



Title	アラスカ・ユーコン河の土砂流出に関する基礎的研究
Author(s)	知北, 和久; CHIKITA, Kazuhisa; 熊井, 隆二 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 23-35
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14301
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p23-35.pdf



アラスカ・ユーコン河の土砂流出に関する基礎的研究

知北 和久・熊井 隆二・平山 賢太

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

リチャード ケムニッツ

米国地質調査所水資源部

(2001年12月18日受理)

A Basic Study on Sediment Discharge in the Yukon River, Alaska

Kazuhisa CHIKITA, Ryuji KUMAI and Kenta HIRAYAMA

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

Richard KEMNITZ

Division of Water Resources, U.S. Geological Survey, Fairbanks, U. S. A.

(Received December 18, 2001)

The characteristic of sediment discharge in the Yukon River, Alaska was investigated by monitoring water discharge and water turbidity for a period of June to September 1999. Two sites for monitoring were selected at site PLS (Pilot Station) near the estuary to Bering Sea and at site YKB (Stevens Village) near a midpoint along the Yukon River channel. In order to ascertain the representativeness of turbidity monitored at a point, cross-sectional fluctuations of water turbidity were examined simultaneously. The turbidity measured at 1 h or 2 hr intervals was converted into suspended sediment concentration (SSC; mg/l), using the relationship between the two properties. As a result, at a given time, the recorded SSC after conversion represented cross-sectional SSC at errors of less than ± 25 mg/l, though the former SSC seasonally varied. The suspended sediment discharge, equal to the product of water discharge and SSC, was thus numerically obtained every 1 hr or 2 hr, using the recorded SSC and the USGS data of water discharge. It is noted that a seasonal variation of SSC in the Yukon River is different from that of water discharge with the sediment discharge controlled by SSC rather than water discharge; a peak sediment discharge occurred in mid-August (site YKB) or in late August (site PLS) by glacier-melt and rainfall sediment runoffs, while a peak water discharge was produced in late June (site YKB) or early July (site PLS) by snowmelt.

I. はじめに

河川における土砂流出機構を論ずる際の重要な点は、浸食運搬される土砂の主要な供給源（河床・河岸・流域斜面など）を特定して各給源の寄与率を定量的に評価すること（例えば、Russell et al., 2001）によって、流域からの雨水・融解水の流出過程とそれによる土砂の浸食・運搬過程をさぐることである（例えば、Chikita, 1996）。小流域からの流出機構に関する研究は今日まで数多くあるが（例えば、早瀬・大場, 1993；三島ほか, 1993；馬場ほか, 2001）、降雨・融雪に伴う土砂生産とその流出機構を系統的に扱った研究は少ない（例えば、芦田・沢田, 1989；Kurashige, 1993）。

他方、大流域からの河川流出については、例えば Nijssen et al. (1997) は、気象データから流域の蒸発散量を組み入れ浸透に関して地層の二層構造を仮定したグリッド・モデルによって、流量の長期変動を再現している。しかし、今回対象としているユーコン河流域など極圏にある河川流出については、さらに永久凍土の分布とその融解量・蒸発量を評価する必要がある。また、大流域からの土砂流出については、例えば Picouet et al. (2001) は、アフリカ・ニジェール河において、浮遊土砂の供給源を概念的に考慮した経験的モデルによって、流量データのみから河川水の浮遊物質濃度の長期変動を再現することを試みている。このように河川の土砂流出については、流域スケールの大小に係わらず系統的な議論が十分がなされていないのが現状である。

ここで研究対象としたユーコン河流域では、近年の土地開発や火災による森林消失、水質悪化やサケ回帰数の減少、およびベーリング海への栄養塩負荷量と基礎生産といった土砂流出に係わる重要な問題が数多く存在する。しかし、これまで、土砂流出に関する長期データは得られていないのが現状である。そこで筆者らは、ユーコン河の主要な流送土砂である浮遊物質（最大粒径 200 μm 程度）の流出量を長期的にとらえ、その供給源をさぐる目的で、1998年6月から野外観測を開始した。ここでは、1999年の観測結果を中心に議論を進める。

II. 流域の概要と観測方法

Fig. 1 に、ユーコン河流域（面積： $8.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ ）と今回の観測点の位置を示す。ユーコン河流域は、下流域と中流域の低地帯、北方の Brooks 山脈、東方の Selwyn 山地と Ogilvie 山地、南方の Alaska 山脈・Wrangell 山地・St. Elias 山地からなる。ユーコン河の支流のうちタナナ川とホワイト川は、源頭部にある氷河の融解により、夏季に土砂流出が盛んである。Fig. 1 には、この2つの支流の位置も示している。

1999年6月初旬～8月下旬に、ベーリング海への河口付近 PLS 点と中流部 YKB 点で河川土砂流出に関するモニタリングを行った。なお、6月初旬は春季の融雪出水期、8月下旬は秋季の降雨出水期にあたる。観測項目は、河川水の濁度・水温と流量で、これらは1時間ないし2時間ごとに連続測定した。なお、PLS 点～YKB 点間の距離は 1097 km である。濁度・水温の測定は、Chikita et al. (2000) と同様、河岸から沖合 30 m 付近に係留系を固定することで実施した。

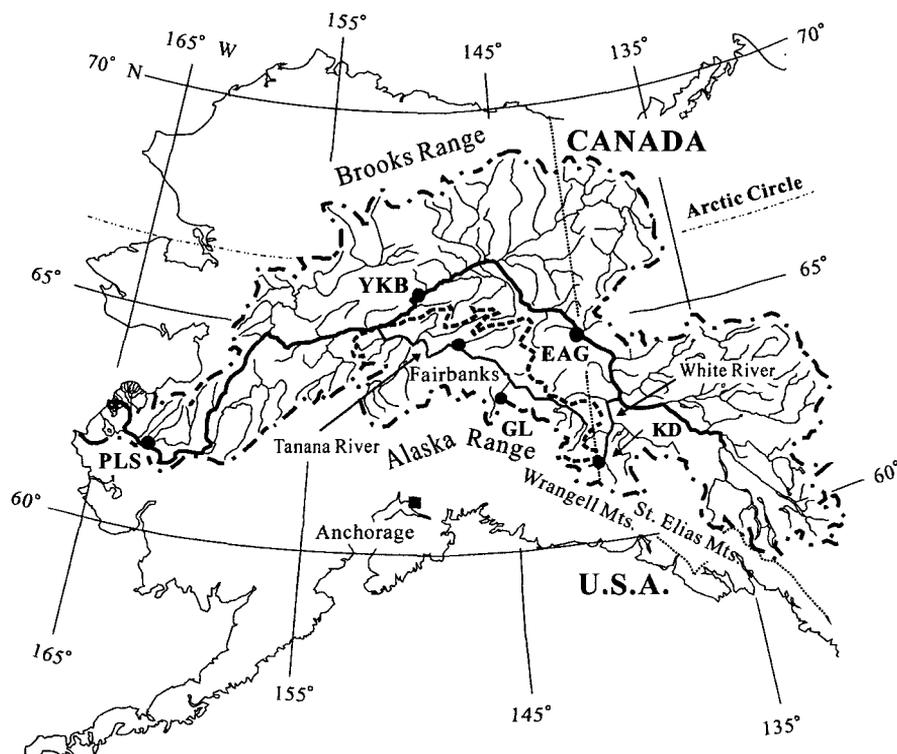


Fig. 1. Location of observation sites in the drainage basin of the Yukon River. The thick dotted lines show part of a water divide of a glacial tributary, Tanana River. Another main glacial tributary, White River, is also indicated.

用いた自記計は、濁度についてはアレック電子KK製後方散乱式水中濁度計(精度 ± 24 ppm)、水温については米国 Onset Computer 社製 Optic StowAway (精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)である。測定間隔は濁度が1時間または2時間、水温が15分である。濁度は各正時に1秒間隔で10回測定し、データ解析にはこの10回平均値を用いた。なお、比較のため、支流タナナ川のFairbanks点で、1999年5月31日と8月23日に濁度・水温の観測と採水を行った。

流量については、YKB, EAG, Fairbanks, GLの各点について米国地質調査所(USGS)による1時間データを用いた。GL点はアラスカ山脈にあるガルカナ氷河から流出するPhelan Creekの観測点である。さらに、KD点はカナダ領のホワイト川上流にあり、ここでは2000年7月2日に採水によって浮遊物質濃度を求め、流量はIndian and Northern Affairs Canada水資源部の日平均データを用いた。なお、1996-2000年の期間、USGSがPLS点の流量観測を停止したため、この点についてはアラスカ州政府Department of Fish and Gameによる毎日16時の水位データを用い、1995年におけるUSGSの日平均流量との相関関係($r=0.839$)から、1999年の日平均流量として求めた。なお、現地観測の際、流路横断面方向数点で電磁流速計を用いて二点法により水深平均流速を求め、これから、区分流量法により流量に換算した。

他方, 1999年6月初旬と8月下旬に, 自記計による横断1点での値の代表性を検討するため, 流路横断方向の約150mごとにTTDプロファイラー(アレック電子KK製ATU200-PK型)を船上から降下させ, 河道内の濁度・水温のゆらぎを調べた。TTD(Temperature-Turbidity-Depth)プロファイラーは自記計と同性能のセンサーを有し, 各点1分以内で20cm深ピッチで濁度・水温の鉛直分布を測定することが可能である。なお, 船位はGPSとレーザー距離計で決定した。得られた濁度の鉛直分布から横断各点での鉛直平均を求め, これと同時採水して得た浮遊物質濃度(SSC; mg/l)との関係を求めた。なお, 採水は米国地質調査所のDepth-Integrating Samplerを用いた鉛直積算採水法によった。また, 試水のSSCは, 目開き $0.45\mu\text{m}$ のミリポア・フィルターで吸引濾過し, 95°C で乾燥後のフィルターを秤量することで得られた。また, 浮遊物質の有機物含有量を評価するため, 秤量後にフィルターを 450°C で熱し, 浮遊物質の灼熱減量(%)を得た。さらに試水中の浮遊物質の粒度について, 粒径 $d \leq 44\mu\text{m}$ では光透過式重力沈降法, $d > 44\mu\text{m}$ では篩別法によってその粒度分布を求めた。

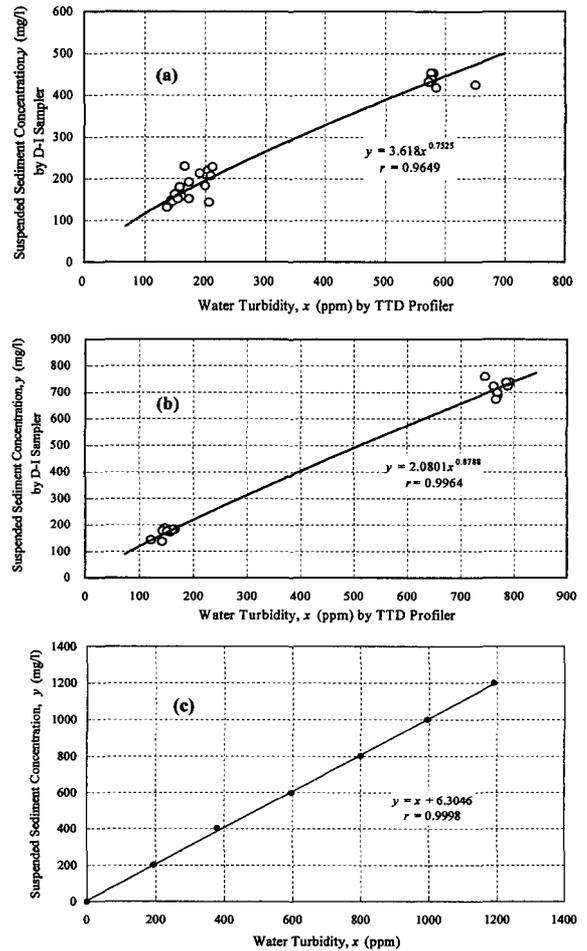


Fig. 2. Relations between water turbidity, x (ppm) and suspended sediment concentration (SSC), y (mg/l) (a) at site YKB, (b) at site PLS and (c) in a laboratory for the TTD profiler. The calibration in a laboratory was conducted with kaolin powder.

III. 結果と討論

1. 濁度と浮遊物質濃度との関係

Fig. 2に, YKB, PLSの各点で得られたTTDプロファイラーによる鉛直平均濁度(ppm)と同時採水に基づく浮遊物質濃度(SSC)との関係を示す。低濁度のプロットが6月初旬, 高濁度のそれが8月下旬の結果である。TTDプロファイラーは, 現地使用前に室内で濁度とSSC(カオリン粉末による)との間に1対1の対応関係があるよう校正されている(Fig. 2c)。Fig. 2a,bでは

濁度 400~500 ppm 当たりのデータが欠けており断言できないが、PLS 点では 1 対 1 関係に近く、YKB 点では濁度 200 ppm を越えると SSC 値は 1 対 1 関係から下方へずれ低い値をとる傾向がある。この原因として、YKB 点では SSC が増加すると浮遊物質に有機物が相対的に多く含まれることが考えられる。実際、8 月での浮遊物質の平均灼熱減量は、YKB 点で 19.6%、PLS 点で 5.3% であった。

Fig. 3 は、YKB 点、PLS 点、Fairbanks 点で得た浮遊物質の積算粒度分布を示す。PLS 点では 6 月初旬の融雪出水期と 8 月で分布形に大きな違いはなく、90% 以上が 63 μm 以下のシルト・粘土の粒子から成る。他方、YKB 点と Fairbanks 点では両期で大きな差があり、融雪期では 10% 以上の砂粒子 (63 $\mu\text{m} < d \leq 2 \text{ mm}$) を含み、8 月には PLS 点に類似した分布形をとる。融雪出水期では YKB 点と PLS 点で粒度が異なるにも関わらず、Fig. 2 での濁度~SSC 関係は、両点でほぼ 1 対 1 に対応している。このことから、ユーコン河での濁度~SSC 関係は、浮遊物質の粒度よりも有機物量に強く依存していることがわかる。

今回は、Fig. 2 a, b に示す回帰式によって、自記計と TTD プロファイラーの濁度値を全て SSC 値に変換した。

2. 観測誤差の評価

Fig. 4 と Fig. 5 は、1999 年 6 月と 8 月に、YKB 点と PLS 点の横断方向で得た SSC と水温の鉛直分布とその平均値 (同記号が対応) を示す。図には、同時に得た自記計の値 (*印) も示した。結果として、河岸付近 (Fig. 4 a の \circ 印, Fig. 4 b の \square 印, Fig. 5 a の \triangle 印, Fig. 5 c の \bullet 印の各プロファイル) を除くと、横断方向の SSC と水温の変化幅はそれぞれ 40 mg/l 以下、0.2 $^{\circ}\text{C}$ 以下である。Fig. 4 b の鉛直プロファイルのうち、 \square 印プロファイルは、水深 3 m 以下で大きな SSC

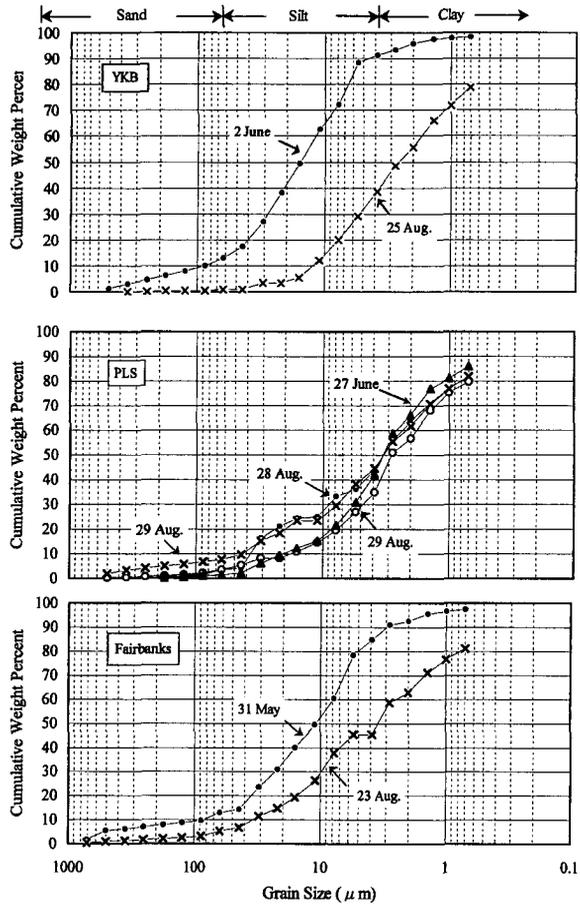


Fig. 3. Cumulative grain size distributions of suspended sediment at site YKB, site PLS and Fairbanks.

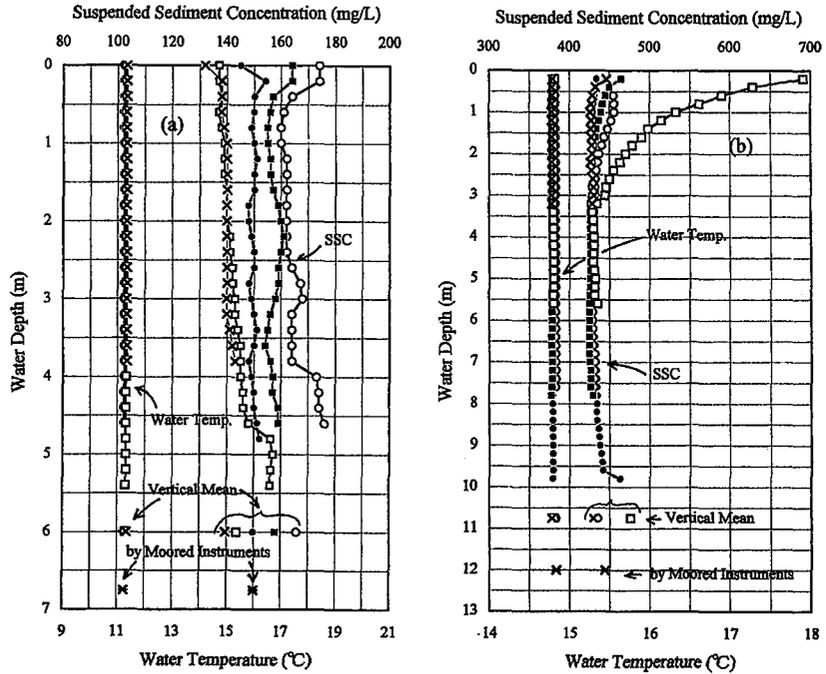


Fig. 4. Vertical distributions of water temperature and SSC across the channel of site YKB by the TTD profiler on (a) 2 June 1999 and (b) 25 August 1999. The vertical mean and the correspondent monitored values are also plotted.

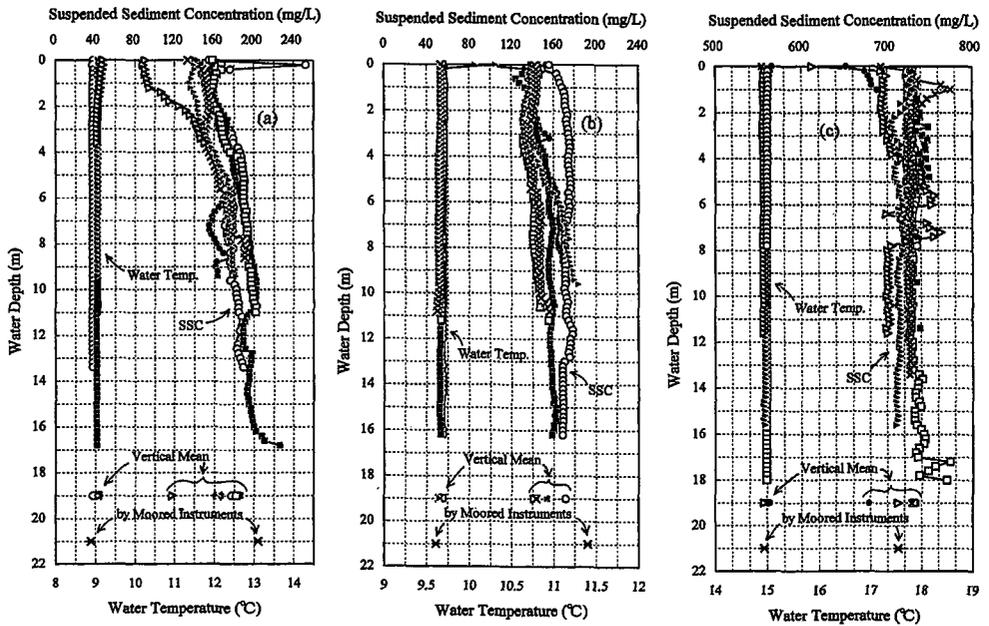


Fig. 5. Vertical distributions of water temperature and SSC across the channel of site PLS by the TTD profiler on (a) 5 June 1999, (b) 6 June 1999 and (c) 28 August 1999. The vertical mean and the correspondent monitored values are also plotted.

値をとる。これは、YKB 点にかかる橋の橋脚に接近したことが原因である。他方、SSC と水温の鉛直平均値を自記計の値と比較すると、上記の河岸付近を除いて、それぞれ YKB 点で $\pm 20 \text{ mg/l}$ 以内と $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内、PLS 点で $\pm 25 \text{ mg/l}$ 以内と $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内で、自記計値は横断方向の値と一致する。これが各点での自記計の観測誤差に対応し、自記計の測定精度 $\pm 24 \text{ ppm}$ (Fig. 2 から $\pm 17 \text{ mg/l}$ に相当) や $\pm 0.2^\circ\text{C}$ と同程度である。このことから、自記計の値について、水温については記録値自身、濁度については Fig. 2 a, b の回帰式による SSC への変換値が、各点の代表的な値と判断され、断面平均値として使用可能である。

ここで、浮遊土砂流出量と流量、SSC との関係について議論する。浮遊土砂流出量 Q_s を求める実用的な手法は、流量算定に用いる区分流量法 (流量 $Q = \sum_n q_{n,n+1}$) に対応して、

$$Q_s \cong \sum_n q_{sn,n+1} = \sum_n \frac{1}{2} b_n \left[(u_n C_n + u_{n+1} C_{n+1}) h_n + \frac{1}{3} (u_n C_n + 2u_{n+1} C_{n+1}) (h_{n+1} - h_n) \right] \quad (1)$$

$$\approx \bar{C} \sum_n q_{n,n+1} = \bar{C} Q$$

ここで、 $q_{sn,n+1}$, $q_{n,n+1}$: それぞれ、横断方向 n 番目と $n+1$ 番目の測線間の区分土砂流出量 (kg/s) と区分流量 (m^3/s)、 b_n : n 番目と $n+1$ 番目の測線間距離 (m)、 u_n , C_n , h_n : それぞれ、 n 番目の測線上の水深平均流速 (m/s)、水深平均 SSC (kg/m^3) および水深 (m)、 \bar{C} : 断面平均 SSC (kg/m^3)、である。ここでは、最も単純な(1)式の最後の式に基づいて浮遊土砂流出量 Q_s を求めることとする。なお、米国地質調査所による流量 Q (m^3/s) の最大観測誤差は、流量値に対して $\pm 5\%$ 程度である。以上から、ここでの Q_s (kg/s) の最大観測誤差は、YKB 点では融雪出水期で $\pm 18\%$ 、氷河融解・降雨出水期で $\pm 9\%$ 、PLS 点ではそれぞれ $\pm 19\%$, $\pm 8\%$ である。なお、実際に 6 月と 8 月に YKB 点と PLS 点で $Q_s \cong \sum_n q_{sn,n+1}$ を求めたが、 $\bar{C} \cdot Q$ との違いはこの観測誤差に入っていた。

3. 土砂流出の季節変化

Fig. 6 は、YKB 点と PLS 点で得られた (a) 流量、(b) 浮遊物質濃度 (SSC)、(c) 水温、(d) 土砂流出量、の時間変化を示す。なお、比較のため、Fig. 6 a には本流 EAG 点とタナナ川 Fairbanks 点の流量、Fig. 6 b, Fig. 6 c, Fig. 6 d には Fairbanks 点での SSC、水温、土砂流出量の値をプロットしている (観測点の位置については Fig. 1 参照)。

結果として、浮遊土砂流出量の変動パターンは SSC のそれとよく似ており、浮遊土砂流出量が流量よりも SSC によって支配されていることがわかる。観測期間中の最大流量は最大 SSC とは異なる時期に起こり、EAG 点で 6 月 20 日 17 時、YKB 点で 6 月 24 日 3 時、PLS 点で 7 月 2 日に記録された。米国 Western Regional Climate Center による EAG 点と YKB 点での雨量・気温の時間データによると、1999 年 6 月 6 日から気温は急激に上昇し、6 月 13 日に最高気温は 30°C 以上に達した。また、6 月中は殆ど無降雨の状態であった。このことから、上記の最大流量は、各点上流域での融雪出水によってもたらされたかと判断される。他方、最大流量時の SSC はかなり低く、せいぜい 200 mg/l 程度である。このことから、融雪期の流域内土砂生産は低く、河道を含

め浸食されるべき土砂の存在量も少ないことがわかる。

7月に入ると、PLS点ではSSCの急激な変動が高い頻度でみられ、SSC増大のとき水温はむしろ減少する。他方、YKB点ではSSCの増加はほとんどみられない。このことから、両点間に流入する、氷河融解流出のさかなタナナ川がPLS点のSSC増大に寄与していると判断される。実際、GL地点での積雪・氷河の融解流出は6月6日から始まり (Fig. 7), 氷河融解流出における流量とSSCがほぼ同位相で変動すること (例えば、知北ほか, 1998; Willis et al., 1996; Hodson

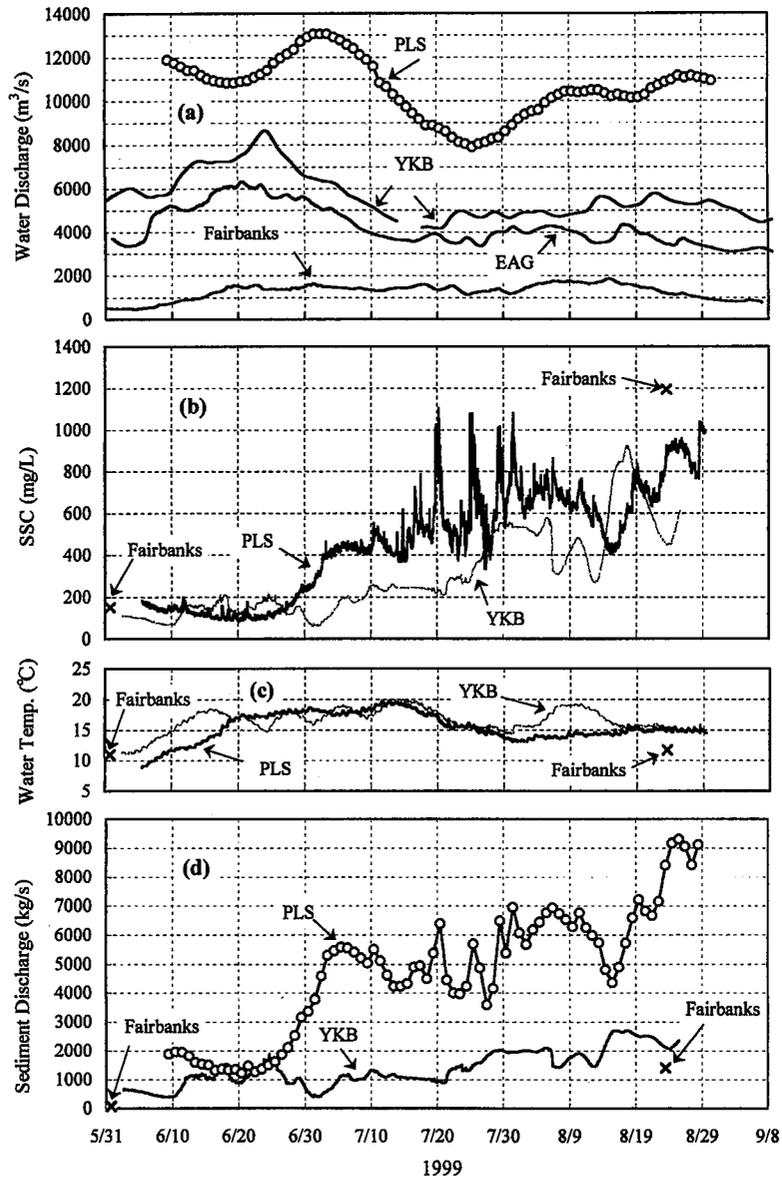


Fig. 6. Temporal variations of (a) water discharge, (b) SSC, (c) water temperature and (d) sediment discharge in 1999.

and Ferguson, 1999 参照) を考慮すると、PLS 点には約 20 日遅れの 6 月 26 日頃から積雪・氷河の融解流出によって SSC が増大し大きく変動したと判断される。また、YKB 点では氷河融解期に SSC がさほど増大しないことから、EAG 点から YKB 点へ流下する過程で、例えば氾濫原地帯の Fort Yukon 付近で、土砂の堆積が起こっていることが示唆される。なお、ユーコン河の減水期に当たる 2000 年 7 月 1 日の EAG 点における観測では、浮遊土砂流出量 4192 kg/s (SSC, 608.4 mg/l; 流量 6890 m³/s) であり、7 月 2 日のホワイト川上流の観測では、土砂流出量 812.5 kg/s (SSC, 2348 mg/l; 流量 346 m³/s) であった (Fig. 1 参照)。このように、EAG 点上流で合流するホワイト川の本流流量への寄与は極めて小さいが、SSC の寄与は比較的大きいと判断される。同様に、1999 年でも氷河融解流出の影響がある期間ではユーコン河流量はむしろ一貫して減少傾向にあり、このことから、タナナ川やホワイト川からの氷河融解は融雪に比べ、ユーコン川流量に大きく寄与しないと考える。実際、Fig. 6 から、タナナ川の流量は PLS 点流量の 1/7 以下である。

YKB 点と PLS 点における観測期間中の浮遊土砂流出量のピークは、それぞれ 8 月 17 日 15:00 と 8 月 25 日に起こっている。両時期とも、源頭部からの伝播時間を考慮しても、氷河融解ピークの過ぎた時期に対応する (Fig. 7)。また、この時期は、両点とも高い SSC を維持して変動し、水温は余り変化しない。以上から、6 月下旬 (YKB 点) か 7 月初旬 (PLS 点) に始まるユーコン河の流量低減期 (つまり、河道せん断応力の減少期) に氷河融解流出によって河道に堆積した土砂が、その後の主に降雨による流量増大によって河道せん断応力が増加し浸食されたものと判断される。このように、ユーコン河の土砂流出変動は、季節的に異なる営力によって発生すると考えられる。

Fairbanks 点でのタナナ川 SSC 値は、横断方向平均で、5 月 31 日 17:10~18:24 に 151 mg/l、8 月 23 日 12:30~13:05 に 1195 mg/l であった。結果として、同川の土砂流出量は YKB 点

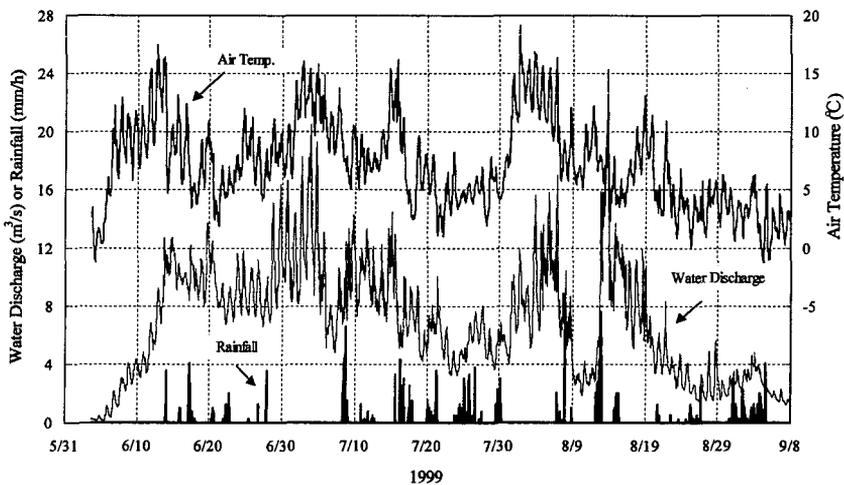


Fig. 7. Temporal variations of air temperature, rainfall and water discharge at site GL.

のそれに比べ、5月の融雪出水期ではかなり低い、8月下旬の水河融解・降雨出水期（降雨出水が優勢）ではほぼ同程度の値を示した（Fig. 6 d）。このことから、タナナ川流量は本流流量に比べ極めて小さいが、土砂流出量は水河融解流出の卓越する時期（7月初旬～8月初旬）や降雨増水時には、本流に大きく影響することが示唆される。

4. 流量と浮遊物質濃度との関係

Fig. 8は、Fig. 6に示した(a) YKB点と(b) PLS点での流量と浮遊物質濃度(SSC)との関係を示す。なお、PLS点については日平均値をプロットしている。YKB点では、それぞれでゆらぎはあるものの、融雪出水期（6月2日～7月4日）と水河融解・降雨による出水の時期（7月13日～8月25日）の2つの時期に分かれ、正の相関がベキ関数 $C' = aQ^b$ (C' : 浮遊物質濃度 (mg/l), Q : 流量 (m^3/s)) で近似される。図の回帰式で示される通り、2つの時期の傾き b はほぼ同じだが、水河融解・降雨出水の時期がより高SSC

を維持し、結果として切片 $\log a$ 値が高い。これは、浸食されるべき堆積物が融雪出水期よりも水河融解出水・降雨出水の時期に相対的に多い (sediment availability が高い) ことを意味する (例えば、知北ほか, 1998)。また、傾き b は、堆積物の力学的性質の一つである“せん断応力に対する浸食のされやすさ (erodibility)”を表す指標で、これは、堆積物の粒径・鉱物組成・粒子密度・含水率に依存する。このため、 b 値が同じであることは、浸食される堆積物の erodibility が同じであり、ユーコン河の場合は、水河被覆域で生産された微細な土砂がその主要な供給源と考える。Morgan (1995) や Picouet et al. (2001) は、むしろ切片 $\log a$ を堆積物の erodibility に関係するパラメータと考えているが、浸食されるべき堆積物が少ない状態で当初から高いSSCを維持することは考えにくい。なお、YKB点では両期間の間の7月4日9:00～7月13日3:00の期間で、 $Q \sim C'$ 間に負の相関が存在する。これは、ユーコン河流量への寄与が小さい水河融

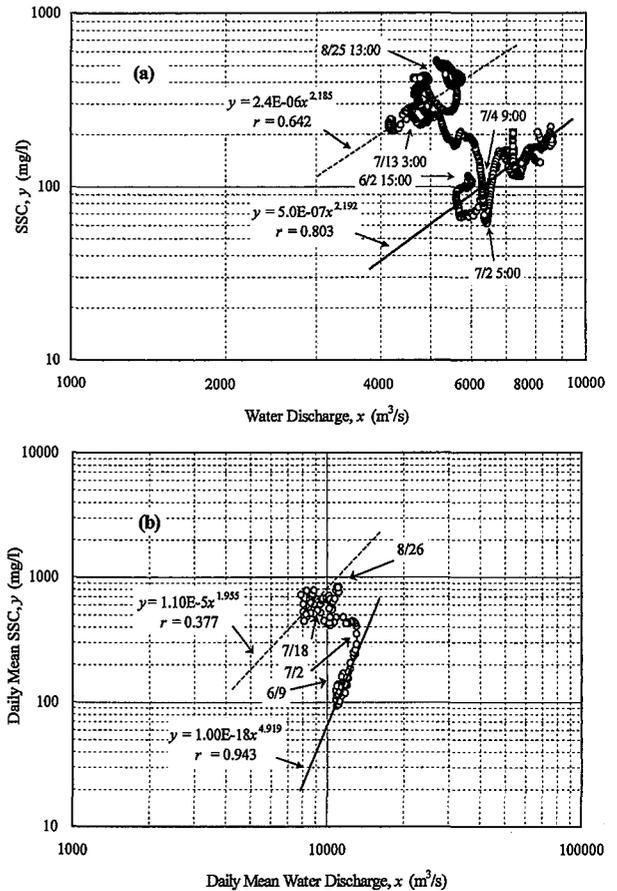


Fig. 8. Relations between water discharge, x (m^3/s) and SSC, y (mg/l) at (a) site YKB and (b) site PLS. Regression lines for periods of snowmelt discharge and glacier-melt-plus-rainfall discharge are given at each site.

解流出の初期段階で、相対的に高い SSC の融解水がユーコン河本流へ流入したことが考えられる。結果として、氷河融解・降雨出水の時期で堆積物供給量が多いのは、White 川などからの氷河融解土砂流出に加えて、上の「負の相関」期に河床や河岸に堆積した土砂が、ユーコン河の降雨増水によって浸食されたことが考えられる。

PLS 点での $Q \sim C'$ 関係は、YKB 点ほど明瞭でないが、やはり正の相関を持つ 2 つの時期（融雪出水期の 6 月 9 日～7 月 1 日と氷河融解・降雨による出水期 7 月 18 日～8 月 26 日）と両期間に挟まれた負の相関の時期があるように見える (Fig. 8 b)。高い SSC を示す氷河融解・降雨出水の時期では相関は良くないが、回帰式から、YKB 点と比べ切片 $\log a$ はやや小さく、傾き $b = 1.950$ はほぼ同値である (Fig. 8 a)。このことから、氷河融解・降雨出水の時期はタナナ川からの土砂流出ばかりでなく、浸食されるべき河道内堆積物も多いことが推測される。この時期に相関が低いのは、タナナ川からの土砂流出量が PLS 点の SSC に大きく寄与するためと考える。他方、融雪出水期では SSC 値は低いが、傾き $b = 4.919$ とかなり大きな値をとる。堆積物が飽和状態ではほとんどがシルトと粘土からなる粒径組成を持つ場合、流れの底面せん断応力 τ_b (N/m^2) は堆積物の単位時間単位面積当たりの浸食量 M ($kg/m^2/s$) に比例し、そのとき b 値がおおよそ 2 をとることが知られている (Chikita, 1996, 知北ほか, 1998, Bhutiyani, 2000)。このため、融雪出水期の流送土砂は氷河流域起源の土砂に比べせん断強度が弱く、おそらく流域斜面を起源とした土壌粒子が支配的であると考えられる。これは、この時期はユーコン河下流域に発達する永久凍土地帯の活動層がまだ薄く、融雪からの地表流発生によって流域斜面の土壌浸食が盛んであることが要因と思われる。

IV. ま と め

本研究では、ユーコン河の下流域 (PLS 点) と中流部 (YKB 点) で河川水の濁度・水温に関する同時モニタリングに初めて成功し、浮遊土砂流出に関する多くの知見を得た。その結果をまとめると次のようである。

- 1) 河道内 1 点での濁度・水温のモニタリングに対し、各点で観測誤差を評価した。その結果、最大観測誤差は YKB 点で ± 20 mg/l と $\pm 0.1^\circ C$ 、PLS 点で ± 25 mg/l と $\pm 0.1^\circ C$ と見積もられた。なお、濁度 (ppm) は、浮遊物質濃度 (SSC ; mg/l) との関係を導き、回帰式を用いて全て SSC に変換した。この相関関係は、浮遊物質の粒度よりも含まれる有機物量によって変化することがわかった。また、浮遊土砂流出量の最大誤差は、季節によって変化し、YKB 点では融雪出水期で $\pm 18\%$ 、氷河融解・降雨出水期で $\pm 9\%$ 、PLS 点ではそれぞれ $\pm 19\%$ 、 $\pm 8\%$ と求められた。
- 2) 米国地質調査所による流量と今回得られた SSC の時系列データから、両者は季節的に全く異なる変化をすることがわかった。つまり、ピーク流量は春季に流域内の融雪出水によって起こり、他方、最大 SSC は夏季～秋季の氷河融解・降雨による出水時に発生する。また、源頭部にアラスカ山脈の氷河域をもつ支流タナナ川はユーコン河に比べ流量は 1/7 以下であるが、SSC

の高い氷河融解出水期には土砂流出量は本流と同程度かそれ以上であることが示唆される。

- 3) SSC と流量との関係から、融雪出水期よりも氷河融解・降雨による出水時の方が土砂生産が高いことがわかった。これは、流量は小さいが高い SSC を持つ氷河融解土砂がユーコン河の減水期に河道内に大量に沈殿し、その後の増水期に河道底面せん断応力の増加によってこの堆積土砂が浸食されたことが要因と考えられる。最終的には、この浸食による堆積物の枯渇が、翌年の融雪出水期の低い土砂生産へと結びつく。また、融雪出水期におけるユーコン河下流の流送土砂は、氷食により生産された土砂ではなく、永久凍土地帯の表層土壌と考えられる。

謝辞 野外観測にあたり、アラスカ大学 Fairbanks 校の Larry Hinzman 博士と Jack Scmid 氏、及び Pilot Station 村中学校の Basil Borrromeo 氏には大変お世話になった。ここに深謝いたします。また、アラスカ大学・国際北極圏研究センター (IARC) の赤祖父俊一博士・新明 雄氏と(株)地球システム科学の富田ゆきし氏・仙頭宣幸氏には調査に対し多大なご協力を頂き、また Indian and Northern Affairs Canada 水資源部の Richard Janowicz 氏には、ホワイト川流量データの提供を受けた。ここに御礼申し上げます。陸水学研究室大学院生の鈴木健史君と梅原信之君には、野外調査に協力頂いた。感謝致します。なお、本研究は、1999 年度海洋技術センター (JAMSTEC) の「アラスカ・ユーコン河流域における水・熱循環観測 (YuWEX)」計画 (研究代表者、北海道大学低温科学研究所・石川信敬博士) の助成による。

文 献

- 芦田和男・沢田豊明, 1989. 山地流域における出水と土砂流出 (18), 京都大学防災研究所年報, **32**, B-2, 471-486.
- 馬場仁志・星 清・藤田陸博, 2001. 蒸発散および浸透を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, **14**, 364-375.
- Bhutiyan, M. R., 2000: Sediment load characteristics of a proglacial stream of Siachen Glacier and the erosion rate in Nubra valleys in the Karakoram Himalayas, India, *Journal of Hydrology*, **227**, 84-92.
- Chikita, K., 1996. Suspended sediment discharge from snowmelt: Ikushunbetsu River, Hokkaido, Japan, *Journal of Hydrology*, **186**, 295-313.
- 知北和久・中道陽文・N. D. スミス・M. ペレス-アルルーチェア (1998): 河川における浮遊土砂流出の機構に関する比較研究, 北海道大学地球物理学研究報告, **61**, 1-10.
- Chikita, K., R. Kumai and R. Kemnitz, 2000. Sediment discharge in Yukon River, Alaska: its continuous measurement and interpretation, *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series VII (Geophysics)*, **11**, 691-706.
- 早瀬吉雄・大場 信, 1993. 森林山地小流域における腐食層と流出機構のモデル化, 水文・水資源学会誌, **6**, 47-54.
- Hodson, A. J. and R. I. Ferguson, 1999. Fluvial suspended sediment transport from cold and warm-based glaciers in Svalbard, *Earth Surface Processes and Landform*, **24**, 957-974.
- Kurashige, Y., 1993. The Mechanism on suspended-sediment supply, Doctoral Thesis, Hokkaido University, 93pp.
- 三島隆明・金丸昭治・常松芳昭・S. D. Costa, 1993. 山腹における雨水流出機構, 水文・水資源学会誌, **6**, 36-54.

- Morgan, R. P. C., 1995. *Soil erosion and conservation*. 2nd ed., Longman, London.
- Nijssen, B., D. P. Lettenmaier, X. Liang, S. W. Wetzel and E. F. Wood, 1997. Streamflow simulation for continental-scale river basins, *Water Resources Research*, **33**, 711–724.
- Picouet, C., B. Hingray and J. C. Olivero, 2001. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin, *Journal of Hydrology*, **250**, 19–39.
- Russell, M. A., D. E. Walling and R. A. Hodgkinson, 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK, *Journal of Hydrology*, **252**, 1–24.
- Willis, I. C., K. S. Richard and M. J. Sharp, 1996. Links between proglacial stream suspended sediment dynamics, glacier hydrology and glacier motion at Midtdalsbreen, Norway, *Hydrological Processes*, **10**, 629–648.