

| 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 | http://hdl.handle.net/2115/68549 |
| Rights | © 応用生態工学会 |
| Туре | article |
| File Information | 109-120(Vol.4 No.2).pdf |



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP



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^{0*}, Hiroyuki YAMADA⁰ and Futoshi NAKAMURA⁰: 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

Ecology and Civil Engineering

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2mm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 うとすることが試みられている (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,可児

(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,現地において未撹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定常法であるス 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5mから6mの瀬と淵が繰り返す Bb型 (可児 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 street. | eams |
|--|------|
|--|------|

| | | 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 th | ne upstream wtaershed | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | |
| | Mioccer | ıe | Pliocene | Pleistocene | | | | |
| | sandstone, mudsone, | conglate and | sandstone, conglomerate, | volcanic ash, pumice and | | | | |
| | tuff and | sandstone | siltstone and tuff | sand | | | | |
| | conglomerate | | | | | | | |

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,かつ未撹乱状態における透 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).

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

本研究では、塩化ビニル製パイプ(内径(d)=3.0 cm, 長さ=1m)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. 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 μ m のふるい上 で水洗いを行った. 45 μ m 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 μ m, 1000 μ m, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m, 63 μ m, 45 μ m)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 μ m 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 μ m)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 μ m から 45 μ m 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 D₁₀、D₃₀を求めた.また、AGUの粒径分類基準(山 本 1994)の分類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(mm)) を (2) 式により *φ*スケールに変換した.

$$\phi = -\log_2 X \tag{2}$$

$$m = 1 / 100 \Sigma f_i x_i \tag{3}$$

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

$$\alpha_{3} = (1 / 100) \sigma^{-3} \Sigma f_{i} (x_{i} - m)^{3}$$
(5)

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

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(oneway 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 D₃₀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 | * * |





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).

| | | | Yurapp | ı river ba | sin | Nukibetsu river basin | | | | | ono-wow | ANOVA | | |
|-----------------------------------|-------|-------|---------|------------|----------|-----------------------|----|-------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|
| | S | E | (| GR | S | SK | | | RE | OHN | | | one-way | ANOVA |
| variable | Mean | SE | Mean | SE | Mean | SE | | Mean | SE | Mean | SE | | f | Þ |
| Mean wetted width (m) (n=15) | 5.14 | 0.81 | ab 5.37 | 1.17 | ab 5.70 | 0.57 | a | 4.51 | 0.86 | b 5.50 | 0.89 | ab | 2.684 | 0.039 |
| Mean reach geadient $(n=3)$ | 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 t | bc | 39.25 | 2.65 | b 60.63 | 4.18 | а | 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 grian 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.

| | Yurappu river basin | | | | | | | Nukibetsu river basin | | | | | | ono-way ANO | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|-------|----|-------|------|----|-------|-----------------------|---|-------|------|----|-------|-------------|----|-----------------|---------|--|
| 17 11 | SE | | | GR | | | SK | | | ORE | | | OHN | | | - one-way ANOVA | | |
| variable | Mean | SE | | Mean | SE | | Mean | SE | | Mean | SE | | Mean | SE | | f | Þ | |
| Openwork gravel (%) | 38.89 | 10.30 | а | 2.78 | 2.78 | b | 0.00 | 0.00 | b | 50.00 | 5.89 | а | 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 | а | 0.47 | 0.11 | b | 11.697 | < 0.001 | |
| Variables of grain size distribution | on | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 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 | а | 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 | а | -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 | а | 0.37 | 0.18 | с | 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 | а | 0.45 | 0.07 | b | 4.135 | 0.007 | |
| D ₃₀ (mm) | 5.06 | 1.17 | а | 3.72 | 0.62 | а | 4.38 | 0.96 | а | 10.23 | 1.80 | а | 1.49 | 0.36 | b | 8.815 | < 0.001 | |

Table 5. Comparison of openwork gravel hydrualic 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 | SI | E | | G | R | | S | K | one-way | ANOVA | |
|---------------------------|-------------|------|---|-------|------|---|-------|-------|---------|-------|-------|
| variable | Mean | SE | | Mean | SE | | Mean | SE | | f | Þ |
| 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 | а | 0.55 | 0.15 | b | 0.74 | 0.31 | b | 5.453 | 0.011 |
| Variables of grain size d | istribution | | | | | | | | | | |
| 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2mm以下を中 心とした3-4cmの礫も含んだ土砂が20-100g程度採取 でき、シルト分(0.062mm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 (Schalchli 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2mm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2mm 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、アーマー・ 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 & Bescha 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89.0t/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(<2mm)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0.125-1.0mm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) Sedimnet 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 hyporheric 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 Reserch 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 fequency 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 sespension. 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国 営事業を中心として一. 土壌の物理性 **70**:73-78.

Jackson W. L. & Bescha 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 の一考察一底質に着目して一.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一.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 一胆振貫気別川の例から一.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 enbironment. Oregon State Univ., Corvallis, Oreg.
- 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 stram microinvertebrate communities within a large agricultlural catchment. Freshwater Biology 29: 285–294.
- Richards C. & Bacon K. (1994) Influence of fine sediment on macroinvertebrate colonization of surface and hypoheric stream substrates. Great Basin Naturalist 54: 106-113.
- Richards C. & Host G. (1994) Examing 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 meseurements. 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 修がサクラマスの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.