

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻

2016 年度  
修 士 論 文

三次元点群データを用いた樹木形状と地形変化の  
解析手法の検討  
Development of analysis method on the relationships  
between tree shape and topographic change

2017 年 2 月 15 日提出  
指導教員 早川 裕弐 准教授

蝦名 益仁  
Ebina, Masuto

1. はじめに
    - 1.1. 背景
    - 1.2. 本研究の目的
  
  2. 調査地域
    - 2.1. 概要
    - 2.2. 足尾山地小流域
    - 2.3. 華巖滝下流斜面
    - 2.4. 東京大学秩父演習林
    - 2.5. 大谷崩一ノ沢流域
    - 2.6. 御嶽山田の原
  
  3. 手法
    - 3.1. TLS 測量による三次元点群データの取得
      - 3.1.1 使用機材
      - 3.1.2. 現地における TLS 測量
      - 3.1.3. TLS 測量データの後処理
    - 3.2. 点群データを用いた地形解析
    - 3.3. 点群データを用いた樹木形状解析
  
  4. 結果
    - 4.1. アーカイブデータの作成
    - 4.2. 足尾山地小流域
      - 4.2.1 地形変化
      - 4.2.2 足尾山地小流域樹木形状解析変化
  
  5. 考察
    - 5.1. 足尾山地小流域における流域地形変化のプロセス
    - 5.2. 植生と地形相互作用
  
  6. 結論
  
  7. 展望
- 謝辞  
参考文献

# 1. はじめに

## 1.1. 背景

近年、土砂災害に対する防災では、将来の人口減少などを想定し、ハード面（砂防ダム・堤防など）の砂防構造物による防災に加え、ソフト面（ハザードマップ・警戒情報など）の防災対策も重視するという、総合的な土砂災害対策が推進されている。国や各地方自治体では、住民に対する防災情報の開示が求められており、ハザードマップなどの作製・公表を通じ、住民の防災に対する意識を向上させようとしている。現状の土砂災害におけるハザードマップでは、急傾斜地の崩壊・土石流・地すべりが発生する可能性がある箇所を、地形図、森林基本図、都市計画図、土砂災害危険区域情報などを基に予測している。しかし、従来手法では予測しきれない災害も発生しており、災害発生可能性のある箇所を判断する要素を増やすことには意義がある。

本研究では、特に森林植生に注目して研究を行った。日本の森林は昭和 30 年代以降、石油・ガスへの転換によって薪炭林の需要が低下した。その結果、多くの天然林は拡大造林により針葉樹の人工林に転換された。しかし、増加した針葉樹の人工林は林業の人手不足や外材の台頭や木材需要の低下などから、伐採適期を過ぎても多くが放置されており、間伐などの手入れがされていない状況になっている。従来、森林は生態系サービスのなかの調整サービスで気候調整機能や災害の抑制の役割を果たしている。下層植生の発達や土壌の団粒構造等により土壌の侵食や斜面崩壊を防止することが知られている (Imaizumi et al., 2008)。また、樹木の根茎は土壌の支持作用を持ち、斜面崩壊を防止する (たとえば Forbes and Jeremy, 2011)。しかし、森林は間伐などの手入れが不足している人工林では、林内が暗くなるため下層植生が発達しない。そのため多くの雨滴が直接土壌にあたり、雨食や表面流による土壌侵食が生じる可能性が高まる (井出ら, 2014, pp.99-101)。また、小径の樹木が過密に分布することにより、樹木の過密生息は根茎の発達不足を招き、樹木の斜面での支持力不足を招くことも懸念される (木下, 2003, pp.36-37; 荻住, 2015,)。今後、林業が大きな転換を向かえない限り、伐採適期が過ぎても放置される過密な森林は増えると予想されている (図 1-1)。そのため、斜面の安定性を評価するうえでも、森林植生に注目し、その植生状況を定量的に評価することが重要である。

本研究では三次元点群データを用いて研究を行う。三次元点群データは三次元上の点を、X 軸・Y 軸・Z 軸の座標で表した点の集まりのデータである。三次元点群データは様々な分野で有効的な活用がされている。従来三次元点群データは主に航空機 LIDAR (Light Detection and Ranging) もしくは ALS

(Airborne Laser Scanning) によって取得されてきた (たとえば佐藤ほか, 2010). ALS は航空機に GNSS (Global Navigation Satellite System) と IMU (Inertial Momentum Unit) を搭載することにより自己位置を特定する. 特定された自己位置から地表面に対してレーザを照射し, レーザが対象物から反射して到達する時間から, 対象物との距離・角度を取得し, 対象物の三次元形状を示す点群データを得る. しかし, ALS は航空機の運用や搭載する機器が高額なため, オンデマンドによる運用は簡単ではない. 一方, より安価かつ使用者の用途に応じた三次元点群データの取得が可能な手法, すなわち地上レーザ測量 (TLS: Terrestrial Laser Scanning) や UAV-SfM (Unmanned Aerial Vehicle-Structure from Motion) が近年急速に普及し, 様々な分野において三次元点群データが導入されつつある (早川・小口, 2016; 早川ほか, 2016).

森林科学の分野では, TLS や UAV-SfM を用いて三次元点群データを取得することで, 以前では得られなかった詳細な樹冠の構造や, 複雑な幹形状のデータが取得できるようになった. また, 得られたデータより, 緑の「量」だけではなく, 定量化の難しい緑の「質」に関しても, 定量化が試みられている (加藤ほか, 2014). 地形学の分野においても, 地上レーザ測量の様々な応用が行われている (早川・小口, 2016). また, 三次元点群データのオープンデータ化も進んでおり, たとえば東京大学空間情報科学研究センターでは共同研究を目的とした HD 地形データシリーズの提供を行っている (小口ほか, 2015).

既に述べたように, 今後の日本の土砂災害の防災を考慮した場合, 放置された高密度の人工林などにおいて, 植生の状況や林床の地形の状況を把握することは, 土砂災害リスクの評価により必要になってくると考えられる. 本研究は, この観点で, 三次元点群データという最新技術により得られるデータの活用を検討する. 具体的な目的は次項に述べる通りである.

## 1.2. 本研究の目的

土砂災害の防止にむけた植生や周辺環境の状況把握に際して、従来の計測手法では十分な計測が行えないといった問題があげられる。たとえば、急斜面の放置された人工林においては、トータルステーション等の設置は難しく、毎木の位置座標取得は難しい。また、GNSS による毎木の位置座標取得も樹木が密なために、植被率が高く衛星からの電波の受信が難しい。そのため、従来の手法だけでは、空間的な広がりを保ちつつ細密な解析をすることは、多大な困難をともなう。

そこで本研究では、様々な対象地において、植生と周辺の環境の三次元点群データを取得し、まずはそれらのアーカイブデータを作成する。そのなかで、特に足尾山地小流域調査地においては、植生の三次元点群データと詳細な周辺の環境の三次元点群データを取得し、地形変化と樹木形状（本研究では特に傾き）の解析手法を検討する（図 1-2）。樹木形状の細密かつ三次元的な計測方法はこれまで十分に確立はされておらず、森林科学分野において、植生の基礎的な情報として調査されることは少ない。本研究では、林内の情報を高解像度で得られる TLS を主要な手法として、地形と植生の双方の三次元点群データを取得する。得られた三次元点群データから、地形変化と樹木形状の空間的解析を行う。さらに、地形変化と樹木形状の相互作用を検証することで、土砂災害の防災・減災に向けた検討を目指す。また将来的な課題として、本研究より得られた基礎的な地形変化と樹木形状から、UAV など他のリモートセンシング技術を利用した広範囲の防災への応用も検討する。

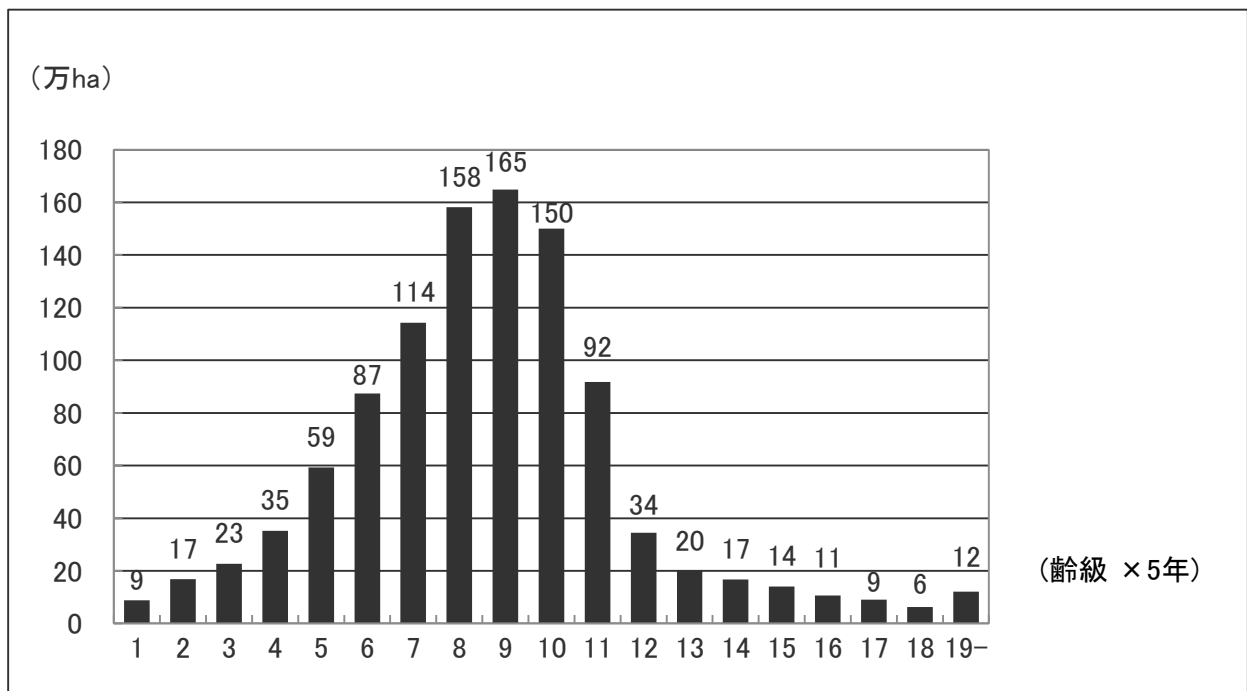


図1-1. 人工林の齢級別面積(林野庁, 2012).

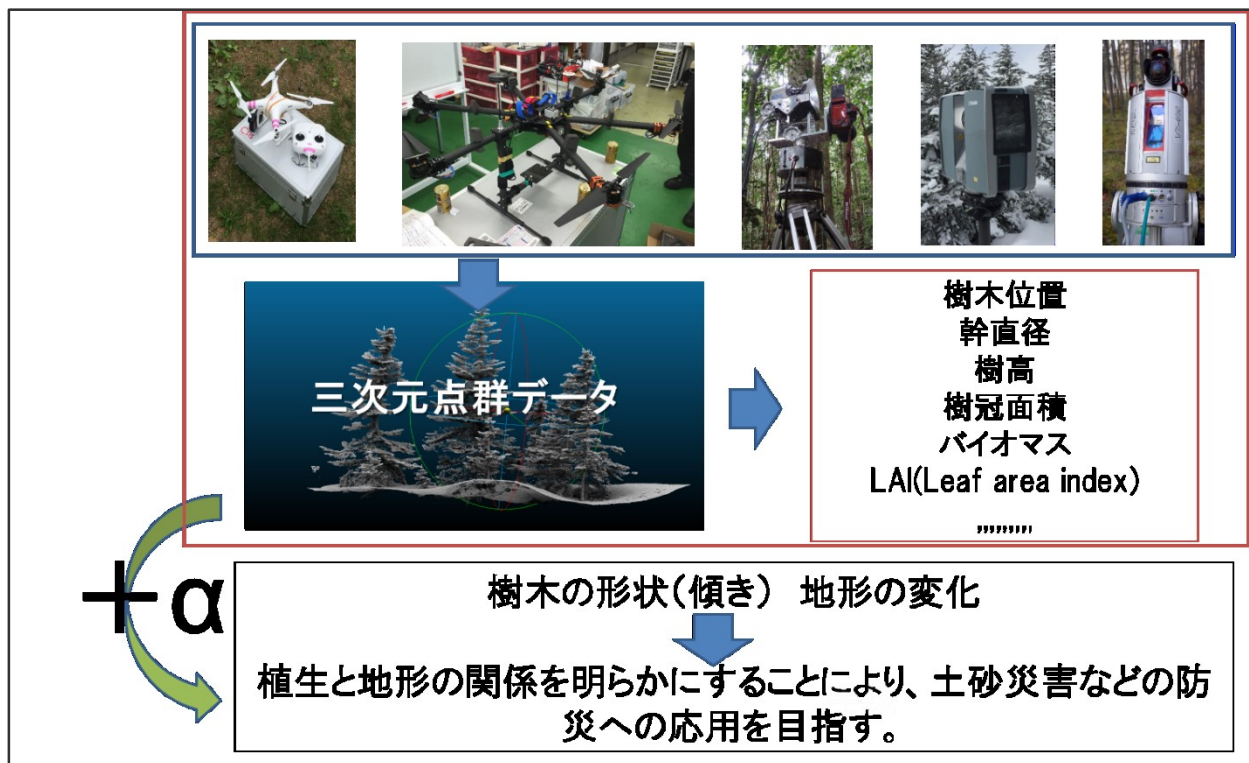


図1-2. 本研究で目的とする研究課題の位置づけ。  
三次元点群データの取得手法各種と、その森林科学分野での従来利用方法、および本研究での試み。

## 2. 調査地域

### 2.1. 概要

本研究では、樹木の形状が地形などの外的な周囲の環境要因によって影響を受ける可能性が高い地点をまず抽出し、それらの現地で TLS 測量を行った。調査対象地は、足尾山地小流域（栃木県鹿沼市）、華巖滝下流域斜面（栃木県日光市）、東京大学秩父演習林（埼玉県秩父市）、大谷崩れ一ノ沢流域（静岡県静岡市）、御嶽山田の原（長野県王滝村）の 5 カ所を選定した。足尾山地小流域、華巖滝下流域左岸斜面、静岡県大谷崩れ一ノ沢流域では、土石流や斜面崩壊、土壌侵食と関連する植生の変形を計測することを目的とした。御嶽山田の原は、とくに積雪から影響を受ける植生の変形の抽出を目的として計測を行った。さらに、これらの対象地域のうち、過去の TLS 測量の三次元点群データが利用可能な足尾山地小流域、華巖滝下流域左岸斜面については、さらに詳細な分析を進めた。その他の調査地に関しても、将来的に多様なデータをアーカイブ化することも視野にいれ、三次元点群データの取得・整備を行った。

### 2.2. 足尾山地小流域

足尾山地小流域は栃木県鹿沼市にある、北側斜面のヒノキ（*Chamaecyparis Chobtusa*）スギ（*Cryptomeria japonica*）人工林に覆われた小流域（約 11000 m<sup>2</sup>）である。樹種は多くがヒノキで構成されている。1960 年代にヒノキが植林なされたものの、その後あまり管理がされなかったため、小径で密な林分になっている。スギは残存木と思われるものが、大径木で存在する。表層の土壌は薄く、密集した林冠によって日光が遮られ、林床は暗く、下層植生はほとんど発達していない。

本調査地では、先行研究によって土石流に関する調査が行われてきた。2005 年に発生した土石流は、当地域では 20 年に一度という規模の、75 mm/hr の降雨によって発生した。この土石流前後で TLS 測量による三次元点群データの取得が行われており、土石流前後の地形の変化が明らかにされたとともに（Wasklewicz and Hattanji, 2009）、樹木形状の変化を計測することができる。本研究では、2005 年に取得されたデータ（Wasklewicz and Hattanji, 2009）を利用するとともに、2016 年に現地における TLS 測量による三次元点群データの取得を行った。また、TLS 測量によって取得した三次元点群データを用いた樹木の傾きの検証のため、現地実測データとの比較を行った。

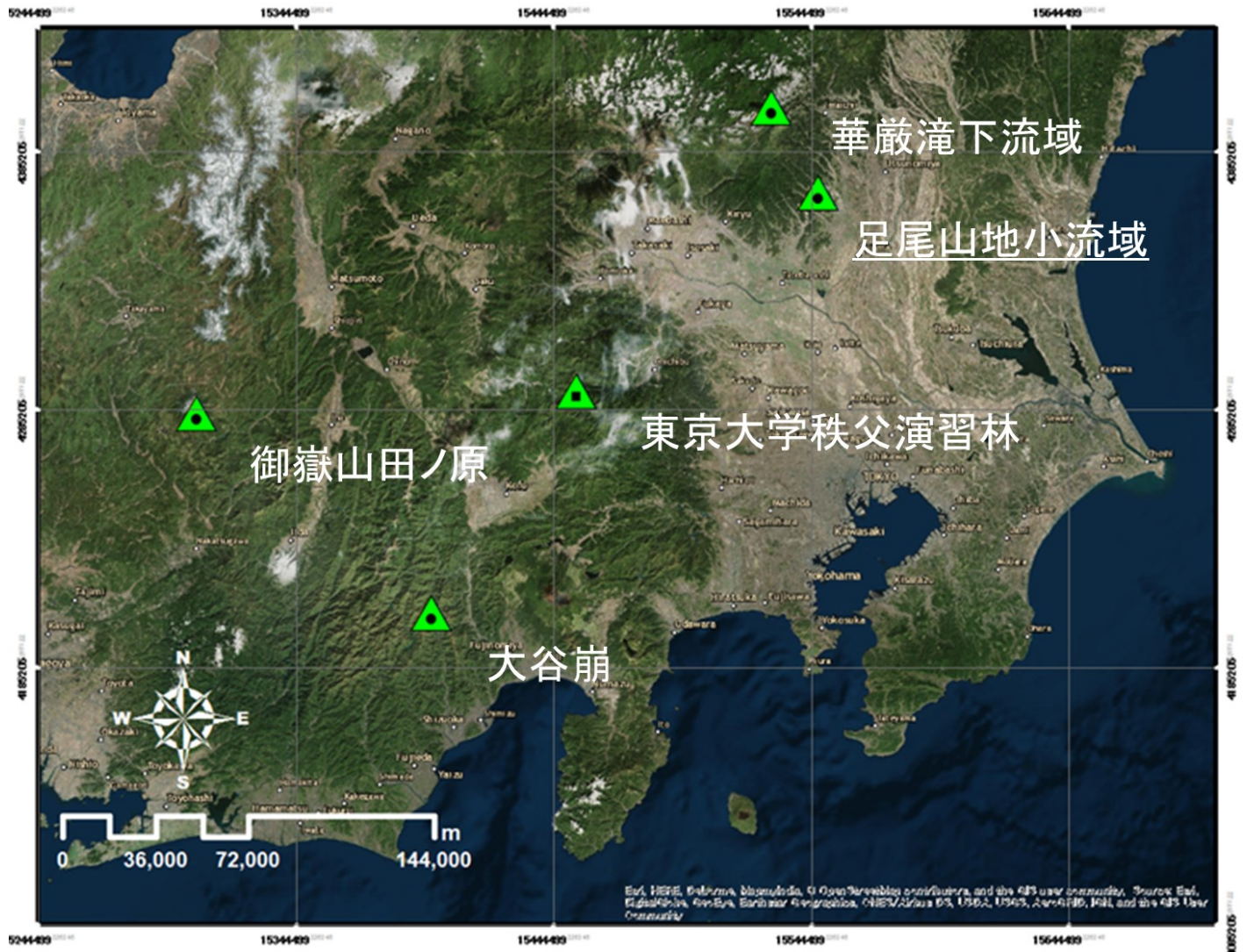


図2-1. 本研究における全調査地点の位置.



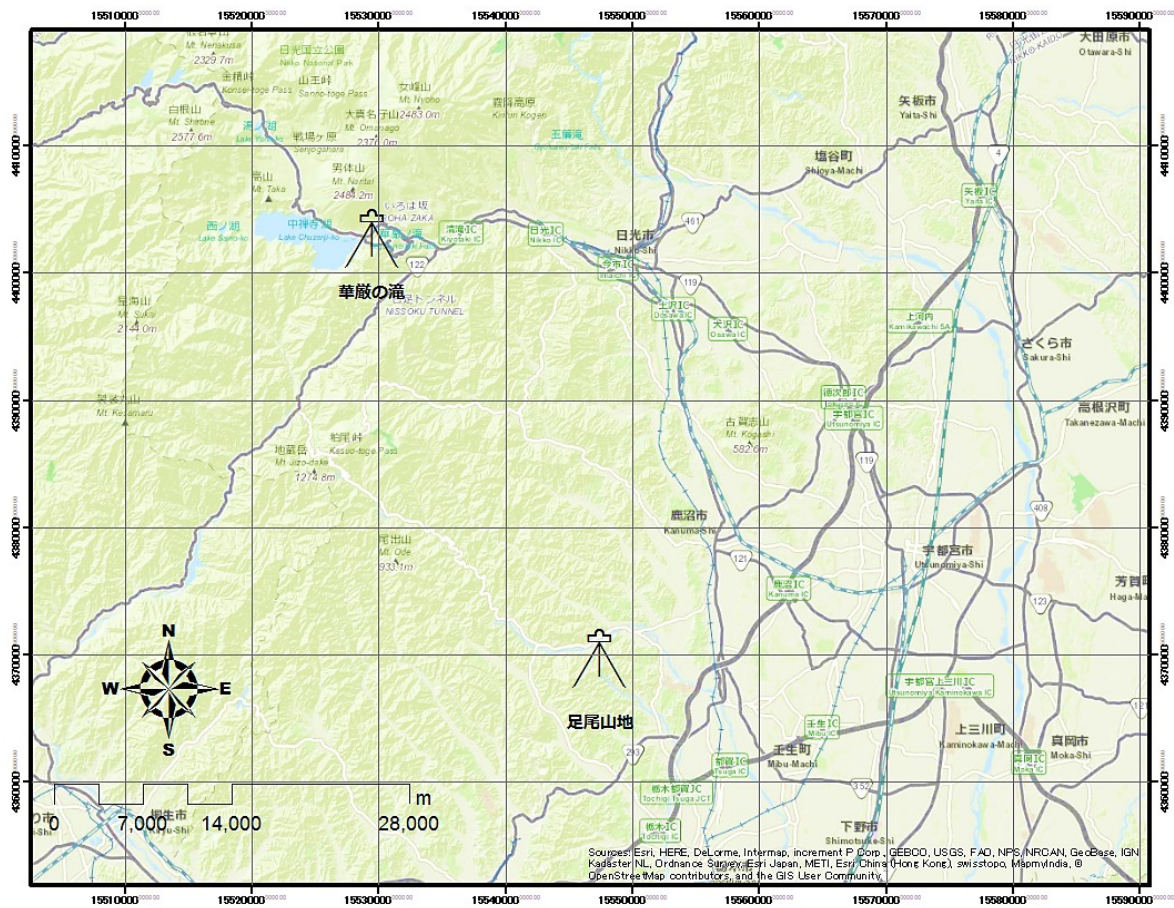


図2-2. 栃木県足尾山地および華厳滝周辺の調査地点.

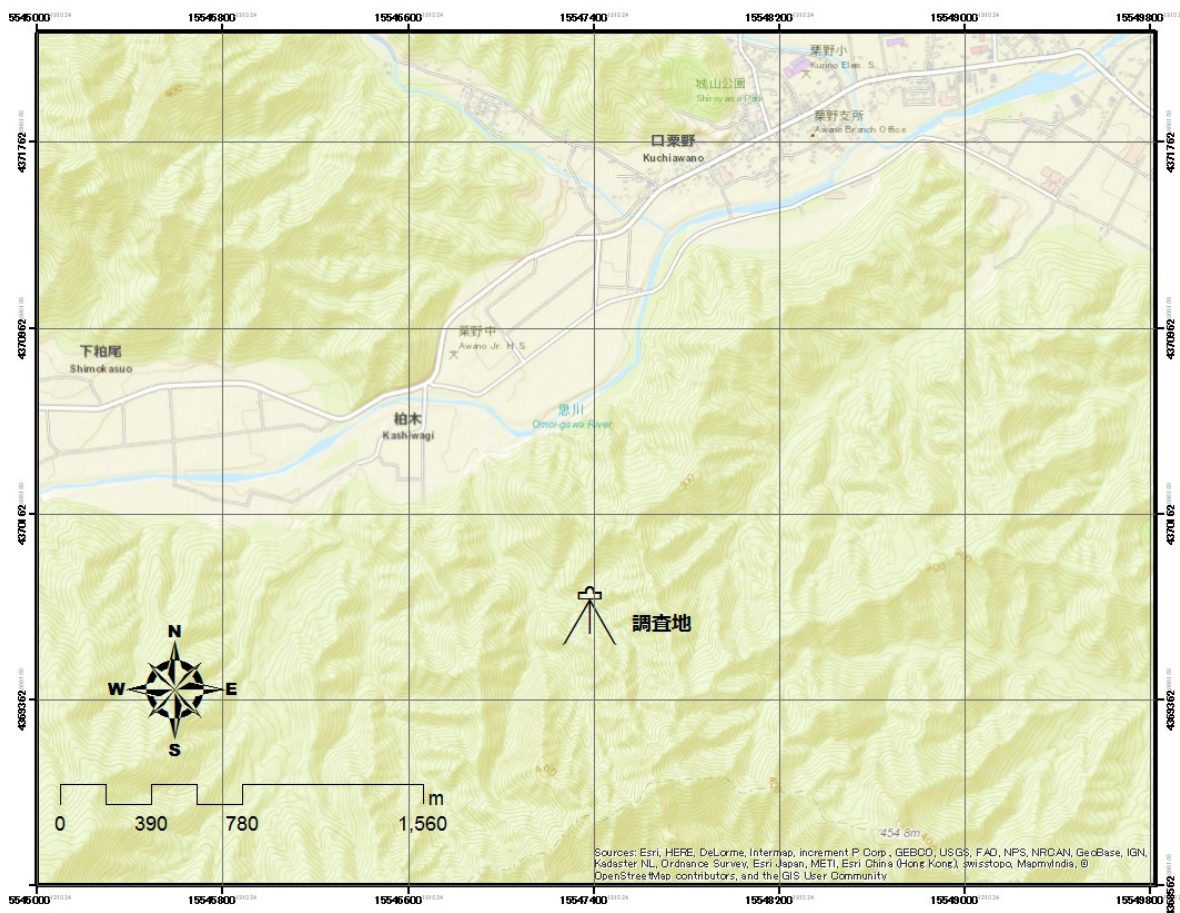


図2-3. 足尾山地小流域の調査地点(図2-2の部分拡大).



図2-4.足尾山地小流域の調査地点の概況.  
(a) 航空写真と調査対象流域の地形三次元表示. Google Earthを使用.  
(b) 調査対象流域を谷底から上流に向けて撮影.  
(c) 調査対象流域の出口外から撮影.

### 2.3. 華巖滝下流斜面

華巖滝は鬼怒川水系大谷川の上流に位置する、栃木県日光市宮祠にある滝であり、観光地としても有名である。上流には中禅寺湖があり、中禅寺湖と華巖滝の間には堰が設けられている。ここでは下流にある水力発電所に安定した流量を確保するとともに、観光資源としての華巖滝の景観を維持するために流量が調整されている。華巖滝では早川・松倉（2003）によって滝の後退速度の研究がなされている。また、2011年より定期的に、観瀑台より滝と滝の周囲を対象に TLS 測量で三次元点群データが取得されている（Hayakawa, 2013; Hayakawa and Obanawa, 2015）。本研究では、滝の正面に位置する観瀑台付近から、滝と間の左岸側の一部において、表層土壌の移動が生じ、また樹木の位置も連動して変化している可能性のある斜面を対象とした。最新の現地調査は 2016 年 12 月に TLS 測量による三次元点群データの取得を行い、また過去に同地点で取得されたデータも用いて比較を行った。

### 2.4. 東京大学秩父演習林

東京大学秩父演習林は埼玉県秩父市（元大滝村）にある、東京大学教育研究施設として東京大学が所有する演習林である。現在の面積は 5812ha で、大地川地区（932ha）と栃本地区（4875ha）の 2 団地に分けられている。本研究では、これらのうち栃本地区における林道沿いの斜面を対象に調査を行った。斜面地形は、主には河川の下刻により、下部では直線的かつ急勾配をもち、また尾根を含む上部では緩勾配をもつという、秩父山地において典型的な特徴を有している。冬季の平均積雪深は 20-30cm である。林況は人工造林地が 13%、天然林が 86%であり、天然林のうち再生林が 63%、原生林が 37%になっている（東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林 秩父演習林, 2015）。演習林という特性上、人工林では研究用途により管理の頻度や手法が区分されており、それらの情報を利用することができる。また、近年はシカの個体数の増加により下層植生が減少しており、これが原因とみられる小規模な崩壊も発生している。本研究では、こうした林道の設置などの林業的な管理による攪乱や、シカの個体数の増加による景観の変化が、樹木の形状や地形にどのような影響があるかを検討する。現地計測は、2015 年 12 月に、TLS 測量と UAV-SfM を用いて実施し、三次元点群データを取得した。また、秩父演習林では高解像度の ALS による三次元点群データや、Cyberforest による音データ、映像データの取得がされており（Saito et al., 2015）、それらとの比較も検討可能である。

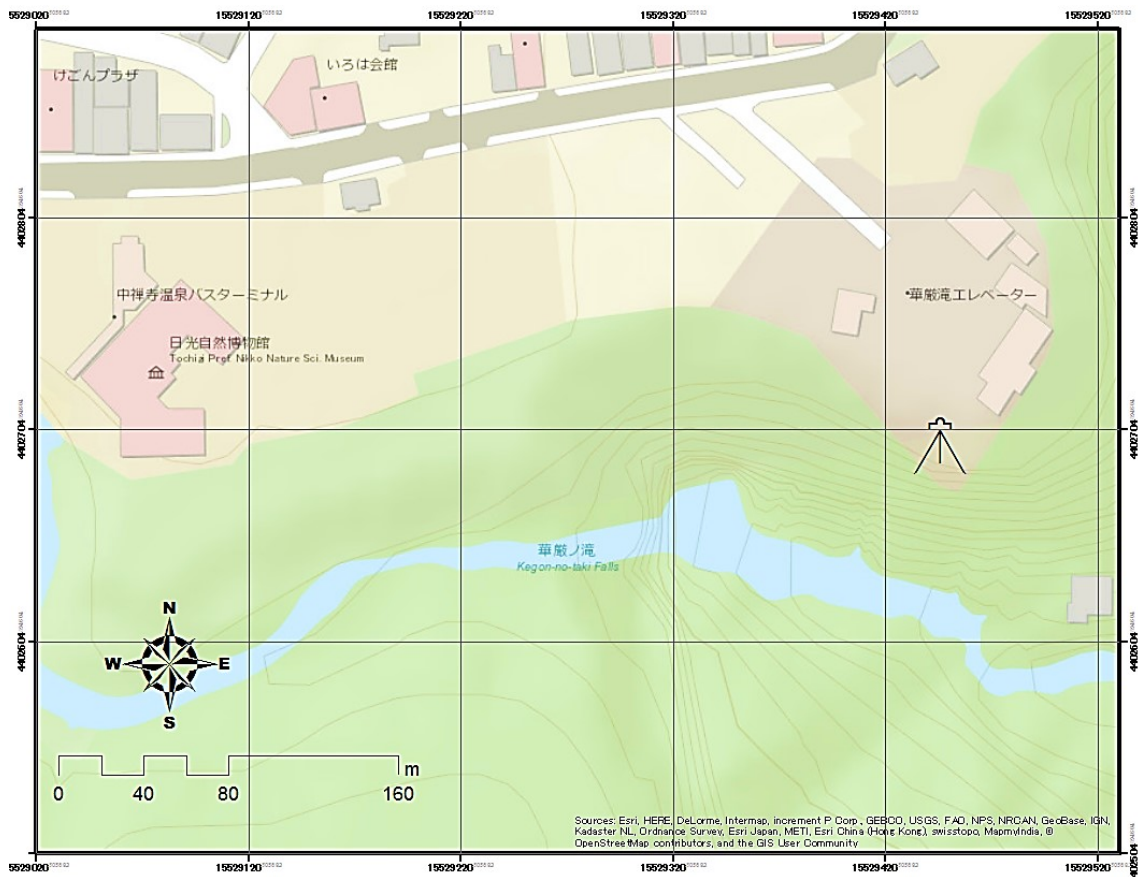
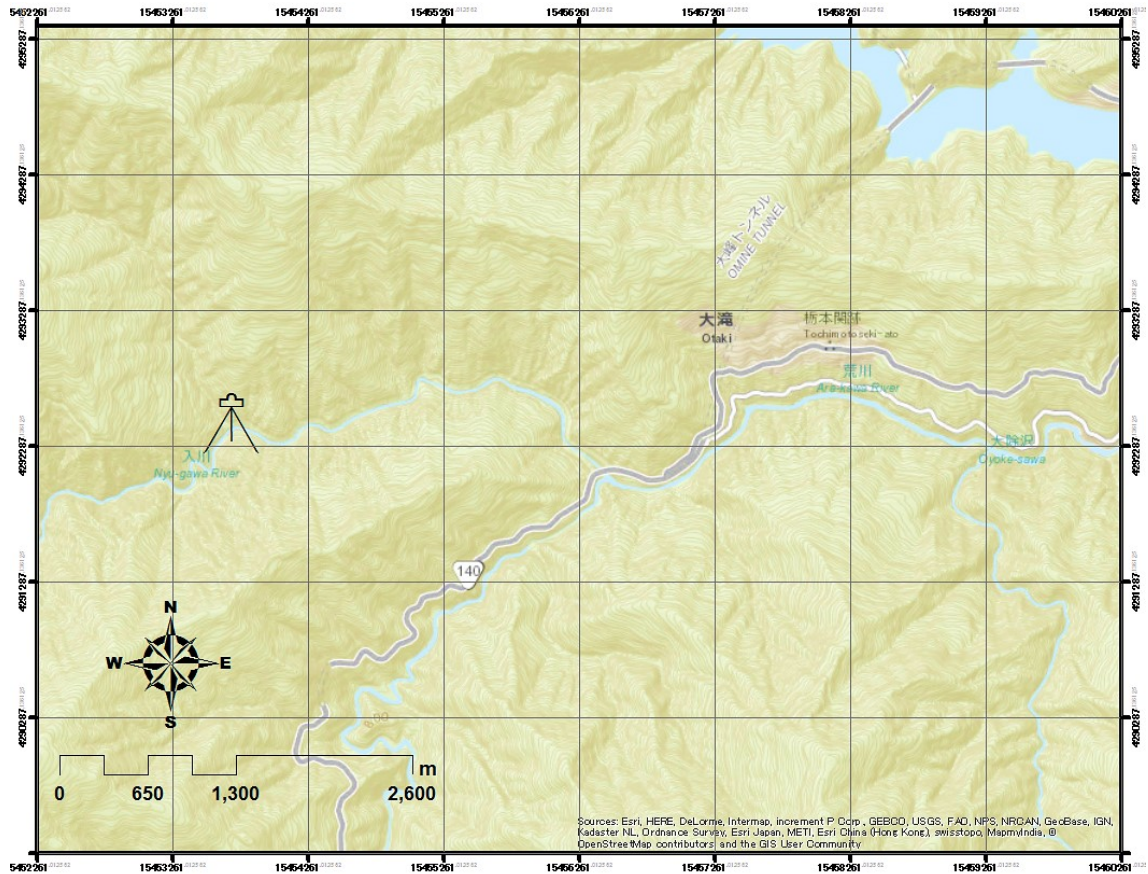


図2-5. 華厳滝の下流左岸域における調査地点  
(栃木県日光市中宮祠，図2-2の部分拡大).



図2-6. 華厳滝調査地の概況. 観瀑台から見た調査地とTLS測量の様子.

(a)



(b)

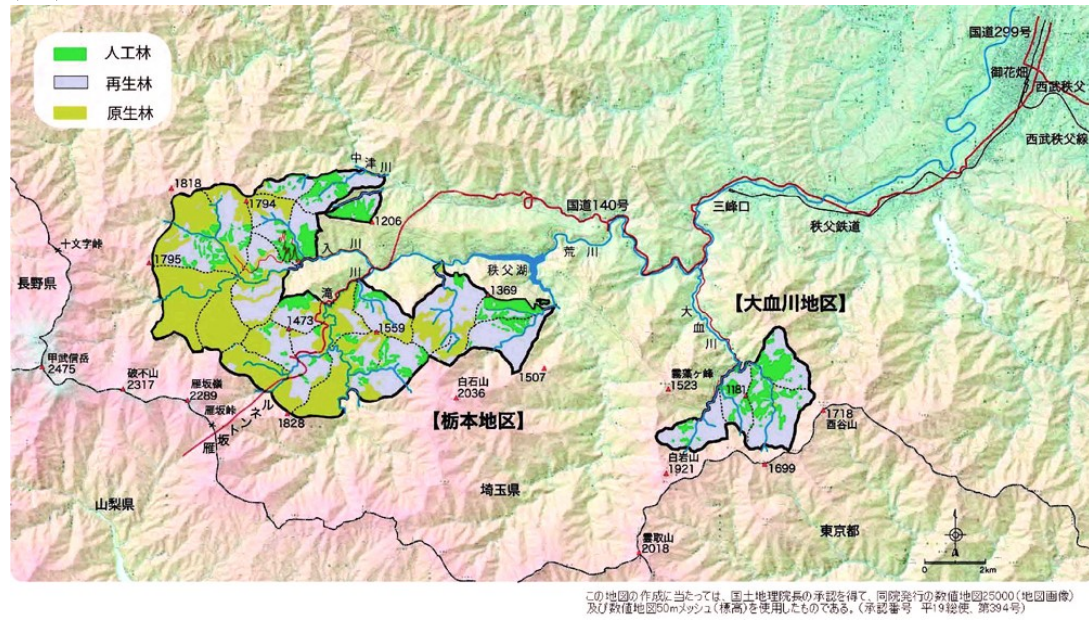


図2-7.(a) 東京大学秩父演習林における調査地点の位置.

(b) 秩父演習林の案内図(東京大学秩父演習林パンフレットより). 森林を種別に色分け.

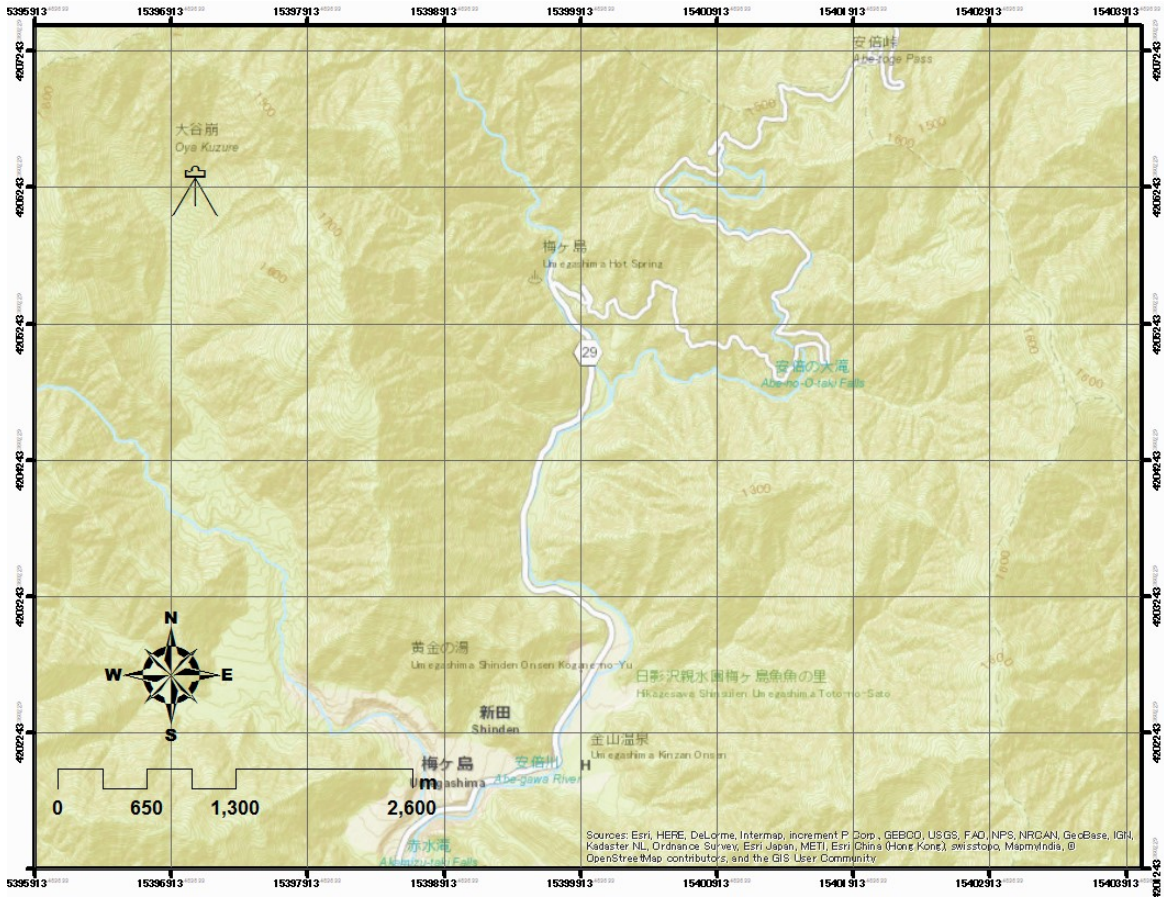
## 2.5. 大谷崩一ノ沢流域

大谷崩は、静岡県静岡市葵区青ヶ島に位置する大規模崩壊地である。南アルプス山地南部の安倍川上流域に位置しており、宝永4年(1707年)10月の宝永地震によって発生し、現在に至るまで活発に土砂が生産され続けている(Tsuchiya and Imaizumi, 2010)。大谷崩には複数の沢が存在する。本研究では、大谷崩のなかでも最も土砂生産が活発である一ノ沢流域を対象とした。一ノ沢では、静岡大学、筑波大学、東京大学の研究グループにより、ビデオカメラ、雨量計、TLS、UAV-SfMによる継続的な観測が行われている。本研究では、一ノ沢流域の出口付近に位置する滝よりも下流における領域を主対象とし、TLS測量による三次元点群データを取得した。この領域では、サワグルミ(*Pterocarya rhoifolia*)などの河畔植生が再生している。

## 2.5. 御嶽山田ノ原

御嶽山田ノ原は長野県木曾郡王滝村に位置し、亜高山帯針葉樹林が分布する。優占する樹種はコメツガ(*Tsuga diversifolia*)、トウヒ(*Picea jezoensis var. hondoensis*)など、亜高山帯を代表する樹種である。林床にはチシマザサ(*Sasa kurilensis*)が、登山道、木道散策路を除き密に分布している。高山の尾根部に位置する田ノ原は全般的に平坦な地形を呈し、湿地帯になっているため、樹木の生息は遅く、小径木が多くを占める(杉田ほか, 2008)。調査地における冬季の最深積雪深は90 cm - 180 cm(2004年 - 2007年)である(杉田ほか, 2008)。また、御嶽山では2014年に大規模な噴火が確認されており、上流域における不安定な火山灰層の存在から、降雨や融雪による土石流といった下流域での土砂災害の危険性が高まっている(片岡ほか, 2015)。本研究では、積雪深と植生形状との関係に注目して、TLS測量による三次元点群データの取得を行った。たとえば積雪深とササの形態との間には相互関係があると考えられているが(酒井, 1977)、それを空間的に検証した研究はあまりない。

(a)



(b)

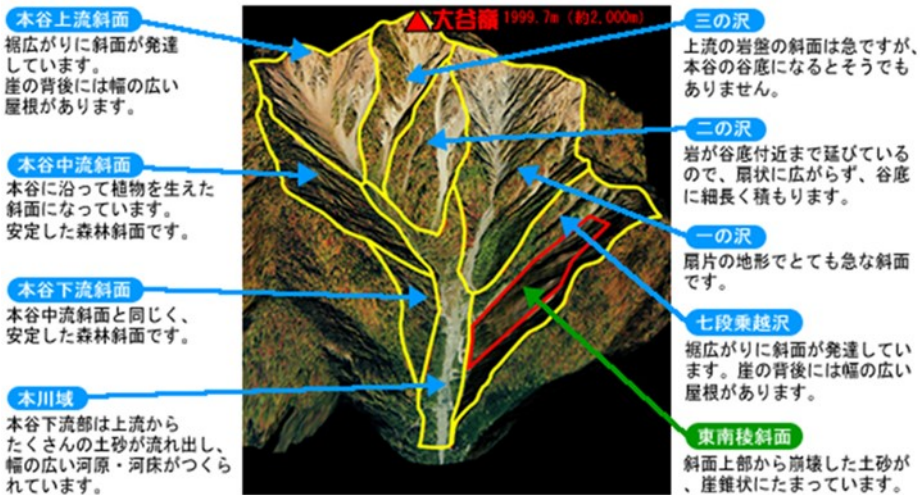


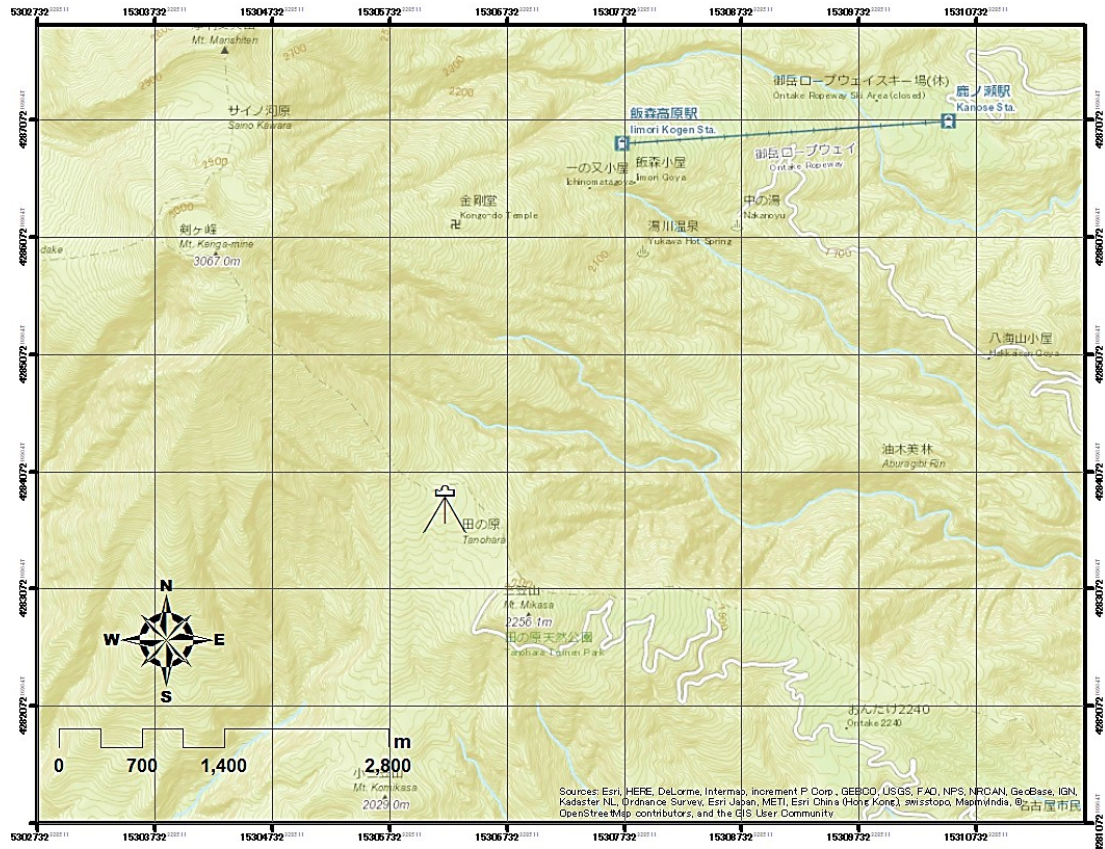
図2-7. (a) 大谷崩における調査地点の位置(静岡県静岡市).  
(b) 大谷崩における各小流域の解説(静岡河川事務所, 2006).  
本研究は一ノ沢下流域を対象とした.



図2-8. 調査地概況(大谷崩・一ノ沢下流域). TLS測量の様子.



(a)



(b)



(c)



図2-9. (a) 御嶽山田ノ原における調査地点の位置.  
(b) 田ノ原の周辺案内図(王滝村公式ホームページより).  
(c) 調査地概況. 積雪後の様子.

### 3. 手法

#### 3.1. TLS 測量による三次元点群データの取得

##### 3.1.1 使用機材

本研究では、主に短距離型の地上レーザスキャナである、Trimble TX5 を用いて TLS 測量を実施した。TX5 は鉛直方向に  $300^\circ$ 、水平方向に  $360^\circ$  の測定範囲を持ち、最大有効測定距離は、屋内または明るさが低い野外であること及び 90% 反射面へ通常投影の場合、120 m である。測距精度は、距離 10-25 m 及び反射強度が 10-90% の場合、 $\pm 2$  mm である。TX5 は現在使われている TLS では小型に分類され（本体量約 5 kg）、容易に持ち運びが可能である（図 3-1.）。

また、使用した過去のデータでは、異なる TLS 機器によって TLS 測量が行われた。足尾山地小流域の 2005 年のデータ取得は、Leica HDS3000 を用いた。華巖滝の 2011 年からのデータ取得では GLS-1500 が用いられた。

##### 3.1.2 現地における TLS 測量

TLS 測量は、静止が保てるところに三脚を据え、その上に TLS 本体を設置することで測量をすることができる。レーザーは周辺のあらゆる物体において反射するため、TLS の設置位置はできるだけ見通しの良いところが望ましい。そうすることで広範囲の点群の取得が可能である。本研究では、現地計測のデータ取得効率を考慮し、次節に述べるようなターゲットレスの方法で TLS 測量を行い、後処理による点群の合成を行う。TLS を設置する間隔は、後処理の点群合成を簡易に行うために、取得される点群が十分にオーバーラップするよう考慮して設置する必要がある。詳細な機械設置点は、調査地、調査目的に沿って考慮されるべきである。たとえば足尾山地小流域では、谷底の地形の詳しい情報が必要であることと、斜面上における見通しが良好でないことから、谷底において連続して TLS を設置した。多時期の取得した、三次元点群データの土石流前を C1、土石流後を C2、土石流後 10 年を C3 と設定した。また、華巖滝下流域では、過去の滝とその周辺の滝崖を対象とした測量は、滝の正面に位置する観瀑台から中距離 TLS を用いて行われていたが、本研究で対象とする左岸斜面とその植生を計測する際には、観瀑台からの測量に加え、より近接した斜面上の歩道沿いに、機械設置点を複数設置した。



図3-1. 本研究で使用したTLSの例.

表3-1. 本研究で使用したTLSの諸元.

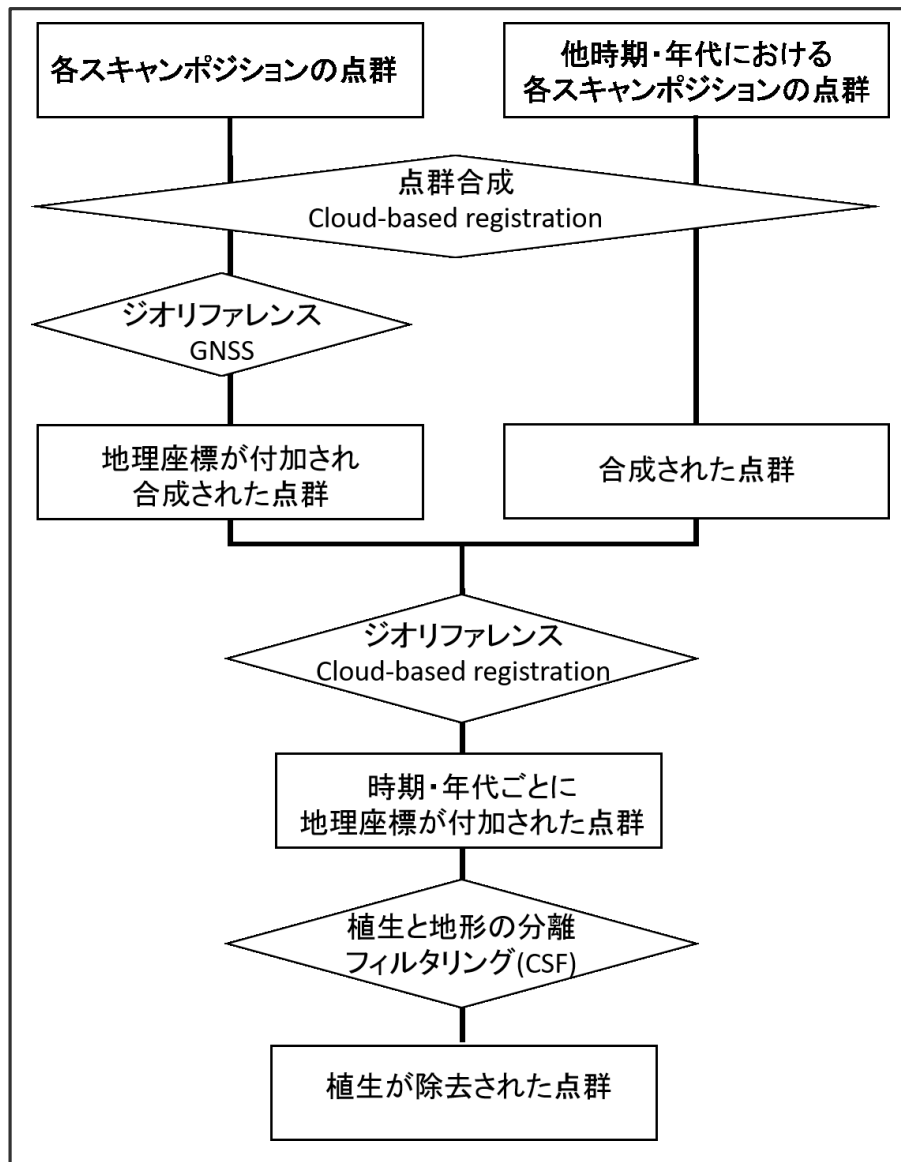
機種名	Leica HDS3000	Trimble TX5
有効測定距離	1 m ~100 m	0.06 m ~ 120 m
スキャン範囲	水平360° , 鉛直270°	水平360° , 鉛直300°
重さ	17 kg	5 kg
測距制度	6 mm	2 mm

### 3.1.3 TLS 測量データの後処理

現地で取得したデータの後処理について、以下に記載する。図 3-2a には点群データ処理の全体的な流れを示した。まず初めに、点群データの管理・処理ソフトウェアである **Trimble RealWorks Ver 8.10** を用いて、スキャンポジションごとの点群データを読み込む。ここから点群を利用するには、各スキャンポジションの点群を合成し一つの点群にする必要がある。本研究では、**Trimble RealWorks** の機能である **Cloud-Based registration** を用いて点群の合成を行った。この **Cloud-Based registration** には、**ICP (Iterative Closest Point)** と呼ばれるアルゴリズムが用いられている。**ICP** とは、二つの点群の特徴となる点群間の距離が最小になるように 2 つの点群のうち片方の点群を移動・回転し、合成するアルゴリズムである。これにより、フィールドでタイポイントとなるターゲット（点群合成のための参照点）を設置せずとも、複数の点群を合成することが可能となる（図 3-2b）。合成した点群の座標は機械点を中心とする相対的な位置座標となるため、とくに既存の空間データとの比較を行う場合には、地理座標を持った点群に変換する必要がある。本研究では後処理型キネマティック **GNSS** 測量を行って、基準点となる複数の地上参照点（**GCP: Ground Control Points**）の位置情報を取得する（位置精度 1～数 cm）。**TLS** によって得られた複数の **GCP** の相対的な位置関係と、**GNSS** 測量による **GCP** の位置情報から得られる相対的な関係が重なり合うように、点群を移動、回転させる行列を作ることによって、合成された点群に地理座標を与える。また、過去のデータなどで地理座標が与えられない点群を用いる場合もある。本研究においては、足尾山地小流域調査地などでは、過去データには地理座標が与えられていなかった。そのような場合は、現在の **TLS** 測量で取得した点群と、過去に取得した点群データの双方に含まれる形状不変領域を対象として、**Cloud-Based registration** により位置合わせを行う。位置を合わせた後、別々の点群として保存することで、過去の点群にも地理座標が与えられる。

合成され地理座標を与えられた点群は、植生と地形とが混在している。植生と地形のそれぞれを精査するためには、フィルタリングを行うことでクラス分けを行い、点群を分ける必要がある。フィルタリングの方法には様々な種類があり、用途や調査地によって使い分けられている。本研究では、点群データ解析の可能なフリーソフトウェアである **CloudCompare** にプラグインとして含まれる、**CSF filter** を用いた（Zhang et al.,2016）。これは、主に **ALS** による点群データ用に作られたアルゴリズムである。本研究では **TLS** によるデータに対し **CSF filter** を用いたが、計算時間が短く、また目的に沿った植生と地形の分離が行えると判断した。

(a)



(b)

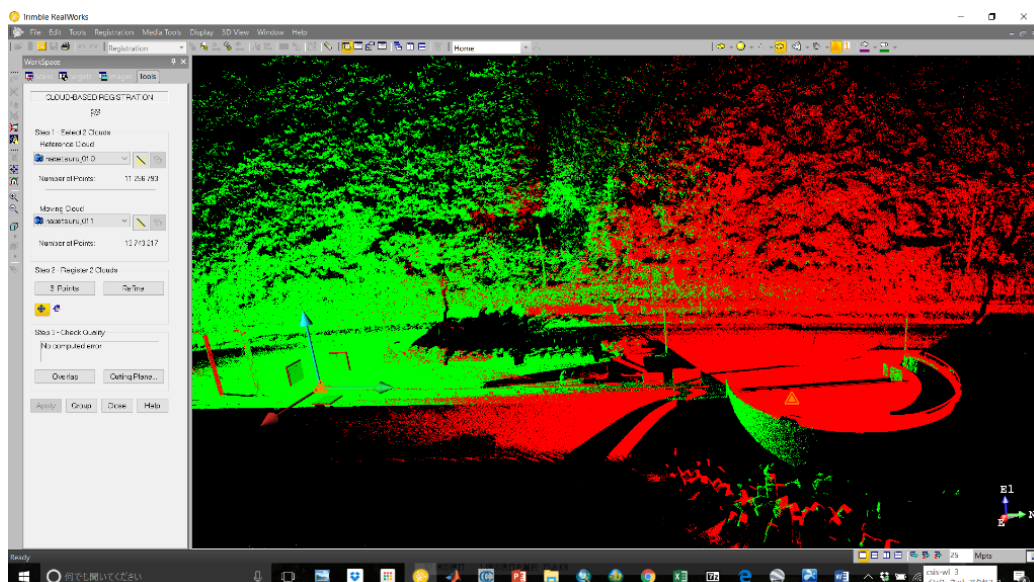


図3-2. (a) 取得した点群の後処理の流れ.  
(b) コンピュータ画面上のCloud-Based registration による点群合成の様子.

### 3.2. 点群データを用いた地形解析

本研究では、まず一般的に行われる DEM を用いた地形解析を行うとともに、三次元点群データを用いた三次元的な地形の解析も行う (図 3-3)。ここでは、後処理により植生と分離された地形の点群データを用いて、地形の変化量を求める。地形の変化量を求めるには、CloudCompare のプラグインに含まれる M3C2 distance を用いた (Lague et al.,2013)。M3C2 は、とくに TLS により取得された点群データの比較に適している。データを比較する際、一方の点群から対象とする点群を指定するが、指定した点群からもう一方の点群を比較する際の、基準となる面とその法線、および法線方向の検索範囲を指定することができる。すなわち、比較する点群の表面における微小な面の向きを推定することもできるツールである (Lague et al.,2013)。また、谷の横断面を詳細に分析するため、点群データから CloudCompare の基礎機能を用いて断面図の抽出を行う。

DEM を用いた解析は、すべて ArcGIS 上で行う。まず、ArcGIS 上で点群が扱えるように LAS データセットを作成する。使用した点群データは、あらかじめ後処理で植生を分離した地形のみのデータを使用する。LAS データセットより、変換ツールを用い、DEM を作成した。DEM のセルサイズ (解像度) は、点群の密度にもとづき決定する。変換の際の標高値の集約方法については、CSF によるフィルタリングで取り除けないものがあつた場合を想定し、検索領域内の最小値を利用する設定とする。作成した DEM からは、Spatial Analyst ツールを用いて、斜面方位・斜面傾斜角と河川フィーチャーを作成する。斜面方位・斜面勾配角は、植生形状の分布との空間的比較に用いる。河川フィーチャーは、流路を特定することで、流路沿いの地形変化を調べることに用いる。作成した河川フィーチャーの長さ、と、両端の直線距離を求め、二つの値の比から蛇行度を求める。

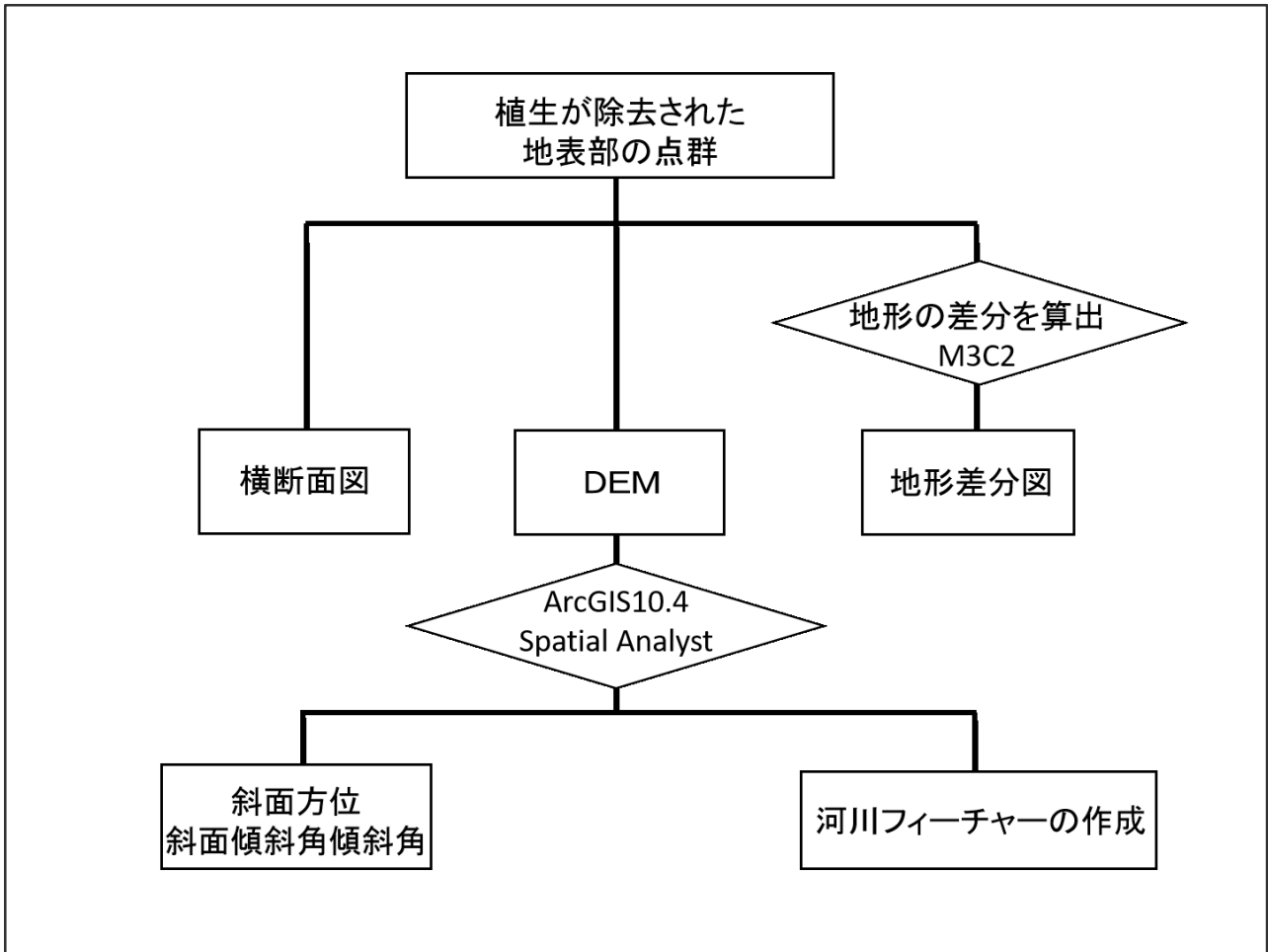


図3-3. 点群データを用いた地形解析の流れ.

### 3.3. 点群データを用いた樹木形状解析

本研究では点群データから樹木形状解析を行った。解析手法は幹の点群から二点の xyz 座標を取得することにより，二点から樹木の傾きの大きさと傾きの方位を取得する（図 3-4a）。この手法はコンピュータ画面上で，手動で二点を指定する方法である（図 3-4b）。この手法を導入した足尾山地小流域はヒノキの単層林である。そのため，対象とする樹木は根曲がり以外はほぼ屈曲せず，幹の傾きを樹木の傾きとすることができる。また，ヒノキの幹は樹木の中では正円の円柱に近いのでこの手法が導入できる。二点の点群をコンピュータの画面上で選択する場合は，円柱を想定したうえで，幹の中心を縦断する同じ鉛直面上に存在する点を慎重に選ぶ必要がある。

幹の傾きと方位については，上記で指定した二点間の座標の差分から求める。すなわち，鉛直方向に対する樹幹の傾きの角度  $s$  は以下の式であらわされる：

$$s = \tan^{-1} \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$$

ここで， $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  はそれぞれ二点の座標差分の成分を示す。また，その傾きの水平方位角  $v$  については，以下の式であらわされる：

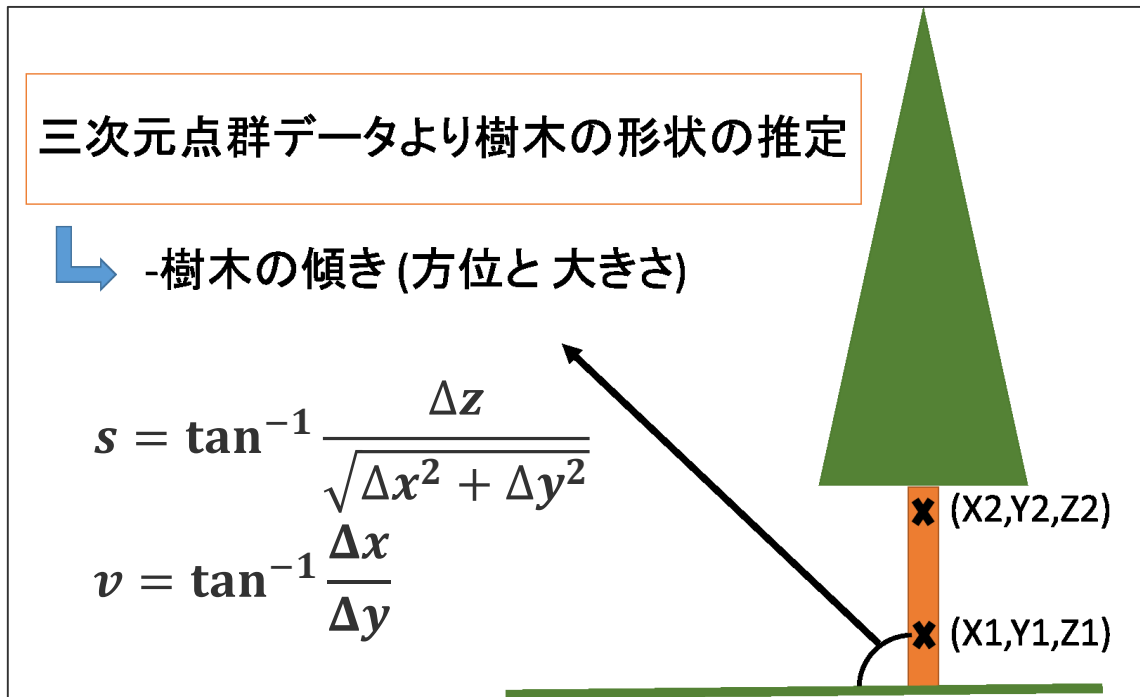
$$v = \tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

傾き  $s$  と方位  $v$  を GIS で利用可能なポイントデータに変換することで，空間的な解析と可視化を行った。多時期の樹木の傾きを比較するため，毎木ごとに固有の番号与えた。すなわち，固有の番号を与えることで，樹木の形状変化を時系列で追うことができる。

樹木の傾きの大きさについては，現地調査による手動計測も実施し，その比較検証を行った。



(a)



(b)

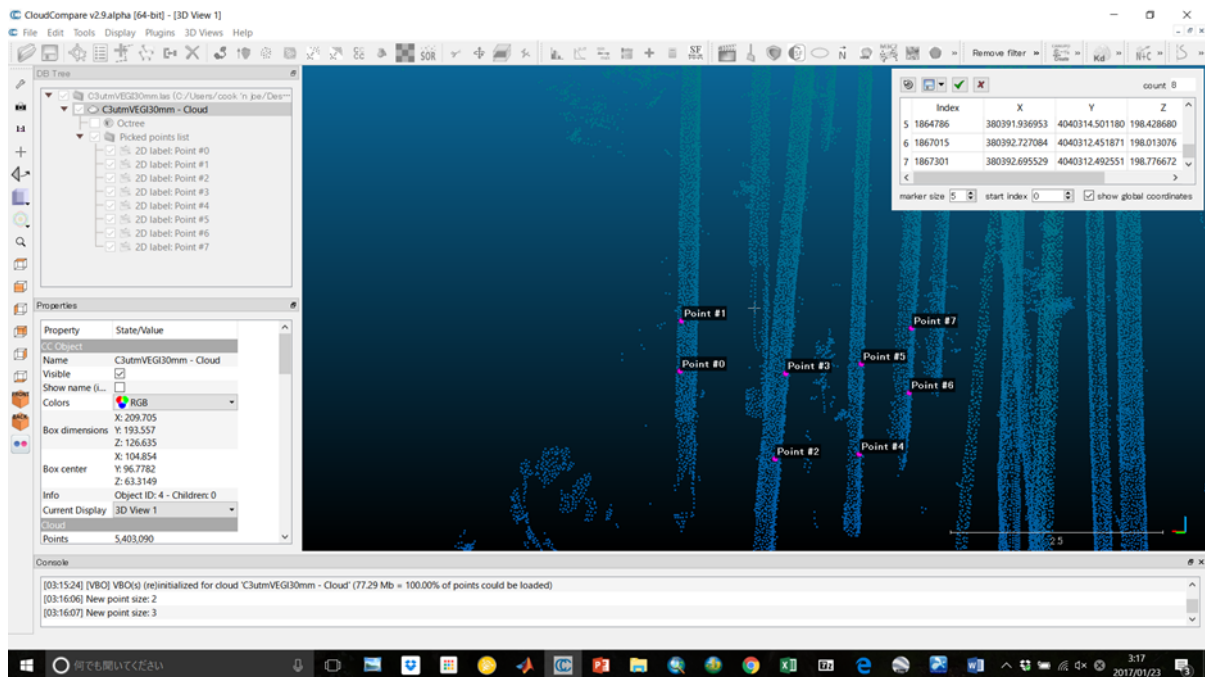


図3-4. (a) 樹木の傾き計測の概念図。  
(b) CloudCompareを使用した、樹木の傾きの手動計測の様子。

## 4. 結果

### 4.1. アーカイブデータの作成

本研究では、五つの調査地で、実際に調査地に赴き、TLS 測量による三次元点群データの取得を行った。また、アーカイブデータとしての整理保存を行なった。

足尾山地小流域では、2016 年の 1 月に測量を行った。谷底に TLS を連続して設置し、谷の形状と流域内の植生の三次元点群データを取得した (図 4-1)。

華巖滝下流斜面では、2016 年の 12 月に測量を行った。斜面を望める観瀑台と斜面上部にある通路に TLS を設置し、斜面の植生と地形の三次元点群データを取得した (図 4-2)。

東京大学秩父演習林では、2016 年の 12 月に測量を行った。栃本地区において林道を起点に、林道の山側、谷側に TLS を設置し、地形と植生の三次元点群データを取得した (図 4-3)。

大谷崩一ノ沢流域では、2015 年 12 月と 2016 年 5 月に測量を行った。一ノ沢流域出口付近に位置する滝よりも下流における河畔植生が再生している領域に TLS を設置し、河畔植生と地形の三次元点群データを取得した (図 4-4)。

御嶽山田ノ原では、2015 年 12 月と 2016 年 2 月の二時期に測量を行った。2015 年 12 月はササが繁茂しているため、木道上に TLS を設置し、地形と植生の三次元点群データを取得した。積雪後の 2016 年 2 月は前回の取得範囲とオーバーラップするように TLS を設置し、積雪と地形と植生の三次元点群データを取得した (図 4-5)。

これらの点群データは、現状を記録する高密度な三次元情報として、将来的な変化検出の原データとして利用可能である。また、取得したデータセット内での地形・植生の形状解析や地域別比較、変化抽出など、さらなる分析が可能なものである。以降は、多時期のデータが揃う、足尾山地小流域を例に、植生と地形の相互作用に注目した詳細な分析結果を示す。

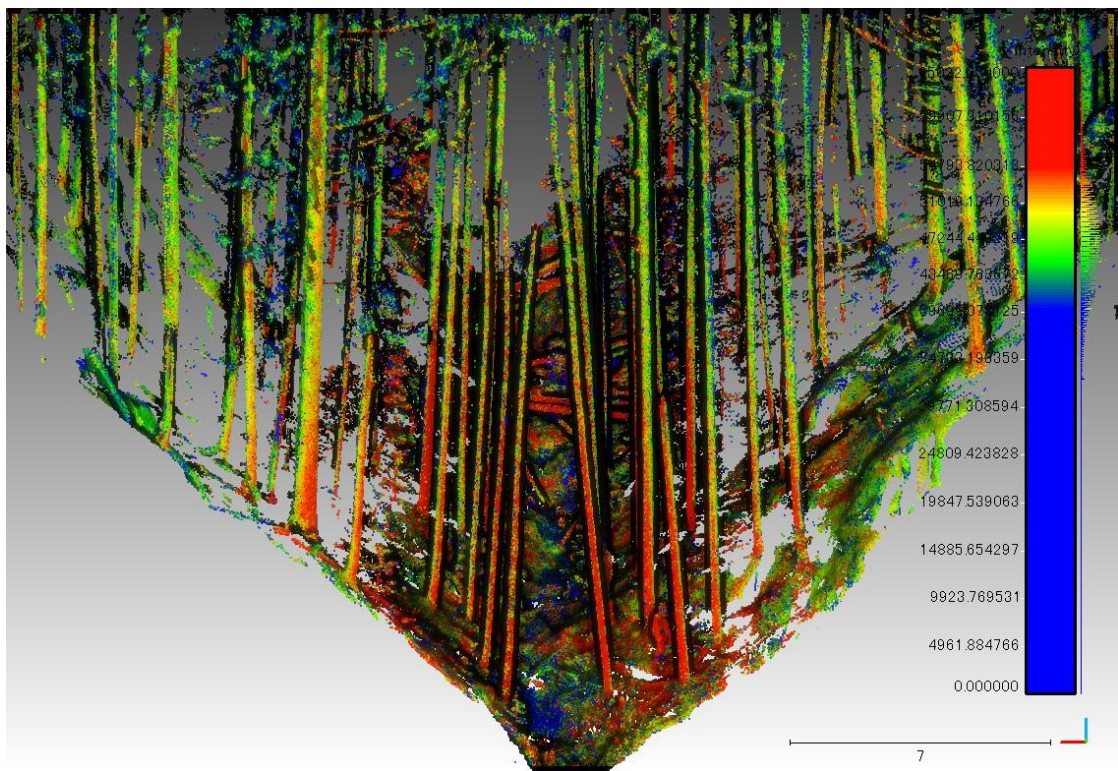


図4-1. 足尾山地小流域における三次元点群データの表示例.  
TLSによる反射強度に応じて色分けして表示.

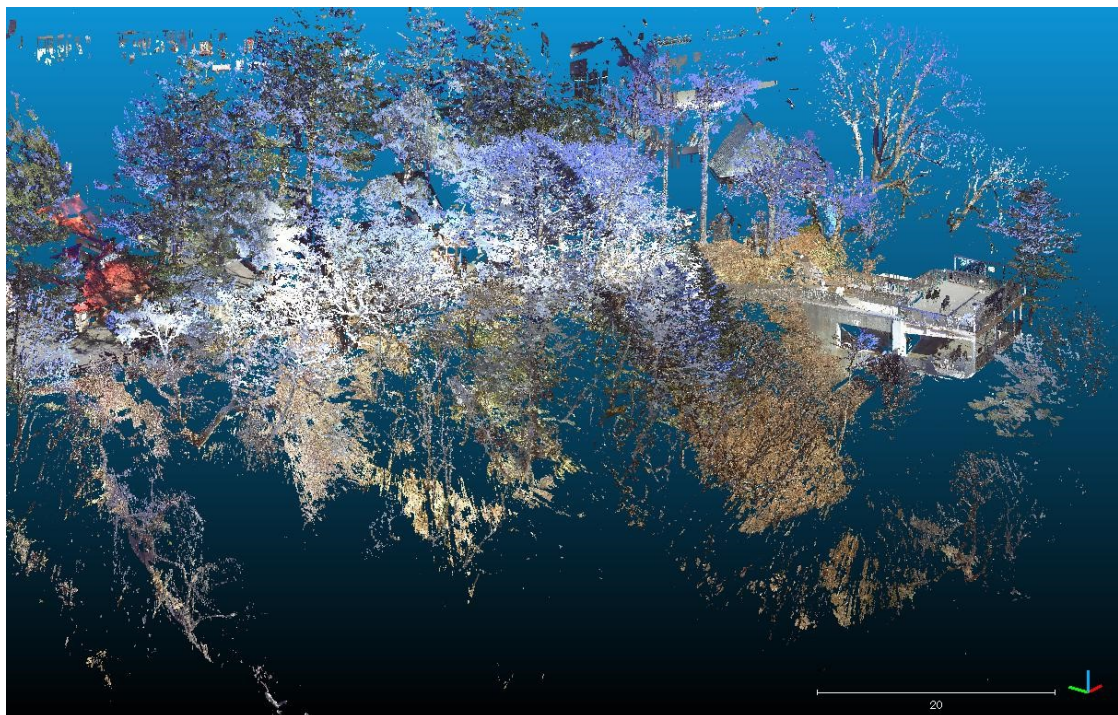


図4-2. 華巖滝下流域斜面における三次元点群データの表示例.  
点群に与えられたRGBカラー情報を表示.  
右端に観瀑台があり, 対象とした斜面と樹木は図の中央付近にあたる.

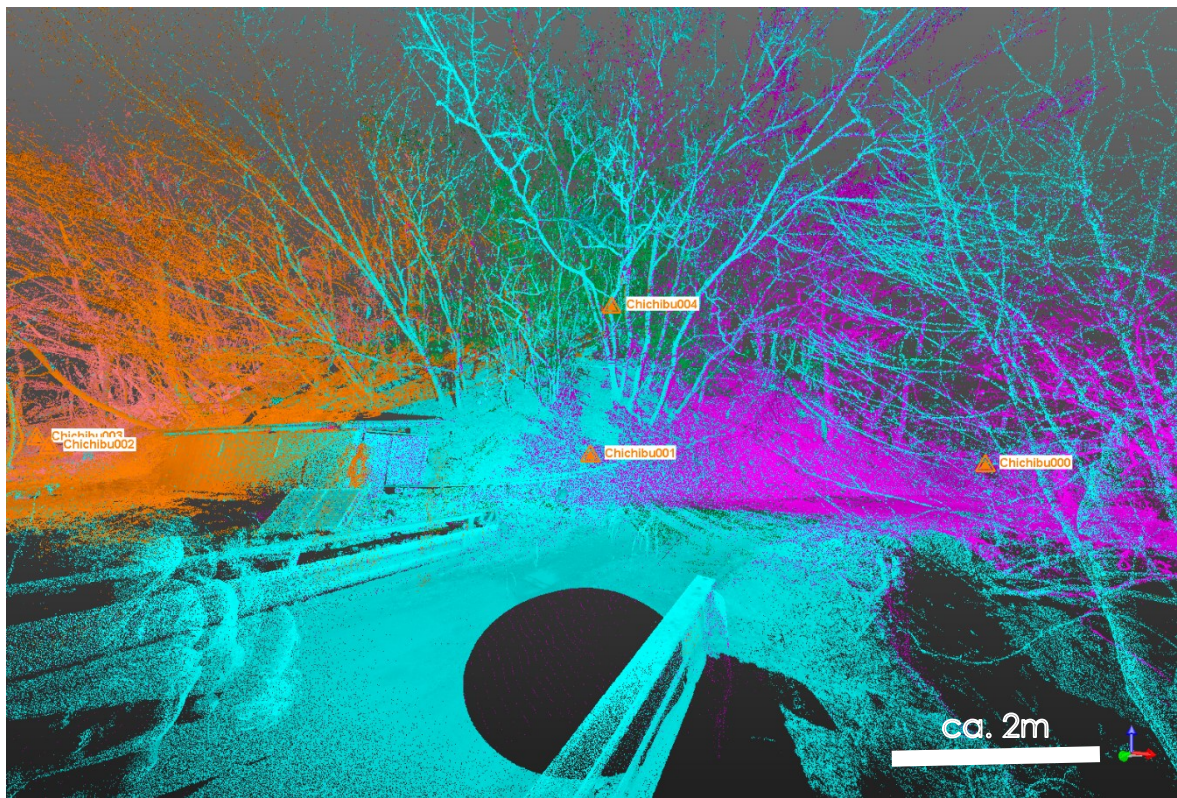


図4-3. 東京大学秩父演習林における三次元点群データの表示例。  
 複数のTLS設置箇所ごとに点群を色分けして表示。  
 三角形はTLSの設置箇所を示す。

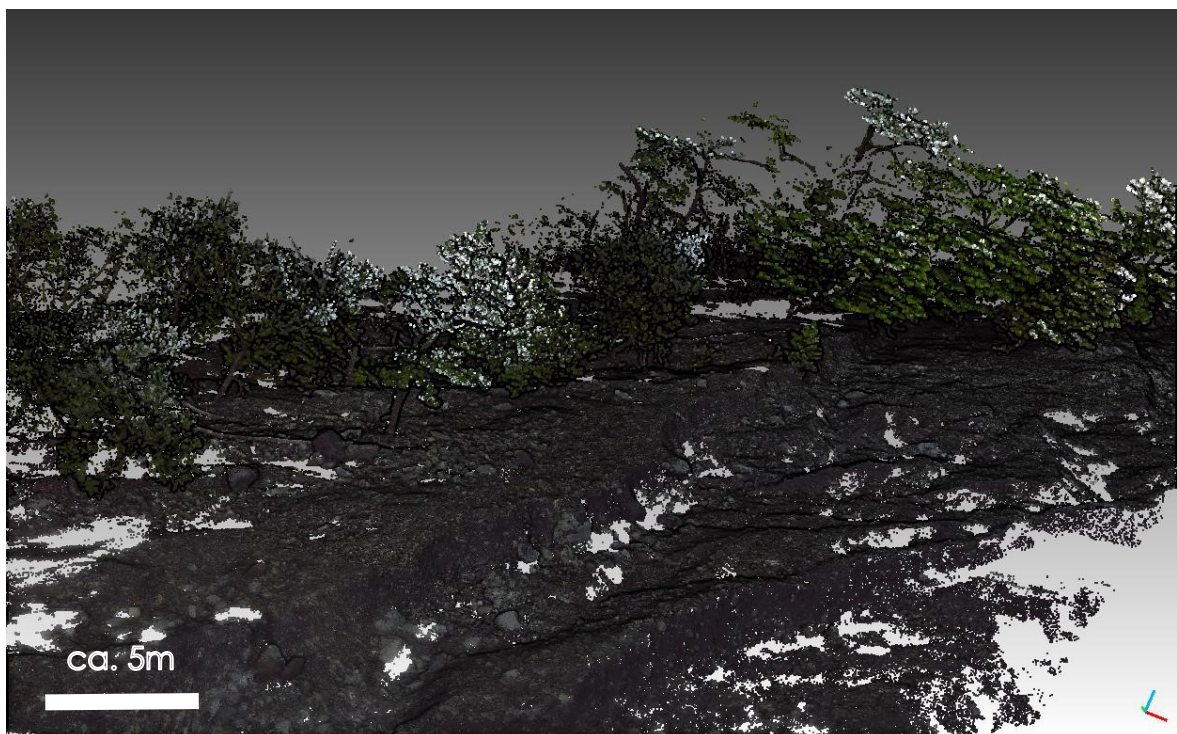
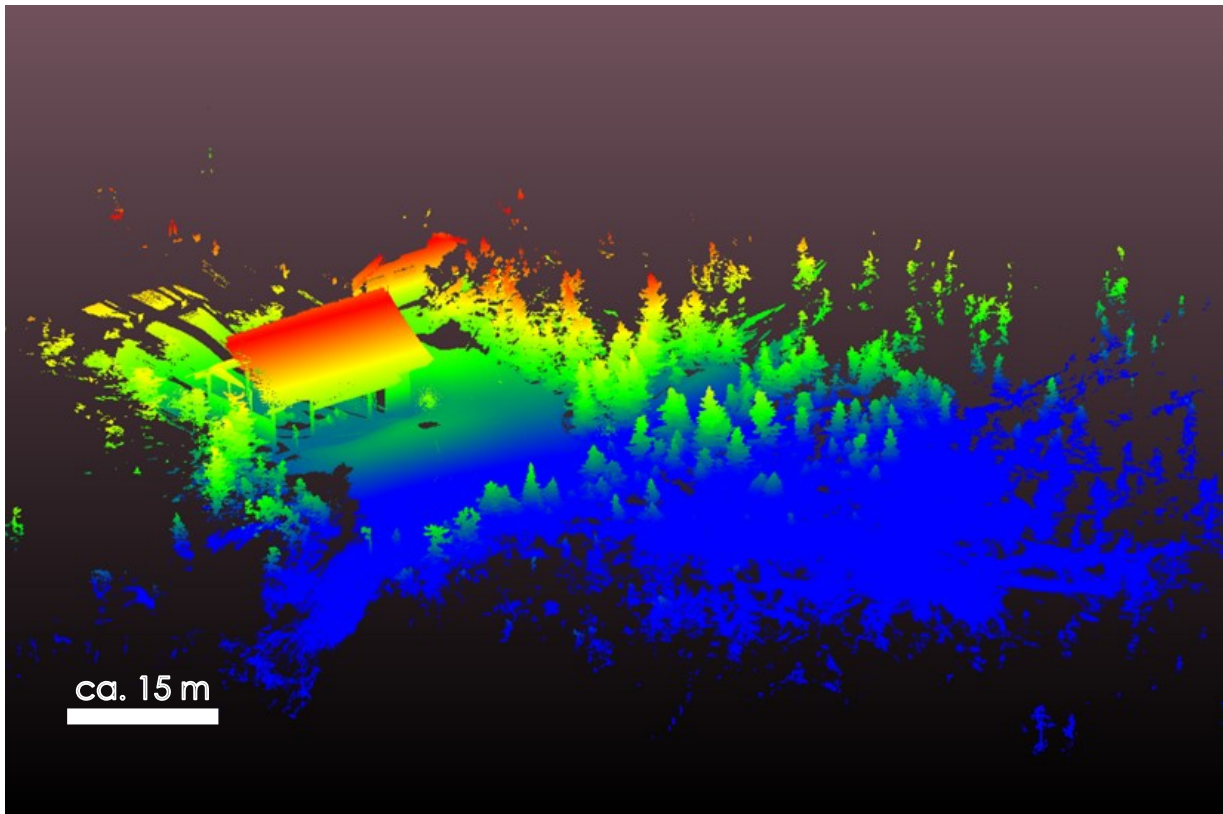


図4-4. 大谷崩・一ノ沢下流域における三次元点群データの表示例。  
 点群に与えられたRGBカラー情報を表示。  
 手前が礫質の堆積物, 奥が対象とした斜面と樹木を示す。

(a)



(b)

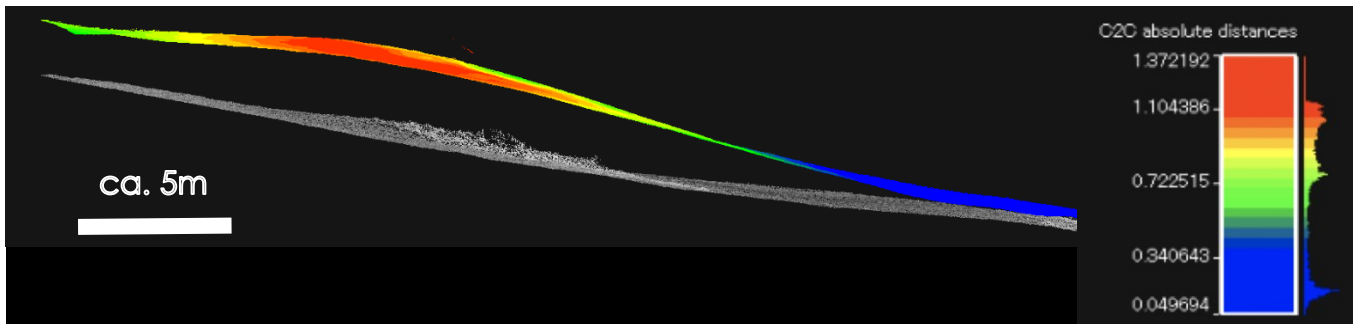


図4-5. 御嶽山田ノ原の調査地における三次元点群データの表示例.  
(a) 高度(標高)による色分け表示.  
(b) 積雪前と積雪後の二時期の点群についての断面での表示例.  
積雪後の点群を点群間距離で色分け表示. 積雪深が可視化される.

## 4.2. 足尾山地小流域における地形と樹木形状の経年変化

### 4.2.1. 地形変化

足尾山地小流域では谷底に連続して TLS を設置することで詳細な地形データを取得することができた。また、過去の土石流前後に取得されたデータと本研究で取得したデータとを比較することで、詳細な地形の変化を検証することができた。

M3C2 distance を用いた解析で求めた、谷底部付近における地形の変化量の結果を三次元点群で表した (図 4-6)。C1 から C2 の間 (C1-C2) では谷全体で侵食が多くみられた。特に谷底では顕著な侵食が見られた (図 4-6c の A)。C2 から C3 の間 (C2-C3) では、C1-C2 でみられなかった谷底での堆積がみられる (図 4-6d の B)。また、同時に谷側面では侵食が発生している (図 4-6d の C)。

TLS 測量によって取得された三次元点群データを、フィルタリングすることによって得られた地形の三次元点群データを用いて、高解像度 (セルサイズ 0.5 m) の DEM を作成した。この DEM より ArcGIS 10.4 の水文解析ツールを用いて、詳細な流路フィーチャーを作成した (図 4-7a:4-8)。流路は C1 から C2 で直線的になる傾向が見られた。蛇行度は 1.33 から 1.17 へと低下している (表 4-1)。

DEM より作成した、C3 の流路フィーチャーを基準とし、三時期の点群の高度 (Z 座標値) を与えることにより、三時期の縦断面を作成した (図 4-9)。C1 を緑、C2 を青、C3 を黒で三時期の変化が明瞭にわかるように明示した。

C3 の DEM より、ArcGIS 10.4 の 3D analyst ツールを使うことで、斜面方位と斜面勾配を求めた (図 4-10)。斜面方位は谷を挟んで西側斜面では北東方向の傾向がみられ、東側斜面では西方向の傾向が見られた。斜面勾配は周辺斜面も含むデータ範囲内における平均は  $40.56^\circ$  で、最大が  $82.40^\circ$  であった。谷底側面と、谷底における遷急点で勾配が大きくなっている。谷を除いた部分の斜面勾配の平均は  $35^\circ$  程度である。

谷底の縦断方向に対して、約 7 m ごとに横断面の作成箇所を設定した (図 4-11)。横断面は C1 を緑、C2 を青、C3 を黒であらわし、三時期の変化が明瞭にわかるように明示した (図 4-12)。

M3C2 distance を算出した点群について、オリジナルからランダムに 3000 点サンプリングし、DEM から算出した斜面勾配角のサーフェス情報をこの点群に付与することで、二つの値の関係を散布図で表した (図 4-13)。M3C2 distance の正の値を堆積とし、橙の点で表示した。M3C2 distance の負の値を侵食とし、青の点で表示した。C1-C2 では、大きな侵食は、斜面勾配が小さい ( $10^\circ$  -  $40^\circ$ )

領域で発生している傾向が見られた。C2-C3 では、大きな堆積は、斜面勾配の小さい領域（ $10^{\circ}$  - $40^{\circ}$ ）で発生している傾向が見られた。侵食は斜面勾配の大きい（ $30^{\circ}$  - $60^{\circ}$ ）領域で発生している傾向が見られた。

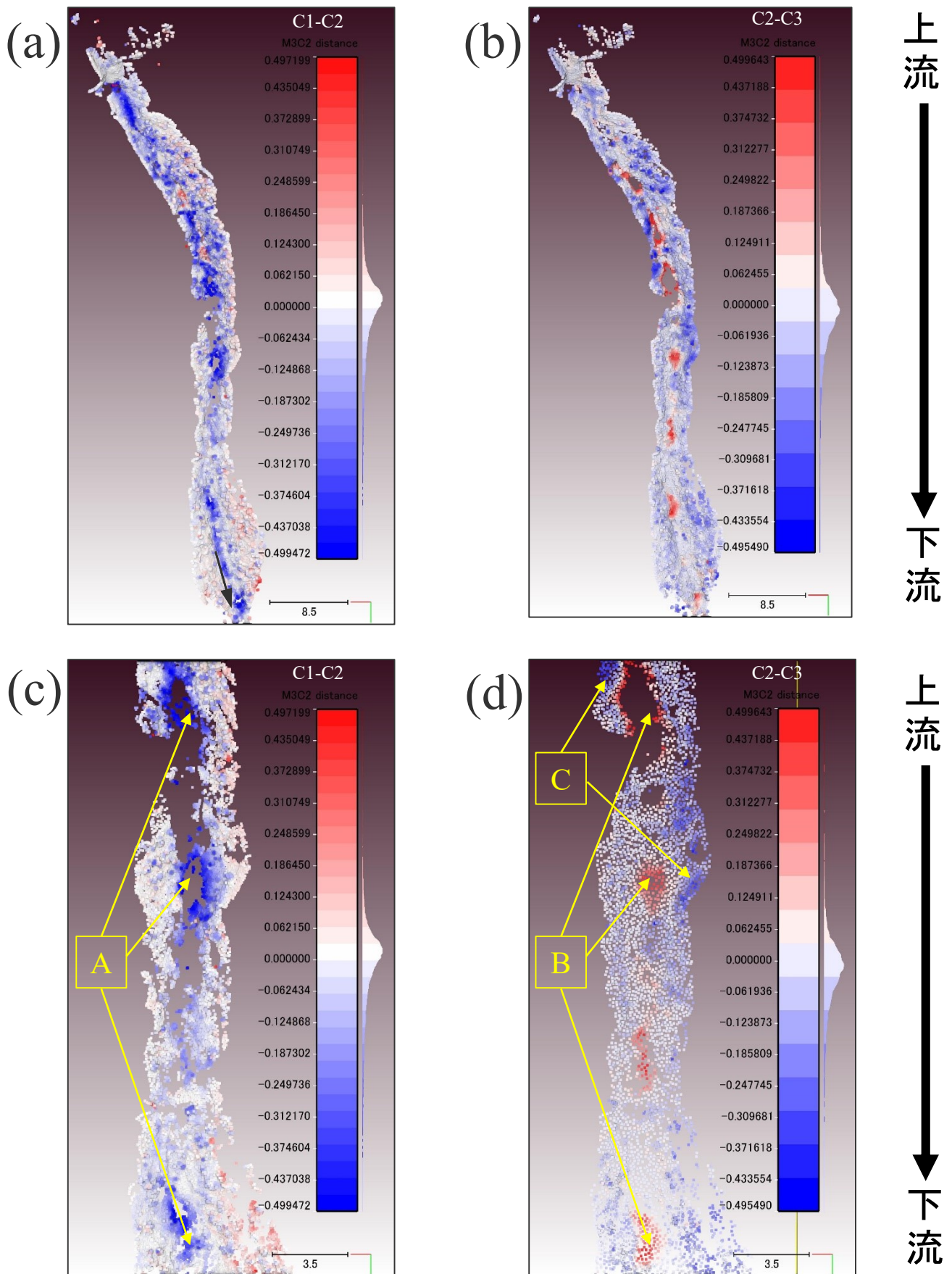


図4-6. 足尾山地谷底部の地形変化. M3C2 distance の結果として得られた三次元点群を正射表示. 青は侵食, 白は検出可能な変化なし, 赤は堆積をそれぞれ示す.

(a) C1-C2(土石流前後) (b) C2-C3(土石流後10年)

(c) 変化箇所の拡大: C1-C2(土石流前後) (d) 変化箇所の拡大: C2-C3(土石流後10年)



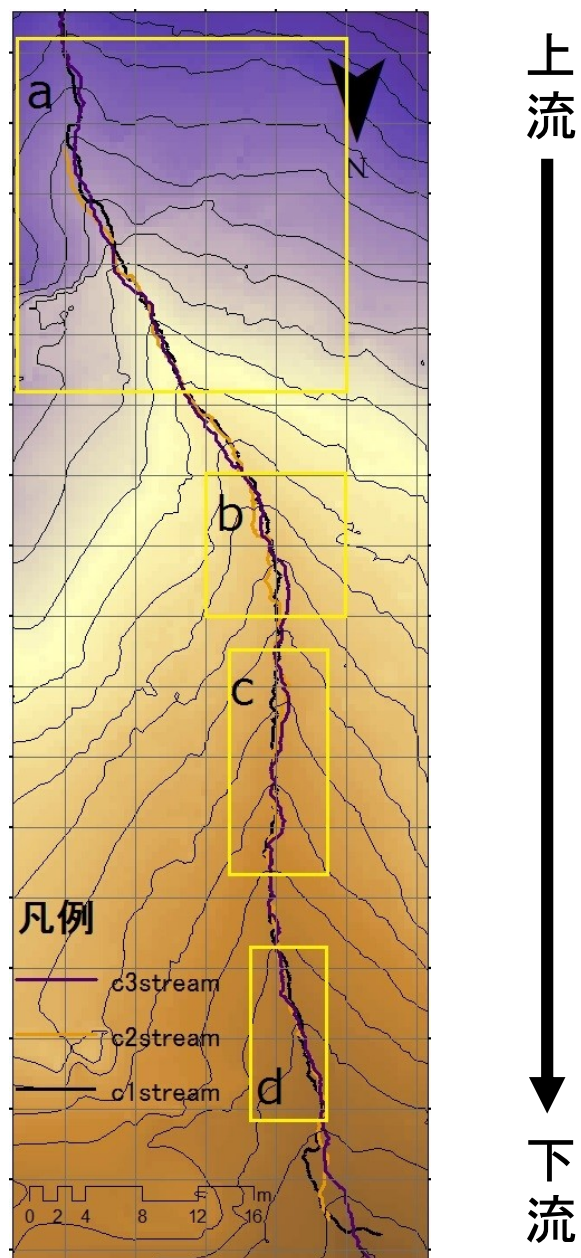
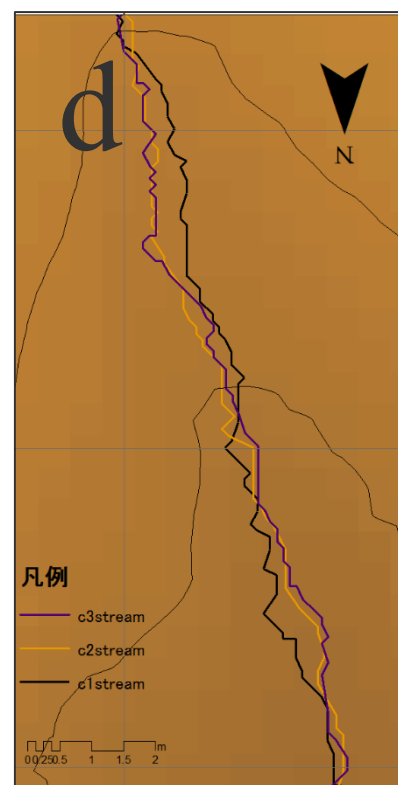
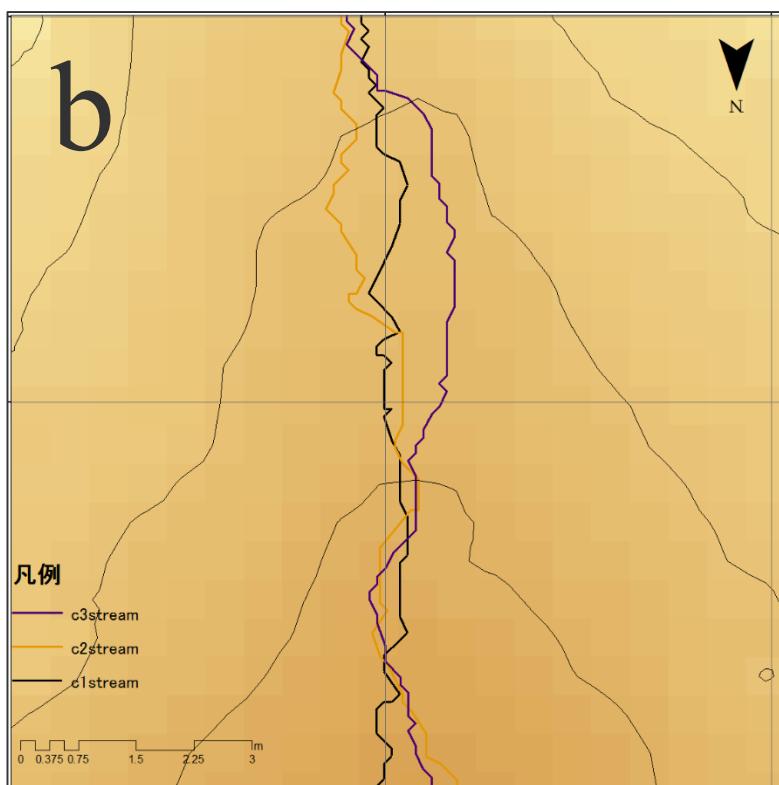
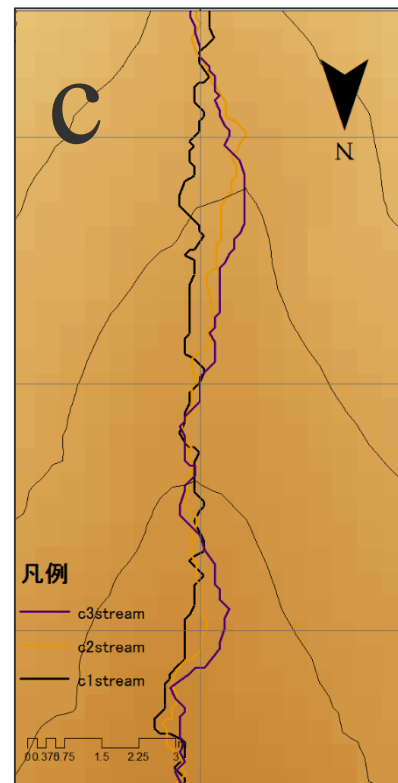
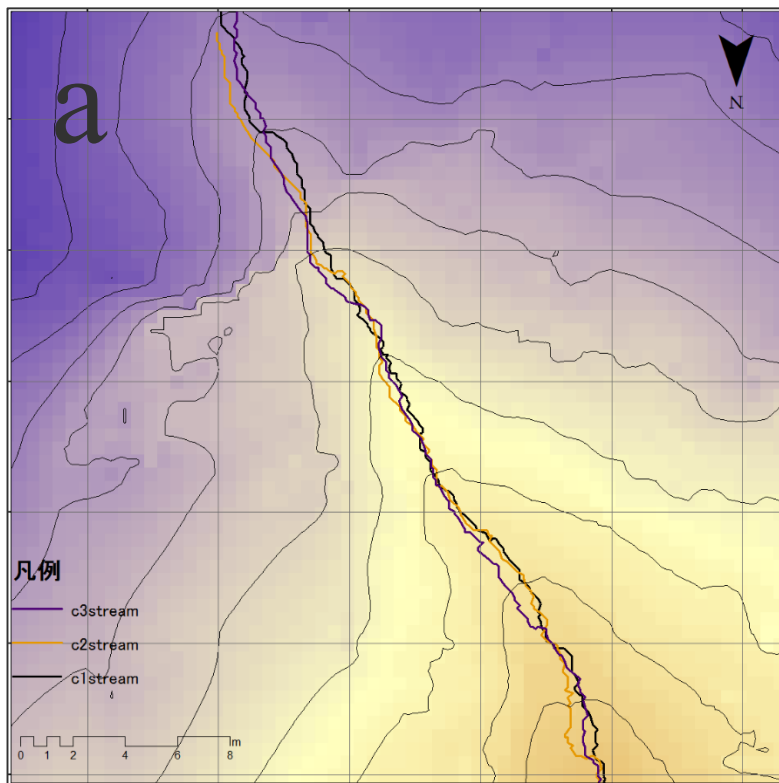


図4-7. TLSによる三次元点群データ(C3)から作成した高解像度DEMと3 m 間隔の等高線, およびそのDEMより作成した三時期の流路フィーチャー. 黒:C1(土石流前), 黄:C2(土石流後), 紫:C3(土石流後10年)で表示.

表4-1. 三時期における流路距離(m), 直線距離(m), 蛇行度.

	流路距離(m)	直線距離(m)	蛇行度
<b>C1</b>	127.4	95.6	1.33
<b>C2</b>	93	79.2	1.17
<b>C3</b>	125.9	108.1	1.16



上流

下流

図4-8. 流路の詳細. 地点番号(a-d)は図4-2で示したものに相当する.  
C1(土石流前)黒, C2(土石流後)黄, C3(土石流後10年)紫でそれぞれ示す.

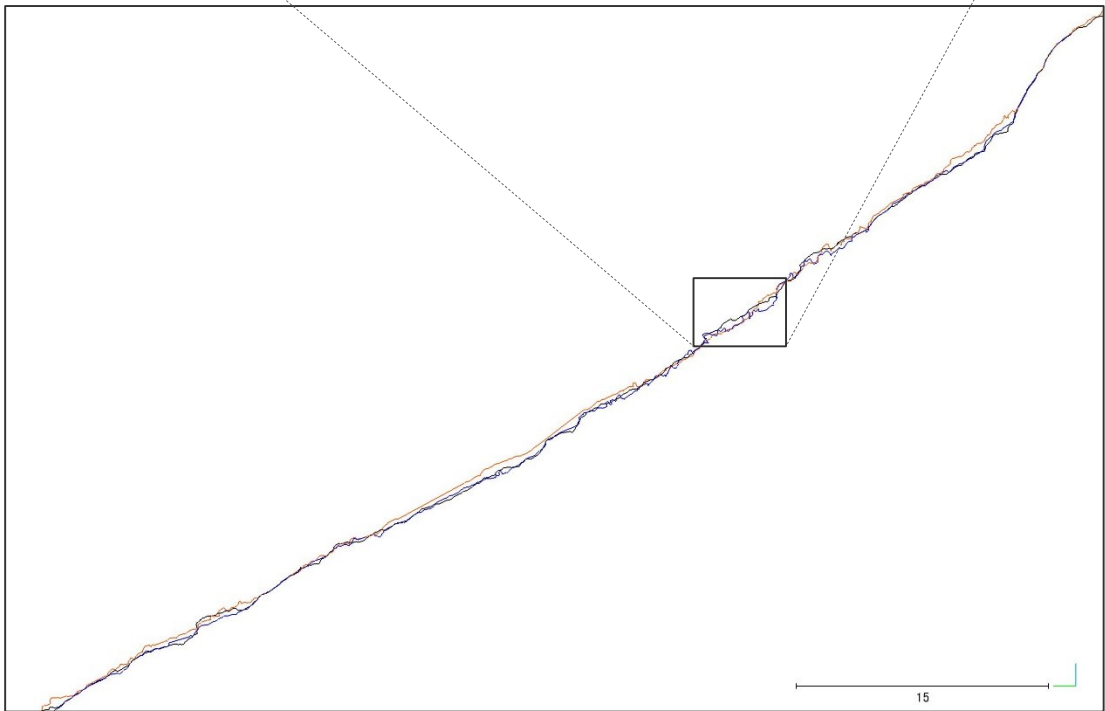
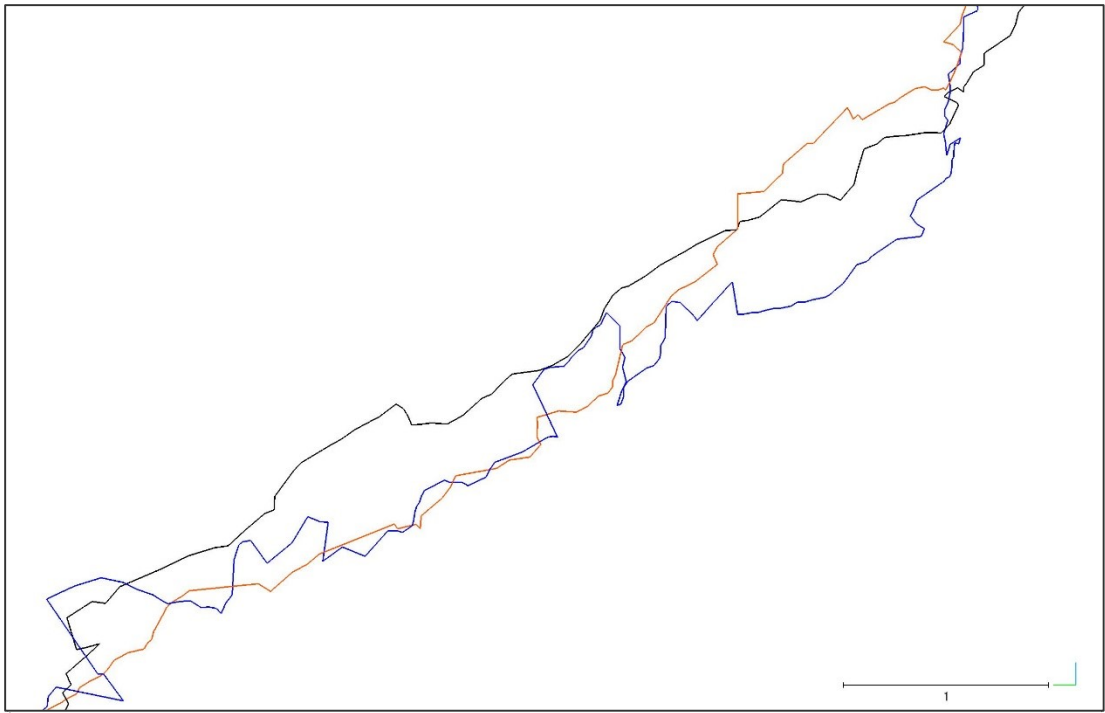
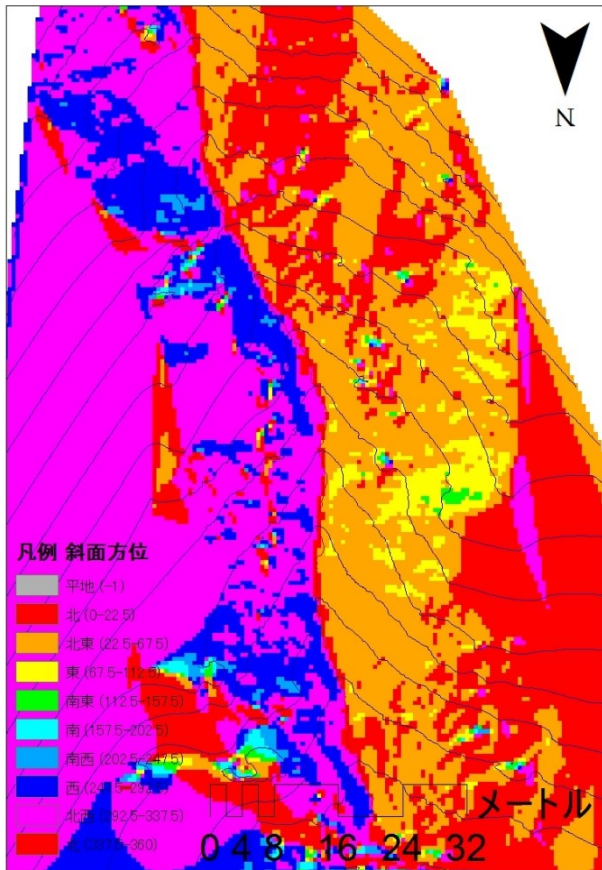


図4-9. 流路に沿って作成した河床縦断面。  
 緑:C1(土石流前), 青:C2(土石流後), 黒:C3(土石流後10年)をそれぞれ示す。

(a)



(b)

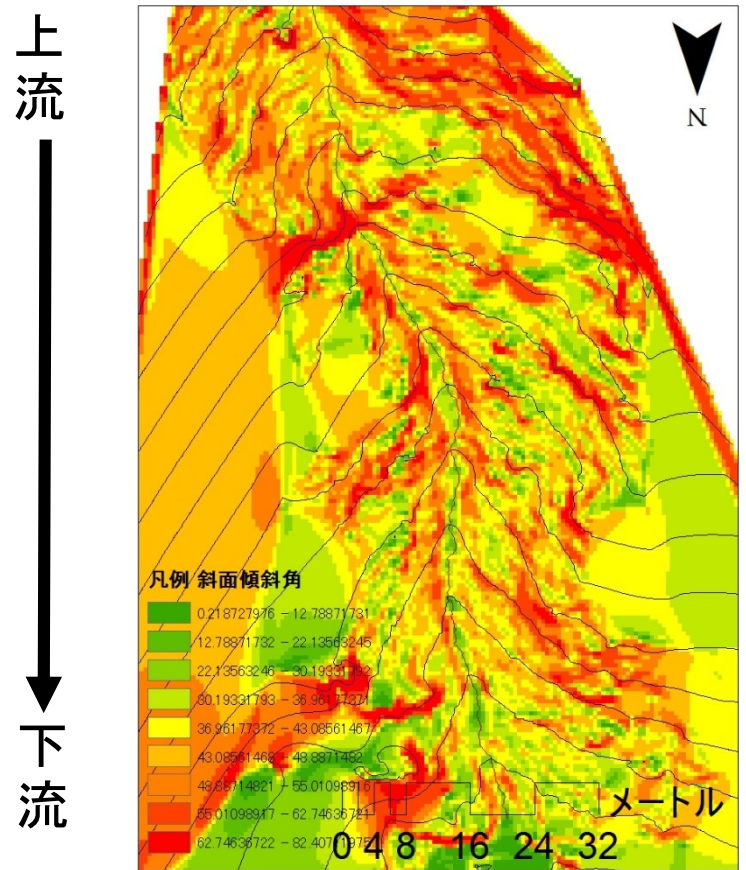


図4-10. TLSを用いて取得した高解像度DEM(C3)を用いた地形解析の結果.  
(a) 斜面方位. (b) 斜面勾配.

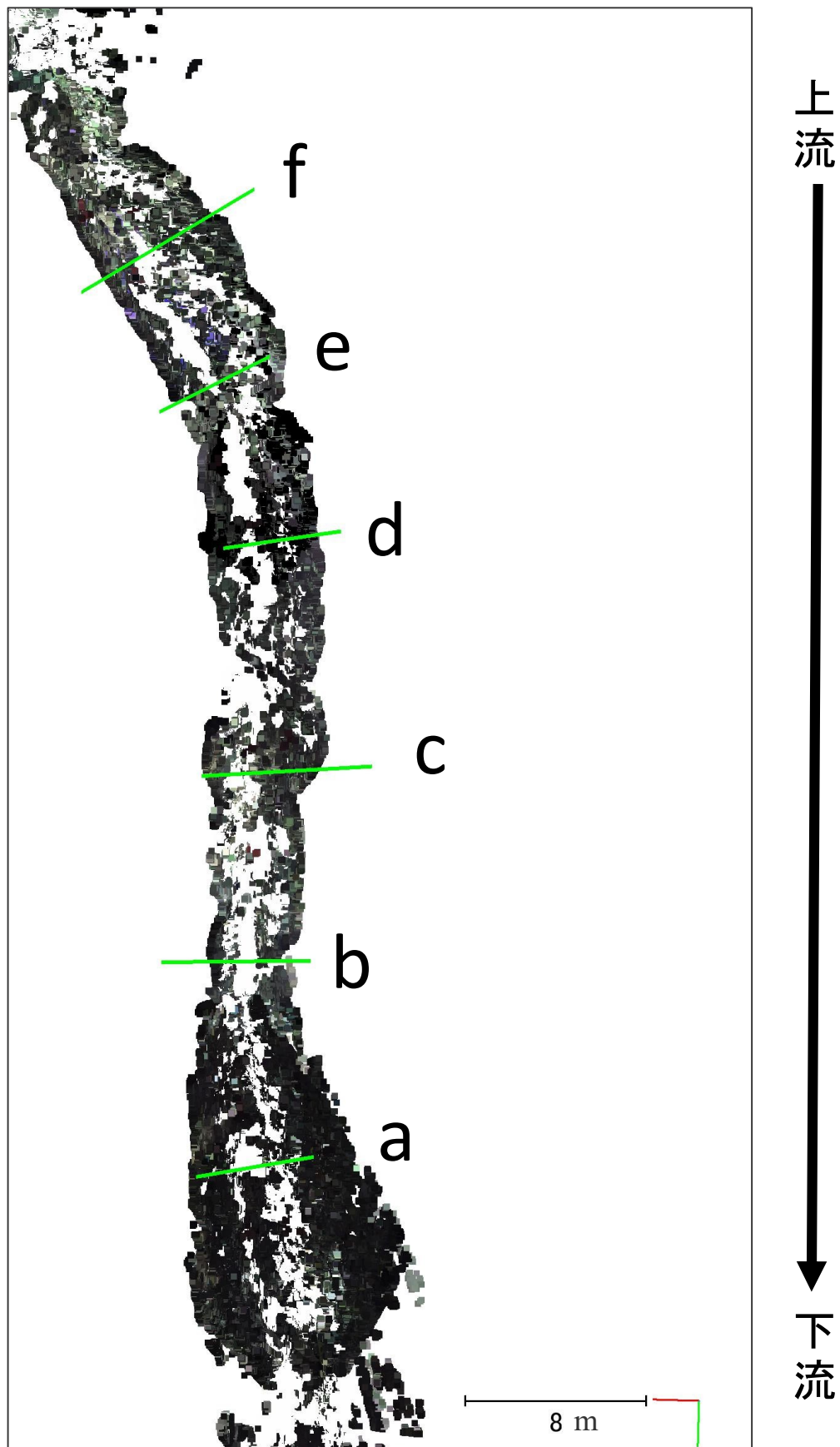


図4-11. 横断面の作成箇所をの平面図.  
緑色の線が横断面の位置を示す.

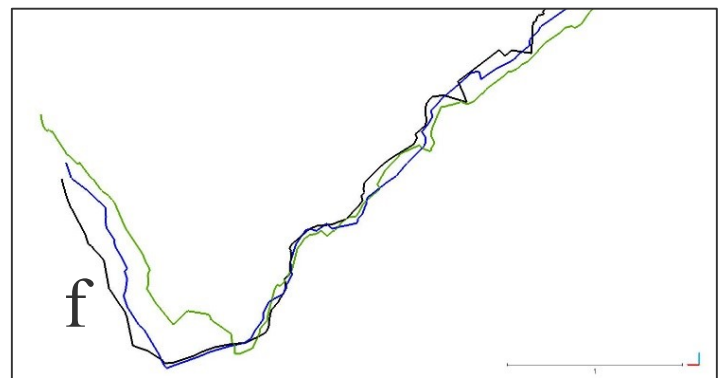
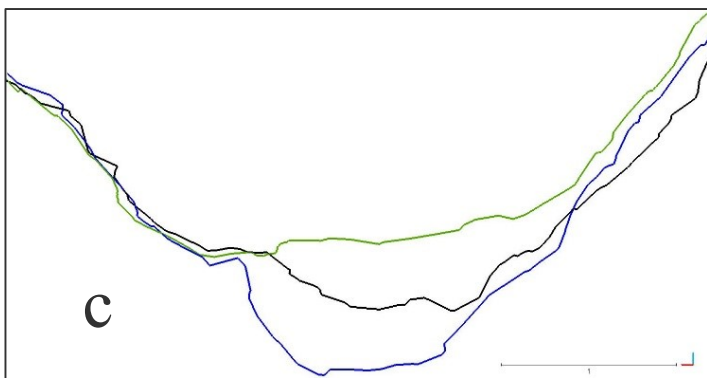
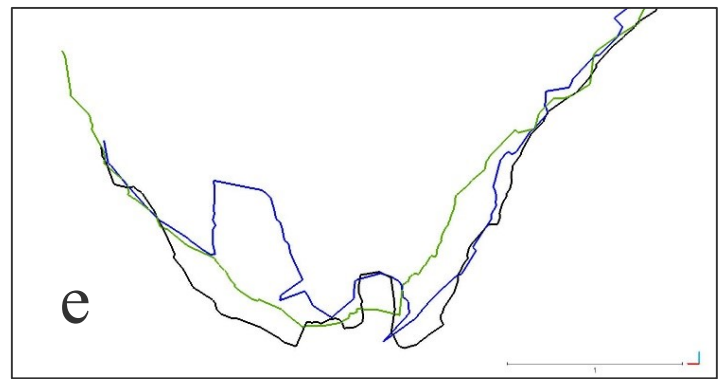
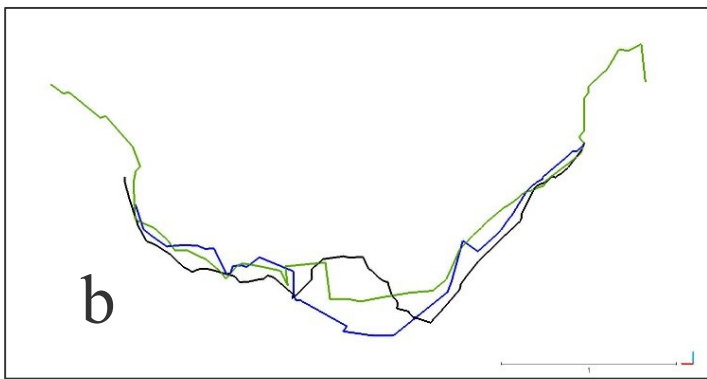
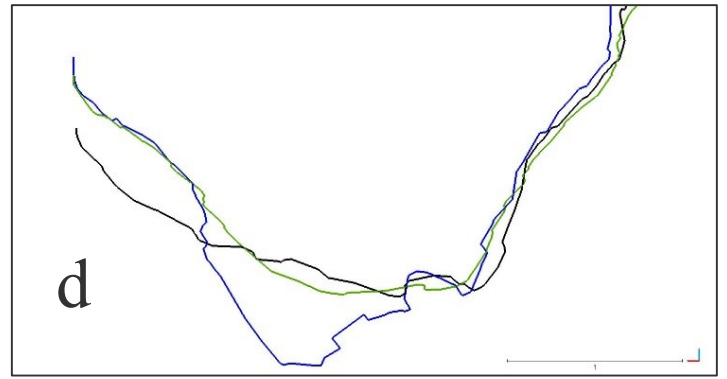
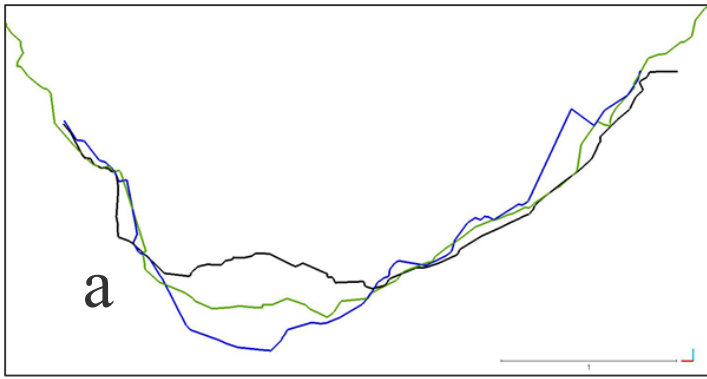
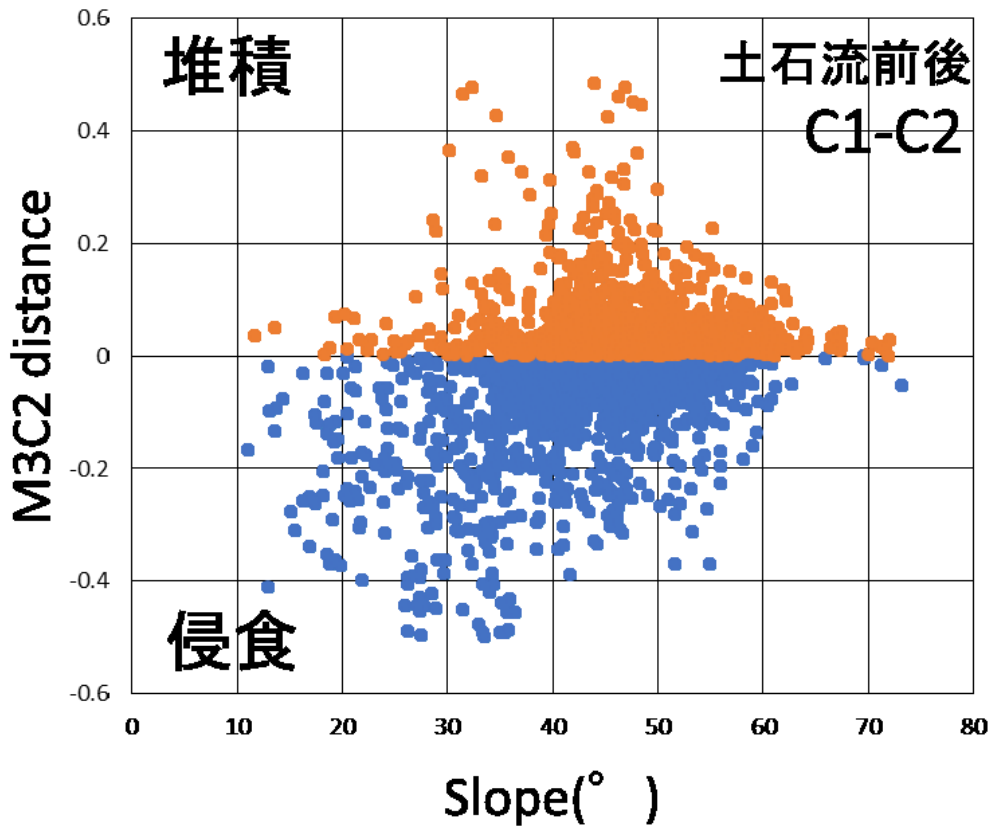


図4-12. 谷底部の横断面. 地点番号(a-f)は図4-5のものに対応する.  
 緑:C1(土石流前), 青:C2(土石流後), 黒:C3(土石流後10年)をそれぞれ示す.

(a)



(b)

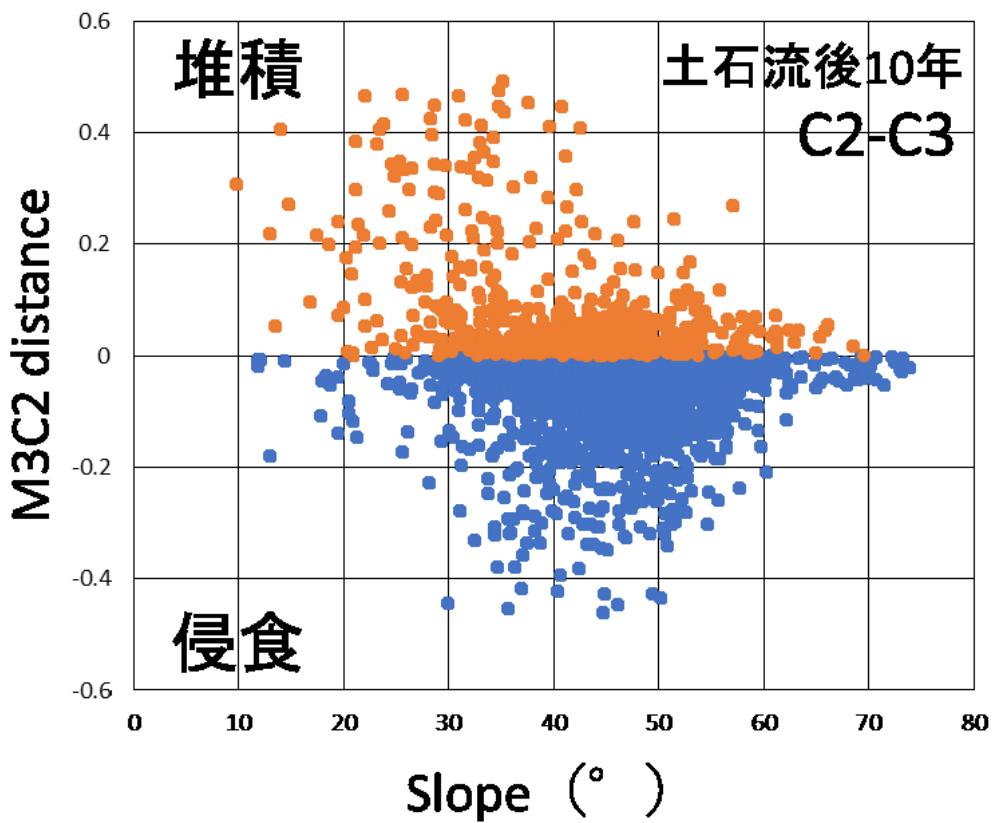


図4-13. 斜面勾配と地形変化量(M3C2 distance)との関係.  
青い点が侵食, 橙色が堆積.

(a) C1-C2(土石流前後) (b) C2-C3(土石流発生後10年)

#### 4.1.2. 樹木形状の変化

高解像度の植生の三次元点群データを用い、足尾山地小流域を対象に、一時期につき約 80 本、三時期で約 240 本の樹木について、幹の傾きの大きさと方位を、毎木の位置情報とともに取得した。樹木形状の変化の追跡を行う対象の樹木は、三時期の中で一番点群の取得範囲の狭い C2 において、幹形状が十分に取得されているものとした。すなわち、樹木の傾きの多時期での比較のため、C2 で取得された情報をもとに、同個体のデータを取得した。樹木の傾きの大きさに關して、現地計測との比較検証の結果を散布図に示した (図 4-13)。現地計測結果を基準とした際の、TLS によるデータから算出した傾きの値の RMSE (平均二乗誤差) は  $3.35^{\circ}$  であった。

樹木の傾きの水平方位の空間分布を、地形解析で作成した DEM と等高線 (3 m 間隔) とともに表した (図 4-14)。樹木の傾きの方位は、矢印の向きで表した。C1, C2, C3 で傾きの方位に違いが見られた。三時期の傾向として、斜面傾斜方向と、流路方向への傾きの傾向が見られた。

C2, C3 の樹木の傾きの方位の傾向を、流路を挟んで西側斜面と東側斜面に分け、8 方位のレーダーチャートで表した (図 4-15)。C2 では、西側斜面方向に北に傾く傾向が、東側斜面方向に南に傾く傾向が見られた。C3 では、C2 での傾向に加え、西側斜面では東に傾く傾向が、東側斜面では西に傾く傾向が見られた。

次に、樹木の傾きの大きさの変化量についての空間分布と (図 4-16)、樹木の傾きの大きさの変化量と斜面勾配角との関係を散布図 (図 4-17) にそれぞれ表した。樹木の傾きの大きさの変化量は C1-C2, C2-C3 の同個体に対して、傾きの大きさの差の絶対値から求めた。C1-C2, C2-C3 も同様に斜面勾配度が大きくなるにつれ、樹木の傾きの変化量は増加する傾向が見られた。



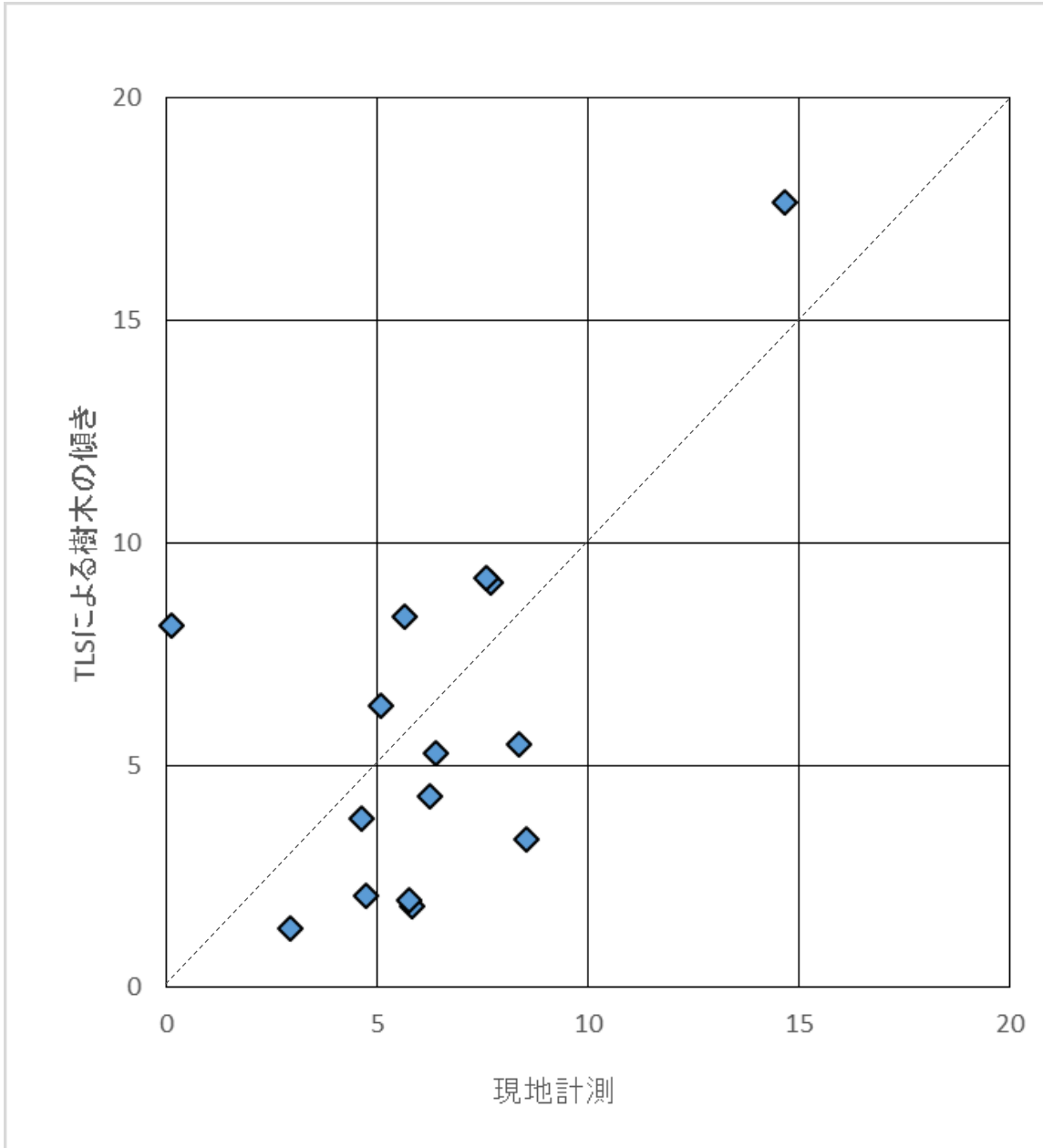


図4-13. 現地における手動計測による樹木の傾きと TLSで取得した点群データによる樹木傾きとの比較.

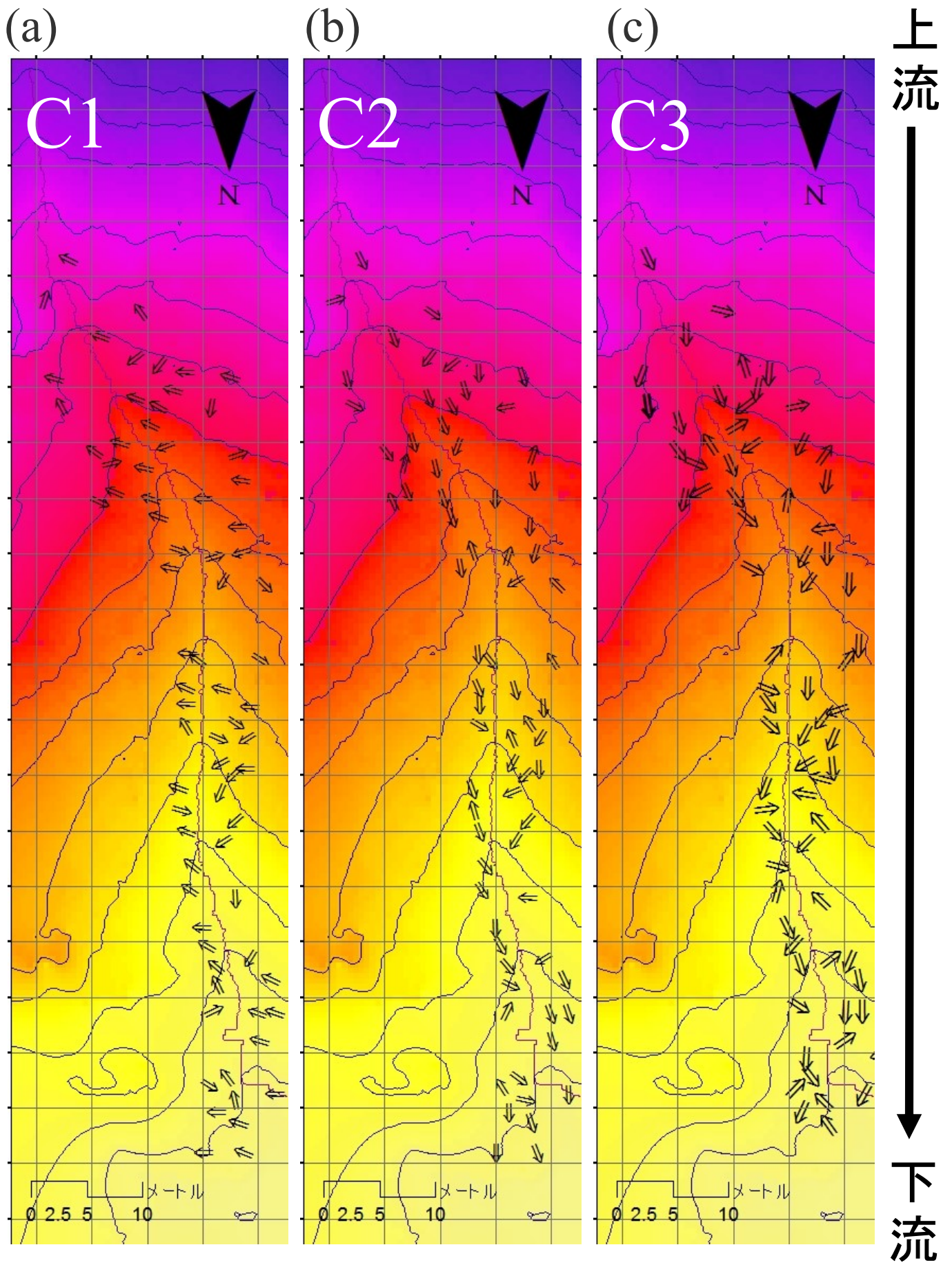


図4-14. 樹木の傾きの方位の空間分布.  
(a) C1 (b) C2 (c) C3

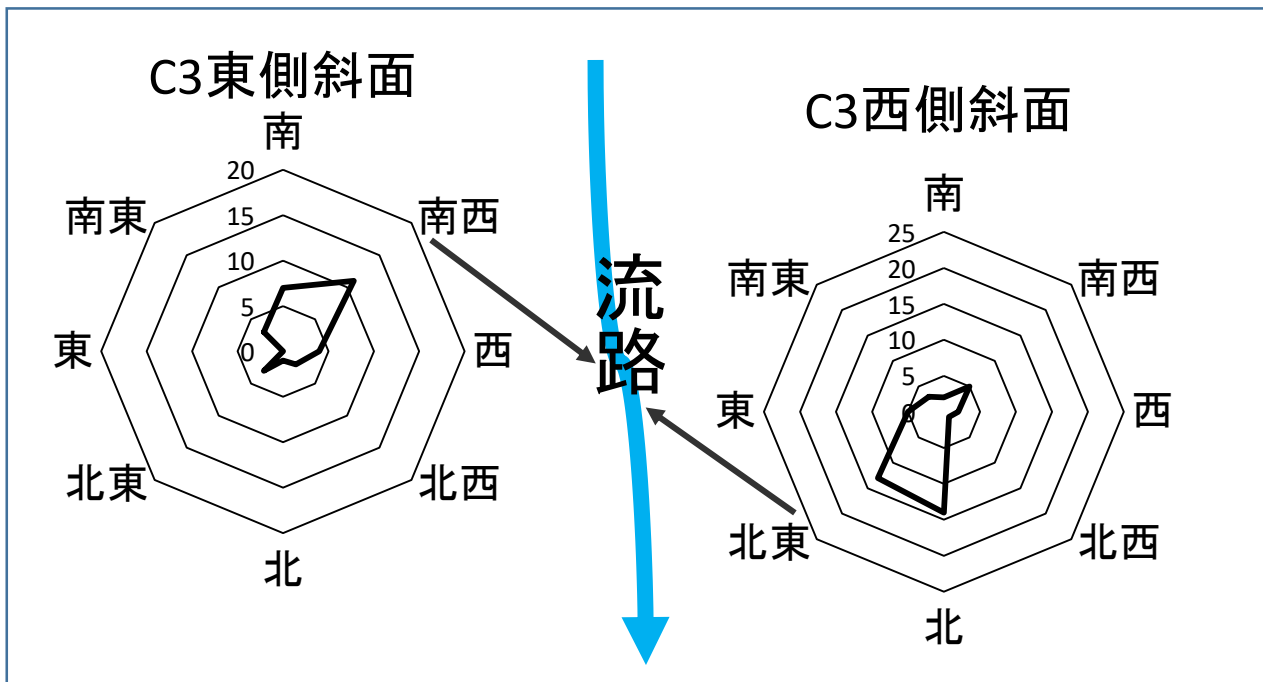
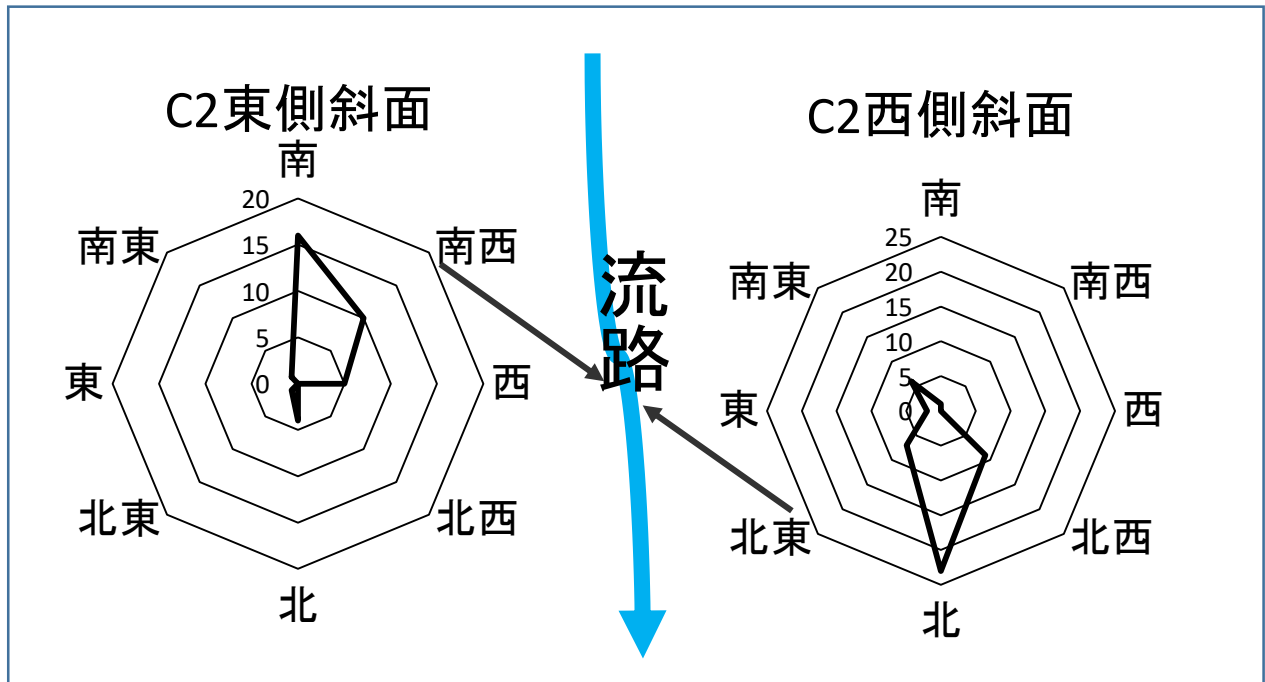
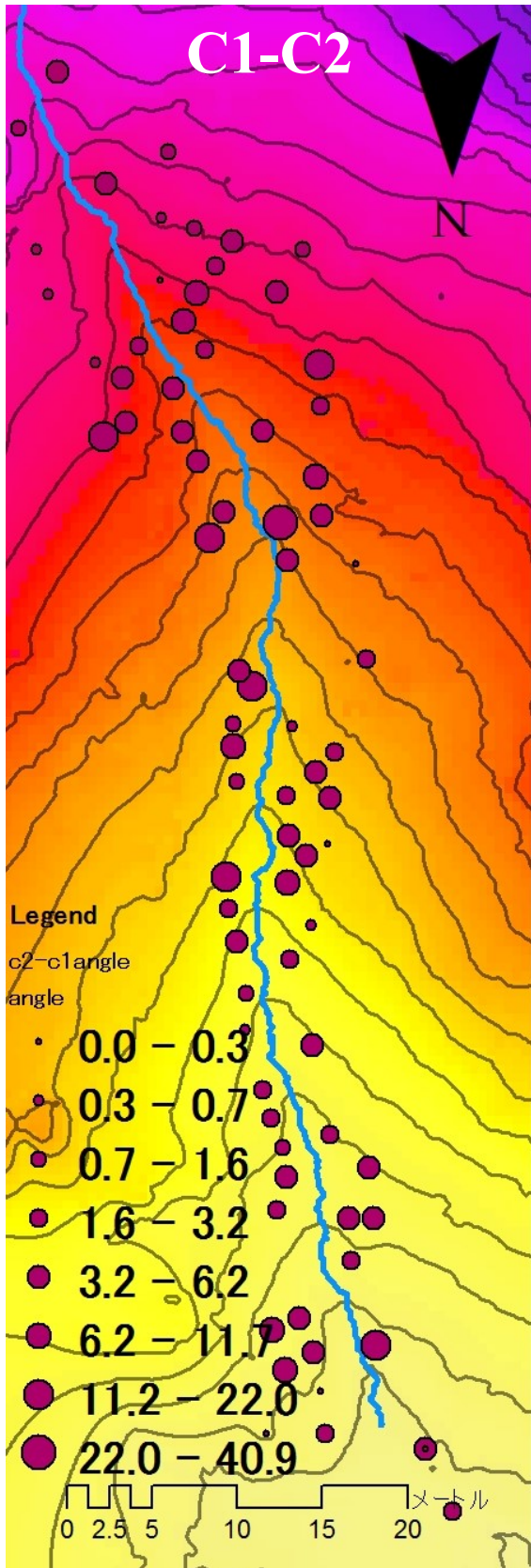


図4-15. 樹木の傾きの方位の傾向.  
 流路をはさんだ東側斜面, 西側斜面のそれぞれで, 8方位のレーダーチャートで表示.

(a)



(b)

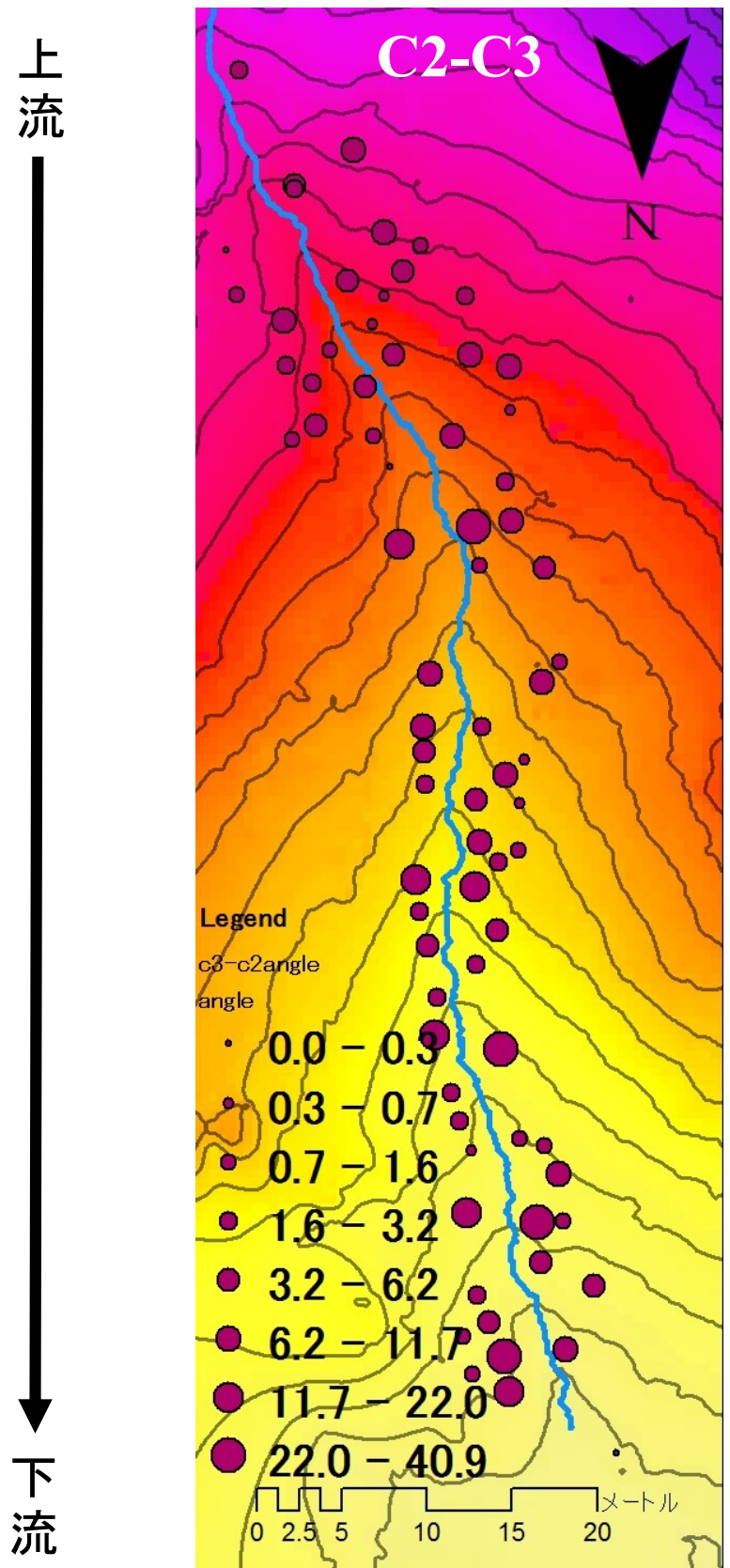


図4-16. 樹木の傾きの大きさの変化量の空間分布。  
(a) C1からC2の傾きの変化量. (b) C2からC3の傾きの変化量.

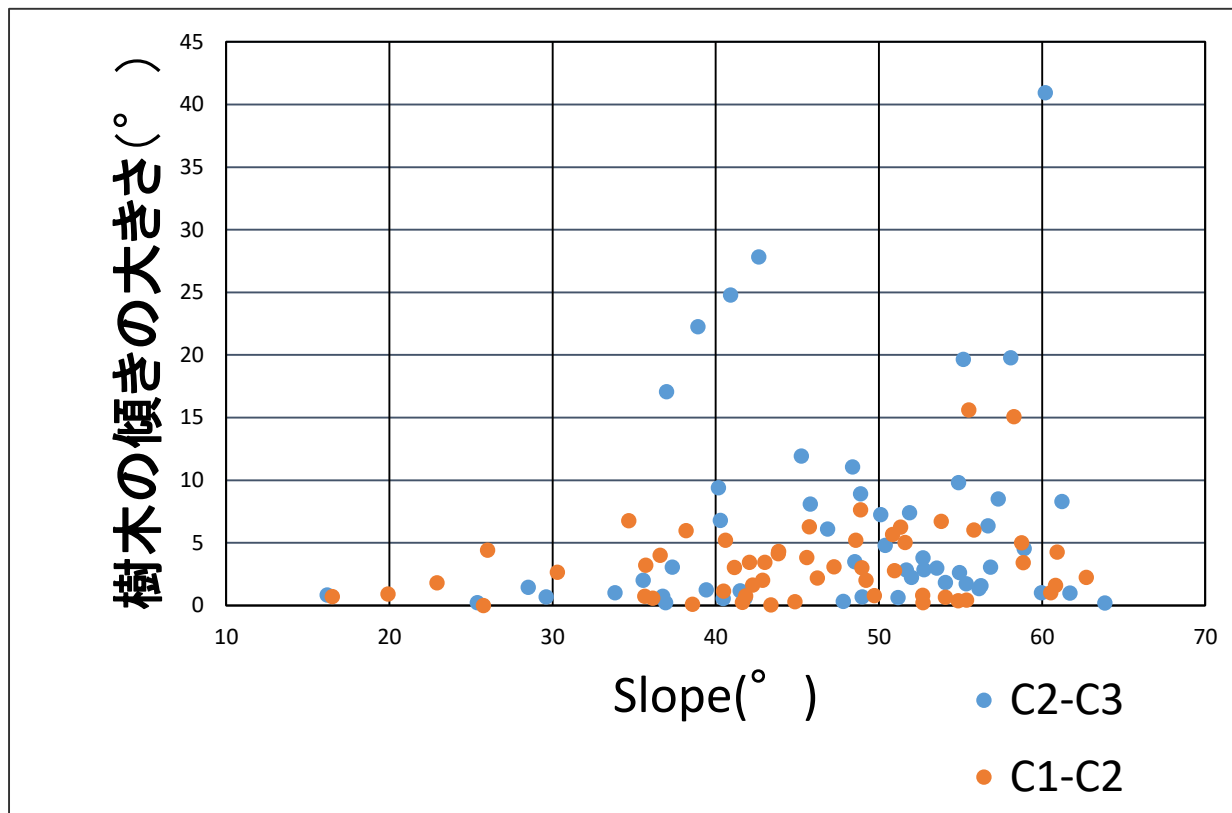


図4-17. 樹木の傾きの変化量と斜面勾配角との関係.  
 橙:C1-C2(土石流前後), 青:C2-C3(土石流後10年)で色分けで表示.

## 5. 考察

### 5.1. 足尾山地小流域における流域地形変化のプロセス

土石流前後の C1-C2 では M3C2 distance (図 4-6a,c) の結果より、対象とした谷の全体で侵食が発生していることがわかった。特に谷底においては、谷側面に比べ変化が顕著である (図 4-6c の A)。横断面 (図 4-12) から、C1-C2 で M3C2 distance の結果と同様に、谷全体での侵食と谷底での変化量の大きい侵食が見られる。すでに述べたように、C1-C2 での地形変化のプロセスは主に土石流により発生したものである。土石流発生後 10 年の C2-C3 では M3C2 distance (図 4-6b,d) の結果より、谷側面の侵食 (図 4-6d の C) と一部の谷底で顕著な堆積 (図 4-6d の B) が発生していることがわかった。一部の谷底で発生している顕著な堆積は、横断面の図 4-9a,d,f のような、C1-C2 で大きな侵食が見られたところで発生している。C2-C3 での地形の変化のプロセスとしては、土石流のような大きなイベントによる変化ではなく、10 年かけて徐々に谷側面が侵食されている結果としての変化である可能性がある。また、C1-C2 で発生した谷底の侵食箇所の一部は、谷側面や流域全体からの土砂の供給によって、谷底の堆積が進み、ほぼ元の状態に回復している。また、M3C2 distance と斜面勾配角の関係からも、C1-C2 と C2-C3 で異なる、地形変化のプロセスを経ていることがわかる。C1-C2 では、顕著な侵食は斜面勾配角の小さい箇所で発生している (図 4-13a)。C2-C3 では、侵食は斜面勾配角の大きい箇所で、堆積は斜面勾配角の小さい箇所で発生している (図 4-13b)。M3C2 distance と斜面勾配が上述にある関係になるのは、図 4-10b からわかるように、谷部において、斜面勾配角の小さい箇所は谷底に集中しており、斜面勾配角が大きい箇所は谷側面に集中しているためだと考えられる。

足尾山地小流域では、20 年に一度規模の降雨によって発生した土石流が、谷底部の堆積物を巻き込みながら流下することによって、谷底部が大きく侵食された (Wasklewicz and Hattanji, 2009)。その後、10 年が経過し、土石流によって侵食された谷底には、谷側面や流域からの土砂などの供給によって、一部が土石流前の状態と近い状態になったと考えられる。この状態は 2005 年の土石流発生以前の状態に近いとため、当時のような 20 年に一度規模の降雨が今後発生した場合には、同様の土石流が発生する可能性がある。

## 5.2. 植生と地形の相互作用

樹木の傾きの方位は、図 4-4a の斜面方位と図 4-14 の樹木の傾きの方位の空間分布の比較から、大局的には斜面方位に従う方向と、流路方向に傾く傾向とがみられる（図 5-1.）。斜面方位に従う方向への傾きは、樹木の枝が斜面方位に従って発達する性質（苧住，2015）から、樹冠がこの方向により密に発達するため、自重で斜面方位方向に傾くためであると考えられる。流路方向への傾きは、谷底部には樹木が成長しにくいことによる林冠ギャップが発生するため、ギャップに発生する日光を求めて、樹木が枝を伸ばすことによる、流路方向へ樹冠が発達するためだと考えられる。また、図 4-15 の樹木の傾きの方位の傾向より、C2 から C3 にかけて樹木の傾きの方位は、より流路方向への傾向が大きくなっている。この現象は、上述にある自重による傾きが原因と考えられる。さらに、5.1 で考察した、土石流後 10 年で発生した流域全体における土壌の移動と、谷側面の侵食により、土壌が流路方向に向けて不安定になることによる根茎の支持力不足も原因として考えられる。

図 4-17 で示した、樹木の傾きの大きさの変化量と斜面勾配の関係では、斜面勾配が増えるにつれ樹木の傾きの変化量が増加する傾向がみられた。この傾向より、樹木は斜面勾配が急であるほど、根茎が不安定になり、傾きが変化しやすくなると考えられる。

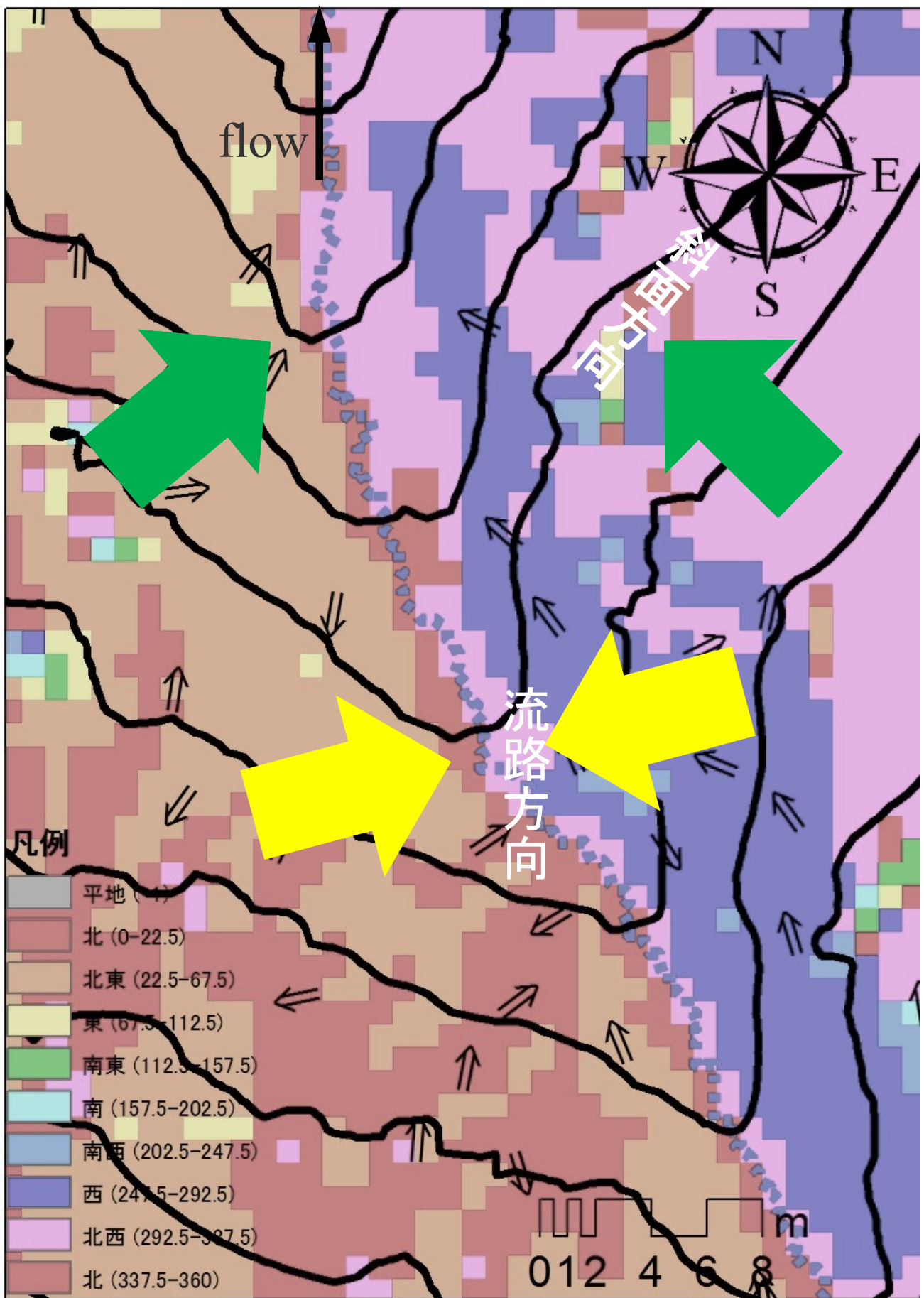


図5-1. 樹木の傾きの傾向を示す模式図.  
黄矢印: 流路方向 緑矢印: 斜面方向



## 6. 結論

本研究ではソフト面での土砂災害対策の充実という目的のもと、地形だけでなく、より多様な環境情報として、植生も含めた三次元点群情報を取得した。すなわち、地形と植生といった、異種でありながらも相互に関連する環境要素の関係を理解することが、土砂災害対策に重要であると考えた。とくに、土砂災害対策ではあまり重要視されてこなかった、植生に注目した点に本研究の独創性がある。

本研究では、五つの異なる環境の調査地において、植生と地形を含む三次元点群データを取得することができた。取得した三次元点群データは、アーカイブデータとして保存された。これを用いることで、より詳細な現状分析や、今後の変化検出といった、周辺環境と植生との相互作用を検証することが可能となる。

上記の調査地のうち、とくに足尾山地小流域の調査地では、2005年に計測された TLS データとあわせ、時間スケールを持つ多時期の点群を TLS 測量で取得することができた。そのため、多時期での地形の変化と植生の形状の変化の解析手法を検討することができた。地形変化の解析では、高解像度の DEM から斜面方位、斜面勾配、流路形状をそれぞれ求めた。また、点群どうしの比較解析では、M3C2 distance を用いて地形の変化を抽出した。M3C2 distance の結果より、土石流発生の直前・直後と、土石流発生後の約 10 年間とで、それぞれ異なるプロセスでの地形変化を、明瞭に示すことができた。土石流前後の地形変化は、土石流にともなう多量の土砂移動とその大きな侵食力によって、谷底が顕著な侵食を受けていた。一方、土石流発生後の 10 年間においては、谷底域の側面における侵食が見られるとともに、土石流によって侵食された谷底の一部においては、周辺斜面からの土砂供給により土砂の堆積量が回復し、土石流以前と同様な地形を呈している部分もみられた。このため、2005年の土石流発生時と同規模の降雨が生じた場合、同様の土石流が発生する可能性があると考えられる。

樹木形状の解析は、足尾山地小流域がヒノキの優占する人工林であり、ヒノキの幹は曲がりなどが発生しにくいといった特徴があることから、樹木の傾きを点群データから求めた。すなわち、幹をあらわす点群のうち上下の二点を手動で選択することで、その位置座標から三角関数を用いて該当木の傾きとその方位を求めた。樹木の傾きの方位は、斜面方位方向と流路方向にそれぞれ集約される傾向がみられた。二つの傾向は、樹木が日光を求めて樹冠を発達させる性質によって、自重で傾くためと考えられる。また、土石流の発生後 10 年間で、より流路方向への傾きが大きくなるといった傾向がみられた。これは、自重による作用に加え、流路方向の土壌が侵食によって失われるために見られる傾向と考えられる。樹木の傾きの大きさの変化量は、斜面勾配が大きくなるほど大きくなる傾

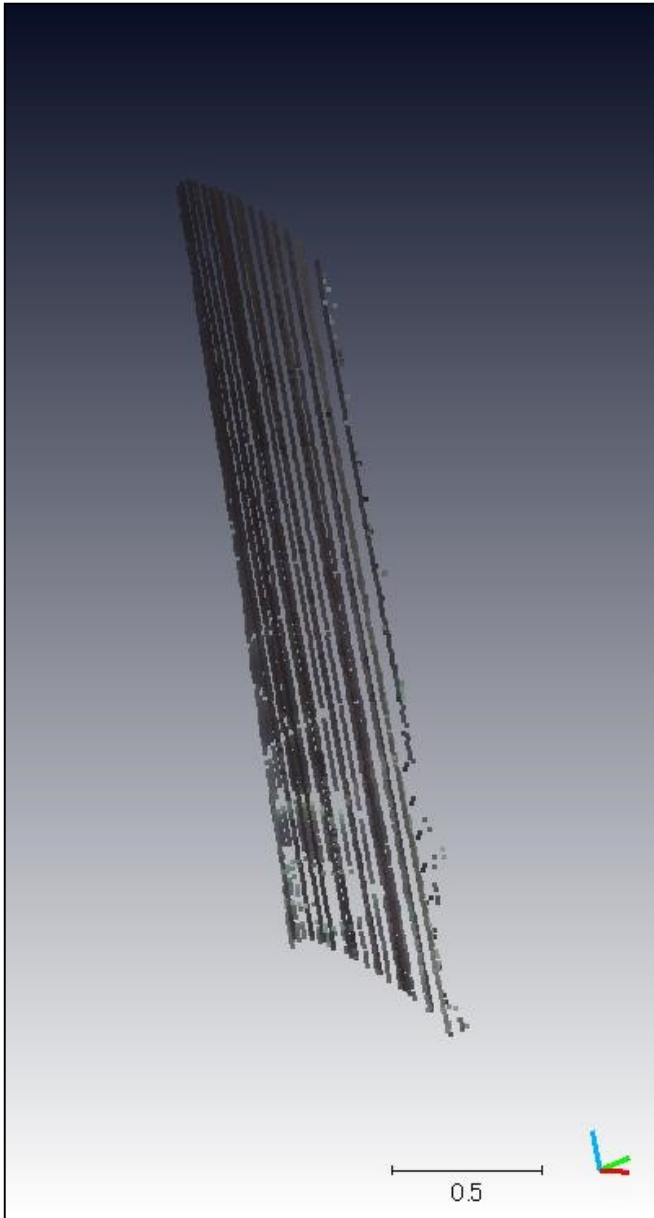
向が見られた。これは、斜面勾配が大きくなると根茎が不安定になり、樹木の土壌支持作用が減少するためであると考えられる。

## 7. 展望

本研究で行った樹木の傾きの解析は、手動に頼る部分が多いため、ヒューマンエラーを含む可能性がある。この点を今後改善するには、まず、より大量の樹木を対象に解析する必要があると考えられる。しかし、本研究で用いた手動の作業に依存する手法では、多大な時間労力がかかるため、今後はコンピュータグラフィックの技術を取り入れた、自動化・半自動化が必要であろう。半自動化の手法としては、たとえば CloudCompare のプラグインである Ransac Shape Detection (Schnabel et al.,2007) を使うことなどが想定される (図 7-1)。

ところで、UAV-SfM の技術はローコストで広範囲のデータの取得が可能である (たとえば小花和ほか, 2014)。しかし、本研究で対象とした足尾山地小流域のような、高密度な森林においては、UAV-SfM のような写真測量に基づく方法では、樹木下に隠れた地形のデータ取得は困難をともなう。一方、本研究で得られたような、地形と樹木の傾きの相互作用の関係がより解明されることにより、UAV-SfM で取得可能な樹冠の傾きといった森林表層の形態的特徴から、樹木の底部にあたる地形の変化を推定できる可能性がある。このような技術の実現のためには、今後も様々な環境における同様のデータ (TLS による点群データ等) を、グラントゥルースデータとしてアーカイブ化することが必要である。上述のように、こうしたデータをアーカイブ化することで、多時期の変化の解析が可能になる。さらに、様々な環境における植生と地形の関係性を明らかにすることで、衛星・空中リモートセンシングといった広範囲のデータに対する解析技術の応用につながると考えられる。とくに、広範囲への技術の応用は、今後、日本のような人口減少が見込まれる地域では、低コストでの国土保全のためにも重要な課題である。

(a)



(b)

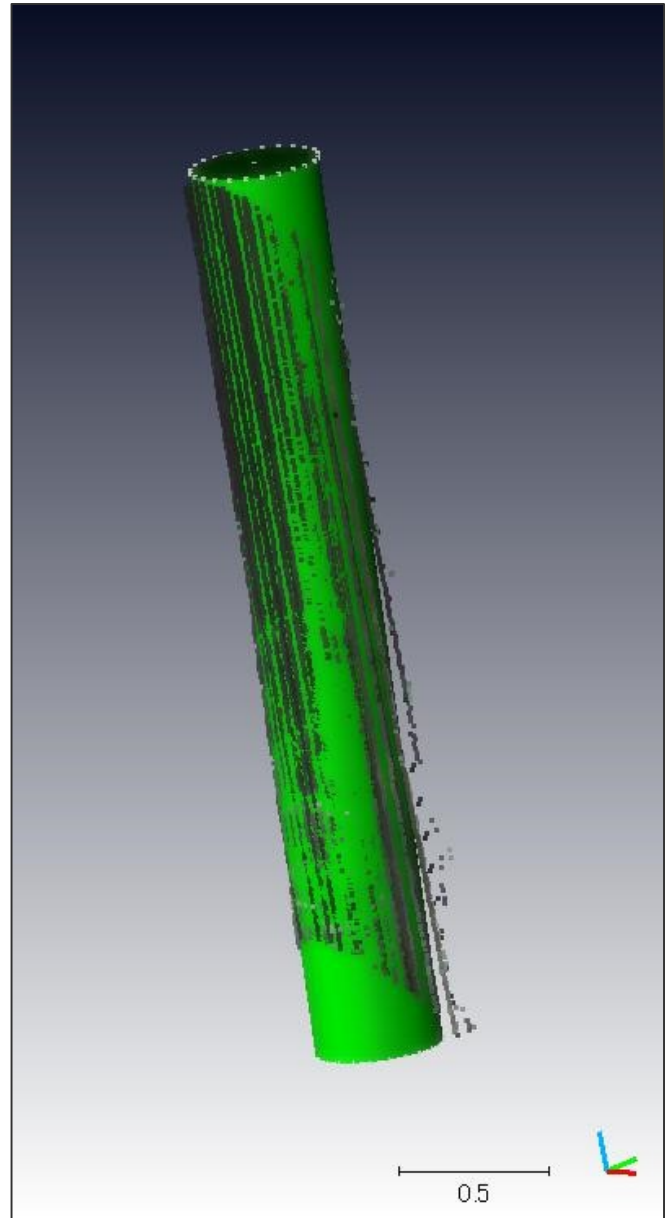


図7-1. Ransac Shape Detectionを用いた幹点群のオブジェクト化の例。  
(a) 抽出された幹をあらわす点群。 (b) 幹の点群に自動フィットされた円筒オブジェクト。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の手助けがあったので、感謝の意を述べたい。指導教員である、東京大学空間情報科学研究センター早川裕弼准教授には丁寧な指導で、最初から最後まで、多大なるご指導をいただきました。東京大学空間情報科学研究センター小口高教授にはゼミの際など、厳しくも有意義な助言をいただきました。East Carolina University の Wasklewicz Thad A 教授、筑波大学八反地剛講師には足尾山地小流域のデータ提供をしていただきました。株式会社ビジョンテックの小花和宏之さんには御嶽山田ノ原調査にて協力していただきました。静岡大学今泉文寿准教授、筑波大学堀田紀文准教授、筑波大学経隆悠さん、静岡大学森林防災工学研究室のメンバーには大谷崩調査にて協力していただきました。千葉大学加藤顕助教には学部生時代から、面白い助言をたくさんいただきました。東京大学空間情報科学研究センター小口研究室・早川研究室のメンバーには日々のプライベートから研究面まで様々支えていただきました。千葉大学園芸学部再生生態学研究室のメンバーには卒業後も暖かく研究生生活を見守っていただきました。そして、両親、家族には遠い北海道の地から精神面・金銭面で多くの手助けをいただきました。名前を挙げきれない、多くの関係者、友人によってこの研究は成り立ちました。この場を借りて、心から感謝の意を表します。

## 参考文献

Fumitoshi Imaizumi, Roy C. Sidle, Rieko Kamei (2008) Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan, *Earth Surface Processes and Landforms* Earth Surf. Process. Landforms 33, 827-840

Keith Forbes and Jeremy Broadhead (2011) *Forests and landslides: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia*, Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific

井出雄二, 大河内勇, 井上真 (2014) *教養としての森林学*, 文永堂出版株式会社

木下勇平 (2003.10) *森林計画学*, 朝倉書店 p36-37

苅住 昇 (2015.1) *森林の根茎特性と構造 バイオマス算定に向けた基礎解析*, 鹿島出版会

林野庁, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h24/4.html>, 2017年2月5日閲覧

佐藤 浩, 岩橋順子, 小荒井 衛, 神谷 泉, 小室勝也 (2010) *国土地理院における高解像度 DEM の整備とそれを活用した地理情報解析研究*, *地形* 31(4) 359-382

早川 裕弉, 小口 高 (2016) *地形学における地上レーザ測量の活用*, *地学雑誌* 125(3) 299-324

加藤顕, 石井弘明, 榎本勉, 大澤晃, 小林達明, 梅木清, 佐々木剛, 松英恵吾 (2004) *レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用*, *日林誌* 96 p. 168-181

小口 高, 早川裕弉, 桐村 喬 (2015) *個人研究者が作成したデータを共有するための東京大学空間情報科学研究センターの活動*, *日本地球惑星科学連合 2015 年大会要旨集* MGI36-04

Wasklewicz, Thad A. and Hattanji, Tsuyoshi (2009) High-Resolution Analysis of Debris Flow-Induced Channel Changes in a Headwater Stream, Ashio Mountains, Japan, *The Professional Geographer* 61(2) 231-249

早川 裕一, 松倉 公憲 (2003) 日光, 華厳滝の後退速度, *地学雑誌* 112 (4) 521-530

Hayakawa, Y. S., Obanawa, H. (2015.12) Development of waterfall cliff face: An implication from multi-temporal high-definition topographic data. AGU Fall Meeting 2015 Abstract EP51B-0916.

東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林 秩父演習林 (2015) 秩父演習林

Kaoru Saitoo, Kazuhiko Nakamura, Mutsuyuki Ueta, Reiko Kurosawa, Akio Fujiwara, Hill Hiroki Kobayashi, Masaya Nakayama, Ayako Toko, Kazuyo Nagahama (2015) Utilizing the Cyberforest live sound system with social media to remotely conduct woodland bird censuses in Central Japan, *Ambio* 2015, 44(Suppl. 4):S572-S583

Tsuchiya S, Imaizumi F (2010) Large sediment movement caused by the catastrophic Ohya-Kuzure landslide, *J Dis Res* 5:257-263

杉田 久志, 岩本 宏二郎, 森澤 猛, 齋藤 智之, 壁谷 大介, 岡本 透, 酒井 寿夫 (2008, 6) 御嶽山における密なチマキザサ林床をもつ亜高山帯針葉樹林の構造と動態, *森林総合研究所研究報告* 7(2)No. 407 81-89

片岡香子, 松元高峰, 齋藤武士, 河島克久, 伊豫部勉, 佐々木明彦, 鈴木啓助, 長橋良隆 (2015) 2014 年噴火後に発生した降雨型ラハールと Rain-on-snow による出水イベントおよび堆積物の特徴, 2015 年地質学会アブスト

酒井, 昭 (1977. 3) 植物の積雪に対する適応, *低温科学. 生物篇* 34: 47-76

静岡河川事務所 (2006) 砂防のページ > 大谷崩 > 大谷崩の地形・地質.  
[http://www.cbr.mlit.go.jp/shizukawa/02\\_sabo/03\\_ooya/tikei/tikei.html](http://www.cbr.mlit.go.jp/shizukawa/02_sabo/03_ooya/tikei/tikei.html), 2016 年 2 月 13 日閲覧

大滝村公式ホームページ

[http://www.vill.otaki.nagano.jp/ontake\\_tozan/tozan03.html](http://www.vill.otaki.nagano.jp/ontake_tozan/tozan03.html), 2016 年 2 月 13 日閲覧

Wuming Zhang (2016) An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation, Article in Remote Sensing

Dimitri Lague, Nicolas Brodu, Jérôme Leroux (2013) Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : application to the Rangitikei canyon (N-Z), ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 80, 10-26,

Ruwen Schnabel, Roland Wahl, Reinhard Klein (2007) Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, Computer Graphics Forum (June 2007), 26:2(214-226)