

## 11.1 積雪寒冷地における流域からの濁質流出と環境への影響評価・管理手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水環境保全チーム、寒地河川チーム

研究担当者：浜本聡、矢部浩規、渡邊和好、西原照雅、水垣滋、丸山政浩、林田寿文、村上泰啓、阿部孝章

### 【要旨】

流域内の SS・物質流出特性を明らかにするため、多地点での同時水文観測に基づき、融雪出水時における水・SS・栄養塩の収支を推定した。また、流域スケールで水・物質循環を評価するために、分布型流出モデルを用いて水流出の再現性を検討した。その結果、鵜川流域では流域全体から SS・栄養塩の負荷があり、沙流川流域では額平川流域からの負荷が比較的多いことがわかった。また、水収支には大きな誤差が含まれる可能性が示唆された。分布型流出モデル（SWAT モデル）で水流出の再現を試みたところ、夏期の降雨出水は良好に再現できたが、融雪出水の再現に課題を残した。

キーワード：SS、栄養塩、収支、融雪出水、SWAT モデル

### 1. はじめに

水・森林資源開発や高度な土地利用開発、治水対策といった人口増加に伴う流域の改変は、河川を通じた水・土砂・物質の動態を変化させ、少なからず河川的环境に影響を与えてきた。また、ゲリラ豪雨に代表される気候変動の影響によって崩壊や地すべりといった大規模な土砂生産・流出が各地で頻発し、長期的な濁水の発生をもたらしている。北海道においても、高濃度の濁水は、水道取水の停止や漁獲量の減少、サケやシシャモの産卵床の減少など、さまざまなインパクトを与えている。

一方、1950年代以降、全国的に顕著な海岸侵食が指摘されており、鵜川河口周辺では1948年から2004年

までに約500mの汀線の後退が認められ（図-1）、2006年には下水処理場の越波被害が報告されている。鵜川河口域は、北海道でも最大規模の河口干潟があり、渡り鳥の重要な休息の場として、北海道を代表する自然環境を形成するが、海岸侵食に伴い干潟が消失するなど<sup>1)</sup>、国土保全だけでなく生態系保全の観点からも海岸侵食の防止が求められている。

流域からの流出土砂のうち大部分を占める浮遊土砂は、河川高水敷や干潟・沿岸域を構成する成分として適切な土砂供給が求められている。一方、シルト・粘土などの微細粒分が過剰な場合、水質・生態系に大きな影響を与える可能性がある。浮遊土砂は、大半が山地から海域まで河床にとどまることなく流下するた

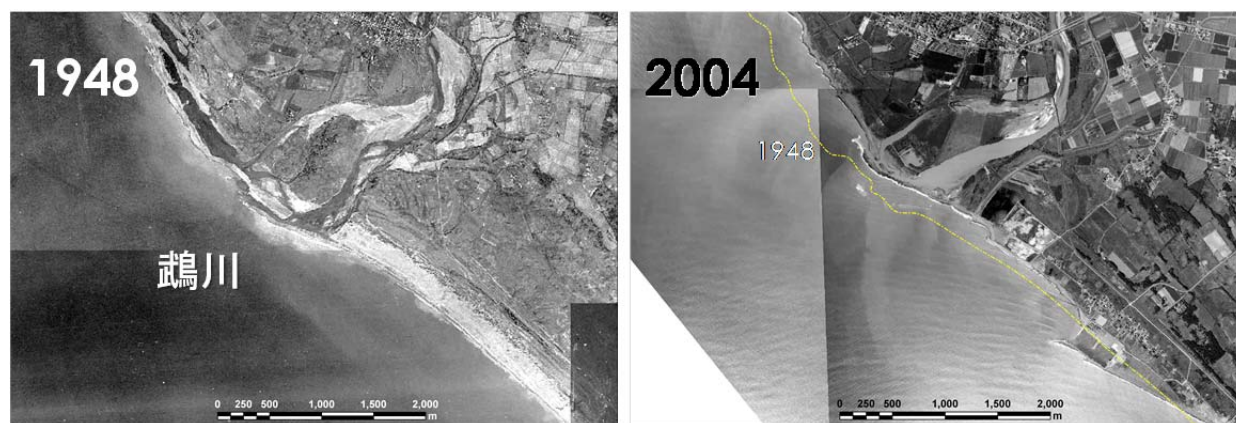


図-1 鵜川河口周辺の汀線変化

め、生産源における対策が重要となる。これまでに、流域や沿岸域での土砂動態については、各領域・関係機関において様々な調査・解析が行われてきており、近年になって河川上流域から海域まで一貫した研究事例がみられるようになった<sup>2)</sup>。しかし、これもダムを上流端とした流砂系での事例であり、土砂の生産源(流域)から堆積域(氾らん原・沿岸・海岸)を一連のシステム(流砂系)として捉えて検討された事例はほとんどみられない。

また、鵜川及び沙流川沖の沿岸流による土砂動態については、これまでも多くの調査・研究が行われてきた<sup>3),4),5)</sup>。しかし、これらの研究は短期的な土砂流出イベントについて検討したものであり、長期的な流域の土砂動態と連動して検討された事例はみられない。干潟や海岸といった海岸地形の保全を考えるためには、流域と沿岸域の長期的な土砂動態を把握し、連動して検討することが重要である。

本研究の目的は、山地から沿岸域までを一連の系とした浮遊土砂・濁質動態の把握手法の開発、及び河道・海岸の堆積・侵食や水質・生態系への影響評価手法を開発することである。本年度は、流域の土砂及び栄養塩の生産源を把握するために、北海道開発局室蘭開発建設部と合同で水文観測・水質調査を行い、融雪出水時のSS及び栄養塩の収支を推定した。また、流域の水・物質循環を推定するために、分布型流出モデルのデータベースを構築し日流量の再現を試みた。

## 2. 方法

### 2.1 研究対象流域

調査対象流域は、北海道中央部の鵜川流域及び沙流川流域とした(図-2)。鵜川は、流域面積1270 km<sup>2</sup>、幹川流路延長135 kmの一級河川である。北海道勇払郡占冠村の狩振岳(1323 m)に源を発し、パンケシュ川、双珠別川、穂別川を合わせて、むかわ町市街地を経て太平洋に注いでいる。河床勾配は、上流域で1/150以上、中流域で約1/100~1/1000、下流域で約1/1000である<sup>6)</sup>。

沙流川は、流域面積1350 km<sup>2</sup>、幹川流路延長104 kmの一級河川である。日高山脈の熊見山(1175 m)に源を発し、ウエンザル川、パンケヌシ川、千呂露川、額平川等の支川と合流し、ほぼ南西方向に流下して日高町富川にて太平洋に注いでいる<sup>7)</sup>。河床勾配は、上流で1/130~1/50、中流域で約1/190、下流域で1/500~1/800である<sup>8)</sup>。

年平均降水量は、鵜川流域では上流域の占冠で1300

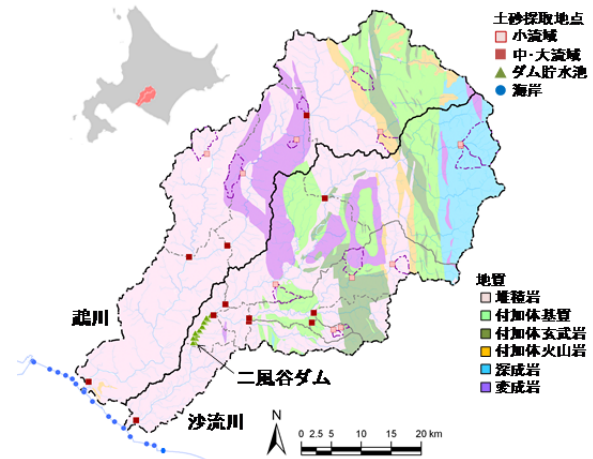


図-2 研究対象流域

mm、下流域の鵜川(むかわ)で1000 mm、沙流川流域では、上流域の日高で1353 mm、下流域の日高門別で975 mmである<sup>8)</sup>。地質はきわめて複雑に入り組んでいる。鵜川流域の最上流域では、白亜紀から古第三紀の堆積物および変成岩類・深成岩類などが日高山脈を構成する。上流域にはジュラ紀~白亜紀の砂岩・泥岩が主に分布し、軟質で開析の進んだ山地を形成する。また、一部に蛇紋岩などの変成岩類が含まれ、地すべりや斜面崩壊を起こしやすい。上流から下流に広く分布する新第三紀の堆積岩類は、礫岩・砂岩・泥岩からなり、比較的軟質で、起伏の少ない山地を形成している<sup>9)</sup>。

沙流川流域では、古生層の一部を除き主に白亜紀層と新第三紀層の堆積岩や貫入岩で形成されている。貫入岩帯は主稜部に発達し、火成岩類では斑禰岩、カンラン岩、変成岩では結晶変岩・変麻岩が多い。層群では水系の東側より、黒色粘板岩・細砂岩のなかに硅質岩・輝緑凝灰岩を介在又は互層する日高累層群、砂岩・泥岩を主とする富良野層群、輝緑凝灰岩を主に硅質岩・粘板岩等を含む空知層群(この層群には蛇紋岩が振内北部から左岸にかけて分布する)などが南北に帯状に連なり、そして、その両側には滝の上層・川端層から成る新第三紀層が連なっている。地表は一般に砂礫を混入した砂壤土・植壤土でおおわれているが、川に面する急斜地では基岩の露出している箇所が多い。下流部においては、土砂の堆積等で土壌も厚いが、表層には樽前火山灰が5~20 cm程度堆積している<sup>8)</sup>。

土地利用は、ほとんどが森林に覆われている。鵜川流域は森林、農地及び市街地がそれぞれ82%、5%及び13%であり、沙流川流域ではそれぞれ88%、6%及び6%となっている。

## 2.2 研究方法

流域の土砂及び栄養塩の生産源を把握するため、多地点に観測地点を設け、同一出水イベントを対象に流量観測及び水質調査を行った。得られた結果より、出水時の水・土砂及び栄養塩の収支を推定した。また、分布型流出モデルの適用可能性を把握するため、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) モデルのデータベースを構築し、水流出の再現性を検討した。

## 3. 鶴川・沙流川流域における融雪期の土砂・物質流出特性

### 3.1 調査の目的

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。とくに積雪寒冷地域である北海道では、年間の水・栄養塩流出負荷にしめる融雪期の割合が60%以上に達するとの報告もあり<sup>9)</sup>、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かかせない。

一般に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こと、また、SS濃度や栄養塩濃度は流量に対して二価性(ヒステリシス)を示すことが知られている<sup>10), 11), 12)</sup>。また、これらの濃度特性は流域の土地利用や地質<sup>13), 14)</sup>、降雨特性や季節<sup>15), 16)</sup>によって異なる。流域の土砂・物質流出特性を把握するには、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り、十分なデータ蓄積は期待できない。一方、流域によってはさまざまな関係機関が水文観測地点を設けている場合があり、出水時の観測を連携して実施することができれば、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。本研究の目的は、複数流域の融雪出水による水・土砂・栄養塩の流出特性を明らかにすることである。寒地土木研究所及び室蘭開発建設部が連携して、融雪出水時に多地点において水文・水質の同時観測を実施し、SSや栄養塩の流出特性や収支について検討した。

### 3.2 調査方法

研究対象流域は、北海道中央部～南部で隣接してい

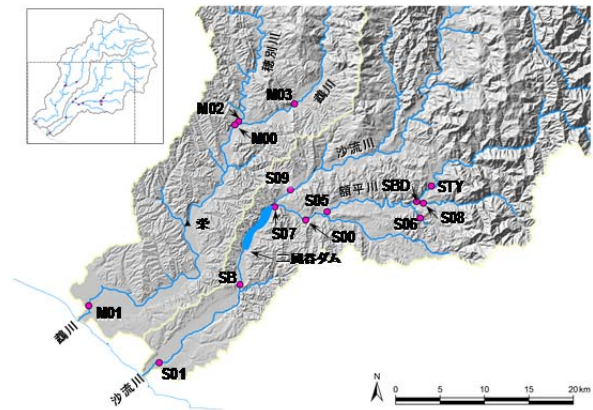


図-3 調査地位置図

表-1 観測地点のピーク流量と採水時の流量

コード	河川名	観測地点	流域面積 [km <sup>2</sup> ]	ピーク流量 [m <sup>3</sup> /s]	採水時の流量 [m <sup>3</sup> /s]		採水 回数	担当 機関
					最小	最大		
M02	穂別川	中島橋	199.9	91.0	12.7	88.4	7	1)
M03	鶴川	富内橋	722.5	443.5	43.2	438.0	7	1)
M00	鶴川	穂別橋	949.5	440.4	55.0	440.4	5	2)
M01	鶴川	鶴川橋	1238.8	599.5	75.9	599.5	5	2)
S08	宿主別川	宿主別橋	63.9	121.2	7.7	55.8	6	1)
STY	額平川	豊穂橋	167.2	49.3	5.7	31.3	6	2)
SBD	額平川	平取ダムサイト	236.0	106.6	8.8	41.2	6	2)
S06	総主別川	町道1号橋	16.8	8.3	1.1	5.5	6	1)
S05	額平川	貴気別橋	290.5	153.5	37.0	134.0	6	1)
S00	額平川	貴気別観測所	373.0	213.2	10.5	49.8	6	2)
S07	額平川	額平橋	383.5	213.2 *	23.7 *	158.6 *	6	2)
S09	沙流川	長知内橋	784.5	218.4 **	82.5 **	218.4 **	5	2)
SB	沙流川	平取橋	1215.0	419.1 †	94.8 †	396.2 †	5	2)
S01	沙流川	沙流川橋	1333.0	460.3	103.3	460.3	5	2)

\*: 貴気別観測所の流量データを使用      †: 二風谷ダム取流量データを使用  
 \*\*: 幌毛志橋の流量データを使用      1) 寒地土木研究所、2) 室蘭開発建設部

る鶴川及び沙流川流域とした(図-3)。流域面積及び幹川流路延長はそれぞれ鶴川流域で1270 km<sup>2</sup>、135 km、沙流川流域で1350 km<sup>2</sup>、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4地点、沙流川流域に10地点、合計14地点とした(図-3)。採水は2012年4月から5月にかけて発生した融雪出水を対象に、可能な限り融雪出水時の水位上昇時、ピーク時、減減時を網羅するように5回ないし7回行った(表-1)。なお、鶴川流域の栄水位流量観測所の流量データについても解析に利用した(図-3)。

採取した水試料について、SS、総窒素、溶存態窒素、総リン、溶存態リンの濃度を測定した。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。また、懸濁態窒素及び懸濁態リンの濃度は、それぞれ総窒素濃度と溶存態窒素濃度、総リン濃度と溶存態リン濃度の差からもとめた。

SSや栄養塩の流出特性については、それぞれの濃度や流出負荷量を流量や比流量の累乗式で近似し、それらの係数をもって流出特性を論じられることが多い。そこで、本研究においても各地点のSS、総窒素及び総リンの濃度、流出負荷量と比流量との関係を累乗式で近似した。

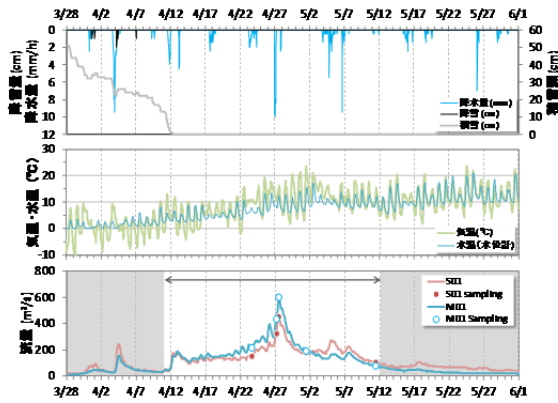


図-4 融雪出水時の流量変動の観測例

降雪・降水量・積雪深・気温は新和（気象庁）、水温はS06 総主別川、流量はM01 鷓川橋、S01 沙流川橋の観測データ

流域のSS及び栄養塩の収支について、観測地点ごとに観測対象期間の流出負荷量を積算してもとめた。融雪出水の特徴として、降雨にともない融雪が促進され、降水と融雪水が急激に河川水位を上昇させること、また、無降雨時にも気温上昇により流域地表面から融雪水が河川へ供給されるため、河川水位に日変動がみられ、高水位が継続することがあげられる。観測された水位変動曲線では、3月下旬から降雨にともなう鋭敏な融雪出水ピークが認められたが、気温が低く、水位上昇は継続しない。本格的な融雪出水は、気温が上昇する4月上旬からはじまり5月中旬まで継続したとみられる（図-4）。そこで、2012年4月10日1時から5月11日24時までを融雪出水期とし、本研究の解析対象とした。

なお、本研究で用いた流量、SS濃度及び栄養塩濃度については速報値を用いている。それぞれの測定項目

について検証後の確定値により再評価が必要であることを付記しておく。

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 SS、栄養塩と流量との関係

一般に出水時のSS濃度や窒素、リンの濃度は流量にともない増加傾向を示し、両者の関係は累乗式で示されることが多い<sup>11),17)</sup>。そこで、本研究で観測されたSS濃度、総窒素濃度及び総リン濃度（C: 単位はそれぞれmg/L）について比流量（ $Q/A$ :  $m^3/s/km^2$ ）との関係を観測地点ごとに累乗式（ $C = a(Q/A)^b$ ）で回帰し、その係数及び決定係数を調べた（表-2）。SS濃度の場合、ほとんどの地点で決定係数（ $R^2$ ）が0.90以上であったが、S05 貫気別橋では0.85、M02 中島橋、M08 宿主別橋では0.80未満と低かった（表-2）。累乗指数**b**は地点によって1.46から4.00まで大きく異なっていた。総リン（TP）については、決定係数はSS濃度と同様であったが、**b**は1.36から3.05とばらつきの幅は比較的小さかった。総窒素（TN）濃度について、SS濃度や総リン濃度に比べて決定係数や**b**が低く、**b**は0.56から1.33の範囲でばらつき、1を下回る地点が多くみられた。これらの結果より、SSや総リンの濃度は流量に応じて増加する一方、総窒素の濃度は必ずしも流量だけに依存せず、流量が増大すると濃度が頭打ちにある可能性が示唆された。

#### 3.3.2 SSの流出特性

SS濃度や総窒素、総リンの濃度は増水時と減水時で異なり、決定係数は必ずしも高くない。SSや濃度と流量との関係を散布図にプロットし時系列順に線でつなぐと、さまざまなパターンの曲線（ヒステリシスループ）を描く<sup>11),12)</sup>。その形状を類型化することで、おおよそ流域の土砂生産・流出特性と関連づけることが

表-2 SS濃度及び栄養塩濃度と比流量との関係（累乗式）における係数

コード	河川名	観測地点	流域面積 [km <sup>2</sup> ]	SS			TN			TP		
				a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
M02	穂別川	中島橋	199.9	7144	1.71	0.77	3.46	0.63	0.68	2.25	1.44	0.79
M03	鷓川	富内橋	722.5	4483	2.03	0.99	3.08	0.66	0.84	1.36	1.74	0.99
M00	鷓川	穂別橋	949.5	11957	2.27	0.96	6.07	0.95	0.96	3.61	1.86	0.98
M01	鷓川	鷓川橋	1238.8	7264	1.92	0.98	5.02	0.82	0.97	3.14	1.61	1.00
S08	宿主別川	宿主別橋	63.9	4472	1.80	0.79	3.97	1.04	0.82	5.07	1.86	0.84
STY	額平川	豊糠橋	167.2	34774	2.94	0.98	1.45	0.56	0.96	8.13	2.44	0.99
SBD	額平川	平取ダムサイト	236.0	69133	3.19	0.98	1.61	0.64	0.93	22.00	2.73	0.97
S06	総主別川	町道1号橋	16.8	198811	4.00	0.93	8.91	1.31	0.91	48.43	3.05	0.91
S05	額平川	貫気別橋	290.5	15617	2.10	0.85	9.46	1.33	0.85	8.51	1.93	0.84
S00	額平川	貫気別観測所	373.0	67064	2.27	0.94	3.03	0.68	0.89	37.03	2.13	0.95
S07	額平川	額平橋	383.5	10024	1.46	0.94	6.98	0.90	0.94	6.48	1.36	0.93
S09	沙流川	長知内橋	784.5	40370	2.85	0.93	10.06	1.29	0.89	20.40	2.81	0.95
SB	沙流川	平取橋	1215.0	48005	2.58	0.98	14.92	1.39	0.93	16.94	2.27	0.96
S01	沙流川	沙流川橋	1333.0	21156	2.19	0.93	10.28	1.16	0.96	10.86	2.00	0.94

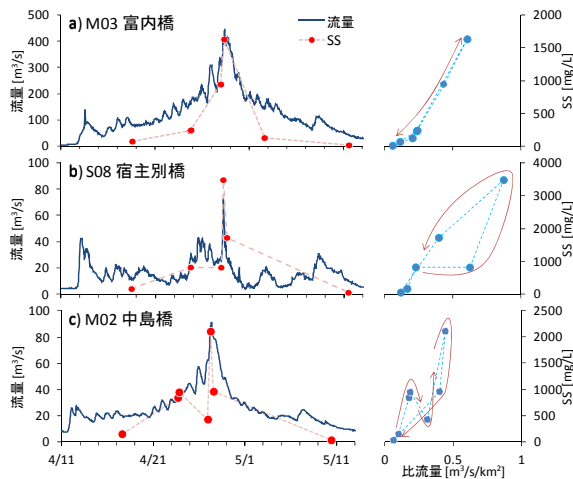


図-5 流量とSS濃度との関係

a) M03 富内橋, b) S08 宿主別橋, c) M02 中島橋

できる<sup>10), 11)</sup>。

SS濃度と流量とのヒステリシスループを調べたところ、観測地点によって異なるパターンが認められた。たとえば鶴川・富内橋(M03)では流量とSS濃度との関係はほぼ一価の関係にあり、SS濃度は流量の累乗式で回帰できる(図-5a)。累乗式による回帰式の決定係数が低かった宿主別川(S08)では、複雑な流量変動を示しており、SS濃度は増水時よりも減水時で高く、反時計回りのループを描く(図-5b)。また、穂別川・中島橋(M02)では、流量ピークまでの増水時にSS濃度が増減し、ヒステリシスループは複雑な形状となっている(図-5c)。

M03のように流量とSS濃度が一価の関係にある場合は、SS濃度が流量に依存していると考えられ、河道内の土砂が巻き上げられて輸送されていると考えられる。S08のように反時計回りの場合、上流域の斜面から流路へ供給された土砂が観測地点に遅れて到達した可能性が考えられる。M02のような複雑なヒステリシスは、増水時の初期と後期で土砂供給源が異なることを示唆している。本研究で得られたヒステリシスループは採水間隔が長く採水回数も十分でないため、ヒステリシスループの形状のみから土砂生産・流出特性を解釈することは困難であるが、土砂生産・流出特性が流域によって異なることが示唆された。

### 3.3.3 栄養塩の流出特性

河川水における総窒素や総リンは存在形態によって懸濁態と溶存態に区分され、流出特性が異なる。総窒素、総リンの濃度は流量とともに増大する傾向が認められたが、それぞれについて懸濁態濃度及び溶存態濃度と比流量との関係を調べたところ、懸濁態は流量に

ともない増加傾向がみられるが、溶存態は窒素、リンともに頭打ちになる傾向が認められた(図-6)。懸濁態の窒素及びリンはそれぞれ懸濁物質(SS)中の有機物、鉱物中に多く含まれると考えられるため、SS濃度との相関がよい(PTN  $r=0.9763, p<0.0001$ ; PTP  $r=0.9082, p<0.0001$ , ともに  $n=63$ , 図-7)。一方、溶存態窒素及びリン濃度は流量の増大による希釈効果が影響していると考えられる<sup>18)</sup>。これらのことから、総窒素及びリンにおける懸濁態の割合はSS濃度によって変化すると考えられる。

SS濃度と総窒素及び総リン濃度における懸濁態の割合との関係を調べたところ、窒素とリンで異なる傾向がみられ、それぞれSS濃度の逆双曲線関数及び双曲線関数によって回帰できた。

$$PTN\% = a \sinh^{-1}(SS/b) \quad RMSE = 5.789 \quad (1)$$

$$PTP\% = a \tanh(SS^b/c) \quad RMSE = 5.167 \quad (2)$$

ここにPTN%及びPTP%はそれぞれ窒素及びリンの懸濁態の割合[%]、SSはSS濃度[mg/L]、 $a, b$ 及び $c$ は各式における定数である。これらの式によると、リンの場合、SS濃度が200 mg/L程度までは懸濁態の割合が急激に増加し、200 mg/L以上ではほとんどが懸濁態として流出する(図-8)。一方窒素は、SS濃度が500 mg/Lでも懸濁態の割合は50%程度にとどまり、SS濃度が3500 mg/Lに達しても懸濁態は約90%と溶存態

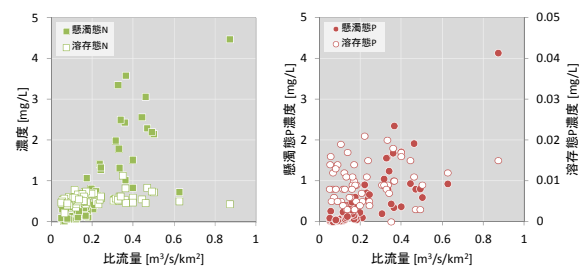


図-6 存在形態別の窒素及びリン濃度と比流量との関係

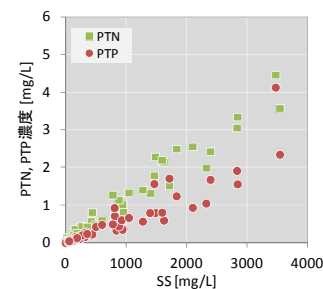


図-7 懸濁態窒素(PTN)及び懸濁態リン(PTP)の濃度とSS濃度との関係

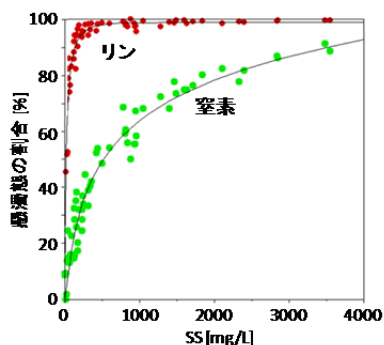


図-8 懸濁態窒素及び懸濁態リンの割合と SS 濃度との関係

の割合が10%も占めることから、窒素流出において溶存態の役割が重要であることがわかる。このように、栄養塩の流出形態は懸濁態の割合が窒素とリンで明確に異なること、その割合が SS 濃度に密接に関連することが示された。

### 3.3.4 SS・栄養塩の流出負荷量と流量との関係

一般に SS や栄養塩の流出負荷量は、流量の累乗式で推定される。各観測地点において SS、総窒素、総リンの総流出負荷量を算出するため、比流出負荷量 ( $L$ : kg/s/km<sup>2</sup>) と比流量 ( $Q/A$ : m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>) と関係を累乗式で回帰した (表-3)。

$$L = C(Q/A) = a(Q/A)^b \quad (3)$$

ここに  $C$  は SS、総窒素または総リンの濃度 (mg/L)、 $a$  及び  $b$  は係数である。 $a$  は比流量が 1 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> のときの比流出負荷量であり、単位流量に対する基本的な SS、総窒素または総リンの発生量を意味する。 $b$  は対数グラフ上での傾きであり、単位面積斜面からの流出

のしやすさを意味する<sup>16)</sup>。

SS 流出負荷量について、一般に比流量の 2~3 乗で表されるが、本研究で得られた  $b$  の範囲は 2.71 から 5.00 と全体的に大きい。また、鶴川流域よりも沙流川流域、額平川流域で高い値を示した地点が多かった。村上ら<sup>20)</sup>によると、額平川貫気別観測所、沙流川幌毛志橋、平取、沙流川橋における 2001~2002 年、2003 年 8 月の高水出水時の  $b$  は 1.71 から 2.39 と報告している。本研究の該当箇所ではいずれも 3 以上であり、2012 年の融雪出水の方が大きいことがわかった。また、総主別川流域の  $b$  が 5.0 と最大であったが、流域面積が小さいほど  $b$  が大きくなることが知られており、地質や勾配、土地利用といった被侵食因子が影響するためと考えられる<sup>14)</sup>。

総窒素及び総リンの流出負荷量について、 $b$  はそれぞれ 1.56 から 2.39、2.44 から 4.05 の範囲であった。総リンは鶴川流域よりも沙流川流域、額平川流域で高く、SS と同様の傾向を示したが、これはリンのほとんどが懸濁態として流出するためと考えられる (図-8)。一方、総窒素は SS や総リンよりも  $b$  の値が小さく、また、流域面積の影響も明瞭でない。これは、流出する窒素の存在形態が SS 濃度によって大きく変化し、溶存態の割合が高いことから (図-8)、SS やリンとは異なる流出経路をもつものと考えられる。このような SS・リンと窒素の流出形態の違いは、流域内の生産源が異なることを示唆している。

### 3.3.5 水・SS・栄養塩の収支

流域の SS・栄養塩の収支について、式 (3) より観測期間中の流出負荷量を積算し、観測地点の総流出負荷量と観測地点間の増減を評価した。鶴川流域について、穂別川中島橋 (M02)、鶴川富内橋 (M03) の総流

表-3 SS 及び栄養塩の流出負荷量と比流量との関係 (累乗式) における係数

コード	河川名	観測地点	流域面積 [km <sup>2</sup> ]	SS			TN			TP		
				$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
M02	穂別川	中島橋	199.9	7.1	2.71	0.89	0.0035	1.63	0.93	0.0022	2.44	0.92
M03	鶴川	富内橋	722.5	4.5	3.03	0.99	0.0031	1.66	0.97	0.0014	2.74	1.00
M00	鶴川	穂別橋	949.5	12.2	3.27	0.98	0.0061	1.95	0.99	0.0036	2.86	0.99
M01	鶴川	鶴川橋	1238.8	7.3	2.92	0.99	0.0050	1.82	0.99	0.0025	2.61	1.00
S08	宿主別川	宿主別橋	63.9	4.5	2.80	0.90	0.0040	2.04	0.95	0.0051	2.86	0.92
STY	額平川	豊糠橋	167.2	34.8	3.94	0.99	0.0014	1.56	1.00	0.0081	3.44	0.99
SBD	額平川	平取ダムサイト	236.0	70.6	4.19	0.99	0.0016	1.64	0.99	0.0221	3.73	0.98
S06	総主別川	町道1号橋	16.8	198.8	5.00	0.96	0.0089	2.31	0.97	0.0484	4.05	0.95
S05	額平川	貫気別橋	290.5	15.6	3.10	0.92	0.0095	2.33	0.99	0.0085	2.93	0.92
S00	額平川	貫気別観測所	373.0	67.1	3.27	0.97	0.0030	1.68	0.98	0.0370	3.13	0.98
S07	額平川	額平橋	383.5	10.0	2.46	0.98	0.0070	1.90	0.98	0.0065	2.36	0.98
S09	沙流川	長知内橋	784.5	36.4	3.85	0.96	0.0101	2.29	0.96	0.0266	3.81	0.97
SB	沙流川	平取橋	1215.0	46.1	3.58	0.99	0.0149	2.39	0.97	0.0167	3.27	0.98
S01	沙流川	沙流川橋	1333.0	21.1	3.19	0.96	0.0103	2.16	0.99	0.0109	3.00	0.97

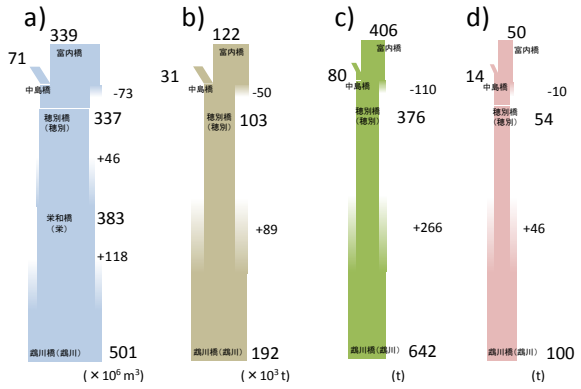


図-9 鶺川流域における水 (a)、SS (b)、総窒素 (c) 及び総リン (d) の収支

量の合計は、合流後の鶺川穂別橋観測所 (M00) の総流量よりも大きく、流下過程で水が減少していることになる (図-9a)。水が減少する原因として利水が考えられるが、それだけが原因であるとは考えにくく、水位や流速、流量の観測誤差が影響している可能性がある。中下流域では、M00 穂別橋から栄和橋、さらに M01 鶺川橋とそれぞれ  $46 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $118 \times 10^6 \text{ m}^3$  の増加があり、栄和橋下流の支川流域からの流入が重要であることを意味している。

SS、総窒素及び総リンについても、M03 富内橋～M00 穂別橋間ではいずれも収支は損失となっているが、水の損失にともなうものであり、観測誤差や利水の影響が考えられる。M00 穂別橋～M01 鶺川橋間で SS 流出量はほぼ倍増しており、中下流域が土砂生産源として重要であることを示唆している (図-9b)。穂別橋より下流域では山地流域が多く、空中写真でも斜面や流路沿いに崩壊裸地が多く認められることから、流域からの浮遊土砂供給があるものと考えられる。

総窒素及び総リンの流出量について、M00 穂別橋～M01 鶺川橋間でそれぞれ 71%、85% の増加が認められる (図-9c, d)。鶺川流域では鶺川上流、穂別川とともに、中下流域の支川も重要な SS、栄養塩の生産源であり、流域全体から流出しているといえる。

沙流川流域の水収支は、二風谷ダム貯水池に流入する沙流川本川が額平川より約 2.2 倍大きく、ダム貯水池周辺や平取橋下流からはそれぞれ  $18 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $60 \times 10^6 \text{ m}^3$  の流入があった (図-10a)。額平川上流域では、平取ダムサイトに流入する額平川本川 (豊糠) と宿主別川の寄与は、流域面積が異なるにもかかわらずほぼ同程度であり、宿主別川の比流量が大きい。額平川中～下流域の S05 貫気別橋と S07 額平橋 (貫気別観測所) では、貫気別川の流入により増加が期待されるが、20%

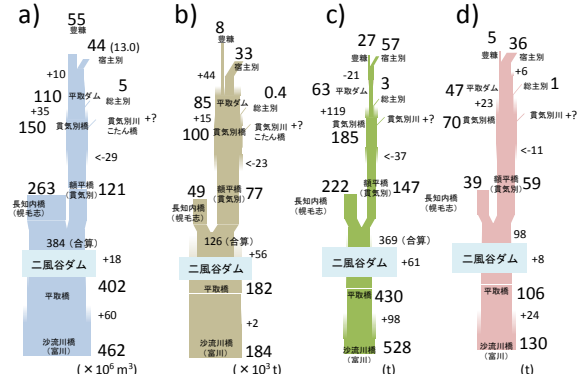


図-10 沙流川流域における水 (a)、SS (b)、総窒素 (c) 及び総リン (d) の収支

程度の損失がみられる。鶺川流域と同様に、観測誤差や利水の影響によるものと推察される。

SS 流出量について (図-10b)、二風谷ダム上流では沙流川 (S09 長知内橋) よりも額平川 (S07 額平橋) の方が  $57\%$  ( $28 \times 10^3 \text{ t}$ ) 大きく、額平川流域が主要な浮遊土砂生産源であると言える。貯水池下流 (平取) に流下した SS 量は、上流からの流入量 (S09+S07) よりも  $44\%$  増加するが、平取橋から沙流川橋の下流域ではほとんど増加せず、海域へ流出している。村上ら<sup>19)</sup>は、平成 12～13 年 (2000～2001 年) の 2 年間における二風谷ダム貯水池の SS 量収支を計算し、沙流川  $82 \times 10^4 \text{ t/年}$  と額平川  $76 \times 10^4 \text{ t/年}$ 、ダム下流への流出量は  $59 \times 10^4 \text{ t/年}$  と見積もっている。この 2 年間では、二風谷ダム上流の SS 流出量は沙流川本川の方が額平川よりも若干大きい。また、既往最大の出水イベントが生じた平成 15 年 (2003 年) 8 月 9 日から 12 日の SS 流出量は、沙流川 (幌毛志橋) 及び額平川 (貫気別観測所) でそれぞれ  $195.6 \times 10^4 \text{ t}$  及び  $126.6 \times 10^4 \text{ t}$  と見積もられており、沙流川の方が大きい<sup>20)</sup>。これらの既往の報告と本研究とは SS 流出量がオーダーで異なるため、単純な比較は難しいが、2012 年の融雪出水時では、額平川 ( $12.4 \times 10^4 \text{ t}$ ) が沙流川 ( $5.8 \times 10^4 \text{ t}$ ) に対して約 2 倍大きかった。生産源の違いが融雪出水特有のものか、それとも 2003 年の台風イベント以降の土砂生産・流出特性の変化によるものか、より長期的な観測結果に基づく検討が必要である。

額平川上流では、宿主別川が額平川 (豊糠) の 4 倍以上の SS 流出量があり、その他の支川からはさらに多くの SS 量 ( $44 \times 10^3 \text{ t}$ ) が供給されていることになる。豊糠、宿主別川の観測地点から平取ダムサイトの観測地点では大きな支川はないため、平取ダムサイトや豊糠における観測誤差が影響している可能性がある。額

平川中～下流域の S05 貫気別橋と S07 額平橋地点では SS 量が減少しているが、これは水収支の損失にもなるものであるが、河床への堆積<sup>21)</sup>も可能性として考えられる。

総窒素の流出量について (図-10c)、二風谷ダム上流では沙流川本川の方が額平川よりも 51% 大きく、貯水池周辺や下流の支川から 17%、平取橋下流で 23% の増加がみられた。額平川上流では、宿主別川の寄与が大きい、額平川本川の寄与も比較的大きく、平取ダムサイトでは流出量が 25% (21 t) の減少となっている。これも観測値不足による L-Q 式の誤差が影響している可能性がある。額平川中～下流域では、平取ダムサイトから貫気別橋間で総窒素流出量が 189% 増加しており、観測誤差だけでなく、牧場などからの負荷が大きく影響している可能性がある。貫気別橋～額平橋間での 37t の減少は、水収支における損失によるものと考えられる。

総リンの流出量については (図-10d)、SS と同様の収支が認められた。二風谷ダム上流では沙流川本川より額平川からの流入量が大きい、貯水池周辺や下流の支川からの流入量は小さく、平取橋下流で約 23% の増加が認められた。額平川上流域では、宿主別川流域からの寄与が大きく、平取ダムサイト下流で 49% の増加が認められる。額平川中～下流域では、やはり水収支の損失にもなる総リン流出量の減少が認められる。

海域に流出する水、SS、総窒素及び総リンについて鶴川流域と沙流川流域で比較すると、ほとんど同程度であった (図-9, 10)。収支からみた生産源の分布については、観測地点の密度の違いにより単純な比較はできないが、鶴川流域では総じて流域全体から流出しており、流量に応じて増減していると考えられる。一方、沙流川流域では SS、窒素、リンでそれぞれ生産源が異なり、地質や土地利用の違いを反映していると考えられた。

#### 4. SWAT モデルを用いた沙流川流域の水流出推定

##### 4.1 調査の目的

積雪寒冷地である北海道では、積雪が貴重な水資源となっており、気候変動による水循環の変化が河川流域の物質循環に影響することが想定されている<sup>22)</sup>。ここでは欧米で利用実績が多い分布型水・物質流出モデルを二風谷ダム流域に適用し、複数年時の水文・気象資料を用いて日流量の再現性を検証することとした。

#### 4.2 SWAT モデル概要及び使用データ

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) モデルは、テキサス A&M ブラックランド調査研究センター及び米国農務省農業研究局 (USDA-ARS) が開発を行っている、流域圏水・物質循環モデルである。図-11 に SWAT モデルの概念図を示す。表面流出には SCS Curve Number 法、蒸発散計算にペンマンモンティス法、土壌浸透量に Green Ampt 法、河道追跡にマスキング法を採用している。対象流域は北海道南部に位置する一級河川沙流川の河口から約 20 km に位置する多目的ダム二風谷ダムの集水域とした (図-12)。面積は 1,215 km<sup>2</sup> である。今回使用したデータセットを表-4 に示す。これらは全て国内で公開されているもので、特に GIS データは WEB 上で容易に入手できる。GIS データ以外の日照時間、相対湿度、気温、風速、雨量

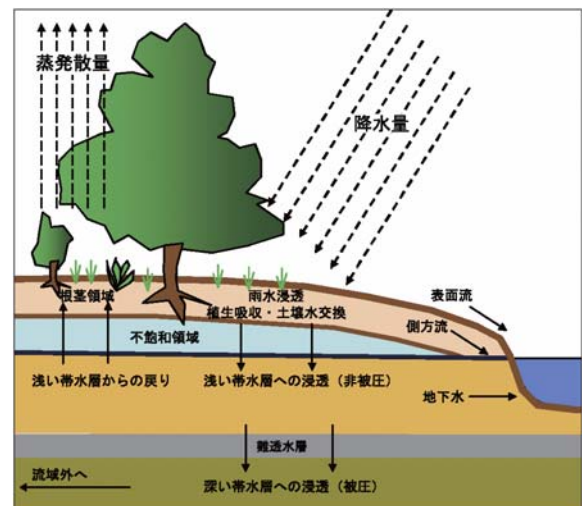


図-11 SWAT 水文サイクル概念図 (Neitsch ら<sup>23)</sup> を改変)

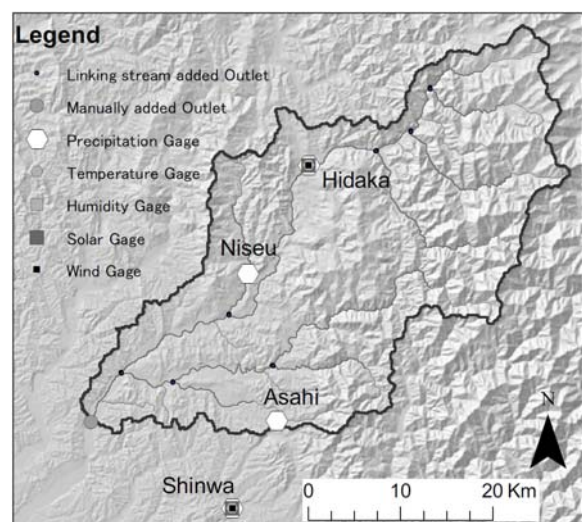


図-12 二風谷集水域及びアメダス地点



表-4 SWAT モデルに適用した主要なデータ

データ種類	発行元	備考
DEM(地形)	国土地理院	10m 解像度の DEM
土地利用	国土地理院	土地利用
土壌分布	土地水資源局	土壌分布
気象	気象庁	日照時間, 風速, 雨量 相対湿度, 気温
レーダー雨量	気象庁	解析雨量
流量	国土交通省	流量

表-5 Nash-Sutcliffe 効率係数

LAT\GW	20	30	40
5	0.5073	0.5077	0.5077
10	0.4693	0.5070	0.4698
15	0.4205	0.4211	0.4209

LAT: 側方流遅れ(日), GW: 地下水遅れ(日) . SWAT モデルでは感度分析やキャリブレーションを実施する前にこのような手動によるフィッティングが推奨されている。

などは気象庁の WEB サイトにおいて、土壌の層別の物理性は土壌調査資料<sup>24), 25)</sup>から入手した。以上の資料からデータセットを構築し、ArcGIS で駆動する ArcSWAT に入力して、二風谷ダム流域の日流入量の再現を試みた。日射量は日照時間から全天日射量の日平均値を推定する手法<sup>26)</sup>を用いて算出した。降雪と融雪を決定する気温閾値を菅谷<sup>27)</sup>に倣い、積雪=2.5℃、融雪=2.0℃とした。蒸発散量の算出において必要となる LAI (葉面積指数) は、北海道の森林林床における代表的なクマザサの LAI=1.71 を SWAT モデルの初期値である 5.0 に加え、6.71 とした。また、15 の分割小

流域には、標高による気温上昇を考慮するための標高帯を 200 m 毎に設定し、GIS で集計した各々の標高帯に含まれる面積及び面積比を入力した。

#### 4.3 結果及び考察

本検討において、SWAT モデルにバンドルされた自動キャリブレーション機能を利用する前段として、側方流遅れ (LAT Q) と地下水流出遅れ (GW DELAY) を用い、マニュアル的にパラメータ同定を行った。表-5に示すように、側方流遅れ、地下水遅れをそれぞれ5日、30日と与えた場合に計算値と実測値の適合性が良く、このパラメータセットを出発値としてパラメータの最適化を実行した。SWAT モデルでは土壌水分量の安定を図るため、2年以上のデータを用いていわゆる暖気運転することが推奨されている。ここでは2006年から5年分のデータを用い、2008年から2010年までの3年分を用いて計算を行った。最適パラメータより推定された二風谷流域の日平均流量のうち、2010年度の推定値と実測値を図-13に示す。7月から10月までの日流量の推定値はNASH効率で約0.8程度と実測を概ね再現していたが、2月から6月まではNASH効率で約0.2程度と再現性が低かった。なお、表-6に計算期間の2008年から2010年までの各月の水循環の流域全体の降水量 (RAIN) に占める降雪量 (SNOW)、表面流 (SURF Q)、側方流 (LAT Q)、蒸発散量 (ET) の平均値を示す。季節による降水量の雨雪の別や、表面流、側方流、蒸発散量の変遷が表現されていることが読み取れる。

GIS 資料、土壌調査資料、アメダス雨量を用い、SWAT モデルで二風谷ダム集水域の日流量変動の再現計算を行った。夏季の日流量の再現性は比較的良好であり、SWAT モデルの有効性が確認された。一方、融雪期の日流量については融雪の再現性に課題があり、

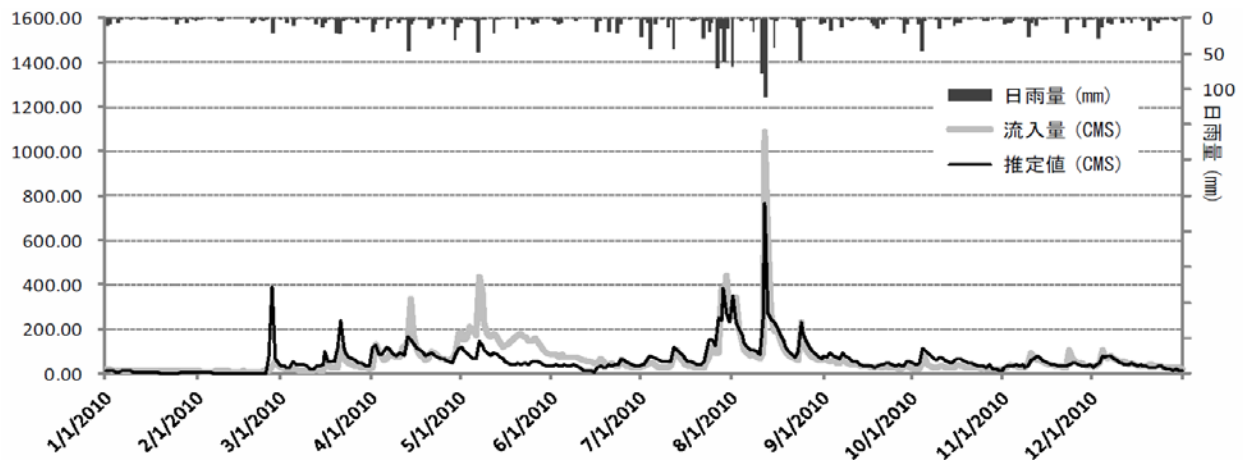


図-13 SWAT モデルによる日流量の再現結果

表-6 月別の水循環諸数値平均 (2008-2010)

MON	RAIN (mm)	SNOW (mm)	SURF_Q (mm)	LAT_Q (mm)	ET (mm)
1	37.5	23.17	1.66	18.15	0.14
2	43.83	28.23	18.84	9.61	0.18
3	84.41	21.91	21.46	82.09	4.48
4	103.92	0.62	2.77	74.88	16.6
5	96.76	0	0.41	75.38	29.14
6	77.09	0	0.2	48.61	40.26
7	289.03	0	10.15	178.35	47
8	210.53	0	14.32	160.56	49.78
9	78.09	0	0.02	54.42	34.51
10	113.26	0	0.4	81.57	15.34
11	99.8	4.78	0.01	82.3	4.06
12	114.28	36.8	1.19	80.16	0.54

ここで、MON:月、RAIN:降水量(mm)、SNOW:降雪量(mm)、SURF\_Q:表面流出量(mm)、LAT\_Q:側方流(mm)、ET:蒸発散量(mm)

今後、気象観測値の代表性、土壌物理性などの要因を検証していく必要があるほか、融雪プロセスのソースコードの吟味を行い、既往研究を参考に修正を行っていく必要があると考えられる。

## 5. まとめ

多地点で同時観測された水質試験結果から、SS や栄養塩の流出特性・収支を比較することで、流域内の物質流出特性を把握することができた。また、観測・試験におけるさまざまな誤差による影響があることも明らかにできた。今回は各関係機関が実施した業務の速報成果を用いて水・土砂・物質の流出特性をとりまとめたため、多少の誤差は含まれる。とくに水収支に損失が認められた鶴川流域の M03 富内橋～M00 穂別橋間や、額平川流域の S05 貫気別橋～S07 貫気別橋間については、水位-流量曲線の精査や観測地点、観測方法の再検討が必要であろう。

今回は 2012 年の融雪期のデータについて検討した。C-Q 式、L-Q 式は見かけ上決定係数は 0.90 以上とよく見えるが、観測点数が少ないことから、濁度計などによる SS 濃度の連続観測が望まれる。また栄養塩については、SS 濃度と窒素・リン濃度における懸濁態の割合との関係を見いだすことができた。SS、総窒素、総リンを測定することで、懸濁態、溶存態の窒素・リン濃度を推定できる可能性もある。このように、より効率的・経済的な観測の継続が望まれる中、今後も複数の機関による観測の分担・協力と収集データの総合的

な解析をすすめることで、流域のより詳細な水・土砂・物質動態が明らかにされることが期待される。

分布型水・物質流出モデルについて、GIS 資料、土壌調査資料、アメダス雨量を用い、SWAT モデルで二風谷ダム集水域の日流量変動の再現計算を行った結果、夏季の日流量変動は複数年時にわたり良好に再現可能であったが、融雪期の再現性に課題が残った。今後、気象観測値の代表性、土壌物理性などの要因を検証していく必要があるほか、融雪プロセスのソースコードの吟味を行い、既往研究を参考に修正を行っていく必要があると考えられる。

## 謝辞

北海道大学流域砂防研究室の笠井美青准教授には、SS 流出負荷量について議論いただいた。北海道開発局室蘭開発建設部治水課・沙流川ダム建設事業所・二風谷ダム管理所には水質分析データを提供いただいた。島根大学の宗村広昭准教授には SWAT モデルの利用に関して多くを御教示頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 大束淳一, 須田誠, 村上泰啓: 日高・胆振地方の海岸変遷と保全の取り組み. 第 51 回 (平成 20 年度) 北海道開発技術研究発表会, 環-47, 2008 年 2 月
- 2) たとえば佐藤慎司, 宇多高明, 岡安徹也, 芹沢真澄: 天竜川-遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討. 海岸工学論文集, 51, 571-575, 2004 年
- 3) 船木淳悟, 新目竜一: 鶴川河口海域における洪水後の土砂拡散について. 水工学論文集, 43, 449-454, 1999 年 2 月
- 4) 山崎真一, 奈良俊介, 宮下将典, 新山雅紀, 山下俊彦: 鶴川河口海域における流動と底質の堆積・移動特性. 海岸工学論文集, 47, 646-650, 2000 年
- 5) 山下俊彦, 宮下将典, 山崎真一, 渡邊康玄: 河川から供給された物質の河口沿岸域での挙動. 海岸工学論文集, 47, 1026-1030, 2000 年
- 6) 北海道開発局: 鶴川水系河川整備計画. p1, 2009 年 2 月
- 7) 北海道開発局: 明日につなぐ、川づくり沙流川流域の未来へ向けた河川整備-沙流川水系河川整備計画 [変更] (直轄管理区間). p1, 2007 年 3 月
- 8) 国土交通省河川局: 沙流川水系流域及び河川の概要. 沙流川水系河川整備基本方針, 2005 年 11 月
- 9) 橘治国, 安藤正治, 大森博之, 飯田真也, 梅本延彦: 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, 1991 年

## 11.1 積雪寒冷地における流域からの濁質流出と環境への影響評価・管理手法に関する研究

- 10) Williams, G. P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology* 111, 89-106.
- 11) 倉茂好匡：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, 1996 年
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Ide J, Nagafuchi O, Chiwa M, Kume A, Otsuki K, Ogawa S. 2007. Effects of discharge level on the load of dissolved and particulate components of stream nitrogen and phosphorus from a small afforested watershed of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *Journal of Forest Research* 12, 45-56.
- 18) 平田健正, 村岡浩爾. 1988. 森林域における物質循環特性の渓流水質に及ぼす影響. 土木学会論文集 399 (II-10): 131-140.
- 19) 村上泰啓, 高田賢一, 中津川誠. 2002. ダム堆砂から見た河川の生産土砂について—既往資料からの整理—. 北海道開発土木研究所月報 595, 34-47.
- 20) 村上泰啓, 中津川誠. 2004. 斜面崩壊・土砂生産・流木発生, in: 土木学会水工学委員会 (編), 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査団報告書. 土木学会, 東京, pp. 46-56.
- 21) Kasai, M., Kimura, T., Marutani, T. 2012. Airborne LiDAR investigation of sediment flux after a major storm event in 2003 in the upper Saru River catchment, Hokkaido. 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, 294-295.
- 22) 地球温暖化予測情報：気象庁, 第 7 巻, pp17, 2008.
- 23) S.L.Neitsch, J.G.Arnold, J.R.Kiniry, J.R.Wiliams: Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2005. Temple, TX: Blacklands Research Center.
- 24) 林野土壤調査報告, 第 10 報, 鶴川事業区, 林野庁札幌管区林務局, 昭和 47 年 2 月.
- 25) 適地適木調査報告書, 第 16 号, 日高支庁管内中西部, 北海道林務部, 昭和 54 年度.
- 26) 近藤純正 (編著), 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.57.1994
- 27) 菅谷博, 暖地積雪面の微細気象的特性とそれに基づく積雪量推定モデル, 北陸農業試験場報告, 32, pp43-64, 1990.

## ASSESSMENT OF SUSPENDED SEDIMENT DYNAMICS AND ITS IMPACT ON ENVIRONMENT FOR WATERSHED MANAGEMENT IN COLD REGION

**Budget :** Grants for operating expenses

General account

**Research Period :** FY2011-2015

**Research Team :** Watershed Environmental

Research Team, River

Engineering Research Team

**Author :** HAMAMOTO Satoshi

YABE Hiroaki

WATANABE Kazuyoshi

NISHIHARA Terumasa

MIZUGAKI Shigeru

MARUYAMA Masahiro

HAYASHIDA Kazufumi

MURAKAMI Yasuhiro

ABE Takaaki

### **Abstract :**

To elucidate the budget of suspended sediment and nutrient in watershed scale, discharge and water quality were observed at multiple stations during snow-melt flood event. Daily discharge was also estimated by SWAT model, semi-process based distributed runoff model, to evaluate the water and nutrient cycle in watershed scale. Based on the field observation, suspended sediment and nutrient were found to be loaded all over the catchment in the Mu River watershed, while in the Saru River, they were loaded much higher from the Nukabira River than the Main stream of Saru River. Daily discharge estimated by SWAT model showed high correspondence to observed discharge during rainfall-runoff event in summer season, but incorrespondence during snow-melt flood event.

**Key words:** suspended sediment, nutrient, budget, snow-melt flood, SWAT model