

II-28

洪水時における浮遊物質の河道内の移動

開発土木研究所	正 会 員	○佐藤 耕治
開発土木研究所	正 会 員	渡邊 康玄
北海道大学	正 会 員	長谷川和義
北海道工業大学	7・D-会 員	橋本 識秀

1. はじめに

河川環境を考慮した河川改修あるいは河道維持を行なう場合、対象区間に生息あるいは生育している生物の状況を把握することは必要不可欠な作業である。また、これらの生育あるいは生息は、河川生態系の基盤を形成する土砂や栄養塩類等に制約を受けていることから、これらの現状や河道の変化に伴う挙動を把握することも必要不可欠な作業となる。河道に蓄積される栄養塩類は、その大半が洪水時に微細砂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<sup>1)</sup>。しかし、栄養塩類を吸着している微細砂の洪水時の挙動については十分把握されているとは言い難く、今後の河川事業推進に向けて早急な解明が必要となっている。本研究は、鶴川における洪水時の観測データおよび河岸の堆積物調査を基に微細砂の高水敷等への堆積過程について考察を行ったものである。

2. 調査対象河川の概要

微細砂の高水敷等への堆積等河道内の物質輸送を把握するためには、ある程度長い区間における変化を把握する必要がある。このため、対象区間において大きな支川流入が無く物質収支がある程度閉じた領域での観測が必要である。また、ダム等の構造物が存在する場合、その影響が観測結果に反映されるため、できる限りそのような構造物が存在しない必要がある。



図-1 調査地点概要図

このような条件を考慮し、調査対象河川を鶴川とし、さらに調査区間を鶴別橋(Kp.40.7)から鶴川橋(Kp.2.6)の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示した。同図からわかるように、鶴別橋から鶴川橋にかけて大きな支川は存在せず流域も河道に対して細長いため、この区間における河道への物質の負荷は河道内を流下してくる上流からの流入に比較し、この区間の河道に直接流入する流域の影響は小さいものと判断できる。

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、浮遊物質観測を目的として鶴別橋および鶴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。鶴川橋および鶴別橋における結果を、それぞれ図-2,3に示した<sup>1)</sup>。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。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 $\Delta C$ を時系列的に示したものである。なお、 $\Delta C$ 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。

Study on transportation of suspended solids in flood flow.  
By Koji SATO, Yasuharu WATANABE, Kazuyoshi HASEGAWA and Norihide HASHIMOTO

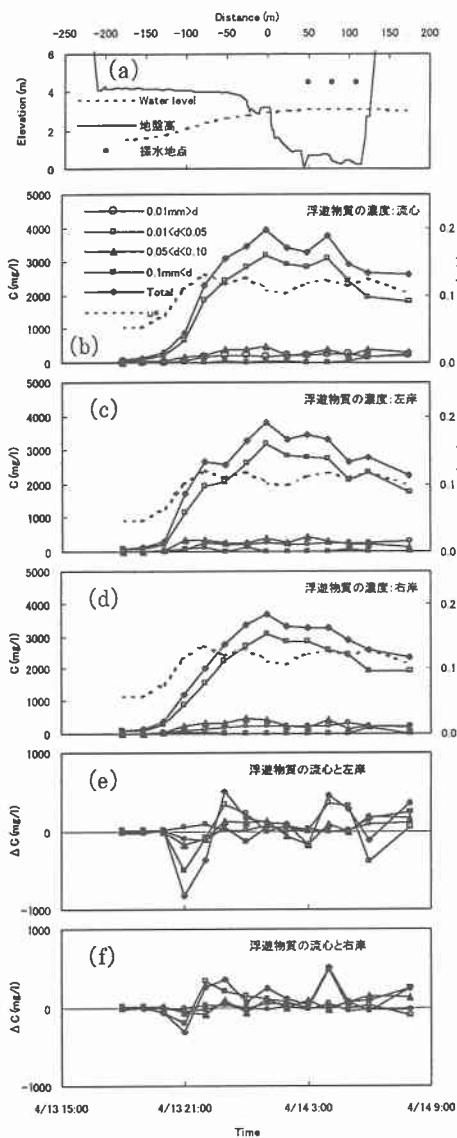


図-2 鷓川橋浮遊物質観測結果

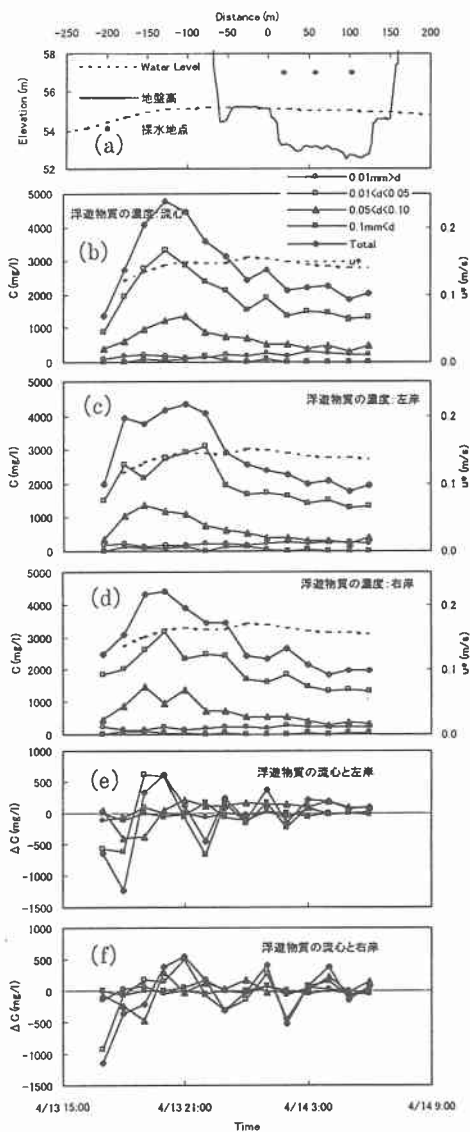


図-3 穂別橋浮遊物質観測結果

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鷓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鷓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、鷓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鷓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鷓川橋で見

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。図-4に鷓川橋における観測された浮遊物質の濃度の変化と想定される浮遊物質の挙動について模式図で示した。図中の数字は、移動する浮遊物質の粒径をmm単位で表したものである。

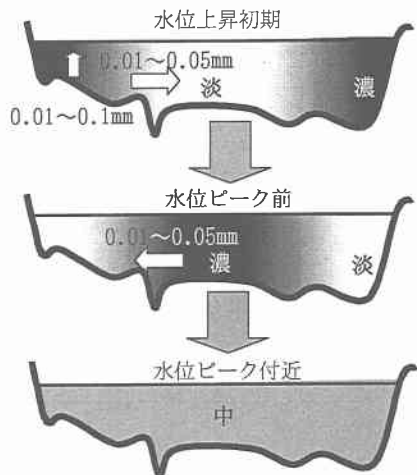


図-4 鷓川橋における浮遊物質濃度の変化と浮遊物質の挙動模式図

#### 4. 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時の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。
- 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をとし、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。その期間の鷓川橋および穂別橋における水位の変化を図-6に示す。なお調査は、穂別橋から鷓川橋の間概ね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-7に各断面の調査位置を示した。水位観測断面2箇所(鷓川橋;2.5km、穂別橋;40.7km)のみの判断であるが、図-7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。

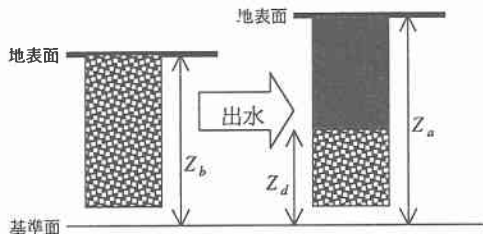


図-5 洗掘堆積調査模式図

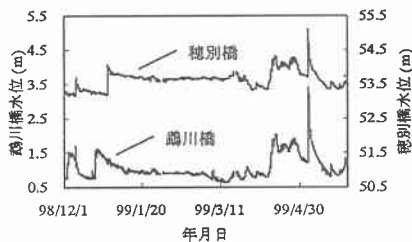


図-6 鷓川橋および穂別橋における水位

図-8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。

### 5. 不定流計算による微細砂の挙動

穂別橋から鶴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<sup>3)</sup>を用いて河床変動計算<sup>4),9)</sup>を行なうこととした。その結果及び前項まで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。

#### 5.1. 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。

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

ここで、 $v$  : 流速、 $g$  : 重力加速度、 $t$  : 時間、 $h$  : 水深、 $\eta$  : 河床高、 $x$  : 縦断距離、 $n$  : マニングの粗度係数、 $R$  : 径深、 $b$  : 川幅、 $\alpha$  : 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。

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

ここで、 $\lambda$  : 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

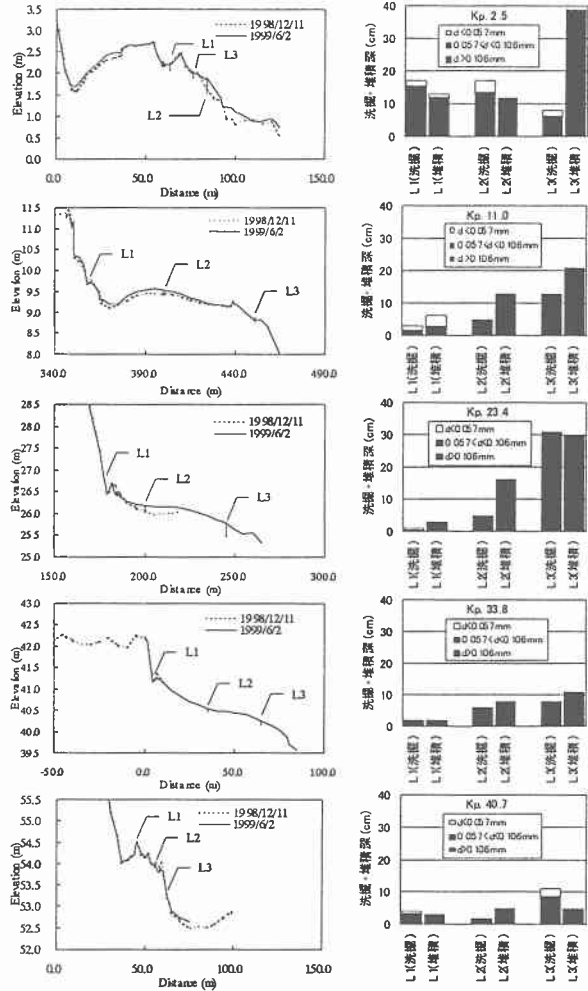


図-7 洗掘・堆積調査箇所(左列)

図-8 洗掘・堆積調査結果(右列)

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<sup>1)</sup>を用いた。

$$\frac{q_{bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = 17 p_i \tau_i'^{3/2} \left( 1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_i'} \right) \left( 1 - \frac{u_{*ci}}{u_*} \right) \quad (4)$$

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、 $\tau_i'$  : 有効無次元掃流力、 $\tau_{*c}$  : 無次元限界掃流力、 $\tau_*$  : 無次元掃流力、 $u_{*c}$  : 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<sup>1)</sup>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<sup>1)</sup>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<sup>1)</sup>を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle (C_i)h \rangle + \frac{\partial (uh(C_i))}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial \langle (C_i)h \rangle}{\partial x} \right) + q_{smi} - w_f C_{bi} \quad (6)$$

$$q_{smi} = p_i K \left( \alpha \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd_i}{u_*} \Omega_i - w_f \right) \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon = 1/6 \kappa u_* h$ 、 $\kappa$  : 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、 $\Omega_i$ は(9)式で表される。

$$\langle C_i \rangle = \frac{C_{bi}}{\beta} \{ 1 - \exp(-\beta) \} \quad (8) \quad \Omega_i = \frac{\tau_{*i}}{B_{*i}} \frac{\int_0^\infty \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}}{B_{*i} \eta} - 1 \quad (9)$$

また、 $\rho_s$  : 浮遊粒子の密度、 $\rho$  : 流体の密度、 $u_*'$  : 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、 $\beta = w_f h / \varepsilon$ 、 $\xi = z/h$ 、 $\eta = 0.5$ 、 $\alpha = 0.14$ 、 $a' = B_{*i} / \tau_{*i}' - 1/\eta$ である。

また、粒径別の流砂の連続式は(10)式で表される。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{1}{b} \frac{\partial (q_{bi} b)}{\partial x} + q_{smi} - w_f C_{bi} \right\} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $\delta$  : 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。

## 5.2. 鷗川穂別橋—鷗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日に鷗川で発生した融雪出水である。流量は500m<sup>3</sup>/sec程度で、対象区間は穂別橋から鷗川橋までとし、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( $d=0.05, 0.30, 1.25, 3.50, 7.5, 30\text{mm}$ )

して、掃流砂及び浮遊砂量を計算した。

図-9 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。図-9 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、下流の鷓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。

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-10 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、計算結果では実測値に比べ流量の上昇が早く、結果として濃度のピークが遅れて現われていることが確認できる。この現象は浮遊物質の横断方向の濃度変化とも考え合わせると、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というよりは、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<sup>1)</sup>可能性を示すものであると考えられる。

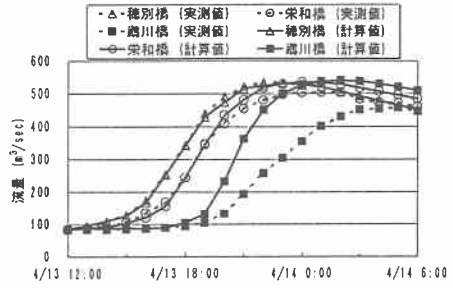


図-9 流量比較

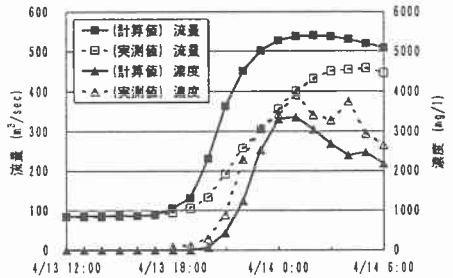


図-10 計算と実測の比較(鷓川橋)

## 6. おわりに

本稿で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ことがわかった。

これらの原因としては、計算には考慮してはいない区間内に存在する河岸堆積物が少なからず影響しているものと考えられる。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。

- 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、橋本識秀;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,(投稿中)
- 3) 矢部孝、観山正見、梶島成治;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SS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,(投稿中)