

三重県紀宝町ジャングの谷における航空レーザ測量データと
航空写真から簡易に推定した土石流に伴う発生流木量

Simple estimation of woody debris associated with debris flow using airborne LiDAR data
and aerial photographs in Jyangunotani Valley in Kihou Town, Mie Prefecture, Japan

島田博匡^{1)*}

Hiromasa Shimada^{1)*}

要旨：三重県紀宝町ジャングの谷で発生した土石流に伴う流木発生量を航空レーザ測量データと航空写真を使用した簡易な方法で推定した。土石流発生後に撮影された航空写真から目視により推定した樹冠消失範囲の面積は0.88 haであった。樹冠消失範囲内で土石流により消失した立木は土石流発生前の航空写真判読により目視で抽出した。各立木の樹高は航空レーザ測量データから作成したデジタル林冠高モデル（DCM）より推定し、既存の樹高と胸高直径（DBH）の関係式からDBHを求めた。立木の樹高とDBHから算出した単木幹材積を合計することで発生流木量を求めた。推定された発生流木量は341.7 m³であり、この数値は一般的な土石流における発生流木量の範囲内であった。

キーワード：森林被害, 森林管理, 流木, 土石流

Abstract: The woody debris associated with debris flow in Jyangunotani Valley was estimated using a simple method that utilized airborne LiDAR data and aerial photographs. Destroyed forest areas of 0.88 ha were estimated by visual detection using aerial photographs taken after the occurrence of debris flow. Stand trees destroyed by debris flow in destroyed forest areas were extracted by visual detection using aerial photographs taken before the occurrence of debris flow. Tree heights were estimated with a digital canopy model (DCM) generated from airborne LiDAR original data, and diameter at breast height (DBH), which was estimated from tree height using a previous regression line. Individual stem volumes calculated from tree height and DBH were summed. Thus, the amount of woody debris was 341.7 m³. The amount of woody debris estimated in this study was plotted within the range of relationship between the watershed area and woody debris in previous studies.

Key Word: forest damage, forest management, woody debris, debris flow

はじめに

近年、頻発する豪雨に起因した山地災害により土砂及び流木災害が各地で発生している。そのため、災害発生の防止や被害緩和を目的とした災害に強い森林づくりが注目され、各地で取り組みが行われるようになっている（藤堂ら2015）。なかでも流木対策の遅れている溪流が多いことから、土砂災害

¹⁾ 三重県林業研究所

Mie Prefecture Forestry Research Institute

* E-mail : shimah03@pref.mie.jp

対策と併せて流木対策を進める必要がある（石川2006）. このような整備を進めるためには、地域性も考慮に入れた上で、砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説（国土技術政策総合研究所2016）、土砂流出防止機能の高い森林づくり指針解説編（林野庁2015）などを参考にして、森林状態に応じた適切な森林管理方法や砂防・治山施設設置計画の検討を行うことが不可欠である。流木対策においては、過去に発生した災害時の流木発生量を把握し、データを蓄積することで地域毎の流木災害の特性を把握する必要がある。三重県においては過去の土砂災害時に発生した流木量を調査した事例はみられないことから発生流木量のデータ取得を進めることが急務となっている。

これまで災害時の発生流木量の推定は、災害発生前後の航空写真から求めた裸地化面積に、近傍に現存する森林の現地調査で求めた立木密度や材積をかけて見積もられてきた（石川1990）。近年では航空レーザ測量データや航空写真解析により樹冠を抽出し樹高、胸高直径（以下、DBH）、材積などを高精度で推定できる技術の開発も進んでおり（大野2015）、災害発生前に取得された航空写真、航空レーザ測量データがあれば、これらを用いて単木レベルでの詳細な解析により流木量を把握することも可能である。しかし、航空レーザ測量による森林解析には4点/m²程度の点密度のデータが必要であり（大野2015）、過去のデータにはそのような品質のデータが得られていないケースも多い。航空写真についても適切な時期に必ずしも解析に適した良好な写真が得られるとは限らず、解像度、影などの影響で樹冠が識別困難なケースもある。しかし、災害発生前の森林の状態に関する資料が限られている場合には、入手可能なデータの質に合わせ、それを最大限活用できる手法で材積推定を行うことが求められる。

そこで、本研究では、三重県内で過去に発生した山地災害における流木発生の実態把握を行う一環として、2011年（平成23年）9月台風12号による豪雨で発生した三重県南牟婁郡紀宝町ジャングの谷の土石流を解析対象とし、災害前の航空写真から目視による立木抽出と低点密度の航空レーザ測量のデータを使用した樹高推定などから発生流木量の簡易推定を行った事例について報告する。

解析対象地と方法

1. 解析対象地

2011年9月4日に平成23年台風12号による豪雨により土石流が発生した三重県南牟婁郡紀宝町大字高岡地内のジャングの谷（蛇崩の谷）を解析対象とした。対象地の地質は花崗斑岩、集水面積は15.8 haである。被災林分の土石流発生時の林齢は森林簿によると52～62年生であった。発生時の雨量は三重県県土整備部が設置している熊野市内の大峪観測所で24時間雨量1,141 mm、最大時間雨量141 mmであった（三重県県土整備部河川・砂防室2012）。土石流は、源頭部で平均崩壊幅30 m、斜距離約100 m、平均崩壊深2～3 m程度、崩壊土砂量約6,000 m³超の崩壊が発生して流下し、途中で狭窄露岩部を流下しながら、沢部内にある河床河岸堆積物を若干巻き込み、ほぼ規模を変えずに堆積扇面まで到達した（松村ら2012）。人家などの被害は全壊5戸、半壊3戸、一部損壊2戸であった（三重県県土整備部河川・砂防室2012）。

2. 方法

災害発生後に撮影された航空写真、災害発生前に取得された航空レーザ測量データと航空写真などを用いて発生流木量の推定を行った。解析には、災害前データとして、国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所（以下、紀南河川国道事務所）が2010年に取得した航空レーザ測量データと航空写真、三重県市町総合事務組合が2006年に撮影した航空写真、災害後データとして、紀南河川国道事務

所が2013年に撮影した航空写真、三重県市町総合事務組合が2011年に撮影した航空写真を使用した。なお、紀南河川国道事務所が2010年に取得した航空レーザ測量では1 m²当たり1点以上のレーザ計測点密度仕様であった。測量はアザーパルスが取得できない機種により行われており、ファーストパルスとラストパルスに分けてオリジナルデータが作成されていたが、解析対象地付近についてはラストパルスのオリジナルデータのみしか入手できなかった。また、本解析対象地においては下流側の一部のみが測量対象区域内で、多くは対象外区域であった。対象外区域については、レーザ計測点密度は低いものであり(平均0.7点/m²)、単木抽出などの森林情報の解析に使用するには不適なものであった。本研究で使用した航空写真は全てオルソ化されたカラー写真であった。なお、以下の作業はすべてGISソフトウェア(ArcGISあるいはQGIS)を使用して行った。

解析手順は次のとおりであった。三重県市町総合事務組合が災害後の砂防ダム施工前の2011年に撮影した解像度20 cmの航空写真は谷部が山体の影に覆われて不明瞭であったため、紀南河川国道事務所が2013年に撮影した解像度25 cmの航空写真で土石流により樹冠が失われた範囲(立木流出範囲)を把握し、樹冠消失範囲のポリゴンを作成した。なお、2013年の航空写真では流末部に砂防ダムが設置されていたため、砂防ダム付近については三重県市町総合事務組合が2011年に撮影した解像度20 cmの航空写真で把握した。次に、作成した樹冠消失範囲ポリゴンを災害前の2010年に紀南河川国道事務所が撮影した解像度25 cmの航空写真の上に重ねた。この航空写真の元画像データにおいて対象部分は影によりやや暗くなっており、樹冠抽出が困難であったため、画像処理により判別が可能な状態に加工した上で、樹冠消失範囲ポリゴン内の立木と樹種(スギ、ヒノキ、広葉樹)を目視で抽出し、立木のポイントデータを作成した。なお、紀南河川国道事務所が2010年に撮影した航空写真の範囲外となっていた源頭部上端付近については、三重県市町総合事務組合が2006年に撮影した解像度40 cmの航空写真で把握した。各単木における樹高を明らかにするために、紀南河川国道事務所が2010年に取得した航空レーザ測量データのうち、ラストパルスのオリジナルデータを用い、2.5 m×2.5 mメッシュ(点密度1~105点/6.25 m², 平均5.0点/6.25 m²)内の標高値の最大値データを代表値とした簡易DSM(Digital Surface Model; 以下DSM)と最小値データを代表値とした簡易DTM(Digital Terrain Model; 以下DTM)を作成した。同時に5 m×5 mメッシュ(点密度1~154点/25 m², 平均17.7点/25 m²)内の標高値の最大値データを代表値とした簡易DSMと最小値データを代表値とした簡易DTMを作成し、2.5 m×2.5 mメッシュと5 m×5 mメッシュのそれぞれについて簡易DSMと簡易DTMの差分値を求めてDCM(Digital Canopy Model; 以下DCM)を作成した。また、2.5 m×2.5 mメッシュの簡易DSMと5 m×5 mメッシュの簡易DTMの差分値のDCM(2.5 m×2.5 m)を作成した。樹高は各立木位置のDCM値とした。基本的には2.5 m×2.5 mメッシュのDCM値を樹高としたが、点密度が少ないメッシュにおいては異常値が生じやすいので、航空写真と見比べて数値が異常と判断される場合には、5 m×5 mメッシュのDCM値、2.5 m×2.5 m DSMと5 m×5 m DTM差分値のDCM、隣接メッシュのDCM値の順で数値を吟味し、適切と判断される数値を樹高(m)とした。一般的にDSMには各メッシュ内のファーストパルスの最大標高値が用いられるが(平田2005)、本研究ではファーストパルスデータが得られなかったことから、ラストパルスの最大標高値を使用した。壮齢スギ、ヒノキ人工林において、地表面で反射されるパルスの割合は1~8%程度であり(Takahashi *et al.* 2006)、大部分は林冠内で反射している。林冠表層など林冠上部で反射するラストパルスもみられることから、各メッシュ内の最大標高値を使用することで、ファーストパルスから作成するDSMに近い数値が得られると考えた。源頭部上端付近については航空レーザ測量データが得られなかったため、この範囲の立木の樹高は、スギ、ヒノキそれぞれについて、この範囲に近接する樹冠消失範囲内の20 m×15 m程度の範囲の立木の航



図-1. 樹冠消失範囲の推定 (2013年紀南河川国道事務所撮影航空写真)

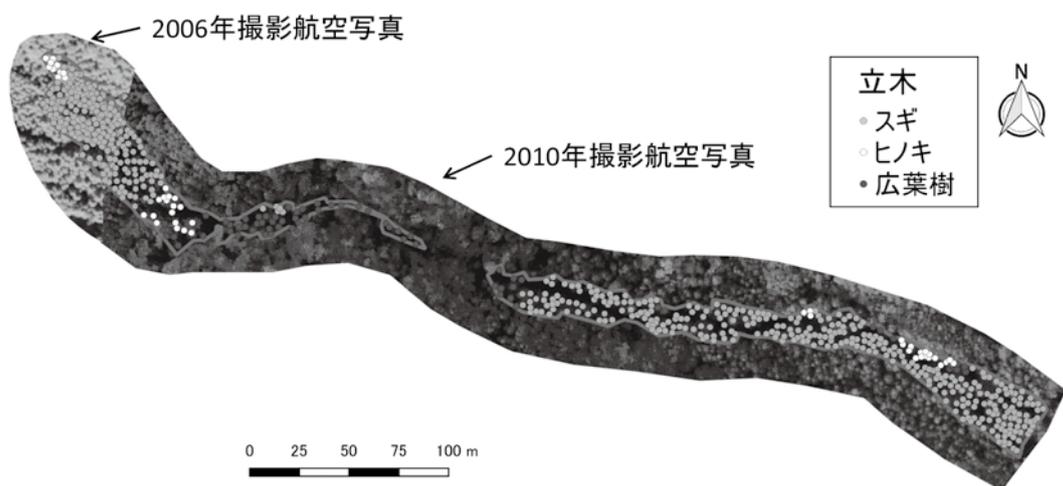


図-2. 災害前の立木の抽出 (2010年紀南河川国道事務所撮影航空写真, 一部は2006年三重県市町総合事務組合撮影航空写真)

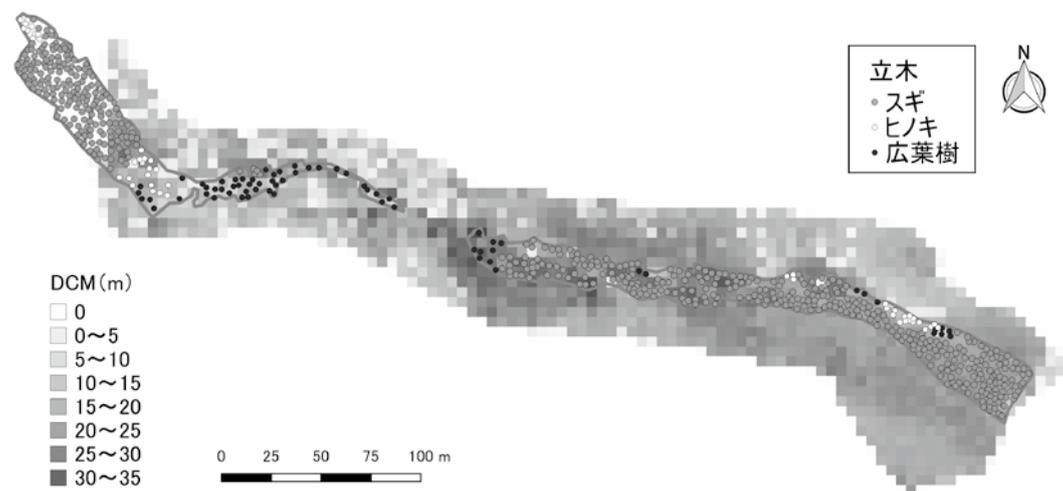


図-3. 災害前の樹高の推定 (5 m × 5 m DCM : 2010年紀南河川国道事務所取得航空レーザ測量データより作成)

空レーザ測量から推定した樹高の平均値を用い、スギ20 m, ヒノキ16 mとした。なお、航空レーザ測量実施時と災害発生時までには1年の時間差があるが、三重県スギ・ヒノキ人工林林分収穫表（長伐期施業対応版）（以下、収穫表；島田2010）において、林齢52～62年生の樹高成長率はスギが1.00～1.36%/年、ヒノキで0.89～1.31%/年とわずかであることから、本研究では樹高の補正は行わなかった。次に各立木の胸高直径（cm）を求めるために、スギ、ヒノキに対しては、明らかになった樹高から収穫表を調整した際に作成された平均樹高 H と平均DBH D の関係式（島田2010）を用い、スギは（1）式、ヒノキは（2）式によりDBHを推定した。

$$\text{スギ} \quad D=0.3914H^{1.407} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ヒノキ} \quad D=0.4327H^{1.397} \quad \dots\dots\dots (2)$$

広葉樹には同様の式が無いので、スギの（1）式を流用して推定した。最後に樹高とDBHから立木幹材積表の単木材積推定式（林野庁1970）を使用して単木材積を求め、全立木の単木材積の和を発生流木量とした。

結果と考察

土石流による樹冠消失範囲は中央部の狭窄露岩部付近を挟んで2カ所（以下、上流側を上流側消失範囲、下流側を下流側消失範囲とする）に分かれて分布し、面積は0.88 haであった（図-1）。また、被災前の航空写真から読み取った樹冠消失範囲内の樹頂点の大半はスギであり、上流側消失範囲の下流部には広葉樹が多くみられた（図-2）。災害前の立木の樹高分布について、図-3に5 m × 5 m DCMを示す。樹高は下流側消失範囲で高い箇所が多く、広葉樹が多く分布していた上流側消失範囲の下流部で低い傾向がみられた。表-1に流木化した立木の本数、樹高、DBH、材積の推定値を樹種別に示す。また、図-4に樹高推定値、図-5にDBH推定値のヒストグラムを示す。流木化した立木の本数は627本でスギ515本、ヒノキ46本、広葉樹66本であった。樹高のヒストグラムのピークは20～22 mにあり、平均樹高はスギ20.3 m、ヒノキ16.2 m、広葉樹15.9 mであった。また、DBHのヒストグラムのピークは26～28 cmで、平均DBHはスギ27.3 cm、ヒノキ21.5 cm、広葉樹19.8 cmであった。材積合計は341.7 m³であり、うちスギの材積が303.0 m³と大半を占めていた。本対象地の林齢と材積の大半を占めるスギの平均樹高から収穫表の地位指数を求めると概ね地位指数17に該当し、このとき収穫表の材積は0.88 ha当たりで499 m³（林齢55年生スギ）であることから、推定された発生流木量はこれの68%程度であった。このことには、林分収穫表は施業上同一の取り扱いを受けた同齢単純林より生産されるhaあたりの立木本数、平均DBH、平均樹高、材積などの標準的な値を示したものであり（南雲・箕輪1990）、

表-1. 流木化した立木の本数、樹高、DBH、材積の推定値

樹種	本数 (本)	平均 樹高 (m)	平均 DBH (cm)	材積 (m ³)
スギ	515	20.3	27.3	303.0
ヒノキ	46	16.2	21.5	17.0
広葉樹	66	15.9	19.8	21.7
合計	627	—	—	341.7
平均	—	19.6	26.1	—

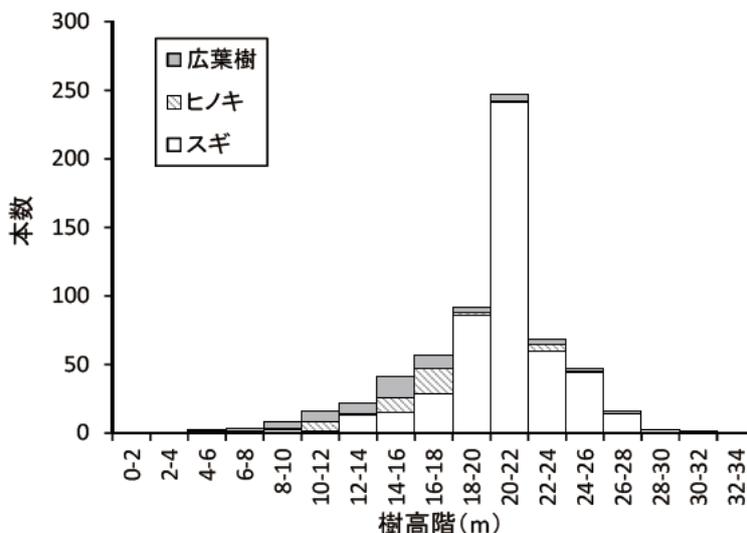


図-4. 流木化した立木の樹高推定値のヒストグラム

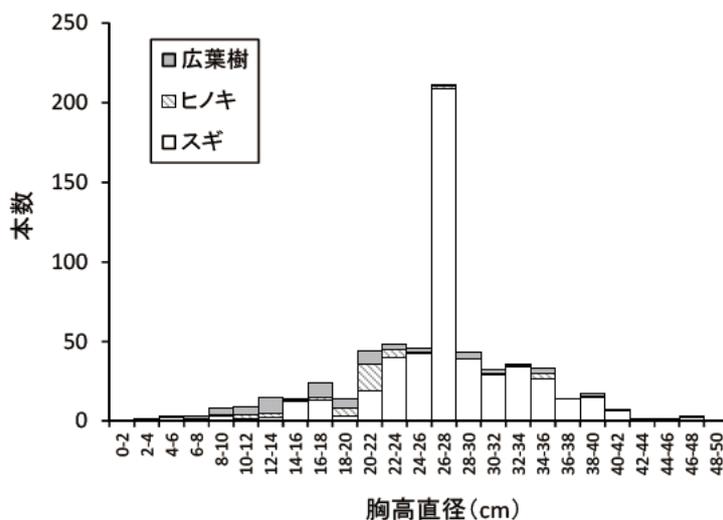


図-5. 流木化した立木の胸高直径推定値のヒストグラム

個々の林分の材積とは一致しないこと、谷の流路部分には立木が植栽されていないので、一様な植栽を行っている部分よりも立木本数が少ないことが関係していると考えられる。なお、樹冠下の劣勢木は航空写真から抽出できないが、その材積量はわずかであると推察される。また、航空レーザ測量データによる樹高推定は実際の樹高よりも過小に評価される傾向があり、本研究で使用したデータのようにレーザ計測点密度が低いとその傾向が顕著になることが知られている（平田2005）。加えて、本研究で使用した航空レーザ測量データはラストパルスデータあり、DSMの作成にはメッシュ内の最大標高値を代表値として使用したが、林冠表面ではない林冠内のデータも含まれると考えられることから、本研究においても樹高を過小に評価している可能性が高い。樹高の過小評価は、DBH、幹材積の過小評価にもつながるため、本研究の手法で算出された発生流木量が過小推定となっている可能性がある。

他の流木発生事例との比較を行うため、図-6に砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説（国土技術政策総合研究所2016）に示された流域面積と発生流木量の関係に本研究の結果を追記した。

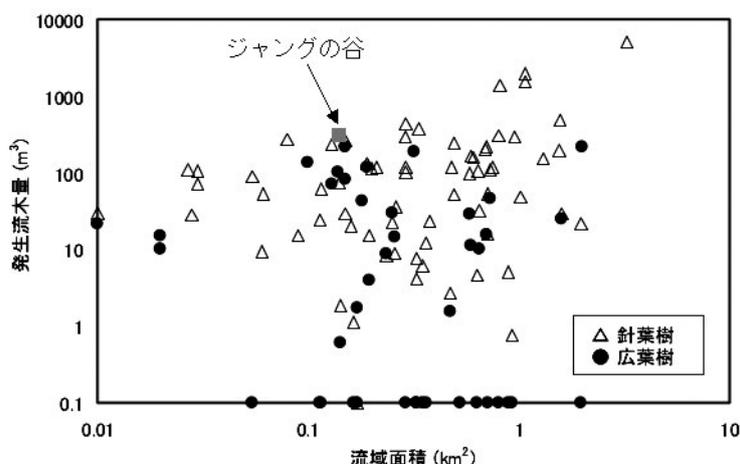


図-6. 流域面積と発生流木量の関係 (国土技術政策総合研究所 2016 に加筆)

全国の発生流木量データがこの図に集約されており、この図にデータを追記することで他事例との比較が行いやすい(海堀ら 2014)。流域面積 0.158 km^2 、発生流木量 341.7 m^3 (針葉樹 93.6%、広葉樹 6.4%) をプロットしたところ、ジャングルの谷の発生流木量は既往調査の上限付近に位置し、この発生流木量は一般的な土石流における発生流木量の範囲内であることがわかった。

おわりに

本研究では既存の航空写真や航空レーザ測量データを活用して、過去の災害時の発生流木量の推定を試みた。今回の手法は、災害発生前の航空レーザ測量データがあるもののレーザ計測点密度が単木抽出を行うには不十分な場合において、航空写真判読による立木の抽出を組み合わせた簡易な方法である。立木の抽出には一定の熟練を必要とするものの、樹冠が判別できる写真であれば比較的状态を問わずに利用可能であるので、適用可能な地域は多いと考えられる。労力的に適用可能面積は数 ha 程度までになると考えられるが、土石流流下区域は谷沿いの狭い範囲に限られることから土石流の発生に伴う発生流木量の把握には適用可能なケースが多いであろう。また、航空レーザ測量データ等から立木の樹高を求める必要があるが、財団法人日本測量調査技術協会が管理するウェブサイト「航空レーザ測量データポータルサイト」(日本測量調査技術協会 2013)によると、点密度 $1 \text{ 点}/\text{m}^2$ 程度のデータであれば、日本国内の広範囲にわたって整備されていることが確認でき、広範囲の地域で本手法が適用できる可能性がある。

今後、三重県内の他の土砂災害発生事例においても、既存データを活用することで同様の解析を行い、発生流木量に関するデータを蓄積することで、三重県における流木災害の特性を明らかにし、森林管理や砂防・治山計画策定につなげていく必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたり、三重大学大学院の山田孝教授(現北海道大学大学院教授)にはジャングルの谷に関する参考資料を提供頂きました。国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所には航空写真及び航空レーザ測量データを貸与頂きました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 平田泰雅 (2005) 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザ光の林冠透過率と地上照射密度の影響. 森林計画誌39 : 81-95
- 石川芳治 (1990) 山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究. 京都大学学位論文
- 石川芳治 (2006) 流木災害と森林. 森林科学47 : 28-32
- 海堀正博・石川芳治・里深好文・松村和樹・中谷加奈・長谷川祐治・松本直樹・高原晃宙・福塚康三郎・吉野弘祐・長野英次・福田 真・中野陽子・島田 徹・堀大一郎・西川友章 (2014) 2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌67 (4) : 49-59
- 国土技術政策総合研究所 (2016) 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説. 国総研資料904
- 松村和樹・藤田正治・山田 孝・権田 豊・沼本晋也・堤 大三・中谷加奈・今泉文寿・島田 徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山 修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島 剛・土屋 智 (2012) 2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌64 (5) : 43-53
- 三重県県土整備部河川・砂防室 (2012) 台風12号による土砂災害～三重県における紀伊半島大水害～. 三重県県土整備部河川・砂防室
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 現代林学講義10測樹学. 地球社
- 日本測量調査技術協会 (2013) 航空レーザ測量データポータルサイト. <http://www.sokugikyo.or.jp/laser/>. (参照 : 2017-4-16)
- 大野勝正 (2015) 航空機測量データを用いた針葉樹の資源把握方法. 森林科学74 : 9-14
- 林野庁 (1970) 立木幹材積表西日本編. 日本林業調査会
- 林野庁 (2015) 土砂流出防止機能の高い森林づくり指針 解説編. 林野庁
- 島田博匡 (2010) 三重県のスギ・ヒノキ人工林における長伐期施業に対応した林分収穫表の作成, 三重県林業研報2 : 1-28
- Takahashi T, Yamamoto K, Miyachi Y, Senda Y, Tsuzuku M (2006) The penetration rate of laser pulses transmitted from a small-footprint airborne LiDAR: a case study in closed canopy, middle-aged pure sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) stands in Japan. Journal of Forest Research 11 : 117-123
- 藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・檀浦正子・平野恭弘 (2015) 間伐がスギの最大引き倒し抵抗モーメントにもたらす影響. 日緑工誌41 : 308-314