

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 566 Dec. 1986

回転粘度計による底泥の流動特性の検討

鶴 谷 広 一
中 野 晋
鷹 濱 潤

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 測定装置と測定方法	4
2.1 回転粘度計	4
2.2 測定方法	5
2.3 測定ずり速度領域の検討	7
2.4 測定ケース	8
2.5 データ解析の方法	9
3. 測定結果とその考察	9
3.1 非ニュートン流体の性質	9
3.2 底泥の種類による流動特性の違い	11
3.3 その他の条件が流動特性に及ぼす影響	16
4. ま と め	21
5. あとがき	22
参 考 文 献	22
主要記号一覧表	22
付録 タイ泥採取位置図	23
流動曲線図及び粘度曲線図	24
測定結果表	28

Investigation of Rheological Properties of Soft Mud with a Rotary Visco-meter

Hiroichi TSURUYA*
Susumu NAKANO**
Jun TAKAHAMA**

Synopsis

It is important to investigate the rheological properties of soft muds in considering the transport process of bottom materials in sea area or estuaries. In this study, rheological properties of muds under various conditions were investigated by using a coaxial-type rotary visco-meter.

In the field, bottom mud suffers a shear stress under the action of ocean waves. In this case we can make a rough estimate of a strain velocity $D (=du/dz)$ in mud as $D < 10s^{-1}$. In this study, therefore, the strain velocity D was set less than $10s^{-1}$ in measuring the relationship between shear stress and strain velocity (flow curve). In the first place, several kinds of muds were used to get flow curves and compared each other. Various factors which affect the rheological properties of muds such as temperature, salt concentration and changing rate of strain velocities were also examined.

In this study, we obtained the following conclusions:

- 1) Soft muds can be treated as Bingham fluid in the range of very low strain velocities ($D < 1s^{-1}$).
- 2) Yield stresses and plastic viscosities of muds are dependent on the rate of water content and decrease with a power of water content.
- 3) The influence of salinity on rheological properties of mud varies with the kind of mud. Bentonite clay is strongly affected by salinity. The increase in salinity makes bentonite more fluidity.

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

回転粘度計による底泥の流動特性の検討

鶴谷 広一*・中野 晋**・鷹濱 潤**

要 旨

海域の浮泥・底泥の移動現象を明らかにする上で重要となる軟弱な底泥の流動特性について調べた。測定はずり速度を連続的に変化させられる同心二重円筒式回転粘度計を用いた。そしてこれまでほとんど測定されていないずり速度が 0 s^{-1} 付近の低ずり速度領域での底泥の流動特性について検討した。その際、底泥の種類のほか、含水比、泥温、塩分濃度、ずり速度の変化率などを変えて、それらの流動特性に及ぼす影響について調べた。本研究での主要な結論は以下のようなものである。

- 1) ほとんどの底泥はずり速度が小さい範囲ではビンガム流体的な流動特性を示し、降伏値を持つ。
- 2) 底泥の降伏値、塑性粘度は底泥の含水比に大きく影響を受け、含水比のべき乗で減少する。
- 3) 間引き水の塩分濃度は底泥によっては流動特性に重大な影響を及ぼし、ベントナイトの場合には塩分濃度の増加にともなって流動しやすくなる。

1. まえがき

外国の大河川の河口周辺には重要な港湾が建設されることが多い。こうした場所では粘土・シルトあるいは細砂といった微細な粒子が沈降・堆積し、港湾や航路の埋没を引き起こす現象、いわゆるシルテーションが重要な問題となっている。わが国でも現在、熊本市沖の有明海で新しい港湾が建設中であるが、ここはシルト質粘土を多く含む軟弱な底泥が厚く堆積しており、港湾や航路の埋没対策についての技術開発が急務となっている。

底質がシルトや粘土の微細粒子で構成される場合には、底質の挙動は粒子間の化学的結合力等に起因する粘着力に依存するようになるため、砂床での底質移動機構とは異なった取扱いが必要である。

砂床の場合、底質の物理的特性は砂粒径、砂粒子の比重、砂粒形状等主として個々の粒子の特性によるところが大きい。それに比較して底泥は連続体としての性質が強く、その物理的特性は底泥を構成している粘土鉱物の種類や性質はもちろんのこと、底泥に含まれる有機物や金属イオンの量、含水比等多くの因子が関与し、複雑であるため、これまでその物理的特性、特に外力に対する変形や流動についてまだ十分明らかになっていない。

物質の変形あるいは流動する性質は“レオロジー”と呼ばれ、底泥の場合には弾性、粘性、塑性の3つが考えられる。含水比が低くて、底泥のせん断強度が大きい場合には、応力解除後に変形を元にもどそうとする復元力（弾性力）は無視できない。しかし、シルテーションで問題となる含水比が高く、軟弱な底泥は小さな応力で簡単に流動する物質であり、弾性よりも粘性及び塑性に関する流動特性が重要である。

粘土ペーストなどの流動特性についての研究は20世紀初頭の Bingham の研究以来、科学の広い分野で行われている。¹⁾ しかし、これらの物質は一般にひずみ速度（ずり速度）とせん断応力が単純な比例関係では表せない非ニュートン流体であるため、精密な測定が可能になったのは近年になってからである。

非ニュートン流体の流動曲線（ずり速度とせん断応力の関係）を求めるためにはずり速度制御の場合は多段階のずり速度でせん断応力（せん断応力制御の場合は多段階のせん断応力状態でのずり速度）を測定する必要がある。したがって細管式粘度計や回転数が1種類か2種類しか変えられない回転粘度計は、非ニュートン流体の流動曲線の測定には不向きである。特に底泥は降伏値を持つ流動を示す塑性の強い物質である。降伏値を持つ物質

* 海洋水理部 水理研究室長

** 海洋水理部 水理研究室

の流動を調べるためには 0 s^{-1} 付近の小さなずり速度レベルまで詳細に測定する必要がある。

底泥の流動曲線を求める実験は粘土ペーストについての実験も含むと国内だけでもかなりの数の研究²⁾⁻¹⁰⁾が行われている。しかし 0 s^{-1} 近くの小さいずり速度領域で精密な測定を行った研究としては大坪⁹⁾の研究と楠田ほか⁹⁾の研究に限られる。

大坪はずり速度を連続的に変化させられるサーレ型の二重円筒式回転粘度計(われわれのものと同原理的には同じ)を用いて、各種底泥(カオリナイト, モンモロロナイト, ベントナイト, 現地泥)の流動特性を調べている。そして、流動特性の形態として降伏値が存在し、流動曲線があるずり速度で折れ曲がるカオリナイト型粘土グループとべき乗則が成立するベントナイト型粘土グループに分類した。また流動曲線の代表量として、2つの降伏値 τ_{y1} , τ_{y2} と2つの粘度 η_1 , η_2 を提案し、それらの性質と限界掃流力等との関係についても詳細に検討し、大きな成果をあげている。しかし短時間で広いずり速度範囲($0 \sim 150\text{ s}^{-1}$ あるいは $0 \sim 346\text{ s}^{-1}$)を連続的に変化させて測定したために、 0 s^{-1} 付近の流動曲線の代表量である η_1 はずり速度変化率(ずり速度の変化速度)が大きくなるほど低下しており、 0 s^{-1} 付近の流動曲線にはずり速度の非定常性の影響が無視できない。

楠田ほか⁹⁾の研究ではずり速度が $0 \sim 0.3\text{ s}^{-1}$ という非常に狭い範囲の測定をひずみ制御及び応力制御の両方式で行っている。しかし、彼らの目的は底泥の流動特性の検討ではなく、回転粘度計の測定で問題となる円筒壁面と試料との境界面で生ずるスリップ現象の解明や制御方法による流動特性の変化など、測定上での問題点の解明である。そのため低ずり速度領域での底泥の流動特性の把握には至っていない。

波動場での底泥の運動は周期的であるので、底泥内のずり速度も 0 s^{-1} を中心に周期運動すると考えられる。

また2.3で述べるようにずり速度の絶対値は波動場では高々 10 s^{-1} のオーダー程度であると推定される。したがって本研究では実際の海域での底泥の運動現象を解析するのに最少限必要と考えられるずり速度が 10 s^{-1} 以下の範囲の底泥の流動特性に注目して測定を行っている。測定は大坪と同様にはば連続的にずり速度を変えられるサーレ型同心二重円筒式回転粘度計を用い、できるだけずり速度変化にともなう非定常性が小さくなるようにずり速度を変化させた。こうした結果、これまで十分には測定されていないずり速度が 10^{-2} s^{-1} のオーダーまでもかなり正確に測定され、降伏値などが求められた。また試料の種類その他、含水比、泥温、塩分濃度などを変えて、それらの流動特性に及ぼす影響についても検討した。

2. 測定装置と測定方法

2.1 回転粘度計

底泥の流動特性についての測定はサーレ型二重円筒式の回転粘度計(レオマット115, コントラパス社製)を用いた。写真-1に今回用いた装置の全景を示す。本装置は回転粘度計の他に回転粘度計の制御とデータ集録を行うためのパーソナルコンピュータ(PS-85, ティアック(株)製), XYレコーダ, 制御信号・出力信号調整用の直流増幅器及び恒温水槽から構成される。

この回転粘度計ではコントロール部のボタンスイッチによる一定回転速度での測定のほか、外部からの電圧入力により、回転速度を自由に变化させる測定も可能である。図-1は外部入力電圧 $E(\text{V})$ と1分間当たりの内筒の回転数 $n(\text{rpm})$ との関係であり、

$$n = 0.780 E \quad (1)$$

で表される。なお今回の測定では特に低ずり速度領域での測定を行うため、内筒の回転速度を減速ギアで1/100に落として使用している。

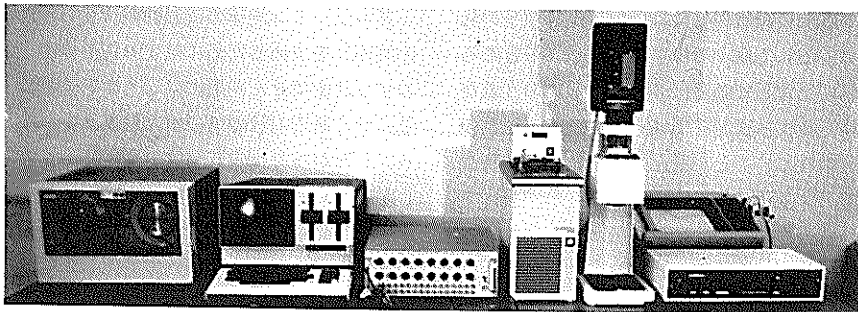


写真-1 粘度測定装置の全景(左から磁気テープ装置, パソコン, 直流増幅器, 恒温装置, 回転粘度計, XYレコーダ)

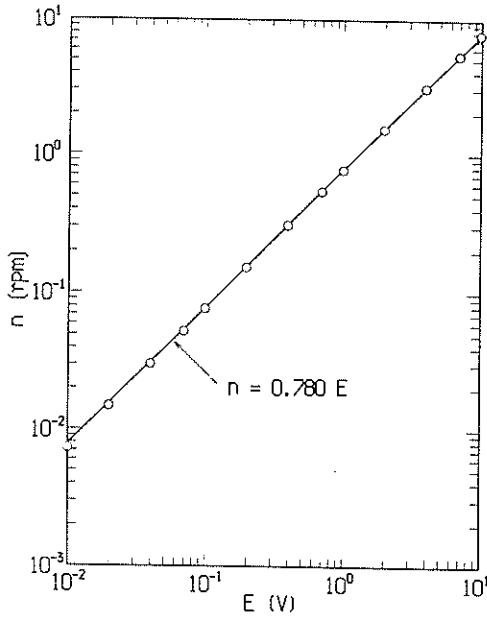


図-1 外部入力電圧と内筒の回転数の関係

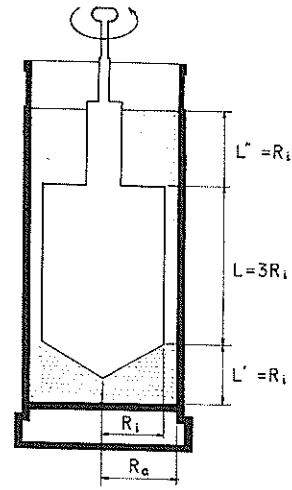


図-2 DIN型測定システム断面図

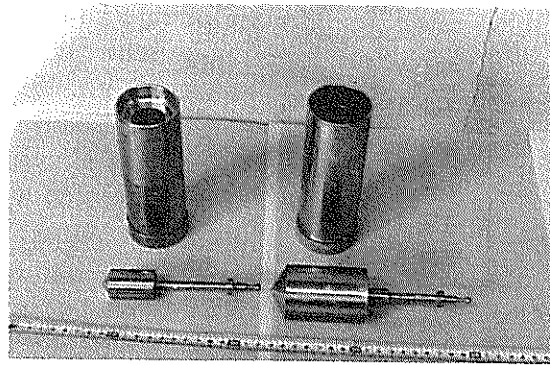


写真-2 DIN型測定システム（左がDIN125, 右がDIN145）

図-2はこの装置で使用した測定システムの断面図で、ドイツ工業規格（DIN）に準拠する内筒の直径が45mmのDIN145及び25mmのDIN125の2種類を用いている。写真-2に両測定システムを示す。右側がDIN145、左側がDIN125である。DIN型の測定システムでは外筒と内筒の半径比 $\delta = R_e / R_i$ は1.0847である。この場合には内筒と外筒の間で生ずる流れの平均的な流速勾配、つまりずり速度 D (s^{-1}) は次式で近似される。

$$D = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \quad (2)$$

したがって、今回の装置では外部入力電圧 E とずり速度 D の間には次の関係が成り立っている。

$$D = 1.007 E \quad (3)$$

2.2 測定方法

(1) 回転粘度計の制御とデータ集録

今回の測定では回転粘度計の内筒の回転速度の制御と内筒が受けるせん断応力についてのアナログ出力のAD変換及び磁気テープへのデータ集録をほぼ同時に1つのパソコンで行っている。

図-3にパソコンによる回転粘度計の制御とデータ集録のフローチャートを示す。ファイル識別名の試料ナン

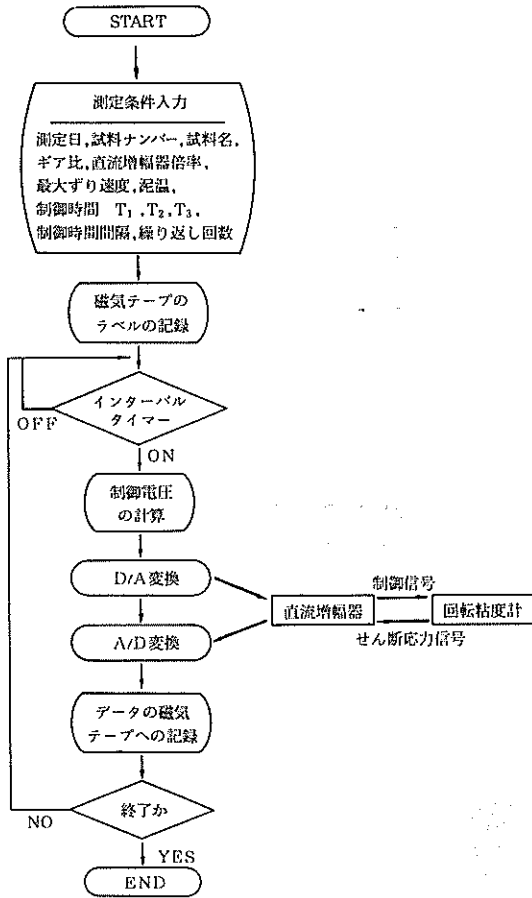


図-3 回転粘度計の制御とデータ集録のフローチャート

バーの他、最大ずり速度、制御時間等の条件が入力されると磁気テープのラベルに測定条件が記録され、スタート信号の入力待ちとなる。試料を充てんした測定システム（ローター及び試料容器）をセットした後、キーボードからスタート信号を入力すると決められた時間間隔（通常は0.5秒）で制御電圧値の計算、制御電圧の出力、回転粘度計で測定したせん断応力値のA/D変換、磁気テープ装置へのデータ出力（制御電圧値及びせん断応力値）が繰り返される。

図-4は今回の測定で用いたずり速度の時間変化曲線である。底泥の流動特性に及ぼすずり速度時間変化率について調べた測定を除き、 T_1 、 T_2 、 T_3 としてそれぞれ2秒、300秒、2秒を採用した。その際ずり速度をコントロールする制御電圧は上昇時・下降時、ともに600段階、0.5秒ごとに変化させている。また図に示しているように、1回の測定で、上昇・下降を3サイクル繰り返

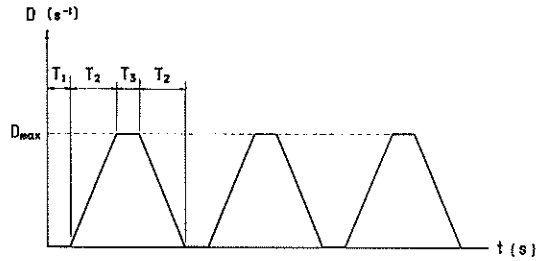


図-4 ずり速度の時間変化曲線

した。したがって、測定に要する時間は約30分である。粘土サスペンションの場合、圧密・沈降の影響を考慮する必要がある。大坪⁵⁾が行った沈降試験によると含水比500%のカオリナイトでは、約30分で沈降面が初期高さの95%程度になることが測定されている。今回の測定では含水比 W は最大でも500%程度であるため、その場合でも沈降による誤差は数%程度と思われる。

2.3で詳しく述べるが、最大ずり速度 D_{max} は $10s^{-1}$ とした。600段階で $0-10s^{-1}$ の間を変化させるため、ずり速度についての分解能は $0.0167s^{-1}$ である。なお最大ずり速度に対するローターの回転数は $7.8rpm$ である。

(2) 底泥試料の作成

底泥試料としては、関係海域の現地泥を用いてその流動特性を各種の条件で行うことが望ましい。しかし現地泥の場合には貝がら等の固形物の除去や泥内の塩分の処理（たとえば、脱塩）等、前処理が必要であるため、今回の測定では市販の粘土粉末を用いた測定を中心に実施した。

使用した市販粘土はカオリナイト（商品名 Engelhard ASP 600、中央粒径 $0.8\mu m$ 、比重 2.670）及びベントナイト（商品名豊順鉱業、妙義印、中央粒径 $6.5\mu m$ 、比重 2.614）の2種類である。このほか現地泥として熊本港付近での採取泥とタイ国4か所（付図-1参照）で採取した泥についても測定した。カオリナイト、ベントナイトと熊本泥の土質試験結果を表-1に示す。

市販粘土粉末については、一定量の水道水あるいは食塩水の中にプロペラ式攪拌機で攪拌しながら、粘土粉末を少量ずつ加えて底泥試料を作成した。含水比を変化させる実験では最初に含水比の低い試料を多めに作成して、その試料で測定した後、少しずつ水あるいは食塩水を加えて攪拌して、含水比を上げ、次の測定を行うようにした。

現地泥については粗砂や貝がら等を取り除くため、 $0.42mm$ のふるいで一度裏ごししてから、食塩水（ $\rho = 1.03g/cm^3$ ）を加えて含水比を調整した。

表-1 粘土と底泥の土質試験結果

試験種目		カオリナイト	ベントナイト	熊本港付近泥
土粒子の比重		2.670	2.614	2.697
コンシステンシー特性	液性限界 W_L	70.5%	183.9%	79.4%
	塑性限界 W_p	32.3%	24.8%	41.3%
	塑性指数 I_p	38.2%	159.1%	38.1%
	流動指数 I_f	17.8	39.6	17.4
	塑性図分類	(CH)	(CH)	(CH)
粒度特性	中央粒径 d_{50}	0.8* μm	6.5 μm	13.0 μm
	礫分(%)	0	0	0
	砂分(%)	0	5.3	5.0
	シルト分(%)	} 100.0	} 94.7	} 95.0
	粘土分(%)			

* エンゲルハード社のデータによる

正確な含水比は測定後、定温乾燥器で乾燥させることにより、乾燥前後の重量測定値から求めた。

2.3 測定ずり速度領域の検討

回転粘度計によってある物質の流動特性を調べる上で、その物質が実際に運動する状況でのずり速度の概略値をあらかじめ検討しておくことが重要である。特に測定対象物質の粘度がずり速度により変化するという非ニュートン流体の場合には、現実には起きているずり速度の範囲と異なるずり速度で測定を行っても全く無意味なものになってしまう。

さて今回対象としているものは、底質として軟弱な底泥が堆積している海域で、波によって底泥がどのように移動するのかという問題である。したがってここでは底泥床上の水面を波が伝播している場での底泥内で生ずるずり速度の概略値について検討する。

図-5に示すように、水深が h_1 で底泥厚さが h_2 の場合を考える。微小振幅波を考えれば底面での流速 u_b は

$$u_b = \frac{a\sigma}{\sinh kh_1} \sin(kx - \sigma t) \quad (4)$$

で表される。ここに a は水面波の片振幅、 σ は角周波数、 k は波数である。今、底泥の表面が水底面付近の水粒子と同程度の速度で運動すると仮定する。その場合には底泥層の層全体での平均的な速度勾配 $\frac{du}{dz}$ は

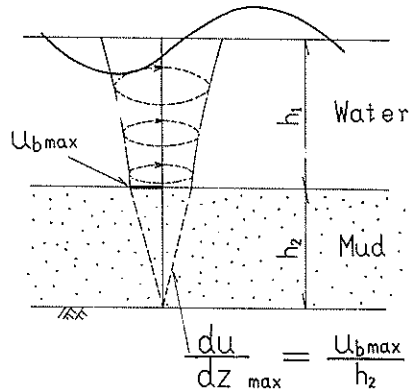


図-5 ずり速度のオーダー検討図

$$\frac{du}{dz} \approx \frac{u_b}{h_2} \quad (5)$$

で表される。これより底泥内で生じていると考えられる層平均的な最大ずり速度は

$$\frac{du}{dz_{max}} \approx \frac{a\sigma}{h_2 \sinh kh_1} \quad (6)$$

程度であると見積もられる。

表-2は現地スケールでの(6)式で計算される層平均的な最大ずり速度の値である。表に示す程度の条件では $\frac{du}{dz_{max}}$

は 1 s^{-1} のオーダー程度である。また実験室スケールでは表-3に示すように 0.1 あるいは 1 s^{-1} のオーダーである。表-1, 表-2よりわかるように現地スケールと実験室スケールの間で $\widehat{du/dz}_{\max}$ のオーダーに大きな違いは見られない。

表-2 ずり速度のオーダーの検討 (現地スケール)

h_1 (m)	h_2 (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$\widehat{du/dz}_{\max}$ (s^{-1})
4	0.5	4.2	1.4	1.52
"	1	"	"	0.758
"	0.5	4.9	1.96	2.37
"	1	"	"	1.19

表-3 ずり速度のオーダーの検討 (実験室スケール)

h_1 (cm)	h_2 (cm)	\bar{T} (s)	\bar{H} (cm)	$\widehat{du/dz}_{\max}$ (s^{-1})
30	10	0.7	4	0.298
"	"	1.4	"	0.905
"	20	0.7	"	0.148
"	"	1.4	"	0.452
20	10	0.7	"	0.645
"	"	1.4	"	1.21
"	20	0.7	"	0.323
"	"	1.4	"	0.603

しかし、ここでの考え方はあくまでも図-5に示したようにかなり単純化した仮定によるものであり、1オーダー程度の許容値を考えるほうが無難である。したがって最大ずり速度としては 10 s^{-1} 程度まで測定する必要がある。また波動場であるため、ずり速度が 0 s^{-1} となる場合もあるので、ずり速度が 0 s^{-1} 付近の微小なずり速度の領域の流動特性も調べる必要がある。

これらのことを考慮して測定するずり速度の範囲としては 0 から 10 s^{-1} とし、その間を 600 段階に分けてほぼ連続的にずり速度を変化させて測定することとした。

2.4 測定ケース

底泥試料の種類による流動特性の違いを調べる実験での測定条件を表-4に示す。それぞれの底泥について記号で示したように含水比を変えて測定した。

表-5は流動特性に及ぼす泥温の影響を調べる実験の測定条件である。この実験ではカオリナイト+水とベン

表-4 底泥の種類と測定含水比

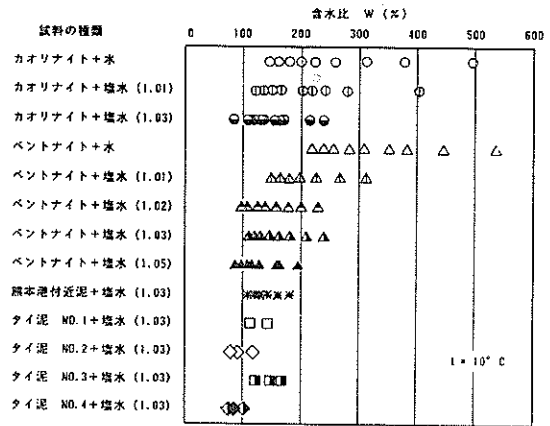


表-5 流動特性に及ぼす泥温の影響についての測定条件

試料	混合水	W (%)	D (1/s)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
カオリナイト	水	206	1	5 ~ 50
"	"	196	0.5	"
"	"	153	1	"
"	"	150	0.5	"
カオリナイト	水	150	0 ~ 10	5, 10, 15, 20, 25, 30
"	"	200	"	"
"	"	250	"	"
ベントナイト	塩水(1.03)	173	1	5 ~ 50
"	"	166	0.5	"
"	"	113	1	"
"	"	117	0.5	"
"	"	99	1	"

トナイト+塩水 ($\rho=1.03\text{ g/cm}^3$) の2種類の試料について測定を行っている。また、この実験においてはずり速度を $0 \sim 10\text{ s}^{-1}$ の間で変化させる通常の測定を泥温を6段階変えて測定するものと、ずり速度を一定にして泥温を連続で変化させて粘度の変化を調べるものの2種類を実施した。

後者の実験は恒温水槽により泥温を 5°C 以下に下げたからローターを一定回転速度 (ずり速度 1 あるいは 0.5 s^{-1} に対応) で回転させ、測定を開始して、その後恒温水槽の水温を 50°C 以上まで連続的に上げることにより行っている。このときの泥温は回転粘度計の測定容器 (外筒) の外壁の温度をサーミスタ温度計 (宝工業(株)製、指示計 D111 型、センサー PPK-67 ($\phi 1\text{ mm}$)) で測定

した。この場合も回転粘度計のせん断応力出力と温度計の出力をパソコンでAD変換して磁気テープに集録した。サンプリング周波数は1Hzで、1回の測定で約30分間を要した。

表-6はざり速度の上昇時間及び下降時間 T_2 を変えて、流動特性に及ぼすざり速度変化率の影響について調べた実験の測定条件を示している。また最大ざり速度を $D_{max} = 100 \text{ s}^{-1}$ とし、 T_2 は300sとして、最大ざり速度による流動特性の違いを調べる実験もカオリナイトについて実施している。

表-6 流動特性に及ぼすざり速度変化率の影響についての測定条件

試料	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	時間間隔(s)
カオリナイト+水 含水比 = 200% $D = 0 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	2	60	2	0.1
	2	120	2	0.2
	2	180	2	0.3
	2	300	2	0.5
	2	420	2	0.7
	2	600	2	1.0

2.5 データ解析の方法

底泥は一般に、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とは外力が作用して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、ある時間外力が取り除かれて静止状態に置かれると元の構造に回復する現象である。こうした流体の流動特性を調べる場合にはその流体に作用した外力の履歴を考慮する必要がある。

履歴の影響をできるだけ小さくする方法として、2つ考えられる。1つは十分に長い静止状態を経過した流体で内部構造が安定しているときの流動曲線を調べるもので、自然に圧密沈降した底泥の降伏値やせん断強度を調べる場合には重要な意味がある。もう1つは十分に応力を加えて内部破壊が定常化した状態で、流動曲線を求めるもので、これは底泥の運動時の流動特性を調べる場合には重要となる。

今回の測定は主として底泥の運動時の流動特性を調べることを目的としている。したがって流動曲線としては応力が連続的に加えられて、すでに内部破壊が定常化している状態で求められるべきである。

今回の測定では図-4に示したようにざり速度の上昇・下降のサイクルを3回繰り返して測定している。各サイ

クルの流動曲線を比較すると、1回目のサイクルの流動曲線は2、3回めのものとはかなり異なっている。特に初めての上昇時には、2、3回めに比べるとかなり大きなせん断応力値のピークが現れる。このピークは試料を回転粘度計にセットしてからの静置時間が長いほど大きくなる。これは粘度計にセットする前にプロペラ式攪拌器で10分程度攪拌しているが、この際に内部構造が破壊され、ゾル化した底泥が、静置状態に放置されてから急速に構造を回復することによると思われる。ところが、2回めと3回めの流動曲線はどの底泥でもほとんど一致しており、1回目のサイクルで内部構造の破壊はほぼ定常になったものと考えられる。したがって流動曲線としては、2回め、3回めのサイクルの各ざり速度ごとの平均をとって求めることにした。また上昇時の流動曲線では $D < 0.1 \text{ s}^{-1}$ の小さなざり速度領域でせん断応力値のわずかなピークが現れることがあった。この原因として、回転速度が下降から上昇に転ずる間に2秒間の静止時間があり、この間にわずかながらも構造回復があったことも考えられる。そこで、流動曲線としては下降時のものを採用して、その特性について検討することにした。なお、3.3で後述するが、 T_2 が300秒以上になると上昇時と下降時の流動曲線はかなり一致しており、下降時の流動特性だけを調べても一般性は失わないと思われる。

3. 測定結果とその考察

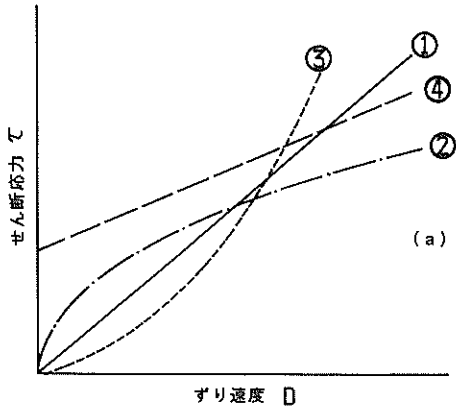
3.1 非ニュートン流体の性質

濃度の希薄な粘土溶液で粘土粒子間の相互作用が無視できる場合には一般にその溶液はニュートン流体と考えることができる。ニュートン流体では図-6(a)(b)の①の直線に示すようにせん断応力 τ とざり速度 D は比例し、粘度 $\mu (= \tau/D)$ はざり速度 D にかかわらず一定となる。

しかし濃度が高くなり、粒子が相互に影響を及ぼし合うようになると粘土溶液は通常、非ニュートン流体となる。(なお、非ニュートン流体の定義として、 $\tau-D$ 曲線が原点を通るが、 τ と D が比例しない流体だけをさす場合があるが¹⁾、ここではニュートン流体ではないものすべてを含むこととする。) 非ニュートン流体ではざり速度 D とせん断応力 τ との関係は直線的とはならず、粘度 μ は D にともなって変化する。以下に代表的な非ニュートン流体の流動特性について紹介する。

(1) 擬塑性流体・ダイラタント流体

擬塑性流体・ダイラタント流体はともに流動曲線が原点を通る流体である。しかし、ざり速度の上昇に対する粘度の変化特性は逆である。つまり、ざり速度を上げて



- ① ニュートン流体
- ② 擬塑性流体
- ③ ダイラタント流体
- ④ ビンガム流体

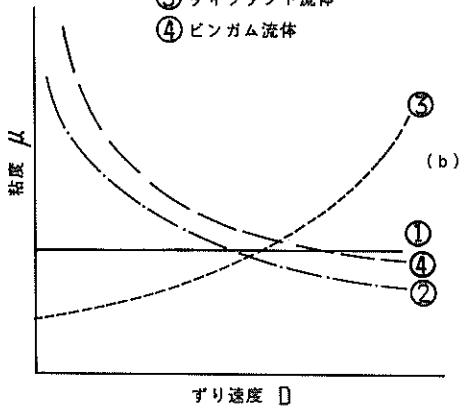


図-6 各種流体の流動曲線と粘度曲線

いくと粘度が低下する流体は擬塑性流体、ずり速度を上げていくと粘度が上昇する流体はダイラタント流体と呼ばれ、その流動曲線、粘度曲線はそれぞれ図-6(a), (b)の②の曲線、③の曲線で表される。

特にせん断応力 τ とずり速度 D が

$$\tau = \mu_p D^n \quad (7)$$

で表される流体はべき乗則流体である。ここで μ_p , n は流体の種類によって定まる物質定数で、 μ_p は擬塑性粘度、 n は構造粘度指数と呼ばれる。そして、 $n < 1$ のときは擬塑性流体、 $n = 1$ のときはニュートン流体、 $n > 1$ のときはダイラタント流体を表す。

また、べき乗則流体の流動曲線、粘度曲線を両対数紙上で表すと図-7のように直線で表される。

今回の測定でもカオリナイトの底泥試料は $D \gg 1 \text{ s}^{-1}$ の範囲でべき乗則流体の性質を示した。

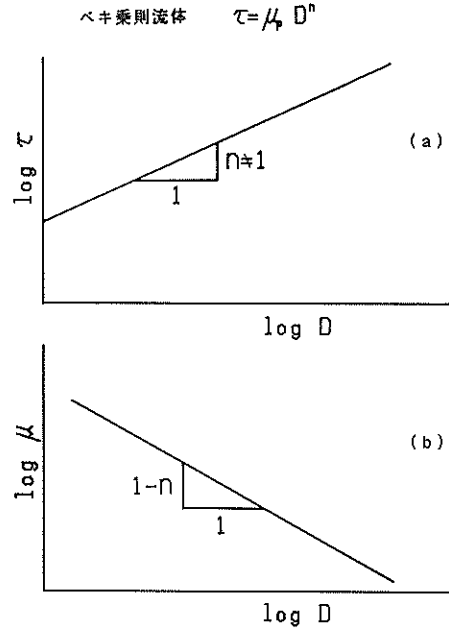


図-7 べき乗則流体の流動曲線と粘度曲線

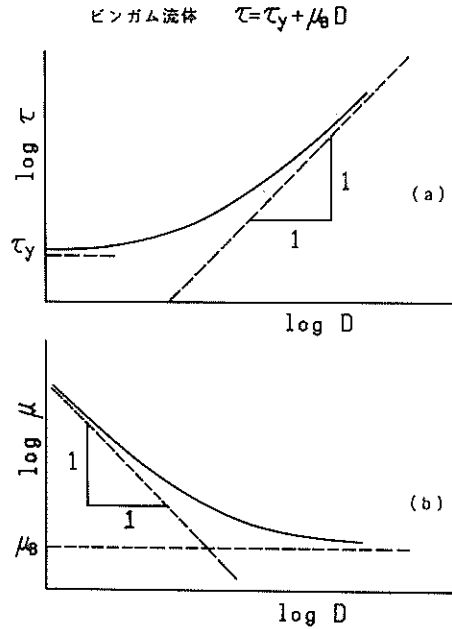


図-8 ビンガム流体の流動曲線と粘度曲線

(2) ビンガム流体

図-6(a)の④の直線のような流動特性をもつ流体をビンガム流体と呼ぶ。この流体はせん断応力が降伏値 τ_y 以上になると流動を始め、その後の τ と D の関係は直線で表される。つまり τ と D の関係は次式で表される。

$$\tau = \tau_y + \mu_0 D \quad (8)$$

ここで μ_0 は塑性粘度と呼ばれる。しかし、降伏値をもつ流体でも、 τ と D の関係がずり速度の広い範囲で直線で表されるものは少なく、ずり速度のごく狭い範囲で τ と D の関係が直線近似される流体が多いようである。したがってビンガム流体は降伏値を持つ流体の理想的流体と言える。図-8 にビンガム流体の流動曲線及び粘度曲線が両対数紙上に表される場合の模式図を示す。ビンガム流体の流動曲線は両対数紙上では D が小さい領域で降伏値 τ_y に漸近し、 D が大きい領域ではほぼ τ は D に比例するようになる。またビンガム流体の粘度曲線は両対数紙上では D が小さい領域でほぼ μ は D に反比例して、 D が大きい領域では塑性粘度 μ_0 に漸近する。

今回の測定ではほとんどの底泥のずり速度の小さい領域 ($D < 1 \text{ s}^{-1}$ 程度) でビンガム流体としての性質を示した。

3.2 底泥の種類による流動特性の違い

底泥は土粒子、水、有機物、金属イオン等の混合物であるのでその流動特性は構成因子の性質や割合等によって大きく変化する。

(1) 底泥の流動曲線と粘度曲線

a. カオリナイト

図-9、図-10 にカオリナイトに水を加えて混合した試料の流動曲線及び粘度曲線を示す。図に示した実線は

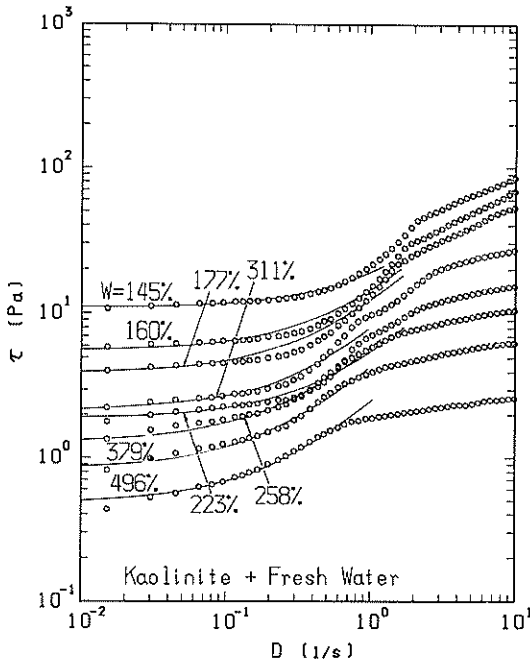


図-9 カオリナイト+水の流動曲線

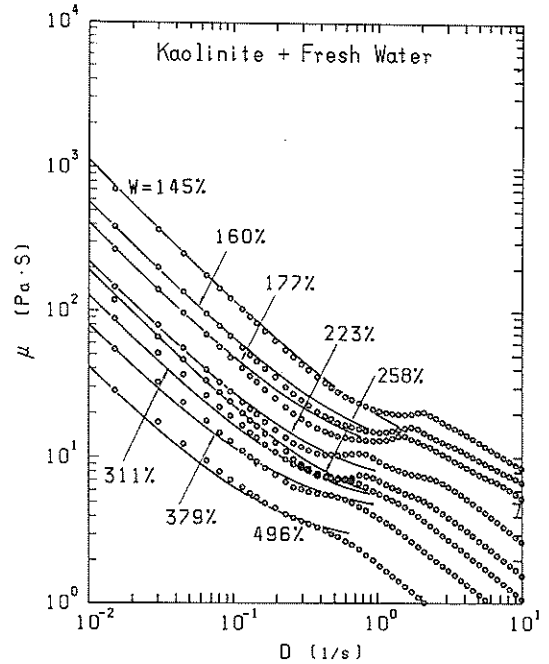


図-10 カオリナイト+水の粘度曲線

式(8)で与えられるビンガム流体の場合の流動曲線で、 D の小さい領域ではカオリナイトはビンガム流体としての挙動を示すことがわかる。また $D > 1$ の領域では τ と D の関係はほぼ直線で表され、この範囲ではカオリナイトがべき乗則流体となることがわかる。粘度曲線からはずり速度の上昇にともなって粘度が急激に低下することが明らかである。

カオリナイトに塩水を加えて混合した測定(付図-2~5)でも流動曲線の特徴はほぼ同一で、 D が小さい領域でビンガム流体の性質を持ち、 D が大きい領域 ($D > 1$) ではべき乗則流体の性質を持つ。

b. ベントナイト

ベントナイトに水を加えて混合した試料の流動曲線及び粘度曲線を図-11、図-12 に示し、ベントナイトに塩水 ($\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$, ρ : 塩水の密度) を加えて混合した試料の流動曲線及び粘度曲線を図-13、図-14 及び付図-6~11 に示す。

ベントナイトの場合には水を混合するか、塩水を混合するかで、その流動特性はかなり変化する。粘度や降伏値は塩水混合時のほうが水道水混合時よりも同一含水程度を比較すると大幅に低下している。

また流動曲線の特徴も両者で異なっている。水道水混合試料は実線で示したビンガム流体についての曲線よりは破線で示したべき乗則流体としての性質をずり速度の

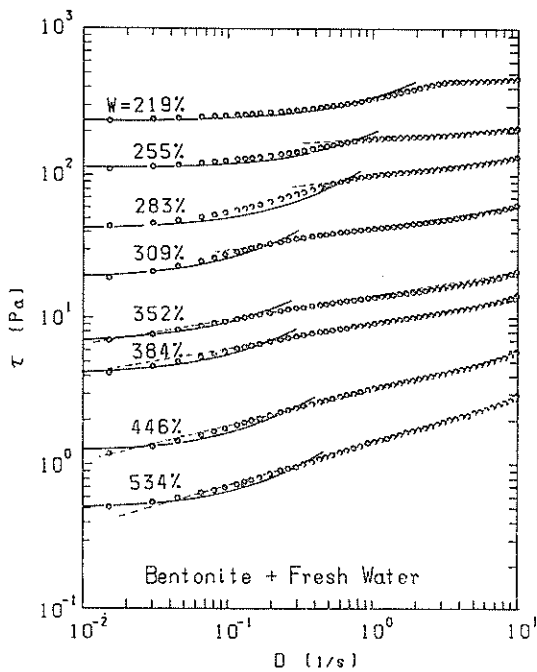


図-11 ベントナイト+水の流動曲線

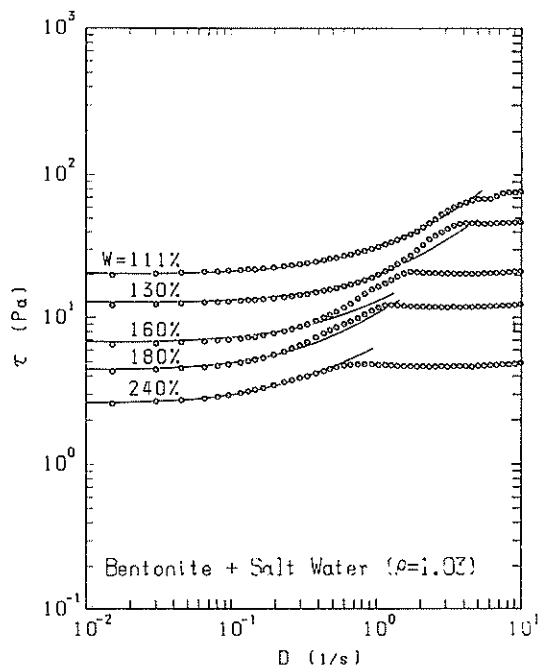


図-13 ベントナイト+塩水 ($\rho=1.03\text{g/cm}^3$) の流動曲線

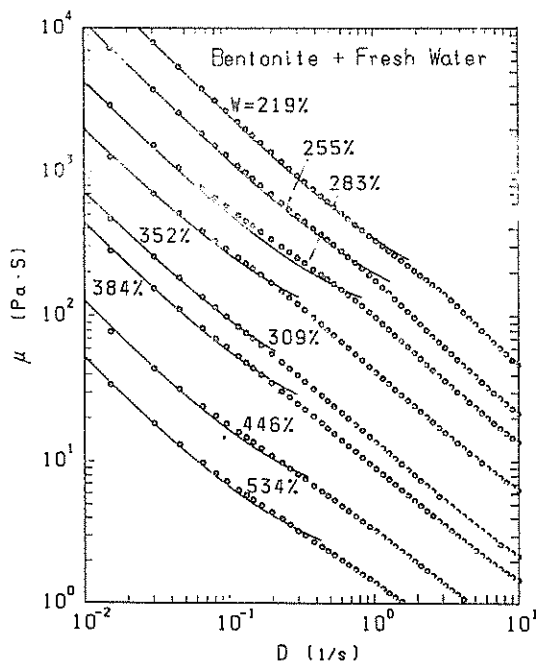


図-12 ベントナイト+水の粘度曲線

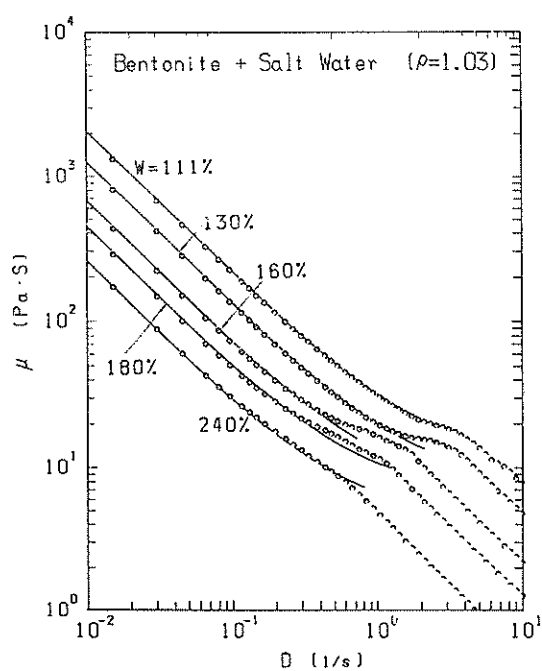


図-14 ベントナイト+塩水 ($\rho=1.03\text{g/cm}^3$) の粘度曲線

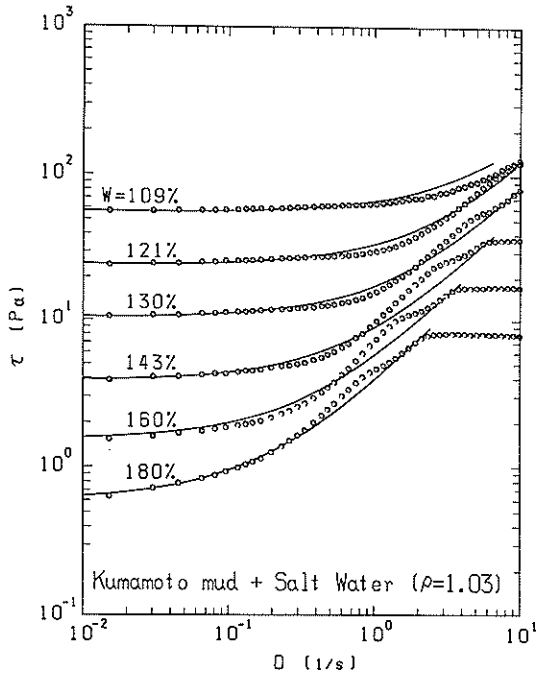


図-15 熊本港付近泥+塩水 ($\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$) の流動曲線

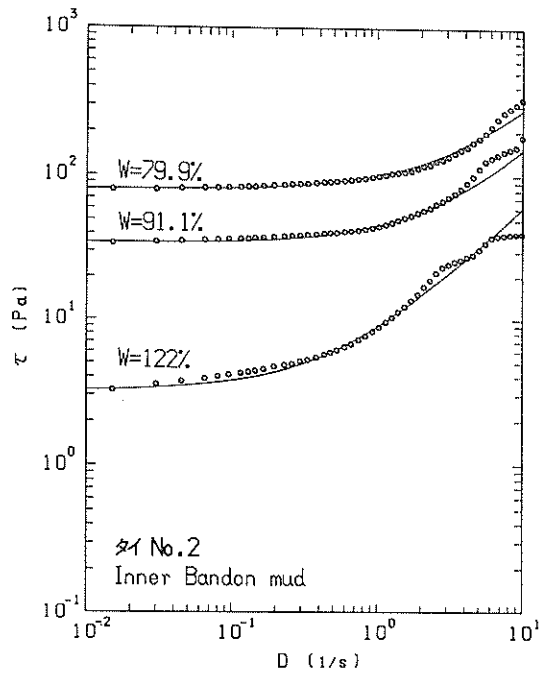


図-17 タイ No.2 泥 (Inner Bandon) + 塩水 ($\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$) の流動曲線

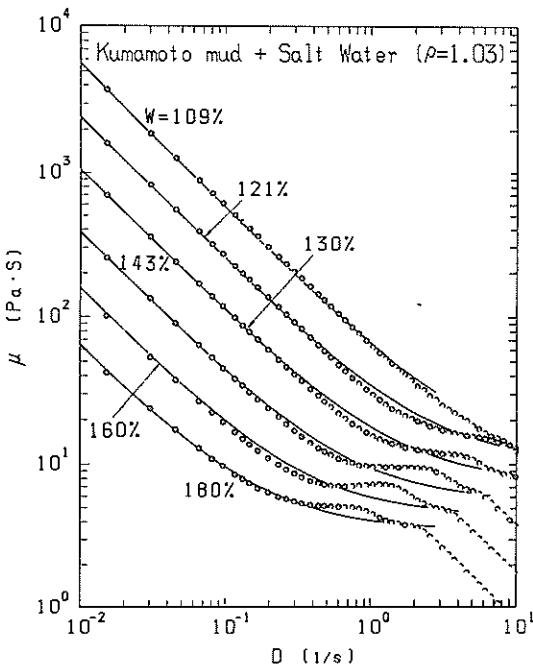


図-16 熊本港付近泥+塩水 ($\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$) の粘度曲線

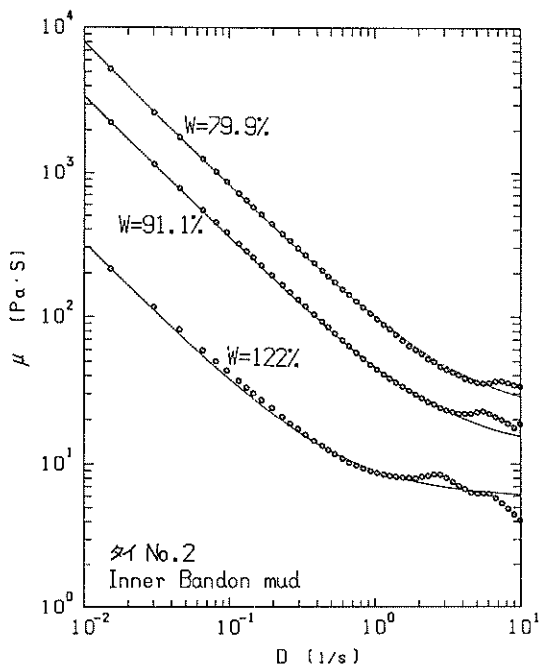


図-18 タイ No.2 泥 (Inner Bandon) + 塩水 ($\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$) の粘度曲線

広い範囲で示している。それに対し、塩水混合試料はずり速度の小さい範囲でビンガム流体の性質を示し、ビンガム流体の曲線からはずれたずり速度の大きい領域では、ずり速度が上昇してもせん断応力はほとんど一定で変化していない。

c. 現地泥

① 熊本港付近泥 (図-15, 図-16)

海域での採取泥ということで、粘度測定では塩水を用いている。流動曲線の特徴は図-13に示した塩水混合時のベントナイトの流動曲線のものによく似ている。 D が小さい範囲ではビンガム流体の流動曲線とよく一致し、 D がある値以上ではせん断応力値はほとんど一定となり、変化しない。

② タイ泥 (図-17, 図-18, 付図-12~17)

タイ国での採取泥についても塩水 ($\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$) を混合して測定している。ここで示した流動曲線、粘度曲線は No.2 (付図-1参照) の位置での底泥についてであるが、他の3か所の採取泥の流動曲線、粘度曲線の特徴もそれほど変わらない。タイ泥も熊本港付近泥と同様、ずり速度の小さな領域ではビンガム流体としての性質をもつことがわかる。 $W=122\%$ の流動曲線には塩水混合ベントナイト及び熊本港付近泥と同様、せん断応力値が一定で、ずり速度が上昇しても変わらない特徴が現れており、タイ泥の流動特性も塩水混合ベントナイ

トと同じ特徴を持っているものと考えられる。

(2) 降伏値と塑性粘度

3.2(1)で調べたように、水道水混合のベントナイト試料を除くと、ずり速度の小さい範囲では底泥はビンガム流体として取扱いが可能であることがわかった。したがって、ここではビンガム流体の流動曲線を表す代表値、つまり降伏値 τ_y と塑性粘度 μ_B について調べる。

図-19は各種底泥の降伏値 τ_y の含水比 W による変化を示している。各底泥とも含水比の増大にともない、降伏値は急激に低下している。カオリナイトの場合には水道水を混合した試料と塩水を混合した試料とで降伏値に大きな差はないが、ベントナイトの場合には塩分濃度によって降伏値がかなり違うことがわかる。

図-20は塑性粘度 μ_B と含水比 W の関係を示している。塑性粘度についても、カオリナイトは塩分濃度による影響が顕著ではないが、ベントナイトは塩分濃度が増加するにつれ塑性粘度が低下していることがわかる。

図-21は降伏値と塑性粘度の関係を示したものである。カオリナイトと塩水混合のベントナイトでは塑性粘度 μ_B は降伏値 τ_y の約1/2乗に比例している。したがって降伏値の増加に対して μ_B の増加は小さい。含水比が小さいほど降伏値は大きいので、含水比の小さい底泥では式(8)の中での降伏値の項の寄与は塑性粘度の項の寄与に比べて、相対的に重要となってくる。

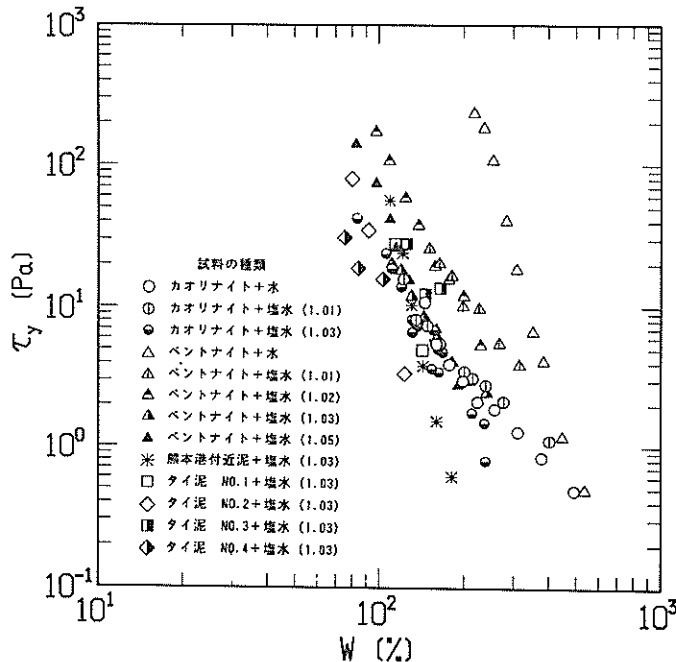


図-19 降伏値 τ_y と含水比 W の関係

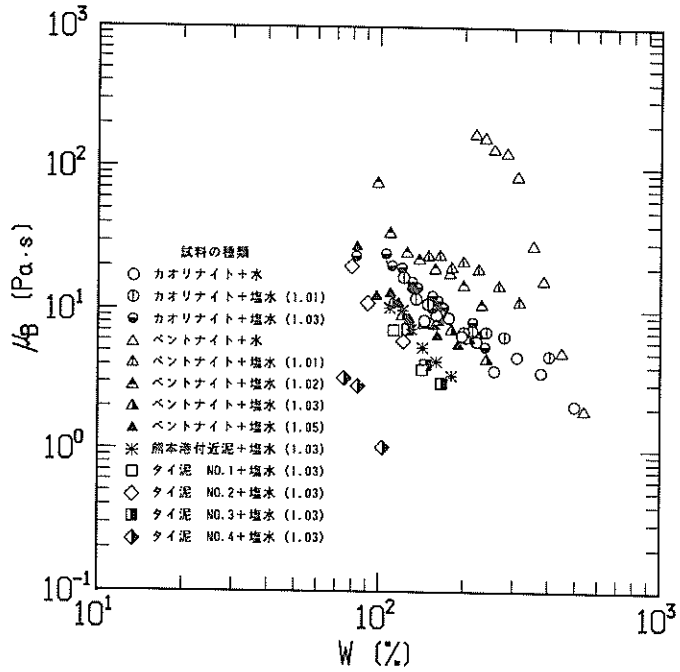


図-20 塑性粘度 μ_B と含水比 W の関係

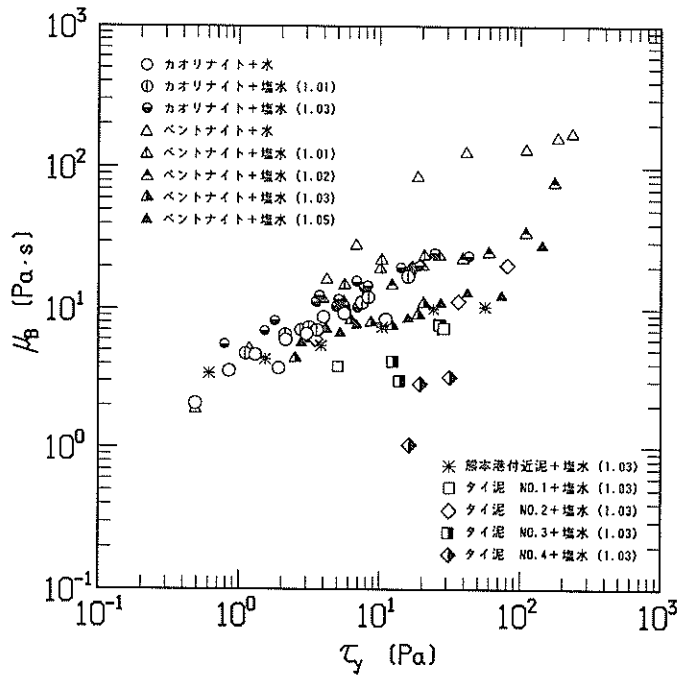


図-21 降伏値 τ_y と塑性粘度 μ_B の関係

3.3 その他の条件が流動特性に及ぼす影響

(1) 泥温

流体の粘性は温度によって変化することが知られている。前節では底泥の流動曲線、降伏値、塑性粘度について検討したが、これらの測定は泥温 $t = 10^\circ\text{C}$ で行っている。現地での底泥温度は気温、水温により、一年中変動しているため、粘性に及ぼす泥温の影響を調べる必要がある。

泥温の影響を調べるために、2種類の方法で測定した。その1つは一定ずり速度で泥温を $5^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ まで変化させ、そのときの粘度の変化を調べる実験である。

図-22, 23はカオリナイトに水を加えた試料について $D = 0.5 \text{ s}^{-1}$ および 1.0 s^{-1} の一定ずり速度で測定した結果である。泥温が 5°C から上昇するにともない、粘度は減少し、 $25^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ で最小となった後、再び増大している。泥温による変化率は $D = 0.5 \text{ s}^{-1}$ のときには比

較的大きく、粘度の最大値は最小値の約2倍となっている。しかし、 $D = 1 \text{ s}^{-1}$ では変化率は小さく、 $W = 206\%$ では1割程度しか変化していない。

図-24, 25は塩水を混合したベントナイトの場合の測定結果である。 $D = 0.5 \text{ s}^{-1}$, $W = 117\%$ では $t = 30^\circ\text{C}$ 付近で粘度が最小となっており、カオリナイトの場合と似ている。しかし、 $D = 0.5 \text{ s}^{-1}$, $W = 166\%$ では泥温の上昇にともなって粘度が低下し、明確な極小値は表れていない。 $D = 1 \text{ s}^{-1}$ の場合には $W = 99\%$, 113% のときには泥温とともに粘度が増加する傾向がみられるなど、粘度に対する泥温の影響は明確ではない。

なお、測定値に多少周期性があるが、これはローターの1回転に対応するものと考えられる。試料の不均質性や回転のわずかなはずみが存在して、せん断応力出力が増減している可能性がある。

もう1つは5, 10, 15, 20, 25, 30°C の各泥温で流

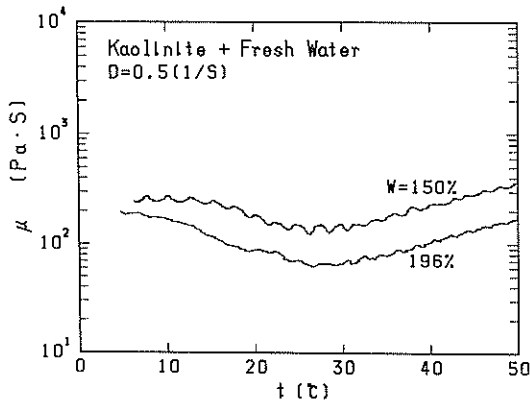


図-22 粘度に及ぼす泥温の影響
(カオリナイト+水, $D = 0.5 \text{ s}^{-1}$)

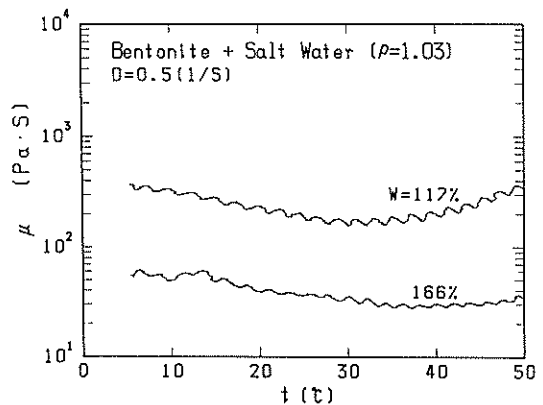


図-24 粘度に及ぼす泥温の影響
(ベントナイト+塩水, $D = 0.5 \text{ s}^{-1}$)

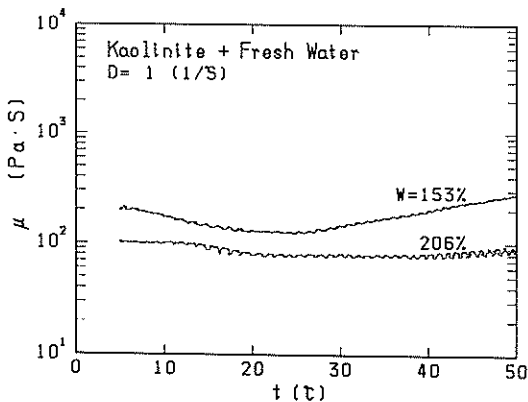


図-23 粘度に及ぼす泥温の影響
(カオリナイト+水, $D = 1.0 \text{ s}^{-1}$)

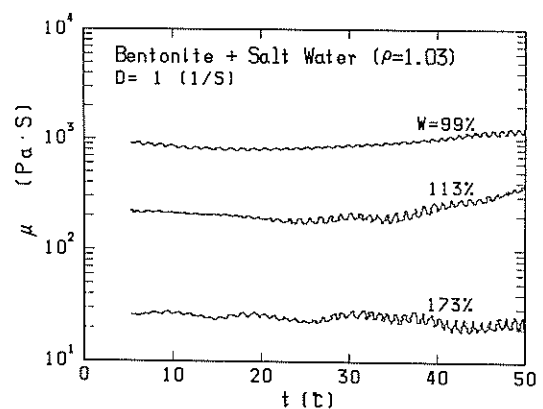


図-25 粘度に及ぼす泥温の影響
(ベントナイト+塩水, $D = 1.0 \text{ s}^{-1}$)

動曲線を求め、降伏値、塑性粘度の温度による変化を調べた。

図-26は降伏値の泥温による変化を示している。 $W=150\%$ では温度とともにわずかながら降伏値は増加しており、 30°C の降伏値は 5°C のもの40%程度増加しているが、 $W=200, 250\%$ ではほとんど変化していない。

図-27は塑性粘度と泥温の関係である。塑性粘度は泥温の上昇ともなって減少しており、 $W=150\%$ では泥温 5°C の塑性粘度に対して、泥温 30°C では約6割の減少がみられる。

泥温を連続可変する実験では、粘度が変化する場合もあったが、泥温に対する変化傾向は必ずしも明確ではなかった。また段階的に泥温を変えた実験では流動曲線の代表値である降伏値、塑性粘度の泥温に対する変化は降伏値の場合に、泥温とともに増加し、塑性粘度の場合に泥温とともに減少する傾向がある。しかし、含水比に対して、流動特性値（降伏値や塑性粘度）が急激に変化するのにくらべるとかなり緩やかであり、底泥の流動特性に及ぼす泥温の影響はそれほど大きくないと思われる。

(2) 塩分

海城や河口に堆積した底泥の挙動を調べる上で、塩分の影響は無視できない。今回の測定ではカオリナイトについて、塩分濃度3種類 ($\rho=1.00, 1.01, 1.03\text{g}/\text{cm}^3$)、ベントナイトについて、塩分濃度5種類 ($\rho=1.00, 1.01, 1.02, 1.03, 1.05\text{g}/\text{cm}^3$) で含水比を変化させて、その流動特性を調べている。ここでは、図-19、図-20に示した降伏値、塑性粘度と含水比の関係をもとに、降伏

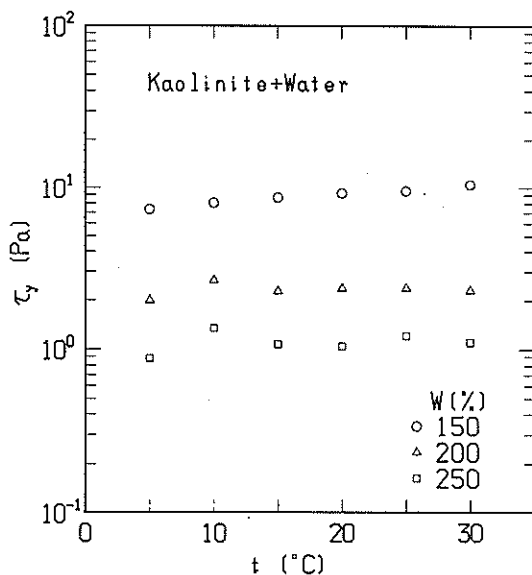


図-26 降伏値 τ_y の泥温による変化

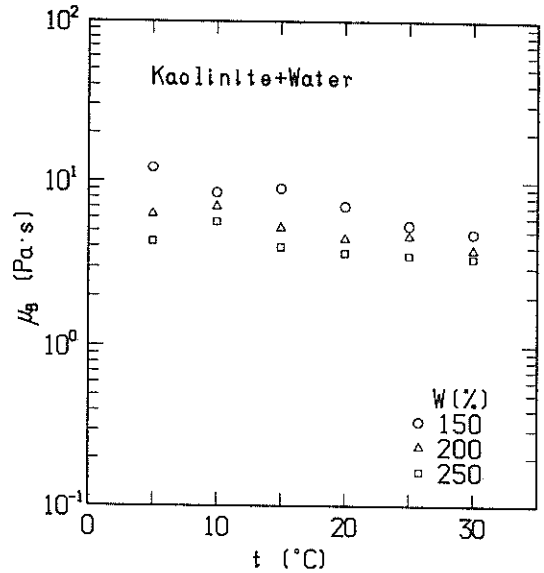


図-27 塑性粘度 μ_p の泥温による変化

値、塑性粘度に及ぼす塩分の影響について検討する。

図-28, 29はカオリナイトの降伏値、塑性粘度の塩分濃度による変化を示している。降伏値は塩分の増加に対してわずかに減少傾向を示し、塑性粘度は塩分の増加に対して増加傾向を示すが、その傾向はあまり明確ではなく、カオリナイトが塩分濃度にあまり影響を受けないことがわかる。

図-30, 31はベントナイトの降伏値、塑性粘度の塩分濃度による変化を示している。降伏値、塑性粘度とも塩分濃度が増加するにともない、減少しており、塩分によってより流動化しやすくなるのがわかる。

このように試料の種類によって、塩分が流動特性に及ぼす影響の度合いはかなり異なる。この理由について、大坪⁵⁾の研究を参考に検討する。

粘土粒子が溶液に接すると電気二重層を形成する。粘土粒子間にはこの電気二重層を介して、電気二重層の重なりに基づく静電反発力と Van der Waals の吸引力が働いている。静電反発力が吸引力よりも大きい場合には粒子は反発し合い、安定な分散状態となり凝集しにくい。しかし、何らかの原因で静電反発力が小さくなると、Van der Waals 力により引きつけられ、粘土粒子は結合しやすくなる。また静電反発力は溶液の電解質の濃度に強く影響を受け、電解質濃度が高くなると、静電反発力は小さくなる。したがって塩分濃度が高くなると、静電反発力が小さくなり、凝集しやすくなる。

大坪によるとカオリナイトは凝集しやすい粘土であり、ベントナイトは蒸留水中では凝集しない粘土である。つ

まり、カオリナイトでは静電反発力は小さく、粘土粒子間の力は Van der Waals 力が卓越している。またベントナイトでは蒸留水中では静電反発力のほうが Van der Waals 力を上回っていると考えられる。粘土粒子がせん断や流動に抵抗する力として粒子間の引力だけでなく、粒子間の斥力つまり静電反発力も抵抗力として働く。この抵抗力は土粒子の配向に対して大きな抵抗力を示し、配向抵抗力と呼ばれる。ベントナイトでは溶液中に電解質が少ないときにはこの配向抵抗力が大きく、降伏値、塑性粘度ともに大きくなる。しかし、電解質が増えてくると、静電反発力の低下にともない、配向抵抗力が減少し、流動化しやすくなるものと考えられる。また

カオリナイトの場合にはもともとこの配向抵抗力は小さく、流動に抵抗する力は粒子間引力によると考えられる。これは塩分濃度等に影響されず、ほぼ一定であるので、塩分の影響がカオリナイトにはあまり現れなかったものと考えられる。

このように塩分の影響は底泥の種類によってはかなり重要であると思われる。

(3) ずり速度変化率と最大ずり速度

今回の測定ではずり速度を連続可変して測定している。したがって各段階でのずり速度で定常状態に至らしめてせん断応力を測定する方法とは得られた結果が異なっている可能性がある。そこでずり速度の上昇・下降時間 T_2

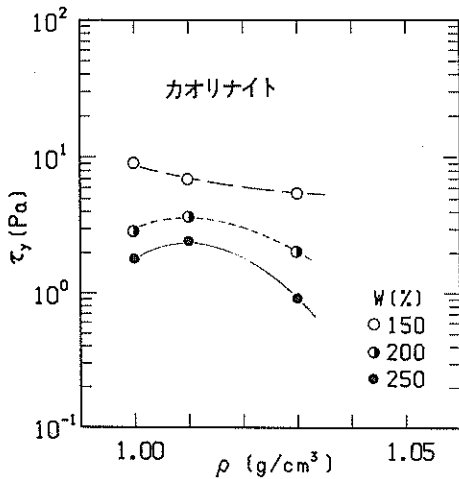


図-28 降伏値 τ_y の塩分濃度による変化 (カオリナイト)

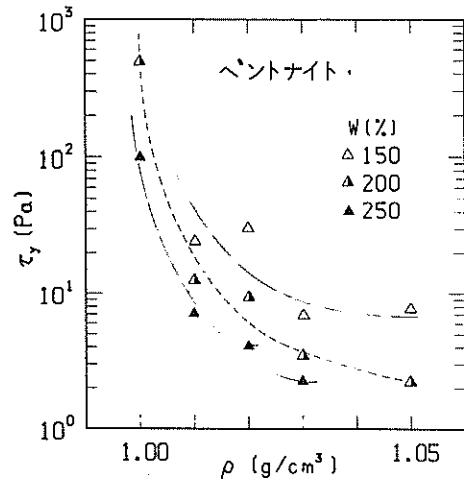


図-30 降伏値 τ_y の塩分濃度による変化 (ベントナイト)

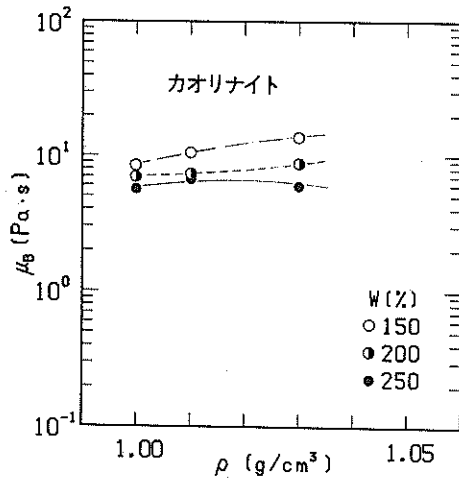


図-29 塑性粘度 μ_B の塩分濃度による変化 (カオリナイト)

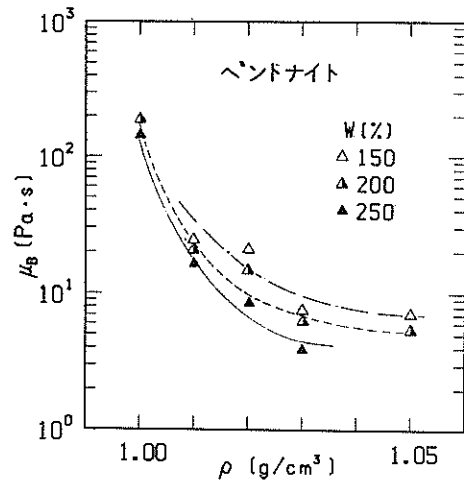


図-31 塑性粘度 μ_B の塩分濃度による変化 (ベントナイト)

を変化させて、ずり速度変化率の大小による流動特性の変化を調べた。

通常、 T_2 は 300 秒で測定しているが、この実験では 60~600 秒の間の 6 段階で T_2 を変化させた。図-32(a)~(f) はそれぞれ $T_2 = 60, 120, 180, 300, 420, 600$ 秒のときの流動曲線である。図中の記号は丸印がずり速度上昇時、三角印がずり速度下降時の流動曲線を示している。またずり速度を変化させる時間間隔はそれぞれ T_2 の $1/600$ の時間となっている。 T_2 が 60 秒、120 秒と短い間は $D < 0.1 \text{ s}^{-1}$ の低ずり速度の範囲と D が 1 s^{-1} 前後で上昇時の曲線と下降時の曲線が少し離れているが、 T_2 を大きくとった場合には、上昇時と下降時の違いは緩和されてくる。そして T_2 が 300 秒以上になると、流動曲線の T_2 による

変化も小さくなる。したがって T_2 を 300 秒以上とった場合にはずり速度の連続変化の影響はかなり小さくなっており、定常状態でのせん断応力測定の結果とも大きく変わらないと考えられる。

図-33 は図-32 で示した流動曲線から得られた降伏値と塑性粘度の値を T_2 に対してプロットしたものである。 T_2 の変化により上昇時の流動曲線の形はかなり変わったが、下降時の曲線はあまり変わらず、 τ_y 、 μ_B ともに T_2 による変化は少なく、ほぼ一定である。

図-34 は T_1 、 T_2 、 T_3 はそのまま最大ずり速度 $D_{\max} = 100 \text{ s}^{-1}$ とした場合のカオリナイト（水道水混合）の流動曲線である。この図は図-9 の流動曲線と対応するものであるが、ずり速度が 1 s^{-1} 以下の曲線は

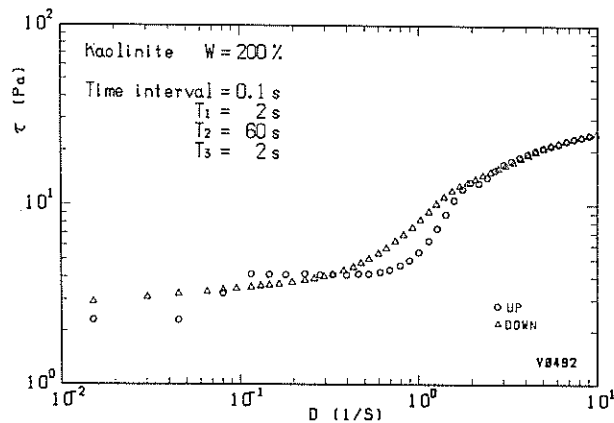


図-32(a) ずり速度変化率を変えた測定での流動曲線
($T_2 = 60 \text{ s}$)

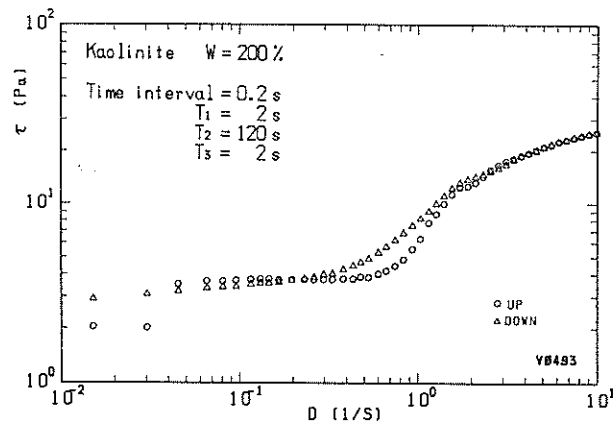


図-32(b) ずり速度変化率を変えた測定での流動曲線
($T_2 = 120 \text{ s}$)

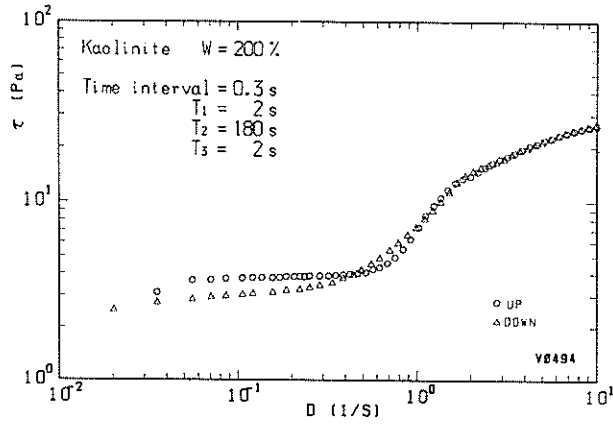


図-32(c) ずり速度変化率を変えた測定での流動曲線
 ($T_2 = 180$ s)

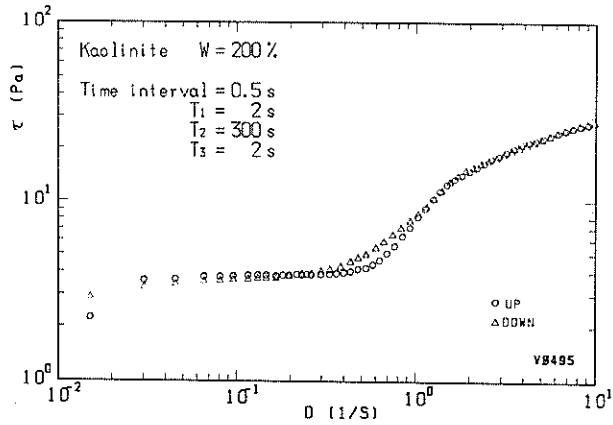


図-32(d) ずり速度変化率を変えた測定での流動曲線
 ($T_2 = 300$ s)

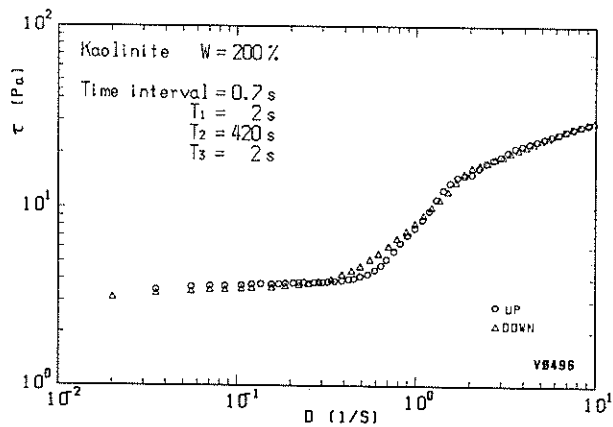


図-32(e) ずり速度変化率を変えた測定での流動曲線
 ($T_2 = 420$ s)

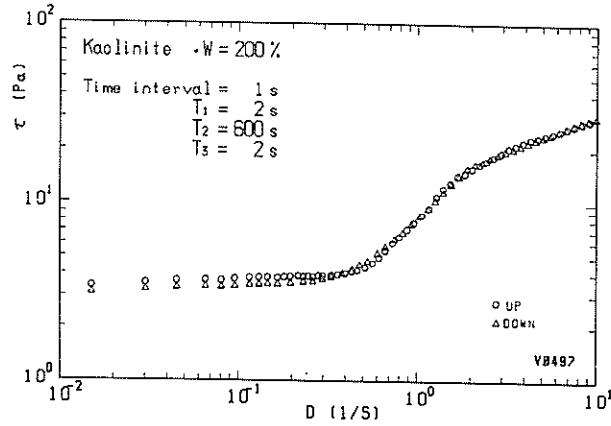


図-32(f) ずり速度変化率を変えた測定での流動曲線
($T_2 = 600$ s)

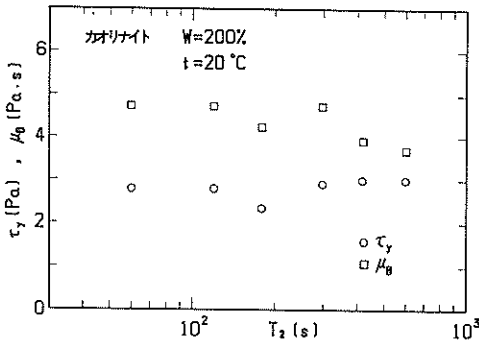


図-33 流動特性代表値とずり速度変化時間の関係

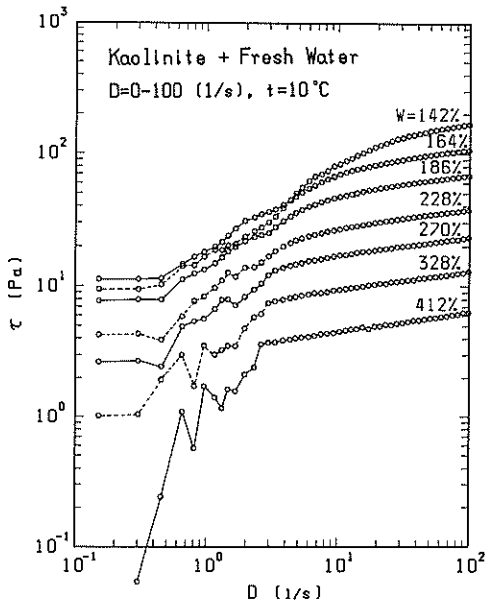


図-34 $D_{max} = 100$ s⁻¹ のときの流動曲線
(カオリナイト+水)

ずり速度領域が $0 \sim 10$ s⁻¹ で測定した図-9の曲線とはかなり異なっており、 $0 \sim 100$ s⁻¹ の範囲で測定したものは正確な降伏値 τ_y や塑性粘度 μ_0 は得られないことがわかる。これは D_{max} を 100 s⁻¹ とした場合にはずり速度変化率が10倍大きくなっていることとずり速度の分解能が $1/10$ 、つまり 0.167 s⁻¹ に落ちているためであると考えられる。 $T_2 = 300$ s程度で $D_{max} = 100$ s⁻¹ とした場合には $D < 2 \sim 3$ s⁻¹ の範囲はほとんど測定できないと考えたほうがよさそうである。

以上のことから正確な測定を行うためには、沈降、圧密の影響が小さい範囲でできるだけずり速度変化率を小さくとることが望ましい。最大ずり速度が 10 s⁻¹ という今回の実験では T_2 を 300 秒程度とればずり速度変化率の影響はほとんど無視できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた成果をまとめると以下に示すようである。

- (1) ほとんどの底泥はずり速度が 1 s⁻¹ より小さい低ずり速度の範囲ではビンガム流体として取り扱うことができる。それより大きいずり速度の範囲ではカオリナイトの場合にはべき乗則流体の性質を示すが、塩水を混合したベントナイトや現地泥はせん断応力値がほぼ一定となる。
- (2) 底泥の降伏値、塑性粘度は底泥の含水比に大きく影響を受け、含水比のべき乗で減少する。
- (3) 泥温が 5°C から 30°C まで変化すると底泥の降伏値は最大4割程度増加し、塑性粘度は最大で6割程度減少する。しかし底泥の流動特性に及ぼす泥温の影響は含水比の変化にともなう影響にくらべるとか

なり小さい。

- (4) 塩分が底泥の流動特性に及ぼす影響はカオリナイトの場合はほとんど無視できるが、ベントナイトの場合には大きく、塩分濃度の増加にともなって流動しやすくなる。
- (5) ずり速度を連続変化させる測定でも上昇及び下降時間を適切に選んで測定することにより、ずり速度変化率の影響を少なくすることができる。

5. あとがき

本研究は昭和59年度から開始された海域における浮泥・底泥の移動と堆積の研究(シルテーションの研究)の一貫として実施された。したがって主として海洋波動下での底泥の運動を検討する上で特に必要である $D=0\sim 10s^{-1}$ の低ずり速度領域に限って、底泥の流動特性を調べている。そのためずり速度が $10s^{-1}$ 以上の範囲での現象についての底泥の流動性については別途検討が必要である。

今回用いた回転粘度計は、比較的操作が簡単であり、測定者の技術はほとんど必要としないため、個人^々の現れにくい試験装置である。また、必要な試料の最も最大50cc程度とわずかな量で済むなど長所が多い。しかし内筒と外筒のギャップより大きい砂れきを含む試料は測定できないことや現場と同じ状態での測定ができないなどの短所がある。こうした問題に対処するため、この試験法と何らかの関係をもつ現地試験法の開発も早急に検討する必要がある。

最後に本研究を行うにあたり、前海洋水理部長田中則男博士をはじめ、入江 功海洋水理部長および当研究所のシルテーション研究メンバーからは終始温かい御援助と御指導を受けている。ここに記して感謝致します。

また粘土と底泥の物性値の測定をしていただいた土質部土質調査研究室小川富美子研究官に感謝致します。

さらにタイ国の貴重な底泥試料は(財)国際臨海開発研究センター大槻第1調査研究部主任研究員及び東亜建設工業(株)外山氏によって採取され、提供いただいたものである。ここに記して感謝致します。

(1986年9月30日 受付)

参考文献

- 1) 中川鶴太郎: レオロジー 第2版, 岩波全書, 324p., 岩波書店, 1978年。
- 2) 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, 第210号, pp.21-32, 1973年。
- 3) 伊藤富雄・松井 保: 粘土の流動機構に関する研究, 土木学会論文報告集, 第236号, pp.109-123,

1975年。

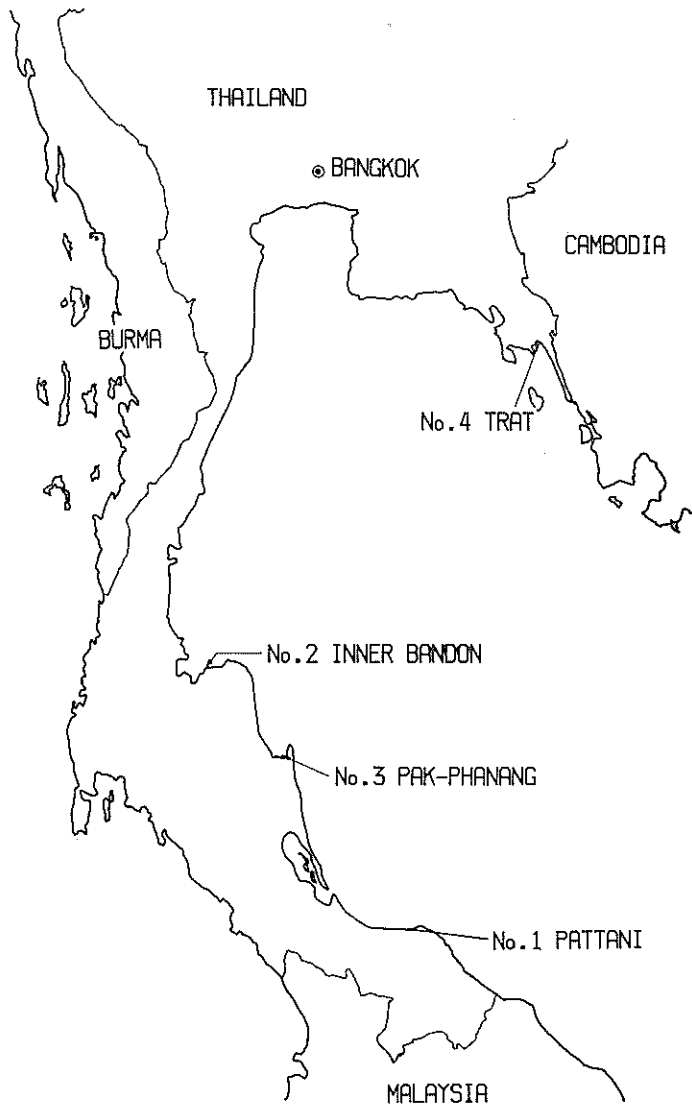
- 4) 松井 保・伊藤富雄: 粘土・水系の統一的な流動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第242号, pp.41-51, 1973年。
- 5) 大坪国順: 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号, pp.1-177, 1983年。
- 6) 遠藤郁夫・金成英夫・影山佳秀: 泥漿の管路輸送に関する実験的研究, 第38回土木学会年次講演会, 第II部, pp.729-730, 1983年。
- 7) 古賀憲一・楠田哲也・栗谷陽一・二渡 了・原 浩・荒木宏之: 底泥のレオロジー特性の測定に関する研究, 第39回土木学会年次講演会, 第II部, pp.867-868, 1984年。
- 8) 西形達明・山岡一三・田家 学: 底泥の流動機構と巻き上げについて(その2), 第39回土木学会年次講演会, 第II部, pp.859-860, 1984年。
- 9) 楠田哲也・二渡 了・古賀憲一・栗谷陽一: 改良型同心円筒回転型粘度計による粘土懸濁液の流動特性の測定, 衛生工学研究論文集, 第21巻, pp.91-99, 1985年。
- 10) 五明美智男・矢内栄二・小島 洋・大槻 忠・糸刈長敬: 進行波存在下における底泥の挙動および波高減衰に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.263-267, 1985年。
- 11) 井本立也: 概説レオロジー(上), 114p., 東京化学同人, 1963年。

主要記号一覧表

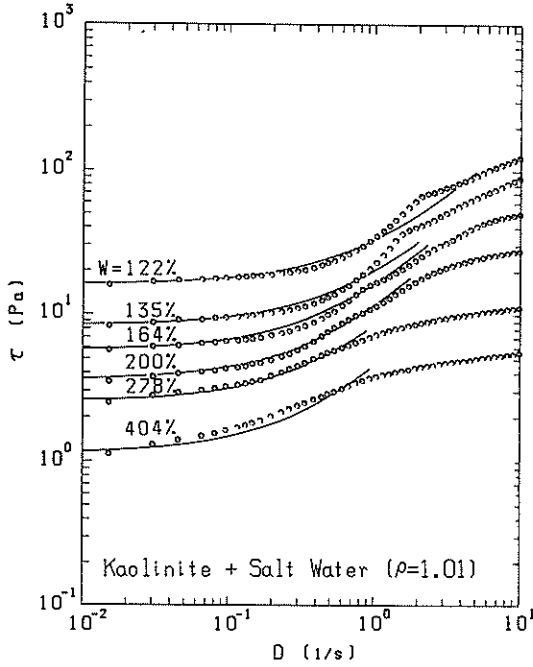
D	: ずり速度 (= du/dz)
D_{max}	: 最大ずり速度
E	: 回転粘度計の制御電圧
T_1	: ずり速度の制御時間 (図-4 参照)
T_2	: ずり速度の制御時間 (図-4 参照)
T_3	: ずり速度の制御時間 (図-4 参照)
R_o	: 回転粘度計の外筒の半径
R_i	: 回転粘度計の内筒の半径
W	: 含水比
a	: 微小振幅波の振幅
du/dz	: 速度勾配
$\overline{du/dz}$: 底泥内での平均的なずり速度
$\overline{du/dz}_{max}$: 底泥内での平均的なずり速度の最大値
h_1	: 水深
h_2	: 底泥厚さ
k	: 波数
n	: ローターの回転数及び構造粘度指数
t	: 泥温 ($^{\circ}C$)
u_b	: 微小振幅波の底面流速
$u_{b,max}$: 微小振幅波の底面流速の最大値

δ : 外筒と内筒の半径の比 ($= R_o/R_i$)
 μ : 底泥の粘度
 μ_B : 塑性粘度
 μ_P : 擬塑性粘度

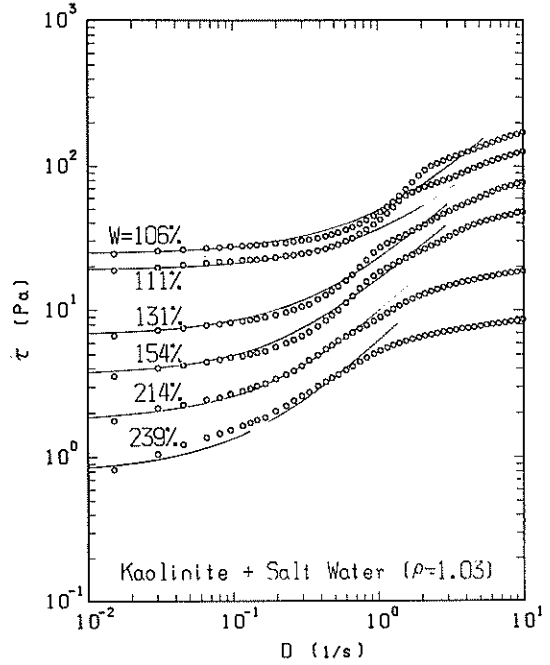
ρ : 混合水の密度
 σ : 波の角周波数
 τ : せん断応力
 τ_y : 降伏値



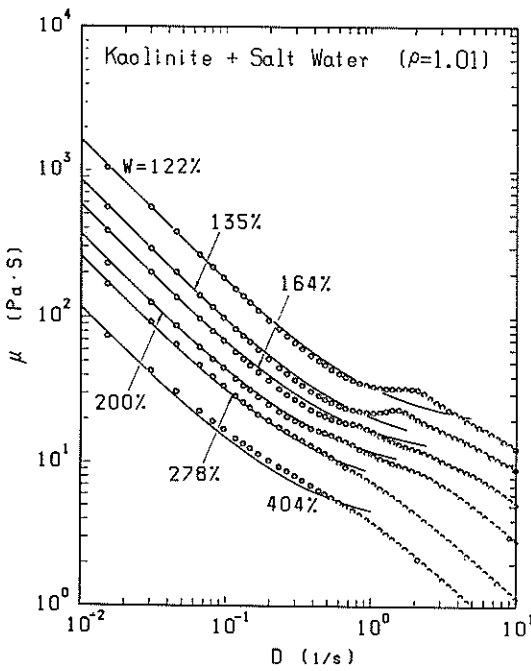
付図-1 タイ泥採取位置図



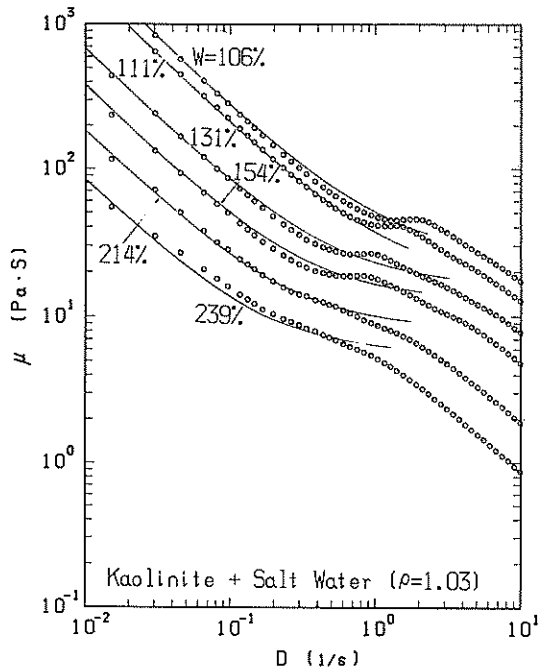
付図-2 流動曲線図
(カオリナイト+塩水($\rho=1.01\text{g/cm}^3$))



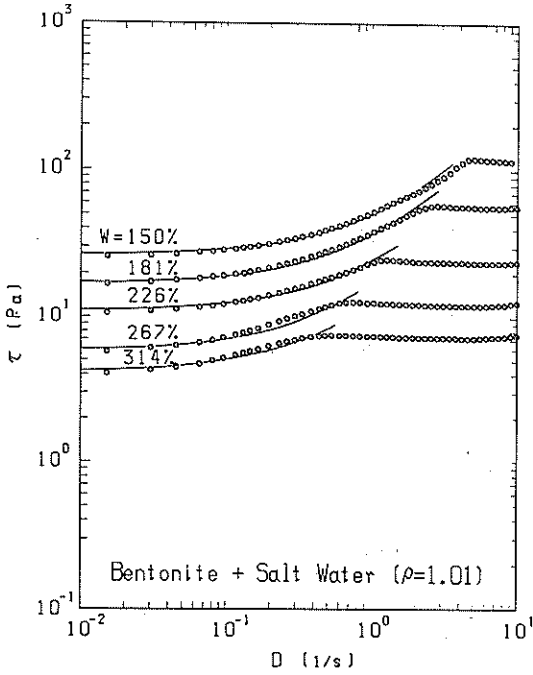
付図-4 流動曲線図
(カオリナイト+塩水($\rho=1.03\text{g/cm}^3$))



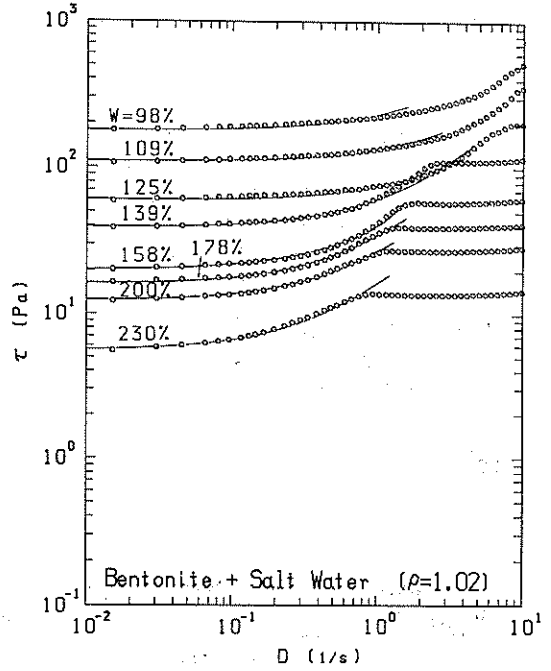
付図-3 粘度曲線図
(カオリナイト+塩水($\rho=1.01\text{g/cm}^3$))



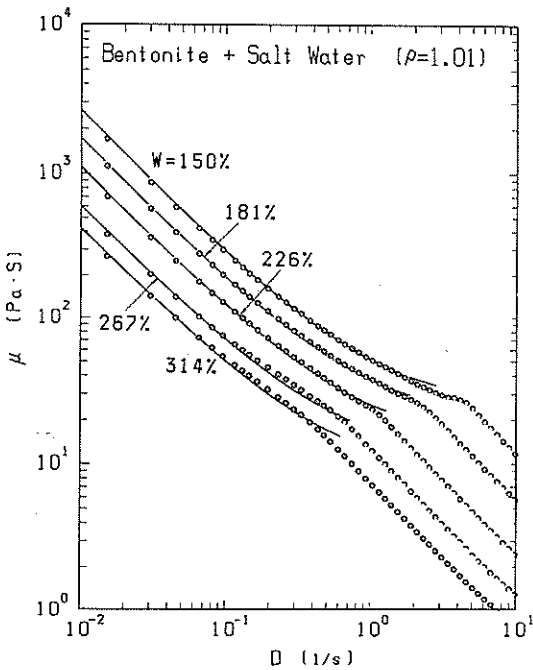
付図-5 粘度曲線図
(カオリナイト+塩水($\rho=1.03\text{g/cm}^3$))



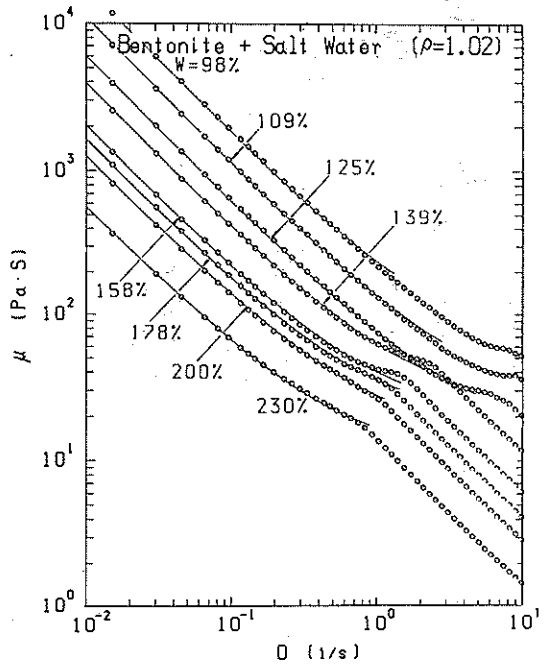
付図-6 流動曲線図
(ベントナイト+塩水($\rho = 1.01 \text{g/cm}^3$))



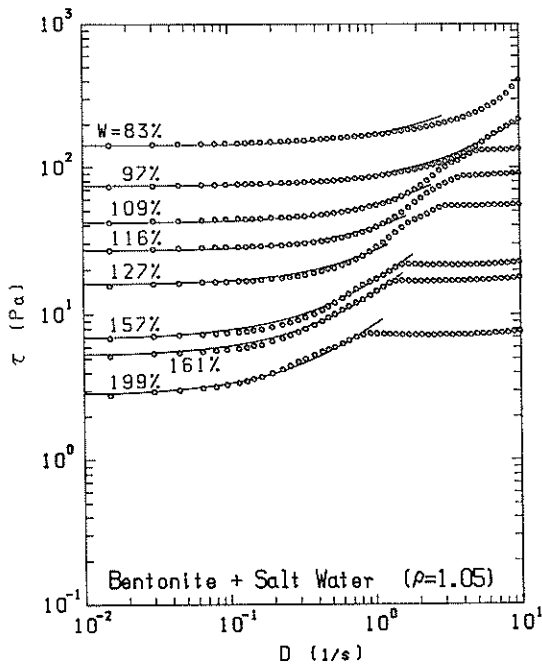
付図-8 流動曲線図
(ベントナイト+塩水($\rho = 1.02 \text{g/cm}^3$))



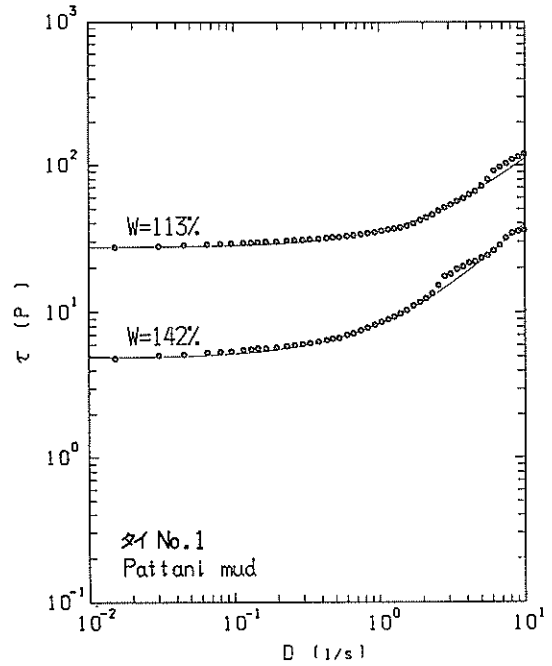
付図-7 粘度曲線図
(ベントナイト+塩水($\rho = 1.01 \text{g/cm}^3$))



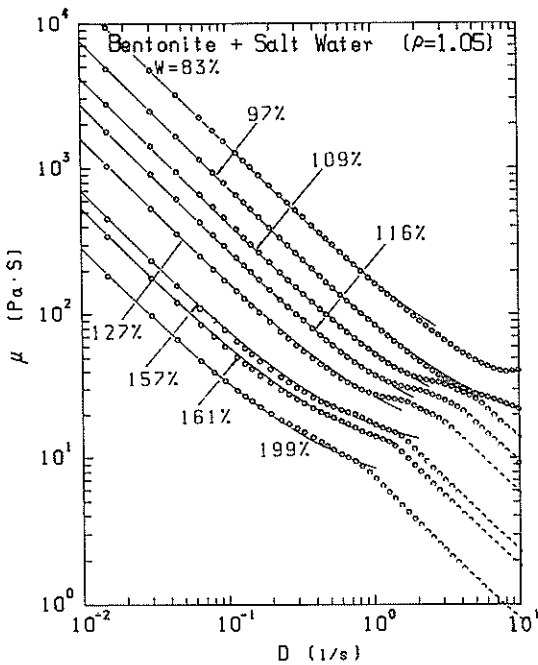
付図-9 粘度曲線図
(ベントナイト+塩水($\rho = 1.02 \text{g/cm}^3$))



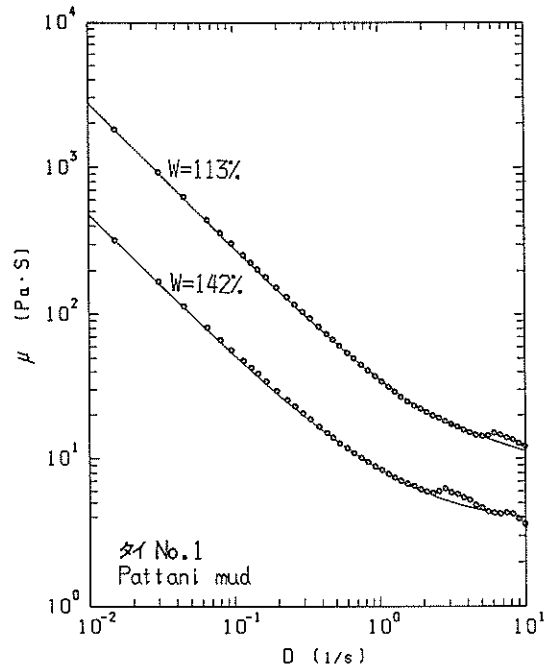
付図-10 流動曲線図
(ベントナイト+塩水($\rho = 1.05\text{g/cm}^3$))



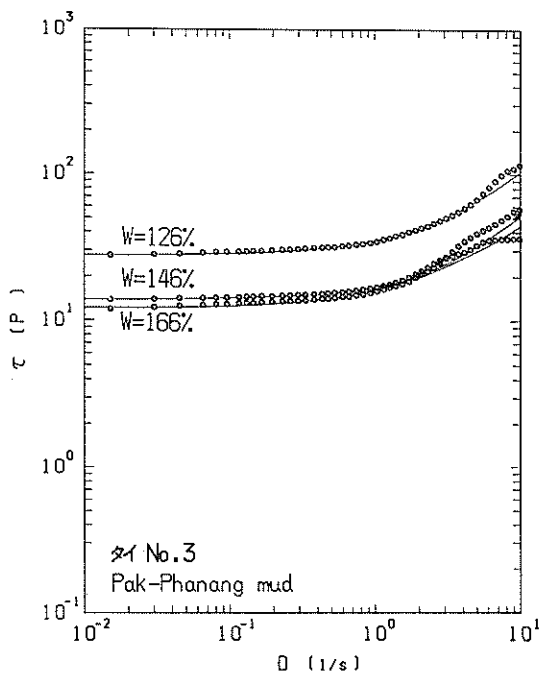
付図-12 流動曲線図
(タイ No.1+塩水($\rho = 1.03\text{g/cm}^3$))



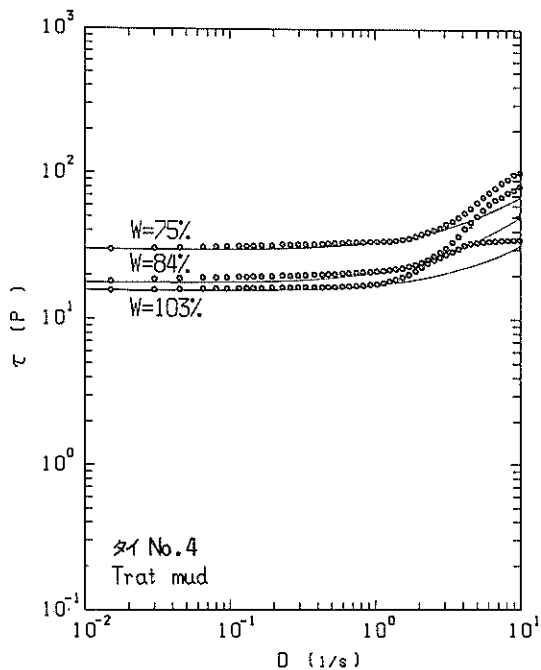
付図-11 粘度曲線図
(ベントナイト+塩水($\rho = 1.05\text{g/cm}^3$))



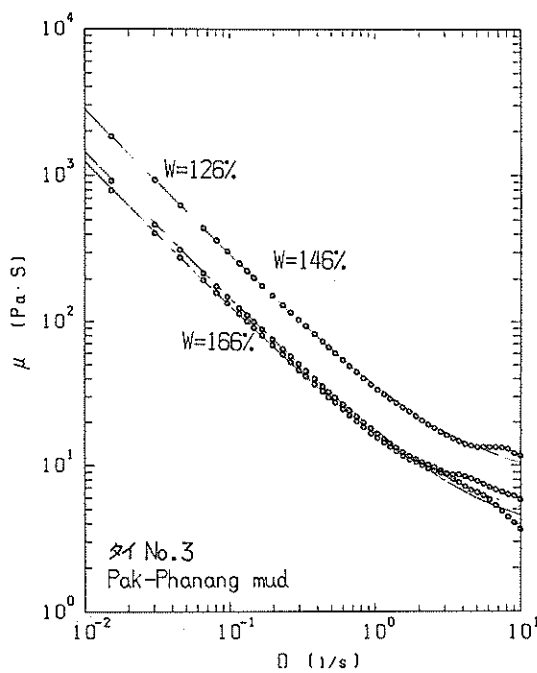
付図-13 粘度曲線図
(タイ No.1+塩水($\rho = 1.03\text{g/cm}^3$))



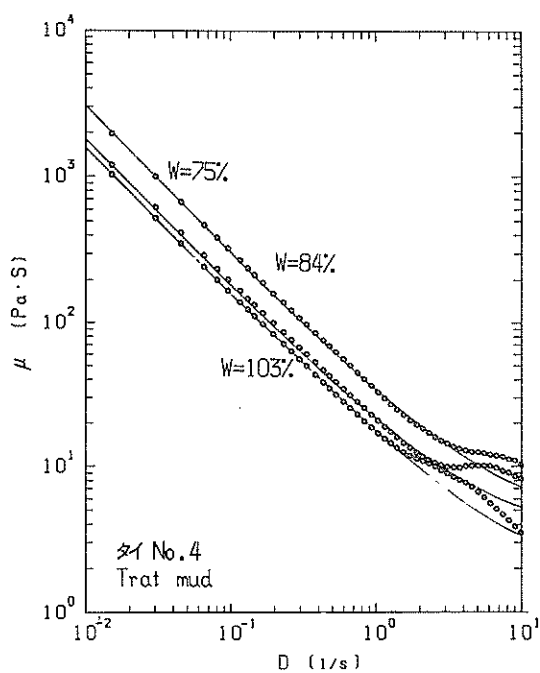
付図-14 流動曲線図
(タイ No.3+塩水($\rho = 1.03\text{g/cm}^3$))



付図-16 流動曲線図
(タイ No.4+塩水($\rho = 1.03\text{g/cm}^3$))



付図-15 粘度曲線図
(タイ No.3+塩水($\rho = 1.03\text{g/cm}^3$))



付図-17 粘度曲線図
(タイ No.4+塩水($\rho = 1.03\text{g/cm}^3$))

付表-1 測定結果表 (その1)

底泥の種類	W (%)	τ_y (Pa)	μ_B (Pa·s)	
カオリナイト	145	11.0	8.41	
	160	5.62	9.26	
	177	3.97	8.74	
	198	3.04	6.56	
	+	223	2.15	5.96
	水	258	1.90	3.72
	311	1.30	4.68	
	379	0.85	3.59	
496	0.49	2.06		
カオリナイト + 塩水(1.01)	122	15.9	17.1	
	135	8.35	12.1	
	149	7.50	11.1	
	164	5.62	9.44	
	+	200	3.55	7.05
	塩水(1.01)	215	3.16	7.22
	241	2.82	7.08	
	278	2.15	6.53	
404	1.12	4.75		
カオリナイト + 塩水(1.03)	83	43.0	24.1	
	106	24.6	25.0	
	111	19.2	20.6	
	120	14.1	20.0	
	131	8.25	14.7	
	131	6.80	15.8	
	135	7.80	14.4	
	+	154	3.70	12.6
	塩水(1.03)	156	7.01	10.4
	162	5.10	11.7	
	163	3.50	11.2	
	169	4.91	10.4	
	214	1.80	8.25	
	237	1.53	7.00	
	239	0.80	5.50	

付表-2 測定結果表 (その2)

底泥の種類	W (%)	τ_y (Pa)	μ_B (Pa·s)	
ベントナイト	219	235.	174.	
	237	185.	163.	
	255	110.	136.	
	283	41.4	128.	
	+	309	18.8	87.4
	水	352	6.81	28.7
	384	4.20	16.3	
	446	1.20	5.11	
536	0.50	1.96		
ベントナイト + 塩水(1.01)	150	26.4	24.2	
	164	20.6	24.6	
	181	17.0	19.9	
	+	199	10.4	22.1
	塩水(1.01)	226	10.1	19.7
	267	5.64	15.0	
314	4.00	11.7		
ベントナイト + 塩水(1.02)	98	177.	78.2	
	109	110.	35.5	
	125	60.	25.9	
	139	39.	23.2	
	+	158	20.0	19.9
	塩水(1.02)	178	16.1	19.2
	200	12.4	15.2	
230	5.51	11.2		
ベントナイト + 塩水(1.03)	111	20.6	11.4	
	120	18.8	9.40	
	130	12.2	7.79	
	144	8.70	8.16	
	+	160	6.30	8.61
	塩水(1.03)	181	4.15	7.36
	209	3.15	6.36	
	240	2.53	4.52	
ベントナイト + 塩水(1.05)	83	143.	28.6	
	97	74.3	12.6	
	109	42.0	13.3	
	116	27.0	11.3	
	+	127	15.8	8.71
	塩水(1.05)	157	6.8	7.79
	161	5.2	6.81	
191	2.8	5.80		

付表-3 測定結果表 (その3)

底泥の種類	W (%)	τ_y (Pa)	μ_B (Pa·s)
熊本港 付近泥	109	56.2	10.4
	121	24.2	10.0
	130	10.4	7.36
	143	3.83	5.41
	160	1.53	4.30
	181	0.61	3.41
タイ No. 1	113	28.5	7.22
	142	5.0	3.78
タイ No. 2	80	80.0	20.3
	91	35.3	11.3
	122	3.4	6.07
タイ No. 3	126	28.0	7.36
	146	12.4	4.14
	166	13.9	3.04
タイ No. 4	75	31.0	3.24
	84	19.0	2.87
	103	16.0	1.04

港湾技研資料 No.566

1986・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.