

講 座

洪水特論 VI

流 送 砂 泥 の 問 題

正 員 細 井 正 延*

まえがき 土砂が河道に堆積し、河床の上昇によつて高水位が上昇したり船舶の航行を阻害したり灌漑用水の引水、排水に支障を来したり貯水池、河口を埋没させたり或は河床低下の水制護岸に対する影響等、河床の洗掘堆積が河状に大きな変化を与えることが多い。河川流砂の性格は千変万化で非常に複雑な様相を呈する為此の調査研究は多くの困難を伴い、現在に於ても尙此の問題は殆ど解決されていないのである。河川断面を或る時間中に洗過する流泥量を知る事が此の調査の差し當つての問題であるが、更に之等の流泥がどの場所にどの位洗掘堆積するか或は何処から運搬されて来たのであるかが分つて始めて調査の目的を十分に達成することが出来るのである。河床高の将来の変化を予測することは単に流泥量を知ることより尙一層の困難を伴うものである。斯様に考え来ると河川の流泥を取扱うにはその河川全長に亘つての河状を把握し且つ流域全般の地質を知つて始めてその全貌を明かにすることが出来る。即ち或る断面の流泥量はその場所の水深水面勾配によるばかりでなく該地点より上流の河状に関係し、流送される土砂の砂粒径、比重によつても左右されるのであつて、流域の地質の分布降雨の分布状態に関係するのである。近年我が國に於ては北大農業物理研究所、建設省土木研究所、運輸省鉄道技術研究所等に於て實際河川の流泥の調査研究に着手しており、U.S.A.に於ても Mississippi, Colorado, Missouri 河等に於て詳細な観測が行われつゝある。

1. 砂泥の運搬

従来運搬形式を浮流と掃流とに區別しているが、掃流とは土砂礫が転動滑動跳躍し乍ら流下する現象及砂礫の山が移動する現象を云い、浮流とは砂泥及び溶解物質が浮游し乍ら流下する現象として定義されてい*

*る。掃流流泥量、浮流流泥量に就ての研究は20世紀始めより今日迄多くの人によつて行われ特に掃流流泥量に就ては実験実測式が多数発表されており、Gilvert, Schoklitsch, Chang, O'Brien 等の公式があるが式形の非常に異つたものが種々存在し、實際に何れの式を用いて算定すればよいか判断に苦しむ状態である。之は、各式に於ける実験或は実測範囲が異つていことにもよるが、同じ範囲の実験（水深水面勾配）に於ても使用した砂泥の粒径と水深水面勾配の相対的關係に左右されて運搬形式が掃流にもなり浮流にもなり掃流と浮流の割合が種々に変つてくるためである。小高水の時には掃流されていた砂礫も大高水になれば浮流される可能性が増すことを考えねばならない。水より重い物質が流水中を浮游しているのは之が自重によつて沈降しようとする力を阻止するに足るだけの渦乱性が流水中に存在するからであつて、若し沈降速度が渦乱による流水の上向速度より大きければ物質は次第に沈降して河底に達し或いは河底にある斯様な物質は浮游させられることなしに河底に接して運搬されることになる。掃流流泥は河底の抵抗を受け乍ら流下するから流下速度は流水速度より小さいが之に反して浮游砂泥の夫れは流水速度に略等しいと考えてよいから同じ時間中に或る断面を通過する砂泥量は緩流河川口に於ては浮游流泥量が掃流流泥量より多いのが普通である。流泥というと直ぐに掃流砂泥のみを考えて浮流砂泥を輕視する傾向があるが実例によつても明かなように浮流量は掃流量に比して大きなものであるから、流泥量を掃流流泥量式のみによつて算定すると大きな誤差を生ずる場合がある。例えば掃流量と浮流量の比は表-1 のようである。

§.1. 流泥量に就て

表-1 河川に於ける掃流量と浮流量の割合

河 名	リンス	ローヌ (セネバ湖入口)	ア ー グ ヴ ズ ル ド ン	ミシシッピ河	コロラド河 口 Yuma 地先	リオ・グランド サン・マーシャル地先
掃 流 量	1: 3.5	1: 6.9	1: 4.1	1: 3	1: 9	1: 4
浮 流 量						1: 6

掃流流泥量に就ては多数の式が発表されているが之

等は大体次の2種類に區別される。

(1) 流速又は流量の函數として表わした式

* 建設省土木研究所技官

1) 野滿隆治：“河川學”：頁199.

之には, G.K. Gilvert, Schaffernak, Meyer-Peter, M. Fabre, Mac Dougall, L. Straub, 中山秀三郎氏等の実験式及び Missouri 河 Omaha に於ける実測式²⁾(L. Straub の実験式の成立することを, 1947年4月の洪水時に観測した資料から確めた。)

(2) 掃流力の函数として表わした式

之には, du Boys, Schoklitsch, Chang, アメリカ水路実験所, O'Brien, Einstein, 永井庄七郎氏等の実験式, 理論式がある。

以上の式は殆ど全部実験によつて決定されたもので, 夫れ等の実験範囲(使用した砂泥の粒径の値をも含めて)は色々である為に掃流と浮流の割合が種々相異つた値をとり, 之が各式中の係数指数の相違を来した原因の一つと推測される。掃流量と浮游量の比が色々な値をとるような広範な実験を行つて, 浮流掃流を同時に考慮した式を作るようにせねばならない。

水よりも重い砂泥粒が河水中を浮游しているのは流水中に渦乱がある為で流速が大きい程渦乱の度合も大きくなるから浮游流泥量も増加してくるのである。例えば建設省土木研究所の吉川氏が利根川佐原地先で渦乱の測定を行つた結果は図-1の通りである。水深3.5mで上側の線は水面より*

* 1mの点, 下側の線は河底より50cmの高さの点に於ける主流の方向の流速の変動を示すが鉛直方向の変動も大体之に比例した値であると想像される。

浮流砂泥が著しく多い河として黄河, 揚子江が著名であるが野満博士が夫々に就て観測した所によると平時に於ても水1ℓ中に2.69gr, 2.05gr(重量比で夫々略々0.269%, 0.205%)の如き多量の砂泥が含まれていたということである。世界中の濁りの強い河に就て G. Baff 氏が掲げた例をとると水1ℓ中の砂泥量が1年平均で表-2の通りである³⁾。

図-1 利根川に於ける渦乱の大きさ

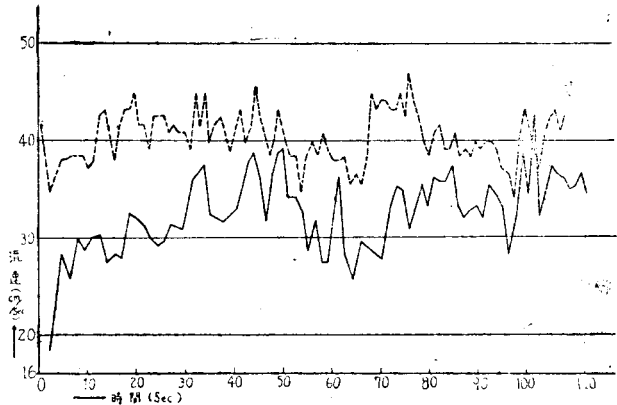
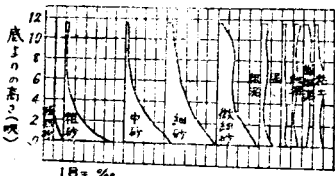


表-2 河川の浮游砂泥量(1年平均)

河名	リ ゲ ラ ン ド	オ ポ ー	ミ シ シ ッ ピ ー	ロ ー ヌ	ナ イ ル	ダ ニ ュ ー ブ	ド ナ ウ
浮游砂泥量 gr/l	3.44	1.11	0.667	0.564	0.499	0.347	0.23)

著者が斐伊川下流, 利根川栗橋地先に於て平水より稍高い水位の際に浮泥量の測定を行つた結果によると大凡水1ℓ中に0.2~0.6grの砂泥を含んでいた。次に河川に於ける浮游物質の垂直分布はどんな状態を呈しているかという点, 粗粒の砂は表層に少く底層に多く集つているが粒径が小さくなるに従つて上下均等な分布に近くなつてくる。例えば G. Straub が Missouri 河で測定した結果は図-2のようである。

図-2 ミズリー河泥砂の垂直分布



理論的に分布曲線を求めるには,

$$\frac{dm}{dz} \left(\eta \frac{dm}{dz} \right) + c \frac{dm}{dz} = 0$$

を $z=h$ で $-\eta \frac{dm}{dz} - cm = 0$ の条件で解いて,

但し z : 河底からの高さ

η : 渦乱による交換係数

c : 砂泥粒の沈降速度, m : 浮游砂泥の濃度

$$m = m_0 \cdot e^{-\int_0^z \frac{c}{\eta} dz}$$

を得る。 η は河底から水面迄異つた値であるが近似的に一定としてその平均値を採用すると,

$$m = m_0 \cdot e^{-\frac{c}{\eta m} z}$$

となる。茲に m_0 は $z=0$ の所の濃度である。

此の式は砂泥濃度が時間的に変らない定常状態であり且つ流水の方向にも濃度が変化しない場合の分布式

2) Proceedings of the Federal Inter-agency Sedimentation Conference. p.99.

3) 1)と同じ。頁. 182.

であつて實際河川に於ける分布状態が此の式に大凡一致することが実証されている。従つて此の様な分布状態に於ける場合の浮泥全量 M は、

$$M = \int_0^h m \cdot dz = m_0 \int_0^h e^{-\frac{c}{\eta_m} z} \cdot dz$$

$$= m_0 \frac{\eta_m}{c} \left(1 - e^{-\frac{c}{\eta_m} h} \right)$$

で表わされる。

m_0 は未知の値であるが、 m_0 については E.W. Lane 及び A.A. Kalinske が次の様に説明している⁴⁾。渦乱の鉛直方向の変動速度分布が正規誤差曲線に従うとして、即ち

$$f(v) = (1/\sqrt{2\pi} \cdot v \sqrt{v^2}) e^{-v^2/2v^2}$$

v : 鉛直方向の変動速度

とし、河底から浮遊する量は c なる沈降速度を有する砂泥が河底物質の何%の量を占めているかということ及び $\int_0^\infty v \cdot f(v) \cdot dv$ の大きさに比例するとし、尚沈澱量と浮き上る量との平衡を考へて、

$$m_0 \propto \frac{\Delta F(c)}{c} \cdot \int_0^\infty v \cdot f(v) \cdot dv$$

で表わした。 $\Delta F(c)$ は底質の篩分曲線から決定される値で例えば c_1 或いは之より小さい沈降速度を有する砂泥が底質中の 60% を占め、 c_2 或いは之より小さな沈降速度を有する砂泥が底質の 70% を占めるとすると $c = \frac{c_1 + c_2}{2}$ なる沈降速度を有する砂泥量 $\Delta F(c) = (70 - 60) = 10\%$ ということである。上式を変形して

$$m_0 = a \cdot \Delta F(c) \left(\frac{1}{2lc} e^{-\frac{c}{2l}} \right)^n$$

を得た。茲に $l_c = \sqrt{\frac{c}{\tau_0/\rho}}$ で、 τ_0 は水底に於ける剪断力、 ρ は水の密度である。Mississippi, Missouri 河での実測結果から、 $n = 1.61$ なる値を得ている。上式については二、三の点を考慮して検討を行いその適否を確かめねばならないと考えている。

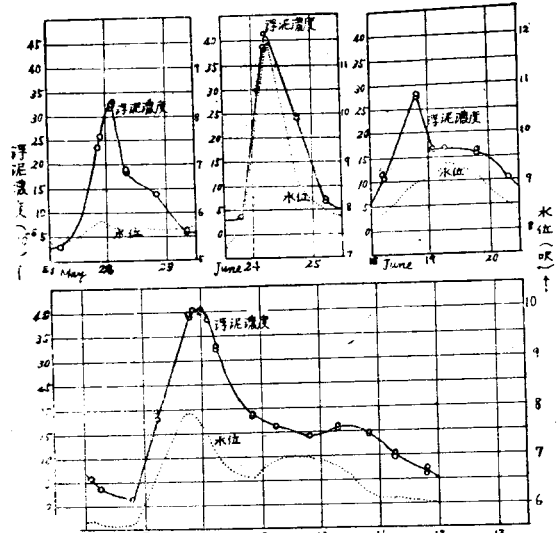
今迄述べて来た所は砂泥濃度が定常状態で且つ流れの方向に濃度が変わらない場合についてであつて、濃度が時間的に変化する場合或いは流水自身が不等流の場合等に於ては拡散の一般微分方程式、

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_x \frac{\partial m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_y \frac{\partial m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_z \frac{\partial m}{\partial z} \right) - \frac{\partial(cum)}{\partial x} - \frac{\partial(cum)}{\partial y} - \frac{\partial(cum)}{\partial z} + c \frac{\partial m}{\partial z}$$

- 4) E. W. Lane and A. A. Kalinske "The Relation of Suspended to Bed-materials in Rivers." Transaction of The American Geophysical Union. p.637.
- 5) 2) と同じ, p.55. Paul C. Benedict "Determination of The Suspended Sediment Discharge of Streams."
- 6) "山地流域に於ける降水量分布." 頁 170. 昭 25.3. 農業物理研究所

を適當な境界条件の下に解けばよいか多くは数学的に解法が不可能である為殆んど解は出ていない。

図-3 Bighorn に於ける水位と浮泥濃度の関係



註: 上図 中浮遊濃度 ($\times 10^{-6}$) とあるは ($\times 10^{-3}$) につき訂正

§.2. 高水時の水位(流量)と浮泥濃度との関係

図-3 は Bighorn 河の Manderson に於ける高水中の水位曲線と浮泥濃度曲線を示す図である⁵⁾。之から分るように濃度と水位の peak は必ずしも一致していないのであつて即ち濃度は単に水位流量のみの函数で表わすわけにはゆかないことを示している。Enoree 河にて 1939 年 8 月の高水時に採取した浮泥の篩分結果を見ると、流泥の粒度分布は時間的に可成大きな変化を示しており出水の初期程細粒の砂泥が多く時間が経つに従つて粗粒の割合が大きくなつていくことを知る。全く同じ水理条件の下に於ても粒径が細い程多量に浮遊運搬されるであろうから、Enoree 河の例に於ては濃度と水位の peak が一致しなかつたのであろう。即ち流域の地質と降雨の分布状態に起因したのてなからうか。

次に北海道大学理学部の菅谷重二氏等が石狩川石狩大橋にて融雪出水期に浮泥を採取して水位と浮泥量の関係を探つた。各点とは浮泥量の関係

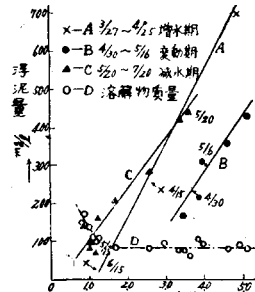


図-4 中に A, B, C の直線で示す線上に極めてよく乗りこの直線で区分される期日は増水初期増水最盛期及び減水期と全く一致するものである。以上より融雪出水時の浮泥量は水位又は流量の一次函数として現わし得るが

た水位変化の状態即ち増水初期豊水期減水期の季節によつて比例常数を異にするということが出来る。各時期に於ける浮泥量はこの水位と浮泥量との関係を用いて計算することが出来るわけである。今A, B, Cの各出水期別にこの直線の傾きから実験式を求めてみると

A. 増水初期 $\bar{m}_A = -200 + 183h$ $1.0m < h < 5.0m$

B. 変動増水期 $\bar{m}_B = -300 + 144h$ $3.0m < h < 5.0m$

C. 減水期 $\bar{m}_C = -25 + 133h$ $1.0m < h < 3.0m$

$$m_A, m_B, m_C: \text{mg/li. } h: \text{m}$$

浮泥量が河水の増減によつて変動するに対して溶解物質の方は図-4中の直線で示すように水位が極く低い時は水位によつて多少変化するが水位が1.5m以上になると水位に無関係に殆ど一定値を示し一般に言われているように水位即ち流量の増加に逆比例して減少するものではないことが分る。上記の如く3つの期間によつて同じ水位(流量)に就ても浮泥量が異なるのは流域の土質と積雪の融解状態によると考えられる。

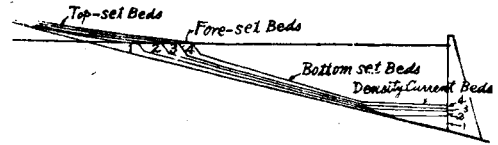
要するに浮泥量は水理条件のみならず流域の地質降雨の状況融雪の状況等にも左右されるであろうことが上記の実例から想像されるわけで、必ずしも従来の式の如くには表わし得ないことが分つた。従つて河川流泥量を知る為にはその河について流泥観測を行い今迄述べてきたような色々の要素を考慮して資料を解析しその河に就ての結論を引き出すようにせねばならない。

2. 貯水池及び河口に於ける沈澱堆積

§.1. 貯水池に於ける沈澱堆積

貯水池に於ける土砂の沈澱に就ては現在特にアメリカに於て陸軍省、農務省地質調査所 T.V.A 等により多くの観測調査が行われている段階で未だその全貌を明かにする迄に到っていない。貯水容量の損失を決定し土砂堆積の影響を予測する為には土砂運搬の機構を究明し、貯水池の土砂堆積量縦断形状及び粒度分布等の測定を長期間に亘つて行い多くの資料を得て始めて問題が解決されるのであつて今後の調査研究に俟たねばならない。土砂運搬の機構に就ては上流から運搬されてきた砂泥が貯水池内で如何なる過程を経て如何なる形状に沈澱堆積するかを解明することが一つの問題であるが、アメリカの地質学者は堆積は4ヶ所で形成されると言つている⁷⁾。即ち Bottom-set Beds, Fore-set Beds, Top-set Beds, Density-currents Beds で之等の位置は図-5に示される。Bottom-set Beds は河流により運搬された細粒の沈澱物から成り薄い層をなし

図-5 堆積の各形式を示す貯水池縦断面



て堆積し、Fore-set Beds は粗粒の沈澱物から成り河流が貯水池内水位に達して流速が減少する場所に堆積する。以上の2ヶ所の河床は急傾斜をなしている。貯水池内に次第に土砂が運び込まれるに従つて Fore-set Beds の位置が前進して Bottom-set Beds の上流部に掩いかぶさつてくる。Fore-set Beds が移動するにつれて勾配が減少するから河流部の流速は減少し河流は粗粒の土砂を Fore-set Beds の上流側に堆積させる。此の部分の河床は緩勾配の層で之を Top-set Beds と称する。以上3ヶ所の他に Density-currents Beds と呼ばれる第4の堆積物があることが最近注目されてきた。貯水池内へ流入する流水が大部分コロイド状か細砂状のものであるならば之が清澄な貯水池に達すると密度流となつて清澄な水の下を流れて貯水池の底に到り貯水池の最下部(ダム付近)に沈澱堆積する。之を Density-currents Beds と呼ぶ。

§.2. 河口に於ける沈澱堆積

河口の埋没に就ては鉄道技術研究所港湾研究室が信濃川北上川旧川河口の現地観測を行つて埋没の機構を調査したが⁸⁾、同研究室の浜田氏は河口に於ける流れを傾斜流性潮流性密度流性の3つの性質から成り立つていふと考え、河口埋没の機構を知る為には特に密度流の状態を明かにせねばならぬことを指摘している。即ち海水と河水の密度差の為に、流下する河水は海水の上層に乗り上げて行き此の為河水層の乱れが弱まり又海水層の河床に対する剪断力も小さいものであるから河水によつて運搬されて来た砂泥は此処に沈澱堆積するといふのである。同氏は上記の河口に於て流速分布密度分布浮泥分布の資料をとつて此の事実を確かめた。

以上で河流による砂泥の運搬に就ての極く概略の所を述べたつもりであるが、此の他河床高の将来の変化に対する予測、流送土砂の護岸水制に対する影響、分水路に於ける砂泥運搬の状態、濁水の水理(清澄な河流の水理との相違)等殆ど未解決の問題が多々あるが、之等に就ては特に河川技術者の現場に於ける調査研究に俟つ所極めて大である。

7) 2)と同じ。p.68. E. W. Lane: "Sediment Engineering as a Quantitative Science".

8) 濱田徳一: "河口港としての石巻港の研究." 附. 25. 3. 運輸省港湾局技術研究課