

洪水時における高水敷上への細粒土砂堆積

FINE SAND DEPOSITION ON A FLOODPLAIN DURING A FLOOD

泉 典洋¹・松田幸子²・田中 仁³

Norihiro IZUMI, Yukiko MATSUDA and Hitoshi TANAKA

¹正会員 Ph.D. Associate Professor, Asian Institute of Technology, School of Civil Engineering (P.O.Box 4 Khlong Luang, Pathumthani 12120, Thailand)

²正会員 日本建設コンサルタント株式会社東北支社技術一部 (〒 980-0022 仙台市青葉区五橋 1-6-2 KJ ビル)

³正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

Fine sand deposition on a floodplain during the Abukuma river flood in 1998 is studied both observationally and theoretically. It is found from the observation that most of the deposition consists of fine sand of about 0.1 mm, which is commonly refer to washload that is not included in bed material. The observed data shows that the deposition is maximized around 10 m inside of the floodplain along the boundary between the main channel and the floodplain. This phenomenon is found to be well explained by the theory of suspended sediment transport. The predicted value of the magnitude of the deposition agrees well with the observed value with the use of suspended sediment concentration obtained in another observation.

Key Words : floodplain, fine sand, suspended load, the Abukuma River, washload

1. はじめに

河川流によって輸送される細粒土砂分の中でも 0.1 mm 以下の最も細かい成分はウォッシュロードと呼ばれ, それらは河道内にほとんど存在しないことから, 上流域から最下流まで堆積することなく運搬され河道形状に対してほとんど影響を与えないものと考えられてきた。しかし最近の研究によって, ウォッシュロードが側岸部形成や高水敷の形成に重要な役割を演じている可能性が指摘されている^{1), 2)}。また生態系の基盤となる各種栄養物質は細粒土砂の粒子に吸着された形態で輸送されることから, 河川環境を考える上でウォッシュロードの挙動を把握することが非常に重要となる³⁾。このような観点からウォッシュロードに関する研究が少しづつ行われるようになってはきているものの, ウォッシュロードの輸送プロセス, 特にその大部分が輸送される洪水時における挙動については, 観測の困難さなどから未だ不明な点が多いのが現状である。

平成 10 年 8 月末の豪雨によって発生した阿武隈川洪水は, 計画高水位を上回る水位を記録する大規模なものとなった。ピーク時には堤防天端近くまで水位が達し, 複断面河道区間の高水敷も水没したが, その際多くの細粒土砂が高水敷上に堆積することになった。本研究では, 今回の洪水によって特に顕著な堆積が認められた阿武隈川中流域に位置する梁川橋付近の高水敷を

対象に堆積土砂の現地調査を行いその特性を把握するとともに理論解析による堆積量との比較, 検討を行う。

2. 現地調査の概要

(1) 対象領域

阿武隈川は総延長 215 km, 流域面積 5480 km² の一級河川である。今回の調査では, 土砂の堆積が顕著に認められた福島県梁川橋直上流(河口から約 57 km)の左岸側高水敷上を対象とする。(図-1, 2 参照) この地点は福島盆地の最下流部に位置し, これより 5 km ほど下流には福島・宮城県境の狭窄部が存在している。梁川橋付近における低水路幅はほぼ一様の約 120 m であり, 調査地点直下流の右岸側には広瀬川が合流している。

(2) 調査の方法

調査は洪水から 2~3 ヶ月が経過した 10 月と 11 月に 3 回にわたって行われた。高水敷上の約 120 m × 320 m の範囲において 5 m 程度の間隔で約 300 地点における現地形の測量と堆積厚さの測定および堆積土砂の粒径分析を行った。

堆積厚さについては, 実際に掘削を行ったところ表層に存在する褐色の非粘性砂層の下に黒色の粘性土砂の層が見られた(図-3)。しかも非粘性砂層と粘性土層の境界より上部には植物の茎, 下部には根の残骸が数

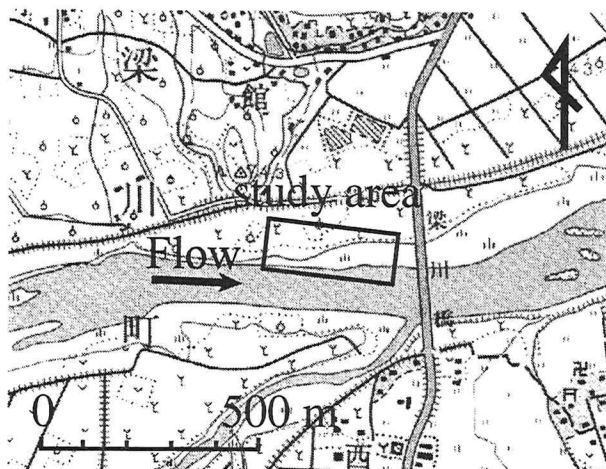


図-1 調査対象領域



図-2 梁川橋から上流を望む。右側の洪水敷が調査対象領域である。



図-3 洪水によって堆積した非粘性砂層とその下に存在する粘性土層

多く認められた。阿武隈川において今回と同規模の洪水が最後に発生したのは昭和 61 年であり、12 年間大規模な土砂堆積が生じることがなかったと考えられる。したがってその間繁茂した植物によって有機質の土壌が地表面付近に形成されたことが推定される。このような考察から、本調査では非粘性砂層と粘性土層の境

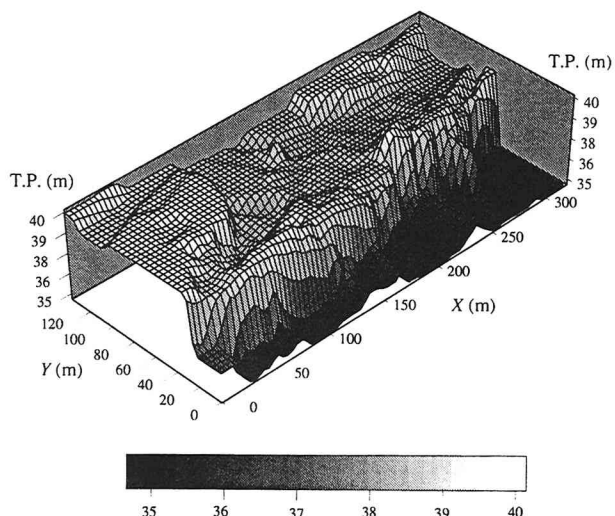


図-4 洪水後の地形

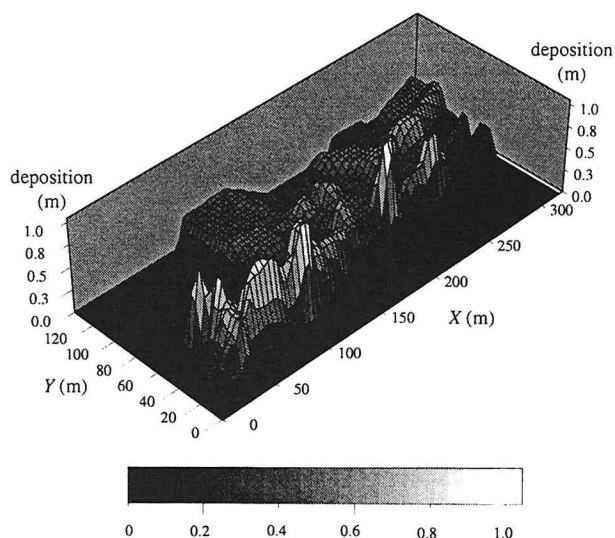


図-5 洪水による堆積土砂の分布

界を洪水前の地表面であるとし、その上部に堆積した非粘性砂層を今回の洪水で堆積したものとみなした。この方法では侵食量を測定することはできないが、樹木の背後であった 1 箇所、最低水路側の端 1, 2 m の領域を除けば、全領域において堆積が生じていた。

また測定点のうちの 39 点については土砂を採取し、ふるい分けや粒度分析計（マイクロトラック社製粒度分析計）を用いて粒度分布を得た。河床材料についても同様にして粒度分布を得た。

3. 現地調査結果

(1) 高水敷上における土砂堆積量

図-4 および 5, 6 にそれぞれ現在の地形および調査によって得られた堆積厚さ、推定される洪水前の地形を示す。図中手前側が低水路であり、流れの方向は左手前から右奥である。

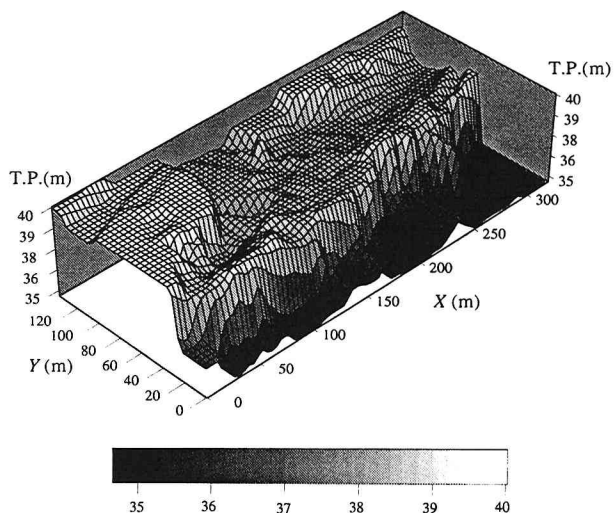


図-6 推定される洪水前の地形

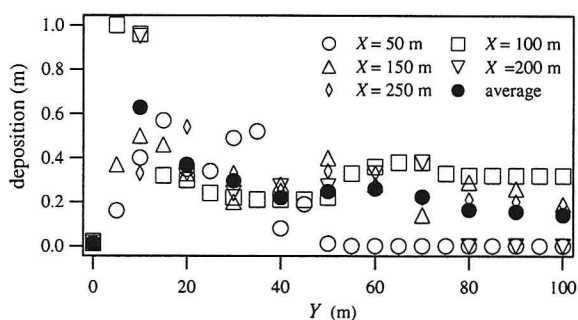


図-7 土砂堆積の横断分布

図-5からは明瞭でないが、堆積が著しい領域は低水路から堤防方向に10 m程入った付近に島状に点在している。それに比べると堤防よりの部分では堆積量が急激に減少している。また堆積量がピークとなる領域では数10 cmから1 mを超える堆積が生じていることがわかる。図-7に図-5中の $X = 50$ m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m地点における堆積量の横断方向分布とこれらから得られる堆積量の平均を示す。

浮遊砂濃度は高水敷よりも底面剪断力の大きい低水路で大きくなる。この濃度差によって高水敷・低水路境界には乱流拡散による浮遊砂フラックスが高水敷方向に発生するが、高水敷は低水路から輸送されてきた浮遊砂を輸送するのに十分な浮遊能を有していないため、浮遊砂は高水敷に入ってすぐのところに帯状に堆積することになる。

(2) 粒径分布

図-8に各地点における堆積土砂の50 %粒径を示す。また図-9に図-8中 $X = 175$ mの地点における90 %, 50 %, 10 %粒径の横断方向分布を示す。これらの図より高水敷上に堆積した土砂は粒径0.1 mm前後の細粒土砂であることがわかる。また全般的に低水路から堤防

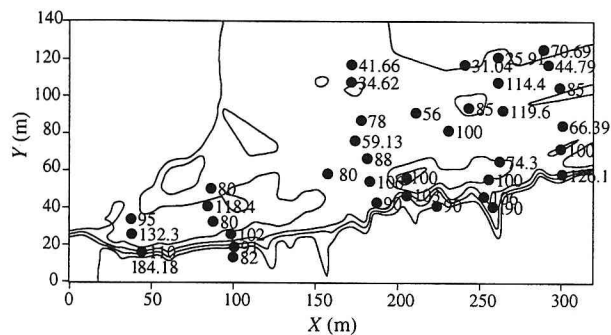


図-8 各地点における堆積土砂の50 %粒径 (単位: μm)

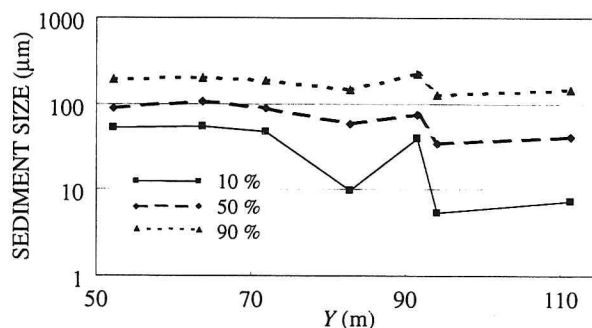


図-9 堆積土砂の粒径の横断分布

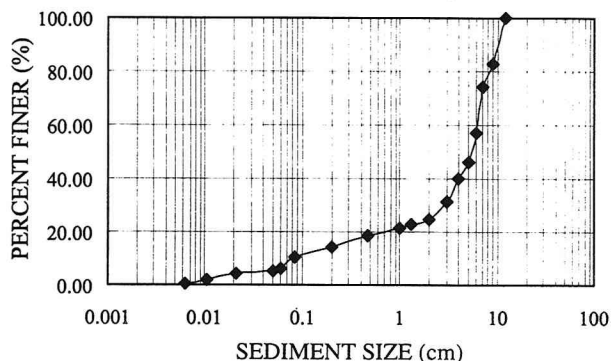


図-10 河床材料の粒度分布

方向に行くにしたがって粒径が小さくなっていることがみてとれる。前述したように浮遊砂が低水路から高水敷に向かって拡散によって輸送される際、浮遊能を超える濃度の浮遊砂は堆積することになるが、その際、粒径による選択的な堆積によって堆積土砂の粒径分布の空間分布が生じたものと思われる。

図-10に河床材料の粒度分布を示す。河床材料の採取は調査領域から低水路側に1 mおよび5 mほど離れた2点で行った。それぞれの点で2-3 kg程度ずつ採取したところ、大きな差異は見られなかったため、それぞれの粒径分布を平均したのが図-10である。図-8, 9との比較から高水敷上に堆積しているような細粒土砂は通常時の河床には10 %程しか存在していないことがわかる。

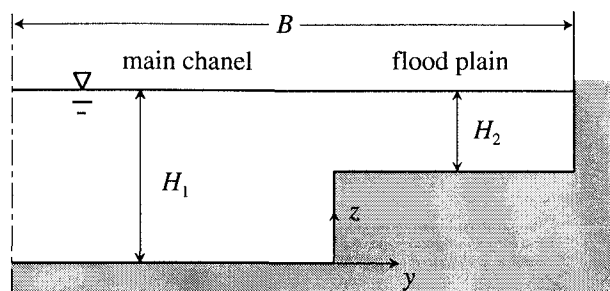


図-11 河道断面の概念図と座標系

(3) 細粒土砂の輸送過程

渡邊ら³⁾は実測の結果から次のように結論づけている。上流から供給された細粒土砂はそのまま最下流まで輸送されるのではなく、供給地点より下流のある地点において一旦高水敷上にトラップされる。この土砂が洪水時における水位の上昇によって再び流水中に巻き上げられ下流側へと輸送される。輸送された土砂は下流側の或る地点において再び高水敷上に堆積する。

今回阿武隈川で生じたようなまれに起きる大規模洪水が、観測されたような顕著な土砂堆積を引き起こし、高水敷を急激に発達させるものと考えられる。

4. 理論

(1) モデル

洪水開始から終了までの流れおよび浮遊砂濃度、浮遊砂堆積をモデル化するにあたり、問題の複雑さを減ずるために対象領域を直線河道であるとし、河道の横断は図-11のような単純な形とする。横断方向に比べ流下方向の変化は十分緩やかであると仮定し、流速および浮遊砂濃度は横断方向にのみ変化するものと仮定する。

また堆積による河床形状の変化は微小であるとし固定床とする。流れおよび浮遊砂濃度については水位の変化に対し十分速やかに変化するものとして、水位の変化に起因する加速度の効果を無視し準定常を仮定する。すなわち洪水の各ステージにおいて水位は変化するものの、流れおよび浮遊砂輸送については定常として取り扱う。それぞれのステージにおける浮遊砂堆積量を時間的に積分することによって洪水開始から終了までの全堆積量が導かれる。

(2) 流速分布

図-11のように座標系をとると水深方向に積分した運動方程式は低水路および高水敷においてそれぞれ次のようになる。

$$\rho g H_1 S + \rho \epsilon_y H_1 \frac{d^2 U_1}{dy^2} - \rho C_{f1} U_1^2 = 0 \quad (1)$$

$$\rho g H_2 S + \rho \epsilon_y H_2 \frac{d^2 U_2}{dy^2} - \rho C_{f2} U_2^2 = 0 \quad (2)$$

ここで ρ は密度、 g は重力加速度、 H は水深、 S は河床勾配、 ϵ_y は横断方向の運動量拡散係数、 U は鉛直方向に平均した流下方向流速、 C_f は摩擦抵抗係数、添字 1, 2 はそれぞれ低水路内および高水敷上での値を表す。最高水位 D のときの河道中央では

$$\rho g D S = \rho C_{fD} U_D^2 \quad (3)$$

が成り立つ。添字 D は最高水位時の河道中央での値を表す。なお摩擦抵抗係数 C_f は Manning-Strickler の式を用い次のように表される。

$$C_f = \left\{ 8.1 \left(\frac{H}{2d_{90}} \right)^{1/6} \right\}^{-2} \quad (4)$$

ここで、 d_{90} は河床構成材料の 90 % 粒径である。

運動方程式 (1), (2) を式 (3) でわると次式が得られる。

$$1 + v \frac{d^2 \phi_1}{d\eta^2} - J^{-2} \phi_1^2 = 0 \quad (5)$$

$$1 + v \frac{d^2 \phi_2}{d\eta^2} - \alpha^{-2} J^{-2} \phi_2^2 = 0 \quad (6)$$

ここで $v = \epsilon_y D / (C_{fD} U_D B^2)$, $\phi = U / U_D$, $\eta = y / B$, $J = (H_1 / D)^{2/3}$, $\alpha = (H_2 / H_1)^{2/3}$ である。ここで前述したように低水路の河床材料は高水敷上よりかなり大きいが高水敷上に大量の細砂を堆積させるような場合、洪水時の低水路河床は大量の細砂で覆われているといわれている²⁾。その場合 C_f の値に大きな差がないことが期待される。ここでは簡略化のためにこのような状況を仮定し、低水路と高水敷で同一の C_f を用いる。横断方向の運動量拡散係数 ϵ_y は局所的な流速や水深で決まる値ではなく、河道内全体における大域的な乱流特性によって決まるものと考え、河道中央での摩擦速度 U_c^* および水深 H_1 を用いて $\epsilon_y = m U_c^* H_1$ で表されるとすれば v は次のようになる。

$$v = \frac{m}{C_{fD}^{1/2}} \left(\frac{H_1}{B} \right)^2 \quad (7)$$

通常の開水路では m は $C_{fD}^{1/2}$ と同オーダーであることが知られている。従って水深に対して河幅が十分大きければ v は十分小さい値をとる。そこで Ikeda and Izumi⁴⁾ にならない v を微小パラメータとし摂動法を用いて v の 1 次までのオーダーについて解くと、最終的に低水路および高水敷についてそれぞれ次の解が得られる。

$$\phi_1 = J + J(\sqrt{\alpha} - 1) \exp \left(\sqrt{\frac{2}{Jv}} \eta \right) \quad (8)$$

$$\phi_2 = J\alpha + J(\sqrt{\alpha} - \alpha) \exp \left(-\sqrt{\frac{2}{\alpha Jv}} \eta \right) \quad (9)$$

(3) 浮遊砂濃度分布

浮遊砂濃度については Parker⁵⁾に倣い次のように定式化する。

$$\tilde{\epsilon}_y \frac{d^2 \zeta}{dy^2} = w_s c_0 - w_s E \quad (10)$$

ここで ζ は水深積分した浮遊砂濃度、 $\tilde{\epsilon}_y$ は横断方向の浮遊砂拡散係数、 $\tilde{\epsilon}_z$ は鉛直方向の浮遊砂拡散係数、 w_s は砂粒子の沈降速度、 c_0 は河床付近における基準面濃度、 E は無次元の浮遊砂巻き上げ速度である。

浮遊砂濃度 c の分布として次の exponential 型を仮定する。

$$c = c_0 \exp\left(-\frac{w_s}{\tilde{\epsilon}_z} z\right) \quad (11)$$

そのとき次のような近似が可能となる。

$$\zeta = \int_0^H c(z) dz \approx \frac{\tilde{\epsilon}_z}{w_s} c_0 \quad (12)$$

浮遊砂拡散係数は運動量拡散係数と比較すると若干大きくなることが知られているが、ここでは単純化のために等しいと仮定し次式で表されるものとする^{4),6),7)}。

$$\tilde{\epsilon}_y = \epsilon_y = m U_c^* H_1, \quad \tilde{\epsilon}_z = \epsilon_z = 0.1 U^* H. \quad (13a, b)$$

沈降速度 w_s は Rubey の式を用いる。また無次元浮遊砂巻き上げ速度 E は次の近似式を用いる。

$$E = K \left(\frac{U^*}{w_s} \right)^2 \quad (14)$$

K は比例定数である。最高水位 D のときの高水敷から無限遠点では

$$0 = \frac{w_s^2}{\epsilon_{zD}} \zeta_D - w_s K \left(\frac{U_D^*}{w_s} \right)^2 \quad (15)$$

が成り立つ。ここで U_D^* は最高水位 D の時の U_c^* である。式(10)を上式でわり、 $Z = \zeta/\zeta_D$ とすると次式が得られる。

$$\lambda \frac{d^2 Z_1}{d\eta^2} = Z_1 - J^{-7/4} \phi_1^2 \quad (16)$$

$$\lambda \frac{d^2 Z_2}{d\eta^2} = Z_2 - \alpha^{-1/2} J^{7/4} \phi_2^2 \quad (17)$$

ここで $\lambda = (\epsilon_y \epsilon_{zD}) / (w_s^2 B^2)$ である。上式を式(8)および(9)を用いて解くと低水路および高水敷においてそれぞれ次のような解が得られる。

$$\begin{aligned} Z_1 = & \frac{J^{15/4}}{2} (\sqrt{\alpha} - 1) \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{2\lambda}{vJ}} - 1} - \frac{2\alpha}{\sqrt{\frac{2\lambda}{v\alpha J}} + 1} \right. \\ & \left. + \alpha + \alpha^{1/2} + 1 \right) \exp\left(-\frac{\eta}{\sqrt{\lambda}}\right) \\ & - \frac{2vJ^{19/4}(\sqrt{\alpha} - 1)}{2\lambda - vJ} \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{Jv}}\eta\right) + J^{15/4} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & \frac{J^{15/4}}{2} (\sqrt{\alpha} - 1) \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{2\lambda}{vJ}} + 1} - \frac{2\alpha}{\sqrt{\frac{2\lambda}{v\alpha J}} - 1} \right. \\ & \left. - \alpha - \alpha^{1/2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{\eta}{\sqrt{\lambda}}\right) \\ & + \frac{2v\alpha^2 J^{19/4}(\sqrt{\alpha} - 1)}{2\lambda - v\alpha J} \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\alpha Jv}}\eta\right) \\ & + \alpha^{3/2} J^{15/4} \end{aligned} \quad (19)$$

a) 浮遊砂堆積量

式(16), (17)の右辺第一項は浮遊砂の堆積速度、第二項は浮遊砂の巻き上げ速度であるからこの差は正味の堆積速度 $\partial z_b / \partial t$ となる。これらに式(8)および(9)を代入すると低水路および高水敷における堆積速度はそれぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_{b1}}{\partial t} = & \frac{J^{3/2}}{2} (\sqrt{\alpha} - 1) \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{2\lambda}{vJ}} - 1} - \frac{2\alpha}{\sqrt{\frac{2\lambda}{v\alpha J}} + 1} \right. \\ & \left. + \alpha + \alpha^{1/2} + 1 \right) \exp\left(-\frac{\eta}{\sqrt{\lambda}}\right) \\ & - \frac{4\lambda J^{3/2}(\sqrt{\alpha} - 1)}{2\lambda - vJ} \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{vJ}}\eta\right) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_{b2}}{\partial t} = & \frac{J^{3/2}}{2} (\sqrt{\alpha} - 1) \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{2\lambda}{vJ}} + 1} - \frac{2\alpha}{\sqrt{\frac{2\lambda}{v\alpha J}} - 1} \right. \\ & \left. - \alpha - \alpha^{1/2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{\eta}{\sqrt{\lambda}}\right) \\ & + \frac{4\lambda J^{3/2}\alpha(\sqrt{\alpha} - 1)}{2\lambda - v\alpha J} \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{v\alpha J}}\eta\right) \end{aligned} \quad (21)$$

流れと浮遊砂濃度に関しては準定常の仮定を用い、洪水開始時刻 T_s から洪水終了時刻 T_e までの間に堆積した浮遊砂量 Δz_b は次のように表される。

$$\Delta z_b = \int_{T_s}^{T_e} \frac{\partial z_b}{\partial t} dt \quad (22)$$

上式に式(20)および(21)を代入し、積分すると堆積量 Δz_b が求められる。

5. 結果と考察

(1) 堆積量と K の値について

現地調査の結果及び平成2年3月に作成された福島地区定期横断測量の定期横断面図を用いて図-11中の B , $H_1 - H_2$ をそれぞれ 160 m, 6 m とする。河床勾配は河川測量データより 6.58×10^{-4} とする。浮遊砂の粒径は一律に 0.1 mm とする。水位は調査地点から 200 m ほど下流の八幡観測所での水位データを用いる。

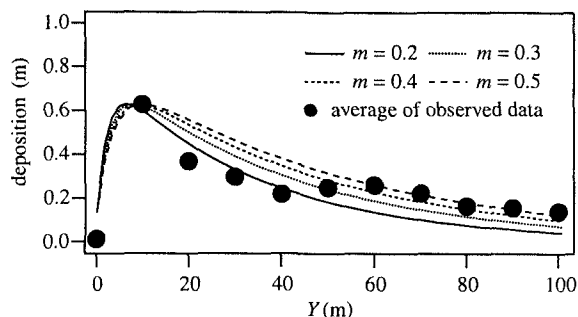


図-12 堆積量に関する実測値と理論値の比較

これらの値を用いて理論から得られた高水敷上での堆積量と実測値の比較を図-12に示す。理論の結果は実測値の傾向を非常に良く表していることがわかる。Ikedaら⁴⁾は比例定数の値として $K = 6.7 \times 10^{-5}$ を用いている。しかしこの値は実験によって非常に大きくばらつく値である。ここでは理論による堆積量のピークが実測のピークと一致するように $K = 1.329 \times 10^{-6}$ とした。これは河床が 50 % 粒径 5.5 cm の礫河床であったために (図-10 参照)、河床全体が細粒砂で覆われている実験値よりも小さくなったものと考えられる。日本大学と東北大学の共同調査によると 8 月 28 日 19 時 35 分時点での大正橋 (調査対象域から約 10km 上流) 付近の浮遊砂濃度は河道中央の表層で 5.43×10^{-4} であった⁸⁾。この値を用いて式 (11) および (12) から得られた表層での浮遊砂濃度は 6.50×10^{-4} であり、与えた K の値は妥当であったと考えられる。

(2) 運動量拡散係数と m の値

図-12 には m の値を変化させた理論結果も示されている。これによると m の値が増加し拡散係数が大きくなっても堆積量のピークの値は変化せず、ピーク的位置がわずかに高水敷側にずれ、ピークより高水敷側の堆積量が若干増加することがわかる。実測値の精度や粒径分布の影響などを勘案すると実測値より m の値をキャリブレートするのは難しいが、 m の値がほぼ 0.2 から 0.5 の間の値を取ることがわかる。

山崎ら⁹⁾は、平行せん断流における横断方向の運動量拡散係数に関する理論を提案した。また Ikeda ら⁴⁾はその理論から拡散係数を二つの領域の流速差のみで表す実験式を提案している。この式を用いると洪水継続期間中の m の平均値は 0.52 となり、上述の 0.2~0.5 という値にオーダー的に一致することがわかる。

6. 結論

本研究は、高水敷上の土砂堆積について現地調査を行うとともに、理論解析による堆積量の計算を行った。それによって得られた主たる成果は次の通りである。

- 高水敷上での土砂堆積は、低水路から高水敷側に 5 ~ 10m ほど入った帯状の領域において顕著であり、その堆積厚さは数 10cm から 1m 以上に達していることがわかった。
- 高水敷上に堆積していた土砂は粒径が 0.1 mm 内外の細粒土砂であり、その粒径は低水路近傍で大きく堤防側に行くにしたがって小さくなるような分布を有していることが明かとなった。
- 浮遊砂輸送の理論から堆積形状を理論的に導き、高水敷内の低水路近傍で堆積量が最大になるという特徴を再現することができた。また浮遊砂の巻き上げ速度の係数を妥当に見積もることによって堆積量の理論値は実測値に非常に良い一致を示した。この巻き上げ係数を用いて予測される浮遊砂濃度は実測された浮遊砂濃度とよく一致することがわかった。

謝辞： 日本大学長林久夫、東北大学真野明両氏には阿武隈川洪水時における貴重な実測結果を提供していただいた。建設省福島工事事務所には洪水時における水位データ他を提供していただいた。実測に際しては東北大学工学部土木工学科水理系の諸氏より多大な援助を得た。また本研究に対し、文部省科学研究費の補助があった。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田光一, Moody, J. A., 宇多高明, 藤井政人: ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 47-62, 1996.
- 2) 泉 典洋, Gary Parker: 浮遊砂を輸送する礫床河川の平衡横断面形状, 土木学会論文集, No. 565/II-39, pp. 43-55, 1997.
- 3) 渡邊康玄, 新目竜一, 斎藤大作, 玉川 尊: 鶴川 1998 年融雪出水時の物質輸送に関する現地調査, 水工学論文集, 第 43 号, pp.1215-1220, 1999.
- 4) Ikeda, S., Izumi, N. and Ito, R.: Effects of pile dikes on flow retardation and sediment transport, Jour. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1459-1478, 1991.
- 5) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed, 1, The sand-silt river, *J. Fluid Mech.*, Vol. 89(1), pp. 109-125, 1978.
- 6) 池田駿介, 泉 典洋: 浮遊砂の横断方向拡散係数について, 土木学会論文集, No. 434/II-16, pp. 47-55, 1991.
- 7) 泉 典洋, 池田駿介: 直線砂床河川の安定横断面形状, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 57-66, 1991.
- 8) 長林久夫, 真野 明: personal communication, 1998.
- 9) 山崎真一, 石川忠晴, 金丸督司: 開水路平面せん断流に関する実験的研究, 第 39 回土木学会年次講演会, 1984.

(1999. 9. 30 受付)