

濁度計の粒径依存特性と 現地使用方法に関する考察

横山勝英¹

¹正会員 工博 国土交通省土木研究所 河川部河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

濁度計は水系の土砂動態モニタリング装置として普及しつつあるが、土砂粒子に対する光学散乱を計測しているために土砂の性状と光学的応答の関係を把握した上で用いる必要がある。本研究では、土砂粒径と濁度の関係を実験によって調べ、さらに現地データに基づいて実用上の適用範囲について考察し、以下を明らかにした。1)濁度の出力値は粒径の増大に伴って減少し、機種による差はあるが砂粒子(0.42mm以上)への反応性が悪いものが多い。2)濁度は粘土成分に強く反応するため、シルト及び砂分の構成比が変わっても影響は少ない。3)現地では、同一地点であれば流送土砂の粒度分布があまり変化しないことを前提にして、濁度のみから土砂濃度を換算することとなる。4)土砂濃度は濁度と粒径の関数として表現できる。

Key Words: turbidity meter, sediment concentration, particle size, optical scattering, monitoring of sediment transport

1. 序論

(1) 研究目的

近年、河川流域における「水系一貫土砂管理」の必要性が認識されている。この概念は、河川の源流から出口に至る水系全体において移動する土砂の量と質を把握し、貯水池容積や河道、海岸の地形を適切に管理するというものである。しかし、現時点では土砂の生産及び移動の実態について不明な点が多いため、現在、砂防・河川・海岸などの各管理者が連携を図り、現地データの蓄積と現象の解明を進めようとしているところである。

土砂動態の観測方法としては、地形変化測量、洪水時の土砂及び濁水採取(バケツ採取、容器式採取、自動採水、ポンプ採取など)、土砂濃度モニタリング(濁度計、超音波流速計、画像処理法など)が挙げられる。

これらの方法のうち、濁度計は光の透過率や散乱強度から水中の土砂濃度を推定するため計測が簡便であり、さらに最近、ゴミや付着藻類を清掃するワイパー機能を有する高濃度タイプのセンサーが実用化された。そのため、センサーを河岸に設置しておくだけで河川での長期間連続した自動計測が可能であり、近年、モニタリングの有効なツールとして活用されつつある。

ところで、流域で生産された土砂は水理量と粒径に応じて河道を移動、もしくは分級堆積するため、水系一貫土砂管理においては移動土砂の量のみならず粒径の情報が非常に重要である。しかし、濁度計には土砂の性状

(粒径、形状、色調)に対する光学的な応答特性があると一般に考えられているので、濁度計で計測可能な粒径範囲や粒径別の濁度応答特性を調べる必要がある。

そこで本研究では、濁度計の土砂粒径に対する応答特性と、土砂観測における濁度計の適用限界について調べることとした。次に、濁度計の特徴と本研究で明らかにする内容を述べる。

(2) 濁度計の特徴

濁度計のメーカー仕様には、通常、カオリン粘土でキャリブレーションした場合の濃度レンジと精度が記載されている。しかし、濁度センサーは光の透過もしくは散乱強度から濃度を換算しているため、懸濁粒子の粒径や形、色によってその応答特性が異なると考えられる。

このうち粒径については理論的にその影響が説明される。すなわち、対象とする粒子の大きさが照射する光の波長の1/10~1/20以下であれば、散乱強度は入射光の強さと粒子径の6乗並びに粒子濃度に比例し(レイリー理論)、その粒子の大きさが光の波長と同程度かそれ以上であれば、散乱強度は入射光の強さと粒子表面積並びに粒子濃度に比例する(ミー理論)。

多くの濁度計で用いられている波長は600~1000nmであり、粒径1 μ m以上の土砂に対してはミー理論が適用される。この場合、粒径が大きくなるほど単位体積中の総表面積は小さくなるため、濃度が等しい濁水でも粒径が大きいと散乱強度は小さくなると考えられる。

表-1 使用土砂の粒径区分と混合率

調整土砂	混合土砂 (混合比)		
	粒径区分(mm)	細粒(%)	中粒(%)
0~0.015	5.5	5.5	5.5
0.015~0.037	26.0	12.3	9.6
0.037~0.075	21.9	19.2	13.7
0.075~0.18	17.8	26.0	17.8
0.18~0.42	13.7	19.2	21.9
0.42~0.84	9.6	12.3	26.0
0.84~2.0	5.5	5.5	5.5
カオリン			

表-2 使用センサーの諸元

センサー	A	B	C	D
測定方式	後方散乱	後方散乱	後方散乱	積分球
使用波長	880nm	860nm	875nm	660nm
測定範囲	2,000NTU	1,000NTU	2,000NTU	500NTU
精度	2%FS	5%FS	2%FS	2%FS

既往の研究では、笠井ら³⁾が粒径の異なる2種類の砂(D50=0.17mmと0.22mm)について後方散乱式濁度計の応答を調べ、粒径が小さい方の砂では大きい方に比べて濁度出力が大きいことを示している。また、宮崎ら⁴⁾は粒径と濁度応答の関係を実験によって検討し、0.0425mm以下の粒径について、粒径が大きくなると濁度が小さく出力されることを示している。

したがって、粒径が大きくなれば濁度が小さくなるのが推測できるが、粒径範囲が断片的で使用センサーも異なっているため定量化は難しい。実河道での土砂管理という観点からすると、濁度計が計測可能な粒径の上限や、河道を流れる大きささまざまな粒径の土砂に対する濁度応答特性の把握が必要であり、粘土から粗砂までを対象とした統一的な検討を実施すべきであろう。

本研究では実河川での観測を想定し、2mm程度の粗砂までを検討対象として粒径別の濁度応答実験を行うこととした。なお、粒子の色調の影響については、宮崎らがほとんど影響を受けないことを示しているため、本研究では取り扱わないこととした。

2. 実験方法

(1) 使用土砂の調整

本実験では、2mmまでの土砂(茨城県鹿島産の山砂)を表-1に示す7段階の粒径範囲に区分した。2mmから0.075mmの粒径はふるい分けにより調整し、0.075mm以下の粒径は水槽での沈降分級作業によって調整した。

また、現地河川を流下する土砂は粒度分布が広範囲に

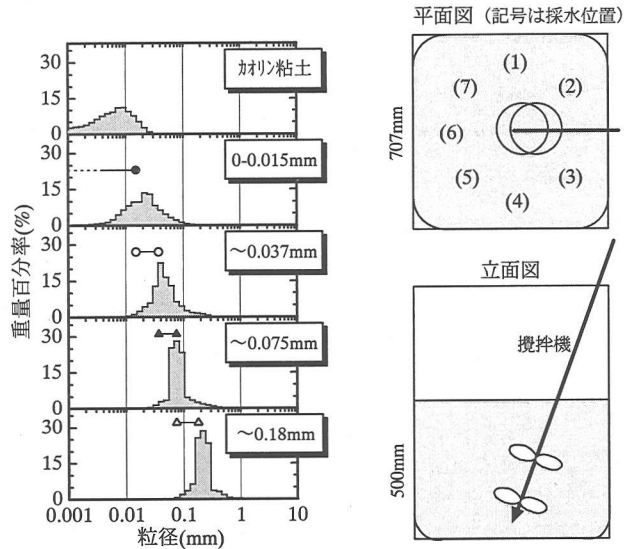


図-1 調整土砂の粒度分布
(レーザー粒度分析装置による確認)

図-2 攪拌装置の概要と
攪拌状態の確認位置

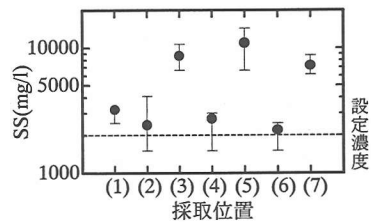


図-3 攪拌装置の各位置での平均濃度と分散

渡っているため、実際に流下している土砂を想定して、3種類の混合粒径土砂を表-1に示す混合率で調整した。検定用にはカオリン粘土を用いた。

沈降分級作業により得られた調整土砂及びカオリン粘土の粒径を確認し、また各作業で得られた調整土砂どうしの粒径の連続性を確認するために、レーザー回折式粒度分析装置(島津製作所製SALD-3000)を用いて粒度分析を行った(図-1の上4段)。図の5段目(0.075~0.18mm)はふるい分けによる調整土砂である。粒度分析の結果、カオリン粘土が最も細粒で、各調整土砂は設定粒径の順に大きくなってゆくことが確認された。

ただし、粒度分析結果は各設定粒径よりも大きめであった。0.075mm以上の土砂はふるい分けの値が真値であるため、粒度分析装置の値は真値よりも大きめにシフトしている可能性がある。また、沈降分級作業では静水中の沈降時間を設定したが、沈降の初期段階では濁水を攪拌した影響が残っていて完全な静水になっておらず、設定粒径よりも粗い粒子が浮遊していた可能性がある。

いずれにせよ、粒径の大小の傾向は確認されたため、分級作業は適切に実施されたものと判断し、これらの土砂を実験試料として供した。

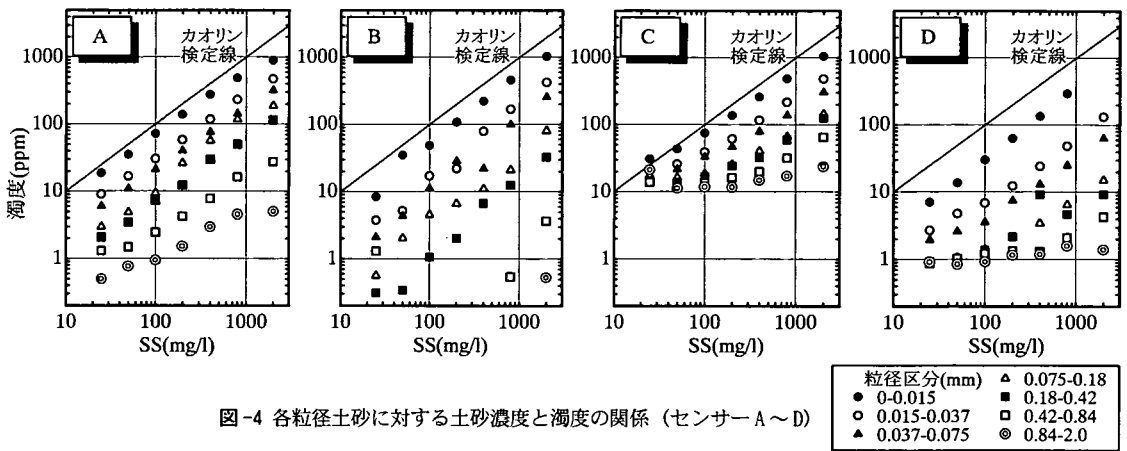


図-4 各粒径土砂に対する土砂濃度と濁度の関係 (センサーA～D)

(2) 濁度センサー

同じ濁水 (粒径や色調の条件が等しい) に対してもセンサーの違い (測定方式, センサー形状, 測定空間の範囲) が測定値の差となって現れる可能性があるため, 複数の濁度センサーを用いて比較することとした。

本研究では土砂観測技術の確立を目指しているため, 洪水時の高濃度濁水 (1000ppm程度) に対応できる, 自然光の影響を受けにくい, 頑強な作りで現地に放置できる, 等の条件を満たす現地用測定機が必要である。濁度計には一般的に, 透過光式, 散乱光式, 積分球式などの方法が用いられているが, 前述の条件に最も適合するのは赤外光を用いた後方散乱方式であると考えられる。そのため, 本研究では赤外後方散乱濁度計を3種類, 比較のために積分球式を1種類の合計4種類のセンサーを実験に用いた。各濁度センサーの諸元を表-2に示す。

(3) 実験水槽

濁度計測時には土砂濃度が均一に保たれている必要がある。本実験では図-2に示す攪拌水槽を作成したが, 位置によっては渦や上昇・下降流が発生してしまうため, 沈降速度の大きい粗砂では均一性が保たれない恐れがある。そのため, 最大粒径 (0.84~2mm) の土砂を攪拌して, 水槽内の位置ごとに浮遊状態を確認した。

図-3に位置ごとの平均濃度と分散を示す。採水は図-2のプロペラ周りに記された7箇所で行い, 各位置の中層から30秒間に5回連続採水して平均と分散を求めた。

その結果, (6)の位置が設定濃度 (2,000mg/l) に最も近く分散も小さいことから最適な位置と判断し, ここに濁度センサーを設置して計測することとした。なお, 壁面は照射光の反射を防ぐために, つや消し黒で塗装した。

(4) 濁度計測

以上の準備のもと, 粒径別濁度応答実験を行った。最初に, カオリン粘土を用いて25~2,000(mg/l)の7段階の溶液を作り, 各センサーの出力値を検定した。次に, 表-1に示した7種類の土砂と3種類の混合土砂を用い

て25~2,000(mg/l)の7段階の溶液を作り, 各センサーの出力値を記録した。出力値はデータロガーやパソコンを用いて, 0.5~1秒間隔で30秒間取り込み, 突発的に発生する異常値を排除した後に平均して濁度とした。

3. 実験結果

本章では, 最初に粒径別の濁度計測を行い, その結果を整理して粒径をパラメーターにして土砂濃度-濁度の関係を定式化した。次に, この式により混合粒径土砂の濁度を濁度と粒径から推定し, 実験結果と比較した。

(1) 粒径別の濁度計測結果

図-4に各粒径に対する濁度と土砂濃度の対応関係をセンサー別に示す。カオリン粘土は濁度の検定に用いているので, 濁度と土砂濃度は等しい。

土砂濃度に対する濁度の値はセンサーごとに異なり, 特に同じ赤外後方散乱方式(A~C)でも出力の様子が異なる。例えば, Aは2mmまでの粒径に対して出力が線形的だが, Bは0.42mm以上でほとんど反応せず, Cは0.18mmを越える頃より出力が線形的でなくなる。また, 積分球式のDは0.075mmを越える頃より出力が非常に低くなり, 精度以下(25ppm)の反応となった。

したがって, 現地で異なるセンサーを混在して使用する際には, その取り扱いに注意を払うべきである。また, 赤外後方散乱方式濁度計が計測できる粒径は, 機種による差もあるが大体の目安として0.42mm以下 (土質区分上の細砂以下) と言える。

土砂濃度に対する濁度の出力値は, 粒径が大きくなるほど小さくなる傾向が見られる。例えば, 実験で使用した2番目に大きい0~0.015mmの粒径についてみると, 赤外後方散乱方式(A~C)では濁度はSSの7割程度, 積分球式のDでは3割程度の値となった。

そこで次に, 粒径・濁度と土砂濃度の関係を定式化する。なお, 本実験で用いた積分球式濁度計は粗粒分への応答が最も悪かったので, 検討から除外した。

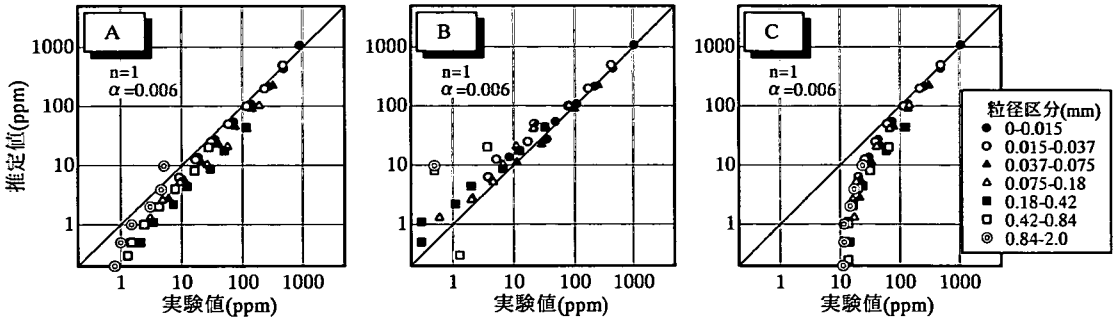


図-5 粒径と土砂濃度から推定した濁度の検証

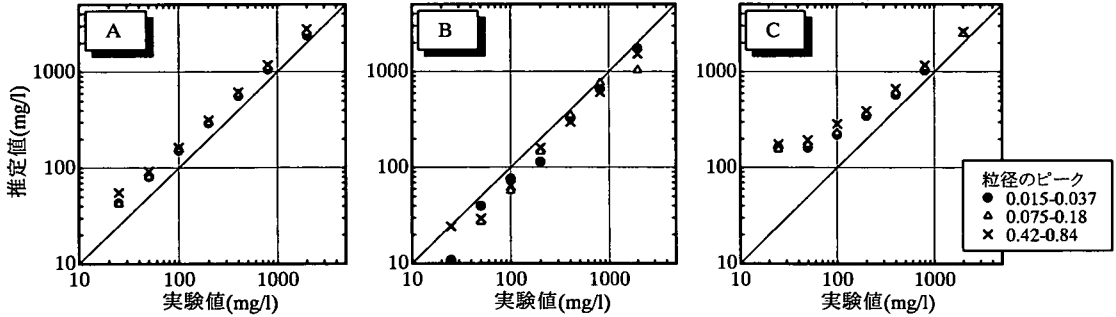


図-6 混合粒径土砂の粒度分布と濁度から推定した土砂濃度の検証

(2) 粒径と濁度の相関関係

ミーの散乱理論によれば、赤外光濁度計では $1\mu\text{m}$ 以上の粒子について散乱強度(濁度)は濃度と粒子比表面積に比例するので、この関係は次式のように表される。

$$T_b = \alpha \left(\frac{1}{d} \right)^n SS \quad (1)$$

ここで、 T_b は濁度、 SS は土砂濃度、 d は粒径、 α と n は補正係数である。粒子表面積との比例関係を厳密に言うとな $n=1$ であるが、実験で用いた各粒径土砂は粒度分布があり、粒子形状の均一性も不明であるので、それらの要因を考慮すると n は1からずれる可能性がある。

式(1)を各センサーの濁度計測結果に適用して、計算値と実験値の差が最小となるように α と n を決定した。計算に用いる粒径は設定粒径範囲の対数軸上の中央値とし、カオリン粘土の粒径は図-1より 0.006mm とした。

残差が最小となる係数はいずれのセンサーでも $n=1$ 、 $\alpha=0.006$ となった。同じ係数が得られたのは、最小粒径(カオリン粘土)の影響が最も強く利いた結果である。

式(1)に係数を適用して濁度を推定すると図-5が得られた。AとBは比較的精度良く濁度を再現できていることが分かる。Cは 100ppm 以下の値で再現性が低い。これは図-4に示されているように土砂濃度が 100mg/l 以下の時に線形性が保たれていないためである。

以上より、粒径に対する応答性はセンサーごとに異なり、応答性の良いセンサーでは濁度と粒径の関係を定式化できることが示された。

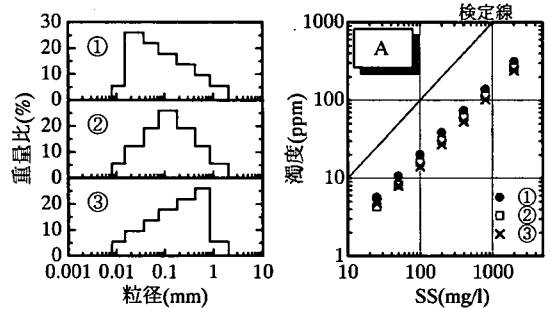


図-7 混合粒径土砂の粒度分布(左)と各土砂に対する濁度出力(右)

(3) 土砂濃度の推定

前節では土砂濃度と濁度及び粒径の関係が明らかになったので、次に実際の河川を想定して、粒度分布を持った混合粒径土砂の土砂濃度を推定する。

粒度分布が分割数 k 、それぞれの粒径に対する重量比が P_i として与えられているとき、各粒径の土砂濃度 SS_i と濁度 T_{bi} は次式で与えられる。

$$SS_i = SS \times P_i \times k \quad (2)$$

$$T_{bi} = \alpha \left(\frac{1}{d_i} \right)^n SS_i \quad (3)$$

$$T_b = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k T_{bi} \quad (4)$$

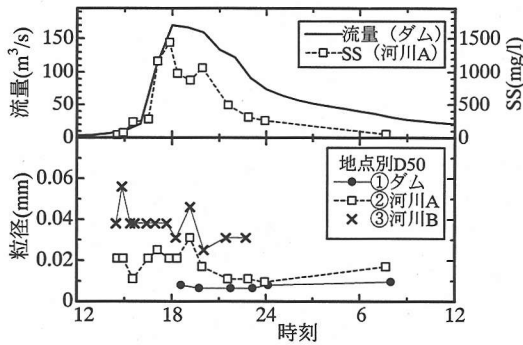


図-8 現地河川における洪水時懸濁土砂の粒径変化時系列

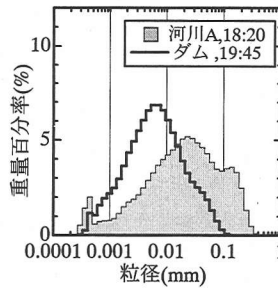


図-9 粒度分布の例

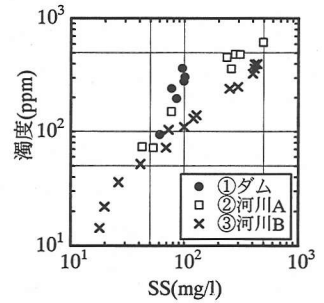


図-10 土砂濃度と濁度の地点別相関

これらを整理すると、次式が求まる。

$$SS = T_b / \alpha \sum_{i=1}^k \frac{P_i}{d_i^n} \quad (5)$$

検証に用いるのは表-1に示した3種類の混合土砂であり、この粒度分布（粒径別の混合比）と計測濁度を式(5)に代入して元の土砂濃度を推定した。図-6に土砂濃度の推定値と設定値の比較を示す。AとBについては、誤差が1~2割程度あるが、線形性が良いためまずまずの結果であるといえる。

したがって、濁度と粒度分布から土砂濃度を求めるためには、まず単粒径に対する濁度応答関係を求め、次に混合粒径土砂を用いた実験によって式(5)の検定を行えばよい。

4. 現地での適用範囲

これまでの結果をまとめると、濁度計が感知できる土砂粒径は機種による差があるが上限が概ね0.42mm程度である、濁度計の応答は粒径依存性が非常に強い、濁度と粒度分布から土砂濃度を推定できる、となる。

一方、現地で土砂観測することを考えて上記の結果を言い換えると、河道を流れる砂分は把握できず、土砂濃度を知るためには粒度分析を行う必要がある、ということになる。そのため、初めに述べた「土砂モニタリングの有効なツール」とはあまり言えなさそうである。

しかし多くの洪水観測では、粒度分布を無視しても濁度と土砂濃度の相関は高いことが示されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。実験結果と現地観測事例の違いは何であるか。

これを確かめるために、先に実施した混合粒径土砂の実験結果について、図-7に粒度分布（混合比）及び、土砂濃度と濁度の関係(A)を示す。混合粒径のピークは1オーダー以上異なるが、濁度は2割程度しか変わらない。濁度は細粒成分に強く反応するため、実験で最小粒径の比率を同じにしたことがこの結果を導いている。したがって、シルトや砂の構成比が変化しても濁度にはあまり影響を及ぼさないとと言える。

次に、現地観測事例として、図-8~10に宮城県七ヶ宿ダム流域における洪水時の採水観測結果を示す。この流域には2つの河川が流れ、合流した直後にダムに流入している。1996年9月の洪水時に現地観測を実施し、2河川とダム上流端でバケツ採水を行い、その場で濁度を計測した後に実験室でSSと粒度分布を分析した。

図-8の上段は洪水概況、下段は各地点での懸濁土砂のD50の時系列である。これにより、河川Aの代表粒径は0.01~0.02mm、河川Bは0.03~0.04mm、ダムは0.005~0.007mmと地点ごとに分布が異なるものの、洪水の流況変化による粒径の変動は少ないことが分かる。

また、図-9に粒度分布の一例として河川Aとダム地点のピーク流量時の分析結果を示す。河川では粘土から砂まで(0.0003~0.4mm)含まれているが、ダム地点では細かい成分のみとなっている。これは、停滞水域に流入したことで分級されたためである。

このような特徴を持つ各地点の濁水について、「濁度-土砂濃度の相関」は図-10のようになり、地点ごとに異なる関係が現れた。河川AとBでは、Aの方が粒径が細かいため濁度もわずかに高くなっている(もっとも、この程度は現地計測における誤差の範囲と考えても良い)。また、ダムでは粒径が河川の1/5程度と小さかったため、濁度にもその傾向が明確に現れている。

図-8や9のような粒径変動特性がどの程度一般性を有するかは分からない。しかし多くの河川で固有の「濁度-土砂濃度の相関式」が示されており、このことから逆に考えて、流域地質条件や河床勾配、水量などが大きく変化しなければ流送される土砂の粒径構成もあまり変わらないと言うこともできるのではないだろうか。

以上より、濁度応答は粒径依存性が高いが、現地で移動している土砂の特性を把握しておけばモニタリングツールとして活用できると言える。つまり、予め採水分析によって地点ごとに「濁度-土砂濃度の相関式」を作成し、濁度のみから土砂濃度を推定することとなる。

例えば、河道の定点で連続観測を実施する場合、流送される土砂の粒径構成はあまり変わらず、また粒度分布が粘土から砂まで広範囲にわたっているために、予め作

成した「濁度－土砂濃度の相関式」により砂分を含んだ通過土砂濃度を通年で時系列的に推定できる。

5. まとめ

(1) 結論

本研究では水系一貫土砂管理のための土砂モニタリングツールとして近年活用されつつある濁度計について、土砂粒径に対する応答特性を調べ、現地で使用する際の取り扱い方法を考察した。結論は以下の通りである。

- 1) 濁度は粒径依存性が高く、粒径が大きくなるほど出力は小さくなる。
- 2) 赤外後方散乱方式濁度計の計測可能粒径は、機種による差があるが、大体の目安として0.42mm以下（細砂以下）である。
- 3) 濁度、粒径と土砂濃度の関係を定式化し、土砂濃度を精度よく計算できることを示した。
- 4) 混合粒径の実験の結果、濁度は粘土成分に強く反応するために、シルト及び砂分の構成比が変わっても、濁度への影響は少なかった。
- 5) 現地河川では、流域条件や水量が変化しなければ懸濁土砂の粒度分布が大きく変化しない可能性があり、その場合には採水分析により地点ごとに固有の「濁度－土砂濃度の相関式」を作成できると考えられる。
- 6) 4)と5)の前提に基づけば、相関式を作成した時の土砂粒径範囲について、濁度のみから土砂濃度を推定することができる。

(2) 提案

詳細な実験の結果、濁度と粒度分布から土砂濃度をかなり正確に求められることが分かったが、現場での正確な土砂モニタリングを想定すると、濁度計測以外に粒度分析も必要というところに難点がある。結局は、粒度分布の変化が少ないことを前提にして、地点ごとに濁度のみから土砂濃度を推定することとなる。

そのため「濁度と粒度分布を同時に計測できる現地用

土砂濃度計」の開発が望まれる。例えば、室内用のレーザー回折式粒度分析装置はレーザーを試料に照射し、透過光の散乱及び回折パターンから粒度分布を求めており、分析時間が数十秒であるため、この方法を現地用濁度計に応用することが有効であろう。ただし、透過式は計測可能な濃度が低く（数百ppm）、透過セルがゴミで塞がれる可能性が高いため、後方散乱方式が望ましい。

このような現地用土砂濃度計が開発されれば、場所を問わずに、かつ採水分析をせずに濁度と粒度分布から土砂濃度を正確に計算でき、さらに濁度計の感知能力が低い砂分の存在比率も正確に把握できる。そうすれば、水系一貫土砂管理のための土砂モニタリングだけではなく、湖沼や海洋での物質動態の研究にも大いに貢献できるものと考えられる。

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、水工学論文集、第42巻、pp.1039-1044, 1998
- 2) 横山勝英、石川忠晴：濁質生産量の推定方法に関する研究、ダム工学、第10巻4号、pp.311-322, 2000
- 3) 笠井雅広、福島雅紀、佐藤慎司：後方散乱式浮遊砂濃度計の基本特性について、土木学会第54回年次学術講演会概要集、pp.112-113, 1999
- 4) 宮崎昭児、早乙女保二、増田勝人：濁度測定における粒径の影響について、運輸省港湾技研資料、No.284, 1978
- 5) 張旭紅、首藤伸夫、田中仁：降雨に伴う濁質の発生及び流出過程、水工学論文集、第38巻、pp.259-264, 1994
- 6) 川村力、清水康行、藤田睦博、市川嘉輝：山地河川における流砂の観測と解析、水工学論文集、第41巻、pp.771-776, 1997
- 7) 坊野聡子、清水康行、斎藤大作、吉田義一、黒木幹男：出水時のダム貯水池における濁質観測、水工学論文集、第42巻、pp.715-720, 1998
- 8) 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、水工学論文集、第44巻、pp.401-406, 2000

(2001.2.6受付)

THE INFLUENCE OF PARTICLE SIZE ON TURBIDITY OUTPUT AND THE INSTRUCTIONS FOR USING TURBIDITY SENSOR IN THE FIELD

Katsuhide YOKOYAMA

Turbidity is optical scattering intensity to suspended sediment. In this study, the influence of particle size on turbidity output was examined in laboratory, and the instructions for using turbidity meter in the field was discussed based on observation data. As particle size grow bigger, turbidity decrease for same SS concentration(SSC). The optical scattering intensity can be obtained up to the size of 0.42mm. SSC can be calculated by turbidity and particle size accurately. When turbidity is monitored in actual water area, SSC is converted from only turbidity using correlation curve between SSC and turbidity, because particle size distributions are not change significantly in the same station. It is desired to develop the new type backscatterance nephelometer which can measure not only the turbidity but also the particle size.