論　文

択伐施業後における渓流水に含まれる微細土濃度の変化

佐藤弘和*,[1]・寺澤和彦[1]

佐藤弘和・寺澤和彦：**択伐施業後における渓流水に含まれる微細土濃度の変化　日林誌 86：349〜357, 2004**　2001年の冬に択伐が行われた森林小流域（流域面積9.2 ha）において，2001年6月〜2002年11月までの渓流水中の微細土（TFS）とその有機成分（OFS）の濃度変化を測定し，択伐前（1997年6〜7月）および無施業流域の濃度と比較した。伐採流域におけるTFS濃度とOFS濃度の平均値は，それぞれ択伐前の値に比べて有意に高かった。伐採実施年における伐採流域のTFS濃度は，無施業流域に比べて有意に高かった。TFS濃度に占める有機成分濃度の割合（OFS割合）は，択伐前後ともに流量があるしきい値を超えたときに値が収束する傾向を示した。増水時のOFS割合は，択伐前に比べて択伐後に小さくなった。択伐後の流路状況の観察から，択伐施業にともなうTFS流出のうち，特に無機成分の流出促進は主に渓流流路直近での集材路敷設にともなう堆積土砂に起因すると推察された。
キーワード：森林流域，択伐，微細土，無機成分，有機成分

Sato, H. and Terazawa K.: **Changes in the Concentrations of Fine Solids in Stream Water after Selective-cut Logging in the Forested Catchment, Central Hokkaido, Northern Japan. J. Jpn. For. Soc. 86: 349〜357, 2004** Concentrations of total fine solids (TFS) and organic fine solids (OFS) in the stream water were measured from June to November in 2001 and 2002, in a forested catchment of 9.2 ha where selective-cutting had been carried out in the winter of 2001. TFS and OFS concentrations from the selective-cutting catchment were significantly higher after cutting as compared with those before cutting (1997). The significant difference in TFS concentrations between selective-cutting and control catchments was observed during the first year following the logging; average TFS concentration was higher in the selective-cutting catchment than that in the control. Ratio of OFS to TFS (=OFS concentration/TFS concentration), which reached a constant value as the stream discharge increased over a critical value were significantly lower during the period after logging as compared with that prior to logging. According to the observation at the disturbed area in the selective-cut catchment, the increase of inorganic component of TFS after logging seemed to result from sediment deposition below the skid trails adjacent to the stream.
Key words: fine solids, forested catchment, inorganic fine solids, organic fine solids, selective-cut logging

I. はじめに

間伐や択伐などの森林伐採は，森林経営にとって必要不可欠な行為である。しかし，伐採行為はときとして大量の浮遊土砂を発生させ，河川において急激な濁水化を引き起こすことがある。人為攪乱によって生じた浮遊土砂流出は，農業や水産業，生活用水に対して大きなインパクトを与え，経済被害を及ぼすことがある。さらに，浮遊土砂は，魚類生息（Sutherland *et al.*, 2002），産卵床（Sheridan and McNeil, 1968；山田・中村，2001），底生生物（長坂ら，2000など），海産資源（荒川・松生，1990など）に対して，負のインパクトを及ぼすことが報告されている。各種産業や生活用水への被害だけでなく，こうした生態系への影響を論じた研究成果が蓄積されるにつれ，浮遊土砂流出に対する地域住民の関心が高まっている。ただし，地域住民から行政機関への要請の中には，川の濁りを森林伐採が原因であると短絡的に結びつける傾向もある。こうした状況が生じる原因には，森林伐採や林地用途転換による濁りの変化に関する情報不足が一端を担っている。

森林伐採と水土流出に関する研究を概観すると，欧米に比べて本邦での研究数は十分ではない。我が国における森林伐採と水流出に関する研究は，1960年代から現在に至るまで行われている（遠藤ら，1961；志水ら，1984；志水，1990；眞板ら，2003）。しかし，森林伐採と浮遊土砂に着目した研究数は，1990年代以降から増加する傾向にあるが，まだ端緒についたばかりといえる（柳井・寺澤，1998；Kim *et al.*，2000；國松，2000；堀田ら，2001）。さらに，上記の研究例の中には，森林伐採の方法として皆伐が採用されている場合がある。現在では，森林経営の上で木材生産重視型から公益的機能重視に転換したために，皆伐行為そのものが少なくなりつつある。そのため，皆伐ではなく間伐や択伐による浮遊土砂流出の特徴を明らかにすることは必要であり，その結果は水環境に配慮した森林施業方法を確立する上で有益な情報を提供するものと考えられる。

また，森林伐採を受けた流域を対象とした研究では，浮遊土砂濃度やその流出量など量的流出特性に基づく評価は多いが，有機物と無機物の配分といった浮遊土砂の成分比率を論じた研究は少ない（Likens and Bormann，1995；柳井・寺澤，1998）。有機物は，河川生態系内を流れる

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author）　E-mail : akebono@hfri.bibai.hokkaido.jp
[1] 北海道立林業試験場（079-0198 美唄市光珠内町東山）
Hokkaido Forestry Research Institute, Koushunai, Bibai 079-0198, Japan.
（2004年5月13日受付；2004年9月6日受理）

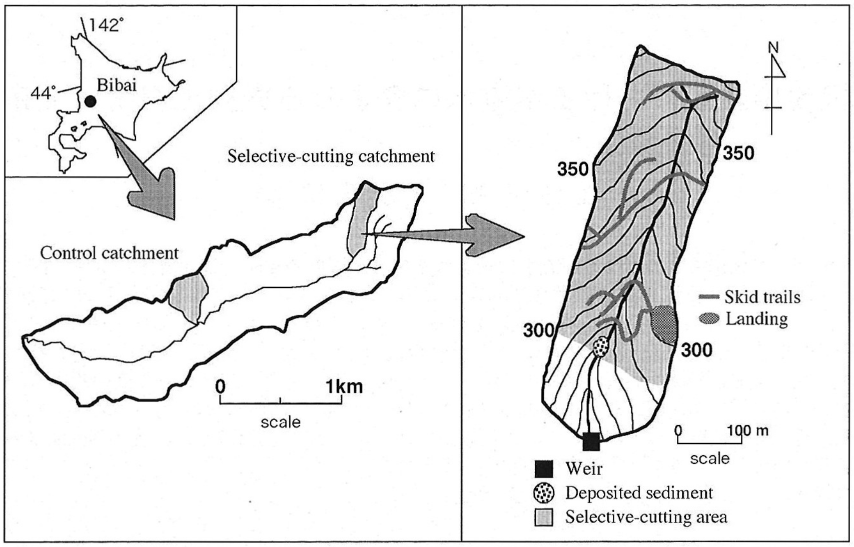

図-1. 試験流域
Map showing the experimental catchment.
集材路は衛生画像（2002年5月7日撮影）で識別できたもののみを示した。
Skid trails shown in this map are only those which were recognizable on the satellite (QuickBird) image (May 7, 2002).

エネルギーとして捉えられることがある（Fisher and Likens, 1973）。しかし，浮遊土砂を扱った研究では，有機物と無機物を一括して「浮遊土砂」として扱うか，有機物と無機物をそれぞれ個別に扱う傾向にある。水生生物にとってプラスの働きを示す有機物とマイナスの影響を及ぼす無機物を同時に取り扱うことは，森林伐採がもたらす土砂流出に対するインパクトを評価する上でも重要である。

本研究は，森林小流域で行われた択伐施業によって，浮遊土砂の一種である微細土（粒径0.1 mm以下）の量的変化のみならず，その有機成分（本論では，微細土に含まれているという意味で有機物ではなく有機成分と述べる）濃度の変化を解明することを目的とする。なお，微細土を対象とした理由は，河床材料との交換が極めて少ないといわれている浮遊物質であり（土木学会水理委員会，1999），河道に流出した大部分の量が流下することから，上流から沿岸域まで流下する間に水生生物や産業用水に悪影響をもたらす可能性が高いと考えられるからである。

II. 調査地域の概要

試験研究流域（以後，伐採流域と表記）は，北海道中央部美唄市にある林業試験場光珠内実験林内に位置し（北緯43°16′30″，東経141°52′40″），ビバイイクシュンベツ川支流である間の沢川流域の一支流域である（図-1）。流域面積は9.2 ha，比高は約130 mである。伐採流域内の平均斜面勾配は32.5%，主流路の平均縦断勾配は15.8%である。基岩地質は，割れ目を持つ第三系の砂岩，泥岩である。光珠内実験林内の土壌は適潤性褐色森林土であり（国土庁土地局，1977），層序（層厚）は表層から腐植質のA層（厚さ20 cm程度），腐植の乏しいB層（厚さ30 cm程度），基岩風化物のC層（厚さは不明）である。なお，流路近傍の急斜面では，基岩上の土壌層厚が約10～15 cm程度しかない。林相は，林分材積が約150～200 m^3 ha^{-1}の落葉広葉樹林であり，林冠構成樹種としてはミズナラ（*Quercus crispula*），イタヤカエデ（*Acer mono*），オニグルミ（*Juglans ailanthifolia*），ホオノキ（*Magnolia obovata*）などが混在する。林床は，クマイザサ（*Sasa senanensis*）が優占する。

伐採流域上流部において，2001年1～2月に択伐が実施された。択伐された立木の本数や材積は明らかではないが，択伐後の現地観察によると伐採木の材積比率が10～20%程度の択伐が行われたとみられた。流域左岸側の尾根部には，土場が設けられた。等高線と平行に開設された集材路は一部渓流流路を横断しており，集材路下流側の流路内（流域末端から流路長にして134 mの上流側の地点）には伐根や枝条，集材路起源の土砂が大量に堆積していた。択伐後には林冠のうっ閉度合いは低下したが，積雪期に伐採したために，伐採跡地の下層植生は集材路と土場を除いて伐採前と同様にクマイザサが繁茂している。

2001年には伐採後の濃度レベルを比較するために，伐採流域近傍（直線距離にして約1.4 km離れている）に対照流域（観測期間中は無施業）を新たに設けた。流域面積は，伐採流域とほぼ同じ9.5 haである。基岩地質は，伐採流域と同じである。林相は，試験林として植栽されたトドマツ人工林（植栽面積は約5 ha，40年生で胸高直径25 cm以上）ならびに広葉樹（樹種は伐採流域と同等）である。林床は，クマイザサが優占している。流域内には尾根と中流部に作業道が通っているが，流路内に大量の土砂を供給するには至っていない。

III. 研　究　方　法

1.　流量の観測と採水方法

伐採流域では，択伐前の1994年7月から1997年11月までの期間，流量の連続観測を行っていた（佐藤，1999）。この時期の流量計測には，流域末端に設置した90°Vノッチ量水堰に取り付けた圧力式自記水位計（コーナ札幌製DS-64K2）により水位の連続観測を行い，流量公式により流量を算出した。1997年6～7月（この期間を伐採前と呼ぶ）には，量水堰に設置した自動採水器（ISCO社製3700型）により降雨時における渓流水の連続採水を行った。

択伐後である2001年6～11月（この期間を伐採実施年と呼ぶ）と2002年5～11月（この期間を伐採実施翌年と呼び，伐採実施年とあわせた場合には単に伐採後と呼ぶ）の流量測定では，採水時において越流深をスケールにより直接測定し，流量公式により流量に換算した（単位は$\mathrm{L\,s^{-1}}$）。伐採後の採水は，無降雨時には週1回の頻度，降雨イベント中には1～2回の頻度で，1Lのポリエチレン製ビンに渓流水を直接汲む方法で行った。対照流域では，量水堰がないために渓流水を直接汲む採水のみを行った。伐採流域と対照流域の採水時刻の差は，ほとんどの場合で20分以内である。伐採流域におけるサンプル数は，伐採前が120本，伐採実施年と伐採実施翌年がともに28本である。対照流域のサンプル数は，伐採実施年が28本，伐採実施翌年が27本である。

本論では，浮遊土砂のうち，微細土（TFS：total fine solids）を扱うことにした。水理学的見地と過去の文献から，浮遊限界と掃流限界が等しくなる限界粒径約0.1mmは，ウォッシュロードの最大粒径とみなせることが報告されている（江頭・芦田，1981）。ウォッシュロードは有機成分を除いて測定するとされているが（寺嶋，2002），本論では有機物も扱うためにTFSの用語を用いた。微細土に含まれる有機成分と無機成分については，微細土有機成分（OFS：organic fine solids）と微細土無機成分（IFS：inorganic fine solids）とそれぞれ呼ぶことにする。

2.　分析方法

採水した試料のTFS濃度およびOFS濃度の分析方法は，以下のとおりである。あらかじめ電気炉で550℃の温度で1時間乾燥させた後に秤量しておいたガラス繊維濾紙（Whatman製GF/Fフィルター）を吸引濾過器に装着した。試料水の濾過は，0.106mmメッシュのふるいに通しながら吸引濾過器に注いだ。濾過後には，ガラス繊維濾紙を温風乾燥器により80℃で48時間乾燥させた後，電子天秤により0.1mg単位まで秤量した。さらに，秤量し終わった濾紙をマッフル炉により550℃で1時間灼熱し，デシケーター内で放熱させた後，電子天秤により0.1mg単位まで秤量した。TFS濃度は80℃乾燥後重量と濾過前重量の差を濾過水量で除した値，OFS濃度は80℃乾燥後重量から550℃灼熱後重量を引いた値を濾過水量で除した値で求めた。なお，IFS濃度（C_i）は，以下の式で求められる。

$$C_i = C_t - C_o \qquad (1)$$

ここで，C_tはTFS濃度，C_oはOFS濃度である。

また，TFS濃度に占めるOFS濃度の割合（以後，OFS割合R_{OFS}と呼び，百分率で表す）を以下の式で定義した。

$$R_{OFS} \equiv \frac{C_o}{C_t} \times 100 \qquad (2)$$

TFSとOFSの負荷量（Q_{TFS}とQ_{OFS}）は，それぞれ濃度と流量（Q）の積で求めた（$Q_{TFS} = C_t \times Q$，$Q_{OFS} = C_o \times Q$）。なお，濃度は$\mathrm{mg\,L^{-1}}$，負荷量は$\mathrm{mg\,s^{-1}}$を単位として表記する。

IV. 解　析　方　法

1.　伐採前後における濃度，負荷量，OFS割合の比較

伐採前，伐採実施年，伐採実施翌年におけるTFS，OFS濃度を比較するために，流量で重み付けした平均値（以後，加重平均値と称する）を以下の式で求めた。

$$C_m = \frac{\sum C_k \cdot Q_k}{\sum Q_k} \qquad (3)$$

ここで，C_mは加重平均値，C_kとQ_kはある採水時に得られた濃度と流量をそれぞれ表す。

伐採前後における濃度の比較には，伐採後のサンプル時流量（ただし，伐採前に観測された流量の範囲に限定）を用いて，伐採前の流量-負荷量関係式から推定した伐採前負荷量の再現値と伐採後に得られた実測値を比較することで行った。

伐採前のTFS，OFS負荷量を目的変数，流量を説明変数としたべき乗回帰式を求め，伐採実施年と伐採実施翌年の観測流量をこの式に代入することで再現値を算出した後，実測値との間に有意差があるかを検定した（One-Way Repeated Measures ANOVA）。濃度を目的変数としなかったのは，流量との関係においてばらつきが大きく，予測式の分散説明率が負荷量を目的変数とした場合に比べて小さいためである。なお，分散分析を行う前に，TFS，OFS濃度と流量のデータについて等分散性を得るために，各濃度と流量について観測値に1.0を加え対数変換をそれぞれ施した。

OFS割合の比較では，R_{OFS}について逆正弦変換（$R_{OFS}' = \arcsin(R_{OFS})^{0.5}$）を施した後，One-Way Factorial ANOVAを用いた。このANOVAを選択した理由は，流域間比較のようにデータ間に対応がないためである。なお，TFS濃度と同様に伐採前の流量を説明変数とした回帰式を求めたが精度が低いため，OFS割合の比較は三つの時期（伐採前，伐採実施年，伐採実施翌年）すべてを対象に行った。

2.　伐採流域と対照流域における濃度，OFS割合の比較

伐採流域と対照流域のTFS濃度とOFS濃度を比較する場合には，ほぼ同時刻に測定していることから両流域の

データ間に対応関係が存在しているので，各濃度について観測値に1.0を加え対数変換を施した後，One-Way Repeated Measures ANOVAで検定した。

OFS割合の比較では，前節と同様にR_{OFS}を逆正弦変換した後，両流域においてデータ間に対応関係があるためOne-Way Repeated Measures ANOVAを用いた。

なお，以上の分散分析では，自由度dfと統計量F値から求められる有意水準pから有意差を判定した（本論では，有意差を判別する基準として，慣例的に使われている$p<0.05$を採用する）。

3. IFSとOFSの濃度比（I/O比）

伐採流域についてIFS濃度，OFS濃度の共変化をみるために相関係数を求めるとともに，以下の式で定義されるI/O比（*IOR*）を求めた。

$$IOR \equiv \frac{C_i}{C_o} \qquad (4)$$

ここで，C_iはIFS濃度，C_oはOFS濃度である。

V. 結　　果

1. 伐採前後における流量-濃度関係の比較

1) TFS濃度とTFS負荷量

伐採流域における択伐前後の比流量とTFS濃度ならびにOFS濃度の関係をそれぞれ図-2に示す。この図では観測結果が広く応用されるために，流量を用いずに比流量（単位は$\mathrm{L\ ha^{-1}\ s^{-1}}$）で表示した。伐採前の観測期間におけるTFS濃度は，100 $\mathrm{mg\ L^{-1}}$未満であった。伐採実施年のTFS濃度は，最大で2,048 $\mathrm{mg\ L^{-1}}$と高い値を示した。TFS濃度の加重平均値は，伐採前が10.1 $\mathrm{mg\ L^{-1}}$，伐採実施年が560.6 $\mathrm{mg\ L^{-1}}$，伐採実施翌年が42.4 $\mathrm{mg\ L^{-1}}$であった。伐採前に比べて伐採実施年の加重平均値は56倍に増えたが，伐採実施翌年は4.2倍にまで減少した。

伐採前後では，採水時における比流量の範囲が異なっているため，伐採前に観測された比流量0.028～0.965 $\mathrm{L\ ha^{-1}\ s^{-1}}$の範囲内で伐採前後のTFS濃度を比較した。伐採前のTFS負荷量と比流量からは，有意なべき乗回帰式

$$Q_{TFS} = 80.4\ Q^{1.51} \qquad (5)$$

が得られた（$r^2=0.758$，$p<0.0001$）。伐採実施年において，先述の流量範囲内に対応するTFS負荷量の実測値は，伐採前のTFS負荷量再現値に対して有意に異なっていた（表-1）。同様に，伐採実施翌年におけるTFS負荷

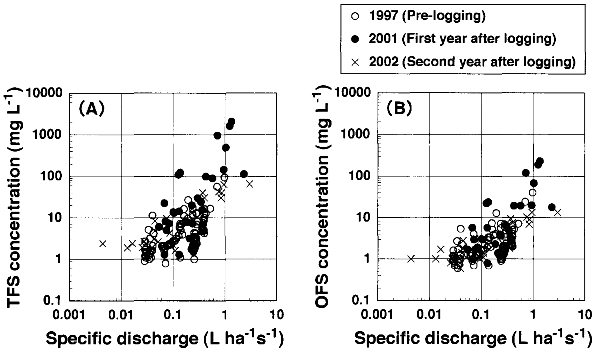

図-2. 伐採流域における択伐前後の流量と微細土（TFS）濃度ならびに微細土有機成分（OFS）濃度の関係
Relationships between stream discharge and total fine solids concentration before and after logging in the selective-cutting catchment.
図中（A）は微細土（TFS），（B）は微細土有機成分（OFS）。
(A), Total fine solids (TFS); (B), Organic fine solids (OFS).

表-1. 伐採実施年と伐採実施翌年におけるTFS負荷量およびOFS負荷量の再現値と実測値の分散分析結果
Results of one-way repeated measures ANOVA for TFS load and OFS load between observed values in each year after logging and estimated values corresponding to the same discharge in sampling before logging.

Dependent variable	Source	*df*	Sum of squares	*F* statistics	Significant level
2001 (First year after logging)					
TFS load	A (samples)	22	18.82		
	B (estimated *vs.* observed loads)	1	4.99	30.64	<0.0001
	A×B (residual)	22	3.58		
	Total	45	27.39		
OFS load	A (samples)	22	12.28		
	B (estimated *vs.* observed loads)	1	1.42	16.04	0.0006
	A×B (residual)	22	1.95		
	Total	45	15.64		
2002 (Second year after logging)					
TFS load	A (samples)	21	22.74		
	B (estimated *vs.* observed loads)	1	1.14	21.22	0.0002
	A×B (residual)	21	1.13		
	Total	43	25.02		
OFS load	A (samples)	21	14.40		
	B (estimated *vs.* observed loads)	1	0.21	9.83	0.0050
	A×B (residual)	21	0.46		
	Total	43	15.08		

量の実測値は，伐採前負荷量の再現値に対して統計的に有意な差が認められた（表-1）。なお，この比流量範囲における TFS 濃度の加重平均値は 175.9 mg L^{-1}，伐採実施翌年が 32.1 mg L^{-1} であり，いずれも伐採前の加重平均値 10.1 mg L^{-1} より高い値であった。

2）OFS 濃度と OFS 負荷量

伐採前の OFS 濃度は最大で 40.4 mg L^{-1} であったが，伐採後の OFS 濃度は最大で 234.0 mg L^{-1} と 1 オーダー高い値を示した。OFS 濃度の加重平均値は，伐採前が 4.5 mg L^{-1}，伐採実施年が 69.5 mg L^{-1}，伐採実施翌年が 9.2 mg L^{-1} であった。伐採実施年の平均値は 15.4 倍に増えたが，伐採実施翌年は 2 倍に留まった。OFS 負荷量と比流量の間には，統計的に有意なべき乗回帰式

$$Q_{OFS} = 36.7\ Q^{1.40} \qquad (6)$$

が得られた（$r^2 = 0.795$，$p < 0.0001$）。TFS 濃度と同様の方法で評価した伐採実施年における OFS 負荷量の実測値は，伐採前 OFS 負荷量の再現値に対して有意差がみられた（表-1）。伐採実施翌年も，OFS 負荷量の実測値と伐採前 OFS 負荷量の再現値の間に有意差が認められた（表-1）。この比流量範囲における OFS 濃度の加重平均値は，伐採実施年が 24.8 mg L^{-1}，伐採実施翌年が 7.5 mg L^{-1} であり，ともに伐採前の加重平均値 4.5 mg L^{-1} より高い値であった。

2.　伐採前後における流量-有機物割合の比較

1）OFS 割合

択伐前後における OFS 割合と流量の関係を図-3 に示す。流量が低いときには OFS 割合にばらつきがみられるが，流量が増加するにつれて OFS 割合が一定の値に近づく傾向が認められた。OFS 割合は，ある流量の値（以後，しきい値と称す）を境に，そのばらつきが変化する。

ここで，しきい値は次の方法で求めた。まず，$Q' = \ln(Q+1)$ の式によって流量を対数変換し，Q' の平均値 m と標準偏差 s をそれぞれ求めた。流量がしきい値を超えると OFS 割合のばらつきが減少する傾向を示すことから，$Q_c' = m + s$ を求めた後，$Q_c' = \ln(Q_c + 1)$ の関係より，$Q_c = \exp(Q_c') - 1$ をしきい値とした。流量のしきい値は，伐採前が 3.23 L s^{-1}（比流量で 0.35 L ha^{-1} s^{-1}），伐採実施年が 6.63 L s^{-1}（比流量で 0.72 L ha^{-1} s^{-1}），伐採実施翌年が 4.81 L s^{-1}（比流量で 0.52 L ha^{-1} s^{-1}）となった。

OFS 割合の収束値は，しきい値を超えた場合の OFS 割合の平均値で表した。この方法は，OFS 割合の収束状況をよく再現していた（図-3 中の直線）。求めた OFS 割合の収束値は伐採前が 42%，伐採実施年が 13% となり，両者の値は明らかに異なっていた。伐採実施翌年における収束値は 22% と，伐採実施年より高い値であったが，伐採前よりは低かった。

流量による OFS 割合の変化は，OFS 濃度の変動と IFS 濃度の変動にそれぞれ対応している。ここで，両濃度の対応関係をみるために，OFS 濃度に対する IFS 濃度の変動について，流量のしきい値により $Q > Q_c$（便宜的に高出水とよぶ）もしくは $Q \leqq Q_c$（低出水とよぶ）の条件についてそれぞれ示した。Q_c を超えた場合の OFS 割合の値は，伐採前と伐採実施年，伐採実施翌年においてそれぞれ統計的に有意に異なっていた（表-2）。また，Q_c 以下の場合においても，伐採前後で OFS 割合に有意差が認められた（表-2）。なお，Q_c を超える Q が観測された日における美唄市内の測候所（試験流域から北西約 11 km）で記録された日降水量（札幌管区気象台提供）は，伐採前と伐採実施年，伐採実施翌年ともに 14〜35 mm であった。

2）I/O 比

高出水もしくは低出水の条件別にみた伐採前後の OFS 濃度と IFS 濃度の関係では，六つの例（2 条件×3 時期）について，値が 0.9 を超える有意な相関係数がそれぞれ得られた（表-3）。両出水条件に関わらず，伐採実施年と伐採実施翌年の I/O 比の平均値は，伐採前の値より高かった（表-3）。さらに，出水条件別で I/O 比の平均値を比較した場合，伐採前後ではともに異なる値を示しており，OFS 濃度に対する IFS 濃度の変動が二つの条件下で異なっていた。ただし，伐採前では，高出水と低出水における I/O 比の平均値の差異は，ほかの時期に比べて小さ

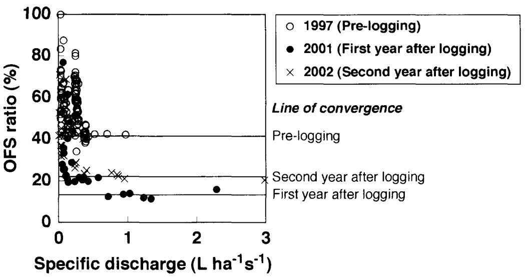

図-3.　伐採前後における微細土（TFS）濃度に占める有機成分（OFS）濃度の割合と流量の関係
Relationships between stream discharge and ratio of organic fine solids (OFS) before and after logging in the selective-cutting catchment.

表-2.　高出水と低出水条件ごとにみた伐採前，伐採実施年，伐採実施翌年における OFS 割合の分散分析結果
Results of one-way factorial ANOVA for OFS ratio among three periods (pre-logging, first year and second year after logging) in high discharge and normal discharge.

Condition	Source	*df*	Sum of squares	*F* statistics	Significant level
Normal discharge	Period	2	6693.76	47.95	<0.0001
	Error	139	9702.87		
	Total	141	16396.63		
High discharge	Period	2	1811.12	581.49	<0.0001
	Error	28	43.60		
	Total	30	1854.72		

かった。一方，伐採後両年では，高出水におけるI/O比の平均値が低出水での値より高かった。特に，伐採実施年におけるI/O比の平均値は，ほかの時期より高い値であった。伐採実施翌年では，I/O比の平均値が伐採実施年に比べて低下した。

表-3. 高出水と低出水条件におけるIFS濃度とOFS濃度の相関係数およびI/O比の平均値と標準誤差
Correlation coefficients between IFS and OFS concentration, and I/O ratio (mean±SE) in high discharge and normal discharge condition in each period.

Period	Condition	Correlation coefficient	Significant level	I/O ratio (mean±SE*)
1997 (Pre-logging)	High discharge	0.999	<0.0001	1.383±0.025
	Normal discharge	0.974	<0.0001	0.742±0.032
2001 (First year after logging)	High discharge	0.999	<0.0001	6.583±0.432
	Normal discharge	0.992	<0.0001	2.888±0.310
2002 (Second year after logging)	High discharge	0.984	0.0024	3.545±0.133
	Normal discharge	0.992	<0.0001	1.649±0.168

* SE, Standard error.

3. 伐採流域と対照流域の濃度比較

1) TFS濃度

伐採実施年では，伐採流域のTFS濃度は対照流域の濃度を上回ることが多く，有意な差が認められた（表-4）。この年のTFS濃度の算術平均値は，対照流域が33.3 mg L^{-1}，伐採流域が214.2 mg L^{-1}であった。伐採実施翌年では，TFS濃度について伐採流域と対照流域の間に有意差が認められた（表-4）。この年のTFS濃度の算術平均値は，対照流域が10.2 mg L^{-1}，伐採流域が14.8 mg L^{-1}であり，両流域における平均値の差は，伐採実施年に比べて小さくなった。

2) OFS濃度

伐採実施年におけるOFS濃度も，TFS濃度と同様の傾向を示し，流域間で統計的有意差が認められた（表-4）。この年のOFS濃度の算術平均値は，対照流域が8.6 mg L^{-1}，伐採流域が28.4 mg L^{-1}であった。しかし，伐採実施翌年では，TFS濃度について伐採流域と対照流域の間に有意差はなかった（表-4）。この年のOFS濃度の算術平均値は，対照流域が3.8 mg L^{-1}，伐採流域も3.8 mg L^{-1}と同値であった。

3) OFS割合

伐採実施年における両流域におけるOFS割合には，統計的な有意差が認められた（表-4）。伐採実施翌年におけ

表-4. 伐採実施年と伐採実施翌年ごとにみた伐採流域と対照流域におけるTFS濃度,OFS濃度,OFS割合の分散分析結果
Results of one-way repeated measures ANOVA for TFS concentration, OFS concentration, and OFS ratio between selective-cutting catchment and control catchment in each year after logging.

Dependent variable	Source	*df*	Sum of squares	*F* statistics	Significant level
2001 (First year after logging)					
TFS concentration	A (samples)	27	130.94		
	B (catchments)	1	15.35	30.97	<0.0001
	A×B (residual)	27	13.38		
	Total	55	159.67		
OFS concentration	A (samples)	27	68.16		
	B (catchments)	1	3.69	11.91	0.0019
	A×B (residual)	27	8.36		
	Total	55	80.21		
OFS ratio	A (samples)	27	6085.50		
	B (catchments)	1	2211.23	25.51	<0.0001
	A×B (residual)	27	2340.80		
	Total	55	10637.53		
2002 (Second year after logging)					
TFS concentration	A (samples)	26	10.98		
	B (catchments)	1	0.26	5.94	0.0219
	A×B (residual)	26	1.12		
	Total	53	12.36		
OFS concentration	A (samples)	25	4.42		
	B (catchments)	1	0.01	0.61	0.4428
	A×B (residual)	25	0.49		
	Total	51	4.92		
OFS ratio	A (samples)	25	4962.43		
	B (catchments)	1	935.08	25.66	<0.0001
	A×B (residual)	25	910.99		
	Total	51	6808.50		

るOFS割合は，3例を除いて伐採流域の値が対照流域の値を下回っていた。伐採実施年同様，両流域のOFS割合には，有意差が認められた（表-4）。

VI. 考　　察

1. 森林伐採流域における微細土流出の特徴

皆伐などを含む伐採と枝条の火入れ，林内路網の開設などにより浮遊土砂濃度が増加した例は，多数報告されている（Brown and Krygier，1971；Beschta，1978；Miller，1984；Lopes *et al.*，2000)。本研究において，同一の流量範囲に限定した伐採前後での濃度比較や対照流域との濃度比較についてともに有意差が確認されたことは，伐採実施年における濃度増加に対して択伐施業による影響があったことを意味する。これを支持する結果には，美唄市の1997年6～7月と2001年同期間の日降水量分布には統計的有意差がなかったにもかかわらず（One-Way Factorial ANOVA，$p>0.05$），2001年6～7月のTFS濃度が伐採前より1オーダー高い値を記録したことが挙げられる。また，森林伐採期間に浮遊土砂の最大濃度が1,000 mg L^{-1}を超えたFerguson *et al.*（1991）の報告と同じく，伐採実施年ではTFS濃度の最大濃度が1,000 mg L^{-1}を超えたことも，伐採の影響を示す傍証となりうる。

一方，伐採実施翌年には，伐採実施年に比べてTFS濃度が低下した。伐採後の年数経過と浮遊土砂流出レベルを論じた研究では，伐採経過後15年まで細粒土砂が増加する例を除いて（Kim *et al.*，2000)，伐採後3～4年経過した時点で伐採前や対照流域の流出レベルまで回復している（Beschta，1978；Miller，1984；Leeks and Marks，1997)。本研究における伐採流域では，伐採実施から約2年でTFS濃度が激減しており，時間経過からみて早い回復傾向を示した。ただし，Beschta（1978）は土砂流出量が伐採前のレベルまで回復したものの，林道の崩壊により再び激増したことを示しており，当流域に開設された集材路が将来同様の崩壊を起こす危険性は残されている。

2. 微細土流出の発生源

伐採実施年における現地調査では，集材路開設により渓流流路内に流入した大量の堆積土砂がみられた。降雨時には堆積土砂の上流側を流れる渓流水は透明であったが，堆積土砂を通過した下流側の渓流水は茶色に変色していたことを目視で確認している。同時に，集材路の裸地化した盛土のり面では，降雨によって泥流と化した土砂が流路内の堆積土砂に流れ込む様子も確認された。伐採前後においてクマイザサによる被覆が変化していないことから，集材路と土場を除く伐採跡地では，雨滴や地表流などに起因した侵食がなかったと考えられる。これらのことから，択伐後におけるTFSの主な発生源は，集材路開設にともない露出した裸地化した盛土のり面や，流路内に堆積した土砂であると判断した。

伐採後のI/O比の平均値が伐採前と違う値を示したことは，集材路開設によって明らかに異なる発生源が存在したことを意味する。すなわち，人為攪乱を受けていない渓岸部やその周辺斜面のほかに，伐採後に新たに生じた裸地や流路内にある堆積土砂から土粒子を主体とするIFSが新たに付加されたと解釈される。同様の傾向として，Likens *et al.*（1970）では，伐採後に無機物の割合が増加している。柳井・寺澤（1998）においても，対照流域の有機物割合が50％前後を占めるのに対して，伐採流域の有機物割合が20％以下であったことを報告している。

伐採流域に設置された集材路は，Heninger *et al.*（2002）が示した土壌攪乱区分によると，表層土が完全に除去され下層土が露出したクラスⅣに相当する。すなわち，有機物含有量が多いと考えられるA層とB層がなく，風化土層が露出している。堆積土砂や盛土のり面における土は，土色や土性（シルト質）が風化土層のそれと似ており，そこに含まれている有機物量は少ないとみなせる。伐採後におけるOFS割合の減少は，伐採前には存在しなかった人為攪乱によって生じた新たな発生源から，TFSの中でもIFSの負荷量がかなり増加したことに起因したと判断した。

伐採実施翌年では，盛土のり面にコケ類が定着していたほか，流路内の堆積土砂が洗い流され残存量が少なかったことを確認した。これより，盛土のり面の安定と流路内にある堆積土砂量が減少したことが，伐採実施年に比べて翌年に微細土濃度が低下した要因であると考える。

伐採後におけるTFS流出の増加ならびにOFS割合の低下は，主に渓流沿いに開設された集材路に起因した流路内堆積土砂と盛土のり面が原因である。過去の調査例においても，伐採時に設置された集材路などの林内路網が浮遊土砂流出を増加させる主な原因となっている（Haupt and Kidd，1965；Brown and Krygier，1971；Beschta，1978；Motha *et al.*，2003)。しかし，本論での結果は，堆積土砂の洗い出しや集材路における不安定土砂の安定化が起これば，伐採前のTFS流出のレベルにまで回復する可能性があることも示している。

3. 森林伐採流域における微細土の成分比率の変化

伐採の影響により有機物の割合が低下することは，すでに報告されている（Likens *et al.*，1970；柳井・寺澤，1998)。逆に，ピートで覆われた流域では，伐採前のコントロール時期には有機物割合が変化しなかったが，伐採後新たに裸地化した部分のピート流出により，有機物割合が増加したケースもある（Francis and Tylor，1989)。いずれの場合においても，森林伐採時の人為攪乱によって生じた地被状況の変化が，IFSやOFSの流出プロセスを変え，OFS割合が変わる原因となっている。

伐採前の状態では，OFSとIFSの濃度配分が流量規模に関わらず小さかったが，伐採実施年にIFS濃度の配分が激増した。これより，伐採実施年の高出水条件において，水流による流路内堆積土砂の侵食量が増加したことが推察される。さらに，高出水条件における日降水量は15～35 mmと高い値を記録していることから，降雨によ

り裸地部から洗い出され流路に流入するIFS量も低出水より多いことも想定される。これらの現象は，伐採後において高出水でのI/O比の平均値が低出水に比べて高い値を示したことに反映したと考える。

伐採実施翌年におけるOFS割合の上昇は，盛土のり面の安定と流路内にある堆積土砂量が減少によりIFSの配分が低下したためと考えられる。これは，伐採実施翌年でのI/O比の平均値が低かったことにも反映している。

VII. おわりに

本研究は，別の研究目的のために設定した試験流域において偶発的に行われた択伐施業の影響を調査したため，伐採前から対照流域を設け，施業前後で流量と濃度の連続観測を行う対照流域法（太田，1996）による評価ができなかった。また，観測体制の制約から，年流出量による議論には至らなかった。しかし，本研究で得られた知見は，択伐という一般的に行われている施業方法ならびに集材路配置が微細土やその有機成分の流出に及ぼす影響について興味深い情報を提供している。

調査結果から，択伐施業後のTFS濃度の発生源は，集材路が流路近傍ならびに流路内を横切る配置に起因していた。さらに，ブルドーザーによる有機物の含有量が多い表層土の除去により，IFSが大量に流出することが示唆された。したがって，伐採行為を行う場合には，集材路面積を少なくし，できるだけ尾根部に集材路を配置するなどの計画を立てる必要がある。

伐採前後におけるOFS割合の収束値の違いは，流路へのIFS供給量と流域内に蓄積されているOFS量の違いをともに反映していると推察された。ある森林流域において，伐採などの人為的改変によって有機成分割合そのものの値や，その収束値が低下する現象は，有機物や無機物の流域内蓄積，流路への供給の点からみて，その森林流域の土砂流出に対する健全度（すなわち，無機物の供給を増大させるような裸地が少なく，水生生物の栄養源となりうる有機物を十分蓄積している流域であるかどうか）を間接的に表していると考えることができる。柳井・寺澤（1998）は，伐採地ではトータルとして物質生産量が多いものの無機物の流出にともなう下流域への負のインパクトも増大するため，有機物の増加がプラスとならず，無機物の減少と有機物濃度の増加を図るような水質管理法の検討が重要であると述べている。OFS割合の収束値を含めて，微細土成分比率は，水質管理方法を確立する際に利用可能な指標となり，土砂流出に対する健全度を定量的かつ客観的に表す指標になりうる。

この研究を進めるにあたり，北海道立林業試験場流域保全科の職員には，現地調査において御協力いただいた。また，同場の臨時職員の方々には，微細土の分析をしていただいた。ここに記し感謝の意を表します。

引用文献

荒川久幸・松生　合（1990）褐藻類カジメ・ワカメの遊走子の沈降速度および基質着生に及ぼす海中懸濁粒子の影響．日本水産学会誌 56：1741-1748.

Beschta, R.L. (1978) Long-term of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range. Water Resour. Res. 14 : 1011-1016.

Brown, G.W. and Krygier, J.T. (1971) Clear-cut logging and sediment production in the Oregon Coast Range. Water Resour. Res. 7 : 1089-1098.

土木学会水理委員会（1999）水理公式集平成11年版．713 pp，土木学会，東京．

江頭進治・芦田和男（1981）山地流域における微細土砂の生産場と流出過程に関する研究．京大防災研年報 24：239-250.

遠藤泰造・勝見精一・舟木敏夫（1961）夏期間の流量に及ぼす伐採の影響について．1960年度林業試験場北海道支場年報：181-214.

Ferguson, R.I., Grieve, I.C., and Harrison, D.J. (1991) Disentangling land use effects on sediment yield from year to year climatic variability. *In* Sediment and stream water quality in a changing environment : Trends and explanation. Peters, N. E. and Walling, D.E. (eds.), 374 pp, IAHS Publ. No. 203, Wallingford. 13-20.

Fisher, S.G. and Likens, G.E. (1973) Energy flow in Bear Brook, New Hampshire : An integrative approach to stream ecosystem metabolism. Ecol. Monogr. 43 : 421-439.

Francis, I.S. and Tylor, J.A. (1989) The effect of forestry drainage operations on upland sediment yields : A study of two peat-covered catchments. Earth Surf. Process. Landforms 14 : 73-83.

Haupt, H.F. and Kidd, W.J., Jr. (1965) Good logging practices reduce sedimentation in central Idaho. J. For. 63 : 664-670.

Heninger, R., Scott, W., Dobkowski, A., Miller, R., Anderson, H., and Duke, S. (2002) Soil disturbance and 10-year growth response of coast Douglas-fir on nontilled and tilled skid trails in the Oregon Cascades. Can. J. For. Res. 32 : 233-246.

堀田紀文・加山俊也・鈴木雅一・太田猛彦（2001）森林流域における浮遊土砂流出への伐採の影響．112回日林学術講：564 p.

Kim, H., Kasai, M., Imada, M., and Marutani, T. (2000) Temporal changes in small particle sediment yielded from the catchment following to forest growth after clear cutting. J. Fac. Agric. Kyushu Univ. 44(3・4) : 473-481.

国土庁土地局（1977）土地分類図 北海道 空知支庁．

國松孝男（2000）森林伐採による栄養塩類の挙動と流出．第18回琵琶湖研究シンポジウム「森林伐採が環境に及ぼす影響」予稿集：15-24.

Leeks, G.J.L. and Marks, S.D. (1997) Dynamics of river sediments in forested headwater stream : Plynlimon. Hydrol. Earth Syst. Sci. 1 : 483-497.

Likens, G.E. and Bormann, F.H. (1995) Biogeochemistry of a forested ecosystem 2nd ed. 159 pp, Springer-Verlag, New York.

Likens, G.E., Bormann, F.H., Johnson, N.M., Fisher, D.W., and Pierce, R.S. (1970) Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. Ecol. Monogr. 40 : 23-47.

Lopes, V.L., Ffolliott, P.F., and Baker, M.B., Jr. (2000) Effects of watershed management practices on sediment concentrations in the southwestern United States : Management implications. USDA Forest Serv. Proc. RMRS-P-13 : 352-355.

眞板英一・鈴木雅一・太田猛彦（2003）東京大学千葉演習林袋山沢流域における伐採前後の流出量変化（2）季節性の検討．114回日林学術講：775 p.

Miller, E.L. (1984) Sediment yield and storm flow response to clear-cut harvest and site preparation in the Ouachita moun-

tains. Water Resour. Res. 20 : 471-475.
Motha, J.A., Wallbrink, P.J., Hairsine, P.B., and Grayson, R.B. (2003) Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. Water Resour. Res. 39, 1056, doi : 10.1029/2001WR000794.
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.
太田猛彦（1996）森林と水循環．森林科学 18 : 26-31.
佐藤弘和（1999）広葉樹林流域における渓流流出特性に関する研究．北海道林試研報 36 : 21-36.
Sheridan, W.L. and McNeil, W.J. (1968) Some effects of logging on two salmon streams in Alaska. J. For. 66 : 128-133.
志水俊夫（1990）森林伐採が融雪流出に及ぼす影響．雪氷 52 : 29-34.
志水俊夫・菊谷昭雄・河野良治（1984）林種転換が小流域の流出に及ぼす影響（II）―1時間最大流量および直接流出量について―．95回日林論 : 551-552.
Sutherland, A.B., Meyer, J.L., and Gardiner, E.P. (2002) Effects of land cover on sediment regime and fish assemblage structure in four southern Appalachian streams. Freshwater Biol. 47 : 1791-1805.
寺嶋智己（2002）水の濁りをはかる．森林科学 34 : 48.
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．日林北支論 49 : 112-114.
柳井清治・寺澤和彦（1998）北海道南部沿岸山地流域における伐採が渓流の土砂および有機物の流出に及ぼす影響．北海道林試研報 35 : 1-10.