

## 浮遊土砂の流出抑制に配慮した森林管理方法

佐藤 弘和<sup>\*、1</sup>

佐藤弘和：浮遊土砂の流出抑制に配慮した森林管理方法 日林誌 88：50～59, 2006 土砂流出抑制機能に配慮した森林整備方法に関する知見を得るために、森林施業と浮遊土砂に関する過去の研究例を整理した。森林伐採の実施や森林整備が不備な場合には、浮遊土砂濃度などが増加する例が多い。伐採後に増加した浮遊土砂濃度や流出量は、年数が経過するにつれて徐々に減少する傾向を示す。林道・作業路・集材路などの林内路網は、しばしば崩壊や侵食を引き起こす要因となる。森林施業にともなう車両走行は、土壌の圧密を引き起こし、土壌物理性の低下や植生回復の遅れに繋がる。浮遊土砂流出の増加を抑制する森林管理の方法は、流路沿いの緩衝林帯の保全、ならびにできるだけ林地を攪乱しない施業を行うことである。

キーワード：緩衝林帯, 森林管理, 森林伐採, 浮遊土砂, 林内路網

Sato, H.: **Effective Forest Management to Reduce Fine Sediment Production and Delivery.** J. Jpn. For. Soc. 88: 50~59, 2006 In order to develop effective forest management practices which reduce fine sediment production and delivery, this paper reviews how forest operations can affect suspended sediment discharge. Cutting and unmanaged forest plantations have shown increases in suspended sediment delivery. Suspended sediment concentrations or annual yields increase following logging, and tend to gradually decline over a period of years. Road systems, such as forest roads, skid roads, and skid trails, are often sources of suspended sediment owing to mass failures or road-surface erosion. Logging activities can compact soils, thus impacting the soils' physical properties and delaying vegetation re-growth on the ground surface. In order to control sediment discharge and soil erosion, buffer strips of riparian forests should be carefully preserved and the area disturbed by forest operations should be minimized.

**Key words:** forest cutting, forest management, forest road system, riparian buffer strips, suspended sediment

### I. はじめに

森林内において伐採や林内路網開設などの人為攪乱が生じると、水源涵養機能や土壌保全・崩壊防止機能に対して負の影響を及ぼすことがある。特に、土砂流出抑制機能(本論では、植生と土壌により、雨滴侵食防止、地表流による侵食防止、林帯による土砂の捕捉、根系による崩壊防止など、発生源での土砂流出を抑え、溪流への土砂流入を抑制する機能の意味とする)の低下は、その流域内だけでなく川を通じてその影響が広範囲に及ぶことがある。実際に、北海道網走地方では海域へ拡散した濁水によりホタテ貝養殖が8億円近い被害を被った例や、留萌地方において河川水を水源とする水道水が濁水により断水するなど、濁水による被害が顕在化している。さらに、人為攪乱に起因した浮遊土砂流出量の増加は、河川に生息する生物やハビタットに影響を及ぼす。細粒土砂による河床間隙の充填は、農地面積占有率が高い河川ほど顕著になり、河床の透水性を低下させる(村上ら, 2001)。さらに、森林伐採によっても河床底質における砂の含有割合が増加する(Scrivener and Tripp, 1998)。河床間隙の閉塞は、産卵環境の悪化を引き起こし(Sheridan and McNeil, 1968; 山田・中村, 2001; Sutherland *et al.*, 2002)、光量低下により藻類を死滅させる(Yamada and Nakamura, 2002)。こ

のように、浮遊土砂流出が河川生物のハビタットへ及ぼす負の影響は大きく、人為攪乱によりその度合いが加速される。

このような生態系への影響や各種産業への被害が顕在化し、マスコミ等で取り上げられるにつれて、浮遊土砂流出に対する社会的関心は高まりをみせている。しかし、世論では、「濁水発生＝森林伐採が原因」という短絡的な図式が描かれることが多い。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が、その際に土砂流出抑制機能を損なわない森林施業方法を確立し実践することは急務である。森林内で生じた人為攪乱により変化する浮遊土砂流出に関わる定量的情報を整理することは、土砂流出抑制機能に配慮した施業方法に関する知見を得るのに有効である。

本論では、森林伐採と林内路網(ここでは、林道、作業道、集材路・搬出路、土場を含む)が浮遊土砂流出に及ぼす影響について過去の研究例をまとめ、これらの結果から森林施業による植生・土壌の攪乱が生じた場合に起こる土砂流出抑制機能の低下を防ぐ方法を紹介する。なお、本論で引用した文献には、「浮遊土砂」として定義した粒径が記載されていないものや、「浮遊砂」と「ウォッシュロード」の区分が明確ではないものがあるため、本論における「浮遊土砂」とは浮遊砂とウォッシュロードを含めた浮遊

\* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: akebono@hfri.bibai.hokkaido.jp

<sup>1</sup> 北海道立林業試験場 (079-0198 美幌市光珠内町東山)

Hokkaido Forestry Research Institute, Koushunai, Bibai 079-0198, Japan.  
(2005年7月22日受付; 2005年10月20日受理)

態として流れる土砂の総称の意味としている。

## II. 浮遊土砂流出に対する森林伐採の影響

### 1. 森林伐採と浮遊土砂流出の関係

現在までに森林伐採と浮遊土砂流出の関係について論じた国内外の論文を発表年順にそれぞれまとめた(表-1)。森林伐採と浮遊土砂流出に関する研究は、欧米では1960年代以降から、我が国では1990年代以降から進められてきた。これらの研究では様々な処理方法を採用しているが大きく区分すると、①立木の状態を変化させる(皆伐、択伐などの伐採方法、伐採地面積率などが反映する)、②下層植生の状態を変化させる(火入れなどが反映する)、③土壌の状態を変化させる(道路設置、架線やトラク

ター、ヘリコプターなどの集材方法、土壌の耕起などが反映する)、となり、これらを組み合わせた試験設計となっていることが多い。処理別に浮遊土砂流出の変化を概観した場合、①、②の処理によって浮遊土砂濃度もしくはその流出量が数倍から10倍前後増加している。また、③の処理(②の処理も含まれる)でも、伐採後に再び植栽する前の立地整備(排水整備や植栽地の耕起など)が浮遊土砂流出量の増加をもたらす例がある(Francis and Tylor, 1989; McBroom *et al.*, 2002)。このように、森林施業の実施は、浮遊土砂の量的増加を招くことは事実である。ただし、林地の攪乱を抑えた架線集材をとまなう皆伐では、浮遊土砂流出の有意な増加が認められないこともある(堀田ら, 2001)。このことは、①の処理のみでは必ずしも浮

表-1. 欧米と我が国における流域を単位とした森林施業と浮遊土砂流出に関する研究例

調査地域	処理	浮遊土砂流出の変化	出典
アメリカ, アイダホ州 Bannok Creek 流域	A) 攪乱程度(伐採面積, 路網面積など)が異なる16流域	A) 溪流路路に達する土砂の主な発生源は搬出路で, 路路までの距離に影響される	Haupt and Kidd, Jr. (1965)
アメリカ, ニューハンブ シャー州 Hubbard Brook 流域	A) 全皆伐で材は切り捨て, 除草剤散布	A) 対照流域に比較して懸濁態物質の流出は4倍	Likens <i>et al.</i> (1970)
アメリカ, オレゴン州 Alsea 流域	A) 架線, トラクター集材, 枝条火入れをとまなう面積82%の皆伐 B) 架線集材をとまなう, 15~30mの溪畔林を残して面積25%の部分皆伐	A) 伐採前に道路を設置しただけの場合, 年流出量が2倍増加 B) 伐採と枝条の火入れ後に年流出量が3倍増加	Brown and Krygier (1971)
アメリカ, オレゴン州 Alsea 流域	A) 架線, トラクター集材, 枝条火入れをとまなう面積82%の皆伐 B) 架線集材をとまなう, 15~30mの溪畔林を残して面積25%の部分皆伐	A) 伐採後, 対照流域の年比流出量と比べて1.5倍増加 B) 伐採後, 対照流域の年比流出量と比較して1.4倍増加	Beschta (1978)
アメリカ, オクラホマ州 Weyerhaeuser 流域	A) 皆伐と立地整備(植生除去, 火入れ, サブソイル)	A) 対照流域の年比流出量の平均値と比較(皆伐一対照流域が3セットのため)して7.8倍	Miller (1984)
イギリス Llanbrynmair Moors	A) 耕起 B) 流域の8カ月後に耕起	A) 耕起後, 年比流出量は2.5倍増加 B) 耕起後, 年比流出量は4.8倍増加	Francis and Tylor (1989)
イギリス Loch Ard 森林	A) 4段階で皆伐, 30%は森林が残存	A) 月比流出量は伐採前の10倍, 対照流域と比較すると最大12倍	Ferguson <i>et al.</i> (1991)
アメリカ, オレゴン州 H.J. Andrews 試験林	A) 架線集材をとまなう皆伐 B) 道路設置をとまなう部分皆伐	A) 年比流出量の平均値は, 伐採前に比べて12倍 B) 年比流出量の平均値は, 伐採前に比べて1.7倍	Grant and Wolff (1991)
イギリス Balquhidder 流域	A) 架線集材をとまなう皆伐 B) 植栽前に耕起 ※対照流域なし	A) 皆伐後に高出水条件で浮遊土砂濃度の変動(標準偏差)が増加 B) 耕起後, 低出水条件で濃度変動が増加	Johnson (1994)
アメリカ, アイダホ州 Silver Creek 流域	A) 面積23%の部分皆伐の後, ヘリコプターによる集材と火入れ	A) 伐採後10年間は年土砂流出量が伐採前に比べて平均97%の増加	Megahan <i>et al.</i> (1995)
イギリス Plynlimon 流域	A) 面積15%の伐採	A) 対照流域の年比流出量の平均値に比べて1.9倍	Leeks and Marks (1997)
アメリカ, アリゾナ州 Beaver Creek 流域 AとBはPonderosa Pine 流域, CとDはPinyon- juniper 流域	A) 全皆伐, 火入れ B) 帯状に1/3伐採, 火入れ C) ケーブルによる引き抜きと斧などで伐採, 火入れ D) 枯れ葉剤散布のみ	A) 対照流域の最大濃度と比較して6.1倍 B) 対照流域の最大濃度と比較して4.2倍 C) 対照流域の最大濃度と比較して1.4倍 D) 対照流域の最大濃度と比較して1.3倍	Lopes <i>et al.</i> (2000)
北海道 原木川流域	A) 全皆伐 B) 溪畔林を残して面積47%の皆伐	A) 対照流域の微細土平均濃度と比較して274倍(出水時)と66倍(平水時) B) 対照流域の微細土平均濃度と比較して5倍(出水時)と2倍(平水時)	柳井・寺澤 (1998)
滋賀県 朽木森林実験流域	A) 2回に分け全皆伐	A) 伐採前の年比流出量に対して伐採直後の年で2.45倍増加	國松 (2000)
千葉県 東京大学袋山沢流域	A) 架線集材をとまなう皆伐	A) 伐採前後で土砂量に明瞭な差はなし	堀田ら (2001)
栃木県 湯西川流域	A) 流域全体の皆伐後, 十数年経過 B) 溪畔林が保存された伐採後, 十数年経過	A) 対照流域の年比流出量と比較して8.7倍 B) 対照流域の年比流出量と比較して3.3倍	中村 (2003)
北海道 光珠内実験林流域	A) 流路沿いとこれを横断するように集材路を設置した択伐	B) 伐採前に比べて伐採した年の微細土濃度の平均値は56倍に増加	佐藤・寺澤 (2004)

遊土砂流出が激増するとは限らないことに留意する必要があることを示唆する。

伐採を行った後も、浮遊土砂が大量に流出し続けるとは限らない。伐採後の年数が経過するにつれて浮遊土砂流出が減少する傾向は、すでにいくつかの研究で見出されている。伐採前もしくは対照流域の濃度レベルまで戻る年数は、伐採経過後15年間まで細粒土砂量が増加した例(Kim *et al.*, 2000)はあるものの、5年未満と早期に回復する場合が多い(Beschta, 1978; Miller, 1984; Leeks and Marks, 1997)。各研究例で示された回復年数は植生回復速度の違いや攪乱地の面積および流域内での配置(川に近いかどうか)の違いなどによって異なることが考えられるが、伐採後における浮遊土砂流出が伐採前のレベルまで回復する傾向にあることは共通している。

## 2. 森林伐採による浮遊土砂流出の増加要因

森林伐採や林道開設によって、渓流水のピーク流量や年流出水量が増加することはよく知られている(King and Tennyson, 1984; 志水ら, 1984; Cheng, 1989)。こうした流量の増加は渓流水による侵食力の増加に繋がり、浮遊土砂流出の増大に反映する可能性がある。しかし、伐採流域のピーク流量は、豪雨時の場合には対照流域との間に有意差がない場合もあり(Ziemer, 1981; Wright *et al.*, 1990)、伐採後における浮遊土砂流出量の増加を単純に流量増加と結びつけることはできない。Megahan *et al.* (1995)では、伐採と火入れ後の流量はほとんど変化しないにも関わらず、年流出土砂量は増加しており、その理由を流路侵食ではなく伐採跡地の土壌侵食に求めている。

森林伐採による浮遊土砂流出の増加要因は、伐採域ないし林内路網の面積拡大にともなう流量の増加よりも、施業にともなう土壌攪乱地(Lopes *et al.*, 2000)や林内路網(Haupt and Kidd Jr., 1965; Beschta, 1978)そのものが発生源となることが指摘されている。Beschta (1978)は、豪雨によって林道崩壊が引き起こされると、伐採直後の値を上回る浮遊土砂が流出したことを報告している。非攪乱域、伐採域、砂利道路、未舗装道路について単位面積あたりに換算した土砂発生源としての寄与率を算出したMotha *et al.* (2003)では、未舗装道路は非攪乱域の20~60倍(伐採域と比較して10倍)、伐採域は非攪乱域の1~5倍であったことが報告されている。Brown and Krygier (1971)では、皆伐行為そのものでは渓流水中の浮遊土砂の濃度変化がほとんどなく、伐採前の道路設置がその濃度を最も大きく変化させている。Sayok *et al.* (1993)では、haあたりの年流出土砂量が[すべての樹木、植生、伐根を排除した皆伐地]>[商用の樹木のみを伐採し、他の植生を残した皆伐地]>[不攪乱状態の森林]、の順であり、攪乱度合いの大きい場からの流出量が多い。このように、林道や伐採地などの攪乱地は、侵食による土砂の生産量と川への流入量が非攪乱地に比べて多く、発生源としての寄与が多大であるといえよう。

伐採地は、侵食だけでなく崩壊地の形成とも関連してい

る。三重県宮川ダム上流域内で発生した表層崩壊の約41.7%は、伐採地内で発生している(平松ら, 2002)。崩壊面積が皆伐後の造林実施からの経過年数につれて増大している例もある(相浦ら, 1996)。このように、伐採地は新たな土砂発生源の形成を誘発することがある。また、矢部(2003)では、裸地面積の増大とともに流出土砂量(この例では、ウォッシュロードは除いている)が指数関数的に増加している。この結果は、流域内の裸地面積の拡大が大きくなるにつれ、大量の土砂排出が発生することを懸念させる。

一方で、森林面積率が高いにも関わらず流出土砂量が多い例がある(中嶋ら, 2003)。この理由としては、土地利用面積が1%に満たない工事現場(土地改良事業や河川改修工事)からの流出であると推察されている。通常、森林流域内における浮遊土砂発生源は面源負荷(area source)として捉えられるが、崩壊地や工事現場のような局所的な発生源は点源負荷(point source)として寄与するため、流域内の裸地状況や人為的改変に関わる情報も浮遊土砂の量的・時間的な変化などを解析する上では無視できない。

## 3. 森林整備の不備による土壌侵食と浮遊土砂流出

適正な間伐などを行わなかった場合にも、森林の土砂流出抑制機能が低下することがある。下層植生が失われたヒノキ林分では、下層植生が繁茂している林分より浸透能が低く(湯川・恩田, 1995)、その要因は雨滴衝撃による団粒破壊にともなう土壌表面の団粒減少に起因する(山本ら, 1998)。下層植生やリターは、クラスト(表面被殻)形成を抑制することで、浸透能低下を抑制している(恩田・湯川, 1995)。ヒノキ林では、こうしたクラスト形成を含む土壌物理性の変化が土砂流出にも反映しており、手入れがなされていないヒノキ林の土壌流亡量は管理されている林分に比べて多い(Onda *et al.*, 2003)。ヒノキ、スギ、アカマツ、落葉広葉樹における林床被覆率と堆積リターを調べた三浦(2000)によると、ヒノキ林の林床被覆率は10~20年生の幼齢期から若齢期にかけて林床植生が少なくなるにつれて急速に低下している。こうした現象はヒノキ林特有のものであるが(三浦, 2000)、他樹種においても林床被覆率を高めるために適切な間伐を施すことは、地表保護や生物多様性を維持する上でも重要であることを示唆する。

伐採後における植栽実施の有無も、流域内の土砂生産に関連する重要な要因である。平松ら(2002)では、ダム堆砂量が植栽面積とは負の相関、無植栽面積とは正の相関関係があり、伐採跡地における植栽の有無が流域内の土砂生産状況に変化を及ぼすことが指摘されている。

## III. 林内路網が引き起こす浮遊土砂流出の実態

### 1. 林内路網における水流出プロセスの変化と侵食・崩壊の発生

林内路網(ここでは、林道、作業道、集材路・搬出路、土場を含む)は、森林施業や整備を行う上で必要不可欠な

生産基盤である。しかし、林内路網は、道路による地中流出の遮断 (Megahan, 1983; Jones, 2000) などを通じて山腹斜面における水流出を変化させる。特に、路網の流域占有面積率は、水流出変化に関与している場合がある。Harr *et al.* (1975) では少なくとも流域に占める道路面積の割合が12%である流域だけが流況を変化させており、King and Tennyson (1984) では森林源頭域における融雪流出や降雨出水の量は道路による攪乱が小面積であっても変わるかもしれないと推察している。こうした林内路網に起因した水流出プロセスの変化は、豪雨や融雪などを起因とした崩壊・侵食の発生に繋がる場合がある。切取りのり面、盛土のり面の崩壊・侵食による裸地形成ならびに路面侵食は、浮遊土砂の発生源として河川の濁水化を促進する。

実際に、林道の存在は、崩壊や地すべりを引き起こす素因となりうる (Swanson and Dyrness, 1975; Lyons and Beschta, 1983; 中村, 1992)。例えば、オレゴン州南西部の Klamath Mountains では、林道と土場の侵食割合が非攪乱地に比べて100倍であり、崩壊地数の3/4が70%以上の斜面勾配でみられ、その半数が斜面脚部1/3の位置にあった (Amaranthus *et al.*, 1985)。

## 2. 道路のり面と路面で生じる侵食・崩壊および浮遊土砂流出の実態

構造的に急勾配になりやすい道路のり面は、崩壊・侵食が生じやすい部位である (吉村ら, 1998; Megahan *et al.*, 2001; Wemple *et al.*, 2001; 吉幸ら, 2001)。特に、盛土のり面に生じた slide (滑動による移動) タイプの地すべりは、切取りのり面の上部斜面で発生する滑動タイプの地すべりや崩落、路面における slump (後方回転による移動) タイプの地すべりに比べて発生数が多い (Wemple *et al.*, 2001)。

浮遊土砂の直接的な発生源となりうる道路部位として、道路路面は特に無視できない。道路路面において、降水時に浮遊土砂が流出している報告例はすでにある (Reid and Dunne, 1984; 呉・井上, 1998; Luce and Black, 1999)。降雨の状況にもよるが、路面での浮遊土砂発生には、雨滴衝突もしくは地表流による侵食に起因するタイプがある。集材路面の侵食状況について検討した佐々木・足立 (2003) では、主に雨滴の衝突インパクトで生じる路面侵食は毎降雨時に発生すると考えられ、路面で生じるリル・ガリー侵食は降雨強度の大きい場合のみ発生するとしている。

林道路面では、路面材として礫や砂利が敷設されていることが多い。Swift, Jr. (1984) では、30の降雨イベントにおける単位降水量、単位道路面積あたりの土壌流出量の平均値について、裸地状態の場合より敷厚5cmの碎石を路面材として用いた場合が高い値を示している。礫路面材による浮遊砂流出抑制効果を人工降雨実験によって検証した李ら (2003) は、粘土質シルトに粗礫を混入した量 (この研究では、礫の混入面積割合と単位面積あたりの礫の重

量割合で評価) が少ない場合には礫が浮遊砂流出に対して遮蔽効果を発揮することで細粒土を捕捉するが、礫が多い場合には礫間に流量が集中することで多量の浮遊砂を流出させると考察している。これらの研究からは、礫や砂利路面材といえども土砂流出を促進させる可能性のあることが読みとれる。

路面侵食は、道路の構造自体とも関連している。例えば、道路長  $L$  とその勾配  $S$  から導かれる  $LS^2$  と土砂流出量は比例関係にある (Luce and Black, 1999)。人工降雨実験では、浮遊砂の流出速さは降雨強度と林道の縦断勾配に影響を受け、降雨強度に対しては単純に比例し、縦断勾配に対しては2乗の割合で増加している (李・峰松, 1997)。さらに、車両走行頻度によっても土砂流出量は異なっている。頻繁に使用されている道路の土砂量は、一時的に使っていない道路や走行頻度が少ない道路に比べて多い (Reid and Dunne, 1984)。

## IV. 森林施業による土壌物理性の変化

### 1. 地表攪乱による土壌の乾燥密度変化

路面や伐採跡地では、車両走行による踏圧や地表面の攪乱によって浸透能や乾燥密度などの土壌物理性が低下する。このような低下は、降雨時において路面上に地表流を発生させ、侵食などを誘発する原因となる。

乾燥密度 (仮比重とも呼ばれる) は、踏圧などを受けるとその値が高くなるため、土壌の圧密や攪乱度合いを表す間接指標となる。森林伐採時における車両走行や地表攪乱によって乾燥密度が増加した例は、多数報告されている。集材路と土場における乾燥密度は1.5倍の増加がみられ (Hatchell *et al.*, 1970)、特に集材路のうち車輪が接地するわだちにおける乾燥密度増加は多数報告されている (Dickerson, 1976; Allbrook, 1986; Ole-Meiludie and Njau, 1989)。同一深度においてはタイヤ式車両よりキャタピラ式車両走行後の乾燥密度が高い値を示すほか (Johnson and Beschta, 1980)、砂質土より粘土地の新設道における乾燥密度は有意に増加している (Malmer and Grip, 1990)。ただし、林地、集材路、火入れ跡地の乾燥密度に有意差がなかった例もある (Snider and Miller, 1985)。こうした研究結果から、車両走行などによって土壌が圧密され乾燥密度が増加することは、例外はあるものの、容易に起こりやすい現象であることが理解される。

乾燥密度は走行回数が増えるほど高い値を示すが、回数が増加するにつれて乾燥密度の増加割合は減少し頭打ちの変化を示す。乾燥密度が最大または最大割合となる走行回数は、Hatchell *et al.* (1970) が2回、Lenhard (1986) が4回、Jansson and Johansson (1998) が2回、Matangaran and Kobayashi (1999) が1~2回と、数回で最大になることが多い。車両走行の影響は、かなり初期の段階で生じている。

車両走行による地表面の圧密は、乾燥密度の増加だけでなく土壌の孔隙も変化させる。特に、間隙サイズが大きい

ほど孔隙率は圧密により減少しやすい (Allbrook, 1986)。Lenhard (1986) では、乾燥密度変化が一定であっても孔隙率や孔隙分布は変化しており、その理由を土壤に外力が加わると外力と抵抗力が平衡になるようなゆがみの発生や再構築が起こり、孔隙率が一定に保たれるような弾性変形プロセスに求めている。また、乾燥密度と浸透能の関係式では、乾燥密度が増加するにつれて浸透能が減少する傾向にある (Ole-Meiludie and Njau, 1989)。

## 2. 植生回復に及ぼす土壤物理性の影響

伐採地や集材路におけるすみやかな植生回復は地表保護に繋がるが、土壤物理性の悪化は植生回復による裸地面对するマルチ効果を妨げる原因になる。攪乱地や集材路では、樹高成長や材積の低下がみられる (Hatchell *et al.*, 1970; Wert and Thomas, 1981; Heninger *et al.*, 2002)。土壤硬度が高ければ、根の貫通深は低下する (Matangaran and Kobayashi, 1999)。植生に対する圧密の影響は樹木だけに限らず、草本のバイオマスにも現れている (Snider and Miller, 1985; 市原ら, 1998)。

## 3. 土壤物理性の経年回復

圧密され土砂流出抑制機能が低下した土壤物理性は、年数の経過とともに対照区とした森林土壤のレベルまで回復する傾向がある (Dickerson, 1976; Wert and Thomas, 1981; Matangaran and Kobayashi, 1999)。乾燥密度の回復年数は、早くて1年 (Mace, Jr., 1971)、遅い場合には32年経過して表層15 cmの深さまで回復したと推定されている (Wert and Thomas, 1981)。また、表層の土壤ほど、回復傾向は早いことも検証されている (Wert and Thomas, 1981; Froehlich *et al.*, 1985)。

## V. 浮遊土砂流出抑制に配慮した森林施業方法

### 1. 浮遊土砂流出抑制を目指す森林施業において配慮すべき点

浮遊土砂流出の抑制に配慮した森林施業を行うためには、林内路網を含む攪乱域面積の減少と攪乱域における比流出量の抑制が鍵となる (具体的方法については図-1を参照)。攪乱域をできるだけ発生させない方法の一つとして、架線集材の使用が挙げられる。この集材方法は地上集材に比べて土場などの攪乱面積が少なく (Miller and Sirois, 1986)、架線集材をとまなう皆伐では浮遊土砂濃度や流出量が変化しない (Johnson and Beschta, 1980; 堀田ら, 2001)。ただし、不完全な状態で吊り上げられた場合には集材木によって地表攪乱や土壤の締め固めが生じることがあり (猪内, 2001)、実際の運用には注意を要する。

架線集材よりコストが安価なことからブルドーザーや高性能林業機械による施業を行う場合、車両走行に起因した攪乱域では土壤物理性の悪化が起こる。こうした土壤物理性に対するインパクトを軽減する方法には、土壤支持力の低い土壤において重機による作業を避ける (Ole-Meiludie and Njau, 1989)、タイヤ式の作業機械ではなく、轍の深さが小さいキャタピラ式を採用する (Jansson and Johan-

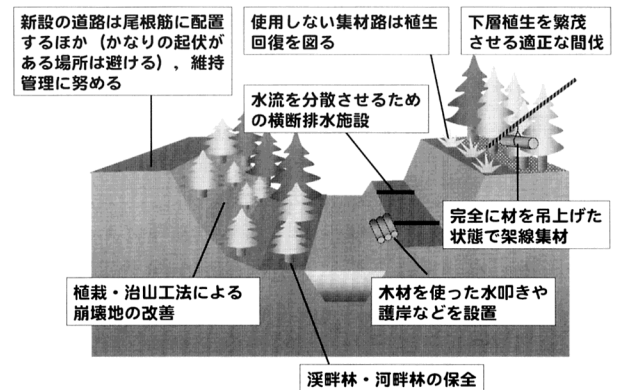


図-1. 濁水発生の抑制に配慮した森林施業・整備の具体例

sson, 1998)、などが提示されている。ただし、これらの軽減方法は森林所有者の経済的な事情も考慮しなければならないため、実施する際には困難な点も多い。

一方、攪乱地の形成が避けられない場合、同場所で生産される土砂を直接流路へ流れ込まないように緩衝林帯を設ける方法がある。溪畔林や河畔林を緩衝林帯として捉えた研究に目を向けると、浮遊土砂が林帯通過時に濾過・捕捉されることが実証されている (例えば, Peterjohn and Correll, 1984; Cooper *et al.*, 1987; 佐藤ら, 2000; 高橋ら, 2003)。現地観測のみならず、カラム実験においても森林土壤による浮遊土砂の濾過は検証されている (大倉ら, 1994)。緩衝林帯の保全を意識した研究として、溪流内搬出路設置流域 (皆伐流域)、尾根のみ搬出路設置流域 (溪畔林残存流域)、対照流域における渓流水中の浮遊土砂濃度をそれぞれ測定した例 (柳井・寺澤, 1998) や、天然林流域、溪畔林残存流域、皆伐流域における年間の単位面積あたりのSS流出量を比較した例 (中村, 2003; Nakamura and Yamada, in press) では、浮遊土砂の流出は皆伐流域>保残流域>対照流域の関係であることが示されている。逆に、伐採をせずに緩衝林帯に道路設置しただけの場合は、河床に堆積した無機成分量が、対照区、緩衝林帯における択伐、傘伐、上層間伐の場合に比べて多く、シルトと粘土の含有率も高い (Kreutzweiser and Capell, 2001)。溪畔林・河畔林を緩衝林帯として残存させることは、発生源からの浮遊土砂流出の捕捉に対して効果的である。高橋ら (2003) は水辺緩衝林帯の幅に関する総説の中で緩衝林帯による浮遊土砂の除去率を一覧表にまとめており、それによると浮遊土砂の除去率が70%を超える例が多い。ただし、畑地から林地に流れ込んだ粒径0.1 mm以下の微細な土砂を含んだ地表流が土壤中に浸透せずに (土壤間隙の目詰まりと考えられる) 林地表面を流れた場合には、林地による除去率が30%程度に低下した例がある (佐藤ら, 2000)。いかに緩衝林帯といえども、浮遊土砂の捕捉効果には限界があることも事実である。

無間伐を含む森林整備の不備は、浮遊土砂流出を増加さ

せることがある。伐採後の植栽や適切な間伐の実施は、土砂流出抑制機能を維持する上で重要である。ただし、植栽や間伐のために林道や作業道、集材路を設置する場合、川沿いや川を横断するような配置などを行うと、逆に浮遊土砂を増加させることに繋がるので、その点は留意する必要がある。

森林流域の浮遊土砂流出では、流域内の地形要因や地質要因の関与も大きい。そこで、森林施業を行う前に、流域内の地形や地質を考慮した上で施業計画を立案することを提言したい。河川環境に対する森林収穫行為の影響を調べた Barrett *et al.* (1998) は、局所的な地質要因が森林経営に関わる要因より重要性があることを指摘している。そこで、岩質がもろく、地すべりや崩壊地が多発する地質(例えば、泥岩質岩石など)を示す流域では、林内路網の尾根筋配置の促進とその維持管理、溪畔林・河畔林の保残など、濁りを防ぐよう最大限に配慮した整備方法を確実に実施すべきである。

## 2. 林道・作業道における対処

路面侵食では、素因(道路長、勾配、路面材質、基盤地質、排水施設の有無や排水能力など)と誘因(降雨強度、降水量、間接的に走行頻度)との組み合わせで、侵食量が異なることは容易に想定される。侵食防止対策を実施する場合には、特に路面勾配が急な箇所や、路面が泥濘化しやすい泥岩質などの基盤地質、排水施設の状態などの情報を整理しておくことは重要である。林道規程による縦断勾配の制限値は、設計速度により7~9%と定められている。路面のわだち集水し侵食されるケースでは、勾配が10.5% (6°)以上の箇所で発生していたとの報告もあり(佐藤・対馬, 2003)、勾配10%以上の場所では路面上を流れる水の分散が効果的である。また、切取りり面の崩落土砂で埋没した側溝では水が路面に溢れることで侵食されることがあり、このタイプの侵食は勾配が5% (3°)の場所でも発生している(佐藤・対馬, 2003)。したがって、側溝の排水能力を維持することは、路面を保護する上でも重要である。

路体の構造(路面勾配など)が、路面侵食や崩壊に影響することは、すでに述べた。林道・作業道を新設する際には、路面やのり面の勾配緩和など施工時に調整することが可能である。しかし、既設の道路では構造そのものを改善することが難しいことがある。したがって、排水溝の新設や既設の排水処理の維持管理などで侵食の起こりやすさを軽減し、路面における浮遊土砂の発生などを防ぐ方法もある。さらに、佐藤ら(2004)は、既設の側溝に木質チップを充填し、路面に生じた濁水をこの側溝に流し込むことで、ウォッシュロードが濾過されることを報告している。

路面に生じた地表流のコントロールは、路面侵食防止のためにも重要である。特に、林道と異なり仮設道である作業道では、横断排水溝や側溝の構造が簡易なものや維持管理が不十分な場合が多々ある。路面集水型によるガリー侵食を防ぐためには、横断溝の排水能力低下を防ぐ維持管理

が必要である(吉幸ら, 2001)。リル・ガリーの長さや路面侵食量が比例関係にある報告(佐々木・足立, 2003)からも、路面に設置する横断排水溝の設置間隔を短くすることは重要である。なお、横断排水溝の最小設置間隔を求める式は小林ら(2002)によって示されており、路面勾配5%で間隔が54 m, 10%で26 m, 20%で10 mと、勾配が増加するにつれ設置間隔は短くなる。しかし、横断溝31箇所のうち、土砂による埋没がみられなかったのはわずか3箇所しかなかった例(佐藤, 未発表)があるなど、横断排水溝の排水能力を維持しなければ、路面侵食防止効果は期待できない。

横断排水溝から排出された濁水の誘導も、あわせて考慮されなければならない。Trimble, Jr. and Sartz (1957)は、カルバートからの土砂排出距離について、横断溝からの排出土砂の堆積距離と緩衝帯勾配の関係を見出し、推奨される緩衝帯幅を提示している(緩衝帯の勾配が10%で14 m, 50%で38 m, 70%で50 m)。前節でも論じたように、樹木や草本による緩衝帯を保残するように路網を配置することは、濁水流出抑制を図る上で必要である。

渓流を横断する横断暗渠管の閉塞は、路体破壊を容易に引き起こす。Wemple *et al.* (2001)は、カルバートの閉塞が流水に由来する侵食(側溝侵食、ガリー)のなかで半数を占めていると報告している。こうした侵食を未然に防ぐためには、カルバートの断面積をできるだけ大きくするほか、橋の使用や複数の暗渠管を並べた multiple culvertsなどが有効である(Ontario Ministry of Natural Resources, 1990)。林道の溪流横断部における災害危険箇所を要因分析した例(近藤・神谷, 1995)では、地形に関する要因(集水域内崩壊面積と集水面積)の影響力が最も大きく、次に林道構造に関する要因(林道の谷側のり面に設置された構造物と谷側のり面高)が強い。また、近藤・神谷(1995)では、林道構造に関する要因について谷側にコンクリートウォールがあれば安全性が高く、練り石積みの設置箇所は安全性がかなり低くなることが報告されている。

路面の縦びき(ripping)や被覆(mulch)は、路面の透水性を増加させ(Luce, 1997)、浮遊土砂流出抑制に対して有効な方法となる。李ら(2003)の研究では、林道開設初期には粗礫をある程度表面に残すような施工法が、浮遊土砂流出防止に効果的であるとしている。砂利の導入のほかに維持管理(礫による補修など)を増やすことや、土砂制御措置(路肩などでの植栽、排水溝はけ口に設置した silt fence)を図ることで、浮遊土砂量は明らかに減少する(Clinton and Vose, 2003)。

切取りり面や盛土のり面の裸地化も、侵食が生じることや、場合によっては崩壊を引き起こす素因となる。切取りり面の侵食には地被の密度、斜面方位、斜面傾斜などが関与しており、切取りり面の侵食防止策として植生などの地被密度の増加、のり面勾配とのり面量の削減、南面の設置を避ける、などが提案されている(Megahan *et al.*,



2001)。通常、施工時における切取のり面の勾配は施工箇所  
の土質によって異なり、粘性土などで8分(51°)、軟岩  
で5分(63°)、硬岩で3分(73°)を標準としている(小  
林ら, 2002)。しかし、施工当初の勾配は、時間が経つに  
つれて緩勾配(40~50°の値)になる傾向がある(小橋  
ら, 1979; 山本ら, 1985)。また、軟岩の切取のり面の侵  
食状況を測定した例では、のり面勾配が45°付近で侵食と  
堆積の境界を示していたことから、この付近の勾配が侵食  
に対する安定勾配と考えられている(小橋ら, 1979)。鈴木  
(1972)においても、切取のり面勾配が8分と1割(45°)  
では、直(90°)、2分(79°)、4分(68°)、6分(59°)の斜面より  
崩落断面積が小さい結果が得られている。これより、土  
質の違いはあるものの、切取のり面の勾配は40~50°程度  
が安定していることが考えられる。また、切取のり面長が  
長いほど崩壊が発生しやすく、路線分布に対する崩壊分布  
の比が最大となる切取のり面長が8.5mと算出された報告  
がある(中尾・森田, 1972)。このように、切取のり面の構  
造は侵食・崩壊の発生と関連があり、林道や作業道を新設  
する場合には、上記の結果を参考にして切取のり面の長さ  
や勾配について崩壊や侵食が起こりにくいように設計すれ  
ば、侵食・崩壊リスクの回避に繋がるかもしれない。

のり面の植生回復導入を図る措置は、侵食防止や崩壊防  
止に対して重要である。ただし、切取のり面に施したマル  
チは、後々侵食防止効果を発揮するものの、施工直後の時  
期では防止効果が期待できない(Megahan *et al.*, 2001)。  
また、裸地化したのり面上への種子の侵入や実生の定着が  
起こっても、土砂移動や地表流による種子、実生の流亡な  
どにより植生が活着できないことが考えられる。切取のり  
面における植生回復にはのり面の安定化を図ることが大き  
な前提条件であり(小橋・吉田, 1980)、継続的に行わな  
ければのり面侵食の防止効果が期待できない。

地被が異なる切取のり面の侵食量を比較した例では、侵  
食量が草本被覆のり面<シラカンバ種子の吹付けのり面<  
裸地化のり面となっており(北原ら, 1985)、草本に比べ  
て木本は吹付けが成功すれば永続的な侵食防止機能が期待  
できる(北原ら, 1988)。以上の報告から、裸地化のため  
に土砂が移動しやすい切取のり面では、土砂移動の抑制と  
水流のコントロールにより裸地面を安定させることで、草  
本ないし木本を導入することが重要である。植生回復によ  
って、崩壊の発生が抑制され林内道路を維持することが  
でき、切取のり面からの土砂流出による溪流の濁水化や側  
溝の閉塞を軽減することにつながる。

溪流・河川の攻撃斜面(水衝部)に位置する盛土のり面  
では、水制工(景観に配慮し、間伐材を利用したもののが好  
ましい)などを用いた護岸対策が有効と考えられる。盛土  
のり面崩壊防止のためには、路面に生じた地表流の集中排  
水を避けるように配慮する必要もある。そのため、横断溝  
の排水吐出口に水叩きを設け、林床の洗掘進行を食い止  
める方法が提案されている(吉幸ら, 2001)。

以上のことを要約すれば、路面、切取のり面、盛土のり

面の維持管理では、路体内に発生する水流のコントロール  
と侵食・崩壊による土砂移動の抑制が鍵となる。

不安定な状態の既設道路ないしは廃道そのものを取り去  
ることもまた、浮遊土砂の発生源を抑制する上で有効かも  
しれない。自然の水文プロセス回復と林内道路からの土砂  
流亡の削減を目的として、①Ripped and Drained(圧  
密解除のために路面に裂け目をつける)、②Partial Out-  
slope, Total Outslope(切取のり面の全部ないしは一部  
を埋めることによって原地形面を再構築する)、③Export  
Outslope(路体を構成する盛土を除去する)、を実施した  
例では、これらの処理区間から流亡する土砂量は無処理区  
間に比べて少ない(Madej, 2001)。

### 3. 集材路における対処

皆伐のみならず択伐や間伐といった伐採行為を行う場合  
には、集材路面積を少なくし、できるだけ尾根筋に集材路  
を配置するなどの計画を立てる必要がある。同様の提案  
は、多数の研究からも提示されている(Johnson and Bes-  
chta, 1980; Gent, Jr. *et al.*, 1983; Amaranthus *et al.*,  
1985; Froehlich *et al.*, 1985; Malmer and Grip, 1990;  
Matangaran and Kobayashi, 1999)。少なくとも間伐や択  
伐時において溪流沿いを避けた集材路の設置は、流路に浮  
遊土砂が直接流れ込むことを防ぐとともに、溪畔域に集材  
路を設置する際の溪畔林の伐採や土壌攪乱を起こさせない  
意味においては溪畔林の保全にも繋がる。

集材路の構造に着目した例では、切取のり面からの土砂  
流出を抑制し、集材路を自然植生で覆うためにのり高を  
1m以下にすることや(市原ら, 1998)、粗い土壌で被覆  
する方法(Froehlich *et al.*, 1985)が提案されている。

森林施業時かそれが終了した後における集材路の処理に  
は、車両走行回数(限定)(Hatchell *et al.*, 1970; Jansson  
and Johansson, 1998)、路面の耕起(Hatchell *et al.*,  
1970; Dickerson, 1976; Gent, Jr. *et al.*, 1983)、路面に播  
種することや集材路周辺の母樹を残すこと(市原ら,  
1998)が提案されている。土壌の乾湿状態によっては土壌  
物理性に対するダメージを免れることがあり(Snyder and  
Miller, 1985)、湿潤状態では砂質性土壌で作業を行う提案  
(Hatchell *et al.*, 1970)がなされている。集材路における  
土壌物理性は時間の経過により回復する傾向にあるもの  
の、上記の方法は流域の浮遊土砂流出に対する健全度を高  
めるためにも、できうる限り実施すべきである。

## VI. 今後進めるべき「森林施業—浮遊土砂」 研究の方向性

既存の研究結果をまとめると、森林伐採による浮遊土砂  
流出を抑制するためには、林地における人為攪乱地の配置  
に考慮し、できるだけサイズを小さくすることが重要であ  
る。また、攪乱をすでに受けた林地では、悪化した土壌物  
理性の改善など早急な処置を行い、植生の早期回復を促す  
必要がある。しかし、実際の現場においては、侵食防止対  
策に対してコストがかかることや、対策に関わる方法その

ものを知らないために、こうした対処が行われないケースが多い。森林施業にともなう浮遊土砂流出に関する研究は主に環境や防災の分野で行われているが、土砂流出防止に配慮した路網を配置した場合の作業効率や費用対効果などの点については林業経営や森林計画分野でも研究を進め、その成果を普及することも重要である。

皆伐流域と対照流域における浮遊土砂流出特性を比較することは両流域の違いが明瞭になるため、研究者にとって森林の土砂流出防止機能を評価しやすい。しかし、森林経営の方針が木材生産から公益的機能重視へ転換した現在、特に公有林では皆伐を避ける傾向が強くなっている。そのため、通常行われている間伐や択伐などによる浮遊土砂流出への影響を調べる研究も、さらに進めるべきである。特に、森林伐採と土砂流出に関する流域スケールの研究を概観すると、欧米に比べて本邦での研究数は少ない傾向にある(表-1)。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, 1983, 1984, 1986; 志水, 1990; 真板ら, 2005)。しかし、森林伐採と浮遊土砂に着目した研究数は、1990年代以降から増加傾向にあるものの、まだ端緒についたばかりといえる。そのため、伐採後における浮遊土砂濃度の長期間の経時変化も十分に調べられていない。我が国における森林伐採と浮遊土砂流出の研究成果が待たれる状況にある。

今後、現場の実態にできるだけ即した研究事例を増やし、その成果を林業の現場へフィードバックすることは、土砂流出抑制機能に配慮した森林施業を行う上で必要不可欠である。

最後に、北海道大学大学院農学研究科の中村太士教授には、御多忙にもかかわらず原稿を読んでいただき有益な御指摘をいただいた。ここに記して心から厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

- 相浦英春・嘉戸昭夫・長谷川幹夫(1996) プナ林の皆伐および針葉樹の造林が行われた多雪山地における表層崩壊の発生過程. 日林誌 78 : 398-403.
- Allbrook, R.F. (1986) Effect of skid trail compaction on a volcanic soil in central Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 1344-1346.
- Amaranthus, M.P., Rice, R.M., Barr, N.R., and Ziemer, R.R. (1985) Logging and forest roads related to increased debris slides in southwestern Oregon. *J. For.* 83 : 229-233.
- Barrett, J.C., Alden, H.G., and Scholz, J.G. (1998) Geologic influences on the response of stream channels to timber harvest-related impacts. *In Forest-fish conference: land management practices affecting aquatic ecosystem*. Brewin, M.K. and Monita, D.M.A. (tech. coords.), 534 pp, Proc. Forest-Fish Conf., May 1-4, 1996, Calgary, Alberta. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Inf. Rep. NOR-X-356*, Edmonton, 95-107.
- 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.
- Cheng, J.D. (1989) Stream changes after clear-cut logging of a pine beetle-infested watershed in southern British Columbia, Canada. *Water Resour. Res.* 25 : 499-456.
- Clinton, B.D. and Vose, J.M. (2003) Differences in surface water quality draining four surface types in the southern Appalachians. *Southern J. Appl. For.* 27(2) : 100-106.
- Cooper, J.R., Gilliam, J.W., Daniels, R.B., and Robarge, W.P. (1987) Riparian areas as filters for agricultural sediment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 : 416-420.
- Dickerson B.P. (1976) Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 : 965-966.
- 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.L., 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, IAHS, London, 13-20.
- 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.
- Froehlich, H.A., Miles, D.W.R., and Robbins, R.W. (1985) Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 1015-1017.
- Gent, J.A., Jr., Ballard, R., and Hassan, A.E. (1983) The impact of harvesting and site preparation on the physical properties of Lower Central Plain forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43 : 595-598.
- Grant, G.E. and Wolff, A.L. (1991) Long-term patterns of sediment transport after timber harvest, western Cascade Mountains, Oregon, USA. *In Sediment and stream water quality in a changing environment: trends and explanation*. Peters, N.E. and Walling, D.E. (eds.), 284 pp, IAHS Publ., No. 217, IAHS, London, 177-184.
- Harr, R.D., Harper, W.C., and Krygier, J.T. (1975) Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resour. Res.* 11 : 436-444.
- Hatchell, G.E., Ralston, C.W., and Foil, R.R. (1970) Soil disturbances in logging. Effects on soil characteristics and growth of loblolly pine in the Atlantic Coastal Plain. *J. For.* 68 : 772-775.
- 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.
- 平松晋也・黒岩知恵・荒砂隆文(2002) 森林伐採や植栽面積の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響. 砂防学会誌 55(4) : 3-11.
- 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 回日林講 : 564 p.
- 市原恒一・豊川勝生・澤口勇雄・松下一樹(1998) 集材路跡地への森林への回帰状況. 森利学誌 13 : 201-210.
- Jansson, K.-J. and Johansson, J. (1998) Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. *Forestry* 71 : 57-66.
- Johnson, M.G. and Beschta, R.L. (1980) Logging, infiltration capacity, and surface erodibility in western Oregon. *J. For.* 78 : 334-337.
- Johnson, R.C. (1994) Suspended sediment from two small upland drainage basin: using variability as an indicator of change. *In Variability in stream erosion and sediment transport*. Olive, K.J., Loughran, R.J., and Kesby, J.A. (eds.), 498 pp, IAHS



- Publ. No. 224, IAHS, London., 403-410.
- Jones, J.A. (2000) Hydrologic processes and peak discharge response to forest removal, regrowth, and roads in 10 small experimental basins, western Cascade, Oregon. *Water Resour. Res.* 36 : 2621-2642.
- 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.
- King, J.G. and Tennyson, L.C. (1984) Alteration of streamflow characteristics following road construction in north central Idaho. *Water Resour. Res.* 20 : 1159-1163.
- 北原 曜・真島征夫・清水 晃 (1985) 林道切取法面からの侵食量について (II) —シラカンパ種子吹付けのり面の結果—。日林北支講 34 : 208-210.
- 北原 曜・真島征夫・清水 晃 (1988) 林道切取法面からの侵食量について (III) —過去 4 年間の比較—。日林北支論 36 : 176-178.
- 小橋澄治・吉田博宣 (1980) 林道切取のり面の安定性と自然植生の回復について (2)。京大演報 52 : 103-116.
- 小橋澄治・島津義史・吉田博宣・酒井徹朗・佐々木功 (1979) 林道切取のり面の安定性と自然食性の回復について—芦生演習林を例として—。京大演報 51 : 164-174.
- 小林洋司・小野耕平・山崎忠久・峰松浩彦・山本仁志・鈴木保志・酒井秀夫・田中聡明 (2002) 森林土壌学。160 pp, 朝倉書店, 東京.
- 近藤恵市・神谷信宏 (1995) 赤石山地南部における林道災害危険箇所要因分析。森林学誌 10 : 205-212.
- Kreutzweiser, D.P. and Capell, S.S. (2001) Fine sediment deposition in streams after selective forest harvesting without riparian buffers. *Can. J. For. Res.* 31 : 2134-2142.
- 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.
- 李 成基・峰松浩彦 (1997) 林道路面から流出する浮遊砂の流出特性に関する実験的研究。森林学誌 12 : 111-120.
- 李 成基・峰松浩彦・李 甲淵 (2003) 林道路面から流出する浮遊砂に対するレキの流出制御特性に関する実験的研究。森林学誌 18 : 159-165.
- Leeks, G.J.L. and Marks, S.D. (1997) Dynamics of river sediments in forested headwater stream: Plynilimon. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 1 : 483-497.
- Lenhard, R.J. (1986) Changes in void distribution and volume during compaction of a forest soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 462-464.
- 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.
- Luce, C.H. (1997) Effectiveness of road ripping in restoring infiltration capacity of forest road. *Restor. Ecol.* 5(3) : 265-270. (Preprint 参照)
- Luce, C.H. and Black, T.A. (1999) Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resour. Res.* 35 : 2561-2570.
- Lyons, J.K. and Beschta, R.L. (1983) Land use, floods, and channel changes: Upper Middle Fork Willamette River, Oregon (1936-1980). *Water Resour. Res.* 19 : 463-471.
- Mace, A.C., Jr. (1971) Recovery of forest soils from compaction by rubber-tired skidders. *Minn. Minnesota For. Res. Notes* : No. 226. (直接参照していない)
- Madej, M.A. (2001) Erosion and sediment delivery following removal of forest road. *Earth Surf. Process. Landforms* 26 : 175-190.
- 真板英一・鈴木雅一・太田猛彦 (2005) 新第三紀層流域における 70 年生スギ・ヒノキ林伐採による年流出量の変化。日林誌 87 : 124-132.
- Malmer, A. and Grip, H. (1990) Soil disturbance and loss of infiltrability caused by mechanized and manual extraction of tropical rainforest in Sabah, Malaysia. *For. Ecol. Manage.* 38 : 1-12.
- Matangaran, J.R. and Kobayashi, H. (1999) The effect of tractor logging on forest soil compaction and growth of *Shorea selanica* seedlings in Indonesia. *J. For. Res.* 4 : 13-15.
- McBroom, M., Chang, M., and Sayok, A.K. (2002) Forest clearcutting and site preparation on a saline soil in east Texas: Impacts on water quality. *In* Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. Outcalt, Kenneth, W. (ed.), 622 pp, Gen. Tech. Rep. SRS-48 Asheville, NC: USDA, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, 535-542.
- Megahan, W.F. (1983) Hydrologic effects of clearcutting and wildfire on steep granitic slopes in Idaho. *Water Resour. Res.* 19 : 811-819.
- Megahan, W.F., King, J.G., and Seyedbagheri, K.A. (1995) Hydrologic and erosional responses of a granitic watershed to helicopter logging and broadcast burning. *Forest Sci.* 41 : 777-795.
- Megahan, W.F., Wilson, M., and Monsen, S.B. (2001) Sediment production from granitic cutslopes on forest roads in Idaho, USA. *Earth Surf. Process. Landforms* 26 : 153-163.
- Miller, E.L. (1984) Sediment yield and storm flow response to clear-cut harvest and site preparation in the Ouachita mountains. *Water Resour. Res.* 20 : 471-475.
- Miller, J.H. and Sirois, D.L. (1986) Soil disturbance by skyline yarding vs. skidding in a loamy hill forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 1579-1583.
- 三浦 覚 (2000) 表層土壌における雨滴侵食保護の視点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被覆率の実態評価。日林誌 82 : 132-140.
- 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.
- 村上まり恵・山田浩之・中村太士 (2001) 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。応用生態工学 4 : 109-120.
- 中嶋洋平・池田駿介・赤松良久・宮本泰章・山口悟司・戸田祐嗣 (2003) 石垣島名蔵川における土砂・栄養塩の流出に関する現地観測。土木学会論文集 747/II-65 : 173-185.
- 中村太士 (1992) 河川環境の改善に対する一つの指針—米国西海岸での手法紹介と日本への適用—。新砂防(砂防学会誌) 45(4) : 15-21.
- 中村太士 (2003) 森林の機能別保全のサブシステム。(森林計画学。木平勇吉編著, 228 pp, 朝倉書店, 東京)。101-120.
- Nakamura, F. and Yamada, H. (2006) The effects of pasture development on the ecological functions of riparian forests in Hokkaido in northern Japan. *Ecol. Eng.* (in press)
- 中尾博美・森田紘一 (1972) 切取法面の崩壊 (I)。日林論 83 : 416-418.
- 呉 在萬・井上章二 (1998) 林道開設地における渓流水の浮遊砂濃度の変化。森林学誌 13 : 161-168.
- 大倉陽一・北原 曜・三森利昭 (1994) 森林土壌の浮遊土砂濾過機能。日林論 105 : 597-598.
- Ole-Meiludie, R.E.L. and Njau, W.L.M. (1989) Impact of logging equipment on water infiltration capacity at Olmotonyi, Tanzania. *For. Ecol. Manage.* 26 : 207-213.
- 恩田裕一・湯川典子 (1995) ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (II) 下層植生の効果に関する室内実験。日林誌 77 : 399-407.
- Onda, Y., Takenaka, C., Furuta, M., Nonoda, T., and Hamajima, Y. (2003) Use of <sup>137</sup>Cs for estimating soil erosion processes in

- a forested environment in Japan. *Trans. Japan. Geomorph. Union* 24 : 13-25.
- Ontario Ministry of Natural Resources (1990) Environmental guidelines for access roads and water crossings. 64 pp, Queens Printer for Ontario, Ontario.
- Peterjohn, W.T. and Correll, D.L. (1984) Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations the role of a riparian forest. *Ecology* 65 : 1466-1475.
- Reid, M.L. and Dunne, T. (1984) Sediment production from forest road surface. *Water Resour. Res.* 20 : 1753-1761.
- 佐々木尚三・足立康成 (2003) 集材路からの土壌流出に関する二三の考察. *日林北支論* 51 : 117-119.
- 佐藤弘和・対馬俊之 (2003) 林内道路の崩壊発生状況とその対策方法への提言. 平成 14 年度重点領域特別研究報告書. 森林域における河川の濁水対策マニュアルの開発. 北海道立林業試験場, 美唄, 74-88.
- 佐藤弘和・寺澤和彦 (2004) 択伐施業後における渓流水中に含まれる微細土濃度の変化. *日林誌* 86 : 349-357.
- 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よる捕捉効果. *森林立地* 42 : 47-52.
- 佐藤弘和・神田克明・藤八雅幸・新岡善宣・近 大輔・寺澤健治・野口稔弘 (2004) 木質チップ充填型側溝による浮遊土砂流出の抑制効果. *北海道林試研報* 41 : 1-14.
- Sayok, A.K., Chang, M., and Watterson, K.G. (1993) Forest clear-cutting and site preparation on a saline soil in East Texas: impact on sediment losses. *In* *Sediment problems: strategies for monitoring, prediction and control.* Hadley, R.F. and Mizuyama, T. (eds.), 284 pp, IAHS Publ. No. 217, IAHS, London, 177-184.
- Scrivener, J.C. and Tripp, D.B. (1998) Changes of spawning gravel characteristics after forest harvesting in Queen Charlotte Islands and Carnation Creek watersheds and the apparent impacts on incubating salmonid eggs. *In* *Carnation Creek and Queen Charlotte Islands Fish/Forestry Workshop: Applying 20 Years of Coast Research to Management Solutions.* Hogan D.L., Tschaplinski, P.J., and Chatwin, S. (eds.), 275 pp, B.C. Min. For. Res. Br., Victoria, B.C. Land Manage. Handb. No. 41, Victoria, 135-140.
- 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 (1983) 林種転換が小流域の流出に及ぼす影響 (I) —無降雨期間の地下水通減曲線について—. *日林論* 94 : 593-594.
- 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—. *日林論* 95 : 551-552.
- 志水俊夫・菊谷昭雄・藤枝基久・岸岡 孝 (1986) 林種転換が小流域の流出に及ぼす影響 (III) —一年および月の流出量と流出率について—. *日林関東支論* 38 : 195-196.
- 猪内正雄 (2001) 森林作業の機械化が森林環境にどんな影響を及ぼすのか. *森林科学* 36 : 25-33.
- Snider, M.D. and Miller, R.F. (1985) Effects of tractor logging on soils and vegetation in eastern Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 1280-1282.
- 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.
- 鈴木正之 (1972) 林道切取法面の土砂崩落—野辺山演習林における事例—. *日林講* 83 : 413-415.
- Swanson, F.J. and Dyrness, C.T. (1975) Impact of clear-cutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascade Range, Oregon. *Geology* 3 : 393-396.
- Swift, L.W., Jr. (1984) Gravel and grass surfacing reduce soil loss from mountain roads. *Forest Sci.* 30 : 657-670.
- 高橋和也・林 靖子・中村太士・辻 珠希・土屋 進・今泉浩史 (2003) 生態学的機能維持のための水辺緩衝林帯の幅に関する考察. *応用生態工学* : 139-167.
- Trimble, Jr. G.R. and Sartz, R.S. (1957) How far from a stream should a logging road be located?. *J. For.* 55(3) : 339-341.
- Wemple, B.C., Swanson, F.J., and Jones, J.A. (2001) Forest roads and geomorphic process interactions, cascade range, Oregon. *Earth Surf. Process. Landforms* 26 : 191-204.
- Wert, S. and Thomas, B.R. (1981) Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 : 629-632.
- Wright, K.A., Sendek, K.H., Rice, R.M., and Thomas, R.B. (1990) Logging effects on streamflow: Storm runoff at Caspar Creek in northwestern California. *Water Resour. Res.* 26 : 1657-1667.
- 矢部和弘 (2003) 風化花崗岩山地における流出土砂量と森林被覆の関係. *砂防学会誌* 56(4) : 4-11.
- 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.
- Yamada, H. and Nakamura, F. (2002) Effect of fine sediment deposition and channel works on periphyton biomass in the Makomanai River, northern Japan. *River Res. Appl.* 18 : 481-493.
- 山本仁志・矢部茂明・豊島重造・大河原昭二 (1985) 林道切取りのり面保護試験地の 5 年間の土砂量. *日林論* 96 : 655-656.
- 山本高也・恩田裕一・服部重昭・山本浩之 (1998) 土壌の微小表面構造の解析による地被物のクラスト形成抑止過程の解明. *日林誌* 80 : 293-301.
- 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溪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.
- 吉村哲彦・松場京子・竹内典之 (1998) 林道のり面における抜け落ち土砂量の季節および経年変化. *森林学誌* 13 : 31-38.
- 吉幸 朗・長澤 喬・森田紘一・中尾博美 (2001) 高密度道路網を基盤とする機械化間伐作業林分における土砂流出について. *森林学誌* 16 : 191-202.
- 湯川典子・恩田裕一 (1995) ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (I) 散水型浸透計による野外実験. *日林誌* 77 : 224-231.
- Ziemer, R.R. (1981) Storm flow response to road building and partial cutting in small streams of northern California. *Water Resour. Res.* 17 : 907-917.