

II-27

洪水流への浮遊物質の供給過程

開発土木研究所 正 会 員 ○三宅 洋
 開発土木研究所 正 会 員 波邊 康玄
 (財) 河川防災研究センター フェロ-会員 星 清
 北海道工業大学 フェロ-会員 橋本 識秀

はじめに

河川の各領域において様々な治水、利水対策がとられている。これらの対策についてその領域においては最善の方法がとられているが、流域一貫した視点で見た場合、矛盾を生じている場合も少なくない。とくにダムや砂防ダムとその下流での河床低下、さらには海への土砂供給の減少等が社会問題としてとりあげられている。このようなことから、河川における水と土砂の流域一貫した管理計画の策定が急務となっている。特に土砂のなかでも微細粒子である SS は栄養塩を吸着していることが報告されており、出水時には短期間で大量に輸送されることを考慮すると、河川環境を考える上でその輸送機構を把握する必要がある。鶴川の中、下流地点における観測結果により、SS の出水時の挙動について、次のような現象が生じていることが報告されている¹⁾²⁾。上流の発生源から河道内に供給された SS は、発生源下流の河岸、高水敷に堆積する。次の出水によって浮上することにより、洪水流とともに流下し、下流のある地点において堆積する。この現象の繰り返しにより、上流域で発生した SS は順次河道内を流下し、海に到達している。すなわち、河道内に貯留された SS が出水時の輸送量に寄与している可能性が高いと考えられている。しかしながら、SS の発生源と考えられる山地から河川への供給、山地流域における動態は明らかにされていない。本研究は、99 年 7 月出水時に鶴川の上流域に位置するパンケシュル川(更生橋)で得られた観測結果を中心に、出水時における河道内への SS の供給、輸送量について検討を行った結果を報告するものである。

1 下流域における出水時の SS 特性

図-1、図-2 はそれぞれ鶴川河口から 2.8km 上流に位置する鶴川橋における降雨出水(1997 年 8 月洪水)と融雪出水(1998 年融雪出水)時に行われた観測により得られた流量と SS 濃度の時系列変化を表したものである。上流域で発生した SS 高濃度成分が平均流速によってそのまま輸送されると考えると、観測される洪水波の流下速度の方が平均流速より早い場合、洪水のピークよりも遅れて高濃度の SS が観測されるはずである。しかし、降雨出水、融雪出水とも流量のピークに対して SS 濃度のピークが早く訪れる傾向がある。このことは、観測された SS が、山地上流域における山地斜面の浸食等を起源とする SS 以外の起源をもつ SS が存在する可能性を示すものである。

1998 年 4 月出水の鶴川橋における観測では、SS に吸着されている水質成分と河岸堆積物に吸着されている成分との比較により、洪水中に観測される SS と河岸の堆積物とは同質のものである事が確認された¹⁾。また、Hiroshi MIYAKE, Yasuharu WATANABE, Kiyoshi HOSHI, Norihide HASHIMOTO
 Study on Supply Process of Suspended Solids to Flood Flow

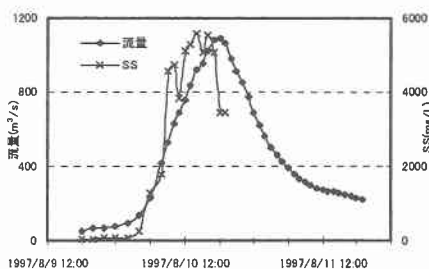


図-1 1997 年 8 月出水

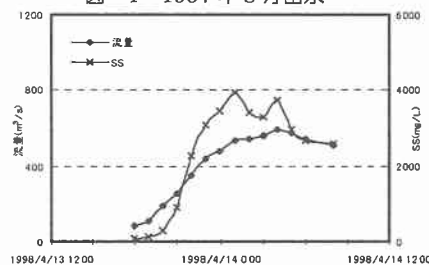


図-2 1998 年融雪出水

流心、および左右岸の SS 濃度の比較により、水位上昇と共に左右岸の SS 濃度が流心の濃度に比較して大きくなる事が確認されている²⁾。1999 年融雪出水前後の河岸堆積物の調査では、出水期間中に河岸堆積物が洗掘され再び堆積を受けている事が確認された²⁾。以上のような観測結果から、下流域においては、出水中は高水敷等に堆積している物質が、洪水波の到達による水位上昇によってまきあがり、SS となって観測されている可能性が高いことが考えられる。

図-3、図-4 は穂別橋、鷺川橋において出水のピークをはさんで観測が実施された 97 年 8 月、98 年 4 月、8 月の 3 出水の資料をもとに、各断面における低水路満杯流量によって無次元化した Q_* と、観測された SS の濃度を整理したものである。この図を見ると、穂別橋、鷺川橋ともに低水路満杯流量を超え、高水敷に水がのると、濃度は増加するが、増加の割合は低水路満杯流量以下の時の増加の割合に比較して低下する傾向がある。このことは、高水敷に水がのることによる掃流力の減少が関連していると考えられる。SS と流量の関係を整理する際に、多くの場合一本の累乗曲線によって近似されるが、鷺川においては低水路満杯程度の流量から傾きが変化する傾向があることから、このような現象を考慮に入れる必要がある。図-5~図-10 は、図-3、4 において求めた 2 種類の回帰式を用いて、97 年 8 月、98 年 4 月、8 月の 3 出水の SS を再現したものである。また、式(1)により誤差二乗和の平方根を算出し、整理したものが表-1 である。ここに、 N : 各出水の観測値数、 Q_{sobi} : 各出水の i 番目の観測値 (m^3/s)、 Q_{sai} : 各出水の i 番目の計算値 (m^3/s) である。

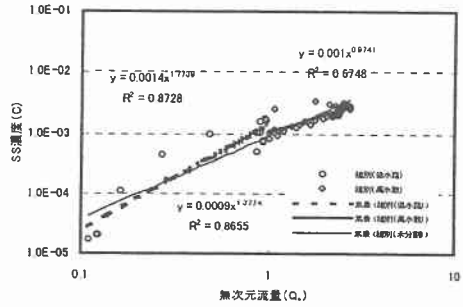


図-3 無次元流量と SS 濃度 (穂別)

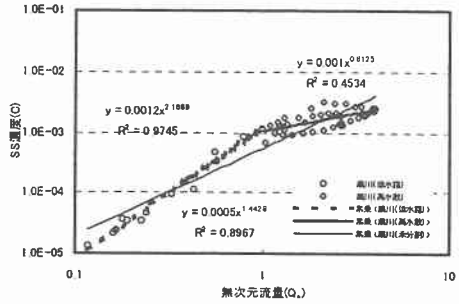


図-4 無次元流量と SS 濃度 (鷺川)

図-5~図-10 は、図-3、4 において求めた 2 種類の回帰式を用いて、97 年 8 月、98 年 4 月、8 月の 3 出水の SS を再現したものである。また、式(1)により誤差二乗和の平方根を算出し、整理したものが表-1 である。ここに、 N : 各出水の観測値数、 Q_{sobi} : 各出水の i 番目の観測値 (m^3/s)、 Q_{sai} : 各出水の i 番目の計算値 (m^3/s) である。

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sobi} - Q_{sai})^2} \quad (1)$$

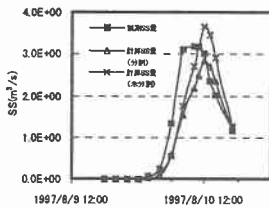


図-5 97 年 8 月出水 (穂別)

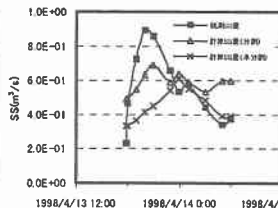


図-6 98 年融雪出水 (穂別)

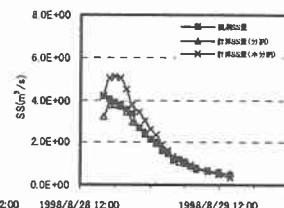


図-7 98 年 8 月出水 (穂別)

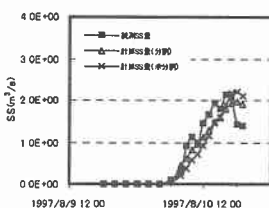


図-8 97 年 8 月出水 (鷺川)

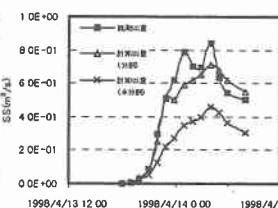


図-9 98 年融雪出水 (鷺川)

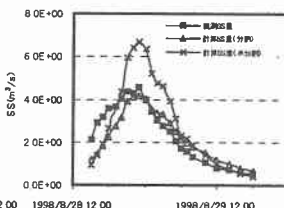


図-10 98 年 8 月出水 (鷺川)

これらより、二本に分割したもの（分割）の方が、一本で近似したもの（未分割）に比べ、全般に推定精度が向上していることが分かる。

表-1 計算値の比較

		總別		鷺川	
		分割	未分割	分割	未分割
1997年8月出水	e (m ³ /s)	2.17	2.27	1.19	1.64
1998年融雪出水	e (m ³ /s)	0.58	0.76	0.30	0.95
1998年8月出水	e (m ³ /s)	1.07	2.58	3.14	6.08

2 上流域における出水時のSS観測

2-1 流域概要と降雨概況

SSの発生源における動態を調べるために、同じ鷺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うこととした。図-11に観測を行った更生橋の概略位置を示す。パンケシュル川流域は鷺川流域のほぼ上流端に位置する流域面積73 km²、そのうち山地面積が71.5 km²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12.4 kmであり、占冠村占冠で鷺川に合流している。観測地点である更生橋は、鷺川との合流点より約300 m上流に位置する。出水時の降雨は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10 mm/hを超える強い雨となった。降雨分布は、図-12(a)に示すように3つの山をもった形をしていることが特徴である。なお、雨量は占冠のアメダスデータを用いている。



図-11 鷺川流域図

2-2 観測結果

流量、水質観測は降雨開始直後の7月28日21時から8月1日10時までほぼ3日半続けられた。なお、水質観測のための採水は橋の上からバケツによって行われた。図-12(b)に示すように観測値は一山目の流量の立ち上がりから、ピーク、3山目の減水部まで連続的に得られている。図-12(c)は更生橋における観測断面の地盤高と観

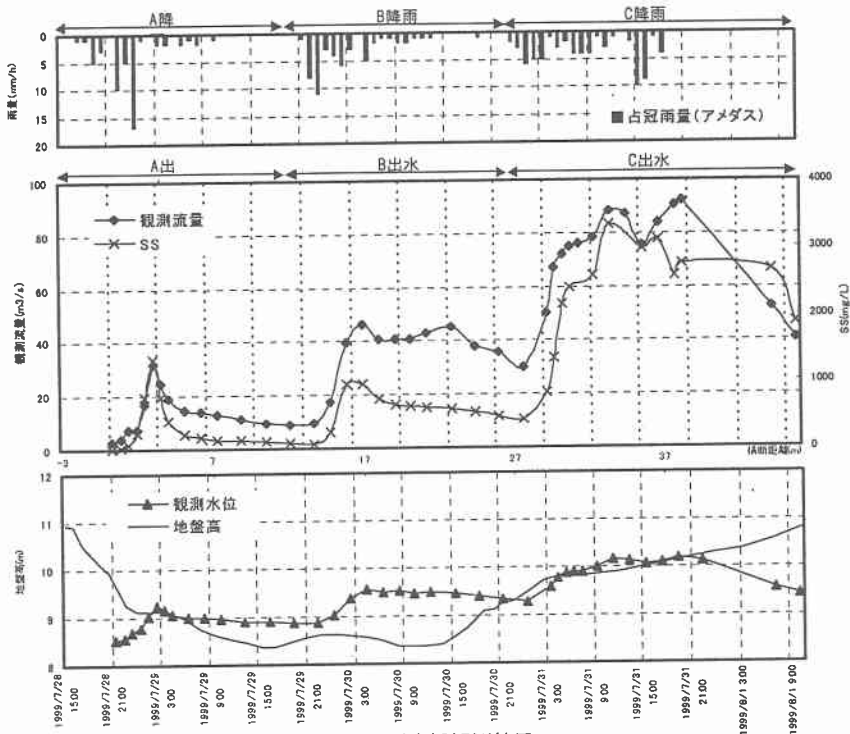


図-12 更生橋観測結果

測水位の関係を示している。1山目は、右岸において植生の付き始める高さ程度までの水位上昇であり、低水路河道満杯程度であると想定される。2山目は1山目を少し上回り、氾濫原と想定される箇所を一部冠水させる規模であった。また、3山目は氾濫原と想定される領域のかなりの部分が冠水する規模の大きい出水であったことがわかる。

3 更生橋における流量とSSとの関係

今回の降雨、出水を図-12のようにそれぞれA降雨、B降雨、C降雨、及びA出水、B出水、C出水に分割する。山地小流域である更生橋における今回の観測結果は、A出水、B出水、およびC出水の最初のピークと次のピークの間までについては、流量とSS濃度の時間変化がほぼ同位相で生起している。穂別橋、鷓川橋におけるこれまでの観測では降雨、融雪出水時ともSS濃度のピークは流量のピークより数時間早く訪れる傾向があり、下流域と異なる特徴が存在する。図-13は更生橋における流量と濃度の関係を示したものである。A出水時に比べ、B出水時は水位、流量が増加しているにもかかわらず濃度は減少しており、C出水の減水部では水位、流量が減少しているにもかかわらず、濃度は高濃度を保っている。

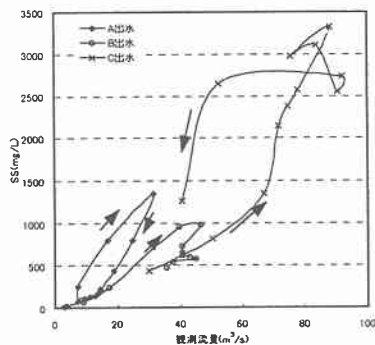


図-13 観測流量とSS濃

4 山地小流域におけるSS量の推定

4-1 観測されるSSの供給源

下流域である穂別橋、鷓川橋において観測されたSSは、濃度ピークが流量ピークより先に訪れる傾向があり、上流域において発生した高濃度のSS成分が輸送されてきたと考えるよりも、洪水波による水位上昇によりまきあげられた河岸のSSが大きく寄与している可能性が高い。しかしながら、SS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-12(b)に示すように、SS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SSと、洪水波の到達によってまきあげられたSS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SS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SS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。

①によって供給されるSS量は、山地斜面表層を流下する一次流出成分と関係があると思われる。そこで、観測されたハイドログラフを一次流出成分と二次流出成分に分離する。

4-2 一次流出量の算定

表-2は、更生橋で観測された、それぞれの出水期間における総雨量、総観測流出高をまとめたものである。なお、流量の観測値と観測値の間の値は、直線で補完した値を用いて流出高を算定している。表-2より、A出水期間では降雨のごく一部しか流出していないが、B出水期間では流出量が増加し、C出水期間では前期降雨の影響を受け、降雨量を上回る流出量が観測されている。このことから、A出水期間は流出量の大半が表層を流下する早い流出成分（一次流出）で構成され、C出水期間は一旦地中に浸透し、遅れて流出する成分（二次流出）が相当量を占めている事が考えられる。

そこで、観測流量をフィルター分離AR法³⁾によって一次流出と二次流出の2成分に分離し、SSとの関係をみ

表-2 総雨量と総観測流出高

出水	期間	総雨量(mm)	総観測流出高(mm)
A出水	7/28 11:00~7/29 18:00	58	15.4
B出水	7/29 19:00~7/30 21:00	53	45.4
C出水	7/30 22:00~8/1 10:00	70	125
合計		181	185.8

ることとした。結果を図-14に示す。なお、時定数 T_c は A 出水の滯減部より $T_c=23.5$ とした。日野ら³⁾は減衰係数 δ に関して 2.0~2.5 の値を推奨しており、打ち切り精度 ESP は 0.001~0.005 の値を用いているので、今回は $\delta=2.2$ 、 $ESP=0.005$ の値を用いて一次流出量、二次流出量を算定している。

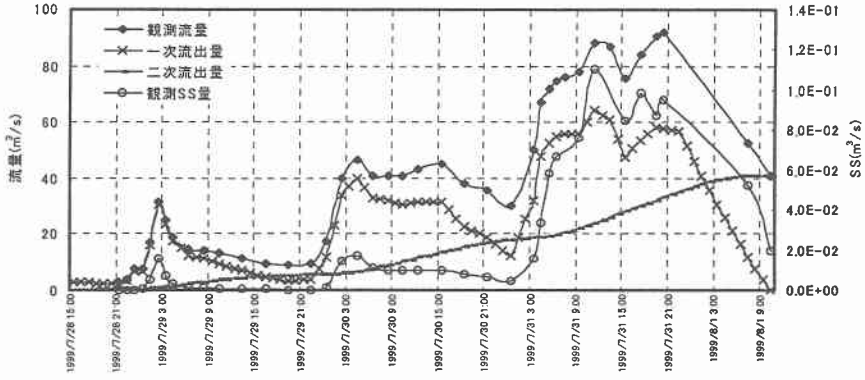


図-14 分離した一次流出量と二次流出量

図-14を見ると、A 出水では流出の大半を一次流出が占めており、連続する降雨のため徐々に二次流出が増加し、C 出水では流出の相当量を二次流出が占めている結果が得られ、今回の降雨はおおむねこのような流出状態であったと考えられる。

4-3 一次流出量と SS 量との関係

図-14を見ると、C 出水における観測流量と観測 SS 量のピーク生起時刻はずれているが、一次流出量と観測 SS 量のピーク生起時刻は一致している。このことから、一次流出量と観測 SS 量は極めて密接に対応していることがうかがえる。流出の大半を一次流出が占める A 出水において、一次流出量と観測 SS 量との関係を示したものが図-15である。式 (2) で表される、A 出水時の一次流出量と観測 SS 量との間の回帰式は高い相関を示している。

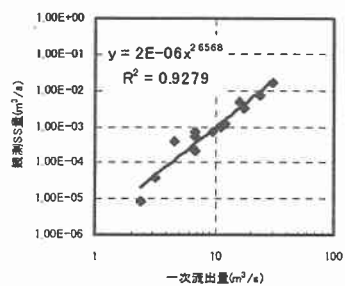


図-15 一次流出量と観測 SS 量の関係(A 出水)

$$Q_{sob} = 2E - 0.6Q_{pri}^{2.6568} \quad (2)$$

ここに、 Q_{sob} : 観測 SS 量(m^3/s)、 Q_{pri} : 一次流出量(m^3/s)。そこで、B および C 出水における SS も、同様に一次流出成分によって供給されると仮定し、 Q_{sr} : 降雨による一次流出成分によって供給される SS 量(m^3/s)とし、式 (2) の関係を用いて SS 量を算定した結果を図-16に示す。図-16 から A 出水時のみの一次流出量と観測

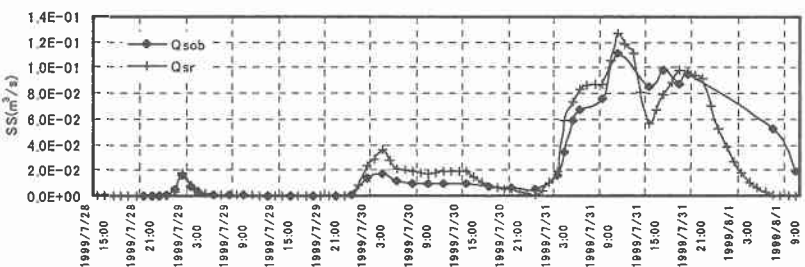


図-16 一次流出成分による SS 量の算定結果

SS 量の関係を用いても、B 出水、C 出水時の観測値に近い値をおおむね算出している。しかしながら、実際に観測された値よりは、大きな値を示す傾向にあるとともに、C 出水減水部において特に観測値との乖離が大きい。

4-4 算定結果の検討

観測された SS は上記①（雨水によるもの）、②（洪水波によるもの）の 2 種類が合成されたものであると考えられ、①については 4-3 で考慮した表層を流下する一次流出量と関係あると思われる。図-16 に示したように、算定結果はおおむね観測値に近い値を算出しているが、実際に観測された SS 量を上回っており、一次流出による SS 量を過大に算定していると考えられる。この原因としては以下の点が考えられる。

- ① A 出水時の観測 SS 量がすべて雨水によってもたらされたと仮定して算定しているが、図-13 を見ると A 出水時は流量に対してかなり高濃度の SS が観測されている。A 出水時は低水路内での水位上昇であるが、下流域同様に洪水波による河岸からのまきあげが相当量発生し、A 出水時の雨水による SS 量を過大に見積もっている。
- ② B 出水では A 出水より水位、流量が増加しているにもかかわらず、図-12(b)、及び図-14 を見ると、濃度は低下し、SS 量は同程度しか観測されていない。このことから、B 出水は直前の A 出水の影響を受けていることが考えられる。しかしながら、図-12(c)を見ると A 出水と B 出水の水位上昇は同程度であり、A 出水で巻上げられた SS が水位低下時に再び堆積したとすると、B 出水時にも再び巻上げられる可能性が考えられ、一次流出量と雨水によって供給される SS 量の関係自体が一定ではなく、前期降雨の影響を受け変化する可能性が考えられる。

以上のように、SS の発生源と考えられる山地から河川への供給メカニズムや、山地流域における動態は現時点では未解明の部分が多い。しかし、降雨、一次流出成分との関係が極めて強いことが明らかになったことから、今後さらに検討を進めていく必要がある。

まとめ

- 1) SS と流量の関係を整理する際に、鶴川、穂別においては低水路満杯程度の流量から傾きに変化する傾向があり、断面形状が急変する高さで二本に分割した回帰式を用いた方が、一本のものより再現性が良く、SS の輸送量を算定する場合このような現象を考慮に入れる必要がある。
- 2) 山地小流域である更生橋において、一次流出量と観測 SS 量との関係はきわめて強いと考えられ、A 出水時の一次流出量と観測 SS 量の間を用いて、全出水期間の一次流出による SS 量を算定した結果、おおむね観測値に近い値を得られたが、実際に観測された値より大きくなる傾向を示すとともに、観測値との乖離が大きい部分も見られ、山地から河川への供給、山地流域における動態について、今後さらに検討を進めていく必要がある。

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現地調査、水工学論文集、第 43 巻、pp.587-592、1999 年
- 2) 渡邊康玄、長谷川和義、橋本謙秀：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、水工学論文集、第 44 巻、2000 年（投稿中）
- 3) 日野幹雄、長谷部正彦：水文学流出解析、森北出版、1985 年
- 4) 佐藤耕治、渡邊康玄：栄養塩類を吸着した微細砂の高水敷等への堆積過程、第 43 回北海道開発局技術研究発表会発表概要集、2000 年