

洪水規模による栄養塩類輸送の変化

DEPENDENCE OF NUTRIENT SALT TRANSPORT ON FLOOD SCALE

吉川 泰弘¹・渡邊 康玄²・安田 浩保²

Yasuhiro YOSHIKAWA and Yasuharu WATANABE and Hiroyasu YASUDA

¹ 正会員 工修 独立行政法人 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

² 正会員 工博 独立行政法人 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

In studying the river environment, it is important to understand how the movement of nutrient salts affects that environment. Fine-grained SS in floodwater adsorb nutrient salts. While flowing downstream, some of the SS sink to the riverbed and become river sediment; conversely, sediment is taken up in the flow to become SS. This study has two purposes. The first is to clarify the relationship between SS and nutrient salt transport at times of flooding. The second is to estimate the amount of nutrient salts deposited in the high-water channel after two floods of different scales. The studied river is the Saru River. For one flood, analysis found a relationship between each kind of nutrient salt and each type of SS, and we expressed it as a single regression equation. The correlation between silt concentration and granular nutrient salts concentration was close. The estimations showed that the amount of SS deposited in the high-water channel differs by flood scale. By substituting the amount of SS deposited in the high-water channel into the derived single regression equation, we were able to estimate the amount of salts deposited in the high-water channel.

Key Words : Hokkaido Saru River, Flood, Nutrient Salts, Nitrogen, Phosphorus, Suspended Material

1. はじめに

栄養塩類は生態系に影響を与えるため、その挙動を把握することは河川環境を維持および管理する上で重要である。一方、洪水時に流下する土砂の中で粒径の細かい土砂は、栄養塩類を吸着した形で河岸堆積物との交換を繰り返しながら流下している事が指摘されている¹⁾。

本研究は、規模の異なる洪水における栄養塩類の挙動の違いの把握を目的としている。観測データから栄養塩類と浮遊物質との相関関係を明らかにし、準二次元不定流複断面計算により高水敷への堆積量を求め、洪水後の栄養塩類の負荷を量的に推定した。

2. 対象流域と洪水および融雪出水

(1) 対象流域の概要

対象流域は、流域面積 1,350km²、幹川流路延長 104km である日高地方の最西端に位置する沙流川とし、二風谷ダムから河口までを対象区間とした。河床勾配は 1/500 ~ 1/800 で道内でも屈指の急流河川であり沖積地を形成している。比較的大きな支川に関しては、ダム堤体約 5km 下流で亜別川および約 15km 下流でシラウ川がある。著者らは、図-1 中の丸印で示した複数の地点で、水位および SS 採水観測²⁾³⁾を平成 13 年から継続的に実施している。

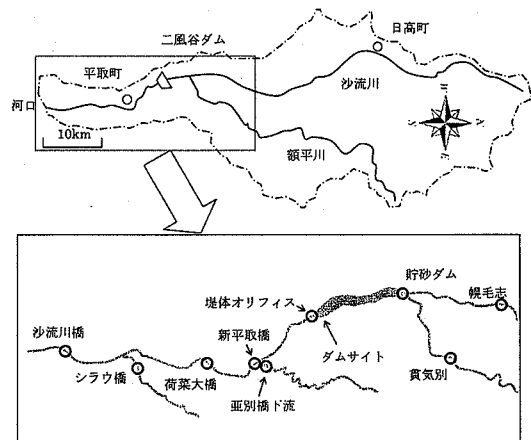


図-1 沙流川の流域図と観測場所

(2) 対象洪水

対象洪水は 2001 年 9 月と 2003 年 8 月の洪水とし、観測したピーク流量を表-1 に示し、1969~2004 年の沙流川橋付近における年最大流量を図-2 に示す。2003 年 8 月洪水は、安全性の問題により沙流川橋においてピーク時は未観測であるため、 $H-Q$ 式より求めた確定値 (毎正時) を 100m³/s で丸め示している。表-1 より、沙流川橋のピーク流量は約 2 倍程度異なり、支川のピーク流量は両洪水とも同程度であった。図-2 より、2001 年 9 月洪水は、3 番目に大きな出水であり、2003 年 8 月洪水では

表-1 両洪水のピーク流量 (単位:m³/s)

ピーク流量	沙流川橋	シラウ川	亜別川
2001年9月	2,400	30	80
2003年8月	5,200	30	30

表-2 両融雪出水のピーク流量 (単位:m³/s)

ピーク流量	沙流川橋	シラウ川	亜別川
2003年5月	372.7	0.5	2.7
2004年5月	606.0	1.3	6.8

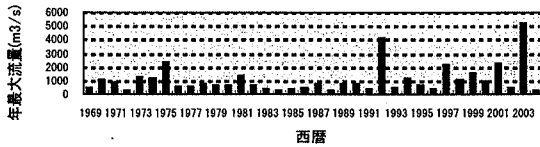


図-2 1969年から2004年の年最大流量

計画規模を上回る最大規模の出水であった。対象とする期間は、観測期間を含む2001年9月11日04:00~13日15:00の計60時間、2003年8月9日10:00~11日09:00の計48時間である。

洪水前後の浮遊物質の観測値より求めた通過量は、2001年9月洪水で上流の新平取大橋762,000t、下流の沙流川橋934,000tで、河道内から172,000tの浮遊物質が流水へと供給されたと推定でき、2003年8月洪水は上流の二風谷ダム2,809,000t、下流の沙流川橋2,885,000tで、河道内から76,000tの浮遊物質が流水へと供給されたと推定できる。なお、2003年8月洪水は前述した理由により、L-Q式により補完し求めた値である。

(3) 対象融雪出水

洪水時との比較を行うために、融雪出水の栄養塩類と浮遊物質の挙動の変化を、2003年4月30日~5月1日と2004年5月3日~2004年5月7日の融雪期間に観測を行った。観測したピーク流量を表-2に示す。沙流川橋でのピーク流量が融雪間で約1.5倍の開きがあり、支川のピーク流量は両融雪出水ともに本川に比べ比較的小さい流量である。

3. 栄養塩類の推定式の導出

ここでは、2001年9月と2003年8月の洪水時に、採水された流水の水質および粒度分析に基づき、栄養塩類の推定式の導出を行う。

(1) 洪水時の流水分析

推定式の導出に必要な観測データは、SS(浮遊物質濃度)、粒度分析、詳細な水質分析、洪水後の高水敷の底質試験である。詳細な水質分析とは、粒子性・溶解性・有機態・無機態へと区分できる分析のことである。SS、粒度分析は両洪水ともに観測しているが、詳細な水質分析は、2001年9月のみ実施している。洪水後の高水敷の底質試験は、2001年9月で洪水1ヵ月後に観測しているが、データ数が少なく解析が行えなかった。また、2003年8月については、強熱減量のみ観測しており、強熱減量は

表-3 栄養塩類と浮遊物質の区分

	窒素：N	リン：P		粒径 mm
総	TN	TP	粘土	0.000~0.005
粒子性有機態	PON	POP	シルト	0.005~0.075
粒子性無機態	-	PPO4-P	細砂	0.075~0.250
溶解性有機態	DON	DOP	中砂	0.250~0.850
溶解性無機態	DIN	DPO4-P	粗砂	0.850~2.000

全粒子性有機態のため栄養塩類のみを抽出することは困難である。このため、洪水時のSSと洪水後の高水敷の堆積物に同一の割合で栄養塩類が付着し両者が同一のものであることが報告¹⁾されていることから、2001年9月洪水での栄養塩類と浮遊物質の解析結果を基に、洪水による高水敷への栄養塩類量を推定する事とした。

(2) 洪水時の栄養塩類と浮遊物質の挙動

栄養塩類とSSを区分別に解析するために、表-3に示す区分で行った。TN・DTN・NH₄-N・NO₂-N・NO₃-N、TP・DTP・DPO₄-P・IP(PO₄-P)の水質分析から足し引きにより、SSおよび粒度分析から、各区分別に算出した。ただし、栄養塩類の無機態窒素は、ほとんどが溶解性なので粒子性は無視している。

a) 洪水時の栄養塩類

両洪水における流量に対する総窒素の挙動を図-3 a)に、総リンの挙動を図-3 b)に示す。両洪水とも流量増加に伴い総窒素・総リン濃度も増加する傾向が見てとれ、その挙動を単回帰式を用いて表した。少なくとも対象とした洪水における総窒素・総リンの挙動は、洪水規模に依存しないと言える。

2001年9月洪水時の流量に対する区分別窒素の挙動を図-4 a)に、区分別リンの挙動を図-4 b)に示す。粒子性成分については、流量増加に伴い濃度も増加し正の相関をとるが、溶解性成分は濃度変化が小さく相関が無いことが分かる。TNに対する百分比はそれぞれPON(88%),DON(3%),DIN(6%)であり、TPに対する百分比はそれぞれPOP(37%),PPO₄-P(60%),DOP(2%),DPO₄-P(1%)である事から、窒素の88%、リンの87%が粒子性で構成されている事が分かる。

b) 洪水時の浮遊物質

両洪水における流量に対する区分別SSの挙動を図-5 a),b)に示す。両洪水とも流量と区分別SSとに正の相関があり、SSに対する百分比は2001年9月でそれぞれ、粘土(26%),シルト(61%),細砂(11%),中砂(2%),粗砂(0%),2003年8月でそれぞれ、粘土(24%),シルト(59%),細砂(14%),中砂(4%),粗砂(0%)であることから、両洪水間でSSの構成比は同程度となっている事が分かる。

c) 洪水時の栄養塩類と浮遊物質の相関

流量と区分別の栄養塩類濃度および区分別のSSとの間に、正の相関があると推測されるため、それぞれの濃度間で相関係数を求め結果を表-4に示し、区分別SSとTPの

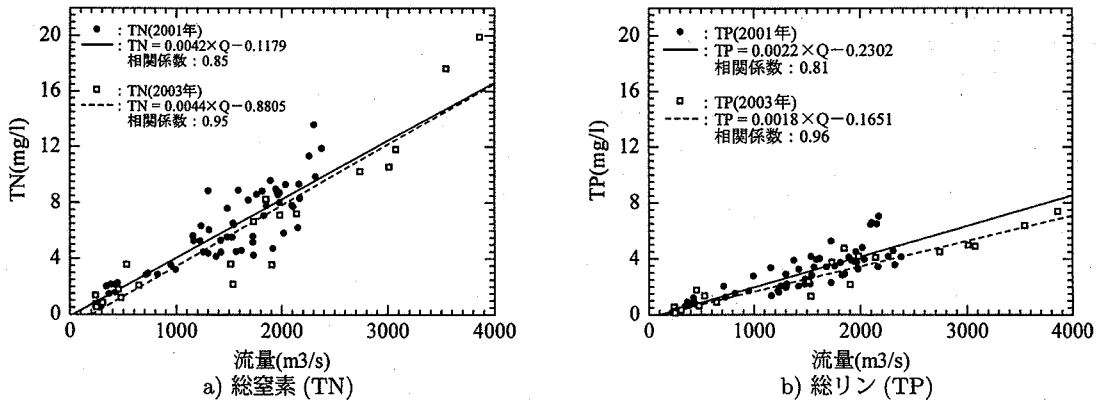


図-3 2003年8月洪水と2001年9月洪水の流量と総窒素, 総リンの関係

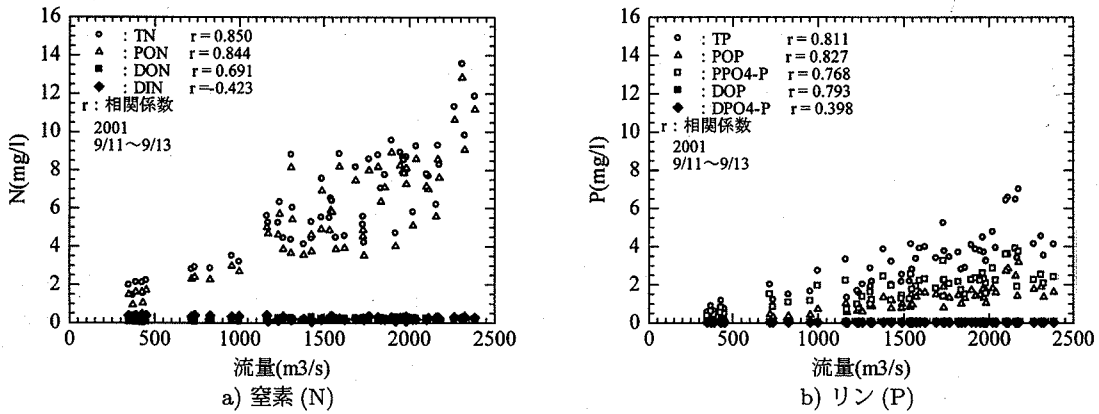


図-4 2001年9月洪水の流量と区分別栄養塩類の関係

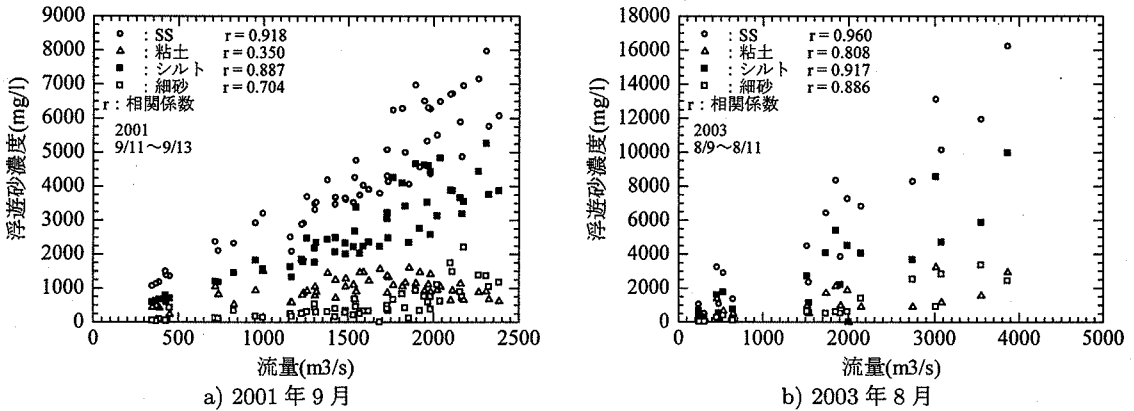


図-5 2001年9月洪水と2003年8月洪水の流量と区分別SSの関係

相関図を表-6に示す。表中の総SSは、区分別SSと判別するため呼称したものである。表-4からシルトが区分別栄養塩類と相関がよく、粒子性成分(PON, POP, PPO4-P)が区分別SSに対して相関が良いことが分かる。このことから、栄養塩類の粒子性成分のその多くが、SS成分のシルトに輸送または、吸着された形で洪水時に流下していると推定出来る。

区分別栄養塩類濃度 L_m [mg/l] と区分別 SS_j [mg/l] との間で、式(1)に示す単回帰式を導き α, β を求めた。また、SSは二価性を持っており⁴⁾、各区分毎に2本の相関式を導出する必要があるが、簡単のため1本とし単回帰式で相関関係を表している。

$$L_m = \alpha_{mj} SS_j^{\beta_{mj}} \quad (1)$$

α, β : 区分別の栄養塩類とSSに係る乗数および指数, m : 栄養塩類区分, j : 土砂(SS)区分

高水敷に堆積した栄養塩類を量的に推定するために、式(1)の L_m を区分別栄養塩類量 W_m [t] に、 SS_j を区分別堆積量 W_j [t] に置き換えた式(2)を用いる。また、区分別堆積量 W_j を求めるために、区分別体積 V_j [m³]、土粒子の密度 p_s [t/m³]、空隙率 λ から式(3)を用いている。

$$W_m = \alpha_{mj} W_j^{\beta_{mj}} \quad (2)$$

$$W_j = p_s (1 - \lambda) V_j \quad (3)$$

表-4 区分別の栄養塩類と浮遊物質の相関係数 (2001年9月)

	粘土	シルト	細砂	中砂	総SS
TN	0.19	0.83	0.65	0.65	0.83
PON	0.19	0.82	0.65	0.65	0.83
DON	0.34	0.51	0.33	0.22	0.52
DIN	-0.37	-0.25	-0.09	0.03	-0.26
TP	0.28	0.73	0.79	0.69	0.83
POP	0.27	0.72	0.82	0.71	0.82
PPO4-P	0.29	0.71	0.75	0.66	0.80
DOP	0.38	0.66	0.47	0.43	0.69
DPO4-P	0.16	0.38	0.27	0.31	0.39

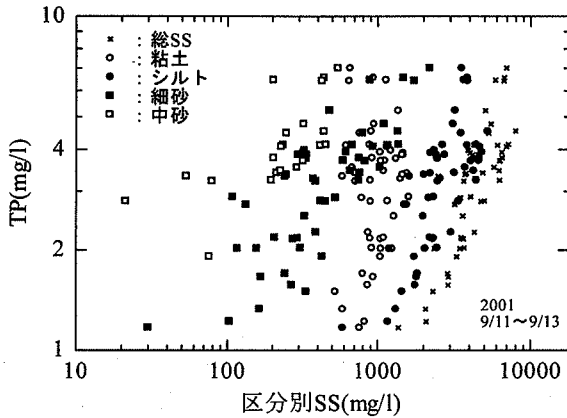


図-6 2001年9月洪水の区分別SSと総リンとの相関図

4. 2003年8月洪水前後の融雪出水

(1) 融雪出水時の栄養塩類

2003年および2004年の融雪出水における流量に対する総窒素・総リンの挙動を、図-7に示す。両出水とも流量の増加に対して総窒素の増加が小さい傾向にある。総リンは、2003年では総窒素と同様な傾向が見られるが、2004年では流量500[m³/s]までは流量と総リンは正の相関があるが、流量がそれ以上になると濃度が減少する傾向にある。

(2) 融雪出水時の浮遊物質

両洪水および2003年8月洪水を挟む2003年、2004年の融雪出水時において、流量とSSとの関係を時系列をとり、上流の新平取大橋において図-8 a)に、下流の沙流川橋において図-8 b)に示す。観測ピッチは、2001年9月洪水が約1時間、2003年8月洪水が約2時間でピーク時は未観測、2003年融雪出水が約1時間、2004年融雪出水が約3時間である。また、融雪出水時は流量が小さいため、図中には拡大図を載せている。2003年8月洪水の立ち上がりについて、沙流川橋(KP2.8)より新平取大橋(KP16.0)の方が、同じ流量に対して若干ではあるがSS濃度が高くなっていることが分かる。2003年融雪出水では、新平取大橋では流量増加に対するSSの増加が見られないが、沙流川橋では若干の相関があることが分かる。2004年融雪出水では、二価性が顕著に現れており時系列で見たところ、薄いSSで始まり濃いSSへと遷移する傾向であった。

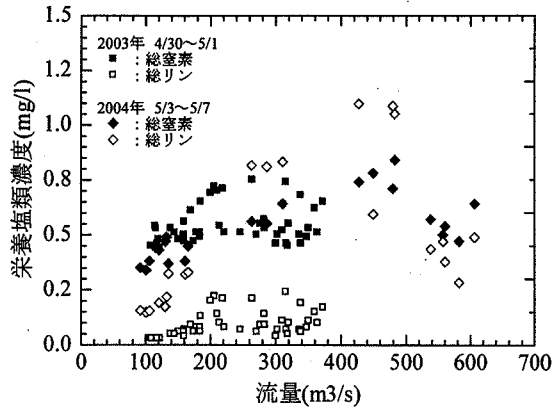
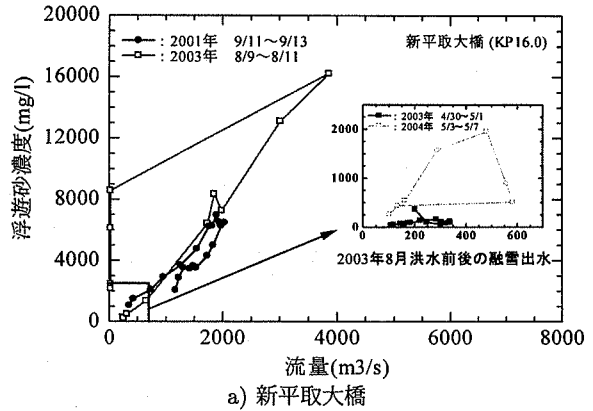
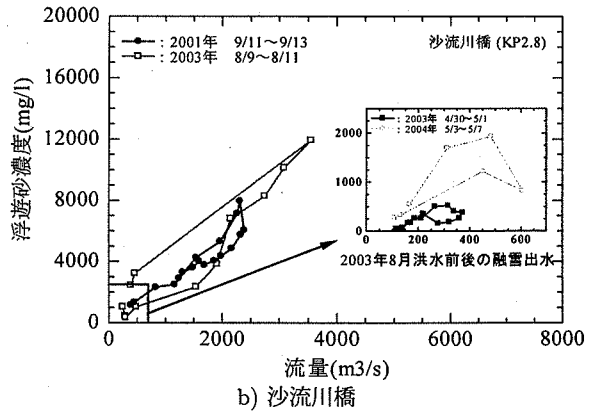


図-7 洪水前後の栄養塩類の変化



a) 新平取大橋



b) 沙流川橋

図-8 洪水・融雪出水時の流量とSSの関係

5. 数値モデルとその計算法

本論文では、洪水時における高水敷の流速を適切に表現するために横断方向の流れの抵抗を考慮し、SSの二価性を再現するために流量の時間的変化を考慮した準二次元⁷⁾不定流複断面計算を行った。

(1) 流れの基礎式

不定流の流れの計算には、連続の式および運動の方程式⁵⁾を用いた。ここで、抵抗項は横断面内の抵抗を考慮し i_e :エネルギー勾配と等しく与えた。

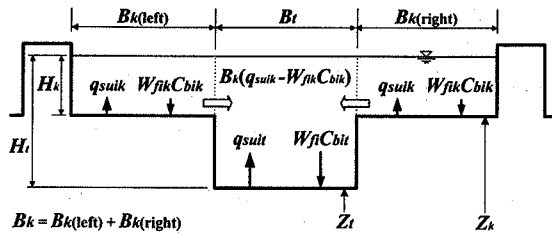


図-9 計算断面モデル

(2) 河床変動の基礎式

低水路については、掃流砂と浮遊砂を考慮した流砂の連続式⁶⁾により河床変動量を算出した。 q_b :単位川幅当りの掃流砂量は芦田・道上¹⁰⁾の式を、粒径別の限界摩擦速度は Egiazaroff・浅田¹¹⁾の式を用いた。 W_f :浮遊砂の沈降速度については、Rubey の式を用いた。

高水敷については、高水敷内の樹木、草地を考慮し掃流砂は出現しないものと仮定して式(4)により求めた。

$$\frac{\partial Z_k}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \left[\sum_i (q_{suik} - W_{fik} C_{bik}) \right] \quad (4)$$

Z :河床高, λ :河床材料の空隙率(=0.4), q_{su} :単位時間単位面積当りの河床からの浮遊砂浮上量, C_b :河床付近の浮遊砂基準点濃度, 添え字 i は各粒径毎で k は高水敷に既定される値を表す。

W_{fik} については、高水敷の沈降速度で高水敷の河床材料調査より低水路よりも細かい粒径が多いことから、細かい粒径の沈降速度を考慮している沈降速度式¹²⁾を用いた。

また、粒径別流砂の連続式¹³⁾で用いる交換層については、低水路については平均粒径程度の2cmを与え、また、SSは一般に1 μ mから2mmの粒子¹⁴⁾のため、SSの浮上沈降を考慮している高水敷については2mmとした。

(3) 浮遊砂濃度の基礎式

粒径別の浮遊砂濃度の連続式は、高水敷での浮上沈降量が浮遊砂濃度及び土砂量に影響を与えることを表す非定常性を考慮し拡散項を含む式(5)を用いた。計算断面モデルを図-9に示す。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (<C_i> (H_t B_t + H_k B_k))}{\partial t} \\ & + \frac{\partial (<C_i> (V_t H_t B_t + V_k H_k B_k))}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial (<C_i> (H_t B_t + H_k B_k))}{\partial x} \right) \\ & + B_t (q_{suit} - W_{fi} C_{bit}) + B_k (q_{suik} - W_{fik} C_{bik}) \quad (5) \end{aligned}$$

C : 浮遊砂濃度, $<>$:水深平均値, H :水深, B :低水路幅, V :流速, ϵ :渦動粘性係数, t :時間, x :距離, 添え字 t は低水路に既定される値を表す。

浮遊砂濃度の分布式は式(6)で与えられ、積分により平均浮遊砂濃度を求めた。高水敷の基準点濃度算出につ

いては、低水路の基準点濃度を用いて式(6)より求めた。

$$c_n = c_b \exp \left(-\frac{W_f}{\epsilon} H_n \right) \quad (6)$$

c_n は、低水路河床面上からの高さ H_n [m] の濃度で添え字 n は低水路河床面上からの離れを表す。

浮遊砂濃度は断面水深平均を与えたため、横断方向の拡散も考慮する必要があるが、簡単のため横断方向の拡散は瞬時に生ずるものとして式(7)を常に満たすと仮定した。

$$\langle C \rangle A = \langle C_t \rangle A_t + \langle C_k \rangle A_k \quad (7)$$

(4) 数値解析法

横断面内の流速分布の運動式はガウスの消去法で解き、不定流計算はリーブフログ法で解いている。計算断面は、一般断面から平均河床高をとり矩形断面とした。また、栄養塩類の取込速度は、流速に比例する⁸⁾ことから、水量の計算は重要であるため、計算において支配的なマンングの粗度係数を移動床流れの抵抗を考慮した岸・黒木⁹⁾の方法を用いて逐次計算を行い計算に取り込んだ。

6. 再現計算結果

(1) 既往洪水の再現

2003年8月洪水は未観測期間があるため、2001年9月洪水沙流川橋において、区分別SSの観測値と再現計算結果を、横軸に計算時間を取り図-10に示す。粘土、シルトに関しては概ね再現できているが、粗い粒径(細砂および中砂, 粗砂も含む)については再現出来なかった。しかし、沙流川および他の河川¹⁵⁾においても、SSの大半が粘土、シルト構成されているため、大まかな傾向を掴みうると言える。

2001年9月洪水時の栄養塩類の挙動の把握を行うために、沙流川橋において総窒素・総リンの観測結果と、再現計算から求めたSSを式(1)を代入した計算結果を、横軸に計算時間を取り図-11に示す。このとき用いた定数は、 $\alpha_{TN}=0.00317$, $\beta_{TN}=0.90645$, $\alpha_{TP}=0.00043$, $\beta_{TP}=1.06131$ である。図-11から総窒素については、立ち上がり・ピーク共に再現性が良くないが、減衰時は再現できている。総リンについては、若干計算値が小さい値を示すが、傾向は掴めている。

SS, 栄養塩類の再現性の問題の原因は、高水敷内の樹木、草地を考慮し掃流砂は出現しないものと仮定しているが、実現象として掃流砂の発生があることが考えられる。

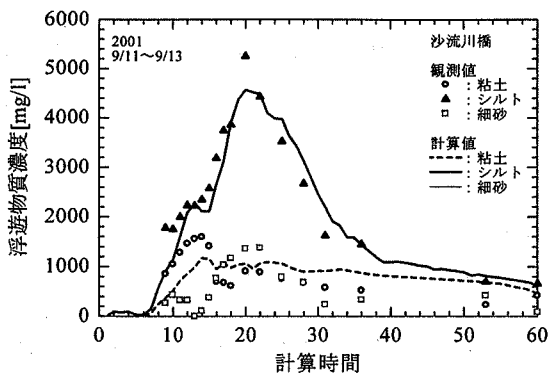


図-10 2001年9月洪水の区分別SSの時間的变化

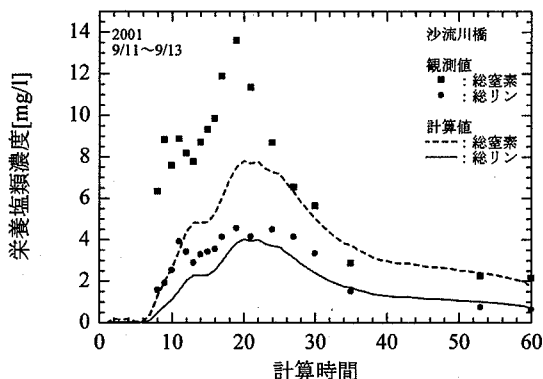


図-11 2001年9月洪水の窒素・リンの時間的变化

(2) 窒素・リンの推定

沙流川橋において洪水前後の浮遊物質の通過量を式(2)に代入し、TPを求めると、2001年9月洪水では通過量934,000tに対しTPは577tで、2003年8月洪水では通過量2,885,000tに対しTPは1,583tであり、洪水規模により海域へと流下する量が異なる事が分かった。

沙流川橋(KP2.8)から新平取大橋(KP16.0)の区間において、横断測量の結果では4,179m³の洗掘を受けているが、再現計算では310,442m³の堆積とその開きは314,621m³と誤差が大きく原因として高水敷に堆積しすぎる事が上げられた。前述したように高水敷の掃流砂を考慮していないためであると推測される。以後、この結果を正しいと仮定した場合について述べる。

再現計算の結果から、洪水前後の高水敷の変動量を、各断面の粒径加積曲線から区分別に分け、式(3)から W_j を求め対象区間で加算したものを表-5に示す。表中の正負号はそれぞれ堆積、洗掘を受けたことを表す。2003年8月洪水は2001年9月洪水に比べ、高水敷に粘土、シルトが堆積する傾向であり、この堆積量により、式(2)を用いて、栄養塩類を推定した。図-10より明らかなように、シルトについて再現が良いことから、シルトと相関係数が良い区分別栄養塩類について、推定量を計算し表-6に示す。洪水間でシルトの堆積量が2,495t異なるが、表-6より、この程度では栄養塩類推定量に優位な差は見られないと言える。

表-5 洪水後の高水敷の変動量(単位:t)

変動量	粘土	シルト	細砂	中砂
2001年9月	46	84,355	-4,511	-37,085
2003年8月	138	86,850	767	-69,354

表-6 シルトに含まれる栄養塩類推定(単位:t)

シルト	PON	POP	PPO4-P
2001年9月	132	50	30
2003年8月	136	52	31

7. おわりに

沙流川の洪水時の区分別の栄養塩類とSSの挙動を明らかにしたところ、粒子性成分とシルトとの相関が良いことが分かった。導出した関係式により栄養塩類の量的な推定が可能であることを示した。また、融雪出水において年次によりSSの挙動が異なる事もわかった。

洪水再現計算において、河道内の河床変動量およびSSのうち細砂と中砂の再現性が悪く、これは実現象においては高水敷で掃流砂が発生していることを示唆する結果である。今後は、掃流砂の横断方向輸送を考慮した二次元計算による検討を行う予定である。

謝辞：本論文は、北海道開発局室蘭開発建設部より、資料の提供等のご協力いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊康玄・新目竜一・斉藤大作・玉川尊：鶴川1998年融雪出水時の物質輸送に関する調査、土木学会水工学論文集第43巻、pp.587-592,1999.
- 2) 渡邊康玄・小川長宏：沙流川2001年夏季出水時のSS輸送特性、土木学会北海道支部論文,2002.
- 3) 小川長宏・渡邊康玄：沙流川流域における2003年8月洪水の調査観測、土木学会水工学論文集第48巻、PP.955-960,2004.
- 4) 土木学会水工学委員会、平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団報告書2004、pp.129-141,2004.
- 5) 日野幹雄、明解水理学、丸善株式会社、pp.200-203,1983.
- 6) 水理公式集、土木学会、pp.174,1999.
- 7) 河道計画検討の手引き、財団法人国土技術研究センター、pp.79-82,2002.
- 8) 宗宮功、自然の浄化機構、技報堂出版、1999.
- 9) 河村三郎、土砂水理学、森北出版株式会社、pp.227-231,1982.
- 10) 芦田和男、道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究、京都大学防災研究所年報第14号B,1971.
- 11) 浅田宏：山地河川の流砂量と貯水池の堆積過程に関する研究、電力中央研究所報告総合報告No.2,1976.
- 12) 島田友典・吉川泰弘・渡邊康玄：2003年8月沙流川洪水時の二風谷ダム湖内の土砂移動特性、北海道開発局技術研究、第48,2004.
- 13) 平野宗夫：Armorringをとともう河床低下について、土木学会水工学論文集第195号、PP.55-65,1971.
- 14) 水質調査の基礎知識、近畿技術事務所、pp.35,2003.
- 15) 山崎真一：寒冷地河川における栄養塩の性質に関する調査、北海道開発局技術研究、第46,2002.

(2005.4.7受付)