

粘着性土砂の侵食と堆積

Erosion and Deposition of Cohesive Sediment

澤 井 健 二

Kenji SAWAI

1. はじめに

自然界の流砂あるいは地表面を構成する土砂材料はきわめて広範で、数mにも及ぶ巨礫から $1\mu\text{m}$ 以下の粘土粒子まで、大小様々の粒子から成るが、 $10\mu\text{m}$ 程度以下の粒子はその粘着力のために、それよりも大きな粒子とは異なった力学特性を示す。河道や海浜の多くの区間では、河床材料の中に占めるそのような微細粒子の割合が小さいため、その影響は無視できるが、土砂の生産場である山地斜面、河岸あるいは土石流の堆積物や土壌には、数%程度の粘土・シルト分が含まれていることが多く、それが無い場合に比べて極めて大きな侵食抵抗を示す。

しかし、微細粒子は一旦水流に取り込まれると、容易に下流へ運搬されていわゆるウォッシュロードを形成し、その濃度が高くなると、流体の粘性を変化させたり、乱流構造を変化させたりする。また、河口部や低水時の都市河川など、流速の小さなところでは、フロックを形成し、複雑な沈降堆積をする。そのようにして形成された水底の軟弱泥土は“へどろ”と呼ばれ、特に富栄養化した水域で形成される、黒色で還元的なへどろは悪臭を放つようになり、“腐泥”と呼ばれる。

このように微細粒子の混入した土砂の侵食と堆積は、砂礫のそれとは非常に異なった様相を呈するが、それは微細粒子に作用する粘着力によるところが大きく、ここでは、そのような土砂を“粘着性土砂”と呼ぶことにする。

粘着性土砂の受食性（侵食されやすさ）や凝集性を支配する要因は数多く、いまだ十分に解明されていないが、締め固め度や含水比など、その存在状態によってそれが変化することが一つの大きな特色である。このために、一旦剥離した粒子は、まだ剥離していない粒子とは非常に異なった挙動を示すことになり、流砂機構を複雑にしている。しかしながら、その反面、河床面における流砂と河床材料との交換が無視できることも多く、ある意味では砂礫床の流砂機構に比べてより単純な側面も持っている。とりわけ、侵食速度がその場所の水理量（たとえば摩擦速度）によって規定されることは、砂礫床では流砂量がその場所の水理量によって規定され（ただし、平衡状態に近い場合）、その流下方向への変化によって侵食・堆積が生じると大きな対照をなしている。このことは河床形態や流路形態に強く反映され、粘着性流路（粘着性土砂で構成された流路）に特有の流路形態を生み出している。

2. 粘着性土砂の受食性

2.1 粘着力の原因と支配因子

土の粘着力は、土粒子相互間に作用する斥力と引力、ならびに土粒子と間隙水の間に作用する界面力によって規定され、それらはまた、粒子の配列状態、粒子表面における電荷の分布状態および間隙水中のイオンの分布状態によって規定されている。このように、土の粘着力の原因は、粒子表面における物理化学的作用にあり、それに影響を及ぼす因子は数多い。

粘着力の原因が粒子表面における作用にあることから考えて、比表面積（単位容積当りの表面積）がその重要な要因となることは容易にうなずける。粒子の形状が同一の場合、粒子の表面積は粒径の2乗、体積は粒径の3乗に比例するから、比表面積は粒径に反比例し、微細な粒子ほど粘着性に富む傾向のあることがわ

かる。一方、同一の体積に対しては、滑らかな球の場合に表面積が最も小さく、扁平あるいはしわ状になるほど表面積が増大する。粘土粒子は一般に、粒径が小さい（数 μm 以下）だけでなく、扁平な形状を有し、きわめて大きな比表面積を持っているのである。

このように、土の粘着力がその構成粒子によって支配されるのは当然であるが、さらにそれらの配列状態、中でも粒子間距離が重要な要因となり、一般によく締め固まった土ほど粘着力が強くなる。また、粘土鉱物が扁平な板状の形状を有することより、その配列状態は単に粒子間距離だけでなく、粒子の向きのそろい方（配向度）によって異なる。粒子の配列構造は、その配向の程度によって、ランダム構造、綿網化構造、分散構造（不完全配向構造）、完全配向構造などに分けられる¹⁾。粘性土はさらに、しばしば大小様々の団粒を形成するが、それらの配列状態やその支配因子を的確に表すことは難しい。

粘着力に影響を与える因子としては、このほか、含水比、鉱物組成、間隙水の組成、温度などが挙げられるが、その影響の定量的評価については、現在のところ統一的な結論が得られていない。

2.2 受食性の表現法ならびに試験法

水流による粘性土砂の侵食機構が十分に解明されていない現在、その侵食速度がどのような水理量によって規定されるかは必ずしも明らかでないが、境界面近傍における流速が主要な支配要素となることは確かであろう。ここでいう流速とは、単に主流方向の時間平均流速だけでなく、垂直方向成分や、それらの時間変動をも含めたものであるが、通常、ある相似性を仮定して、掃流力あるいは摩擦速度で外力要因を代表させ、それらと侵食速度との関係をもって、それぞれの材料の受食性を表現する。この場合、流水中に土砂が含まれていると、その土砂濃度あるいは流砂量によっても侵食速度が変化するが、河床材料特性としての受食性を論じる場合には、流砂の影響を除いたものを対象とする。

粘性土の受食性を直接的に求めるには、粘性土の表面に水流を作用させて、その掃流力と侵食速度を計測すればよく、最も単純には、砂礫の場合と同様に、等流状態の直線開水路路を用いることが考えられるが、ジェットを用いた試験法^{2), 3)}や回転クエット流を用いた試験法^{4), 5)}も用いられている。しかしながら、同一材料に対しても、試験法が異なると、掃流力と侵食速度の関係の異なることがあり、よりの確かな受食性の表現法ならびに試験法について検討の余地が残されている。

2.3 粘性土の限界掃流力

一般に、粘性土砂の表面に作用する掃流力を徐々に上げていくと、それがある値に達するまではほとんど侵食が見られず、ある掃流力 τ_c を境にして侵食速度が急激に増大する。そのような掃流力を侵食限界掃流力あるいは単に限界掃流力と呼ぶ。

含水比がさほど大きくなく、比較的強い粘土では、図-1(a)に示すようにこの限界は比較的明瞭で、一義的に決定されるが、含水比が非常に大きくて液性限界を上回るような場合には、やや異なった特性の見られることがある。すなわち、図-1(b)に示すように、侵食速度の急変する掃流力が2つあり、一つは底質が流送し始める限界 τ_{c1} で、流送限界と呼び、他の一つは河床面が破壊して河床高を維持できなくなる限界 τ_{c2} で破壊限界と呼ぶ。

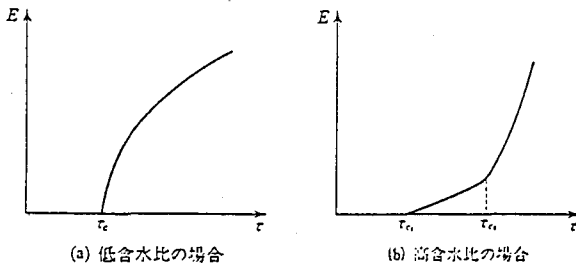


図-1 限界掃流力の概念図

表-1 粘性土の限界摩擦速度

土質分類	限界摩擦速度 [cm/s]
砂質ローム	5.8~6.3
中位のローム	6.3~6.9
火山灰	
固いローム	6.9~8.6
固い粘土	8.6~14.4

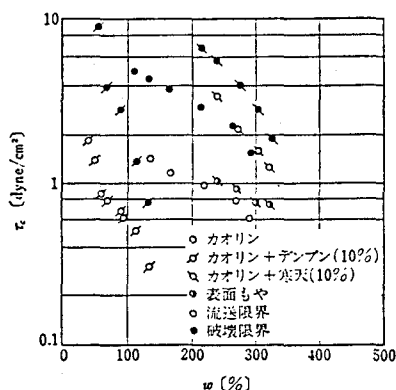


図-2 比較的高い含水比での
カオリンの限界掃流力

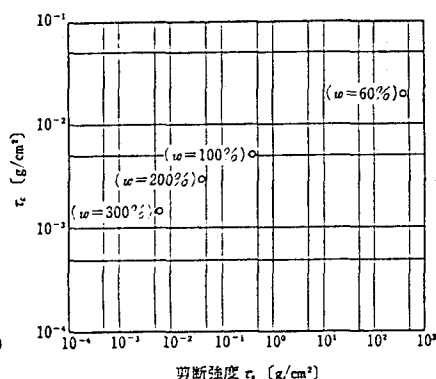


図-3 ベントナイトの限界掃流力
と剪断強度

限界掃流力に影響を及ぼす因子は数多く、存在状態も含めて個々の土について侵食試験を行わなければそれを把握することはできないが、その概略値として、Etcheverry⁶⁾のデータによるものを摩擦速度に換算して示すと、表-1のようである。これは受食性試験によって得られたものではなく、実際の河道における資料から、流路が安定であるための許容水理量を見出そうとしたものであり、含水比や締め固め度が示されていないなど、厳密性に欠けるが、比較的低い含水比（おそらく塑性限界と液性限界の中間にあるものと思われる）の粘性土に対する侵食限界の目安を与えるものとして注目される。しかしながら、Lane⁷⁾によって示されているように、同一の材料でも締め固めの程度によって限界掃流力が約20倍も異なることがあるので、その適用には注意が必要である。

図-2は、比較的高い含水比でのカオリンの限界掃流力を示したもので⁸⁾、含水比が300%にも達すると、わずか1 cm/s程度の摩擦速度で底面が破壊する。

このような限界掃流力を、他の土質パラメータと結びつけようとする試みは、数多くなされているが、いずれも一般的なものとはなっていない。たとえば、Dunn³⁾は、限界掃流力 τ_c とベンセン断強度 S_v との間の関係式として、実験的に

$$\left. \begin{aligned} \tau_c &= 0.02 + \frac{S_v \tan \theta}{1000} + 0.18 \tan \theta \\ \theta &= 30 + 1.73 PI \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

（ここに、PIは、塑性指数、 τ_c および S_v の単位はlbs/ft²、 θ の単位は度）

を得ているが、実験に用いられた材料は限られており、塑性指数の範囲も6～16と狭いので、この式を他の条件にまで拡張して用いることは危険である。図-3は、ベントナイトの限界掃流力とせん断強度との関係を示したものであるが、液性限界（ $w=300\%$ ）付近と塑性限界（ $w=40\%$ ）付近とでは、せん断強度が10⁵倍程度異なるにもかかわらず、限界掃流力は10倍程度しか変化せず、両者の間に線形関係は見出せない。

このほか、分散比や粘土含有率、平均粒径、有機物含有率、陽イオン交換容量、カルシウム・ナトリウム比、間隙比など、種々のパラメータと限界掃流力との相関が検討されている^{2), 9)}。また、高含水比の底泥においては、カオリン主成分粘土とベントナイト主成分粘土の各グループごとに、限界掃流力と粘度との間に一定の関係のあることが見出されている¹⁰⁾。さらに、細井ら¹¹⁾は、含水比の非常に高い底泥の巻き上げを2層流現象として捉え、侵食限界において

$$F \equiv \frac{u_* c}{(\varepsilon g \nu')^{1/3}} \approx 0.25 \quad (2)$$

となることを見出している。ここに、 ν' は底泥のみかけの粘性、 ε は相対密度差である。

これまでは、比較的粘土分の多い河床材料を対象として、その構成成分を区別せず、一体のものとみなしてきたが、砂礫分の多い材料では、粘土分の侵食と砂礫分の侵食とを分けて考え、両者がともに侵食される限界として、限界掃流力を捉えることができる。図-4に示すように、砂礫粒子の空隙を粘土分が満たしている場合には、表層の粘土分が侵食されるまでは砂礫粒子は動き得ないから、その粘土分の限界掃流力を上回る掃流力が作用しなければ、侵食は生じない。掃流力が粘土分の限界掃流力を上回ると、表層の粘土分が侵食され、砂礫粒子は、流れに露出するようになるが、それが移動するためには、その重力に起因する抵抗と、粒子下部の粘性土の粘着抵抗との和を上回る掃流力が作用しなければならない。

いま、砂粒子を流れ方向に動かそうとする力とこれに抵抗しようとする力とが釣り合った状態、すなわち、移動限界状態を考えると、次式が成り立つ¹²⁾。

$$F_D + F_W \sin \theta = (F_W \cos \theta - F_L - F_B) \tan \varphi + F_c \quad (3)$$

ここに、 F_W ：重力、 F_B ：浮力、 F_D ：抗力、 F_L ：揚力、 F_c ：粘着力、 θ ：河床勾配、 φ ：砂粒子の安息角である。静水圧分布を仮定すると、これらの力はそれぞれ次式のように書ける。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D k_1 d^2 u_a^2 \quad (4)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L k_2 d^2 u_a^2 \quad (5)$$

$$F_W = \rho_s k_3 d^3 g \quad (6)$$

$$F_B = \rho k_3 d^3 g \cos \theta \quad (7)$$

$$F_c = k_1' d^2 f_c \quad (8)$$

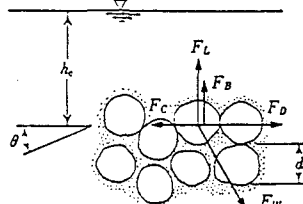


図-4 砂礫粒子に作用する力

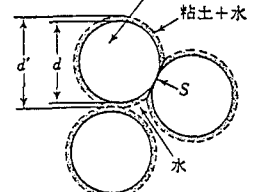


図-5 砂粒の表面に付着した粘土層

ここに、 C_D ：抗力係数、 C_L ：揚力係数、 d ：砂粒子径、 ρ_s ：砂粒子密度、 ρ ：水の密度、 u_a ：砂粒子に作用する代表流速、 k_1 、 k_2 、 k_3 ：形状係数で、球形の場合には、 $k_1 = k_2 = k_3 = \pi/6$ 、 f_c ：単位面積当りの粘土の粘着抵抗、 $k_1' d^2$ ：粘着抵抗に寄与する粘土の粘着面積である。いま、摩擦速度 u_* を用いて

$$u_a = \alpha u_* \quad (9)$$

のように表示し、式(4)～(9)を式(3)に代入すると、砂粒子の移動限界に関する無次元掃流力 τ_{*cc} が次式のように表される。

$$\tau_{*cc} = \underbrace{\left(\cos \theta \tan \varphi - \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \sin \theta \right) \frac{\phi_s}{\tan \varphi}}_{\tau_{*c}} + \underbrace{\frac{k_1' d^2 f_c}{(\rho_s - \rho) g k_3 d^3} \frac{\phi_s}{\tan \varphi}}_{\Delta \tau_{*cc}} \quad (10)$$

ここに、 $\tau_{*cc} = u_a^2 / (\rho_s / \rho - 1) g d$ 、 $\phi_s = \text{Sieldsパラメータ} = 2 k_3 \tan \varphi / \{ C_D (k_1 + k_2 C_L / C_D \cdot \tan \varphi) \alpha^2 \}$ である。式(10)の右辺第2項が粘土を含むことによる限界掃流力の増分 $\Delta \tau_{*cc}$ であって、これは、砂粒径 d 、粘着力 f_c および粘着面積 $k_1' d^2$ によって変化する。

粘着面積 $k_1' d^2$ は、単に材料の特性だけでなく、砂粒周囲の粘土分の侵食の程度によって変化する¹³⁾、一般的に表すことは困難であるが、図-5に示すように、砂粒の表面に粘土分が付着しているものとすれば、一つの接点での粘着面積 S は次式で近似される。

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{p_f(1+\sigma w)}{p_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \quad (11)$$

ここに、 p_f ：粘土の含有率、 λ ：砂粒子の実質部分以外を空隙とみなしたときの空隙率、 $\sigma = \rho_s / \rho$ である。路床表面の1個の砂粒子が n 個の接点で支えられているものとすれば、粒子の離脱に対して抵抗する粘着面積の総和は nS となる。そこで、 $k_1' d^2 = nS$ とおき、これを式(10)に代入することにより、粘土分の含有による限界掃流力の増分は次のように表される。

$$\Delta \tau_{*cc} \equiv \tau_{*cc} - \tau_{*c} = \frac{3}{2} n \frac{f_c}{(\rho_s - \rho) g d} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{p_f(1+\sigma w)}{p_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \frac{\phi_s}{\tan \varphi} \quad (12)$$

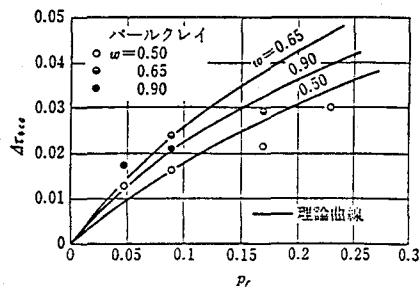


図-6 $\Delta\tau_{acc}$ と p_r の関係

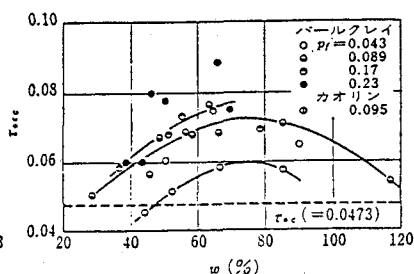


図-7 τ_{acc} と w の関係

ここで、式(12)中の大かっこの中は、 p_r および w の増加関数であるが、粘着力 f_c は w の減少関数であるから、式(12)の値は、 p_r が大きくなると増大し、 p_r 一定のときにはある含水比で極大を示すことになる。

図-6は粘着性材料としてパールクレイを用いた場合の $\Delta\tau_{acc}$ と p_r との関係を w をパラメータとして示したものである。 f_c は実験値が理論曲線に適合するように定められたもので、 f_c は p_r および w によって変化せず、 $f_c = 110 \text{ dyne/cm}^2$ としている。また、実測の結果、 $n = 3$ 、 $\tan \varphi = 0.765$ としている。図-6から式(12)の妥当性と $\Delta\tau_{acc}$ が砂礫の移動限界に対してかなりの影響を持っていることを知ることができる。しかし、 f_c の値は材料の種類によって変化することはいうまでもない。図-7は p_r をパラメータとして τ_{acc} と w との関係を示したものである。理論式の示すとおり、 w が70-80%のところで τ_{acc} は最大値を示している。

2.4 粘性土の侵食速度

粘性土の侵食速度 E と掃流力 τ との関係は、

$$E = \alpha(\tau - \tau_c)^\beta \quad (13)$$

のような形で表現されることが多い。しかしながら、式(13)における係数 α や指数 β の値は、粘土の種類や掃流力の範囲によって異なり、一般性をもつものではない。

たとえば、芦田・田中⁽¹⁴⁾は図-8に示すように、ベントナイトを用いた侵食実験により、 τ/τ_c が5程度をこえると、各含水比ごとに E/u_c がほぼ一定になることを見出している。ここに、 E は河床面の低下速度である。また、大坪・村岡⁽¹⁵⁾はさらに高含水比の底泥に対して、式(13)の指数 β が2になることを見出している。大坪らはまた、侵食速度の無次元表示として、

$$p_{1*} \equiv \frac{A_2}{A_1} \frac{p_1}{\rho_0 d_0} t_0 \quad (14)$$

掃流力の無次元表示として、

$$\tau_*' \equiv \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \quad (15)$$

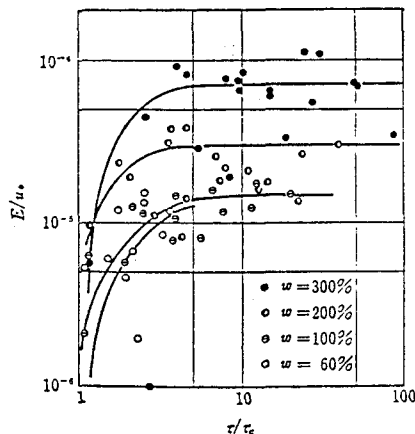


図-8 E/u_* と τ/τ_c の関係

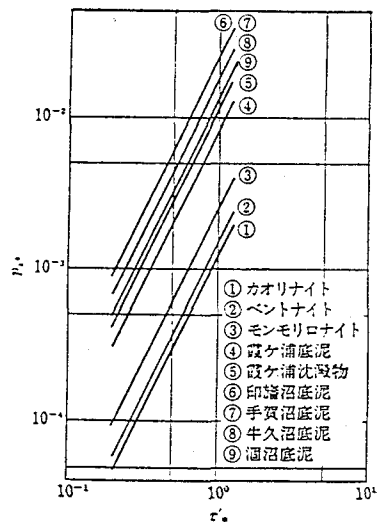


図-9 p_{1*} と τ_*' の関係

をとり、両者の関係を検討している。ここに、 p_s は g/cm^2s で定義される底質の飛出し量、 A_2 、 A_3 はそれぞれ粒子の面積、体積に関する形状係数、 ρ_0 は飛出しの際の代表的粒子の密度、 d_0 は代表粒径である。 t_0 は基準時間で、次元解析的考察により、次のようにとられている。

$$t_0 = \frac{\eta_1}{\rho_1(\rho_0/\rho - 1)gd_0} \quad (16)$$

ここに、 ρ_1 は見かけの密度、 η は底質の粘度であり、 t_0 は代表粒子が周囲の粒子のため η に比例する粘性抵抗を受けながら粒径分だけ沈降するのに要する時間に対応する。ここで、 d_0 を $200\mu m$ とにおいて p_s と τ の関係を整理すると、図-9に示されるように、2つのグループが存在し、各々のグループごとに一定の関係が認められる。

粘性土の侵食速度を力学的に考察した理論としては、Partheniades¹⁶⁾のものが挙げられよう。彼は、掃流力の変動特性に着目し、侵食速度は掃流力がせん断強度の $1/k$ を上回る確率と単位面積当りの粒子数ならびに粒子の重量に比例し、そのような粒子の結合を破壊するのに要する時間 $t(\tau_0)$ に反比例するものと考え、掃流力が正規分布に従うものとして、

$$E = \frac{Ad\gamma_s}{t(\tau_0)} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\left(-\frac{c}{k\tau_0} - 1\right)\eta_0}^{\left(\frac{c}{k\tau_0} - 1\right)\eta_0} \exp\left\{-\frac{w^2}{2}\right\} dw \right] \quad (17)$$

を導いている。ここに、 E は単位時間に単位面積から離脱する土砂の重量、 d_s は粒径、 γ_s は単位体積重量、 c はせん断強度、 τ_0 は平均掃流力、 η_0 は掃流力の変動係数の逆数、 A は形状係数である。しかしながら、 $t(\tau_0)$ をどのように評価すればよいかについては言及していない。岸・山口・武内¹⁷⁾は、カオリンクレイとシルトの混合物の侵食実験より、式(17)における k の値を1500とにおいて $t(\tau_0)$ を逆算し、カオリンクレイのみの場合 $t(\tau_0) = 0.18\text{sec}$ 、シルト分を含む場合 $t(\tau_0) = 3.24\text{sec}$ を得ている。

粘土と砂の混合物の侵食について、芦田・田中¹⁴⁾は、砂礫の間隙を粘土分が埋め尽くしている状態を対象として、その侵食過程を図-10のように分解し、それぞれの過程に要する時間を次のように表した。

$$T' = \frac{k_1 d}{E} \quad (18)$$

$$\bar{T} = \frac{(1-\lambda)\bar{l}d}{\bar{q}_0} \quad (19)$$

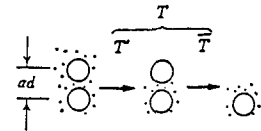


図-10 侵食過程

ここに、 T' は砂礫の周囲の粘土が剥離して砂礫が移動しやすい状態になるのに要する時間、 $\bar{T}$ はそのような状態になったのち、実際に砂礫が移動するまでに要する時間である。また、 d は砂礫の直径、 E は粘土の侵食速度、 $\bar{q}_0$ は砂礫床の場合の平衡流砂量、 $\bar{l}$ は砂礫の跳躍距離、 λ は空隙率、 k_1 は1に近い係数である。砂礫の間隔を αd とすれば、混合物の侵食速度は、

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\alpha d}{T' + \bar{T}} = \frac{\alpha}{\frac{k_1}{E} + \frac{(1-\lambda)\bar{l}}{\bar{q}_0}} \quad (20)$$

で与えられる。これは、粘土の侵食と砂礫の侵食とが交互におこり、それぞれの過程では粘土のみあるいは砂礫のみから成る河床の侵食とほぼ同じ状態が生じているとの考えに基づいて導かれたものであり、ベントナイト・砂混合物に対して、 $\bar{l} = 100d$ 、 $\alpha = 1$ 、 $k_1 = 1$ とおくことによって実験結果をよく説明できることが示されている。

一方、芦田・江頭・加本¹²⁾は、先に述べた、粘土分が砂礫表面に付着しているような状態を対象として、それらが一体となって剥離する場合の離脱率は、中川・辻本¹³⁾によって見出された砂礫床における離脱率の表記式

$$p_s \sqrt{d/(\sigma-1)g} = \begin{cases} F_0 \tau_* (1 - \tau_{*c}/\tau_*)^3 & (\tau_* > \tau_{*c}) \\ 0 & (\tau_* \leq \tau_{*c}) \end{cases} \quad (21)$$

の τ_{*c} の代わりに τ_{*cc} を用いて推定できるものとしている。ここに、 p_s は単位時間当りの離脱率、 $\tau_* = u_*^2/(\sigma-1)gd$ 、 F_0 : 実験定数 (0.03~0.035) である。離脱率と侵食速度の関係は次式で与えられる。

$$E = p_s N k_2 d^3 \quad (22)$$

ここに、 E は単位面積当りの砂礫の離脱体積、 N は単位面積当りの砂礫の露出個数 ($1/k_2 d^2$) である。

3. 粘着性材料河床の侵食と流路形態

3.1 粘着性河床の侵食と流砂

前節では流砂の影響を除外して、材料特性としての侵食速度と流砂の関係について述べたが、実際の河床では、侵食が生じればその流下方向への累積が流砂として流れることになり、それが無視できない量に達すると、侵食速度に影響を及ぼすようになる。その影響には次の2つの側面がある。すなわち、密度の増加による掃流力の増大や流砂の削剥作用による侵食の促進効果と、流砂の被覆による侵食の抑制効果である。流砂量が極端に多くなれば、河床全体が流砂で被覆され、新たな侵食が生じなくなるが、流砂量がさほど多くない場合には、上述の2つの効果のどちらが卓越するかは明らかではない。

いま、前者すなわち流砂による削剥作用を省略すれば、粘土・砂礫混合河床の侵食と流砂機構は次のようにモデル化される⁽¹⁴⁾。

粘土分を含んだ砂礫床が侵食されると、砂礫分は河床と流水との間を往復しながら徐々に流下するが、粘土分はほとんど水流と一体となってただちに流下してしまうであろう。また、砂礫に付着していた粘土分が一部そのまま残るとしても、それが堆積した粒子間の粘着力に寄与するにはかなりの時間を要するから、流水の作用を受けている間には強度は回復せず、粘土の付着していない砂礫粒子と同様の受食性を示すであろう。したがって、河床面は、まだ剥離していないもとの混合物の露出部と、いったん侵食されたのち輸送の過程で堆積している砂礫の被覆部とで異なった受食性をもつようになる。

そこで、図-11に示すように、河床面におけるそれらの占める領域をそれぞれ領域Ⅰおよび領域Ⅱとして区別し、単位時間にそれぞれの領域の単位面積から離脱する砂礫の体積を E_1 および E_2 、単位面積の河床に落下する砂礫の体積を D とすれば、流砂の連続式は次のようになる。

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = E_1 + E_2 - D \quad (23)$$

ここに、 q_B は、粘土分を除外した単位幅流砂量である。 E_1 および E_2 はそれぞれ各領域の露出面積率 δ_1 および δ_2 に比例するものと考えられるから、河床が領域Ⅰあるいは領域Ⅱのみで覆われている時の値をそれぞれ $\bar{E}_1$ および $\bar{E}_2$ で表せば、

$$E_1 = \delta_1 \bar{E}_1 \quad (24)$$

$$E_2 = \delta_2 \bar{E}_2 \quad (25)$$

となる。ここで、 δ_2 、 D 、 q_B の間に比例関係が成り立つものとすれば、 E_2 と D とは釣り合うことになり、式 (23) は、

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = \left(1 - \frac{q_B}{\bar{q}_B}\right) \bar{E}_1 \quad (26)$$

となる。これを x で積分すれば、

$$\frac{q_B}{\bar{q}_B} = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{E}_1}{\bar{q}_B} x\right) \quad (27)$$

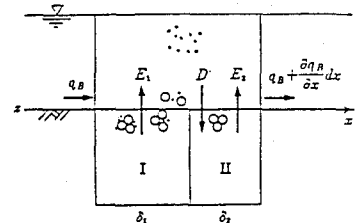


図-11 領域別の砂礫の収支

が得られる。ここに、 $\bar{q}_B$ は河床が砂礫のみで構成されている時の流砂量である。 $\bar{q}_B$ と $\bar{E}_2$ の間には、

$$\bar{q}_B = \bar{E}_2 l \quad (28)$$

の関係があるから、式(27)は、

$$\frac{q_B}{\bar{q}_B} = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} \frac{x}{l}\right) \quad (29)$$

のように表される。ここに、 l は平均跳躍距離である。前節に述べたように、粘土分を含有する砂礫床では侵食速度が小さく、 $\bar{E}_1/\bar{E}_2$ が1よりも小さいから、 x/l がかなり大きくなければ流砂量は平衡値に達しないことになる。

なお、式(29)の適合性は材料によって若干異なり、砂・パルクレイ混合物を用いた実験¹²⁾では同式がよく適合するのに対し、砂・ベントナイト混合物を用いた実験¹⁴⁾では、 q_B が流路長 x にほぼ比例して増加し、 $q_B = \bar{q}_B$ となったところで急激に侵食が停止する。これは、パルクレイとベントナイトでは砂礫の空隙の埋め方が異なり、河床粗度ひいては砂礫の跳躍距離などを変化させているためではないかと推測される。すなわち、パルクレイの場合には、粘土が薄い膜状となって砂礫の表面に付着し、河床粗度をさほど変化させないのに対し、ベントナイトの場合には、その膨潤性のため、粘土が砂礫の空隙全体を埋め尽くす状態となって粗度を減少させており、 δ_B がある値に達したところで急激にその効果が消滅するのであろう。

以上は粘土・砂礫混合河床における主として砂礫分に着目した流砂機構であるが、次に粘土分の流送に着目してみよう。先に述べた領域Ⅰにおいて侵食が生じると、そこに含まれる粘土分の大部分は砂礫と分離して水中に取りこまれ、浮遊状態となって下流へ輸送される。砂礫に付着した一部の粘土は、一時的に領域Ⅱに取りこまれることになるが、やがては砂礫と分離して流水中に取りこまれていくであろう。したがって、多少の遅れは伴うにしても、近似的には次式が成り立つ。

$$\partial q_c / \partial x = p E_1 \quad (30)$$

ここに、 q_c は粘土分の単位幅流送量、 p は領域Ⅰにおける粘土分と砂礫分との比率である。すでに述べたように、砂礫分の流送量がある値に達すると、領域Ⅰからの侵食は見られなくなり、それに伴って粘土分の流送量もある値から増加しなくなるが、これは、河床面にそれ以上の粘土の補給源がなくなるためであって、流水が粘土によって飽和するためではない。河床が粘土のみで構成されている場合には、砂礫を含む場合に比べてはるかに高濃度に達するまで侵食が進むであろう。しかしながら、その濃度の上限値がいくらになるかは、現在のところ明らかではない。

いずれにしても、侵食速度がその場所の水量に対応し、その流下方向への積分として流砂量が定まることは、粘着性材料河床の大きな特徴である。

なお、粘性土の侵食では、以上に述べた比較的表層における粒径規模の土砂の挙動のほかに、土塊としての土砂の挙動が重要になることもある。たとえば、河岸侵食では、ある深さと幅をもった土塊が間欠的に崩落する現象がしばしば見られる¹⁹⁾が、その機構についてはここでは言及しない。

3.2 粘着性流路の形態

(1) 横断形状

粘着性流路の横断形状は、砂礫で構成される流路の横断形状に比べて、幅水深比の小さい特徴をもつ。たとえば、砂・ベントナイト混合物の上に形成される流路は、幅水深比が約4となっている²⁰⁾。これは、砂礫床と異なって、底面に大きなせん断力が作用すると河床が低下し、水面幅の拡大が妨げられるためである。

すでに述べたように、粘着性材料河床は、各点の掃流力に対応して侵食されるから、その横断面の変形過程は、断面内の掃流力分布と材料の受食性によって規定される。いま、等流状態を仮定すれば、横断面内の掃流力分布は、断面を等流速線の直載線群で分割することにより、

$$\tau = \rho g (dA/ds) l \quad (31)$$

と近似される。ここで、等流速線を壁面からの等距離線で近似すれば、その直載線は壁面にたてた法線となり、

$$dA/ds = (1 - \kappa l/2) l \quad (32)$$

が得られる。ここに、 κ は壁面の曲率、 l は図-12に示すように、断面内の等距離分割点（壁面上の2つ以上の点を最終距離とするような点）または水面までの法線の長さである。法線群が流路中心線上以外では交わらないとき、式(32)は次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau}{\rho g H_0 l} &= \left\{ 1 + \left(\frac{dy'}{dx'} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{d^2 y'}{dx'^2} F' \right\} \cdot F' / \sqrt{1 + \left(\frac{dy'}{dx'} \right)^2} \\ F' &= \min \left\{ 1 - y', x' \frac{dx'}{dy'} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

ここに、 H_0 : 中心軸上での水深、 x' 、 y' : H_0 で基準化した壁面の座標である。

τ が τ_c を上回れば、材料の受食性に応じて壁面が後退するが、その方向は壁面に垂直で、

$$\frac{dn}{dt} = E \quad (34)$$

$$E = f_n(\tau) \quad (35)$$

と表される。ここに、 n は壁面の外向き法線方向変位である。また、水理量と流路形状の間には次の抵抗則と連続式が成り立つ。

$$v = \sqrt{8gRI/f} \quad (36)$$

$$Q = Av \quad (37)$$

ここに、 v : 平均流速、 R : 径深、 f : 抵抗係数、 Q : 流量である。

式(33)~(37)を用いれば、粘性性流路の横断形状を解析することができる。

図-13は、砂・ベントナイト混合物を対象として、上記の式系を用いて横断面の変形過程を追跡したものであり、狭くて深い流路は急速に拡幅し、また広くて浅い流路は中央部が激しく洗掘されて縮幅し、同一の断面形状に近づいた後、ほぼその形状を保って低下している。

このように形状を変化させずに低下する断面を平衡断面と呼ぶことにすれば、平衡断面の条件は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{E}{\cos \theta} = \text{const.} \quad (38)$$

で表される。

いま、粘性土の受食性が、

$$E \propto u_*^n \quad (39)$$

と表されるものとすれば、式(33)、(34)、(38)、(39)より、

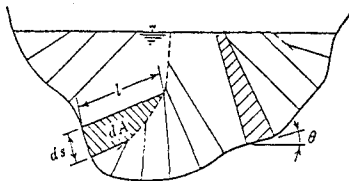


図-12 法線群による断面分割

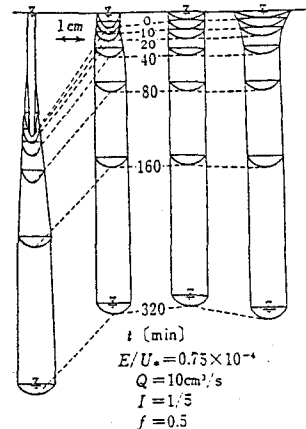


図-13 横断面の変形過程

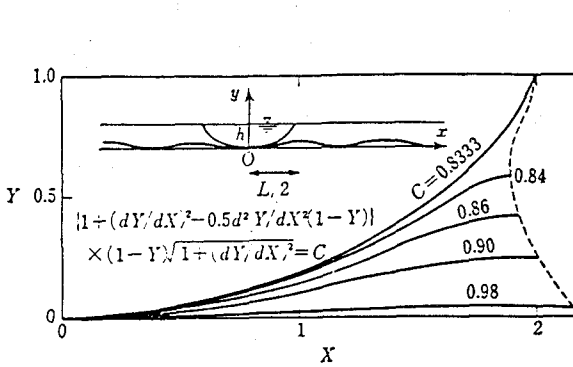


図-14 平衡横断面の理論解

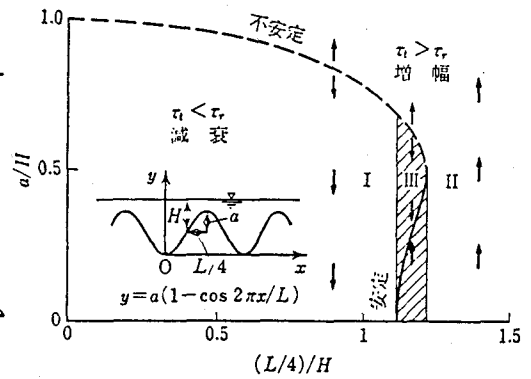


図-15 横断方向の正弦波状凹凸の発達減衰区分

$$C = \left\{ 1 + \left(\frac{dY}{dX} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{d^2 Y}{dX^2} \cdot F \right\} \cdot F \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{dY}{dX} \right)^2 \right\}^{1/n-1/2} \quad (40)$$

$$F = \min \left[1 - Y, X \frac{dX}{dY} \right]$$

が得られる。ここに、 $X = x/h$ 、 $Y = y/h$ 、 h は最大水深、 C は最深部の掃流力と $\rho g h I$ との比である。

図-14は、 $X = 0$ において、 $Y = 0$ 、 $dY/dX = 0$ の境界条件のもとで、 $n = 1$ の場合について式(40)を積分したもので、 $C < 0.8333$ の場合には解曲線が水中で直立してその法線群が交錯し、本モデルに適合する解が得られないが、 $C > 0.8333$ の場合には $X \approx 2$ で河床高の極大が現れて、うね間隔・最大水深比が約4の横断方向の波状河床となる。ただし、その場合には水際が現れず、流路幅が無限となるので、現実の有限の流路に対する解とはなり得ない、そして特に $C = 0.8333$ の場合にのみ、その峰が水面と一致し、水面幅・最大水深比が約4の閉じた平衡断面となる。

このように、理論と実験との間に良い対応が見られるが、ここで得られた水面幅・最大水深比は、侵食速度が摩擦速度に比例する条件に対するものであり、一般的なものではないことに留意しなければならない。

先に、幅水深比の大きな流路は、中央が急速に掘れて縮幅することを述べたが、実際には、この比があまり大きくなると流路の分裂が生じる。これは、底面に存在する横断方向凹凸の不安定性に基づくものであり、次のように説明される。すなわち、底面に凹凸が存在すると、凹部では水深が深く凸部では水深が浅くなる一方、凸部では壁面の曲率による掃流力の集中、凹部では遮蔽が生じ、間隔の狭い微少な凹凸では凹部よりも凸部の掃流力が大きくなって凹凸が減衰するが、間隔の広い凹凸あるいは波高の大きな凹凸では凸部よりも凹部の掃流力が大きくなって凹凸が発達するのである。図-15は、式(33)に基づいて、横断方向の正弦波状凹凸の発達減衰区分を行ったものであり、波長が平均水深の約5倍を越える凹凸は、発達して流れを分離させる。そのような擾乱が存在するためには、流路幅が2波長以上なければならないから、結局、幅水深比が約10以上の流れは不安定、それ以下の流れは安定となる。事実、ペントナイト・砂混合物を用いた実験によると、幅水深比が約10の流れは2本に分裂し、幅水深比が数百の流れは数十本に分裂している²¹⁾。

なお、以上は流水断面のみの形状であるが、粘着性流路では侵食の進行に伴って河床が顕著に低下するため、水際線よりも上の流路壁をも含めると、穿入蛇行とあいまって、オーバーハングなどきわめて特異な形状を呈することがある。

(2) 縦断形状

粘着性流路では、勾配が小さければ顕著な河床波は形成されないが、勾配が急になると底面凹凸が発達して階段状縦断形状を呈し、極端な場合にはオーバーハングを伴うようになる。これを砂礫床の場合と類似の安定解析によって検討してみよう。

流れが2次元のつかつ漸変流としての解析ができるものとすれば、その基礎方程式系はつぎのようになる

$$\partial z / \partial t = -E \quad (41)$$

$$E = f_n(u_*) \quad (42)$$

$$(\partial h / \partial x) \cos \theta = i - \partial / \partial x (v^2 / 2g) - u_*^2 / gh \quad (43)$$

$$i = \sin \theta - \partial z / \partial x \cos \theta \quad (44)$$

$$vh = q \quad (45)$$

$$u_* = (1 - \alpha \partial h / \partial x) v / \varphi \quad (46)$$

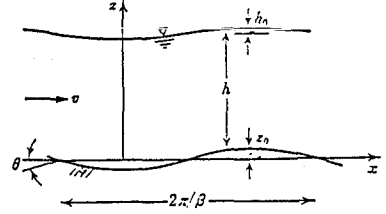


図-16 諸変数の定義図

ここに、(x, z)は図-16に示すように、主流方向ならびにそれに垂直上向き方向にとった河床面の座標、hは水深、vは流速、iは勾配、u_*は摩擦速度、\thetaは平均勾配、qは単位幅流量(一定)、\alphaは加速・減速による摩擦速度の変化²³⁾を表す係数、\varphiは等流状態における流速係数である。

ここで各量を平均量と変動量とに分け、変動量が微小であるとして高次の項を省略し、さらにそれらの変動量が、

$$\begin{aligned} a' &= a_0 e^{i t} \cos \{ \gamma_1 t + \beta (x - \delta_a) \} \\ &= \text{Real} [a_0 e^{(i \gamma_1 + i \beta x - \beta \delta_a) t}] \end{aligned} \quad (47)$$

と表されるものとすれば、増幅率および伝播速度は

$$\gamma_1 = -\frac{dE}{du_*} \left\{ \frac{\partial u_*}{\partial h} (1 - Fr^2) + \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \frac{Fr^2}{\varphi^2 h} \right\} \beta^2 / J \quad (48)$$

$$\begin{aligned} C = -\frac{\gamma_2}{\beta} &= \frac{dE}{du_*} \left\{ \frac{\partial u_*}{\partial h} \frac{u_*}{gh^2 \cos \theta} \left(u_* - 2h \frac{\partial u_*}{\partial h} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \left(1 - Fr^2 + 2 \frac{u_*}{gh \cos \theta} \frac{\partial u_*}{\partial h_x} \right) \beta^2 \right\} / J \end{aligned} \quad (49)$$

となる。ここに、 $Fr = v / \sqrt{gh \cos \theta}$, $\Delta = \{ u_* (u_* - 2h \partial u_* / \partial h) / (gh^2 \cos \theta) \}^2 + \{ 1 - Fr^2 + 2u_* (\partial u_* / \partial h_x) / (gh \cos \theta) \}^2 \beta^2$, $h_x = \partial h / \partial x$ である。

擾乱が発達する条件は $\gamma_1 > 0$ であるが、粘着性流路では一般にEとu_*が正の相関をもつから、式(48)よりその条件は波長によらず、

$$Fr > 1 / \sqrt{1 - \frac{1}{\varphi^2 h} \frac{\partial u_* / \partial h_x}{\partial u_* / \partial h}} \quad (50)$$

となり、根号の中の第2項が1に比べて十分小さいので、結局、常流は安定、射流は不安定ということになる。また、式(50)が成り立つとき、式(49)は負になるから、擾乱は上流方向へ伝播する。

この安定解析による擾乱の盛衰区分は実験結果と対応するが、図-17に見られるように、実験では擾乱が必ずしも上流方向へ伝播せず、特に、発達初期においてむしろ下流方向へ伝播するものも見られる。また、時間の経過に伴って凹凸が著しく成長した後、変形速度が低下するようになるが、上記の線形解析ではそのような特性は説明できない。このように凹凸が顕著に発達した状態では、流れは射流部と湛水部の繰り返しとなっている。

なお、縦断形状が階段状さらにはオーバーハングを伴うようになって、比較的それが安定であるのは、材料の強い抵抗によるものであり、粘着性流路に特有の現象である。

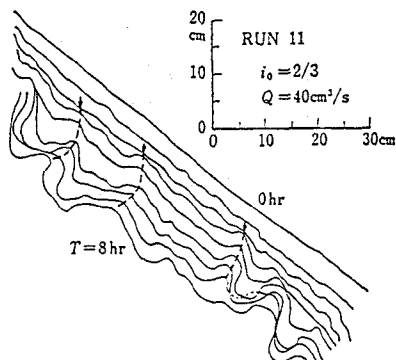


図-17 粘着性流路の縦断形状の変化

(3) 平面形状

粘着性流路の平面形状は、流路中心の蛇行とそれに伴う流路幅の変化の他に、縦断形状に伴う幅の変化が重なった複雑なものとなる。すなわち、縦断形状の峰の部分では流路幅が狭くなり、谷の部分では広くなる傾向があるが、蛇行の位相と縦断形状の位相とが一致しないため、図-18に見られるような特異な幅の変化を呈することがある。

一方、流路中心線の蛇行については、沖積蛇行の場合と類似の解析がなされるが、沖積蛇行において重要な役割を演ずる交互砂州の発達には粘着性流路には見られず、異なった波数域の蛇行が形成される⁽²⁴⁾。

このような個々の流路の蛇行によって隣接する流路が交差すると、それらの流路の間に淘汰が生じ、複雑な流路網が形成されていく。そのような流路網の発達過程の予測には、土砂水理学的な考察に基づいた確率的シミュレーション^{(21)・(25)}が有効であるが、現在のところ、大きな流域に適用することは難しい。

4. 粘着性土砂の堆積過程

4.1 粘着性土砂の堆積機構

土砂の過剰な供給や流れの土砂流送能力の減少など、何らかの原因によって、流送土砂量が流れのもつ土砂流送能力を上回る状態が作り出されると、土砂の堆積が生じる。粘性土の堆積機構は、浮遊砂のそれに類似しており、基本的には拡散方程式によって表現することができるが、拡散係数や底面の境界条件のほかに、フロックの形成と破壊に伴う、粒径階の間の物質の出入りなど、未解明の点が多く、実験的研究が推し進められている。

しかしながら、粘性土は粒径が小さいため、ひとたび流水中に浮遊すると容易には堆積せず、短い区間でその堆積特性を調べることは困難である。流水中での粘性土の堆積過程に関する実験では、粘性土を浮遊した流れを同じ区間に何度も循環させ、時間の経過に伴う濃度の減少を測定する方法がとられる。この場合、直線水路を用いると、水流の循環系統における機械的攪乱によって粘性土の構造が破壊されるため、円形水路において、shear ringと水路との相対運動によってせん断流を生じさせる工夫がなされている⁽²⁶⁾。円形水路では回転流に伴う2次流の影響などにより直線水路とは流れの構造が異なるが、堆積過程を支配する主要な水理量は水深と摩擦速度であると考えて、両者を対応させる。

さて、このような循環水路において、ある一定の掃流力で底質を浮遊させた後、掃流力を減少させて別の一定値に保持すると、粘性土の浮遊物濃度は図-19に見られるように、時間とともに減少した後、一定の値に落ち着くようになる。ここで、初期濃度を c_0 、最終濃度を c_{∞} とすると、それらの比 c_{∞}/c_0 が、初期濃度によらず一定になっていることが注目される。すなわち、このような粘性土の堆積過程では、最終濃度が初期濃度に依存し、水理量に対して一意的に定まらないのである。これは、浮遊物が様々な大きさのフロックから成っており、各掃流力に対応した最大浮遊フロック径よりも大きなフロックが堆積し、それよりも小さな成分は堆積物に若干付着はするものの、ほとんど浮遊し続けるからである。

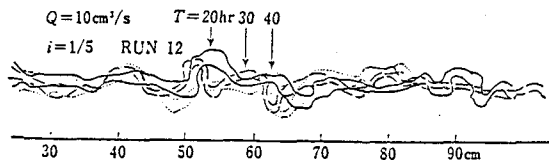


図-18 粘着性流路の平面形状の変化

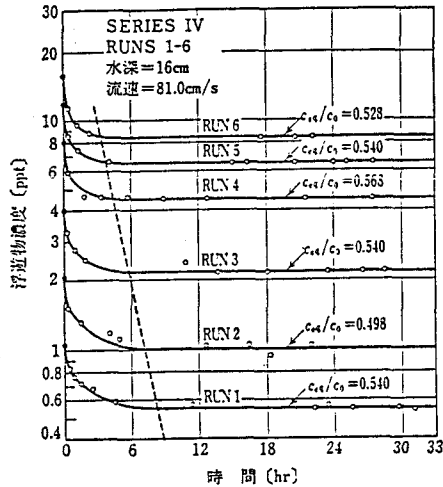


図-19 浮遊物濃度の時間変化

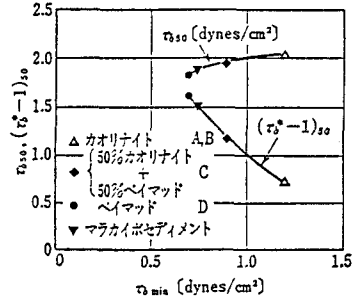


図-20 τ_{50} と τ_{min} の関係

Mehta Partheniades²⁷⁾は、カオリナイト、ベイマッド、ならびにそれらの混合物を用いた堆積実験の結果から、相対平衡濃度と掃流力の関係を次のように表している。

$$\left. \begin{aligned} c_{eq}^* &\equiv \frac{c_{eq}}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-w^2/2} dw \\ y &= \left\{ \log \frac{\tau_b^* - 1}{(\tau_b^* - 1)_{50}} \right\} / \sigma_y \\ \tau_b^* &\equiv \frac{\tau_b}{\tau_{bmin}} \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

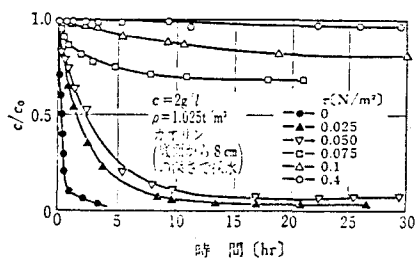
ここに、 τ_{bmin} は $c_{eq}^* = 0$ となる掃流力、 τ_{b50} は $c_{eq}^* = 50$ となる掃流力である。 σ_y は対数正規分布の標準偏差に相当するもので、 $\sigma_y = 0.49$ がよく適合する。図-20に示すように、 τ_{b50} は τ_{bmin} と強い相関をもち、それらはまた粘土鉱物の化学的指標の一つである陽イオン交換容量(CEC)などと相関をもつが、これらの関係は水質によっても変化する可能性がある。

Mehta, Partheniades²⁸⁾は、さらに堆積過程における濃度の時間変化特性についても対数正規分布をあてはめ、

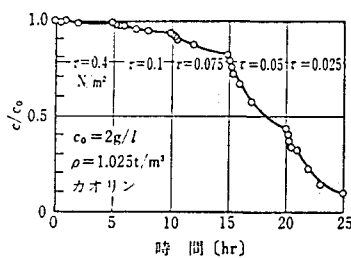
$$\left. \begin{aligned} c^* &\equiv \frac{c_0 - c}{c_0 - c_{eq}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-w^2/2} dw \\ T &= \frac{1}{\sigma_2} \log \frac{t}{t_{50}} \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

を得ている。 σ_2 や t_{50} は τ_b^* 、 h 、 c_0 等によって変化し、ある τ_b^* のとき σ_2 や t_{50} が最大をとって堆積速度が最小となる。また、水深が大きいほど堆積速度は大きく、 c_0 が増加すると堆積速度が減少する。ただし、上式の成立範囲には限界があり、 c_0 が25000ppmになると、 $\tau_b^* < 0.25$ では、いかなる c_0 の値に対しても上式は適用できない。

楠田・海田²⁹⁾は、Partheniadesらと類似の回転水路を用いて、掃流力を段階的に減少させる実験も行い、最初から掃流力を大幅に減少させた場合に比べて、濃度低下速度が減少する傾向にあることを見出している(図-21)。これは、大きな掃流力において粗い成分が先に沈殿してしまうと、次段の小さな掃流力の時に、初期の粒度分布が粗い粒度のところで減少したものとなり、当初からこの掃流力で沈降したときに比べてブロックの成長がやや遅れるためである。



(a) 掃流力変化が一般の場合



(b) 掃流力変化が多段の場合

図-21 浮遊物濃度の時間変化

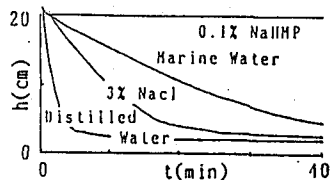


図-22 回分沈降曲線

4.2 微細土砂の凝集沈降に及ぼす海水の影響

微細土砂の沈降過程において、フロックが形成されると、沈降特性が著しく変化することは、よく知られている。フロックの形成は土砂の鉱物組成、溶媒の組成、土砂濃度、乱流強度等によって支配されるが、これらのパラメータから定量的にフロックの特性を論じられるには至っていない。

真水と海水とのどちらで粘土粒子が凝集しやすいかについては、海水の方が凝集しやすいと説明されることが多いが、凝集の程度は、粘土の組成によっても異なっている。Yen³⁰⁾ らによれば、モンモリロナイトは、蒸留水中ではほとんど凝集せず、海水に接すると凝集して、10倍以上の粒径(フロック径)をもつようになるが、カオリナイトは、蒸留水中において顕著に凝集して、分散媒中の粒径の10倍以上のフロック径を有し、海水に接してももはやそれ以上にはフロック径が増加しない。

このように、粘土の種類や溶媒の種類によって凝集特性が異なるのは、粒子表面の二重層の構造が異なるためであり、拡散層内に分布するイオンの原子価と自由水溶液中の電解質濃度が低いほど二重層内の電位が高くなって、粒子間の反発力が大きくなるので、土粒子は凝集しにくくなると説明されている³¹⁾。また、これらの電気化学的特性に関わるパラメータとして、陽イオン交換容量やゼータ電位などが挙げられているが、十分な説明がつけられるまでには至っていない。

近年、沖縄県の近海では、国頭マージと呼ばれる赤土砂の流出による環境変化が問題となり、その制御法が種々の観点から検討されている。上に述べたように、従来、粘性土の懸濁液が海水に接すると、沈降が促進されるという報告が随所に見られるが、著者は、国頭マージの沈降試験を行う過程で、その逆の特性のあることを見出している³²⁾。

まず、濃度がかかなり高い場合の、溶媒による国頭マージの沈降速度の違いを調べるため、次のような実験を行った。溶媒としては、海水、河川水、蒸留水、食塩水、分散剤溶液の5種類を用意し、500ml用のメスシリンドラ(深さ約20cm)内で、土壌サンプル25gと溶媒500mlを十分に攪拌した後(初期重量濃度3.7%)、静置し、界面沈降状況を観察した。

土壌サンプルは、沖縄県国頭郡恩納村と名護市との境界付近の丘陵地で採取されたもので、実験時まで自然含水状態(含水比約30%)を保つため、約3週間ビニール袋に入れて密封保存しておいた。海水のサンプルは、石川県尼御前海岸で採取し、実験時まで約1週間ポリエチレン容器内に保存しておいた。河川水は、実験当日に京都府宇治市の淀川(宇治川)隠元橋直上流右岸で採取した。食塩水は、塩化ナトリウムの3%溶液、分散剤溶液は、ヘキサメタリン酸ナトリウムの0.2%溶液を用いた。

その結果、分散剤溶液の場合以外は、いずれも明確な界面沈降を呈し、界面の低下速度は蒸留水中の場合が最も速く、約6分で圧縮沈降に移行した。ついで、河川水、食塩水、海水の順で沈降が遅くなり、分散剤中の場合には、40分以上経過しても粗粒分の沈降が確認されたのみで、肉眼による観察では、懸濁状態の変化は検出されなかった。宇治川の河川水の場合には、蒸留水の場合に比べて沈降がやや遅くなるものの、大きな差異は見られなかった。図-22は、回分沈降曲線を示したものであるが、食塩水の場合には約30分で圧縮沈降に移行し、尼御前の海水の場合には約50分で圧縮沈降に移行するものと判断される。

このように、国頭マージの界面沈降特性は溶媒によって異なるが、ここで得られた結果は、海水中よりも河川水中の方が沈降が速いということであり、「海水に接すると粒子の沈降が早められる」という通説とは逆になっている。ただし、一口に「海水」といっても、地域あるいは時期によってその性質が異なることも考えられるので、土砂サンプルの採取地に近い沖縄県恩納村瀬名地区周辺の海水を取り寄せ、類似の実験を行ったところ、尼御前の海水の場合よりも沖縄の海水の場合の方がかなり沈降が速く、3%の食塩水の場合に近い結果が得られたが、蒸留水の場合に比べると、はるかに遅かった。河川水についても、当然、場所と時期によって水質が異なるので、その影響を確かめておく必要があるが、沖縄総合事務局で現地の河川水、海水および蒸留水を用いて行われた類似の沈降実験においても、やはり蒸留水中での界面沈降が最も速く、ついで河川水、海水の順となっており、かつ、蒸留水と河川水との差異がさほど顕著でないのに対して、海水中での界面沈降はそれらに比してきわめて遅くなっている。

次に、土砂濃度による沈降特性の相違を調べるために、自然含水状態で保存しておいた国頭マージのサンプルを、空気乾燥状態にして軽くすりつぶした後、88 μ フルイを通過した粒子を試料とし、22.5gの蒸留水、沖縄の海水、尼御前の海水、および0.4%ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液を溶媒として、直径3cmのカメラフィルム用透明プラスチックケースに重量濃度0.075%、0.22%、0.34%、および13.0%の溶液を作成し、十分に振とうさせた後、静置して、沈降状況を観察した。その結果、いずれの場合でも、界面沈降が生じたのは、濃度13%の場合のみであった。先の実験において、濃度3.7%の懸濁液では界面沈降が生じたことから、国頭マージの界面沈降の発生限界濃度は3~3.5%程度であると判断される。

界面沈降が生じると界面よりも上の上澄み部分の土砂濃度はきわめて小さくなり、溶媒が蒸留水の場合には、上澄み液の濃度は界面の通過直後にすでに0.1%以下となっている。溶媒が海水の場合にも、界面沈降が生じると、上澄み液の濃度がかなり低下するものの、界面通過直後では、蒸留水を溶媒とする場合ほどには下らない。ところが、ある程度時間が経過すると、溶媒が蒸留水と海水の場合とで、上澄み液の濁度に逆転が生じ、海水の場合の方が上澄み液の濁度が低くなる。（先の沖縄総合事務局の実験では、静置後、2~5時間を境に逆転が生じている。）

次に、界面の生じない3%以下の濃度の場合について、濁度の時間変化を詳細に観察すると、同じ溶媒に対してでも、ある時間の経過後には、初期濃度の高かった懸濁液の濁度が、初期濃度の低かった懸濁液の濁度よりも低くなる場合のあることがわかった。たとえば、溶媒が蒸留水の場合、初期濃度2.99%の懸濁液と0.22%の懸濁液とでは、静置後数分の内に濁度が逆転する。すなわち、一定時間静置後の濁度が最大となるような初期濃度が存在し、しかもそれが界面沈降の発生限界濃度よりも低いのである。そのように一定時間経過後の濁度が最大となる初期濃度は、溶媒によっても異なり、尼御前の海水の場合には、3%以上の濃度でピークが生じるようであるが、沖縄の海水の場合には、やや特異な傾向が現れ、初期濃度が0.34%において、一定時間経過後の濁度が最小となった。

このように、溶媒や初期濃度によって、濁度の時間変化が異なるのは、フロックの形成、とりわけフロック径の分布特性の相違によるものと考えられる。

5. おわりに

以上、粘着性土砂の侵食と堆積機構に関する研究をレビューしてきたが、未解明の点が数多く残されている。また、粘着性土砂の侵食と堆積の制御や抑制は、環境問題への取り組みの一環として、その重要性を増している。たとえば、土壌保全や水質保全の観点からすれば、その侵食量を抑制するとともに、堆積を促進させることが重要である。一方、河口部においては、土砂堆積による航路の埋没や、ヘドロの堆積による環境の悪化が方々で生じており、いかにして堆積を抑制するかも重要な課題である。これらの諸問題を解決するためには、単に、力学的なアプローチにとどまらず、化学的さらには生物学的な観点を含めた、より広い観点からのアプローチが必要となろう。

参考文献

- 1) 土壤物理研究会：土の物理学，森北出版，1979.
- 2) Smerdon, E.T. and Beasley, R.P.: Critical tractive forces in cohesive soils, *Agricultural Engineering*, 26-29, 1961.
- 3) Dunn, I.S.: Tractive resistance of cohesive soil, *Jour. of the Hydraulics Div., Proc. ASCE*, HY1, 1-24, 1965.
- 4) Moore, W.L. and Masch, F.D.: Experiments on the scour resistance of cohesive sediments, *Jour. of Geophys. Research*, 67, 4, 1437-1449, 1962.
- 5) 澤井健二・芦田和男：粘性土の受食性試験法に関する研究，第16回自然災害科学総合シンポジウム論文集，213-214, 1979.
- 6) Etcheverry, B.A.: *Irrigation Practice and Engineering*. Vol. II, p.57, McGraw-Hill.
- 7) Lane, E.W.: Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation, *Proc. ASCE, Irr. and Dr. Div.*, 79, Separate. 280, 1953.
- 8) 村岡浩爾・大坪国順：底泥の限界掃流力に関する実験的研究，国立公害研究所報告，第14号，33-55, 1980.
- 9) Lyle, W.M. and Smerdon, E.T.: Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils, *Trans. ASCE*, 419-422, 1965.
- 10) 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，73-78, 1981.
- 11) 細井由彦・住友 恒・井上頼輝：含水率の高い底泥のまき上げについて，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，第2部，371-372, 1981.
- 12) 芦田和男・江頭進治・加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1)－粘性材料を含む砂礫の移動限界と流砂量－，京都大学防災研究所年報，第25号B-2，349-360, 1982.
- 13) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究，第24回水理講演会論文集，135-141, 1980.
- 14) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂礫床の侵食と流砂機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，571-584, 1974.
- 15) 大坪国順・村岡浩爾：底泥の飛び出し量に関する研究，第26回水理講演会論文集，141-146, 1982.
- 16) Partheniades, E.: Erosion and deposition of cohesive soils, *Jour. of the Hydraulics Div., Proc. ASCE*, HY1, 105-139, 1965.
- 17) 岸 力・山口忠男・武内達夫：流れによる粘性土の洗掘破壊と水路の限界流速，土木学会大22回年次学術講演会講演概要集，第2部，47.1-4, 1967.
- 18) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第244号，71-80, 1975.
- 19) 村本嘉雄・藤田裕一郎：蛇行流路の形成過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第19号B-2，167-185, 1976.
- 20) 澤井健二・芦田和男：粘性流路の侵食と横断形状に関する研究，土木学会論文報告集，第266号，73-86, 1977.
- 21) 芦田和男・田中健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(1)－流路網の確率的シミュレーションを中心として－，京都大学防災研究所年報，第18号B，513-528, 1975.
- 22) 芦田和男・澤井健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(3)－流路の3次元形状－，京都大学防災研究所年報，第20号B-2，371-385, 1977.

- 23) 椿東一郎・斉藤 隆：流れによるSand Waveの発生限界，九州大学工学集報，第40巻，第5号，741-748，1967.
- 24) 池田駿介・Gary Parker・澤井健二：河川の蛇行に関する統一見解，第24回水理講演会論文集，339-349，1980.
- 25) 澤井健二：降雨による流路網の発達過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第25号B-2，317-326，1982.
- 26) Partheniades, E.: Erosion and deposition of cohesive materials, River Mechanics, Chap.25, ed. by H.W.Shen, Colorado State, Univ., 1971.
- 27) Mehta, A.J. and Partheniades, E.: Effect on physico-chemical properties of fine suspended sediment on the degree of deposition, Proc. Int. Sym. on River Mech., IAHR, 465-476, 1973.
- 28) Mehta, A.J. and Partheniades, E.: An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments, Jour. of Hydraulic Research, 13, 4, 361-381, 1975.
- 29) 楠田哲也・海田輝之：底泥の巻き上げと沈降，国立公害研究所調査報告，第16号(B-16-181)，78-92，1981.
- 30) Yen Kai, Ren Rushu and Zen Xiaochun: Some sediment problems on silty coast and estuaries, Proc. 4th Int. Sym. on River Sedimentation, 754-761, 1989.
- 31) 嘉門雅史・浅川美利：新体系土木工学16土の力学(1)－土の分類・物理化学的性質－，技報堂出版，81，1988.
- 32) 澤井健二：粘性土の侵食と堆積に関する一考察－沖縄県国頭マージを事例として－，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，571-577，1990.