

濁度計を用いた浮遊土砂・栄養塩の連続観測

土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム
室蘭開発建設部 治水課
室蘭開発建設部 二風谷ダム管理所

水垣 滋
捧 雅章
小田島 大祐

山地から沿岸域まで河川を通じて流出する浮遊土砂や栄養塩は、陸域・海域の自然環境の形成に重要な役割を果たす。したがって、水系一貫した総合的な水・土砂管理を考える上で、浮遊土砂・栄養塩の流出データの蓄積と実態把握が必須となる。本研究では、鶴川及び沙流川水系において2012～2016年にわたり多地点・同時・合同で実施した水文・水質調査の結果と濁度計を用いた観測手法について検討した。

キーワード：融雪、SS、栄養塩、窒素

1. はじめに

沿岸域の自然環境には、そこに寄与するさまざまな河川流域の水・土砂・物質流出特性が大きく関与している。特に積雪寒冷地域である北海道では、年間の水・栄養塩流出負荷に占める融雪期の割合が60%以上に達するとの報告もあり¹⁾、水・土砂・物質の流出が陸域・海域の自然環境の形成に重要な役割を果たしている。したがって、陸域・海域の自然環境を保全するためには、沿岸域に寄与する複数の流域の水・土砂・物質流出特性の理解が欠かせない。

一般に浮遊土砂（以下、SS）濃度は流量に対して増加傾向を示すが、窒素やリンの濃度は溶存態か懸濁態かによって流量に対する応答が異なる^{2),3),4)}。また、これらの濃度特性は流域の土地利用や地質^{5),6)}、降雨特性や季節^{7),8)}によっても異なる。したがって、流域の土砂・物質流出特性を把握するためには、観測地点において水文観測や採水、水質分析などを一定の期間継続し、物質濃度の流量に対する応答特性、任意期間の総流出負荷量や収支を評価する必要がある。

しかし、複数の流域において上流域から下流域までの同時観測を単独機関で実施することは、コスト面や労力的な面で困難である。一方、水文観測地点を設けている様々な関係機関が出水時の観測を連携して実施すれば、多地点における同時観測データの蓄積と総合的な解析が可能となる。

寒地土木研究所と室蘭開発建設部は、融雪出水時及び降雨出水時に多地点における水文・水質の同時観測を2011年～2016年まで連携して実施してきた^{9),10)}。これらの報告では、1) 河川縦断方向の水収支が下流で減となることがあり、地点間の水・SS・栄養塩流出量の正確

な地点間比較が容易でないこと、2) 各観測地点では、比流量-比SS流出量の関係式（ $Q-Q_{SS}$ 式）は、観測地点によって異なり、また地点によっては季節によって異なることがあること、3) 総窒素、総リンの流出量は流量との関係式から推定できるが、溶存態窒素及びリンの流出量は流量だけから推定することは困難であること、4) 窒素及びリンの懸濁態・溶存態の存在比がSS濃度と関係があること、などがわかってきた。また前報¹⁾では、流量からSS、窒素（総窒素、懸濁態窒素、溶存態窒素）、リン（総リン、懸濁態リン、溶存態リン）の流出負荷量を推定する手法を構築した。しかし、流量とSS濃度は必ずしも相関は高くないことから、濁度計によるSS濃度観測を適用することが望ましいと考えられる。

本研究の目的は、複数流域における水・土砂・栄養塩の流出特性を明らかにするために、濁度計を用いた連続観測手法を構築することである。これまでの合同調査による水質調査結果を用いて、存在形態別の窒素濃度推定モデルを再構築し、濁度計によるSS濃度及び栄養塩の連続観測手法について検討した。

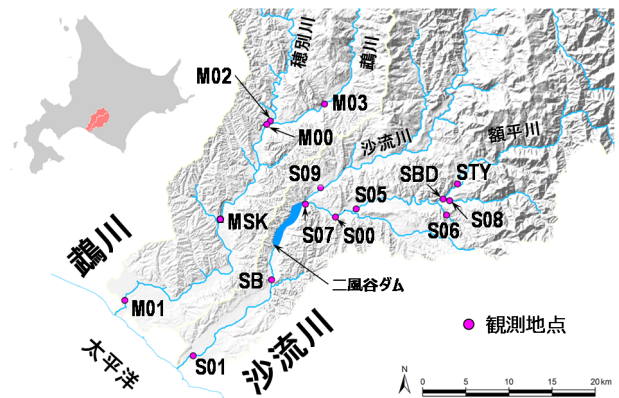


図-1 調査地位置図

2. 方法

(1) 研究対象流域及び野外調査

研究対象流域は、北海道中央部～南部で隣接している鶴川及び沙流川流域とした(図-1)。流域面積及び幹川流路延長はそれぞれ鶴川流域で1270 km²、135 km、沙流川流域で1350 km²、104 kmであり、ともに一級河川である。観測地点は鶴川流域に5地点、沙流川流域に10地点、合計15地点とした(図-1)。採水は2012年4月から2016年8月までの融雪出水及び降雨出水を対象に、可能な限り水位上昇時、ピーク時、逓減時を網羅するようにそれぞれ3回ないし7回行った(図-2)。濁度観測は後方散乱式濁度計を用いて、鶴川流域で3地点(図-1のM01、M02、M03)、沙流川流域で3地点(図-1のS01、S06、S09)、合計6地点で実施した。

(2) 分析・解析方法

採取した水試料について、SS、総窒素(Total Nitrogen; 以下TN)、溶存態窒素(Dissolved Nitrogen; 以下DN)、化学的酸素要求量(COD)の濃度を測定した。懸濁態窒素(Particulate Nitrogen; 以下PN)濃度は、TNとDNの差分で得られた値を用いた。SS濃度の測定にはポアサイズ1 μmのフィルターを用いた。

濁度計によるSS濃度推定のために、濁度計の濁度とSS濃度との関係を観測地点毎に調べ、回帰分析を行った。また、各種窒素濃度と比流量、SS濃度、COD濃度との関係を調べた。SS濃度による窒素の懸濁態存在比のモデル化は、非線形回帰分析(統計解析ソフト JMP 11.2.1)を行い、最適解を調べた。なお、流量データは2015年及び2016年が暫定値、水質分析データは2016年が暫定値であり、モデル化等の解析対象から除外した。

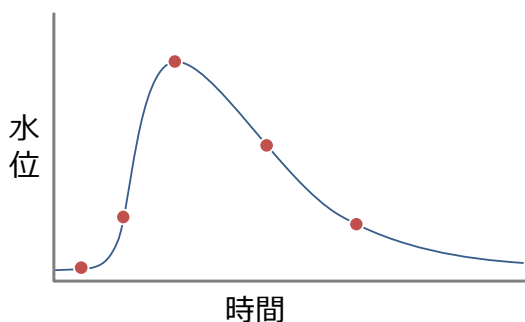


図-2 採水タイミングのイメージ

3. 結果と考察

(1) 濁度計によるSS濃度推定

濁度計により浮遊土砂濃度を観測するには、様々な濁度ステージで採水を実施し、濁度値とSS濃度との関係

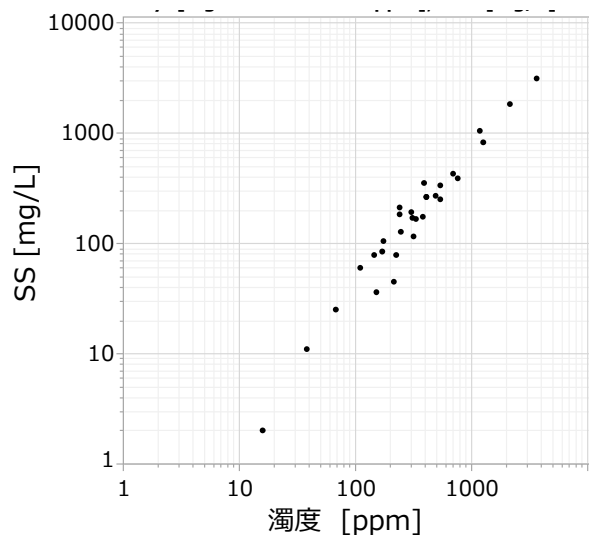


図-3 濁度とSS濃度の関係(S01)

式を構築する必要がある。図-3は沙流川・富川観測所(S01)に設置した濁度計の濁度とSS濃度との関係である。

$$C_{SS} = \alpha T b^{\beta} + c \quad [1]$$

ここに、 C_{SS} はSS濃度、 Tb は濁度計濁度、 α 及び c は定数である。決定係数 R^2 は0.9以上と高く、濁度(ppm)及びSS濃度(mg/L)の1～数千1,000の幅広い範囲で適用できることがわかった。

なお、後方散乱式の濁度計は、濁度の応答が粒子の比表面積(粒径組成)に依存するため、実際の河川では必ずしも濁度とSS濃度とが直線で回帰できないことがある。粒径組成の影響を考慮するために、流量をパラメータにいった回帰式も提案されているが⁷⁾、流量と比表面積との関係を調べる必要があり、今回は採用しない。

(2) SS濃度と栄養塩濃度

栄養塩濃度の推定が流量やSS濃度から可能になるかどうかを調べるために、流量やSS濃度と総窒素(TN)、溶存態窒素(DN)及び懸濁態窒素(PN)との関係を調べた(図-4)。TN、PNは比流量に対して正の相関が認められるが、ばらつきが大きく、地点による違いを反映している。また、TNとPNはSSやCODに対して正の相関を示し、比較的ばらつきが小さい。PNは、とくにCODに対して地点に関係なくばらつきが極めて小さく、また、SSやCODが高くなるほどばらつきが小さくなる傾向が認められる。これらのことは、懸濁態窒素が主に懸濁態の有機物に含まれていることを示唆している。一方、DNは比流量、SS、CODのいずれとも有意な相関は認められず、ばらつきが大きい。頭打ちの傾向にあるように見える。

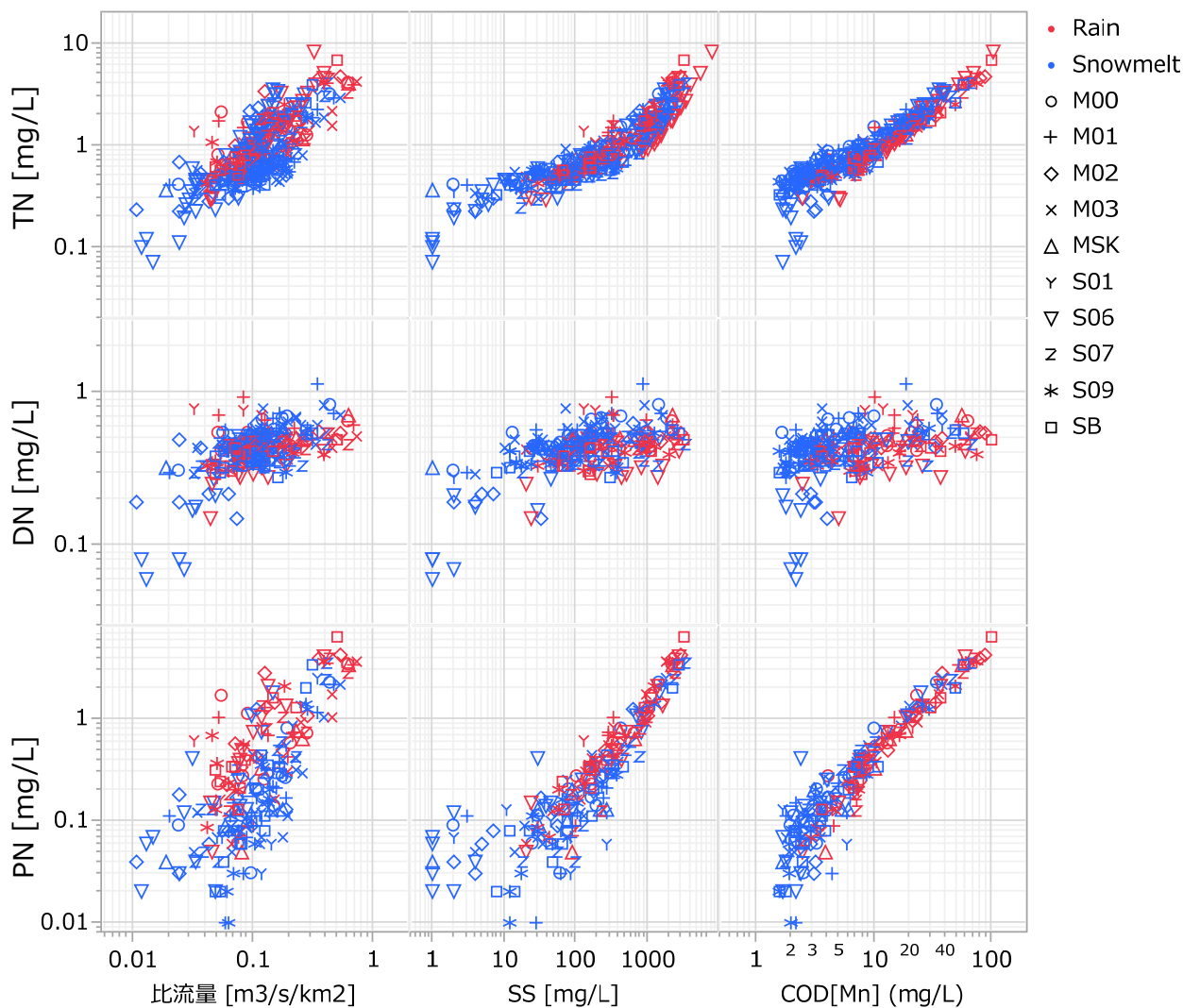


図4 総窒素、溶存態窒素、懸濁態窒素と比流量、SS、CODとの関係

このように、SSやCODといった懸濁物質や有機物が多いほど、河川水中の窒素は主にPNとして流出し、SSやCODとの相関がよくなると考えられる。これらの窒素濃度を濁度計で観測するためには、SS濃度と関連づけることが必要となる。総窒素濃度とSS濃度との関係は、式[1]同様、以下の式で回帰できる。

$$TN = \alpha C_{SS}^{\beta} + c \quad [2]$$

ここに、 TN はTN濃度、 C_{SS} はSS濃度、 α 、 β 及び c は定数である。

懸濁態窒素の存在比 (PN/TN) とSSとの関係を見てみると、いずれもばらつきは小さく、地点に関係なく、以下の式で近似できることがわかった (図4)。

$$\frac{PN}{TN} = \frac{C_{SS}}{C_{SS} + \alpha} \quad [3]$$

ここにPNは懸濁態窒素濃度、TNは総窒素濃度、 C_{SS} はSS

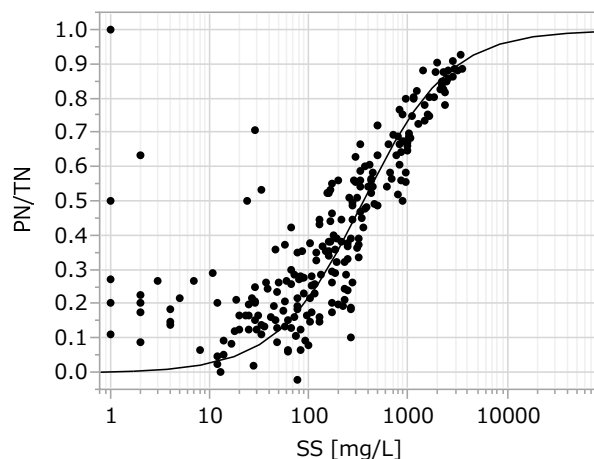


図5 窒素の懸濁態存在比とSS濃度

濃度、 α は定数であり、PN/TNが0.5となるSS濃度と等しい値をとる。図-5では、 $\alpha = 350$ であり、SS濃度が350 mg/Lで懸濁態と溶存態の存在比が等しくなり、3150 mg/Lで総窒素濃度の90%が懸濁態、10%が溶存態として流出すると推定される。この式は、SSが10 mg/Lより低

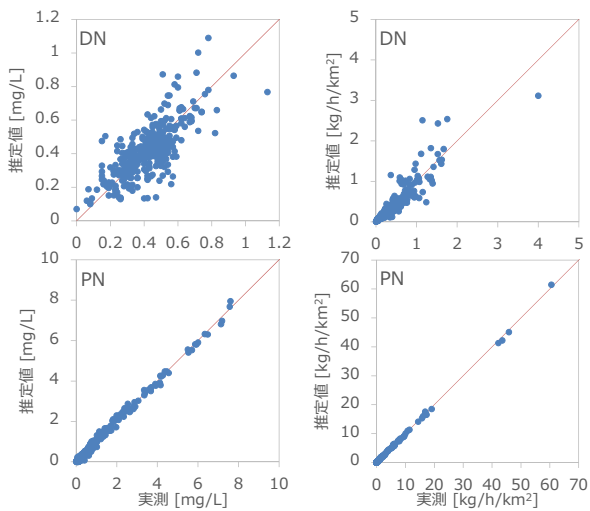


図6 溶存態・懸濁態窒素の推定値と実測値の比較

い場合は誤差が大きいですが、10 mg/L ~ 数1000 mg/L程度の広い範囲に適用可能であることがわかる。高濃度の濁水が発生している条件下で有効であり、濁度計で推定したSS濃度から推定できる可能性がある。

(3) 存在形態別態窒素濃度・流出負荷量の推定精度

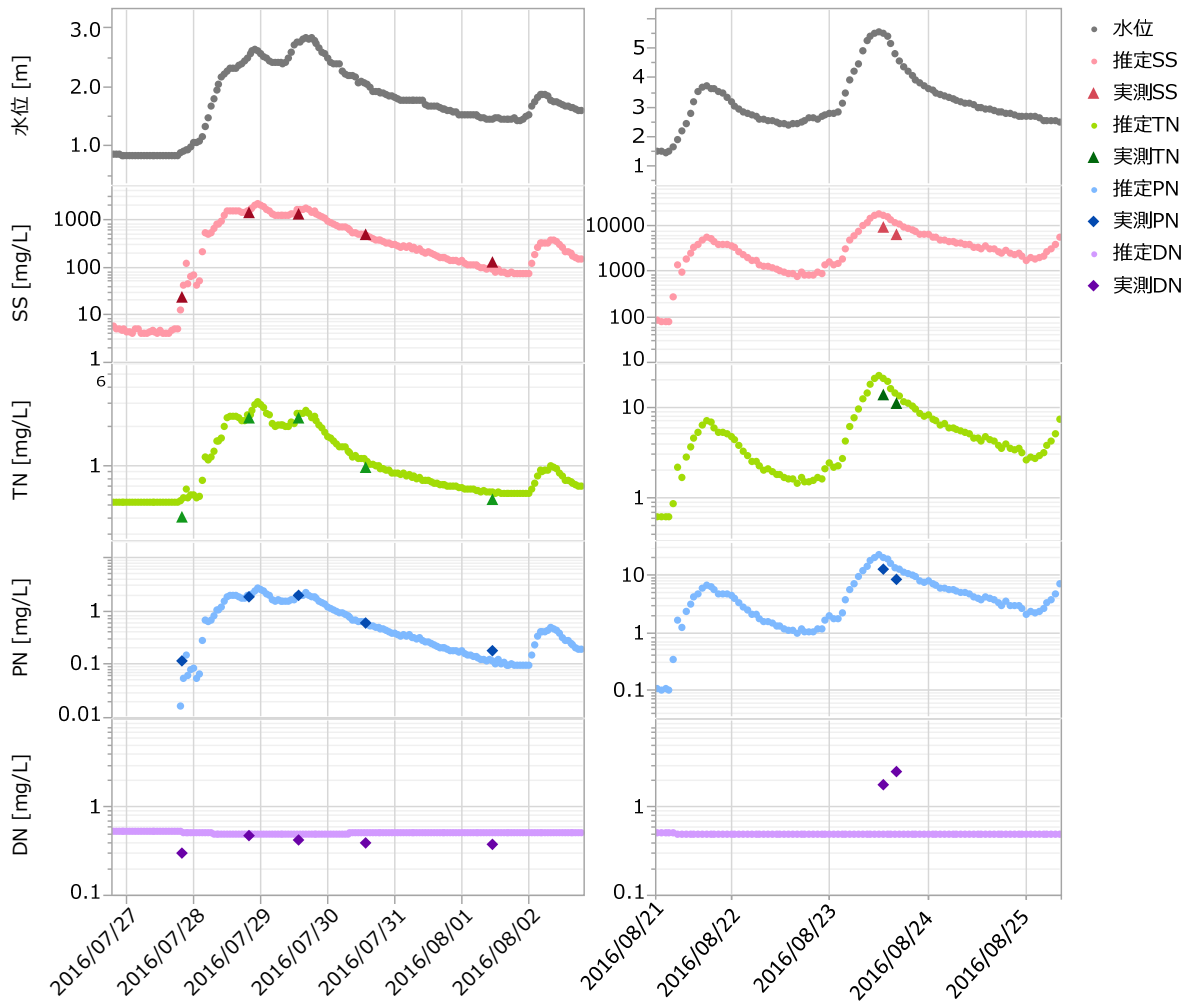


図7 2016年8月台風イベント時の推定結果 (S01)

濁度計からSS濃度を推定できること(式[1])、SS濃度からTN、PN/TN比、ひいてはPN及びDN濃度を推定できることがわかった(式[2]及び[3])。SS濃度から推定したDN濃度及びDN流出負荷量を実測値と比較すると、DN濃度ではバラツキが大きいものの、流出負荷量では誤差が小さくなった(図-6)。一方、PNの場合は濃度も流出負荷量も実測値との誤差が小さく、精度良く推定されていることがわかる。これらのことから、溶存態窒素の推定値は、流出負荷量の評価には利用可能である一方、濃度の絶対値を議論する場合には注意が必要であるといえる。

(4) 2016年台風イベント時の濁度と窒素流出の推定

2016年8月は北海道に3つの台風が上陸し、鶴川及び沙流川流域にも大規模な出水をもたらした。濁度計を設置した観測地点では、この出水中の濁度変化をうまく捉えられた地点がある。図-7は沙流川・富川観測所(S01)で観測された水位・濁度と、濁度から推定した各種窒素濃度の変化を実測値と合わせて示したものである。SS濃度は1万ppmを超える極めて高濃度の範囲まで変動を捉えていることがわかる。また、SS、TN、PNの推定値は実測に近い値をとっており、よく推定できたといえる

が、DNについては、特に8月23日の水位ピーク付近の値は大きく実測値と外れている。

推定値や実測値はいずれも速報値・暫定値であり、精査が必要であるが、DNについては式[3]によるモデルの適用可能性について、このような大規模出水時のデータを含めた上でさらに検証が必要がある。

4. おわりに

濁度計を用いた栄養塩の連続観測に向けて、SS濃度を用いた存在形態別窒素濃度の推定モデルを再構築した。溶存態窒素濃度の推定にはある程度の誤差を許容しなければならないものの、流出負荷量の推定には有用であることがわかった。また、2016年8月の台風に伴う出水イベント時に貴重な観測データが得られており、大規模出水時への適用性の検証が今後の課題である。

謝辞： 拙稿に対し関係各位から貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 橋治国, 安藤正治, 大森博之, 飯田真也, 梅本延彦. 1991. 融雪期における山地森林域河川からの栄養塩流出. 衛生工学研究論文集 27: 33-44.
- 2) Williams GP. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. Journal of Hydrology 111, 89-106.
- 3) 倉茂好匡. 1996. 浮流土砂の測定および解析方法. 恩田裕一, 奥西一夫, 飯田智之, 辻村真貴(編). 水文地形学-山地の水循環と地形変化の相互作用- 古今書院, 東京, 132-142p.
- 4) Ide J, Haga H, Chiwa M, Otsuki K. 2008. Effects of antecedent rain history on particulate phosphorus loss from a small forested watershed of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). Journal of Hydrology 352: 322-335.
- 5) 村上泰啓, 中津川誠, 高田賢一. 2004. 流域条件と土砂・水質成分の流出特性について. 水工学論文集 48: 1105-1110.
- 6) 横山勝英, 藤塚慎太郎, 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.
- 7) 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 5(1): 70-79.
- 8) 吉川泰弘, 渡邊康玄. 2005. 物質輸送に与える大規模洪水の影響. 北海道開発土木研究所月報 628: 2-17.
- 9) 水垣滋, 吉川契太郎, 旭峰雄. 2013. 鶴川・沙流川流域における融雪期の土砂・物質流出特性. 第 56 回(平成 24 年度)北海道開発局技術研究発表会 KK-19.
- 10) 水垣滋, 吉川契太郎, 佐々木 晋. 2014. 鶴川・沙流川流域における土砂・栄養塩収支. 第 57 回(平成 25 年度)北海道開発局技術研究発表会 KK-36.
- 11) 水垣滋, 田上信樹, 佐々木 晋. 2015. 鶴川・沙流川流域における土砂・栄養塩流出の季節変化. 第 58 回(平成 26 年度)北海道開発局技術研究発表会: KK-23.