

中流域にダムが存在する河川における土砂・物質輸送の観測

Observation on Longitudinal Transportation of Suspended Solids during Floods at a River with a Reservoir

小川長宏¹・渡邊康玄²

Takehiro OGAWA and Yasuharu WATANABE

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

²正会員 工博 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

Recent river management problems include a decrease in water storage capacity of the dam reservoir due to sedimentation and a lack of continuity in sediment moment from upper to lower reaches. To clarify the characteristics of substance transport during flooding, we conducted observation and sampling at the Saru River in Hokkaido, with a reservoir at its middle reaches. We examined those observations and sampled data. Due to the presence of the reservoir, SS is not transported from the upper reaches at the early phase of flood. Using this phenomenon and the unsteady-flow and bed variation calculation model, we clarified the behavior of suspended solids at the time of a flood and the tributary during the flood.

Key Words : Field observation, suspended solid, Saru river, sediment transport, unsteady flow

1. はじめに

近年河道内における土砂の侵食・堆積作用に伴う洪水流下能力の変化, 上・下流における土砂収支のアンバランス等の課題が指摘され, 河川管理において流域一貫した土砂管理の重要性が指摘されている. このため, 河川において土粒子の移動は特に増水時に顕著に生じ下流域へと供給されることから, 各地において洪水時の物質輸送に関する現地調査が実施されてきている. 北海道開発土木研究所では, 一級河川鶴川において洪水時の調査を実施し, 中下流域のSSや栄養塩類の挙動について把握を行ってきている^{1,2,3)}. その中で, 流域から供給されたSSがそのまま海域に流出するだけではなく, 複数の洪水により河岸近傍で堆積巻上げを繰り返して河口まで流下するものが存在することを指摘した. このことから, 河川域特に河岸近傍における自然環境は, SSおよびこれに吸着している栄養塩類の影響を強く受けていることが想定される.

一方で, ダム湖内の堆砂による貯水容量の減少やこれに伴う上流域から下流域への土砂移動の連続性が確保されない問題が生じている. このようなことから, 土砂や

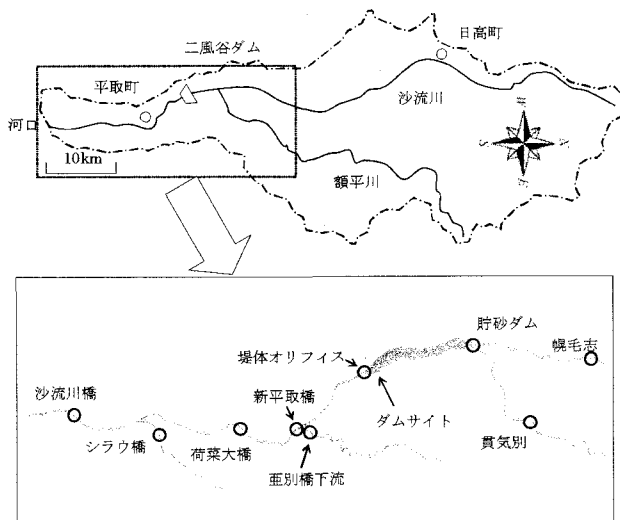


図-1 流域の模式図と観測箇所

栄養塩類等の現状や河道の変化に伴う挙動についての確に把握することが試みられている.

しかし, 微細砂等で構成されるウォッシュロードと呼ばれ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, 上記の諸問題の解決に向けて早期の解明が求

表-1 各地点の河口からの距離

地点 単位：km	沙流川橋	シラウ川 合流点	荷菜大橋	新平取橋	亜別川 合流点	ダム堤体	貯砂ダム	幌毛志	貫気別
河口から の距離	2.8	6.6	12.5	16.1	16.4	21.4	27.1	34.3	33.4

表-2 観測地点間及び支川流域面積

	流域面積 (km ²)
ダム堤体-新平取橋	14.20
新平取橋-沙流川橋	58.60
亜別川	24.00
シラウ川	11.40

められている。

本研究は、図-1に示す中流域にダム湖の存在する北海道の一級河川である沙流川において洪水時の流水中の浮遊物質濃度観測を基に、2002年10月に観測された出水についての1次元不定流河床変動計算も用いて、中流部にダム湖の存在する河川での出水時の浮遊物質の下流への輸送について検討を行ったものである。

2. 流域と出水の概要

沙流川は、流域面積1,350km²、幹川流路延長104kmである。流域の87%が山地であり残りの平地の大部分は河口から上流約21kmに位置する二風谷ダムより下流に広がっており、農耕地および軽種馬放牧地として利用されている。二風谷ダムの集水面積および湛水面積は、それぞれ1,215km²および4.3km²である。比較的大きな支川に関しては、ダム湖直上流で額平川が合流し、ダム堤体約5km下流で亜別川および約15km下流でシラウ川が合流している。流域の概要を図-1に示した。なお、亜別川の流域面積および流路延長は、24.0km²および7.0kmであり、シラウ川はそれぞれ11.4km²および6.3kmである。

観測を行った洪水は、2001年8月22日～24日の平均年最大流量規模をやや下回る中規模出水と9月11日～13日の過去20年間で最大の大規模出水、及び2002年10月5日～7日に観測された小規模出水である。各出水とも基本的に流入量＝放流量のゲート操作が行われ、2001年9月出水の流入量が1,900m³/sを超えた時間帯だけ洪水調節が実施された。

3. 観測地点の概要

観測は図-1に示す地点において行った。各地点の河口からの距離を表-1に示す。なお、支川の影響を把握するため、ダム下流において比較的大きな流域を持つ亜別川とシラウ川についても本川との合流点近傍で観測を

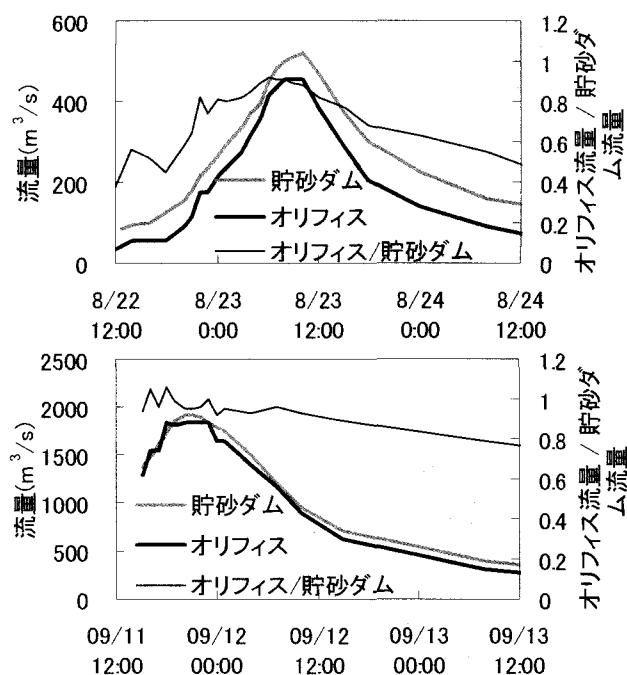


図-2 ダム湖へ流入した流量とダムから放流された流量

行っている。観測地点間と支川の流域面積を表-2に示した。亜別川は、ダム堤体地点と新平取橋地点との間で沙流川に合流しているが、ダム堤体地点と新平取橋地点との間の残流域に占める亜別川の割合は63%となる。また、シラウ川は荷菜大橋と沙流川橋の間で合流しているが、この区間の残流域が不明であるため、新平取橋地点と沙流川地点との間の残流域面積と比較すると、残流域に占めるシラウ川の割合は16%となる。

なお、堤体オリフィス箇所を除く箇所では表面採水と流量観測を、オリフィス地点においては放流水の採水をそれぞれ実施した。シラウ川のシラウ橋および亜別川の亜別橋下流では河道中央のみの採水であり、他の地点においては左右岸近傍と河道中央の3箇所からの採水とした。2001年8月出水の亜別橋下流における流量観測は実施していない。また、2002年10月出水についてはダムより下流部の観測データ以外整理されていないため、これを用いて検討を行った。

4. 2001年出水観測と考察

ダム湖上流端に位置する貯砂ダム地点の流量および通過SS負荷量とダムからの放流箇所であるオリフィス地点

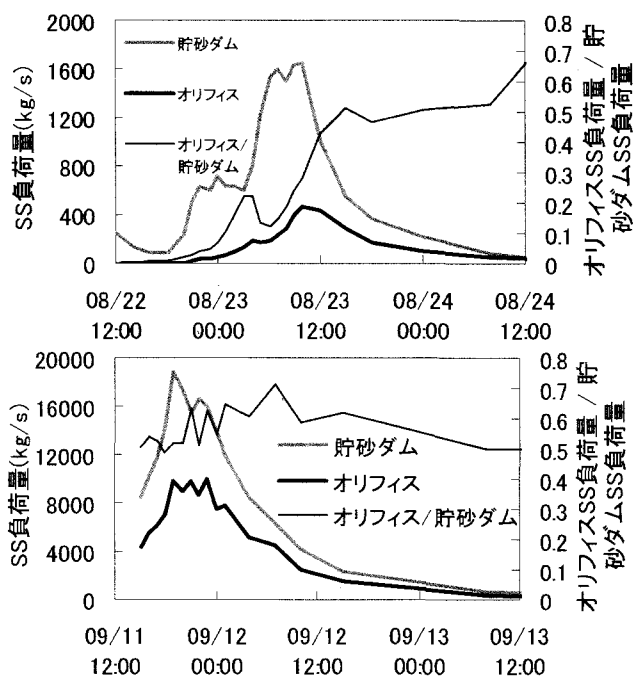


図-3 ダムへ流入したSS負荷量とダムから放流されたSS負荷量

の流量および通過SS負荷量を比較することにより、8月及び9月出水でのダム湖内への貯留量が把握できる。流量およびSS負荷量について図示したものが、それぞれ図-2および図-3である。観測された期間の流入に対する流出量の割合の時間平均は、流量が70%（2001年8月出水）および92%（2001年9月出水）に対してSSの負荷量は21%（8月出水）および56%（9月出水）である。出水前と出水後のダム水位が等しくなるまでの期間を出水の期間とすると、ダム湖内への流入量とダム湖からの流出量がほぼ一致するはずである。ダム湖への貯留が存在するため、出水期間が極めて長くなり、この考え方を基にすると、今回の観測期間は十分とれていなかったことになる。出水初期および出水後期の観測が行われていないが、観測期間中に上流から流入したほぼ半分のSSがダム湖に貯留されたことになる。観測されなかった出水後期は期間が長い、SS負荷量が大きくないことから、出水期間を通して、この値は大きく変わらないものと考えられる。また、図-3において明確に示されているように、出水初期のダムからの放流水は、同時刻に上流から高い流入SS負荷があっても、出水以前にダムに貯留されていたSSを含まない水であることから、SS負荷量はほぼゼロとなっている。このことは、ダム下流の出水時におけるSSの輸送形態が、ダムが存在しない河川と大きく異なる点である。

5. 2001年出水時ダム下流のSS変化

沙流川のダム下流における本川の観測地点と支川の観

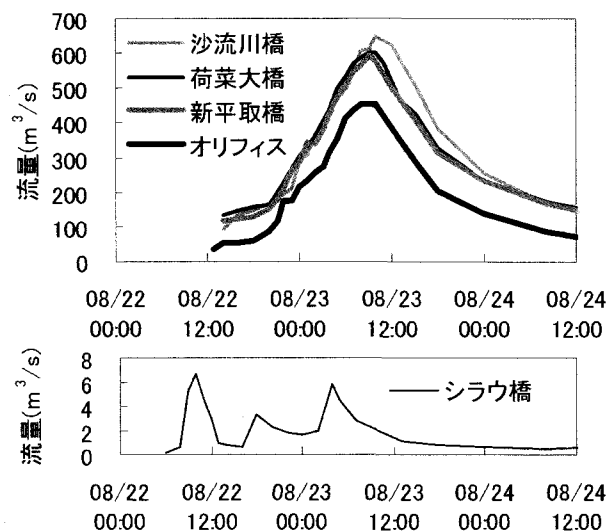


図-4 ダム下流の流量変化

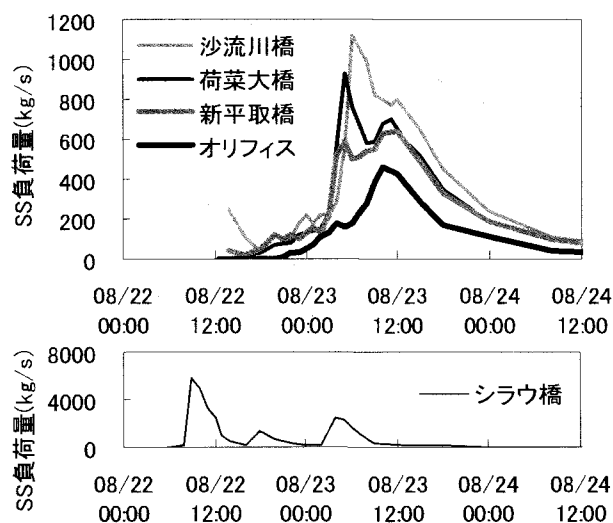


図-5 ダム下流のSS負荷量変化

測地点での、8月出水における流量及びSS負荷量の変化について図示したものが図-4及び図-5である。本川ダムサイトと新平取橋の間に垂別川が、本川荷葉大橋と沙流川橋の間にシラウ川が合流していることから、本川の2地点間における流量とSS負荷量の増加と支川や残流域から供給されている量との比較を行うこととした。シラウ川については面積の割合が小さく多少問題もあるが、垂別川およびシラウ川の沙流川合流点直上流での観測結果をそれぞれの残流域の代表値として考えることとした。すなわち残流域からの供給量が支川の観測値で代表できるものと支川の観測値を、支川を含む本川2地点間の区間流域面積に占める支川流域面積の割合で除したものを、本川の2地点間に供給された支川および残流域の供給量と考える。本川2地点間の観測値の差が全て支川や残流域から供給されているものと考え、これらの値は一致することとなる。8月、9月の両出水についてこれらの関係を求めてまとめたものが表-3である。流量については、沙流川橋と新平取橋との間の増加量について若干差が認められるものの、概ね両者の値は一致してい

表-3 各区間における流量およびSS負荷の増加量と支川との関係 (単位: m³/s)

項目	区間	算出方法	8月出水 初期	8月出水 ピーク	9月出水 初期	9月出水 ピーク
流量増加 量	新平取橋-オリフィス	本川観測値より算出				150
		亜別川観測値より算出				130
	沙流川橋-新平取橋	本川観測値より算出	60	50		340
		シラウ川観測値より算出	40	30		130
SS負荷量 増加量	新平取橋-オリフィス	本川観測値より算出			2500	3500
		亜別川観測値より算出			2400	1300
	沙流川橋-新平取橋	本川観測値より算出	200	530		5200
		シラウ川観測値より算出	200	100		

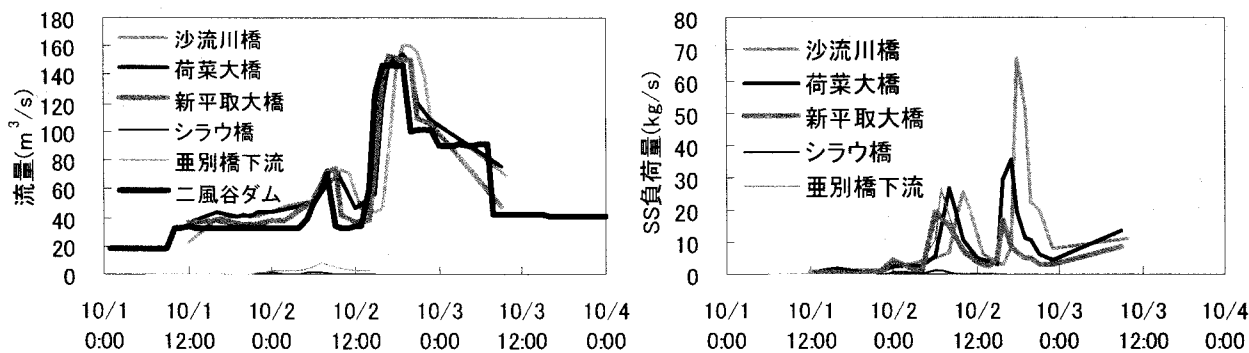


図-6 2002年10月ダム下流の流量とSS負荷量の変化

る。このことから、上記の仮定はほぼ妥当なものと考え
ることとする。一方、SS負荷量について出水初期の両者
の値は、ほぼ一致しているものの、負荷量がピークとな
る時点での両者の値は大きく異なる。このことから、出
水初期には残流域から供給されるSS負荷量が支川の観測
値で代表できるが、ピーク付近では残流域が支川の観測
値を上回る負荷量を供給していることが推察される。また、
鵜川⁴⁾の観測から指摘されている、水位上昇に伴う
河岸からのSSの供給が支川や残流域からの供給に加え生
じたものとも考えられる。

6. 2002年出水時ダム下流の流量とSS変化

図-6は2002年10月のダム下流における流量とSS負荷量
の変化を示した図である。なお2002年10月の出水につい
ては堤体オリフィス地点の観測データが整理されていな
い。そこで、オリフィスの流量として二風谷ダム管理所
で把握している放流量を用いることとした。2002年10月
の出水は小規模な出水であり、流量及びSS負荷量とも
2001年の2つの出水に比べ値が小さい。この出水では10
月2日の6:00～10:00の間と16:00～18:00の間に2度の
ピークを迎えている。1度目及び2度目のピーク時での流
量について、二風谷ダム放流量及び本川の各地点間で
ピーク値はそれほど変わらない。また支川の流量観測値
が小さいことから、2001年の各出水とは異なり、本川は
支川の影響をあまり受けることなくほぼ同流量で流下し

ているものと考えられる。

1度目のピーク時におけるSS負荷量については亜別橋
下流地点のピーク値は26kg/sで、下流の本川各地点にお
けるSS負荷量ピーク値と変わらないものとなっている。

またもう一つの支川の観測地点であるシラウ橋でのSS
負荷量の観測値は1kg/sで亜別橋下流でのSS負荷量に比
べ非常に小さい値であった。このことから1度目のピー
ク時における本川のSS負荷量については、本川への亜別
川以外の残流域からのSSの流入は非常に小さく、かつ洪
水前期においてダム放流水のSS負荷量が小さいことを踏
まえると、降雨により発生した亜別川から本川へのSS流
出の影響が極めて大きかったものと考えられる。

2度目のピーク時付近におけるSS負荷量については、1
度目のピーク時付近におけるSS負荷量の挙動とは異なり、
本川下流に行くに従いピーク値は増大している。この時
刻付近の支川での観測は終了しており支川から本川への
影響を調べることはできないが、ダムより下流域の雨量
観測所では10月2日8:00以降に降雨は観測されていない
ため、ダム下流域にある支川から本川へのSS流入はほと
んどなかったものと推定される。また図-6よりピーク時
で1度目のピーク時に比べほぼ2倍の流量がダムから放流
されている。よって本川の各観測地点間のSS増加につい
ては、流量の増加による水位上昇に伴う河岸からのSSの
供給が生じたこと、また支川以外の残留域からのSS供給
が考えられる。

7. 不定流計算による浮遊物質の挙動

新平取橋から沙流川橋までの間において、本川河岸よりの程度の浮遊物質が供給され、どのような挙動をしているかを把握するため、鶴川のSSの挙動を検討した際に用いた手法⁴⁾と同様の手法、1次元不定流計算にCIP法を用いて河床変動計算⁵⁾を行い検討した。

(1) モデルの概要⁴⁾

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。

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q ：流量、 g ：重力加速度、 t ：時間、 h ：水深、 η ：河床高、 x ：縦断距離、 n ：マンニングの粗度係数、 R ：径深、 A ：断面積、 α ：エネルギー補正係数である。

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。検討対象である浮遊物質は、浮遊砂の中に含まれるものとして扱った。

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

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、 b ：川幅、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。

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

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_{*ci} ：無次元限界掃流力、 τ_{*i} ：無次元掃流力、 u_{*ci} ：限界摩擦速度、 u_{*i} ：摩擦速度である。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り、ここでは岩垣の式⁸⁾を用いた。

浮遊砂については図-7に示すように、浮遊物質と河岸堆積物との交換が洪水水中に行われることを想定し、初期

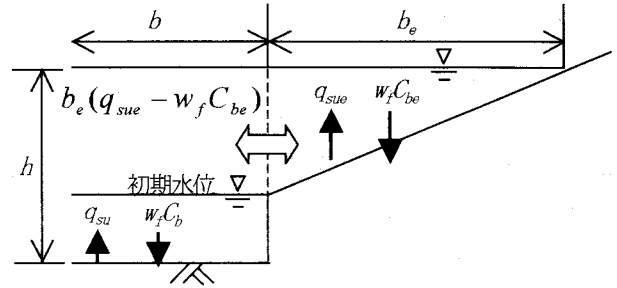


図-7 河岸堆積物からの浮遊物質の供給モデル

水位における川幅を b 、水位の上昇に伴い浸水する河岸幅を b_e として、(6)式で表される粒径別の浮遊砂濃度の連続式と、(7)式で表される板倉・岸の浮遊砂浮上量式⁹⁾を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\langle C_i \rangle h b \right) + \frac{\partial (u h b \langle C_i \rangle)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \langle C_i \rangle h b}{\partial x} \right) + b (q_{sui} - w_{fi} C_{bi}) + b_e (q_{sue} - w_{fi} C_{be}) \quad (6)$$

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

b_e ：浸水した河岸幅、 q_{sue} ：単位時間単位面積当りの浸水した河岸からの浮遊砂浮上量、 C_{be} ：浸水した河岸の底面付近の浮遊砂濃度、添え字 i は粒径 d_i の値、 $\varepsilon = 1/6 \kappa u_* h$ 、 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。

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

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

ここで、 ρ_s ：浮遊粒子の密度、 ρ ：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、 $\beta = w_{fi} h / \varepsilon$ 、 $\xi = z/h$ 、 $\eta_* = 0.5$ 、 $\alpha_s = 0.14$ 、 $a' = B_{*i} / \tau_{*i}' - 1/\eta_*$ である。

さらに、粒径別の流砂の連続式は(10)式で表される。

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

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。

(2) 計算条件と計算結果

計算はダムが存在する河川での出水時の特徴を最も表していると考えられる、2002年10月出水を対象とした。

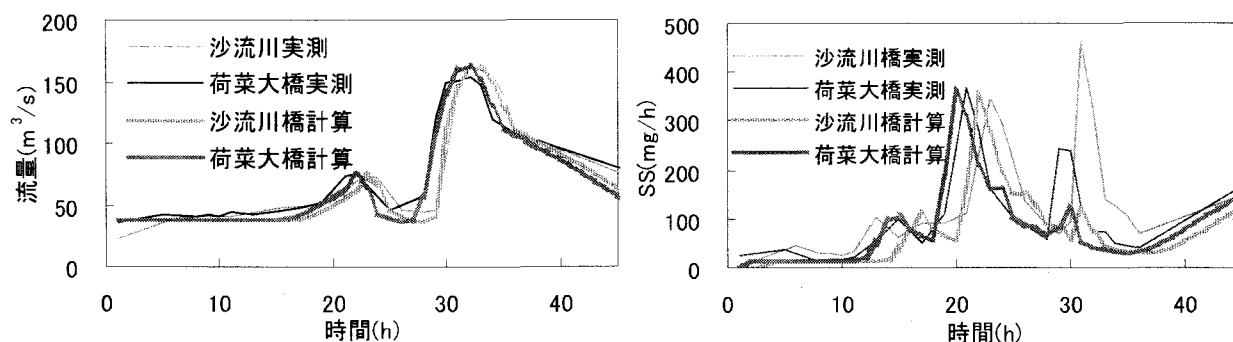


図-8 流量と浮遊物質(SS)の観測値と計算結果

ピーク流量は $160\text{m}^3/\text{sec}$ 程度であり、高水敷への乗り上げは観測されていない¹⁾。対象区間はダム下流の河川横断測量データの存在する、新平取橋から沙流川橋までとした。なお、計算に用いた河道断面は、各観測地点で実施されている横断測量データを基に、対象洪水のピーク水位以下の河道として河床高と川幅を決定した。不定流計算の境界条件として、上流端では新平取橋で観測された水位と流量を与え、下流端では水位が不明であり計算の安定性を考慮して水面勾配の縦断変化が直上流と同じになるよう設定した。また、新平取橋の水位が上昇し始めた時点の流量 $37\text{m}^3/\text{s}$ を用いて不等流計算を実施し、初期条件とした。河床変動計算に用いた初期河床材料の粒径分布は、浮遊物質の挙動を把握することを主目的としていることから、計算区間の河床材料調査結果を基に平均的な分布を与え、計算区間において一定とした。また、観測された浮遊物質の粒径が 0.1mm 以下であり河床材料中には存在しないこと²⁾から、計算に用いた代表粒径の 0.05mm を浮遊物質として扱うこととした。河床変動の境界条件は、上流端で動的平衡となるよう設定するとともに、代表粒径 0.05mm については新平取橋で観測された浮遊物質濃度を与えることとした。

図-8は、河口から 2.8km 上流に位置する沙流川橋および 12.5km 上流の荷菜大橋における流量と浮遊物質の観測値と計算結果を比較したものである。流量については、出水の立ち上がり時刻およびピーク流量を概ね再現している。一方、浮遊物質濃度は、1度目のピーク時にはピーク濃度と立ち上がり時刻を概ね再現しているものの、2度目のピーク時にはピーク濃度が観測値と比べ小さな値となっている。再現計算において1次元不定流モデルに微細砂の河岸堆積物との交換を組み込んだモデルであるが、河岸からの本川浮遊物質濃度への影響は小さかった。また今回の計算では計算区間内に支川等の流入を考慮していないが、前述したように計算区間内で本川に合流する最大支川であるシラウ川の流量及び浮遊物質の流入は非常に小さく、支川の本川への影響はほとんどないものと考えられる。これらのことから2度目のピーク時にはピーク濃度の観測値と計算値の違いは、支川以外の残留域からの浮遊物質の流入が原因と考えられるが、このことについては今後の検討課題とし

たい。

8. おわりに

ダムが中流域に存在する河川のSSの挙動について、現地調査結果を基に1次元不定流計算も用いて検討を行った。ダムが存在することにより、出水初期には上流からSSが輸送されてこないため、河道内における洪水時のSSの挙動や支川の影響をより明確にすることができたと考えられる。なお、今回の調査では、比較的大きな支川のみを観測値から検討を行ったが、比較的小規模の小さな支川や残流域についてのSSの挙動の特性が推察の域を出ないため、これらについて確認をする必要がある。

参考文献

- 1) 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調査, 土木学会水工学論文集第43巻, pp.587-592, 1999.
- 2) 三宅洋, 渡邊康玄: 洪水流への浮遊物質の供給過程, 土木学会北海道支部論文報告集第56号(B), pp.132-138, 2000.
- 3) 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, pp.4137-418, 2000.
- 4) 佐藤耕治, 渡邊康玄: 洪水時における微細砂の縦断方向輸送, 土木学会水工学論文集第44巻,
- 5) 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.
- 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 T. Kishi: Open Channel Flow with Suspended Sediments, Jour. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 106, No. HY8, 1980.

(2003. 4. 11受付)