

〈原著〉

平成18年長野県7月豪雨により岡谷諏訪地域で発生した 土石流発生地の植生的特徴

安田 哲¹・島野光司^{*,2}

Forests of mudslide areas in the Okaya and Suwa regions, Nagano prefecture, Japan. Akira YASUDA¹ and Koji SHIMANO^{2,*} (¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, ²Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto City, Nagano 390-8621. *E-mail: shimano@shinshu-u.ac.jp). *Bulletin of the institute of Nature Education in Shiga Heights, Shinshu University* 48: 1-7 (2011)

We compared artificial forests damaged by debris flow caused by heavy rainfall in Nagano prefecture in July, 2006 and undamaged forests in Nagano prefecture. Damaged forests had the following common characteristics: high H/D-ratio, high stem density, short distance between stems, small relative spacing, and thin litter. However, several other factors did not differ significantly between damaged and undamaged forests: species richness and species diversity on the forest floor, volume of forest floor vegetation, light environment, and maximum soil water capacity. In damaged artificial forests, stem densities and H/D-ratio were high. Such conditions led to weak root growth and forest that are easily damaged by natural disaster. We can't mention that condition of the tree root in the soil. In the future, it is necessary for more detailed understanding that relationship between the forests easily damaged by natural disaster and the artificial forests including high stem density and high H/D-ratio.

Key words: H/D-ratio, relative spacing, artificial forest, debris flow, management

1. はじめに

平成18年7月豪雨により、長野県岡谷諏訪地域は土砂災害に見舞われた。特に大きな土石流が発生した岡谷市湊地区の小田井沢川では、崩れた土砂が溪岸・溪床に生育していた樹木を巻き込み共に流下することで、下流部の住宅被害を拡大させた(平成18年7月豪雨土石流災害検討委員会2007)。

一般に、森林は土砂の移動を抑止する機能を持っており(只木1982)、群落の木本や草本が林床を被覆することにより土壌表面の侵食を抑制すること(Fahey and Jackson 1997; 福島 1977; Haigh and Gentcheve-Kostadinova 2002; Wilkinson 1999)や、樹木の根系が崩壊を抑止すること(Abe and Iwamoto 1986; 荒木・阿部 2005; 塚本 1998)などが報告されている。

また森林には、発生した土砂流出をその下流に生育する一定量の樹木に堆積し、軽減させる機能(藤田 1987; 古沢・海掘 2002; 水山ほか 1989)もある

が、本調査地では、崩れた土砂を森林(樹木)が軽減させることが出来なかったと考えられる。

そこで本研究では、土石流が発生した岡谷諏訪地域の小田井沢川沿いに成立していた森林がどのような状態(植栽木の密度や形状比, 相対幹距比, 植生体積, 林床の光環境, 多様度)にあったのかを調査し、どのような状態の森林で土石流が起きたのかを把握することを目的とした。また、同時に土石流が発生していない森林の植生も調査し、結果を比較した。

2. 研究の方法

2.1 調査地

土石流の発生した溪流に植栽されていた森林として岡谷市湊地区の小田井沢川に植林されていた人工林(アカマツ, カラマツ, スギ)で調査を行い、対照として、近隣に植林されている松本市, 塩尻市の人工林(アカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.), カラマツ(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrire), スギ(*Cypripmeria japonica* L. filii. D. Don.))でも調査を行った(図1, 表1)。また、対照として調査した人工林(以後, 対照区)はいず

¹ 北海道大学大学院環境科学院

² 信州大学理学部物質循環学科(〒390-8621 松本市旭3-1-1 *E-mail: shimano@shinshu-u.ac.jp)

表1. 調査地概要

全調査地点で植生帯はブナクラスに属する。

呼称	調査地名	調査地点	地点数	高度(m)	平均斜面角度(°)	立地
対照区	対照区 内田 アカマツ林	長野県松本市内田	5地点	811	2.0	斜面下部(沢沿い)
	対照区 高ポッチ スギ林	長野県塩尻市高ポッチ高原	3地点	1104	21.0	斜面中部
	対照区 片丘 スギ林	長野県塩尻市大字片丘1	2地点	852	2.0	斜面下部(沢沿い)
	対照区 美ヶ原 カラマツ林	長野県松本市美ヶ原高原	4地点	1190	19.5	斜面中部
	対照区 片丘 スギ林	長野県塩尻市大字片丘2	1地点	807	15.0	斜面下部(沢沿い)
土石流発生地	土石流発生地 アカマツ林	長野県岡谷市湊地区	5地点	950	18.6	尾根沿い
	土石流発生地 スギ林	長野県岡谷市湊地区	5地点	753~814	12.0	斜面下部(沢沿い)
	土石流発生地 カラマツ林	長野県岡谷市湊地区	5地点	814	7.2	斜面下部(沢沿い)

れも間伐の施されている林分であった。

いずれの調査地も標高753mから1,190m, 平均斜面角度2°から21°, 調査地の立地は尾根沿いから沢沿いまでである(表1)。また, 年平均気温は10.6°Cから11.5°C, 平均降水量は1019~1307mm, 暖かさ指数は85.6. (°C・月)から93.1. (°C・月), 寒さ指数は-15.3. (°C・月)から-18.1. (°C・月)である(年平均気温, 暖かさの指数, 寒さの指数, 年平均降水量はメッシュ気候図2000より算出)。

本調査地の潜在自然植生は冷温帯の落葉広葉樹林であるブナクラスに区分される(山崎1979)。調査地点数は, 小田井沢川の人工林15地点(アカマツ林5地点, カラマツ林5地点, スギ林5地点(サワラを含む))と, 対照区の人工林15地点(アカマツ林5地点, カラマツ林5地点, スギ林5地点(ヒノキを含む)), 計30地点で調査を行った(表1)。

地質は, 第三紀鮮新世(約500万年以降)から第四期はじめ(約180万年前)に噴出した塩嶺累層と呼ばれる安山岩溶岩や火砕岩から成る火山岩で広く覆われており, 塩嶺累層の基底は中生代ジュラ紀後期(約1億5千万年前)の泥岩・砂岩互層の編成した領家変成岩から成る(青木ほか2007)。また, 調査地が位置している諏訪盆地は, 北西-南東方向のフォッサマグナにより北東-南西方向に引き裂かれ, 埋没して舟形の盆地となったと考えられ, 盆地周辺の山麓は砂泥・砂礫から成る扇状地性の堆積物で形成されている(青木ほか2007)。

降水量は, 土石流発生時の2006年7月17日から19日までの3日間, 諏訪および上伊那地域では, 平年の年間降水量の約1/3の降水量があったと報告されている(青木ほか2007)。

2.2 調査方法

2.2.1 植栽木調査

植栽木の状態を調べるため, 15m×15mの方形枠内にある植栽種を含めた樹高1.3m以上の全て本木を対象に毎木調査を行った。その際, 土石流発生地

では沢に接している森林に植栽された箇所に方形区を設けた。樹種, 樹高, 幹周りの長さを測定し, 樹高と幹直径の比を示す形状比(樹高/胸高直径×100), 木がどの程度過密にあるかを示す立木密度(本数/ha)を求めた。

2.2.2 樹間距離ならびに相対幹距比(Sr)

植栽木調査に加え, 木の混み具合を示す相対幹距比(Sr, 平均樹間距離/平均樹高×100)を測定した。相対幹距比は%で表される。ここで用いる平均樹間距離は $100/\sqrt{N}$ で求めた。Nは1haあたりの立木本数である(西澤1972)。相対幹距比は17%以上20%未満であれば林分の混み具合は適正, 14%以上17%未満であれば過密, 14%未満であれば超過密であることが知られている(島崎1999)。

2.2.3 林床植生・リター層の厚さ調査

土石流発生地と対照区の出現種および種数を調べるために, 表1の30調査地点において, 2007年7月から10月にかけて植物社会学的調査(Braun-Blanquet 1964)を15×15mの方形枠を設置して行った。植生調査は植栽木を除く全ての植物を対象に行い種名, 被度, 群度を測定した。被度は5, 4, 3, 2, 1, +の6段階で, それぞれ75%以上, 50%以上75%未満, 25%以上50%未満, 5%以上25%未満, 5%未満, きわめて少ない, に対応している。

また, 植物による被覆が林床に到達する雨量や土砂流出を減少させること(藤井1959; 西田ほか1998; 沼本ほか1999)から, 小田井沢川の林床の植物量は対照区に比べ少なく, 土砂が流出しやすい環境だったのではないかと考え, 低木層と草本層の植生体積を林床の植生体積とし, 調査地に出現した全植物の被度×平均高($m^3/225m^2$)で求めた。ここでいう被度とは, ある植物種が地表面を覆っている度合いのことで, Braun-Blanquet(1964)の方法により種ごとの被度を決定するとき用いる植被のクラスである5, 4, 3, 2, 1, +の被度をその範囲の中央値で代表させたものである。具体的には5,

4, 3, 2, 1にそれぞれ87.5%, 62.5%, 37.5%, 15%, 2.5%を与えた。被度が+の場合は, Braun-Blanquet (1964) に従い, その代表値として0.1%を用いた。

さらに, 調査地に出現した植物の多様性を測定するために Shannon-Wiener の H' (多様度指数) を算出した (Shannon and Weaver 1963)。

$$H' = - \sum_{i=1}^s \text{Pilog}_2 \text{Pi}$$

ここで, s は 1 調査区内の種数, Pi は対象となる調査区内の i 番目の種の相対優占度である。相対優占度は林床の植生体積と同様, 6段階の被度をその範囲の中央値で置き換えたものである。この中央値がその種の 1 調査区全体の被度に対する割合である。単位は bit である。

次いで, 林床の植生体積量に比例して厚さが増すと考えられるリター層の厚さを測定するため, 調査地で A_0 層の厚さを測定し, リター層の厚さとした。

2.2.4 林床の光環境調査

<林冠閉鎖率>

林床植生に影響を与える林床の光環境を測定するため, 35の全調査地点において, 2007年7月から10月にかけて, 太陽の写りこみがないように曇天時に地上約1.3mで全天写真を魚眼レンズで撮影し (カメラ: Nikon COOLPIX5400; レンズ: Nikon Fish-eye Converter FC の E90.2x), パーソナルコンピュータ用の全天写真解析ソフト LIA32 ver.0.376 β 1を用いて林冠閉鎖率(%)を算出した。ここでは, 植栽樹の影響を測るため, 林床植生の上限として1.3mに高さを設定し, 撮影した。ただし, 亜高木層のある林分では, ここで得られる値は, 植栽木だけではなく, 自然に再生した亜高木の影響も受けている。

<光量子密度調査>

実際に林床にどれだけの太陽光が届いているかを調べるため, 35の全調査地点に光量子センサー (セ

ンサー: GaAsP フォトダイオード G1118, 浜松フォトニクス, 日本; ロガー: UIZ3635, HIOKI, 日本) を約1.3mの高さで設置し, 日積算光量子密度を測定した。測定は2007年11月01日から2007年11月13日に調査地一点につきセンサーを一つ設置し, この期間の晴天時3日間6:00から17:00までの平均値を測定値として用いた。この測定値を対照地点である信州大学理学部屋上に設置した光量子センサーの日積算光量子密度で割った値を求め, 相対光量子密度とした。また, カラマツの葉が黄葉しながらも, まだ落葉せずに残っていた。

2.2.5 最大容水量調査

調査地の土壌がどの程度水分を保持できるかを知るため, Hilgard法 (東京大学園芸科学教室編 1976) を用いて最大容水量を測定した。これは, 採取した土壌を 2 mm のふるいにかけて, 105°Cのオーブンで24時間乾燥させた試料を直径5.6cm, 深さ1cmの底部に小孔のあいた皿に, 2 mm以下の風乾細土を机上でたたきながら充填し, 底部を水に浸したときに土壌が保持する含水率を測定する方法である。

3. 結果

3.1 立木密度と形状比

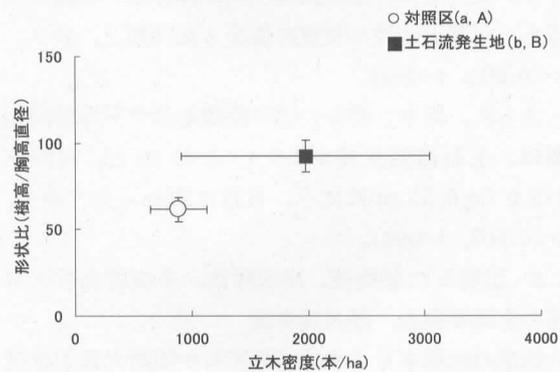


図1. 形状比と立木密度との関係

異なるアルファベット間に有意差あり。形状比の有意差は大文字, 植栽密度の有意差は小文字で表す。t-test, $p < 0.001$ 。

表2. 各測定項目

立地別平均の検定は t-test による。

場所	形状比	立木密度(本数/ha)	胸高直径(cm)	相対幹距比(Sr, %)	樹間距離(m)	植生体積指数($\text{m}^3/225\text{m}^2$)	リター量(cm)
土石流発生地	92.5 (± 9.1) a	1974.7 (± 1065.8) a	24.0 (± 6.7) a	12.8 (± 2.6) a	2.6 (± 0.8) a	167.0 (± 179.4) a	1.0 (± 0.9) a
対照区	61.7 (± 7.0) b	888.2 (± 240.1) b	31.8 (± 3.5) b	18.5 (± 1.7) b	3.4 (± 0.5) b	85.6 (± 73.3) a	3.4 (± 2.0) b

異なるアルファベット間に有意差あり。t-test, $p < 0.001$ 。カッコ内は標準偏差。

場所	出現種数(種/225 m^2)	林冠閉鎖率(%)	多様度指数(bit)	樹高(m) *	相対光量子密度(%)	最大容水量
土石流発生地	40.3 (± 11.5) a	76.7 (± 2.9) a	2.7 (± 0.6) a	20.6 (± 7.1) a	0.12 (± 0.07) a	0.46 (± 0.06) a
対照区	36.9 (± 13.1) a	75.3 (± 2.8) a	3.0 (± 0.8) a	18.6 (± 2.2) a	0.09 (± 0.06) a	0.47 (± 0.07) a

異なるアルファベット間に有意差あり。t-test, $p < 0.001$ 。カッコ内は標準偏差。

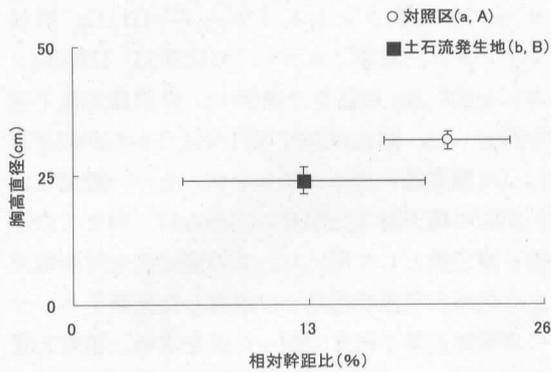


図2. 相対幹距比と胸高直径との関係

異なるアルファベット間に有意差あり。胸高直径の有意差は大文字，相対幹距比の有意差は小文字で表す。t-test, $p < 0.001$.

土石流発生地林分の平均形状比は対照区のそれに比べ有意に高く(図1, 表2, $p < 0.001$, t-test), 樹高に対し幹が細かった。また, 土石流発生地林分の平均立木密度は, 対照区のそれに比べ有意に高かった(図1, 表2, $p < 0.001$, t-test)。

3.2 相対幹距比と胸高直径, 平均樹間距離

土石流発生地の林分の平均相対幹距比は, 対照区に比べ有意に低かった(図2, 表2, $p < 0.001$, t-test)。土石流発生地の平均相対幹距比は12.8 (± 2.6) %で, 島崎(1999)が過密とする14%を下回っていた。また, 土石流発生地の林分の平均胸高直径も, 対照区に比べ有意に低かった(図2, 表2, $p < 0.001$, t-test)。

さらに, 樹木と樹木間の距離を示す平均樹間距離は, 土石流発生地が2.6 (± 0.8) mと, 対照区の3.6 (± 0.5) mに比べ, 有意に短かった(表2, $p < 0.001$, t-test)。

3.3 出現した植物種, 出現種数, 多様度指数と林床の光環境調査, 最大容水量

林床の光環境を示す林冠閉鎖率や相対光量子密度に加え, 出現種数, 多様度指数について, 土石流発生地と対照区の間で有意な差は見られなかった(表2, $p > 0.05$, t-test)。また, 土石流発生地の土壌の最大容水量は低くなると考えていたが, 両調査地間に有意な差は認められなかった(表2, $p > 0.05$, t-test)。

3.4 植生体積量とリター層の厚さ

リター層の厚さは土石流発生地で対照区に比べ有意に低かった(表2, $p < 0.001$, t-test)。一方植生体積量は, 土石流発生地と対照区間に有意な差は認められなかった(表2, $p > 0.05$, t-test)。

4. 考察

4.1 土石流発生地の人工林の特徴

4.1.1 立木密度と形状比

土石流発生地の人工林の特徴は, 高い立木密度, 高い形状比だった(図2, 表2)。このことから, 土石流発生地に植栽されていた樹木は, 対照区の植栽樹に比べ, 過密に植栽され, 幹の太さに対し樹高が高い状態のまま管理されていたと考えられる。

本来, 植栽樹は目的に応じて徐々に間伐を施す(坂口1961)必要があり, 例えばスギ林の間伐指針表では, 樹高20mに達しているスギ林(土石流発生地の植栽木の平均樹高)では, 中庸仕立の場合, 637本/haまで本数を減らすことになっている(林業実習研究会編1969)。しかし, 土石流発生地の植林地では植栽木の平均樹高は20.6 (± 7.1) mなのに対し, 立木密度は1974.7 (± 1065.8) 本/haと非常に高く, 近隣の森林に比べ十分に間伐が行われておらず, 土石流発生地の植栽樹は高密度のまま成長し, 形状は細長くなったと考えられる。今回は根系の調査を行っていないため, 本調査地の樹木根系に関する言及はできないが, 植栽樹は高密度に植林されると, 地上部の樹木の重さに対する地下部の重さが減少するため根系の支持力が減少し, 倒伏しやすくなる(苅住1979)。こうしたことから, 本研究で根系の調査を行っていないため明言できないが, 立木密度が過密だった本調査地の根系の支持力は弱い状態だった可能性がある。

4.1.2 相対幹距比と胸高直径, 平均樹間距離

土石流発生地の人工林には, 低い相対幹距比, 低い胸高直径, 短い樹間距離という特徴があった(図3, 表2)。これは土石流発生地の植栽樹は間伐遅れになっており, 植栽樹は超過密な状態で管理され, 幹は細くなったということを示している。一方, 対照区の植栽樹は間伐が適切に施されていたと考えられる。

樹間距離が2.6 (± 0.8) mという結果は, 稲垣(1999)が飛騨川で風倒被害があったヒノキ林で調査を行った際, 倒伏樹木の樹木間隔が1.58m, 未倒伏のものは2.39mであり, 未倒木のヒノキでは間伐が行われており, 樹間間隔が倒木林に比べほぼ0.7倍になるという報告と類似している。本研究では土石流発生地の樹間距離は2.6mで, 対照区の3.4mの約0.76倍に相当する。このことから, 今回調査した土石流発生地の林分では, 植栽樹の樹間間隔が狭いため水平へ張る根の支持力が弱く, 倒木し

やすい状態になっていた可能性がある。

4.2 土石流発生地の人工林特有と言えない特徴

出現した植物種、出現種数、多様度指数と林床の光環境調査、最大容水量林床の植生体積量については、土石流発生地と対照区間に有意な差が認められなかった(表2)。一方、リター層の厚さは土石流発生地で有意に少なかった(表2)。

4.2.1 出現した植物種、出現種数、多様度指数と林床の光環境

これらの要素は、土石流発生地と非発生地で変わってくるというよりも、上層木の植栽樹の種類によって異なることが推察された。これは、アカマツ林、カラマツ林の林床は明るく出現する植物数も多いのに対し、スギ林は林床が暗く、出現する植物数も少ないということを示唆している。よって、土石流発生地に特徴的な植物種や種数を探るためには、上層木(植栽木)を絞り、調査することが好ましいと言える。

4.2.2 最大容水量

最大容水量に差が認められなかった理由に関しては、採取した土壤の一部が撥水性を有しており、水を吸収しないサンプルがあったため、正確な測定が出来なかったためだと考えられる。撥水性の有無は土石流発生地の土壤、対照区の土壤に関わらず有していたため、森林の土壤は均一に分布していないことが示唆される。

4.2.3 林床の植生体積量とリター層の厚さ

土石流発生地ではリター層が対照区に比べ薄かったが、植生体積量については両地点で有意な差は認められなかった(表2)。リター層の厚さについては、土石流発生地の調査地は、沢沿いの斜面に立地していたため、リターが流亡しやすい環境にあったためと考えられる。一方、対照区の林分は土石流発生地に比べ沢から距離が離れていたため、リターは流亡しにくい環境であったとも考えられる。

また、降水の一部は森林の樹冠部で遮断されることが知られており(藤井1959;蔵治・田中2003)、樹冠を透過してきた降水は次に低木層により遮断される(鈴木ほか1979)と考えられることから、土石流発生地の植生体積量は対照区に比べ少ないと予想していた。しかし両地点の植生体積量に有意な違いは生じなかった(表2)。差が生じなかった理由として、前述した林床の光環境、出現種数、多様性、最大容水量に差が生じなかった(表2)のと同様に、植栽樹種を統一して調べなかったため、上層の植栽樹の違いにより林床の環境も異なることが影響して

いると考えられる。

以上のことから、もし仮にこれらの項目から土石流発生地に特徴を見出すとするならば、少ないリター層が、リターやその下にある土壤の流出、水分の移動を促進した、と考えられる。しかしながら、本研究では土砂や水の移動に関する実験を行っていないので、土石流発生地の林床の状態が対照区のそれに比べ、土砂や水が沢に移動しやすく、土石流の発生を助長する環境にあったとは断言できない。

よって、以上の項目からは、土石流が起きた森林特有の状態は把握できなかったが、植栽樹種を統一した調査を行えば、土石流発生地特有の項目をより多く探れる可能性がある。

5. 土石流の発生した森林の特徴と今後の課題について

今回の研究からは、間伐遅れにより根の張りが弱くなった人工林で土石流が起きたとは必ずしも結論付けられなかった。これは、林床に出現した植物種数、植生体積、林床の光環境、多様度指数、最大容水量に差は見られなかったことによる。しかしながら、土石流発生地の樹木は明らかに過密な状態にあり、その形状は細長かった。土石流発生地の森林の特徴は、高い形状比、高い立木密度、短い樹間距離、小さな相対幹距比、薄いリター層であり、こうした属性はこれまで知られている、土石流災害の起こりやすい森林の特徴と一致する(古沢・海掘2002;稲垣1999)。

森林や植物があることで必ずしも土石流を防げるわけではなく(阿部ほか1992;1993)、土壤浸透能が飽和状態に達するような大豪雨では、土壤に水分が浸透しにくくなり、この場合、洪水緩和が難しくなることもあると思われる(太田2004)。また、間伐遅れが根系の発達の悪化を招き、根の成長を悪化させるわけではなく、無間伐が森林の崩壊防止力を低下させているとは言えないという報告(荒木・阿部2005)もあるが、間伐が根系の成長に及ぼす影響に関する報告はまだ少なく、今後更なる研究を積み重ねる必要がある。

今回の土石流の崩壊面は樹木の根系よりも深く、崩壊の発生抑制にその効果を発揮しなかったものと考えられ、多くの山崩れは、木の根が存在する範囲の表層土層が崩壊する「表層崩壊」で起こっており(過去の豪雨の際に発生した山崩れの大半(発生数で99%以上と推定)は実は表層崩壊)、したがって「森林は山崩れを防ぐ」と言え、実際に、昭和後期から平成にかけての森林の成長によって、土砂災

害は減少していると沼本ら（1999）は指摘している。よって、災害による被害を軽減するためには、間伐により根系の発達を良くすることで崩壊を防止するためだけではなく、間伐により病虫害や風害、気象害等に対する抵抗力の強い健全な森林を育成し（青木ほか2007）、森林を崩壊防止に最も適した状態に誘導することが重要である（阿部2006）。

地下部に比べ調査が比較的容易な地上部の植生調査により、土石流発生地に特徴的に見られた要素は高い形状比、高い立木密度、短い樹間距離、小さな相対幹距比、薄いリター層であった。こうした属性はこれまで知られている、土石流災害の起こりやすい森林の特徴と一致する（古沢・海堀2002；稲垣1999）、と考えられる。しかし、本調査では根系の調査を行っていないため、過密な状態で生育した樹木は根系の発達が不十分で倒れやすい、ということまで言及は出来なかった。間伐遅れが根系の発達の悪化を招き、根の成長を悪化させるわけではなく、無間伐が森林の崩壊防止力を低下させているとは言えないという報告（荒木・阿部2005）もあるが、間伐が根系の成長に及ぼす影響に関する報告はまだ少なく、今後更なる研究を積み重ねる必要がある。また、林床に出現した植物種数、植生体積、林床の光環境、多様性指数、最大容水量に差は見られなかった。これらの項目は植栽樹種を統一した調査を行うことで、土石流発生地の特徴になりうる可能性がある。

森林や植物があることで必ずしも土石流を防げるわけではなく（阿部ほか1992；1993）、土壌浸透能が飽和状態に達するような大豪雨では、土壌に水分が浸透しにくくなり、この場合、洪水緩和が難しくなることもあると思われる（太田2004）。しかし多くの山崩れは、木の根が存在する範囲の表層土層が崩壊する「表層崩壊」で起こっており（過去の豪雨の際に発生した山崩れの大半（発生数で99%以上と推定）は実は表層崩壊）、したがって「森林は山崩れを防ぐ」と言え、実際に、昭和後期から平成にかけての森林の成長によって、土砂災害は減少していると沼本ら（1999）は指摘している。よって、災害による被害を軽減するためには、間伐により根系の発達を良くすることで崩壊を防止するためだけではなく、間伐により病虫害や風害、気象害等に対する抵抗力の強い健全な森林を育成し（青木ほか2007）、森林を崩壊防止に最も適した状態に誘導することが重要である（阿部2006）。

謝 辞

本研究を行うにあたり、信州大学物質循環学科の國頭 恭 准教授ならびに戸谷仁美氏には最大容水量の測定法について終始丁寧なご指導をいただいた。信州大学物質循環学科の植生・生態研究室の竹内啓太、清水理恵、北川久美子、白水由季、田村元の各氏、山本研究室の厚芝源太郎氏には様々な面でご協力いただいた。また、土石流発生地の調査を快く受け入れて下さった工事関係者の方々、長野県砂防課の方々にも貴重な情報を提供していただいた。以上の方々にも心より感謝申し上げる。最後に、平成18年7月豪雨で亡くなられた方のご冥福を心からお祈り申し上げます。

引用文献

- 阿部和時（2006）森林の持つ斜面崩壊防止機能（＜特集＞斜面の安定と根系を巡る諸問題）. 日本緑化学会誌 **31**：330-337.
- 阿部和時・趙廷寧・王玉杰（1992）中国黄土高原における森林の崩壊防止機能の研究（I）. 日本緑化学会誌 **18**：19-26.
- 阿部和時・趙廷寧・王玉杰（1993）中国黄土高原における森林の崩壊防止機能の研究（II）. 日本緑化学会誌 **19**：27-31.
- Abe, K. and Iwamoto, M. (1986) An Evaluation of Tree-Root Effect on Slope Stability by Tree-Root Strength. *Journal of Japanese Forest Society* **68**：505-510.
- 青木 旭・阿部廣史・松澤義明（2007）降雨特性から見た平成18年7月岡谷土砂災害について. 長野工業高等専門学校紀要 **41**：11-16.
- 荒木 誠・阿部和時（2005）間伐は森林の土壌を守れるか？ *森林科学* **44**：26-31.
- Braun-Blanquet, J. (1964) *Pflanzensoziologie. Grundzuegeder Vegetationskunde*. 865pp. Springer-Verlag, Wien.
- Fahey, B. and Jackson, R. (1997) Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology* **84**：69-82.
- 藤井真一（1959）ヒノキ林の遮断雨量に関する試験. 日本林学会誌 **71**：262-269.
- 藤田晋輔（1987）山くずれ、土石流に対する樹木や溪床林の防災機能と指標機能（予報）. 鹿児島大学農学部演習林報 **15**：63-73.
- 福島義宏（1977）田上山地の裸地斜面と植栽地斜面の雨水流し解析. 88回日本林学会大会発表論文集 pp.

- 391-392,
古沢英夫・海掘正博 (2002) 土石流の流動を抑制した自然的要因についての考察. 広島大学総合科学部紀要 IV理系編 28: 49-60.
- Haigh, M. J. and Gentcheve-Kostadinova, Sv. (2002) Ecological erosion control on coal-spoil banks: an evaluation. *Ecological Engineering* 18: 371-377.
- 平成18年7月豪雨土石流災害検討委員会 (2007) 平成18年豪雨災害に関する提言書. 長野県, 長野.
- 稲垣秀樹 (1999) 植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊. *応用地質* 40: 196-206.
- 苅住 昇 (1979) 樹木根系図説. 1121pp. 誠文堂新光社, 東京.
- 蔵治光一郎・田中延亮 (2003) 世界の熱帯林における樹冠遮断研究. *日本林学会誌* 85: 18-28.
- 水山高久・中野陽子・鈴木浩之 (1989) 樹林の土砂流出抑制効果に関する実験. *新砂防* 42: 34-36.
- 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1998) 雲仙普賢岳火砕流体積斜面における植生回復による表面流・土砂流出の変化. *日本緑化工学会誌* 23: 249-255.
- 西澤正久 (1972) 森林測定. 348pp. 林業教育研究会 (編), 農林出版, 東京.
- 沼本晋也・鈴木雅一・太田猛彦 (1999) 日本における最近50年間の土砂災害被害者数の減少傾向. *砂防学会誌* 51: 3-12.
- 太田猛彦 (2004) 21世紀における日本の森林と山岳管理について. *Journal of Geography* 113: 203-211.
- 林業実習研究会 (編) (1969) 林業実習ハンドブック. pp. 59. 朝倉書店, 東京.
- 坂口勝美 (1961) 間伐の本質に関する研究. *林業試験場研究報告* 131: 1-95.
- Shannon, C. E., and Weaver, W. (1963) *The mathematical theory of communication*. 144pp. University of Illinois Press, Chicago.
- 島崎 洋 (1999) 山造り承ります. 237pp. 川辺書林, 長野.
- 鈴木雅一・加藤博之・谷 誠・福嶋義宏 (1979) 桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹間流下量, 遮断量の研究 (I): 樹冠通過雨量と樹間流下量について. *日本林学会誌* 61: 202-210.
- 只木良也 (1982) 人間生活を守る森林, 只木良也・吉良竜夫編, ヒトと森林. pp. 1-18. 共立出版, 東京.
- 東京大学園芸科学教室 (編) (1976) 実験農芸化学上巻. pp. 69-70. 朝倉書店, 東京.
- 塚本良則 (1998) 森林は山地の侵食防止にどのように機能しているか. *森林科学* 22: 2-9.
- Wilkinson, A.G. (1999) Poplars and willows for soil erosion control in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 16: 263-274.
- 山崎 惇 (1979) ブナクラス域. 宮脇 昭 (編), 長野県の現存植生. pp. 136-149. 長野県, 長野