

鵜川1998年融雪出水時の物質輸送 に関する現地調査

FIELD OBSERVATION OF MASS-TRANSFER DURING THE 1998 SNOWMELT FLOOD IN THE MUKAWA RIVER

渡邊康玄¹・新目竜一²・斎藤大作²・玉川尊³

Yasuharu WATANABE, Ryuichi SHINME, Daisaku SAITO and Takashi TAMAGAWA

¹正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工修 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

Field observations were performed on the Mukawa Bridge located 2.6km upstream of the Mukawa River mouth during the 1998 snowmelt flood. Observations were made of water level, discharge, bed material and various components of water quality. The following became clear as a result of the investigations.

There is strong correlation in the concentration of the Nitrogen and the Phosphorus, which is adsorbed to by the suspended solids, with the average grain size of the suspended solids. Some water-quality components increase with discharge, and other components do not change with discharge. The water-quality components, which increase in concentration at the time of the flood, are primarily the undissolved elements. It seems that the rise in concentration of undissolved solids at the time of the flood was due to the suspension of flood plain and near bank deposits.

Key Words : Field observation, Mass-transfer, Snowmelt flood, Mukawa river

1. はじめに

従来、流水の水質観測は大きな社会問題となった公害という観点から、主に典型7公害の一つである水質汚濁等の現象解明を目的としてきた。これらの現象の解明もなお非常に重要な事項の一つであるが、近年特に自然環境としての河川環境の重要性が指摘され、河川生態系の基盤を形成するものとして、河川における物質輸送現象の解明がなされるようになってきている^{1), 2)}。河川環境を取りこんだ河道計画の策定や河道維持管理手法等を考える上で、これらの物質輸送は、土砂移動も含め、その供給源である流域から河道を経て海域までの水系一貫した挙動の解明が必要である。特に、北海道では年間の流出の約半分を占める洪水継続時間の長い融雪出水時の物質輸送が河川生態系に非常に大きな影響を与えているものと考えられる。本研究は、平成10年4月に生じた融雪出水時に河床材料及び表面流水を採取し、河川環境を考える上で重要である窒素・リン等に注目し、洪水時の物質移動を調査した結果を報告するものである。

2. 鵜川流域の概要

調査を実施した鵜川は、流域面積1,270km²で河道長が135kmの一級河川である。図-1に鵜川流域の概要図を示す。流域の形状は南北に細長く、大きな支川として穂別川が穂別町内KP41で合流している。他の支川は短く流域を囲む稜線から本川に直角に合流している。

流域の上流部は深い谷を形成しており、穂別町からの中下流は、狭い谷底低地をなし、河口付近はデルタを形成している。この流域は、川沿いの平地部を除くと大部分は森林である。中下流部川沿いの谷底平地の多くは、集落、水田、牧草地に利用されている。流域の土地利用は、森林・水田・畑・市街地がそれぞれ91%・5%・3%・1%となっている。なお、1998年の融雪期直前の洪水として、1997年8月に高水敷が全川区間で概ね1m程度以上冠水する規模の出水があった。

鵜川の水質に関する環境基準の類型指定は、下流域でAに指定されており、1998年の水質ランキング(BOD)は、全国第2位であった。

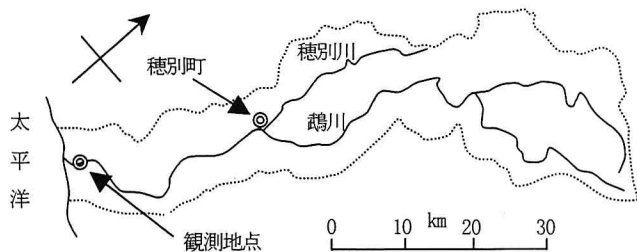


図 - 1 鵜川流域の概要

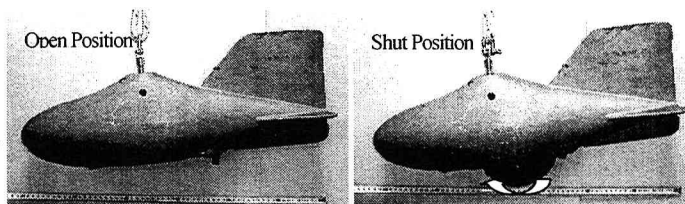


写真 - 1 河床材料採取器

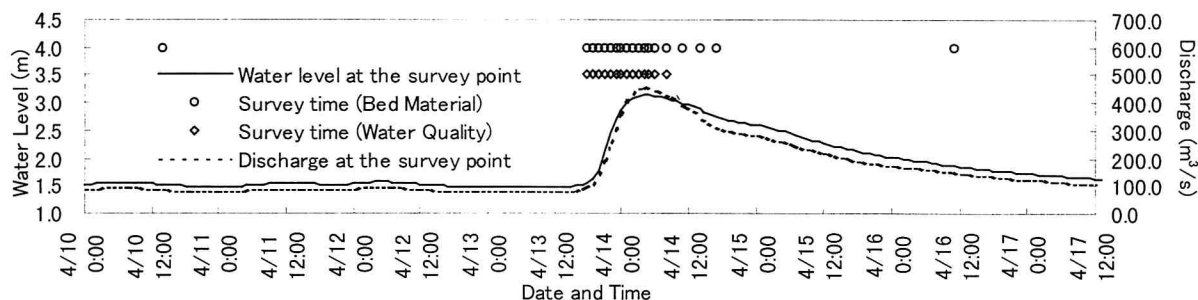


図 - 2 調査地点（鵜川橋）の水位と観測実施時刻

表 - 1 水質分析項目

3. 融雪出水と観測の概要

1998年4月13日に生じた融雪出水時に、河口から2.6km地点に位置する鵜川橋において、観測を実施した。観測項目は流量・水位・水面勾配であり、河床材料及び表面水を採取した。表-1に示す水質項目について、採取された表面水の分析を行なった。また、水質項目の浮遊物質と河床材料については、粒度分析を実施した。

表面水は、橋上からバケツで流心部の流水を採水したものである。採水時刻は、水位上昇直前の13日18時からほぼ1時間毎であり、14日8時まで計14回行なった。

河床材料は、橋上から採水を行なった個所において写真-1に示す採取器を用いて採砂したものである。この河床材料採取器は、米国Rickly Hydrological社製で、重さ約14kg、長さ約60cm、採取量175cm³である。また、河床面から5cmの厚さで河床材料が採取可能となっている。採砂は採水と同時に実施したが、その他に出水生起3日前に1回と減水期の14日11時、14時、17時及び16日11時の計19回行なわれた。

観測された鵜川橋地点の水位及び流量を図-2に示す。また、観測及び採水・採砂を実施した時刻をそれぞれ◇及び○印で併記している。採水及び採砂は、出水直前から減水期に至るまで行なわれている。

4. 水質成分の観測結果

(1) 水質成分の分析結果

図-3は、分析を行なった各成分について、初期値（4月13日18時における観測値）を基準として各時刻の値がどのように変化したかを時系列的に示したものである。な

分析項目	記号	4/13 18:00の観測値
浮遊物質	SS	90(mg/l)
浮遊物質の強熱減量	VSS	5(mg/l)
アンモニア態窒素	NH ₄ -N	定量下限値未満
溶解性亜硝酸態窒素	NO ₂ -N	0.002(mg/l)
溶解性硝酸態窒素	NO ₃ -N	0.20(mg/l)
総窒素	T-N	0.38(mg/l)
溶解性総窒素	DT-N	0.33(mg/l)
総リン	T-P	0.055(mg/l)
溶解性総リン	DT-P	0.011(mg/l)
オルトリン酸態リン	PO ₄ -P	0.028(mg/l)
溶解性オルトリン酸態リン	DPO ₄ -P	0.007(mg/l)
総有機態炭素	TOC	2.0(mg/l)
鉄	Fe	3.35(mg/l)
マンガン	Mn	0.06(mg/l)
紫外線吸光度	UV	0.034(-log)

お、アンモニア態窒素は、ほとんどの時刻で定量下限値(0.02mg/l)未満であったため、検討から除外することとした。また、参考のため、観測地点での摩擦速度の変化についても記した。各分析成分の洪水時の濃度変化は、流量の変動と対比して、大きく次の4つの傾向に分かれる結果となった。

(a) 流量の変化と同じ変化をするもの。総窒素、沈降性浮遊物質SSS(30min.)、沈降性浮遊物質SSS(60min.)などがこの分類にあたる。

(b) 流量の変化の5倍程度の変化を示すもの。浮遊物質、浮遊物質の強熱減量、総リン、オルトリン酸態リン、総有機態炭素、鉄、マンガンが挙げられる。

(c) 流量の変化に関係無くほぼ一定値であるもの。紫外線吸光度、溶解性硝酸態窒素、溶解性オルトリン酸態リン、溶解性総窒素は洪水期間中ほぼ一定値である。

(d) 洪水期間中変化はしているが、流量の変化とは関係無いもの。溶解性亜硝酸態窒素、溶解性総リンがこれに

あたる。

窒素に着目して見てみると、総窒素が(a)に、溶解性総窒素及び溶解性硝酸態窒素が(c)にそれぞれ属している。また、溶解性亜硝酸態窒素が(d)に分類されているが、洪水中的の変化は大きくない。このことから、総窒素の洪水中的の増加は、粒子性窒素の洪水中的の増加に起因していると判断される。

一方、リンについては、総リン及びオルトリン酸態リンが(b)に、溶解性オルトリン酸態リンが(c)に、また溶解性総リンが(d)にそれぞれ属している。なお、溶解性総リンの変化は、溶解性オルトリン酸態リンがほとんど変化していないことから、溶解性の有機態リンの変化に起因していることになる。従って、総リンの洪水中的の極めて大きな変動は粒子性の有機態リン及び無機態リンと溶解性の有機態リンに起因しているものと言える。

窒素及びリンの形態をさらに詳しく見るため、図-4に各濃度の時間変化を示す。直接分析した項目は表-1に示した項目のみであることから、粒子性総窒素(PT-N)は総窒素から溶解性総窒素を、溶解性有機態窒素(DON)は溶解性総窒素から溶解性硝酸態窒素及び溶解性亜硝酸態窒素を、粒子性総リン(PT-P)は総リンから溶解性総リンを、粒子性オルトリン酸態リン(PP₀₄-P)はオルトリン酸態リンから溶解性オルトリン酸態リンを、溶解性有機態リン(DOP)は溶解性総リンから溶解性オルトリン酸態リンを、有機態リン(OP)は総リンからオルトリン酸態リンを、粒子性有機態リン(POP)は有機態リンから溶解性有機態リンを差し引いたものとしてそれぞれ算出した。窒素は、洪水初期において溶解性で有機態と無機態が混在しているが、洪水初期以降その大部分が粒子性であることが示されている。リンは洪水初期を含め洪水期間中、オルトリン酸態と有機態が同程度の割合で存在し、それらのほとんどが粒子性である。また、窒素、リンとも洪水期間中に溶解性の濃度に大きな変化が無く、粒子性の濃度のみが大きく変化している。

以上のことから、河川環境を考える上で非常に重要である窒素及びリンは、浮遊物質濃度の洪水中的の変化とも考え合わせると、浮遊物質に吸着されて輸送されていると判断される。従って、浮遊物質の洪水時の挙動や発生源を検討することが極めて重要な事項となる。

(2) 浮遊物質と各水質成分との関係

浮遊物質に吸着あるいは含まれている割合を調べるため、各粒子性の水質成分の濃度と浮遊物質の濃度との関係を見たものが図-5である。これらの物質と浮遊物質の濃度との相関はきわめて高く、これらの結果から各成分の浮遊物質に占める割合を知ることが可能であると判断される。このことを考慮し、回帰式は式(1)で表される形とした。

$$W_i = \alpha_i W_{ss} \quad (1)$$

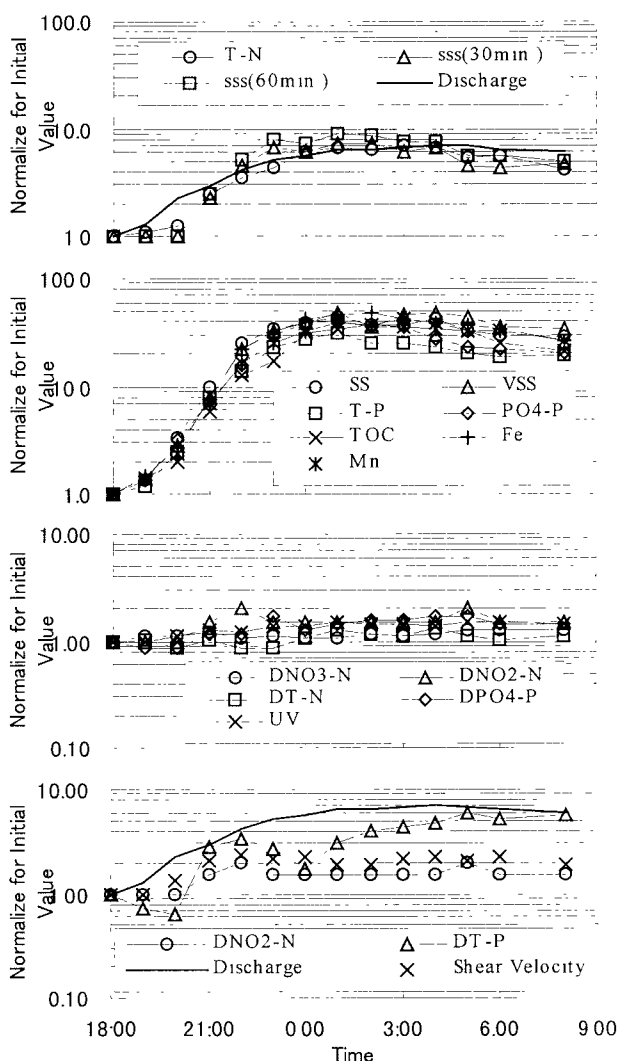


図-3 各水質成分の洪水中的における時間変化
(4月13日18:00の値で基準化)

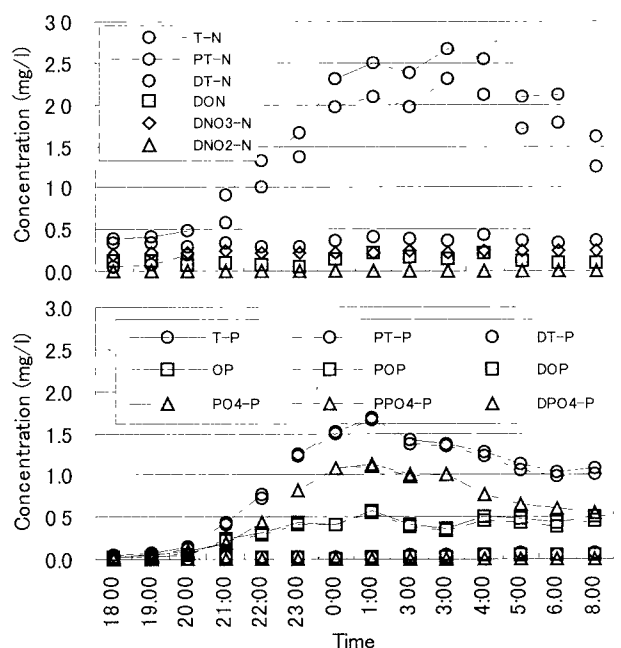


図-4 窒素及びリンの形態

ここで、 W_i : 水質成分*i*の質量、 α_i : 水質成分*i*に関する係数、 W_{SS} : 浮遊物質の質量である。図 - 5には、各成分濃度の浮遊物質濃度との回帰式を併記した。回帰式の係数は、それぞれの成分が浮遊物質に占める割合を意味する。窒素に関して、直接分析あるいは間接的に算出できる粒子性の物質は、粒子性総窒素のみである。粒子性総窒素は、浮遊物質の質量のうち0.06%を占めていることがわかる。リンは各粒子性の成分が算出可能である。浮遊物質に占める粒子性総リン、粒子性オルトリン酸態リン及び粒子性有機態リンの割合はそれぞれ0.04%、0.03%、0.01%である。浮遊物質を構成する成分として、鉄及びマンガンについても分析を行なったが、それぞれ3.93%、0.06%を占めている。また、総有機態炭素も浮遊物質との相関が強く、浮遊物質の1.89%を占める結果となった。浮遊物質の強熱減量は、浮遊物質の6.12%である。すなわち、浮遊物質のうち質量にして6.12%が有機物で占められている事になる。

(3) 浮遊物質の粒度分布

洪水時の浮遊物質の粒径分布がどのように変化しているかを見たものが、図 - 6である。洪水時に細粒化し、減水期に元に戻る過程が確認されたが、粒径の範囲は0.0047mm~0.132mmでありほとんど変化が無い。なお、粒子の浮遊形態を示す指標である摩擦速度と粒子の沈降速度の比は、最大粒径0.132mmを用いると、洪水初期、水位上昇期及び下降期でそれぞれ4、10、8程度の値となっている。

浮遊物質は、図 - 3からわかるように洪水初期の濃度と比較してピークで40倍程度の濃度になることから、どの粒径がどの程度変化しているかを把握するため各粒径別に濃度の時系列変化を見ることとする。図 - 7は、構成割合の時系列的な変化が同じものを一つのグループとして区分した粒径毎の濃度の時間変化を見たものである。0.01mm以下の物質及び0.05mm以上の物質は、観測期間中では水位の変化に関係無く、変化の割合は小さいが時間と共に増加している。一方、0.01~0.05mmの物質は、水位の上昇と共に増加し、水位のピーク以降減少に転じており、その変化も前者の変化に比べ極めて大きい。その内、0.015~0.032mmの物質の割合が40~50%と最も大きくかつ変化の割合も大きい。

なお、粒径の区分に用いた構成割合の時系列的な変化とは、次のとおりである。0.01mm以下の物質は、水位上昇と共に減少し下降期に増加している。0.01~0.015mmの物質は時間と共に増加し、0.032~0.05mmの物質は減少している。しかし、その程度は両者とも小さい。0.05mm以上の物質は、0.01mm以下の物質と同様の傾向を示している。また、0.015~0.032mmの物質は極めて大きな変化を示し、洪水初期から水位のピークまで上昇しその後減少している。

このように洪水時には、洪水初期における浮遊物質と

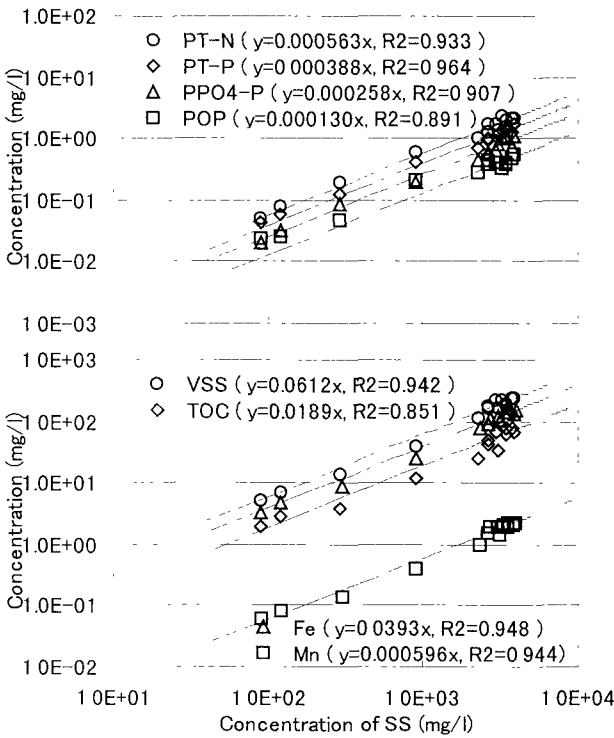


図 - 5 浮遊物質濃度と粒子性水質成分との関係

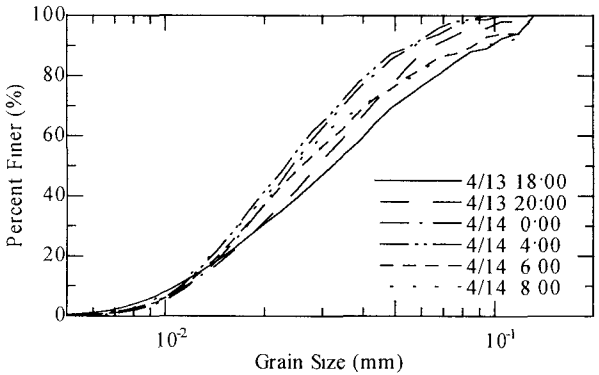


図 - 6 浮遊物質の粒径加積曲線の時間変化

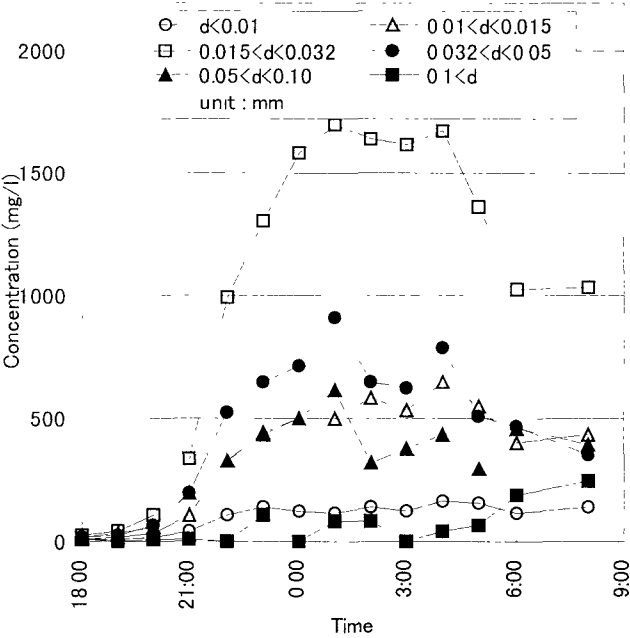


図 - 7 浮遊物質の粒度構成の時間変化

比較して、粒径の細かい成分が相対的に多く占めることとなる。

5. 洪水中の河床材料の粒径変化

洪水中の浮遊物質の粒径変化と比較を行なうため、洪水中に採取した河床材料についても粒度分析を行なった。その結果を時系列的に整理したものが図 - 8である。図 - 8には比較のため各時刻について、岩垣の式³⁾から求めた移動可能な最大の粒径 d_c 及びRubeyの式⁴⁾から求めた沈降速度と摩擦速度が等しくなる粒径 $d_{(w_f=u*)}$ についても併記した。水位の上昇直前である4月13日18時の粒径分布は、3日前の分布に比較し若干粗粒化しているが、大きく変化していない。しかし、水位上昇期に急激に粗粒化が進行し、水位上昇期である13日22時には水位のピーク発生時である14日4時の粒度分布とほぼ同じ分布となっている。またピーク後は、14日6時と11時に見られる粒径分布の大きな変動を伴っているが、細粒化している様子が伺える。この粒径分布の大きな変動は、水位上昇期にも若干見られるが水位のピーク生起後に特に顕著であり、14日11時前後のものが最も大きく0.3~0.4mm程度の粒子の構成割合が非常に高くなり一様粒径に近い分布形となっている。

河床材料は最も細かい粒径でも0.1mm程度であり、浮遊物質の最大粒径が0.132mmであることから、流水中の河床材料と水面近傍の浮遊物質とは粒径に関してほとんど重複していない。

今回の観測では、直接河床形状を測定していないため、芦田ら⁵⁾の小規模河床形態領域区分図を用いて、河床形態を推定することとした。図 - 9は、各観測時刻における値を採取された河床材料の平均粒径を用いて小規模河床形態領域区分図にプロットしたものである。13日18時及び19時は限界掃流力以下であるがその後は全てLower Regimeに分類され小規模河床波が形成されていたものと推定される。三輪ら⁶⁾は、混合粒径の実験を実施し、河床波の前面で粗粒化しクレスト直上流で細粒化することを確認している。また、喜澤ら⁷⁾は、今回の観測地点より30km程上流の穂別橋においてADCPを用いた洪水時の詳細な流速分布の観測を実施し、相当粗度高の変化から周期2~3時間の河床波の存在を指摘している。このようなことから、今回観測された粒径分布の大きな変化は、明確ではないが4~5時間程度の周期を持っており、河床波によるものであると推定される。

6. 高水敷堆積物との比較

浮遊物質と河床材料の粒径が重複しておらず、浮遊物質と河床材料との関係が認められなかったことから、前

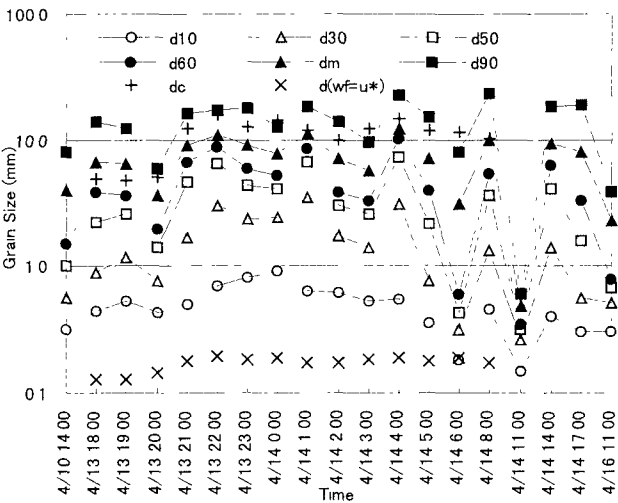


図 - 8 河床材料粒径の時間変化

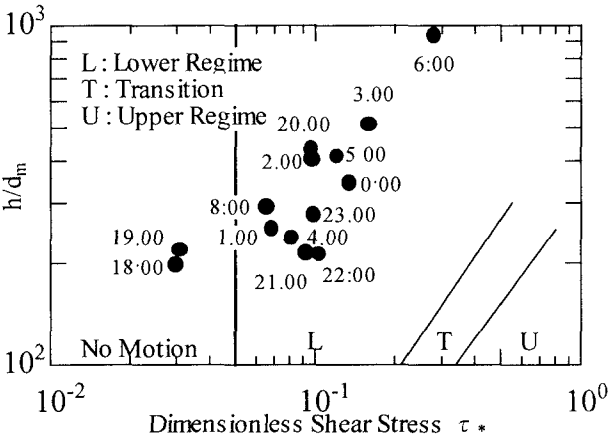


図 - 9 洪水時の小規模河床形態

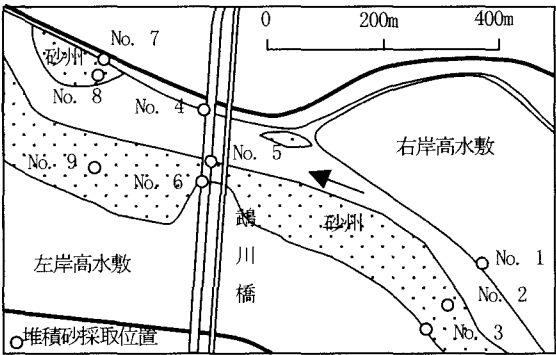


図 - 10 堆積土砂採取地点

年の出水で堆積したと思われる高水敷等における堆積砂と浮遊物質との関係を見ることとする。図 - 10は、昨年8月の洪水で堆積したと思われる堆積砂を融雪出水後に採取した地点を示したものである。採取地点は、今回の観測地点である鶴川橋近傍の9地点である。

各地点での粒径分布を図 - 11に示す。河床材料と同じ範囲の粒径で構成されている地点から浮遊物質と同じ範囲の粒径で構成されている地点まで、地点により粒径が大きく異なっている。砂州上の堆積物は概ね粒径が粗く高水敷上の堆積物が細かい傾向にある。これらの地点の堆積土砂に含まれる粒子性総窒素、粒子性総リン及び強

熱減量を測定した結果を、各地点の平均粒径で整理したものが、図 - 12である。各成分の構成比は、式(2)で表わされる回帰式で平均粒径と結び付けられ、ある程度の相関を持っていることがわかる。

$$\beta_i = \gamma_i d_m^{\kappa_i} \tag{2}$$

ここで、 β_i :成分*i*が堆積物中に占める割合、 γ_i 、 κ_i :成分*i*に関する係数、 d_m : 堆積物の平均粒径である。図 - 12は、粒径が大きくなるに従って各成分の構成比が小さくなる傾向を示している。

式(1)における α_i と式(2)における β_i は、ともに粒子に占める各成分の構成比を表している。洪水中の浮遊物質と堆積物との関係を見るために、式(2)で浮遊物質の平均粒径を用いて β_i を算出し、これを式(1)の α_i として浮遊物質の水質成分を推定することとした。図 - 13は、この方法で求めた浮遊物質の濃度と浮遊物質を成分分析して求めた濃度との関係をみたものである。粒子性総窒素の推定値が分析値に比べ全体的にやや大きい値を示しているが、ほぼ推定値と分析値は同程度の値となっている。高水敷等の堆積物を分析することで洪水時の粒子性水質成分の濃度を見積もることができることを示すと同時に、洪水中では高水敷等に堆積している物質がまきあがって浮遊物質となっていることを示唆するものであると考えられる。

7. おわりに

鶴川の融雪出水時の観測結果を用い、浮遊物質と水質成分及び河床材料等の関係を考察した結果、洪水中の窒素・リン等は浮遊物質に吸着された形で輸送され、かつ吸着されている物質に関して高水敷等の堆積物と同質であることが示された。また、浮遊物質の平均粒径で粒子性の水質成分構成比が整理された非常に興味深い結果が得られた。しかし、この現象が普遍的であるかについては、今後の課題となる。

参考文献

- 1) 新目 竜一、船木 惇悟：鶴川におけるSS流出負荷特性について、土木学会年次学術講演会講演概要集第2部、pp.712-713, 1998.
- 2) 斎藤大作、船木惇悟、新目竜一：鶴川河口海域における河川からの供給物質について、水文・水資源学会1998年研究発表会要旨集、pp.124-125, 1998.
- 3) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集No.41, pp.1-21, 1956.
- 4) Rubey, W. W.: Settling Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles, Amer. Jour. Sci., Vol.25, pp.325-338, 1933.
- 5) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No.206, pp.59-69, 1972.

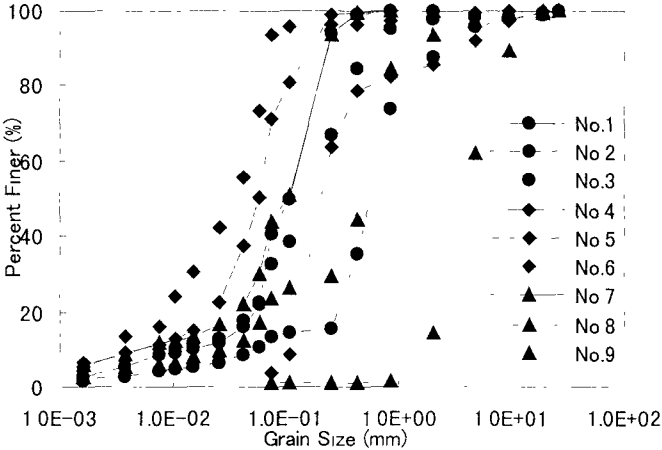


図 - 11 堆積物の粒径加積曲線

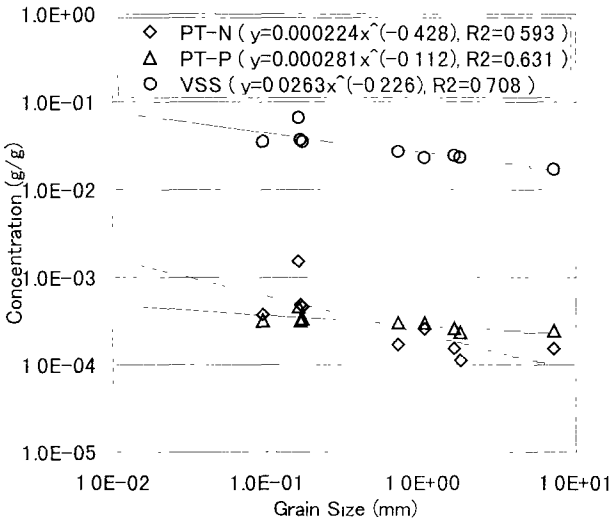


図 - 12 堆積物の平均粒径と各成分の占める割合

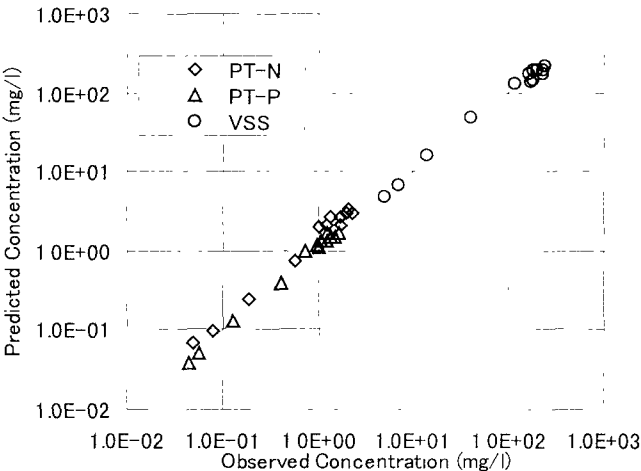


図 - 13 浮遊物質に含まれる物質濃度の推定結果

- 6) 三輪浩、大同淳之：河床波の変形に及ぼす混合砂の分級効果、土木学会水工学論文集No. 41, pp. 901-908, 1997.
- 7) 喜澤一史、山下彰司、鳥谷部寿人、長谷川和義：洪水流における水理構造の変化について、土木学会北海道支部論文報告集、No. 54(B), pp. 258-263, 1998.

(1998. 9. 30受付)