

細粒土砂堆積による高水敷形成現象を1次元 河床変動計算に組み込んだ河積変化予測手法

A METHOD FOR ESTIMATING SECTIONAL-AREA CHANGE BY DEPOSITION
OF FINE SEDIMENT ON HIGH-WATER CHANNEL WITH 1-D CALCULATION
OF RIVER-BED VARIATION

武内慶了¹・服部敦²・藤田光一³・佐藤慶太⁴

Yoshinori TAKEUCHI, Atsushi HATTORI, Koh-ichi FUJITA and Keita SATO

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(〒305-0804 つくば市旭1番地)

²正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (同上)

³正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 (同上)

⁴正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (研究当時, 同上)

We found that riparian deposits of fine sediment originating from wash load material to cause forming high-water channel and channel narrowing frequently observed in natural-levee reaches can be classified into “longitudinally advection type” and “lateral diffusion type”. By incorporating an essential feature of sediment transport for each type into a conventional 1-D calculation of river-bed variation while retaining its simplicity, we developed a practical method of estimating the change in the longitudinal profile of flood flow capacity due to both river-bed variation and width reduction of a low-water channel. The method well reproduced geomorphic changes observed in the Sendai River, though several problems to be solved for improving the prediction accuracy were acquired.

Key Words : wash load, fine sediment, deposition, vegetation, simplified estimating method

1. はじめに

自然堤防帯に属し、砂礫を河床材料に持つ河道では、低水路河床部をウォッシュロードとして流下する細粒土砂が、水際や切り下げた高水敷上の植生繁茂域に一部捕捉され堆積し、高水敷高の上昇が生じる場合がある¹⁾。こうした高水敷の上昇は比較的速やかに生じ、低水路拡幅後、10年程度で概ね元の高水敷高に復する事例もある^{2), 3)}。これは、細粒土砂の流送量が砂礫に比べはるかに大きい⁴⁾ため、細粒土砂が堆積する条件がひとたび整うと、高水敷の形成が速やかに生じうることを意味している。また木下⁵⁾は、1981年に生じた大出水後の石狩川中・下流区間を対象に現地踏査を実施し、出水中濃度の高いシルト・粘土は高水敷に広く堆積し、水中を浮遊した砂も、水位上昇とともに特に河岸付近に厚く堆積し、自然堤防状の高まりを呈しやすいたことを指摘した。藤田ら²⁾は、同様に形成された高水敷が自然堤防状を呈していたことに加え、高水敷形成機構が元河道の川幅や湾曲度に強く依存せず、河道縦断位置にかかわらず同時進行

的に堆積が進みうることを指摘した。こうした変化が生じる河道に対し、治水機能維持の観点から管理する場合、河道設計時には、必要流下能力に加え細粒土砂の堆積空間としての河積を予め設定しておくことが合理的と考えられる。この際、維持管理労力、すなわち将来生じうる細粒土砂堆積量を精度良く見積もる技術が必要となる。

細粒土砂堆積に伴う高水敷形成の予測法は、これまでに以下の提案がなされた。経験的手法として Moody and Troutman⁶⁾は、土粒子の沈降速度及び水深平均濃度、密度を用い、高水敷への細粒土砂堆積量の予測式を得た。解析的手法として James⁷⁾、Pizzuto⁸⁾、藤田ら²⁾は、低水路から横断方向拡散によって運搬された細粒土砂が、高水敷上に堆積することにより、特に河岸付近に堆積するタイプの高水敷形成現象が説明できることを示した。しかしこれらは本質的機構により現象を説明することどまり、予測技術化には至っていない。大沼ら⁹⁾は、植生によるウォッシュロードの捕捉・堆積効果を組み込んだ平面2次元河床変動解析を行い、予測計算結果に基づく治水・環境両機能の一体的評価を試みた。しかし、この手

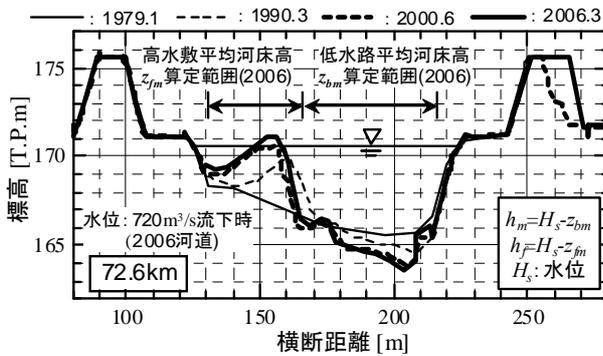


図-1 河岸際凸型の例 (川内川72.6km)

法は未だ研究段階にあること、計算労力が非常に大きく長期間の予測計算には必ずしも適さない現状にある。このように需要 (将来予測に基づく合理的な河道設計) と供給 (実効性のある予測技術) の間に生じるギャップを埋めることが喫緊の課題である。

本研究は、これらの課題を解決すべく、既往の知見及び実態分析から得られる、ウォッシュロードの堆積に関わる本質的機構を失わない範囲で大胆に簡略化し、一連の河道延長に渡る総堆積量を予測するための手法 (以下、本手法) を提案し、この手法の妥当性を検証するものである。なお、簡略化にあたっては、高水敷に堆積する細粒土砂は低水路河床材料とほとんど混じり合わないウォッシュロードとして流下し、河床材料の流送形態・堆積機構とは異なること、また低水路及び高水敷においてそれぞれを構成する土砂の粒径範囲が異なることから、低水路河床変動と高水敷への細粒土砂堆積は切り離してモデル化することができるとの着想を得た。なお、本手法は、河道の一部に細粒土砂を補足する条件、つまり植生が繁茂した後の細粒土砂堆積現象を対象としたものであり、低水路河床材料の流送に伴う陸地部の形成過程については考慮していない。

2. 本手法に組み込む現象とその必要性

(1) 堆積形状のパターンとその発生領域

川内川において、平水時に水面上に現れる低水路の一部に、細粒土砂堆積により形成された高水敷の横断形状を観察したところ、図-1に示すように主に河岸付近に堆積するタイプ (以下、河岸際凸型) と、図-2に示すようにほぼ一様に堆積するタイプ (以下、一様堆積型) に分けられた。次に、堆積が生じた一連区間ごとに、上流端からの流下距離と低水路・高水敷水深比の関係から、各堆積タイプの発生領域を調べた。その方法を以下に示す。堆積タイプは、前回測量年月から当該測量年月にかけての高水敷堆積形状からそれぞれ目視により判断し、河岸侵食等により明確に区別できないものについては分析対象から除外した。低水路水深 h_m 及び高水敷水深 h_f は、前回測量年月から当該測量年月の間に発生した最大流量流下時の水位 H_s を1次元不等流計算により算定し、図-1、

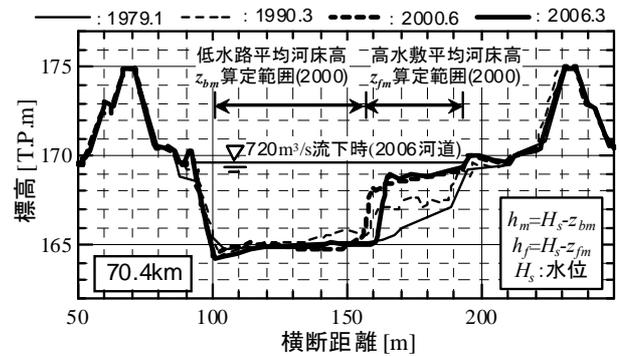


図-2 一様堆積型の例 (川内川70.4km)

図-2に示す低水路及び高水敷の平均河床高 z_{fm} 、 z_{fm} との差分として求めた。上流端からの流下距離 L は、高水敷への堆積が見られた一連区間の上流端から対象断面までの流下距離とした。この方法により、同一断面であっても測量時期ごとの情報が抽出され、比高及び出水規模の違いによる堆積タイプの変化も考慮した図-3が得られた。河岸際凸型と一様堆積型が混在する領域があるものの、堆積パターンの発生領域が区分されることがわかった。 h_f/h_m が同等である場合、 L/h_f の増加に従い一様堆積型から河岸際凸型に変化する。また、 L/h_f が同等である場合、 h_f/h_m の減少に従い一様堆積型から河岸際凸型に変化する。これらの傾向は、形成された高水敷の位置が直線部、湾曲部 (内岸側) によらない。以上より、一連の堆積区間において、堆積形状は上流ほど一様堆積型に、下流ほど河岸際凸型となる。また、低水路・高水敷の比高差が小さい (h_f/h_m が1に近い) ほど、一様堆積型となる領域が縦断方向に増加することがわかった。なお、湾曲部外岸側での細粒土砂堆積は2断面について認められたが、そのうち1断面は河岸侵食が顕著であり、分析に十分な情報が得られなかったため、対象から除外した。

細粒土砂の供給方向に着目し、図-1から図-3に述べた2つの堆積パターンの形成機構について考察を加える。河岸際凸型は、James⁷⁾、Pizzuto⁸⁾及び藤田ら²⁾が得た近似計算結果と良く類似しており、低水路部を浮遊しながら流下する細粒土砂が横断方向に拡散し、高水敷上の植生により捕捉され堆積した結果形成されると考えられる。よってこのタイプを「横断方向拡散型」と定義する。一方、一様堆積型は、横断方向拡散型としては説明できない堆積形状を呈しており、Parker et al.¹⁰⁾が指摘するように、細粒土砂が上流から縦断方向に移流し、植生により捕捉され堆積した結果形成されると考えられる。よってこのタイプを「縦断方向移流型」と定義する。

(2) 低水路・高水敷の比高差が堆積速度に及ぼす影響

細粒土砂堆積部の河床高変化速度は、高水敷上の細粒土砂堆積領域の平均河床高を測量年月が異なる複数の横断測量結果 (期間10年以上) について算出し、その高さの経年変化傾向を直線近似しその傾きの大きさとして算定した。その期間の低水路・高水敷比高差は以下によ

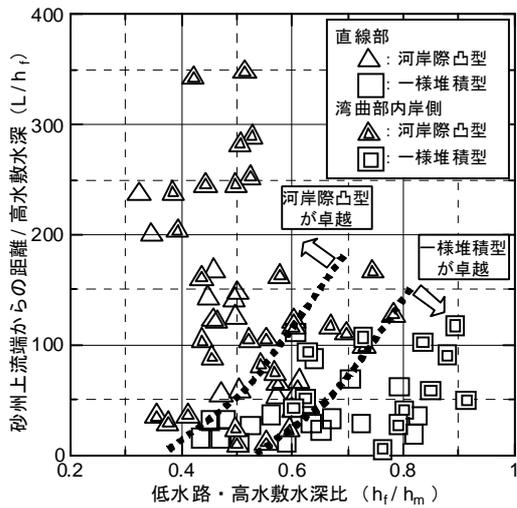


図-3 堆積パターンの発生領域

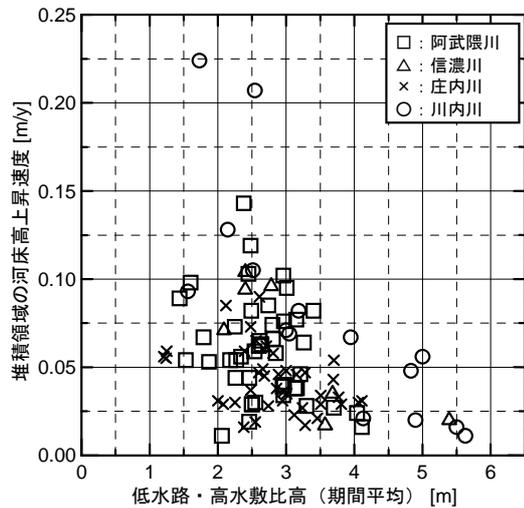


図-4 低水路からの比高と堆積高上昇速度

て算出した。まず、測量年代ごとの低水路平均河床高を算出し、先に算出した細粒土砂堆積領域の平均河床高との差分を取り、比高差を求めた。次に、対象期間平均の比高差を算出した。以上の方法を阿武隈川、信濃川、庄内川、川内川に適用して得た比高差と上昇速度の関係を図-4に示す。ばらつきはあるものの、細粒土砂堆積領域の河床高上昇速度は、低水路河床からの比高が大きいほど小さく、比高が小さいほど大きくなる傾向にある。その傾向は川内川で顕著に見られる。図-1, 2に、川内川の対象区間における平均年最大流量 (720m³/s, 2006年河道) 流下時の1次元不等流計算水位を示しており、中小規模出水であっても、細粒土砂堆積部が冠水しやすかったことが伺える。一方、他の河川では、断面によって低水路幅が大きく異なり、堆積部が冠水する流量規模に明瞭な違いが表れる場合もあった。このことから、分布のばらつきの原因の1つに、同一河川において同等の比高であっても、断面によって冠水する流量規模、つまり冠水頻度が異なることが考えられる。一般に、比高差が大きいと冠水頻度が小さくなり、比高差が小さいと冠水頻度が大きくなることから、細粒土砂堆積領域の河床高上昇速度は、冠水頻度の影響を受けると言える。堆積速度は比高の影響を受ける傾向が見られるため、高水敷の堆積量の予測にあたっては、低水路部の河床高変化についても適切に評価する必要があると考えられる。

3. 予測手法の構築

(1) 本手法の基本構成

2. で述べた機構を組み込み、かつ実効性のある予測手法の基本構成を、以下のように考えた。川内川における低水路河床材料と浮遊砂の粒度分布 (図-5) から、出水時に水中を浮遊し、高水敷に堆積しうる粒径は、低水路部にほとんど含まれていないことがわかる。また藤田ら²⁾は、川内川で形成された高水敷の主な構成材料が細砂・微細砂、シルトであることを示した。このことから、

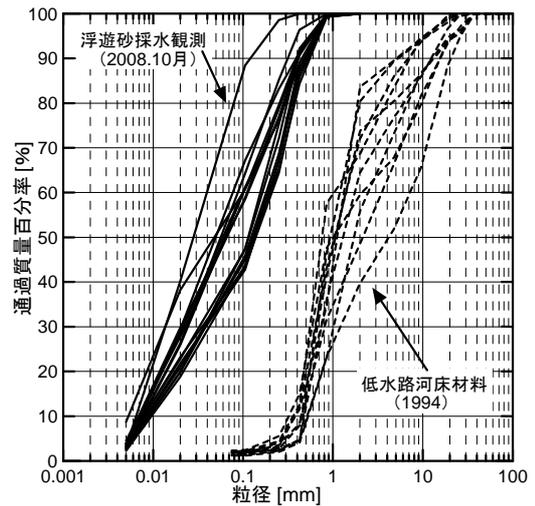


図-5 低水路河床材料と浮遊砂の粒度分布 (川内川)

高水敷に堆積する細粒土砂は低水路河床材料とほとんど混じり合うことなく流下し、低水路河床材料の粒径範囲・流送形態・堆積機構とは異なるため、低水路河床変動と高水敷への細粒土砂堆積を切り離してモデル化できると考えた。まず、低水路部の河床変動は、技術化が進み、現在広く用いられている1次元河床変動計算により考慮した。通常、1次元河床変動計算は低水路部分の河床変動のみを見込み、高水敷の河床変動計算を行わない。高水敷部の河床変動は、(2)及び(3)に詳述するように、水中を浮遊する細粒土砂の高水敷への供給、植生による捕捉・堆積計算により考慮した。

低水路部の1次元河床変動計算と高水敷への細粒土砂堆積計算を組み合わせた本手法の計算方法を以下に示す。1) 予め低水路部と高水敷部の計算範囲を区分する。2) ΔT の期間は独立に計算する。3) ΔT 後に低水路部河床変動量と細粒土砂の堆積横断形状を合成し、2), 3)を繰り返す。本手法を構成する2つの計算間で受け渡す情報は、低水路河床変動量と細粒土砂堆積に伴い変化する高水敷の横断形状である。水位計算は個別に行っているが、両計算で水位～流量関係が概ね同等となるように設定した。

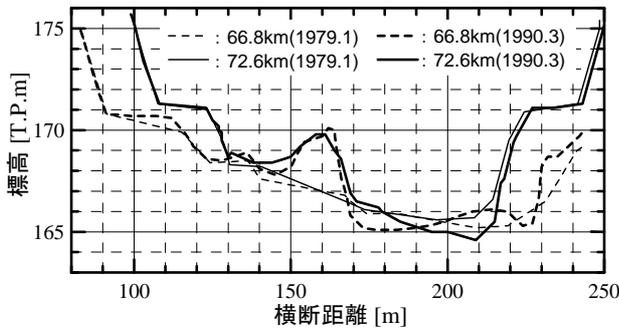


図-6 川内川66.8kmと72.6kmの横断面図の重ね合せ

また、河道は河床材料の粒径に見合う摩擦速度（平均年最大流量流下時）となるよう川幅（低水路幅）を調整することが知られている¹¹⁾。本手法では河道掘削・低水路拡幅後も元の川幅に戻るものと捉えることにより、細粒土砂堆積範囲を予め設定できると考えた。高水敷への細粒土砂堆積計算にあたり、一連の堆積区間における対象断面の縦断位置を踏まえ、予め堆積タイプを横断方向拡散型、縦断方向移流型のいずれかに設定し計算を行った。

(2) 細粒土砂の流送・堆積計算（横断方向拡散型）

藤田ら²⁾は、パウダー川（米国モンタナ州、ワイオミング州）の36km離れた2つの横断面について、同じ時期における、横断方向拡散型で形成された堆積部分の横断形状が同じで、縮小後の低水路幅に大きな差がないことを示した。また、水理検討により、これは細粒土砂堆積による高水敷形成機構が元河道の川幅や湾曲度に強く依存せず、両断面に共通する条件である流量、供給土砂、植生に強く依存していることを示した。図-6に示すとおり、川内川においても、縮小後の低水路幅に10m程度の差が見られるものの、約6km離れた2つの断面で同様の現象が見られた。但し、重ね合せに関しては、新しく形成された河岸の位置をほぼ一致させている。これより、横断方向拡散型は、ウォッシュロードとしての細粒土砂の縦断的な伝播速度は、掃流砂のそれに比べ圧倒的に大きく、また、低水路部の細粒土砂流量は上流側の影響を受けにくいと考えられる。よって、ウォッシュロードとして流送される細粒土砂堆積現象は、植生繁茂域が形成されれば、縦断位置に係わらずその地点の比高や土砂供給の元となる低水路部の濃度に応じた堆積が生じると近似的に取り扱うこととした。

基礎方程式を示す。流れの基礎式として、主流速横断分布、河床勾配、湾曲度が縦断的に等しいとする擬似等流を仮定し、浅水流近似した直交曲線座標系（ s - n 座標系）の水深、運動方程式、連続式を(1)～(3)式に示すように表し、河道横断方向の変化のみを考慮した。

$$h = h_0 + \frac{\bar{u}^2}{gr} n - \eta \quad (1)$$

$$\frac{r_0}{r} g I_b - \frac{gn_b \bar{u}^2}{h^{4/3}} + \frac{1}{h} \frac{d}{dn} \left(h \varepsilon_h \frac{d\bar{u}}{dn} \right) = 0 \quad (2)$$

$$Q = \int h \bar{u} dn \quad (3)$$

ここで、 h :水深、 h_0 :平均水深、 \bar{u} : s (主流)方向水深平均流速、 n : n (横断)方向、 g :重力加速度、 r :曲率半径、 η :平均河床高からの変動量、 r_0 :河道中央の曲率半径、 I_b :エネルギー勾配、 n_b :粗度係数、 ε_h :水平方向の渦動粘性係数、 Q :流量である。なお、 ε_h については池田・泉¹²⁾を参考に $\varepsilon_h = 0.23 u_* h$ とした。

次に、横断方向拡散型に用いる細粒土砂堆積に関する基礎式を示す。流れの基礎式と同様に、縦断方向に擬似等流を仮定し、湾曲流れで発生する2次流の影響による横断方向移流を考慮した河道横断方向の浮遊砂濃度に関する拡散方程式を(4)式に、流砂の連続式を(5)式に示す。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \int_{-h}^0 (vc) dz + \frac{d}{dn} \left\{ \int_{-h}^0 (vc) dz \right\} - v_b c_b \frac{dh}{dn} \\ & = \varepsilon_h \frac{d^2(\bar{c}h)}{dn^2} + \frac{d\varepsilon_h}{dn} \frac{d(\bar{c}h)}{dn} - \varepsilon_h \frac{dh}{dn} \frac{dc_b}{dn} \\ & - c_b \left(\frac{dh}{dn} \frac{d\varepsilon_h}{dn} + \varepsilon_h \frac{d^2h}{dn^2} \right) + (q_{su} - w_0 c_b) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dz_b}{dt} = \frac{-1}{1-\lambda} (q_{su} - w_0 c_b) \quad (5)$$

ここに、 v : n 方向流速、 c :浮遊砂濃度、 z :鉛直方向、 v_b : n 方向底面流速、 c_b :河床底面の浮遊砂濃度、 \bar{c} :水深平均浮遊砂濃度、 q_{su} :河床からの巻上げ量、 w_0 :浮遊砂の沈降速度である。なお、同一の水理量や濃度であっても、粒径によって c_b 、 q_{su} が変化し、堆積形状が異なりうるため、細粒土砂の粒度分布を考慮する必要があると考えられるが、本手法の全体的な考え方の妥当性を検証することが目的であるため、一様粒径として取り扱った。

浮遊砂濃度の横断分布は以下のように求めた。細粒土砂の低水路からの拡散による供給を再現するため、境界条件として植生域近傍の低水路部に濃度 \bar{c} を与え(4)式により c_b を求めた。湾曲部において生じる横断方向流速の鉛直分布は、池田¹³⁾による一様湾曲水路を仮定した横断方向流速式を与えた。浮遊砂濃度の鉛直分布、 \bar{c} 、 q_{su} はLane-Kalinske式¹⁴⁾で表し、 w_0 はRubey式¹⁵⁾により求めた。得られた q_{su} 、 w_0 、 c_b を用い、(5)式により細粒土砂堆積高を求めた。また、供給濃度は流量に比例し $\bar{c} = \alpha Q$ の関係が成立すると仮定した。このような境界条件の与え方としたのは、高水敷植生域に供給される細粒土砂の濃度は、高水敷植生域に最も近い低水路部の濃度によって決まるものであり、また低水路部は流下断面の中でも流速が大きい領域であることから、浮遊する細粒土砂が良く混ざり合い、低水路内での濃度がほぼ一様と見なせると考えたからである。植生域においては、植生密度が空間的に一様となりにくいこと、堆積した細粒土砂の再浮上を総合的に考慮し、大沼ら⁹⁾の設定方法に従い(4)、(5)式ともに $(q_{su} - w_0 c_b)$ を $(-\sigma w_0 c_b)$ に置き換え、 $\sigma = 1/3$ とした。また、植生域（細粒土砂堆積域）以外では細粒土砂が堆積しないものとし、河床からの巻上げ量を沈降量と等しくすることにより、実質の堆積量を0とした。

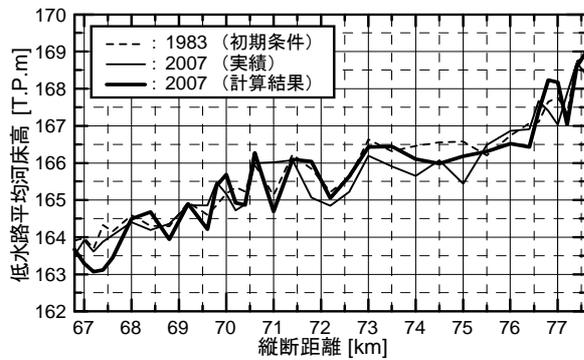


図-7 低水路平均河床高の縦断分布 (川内川)

(3) 細粒土砂の流送・堆積計算 (縦断方向移流型)

縦断方向移流型は、細粒土砂が縦断方向に流送されるため、低水路部から供給された細粒土砂の、一連の堆積区間上流側での捕捉に伴う濃度低減を見込む必要がある。つまり局所的ではあるが、対象地点への細粒土砂流量は上流区間の影響を受け、これが横断方向拡散型と異なる特徴である。本計算では、対象横断面への細粒土砂供給の濃度及び範囲を適切に与えることにより、横断形状変化を近似的に計算できると考えた。

計算の方法を示す。流れの基礎式は横断方向拡散型と同様に解いた。細粒土砂の対象断面上流側での捕捉に伴う濃度低減を考慮し、(4)式を用いず植生域のみに細粒土砂の一樣濃度 \bar{c} を与え、鉛直方向にLane-Kalinske分布を仮定した濃度分布から c_b を求めた。(5)式により細粒土砂堆積量を求めた。

4. 実河川の河道横断形状変化の再現計算

本手法を川内川66.8~77.2km区間(25断面)に適用し、1983年から2007年までに生じた河道変化の再現を試みた。この区間の主な河床材料は砂礫であり(図-5)、河床勾配は約1/1,760である。流量はこの期間に生じた実績値を与え、低水路及び高水敷それぞれの河床変動を合成する期間 ΔT を1年とした。細粒土砂の粒径及び供給濃度は以下のように設定した。1)複数回分の採水観測から得られた浮遊砂の粒度分布を平均化した。2)実際に高水敷に堆積していた主な粒径が細砂からシルトであることを確認し、堆積材料の最大粒径以下で1)の粒度分布を再構成した。3)観測結果から、前述の濃度に関する係数 α の幅を定め、計算により再現性の高い細粒土砂粒径と供給濃度の組み合わせを調べた。この結果、低水路部の細粒土砂濃度を $\bar{c} = 6.5 \times 10^{-7} \cdot Q$ 、細粒土砂粒径を0.08mmと設定した。植生域に捕捉され堆積する細粒土砂量は、低水路部を流送する総量のごく一部であり、対象とする約10km区間において流下距離増大に伴う低水路部の細粒土砂濃度低減は少ないと考え、縦断的に一樣な濃度式を与えた。

再現計算結果を示す。まず、1次元河床変動計算による低水路平均河床高変動量の再現性を図-7により確認した。必ずしも高い再現性を有してはいないことがわかる。

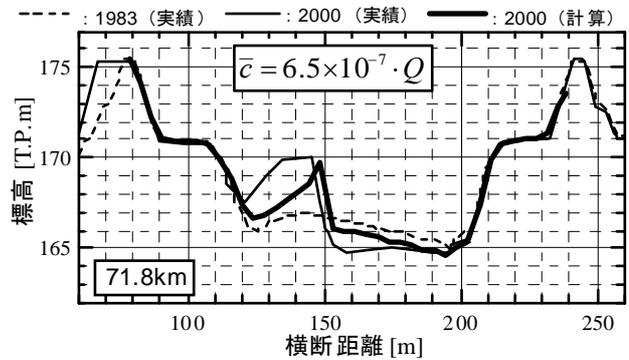


図-8 再現計算結果 (川内川71.8km, 横断方向拡散型)

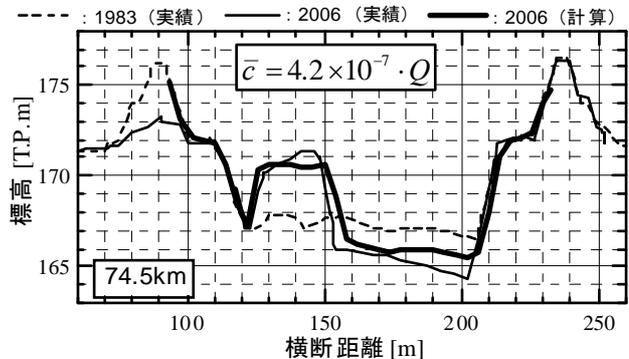


図-9 再現計算結果 (川内川74.5km, 縦断方向移流型)

この要因として、対象区間内に軟岩が露出している箇所が見られること(本計算では74.5kmのみ軟岩の露出を考慮した)、対象区間上流側に位置する可動堰の通過土砂量を適切に与えられていない可能性があること、対象区間直下流側の支川合流に伴う水位上昇を見込んでいないことなどが考えられる。次に横断形状変化の再現計算結果例を図-8, 9に示す。いずれの断面も低水路部の河床低下傾向を良く再現できている。横断方向拡散型として計算した71.8km断面(図-8)では、細粒土砂堆積領域において、河岸部では堆積形状及びその高さを再現できているものの、河岸部の裏側における堆積量は再現できていない。縦断方向移流型として計算した74.5km(図-9)では、細粒土砂堆積領域における堆積形状及び量が良く表現されている。計算対象とした全ての断面を対象とし、細粒土砂堆積量を河積に代表させ、計算結果と実際の変化を比較し、図-10に示す。縦断方向移流型での計算結果は、実態を良く再現できているが、横断方向拡散型での計算結果は一定の再現性はあるものの、全体的に実際の堆積量を下回る傾向にあり、計算された横断形状の特徴は図-8と同様の傾向を示した。計算結果では、河岸部裏側の堆積部斜面の横断勾配が40度程度と大きくなっている。このことから、堆積部の横断形状が水中安息角など一定の角度以下で安定する効果が組み込まれていないこと、さらには図-8, 9からも推測されるように、横断方向拡散型、縦断方向移流型が混在していると考えられ、本手法ではいずれかの堆積タイプのみを取扱う計算となっていることが図-8, 10の要因であると考えられる。

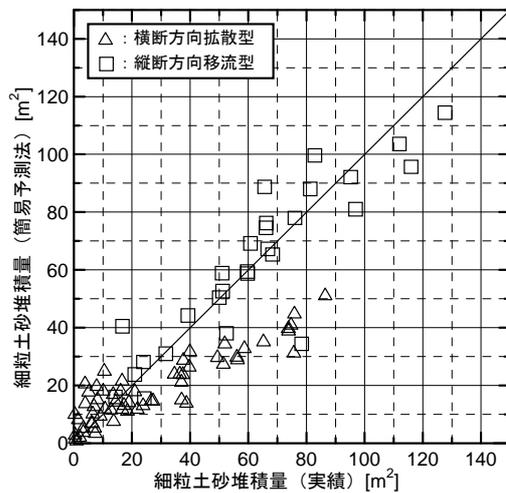


図-10 細粒土砂堆積量の再現性

次に、低水路部の河床変動を見込んだことによる効果を調べる。前述の計算条件を基本とし、低水路部の河床変動量を0とした場合の計算を実施した。この結果を前述の計算結果と比較し、細粒土砂堆積量の違いを調べた(図-11)。低水路河床が低下傾向にある断面では、低水路河床変動を見込まない場合に比べ細粒土砂堆積量が小さくなり、また低水路河床が上昇傾向にある断面では細粒土砂堆積量が大きくなる傾向が明瞭に見られた。この計算条件では、堆積量のずれが20%以上となる断面もあった。本研究では、低水路部の河床変動の再現性が必ずしも高いとは言えない結果が得られたが、例えば人為的な河積増大に伴い低水路に働く掃流力が縦断的に変化する場合においては、低水路部の河床変動を考慮した予測計算を行うことが重要であると考えられる。

5. まとめ

得られた知見を以下に示す。1) 細粒土砂が堆積する一連区間では、上流ほど一様堆積型が、下流ほど河岸際凸型が卓越する。2) 低水路・高水敷の比高差が小さい、また流量規模が大きいほど、一様堆積型が卓越する縦断区間が増大する。3) 低水路からの比高が小さい高水敷ほど、細粒土砂堆積部の河床高上昇速度が大きい。4) 1)~3)で得られた基本的特性を組み込み、1次元河床変動計算に組み込んだ予測手法を開発した。5) 縦断方向移流型及び横断方向拡散型の混在領域の取扱いや、安息角に基づく堆積土砂の再配分方法などの課題は残るものの、得られた手法を用いることにより、河道設計時に維持管理労力の最適化を図る見通しを得た。

謝辞: 本研究の実施にあたり、国土交通省東北、北陸、中部、九州地方整備局より貴重な調査データを提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 河道特性に関する研究-その3-河床変動と河道計画に関する

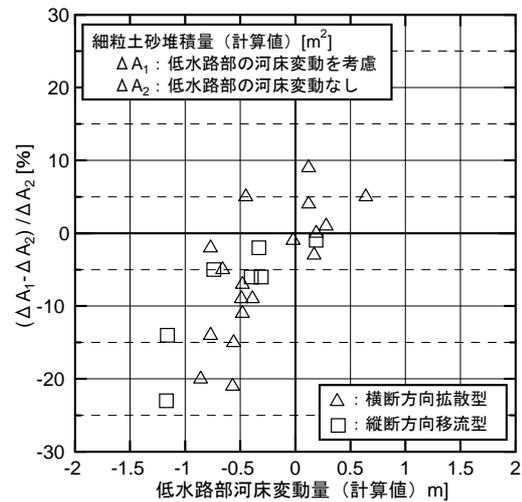


図-11 低水路河床変動が細粒土砂堆積量に及ぼす影響

- 研究, 第46回建設省技術研究発表会報告, pp. 600-651, 1992.
- 2) 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.
 - 3) 武内慶了・大沼克弘・佐藤慶太・服部敦・藤田光一: 河道セグメント2における細粒土砂堆積に伴う高水敷再形成の簡易予測手法の開発, 土木技術資料, Vol. 52, No. 7, pp. 26-29, 2010.
 - 4) 藤田光一: 流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望, 2000年度(第36回) 水工学に関する夏期研修会, pp. B-4-1~4-15, 2000.
 - 5) 木下良作: 航空写真による洪水流解析の現状と課題, 土木学会論文集, 第345号/II-1, pp. 1-19, 1984.
 - 6) Moody, J. A. and Troutman, B. M. : Quantitative model of the growth of floodplains by vertical accretion, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, pp. 115-133, 2000.
 - 7) James, C. S. : Sediment transfer to overbank sections, *J. of Hydraulic Research*, Vol. 23, No. 5, pp. 435-452, 1985.
 - 8) Pizzuto, J. E. : Sediment diffusion during overbank flows, *Sedimentology*, Vol. 34, pp. 301-317, 1987.
 - 9) 大沼克弘・藤田光一・佐藤泰夫・西本直史・松木洋忠・井上優: セグメント2河道を対象とした河道掘削後の河道変化予測に基づく治水・環境機能の一体的評価に向けた試み, 河川技術論文集, 第13巻, pp. 375-380, 2007.
 - 10) Parker, G., Cui, Y., Imran, J. and Dietrich, W. E. : Flooding in the lower Ok Tedi, Papua New Guinea due to the disposal of mine tailings and its amelioration, *International Seminar on Recent Trends of Floods and Their Preventive Measures, Sapporo, Japan*, pp. 21-48, 1996.
 - 11) 山本晃一: 沖積河川-構造と動態-, 技報堂出版, p. 334, 2010.
 - 12) 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.
 - 13) 池田駿介: 移動床河川の弯曲部における二次流と動的横断平衡河床について, 土木学会論文報告集, No. 229, pp. 55-65, 1974.
 - 14) Lane, E. W. and Kalinske, A. A. : Engineering calculations of suspended sediment, *Trans. AGU*, Vol. 22, pp. 603-607, 1941.
 - 15) Rubey, W. W. : Settling velocities of gravels, sand and silt particles, *American J. of Science*, Vol. 25, pp. 325-338, 1933.

(2011. 5. 19受付)