

九州大学工学部 正 員 〇二 渡 了
 同 上 正 員 楠田 哲也
 同 上 正 員 桑谷 陽一

1. はじめに.

近年、水質環境問題に関して、河口・港湾域において堆積している底泥の果す割合を明らかにすることが重要となってきた。底泥の巻き上げ現象についての研究が行われ、その巻き上げ量の予測式等について検討されているが、十分ではない。筆者らは、これまでに円形回転水路を用いた巻き上げ実験を行ない、巻き上げ速度が時間的に低下あるいは停止し、それは、底泥表層の固体分率の増加による底泥表層の硬化のためであることを明らかにした。¹⁾底泥に剪断応力を作用させると、限界剪断応力以上では巻き上げが生じ上に述べたような現象が起こるが、それ以下の剪断応力を作用させた場合に、底泥がどのような流動特性を示すかについては今のところ不明である。この流動特性を明らかにするためには、底泥のレオロジー特性を把握しておく必要がある。また、円形回転水路での実験では、底泥界面に作用する剪断応力は乱流下なので時間的に変動する。この時間的変動の効果についても今のところ不明である。本研究は、底泥に種々の剪断応力を層流という条件下で作用させ、底泥の鉛直方向の相対的なずり量及び固体分率を測定し、底泥の流動特性について検討を加えたものである。

2. 実験装置及び方法.

図-1に実験に用いた剪断流装置の概略を示す。この装置は、ベルト（ベルト長120cm、幅7cm）を回転させて、底泥に剪断応力を作用させるものである。水路（長さ92cm、幅30cm、深さ16cm、アクリル樹脂製）内では、ベルト部が固定され、

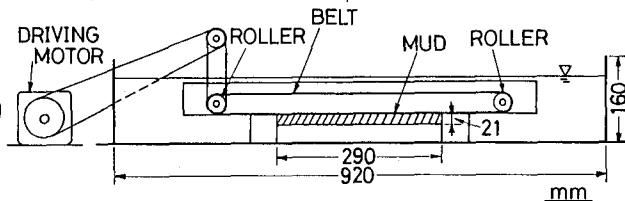


図-1. ベルト式剪断流装置

その下にベルトとの間隙が3mmになるようにして底泥を入れた容器（内寸：長さ29cm、幅5cm、深さ2.1cm）を置くことができる。この底泥を入れる容器は出し入れが自由である。底泥に作用する剪断応力は、ベルトの回転速度と間隙厚より算出した。また、今回の最大の剪断応力は 0.22 N/m^2 であり、そのときのレイノルズ数は2000程度で、流れは層流状態である。剪断応力は、0から最大値まで任意に設定できる。試料には、筑後川河口付近で採取した底泥（比重2.61、液性限界41%、塑性限界41%、強熱減量12%）を用いた。

実験はまず、底泥の鉛直方向の相対的なずり量を測定するために、容器中央部において横断方向にカオリン泥（市販カオリン、ASP-600 使用）を全体に影響を及ぼさない程度として幅2mmに挿入して実験を行ない、実験終了後に縦断方向に仕切りを入れたときの泥を取り除き、初期の位置からの移動量を読み取った。また、底泥の固体分率の鉛直方向の分布は、実験終了時にコアサンプラー（直径2.1cm）を挿入し、底泥を層状に採取して求めた。数種類の含水比の試料について、それぞれ剪断応力を変えながら、剪断応力を一律に30分間作用させ、その後これらの操作を行なった。実験は、比重1.025の塩水（並塩使用）中で行なった。さらに、試料及び塩水の物性変化を防ぐため、室温 20°C の恒温室内で実験を行なった。

3. 実験結果及び考察

含水比が240%及び286%の場合の試料について、剪断応力を変えて実験を行なった。図-2、3に各剪断応力に対する底泥の鉛直方向の相対的なずり量を示す。この相対的なずり量は、剪断応力をまったく作用させずに30分間塩水中に放置したときのカオリン泥の位置を原点とし、しかも剪断応力を作用させたときのずり量が底面で0となるように求めたものである。これは、泥最下部と容器底面とのスリップが生じることがあり、そのままで

は、底泥そのもののずり量として表わせばいいため、カオリニ泥が治具の特性上あるゆがみをもつて初めてセットされる影響を除くためである。これらの結果は、表層付近のずり量が最も大きく、下層部になる程小さくなっていることを示している。歪みとしては、表層に近い程大きい傾向にあり、単純剪断にはなっていない。また、この場合の底泥の高さは実験によるものであり、それらと比べると剪断応力が大きくなる程低くなっている。円形回転水路を用いた実験において求められた巻き上げの限界剪断応力の関係式は、 $\tau_c = 6.5(1-\varepsilon)^{1/6} (N/m^2)$ 、 $1-\varepsilon = 1/(\frac{\rho_s}{\rho_w} \frac{w}{1+w} + 1)$ である。ここで、 ρ_s : 底泥の密度、 ρ_w : 水の密度、 w : 含水比、 $1-\varepsilon$: 固体分率、であり、この式よりそれぞれの含水比の限界剪断応力は、 $w=240\%$ で $0.272 N/m^2$ 、 $w=286\%$ で $0.213 N/m^2$ となる。実際に、実験中での水路内の濃度変化を観察していると、それぞれ最大の剪断応力を作用させたときには巻き上げが起こっており、終了時の底泥高も低くなっている。しかし、剪断応力が小さく巻き上げが起こらない場合でも底泥高は低くなっている。これは、底泥が剪断応力を受けて、剪断されたことによって底泥粒子の構造に変化が生じ締め固められたものと考えられる。剪断応力とずり量の関係は明確ではない。しかし、図-3において、30分間の実験中に一樣にずりが生じたと仮定すると、歪速度は、およそ $5 \times 10^{-5} (s^{-1})$ となり、有効剪断応力のオーダーを $0.01 N/m^2$ と過小に見積もっても、大坪により示されている底泥の塑性粘度としての $1 Pa \cdot s$ (10 poise) より2桁程塑性粘度が大きくなければ、ずり量の説明がつかない。このことは、回転粘度計のような剛境界と水・底泥界面のような自由境界との、板状体の剪断機構に対する作用の差とも考えられる。

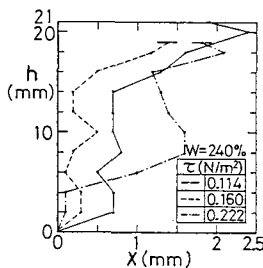


図-2. 相対的ずり量

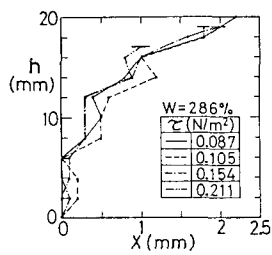


図-3. 相対的ずり量

次に、それぞれの場合の実験終了時の鉛直方向の固体分率の分布を図-4, 5に示す。中・下層部では大きな違いはないが、表層付近では若干の差が見られる。限界剪断応力に近いところでは傾向が異なるようであるが、これは、実験終了時の底泥表面に小さなクラックが生じておりこの間隙水を同時に採取しているためにある程度の誤差が生じることによると考えられる。また、剪断応力が作用しない場合とそれらを比べると、底泥表層では固体分率が増加していることが分かる。その固体分率の増分と加えた剪断応力との関係は図-6のようになる。その傾向は明瞭ではないが、限界剪断応力以下でも底泥表層付近で底泥の硬化が起こっていることが分かる。

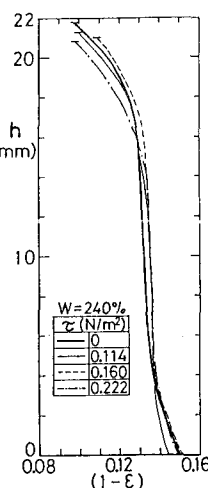


図-4. 固体分率分布

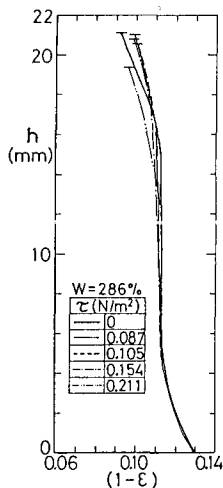


図-5. 固体分率分布

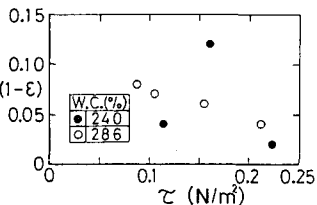


図-6. 固体分率増分と剪断応力の関係

次に、それぞれの場合の実験終了時の鉛直方向の固体分率の分布を図-4, 5

に示す。中・下層部では大きな違いはないが、表層付近では若干の差が見られる。限界剪断応力に近いところでは傾向が異なるようであるが、これは、実験終了時の底泥表面に小さなクラックが生じておりこの間隙水を同時に採取しているためにある程度の誤差が生じることによると考えられる。また、剪断応力が作用しない場合とそれらを比べると、底泥表層では固体分率が増加していることが分かる。その固体分率の増分と加えた剪断応力との関係は図-6のようになる。その傾向は明瞭ではないが、限界剪断応力以下でも底泥表層付近で底泥の硬化が起こっていることが分かる。

4. おわりに

以上のように、限界剪断応力以下の小さな剪断応力でも、底泥は流動し、その表層の固体分率も若干増加することが分かった。しかし、底泥最下部と容器底面とがスリップする場合もあり、この点は改良する必要がある。また、底泥がどの程度の time scale で流動するのか、あるいは、底泥高を変化させたときの流動特性については今後さらに検討していく予定である。

<参考文献> 1) 二瀬、海田ら：底泥の巻き上げ量の予測モデルに関する研究、水質汚濁学会講演集, pp120-121, 1984. 3.

2) 大坪国順：底泥の物性及び流動特性に関する実験的研究，国立公害研究所報告，第42号，1983.