

公益社団法人 国土緑化推進機構

「緑と水の森林ファンド」事業助成

新たな森林施業に対応した  
水土保全技術手法に関する調査研究

平成 25 年度報告書

平成 26 年 6 月

一般社団法人 森林保全・管理技術研究所

## はじめに

森林は、木材生産のみならず国土保全、地球温暖化防止などの多面的機能を有していることから、それらの機能を維持・発展させるため、これまでも適切な森林の整備や保全が行われてきた。

中でも、1,000万ヘクタールを超す人工林では、未だ間伐等の施業の必要な林分がある一方、育てる段階から本格的な利用段階にさしかかった森林も増加しつつある。

このような中、山村の振興や林業・木材産業の振興、国土保全や地球温暖化対策などに向けて森林資源の積極的な利活用を図るとともに、持続的かつ安定的な森林を維持・造成するため、適切な主伐や再造林を推進して齢級構造の平準化を進めるなどの森林整備の促進が課題となっている。

そのため、森林資源の積極的な利活用にあたっては、木材産業の高度化のみならず森林施業の集約化や新たな規格による路網整備、高性能林業機械の導入などによる効率的、持続的な森林経営を図る必要がある。

その一方、これらの積極的な森林利用の促進に向けた取組みを円滑・着実に推進するためには、森林の多面的機能、とりわけ国民の安心・安全に関わりの深い水土保全機能に及ぼす影響を解明し、望ましい森林整備のありかたについてさらに検討する必要がある。

そこで、一般社団法人 森林保全・管理技術研究所に設置された水土保全部会では、(独)森林総合研究所と連携して茨城県内の間伐跡地に試験地を設定し、定期的に調査・観測を実施してきた。

それらの調査結果に基づき、森林施業に不可欠な間伐や伐採方法、路網配置や構造、集運材の方法などが森林の水土保全機能に及ぼす影響を林種・林型、地形・地質、気象条件などと関連づけて評価するとともに、望ましい森林施業のあり方についても検討を行った。

さらに、これらの調査事例に加えて、「土砂災害に強い森林づくりへの提言」、「森林作業道作設と水土保全対策」、「数値地形情報を利用した路線選定プログラム」、「森林作業道からの土砂流出対策」なども合わせて報告書にとりまとめた。

本報告書が今後推進される森林整備に関わる多くの技術者や行政担当者に広く活用されることを願っている。

なお、本調査研究を実施するにあたりご高配をいただいた茨城森林管理署、(独)森林総合研究所をはじめ、関係各位に感謝申し上げます。

平成 26 年 6 月

一般社団法人 森林保全・管理技術研究所 水土保全部会

## 目 次

<b>第1章 事業の概要</b> .....	<b>1</b>
<b>第1節 課題名</b> .....	1
<b>第2節 調査目的</b> .....	1
<b>第3節 調査項目</b> .....	1
<b>第4節 調査計画</b> .....	1
<b>第5節 調査体制</b> .....	2
<b>第2章 調査方法及び調査結果</b> .....	3
<b>第1節 既往文献調査</b> .....	3
第1項 関連掲載誌の検索 .....	3
第2項 該当論文等の選定 .....	3
第3項 整理・まとめ .....	4
<b>第2節 現地実態調査</b> .....	7
第1項 調査目的及び調査地の概要等.....	7
第2項 土壌侵食調査 .....	19
第3項 斜面崩壊調査 .....	61
第4項 関連林業地実態調査（長野県松本地区） .....	74
<b>第3節 現地実態調査のまとめ</b> .....	81
第1項 茨城県常陸太田試験地 .....	81
第2項 長野県松本地区 .....	81
<b>第3章 森林施業上の留意点</b> .....	83
<b>第1節 土砂災害に強い森林づくり</b> .....	83
第1項 表面侵食 .....	83
第2項 崩壊 .....	85
第3項 土石流 .....	95
第4項 災害に強い森林づくりへの提言 .....	99
<b>第2節 森林作業道作設と水土保全対策</b> .....	102
第1項 土砂流出抑制の基本的な考え方 .....	102
第2項 林道と森林作業道の対処方法の違い .....	102
第3項 森林作業道の作設と土砂流出抑制対策 .....	102
<b>第3節 数値地形情報を用いた路網選定プログラム</b> .....	108
第1項 数値地形図と路線選定ソフトウェアの開発 .....	109
第2項 作業道が開設された斜面 .....	111
第3項 地形情報と作業道の土工量 .....	113
第4項 土工量の精度対策 .....	116
第5項 土工量計算ソフトウェアの概要 .....	120

第4節 森林作業道からの土砂流出対策.....	126
第1項 はじめに.....	126
第2項 土砂を流出させない道づくりの考え方 .....	126
第3項 土砂流出の原因と対策 .....	126
第4項 おわりに.....	135

# 第1章 事業の概要

## 第1節 課題名

「新たな森林施業に対応した水土保全技術手法に関する調査研究」

## 第2節 調査目的

わが国の森林・林業を早急に再生するため、平成32年を目途に路網の整備や森林施業の集約化、それに必要な人材育成等により木材の効率的かつ安定供給を図る、森林・林業の再生に向けた取組が推進されている。

それにともなって今後拡大すると想定される森林伐採や間伐等の森林施業が山地の水土保全機能に及ぼす影響を解明するとともに、水土保全機能上望ましい森林施業の進め方を検討する必要がある。

今後、森林・林業の再生に向けた取組を円滑・着実に推進するため、伐採方法、間伐の種類、新たな規格による林道・作業路等の構造、路網密度、機械化等による森林施業が林地の水土保全機能に及ぼす影響を林種・林型、地形・地質、気候・気象条件等の自然条件や森林施業地の社会的条件等と関連づけて適切に評価する必要がある。

そのため、新たな森林施業技術が水源かん養機能や土砂流出防止機能等に及ぼす影響について資料解析や現地実態調査等にもとづいて検討するとともに、得られた成果をもとに新たな森林施業に対応した水土保全技術手法を今後の森林・林業の再生に向けた取組の推進に向けてとりまとめることとする。

## 第3節 調査項目

- 1) 森林施業と水土保全機能に関わる既往文献調査
- 2) 森林施業の実態調査
  - ① 伐採及び間伐方法
  - ② 路網計画及び作設方法
  - ③ 機械化作業システム
  - ④ その他関連項目
- 3) 水土流出の実態調査
  - ① 水流出実態
  - ② 土砂流出実態
  - ③ その他関連機能
- 4) 調査結果の整理・解析
- 5) 新たな森林施業に対応した水土保全技術手法のとりまとめ

## 第4節 調査計画

- 1) 調査期間：平成23年度～25年度の3か年間
- 2) 工程計画

表 1 工程計画

項目	H23年度	H24年度	H25年度
検討委員会の開催			
作業部会の開催			
調査方針の検討			
調査データの収集・解析			
現地検討会			
現地実態調査			
調査結果のとりまとめ			

## 3) 調査計画の概要

- ① 検討委員会及び作業部会をそれぞれ開催し、とりまとめ方法等について検討する。
- ② 既往文献等の調査データを整理・分析する。
- ③ 現地実態調査を実施する。
- ④ 当年度の調査結果及び全期間の調査結果を取りまとめる。

## 第5節 調査体制

本部会においては、学識経験者及び専門技術者等により構成された検討委員会方式で調査研究を行う。なお、検討委員等は、以下のとおりとする（所属等は平成25年当時）。

また、調査研究は、森林保全・管理技術研究所が委託した「森林施業と水土保全機能に関する資料収集・分析」の受注者である（株）森林土木施設研究所及び（株）森林テクニクスが（独）森林総合研究所の関連研究分野と連携・分担して実施する。

## ① 検討委員会（五十音順）

委員	落合博貴	(独) 森林総合研究所企画部長
委員長	北原 曜	信州大学農学部教授
委員	桐部和義	(株) 森林土木施設研究所
委員	佐保昇児	(株) 森林テクニクス
委員	品川正義	(株) 森林テクニクス
委員（主査）	竹内美次	元(独)森林総合研究所研究領域長
委員	田中良明	(独) 森林総合研究所森林路網研究室長
委員	靄林光久	技術士
委員	根橋達三	森林部門技術士会会长
委員（副主査）	渡邊悦夫	(株) 森林テクニクス

## ② 作業部会（五十音順）

委員	桐部和義	(株) 森林土木施設研究所
委員	佐保昇児	(株) 森林テクニクス
委員	品川正義	(株) 森林テクニクス
委員（主査）	竹内美次	元(独)森林総合研究所研究領域長
委員	靄林光久	技術士
委員	根橋達三	森林部門技術士会会长
委員（副主査）	渡邊悦夫	(株) 森林テクニクス

## 第2章 調査方法及び調査結果

### 第1節 既往文献調査

#### 第1項 関連掲載誌の検索

森林施業と水土保全機能に関連する学会誌、機関誌、行政資料等に掲載されている論文等をリストアップするため、国立情報学研究所（NII）の論文情報ナビゲータ CiNii（サイニイ）等による検索調査を実施した。検索の際のキーワードとして「林道 保全」等の32パターンを適用した結果、平成25年1月の時点でのリストアップされた検索総数は484件であった。今年度（平成26年6月時点）、新たに検索した結果、19件の論文等をリストアップした。（表2参照）

表2 既往文献の収集結果

キーワード	文献数
林道 保全	3件
林道 侵食	1件
林道 災害	1件
作業道 保全	1件
作業道 崩壊	1件
路網 地形	3件
路網 地質	1件
林業専用道	3件
森林作業道	4件
計	19件

#### 第2項 該当論文等の選定

検索された19件の論文等の中から本業務目的に合致した7件の論文を収集した。収集した論文の一覧は次のとおりである。

- ① 神奈川県自然環境保全センター県有林整備課（2013）：路線と路網の優良事例 林道「鷹ノ巣山線」における路網活用状況について、林道、第50巻 第1号、pp.17-19
- ② 斎藤仁志（2012）：LiDARデータを用いた林道設計手法と作業道配置手法の開発、宇都宮大学農学部演習林報告、第48号、pp.71-110
- ③ 長水崇（2013）：林業専用道における路面水の処理について、林道、第50巻 第3号、pp.52-56
- ④ 栗原紀美子（2013）：林業専用道等の路面洗掘防止について、林道、第50巻 第5号、pp.4-7
- ⑤ 高橋拓史・櫻井倫・酒井秀夫（2014）：工法の異なる森林作業道における路面支持力の特徴（特集 路網整備の技術的課題(1)）、森林利用学会誌、第29巻 第1号、pp.31-36
- ⑥ 宗岡寛子（2014）：森林作業道における波状縦断勾配の排水効果とその特徴について、林道、第50巻 第11・12号、pp.223-226
- ⑦ 福島県会津農林事務所森林林業部（2014）：路線と路網の優良事例 森林作業道「芋小屋線」の開設にあたって、林道、第50巻 第11・12号、pp.227-229

### 第3項 整理・まとめ

前述の収集した7件の論文と昨年度までに収集した論文のうち次に示す27件について抄録を作成した。

(平成23年度収集分)

- ① 江崎次夫（1984）：林道のり面の保全に関する研究 現実のり面における土砂流出の実態（盛土のり面）、愛媛大学農学部演習林報告、pp.32-37
- ② 江崎次夫（1984）：林道のり面の保全に関する研究 現実のり面における土砂流出の実態（切取りのり面）、愛媛大学農学部演習林報告、pp.37-40
- ③ 出来俊彦（1988）：急勾配林道における路面侵食の実態について、京都大学農学部演習林報告、pp. 198-207
- ④ 北原曜・真島征夫・清水晃（1986）：寒冷地の林道切取法面における木本類侵入の初期過程：工種によるカンバ類の侵入の違い、緑化工技術、第12巻 第2号、pp.19-24
- ⑤ 古谷士郎（1983）：林道の路面侵食について（IV）-1982年度の侵食量調査結果-、京都大学農学部演習林報告、pp. 230-241
- ⑥ 藤井禱雄（1982）：林道路面におけるリル侵食の形状変化（II）、京都大学農学部演習林報告、pp. 131-139
- ⑦ 伏見知道・藤久正文・尾上清利（1982）：花崗岩風化土地域の林道土工構造物表面の侵食について（III）モデル路面での雨水流出と侵食、愛媛大学農学部演習林報告、pp.13-19
- ⑧ 丸谷知己・中村剛・馬淵哲也・高橋陽一（1978）：北海道演習林における林道法面の侵食試験、九州大学年報、pp.17-18
- ⑨ 丸谷知己・中村剛・馬淵哲也・高橋陽一（1977）：火山灰地の林道における侵食試験、九州大学年報、pp.11-12
- ⑩ 有賀一広・古澤宏章・富澤舞（2008）：栃木県鹿沼市私有林における作業道法面崩壊と路面浸食の検討、日本森林学会関東森林研究、第59号、pp.273-276
- ⑪ 小山 敏（2011）：急増する林業用作業道から災害を出さないために：ルート計画と盛土の簡易検査、新砂防、第63巻 第6号、pp.66-70
- ⑫ 酒井秀夫（2005）：特集 災害に強い作業道を検証--徳島県橋本光治氏の大橋式作業道に見る、現代林業 2005年10月号、pp.16-32
- ⑬ 酒井秀夫（2011）：特集 林業専用道・森林作業道読み方シリーズ(1)これが林業専用道だ!、現代林業 2011年8月号、pp.12-29
- ⑭ 加藤和彦（1987）：福岡県の林道灾害発生状況からみた設計上の問題点、林道研究発表論文集、第22巻、pp.221-226
- ⑮ 成田健一（1988）：水に強い林道設計の一考察、治山林道研究発表論文集、第24巻、pp.30-33
- ⑯ 山本憲治（1991）：水に強い林道とは、治山林道研究発表論文集、第26巻、pp.104-105
- ⑰ 船坂有紀彦（1997）：林道灾害箇所の分析結果、治山林道研究発表論文集、第33巻、pp.112-117
- ⑱ 市原恒一・福田章史（1985）：林道路面上を流れる雨水量、林道研究発表論文集、第20巻、pp.167-176
- ⑲ 山本 真一（1995）：林道灾害についての一考察、林道研究発表論文集、第30巻、pp.73-78

(平成24年度収集分)

- ① 山場淳史・與儀兼三・佐野俊和【他】・川元満夫（2012）：広島県北部地域における森林作業道の路面支持力と地形指標の関係性、森林利用学会誌、第27巻 第3号、pp.159-164
- ② 九州森林管理局森林整備課（2012）：路線と路網の優良事例 林業専用道モデル路線「庵ノ山1447林道」、林道、第49巻 第4号、pp.87-90
- ③ 垣地英範（2012）：林業専用道作設に向けた留意事項、林道、第49巻 第4号、pp.78-82
- ④ 酒井秀夫（2012）：林業専用道の要点はここだ!より深い理解のために、現代林業、2012年3

月号、pp.12-27

- ⑤ 小倉晃（2012）：森林作業道の土砂流出抑制手法(スギの枝条散布)、現代林業、2012年3月号、pp.38-41
- ⑥ 佐々木重行・茅島信行・桑野泰光（2010）：作業路での土砂移動と枝条散布による抑制効果、福岡県森林林業技術センター研究報告、第11号、pp.33-38
- ⑦ 佐々木重行・檜崎康二・桑野泰光（2007）：枝条による作業路の土砂流亡防止効果、日本森林学会大会学術講演集、第118号
- ⑧ 白田寿生・古川邦明・小倉晃・梅田修史・鈴木秀典（2010）：枝条による路面侵食防止対策の効果、森林利用学会学術研究発表会講演要旨集、第17号

森林施業と水土保全機能に関する過去の文献は前述のとおりであるが、とりわけ林道、林業専用道、森林作業道等の道路と水土保全機能の関係を調査・研究した事例が多いのが特徴である。

文献を課題ごとの事象や対応策を整理すると表3のとおりである。

表3 林道等と水土保全機能に係る過去の知見

課題	事象と対応策
路面侵食	<ul style="list-style-type: none"><li>・雨水流出率は約30%で、雨水流出量は一降雨量、一時間最大降雨量あるいは降雨加速指数との間に高い相関関係が認められる。</li><li>・土砂流出量は、10分間最大降雨量と相関関係を示している。</li><li>・雨水流出量と土砂流出量は、高い相関関係が認められる。</li><li>・降雨流水により侵食が生じ、より凹凸の激しい横断面が形成される。</li><li>・例年水準程度の降雨量ではさして大きい変化をせず、少々の侵食及び上流からの土砂の堆積を繰り返す。</li><li>・路面の融解後に流路の集中と分散が鮮明となる。</li><li>・勾配が急になるほど、侵食溝の発生頻度は高くなる。</li><li>・侵食溝断面の大きさ及び形状は縦断勾配20%前後で最大となる。</li><li>・曲線半径が小さいほど路面侵食が大きくなる。</li><li>・路面上空が樹冠層により被われている箇所では侵食溝の発生が抑制され、その断面積・形状比（深さ／幅）とも小さくなる。</li></ul> <p>【対応策】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>➢ 開設時に急勾配、小半径の道は造らない。</li><li>➢ 路面勾配を急激に変えることは、林道路面の侵食現象の面からみて好ましくない。</li><li>➢ 横断勾配を外向きに付け、雨水が集中する前に谷側に誘導する「その場排水」が簡便な排水方法として有効である。</li><li>➢ 路面補強工法（小丸太敷設、碎石転圧等）が侵食溝の発達・拡大を抑制する。</li><li>➢ 排水は路面中央部を低くして水を流す。</li><li>➢ 横断排水施設は道路と直行しないようにする。</li></ul>
路側決壊	<ul style="list-style-type: none"><li>・林道谷側の被災は、路肩の崩壊が多く、多量の路面水の路肩からの流出、土側溝からの浸透水、山側からの浸透水等が主な被災原因とみられる。</li><li>・路面水の侵食による決壊は、経過年数の短い路線に多く発生し、被災幅が大きくなる傾向にある。</li><li>・林地傾斜角が35°以上になると多く発生する。</li><li>・曲線半径が30m以下になると決壊が多くなる傾向にある。</li></ul>
枝条散布	<ul style="list-style-type: none"><li>・作業路では林内と比較して細土、礫、有機物の移動量がそれぞれ7～20倍、5～35</li></ul>

	<p>倍、1~10倍と多い。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・傾斜が急な作業路では、細土・礫・有機物いずれの移動量も最も多い。</li> <li>・作業路内では轍部分での移動量が轍以外の部分より多い。</li> <li>・細土、礫、有機物の移動量は降水量と密接な関係が見られる。</li> <li>・枝条による路面の被覆量と土砂移動量との関係は負の相関の傾向である。</li> <li>・スギ枝条を作業路に散布すると、細土、礫、有機物の移動量はそれぞれ <math>1/2 \sim 1/8</math>、<math>1/3 \sim 1/20</math>、<math>1/6</math> 以下に減少する。</li> <li>・枝条設置前後では、設置後の降水量に対する細土の移動量は約 <math>1/5</math> に礫・有機物もそれぞれ約 <math>1/20</math> に低下する。</li> <li>・100%枝条散布箇所では、残置直後の土砂移動レート（降水量 1 mmあたり、1mの幅を通過する土砂量）を裸地の 1%程度に軽減させる。</li> <li>・被覆割合を増加させるとレートが減少する。</li> <li>・傾斜が緩やかな作業路や古い作業路でも、枝条設置によって細土・礫・有機物の移動量は低下している。</li> </ul> <p><b>【対応策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 作業路表面を枝条で覆うことで、雨滴衝撃や表面流による細土や礫などの土砂移動を抑制する効果がある。</li> <li>➢ 枝条散布が表面流の濁度低下に効果がある。</li> <li>➢ 枝条による路面被覆は路面侵食防止対策として有効である。</li> </ul>
盛土法面 侵食	<ul style="list-style-type: none"> <li>・のり面の侵食機構には作用因子として、雨滴衝撃力が強く関与している。</li> <li>・10 分間最大雨量が降雨による侵食に及ぼす支配的因子である。</li> <li>・土壤流出量は土壤の締め固め度合いの増大に伴って、増加傾向を示している。</li> <li>・土砂流出量には、土壤因子としての、土壤の締め固め度合いの変化に基づく土壤孔隙率及び土壤の粒径分布が大きな役割を果たしている。</li> </ul> <p><b>【対応策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 路肩を補強し、水が集中しないようにこまめに横断排水や分散排水を施す。</li> </ul>
切取法面 侵食	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流出土砂量は 10 分間最大降雨量との間に最も高い相関関係が認められる。</li> <li>・土砂流出量は、土壤硬度の増大に伴って減少傾向を示し、盛土のり面とは全く逆の傾向を示す。</li> <li>・土砂流出量は、土壤因子としての土壤硬度、すなわち土壤孔隙率及び基岩の風化度に影響される。</li> <li>・<math>45^\circ</math>、<math>60^\circ</math>、<math>90^\circ</math> の 3 種類の傾斜法面の土砂流出量と形態を観測した結果、<math>90^\circ</math> は切取後約 1 年間の土砂生産が激しいがその後はほとんど変化しない。また <math>45^\circ</math> は切取後 2 年目になっても土砂生産が増大しており、<math>90^\circ</math> よりも量的に多くなっている。</li> <li>・試験地設定 6 ヶ月後の堆積土量及び土石最大到達距離は <math>90^\circ</math> 法面で最も大きく、<math>60^\circ</math> 法面で最も小さい。また、侵食形態では、<math>90^\circ</math> 法面では風食と凍上崩落、<math>60^\circ</math> 法面及び <math>45^\circ</math> 法面では雨裂侵食と融解による流動が見られる。</li> </ul> <p><b>【対応策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 切取法面はできるだけ短くする。</li> </ul>

## 第2節 現地実態調査

### 第1項 調査目的及び調査地の概要等

#### (1) 調査目的

平成21年12月に策定された森林・林業再生プランを推進するため、高密度路網の整備や高性能機械の導入等が進められているが、健全な森林を維持・管理していくためには水土保全機能に及ぼす影響についても併せて検討していく必要がある。

なかでも森林作業道は間伐等の森林整備、木材の集材・搬出のため継続して使用される道ではあるが、土構造を基本としていることから、路網配置や作設にあたっては地形・地質、気象条件等に留意する必要がある。

そこで、茨城森林管理署管内にある間伐施業現場の小流域において、森林作業道が森林域に与える影響を調査し、他の林業地における実態調査の結果を加え、水土保全に配慮した森林作業道の路網配置や作設、維持管理方法等について検討し、森林・林業の再生に向けた取組の推進に資する。

なお、これらの調査・観測にあたり、独立行政法人森林総合研究所の関連研究分野と連携・分担して実施する。

#### (2) 調査地の概要

##### 1) 調査地の位置

調査地は、図1の調査位置図に示すように、茨城県常陸太田市にある茨城森林管理署管内の間伐施業地に設定した。

##### 2) 調査地の地質

間伐施業地周辺の地質は、亜角礫を主とする礫岩【新第三紀】、阿武隈新期型花崗岩（片状黒雲母花崗岩）【中生代～古第三紀】、安山岩質集塊岩及び凝灰質砂岩を含む【新第三紀】からなる。

##### 3) 調査地の施業

間伐施業地全体の面積は図2の森林作業道の配置及び計測流域に示すように30.17haで、蓄積14,876m<sup>3</sup>、収穫量4,247m<sup>3</sup>、生産量3,150m<sup>3</sup>である。間伐は、平成23年度に林齢45年生のスギを2伐5残で列状間伐した。その施業のために作設された森林作業道は、新たな森林作業道作設指針に則り、路網密度（予定）が175m/haで、フォワーダ等車輌系機械が安全に走行でき、かつ作業システムの効率性を考慮するとともに、地形・地質の安定した箇所を通過するよう設定されている。また、地形に沿った屈曲線形になるように、さらに排水にも配慮して波形勾配になるよう配置された。

なお、本調査で独自に実施した簡易GPS測量によれば、森林作業道実施線の路網密度は132m/haで、図内に赤線で示してある。

調査・観測を実施する小流域は、間伐施業地の上部斜面に位置し、そのほぼ中央部を流れる小溪流に向かって両側から緩やかな勾配の森林作業道が通っている。森林作業道の路面の一部には、侵食防止を図るため間伐木の枝条が撒布され、さらに一定間隔で浅い素掘りの横断排水溝が設置されている。なお、間伐作業は平成23年度に実施されて以後、平成24年度には行われておらず、今後しばらくは間伐等の施業を実施する予定はない。

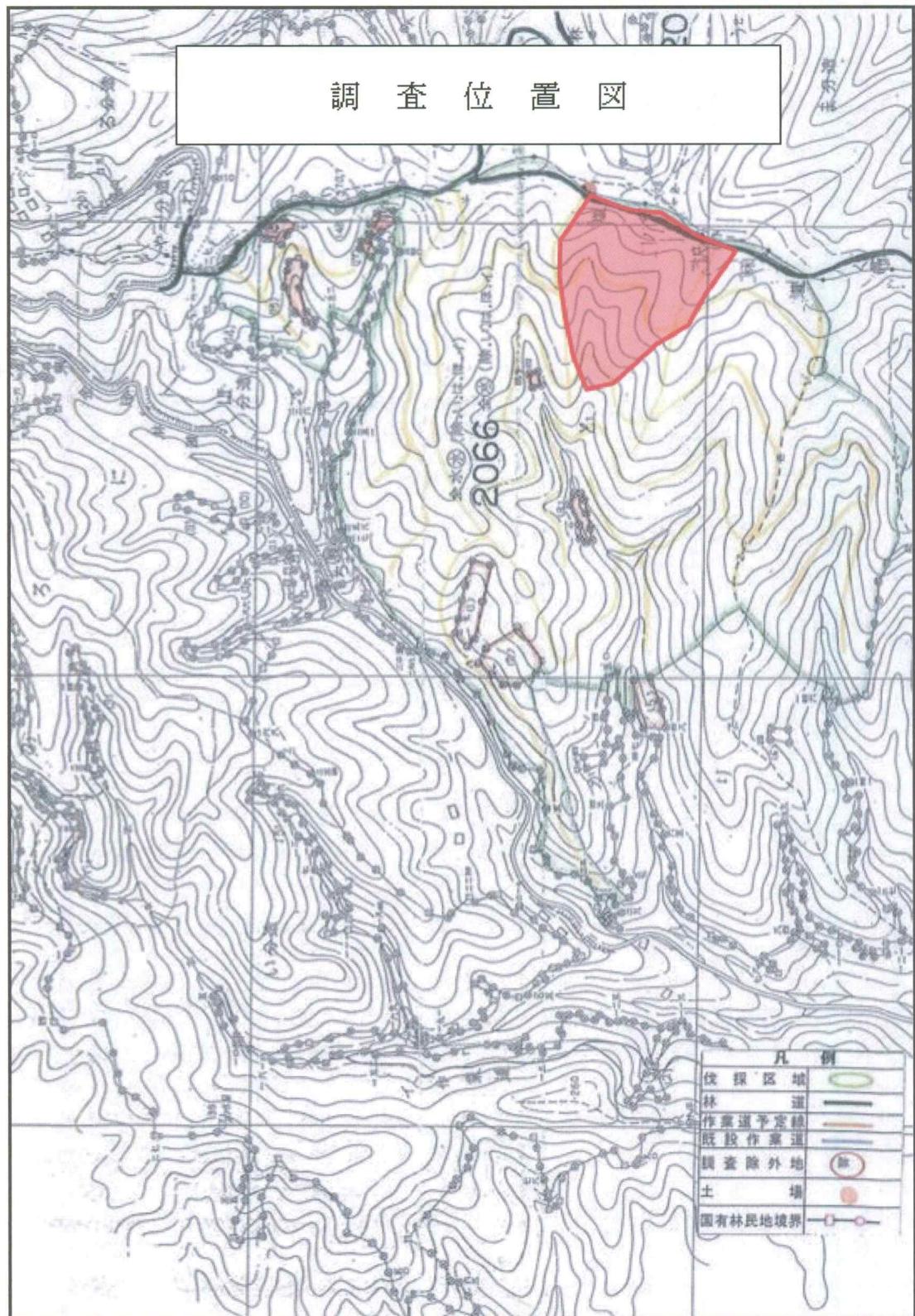


図 1 調査地位置図

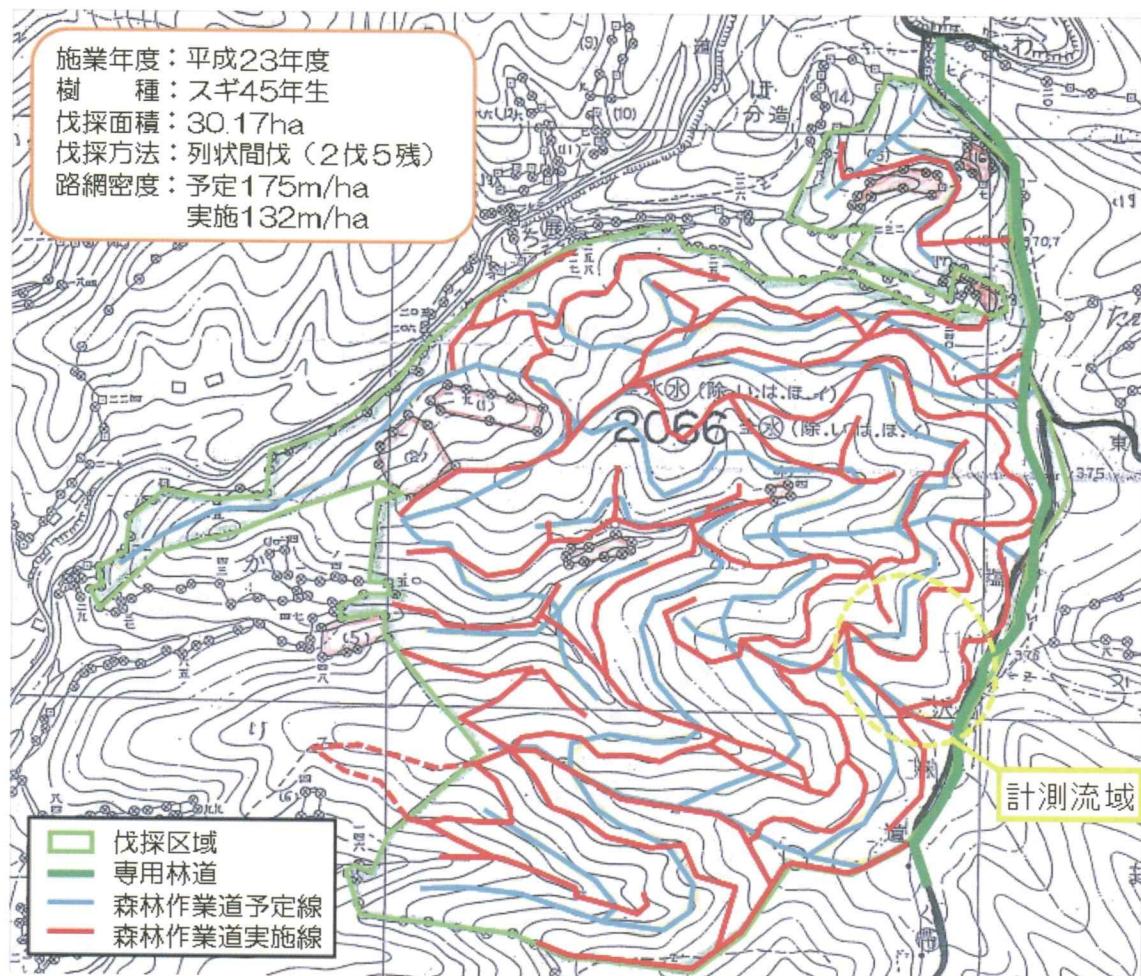


図 2 森林作業道の配置及び調査流域（森林総研）

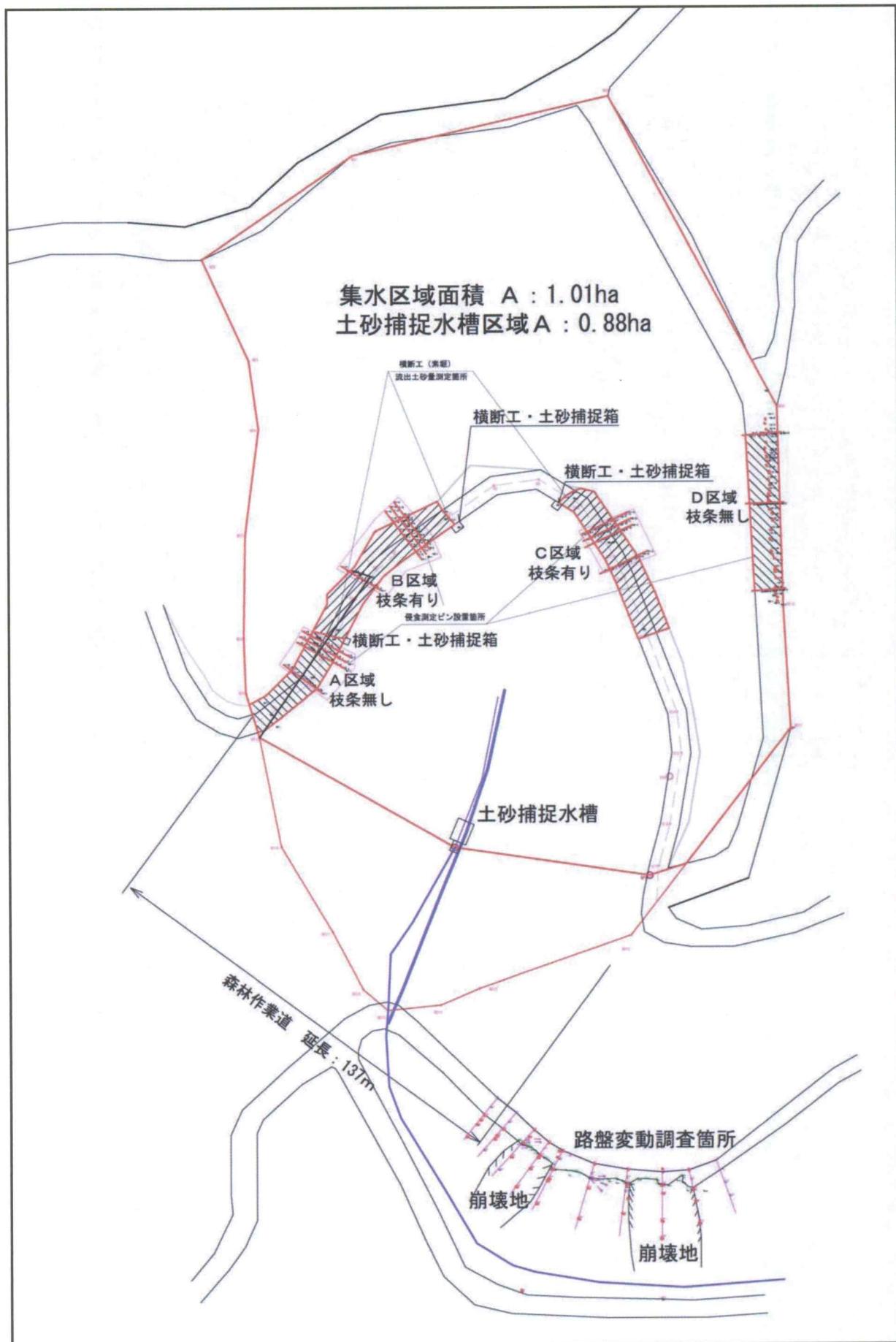


図 3 調査箇所位置図

#### 4) 調査地の植生

調査地は概ねスギ及びヒノキの人工林で占められており、尾根部にヒノキ、山腹斜面及び渓流部にスギが植栽されている。これら針葉樹の下層には多様な広葉樹が成立している。

こういった植生の状況を把握するため、林地内に3箇所（斜面上部、中部、下部）、路面に3箇所（A区間、B区間、C区間）のコドラートを設け、被度群度による調査を行った。

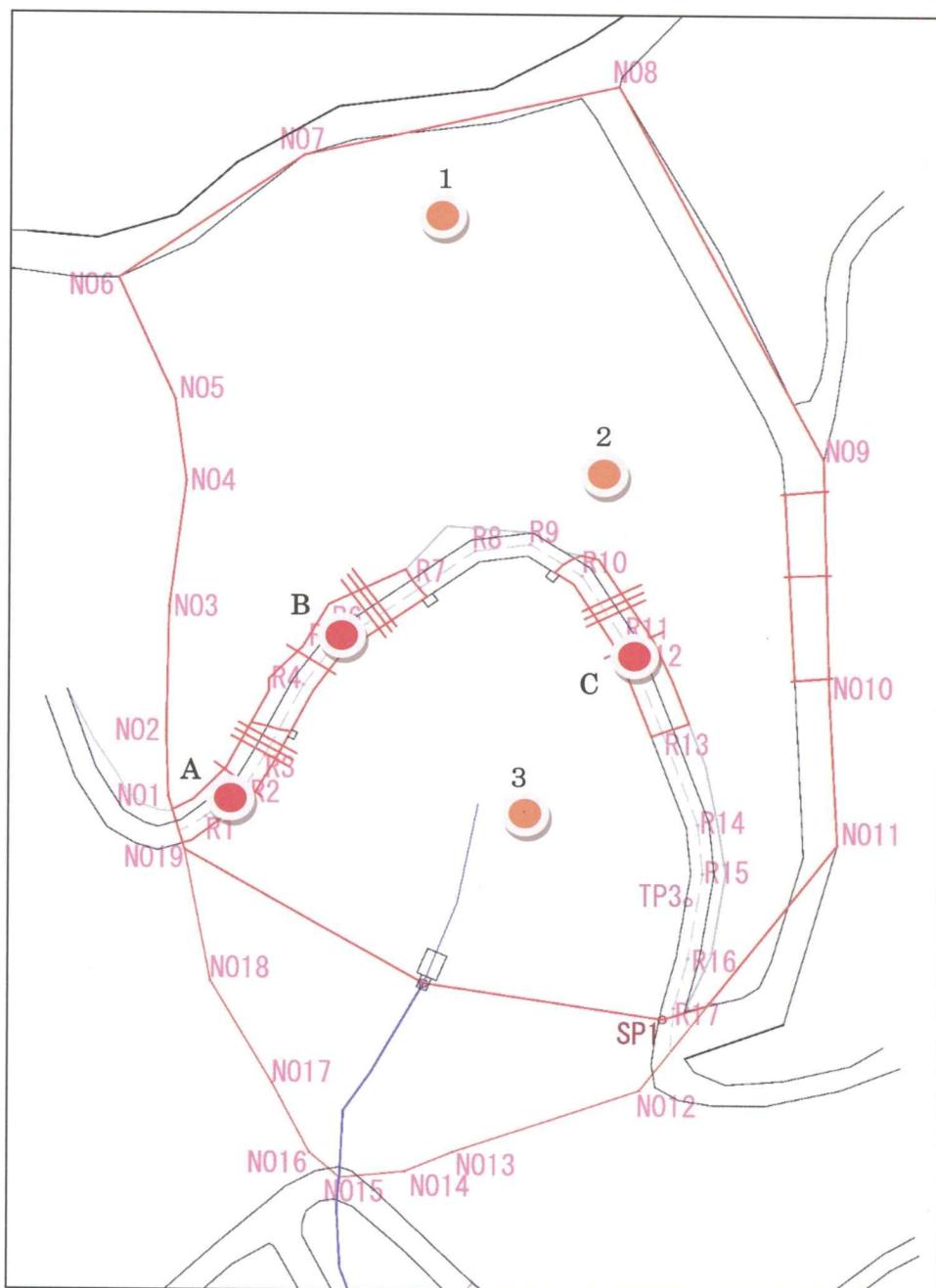


図 4 植生調査箇所位置図

表 4 調査地No 1 植生帳表

調査地No.	1	調査範囲の規模		10 X 10 m				調査年月日	26年 4月15日		調査担当者	金子祐次郎										
環境条件	位置	斜面上部			標高	m	方位		平均傾斜		30 度											
	地形	(回)凸・平	土壤状況	B <sub>D</sub> (d)		水分状況		乾(中)潤	日照状況	(良)中・不良												
周辺植生	ヒノキ植林																					
調査地の植生状況	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度							
	I	ヒノキ	17.0	4	4		キブシ	1.5	+		IV	アズマネザサ	0.5	+								
		スギ	20.0	1	1							サカゲイノデ	0.3	+								
												ヒカゲスグ	0.2	+								
	III	ヒサカキ	2.0	2	2							スイカズラ	0.2	+								
		コアジサイ	1.0	1	2							ヒメカンスグ	0.3	+								
		モミジイチゴ	1.0	1	2	IV	ティカカズラ	0.1	2	2		マタタビ	0.5	+								
		タマアジサイ	1.0	1	2		ヤブコウジ	0.2	2	2		ヒノキ	0.5	+								
		スギ	2.0	+			クサイチゴ	0.2	1	2		スギ	0.5	+								
		ヒノキ	1.0	+			ヒサカキ	0.3	1	2		モミジイチゴ	0.5	1	2							
		ムラサキシキブ	1.0	2	2		アオヤギソウ	0.2	+			ヤマアジサイ	0.8	1	2							
		ニワトコ	1.5	+			ヘビノネゴザ	0.3	+			ツクバネウツギ	0.5	+								
		アオキ	1.5	+			ミヤマカンスグ	0.3	+			ヤブソテツ	0.2	+								
	階層別組成	階層	高さの範囲		階層別被度%		優占種名		出現種数		備考・特記事項等											
	I	高木層	10 m~ m		75		ヒノキ		2													
	II	亜高木層	5 m~ 8 m		0		-		-													
	III	低木層	1 m~ 5 m		40		ヒサカキ		10													
	IV	草本層	1 m~ m		50		ティカカズラ		19													
		合計							31													
所感	○ ヒノキ材の下部をヒサカキが覆う。																					
	○ 地表部はティカカズラ、ヤブコウジの生育が多い。																					
	○ 作業道の跡地にヒサカキ、ヤマアジサイが侵入し勢力を拡大しつつある。																					
	○ ヒノキ林ではあるが、林内に作業道建設時、土壤が攪乱された裸地が生じたこと、間伐により上層が開け光環境が良好になったことから、周辺からの植物の侵入が高まつたものと考えられる。																					

表 5 調査地No 2 植生帳表

調査地No.	2	調査範囲の規模		10 X 10 m			調査年月日		26年 4月15日		調査担当者	金子祐次郎								
環境条件	位置	斜面中部			標高	m	方位		平均傾斜		25 度									
	地形	(回)凸・平	土壤状況	B <sub>D</sub>	水分状況		乾・中・潤	日照状況	良・中・不良											
周辺植生	スギ植林																			
調査地の植生状況	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度					
	I	スギ	20	4	4		ヒサカキ	0.5	+		IV	クサイチゴ	0.3	3	3					
							ヤマザクラ	0.5	+			ティカカズラ	0.2	2	2					
	III	タマアジサイ	1.0	2	3		カラスザンショウ	1.0	+			ヤブソテツ	0.3	+						
		モミジイチゴ	1.0	2	3							イノモトソウ	0.3	1	2					
		ムラサキシキブ	1.0	2	2							オシダ	0.5	+						
		ハナイカダ	1.0	+		IV	ミツバアケビ		+			イノデ	0.5	+						
		ミズキ	1.0	+			ベニシダ		+			アオキ	0.5	+						
		ニワトコ	2.0	+								リョウメンシダ	0.3	+						
		オトコヨウゾメ	1.0	+								ハナイカダ	0.5	+						
		ツクバネウツギ	1.0	+								タケニグサ	0.5	+						
		アオキ	1.0	+								ミヤマカンスゲ	0.3	1	2					
		ウリノキ	1.0	+								ヤブコウジ	0.1	+						
	階層別組成	階層	高さの範囲		階層別被度%		優占種名		出現種数		備考・特記事項等									
	I	高木層	10 m~ m		70		スギ		1											
	II	亜高木層	5 m~ 10 m		-		-		-											
	III	低木層	1 m~ 5 m		40		タマアジサイ		13											
	IV	草本層	1 m~ m		60		クサイチゴ		14											
		合計							28											
所感	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 中腹部の凹状地であり、水分環境が比較的よい。このため好湿性の植物(ハナイカダ、オシダ、アオキなど)が比較的多く出現する。</li> <li>○ 上木のスギは間伐により30~40%程度の空間が生じている。林床の光条件は良好であり、植生の被覆も多いことから侵食の懸念は少ない。</li> </ul>																			

表 6 調査地No.3 植生帳表

調査地No.	3	調査範囲の規模		10 X 10 m				調査年月日		26年 4月15日		調査担当者	金子祐次郎														
環境条件	位置	斜面下部				標高	m	方位				平均傾斜		30 度													
	地形	凹・凸・ <input checked="" type="radio"/> 平	土壤状況		B <sub>b</sub>	水分状況		乾・中・润	日照状況		良・ <input checked="" type="radio"/> 中・不良																
周辺植生	スギ植林																										
調査地の植生状況	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度												
	I	スギ	20	4	4							キブシ	0.8	1	2												
												マタタビ	0.5	+													
	III	タマアジサイ	1.0	2	3							アオキ	0.5	+													
		ムラサキシキブ	1.0	2	3							ハナイカダ	0.5	+													
		アオキ	1.0	1	1							リョウメンシダ	0.3	+													
		クマイチゴ	1.0	+								モミジイチゴ	0.3	+													
		ニワトコ	1.0	+		IV	クサイチゴ	0.5	3	3		サンショウ	0.5	+													
		タラノキ	1.0	+			ニガイチゴ	0.8	+			オシダ	0.3	+													
		モミジイチゴ	1.0	1	2		クマイチゴ	0.8	+			ジュウモンジシダ	0.3	+													
		ハナイカダ	1.0	+			ミヤマカンスゲ	0.3	1	2																	
							ウリノキ	0.5	1	1																	
							ヒカゲスゲ	0.3	+																		
	階層		高さの範囲		階層別被度%		優占種名		出現種数		備考・特記事項等																
	I	高木層	10 m ~ m		70		スギ		1																		
	II	亜高木層	5 m ~ 10 m		-		-		-																		
	III	低木層	1 m ~ 5 m		40		ヤマアジサイ		8																		
	IV	草本層	1 m ~ m		60		ツルイチゴ		15																		
	合計								24																		
所感	○ 湧水地付近の斜面下部。																										
	○ 上層をスギが覆い、下層(低～草本層)をタマアジサイ、クサイチゴ、アオキが覆う。																										
	○ 間伐により上層に空間が出来たことから、光環境がよく 下層植生は多い。現状では草本層が主体ではあるが、木本類多く、斜面の安定上良好な状況を呈している。																										
	○ 水分条件がよいことから好湿性の種類が多い。																										
	(アオキ、ハナイカダ、ウリノキ、リョウメンシダ、オシダ、ジュウモンジシダなど)																										

表 7 調査地NoA 植生帳表

調査地No.	A	調査範囲の規模	1 X 1 m				調査年月日	26年 4月15日		調査担当者	金子祐次郎						
環境条件	位置	路上			標高	m	方位	平均傾斜			30 度						
	地形	凹・凸	平坦	土壤状況	lm	水分状況	(乾) 中・潤	日照状況	(良) 中・不良								
周辺植生	ヒノキ・スギ植林																
調査地の植生状況	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層						
	IV	スギ	0.1	2	2												
		ヒノキ	0.1	2	2												
		キブシ	0.1	+													
		ニガナ	0.1	+													
		ニガイチゴ	0.3	+													
		ハハコグサ	0.1	+													
		スゲSP	0.1	+													
		ヒメカンスゲ	0.1	+													
		セイヨウタンポポ	0.1	+													
階層別組成	階層	階層		高さの範囲		階層別被度%	優占種名		出現種数	備考・特記事項等							
	I	高木層	m~ m		-												
	II	亜高木層	m~ m		-												
	III	低木層	m~ m		-												
	IV	草本層	1 m~ m		40	スギ											
		合計															
所感	○ スギ、ヒノキの稚樹が多いが 現状では降雨による侵食から表土の流亡を」防止できるまでには成長していない。																
	○ 裸地部分が60%程度ある。ただしこれら部分には、周辺及び上層より落下した枝葉の堆積もみられ、これらを加味した																
	地表の被覆状況は概ね裸地30%程度になる。																

表 8 調査地NoB 植生帳表

調査地No.	B	調査範囲の規模	1 X 1 m				調査年月日	26年 4月15日		調査担当者	金子祐次郎							
環境条件	位置	路上			標高	m	方位		平均傾斜	度								
	地形	凹・凸	土壤状況	lm	水分状況	(乾)中・潤	日照状況	(良)中・不良										
周辺植生	スギ・ヒノキ植林																	
調査地の植生状況	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層							
	IV	スギ	0.1	2	2													
		ヒノキ	0.1	+														
		ヨモギ	0.1	+														
		タチツボスミレ	0.1	+														
		ニガナ	0.1	+														
		ハルノノゲシ	0.1	+														
		ススキ	0.2	+														
		ミツバツチグリ	0.1	+														
		スゲSP	0.1	+														
階層別組成	階層	高さの範囲		階層別被度%		優占種名		出現種数	備考・特記事項等									
	I	高木層	m~ m		-													
	II	亜高木層	m~ m		-													
	III	低木層	m~ m		-													
	IV	草本層	1 m~ m		10	スギ												
所感	○ 周辺より侵入成立したスギが主体の植被を形成する。現状では植被としては少ないが、地表面には落葉がみられ、70~80%の被覆を形成している。このため、地表流に対しては若干の侵食防止効果が期待できる。																	
	○ ススキ、ムラサキシキブ、キブシ、ニガナなどの成立がみられ、今後さらにその量が増加すると思われる。																	

表 9 調査地NoC 植生帳表

調査地No.	C	調査範囲の規模	1 X 1 m			調査年月日	26年 4月15日		調査担当者	金子祐次郎						
環境条件	位置	路上		標高	m	方位		平均傾斜	度							
	地形	凹・凸(平)	土壤状況	Im	水分状況	(乾)中・潤	日照状況	良・中・不良								
周辺植生	スギ・ヒノキ植林															
調査地の植生状況	階層	植物名	高さ	被度%	群度	階層	植物名	高さ	被度%	群度						
	IV	スギ	0.2	3	2											
		ヒノキ	0.1	+												
		ニシキウツギ	0.8	+												
		ヒメカンスゲ	0.1	+												
		キブシ	0.5	+												
		ニガナ	0.1	+												
階層別組成	階層	高さの範囲	階層別被度%	優占種名		出現種数	備考・特記事項等									
	I 高木層	m~ m	-													
	II 亜高木層	m~ m	-													
	III 低木層	m~ m	-													
	IV 草本層	1 m~ m	40	スギ												
	合計															
所感	○ スギ稚樹の成立が多く 地表面の被覆状況は被覆度40%程度である。															
	○ 周辺からニシキウツギ、キブシなどの低木類の侵入も進んでおり、放置した場合には今後植生の定着が増すことが予想される。															

これらの調査結果から、林内は概ね植栽された針葉樹により、75%程度の被覆率で成立しており、その下層には、低木層が40%程度の被覆率で成立している。また、草本層となる林床植生も50~60%となっており、表面侵食が発生している状況も確認されないことから、水土保全林としてその機能を十分發揮しているといえる。

成立種では、低木層にヒサカキ、コアジサイ、アオキ、ムラサキシキブ等の当地区周辺にも一般的に見られる広葉樹が成立している。また草本層を含めて、クサイチゴやモミジイチゴ、ヘビイチゴ等のバラ科の植生が多く見られた。これらの植生は比較的先駆的な種であることから、前回の間伐による光環境の改善が影響していると考えられる。

一方、路面部では、植生の成立は比較的まばらで、10~40%の被覆率となった。成立種は周辺に多く成立しているスギやヒノキの稚樹が多い傾向が見られる。その他、先駆的なタンポポ、イチゴ類、スゲ類などが点在する状況であった。

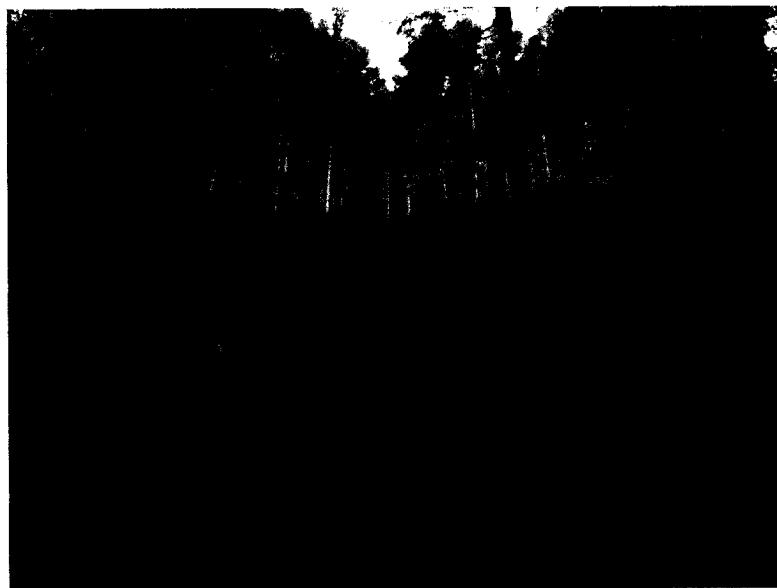


写真 1 周辺林内の状況



写真 2 路面の植生状況

### (3) 調査項目

森林作業道が林地に与える影響を把握するため調査地を設定し、平成 24 年度から平成 25 年度の 2 カ年にわたり経年変化に着目して現地調査を実施した。調査項目は、水土保全に及ぼす影響を考慮して土壤侵食及び斜面崩壊を取り上げ、以下の項目とした。

#### 1) 土壤侵食調査

##### ①路面及びのり面の侵食量調査

路面及びのり面の土砂移動量を把握し、土砂収支及び形状変化等を把握する。

##### ②路面被覆度調査

路面の被覆状態を把握するため、枝条及び植生等による被覆率を把握する。

##### ③流出土砂量調査

土砂の供給源となりやすい切土のり面の流出土砂量を把握する。また、切土のり面や路面から流入する横断排水溝の堆積土砂量や横断排水溝からの流出土砂量及び小溪流への流出土砂量を把握する。

#### 2) 斜面崩壊調査

##### ①路盤変動調査

森林作業道の路盤において斜面崩壊が発生した箇所を対象に、路盤変動の崩壊面積や変位量等の経年変化を把握する。

##### ②既存斜面崩壊地踏査

調査地周辺の森林作業道の踏査を行い、既存の斜面崩壊地を把握するとともに、斜面崩壊の発生原因や対策等を検討する。

## 第 2 項 土壤侵食調査

### (1) 路面及びのり面侵食量調査

#### 1) 土量算出方法

侵食量調査は、森林作業道の路面及びのり面に対して行うもので、点的な深さのデータを基に土量を算出する方法で行った。具体的な調査方法は、侵食の深さの変化を測定するため、直径 12 mm、長さ 60 cm の塩ビ製のピンを、測定対象となる森林作業道の路面及び切土・盛土のり面に打ち込み、その頂部から地表面までの距離の変化を調査した。

なお、侵食深の測定にあたっては、2012 年 6 月 8 日の測定値を初期値とし、それぞれ初期データとの差を求めた。



写真 3 測定ピンの設置状況

また、路面幅は、森林作業道作設時に設定した路肩から約3mまでとし、その地点からのり肩までを切土のり面とした。侵食深の変化は、路面、切土のり面毎に各測定点の値から4測線の侵食深の増減の平均値を求め、その平均深に路体面積あるいは切土のり面の平面積を乗じて侵食量あるいは堆積量とした。

ただし、盛土のり面の侵食土砂量は、横断排水溝で測定できることや侵食深の正確な測定が困難なことから、森林作業道の土砂収支の算出には含めていない。そのため、のり面とだけ表示された箇所は切土のり面を指している。

## 2) 調査区の設定

調査地について、地形、枝条敷設の有無などから、侵食量測定を行う測定区を3カ所（A区からC区）設定した。図6の侵食量調査区位置図及び図7の作業道縦断面図に示すように、路体については、間伐木枝条を散布していないA区、間伐木枝条を散布したB区及びC区である。A区は路面幅が2.99m、延長は15.22m、平面積は45.57 m<sup>2</sup>、勾配は13%である。同様にB区は路面幅が2.99m、延長は26.92m、平面積は80.36 m<sup>2</sup>、勾配は14%である。またC区は路面幅が2.99m、延長は26.27m、平面積は78.55 m<sup>2</sup>、勾配は11%である。また、切土のり面の平面積は、A区が25.34 m<sup>2</sup>、B区が65.20 m<sup>2</sup>、C区が47.67 m<sup>2</sup>である。勾配はどの調査区も概ね8分で切られ、枝条被覆はされていない。

## 3) 測定ピンの設置

侵食量測定ピンは、当初の2012年6月8日から2013年7月31日までは、それぞれの調査区下部の、横断排水溝に近接した上方に1m間隔で3測線設定したが、2013年7月31日に調査区の中間点付近に1測線増設した。

それぞれの測線における侵食測定ピンの配列は、路面及びのり面に対し直角方向に設定し、地形変化点等を考慮してピン間隔を決定した。

## 調査流域図

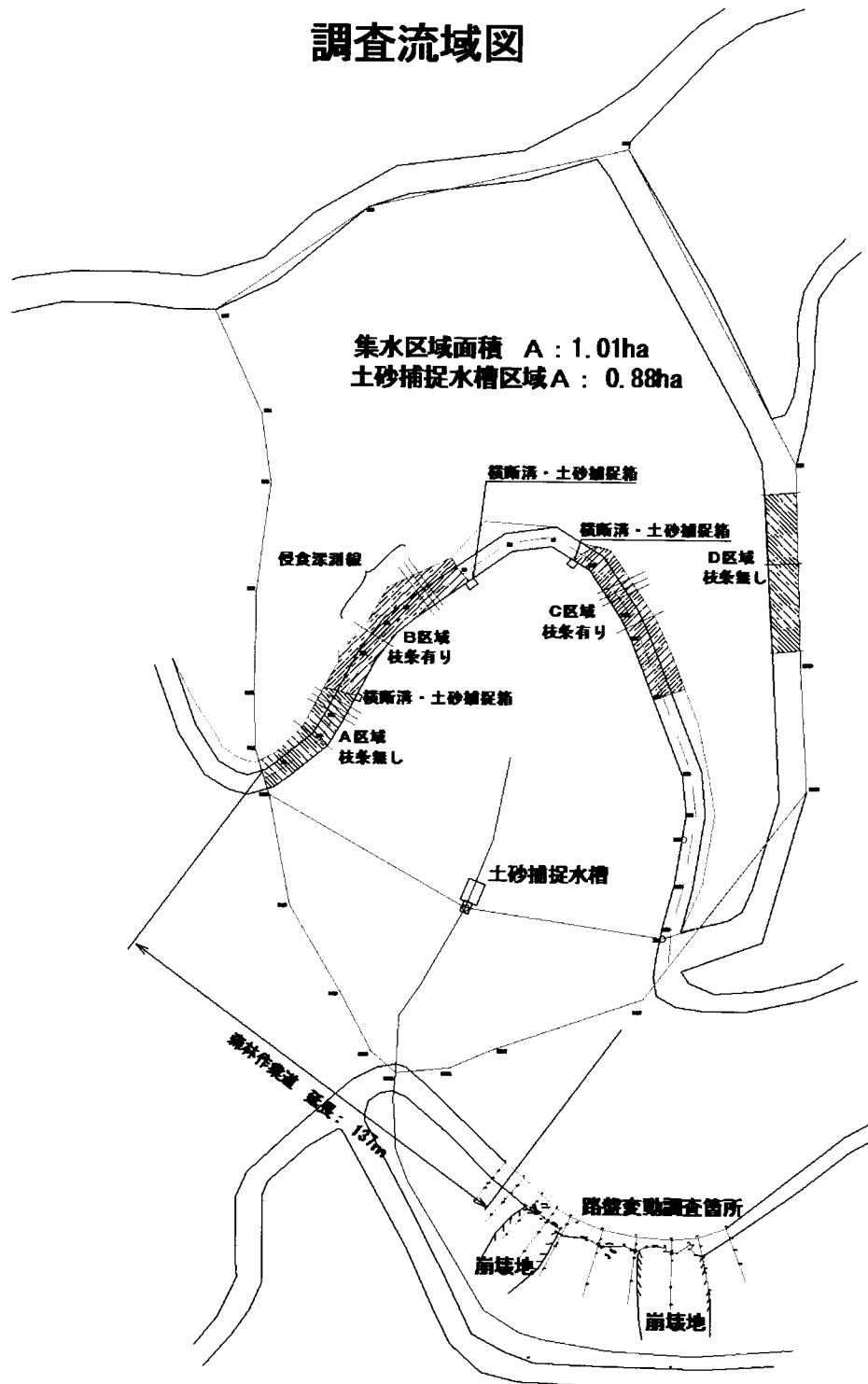


図 5 調査流域図

## 侵食量調査区位置図

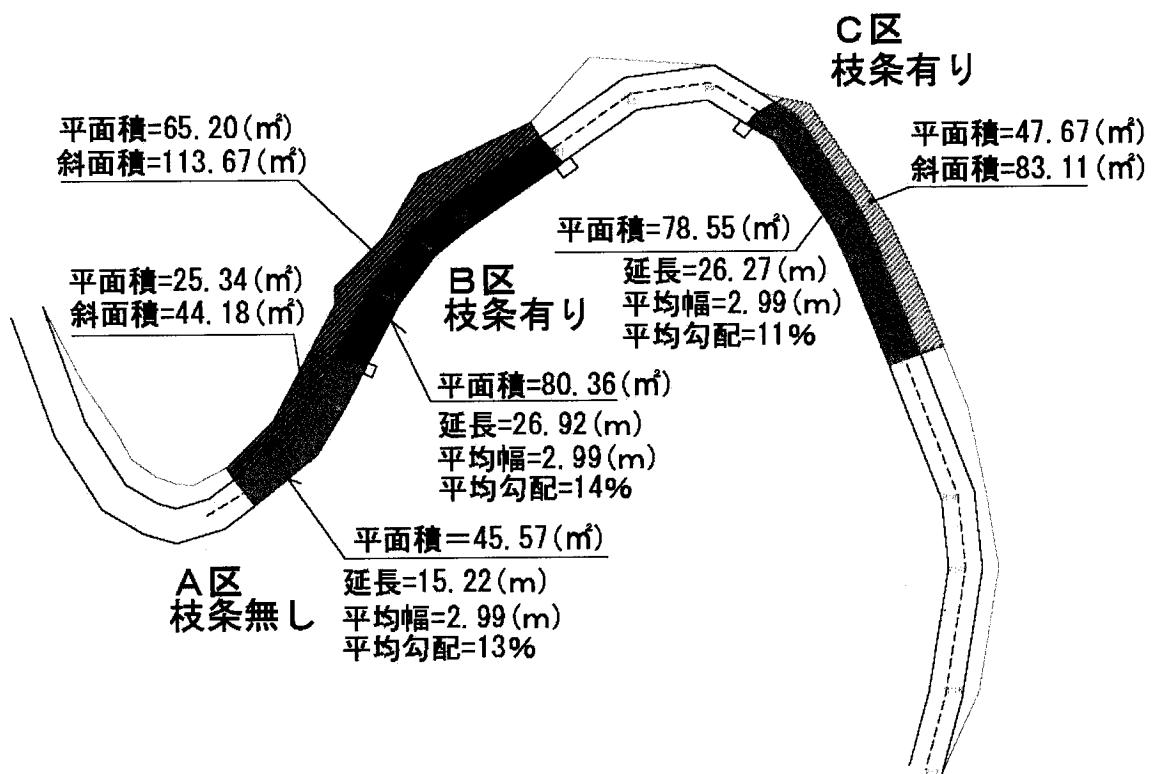


図 6 侵食量調査区位置図

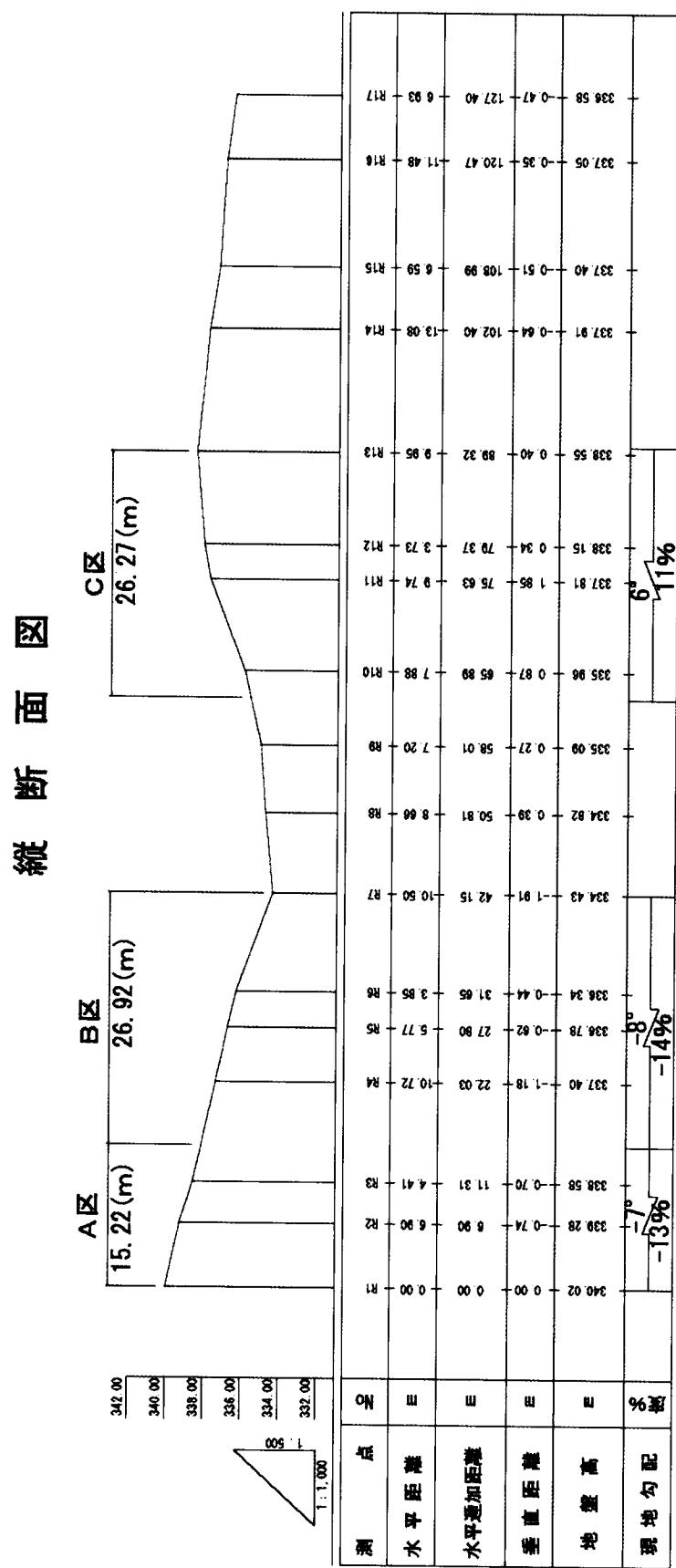


図 7 侵食量調査区\_縦断面図

4) 調査結果の概要

① 平成 24 年度調査

表 10 侵食深及び堆積深集計表

2012/8/1

	路体部		のり尻部	
	侵食	堆積	侵食	堆積
A1	0.015	0.005	0.015	0.004
A2	0.012	0.006	0.001	0.003
A3	0.002	0.010	0.008	0.000
平均面積	0.010	0.007	0.008	0.002
平均延長(m)	3.207		0.913	
平均深(mm)	3.01	2.18	8.83	2.26
B1	0.002	0.025	0.115	0.008
B2	0.005	0.007	0.043	0.007
B3	0.000	0.088	0.011	0.002
平均面積	0.002	0.040	0.056	0.006
平均延長(m)	2.937		1.377	
平均深(mm)	0.76	13.62	40.73	4.12
C1	0.002	0.006	0.008	0.004
C2	0.012	0.000	0.002	0.001
C3	0.011	0.003	0.006	0.005
平均面積	0.008	0.003	0.006	0.003
平均延長(m)	2.690		1.563	
平均深(mm)	3.09	1.12	3.62	2.07

2012/10/18

	路体部		のり尻部	
	侵食	堆積	侵食	堆積
A1	0.008	0.010	0.017	0.003
A2	0.005	0.024	0.003	0.002
A3	0.000	0.012	0.007	0.000
平均面積	0.004	0.015	0.009	0.002
平均延長(m)	3.207		0.913	
平均深(mm)	1.35	4.78	9.93	1.79
B1	0.027	0.019	0.018	0.012
B2	0.001	0.020	0.024	0.011
B3	0.001	0.035	0.052	0.005
平均面積	0.010	0.025	0.031	0.010
平均延長(m)	2.937		1.377	
平均深(mm)	3.29	8.41	22.69	6.90
C1	0.003	0.004	0.001	0.005
C2	0.011	0.000	0.021	0.000
C3	0.019	0.002	0.065	0.000
平均面積	0.011	0.002	0.029	0.002
平均延長(m)	2.690		1.563	
平均深(mm)	4.00	0.76	18.53	1.13

2013/3/21

	路体部		のり尻部	
	侵食	堆積	侵食	堆積
A1	0.006	0.019	0.002	0.007
A2	0.000	0.041	0.000	0.010
A3	0.001	0.022	0.000	0.044
平均面積	0.002	0.027	0.001	0.021
平均延長(m)	3.207		0.913	
平均深(mm)	0.73	8.52	0.88	22.45
B1	0.021	0.043	0.000	0.047
B2	0.022	0.012	0.009	0.091
B3	0.004	0.061	0.000	0.060
平均面積	0.016	0.039	0.003	0.066
平均延長(m)	2.937		1.377	
平均深(mm)	5.36	13.19	2.13	47.89
C1	0.004	0.005	0.019	0.001
C2	0.000	0.019	0.000	0.072
C3	0.013	0.010	0.000	0.076
平均面積	0.006	0.011	0.006	0.049
平均延長(m)	2.690		1.563	
平均深(mm)	2.06	4.26	4.09	31.64

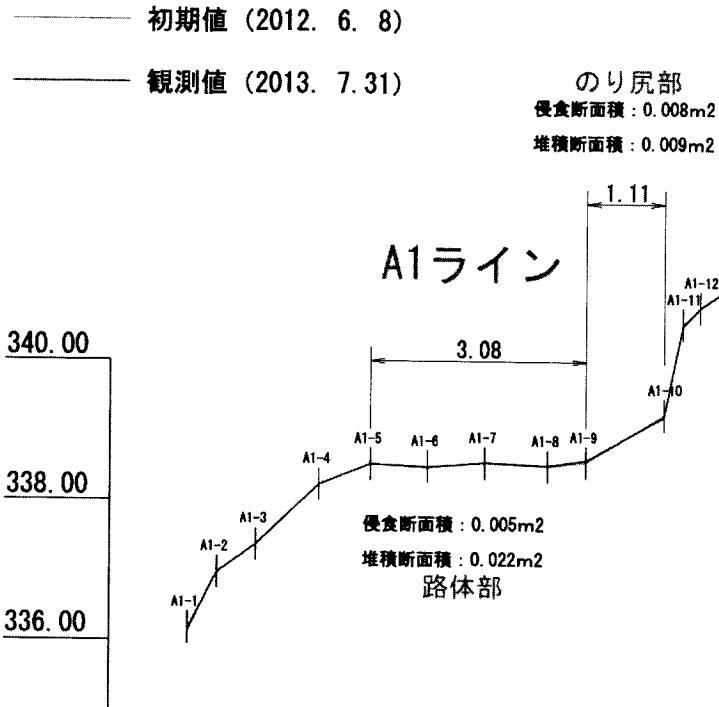


図 8 断面積の例

侵食ピンの点の深さのデータを面的な広がり及び土砂量という堆積に変換するため、以下の処理を行った。

### 1) 区間の設定

侵食の経年変化が大きく異なる路体とのり面について区分し、のり面については堆積の著しいのり尻を対象とした。よって、路体部とのり尻部の2区間に区分した。

### 2) 変化の断面測定

各区分において、初期値（2012年6月8日）との断面の差分をとり、初期値より減少している部分を「侵食」、増加している部分を「堆積」と区分して断面積を測定した。

### 3) 平均深の算出

各区分の断面積を各区分の延長で除した値をその区分の平均深として取り扱う。上図の例の場合、路体部の侵食断面積が 0.005m<sup>2</sup>であり、その延長が 3.08m となった、このため、路体部の平均侵食深は  $0.005\text{m}^2 \div 3.08\text{m} = 0.0016\text{m}$  となり、1.6mm となる。

### 3) 平均土砂量の算出

各ラインの平均侵食及び堆積深が算出された後、それぞれのラインの平均をとり、そのラインの面積を乗じて土砂量とした。

この結果をとりまとめ、調査区毎にその平均深に路面平面積あるいはのり面平面積を乗じて求めた侵食土砂量及び堆積土砂量を表 11 に示す。

表 11 侵食及び堆積土砂量集計表

8月1日				Bライン侵食土砂量(m3)				Cライン侵食土砂量(m3)					
Aライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)	Bライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)	Bライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)		
路体部	45.57 ×	3.01	$\div 1000 \div 2 =$	0.069	土砂量(m3)	路体部	80.36 ×	0.76	$\div 1000 \div 2 =$	0.031	路体部	78.55 ×	3.09
のり尻部	13.32 ×	8.83	$\div 1000 =$	0.118		のり尻部	39.75 ×	40.73	$\div 1000 =$	1.619	のり尻部	45.72 ×	3.62
計				0.186		計				1.649	計		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Cライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)		
路体部	45.57 ×	2.18	$\div 1000 \div 2 =$	0.050	土砂量(m3)	路体部	80.36 ×	13.62	$\div 1000 \div 2 =$	0.547	路体部	78.55 ×	1.12
のり尻部	13.32 ×	2.26	$\div 1000 =$	0.030		のり尻部	39.75 ×	4.12	$\div 1000 =$	0.164	のり尻部	45.72 ×	2.07
計				0.080		計				0.711	計		
土砂収支			-0.106	土砂収支				-0.939	土砂収支		-0.149		

10月18日				Bライン侵食土砂量(m3)				Cライン侵食土砂量(m3)					
Aライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)	Bライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)	Bライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)		
路体部	45.57 ×	1.35	$\div 1000 \div 2 =$	0.031	土砂量(m3)	路体部	80.36 ×	3.29	$\div 1000 \div 2 =$	0.132	路体部	78.55 ×	4.00
のり尻部	13.32 ×	9.93	$\div 1000 =$	0.132		のり尻部	39.75 ×	22.69	$\div 1000 =$	0.902	のり尻部	45.72 ×	18.53
計				0.163		計				1.034	計		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Cライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)		
路体部	45.57 ×	4.78	$\div 1000 \div 2 =$	0.109	土砂量(m3)	路体部	80.36 ×	8.41	$\div 1000 \div 2 =$	0.338	路体部	78.55 ×	0.76
のり尻部	13.32 ×	1.79	$\div 1000 =$	0.024		のり尻部	39.75 ×	6.90	$\div 1000 =$	0.274	のり尻部	45.72 ×	1.13
計				0.133		計				0.612	計		
土砂収支			-0.030	土砂収支				-0.422	土砂収支		-0.923		

3月21日				Bライン侵食土砂量(m3)				Cライン侵食土砂量(m3)					
Aライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)	Bライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)	Bライン侵食土砂量(m3)		平面積(m2)	深さ(mm)		
路体部	45.57 ×	0.73	$\div 1000 \div 2 =$	0.017	土砂量(m3)	路体部	80.36 ×	5.36	$\div 1000 \div 2 =$	0.215	路体部	78.55 ×	2.06
のり尻部	13.32 ×	0.88	$\div 1000 =$	0.012		のり尻部	39.75 ×	2.13	$\div 1000 =$	0.085	のり尻部	45.72 ×	4.09
計				0.028		計				0.300	計		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Cライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)		
路体部	45.57 ×	8.52	$\div 1000 \div 2 =$	0.194	土砂量(m3)	路体部	80.36 ×	13.19	$\div 1000 \div 2 =$	0.530	路体部	78.55 ×	4.26
のり尻部	13.32 ×	22.45	$\div 1000 =$	0.299		のり尻部	39.75 ×	47.89	$\div 1000 =$	1.904	のり尻部	45.72 ×	31.64
計				0.493		計				2.434	計		
土砂収支			0.465	土砂収支				-2.134	土砂収支		1.346		

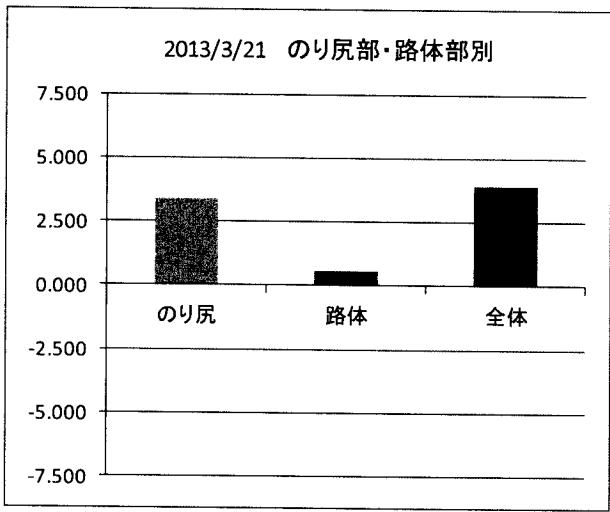
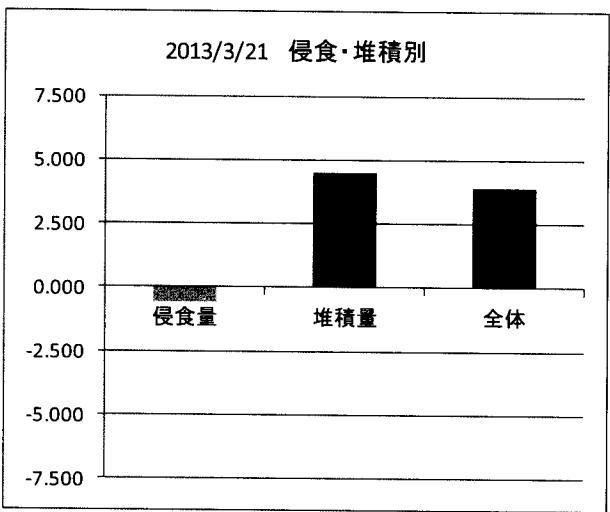
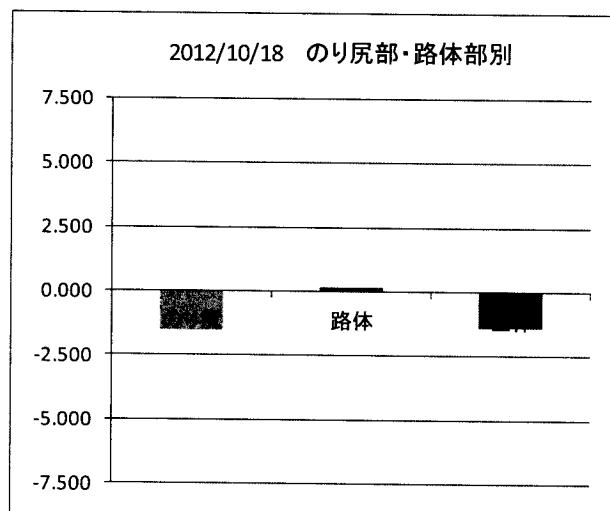
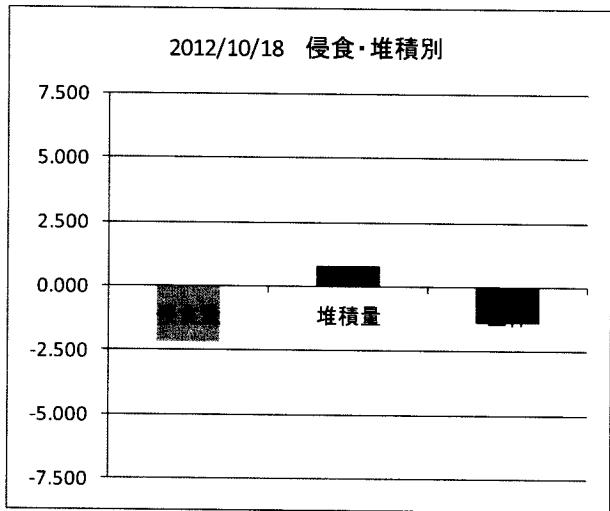
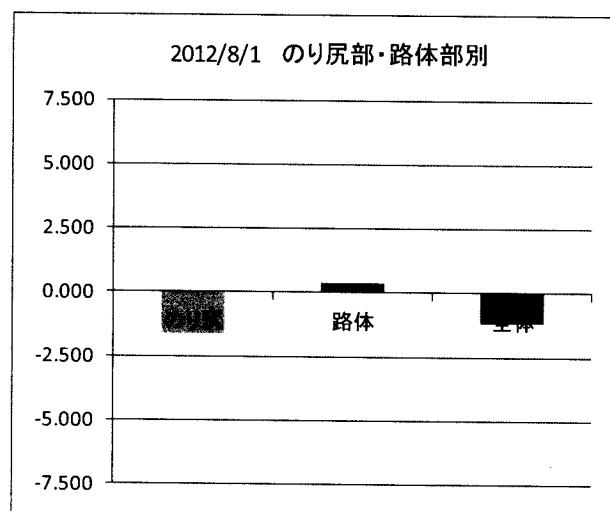
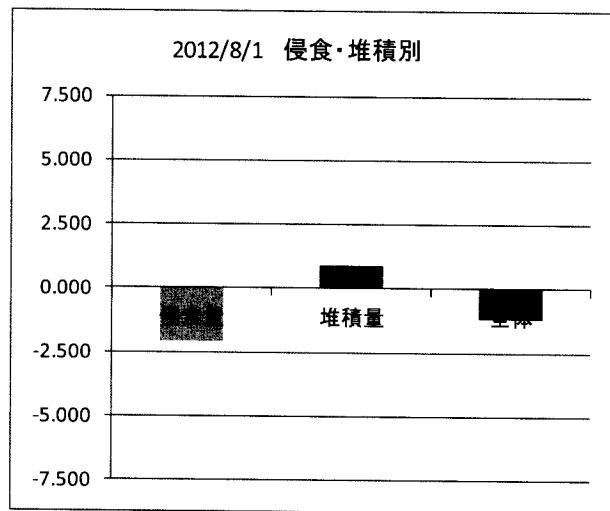


図 9 侵食・堆積別土砂収支

図 10 のり面・路面土砂収支

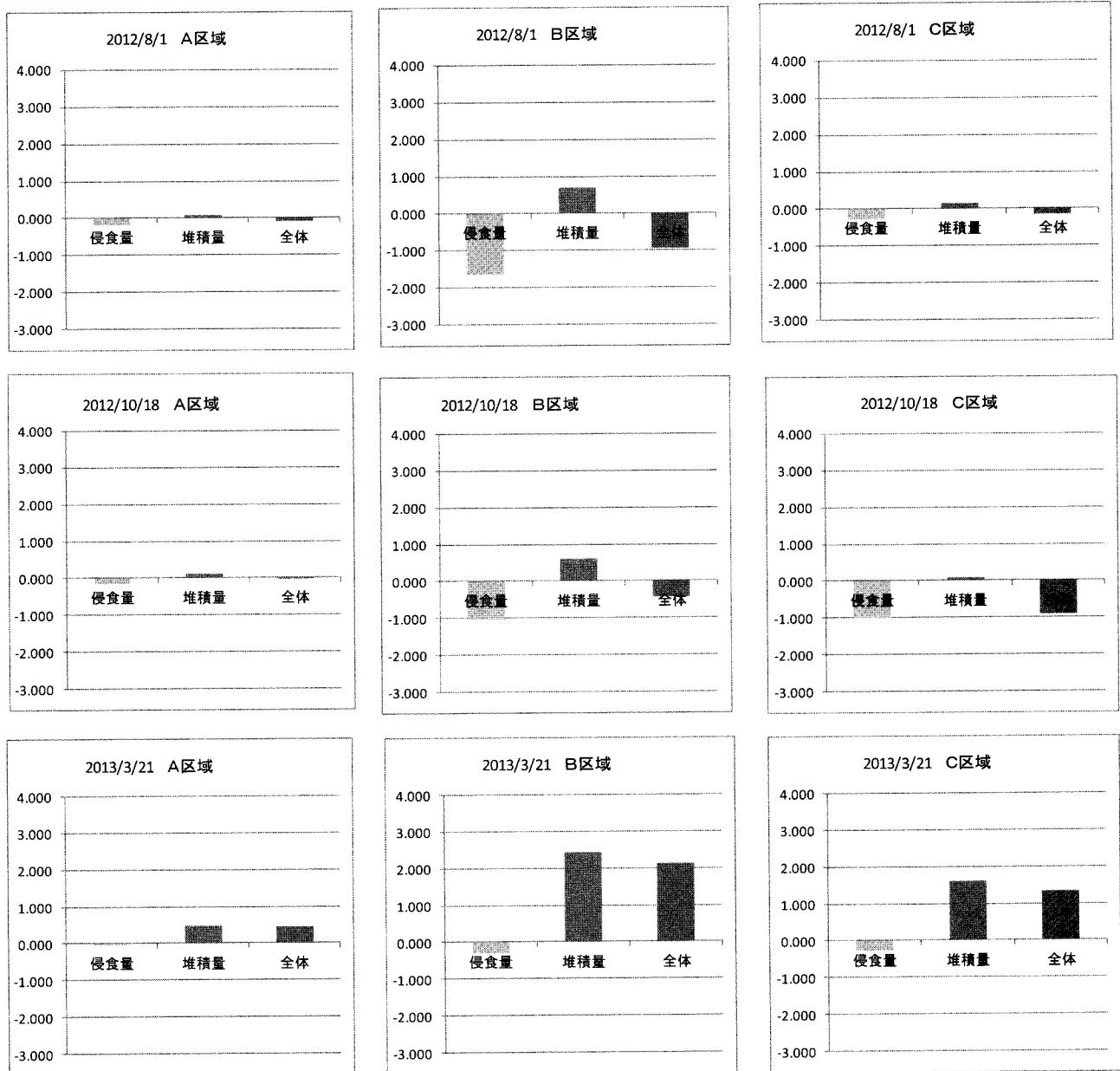


図 11 区域別土砂收支

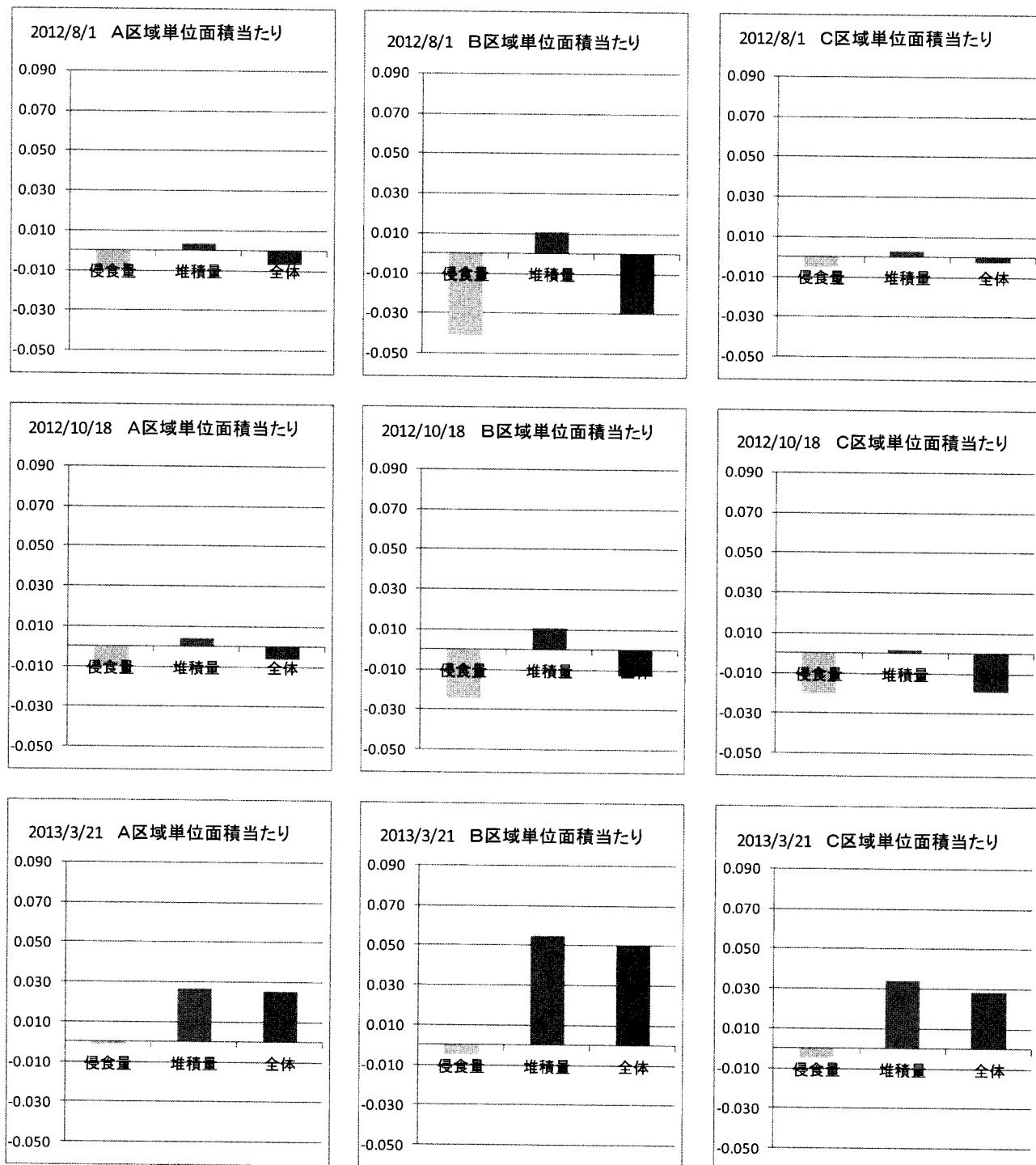


図 12 単位面積当たりの土砂収支

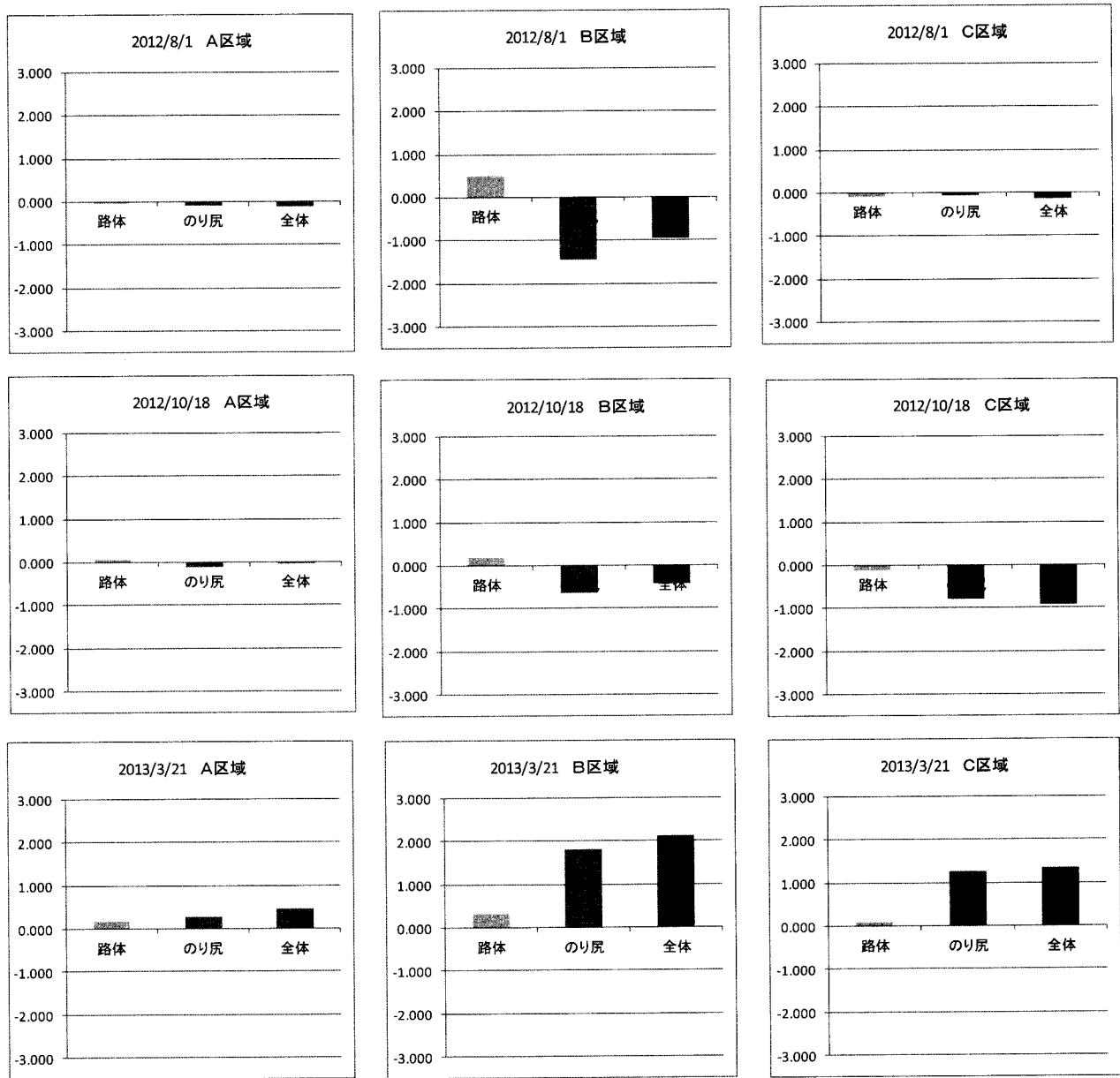


図 13 路面・のり面別土砂収支

図 9 に表 11 から求めた測定期間別の全調査区を合計した侵食・堆積土砂量を示す。梅雨明けの前期及び台風期後の中期では堆積量よりも侵食量が多く、全体としては侵食が卓越していることが示めされた。しかし、融雪後の後期には侵食量よりも堆積量が多く、全体として堆積が卓越していることが示された。

図 10 に測定期間別に全調査区を合計したのり面・路面土砂量集計図を示す。路面では全期間ともわずかながら堆積しているが、切土のり面では侵食が卓越しているため前・中期の 2 期間の土砂収支は侵食土砂量が多いが、後期では切土のり面も堆積が卓越しているため、のり面及び路面の双方とも堆積となり、全体でも堆積が多くなっている。

図 11 には、調査区分別の土砂収支集計図を示す。A 区では前・中期の 2 期間の土砂量は比較的少ないが堆積土砂量よりも侵食土砂量が多く、全体として侵食土砂量が卓越している。後期では侵食土砂量よりも堆積土砂量が多く全体としては堆積土砂量が卓越している。B 区においては、A 区よりも侵食土砂量、堆積土砂量ともかなり多いが、前・中・後期を通じて A 区と同様な傾向がみられ

る。C 区においても土砂量は異なるが、A 区及び B 区と同じような傾向が認められた。

図 12 に土砂量の値を単位面積 ( $1 \text{ m}^2$ ) 当たりに換算して示した。これによると C 区は A 区と B 区の中間的な値を示している。

図 13 に路面・のり面別土砂収支を示す。全調査区とも期間毎の土砂収支の傾向は類似している。しかし、B 区は、路面の土砂収支は他区と比べて顕著に多くはないが、切土のり面の土砂量は極めて多くなっている。これらのことから、本調査においては、森林作業道における土砂収支は、路面の影響よりも切土のり面の影響が大きいことが示唆された。また、路面に枝条被覆のある B 区において土砂収支に及ぼす路面の枝条被覆の効果が見られなかったのは、枝条被覆のない切土のり面の影響が特に大きかったためと推測される。

## ② 平成 25 年度調査

平成 25 年度の侵食量調査は、2013 年 7 月 31 日、同年 9 月 14 日、同年 11 月 15 日、2014 年 4 月 15 日の 4 回の測定を行った。

以下に、各測線及び測定日における平均侵食深を示した表と図面を示す。

表 12 侵食深及び堆積深集計表

2013/7/31		2013/11/15		
	路体部		のり尻部	
	侵食	堆積	侵食	堆積
A1	0.005	0.022	0.008	0.009
A2	0.006	0.026	0.000	0.026
A3	0.000	0.036	0.000	0.036
A4	0.010	0.007	0.000	0.011
平均面積	0.005	0.023	0.002	0.020
平均延長(m)	3.298		0.948	
平均深(mm)	1.61	0.62	1.06	2.153
B1	0.006	0.050	0.000	0.026
B2	0.009	0.020	0.000	0.106
B3	0.003	0.072	0.004	0.041
B4	0.004	0.018	0.000	0.018
平均面積	0.006	0.040	0.001	0.048
平均延長(m)	2.903		1.415	
平均深(mm)	1.91	13.92	0.74	31.07
C1	0.015	0.000	0.050	0.003
C2	0.015	0.006	0.000	0.046
C3	0.013	0.011	0.000	0.076
C4	0.010	0.004	0.014	0.004
平均面積	0.013	0.005	0.016	0.032
平均延長(m)	2.680		1.688	
平均深(mm)	4.92	1.89	9.41	19.24

2013/9/14		2014/4/15		
	路体部		のり尻部	
	侵食	堆積	侵食	堆積
A1	0.005	0.028	0.008	0.013
A2	0.001	0.045	0.000	0.025
A3	0.003	0.024	0.000	0.031
A4	0.073	0.006	0.000	0.021
平均面積	0.020	0.026	0.002	0.022
平均延長(m)	3.298		0.948	
平均深(mm)	6.10	7.80	2.06	23.43
B1	0.006	0.065	0.000	0.034
B2	0.010	0.023	0.000	0.118
B3	0.004	0.070	0.004	0.044
B4	0.004	0.028	0.000	0.015
平均面積	0.006	0.046	0.001	0.053
平均延長(m)	2.903		1.415	
平均深(mm)	2.00	19.01	0.64	37.23
C1	0.016	0.000	0.031	0.006
C2	0.007	0.021	0.001	0.051
C3	0.042	0.021	0.000	0.051
C4	0.006	0.005	0.004	0.002
平均面積	0.018	0.012	0.009	0.027
平均延長(m)	2.680		1.688	
平均深(mm)	6.66	4.44	5.38	16.24

7月31日	Aライン埋積土砂量(m3)			Bライン埋積土砂量(m3)			Cライン埋積土砂量(m3)			
	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	
路体部	45.57 × 1.61 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.037	路体部	80.36 × 1.91 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.077	路体部	78.55 × 4.92 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.193		
のり尻部	13.32 × 1.98 ÷ 1000 =	0.026	計	39.75 × 0.74 ÷ 1000 =	0.029	のり尻部	45.72 × 9.41 ÷ 1000 =	0.430		
		0.063			0.106			0.623		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	
路体部	45.57 × 6.82 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.155	路体部	80.36 × 13.82 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.555	路体部	78.55 × 1.89 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.074		
のり尻部	13.32 × 21.53 ÷ 1000 =	0.287	計	39.75 × 33.67 ÷ 1000 =	1.339	のり尻部	45.72 × 19.24 ÷ 1000 =	0.880		
		0.442			1.894			0.954		
		0.379	土砂収支		1.788	土砂収支		0.331		
9月14日	Aライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)
路体部	45.57 × 6.16 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.140	路体部	80.36 × 2.00 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.080	路体部	78.55 × 6.66 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.262		
のり尻部	13.32 × 2.06 ÷ 1000 =	0.027	計	39.75 × 0.64 ÷ 1000 =	0.025	のり尻部	45.72 × 5.38 ÷ 1000 =	0.246		
		0.168			0.106			0.507		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	
路体部	45.57 × 7.80 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.178	路体部	80.36 × 16.01 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.643	路体部	78.55 × 4.44 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.174		
のり尻部	13.32 × 23.43 ÷ 1000 =	0.312	計	39.75 × 37.23 ÷ 1000 =	1.480	のり尻部	45.72 × 16.24 ÷ 1000 =	0.742		
		0.490			2.123			0.917		
		0.322	土砂収支		2.018	土砂収支		0.409		
11月15日	Aライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)
路体部	45.57 × 7.02 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.160	路体部	80.36 × 6.55 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.263	路体部	78.55 × 6.71 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.263		
のり尻部	13.32 × 0.18 ÷ 1000 =	0.002	計	39.75 × 0.71 ÷ 1000 =	0.028	のり尻部	45.72 × 6.21 ÷ 1000 =	0.284		
		0.162			0.291			0.547		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	
路体部	45.57 × 9.51 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.217	路体部	80.36 × 15.61 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.627	路体部	78.55 × 6.40 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.251		
のり尻部	13.32 × 21.56 ÷ 1000 =	0.287	計	39.75 × 25.94 ÷ 1000 =	1.031	のり尻部	45.72 × 28.37 ÷ 1000 =	1.297		
		0.504			1.658			1.548		
		0.342	土砂収支		1.367	土砂収支		1.001		
4月15日	Aライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)
路体部	45.57 × 7.68 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.175	路体部	80.36 × 2.78 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.112	路体部	78.55 × 7.58 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.298		
のり尻部	13.32 × 0.50 ÷ 1000 =	0.007	計	39.75 × 41.70 ÷ 1000 =	1.657	のり尻部	45.72 × 0.03 ÷ 1000 =	0.001		
		0.182			1.769			0.299		
Aライン堆積土砂量(m3)	平面積(m2)	深さ(mm)	土砂量(m3)	Bライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	Cライン埋積土砂量(m3)	平面積(m2)	土砂量(m3)	
路体部	45.57 × 9.86 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.225	路体部	80.36 × 24.41 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.981	路体部	78.55 × 4.61 ÷ 1000 ÷ 2 =	0.181		
のり尻部	13.32 × 51.90 ÷ 1000 =	0.691	計	39.75 × 71.06 ÷ 1000 =	2.825	のり尻部	45.72 × 36.87 ÷ 1000 =	1.686		
		0.916			3.805			1.867		
		0.734	土砂収支		2.036	土砂収支		1.568		

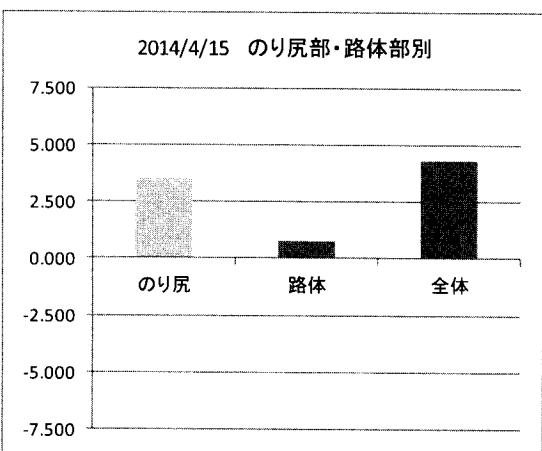
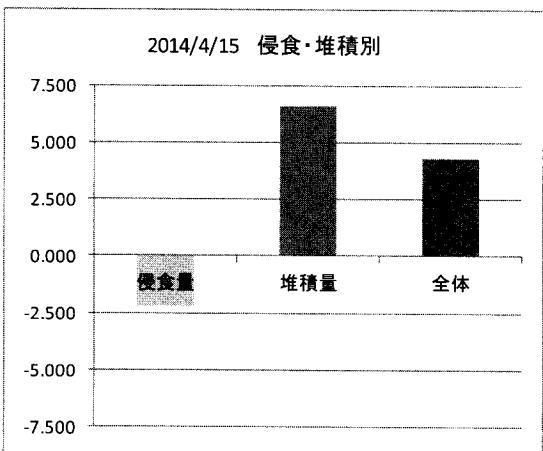
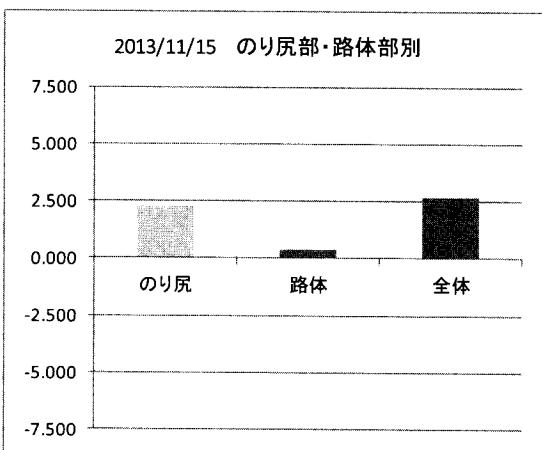
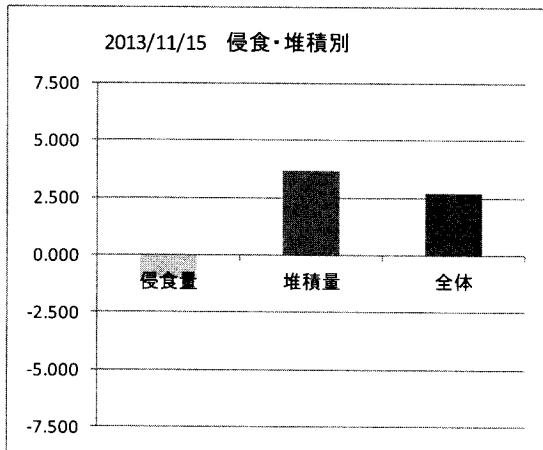
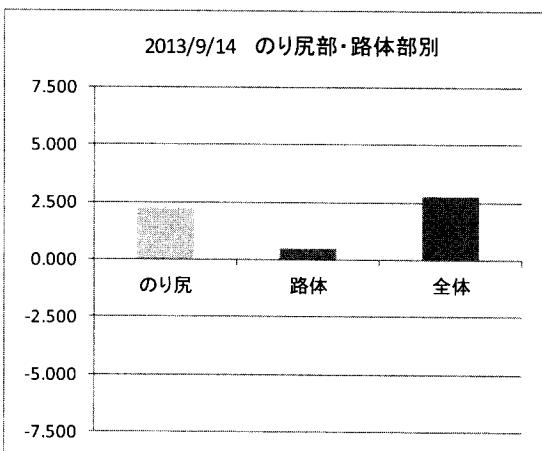
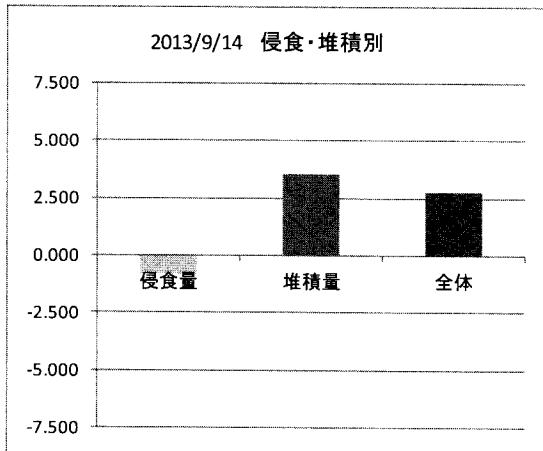
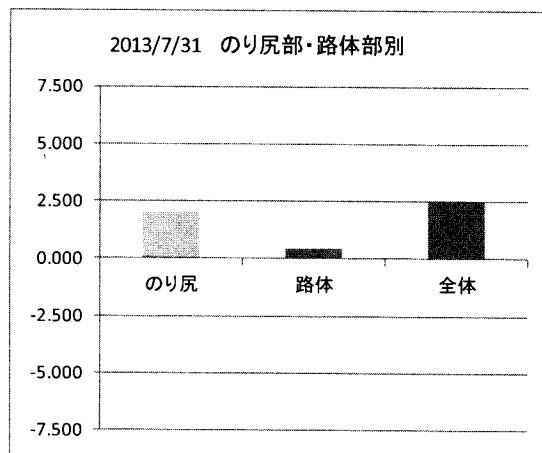
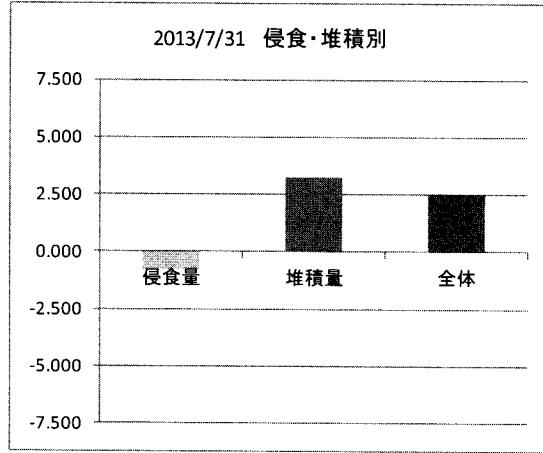


図 14 侵食・堆積土砂収支

図 15 のり面・路面土砂収支

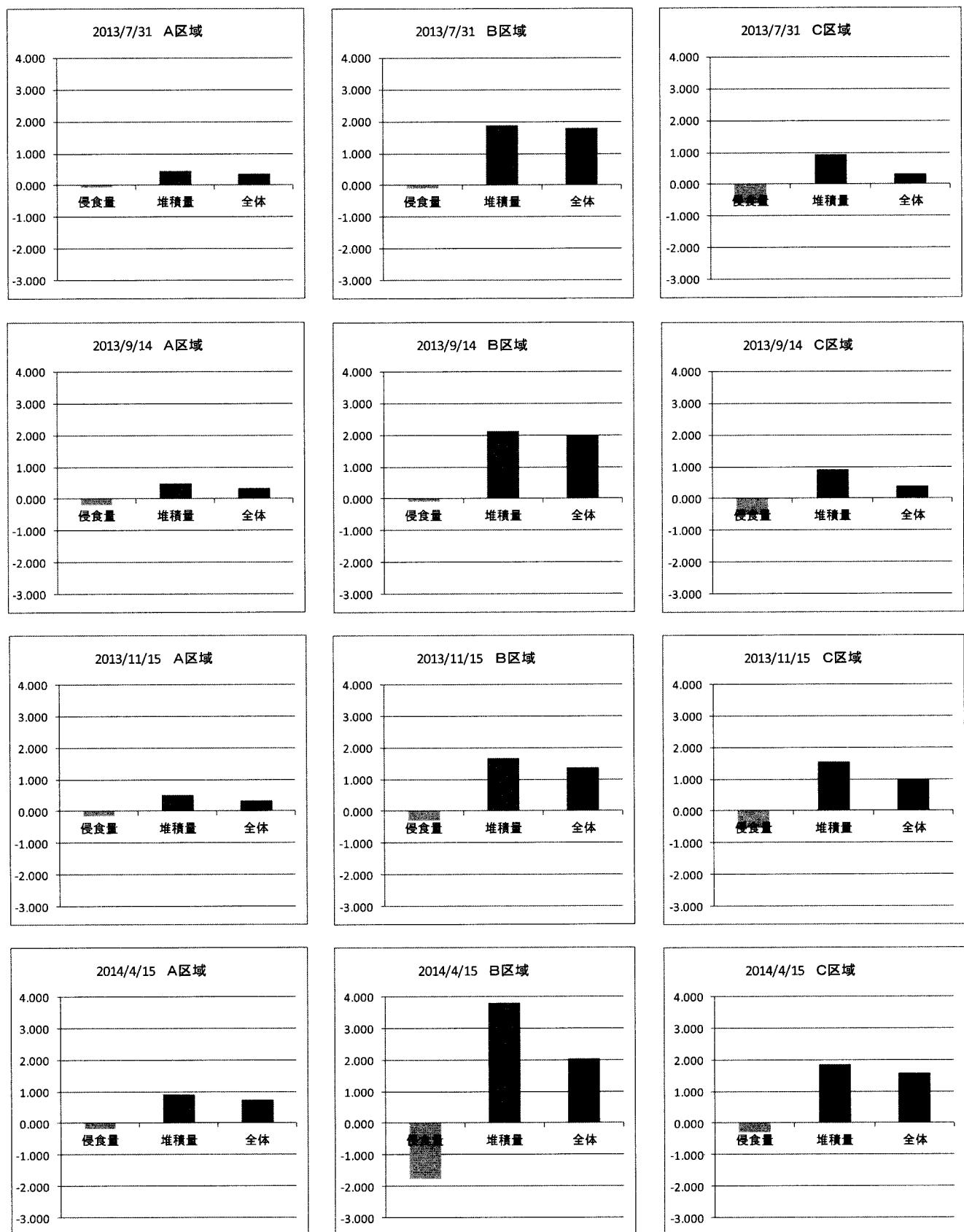


図 16 地域別土砂收支 (総量)

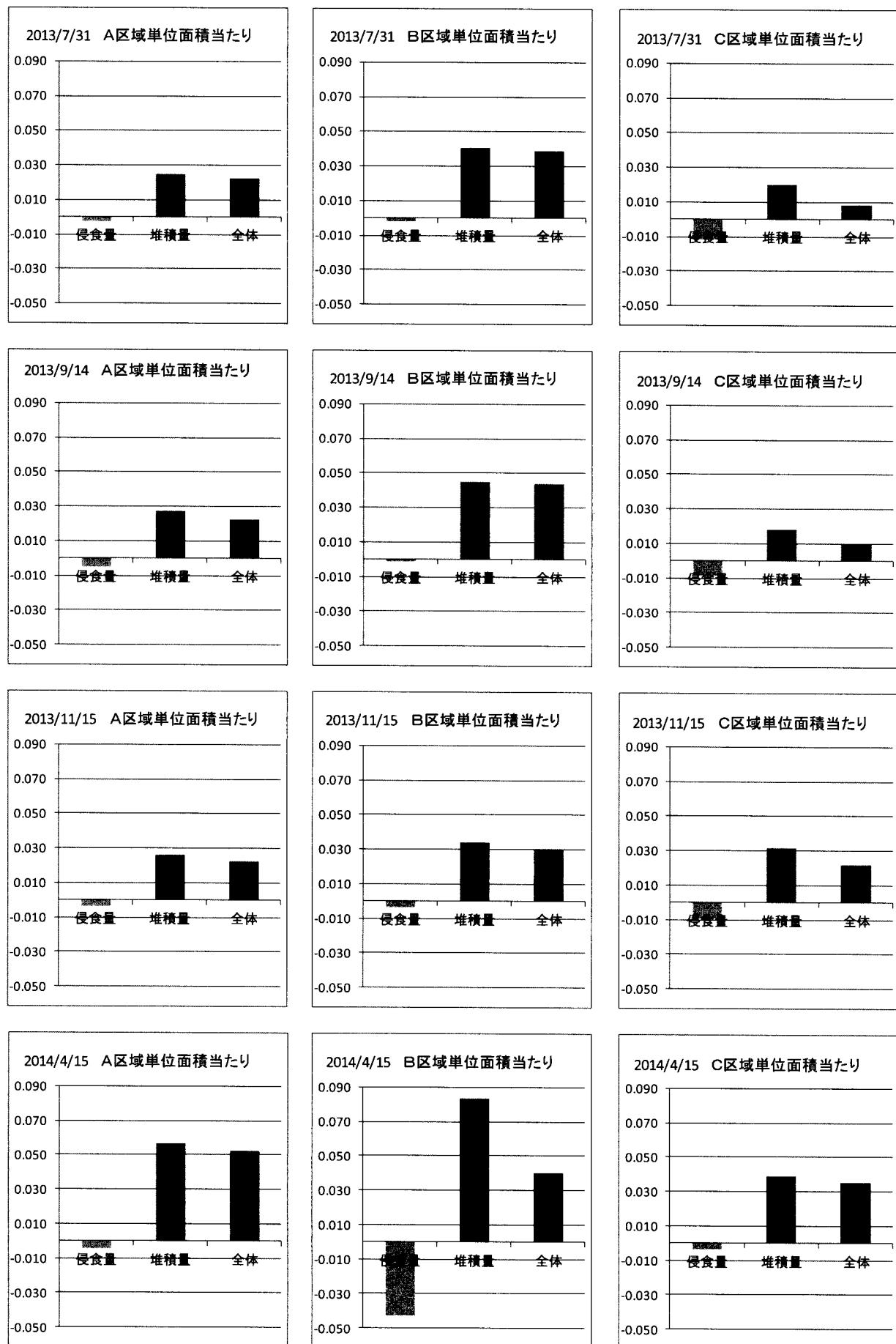


図 17 区域別土砂收支（単位面積当たり）

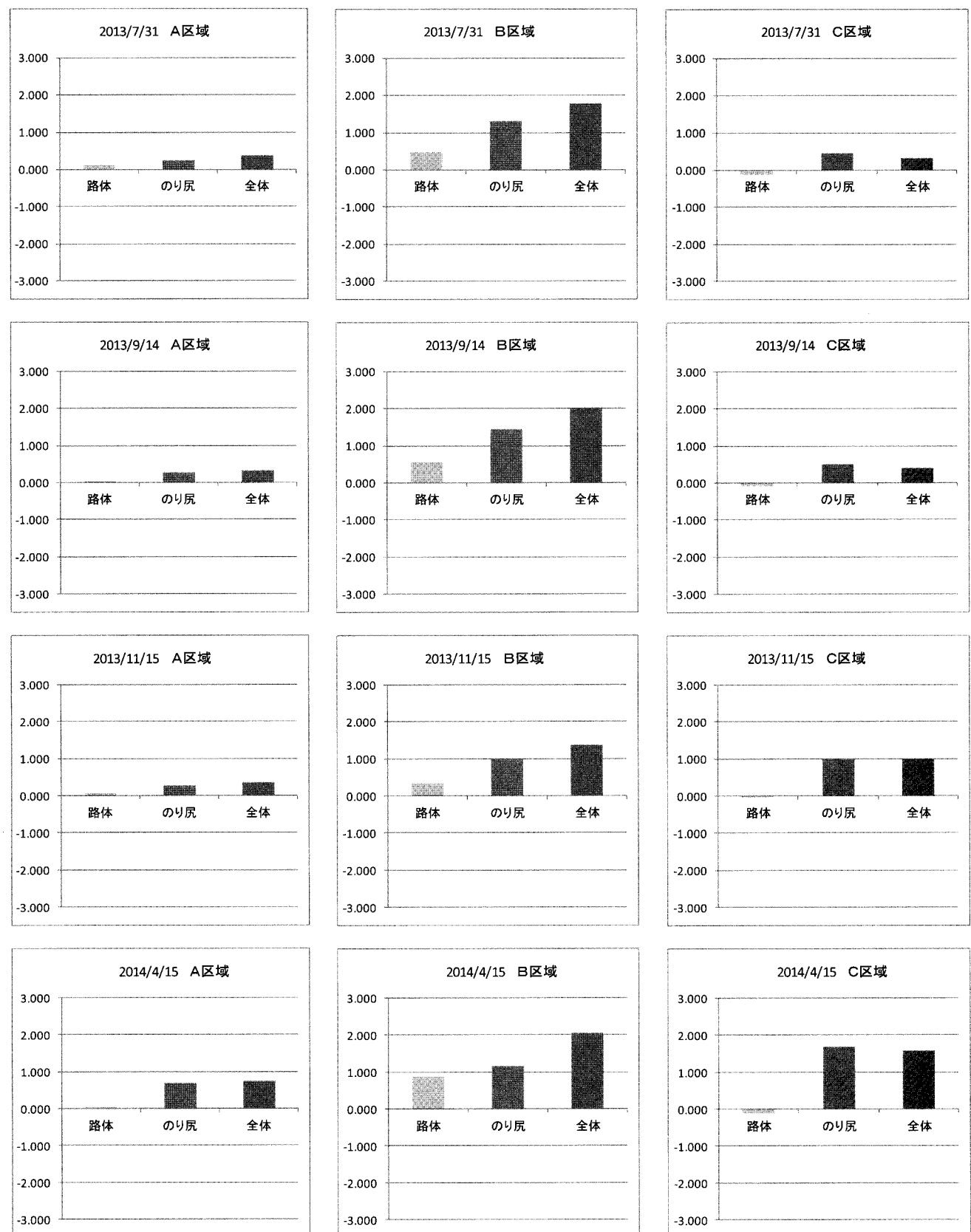


図 18 路面・のり面別土砂収支

平成 25 年度調査では以下のような傾向が見られた。

#### ○侵食・堆積別土砂量

A 区、B 区、C 区を合計した侵食と堆積の土砂収支は、夏期から秋期にかけての 11 月 15 日までの調査では、若干の侵食傾向がうかがえるものの侵食と堆積はほぼ均衡している。それに対して、冬期を経過した 4 月 15 日の調査では、堆積の割合が大きく増加したことが認められる。

#### ○のり面・路面土砂収支

前述と同様に、A 区、B 区、C 区を合計したのり面と路面別の土砂収支は、夏期から秋にかけての 11 月 15 日までの調査では、のり面で侵食、路面で堆積が卓越しているが、冬期後の 4 月 15 日の調査では、のり面では侵食よりも堆積の割合が大きく増加しているが、路面については、時期的な差はあまり見られなかった。

#### ○区域別土砂収支（総量）

A 区、B 区、C 区の区域別の土砂の収支を総量で比較すると、B 区が最も大きく、次いで C 区域となり、A 区域が最も変動量が少ない結果となった。

#### ○区域別土砂収支（単位面積あたり）

単位面積あたりの土砂収支は、前述の区域別と比較しその差は小さくなる。

#### ○路面・のり面別土砂収支

A 区は路面の変化はあまり見られないが、のり面では春期に堆積が認められた。B 区は、年間通して路面の堆積が認められるが、のり面は春期のみ堆積が認められた。C 区は B 区と同様な傾向が認められた。A 区と B 区・C 区との違いは路面の枝条被覆の多寡によるものと推察される。

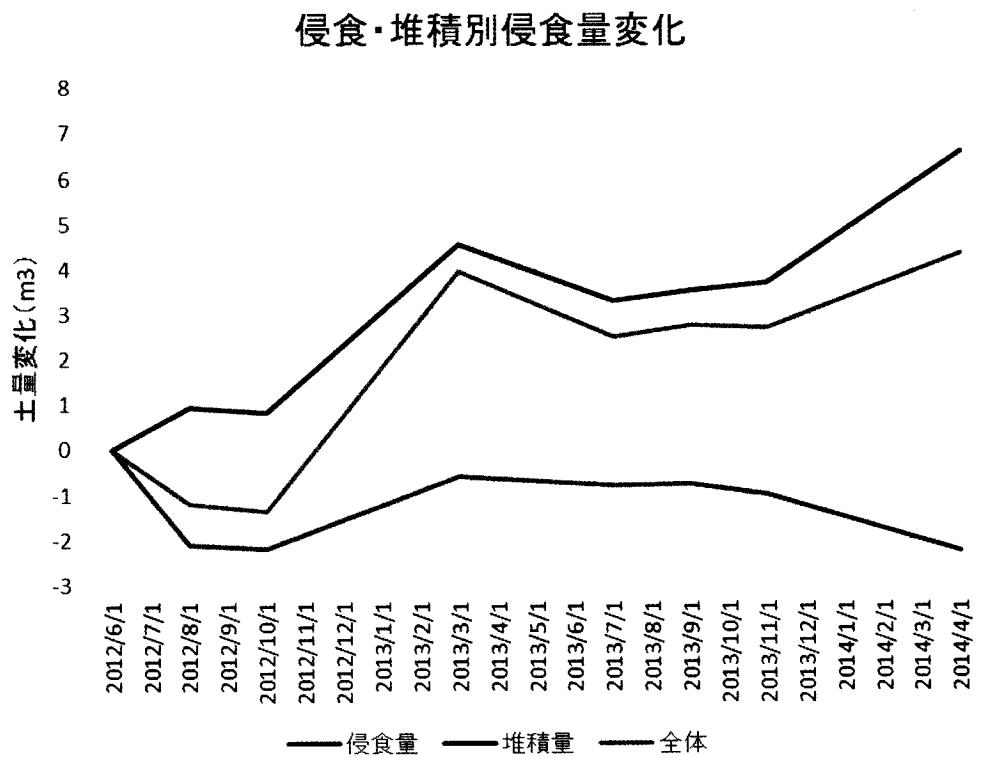


図 19 2012 年 6 月から 2014 年 4 月までの侵食・堆積別土量変化

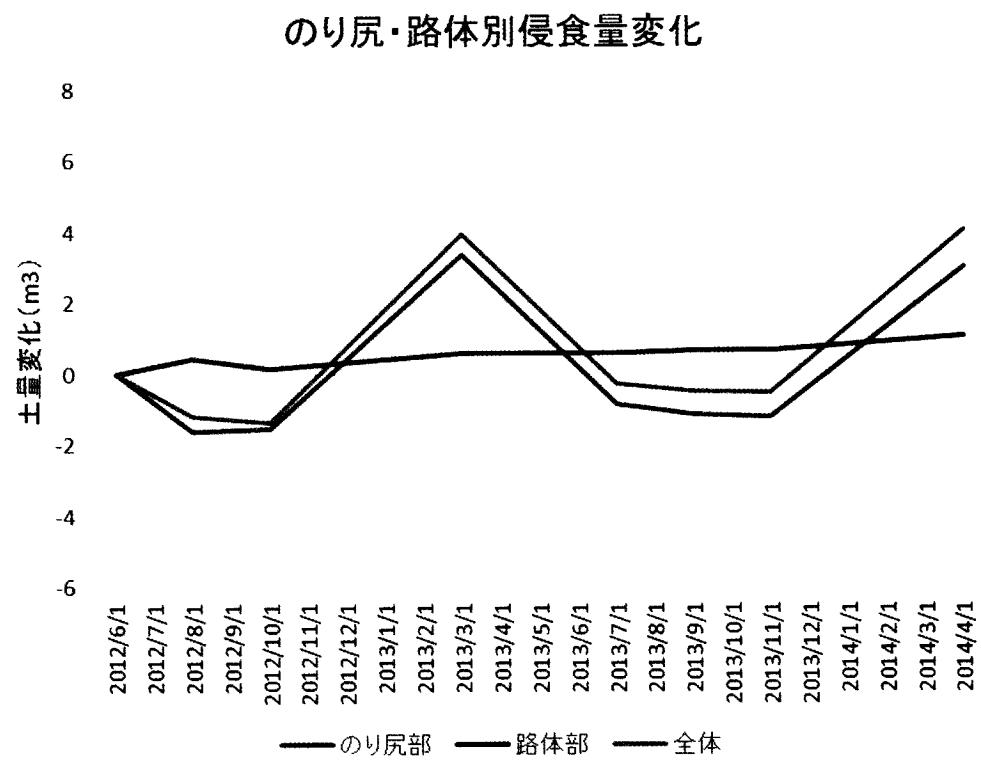


図 20 2012 年 6 月から 2014 年 4 月までののり面・路面別土量変化

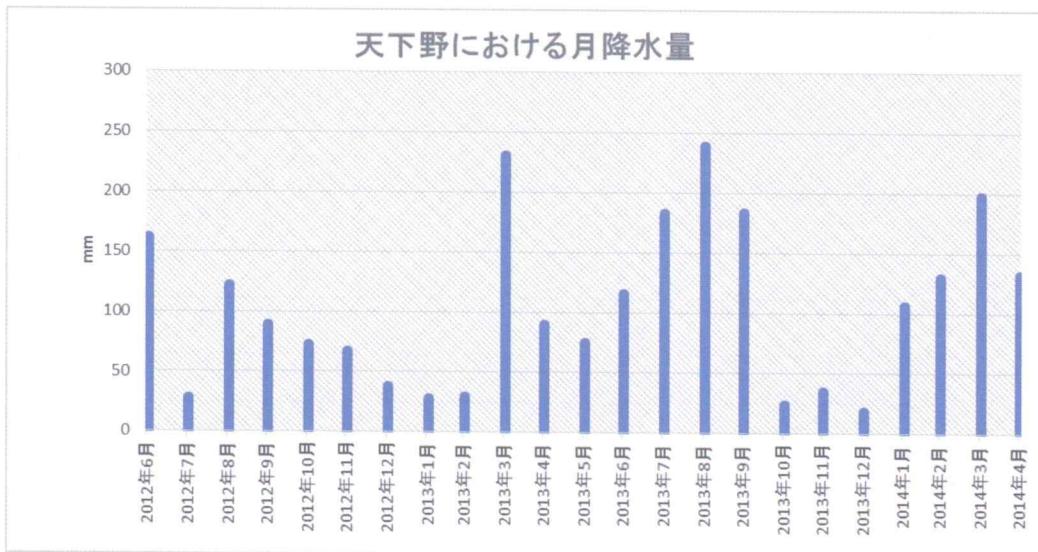


図 21 2012 年 6 月から 2014 年 4 月までの月降水量  
天下野（けがの）観測所：茨城県常陸太田市天下野町 4883 北小学校  
(調査地から直線で約 2.0km)

### ③ 平成 24 年度及び平成 25 年度 2 箇年分の総括

本試験地では、土壤侵食と斜面崩壊に関する調査を行い、路面及びのり面侵食量調査、路面被覆度調査、流出土砂量調査、横断排水溝堆砂深調査、路盤変動調査、既存斜面崩壊地踏査の 6 項目に分けてとりまとめた。この中で、路面及びのり面侵食量調査を除いた調査項目は本年度単年の調査結果（路盤変動調査については昨年度は変化なし）であることから、ここでは主として路面及びのり面侵食量調査について、2 箇年分の時系列的な変化をまとめるとともに、近傍の雨量観測データと比較し、土量変化の要因を推察する。（図 19、図 20）

#### ○侵食・堆積別

春期における堆積量の増加と侵食量の減少が 2 箇年とも見られ、徐々に堆積が増加している傾向も見られる。

#### ○のり面・路面別

のり面については、前述の侵食・堆積別の傾向と同様徐々に堆積が増加している傾向も見られるが、路面については、2 年間を通じて時期的な変化が少ない傾向が現れた。このことから、のり面からの土砂移動が調査地全体の土砂移動の大部分を占めているといえる。

#### ○雨量との関係

雨量データから現地では春期の雨量が多い傾向が伺える。特に 2013 年 3 月、2014 年 3 月は夏期と同等の雨量を記録している。このことにより、春の調査結果に堆積が多い主要な要因として凍上融解が想定されたが、春期の多雨によるのり面からの供給の影響も大きいものと思われる。

## (2) 路面被覆度調査

### 1) 調査方法

路面被覆度は、路面侵食作用に大きな影響を与えることから、路面にある枝条や植生の面的な広がりと、その厚さ（高さ）を把握するため実施した。今回の調査では、点的な調査箇所を数多くとり、面的で厚さのある被覆量の算定を行うこととした。

具体的には、各調査区内の全域について路面のセンターを中心に 1m四方の点群を設け、その点での被覆の厚さ（高さ）の測定を行った。

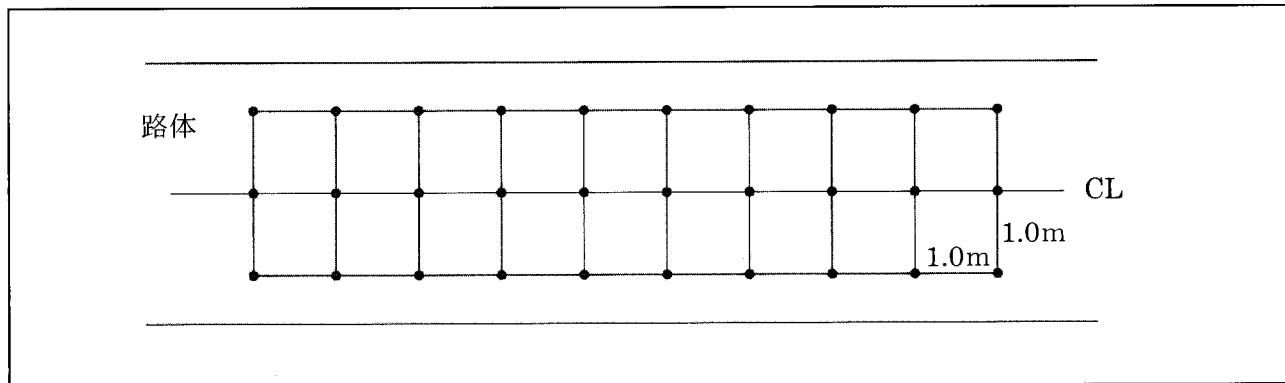


図 22 被覆度調査の模式図

なお、B 区及び C 区における間伐木の枝条による路面被覆は、平成 23 年度の森林作業道開設時に実施されたが、路面被覆度調査は 2013 年 3 月 21 日から測定を開始したので、この時の値を初期値として 2013 年 7 月 31 日、2013 年 11 月 15 日、2014 年 4 月 15 日の 4 回の観測を行った。また、3 回目の調査である 2013 年 11 月 15 日からは、植被の種類として生育している「植生」とその他の「リター」に分けて測定を行った。

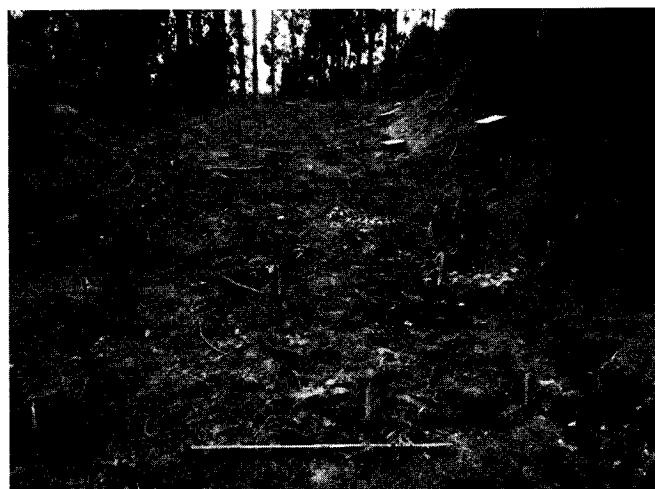


写真 4 2013 年 7 月 31 日の状況



写真 5 2014 年 4 月 15 日の状況

### 2) 調査結果

調査の結果、A 区域では縦 17 カ所 × 3 カ所（谷・中・山側）の 51 カ所、B 区域では縦 26 カ所 × 3 カ所（谷・中・山側）の 78 カ所、C 区域では縦 25 カ所 × 3 カ所（谷・中・山側）の 75 カ所の点群の調査を行った。それぞれの調査箇所で、植被があればその高さを測定する。各点における植被の有無を調査地数の割合で示したものを見たものを被覆率とした。

以下に、それぞれの調査結果を平均した集計表を示す。

**A 区間 路面被覆総括表**

区間	測線	項目	区分	第1回	第2回	第3回	第4回
				2013.3.21	2013.7.31	2013.11.15	2014.4.15
				計算値	計算値	計算値	計算値
A	1 谷側	有被覆箇所数	(植生)			5	13
			(リター)	12	12	13	17
			(全被覆)			14	17
		無被覆箇所数	(植生)			12	4
			(リター)	5	5	4	0
			(全被覆)			3	0
		被覆率(%)	(植生)			29	76
			(リター)	71	71	76	100
		全体被覆率(%)	(植生+リター)	71	71	82	100
		最大被覆高(cm)	(植生)	4.5	8.0	30.5	12.0
			(リター)			4.5	3.0
		最小被覆高(cm)	(植生)	0.5	1.0	0.5	1.0
			(リター)			0.5	1.0
A	2 中央	累積被覆高(cm)	(植生)	23.0	44.0	44.5	74.0
			(リター)			21.0	27.0
			(全被覆)				
		平均被覆高(cm)	(植生)	1.9	3.7	8.9	5.7
			(リター)			1.6	1.6
		有被覆箇所数	(植生)			10	11
			(リター)	15	14	15	16
			(全被覆)			17	17
		無被覆箇所数	(植生)			7	6
			(リター)	2	3	2	1
			(全被覆)			0	0
		被覆率(%)	(植生)			59	65
			(リター)	88	82	88	94
A	3 山側	全体被覆率(%)	(植生+リター)	88	82	100	100
		最大被覆高(cm)	(植生)	21.0	8.5	24.0	20.0
			(リター)			13.5	4.0
		最小被覆高(cm)	(植生)	0.5	0.5	2.0	2.0
			(リター)			1.0	1.0
		累積被覆高(cm)	(植生)	60.0	51.5	91.0	87.0
			(リター)			62.5	30.0
		平均被覆高(cm)	(植生)	4.0	3.7	9.1	7.9
			(リター)			4.2	1.9
		有被覆箇所数	(植生)			6	6
			(リター)	16	17	14	16
			(全被覆)			15	16
A	全区間	無被覆箇所数	(植生)			11	11
			(リター)	1	0	3	1
			(全被覆)			2	1
		被覆率(%)	(植生)			35	35
			(リター)	94	100	82	94
		全体被覆率(%)	(植生+リター)	94	100	88	94
		最大被覆高(cm)	(植生)	10.0	5.5	8.5	11.0
			(リター)			8.0	4.0
		最小被覆高(cm)	(植生)	0.5	0.5	2.5	2.0
			(リター)			0.5	1.0
		累積被覆高(cm)	(植生)	49.5	47.0	31.0	36.0
			(リター)			49.5	38.0
		平均被覆高(cm)	(植生)	3.1	2.8	5.2	6.0
			(リター)			3.5	2.4
A	全区間	有被覆箇所数	(植生)			21	30
			(リター)	43	43	42	49
			(全被覆)			46	50
		無被覆箇所数	(植生)			30	21
			(リター)	8	8	9	2
			(全被覆)			5	1
		被覆率(%)	(植生)			41	59
			(リター)	84	84	82	96
		全体被覆率(%)	(植生+リター)	84	84	90	98
		最大被覆高(cm)	(植生)	21.0	8.5	30.5	20.0
			(リター)			13.5	4.0
		最小被覆高(cm)	(植生)	0.5	5.0	0.5	2.0
			(リター)			0.5	1.0
		累積被覆高(cm)	(植生)	132.5	142.5	166.5	197.0
			(リター)			133.0	95.0
		平均被覆高(cm)	(植生)	3.1	3.3	7.9	6.6
			(リター)			3.2	1.9

## B 区間

## 路面被覆総括表

区間	測線	項目	区分	第1回	第2回	第3回	第4回
				2013.3.21	2013.7.31	2013.11.15	2014.4.15
				計算値	計算値	計算値	計算値
1 谷側	(植生)	有被覆箇所数	(リター)	20	19	20	24
		(全被覆)				24	25
	(植生)	無被覆箇所数	(リター)	6	7	6	2
		(全被覆)				2	1
	(植生)	被覆率(%)	(リター)	77	73	35	46
		(植生+リター)				77	92
	最大被覆高(cm)	(植生)	(リター)	12.0	8.0	26.0	45.0
		(植生)				7.5	8.0
	最小被覆高(cm)	(植生)	(リター)	0.5	0.5	1.5	1.0
		(植生)				0.5	1.0
	累積被覆高(cm)	(植生)	(リター)	62.5	52.0	73.0	109.0
		(植生)				52.0	63.0
2 中央	(植生)	平均被覆高(cm)	(植生)	3.1	2.7	8.1	9.1
		(リター)				2.6	2.6
	有被覆箇所数	(植生)	(リター)	24	25	26	26
		(全被覆)				26	26
	無被覆箇所数	(植生)	(リター)	2	1	0	0
		(全被覆)				0	0
	(植生)	被覆率(%)	(リター)	92	96	54	50
		(植生+リター)				100	100
	最大被覆高(cm)	(植生)	(リター)	12.0	19.0	45.0	20.0
		(植生)				10.5	11.0
	最小被覆高(cm)	(植生)	(リター)	1.0	0.5	1.0	1.0
		(植生)				0.5	1.0
	累積被覆高(cm)	(植生)	(リター)	108.5	130.5	196.0	92.0
		(植生)				119.5	107.0
B 3 山側	(植生)	平均被覆高(cm)	(植生)	4.5	5.2	14.0	7.1
		(リター)				4.6	4.1
	有被覆箇所数	(植生)	(リター)	24	22	24	24
		(全被覆)				25	24
	無被覆箇所数	(植生)	(リター)	2	4	2	2
		(全被覆)				1	2
	(植生)	被覆率(%)	(リター)	92	85	92	92
		(植生+リター)				69	54
	最大被覆高(cm)	(植生)	(リター)	11.5	25.5	58.0	40.0
		(植生)				14.5	6.0
	最小被覆高(cm)	(植生)	(リター)	1.0	0.5	1.5	3.0
		(植生)				1.5	1.0
	累積被覆高(cm)	(植生)	(リター)	129.5	210.5	377.0	179.0
		(植生)				115.0	88.0
全区間	(植生)	平均被覆高(cm)	(植生)	5.4	9.6	20.9	12.8
		(リター)				4.8	3.7
	有被覆箇所数	(植生)	(リター)	68	66	70	74
		(全被覆)				75	75
	無被覆箇所数	(植生)	(リター)	10	12	8	4
		(全被覆)				3	3
	(植生)	被覆率(%)	(リター)	87	85	90	95
		(植生+リター)				53	50
	最大被覆高(cm)	(植生)	(リター)	12.0	25.5	58.0	45.0
		(植生)				14.5	11.0
	最小被覆高(cm)	(植生)	(リター)	0.5	0.5	1.0	1.0
		(植生)				0.5	1.0
	累積被覆高(cm)	(植生)	(リター)	300.5	393.0	646.0	380.0
		(植生)				286.5	258.0
	平均被覆高(cm)	(植生)	(リター)	4.4	6.0	11.1	9.7
		(リター)				4.1	3.5

C 区間 路面被覆総括表

区間	測線	項目	区分	第1回	第2回	第3回	第4回
				2013.3.21	2013.7.31	2013.11.15	2014.4.15
				計算値	計算値	計算値	計算値
1 谷側	C	有被覆箇所数	(植生)			9	17
			(リター)	22	22	24	25
			(全被覆)			25	25
		無被覆箇所数	(植生)			16	8
			(リター)	3	3	1	0
			(全被覆)			0	0
		被 覆 率 (%)	(植生)	88	88	36	68
			(リター)			96	100
		全体被覆率 (%)	(植生+リター)	88	88	100	100
		最大被覆高 (cm)	(植生)	7.0	18.0	34.0	20.0
			(リター)			6.0	6.0
		最小被覆高 (cm)	(植生)	0.5	0.5	0.5	4.0
			(リター)			0.5	1.0
2 中央	C	累積被覆高 (cm)	(植生)	68.5	92.5	125.5	166.0
			(リター)			69.0	76.0
		平均被覆高 (cm)	(植生)	3.1	4.2	13.9	9.8
			(リター)			2.9	3.0
		有被覆箇所数	(植生)			16	15
			(リター)	22	24	20	23
			(全被覆)			25	25
		無被覆箇所数	(植生)			9	10
			(リター)	3	1	5	2
			(全被覆)			0	0
		被 覆 率 (%)	(植生)	88	96	76	60
			(リター)			80	92
		全体被覆率 (%)	(植生+リター)	88	96	100	100
3 山側	C	最大被覆高 (cm)	(植生)	14.0	41.0	58.0	44.0
			(リター)			18.0	13.0
		最小被覆高 (cm)	(植生)	0.5	0.5	0.5	4.0
			(リター)			0.5	1.0
		累積被覆高 (cm)	(植生)	117.0	231.0	175.0	188.0
			(リター)			125.5	92.0
		平均被覆高 (cm)	(植生)	5.3	9.6	10.9	12.5
			(リター)			6.3	4.0
		有被覆箇所数	(植生)			14	12
			(リター)	20	19	18	24
			(全被覆)			23	25
全区間	C	無被覆箇所数	(植生)			11	13
			(リター)	5	6	7	1
			(全被覆)			2	0
		被 覆 率 (%)	(植生)	88	76	56	48
			(リター)			72	96
		全体被覆率 (%)	(植生+リター)	88	76	92	100
		最大被覆高 (cm)	(植生)	10.0	22.0	50.0	31.0
			(リター)			11.0	12.0
		最小被覆高 (cm)	(植生)	0.5	0.5	3.5	2.0
			(リター)			1.0	1.0
		累積被覆高 (cm)	(植生)	97.0	115.5	225.5	142.0
			(リター)			65.5	89.0
		平均被覆高 (cm)	(植生)	4.9	6.1	16.1	11.8
			(リター)			3.6	3.7
		有被覆箇所数	(植生)			39	44
			(リター)	64	65	62	72
			(全被覆)			73	75
		無被覆箇所数	(植生)			36	31
			(リター)	11	10	13	3
			(全被覆)			2	0
		被 覆 率 (%)	(植生)	85	87	52	59
			(リター)			83	96
		全体被覆率 (%)	(植生+リター)	85	87	97	100
		最大被覆高 (cm)	(植生)	14.0	41.0	58.0	44.0
			(リター)			18.0	13.0
		最小被覆高 (cm)	(植生)	0.5	0.5	0.5	2.0
			(リター)			0.5	1.0
		累積被覆高 (cm)	(植生)	282.5	439.0	526.0	496.0
			(リター)			260.0	257.0
		平均被覆高 (cm)	(植生)	4.4	6.8	13.5	11.3
			(リター)			4.2	3.6

表 13 路面被覆度調査集計表

測定箇所		第1回	第2回	第3回	第4回	平均
		2013.3.21	2013.7.31	2013.11.15	2014.4.15	
A区間	谷側	71	71	82	100	81.0
	中	88	82	100	100	92.5
	山側	94	100	88	94	94.0
	平均	84.3	84.3	90.0	98.0	89.2
B区間	谷側	77	73	92	96	84.5
	中	92	96	100	100	97.0
	山側	92	85	96	92	91.3
	平均	87.0	84.7	96.0	96.0	90.9
C区間	谷側	88	88	100	100	94.0
	中	88	96	100	100	96.0
	山側	88	76	92	100	89.0
	平均	88.0	86.7	97.3	100.0	93.0
平均	谷側	78.7	77.3	91.3	98.7	86.5
	中	89.3	91.3	100.0	100.0	95.2
	山側	91.3	87.0	92.0	95.3	91.4
	平均	86.4	85.2	94.4	98.0	91.0

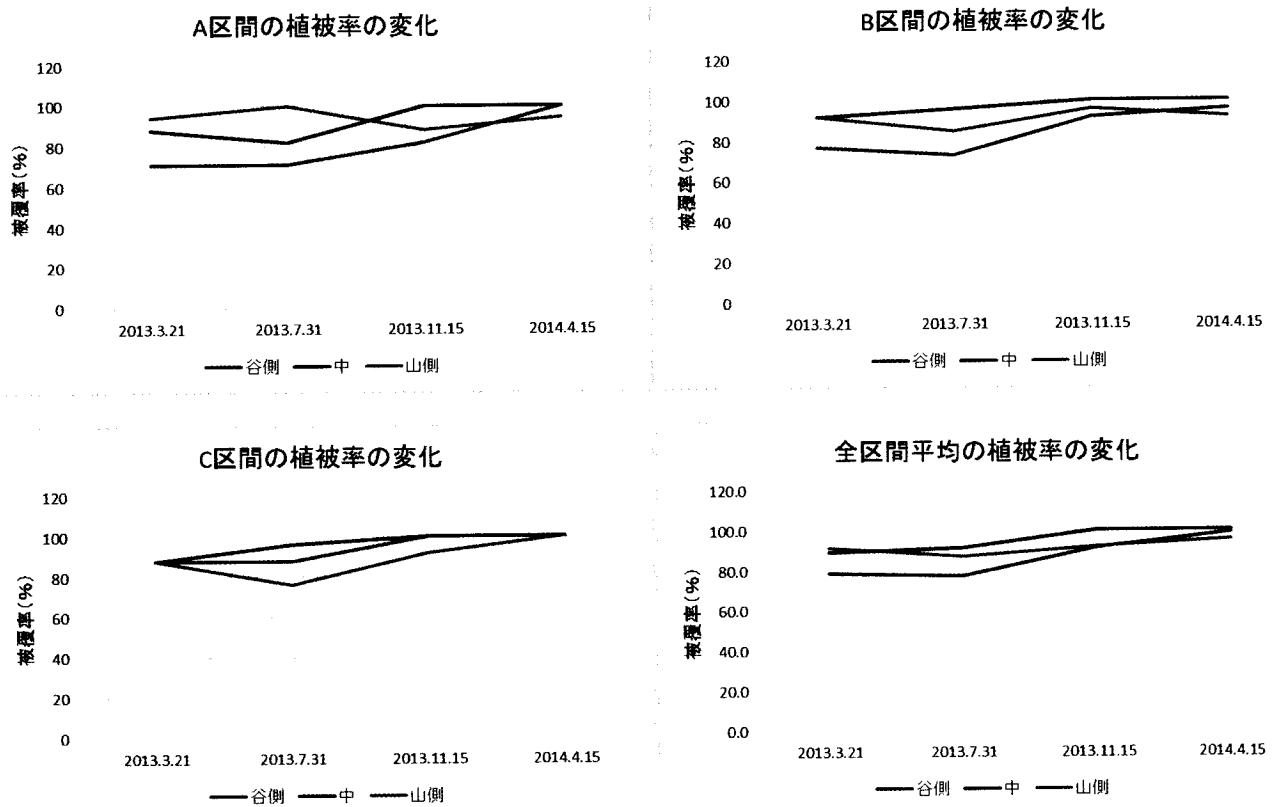


図 23 各区間及び全区間平均の植被率の変化

この結果、作業道作設後に枝条散布を行わなかった A 区間と枝条散布を行った B 区、C 区との差は余り見られず、2013 年 3 月 21 日の時点で若干の差が認められただけで概ねすべての区間で 100% に近い被覆度を示す結果となった。

このことから、枝条の非散布区間でも 2 年から 3 年で散布区間と同様の被覆率を有することが

認められた。なお、当地区における路面被覆の形成要因として、間伐残存木からの供給量が多いことや路面の立地により枝条の溜まりやすさや植生の侵入しやすさ等の影響が大きいものとみられる。

### 3) 土壌硬度

路面やのり面の表面状態を把握するため、被覆と合わせて土壌硬度についても調査を行った。土壌硬度調査には山中式硬度計を用い、路体を路面、崖錐、のり面の3区分に分け、A区間、B区間、C区間、D区間においてそれぞれ3箇所の測定を行った。なお、路面については、路肩、轍、中央部の値を平均したものを測定値とした。

調査時期は、2013年7月31日と2014年4月15日の2回であった。以下にその調査結果をまとめた。

土壌硬度総括表(単位:mm)

調査場所		平均値	調査場所		平均値		
A-1	上部	路盤	14.9	C-1	上部	路盤	13.5
	中部	崖錐	4.0		中部	崖錐	2.5
	下部	切土	17.0		下部	切土	12.5
A-2	上部	路盤	15.6	C-2	上部	路盤	12.8
	中部	崖錐	4.5		中部	崖錐	3.0
	下部	切土	26.0		下部	切土	19.0
A-3	上部	路盤	13.3	C-3	上部	路盤	10.5
	中部	崖錐	5.0		中部	崖錐	2.5
	下部	切土	14.5		下部	切土	15.5
B-1	上部	路盤	14.8	D-1	上部	路盤	15.3
	中部	崖錐	3.0		中部	崖錐	-
	下部	切土	21.0		下部	切土	-
B-2	上部	路盤	13.3	D-2	上部	路盤	14.5
	中部	崖錐	5.5		中部	崖錐	-
	下部	切土	12.0		下部	切土	-
B-3	上部	路盤	12.0	D-3	上部	路盤	14.3
	中部	崖錐	5.0		中部	崖錐	-
	下部	切土	18.0		下部	切土	-

この結果、崖錐箇所以外は概ね10mm~19mmの範囲に入っているが、崖錐箇所では2.5mmとかなり低い値となった。

よって、崖錐箇所以外は、表土の堅さはほぼ同様であり、土壌硬度だけを見る限り路面では大きな差異は認められなかった。

### (3) 流出土砂量調査

#### 1) のり面流出土砂量

##### ① 調査方法

流出土砂量は、土砂の供給源としてその影響が大きい切土のり面を対象として、土砂移動量の把握を目的として行ったものである。調査方法は、土砂発生箇所に土砂受箱を設置し、そこに捕捉された土砂を計測する方法で行った。

土砂受箱は、幅30cm、高さ8cm、奥行き21cmの塩ビ製の箱で、雨水などが滞水しないように側面はメッシュ構造のものを採用した。

設置箇所は、のり面の向きが異なるA区間（南東向き斜面）とC区間（南西向き斜面）につ

いて、それぞれ2箇所の切土のり面を対象とした。各のり面には、切土状態が保たれているのり面の最下部（H）とその下方にある堆積土砂の最下部（L）に2つの土砂受箱を設置した。よって、全体では2区間×2のり面×2箇所の計8箇所で土砂移動量の把握を行った。

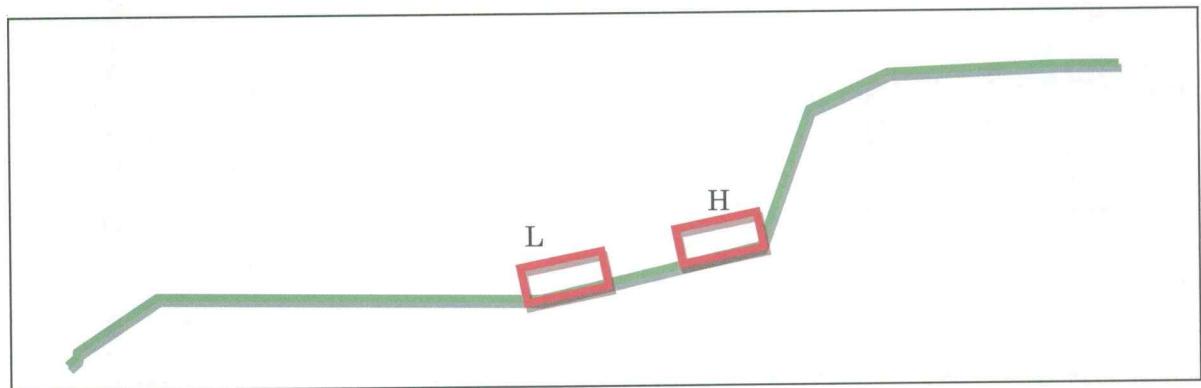


図 24 土砂受箱設置模式図



写真 6 土砂受箱の設置状況

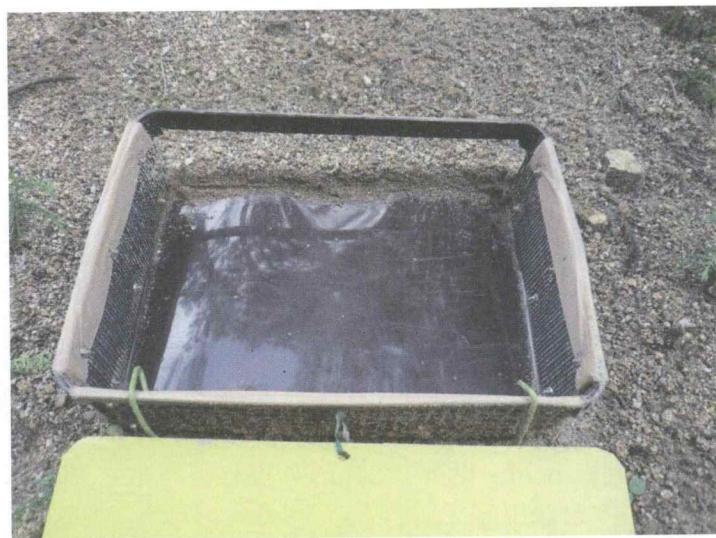


写真 7 土砂受箱内部の状況



写真 8 A 区間内での設置状況

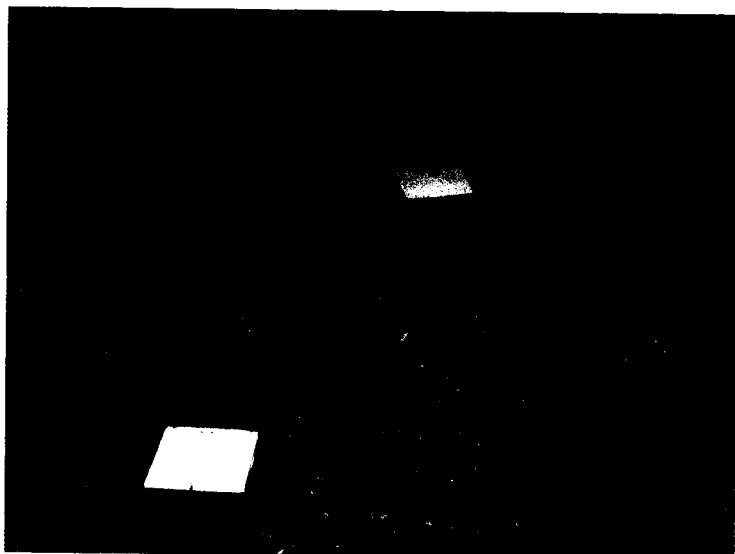
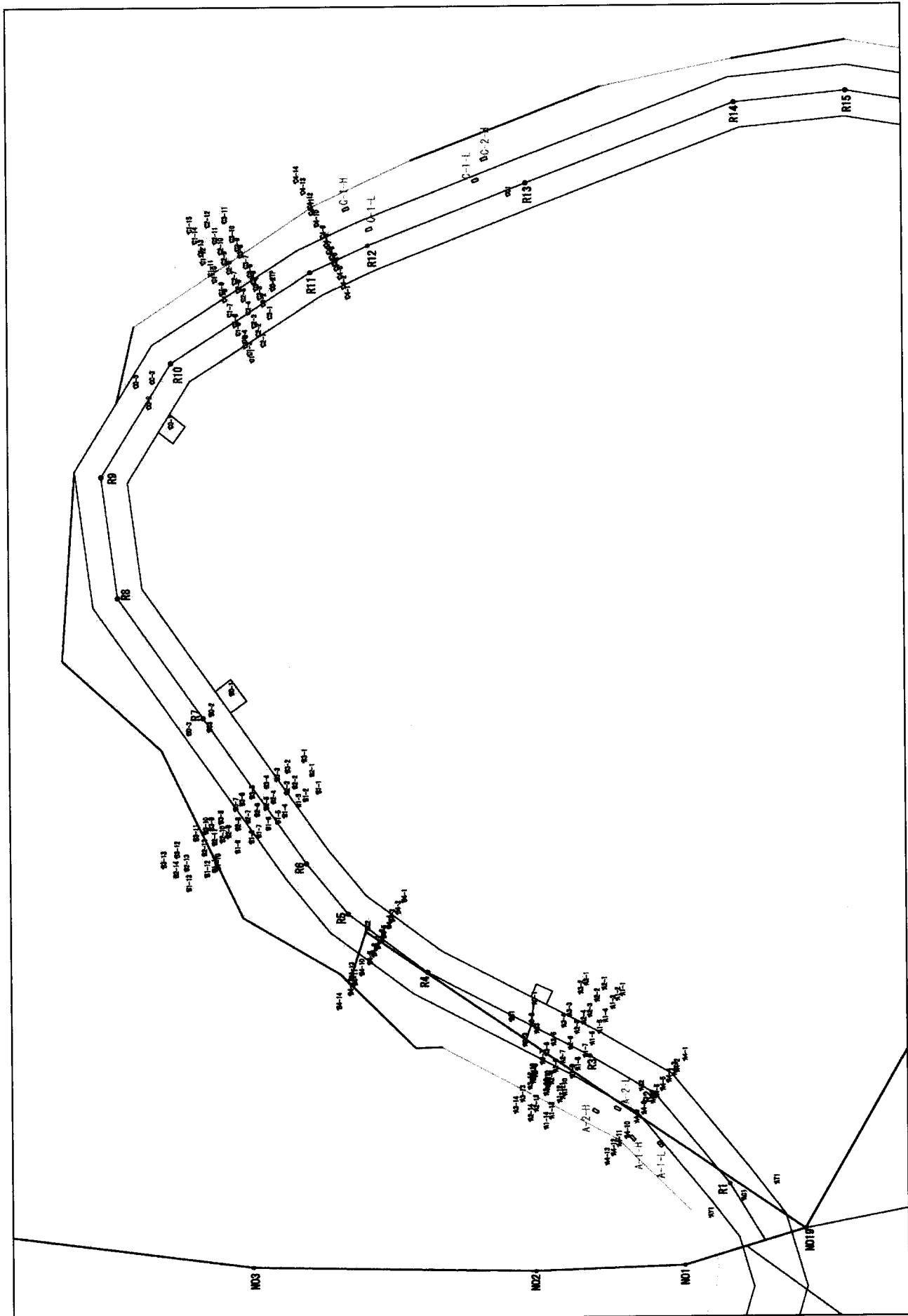


写真 9 C 区間内での設置状況



土砂受箱位置図

② 調査結果

流出土砂量は、2013年7月31日に土砂受箱を設置し、2013年9月14日、2013年11月15日、2014年4月15日、2014年6月25日の4回測定した。以下にその調査結果を示す。

流出土砂量(土砂受箱) 総括表(1)

水分条件：気乾重  
単位：g

	器具設置日	H25.7.31	H25.9.14	H25.11.15	H26.4.15	計
	土砂採取日	H25.9.14	H25.11.15	H26.4.15	H26.6.25	
	観測日数	45日間	62日間	151日間	71日間	329日間
	重量測定日	H25.9.23	H25.12.25	H26.4.27	H26.7.17	
A-1-H	天板上					
	容器内					
	総重量	1,729	2,496	944	1,112	6,281
	総重量/(日)	38.4	40.3	6.3	15.7	19.1
A-1-L	天板上					
	容器内					
	総重量	1,049	1,884	1,512	798	5,423
	総重量/(日)	23.3	30.4	10.0	11.2	16.5
A-2-H	天板上					
	容器内					
	総重量	769	886	5,290	2,430	9,375
	総重量/(日)	17.1	14.3	35.0	34.2	28.5
A-2-L	天板上					
	容器内					
	総重量	1,689	3,990	5,654	3,578	6,931
	総重量/(日)	37.5	64.4	37.4	50.4	21.1
C-1-H	天板上		1,674	3,618		
	容器内		3,370	6,686		
	総重量	270	5,044	10,304	1,286	11,590
	総重量/(日)	6.0	81.4	68.2	18.1	35.2
C-1-L	天板上					
	容器内					
	総重量	809	2,180	3,002	710	6,701
	総重量/(日)	18.0	35.2	19.9	10.0	20.4
C-2-H	天板上			1,300		
	容器内			5,810		
	総重量	134	116	7,110	782	8,142
	総重量/(日)	3.0	1.9	47.1	11.0	24.7
C-2-L	天板上					
	容器内					
	総重量	799	994	1,666	740	4,199
	総重量/(日)	17.8	16.0	11.0	10.4	12.8

A-1-H (H26.4.15 土砂採取)は土砂受箱転倒のため参考値

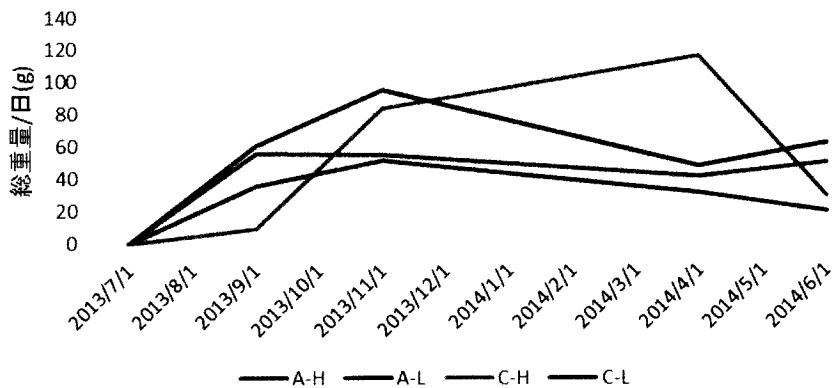
## 流出土砂量(土砂受箱) 総括表(2)

単位 : g

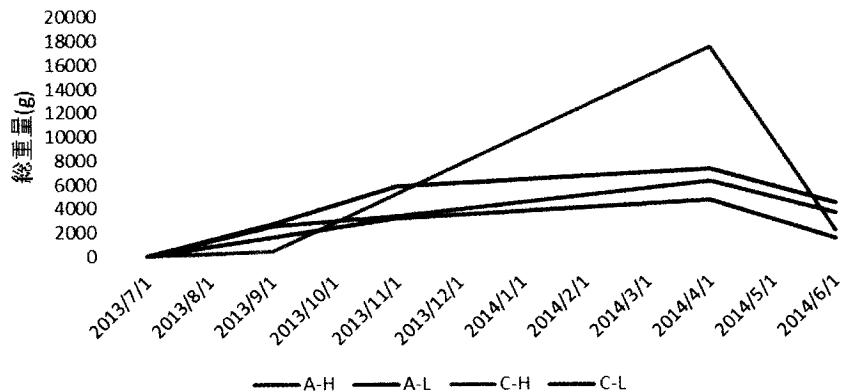
	器具設置日	H25.7.31	H25.9.14	H25.11.15	H26.4.15	計
	土砂採取日	H25.9.14	H25.11.15	H26.4.15	H26.6.25	
	観測日数	45日間	62日間	151日間	71日間	329日間
	重量測定日	H25.9.23	H25.12.25	H26.4.27	H25.7.17	
A-H 計	気乾重	2,498	3,382	6,234	3,542	15,656
	気重量/(日)	56	55	41	50	48
C-H 計	気乾重	404	5,160	17,414	2,068	25,046
	気重量/(日)	9	83	115	29	76
H 合計	気乾重	2,902	8,542	23,648	5,610	40,702
	気重量/(日)	64	138	157	79	124
A-L 計	気乾重	2,738	5,874	7,166	4,376	20,154
	気重量/(日)	61	95	47	62	61
C-L 計	気乾重	1,608	3,174	4,668	1,450	10,900
	気重量/(日)	36	51	31	20	33
L 合計	気乾重	4,346	9,048	11,834	5,826	31,054
	気重量/(日)	97	146	78	82	94

A-1-H (H26.4.15 土砂採取)は土砂受箱転倒のため参考値

### 土砂流出量の変化(総重量/日)



### 土砂流出量の変化(総重量)



この結果、総量では全体的に全期間を通して増加する傾向がみられており、のり面からの土砂供給が継続的に発生していることがうかがえる。しかし、最終観測（2014.6.25）については、期間が短いことと大きな降水がなかったことから、減少傾向にある。また、切土のり面直下（H）と堆積箇所（L）の差は顕著に表れなかつた。

一方、総重量を調査日数で除したもの（総重量／日数）では、冬期間（11月15日から翌4月15日まで）での生産量が若干少なくなっており、凍結・融解による土砂生産よりも降雨による土砂生産の方が大きいような傾向が見られた。

しかし、南西向き斜面のC-Hでは大量の土砂が捕捉されているが、この土砂は、のり面侵食により生産された土砂よりも、写真 11に示すように、凍結・融解によるのり肩の崩落によって生産された土砂が影響したためと考えられる。



写真 10 2014年7月31日のA-1-Hの土砂受箱の状況



写真 11 2014年6月25日のA-1-Hの土砂受箱の状況

## 2) 横断排水溝堆砂深調査

### ① 調査の目的

路面を流下する土砂は、下方に横断排水溝がある場合、その大部分は横断排水溝を経て林地へと移動する。この移動量は、共同研究である森林総合研究所が設置している試験施設（土砂受箱）で測定を実施している。

本調査は、この横断排水溝から流出する土砂と、路面及びのり面における侵食量調査との関連を把握するために行うもので、路面を流下する土砂が素掘りの横断排水溝を経るときに、どの程度の堆砂期間、どの程度の量が堆積するか、その変化量を把握するものである。

### ② 調査方法

調査方法は、路面及びのり面における侵食量調査と同様に、塩ビ製の測定ピンを用いて堆積及び侵食深を計測する方法で行った。

調査対象箇所は、A 区間、B 区間、C 区間、D 区間の最下端にある横断排水溝であり、それぞれ谷側、中央、山側の 3 点で調査を行った。また、調査期間は初回の 2012 年 6 月 8 日の測定値を初期値とし、2012 年 8 月 1 日、2012 年 10 月 18 日、2013 年 3 月 21 日、2013 年 7 月 31 日、2013 年 9 月 14 日、2013 年 11 月 15 日、2014 年 4 月 15 日の 8 回の調査を行った。ただし、D 区間については、2013 年 7 月 31 日の値を初期値とした。



写真 12 横断排水溝における堆砂深調査状況 (B 区間)



写真 13 横断排水溝における堆砂深調査状況 (D 区間)

### ③ 調査結果

各調査結果をそれぞれの初期値との差をまとめると以下の様になる。

#### 横断排水溝堆砂深変化

(初期値) - : 侵食 + : 堆積

ピン番号	第1回		第2回		第3回		第4回		第5回		第6回		第7回		第8回	
	H24.6.8		H24.8.1		H24.10.18		H25.3.21		H25.7.31		H25.9.14		H25.11.15		H26.4.15	
	測定値	測定値	1-2	測定値	1-3	測定値	1-4	測定値	1-5	測定値	1-6	測定値	1-7	測定値	1-8	
A O 1	20.0	20.8	-0.8	21.0	-1.0	21.2	-1.2	20.9	-0.9	21.7	-1.7	21.0	-1.0	20.6	-0.6	
A O 2	21.5	18.3	3.2	18.6	2.9	18.0	3.5	18.8	2.7	19.0	2.5	18.9	2.6	19.2	2.3	
A O 3	26.5	22.3	4.2	23.2	3.3	22.4	4.1	22.2	4.3	22.3	4.2	21.5	5.0	20.3	6.2	

(初期値) - : 侵食 + : 堆積

ピン番号	第1回		第2回		第3回		第4回		第5回		第6回		第7回		第8回	
	H24.6.8		H24.8.1		H24.10.18		H25.3.21		H25.7.31		H25.9.14		H25.11.15		H26.4.15	
	測定値	測定値	1-2	測定値	1-3	測定値	1-4	測定値	1-5	測定値	1-6	測定値	1-7	測定値	1-8	
B O 1	18.5	17.9	0.6	19.0	-0.5	19.9	-1.4	20.0	-1.5	19.4	-0.9	21.3	-2.8	21.4	-2.9	
B O 2	21.5	21.0	0.5	21.2	0.3	21.0	0.5	21.1	0.4	21.2	0.3	20.0	1.5	20.0	1.5	
B O 3	31.5	30.8	0.7	31.2	0.3	30.2	1.3	30.5	1.0	30.5	1.0	29.8	1.7	29.5	2.0	

(初期値) - : 侵食 + : 堆積

ピン番号	第1回		第2回		第3回		第4回		第5回		第6回		第7回		第8回	
	H24.6.8		H24.8.1		H24.10.18		H25.3.21		H25.7.31		H25.9.14		H25.11.15		H26.4.15	
	測定値	測定値	1-2	測定値	1-3	測定値	1-4	測定値	1-5	測定値	1-6	測定値	1-7	測定値	1-8	
C O 1	19.0	19.3	-0.3	19.4	-0.4	17.6	1.4	18.0	1.0	17.9	1.1	17.8	1.2	17.2	1.8	
C O 2	28.0	27.2	0.8	27.3	0.7	27.0	1.0	27.5	0.5	27.4	0.6	27.0	1.0	26.8	1.2	
C O 3	27.0	26.4	0.6	26.6	0.4	25.7	1.3	25.7	1.3	26.2	0.8	25.3	1.7	25.4	1.6	

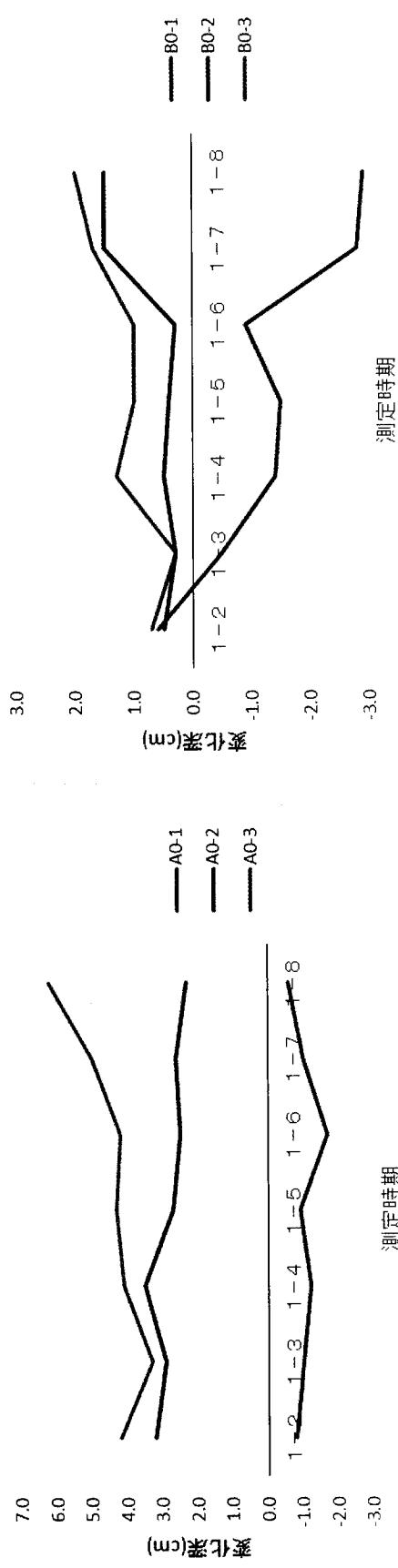
(初期値) - : 侵食 + : 堆積

ピン番号	第1回		第2回		第3回		第4回		第5回		第6回		第7回		第8回	
	H24.6.8		H24.8.1		H24.10.18		H25.3.21		H25.7.31		H25.9.14		H25.11.15		H26.4.15	
	測定値	測定値	1-2	測定値	1-3	測定値	1-4	測定値	1-5	測定値	1-6	測定値	1-7	測定値	1-8	
D O 1	-	-	-	-	29.6		25.9	3.7	25.3	4.3	24.0	5.6	23.5	6.1		
D O 2	-	-	-	-	23.9		19.5	4.4	18.7	5.2	16.8	7.1	16.2	7.7		
D O 3	-	-	-	-	21.8		18.0	3.8	17.2	4.6	15.4	6.4	15.5	6.3		

ただし、ピン番号の1が谷側、2が中央、3が山側である。

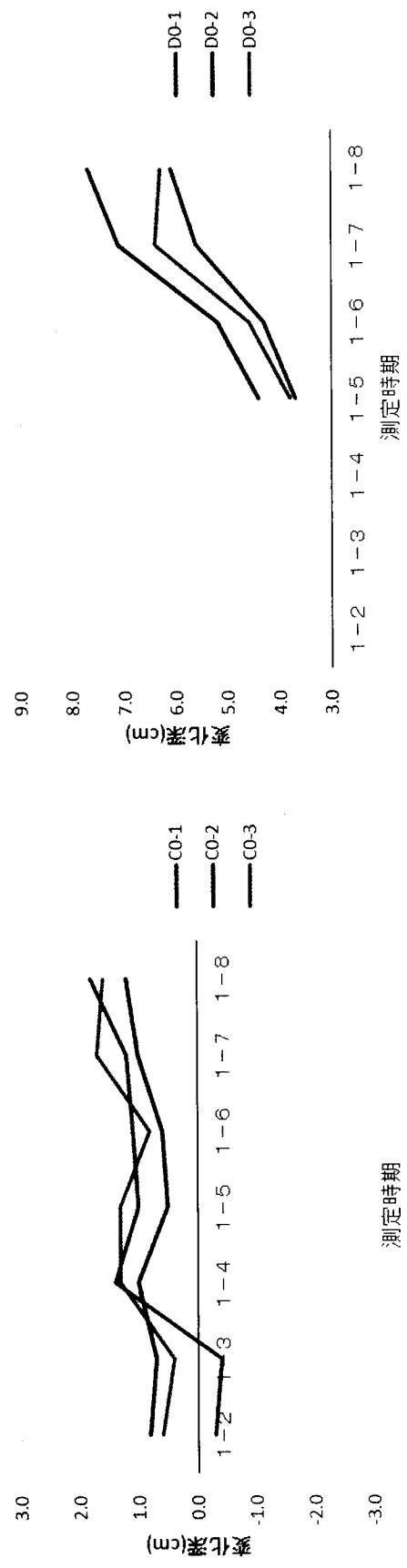
### A0横断溝の変化

### B0横断溝の変化



### C0横断溝の変化

### D0横断溝の変化



この結果から、全体的に谷側で堆積、山側で侵食の傾向が見られる。箇所別では、A 区間は概ね土砂収支が均衡していて、B 区間では土砂の移動量が増加しており、C 区間及び D 区間では徐々に土砂の堆積が増えている傾向が見られた。

特に、D 区間ではその増加傾向が他と比較して大きく、5cm を超えて堆砂している。これは、D 区間は他と比較して植被率が低く、傾斜が急峻であることが要因の一つであると想定される。

### 3) 路面流出土砂量調査（森林総研調査）

#### ① 流出土砂量及び流出水量

各調査区からの流出土砂量は、それぞれの横断排水溝の末端から流出した土砂を一定期間毎に土砂受箱で捕捉し、強熱減量してその重量を求めた。同様に流域の出口で捕捉した土砂量も同様な方法で求めた。測定期間は、2012 年 7 月 20 日～2013 年 11 月 26 日である。

図 25 の降雨量及び流出土砂量に示すように、全計測期間を通じて流域出口 (W) で最も多く、次いで枝条被覆のない A 区 (S1)、枝条被覆のある C 区 (S3)、同じく枝条被覆のある B 区 (S2) の順となった。特に枝条被覆のない A 区は、枝条被覆のある B 区及び C 区と比較して、路面長が短いにもかかわらず極めて流出土砂量が多かった。

これは、B 区の切土のり面から流出した土砂は路面の枝条被覆によって捕捉されたため、横断排水溝にまで到達せず、B 区の土砂流出量が少なかったと推測される。

また、全調査区とも降水量の多い 8 月～10 月にかけて多いが、2012 年では降水量の少なくなる秋期から冬期にかけては減少し、2 月にはほとんど土砂流出は認められなくなった。しかし、2013 年では秋期から冬期にかけて降水量が多く、全調査区とも 2012 年の同期よりも流出土砂量は多い傾向が見られた。しかし、どの調査区も観測開始時期に比べて 1/10 程度であった。

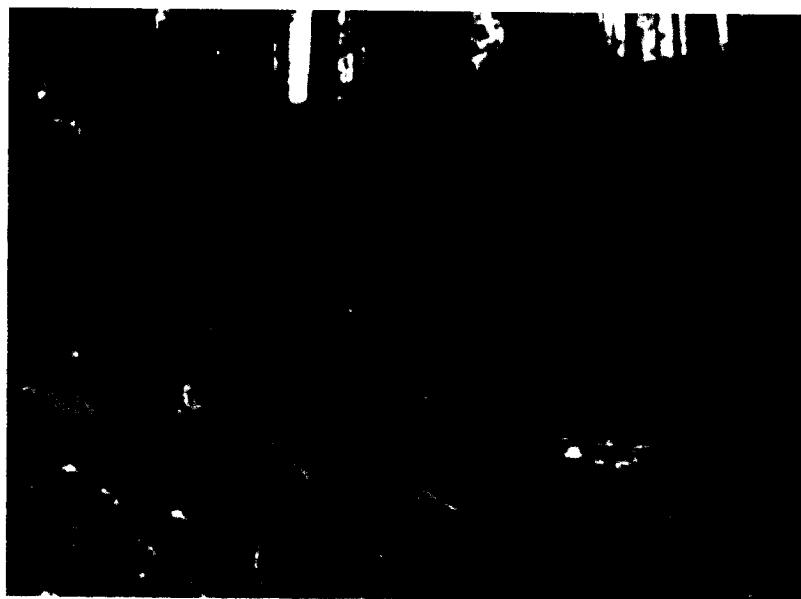


写真 14 調査流域及び測定機器の配置  
調査流域全景（森林総研）



横断排水溝からの流出土砂受け装置（森林総研）



水土流出観測施設（森林総研）

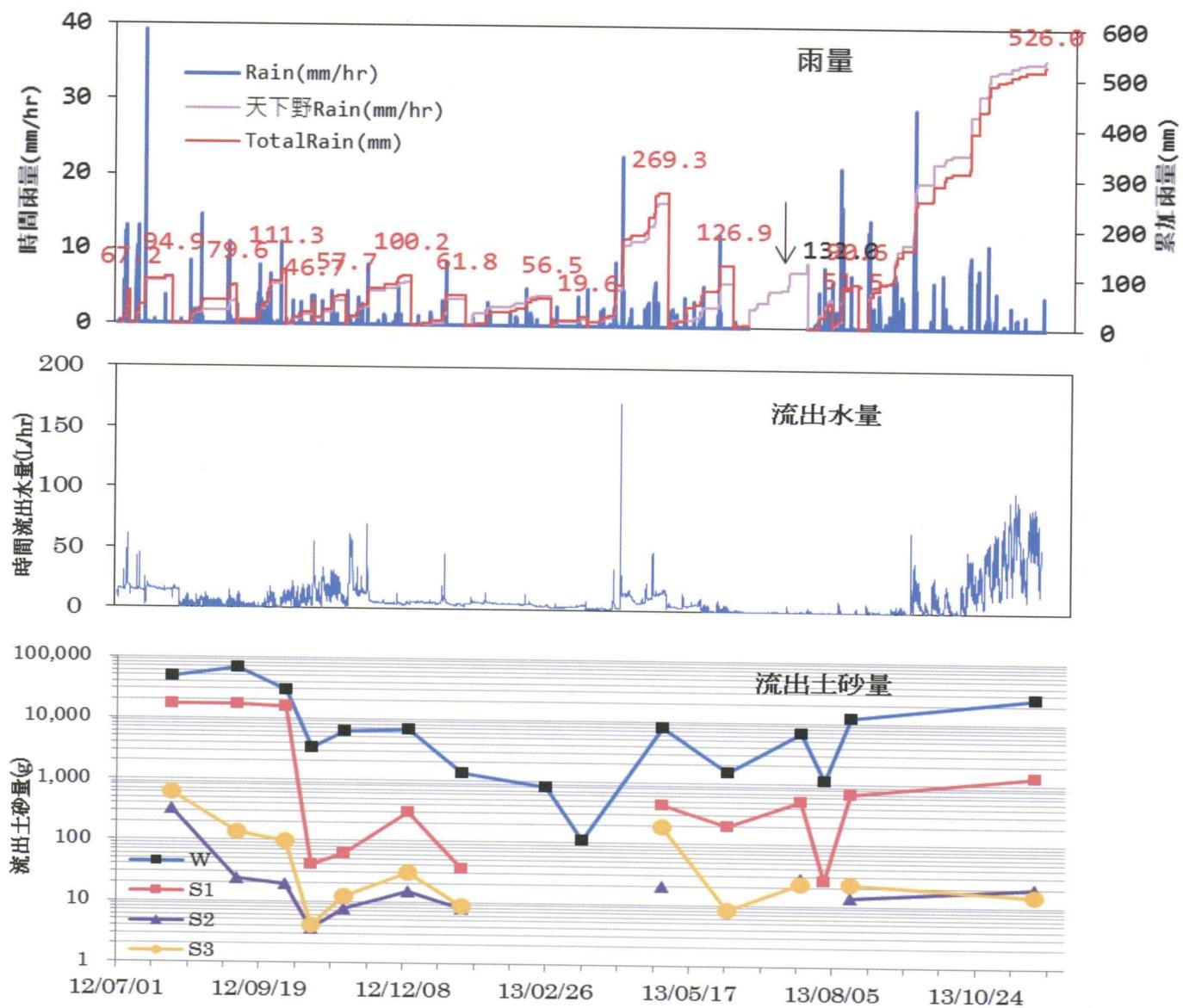


図 25 降雨量、流出水量及び流出土砂量（森林総研）

## ② 流出土砂の粒度分布調査

図 26 に流出土砂の粒度分布図を示す。流出土砂の粒度分布は、比較的流出土砂の多かった、2012年8月1日、9月6日、10月3日の3期間の流出土砂で求めた。

流出土砂の粒度分布は、流域出口(W)と比較して、枝条被覆のあるB区(S2)及びC区(S3)の平均粒径は小さくなるが、枝条被覆のないA区(S1)では大きくなつた。そのことは、枝条被覆があると掃流力が減殺され、比較的大きな砂粒の流出が抑制されることや枝条被覆によって捕捉されることが示唆される。

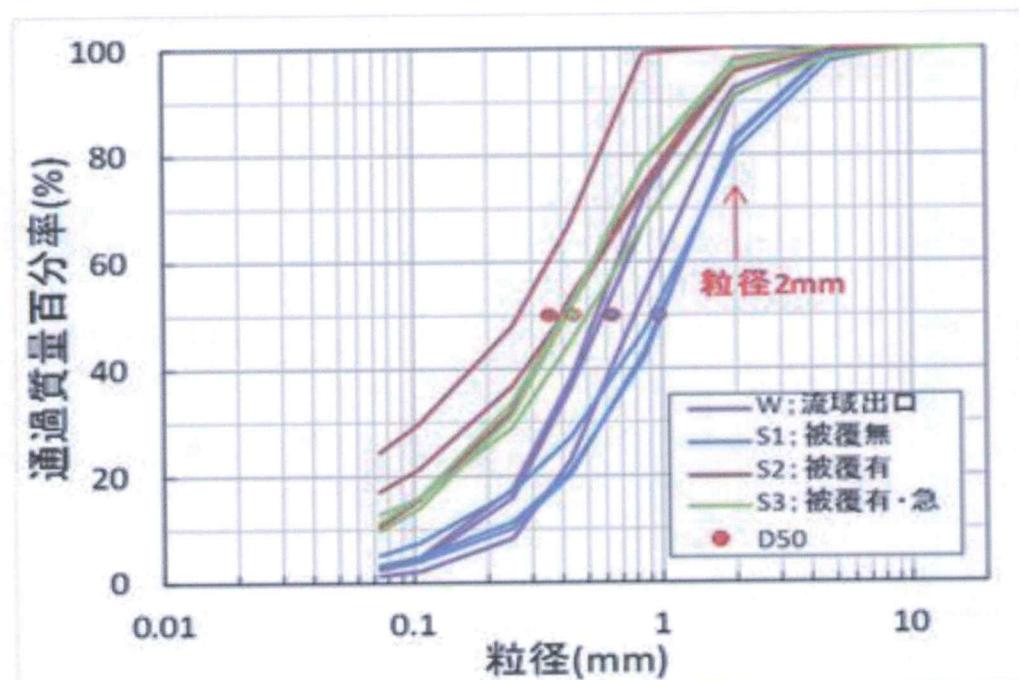


図 26 流出土砂の粒度分布（森林総研）

#### 4) ガリー侵食痕の変化 (D 区路面)

D 区は、等高線方向の森林作業道同士を結ぶ連絡道として作設されたため、勾配が急で、最も激しく表面侵食が発生し、横断排水溝における土砂の堆積量の変化も大きかったことから、その経年変化を測定した。その結果を示すと下図のとおりである。

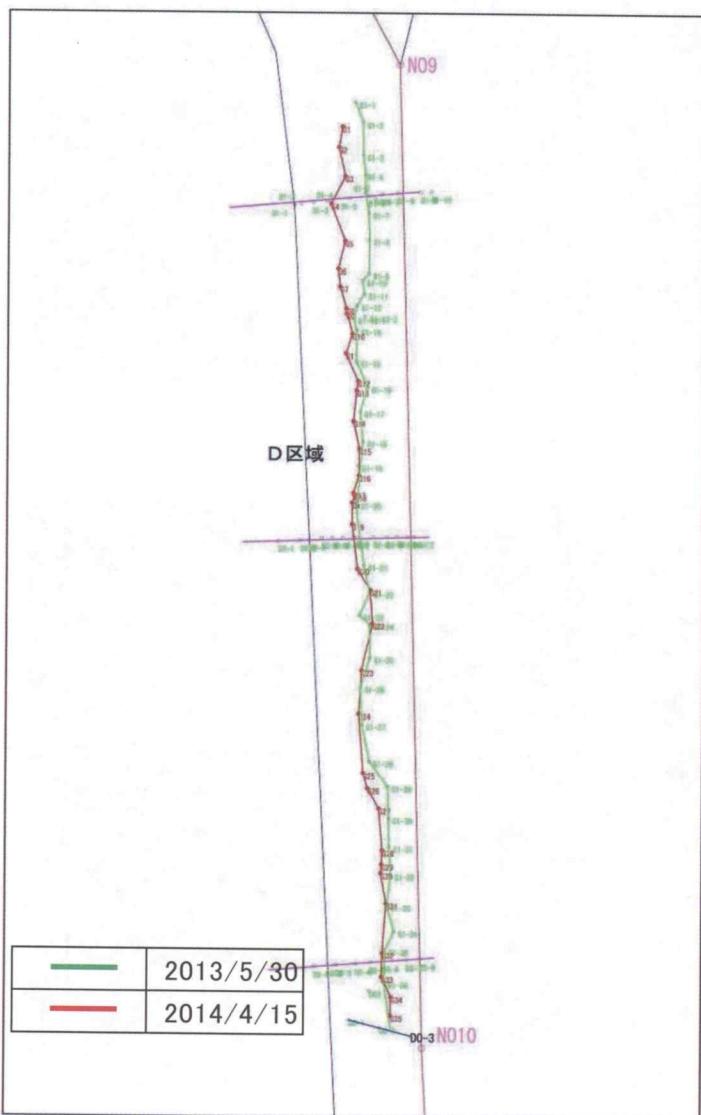


図 27 ガリー侵食位置図

D 区は、尾根部に設けられた箇所で、周辺からの枝条等の供給が、斜面中部である他の区間と比較して乏しい。このことから、作業道作設後 3 年が経過する現在でも、路面の被覆率が低い状態である。また、縦断勾配が急峻であるため、地表流が発生した場合の侵食力は、他の区間と比較し高いことがうかがえる。このことから、調査開始時点からガリー侵食が確認された。

今回の調査では、侵食経路は時間の経過とともに微妙に変化しており、縦侵食が顕著に進行している状況は確認されなかった。今後も時間の経過とともに侵食は進展することが想定されるが、降雨の状況がこの 2 年間と同様であれば、急激な侵食によって路体破壊にまで至る危険性は低いものと思われる。

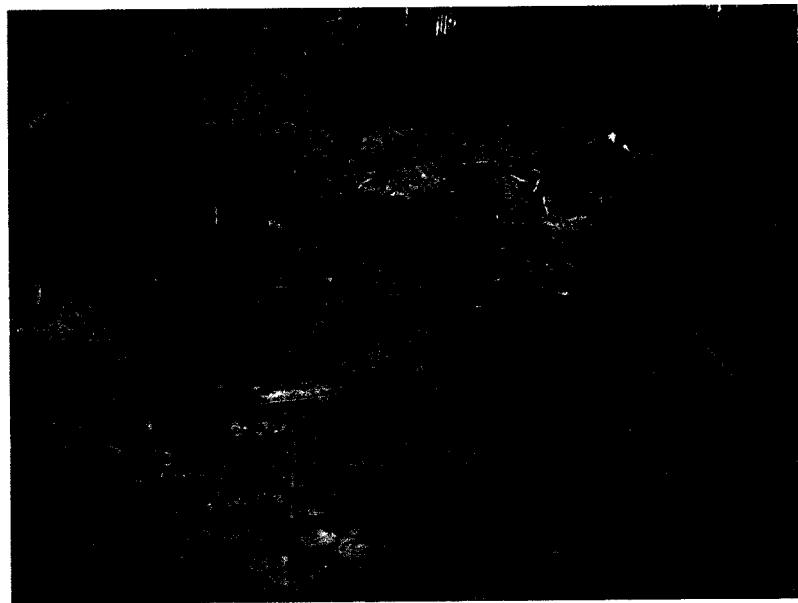


写真 15 D 区間の全景



写真 16 D 区間の表面侵食の状況

### 第3項 斜面崩壊調査

#### (1) 路盤変動調査

##### ① 調査方法

路盤変動調査は、路肩崩壊の発生した箇所を対象として、その後の地形変動を把握するために行った。崩壊の発生した場所は、図 28 の調査箇別位置図に示すように調査地下流部に位置する森林作業道である。

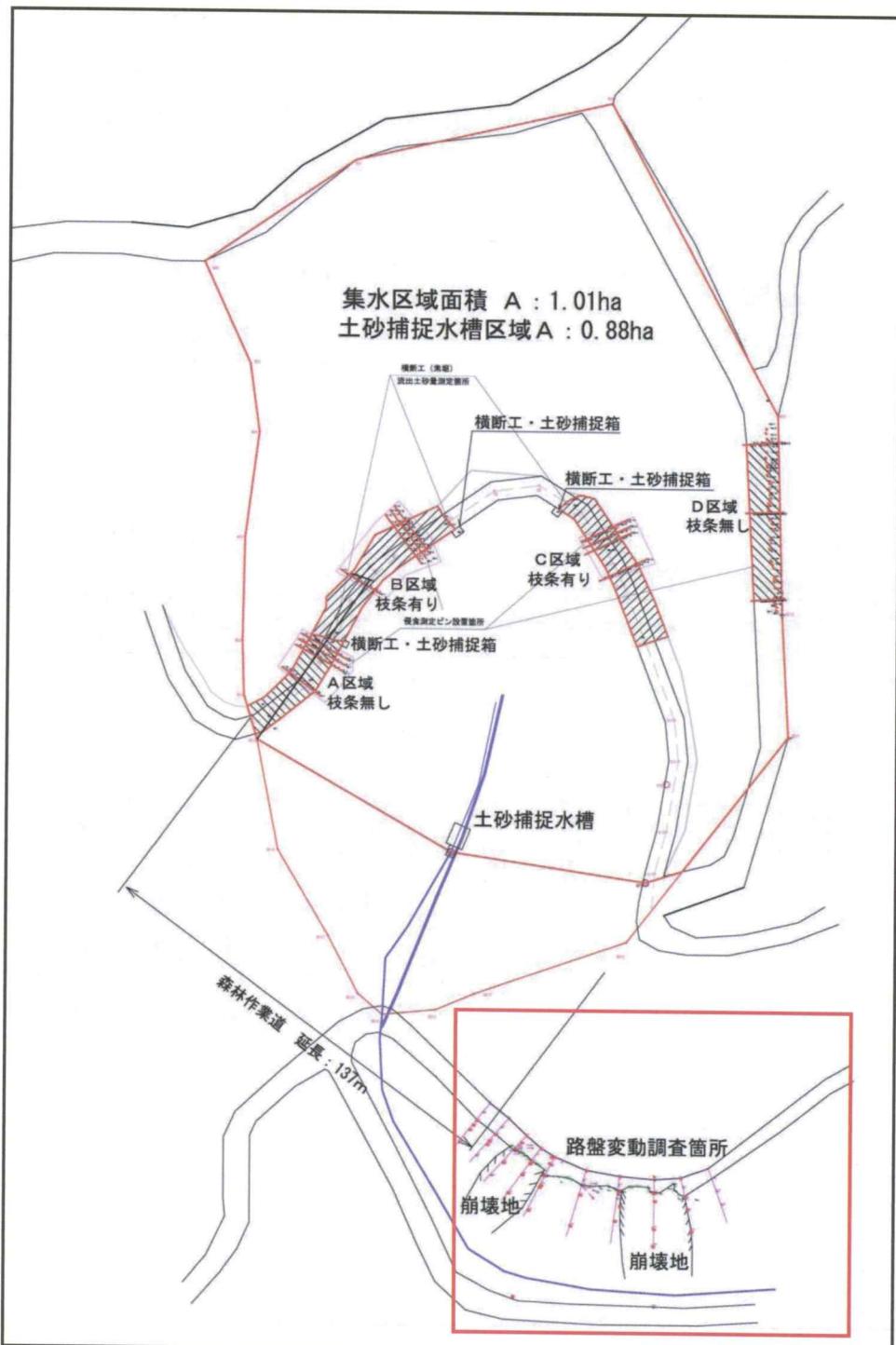


図 28 調査箇別位置図 (再掲)

路盤変動調査箇所縦断面図

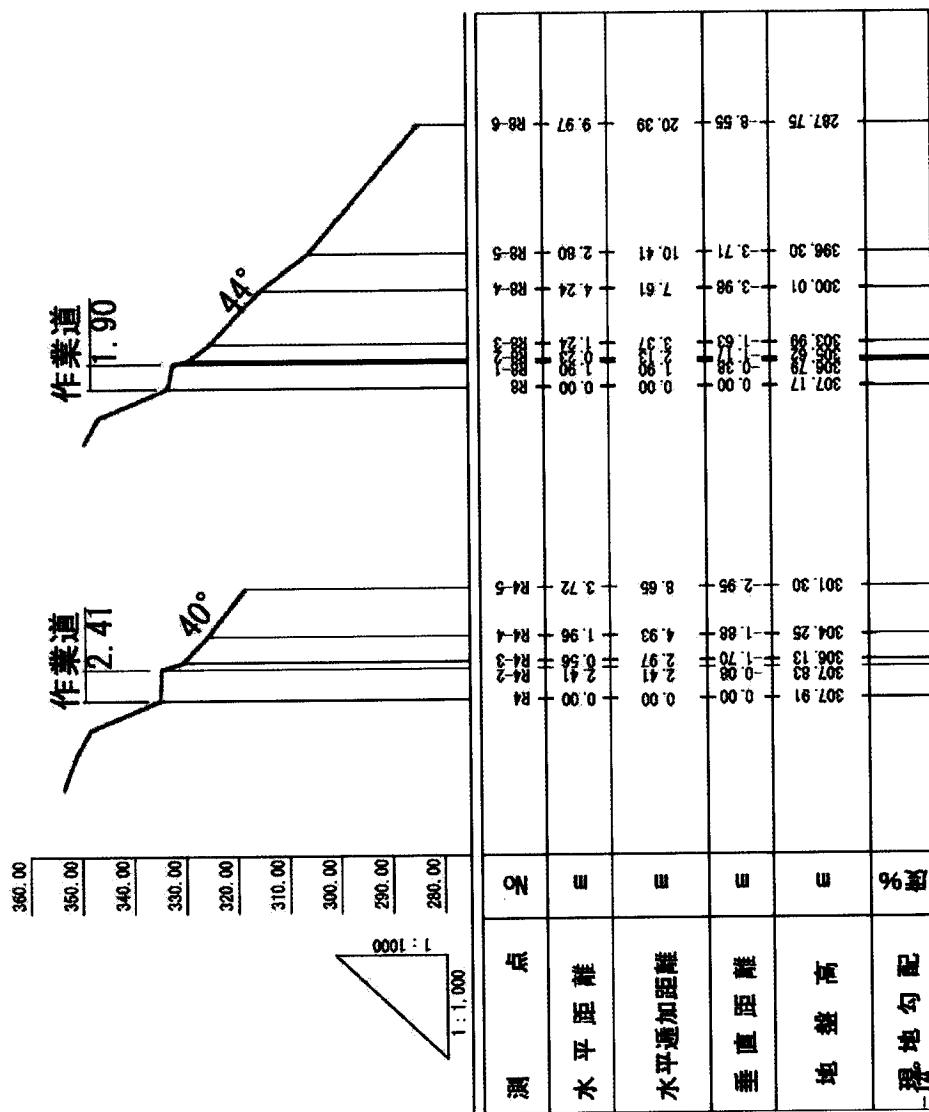


図 29 路盤変動調査箇所の縦断面図

この路肩崩壊が 2 箇所発生した場所に、10 本の縦断側点を設け、各杭の移動量を把握することで、崩壊地の変動を把握した。

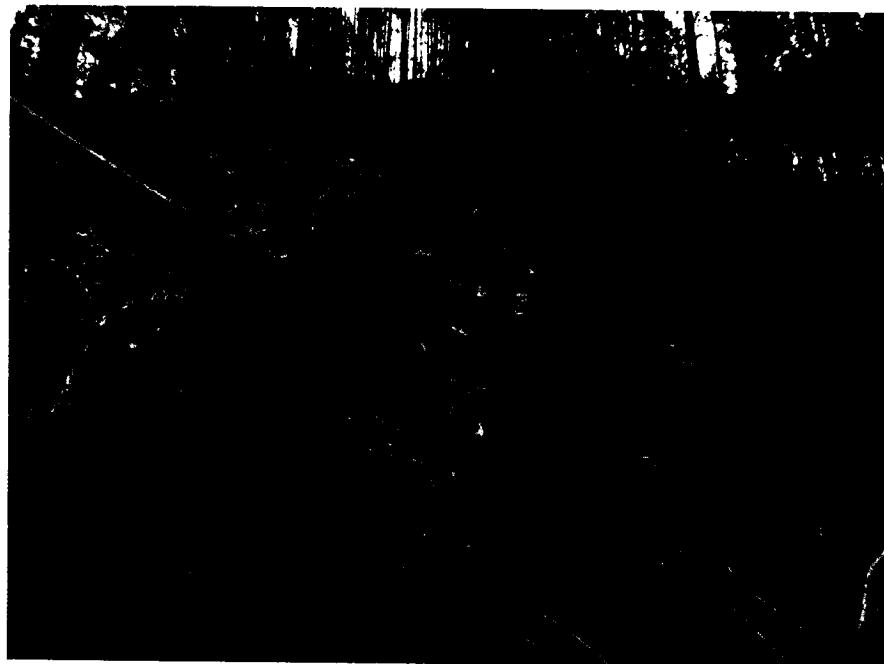


写真 17 路肩崩壊箇所（大）の状況

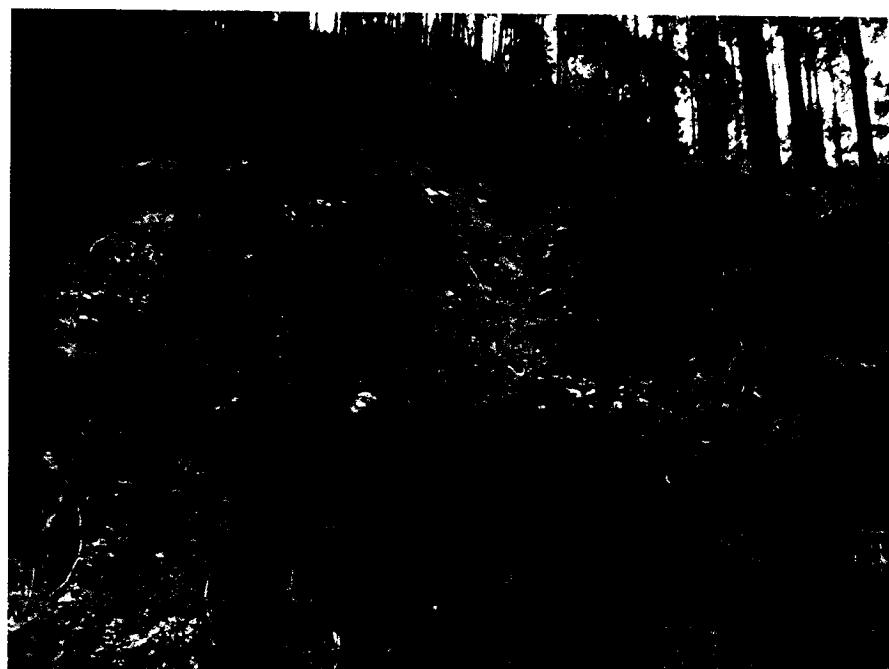


写真 18 路肩崩壊箇所（小）の状況

## ② 調査結果

測量は 2012 年 10 月 18 日に崩壊地の初期データの収集を行った。その約 7 ヶ月後の 2013 年 5 月 30 日に第 2 回目の測量、1 年 6 ヶ月後の 2014 年 4 月 15 日に第 3 回目の測量を行った。その結果を図示すると次図のとおりである。

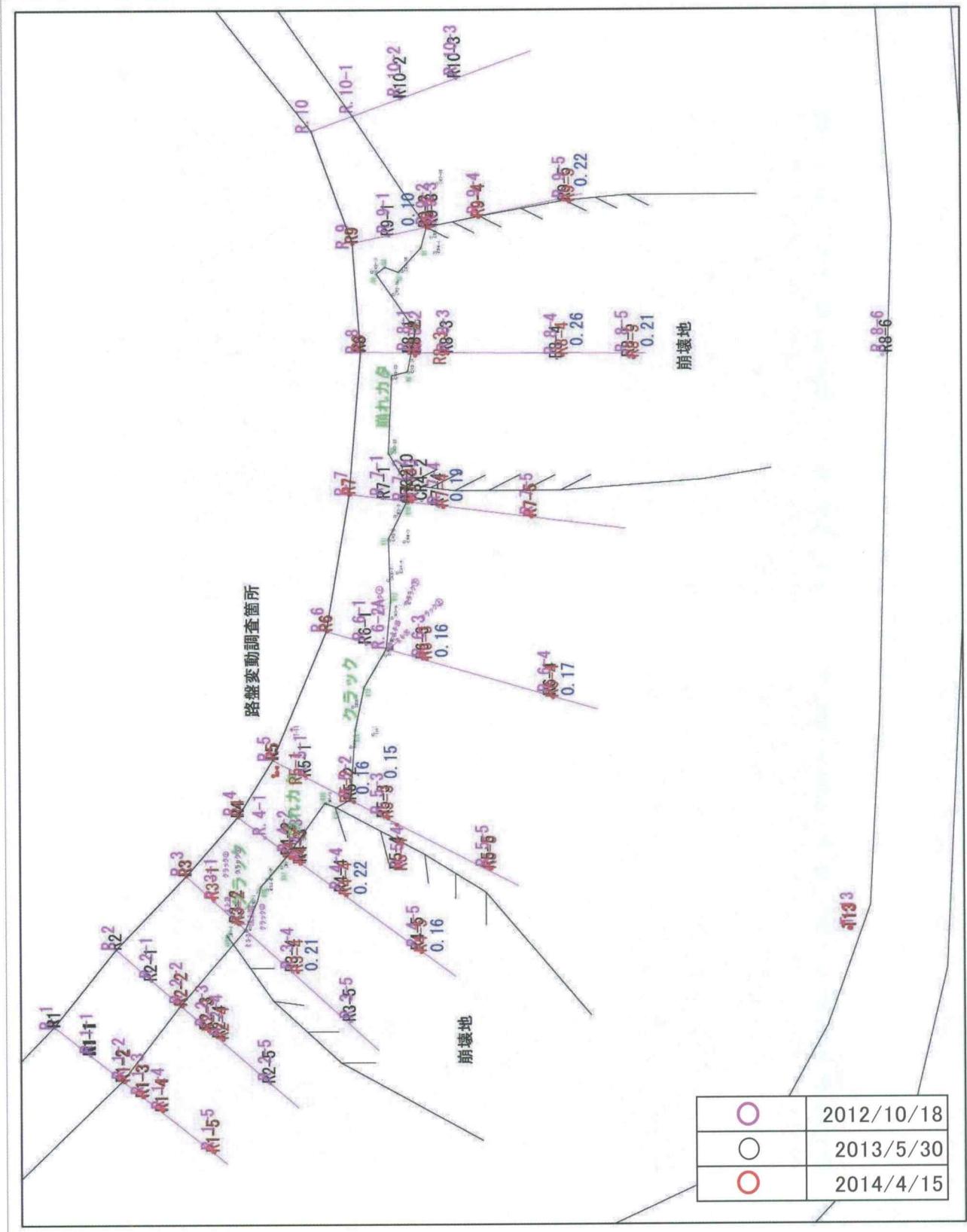


図 30 路盤変動調査結果

第2回目の測量では、杭の変動は概ね測量誤差の範囲であったが、第3回目の測量では12本の杭に10cmを超える移動が見られた。それらの移動量をまとめると次表のとおりである。

表 14 移動した杭の移動量集計表

杭No.	移動量(m)
R3-4	0.21
R4-4	0.22
R4-5	0.16
R5-2	0.16
R5-3	0.15
R6-3	0.16
R6-4	0.17
R7-4	0.19
R8-4	0.26
R8-5	0.21
R9-2	0.10
R9-5	0.22
平均	0.18

これらの杭は、すべて斜面下方に移動しており、徐々に斜面の崩落が進行していることがうかがえる。しかし、崩壊した斜面及びその上部についても、大きな拡大崩壊や新たな崩壊地の発生は見られなかった。また、上部のクラックについても大きな変動は見られなかつたが、今後斜面の移動に伴い一気に滑落することが危惧される。

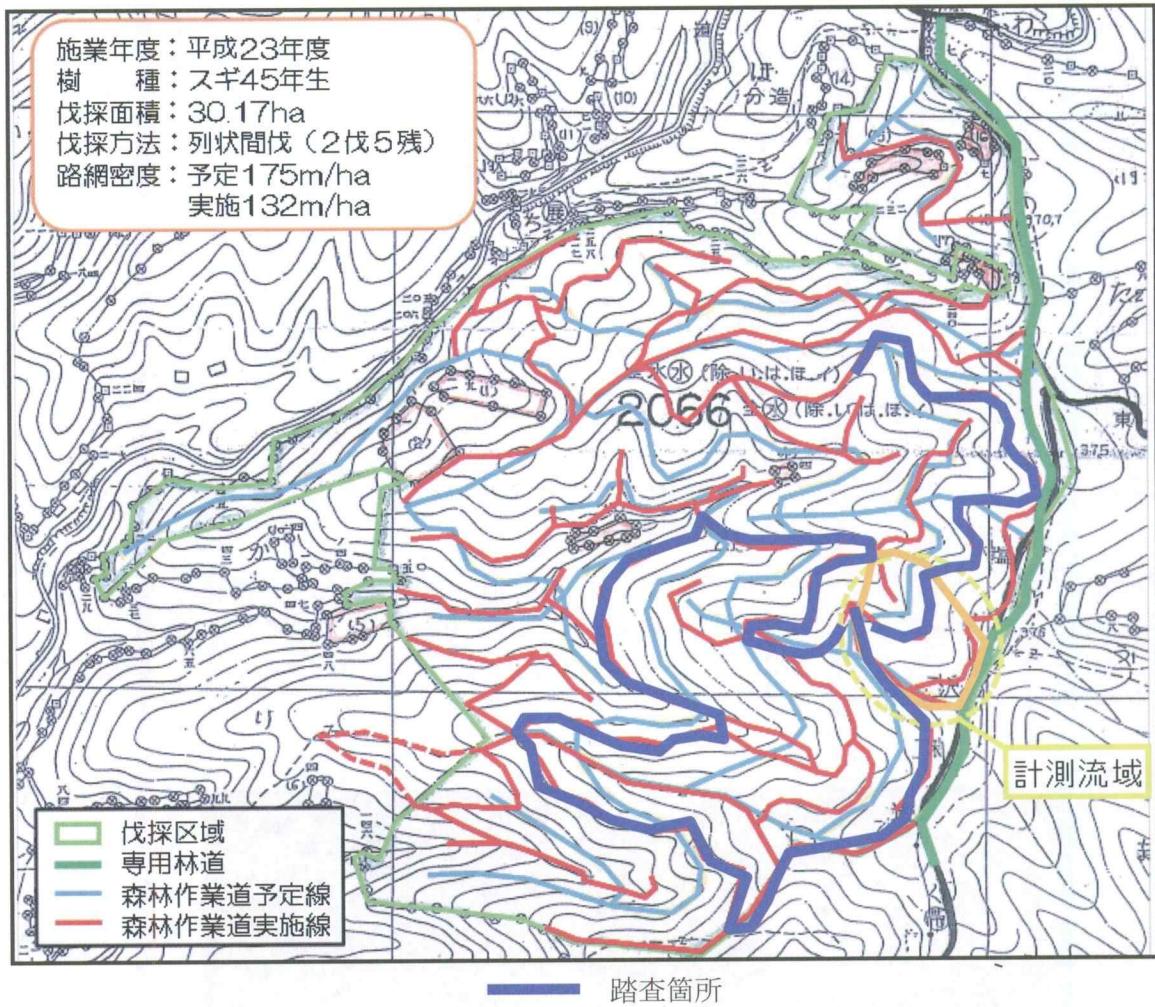


写真 19 崩壊地上部のクラックの状況

## (2) 既存斜面崩壊地踏査

### ① 調査方法

調査地周辺の作業道を踏査し、路肩崩壊、切土のり面の崩壊、路面侵食等、水土保全上留意すべき事象について把握した。調査方法は、既存の作業道を踏査し、写真撮影等を中心に行った。以下に踏査箇所を示す。



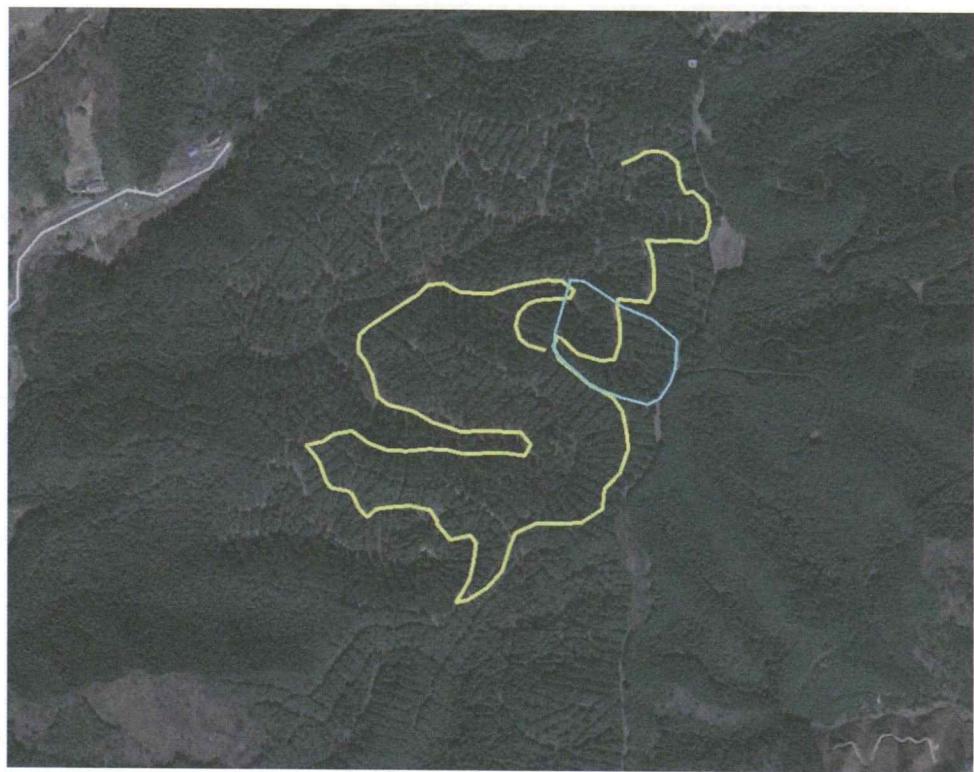


図 32 踏査箇所位置図 (GPS による軌跡)

## ②調査結果



写真 20 路肩箇所の侵食

雨水等の集中により路肩部分の土砂が流出した箇所。盛土部に丸太柵による補強が行われているが、柵間から土砂が流出したことが要因とみられる



写真 21 横断排水溝谷側の侵食  
素掘りの横断排水溝の流末部が侵食  
を受けている状況。横断排水溝流  
部が盛土となっていることから侵食  
が進んだものと思われる



写真 22 上写真の横断排水溝の状  
況



写真 23 盛土箇所におけるクラック  
の発生状況

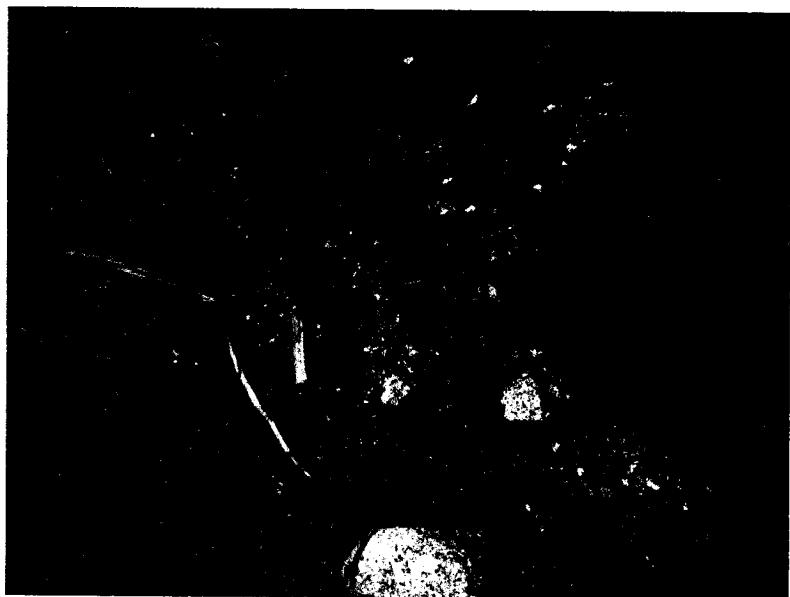


写真 24 クラックの拡大写真

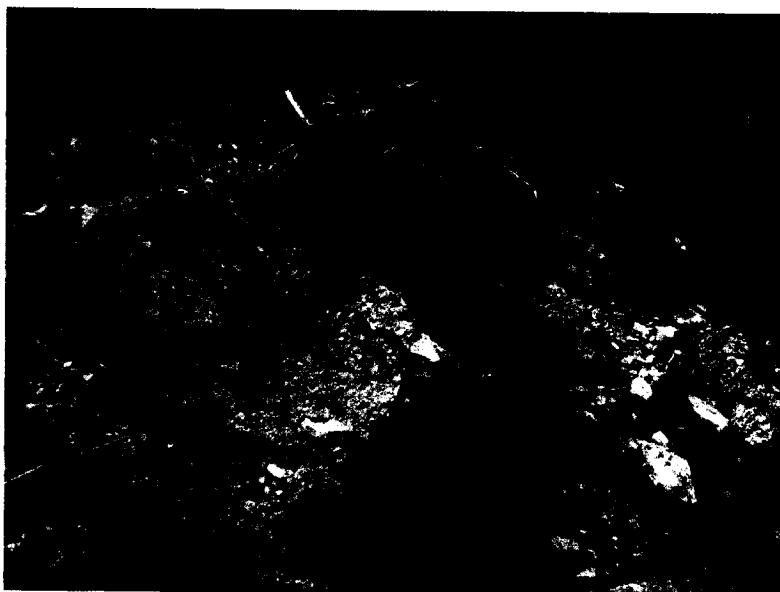


写真 25 路肩崩壊下流側の状況



写真 26 路肩崩壊上流側の状況



写真 27 路肩崩壊の対岸からの状況



写真 28 路肩崩壊の近景



写真 29 路肩崩壊の状況  
立木が残存している



写真 30 路肩崩壊の状況  
立木に横木を渡し柵工の効果を期待したが、土砂が中抜けした

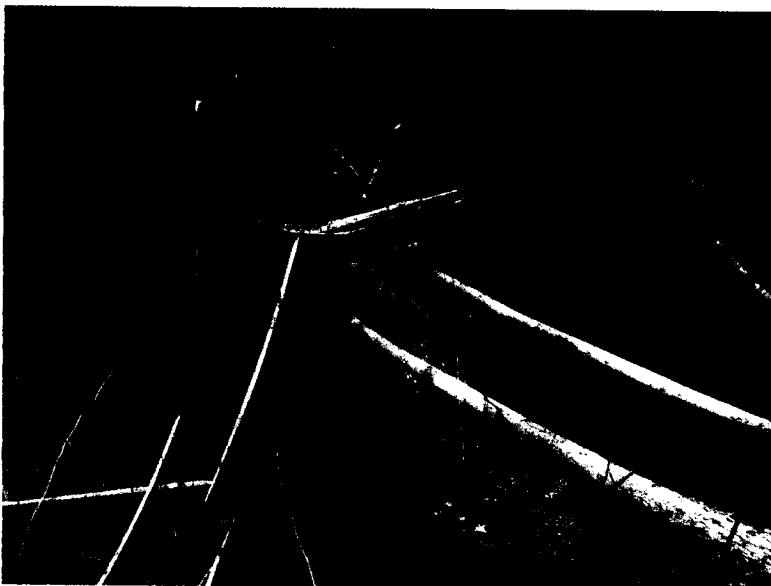


写真 31 風倒木の状況  
沢沿いまたは、2伐により空間が開けた箇所などで多く見られた。根系は浅い箇所で広がっており、深根の発達が見られない



写真 32 路肩崩壊の対岸からの状況



写真 33 路肩崩壊の近景



写真 34 路肩崩壊箇所から上流に  
続くクラックの状況



写真 35 切土のり面の立木の崩落



写真 36 切土のり面の根株の崩落

以上の様に、当該森林作業道では主として盛土箇所で崩落が発生していたが、一部には切土のり面の崩壊とそれに連動して立木や根株の崩落も見られた。

盛土に際しては、柵工等の路肩保護工を設置して作業道の補強に努めているが、降雨によって柵工の横木の隙間から土砂が流出し、中抜け状態となっている箇所も見られた。

なお、盛土の崩壊が発生している箇所の多くは、2伐5残の「2伐」箇所で発生している傾向が伺えた。また、盛土の状態が同様であっても、上空が開けている2伐箇所では、上木が残っている箇所と比較して侵食が早く進行することが想定される。これが2伐箇所での崩壊の発生と関係している可能性がある。

#### 第4項 関連林業地実態調査（長野県松本地区）

##### （1）調査目的

昨年度から茨城県常陸太田試験地において、間伐等の森林施業や森林作業道の開設が水土保全機能に及ぼす影響について調査・観測を実施してきたが、常陸太田試験地とは異なった地形・地質、気象条件、間伐方法、森林作業道の開設状況等における水土流出の実態を現地踏査し、比較検討を行う。

##### （2）調査地の概要

次ページの調査路線位置図に示すように、松本地区の調査地は長野県松本市の西南部に位置している。岩質は珪質泥岩や泥岩を基質とし、その中にチャート、砂岩、凝灰質泥岩が混在している。地層は、森林作業道の開設地では流れ盤となっている。山腹斜面の平均傾斜は27°で、常陸太田試験地よりも急傾斜であるが、谷密度は常陸太田試験地よりも小さい。標高は1000m～1200mで、常陸太田試験地よりもかなり高標高に位置している。従って、常陸太田試験地よりも最低気温は低いが、平均気温を見るとあまり差は認められない。降水量は1100mm程度で、常陸太田試験地よりも200mm程度少ない。林況はカラマツ、アカマツ、ヒノキが主体で、一部にスギも混在している。

間伐方法は、常陸太田試験地が列状間伐（2伐5残）であるのに対して、松本地区は定性間伐で実行されている。

松本地区の森林作業道は平成22年に開設された。森林作業道配置図に示すように、尾根部には高低差を克服するため、縦断勾配が急な連絡用の道（連絡部）が開設され、そこから等高線方向に波形の集材用の道（集材部）が開設されている。森林作業道の縦断勾配は、11～30%で、幅員は3.0～3.8mである。一部の盛土部分には丸太を利用した路肩保護工が設置されている。

切土のり面の高さと勾配は、それぞれ連絡部では0.6～3.0m、78～83°、集材部では0.5～2.6m、76～80°である。

なお、表15には松本地区及び常陸太田試験地の地形・地質、植生、森林施業、森林作業道等の概要をまとめて対比させて示している。



図33 調査路線位置図

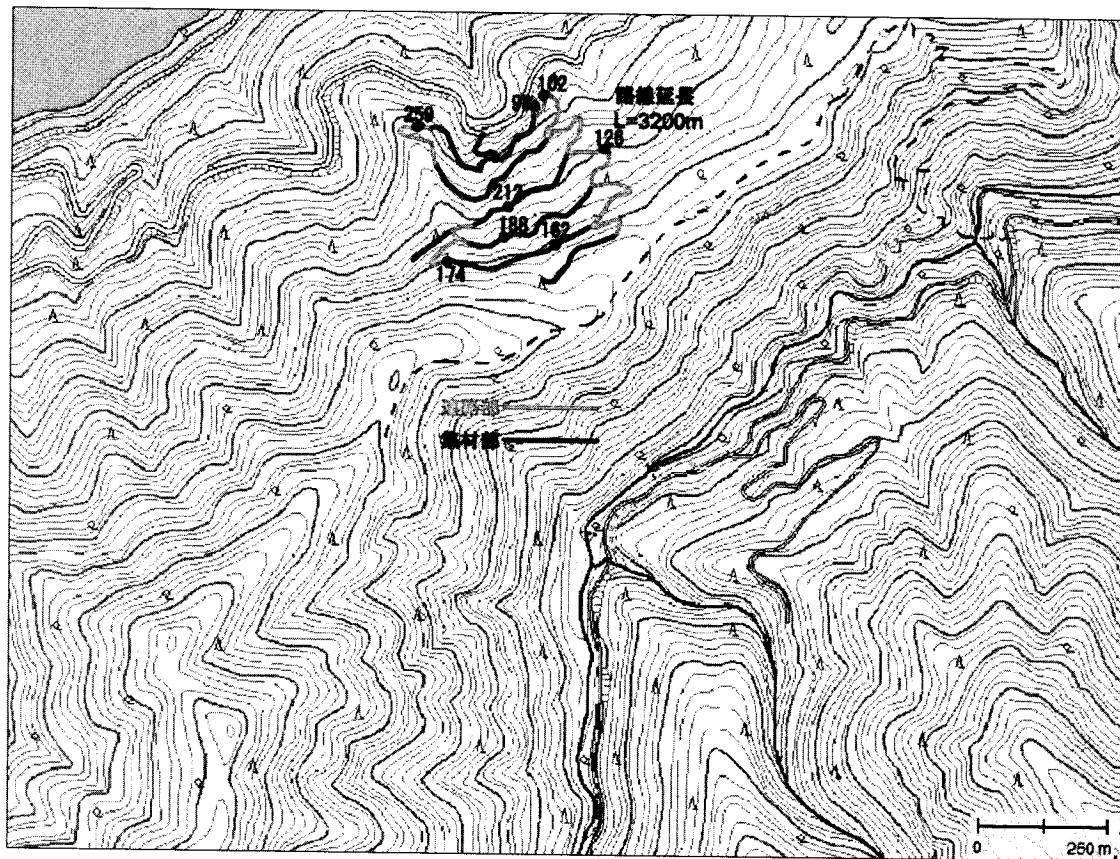


図 34 森林作業道配置図

表 15 調査地の概況（常陸太田との対比）

調査地		長野県松本地区	茨城県常陸太田試験地
位置	所在地	長野県松本市	茨城県常陸太田市
	流域	信濃川～千曲川～犀川～梓川 右岸	久慈川～山田川左岸
地形	地形分類	大起伏山地（谷密度小）	小起伏山地（谷密度大）
	標高	1020～1180m	240～360m
	平均傾斜	27°	23°
地質	年代	中生代ジュラ紀	中生代前期白亜紀
	岩相	砂岩・泥岩互層（領家變成帯） 流れ盤	阿武隈花崗岩
植生	林況	カラマツ・アカマツ・ヒノキ 820～1100 本/ha	スギ・ヒノキ 1000～1500 本/ha
気象	年降水量	平均 1102 mm	平均 1315 mm
	最大	日 107 mm、時間 21.5 mm	日 158.5 mm、時間 54.0 mm
	気温	平均 11.3°C 最高 35.1°C、最低 -17.3°C	平均 12.8°C 最高 35.8°C、最低 -10.6°C
森林施業	施業主体	財産区	茨城森林管理署
	伐採方法	定性間伐	列状間伐（2伐5残）
	搬出方法	グラップル	ワインチ付グラップル
作業道	総延長	3211m	5280m
	密度	238m/ha	173m/ha
	幅員	3.0～3.8m	3.0m程度
	縦断勾配	11～30%	5～30%
	走行車両	フォワーダ	フォワーダ
	施工	盛土・締固めによる工法	盛土・締固めによる工法

注) 気象統計期間: 2003-2012

観測所（松本）: 松本今井

観測所（常陸太田）: 中野（降水量）・常陸大宮（気温）

### (3) 調査結果の概要

#### 1) 路面の状況

平成 25 年 6 月 6 日に松本地区の森林作業道を踏査した。それによると、路面の土は砂質土に礫質土が多く混在しており、透水性は比較的良好であると推察される。当該調査区間に設置された横断排水溝は、素掘り排水溝及び丸太排水溝がそれぞれ 1 箇所ずつしか設置されていないにもかかわらず表面侵食はそれほど顕著に見られないのはそのためと考えられる。一部の路面には落葉の堆積や造林樹種の稚樹及び草本の侵入が見られ、路面が侵食に対して比較的安定しているように見受けられる。しかし、同一な傾斜でしかも路線長が長い箇所では、その区間に横断排水溝が設置されていないため、地表流によるやや深い侵食溝も見られた。また常水のある渡河部には丸太による洗越工が施工されているが、大きな洗掘は生じていない。

#### 2) 切土のり面の状況

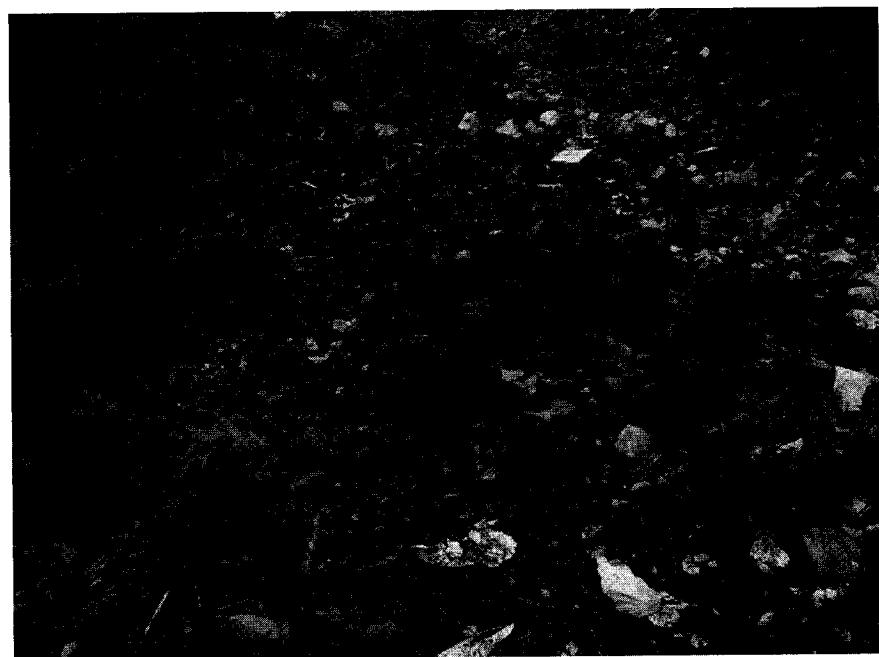
切土のり面が礫質土の場合は、凍結・融解等に起因して崩落し、のり面末端に堆積している箇所もあった。さらにその一部は路面中央にまで散乱している箇所も見られた。しかし、のり面の勾配は開設当初と比較して余り変化がないように思われる。一方、切土のり面が砂質土の場合、雨水等により侵食されてのり面末端に堆積し、のり面勾配が当初よりも緩和されている箇所も見られた。また、切土のり面の上部斜面が急傾斜の場合、山腹斜面が小崩壊している場所も見られた。

#### 3) 盛土のり面（路肩）の状況

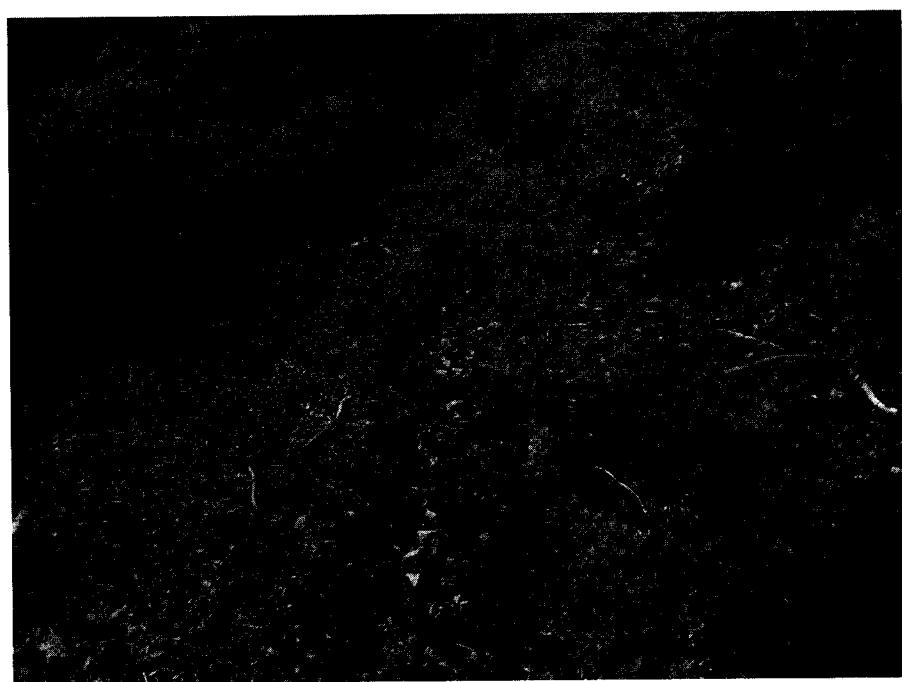
丸太利用の路肩保護工を設置してある箇所では、路肩の侵食や崩壊はあまり見受けられなかったが、森林作業道が尾根部の急傾斜斜面を横断する箇所でのり肩崩壊が 1 箇所見られた。その要因として地形・地質の影響や盛土部分の締固め不足のほか、盛土斜面下部に生立していた立木や間伐木の伐根による崩壊抑止効果が期待できなかったことも要因の一つとして推察される。なお、崩壊箇所に連続して路面にクラックが発生していることから、今後路肩崩壊が拡大することも考えられる。

なお、松本地区における状況写真は、写真 37～写真 39 に調査地現況写真としてまとめて示す。

写真 37 森林作業道の路面の状況 (2013年6月6日)

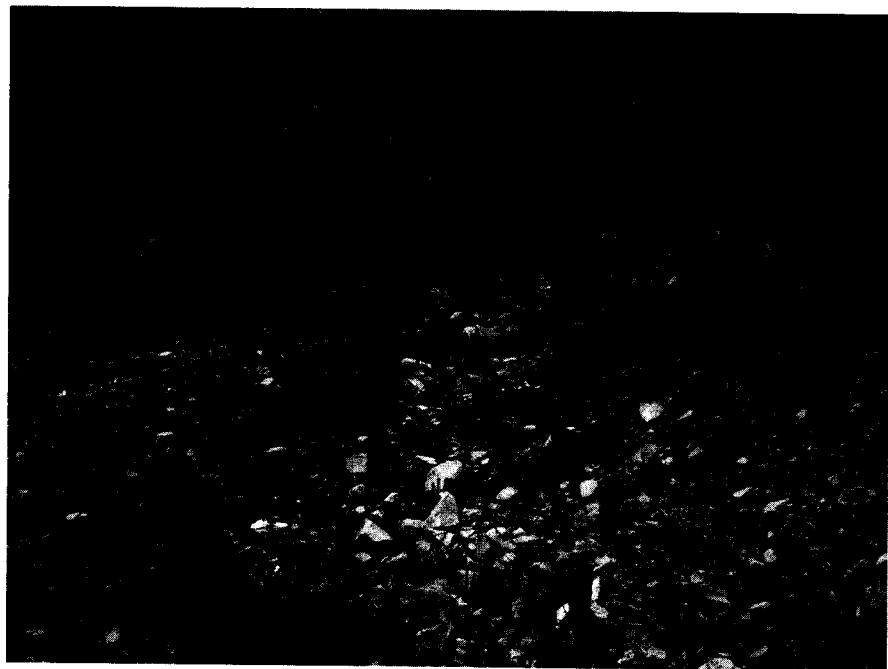


路面（集材部）の植生侵入状況



路面（連結部）の侵食状況

写真 38 森林作業道の切土のり面の状況 (2013年6月6日)



礫質土の切土のり面の状況



砂質土の切土のり面の状況

写真 39 森林作業道の路肩崩壊の状況 (2013年6月6日)



路肩の崩壊状況



路肩下部の崩壊面の状況

### 第3節 現地実態調査のまとめ

#### 第1項 茨城県常陸太田試験地

##### (1) 路面及びのり面侵食量調査から

森林作業道からの流出土砂の発生源としては、路面そのものの侵食に起因するものよりは、切土のり面に起因するものが多く、とくに、切土のり面の肩の部分が侵食されてそこからの崩落の影響が大きい。そのため、高いのり高を避け、のり面勾配の緩和をはかることが望ましい。

また、土砂移動量は路面の斜面長や面積に比例して大きくなりガリー侵食にまで発展するおそれがあることから、横断排水溝を適宜設置する必要がある。とくに路面の集水区間が長くなる場合や連結部の急傾斜作業道などではより密に配置する必要がある。さらに常陸太田試験地のように侵食されやすいマサ土の分布する地帯ではとくに留意する必要がある。

なお、路面に存在する枝条等は路面侵食や土砂移動の軽減に高い効果が認められるが、年々腐朽などにより減少するので、落葉・枝落ち等による周辺からの枝条等の供給が少ない箇所や、地形的に枝条等が溜まりにくい箇所、早期に植生の侵入が期待できない箇所では、間伐や枝打ち時などに人为的に枝条を散布する等の対策を検討する必要がある。

流出土砂量の経年変化をみると開設直後は多いが、その後通行車両がない場合は、初期の不安定土砂の流去や植生・枝条などによる路面被覆により次第に減少する傾向が認められる。

##### (2) 路盤変動調査及び既存斜面崩壊地踏査から

盛土部、特に路肩箇所での崩壊発生が認められた。盛土の補強に関しては、柵工などが一般的であるが、柵の隙間から土砂が流出することが危惧されることから、柵背面にマット類や礫質土を配置する等の盛土の補強を図るなどの対策が必要である。また、盛土斜面における侵食の発生は路肩部を起点として下方に進行することが多いことから、丸太敷などの侵食防止対策を必要に応じて行うことが望ましい。

また、横断排水溝の吐口部での侵食や崩壊が認められたことから、横断排水溝の吐口での侵食対策を行う必要がある。吐口が盛土部にかかる場合には特に対策の必要性が高く、侵食防止効果のあるマットや石礫の配置等を行う必要がある。

なお、当調査地は2伐5残の間伐が実施されたが、路面の崩壊は「2伐」箇所で多く認められしたことから、間伐の計画・作業に当たっては、2伐箇所が尾根部などの急傾斜地に該当しないように配慮することも必要である。特に下流側の盛土部分の伐採は避けることが望ましい。

一方、間伐等の森林施業は作業道作設後に行うことから、2伐箇所がどこに来るかは作業道作設時には対応困難な課題であるが、尾根部などの急傾斜部では森林作業道作設時に密な柵工の配置や丸太杭の打設などを行い、前もって崩壊防止策を図っておくことが望ましい。

#### 第2項 長野県松本地区

##### (1) 路面及びのり面侵食調査から

当地区の森林作業道は、常陸太田試験地に比較して全体的に横断排水溝が少なく、当該調査区間においても横断排水溝は2箇所しか設置されていない。それにもかかわらず路面侵食はそれほど顕著には見られなかったのは、当該地はマサ土の常陸太田試験地とは異なり、路面の土は砂質土に礫

質土が多く混在しており、透水性は比較的良好であったためと推察される。しかし、同一な傾斜で路線長が長い箇所では、地表流によるやや深い侵食溝も見られた。

また、切土のり面が礫質土の場合は、一部は路面中央にまで散乱している箇所も見られるが、のり面の勾配は開設当初と比較してあまり変化が見られない。一方、切土のり面が砂質土の場合、常陸太田試験地と同様に雨水等により侵食されてのり面末端に堆積し、のり面勾配が当初よりも緩和されている箇所も見られた。

## (2) 路盤変動調査から

当該調査区間では、森林作業道が尾根部の急傾斜斜面を通過する箇所でのり肩崩壊が1箇所見られた。その原因として地形・地質の影響や盛土部分の締固め不足のほか、間伐方法が常陸太田試験地と異なり定性間伐であったが、盛土斜面下部の立木が間伐されたため林木根系による崩壊抑止効果が期待できなかったことも要因の一つとして推察される。

## 第3章 森林施業上の留意点

### 第1節 土砂災害に強い森林づくり

はじめに

わが国は、脆弱な地質と多雨気候、そして高い人口密度のため土砂災害が毎年起きている。半乾燥地で起きる風食や氷河の融解に伴う土砂災害を除けば、およそほとんどの土砂災害が揃っていると言っても過言ではない。このように常に土砂災害に見舞われているわが国であるが、一口に土砂災害と言っても、崩壊や土石流、落石など突発的で人命財産に直接影響する災害から、表面侵食のようにダム堆砂や表土流亡などによる恒常的な災害もある。災害を引き起こすこれらの土砂移動現象は、このように形態も様々であり、また莫大なエネルギーを持っているため、総合的な防災対策が必要である。すなわち、発生源である山地斜面を保全し土砂移動現象を極力軽減させること、それでも発生してしまった土砂をコントロールして人命財産に極力影響させないこと、さらに土砂移動が大規模で人命財産に及ぶ可能性がある場合には警戒避難すること、など土砂災害防止には各部分で総合的な対策をとる必要がある。このうち、発生源はふつう面的に広く森林に覆われており、また気象条件や地質条件などはコントロールできない中で、唯一森林は人為的なコントロールが可能である。すなわち、土砂災害の発生源にもなる山地斜面では、不確実性はありながらも広く面的に安価にかつ恒常的な森林の土砂災害防止機能が期待される。これまで森林の土砂災害防止機能は統計的にも広く認められており、森林の管理方法一つで土砂移動現象をある程度抑制することが可能である。しかし、これまで森林の土砂災害防止機能を明確に数量的に表すことが不足していた。例えば、表面侵食防止機能は一般化することが不足していたし、崩壊防止機能や土石流緩衝機能も力学的な評価が不足していた。

そこで本報告では、これまで筆者等が行ってきた様々な測定結果から、表面侵食防止機能の一般化と崩壊防止機能、土石流緩衝機能の力学的評価を述べるとともに、これらの成果を活かして各機能を高める森林保全・管理技術の方策を示し、さらに土砂災害に強い森林づくりの指針を述べたい。

#### 第1項 表面侵食

表面侵食量は複雑な要因によって決まる。この要因とは、すなわち降雨（総降雨量と降雨強度）、土壤（粒径や密度など）、斜面長、傾斜、植被（植物種や被度など）、人為的な保全策、季節性（同じ降雨量と降雨強度でも春のほうが秋より侵食量が大きい）などである。国内外には様々な侵食量予測式があり、分類すると経験式と半理論式、理論式、あるいは室内の降雨実験により求められた式と野外の侵食プロットで得られた式、要因を降雨などいくつかに絞って得られた式などがある。このうち、植生の効果を組み込んでいない予測式は数多く、実際の斜面での侵食量の予測には向いていないことが多い。これに対して、米国農商務省土地保全局で開発され世界中で広く使われているUSLEは、下式に示すように先に述べた要因のうち主な6個が組み込まれており、式形も単純であり植生の効果や工種を数量的に表現できる。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

ここで、R：降雨係数、K：土壤係数、L：斜面長係数、S：傾斜係数、C：作物係数（植被係数）、P：保全係数である。それぞれの係数を求めるには前もって計算する必要があるが、アメダスデータ、土壤型か地質、斜面長と傾斜角、植生の種類、工種が分かっていれば簡単に算出したり、表から数値を求めることができる。このように汎用性が高い式なので、流域の侵食量やいろいろな

斜面の侵食量が予測できる。また逆に言えば、この式は侵食量が既知ならば、逆算して植被係数Cを求めることができる。すなわち、この植被係数は、他の要因が同じ裸地の侵食量を1としたときの侵食量であり、植生の効果を一般化することができる。例えば、これまで全国で行われてきた侵食プロットからの侵食量を使って、植生の効果を一般化した結果を表16に示す。

表 16 様々な森林の植被係数 C

林相	植被係数 C	測定地	プロットの大きさ		傾斜 (度)	測定期間	引用文献	備考
			斜面長(m)	幅(m)				
エゾマツ・トドマツ天然林	0.023	北海道天塩	10	1	40	3年	村井延1960	
トドマツ天然林—林床ササ	0.0086	北海道白老	50	50	3	2年	石川ほか1962	
アカマツ40年生天然林	0.0045	岩手県好摩	20	5	20	半年×3回	村井ほか1972	
アカマツ30年生天然林	0.0084	岡山県古都	20	10	30	1年	川口ほか1948	
針広混交天然林	0.016	北海道爾童	10	1	17	3年	村井延1960	
針広混交天然林	0.0073	北海道天塩	10	1	40	1年	村井延1957	
落葉広葉樹天然林	0.115	北海道苦小牧	10	1	26	3年	村井延1960	注1)
落葉広葉樹天然林	0.016	群馬県吾妻	5	1	17, 25	半年×3回	関根1994	注2)
ブナ天然林	0.0069	新潟県湯沢	5	1	6, 7, 28	半年×3回	水源地森林機能研究会1993	注3)
落葉広葉樹二次林	0.0085	新潟県湯沢	5	1	13, 17	半年×3回	水源地森林機能研究会1993	注3)
カラマツ5年生人工林	0.014	岩手県盛岡	10	3	40	半年×3回	岩崎ほか1977	注4)
カラマツ32年生人工林	0.0051	岩手県好摩	20	5	20	半年×3回	村井ほか1972	
カラマツ社齡人工林	0.0012	岩手県好摩	不明	不明	不明	半年×3回	村井1976	
カラマツ社齡人工林	0.021	群馬県橘恋	5	1	13, 18, 20, 25	半年×3回	関根1994	注2)
カラマツ社齡人工林-林床ササ	0.0061	群馬県橘恋	5	1	26, 32	半年×3回	関根1994	注2)
針広混交人工林	0.0045	長野県飯田	3.1—3.7	1.3	34—39	1年	松岡ほか1982	注5)
針広混交人工林	0.0014	長野県飯田	3.1—3.7	1.3	34—39	1年	松岡ほか1982	注6)
スギ社齡人工林	0.0049	新潟県湯沢	5	1	7, 8	半年×3回	水源地森林機能研究会1993	注3)
スギ幼齢人工林	0.012	新潟県湯沢	5	1	9	半年×3回	水源地森林機能研究会1993	注3)
ヒノキ社齡人工林	0.010	群馬県橘恋	5	1	14, 20	半年×3回	関根1994	注2)
ヒノキ社齡人工林—林床なし	0.036	滋賀県栗東	2	1	30, 40	半年×2回	服部ほか1992	注7)
ヒノキ社齡人工林—林床ササ	0.0050	滋賀県栗東	2	1	30, 40	半年×2回	服部ほか1992	注7)
モミ若齢人工林	0.011	群馬県橘恋	5	1	18, 25, 30	半年×3回	関根1994	注2)
ヤマハンノキ人工林	0.0080	新潟県湯沢	5	1	1	半年×3回	水源地森林機能研究会1993	注3)

注1) コントロール区の裸地の侵食量が非常に小さい。注2) キヤベツ畑のCを0.3(農林水産省土地改良事業計画指針、農地開発(改良山成工)1992)として換算。注3) スキー場草地のCを0.02(農林水産技術会議1997)として換算。注4) ライシメータによる値。注5) アカマツ・カラマツ・ネジキ混交。注6) カラマツ・エゴノキ混交。注7) アカマツ林のCを0.0084(前出、川口ほか1948)として算出。

表に示されたように、スギなどの針葉樹林や広葉樹林では0.0030~0.0086で、裸地の1/100~1/300の侵食量となるが、間伐遅れのヒノキ林では0.036~0.22で、ひどい場合は裸地の1/5程度の侵食量になってしまふ。これらの値は、他の5つの要因が同一の斜面に対する値であるから、降雨量が多く傾斜の大きい山地斜面では、その侵食量は非常に大きな値となる。

一方、表17に示す保全係数は山腹工を数値で示すことになり、工種や比較にも大変便利である。すなわち表に示すように、基礎工のみだと0.5、それに植生工が加わって0.01以下になる。また木本を播種した場合と草本を播種した場合の経年変化の比較も容易である。

以上のことから、USLEを用いることにより植生の表面侵食防止機能は数値で比較でき、緑化の効果や森林管理の効果も定量的に評価することが可能である。植生の表面侵食防止機能を細分すると、雨滴エネルギー減殺、高い浸透能による表面流量減少、地表流速減殺、根系の土粒子緊縛などが挙げられるが、これらの効果を最も引き出すのは落葉層である。落葉層により、樹冠や林床植生で減殺してきた雨滴エネルギーを最終的にゼロにさせ、また落葉層からの腐植は土壤の浸透能を高め、地表流が発生しても流速に対する抵抗として働くためである。したがって、この落葉層をいかに保全するかが表面侵食防止の重要なポイントとなる。伐採があっても地表面を攪乱しなければ侵食がほとんど起きないことが立証されている。

表 17 山腹工の保全係数 P

山腹工種	保全係数 P	測定地	プロットの大きさ		傾斜 (度)	測定期間	引用文献	備考
			斜面長(m)	幅(m)				
階段工	0.76	北海道札幌	3	1.5	42	4年	北原ほか1986, 1988	
枝条被覆工	0.73	三重県海山	10	5	36	1年	川名ほか1963	注1)
石疊流路工	0.72	北海道札幌	3	1.5	42	4年	北原ほか1986, 1988	
簡易編柵工	0.42	三重県海山	10	5	36	1年	川名ほか1963	注1)
むしろ伏工	0.017	北海道札幌	3	1.5	42	3年	北原ほか1986, 1988	
そだ伏工(1年目)	0.16	北海道札幌	3	1.5	42	1年	北原ほか1986, 1988	
同(2年目)	0.48		同	上				
階段工+草本緑化(1年目)	0.052	長野県飯田	3.1~3.7	1.3	34~39	1年	松岡ほか1982	
階段工+木本緑化(3年目)	0.013	長野県飯田	3.1~3.7	1.3	34~39	1年	松岡ほか1982	注2)
階段工+木本緑化(43年目)	0.0024	長野県飯田	3.1~3.7	1.3	34~39	1年	松岡ほか1982	注2)
木本吹付け工(1年目)	0.046	北海道札幌	3	1.5	42	1年	北原ほか1988	注3)
同(2年目)	0.060		同	上				
同(3年目)	0.051		同	上				
草本吹付け工(1年目)	0.0045	北海道札幌	3	1.5	42	1年	北原ほか1986, 1988	
同(2年目)	0.0028		同	上				
同(3年目)	0.070		同	上				
同(4年目)	0.17		同	上				
積苗工(+植栽工)	0.23	愛知県多治見	2	0.5	不明	半年	大味ほか1967	
積苗工(+植栽工)3年目	0.0053	滋賀県田上	20	5	35	1年	鈴木ほか1989	
同4年目	0.0030		同	上				
同5~15年目	0.0029		同	上				

注1) ヒノキ杜鵑人工林内に設置されたプロットの値。注2) アカマツ植栽。注3) シラカンバ種子吹付け。

逆に間伐遅れのヒノキ林では、鱗片葉が数 mm に細分化されるため、雨滴衝撃により土粒子とともに飛散するため表面侵食が大きく発生してしまう。これらのことから、表面侵食防止機能を高める森林とは、地表面の落葉層を保全し極力痛めないで施業することが重要である。樹種では針葉樹と広葉樹あるいは人工林と天然林で表面侵食防止機能に大差がない。先に述べたように、唯一、ヒノキだけは適期に間伐を行うことが必要となる。伐採を行うときは、伐採木の枝葉を裸地に被せるだけで侵食量を 1/10 に押さえることができる。伐採時はちょっとした配慮で侵食量を極端に減らすことが可能である。

## 第2項 崩壊

毎年のように発生する全国の土砂災害では、森林の崩壊防止機能が毎度のように問われている。しかし、森林の崩壊防止機能に関する研究は、掘削しなければ目に見えない地下部の調査が必須であるため非常に遅れており、十分に社会的なニーズに応えきれていない。統計的には、多数の崩壊資料をもとに崩壊防止機能は証明されているが、力学的な検討は甚だ不十分であり、樹種の違いや間伐など森林整備との関係にあるのかなど、調査研究事例が非常に少ないので現状である。

災害のたびによく言われることは、森林の崩壊防止機能には限界があり、災害を未然に防げなかった・・・。しかし、崩壊に対する森林根系の力学的限界は未だ明らかになっていないはずである。それを限界があったと言うのはいささか非科学的ではないだろうか。森林根系の崩壊防止機能を明らかにすることは、とりもなおさず限界を知ることである。崩壊防止機能には限界があることは当然であるが、では果たして限界の値はいったいどのくらいなのであろうか。これらの機能を解明するため、信州大学農学部治山学研究室ではこれまで 10 年以上にわたり根系等の調査を行ってきた

ので、その成果を集約して以下に述べる。

### (1) 森林根系の崩壊防止機能に関する従来の考え方の問題点

これまでの森林根系の崩壊防止機能に対する考え方は、2次元無限長斜面あるいは2次元の円弧すべりで考えることが多かった。これは斜面安定を考える上で、計算がしやすいことなどによるものであるが、崩壊すべり面が根系範囲（1～1.5m）より深い場合は根系の崩壊防止機能は発揮されないとされてきた。また浅いところに岩盤がある場合は、根系が侵入できないため、この場合もまた根系の崩壊防止機能はないとされてきた。このように2次元で考えると、森林根系のうち鉛直根しか評価できること、すべり面が深いと鉛直根は機能しないと結論づけられてしまうことが多い。しかし、崩壊は広がりをもった3次元で発生している。3次元で斜面安定を考える時、2次元で無視されてきた水平根を無視することはできない。また、崩壊すべり面が鉛直根より深くても水平根は機能している。2次元断面で斜面安定を考えることは森林根系の崩壊防止機能、とりわけ水平根を軽視するなど現象を正しく捉えているとはい難い。今後は3次元で根系の崩壊防止機能を正しく評価することが重要である。

実際に崩壊地を観察してみると、崩壊縁に多数の根系がゴボウ状態あるいは破断状態で露出しているのがわかる。本来根系は多数分岐しているはずであるが、ゴボウ根となっているのは、分岐した根が外力により削ぎ落とされた結果であるし、破断されているのは大きな外力がはたらいたことを証明している。さらに注意すべきは、崩壊縁に沿って露出しているのは水平根が圧倒的であることであり、鉛直根ではなく水平根の崩壊防止機能を正しく評価することがいかに重要であるかがわかる。

### (2) 森林根系の力学的はたらき

では、森林根系は力学的にはどのようなはたらきがあるのか概略を述べることにする。これまでの国内外の研究で、根系の力学的はたらきは以下のクーロン式の粘着力増強分として評価されることが分かっている。

$$\tau = \sigma \tan \phi + C + \Delta C \quad \dots (1)$$

ここで、 $\tau$ ：剪断抵抗力、 $\sigma$ ：上載荷重、 $\phi$ ：土の内部摩擦角、 $C$ ：土の粘着力、 $\Delta C$ ：根系による粘着力増強分である。崩壊時のすべり面での根系の挙動は、すべり面の剪断力に対して根系は引き抜き抵抗力としてはたらいている。実際には全根が引き抜けることは少なく根系が引き抜かれつつ、根系のより先端で破断することが多い。これは2次元での鉛直根のはたらきであるが、3次元での崩壊縁における水平根の挙動においても同様なはたらきを行っている。すなわち、森林根系は崩壊すべり面のどの部分においても引き抜き抵抗力としてはたらいている。

根系の引き抜き抵抗力は、以下の回帰式で表されている。

$$T = a D^b \quad \dots (2)$$

ここで、 $T$ ：引き抜き抵抗力（NまたはkN）、 $D$ ：根系断面直径（mm）、 $a$ と $b$ ：係数。 $b$ が2であると断面積に比例することになるが実際はそれより小さい（後述）。

また、土壤の単位断面積あたりの根系の引き抜き抵抗力の総和は、以下の式で表される。

$$\Delta C = k \sum y_i \cdot N_i \quad \dots (3)$$

ここで、 $\Delta C$ ：根系の崩壊防止力、 $k$ ：根系の引き抜き方向に関する補正值（後述）、 $y_i$ ：直径階別引き抜き抵抗力（引き抜き試験より得られた回帰式(2)より）、 $N_i$ ：直径階別根系本数（根系分布調査より得られる）。根系の引き抜き方向はすべり面に沿うため、根系の延長方向の引き抜き抵抗力より $k=1.12$ 倍大きくなることが知られている（Wu1979）。しかし、この値は1と大差なく、また根系の引き抜き抵抗力のバラツキのほうが大きいので、ここではわざわざ乗じる必要はないものと判断し、以下の計算では $k=1$ としている。

### (3) 引き抜き試験の結果

これまでに上諏訪町福沢川上流（褐色森林土）、岡谷市志平沢上流（ローム質黒色土）、南箕輪

村信大構内演習林（ローム質黒色土）、伊那市手良沢山信大演習林（花崗岩マサ土）、伊那市西春近（ローム質黒色土）などで、ヒノキ、カラマツ、アカマツ等針葉樹人工林、ミズナラ、コナラ等落葉広葉樹天然林、マダケ林、などの根系を多数引き抜き試験した。その結果、引き抜き抵抗力に関する以下諸点が明らかになった。

1. 根系の地表面からの深さによる差はない（相馬 2004、2006 など）。
 

ヒノキ、カラマツ、広葉樹などで検証したが、いずれも差はない。
2. 引き抜けた形状（破断や全根引き抜けなど）による差はない（相馬 2004、2006 など）。
 

ヒノキ、カラマツ、広葉樹などで検証したが、いずれも差はない。
3. 地形、土質による差はない（相馬 2004、2006 など）。
 

砂質の花崗岩マサ土（手良沢山演習林）、粘土質のローム土（信大構内演習林）、あるいは黒色土（岡谷、諏訪）、褐色森林土（下諏訪）などで検証したがいずれも差はない。また、35 度程度の急傾斜地（手良沢山演習林など）と、5～20 度程度の緩傾斜地（構内演習林など）で差がない。
4. 土壤水分による差はある。野外実験では飽和時は自然含水時の 30%減となった（図 35 相馬 2006、岩名 2009）。

これについては、以下に示したように過去に塙本（1987）の報告があり、以下のように自然含水状態と飽和状態で引き抜き抵抗力に有意差がないと結論づけている。

自然含水状態 :  $T = 27.4D^{1.45}$

飽和状態 :  $T = 30.5D^{1.25}$

ただし、この式で根系直径 10mm の引き抜き抵抗力を試算すると、自然含水状態は 772kN であるのに対し、飽和状態では 542kN であり飽和すると自然含水状態の 70%になる。

一方の相馬（2004）は渓流を堰き止めヒノキの引き抜き抵抗力を計測した結果、

自然含水状態 :  $T = 23.0D^{1.68}$

飽和状態 :  $T = 15.6D^{1.69}$

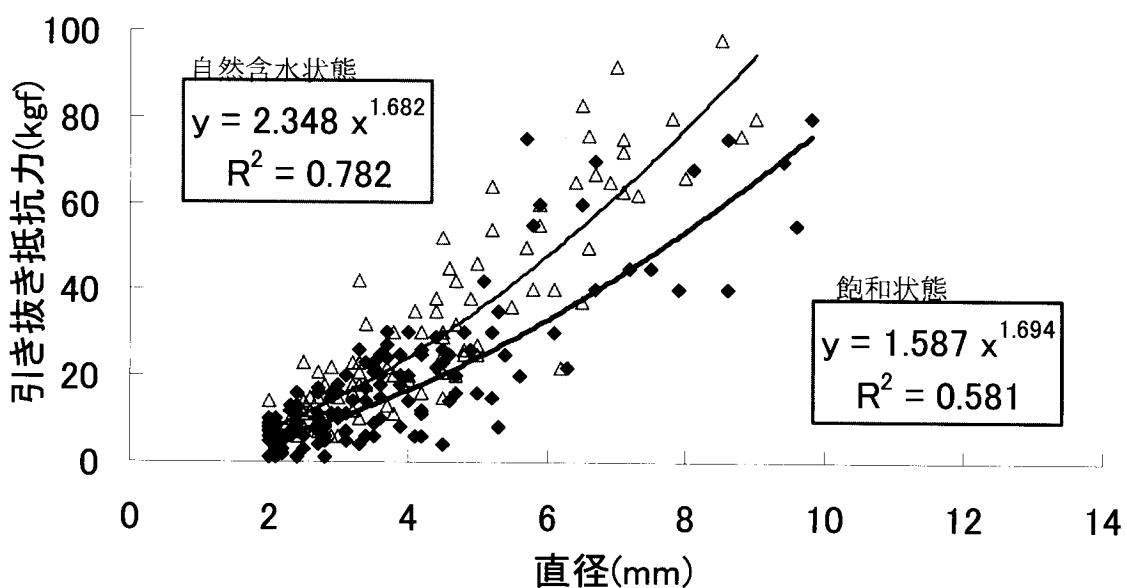


図 35 土壤の自然含水状態と飽和状態の違いによる根系引き抜き抵抗力の違い  
(危険率 1 % で有意) (相馬 2006 : 花崗岩風化マサ土)

であり、係数 b はほとんど変化せず係数 a が 68% に低下するとした。この場合、直径 10mm の根系の引き抜き抵抗力は、自然含水状態 1101kN に対し、飽和状態は 764kN で 69% となる。

また岩名（2009）は、耐水ベニヤで周囲を囲い、その中に注水を継続し一昼夜湛水状態にしてヒノキの引き抜き抵抗力を測定した。その結果、

$$\text{自然含水状態} : T = 29.4D^{1.44}$$

$$\text{飽和状態} : T = 22.7D^{1.38}$$

であり、 $b$  値はやはりあまり変化せず  $a$  値が 77% に低下するとした。この場合、直径 10mm の根系の引き抜き抵抗力は、自然含水状態 810kN に対し、飽和状態は 545kN で 67% となる。以上の 3 つの研究例から考えると、飽和状態の引き抜き抵抗力は係数  $a$  が自然含水状態の 70% 程度に低下する一方、係数  $b$  はほとんど変化しないため、自然含水状態の 70% 程度になると考えられる。

5. 樹種による差はある。(2)式の  $a$  と  $b$  の値および直径 10mm の引き抜き抵抗力を以下の表 18 に示す。表に示したように、根系直径 10mm の引き抜き抵抗力 (kN) は、針葉樹ではスギ 0.7~1.3、ヒノキ 0.8~1.1、アカマツ 0.5、カラマツ 0.4 程度であり、広葉樹ではケヤキが強く 2.5、コナラ 1.0、その他は概ね 0.5~0.9 程度である。すなわち、ケヤキが群を抜いて強いほかは、針葉樹と広葉樹とは大きな差ではなく、およそ 0.5~1.0kN 程度である。ただ、スギ、ヒノキと広葉樹のケヤキとナラ類は強く、アカマツとカラマツはやや弱いと言えよう。

表 18 引き抜き試験で得られた引き抜き抵抗力の回帰式中の a, b 値

	a	b	直径 10mm の引き抜き抵抗力 (N)	引用文献 *は信大
スギ	31.6	1.34	688	盛岡ほか 1989
スギ	42.2	1.48	1274	石垣ほか 1989
スギ	126.8	1.08	1524	同 (資料数少ない?)
スギ	19.4	1.60	772	阿部ほか 1996
ヒノキ	12.3	1.80	776	野毛ほか 2002*
ヒノキ	23.0	1.68	1101	相馬ほか 2004*
ヒノキ	29.4	1.44	810	岩名ほか*
トドマツ	8.58	1.71	440	神原ほか 2002 (垂直根のみ)
アカマツ	10.7	1.70	536	北原ほか 2002*
アカマツ	11.7	1.59	455	久保田ほか 2006*
カラマツ	12.3	1.46	357	久保田ほか 2005*
スギ, 広葉樹	27.4	1.45	772	塚本 1987 (樹種で差がない)
広葉樹	11.1	1.74	610	北原ほか 2002*
コナラ	39.3	1.41	1010	石垣ほか 1989
コナラ	28.4	1.56	1031	松下ほか 2009*
ミズナラ	20.7	1.56	752	久保田ほか 2006*
クヌギ	14.5	1.72	761	松下ほか 2009*
クリ	21.1	1.49	652	松下ほか 2009*
ケヤキ	34.3	1.87	2543	松下ほか 2009*
ミズキ	25.3	1.54	877	松下ほか 2009*
リョウブ	18.5	1.51	599	松下ほか 2009*
ウワミズザクラ	20.4	1.51	660	松下ほか 2009*
カスミザクラ	14.9	1.47	440	松下ほか 2009*
ウリハダカエデ	17.5	1.49	541	松下ほか 2009*
ヒツバカエデ	23.7	1.53	804	松下ほか 2009*
ケヤマハンノキ	9.73	1.74	535	加藤ほか 2008*
ヤシャブシ	17.0	1.54	589	加藤ほか 2008*
ニセアカシア	7.28	1.94	634	加藤ほか 2008*
ヤマハギ	9.67	1.68	463	加藤ほか 2008*
マダケ (ひげ根)	13.5	1.73	—	岩波ほか 2006*
(マダケのひげ根は 5mm まで。地下茎は断面直径と関係なく 1 本あたり平均 6.25kN)				

\*信大での研究例

## (4) 根系分布の調査結果

林内に長さ 2m、深さ 1m、幅 0.6m ほどのトレーナーを多数据削し、根系分布を調べた。調査はいろいろな樹種や立木間隔で行った。出現した根系は、樹種、座標位置、断面直径を記載した。その結果、根系の分布本数と断面積合計に関して以下の諸点が明らかになった。

- 崩壊の起こるような 30 度以上の斜面においても根系の最深は 1~1.2m 程度であった (図 36 野毛 2002、白井 2004、久保田 2006 など)。

2. 立木間のどの位置でも根系本数  $50 \pm 20$  本/ $m^2$  程度で、樹種や林齡が異なっても変わらなかつた（図 37 左、白井 2006、伴 2009 など）。

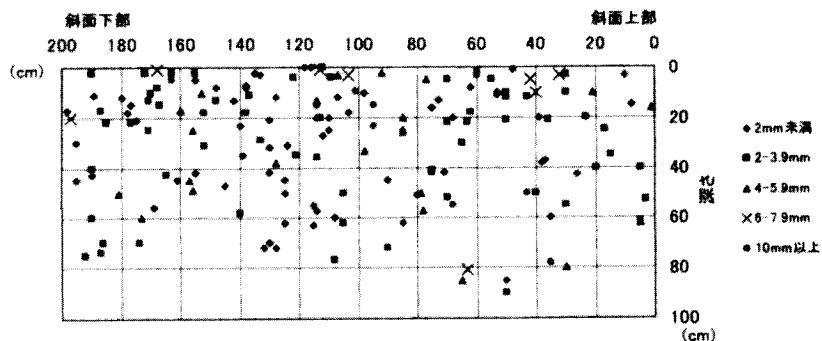


図 36 根系分布の一例（手良沢山演習林、カラマツ 51 年生人工林、久保田 2006）

3. 斜面位置による根系本数の差はあまりないようである（久保田 2006 など）。
4. 断面積合計および $\Delta C$ は立木間中央が最小で立木から 50cm 離れた場所の断面積合計の 1/4 であった。（図 37 右、白井 2006）。
5. 同一林分において立木間隔が広いと立木間中央の断面積合計と $\Delta C$ は小さくなる。一方、立木密度が高いと細い根ばかりとなり、本数は変わらないものの断面積合計は減少する（図 38 白井 2006、伴 2009）。

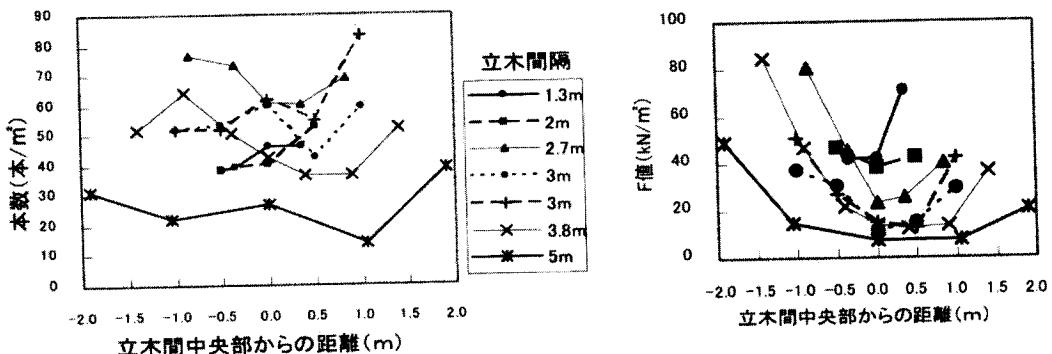


図 37 立木間隔と根系本数分布（左図）および立木間隔と $\Delta C$ （右図、F 値とは $\Delta C$ のこと、ヒノキ人工林、白井 2006）

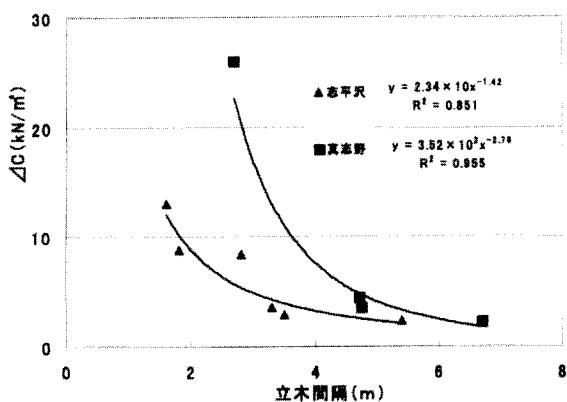


図 38 立木間隔と $\Delta C$ の関係（諏訪地域、カラマツ人工林、伴 2009）  
■：間伐林、▲：無間伐林

### (5) 崩壊防止力 $\Delta C$ (単位断面積あたりの粘着力増強分) の算出結果

引き抜き試験結果および土壌の単位断面積あたり直径階別根系本数から算出した  $\Delta C$  については、以上でも触れたが、これまでの結果を合わせてまとめると以下のとおりである。

1. 立木間中央の  $\Delta C$  は、根際の 1/4 程度で 5~50kN/m<sup>2</sup> であった（白井 2006 など）。立木間中央が林内の最弱部であった。また、一般の表層土の粘着力  $C$  は 0~3kN/m<sup>2</sup> 程度であるから、根系の  $\Delta C$  は非常に大きいことが分かった。
2. 同一林分ならば、立木間隔が狭いほうが立木間中央の  $\Delta C$  は大きい（白井 2006、伴 2009）。
3. 立木密度が減少すると、立木間中央の  $\Delta C$  は増加する（白井 2006、伴 2009）。
4. 林齢が増すと、立木間中央の  $\Delta C$  は増加する（白井 2006）。
5. 根系本数が林内で一定（前述）ならば、引き抜き抵抗力は直径の 1.5 乗に比例するため、細い根が多数あるより、太い根が混じるほうが  $\Delta C$  は大きくなる。
6. 通常規模の表層崩壊では、 $\Delta C$  に占める水平根の寄与は鉛直根に比べ圧倒的に大きい（北原 2002）。

### (6) 間伐と $\Delta C$

まず、伐採木の根系腐朽については、伐採後の経過年数を  $t$  年とおくと(2)式中の  $a$ 、 $b$  値と  $t$  には以下のような関係があった（図 39 水野 2004）。

$a$  は経過年とともに指数関数的に減少し、 $a = 25.1 t^{-1.62}$

$b$  は経過年と無関係に一定。

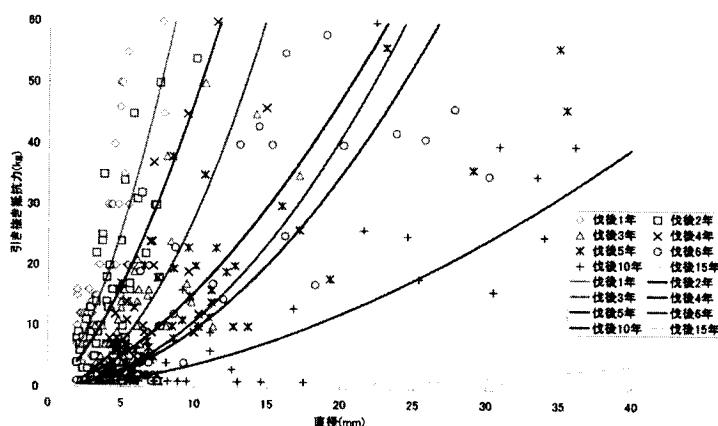


図 39 伐採後の経過年数に対する根系直径と引き抜き抵抗力の関係

すなわち、例えばヒノキならば  $y$  を单根の引き抜き抵抗力 (kN) とすると、以下の回帰式が得られた。

$$y = 25.1 t^{-1.62} D^{1.74}$$

具体的に示すと、根系断面直径が数 mm の細い根は数年でほとんど無視できるぐらいの引き抜き抵抗力となる。また、伐採後経過年数に伴う  $\Delta C$  の変化は、

$$\Delta C = \alpha t^{-1.62}$$

となる（水野 2004）。ここで、 $\alpha$ ：伐採後 1 年の  $\Delta C$  であるが、針葉樹でも伐採後しばらくは生きているので、伐採前の  $\Delta C$  でよいと考えられる。ヒノキ林において立木間中央の  $\Delta C$  を試算した結果では、伐採後 5 年で  $\Delta C$  は 7 % に低下した。

一方、残存木の根系は、間伐後の経過年数とともに間伐木周辺へ急速に伸びていき、新立木間中央の  $\Delta C$  は伐採後 5 年以降直線的に増加する（図 40 今井 2009）。一方、無間伐の場合は、 $\Delta C$  が頭打ちとなり、林齢 50 年でも 10kN/m<sup>2</sup> 以下であった（図 41 今井 2009）。間伐後の根系調査は、まだ少数例しかないので明確なことが言えないが、間伐木がかなり腐朽した伐採後 5 年で、旧

立木間中央（間伐木と残存木の立木間中央）の $\Delta C$ は数倍、新立木間中央の $\Delta C$ は間伐前と同じ値に戻り、間伐後30年で $20\text{kN/m}^2$ 近くになることが確かめられた（図42左）。間伐林と無間伐林の $\Delta C$ の経年変化モデルを図42右に示す。間伐が $\Delta C$ に与える影響について、現在カラマツ人工林についても検証中である。

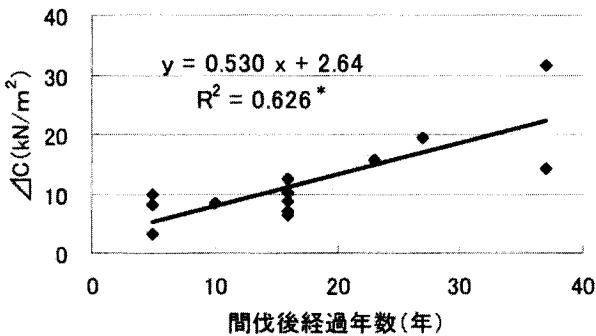


図40 間伐後の経過年数に伴う $\Delta C$ の変化（手良沢山ヒノキ人工林，今井2009）

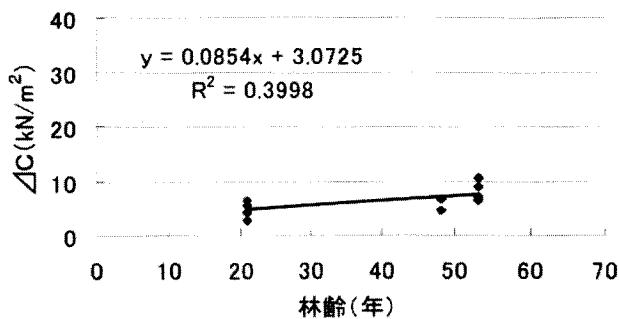


図41 無間伐林の $\Delta C$ の変化（手良沢山ヒノキ人工林，今井2009）

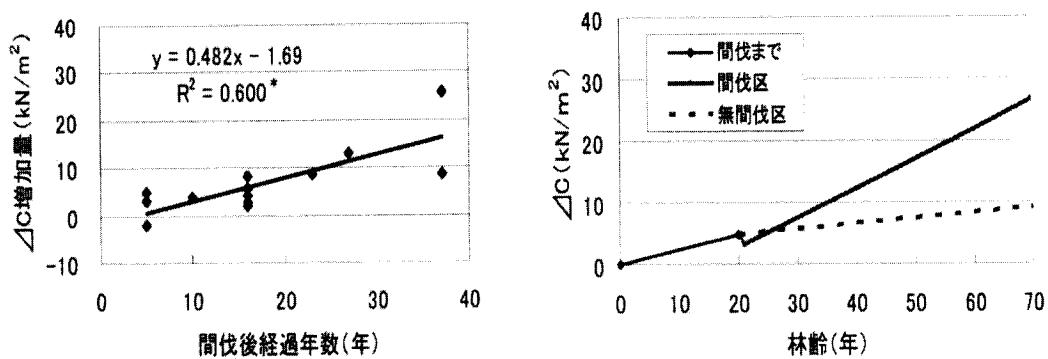


図42 間伐後の経過年数に伴う $\Delta C$ 増加量（左図）と間伐した場合と無間伐のままの場合の $\Delta C$ の変化モデル（ヒノキ人工林，今井2009）

以上の結果から若干の推定も含めて考察すると、林内の最弱部である立木間中央の $\Delta C$ は、造林木の成長とともに増加するが、間伐が遅れると頭打ちになると考えられる。これに対して適期に間伐すると、伐採木直下の $\Delta C$ は伐採木根系の腐朽により急速に低下するものの、残存木根系の伸長により伐採後少なくとも5年後には元の状態に戻り、以降さらに増加するものと考えられる。

なお、間伐後十分な年数を経た林分では、間伐により立木間中央の最弱部の箇所数が減ることになり、これも林分全体の機能を高めていることになる（今井 2007）。ただし、大きすぎる間伐率は間伐木への残存木からの根系伸長が遅れること、経費節減のための列状間伐は林内に弱線が連続すること、が推定され崩壊防止機能を期待する森林の施業方法として好ましくないものと考えられる。

## 7) 根系を考慮に入れた斜面安定計算

根系を含めた3次元斜面安定計算の例を示す。まず1例は、平成18年7月豪雨災害において多数の崩壊を発生させた岡谷市小田井沢川と本沢川流域を対象に、10ヶ所の崩壊地の測量（周囲、縦断、横断など）、土質定数（飽和時の内部摩擦角と粘着力、飽和時重など）測定（森林総合研究所および長野県林業総合センターの資料提供による）、根系調査（崩壊縁における残存根系の樹種、断面直径、本数など）から得たデータをもとに、各崩壊地の安定計算を行った（鈴木 2007）。計算では、崩壊時の土壤水分を再現させるため飽和条件とし、崩壊斜面を1×1mのブロックに分け、根系による $\Delta C$ は周縁部のブロックにのみ働くことにし $F_s$ を求めた（方法は相馬の上記の例と同じ）。また、飽和による引き抜き抵抗力の減少を30%に想定して計算した。

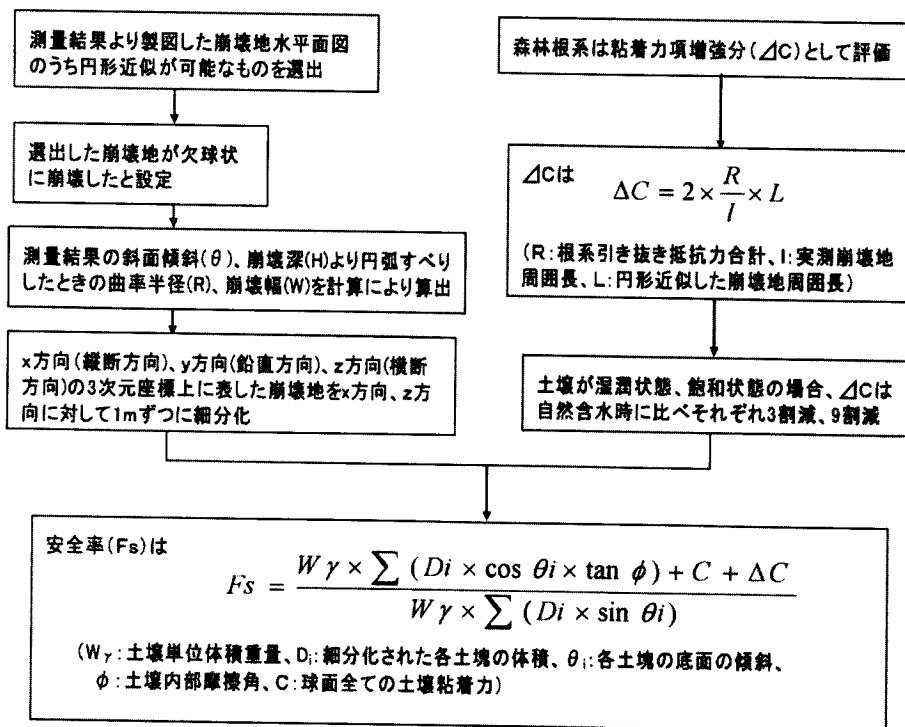


図 43 斜面安定計算フロー図

表 19 7ヶ所の崩壊地を対象に行った斜面安定計算の結果（鈴木 2008 専攻研究論文）

	崩壊地Ⅲ	崩壊地Ⅳ	崩壊地Ⅴ	崩壊地Ⅵ				
	森林なし	森林なし	森林なし	森林なし				
自然含水状態	1.620 1.114 0.999	1.383 0.980 0.980	1.472 1.099 0.961	1.269 0.945 0.945	1.686 1.049 0.825	1.224 0.788 0.788	1.578 1.111 0.984	1.316 0.963 0.963

	崩壊地Ⅶ	崩壊地Ⅷ	崩壊地Ⅸ			
	森林なし	森林なし	森林なし			
自然含水状態	1.625 1.079 0.971	1.402 0.953 0.953	1.780 1.174 1.032	1.488 1.025 1.025	1.796 1.218 1.097	1.546 1.077 1.077

ただし、表 19 では、土壤湿潤状態では引き抜き抵抗力を 30% 減とし、土壤飽和状態では 90% 減としたが、その翌々年の岩名（2009）の試験で飽和状態で確実に 30% 減となることが分かったので、90% 減は考慮しなくてよいものと考えられる。

以上の実際の崩壊地の根系調査から得た値を用いても、森林根系の存在により飽和時の斜面安全率は 0.15 程度上昇すること、飽和時に  $F_s$  がほぼ 1 近くになり崩壊が起きたことが予想されること、等が分かった。この安定計算では各崩壊地のすべり面を近似的に欠球型と仮定して算出したことなどいくつかの仮定が入っているが、根系が斜面安定に寄与していること、根系を入れた斜面安定計算の意義は非常に大きいことを確認できた（鈴木 2007）。

もう 1 例は、今井（2009）が間伐の有無により  $F_s$  がどのように時系列で変化するかをも算出したもので、基本的な計算方法は上記の例と同じである。

表 20 安定計算を行った崩壊規模

斜面傾斜 $\theta$ (°)	30	30	30	35	35	35	40	40	40
崩壊深さ $H$ (m)	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
曲率半径 $R$ (m)	7.5	11.2	14.9	5.5	8.3	11.1	4.3	6.4	8.5
崩壊幅 $W$ (m)	7.5	11.2	14.9	7.5	11.2	12.7	5.5	8.2	11.0
崩壊周囲長 $L$ (m)	23.4	35.2	46.9	23.4	35.2	39.9	17.3	25.9	34.5

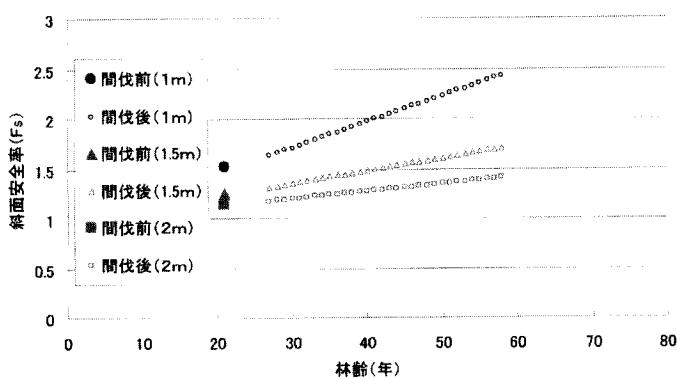


図 44 斜面安定計算の一例（傾斜 40 度、間伐を 21 年生で行った）

この計算では、いずれも間伐後 5 年で間伐前と同じ程度に  $F_s$  が上がり、その後も順調に上昇すること、 $F_s$  の上昇割合は崩壊深と関係があり、浅い崩壊ほど上昇割合が大きいこと、などが判明した（今井 2009）。

### 第3項 土石流

土石流は大きな流体力と衝撃力を持ち、その破壊エネルギーは極めて大きい。大規模な土石流や小規模でも流下区間の土石流に対して、森林は倒され流木となって下流の災害をむしろ大きくしてしまうこともある。しかし、小規模な土石流や崩壊地直下の土石流エネルギーの小さい区間あるいは堆積区間では、森林は土石流エネルギーを緩和あるいは土石流を停止させることが可能である。このような森林を土石流緩衝林あるいは災害緩衝林と呼ぶ。土石流緩衝林の研究は、戦後の災害多発期に一部行われたが、未解明な点が数多く、どのような林齢でどのような樹種をどのように配置したらよいのか、さらにどのように管理していったらよいのか、などほとんど明らかになっていない。

もちろん、森林の土石流緩衝機能には限界があるはずであるが、発生源対策として土石流のエネルギーを少しでも緩和させ流木化を防ぎ流木による災害を防止すること、下流の防災構造物の規模と配置にかかる経費を少しでも軽減させるために、この機能を解明し効果的な森林配置方法を検討することは決して無駄なことではない。

この機能を解明するためには、土石流流体力の作用点にワイヤーを懸け立木を引き倒す試験が有効である。これにより、樹種や立地環境の異なる立木の引き倒し抵抗力を求め、対象地の土石流流体力と比較し森林配置計画を検討することが可能となる。過去にも立木の引き倒し試験は行われている。しかし、その目的は風雪害防止や集材作業の安全確保のためのものであるため、外力の作用点が異なっている。したがって、これらの結果を土石流の緩衝機能の力学的評価に結びつけることは難しい。

信州大学治山研では、これまで樹種ごと、立地条件ごとに立木の引き倒し試験を行ってきた。まだ研究は端緒についたばかりで、数樹種を立地条件ごとに試験したのみであるが、いくつかの興味深い結果が得られているので以下に述べる。ここでは特に、わが国の代表的な樹種であるスギ・ヒノキ・カラマツ・コナラについて、引き倒し抵抗力と立木形状の関係を明らかにするとともに、樹種の違いを比較検討する。その他、飽和状態と自然含水状態の比較、コナラに関しては実生と植栽の違いが引き倒し抵抗力に与える影響についても試験したので以下に述べる。なお、このような引き倒し試験は大がかりでかつ経費がかかるため、中部森林管理局、長野県林業総合センターならびに（社）長野県林業コンサルタント協会、兵庫県農林水産部および同農林水産技術総合センター、愛知県農林水産部および同水産振興基金栽培漁業部等と共同で試験を行っているが、ここでは、深見ほか（2010、2011）による主に長野県内で行った試験結果を示す。

#### （1）試験地・試験対象

試験地は、長野県塩尻市の長野県林業総合センター構内で、地形は傾斜6度の緩斜面、土壤は火山灰を起源とする適潤性黒色土（B<sub>1</sub>D）である。4樹種の林分は隣接している。統計上十分な資料数が必要なため、引き倒しはスギ17本、ヒノキ19本、カラマツ20本、コナラ17本行った。スギ、ヒノキ、カラマツは林齢22年生の人工林、コナラは19年生の天然性2次林であり、立木密度はスギが2000本/ha、ヒノキが2000本/ha、カラマツが1200本/ha、コナラが2000本/haである。飽和と自然含水など土壤水分の違いについては、中部森林管理局南信森林管理署の黒河内国有林内で渓流を堰き止めて引き倒し試験を行った。また実生と植栽の違いについては、兵庫県農林水産技術総合センター内で行った。

なお、立木の形状については、形状比は樹高（m）を胸高直径（cm）で除して100倍して求めた。樹冠体積は、樹冠長と直行する2方向の枝張り直径から、スギ、ヒノキ、カラマツは樹冠部を円錐、コナラは半楕球とみなしてそれぞれ算出した。

#### （2）試験方法

土石流の波高を考慮し地際から1mの高さの幹にワイヤーをかけ、重機で牽引した。立木とワイヤーの間には添え木をした。対象木と重機をつなぐワイヤーの間にはロードセル（98kN用荷重変

換器) を挟み、ロードセルからの出力はインターフェイスを介在させて、荷重の変化を時系列でパソコンに収録した。牽引を始めて、立木にかける荷重を徐々に増やしていき、荷重に対する立木の抵抗力がピークに達し、下がり始めたところで試験を終了した。これにより立木の最大引き倒し抵抗力(以下、最大抵抗力)を測定した。なお、ワイヤーは地上1mにかけてあるので、引き倒しモーメントは引き倒し抵抗力と同じ数値になる。試験終了後、対象木を伐倒し樹高と樹冠長を計測した。

### (3) 最大抵抗力と立木形状との関係

得られたそれぞれの回帰式と決定係数を表21に示す。

#### 1) 最大抵抗力と胸高直径の関係

4樹種の最大抵抗力と胸高直径の関係について、例としてスギを図45、ヒノキを図46に示す。

表21 長野県林業総合センター(塩尻)で行った4樹種の引き倒し試験結果(回帰式と決定係数)  
(深見2010)

樹種	F-D	F-H	F-S	F-V
スギ	回帰式 $F=5.71 \times 10^{-4} D^{3.57}$	$F=4.67 \times 10^{-5} H^{4.74}$	$F=1.49 \times 10^{12} S^{-5.67}$	$F=5.41 \times 10^{-2} V^{1.63}$
	決定係数 $R^2=0.908^{**}$	$R^2=0.948^{**}$	$R^2=0.307^*$	$R^2=0.516^{**}$
ヒノキ	回帰式 $F=3.49 \times 10^{-3} D^{3.08}$	$F=2.04 \times 10^{-3} H^{3.84}$	$F=1.89 \times 10^7 S^{-3.24}$	$F=5.96 \times 10^{-1} V^{1.01}$
	決定係数 $R^2=0.925^{**}$	$R^2=0.727^{**}$	$R^2=0.324^*$	$R^2=0.624^{**}$
カラマツ	回帰式 $F=2.20 \times 10^{-3} D^{3.19}$	$F=1.29 \times 10^{-6} H^{5.83}$	$F=8.80 \times 10^9 S^{-4.33}$	$F=4.58 \times 10^{-1} V^{1.02}$
	決定係数 $R^2=0.917^{**}$	$R^2=0.792^{**}$	$R^2=0.656^{**}$	$R^2=0.565^{**}$
コナラ	回帰式 $F=5.52 \times 10^{-3} D^{3.08}$	$F=4.05 \times 10^{-4} H^{4.15}$	$F=2.54 \times 10^7 S^{-3.08}$	$F=6.37 \times 10^{-1} V^{0.99}$
	決定係数 $R^2=0.931^{**}$	$R^2=0.601^{**}$	$R^2=0.485^{**}$	$R^2=0.669^{**}$
岡谷カラマツ (参考)	回帰式 $F=4.82 \times 10^{-3} D^{2.78}$	-	-	-
	決定係数 $R^2=0.831^{**}$	-	-	-

F: 最大抵抗力(kN) D: 胸高直径(cm) H: 樹高(m) S: 形状比 V: 樹冠体積(m<sup>3</sup>)

(決定係数( $R^2$ )の右肩の記号について、それぞれ、\*: 危険率5%で有意 \*\*: 危険率1%で有意の意)

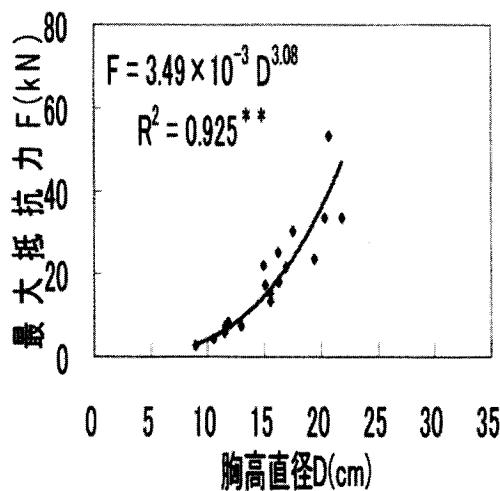


図45 最大抵抗力と胸高直径の関係(スギ)  
(深見ほか2011)

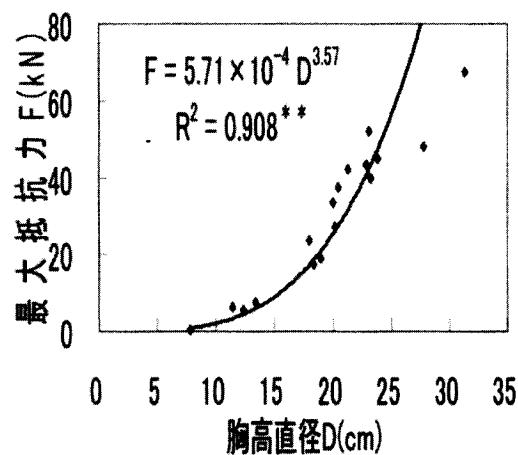


図46 最大抵抗力と胸高直径の関係(ヒノキ)  
(深見ほか2011)

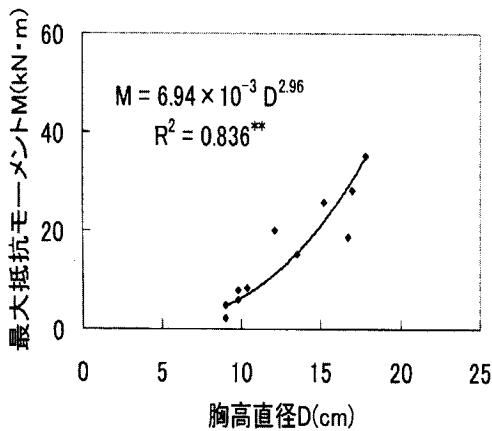


図 47 最大抵抗モーメント（最大抵抗力×ワイヤー位置 1 m）と胸高直径の関係（コナラ実生）  
(深見ほか 2011)

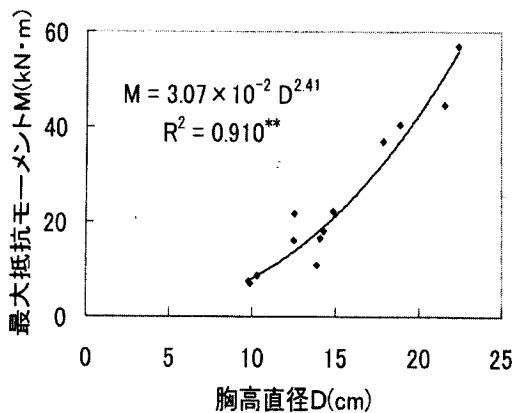


図 48 最大抵抗モーメント（最大抵抗力×ワイヤー位置 1 m）と胸高直径の関係（コナラ植栽）  
(深見ほか 2011)

また、コナラの実生と植栽について図 47 と図 48 に示す。最大抵抗力と胸高直径の関係は表に示したように 4 樹種いずれも危険率 1 % で有意の強い相関であり、また最大抵抗力と他の立木形状の関係に比べ、平均して決定係数が非常に高かった。今回の対象 4 樹種について、胸高直径と最大抵抗力の回帰式のべき乗数がいずれもほぼ 3 乗で近似できた。また、コナラの実生と植栽の差について統計的検定を行ったところ、有意差がなかった。したがって、スギ、ヒノキ、コナラの樹種間に差はあっても実生と植栽の差は無く、植栽後 20 年も経過すれば根系が発達し引き倒し抵抗力に差がでなかつたためと考えられる。

最大抵抗力は立木を引き倒す際に引き抜ける（あるいは破断する）根系の引き抜き抵抗力の総和と密接に関わっていると考えられる。引き抜き抵抗力の総和の増大には根の肥大成長と根の総本数の増加という二通りの根系成長が考えられるため、今後、立木の地下部を調査し、胸高直径・胸高断面積の増大がこの二通りの根系成長とどのような関係にあるのか検証する必要がある。

### 2) 最大抵抗力と樹高の関係

最大抵抗力と樹高の関係は 4 樹種いずれも危険率 1 % で有意であったが、スギを除いて最大抵抗力と胸高直径の関係ほど決定係数は高くなかった。4 樹種のうちコナラの決定係数が他の樹種に比べやや低いのは、通直な針葉樹と違い広葉樹は樹体の形状が様々であるために、樹体の高さだけでは最大抵抗力を説明するには不十分だからであると考えられる。

### 3) 最大抵抗力と形状比の関係

最大抵抗力と形状比の関係はスギ、ヒノキは危険率 5 % で有意、カラマツ、コナラは危険率 1 % で有意であった。これも最大抵抗力と胸高直径の関係ほど決定係数は高くなかった。特にスギ、ヒノキについて、最大抵抗力と胸高直径、最大抵抗力と樹高の間では強い相関を示していたにも係わらず、最大抵抗力と形状比との関係において決定係数が低かった。これは、形状比が樹高を胸高直径で除したものであり、この二つの要素の影響を受けるため、ばらつきが大きくなるのではないかと推察される。したがって形状比から最大抵抗力を判断することは難しいと考えられる。

### 4) 最大抵抗力と樹冠体積の関係

最大抵抗力と樹冠体積の関係は 4 樹種いずれも危険率 1 % で有意であった。これも最大抵抗力と胸高直径の関係ほど決定係数は高くなかった。最大抵抗力と樹冠体積の回帰式は、今回の対象 4 樹種は指数関数的関係を示したが、べき乗数はスギを除いて 3 樹種ともほぼ 1 であることから、スギを除いた 3 樹種においては、最大抵抗力と樹冠体積はほぼ直線的関係を示すと考えられる。

上記の最大抵抗力と立木形状の関係において、最大抵抗力と樹高、形状比、樹冠体積は林齢や樹種の差異によって決定係数にややばらつきが見られたが、最大抵抗力と胸高直径の関係は、今回の対象4樹種いずれも同様に決定係数が高かった。したがって、一般に最大抵抗力は胸高直径により判断するのが適当であると考えられる。

#### (4) 塩尻カラマツと岡谷カラマツの最大抵抗力の比較

昨年長野県岡谷市小田井沢川本流において今回の試験と同様の方法で引き倒し試験を行ったカラマツ（以下、岡谷カラマツ）と、今回引き倒し試験を行ったカラマツ（この項では区別のため「塩尻カラマツ」と呼ぶ）の最大抵抗力を比較する。岡谷カラマツは対象木24本、林齢45年前後で、立木密度は約2000本/haの間伐遅れの人工林である。表21に示す塩尻カラマツと岡谷カラマツの最大抵抗力と胸高直径の回帰式は危険率5%で差があり併合できなかった。これは胸高直径のレンジが異なるために有意差が表れた可能性が考えられた。そこで、塩尻カラマツ、岡谷カラマツの対象木のうち、胸高直径のレンジの重なる胸高直径15~25cmの範囲の対象木のみを選出し、改めて最大抵抗力と胸高直径の回帰式を求め、回帰式の併合の検定を行った。胸高直径15~25cmの塩尻カラマツ及び岡谷カラマツの最大抵抗力と胸高直径の関係を図49にそれぞれ示す。胸高直径15~25cmの塩尻カラマツと岡谷カラマツの回帰式はやはり危険率5%で差があり併合できなかった。最大抵抗力と胸高直径の関係は、先述の通り決定係数が非常に高く、強い相関が認められた。それにも関わらず両試験地のカラマツの同レンジの胸高直径の対象木の間に有意差が見られた。このことは、同様の胸高直径の立木においても立地条件により最大抵抗力が変化することを示唆しており、根系の成長が立地環境因子などに支配されている可能性が考えられる。

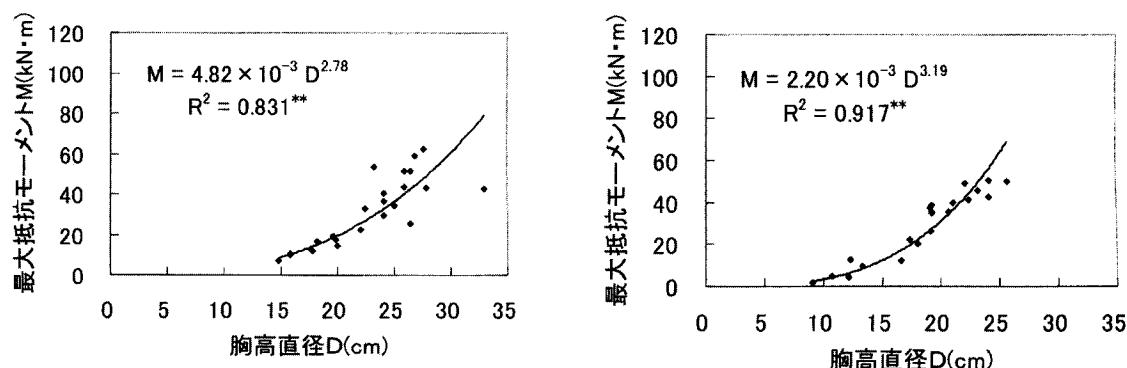


図49 カラマツ人工林の引き倒し試験結果（左：岡谷、右：塩尻）  
(深見ほか 2011)

#### (5) 飽和状態と不飽和自然含水状態の比較

中部森林管理局南信森林管理署管内でカラマツを対象に行った土壤水分の違いによる引き倒し抵抗力について図50に示す。図示のように、両者ともべき値がほぼ3乗であり係数も差が小さかった。そこで統計的検定を行ったところ、有意差が認められなかった。

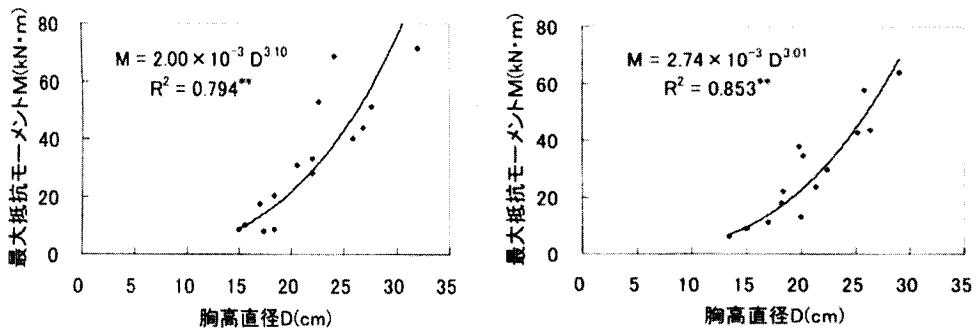


図 50 飽和状態（左）と自然含水状態（右）のカラマツ人工林の引き倒し試験結果  
(深見ほか 2011)

#### （6）最大抵抗力と根系の引き抜き抵抗力の樹種間比較

対象 4 樹種の回帰式から胸高直径 20cm の最大抵抗力を求めた。また過去に求められている根系の引き抜き抵抗力の回帰式からスギ、ヒノキ、カラマツ、同じく松下（2009）の回帰式からコナラの根系断面直径 10mm の引き抜き抵抗力を求めた。ここで、引き抜き抵抗力の回帰式とは、土壤断面から出現した根系の断面直径とそれを引き抜いたときの抵抗力の関係から求められたものである。胸高直径 20cm の最大抵抗力は、スギ 25.2kN、ヒノキ 35.8kN、カラマツ 31.2kN、コナラ 55.6kN となり、コナラ > ヒノキ > カラマツ > スギの順に大きかった。一方、根系断面直径 10mm の引き抜き抵抗力は、スギ 0.7731kN、ヒノキ 0.7736kN、カラマツ 0.3536kN、コナラ 1.0311kN となり、コナラ > ヒノキ > スギ > カラマツの順に大きかった。最大抵抗力、引き抜き抵抗力ともに次点のヒノキを大きく離してコナラが最上位であり、最大抵抗力と引き抜き抵抗力の関係をよく示す結果となった。一方、カラマツとスギは最大抵抗力と引き抜き抵抗力で順位が入れ替わった。4 樹種全体で見ると最大抵抗力と引き抜き抵抗力の関係は完全には一致しない結果となった。このことから、最大抵抗力は 1 本の根系の力学的強度を拡張するだけでは評価することができず、樹種による根系の本数や形状など発達の違いも考慮し、立木 1 本当たりの全根系を包括的に捉えた力学的評価をする必要があると考えられる。

ここで、土石流緩衝機能の高い森林を造成することを考えれば、上記のように同程度の胸高直径においてコナラの最大抵抗力は針葉 3 樹種と比べて非常に大きいといえ、今回の対象 4 樹種のうちではコナラを導入することが有効であると考えられる。またこの結果から、一般造林樹種の針葉樹に比べナラ類等の広葉樹は同程度の胸高直径においてより高い最大抵抗力を持つ可能性も考えられる。

#### 第4項 災害に強い森林づくりへの提言

以上の結果と考察をもとに、災害に強い森林づくりに関する提言を以下に行う。ただし、表面侵食は主にヒノキ人工林の林令 20 年程度の無間伐林が対象であるため割愛し、ここでは主に崩壊や土石流が起こるような斜面（谷頭の集水斜面で傾斜 25 度以上）を対象とした。

##### （1）崩壊に強い森林づくり

1. 森林の崩壊防止機能には限界があるが、森林施業により機能を高めることは十分可能である。
2. 統計的には崩壊箇所数や崩壊頻度、崩壊面積を減少させていることが証明されている。一方、力学的には鉛直根、水平根とも崩壊すべり面において、粘着力増強分として剪断抵抗力を大きくさせ崩壊抑止力を増加させている。
3. 土壤の単位断面積あたり粘着力増強分は、立木間中央が最弱であるため、林内に最弱部を連続させないことと、最弱部の強度を高めるように施業することが基本である。
4. 樹種ではスギ、ヒノキ、ナラ類など広葉樹が好ましい。カラマツやアカマツは半分程度の強さ

だが、広葉樹などの侵入木や下層木が育成できるように施業するとよい。

5. 林齢が増すとともに崩壊防止機能は高まるが、間伐をしないと頭打ちとなる。立木密度は順次減らす必要がある。
6. 適期の間伐は太い根系を多くし崩壊防止機能を高めることに有効である。
7. 地質・土壌に関しては、土の粘着力がほとんど0の花崗岩まさ土で根系は特に大きな役割を持っている。花崗岩地帯では皆伐は避ける。
8. 地形に関しては、崩壊が多発する谷頭は優先的に間伐を進め根系の崩壊防止機能の向上に努める。可能なら保安林指定して本数調整伐にする。
9. 間伐方法に関しては、林内に崩壊縁となるような連続した弱線を作らない。列状間伐は好ましくない可能性がある。また、収量比数を極端に小さくするような強度間伐は、残存木の立木間中央への根系侵入に時間がかかるため問題がある。
10. 間伐木は、崩壊や土石流が想定されるような場所に放置しない。流木となり被害を増加させることがある。
11. 侵入木に関しては、アカマツ松枯れ危険地帯において広葉樹などの侵入木をあらかじめ育成しておくことが重要である。
12. その他、施業に関しては、つる切りをし巻き添え崩壊を防ぐ。
13. 林道に関しては、横断排水溝を崩壊の起こる可能性のある急峻な集水斜面などに設置しない。

## (2) 土石流に強い森林づくり

崩壊を端緒として起こる土石流については、上記の崩壊に強い森林づくりに準ずるが、現時点で考えられるその他の事項は以下のとおりである。

1. 土石流のエネルギーが小さい崩壊地直下あるいは土砂堆積区間では、森林の土石流緩衝機能が期待できる。
2. 土石流緩衝機能は、樹冠体積が大きく胸高直径が太い立木がよい。
3. 引き倒し抵抗力は胸高直径の3乗に比例するので、太くなればなるほど急速に引き倒し抵抗力が大きくなる。
4. 樹種はコナラがよい。おそらくナラ類など広葉樹類が強い可能性がある。
5. 引き倒し抵抗力を強めるのは、適度な間伐により光合成が行われる樹冠体積を増やし、根系発達を促すようにすることがよいと考えられる。
6. 樹木の配列は、千鳥配列がよいと思われる。

## おわりに

この報告の大部分は、信州大学農学森林科学科治山学研究室の学生院生の血と汗の成果であり、2002年卒業の野毛伴基君、2004年卒業の水野隆次君、2006年大学院修士課程修了の白井隆之君と相馬健人君、2007年卒業の鈴木健太君、同年大学院修士卒業の久保田 遼君と岩波定裕君、2008年卒業の加藤亜矢子さんと深見悠矢君、2009年卒業の岩名 祐さんと伴 博史君と松下将大君、同年大学院修士課程修了の今井裕太郎君と小林健之君には深甚の謝意を申し上げます。また、信州大学農学部アルプス圏フィールド科学教育研究センター手良沢山演習林、中部森林管理局、長野県林業総合センターならびに(社)長野県林業コンサルタント協会、兵庫県農林水産部および同農林水産技術総合センター、愛知県農林水産部および同水産振興基金栽培漁業部には試験地提供など多方面から惜しみないご協力をいただきました。以上の皆様のご協力に深く感謝申し上げます。

## 引用文献（信大分のみ）

- 伴 博史・北原曜・小野裕：間伐がカラマツ根系の崩壊防止機能に及ぼす影響，中部森林研究，57，179-182，2009  
深見悠矢・北原曜・小野裕：立木引き倒し試験による森林の土石流緩衝機能の力学的評価，中部森

- 林研究, 56, 283-286, 2008
- 深見悠矢・北原曜・小野裕ほか:スギ・ヒノキ・カラマツ・コナラ立木の引き倒し抵抗力, 中部森林研究, 57, 195-198, 2009
- 深見悠矢・北原曜・小野裕・藤堂千景・山背敬太郎:土壤水分等が異なる場合の立木引き倒し試験, 日林誌 93, 8-13, 2011
- 深見悠矢・北原曜:災害緩衝林造成のための樹木引き倒し試験結果の報告, 平成 20~21 年度「災害に強い森林づくり」, 長野県林業コンサルタント協会, 2010
- 今井裕太郎・北原曜・小野裕:間伐後の経過年数による根系の崩壊防止機能の違い, 中部森林研究, 56, 269-272, 2008
- 今井裕太郎・北原曜・小野裕:ヒノキ根系の崩壊防止力に及ぼす間伐の影響, 中部森林研究, 57, 175-178, 2009
- 岩名 祐・北原曜・小野裕:飽和条件下におけるヒノキ根系の引き抜き抵抗力, 中部森林研究, 57, 187-190, 2009
- 岩波定裕・北原曜・小野裕:マダケ林の崩壊防止機能の評価, 中部森林研究, 55, 127-130, 2007
- 加藤亜矢子・北原曜・小野裕:治山緑化樹種根系の崩壊防止機能の評価, 中部森林研究, 56, 273-276, 2008
- 北原 曜・野毛伴基・小野 裕:ヒノキ林における水平根の崩壊防止効果, 113回日林論, 2002
- 小林健之・北原曜・小野裕:休耕田跡地に成立するカラマツ人工林における根系分布, 中部森林研究, 57, 191-194, 2009
- 久保田 遼・北原曜・小野裕:表層崩壊に及ぼすカラマツ根系の引き抜き抵抗力に関する力学的評価, 中部森林研究, 54, 191-194, 2006
- 久保田 遼・北原曜・小野裕:樹種による根系分布と引き抜き抵抗力の違い, 中部森林研究, 55, 123-126, 2007
- 松下将大・北原曜・小野裕:林床に侵入する広葉樹根系の引き抜き抵抗力と单根引張強度の関係, 中部森林研究, 57, 183-186, 2009
- 水野隆次:伐採経過年数にともなう森林根系の力学的評価—伐採後 1~15 年ヒノキ根系を対象として—, 信州大学農学部専攻研究論文, 2004
- 野毛伴基:ヒノキ林における水平根の崩壊防止機能の力学的評価, 一伐採 1 年後の伐根間における根系の補強強度—, 信州大学農学部専攻研究論文, 2002
- 白井隆之・相馬健人・北原曜・小野裕:樹木根系による崩壊防止機能に及ぼす立木密度の影響, 中部森林研究, 54, 187-190, 2006
- 相馬健人・北原曜・小野裕:土壤水分状態がヒノキ根系の引き抜き抵抗力に及ぼす影響, 中部森林研究, 54, 183-186, 2006
- 鈴木健太:斜面安定解析から導いた森林根系の崩壊防止機能の評価—平成 18 年 7 月豪雨災害に伴う崩壊地における残存根系調査より—信州大学農学部専攻研究論文, 2007

(北原 曜)

## 第2節 森林作業道作設と水土保全対策

はじめに

森林作業道の作設に当たって、作設後の土砂流出を極力抑制するための手法について茨城県常陸太田市と長野県松本市の現地検討会を踏まえて記述する。

### 第1項 土砂流出抑制の基本的な考え方

森林作業道からの土砂流出は、大別すると作設時の切土・盛土の逸散土砂、作設後の切土・盛土法面の崩落土砂、路面水による路面洗堀土砂が融雪及び降雨等の流水によって流出している。

そこで重要視すべきは、森林作業道作設に至るまでの手順と作設現場での実行対応の在り方である。作業道作設に当たっては、机上での路網計画図を基に標準横断面を提供して、後は作設工事担当の重機オペレータ任せが多いようであるが、これでは流出土砂を抑制することはできない。

森林作業道からの発生・流出土砂を抑制するには、当初の企画立案段階から間伐等森林施業終了後の維持管理に至るまで、過去に治山・林道(作業道)の実践と経験がある森林土木技術の精通者が参画し、技術的な対応策、基準書、各種仕様書、マニュアル等で明確にすると共に現場指導に当たる必要がある。

### 第2項 林道と森林作業道の対処方法の違い

林道と森林作業道は、道の観点からは同じといえるが、それぞれ利用目的が異なることから対処方法も異なっている。林道は、人員、木材各種物資、施工機械等を輸送するための施設であり、作設に当たっては法に準拠する各種の制限が課せられる。森林作業道は森林施業の作業場の施設であることから労働安全衛生規則の適用はあるが、他には林地崩壊の危険度に直結しなければ特段の制約はないといえる。

#### (1) 林道

林道作設は、当該林道の利用区域の森林施業の方針、環境への影響、概略経費及び費用対効果等を把握するために全体計画調査を行う。次いで林道の利用度に対応させた規格・構造を決定する。これらの結果を踏まえて具体的な路線の現地測量・設計となっていくが、これらの取り組み方は林道技術基準・指針、林道規程等に列挙されている。概略設計に基づく現地での施工は、林道工事仕様書、施工管理基準等を踏まえて実施される。また、作設後は一般車両の通行が可であれば、道路交通法が適用されると共に林道管理者は常に管理責任を問われる所以、常時維持管理を行わなければならない。これを怠ると法に基づく災害復旧対象事業から除外されることもある。

#### (2) 森林作業道

森林作業道の作設は、森林作業道作設指針を踏まえて進められていくことになるが、路体の構築には極力各種の永久構造物を採用せず、土構造物及び現地発生材(土石・木材)を利用した構造物で実施することを主体としている。森林作業道の幅員は、森林施業を効率的に実施するために大型の林業機械を活用することから、機体の構造上3m前後をしているところが多い。また、間伐等森林施業に要するコスト縮減の観点から林地の地表傾斜角は考慮しつつも、路網密度を高くしている。これは同一林地傾斜面に森林作業道が複数本入ることであり、林地の土砂流出・林地崩壊の危険性が高いと言っても過言ではない。

### 第3項 森林作業道の作設と土砂流出抑制対策

森林作業道作設の切取法高と切取土量を大きく左右するのは、対象森林の地表傾斜角の緩急である。作設した森林作業道からの土砂流出を抑制するには、作設時の切盛の土砂量を極力少なくする

ことが重要である。盛土に余った切取土砂は安易に捨土とせず、路体及び造材等の作業場の作設に活用するが、この時、土砂流出を起こさないように十分に締め固めることが重要である。また、森林作業道作設後の土砂流出を抑制するためには切取法長を極力短くして、法面崩落土砂を少なくすることが重要である。

わが国の森林地帯は、殆どが中から急の傾斜地で占めており、緩傾斜地は大変少ない。人工林として現在まで育成してきた森林を、途中で施業放棄はできない。森林整備が不良で地表が植生から被覆されていなければ降雨または融雪の流水により、経常的に林地の土砂が流出して林地崩壊等の災害が発生する危険度が高い。これらを踏まえ、土砂流出を抑制した効率的・効果的な森林作業道作設の手法・手順について記述する。

#### (1) 間伐等森林施業を実施しようとする対象森林の設定

縮尺5万分の1の地形図に対象森林の位置を入れると同時に近傍の地形の概要を把握する。また、地質図により対象森林の地質の概要を把握しておく。さらに、1千分の1の基本図に対象森林全体を図示し、近隣の林道・作業道等の道路状況、治山ダム有無、山腹工事等治山事業の有無を把握する。

#### (2) 間伐等森林施業の方法の検討

基本図から谷筋、尾根筋、等高線間隔の広狭、崩壊地の有無等を把握し、当該対象森林の施業方法を検討する。具体的には、単木間伐か列状間伐か、立木の伐倒機種、伐倒木の玉切り方法と使用する林業機械、集材・運材の方法である。

このことにより、当面の間伐等森林施業に使用する林業機械の種類と大きさ・重量を把握することができ、森林作業道の規格・構造が想定できる。

#### (3) 森林作業道の規模と密度の検討

対象森林の地表傾斜角が25度程度以下であれば、森林施業に使用する林業機械の運行は、集材・運材も含めて森林作業道を作設して利用することが多い。

路網密度は、森林施業のコスト縮減を第一義に、森林の地表傾斜角を考慮して路線を配置した結果による。当初から路網密度ありきで出発すると林地の負担が重すぎ、林地崩壊の原因になりかねない。

林地の傾斜角が30度程度を超えると、地質、土質、降雨量等の条件にもよるが、集材方法にタワーヤード等を組み合わせ、森林作業道を同一山腹斜面に複数本作設しないように対処し、林地崩壊を起こさせないようにすることが重要である。

机上で検討したこれら個々の路線を1千分の1の基本図に図示し、森林作業道の路網を構成する。個々の路線には、予定縦断勾配を図上に明記し、等高線から読み取った谷筋（排水施設の設置関連）、尾根筋（上下作業道との連絡道作設の関連）の図上での状況を把握し、これらを基に対象森林の現地調査・測量に入る。

#### (4) 現地調査

森林作業道作設予定の対象森林に入る前に、近隣の既設の林道や作業道の実態を十分把握する必要がある。具体的には、切土・盛土法面の法勾配と表土の流出状況、岩質・土質及び植生の繁茂状況を把握する。また、近隣の谷筋・沢筋の土石流の実態及び流水状況も把握しておく。

#### (5) 対象森林での実施測量と設計の重要性

現地検討会の現場状況から判断すると、森林作業道作設は、机上で検討して基本図に図示した路網配置図と、切土、盛土、木組構造物等の標準横断図を提示し、現地における具体的な作設対応は重機のオペレータに任せ、作設コストの縮減を図っているように思われた。しかし森林施業を実施する林地斜面は、大半が中から急の斜面である。森林作業道作設に起因する土砂流出及び林地崩壊を抑制するには、施工前に切土・盛土高等を極力低くすると共に路面水等の流水対策を図る上からも実施測量、路体構造設計、関連する設計図、切土・盛土等の数量計算は必要不可欠である。また、対象森林の路網構築に必要する費用を把握するためにも欠かすことはできない。

事業の実施に当たっては、事前に対象森林における森林作業道作設のための調査・測量・設計の仕様として、測量精度、平面・縦断・横断の設計基準等を明示しておく必要がある。なお、作設前の地形現況把握は、開設後の管理手法の必須条件でもある。

#### (6) 実施測量の手順

##### 1) 予測（予備測量）

対象森林の基本図で計画した路網全体について、個別路線の位置と計画縦断勾配が現場に合致しているかを概測するもので、ハンドレベルとポールと巻尺または間繩を使用して行う。起点からハンドレベルを移器する毎に現地で採取した杖程度の長さの棒頭に、赤色のテープ等を結び計画路線を現地に移設していく。途中、基本図で計画した路線の位置の違い等が発生した場合は、目的地との高低差及び起点からの現地点までの距離を把握した上で計画勾配の修正を行う。ハンドレベルの移器間の距離測定は、計画勾配の修正には欠かせないし、路線の概略延長把握にもなるので必ず測定する。また、尾根筋等で森林作業道と森林作業道を連結する急勾配となる連絡森林作業道についてもこの手法で移設する。

##### 2) 平面測量

基本図で計画した路網の路線毎の予測線が決定したら、次は、個々の路線の中心線の位置を決定していく。予測線の位置は計画路線の路面高なので、現地ではこの高さを見ながら、完成後の路線形状を頭に描きながら、切土・盛土が必要最小限となるような路線の中心位置を決めていく。

先ず、路線毎に予測線の位置を確認しながら路線の横断面を想定し、直線区間が必要以上長くならないように現地の地形に沿って交点（I P）を決めて行く。ただ、路線横断面を想定した場合、半切・半盛となる中心線の位置は、設計図としては理想的かもしれないが、施工では、土量の変化率やロス率等から盛土の土量が不足すので、経験からすれば、3分の2が切土路面で3分の1が盛土路面となるように想定した方が実態に合う。また、完成後の路面安定にも繋がる。

なお、交点決定に併せて、盛土側沿線の生立木が、間伐材を利用することにより盛土留や片桟道的な路肩構成の助成部材となりうるか、可能であればその延長はどれだけあるのか等を測定し野帳に記述しておく。そして、具体的な路線の決定に当たっては、回転半径に支障のない範囲で交点の位置を移動するとか縦断勾配を波型勾配にする等により、それら生立木を活用した堅固な路体構造の設計にする。

交点の位置が決定したら路線毎に交点間距離と、ポケットコンパスにより交点の位置を測定する。個別路線は、地山に沿った線形になっていることが多いことから交角は鋭角が多いので、原則的には曲線設定を行った方がよい。ただし、交点とMC間の距離が余りない交角30度程度までは曲線設定を省略することが出来る。このような場合は、仕様書に明示しておく必要がある。

なお、路線毎のより適切且つ正確な設計に資するため、路線の中心線に沿って、20m～30m間隔に測点を設置する。MCを設置した箇所は、MCが中心線の位置となるので測定時には注意すること。なお地形の変化点、構造物設置箇所等で測点を設定することが必要な箇所にはプラス杭として設置する。

##### 3) 縦断測量

平面測量で設置した路線毎の各測点の地盤高は、路線の設計及び施工、その後の維持管理の基礎となるので、路線毎にベンチマークを設定して自動レベル等精度の高い測量器械で正確に測量することが重要である。誤差は、往復測量で路線毎5cm程度とするが、これ等は仕様書に明示しておく必要がある。GPSを活用して林地の地盤高を把握するには、樹木が林地を覆っており相当の困難性を伴うのでやはり測量器械による実測方が早く正確である。

測量は、路線毎に器械を移器しながら、移器間の各測点のベンチマークからの高低差を測定していくものであるが、途中区間で計画縦断勾配の予定路面高（ハンドレベルで測定した位置）と測定している測点の地盤高に大きな差がある場合は、切土・盛土の高さが大きいことを示しているので、設計段階で波型勾配を検討した方がよいことを表している。このような場合は、測定地盤高から必

要限度の切土盛土高の高低差と測点区間による必要延長を野帳に記述しておくと設計時に役立つ。

#### 4) 横断測量

各路線の測点毎の横断の形状は、ポールによる横断測量を少なくとも測点から左右とも5m幅程度は実測しておく必要がある。これにより測点毎の林地傾斜が把握できるので路線毎の路体構造設計が適切に行える。測量の際、特に注意を要することは、平面測量で設定したセンターラインに対して直角方向に測定することである。カーブを設置したところは、必ずIP点とMC点を繋げた方向に測定する。このように各測点の横断図は同一条件の基に測定しているので、これに測点間の延長を加味して、路線として立体的な数量把握へと誘導できる。

この測量を実施する際に、併せて測点間における土質・岩質区分、支障木の樹種・径級・本数を調査して野帳へ記帳しておく。また、計画路線と交差する小谷や沢、流水痕がある凹地があれば、排水施設として洗越工等の設置が必要となるのでそれらの必要幅及び深さ等の必要事項を野帳に記帳しておく。

#### (7) 森林作業道の線形設計・路体構造設計・構造物設計

森林作業道は、対象森林の間伐等当面の森林施業を低コストでしかも効率よく実施するために作設する道路であり作業場である。具体的な役割は、立木の伐採及び伐倒木の造材、集材、運材の作業をする林業機械の運行と作業場に供されるものである。したがって、走行のスピードは要求されてしまう、林業機械の作業に耐えうる路体支持力の確保と林業機械本体及び造材運搬時の回転半径の確保が重要な条件である。安息角で安定している林地斜面にこの条件を満たす路線を作設するのだから、極力土砂流出を抑制して林地崩壊を発生させない森林作業道を設計することが重要である。

##### 1) 平面設計

平面設計は、対象森林の全体路網及び個別路線について、現地の実測に基づいて平面線形として設計する。設計図は、通常縮尺千分の1程度とする。走行スピードは要件ではないので、直線区間を長くしないで、極力急な縦断勾配を避け、地形の等高線沿いの線形を主体に、切土高・盛土高を低くすることにより、森林作業道作設による林地への傷口を小さくすることにより発生土量を抑制することができる。

なお、設計に当たっては、切土・盛土の土量抑制等のため計画路線沿線の生立木の活用や、波型縦断勾配にした方が有効となる場合は、横断設計、縦断設計とも連動して図上で必要区間のセンター移動する変更設計を行う。

また、路面排水は、沢や流水の痕跡がある凹地を利用するが、そこまでの距離が長く、途中で横断排水が必要な場合は、先ず堅固な地山の尾根筋を排水箇所とし、次いで一定箇所に路面水を集中させないことを前提に適切な間隔を取り、路側が盛土箇所ではなく地山の切取断面箇所へ分散排水する。横断排水施設は、現地に発生した丸太を活用した止水壁程度のものきめ細かに設置する。

##### 2) 縦断面設計

縦断測量で計測した数値は、唯一、対象森林を路網として構成する各路線の測点毎の精度の高い地盤高を表すもので、これが作設する森林作業道の縦断面・横断面設計の基準となる。

縦断設計は、連絡作業道を含め個別路線の実測に基づいて作図した地山の平面図・縦断図・横断図を対象にして、各測点毎の切土高、盛土高を検討して決定していくものであり、計画路線毎の縦断線形として設計するものである。設計図の縮尺は、通常横(距離)千分の1・縦(高さ)百分の1程度とする。

平面図でセンター移動した測点の地盤高は、横断図で移動測点の地盤高を図上測定し、そこから計画路面高を決定する。

計画縦断勾配を波型勾配にするのは、大別すると、①切土高、盛土高を抑制するため、②路側の生立木を構造物として活用するため、③沢や流水痕跡のある林地凹地への対応策及びそこを利用して路面水の排水に供するため、の3点が考えられる。それぞれの目的を効果的に發揮できる縦断勾配

配に設計することが重要である。

### 3) 横断面設計

横断設計は、路網の路線毎測点毎に切土法勾配・断面、盛土法勾配・断面、現場発生材を活用した路側構造物断面を決定していくものであり、設計図の縮尺は、通常百分の1程度とする。

先ず、ポールによる実測地山横断図に、縦断設計で決定した測点毎の切土高（-）・盛土高（+）を表示する。その設定された高さに道幅分を水平にとる。作業道では通常側溝を設置しないので、切土側はその端末から必要とする切土法勾配（切土高が低いので6分程度）で地山線に交差するまで上がり切土断面図とし、盛土側も同様の手順で端末から必要とする盛土法勾配（盛土高が低いので1割2分程度）で地山線に交差するまで下がり盛土断面とする。この時、土質、切盛り高、生立木の活用等で構造物が必要な場合は、その法勾配に応じた構造図を横断図に図示し、詳細設計は別途行う。

これ等が設計された横断図で、切盛法長・断面積を測定して数量計算表により、切土・盛土の土量計算（土量の過不足を把握して対処策を立てる。）、土砂流出抑制のために必要な種子吹き付け工等の法面工断面積計算を行う。

### 4) 構造物設計

構造物設計は、対象森林全体の路網について余分な切土量の残土処理場（通常は作業土場として活用する。）、不足盛土量を採取する土取場、沢または流水の痕跡のある凹地等へ土砂流出防止対策工として設置する木製土砂留構造物または布団籠工等と、路線毎に路体を構築する布団籠工等路側構造物、木製洗越工、木製横断溝等の構造物に区分して、それぞれ別々に設計して設計図を作成する。いずれも現地発生材を活用することを主体として設計する。連絡作業道は、急勾配となる場合が多く、路面水による路面洗堀が激しいので、スリップ止めを考慮したコンクリート路面工またはソイルセメントによる路面工等を設計する必要がある。構造物設計の設計図の縮尺は、通常五十分の1程度とする。

### 5) 工事費の積算

森林作業道の作設を経済的に有利に実施するには、事前に森林作業道工事仕様書を策定しておき、設計に基づき、林道工事標準歩掛、物価版等を適用し、現地に応じた小型または中型のバックホー等の重機の稼働を前提に、工種・工法毎に単価表、明細書、内訳書を作成して時価の工事価格を把握する。森林作業道の作設費用は、対象森林の管理・経営に対する費用対効果の根幹ともなる設備投資であるから、経費の根拠を明確にしておき、以後の維持管理の経費へと繋げていく必要がある。出たとこ勝負の現場任せの森林作業道作設では経費の内容等不明確であり、施行主体としては出資者(国民)に対して余りにも無責任すぎると言わざるを得ない。

## （8）森林作業道作設工事の施工と施工管理

### 1) 工事の施工

工事の施工は、せっかく安息角で安定している林地斜面に路網を作設していくのであるから、施工時または施工後に土砂流出や林地崩壊とならないように現地に合致した施工方法を探ることが重要である。こためには、工事費の積算でも触れたが、オペレータ任せではなく、森林作業道工事仕様書等を適用して森林土木技術者が適時・適切に設計変更をする等現地指導を行う必要がある。森林作業道も林道の場合と同様、現地の精密且つ詳細調査による設計を行っていない概略設計で施工を開始しているから、施工時の設計変更は前提条件になっているとみてよい。

工事仕様書は、使用する機械器具の種類・大きさ、使用材料の品質・規格、ベンチマーク等の測量基準標、丁張、施工中の災害予防対策等を明確にする一般的な仕様書と、工種・工法毎の施工手順及び内容等を明確にする個別具体的な仕様書に区分して策定しておく。森林作業道の場合、工事の殆どが切土、盛土であることから、土工に関わる仕様書で、伐開、表土の対処、盛土基礎の段切り、切土・盛土法面の対処について詳細に設定しておく必要がある。

## 2) 施工管理

施工の実施に当たっては、現地の状況変化、気象状況、工事仕様書との関連等を踏まえた場合、施工管理を適切に実施していく必要がある。ここでは森林作業道作設工事でも必須となる管理事項について記述する。

第1に工事の施工計画を立てること。対象森林の全体路網作設工事の開始から完了までの工事期間を設定し、この工期内に工事を円滑且つ安全に完了させるため投入する機械の機種・台数、労務者使用の時期と人数等を予定経費内に収めて計画する。

第2に工程管理表を作成すること。工事の施工計画を円滑且つ経済的に進めるため、工期内における工種・工法毎の施工時期・期間・内容の配分である。森林作業道の場合は、工事内容が複雑ではないので旬日工程表のバーチャート方式が通常である。特に注意を要するのは、森林作業道の工事は土工中心であるので、施工時の土砂流出や林地崩壊を抑制するため切土・盛土は、梅雨時期、台風時期を極力外して工程表を組むことが重要である。また、法面緑化工は、発芽・生育状況を考慮して春季とする。

第3に品質管理を行うこと。森林作業道の場合、連絡作業道のコンクリート路面工等を除き殆どが土砂路面である。切土路面部と盛土路面部の支持力が異なれば、完成後の安全な森林施業が確保できないし、路体崩壊の原因にもなる。盛土部の締め固めについては仕様書による転圧の手法及び所定支持力が確保されているか等を管理していくことが重要である。

施工管理には、この他原価管理、安全管理、出来形管理、写真管理等多種の事項があるが、工事を施工する森林作業道の実態に応じて優先管理事項を選択していく。

なお、施工管理の手順は、P(計画)、D(実行)、C(検討)、A(処置)により、手抜きにならないように管理していく必要がある。

### おわりに

以上、土砂流出対策を主体に森林作業道の計画から工事施工までの必要要件を事業実行者の立場に立って記述してきた。我が国の森林の特性を考慮して間伐等の森林施業を行う作業場としての森林作業道を作設するには、作設時及び作設後の林地への影響を最小限に留めるため、入念な調査・測量・設計・工事施工・施工管理が必要であり、事前にそれぞれの事業の仕様を明確にしておかなければならぬ。そのためには、土木事業に伴う林地の改変の在り方に詳しい森林土木技術者の参画が必須要件である。いかに道の規模が小さく施工が単純で構造物が少ないからとはいへ必要な道路幅は3mである。机上で企画・立案した路網で、施工を重機のオペレータ任せにしては以後の森林管理、森林作業道の維持管理を考慮した場合、事業実行者としては無責任であると言わざるを得ない。

また、森林整備事業に要する資金は、国産材価格が低迷期にある現在、特林家の場合を除き、森林作業道の作設を含め殆どの場合、国費、県費、市町村費の公費が使用されている。このことは、出資者である国民に対して使途の内容を明確にすることが義務付けられていることを意味している。そのためにも技術的に明確な根拠に基づいて事業を実施することを明らかにしておく必要がある。

(鶴林光久)

### 第3節 数値地形情報を利用した路網選定プログラム

はじめに

近年、森林作業道（以下、作業道と略す）を開設することによって、プロセッサ、スイングヤードなどの機械を森林内に導入、低コストで木材を搬出することが活発に行われている。作業道を高密度で配置することは、森林内での木寄距離を短くすることになり、集材費用を低減させる効果がある（写真 40、写真 41）。



写真 40 作業道からのウインチによる木寄せ



写真 41 フォワーダによる集材

こうした作業道を計画、施工する上での問題点を考えてみよう。

作業道をつくるということは、傾斜地である森林に比較的、平らな路面を作設することである。当然、急傾斜地よりも緩傾斜地のほうが作設は容易である。急傾斜地では路面を作設するために、

より多くの切土や盛土つまり土工が必要であり、同じ規格の作業道を作設するなら、急傾斜地の方が、コストがかかる。したがって、急傾斜地では、スイングヤーダやタワーヤーダのような比較的長い、木寄せ、集材が可能な機械で作業システムを構成することによって、作業道の開設を抑える必要がある。

一方で、緩傾斜地では機械に設置されたウインチによる地引による木寄せだけで事足りてしまう程度に、作業道を作設することも可能である。また急傾斜地であっても、大型の機械の導入を行わずに、幅員の大きさを抑制することによって高密度に路網を展開している事例もある。

同じ山岳道である林道と比較した場合、林業機械が走行する作業道は、トラックなどの走行を考慮に入れない場合には、幅員が狭く、比較的大きな縦断勾配を許容し、盛土高や切土高は抑えられる傾向がある。しかし、盛土が不可能な、急傾斜地で作業道を開設すると、どうしても切土によって作業道を作設せざるを得ないので、長大な切土のり面が発生して、それが切土のり面崩壊の可能性にもつながる。急傾斜地への路線導入はできるだけ避けるべきである。

作業道では、切土のり面や盛土のり面は、自然による緑化が原則であり、排水工は簡易な排水施設にたよっている。そのため、大きな縦断勾配区間を設けることによって、路面水による路面の浸食が発生、あるいは、うまく排水されず集まつた路面水が盛土部分に流れ込んで路体崩壊させてしまうようなことも起こりうる。

作業道は、その性質上、起点と終点をむすぶ役割だけでは十分でなく、図-1にみられるように、機械導入を面的に行わせる必要がある。つまり、作業道を森林全体にいきわたらせる必要がある。比較的傾斜の急な地域で作設される作業道の路網には、谷から山の斜面に沿って上っていく、縦断勾配の大きな幹線と、そこから等高線方向に支線を伸ばして、森林へのアクセスを可能にするパターンが見られる。

これらのことから、平野部ではなく山岳地に作設される作業道の計画や施工は、地形による制約をよく考慮したうえで、実行することが必要である。

## 第1項 数値地形図と路線選定ソフトウェアの開発

国土地理院が作成した10mメッシュの数値地形図は全国で利用することが可能である。また航空機レーザーによる測量によって2mメッシュの数値地形情報が入手可能な地域もある（図51）。こうした情報は地理情報システム（GIS）に入力して解析ことができる。このGIS上で対話的に作業道の路線選定を行わせることが考えられる（図52）。

作業道の作設は、地形を十分に考慮する必要があることはすでに述べた。GISでは数値地形から得られる情報に、等高線、選定された路線が重ねて表示できるので、ユーザーは等高線をたよりに地形と作業システムを考慮しながら対話的に作業道を計画することができる（図52）。



図 51 航空機レーザーによる2mメッシュの数値情報

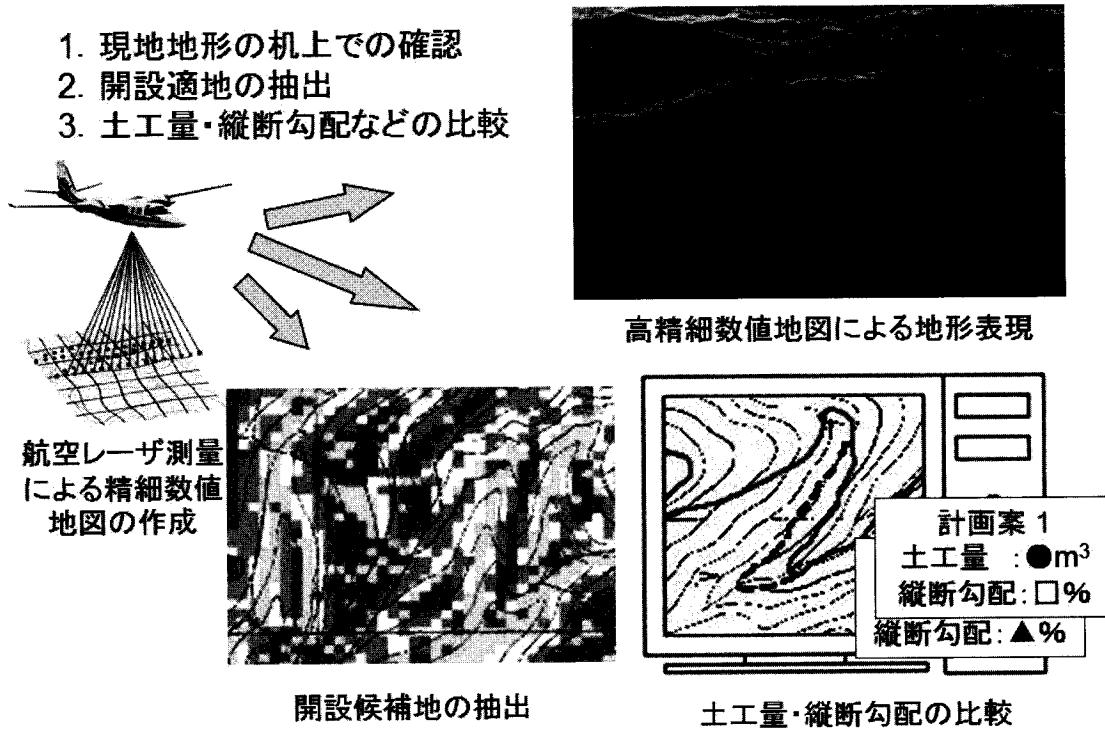


図 52 路線選定システムのイメージ

G I S では数値地形情報から T I N と呼ばれる空間三角形の集合を作成する機能が備わっているため、ユーザーが選定した任意の地点の地上高が算定できる。複数点からなる路線を選定すると、その路線に垂直な方向、つまり路線の横断面の形状も算定することができる。この断面情報に路線幅、切土勾配、盛土勾配を加えれば、路線の任意の点において、盛土、切土の断面の面積が計算できる。一定の区間ごとにこの断面積の計算を行えば区間長を掛けることによって路線の盛土、切土の土量が算定できるようになる。

こうした対話的な路線選定プログラムを使えば、実際に作業道を作成する前におおよその土工の量の検討をつけることができる。作業道というのは、一度作ってしまうとそれを修正することが非常に困難なので、机上の計算ではあるとはいっても、事前に、路線の位置やそれに伴う土工量の傾向が把握できることには価値はあると思われる。

特に、作業道の作設の初心者にとっては、作業道を計画するということを疑似的に体験できるという効果が大きいと思われる。

また複数の路線の比較が、定量的にできるという利点もある。数値地形情報を解析して得られる別の情報を、G I S 上で参照しながら路線選定を行えるという利点もあるが、これについては後述する。

一方で、欠点として考えられるのは、数値地形図がもっている情報に限界があることである。地形のもっている細かな変動、例えば小さな谷や、地表面の凹凸は、10 m メッシュの情報には含まれていない。2 m メッシュでは山腹を走る自動車道の形状まで含まれているが（図-3）、計算に必要なメモリや時間が増大する。

数値地形情報は地上表面の形状の情報しかもたない。その地表面の下にある土質や地質の情報は、別途入手して G I S 内で重ね合わせる必要がある。作業道は、急傾斜地を避ける一方で、崩壊の危険性のある場所や、施工が困難な土質、地質条件の場所を避けなくてはならないのであるが、そういう情報は実際に現地で踏査してみなければわからない。したがってこのソフトウェアによ

る路線選定は、計画の第一歩であり、現場における踏査や測量をとつてかわるものではない。

## 第2項 作業道が開設された斜面

図 53 は作業道が開設された場所の地形傾斜とラプラシアンを解析したものである。ラプラシアンとは、地形の形状をみるもので、地形が凹型斜面であればプラスの値を示し、凸型斜面であればマイナスの値を示す。●で示された幹線作業道と□で示された支線作業道の値に注目してほしい。地形傾斜では幹線は支線より傾斜の緩い場所に作設される傾向がある。また下段に示されたグラフは道が開設された場所の傾斜の分布の累積図である。この図から幹線は、ほとんど傾斜 30 度未満の場所を選んで作設されていることがわかる。支線は傾斜 30 度を超えて、40 度程度の場所にまで作設が行われていることを示している。

ラプラシアンは、幹線のほうがマイナスの値をとる傾向が明確に示されている。これは、幹線が凸上の地形に分布する傾向が高いことを示している。支線はゼロ付近の値をとっており、凹凸に関係なく開設されていることが推定できる。

まとめると、幹線は傾斜が緩やかで、凸型斜面の地形に配置され、支線は傾斜や凹凸にかかわらず配置されていることがわかる。このことを図 54、図 55 で確認してみよう。

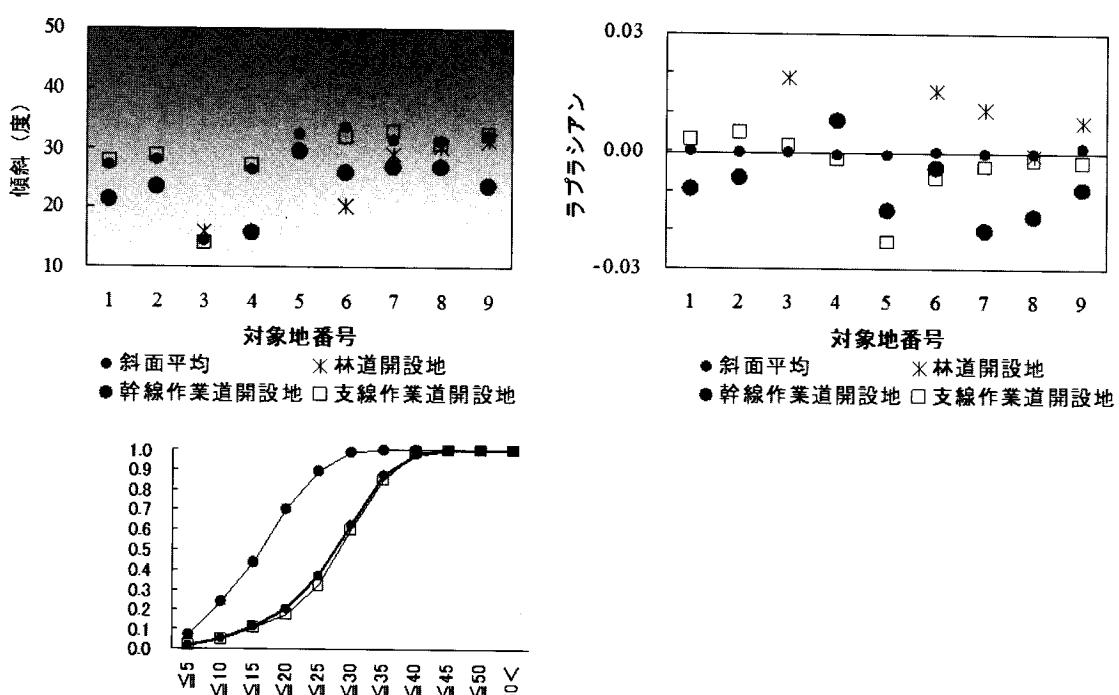


図 53 作業道作設箇所の地形解析

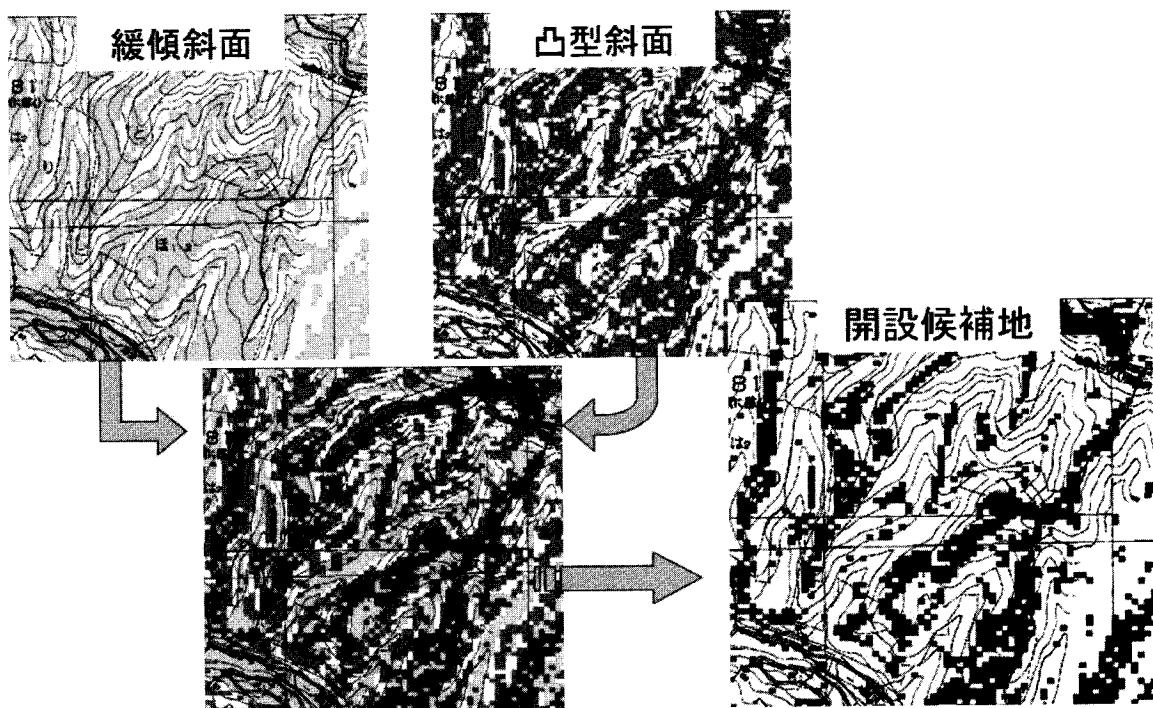


図 54 開設地の地形傾斜と凸型斜面

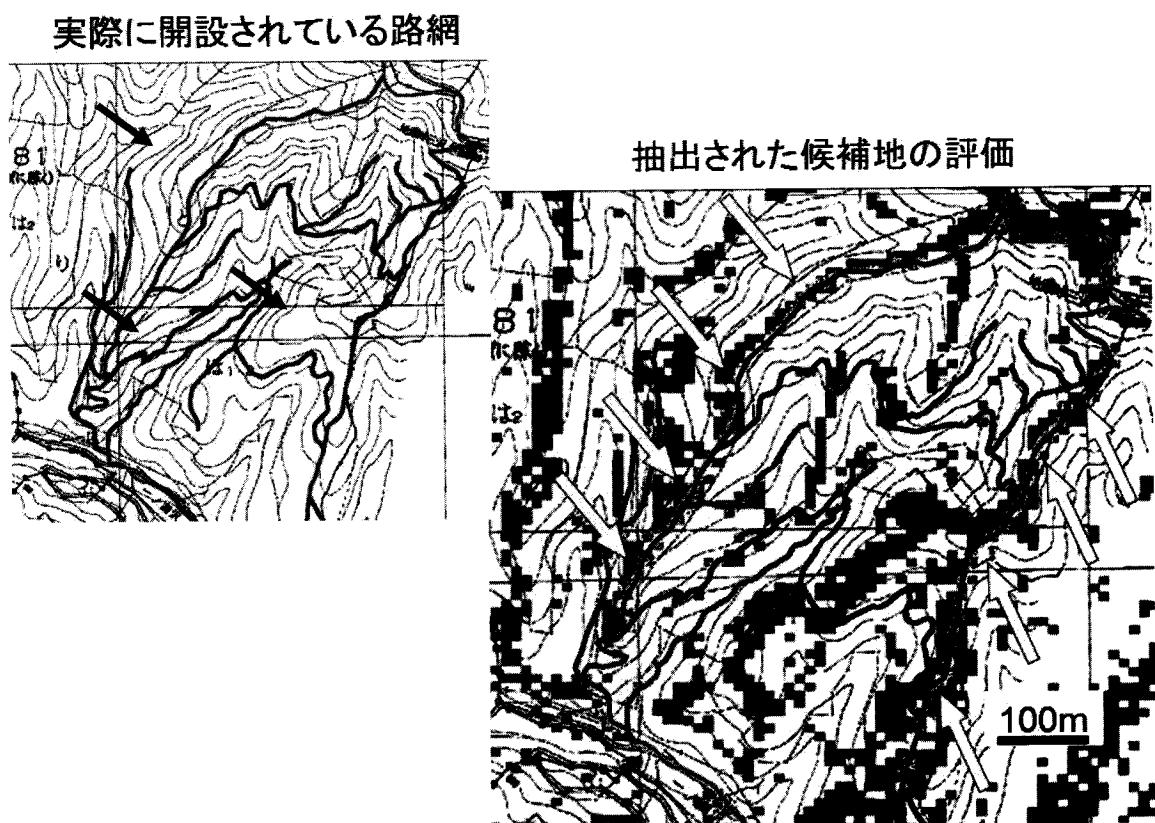


図 55 幹線の開設適地と幹線作業道の配置

図 54 の左上図は、着色した部分が傾斜 30 度未満の箇所である。右上図はラプラシアンがマイナスである、つまり凸型斜面を抽出して着色したものである。下段の左図は、傾斜が 30 度以下で、かつ、ラプラシアンが負の斜面を着色したものである。下段の右図は、傾斜が 30 度以下で、かつ、ラプラシアンが負の斜面だけ着色している。このような斜面は、地形的には、緩やかな尾根部に存在していることがわかる。

図 55 の左上図は、作業道による路網を示しており矢印で示された 3 本の路線が、幹線作業道である。幹線作業道のうちの 1 本は谷を上がっていく路線であるが、両側の 2 本は尾根をあがっていく路線であり。右側の路線は、取り付け部からヘヤピン状に上がっていく尾根へとつながっていることがわかる。両側の 2 つの幹線は、このように尾根部の傾斜 30 度未満で凸地形の場所にとりつけられた、主として山を登っていくことを重視した路線である。こうした路線は部分的に縦断勾配がきつくて、車両による作業ができない場所もある。この幹線から等高線方向に設けられた支線は、勾配が緩やかで、主として森林作業を行うために設けられた支線である。

G I S を路線選定に用いることの利点の一つは、こうした補助的な情報を利用したうえで、実際の作業システムを想定しながら、路線選定が行えることである。

### 第3項 地形情報と作業道の土工量

数値地形図からえられる情報を表示しながら、路線選定を行い、その土工量を予測するソフトウェアを開発するのであるが、それが実際の土工量とどれだけ違うのか、あらかじめ検討しておく必要がある。そのための現地調査を行った。解析の対象地を図 56 に示す。

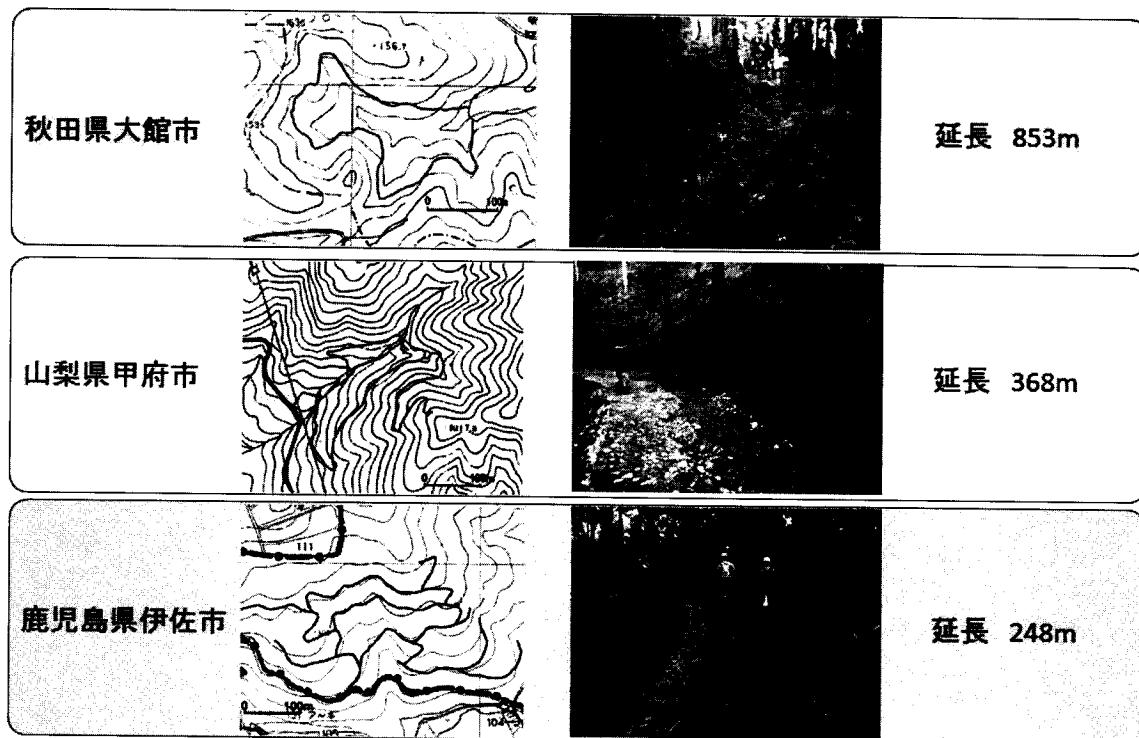


図 56 解析対象地

G I S から得られる路線の横断面の地形情報に対して、幅員、盛土勾配、切土勾配の情報を与えれば土工量が算定できると述べた。盛土、切土勾配については、平成 22 年に林野庁によって示された作業道開設指針によれば、切土のり面勾配は土砂の場合は 6 分、岩石の場合は 3 分を標準とすることや、盛土のり面勾配は、盛土高や土質等にもよるが、概ね 1 割より緩い勾配とすることなど

が示されている。さらに幅員は傾斜や使用機械に応じて定めるものとされている。

のり面勾配に関してはかなり絞られているが、幅員に関しては使用機械による、ばらつきが想定されている。

問題は、土工量を計算するプログラムを作成する場合、断面ごとに幅員やのり面勾配を設定するようになることが望ましいが、それがプログラムを非常に複雑なものにすることである。できればのり面勾配や幅員は一定の値を与えることで済ませたい。

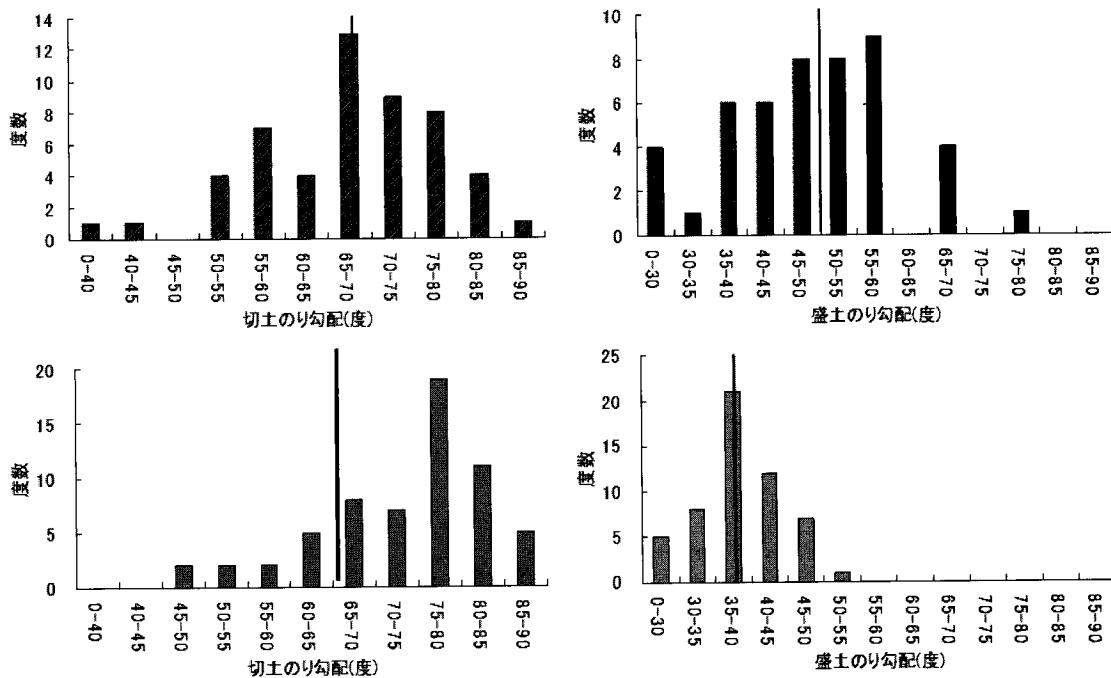


図 57 のり面勾配の分布

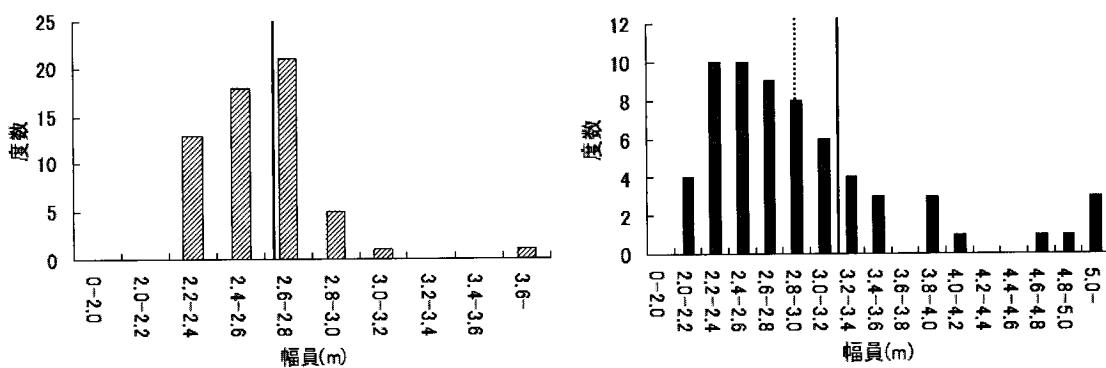


図 58 幅員の分布

図 57 は大館市（上段）、甲府市（下段）の、のり面勾配の実測値の分布を示したものである。また図 58 は幅員の分布である。それぞれ、縦棒が分布の平均値を示す。切土は大館、甲府とも 3 分（70 度）程度、盛土は大館が 8 分（50 度）、甲府が 1 割 2 分（40 度）となっている。大館の盛土勾配が大きいのは土質が粘性土であることによると考えられる。いずれも、ばらつきのある分布をしているが、これは施工後の変化に起因するものや、作業道そのものが、設計図にしたがって開

設されるわけではないので、施工のばらつきによる影響が考えられる。

幅員は大館（左側）が 2.8m、甲府（右側）が 3.2m程度であり、これは開設や間伐に使用する機械の違いが主な原因である。しかし、条件が良い個所では作業性を考えて拡幅されることがある。また条件の悪い場所では最低限、機械が走行できる幅員があればよい。両者の分布の最小値が、急に途切れているのは、このためである（図 58）。

図 59 は測量と数値地図から得られた作業道の横断面の傾斜を比較したものである。

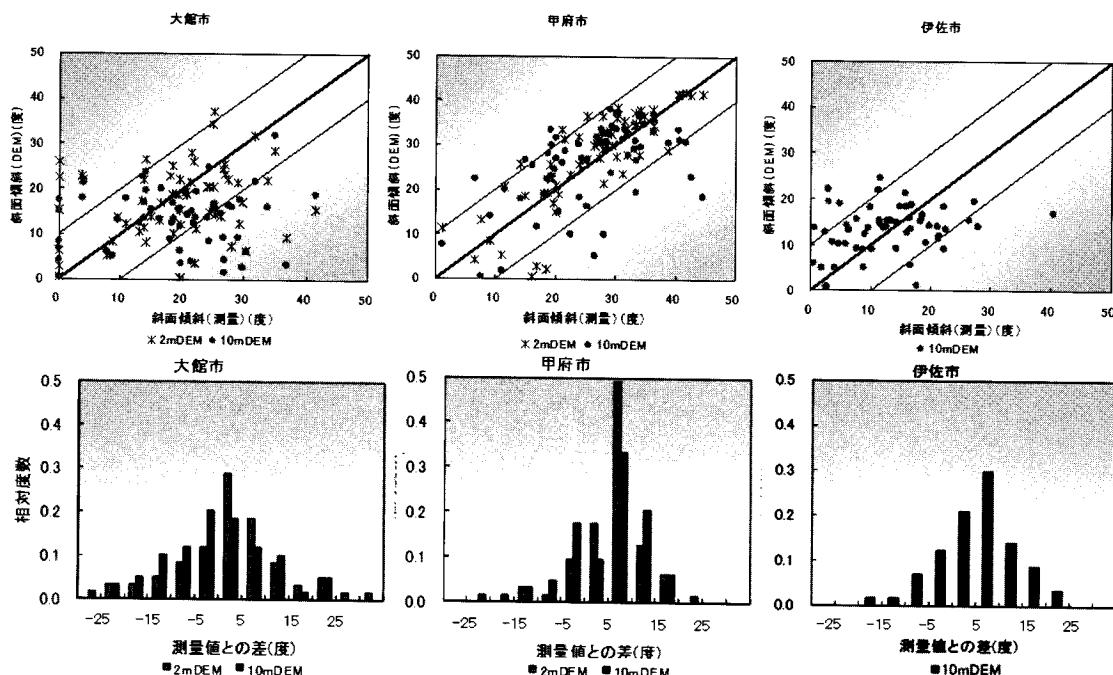


図 59 測量及び数値地形図から得られた作業道横断面の地形傾斜の比較

大館と甲府では 2 m メッシュの数値地形図も入手できたので、10m の数値地形と比較することができる。

3か所とも、数値地形図からの計算値と測量による値は相関していることがわかるが、相関の程度はあまり高くない。これは、路線上の位置を G P S で測定しているため、位置情報の誤差によるものと考えられる。また、大館の実測値の 20 度から 40 度の間で誤差が大きく、実測値よりも低い値がでている。この原因としては、大館の調査地が、地滑りによるものなのか、地表に凹凸が多い地形であることが考えられる（図 56）。2 m メッシュを用いた場合、若干精度が向上していることもわかる。2 m メッシュを使った場合に精度がそれほど向上しないのは、位置情報の誤差に加えて、G I S が三角形網（T I N）を作成する段階で、細かな凹凸の情報を省いてしまうことが考えられる。

このように、対話型プログラムによる土工量の予測は、のり勾配、幅員のばらつきに加えて、横断面の傾斜の誤差も加わることから、困難なことが予測された。

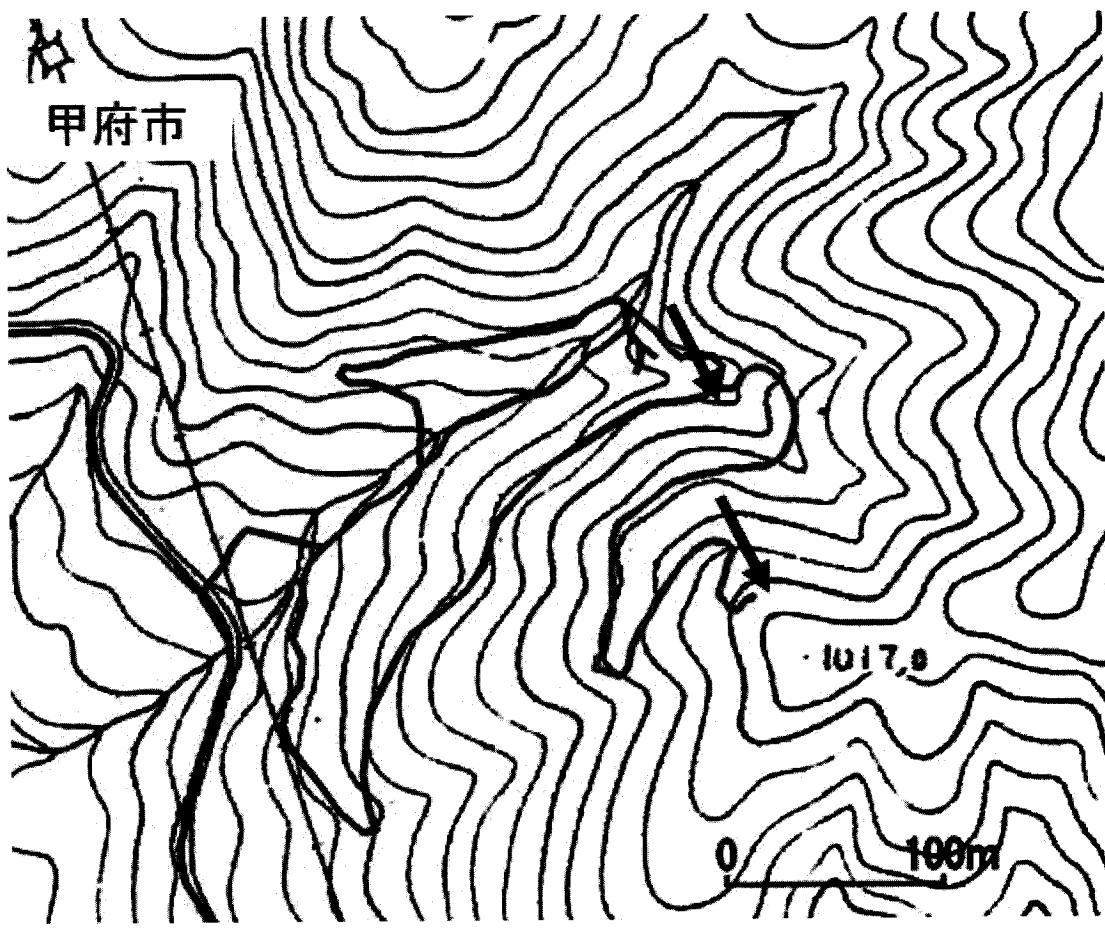


図 60 甲府の調査地

図 60 の甲府の調査地で、矢印で示された区間において、数値地形図から予測した土工量と、測量から求めた土工量を比較した。

結果は、測量による土工量は切土が  $1.7\text{m}^3/\text{m}$ 、盛土が  $1.1\text{m}^3/\text{m}$ 、合計  $2.8\text{ m}^3/\text{m}$  であり、予測値は、切土が  $0.8\text{m}^3/\text{m}$ 、盛土が  $4.1\text{m}^3/\text{m}$ 、合計  $4.9\text{m}^3/\text{m}$  であり、合計値は倍近い差となった。横断面の傾斜の精度、のり勾配や幅員のばらつきから考えて、予測が困難であることは予見されたのであるが、それでも合計値に 2 倍程度の違いがあるため、実測と計算による横断面を比較して原因の考察を行った。

#### 第4項 土工量の精度対策

図 61 は実測と計算値が大きく外れている横断面における、実測による横断面図と計算による横断面図を比較したものである。測量による横断面図は、両切りと呼ばれる切土のみで作設された断面である。予測では、わずかな切土と大きな盛土により計算されている。この理由は、路面高の設定によるものである。計算では、路面高は、選択した地点の地表高を標準の路面高とする仕様になっている。そのため、このような差が生じたのである。コンピュータで何かを計算させる場合には、路面高の初期値を設定する必要があるが、その際に地表高をデフォルト値として採用している。路面高をあらかじめ入力する手間を省くためである。しかし、路面高は、路線の縦断勾配を決定し、盛土、切土のバランスを調整するための重要な要素である。したがって開発するソフトウェアではデフォルト値での計算の後、各断面の路面高を調整できるようにする機能を組み込むことが必要なことがわかる。図の下段、右側は、路面高の調整後の断面で、土工量はほぼ、測量によるものとほぼ一致している。

●測量

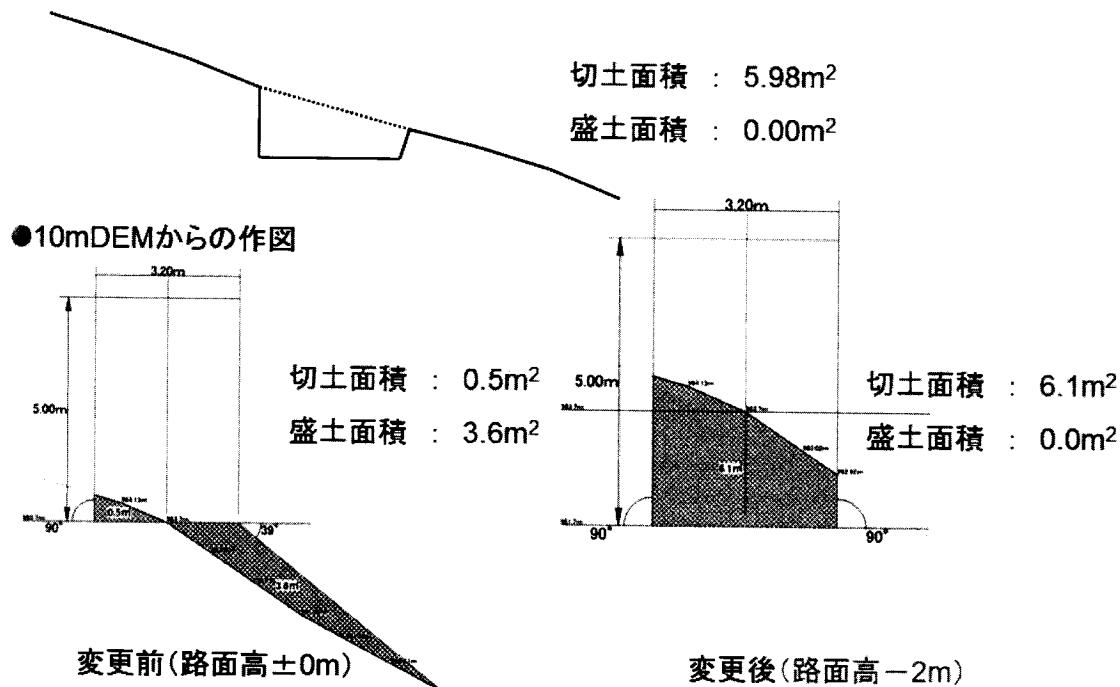


図 61 路面高の調整

図 62 では、測量の断面に比べると、盛土の計算値が過大となっている。断面を比較すると、これは明らかに幅員の違いによるものであることがわかる。すでに行った調査では幅員にも、相当なばらつきがあった。デフォルトでは 3.2m である幅員を 2.4m にすることによって計算値が実測値に近づいたことがわかる。

図 63 では、測量の断面に比べると、予測による盛土量が多い。これは、盛土ののり勾配が予測値では緩やかであることが理由である。実際の作業道ではのり勾配に、かなりのばらつきがあった。デフォルト値では盛土ののり勾配は 1 割 2 分 (40 度) としている。図の下段、右側の図はのり勾配を 1 割 (45 度) に変更したものであるが、それにより予測値は実測値に近づいている。

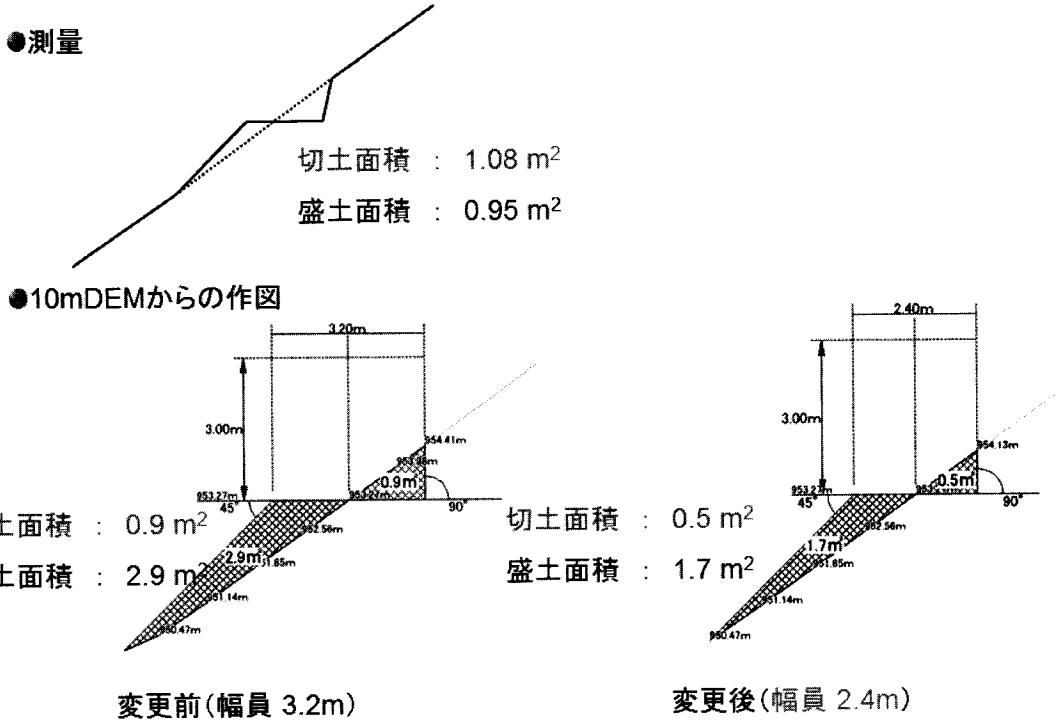


図 62 幅員の調整

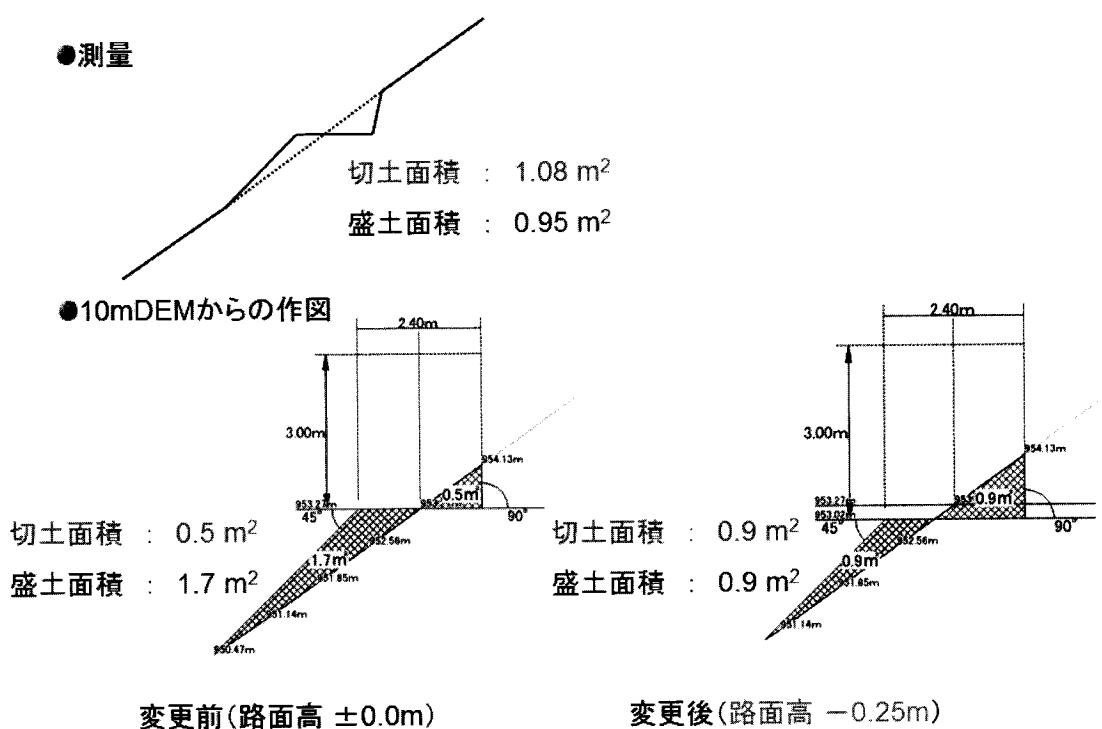


図 63 のり勾配の調整

図 64 は、調査地 3か所における作業道路線の土工量の合計の比較を、実測値を 1 として、評価したものである。調整なし、路面高の調整、路面高と幅員の調整、路面高、幅員、こう配の調整と手間をかけることによって予測値が実測値に近づいていくことが明らかである。とくに大館の 2 m メッシュによる計算の精度向上が著しい。

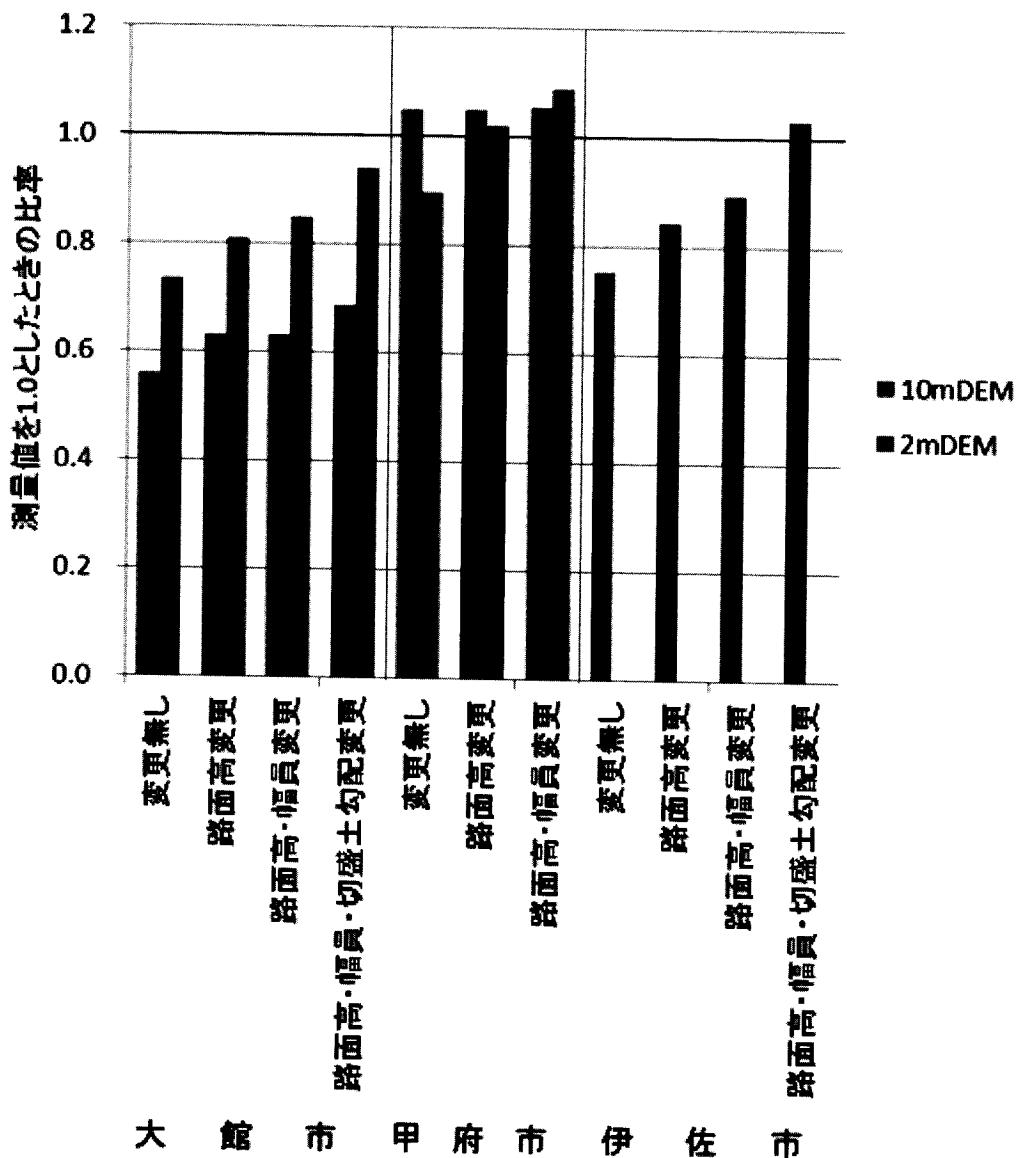


図 64 作業道の土工量合計の比較

これらの結果から、数値地形図による土工量の予測は、計画高、のり勾配、幅員を調整すれば有効な予測となりうることが実証された。

このうち、計画高の調整は、車両が走行可能なように縦断勾配を調整したり、盛土、切土のバランスを決定する本質的な要素であるため、各計算断面において調整できる仕様とすることにした。のり勾配や幅員は、残念ながらデフォルト値のみ変更可能である。

しかしながら、このソフトウェアの当初の目的は、踏査の前に行う、地図上での路線選定に数値地形図による情報を加えて、概算の土工量の評価をすることである。いいかえれば、どのような斜面にどのように路線を入れれば、どのような土工量となるのか、あるいは、路線間の土工量の比較に対して、大まかな推定値を知ることである。勾配や幅員は、使用する作業システムや土質、地質に依存するものであるから、デフォルト値の変更ができれば十分であろう。

他にも、プログラムは、盛土が不可能な斜面を選択した場合、縦断勾配が制限値を超えた場合に警告をだすなど、数値情報をつかった様々な機能を提供する。

また作業道を数値で、あるいは図面で残すという役割もある。長年にわたる経験をへて道づくり

のベテランとよばれるようになった技術者の路線選定が、どのようなものなのか、初心者が選定する路線とどのように違うのかなど、路線選定を定量的に分析することができる。

## 第5項 土工量計算ソフトウェアの概要

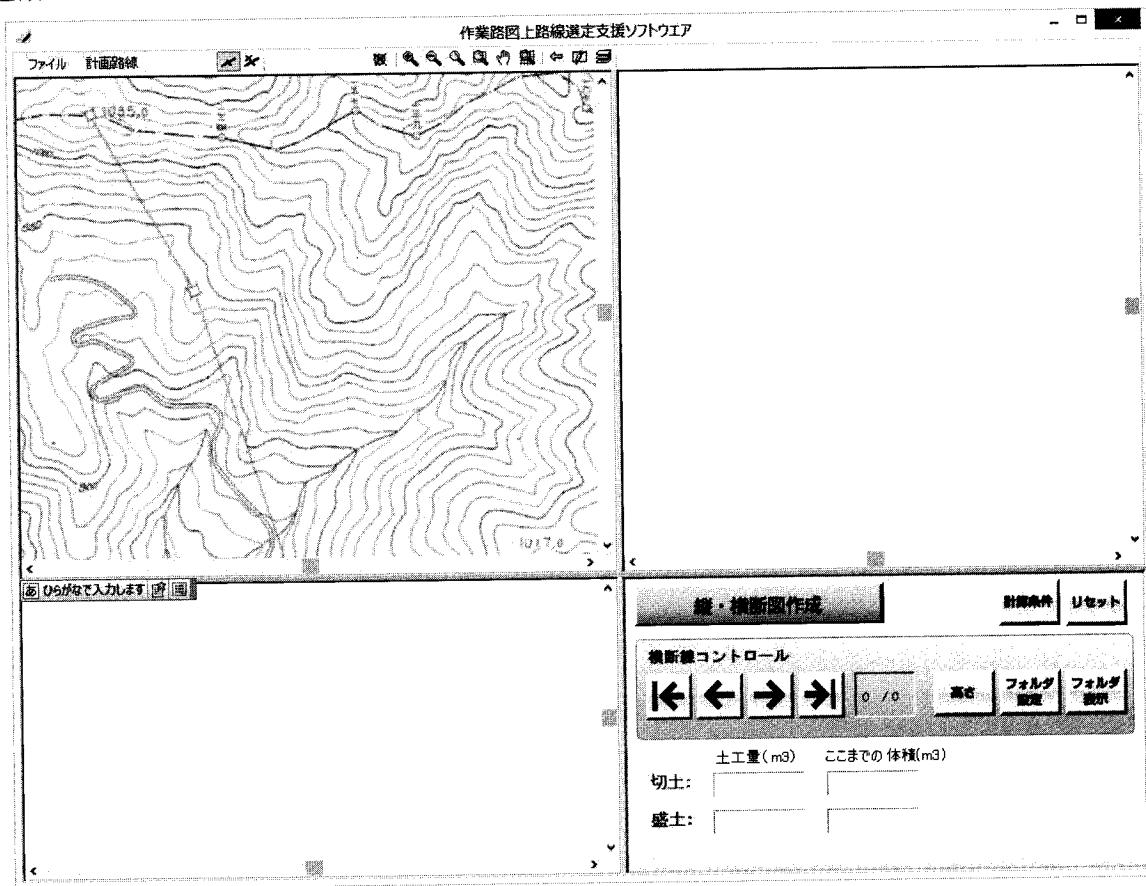
### (1) 起動とデータ入力



左のアイコンで示される SelectedRoutes.exe をダブルクリックします。

ファイル→開くメニューをつかって GIS が作成したデータ(.SWD)を読み込みます。  
このファイルには、基本図.bds、道路.bds、Tin.bds の3つのファイルを含んでいる必要があります。

(起動して.SWD データを読み込んだ状態)



G I S の上に構築されたシステムであるため、G I S のもつ

選択解除

地図の拡大

地図の縮小

選択拡大

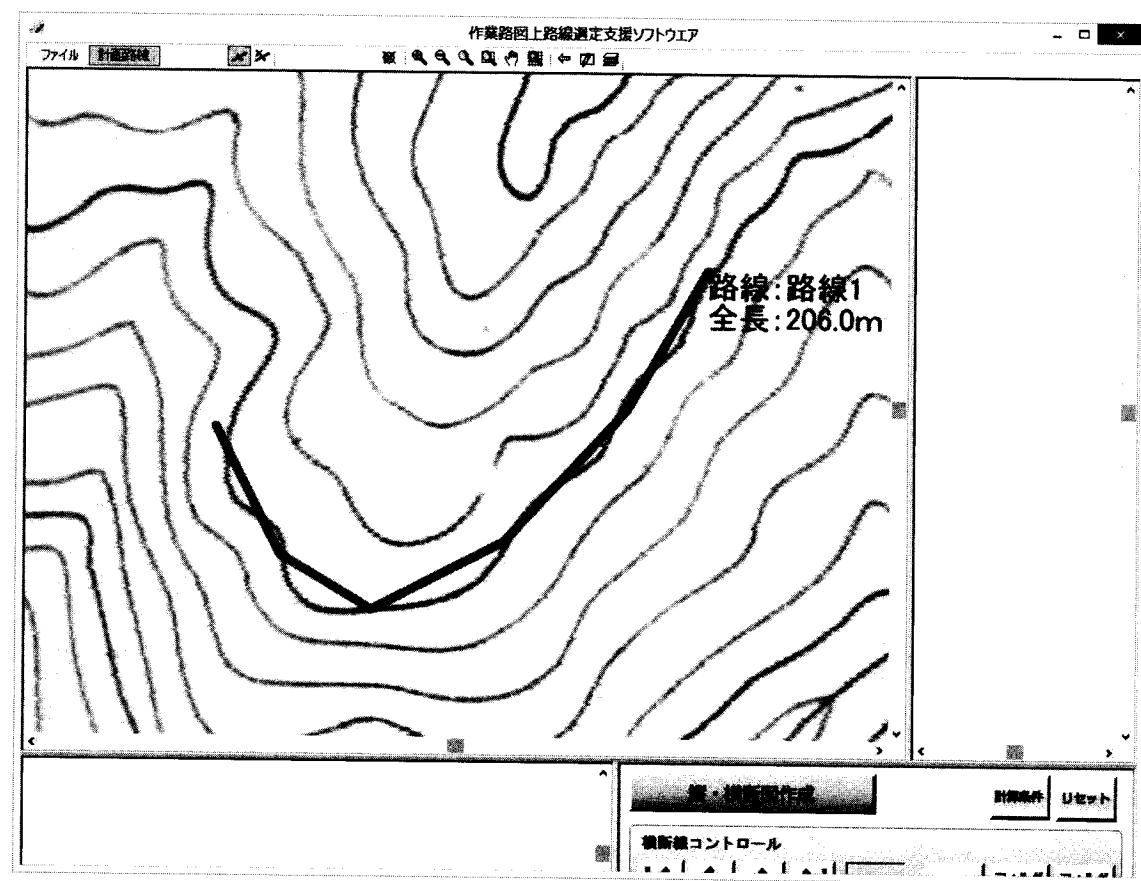
といったコマンドがそれぞれの子ウインドウで実行できます。

### (2) 計画路線の入力

左上のウインドウが対話的に路線を入力するウインドウになります。

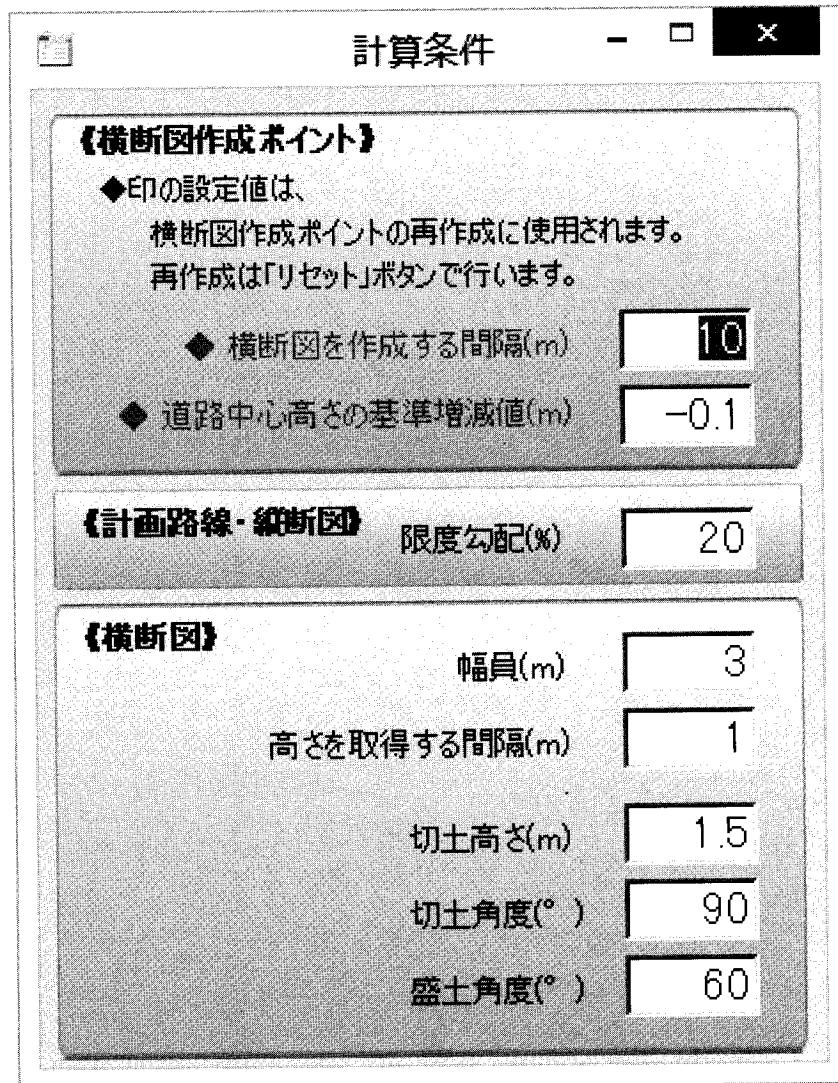
地形図をわかりやすい大きさまでズームアップしてマウスで予定線を入力します。

入力の終わりでエンターキーを入力して路線を確定させます。



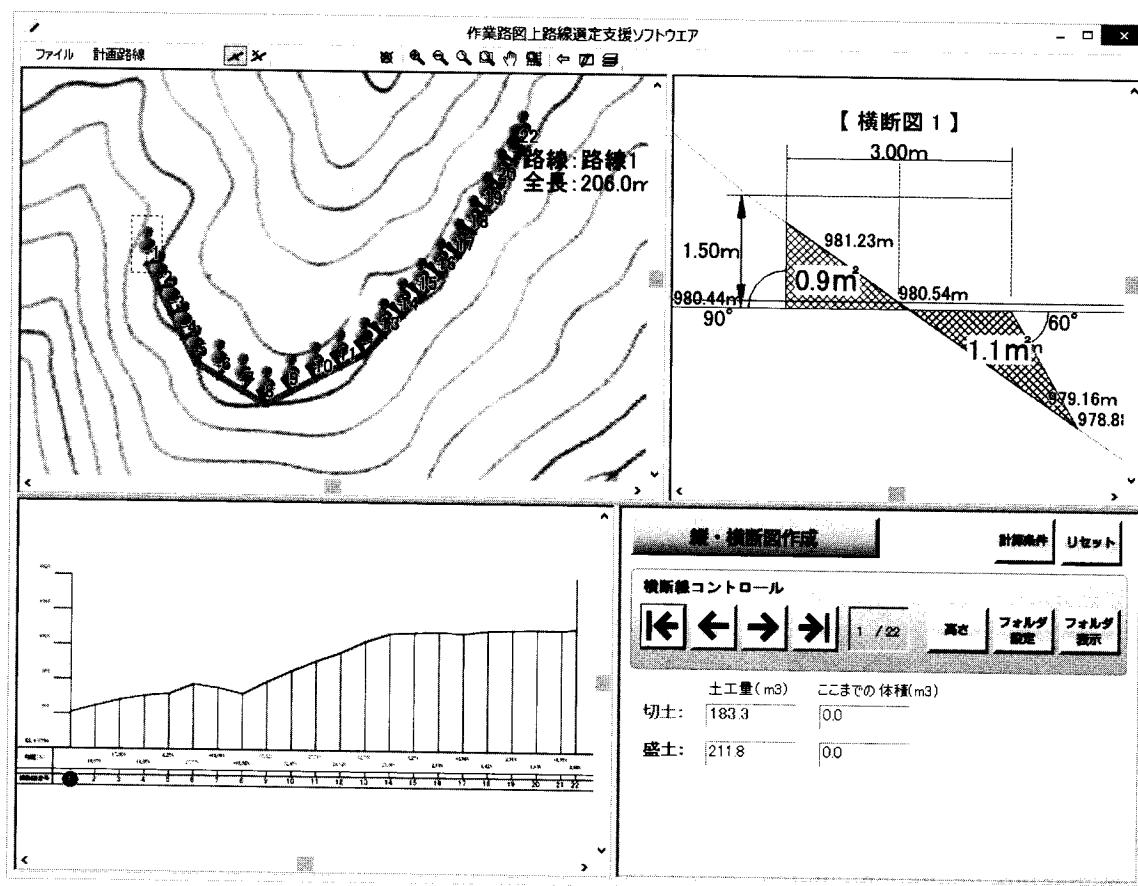
尾根をほぼ等高線にそって走る作業道（路線 1）を入力しました。  
この時点で路線 1 の全延長が 206m であることがわかります。

### (3) 計算条件



土工量の計算に先立って、計算条件を変更できます。  
横断面を作成する間隔、限度こう配、切土、盛土勾配などが入力できます。  
ここではこれらの条件を変更せずに土工量を計算します。  
土工量を計算するには、右下のウインドウの縦・横断図作成と書かれた黄色のボタンをクリックします。

#### (4) 土工量の計算結果



これだけの操作で、土工量の計算は終了です。

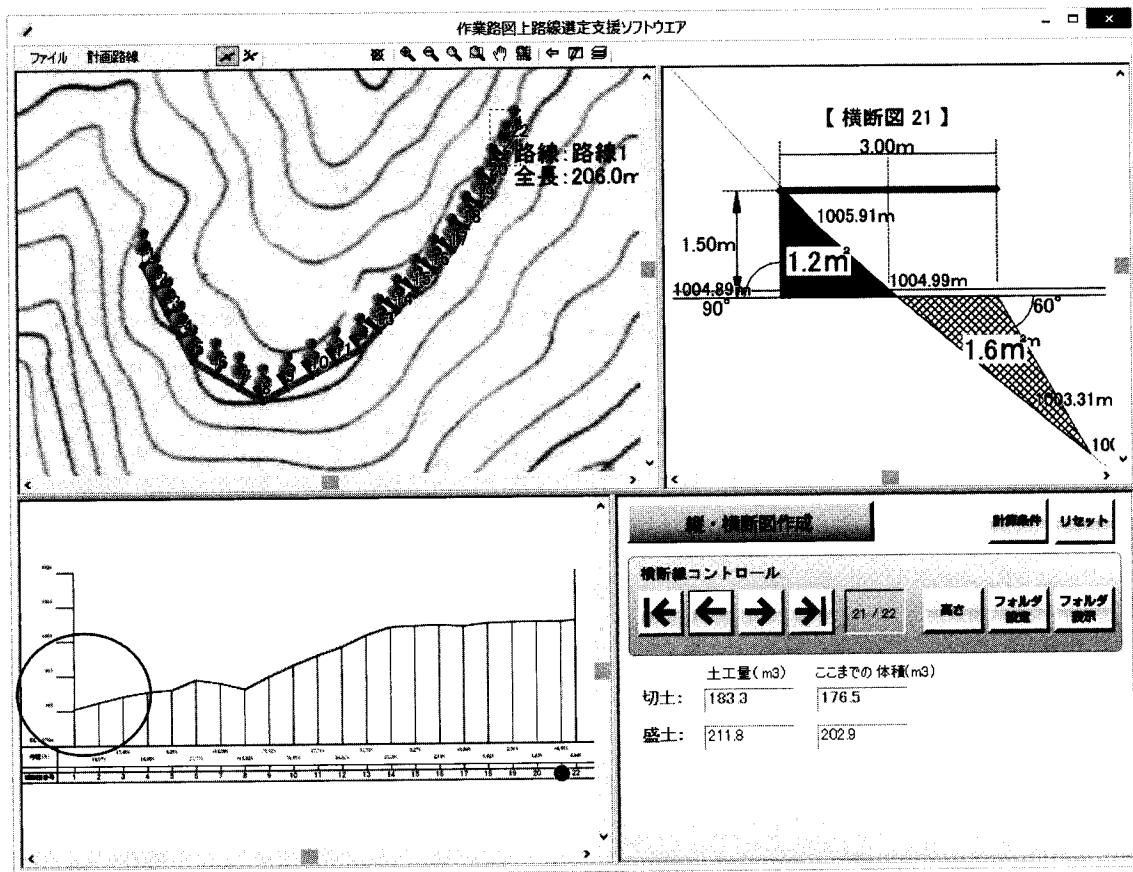
切土量は 183.3、盛土量は 211.8m<sup>3</sup> です。

右上のウインドウには最初の横断面の図面が描かれます。

右下のコントロールの矢印ボタンを使って、順番に横断面を見ていくことができます。

左下のウインドウには路線の縦断図が表示されます。

## (5) エラーの表示



横断図では切土の高さが規制値を超えた場合や、予定した盛土勾配で盛土が急傾斜地形にすりつかない場合、エラー表示をします。

この計算では 21 番目の断面のみ、切土高が計算条件で指定した制限値である 1.5m をこえていました。

また左下の縦断図面にも赤線が引かれていますが、これは計算条件で指定された限度勾配 20% を超えていることを示しています。

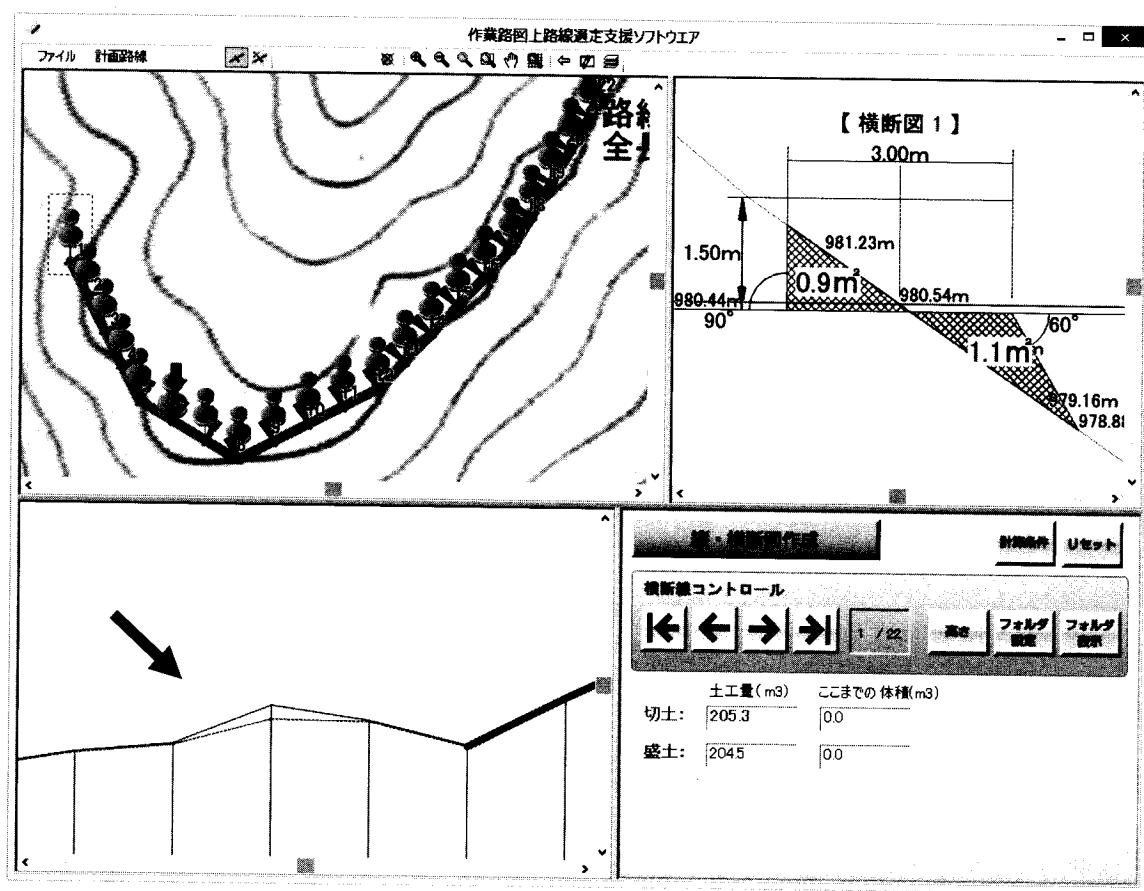
縦断図の丸印で示された箇所の縦断勾配を路面高の調整によって変更してみましょう。

## (6) 路面高の変更

矢印ボタンをつかってエラーが示されている断面へ移動して、右下コントロールウインドウの「高さ」ボタンを押すと次のダイアログボックスが現れます。



路面高を-1m下げるように入力した結果が以下の図です。



黒矢印で示されている通り、路面高が下がって、縦断勾配も制限以下に抑えられたことがわかります。

#### (7) その他の機能

選択した路線を、現地踏査に備えて、携帯 GPS で使用できるように出力できます。

逆に、GPS で取得したデータを入力路線として使用することもできます。

平面図、縦断図、横断図は画像として出力することができます。

(田中良明)

## 第4節 森林作業道からの土砂流出対策

### 第1項 はじめに

森林作業道をはじめとする路網の開設が各地で進められている。森林作業道作設指針では、森林作業道とは「継続的に用いられ」、「丈夫で簡易」な道（1）とされる。そのため、路線計画や施工方法などが盛んに検討されてきたが、森林作業道（以下、作業道）の開設による環境影響に関しては、これまで優先的に検討されてこなかった印象がある。しかし、継続的に使用する道であれば、環境に対する影響も長期間にわたって及んでしまう懸念があるため、森林作業道の環境影響に関する検討は十分に行う必要がある。環境への影響として考えられるものはいくつか挙げられるが、本稿ではその最たるものとして、土砂・濁水の流出を取り上げることとする。なお、以下の内容は農林水産技術会議「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」における「間伐促進のための低負荷型作業路開設技術と影響評価手法の開発」の成果を取りまとめた手引書（2）から引用している。

作業道の開設は、山地の自然斜面を掘削して、のり面や路面などの裸地を人工的に作ることに他ならないため、少なからず土砂の移動や濁水が発生してしまう。元の斜面に存在していた植生や落葉などは、雨滴の衝撃から土の表面を保護し、侵食を抑制する効果をもつため、裸地化した斜面では自然斜面と比較して何倍もの土砂が移動するようになる。土砂流出が著しい場合には、谷に流入して濁水となり、生活用水や養魚施設などにも大きな影響を及ぼしてしまう。作業によって発生した濁水が原因で、簡易水道の取水が止まってしまったケースも起こっている。

次章からは、作業道からの土砂流出を抑えるための考え方について述べた後、土砂・濁水が流出する原因やメカニズムについて解説しながら、その抑制対策について紹介していく。

### 第2項 土砂を流出させない道づくりの考え方

作業道からの土砂流出を抑えるためには、路線計画から伐採・搬出作業終了後までの長期間にわたって対策を考える必要がある。作業道には、計画、施工、作業などの各段階があるが、これらの各段階において、どのような原因や現象によって土砂が発生しているのかを知ることが、抑制対策の第一歩となる。原因を知ることによって、後述する抑制対策をそのまま適用するだけでなく、各現場の自然条件に応じた適切な対応をとることも可能になると思われる。

各段階の中で、通常最も多くの土砂や濁水が流出するのは、施工時もしくは車両が通行する作業時である（3）。これは、掘削や走行によって路面上の土砂が搅乱され、搅乱された土砂が降雨によって河川などへ運ばれるためである。また、高すぎる切土のり面や、河川に接近しすぎる路線配置など、路線計画に起因する問題があると、継続的な土砂・濁水の流出につながる。さらに、作業直後の路面も搅乱されていて土砂が出しやすい状態となっているため、対策が必要となる。次章からは、「計画時」、「施工・作業時」、「作業終了時」の三つの段階に分けて、土砂流出の原因と対策を紹介する。

### 第3項 土砂流出の原因と対策

#### （1）計画時

作業道の路線計画では、斜面のどこにどのような道を開設するか検討を行っていく。開設する斜面の選択が不適切な場合、崩壊などの危険性が高くなるだけでなく、縦断勾配やのり面の高さなども大きくなってしまうため、適切な勾配、高さとするためにも路線計画が重要となる。

作業道における土砂流出実態を明らかにするため、小倉らは、既設の85路線、総延長約88kmの作業道における被害特性を調査するとともに、別の路線に200mの試験地を設定して、土砂流出状況の観察を行った。まず、切土のり面の侵食・崩壊に関する調査結果を見ると、既設路線では切土

のり面高 150cm 以上、斜面傾斜 30 度以上の箇所でのり面の崩壊が多く見られ（図 65）、試験地内でも切土高 150cm 以上ののり面からの崩落土砂が多く見られた（図 66）。斜面傾斜が 30 度以上の箇所では、盛土側の路体が変位したことによると思われる路面上のクラックが発生しており、36 度以上の急傾斜地ではクラック数が急増（図 67）、一部で路体の崩壊も見られた。

次に、路面侵食について見ると、既設路線における侵食（軽トラックなどの車両の走行に支障ができると思われる程度の侵食）は縦断勾配 10 度（18%）以上の路面に多く見られた（図 68）。同様に、試験地内でも縦断勾配が 4 度（7%）を越えると侵食が始まり、10 度（18%）以上で侵食量が多くなっていた（図 69）。

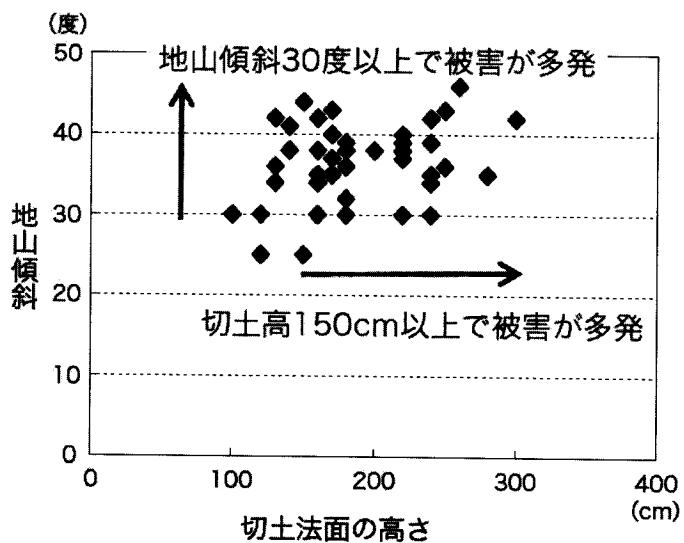


図 65 切土のり面の侵食・崩壊箇所数  
切土のり面の高さと斜面傾斜の関係

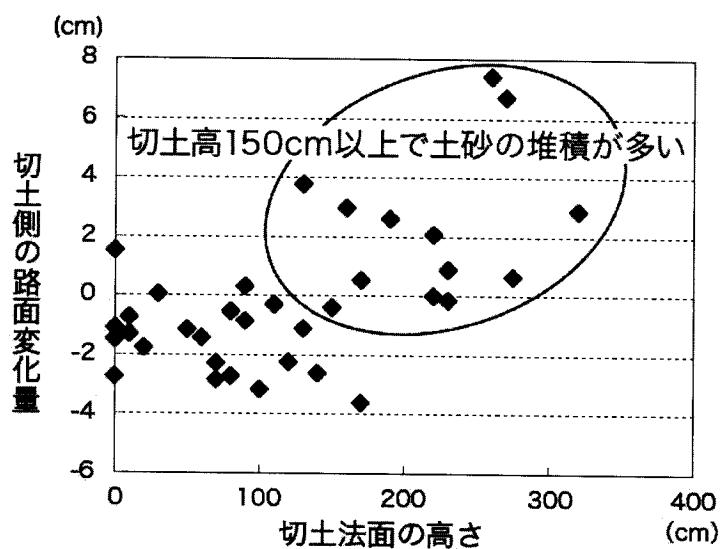


図 66 切土のり面の高さと切土側の路面変化

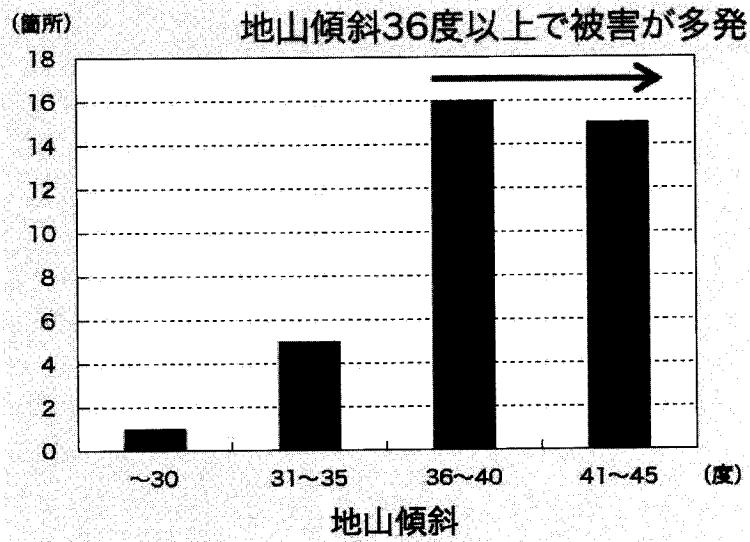


図 67 路面クラック発生箇所

これらの結果から、のり面高さ・縦断勾配・斜面傾斜をある一定以下に抑えると、侵食・崩壊の確率を低くできることが分かる。具体的には、切土のり面の高さは最大 150cm 程度、縦断勾配を 10 度 (18%) 以下とし、傾斜 30 度未満の緩傾斜面に開設することが求められる。なお、これらの制限値は、凍上や積雪などの気象条件、地質条件などによって異なることも考えられるため、各地の侵食、崩壊の実態をよく観察して、地域に合った値とすることが重要である。

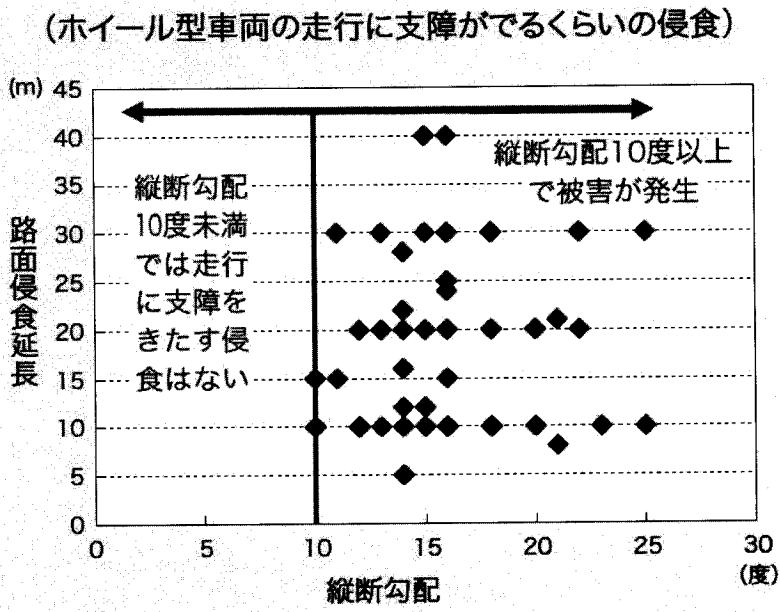


図 68 路面侵食発生箇所の縦断勾配と侵食延長

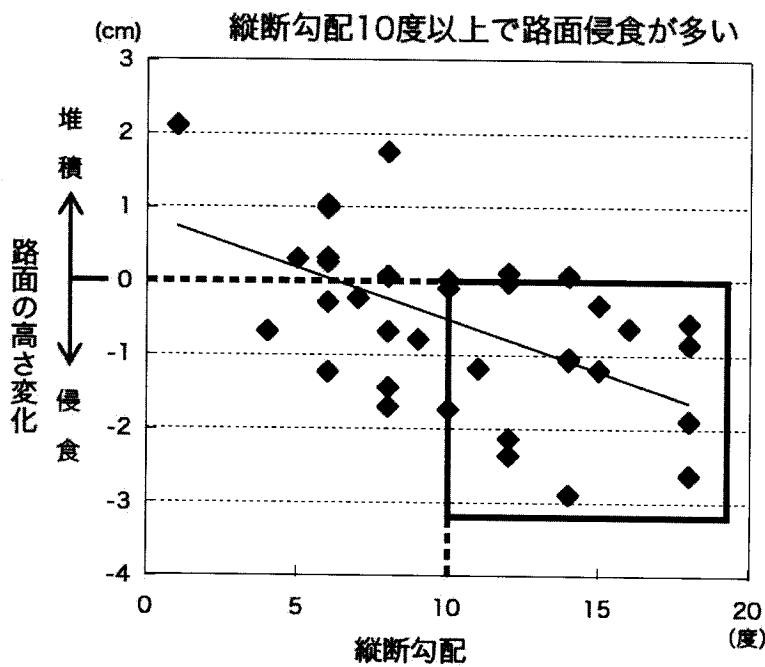


図 69 縦断勾配と路面の高さ変化

これらの制限値を実現するためには、図上路線選定や現場踏査を入念に行い、路線の配置や縦断勾配、のり面高などについて十分な検討を行わなければならない。全国の標高値を収録している数値地図を活用すると、地図上に描いた計画路線の縦・横断面図を表示することも可能となっており、図上路線選定を効率的に行うことができる。例えば、森林作業道支援ソフト（SR+・エスアルプラス）では、森林基本図などの画像を背景として、マウス操作で予定路線を描いていくと、縦断面図、横断面図を表示し、切土量、盛土量を算出することができる。これらの図面や値を参考にして、対話的な操作を繰り返しながら、より適正な路線に近づけていくことができる（4）。

次に、作業道からの濁水対策について見てみる。後述するとおり、施工・作業時の対策として濁水の濃度（濁度）を直接下げるることもできるが、それだけでは限界があるため、河川から作業道までの距離を考慮した路線配置が重要となる。それでは、作業道からの濁水が河川に到達しないようにするために、実際にどのくらいの距離が必要となるのだろうか。作業道から林地へ流れ込む土砂の到達距離について、臼田らが実態調査を行った結果、全体的に傾斜が急なほど土砂が遠くまで到達する傾向が見られた（図 70）。ただし、地表の被覆状況などが様々であるため、距離にはばらつきが見られる。同様の調査は Trimble（5）によっても行われており、道から発生した土砂が河川に到達しないために必要な、道と河川の距離の算出方法が提唱されている。この方法で算出される距離（図 70 中の赤い直線）も、調査結果と同様に傾斜が急なほど距離が長くなっている。例えば林地の傾斜が 35 度の場合には、道と河川の間には約 100m の距離が必要である。路線選定の際はこの距離を参考にして、可能な限り河川から遠ざけて路線を配置することが濁水防止の観点から重要となる。

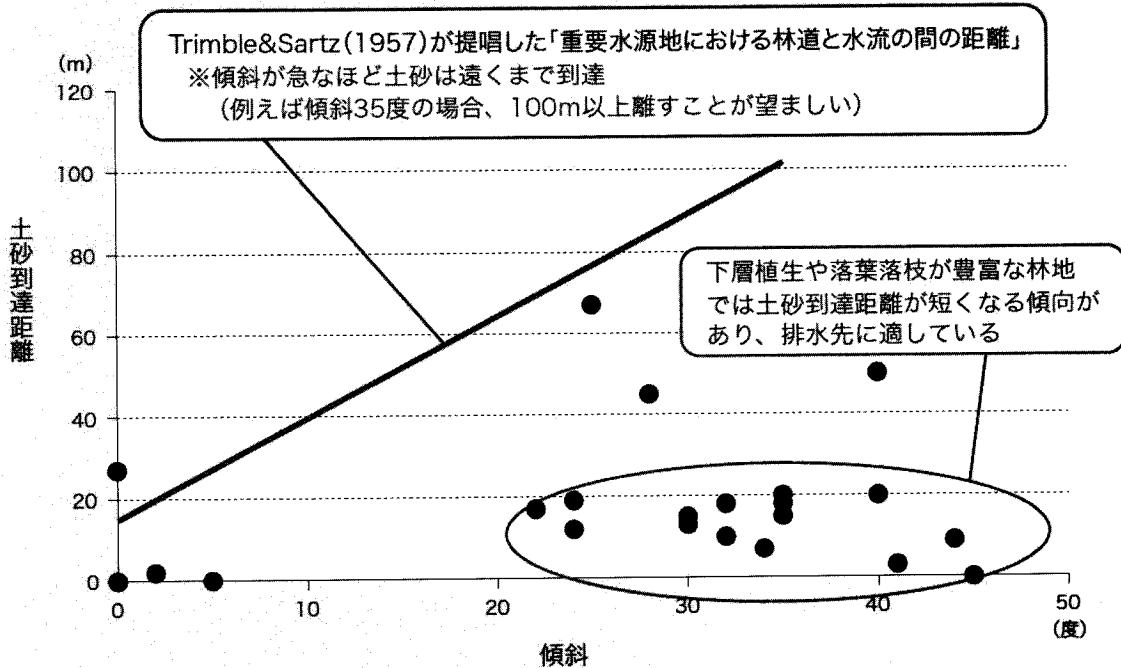


図 70 林地の傾斜と作業道からの土砂到達距離の関係

## (2) 施工・作業時

前述したとおり、施工・作業時には土砂・濁水が発生しやすい状態となる。土砂が移動すること自体はある程度避けられることなので、移動した土砂が河川へ流入して濁水とならないよう、濁水発生の原因と対策を述べる。

作業道が河川の濁度に及ぼす影響を明らかにするため、作業道が河川を横断する渡渉点の下流において濁度を計測した。作業道の施工前、施工・作業中、作業完了後に濁度を計測したところ、施工・作業中の濁度が最も大きくなっていた（図 71）。なお、これらのデータは計測した値のうち同程度の降雨強度時（約 10mm／時）の値を抽出したものである。土砂が河川に流入する原因の多くは降雨であるため、作業道に起因する河川の濁りを防ぐためには、降雨時の施工・作業を避けることが重要となる。また、その他の対策として、河川に流入する表面流（路面上を流れる水）の土砂濃度を下げること、表面流が河川に流入しないようにすることなどがある。以下に具体的な方法を説明していく。

表面流の土砂濃度を低下させるためには、沈砂池を設けることが有効である（6）。沈砂池とは、横断溝などの流末部に設置する窪地（図 72）のことで、沈砂池内に流入した濁水が、あふれながらゆっくり流出することで、窪地内に濁水中の土砂を捕らえることができる沈砂池へ流入する前後で濁水の浮遊物質濃度がどのように変化しているのか計測した結果（図 73）、沈砂池を経ることで浮遊物質濃度が大幅に減少し、特に粒径 0.1mm 以上の土砂（主に砂）はすべて沈砂池内に捕捉されることが分かった。沈砂池の周囲を枝条で囲むと、土砂濃度をより大きく低減することが期待できる。

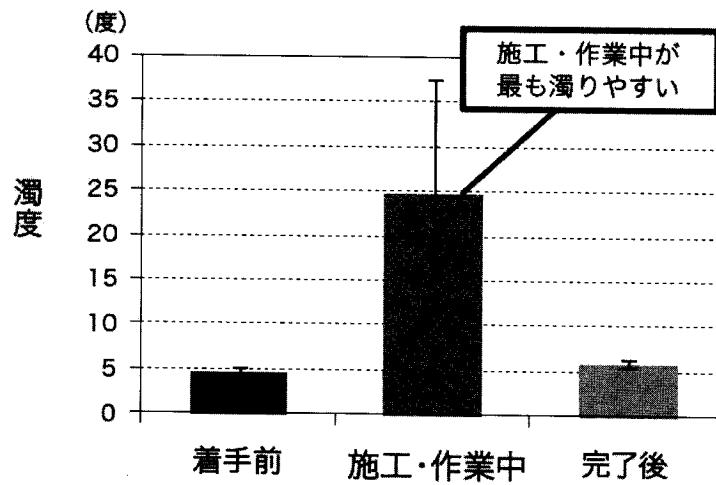


図 71 降雨時における期間別の平均濁度  
降雨強度はいずれも 10mm／時

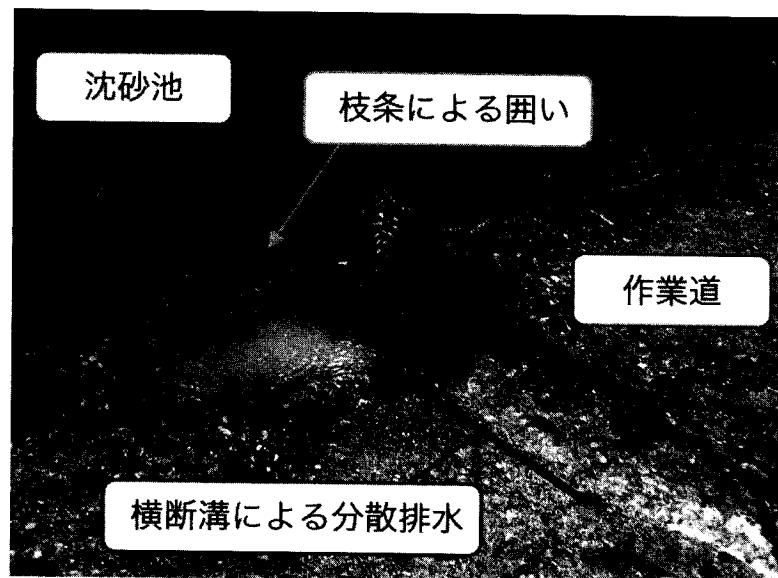


図 72 横断溝による分散排水と流末に設置された沈砂池

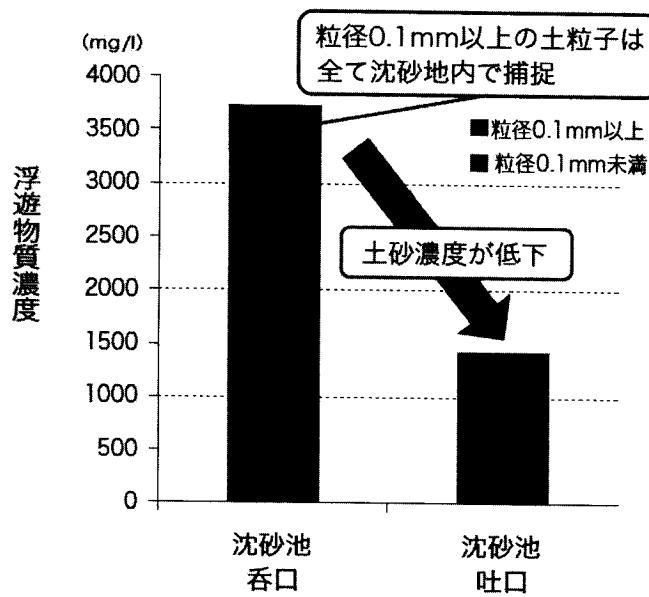


図 73 沈砂池による濁水の土砂濃度低減効果

路面から排水された表面流が河川へ到達しないようにするために、途中の林地に浸透させることも有効である（図 74）。林地は裸地と比較して水を浸透させる能力（浸透能）が高いので、濁水を浸透させることで、土砂の河川への到達を抑制することが期待できる。ただし、下層植生や落葉に乏しい裸地化した林地や、急傾斜面では浸透能が低くなっているため、このような林地への排水は避ける必要がある。また、大量に排水することも浸透能の低下を招くため、避けなければならない。路面からの排水をこまめに分散することは、路面侵食防止の観点だけでなく、濁水防止の観点からも重要となる。

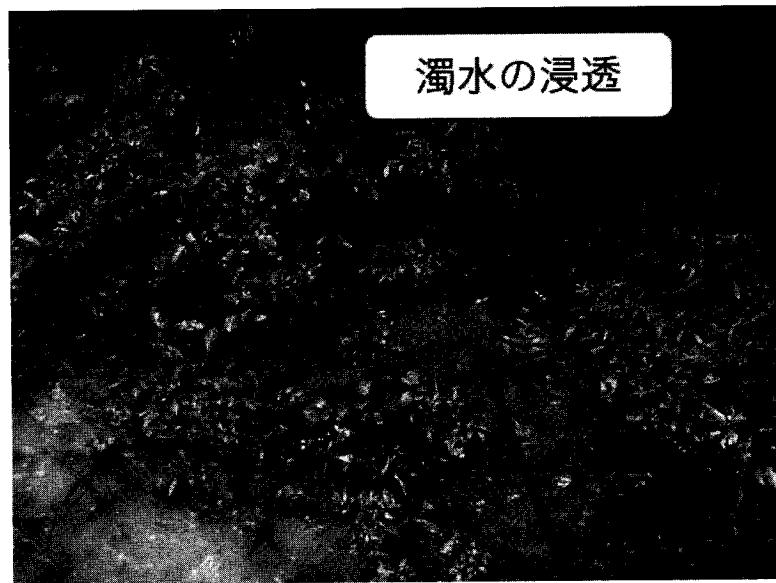


図 74 安定した林地へ浸透する濁水

河川に濁水が流入すると流下とともに濁度はどのように変化するのだろうか。調査結果を見ると、作業道から発生した濁水が河川へ直接流れ込んでいる箇所では、濁度が大きく上昇しているものの、約 60m 下流では流入前と同程度の濁度に低下していた（図 75）。しかし、流入水の濁度が大きい場合などは、数 100m 下流にまで濁水の影響が及ぶこともあった（7）。よって、生活用水の取水施設など特段の配慮が必要な施設がある場合、作業道の渡渉点などから十分離すよう留意しなければならない。

これらの対策は、いずれも一つだけで確実な効果を發揮するものではないため、各対策を臨機応変に組み合わせて対処することが重要となる。

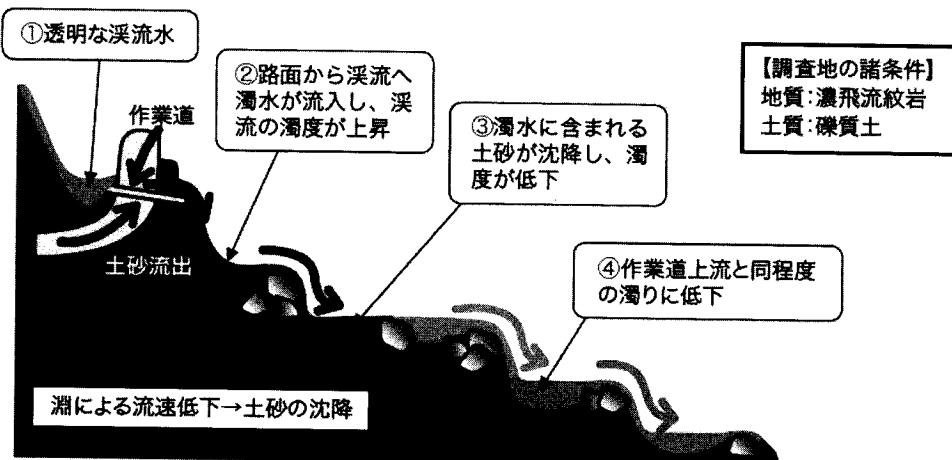
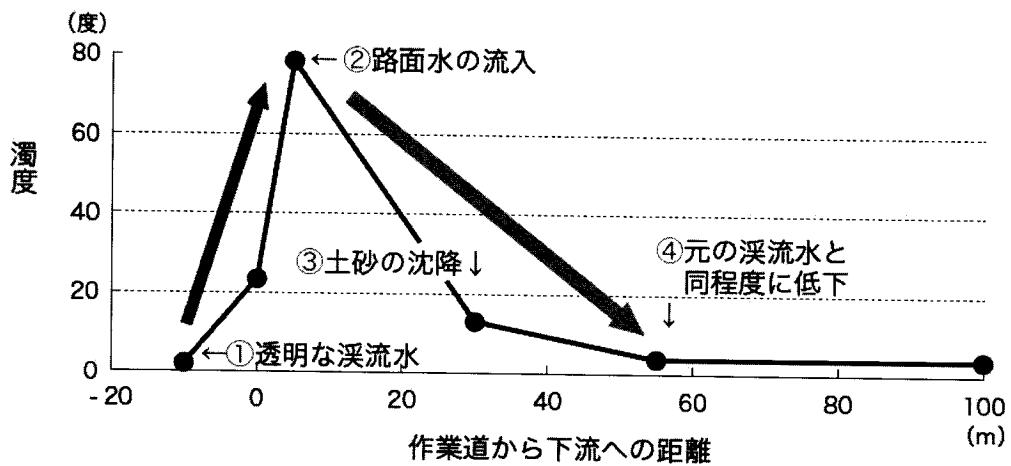


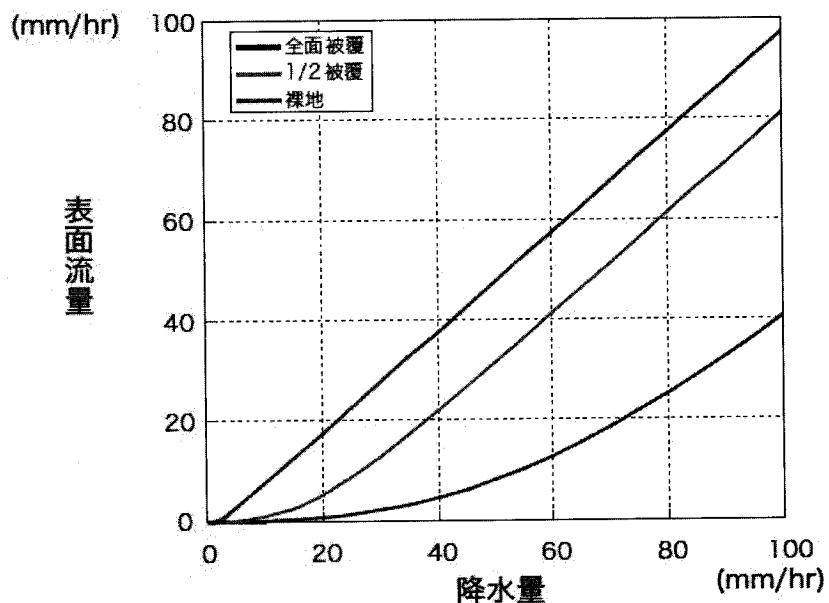
図 75 作業道から渓流へ流入した濁水の濁度変化の事例

### (3) 作業終了時

作業終了後の路面やのり面からも、主に降雨が原因となって土砂が流出する。路面のような裸地において、降雨から濁水が発生するメカニズムを以下に説明する。まず、雨滴の衝撃が土壤を剥離・飛散させ、目詰りなどが起こって浸透能が低下する。次に、浸透しきれなくなった雨水が下方に流れながら表面流となり、路面を侵食して濁水となる。つまり、作業道の土砂流出抑制の基本は、雨滴が路面を直接たたかないようにし、路面の浸透能の低下を防ぐことである。そのために、造材時の枝払いに発生した枝条を路面に散布し、裸地部分を覆うことで土砂流出を抑制することが効果的となる。ただし、枝条を散布した路面は走行に適さないため、この対策を実施できるのは、次の間伐まで長期間使用しない作業道に限られる。枝条散布の効果を調べた試験結果を紹介する。

枝条散布による表面流抑制効果を調べた現地散水試験の結果を見ると（図 76）、裸地の場合数 mm／時以上の降雨強度で表面流が発生しているのに対し、枝条によって  $1/2$  程度被覆した場合は約 10mm／時、全面を被覆した場合は約 20mm／時以上の降雨にならないと表面流が発生していない（8）。また、被覆程度を高くするほど、表面流の土砂濃度も低下することが分かり、裸地で 9.59 g/l、 $1/2$  被覆で 4.53 g/l、全面被覆で 0.72 g/l であった。これらのことから、枝条散布は表面流の抑制および土砂濃度の低下に効果があり、枝条散布によって作業道路面からの土砂の発生量を減少できることが分かる。そこで、作業終了直後の作業道（縦断勾配 10 度（18%））の路面を試験地とし、スギ枝条による被覆程度を変えた試験区として、全面被覆、 $1/3$  程度被覆、 $2/3$  程度被覆、裸地（被覆無し）を設定し、土砂移動レート（降水量 1mmあたり、1m の幅を通過する土砂量）を測定した（図 77）。その結果、全面被覆した試験区では土砂移動レートを裸地の 1%程度に軽減

することができた。また、被覆割合が増加するほど土砂移動レートが減少し、土砂流出が抑制されることも分かった（9、10）。同様の試験によって、ヒノキの枝条でもこれらの効果を確認している（11）。なお、枝条散布にかかる時間は、グラップルを用いた場合、スギで20秒程度、ヒノキで30秒程度（いずれも幅員3mの路線延長1mあたり）であった。このような差がでたのは、ヒノキはスギよりも硬く、グラップルでの取り扱いに時間がかかったためと思われる。なお、枝条とは枝だけを指す言葉だが、現場では枝払いした葉付きの枝を指すことが多いため、本稿でもこの意味で使用している。



裸地(枝条0%)の場合、数mm/hrの降雨で表面流が発生するが、1/2被覆の場合は10mm/hr程度、全面被覆の場合は20mm/hr程度の降雨で表面流が発生する

図 76 降水量と表面流量の関係  
路面枝条被覆状態の違いによる

前述したとおり、路面のような裸地では土砂流出が起こりやすくなるが、植生が繁茂してくると、裸地における表面流発生プロセスが緩和されて、土砂流出を抑制することができる。作業道路面における植生回復状況と土砂流出の関係（図78）を見ると、枝条を散布しない裸地では、散布した場合に比べて土砂移動レートが大きくなっているものの、植生が回復し始めると土砂移動レートが大幅に減少し、植生がほぼ回復する3年目には枝条散布した場合と同程度の土砂移動レートになることが分かる。路面の植生が回復すれば土砂の移動は収まるため、枝条被覆は植生が回復するまでの土砂移動抑制対策といえる。植生の回復期間については、谷付近で早く、尾根付近で遅くなる傾向が見られたが、平均的におおよそ3年程度であった。一方、盛土のり面の侵食防止にも早期緑化が有効な方法の一つとなる（図79）（12）。これは、掘削した表土を盛土のり面に貼り付けることで、省力かつ安価に実行することができる。表土には埋土種子や植物の根系が多く含まれ、腐植層に富んでいることから、早期に植生が回復して、土砂・濁水の流出を抑制することができる。

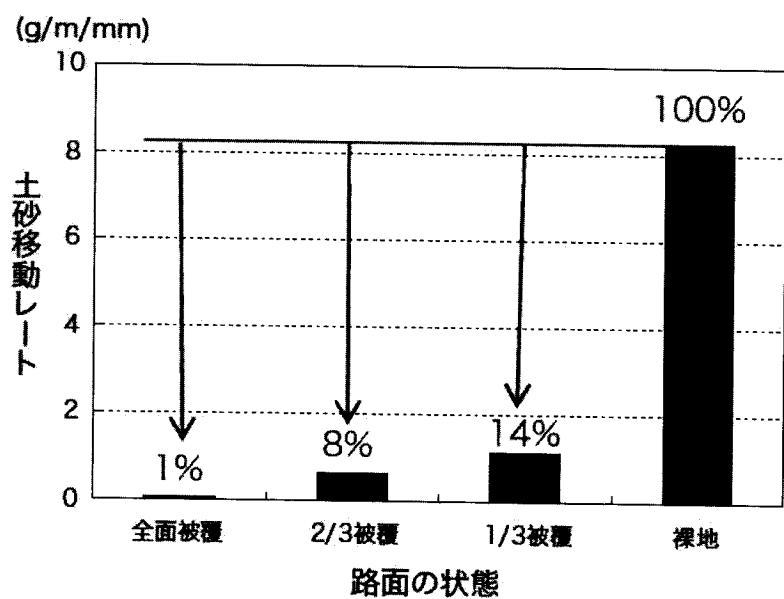


図 77 路面被覆状態と土砂移動レート

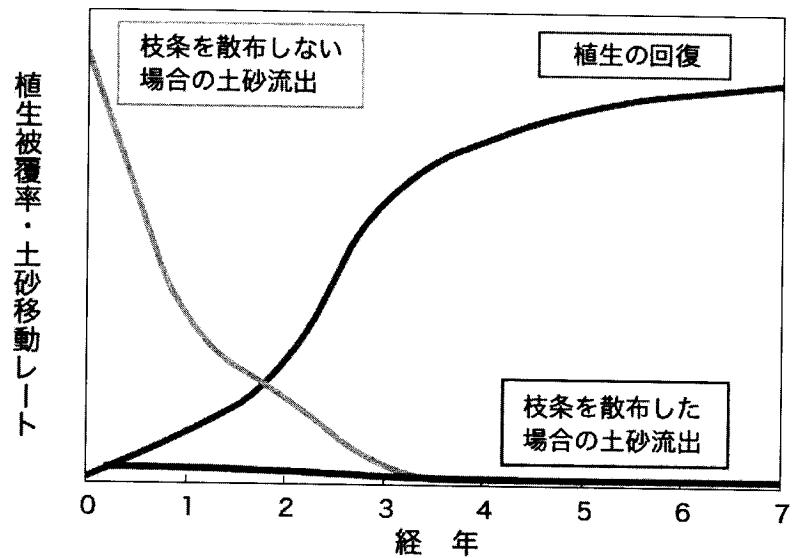


図 78 路面の土砂移動レートと植生の経年変化

#### 第4項 おわりに

以上、作業道からの土砂流出原因とその対策について紹介した。これらの結果は、主に石川県と岐阜県で調査されたデータであり、他の地域では地形や土質だけでなく、降水量や積雪量などの気象条件も大きく異なるため、土砂流出の抑制対策も異なってくると考えられる。紹介した内容を参考に、各地の特性に応じた対策を工夫していただきたい。

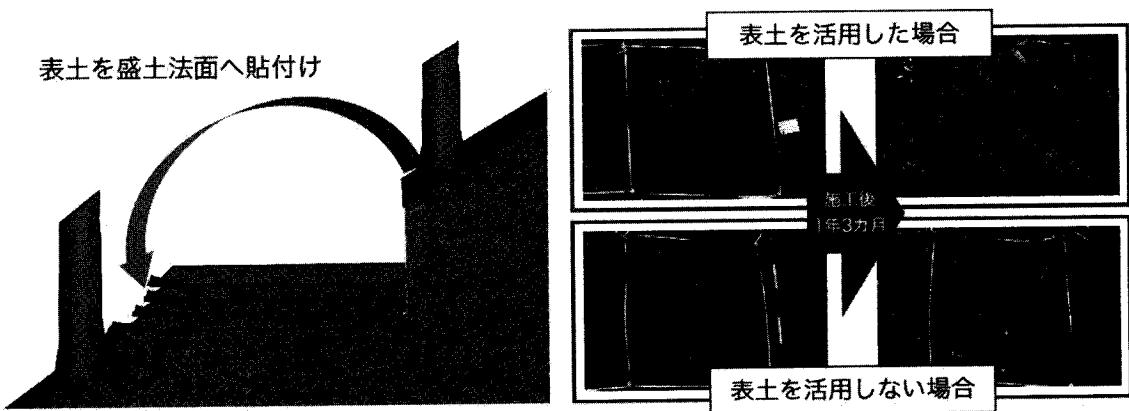


図 79 表土を活用した盛土のり面の早期緑化

### 引用文献

- (1) 林野庁「森林作業道作設指針」 <http://www.rinya.maff.go.jp/kanto/apply/publicsale/wood/pdf/sinrinsagyoudou-sakusetu-sisin.pdf>
- (2) 独立行政法人森林総合研究所, 石川県農林総合研究センター林業試験場, 岐阜県森林研究所 (2012) 森林作業道開設の手引き－土砂を流出させない道づくり－, pp20
- (3) 白田寿生, 古川邦明, 安達原子, 藤下定幸 (2010) 路網開設による濁水流出の実態について, 中部森林研究, 58, 79-80
- (4) 鈴木秀典 (2012) 森林作業道の路線選定を支援する, 季刊森林総研, 17, 9-11
- (5) Trimble G.R. & Sartz R.S. (1957) How far from a stream should a logging road be located? Journal of Forestry, 55, 339-341
- (6) 白田寿生, 古川邦明, 鈴木秀典, 小倉晃 (2014) 森林作業道における濁水流出防止対策の検討－沈砂池の効果－, 森林利用学会誌, 29, 97-100
- (7) 杉山正典, 古川邦明, 横井秀一, 白田寿生, 松本武 (2009) 山地小流域における作業路開設時の濁水発生について, 中部森林研究, 57, 169-172
- (8) 小倉晃, 恩田裕一 (2011) 現地散水試験による枝条被覆した作業路の浸透能の測定, 石川県林試研報, 43, 19-21
- (9) 小倉晃, 小谷二郎 (2009) 簡易作業路における土砂流出量の実態と抑制方法, 中部森林研究, 57, 167-168
- (10) 小倉晃, 小谷二郎 (2011) 簡易作業路の土砂流出特性, 中部森林研究, 59, 189-190
- (11) 白田寿生, 古川邦明, 小倉晃, 梅田修史, 鈴木秀典 (2011) 作業路の土砂流出抑制手法－ヒノキの枝条を散布して－, 日本森林学会大会学術講演集 122, Pb1-56
- (12) 白田寿生 (2012) 作業道における表土ブロック積み工法の法面保護効果, 機械化林業, 703, 10-14

(鈴木秀典)

平成 26 年 6 月 30 日 発行

編集・発行 (一社) 森林保全・管理技術研究所

郵便番号 102-0085

住 所 東京都千代田区六番町 7 番地 日林協会館内

T E L 03-5212-8148

F A X 03-6737-1237

E-mail office@hozen-ken.jp

U R L <http://www.hozen-ken.jp/>