

5. 最上川流域の融雪期における物質輸送

Suspended Material Carried by Snow Melt Runoff in the MOGAMI River Basin

小川 かおり* 真野 明* 前川 勝朗**

Kaori OGAWA, Akira MANO, and Katsuro MAEKAWA

ABSTRACT: Snow-melt run-off during thaw causes a large amount of material transport in the river of snow-covered region. We investigated the characteristics of material transport along the main stream of Mogami River from the analysis of the distribution of SS, T-N, T-P and the material transport flux. The distribution of SS, T-N and T-P are obtained by sampling river water. The material transport flux was computed by using the remote sensing data of NOAA/AVHRR.

Dynamic model on the SS concentration by using the equilibrium between erosion and deposition explain the characteristics of observations. The source of SS and T-P is the river bed of the main stream and the source of T-N is the basin..

KEYWORDS: snowmelt, Mogami River, transport, flux

1. はじめに

積雪地域に存在する河川では、融雪期における流量が年間の総流出量に占める割合が極めて高い。それは水質成分についても同様であり、融雪期における流出が水環境に及ぼす影響は大きいと考えられる。従って、水質成分の流出特性を理解することは重要な課題となる。そこで本研究では、山形県の最上川を対象流域とし、融雪期における物質輸送特性を明らかにすることを目的とする。対象流域を図1に示す。

最上川は、流域面積を 7040km²、本川の流路延長を 229km とし、その流域は山形県全面積の約 75%を占める。流域を囲む朝日山地、飯豊山地、奥羽山脈などに降り積もった雪は3月中旬より融けだし、約2ヶ月間に及ぶ雪融け出水をもたらす。融雪期間の流出量は年間流出量の約40%を占め、この地方の重要な水資源となっている。本流は米沢盆地、長井盆地、山形盆地、庄内平野の都市域を、支流は新庄盆地、尾花沢盆地の都市域を貫流しているため、出水は様々な懸濁物質を流域から河口へと輸送している。本研究はこの懸濁物質に着目し、輸送量の空間的な特性を明らかにすることを目的として河川水の採水・分析、データの解析を行った。

2. 解析方法

2. 1 採水及び分析

本研究では、1998年4月12日、25日の2日間に最上川流域の本流、支流各地点において採水実測を行った。採水地点を図1に、また、地点番号と地点名の対応を表2に示す。採水は、建設省の水位観測所付近

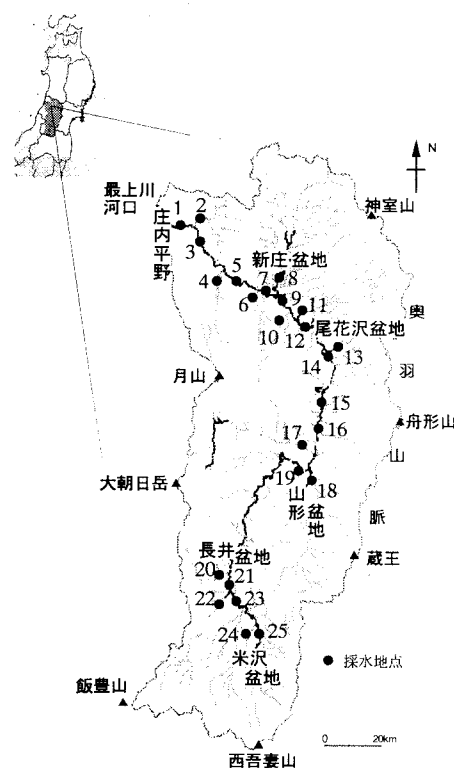


図1 対象流域及び採水地点

*東北大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Tohoku University

**山形大学農学部 Department of Agriculture, Yamagata University

にある橋の下流側において、橋脚によって生じる後流の影響が少ないと思われる場所で行った。観測チームは山形大学、東北大学から1チームずつの計2チームで、それぞれ下流部、上流部を担当した。採取した試料は、浮遊物質濃度 (SS)、全リン (TP)、全窒素 (TN) の3項目についての分析を行った。SS はガラスフィルターろ過法によって求めた。また、TP、TN については、下水道試験法に基づき、ペルオキシ2硫酸カリウムと水酸化ナトリウムによる同時分解を行い、テクニコン社のオートアナライザーⅡを用いて測定した。

2. 2 物質輸送フラックスの算定

SS、TN、TP の空間分布特性について論ずるために、各地点における輸送フラックスを算定する。物質輸送フラックスは、以下の式によって表される。

$$Fu = D \cdot Q \tag{1}$$

ここで、Fu は物質輸送フラックス、D は物質濃度、Q は流量である。空間分布特性を知るためには、できるだけ多数の地点について求めることが必要である。しかし、水位の流量換算がなされている観測所は本川上では主要箇所のみであり、支川においてはほとんど存在しないため、そのような地点については何らかの方法でもって流量を求める必要である。

融雪最盛期には積雪の密度は全層に渡って一定となり、積雪域の如何なる領域でも同様に融雪が生じるので、集水域内に積雪が多いほど観測される流量は大きくなることが予想される。そこで本研究では、ある観測地点での流量を、その観測地点の集水面積に存在する積雪面積で表すことを試みる。

積雪面積の算定には、国土地理院の国土数値情報及び衛星データを用いた。国土数値情報の流域界位置、標高、流路位置のデータを用いてメッシュサイズ1km×1kmの最上川の擬河道網を市毛ら¹⁾の方法に倣って作成し、擬河道網と衛星データを重ね合わせることで積雪面積を求める。また、利用した衛星データは、東北大学大型計算機センターが提供している NOAA/AVHRR データである。チャンネル特性を表1に示す。積雪面において、短波長領域では0.6μm 付近の波長の反射率が大きく、長波長領域では11μm 付近の放射量が大きい。ため、それらを含む波長帯のチャンネルを選ぶことが望ましい。よってch.1、ch.4を使用する。しかし以上の方法では、高層に存在する温度の極端に低い雲域の除去は可能ではあるが、低層に存在する雲の除去が不可能である。風間ら²⁾は中間赤外の波長域が大気中の水粒に強く反射する性質を持つことを利用して低層の雲域の除去を行うことが有効であるとしている。よって更にch.3を使用することにした。積雪面積算定の手順は以下の通りである。まず、最上川全体がほぼ快晴で

表1 NOAA/AVHRR のチャンネル特性

channel	Wave length (μm)	value
1	0.58～0.68 (visible)	Albedo(%)
2	0.73～1.0 (near infrared)	Albedo(%)
3	3.55～3.93 (middle infrared)	Brightness temperature (°C)
4	10.3～11.3 (thermal infrared)	Brightness temperature (°C)
5	11.5～12.5 (thermal infrared)	Brightness temperature (°C)

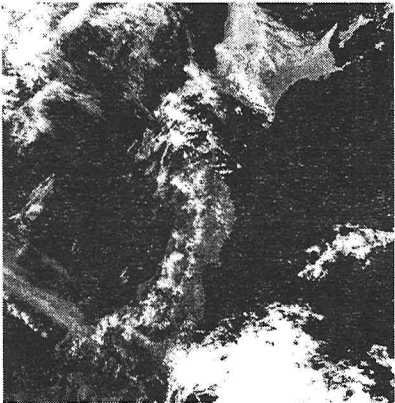


図2 衛星画像 (1998. 4. 4)

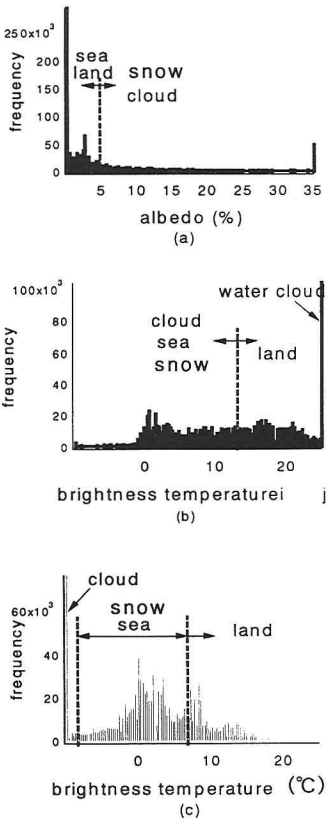


図3 画素値のヒストグラム
(a), (b), (c) はそれぞれ、channel1, 3, 4



図4 積雪マップ

ある衛星画像を選び、Ch.1, 3, 4 それぞれについて画素値のヒストグラムを作成する。図2, 3に、衛星画像とヒストグラムの例を示す。Ch.1では、海域や無雪の陸域によってアルベドが低い部分の度数が高く、雪域を示すアルベドはそれ以上である。Ch.3では、低層に存在する雲や無雪の陸域によって、高い輝度温度値で度数が高くなっている。Ch.4では、高層の雲の存在によって輝度温度値の低い部分で度数が高くなり、また、無雪の陸域では輝度温度値が高くなるため、雪域を示す輝度温度値はその間にあることがわかる。以上の情報から各チャンネルの画素値について、雪域を示すと考えられるおおよそのしきい値を決める。そのしきい値をもとに擬河道網上に雪域を描き、積雪深データ、衛星画像と比較してしきい値を補正することによって最終的な値を決定する。以上の方法によって1998年4月には2枚(4, 28日)の最上川流域における積雪マップを作成した。作成した積雪マップを図4に示す。この積雪マップから、各集水域における積雪域の大きさを知ることができる。そして、4月4日から28日までの積雪域の減少が一定の割合でおこるものと仮定することによって、採水日(4月12日, 25日)の各集水域における積雪面積を求めることができる。図5に積雪面積と流量の関係を示す。これからもわかるように、積雪面積と流量は高い相関があり、近似曲線から各地点の流量を求めることが可能となる。

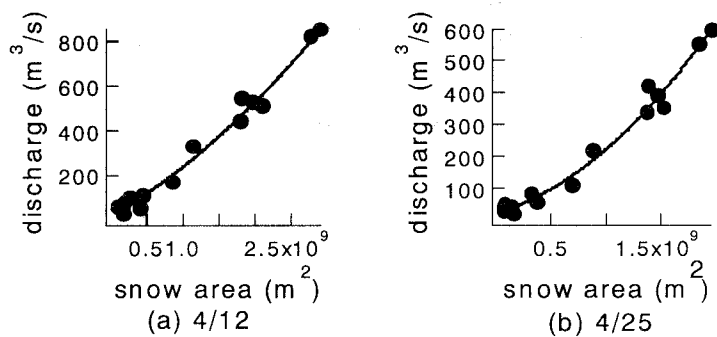


図5 積雪面積と流量の関係

表2 輸送フラックスの比較(4/25)

	No.	観測点名	SS	TN	TP
本川	25	糠野目	1.0	1.0	1.0
	23	西大塚	1.4	1.6	1.5
	21	小出	2.0	1.9	1.9
	19	長崎	3.0	2.6	2.4
	16	下野	4.4	4.5	4.5
	15	稲下	7.8	7.2	22.0
	14	大石田	5.7	11.1	14.3
	12	堀内	7.1	9.2	18.8
	9	本合海	10.9	10.8	18.8
	7	古口	13.0	9.5	26.2
	5	高屋	8.9	11.3	33.0
	3	中牧田	14.0	9.9	33.5
	1	砂越	14.6	12.4	51.8
支川	24	吉島橋	0.4	0.3	0.2
	22	白川橋	0.4	0.3	0.2
	20	野川橋	0.1	0.2	0.1
	18	寺津	0.7	2.1	1.7
	17	西根	0.6	0.4	0.4
	13	丹生川橋	0.2	0.3	0.4
	11	岩清水	0.2	0.5	0.8
	10	通り	0.8	0.4	1.1
	8	真木	0.4	0.3	1.0
	6	角川橋	0.8	0.3	1.5
	4	肝煎	1.3	0.3	1.3
	2	石名坂	0.3	0.3	1.8

3. 解析結果及び考察

3. 1 物質の発生源

表2に、4月25日における各観測地点での輸送フラックスの比較結果を示す。図中に示す数字は、本川の最上流観測点(糠野目)でのフラックスを1とした時の比である。糠野目観測点でのフラックスは、SS, TN, TP それぞれ 1.25×10^3 , 32.1, $2.57(\text{kg/s})$ である。SS, TP については、支川からの輸送量は本川に比べて非常に小さいことから、主な発生源は本川の河床であることがわかる。また、TN については人間の活動が

活発であるところというのは自明である。具体的には米沢盆地、山形盆地であり、特に山形盆地を通過する須川からの発生量が多い。

3. 2 SS と TN, TP との関係

図6にSSとTN, TPとの関係を示す。SSとTPに関しては多少のばらつきがあるものの相関があり、リンは懸濁物質に含まれた形で流出することがわかる。これに対してSSとTNの相関性はなく、窒素の輸送形態は土砂と無関係であると言える。これは、汚濁源が人為的汚濁源であるか、自然汚濁源であるかの違いによる。

3. 3 流量と各濃度との関係

図7、図8に本川、支川における流量と濃度の関係を示す。本川ではSSとTPと流量の相関が見られ、TNとの相関は見られない。これは、汚濁源が人為的汚濁源であるか、自然汚濁源であるかの違いによる。TNのような人為的汚濁源は点源であるため、その濃度は流量に無関係である。しかし、SS、TPのような自然汚濁源は面源であるため、洗い出しの効果によって流量に左右されるのである。しかし、支川については全ての項目について相関性はない。これは、支川のように小さい集水域では、その地質や土地利用状況の影響が水質に顕著に表れるためであると考えられる。例えば、流量が小さくても、集水域の岩質が脆い場合はSSが大きくなるのである。

3. 4 本川における流下方向の物質輸送フラックスの変化

図9に代表観測点として、本川最下流観測点（砂越）の4月におけるハイドログラフを示す。また、図10に本川流下方向におけるSS, TN, TPの輸送フラックスの変化を示す。図9から、採水を行った12日と25日では、12日の流量が大きいことがわかる。

(A) SS

上流部を除いて、分析結果には大きな差が見られる。先にも述べたように、SSの主な発生源は本川の河床であることから、濃度の差は河床土砂の巻き上げ量の差であると考えられる。そこで、25日に巻き上げ量が増加したのは、流量が12日より大きく、河床に働くせん断力が増加したためであると仮定して、以下のことについて検討してみる。

幅B、水深hの幅広矩形断面の河道に、流速vの一様流れを仮定すると、流量Qはマンニングの式を用いて式(2)のように表される。

$$Q = \frac{1}{n} B h^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで、nはマンニングの粗度係数、Iは河床勾配である。ある断面でのa日の流量を Q_a 、b日の流量を Q_b 、その時の水深をそれぞれ h_a 、 h_b とすると、水深の比は式(2)を用いて以下のように表せる。

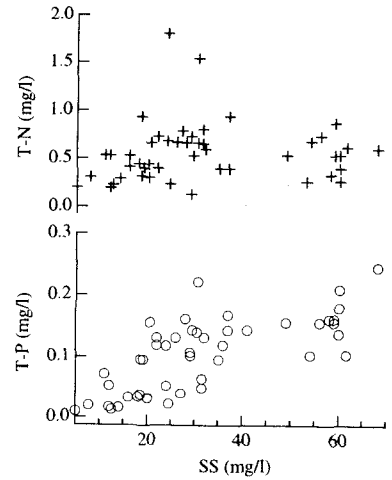


図6 SSとTN, TPの関係

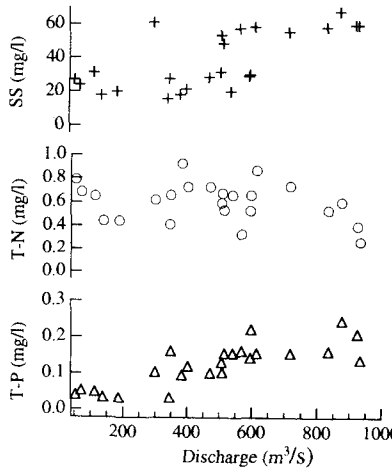


図7 流量と濃度の関係（本川）

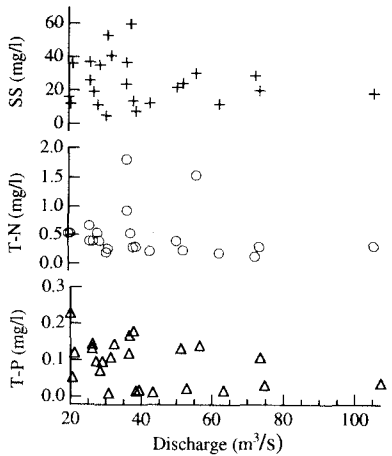


図8 流量と濃度の関係（支川）

$$\frac{h_b}{h_a} = \left(\frac{Q_b}{Q_a} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (3)$$

摩擦と重力の分力が釣り合っている等流状態であるなら、摩擦速度 u_* は径深 R 、河床勾配 I を用いて

$$u_* = \sqrt{RgI} \quad (4)$$

となる。幅広矩形の仮定及び式(3)より、摩擦速度の比は以下のように表せる。

$$\frac{u_{*b}}{u_{*a}} = \left(\frac{h_b}{h_a} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{Q_b}{Q_a} \right)^{\frac{3}{10}} \quad (5)$$

泉ら³⁾によると、巻き上げ量によるフラックス Fu とシールズ数 τ_* 、摩擦速度の間には

$$Fu \propto \tau_*^2 \propto u_*^4 \quad (6)$$

という関係がある。また、鉛直・横断面方向に浮遊土砂濃度が一様であると仮定した場合、沈降による土砂フラックス F_d は、

$$F_d = SS \cdot w_0 \quad (7)$$

と表される。今、巻き上げフラックスと沈降フラックスが等しいと仮定すると、式(6)、(7)から以下の関係を得る。

$$SS \propto \tau_*^2 \quad (8)$$

よって、 a 、 b 日の SS をそれぞれ SS_a 、 SS_b とした時、 SS の比は次のように表すことができる。

$$\frac{SS_b}{SS_a} = \left(\frac{u_{*b}}{u_{*a}} \right)^4 = \left(\frac{Q_b}{Q_a} \right)^{\frac{6}{5}} \quad (9)$$

$a=12$ 日、 $b=25$ 日の SS 比について、実測値と式(9)から求めた推定値とを比較した結果を図 11 に示す。推定値は実測値を忠実に表してはいないが、おおよその土砂濃度を知る手段としては有効である。

(B) TN, TP

TN は両日の結果に差が現れなかった。流量の大きさに関わらず、フラックスの大きさが一定ということは、先にも述べたように、発生源が「点」であることを意味する。また、リンは土砂に含まれて輸送されるため、 SS と同様の結果が得られた。

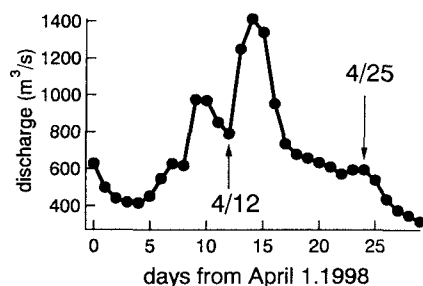


図9 ハイドログラフ (砂越)

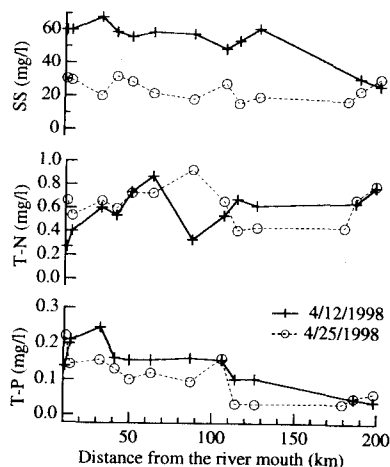


図10 本川上の濃度変化

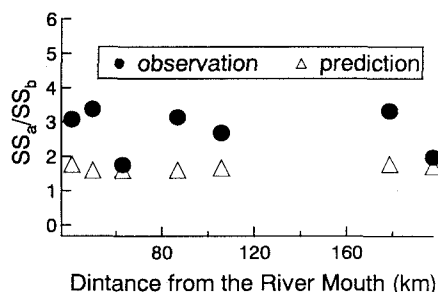


図11 SS 比についての実測値と推定値の比較

4. おわりに

本研究では、現地観測、試料分析、データの解析という一連の作業を行うことによって、融雪期における最上川流域の物質輸送特性を明らかにすることを試みた。対象領域が広範囲であるため、流域全体に渡っての採水、衛星データを用いた積雪域判定は、有効であると言える。解析によって得られた知見を以下に示す。

- ①融雪最盛期には、各地点の流量とその集水域に存在する積雪面積の間には高い相関性がある。
- ②最上川本川において、浮流状態の土砂の供給源は本川の河床である。リンは土砂に含まれて輸送されるため、発生源は土砂と同様であると考えられる。窒素の供給源は、人間活動の活発な盆地である。
- ③本川では、流量とSS、流量とTPの相関性が認められるが、支川ではそのような傾向が見られない。これは、支川では地質や土地利用の影響が水質に強く表れるためであると考えられる。
- ④流量増加に伴う土砂フラックスの増加の原因は、河床におけるせん断力の増加によって河床土砂の巻き上げ量が増加することであると考えられる。

最後に、建設省東北地方建設局山形工事事務所、酒田工事事務所、新庄工事事務所には貴重なデータを提供していただいた。また、河川整備基金より研究費の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)市毛輝和・八代義信・真野明：阿武隈川における1996年17号台風の出水解析，第5回地球環境シンポジウム講演集，pp.203-208,1997.
- 2)風間聡・川村宏・枝松芳枝・沢本正樹：AVHRR/NOAAデータによる積雪域抽出パラメータの経時変化，日本リモートセンシング学会誌，Vol.12,No.4,pp.59-69,1992.
- 3)泉典洋・パーカー，ゲーリー：礫床河道内に堆積する細砂について，水工学論文集第39巻，pp.665-670,1995.