



Title	北海道南部の山地小河川における細粒土砂の堆積と浮き石および河床内の透水性に関する研究
Author(s)	村上, まり恵; 山田, 浩之; 中村, 太士
Citation	Ecology and Civil Engineering, 4(2), 109-120 https://doi.org/10.3825/ece.4.109
Issue Date	2001
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/68549
Rights	© 応用生態工学会
Type	journal article
File Information	109-120(Vol.4 No.2).pdf



原著論文 ORIGINAL PAPER

北海道南部の山地小河川における細粒土砂の堆積と浮き石および河床内の透水性に関する研究

村上まり恵*・山田浩之¹⁾・中村太士¹⁾

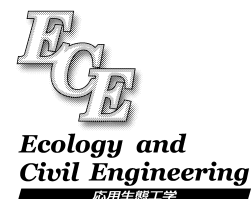
北海道大学大学院農学研究科森林管理保全学講座 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

Marie MURAKAMI^{1)*}, Hiroyuki YAMADA¹⁾ and Futoshi NAKAMURA¹⁾: Hydraulic conductivity of substrate and openwork gravel rate associated with fine sediment depositon in mountain streams, southern Hokkaido. *Ecol. Civil Eng.* 4(2), 109-120, 2001.

1) Department of Forest Science, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Nishi 9 Kita 9, Kita-ku, Sapporo 060-8589, Hokkaido, Japan

Abstract: The fine sediment (<2 mm) effects on percentage of openwork gravel and hydraulic conductivity were studied at 5 small catchments in southwestern Hokkaido, Japan in 1999. We also examined the influence of land use on substrate and hydraulic conductivity. Bed material was sampled using the frozen core technique and hydraulic conductivity was measured using the packer test. The percentage of openwork gravel and hydraulic conductivity decreased with an increase in proportion of fine sediment. Especially the weight percentage of 0.125 to 1.0 mm showed the most negative correlations with these parameters, which indicates that fine sediment filling the interstitial space of gravel bed is responsible to the decreases in these parameters. The stream containing great amount of fine sediment had extensive agricultural development in its catchment area. Thus these substrata differences among the streams were attributable to the surface soil erosion and bank erosion at agricultural fields. Fine sediment progressively accumulated in streambed materials under normal flow conditions, resulting in a decrease in openwork gravels and hydraulic conductivity. Losing the interstitial space of gravel bed will have detrimental effects on benthic fish and invertebrate and other aquatic biota that require these habitats in their life cycles. In order to maintain healthy stream ecosystem, we need to pay more attention on the conditions of fine sediment and bed materials, and to seek effective measures to prevent fine sediment production and deposition. The sampling methods applied in this study were proved to be useful to investigate fine sediment and hydraulic conductivity of the bed materials.

Key words: fine sediment, frozen core technique, hydraulic conductivity, openwork gravel, packer test



はじめに

近年、農地開発や森林伐採、採鉱、都市化などの流域の人為改変に伴う土砂の生産量が増加し、粒径 2 mm 以

下の土砂として定義される細粒土砂 (fine sediment) の河床への堆積が顕著になっている (Barton 1977; Walling 1990; Richards et al. 1993)。細粒土砂が堆積した河床では、底生生物の生息空間である礫間隙の消失や透水性の低下により、水生昆虫の種数、個体数の減少 (Lemly 1982; Wood & Petts 1994; 長坂ほか 2000)、底生魚類の

2001 年 2 月 26 日受付, 2001 年 7 月 31 日受理

* e-mail: marie@for.agr.hokudai.ac.jp

生息密度の低下（渡辺ほか 1999）、サケ科魚類の卵の生残率低下（Chapman 1988；Reiser & White 1990；山田・中村 2001）、付着藻類に直接堆積することによる藻類生産量の低下（Graham 1990；山田・中村 2000）など、河川生物相に対して悪影響を及ぼしていると報告されている。欧米では、このように河川生態系に及ぼす細粒土砂の影響は Sediment pollution として懸念されている（Waters 1995）。日本においても河川環境の保全について議論されるようになってきているが、Sediment pollution に対する関心は未だうすく、細粒土砂の管理体制が確立されていないのが現状である。また、土砂生産量は、河畔や河岸などのみならず流域の土地利用による影響を大きく受けている（Allan et al. 1997；Walling 1999）。その為、欧米では、細粒土砂の生産量および堆積の実態を土地利用や開発面積、流域内の配置という景観要素から捉えようとするのが試みられている（Richards & Host 1994；Boulton 1997；Wood & Armitage 1997）。今後これらの資料を集積することが、河川環境の保全を目標とした流域管理を構築していく上で急務となっている。

一方、これまで主に河川生態学の分野で生物相と底質の関係について論じる際には、底質の特徴として、可見（1978）に定義されるような浮き石およびはまり石や、視覚的に優占する砂礫の粒径が用いられてきた（Wright et al. 1989；Richards & Host 1994）。Waters (1995) も指摘するように、細粒土砂の影響を評価するためにはこれまでの研究事例をふまえて、細粒土砂の堆積、浮き石の程度、透水性を定量的に評価し、これらの関係を明らかにする必要がある。しかし、日本ではこうした細粒土砂の河床間隙への堆積に関する研究は少なく、その現地調査方法すら確立されていないのが現状である。本研究で適用した凍結コア法は、河床の細粒土砂を流出させずに簡易に採取する方法として、欧米の砂礫河床の河川で広く適用されている（Carling 1981；Carling & Reader 1982；Petts 1988）。しかし、日本では流水中の河床材料の採取に用いた事例は未だなく、また簡便で統計的解析にも耐えられる多くのサンプルを採取できる方法は発展途上である。また、現地において未攪乱状態で河床の透水性を求める方法として、食塩や染色材料を用いたトレーサー試験（河野 1989）、単孔式透水試験の非常法であるスラッグテスト（Dahn & Valett 1996）を用いるのが一般的である。しかし、透水性の良過ぎる河床では、濃度変化および水位変化が速いため、それらの方法で測定することは困難であった。その為、現地において確実かつ簡便に計測できる透水試験が求められている。

本研究の目的は、1) 流水中の河床間隙に存在する細粒土砂の採取、および現地における透水係数の測定方法を確立すること、2) それらの方法を用いて細粒土砂量と浮き石および透水性の関係を定量的に明らかにし、また底質が異なる河川間において細粒土砂量、浮き石および透水性の差異を検討すること、3) さらに、これらの河川間の差異に流域の土地利用が及ぼす影響について考察を加えることである。

研究方法

研究対象流域概況

北海道では、1970年代以降農地開発が進み（石渡 1994）、土壌流亡やガリー侵食などが発生し、河川への細粒土砂の流入量が増加している。本研究で対象流域とした遊楽部川および貫気別川流域は、畑作および酪農が盛んな農業地帯であり、近年、農地開発に伴い土砂流出量が増加し、特に貫気別川は北海道内で流出土砂量の多い河川として位置付けられている（佐藤 1999）。これらの流域の支流である山地小河川で予備調査を行った結果、河床勾配および蛇行や瀬淵構造の流路形状が類似しているにも関わらず、浮き石の出現頻度や細粒土砂の堆積量などの底質が河川によって異なることが得られた。そのため、本研究ではそのような河川でも特に流域面積および河床勾配が類似していた遊楽部川支流のセイヨウベツ川（SE）、賀呂川（GR）、サクラベツ川（SK）の3河川、貫気別川支流のオロエンヌキベツ川（ORE）とオーホナイ川（OHN）の2河川を調査対象河川とした（Fig. 1）。

遊楽部川流域の地質は、砂岩を主体とした新第三系の火山岩類で基盤が構成されている（Table 1）。一方、貫気別川流域は新第三系火山岩類で形成された基盤を第四系火砕流堆積物および降下火山灰が覆うように火砕流台地が形成されている（Table 1）。各河川の流域面積は、賀呂川で13 km²と若干小さいことを除いて、各河川とも20 km²程度で、平均河床勾配は約1/30の急勾配山地河川である（Table 1）。いずれの河川も、上流部で砂防ダムなどの構造物の設置や河川改修は行われていない。また、各河川において、河床勾配、流路形状、河床材料の最大粒径が類似した調査区間を選択した（Fig. 1）。各調査区間とも、川幅は5 mから6 mの瀬と淵が繰り返すBb型（可見 1978）の河川で、河床材料は、最大約20 cmの大礫によって構成されている。

各河川の流域の土地利用状況は、主に森林地あるいは農地で占められており、遊楽部川流域では牧草地、貫気

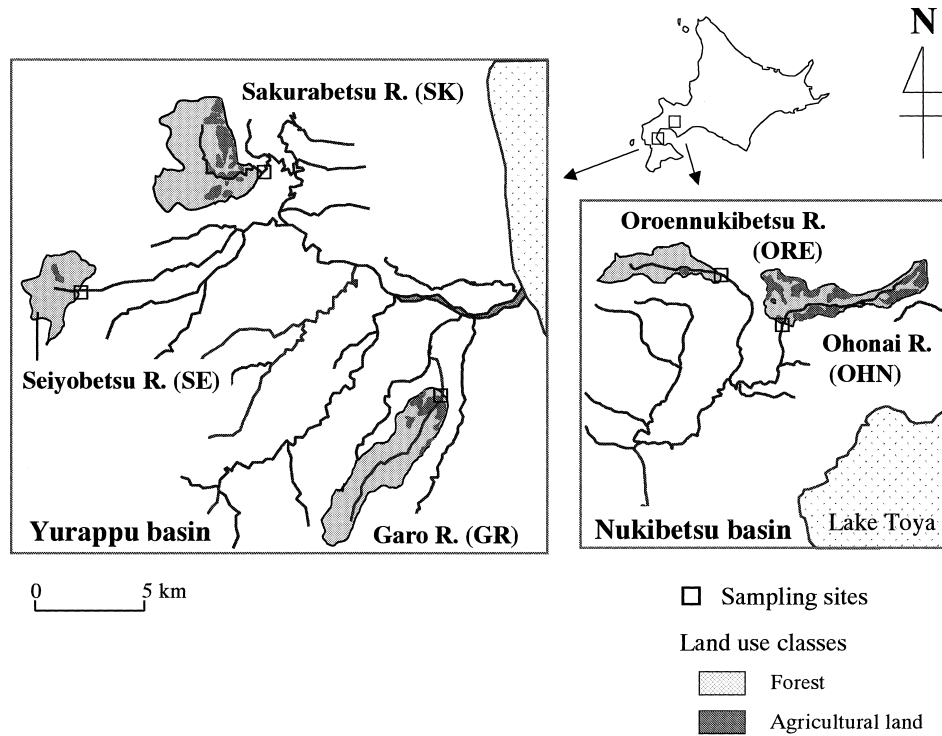


Fig. 1. Location and land use of the studied basins.

Table 1. General description of the five streams.

	Yurappu river basin			Nukibetsu river basin	
	SE	GR	SK	ORE	OHN
Catchment area (km ²)	18.7	13.2	24.6	21.6	22.0
Reach length (km)	11.3	13.3	5.5	12.9	9.8
Mean gradient	1/32	1/27	1/34	1/32	1/33
Land use percentage in the upstream watershed					
Forested land (%)	95.5	89.5	82.3	96.0	56.6
Agricultural land (%)	4.5	10.5	17.7	4.0	43.0
Others (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Geology	Negene			Holocene	
	Miocene		Pliocene	Pleistocene	
	sandstone, mudstone, tuff and conglomerate		sandstone, conglomerate, siltstone and tuff	volcanic ash, pumice and sand	
	conglomerate and sandstone				

SE = Seiyoubetsu River ; GR = Garo River ; SK = Sakurubetsu River ; ORE = Oroennukibetsu River ; OHN = Ohonai River

別川流域では、主にジャガイモ、豆類を生産する畑地として利用されている。調査区間よりも上流部の流域における農地の占める割合（以後、農地率とする）は、ORE < SE < GR < SK < OHN の順に大きく、特に OHN では、他の河川に比べ農地率が 43% と高い値を示している (Table 1)。また、土砂の生産源の特徴として、各河川とも調査

区間上流部の台地斜面でいくつかの崩壊地が見られることが挙げられる。特に、オーホナイ川では、ガリー状の崩壊地発生数がオロエンヌキベツ川に比べ約 3 倍に達する (長坂 1998)。また、セイヨウベツ川を除いて、各調査区間の上流部では、河川に隣接した氾濫原の一部が農地として利用されている (Fig. 1)。各河川の調査区間の

河畔域は、いずれもヤナギ類 (*Salix* sp.), ケヤマハンノキ (*Alnus hirsuta*) などの落葉広葉樹により構成されており, これらの樹冠が流路を覆っている。

オーホナイ川とオロエンヌキベツ川では, 北海道立林業試験所ほか (1998, 1999, 2000) により, 主に土砂の生産源, 浮遊土砂の流出特性, 河川生物相 (魚類, 底生動物, 付着藻類) などの調査が行われている。特に, オーホナイ川では, 細粒土砂の堆積量が多く, 底生生物の個体数が低下していると報告されている (長坂ほか 2000)。

調査地点の設定と調査期間

淵から早瀬への移行帯に出現する平瀬は, 表流水が河床にもぐりこむ浸透性の良い場所である (Vaux 1962)。また, この平瀬はサクラマスが多く産卵する場でもある (柳井ほか 1996)。本研究では, このような平瀬を対象とし, 各調査区間において川幅よりも長く出現し, かつ流速や水深が河川間で類似した平瀬を3箇所選択した。また, 各平瀬の流心において, 縦断方向に等間隔になるように調査地点を3点設置した。各平瀬において河床勾配, 川幅を計測し, 各調査地点で, 流速・水深の測定, 浮き石の評価, 透水試験, 河床材料の採取を行った。

遊楽部川流域では, 1999年8月2日に流量が700 m³/secを超える大出水が発生している (Fig. 2)。同様に, 貫気別川流域においても同時期に同規模の出水が発生している。遊楽部川流域の3河川 (SE, GR, SK) については, この出水直後, 流量が安定した1999年8月8日から13日の間 (以後, 出水後: after the flood とする) とそれから1ヶ月後の9月13日から16日の間 (以後, 平水時: normal flow とする) の2回調査を行った (Fig. 2)。貫気別川流域の2河川 (ORE, OHN) については, この出水から1ヶ月後の1999年10月5日から8日の間 (以後,

平水時: normal flow とする) のみ調査を行った (Fig. 2)。なお, 各河川とも出水から1ヶ月の間, 8月上旬に見られたような大きな出水はない。

調査方法

各調査地点において, 流速は6割水深でプロペラ式流速計 (横河電気 3631 改造型) を用いて計測し, 水深は標尺を用いて最小1 cm単位まで測定した。また, 各調査地点に50 cm×50 cmのコドラートを設置して, 浮き石割合 (openwork gravel rate) を求めた。浮き石割合は, 石が積み重なり石と石の隙間が空いた状態を浮き石とし (可児 1978), コドラート内の浮き石の占める面積割合を示したものである。なお, 浮き石割合は, 0%, 25% (0-25%未満), 50% (25-50%未満), 75% (50-75%未満), 100% (75-100%) の5段階評価を行った。

河床の透水性の評価には, 各調査地点に設置した単井戸を用いてパッカー法による透水試験を実施し, 透水係数を算出した。なお, 本研究で用いたパッカー法は, これまで帯水層の透水性を調査する際に用いられてきた定常法による原位置単孔式透水試験の一つで, 透水性の高い地盤においても精度良く, かつ未攪乱状態における透水性の評価が可能である (西垣 1986)。パッカー法は, 井戸孔内に一定の水位差 (h (cm)) を作用させ, 定常になった状態での揚水流量 (q (cm³/sec)) を測定して, 透水係数 (K (cm/sec)) を求める方法である (Hvorslev 1951; Dargan 1978)。試験区間長 (l (cm)) と井戸の内径 (d (cm)) の比 (l/d) が8未満である場合は次式を用いる (西垣 1986)。

$$K = \frac{q}{2\pi hl} \sinh^{-1} \left(\frac{l}{d} \right) \quad (1)$$

本研究では, 塩化ビニル製パイプ (内径 (d) = 3.0 cm, 長さ = 1 m) の先端に10 cmの試験区間 (l) を設けた井戸を用いた (Fig. 3)。試験区間には, 周囲8方向に1 cm間隔で直径3 mmのストレーナ孔を設けてある。試験区間に表流水が直接浸入することを防ぐため, 河床表面から深さ10-20 cmの位置に試験区間を設置した。揚水用のポンプは, 市販の給水ポンプ (最大揚水量9.5 cm³/sec) を改良したものを用い, 揚水流量はメスシリンダーとストップウォッチを用いて3回計測し, 平均した値を用いた。井戸内の水位は, 圧力式自記水位計 (KADEC-MIZU, コーナーシステム社) を井戸に挿入して測定した (Fig. 3)。また, 表流水が井戸側面を伝って井戸内に流入することを防ぐため, 200×200 mmの止水マット (ラバー製, 厚さ10 mm) を井戸の周りに設置した (Fig. 3)。

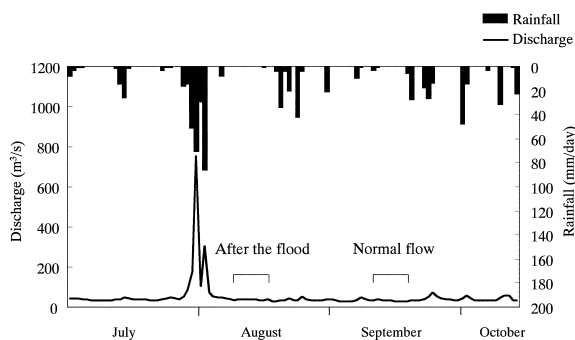


Fig. 2. Temporal changes in water discharge and daily rainfall in Yurappu River from July to October, 1999. □ indicates sampling period.

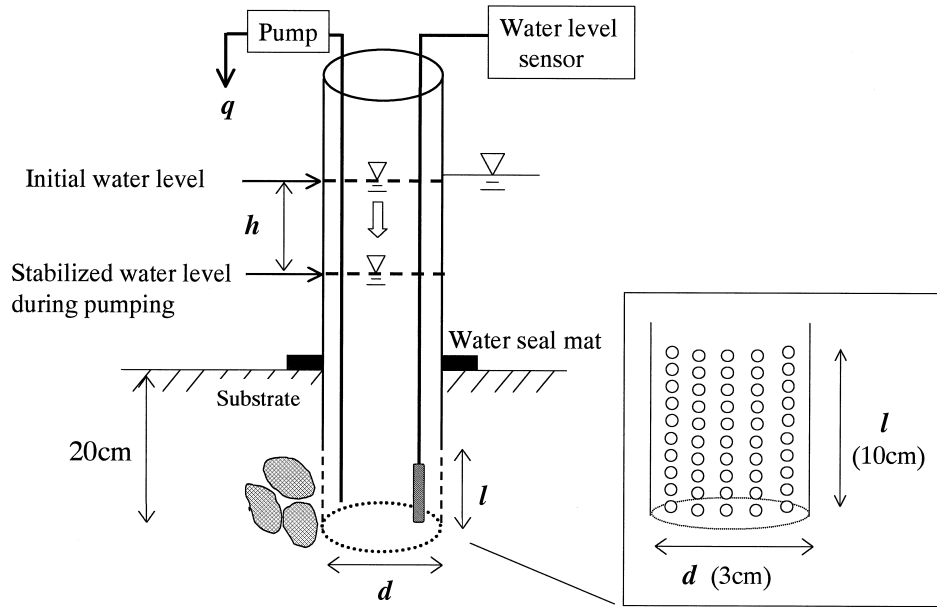


Fig. 3. Instrument for the packer test to measure hydraulic conductivity of substrate.

河床材料は、各調査地点において、細砂（0.25 mm）以上の土砂に対してはサーバーネット（メッシュサイズ 0.25 mm、採取面積 25×25 cm）を用い、細砂以下の土砂は、凍結コア法（Frozen core technique）を用いて河床表面から深さ 10–20 cm の土砂を採取した。凍結コア法は、河床に打ち込んだ凍結コアサンプラーに液体窒素を注入してサンプラーの周りの土砂を凍結させることにより、細粒土砂を流下させずに採取する方法である（Carling 1981）。本調査では、Schälchli（1992）を参考にしてステンレス製の内径 17 mm、長さ 1 m の凍結コアサンプラーを用いた。

粒度分析

採取した試料を実験室に持ち帰り、以下に示す方法により粒度分析を行った。

サーバーネットで採取した試料は、0.25 mm のふるい上で 0.25 mm 以下の土砂及び有機物を水洗いし、110℃で 24 時間乾燥させた。デシケーター内で放冷した後、ふるい（63 mm, 31.5 mm, 16 mm, 9.5 mm, 4 mm, 2 mm, 0.25 mm）を用いふるい分けをし、各ふるいに残留した試料を秤量した。一方、凍結コア法で採取した試料は、過酸化水素水で有機物を除去した後、45 μm のふるい上で水洗いを行った。45 μm ふるいに残留した試料は、110℃で 1 時間乾燥させ、デシケーター内で放冷した後、ふるい（2000 μm, 1000 μm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, 63 μm, 45 μm）を用いてふるい分けし、各ふるいに残留した試料を秤量した。水洗いにより 45 μm のふるい

を通過した試料については、あらかじめ 110℃で 1 時間乾燥させ乾燥重量を測定した Whatman 社製 GF/F グラスファイバー濾紙（ポアサイズ 0.7 μm）を用いて濾過し、110℃で 8 時間乾燥させ、デシケーター内で放冷した後、秤量した。これとフィルターの乾燥重量の差を 0.7 μm から 45 μm の重量とした。

データ解析

1) 粒度組成

サーバーネットと凍結コア法で得た粒度分布を合わせるため、サーバーネットで得られた粒径 0.25–2.0 mm の重量百分率と凍結コア法より得られた 0.25–2.0 mm の重量百分率の比を求め、これを凍結コア法で得られた全重量に乗じて、通過重量百分率を補正した。これにより得られる粒径加積曲線より、通過重量百分率 10%, 30% の粒径 D_{10} , D_{30} を求めた。また、AGU の粒径分類基準（山本 1994）の分類による各粒径範囲ごとの重量百分率と細粒土砂（粒径 2 mm 以下）の重量百分率を求めた。さらに、粒度分布の特性を把握するために、Friedman（1961, 1967）の積率公式（(3)–(6)式）を用いて、平均粒径（mean: m ）、淘汰度（standard deviation: σ ）、歪度（skewness: α_3 ）、尖度（kurtosis: α_4 ）を算出した。その際、粒径（ $X(\text{mm})$ ）を（2）式により ϕ スケールに変換した。

$$\phi = -\log_2 X \quad (2)$$

$$m = 1 / 100 \sum f x_i \quad (3)$$

$$\sigma = (\sum f_i (x_i - m)^2 / 100)^{1/2} \quad (4)$$

$$\alpha_3 = (1 / 100) \sigma^{-3} \sum f_i (x_i - m)^3 \quad (5)$$

$$\alpha_4 = (1 / 100) \sigma^{-4} \sum f_i (x_i - m)^4 \quad (6)$$

ただし、 x_i は各粒径の中間値、 f_i は各粒径の重量百分率である。なお、淘汰度は粒径の分級度合いを示し、値が小さいほど粒度分布の広がりが狭く、分級性がよいことを示す。歪度は、粒度分布曲線の対称性を示し、平均粒径を中心に、粗粒側へ偏っている場合には正の値を示す。尖度は粒度分布曲線における尖りの度合いを表し、値が大きいほど突出した分布曲線を示す。すなわち、分布曲線において、最頻値部分への粒径の密集度を示している (Friedman 1961; 松本 1977)。

2) 統計解析

粒度組成、透水係数、浮き石割合の関係を検討するため、それぞれの変量の間で相関分析を行った。また、各河川の物理環境 (河床勾配、川幅、流速、水深)、粒度組成、透水係数、浮き石割合の違いを検討するため、各調査期間で河川を因子とした一元配置の分散分析 (one-way ANOVA) を行った。その結果、河川間で有意差が認められた場合、Tukey の方法による事後比較を行った。また、各河川における平水時と出水後の粒度組成、透水係数、浮き石割合の違いを検討するために、平水時 (normal flow) と出水後 (after the flood) の各変量について t 検定を行った。なお、統計解析を行うにあたり、正規性、等分散性を仮定するため、透水係数、粒径については対数変換を行った。

結 果

粒度組成と浮き石割合、透水係数の関係

本研究で得られた河床材料は、いずれの河川においても粒径 63 mm 以下の礫・砂・シルト・粘土で構成されていた。粒度組成と浮き石割合及び透水係数の間で、相関分析を行った結果、浮き石割合は淘汰度を除く全ての変量と相関が認められ、特に歪度および尖度と比較的強い正の相関が認められた (Table 2)。また、浮き石割合は細粒土砂 (2 mm 以下) および 1 mm 以下の重量百分率と負の相関が得られ、それらの中でも粒径 0.125-1.0 mm の重量百分率と最も強い相関が認められた (Table 2)。一方、透水係数も、淘汰度を除く全ての変量と相関が認められ、特に D_{30} と比較的強い正の相関が認められた (Ta-

Table 2. Correlation coefficients between openwork gravel hydraulic conductivity (K) and variables of grain size distribution in the study reaches ($n=72$). *and** indicate significant levels at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

Variables of grain size distribution	Openwork gravel (%)		K (cm/s)	
Mean	-0.403	**	-0.352	**
SD	0.018		-0.123	
Skewness	0.605	**	0.455	**
Kurtosis	0.557	**	0.410	**
D_{10}	0.382	**	0.311	**
D_{30}	0.413	**	0.467	**
Percentage of				
<2.0 mm	-0.428	**	-0.356	**
<1.0 mm	-0.400	**	-0.373	**
0.125-1.0 mm	-0.448	**	-0.392	**

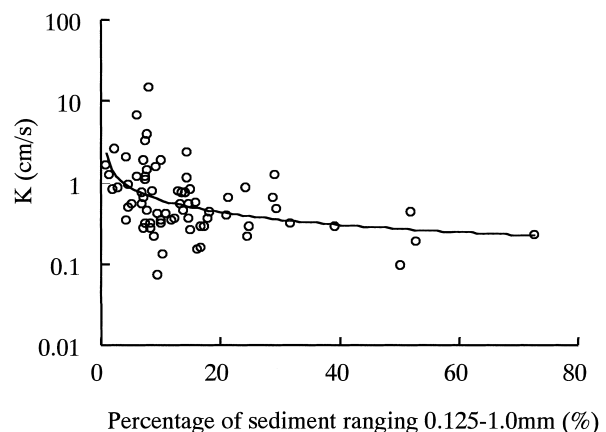


Fig. 4. Relationship between hydraulic conductivity (K) and weight percentage of 0.125-1.0 mm sized sediment in substrate. Solid line indicate a regression fitting curve between K and weight percentage of 0.125-1.0 mm

ble 2)。さらに細粒土砂 (2 mm 以下) および 1 mm 以下の重量百分率と負の相関が得られ、各粒径範囲の中でも粒径 0.125-1.0 mm の重量百分率と最も強い相関が認められた (Table 2, Fig. 4)。また、浮き石割合と透水係数の間で正の相関が認められ ($r=0.488$, $p<0.01$, $n=72$)、浮き石割合の増加に伴って透水係数が大きくなることが明らかになった。

平水時における各河川の浮き石割合、粒度組成、透水係数の違い

本研究では、全ての河川で同様な河床勾配、川幅、流速、水深になるように調査区間を設定したが、平水時

Table 3. General description of the study reach in the five streams. Comparison of each variable among the five streams (under normal flow) by one-way ANOVA and Tukey-HSD tests. Values denoted by the same letter are not significantly different ($p>0.05$).

Variable	Yurappu river basin									Nukibetsu river basin						one-way	ANOVA
	SE		ab	GR		ab	SK		a	ORE		b	OHN		a	<i>f</i>	<i>p</i>
	Mean	SE		Mean	SE		Mean	SE		Mean	SE		Mean	SE			
Mean wetted width (m) (n=15)	5.14	0.81		5.37	1.17		5.70	0.57		4.51	0.86		5.50	0.89		2.684	0.039
Mean reach gradient (n=3)	0.014	0.008		0.013	0.003		0.009	0.008		0.012	0.017		0.015	0.012		0.146	0.961
Current Velocity (cm / s) (n=9)	27.17	2.36	c	35.83	3.48	bc	30.31	1.30	bc	39.25	2.65	b	60.63	4.18	a	19.732	<0.001
Water Depth (cm) (n=9)	17.89	2.07		21.00	1.89		16.89	1.64		20.22	3.21		20.67	2.01		0.674	0.614

Table 4. Comparison of openwork gravel hydraulic conductivity (K) and variables of grain size distribution among the five streams (under normal flow) by one-way ANOVA and Tukey-HSD tests. Values denoted by the same letter are not significantly different ($p>0.05$). Sample size of each stream is 9.

Variable	Yurappu river basin									Nukibetsu river basin						one-way ANOVA	
	SE			GR			SK			ORE		OHN		<i>f</i>	<i>p</i>		
	Mean	SE		Mean	SE		Mean	SE		Mean	SE		Mean			SE	
Openwork gravel (%)	38.89	10.30	a	2.78	2.78	b	0.00	0.00	b	50.00	5.89	a	0.00	0.00	b	6.338	<0.001
K (cm / s)	0.80	0.21	b	0.36	0.05	b	0.44	0.11	b	3.51	1.45	a	0.47	0.11	b	11.697	<0.001
Variables of grain size distribution																	
Percentage of (%)																	
<2.0 mm	18.23	2.64	b	25.74	2.18	b	25.12	4.69	b	13.06	2.93	b	49.44	8.16	a	8.633	<0.001
Mean (Φ)	−2.79	0.24	b	−2.66	0.18	b	−2.47	0.27	b	−3.50	0.24	a	−1.13	0.33	b	10.884	<0.001
SD	2.27	0.09		2.26	0.09		2.29	0.11		1.94	0.13		1.88	0.11		3.637	0.013
Skewness	1.41	0.14	ab	0.80	0.12	b	0.86	0.20	b	1.62	0.13	a	0.37	0.18	c	9.670	<0.001
Kurtosis	6.14	0.63	bc	3.47	0.31	d	3.58	0.54	d	7.13	0.92	ab	4.09	0.35	cd	8.086	<0.001
D ₁₀ (mm)	1.14	0.31	ab	0.72	0.08	ab	0.69	0.19	b	2.15	0.67	a	0.45	0.07	b	4.135	0.007
D ₃₀ (mm)	5.06	1.17	a	3.72	0.62	a	4.38	0.96	a	10.23	1.80	a	1.49	0.36	b	8.815	<0.001

Table 5. Comparison of openwork gravel hydraulic conductivity (K) and variables of grain size distribution among the three streams (after the flood) by one-way ANOVA and Tukey-HSD tests. Values denoted by the same letter are not significantly different ($p>0.05$). Sample size of each stream is 9.

Variable	SE		GR		SK		one-way	ANOVA
	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE	<i>f</i>	<i>p</i>
Openwork gravel (%)	61.11	8.45	41.67	9.32	30.56	11.62	2.447	0.108
K (cm / s)	1.86	0.62	0.55	0.15	0.74	0.31	5.453	0.011
Variables of grain size distribution								
Percentage of (%)								
<2.0 mm	17.20	3.04	23.76	5.82	19.70	5.25	0.466	0.633
Mean (Φ)	−2.92	0.30	−3.24	0.32	−3.17	0.34	0.277	0.761
SD	2.56	0.22	2.21	0.17	2.15	0.09	1.708	0.203
Skewness	1.72	0.15	1.34	0.31	1.49	0.22	0.655	0.529
Kurtosis	6.80	0.79	6.26	1.76	5.55	0.70	0.283	0.756
D ₁₀ (mm)	1.29	0.36	2.31	1.15	1.49	0.35	0.557	0.58
D ₃₀ (mm)	6.71	1.77	7.84	2.13	8.93	2.32	0.284	0.755

(normal flow)の流速はOHNが他の4河川と比べ有意に高く、川幅はOREがSKに比べ有意に狭かった (Table 3)。川幅に関しては、その差は比較的小さかった (Table 3)。

平水時において遊楽部川流域の3河川と貫気別川流域

の2河川の計5河川で、一元配置の分散分析を行った結果、浮き石割合は、GR、SK、OHNで他の2河川より有意に低く、SK、OHNでは0%であった (Table 4, Fig. 5 (a))。OHNにおける細粒土砂の重量百分率の平均値は49%であり、他の4河川より有意に高く (Table 4)、OHN

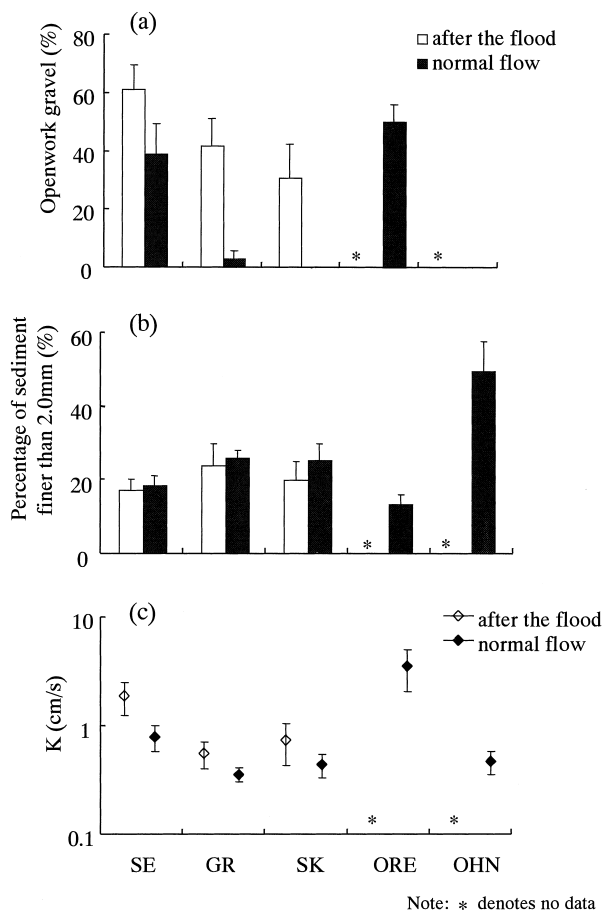


Fig. 5. Mean and SE (bar) of (a) percentage of openwork gravel, (b) weight percentage of 0.125-1.0 mm sediment and (c) hydraulic conductivity (K). There are no data after the flood in ORE and OHN.

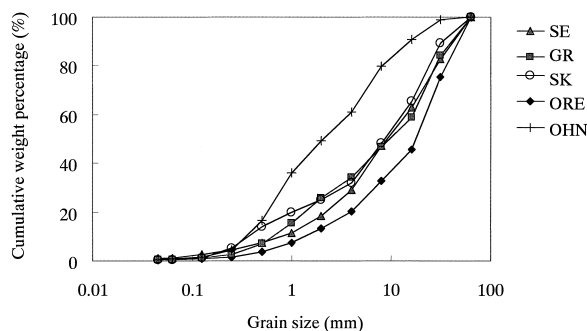


Fig. 6. Average grain size distributions of substrate under normal flow conditions.

>GR>SK>SE>ORE の順に高かった (Fig. 5(b)). また, OHN は ORE に比べ, 平均粒径, 歪度, 尖度が有意に小さく (Table 4), OHN は細粒側に, ORE は粗粒側へ偏った粒径であることが特徴付けられた (Fig. 6). SE, GR, SK の粒度分布には, 特に違いは見られなかったが, SE の歪度, 尖度が高く (Table 4), GR, SK に比べ若干粗粒側に偏った粒度であった (Fig. 6). 透水係数は, ORE で他の河川に比べ有意に大きく (Table 4), 細粒土砂の重量百分率と逆の傾向を示した (Fig. 5(c)).

出水後における各河川の浮き石割合, 粒度組成, 透水係数の違い

出水後において遊楽部川流域の 3 河川で一元配置の分散分析を行った. その結果, SE, GR, SK で浮き石割合が, SE>GR>SK になったが, 河川間に有意な差は認められなかった (Table 5, Fig. 5(a)). 同様に, 粒度組成を示す全ての変量は, 河川間に有意な差が認められなかった (Table 5). これに対し, 透水係数は, GR, SK に比べ SE で有意に高くなった (Table 5, Fig. 5(c)).

各河川における出水後と平水時の浮き石割合, 粒度組成, 透水係数の違い

浮き石割合は, SE, GR, SK の全ての河川で平水時に低下する傾向が見られた (Fig. 5(a)). GR および SK では出水後に比べ, 平水時の浮き石割合が有意に減少した (t -test, GR: $t=4.603$, $p<0.05$; SK: $t=2.630$, $p<0.05$). 細粒土砂の重量百分率は, SK で平水時においてわずかに高かったが, いずれの河川においても有意な差は認められなかった (t -test, $p>0.05$; Fig. 5(b)). 平均粒径・尖度・歪度は, 全ての河川で平水時に小さくなる傾向が見られた (Table 4, 5). その中でも, SK では尖度が平水時に有意に小さくなった (t -test, $t=2.586$, $p<0.05$). 透水係数は, 全ての河川で出水後に比べ平水時に小さくなる傾向がみられたが (Fig. 5(c)), いずれの河川においても有意な差は認められなかった (t -test, $p>0.05$).

考 察

細粒土砂の堆積が浮き石および透水性に及ぼす影響

本研究で用いた凍結コア法では, 粒径 2 mm 以下を中心とした 3-4 cm の礫も含んだ土砂が 20-100 g 程度採取でき, シルト分 (0.062 mm 以下) を含めた粒度分析を行う際にも十分な量を得られた. Petts (1988) が, この方法で得られる粒度組成の精確さを指摘しているように, 本研究においても細粒土砂の重量割合を把握する方法として有効であることが確認された.

浮き石割合が歪度および尖度と比較的強い正の相関が認められたことから、浮き石は、主構成材料となる礫の粒径が大きく、かつ一定の粒径で形成される河床で多くなることが明らかになった。また、McClelland & Brusven (1980) や長坂ほか (2000) は、2–1 mm 以下の砂の堆積量が多くなると、浮き石が減少すると指摘している。その堆積過程として、まず粗い砂や細礫が大きい礫間に堆積し、細かい砂がさらにその間隙を埋め、さらに細かい粒径によって間隙が埋められていくことが水路実験において観察されている (Schälchli 1995)。本結果でも細粒土砂 (2 mm 以下) の重量百分率と浮き石割合との間に強い負の相関が得られたことから、主に 2 mm 以下の粒径が上記の過程を経て堆積し、浮き石が減少すると考えられる。

一方、透水係数と粒度組成の関係は、Hazen 式や Terzaghi 式などに示される様に、 D_{10} や D_{30} で示される土粒子の粒径が小さくなるほど、透水係数が小さくなることが知られており (河野 1989)、本結果でも同様な結果が得られた。さらに、得られた透水係数の値が砂と砂利の混合物の透水係数の値である $1 \times 10^{-1} \sim 10^{-2}$ (河野 1989) の範囲にあることから、流水中の河床でパッカー法を適用した際に得られる透水係数の値の妥当性が示された。また、透水係数は、特に 0.125–1.0 mm の重量百分率の増加により低下することが明らかになった。

これまで、河床の物理環境を定量的に捉えた研究事例により、河床の 2 mm 以下の重量百分率が高くなると、水生昆虫の現存量および種数の減少 (Lemly 1982; 長坂ほか 2000; Wood & Petts 1994)、底生魚類の生息密度の低下 (渡辺ほか 1999; 加村・中村 2000)、サケ科魚類の卵の生残率低下 (Chapman 1988; Reiser & White 1990; 山田・中村 2001) が報告されており、その要因として生息場、営巣場である礫間隙の消失 (Richards & Bacon 1994) や透水性の低下に伴う溶存酸素供給量の減少 (Moring 1982) が指摘されている。本研究からも 2 mm 以下の細粒土砂量の増加は、浮き石の減少や透水性の低下をもたらすことが明らかになり、生物相に及ぼす影響も大きいと考えられる。

各河川の浮き石、細粒土砂量、透水性の違い

掃流力が限界掃流力を超える出水時では、アーモア・レイヤー (armor layer) が壊され、同時に礫間に堆積していた細粒土砂は再び掃流あるいは浮遊し、新たな河床面が作られる (Lisle 1989; Schälchli 1995; Acornley & Sear 1999)。これに対し、掃流力が限界掃流力以下の出水時では、浮遊砂が間隙に堆積して (Jackson & Beschta

1982)、河床の透水性が低下することが実験で確かめられている (Schälchli 1995)。調査を行った出水後と平水時の間には、小出水がいくつか発生しており (Fig. 2)、本結果では、出水後に比べ平水時に浮き石割合および透水係数が低くなり、細粒土砂重量百分率が小さくなる傾向が得られた。これは、この小出水時に供給された細粒土砂が礫間隙に堆積したためと考えられる。

一方、出水後には SE, GR, SK の間で浮き石割合、細粒土砂の重量百分率などの粒度組成が河川間に違いがないのに対し、平水時では GR, SK で浮き石割合が低く、細粒土砂の重量百分率が高かった。同様に、GR, SK で平均粒径、歪度、尖度の変化が大きかった。細粒土砂の堆積量は浮遊砂濃度の増加により促進されることから (Carling 1984; Schälchli 1992; Acornley & Sear 1999)、平水時における河川間の粒度組成の差異は、各河川の小・中出水時の浮遊砂濃度が異なったためと考えられる。また、細粒土砂の堆積量が多い GR, SK では、浮遊砂濃度が高いと推察される。逆に、透水係数は平水時では河川間に差異が見られず、出水後で河川間に違いが現れた。これは、Phillips (1971) が指摘しているように、河床内の透水性は細粒土砂のわずかな増加により低下することを考慮すれば、出水後であっても SE に対し GR と SK では細粒土砂の重量百分率が、若干高かったためと考えられる。従って、粒度組成は、小中出水時の細粒土砂の供給により細粒化し、またそれに伴い浮き石も減少していくが、透水係数はこれらの底質の変化に敏感に反応し、早い段階で変化が現れるものと思われる。

土地利用が浮き石、細粒土砂量、透水性に及ぼす影響

Richards & Host (1994) は、土地利用の異なる 11 流域を対象に土地利用と底質の関係について、農地率が高い流域で細粒土砂の占める割合が高く、はまり石 (enbeddedness) の割合が高くなると指摘している。本結果でも、細粒土砂の重量百分率の高い河川は農地率の高い河川であり、農地率が高くなれば、細粒土砂の重量百分率は高くなり、浮き石割合が減少する傾向が見られた (Table 1, Fig. 5(a), (b))。農地が隣接した河川では、農地における表流水の発生 (佐藤ほか 2000)、それに伴うガリー侵食の発達 (Burkard & Kostaschuk 1997)、河岸崩壊の発生 (Braatz 1993) により、土砂生産量が増加し、同時に流水中の浮遊砂量も増加する (長澤 1992; Allan et al. 1997)。このように河川に隣接した農地が多くなるに従い、浮遊砂量も増加することが知られている。実際に農地率が高い OHN では、ORE に対し河岸の台地斜面でガリー状の崩壊地発生数が多く (長坂 1998)、7 月か

ら12月までの積算浮遊砂量(0.001-2.0 mm)がOREの約4倍の89.0 t/km²にまで及んでいる(佐藤 2000). 本結果でも, OHNは流速が他の河川と比べて大きいにも関わらず, 河床材料に細粒土砂を最も多く含んでいる河川であった. また, 農地開発の進んでいるGR, SKにおいても, 同様な河岸崩壊が多く観察されることを考えれば, OHN, GR, SKで, 細粒土砂の重量百分率が高いのは, このような農地の影響が現れたためと思われる.

一度堆積した細粒土砂は, 大出水による河床のフラッシュ・アウトにより一時的に除去されるが, 農地などの土地開発により細粒土砂の生産量が多い流域では, 小出水時に細粒土砂の流入および河床への堆積が大きく進行するものと考えられる. そのような場では, 極端な浮き石の減少や河床の透水性の低下が現れ, 生物相に重大な悪影響を及ぼすと考えられる. 特に, 本研究で対象とした平瀬は, サクラマスが多く産卵する場であり(柳井ほか 1996), 細粒土砂の堆積により産卵床の透水性が低下し, 溶存酸素供給量が減少するため卵の生残率が低下する(山田・中村 2001). これらを考慮すれば, 河川環境の保全を目標とした流域管理を行う場合, 河川への細粒土砂の流入を制限することは必須である. そのためには, 流域における細粒土砂の生産源の空間分布および生産量を把握することが重要である. また, 本研究で用いた凍結コア法, パッカー法は, 簡便であり, 流水中の河床における細粒土砂の採取および透水係数の計測に有効であった. 今後これらの方法を活用して細粒土砂に関する調査事例を増やし, 河床への堆積過程さらに堆積防止方法を検討する必要がある.

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 北海道大学大学院農学研究科の新谷融教授, 菊池俊一助手, 宮崎大学農学部清水収助教授には, 有意義なご指摘をいただいた. 稗田一俊氏には遊楽部川流域の情報を提供していただいた. 北海道酪農学園大学の金子正美助教授には, GISのデータを使用するにあたり協力していただいた. 岡山大学環境理工学部の西垣誠教授, 小松満助手には, 透水試験について御助言をいただいた. 北海道大学農学部学生諸氏には, 野外調査を手伝っていただいた. また, 論文を作成するにあたり担当編集者ならびに校閲者の方々には有意義な御助言をいただいた. ここに記して深謝の意を表す. なお, 本研究の一部は, 文部省科学研究費(10460059), (財)リバーフロント整備センター, (財)河川環境管理

財団の河川整備基金助成事業および(社)砂防学会ワークショップの研究助成により実施されたものであることを付記する.

摘 要

細粒土砂(<2 mm)の堆積が浮き石割合, 透水性に与える影響を検討するため, 北海道南西部の遊楽部川流域と貫気別川流域の底質が異なる5つの山地小河川を対象として, 粒度組成と浮き石割合および透水係数の調査を行った. また, これらの河川間の違いを明らかにした上で, 各河川の土地利用の特徴について考察した. なお, 流水中の河床における細粒土砂の採取には凍結コア法を用い, 透水係数の計測には原位置透水試験のパッカー法を適用した.

浮き石割合および透水係数は, 平均粒径, 歪度, 尖度と強い相関が見られ, また細粒土砂の重量割合と負の相関が得られた. なかでも, 粒径0.125-1.0 mmの重量百分率と最も強い負の相関が得られた. これらのことから, 細粒土砂の堆積により, 浮き石割合および透水係数が低下することが定量的に明らかになった. また, 浮き石割合の減少により透水係数が低下することが得られた. 一方, 河川間において, 細粒土砂の重量百分率, 浮き石割合, 透水係数に違いが認められ, 細粒土砂量が多く, 透水係数や浮き石割合が低い河川は, 農地率の高い河川であった. 農地開発により表土流出や河岸崩壊が生じ, 土砂生産量が増加すると報告されていることから, 農地率が高い河川では, そのような影響が底質に現れたと考えられた. また, 細粒土砂を多く含む河床では, 出水によるフラッシュ・アウトがない場合, 細粒土砂の堆積が進行し, 河川生物相に及ぼす影響が大きいことが予想された.

本研究で用いた凍結コア法およびパッカー法は, 流水中の細粒土砂の採取および透水係数の測定方法として有効であった. 今後, 河川環境の保全を考える際, これらの方法を活用して細粒土砂に関する知見を深め, 河床への堆積過程さらに堆積防止方法を検討する必要がある.

引用文献

- Acornley R.M. & Sear D.A. (1999) Sediment transport and siltation of brown trout (*salmon trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes* **13**: 447-458.
Allan J.D., Erickson D.L. & Fay J. (1997) The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales. *Fresh water Biology* **37**: 149-161.

- Barton B. A. (1977) Short-term effects of highway construction on the limnology of a small stream in southern Ontario. *Freshwater Biology* **7**: 99-108.
- Boulton A. J. (1997) Land-use effects on the hyporheic ecology of five small streams near Hamilton, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **31**: 609-622.
- *Braatz D. A. (1993) Erosion control assessment study: total suspended solid (TSS) in Eastatoe and little Eastatoe creeks, Pickens County, South Carolina. Research report to Duke Power Company, Huntersville, North Carolina.
- Burkard M. B. & Kostaschuk R. A. (1997) Patterns and controls of gully growth along the shoreline of lake Huron. *Earth Surface Process and Landforms* **22**: 901-911.
- Carling P. A. (1981) Freeze-sampling coarse river gravels. In S. Trudgill et al. (eds.) *Shorter Technical Methods* (IV). British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin **29**: 19-29.
- Carling P. A. (1984) Deposition of fine and coarse sand in an open-work gravel bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **41**: 263-270.
- Carling P. A. & Reader N. A. (1982) Structure, composition and bulk properties of upland atream gravels. *Earth Surface Processes and Landforms* **7**: 349-365.
- Chapman D. W. (1988) Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* **117**: 1-21.
- Dargan G. (1978) A note on packer, slug, and recovery tests in unconfined aquifers. *Water Resources Research* **14**: 929-934.
- Dahn C. N. & Valett H. M. (1996) Hyporheic zones. In: *Methods in Stream Ecology* (eds. Hauer, F. R. & Lamberti, G. A.), pp. 107-119. Academic Press, California.
- Friedman G. M. (1961) Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics. *J. Sed. petro.* **31**: 514-529.
- Friedman G. M. (1967) Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sand. *J. Sed. petro.* **37**: 327-354.
- Graham A. A. (1990) Siltation of stone-surface periphyton in rivers by clay-sized particles from low concentrations in suspension. *Hydrobiologia* **199**: 107-115.
- 北海道立林業試験場・北海道立水産孵化場・北海道立中央農業試験場 (1998) 農村地帯における河畔環境の再生に関する研究. 平成 9 年度共同研究報告書.
- 北海道立林業試験場・北海道立水産孵化場・北海道立中央農業試験場 (1999) 農村地帯における河畔環境の再生に関する研究. 平成 10 年度共同研究報告書.
- 北海道立林業試験場・北海道立水産孵化場・北海道立中央農業試験場 (2000) 農村地帯における河畔環境の再生に関する研究. 平成 11 年度共同研究報告書.
- Hvorslev M. J. (1951) Time lag and soil permeability in ground-water observations. *Waterways experiment station corps of engineers, U. S. Army, Vicksburg, Mississippi*.
- 石渡輝夫 (1994) 北海道における農地の造成と土層改良一営事業を中心として一. *土壌の物理性* **70**: 73-78.
- Jackson W. L. & Beschta R. L. (1982) A model of two-phase bedload transport in an Oregon coast range stream. *Earth Surface Processes and Landforms* **7**: 517-527.
- 可児藤吉 (1978) 普及版 可児藤吉全集. 思索社, 東京.
- 加村邦茂・中村太士 (2000) ハナカジカの生息環境についての一考察—底質に着目して—. *日本林学会北海道支部論文集* **48**: 133-135.
- 河野伊一郎 (1989) 地下水工学. 鹿島出版, 東京.
- Lemly A. D. (1982) Modification of benthic insect communities in polluted streams: Combined effects of sedimentation and nutrient enrichment. *Hydrobiologia* **87**: 229-245.
- Lisle T. E. (1989) Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, North Coastal California. *Water Resources Research* **25**: 1303-1319.
- 松本秀明 (1977) 仙台付近の海岸平野における微地形分類と地形発達—粒度分析法を用いて—. *東北地理* **29**: 229-237.
- McClelland W. T. & Brusven M. A. (1980) Effects of sedimentation on the behavior and distribution of riffle insects in a laboratory stream. *Aquatic Insects* **2**: 161-169.
- Moring J. R. (1982) Decrease in stream gravel permeability after clear-cut logging: An indication of intergravel conditions for developing salmonid eggs and alevin. *Hydrobiologia* **88**: 295-298.
- 長坂晶子 (1998) 土地利用の影響を知って川の濁りを防ごう—胆振貫気別川の例から—. *光珠内季報* **112**: 9-12.
- 長坂晶子・中島美由紀・柳井清治・長坂有 (2000) 河床の砂礫構成が底生動物の生息環境に及ぼす影響—森林および畑地河川の比較—. *応用生態工学* **3**: 243-254.
- 長澤徹明 (1992) 平成 3 年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書「積雪寒冷地の小流域保全に関する農業土木的研究」81-84.
- 西垣誠 (1986) 単孔式原位置透水試験法の整理 (その 2) 地下水と井戸とポンプ **28**(3): 15-24.
- Petts G. F. (1988) Accumulation of fine sediment within substrate gravels along two regulated rivers, UK. *Regulated Rivers: Research and Management* **2**: 141-153.
- *Phillips R. W. (1971) Effects on sediment on the gravel environment and fish production, In J. K. Krygier and J. D. Hall (eds.) *Forest land uses and stream environment*. Oregon State Univ., Corvallis, Ore.
- Reiser D. W. & White R. G. (1990) Effects of streamflow reduction on Chinook salmon egg incubation and fry quality. *Rivers* **1**: 110-118.
- Richards C., Host G. H. & Arthur J. W. (1993) Identification of predominant environmental factors structuring stream microinvertebrate communities within a large agricultural catchment. *Freshwater Biology* **29**: 285-294.
- Richards C. & Bacon K. (1994) Influence of fine sediment on macroinvertebrate colonization of surface and hyporheic stream substrates. *Great Basin Naturalist* **54**: 106-113.
- Richards C. & Host G. (1994) Examining land use influence on stream habitats and macroinvertebrates: A GIS approach. *Water Resource in Bulletin* **30**(4): 729-737.
- 佐藤弘和 (1999) 貫気別川流域における浮遊土砂の流出特性. 平成 10 年度共同研究報告書「農村地帯における河畔環境の再生に関する研究」北海道立林業試験場; 北海道立水産孵化場; 北海道立中央農業試験場, 1-21.
- 佐藤弘和・長谷川昇司・長坂有 (2000) 土壌物理性からみた

- 畑地からの浮遊土砂発生機構と林地における補足効果 森林立地学会誌 森林立地 **42**(2): 47-52.
- 佐藤弘和 (2000) 貫気別川流域における浮遊土砂の流出特性とその供給源. 平成 11 年度共同研究報告書「農村地帯における河畔環境の再生に関する研究」北海道立林業試験場; 北海道立水産孵化場; 北海道立中央農業試験場, 1-15.
- Schälchli U. (1992) The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. *Hydrobiologia* **235/236**: 189-197.
- Schälchli U. (1995) Basic equations for siltation of riverbeds. *Journal of Hydraulic Engineering* **121**: 274-287.
- Vaux W.G. (1962) Interchange of stream and intragravel water in a salmon spawning riffle. U.S. Fish and Wildlife Service Fishery Bulletin **66**: 479-487.
- Walling D.E. (1990) Linking the field to the river: Sediment delivery from agricultural land. In J. Boardman, I. D. L. Foster, and J. A. Dearing (eds.), pp. 129-152. Soil erosion on agricultural land. John Wiley, Chichester.
- Walling D.E. (1999) Linking land use, Erosion and sediment yields in river basin. *Hydrobiologia* **410**: 223-240.
- 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進 (2001) 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響. 応用生態工学 **4**: 133-146.
- Waters T.F. (1995) Sediment in streams. — Sources, Biological Effects, and Control —. American Fisheries Society Monograph 7, Maryland.
- Wood P.J. & Armitage P.D. (1997) Biological Effects of fine sediment in the Lotic Environment. *Environmental management* **21**(2): 203-217.
- Wood P.J. & Petts G.E. (1994) Low flows and recovery of macroinvertebrates in a small regulated chalk stream. *Regulated Rivers: Research and Management* **9**: 303-316.
- Wright J.E., Armitage P.D., Furce M.T. & Moss D. (1989) Prediction of invertebrate communities using stream measurements. *Regulated Rivers: Research and Management* **4**: 147-155.
- 柳井清治・永田光博・積丹共同調査グループ (1996) 河川改修がサクラマス産卵環境に及ぼす影響. 砂防学会誌 **49**(4): 15-21.
- 山田浩之・中村太士 (2000) 真駒内川における微細粒砂堆積と付着藻類の現存量に関する研究 日本林学会北海道支部論文集 **48**: 136-138.
- 山田浩之・中村太士 (2001) 微細砂堆積による河床透水性の低下がサクラマス卵の生残率に及ぼす影響 日本林学会北海道支部論文集 **49**: 112-114.
- 山本晃一 (1994) 沖積河川学 堆積環境の視点から. 山海堂, 東京.

*印を付した文献は、直接参照していない。