

大河川における濁度観測値による 土砂輸送量の計算

CALCULATIONS OF THE SEDIMENT TRANSPORT BY TURBIDITY DATA IN A LARGE RIVER CHANNEL

山 口 甲¹・三田村 一 弘²・渡 辺 浩 司³

Hajime YAMAGUCHI, Kazuhiro MITAMURA and Kouji WATANABE

¹正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 1-1)

²正会員 株式会社 北開水工コンサルタント (〒080-0314 北海道河東郡音更町共栄台西 11 丁目 1)

³正会員 北海道開発局 室蘭開発建設部 (〒051-8524 室蘭市入江町 1-14)

The present study addresses the procedure to predict the time dependent of suspended material loads from discharge hydrographs by using of a newly proposed turbidity function. The turbidity, which is relatively easily measured even during big floods, is a convenient index to understand transport mechanisms of suspended material load. The turbidity has different characteristics in the rising and falling limbs of flood hydrographs. This hysteresis effect in the relationship between turbidity and discharge is modeled by a nonlinear function in the present study. On the basis of simulation results, the turbidity function appears to have effectual methods for predicting suspended material loads.

Key Words : *suspended material load, bed load, turbidity function*

1. まえがき

積雪寒冷地の大きな流域を持つ河川の土砂流出量は極めて大きく、その土量はダム貯水池の堆砂、土砂の氾濫、河道堆積、海域拡散等をもたらし、災害を助長したり、河川水域の環境変化の原因となっているので、河川流域を土砂の流砂系として位置づけ、水系全体の土砂動態現象を究明する必要がある¹⁾。ところで河道内の流出土砂量の輸送形態は掃流砂、浮遊砂、wash load に区分されているが、形態別の量的実態把握は未だ十分とは言えず、また融雪出水と降雨出水、出水の増水期と減水期等のS.Sの相違等は論じられているものの、流出土砂量の算定に反映させるには多くの研究課題が残されている。

本文は、石狩川流域の流量観測地点において、土砂輸送量の観測と1時間毎の濁度の連続観測を行い、その資料を分析して融雪出水・降雨出水の土砂輸送量の相違、出水の増水期・減水期における土砂輸送量の違いを明らかにして、降雨による出水の土砂輸送量を計算する方法を述べる。

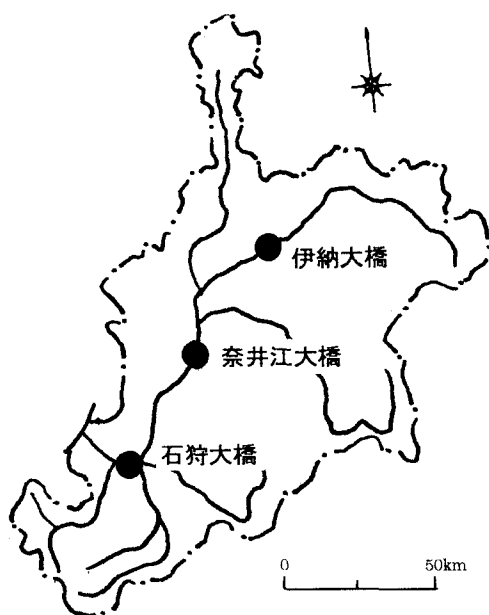


図-1 流送土砂・濁度観測位置

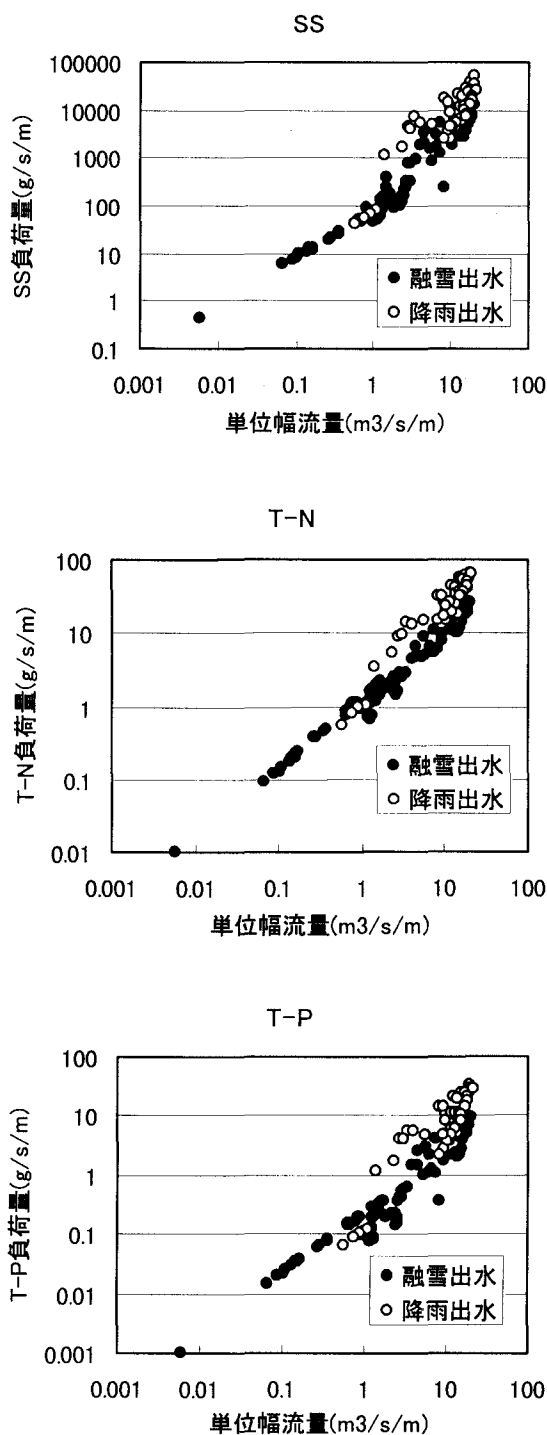


図-2 単位幅当り物質輸送量 (奈井江大橋)

2. 土砂輸送量の観測

(1) 土砂輸送量

観測対象河川である石狩川は総流域面積 14,330km² を有する大規模河川であり、流域平均降水量は 1,300mm で年平均 $15 \times 10^9 \text{ m}^3$ の流量によって多量の土砂が運搬されている。また同一流量での土砂輸送量は降雨出水時に大きく、流量の時間変動も大きいが出水期間が短い傾向が

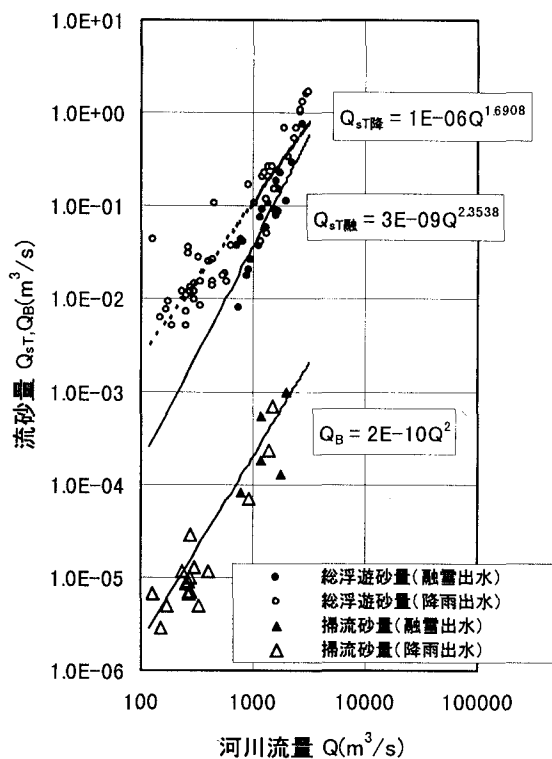


図-3 河川流量と流砂量 (石狩大橋)

ある。一方、融雪出水時の土砂輸送量は小さく、かつ流量の時間変動が小さいが長時間続くことが多い。

これらの実態を把握するため、平成 9, 10 年に図-1 に示す 3 地点で流下物質の観測を行った。観測対象とした測定項目は、掃流砂、浮遊砂、土砂の粒径、濁度、総窒素、総リン及び水深、流速である²⁾。掃流砂は土研式採砂器を用い、浮遊砂はバンドーン式採水器で採水して、粒度分析はコールターカウンター法、S.S は重量法、濁度は積分球式光電光度法による。総窒素 (T-N)、総リン (T-P) は水質分析告示 140 号に基づき計測した。また水深はロッド、流速はプライス型流速計を用いている。それぞれの計測点は、垂直方向 2 点 (2 割, 8 割)、横断方向 5 測線である。流速が大きくなり、計測器具の水中固定が困難な出水では、横断方向 4 測線上の水面のみの観測とした。その一例として河道単位幅当たりの輸送量を流量との関係で表すと、図-2 のとおりでいずれの物質とも流量との相関性が見られ、かつ融雪出水と降雨出水では輸送量に差異が見られることが判明した。また、単位幅当たりの輸送量は、3 観測所ともおおむね S.S が 100 に対し、総窒素 1、総リン 0.1 の割合で輸送されているが、更にそれぞれの物質の発生源及びその輸送過程の究明が必要である。

また、筆者らは石狩大橋で先に掃流砂及び浮遊砂を観測した³⁾。この観測では水面幅 250m、平均水深約 9m の河道で、垂直方向 0.5m 間隔、横断方向 17 測線上で浮遊砂は 1 回あたり約 170 点、掃流砂は 17 測線上の河床面で測定している。測定項目は S.S、掃流砂量のほかに各測

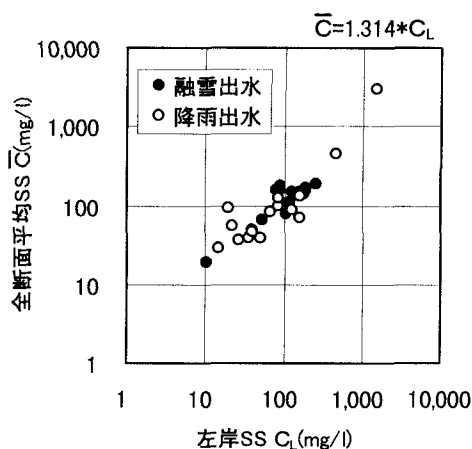


図-4 左岸 S.S. と全断面平均 S.S. (石狩大橋)

点の水深、流速である。また、観測は融雪出水及び降雨出水の増水期と減水期を比較できるように、観測時期を設定し観測している。観測成果を流下断面全体の河川流量 Q と掃流砂量 Q_B 、総浮遊砂量 Q_{st} の関係で図-3 に示している。図からわかるように、掃流砂量は河道内の水量に支配されて移動する現象であるから、融雪出水及び降雨出水での違いは見られない。ところが、wash load を含む総浮遊砂量は、融雪出水と降雨出水で輸送量の相違が顕著であり、同じ流量では降雨出水のほうが幾分多く輸送されていることがわかる。また降雨出水では流量 Q との相関性が良くないように見られるが、その原因は増水期の輸送量は大きく、減水期の輸送量が小さいことによるものである。

このように、融雪出水を伴う積雪寒冷地の河川において、土砂輸送量を論じるにあたって基礎となる流砂量観測は、融雪出水及び降雨出水それぞれの出水で測定することが重要であり、また1つの出水にあつては、増水期・減水期それぞれについて連続して観測する必要がある。

また、この流砂量観測値を用いて、河道断面内の S.S. の分布形状を検討したが、その中から次に述べる水質自動監視装置による毎時の濁度測定が河岸で行われていることを考慮して、河岸における S.S. 観測の有為性を検討した。

河岸の S.S. を C_L 、流路全体の平均 S.S. を $\bar{C}$ と表し、次式で求める。

$$C_L = \frac{1}{q} \int_a^h c_i \cdot v_i \cdot dh \quad (1)$$

$$q = \int_a^h v_i \cdot dh \quad (2)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{Q} \int_0^B \int_0^h c \cdot v \cdot dh \cdot dB \quad (3)$$

$$Q = \int_0^B \int_0^h v \cdot dh \cdot dB \quad (4)$$

ここに q : 流路単位幅の流量 ($m^3/s/m$)、 c_i : 河岸測線の

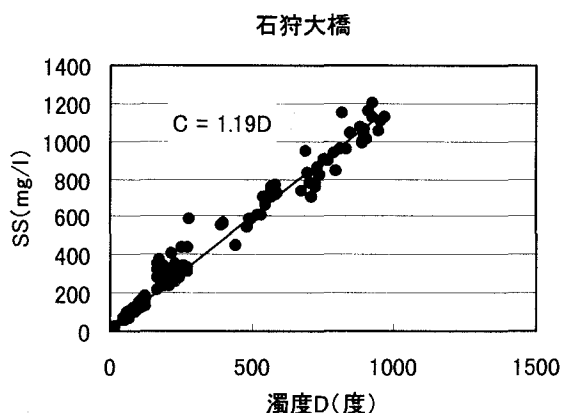
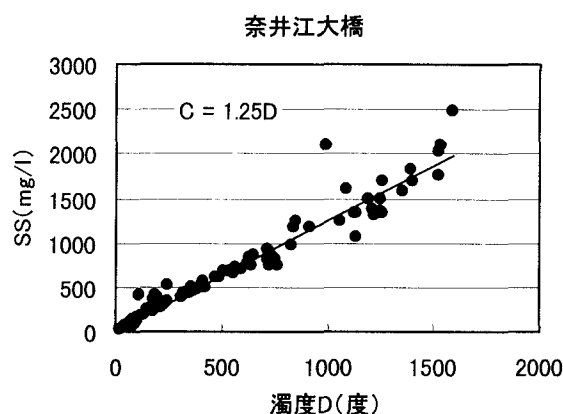
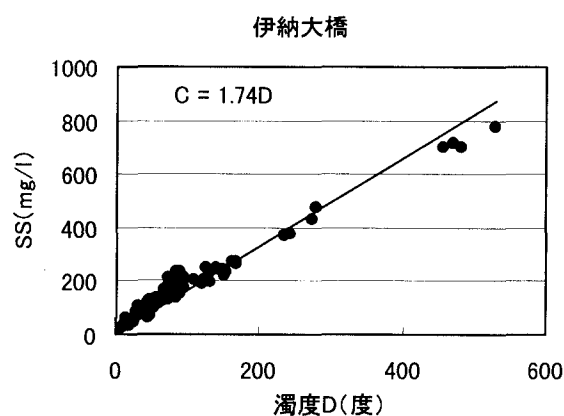


図-5 濁度と S.S

任意水深の S.S. (g/m^3)、 c : 任意地点の S.S. (g/m^3)、 v_i : 河岸測線任意水深の流速 (m/s)、 v : 任意地点の流速 (m/s)、 a : 境界層厚 (m)、 h : 水深 (m)、 dh : 区分水深 ($0.5m \sim 1.0m$ 間隔)、 B : 河幅 (m)、 dB : 区分幅 ($15m$ の測線間隔) 観測値によれば C_L と $\bar{C}$ の関係については、図-4 に示すとおりで次の相関式を得た。

$$\bar{C} = 1.314 \cdot C_L \quad (5)$$

この調査結果は、危険性が少なく、また観測が容易である河岸において S.S. を測定することが、物質輸送量に関するデータの蓄積を容易にすることを意味する。

(2) 濁度と S.S

北海道開発局は、水質の監視を目的として、図-1に示す3箇所の河岸において、pH、DO、電気伝導率、濁度、CN、NH₄の6項目を1時間毎に計測している。そのデータのうち濁度の観測値に着目して、土砂輸送量に換算できないかを調査した。まず濁度データが計測されている3地点で採水した流水について、濁度(度)とS.S(mg/l)を同時に計測した。その計測方法は、(1)に述べた方法と同じである。その結果、図-5に示すようにそれぞれの関係は比例関係と見ることができる⁴⁾。

C = α · D (6)

ここに C : S.S(mg/l), D : 濁度(度), α : 換算係数
換算係数αは、測定地点によって異なった値を示しており、測定する河川によって示される固有値と考えられる。しかし、同一地点では、濁度値の大小、また融雪出水と降雨出水の違いなどでは、あまり変化しない値と考えて良い。

αが観測地点によって異なる要因は未だわからないが、今回の3箇所の分析結果から見ると、上流側ほど大きい値を示しており、このことは浮遊中の土砂粒径と関係するとも考えられる。これらの関係を1つの例として、河床砂礫の平均粒径 d_mとの関係で表わすと図-6の通りであるが、いずれにせよそれらの検証は今後の課題である。

しかし、今回の調査で濁度とS.Sとの関係が得られたことは、濁度 D と流量 Q の時間観測値が得られれば、または流量のハイドログラフは一般的にデータがそろっているので、何らかの方法で濁度の時間毎の値が予測できれば、出水毎のS.S輸送量の計算が可能となることを示している。

3. 濁度関数の分析

出水時の濁度と流量は、流量が大きくなると濁度は大きくなる関係にある。しかし、出水の増水期と減水期では同一流量に対する濁度は増水期が大きい。また、濁度が最も大きい値が発生する時刻は、流量の最大値が発生する時刻とは限らない。その例を図-7に示しているが、石狩大橋(流域面積 12,697km²)においては、濁度が流量に比べて先行しており、また毎時刻の濁度は、時系列的に見て、流量の単位時間当たりの変化量 dQ/dt の時系列変化と位相が合っている。また、濁度と流量の関係は、図-8に示すとおり時刻毎に変動していて、石狩大橋(12,697km²)、奈井江大橋(8,943km²)、伊納大橋(3,379km²)ともに増水期の濁度は大きく、減水期には小さくなり、流量の変化に伴う濁度のヒステリシスは右回りのループを描く関係が見られ、更には融雪出水に比較して降雨出水のほうが濁度値が大きくなる傾向が見られる(図-9参照)。これは、土砂輸送量観測において指摘したとおり、

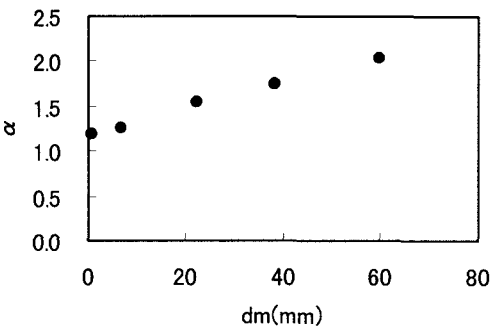
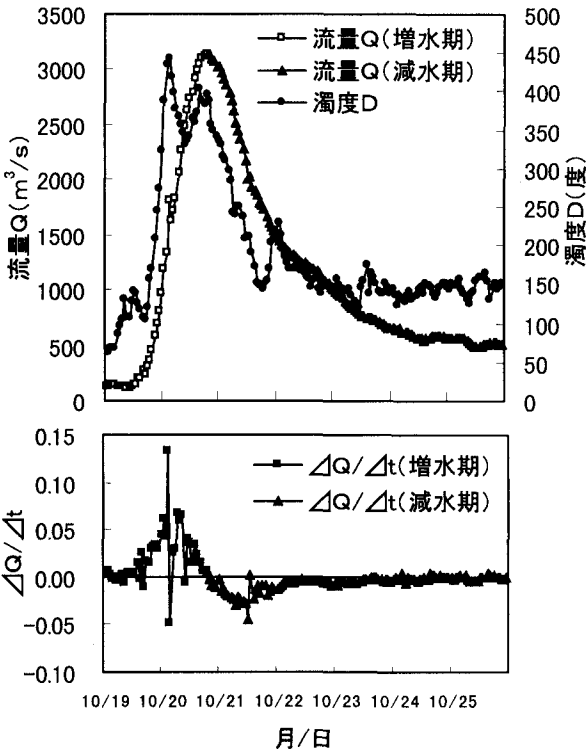


図-6 河床砂礫 d_mと α



昭和54年10月19日～25日 実測値(石狩大橋)

図-7 流量・濁度・ΔQ/Δtの時間変化

総浮遊砂量は降雨出水の場合が大きいことと符合した結果となっている。

これらの毎時の濁度(度)と流量 Q(m³/s)との関係に着目して、その関係を次式に示す簡単な濁度関数で考えてみる⁵⁾。

D = K₁Q^{P₁} + K₂ dQ/dt (7)

さらにS.S Cと濁度 D には、C = α · D の関係があることは先述のとおりであるので、総浮遊砂量 Q_{st}は式(7)を用いて次のように表わされる。

Q_{st} = (α/γ) × 10⁻⁶ · { K₁Q^{P₁} + K₂ dQ/dt } · Q (8)

式(7)、(8)において D : 濁度(度), Q : 流量(m³/s), Q_{st} : 総浮遊砂量(m³/s), γ : 土砂の単位重量(t/m³), C : S.S(mg/l, g/m³), K₁, K₂, P₁, α : 係数

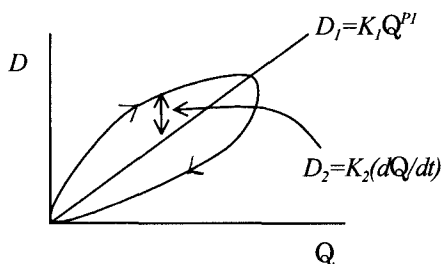


図-8 流量と濁度の関係

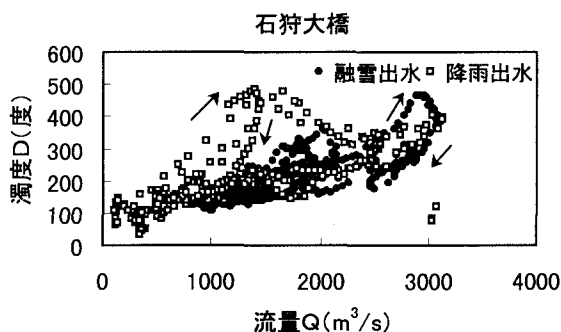


図-9 流量と濁度 (出水各3例)

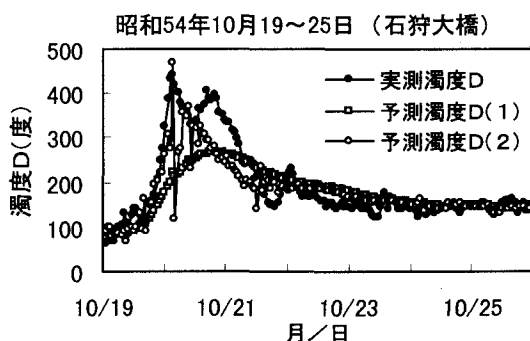
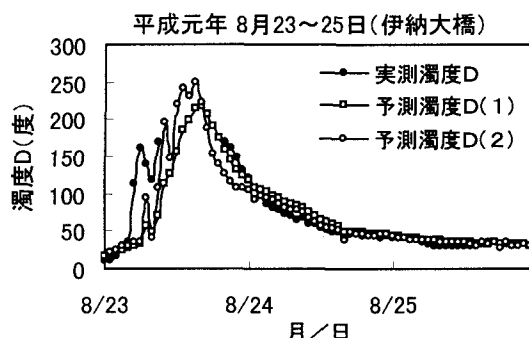


図-10 濁度関数による再現計算

濁度関数の適合性を検証するため、伊納大橋、奈井江大橋、石狩大橋の3観測所における融雪出水・降雨出水それぞれ3洪水について、毎時の流量から実測した濁度を再現するために最も適合する平均した係数 P_1 、 K_1 、 K_2 を同定する。同定値を用いた濁度関数による再現計算結果は図-10に示す。予測濁度 $D(1)$ は式(7)の第1項のみで計算し、予測濁度 $D(2)$ は第2項も使用した場合である。予測濁度 $D(2)$ が良い再現が得られており、式

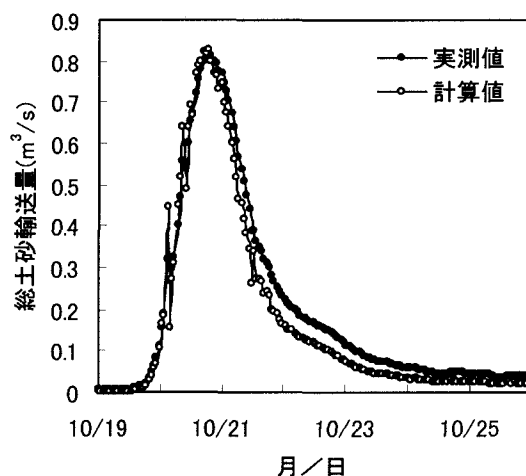


図-11 土砂輸送量計算例
(石狩大橋 S54. 10. 19～25)

(7)の妥当性がわかる。同定した値は P_1 は0.6～2.0の範囲にあり、その値を観測所、出水毎に示すまでには至っていない。また、 K_1 は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 、 K_2 は $10^1 \sim 10^3$ と観測所、出水毎にランダムな値となり、これら係数の変動については今後検討を要する。

4. 土砂輸送量の計算

次に濁度関数と流砂量の相関式を用いて、降雨出水を事例として、石狩大橋における総土砂輸送量を計算し、濁度関数の適合性を検証する。

まず濁度関数を用いる方法は次による。石狩大橋における時間濁度を測定する水質自動監視装置は、石狩川の左岸に設置されているので、濁度関数で計算した濁度は河岸の値である。また、河道全断面のS.S.Cは、先に述べた式(6)、(5)を用いて、濁度値から求められる。さらにS.Sを含砂量と考え、これらの観測値による相関式と濁度関数並びに流量 Q (m³/s)を用いて、総浮遊砂量 Q_{st} (m³/s)を求める(石狩大橋)。

$$Q_{st} = \frac{1.314 \cdot \alpha}{\gamma} \times 10^{-6} \left\{ K_1 Q^{P_1} + K_2 \frac{dQ}{dt} \right\} \cdot Q \quad (9)$$

石狩大橋においては、 $\alpha = 1.19$ 、 $\gamma = 2.65$ (t/m³)を用いて、 Q_{st} を計算する。また、 K_1 、 P_1 、 K_2 は当該出水で水質自動監視装置による実測値で同定した値を用い、計算した。また、掃流砂量 Q_b (m³/s)は、出水の増水期・減水期ともに流量と一定の関係が見られるので、石狩大橋における現地観測による相関式から求める(図-3参照)。

$$\text{石狩大橋 } Q_b = 2 \times 10^{-10} Q^2 \quad (10)$$

よって、総土砂輸送量 Q_T が計算できる。

$$Q_T = Q_{st} + Q_b \quad (11)$$

また、流砂量観測値を用いる方法は、図-3に示した総浮遊砂量及び掃流砂量と河川流量との相関式を用いて、総土砂輸送量を計算し、前者の濁度関数を媒体とした土

砂輸送量との比較を行った。総浮遊砂量 Q_{st} は式 (12)、掃流砂量 Q_B は式 (10)、総土砂輸送量 Q_T は式 (11) を用いる。

$$Q_{st} = 10^{-6} Q^{1.6908} \quad (12)$$

石狩大橋における降雨出水の計算例を図-11 に示す。実測値 (●) は、図-3 に示す流量と総浮遊砂・掃流砂の関係を示す相関式を用いて算出したものである。計算値 (○) は、それぞれの出水について同定した係数を用いて式 (9)、(10)、(11) により算出しており、毎時間輸送量の再現性は良いことがわかる。

5. まとめ

大きな流域を有する河川の土砂輸送量は、シルト、粘土などの微粒子で構成されている wash load が卓越しているため、その土量を把握するため総浮遊砂量の観測を行った。また、浮遊物質量を表わす S.S と濁度には、一定の関係があることが確かめられた。次に、流量をパラメーターとする濁度関数を用いて、その濁度を計算する方法を提唱した。そして濁度関数から S.S と濁度の関係を用いて総浮遊土砂量を推定する方法を考究し、その精度を検討した。その結果、土砂輸送量の観測及びその分析から次の諸点が明らかになった。

- (1) 出水時に河道を流下する輸送物質のうち土砂、総窒素、総リンは重量でおおむね 100 : 1 : 0.1 の割合である。
- (2) 同一流量で輸送される土砂量を見ると、降雨出水による輸送量は融雪出水による輸送量よりも大きく、出水原因別に輸送量を検討する必要がある。

- (3) また 1 つの出水でも、増水期と減水期により土砂輸送量に違いがあるので、それぞれの時間帯に観測を行い、土砂輸送量の実態を把握する必要がある。
- (4) 石狩川石狩大橋における土砂輸送量は総浮遊砂が卓越し、総浮遊砂量は掃流砂の 500～1,000 倍程度大きい。
- (5) 濁度と S.S には一定の関係が有るものの、その関係は観測地点により異なるので、観測地点毎に測定する必要がある。
- (6) 出水時に見られる濁度の時間変化は、流量 Q と流量の時間変動量 dQ/dt との関係で示す濁度関数によって表わすことができる。
- (7) 濁度関数、濁度と S.S の関係等から 1 出水当たりの総土砂輸送量の計算が可能である。

参考文献

- 1) 河川審議会：流砂系の総合的な土砂管理に向けて、総合土砂管理小委員会、平成 10 年 7 月。
- 2) (財)北海道河川防災研究センター：観測値による物質輸送量の推計、平成 11 年 6 月。
- 3) 北海道開発局：第 13 回北海道開発局技術研究発表会（河川部門）河床変動に関する調査研究最終報資料編、昭和 45 年 2 月。
- 4) 石狩川開発建設部：流量・濁度観測資料、平成 10 年 5 月。
- 5) 渡辺浩司, 山口 甲：濁度関数の支配因子に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集第 55 号 (B), pp.298～301, 1999。

(1999. 9. 30 受付)