

河川上流域における流出の成分分離を用いた洪水時の SS 推定手法

Calculation method for load of Suspended Solids at upper region during floods

北海道開発局 開発土木研究所 環境研究室 ○正員 小川 長宏 (Takehiro Ogawa)

北海道開発局 開発土木研究所 環境研究室 正員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)

北海道開発局 開発土木研究所 環境研究室 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatugawa)

1. はじめに

河道内における土砂の浸食・堆積作用に伴う洪水流出能力の変化、河川構造物の維持管理、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ており、土砂の水系スケールでの管理に向けた取り組みが行われつつある。その中で洪水時の微細粒子の輸送量を測定するため、濁度や SS の測定が行われてきている^{1), 2), 3), 4)}。一方、近年河川における栄養塩類の輸送に土砂などの微細粒子が大きく関係していることが明らかにされている⁵⁾。微細粒子は洪水時、短期間に大量に輸送されることを考慮すると、洪水時の微細粒子の輸送量を推定することは河川管理を行う上できわめて重要な課題となっている。

本研究では昨年度の三宅らによる「洪水流への浮遊物質の供給過程」⁶⁾の結果を再度検討しながら、SS 輸送量の推定方について考察する。

2. 2000 年融雪出水

2-1. 観測概要

河川上流域における SS の動態を調べるために、鵡川の上流に位置するパンケシュル川の更生橋で観測を行った。図-1 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、鵡川流域のほぼ上流端に位置し流域面積 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 であり占冠村占冠で鵡川に合流している。2000 年 4 月 5 日 16 時～4 月 6 日 16 時に生じた降雨は、6 日 1 時までの 10 時間に最大雨量強度が 8mm/h で集中的に降り、その後断続的に 1～3mm/h の雨量強度であった。降雨分布を図-2(a) に示した。なお、雨量は



図-1 概略位置図

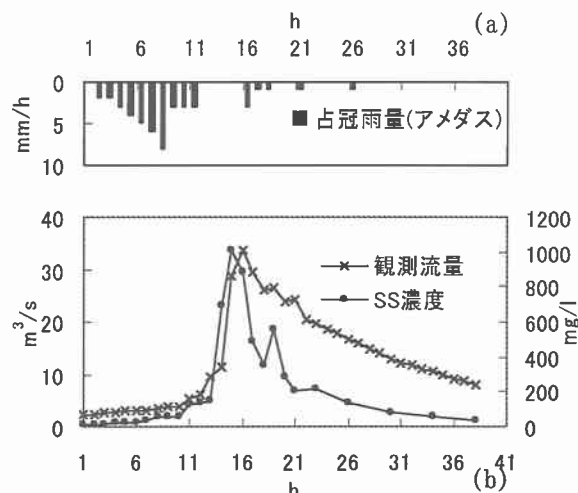


図-2 更生橋観測結果

占冠のアメダスデータを用いている。

流量と水質観測のための採水が降雨生起直前の 4 月 5 日 14 時から 4 月 8 日 14 時まで実施された。流量観測は、徒歩 2 点法及び浮子を用い、1 時間毎に行われた。また採水が橋上からバケツにより 4 月 6 日 13 時までは 1 時間毎、その後は 2～6 時間毎に水位の下降状況に合わせて実施されている。観測された流量と SS 濃度を図-2(b) に示す。

2-2. SS の挙動

今回対象としたパンケシュル川流域は流域面積が小さく、河道長の短い山地小流域である。ここで観測される SS の河川水への供給のされ方は、以下の 2 種類が考えられる。

- ①降雨によって発生する斜面表層を流れる流水により輸送され、雨水とともに河川水に供給される。
- ②河岸、高水敷に堆積している SS が、洪水波による流水によって巻き上げられ河川水に供給され、その後流量低下に伴い河岸・高水敷沈降する。

①により供給される SS は、斜面表層を流れる 1 次流出成分に関係があると考えられる。図-2 を見てみると、SS 濃度のピークが観測流量のピークよりやや早く出現しているが観測流量と SS 濃度はほぼ同位相で推移しており、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巻き上げられる SS がほぼ同時に現れると考え

られる。ここで、SS 濃度と流量との単位を揃えるために、SS 濃度に流量を乗じた SS 負荷量を土砂比重 2650kg/m^3 で割ったものを観測 SS 量とする。図-3 は、各流量における観測 SS 量の挙動を示した図である。図-3 をみると、流量の上昇期と下降期でループを描いている。すなわち、同一流量であっても、上昇期の方が下降期に比べて観測 SS 量が多いことを示している。流量の上昇期における観測 SS 量は、河岸等から巻上げられたものが加わり、下降期には河岸等へ沈降するためこのような現象が生じているものと考えられる。

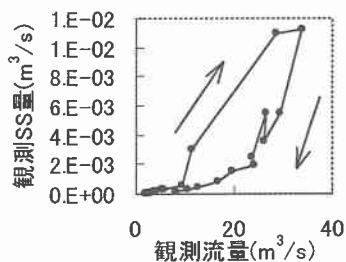


図-3 SS の挙動

3. 1 次流出と SS の関係

三宅らの研究⁵⁾によると、SS 成分は 1 次流出成分と密接な関係を持つとしている。そこで観測流量をフィルター分離法により 1 次流出成分と 2 次流出成分に分離し、1 次流出成分と SS 量との相関を見ることにする。ここで時定数 $Tc=19$ とした。また日野ら⁶⁾は減衰係数 $\delta=2.0\sim 2.5$ 、打ち切り精度 $ESP=0.001\sim 0.005$ の値を推奨しており、今回は $\delta=2.2$ 、 $ESP=0.005$ の値を用いて分離計算を行った。結果を図-4 に示す。2 次流出成分は観測流量のピーク付近から徐々に増加しており、流量ピーク前までは流出のほとんどを 1 次流出成分が占める結果となった。

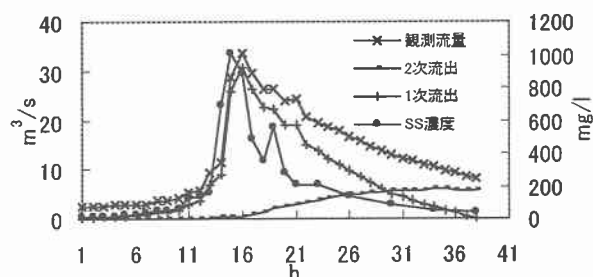


図-4 分離された流出成分と SS

1 次流出量と SS の関係をみるため、1 次流出量と観測 SS 量との相関をとり、図-5 に示した。1 次流出量と観測 SS 量との回帰式は式(1)で示される。

$$Q_{sob} = 5E - 05Q_{pri}^{1.49} \quad \dots(1)$$

ここに、 Q_{sob} : 観測 SS 量(m^3/s)、 Q_{pri} : 1 次流出量(m^3/s)である。回帰式の分散は 0.97 と高く、これからも 1 次流出成分と SS との関係が確認できる。式(1)に 1 次流出量を代入して再現性を見たものが、図-6 である。図-6 をみると、式(1)を導いたデータを使用したにもかかわらずピーク部分の再現性が悪くなっている。

三宅ら⁵⁾は山地小流域である更生橋において、1 次流出量と観測 SS 量とは密接な対応があるとしているが、今回の出水例においてはそれは一致しなかった。この理由として図-3 においてピークに至る上昇期の観測点数が

少なく、後半の下降部における観測点数が多いため、式(1)で表される回帰式が、水位の下降部に対する重みが大きくなってしまったということが挙げられる。また 1 次流出が高い部分においてループを描く傾向が見られるが、回帰式はこの現象を表すことができない。さらに観測期間が 4 月 5 日～4 月 8 日であり、融雪期間中の降雨による出水であったことが挙げられる。検討した期間の総降雨高は 19.7mm であったのに対し、総流出高は 44mm であった。したがって、観測流量は融雪による出水と雨水による流出が一緒になった出水形態であったものと考えられ、フィルター分離する際の時定数の値が上手くとれず、1 次流出成分と 2 次流出成分の分離が十分にされていないことが想定される。

そこで、融雪量が入らない更生橋における 1 次流出成分と観測 SS 量との関係を把握するため、1999 年 7 月 28 日～8 月 1 日に生じた出水について同様の検討を行う。

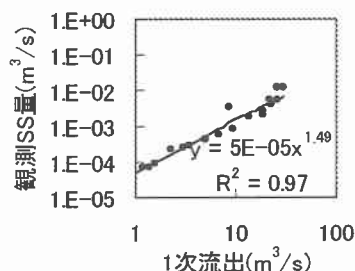


図-5 1 次流出と観測 SS 量

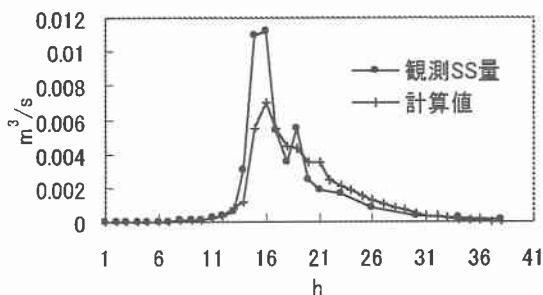


図-6 計算結果

4. 1999 年 7 月 28 日～8 月 1 日 出水

この出水については、三宅ら⁵⁾によって解析・検討が行われているが、当時のデータに不備なところがあり、今回データが整備されたのでそのデータを用いて検討を行う。更生橋で観測された流量を、フィルター分離法により 1 次流出と 2 次流出に分離した。ここで、時定数 Tc は 1 山目出水の逓減部より $Tc=23.0$ 、減衰係数 $\delta=2.2$ 、 $ESP=0.005$ の値を用いて計算を行った。結果と観測された SS 濃度を、図-7 にあわせて示す。ここで便宜上、出水を図-7 にあるように 3 つに分けそれぞれ A 出水、B 出水、C 出水と呼ぶこととする。

観測流量をフィルター分離する際、各流出量が負の値をとることのないように分離する。図-7 の C 出水における 86 時間目以降の流量は観測しておらず、その後流量がどのように減衰しているのかは不明であるため、特に C 出水において流出量が十分に分離されているとはいえない。しかしながら A、B 出水についてはその影響は小さく、また出水成分がほぼ 1 次流出で占められており、2 次流出量がこれ以上大きくなることは考えられないため、分離に関して A、B 出水は問題が無いものと考えられる。

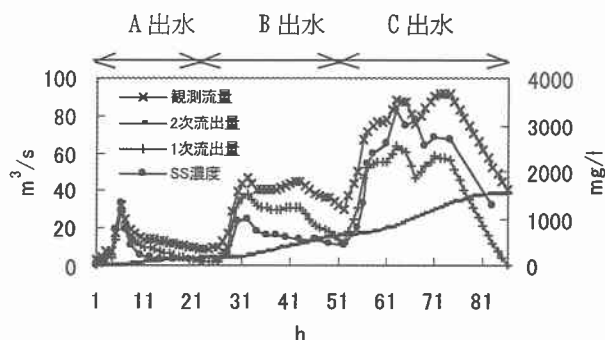


図-7 分離された流出成分と SS

そこで、A、B 出水について検討していくこととする。特に、ほぼ 1 次流出成分で占められていると判断される A 出水について、分離し

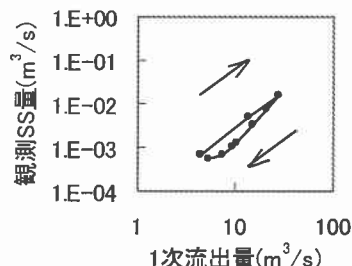


図-8 A 出水における SS の挙動

た 1 次流出成分と SS の関係を調べる事にする。図-8 は、A 出水での各 1 次流出量に対する観測 SS 量の挙動を示した図である。図-8 をみると、やはり上昇部と下降部でループを描いている。観測流量及び 1 次流出量のピークと SS 量のピークが一致している A 出水において、SS 量の 2 価性が出現していることから、鶴川の下流に位置する鶴川橋や穂別橋で確認されている⁹⁾河道内の堆積物の流水による巻上げ、沈降が更生橋においても生起しているものと判断される。同流量で観測 SS 量が高い値を示すものには巻上げ成分が多く、低い値を示すものには沈降成分が多く含まれると考えられる。

5. 1 次流出量と SS との関係

河川において数年単位の長い期間で考えると、洗掘・堆積は無視できないものになるが、佐藤ら⁹⁾は鶴川下流域の穂別橋～鶴川橋間で河岸堆積物の巻上げ・沈降を考慮した不定流河床変動計算を行い、低水路満杯程度の洪水期間中における SS の挙動について河床堆積物の巻上げ・沈降を考慮する必要があるとともに、一洪水期間中で巻上げ量と沈降量がほぼ均衡していることを報告している。そこで、A 出水においても一洪水期間を通せば巻上げ成分と沈降成分が同量になるものとし、観測 SS 量から両者を差し引いたものが 1 次流出によって上流から輸送されてくる SS と考えることとする。

この 1 次流出によって輸送される観測 SS 量を式(2)で表す。

$$SS_{pri} = aQ_{pri}^b \quad \cdots(2)$$

ここに、 SS_{pri} : 1 次流出による SS 量(m³/s)、 Q_{pri} : 1 次流出量(m³/s)、 a, b : 係数 である。

観測 SS 量を SS_i とし、ループがはじまる観測点の観測 SS 量及び 1 次流出量を $SS_0, Q_{pri,0}$ とすると、式(3)が成り

立つ。

$$\begin{cases} SS_1 \Delta t_1 + SS_2 \Delta t_2 + \cdots + SS_n \Delta t_n = \sum_{i=1}^n a Q_{pri,i}^b \Delta t_i \\ SS_0 = a Q_{pri,0}^b \quad \cdots(3) \end{cases}$$

ここで、 Δt_i は SS_i が観測 SS 量を代表する時間である。

(2)、(3)式に A 出水における各観測量を代入することにより 1 次流出による SS 量は式(4)で示される。

$$SS_{pri} = 3E - 05Q_{pri}^{1.76} \quad \cdots(4)$$

図-9 は観測 SS 量と(4)式の関係を表した図である。式(4)とループを描く線に囲まれた上側の部分が巻上げにより生じた SS を、下側の部分が沈降により減少した SS 量をそれぞれ示すことになる。次に式(4)を用いて A、B 出水成分について検討を行う。図-10 は、式(4)を用いて SS 量を再現したものと観測 SS 量とを比較したものである。図-10 をみると A 出水について上昇部からピークを過ぎたところまで、観測 SS 量より計算値が小さくなっている。この差が河岸等からの巻上がり量と考えられる。その後の下降部において、計算値が観測 SS 量より大きくなっており、その差が河岸等への沈降量と考えられる。また総観測 SS 量は 155.7m³、総計算値は 153.3m³ であり一洪水を通しての SS 量は概ね再現している。一方 B 出水については A 出水とは逆に上昇期においてほとんど巻上がり成分はみられず、ピーク付近から沈降成分が多いと思われる区間が続き、下降部である 46 時間目にして巻上がり量が発生している結果となった。これについては B 出水生起前後に発生した A・C 出水との流出量の関連や、当時の現地状況を含めて、別途検討する必要がある。B 出水の総観測 SS 量は 839.2m³、総計算値は 977.5m³ であり、B 出水は A 出水ほどではないが一洪水全体として SS 量をよく表していると考えられる。

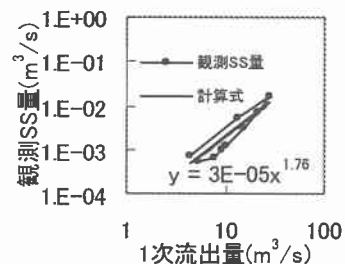


図-9 観測 SS 量と計算式

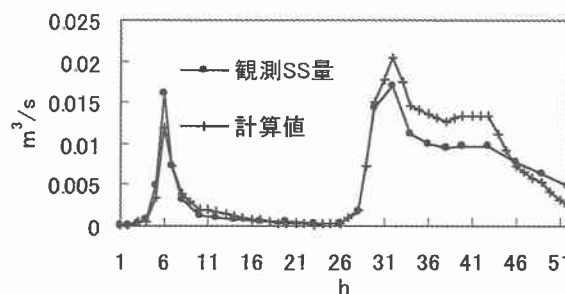


図-10 計算結果

6. 更生橋出水例への適用

1999 年の出水で求めた 1 次流出による SS 量推定式(4)を、前出の 2000 年出水に適用する。ここで 2000 年の出水の

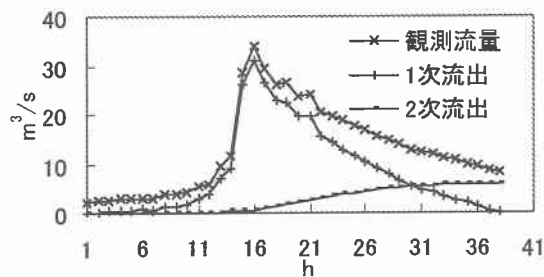


図-11 分離された流出成分

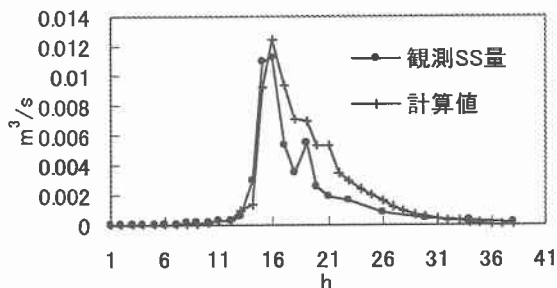


図-12 計算結果

観測流量を、融雪の影響が入っていない1999年のA出水における逓減部の時定数 $T_c=23.0$ を用い、フィルター分離法により分離し直すこととした。結果を図-11に示す。

分離し直した1次流出成分を用い、式(4)により計算した1次流出によるSS量の結果を、図-12に示す。図-12をみると観測SS量と計算値がピークでほぼ一致している。

また、上昇部において観測SS量の方が計算値よりも大きく、下降部において逆転するという傾向が現れている。しかしながら1999年の出水例におけるA出水と比べると、巻上がり成分が少なく、沈降成分が多くなっており総観測SS量は 201.3m^3 、総計算値は 272.7m^3 であった。

図-13は2000年出水の観測SS量と計算値との関係を表した図である。図をみると観測SS量はやはりループを描いているが、式(4)とループを描く線に囲まれた上側の部分が下側の部分に比べ少なく、巻き上げに比べ沈降

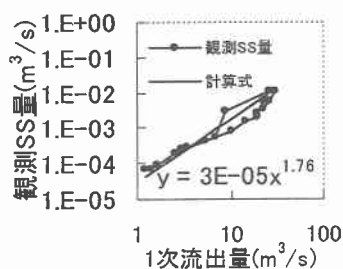


図-13 観測SS量と計算式

※黒く見えるのは、雪面上にシルトが堆積している



図-14 2000年4月6日12時 更生橋

が多いと想定される結果となっている。巻上げが少ない原因として、河岸上の積雪が考えられる。図-14は観測SS量のピークの4時間後における4月6日12時の更生橋付近の状況を撮った写真であるが、写真をみると河岸が雪で覆われており、河岸堆積物が流水にさらされる面積が夏期出水時である1999年のA出水時に比べ、小さかったことが考えられる。一方、沈降量は積雪の影響はないため、観測SS量と計算値との間に差ができたと考えられる。

7. おわりに

以上2つの洪水を用いてSS量の推定について検討を行った。SSの流出に河岸からの巻上げ、沈降の概念を持ち込み、1次流出とSSの流出との関係をより明確にした推定法により、更生橋での夏期出水において概ね再現できた。この手法により、ある程度のSSの推定は可能であると思われる。

しかし、河岸からの巻上げ、沈降量を物理量と結びつける段階には未だ至っていないため、今回の計算には含まれていない。融雪時における河道内の状況を含め、調査を継続していく必要がある。

参考文献

- 1) 清水康行、嵯峨浩、早川博、品川守：石狩川の土砂流出に関する研究、土木学会水工学論文集 42 巻、PP1039-1044、1998 年
- 2) 平林桂、平舘治、望月達也他 11 名：洪水時広域採水による湖沼川水系の土砂動態観測、土木学会水工学論文集 42 巻、PP1045-1050、1998 年
- 3) 上片野聡子、清水康行、斎藤大作、吉田義一：ダムを含む沖積河川の土砂移動について、土木学会水工学論文集 43 巻、PP581-586、1999 年
- 4) 山口甲、三田村一弘、渡辺浩司：大河川における濁度観測値による土砂輸送量の計算、土木学会水工学論文集 44 巻、PP401-406、2000 年
- 5) 三宅洋、渡邊康玄、星清、橋本識秀：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II, IV, VII部門)第56号(B)、P132-137、2000 年
- 6) 日野幹雄、長谷部正彦：水文流出解析、森北出版、1985 年
- 7) 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粒砂の堆積状況、土木学会水工学論文集 44 巻、PP413-418、2000 年
- 8) 佐藤耕治、渡邊康玄：洪水時における微粒砂の縦断方向輸送、土木学会水工学論文集 45 巻、投稿中