

高濃度泥流の流動特性

Rheological Behavior on
High Density Mud Flow

千葉工業大学 正員 滝 和 夫

1. ま え が き

泥流や大河川などで観察されるような微細砂を高濃度に含む流れの動的機構については固液界面での電気的な力の影響が無視できず、現象の予測が難しい。従来、このような流れにおいては、ビンガムあるいはダイラタント流体としての性質を示すことが知られており、降伏値・粘度等のレオロジー定数について数多くの研究がなされてきた。その結果、個々の粒子接合点の物理化学的な機構が泥流の粘性に深く関わっており、泥流の種々の流動形態および濁流等の濃度を決める原因となっていると考えられているが、未だ十分には解明されていないようである。そこで、本報では、まず、高濃度固液混相流の一般的な流動式をあげ、流動特性を支配するパラメータについて簡単な考察を加え、微細な土砂を高濃度に含む泥層の流動開始時の問題点、特に泥層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、泥層の含水比について固液界面での相互作用という面から考察を試みた。

2. 諸流動モデル

流水中に微細土砂が含まれると、その粒子は表面に負の電荷を生じ、電気二重層を形成する。この粒子の集合である泥層では、粒子の移動を拘束する粘性抵抗（電荷等に関係する）に外力が打ち勝ったとき、粒子は初めて移動を開始することになる。この現象を表わす式として、塑性流動の式、ベッキンゲル指数則の式およびEyringの式があげられる。そして、これらの基本式型として、

$$D = \frac{1}{\eta_a} (\tau - \tau_0)^n \quad (1)$$

ただし、 $\tau_0 = 0, n = 1$; ニュートン流動 $\tau_0 = 0, n < 1$; ダイラタント流動

$\tau_0 = 0, n > 1$; 擬塑性流動 $\tau_0 \neq 0, n < 1$; ビンガム流動

で与えられる¹⁾。ここで、 τ はせん断応力、 τ_0 はせん断降伏値、 D はひずみ速度、 n はレオロジー定数、 η_a は見掛けの粘度である。また、Ellisはひずみ速度の小さな領域ではニュートン流動の影響が強く現れるとして、

$$D = (\phi_0 + \phi_1 \cdot \tau^{n-1}) \tau \quad (2)$$

を示した。ここで、 ϕ_0 および ϕ_1 は粘度に関する係数である。

一方、Ostwaldは実験から、せん断応力が極めて小さい範囲ではニュートン流体、また、極めて大きな範囲でもニュートン流動の挙動を、そして、その間はダイラタントから擬塑性流動へと変化することを明らかにした。これに関しては、Philippoffの式あるいはEyringの式がある。ひずみ速度 D は泥粒子間の単位変形機構の個数 N 、活性化エネルギー E_0 およびボルツマン常数等の物性値から、

$$D = C \cdot \exp \{ f(E_0) \} \cdot \sinh \{ g(\tau/N) \} \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで、 $f(E_0)$ 、 $g(\tau/N)$ はそれぞれ活性化エネルギーの関数、せん断応力と粒子の単位変形機構の個数の比から成る関数を意味する。この(3)式は泥流等のレオロジー式が粒子表面の電荷量等に関する粘性係数、せん断降伏値およびひずみ速度の関数として整理できる。また、村山ら²⁾および松井

ら³⁾はせん断応力に応じて泥層粒子の単位変形機構の個数が決定されるとして、 $N=a(\tau-\tau_0)$ を仮定し、実験結果を良く説明できることを示した。しかし、この値を直接(3)式に代入することには問題が残されているようである。一方、(3)式の見掛けの粘度は $1/\{C \exp(f(E_0)) \cdot g(N)\}$ で求められる。そして、 τ の小さな範囲ではニュートン流動的値を、また、 τ の大きな範囲では非ニュートン流動的な値となって、Ostwald 曲線を完全に満足するものではない。Powell-Eyringはこの点を考慮したモデルとして、

$$D = A \sinh B(\tau + C_0 \cdot D) \quad (4)$$

を導いている。ここで、 A, B, C_0 は粘度等の係数である。(4)式は一次のひずみ速度項を含むから、Ellisの導いた(2)式と同様に、ニュートン流動を基調とした式型であると言うことができる。

以上述べてきたように、非ニュートン流動体に対するレオロジー式はニュートン流動に対する式に現象の非線型性を重ね合わせた式型を取っているのが一般的である。そして、式中の各項を構成しているパラメータがどのような代表物理量で表現されるのが最も適切であり、また、実際であるのかを知ることが必要であるように思われる。

3. 泥層の流動機構

泥層の流動を微視的にみると、一般に、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粘性力として深く関わっており、泥層中の粒子が空孔への移行する際の拘束となっている。したがって、外力 τ がこの内部抵抗に打ち勝った時、はじめて粒子の移動が生じることになる。そこで、いま、Fig.1のように、せん断応力をうけた粒子が空孔方向へ移動する活性化の確率 P を考えると、

$$P = \frac{2KT}{h} \exp\left(\frac{-E_0}{RT}\right) \sinh\left(\frac{\alpha\tau}{KT}\right) \quad (5)$$

となる。^{4,5,6)}ここに、 K ；ボルツマン常数(1.3805×10^{-16} erg/deg)、 T ；絶対温度、 R ；ガス定数(1.987 cal/deg·mol)、 h ；プランク常数(6.624×10^{-27} erg·sec)、 $\alpha = \lambda/2N$ 、 λ ；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(結合数)、 E_0 ；活性化エネルギーである。さらに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、 $\sinh(\lambda\tau/2KNT) \approx (1/2) \exp(\lambda\tau/2KNT)$ と表わすことができる。したがって、 $C = X\lambda KT/h$ として底泥層のひずみ速度 D は、

$$D = C \exp\left(\frac{-E_0}{RT}\right) \cdot \exp\left(\frac{\lambda\tau}{2KNT}\right) \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 X は活性化確率 P とひずみ速度 D を関係づけるパラメータで、frequency factorとよばれる係数である。

一般に、粒子の表面電化の状態と泥層中の水の酸素による一次結合あるいは水素結合とによって、活性化エネルギーは、それぞれ、 $E_0 = 30$ Kcal/mol、 $E_H = 40$ Kcal/molの値を示す。これが泥層における粒子の移

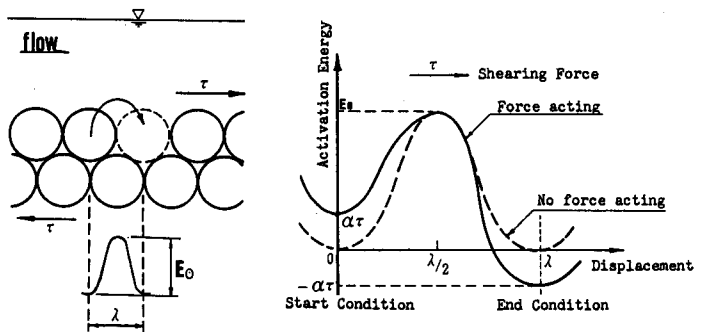


Fig.1 Influence of a shearing force on energy barriers opposing particle movement.

動（流動）に強く関わっているところで、泥層粒子相互の結合が酸素による一次結合であるか、あるいは水素結合となっているかは粒子間隔（粒子間距離）によって知ることができる。すなわち、泥粒子の容積濃度あるいは泥の含水比が最も重要な因子であると考えることができる。そこでいま、これらの活性化エネルギーの和 E_0 について多くの実験データ^{2,3,7)}を整理し示すと Fig. 2 のようになる。ここで、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 は泥層に含まれる粘土鉱物の量、種類や電解質など、泥層の物理・化学的性質を代表する値として、土質工学の分野などで広くもちいられている。図より、 W/W_L が大きくなるにしたがい、活性化エネルギーは 30 Kcal/mol から次第に減少する傾向が認められる。また、活性化エネルギー 4.0 Kcal/mol の点は粘土サスペンションがニュートン流動を示す点である。泥層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 8.2 乗に反比例し、次式のように表わすことができる。

$$E_0 = -8.2 \ln \left(\frac{W}{W_L} \right) + 30 \quad (7)$$

ここで、 $E_0 = 4 \text{ Kcal/mol}$ に近くなると、ニュートン流動となり、密度流的現象が現れる。その時の限界は Fig. 2 より、含水比で 950%、活性化エネルギー量で $E_0 = 28 \text{ Kcal/mol}$ である。

一方、泥層に動的なひずみが作用すると、種々の流動形態が見られる。これは、各流動形態が泥の種類のみによって定まるのではなく、また、泥の含水比の増大が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、各含水比のもとで得られた流動曲線図を、ニュートン流動曲線を基軸に、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、拡張 Ostwald 曲線を描く^{8,9)}。その時の軸移動量および千里粘土 A⁷⁾ における移動量と無次元含水比との関係は Fig. 3 に示すとおりで、明確な比例関係を持っていることが認められる。そして、このひずみ速度軸の移動量は活性化エネルギーで表現すると

$$E_0 = \frac{3}{4} \lg a - 2.44 \quad (8)$$

で表わすことができる。ここで、任意の含水比における泥層の活性化の度合いがひずみ速度軸移動量を定めると考えることができる。したがって、活性化エネルギーが大なるほど負軸方向への移動量が大きくなることがわかる。また、ひずみ速度軸の移動量は活性化エネルギー E_0 に比例し、ひずみ速度等の流れに関係するもの以外の底泥の性質によって決まると考えることができる。

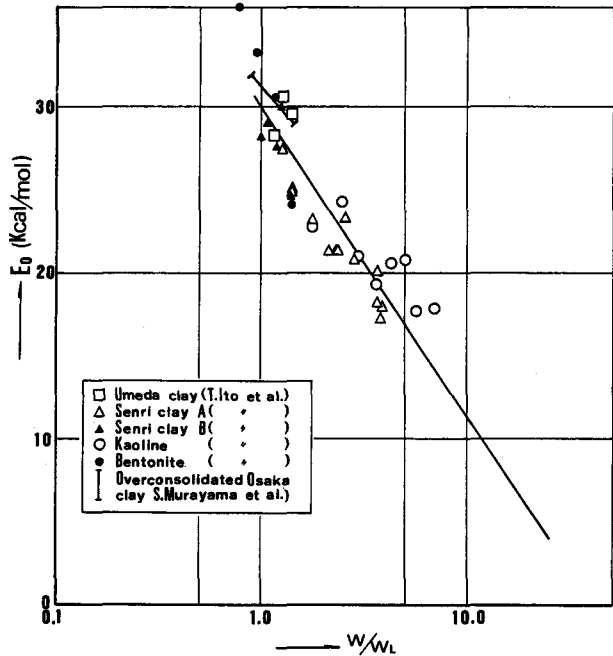


Fig.2 Variation of activation energy and water content.

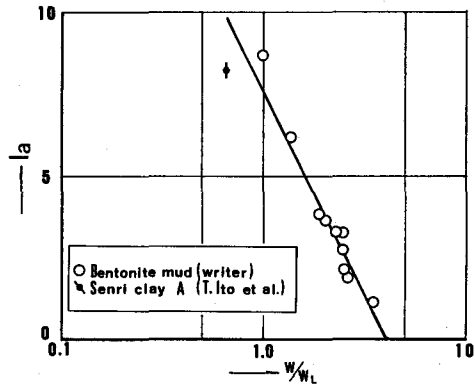


Fig.3 Mobility of strain rate as function of water content.

次に、泥層の状態を示す量である結合数 N について調べることにする。いま、泥流を引き起こすような外力が粒子とそれに接する空孔との間に $2\alpha\tau/\lambda$ のポテンシャル傾度を持つ程になると粒子と空孔との位置交換の確率は 0 以上となり変形（流動）が生じ始める。ここで、 α は基本的には泥層の粒子の大きさや種類によって決定される値であると考えられる。そこでいま、その状態を表わす量として含水比を用い、種々のデータをプロットすると、Fig. 4 のようになる。ここで、縦軸は泥層単位体積当りの粒子個数を考慮する意味から、結合数と含水比の積からなる量をとっている。図中の実線はデータとの最適線を示すもので、

$$N = 4 \times 10^{10} (W/W_L)^{-4} / W \quad (9)$$

で表わされる。泥流等の流動現象ではせん断降伏値をもつことから、ひずみ速度 D および見掛けの粘性係数 η_a は(6)、(7)、(9) 式から、

$$D = X \frac{K\lambda T}{h} \exp \left\{ \frac{8.2 \cdot \ln(W/W_L) - 30}{RT} \right\} \exp \left\{ \frac{\lambda(\tau - \tau_0)(W/W_L)^4 / W}{8 \times 10^{10} KT} \right\} \quad (10)$$

$$\eta_a = \frac{\tau - \tau_0}{D} = \frac{h(\tau - \tau_0)}{X\lambda KT} \exp \left\{ \frac{-8.2 \cdot \ln(W/W_L) + 30}{RT} \right\} \exp \left\{ \frac{-\lambda(\tau - \tau_0)(W/W_L)^4 / W}{8 \times 10^{10} KT} \right\} \quad (11)$$

となる。(10) および (11) 式は含水比をパラメータとして泥層のせん断応力とひずみ速度との関係を示したもので、含水比の増大が泥流等の流動特性を調べる上で大きな影響を与えることがわかる。また、せん断力作用によって供給されるエネルギーが熱エネルギーに比べて小さいとき、ひずみ速度とせん断応力とは比例関係を与えることから、(10) 式はニュートン流動にも適応できると考えられる。

一方、微視的立場から導かれた泥層粒子の単位変形機構の個数の変化と巨視的立場にある泥層の内部摩擦エネルギー量との関係調べる。単位変形機構の個数 N はデータのひずみ速度とせん断応力とから、その時の勾配と(6)式から求めることができる。また、泥層の内部摩擦エネルギーにかかわる量は泥層のせん断応力とひずみ速度とを両軸に取って描かれるヒステリシスループの面積からもとまる。これらの関係を図示したのが Fig. 5 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 $2.8 \text{ \AA}$ 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量と応力に直交な単位断面中に並列に存在する単位変形機構の個数 N とは一次で比例していることが認められる。したがって、

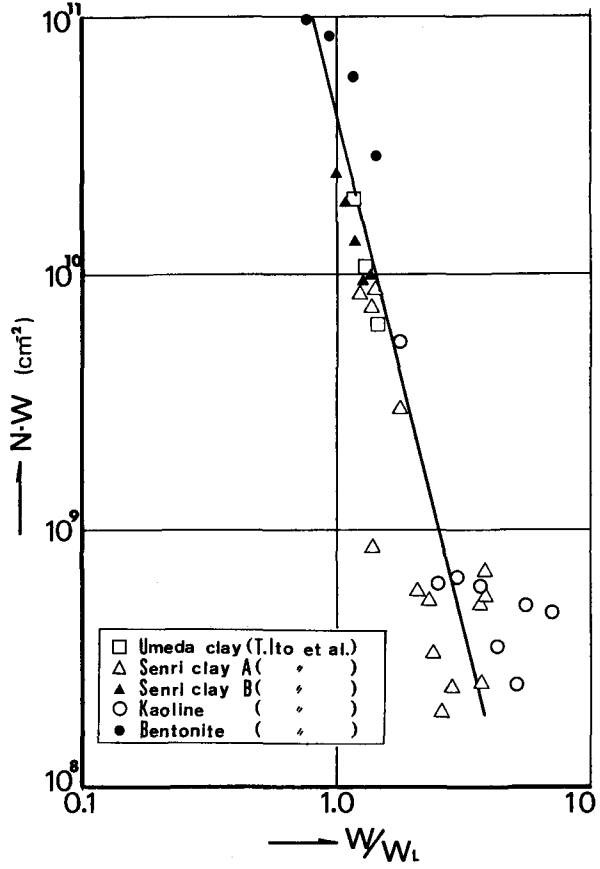


Fig. 4 Number of bonds depend on the water content.

粘性の卓越するような泥流では、せん断応力とひずみ速度とで作られる内部摩擦によって消費されるエネルギーは泥粒子間の移動（活性化）のエネルギー、すなわち、粒子間の粘着による拘束から飛び出しに要するエネルギーとなるもので、底泥層の流動として現れる。

4. あ と が き

微細な土砂を高濃度に含む泥流等の動的機構については固液界面での電氣的な力の影響が無視できず、ビンガムあるいはダイラタント流動体としての性質を示すことが知られている。そして、泥層の降伏値、粘度等のレオロジー定数について研究がなされ、その結果、個々の粒子接合点の物理化学的な機構が泥流の粘性に深く関わっており、泥流の種々の流動形態を決める原因となっていることが明らかにされている。このことは泥流や大河川等での堆積底泥の流動機構の解明にとって、現象を分類する上からも最も基本的な要因の一つであると考えられる。そこで、微視的な立場と巨視的な立場とから、泥層粒子が移動するに要する活性化エネルギー量および粒子間結合数と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) 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に反比例して減少し、その比例係数が -8.2 となることを明らかにした。そして、粒子の持つ活性化エネルギーは含水比が液性限界値と等しい時に酸素の一次結合である 30Kcal/mol の値をとり、含水比の増大と共に、その値は水素結合の 4Kcal/mol へと直線的に減少する。

2) 拡張Ostwald曲線による泥層の流動特性から、ひずみ速度軸の移動量は泥層の無次元含水比の変化量および泥粒子の活性化エネルギーの変化量を示している。

また、泥層の内部摩擦エネルギーと粒子間の移動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、泥の特性量が無次元含水比によって幅広く説明できることを示唆しているものと考えられる。

3) ひずみ速度は底泥層に働くせん断応力に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、ひずみ速度軸移動量）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) 泥層の粒子間の単位変形機構の数（結合数）は泥層の持つ特性によって定まる物理量であると考えられ、無次元含水比の -4 乗に比例することを実験データから明らかにした。

終わりに、本研究を行なうにあたり、千葉工業大学土木工学科岡正義先生より貴重な御助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

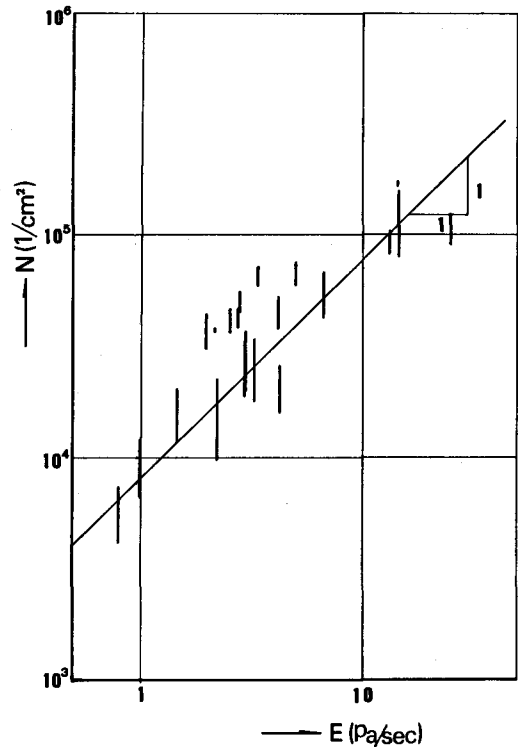


Fig.5 Variation of the area of histeresis loop and number of bonds.

5. 引 用 文 献

- 1) 川島俊夫；非ニュートン流体の流動、混相流の流動機構と応用技術、混相流シンポジウム実行委員会、PP221～238、1983.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Milchell, 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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、PP1～6、1983.
- 9) 滝 和夫；底泥の流動特性に関する研究、第13回環境問題シンポジウム講演論文集、土木学会環境問題小委員会、PP1～6、1985.