

## 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：寒地水圏研究グループ（水環境・寒地河川）

研究担当者：平井康幸、谷瀬敦、○水垣滋、久保まゆみ

### 【要旨】

本研究では、鵜川河口・沿岸域への濁質流出に寄与する鵜川及び沙流川流域と周辺海岸を対象に、山地から沿岸域までを流砂系とした濁質（浮遊土砂）動態を解明し、またそれらの把握・評価手法の開発を行った。濁度計による浮遊土砂濃度推定手法を構築し、浮遊土砂流出量を定量評価した。放射性同位体トレーサによる浮遊土砂生産源推定手法を構築し、流域の浮遊土砂生産量を地質別、支流域別に評価した。また、SS濃度を用いた存在形態別の栄養塩濃度推定手法を構築した。山地から海岸・沿岸域の浮遊土砂生産・流出・堆積には、岩石の風化特性や地すべりといった流域の地質特性の違いが寄与しており、浮遊土砂の生産源に粒径依存性が認められた。分布型水文流出モデル（SWAT）では浮遊土砂濃度の再現性が低く、地すべりによる土砂生産・供給プロセスのモデル化が新たな課題として抽出された。

キーワード：浮遊土砂、浮遊土砂生産量、土砂生産源推定、栄養塩、SWAT

### 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、少なからず河川や海岸・沿岸の環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。このように、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重要である一方、シルト・粘土などの微細粒分が過剰に流出した場合、水質・生態系に大きな影響を与える可能性がある。

平成 10（1998）年 7 月に当時の建設省河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会から建設大臣に「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の答申がなされ、「時間的・空間的な広がりをもった土砂移動の場」を「流砂系」と定義し、流砂系においてそれぞれの河川・海岸の特性を踏まえて、国土マネージメントの一環として適切な土砂管理を行うことが目標にかかげられた<sup>1)</sup>。浮遊土砂については、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め、流砂系においては生産源における対策が重要となることが指摘されている。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（山地）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。

本研究の目的は、山地から沿岸域までを一連の系とした濁質（浮遊土砂）動態を明らかにするとともに、それらの把握手法の開発、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。本研究では、海岸侵食による河口干潟の減少が指摘されている鵜川の流域及び河口・沿岸域を対象に、微細土砂で構成される濁質（浮遊土砂）に着目した。まず、鵜川河口域・河口干潟の現状を把握し、干潟保全対策における課題を抽出した（3章）。つぎに、山地・上流域から河口まで流域スケールの濁質生産・流出特性の解明（4章）、流域から河口・沿岸域への濁質流出・堆積実態の解明（5章）、山地からの濁質生産・流出特性を考慮した環境への影響評価・管理手法の開発（6章）を行った。

### 2. 研究対象流域

鵜川河口周辺では 1978 年から 1999 年までに約 300 m の汀線の後退が確認されており（図-1）、2006 年には下水処理場の越波被害が報告されている<sup>3)</sup>。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

## 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



図-1 鵜川河口域における海岸侵食と干潟消失（大東ら<sup>3)</sup>）

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>3)</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。

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>4),5),6)</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。

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 1,270 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 (1,323 m) に源を発し、パンケシユル川、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>7)</sup>。

沙流川は、流域面積 1,350 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 (1,175 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>8)</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>9)</sup>。

年平均降水量は、鵜川流域では上流域の占冠で 1,300 mm、下流域の鵜川(むかわ)で 1,000 mm、沙流川流域では、上流域の日高で 1,353 mm、下流域の日高門別で 975 mm である<sup>9)</sup>。地質はきわめて複雑に入り組んでいる(図-2)。鵜川流域の最上流域では、白亜紀から

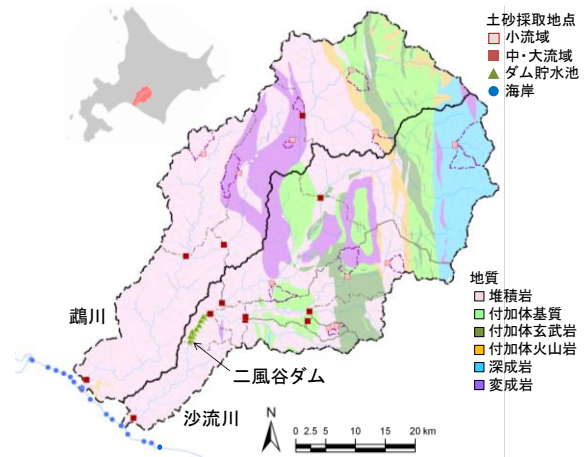


図-2 研究対象流域の地質

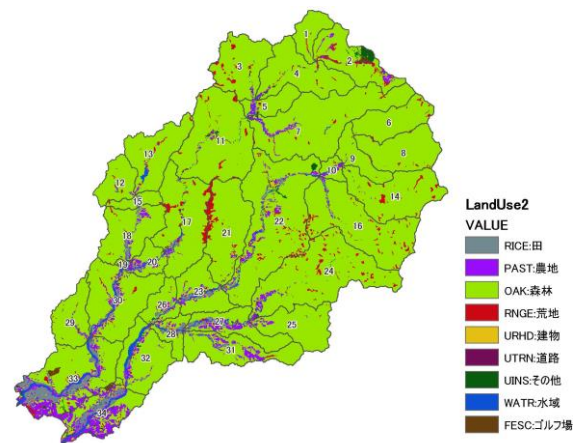


図-3 研究対象流域の土地利用

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>7)</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5~20cm程度堆積している<sup>9)</sup>。土地利用は、ほとんどが森林に覆われている(図-3)。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。

### 3. 鵜川河口干潟の保全対策における課題抽出

#### 3.1. 目的

鵜川河口周辺では、海岸侵食に伴う社会的影響として、汀線後退による河口干潟の消失とそれに伴う渡り鳥の減少、越波被害などが生じている<sup>3)</sup>。それに対して、各関係機関では河口干潟の自然再生事業、海岸林の災害復旧、漁港のサンドポケット造成と浚渫、浚渫砂のサンドバイパスによる養浜などが実施されてきた。一方、河川の大規模な出水により河口・沿岸域に拡散・堆積する大量の濁質成分は、ときに水産資源に影響を

及ぼすことがある。一般に、海域に拡散した微細土砂をその場で対策することは困難なため、流砂系の総合土砂管理では流域の生産源における対策が求められる。そのため、これらの微細な土砂について、陸域から沿岸への生産・輸送・流出・拡散・堆積といった一連の過程を把握する必要があるが、未解明な部分が多く、実態がつかめていないのが現状である。

本研究を遂行するにあたり、本章では、鵜川の河口域周辺の土砂動態について既往資料の整理と現地調査を行い、長期的な干潟保全対策における課題を抽出することとした。

#### 3.2. 方法

調査対象地は、鵜川流域及び河口域周辺とした(図-4)。長期的な空中写真による汀線変化実態を把握するために、過去の空中写真・衛星写真を判読した。また、流出土砂と海岸土砂の粒径組成を比較するため、流域内の浮遊土砂と海岸砂を採取し、粒度分析を行った。さらに、流域からの浮遊土砂流出量の長期変化傾向を把握するために、流量及びSS(浮遊土砂)濃度の既往調査データを用いて流量-浮遊土砂量の関係式(一般に

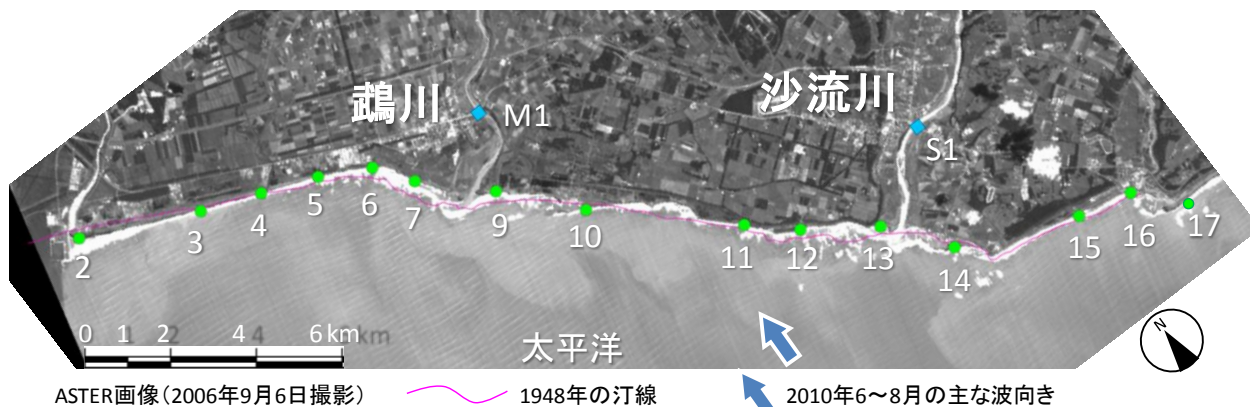


図-4 河口・海岸調査対象地



図-5 鵜川河口付近の汀線変化

L-Q 式または Q-Qs 式) を構築し、浮遊土砂流出量の年々変動を検討した。

### 3.3. 結果と考察

海岸汀線の長期的な変遷から、1948 年～2004 年の 56 年間で最大約 500 m も後退している箇所が認められた (図-5)。鵜川の浮遊土砂流出量の長期的傾向は、1997 年以降増加傾向にあり (図-6)、規模の大きな出水イベントが頻発していることに起因する。このことは、濁質となる浮遊土砂のみならず、海岸砂となる相当量の掃流砂も大規模な出水に伴って河川から河口・沿岸域に供給されていることを示唆している。2011 年の融雪出水後の空中写真 (寒冷沿岸域チーム撮影) では、河口の砂嘴が出水によって大部分が消失し、6 月下旬には徐々に回復している様子が確認できる (図-7)。この砂嘴の回復により、人工干潟が直接波の影響を受けにくくなるとともに、河口右岸側には以前の河口干潟と同様の静水環境が形成されているのが認められる (図-7)。鵜川河口の砂嘴を構成する海岸砂について、2010 年 6 月から 2011 年 12 月までの粒径分布の変化を調べたところ、粒径 0.1~1 mm の範囲で大きく変動していることがわかった (図-8)。このことは、砂嘴の構成材料は必ずしも粒径が均一でなく、出水や波浪等によりある程度の幅をもって変動することを示している。

これらのことから、干潟を長期的に保全するには、砂嘴の延伸による静水域の形成が有効であると推察される。しかし、出水時には砂嘴地形の消失と回復を繰り返すことから、持続的な砂嘴形成を期待するには、このようなダイナミックな地形変化を長期的に継続させることが重要であると考えられる。そのためには、河川や漂砂による河口域への継続的な土砂供給が必要であり、鵜川のみならず、漂砂の上手側の沙流川からの供給も重要であると考えられる。河川や漂砂のほか、関係機関で実施しているサンドバイパスといった土砂供給も砂嘴形成に相当程度の役割を果たしているものと考えられる。流砂系という視点でみれば、砂嘴や海岸の砂のみならず沿岸域に拡散・堆積する微細な土砂についても、鵜川や沙流川の土砂生産源から供給すべき粒径及び量を評価することが重要な課題である。

## 4. 山地から沿岸域への濁質の挙動特性の把握

### 4.1. 目的

山地から沿岸域まで一貫した総合的な土砂管理において、山地部で生産された土砂は、流域内において

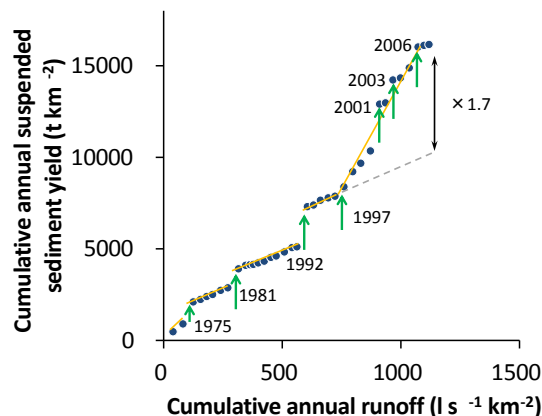


図-6 浮遊土砂量の変化傾向 (1973-2008)



図-7 鵜川河口における融雪出水前後の地形変化 (空中写真: 寒冷沿岸域チーム 撮影・提供)

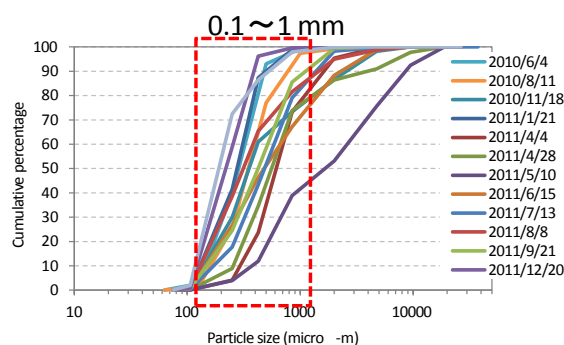


図-8 鵜川河口・砂嘴の粒径分布の時系列変化

ダム貯水容量の圧迫、生態系への影響、海岸線の後退など様々な問題を引き起こしている。これらの問題は流域を通して流下する浮遊土砂が原因であるものが多く、浮遊土砂の生産及び移動実態の把握が課題となっている。浮遊土砂は、出水時に生産源から沿岸域まで一気に流下してしまうため、その挙動を明らかにするためには出水時に現地調査を行う必要があり、多大な労力とコストがかかる。近年、山地小流域では流砂・水文観測<sup>10)</sup>が全国の様々な地域で試みははじめられているものの、降水量や流量といった水文データに比べて、浮遊土砂の流出量や粒径といったデータの蓄積はほとんどなく、濁質の挙動特性を山地から沿岸域まで明らかにした国内の事例はみられないのが現状である。

そこで本章では、山地から沿岸域への濁質挙動特性について、濁質の生産源や生産・流出特性といった流域スケールの挙動を明らかにすることを目的に、鶴川及び沙流川の両流域を対象に、濁質観測手法の開発、濁質生産源の推定手法の開発、山地小流域からの濁質生産・流出特性の把握を行うこととした。

## 4.2. 濁質観測手法の開発

### 4.2.1. 目的

浮遊土砂輸送量の適切な評価のためには、土砂濃度の連続観測が重要になる。浮遊土砂輸送を定量的に観測する手法は数多くあるが、中でも濁度計は河道内に設置しておくだけで長期間の連続観測が可能で、土砂動態のモニタリング装置として広く普及しつつある。

一般的に用いられる濁度計は、濁水中の赤外後方散乱強度を測定して濁度に変換するもので、2,000 NTU（カオリン濃度で 2,000 mg/L 程度）を測定限界とするものが多い<sup>11),12)</sup>。そのような条件では濁度と浮遊土砂濃度（以下、SS 濃度）は線形関係があり、濁度から SS 濃度を精度よく推定できる。しかし近年、数千～数万 ppm をこえる高濃度の濁水の観測事例が報告されており<sup>13),14)</sup>。このような高濁度領域では SS 濃度に対し

て線形関係は満たされないことが指摘されており<sup>15),16),17)</sup>、同じ濁度値であっても SS 濃度で 4 倍以上の開きが確認されるケース<sup>15)</sup>も報告されている。後方散乱強度は粒子比表面積に影響を受けるため<sup>15)</sup>、出水による濁水中の粒径組成の変化が SS 濃度の推定精度に影響を及ぼす可能性がある。

実河川では、降雨出水時の流量増大に伴い高濃度の濁水が発生するが、SS 濃度の推定精度が低ければ流出土砂量の評価に大きな誤差が生じる恐れがある。濁度計による計測濁度の粒径依存性は実験によって確かめられた事例はあるが<sup>15)</sup>、実河川における濁質の特性を考慮した浮遊土砂濃度推定式はいまだ構築されていない。

本調査の目的は、降雨出水時の流出する高濃度濁水を対象に、濁度計を用いた SS 濃度推定式を構築することである。高濃度濁度計を用いて濁度の通年観測を実施し、濁度計のキャリブレーションに基づき、計測濁度に基づく SS 濃度の実用的な推定手法を検討した。

### 4.2.2. 調査方法

調査地は、鶴川流域に 2 地点、沙流川水系額平川流域に 3 地点、合計 5 地点とした（図-9、表-1）。各調査地点で流量及び浮遊土砂濃度を観測するため、自記式

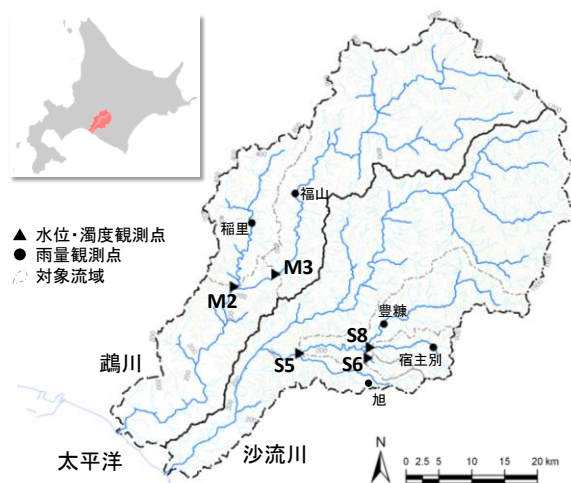


図-9 調査地点位置図

表-1 調査地点・濁度計諸元

水系	鶴川		沙流川		
	穂別川	鶴川	額平川	総主別川	宿主別川
対象流域	穂別川	鶴川	額平川	総主別川	宿主別川
調査地点	中島橋	富内橋	貫気別橋	町道1号橋	宿主別橋
地点コード	M2	M3	S5	S6	S8
流域面積	200	723	290	17	64
年平均降水量 (mm)	1418	1521	1286	1668	1728
雨量観測所	穂里	福山	豊糠	旭	宿主別
濁度計型式	ATU75W-USB	ATU3-8M	ATU75W-USB	ATU75W-USB	ATU75W-USB
測定限界 (ppm)	100,000	20,000	100,000	100,000	100,000

## 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

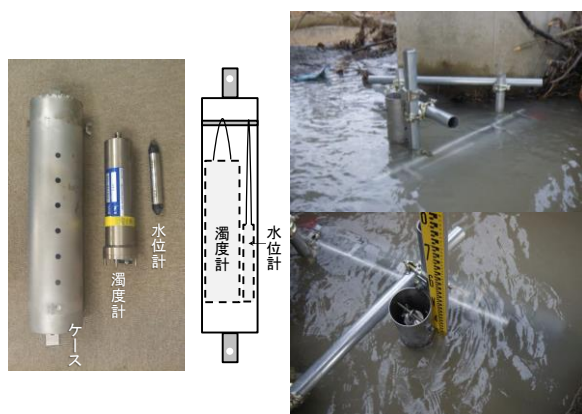


図-10 水位・濁度計の設置例

水位計（応用地質; S&DL mini）及び濁度計（JFE アドバンテック: ATM3-8M, ATM75W-USB）をステンレス保護ケースに挿入して河川内に設置した（図-10）。所有機材の都合により、比較的低い濁度が見込まれる M3 地点にのみ ATU3-8M（測定範囲 0～20,000 ppm）を設置した（表-1）。これらの濁度計の測定原理は赤外後方散乱方式であるが、センサー部の仕様は異なっている。濁度値は、メーカーによりカオリン（中央粒径 6 μm; JFE アドバンテック私信）で校正され、ppm の単位で出力される。

水位及び濁度の測定時間間隔は 10 分とし、2010 年の 1 年間実施した。各観測地点において平水時及び出水時に流速測定を行い、あらかじめ水位-流量曲線を作成し、流量の時系列データを得た。濁度計の観測生データから異常値を除去するため、濁度計が水面上にでていた期間、土砂埋積が考えられる期間、無降雨時や河川結氷期間など土砂流入による濁度上昇が想定されない期間のスパイクデータを棄却した。その上で、前後 30 分（7 点）の移動平均値を濁度データとした。

濁度から SS 濃度を算出するため、各地点において融雪出水時に 4～5 回、夏期の降雨出水時の水位ピーク時に 1～2 回、橋上より左岸、流心、右岸の 3 箇所河川水の表面採水を実施した。各地点の各箇所における採水量は約 8 L とした。

採取した河川水の一部を吸引ろ過し、フィルター上の残留物の乾燥重量を水試料量で除して、SS 濃度を算出した。各地点の SS 濃度は、左岸、流心及び右岸 3 箇所の平均 SS 濃度とした。濁度成分の粒度分析について、各地点の 3 箇所で採取した河川水を等量ずつ混合し、濁質成分を十分に静沈させ上澄みを除去した後、絶乾したものを分析試料とした。乾燥した濁質試料は、ふるい試験を行い、0.5 mm 以下の成分についてはレー

ザー一回折式粒度分布測定装置（島津 SALD-3000S 及び SALD-2000J）により粒度分布を調べた。レーザー分析には、30%過酸化水素水で有機物分を除去したものを分析試料とした。比表面積は、等価球体を仮定した粒子の比表面積とし、粒度試験結果を用いて次式によって算出した。すなわち、

$$SSA = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{6}{\rho \sqrt{d_i d_{i+1}}} p_i \quad (1)$$

である。ここに、SSA は比表面積 (m<sup>2</sup>/g)、n は粒径階数、d<sub>i</sub> は粗い方から i 番目のメッシュサイズ (m)、p<sub>i</sub> は粒径階 i の存在割合、ρ は粒子密度 (g/m<sup>3</sup>) である。ただし本研究では、粒子密度を 2.6×10<sup>6</sup> g/m<sup>3</sup> とした。比表面積は、粒度が粗いほど小さくなる。

### 4.2.3. 結果と考察

SS 濃度は数千 mg/L 以上の高い値が得られ、とくに S5 地点と S8 地点では SS 濃度が 10,000 mg/L 以上の超高濃度の濁水が確認された。SS 濃度を濁度値から推定するため、採水と同時に濁度と SS 濃度との関係を調べた（図-11）。河川水の濁質がカオリンと同じ性質であれば、河川水の SS 濃度は濁度と同じ値をとるはずであるが、全体的にばらつきが大きかった。M3、S5 及び S8 地点の SS 濃度について地点ごとに濁度のべき乗関数で回帰したところ、決定係数は 0.71～0.85 程度であった。これらのことから、濁度から SS 濃度を単純な換算式で精度良く推定することができないことがわかった。このことは、濁度成分の性質が均一でなく、濁度計の機種や地点や流況によって SS 濃度に対する

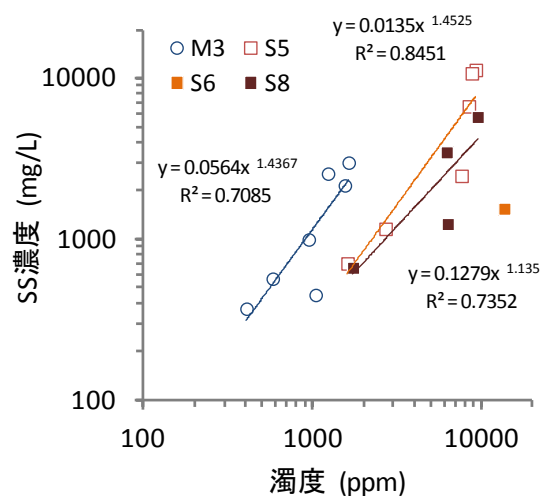


図-11 濁度と SS 濃度の関係

濁度の応答が異なる可能性を示唆している。

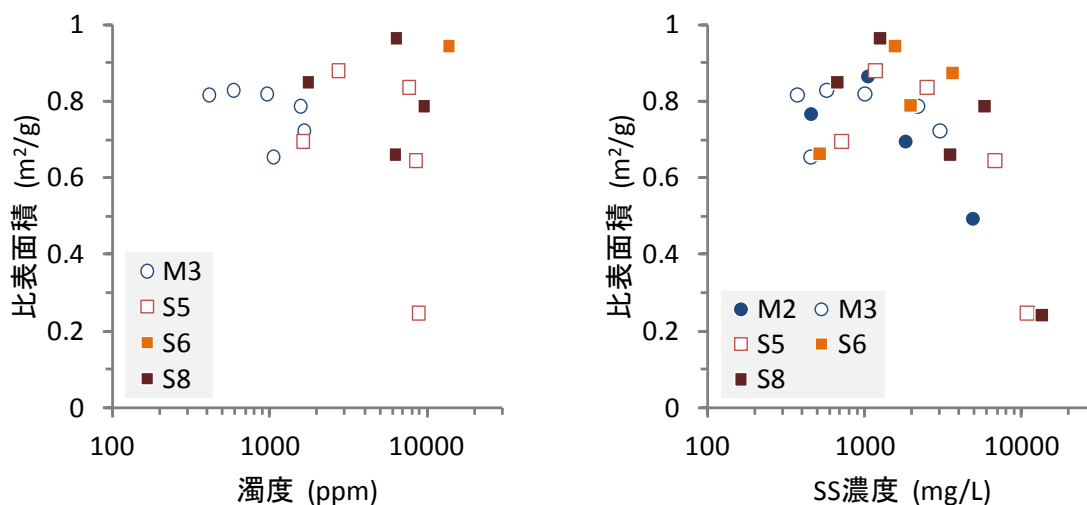


図-12 濁度、SS 濃度と比表面積との関係

濁度及び SS 濃度に対する濁質成分の粒径組成による影響を調べるため、濁度及び SS 濃度と比表面積との関係を調べた (図-12)。比表面積は濁度との間に明瞭な傾向は認められないが、SS 濃度に対して明瞭な減少傾向が認められた。比表面積は、その値が大きいほど粗粒分が多く、微細粒分が少なくなることを意味していることから、SS 濃度が高いときは濁質成分として粗粒分が大きく混入している可能性がある。

流量と比表面積との関係を調べた (図-13)。M2、M3、S5 及び S8 地点では、融雪出水時初期の流量が最も小さいときを除いて、比表面積は流量にともない減少傾向を示した。S6 地点は、最も流量が大きい時を除いて、比表面積は流量に対して減少傾向を示した。これらのことから、濁質の粒度組成が流量によって変化していることが示唆された。

濁質の比表面積は流量に対して、明瞭ではないが減少傾向を示しており (図-13)、流量にともなう SS/Tb の増加が期待できる。そこで、SS/Tb と流量との関係を調べたところ、鶴川流域 (M3: ATU3-8M) 及び額平川流域 (S5, S6, S8: ATU75W-USB) において、それぞれ (2a) 式及び (2b) 式によって回帰できた (図-14)。

$$\frac{SS}{Tb} = (-4 \times 10^{-6})Q^2 + 0.0062Q - 0.3398$$

$$R^2 = 0.9167 \quad (2a)$$

$$\frac{SS}{Tb} = (-3 \times 10^{-6})Q^2 + 0.0035Q - 0.2198$$

$$R^2 = 0.9253 \quad (2b)$$

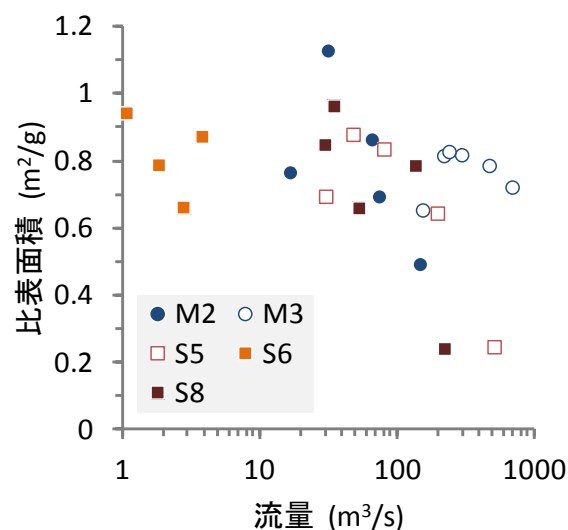


図-13 流量と比表面積の関係

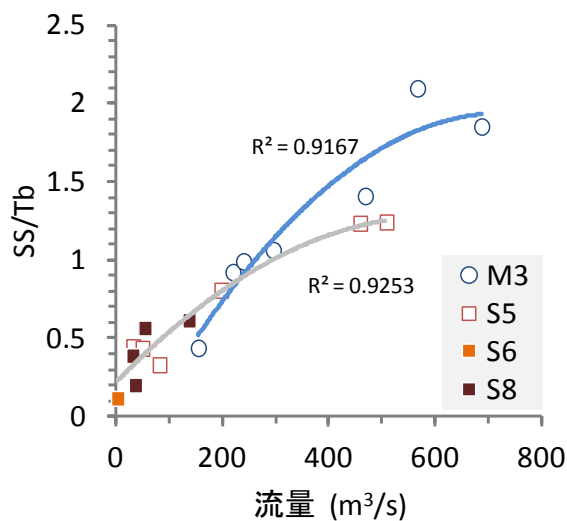


図-14 流量と SS/Tb の関係

ここに SS は土砂濃度 (mg/L)、Tb は濁度 (ppm) 及び Q は流量 (m<sup>3</sup>/s) である。これらの式を SS 濃度について一般化すると、

$$SS = Tb(aQ^2 + bQ + c) \quad (3)$$

となる。ここに、a、b 及び c は係数である。

本研究で行った濁度計による SS 濃度の推定は、出水時の表面採水により SS 濃度を算出している。一般的に水深方向には流速分布が存在するため<sup>18)</sup>、水面付近の浮遊土砂の粒径分布と濁度計設置高さでの粒径分布は異なる可能性がある。しかし、鶴川流域における実測例では、SS 濃度の鉛直方向の変化は認められなかった<sup>19)</sup>。そのため、SS 濃度の鉛直分布の濁度に与える影響は小さいものと考えた。濁度と流量データを用いた (3) 式による SS 濃度推定式は、濁度-SS 濃度式 (図-11) よりも決定係数が高いことから、高濃度の SS 濃度をより精度良く推定できると考えられる。

### 4.3. 濁質生産源推定手法の開発

#### 4.3.1. 目的

浮遊土砂は、豪雨による地すべりや崩壊といった大規模な土砂生産が発生した後も、引き続き降雨によって継続して流出する。沙流川流域では 2003 年 8 月の台風によって観測史上最大の洪水イベントが発生し、とくに支川の額平川流域では全域にわたって崩壊や地すべりが同時に多発した。土砂流出の長期化は、濁水の発生を伴い、ダム貯水池の埋積や下流域の河川生態系や水産資源に影響を及ぼす。流域一貫した土砂管理を考える上で、このような濁質の生産源を把握することは極めて重要となる。本調査の目的は、トレーサを用いて浮遊土砂の生産源を明らかにすることである。

#### 4.3.2. 方法

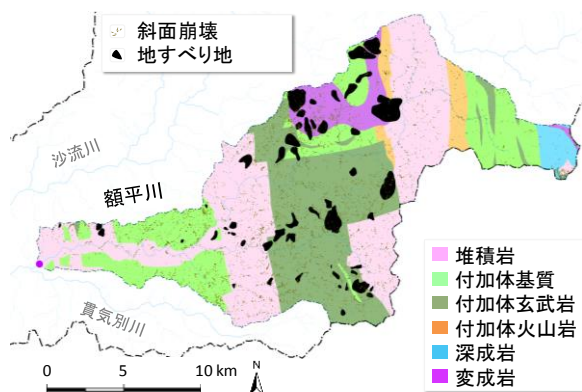


図-15 調査対象流域

調査流域は、沙流川水系額平川流域 (貫気別橋地点: 流域面積 290km<sup>2</sup>) とした (図-15)。2010 年 8 月 11 日から降雨出水イベントが発生し、総雨量 202 mm、最大時間雨量 38 mm/h であった。貫気別橋に水文定点観測点を設け、水位計及び濁度計を設置し、流量及び SS 濃度の連続観測を行った。流量ピーク時に表面採水を行い、浮遊土砂の抽出を行った。また、浮遊土砂サンプラーを設置し、出水期間中の浮遊土砂を捕捉・回収した。

出水イベント中の流出土砂の生産源を推定するため、Mizugaki et al.<sup>20)</sup>にしたがい、放射性同位体特性 (<sup>212</sup>Pb, <sup>228</sup>Ac, <sup>40</sup>K) による生産源推定を行った。浮遊土砂の放射性同位体特性は、γ線スペクトロメトリーにより定量評価し、地質 (岩種) により区分された 6 種の土砂生産源 (堆積岩、付加体基質、付加体玄武岩、付加体火山岩、深成岩、変成岩) とのマハラノビス距離を計算し、それぞれの寄与率を算出した。

また、生産源寄与の妥当性を評価するため、潜在的な生産源の指標として地すべり地<sup>21)</sup>及び崩壊地<sup>22)</sup>の分布密度、傾斜及び起伏量を 6 つの生産源地域ごとに GIS (ESRI; ArcGIS9.3.1, Spatial Analyst) を用いて集計した。

#### 4.3.3. 結果と考察

観測された降雨出水イベントでは、流量は最大 531 m<sup>3</sup>/s、浮遊土砂濃度は最大約 12,000 mg/L を記録した



図-16 観測された出水イベント中の濁水 (2010/8/12)

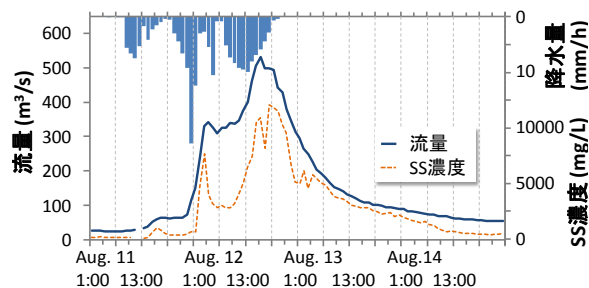


図-17 出水イベント中の流量及び SS 濃度



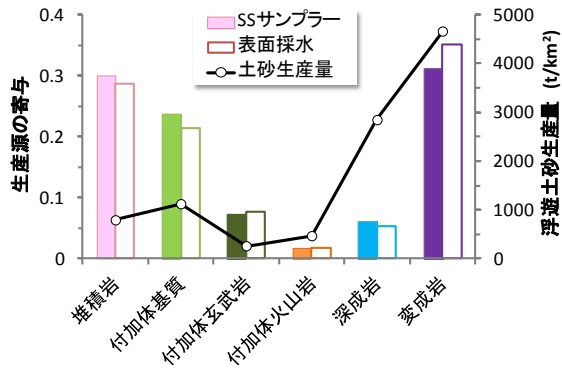


図-18 出水イベント中の濁質に対する生産源グループの寄与と土砂生産量

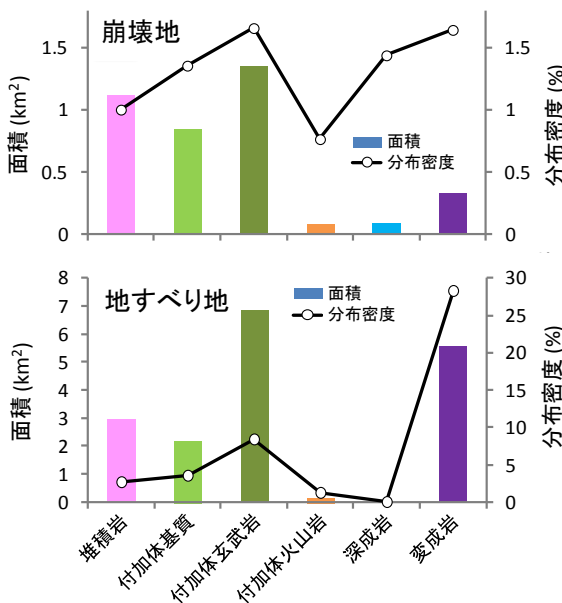


図-19 崩壊地、地すべり地の面積と分布密度

(図-16, 17)。出水期間中の浮遊土砂流出量は約293,000t、土砂生産量は1,010t/km<sup>2</sup>であり、2003年8月の額平川流域の土砂生産量の約30%程度である。

放射性同位体トレーサによる生産源寄与は、変成岩、堆積岩及び付加体基質がそれぞれ31%、30%、24%と高く、これらの生産源グループで85%を占める(図-18)。寄与率と土砂流出量を乗じ、各生産源グループの面積で除すことによって、生産源グループごとに土砂生産量を算出した。その結果、変成岩が最も土砂生産量が高く(4,700t/km<sup>2</sup>)、深成岩がそれに次いで高かった(図-18)。

地すべり地や崩壊地は変成岩地域で密集しており(図-15, 19)、土砂生産量の高さが伺える。一方、深成岩は地すべり地や崩壊地は少ないものの(図-15, 19)、地形が急峻であり(図-20)、土砂生産ポテンシャルは

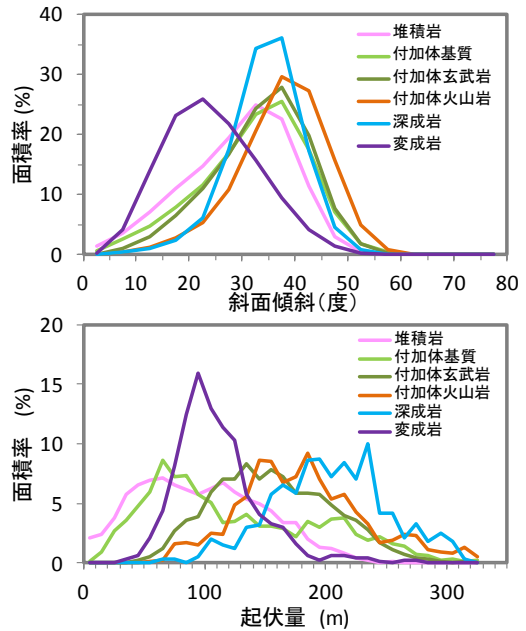


図-20 地質別にみた斜面傾斜と起伏量

高いものと推察される。一方、付加体玄武岩は崩壊地が密集しているが(図-15, 19)、土砂生産量は小さく評価された(図-18)。崩壊時に発生した土石は粒径が大きく、風化を受けにくい<sup>23)</sup>ため、浮遊土砂生産源としての寄与が小さくなったと推察される。

水文観測による流出土砂量の定量評価と、放射性同位体トレーサによる土砂生産源推定手法を組み合わせることで、地質毎の土砂生産量を推定することができた。推定された地質毎の土砂生産量は、地質による土砂生産・流出プロセスの違いを反映している可能性があり、これらの手法による生産源評価手法は有効であると考えられる。

#### 4.4. 土砂生産ポテンシャルと浮遊土砂流出に及ぼす地形・地質の影響

##### 4.4.1. 目的

水系一貫した土砂管理(流砂系)において、流域の浮遊土砂動態の把握は重要な課題の一つであり、その土砂生産量の把握と予測が必要となる。一般に流域の土砂生産量評価にはダム堆砂データが利用され、流域の降雨・地形・地質特性との関係が論じられてきた<sup>24)</sup>。岡野ら<sup>25)</sup>はダム貯水池の堆砂データをもとに、流域の年流出土砂量を起伏度と平均標高との積で算出される指標値によって回帰できることを示し、日本全国の土砂生産強度マップを提示している。しかし、ダム貯水池や貯砂ダムの堆積土砂の大半は砂礫で構成されているため、この指標値(以下、土砂生産ポテンシャル)

の浮遊土砂への適用性については明らかでない。一方 Mizugaki et al.<sup>20)</sup>は、水文観測と天然放射性同位体トレーサを用いて地質（母岩）別の浮遊土砂生産量を評価し、浮遊土砂についても地質や地形によって生産量が異なる可能性を指摘している。

本研究の目的は、地質や土砂生産ポテンシャルの違いが浮遊土砂流出におよぼす影響を明らかにすることである。さまざまな流域スケール及び地質構成の流域末端部に浮遊土砂サンプラー<sup>26)</sup>を設置し、捕捉された浮遊土砂量と流域の地形、地質、降雨特性との関係を調べた。

#### 4.4.2. 方法

##### 調査地及び野外調査

調査流域は、北海道中央部に位置する一級河川鶴川水系（流域面積 1,270 km<sup>2</sup>）及び沙流川水系（1,350 km<sup>2</sup>）とした（図-21）。シームレス地質図上で単一の地質で構成される 13 の小流域（小流域スケール；流域面積 0.7~27.2 km<sup>2</sup>）を設定し、流域末端部に浮遊土砂サンプラーを設置した。また複数の地質で構成される本支川の中・下流域 12 地点（中・大流域スケール；流域面積 17~1,333 km<sup>2</sup>）にも浮遊土砂サンプラーを設置した。設置期間は 2009 年 11 月~2010 年 11 月の 1 年間であり、その間 1~4 回程度、捕捉された土砂を回収し、乾燥重量を秤量した。

##### 分析・解析方法

各流域の地形・地質特性は、ArcGIS（ESRI; ArcGIS 9.3.1, Spatial Analyst）を用いて求めた。国土地理院発行の 10 m メッシュ数値標高モデルを用い、各流域の流域面積、標高、起伏量を集計した。土砂生産ポテンシャルは、岡野ら<sup>25)</sup>にしたがい、調査流域の起伏度（起

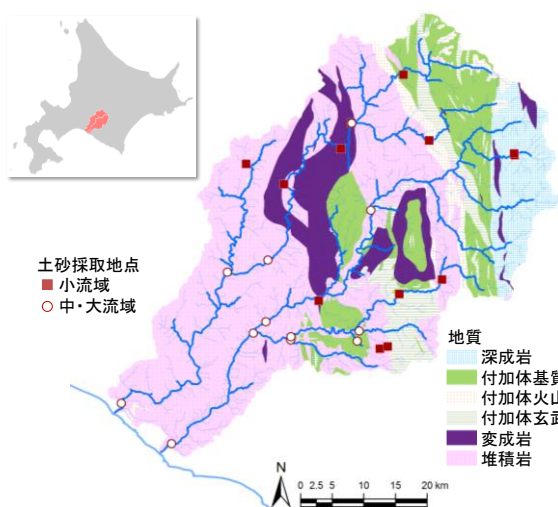


図-21 調査地位置図

伏量の最頻値以上の合計値÷流域面積）と平均標高との積とし、調査流域ごとに評価した。地質は Mizugaki et al.<sup>20)</sup>の生産源区分にしたがい 6 種の岩石で分類した（図-21）。また、気象庁レーダーアメダス解析雨量データを用いて、各流域の浮遊土砂サンプラー設置期間毎に最大降雨強度、総雨量を集計した。

#### 4.4.3. 結果及び考察

##### 捕捉された浮遊土砂

調査地点・設置期間によって流域面積や降水量が異なるので、SS サンプラーで捕捉された土砂量への影響を除くため、流域面積あたり・観測期間中の降水量 1 mm あたりの SS 捕捉量（g/km<sup>2</sup>/mm；以下、比 SS 捕捉量）を算出した。比 SS 捕捉量は小流域スケールで 1.6×10<sup>-1</sup> g/km<sup>2</sup>/mm、中・大流域スケールで 3.4×10<sup>-3</sup> g/km<sup>2</sup>/mm と有意な差があった（p < 0.0001）。比 SS 捕捉量は流域面積に対して明瞭な減少傾向を示し（図-22）、山地上流域ほど土砂生産量が大きいことが示唆される。

小流域スケールの比 SS 捕捉量は付加体玄武岩で最も大きく、深成岩、付加体火山岩で小さい（図-23）。地

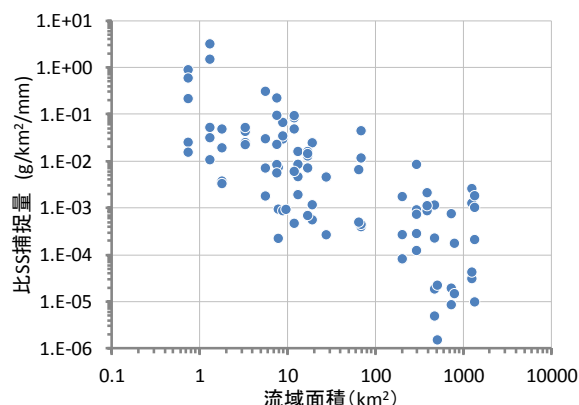


図-22 比 SS 捕捉量と流域面積との関係

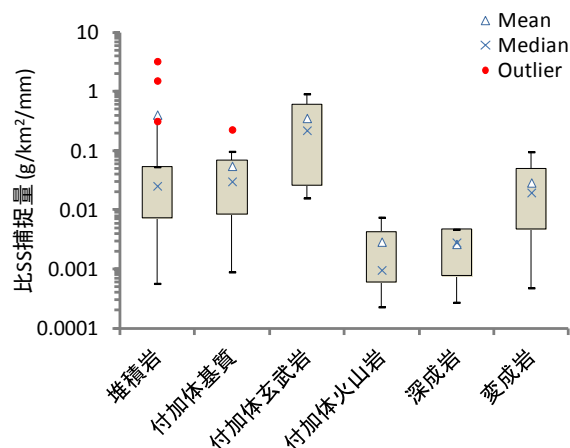


図-23 比 SS 捕捉量と流域面積との関係

質による比 SS 捕捉量の違いは、土砂生産特性が地質によって異なることを示唆している。地質ごとにみた比 SS 捕捉量と降雨特性との関係は、変成岩流域や深成岩流域で有意な正の相関があり、他の地質流域でも増加傾向がみられた。このことから、浮遊土砂生産量は降雨に伴い増大すると考えられる。

### 土砂生産ポテンシャルと比 SS 捕捉量

小流域スケールの土砂生産ポテンシャルは付加体玄武岩や深成岩が他の地質より大きく、地質による違いがみられた (図-24)。小流域スケールの比 SS 捕捉量と土砂生産ポテンシャルとの間に相関は認められず (図-25)、地形特性のみで浮遊土砂生産量を評価できないことが示唆される。

一方、中・大流域スケールの土砂生産ポテンシャルは比 SS 捕捉量に対して負の相関があり (図-26)、むしろ浮遊土砂生産の抑制指標となっている可能性がある。中・大流域スケールの土砂生産ポテンシャルは深成岩の面積率にのみ正の相関を示した ( $p=0.0092, n=12$ )。これは、深成岩流域の比 SS 捕捉量が小さいために (図-23)、深成岩の面積率が大きいほど比 SS 捕捉量が小さ

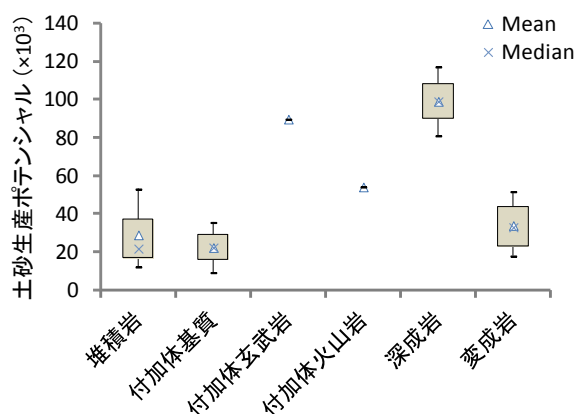


図-24 地質別小流域の土砂生産ポテンシャル

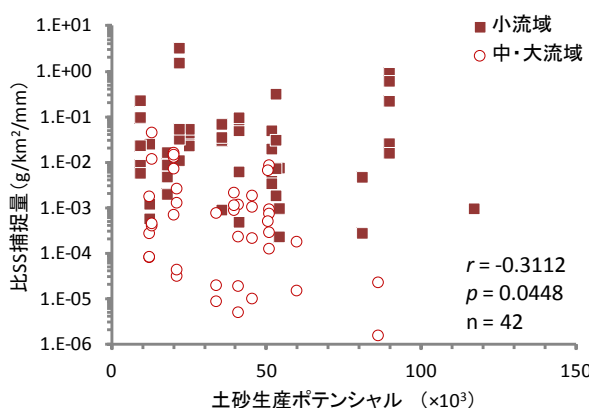


図-25 土砂生産ポテンシャルと比 SS 捕捉量

くなったと考えられる。

深成岩は主に沙流川最上流域に分布し、溪岸の裸地斜面が露岩して地形が急峻なため、溪岸に浮遊土砂となりうる土砂が乏しい可能性がある。一方、堆積岩はスレーキングを受けやすく<sup>23)</sup>、河床材料でも細粒化して容易に浮遊土砂として流出しうる。今後は地質による風化特性の違いを考慮し、浮遊土砂生産・流出特性との関係を明らかにする必要があると考えられる。

## 4.5. 異なる地質流域の浮遊土砂生産・流出特性

### 4.5.1. 目的

山地で生産される土砂の量・質 (粒径) を把握することは、流砂系を考慮した総合的な流域土砂管理において重要な課題の一つである。流域の土砂生産量の主な規定要因の一つに地質特性の影響が知られているが<sup>25), 27)</sup>、流域がさまざまな地質で構成される場合、流域内の土砂生産量や流出土砂の粒径組成に空間的な違い (ばらつき) が生じる可能性がある。しかし、山地流域の浮遊土砂生産・流出特性の地質・地形・降雨条件がどのように粒径の違いを生み出すかについて、データに基づいた総合的な解釈はなされていない。効率的な土砂生産源対策を計画・実施するには、流域を構成する地質別に土砂生産特性を明らかにする必要がある。

そこで本章では、地質の異なる山地流域の浮遊土砂生産・流出特性を明らかにすることを目的に、生産源土砂と浮遊土砂の現地調査及び粒度分析、暴露試験を行った。浮遊土砂の粒径に着目した地質による土砂生産・流出特性の違いを検討した。

### 4.5.2. 方法

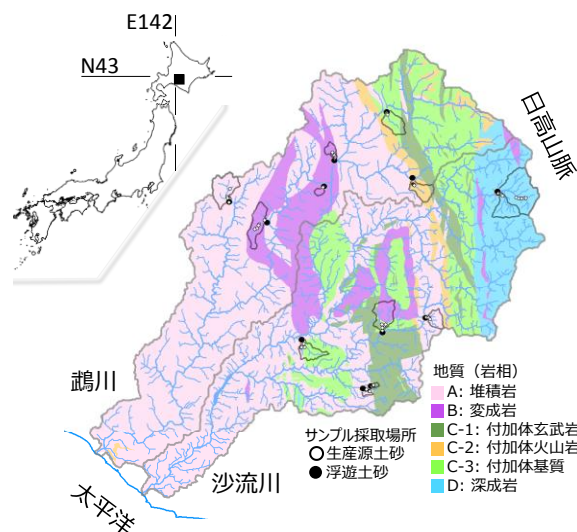


図-26 調査地位置図

### 生産源土砂と浮遊土砂

調査流域は、北海道中央部に位置する一級河川鷓川水系(流域面積 1,270 km<sup>2</sup>)及び沙流川水系(1,350 km<sup>2</sup>)とした(図-26)。シームレス地質図上で単一の地質で構成される13の小流域(流域面積 0.7~27.2 km<sup>2</sup>)を設定し、各流域の溪岸裸地斜面について5~8箇所から表層5 cm程度の土砂を採取し、生産源土砂とした。さらに流域末端に浮遊土砂サンプラーを設置し(2009年11月~2014年12月)、その間8~13回、捕捉された土砂の回収と乾燥重量の秤量、及び粒度分析を行った。

### 暴露試験

暴露試験は、寒地土木研究所(札幌市)の屋上で実施した。山地流域の溪岸裸地斜面から採取した岩石のうち、直径3~5 cm程度のものを4個ずつ選び、電気乾燥炉により35~45℃で風乾したものを供試体とした(表-2)。供試体を2 mmメッシュの篩に設置し、細粒化土砂を塩ビ容器で捕捉した。観測期間は2013年10月1日から2015年10月1日の2年間とし、約2~4週間ごとに、計32回、容器の回収を行った。捕捉された土砂と降水をガラス繊維フィルター(ADVANTEC GF/F; ポアサイズ0.7 μm)でろ過し、105℃で絶乾したる紙上の残留物を秤量し、風化生成物の重量とした。風化の程度を比較するために、風化生成物の重量を供試体の初期重量で除した、風化率で評価した。また、197日目までの風化生成物について粒度分析を行い、粒径別の風化率を評価した。

### 解析方法

各流域の地形・地質特性は、ArcGIS (ESRI; ArcGIS 10.0, Spatial Analyst)を用いて求めた。国土地理院発行の10 mメッシュ数値標高モデルを用い、各流域の流

表-2 供試体の諸元

記号	地質	採取場所	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
A-1	堆積岩 新第三紀・砂岩	沙流川 オパラダイ川	2.25
A-2	堆積岩 白亜紀・泥岩	鷓川 ヌタポマナイ川	2.66
B-1	変成岩 時代不詳・蛇紋岩	沙流川 ニセウ川	2.50
B-2	変成岩 白亜紀・カムイコタン変成岩	鷓川 弓立沢	2.28
C-1	付加コンプレックス ジュラ紀・白亜紀・玄武岩ブロック	沙流川 バンケヌシ川	3.04
C-2	付加コンプレックス ジュラ紀・白亜紀・玄武岩岩体	鷓川 双珠別川五の沢	2.68
C-3	付加コンプレックス 白亜紀・メランジ(砂岩泥岩)	鷓川 大滝の沢	2.60
D	深成岩 古第三紀・片麻岩	鷓川 トマム	2.95

域面積、標高、1次河川の流路勾配を集計した。地質はMizugaki et al.<sup>20)</sup>の生産源区分にしたがい6種の岩石で分類した(図-26)。また、気象庁のアメダス降水量データを用いて、各流域の浮遊土砂サンプラー設置期間毎に最大降雨強度、総雨量を集計した。

### 4.5.3. 結果及び考察

浮遊土砂サンプラーで捕捉された土砂量を比較す

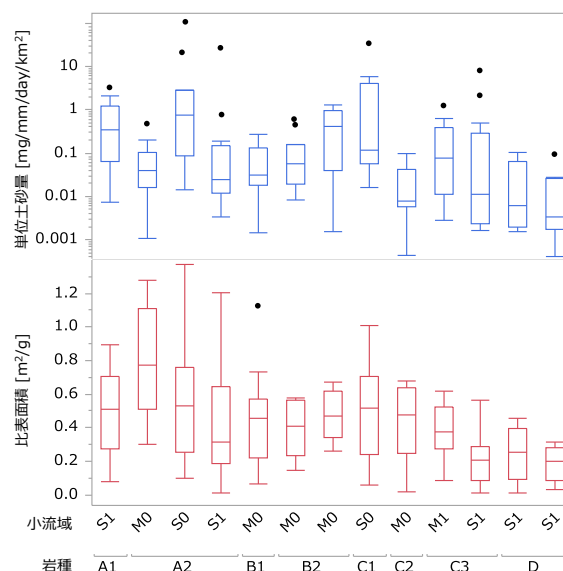


図-27 山地小流域の単位土砂量と比表面積

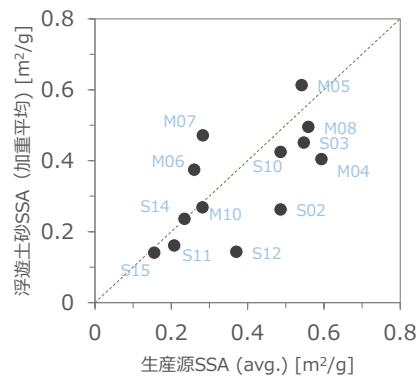


図-28 生産源と浮遊土砂の比表面積の比較(小流域)

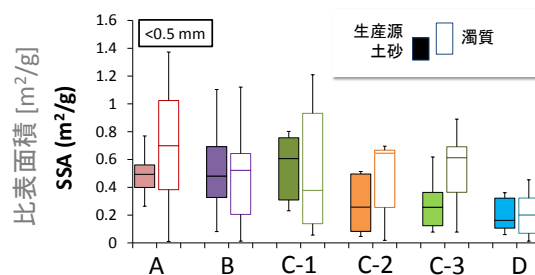


図-29 生産源と浮遊土砂の比表面積の比較(岩種)

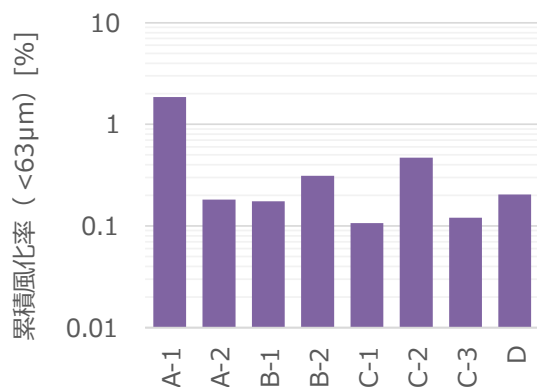


図-30 微細粒子画分 (<63μm) の累積風化率

るために、流域面積や観測期間、降水量が異なるため、単位時間・降水量・面積あたりの捕捉量（単位土砂量とする）を算出した。また、粒径組成は比表面積を指標とした。単位土砂量や比表面積は、小流域によって様々であり、地質による違いが認められた（図-27）。浮遊土砂の比表面積は生産源土砂のそれと正の相関があり（図-28）、概ね生産源土砂の粒径特性に依存することが示唆される（図-28, 29）。C-2の浮遊土砂の比表面積は生産源土砂より大きく、微細土砂の流出が卓越していると考えられる（図-29）。暴露試験では、C-2の累積風化率は4.4%とA-1（86.4%）、B-1（14.0%）について3番目に高く、63 μm以下の微細粒子画分の生成率は全岩の0.47%（ただし197日間の累積）と2番目に高かった（図-30）。これらのことから、河床・溪岸の礫の風化による微細土砂の生成が浮遊土砂流出に影響している可能性が示唆される。一方、1次オーダーの流路勾配は地質によって大きく異なるが、単位土砂量や比表面積との関係は認められなかった。このことから、地質による地形特性の違いは浮遊土砂の流出特性に直接的な影響をもたらしていないと推察される。

#### 4.6. 融雪出水を有する流域からの浮遊土砂流出特性

##### 4.6.1. 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。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<sup>28)</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、濃度特性は流域の土地利用や地質<sup>17)</sup>、<sup>29)</sup>、降雨特性や季節<sup>30)</sup>、<sup>31)</sup>によっても異なる。したがって、流域のSS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、SS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。本章の目的は、複数流域におけるSSの流出特性を明らかにすることである。国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部（以下、室蘭開発建設部）と合同で出水時の多地点同時観測を行った<sup>32)</sup>、<sup>33)</sup>。

##### 4.6.2. 方法

研究対象流域は鶴川及び沙流川流域とし、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-31）。採水は2012年4月から5月にかけて発生した融雪出水と、2012年9月から10月にかけて発生した降雨出水を対象に、可能な限り水位上昇時、ピーク時、逡減時を網羅するようにそれぞれ3回ないし7回行った。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-31）。

採取した水試料について、SS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。SSの流出特性については、SSの濃度や流出負荷量を流量または比流量に対して散布図上にプロットし、累乗式で近似したときの係数や決定係数をもって流出特性を論じられることが多い。しかし、かならずしも決定係数は高いとは限らず、流出負荷量をより精度よく

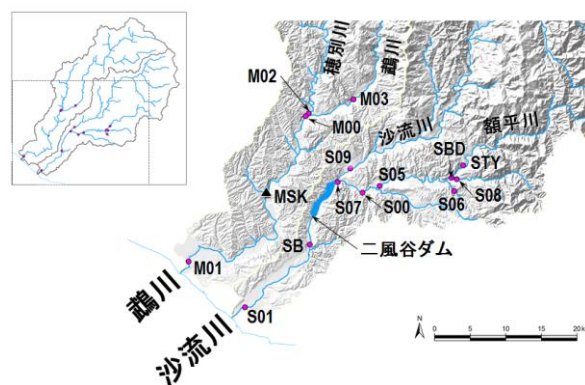


図-31 調査地位位置図

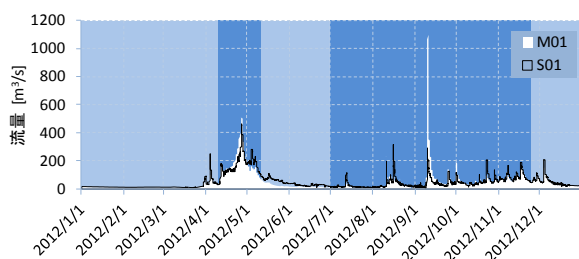


図-32 2012年鷲川・沙流川の流量変動と解析期間

濃い網掛けの期間が融雪出水期及び降雨出水期

推定するには、近似式を累乗式に限らず、さまざまな式形やそれらの場合分けも検討する余地がある。本章では、流出負荷量を推定するために、各地点のSS濃度、流出負荷量と比流量との関係を検討し、より決定係数が高くなる式形を採用することとした。

流域のSS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。解析対象期間は融雪出水期と降雨出水期とし、2012年4月10日1時から5月11日24時までを融雪出水期、7月1日から積雪直前の出水イベントが終了する11月22日までを降雨出水期とした(図-32)。

#### 4.6.3. 結果と考察

##### SSと流量との関係

融雪出水期と降雨出水期において、SSや窒素、リンの流出応答を調べるため、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: m³/s/km²)との関係を観測地点ごとにプロットしたところ、観測地点によって様々なパターンが認められた(図-33)。このパターンは、おおむね3つのタイプに分類できる。すなわち、1)融雪出水期と降雨出水期で流量に対するSS濃度の関係がほぼ同じ曲線で近似できるもの(S00, S06, S07)、2)融雪出水期よりも降雨出水期でSS濃度が高くなり、異なる曲線で近似しうるもの(M03, M00, M01, STY, S09)、3)融雪出水期あるいは降雨出水期のイベント中に、流量に対するSS濃度の傾きに変化が見られるもの(M02, S08, SBD, S05)、である。SB及びS01に関しては、降雨出水期の傾向が不明瞭であるが、採水のタイミングが流量の少ないときに集中したこと、またSS濃度に大きなばらつきが見られなかったことによると推察される。ただし、M02やS05のように降雨出水期に流量が小さくても大幅なSS濃度の上昇が認められる地点もあることを考えると、SB及びS01については、1)のパターンに属する可能性があるかと推察される。

これらの流量とSS濃度との関係において、地点に

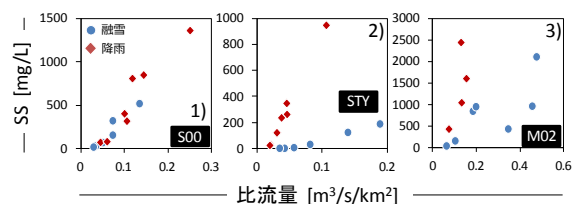


図-33 SS濃度と比流量の関係の例

よる違いが見られることは、土砂供給・輸送特性が地点や季節(出水イベント)によって異なることを示している。1)のパターンのように流量とSS濃度との関係に季節変化が少ない場合は、SS濃度が河川の水量量によって規定されていると推察される。2)や3)のパターンでは、河川の水量量だけでなく、斜面や河床からの土砂供給量に季節性や降雨イベントの履歴効果といった時間的不連続性が影響しているものと推察される。

流域内の様々な観測地点においてSSの総流出負荷量を算出するため、比流出負荷量(L: kg/s/km²)と比流量(Q/A: m³/s/km²)との関係を累乗式、2次式、3次式で回帰し、もっとも決定係数の高いものを採用した。その際、単一の回帰式では流出負荷量がマイナスとなる場合や、あきらかに相関係数が低い場合は、流量や季節別に回帰式をあてはめ、決定係数が改善した場合はそれらを採用した。その結果、SSの流出負荷量に関する推定式の決定係数は、それぞれ0.82~1.00であった(表-3)。ただし、決定係数が0.90未満の地点では、かならずしも十分な推定精度が得られたとは言いがたい。

##### 水の収支

融雪出水期及び降雨出水期の流域における水及びSSの収支について、表-3の推定式より観測期間中の流出負荷量を積算し、観測地点の流量及び総流出負荷量

表-3 SS濃度と比流量によるL-Q式と決定係数

コード	河川名	観測地点	流域面積 [km²]	SS	R²	備考
M02	徳別川	中島橋	199.9	2次	0.89	
M03	鷲川	富内橋	722.5	2次	0.98	
M00	鷲川	徳別橋	949.5	累乗	0.75	
MSK	鷲川	栄和橋	1069.2			
M01	鷲川	鷲川橋	1238.8	3次	1.00	
S08	宿主別川	宿主別橋	63.9	3次	0.98	
STY	額平川	豊糠橋	167.2	累乗/3次	0.98	***
SBD	額平川	平取ダムサイト	236.0	累乗	0.86	
S06	総主別川	町道1号橋	16.8	3次	0.94	
S05	額平川	貫気別橋	290.5	累乗	0.89	
S00	額平川	貫気別観測所	373.0	2次	0.86	
S07	額平川	額平橋	383.5	累乗	0.82	*
S09	沙流川	長知内橋	784.5	3次	0.90	**
SB	沙流川	平取橋	1215.0	3次/累乗	0.99	
S01	沙流川	沙流川橋	1333.0	累乗	0.93	

\*: 貫気別観測所の流量データを使用

\*\* : 梶毛志橋の流量データを使用

\*\*\*: 融雪期・降雨出水期それぞれ別のL-Q式を適用

と観測地点間の増減を評価した。

水収支は、通常、下流の観測地点ほど総流量が大きくなると考えられるが、融雪出水期及び降雨出水期ともに下流の総流量が上流よりも小さくなる(逆転する)区間が認められた。鵜川流域では、穂別川中島橋(M02)、鵜川富内橋(M03)の総流量の合計は、合流後の鵜川穂別橋観測所(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-34)。沙流川流域では、額平川貫気別橋(S05)と額平川貫気別観測所(S00)の総流量がほぼ同程度であり、貫気別川からの総流量がほとんどないことになる。水が減少する原因として、一般にダムや発電、農業用水等による取水が考えられるが、本調査地ではそれらのみ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。SS、総窒素及び総リンの収支は流量に大きく依存しているため、これ以降、水収支の逆転が生じたこれらの区間を含まない地点間において比較・検討を行うこととする。

流域から海域への総流量は、融雪出水期は鵜川(M01)と沙流川(S01)でほぼ同程度であったが、降雨出水期は鵜川のほうが沙流川より大きかった(図-34)。これは9月の出水イベント時の降水量が鵜川流域で大きく、沙流川流域では大規模な出水とならなかったためである。

鵜川流域の総流量は、中・上流域の鵜川(M03)は穂別川(M02)に比べて、融雪出水期で4.5倍、降雨出水期で4.1倍大きい。流域面積は鵜川(M03)が穂別川(M02)より3.6倍大きく(表-3)、鵜川本川の方が比流量が大きいことになる。中・下流域では、穂別(M00)、栄(MSK)地点の融雪出水期及び降雨出水期

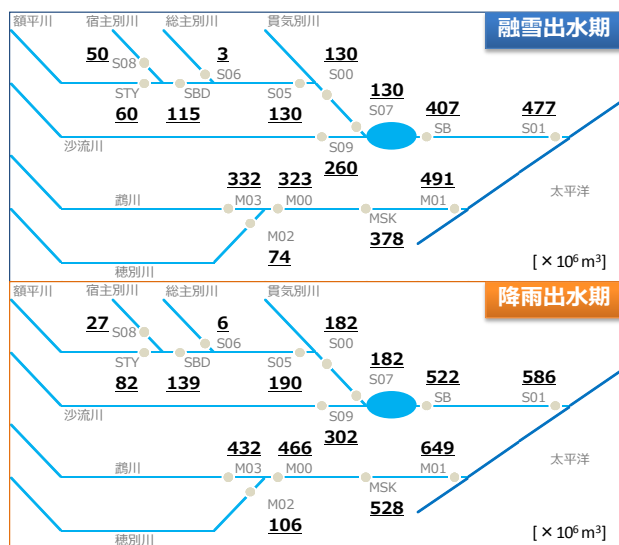


図-34 鵜川・沙流川流域における水収支

の総流量は、それぞれ流域末端(鵜川; M01)のそれぞれ65.8~71.8%、及び77.0%及び81.4%であった。M01に対する流域面積率はM00、MSKでそれぞれ76.6%、86.3%であり(表-3)、中・下流域からもそれなりの寄与がある。

沙流川流域の総流量は、二風谷ダム貯水池に流入する沙流川本川(幌毛志; S09)が額平川(貫気別観測所; S00)より融雪出水期で約2倍、降雨出水期で約1.7倍大きかった。沙流川本川(S09)の流域面積は額平川(S00)流域面積より約2倍大きく、比流量は融雪出水期は同程度、降雨出水期は額平川流域で大きかったといえる。下流域では、平取(SB)における融雪出水期と降雨出水期の総流量はそれぞれ流域末端(S01)の85%及び89%であった。流域面積率が91%であることから、下流域の比流量は中・上流域に比べて若干低い。額平川流域では、宿主別川(S08)と額平川上流(豊糠; STY)において融雪出水期と降雨出水期に顕著な違いがあるのが特徴的である。特に融雪出水期のS08では総流量が大きい。

#### SSの収支

流域から海域へのSS流出量は、融雪出水期、降雨出水期ともに鵜川(M01)の方が沙流川(S01)よりも大きかったが、とくに降雨出水期で約7倍と顕著であった(図-35)。これは、9月の降雨イベントがおもに鵜川流域で発生したためであり、流量ピークの違いに起因する(図-32)。鵜川流域のSS流出量は、中・上流域の鵜川(M03)と穂別川(M02)は融雪出水期と降雨出水期で同程度であり、M02に比べてM03は約1.2~1.5倍大きかった。中・下流域では、穂別(M00)から流域末端(鵜川; M01)の区間において、融雪出水期及

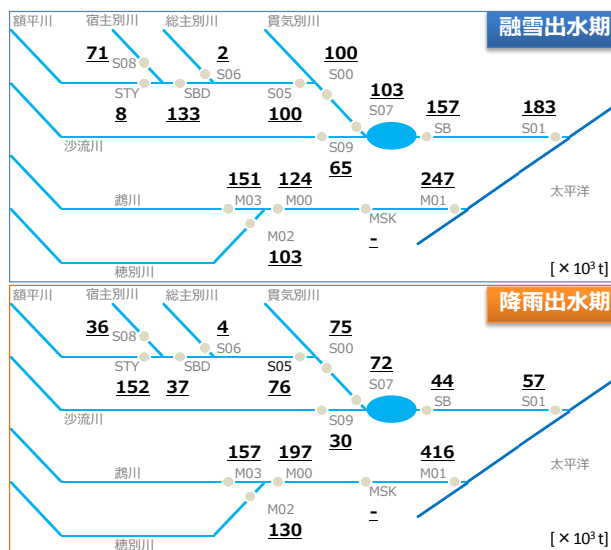


図-35 鵜川・沙流川流域におけるSS収支

び降雨出水期ともに約2倍に増加している。降雨出水期のSS流出量は融雪出水期の1.6倍以上大きく、降雨出水による土砂生産・供給量が融雪期より大きく、中・下流域の寄与が大きいことを示している。

沙流川流域のSS流出量は、二風谷ダム貯水池に流入する額平川(額平橋;S07)が沙流川本川(長知内橋;S09)より融雪出水期で約1.6倍、降雨出水期で約2.4倍大きく、水収支と逆転している(図-35)。下流域では、平取(SB)における融雪出水期と降雨出水期のSS流出量はそれぞれ流域末端(S01)の86%及び77%であった。額平川流域上流域の宿主別川(S08)と額平川上流(豊糠;STY)でSS流出量を比較すると、融雪出水期はS08が約9倍大きく、一方、降雨出水期はSTYが約4倍大きい。これは、水収支のみならずSS濃度の応答に季節性があることに起因していると考えられる(図-33)。

本章では2012年の融雪出水期と降雨出水期のデータについて検討した。L-Q式は見かけ上決定係数は0.90以上とよく見える地点でも、とくに降雨出水期の高水時のデータが少ないことから、今後もデータの蓄積が望まれる。SS濃度が流量によって規定され、季節性が影響しない地点においては、ある程度のデータ蓄積によってC-Q式の堅牢性を確認することで、信頼における流出負荷量の評価が可能となるかもしれない。ただし、C-Q特性は地点によってばらつきがあることから、流量のみからSS濃度やSS流出量の評価をするには、大きな誤差が含まれることを認識しておく必要がある。濁度計によるSS濃度の連続観測等でより精度の高いSS濃度の流出特性やSS流出量の評価が望まれる。

## 5. 流域からの濁質流出と河口域の堆積環境への影響

### 5.1. 目的

北海道南部の太平洋側に位置する鶴川沿岸域では、過去数十年の間に汀線が大きく後退した結果、越波被害や河口干潟の消失が生じており、国土保全と生態系保全の観点から長期的な海岸保全策が求められている<sup>3)</sup>。長期的な海岸保全を行うためには、陸域の山地上流域から河口・沿岸域まで一貫した「流砂系」として捉えた総合的な土砂管理が重要であり、近年、流砂系をとおした調査・研究事例が報告されている<sup>2)</sup>。本研究の目的は、鶴川周辺海岸(鶴川海岸と呼ぶ)を構成する土砂の生産源、粒径特性及びその変動特性を明らかにすることである。流域内及び海岸のさまざまな地点

において浮遊土砂・堆積土砂を採取し、放射性同位体トレーサを用いた土砂生産源の推定を行った。また海岸土砂の粒径特性をモニタリングした。

### 5.2. 方法

調査地は、北海道中央部の鶴川及び沙流川流域及び周辺海岸とした(図-4)。上流の小流域から本川の中流域、河口の大流域まで25地点において、浮遊土砂サンプラーや表面採水により浮遊土砂を採取した(2009年~2010年、138試料)。また、二風谷ダム貯水池の底質を24地点で採取した(2010年6月及び11月で2回、48試料)。鶴川及び沙流川河口を含む約27kmの海岸沿い17地点で表層堆積土砂を採取した(2010年11月~2012年10月まで21回、314試料)。採取した土砂( $\phi 0.5\text{ mm}$ 以下)について、ガンマ線分析により放射性同位体( $^{212}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Ac}$ 、 $^{40}\text{K}$ )濃度を測定し、地質(岩石)で6区分した生産源の寄与を評価した<sup>20)</sup>。フルイ試験及びレーザー回折式粒度分布測定装置により土砂の粒径組成を測定し、比表面積を算出した。

### 5.3. 結果と考察

浮遊土砂の生産源は堆積岩、変成岩の寄与が高く、

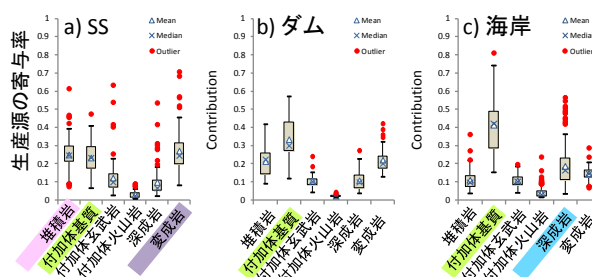


図-36 SS・ダム底質・海岸土砂の生産源寄与

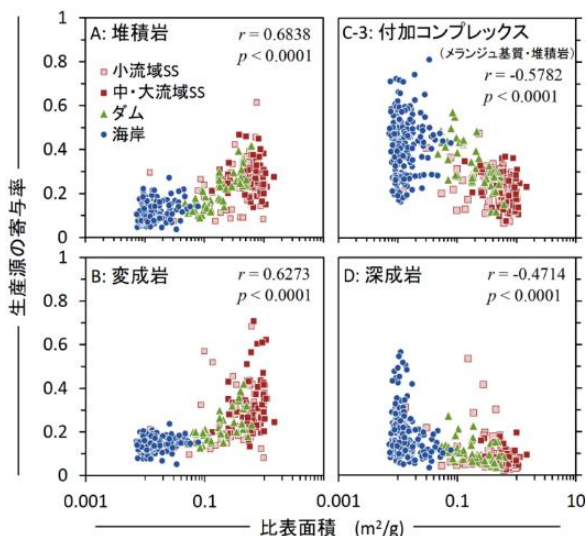


図-37 生産源寄与と比表面積の関係



ダムの底質は付加体基質、海岸土砂は付加体基質及び深成岩の寄与が高かった(図-36)。推定された土砂生産源の寄与と比表面積との関係を調べたところ、付加体基質と深成岩の寄与は負の相関が、堆積岩と変成岩の寄与は正の相関が認められた(図-37)。これらのことから、流域から流出する土砂は、粒径に応じて流域内の土砂生産源が異なり、海岸土砂の主要な生産源は鶴川・沙流川流域の上流域であると考えられる。

海岸土砂の平均粒径は0.30 mm～0.76 mmの範囲で、地点・季節によるばらつきが見られた(図-38)。様似

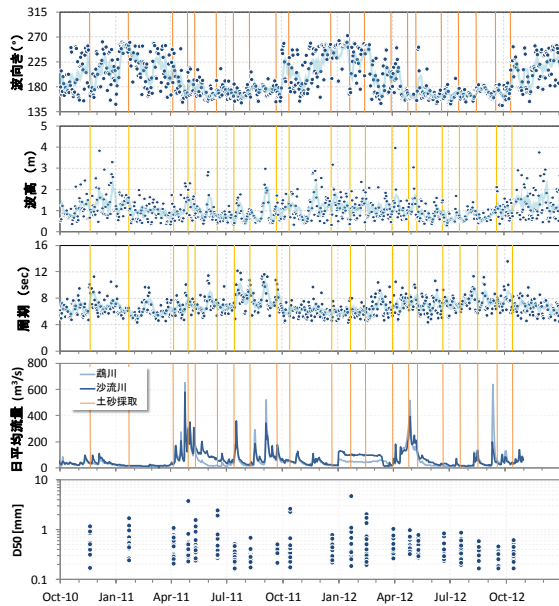


図-38 観測期間中の波向き・波高・周期(様似)、流量(鶴川・沙流川)及び海岸土砂の平均粒径(D<sub>50</sub>)

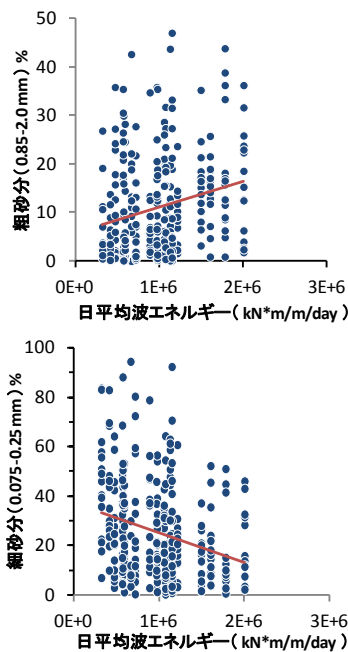


図-39 波エネルギー粗砂分(上)・細砂分(下)との関係

沖の日平均波エネルギーと粒径指標(平均粒径D<sub>50</sub>、最大粒径、粗砂%、細砂%)とで相関分析を行ったところ、粗砂分は有意な正の相関( $r=0.232$ 、 $p<0.001$ 、 $n=314$ )を、細砂以下%は有意な負の相関( $r=-0.271$ 、 $p<0.001$ 、 $n=314$ )を示した(図-39)。また波向きごとの日平均波エネルギーに対して、冬に卓越する南南西～西の波エネルギーは細砂分と負の相関を、D<sub>50</sub>、最大粒径、粗砂分は正の相関を示したが、春から秋に卓越する南～南東の波エネルギーはいずれの粒径指標とも相関が認められなかった。これらのことから、主に冬期間の波エネルギーは細砂分を流失させ、海岸土砂を粗粒化させているものと考えられる<sup>34)</sup>。

春から秋は波エネルギーが比較的小さく、河川出水による土砂供給量が多いことから、河口からの距離に応じて粒径が変化するものと考えられる。平均粒径D<sub>50</sub>及びD<sub>50</sub>の変動係数(CV)は河口から漂砂の卓越方向(南東→北西)の距離に対して増加傾向が認められた(図-40)。このことから、鶴川周辺の海岸地形を構成する土砂は、主に鶴川・沙流川流域の上流域から供給され、河口付近では安定的に堆積するもの、河

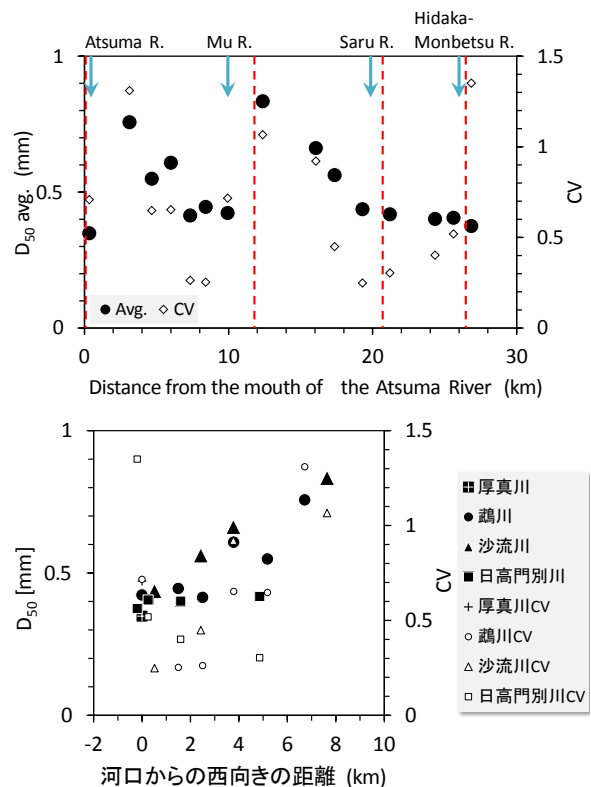


図-40 河口からの距離と平均粒径(D<sub>50</sub>)及び変動係数(CV)

上) 厚真川河口から東向き距離とD<sub>50</sub>及びCV。矢印は河口の位置、点線は漁港・港の位置を示す。下) 漁港間の河口からの西向き距離とD<sub>50</sub>及びCV。

口から遠いほど冬期の高波浪により細粒分が沖合に流失し不足するものと推察される。河川上流域から沿岸域まで土砂の連続性を確保する重要性を示している。

鵠川海岸における粒径モニタリングと放射性同位体トレーサによる鵠川・沙流川流域における生産源推定の結果、粒径特性の時空間分布は港ではさまれた区間において河口からの距離と波浪や河川流量の季節変化による細砂分の挙動で説明することができた。また、海岸土砂の主要な生産源は、鵠川・沙流川の中・上流域に分布する付加コンプレックス（メランジュ基質・堆積岩）と深成岩の地域であると推定された。これらの結果は、鵠川海岸の長期的な保全には河川上流域から沿岸域まで土砂の連続性を確保することが重要であることを示している。

## 6. 濁質の環境影響評価・管理手法開発

### 6.1. 目的

流域で生産され河川を通じて海岸・沿岸域へ流出する浮遊土砂は、濁質となって拡散・堆積し、海岸や海底の構成材料としてさまざまな生物の生息場環境に寄与する<sup>35-38</sup>)。また、沿岸域に拡散する濁質は光環境を阻害してプランクトン等の基礎生産を抑制する可能性がある一方、同時に流域から負荷される栄養塩によって、沿岸域での基礎生産が増大することも報告されている<sup>35, 39-41</sup>)。このように、流域から沿岸域へ流出する浮遊土砂・栄養塩の季節変化や長期的な変動を評価・予測することは、流域の河川環境のみならず海岸・沿岸域の環境保全・管理において極めて重要な情報を与える。近年、分布型の水・土砂・物質流出モデルが提案されており、流域特性に応じた濁質・栄養塩の流出量予測が可能となってきている<sup>42</sup>)。しかし、これまでに山地から海域に至るまで濁質や栄養塩の動態について、観測データが不足していることから、これらの実態把握はかならずしも十分とはいえず、また観測・予測手法についても有効なツールが確立されているとはいえない。

そこで本章では、山地から海域にいたるまで濁質の環境への影響評価・管理手法を開発することを目的とした。流域からの濁質及び栄養塩の流出実態把握と簡易な連続観測手法の開発、流域内の浮遊土砂生産量の空間分布評価手法の開発とその規定要因、流域の濁質生産・流出過程を考慮した水・浮遊土砂の分布型流出モデルの構築を行った。

### 6.2. 多地点同時観測による浮遊土砂・栄養塩流出特性

#### 6.2.1. 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。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<sup>28</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<sup>43-45</sup>)。また、これらの濃度特性は流域の土地利用や地質<sup>17, 29</sup>)、降雨特性や季節<sup>30, 31</sup>)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。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ことである。

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～2014年まで連携して実施してきた。本章では、詳細な水・SS・栄養塩の流出特性を把握するために、SS及び栄養塩の流出負荷量を流量から推定する方法を構築し、観測地点ごとに水・SS・栄養塩（懸濁態・溶存態の窒素及びリン）について流出量の季節変化特性を調べた。

#### 6.2.2. 方法

##### 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鵠川及び沙流川流域とした（図-41）。流域面積及び幹川流路延長はそれぞれ鵠川流域で1,270 km<sup>2</sup>、135 km、沙流川流域で1,350 km<sup>2</sup>、104 kmであり、ともに一級河川である。観測地点は鵠川流域に5地点、沙流川流域に10地点、合計15地点とした（図-41、表-4）。採水は2012年4月から2014年5月までの融雪出水及び

## 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

降雨出水を対象に、可能な限り水位上昇時、ピーク時、逡減時を網羅するようにそれぞれ3回ないし7回行った。

### 水質分析

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)、総リン (Total Phosphorous; 以下、TP)、溶存態リン (以下、DP) 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 (Particulate N; 以下、PN) 及び懸濁態リン (以下、PP) の濃度は、それぞれ TN 濃度と DN 濃度、TP 濃度と DP 濃度の差からもとめた。

### 解析方法

各観測地点において SS、栄養塩の流出量を評価するには、流量とともに SS や栄養塩の濃度の時系列デー

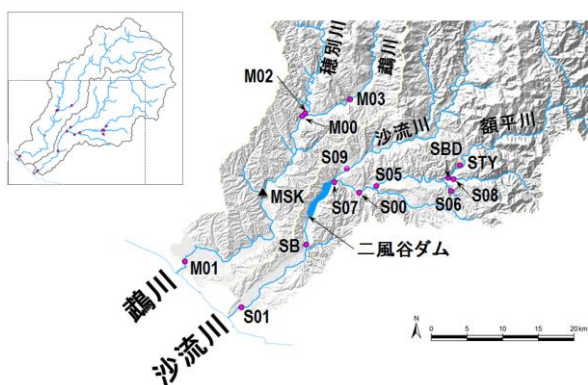


図-41 調査地位置図

表-4 観測地点と有効データの有無

コード	河川名	観測地点	流域面積 [km <sup>2</sup> ]	有効データの有無				備考
				Q	SS TN, TP	PN, DN PP, DP		
M02	鶯別川	中島橋	199.9	○	○	○		
M03	鶯川	富内橋	722.5	○	○	○		
M00	鶯川	鶯別橋	949.5	○	○	○		
MSK	鶯川	栄和橋	1069.2	○	○	○		
M01	鶯川	鶯川橋	1238.8	○	○	○		
S08	宿主別川	芽生	63.9	○	○	○		
S08	宿主別川	宿主別橋	63.9	×	○	○		
STY	額平川	豊糠橋	167.2	○	○	×	***	
SBD	額平川	平取ダムサイト	236.0	○	○	×		
S06	総主別川	町道1号橋	16.8	○	○	○		
S05	額平川	貴気別橋	290.5	×	○	○		
S00	額平川	貴気別観測所	373.0	×	○	×		
S07	額平川	額平橋	383.5	×	○	○*		
S09	沙流川	長知内橋	784.5	○	○	○**		
SB	沙流川	平取橋	1215.0	○	○	○		
S01	沙流川	沙流川橋	1333.0	○	○	○		

\*: 貴気別観測所の流量データを使用

\*\* : 梶毛志橋の流量データを使用

\*\*\*: 融雪期・降雨出水期それぞれ別のL-Q式を適用

タを得る必要がある。しかし、これらを直接、自記計などで連続観測することができないため、様々な流量ステージで採水して水質試験を行い、SS や栄養塩の流出量を流量から近似的に推定する手法が用いられるのが一般的である。本報では、観測地点毎に SS 及び栄養塩の流出量を評価するために、これらを流量データから推定する手法を構築した。

観測地点毎に流域面積が異なるため、単位流域面積あたりの流出量 (以下、比負荷量) と流量 (以下、比流量) との関係を、べき乗式により近似した。

$$L = a q^b \quad (4)$$

ここに、 $L$  は比負荷量 [kg/s/km<sup>2</sup>]、 $q$  は比流量 [m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>]、 $a$  及び  $b$  は係数である。この式は、SS、TN 及び TP に適用しうる。存在形態別の栄養塩、特に DN や DP については、式(4)による近似はよくない<sup>32), 33)</sup>。

一方、存在形態別の栄養塩濃度について、水垣ら<sup>32), 33)</sup>は、懸濁態の存在割合が SS 濃度の双曲線関数によって近似できることを報告してきた。

$$PN / TN = a \sinh^{-1} (SS / b) \quad (5)$$

$$PP / TP = c \tanh (SS^n / m) \quad (6)$$

ここに、 $\sinh^{-1}$  (アークハイパボリックサイン) は逆双曲正弦、 $\tanh$  (ハイパボリックタンジェント) は双曲正接、 $PN/TN$  及び  $PP/TP$  は窒素またはリンの総濃度に対する懸濁態の存在比、 $SS$  は SS 濃度 [mg/L]、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $n$  及び  $m$  は係数である。

SS、TN 及び TP の任意期間における比負荷量は、式(4)により流量の連続データにより推定できるが、栄養塩の存在形態別の比負荷量は式(4)の近似が比較的悪い<sup>32), 33)</sup>。一方、式(5) 及び(6)のとおり、窒素及びリンの懸濁態・溶存態の存在比は SS 濃度によって異なることから、式(4)で得た TN 及び TP に、式(5)または(6)で得た懸濁態・溶存態の存在比を乗じることで、窒素及びリンの比負荷量を存在形態別に推定できる。

$$L_{px} = L_{tx} P_{px} \quad (7)$$

$$L_{dx} = L_{tx} - L_{px} = L_{tx} (1 - P_{px}) \quad (8)$$

ここに、 $L_{tx}$ 、 $L_{px}$  及び  $L_{dx}$  はそれぞれ窒素またはリンの全体、懸濁態及び溶存態の比負荷量 [kg/s/km<sup>2</sup>]、 $P_{px}$  は窒素またはリンの総濃度に対する懸濁態の存在比である。

式(7)または(8)によって任意期間における PN、DN、

PP 及び DP の比負荷量の総量を求めるためには、懸濁態の存在比を式(5)または (6)から代入するが、その際に連続的な SS 濃度の値が必要となる。濁度計などで連続データを得られている場合はそれを用いるのがよいが、本報では、SS 濃度を以下の式で算出することとした。すなわち、比負荷量は、濃度と流量の積を流域面積で除して得られるから、

$$L_{SS} = 10^{-3} C_{SS} Q / A = 10^{-3} C_{SS} q \quad (9)$$

[mg/L]、 $Q$ は流量 [m<sup>3</sup>/s]、 $A$ は流域面積 [km<sup>2</sup>]、 $q$ は比流量 [m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>] である。SSの比負荷量は式[1]において比流量より連続的に得られるから、式[1] 及び[6]から、

$$a q^b = 10^{-3} C_{SS} q \quad (10)$$

式[7]を $C_{SS}$  について整理すると、

$$C_{SS} = 10^3 a q^{b-1} \quad (11)$$

ここに、 $L_{SS}$ はSS比負荷量 [kg/s/km<sup>2</sup>]、 $C_{SS}$ はSS濃度

となる。このように、式(5)または(6)の SS 濃度に式(11)

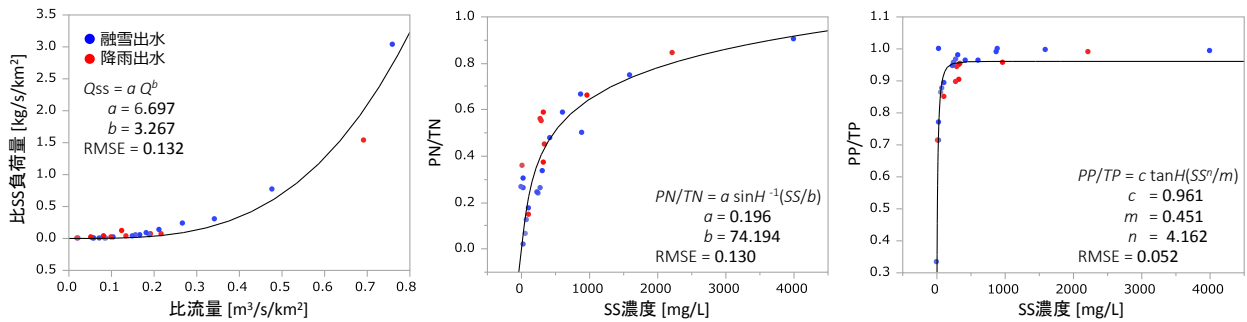


図-42 比 SS 負荷量、PN/TN 及び PP/TP の近似例 (M01)

比 SS 負荷量は式(4)、PN/TN は式(5)、PP/TP は式(6)で近似。青○は融雪出水時、赤○は降雨出水時のサンプル。

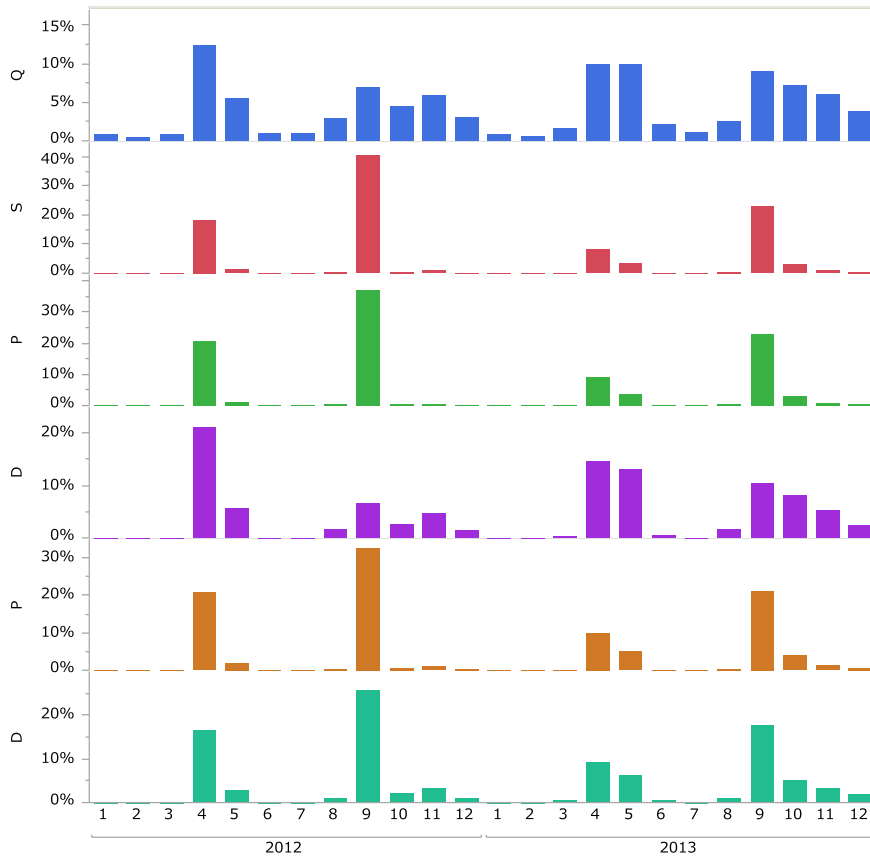


図-43 鵜川 M01 の流量、SS 及び栄養塩の月別流出割合

で求めた値を代入することで、懸濁態及び溶存態の窒素またはリンについても、比負荷量を比流量から推定できる。

以上、式(4)~(11)より、各観測地点における SS、PN、DN、PP 及び DP の比負荷量を流量の毎時データを用いて推定し、2012年1月~2013年12月の2年間について、月別に総量を積算した。まず、各観測地点において、得られた流量、SS、TN、PN、TP 及び PP 流出量または濃度の値から式(4)、(5) 及び(6)の各係数を求めるために、非線形回帰分析(統計解析ソフト JMP 11.2.1)を行い、最適解と2乗平均平方根誤差(RMSE)を調べた(図-42)。この最適解を用いて、SS、PN、DN、PP 及び DP の流出量の時系列データを得た。次に、観測地点毎に各流出量の季節的な変化を評価するため、2年間の総流出量に対する月別流出量の割合を評価した。なお、流量データについて2013年は暫定値を用いた。流量データに欠測が多かった額平川の S05、S00 及び S07 地点は解析から除いた。また宿主別川 S08 については、宿主別橋地点の流量データ(寒地土研)に欠測があるため、芽生地点(開発局)のデータを用いた。

### 6.2.3. 結果と考察

#### 鵜川・沙流川における水・SS・栄養塩流出

鵜川及び沙流川から沿岸域へ流出する SS 及び栄養

塩の流出特性を把握するために、鵜川(M01)と沙流川(S01)の結果を図-43及び図-44に示した。

鵜川流域の水流出量は、2012年4月が最も多く、ついで、2013年の4月と5月、2013年9月が多い。SS 流出量は、2012年9月に最も多く、ついで2013年9月、2012年4月となっている(図-43)。窒素流出について、PNとDNは傾向が異なる。PNはSSと同様に2012年9月、2013年9月、2012年4月に多いが、DNは2012年4月が20%以上と最も多く、ついで2013年4月、5月と、水流出のパターンと類似している。ただし、2012年の降雨期の流出量は少ない。リン流出について、SSやPNと同様に、2012年9月が最も多く、ついで2013年9月、2012年4月に多い。これらのことから、栄養塩の流出量の季節変化特性は、PN、PP、DPはSSと同様のパターンを示し、DNは流量のパターンと類似していることがわかった。いずれの栄養塩も、年間の流出量における融雪出水の役割が大きいことがわかる。

沙流川流域の水流出量は、融雪期の4月、5月が最も多く、ついで、2012年11月、2013年9~11月の降雨期が多い。SSの流出は、2012年4月に最も多く、ついで2013年5月、4月、9月となっている(図-44)。窒素流出について、鵜川ほど顕著ではないが、PNと

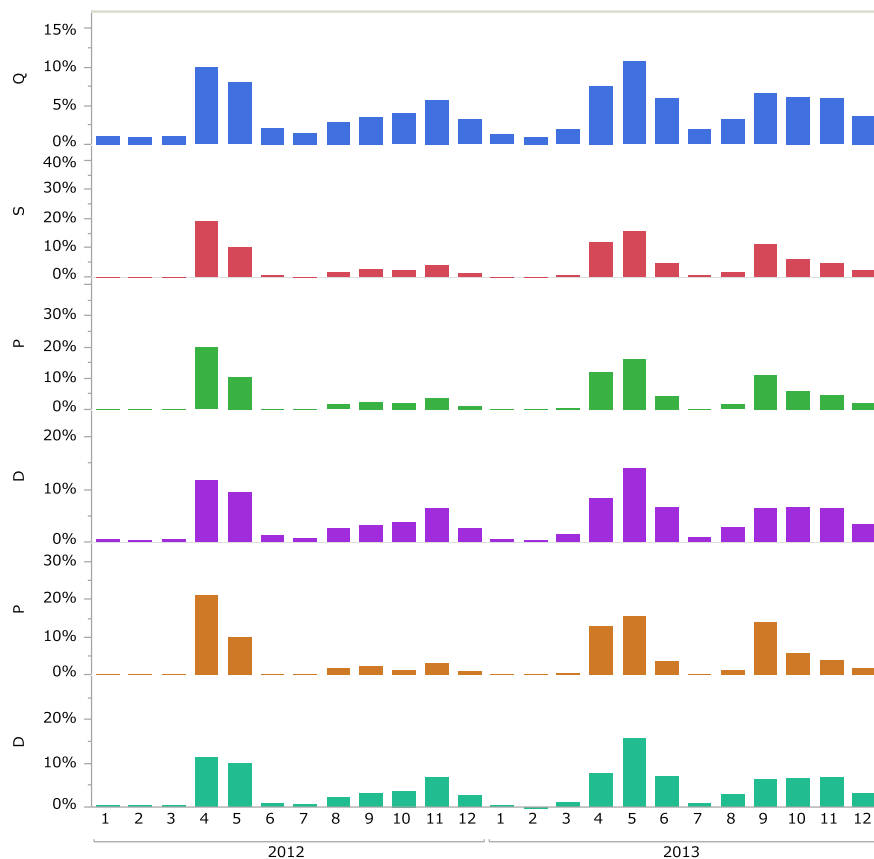


図-44 沙流川 S01 の流量、SS 及び栄養塩の月別流出割合

DNは傾向が異なる。PNはSSと同様に2012年4月、2013年5月、4月、9月に多いが、DNは水と同様に、融雪期の4月、5月に多く、2012年11月、2013年9～11月の降雨期に多い。リン流出について、窒素と同様、懸濁態PPはSSと、溶存態DPは水と同様のパターンが認められた。これらのことから、栄養塩の流出量の季節変化特性は、PN、PPはSSと同様のパターンを示し、DN、DPは流量のパターンと類似していることがわかった。いずれの栄養塩も、年間の流出量における融雪出水の役割が大きいことがわかる。

鵜川と沙流川を比較すると、2012年の9月のSS、栄養塩の流出パターンに大きな違いが認められた。また、鵜川ではDPもSSに類似した季節変化を示すが、沙流川では流量に類似した季節変化を示しており、栄養塩の流出特性が隣接する流域間で異なっていることがわかった。

#### 様々な地点における水・SS・栄養塩流出

鵜川水系と沙流川水系の水、SS及び栄養塩の流出量の季節変化特性を比較するために、2年間（2012年～2013年）の総流出量に対する月流出量の割合を折れ線グラフで示した（図-45）。流量Qについて、鵜川水

系（青色）と沙流川水系（赤色）ではほぼ同様の季節変化を示している。一方、SSや栄養塩については、M01（図-43）とS01（図-44）でみたように、鵜川水系と沙流川水系で異なる季節変化が認められる。

SSについては、M01と同様、鵜川水系ではどの地点でも2012年9月に高い流出割合が認められる。一方、沙流川水系では、地点によって異なるパターンが見られるものの、おおむねS01と同様の季節変化が認められた。

窒素流出について、鵜川水系、沙流川水系ともに、PNはSSと同様の季節変化が認められたが、DNは地点によるバラツキがかなり大きいことが見て取れる。鵜川水系では、中・下流域のM01、MSK、及びM00はほぼ同じであるが、M02とM03はかなり異なるパターンを示している。沙流川水系では、二風谷ダム下流のS01、SBや二風谷ダム上流の沙流川本川S09、平取ダム上流の額平川STYはほぼ同様の季節変化パターンだが、平取ダム地点SBD、平取ダム上流の宿主別川S08、平取ダム下流の小支川S06では、それぞれ異なる季節変化を示している。

リン流出について、PP、DPはSSと同様のパターン

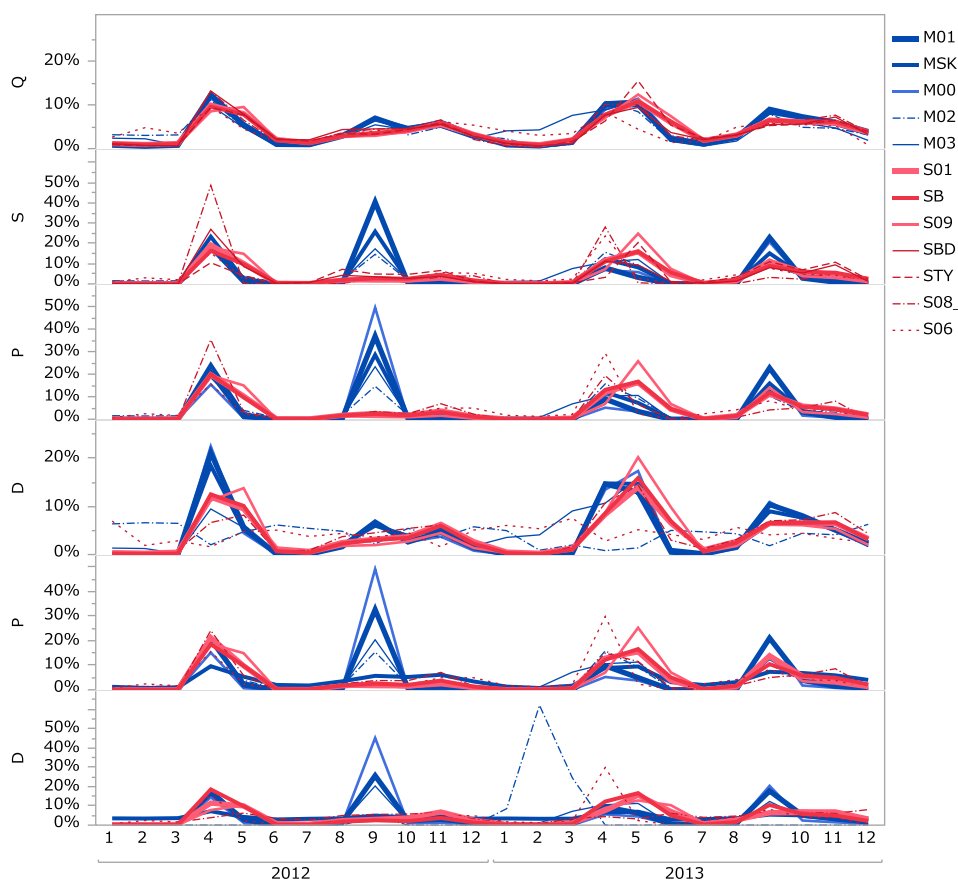


図-45 全観測地点の流量、SS及び栄養塩の月別流出割合

が認められた。DPについては、M02のみ、2月に極めて高い流出割合を示しており、これについてはさらに詳細な検討が必要である。

### 栄養塩の流出量評価における今後の課題

本章では、鶴川及び沙流川流域の多地点で同時水文観測を実施した結果を用い、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。またこれらの手法を用いて、地点毎に2012年～2013年の2年間、月ごとのSS及び栄養塩の流出負荷量を算出し、季節変化特性を調べた。その結果、鶴川と沙流川ともに、年間の流出量における融雪期の役割が大きく、鶴川流域においては特に、溶存態窒素において、融雪期の流出量が多いことがわかった。また、鶴川と沙流川とでは、SS及び栄養塩の流出における季節変化パターンが異なることがわかった。SS及び栄養塩流出の季節変動を多地点間で比較したところ、特に溶存態窒素に地点間の違いが認められた。このように、SS・栄養塩の流出負荷量を定量的に把握し、その流出特性について季節的な変動を明らかにすることができた。また上流（小流域）になるほど、これらの流出特性にバラツキが認められる可能性も示唆された。これらの結果は、精力的な現地調査による貴重なデータに基づいて初めて得られるものであり、多機関が連携しているとはいえ、この調査体制を継続することは必ずしも容易ではない。今後の流域管理や沿岸・河川生態系への影響評価に向けて、これらの水質モニタリングを継続していくことが望ましいが、より簡便な栄養塩流出量のモニタリング・評価手法が求められる。例えば、濁度計等の自記観測機器や、水や物質循環を扱うことができる分布型流出モデルなどの援用も含めて、流域からの水・土砂・栄養塩の動態評価を検討していく必要がある。

## 6.3. 流域スケールにおける浮遊土砂生産量推定法

### 6.3.1. 目的

土砂生産量は流域の土砂生産特性の代表的な指標であり、砂防計画やダム堆砂対策を立案する際の基本的かつ極めて重要な情報である。土砂生産量は、一般に砂防・発電・多目的ダムの堆砂データを用いて、掃流砂や浮遊砂を対象にした数十年間の平均値として評価した例が多く、主な規定要因の一つに地質特性の影響が知られている<sup>24), 25), 27)</sup>。流砂系の総合的な土砂管理において、山地から海岸・沿岸域に流出する浮遊土砂に焦点をあてると、対象流域にはさまざまな地質で構成される場合が多く、流域内の生産土砂の量や粒径特性の空間的な違い（ばらつき）は把握できない。効率的な浮遊土砂生産源対策を計画・実施するには、流域内の浮遊土砂生産源の分布を明らかにする必要がある。

Mizugaki et al.<sup>20)</sup>は、沙流川水系額平川流域を対象として、放射性同位体トレーサを用いた地質別の浮遊土砂生産源推定法を構築し、降雨出水イベント時の浮遊土砂生産量を地質別に推定した。この手法をより長期的な観測データに適用できれば、流域内の浮遊土砂生産量の分布を評価できる可能性がある。本章の目的は、流域末端から流出する浮遊土砂量とその生産源を定量的に評価する手法を構築することである。そのために、水文観測、水質試験、放射性同位体トレーサを用いた地質別の浮遊土砂生産源の寄与推定を行った。また、浮遊土砂生産量とその潜在的要因との関係をGIS解析により調べた。

### 6.3.2. 方法

#### 調査地概要及び野外調査

研究対象流域は、鶴川及び沙流川流域とした（図-46）。流域の表層地質は、上流から下流に向けて主に深成岩、付加体、堆積岩で構成され、蛇紋岩や泥質片岩等の変

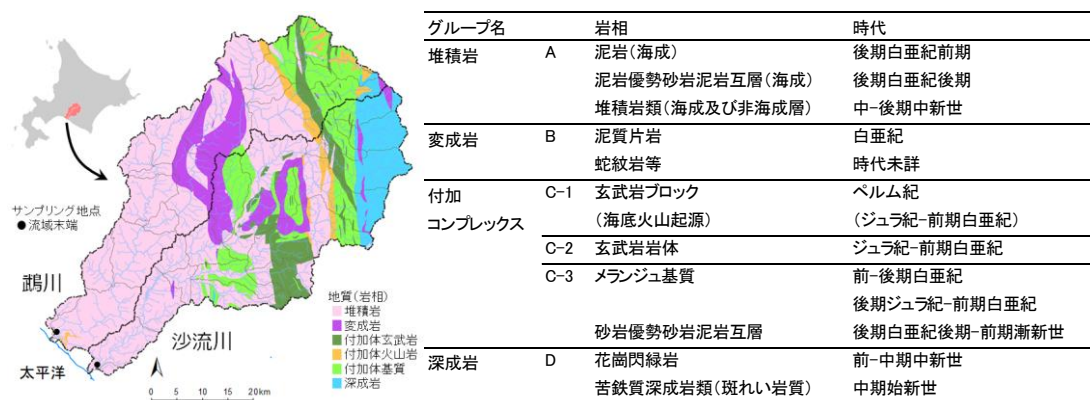


図-46 対象流域と表層地質の分布

成岩が中流域に分布する(図-46)。土地利用は森林、農地及び市街地がそれぞれ85%,6%及び9%を占める。年平均降水量は下流で975mm、上流で1,353mmである。

観測地点は鶴川橋(河口から2.55km)及び沙流川橋(2.7km)の2地点とした(図-46)。2011年4月から2013年9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表面採水(18リットル)を行った。

### 分析方法

採取した水サンプルの一部をとり、SS濃度(ポアサイズ1μm)を調べた。また、水サンプル(16.5リットル)の濁度成分を蒸発乾固して抽出し、粒径0.425mm以下の画分について、ガンマ線スペクトロメトリーにより放射性同位体濃度(<sup>212</sup>Pb, <sup>228</sup>Ac, <sup>40</sup>K)を調べた。

### 浮遊土砂生産源の推定

濁度成分に対する各地質別生産源グループの寄与の推定は、Mizugaki et al.<sup>20)</sup>の方法にしたがった。6つの生産源グループ(図-6のA~D)と濁度成分の<sup>212</sup>Pb, <sup>228</sup>Ac, <sup>40</sup>K濃度からマハラノビスの距離を計算した。生産源寄与を距離の逆数に比例するものと仮定し、以下の式で各生産源からの寄与を算出した。

$$p_i = \frac{1/d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1$$

ここに  $p_i$  は濁度成分に対する生産源  $i$  からの寄与、 $d_i$  は生産源  $i$  と濁度成分とのマハラノビスの距離である。

### 地質別の浮遊土砂生産量の推定

年間流出浮遊土砂量は、水試料採取時の流量とSS濃度を乗じて算出した浮遊土砂流出量を流量のべき乗式(L-Q式)で近似することにより、流量の毎正時データから連続的に評価した(2010~2012年の3年分)。地質別の浮遊土砂生産量について、SS濃度に流量を乗じた浮遊土砂量に、放射性同位体トレーサで推定した地質別の浮遊土砂の生産源寄与を乗じることで、地質別の浮遊土砂流出量とし、流量との関係をべき乗式で近似して地質別L-Q式を作成した。浮遊土砂生産量は、年間の浮遊土砂流出量及び地質別土砂流出量を流域面積あるいは各地質面積で除すことにより算出した。

### 流域スケールの浮遊土砂生産量とGIS解析

流域スケールの浮遊土砂生産量を推定するために、鶴川・沙流川流域を各17の支流域に分割し、地質の面積割合を調べた。前述の方法で推定した地質別の浮遊土砂生産量に地質面積割合を乗じて、流域ごとの浮遊土砂生産量とした。また、浮遊土砂生産・流出

の潜在的要因として、流域ごとに平均傾斜や地すべり地の分布密度をGIS(ArcGIS Ver. 10.0, Spatial analyst; Esri社)を用いて調べ、流域の浮遊土砂生産量との相関を調べた。なお地質は産総研20万分の1シームレス地質図、傾斜は国土地理院の10mメッシュ標高データ、地すべり地は防災科研の地すべり地分布図を用いた。

### 6.3.3. 結果と考察

流量と流出土砂量との関係を調べたところ、鶴川、沙流川ともにべき乗式(L-Q式)で近似できた(図-47)。地質別にL-Q式を構築したところ、鶴川の変成岩、深成岩、沙流川の変成岩でばらつきが大きかったが、近似

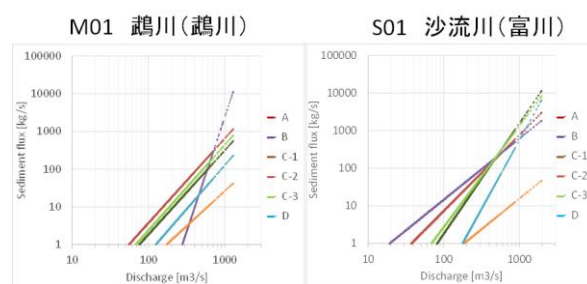


図-47 水系ごとの地質別L-Q式

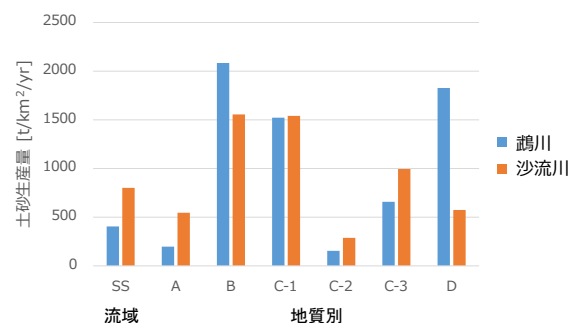


図-48 地質別浮遊土砂生産量

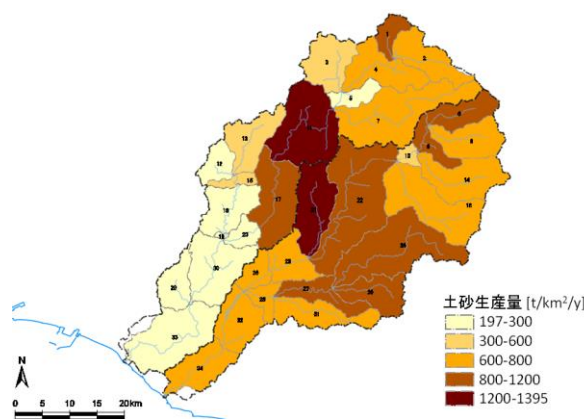


図-49 流域ごとの浮遊土砂生産量



## 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

可能であった。

構築したL-Q式を用いて2010年～2012年の流域の年平均土砂流出量及び土砂生産量を調べたところ、鶴川でそれぞれ50万t及び406 t/km<sup>2</sup>/年、沙流川でそれぞれ106万t及び801 t/km<sup>2</sup>/年であり、沙流川流域の方が鶴川に比べて約2倍大きかった。地質別土砂生産量は流域によって異なる傾向が認められ、鶴川では変成岩 (B)、付加体玄武岩ブロック (C-1)、付加体基質 (C-3)、深成岩 (D) が流域平均より大きく、沙流川は変成岩、付加体玄武岩ブロック、付加体基質が流域平均より大きかった (図-49)。

流域ごとに得られた地質別濁質生産量から支流流域ごとに土砂生産量を算出したところ、197～1,395 t/km<sup>2</sup>/年となり、鶴川・沙流川中流域に土砂生産量が大きい地域が集中していることがわかる (図-49)。支流流域ごとの浮遊土砂生産量と地すべり地の分布密度、表層崩壊の分布密度、平均傾斜、溪流 (1次河川) の勾配との関係を調べたところ (図-50)、鶴川及び沙流川の全支流流域では地すべり地の分布密度と有意な正の相関が認められ、とくに沙流川では地すべり地分布密度と線形の関係が認められた。1次河川の流路勾配は鶴川水系でのみ3%以上の勾配で増加傾向が認められた。一般に地すべりは融雪期に滑動しやすいことから、流路沿いに押し出された地すべり地が流水によって侵食をうけることにより、土砂が生産・流出するものと推察される (図-51)。また、鶴川水系の場合は、溪流の勾配が急なほど土砂が流出しやすいことを反映している可能性がある。

一方、崩壊跡地の分布密度や平均斜面勾配は浮遊土砂生産量との相関が認められなかった。沙流川中流域は2003年8月の豪雨時に表層崩壊が多発した地域であるが<sup>46)</sup>、表層崩壊の分布密度との相関が得られなかった。これは、2003年以降、崩壊裸地斜面が徐々に植生回復することによって、表面侵食による土砂流出が抑制されていることを示唆している (図-52)。

これらの結果は、推定された浮遊土砂生産量は、地質によって特徴付けられる土砂生産プロセスを反映していることを示しており、放射性同位体トレーサと水文観測に基づく地質別の浮遊土砂生産量推定法の有効性を示している。

### 6.4 浮遊土砂生産量に及ぼす降雨分布の影響

#### 6.4.1 目的

出水時の流出する浮遊土砂の生産量は、素因である地質 (岩相) のほかに、誘因として降雨が影響する<sup>27)</sup>。

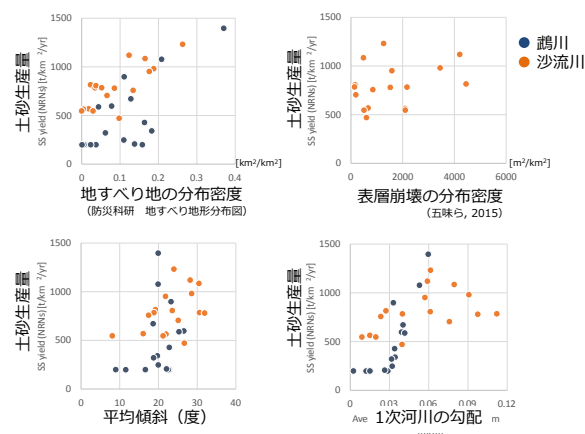


図-50 支流流域の浮遊土砂生産量と潜在的要因との関係



図-51 流路沿いの地すべりの押し出し (沙流川)



図-52 崩壊跡地の植生回復 (沙流川水系総主別川)

47) 流域が大きい場合、流域内の降雨分布は出水毎に異なる可能性があるため、放射性同位体トレーサで推定した浮遊土砂生産源の寄与は、当該出水時の降雨分布が影響している可能性がある。これまでに 2010～2012 年の年平均の浮遊土砂生産量は、流域内の地すべり地の分布密度との有意な相関が認められたが、出水時の浮遊土砂によって生産場が異なる可能性があり、かならずしも地質によって一意に決まるわけではない

47)。

そこで本章では、出水イベント毎の浮遊土砂生産量の違いが降雨分布の影響を受けているかを確認することを目的に、トレーサ手法によって評価された水系・地質地域ごとに、浮遊土砂生産量と地すべり地密度、降雨指標との関係を調べた。

#### 6.4.2. 方法

対象流域は鵜川及び沙流川とした。水系・地質地域ごとに、解析雨量（気象庁）を用いて降雨指標（期間総降水量・期間最大降水量）を集計した。地すべり地の分布は、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図

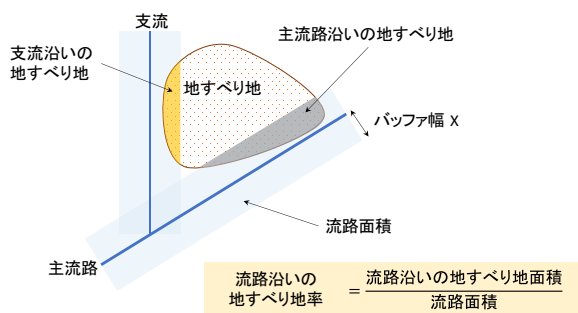


図-53 流路沿いの地すべり地の評価方法

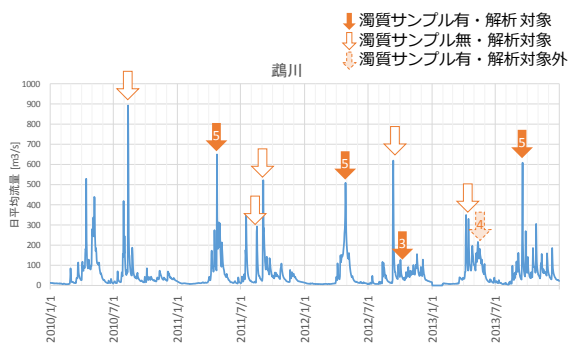


図-54 解析対象イベント

を用いた。地すべり地形の土砂生産に影響する部分のみを考慮するため、GIS上で流路網にある幅のバッファを発生させたものを河道とし、河道と地すべり地形の重なり合う面積を評価した（図-53）。

浮遊土砂生産量と地すべり地密度及び降雨指標の関係を相関分析によって調べた。解析対象のイベントは2010～2013年の降雨及び融雪出水の9イベントとした（図-54）。サンプル数は、2水系、6地質（岩石）区分、9イベントで108となる。

#### 6.4.3. 結果と考察

浮遊土砂流出量と面積、地すべり地面積（バッファ幅40m）、最大24時間雨量との相関調べた結果を表-5に示した。イベント毎の土砂流出量は、9イベント中7イベントで地すべり地面積と有意な正の相関を示しており、そのうちイベント2（融雪出水）のみが最大24時間雨量とも相関が認められた。一方、イベント6（降雨出水）では最大24時間雨量のみが、イベント7（降雨出水）は面積のみと正の相関が認められた。これらのことから、浮遊土砂流出量の規定要因として、降水

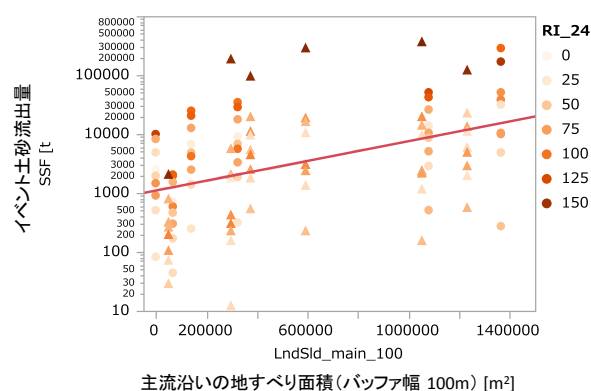


図-55 浮遊土砂流出量と地すべり地面積及び降雨指標との関係

表-5 浮遊土砂流出量と地すべり地面積及び降雨指標との相関

Event	Type	Area		LndSld_main_40		RI_24h	
		r	p	r	p	r	p
1	Rain	0.0779	0.8098	0.8102	0.0014	0.4147	0.1802
2	Snowmelt	0.1943	0.5451	0.8527	0.0004	0.8103	0.0014
3	Rain	0.5628	0.0568	0.5446	0.0671	-0.1539	0.633
4	Rain	0.3954	0.2033	0.7012	0.0111	0.4861	0.1091
5	Snowmelt	0.3215	0.3082	0.7367	0.0063	0.4541	0.1381
6	Rain	0.092	0.7762	0.4651	0.1276	0.7824	0.0026
7	Rain	0.6645	0.0184	0.3886	0.2118	0.5656	0.0553
8	Snowmelt	0.4166	0.1779	0.6446	0.0236	0.2697	0.3966
9	Rain	0.3292	0.2961	0.6358	0.0263	-0.3942	0.2049

量の空間分布よりも、地すべり地の空間分布が重要であることが明らかとなった。図-55 には地すべり地面積（バッファ幅 100 m の場合）とイベント浮遊土砂流出量の関係を示したが、最大 24 時間降水量が大きいほど浮遊土砂流出量が大きくなる傾向が認められる。これは、同一水系・地質地域においては、降水量が大きいイベント時に浮遊土砂量が多くなることを意味しており、従来の研究<sup>27),47)</sup>と同じ傾向が認められた。

## 6.5 SWAT モデルのデータベース構築と流量再現

### 6.5.1 目的

気候変動や土地利用が流域・沿岸域環境に及ぼす影響を評価する上で、水・土砂・栄養塩の流出予測は重要である。米国 USDA と Texas A&M 大学にて開発されてきた流域水文水質モデル SWAT (Soil and Water Assessment Tool)<sup>42)</sup> は、主に農業流域を対象に、水循環、土壌侵食、栄養塩等の動態を再現、予測する流域総合評価モデルであり、データの編集や計算を GIS で扱うことができる。米国のみならず、世界各国で SWAT の適用事例が増加しつつあるが<sup>48)</sup>、森林が国土の約 7 割を占める日本においては SWAT を適用した事例は必ずしも多くはない。国内での SWAT 適用事例として、農業流域を対象とした事例が報告されるようになってきたものの<sup>49~52)</sup>、森林流域に適用した事例はほとんど認められない。その理由の一つに、入力値のデータベースを独自に構築する必要があることが挙げられる。公開されている SWAT には、米国内の様々なデータベースが組み込まれており、米国内の流域であれば、利用者はすぐにでも使い始めることができる。近年、日本でも地形・気象・水文データのみならず土壌データの公開が進みつつあるが、農地土壌と森林土壌は異なる機関が調査・公開してきたため、流域全体をカバーするには、農地・森林の土壌データを統合する必要がある。これが可能となれば、森林が優占する流域においても SWAT を適用できる可能性がある。

本章の目的は、鶴川及び沙流川流域に適用可能な SWAT モデルを構築することである。そのために、様々な土壌調査資料から SWAT 用土壌データベースを構築し、鶴川・沙流川流域の日流量の再現を試みた。

### 6.5.2 方法

研究対象流域は、鶴川流域（鶴川水位観測所：流域面積 1,270 km<sup>2</sup>）及び沙流川流域（富川水位観測所：流域面積 1,350 km<sup>2</sup>）とした。分布型流出モデルは ArcSWAT (ArcGIS Ver. 10.0; SWAT2009 及び 2012) を用いた。SWAT 用のキャリブレーションソフトウェア

として SWAT-CUP2012 (Eawag, 2014) を用いた。

使用するデータセット (DEM、土地利用、土壌分布、気象、流量) は、すべ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。土壌図については、広域での GIS データが整備されている 20 万分の 1 土地分類基本調査 (土壌図) 「北海道」を用いることとした。一方、現地の土壌調査データは、国有林、道・民有林及び農地についてそれぞれ、林野土壌調査報告 (森林総合研究所)、森林土壌情報データベース (北海道総合研究機構林業試験場) 及び地力保全土壌図データ CD-ROM (一般財団法人日本土壌協会) があり、土地利用区分により異なる機関が公開しており、それらを利用した。

土壌データベースは、20 万分の 1 土地分類基本調査 (土壌図) 「北海道」の土壌区分 (属性 2 レベル) ごとに、国有林 (林野土壌調査報告)、道・民有林 (森林土壌情報データベース-北海道・民有林) 及び農地 (地力保全土壌図データ) の土壌区分を対応させた。土壌調査データの適用範囲は、GIS を用いて土壌区分ごとにティーセン法でポリゴンレイヤを作成し決定した。これらのデータベースを用いて、鶴川及び沙流川流域の末端における 2010~2012 年の日流量について、十分な再現精度 (Nash-Sutcliffe 係数<sup>53)</sup> (モデル予測値と観測値の適合性を評価する指標) で 0.8 程度) が得ら

表-6 土壌図と国有林、道・民有林及び農地土壌調査データの統合 (概要)

20万分の1土壌図		国有林 民有林	農地	
属性1	属性2			
グライ土	グライ土壌	G	○	
	粗粒グライ土壌	G_c	○	
ポドソル	ポドソル化土壌高山性岩屑土壌	P_LH	○	
灰色低地土	細粒灰色低地土壌	GL_f	○	
	粗粒灰色低地土壌	GL_c	○	
褐色森林土	暗色系褐色森林土-ポドソル化土壌	DB_P	○	
	褐色森林土-黒ボク土	B_A	○	
	褐色森林土-粗粒火山抛物体未熟土壌	B_RVc	○	
	褐色森林土 I	B_I	○	
	褐色森林土 II	B_II	○	
	褐色森林土 III	B_III	○	
褐色低地土	褐色森林土 IV	B_IV	○	
	褐色低地土壌	BL	○	
	粗粒褐色低地土壌	BL_c	○	
	岩石地	L_RL	○	
黒ボク土	黒ボク土壌-岩石地	LH_RL	○	
	黒ボク土壌a(黒ボク土)	A_a	○	
黒ボク土	黒ボク土壌b(ローム質黒ボク土)	A_b	○	
	累層黒ボク土壌	AT	○	
	未熟黒ボク土壌	AE	○	
	湿性黒ボク土壌a(黒ボク土)	AW_a	○	
	湿性累層黒ボク土壌	AT_w	○	
	湿性未熟黒ボク土壌	AE_w	○	
	淡色黒ボク土壌	AO	○	
	泥炭土	砂礫地など	SG	○
	未熟土	低位泥炭土壌	Lp	○
		残積性未熟土壌	RG	○
砂丘未熟土壌		RS	○	
粗粒火山抛物体未熟土壌		RV_c	○	
	湿性粗粒火山抛物体未熟土壌	RV_cw	○	

れるまで繰り返しモデルパラメータのキャリブレーションを実施した。

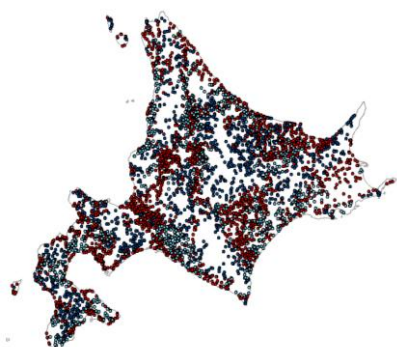
6.5.3. 結果と考察

土壤データベースの構築

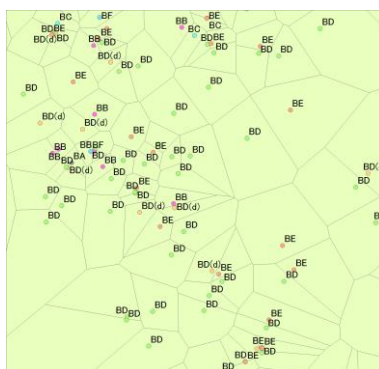
SWATモデルにおいて実際の土壤調査データを最大限活用するために、土壤データベースを統合すること

表-7 土壤図と林野土壤分類の対応例（褐色森林土Ⅱ）

20万分の1土壤図				国/民有林（林野土壤）		
属性1	属性2	混在区	属性2ID	林野土壤亜群	林野土壤型・亜型	土壤型ID
褐色森林土	褐色森林土Ⅱ	乾性褐色森林土壤	B_II	褐色森林土	乾性褐色森林土（細粒状構造型）	BA
					乾性褐色森林土（粒状・堅果状構造型）	BB
					弱乾性褐色森林土	BC
				赤色系褐色森林土	乾性赤色系褐色森林土（細粒状構造型）	rBA
					乾性赤色系褐色森林土（粒状・堅果状構造型）	rBB
					弱乾性赤色系褐色森林土	rBC
				黄色系褐色森林土	乾性黄色系褐色森林土（細粒状構造型）	yBA
					乾性黄色系褐色森林土（粒状・堅果状構造型）	yBB
					弱乾性黄色系褐色森林土	yBC
	褐色森林土壤	B_II	褐色森林土	適潤性褐色森林土	BD	
				適潤性褐色森林土（偏乾亜型）	BD(d)	
				適潤性赤色系褐色森林土	rBD	
				適潤性赤色系褐色森林土（偏乾亜型）	rBD(d)	
				適潤性黄色系褐色森林土	yBD	
				適潤性黄色系褐色森林土（偏乾亜型）	yBD(d)	
湿性褐色森林土壤	B_II	褐色森林土	弱湿性褐色森林土	BE		
			湿性褐色森林土	BF		



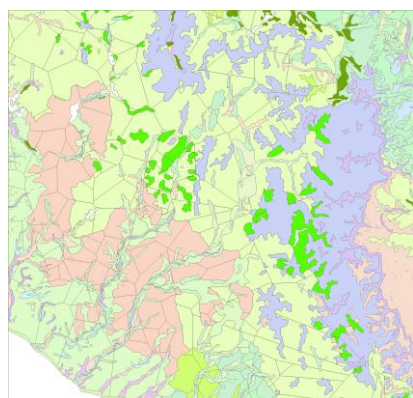
1. BⅡの調査地点を抽出



2. 調査地点でテーセン分割



3. 土壤図BⅡの範囲でクリップ



4. 他の分類群も同様に作成



5. 完成（調査地点で色分け）

図-56 土壤データベースの構築手順

とした。各土壌データベースを統合するために、土壌図の土壌区分（属性2レベル）ごとに、各現地土壌調査データの土壌区分を対応させた（表-6）。土壌調査データの適用範囲は、GISを用いて土壌区分ごとにティーセン法でポリゴンレイヤを作成し決定した。

例として、土壌図と林野土壌分類（国・道・民有林）との対応について、褐色森林土Ⅱの場合を表-7に示した。20万分の1土壌図において属性2の褐色森林土Ⅱ（B\_Ⅱ）には、乾性褐色森林土壌、褐色森林土壌、湿性褐色森林土壌が含まれ、それぞれに対応する林野土壌分類の林野土壌亜群、林野土壌型・亜型が関連づけられている。このような一覧表を、土壌図のすべての属性2について作成した。

土壌調査データの適用範囲の作成手順についても、同じく褐色森林土（B\_Ⅱ）の例を図-53に示した。まず、B\_Ⅱの調査地点を抽出し、ティーセン分割を行い、ポリゴンを発生させる（図-56(1),(2)）。ティーセン分割されたポリゴンを、土壌図のB\_Ⅱのポリゴンでクリップした範囲が、B\_Ⅱの各調査地点の適用範囲となる（図-56(3)）。この作業を、土壌図のその他の分類群（属性2）についても行い、統合する（図-56(4)）。その結果、鶴川及び沙流川流域のSWATモデル用に統合土壌データベースを構築することができた（図-56(5)）。現時点では、これ以上に詳細な土壌データベースを構築することが困難であり、もっとも現地状況を反映した土壌図と考えられる。

### 日流量の再現

ArcSWATにおいて、統合した土壌データベースを用いてHRU（水文応答単位）を作成し、鶴川流域（鶴川水位観測所）及び沙流川流域（富川水位観測所）の日流量（2010～2012）の再現を試みた。統合土壌データベースを用いることで、SWATモデルのキャリブレーションにおいて土壌に関する変量を除外できるため、変量数を減少し計算負荷を減じることができた。SWAT-CUPを用いたSWATモデルの感度分析とキャリブレーションを鶴川及び沙流川の2流域を同時に行った。2010年8月の降雨出水は解析対象期間で最大流量を示しているが、モデルによる推定値はピーク流量で鶴川、沙流川ともに過小評価となっている（図-57）。その他の出水ピークについても、日流量がおおむね200 m<sup>3</sup>/s以上ではモデル推定値が実測に対して過小評価、200 m<sup>3</sup>/s以下では同程度もしくは過大評価となっている場合が多い。しかし、流量変動はおおむね一致しており、決定係数R<sup>2</sup>、Nash-Sutcliffe係数ともに0.80前後の値が得られた（図-57）。Nash-Sutcliffe係数は、1.0に近いほどモデルの精度が高いとされ、0.7以上でモデルの再現性は高いとされることから、SWATモデルにより比較的高い再現性を得ることができたといえる。このことから、得られたモデルのパラメータセットは、おおむね鶴川及び沙流川流域の水文プロセスを反映したものであると考えられる。

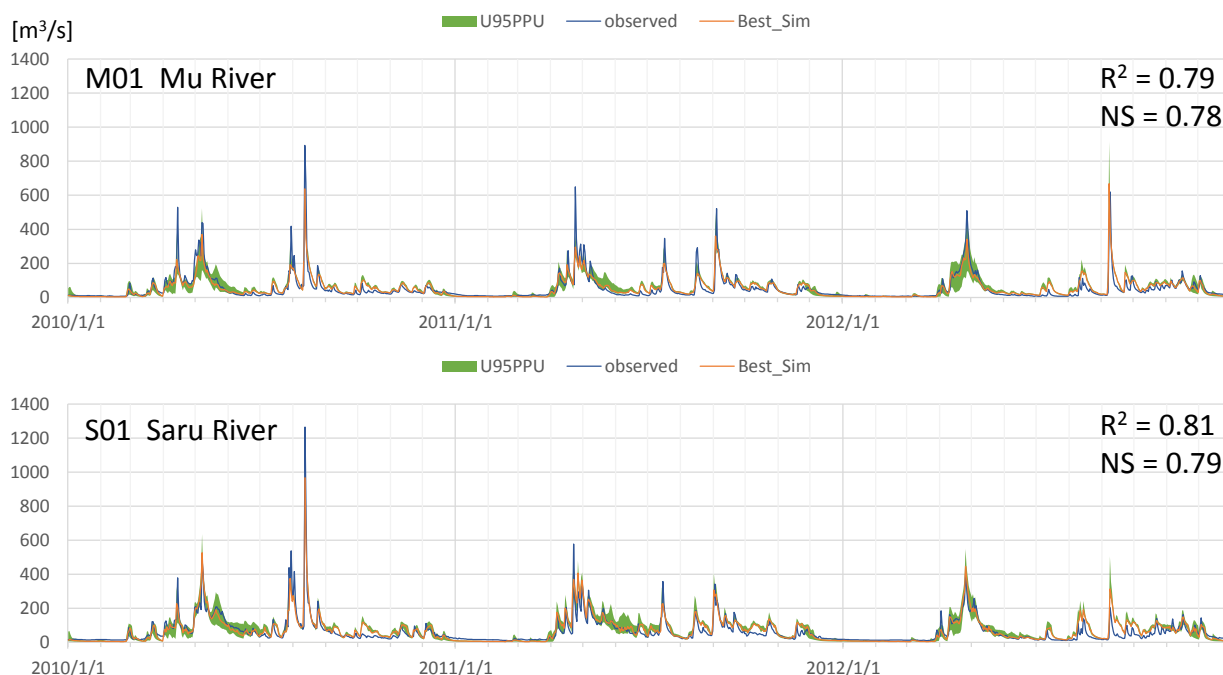


図-57 SWATモデルによる日流量の推定値と観測値の比較（2010～2012）

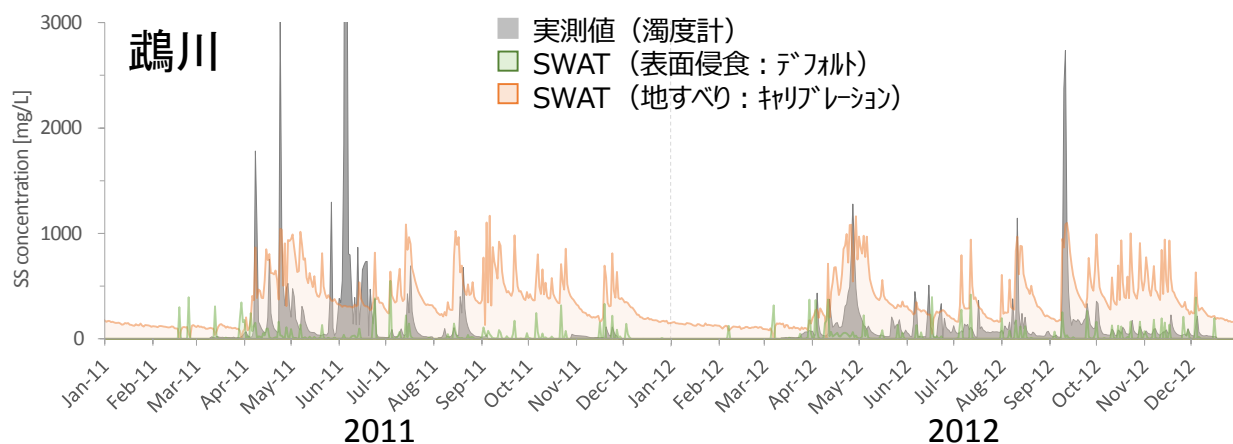


図-58 SWATモデルによる浮遊土砂濃度の再現 (鷓川)

## 6.6. SWATモデルによる浮遊土砂濃度の再現

### 6.6.1. 目的

SWATモデルでは、流域を複数の支流域に分割し、それぞれを斜面と河道に区分し、斜面ユニットはHydrological Response Unit (HRU)と呼ばれる地形、土壌、土地被覆等の要素で特徴付けられる単位で構成されている。水・土砂・物質の斜面から河道への輸送過程は、支流域毎にHRUの面積割合を考慮している。したがって、SWATモデルにより浮遊土砂濃度を再現するには、斜面からの河道への土砂生産・供給と、河道での土砂生産・輸送を考慮する必要がある。

地すべりによる土砂生産は、河道へ押し出された流水により侵食される、河岸侵食が想定される。その場合、斜面ユニットにおける表面侵食よりもむしろ、地すべり地が河道沿いに分布する区間で河岸侵食が卓越すると考えられる。本章では、流路沿いの地すべり地による河岸侵食を考慮することで、SWATモデルによる浮遊土砂濃度の再現を試みることにした。

### 6.6.2. 方法

#### 地すべり地の空間分布モデル

河岸侵食は河道に地すべり地が接する区間でのみ生じると仮定し、河道沿いの地すべり地面積率を、河道の被侵食係数(CH\_COV1)の初期値に反映させることで、地すべり地の分布密度の影響をSWATモデルに組み込んだ。

#### SWATモデルによる濁質流出の再現

鷓川及び沙流川流域の末端における2011～2012年の濁度計で観測したSS濃度(日平均)について、土砂生産・供給・輸送に関連するパラメータのキャリブレーションを行った。なお、初期値として、モデルに組み込まれている一般値(デフォルト値)でキャリブレーションした場合と、地すべり地の分布密度を河道の

被侵食係数に反映させた場合の2通りを検討した。SWATモデルにはArcGIS 10.0及びArcSWAT2012を、キャリブレーションにはSWAT-CUP 2012を用いた。

### 6.6.3. 結果と考察

#### SWATモデルによる浮遊土砂濃度の再現

これらの水文パラメータセットを用いて、2011年～2012年のSS濃度の再現を試みた(図-58)。デフォルト値は浮遊土砂濃度は全体的に全期間を通して実測値に比べて低く、変動パターンも全く合っていない。一方、地すべり地密度を考慮してキャリブレーションした結果は、浮遊土砂濃度が全体的に上昇し、変動パターンがより実測に近くなったものの、ピーク土砂濃度は依然として低いこと、平水時に土砂濃度が低下しないことなど、十分に浮遊土砂濃度を再現したとはいえない。モデルシミュレーション結果から推定した浮遊土砂生産量の空間分布をトレーサ手法と比較しても、まったく一致していないことがわかる(図-58)。

実測値とモデルシミュレーション結果との違いについては、さまざまな要因が考えられるが、すくなくとも、水文パラメータの妥当性、斜面から河道への土砂供給のタイミングや有効な地すべり地面積の与え方、河道での浮遊土砂輸送に関するモデルの改良などの検討が必要であると考えられる。

## 7. まとめと課題

本研究では、濁度計を用いた浮遊土砂や存在形態別栄養塩の観測手法、浮遊土砂の生産源推定手法及び生産量評価手法を構築し、鷓川及び沙流川流域での有効性が確認できた。その結果、従来、流域スケールの浮遊土砂生産・流出過程において考慮されてこなかった地すべり地が、定常的な浮遊土砂流出に寄与している

## 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

ことが明らかとなった。

一方、SWAT モデルをはじめ、一般的な分布型水・土砂流出モデルは、斜面上に発生した表面流による土砂輸送を考慮したものが多く、崩壊や地すべりといったマスマーブメントによる土砂生産・供給過程は組み込まれていない。そのため、本研究では従来の分布型水・土砂流出モデルによる浮遊土砂濃度の再現は困難であることが判明した。

本研究で明らかになったように、地すべりといった実際の土砂生産・供給プロセスを考慮した土砂流出モデルを構築できれば、流域から沿岸域へ流出する濁質の動態を生産源から追跡できるだけでなく、気候変動等による水・土砂・栄養塩流出の将来予測に大きく貢献できる可能性がある。モデルによる浮遊土砂流出の評価・予測のためには、地すべりによる土砂供給プロセスを考慮した、あらたな土砂生産モデルの開発が必要である。

また、流砂系における浮遊土砂の生産源に粒径依存性があることが明らかとなり、岩石の風化特性によって生産土砂の粒径特性が規定されることに起因することが、データによって裏付けられた。本研究では、濁質に焦点を当てたため、おもに浮遊土砂を対象としてきたが、流砂系の総合的な土砂管理においては、河川・海岸地形を構成する比較的粗粒な砂礫の動態把握も重要な課題である。今後は、さまざまな粒径範囲を対象とした土砂生産プロセスの解明と、それらに適用する土砂生産源推定手法や土砂生産量の評価手法の開発がのぞまれる。

### 参考文献

- 1) 山本晃一(編著): 総合土砂管理～流砂系の健全化に向けて～. 技報堂出版, 東京, p. 386, 2014年9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, pp. 571-575, 2004年
- 3) 大東淳一, 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
- 4) 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, pp. 449-454, 1999年2月
- 5) 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, pp. 646-650, 2000年

- 6) 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, pp. 1026-1030, 2000年
- 7) 北海道開発局: 鶴川水系河川整備計画. p. 1, 2009年2月
- 8) 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). 2007年3月
- 9) 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
- 10) 岡本敦, 内田太郎, 鈴木拓郎: 山地河道における流砂水文観測の手引き(案), 国土技術政策総合研究所資料, No. 686, p. 33, 2012年4月
- 11) たとえば Lewis J.: Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation, Water Resources Research, 32, pp. 2299-2310, 1996年
- 12) 山口甲, 三田村一弘, 渡辺浩司: 大河川における濁度観測値による土砂輸送量の計算. 水工学論文集, 44, pp. 401-406, 2000年
- 13) 石田哲也, 中山恵介, 大西健史, 夏井皓盛, 大森未音, アイヌルアブリズ, 丸谷靖幸, 岡田知也: 融雪期における高濁度水発生機構と細粒土砂輸送. 水工学論文集, 54, p. 433-438, 2010年
- 14) Abe T, Mizugaki S, Toyabe T, Maruyama M, Murakami Y, Ishiya T: 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), pp. 70-79, 2012年
- 15) 横山勝英: 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察. 土木学会論文集, 698 (II-58), pp. 93-98, 2002年
- 16) 横山勝英: 河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について-白川と筑後川の事例-. 応用生態工学, 8(1), pp. 61-72, 2005年
- 17) 横山勝英, 藤塚慎太郎, 中沢哲弘, 高島創太郎: 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, p. 553-558, 2008年
- 18) 横山洋, 喜澤一史, 長谷川和義: 鶴川洪水における水位変化と水理量の関係について. 土木学会第55回年次学術講演会, II-102, 2000年
- 19) 鳥谷部寿人, 山下彰司, 喜澤一史, 長谷川和義: 平成9年8月鶴川洪水における現地観測の結果とその解析. 土木学会北海道支部論文報告集, 54, pp. 145-150, 1998年
- 20) Mizugaki S, Abe T, Murakami Y, Maruyama M, Kubo M.: Fingerprinting Suspended Sediment Sources in the Nukabira River, Northern Japan. International Journal of Erosion Control

## 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

- Engineering, 5, pp. 60-69, 2012.
- 21) 山岸宏光：北海道の地すべり地形-分布図とその解説-. 北海道大学図書刊行会, 札幌, p. 392, 1993 年
  - 22) 村上泰啓, 中津川誠: 斜面崩壊・土砂生産・流木発生. 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査団報告書, 土木学会水工学委員会 (編), 土木学会, 東京, pp. 46-56, 2004 年
  - 23) 村上泰啓, 鈴木雄介, 池島剛: 航空レーザー測量結果を用いた沙流川流域の微地形判読と基盤岩の土砂生産特性について. 河川技術論文集, 14, pp. 127-132, 2008 年
  - 24) たとえば田中治雄, 石外宏: 貯水池の堆砂量と集水区域の地形及び地質との関係について (第 1 報). 土木学会誌, 36, pp. 173-177, 1951 年
  - 25) 岡野眞久, 高柳淳二, 藤井隆弘, 安藤明宏: ダム貯水池流入土砂量に基づく堆砂管理についての考察-土砂生産量強度マップの開発の事例-. ダム工学, 14, pp. 167-176, 2004 年
  - 26) Phillips JM, Russell MA, Walling DE.: Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. Hydrological Processes, 14, pp. 2589-2602, 2000 年
  - 27) Hicks DM, Hill J, Shankar U.: Variation of suspended sediment yields around New Zealand: the relative importance of rainfall and geology. IAHS Publication, 236, pp. 149-156, 1996 年
  - 28) 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, pp. 33-44, 1991 年
  - 29) 村上泰啓, 中津川誠, 高田賢一: 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, pp. 1105-1110, 2004 年
  - 30) 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.
  - 31) 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.
  - 32) 水垣滋, 吉川契太郎, 旭峰雄: 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)北海道開発技術研究発表会: KK-19, 2013 年
  - 33) 水垣滋, 吉川契太郎, 佐々木晋: 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)北海道開発技術研究発表会: KK-36, 2014 年
  - 34) 佐藤慎司・前田亮・磯部雅彦・関本恒浩・笠井雅広・鳥居謙一・山本幸次: 鹿島灘南部海岸の地形形成機構に関する現地調査, 土木学会論文集, 663, II-53, pp. 89-99, 2000 年
  - 35) 大橋正臣, 山本潤, 須藤賢哉, 水垣滋, 門谷茂, 田中仁: 鶴川沿岸の漁場環境に及ぼす河川出水の影響. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68(2), I\_1121-I\_1125, 2012 年
  - 36) 水垣滋, 大塚淳一, 丸山政浩, 矢部浩規, 浜本聡: 鶴川海岸の土砂生産源と粒径の季節変化. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 69(2), I\_671-I\_675, 2013 年
  - 37) 大塚淳一, 水垣滋, 山下俊彦: 複素主成分分析を用いた鶴川沿岸域の地形変動解析. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 71(2), I\_401-I\_406, 2015 年
  - 38) 大塚淳一, 水垣滋, 山下俊彦: 北海道鶴川河口域の短期的な地形変動機構について. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), I\_649-I\_654, 2015 年
  - 39) 大橋正臣, 山本潤, 須藤賢哉, 水垣滋, 門谷茂: 鶴川沿岸の基礎生産に対する融雪出水の効果について. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 69(2), I\_1191-I\_1195, 2013 年
  - 40) 大橋正臣, 河合浩, 三上信雄, 水垣滋, 大村智宏, 山本潤, 門谷茂: 鶴川沿岸の基礎生産に及ぼす光環境の影響に関する研究. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 70(2), I\_1032-I\_1037, 2014 年
  - 41) 大橋正臣, 三森繁昭, 三上信雄, 水垣滋, 山本潤, 門谷茂: 鶴川沿岸の現地観測によるブルーム初期から融雪出水期までの基礎生産の変化について. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), I\_1429-I\_1434, 2015 年
  - 42) Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR.: Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association, 34, pp. 73-89, 1998 年
  - 43) Williams GP: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. Journal of Hydrology, 111, pp. 89-106, 1989 年
  - 44) 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, pp. 132-142, 1996 年
  - 45) Ide J, Haga H, Chiwa M, Otsuki K: Effects of antecedent rain history on particulate phosphorus loss from a small forested watershed of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). Journal of Hydrology, 352, pp. 322-335, 2008 年
  - 46) 村上泰啓, 中津川誠: 斜面崩壊・土砂生産・流木発生, 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査団報告書 (土木学会水工学委員会: 編), 土木学会, pp. 46-56, 2004 年
  - 47) 清水収: 土砂収支解析による流域土砂輸送の時空間特性



## 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

- に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告, 55, pp. 123-215, 1998 年
- 48) Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG: The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50, pp. 1211-1250, 2007 年
- 49) Somura H, Arnold J, Hoffman D, Takeda I, Mori Y, Di Luzio M: Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve. Hydrological Processes, 23, pp. 1887-1900, 2009 年
- 50) Somura H, Takeda I, Arnold JG, Mori Y, Jeong J, Kannan N, Hoffman D: Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin, Japan. Journal of Hydrology, 450-451, pp. 25-35, 2012 年
- 51) 清水裕太, 小野寺真一, 齋藤光代: 郊外農業流域におけるリン流出量推定への SWAT モデルの適用可能性. 水文・水資源学会誌, 26, p. 153-173, 2013 年
- 52) 加藤亮, 渡邊裕純, Boulange J, 江口定夫, 坂口敦, 宗村広昭: SWAT モデルの水田を含む流域への適用の問題点と改善に向けて (小特集 私のお薦めのシミュレーションモデル). 水土の知:農業農村工学会誌, 81, pp. 983-987, 2013 年
- 53) Nash JE, Sutcliffe JV: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10, pp. 282-290, 1970 年

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

**Budgeted :** Grants for operating expenses

General account

**Research Period :** FY2011-2015

**Research Team :** Watershed Environmental  
Research Team, River  
Engineering Research  
Team

**Author :** HIRAI Yasuyuki

TANISE Atsushi

MIZUGAKI Shigeru

KUBO Mayumi

### **Abstract :**

To elucidate suspended sediment dynamics from mountain to coast in the Mukawa River and Saru River watersheds, we observed and evaluate the runoff, budget and yield of suspended sediment, and developed the monitoring method of suspended sediment concentration for high-turbidity water, sediment fingerprinting technique and particulate-dissolved nutrient concentration. Differences in lithological features such as weathering and landslide were found to contribute to the particle size and yield of suspended sediment from mountain to coast, leading to the dependency of source area on particle size of suspended sediment. SWAT model could not simulate the suspended sediment concentration well due to the lack of dominant erosion process such as landslide for the Mukawa and Saru River watersheds. These results indicate the landslide erosion process should be modelled for evaluate and/or simulate the suspended sediment dynamics from mountain to coast.

**Key words:** suspended sediment, suspended sediment yield, sediment fingerprinting, nutrient, SWAT