

(9) 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

MEASUREMENTS OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CLAY SUSPENSION
WITH AN IMPROVED COAXIAL ROTARY VISCOMETER

楠田哲也*、○二渡 了*、古賀憲一**、栗谷陽一*

Tetsuya KUSUDA*, Touru FUTAWATARI*, Kenichi KOGA**, Youichi AWAYA*

ABSTRACT; In this study, to solve problems on a conventional rotary viscometer, that is, the slip phenomenon of suspension along the cylinder walls, edge effects, and control methods of viscometer, an improved coaxial rotary viscometer was designed and produced, and two simple calculation methods of rheological properties of suspension were developed when the gap between cylinders was wide. The features of this improved viscometer are as follows: 1) The mechanism of transmitting torque was separated from the mechanism of measuring the rate of shear; 2) A triple cylinder type rotary viscometer was used to minimize the edge effects; and 3) The viscometer was operated at the condition of either constant apparent deformation rate or constant shear stress.

As the simple calculation methods of rheological properties, differential and integral methods are proposed. The former is available when the angular velocity distribution in the radial direction of clay suspension is known over the distance between center and outer cylinders, the latter is available to obtain the relationship between deformation rate and shear stress from the angular velocities near them. Experimental results of clay suspensions with this viscometer differ from the results with conventional viscometers due to the consideration of the slip phenomenon.

KEYWORDS; Rheology, Viscometer, Clay, Suspension.

1. 緒 言

粘性係数が歪速度によって変化しないニュートン流体とは異なり、コロイド懸濁液、高分子溶液、粒子懸濁液のような非ニュートン流体は、歪速度により粘性係数が大きく変化する。速度勾配を du/dy 、剪断応力を τ とするとき、 $\tau f(\tau) = -du/dy$ における $f(\tau)$ により、非ニュートン流体の流動特性が与えられる。回転型粘度計によりこの $f(\tau)$ を粒子懸濁液について求める場合、著者らの知る限りでは、壁面境界において non-slip の条件を用いて計算されているのが常である。粒子懸濁液と境界面の接するところでは、粒子は境界面を越えることができないので、境界面近傍では粒子の濃度が減少し、極端な場合には粒子の存在しない媒体のみの薄層が形成されることがある。このような層が形成されると、媒体のみの粘度は粒子懸濁液より小さいので、みかけ上、壁面と粒子懸濁液の間にスリップが存在しているように見えることになる。この現象は、低含水比の懸濁液の場合に顕著に現われる。この現象が存在すると、測定粘度は実粘度より低く与えられることになる。また、従来の市販の円筒回転型粘度計は二重円筒型であり、外筒と内筒からなっているため、内筒の端効果がかかなりの誤差となっている場合も少なくない。さらに、測定時の制御項目を円筒の回転速度のみに限っているものが著者らの知る限り全てであり、このため、応力制御型の履歴性の検討ができないようになっている。

* 九州大学工学部 Faculty of Engineering Kyushu University, ** 佐賀大学理工学部 Faculty of Science and Engineering Saga University

本研究は、以上の諸点について検討を加えるために、1) 市販されている円筒回転型粘度計の上述のような短所を改良するために、i) トルクを作用させる機構と歪速度を測定する機構とを分離し、みかけ上のスリップ（以下スリップと称する）が存在していても、剪断応力に対応する歪速度を正確に測れるようにすること、ii) 端効果をできる限り小さくすること、iii) 測定時の制御項目として剪断応力を採用できるようにすること、を目標として同心三重円筒回転型粘度計を試作する、2) 円筒間隙が大きい場合の $f(\tau)$ の簡便な計算法を開発する、3) $f(\tau)$ を粘土懸濁液を用いて測定し、底泥の挙動という点を中心に検討を加える、という1), 2), 3) の三つの目的をもって行なわれたものである。

2. 実験装置

流体の流動特性の測定方法は既に確立され、代表的なものとして同心円筒回転型の他に、毛細管型、同心円筒軸方向移動型、平行円板回転型、帯型等がある¹⁾。同心円筒回転型の場合、市販品は、以前は外筒回転・内筒応力測定型のものが多かったが、最近では内筒回転・内筒応力測定型のものが多い。佐藤ら²⁾によって用いられたものは前者のものである。滝ら³⁾により用いられたものは後者のものであり、大坪^{4,5)}により用いられたものもこの種のものである。いずれの粘度計も、スリップが境界面上で存在しないという前提にたつて、測定結果が整理されている。スリップが境界面上で存在するという前提にたつと、同心円筒回転型の場合、必然的に回転円筒の回転数から歪速度を直接求めることはできなくなる。実験装置の試作に際し、前述の目標達成のために、以下のように設計方針をたてた。

1) トルク作用機構と歪速度測定部の分離

歪速度は、円筒容器壁間にて直接検出を行なうため、マーカーまたは簡便法として回転子を用いるようにする。

2) 端効果の減少

三重円筒型とする。内筒と外筒とを一体化し、この間に中間筒を挿入する。そして、内・外筒を回転させ、中間筒内・外面に働くトルクの和を測定することにする。このようにすることにより、中間筒の端効果を減少させる。

3) 制御方式

マイコンと組合せることにより、みかけ歪速度制御、トルク制御いずれの方式もとれるようにする。

装置概略を Fig.1 に示す。試料を入れる容器の外筒はアクリルパイプ（内径129.40mm ϕ ）、内筒はデルリン樹脂製（外径98.60mm ϕ ）である。これら両者がトルクを試料に加えることになる。中間筒はアルミニウムパイプ（内径110.50mm ϕ 、外径111.50mm ϕ ）である。試料必要量は最大 550 ml であり、容器における試料高はこのときほぼ 9.5 cm となる。内、中、外筒の半径比は、ニュートン流体を使用した際に、中間筒内・外表面において剪断応力が等しくなるように定めた⁶⁾。半径比は、 $s = \text{外筒内径} / \text{中間筒外径} = 1.16$ 、 $k = \text{内筒外径} / \text{中間筒内径} = 0.89$ であり、 $s^{-2} + k^2 = 2$ としている。中間筒の軸は、上部 1ヶ所と下端の計 2ヶ所ですりを除いたベアリングにより保持されている。内・外筒は、カンチレバー式の支持になっている。トルクは、渦巻きバネの捩れ角、あるいは磷青銅の薄板のたわみ角（ストレンゲージ使用）より求める。

制御方法の第一は、中間筒に作用するトルクを一定（バネの捩れ角を一定）に保つように歪速度を制御する方法である。所定の捩れ角に中間筒の回転角度が保たれるように光学センサーで位置を検出しつつ、マイコン制御のステッピングモーターにより内・外筒の回転速度を調整し、そのときのステッピングモーターへ送るパルス数を記録する。

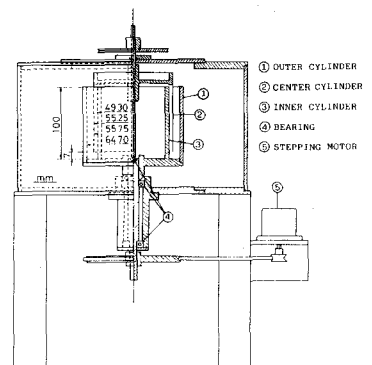


Fig.1 Concentric Cylinder Viscometer

第二の制御方法は、みかけ歪速度（内・外筒の回転速度）を一定とし、中間筒に働くトルクを測定する方法である。

歪速度の測定には、ポリスチレン微小粒子をマーカーとして用いる方式（マーカー法）と、回転子を用いる方式（回転子法）のいずれかを用いた。回転子は Fig.2 に示す通りである。

以上のような設計により従来の同型の粘度計に比べその装置特性をかなり改良することができた。その一方で、従来のものに比べて生じる問題点は以下のようなものである。

㊦ 試料必要量がやや多い。

㊧ 測定試料の流動特性の測定区間が2ヶ所となるために、剪断応力と歪速度の関係が急変するところで、その変化率が平均化される。

㊨ については、歪速度を直接測定するために各円筒間隙をやや大きくしたことによるものであり、避けられない。試料の量に応じて試料高を調整すれば、必要量をやや減少させることができる。㊩ トルク測定部の端効果を小さくするために生じたものであるが、この点については、測定試料の特性によっては検討が必要となる可能性がある。

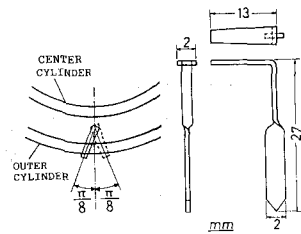


Fig.2 Deformation Rate Measuring Device

3. 解析方法

まず、境界面と懸濁液との間にスリップが存在する場合の剪断応力と歪速度の関係から $f(\tau)$ を求める方法を微分法と積分法により導く。

微分法 トルク T と剪断応力 τ_{θ} （以下 τ と称す）の関係は、懸濁液の角加速度を無視できるとすれば、定常状態として取扱えるので、 r を半径、 h を試料の有効高とすれば

$$T = 2\pi r h \cdot \tau r \quad (1)$$

$$\therefore \tau = \frac{T}{2\pi h} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2)$$

式(2)を微分した後、式(2)で辺々を除すと

$$\frac{d\tau}{\tau} = -2 \frac{dr}{r} \quad (3)$$

あるいは

$$d(\ln \tau) = -2 d(\ln r) \quad (3')$$

懸濁液の歪速度 $\dot{\gamma}$ は、角速度 ω として

$$\dot{\gamma} = \frac{d(\omega r)}{dr} = \omega = r \frac{d\omega}{dr} \quad (4)$$

剪断応力と歪速度の関係を

$$\tau = -\frac{1}{f(\tau)} r \frac{d\omega}{dr} \quad (5)$$

とおくと、式(2)、(5)から

$$f(\tau) = -\frac{2\pi h}{T} r^3 \frac{d\omega}{dr} = \frac{4\pi h}{T} \frac{d\omega}{d(\frac{1}{r^2})} \quad (6)$$

を得る。式(6)は、円筒回転型粘度計の円筒間の懸濁液の角速度分布が半径方向に渡って明らかな場合に、 $f(\tau)$ の算出に利用できる。

積分法 剪断応力 τ と半径 r の関係は一義的に定めうるので、式(3)を用いると

$$r \frac{d\omega}{dr} = r \frac{d\omega}{d\tau} \frac{d\tau}{dr} = -2\tau \frac{d\omega}{d\tau} \quad (7)$$

式(7)を式(5)に代入して

$$f(\tau) = 2 \frac{d\omega}{d\tau} \quad (8)$$

式(8)を積分するにあたり、中間筒と外筒間の懸濁液を測定対象とすることにして、境界条件としてスリップを考慮して

$$\omega = \begin{cases} \Omega_{co} \cdots \text{中間筒外面の懸濁液の角速度} \\ \Omega_{ou} \cdots \text{外筒内面の懸濁液の角速度} \end{cases}$$

とすれば

$$\Delta\Omega = \Omega_{ou} - \Omega_{co} = \frac{1}{2} \int_{\tau_{co}}^{\tau_{co}/s^2} f(\tau) d\tau \quad (9)$$

ここに、添字 ou, co: 各々外筒内面と中間筒外面を示す。半径比 $s = r_{ou}/r_{co}$, Ω : 角速度である。式(9)が積分型の方程式である⁷⁾。式(9)は Pawlowski⁸⁾や Krieger と Elrod⁹⁾により解法が考案されている。ここでは、歪速度が0のとき粘性係数を ∞ とみなしうる場合の、より簡単な解法を導く。

式(9)の和を τ_{co} に関してとると、

$$\Omega = \Sigma \Delta\Omega = -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\tau_{co}}^{\tau_{co}/s^{2n}} \frac{\tau_{co}/s^{2n}}{\tau_{co}/s^{2n+2}} f(\tau) d\tau \quad (10)$$

$$= -\frac{1}{2} \int_0^{\tau_{co}} f(\tau) d\tau \quad (10')$$

式(10')は、ニュートン流体の場合やビンガム流体の場合でも、降伏値の設定の代りに粘度を無限大とおくことにより

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} f(\tau) < \infty \quad (11)$$

となるので、積分可能となる。また、式(10)は、 $\Omega = \Omega(\tau_{co})$ であることから、第一種の Volterra 型の積分方程式になっている。式(10)を τ_{co} で微分すると、 $f(0) = 0$ から

$$\frac{d\Omega}{d\tau_{co}} = -\frac{1}{2} f(\tau_{co}) \quad (12)$$

となり、 $f(\tau)$ を決定することができる。式(7)を用いて、最終的に

$$\tau_{co} f(\tau_{co}) = \dot{\gamma} \quad (13)$$

となる。計算に際しての手順は、①試料の流動が停止する τ_{co} から、充分流動を生ずる τ_{co} まで、いく通りかの τ_{co} について $\Delta\Omega$ を求める、②式(10)に示された方法で和を求め、 Ω を得、 Ω と τ_{co} のグラフを作る、③このグラフから図上微分により、 $d\Omega/d\tau$ と τ_{co} の関係式を得る、④さらに、 τ_{co} と $-2\tau_{co}d\Omega/d\tau_{co}$ の関係式を作ると一般的な τ と $\dot{\gamma}$ の関係となる。式(11)が成立しない場合には、 $\tau f(\tau)$ を $f(\tau)$ と新たに定義し直して、式(10)の操作を行なわないで、式(12)に相当する取扱いをする Pawlowski の解法⁸⁾に従えば、面倒であるが解くことができる。

微分法、積分法とは別の方法として、 τ と $\dot{\gamma}$ の関係を直接的に求める場合には、中間筒と外筒間の懸濁液の角速度分布を式(6)に代入して求める。

4. 実験試料の物性

試作粘度計の実験試料として、カオリン (ASP-600) と筑後川底泥を用いた。カオリンの比重は2.66、液性限界65%、塑性限界36%、強熱減量18%であり、筑後川底泥では、比重2.52、液性限界99%、塑性限界41%、強熱減量12%である。両者の粒度分布(JIS A 1204)は Fig.3 に示す通りで

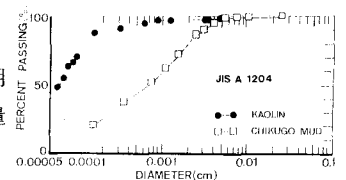


Fig.3 Size Distribution

ある。試料は、吸着陽イオンによる影響を避けるために、比重1.025の塩水中に一週間以上浸したものを使用した。

5. 実験方法

実験手順としては、性状が一樣となるように攪拌した試料を粘度計内・外筒間に注入する。その後、二通りの制御方式のいずれかに応じて、すみやかに実験を開始した。トルク一定制御型の場合には、光学センサーを、渦巻きバネが所定の捩れ角になる位置にセットし、マイコンによって光学センサーからの信号を検出しつつステッピングモーターへ回転信号を送り、中間筒が所定の回転角度に停止するようにする。このとき、みかけの歪速度は、ステッピングモーターへ送るパルス数より算出する。この場合の角度検出の誤差は $\pm 0.5^\circ$ であり、剪断応力では $\pm 0.02 \text{ N/m}^2$ 程度である。一方、みかけ歪速度一定制御型の場合には、内・外筒を所定の角速度で回転させ、そのときの中間筒の回転角度あるいは燐青銅の薄板のたわみ角より、中間筒に働くトルクを算定した。歪速度の検出も方式に応じて二通りの方法のいずれかを選ぶ。直接歪速度を求める場合には、Fig.2に示した回転子を回転軸に平行に中間筒外壁と外筒内壁の中間に差し込み、半径方向に関して $-\pi/8$ から $\pi/8$ だけ回転するに要する時間 $T\pi/4$ を求め、実質歪速度 $\dot{\gamma}_{sub}$ を

$$\dot{\gamma}_{sub} = 2 \tan \frac{\pi}{8} / T\pi/4 \quad (14)$$

で求める。この場合、回転子は何ら拘束されず、懸濁液の歪に相当する分だけ回転する。ただし、この場合に懸濁液の含水比が高くなる（300%以上）と、回転子の重量に対する支持力が不足し測定不能となる。間接的な方法としては、ポリスチレン粒子（直径 $1.0 \text{ mm}\phi$ 、密度 1.07 kg/m^3 ）を着色したものを、外筒・中間筒間の懸濁液表面に置き、外筒上端まで塩水を満した後透明の蓋をし、目視により角速度と半径（回転中心軸からの距離）の関係を求める。

実験は、液温の変化を避けるために $20 \pm 1^\circ \text{C}$ の恒温室内で行なった。

6. 実験結果

まず、予備実験として装置特性及び計算方式の確認のために、本回転粘度計を用いてグリセリン溶液（ニュートン流体）の粘度測定を行なったところ、 $0.85 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ が得られた。一方、オストワルド粘度計により得られた値が $0.84 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であったのではほぼ1%の誤差を許容するならば、本装置の端効果を無視してさしつかえないことが解かった。

剪断歪を生じさせると、通常、粘土懸濁液内において粒子間構造の変化が生じ粘度が変化する³⁾。この状態の一例を示したのがFig.4である。この場合、試料の初期状態は充分攪拌されたものであり、みかけ歪速度を一定としているため、すべての場合において粘度が増加している。粘度の増加は、歪速度の大きいものほど大きい。これは、粘度の増加が歪量に依存することを示唆している。本実験では、すべての場合においてこのような粘度変化が観察されたので、すべて定常状態に到着したところの値を採用することにした。

次に、マーカ法によりトルク一定の条件下でカオリン懸濁液の角速度を測定したものの定常状態時の例をFig.5に示す。図の左端が中間筒外壁、右端が外筒内壁にあたる。したがって、本来境界面でスリップがないならば、左端ではすべての角速度が0をとることになる。しかし、実際にはそうはならず、すべて有限の値をとっている。このことは、スリップの存在を示している。中間筒外壁面でのスリップ量は、図の左端の値にそこの半径を乗じたものとなる。こ

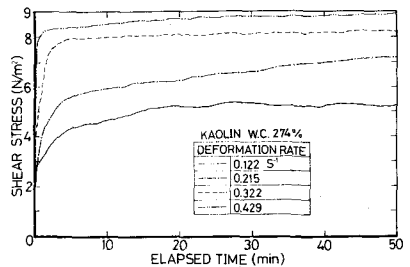


Fig.4 Change of Shear Stress at Constant Deformation Rate

こでのスリップ量は、剪断応力が大きくなるほど大きくなっている。外筒角速度を右端の軸上に塗りつぶした同じ形の記号で示している。外筒内壁面でもスリップを生じているが、外筒側ではスリップ量と剪断応力との間に明瞭な関係はない。同一条件の実験を繰り返した場合、スリップ量を含めて、ほぼ再現されたので、このようなことが常に生じると思われる。図中の実線は、多少ばらついている各測定結果の代表値と思われるものを示したものである。同一のマーカーでも周方向にいつも等しい角速度で移動していないことが観察されているので、測定誤差の他に、粘土懸濁液の剪断が層流状のみで行なわれていない可能性のあることを示しているように思われる。外筒に近づくほどこれらの実線の勾配が減少しているのは、式(1)のようにトルクが一定値に保たれるために、剪断応力が空間的に減少していくことによる。

カオリン懸濁液の実質歪速度 ($\dot{\gamma}_{sub}$) を回転子を用いて求めたものと、外筒の角速度 ($\dot{\gamma}_{ap}$) との関係を Fig.6 に示す。図中の直線は、実質歪速度とみかけ歪速度が等しいとしたときの関係を示している。回転子が実質歪速度を示しているものとすれば、実質歪速度は、non-slip を仮定したときの歪速度 ($\dot{\gamma}_{ap}$) の数分の一になる場合のあることを示している。このことは、Fig.5 の右端の塗りつぶした記号と左下端とを結んだ直線の勾配と、各実線の平均勾配との比較からでも確かめられる。

マーカー法を用いて、トルクあるいはみかけ歪速度一定の条件で、微分法と積分法の双方を用いてカオリン懸濁液の流動特性を求めた例が Fig.7,8 である。図中のプロットは、微分法によって求めた実測値である。流動曲線は、いずれも大坪⁴⁾の示したように二段階に分かれていて、ビンガム流体の特徴を示している。

まず、データ整理法としての積分法と微分法を比較する。含水比が小さいほど、積分法のものと同微分法のものとはずれている。これは、積分法では境界壁面近傍の角速度のみしか使用しないために、剪断応力の小さいところで積分時の誤差の累積がかなり効くことによるものと思われる。これを防止するには実験回数を増せばよいが、そうすると微分法に比べて簡便というメリットが減る。一方、微分法は、結果を求めるのに手数を要するが、データのばらつきが小さいならば、各点における歪速度を用いるため自らデータ数が多くなり、精度が高くなると思われる。いずれが良いかは、試料の性状にもよるが、含水比の低いときにはどちらかといえば微分法が好ましいように思える。

次に、トルク一定制御とみかけ歪速度一定制御を比較する。みかけ歪速度一定制御のものの方が、定常状態に達したときの同一歪速度に対する剪断応力の値は、トルク一定制御のものより全体的にみてほぼ2倍になっている。トルク一定制御方式の場合、十分に攪拌した懸濁液を試験すると、当初歪速度は大きく、徐々に小さくなり、試験開始後20分前後で定常状態に達する。一方、同様の懸濁液をみかけ歪速度一定制御で行なうと、剪断応力が徐々に大きくなっていき、やはり20分前後で定常状態に達する。両者の違いは、歪速度と剪断応力の変化経路の違い

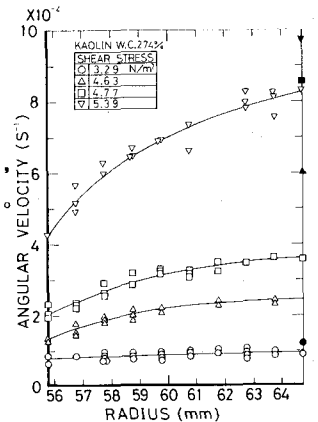


Fig.5 Angular Velocity Distribution of Kaoline Suspension (W.C.274% Shear stress kept constant)

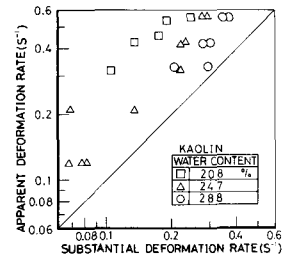


Fig.6 Apparent and Substantial Deformation Rates

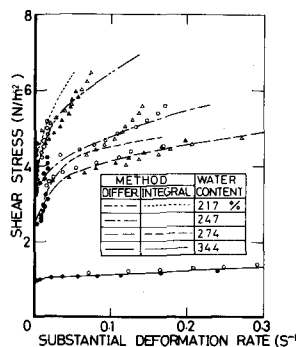


Fig.7 Flow Curve of Kaoline by Differential and Integral Methods (Shear stress kept constant)

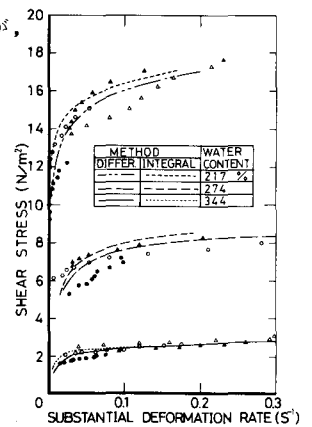


Fig.8 Flow Curve of Kaoline by Differential and Integral Methods (Apparent deformation rate kept constant)

いであって、粘土懸濁液のような流体に特有の現象である。実験時の観察によれば、両者の最大の違いは、含水比の低いときに、トルク一定制御の場合歪速度 0 の状態が容易に識別できるのに対し、みかけ歪速度一定制御の場合には実質歪速度が 0 になりにくいという点である。

それぞれの流動曲線は、ビンガム流体特有の歪速度の小さいところで粘度が急増する領域（領域 1）と、歪速度が大きく相対的にみれば粘度があまり変化しない領域（領域 2）とに大別できる。この区別は、試料の含水比が極めて高い場合、あるいは逆に極めて低い場合には明瞭でなくなる。本実験の範囲ではこれらを区別することができたので、前者における物性値、例えば降伏値や塑性粘度には添字 1 を付けて τ_{y1} , η_1 のように示し、同じく、後者のものには添字 2 をつけて τ_{y2} , η_2 のように表わすことにする。Fig.9 はカオリンと筑後川底泥両者のトルク一定制御下における微分法によって得られた η_1 , η_2 と含水比の関係を示したものである。実験範囲内では、いずれも、勾配が -4 程度あるいはそれより小さ目になる。全体的な傾向は大坪⁴⁾による結果と類似であるが、絶対値はいずれも本実験結果の方が 1 桁大きい。

Fig.10 は、カオリンと筑後川底泥両者の τ_{y1} と η_1 , τ_{y2} と η_2 の関係を示したものである。参考のために、大坪⁴⁾による結果も示している。領域 1 では粘土の種類によらずその傾向は同じであるが、本結果は大坪によるものより粘度で 1 桁大きくなっている。領域 2 についても傾向は同じであり、本結果は大坪によるものより大きく、その差は 2 桁となっている。

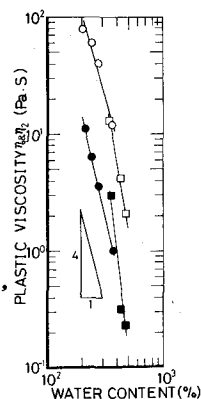


Fig.9 Plastic Viscosity (Kaolin η_1 :○, η_2 :●, Chikugo Mud η_1 :□, η_2 :■)

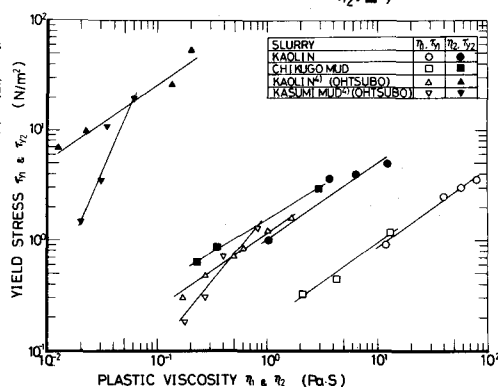


Fig.10 Relationship between Yield Stress and Plastic Viscosity

7. 考 察

粒子懸濁液の流動特性は、未だ理論的に解決されていない問題である。種々の物質についてそれぞれ検討されているのが現状である。スラリー状のものは、凝集による構造形成と、それに加えられた歪による二次的構造形成により、特異な挙動を示すことが多い。本実験においては、性状が一樣となるように攪拌した状態を初期条件とし、みかけ歪速度かトルクのいずれかを制御することによって歪を与え、定常状態に達したところを結果として採用した。応用面から考えると、実験結果の用途によって、例えば、底泥の巻き上げ予測用なのか、あるいは、汚泥を管路輸送するときの輸送時の粘度推定なのか、一度輸送を停止した後再開するときに必要な動力の推定なのかというように、それぞれ初期条件が異なるし、しかも、歪を与える条件も異なる。したがって、本実験の結果も、従来の結果も汎用できるとはいえない。この点に関しては、基礎研究の積み重ねが必要である。

底泥の巻き上げに関しては、トルク一定制御下における歪量の増大に伴う粘度増加機構の解明がなされなければならない。本装置は、この目的達成のための 1 ステップとして、利用し易い形になっている。しかし、底泥巻き上げ時のように、応力は作用するが境界条件としての空間的拘束がないという条件とは、依然として異なっているところがある。従来の研究では、毛細管型粘度計においてスリップ厚を管径によらず一定として解析的に求めたものがある。しかし、本実験のように、スリップの存在をはっきりと認めたものは、著者らの知る限り見あたらない。大坪の実験結果⁴⁾と比較して τ_{y1} と η_1 の関係が、 η_1 に関して 10 倍異なっている

ことは、大坪の結果とは、1) スリップの存在の有無、2) 定常状態の取り方、3) 応力あるいは歪経路の違い、等に起因するものと思われる。同一サンプルによるクロスチェックを研究者間で行なうことも、将来問題となるであろう。

データの整理方法として、微分法と積分法を提案した。本文中においては、微分法により整理したものを使用した。粒度分布が広汎に渡っている試料の場合、微分法ではデータのばらつきが大きくなり処理できなくなるときがある。このような場合には、積分法を使用すると平均的な結果が容易に得られる。

本実験に使用した粘度計は、端効果は小さくなっているものの、中間筒と内筒の間の試料の挙動が、平均剪断応力の違いから中間筒と外筒間の試料の挙動とは少し異なり、試料の挙動が歪速度に関して非線形のとくに特に誤差が大きくなる可能性がある。この点については、改良の余地が残されている。

8. 結 論

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 三重円筒回転型粘度計を開発した。その特徴は、i) トルクを加える機構と歪速度を測定する機構とを分離し、装置境界面におけるスリップが存在しても支障なく粘度が測れる、ii) 端効果が小さく、ほぼ無視できる、iii) みかけ歪とトルクのいずれかで制御できる、である。
- 2) 流動曲線を求める方法として、試料の角速度分布から直接求める方法と、境界壁面での角速度から求める方法の二法を示した。
- 3) 粘土懸濁液は、含水比 200 ~ 300 % 程度では、境界壁面近傍でみかけ上スリップを生じる。
- 4) カオリンと筑後川底泥の流動特性を明らかにした。

本研究の遂行にあたり、実験に協力して下さいました山下三平君にお礼申し上げます。本研究は、文部省科学研究費の補助を受けたものであり記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高分子学会編：レオロジー測定法，共立出版，1965.
- 2) 佐藤敦久，陳鴻霞：上水汚泥の流動特性に関する研究(Ⅲ)，水道協会雑誌，第 52 巻第 5 号，p.p.30~41, 1983.5.
- 3) 滝和夫，岡正義：河川底泥の流動特性，第 11 回環境問題シンポジウム講演論文集，p.p.51~56, 1983.8.
- 4) 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，p.p.79~103, 1983.
- 5) 大坪国順，村岡浩爾：底泥の物性と限界掃流力の関連について，第 25 回水理講演会論文集，p.p.73~78, 1981.2.
- 6) Bird, R. B., W. E. Stewart and E. N. Lightfoot: Transport Phenomena, John Wiley&Sons, p.p.94~96, 1960.
- 7) 中川鶴太郎，神戸博太郎：レオロジー，みすず書房，p.p.333~336, 1969.
- 8) Pawlowski, V. J.: Bestimmung des Reibungsgesetzes der nicht-Newton schen Flüssigkeiten aus den Viskositätsmessungen mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters, Kolloid Zeitschrift, Band 130, Helf 3, p.p.129~131, 1953.3.
- 9) Krieger, I. M. and S. H. Maron: Direct Determination of the Flow Curves of Non-Newtonian Fluids, J. Applied Physics, Vol. 23, No. 1, p.p.147~149, 1952.1.