



Title	河川における浮遊土砂流出の機構に関する比較研究
Author(s)	知北, 和久; CHIKITA, Kazuhisa; 中道, 陽文 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 61, 1-9
Issue Date	1998-03-20
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.61.1">https://doi.org/10.14943/gbhu.61.1</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14255">https://hdl.handle.net/2115/14255</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	61_p1-9.pdf



## 河川における浮遊土砂流出の機構に関する比較研究

知北 和久・中道 陽文

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

ノーマン D. スミス

イリノイ大学シカゴ校地質学科

マルタ ペレス-アルルーチェア

ヴィーゴ大学理学部地球科学科

(1997年12月16日受理)

## A Comparative Study on Suspended Sediment Discharge of Rivers

Kazuhisa CHIKITA and Yobun NAKAMICHI

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Norman D. SMITH

Department of Geology, the University of Illinois at Chicago

Marta PEREZ-ARLUCEA

Departamento de Recursos Naturais e Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidade de Vigo

(Received December 16, 1997)

The mechanism on suspended sediment discharge in rivers generated from snowmelt or glacier-melt is examined by comparing common features of hydrology and suspended sediment. The sediment discharge from snowmelt and glacier-melt was observed in 1993 in Ikushunbetsu River (43°14'N, 142°00'E), Hokkaido and Peyto Creek (51°43.5'N, 116°31'W), Alberta, Canada, respectively. In Ikushunbetsu River, water discharge ( $Q$ ) and suspended sediment concentration (SSC) of water temporarily varied in phase, while in Peyto Creek, they were in phase, or  $Q$  preceded SSC by 2 hrs or less. The suspended sediment commonly consists of more than 90 wt.% silt and clay (grain diameter,  $d < 62.5 \mu\text{m}$ ), thus being transported as washload. Significant correlation ( $r=0.968$ ) between  $Q$  and SSC in Ikushunbetsu River means that the sediment yielded on the lateral slope is eroded by the shear force of river flow, and that the lateral shear stress ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) is proportional to the eroded sediment mass ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ). Regression lines between  $Q$  and SSC have the same slope between the two rivers; the suspended sediment in Peyto Creek, mostly supplied through the subglacial channel, probably originates in the ground moraine of the Peyto Glacier, which could be proportionally eroded by the flow shear of glacial meltwater.

### I. はじめに

我が国の積雪流域における河川の融雪土砂流出は、流域における堆積物生産過程の複雑さや浸食領域と融解水挙動の相互関連の多様性によって、今日までその機構が十分明らかにされたとはいえない

(知北, 1994). 他方, 氷河被覆のある山岳流域では, 氷食作用に基づく moraine 生成と共に, 夏季には氷河融解から土砂流出が発生する. このとき, 砂礫など粗粒物質は氷河末端下流に堆積し outwash plain を形成するが, 細粒な浮遊土砂 (細砂~シルト・粘土) の多くは washload としてさらに下流へ輸送される. これらの土砂の起源は, 主に氷河流動に伴い生産される グランド・モレーン (ground moraine) と考えられる (Sugden and John, 1977). しかし, 氷底でのその分布状態や氷河内部の融解水の挙動について不明の点が多く, その相互関連はほとんど明らかにされていない.

この研究では河川の浮遊土砂流出について, 北海道の融雪期におけるその特性と比較することによって, カナダ・アルバータ州の氷河流域における夏季の融氷土砂流出の素過程を明らかにすることを目的としている. 融氷土砂流出の研究としては, Chikita (1993) が既に報告しているが, その後知北 (1995) によって幾春別川の土砂流出機構が定量的に明らかにされた. ここでは, ペイトー川で得た新たな観測データをもとに両川の土砂流出特性をより詳細に比較し, その共通する素過程について議論する.

## II. 流域および観測方法

対象流域は北海道・幾春川流域 (北緯  $43^{\circ}14'$ , 東経  $142^{\circ}00'$ ) とカナダ・ペイトー川流域 (北緯  $51^{\circ}43'5''$ , 西経  $116^{\circ}31'$ ) であり, 河川土砂流出の観測は, それぞれ 1993 年 4 月の融雪期と 1993 年 7~8 月の氷河融解期に実施した (Fig. 1 と Fig. 2). なお, 幾春別川 B 点での流域面積は  $37.5 \text{ km}^2$ , ペイトー川 A 点での流域面積は  $45.0 \text{ km}^2$  で, ペイトー川流域の 29% は氷河域 (ペイトー氷河とワプタ氷原) である. 幾春別川 A 点の下流には桂沢ダム湖, ペイトー川 B 点の下流にはペイトー湖が存在する. 地形的特徴として, 幾春別川の蛇行河道沿いには基盤の急峻な gorge 斜面 (傾斜角  $36\sim 54^{\circ}$ ) が発達している. なお, 両川の流域地質は主に海成の堆積岩で, 幾春別川が中生界白亜系の砂岩・泥岩・凝灰岩・頁岩,

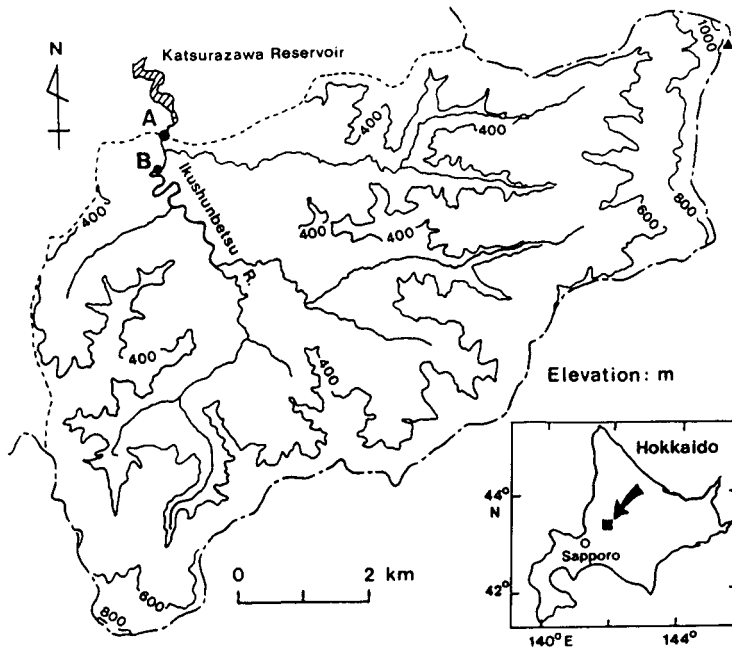


Fig. 1. Locations of Ikushunbetsu River, Hokkaido and observation sites.

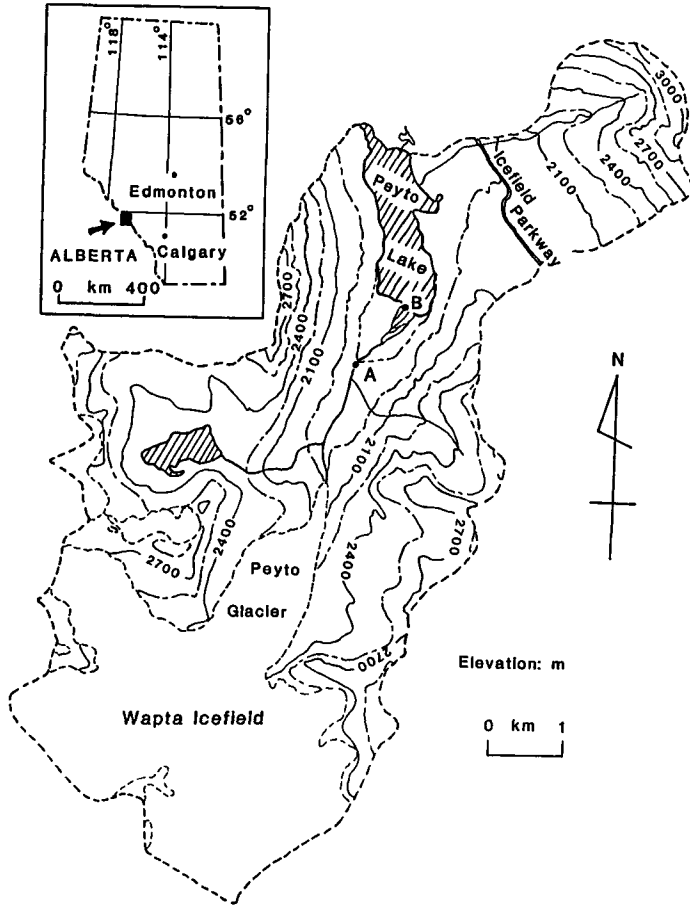


Fig. 2. Locations of Peyto Creek, Alberta, Canada and observation sites

ペイトー川は先カンブリア界及び古生界カンブリア系のドロマイト・泥岩・石灰岩である。

幾春別川ではA点で気象要素（気温・雨量），B点で河川の水位・浮遊物質濃度(SSC)・水温の連続観測をおこなった。またB点上流で，河道側方のgorge斜面上端から滝として流入する幾つかの地表流のうち，流量最大のものについてその水温を連続測定した。ペイトー川では，outwash plain上流端のA点で河川の水位・SSC，outwash plain下流端（ペイトー湖の三角州フロント）付近のB点で河川水温，B点近くで気象要素（気温・雨量）の連続観測を実施した。なお，水位測定は幾春別川では圧力式水位計（精度， $\pm 0.9$  cm），ペイトー川ではフロート式スティーブンス記録計（精度， $\pm 1$  cm）を用いた。

河川流量の時系列は，水位—流量曲線（幾春別川，相関係数 $r=0.993$ ；ペイトー川， $r=0.988$ ）を作成し水位記録より求めた。また河川水のSSCは，自動採水器（ISCOサンプラー）によって2～6時間ごとに中層水を採取し， $0.45\sim 1.0\ \mu\text{m}$ メッシュのフィルターで吸引ろ過後乾燥秤量して求めた。このとき，中層1点採水によるSSC値の空間的偏りを考慮して，随時depth integrated samplerやコア・チューブによってほぼ全層（水面～90%水深）の同時採水を行い，このSSCと1点採水のSSCとの相関（ $r=0.90\sim 0.92$ ）から，ほぼ全層SSCの時系列データを最終的に求めた。

### III. 結果と討論

#### 1. 土砂流出の時間変化

Fig. 3に、幾春別川について1993年4月16~29日間に得たA点での雨量・気温、B点での河川の流量・水温・SSC、およびB点上流にみられた地表流(waterfall)の水温の観測結果を示す。図から明らかのように流量とSSCはほぼ同位相で日変動し、毎日20時(図中の短い縦線)頃にそれらの極大が現れる。但し、4月18日、4月25日および4月28日のように、20時から時間的に離れて降雨がある場合、融雪流出の上に応答の早い降雨流出が重なるためこの規則性は乱される。しかし、この場合もSSCは流量に対し一貫した変動を示す。日射による融雪は正午頃極大を示すと考えられ、この流量ピークの約8時間の遅れは、積雪表面融解水の積雪・土壌層の内部浸透による通過時間と河道流入後の流下時間によって説明される(例えば、Nomura, 1994)。このSSCと流量との一貫した対応関係は、融雪水の流動がもつせん断力と正味の土砂浸食量との間に何らかの力学関係が成り立つことを示唆する(知北, 1995; Chikita, 1996)。なお、4月23日20時頃、この融雪期間の最大値(流量,  $22.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ; SSC,  $2170 \text{ mg/l}$ )を記録した。これは同日午後からの降雨流出が重なったものである。

河川水温は一般に日射に支配されると考えられる(例えば、佐渡, 1983)が、地表流水温の極大はB点水温より早く正午頃現れる。これは、地表流は融雪からの流出応答がより早いことを意味する。Fig. 4はペイトー川における1993年7月24日~8月6日間のA点での流量・SSC、B点での水温、およびB点付近での気温の時系列を示す。なお、雨量は雨量計の不調で測定できず、このため約40 km南南東にあるルーズ湖での雨量記録を参考にした。

ペイトー川の場合、流量とSSCは気温変化に対応し共に明瞭な日変動を示すが、流量の極大時間は毎日15時~18時で、SSCの極大と同時かまたはそれより1~2時間先行して現れるのが特徴である。8

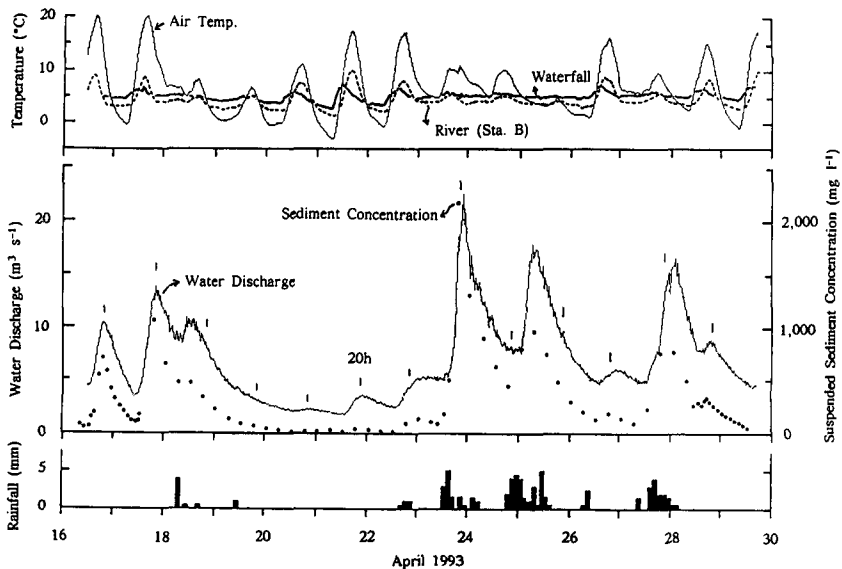


Fig. 3. Temporal variations of water discharge, water temperature and suspended sediment concentration at site B, air temperature and rainfall at site A and water temperature of overland flow (waterfall) at upstream of site B, Ikushunbetsu River for April 16–29, 1993 (Chikita, 1995). Vertical short lines above the water discharge indicate the time of 20:00.

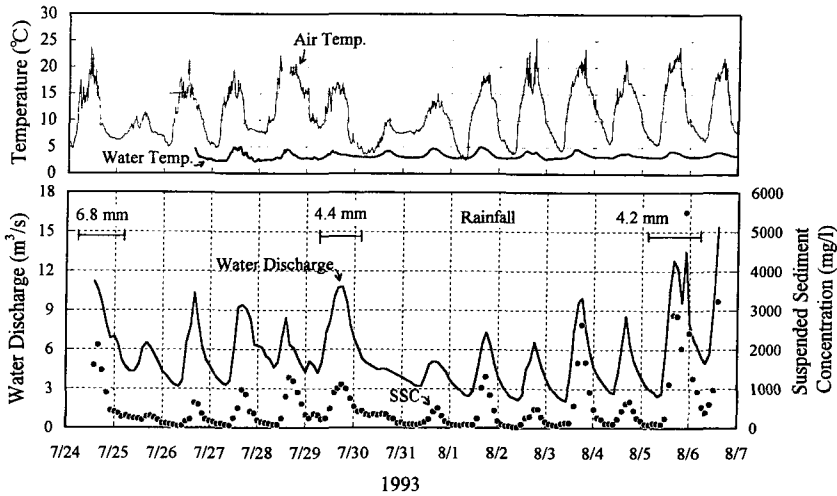


Fig. 4. Temporal variations of water discharge and suspended sediment concentration (SSC) at site A, water temperature at site B, and air temperature near site B, Peyto Creek for July 24-August 6, 1993. The rainfall values come from the records at the Weather Station of Lake Louise, Alberta Canada.

月5日21時頃には、測定期間中最大のSSC 5500 mg/l (流量, 14.4 m<sup>3</sup>/s)を記録したが、これは同日の融氷流出に降雨(4.2 mm)による流出が重なったことによる。また、幾春別川に比べある流量に対するSSCの値とその変動は大きく、これは浮遊物質の供給量(sediment availability)は十分だが浸食される物質自身が不安定な状態にあることを意味する。

## 2. 土砂流出の素過程

Fig. 5は、知北が過去において両川の浮遊物質につき粒度分析した結果(積算粒度分布)を確率紙上にプロットしたものである(Chikita et al., 1993)。両川の浮遊物質は、共に90 wt.%以上がシルト・粘土(粒径,  $d < 62.5 \mu\text{m}$ または $\phi > 4.0$ ;但し,  $\phi = -\log_2(d \times 10^{-3})$ )から成り、SSCがその日の極大に近いと粒度分布(白三角と白丸)が直線状(それぞれ実線と破線)で対数正規分布に近い粒度組成をもつ。両川の流れが持つ底面せん断力を考慮すると、これらの粒径に対しては常に“拡張されたシールズ曲線”を越えた領域(浸食または浮流領域)にプロットされる(Chikita, 1990)。このことから、ここでは物質の供給量が十分であれば、流量に依存した底面せん断力の大きさに応じ、浸食量が増えることが考えられる。つまり、Fig. 3とFig. 4での流量とSSCの対応関係は、浸食される土砂の供給量と安定条件(土砂の安息角、粒径・鉱物組成、土壌水分量)を考える際の判断材料となりうる。

Fig. 6は、Fig. 3とFig. 4に示す流量とSSCの関係について図にまとめたものである。予想された通り、ペイトー川の流量に対するSSCのバラツキは大きく相関係数は低い。しかし、両川で帰帰直線の傾きはほぼ同じで、浸食当力の物理条件が両川で共通していることを示唆する。知北(1995)は、幾春別川に対し浮遊物質の供給源が河道沿いのgorge斜面上にある崩落した風化土壌であると特定し、この浸食条件として河川流の底面せん断応力 $\tau_0$ と土砂浸食量 $M$ がほぼ比例関係にあることを導いた。ペイトー川の場合、浮遊物質の供給源は、主にペイトー氷河の氷底にあるground moraineおよび氷河末端下流に形成された小規模なoutwash plainと考えられる。ペイトー川は、A点に達するまでこのoutwash plain上を流下する。このため、そのせん断応力を考慮すると河道を構成するoutwash plain堆積物を一部取り込むことは十分考えられる。しかし、現地調査では、ペイトー氷河の氷底流路から

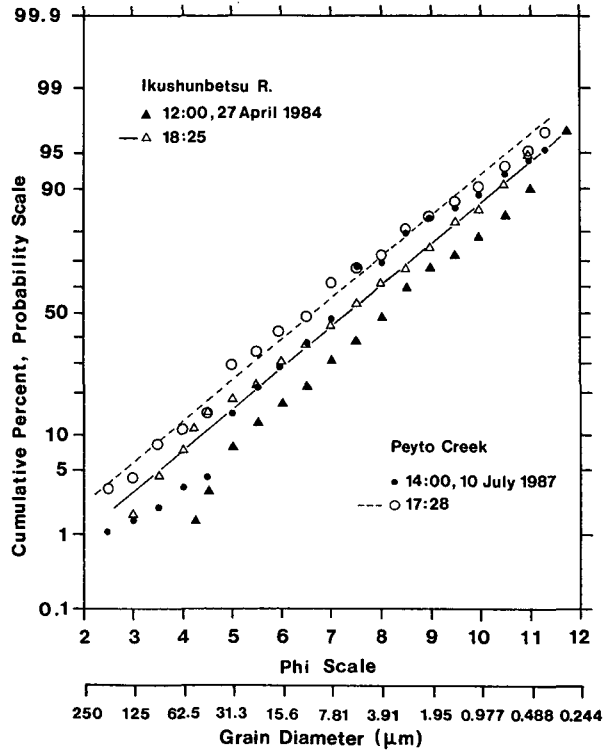


Fig. 5. Grain size distributions of suspended sediment in Ikushunbetsu River and Peyto Creek. Analytical results are plotted on a lognormal probability paper (modified after Chikita et al., 1993).

の融解水は、A点の約80%を説明できるSSC値を示した。このことから、Fig. 4の変動は基本的には、氷底流路に至る融解水がそのせん断応力に応じて周囲のground moraineを浸食し、幾春別川と同様に $\tau_b \propto M$ が成り立つことが考えられる。また回帰直線から、ペイトー川がある流量に対し幾春別川より約2倍SSCが大きいのがわかる。これは、氷食によるground moraineの生産が十分で、これが流出への高いsediment availabilityを供していること、またその鉱物組成はほとんど粘土鉱物を含まず (Table 1), 同じ湿潤状態での粘着抵抗が相対的に低いことが原因と考える。なお、ペイトー川での粘土鉱物はアメサイトのみで、幾春別川では典型的な粘土鉱物であるカオリナイト・イライト・緑泥石 (Chlorite)のほか、この流域特有の混合層鉱物 (Mixed-Layer) が認められる。

なお、融氷期全体の流出土砂量を観測点下流にあるペイトー湖でのシルト・粘土粒子の堆積速度 (三角州の堆積は除く) から見積もると、1日間単位流域面積当たりで14.3 ton/km<sup>2</sup>・dと求められた (Chikita, 1992)。これは、Chikita (1996) が1992年に行った幾春別川での融雪期全体の土砂流出観測で得た2.6 ton/km<sup>2</sup>・dの5.5倍であり、ペイトー川流域での氷食・融解作用が極めて高い土砂生産・流出をもたらすことを意味する。

Fig. 7は、幾春別川とペイトー川について流量-SSC図上での時間変化の軌跡 (ヒステリシス) を示す。ペイトー川については、流量とSSCの極大が一致した変動についてプロットしている。幾春別川では、日射融雪が盛んな無降雨時 (4月16日14:00-4/17 11:00) と降雨時 (4月23日10:10-4月24日19:00) の両者でほぼ一曲線上の軌跡を示し、流量とSSCの増減について一対一の対応関係が

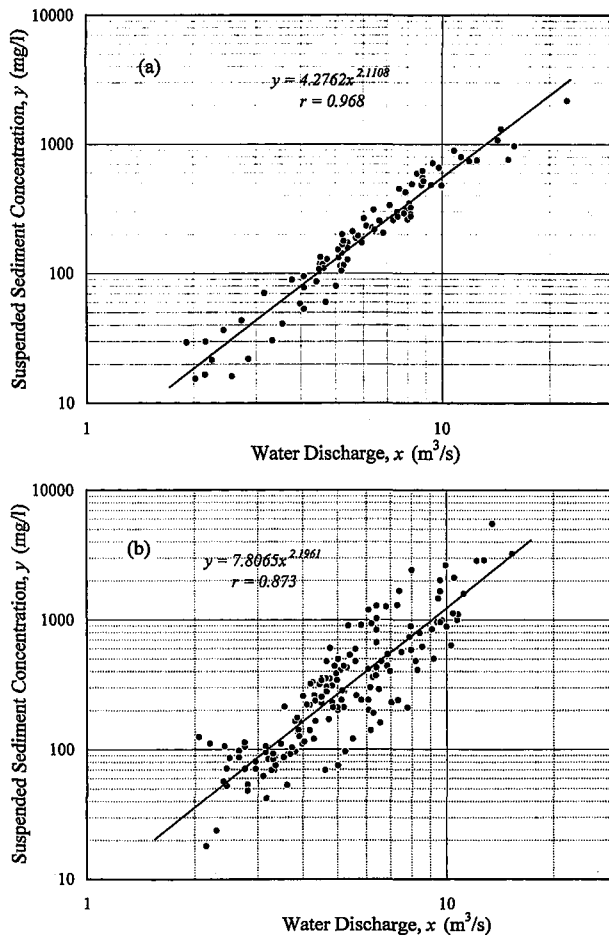


Fig. 6. Relations between water discharge and suspended sediment concentration for (a) Iku-shunbetsu River and (b) Peyto Creek.

あることがわかる (Fig. 3参照)。つまり知北(1995)による  $\tau_b \propto M$  関係がほぼ常に成り立つことが考えられる。しかし、ペイトー川では、流量とSSCの増減ごとに異なった反時計周りのヒステリシスを描き、特に降雨がある場合 (7月29日6:00-7月30日10:00) はヒステリシス全体の傾きも小さくなる (Fig. 4参照)。反時計周りのヒステリシスは、基本的に流量の増加・減少傾向がSSCのそれより時間的に早いことを意味するが、ヒステリシスの傾きが小さくなることは、両者の対応関係が降雨時には成り立たなくなることを示す。これは、流量増大によってoutwash plainでの浸食が一部河道崩壊の形で非線形に増大するが、小さな降雨は却ってその堆積物の吸着抵抗を高め、崩壊の程度を抑えることが原因と考える。しかし、Fig. 7bの7月29日6:00-7月30日10:00を除くと、Fig. 7の流量 < 10 m<sup>3</sup>/sの範囲で両川のヒステリシス全体の傾きはほぼ一致している。これは、ペイトー川では、氷底流路からの土砂流出に対し融解水流量とground moraineの間で  $\tau_b \propto M$  関係が成り立つことが考えられる。山岳氷河についてこれまで推定された氷底流路の分布から、いくつかの流路それぞれに存するground moraineについて  $\tau_b \propto M$  関係が成り立つと考える (Sugden and John, 1977)。

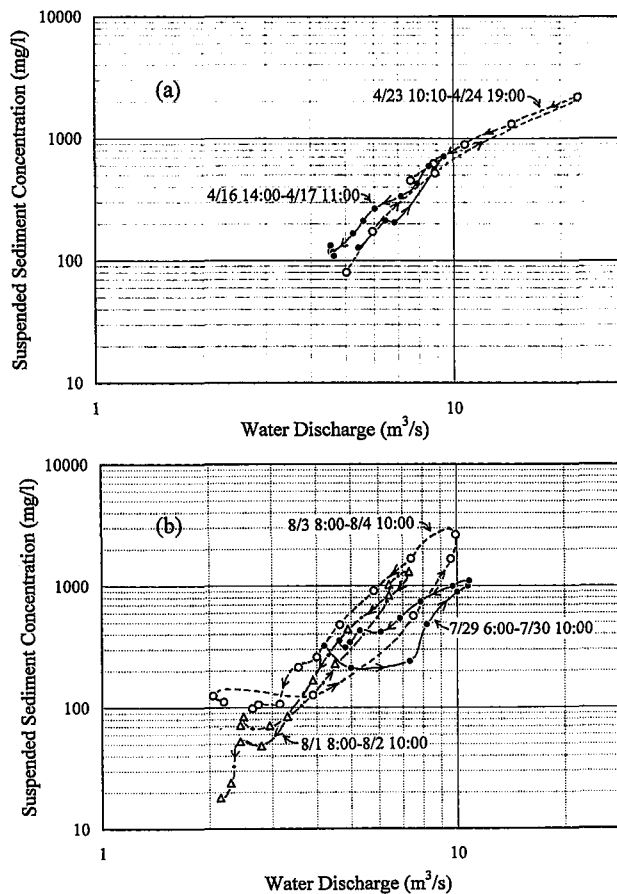


**Table 1.** Main mineralogy of  $d < 250 \mu\text{m}$  and  $d < 2 \mu\text{m}$  grains contained in suspended sediment of Ikushunbetsu River, Hokkaido and Peyto Creek, Alberta, Canada (Chikita et al., 1993). The analysis was conducted by the X-ray diffraction method. The peak intensity shows the "relative" peak height on an X-ray diffraction curve among the identified minerals.

Ikushunbetsu River						
Minerals	Plagioclase	Quartz	Kaolinite	Illite	Mixed-Layer	Chlorite
Lattice Spacing, Å	3.2	3.3	7.1	10.0	10.8	14.3
Peak Intensity :						
<250 $\mu\text{m}$	10	10	1	1	1	1
<2 $\mu\text{m}$	1	10	5	10	10	2

Peyto Creek						
Minerals	Dolomite	Calcite	Quartz	Aragonite	Amesite	Muscovite
Lattice Spacing, Å	2.9	3.0	3.3	3.4	7.1	9.9
Peak Intensity :						
<250 $\mu\text{m}$	10	1	1	—	—	—
<2 $\mu\text{m}$	10	3	2	10	2	6



**Fig. 7.** Hystereses between water discharge and suspended sediment concentration from Figs. 3 and 4. (a) Ikushunbetsu River ; (b) Peyto Creek.

## 結 論

積雪流域と氷河流域からの河川（それぞれ北海道・幾春別川とカナダ・ペイトー川）の浮遊土砂流出について、浮遊物質はともに 90 wt.%以上のシルト・粘土から成り、河川流量と浮遊物質濃度(SSC)が明瞭な日変動を示した。幾春別川の土砂流出の機構としては、河岸斜面に堆積した風化土壌が河川流の底面せん断応力 $\tau_b$ に比例して浸食され流出することが示される。ペイトー川では上述の共通した特性に加え、流量-SSC曲線の平均的傾きが幾春別川とほぼ同じで、このことから共通の営力条件が考えられる。つまり、ペイトー川の土砂流出はペイトー氷河の氷底流路からの流出によって支配されるが、氷河融解水が中央の氷底流路に達する幾つかの氷底流路について、その流量に対応する $\tau_b$ と流路内にある細粒なground moraineの浸食量が比例関係にあると考える。ペイトー川は、幾春別川に比べある流量に対し平均約2倍のSSCを持つ(Fig. 6の回帰直線)。これは、幾春別川の土砂生産(風化土壌層の崩落; 知北, 1995)に比べ氷食作用による土砂生産が大きく高いsediment availabilityをもつこと、また粘土鉱物をほとんど含まないため湿潤なground moraineのせん断強度が相対的に弱いことが原因と考えられる。

謝辞 観測に際し、カナダ、ブリティッシュ・コロンビア大学の米光昇博士はじめ院生諸氏、及び北海道大学理学部地球物理学科陸水学研究室の学生諸氏に一方ならぬご協力を頂いた。厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- Chikita, K., 1990. Sedimentation by River-Induced Turbidity Currents : Field Measurements and Interpretation. *Sedimentology*, 37, 891-905.
- Chikita, K., 1992. The Role of Sediment-Laden Underflows in Lake Sedimentation : Glacier-Fed Peyto Lake, Canada. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido University, Ser. VII(Geophysics)*, 9, 211-224.
- Chikita, K., 1993. A Comparative Study on Suspended Sediment Discharge Initiated by Snow-or Glacier-Melting. *Proc. 4th Assembly of Intern. Assoc. Hydrol. Sci., 1993, Yokohama, IAHS Publication*, No. 217, 257-267.
- 知北和久, 1994. 積雪流域における土砂流出機構. *水文・水資源学会誌*, 7, 460-464.
- 知北和久, 1995. 融雪期における土砂流出機構: 北海道・幾春別川. *水文・水資源学会誌*, 8, 38-48.
- Chikita, K., 1996. Suspended Sediment Discharge from Snowmelt : Ikushunbetsu River, Hokkaido, Japan. *Jour. Hydrology*, 186, 295-313.
- Chikita, K., J. Ishii and H. Tachibana, 1993. The Mechanism of Suspended-Sediment Discharge in Rivers Generated from the Spring Thaw or the Summer Glacier-Melting. 石井次郎教授追悼論文集, p. 79-88.
- Nomura, M., 1994. Studies on the Delay Mechanism of Runoff to Snowmelt. *Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Ser. A*, No. 39, 1-49.
- 佐渡公明, 1983. 河川水の熱収支と水温解析に関する研究. 北海道大学学位論文, 102 pp.
- Sugden, D.E. and B.S. John, 1977. *Glaciers and Landscape*. Edwards Arnold, London, 376pp.