

洪水時における浮遊物質の横断面内輸送と 河岸堆積微細砂の堆積状況

LATERAL DIFFUSION OF SUSPENDED SOLIDS AND SCOURING AND
DEPOSITION OF FINE SAND ON THE FLOODPLAIN DURING FLOODS

渡邊康玄¹・長谷川和義²・橋本識秀³

Yasuharu WATANABE, Kazuyoshi HASEGAWA and Norihide HASHIMOTO

¹正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目)

The concentration of suspended solids was measured at the Mukawa Bridge located 2.6km upstream of the Mukawa River mouth, and at the Hobetsu Bridge located 40.7km upstream of the river mouth. The lateral diffusion of suspended solids was measured by comparing the concentration of suspended solid at the center of river course and shores. Suspended solids are transported toward the center from the shore in the early flood stage and afterward move to the shore from the center. Observations of sediments on the floodplain were conducted before and after flood at the Mukawa River to understand the relationship between suspended solids and sediment on the floodplain. The scouring of the sediment on the floodplain and the deposition of the particles, which have the same size as suspended solids on the floodplain, was verified. From these investigations, it is shown that suspended solids and the sediment are interchanged during floods.

Key Words : Field observation, Lateral diffusion, Fine sand, Suspended solid, Mukawa river

1. はじめに

海岸浸食や河床低下あるいはダム堆砂の問題等、河川における土砂輸送の変化が社会的な問題として取り上げられ、土砂の供給源としての流域から河道を経て海域までの流域一貫した土砂管理の必要性が指摘されてきている。しかし、河道内における土砂輸送の機構はいまだ十分把握されておらず、どのような性質の土砂がどの程度の量海域まで到達しているか、あるいは河道内でどのような動きをしているかは不明である。

一方、近年河川環境保全の重要性が指摘されており、藤田ら¹⁾が高水敷形成にウォッシュロードの堆積と植物繁茂が寄与していることを指摘しているように、生態系の基盤を形成する河道形態の変化や形成過程の把握のためにも、土砂の輸送形態について解明されなければならない。さらに、1998年の鶴川における融雪出水時の観測において、洪水時の窒素・リンの輸送は砂粒子に吸着された形態で移動しており、河岸堆積物と洪水時の浮遊物質とが極めて強い関係にあることが指摘されている²⁾。このように、洪水時の微細な砂粒子の挙動解明は河川環

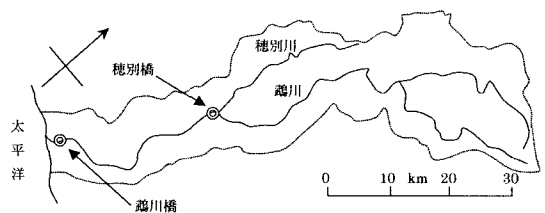


図 - 1 浮遊物質観測地点

境を考えていく上でも極めて重要な事項であるといえる。泉ら³⁾は、礫床河道における細砂の堆積による地形形成メカニズムの理論的解明を試みているが、堆積位置等についての解明を必要としている。

一般に0.1mm以下の粒径の浮遊物質は、ウォッシュロードと呼ばれ河床と交換せず流下するものとして浮遊砂と区別されて扱われている。しかし、水位のピークに先行してその濃度のピークが現れることから、河床剪断力との関係も考慮されるべき可能性が存在している。本研究は、洪水時の流水中の浮遊物質濃度変化から、浮遊物質の横断方向の挙動について検討を行うとともに、洪水前後に実施した堆積物調査を基に浮遊物質と河岸堆積物との関係について報告するものである。

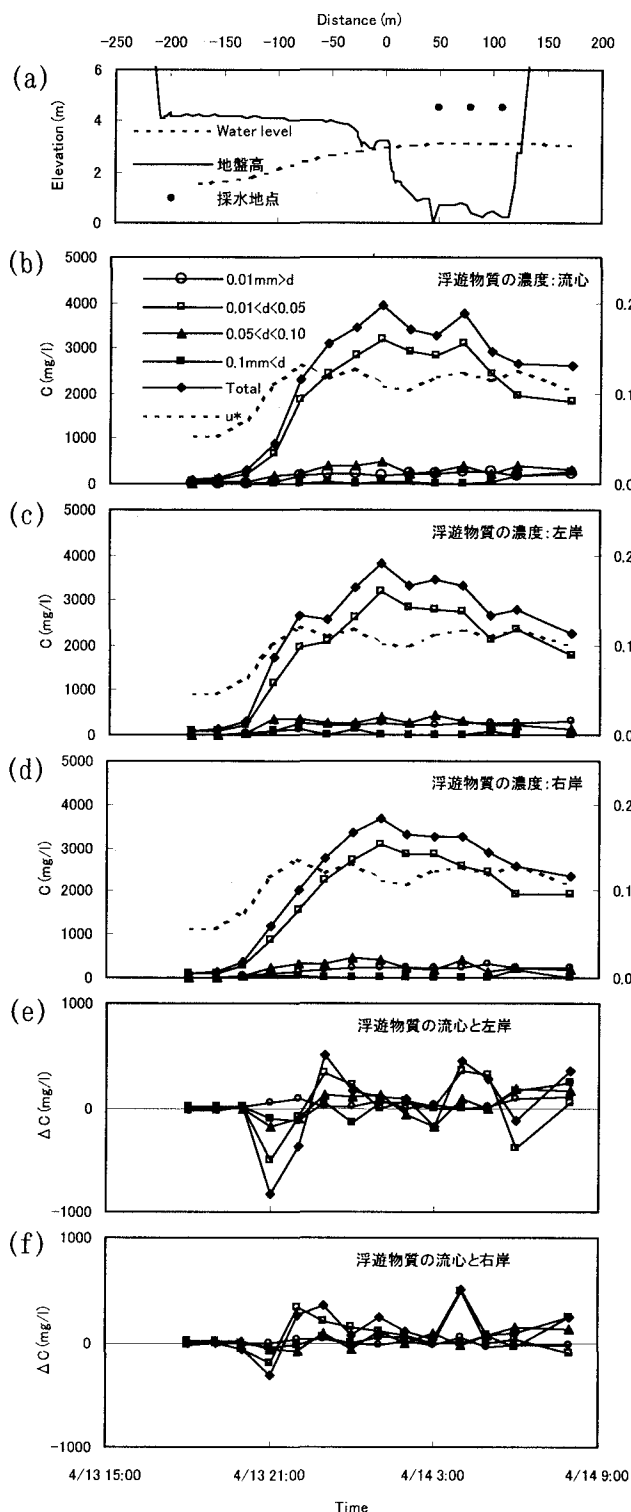


図-2 鵜川橋浮遊物質観測結果

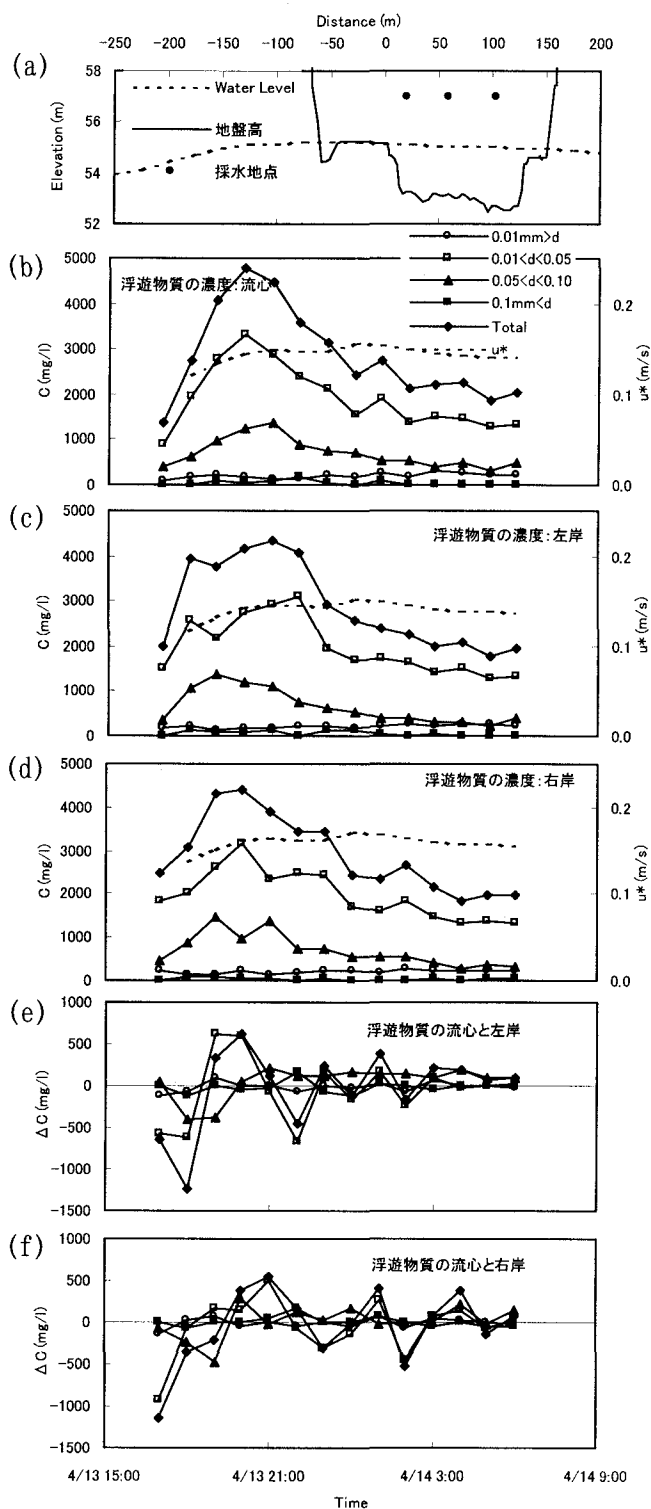


図-3 穂別橋浮遊物質観測結果

2. 融雪時の浮遊物質観測

(1) 浮遊物質SSの観測概要

北海道中部に位置する鵜川において、1998年4月13日に生じた融雪出水時に、河口から2.6km地点に位置する鵜川橋および河口から40.7km地点に位置する穂別橋において、採水による浮遊物質観測を実施した。図-1に鵜川橋および穂別橋の概略位置を示す。なお、両観測地点の間には大きな支川の流入は無い。各観測地点では、

流心および左右岸近傍の3地点で採水を行った。採水は、橋上からバケツで表面の流水を対象に行われた。採水時刻は、鵜川橋では水位上昇直前の13日18時からほぼ1時間毎に14日8時まで計14回、穂別橋では水位上昇直後の13日17時からほぼ1時間毎に14日6時まで計14回である。断面形状、採水位置および観測水位を鵜川橋と穂別橋についてそれぞれ図-2(a)および図-3(a)に示した。なお、観測対象の融雪出水は、図からもわかるように、ピーク水位が低水路満杯程度の規模であった。

(2) 浮遊物質の観測結果

浮遊物質濃度の観測結果を、鷺川橋について図-2、穂別橋について図-3にそれぞれ示した。各図の(b)は流心、(c)は左岸、(d)は右岸の浮遊物質濃度 C の時間変化を示したものである。浮遊物質のピーク濃度は、上流である穂別橋の方が下流に位置する鷺川橋に比較してやや大きい値を示しているが、高濃度の継続時間は鷺川橋の方が長くなっている。浮遊物質濃度の時間変化の特徴として、両観測地点とも水位ピーク前に濃度のピークが生起しており、水位ピーク時には濃度が既に低下していることが挙げられる。また、両観測箇所ともに、浮遊物質の大半が粒径 $0.01\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$ の粒子である。穂別橋では、その他に粒径 $0.05\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$ の粒子が比較的多く含まれている。このことは、穂別橋の摩擦速度が鷺川橋のものに比べ若干大きいことに由来すると考えられる。なお、観測された浮遊物質は表面採水によるものであり、水深方向の濃度分布や粒径分布の変化については、今後の課題となっている。

(3) 浮遊物質の横断方向拡散

図-2(e),(f)および図-3(e),(f)は、それぞれ鷺川橋および穂別橋における浮遊物質の流心での濃度と左右岸での濃度の差 ΔC を時系列的に示したものである。なお、 ΔC は、流心の濃度が左右岸の濃度に比較して高い場合に値が正となる。鷺川橋の場合、水位上昇極初期には流心と左右岸の濃度に差が認められないが、水位上昇とともに左右岸の濃度が流心に比較して大きくなり、水位上昇速度が低下すると、逆に流心の濃度の方が高くなっている。また、水位ピーク生起時には、流心と左右岸の濃度差が顕著でなくなる傾向を示した。一方、穂別橋は水位が上昇し始めしばらくしてからの観測開始であったため、鷺川橋で見られた水位上昇極初期の流心と左右岸の濃度に差が認められない期間が存在せず、観測開始時には既に左右岸の濃度が流心に比較して高い状態であった。しかし、流心と左右岸の濃度差の傾向は概ね鷺川橋で観測された傾向と同じである。

左右岸と流心の浮遊物質の濃度差が確認されたことから、洪水時の浮遊物質の横断方向拡散現象として、洪水立ち上がり初期に浮遊物質が岸側から流心に向かいその後流心から岸側に向かって移動していることが想定される。浮遊物質を構成する粒径の変化とも考えあわせると、洪水初期に河岸から $0.01\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$ の砂粒子が供給され、流心に向かって移動し、その後河岸方向に向きを変えているとも考えられる。

長谷川ら⁴⁾は、等流を仮定し式(1)で示されるように河床面における砂粒子のまきあげ量 q_{su} に横断方向拡散の河床斜面効果を取り入れて式(2)で表される横断方向のフラックス J_y を求めている。

$$q_{su} = \varepsilon_{sy} \frac{\partial C(z)}{\partial y} \bigg|_{z=\zeta} - \varepsilon_{sz} \frac{\partial C(z)}{\partial z} \bigg|_{z=\zeta} \quad (1)$$

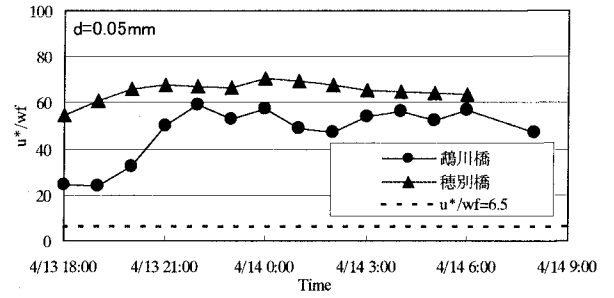


図-4 鷺川橋および穂別橋における u_*/w_f の変化

$$J_y = -\varepsilon_{sy} \left(\frac{\partial}{\partial y} \int_{\zeta}^{\zeta+h} C(z) dz + C(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ここで、 ε_{sy} ：横断方向の拡散係数、 ε_{sz} ：水深方向の拡散係数、 $C(z)$ ：高さ z における浮遊砂濃度、 $C(\zeta)$ ：基準面高さ ζ における浮遊砂濃度、 ζ ：河床高、 y ：横断方向位置、 h ：水深である。流路中央での式(2)の値を具体的に求めるため、浮遊砂の濃度分布、基準面濃度、横断方向および水深方向の拡散係数に、式(3)～(6)を用いている。

$$C(z) = C(\zeta) \exp \left\{ -\int_{\zeta}^z \frac{w_f}{\varepsilon_{sz}} dz \right\} \quad (3)$$

$$C(\zeta) = \alpha \left(\frac{u_*}{w_f} \right)^{\beta} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{sy} = 2\varepsilon_{sz} \quad (5) \quad \varepsilon_{sz} = \frac{u_* h_0}{\gamma} \quad (6)$$

ここで、 w_f ：砂粒子の沈降速度、 u_* ：摩擦速度、 α, β, γ ：定数、添え時 $_0$ ：流路中央での値を示す。その結果、河岸部と流路中央部境界付近での横断方向のフラックスの向きを式(7)として導いている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_{*0}}{w_f} &> \frac{2\gamma}{\beta} & : \text{流心から河岸方向} \\ \frac{u_{*0}}{w_f} &< \frac{2\gamma}{\beta} & : \text{河岸から流心方向} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、実験室規模の実験で通常用いられる $\beta = 4$ 、 $\gamma = 13$ を式(7)に代入して閾値を6.5としている。

この結果と比較するため、浮遊物質の粒径を 0.05mm と設定して沈降速度を、鷺川橋および穂別橋における流心での摩擦速度をそれぞれ求め、図化したものが図-4である。図-2(e),(f)および図-3(e),(f)と併せて考えると、浮遊物質の移動方向の閾値は、50～60程度と判断される。この値は、前述の6.5と比較して1オーダー大きな値となっているが、6.5という値が不確定要素のある横断方向の拡散係数の定数に由来するものであり、かつ横断形状や浮遊物質の不均一さおよび流れの非定常性等の効果も存在すると考えられることから、これらのことを今後考慮する必要があると考えられる。

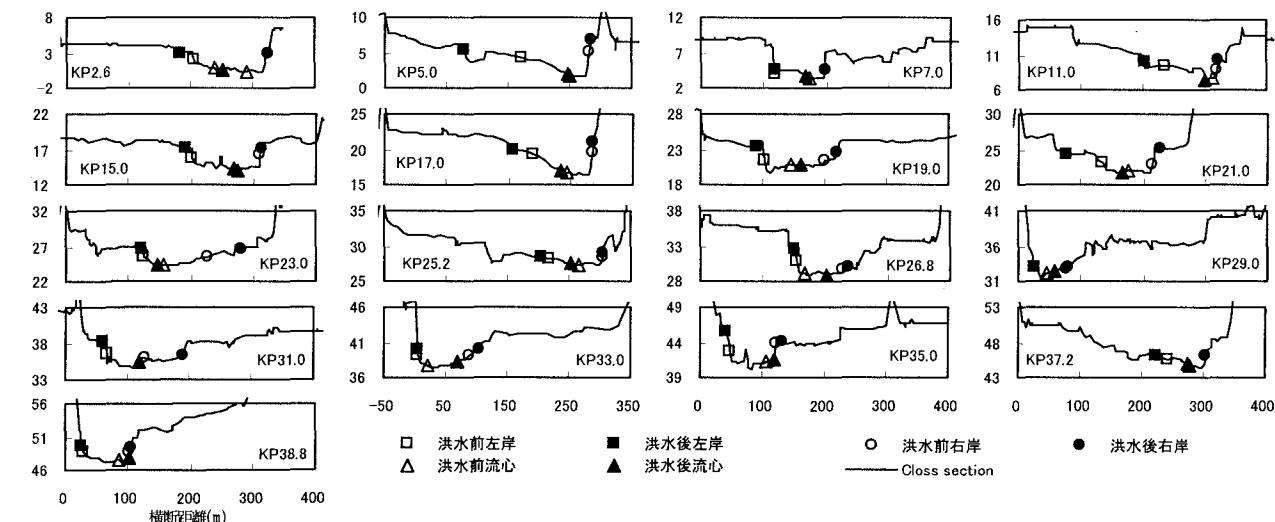


図 - 5 河岸堆積物および河床材料縦断調査位置図

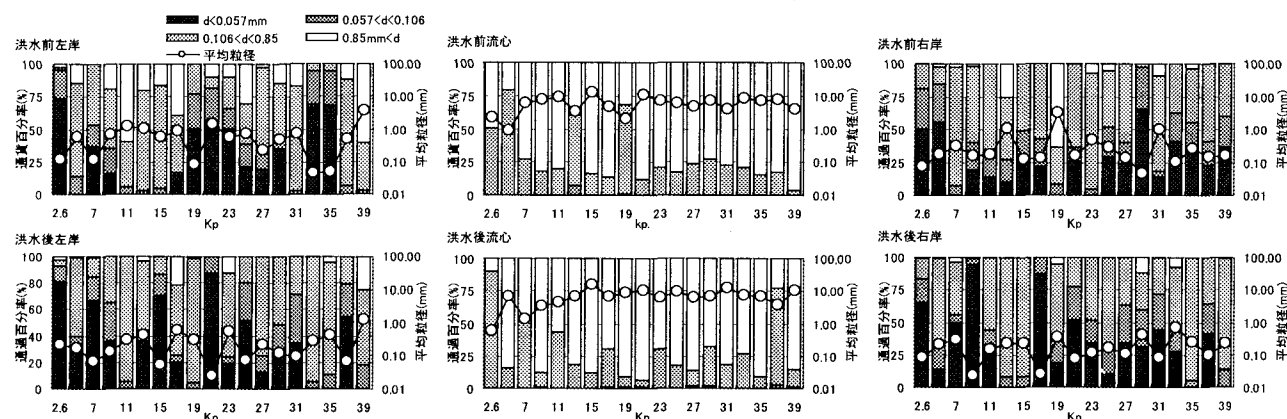


図 - 6 河岸堆積物および河床材料縦断調査結果

また、今回対象としている浮遊物質は、粒径が0.1mm以下であり、式(4)が粒径0.05mm程度の細かい粒子に適用することが妥当であるかという問題もある。閾値に関して今後の課題となるとともに、微粒子の濃度に関しては、浮遊物質の挙動を把握する上で基礎的事項であることから早急な解明が必要である。

3. 河岸堆積物調査

河岸における土砂が浮遊物質として流れに供給されていることが示唆されたことから、河岸に堆積している微細砂に着目して調査を実施することとした。

(1) 河岸堆積物の縦断分布

河岸堆積物の構成材料について、縦断的な変化を把握するため、1998年8月洪水生起直前の8月26,27日と洪水直後の9月7,9,10日に鵜川橋から穂別橋にかけての約40kmについて概ね2km毎計17断面について、左右岸の堆積物の構成材料を採取し粒度分析を行った。比較のため、同一断面における河床材料についても採取分析を行った。左右岸における土砂の採取は堆積物のみとし、表層の土砂を採取するようにした。1998年8月洪水は既往第3位の大規模な洪水であり鵜川橋地点の水位が4.81mに達し、4

月の融雪出水に比べ土砂の動態に関して現象がより顕著に生じたものと考えられる。調査日の水位の関係上、河岸における採砂が洪水前後で全く同一の個所での調査はできなかったが、堆積物の性状の違いは確認できるよう前後での採砂の仕方は同一になるよう努めた。8月洪水前後の採取位置および分析結果を、それぞれ図-5、6に示した。平均粒径は、洪水前後で左右岸において小さくなる傾向が認められるがオーダーが変化するような変化は無く、左右岸は0.1~1.0mm程度であり、河床材料は1オーダー大きい1.0~10mm程度となっている。粒度構成に着目すると、左右岸の堆積物において、鵜川における浮遊物質の粒径である0.05mm以下の粒径の割合が30%程度占めていることがわかる。一方、河床材料には、0.1mm以下の粒径のものはほとんど存在しない。このことから、浮遊物質と堆積物との強い関係がうかがえる。

このように、同一断面においても河岸近傍と常時水没している河床では粒径分布が大きく異なっていることから、浮遊物質の横断方向の拡散現象を検討する場合には、長谷川ら⁵⁾が指摘したように、対象となる粒子の存在割合 P_i の横断方向 y に関する変化 dP_i/dy 等を考慮する必要があると考えられる。

なお、平均粒径および粒度構成ともばらつきがあるが、縦断的に系統的な変化は見られない。また、粒径の大き

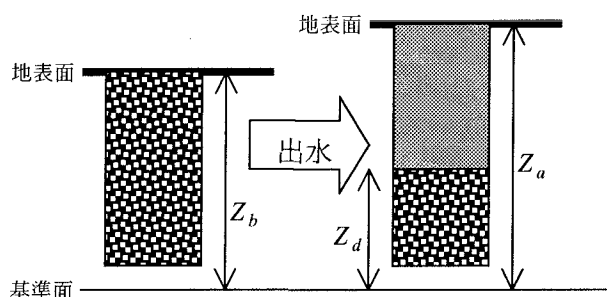


図-7 洗掘堆積調査模式図

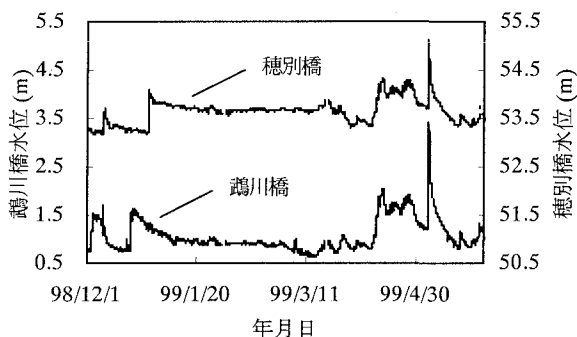


図-8 鵜川橋および穂別橋における水位

さと採取位置の状況とを比較したが、河道湾曲の内外岸別、砂州の有無等との関係は見られなかった⁶⁾。

(2) 河岸堆積物の洪水時における洗掘・堆積

次に、河岸堆積物の流れへの供給および浮遊物質の堆積がどの程度であるかを把握するため、以下の方法で洪水時の洗掘・堆積量を、鵜川橋から穂別橋の間概ね10km毎にKp.2.5、11.0、23.4、33.8、40.7の計5断面の左岸側について、通常時は冠水せず、出水時のみ冠水する各断面3地点づつ計測することとした。3地点のうち、高水敷側をL1、低水路側をL3、中央をL2としている。

- 1) 調査対象地点において、直径50cm程度の大きさで、目視で堆積物の粒径が異なると判断される層毎に合計の層厚が50cm程度になるよう堆積物を取り分ける。なお、このとき各層の厚さを測定しておく。
- 2) 調査対象地点極近傍の堆積物を用い、粒度分析を行う。
- 3) 取り分けた各層毎に細かく切った荷造り用テープを混ぜる。
- 4) 堆積物の層の順番が元に戻るよう、荷造り用テープを混ぜた堆積物を元に戻す。
- 5) 調査地点の標高(Z_b)を測定する。
- 6) 出水後、調査地点の標高(Z_a)を測定するとともに、最も上に位置する荷造り用テープを含んだ層の表面の標高(Z_d)を測定する。
- 7) 荷造り用テープを含まない出水後に堆積したと判断される堆積物について、目視で堆積物の粒径の異なると判断される層毎に厚さを測定するとともに、粒度分析を実施する。

図-7に示す堆積物の洗掘・堆積についての模式図のように、洪水時の洗掘厚は($Z_b - Z_d$)、洪水時の堆積厚は($Z_a - Z_d$)でそれぞれ求められる。

対象洪水を1999年の融雪出水としているため、出水前の調査を1998年12月に、融雪出水後の調査を1999年6月2日に行った。その期間の鵜川橋および穂別橋における水位の変化を図-8に示す。12月下旬から1月上旬にかけての水位の上昇は結氷のためである。水位観測断面2箇所(鵜川橋; 2.5km、穂別橋; 40.7km)のみの判断であるが、図-9に示した調査地点L1、L2、L3の各断面における位置との関係から、Kp.2.5およびKp.40.7におけるL3地点が6月2日での水際であり、各調査地点とも3月下旬から

の融雪出水時のみ冠水したと判断される。

図-10に洗掘・堆積調査結果を示した。洪水前の各々の調査地点の高さを基準(0)とした高さを縦軸にとり、洪水前の地表面の高さ(Before Flood:0)、洪水中に最も洗掘を受けたと考えられる地表面の高さ(During Flood: $Z_d - Z_b$)、洪水後の地表面の高さ(After Flood: $Z_a - Z_b$)を各調査地点毎に示したものである。なお、堆積物の深さ方向の粒径構成が異なっていることから、このことがわかるように、粒径の異なる層毎に塗りつぶしパターンを変えている。また、図-10における凡例の数字は、各層における平均粒径をmm単位で示したものである。各調査地点とも、洪水中に一旦洗掘を受け、その後堆積したことをうかがわせる結果が得られている。洗掘および堆積は大きい箇所では10cm以上生起しており、流水中への砂粒子の供給および流水中から河岸への土砂堆積が大きいことが判明した。なお、今回の調査では、洗掘と堆積がほぼ同程度の地点が多かった。洪水中の河床変動は、洪水中に大きく洗掘を受け洪水後半に埋め戻される現象が確認されており、通常洪水前後に行なわれる横断測量等では、十分に把握されないことが明らかとなっている^{7), 8)}。調査地点毎に平均粒径を見ると、洪水中に洗掘されたものと洪水中に堆積したものとほぼ同程度の大きさとなっており、洪水前後での河岸の構成材料が大きく変化していない。このことから河岸においても、洪水前後の測量だけでは河岸の洗掘堆積状況の把握は、困難であると考えられる。

また、流水中の浮遊物質と堆積物との関係を把握するため、洗掘および堆積した量について、粒径が0.057mm未満・粒径が0.057mm以上0.106mm未満・径が0.106mm以上のものに区分して図-11に示した。河床にはほとんど存在せず浮遊物質にのみ含まれる粒径0.1mm以下の河岸堆積物は、全地点の平均をとると、洪水中に1.3cm程度洗掘を受けその後0.9cm程度堆積したこととなる。その内粒径0.057mm未満の堆積物は、それぞれ0.8cmおよび0.5cmである。なお、0.057mm未満および0.057mm以上0.106mm未満の粒径の堆積物は全堆積物に占める割合が出水前後とも低水路側のL3地点に比べて高水敷側のL1の方が高くなっている。

以上のことから、河岸堆積物と浮遊物質との交換が出水の度にかんがりの量で行なわれていると判断される。

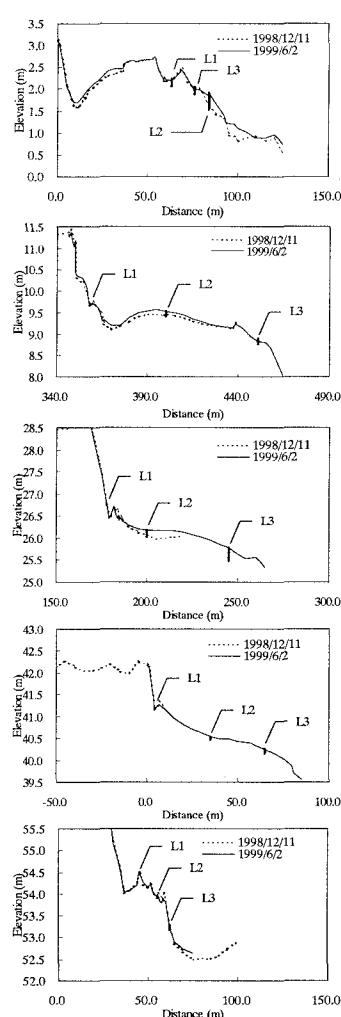


図 - 9 洗掘・堆積調査箇所

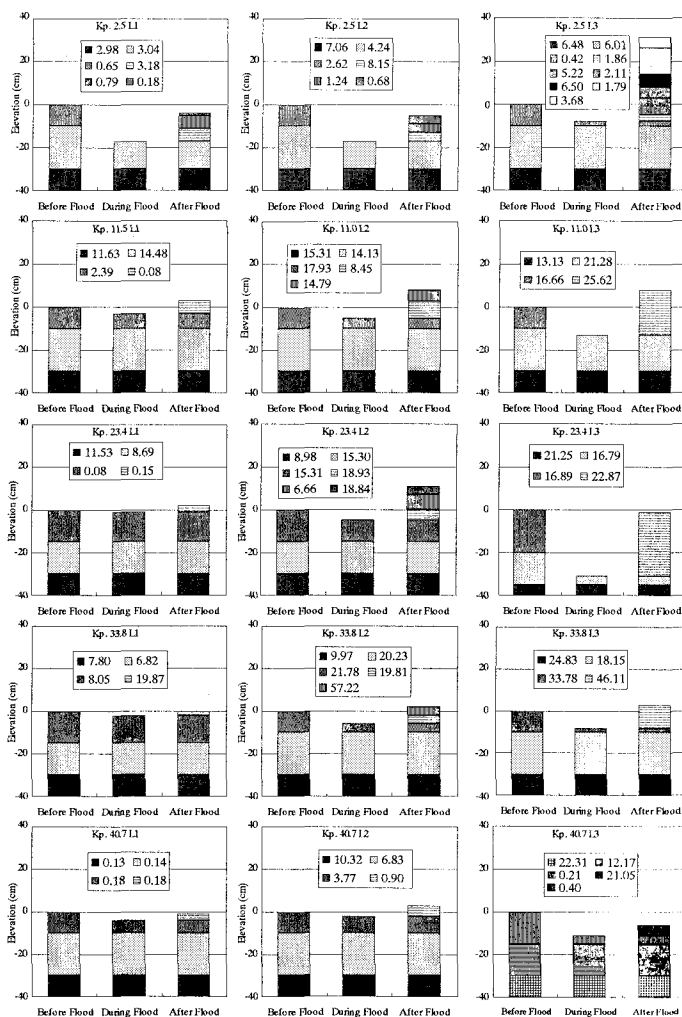


図 - 10 洗掘・堆積調査結果

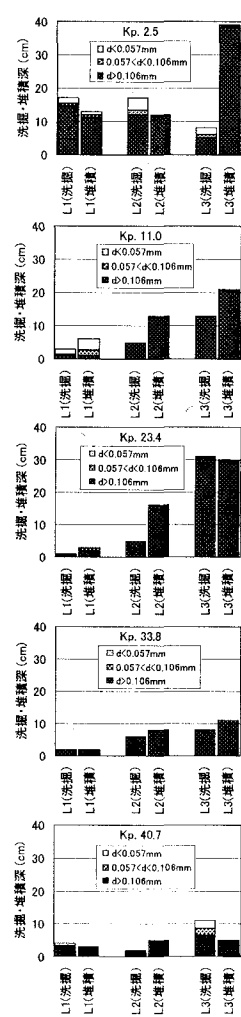


図 - 11 細粒砂の占める割合

4. おわりに

鵡川融雪出水時の浮遊物質濃度の観測結果から、洪水時の浮遊物質の横断方向拡散現象が示唆された。浮遊物質のフラックスの移動方向に関して、微細砂の濃度等について不明な点があり閾値については今後の課題であるが、摩擦速度と粒子の沈降速度の比による整理を試みた。

また、河岸における堆積物調査により、河床材料中にはほとんど存在せず浮遊物質と同程度の粒径の粒子が多く存在していることを明らかにした。このことから、横断方向の拡散に関して対象粒子の存在割合の横断方向変化量についても考慮されるべきである。

さらに、河岸堆積物の洪水時の洗掘・堆積現象を定量的に把握し、浮遊物質と河岸堆積物との交換が洪水時に行なわれていることが判明した。

このように浮遊物質は、栄養塩類が吸着していることも考え合わせると、河道形成や河川環境を考えていく上で、非常に重要な物質であるといえる。

参考文献

1) 藤田光一、John A. MOODY、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、土木学会論文集第551号/II-37、pp.47-62、1996。

- 2) 渡邊康玄、新目竜一、斎藤大作、玉川尊：鵡川1998年融雪出水時の物質輸送に関する調査、土木学会水工学論文集第43巻、pp.587-592、1999。
- 3) 泉典洋、Gary PARKER：礫床河道内に堆積する細砂について、土木学会水工学論文集第39巻、pp.665-670、1995。
- 4) 長谷川和義、望月明彦：シルト・細砂からなる流路の浸食過程、土木学会第31回水理講演会論文集、pp.725-730、1987。
- 5) 長谷川和義・藤田睦博：河岸浸食に関する研究、北海道大学委託研究報告 平成元年度 河川の機能に関する基礎的研究、pp.95-135、1990。
- 6) 渡邊康玄、新目竜一、斎藤大作：鵡川における洪水時の河岸堆積に関する調査、土木学会北海道支部論文報告集第55号(B)、pp.230-235、1999。
- 7) 砂田憲吾：釜無川(富士川)における一洪水による河床変動、土木学会論文集第363号/II-4、pp.235-243、1985。
- 8) 山下彰司、清水康行、渡邊康玄：急流河川の床止め近傍の河床変動、土木学会水工学論文集第36巻、pp.35-42、1992。

(1999.9.30受付)