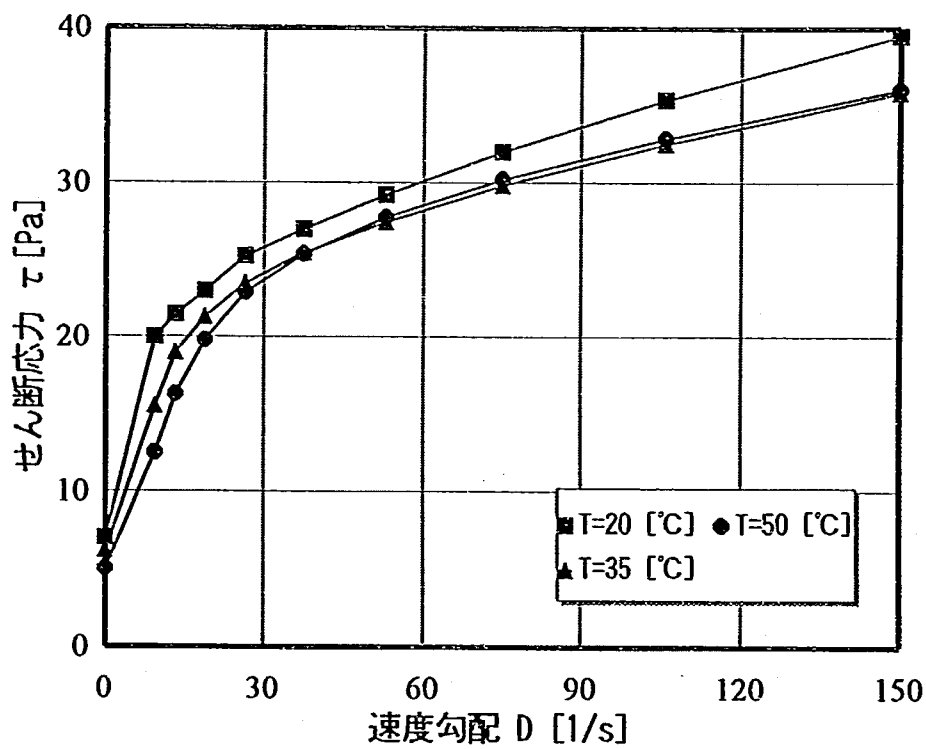


図4-3 供試汚泥の流動曲線(3)

Run 3 (TS=4.3%)

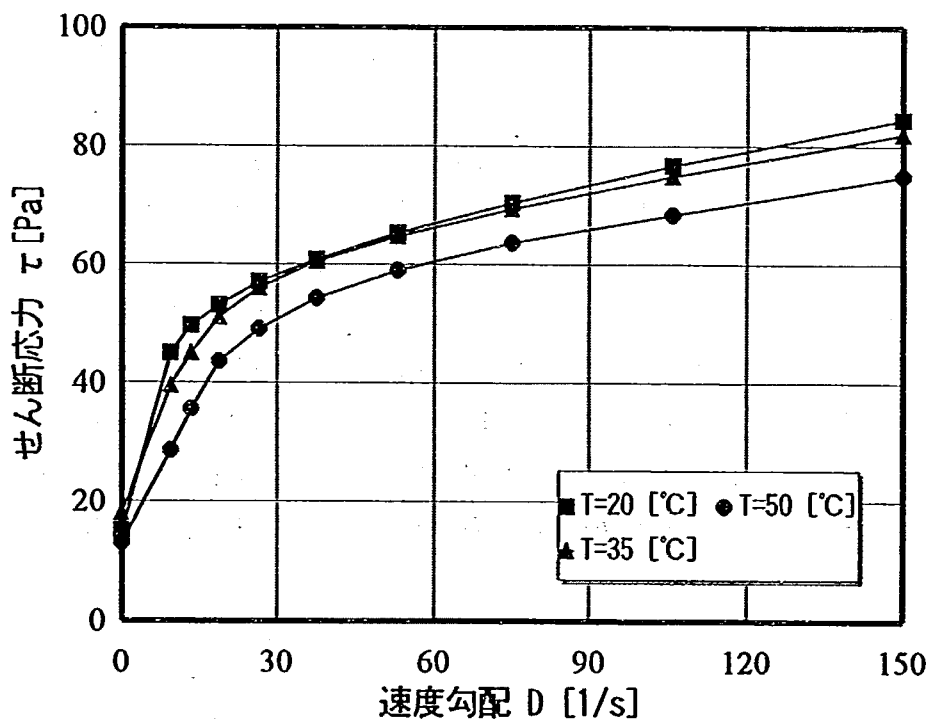


図4-4 供試汚泥の流動曲線(4)

Run 4 (TS=5.2%)

各 Run における流動曲線の測定結果を図4-1~4に示す。これらを擬塑性流動として扱うこととし、各レオロジー定数は流動曲線の速度勾配の区間 $10 \leq D \leq 150$ において近似計算を行って求めた。なお、50℃における測定時には、供試汚泥表面が多少乾燥する傾向が見られたが、測定結果に影響は与えないものと考えられる。

擬塑性粘度 k および構造粘度指数 n をそれぞれTSおよび温度の関数として表したものが図4-5~8である。TSの増加とともに流動性が低下し、逆に温度の増加とともに流動性が向上することがわかる。

下水汚泥の流動特性に関する既存の研究においては、擬塑性粘度は Andrade の粘度式に従うが、構造粘度指数は温度に依存しないとされている¹⁶⁾。これは汚泥の流動特性をビンガム流動として扱った場合も同様で、塑性粘度は Andrade 式に従うが、降伏値は温度に依存しないとされている¹⁶⁾。しかし図4-8から明らかなように、 n にも温度依存性があり高温になるほど大きくなる（非ニュートン性の低下）。 n が温度に対して独立であれば、既存の研究のように k についてのみ解析を行えばよいが、今回の場合 k と n の影響を同時に取り入れる必要がある。そこで、温度上昇による流動性の低下の度合いを判断する指標として見かけ粘度 θ を用いることとした。

速度勾配 150 [1/s] における見かけ粘度とTSの関係を図4-9に示した。これより、高濃度消化汚泥の流動性は高温とすることにより若干改善されるが、その度合いはごくわずかで、高濃度化による流動性の低下をカバーするまでには至っていないことがわかる。この傾向は汚泥が高濃度になるほど顕著であり、例えば Run 2 (TS = 3.2 %) では、温度を 20℃から 50℃に上げることは、見かけ粘度の観点からTSを 0.8 % 下げることと相当するが、Run 4 (TS = 5.2 %) の場合には、TSをわずかに 0.2 % 下げることにはしかあたらない。これは、見かけ粘度はTSに対して対数的に増加するのに対し、温度上昇に起因する低下量はTSによらずほぼ一定であることによる。

図4-10は 20℃における見かけ粘度に対する 35, 50℃の見かけ粘度の比を、水 (TS = 0 %) の場合も含めて表したものである。50℃のデータについてはばらつきが大きい。汚泥が高濃度化するほど温度上昇による流動性の改善効果が失われていくことがわかる。大垣らの実験¹⁶⁾では、希薄な懸濁液においては温度上昇に伴う懸濁液の粘度低下は溶媒の粘度低下と同比率であるが、粒子間に直接の相互干渉が生じるような高濃度の懸濁液においては、温度上昇によって溶媒の粘度が低下しても懸濁液としての粘度はそれほど低下しなくなるという結果が得られている。今回の調査結果はこれを支持するものであった。

図4-10中の直線は、大垣らの実験結果を考慮し、ある濃度までは見かけ粘度の比が水の場合と同一であるとして求めた回帰直線である。汚泥の粘度低下率と水の粘度低下率に差が生じてくると考えられる境界濃度は、非ニュートン性の境界やチクソトロピー性の境界とほぼ同じ領域にあることがわかる。これらの関係について詳細に調査することは流動機構の解明に直接つながるものとして、温度の影響の定量的把握とともに今後の検討課題である。

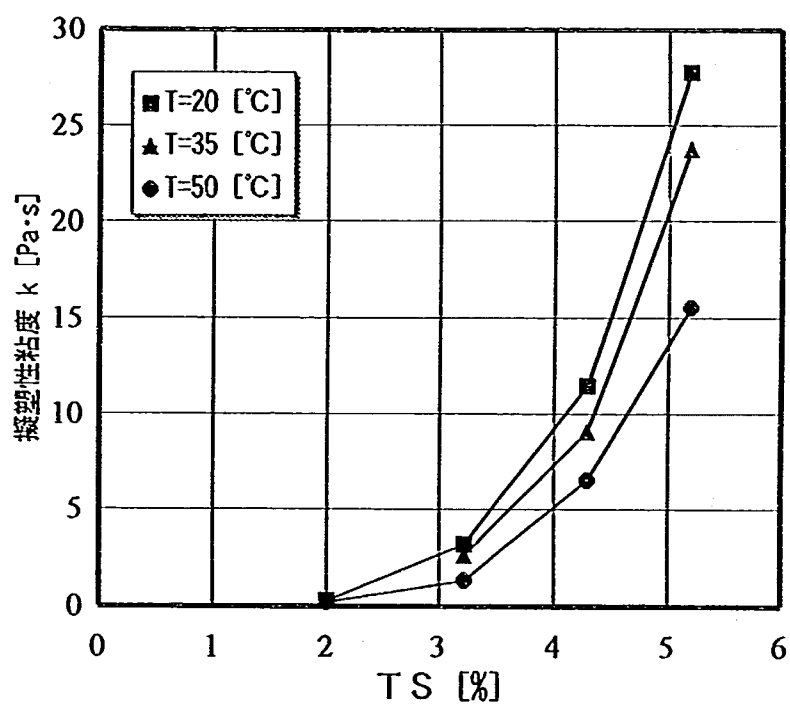


図4-5 擬塑性粘度とTS

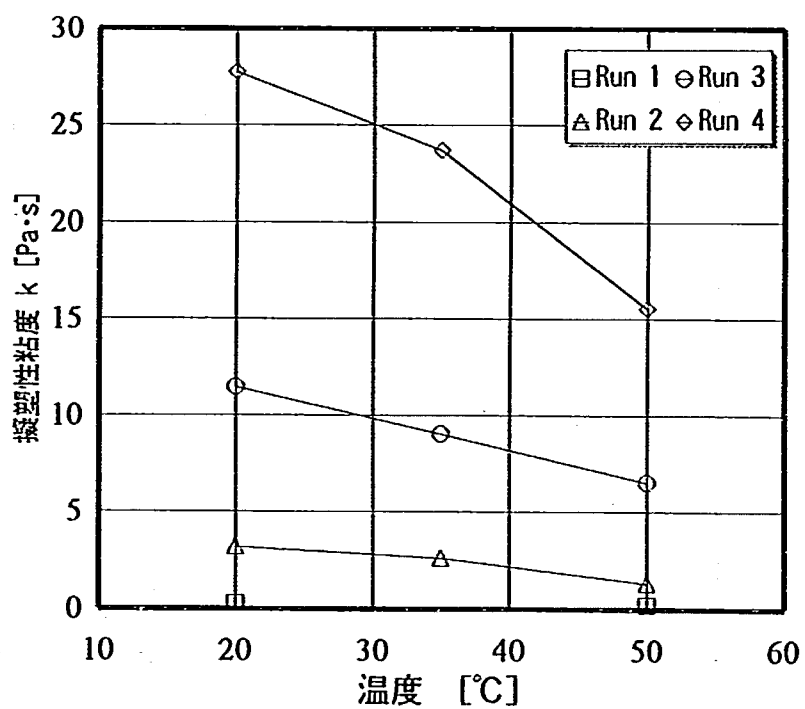


図4-6 擬塑性粘度と温度

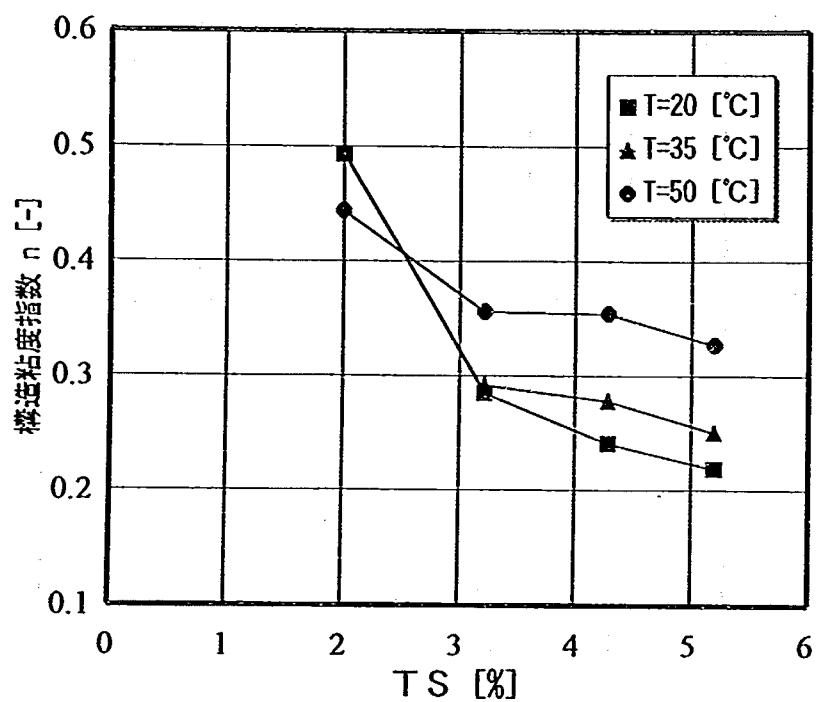


図 4-7 構造粘度指数とTS

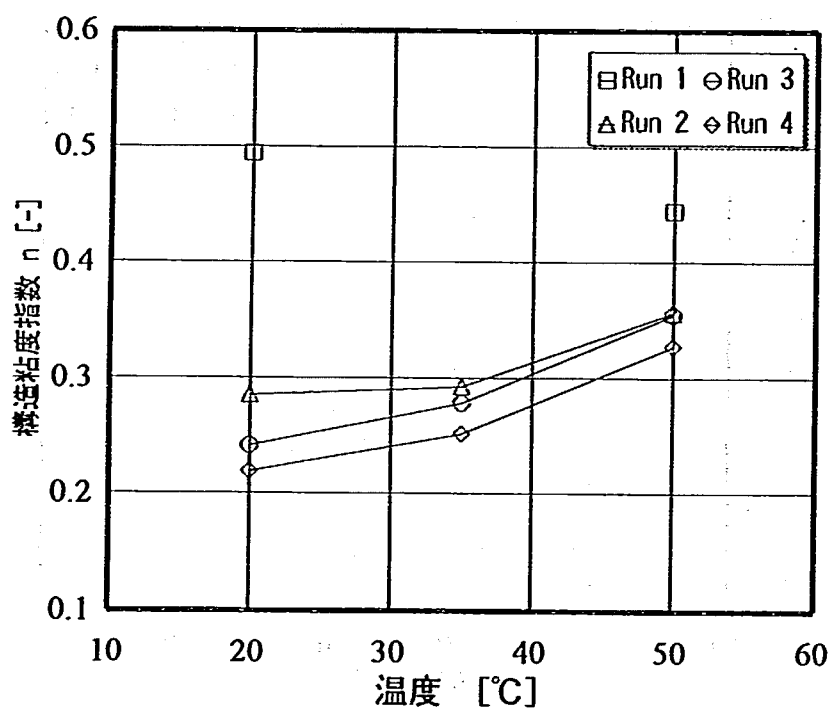


図 4-8 構造粘度指数と温度

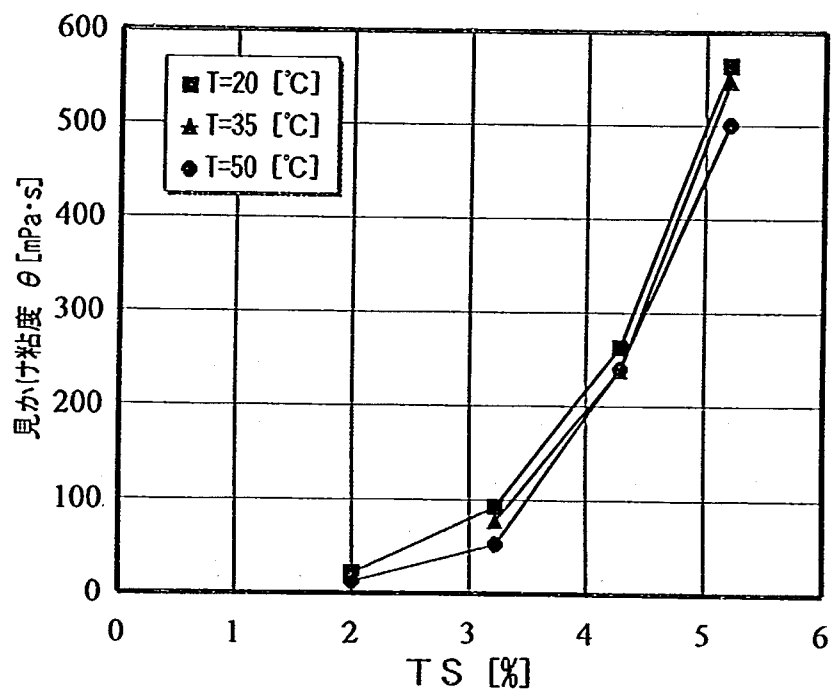


図4-9 見かけ粘度とTS
速度勾配 $D=150$ [1/s] における見かけ粘度

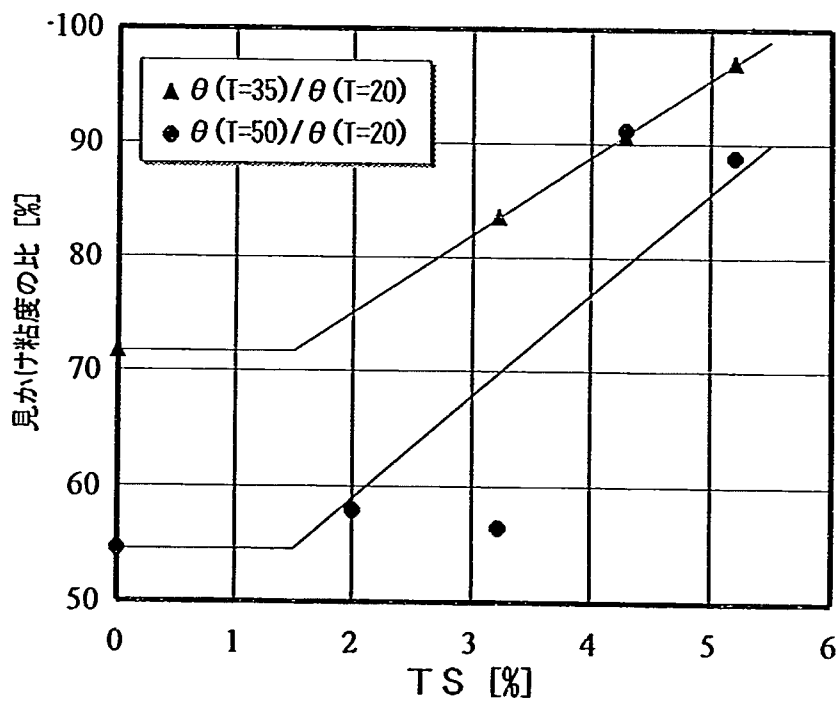


図4-10 温度上昇に伴う見かけ粘度の低下
20°Cにおける見かけ粘度に対する各温度の見かけ粘度の比

4.1.2 チクソトロピーと温度

最大速度勾配 $D_{\max}$ (150 [1/s]) における初期のせん断応力 τ_0 と 30 分経過後のせん断応力 τ_{30} を用いてチクソトロピーの評価を行い、温度との影響について検討した。各 Run のうち、Run 1 以外はチクソトロピー性があると判断された。

チクソトロピーの指標として、チクソトロピー量 1 を $\tau_0 - \tau_{30}$ 、チクソトロピー量 2 を τ_0 / τ_{30} と定義した。チクソトロピー量 1 は 30 分間での応力低下量そのものであり、チクソトロピー量 2 は平衡流動時応力に対する初期応力の比を表している。

図 4-11 はチクソトロピー量 1 と温度との関係を表したものである。チクソトロピー量 1 は温度についてほぼ独立で、濃度が高いほど降下量が大きくなるということがわかる。よって、チクソトロピーに関しても粘度の場合と同様に、温度の影響は濃度の影響ほど大きくないという結論が導かれる。

図 4-12 はチクソトロピー量 2 と TS との関係を表したものである。チクソトロピー量 2 は濃度によらずほぼ一定でおよそ 1.5~1.6 の値をとることがわかる。温度が高い場合は低い場合と比べ平衡時の応力が多少小さくなるが、降下量そのものは温度によらずほぼ一定であるため、チクソトロピー量 2 の値は大きくなる傾向があった。

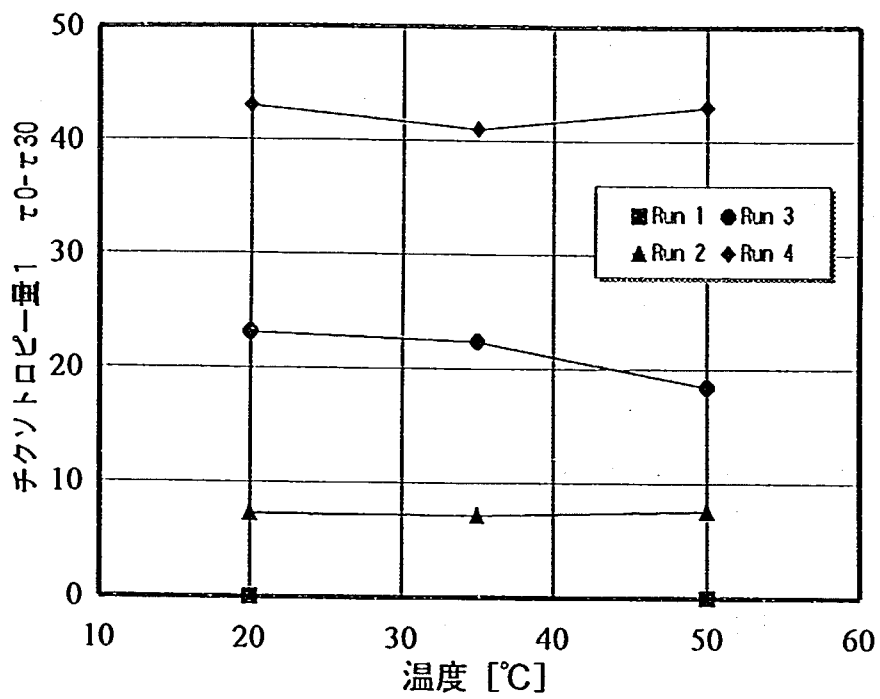


図4-11 チクソトロビー量1と温度

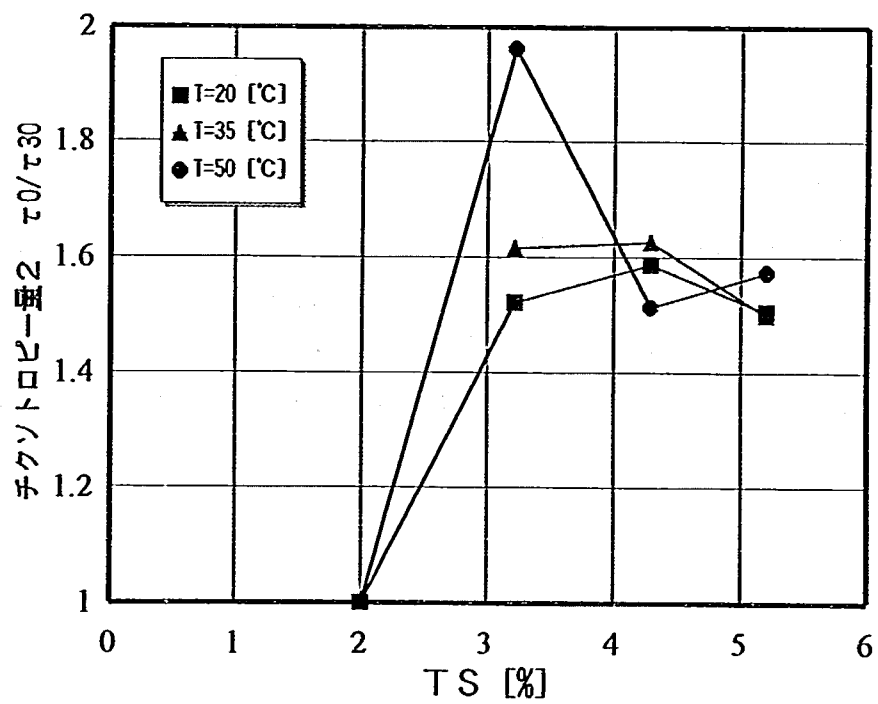


図4-12 チクソトロビー量2とTS

4. 2 粒子径の影響

4.2.1 管路輸送に伴う流動特性の変化

実施設における送泥前後の汚泥性状を把握するための調査は、送泥中の汚泥の変性を防止し、後続のプロセスを含めた最適な汚泥処理システムを確立することを目的として、近年大都市を中心として実施されるようになってきた。送泥中に汚泥の流動特性が変化するとすれば次のような原因が考えられる。

- ・流動変形を受けることによる粘度低下（チクソトロピー性がある場合）。
- ・輸送中の温度変化に伴う粘度変化。
- ・輸送及び貯留に伴い汚泥が腐敗し性状が変化する（生物化学的变化）。
- ・輸送に伴い粒子が物理的に崩壊し粘度が低下する。
- ・管の立ち上がり部分等に汚泥が沈積して部分的に濃度が増加する。

管路輸送システムを設計する際には、これらのファクターが送泥時にどの程度変動し、それがどの程度流動特性に影響してくるのかを定量的に把握しておく必要がある。しかし実施設においては、送泥汚泥の性状が均一でないこと、サンプリング箇所が限定されていること、タイムラグ等により精度の高い調査を実施することはなかなか難しい。

表4-2⁽⁷⁷⁾⁻⁽⁷⁹⁾に、最近各自治体で実施された、送泥に伴う汚泥性状の変化についての調査の概要をまとめた。どの調査においても送泥に伴い汚泥が腐敗することは確認されているが、その流動特性がどのように変化したかは明確になっていない。表4-3は土木研究所で実施した実態調査の結果（表1-3と重複）であるが、送泥濃度が低く、見かけ粘度が測定下限以下であったため、送泥前後の差は測定誤差の範囲内と考えられる。また粒子径についても、若干送泥後の方が小さかったが、有意な差があったと判断できるまでには至らなかった。

しかし、汚泥輸送実験装置を用い、消化汚泥および混合濃縮汚泥を供試汚泥として一定流速で循環圧送したところ、圧力損失、見かけ粘度（速度勾配 300 [1/s] での）、粒子径がともに低下するという結果が得られた（図4-13）。供試汚泥はともにチクソトロピー性がなかったため、見かけ粘度および圧力損失の低下は粒子径の低下に起因するものと考えることができる。一方、粒子径が低下したのは流れが乱流であり、かつ汚泥を循環利用するため汚泥粒子が送泥ポンプを何度も通過することが原因と考えられる。

そこで本節では、実施設における送泥で粒子が崩壊するかどうかは別として、粒子径の低下が見かけ粘度に及ぼす影響についての検討を行うことにする。実験にはホモジナイザーを用い、意図的に汚泥粒子を破壊させて測定に供した。

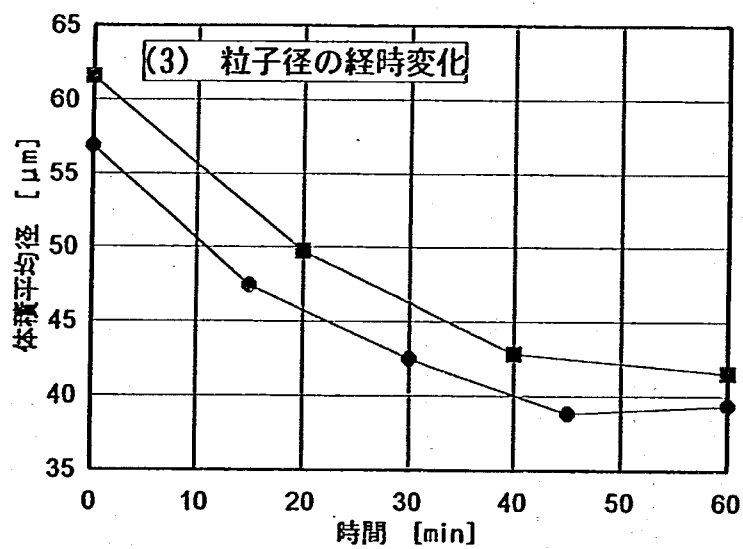
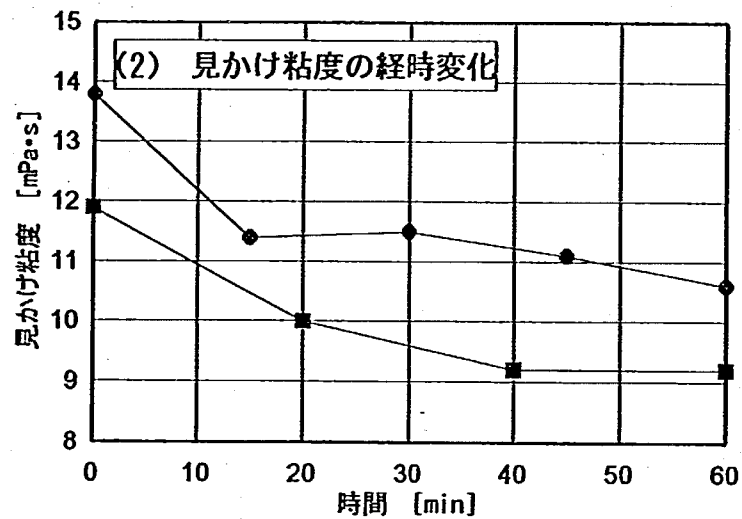
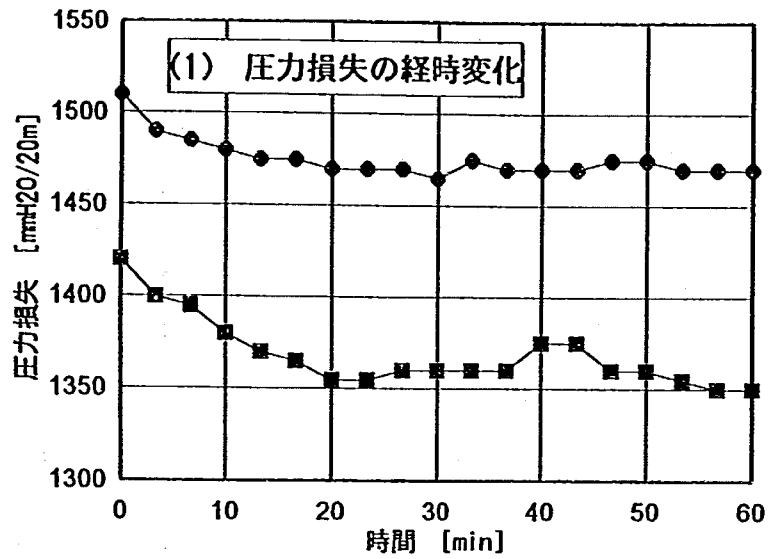
表 4 - 2 送泥前後の汚泥性状の変化（自治体報告書）

自治体	対象送泥管	延長 [km]	管径 [mm]	流速 [m/s]	送泥濃度 [%]	送泥前後の汚泥性状
川崎市（1989）	等々力→入江崎	15.4	300	0.8	1.0	圧送前後では多少腐敗が進行する程度。 粒子径に大きな変化はなし。
横浜市（1990）	西部 → 栄第 1	7.6	350	0.4	2.5	pHが低下し腐敗傾向にあるものの、粒子径には 有意な変化は見られなかった。 粒子径はコールタカウンタ法により測定。
	栄第 2 → 栄第 1	2.0	300	1.0	1.6	
東京都（1992）	三河島→砂町	13.5	350	-	1.3	Mアルカリ度、揮発性有機酸が増加し腐敗傾向 粘度は低下したがTSに起因するとみられる。 粒子径は未測定。
	落合 → 小台	10.6	350	-	0.7	

表 4 - 3 送泥前後の流動特性の変化（土研実態調査）

処理場	延長 [km]	管径 [mm]	流速 [m/s]	管内滞留 時間 * [h]	送泥 前後	TS [%]	VS [%]	体積 平均径 [μm]	見かけ粘度 (150 [1/s]) [mPa・s]	特 記 事 項
TT	2.7	200	0.7	5	前	1	80	55	6.7	外観上の変化は見受けられない
					後	0.9	79	48	5.6	
IK	11.0	250	0.6	18	前	0.7	84	79	3.9	送泥後は腐敗臭あり。 黒色を呈し、難沈降性。
					後	0.7	82	71	4.7	

* 1日当たり送泥量，ポンプ実稼働時間を考慮して計算したもの



■ 消化汚泥, TS=1.8% (1.4m/s, 28°C)
 ● 濃縮汚泥, TS=1.9% (1.4m/s, 34°C)

図4-13 汚泥輸送実験装置での実験結果

4.2.2 ホモジナイザーを用いた実験

ホモジナイザーは、カッターを高速回転させることにより、試料粒子を短時間に破砕することができる。仮に実施設の送泥において粒子径が低下するとしても、同時に腐敗も進行するため、粒子径の低下による流動特性への影響のみを評価することができないが、ホモジナイザーによればそれが可能である。ここでは、カッターの回転数を一定として攪拌時間を変化させることにより供試汚泥粒子を数段階に破壊し、粒子径と流動特性の関係について検討した。

供試汚泥の性状を表4-4に示す。供試汚泥にはチクソトロピー性のない低濃度の汚泥を選んだ。これはチクソトロピー性がある場合、ホモジナイザーの攪拌により測定最大速度勾配以上の流動化が生じ、無攪拌の場合と条件をそろえることができないためである。カッターの回転数は約 10,000 [rpm] とし、攪拌時間を 0, 2, 6 [min] の3通り設定した。流動特性の測定は、図3-15の(1)に準じ、 $D_{\max} = 150$, $t = 3$ に設定した。測定温度は 20°Cとし、センサーシステムには MV1 を用いた。粒子径の測定には MICROTRAC, SRA を用いた。図4-14に粒径分布の測定例を示す。

図4-15に攪拌時間と体積平均径との関係を示す。粒子の崩壊は最初の数分で進行し、攪拌時間2分と6分では粒子径に大きな差がなかった。図4-16に攪拌時間と見かけ粘度との関係を示す。ここで見かけ粘度は $D_{\max}$ (150 [1/s]) における値を用いた。攪拌時間とともに粒子径は低下するが、見かけ粘度に大きな変化は見られなかった。これは汚泥輸送実験装置を用いた実験結果から導かれる推論（粒子径の低下に伴い見かけ粘度は低下する）と異なるものであった。

大垣ら⁴⁵⁾によれば、懸濁液の粘度とその濃度を関係づける指標として最終沈降体積分率から求められる体積分率を用いることが有効であり、これを指標として使う限り、粒子の絶対径、粒度分布、粒子形状、粒子比重などは直接的には粘度と無関係になるとされている。しかし粒子が崩壊した場合、粒子中に包含されていた水分が粒子外へ移行したり、粒径の低下に伴い粒子充填率が変化したりすることにより、体積分率もある程度変化するものと考えられる。また、管路輸送実験に伴い粒子径が均質化された場合には、レオロジー定数が汚泥種類に関係なく濃度の関数として表されることも確かめられている（第2章）。これらのことから、粒子径と流動特性とは何らかの関係があることが推察される。

ホモジナイザーによる実験結果と汚泥輸送実験装置による実験結果とが一致しなかった原因として、粒子の破壊のされ方が汚泥輸送実験装置の条件を再現していないことが考えられる。カッターが非常に高回転であったため、逆に粘りけがでてくるようにも見受けられた。よって、粒子径を粒子破壊により低下させるのではなく、分級によって低下させる方法についても検討する必要があると考えられる。また汚泥の場合はふるい分けやその後の濃度調整が容易に行えないため、粘土やベントナイトといった無機系の試料を用いた検討も必要である。

表 4-4 供試汚泥の性状（ホモジナイザー実験）

Run No.	汚泥種類	TS [%]	VS [%]	Non-N. *	Thix. **	攪拌時間 [min]	体積平均径 [μm]	見かけ粘度 (150 [1/s]) [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]
1	消化汚泥	1.7	-	○	-	0	50	8.6
						2	35	8.4
						6	32	12.5
2	混合濃縮汚泥	1.3	75	○	-	0	57	6.5
						2	38	6.1
						6	33	7.0
3	余剰濃縮汚泥	2.3	77	○	-	0	35	43.5
						2	28	43.5
						6	25	42.7

* 非ニュートン性をもつサンプルに○
 ** チクソトロピー性のあるサンプルには○

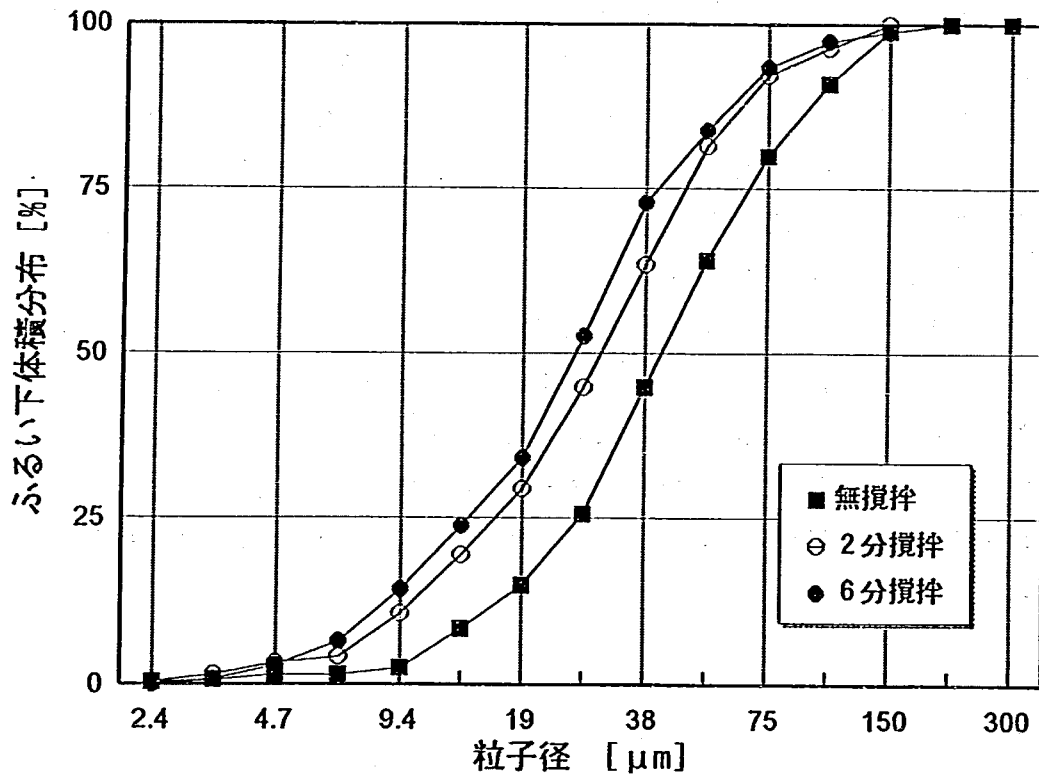


図 4-14 ホモジナイザーによる粒径分布の変化 (Run 1)

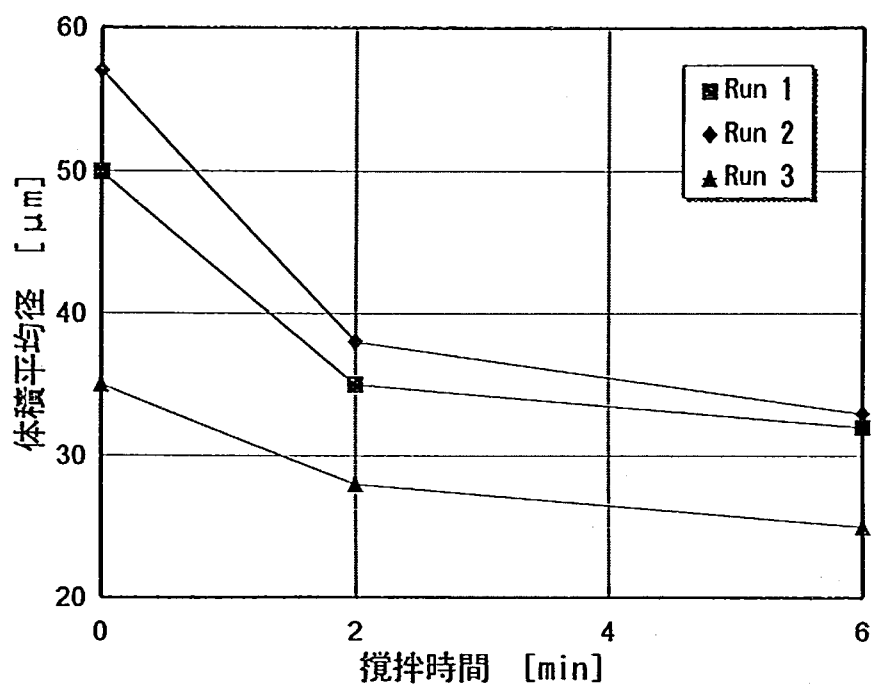


図 4-15 攪拌時間と体積平均径の関係

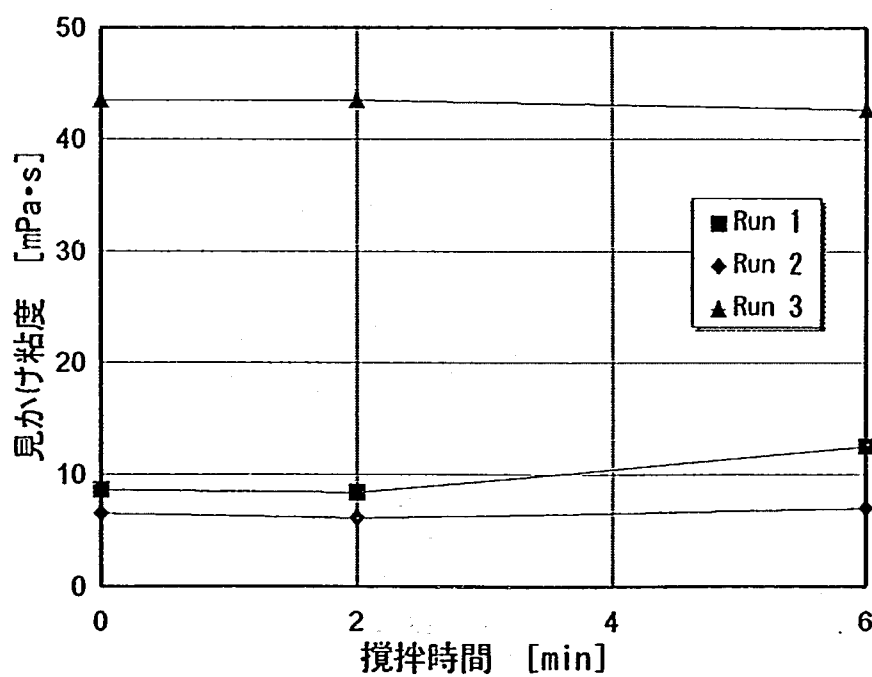


図 4-16 攪拌時間と見かけ粘度の関係

4. 3 汚泥貯留と流動特性(1) -腐敗の影響-

4.3.1 目的と実験方法

汚泥の管路輸送に際して、送泥管の破損や停電等の非常時には送泥が不可能となるため、汚泥を一時貯留する必要がある。また、中小規模の処理場に管路輸送を適用した場合には、汚泥発生量が少ないため輸送前もしくは管内において汚泥を長時間貯留しなければならないことも考えられる。このような場合汚泥は腐敗すると考えられるが、腐敗に伴う流動特性の変化について調査された例は少ない。

吉田ら²⁵⁾は、日数経過による流動特性の変化について調査しているが、流動特性の変化は管路輸送の観点からは問題とならない程度であると結論し詳細な検討がなされていない。そこで本節では、貯留に伴う腐敗が流動特性に及ぼす影響について、貯留時の温度と濃度をパラメーターとした実験を行い検討した。

供試汚泥には SA 処理場の余剰濃縮汚泥を3段階に濃度調整したものを扱い、これらを 10℃、20℃、30℃の恒温室で温度制御した。貯留は採泥日を0日目として24日目まで継続した。実験条件と実験開始時の各ケースの汚泥性状を表4-5に示す。

汚泥は蓋をしたポリバケツ内に静置貯留し、分析用試料採取時にのみ攪拌棒で均一に混合した。各ケースとも汚泥量は約 60L としたが、これは試料採取による汚泥量減少の影響を受けない程度の量である。

汚泥性状は以下の各項目について測定した。

- ・汚泥全体を対象 : pH, TS, VS, SS
- ・遠心分離後のろ過上澄液を対象 : TOC, Mアルカリ度, NH₄-N, PO₄-P

流動特性の測定は、図3-15に準じ、 $D_{max} = 150$, $t = 3$ に設定した。測定温度は貯留温度によらず 20℃とし、センサーシステムには MV1 を用いた。他に粒子径、比重を測定した。

実験中の様子について写真4-1に示す。

表4-5 供試汚泥の性状と実験

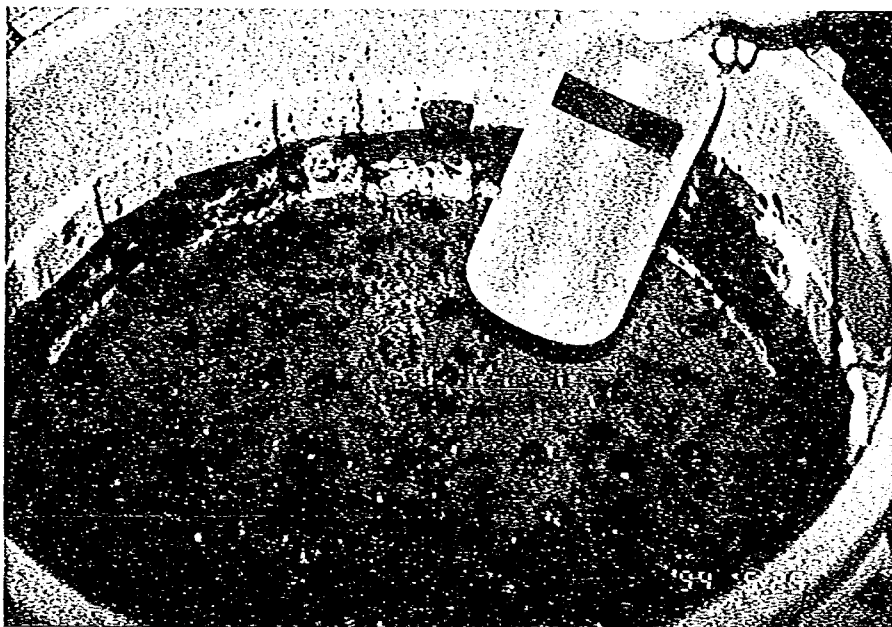
Run No.	Sample I.D.	貯留温度 [°C]	実験開始時の汚泥性状				Non-N. *	Thix. **
			TS [%]	VS [%]	比重 [-]	体積平均径 [μ m]		
1	10℃, 1/4	10	1.2	76	1.004	35.7	○	—
2	20℃, 1/1	20	4.0	77	1.014		○	○
3	20℃, 1/2	20	2.0	77	1.007		○	—
4	20℃, 1/4	20	1.2	76	1.004		○	—
5	30℃, 1/1	30	3.9	76	1.015	38.4	○	○
6	30℃, 1/2	30	2.0	76	1.007		○	—
7	30℃, 1/4	30	1.2	76	1.004		○	—

*

非ニュートン性をもつサンプルに○

**

チクソトロピー性のあるサンプルには○



攪拌前の供試汚泥表面の状態
(30℃-1/1、9日目)



試料採取時の攪拌

写真4-1 汚泥貯留実験の様子

4.3.2 実験結果

■ 汚泥性状

汚泥貯留に伴う各測定項目の経日変化について図4-17～24に示した。

嫌氣的条件化で汚泥が貯留された場合腐敗が進行し、有機物の分解、可溶化、ガス化に伴う TS の減少、DS (TS - SS により算出) の増加、各溶解成分 (TOC, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) の増加が起こる。この間、汚泥中の無機分は変化を受けないため VS が低下する。VS の低下率は腐敗の程度を表す指標と考えられるが、図4-19より温度が高いほど大きく、汚泥濃度による影響はあまり受けないことがわかる。

腐敗は、酸性発酵期、酸性減退期、アルカリ性発酵期と段階的に進行するが、腐敗がどの段階まで進んでいるかは pH の変化から確認できる。24日目において、10℃および20℃で貯留したものは、まだ酸性減退期にあるものと考えられるが、30℃で貯留したものはアルカリ性発酵期まで腐敗が進行していた。アルカリ性発酵期まで腐敗が進行すると、これまで増加してきた TOC や DS が減少に転じることがわかる (図4-20, 21)。

■ 比重、粒子径

比重の経日変化を図4-25に示す。貯留に伴う比重の大きな変化はなく、また貯留温度、汚泥濃度の影響も明確でなかった。貯留に伴い TS は減少しているため、単位濃度当たりの比重は増加する結果となった (図4-26)。これは、比較的軽い有機物のみが分解し、重い無機物がそのまま残っているためと考えることができる。

粒子径については体積平均径および 90% 径の変化で評価した (図4-27～28)。測定値は測定誤差の範囲内で変動しており、腐敗により粒子径が減少すると結論づけるまでには至らなかった。

これらのことから、腐敗による物理的な性状変化としては、単位濃度当たりの比重の増加、固形物濃度の減少、SS に対する DS 分の増加が挙げられ、粒子径には大きな変化はないものと考えることができる。ただし、今回の実験に供試したのは比較的均一で粗大粒子を含まない余剰汚泥であり、同様な実験を初沈汚泥を用いて行った場合には粒径分布に変化が生じる可能性があることに留意しなければならない。

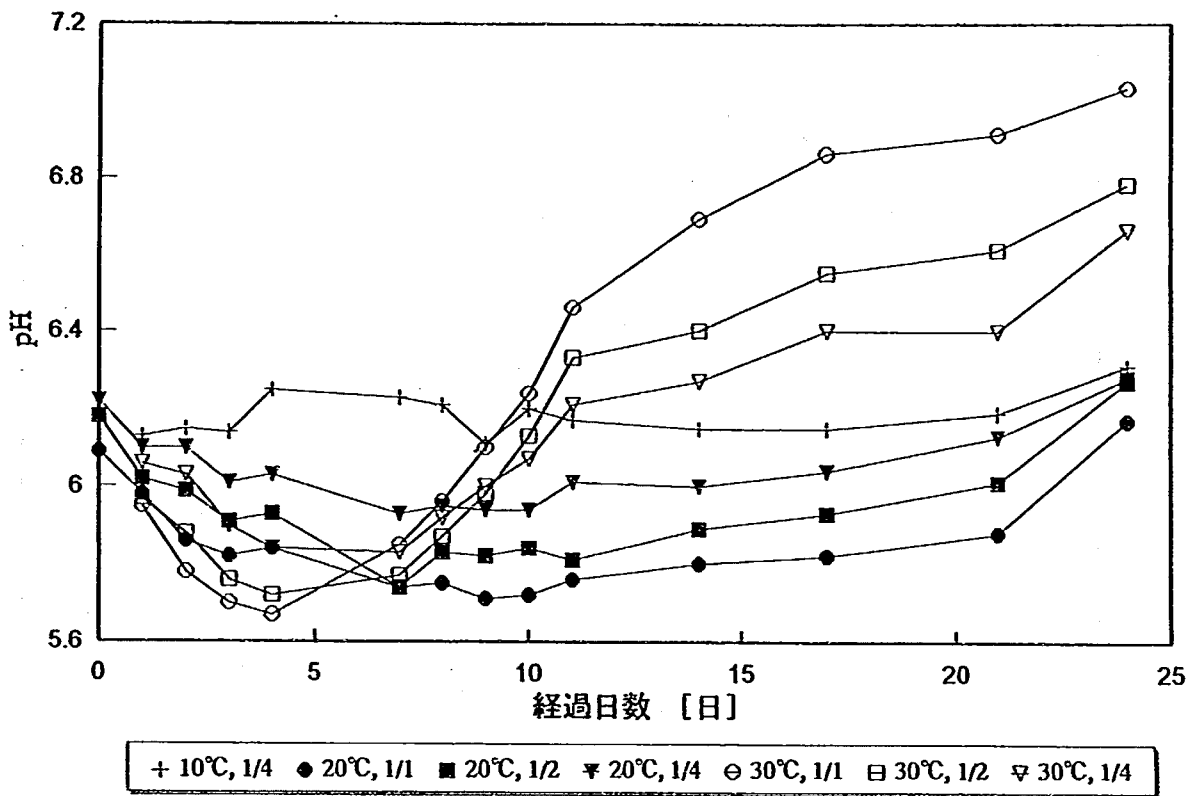


図4-17 汚泥貯留実験、pHの経日変化

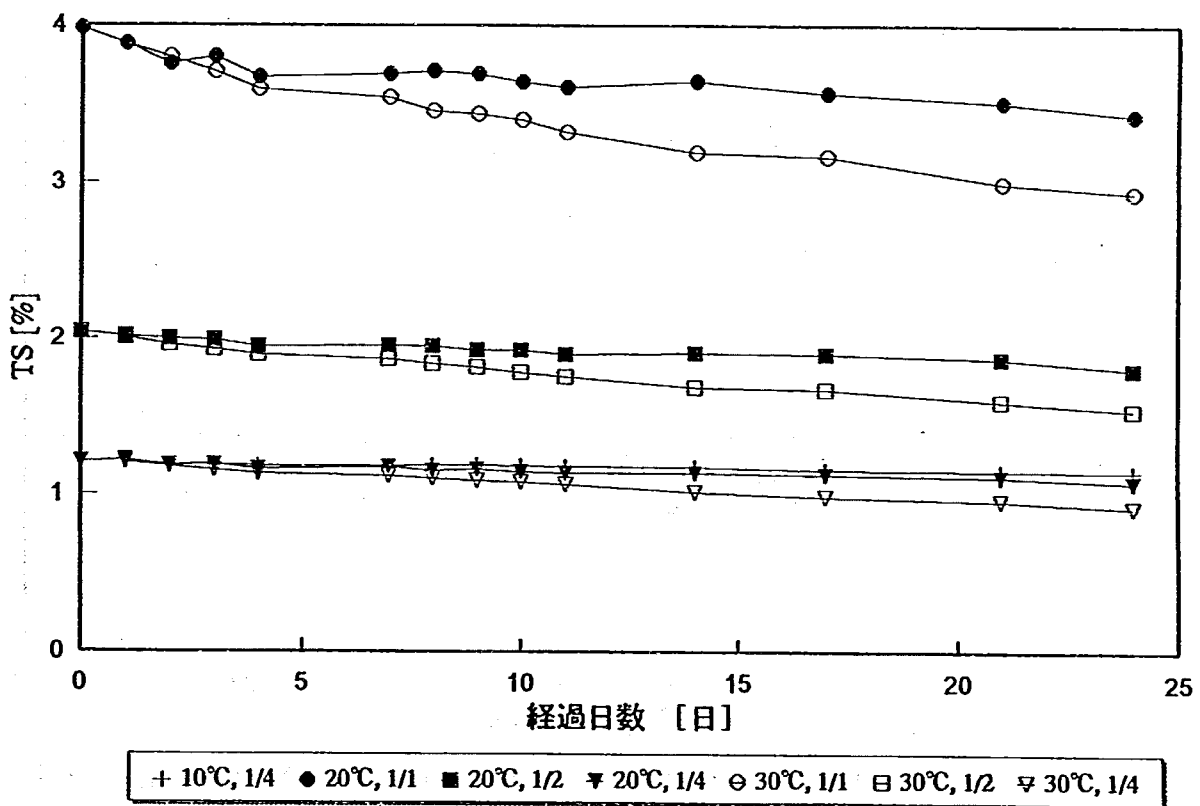


図4-18 汚泥貯留実験、TSの経日変化

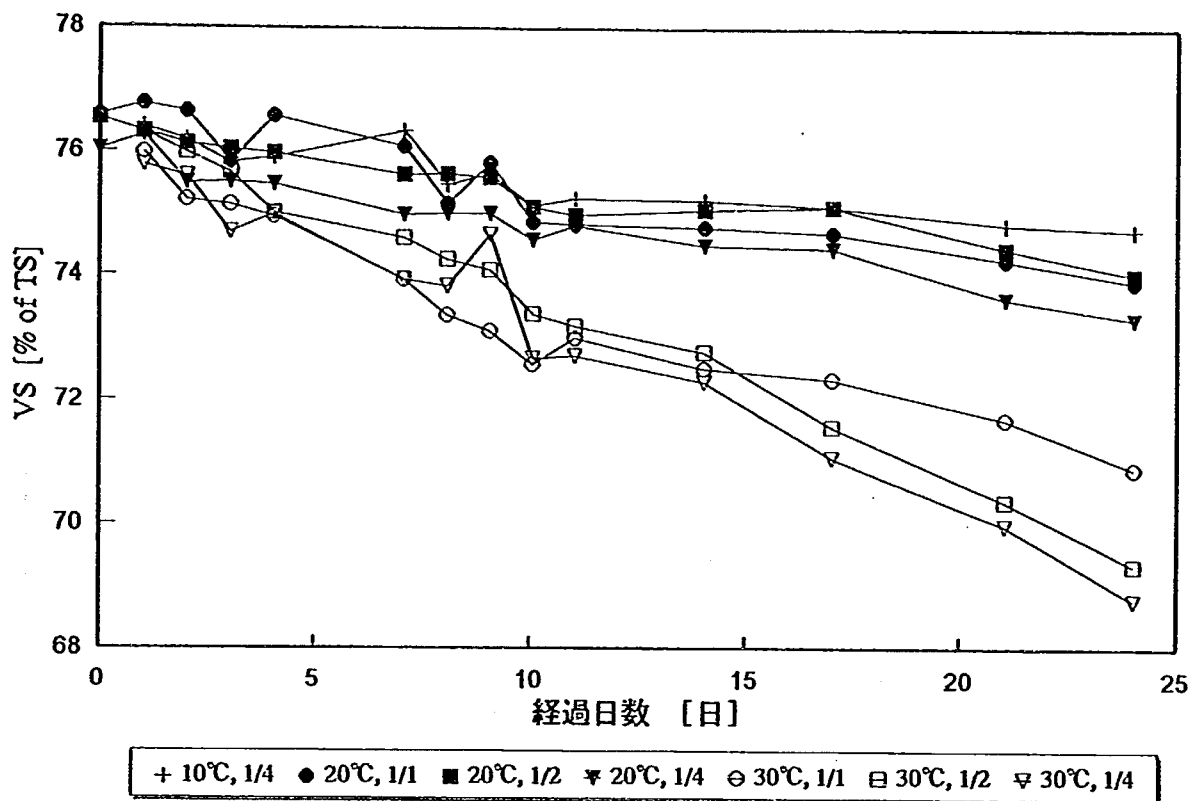


図4-19 汚泥貯留実験、VSの経日変化

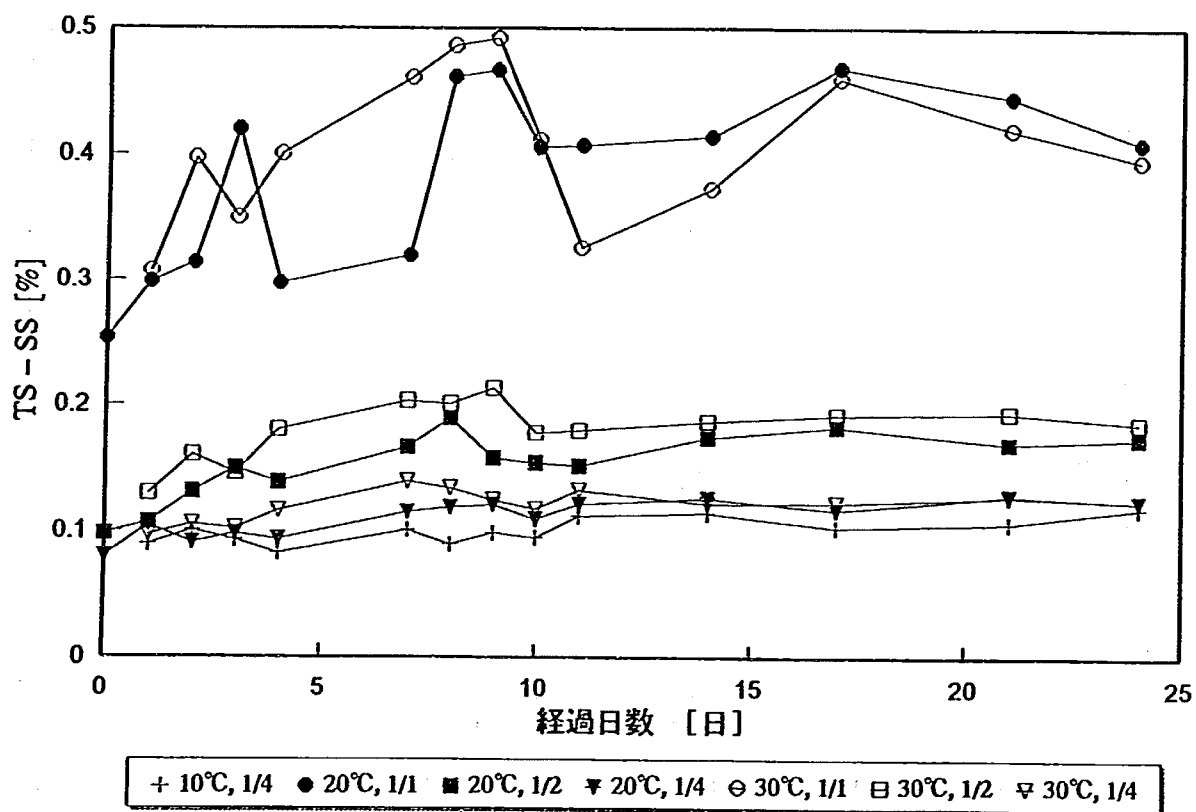


図4-20 汚泥貯留実験、DSの経日変化

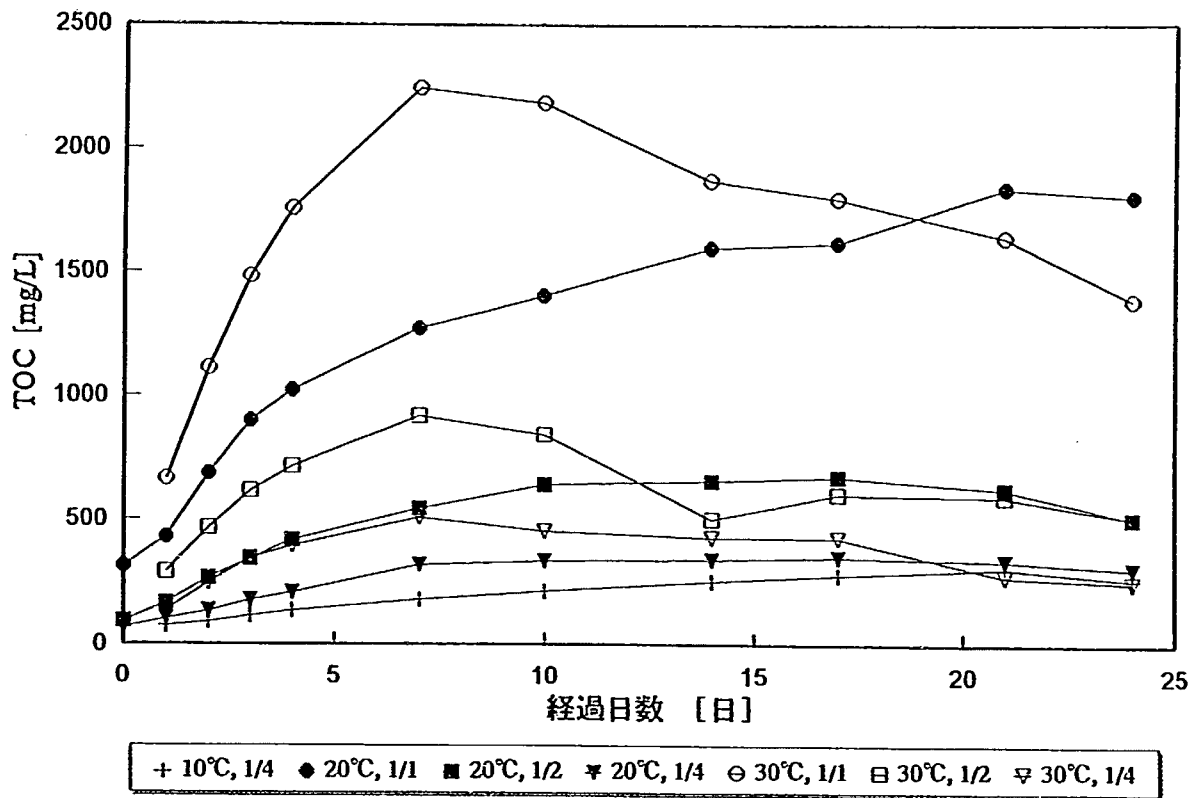


図4-21 汚泥貯留実験、溶解性TOCの経日変化

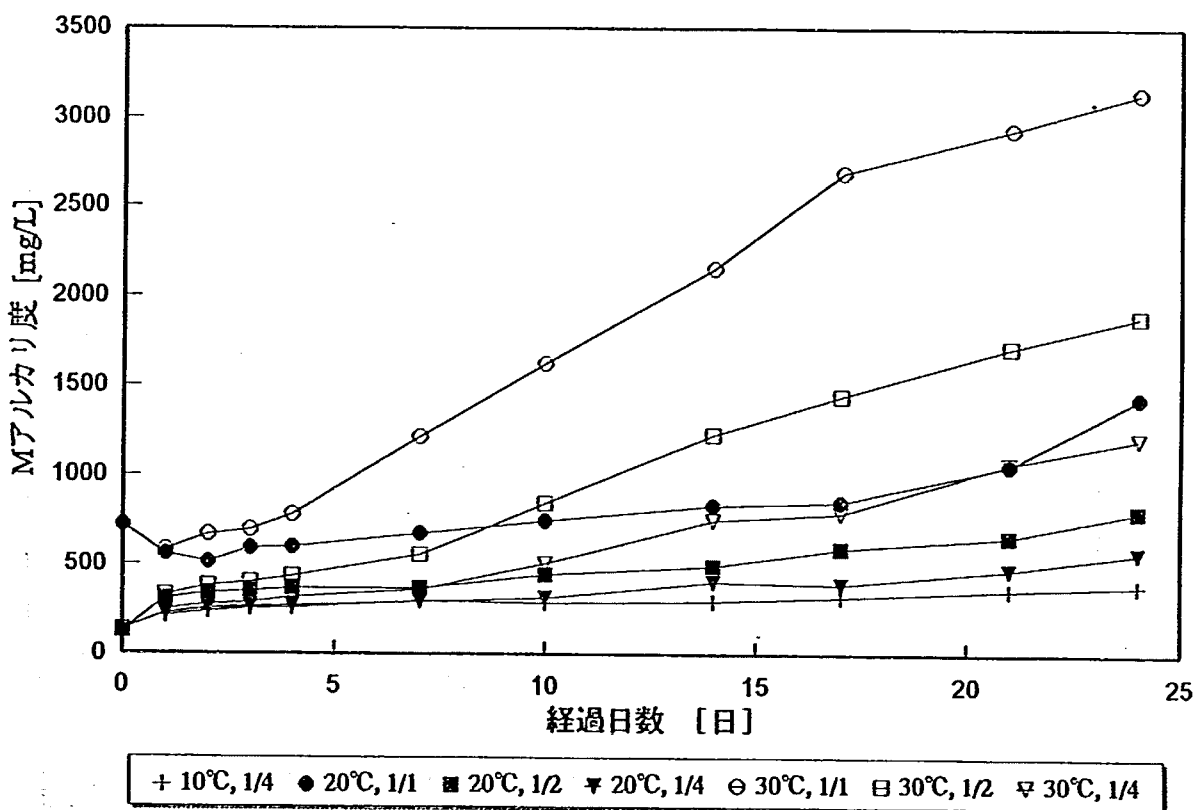


図4-22 汚泥貯留実験、Mアルカリ度の経日変化

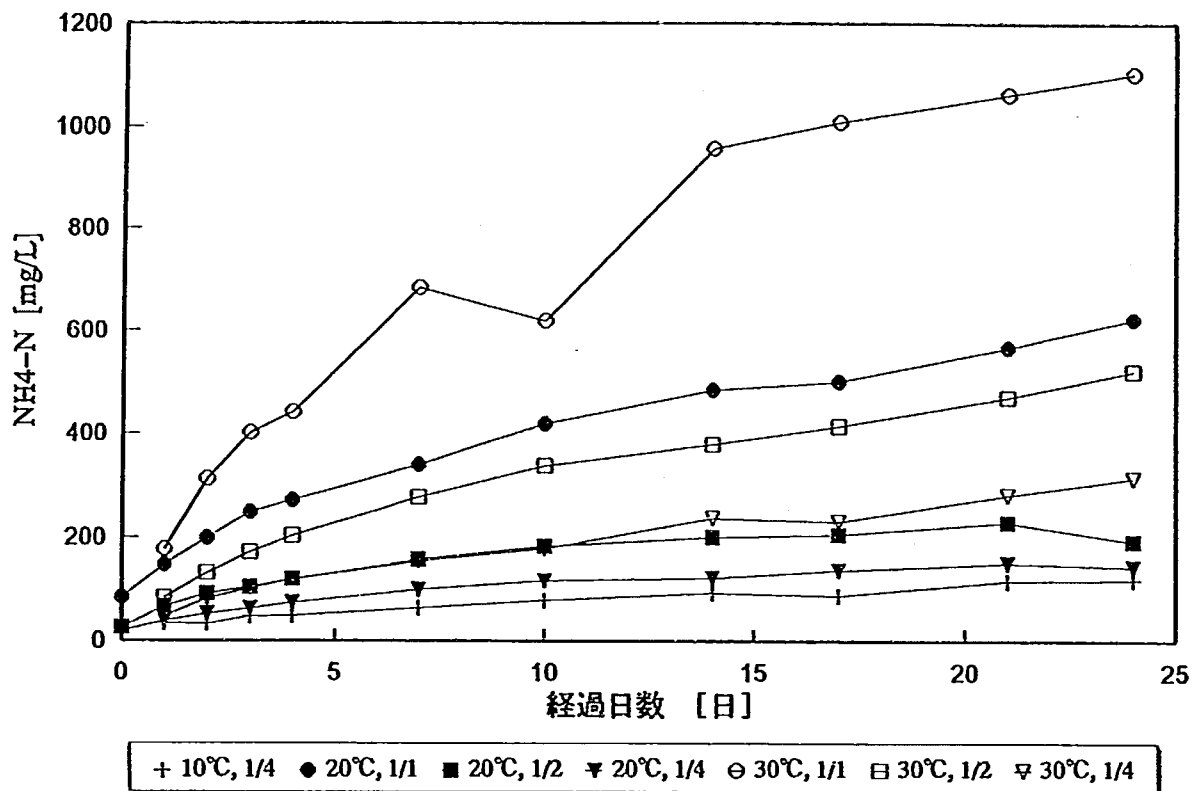


図 4-23 汚泥貯留実験、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の経日変化

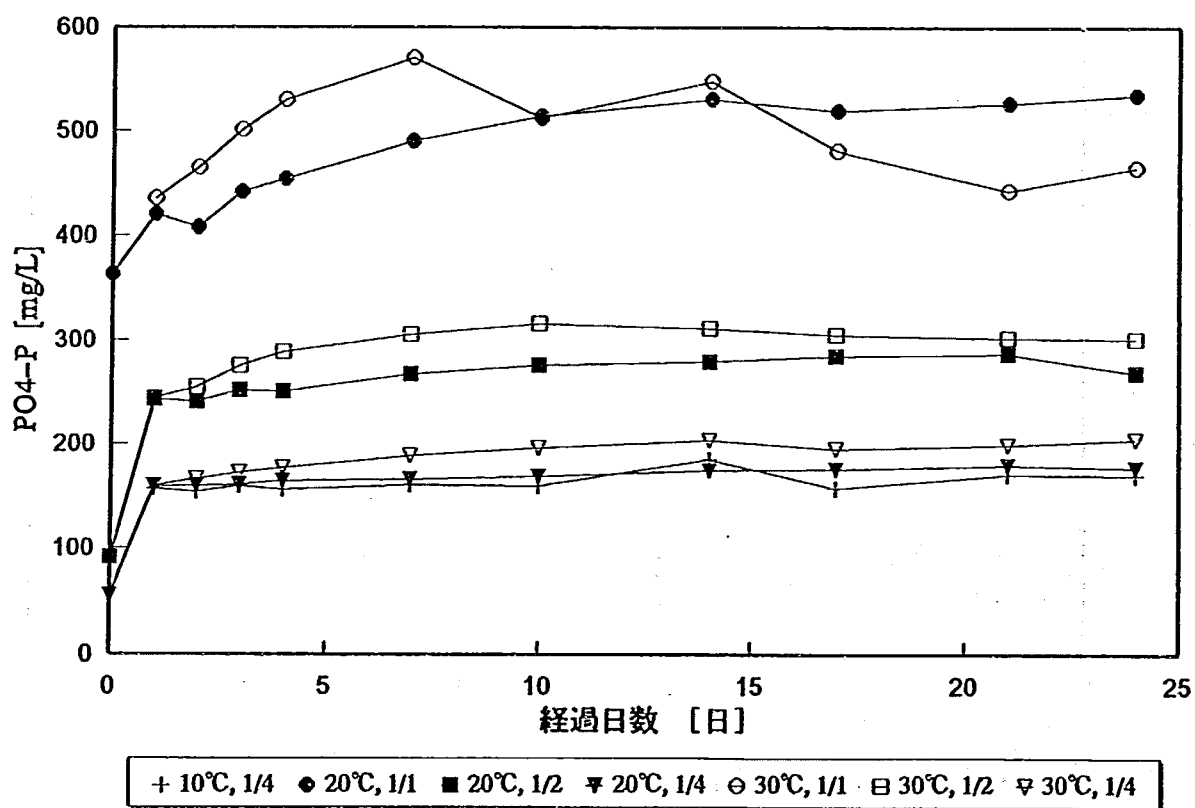


図 4-24 汚泥貯留実験、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の経日変化

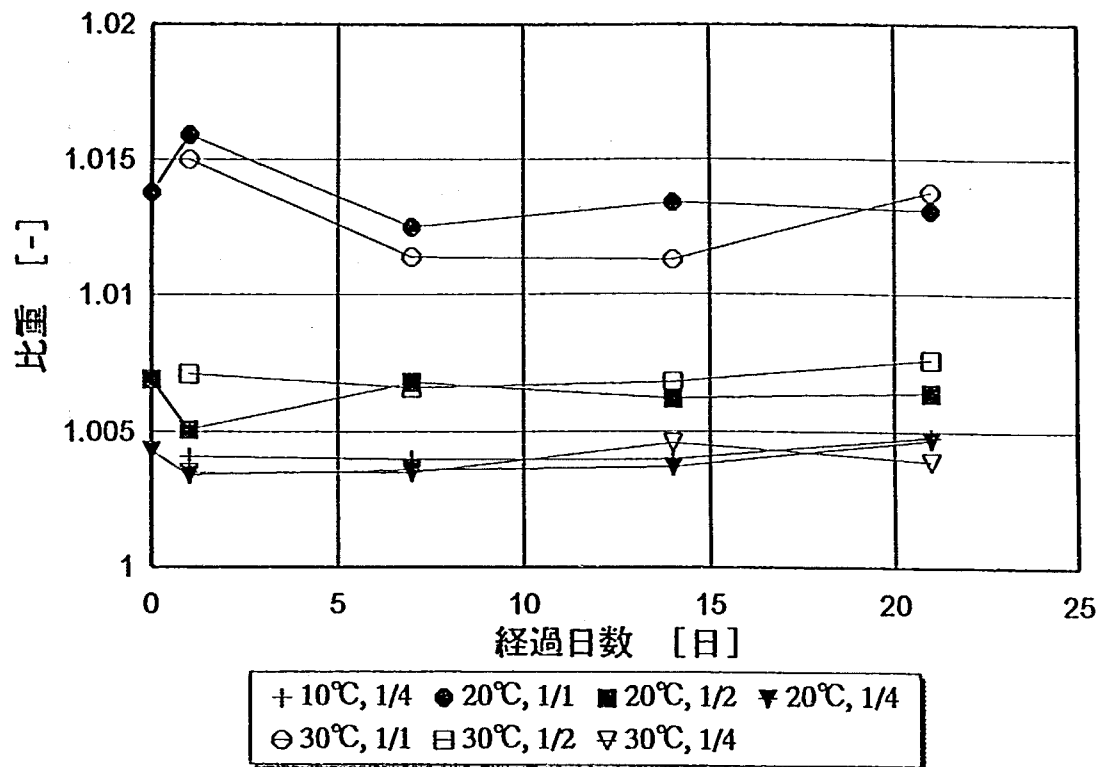


図4-25 比重の経日変化

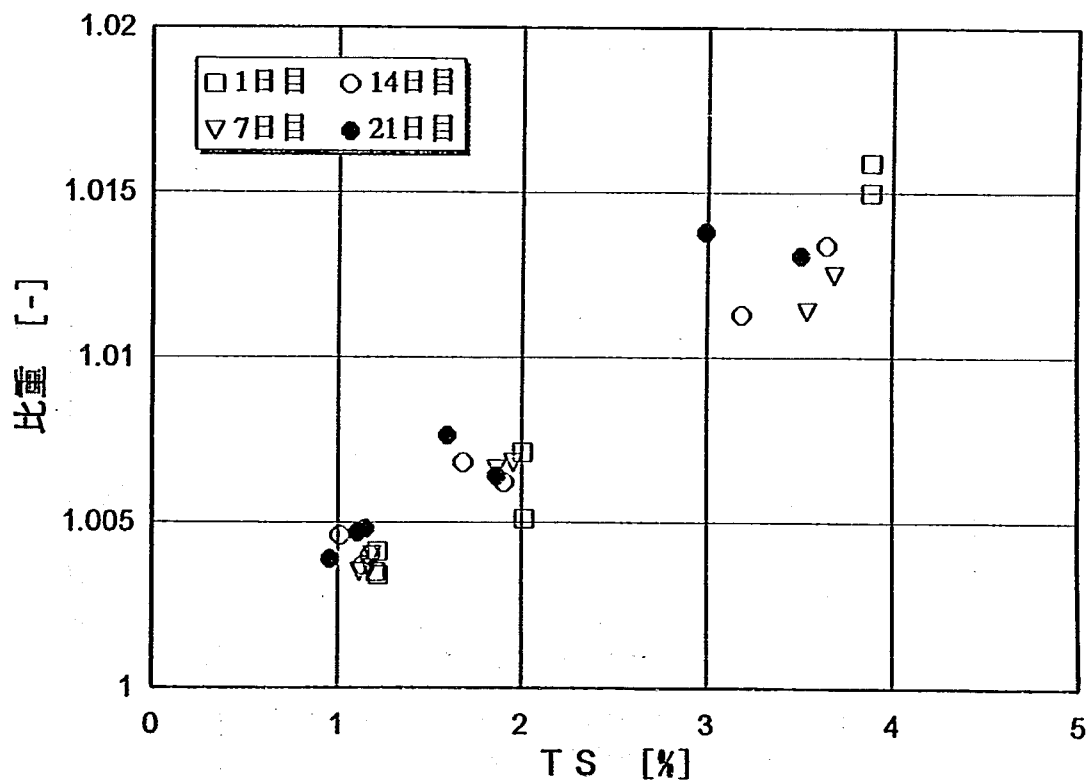


図4-26 比重とTSの関係

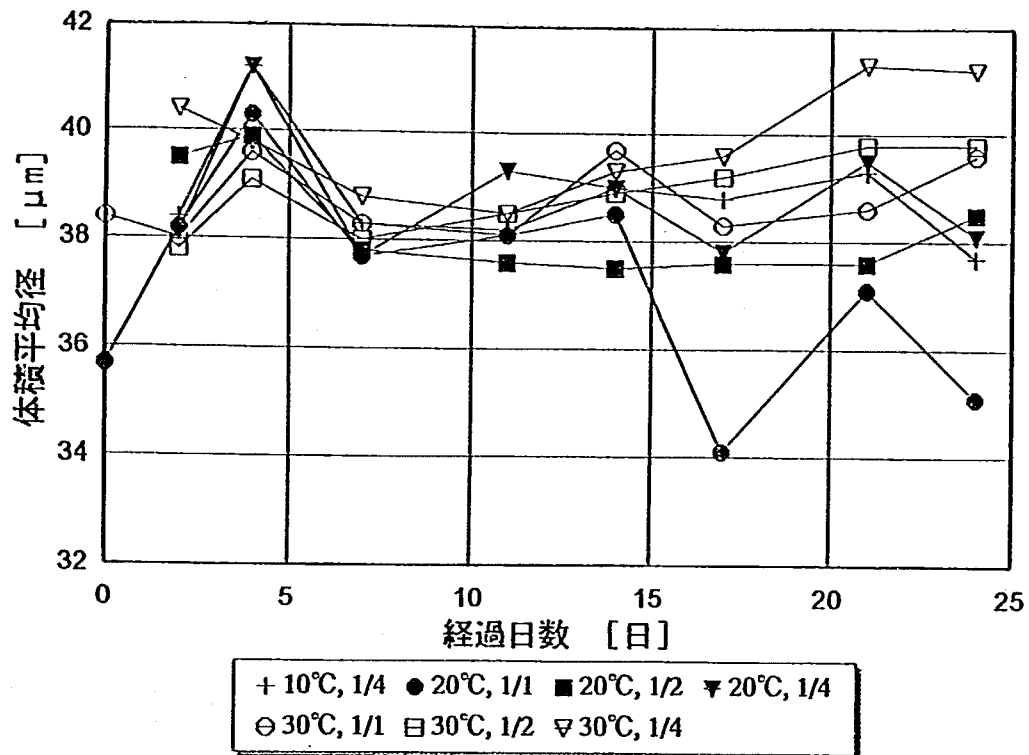


図4-27 体積平均径の経日変化

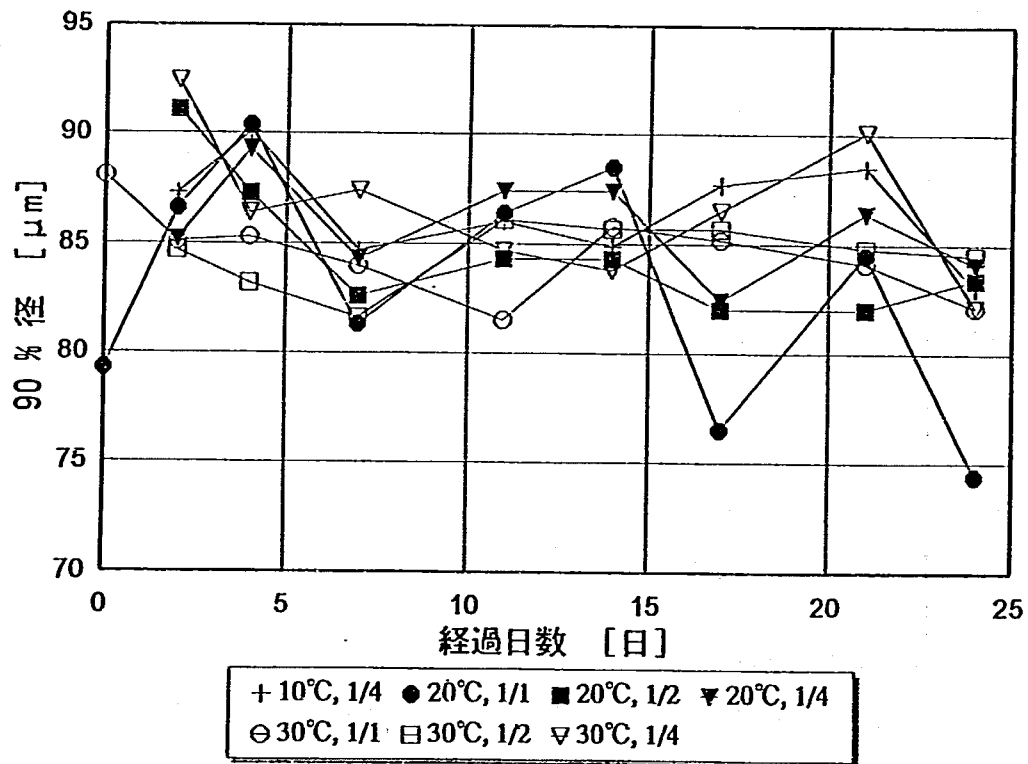


図4-28 90%径の経日変化

■ 粘 度

$D = 150$ [1/s] における見かけ粘度の経日変化を図 4-29 に示す。見かけ粘度は腐敗の進行とともに低下し、貯留温度が 30℃ の場合に特に低下率が大きかった。見かけ粘度の経日変化の様子は、TS の変化（図 4-18）とよく似ており、両者の関係を図示するとよい相関のあることがわかった（図 4-30）。また、得られた流動曲線の区間 $15 \leq D \leq 150$ において近似計算により各レオロジー定数を求め、TS との関係を両対数軸上にて示すと図 4-31、32 のようになる。見かけ粘度同様に、2 つのレオロジー定数と TS の間にはよい相関が見られた。

これらのことから、腐敗に伴う粘度の変化は濃度の低下に帰することができ、単位濃度当たりの比重の増加、SS に対する DS 分の増加等の他の物理的因子は影響が小さいものと考えられる。特に、有機物の分解により溶媒部分（遠心分離上澄液）の粘度は大きく変化すると考えられるが、これは汚泥全体の粘度にほとんど影響しなかった。この結果は、4.1.1 において汚泥温度とレオロジー定数との関係を検討した際に得られた結論と同様であった。また汚泥粘度を表す指標としては固形物濃度 (TS) よりも SS の方が適当であることが示唆されるが、今後の検討課題である。

■ チクソトロピー

チクソトロピー性を示した 20℃, 1/1 および 30℃, 1/1 の場合について検討した。チクソトロピーの評価は、4.1.2 と同様に、 $\tau_0 - \tau_{30}$ （チクソトロピー量 1）、 τ_0 / τ_{30} （チクソトロピー量 2）の 2 つを用いた。これら 2 つの量の経日変化を図 4-33、34 に示す。

チクソトロピー量 1 は貯留温度によらずほぼ同じ傾向であり、汚泥の腐敗の進行につれ低下した。これは汚泥濃度の減少が原因と考えられる。またチクソトロピー量 2 は、30℃ の方が多少大きく、また腐敗とともに漸減する傾向にあった。しかし、おおむねその値は 1.5 程度であり、4.1.2 における測定結果とほぼ同様であった。

これらの結果から、チクソトロピーについても粘度と同様に、腐敗に伴う変化は濃度の低下に帰することができるものと考えられる。

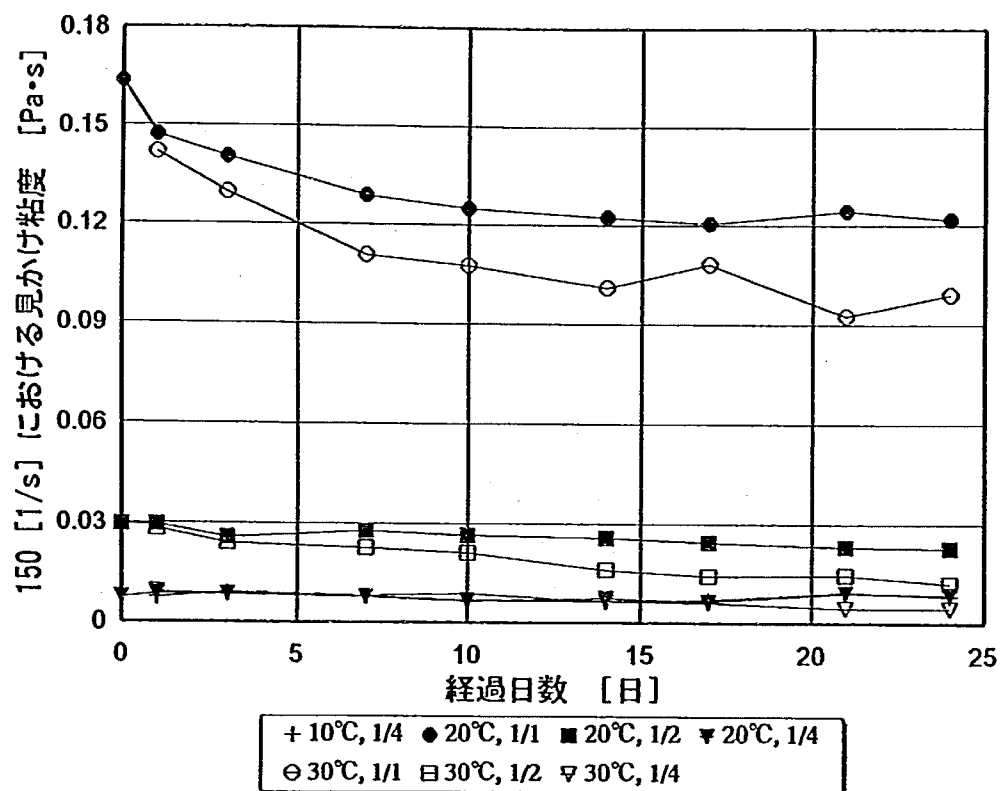


図4-29 見かけ粘度の経日変化

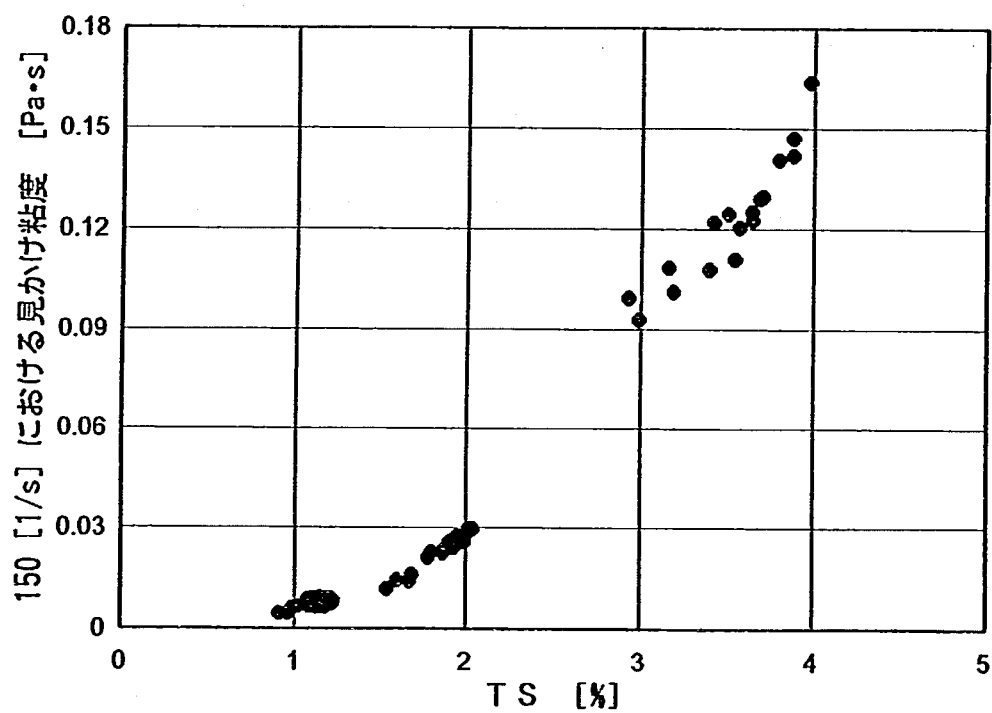


図4-30 TSと見かけ粘度の関係

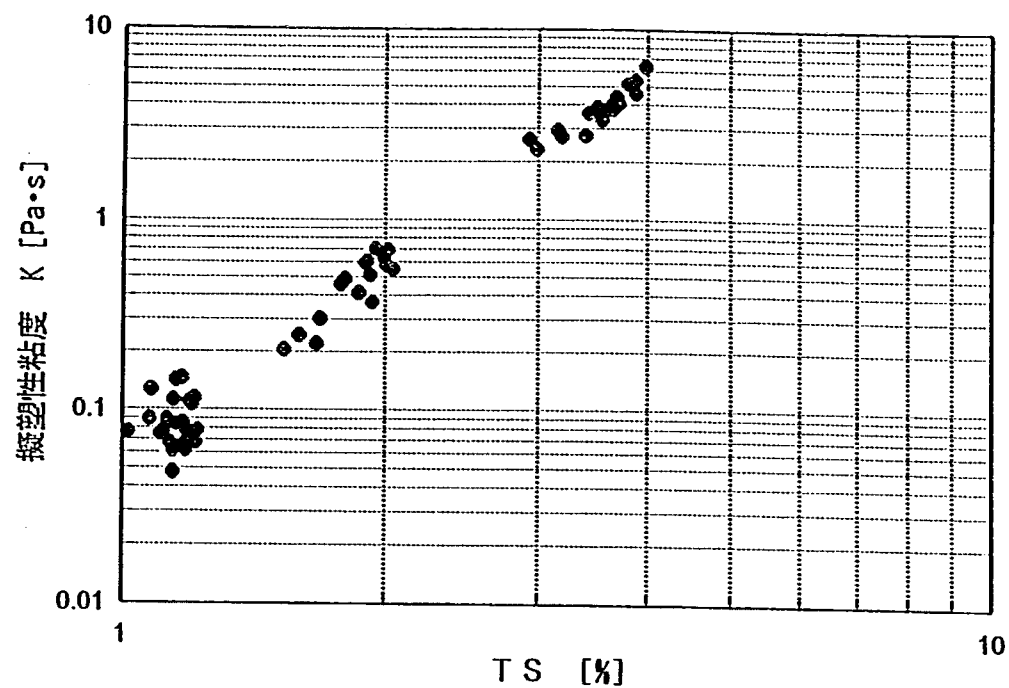


図 4-31 TSと擬塑性粘度の関係

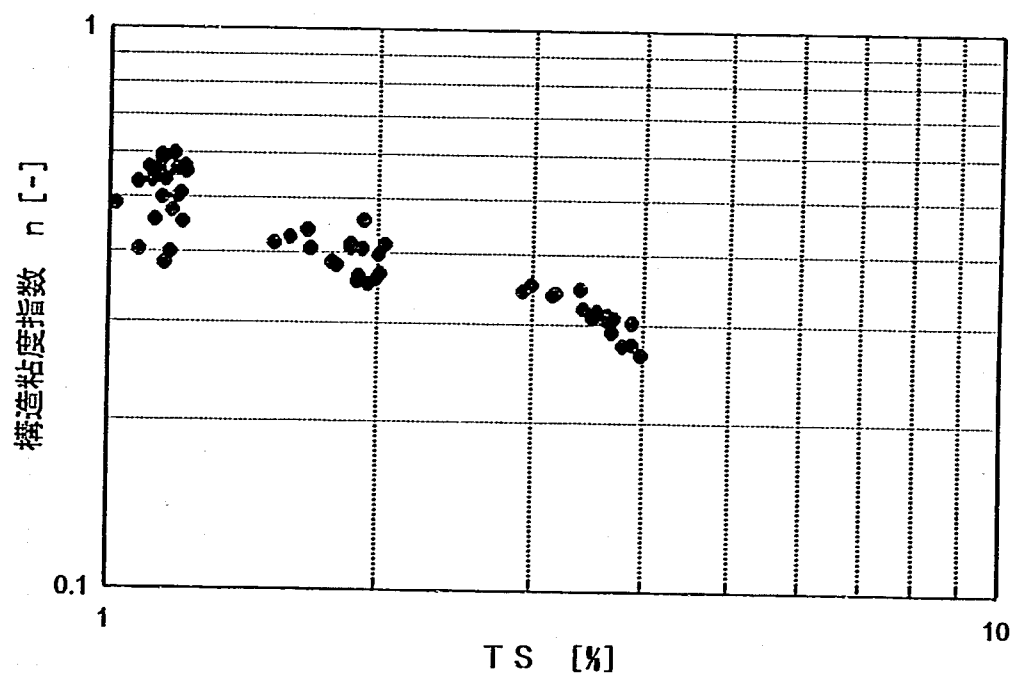


図 4-32 TSと構造粘度指数の関係

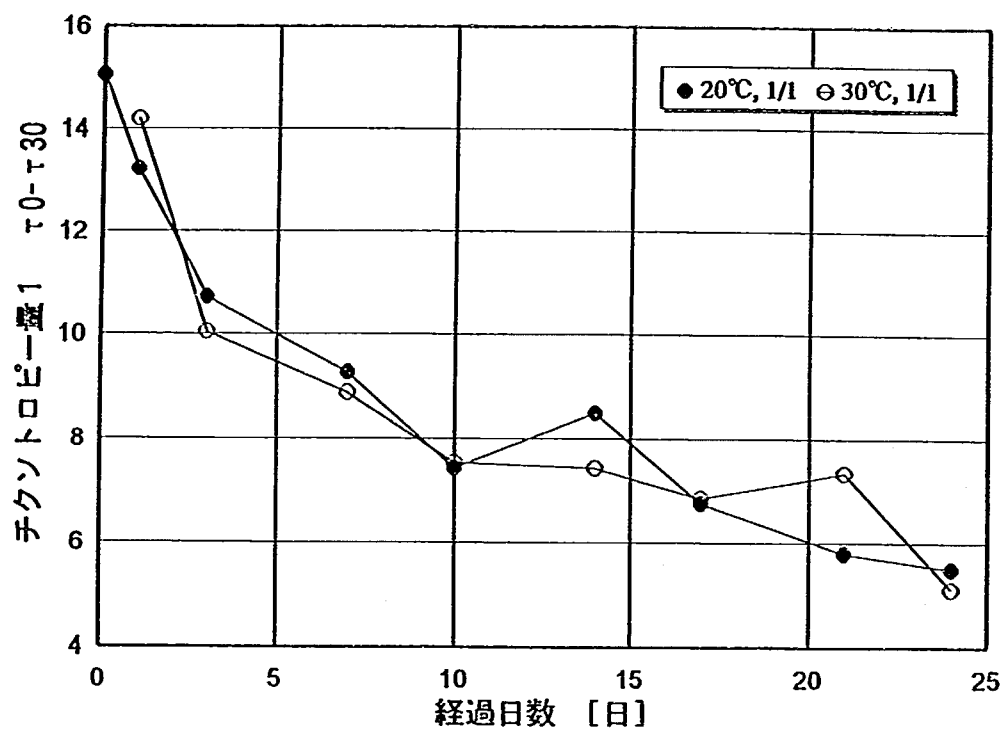


図4-33 チクソトロピー量1の比重の経日変化

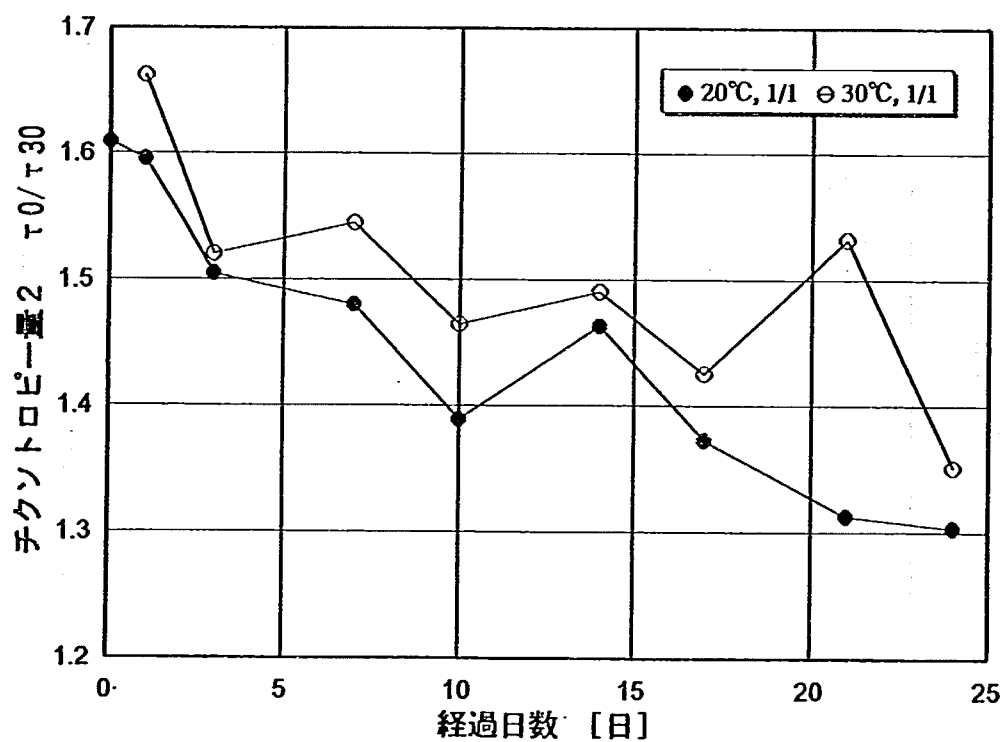


図4-34 チクソトロピー量2の比重の経日変化

4. 4 汚泥貯留と流動特性(2) —チクソトロピーの回復過程—

4. 4. 1 目的と実験方法

これまでチクソトロピー性がある汚泥の場合でも、輸送時に流動化することを考慮して平衡流動時の流動曲線を測定してレオロジー定数を求める方法について考えてきた。しかし、実際に送泥システムを設計する際には、チクソトロピーに相当する分を安全率として考慮しなければならない。

層流域の送泥管の圧力損失は管壁の応力により生じるため、平衡流動時応力に対する初期応力の比である τ_0 / τ_{30} (チクソトロピー量 2) は、そのまま安全率としても用いることができる。しかし、輸送前には全く流動化されていない汚泥であっても、輸送されるに従って徐々に流動化し、着泥時には平衡流動状態に達していると考えられるから、送泥管の全区間にわたってこの安全率を用いる必要はない。Rose-Innes ら²⁹⁾ は、南アフリカの 4 処理場の余剰汚泥を用いて流動曲線を測定した結果、チクソトロピー量 2 に相当するものとして 1.5 という値をあげ、このとき送泥管全体の圧力損失に対する安全率としては 1.25 程度見積もれば適当であるとしている。

しかし、何らかの理由により管内に汚泥を長時間貯留する必要がある場合、もし輸送により一度流動化した汚泥が管内で静置されたことにより元の粘度の高い状態に回復するとすれば、送泥再開時には送泥管の全区間が流動化していない汚泥で占められることになる。このような仮定が成り立つのであれば、上述のような考え方は適用できず、あらかじめ安全率を大きくとらなければならない。

そこで本節では、汚泥のチクソトロピーという性質のうちこれまであまり注目されてこなかった部分、すなわち流動化した汚泥の粘度の回復過程について検討を行った。粘度の回復について言及している文献は少ないが、先ほどの Rose-Innes ら²⁹⁾ は、流動曲線の測定により一度流動化した余剰汚泥は、20 時間静置しても元の粘度までは回復しなかったと報告している。

■ 実験方法

供試汚泥には SA 処理場の余剰濃縮汚泥を 7 通りに濃度調整したものを用いた。これらの供試汚泥が十分に流動化するまで卓上攪拌機で攪拌し、その後 20℃で静置して見かけ粘度の経時変化を測定した。また汚泥を貯留した場合には腐敗の影響も無視できないため、無攪拌の供試汚泥も同じ条件化で静置貯留してその流動特性の経時変化を測定した。なお経時変化は Rose-Innes らの場合より長く、48 時間後まで測定を行った。

攪拌後汚泥の見かけ粘度の測定方法は図 3-15(1)に準じ、 $D_{\max} = 150$, $t = 3$ として行った。無攪拌の汚泥については図 3-15(2)に準じた。センサーシステムには MV1 を用いた。また回転粘度計にて測定した試料はその都度廃棄した。

使用した卓上攪拌機を写真 4-2 に示す。攪拌時には、粘度計において $D = 150$ [1/s] で 30 分間ホールドした場合と同程度の流動化が生じるように、回転数と回転時間を調節した。

実験開始時の各ケースの汚泥性状について表 4-6 に示す。

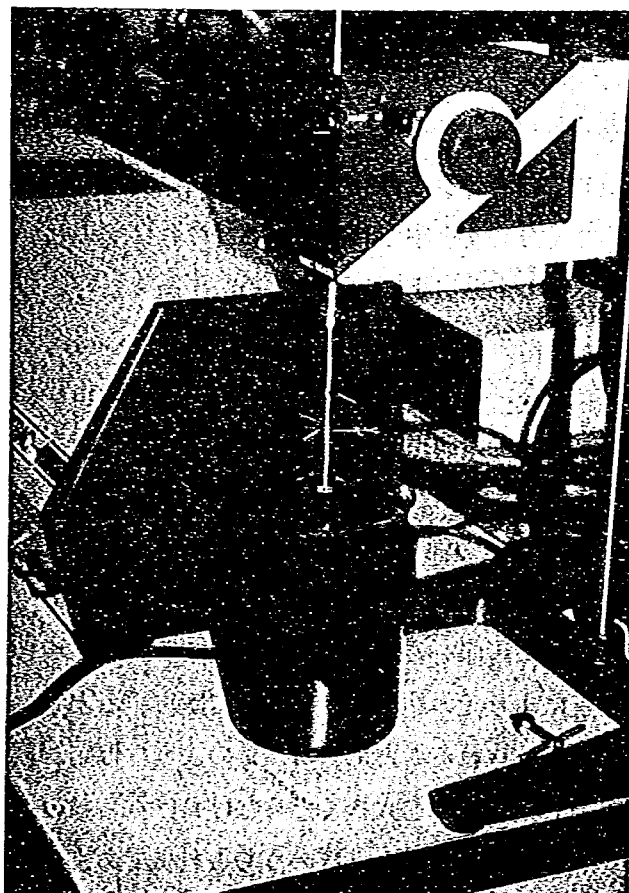


写真 4-2 実験に使用した卓上攪拌機

表 4-6 供試汚泥の性状

Run No.	Sample I.D.	TS [%]	VS [%]	比重 [-]	体積 平均径 [μm]	Non-N. *	Thix. **
1	2- 8/8	3.8	77	1.013	28.2	○	○
2	2- 7/8	3.3	77	1.011	29.9	○	○
3	2- conc.	4.6	78	1.015	29.7	○	○
4	3- 10/10	4.1	74	1.015	28.1	○	○
5	3- 9/10	3.7	75	1.012	28.0	○	○
6	3- 8/10	3.3	74	1.011	26.6	○	○
7	3- 7/10	2.8	74	1.009	28.5	○	○

* 非ニュートン性をもつサンプルに○
 ** チクソトロピー性のあるサンプルには○

4.4.2 実験結果

攪拌機による流動化の程度と粘度計による流動化の程度を、 $D = 150$ [1/s] における見かけ粘度によって比較したものが図4-35である。両者はよく一致しており、このことから攪拌直後の供試汚泥は、粘度計において $D = 150$ [1/s] で 30分間ホールドしたのと同じ流動化のレベルにあったと考えることができる。また、攪拌の前後で粒子径を測定し比較したところ、攪拌機による攪拌は粘度計による測定と同様に、粒子径にはほとんど影響しないことが確認された。

同一条件で静置貯留した無攪拌の供試汚泥について、実験開始時、24時間後、48時間後のチクソトロピー性を、これまでと同じく $\tau_0 - \tau_{30}$ (チクソトロピー量1), τ_0 / τ_{30} (チクソトロピー量2) の2つを用いて評価した。実験開始時の TS と各チクソトロピー量の関係を図4-36, 37に示したが、TS が大きいほど各チクソトロピー量も大きいという傾向があった。また供試汚泥が同一処理場の余剰濃縮汚泥ということもあり、チクソトロピー量2は図4-34とほぼ同じ範囲 (1.3~1.6) にあった。しかし、経過時間とチクソトロピー量の関係は明確ではなかった。

無攪拌の供試汚泥の τ_{30} に対応する見かけ粘度 ($D = 150$) について、実験開始時の値を1としたときの経時変化を図4-38に示す。これは前節で検討した腐敗の影響による粘度低下を表しており、図4-29に対応するものである。48時間後における値はおよそ 0.85~1 の範囲にあり、濃度が高いほど低下率が大きいという傾向が見られた。

これに対し、攪拌後の汚泥の見かけ粘度 ($D = 150$) について、同様に攪拌直後の値を1としたときの経時変化を図4-39に示す。見かけ粘度は静置されると徐々に回復し、攪拌後数時間から24時間で回復のピークを迎える。しかしその後は幾分減少し、48時間後の値はおよそ 0.95~1.1 の範囲にあった。

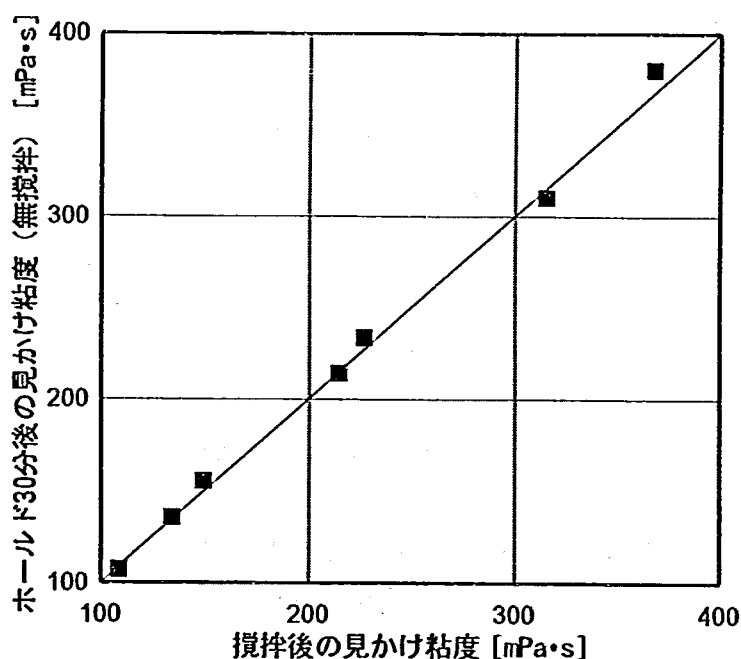


図4-35 実験開始時の流動状態の比較

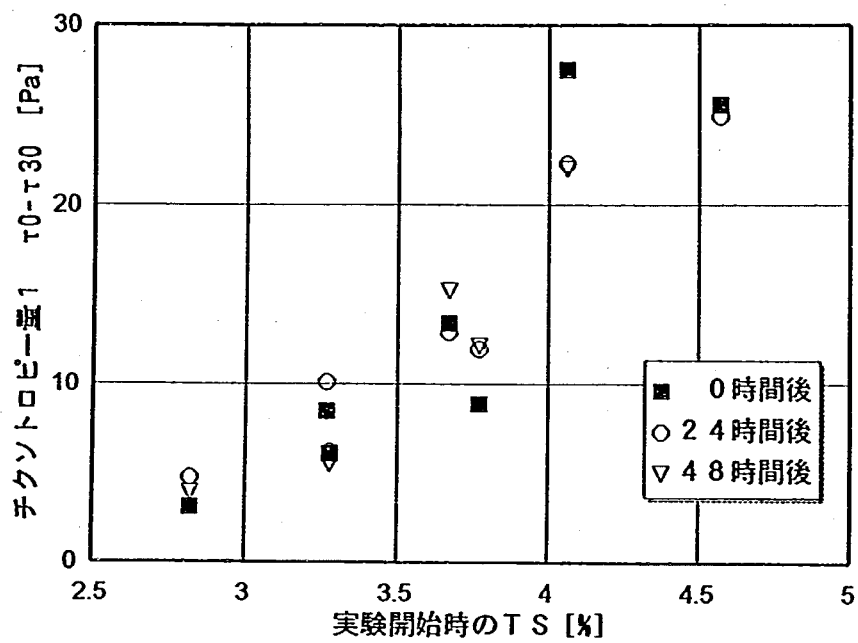


図 4-36 開始時TSとチクソトロピー量 1
(無攪拌の供試汚泥)

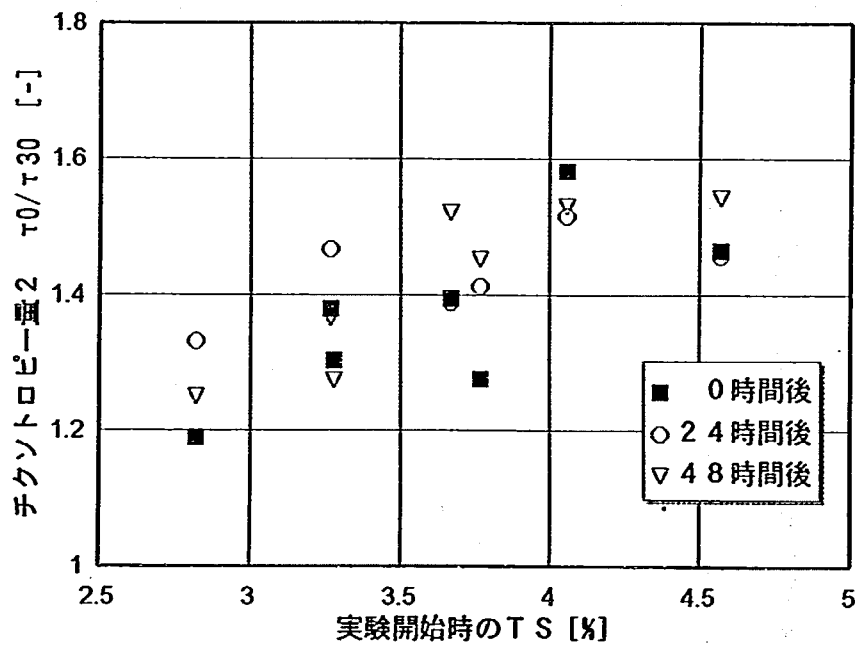


図 4-37 開始時TSとチクソトロピー量 2
(無攪拌の供試汚泥)

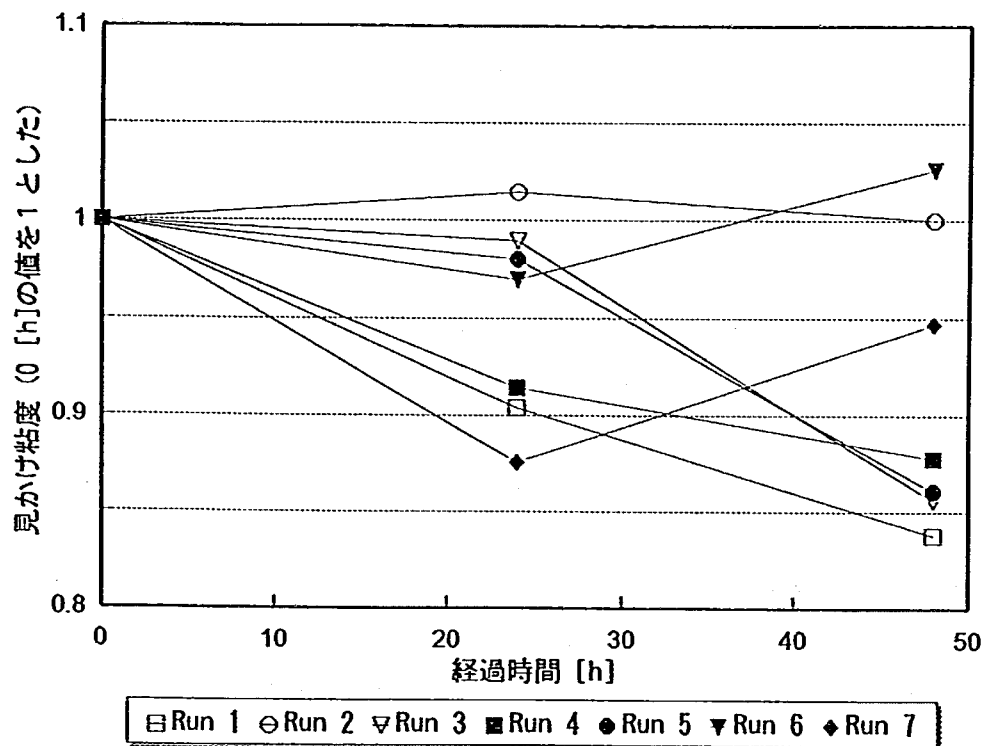


図4-38 見かけ粘度の経時変化 (無攪拌)
0 [h] におけるホールド後見かけ粘度を1とした場合

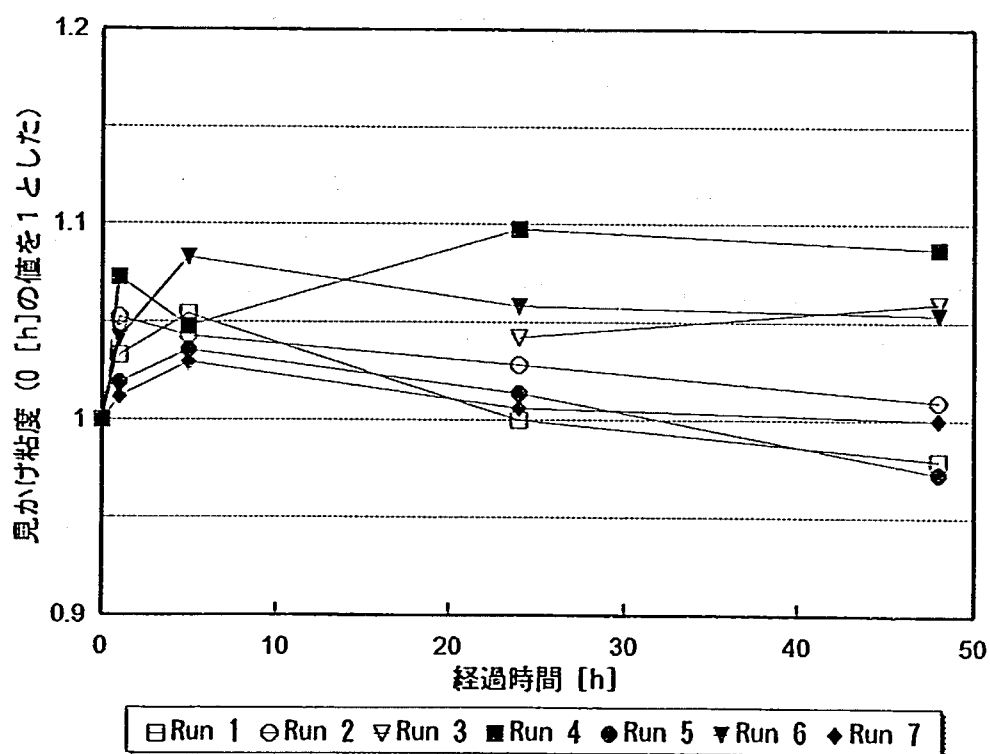


図4-39 見かけ粘度の経時変化 (無攪拌)
0 [h] における見かけ粘度を1とした場合

ここで留意しなければならないのは、攪拌後の汚泥はリピートにより見かけ粘度の測定を行っているという点である。リピート法の場合、静置により粘度が回復しても、徐々に回転数を上げて測定する間に再び汚泥が流動化するため、実際に回復した粘度より小さめの評価となっていることが考えられる。よって本来なら、攪拌後の汚泥もホールドにて測定し τ_0 に対応する見かけ粘度にて評価するのが適当であるが、実験条件の都合上、今回はリピートを選択している。

一旦回復した粘度が再び低下するのは、腐敗の進行に伴う粘度低下が原因と考えられる。図4-39の測定結果は、チクソトロピーの回復過程と腐敗による粘度低下という2つの要素が足し合わされたものと考えられるため、このグラフより図4-38の腐敗による影響の成分を取り去ってやれば、純粋なチクソトロピーの回復過程のみのグラフを得ることができる。この考え方に基づいて図4-39を補正したものが図4-40である。多くの場合、静置時間とともに粘度が回復し、48時間後の見かけ粘度の値はおよそ1.0~1.2の範囲にあった。

攪拌により流動化した汚泥が静置により攪拌前の粘度まで回復するとした場合、攪拌直後の見かけ粘度を1として表した相対的な見かけ粘度の値はチクソトロピー量2の値と等しくなる。そこで、チクソトロピー量2と、補正前後の見かけ粘度の最大回復値を比較して、静置による見かけ粘度の回復率について検討した(図4-41)。チクソトロピー量2と見かけ粘度最大回復値はともにTSが大きいほど大きい傾向にあり、両者の比を持って回復率を定義するならばその値は補正前でおおよそ15%、補正後でおおよそ30~50%であった。よってチクソトロピー性により粘度はある程度まで回復することが理解できるが、その回復には時間を要し、また腐敗による粘度の低下によって相殺されてしまうため、実際の測定においては粘度の回復現象として現れてこないものと考えられる。

以上の結果より、実質的には一度流動化した下水汚泥は静置してもほとんど粘度が回復しないものと考えることができる。よって、チクソトロピーとは本来粘度の低下と回復の両方向の性質を指す用語であるが、送泥システムを設計する際には粘度が低下する方向だけを考慮すればよい。

チクソトロピー量から送泥管の圧力損失の安全率を決定する方法は、前述のRose-Innesらのような方法で正しいと考えられるが、その値については管路輸送の面からさらに検討が必要である。ただし、第4章におけるいくつかの実験において、チクソトロピー量2の測定値は概ね1.3~1.6の範囲にあったため、最大でも1.5程度の安全率を見積もれば十分であると考えられる。

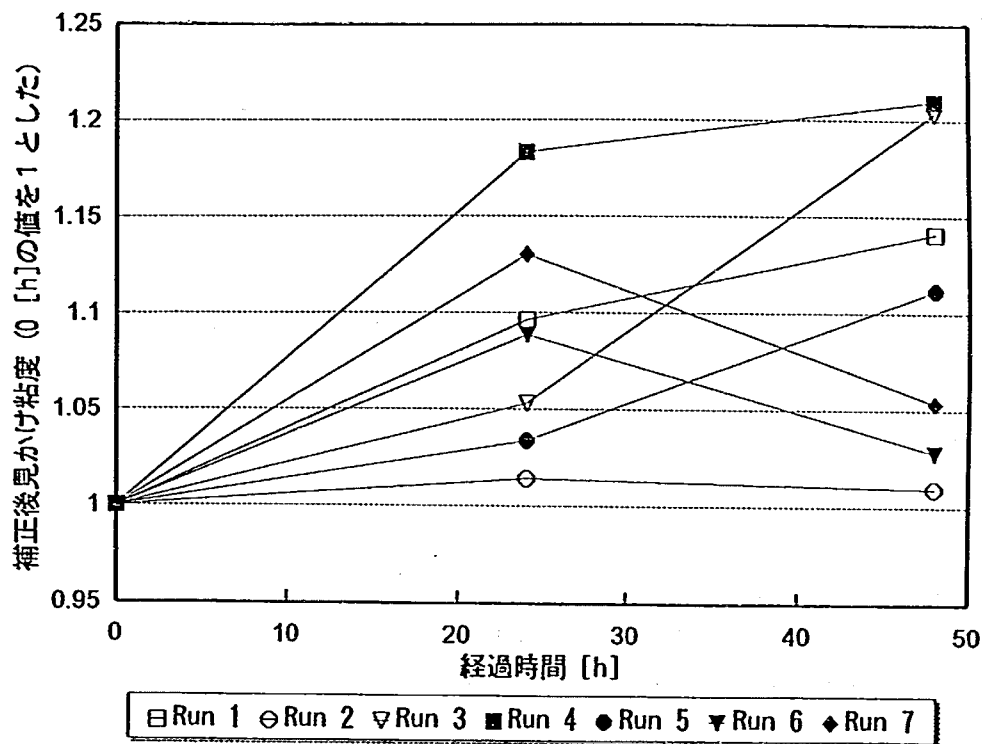


図4-40 見かけ粘度の経時変化 (攪拌後、補正あり)
0 [h]における見かけ粘度を1とし、かつ腐敗に対して補正した場合

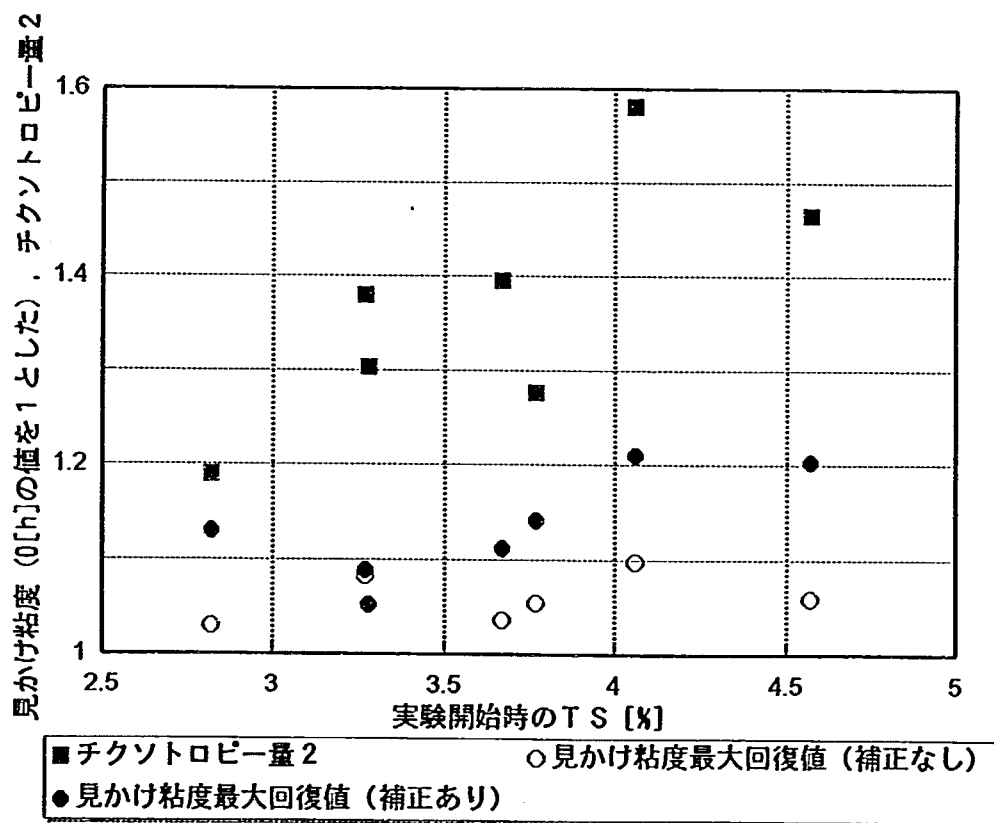


図4-41 開始時TSと粘度の回復量
(チクソトロピー量2との比較)

4.4.3 その他

本調査の成果とは直接には関係がないが、粘度の回復に関しては以下のようなエピソードがあった。

チクソトロピー性のある汚泥を試料として図3-15に準じて流動特性を測定した場合、粘度計内の試料は平衡流動状態に達しており、同一試料に対して再度測定を行えば、最初の測定結果と同じ流動曲線が得られる。ところが測定後に一度外円筒を粘度計からはずし、外円筒内の試料をよく攪拌してから再度測定すると粘度が回復するという現象が観察された。

当初、回転粘度計ギャップ内における粒子の配向化がチクソトロピーの主因であり、外円筒をはずし試料を乱雑に攪拌することによりその並びが崩れ粘度が回復するものと考えた。しかし、これは単に装置と測定法上の問題であって、チクソトロピーの原因とは全く無関係であることが明らかとなった。

つまりセンサーシステム MV1 の場合、サンプル必要量は 40cm^3 であるのに対し、実際の両円筒間（すなわち測定に直接関与する部分）の容積は約 8cm^3 であり、サンプル量の $1/5$ 程度でしかない。よって外円筒を粘度計からはずして試料を攪拌すると、これまで外円筒の底面にあって流動変形を受けていない試料が新たにギャップ内に入ってくるために、あたかも粘度が回復したかのように見えたと考えられる。

チクソトロピーにより粘度低下が起こる原因については、懸濁液の内部構造にまで関わる非常に難解な問題であるため、本調査においては全く触れていない。

5. まとめと今後の課題

本調査では、管路輸送時の圧力損失の予測を対象とした下水汚泥の流動特性の把握を目的として、共軸円筒型回転粘度計を用いた固形物濃度 6 % 程度までの汚泥の粘度測定を実施し、粗大粒子やチクソトロピー性を考慮した粘度測定方法、非ニュートン流動モデルの適用、温度の影響、貯留の影響、チクソトロピーの影響等について検討を行った。

以下に本調査で得られた成果の概要をまとめる。

1. 概 説

- (1). 送泥技術の概要、汚泥集約処理の現状について総括し、液状汚泥の輸送について管路輸送と車両輸送の比較を行った。汚泥管路輸送の実態調査を実施した。
- (2). 既存の研究における汚泥輸送実験の概要、流動特性調査の概要、チクソトロピーの扱いについて総括し、共軸円筒型回転粘度計の測定原理についてまとめた。

2. 非ニュートン流動モデルの適用

- (1). 流動曲線の形状および管路輸送の観点から検討した結果、下水汚泥の流動特性を表現するモデルとしては擬塑性流動モデルが適していると判断された。

3. 回転粘度計を用いた粘度測定方法の検討

- (1). 汚泥が粗大粒子を含む場合にギャップサイズを広くとって測定すると、見かけ粘度を高めに評価されることを実験と計算により明らかにした。ギャップサイズの広いセンサーシステムの使用をできる限り避けるためには、ふるい分けの利用が効果的である。
- (2). ギャップサイズを広くとった場合の測定結果の補正方法について、粘度計内試料の流動状態をビデオカメラで実測する方法および代表粘度を用いる方法の 2 つを検討した。代表粘度を用いる方法が簡便で実用的である。
- (3). チクソトロピー性をもつ汚泥の場合、粘度測定時の最大速度勾配 $D_{\max}$ により流動化の程度が決定され、得られる流動曲線の形状も異なってくる。よって管路輸送時に汚泥がどの程度流動化するかを考慮して測定時の $D_{\max}$ を決定する必要がある。
- (4). チクソトロピー量と平衡流動状態の流動曲線を同時に測定する方法として図 3-15 のような回転数制御方法を提案した。このとき $D_{\max}$ の値を $8V/d$ に、ホールド時間を 30 分に設定することが妥当であると判断した。

4. 流動特性に影響を及ぼす各因子についての検討

- (1). 汚泥が高濃度の場合、温度の変化、および腐敗による溶解性成分の増加により溶媒部分の粘度が変動しても、汚泥全体の粘度に対する影響は小さい。
- (2). 腐敗に伴う流動特性の変化は、固形物濃度の低下にその原因を帰することができる。また腐敗に伴う粒子径の変化は観察されなかった。
- (3). チクソトロピーの評価指標として、チクソトロピー量1および2を定義した。
- (4). チクソトロピー量1は濃度の増加に伴い大きくなる。チクソトロピー量2は濃度により多少変動するが概ね 1.3~1.6 の範囲内にあり、送泥管の圧力損失に対する安全率は最大でも 1.5 程度見込めば十分であると考えられる。
- (5). チクソトロピー性により、一度流動化した汚泥の粘度は静置することによりある程度まで回復するが、回復には時間を要し、その間に汚泥が腐敗し粘度が低下するため、粘度の回復現象は表面的には現れてこない。見かけの回復率は最大で約 15% 程度であった。
- (6). ホモジナイザーを用いた実験により粒子径の影響について検討した。粒子径を低下させても見かけ粘度に大きな変化は見られなかった。しかし管路輸送実験の結果からは、粒子径が低下すると見かけ粘度も低下するという結論が得られており、今後さらに検討する必要がある。

これらの成果より、汚泥が高濃度になるほど溶媒部分の影響は小さくなることが明らかとなった。よって、汚泥の粘度を表す指標としては溶解成分も含んだ濃度 (TS) よりも、浮遊物質 (SS) や粒子沈降率から求められる体積濃度を用いる方が適当と考えられる。

そこで、現在は体積濃度を用いてレオロジー定数を整理した場合にどのような結果が得られるかについて調査を進めているところである⁵⁰⁾。同時に、粒子径の変化がどの程度流動特性に影響するかを、汚泥以外の懸濁液も用いながら検討していく必要がある。また最近では脱水汚泥の管路輸送例も増加していることから、本調査で対象としなかったさらに高濃度の汚泥についても、その流動特性を調査していく必要があると考えられる。

最終的には、簡便な流動特性の評価方法を確立し、別に進めている送泥管の圧力損失の検討結果を総合し、効率的な送泥計画を策定するための技術指針をとりまとめることが目標である。

6. 謝 辞

本調査の実施にあたり、以下の部外研究員の方々にご協力いただきました。

平成4年度：笠井淳史氏（小野田ケミコ株式会社環境部）

平成5年度：中村伸二氏（福岡市下水道局）

平成6年度：加藤一幸氏（岐阜県土木部）

ここに記して改めて感謝の意を表したいと思います。皆さん大変ご苦労さまでした。

また実験棟の寺元克子嬢には、汚泥性状の分析等の作業をお願いしました。ご協力どうもありがとうございました。

最後になりましたが、供試汚泥の採取や管路輸送実態調査にご協力いただいた各処理場の関係各位に感謝いたします。

7. 参考文献

- 1). Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal, Chap. 14 "Transportation", EPA 625/1-79-011 (1979).
- 2). 岡田和男 編著：下水汚泥の処理・処分，第9章 輸送，環境公害新聞社 (1983).
- 3). 福井経一：広域下水汚泥処理システムの解析に関する研究，京都大学学位論文 (1993).
- 4). 下水道設備の実態調査報告 -ポンプ場及び処理場の各種搬送設備-，下水道協会誌，Vol. 30, No. 361, pp. 75-79 (1993).
- 5). 宮江伸一，小野徳哉：粘稠性物質の管路抵抗低減に関する研究，混相流シンポジウム '91 講演論文集，pp. 171-174 (1991, 7).
- 6). 福田和雄：名古屋市における脱水汚泥のハンドリング，下水道協会誌，Vol. 31, No. 378, pp. 20-24 (1994).
- 7). 下水汚泥処理総合計画策定マニュアル，日本下水道協会 (1991).
- 8). 三品文雄，地田修一：パイプ輸送による汚泥の変性及び脱水性に関する一考察，下水道協会誌，Vol. 25, No. 289, pp. 51-56 (1988).
- 9). 佐藤和明：汚泥集約処理の課題と方向，下水道協会誌，Vol. 28, No. 326, pp. 6-9 (1991).
- 10). 松原 誠，中村伸二，渡部春樹：下水汚泥管路輸送における圧力損失予測手法の検討，PPM-1994/2, pp. 15-20 (1994).
- 11). 渡部春樹：下水汚泥処理処分・利用の傾向と今後の方向性，PPM-1994/8, pp. 60-66 (1994).
- 12). 全県域汚水適正処理構想策定マニュアル（案），日本下水道協会 (1993).
- 13). 松尾友矩 他 訳：水質環境工学 -下水の処理・処分・再利用-，12. 4. 3. 損失水頭の決定，技報堂出版 (1993). [原著：Metcalf and Eddy, Inc., Wastewater Engineering, 3rd Edition, (1991).]
- 14). 下水道施設計画・設計指針と解説 -1994年版-，日本下水道協会 (1994).
- 15). 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).
- 16). 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).
- 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). 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，ダクトイル鉄管，No. 52, pp. 29-47 (1992).
- 19). Vesilind, P. A. : Treatment and Disposal of Wastewater Sludges, Chap. 4 "Sludge Pumping", Ann Arbor Science (1980).
- 20). Annen, G. : Zur Berechnung der Reibungsverluste von Klarschlamm, GWF, 104 Jahrg., Heft 12, pp. 342-346 (1963).
- 21). 水理公式集 -昭和60年版-，土木学会 (1985).

- 22). Chou, T. L. : Resistance of sewage sludge to flow in pipes, Proc. ASCE, SA5, Paper 1780 (1958).
- 23). 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).
- 24). Dick, R. I. and Ewing, B. B. : The rheology of activated sludge, Journal WPCF, Vol. 39, No. 4, pp. 543-560 (1967).
- 25). 吉田信之, 荻野悦生, 吉井信夫 : 下水汚泥の流動性に関する検討, 下水道協会誌, Vol. 9, No. 101, pp. 16-23 (1972).
- 26). 高田 蔵, 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).
- 27). 高田 蔵, 川島 晋 : 下水汚泥の流動特性, 下水道協会誌, Vol. 13, No. 146, pp. 54-59 (1976).
- 28). Mulbarger, M. C., Copas, S. R., Kordic, J. R. and Cash, F. M. : Pipeline friction losses for wastewater sludges, Journal WPCF, Vol. 53, No. 8, pp. 1303-1313 (1981).
- 29). Ross-Innes, I. H. and Nossel S. : The rheology and pumping of thickened activated sludge, Wat. Sci. Tech. Vol. 15, Capetown, pp. 59-76 (1983).
- 30). Carthew, G. A., Goehring, 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).
- 31). 岩森暁如, 安藤明宏, 遠藤郁夫 : 下水汚泥の摩擦損失係数に関する実験的研究, 土木学会第49回年次学術講演会, II-454 (1994).
- 32). 下水道ハンドブック, 建設産業調査会 (1982).
- 33). 川田裕郎 : 計量管理技術双書(1) 粘度, コロナ社 (1958).
- 34). 後藤康平, 平井西夫, 花井哲也 : レオロジーとその応用, 共立出版 (1962).
- 35). 山田嘉明, 柳澤延房 訳 : M. ライター 改訂レオロジーの基礎理論, コロナ社 (1962).
- 36). 松原 誠, 渡部春樹, 佐藤和明, 笠井淳史 : 高濃度下水汚泥の管路輸送特性に関する研究, 第30回下水道研究発表会講演集, pp. 695-697 (1993).
- 37). 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).
- 38). 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, (投稿中) .
- 39). 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).
- 40). Behn, V. C. : Derivation of flow equations for sewage sludges, Proc. ASCE, SA6, pp. 59-81 (1960).
- 41). 機械工学便覧 A5 流体力学, 第21章 非ニュートン流体, 日本機械学会編 (1986).
- 42). 下水試験方法 -1984年版-, 日本下水道協会 (1984).
- 43). 笠井淳史, 松原 誠, 渡部春樹 : 回転粘度計による汚泥の粘度の測定, 土木学会第49回年次学術講演会, II-455 (1994).

- 44). 中村伸二, 松原 誠, 渡部春樹: 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, pp. 577-579 (1994).
- 45). 村田二郎, 菊川浩治: まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案, 土木学会論文報告集, No. 284, pp. 117-126 (1979).
- 46). 大垣真一郎, 松尾友矩: 高濃度懸濁液の流動特性について, 土木学会論文報告集, No. 210, pp. 21-32 (1973).
- 47). 川崎市下水道局: 汚泥圧送による汚泥変性及び汚泥処理施設への影響調査報告書 (1989).
- 48). 横浜市下水道局, 日本下水道処理施設管理業協会: 送泥汚泥気質等基礎調査・統計業務委託報告書 (平成元年度) (1990).
- 49). 東京都下水道局技術調査年報, 平成4年3月: 3-1 送泥に伴う汚泥性状の変化の実態及び腐敗抑制のための調査 (1992).
- 50). 加藤一幸, 松原 誠, 渡部春樹: 下水汚泥の流動特性について, 第32回下水道研究発表会講演集, (投稿中).
- 51). 蓑輪善蔵: 計量管理技術双書(8) 密度および濃度, コロナ社 (1959).
- 52). 岡田和男 編著: 下水汚泥の処理・処分, 第3章 汚泥発生量とその性状, 環境公害新聞社 (1983).

付録（A）関連するいくつかの調査結果について

A1. 汚泥比重の測定方法

A2. 粒子径の測定方法

A 1 汚泥比重の測定方法

送泥時の圧力損失は擬塑性流体のレイノルズ数 Re_p と密接な関係がある³¹⁾。 Re_p は、送泥管の内径、送泥流速、汚泥密度、およびレオロジー定数 k 、 n の関数として表される。これらのうち、汚泥側の要素は密度とレオロジー定数である。ここでは汚泥密度を求めるために必要な比重の測定方法について検討する。

当初は、下水試験方法の第5章第5節の「流動しにくい試料の測定」を参考として、次のような方法により比重を測定した。

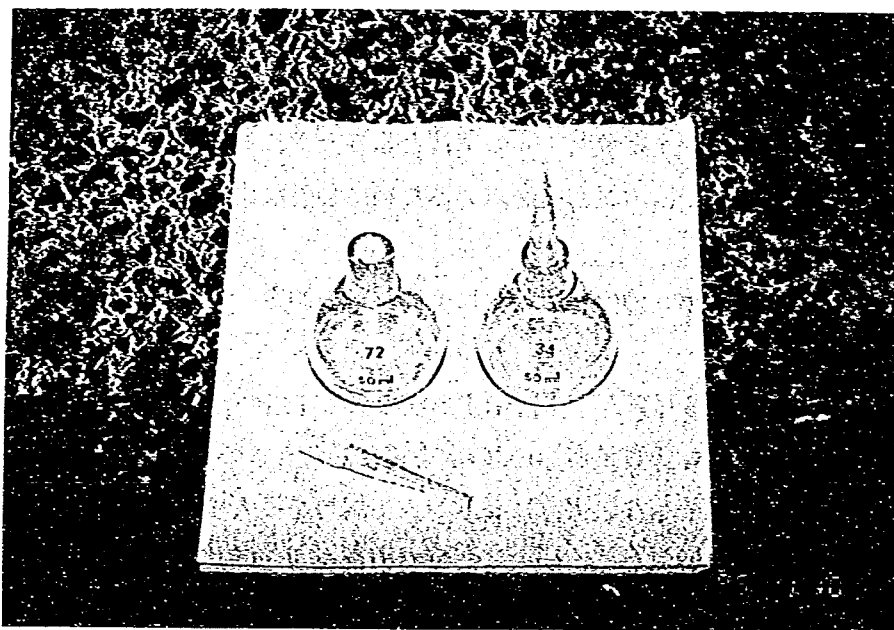
- ・比重びん (pycnometer) は写真A-1に示す形状のものをを用いた。呼び容積は 50ml である。
- ・比重びんはあらかじめ乾燥質量と 20℃の水を満たしたときの質量を測定しておく。
- ・すり合わせに汚泥が付着しないようにシリンジで試料を投入する。
- ・汚泥は流動性に乏しく脱気しにくいので、試料の量を 20ml 程度とし残りを水で満たす。
- ・測定時の試料および水の温度を 20℃に調整する。

この方法により同一汚泥を濃度調整して測定した結果が図A-1であるが、データにばらつきが大きく、回帰直線も濃度0のときに比重1を通らず、比重が正確に測定されなかったことを表している。これは温度管理と脱気が不十分であったことが原因と考えられた。

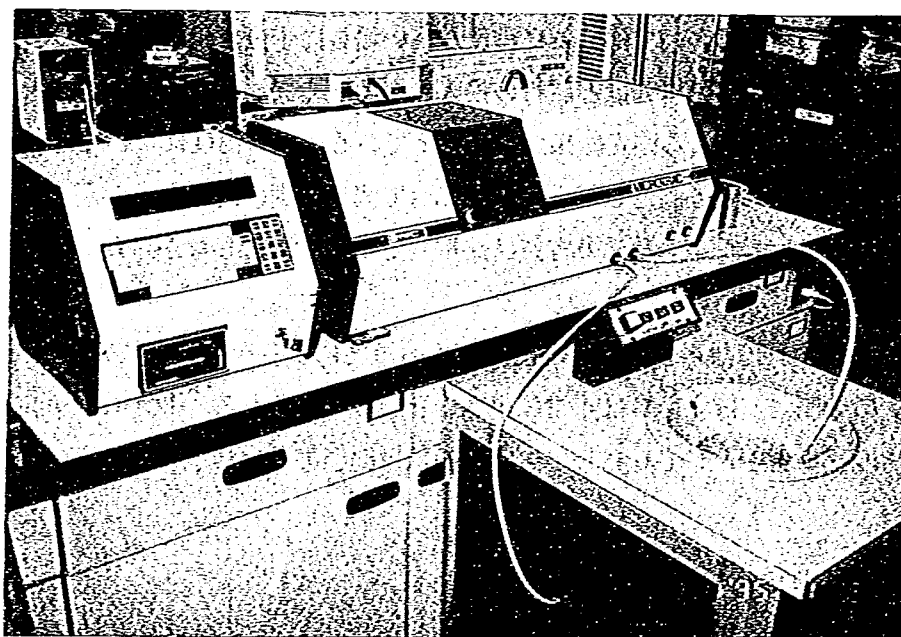
比重測定の重要な因子である温度⁵¹⁾については、これを 20℃にコントロールしようとしたところに無理があり、逆に測定時の試料温度とその温度における水の密度を用いて、満水時の質量を換算する方法が精度が高いと考えられた。また脱気については、特に濃度が高い場合に十分な攪拌、脱気が行えない状況にあったため、試料量を固定せず高濃度の場合ほど試料の投入量を少なく (5ml 程度) することとした。

以上のような改良された方法による測定結果が図A-2である。試料温度については各質量を測定した後、比重びん内に小型温度計を挿入して測定した。前図と比べて測定精度の向上がうかがえる。また、煮沸による脱気の効果についても検討したが、煮沸の有無は比重測定結果に影響しなかった。

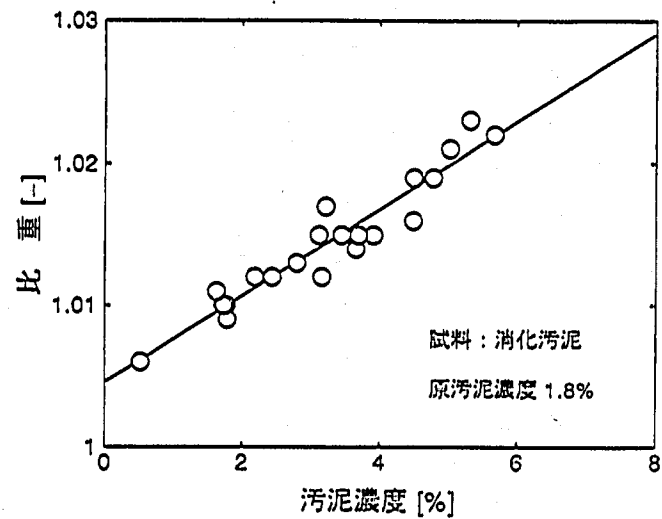
しかしここで留意しなければならないのは、汚泥比重の濃度による変動幅は数%程度であり⁵²⁾、比重の測定誤差が圧力損失の予測に及ぼす影響は非常に小さいということである。レオロジー定数の変動幅や測定誤差を考えれば、汚泥比重を1として計算しても実用的には問題のない程度であると考えられる。



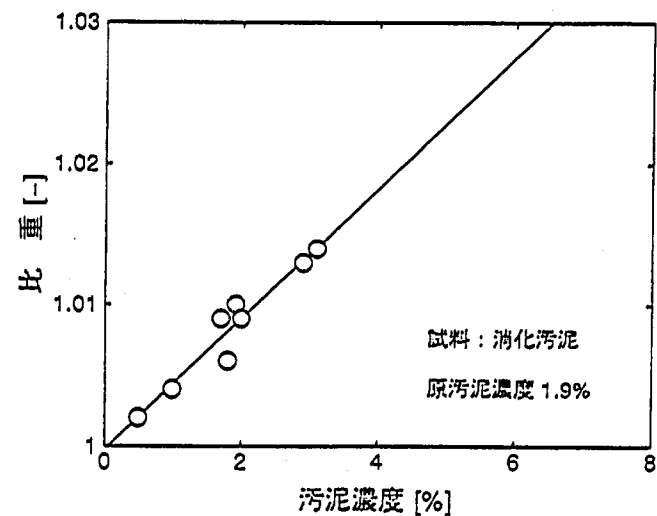
写真A-1 調査に使用した比重びん



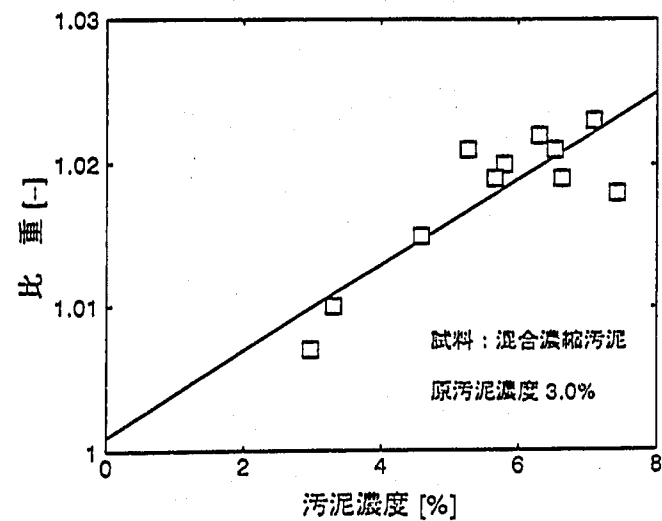
写真A-2 粒度分析計 (MICROTRAC SRA 7995-10)



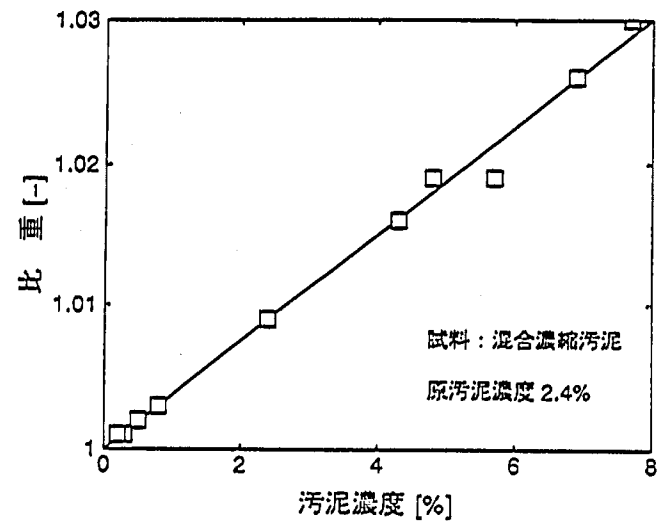
図A-1(1) 汚泥比重の測定例 (改良前)



図A-2(1) 汚泥比重の測定例 (改良後)



図A-1(2) 汚泥比重の測定例 (改良前)



図A-2(2) 汚泥比重の測定例 (改良後)

A 2 粒子径の測定方法

汚泥の粒子径（分布）はレーザー回折・散乱式粒度分析計 MICROTRAC SRA 7995-10（写真A-2）により測定した。本分析計はレーザー光源前方散乱光のフラウンホーファ回折を用いて体積ベースでの粒径分布を測定するもので、光源に He-Ne ガスレーザーを使用する。汚泥粒子は凝集状態にあるため、比較的大きなリサーキュレータを用いてこれを分散、浮遊させる。データの取り込み頻度は4回/秒であり、1.6～300 μ の範囲で15区分の粒径分布が測定される。

本分析法の特長は、迅速かつ確実に広い測定レンジにおける粒径分布が測定されることである。また投入試料の濃度や粒子形状の影響も小さい。本分析計による粒径分布測定の再現性について表A-1に示した。ここでは2種類の試料についてそれぞれ8回の測定を行っているが、体積平均径 d_{mv} および50%径 d_{50} の範囲は平均値 $\pm 5 \mu$ に収まる程度である。よって、 d_{mv} や d_{50} に10 μ 以上の差があれば、試料の粒径分布が異なると判断してよいものと考えられる。

逆に本分析法の欠点は、粒子の個数分布が測定できないこと（コールターカウンターでは可能）、凝集状態でのフロック径は測定できないこと、リサーキュレータ内で粒子が崩壊すること、測定レンジ以外の粒子については何ら情報が得られないこと等が挙げられる。

図A-3に粒径分布の連続測定に伴う粒子の崩壊の様子を示す。これは同一試料（濃縮汚泥）をリサーキュレータ内にいれたまま、サンプリング時間120秒で60回連続測定した結果であるが、リサーキュレータ内の渦流があまりにも強力であるため、最初の10回の測定で既に d_{50} は10 μ 、 d_{mv} は20 μ 程度小さくなっている。よって、正確を期するためには、試料を投入後手早く測定を開始することが重要となる。またサンプリング時間は経験的に75～90秒が適当と考えられた。

次に測定レンジについてであるが、本分析法の場合測定レンジ1.6～300 μ の範囲外にある粒子については全く測定ができない。特に汚泥の場合は粗大粒子を多く含むため、正確な分布を求めるためには300 μ より大きい部分について考慮する必要がある。1つの方法としてふるい分け（重量法）により300 μ 以上の粒子の割合を測定し、分析計による測定結果を補正するということが考えられる。図A-4にふるい分けにより粒径分布測定結果を補正した例を示す。粒子径の大きい生の初沈汚泥を含む場合には補正の効果が大きく現れている。より正確を期す場合にはふるい分けも何段階か行う必要がある。

しかし、小孔径のふるい(1mm以下)の場合、ふるいの目が短時間で閉塞しふるい分けが実用的でないこと、および本調査においては粒径分布を粒子崩壊の指標として用いており、必ずしも正確な粒径分布を必要としないことから、本文中の粒子径の値はふるい分けによる補正等はいっさい行っていない生の測定結果で表示している。粒子崩壊の指標として粒径分布を用いる場合、本分析計では前述の通り10 μ のオーダーに差があれば粒子が崩壊したものと判断することができる。

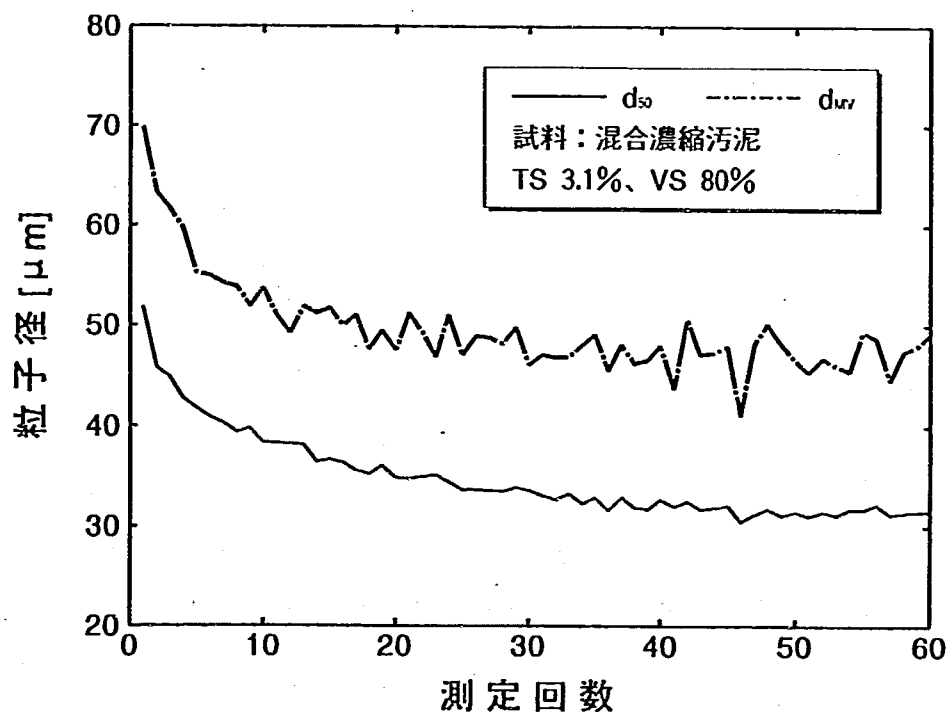
表A-1 粒径分布測定のリ現性

試料1：消化汚泥（霞ヶ浦浄化センター）

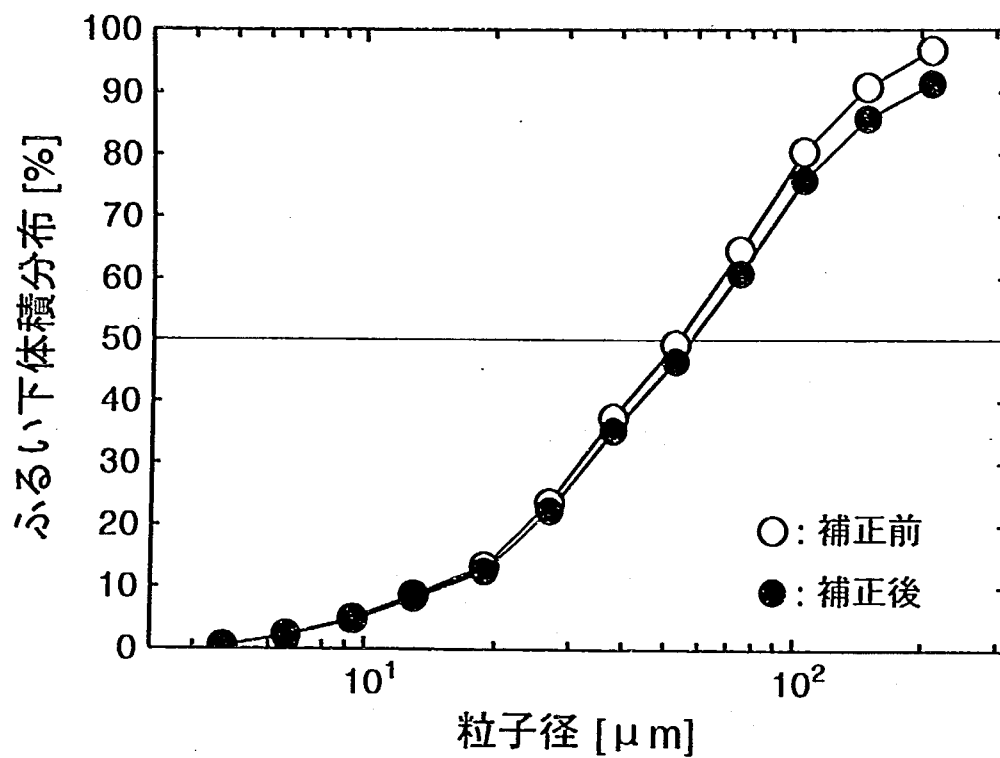
Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8	平均値
サンプリング時間 [s]	75	75	75	75	90	90	90	90	
体積平均径 d_{MV} [μ]	66.4	70.0	67.8	69.9	65.3	68.9	65.9	65.6	67.5
10%径 d_{10} [μ]	15.5	14.8	13.0	14.7	13.9	14.2	15.1	15.6	14.6
50%径 d_{50} [μ]	53.0	53.3	52.5	52.7	51.9	53.4	52.4	52.5	52.7
90%径 d_{90} [μ]	140.8	143.9	146.3	150.0	137.0	158.0	139.5	133.9	143.7

試料2：混合濃縮汚泥（霞ヶ浦浄化センター）

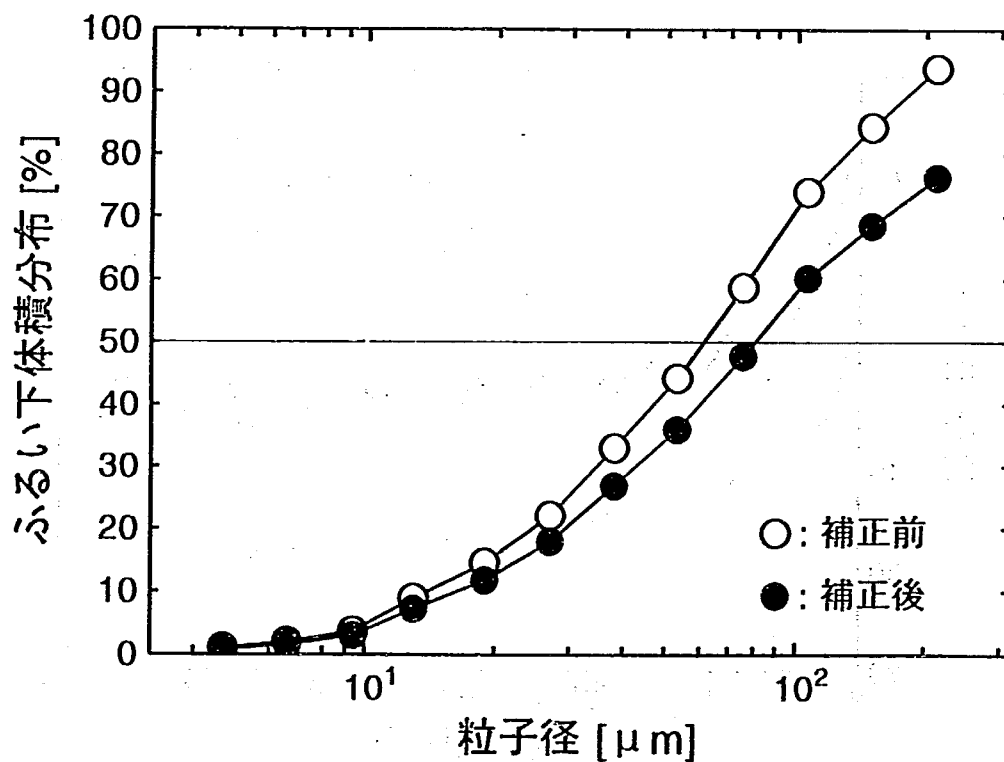
Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8	平均値
サンプリング時間 [s]	75	75	75	75	90	90	90	90	
体積平均径 d_{MV} [μ]	71.3	72.7	77.2	75.4	78.6	72.0	76.3	77.0	75.1
10%径 d_{10} [μ]	13.5	14.4	14.6	14.0	14.5	14.1	14.1	13.5	14.1
50%径 d_{50} [μ]	53.7	56.0	58.8	61.9	59.6	55.8	58.9	60.5	58.2
90%径 d_{90} [μ]	149.0	148.0	181.6	151.0	192.8	148.0	177.9	166.4	164.3



図A-3 粒径分布の連続測定に伴う粒子の崩壊



図A-4(1) 消化汚泥の粒径分布の測定例



図A-4(2) 混合濃縮汚泥の粒径分布の測定例

付録（B）参考資料

B1. 複数処理場有都市における汚泥集約処理の実施状況（平成4年度）

B2. 汚泥集約処理における液状汚泥輸送の実施状況（平成4年度）

B 1 複数処理場有都市における汚泥集約処理の実施状況（平成4年度）

都道府県	都市名	処理場数	集約処理	輸送手段			特記事項	No.
				液状汚泥		脱水汚泥		
				車両	管路			
北海道	札幌市	8 + 2	○	○		○	手稲焼却センター、厚別コンポストセンター 平成3年度まで、液状汚泥車両輸送 一部都市ゴミと混焼	1
	小樽市	2	○			○		2
	旭川市	2	○		○			3
	室蘭市	3	×					4
	釧路市	3	○	○				5
	帯広市	2	○	○			帯広市へ 特定環境 特定環境×2	6
	幕別町	1	○	○				7
	苫小牧市	3	○	○	○			8
	千歳市	2	○	○				9
	別海町	2	○	○				10
青森県	青森市	3	○	○			平成6年度まで	11
	八戸市	3	×					12
	五所川原	2	○	○				13
岩手県	盛岡市	2	×					14
	釜石市	2	○	○				15
宮城県	仙台市	2	○	○			特定環境	16
秋田県	秋田市	4	○	○			特定環境（金足、羽川）	17
山形県	山形市	2 + 1	○			○	前明石ヶヶ処理場	18
	鶴岡市	2	○	○				19
福島県	郡山市	2	○	○			特定環境 特定環境（平成5年度より集約開始）	20
	いわき市	3	×					21
	原町市	2	○	○				22
	富岡町	2	×					23
茨城県	水戸市	2	×				取手地方広域下水道組合 特定公共	24
	取手市	2	×					25
	鹿島町	2	×					26
栃木県	宇都宮市	2	○			○		27
	日光市	2	×					28
	小山市	2	○			○		29
群馬県	前橋市	3	○	○			流域桐生処理場	30
	高崎市	2	×					31
	桐生市	1 + 1	○	○				32
	太田市	2	×					33
	館林市	2	×				特定環境×2	34
	伊香保町	2	○		○			35
	中之条町	2	○	○				36
埼玉県	川越市	2	×				特定環境	37
	飯能市	2	○	○				38
	東松山市	2	○			○		39
千葉県	松戸市	2	×				特定公共	40
	市原市	3	○		○			41
	千葉市	6	○	○			特定公共	42
	柏市	2	×					43
東京都	東京区部	10 + 1	○		○	○	南部スラッジプラント 平成5年度めじろ台処理場廃止 2処理場間で双方向輸送（焼却）	44
	八王子市	2	○	○				45
	町田市	2	○			○		46

都道府県	都市名	処理場数	集約処理	輸送手段			特記事項	No.
				液状汚泥		脱水汚泥		
				車両	管路			
神奈川県	横浜市	11+2	○		○		北部汚泥処理センター、南部汚泥処理センター	47
	川崎市	4	○		○			48
	横須賀市	3	○		○			49
	藤沢市	2	×					50
	大和市	2	○			○		51
	箱根町	2	○			○		52
新潟県	新潟市	3	○	○			特定環境	53
	長岡市	2	○	○				54
	見附市	2	×					55
	能生町	2	○	○				56
	湯ノ谷村	2	○	○				57
富山県	高岡市	2	○			○	特定環境	58
	魚津市	2	○	○				59
石川県	金沢市	2	×				特定環境×2，衛生公社で集約	60
	松任市	2	×					61
	吉野谷村	2	×					62
福井県	福井市	2	×					63
	永平寺町	2	○	○				64
長野県	長野市	2	○			○	2処理場間で双方向輸送（焼却）	65
	松本市	2	×					66
岐阜県	岐阜市	3	○			○		67
	関市	2	○	○				68
静岡県	静岡市	3	○	○			平成4年度まで 特定環境	69
	浜松市	4	○	○				70
	沼津市	3	○	○				71
	清水市	2	×				単独処理1，送泥1，受泥2	72
	熱海市	2	○		○			73
	富士市	4	○	○				74
愛知県	名古屋市	15	○		○			75
	豊橋市	6	○		○			76
	一宮市	2	×					77
	瀬戸市	2	×					78
	春日井市	2	×					79
三重県	四日市市	6	○	○		○		80
京都府	京都市	4	○		○	○	特定環境	81
	舞鶴市	2	○	○				82
大阪府	大阪市	12	○		○	○	エース大阪南 エース大阪南	83
	堺市	4	○		○	○		84
	岸和田市	1	○		○			85
	吹田市	3	○		○			86
	泉大津市	1	○		○		エース大阪南 エース大阪北東 エース大阪北東 エース大阪南，泉北環境整備施設組合	87
	枚方市	2	○			○		88
	交野市	1	○			○		89
	高石市	1	○		○			90
兵庫県	神戸市	8+1	○			○	東部スラッジセンター	91
	龍野市	3	×					92
	姫路市	9	○			○	エース兵庫西 エース兵庫東	93
	尼崎市	3	○		○	○		94
	明石市	5	○		○	○	平成4年度末で液状汚泥輸送廃止	95
	西宮市	3	○		○			96

都道府県	都市名	処理場 数	集約 処理	輸 送 手 段			特 記 事 項	No.
				液状汚泥		脱水 汚泥		
				車両	管路			
兵庫県	芦屋市	2	○	○				97
	高砂市	2	○	○				98
奈良県	奈良市	2	×					99
	生駒市	2	×					100
和歌山県	和歌山市	2	×					101
鳥取県	鳥取市	2	×					102
	米子市	3	○		○	○		103
島根県	八束町	2	×				特定環境×2 特定環境×2	104
	多伎町	2	×					105
岡山県	岡山市	5	○	○				106
	倉敷市	4	×					107
広島県	広島市	5	×					108
	呉市	2	×					109
山口県	下関市	3	×					110
	宇部市	2	×					111
	徳山市	2	×					112
	長門市	2	○	○				113
香川県	高松市	2	×					114
愛媛県	今治市	3	×					115
高知県	高知市	3	○		○			116
福岡市	北九州市	5	×				汚泥管理センター	117
	福岡市	5 + 1	○			○		118
長崎県	長崎市	7	○	○				119
	佐世保市	2	×					120
熊本県	熊本市	4	○	○		○	八幡台下水処理場	121
	荒尾市	2 + 1	○	○				122
大分県	大分市	6	○	○				123
宮崎県	宮崎市	4	○	○				124
	延岡市	2	○	○				125
鹿児島県	鹿児島市	5	○		○			126

流域下水道関連

- 宮城県：鳴瀬川流域鹿島台→吉田川流域大和：液状車両
- 大阪府：淀川右岸流域高槻→安威川流域中央：脱水汚泥
- 香川県：中讃流域金倉川 →中讃流域大東川：液状車両
- エースに送泥している流域下水道：南大阪湾岸流域、淀川左岸流域、武庫川流域、揖保川流域

その他

- 鳥取県：日吉津村ほか：移動脱水車の導入
- 石川県：津幡町ほか：移動脱水車の導入

B 2

汚泥集約処理における液状汚泥輸送の実施状況（平成4年度）

都道府県	都市名	輸送形態		送泥側 処理場	受泥側 処理場	輸送 距離 [km]	送泥量 [m³/年]	送泥 濃度 [%]	送泥側 処理水量 [m³/日]	特記事項	No
		車両	管路								
北海道	札幌市	○		拓北	伏古川	11	7,066	3.3	3,980		1
		○		定山溪	伏古川	33	6,377	3.3	10,500		2
	旭川市		○	亀吉	西部	6	394,000	0.6	36,400		3
	釧路市	○		白樺	古川	10	10,151	3.4	5,840		4
	帯広市	○		南帯広	帯広川	13	5,363	2.8	2,510		5
	幕別町	○		幕別	帯広川	20	2,788	3.1	1,250		6
	苫小牧市		○	高砂	西町	4	156,807	0.7	29,700		7
		○		勇払	西町	18	6,121	2.5	2,850		8
	千歳市	○		支笏湖畔	千歳	26	825	2.6	640		9
	別海町	○		西春別	別海	30	1,600				10
青森県	青森市	○		新田	八重田						11
	五所川原	○		広田	五所川原						12
岩手県	釜石市	○		上平田	大平	3	952	2.6	370		13
宮城県	仙台市	○		秋保温泉	南蒲生	30	3,183	1.5	1,570		14
秋田県	秋田市	○		金足	八橋						15
		○		羽川	八橋						16
山形県	鶴岡市	○		湯野浜	鶴岡						17
福島県	郡山市	○		熱海	郡山	20					18
	原町市	○		高松	原町第一						19
群馬県	前橋市	○		広瀬	前橋	4	9,252	1.0	2,000		20
		○		大利根	前橋	4	1,494	5.0	3,060		21
	桐生市	○		桐生	境野	6	7,769	1.7	3,830		22
	中之条町	○		沢渡	四万						23
	伊香保町		○	物聞沢	湯沢	0.6	5,795	2.0	5,050		24
埼玉県	飯能市	○		原市場	飯能						25
千葉県	市原市		○	菊間	松ヶ島	11	222,885	0.5	17,300		26
	千葉市	○		大宮	坂月	5	3,917	2.0	1,560		27
		○		小倉	坂月	3	8,720	1.6	2,360		28
		○		北部	坂月	4	779	1.4	230		29
		○		坂月	南部	15	15,520	4.3	6,770		30
東京都	東京区部		○	三河島	砂町	15	4,593,000	1.1	554,000	一部送泥	31
			○	芝浦	森ヶ崎	10.5	2,300,000	0.8			32
			○	落合	小台	10.6	2,805,480	0.7	430,000	小管経由	33
			○	中川	葛西	16	949,320	0.7	113,000		34
	八王子市	○		めじろ台	北野	10	1,811	2.9	1,150		35
神奈川県	川崎市		○	麻生	入江崎	33.3	125,165	1.0	13,600	→37→	36
			○	等々力	入江崎	15.9	513,285	1.5	106,000		37
	横須賀市		○	上町	下町	3.4	95,912	1.2	31,800		38
	横浜市		○	中部	南部SS	12.7	425,000	0.8	67,800		39
			○	南部	南部SS	9.3	1,113,000	0.7		一部送泥	40
			○	西部	南部SS	20.9	545,000	0.5	56,000		41
			○	栄第2	南部SS	15.4	1,048,000	0.6	103,000	→43→	42
			○	栄第1	南部SS	13.4	239,000	0.9	40,200	→43→	43
			○	神奈川	北部SS	5	1,855,000	0.8	285,000		44
			○	緑	北部SS	18.2	1,576,000	0.3	100,000	→46→	45
			○	港北	北部SS	12.2	969,000	0.6	134,000	→47→	46
			○	北部第1	北部SS	4.5	1,540,000	0.5	124,000		47

都道府県	都市名	輸送形態		送泥側 処理場	受泥側 処理場	輸送 距離 [km]	送泥量 [m³/年]	送泥 濃度 [%]	送泥側 処理水量 [m³/日]	特記事項	No
		車両	管路								
新潟県	新潟市	○		島見	中部		303	3.1			48
	長岡市	○		前川	第一	10	831	1.9	280		49
	能生町	○		川崎	能生	5	255	2.0	100		50
	湯之谷村	○		奥只見	大湯	30	93	6.4	140		51
富山県	魚津市	○		川の瀬	魚津						52
福井県	永平寺町	○		志比	中央	6	650	5.1	1,020		53
岐阜県	関市	○		田原	関						54
静岡県	静岡市	○		中島	高松	4	20,800	3.1	34,300		55
	浜松市	○		陸ヶ丘	中部	17	1,944	1.8	1,050		56
		○		舘山寺	中部	23	5,400	1.9	3,400		57
		○		湖東	中部	17	1,818	3.2	1,070		58
		○		重須	中部	15	684		820		59
	沼津市	○		久連	中部	20	216	1.5	260		60
	熱海市		○	第1	第2	0.3	146,332	0.1	5,700		61
	富士市	○		富士見台	吉原	10	8,298	1.3	2,060	一部西部へ	62
	豊橋市		○	野田	中島	10	120,000	0.5		余剰汚泥	63
	名古屋市		○	守山	山崎	16.7	658,000	0.8	67,100	→65→	64
愛知県			○	名城	山崎	12.5	499,000	0.8	50,200	→66→	65
			○	堀留	山崎	8.6	1,018,510	0.8	105,000	→67→	66
			○	熱田	山崎	3.1	214,732	0.8	29,600		67
			○	伝馬町	山崎	3	178,000	0.8	37,500		68
			○	露橋	宝神	14.4	407,000	0.8	66,300	→70→	69
			○	岩塚	宝神	9.1	590,000	0.8	110,000	→71→	70
			○	打出	宝神	6.5	417,000	0.8	89,800		71
			○	西山	柴田	14.5	164,000	0.8	16,900	→73→	72
			○	植田	柴田	10.6	423,000	0.8	46,100	→74→	73
			○	鳴海	柴田	4.7	845,000	0.8	93,100		74
			○	千年	柴田	6.0	352,000	0.8	47,600		75
三重県	四日市市	○		朝明	日永	13	1,539	2.0	1,400		76
		○		坂部	日永	10	1,492	2.0	840		77
京都府	京都市		○	吉祥院	鳥羽	1.5	638,970	0.5	73,800		78
	舞鶴市	○		野原	東	20	289	1.0	210		79
大阪府	大阪市		○	市岡	津守	4.1	992,000	0.2	82,000	→81→	80
			○	千島	津守	1	482,000	0.3	46,000		81
			○	十八条	大野	9.9	2,645,000	0.2	140,000		82
			○	今福	放出	1.1	1,037,000	0.7	171,000		83
	吹田市		○	川面	南吹田	2	147,000	0.9	21,000		84
	堺市		○	泉北	エース	14.1	314,000	1.1	49,200	→86→	85
	高石市		○	高石	エース	6.1	47,500	1.4	20,200	→87→	86
	泉大津市		○	汐見	エース	2.1	35,200	1.6	14,600		87
	岸和田市		○	磯の上	エース	2.7	131,400	1.0	33,300		88
兵庫県	尼崎市		○	東部第2	東部第1	0.8	379,000	0.8	46,000	平4まで	89
	明石市		○	大久保西	大久保東		7,630	0.5	870		90
	西宮市		○	鳴尾浜	枝川	2.4	211,000	0.8	26,800		91
			○	甲子園浜	枝川						92
	芦屋市	○		奥山	芦屋	6	588	3.0	780		93
鳥取県	高砂市	○		高砂	伊保	7	2,938	2.7	6,900		94
	米子市		○	皆生	内浜	8	21,200	0.7	10,600		95
岡山県	岡山市	○		芳賀佐山	旭西	12	4,613	2.3	730		96
		○		流通団地	旭西	15	672	1.6	170		97
山口県	長門市	○		俵山	東深川	20	405	2.5	300		98

都道府県	都市名	輸送形態		送泥側 処理場	受泥側 処理場	輸送 距離 [km]	送泥量 [m³/年]	送泥 濃度 [%]	送泥側 処理水量 [m³/日]	特記事項	No.
		車両	管路								
高知県	高知市		○	潮江	下知	2	13,200	2.0	11,200		99
長崎県	長崎市	○		小江原	中部	4	847	2.9	740		100
熊本県	熊本市	○		武蔵ヶ丘	中部	15	5,610	1.1	1,930		101
	荒尾市	○		桜山	八幡台	2	1,884	2.5	880		102
大分県	大分市	○		敷戸	宮崎	1	4,306	1.5	880		103
		○		松岡	大在	6	306	1.1	370		104
宮崎県	宮崎市	○		木花	大淀	8	1,433	3.4	1,400		105
		○		青島	大淀	11	710	3.8	570		106
	延岡市	○		一ヶ岡	妙田	10	4,715	3.0	2,130		107
鹿児島県	鹿児島市		○	錦江	南部	11	287,000	0.6	32,600		108
			○	二号用地	南部	0.2	64,000	0.8	7,250		109
			○	脇田分場	南部	4	76,000	0.4	5,820		110

付録（C）関連発表論文

- | | | |
|-----|------------------------|--------------------|
| C1. | 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 |
| C2. | 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 |
| C3. | 回転粘度計による汚泥の粘度の測定 | 第49回土木学会年次講演集 |
| C4. | 下水汚泥の流動特性について | 第32回下水道研究発表会講演集 |

C 1 (27) 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。

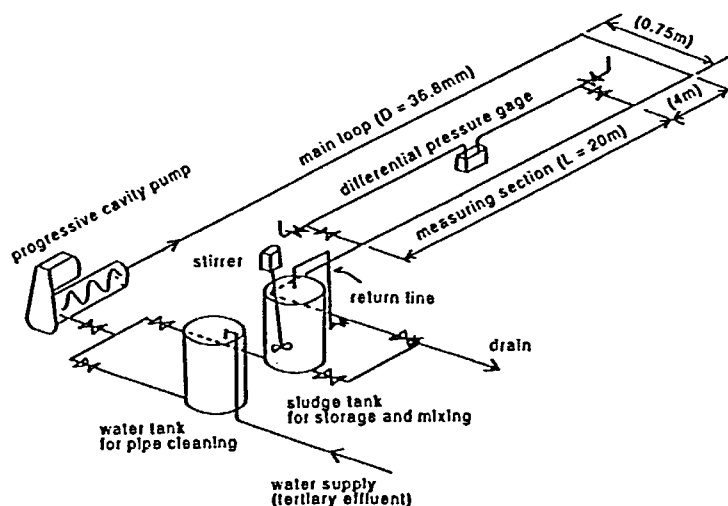


Fig. 1 Schema of Sludge Pumping Transportation Equipment

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]

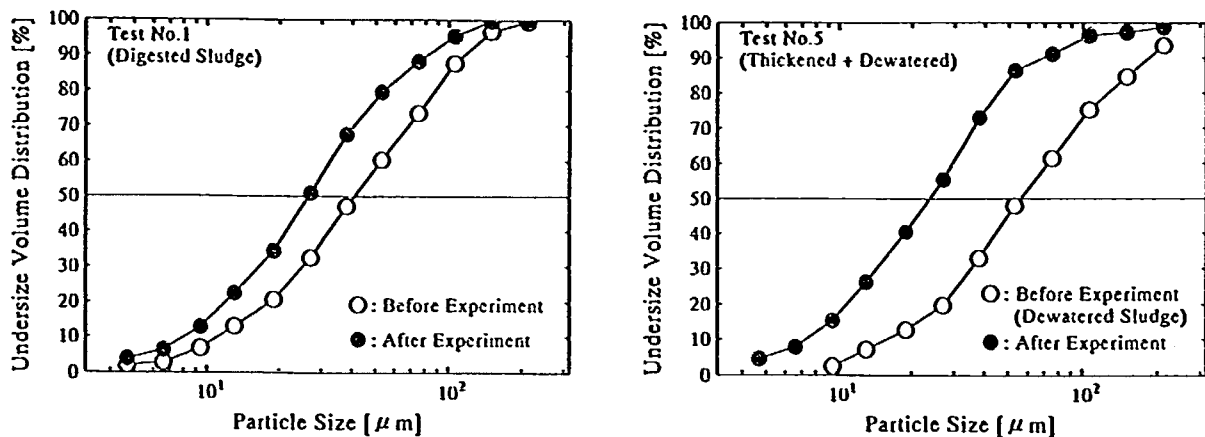


Fig. 2 Examples of particle size distribution

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・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・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 (37.5～300 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。

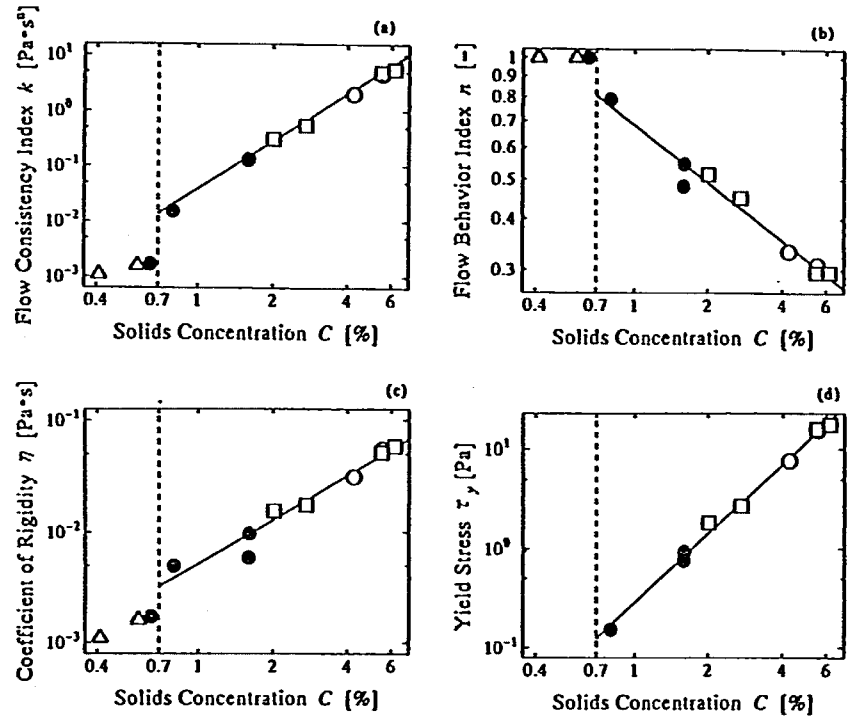
$$\text{Pseudoplastic : } k = 0.0385 C^{2.87} ; \quad n = 0.682 C^{-0.473} \quad (3)$$

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

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

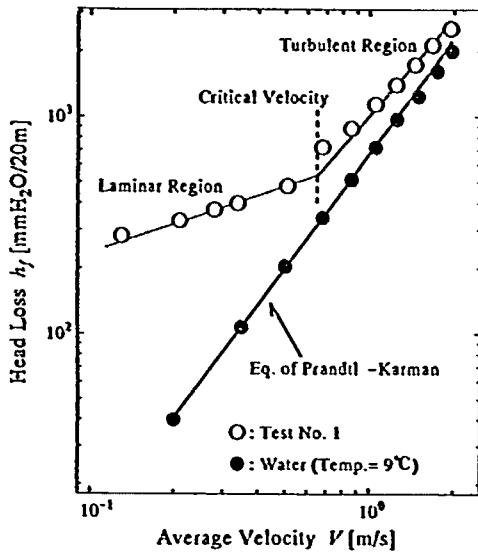


Fig. 4 An example of the relationship between average velocity and head loss

$R_{eB3} = R_{eB1} \cdot (1-a)$ 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、ヘッドストリーム数を用いる方法^{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

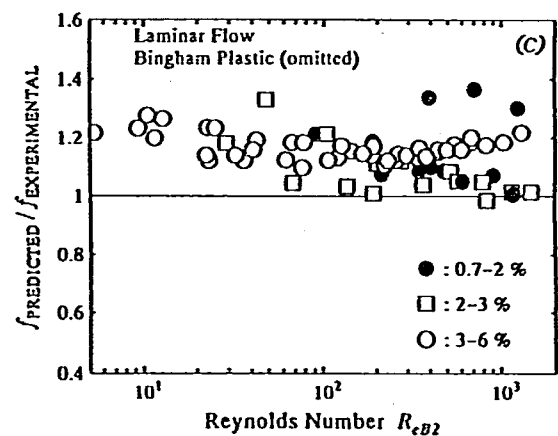
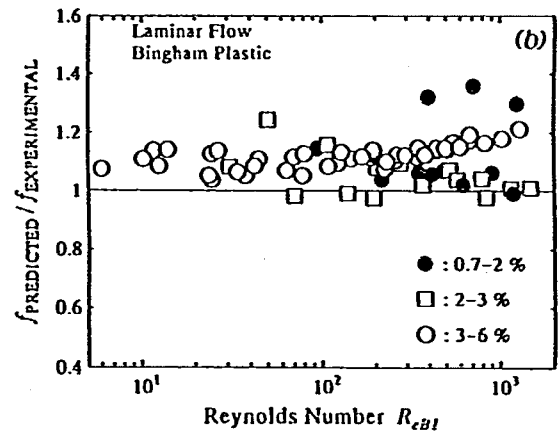
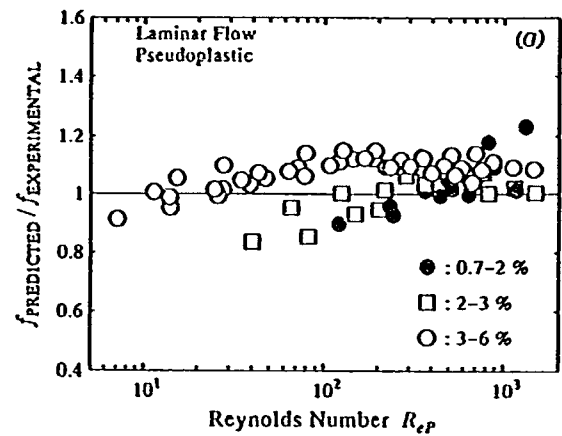


Fig. 5 Comparison between the prediction methods in laminar region

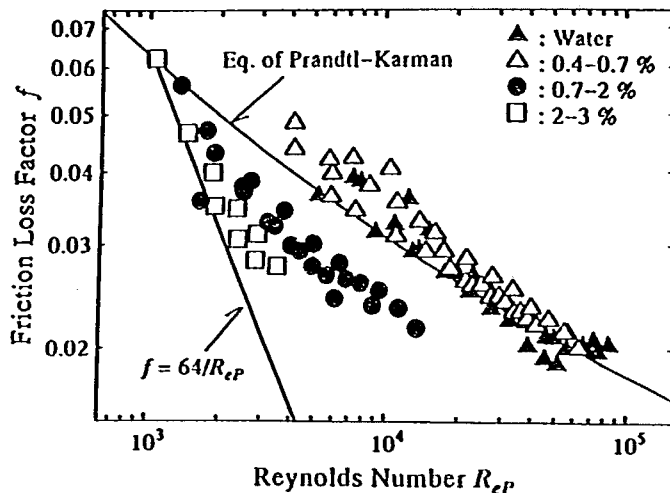


Fig. 6 The relationship between experimental friction factor and Reynolds number for pseudoplastic fluid

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 R 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

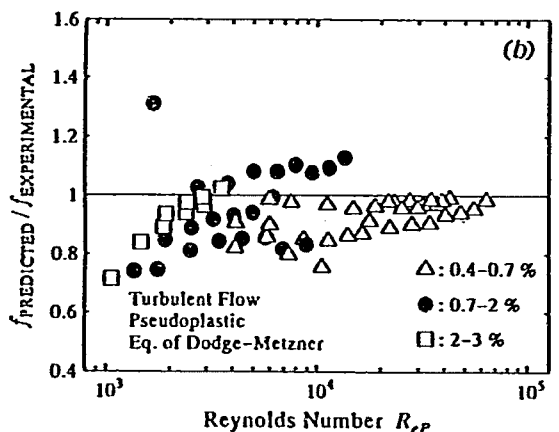
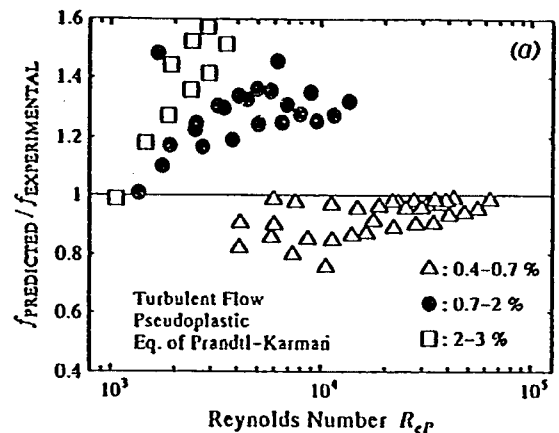


Fig. 7 Comparison between the prediction methods in turbulent region

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。

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。

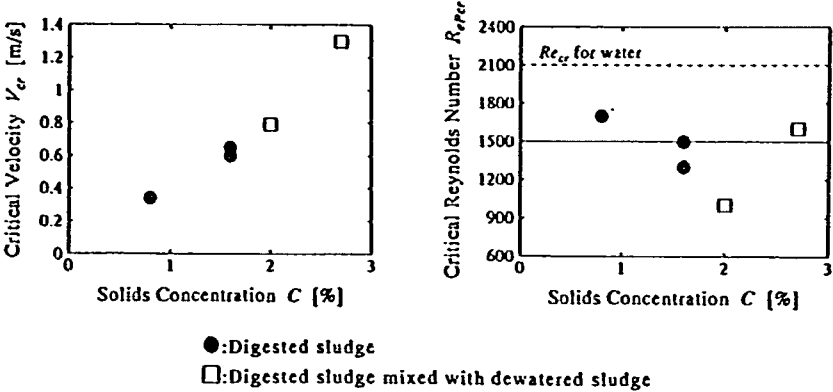


Fig. 8 Measured critical velocity and critical Reynolds number

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。

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

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

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.

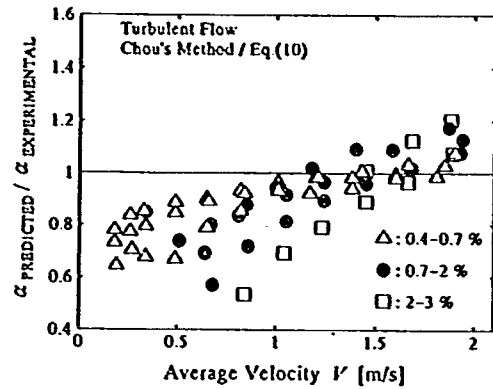


Fig. 9 Comparison of experimental sludge multiplication factor with those predicted by Chou's method

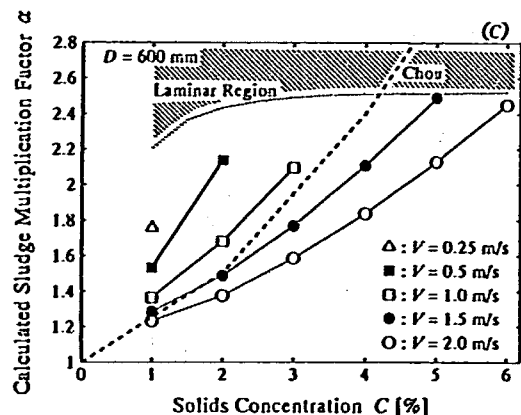
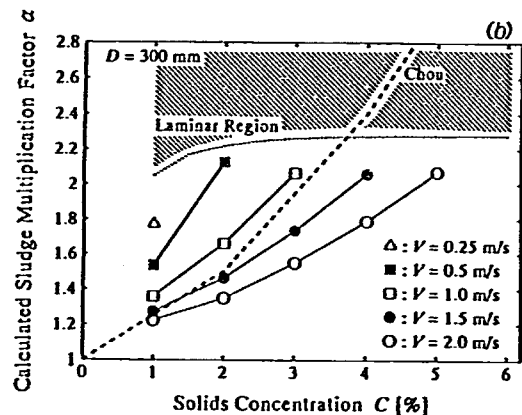
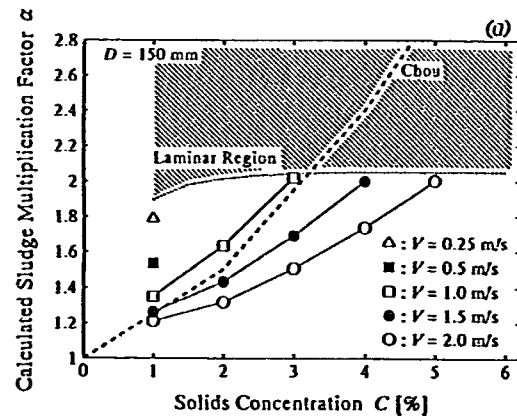


Fig. 10 Sludge multiplication factor calculated on Dodge's method

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。

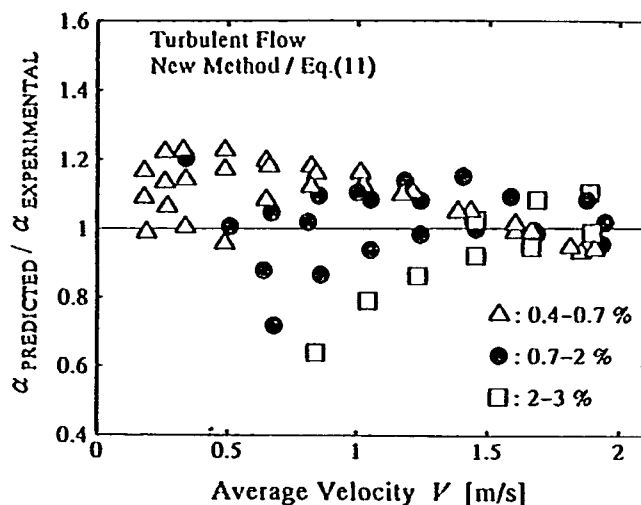


Fig. 11 Comparison of experimental sludge multiplication factor with those predicted by Eq. (11)

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 徹, 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.

12-1 回転粘度計による下水汚泥の 流動特性の測定

福岡市 ○ 中村 伸二
建設省土木研究所 松原 誠
渡部 春樹

1. はじめに

下水汚泥の管路輸送は汚泥処理に必要不可欠であり、今後、集約処理・有効利用が進展するにともない汚泥輸送の事例が多くなりその重要性が増大してくるものと考えられる。汚泥の流動特性の把握は管路の圧力損失を予測する上で重要であるが、まだその測定方法が確立されていない。そこで今回、回転粘度計による高濃度下水汚泥の粘度測定を行い、測定方法と流動特性についていくつかの知見を得たので報告する。

2. 実験方法

二重円筒回転粘度計(Haake RV12)を用いて流動特性を測定した。内筒と外筒の円筒間に供試汚泥を満たし、内筒回転速度とトルクを検出し速度勾配とせん断応力を計算により求めた。回転粘度計の諸元を表-1に示す。また供試汚泥は、茨城県霞ヶ浦浄化センターの汚泥を用い、遠心分離機で濃縮することにより濃度調整を行った。

汚泥はチクソトロピックな性質を持つ非ニュートン流体である。チクソトロピー現象は外力が働き流体の内部構造が破壊されると粘度が低下し急激に流動化するが、力を取り除いた静止状態に置かれると元の構造に回復する現象である。高濃度汚泥の場合、チクソトロピーの影響を十分に考慮した流動特性の測定が必要である。流動特性を表すせん断応力と速度勾配の関係を示した流動曲線の測定については、リピート法とホールド法の2方法がある。リピート法では回転速度(速度勾配)を連続可変して上昇・下降を繰り返すことにより定常状態に持っていく場合で測定している。ホールド法は各段階での一定の速度勾配で定常状態にいたらしめてせん断応力を測定する方法である。今回の測定条件を表-2に示す。ここでは管路輸送を前提としているので、管径と輸送時の速度範囲(管内速度0~1.5m/sに対応)に応じた速度勾配を測定範囲とする。そこで汚泥をニュートン流体として近似した場合の送泥管壁の速度勾配 $8V/D$ を考慮し回転粘度計の速度勾配 (du/dy) の範囲を0~300s⁻¹と決めた。

3. 実験結果

(1) 流動曲線と流動特性

1) 定常状態までの時間

流動曲線としては応力が連続的に加えられすでに内部構造の破壊が進み定常化している状態で求められるべきである。一方、ポンプの起動時の状態は測定時の初期挙動に対応していると考えられる。ホールド法について、ある一定速度勾配において起動から定常状態になるまでの時間をみるため、各測定回転数について、

表-1 回転粘度計の諸元

内 筒	MV1	MV2	MV3
内筒半径 R_i (mm)	20.04	18.4	15.2
内筒長さ L (mm)	60	60	60
外筒半径 R_a (mm)	21	21	21
半径比 $\delta = R_a/R_i$	1.05	1.14	1.38
試料容量 (cm ³)	40	55	70

表-2 流動曲線の測定条件

試料 NO.	方 法	内筒	回転数 rpm	速度勾配 s ⁻¹	汚泥	濃度 %	IS/IS %
1	ホールド	MV1	64	150	消化	4.6	67.2
2	ホールド	MV1	64	150	初沈	6.2	79.1
3	ホールド	MV1	128	300	消化	4.6	67.2
4	ホールド	MV1	128	300	初沈	6.2	79.1
5	ホールド	MV1	~128	~300	消化	4.2	67.1
6	リピート	MV1	128	300	消化	4.2	67.1
7	リピート	MV1	32	75	消化	4.2	77.0
8	リピート	MV1 MV2 MV3	128 250 512	300 225 225	余剰	4.8	74.5
9	ホールド	MV1	64	150	初沈	5.2	79.1
10	ホールド	MV1	64	150	消化	5.0	66.5

non-timeで測定回転数にもっていき初期挙動のピーク値と時間経過によるせん断応力の変化を調べた。RUN1~4の結果を図-1に示す。高濃度汚泥の場合、定常状態までの流動時間が長くなるが、ほぼ30分を経過すれば直線でありほぼ定常状態になっていると判断し、30分後の状態をとることにした。

また、リピート法については、上昇・下降時間を各3分づつとり上昇・下降を5回繰り返すことにより、上昇曲線と下降曲線がほぼ一致したため定常状態になったものと判断した。

2) 流動曲線の求め方

リピート法とホールド法とは定常状態になるまでの応力の受け方が違うため得られた結果が異なっている可能性がある。リピート法は一度のサンプル測定で流動曲線を得られるという簡便性はあるが、最大速度勾配より低い領域では、本来の速度勾配より大きな力を受けた履歴があり、各速度勾配に対応した定常状態のせん断応力とはいえない面がある。そこで2つの方法の違いを示したのが図-2である。広範囲の速度勾配での流動曲線(RUN5,6)を比べるとリピート法の場合、最大速度勾配のほぼ50%以下の領域では定常状態のせん断応力が過小に評価され、逆に高い領域ではやや過大に評価している傾向になる。一方、速度勾配範囲を限定して測定したリピート法の流動曲線(RUN7)では両者の差はほとんどない結果が得られた。したがって流動曲線を求めるためには、各一定速度勾配でのせん断応力を多段階の速度勾配ごとに求めることによって得られる方法が望ましいが、適用条件に応じて速度勾配範囲を適切に選定することによりリピート法であっても遜色のない流動曲線を得ることができる。

(2) ギャップ量の補正方法

一般に非ニュートン流体の場合、二重円筒間距離(ギャップ量)が小さいほど正確に粘度を測定できるが、汚泥試料の粒子径、凝集状態等によりギャップ量の小さい場合ではうまく測定できないことがある。そこで、ギャップ量を大きくした場合

の特性をみるため3種類の内筒を用い実験を行った(RUN7)。図-3に示すようにギャップ量を変化させた場合、各測定結果は異なったものになった。粘度を評価する場合、ギャップの影響を補正する方法が必要である。角速度のギャップ内における変化は、ニュートン流体では内筒壁での最大角速度から外筒壁の角速度0

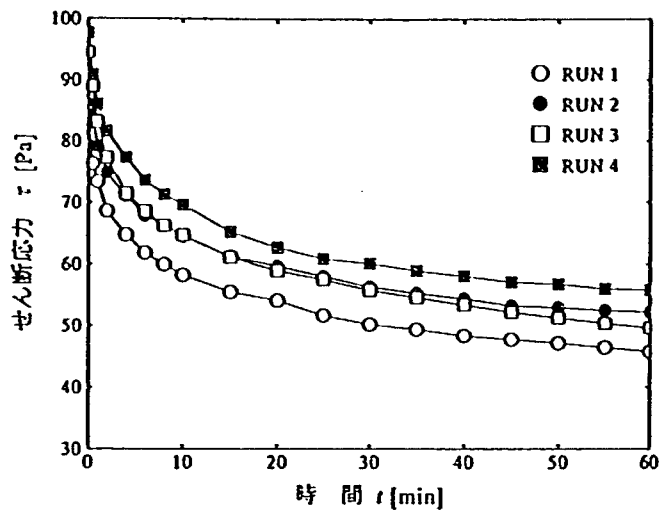


図-1 一定速度勾配での経時変化

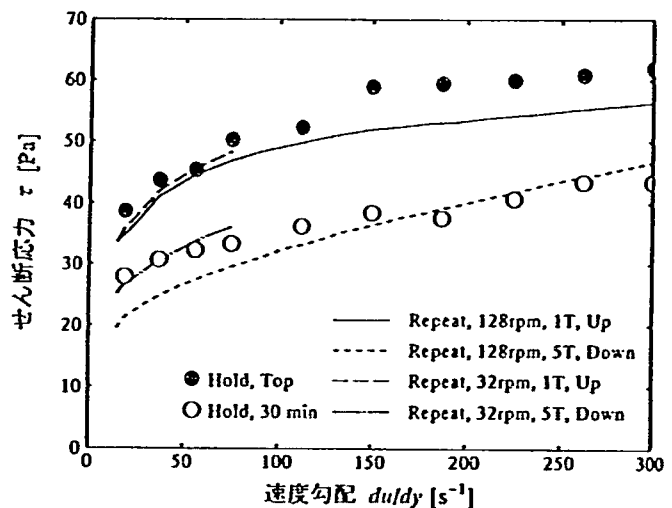


図-2 リピート法とホールド法による流動曲線

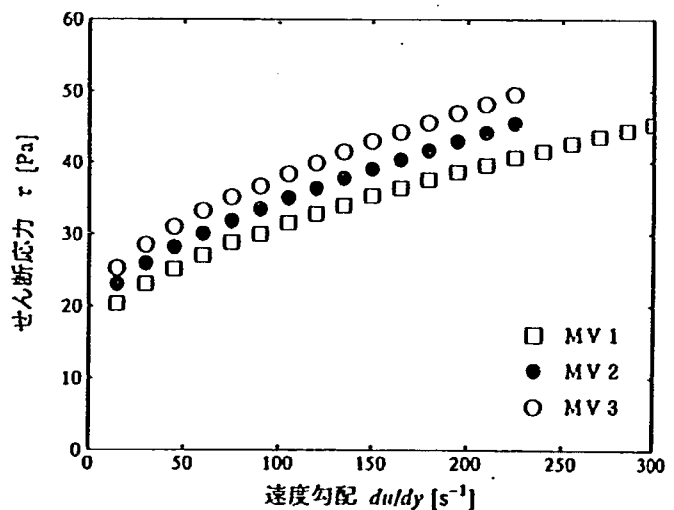


図-3 ギャップの影響 (補正前)

までほぼ直線になるのに対し、汚泥のような非ニュートン流体ではカーブの曲がりが大きい。そこでギャップを満たしている汚泥全体の平均的粘度で代表させる。2つの円筒はその間に汚泥をはさんで平衡の状態にあるから、円筒の面に作用するせん断力は円筒の共軸回りに回転モーメントを生じる。汚泥の各層にもこれと同じ回転モーメントが作用する。

汚泥の薄層のせん断応力；

$$\tau = \eta r \frac{d\theta}{dr} = \frac{2\eta\Omega}{r^2(1/Ri^2 - 1/Ra^2)}$$

代表せん断応力 τ_{rep} ；

$$\tau_{rep} = \frac{\tau_i + \tau_a}{2} = \frac{1+\delta}{2\delta^2} \tau_i \quad \delta = \frac{Ra}{Ri}$$

代表速度勾配 D_{rep} ；

$$D_{rep} = \Omega \frac{1+\delta^2}{\delta^2-1} = \frac{1+\delta}{2\delta^2} Di$$

Ri ：内筒半径 Ra ：外筒半径 r ：半径

θ ：回転角速度 Ω ：内筒角速度 D ：速度勾配

τ ：せん断応力 η ：みかけ粘度

i ：内筒外周部 a ：外筒内周部

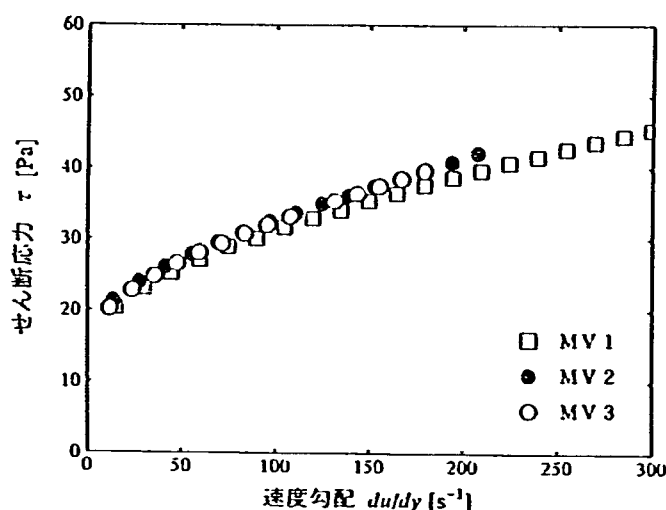


図-4 ギャップの影響(補正後)

実験に使用した回転粘度計の諸元から流動曲線の補正係数を各内筒について求め、図-3の流動曲線を補正したものを図-4に示す。この方法によりギャップ量にかかわらずほぼ1本の流動曲線が得られた。

(3) 温度の影響

温度による影響を調べるために、速度勾配 150 s^{-1} で汚泥温度 T を5から50℃まで5℃ずつ変化させ、そのときのみかけ粘度の変化を調べた(RUN9, 10)。結果を図-5に示す。濃度の高い汚泥の場合、温度の上昇にしたがって水に対する相対粘度は増加する。この増加率はほぼ一定である。粘度の絶対値そのものは温度の上昇に伴って減少しているのであるが、その程度が水の場合ほど大きくはない。高濃度汚泥の場合、粒子間に直接の相互作用が働いているため、このことが温度特性にも現れ、温度上昇によって水の粘性が低下しても汚泥としての粘度はそれほど低下しないと考えられる。

また、汚泥の濃度や種類に対して流動特性が急激に変化するのにくらべると緩やかであり、汚泥の流動特性に及ぼす温度の影響はそれほど大きくないと思われる。

4. まとめ

管路輸送を目的とした下水汚泥の粘度測定方法と流動特性に関して次のことがわかった。

- ①輸送管路に応じた回転粘度計の速度勾配を選定し、ホールド法の定常状態として30分後の状態をとることがよい。
- ②流動曲線の求め方としてホールド法によるものが望ましいが、速度勾配範囲の取り方によりリピート法でもよい結果が得られた。
- ③ギャップ量を考慮した補正により内筒径にかかわらず同様な流動曲線が得られた。
- ④汚泥の濃度や種類に比べ温度が変化したときの粘度への影響はそれほど大きくない。

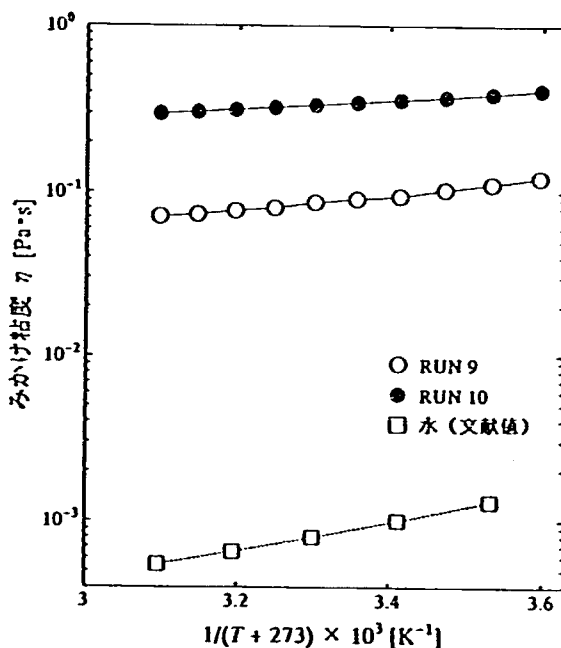


図-5 温度の影響

小野田ケミコ 正会員 笠井淳史
建設省土木研究所 正会員 松原 誠
正会員 渡部春樹

1. はじめに

下水汚泥の有効利用を進めるために、管路輸送は今後重要になってくると考えられる。効率よく汚泥を管路輸送するには、圧力損失の算出が必要であり、粘性は圧力損失に大きな影響をおよぼすので、注意して測定する必要がある。

汚泥は非ニュートン流体であるため、速度勾配を生じさせる距離(以下、ギャップサイズとする)が狭いほど正確に粘度が測定できることが知られている。

回転粘度計は、速度勾配を任意に設定できるため溶液などの粘度測定によく用いられるが、比較的大きな粒子を含む懸濁液を試料とする場合には、ギャップサイズが狭いと粒子が引っかかり測定不能となる。

このため、汚泥の粘度測定に関する従来の報告は、ギャップサイズの広い条件において筒にはたらくトルクを計測し、筒の回転速度から速度勾配をもとめ粘度を算出したものがほとんどであった。

そこで、共軸二重円筒型の内筒回転粘度計を用い、同一の試料についてギャップサイズの異なる筒を用い、筒ならびに汚泥の回転速度とトルクとの関係を計測した結果、粘度の算出方法についていくつかの知見が得られたので報告する。

2. 測定の原理

一般にニュートン流体を内筒回転方式の粘度計で測定した場合、円筒間の試料の半径 r の面と $r + dr$ の面とにはたらく回転モーメントがつりあうとすると、角速度 $\omega(r)$ は次の(1)式で表され、流体の速度分布がわかる。ここで、 R_c は外筒半径、 R_b は内筒半径、 δ は半径比($=R_c/R_b$)、 ω_b は内筒の角速度である。

$$\omega(r) = \frac{\omega_b}{\delta^2 - 1} \left(\frac{R_c^2}{r^2} - 1 \right) \quad \text{----- (1)}$$

さらにこの式から粘性抵抗を生じさせる速度勾配 $D(r)$ が求められる。

$$D(r) = r \frac{d\omega}{dr} = \frac{-2\omega_b}{\delta^2 - 1} \left(\frac{R_c}{r} \right)^2 \quad \text{----- (2)}$$

3. 実験方法

用いた外筒の半径は21.0mm、内筒は3種で半径は20.0mm、18.4mmおよび15.2mmであり、ギャップサイズは1.0mm、2.6mm および 5.8mmとなる。内筒をセンサー部に吊るし、試料を所定量入れた外筒を内筒の外側に装着すると、内筒と外筒の間に試料が満たされる。然、乱流および慣性の影響のない条件で、内筒を停止状態から無段変速で回転速度を上昇させ所定の回転速度に達した後、無段変速で回転速度を下降させ停止させる。この間の回転速度をX軸に、内筒に検出されるトルクをY軸としてXYプロットに記録した。

また、2.6mm および 5.8mmのギャップサイズとなる条件について、円筒間の試料水面にトレーサーとして約0.2mm角の紙片を0.3~1.0mm間隔で数個浮かべ、ビデオカメラで所定の内筒の回転速度における試料の流動状態を近接撮影し、低速度再生することにより回転中の試料の流速分布を求めた。

本実験はすべて茨城県K処理場のTS=1.5%の消化汚泥を試料とし、外筒の周囲のジャケットに恒温水槽内の水を循環することで試料を20℃に保温して行った。

4. 実験結果

3種のギャップサイズで計測したおのおのの試料の流動曲線は回転速度の上昇と下降でほぼ一致した。また、1.0mmギャップサイズでも粒子が引っかかることなく計測できた。(2)式より算出した速度勾配より求めた流動曲線をFig.1に示す。汚泥の粘度はギャップサイズの広い方が高く算出された。

次に、2.8mmおよび5.8mmのギャップサイズについて、トレーサーによる汚泥の流速分布と(2)式より流速分布を求め、これらの結果をFig.2およびFig.3に示した。ここで、Nは試料の回転速度、 N_b は内筒の回転速度を示す。いずれの速度勾配も実測値の方がニュートン流体と比較し、内筒近傍で大きく外筒近傍で小さくなった。

このため、2.8mmおよび5.8mmのギャップサイズについて、内筒と内筒から

1.0mmの位置で実測したトレーサーの回転速度から求めた速度勾配と(2)式で算出される速度勾配との関係を求めFig.4に示した。

この関係よりFig.1の流動曲線を補正した結果を、Fig.5に示す。2.6mmおよび5.8mmのギャップサイズの補正した流動曲線はほぼ一致し、1.0mmで測定した(2)式の速度勾配より求めた流動曲線に近い値となった。

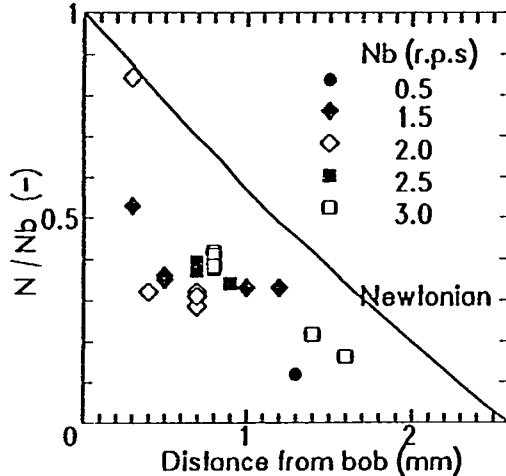


Fig.2 Distribution of rotational speed

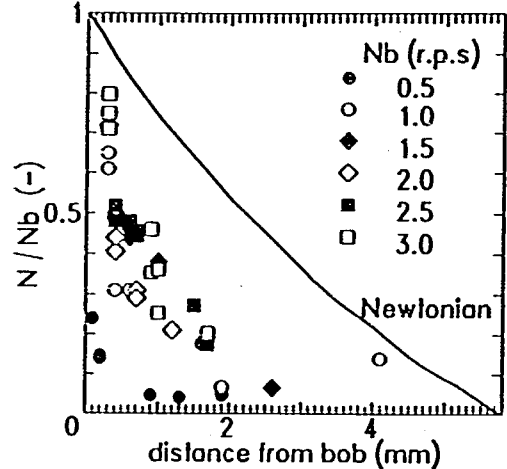


Fig.3 Distribution of rotational speed

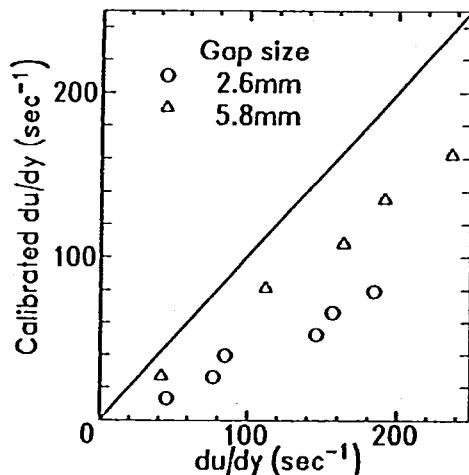
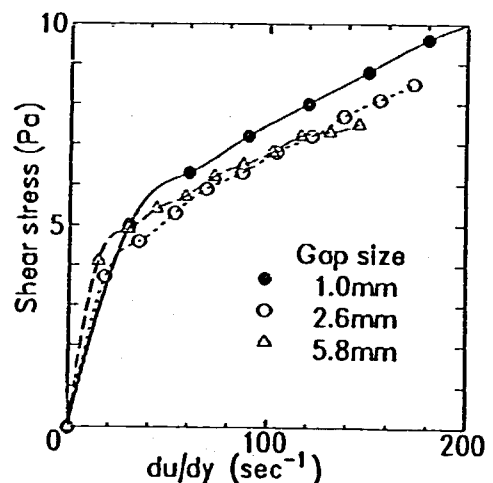
Fig.4 Calibration of du/dy 

Fig.5 Calibrated flow curve

5. まとめ

汚泥の粘度を、粗大粒子の引っかからないようギャップサイズを広くとると、非ニュートン流体の場合、速度勾配を実際より小さく見積もり、高い粘度として算出することになるため、流動曲線を流速分布により補正することでより正確な粘度を算出できるものとする。

岐 阜 県 ○加藤 一幸
建設省土木研究所 松原 誠
渡部 春樹

1. はじめに

下水汚泥の流動特性を把握することは、管路の圧力損失を予測する上で重要である。著者らは、回転粘度計を用いた下水汚泥の流動曲線の測定方法について既に検討を行っている^{1)・2)}。これらの結果をふまえ、各種下水汚泥の流動特性を測定したところ、汚泥のレオロジー定数、非ニュートン性、チクソトロピー性について実験的にいくつかの知見が得られたのでここに報告する。

2. 実験方法

供試汚泥として、4処理場、11種類の汚泥を使用した。粗大粒子等が混入していると考えられる汚泥については、あらかじめ2mm目ふるいを用いてこれを除去した。各供試汚泥は遠心分離器で濃縮、または水道水で希釈することにより8～17通りに濃度調整した。

流動特性は、共軸円筒型回転粘度計(Haake, RV20)を用いて測定した。円筒間のギャップ量は0.96mmである。測定に際して速度勾配を次のように制御した。汚泥がチクソトロピー性を示す場合はホールド法を用い、速度勾配150[1/s]で30分間ホールドし、その後3分で速度勾配0[1/s]に減速した。チクソトロピー性がないと判断した場合はリピート法を用い、3分で速度勾配を0[1/s]から150[1/s]に加速、その後3分で0[1/s]に減速した。測定温度は20℃とした。

体積濃度は、24時間静置後の沈降した汚泥の体積が全体に占める割合と定義し、低濃度に調整した供試汚泥(3～4通り)を500ccメスシリンダーに入れて20℃恒温室において測定した。腐敗の進行に従い汚泥が気泡をかんで浮上する場合があるが、このときは浮上した汚泥の体積から求めた。この結果から各汚泥ごとに、濃度C[%]と体積濃度Cv[-]の比を回帰計算により求め、これを体積濃度係数k24(=Cv/C)と定義した。この値よりあらためて全汚泥の体積濃度を計算し直した。これらの供試汚泥の性状は表-1のとおりである。

3. 実験結果

3.1 供試汚泥の特徴

図-1に体積濃度係数とVSの関係を示す。図より、消化汚泥はVSが他の汚泥に比べて小さく、余剰汚泥は初沈汚泥より体積濃度係数が大きかった。混合濃縮汚泥は余剰汚泥と初沈汚泥のほぼ中間の傾向を示した。また、体積濃度係数とVSの間には明確な相関が見られなかった。

表-1 供試汚泥の性状

処理場名	汚泥の種類	原汚泥TS[%]	原汚泥VS[%]	原汚泥比重	調整濃度[%]		体積濃度係数k24	備考
					最低濃度	最高濃度		
1	A 消化	1.55	59.4	1.0054	0.430	4.61	0.759	高温消化
2	A 濃縮	2.09	81.7	1.0048	0.233	5.01	0.610	混合濃縮, 注2
3	A 余剰	2.13	81.1	1.0050	0.295	6.40	0.543	
4	B 余剰	4.62	78.1	1.0155	0.499	6.42	0.561	機械濃縮
5	B 初沈	2.70	79.7	1.0095	0.357	5.29	0.383	注1, 注2
6	C 初沈	1.44	77.1	1.0045	0.273	5.35	0.410	注1
7	C 消化	1.48	71.1	1.0071	0.181	4.87	0.842	
8	C 余剰	1.01	74.9	1.0022	0.209	4.94	0.934	注1
9	D 消化	1.70	64.2	1.0052	0.421	4.48	0.495	
10	D 濃縮	1.25	73.4	1.0044	0.420	4.44	0.359	混合濃縮, 注2
11	D 余剰	1.04	82.2	1.0048	0.255	5.52	0.615	注1

注1: 採泥後しばらく放置して上澄液を除去したあとの汚泥

注2: 2mmふるいを通したもの

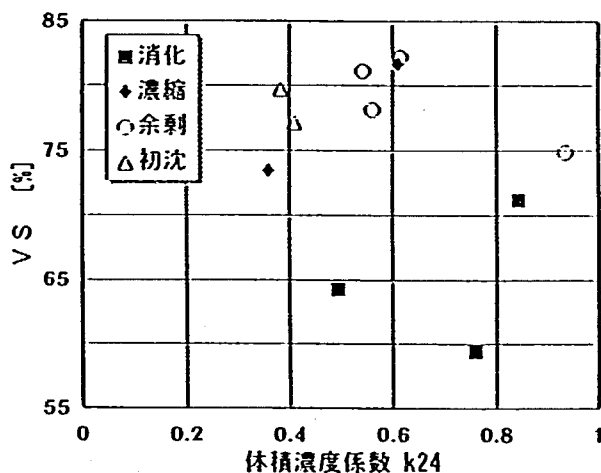


図-1 体積濃度係数とVS

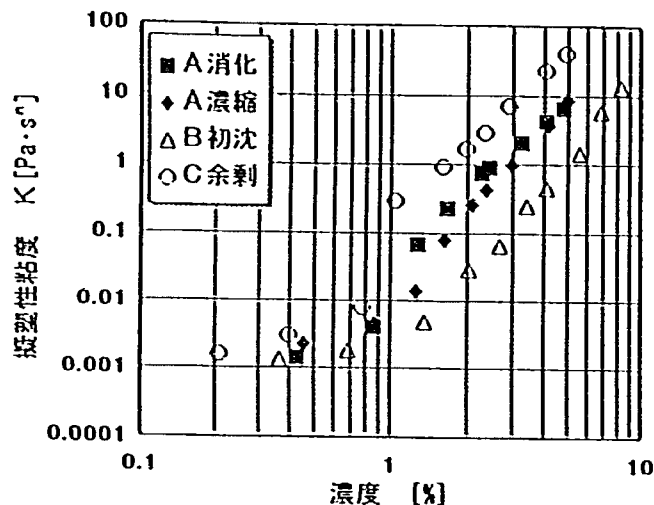


図-2 濃度と擬塑性粘度K

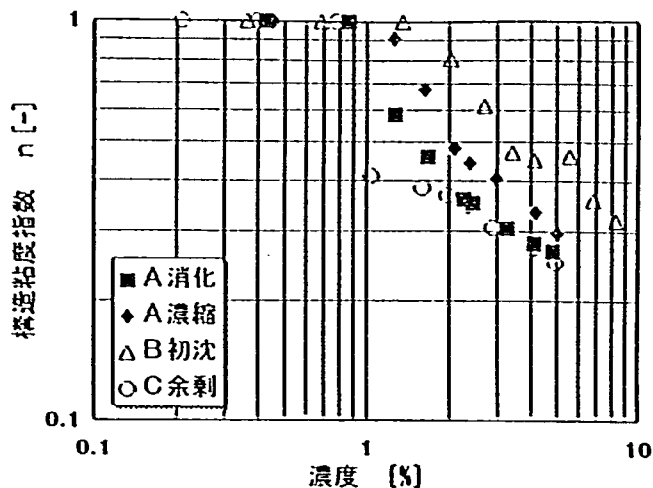


図-3 濃度と構造粘度指数n

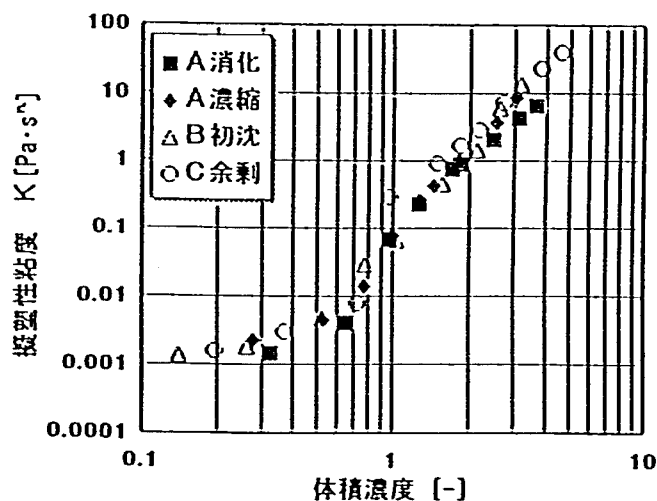


図-4 体積濃度と擬塑性粘度K

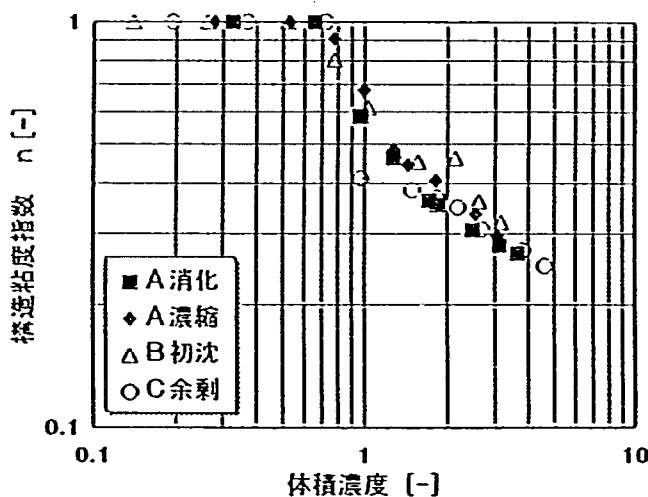


図-5 体積濃度と構造粘度指数n

3.2 レオロジー定数

回転粘度計により得られた流動曲線をニュートン流動と擬塑性流動の各モデルで近似し、相関係数の大きい方に流動モデルを決定し、レオロジー定数（擬塑性粘度 K [Pa·sⁿ], 構造粘度指数 n [-]）を求めた。

各汚泥種類の中から代表的な汚泥を選択し、レオロジー定数と濃度の関係を両対数上に図示すると図-2, 3のようになり、同じ汚泥ごとに相関はあるが異種汚泥間では異なっている。ところが体積濃度との関係で整理すると（図-4, 5），レオロジー定数は汚泥の種類に関わらずよい相関があり、これらは2本の直線で表すことができた。その境界はおよそ $C_v = 0.4$ であった。

$$0.1 < C_v < 0.4 \text{ のとき } K = 0.0080 \times C_v^{1.02}, \quad n = 1 \quad (\text{ニュートン流動})$$

$$0.4 < C_v < 5 \text{ のとき } K = 0.0908 \times C_v^{3.97}, \quad n = 0.582 \times C_v^{-0.607} \quad (\text{擬塑性流動})$$

このことより、汚泥の流動特性を決定づける第1の因子は体積濃度であり、言い換えれば汚泥中の自由水の割合であると考えられる。よって汚泥種類の違いを表す V/S , 比重, 粒径, 凝集性等といった因子の影響は2次的なものにとどまるか、もしくは体積濃度に包含されると考えられる。ゆえに各種汚泥のレオロジー定数を簡便に予測するためには濃度より体積濃度を用いるのがより妥当であるといえる。

また、すべての供試汚泥の流動特性を体積濃度で整理したものが図-6である。この図からも、多少のばらつきはあるが体積濃度が約0.4以下ではニュートン流動を示すことが確認できた。この境界を濃度で整理し直してみると濃縮, 消化, 余剰汚泥で約1%, 初沈汚泥で約1.5%程度であった。

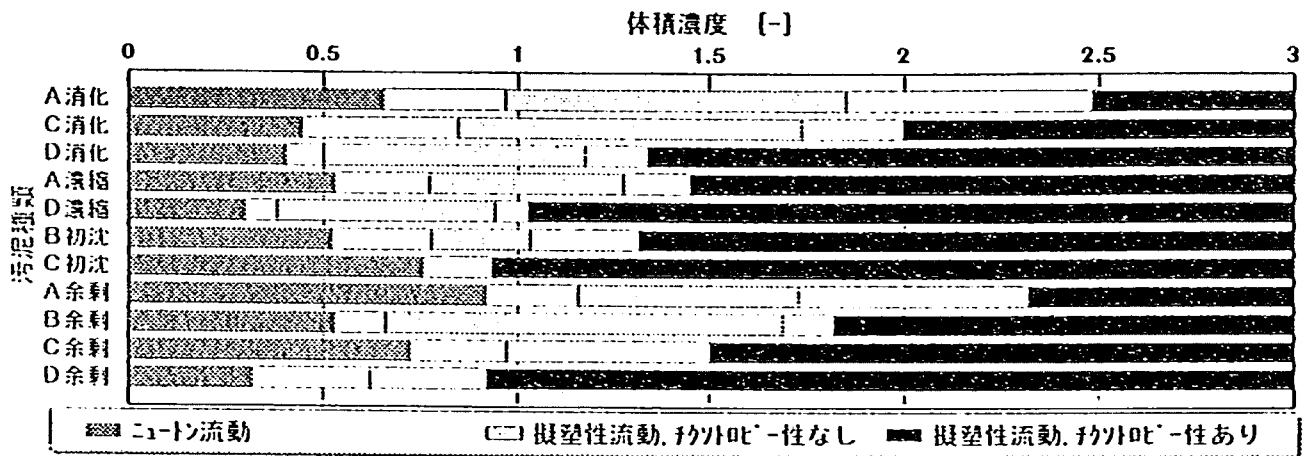


図-6 供試汚泥の流動特性と体積濃度

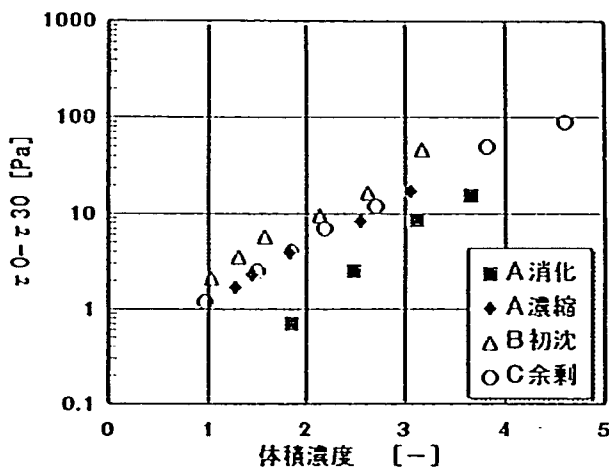


図-7 体積濃度と $\tau_0 - \tau_{30}$

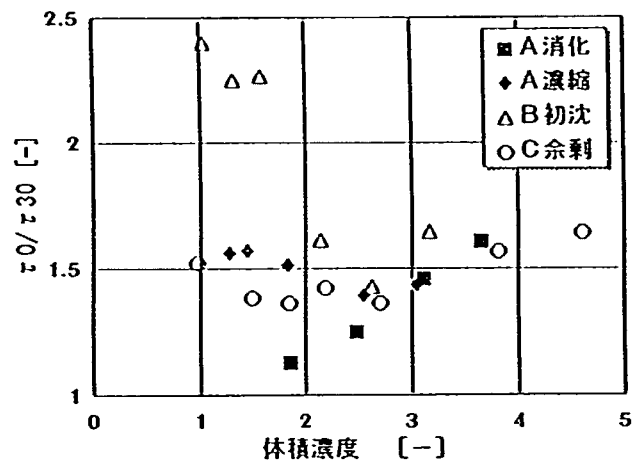


図-8 体積濃度と τ_0 / τ_{30}

3.3 チクソトロピー性

ホールド法による測定開始時の速度勾配 $150[1/s]$ におけるせん断応力を τ_0 、30分後のせん断応力を τ_{30} とし、 $\tau_0 - \tau_{30}$ 、 τ_0 / τ_{30} という2つの値について整理した(図-7, 8)。図-7より、体積濃度が大きいほど、 $\tau_0 - \tau_{30}$ も大きくなった。また、図-6からもわかるように体積濃度が約1以下ではチクソトロピー性は見られなかった。また、図-8より、 τ_0 / τ_{30} は約1.5であった。

これらのことより、管路輸送システムを設計する際には、体積濃度が約1以下ではチクソトロピー性を考慮しなくてもよく、体積濃度約1以上でも安全率を最大で1.5程度とれば汚泥のチクソトロピー性に対応できるといえる。また、体積濃度約1以下ではチクソトロピー性が見られないということは、粒子が自由に動ける領域がある汚泥には、チクソトロピーという現象が起こらないということを示している。

4. まとめ

- (1). 体積濃度が約0.4以下の汚泥はニュートン流動を示す。また、汚泥のレオロジー定数はその種類に関係なく、体積濃度の関数で表すことができる。
- (2). 汚泥は体積濃度約1以下ではチクソトロピー性を示さない。また、 τ_0 / τ_{30} の値は、体積濃度に関係なく約1.5である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 笠井ほか：回転粘度計による汚泥の粘度の測定，土木学会第49回年次学術講演会，1994。

下水汚泥の流動特性に関する
調査報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3363号
平成7年4月 (1995年)
建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室

要 旨

下水汚泥の流動特性に関して、回転粘度計を用いて粘度測定を行い、管路輸送時の圧力損失予測を目的とした粘度測定方法、非ニュートン流体モデルの適用、チクソトロピー挙動、腐敗、温度の影響等について検討を行った。

キーワード：下水汚泥、非ニュートン流体、チクソトロピー、管路輸送、回転粘度計

郵便はがき

50円切手
をはいて
下さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料 第 3363 号 部

上記のとおり受領いたしました。

所属 (住所)

氏名 印

土木研究所資料 第 3363 号

○