

洪水時における河道内の浮遊物質の移動

TRANSPORT OF SUSPENDED SOLIDS IN FLOOD FLOW

佐藤耕治¹・渡邊康玄²・三宅 洋³

Koji SATO, Yasuharu WATANABE and Hiroshi MIYAKE

¹正会員 北海道開発局開発土木研究所環境水工部環境研究室（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目）²正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所環境水工部環境研究室（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目）³正会員 工修 総理府国際平和協力本部事務局（〒100-0014 東京都千代田区永田町1丁目6-1）

When river improvement or maintenance works are to be undertaken with due consideration given to the river environment, it is essential to understand the status of river life in the affected river sections. Also, in light of the fact that river life is affected by sediment, nutrient salts and other factors on which river ecosystems are based, it is equally important to understand the status of these factors as well as their behavior changes that may result from river channel alterations. It has been pointed out that most of the nutrient salts that build up in river channels are absorbed by fine sands and transported in times of flood, before being deposited at their subsequent locations. However, the behavior during floods of such very fine sands that have absorbed nutrient salts has yet to be sufficiently clarified, and its earliest possible clarification is required to help further promote future river projects. This report considers the deposition process of very fine sands in high-water channels, based on data obtained from flood observation of the Mukawa River and subsequent survey on riverbank deposits.

Key Words: *Suspended solids, sediment transport, nonsteady flow calculation and bed variation calculation*

1. はじめに

河川環境を考慮した河川改修や河道維持を行なう場合、そこに生息している動植物の状況を把握することは非常に重要なことである。動植物の生息は河川生態系の基盤を形成する土砂や栄養塩類等と密接な関係があり、それらの制約を受けている。また、砂防ダムや河川改修などの影響で、下流域では安定した土砂供給が行われなくなり、河床低下、さらには海への土砂供給の減少が社会問題として大きく取り上げられている。したがって、土砂や栄養塩類等の現状や河道の変化に伴う挙動について的確に把握することが必要である。

河道に蓄積される栄養塩類は、その大半が洪水時に浮遊物質に吸着された形で河道内を移動・堆積していることが指摘されている¹⁾。しかし、栄養塩類を吸着している浮遊物質の洪水時の挙動については十分解明されておらず、河川における流水と土砂の流域一貫した管理が重要視されている。

本研究では、鶴川における洪水観測および洪水前後の調査を基に浮遊物質の挙動について考察を行った。



図 - 1 鶴川流域図

2. 調査対象河川概要

浮遊物質の挙動を流域一貫して把握するためには、上流から下流までの長い区間における変化を把握する必要がある。このため、対象流域において大きな流入支川が少なく、ダム等の構造物が存在しない必要がある。このような条件を考慮し、調査対象河川を鷗川とした。調査区間は上流支川パンケシュル川から鷗川河口までの区間とすることとした。図-1 に調査対象区間の概略位置図を

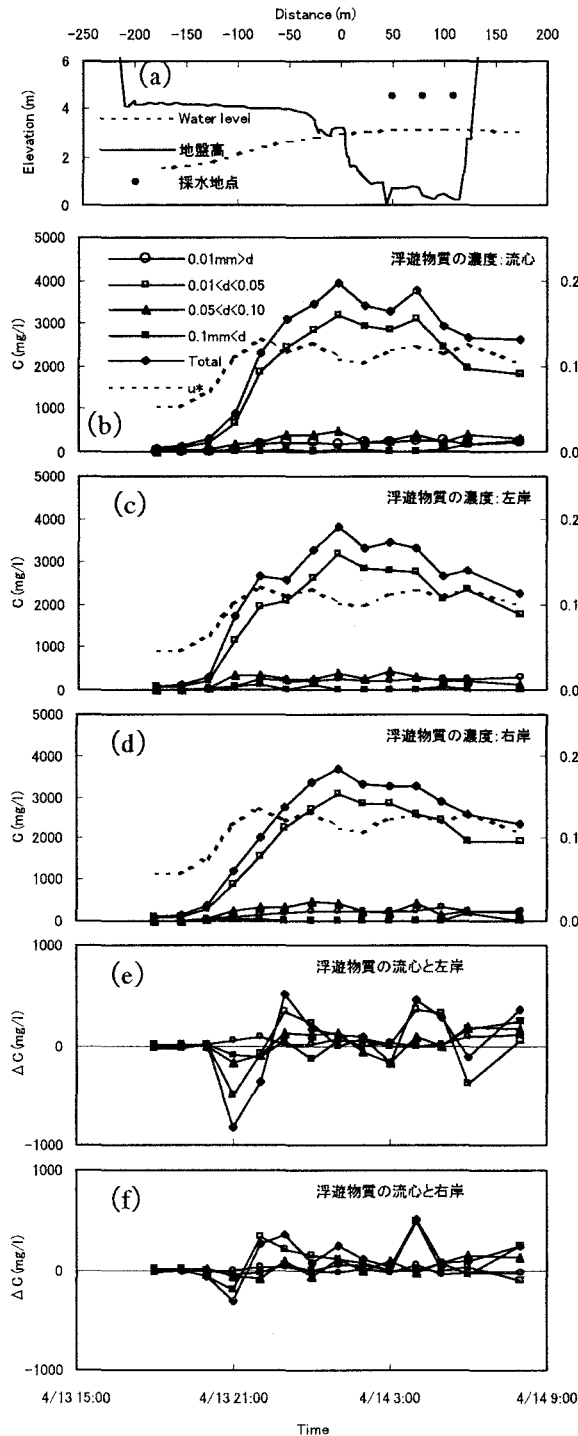


図-2 鷗川橋浮遊物質観測結果

示した。

鷗川は占冠村のトマム岳に源を発し、パンケシュル川、双朱別川などの支川を合わせて、穂別町で穂別川と合流し、鷗川町で太平洋に注いでいる流域面積 $1,270\text{km}^2$ 、幹線流路延長 135km の一級河川である。

3. 浮遊物質の横断面内輸送

1998 年 4 月 13 日に生じた融雪出水時に、浮遊物質

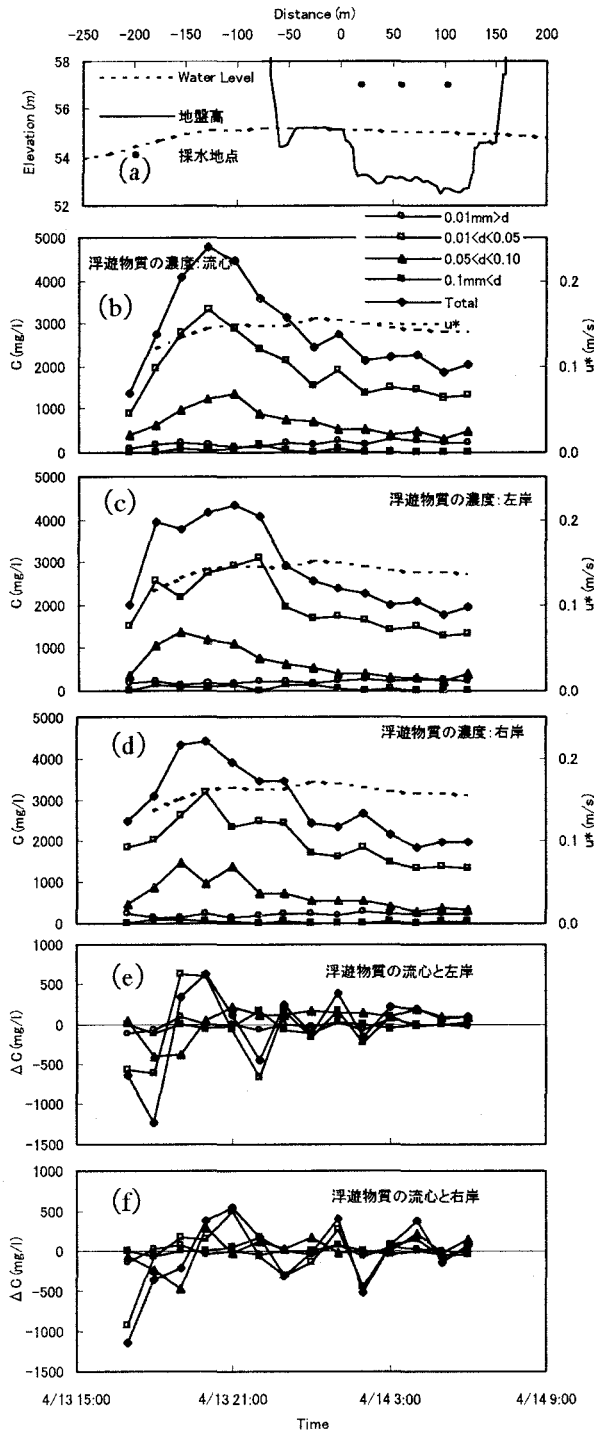


図-3 穂別橋浮遊物質観測結果

観測を目的として穂別橋および鷗川橋において採水を行った。採水は、両観測地点とも流心部および左右岸近傍の3箇所、橋上からバケツにより表面の流水を対象として行われた。採水時間は、概ね1時間毎に実施されている。採取された浮遊物質について粒度分析を実施し、粒径毎の濃度を把握した。鷗川橋および穂別橋における結果を、それぞれ図-2,3に示した²⁾。なお、図-2および3における(a)は、断面形状、採水位置および観測水位を、(b)、(c)および(d)はそれぞれ流心、左岸および右岸の浮遊物質濃度Cの時間変化を示したものである。uは現地観測で計測した水位から算定した水面勾配から計算した。また、(e)および(f)はそれぞれ浮遊物質の流心での濃度と左岸および右岸での濃度の差 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正の値となる。

浮遊物質の時間変化の特徴として、両観測地点とも水位ピーク生起前に濃度のピークが生じていることが挙げられる。また浮遊物質の粒径は、0.05mm以下のものが大半を占め、穂別橋では0.05~0.1mmの粒径のものが多少含まれている。穂別橋において浮遊物質の粒径が鷗川橋に比較して大きい原因としては、穂別橋における摩擦速度が鷗川橋に比較して大きいことが考えられる。なお、水深方向の濃度分布や粒径分布の変化も想定されるが、このことについては今後の課題である。

また、左右岸近傍と流心における浮遊物質の濃度差については、観測地点周辺は特異な平面形状でなく、形状による影響は少ないと考えられる。鷗川橋において洪水極初期には濃度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の濃度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が高くなる結果が得られた。穂別橋においては、観測開始時にすでに水位上昇が生じているため鷗川橋の洪水初期に見られた濃度差の無い状態が認められないが、濃度差の傾向は概ね鷗川橋で見られた傾向と同様の現象が生じている。以上のことから、浮遊物質の粒径変化も考え合わせると、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0.01~0.1mmの浮遊物質が河岸近傍から供給され流心に向かって移動し、その後流心から河岸に向かって移動していることが想定される。

4. 上流域における浮遊物質の挙動

浮遊物質の発生源における動態を調べるために、同じ鷗川の上流に位置するパンケシュル川の更生橋において観測を行なうこととした。観測を行ったパンケシュル川の概略位置は図-1に示すとおりである。パンケシュル川流域は鷗川流域のほぼ上流端に位置する流域面積73km²、そのうち山地面積が71.5km²を占める山地小流域である。パンケシュル川は幹線流路延長12.4kmであり、占冠村占

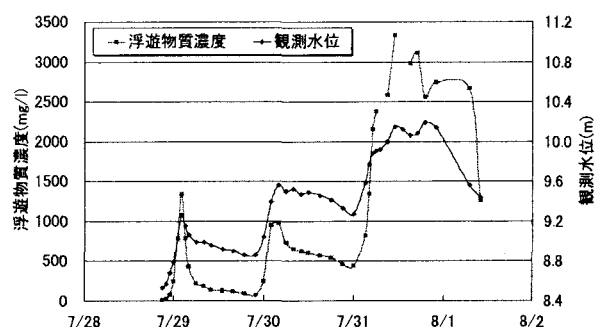


図-4 水位・浮遊物質濃度（更生橋）

冠で鷗川に合流している。観測地点である更生橋は、鷗川との合流点より約300m上流に位置する。

出水時の降雨は1999年7月28日17時から7月31日18時までほぼ3日間、断続的に降り続き、最大雨量強度は10mm/hを超える強い雨となった。降雨分布は、3つの山をもった形をしていることが特徴である。

この観測の結果、浮遊物質輸送の出発地点と考えられる、流域面積が小さく河道長の短い山地小流域においては、図-4に示すように、浮遊物質濃度と流量変化はほぼ同位相で推移している。このことから、山地小流域では、上流から輸送される浮遊物質と、洪水波の到達によってまきあげられた浮遊物質をほぼ同時に観測していることが考えられる。山地小流域における観測される浮遊物質の供給源は、大別して以下の2つが考えられる。

- ① 降雨によって発生する斜面表層を流れる流水によって輸送され、雨水とともに流水に供給される。
- ② 河岸、高水敷に堆積している浮遊物質が、洪水波による水位上昇によってまきあげられ、流水に供給される。

5. 河岸における微細砂の洗掘・堆積

河岸から浮遊物質が流れに供給されることが想定されたことから、どの程度の量であるかを把握する目的で、以下の方法により洪水中における河岸近傍の堆積物の洗掘・堆積量を把握することとした。

- 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、粒度分析を行なう。
- 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。

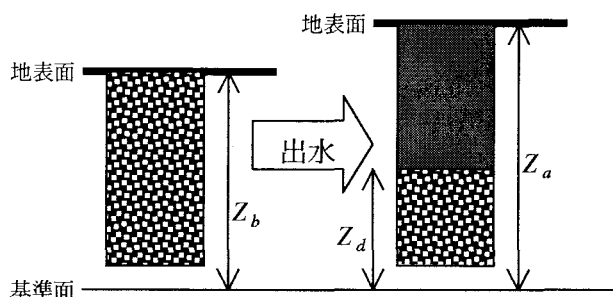


図-5 洗掘堆積調査模式図

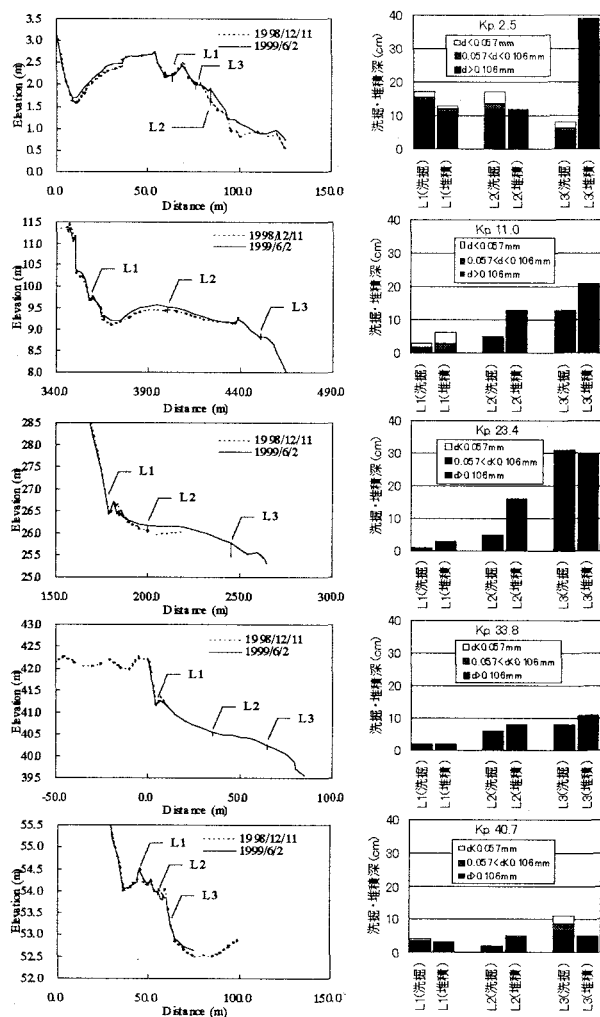


図-6 洗掘・堆積調査箇所(左列)

図-7 洗掘・堆積調査結果(右列)

- 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が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-5に示す堆積物の洗掘・堆積についての模式図のように、洪水時の洗掘深は($Z_b - Z_d$)、洪水時の堆積厚は

($Z_a - Z_d$)でそれぞれ求められる。

1999年の融雪出水を対象洪水とし、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、4～5月にかけて融雪出水が発生している。なお調査は、穂別橋から鷺川橋の間概ね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、通常時は冠水せず融雪出水程度の水位上昇期に冠水する各断面3地点計15地点で行った。図-6に各断面の調査位置を示した。水位観測断面2箇所(鷺川橋; 2.5km、穂別橋; 40.7km)のみの判断であるが、図-6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-7は、洪水中に最も洗掘を受けたと考えられる深さ(洗掘深)、最も洗掘を受けた時点からの堆積厚を調査地点毎に示したものである。なお、洗掘および堆積においてどのような粒径のものがどの程度の割合で関与しているかがわかるように、粒径が0.057mm未満、0.057mm以上0.106mm未満、0.106mm以上の3区分に分けて塗りつぶしパターンを変えている。観測された浮遊物質の粒径と一致する0.1mm以下の河岸堆積物は、全地点の平均をとると、洗掘が1.3cm程度であり堆積が0.9cm程度となる。これらの値は、全粒径による洗掘・堆積量の10%程度である。なお、0.057mm未満の堆積物はそれぞれ0.8cmおよび0.5cmである。

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われていると判断される。

6. 不定流計算による微細砂の挙動

穂別橋から鷺川橋までの間において、浮遊物質がどのような挙動をしているかを把握するため、1次元不定流にCIP法³⁾を用いて河床変動計算^{4), 5)}を行なうこととした。その結果及び前項まで述べてきた現象を用いて、微細砂の挙動について考察を行なう。

6.1. 不定流河床変動計算基礎式

開水路不定流の運動方程式および連続の式は、それぞれ(1)および(2)式で表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{cv^2}{2g} \right) = - \frac{\partial(h+\eta)}{\partial x} - \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial x} = -v \frac{h}{b} \frac{\partial b}{\partial x} \quad (2)$$

ここで、 v :流速、 g :重力加速度、 t :時間、 h :水

深、 η : 河床高、 x : 縦断距離、 n : マニングの粗度係数、 R : 径深、 b : 川幅、 α : エネルギー補正係数である。なお、CIP 法は差分を行なう際の補間方法にスプライン補間を行なう手法である。CIP 法は、波形の伝播等で数値拡散が極めて小さく、洪水波を計算する場合に威力を発揮する。

河床変動計算は、浮遊物質の挙動を見ることから掃流砂と浮遊砂について考慮することとした。(3)式で表される流砂の連続式により河床変動量を算出する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{1}{b} \frac{\partial \sum_i (q_{bi} b)}{\partial x} + \sum_i (q_{sui} - w_{fi} C_{bi}) \right\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 λ : 河床材料の空隙率、 q_b : 単位川幅当りの掃流砂量、 q_{su} : 単位時間単位面積当りの河床からの浮遊砂浮上量、 w_f : 浮遊砂の沈降速度、 C_b : 河床付近の浮遊砂濃度、添え字 i は粒径 d_i の値であることを示している。

掃流砂量式には、(4)式で表される芦田・道上の式⁶⁾を用いた。

$$\frac{q_{bi}}{\sqrt{s} g d_i^3} = 17 p_i \tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*i}} \right) \quad (4)$$

ここで、 s : 砂の水中比重、 p_i : 粒径 d_i の粒子が河床面に占める割合、 τ_{*i} : 有効無次元掃流力、 τ_{*e} : 無次元限界掃流力、 τ_{*} : 無次元掃流力、 u_{*e} : 限界摩擦速度、 u_{*} : 摩擦速度である。なお、粒径別の限界摩擦速度は、(5)式で表される Egiazaroff・浅田の式⁷⁾を使用した。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left\{ \frac{\log 23}{\log \left(21 \frac{d_i}{d_m} + 2 \right)} \right\}^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (5)$$

ここで、 u_{*cm} : 河床の平均粒径 d_m に対する限界摩擦速度である。なお、ここでは岩垣の式⁸⁾を用いた。

浮遊砂については、(6)式で表される粒径別の浮遊砂濃度の連続式および(7)式で表される板倉・岸の浮遊砂浮上量式⁹⁾を用いた。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\langle C_i \rangle h) + \frac{\partial (u h \langle C_i \rangle)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial (\langle C_i \rangle h)}{\partial x} \right) + q_{sui} - w_{fi} C_{bi} \end{aligned} \quad (6)$$

$$q_{sui} = p_i K \left(\alpha \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{g d_i}{u_{*i}} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon = 1/6 \kappa u_{*h}$ 、 κ : カルマン定数、 $\langle \rangle$: 水

深平均値を表し、 $\langle C_i \rangle$ は(8)式で表す。また、 Ω_i は(9)式で表される。

$$\langle C_i \rangle = \frac{C_{bi}}{\beta} \{ 1 - \exp(-\beta) \} \quad (8)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i}}{B_{*i}} \frac{\int_a^\infty \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}}{B_{*i} \eta_{*i}} - 1 \quad (9)$$

また、 ρ_s : 浮遊粒子の密度、 ρ : 流体の密度、 u_{*i} : 有効摩擦速度、 B_{*i} : 揚力算定の際の速度に摩擦速度を適用するための換算係数、 $\beta = w_{fi} h / \varepsilon$ 、 $\xi = z / h$ 、 $\eta_{*i} = 0.5$ 、 $\alpha_{*i} = 0.14$ 、 $a' = B_{*i} / \tau_{*i} - 1 / \eta_{*i}$ である。

また、粒径別の流砂の連続式は(10)式で表される。

$$\begin{aligned} & \delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ &+ \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{1}{b} \frac{\partial (q_{bi} b)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} C_{bi} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 δ : 交換層の厚さであり、 p_i は(11)式で表される。

$$p_i = \begin{cases} p_i & ; \partial \eta / \partial t > 0 \\ p_{i0} & ; \partial \eta / \partial t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 p_{i0} : 粒径 d_i の粒子が原河床に占める割合である。

6.2. 鶴川穂別橋—鶴川橋間における計算結果

計算の対象に使用した洪水は1998年4月13日に鶴川で発生した融雪出水である。流量は500m³/sec程度で、対象区間は穂別橋から鶴川橋までとし、穂別橋の観測結果(水位・流量・SS濃度)を既知として、下流方向に計算を行った。河床材料は計算区間において一定とし、6分割($d=0.05, 0.30, 1.25, 3.50, 7.5, 30$ mm)して、掃流砂及び浮遊砂量を計算した。

図-8に各地点の流量変化を実測値(点線)及び計算値(実線)で示す。計算は水位上昇に伴う流下面積の増大を考慮するため、水位変動に応じて川幅が変動するようプログラムした。図-8において、中間の栄和橋(Kp.26.0)においてはピークの時間及び流量が一致しているが、下流の鶴川橋においては実測値に比べて流量の増加が早く、ピーク時間にずれが生じている。

原因としては、栄和橋と鶴川橋の間に頭首工が2つ存在することが考えられるが、河床高や川幅などは計算上考慮に入れている。また、ずれが生じている区間は下流

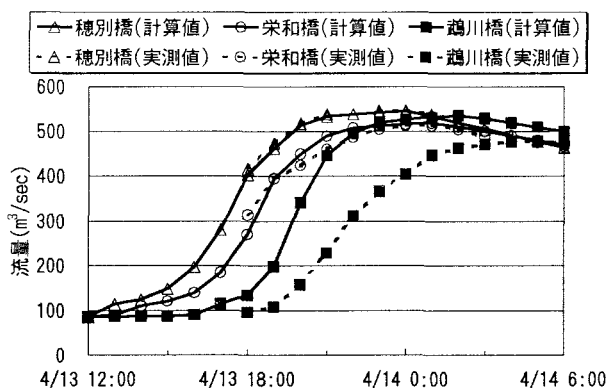


図 - 8 流量比較

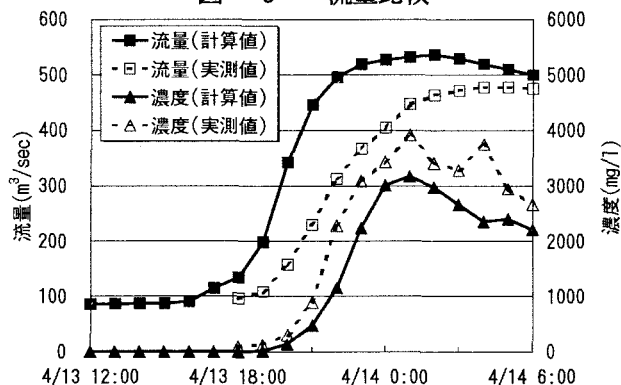


図 - 9 流量と浮遊物質濃度の比較 (鷓川橋)

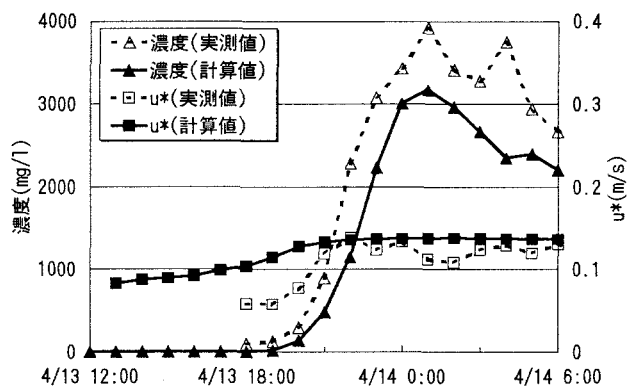


図 - 10 摩擦速度と浮遊物質濃度の比較 (鷓川橋)

区間であるため、水位上昇に伴う川幅の変動は考慮されていても、高水敷など河床高の違いによる影響によって生ずる平面的な流れが実際の洪水時の流況と必ずしも一致していない可能性が考えられる。なお、流量は洪水中に浮子によって測定した流速と、同時に測定した水位の値を用いて算出している。

次に、鷓川橋における流量と浮遊物質濃度変化について、実測値と計算値を時間的に比較した。浮遊物質濃度は観測の結果によると、粒径 0.05mm 程度であることから、計算上は 0.05mm の浮遊砂の値を浮遊物質として扱った。図-9 において、実測値の流量及び濃度に着目すると、洪水上昇期に濃度のピークが現われている。これに対し、計算結果では流量の上昇に比べ、濃度のピークが遅れて現れていることが確認できる。一方、図-10 では摩擦速度と浮遊物質濃度の関係について着目した。摩擦速度は

実測値・計算値ともに浮遊物質濃度ピークよりも前にピークに達していることが伺える。

以上のことと、浮遊物質の横断方向の濃度変化とを考えると、鷓川橋において観測された浮遊物質が上流から流下してきたものだけではなく、河道内に蓄積されていた物質が水位上昇に伴い巻き上がったものを捕えている¹⁰⁾可能性も考えられる。

6. おわりに

今回は鷓川における洪水観測の結果を検証することを目的として、1 次元不定流河床変動計算を行なった。その結果、流量に関しては下流の鷓川橋では洪水の立ち上がり時期やピーク時間が早まる傾向が見られた。また、浮遊砂濃度についてはピーク値や波形に関しては、ある程度の値の一致を見ることができた。しかし、実際には洪水の流量ピークの前に訪れるはずの濃度のピークが、計算では全体的に遅れているという結果になった。これらの原因としては、計算には考慮していない区間に存在する河岸堆積物が少なからず影響している可能性が考えられる。今後の計算精度向上のためには、河岸堆積物を考慮したモデルを開発することで、より再現性のある計算を行なうことができる。

参考文献

- 1) 渡邊康玄、新目竜一、齋藤大作、玉川尊；鷓川 1998 年融雪出水時の物質輸送に関する現地調査，土木学会水工学論文集，第 43 巻，1999.2
- 2) 渡邊康玄、長谷川和義、橋本誠秀；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，土木学会水工学論文集，第 44 巻，2000.2
- 3) 矢部孝、観山正見、栴島成治；パソコンによるシミュレーション物理，朝倉書店，pp.41～47，1992.2
- 4) 清水康行；沖積河川における流れと河床変動の予測手法，開発土木研究所報告，第 93 号，1991.2
- 5) 北海道開発局土木試験所河川研究室；現場のための水理学，北海道開発局土木試験所月報，No.411～415，1987.8～12
- 6) 芦田和男、道上正規；混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 14 号 B，1971
- 7) 浅田宏；山地河川の流砂量と貯水池の堆積過程に関する研究，電力中央研究所報告総合報告 No.2，1976
- 8) 岩垣雄一；限界掃流力の流体力学研究，土木学会論文集第 41 号，1956
- 9) Itakura, T. and Kishi, T.; Open Channel Flow with Suspended Sediments, Jour. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 106, No. HY8, 1980
- 10) 三宅洋、渡邊康玄；洪水時における S S 輸送量推定について，第 43 回北海道開発局技術研究発表会発表概要集 (3)，2000.2

(2000.4.17 受付)