

濁度計を用いた出水に伴う 高濃度濁水中の浮遊土砂濃度推定法

(独) 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム ○水垣 滋
(独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム 阿部 孝章
(独) 土木研究所寒地土木研究所 道央支所 丸山 政浩

流域土砂管理において浮遊土砂量の把握は重要である。浮遊土砂量の把握には一般に濁度計が用いられ、濁度 (ppm) からSS濃度 (mg/L) への回帰式を構築する必要がある。しかし高濃度の濁水では、濁度計の測定限界やSS濃度の過小評価などの問題がある。本研究では高濁度条件においてもSS濃度を精度良く推定する手法の開発を目的とし、高濃度濁度計を用いた連続観測とSS濃度の新たな推定式の構築を試みた。

キーワード：浮遊土砂、濁度計、SS、濁質

1. はじめに

近年、流域一貫した土砂管理の重要性が認識されている。山地部で生産された土砂は流域内で、貯水池容量の圧迫、生態系への影響、海岸線の後退など様々な問題を引き起こしている。これらの問題は流域を通して流下する浮遊土砂が原因であるものが多く、浮遊土砂の生産及び移動実態の把握が課題となっている。

こうした研究に見られる浮遊土砂輸送量の適切な評価のためには、土砂濃度の連続観測が重要になる。浮遊土砂輸送を定量的に観測する手法は数多くあるが、中でも濁度計は河道内に設置しておくだけで長期間の連続観測が可能で、土砂動態のモニタリング装置として広く普及しつつある。

一般的に用いられる濁度計は、濁水中の赤外後方散乱強度を測定して濁度に変換するもので、2000 NTU (カオリン濃度で2000 mg/L程度) を測定限界とするものが多い^{1,2)}。そのような条件では濁度と浮遊土砂濃度 (以下、SS濃度) は線形関係があり、濁度からSS濃度を精度よく推定できる。しかし近年、数千～数万 ppm をこえる高濃度の濁水の観測事例が報告されており^{3,4)}。このような高濁度領域ではSS濃度に対して線形関係は満たされないことが指摘されており^{5,6,7)}、同じ濁度値であってもSS濃度で4倍以上の開きが確認されるケース⁷⁾も報告されている。後方散乱強度は粒子比表面積に影響を受けるため⁹⁾、出水による濁水中の粒径組成の変化がSS濃度の推定精度に影響を及ぼす可能性がある。

実河川では、降雨出水時の流量増大に伴い高濃度の濁水が発生するが、SS濃度の推定精度が低ければ流出土砂量の評価に大きな誤差が生じる恐れがある。濁度計による計測濁度の粒径依存性は実験によって確かめられた

事例はあるが⁹⁾、実河川における濁質の特性を考慮した浮遊土砂濃度推定式はいまだ構築されていない。

本研究の目的は、降雨出水時の流出する高濃度濁水を対象に、濁度計を用いたSS濃度推定式を構築することである。高濃度濁度計を用いて濁度の通年観測を実施し、濁度計のキャリブレーションに基づき、計測濁度に基づくSS濃度の実用的な推定手法を検討した。

2. 方法

(1) 研究対象流域

調査対象流域は、北海道中央部の一級河川鶴川流域 (流域面積 1270 km²) 及び沙流川流域 (1350 km²) とした (図-1)。年平均降水量は、上流域で約 1300～1350 mm、下流域で約 1000 mm である。地質はきわめて複雑



図-1 調査地位位置図

表-1 調査地概要

水系	鷓川		沙流川		
対象流域	穂別川	鷓川	額平川	総主別川	宿主別川
調査地点	中島橋	富内橋	貫気別橋	町道1号橋	宿主別橋
地点コード	M2	M3	S5	S6	S8
流域面積	200	723	290	17	64
年平均降水量 (mm)	1418	1521	1286	1668	1728
雨量観測所	稲里	福山	豊糠	旭	宿主別
濁度計型式	ATU75W-USB	ATU3-8M	ATU75W-USB	ATU75W-USB	ATU75W-USB
測定限界 (ppm)	100,000	20,000	100,000	100,000	100,000

に入り組んでいる。鷓川流域は、最上流域が白亜紀から古第三紀の堆積物および変成岩類・深成岩類などで構成され、上流域はジュラ紀～白亜紀の砂岩・泥岩が主に分布し、軟質で開析の進んだ山地を形成する。また一部に蛇紋岩などの変成岩類が含まれ、地すべりや斜面崩壊を起こしやすい。上流から下流には新第三紀の堆積岩類が広く分布し、起伏の少ない山地を形成している。沙流川流域の地質は、古生層の一部を除き主に白亜紀層と新第三紀層の堆積岩や貫入岩で形成されている。貫入岩帯は主稜部に発達し、火成岩類では斑岩、カンラン岩、変成岩では結晶変岩・変麻岩が多い。土地利用は、ほとんどが森林に覆われている。鷓川流域は森林、農地及び市街地がそれぞれ 82%、5%及び 13%であり、沙流川流域ではそれぞれ 88%、6%及び 6%となっている。

(2) 観測方法及びデータ処理

調査地は、鷓川流域に 2 地点、沙流川水系額平川流域に 3 地点、合計 5 地点とした (図-1、表-1)。各調査地点で流量及び浮遊土砂濃度を観測するため、自記式水位計 (応用地質; S&DL mini) 及び濁度計 (JFE アドバンテック: ATM3-8M, ATM75W-USB) をステンレス保護ケースに挿入して河川内に設置した (図-2)。所有機材の都合により、比較的低い濁度が見込まれる M3 地点にのみ ATU3-8M (測定範囲 0~20,000 ppm) を設置した (表-1)。これらの濁度計の測定原理は赤外後方散乱方式で



図-2 水位計・濁度計の設置例

あるが、センサー部の仕様は異なっている。濁度値は、メーカーによりカオリン (中央粒径 6 μm; JFE アドバンテック私信) で校正され、ppm の単位で出力される。

水位及び濁度の測定時間間隔は 10 分とし、2010 年の 1 年間実施した。各観測地点において平水時及び出水時に流速測定を行い、あらかじめ水位-流量曲線を作成し、流量の時系列データを得た。濁度計の観測生データから異常値を除去するため、濁度計が水面上にでていた期間、土砂埋積が考えられる期間、無降雨時や河川結氷期間など土砂流入による濁度上昇が想定されない期間のスパイクデータを棄却した。その上で、前後 30 分 (7 点) の移動平均値を濁度データとした。

濁度から SS 濃度を算出するため、各地点において融雪出水時に 4~5 回、夏期の降雨出水時の水位ピーク時に 1~2 回、橋上より左岸、流心、右岸の 3 箇所河川水の表面採水を実施した。各地点の各箇所における採水量は約 8L とした。

(3) 分析方法

採取した河川水の一部を吸引ろ過し、フィルター上の残留物の乾燥重量を水試料量で除して、SS濃度を算出した。各地点のSS濃度は、左岸、流心及び右岸3箇所の平均SS濃度とした。濁度成分の粒度分析について、各地点の3箇所採取した河川水を等量ずつ混合し、濁質成分を十分に静沈させ上澄みを除去した後、絶乾したものを分析試料とした。乾燥した濁質試料は、ふるい試験を行い、0.5 mm以下の成分についてはレーザー回折式粒度分布測定装置 (島津 SALD-3000S及びSALD-2000J) により粒度分布を調べた。レーザー分析には、30%過酸化水素水で有機物分を除去したものを分析試料とした。比表面積は、等価球体を仮定した粒子の比表面積とし、粒度試験結果を用いて次式によって算出した。すなわち、

$$SSA = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{6}{\rho \sqrt{d_i d_{i+1}}} p_i \quad (1)$$

である。ここに、SSAは比表面積 (m²/g)、nは粒径階数、d_iは粗い方からi番目のメッシュサイズ (m)、p_iは粒径

階*i*の存在割合、 ρ は粒子密度 (g/m^3) である。ただし本研究では、粒子密度を $2.6 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ とした。比表面積は、粒度が粗いほど小さくなる。

3. 結果

(1) 濁度とSS濃度の関係

濁度とSS濃度2010年4月～5月の融雪出水時及び8月12日の降雨出水時の観測結果を表-2に示す。S6では立入制

限のため夏期降雨出水時に採水できなかったが、その他は出水時の表面採水を実施できた。SS濃度の範囲は地点によってさまざまであるが、いずれの地点でも採水した時点の流量及びSS濃度は夏期出水時に最も大きかった。SS濃度は数千 mg/L 以上の高い値が得られ、とくにS5地点とS8地点ではSS濃度が $10,000 \text{ mg/L}$ 以上の超高濃度の濁水が確認された。

SS濃度を濁度値から推定するため、採水と同時刻の濁度とSS濃度との関係を調べた (図-3)。ただし、M2

表-2 観測結果

	観測所名	調査年月日	流量	濁度	SS	SS/Tb	比表面積
			(m^3/s)	平均 (ppm)	平均 (mg/L)		(m^2/g)
M2	穂別川 (中島橋)	2010/4/2 10:40	16.53	—	456	—	0.7669
		2010/4/14 11:50	73.60	—	1823	—	0.6951
		2010/4/30 12:10	31.19	—	497	—	1.1299
		2010/5/7 15:00	65.19	—	1050	—	0.8650
		2010/8/12 14:00	146.04	—	4887	—	0.4935
M3	鷓川 (富内橋)	2010/4/2 13:10	152.88	1039	454	0.437	0.6547
		2010/4/14 13:40	294.13	946	1004	1.061	0.8193
		2010/4/30 13:15	218.10	405	373	0.921	0.8167
		2010/4/30 17:35	238.00	579	573	0.990	0.8289
		2010/5/7 16:10	467.33	1547	2177	1.407	0.7873
		2010/8/12 15:15	565.69	1230	2577	2.095	—
		2010/8/12 18:20	686.46	1630	3017	1.851	0.7229
S5	額平川 (貫気別橋)	2010/4/2 14:20	30.09	1604	713	0.445	0.6955
		2010/4/14 14:15	79.82	7588	2497	0.329	0.8365
		2010/4/30 13:40	47.59	2694	1170	0.434	0.8801
		2010/5/7 13:50	195.99	8381	6750	0.805	0.6453
		2010/8/12 14:40	457.76	9217	11367	1.233	
		2010/8/12 16:30	507.34	8728	10833	1.241	0.2471
S6	総主別川 (町道1号橋)	2010/4/2 12:40	2.75	—	517	—	0.6633
		2010/4/14 12:40	3.77	—	3627	—	0.8742
		2010/4/30 12:50	1.06	13596	1560	0.115	0.9443
		2010/5/7 12:30	1.82	—	1960	—	0.7895
S8	宿主別川 (宿主別橋)	2010/4/2 11:40	29.66	1730	670	0.387	0.8498
		2010/4/14 11:40	52.41	6200	3497	0.564	0.6610
		2010/4/30 12:20	34.50	6289	1253	0.199	0.9647
		2010/5/7 13:10	135.48	9457	5797	0.613	0.7873
		2010/8/12 14:00	220.37	—	13433	—	0.2419

—: 欠測

地点では濁度が欠測であったため、除外した。河川水の濁質がカオリンと同じ性質であれば、河川水のSS濃度は濁度と同じ値をとるはずであるが、全体的にばらつきが大きかった。M3、S5及びS8地点のSS濃度について地点ごとに濁度のべき乗関数で回帰したところ、決定係数は0.71~0.85程度であった。これらのことから、濁度からSS濃度を単純な換算式で精度良く推定することができないことがわかった。このことは、濁度成分の性質が均一でなく、濁度計の機種や地点や流況によってSS濃

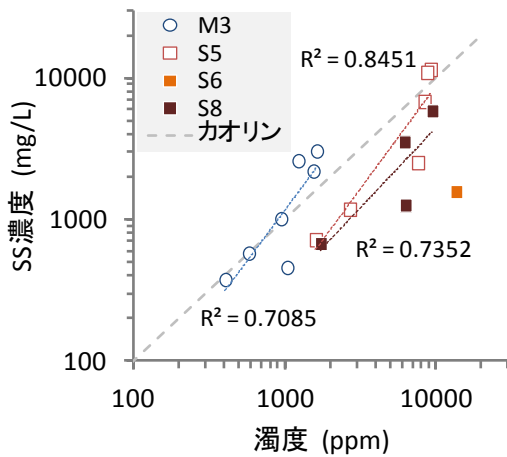


図3 濁度とSS濃度との関係

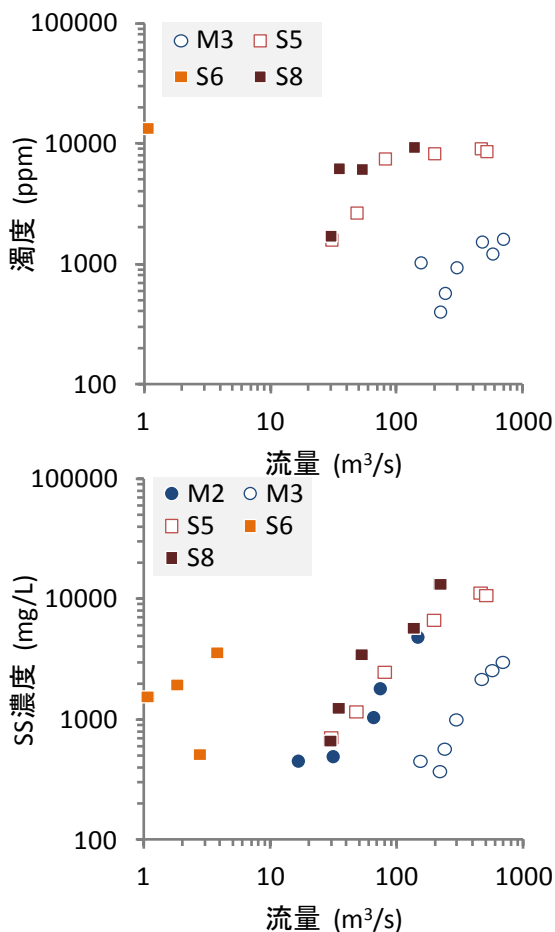


図4 流量と濁度 (上) 及びSS濃度 (下) との関係

度に対する濁度の応答が異なる可能性を示唆している。

(2) 流量と濁度及びSS濃度との関係

濁度及びSS濃度の流況による影響を調べるため、流量と濁度及びSS濃度との関係を調べた (図4)。地点ごとの濁度は流量に対して頭打ちの傾向が伺えるが、SS濃度はいずれの地点も流量に対して明瞭な増加傾向が認められた。このように濁度とSS濃度は流量に対する応答が異なることがわかった。このことは、流量の増大によるSS濃度の変化を濁度計が検出できていない可能性を示唆している。

(3) 比表面積と濁度及びSS濃度との関係

濁度及びSS濃度に対する濁質成分の粒径組成による影響を調べるため、濁度及びSS濃度と比表面積との関係を調べた (図5)。比表面積は濁度との間に明瞭な傾向は認められないが、SS濃度に対して明瞭な減少傾向が認められた。比表面積は、その値が大きいほど粗粒分が多く、微細粒分が少なくなることを意味していることから、SS濃度が高いときは濁質成分として粗粒分が大きく混入している可能性がある。

流量と比表面積との関係を調べた (図6)。M2、M3、S5及びS8地点では、融雪出水時初期の流量が最も小さい

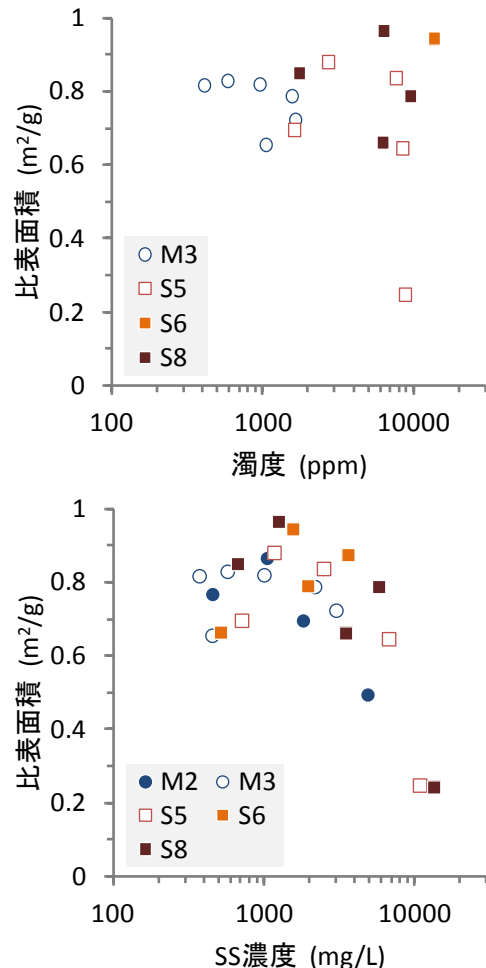


図5 濁度 (上) 及びSS濃度 (下) と比表面積との関係

ときを除いて、比表面積は流量にともない減少傾向を示した。S6地点は、最も流量が大きい時を除いて、比表面積は流量に対して減少傾向を示した。これらのことから、濁質の粒度組成が流量によって変化していることが示唆された。

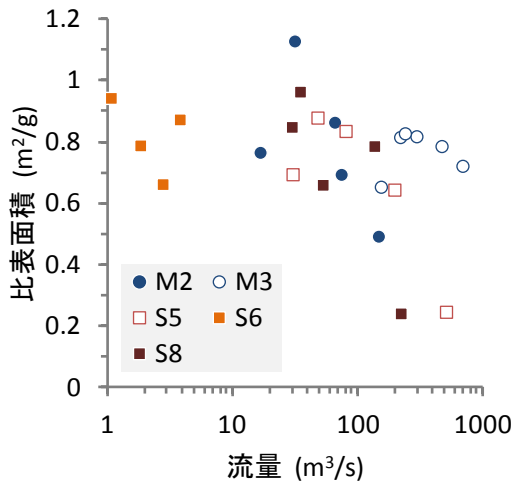


図-6 流量と比表面積との関係

4. 考察

SS濃度は、濁度との間に単純な相関関係はみられず、単一の曲線による回帰式を構築することができなかった。この要因として、流量に伴う濁質の粒度組成の変化が影響していると考えられた。濁質の粒度組成に及ぼす水理学的な影響を明らかにすることができれば、現地観測による濁度計を用いたSS濃度評価手法の改善に役立つ可能性がある。

一般に、河道内土砂の輸送可能量は、断面平均流速 \bar{U} 、粒子沈降速度 w_s や乱れ速度の鉛直方向成分等の水理諸量に支配される⁸⁾。 \bar{U} は掃流力 τ_0 と $\tau_0 = \rho g \bar{U}^2 / C^2$ という関係がある(ただし ρ は水の密度、 g は重力加速度、 C はChezyの係数)ため、流速が大きくなるほど粒径の大きな粒子が流送される。したがって、河道内の水理量が変化すれば、流送土砂の粒径も変化することがわかる。

水理量による濁質の粒径変化は、SS濃度に対する濁度の応答に影響を及ぼす。Mieの散乱理論によれば、赤外光濁度計では1 μm 以上の粒子について散乱強度(濁度)は濃度と粒子表面積に比例するため、単一粒径の場合は、

$$Tb = \alpha \left(\frac{1}{d}\right)^n SS \quad \text{すなわち、} \quad \frac{SS}{Tb} = \alpha^{-1} d^n \quad (2)$$

という式になる⁵⁾。ただし、 α 及び $n (> 0)$ は補正係数である。この場合、流量が増加し流送土砂の d が大きくなれば SS/Tb が増加するのは明らかである。混合粒径の場合、流量が増大すれば粒度分布は平均粒径 d_m が大きくなる方向へシフトする。ある d_m に着目した時にもこの

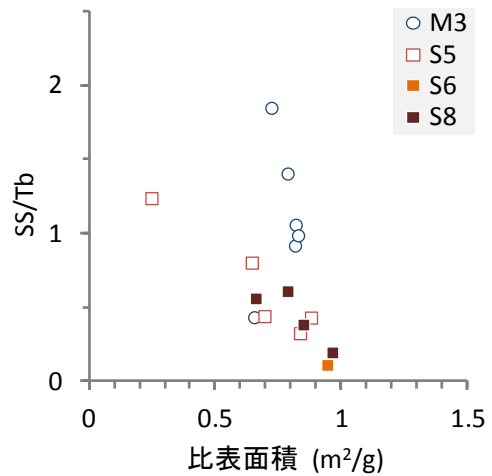


図-7 比表面積とSS/Tbとの関係

式を満たすと考えられるから、 SS/Tb は粒度分布を持っていても、流量増加に伴い増加することが推察される。

本研究においても、 SS/Tb と濁質の比表面積との関係を調べた(図-7)。 SS/Tb は、M3の比表面積が最も小さい点(4月2日)を除けば、鶴川流域(ATU3-8M)と額平川流域(ATU75W-USB)のそれぞれにおいて、比表面積に対して減少傾向が認められた。差圧センサーによる濁度観測事例においても、粒度分布の変化によって SS/Tb 比が変化することが報告されており⁹⁾、センサーの測定原理にかかわらず粒径変化が SS/Tb を規定していると考えられる。 SS/Tb の比表面積に対する減少傾向の違いは、流域特性によるものか機種によるものか、あるいは両方なのかは判断できないが、現地観測においても濁度の粒径依存性を確認することができた。

濁質の比表面積は流量に対して、明瞭ではないが減少傾向を示しており(図-6)、流量にともなう SS/Tb の増加が期待できる。そこで、 SS/Tb と流量との関係を調べたところ、鶴川流域(M3: ATU3-8M)及び額平川流域(S5, S6, S8: ATU75W-USB)において、それぞれ(3a)式及び(3b)式によって回帰できた(図-8)。

$$\frac{SS}{Tb} = (-4 \times 10^{-6})Q^2 + 0.0062Q - 0.3398 \quad R^2 = 0.9167 \quad (3a)$$

$$\frac{SS}{Tb} = (-3 \times 10^{-6})Q^2 + 0.0035Q - 0.2198 \quad R^2 = 0.9253 \quad (3b)$$

ここにSSは土砂濃度(mg/L)、 Tb は濁度(ppm)及び Q は流量(m^3/s)である。これらの式をSS濃度について一般化すると、

$$SS = Tb(aQ^2 + bQ + c) \quad (4)$$

となる。ここに、 a 、 b 及び c は係数である。

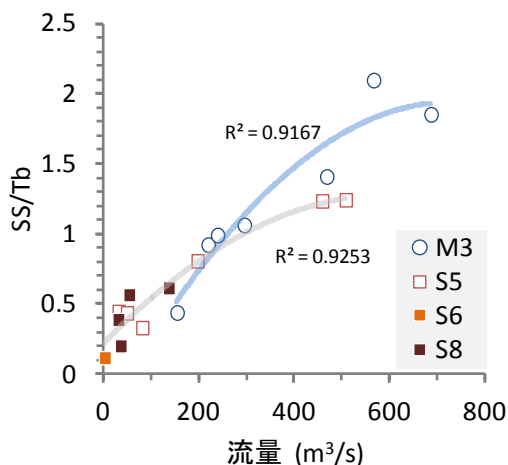


図-8 流量とSS/Tbとの関係

本研究で行った濁度計によるSS濃度の推定は、出水時の表面採水によりSS濃度を算出している。一般的に水深方向には流速分布が存在するため¹⁰⁾、水面付近の浮遊土砂の粒径分布と濁度計設置高さでの粒径分布は異なる可能性がある。しかし、鶴川流域における実測例では、SS濃度の鉛直方向の変化は認められなかった¹¹⁾。そのため、SS濃度の鉛直分布の濁度に与える影響は小さいものと考えた。濁度と流量データを用いた(4)式によるSS濃度推定式は、濁度-SS濃度式(図-3)よりも決定係数が高いことから、高濃度のSS濃度をより精度良く推定できると考えられる。

5. おわりに

流域一貫した土砂管理において浮遊土砂流出量を把握する際は、一般に流量とSS濃度の測定は必須である。本研究で提案したSS濃度推定式は、濁度と流量をパラメータとしているため、あらたに測定項目を追加する必要がなく、従来の測定項目で得たデータを利用できる点で汎用性が高い。ただし、各係数は濁度計の機種やその校正方法(カオリンの粒度分布)、濁質の物理特性や流域の土砂生産・流出特性により異なる可能性があるため、調査地点ごとに決定する必要がある。また、土砂の生産・流出過程は季節や降雨出水規模によって異なり⁴⁾、流送される粒径に影響を及ぼす可能性も考えられる。本研究では、観測機器や機器設置方法といった観測上の問題により欠測が多く、データ数が不十分であったため、地点ごとの係数を決定するにはいたらなかった。今後も

データを蓄積して精度検証を行うとともに、さまざまな地点の既往観測データについても検討し、SS濃度推定式の一般性を確認する必要がある。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部には雨量・水文データ等を提供いただきました。また、現地調査について株式会社福田水文センター、北開水工コンサルタントにご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえばLewis J. 1996. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Research* 32: 2299-2310.
- 2) 山口甲, 三田村一弘, 渡辺浩司. 2000. 大河川における濁度観測値による土砂輸送量の計算. *水工学論文集* 44: 401-406.
- 3) 石田哲也, 中山恵介, 大西健史, 夏井皓盛, 大森未音, アイヌルアブリズ, 丸谷靖幸, 岡田知也. 2010. 融雪期における高濁度水発生機構と細粒土砂輸送. *水工学論文集* 54: 433-438.
- 4) Abe T, Mizugaki S, Toyabe T, Maruyama M, Murakami Y, Ishiya T. 2012. High range turbidity monitoring in the Mu and Saru river basins: All-year monitoring of hydrology and sediment transport in 2010. *International Journal of Erosion Control Engineering* (in review)
- 5) 横山勝英. 2002. 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察. *土木学会論文集* 698 (II-58): 93-98.
- 6) 横山勝英. 2005. 河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について-白川と筑後川の事例-. *応用生態工学* 8(1): 61-72.
- 7) 横山勝英, 藤塚真太郎, 中沢哲弘, 高島創太郎. 2008. 多点濁度観測による筑後川水系のSS流出・輸送特性に関する研究. *水工学論文集* 52: 553-558.
- 8) Dietrich WE. 1982. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research* 18: 1615-1626.
- 9) 角哲也, 森田佐一郎, 越智隆志, 小宮秀昭. 2002. 差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発. *水工学論文集* 46: 779-784.
- 10) 横山洋, 喜澤一史, 長谷川和義. 2000. 鶴川洪水における水位変化と水理量の関係について. *土木学会第55回年次学術講演会*: II-102.
- 11) 鳥谷部寿人, 山下彰司, 喜澤一史, 長谷川和義. 1998. 平成9年8月鶴川洪水における現地観測の結果とその解析. *土木学会北海道支部論文報告集* 54: 145-150.