

## (1) 底泥の流動特性に関する研究

### STUDY ON THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF MUDS

滝 和夫  
Kazuo TAKI

**ABSTRACT;** It is well known that muds exposed to fluid stressing are eroded, and is very important to understand the mechanism of mud layer erosion for the fluctuation of water quality. The patterns of mud surface affected with the flow are classified in longitudinal rectilinear grooves, linguoid ripple mark as internal wave, parting-step lineations and current ripple. These patterns are controlled by the shear resistance of muds in triaxial compression to frictional and cohesive properties, effective stress, soil structure, rate of strain, and temperature. And velocity and shear stress are often used interchangeably in erosion studies.

Data are presented showing that the activation energy is directly proportional to water content, mobility of strainrate superposed on the expanded Ostwald fluidity curve and the number of interparticle contacts per unit area of mud cross section. For the activation energy of contact on the interparticle is concerned with the cohesion of mud layer, this parameter is introduced into the basic factors to explain the fluidity, surface pattern and eroded mud quantity. Consequently, the mud fluidity is synthetically explained by the microscopic activation energy of interparticle, and by the dimensions of macroscopic hysteresis loop signified internal friction energy.

**KEYWORDS;** Mud, Erosion, Activation energy, Hysteresis loop.

#### 1. ま え が き

微細粒子からなる堆積物(底泥)の巻上がり現象を明らかにすることは河川・湖沼などにおける水質変動機構を知るうえからも重要である。そして、個々の底泥粒子接合点の物理化学的な機構が底泥層の粘性に深くかかわっており、底泥層の種々の流動形態、表面の模様、そして、巻上がり量を決める原因となっていると考えられる。そこで、本報では、底泥の流動形態を粒子間の流動単位数、粒子移動に伴う活性化エネルギー、拡張Ostwald 流動曲線へのあてはめに必要なひずみ速度移動量および含水比を調べ、底泥層の統一的な流動機構を明らかにし、微視的な基本機構である流動単位に作用するせん断応力の特性について検討するとともに、泥の内部摩擦エネルギーを泥層の巨視的挙動を粒子の活性化エネルギーのような微視的な立場からあきらかにすることを試みた。

#### 2. 底泥層表面の状態

底泥層が流れによるせん断作用を受けると、表層部分で流動や表面の粒子の移動が観察される。Photo.1はその様子を示したものである。これらの写真は幅30cm、長さ6mの実験用閉水路を用い、水路中央部1.5mの区間に底泥材料を敷きならし、種々の流れの条件下での泥層表面の状態を写真で撮影したものである。この

時の流速は0～35cm/sの範囲で非常に遅い速度で底泥の全層破壊に至るまで流速を増大させている。また、底泥材料にはベントナイト泥(a～c)とイオン交換樹脂を用い、底泥に強い粘性を持つ場合(a,b)、流水中に凝集剤を含む場合(c)、粘性のない均一粒径を持つ場合(d)について撮影したものである。これらの写真から明らかなように、底泥表面には、(1)掃流的な縦縞が生じる、(2)密度流的な内部波が生じる、(3)流下方向に薄くロール状のめくれが幾筋も生じ層状にはがれる、(4) dune, ripple 状の模様が生じる、等の現象が認められる。このように、底泥の状態がある特定の流動形態をとるかのようによて決めてしまうことのできないのがわかる。したがって、河川、湖沼に堆積した底泥層の表面は流れの状態と底泥の粘性の有無、含水比、流速、水温等によって種々の模様と流動形態を示すことが考えられる。さらにまた、泥層の流動特性を明らかにすることが底泥の巻上がり現象の機構を知る上で最も重要な因子の一つであると考えられる。

### 3. 底泥層の流動機構

底泥粒子の巻上がり現象の根幹である底泥層の流動を微視的にみると、層の中にある空孔と泥粒子との位置交換が流動をつくりだしている、とみることができる。また、この流動には粒子の持つ活性化エネルギーが深く関わっていることが知られている。この活性化エネルギーは粒子の表面電化の状態と底泥層中の水の酸素による一次結合および水素結合によって、それぞれ  $E_0=30 \text{ Kcal/mol}$ ,  $E_H=4.0 \text{ Kcal/mol}$  が働いていると考えられる。これが底泥層における粒子の移動(流動)に強く関与することから、底泥層の流動特性を知る上からも含水比が最も重要な因子となる。そこで多くの粘土についてのこれらの活性化エネルギーの和  $E_0$  について実験データ<sup>1, 2, 3)</sup>を整理し示すと Fig.1 のようになる。図中の横軸は泥の含水比を表わし泥の液性限界値  $w_L$  で無次元化した値である。この  $w_L$  は底泥に含まれる粘土鉱物の量、種類や電解質など、底泥の物理・化学的性質を代表する値として、土質工学の分野など広くもちいられている値である。図より、底泥の活性化エネルギーは次式に示すように無次元含水比の3/2乗に反比例し、次式のように表わすことができる。

$$E_0 = -\frac{3}{2} \ln \left( \frac{w}{w_L} \right) + 30 \quad (1)$$

また、 $w/w_L$  が大きくなるにしたがい、活性化エネルギーは一次結合の  $30 \text{ Kcal/mol}$  から粘土サスペンションがニュートン流動を示す点  $4.0 \text{ Kcal/mol}$  へと次第に減少する傾向が認められる。

一方、種々の流動形態は泥の種類のみによって定まるのではなく、ひずみ速度の作用の仕方によっても各流動形態が見られることは周知のとおりである。さらに、底泥の含水比の増大はせん断速度の見掛け上の増大を意味すると考えられる。そこで、ニュートン流動体の流動曲線を基軸に、各含水比のもとで得られた流動曲線図のせん断速度軸を移動して拡張Ostwald 曲線と一致させることを考える。いま、350～1560%の10段階の含水比を持つベントナイト泥について、その拡張Ostwald 曲線を描くと Fig.2 のようになる。<sup>4)</sup> また、そ

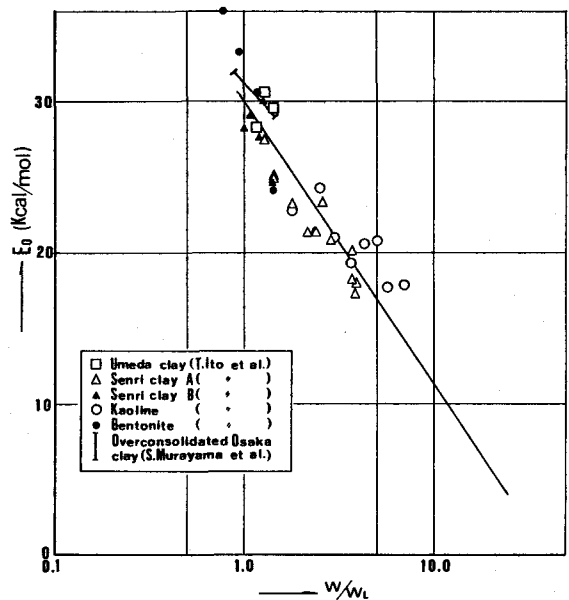


Fig.1 Variation of activation energy and water content.

の時の軸移動量および伊藤ら<sup>1)</sup>の実験から得られた千里粘土Aに対する流動曲線から求めた移動量と無次元含水比との関係を示したのがFig.3 である。

$$l_a = -2 \cdot \ln\left(\frac{W}{W_L}\right) + 7.5 \quad (2)$$

ひずみ速度軸移動量は活性化エネルギーを用いて、(1)、(2) 式から、

$$l_a = \frac{4}{3} E_a - 32.5 \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで、バントナイト泥による実験からは  $W/W_L = 24.3$  で底泥はニュートン流動性を顕著に現すことが認められる。そしてその時の  $E_a$  値は  $24.4 \text{ kcal/mol}$  である。これから、底泥粒子どうしの接合は水の酸素による一次結合による所が大であると考えられる。また、ひずみ速度軸の移動量は外力が加わらない状態での各含水比における活性化エネルギー  $E_a$  に

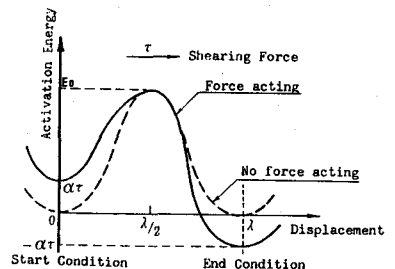
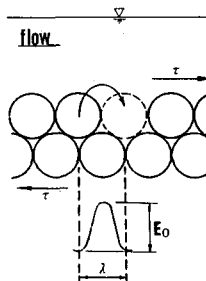
比例していることがわかる。以上のことから、底泥の無次元含水比  $W/W_L$  を知ることで、泥の活性化エネルギー量、あるいは拡張Ostwald 曲線にあてはめのための軸移動量  $l_a$  を知ることができる。

いま、せん断力をうけた粒子がFig.4 のように、空孔方向へ移動する確率は<sup>5, 6)</sup>  $k$ ; ボルツマン常数 ( $1.3805 \times 10^{-16} \text{ erg/deg} \cdot \text{mol}$ )、 $T$ ; 絶対温度、 $R$ ; ガス定数 ( $1.987 \text{ cal/deg} \cdot \text{mol}$ )、 $h$ ; プランク常数 ( $6.624 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$ )、 $\alpha = \lambda / 2N$ 、 $\lambda$ ; 運動方向に測った粒子の平衡位置間の距離、 $N$ ; 応力に直角な単位断面中に並列に存在する単位変形機構の個数、 $E_a$ ; 活性化エネルギーとして

$$\frac{2KT}{h} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \sinh\left(\frac{\alpha \tau}{KT}\right) \quad (4)$$

となる。さらに、応力に平行な単位長さの中に単位変形機構が  $n$  個直列に存在する<sup>7)</sup> のものとしてと底泥層のひずみ速度  $D$  は  $C = 2 \lambda n K T / h$  として、

$$D = C \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \sinh\left(\frac{\lambda \tau}{2KNT}\right) \quad (5)$$



ここで、底泥の流動現象では、せん断作用によって供給されるエネルギーが熱エネルギーよりも大きいと考えられることから、 $\sinh(\lambda \tau / 2KNT) \approx$

Fig.2 Expanded Ostwald fluidity curve on the bentonite mud.

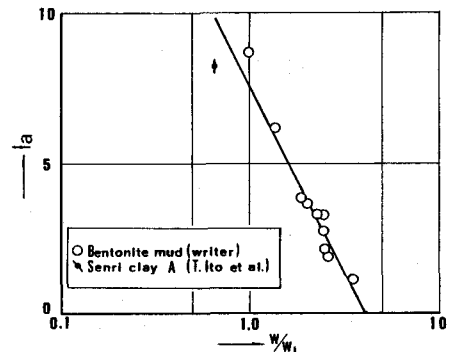


Fig.3 Mobility of strain rate as function of water content.

$\exp(\lambda \tau / 2kNT)$ と表わすことができる。したがって、(5)式は

$$D = C \exp\left(\frac{-E_0}{RT}\right) \cdot \exp\left(\frac{\lambda \tau}{2kNT}\right) \quad (5)'$$

で与えられる。底泥の粒子は外力 $\tau$ が粒子の空孔への移行を拘束する粘性抵抗に打ち勝ったとき、はじめて移動をはじめることになる。したがって、 $\tau$ が限界せん断応力 $\tau_0$ 以下では $N=n=0$ である。また、 $\tau$ と $\tau_0$ との差が大きくなほど粒子が拘束力から解放される程度（単位変形機構の個数）は大きくなると考えられるから、これらを整理すると、

$$\begin{aligned} 0 < \tau < \tau_0 ; N=n=0 \\ \tau_0 < \tau ; N \propto (\tau - \tau_0), n \propto (\tau - \tau_0) \end{aligned} \quad (6)$$

いま、底泥層が均一で、しかも、酸素による一次結合の強いheterogeneous processの流動特性を持つものとする。伊藤らのカオリン、粘土およびベントナイトによる実験<sup>1,2)</sup>およびMitchellら<sup>3)</sup>の湾の底泥による実験結果から、 $N$ および $n$ と $(\tau - \tau_0)$ の間に単純な比例関係を仮定することができる。そこで、(3)、(5)および(6)式からひずみ速度 $D$ および見掛けの粘性係数 $\eta_a$ は、ひずみ速度軸移動量 $l_a$ を用いて、

$$D = \frac{2\lambda a(\tau - \tau_0)kT}{h} \exp\left\{-\frac{(0.75)la+24.4}{RT}\right\} \exp\left(\frac{\lambda \tau}{2kb(\tau - \tau_0)T}\right) \quad (7)$$

$$\eta_a = \frac{(\tau - \tau_0)}{D} = \frac{h}{2\lambda a kT} \times \frac{1}{\exp\{-(0.75)la+24.4)/RT\}} \times \frac{1}{\exp\{\lambda \tau / (2kb(\tau - \tau_0)T)\}} \quad (8)$$

をえる。ここで、 $a, b$ は比例定数で、伊藤らの実験から $b=4 \times 10^{-8}$ と定めることができる。また、(7)式から、ひずみ速度はせん断応力を指数関数とする非線型の形をもち、せん断応力の大な領域で非線型性は弱められることがわかる。また、見掛けの粘性係数 $\eta_a$ はボルツマン常数、プランク数等の底泥の物性にかかわる量に加えて、せん断力、含水比およびひずみ速度移動量の大きさも指数関数的に関係することが認められる。

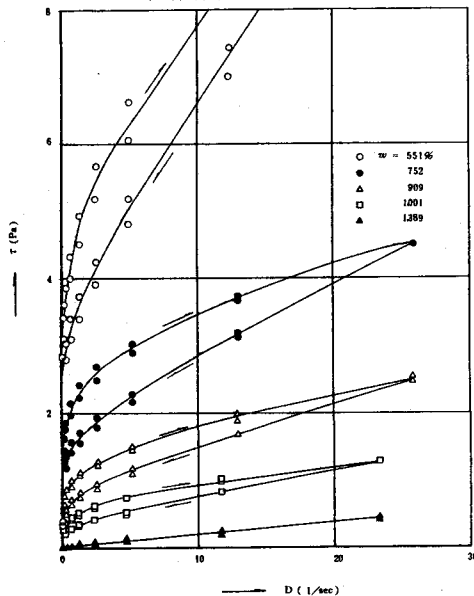


Fig.5 Histeresis loops on the bentonite muds with various water content.

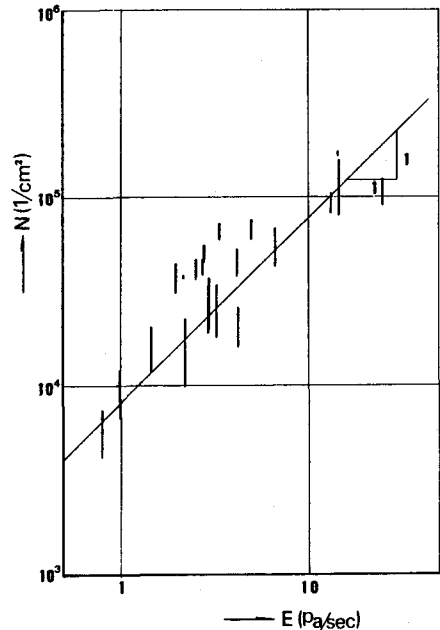


Fig.6 Variation of the area of histeresis loop and number of bonds.

次に、底泥粒子の単位変形機構の個数の変化と底泥層のせん断応力・ひずみ速度によって描かれるヒステリシスループ面積との関係を調べることとする。単位変形機構の個数 $N$ は(5)'式を変形した次式を用い、データをひずみ速度とせん断応力について図示し、その時の勾配から、 $N$ の値を求めることができる。

$$\ln D = \frac{\lambda}{2KNT} \tau + \frac{-E_0}{RT} + \ln C \quad (9)$$

また一方、Fig.5 に示すヒステリシスループの面積は、底泥層の内部摩擦エネルギーにかかわる量を表していると考えられる。これら、 $N$ 値とヒステリシスループ面積 $E$ との関係を図示したのがFig.6 である。ここで、ベントナイト泥に対する粒子の平衡位置間の距離は $2.8A^{\circ}$ としている。図より、流れによるせん断作用を受けた泥層の内部摩擦エネルギーと応力に直角な単位断面中に並列に存在する単位変形機構の個数 $N$ とは1:1の勾配に従う比例関係を持つことが認められる。そして、単位変形機構の個数 $N$ の大小は底泥層の内部摩擦エネルギー量と比例関係にあり、このヒステリシスループを知ることによって、底泥の流動機構をある程度知ることが可能になると考えられる。このことから、底泥層を微視的立場から見た単位変形機構の個数 $N$ と巨視的立場から見た内部摩擦エネルギーとは明らかな比例関係にあり、粘性の卓越する底泥の粒子間の移動（活性化）のエネルギー、すなわち、粒子間の粘性による拘束からの飛び出しに要するエネルギーと底泥層の流動とは同一のものとして取り扱うことができると考えられる。また、従来からこの種の研究に底泥の含水比を広くもちてデータの整理がなされてきたが、このとは底泥層の活性化エネルギーあるいはせん断応力による内部摩擦エネルギーを間接的に評価していることになっていることがわかる。

#### 4. あ と が き

河川、湖沼に堆積した底泥が流れによって生じる様々な模様と巻上がり量は底泥の粘性の有無、流速、水温等の種々の組み合わせによってその表面に、掃流的な縦縞、密度流的な波状模様、ロール状で層状の筋状のはがれ、およびrippleが生じる。このような現象を作り出す要因として、流速、粒子径の他に、底泥層の粘性が大いに関係していると考えられる。そこで、微視的な立場から底泥粒子が移動するのに要する活性化エネルギー量と巨視的立場から泥層の内部摩擦エネルギーとについて、その特性を調べた。その結果、次のような知見をえた。

- 1) 底泥粒子の活性化エネルギー量は液性限界値で除した無次元含水比の対数値の3/2 乗に反比例して減少することが明らかとなった。そして、粒子のもつ活性化エネルギーは含水比が液性限界値と等い時に30kcal/mol の値をとり、含水比の増大とともに、活性化エネルギーは減少し、水素結合である4.0kcal/mol に一致するようになる。
- 2) 拡張Ostwald 曲線による底泥の流動特性から、ひずみ速度軸の移動量は底泥層の無次元含水比および粒子の活性化エネルギー量と一次の比例関係にある。また、底泥層の内部摩擦エネルギーと粒子間の移動（活性化）に要するエネルギーとも一次の比例関係にあることが認められた。これらから、底泥の特性量が無次元含水比によって説明できることを示唆していると考えられる。
- 3) ひずみ速度は底泥層に働くせん断応力のみには比例して増大するのではなく、見掛けの粘性係数（活性化エネルギー、含水比、ひずみ速度移動量）にも影響を受け、粒子の活性化エネルギーの増大と共に指数関数的に減少する。
- 4) 含水比によるデータの整理は底泥層の粒子の持つ活性化エネルギーおよび流れの持つせん断応力、ひずみ速度によってつくられる内部摩擦エネルギーを間接的に表わしている。

#### 5. 引 用 文 献

- 1) 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、PP109～123、1975。
- 2) 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、PP41~51,1975.

- 3) Mitchell, J.K., A. Singh and R.G. Campanella; Bonding, Effective Stress, and Strength of Soils, Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, ASCE., vol.95, No. SM5, PP1219 ~1246, 1969.
- 4) 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会論文報告集、土木学会環境問題小委員会、PP51~56, 1983.
- 5) 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)、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、第2部、PP859 ~860、1984.
- 6) Kelly, W.E. and R.C. Gularte; Erosion Resistance of Cohesive Soils, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol.107, No. HY10, PP1211 ~1224, 1981.
- 7) 村山朔郎、柴田 徹; 粘土のレオロジー的特性について、土木学会論文集、第40号、PP1 ~31, 1956.

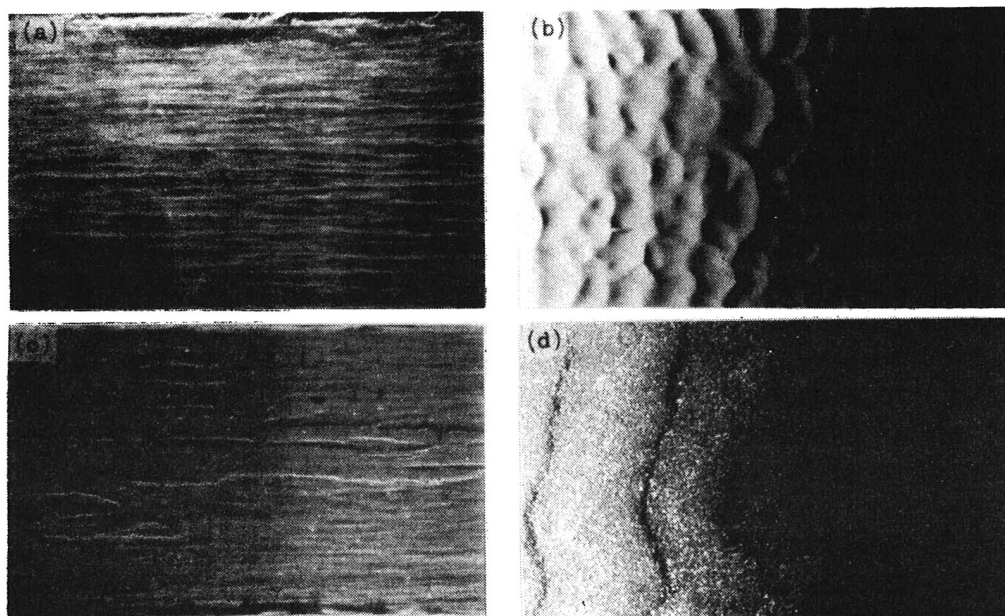


Photo.1 Flow patterns on mud layer surface acting shear flow from left to right. (a) Bentonite mud,  $W=953\%$ , velocity; 22.6cm/s. No additional water flow. (b) Bentonite mud,  $W=750\%$ , velocity; 19.5cm/s, No additional water flow. (c) Bentonite mud,  $W=717\%$ , velocity; 30.0cm/s. Water flow added a coagulant agent. (d) Ion exchange resin, mean diameter; 0.63mm, velocity; 16.0cm/s. No additional water flow.