

底泥の物性と限界掃流力の関連について
On the Relation between Physical Properties and Critical Shear Stress of Mud

国立公害研究所 水質土壌環境部 正員 ○ 大坪 国順
村岡 浩爾

1 まえがき

浅く大きな湖や河口部では、水質に与える底泥の影響はかなり大きく、底泥からの栄養塩類の水系への回帰量の把握が重要な問題となっている。底泥からの栄養塩類の回帰には、濃度勾配による拡散と外乱による泥の直接的攪乱が考えられる。本研究は、直接攪乱による栄養塩の回帰量を評価するための第一歩として底泥の限界掃流力の特性を明らかにしようとするものである。特に、ひずみ速度が0に近い領域における底質の流動曲線に注目して降伏値、粘度を求め、これらの量と限界掃流力との間の関係について詳しく検討した。

表-1 実験に用いた底質とその物性

MUD	$d_m(\mu m)$	σ	P.L.	L.L.
Kaolin	4.21	2.60	38.54	51.05
Kaolin + Starch	4.41	2.48	27.87	42.28
Kaolin + Agar	41.0	2.48	49.80	725.0
Bentnite	14.4	2.60	32.95	186.5
Bentnite + Starch	13.2	2.48	24.80	162.5
Bentnite + Agar	40.0	2.48	22.17	250.3
Mud A	20.7	2.42	70.70	212.5
Mud B	27.2	2.61	44.20	102.8
Sediment	25.1	2.28	77.70	324.9

2 実験条件および底泥の分類

底泥の限界掃流力を求める実験には、長さ7 m×幅15 cm×高さ5 cmの矩形断面の透明アクリル製の管水路を用いた。長さ30 cm×幅10 cmの移動床部を上流端から5 m下流に設けた。移動の限界の判定には目視による方法とレーザー濃度計の出力の変化による方法とを併用した。実験方法や手順については参考文献1)に詳しい。底質の流動曲線を求めるのに用いた粘度計はひずみ速度が任意の速度で連続可変の2重円筒式回転粘度計である。この粘度計によってひずみ速度の小さな範囲の流動曲線が精度よく求められる。

底質として用いた試料の種類と、その物性量(平均粒径, 比重, P.L., L.L.)を表-1に示す。表-1に示された物性量は含水比によって変化しないものである。カオリンとベントナイトに混合させたデンプンおよびカンテンの含有率は全て重量百分率で10%である。表中、Mud Aは霞ヶ浦高浜入で採集された底泥であり、Mud Bはそれに0.1規定のNaOHを加えた加熱処理により腐植分を除去したものである。

Sedimentとあるのは、同じ高浜入において風波時に水底から巻き上がった沈殿物が再び沈降してきたものを採集びんによって採集したものである。カオリン、ベントナイトともに平均粒径はデンプン含有によっては変化せず、カンテン含有によってはかなり大きくなり100 μm 以上の粘土塊も存在した。³⁾

表-1に示した泥は、十分水を加えて懸濁させた後に静水状態で放置された時の状態によって2つのグループに分類される。1つは、カオリン主成分粘土およびMud A, Mud B, Sedimentのグループでこれを第1グループとする。第1グループに共通することは静置状態においてほとんどの粒子が沈殿し、上層には透明な水の層が現れる。他のグループはベントナイト主成分粘土で第2グループと名付ける。このグループの特徴は粒子は多少は沈殿するが底質と水は分離することがなく懸濁状態のまま存在することである。Mud A, Mud B, Sediment が沈殿するのは、凝膠作用などによる粒径の増大に伴ない重力が粒子間の反撥力に卓越するためと考えられる。

カオリンがベントナイトに比べ粒径が1/3程度であるにもかかわらず沈殿するのは両者の親水性の違いに起因する。ベントナイトは親水性が大きく、粘土コロイドの内部と表面に多量の水分子を

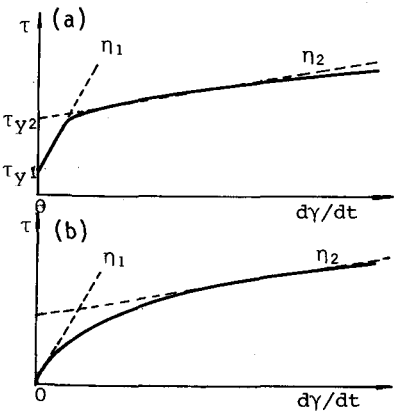


図-1 流動曲線の模式図

取りこむため見かけの粘土粒子の半径が大きくなる。そのため粘土粒子間の反撥力が大きくなる一方で見かけの比重の減少によって重力が小さくなるので沈殿しにくくなる。一方、カオリンは親水性が小さいので粘土粒子の周りの水膜が非常に薄い。そのため反撥力が小さくなる一方で見かけの比重の減少がないので重力が卓越し、没殿しやすい。

3 底泥の流動特性

底質の流動特性は含水比によって変化する。一般に、粘土懸濁体は高濃度においては非ニュートン流体の流動特性を示し、降伏値をもつものもある。流体におけるずり速度 $\dot{\gamma}$ とずり応力 τ との関係を示す曲線は流動曲線といわれる。非ニュートン流動の場合、 $\tau/\dot{\gamma}$ の値は一定とならず、 $\dot{\gamma}$ 、 τ に依存するものとなり物質定数ではない。非ニュートン流体の流動曲線を求めるためには $\dot{\gamma}$ を連続的に変化させることができる粘度計が必要である。従来この目的でストーマー式回転粘度計がよく用いられるが、この場合 $\dot{\gamma}$ と τ の関係は離散的なものであり、 $\dot{\gamma}$ の小さな領域の精度が悪く、低粘度流体の測定には適さないといわれている。著者らは、 $\dot{\gamma}$ が連続可変の回転式粘度計を用いることによって $\dot{\gamma}$ が 0 付近の小さな領域に注目して $\dot{\gamma}$ と τ の関係を詳細に検討した。図-1 は今回の実験に用いられた底質に対する 2 つの典型的な流動曲線を模式的に示したものである。(a) は第 1 グループの泥に共通するもので、その特徴は降伏値の存在と流動曲線の急激な折れ曲がりにある。即ち、 $\dot{\gamma}$ の小さな領域では直線的であり、 $\dot{\gamma}$ のある値で急激に折れ曲がって緩やかな勾配の曲線になることである。(b) は、第 2 グループの泥に共通するもので、降伏値が存在せず、 $\dot{\gamma}$ の増加に伴ない勾配が緩やかになる滑らかな曲線である。

図-2 は、 $\eta_A = \tau/\dot{\gamma}$ で定義される見かけの粘度 η_A と $\dot{\gamma}$ の関係を示したものであり、カオリン主成分粘土、ベントナイト主成分粘土、現地泥の 3 つに分類してある。ベントナイト主成分粘土は、 η_A が $\dot{\gamma}$ に対して両対数紙上でほぼ直線的に減少しているので、 $\dot{\gamma} \sim \tau$ の関係は $\dot{\gamma} = \alpha \tau^n$ (α : 定数, $0 < n < 1$) なるべき法則が成立する。第 1 グループの底質の $\eta_A \sim \dot{\gamma}$ の曲線は、途中に平坦部をはさんだ 2 つの減少曲線からなる点に共通性がある。 $\eta_A \sim \dot{\gamma}$ において曲線が平坦となる部分は、図-1(a) で $\tau \sim \dot{\gamma}$ の関係が急に折れ曲がる地点に対応し、その地点の $\dot{\gamma}$ の値は、一般に含水比が大きくなるにつれて減少する傾向がある。図-2 の結果より、流動曲線が第 1 グループと第 2 グループで明確に異なっていることがわかる。

図-3 は、 $\dot{\gamma}$ の小さな範囲の $\tau \sim \dot{\gamma}$ の関係を直線近似して、 $\eta_1 = (\tau - \tau_0)/\dot{\gamma}$ (τ_0 : 降伏値、ベントナイトの場合は $\tau_0 = 0$) で求められる粘度 η_1 と含水比 w との関係を示したものである。各底質とも、含水比の増加に伴ない η_1 の減少傾向が認められる。カオリンとベントナイトにおいて、同一含水比に対して η_1 は両者ともデンプン含有により低下し、カンテン含有により増加する。同一含水比における粘度はベントナイトがカオリンより大きく、デンプン含有ベントナイトとカンテン含有カオリンを比べても前者が大きい。現地泥に対しては、同一含水比では粘度は沈殿物 > Mud A > Mud B という順であり、粘度の大きい底質ほど含水比の増加に伴ない粘度の減少の割合が小さい。腐植分が底質の流動特性に大きな影響を与えること、また沈殿物と堆積底泥の間には流動特性に大きな違いがあることがわかった。

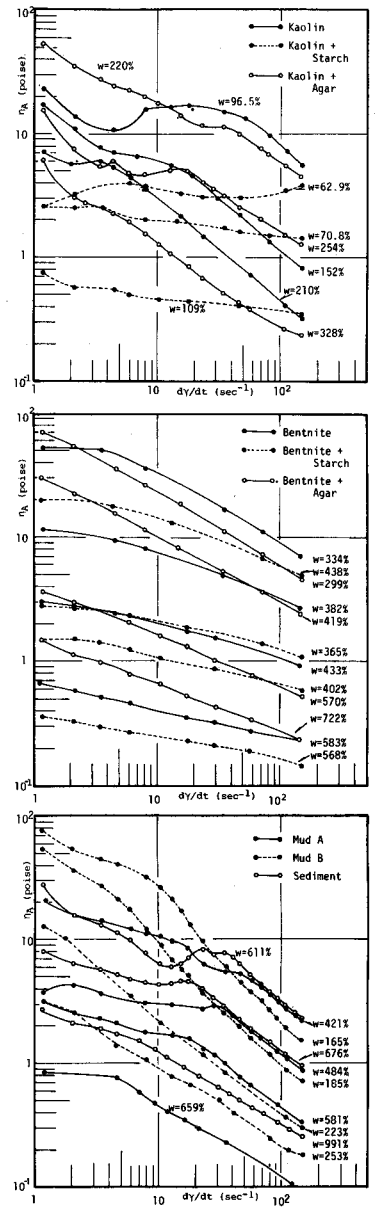


図-2 η_A と $d\gamma/dt$ の関係

η と他の物性との関係としては、主成分が同一の底質であれば、液性限界値 (L.L.) が大きい底泥ほど、同一含水比での η の値は大きくなる傾向がある。

同一含水比でも、底質によって粘度の値に差が現れる原因としては次のことが考えられる。粘土懸濁液中に存在する水には2つの形態があり、1つは見かけの粘土粒子の内部と表面に強固に保持されたもので、他の1つは自由水といわれるものである。同一含水比であっても、自由水の割合が大きくなると、粘土粒子間の距離が大きくなり粘度が下がる。自由水の割合は粘土粒子の親水性と深い関係があり、親水性が大きいほど自由水の割合は減少する。ベントナイト主成分粘土はカオリン主成分粘土に比して親水性が非常によく、その結果同一含水比では η の値が大きくなる。デンプンを含有すると粘度が低下するのは、デンプンが粘土粒子の水膜を薄くするためと考えられる。カンテン含有の底質の粘度が同一含水比で大きくなるのはカンテン自体の保水能力のため粘土塊内部に保持される水の量が増えるためと考えられる。現地泥の場合も有機物質の保水能力によって説明される。

図-4 は $\dot{\gamma}$ の大きな領域の $\tau \sim \dot{\gamma}$ 曲線を直線近似した場合の勾配より求めた粘度 η_2 と含水比の関係を示したものである。含水比に対する傾向は η_1 と全く同じである。低含水比時のデンプン含有カオリンを除いて、 η_2 は η_1 より小さい。デンプン含有カオリンは高含水比時にはニュートン流体的な流動特性を示した。この理由としては、デンプンの存在によってカオリン粒子の凝膠が防げられ、網目構造等の弾性変形を特徴づける構造が形成されないためと考えられる。図-5 は図-1 の(a)の図に示した2つの降伏値と含水比との関係である。

ベントナイト主成分粘土には τ_{y1} が存在しないので、 τ_{y2} も示してない。 τ_{y1} は測定される真の降伏値であり、 τ_{y2} は見かけの降伏値である。 η_1 や τ_{y1} は $\dot{\gamma}$ の小さな範囲まで正確に測定しなければ求められない量であり、低粘度物質においてストーマー式回転粘度計などで求められる η や τ_y はここに示した η_2 や τ_{y2} であることが多い。ほとんどの底質において τ_{y1} と τ_{y2} の値は1オーダー異なることがわかる。 τ_{y1} は含水比の増加に伴ない減少し、同一含水比においては η_1 の大きな底質ほど τ_{y1} も大きくなる傾向がある。図-6 は各底質の τ_{y1} と η_1 の関係を示したものであるが、 τ_{y1} と η_1 は比例関係が認められる。このことは τ_{y1} と η_1 の原因が同じものであることが推察される。

以上、流動特性を中心に述べてきたが、底質の初期流動特性は

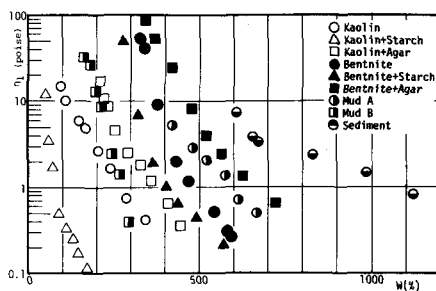


図-3 η_1 と w の関係

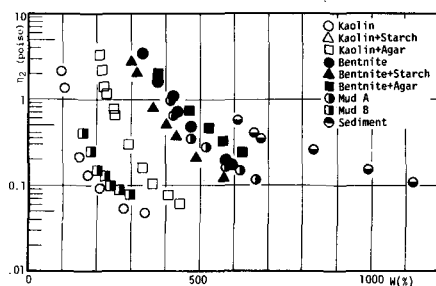


図-4 η_2 と w の関係

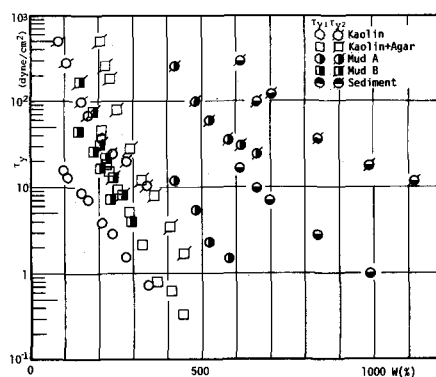


図-5 τ_y と w の関係

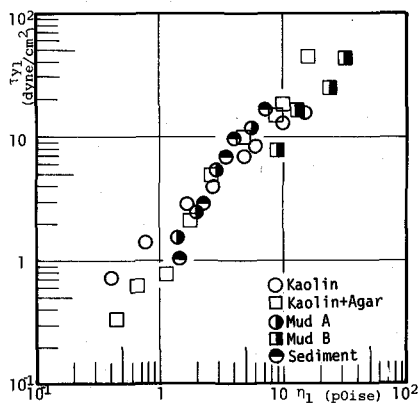


図-6 τ_{y1} と η_1 の関係

$\eta_a \sim \dot{\gamma}$ 曲線の違いと τ_{y1} の存在の有無から、第1グループと第2グループの底質に分類されると思われる。初期流動特性の違いは主として主成分粘土のコロイド状態での特性に起因する。降伏値の存在や流動曲線の勾配の急激な変化は主として粒子間の凝膠作用による何らかの結合構造（例えば網目構造）の存在とそれの $\dot{\gamma}$ の増加に伴う破壊に関係していると思われる。

4 底泥の限界掃流力と物性との関係

底泥の限界掃流力を求める実験の結果、粘土の流送に関しては2つの限界掃流力を定義することが妥当であると考えた。1つは底質が流送し始める限界であり、いわゆる砂粒の移動限界に対応するものであり、他の1つは河床面が破壊する限界である。前者を流送限界（Limit of soil particle's movement）、後者を破壊限界

（Limit of bed destruction）と定義した。破壊が生じると短時間に多量の底質が流送される。図-7は各底質の流送限界時と破壊限界時の限界掃流力 τ_{c1} , τ_{c2} と含水比の関係である。各底質とも τ_0 は w の増加に伴い減少する。カオリン、ベントナイトともに両限界の τ_0 は同一含水比においてデンプンを含むすれば減少し、寒天を含むすれば増加する。現地泥は、 η_1 の大きなものほど τ_0 も大きい。全般的な傾向として、含水比が増大するにつれて τ_{c1} と τ_{c2} は近づいてくる。両限界とも、含水比の増加に伴う τ_0 の減少の割合が底質によって異なり、 w によって τ を規定することはできない。図-8は底泥における重力による流送抵抗分を評価するために、流送限界時に対して τ_{c1}/sgd を示したものである。ここで $s = \sigma - \rho$, σ : 粘土の密度, ρ : 水の密度である。横軸（ $1-n$ ）において n は空隙率である。 τ_{c1} は含水比の違いによる単面面積当りの粘土粒子の個数の影響を考慮して τ_{c1} を補正したものである。 τ_{c1}/sgd の値は最小値でも0.8付近であり、粒子 Re 数が1以下の砂粒に対する値0.13より数倍大きい。このことより、底泥の流送に関しては重力による抵抗力は無視できると考えられる。 τ_{c1}/sgd と $1-n$ の関係は、第1グループと第2グループとに大別される。後者は、 $1-n$

に対する τ_{c1}/sgd の値の変化が小さく、ベントナイト主成分粘土における粘着抵抗力が含水比に対して大きく変化しないことを示す。前者は $1-n$ の増加に伴ない τ_{c1}/sgd が急激に増大し、粘着抵抗力が含水比に対して敏感に変化することを示す。図-9は、両限界における $(\tau_{y1} - \tau_c)$ と η_1 の関係である。両限界とも、 η_1 が大きい（ w が小さい）場合には τ_0 と τ_{y1} とがかけ離れたものとなるが、 η_1 が小さく（ w が大きく）なるにつれて、 τ_0 と τ_{y1} は近づき、 $\tau_{c1} \leq \tau_{y1} \leq \tau_{c2}$ の関係が認められる。しかし、ベントナイト主成分粘土には τ_{y1} が存在しないことと、低含水比では $\tau_0 \ll \tau_{y1}$ であることから、 τ_{y1} によって τ_{c1} , τ_{c2} を規定するのは難しいと考える。図-10の2つの図は、両限界のおおのについて、 η_1 と τ_0 の関係を示したものである。両限

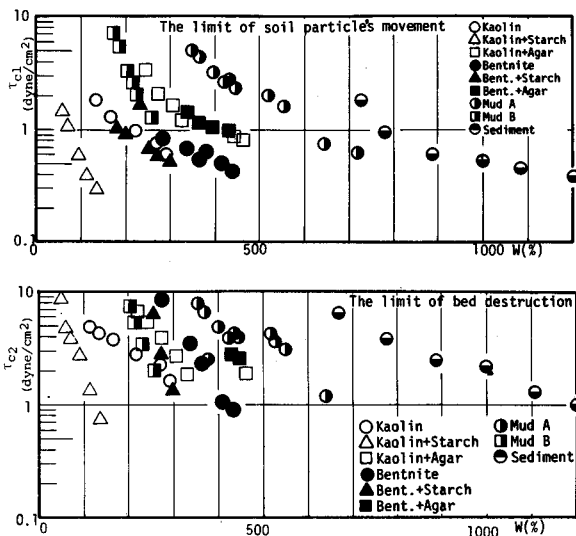


図-7 τ_0 と w の関係

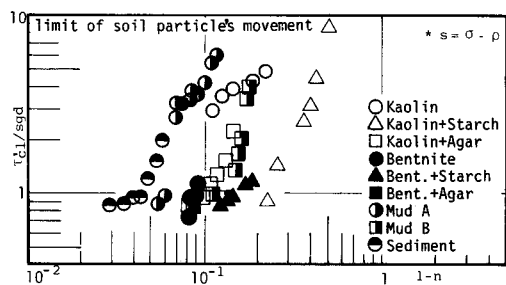


図-8 τ_{c1}/sgd と $1-n$ の関係

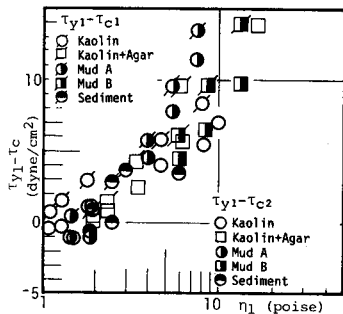


図-9 $\tau_{y1} - \tau_0$ と η_1 の関係

界とも、 τ_0 と η の関係が第1グループと第2グループに分類されて、そのおのおのにはほぼ一定の関係が認められる。

また、この2つのグループは流送形態においても明確に分類される。第1グループの特徴は、 $\tau > \tau_{01}$ で河床面がアバタ状となること、 τ の増加に伴って形成される wavy bed は移動することなく、trough 部に亀裂が生じその部分から破壊に至ることである。第2グループの特徴は、河床面がアバタ状になることはなく、 τ の増加に伴って必ず形成される wavy bed はゆるやかに下流へ移動し、亀裂は生ぜず crest 部が押し潰されるように破壊することである。写真1, 2, 3は τ の増加に伴う底質の流送状態の変化を示したもので、写真-1が第1グループに属するMud Aの場合でアバタ状の河床面とtrough 部の亀裂が認められる。写真-2は第2グループのベントナイトで wavy bed の crest 部が押し潰されるのが見える。写真-3は w が非常に高い場合で内部波が認められる。これについては後で述べる。

以上、底泥の流送特性に関しても、底質が第1グループと第2グループに分類されることが明らかとなった。特に $\tau_0 \sim \eta$ の関係は、 $\tau_0 \sim w$ の関係には直接現れなかった2つの泥のグループの存在を明確にし、各グループごとにかなりまとまった関係を示している。よって、底泥の限界掃流力はそのグループごとに $\tau_0 \sim \eta$ の関係をj用いてある程度評価できるものと考えられる。底質のグループ分けには、懸濁させた後の静置状態で示す特徴が目安になろう。

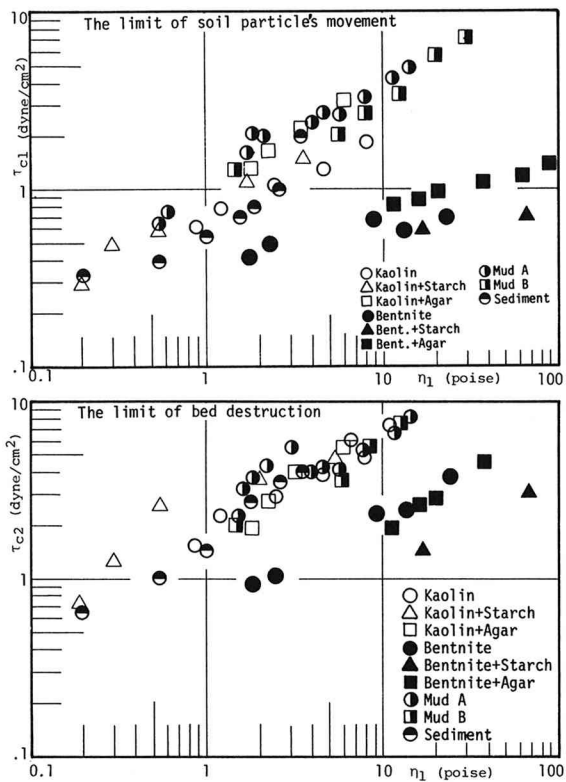


図-10 τ_0 と η の関係



写真-1 Mud A の流送-破壊過程 (含水比530%)

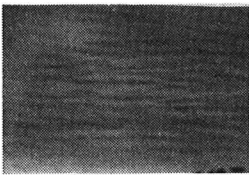
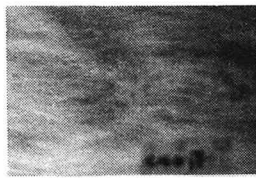


写真-2 デンブン含有ベントナイトの流送-破壊過程 (含水比233%)

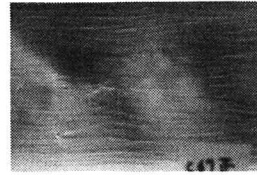
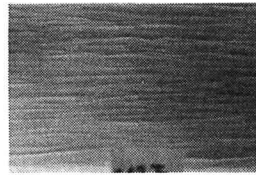


写真-3 ベントナイトの流送過程と内部波 (含水比440%)



図-11は破壊限界に対して $K_1 = u_{*02} / (\epsilon v_1 g)^{1/3}$ と v_1/ν の関係を示したものである。ここで、 $u_{*02} = (\tau_{02}/\rho)^{1/2}$, $\epsilon = (\rho_1 - \rho)/\rho$, v_1 : 底泥の動粘度, ν : 水の動粘度, ρ_1 : 底泥の見かけの密度, である。 K_1 なる無次元量は粒径を無視しうるとして得られるもので、内部波の碎波を規定するクーリガン数に対応するものである。図中*印のデータが、実際に流送時に内部波と見なせるものが現れたことを示す。

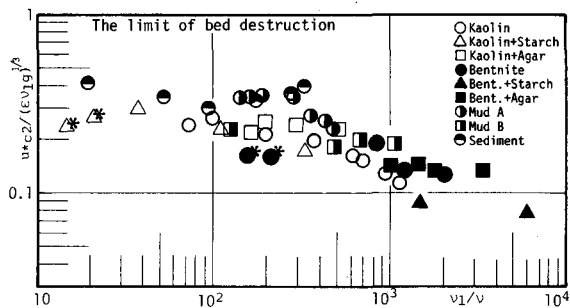


図-11 $u_{*02} / (\epsilon v_1 g)^{1/3}$ と v_1/ν の関係

今回の実験によれば、内部波は底質の粒径が小さく、かつ緩弱にくいものである場合に τ_{02} が 1 付近の値となったものに認められた。図より、底質によっては K_1 が内部波が現れた場合の K_1 より大きくても内部波が現れなかったことがわかる。 K_1 や v_1/ν から、底泥の流送時に内部波が現れる条件を規定することはできない。どの底質の場合でも、含水比が非常に高くなれば、内部波が現れると考えられるが、第1グループに属する底質は、自然状態ではそのような高含水比の状態では存在しえない。実際、デンプン含有カオリンの場合でも、流送実験では人為的に高含水比の条件に設定したため内部波が現れたが、そのような含水比の懸濁体は静置すれば沈殿し水層と分離する。また、第1グループの底質の流送においては亀裂の発生という内部波の概念とは矛盾する現象が現れるので、このグループの底質の流送に関しては内部波的な取り扱いが必要ないと思われる。著者らは、各地の湖沼や河口での底泥の流送実験を行ってきたが、これらの底泥の流送形態はすべて第1グループと同じで、内部波が現れなかった。²⁾ 明言はできないが、自然界の底泥でも大部分は第1グループに属するものと思われる。今後、多くの現地泥に対して、ここに示したグループ分けの妥当性や、図-10の $\tau_0 \sim \eta$ の関係の適用性を検討するつもりである。

5 結 び

本研究は、ずり速度が任意に連続可変な2重円筒式回転粘度計を用いて得られたずり速度の非常に小さな領域での流動に関する特性量と限界掃流力との関係を検討したものであり、得られた知見を以下にまとめる。

① 底質は懸濁させた後静置させた時の状態により2つのグループに分類された。1つは、カオリン主成分粘土と現地泥であり、親水性が小さく含水比が大きくなると懸濁状態を保てず沈殿し水の層と分離した状態となるもので、他の1つはベントナイト主成分粘土で、親水性が良く懸濁状態を保持できるものである。

② この2つのグループは、静置条件での状態の違いだけでなく、 $\tau \sim \eta$ 曲線、降伏値の有無などの流動特性においても明確に分類され、また水流による流送特性においても、流送形態や $\tau_0 \sim \eta$ の関係などではつきりと分類された。第1のグループは、降伏値が存在し、 $\tau \sim \eta$ 曲線に急激な勾配の変化が現れた。また流送時には、ヒビ割れが生じその部分から破壊する。第2のグループは降伏値を持たず、 $\tau \sim \eta$ 曲線はベキ法則が成立し、流送時にはヒビ割れは生ぜず、wavy bedのcrest部が押し潰されるように破壊する。

③ 底泥の限界掃流力は、流送限界と破壊限界の2つの状態に対して定義する必要がある。両限界の τ_0 の値は、 $\tau_0 \sim \eta$ の関係で各グループごとに比較的良好にまとめられた。グループごとで $\tau_0 \sim \eta$ の関係が異なるのは粘土粒子の性質に起因するものである。

④ 高含水比の底泥において、流送時に内部波が現れたことがあったが、第1グループの底質に対しては自然状態では内部波が現れるような高含水比は存在しないので、このグループの底質には内部波的な取扱いは必要ないとする。

参 考 文 献

- 1) 大坪, 村岡, 高野, (1980) 第16回衛生工学研究討論会 P.P.140-147
- 2) 大坪, 村岡 (1980) 第35回土木学会年次学術講演会 P.P.774-775
- 3) 村岡, 大坪 (1980) 国立公害研究所研究報告第14号 P.P.33-55