

木質チップ充填型側溝による浮遊土砂流出の抑制効果

佐藤弘和*・神田克明**¹・藤八雅幸**²・新岡善宣**³
 近 大輔**⁴・寺澤健治***・野口稔弘***

**Effects of wood chips filled into drainage ditch along skidding road
 on filtration of suspended sediment**

Hirokazu SATO* Katsuaki KANDA¹ Masayuki TOUHACHI**² Yoshinobu NIIOKA**³
 Daisuke KON**⁴ Kenji TERAZAWA*** and Toshihiro NOGUCHI*****

要 旨

本研究では、木質チップを充填材とした暗渠型側溝を施工し、路面から流れ込む浮遊土砂の濾過効果を検証した。北海道紋別市に位置する住友林業社有林内の作業道において、既設の明渠型側溝に木質チップ（または一部砂利）を充填し暗渠型の側溝にした6区間と明渠区間（対照区間）を1区間それぞれ設定した。7区間について、横断暗渠管から流出する水量と微細土砂（粒径0.1mm以下）濃度の測定をそれぞれ行った。また、人工的に側溝に注水する試験を行い、暗渠と明渠の保水状況を確認した。一方、室内実験において、30cm厚のチップに人工濁水を流し込み、濾過材としてのチップの効果を検証した。幅員内に設置した側溝上を車両（間伐材積載時重量35.7トン）が通行できるかを検証するために、走行後の沈降量を測定し、あわせて濾過効果の持続性を評価した。

降雨時に排水される水量は、明渠区間の水量の20～40%であった。微細土砂濃度も同様に、明渠区間に比べて低下した。しかし、高濃度の微細土砂流出が起こるほど、濾過効果が減少する傾向が認められた。注水試験の結果では、明渠区間において注水量に対する排水量が73%を上回ったのに対して、暗渠型側溝では排水量が10%を超えなかった。室内実験では、投入した浮遊土砂量の83%が捕捉された。車両走行に対して、すべてチップで充填された区間の平均沈降量は11.2cmであったが、走行は可能であり濁水濾過効果が維持されていた。

木質チップを充填材とした暗渠型側溝は、濁水を濾過する効果があることが明らかとなった。

キーワード：木質チップ，側溝，作業道，浮遊土砂，濾過効果

* 北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198

** 北海道網走支庁紋別地区林業指導事務所（網走西部森づくりセンターに統合）

*** 住友林業株式会社

¹ 現 石狩森づくりセンター，² 渡島東部森づくりセンター，³ 興雄地区森林育成（協），⁴ 空知支庁

〔北海道林業試験場研究報告 第41号 平成16年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 41, March 2004〕

Abstract

The effects of wood chips filled into ditch on filtration of suspended sediments were examined. Three different types of ditch (filled up with wood chips/ with chips containing gravel layer/ without chips as control treatment) were installed along the skidding road in Monbetsu city, northeastern Hokkaido. The amount of water and the concentration of fine suspended sediment (0.1mm or smaller in particle diameter) drainage from under drainpipes were measured in each ditches after rain events. We poured water into the ditches to evaluate water retention rates of ditches. In the laboratory, prepared muddy water was poured into wood chip layer of 30cm deep in order to evaluate the filtering capacity of chips. Compaction of chip layer by tramping of a truck (35.7 ton in weight) on ditches was surveyed in terms with the maintaining the filtering effects, and the possibility of running on the ditches also was tested.

The volume of water drained from culverts during storm events ranged 20 - 65% of outflow from the control. Fine sediment concentrations through ditches with wood chips were also lower than those through the control. However, the filtration effects of wood chips tended to decrease as the concentration of sediments increased. Discharge rate of pouring water did not exceed 10% in the ditches with wood chips and exceeded 73% in the control. Wood chips trapped 83% of the pouring fine sediment in the laboratory. Although running of heavy vehicles caused depression of chips layer by 11.2cm in depth, road traffic was not obstructed, and ditches still maintained the filtering effects of sediments.

Wood chips filled into ditch are effective for filtering suspended sediments.

Key words: wood chips, ditch, skidding road, fine suspended sediment, filtering effect

1. はじめに

林道や作業道、集材路など（以後、林内路網と総称する）は、森林施業を行う上で重要な生産基盤である。しかし、その配置や構造に問題があると、路面部の侵食やのり面崩壊発生により浮遊土砂の発生源となり、場合によっては河川の濁水化を引き起こす（呉・井上、1998；吉幸ら、2001）。過剰な浮遊土砂生産を回避するために、尾根部を中心とする路網配置（Matangaran and Kobayashi, 1999；中村、1999）や、浸透能増加を目的とした路面の耕転（Hatchell *et al.*, 1970；Dickerson, 1976；Gent Jr. *et al.*, 1976；市原ら、1998）など、さまざまな対策が提案されている。しかし、既設路網の配置転換は経済的、地形的制約から困難な場合が多く、既設路網（集材路や土場）における耕転では車両走行に伴う再圧密によって路面での土砂流出を繰り返し発生させることになりかねない。そこで、これらの方法に代わる浮遊土砂流出の抑制対策（以後、単に抑制対策と呼ぶ）を構築する必要がある。

水質汚濁の対策では、発生源からの流出を低減させることが最も有効である。それが困難な場合には、路面上から溪流への浮遊土砂流出過程において浸透濾過・捕捉させる方法が考えられる。実際に、畑地からの浮遊土砂流出に対して、浸透能の高い森林土壌と下層にあるササにより 30～100%の浮遊土砂が捕捉された例がある（佐藤ら、2000）。このように、浮遊土砂が発生源から溪流に到達する間に、濾過効果が期待できる資材（濾過材）を用いることも、抑制対策を行う上で有効であると考えた。

著者らは、路面に発生した濁水流出軽減のために、林地と同等の浸透機能を有する濾過材として木質チップに着目した。農業分野において、木質チップは暗渠疎水材としてすでに利用されているが（津田ら、1997）、濁水濾過材としての機能は評価されていない。砂防分野では、濁水濾過材として礫や軽石などが用いられており、その濾過機能が評価されている（井良沢ら、1992）。これらの濾過材同様、木質チップによ

る濾過効果が高ければ、間伐材の消費拡大も期待できる。実際に、木質チップを活用した林内路網整備が実施された例がいくつかある（江本・中村，1995；坂，1996）。しかし、これらの施工例では、木質チップの濁水濾過機能に関する定量的評価がなされていない。

本論では、既設の明渠型（素堀）側溝に木質チップを充填した暗渠（以後、環境配慮型暗渠と呼ぶ）を施工し、その濁水濾過効果を検証した。施工した暗渠と既設の明渠において、降雨時に排出される水量と微細土砂濃度の測定ならびに人工注水試験を行い、結果を比較することで、濾過効果を評価した。木質チップの濁水濾過効果に関する室内実験もあわせて行った。また、道路新設時における切取り面の土工量削減のために幅員内にもこの暗渠を設置し、車両走行による圧密が環境配慮型暗渠の表面変化に及ぼす影響について調査した。

2. 調査地概要

環境配慮型暗渠の施工と調査は、2000年に北海道紋別市上渚滑町にある住友林業社有林内の作業道で行った。周辺の地形は丘陵地であり、標高は60～320mである。地質は、主に古第三系の粘板岩で構成されている。林相は、沢沿いがミズナラ (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*) を中心とした広葉樹、尾根部が30～40年生のカラマツ (*Larix leptolepis*) 人工林である。林床は、クマイザサ (*Sasa senanensis*) が優占する。この地域の1971～2000年の年平均気温は6.1℃、年平均降水量は836mmと北海道内でも少ない。

調査区間とした作業道の延長は、175mである（図-1）。作業道は斜面の切取と盛土によって開設されており、路面に植生はなく、基岩が露出している。幅員は3mで、路面縦断勾配は1～5°である。路面上部は、一部カラマツの樹冠により被陰されているが、大部分の区間は被陰されていない。

調査区間については、25m間隔で7つのセグメントに区分した（図-1）。対照区間として、明渠を最上部の区間に設定した（以後、明渠区間と呼ぶ）。以下、幅員外と幅員内において、それぞれ3種類の処理を施した（図-2）。すなわち、カラマツチップ（以後、単にチップとする）のみを充填した区間（以後、幅員外全チップ区間、幅員内全チップ区間と呼ぶ）、上部にチップと下部に砂利を充填した区間（幅員外上部チップ区間、幅員内上部チップ区間）、上部に砂利と下部にチップを充填した区間（幅員外下部チップ区間、幅員内下部チップ区間）である。

チップのサイズは目視で3cm程度、砂利のサイズは約5cm以下である。

路面上に発生した濁水が環境配慮型暗渠と明渠に流れ込むように、ブルドーザーによって切取り面側が低くなるように横断方向で勾配2°の傾斜をつけた。明渠区間より上部からの流水を明渠区間に流入させないために、明渠区間の上部に浸透升を設置し横断排水管（プラヒューム管：φ=300mm）を經由し排水するようにした。幅員外にある既設の側溝および幅員内では新たに暗渠バケットで溝を掘り、各暗渠区間の最深部には排水用の網

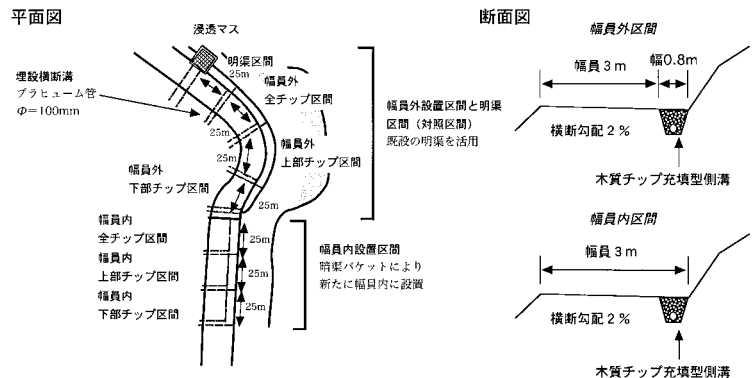


図-1 調査区間の概要

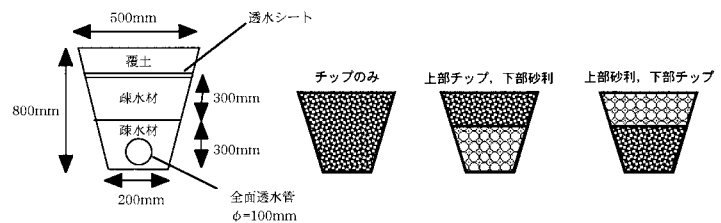


図-2 環境配慮型暗渠の構造

状全面透水管（カナドレーン： $\phi = 100\text{mm}$ ）を全延長に配置した。各区間では、隣接する区間に水を移動させないためにコンクリートパネルによって疎水材及び排水管を遮断するとともに、路面に浅い水切りを施した。各暗渠区間と明渠区間では、全面透水管終端部にL字管を接続させた横断排水管（プラヒューム管： $\phi = 100\text{mm}$ ）をそれぞれ設置し排水させた。以上の操作により、濁水を明渠、暗渠に流入させるようにした。

環境配慮型暗渠の構造を図-2に示す。暗渠の構造は、基本的には農業用暗渠を模した。明渠区間は、横断面が上底幅（ $W_u=900\text{mm}$ ）、下底幅（ $W_d=300\text{mm}$ ）、深さ（ $D=300\text{mm}$ ）の逆台形状になっている。明渠区間の横断面積は、 $1,800\text{cm}^2$ である。明渠区間下部における横断管への接続は、浸透升を介さず直付けした。

幅員外全チップ区間と幅員内全チップ区間では、横断面が上底幅（ $W_u=500\text{mm}$ ）、下底幅（ $W_d=200\text{mm}$ ）、深さ（ $D=800\text{mm}$ ）の逆台形状になっている。全チップ区間の横断面積は、 $2,800\text{cm}^2$ である。そのうち、最深部から600mmの厚さまでチップを充填した後、透水シートで仕切り、その上に200mmの厚さで覆土した。透水シートを用いた目的は、チップのみの充填では風などで飛散することが考えられること、チップと覆土が混じらないようにするためである。幅員外と幅員内の上部チップ区間では、横断面の形状は全チップ区間と同様で、最深部から300mmまでを砂利で充填し、その上に厚さ300mmのチップを敷き詰めた。2層の間に仕切りは入れなかった。幅員外と幅員内の下部チップ区間でも、充填材の上下が逆転した構造になっているだけで、横断形状は同じである。なお、暗渠区間の敷設に際しては、側壁に型枠を設置することで、横断面の形状が各区間において異ならないよう留意した。暗渠設置の際に使用したチップは、紋別市渚滑町にある横内林業（株）紋別事業所で生産している製品を用いた。施工が完了したのは、2000年9月29日であった。

3. 調査方法

（1）降雨による濁水水量と濃度の観測

各区間において、降雨によって路面に発生した濁水を採取した。濁水の採取方法としては、横断排水管から流れ出す濁水を横断排水管末端に設置した20リットル容量のペール缶に集めた。ペール缶側壁には穴が開けられており、その穴にビニールホースの一端を装着し、別の端は水道メータに接続した。明渠区間と各暗渠区間における排水量はペール缶に貯まった水の水深を物差しで測定し、ペール缶側壁の穴の位置を超えた水量に関しては水道メータの値を読み流出量を求めた。採水は、採取前にペール缶内を攪拌し、内部の濁水が均質となった後に500mlのペットボトルに移し変えて行った。採取された水は、室内に持ち帰り、吸引濾過法により微細土砂濃度、灼熱損量により微細土砂有機成分をそれぞれ測定した。微細土砂無機成分濃度は、微細土砂濃度と微細土砂有機成分濃度の差で求められる。

缶に溜まった水の採取では、排水管から直接濁水を採取する場合に比べて、濃度の値が異なる可能性があるが、各区間の採水用ペール缶の構造が同じであることから、相対的な濃度の大小は評価できると考えた。

降水量については、気象台提供による試験地近傍の「上藻別」の日降水量データを利用した。

（2）野外における人工注水試験

チップの保水能力を確認するために、2000年11月27～28日に人工注水試験を実施した。対象区間は、実施日以前の観察から、降水時に排水がみられた幅員内全チップ区間および幅員内上部チップ区間、対照としての明渠区間とした。降雨時の状況では2つの下部チップ区間はともに排水がみられなかったため除外したが、同様に濁水がまったく排水されなかった幅員外全チップ区間については試験的に実施した。注水方法は、満水したタンクを用意し、ポンプにより対象とした区間に直接注いだ。注水にあたっては、まず

除雪と覆土の除去を行い、チップを露出させた状態で行った。濁水濃度観測の結果からチップの吸水性能が非常に大きいことがわかったため、注水は、膨大な水量を必要とする路面全体への散水ではなく、暗渠の1地点から直接注水することにした。また、区間最上部から注水すると排水量が極めて少なくなることや排水時間が相当かかることが予想されたため、注水は横断排水管の10m上部地点から行った。注入口の大きさは、60×40cmである。

注水試験に用いたタンクは防火用水槽で、容量は約800リットルである。注水に使用したポンプは消防用ポンプで、600～700リットルを5分足らずで注水完了できる能力をもつ（形式：カトーポンプKF-40, Eg. 富士重口ビンEy-40, 出力：定格3.5馬力/最大5馬力）。

注水総量と横断配水管から排出された水量（ここでは、排水総量と呼ぶ）、注水開始時刻と注水終了時刻、排水開始時刻と排水終了時刻をそれぞれ測定した。注水総量は、タンクについた目盛りを直読して求めた。排水総量は、横断排水管からの排水された水を容量2リットルの容器で受け、その総量を算出して求めた。

（3）チップによる濁水濾過に関する室内実験

チップの吸水性および濁水の濾過効果を調べるために、室内実験を行った。容量45リットル（高さ47cm, 上面の内径37.5cm, 下面の内径32.5cm）のプラスチック製ポリバケツを用意し、下部に排水を目的とした蛇口を取り付けた。このポリバケツ内にチップを厚さ30cm（体積0.023m³）になるように敷き詰めた。チップをポリバケツから取り出し十分に風乾させた後、乾燥器により60℃で48時間乾燥させた。電子はかりにより乾燥後の重量（ M_1 ）をグラム単位まで測定した。なお、乾燥重量測定後のチップについて、実験を開始するまで室温15℃前後、湿度30%前後の恒温室内に保管した。

試験地において、スコップで作業道表層の土砂を攪乱採取した。この試料を実験室に持ち帰り、乾燥器によって80℃で48時間乾燥した。乾燥後の試料については、乳鉢を使って粉碎した後、106μmメッシュのふるいによって試料のふるい分けを行った。実験には106μm以下の粒径をもつ微細土砂を使用した。微細土砂を再び自然対流型乾燥器に入れ、80℃で48時間乾燥させデシケーター内で冷ました後、容量1リットルのポリエチレン製ビン10本に1gの微細土砂をそれぞれ入れた。微細土砂の入った各ポリビンに1リットルの純水をそれぞれ入れ、微細土砂濃度が1,000mg L⁻¹となるよう調整された濁水を総量10リットルつくった。

実験開始時において、重量（ M_2 ）を再測したチップをポリバケツに再び敷き詰めた。濁水の供給方法として、濁水1リットルを水平にならしたチップ上面全体にかかるように静かに注いだ。濁水投入後は、蛇口から排水される濁水をポリビンで受け、その水量（以後、排出水量と呼ぶ）と濁水濃度をそれぞれ測定した。以後、同様の操作を濁水1リットル投入するごとに行った。最終的にチップへ投入した濁水の最終積算投入水量（ V ）は、10リットル（=10,000g）とした。なお、この水量は降水量に換算すると、ポリバケツに総量90.5mmの雨が降った場合に相当する。

実験後には、チップを再び秤量し、実験終了後のチップの重量（ M_3 ）を求めた。実験開始前におけるチップそのものに含まれていた水分の含水率（ θ_s ）と、実験終了後におけるチップへの水分保持率（ A_b ）は、以下の式で求められる。

$$\theta_s = \frac{(M_2 - M_1)}{M_2} \times 100 \quad \dots (1)$$

$$A_b = \frac{(M_3 - M_2)}{V} \times 100 \quad \dots (2)$$

（4）車両走行試験

幅員内に環境配慮型暗渠を配置した調査区では、車両走行時の荷重による圧密により深さが減少し、濾過効果が低下することが考えられる。

2001年10月9日に幅員内に設置した暗渠3区間において、5m間隔で横断方向に3側線をそれぞれ設け、切取りのり面側に基点を設定し、レベル測量により路面および暗渠上面の横断形状を測定した。この測量の後、間伐材を積載した総重量35.7トンのダンプを車輪の片側が3暗渠区間上を通るように走行させた。走行後には、走行前と同一の測線において横断面の地形変化を再測した（前進2回、後進1回の計3回目と、前進5回、後進3回の計8回目の走行時点で測定）。また、幅員内区間において、この試験時の前後における微細土砂濃度の比較を行った。

4. 解析方法

各調査区における濁水の排水量は、水道メーターを用いているために積算値で表される。そこで、ある採水日において、前回の採水日翌日から採水前日までに降った総降水量（以後、積算降水量と呼ぶ）に対する同期間の積算排水量の関係から、環境配慮型暗渠による濁水保持効果を検証した。微細土砂濃度は、明渠の値を100として各暗渠区の微細土砂濃度値を相対的に表した濃度比で示した。統計解析は、Friedman検定を用いた。その際には、自由度 df 、 χ^2 値、有意水準 p を併記した。

人工注水試験では、注水量が区間によって異なるために、注水量に対する排水量の割合で保水能を評価した。

チップの濁水濾過効果は、積算濁水水量に対する積算流出水量、微細土砂、微細土砂有機成分、微細土砂無機成分のそれぞれの濃度と流出量（＝濃度×流出水量）で評価した。

車両走行試験では、3測線の横断面形状を比較した後、走行前の横断面から走行後に沈降した部分の深さを平均し、幅員内3区間で平均沈降量を比較した。

5. 結 果

（1）環境配慮型暗渠における濁水排水量

降雨時における現地調査において、路面上に生じた濁水が暗渠に流れ込んでいる様子が観察された。2000年10月30日～2002年10月6日までを対象にした幅員外3区間および幅員内3区間における積算降水量と積算排水量の関係をともに図-3に示す。これらの図では、明渠区間での観測結果もあわせて示した。なお、積算降水量が300mm以上の例は、11月～翌年5月までの冬季における観測値である。

明渠区間では、積算降水量が増加すると積算排水量が増える傾向がみられた。幅員外暗渠3区間を比較すると、全チップ区間と上部チップ区間では、ほとんど排水されることはなく、前者では積算排水量が常に0リットルであった（漏水などの影響があるため、統計処理はしていない）。下部チップ区間では、明渠区間における積算排水量に近い量がしばしば排出されていたが、積算降水量に対して明瞭な傾向は認められなかった。

幅員内に設置した3区間内では、上部チップ区間でやや他の区間より積算排水量が多くなる例があったが、3処理間には統計的に有意な差はなかった（Friedman検定、 $df=2$ 、 $\chi^2=1.135$ 、 $p=0.567$ ）。ただし、全チップ区間と下部チップ区間では、積算降水量の増加に対して積算排水量が低下する傾向であった。

排水がみられた幅員内の3区間を対象に、明渠区間における積算排水量に対する各区間の積算排水量の比（ここでは、排水比と呼ぶ）を、積算降水量をもとに整理した（図-4）。積算降水量の増加に伴い、排水比は減少する場合がみられた。幅員内上部チップ区間では、他の区間に比べて排水比が高い値を示す場合が多かった。また、排水比が100%を超える例がいくつか観測された。

すべての区間について、各調査区で排水量の連続記録が得られた2001年7月17日～2002年10月6日における総積算排水量を算出した（表-1）。総積算排水量では、明らかに明渠区間が多かった。明渠区間

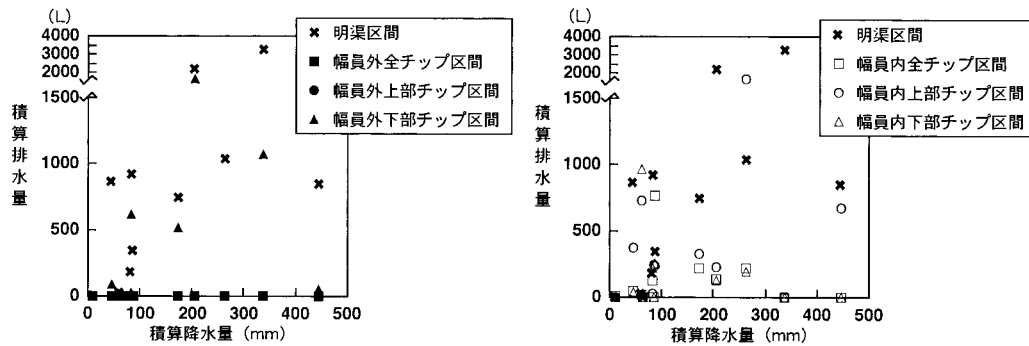


図-3 各暗渠区間における積算降水量と積算排水量の関係

表-1 各区間で2001年7月17日～2002年10月6日において観測された総積算排水量と排水比（明渠区間での観測値に対する積算排水量の割合）

処理	総積算排水量 (L)	排水比 (%)
明渠区間	6,477※	100
幅員外全チップ区間	0	0
幅員外上部チップ区間	11	0.2
幅員外下部チップ区間	2,501	38.6
幅員内全チップ区間	1,320	20.4
幅員内上部チップ区間	4,227	65.3
幅員内下部チップ区間	1,795	27.7

※オーバーフローしていた可能性があるが、ここではこの値で排水比を求めた。

の値に対する総積算排水量の割合は、20～65%の範囲であった。

(2) 環境配慮型暗渠における微細土砂濃度

明渠区間で測定された微細土砂濃度に対する各区間における微細土砂濃度の割合（以後、濃度比と呼ぶ）を表-2に示す。幅員外全チップ区間では排水がなかったため、濃度比が0であった。幅員外上部チップ区間と同下部チップ区間では、2000年10月30日の例を除いて、後者の濃度比が高い値を示した。幅員内に設置した3区間では、全チップ区間が他の区間に比べて高い濃度比を示していた。幅員内上部チップ区間と同下部チップ区間では、2000年10月3日と2002年7月15日の例を除いて、10%以下の濃度比であった。2002年7月15日は、幅員内暗渠3区間で濃度比が100%を超えていた。幅員内3区間では、微細土砂の濃度比に統計的有意差が認められなかった（Friedman検定、 $df=2$ 、 $\chi^2=4.67$ 、 $p=0.097$ ；2002年7月15日のデータを除いて算出）。

濃度レベルの違いによるチップの濁水濾過効果を検証するために、明渠区間で観測された微細土砂濃度に対する各区間の濃度比を示した（図-5）。明渠区間の微細土砂濃度が 145mg L^{-1} 以下の低い場合には、濃度比が100%を超える例がみられた。明渠区間の微細土砂濃度が約 $1,000\text{mg L}^{-1}$ 以上になると、濃度比が徐々に高くなる傾向がみられた。処理間で比較すると、幅員内全チップ区間の濃度比が相対的に高い値を

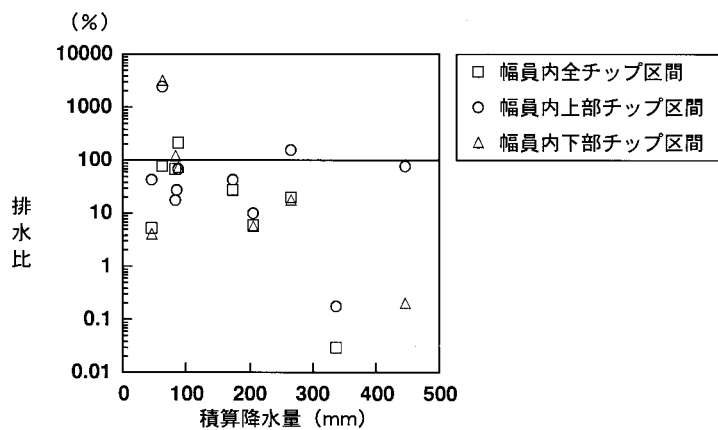


図-4 幅員内暗渠区間における積算降水量と排水比の関係
※排水比は、明渠における積算排水量に対する幅員内暗渠区間における積算排水量の比

表－2 各区间における微細土砂濃度比（濃度比は、明渠区間の微細土砂濃度に対する各区間の微細土砂濃度の割合を百分率で表した値；単位は％）

採水日	幅員外			幅員内		
	全チップ	上部チップ	下部チップ	全チップ	上部チップ	下部チップ
2000年						
10月3日	0	—	—	78.4	22.2	59.1
2000年						
10月30日	0	32.4	4.0	—	—	—
2002年						
6月6日	0	—	2.4	—	—	—
2002年						
7月15日	0	—	81	119.4	257.1	131.1
2002年						
8月6日	0	—	6.3	21.2	6.1	—
2002年						
8月30日	0	0.2	9.1	37.2	1.5	8.6
2002年						
10月6日	0	0.1	13.6	49.4	4.6	4.1

示しているほかは、明瞭な違いが認められなかった。なお、全チップ区間の濃度比が高い理由としては、路面に発生した濁水が暗渠に流れ込む位置が他の区間に比べて排水溝に近かったことなどが挙げられる。

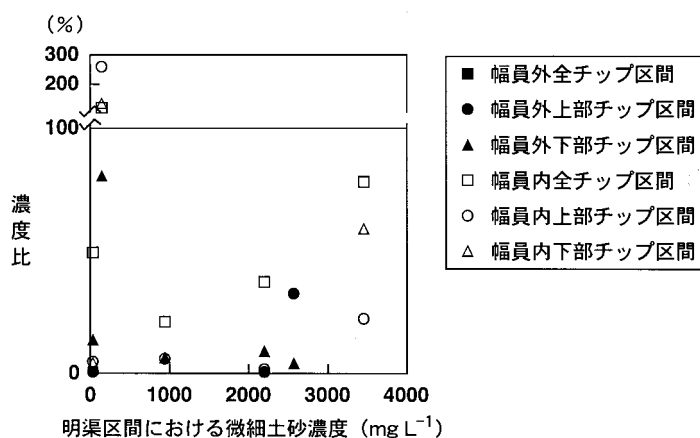
（3）人工注水試験の結果

各区间における人工注水によって排出された水量を図－6に示す。明渠区間について、2リットル容量のカップでは計測が間に合わず、こぼれにより測定できなかった排水量もあるため「～以上」と表記した。

供給水量に対する排水量の割合では、

明渠区間が73%以上（実際には、目視観測によりほぼ100%流出していた）と大量に排水されたのに対して、幅員外全チップ区間と幅員内全チップ区間がそれぞれ0.0%と8.0%、幅員内上部チップ区間が5.5%といずれも10%未満の割合であった。

注入開始から、排出開始および排水終了までの時間を表－3に示す。注水時間は、暗渠区間が全て8分前後、明渠区間が注水量を半分以下としたため2分であった。暗渠区間では、注水速度60～100L min⁻¹前後で注水したが、オーバーフローは起こらなかった。暗渠区間では注水開始から排水開始までの時間は10分前後であった。暗渠区間の延べ排水時間は、明渠区間が注水時間と同じ2分であったのに対し、排水量の少なかった上部チップにおいては6分と注水時間より早かった。逆に、全チップ区間では、すべて排水しきるまで27分を要した。排水速度では、明渠区間の109.5L min⁻¹に対して、幅員内の両区間では5.0L min⁻¹以内と低い値であった。



図－5 明渠区間における微細土砂濃度と各暗渠区間における濃度比の関係

※濃度比は、明渠における微細土砂濃度に対する各暗渠区間における微細土砂濃度の比

表-3 人工注水試験における注水、流出に関わる時間と速度

処理	注水時間 (min)	注水量 (L)	注水速度 (L min ⁻¹)	排水開始 所要時間 (min)	延べ排水 時間 (min)	排水速度 (L min ⁻¹)
明渠区間	2	300	150.0	0	2	109.5
幅員外 全チップ区間	7	670	95.7	流出せず	流出せず	流出せず
幅員内 全チップ区間	8	610	76.3	10	27	1.8
幅員内 上部チップ区間	8	530	66.3	9	6	4.9

(4) 室内実験におけるチップによる微細土砂の濾過

実験開始前のチップの含水率 (θ_s)

は1.8%とわずかであった。水分保持率 (A_b) は23.5%であり、濁水の積算投入水量に対して約1/4がチップに保持されていた。

濁水1リットル投入ごとに排出された水の微細土砂、微細土砂有機成分、微細土砂無機成分の濃度をともに図-7に示す。微細土砂濃度の76.6~89.2%は微細土砂無機成分が占めており、積算投入水量に関わらず有機成分の濃度はほぼ一定の値であった。積算投入水量が2リットル以降は微細土砂濃度が減少する傾向にあったものの、積算投入水量に対する微細土砂濃度の変化に単調減少、単調増加などの関係は認められず変動した。微細土砂濃度の値は、154~335mg L⁻¹の範囲にあった。

積算投入水量に対する積算排水量の関係を図-8に示す。両者の関係は、直線的な関係が認められた。最終積算投入水量に対し、最終的に排出された濁水の積算水量は7.49Lであった。この値は、積算投入水量の75%に相当する。

積算投入水量に対する微細土砂、微細土砂有機成分、微細土砂無機成分の積算流出量をともに図-9に示す。微細土砂、微細土砂無機成分の積算流出量は、ともに積算投入水量が4~6リットルの時にその増加が緩やかになるものの、ほぼ直線的な関係を示した。最終的に投入された量10gに対し、最終的に排出された微細土砂、微細土砂有機成分、微細土砂無機成分の積算流出量は、それぞれ1.68、0.26、1.42gであった。これより、微細土砂の捕捉率は83.2%となった。

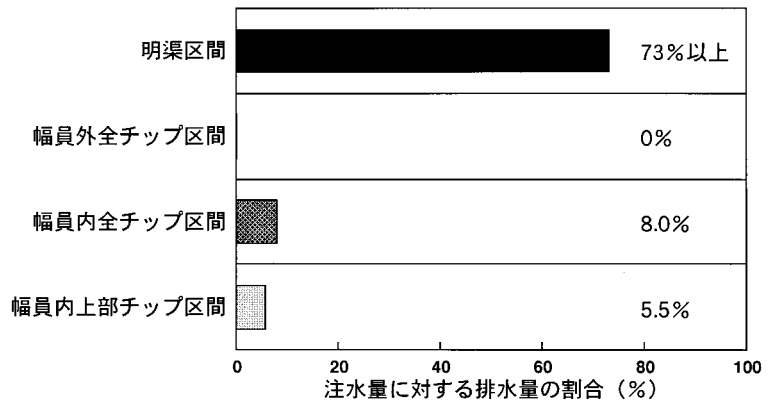


図-6 人工注水試験における注水量に対する排水量の割合

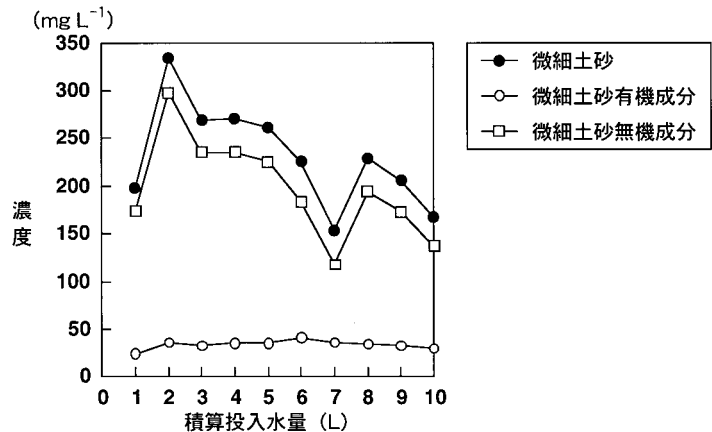


図-7 積算投入水量に対する微細土砂、微細土砂有機成分、微細土砂無機成分の濃度変化

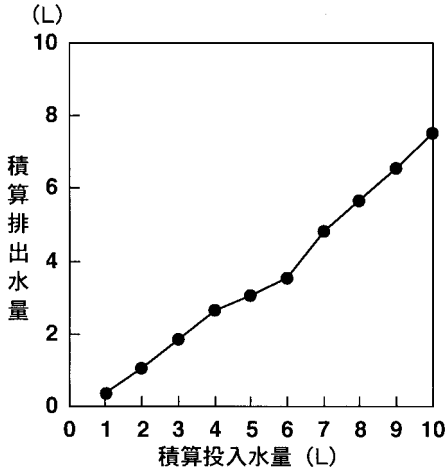


図-8 積算投入水量に対する積算排出量の関係

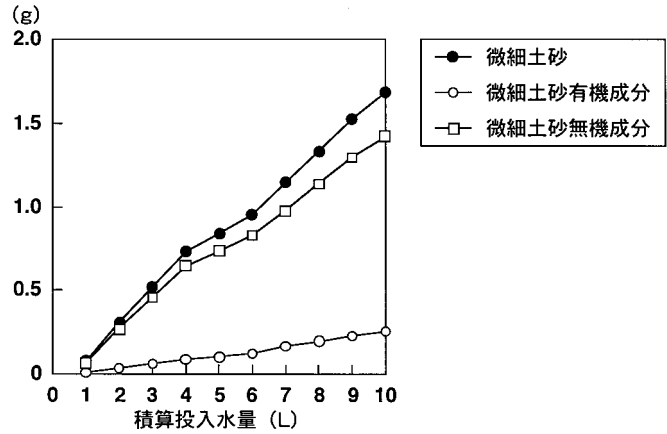


図-9 積算投入水量に対する微細土砂、微細土砂有機成分、微細土砂無機成分の積算流出量の関係

(5) 車両走行による暗渠横断面形状の変化

3区間で測定した横断面形状を図-10に示す。全チップ区間では、3回目、8回目ともに暗渠上面で沈み込みが確認されたが、路面上では顕著な変化がなかった。上部チップ区間では、3回目に暗渠で大きな沈み込みがあったものの、8回目では3回目に比べて比高の変化が小さかった。また、暗渠と路面の境界部において、バームと呼ばれる盛り上がった地形が形成されることがあった。下部チップ区間では、Line2を除いて3回目に暗渠上面で大きな沈み込みがあったが、8回目では3回目ほどの沈み込みがなかった。

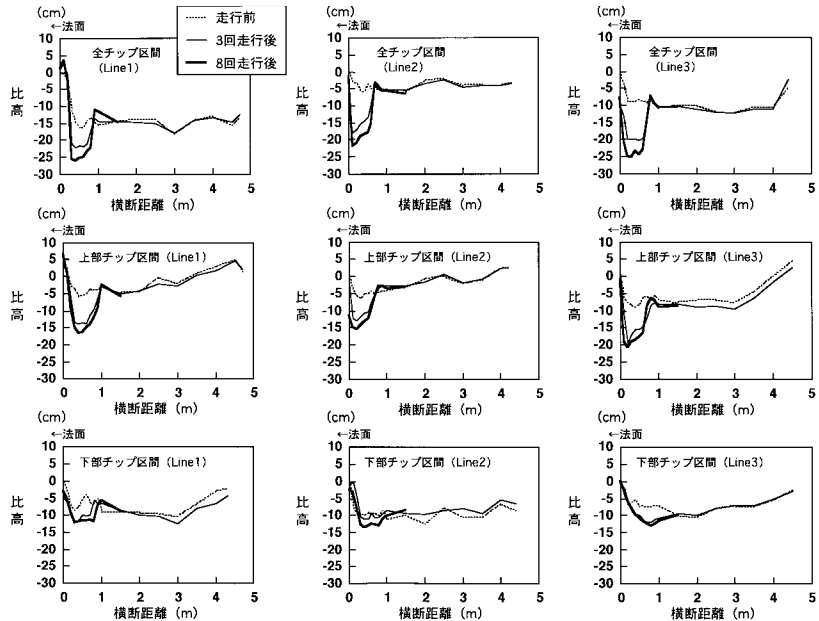


図-10 幅員内暗渠区間における車両走行前後の路面地形変化

横断測量結果から、平均沈降量(車両走行前後で低下した値のみの平均値)を算出した(図-11)。平均沈降量は、3回目、8回目ともに、全チップ区間>上部チップ区間>下部チップ区間の順であった。各区間ともに、回数が増えると平均沈降量が頭打ちになる増加傾向を示した。8回目の平均沈降量は、全チッ

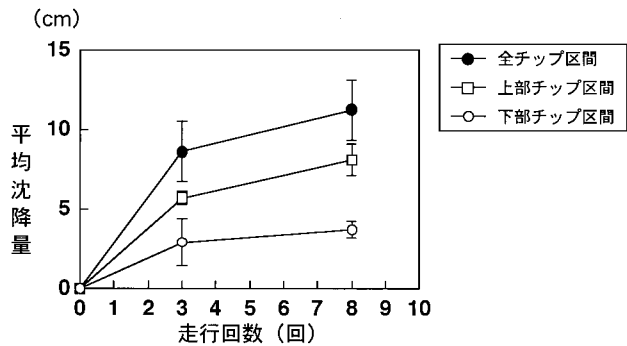


図-11 幅員内暗渠区間における車両走行回数による平均沈降量の推移

プ区間が 11.2cm, 上部チップ区間が 8.1cm, 下部チップ区間が 3.7cm であった。

6. 考 察

(1) 環境配慮型暗渠が有する濁水の保持効果

現地調査や注水試験では、幅員外全チップ区間、幅員外上部チップ区間で、水がほとんど排出されなかった。この理由としては、①排水管接続部や埋め戻し箇所への漏水や暗渠底部にある亀裂からの降下浸透、②施工後に新たにできたバームによる暗渠への地表流入阻害、などが挙げられる。ここでは原因を特定することはできないが、幅員外区間での結果では濁水保持効果について議論できないことから、以後の考察は幅員内3区間の結果に基づく。

現地調査と人工注水試験の結果から、従来型である素堀式明渠型側溝では、積算降水量の増加に伴い排水量が増加する傾向を示し、短時間に大量の水が排水される特徴を有していた。明渠における短時間・大量の流れは側溝そのものの侵食を促し、山腹斜面における水流出プロセスに影響を与えることが示唆される。実際に、他の地域においては、目視により側溝侵食が生じている路線が確認されている。

これに対して、チップを充填材として用いた環境配慮型暗渠は、現地での観測から、数例を除いては明渠区間より排水量が少なく、注水試験結果から排水割合が 10%未滿、注水速度に対する排水速度もかなり低い値に抑えられていた。これは、環境配慮型暗渠が路面上に発生した濁水を保持し、ゆっくり排出する機能があることを示している。

総積算排水量の比から、チップによる濁水排出は 20～65%程度に抑えられていた。チップの濾過効果実験においても、水分保持率は最終積算投入水量に対して約 1/4 であった。これらの結果から、チップによる保水能力により、濁水排水量を減少させることが期待できる。

降雨直後の観察では明渠区間に設置したペール缶周辺にオーバーフローの痕跡があった。こうした状況のときに排水比が 100%を超えたことから、明渠区間では水道メーターに接続したチューブの排水能力を超えた排水量があったため、排水量の値が低くなったことが予想される。

処理別でみた場合、統計的有意差がなかったものの、幅員内上部チップ区間でやや積算排水量が多くなる傾向であった。これは、暗渠への濁水流入点が区間ごとで異なっていたことが想定される。

積算降水量に対する排水比の検討から、積算降水量が多いほど濁水保持能力が相対的に高くなる傾向が認められた。チップの保水性に限界があると仮定すると、積算降水量の増加に対して積算排水量も増加する結果とは逆になる。この原因としては、積算した期間内の降雨強度分布が異なっていたために、期間ごとの乾湿程度が違っていたことが考えられる。

(2) 環境配慮型暗渠が有する微細土砂濃度に対する濾過効果

明渠区間では、微細土砂濃度が $1,000\text{mg L}^{-1}$ を超える濁水が観測された。濁水中に含まれる浮遊土砂のうち、微細土砂が占める割合は 60%以下にはならず、そのほとんどが 80%以上、場合によっては 90%を超えていた。路面上に発生した濁水は、ほとんど微細な土砂で占められている。

環境配慮型暗渠の微細土砂濃度比は、2002年7月15日を除いて 100%以下であった。これより、チップが濁水中の微細土砂を除去していることは明らかである。濾過実験の結果からも、チップには微細土砂を捕捉する効果があることがわかった。特に、投入した濁水濃度 $1,000\text{mg L}^{-1}$ に対して微細土砂濃度では約 1/5～1/3 まで減少し、微細土砂の捕捉率 83.2%は極めて高い値である。これより、林道路面由来の濁水をチップに通過させることで、過剰に流出する微細土砂を濾過する効果が期待できる。なお、現地調査において微細土砂濃度比が 100%を超えた例については、チップに付着した微細土砂の洗い出しなどが理由として考えられるが、ここでは原因を特定することはできない。

環境配慮型暗渠における微細土砂の濃度比は、明渠区間における微細土砂濃度が高くなるほど増加する傾向がみられた。これは、高濃度の濁水に対して濾過効果が減少することを意味する。したがって、この暗渠による濾過機能には、限界があることが示唆される。

濾過実験開始前の仮定として、現地調査結果と同様、積算投入水量が多くなるほどチップの水分保持率と微細土砂の捕捉率が低下し、増加傾向が頭打ちになることが予測された。しかし、積算排出水量と積算流出量は、積算投入水量に対して明瞭な頭打ちの増加傾向はなかった。チップの水分保持率や微細土砂捕捉率の限界を調べるには、チップの体積に対して濁水投入水量を増やす必要がある。

処理間による微細土砂濃度比の違いでは、統計的有意差はないものの、幅員内全チップ区間の値が高い傾向を示した。この理由として、全チップ区間ではチップとの接触時間が相対的に早かったことが想定される。ただし、注水実験において、全チップ区間は上部チップ区間より排水時間が長かった。全チップ区間における高い濃度比は、濁水流入点と横断排水管までの距離が他の区間より短く、結果として濁水がチップと接触している距離が相対的に短いことに起因すると考えられる。

(3) 幅員内暗渠区間における車両通行の可能性

カラマツチップは粗大間隙が多く、圧縮に強い特徴をもつことが報告されている（津田ら、1997）。本研究では、幅員内暗渠区間において車両走行により荷重をかけた場合、暗渠上面が沈降する現象がみられた。路面において車両通行によってわだちが低下することは、他でも報告されている（Jansson and Johanson, 1998）。走行回数に対する平均沈降量は、3種類の暗渠区間に関わらず走行回数を重ねると、頭打ちになるような増加がみられ、ある一定の値に漸近することが考えられる。

構造による違いで比較した場合、平均沈降量には明瞭な違いが認められ、砂利を混入させた区間では平均沈降量が少なかった。特に、上部に砂利を充填した区間では平均沈降量がわずか3cmであり、車両走行上問題となるものではなかった。最も平均沈降量が多かった全チップ区間では、車両は通行可能であったが、車体がかかなり傾いていた。車両走行が可能で濁水濾過効果も期待できる側溝の構造としては、砂利と組み合わせるタイプが有効である。

なお、走行前に暗渠上面に付けたマーキングが残っていたことから、暗渠上面の沈み込みは、タイヤの回転による攪乱ではなく、荷重による沈降である。

車両による踏圧が濁水流出抑制効果に影響を及ぼすことが想定される。表-2に示した濃度比では、幅員内暗渠区間における2002年の値は、2000年の値より低く50%以下であった（2002年7月15日の例を除く）。したがって、幅員内暗渠区間における濁水濾過効果は、踏圧後においても発揮されていた。踏圧を受けた期間のうち2002年5月27日～10月6日までの積算排水量から求めた排水比では、幅員内全チップ区間が29.6%、上部チップ区間が31.5%、下部チップ区間が17.5%と、濁水保持機能は依然として発揮されていた。暗渠上の車両走行による濁水保持効果は激的に変化することがなく、水量と濃度に対して効果はともに維持されていた。

ただし、3区間において、暗渠と路面の境界部にバームが形成されていたことは、濁水流出抑制に対して問題となる。バームは、車両走行時に生じやすい。Jansson and Johanson (1998)の例では、キャタピラ式よりタイヤ式ではわだちが深く、バームが大きくなることが報告されている。暗渠に沿って形成されたバームは、路面を流れる濁水の暗渠への流入を阻害する。車両走行後に顕著なバームが生じた場合には、これを削り取り、路面を再びならすなどの作業が必要である。

(4) 環境配慮型暗渠の問題点と施工地条件

環境配慮型暗渠は、濁水量と微細土砂濃度の観測結果からみて、濁水保持と濾過効果を有することが明らかになった。しかし、本調査地以外で施工した例では、暗渠の排水能力を超えた水が流入したため、チップ内にガリーが形成され、路面にまでチップが流亡していた。このケースでは、横断排水溝の設置間隔が

100m以上と長いことや、側溝の深さが30cm程度と浅いことから、チップの流亡原因として排水能力が不十分であったと考えた。

本研究では試験目的のために横断排水管の設置間隔を25mとしたが、水流によるチップの流亡はみられなかった。これより、環境配慮型暗渠の設置の際には、横断排水管の設置間隔を長くとらず、周囲から暗渠に流入する水量を排水処理できる断面積を確保する必要がある。

著者らは、別の施工地において切取りり面からの崩落土砂が環境配慮型暗渠上に堆積していたのを観察した。明渠でこのような状況が生じると、側溝を流れていた水が溢れ、路面を侵食する場合がある。環境配慮型暗渠では、底部にまで崩落土砂が堆積することがないため、切取りり面崩落後も継続して排水する可能性がある。

カラマツチップの耐久性については、農業暗渠用の疎水材として11年経過した場合、60%の体積減少が生じたが、疎水効果が保持されていたとの報告がある（津田ら、1997）。チップではないが丸太の場合、その分解係数はアカエゾマツ<カラマツ≒トドマツ<ミズナラの順になることが明らかにされている（酒井ら、2003）。これらの研究例から、チップとして針葉樹を用いれば、設置後10年程度は維持されることが期待できる。ただし、地域的な気象条件の違いや、流入する濁水量の違いなどがチップの分解率に寄与することが考えられるため、今後はチップの分解や目詰まりの面も含めて継続的な観察をする必要がある。

謝 辞

環境配慮型林道の調査では、住友林業山林部紋別山林事務所の東山攸徹前所長（当時）、蓮沼聖司係長（当時）ほか、事務所の方々の多大なる御協力をいただいた。また、北海道立林業試験場の対馬俊之氏と太田石一氏にもお手伝いいただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

引用文献

- Dickerson B.P. (1976) Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 : 965-966.
- 江本和則・中村茂明（1995）林道工事における間伐材利用促進調査試験について．平成6年度林業技術研究発表大会論文集．北海道林業改良普及協会：176-177.
- Gent Jr.J.A., Ballard R., and Hassan A.E. (1983) The impact of harvesting and site preparation on the physical properties of Lower Coastal Plain forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 595-598.
- Hatchell G.E., Ralston C.W., and Foil R.R. (1970) Soil disturbances in logging. *J. For.* 68(12) : 772-775.
- 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．森林利用学会誌 13 (3) : 201-210.
- 井良沢道也・石川芳治・小泉 豊（1992）濁水対策に関する実験的研究．新砂防（砂防学会誌） 45 (1) : 38-42.
- 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(1) : 57-66.
- 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.
- 中村太士（1999）流域一貫 一森と川と人のつながりを求めて一．築地書館：138pp.
- 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．森林利用学会誌 13 (3) : 161-168.

- 坂 文博 (1996) 林道工事における間伐材利用促進調査試験について (要約). 平成7年度林業技術研究
発表大会論文集. 北海道林業改良普及協会: 205-207.
- 酒井佳美・田中永晴・高橋正通 (2003) 北海道の主要樹種における材の初期分解速度. 日林北支論 51:
64-66.
- 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.
- 津田真由美・関 一人・斉藤直人・青山政和・奥村真由己・森 満範・菊地伸一・窪田 實・北川 巖・
横井義雄 (1997) カラマツチップの暗渠疎水材としての利用. 北海道立林産試験場研究報告
11 (2): 5-10.
- 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. 森林利用学会誌 16 (3): 191-202.