

博士論文

高密度航空レーザデータを使用した
微地形強調図による落石発生源抽出に関する研究

2018年9月

宮下 征士

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目 次

第 1 章 研究の背景と目的	1-1
1.1 研究の背景	1-1
1.2 本研究の目的	1-6
1.3 本論文の構成	1-7
参考文献	1-8
第 2 章 高密度航空レーザの概要	2-1
2.1 航空レーザ測量とは	2-1
2.2 航空レーザ測量データの種類	2-6
2.3 高密度と低密度の違い	2-8
参考文献	2-8
第 3 章 微地形強調図の提案	3-1
3.1 微地形表現手法	3-1
3.2 微地形表現手法の透過合成	3-7
3.3 微地形強調図の提案	3-8
3.4 微地形強調図による落石発生源抽出手法	3-10
参考文献	3-11
第 4 章 微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証	4-1
4.1 微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証フロー	4-1
4.2 検証フィールド	4-2
4.3 計測諸元	4-3
4.4 異なる 2 時期の計測データの差異	4-4
4.5 机上抽出	4-5
4.6 タブレット (GNSS 機能付) を使用した現地調査	4-6
4.7 異なる 2 時期の微地形強調図による落石発生源抽出の差異	4-8
4.8 冬季における道路縦断方向計測データと格子状計測データの 微地形強調図による落石発生源抽出の差異	4-16
4.9 森林基本図を利用した落石発生源抽出調査との差異	4-19
参考文献	4-20

第5章	微地形強調図による落石発生源抽出検証（美作市）	5-1
5.1	検証フィールド	5-1
5.2	計測諸元	5-1
5.3	微地形強調図による落石発生源抽出結果	5-2
第6章	微地形強調図による落石発生源抽出検証（岡山市）	6-1
6.1	検証フィールド	6-1
6.2	計測諸元	6-1
6.3	微地形強調図による落石発生源抽出結果	6-2
	参考文献	6-15
第7章	高密度点群データによる急崖抽出	7-1
第8章	微地形強調図を利用した道路防災カルテの精度検証	8-1
8.1	道路防災カルテとは	8-1
8.2	微地形強調図と道路防災カルテの比較検証	8-2
8.3	道路防災カルテの精度	8-9
	参考文献	8-11
第9章	結論, 今後の課題	9-1
9.1	本研究の成果	9-1
9.2	今後の課題	9-2

謝辞

第1章 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

1.1.1 はじめに

近年，ゲリラ豪雨，大型台風等の異常気象や大規模地震などにより，道路への落石事故が頻発している。

2016年5月4日には，主要地方道浜田作木線（島根県邑南町戸河内地内）において落石が発生し，通行する自動車を直撃し，助手席に乗っていた一人の命が失われた。（図1.1.1）

2017年2月5日には，一般県道福本和気線（岡山県美作市真神地内）において落石が発生し，走ってきた乗用車が落石に乗り上げ，車体の一部が壊れる被害が出た。（図1.1.2）

このように落石事故が頻発していることから，落石対策事業（道路防災点検，災害防除設計，落石対策工事）へ取り組む機運が高まっている。



図1.1.1 落石写真（島根県）【1.1】



図1.1.2 落石被災写真（岡山県）

1.1.2 落石

落石とは、岩盤の不連続面（岩盤中に発達する節理，片理，層理等の割れ目）が拡大して，岩塊や礫がはく離したり，表層堆積物，火山噴出物，固結度の低い砂礫層の中の岩塊，礫が表面に浮き出して斜面より落下する現象をいう【1.2】。

落石の発生形態は，主に以下の通りである。

- ・ 抜け落型落石（転石）
- ・ はく離型落石（急崖，浮石）

抜け落型落石（転石）は，土砂中の礫のみが運動を開始する場合と，土砂の崩壊に伴って落石が発生する場合とがある。

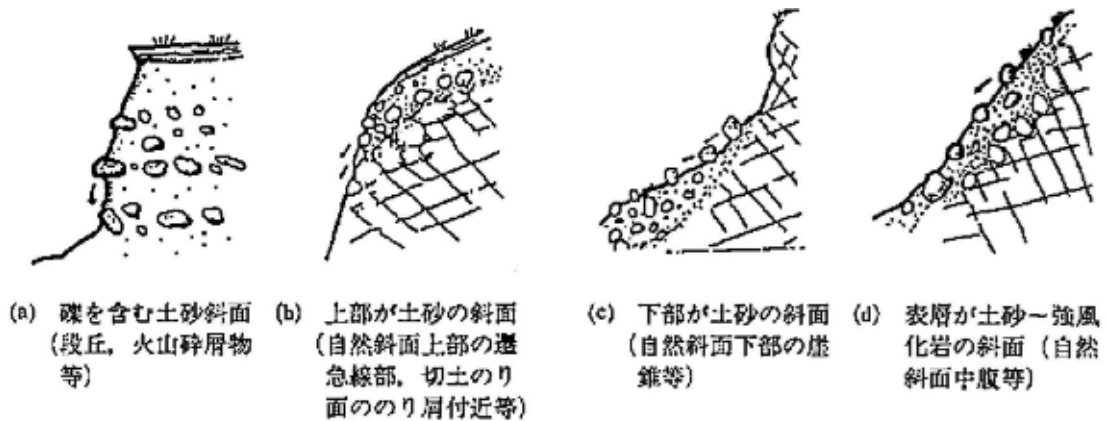


図 1.1.3 抜け落型落石（転石）の発生形態【1.3】

はく離型落石（急崖，浮石），主として岩盤斜面で発生する。

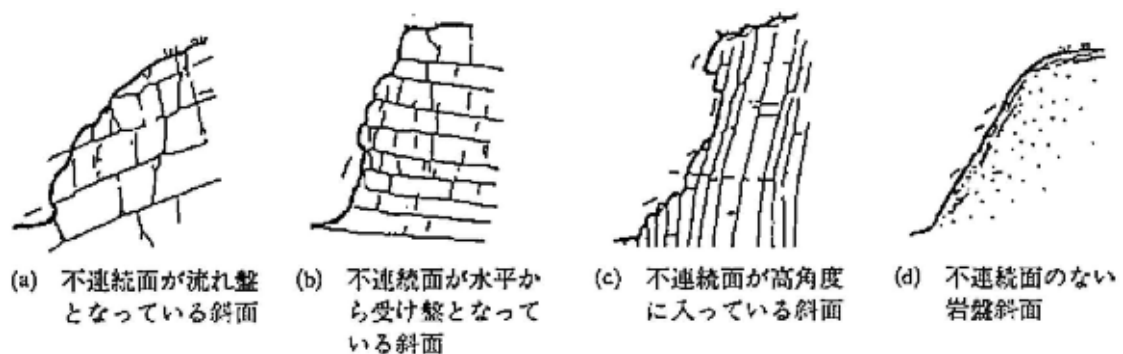


図 1.1.4 はく離型落石（急崖，浮石）の発生形態【1.3】

1.1.3 落石発生源の定義

本研究では、はく離型落石である落石発生源の急崖（露岩）を高さ 2.0m 程度の岩盤で標高下方が急勾配のものと定義する。抜け落型落石である転石とは、急崖等から落下したり、土砂の表層崩落による落石などにより、斜面中で止まっているものと定義する。

1.1.4 落石対策事業とは

落石対策事業とは、落石対象物に対して、点検、設計、施工等を実施するものである。

一般的な落石対策事業（調査・設計）のフローを図 1.1.5 に示す。

<全体計画>

落石が頻発する路線において、全体計画を立案する。

<資料收集整理>

道路パトロールおよび作業日報、災害記録、落石対策工施工記録、現況平面図（森林基本図、都市計画図）、道路防災点検カルテ等の資料を收集整理する。

<点検箇所選定>

收集整理した資料により、点検対象範囲および箇所を選定する。

<点検資料整理>

点検対象範囲および箇所において、点検資料を作成する。

<点検>

木々の生い茂った急峻な斜面において、点検資料（図面）、ポール、筆記用具、デジカメ等を持参しながら現地点検を実施する。

<結果取りまとめ>

点検結果を箇所別記録表や防災カルテに取りまとめ、要対策箇所を抽出する。結果を検証し、対策順を決定する。

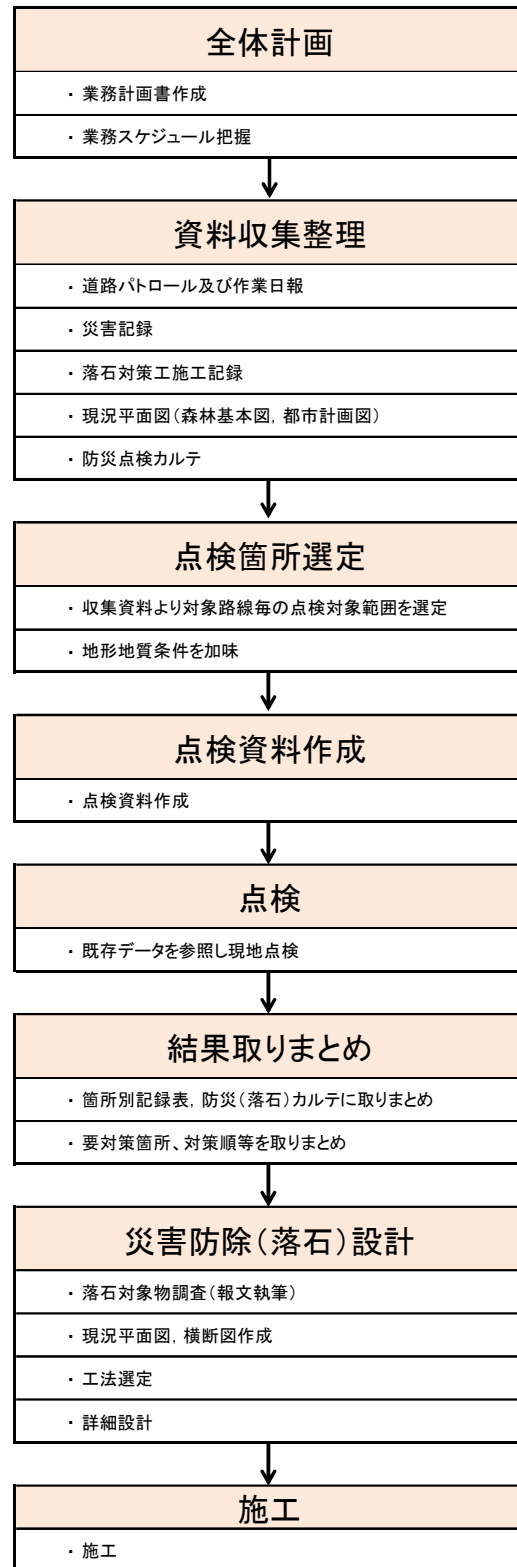


図 1.1.5 落石対策事業（調査・設計）フロー

<災害防除（落石）設計>

災害防除（落石）設計を実施する。詳細な点検結果を基に，落石予防工と落石防護工を組み合わせて比較検討，工法選定を行い，現況平面図および横断図を取得して，詳細設計を実施する。

<施工>

詳細設計によりまとめられた図面数量を基に施工を実施する（図 1.1.6）。



図 1.1.6 施工事例 落石予防工__ロープ伏工（左）
落石防護工__高吸収落石防護柵（右）

1.1.5 落石対策事業における課題

現状の落石対策事業においては，図1.1.7に示すような森林基本図（5000分の1，空中写真測量）や道路台帳等の落石発生源（急崖，転石）が表現されていない精度の低い図面が使用されている。図1.1.8のような樹木が繁茂した斜面中において，実測による現況平面図作成は困難であるため，精度の低い図面が使用されてきた経緯がある。現地調査においても，落石発生源の位置把握が困難であり，落石発生源の位置精度不良や調査漏れが発生し，安全性が問題視されている。

落石対策事業の安全性を高めるためには，以下の課題をクリアしなければならない。

①高精度な図面作成

森林基本図等の精度の低い図面ではなく，落石発生源が表現された高精度な図面を作成する。

②落石発生源の抽出精度の向上

高精度な図面を使用することにより，落石発生源の抽出精度を向上させる。

③落石発生源の正確な位置把握

高精度な図面を使用することにより，落石発生源の正確な位置を把握する。

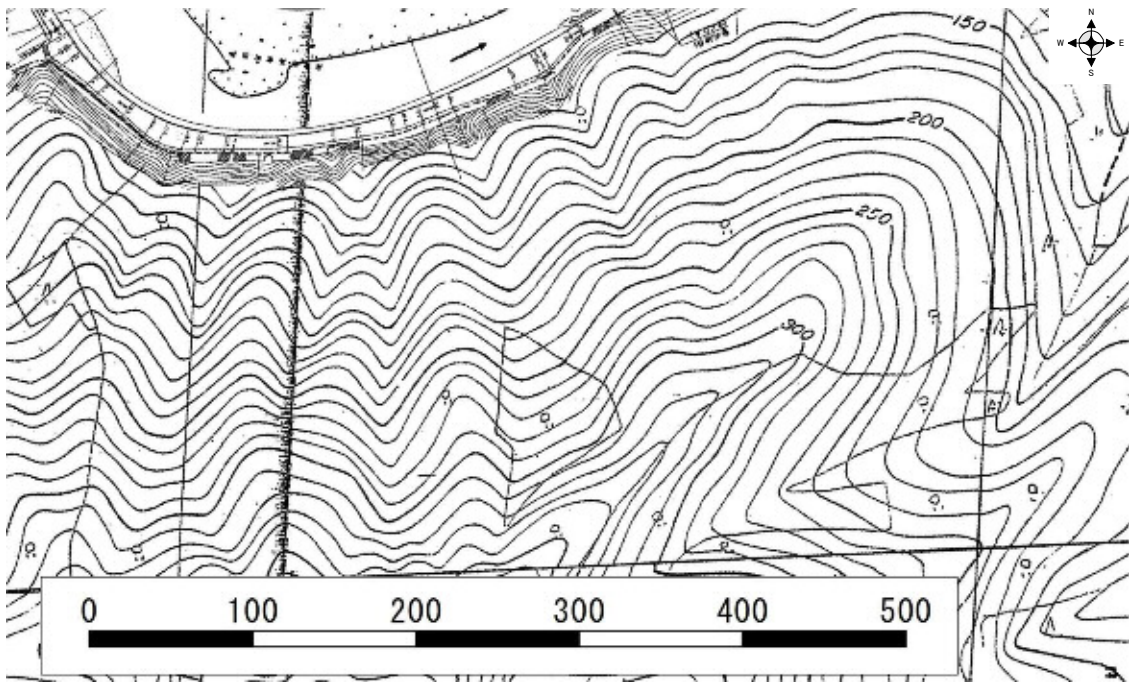


图1.1.7 森林基本图

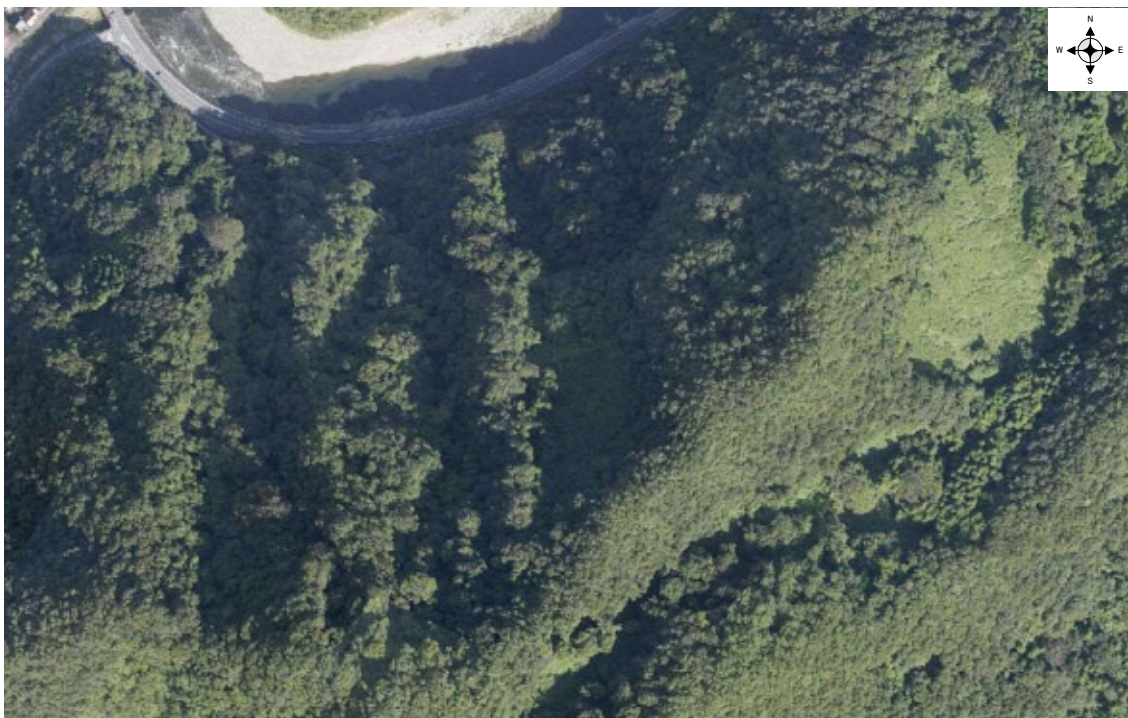


图 1.1.8 植生繁茂状况写真 (10月摄影)

1.2 本研究の目的

落石対策事業の課題を解決するために、樹木の繁茂した斜面中において地表面を捉えることができる航空レーザ測量を活用することを提案する。

落石発生源の位置精度不良や調査漏れを解消するには高精度な図面が必要である。樹木の繁茂した斜面中において地表面を捉える手法として、航空レーザ測量がある。

さらに、近年の航空レーザ測量機器の性能向上により高密度航空レーザデータの活用が期待されている。

航空レーザ測量データの活用事例は広きにわたり、以下のような事例に活用されている。

- ・地すべり地形等の微地形判読【1.4】【1.5】
- ・河川浸水想定【1.6】
- ・森林、植生分布【1.7】

航空レーザ測量データを使用した落石発生源抽出への活用、研究事例は、国内【1.8】【1.9】【1.10】【1.11】だけでなく、国外【1.12】【1.13】【1.14】【1.15】【1.16】においても存在する。（表1.2.1）

落石発生源抽出における既往研究で作成された図面は、単体での微地形表現手法で作成されたものであり、地形の傾斜に着目したものが多く、尾根谷を含む微地形の表現が不十分であった。

本研究では、航空レーザ測量より得られる高密度航空レーザデータから、微地形表現手法の組み合わせにより高精度な図面である微地形強調図（傾斜量図＋ウェーブレット解析図＋等高線図）を作成し、落石発生源の机上抽出、現地調査による抽出精度を検証する【1.17】

【1.18】。微地形強調図は、異なる2時期（夏季・冬季）や計測方向（道路縦横断）において作成し、抽出精度を比較し、落石発生源抽出における微地形強調図の有用性を示す。微地形強調図を利用した道路防災カルテへの活用についても述べる。

表 1.2.1 航空レーザ測量データを使用した落石発生源抽出への主な活用、研究事例

タイトル	年度	概要
航空レーザ測量を用いた地質調査事例	2011	等高線図，陰影図を使用した，浮石，転石の把握
転石調査のための高密度航空レーザ計測による斜面の可視化	2014	S-DEM（下層モデル）から作成した起伏図を使用した，転石調査
数値標高モデルを用いた簡易な露岩抽出手法	2015	DEM（数値標高モデル）から作成した等高線図，傾斜量図，曲率図を使用した，露岩の抽出
An approach to automatic detection and hazard risk assessment of large protruding rocks in densely forested hilly region	2016	高密度に樹木で覆われている地域における，突出した岩の自動抽出

1.3 本論文の構成

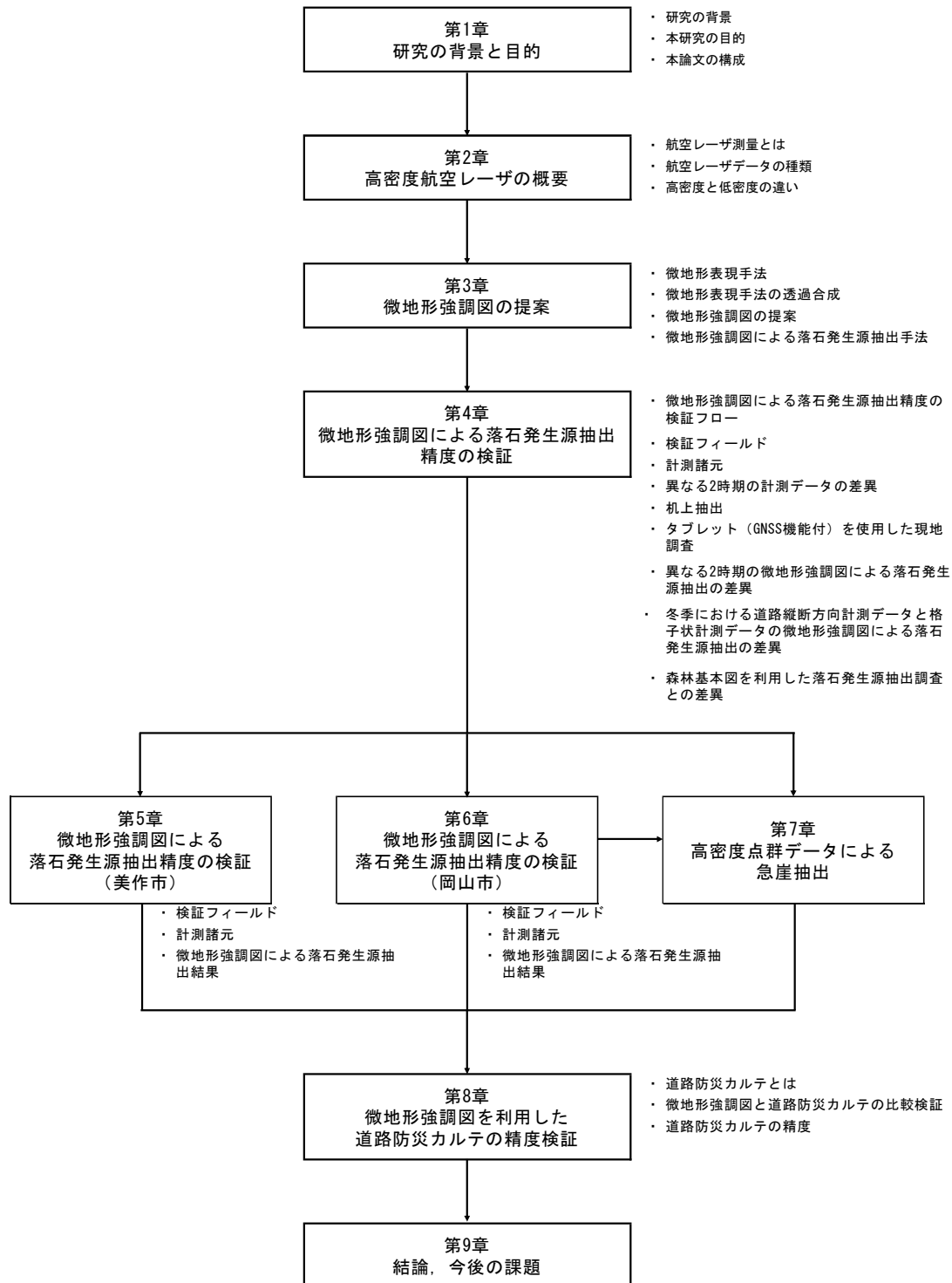


図 1.3.1 本論文の構成

本論文は、図 1.3.1 に示す通り、第 1 章から第 9 章までの 9 つの章で構成している。第 1 章では、研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の構成をまとめる。第 2 章では、本研究で使用する高密度航空レーザの概要についてまとめる。第 3 章では、高密度航空レーザデータを使用した様々な微地形表現手法を紹介する。落石発生源を抽出するための図面として、微地形表現手法の傾斜量図、ウェーブレット解析図、等高線図を透過合成した微地形強調図を提案する。第 4 章では、提案する微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証を行う。異なる 2 時期（夏季・冬季）データおよび道路縦断方向計測データと格子状計測データにおいて微地形強調図で机上抽出を行い、現地調査により抽出精度の検証を行う。第 5 章では、第 4 章の結果の妥当性を確認するために、検証フィールド B（美作市）において冬季の道路縦断方向計測データにより、微地形強調図で机上抽出を行い、現地調査により抽出精度の検証を行う。第 6 章では、第 4 章の結果の妥当性を確認するために、検証フィールド C（岡山市）において冬季の道路縦断方向計測データにより、微地形強調図で机上抽出を行い、現地調査により抽出精度の検証を行う。第 7 章では、検証フィールド C（岡山市）において、グリッドデータによって変換された点群データから、現地調査した落石発生源の高さと角度の関係を整理する。第 8 章では、微地形強調図が、道路防災カルテ（添付正面図）の代替になるか確認するために、着目点の位置精度の検証を行う。第 9 章では、これまで研究を行った経緯を総括し、微地形強調図による落石発生源抽出の有用性についてまとめ、今後の課題を示すことにより本論文の結論とする。

参考文献

- 【1.1】 島根県土木部（落石事故再発防止検討委員会）：島根県で発生した落石事故に関する報告書，pp. 3，2016.
- 【1.2】 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧，pp. 6，2017.
- 【1.3】 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧，pp. 8-10，2017.
- 【1.4】 菊地輝行，秦野輝儀，千田良道，西山哲：S-DEMデータを利用した地すべり地における変動ベクトル解析技術の開発，応用地質 第57巻6号，pp. 277-288，2017.
- 【1.5】 佐々木寿，向山栄：地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用，応用地質 第49巻6号，pp. 318-330，2009.
- 【1.6】 真下和彦，横田宏行，岡山和生，楨朗，磯部裕介，平岡透，恩田裕一，末次忠司：航空レーザ測量データを用いた地形解析による内水浸水想定区域設定手法の開発，地形 第33巻第3号，pp. 281-295，2012.
- 【1.7】 岡谷隆基，乙井康成，中埜貴元，小荒井衛：新潟県出雲崎地区における航空レーザ計測データによる森林の3次元要素の抽出，写真測量とリモートセンシング 第52巻2

- 号, pp.56-68, 2013.
- 【1.8】山田晃, 栃本泰浩, 千田良道: 航空レーザ測量を用いた地質調査事例, 全地連「技術フォーラム2011」京都, 2011.
 - 【1.9】増田仁, 田近真悟, 沢田和秀, 小野貴稔: 転石調査のための高密度航空レーザ計測による斜面の可視化, 第23回調査・設計・施工技術報告会, pp.17-24, 2014.
 - 【1.10】長谷川淳, 太田岳洋: 数値標高モデルを用いた簡易な露岩抽出手法, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.115-116, 2015.
 - 【1.11】Chhatkuli, K. Kawamura, K. Manno, T. Satoh, K. Tachibana: An approach to automatic detection and hazard risk assessment of large protruding rocks in densely forested hilly region, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, VolumeXLI-B3, pp.195-199, 2016.
 - 【1.12】Antonio Abellán, Jaume Calvet, Joan Manuel Vilaplana, Julien Blanchard: Detection and spatial prediction of rock-falls by means of terrestrial laser scanner monitoring, Geomorphology, Volume119, Issues 3-4, pp.162-171, 2010.
 - 【1.13】C. Michoud, M. -H. Derron, P. Horton, M. Jaboyedoff, F. -J. Baillifard, A. Loye, P. Nicolet, A. Pedrazzini, A. Queyrel: Rockfall hazard and risk assessments along roads at aregional scale: example in Swiss Alps, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, pp.615-629, 2012.
 - 【1.14】R. Salvini, M. Francioni, S. Riccucci, F. Bonciani, I. Callegar: Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domo-dossola-Iselle railway, the Italian Alps, Geomorphology, Volume185, pp.110-122, 2013.
 - 【1.15】M.Toniani, Abellan, A. : Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: A clustering approach using R, Journal of Spatial Information Science, Number8, pp.95-110, 2014.
 - 【1.16】Ryan A. Kromer, D. Jean Hutchinson, Matt J. Lato, Dave Gauthier, Thomas Edwards: Identifying rock slope failure precursors using LiDAR for transportation corridor hazard management, Engineering Geology, Volume195, pp.93-103, 2015.
 - 【1.17】宮下征士, 今西将文, 宮田真考, 西山哲: 異なる2時期の航空ヘリレーザデータを使用した落石発生源抽出の基礎的検証, 平成29年度(第69回)土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.373-374, 2017.
 - 【1.18】宮下征士, 今西将文, 宮田真考, 西山哲: 高密度航空レーザデータを使用した微地形強調図による落石発生源抽出の検証, 土木学会論文集F3(土木情報学) 73巻2号, pp.92-108, 2017.

第2章 高密度航空レーザの概要

2.1 航空レーザ測量とは

2.1.1 航空レーザ測量とは

「航空レーザ測量」とは、航空レーザ測量システムを用いて地形を計測し、格子状の標高データである「グリッドデータ」等の数値地形図データファイルを作成する作業をいう。

航空機（固定翼、回転翼）に搭載したノンプリズム型レーザ測距儀から地上に向けてレーザパルスを照射し、地表面や地物から反射するリターンパルスにより、3次元航空レーザデータを取得する移動体計測である。

航空レーザ測量は、樹木のある山地であっても、レーザが地表面に到達することで直接計測することができる（図2.1.1）。精度は、地表面へのレーザ到達密度に依存する。一方、空中写真測量は、樹木の上面を計測し、樹高を差し引くことで間接的に地表面を計測しているため、低精度である。この違いから、航空レーザ測量では空中写真測量では難しかった山地部における地形の変化点を精細にとらえることができる。

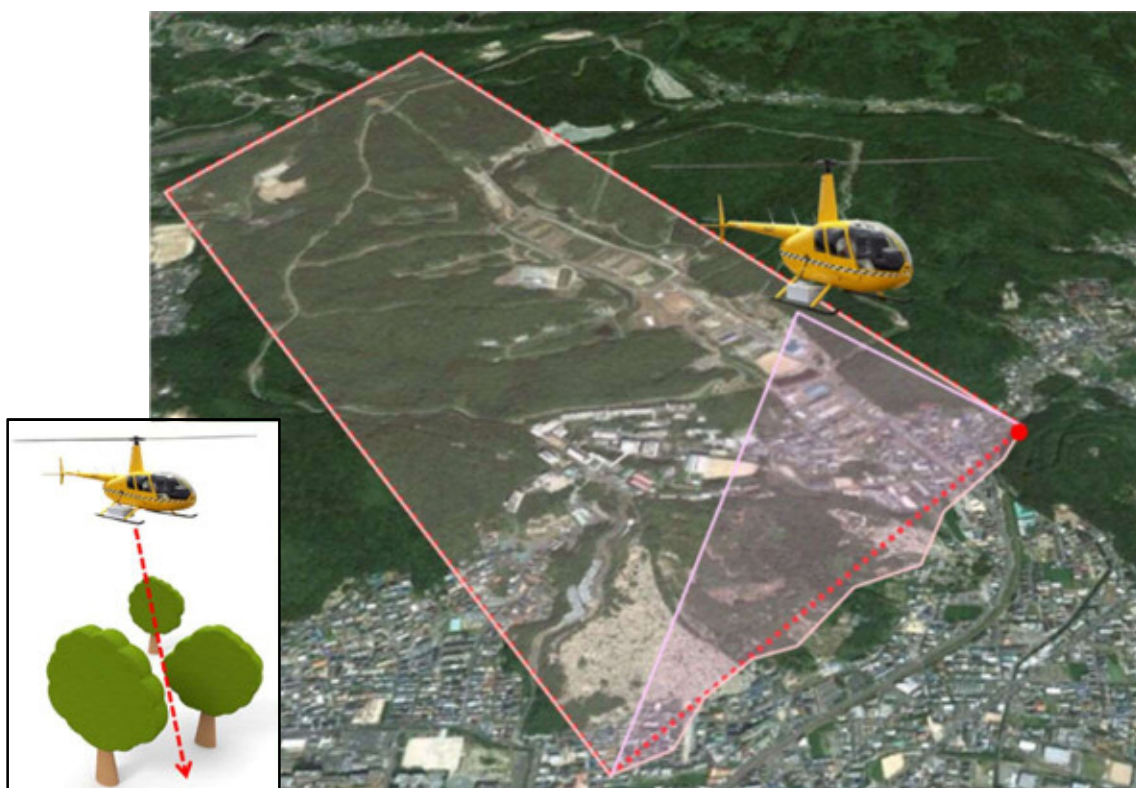


図 2.1.1 航空レーザ測量イメージ図

2.1.2 航空レーザ測量システムの構成

航空レーザ測量システムは、図2.1.2に示す以下の4つの機器で構成される。

①IMU (Inertial Measurement Unit)

レーザスキャナやデジタルカメラの三軸の姿勢と加速度を求める慣性計測装置である。

②GNSS (Global Navigation Satellite System)

地上の固定局と航空機で同時にGPSの測位電波を受信し、航空機の位置、軌跡を算出する。IMUによる姿勢、位置情報統合補間して位置決定の精度や頻度を向上させる。

③レーザスキャナ

地表に向けて、一般的に1秒あたり数万～数十万回のレーザ光線を照射し、反射光をレシーバーで受光する。レーザ光の往復時間により、レーザ発射位置から光線の到達した地上照射点との距離を測定する。

④デジタルカメラ

レーザスキャナと連動してデジタル空中写真を撮影する。航空レーザ計測時の地表の状態を把握する目的で同時撮影したり、近赤外画像の取得も可能である。

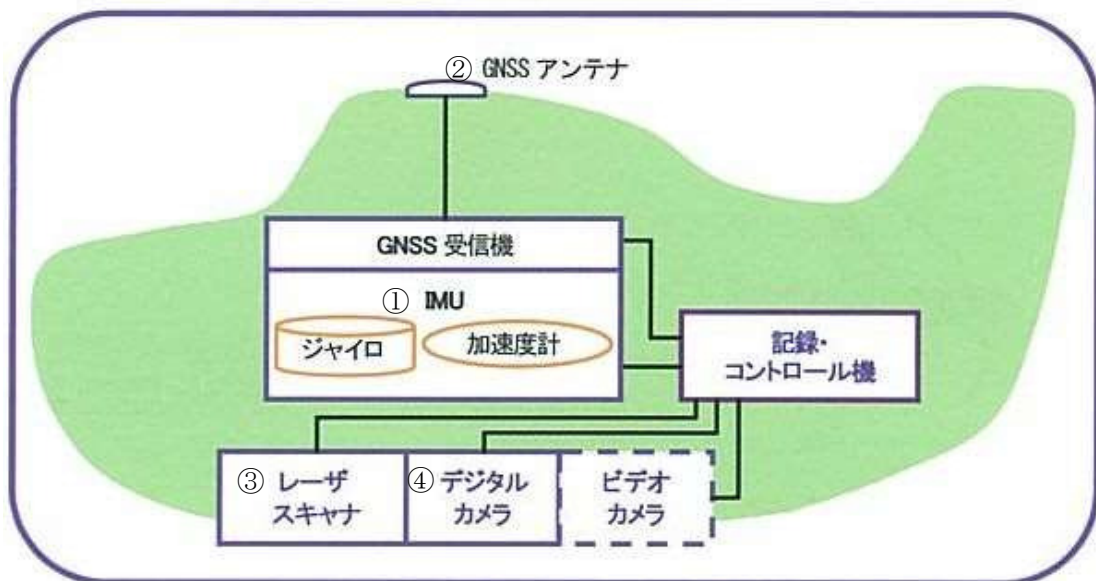


図2.1.2 航空レーザシステムの基本構成【2.1】

2.1.3 航空レーザ測量に使用する機体

航空レーザ測量に使用される機体には、図2.1.3に示す固定翼（セスナ）と回転翼（ヘリコプター）の2種類がある。

固定翼（セスナ）は、回転翼に比べ滞空時間が長く、飛行距離が長いことから、遠隔地あるいは広範囲の計測に適する。水平飛行である。

回転翼（ヘリコプター）は、固定翼に比べ滞空時間が短く、低速度かつ低対地高度での飛行が容易であることから、特定範囲を高密度で計測することに適する。速度の加減や高度の調整が可能であり、地形に合わせた計測が可能である。

両機体の特徴を表2.1.1にまとめる。

表2.1.1 機体の比較【2.2】

比較項目	固定翼	回転翼
飛行速度	110～150kt程度。	20～90kt程度。
主な用途	大面積作業に適する。 (* ** km ² ～* ** * km ²)	特定地域の詳細調査に適する。 (* km ² ～* ** * km ²)
計測密度	2m～1mに1点程度の計測を効率的に実施。	50cm以下に1点の高密度計測にも適合。
飛行特性	姿勢安定性、直進性が良い。	機動性が高い（速度・高度の制御が容易）。
高度変化	基本的に水平飛行。	山地などの地形に沿った計測が可能。
航続時間	長（5～6時間） 航続距離が長く、拠点から遠隔地でも容易に到達し、計測が可能。	短（2～3時間） 長距離空輸に時間がかかる。 現地ヘリポートが必要なこともある。
搭載方法	基本的にセンサ部は機内に搭載し、直下中心に左右にスキャンすることが多い。	センサ部を直下だけでなく傾けて設置可能。



図2.1.3 機体写真（左：セスナ_右：ヘリコプター）

2.1.4 航空レーザ測量作業

航空レーザ測量の作業フローを、図 2.1.4 に示す。【2.3】

<作業計画>

GNSS 衛星配置等を考慮して、計測諸元、飛行コース、固定局の設置場所および GNSS 観測について計画立案する。

<固定局設置>

航空レーザ測量において、レーザ測距装置の位置をキネマティック法で求めるための地上固定局を設置する。電子基準点を用いる。

<航空レーザ計測>

航空レーザ測量システムを用いて、計測データを取得する。

<数値写真撮影>

空中から地表を撮影した画像データで、フィルタリング及び点検のために撮影する。航空レーザ計測と同時期に撮影することを標準とし、建物等の地表遮蔽物が確認できる解像度とし、地上画素寸法は 1.0 メートル以下を標準とする。撮影は、対象地域を網羅する範囲とする。

<調整用基準点設置>

3次元計測データの点検及び調整を行うための基準点を設置する。

<3次元計測データ作成>

航空レーザ計測データおよび GNSS/IMU データを統合解析し、3次元座標データを作成する。

<写真地図作成>

数値写真および 3次元計測データ等を用いて正射変換により作成する。

<水部ポリゴンデータ作成>

写真地図データを用いて水部の範囲を対象に作成する。

<オリジナルデータ作成>

三次元計測データから調整用基準点成果を用いて点検・調整した 3次元座標データを作成する。

<グラウンドデータ作成>

オリジナルデータからフィルタリング処理により地表面の 3次元座標データを作成する。

<グリッドデータ作成>

グラウンドデータから内挿補間により格子状の標高データを作成する。

<等高線データ作成>

グリッドデータから自動生成により等高線データを作成する。

<数値地形図データファイル作成>

データを電磁的記録媒体に記録する。

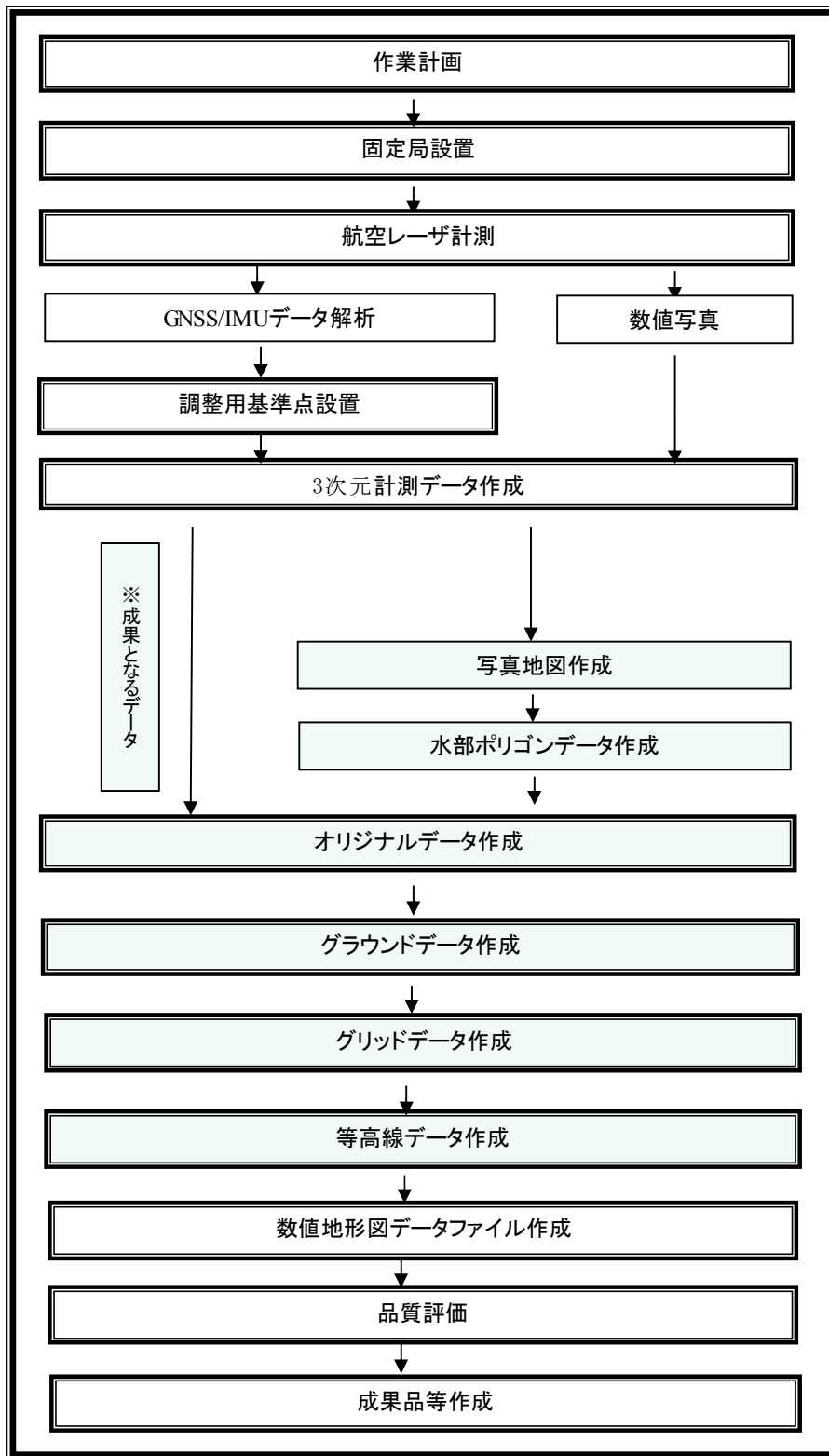


図 2.1.4 航空レーザ測量作業フロー

2.2 航空レーザ測量データの種類

2.2.1 オリジナルデータ

オリジナルデータは、計測した点全部（地上の地形，地物，樹木等を全て含んだ状態）を調整用基準点等で点検調整を行い，空中ノイズ等を除去して格納したデータである（図2.2.1）。

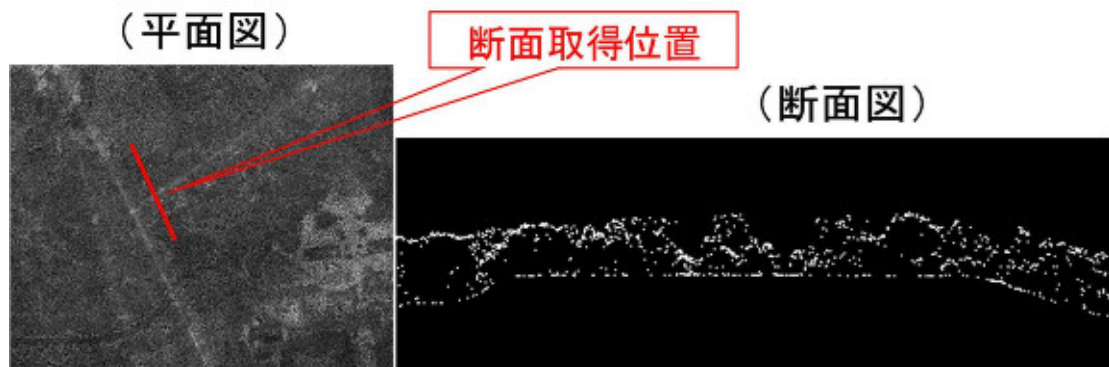


図2.2.1 オリジナルデータ

2.2.2 グラウンドデータ

地形データとして活用するために，オリジナルデータをフィルタリング処理により，樹木等を除去・分類したデータをグラウンドデータという（図2.2.2）。

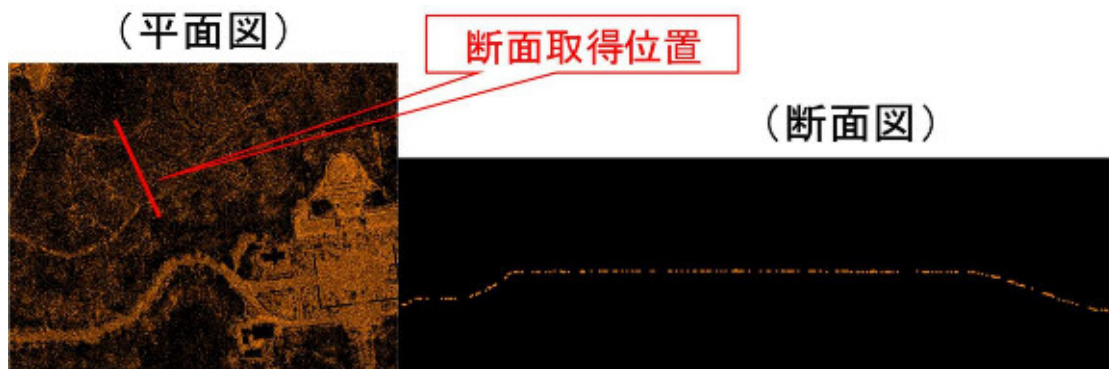


図2.2.2 グラウンドデータ

2.2.3 グリッドデータ

グラウンドデータから不整三角網を作り，等間隔のメッシュをかぶせ，メッシュ点の高さを線形近似によって補間処理させたもの（図2.2.4）をグリッドデータという（図2.2.3）。

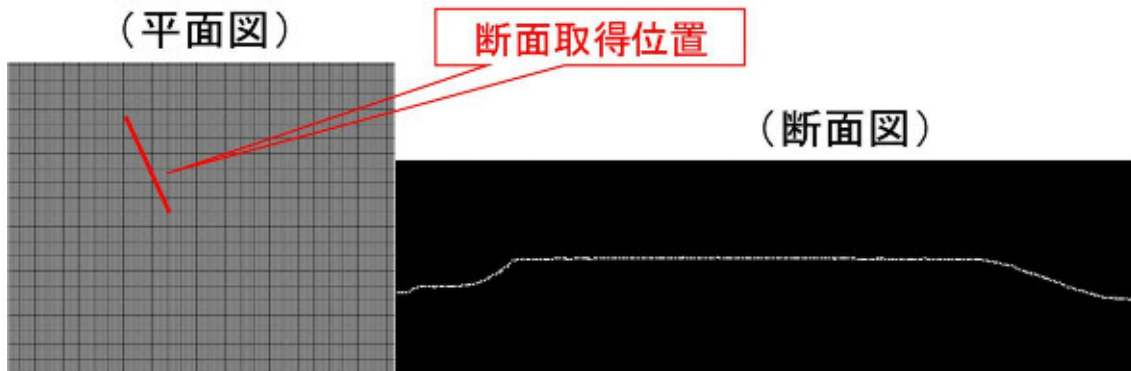


図2.2.3 グリッドデータ

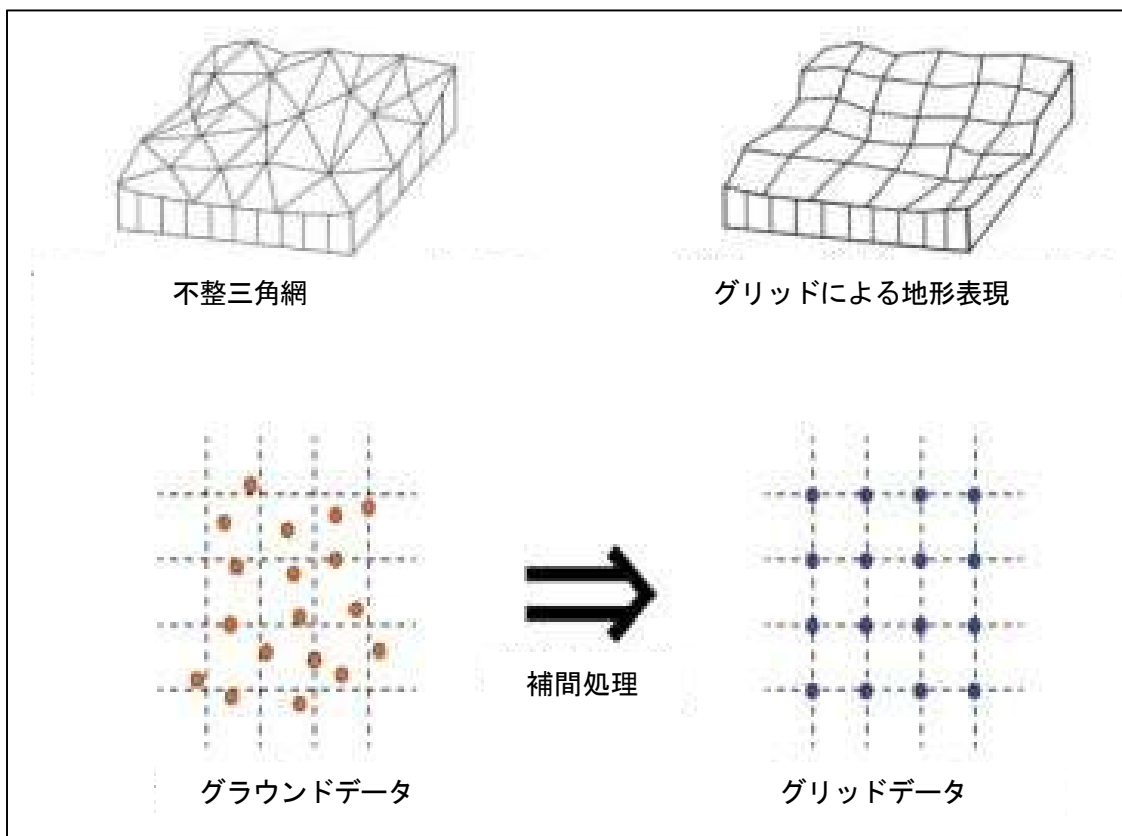


図2.2.4 グリッドデータ作成イメージ図

2.3 高密度と低密度の違い

航空レーザ測量は古くから実施され、さまざまなデータが蓄積されており、航空レーザ測量データポータルサイト【2.4】で地域、管理者、計測密度、計測会社を検索できるようになっている。今までの航空レーザ測量は、公共測量作業規程の準則【2.5】に基づく地図情報レベル2500（格子間隔2m以内）のデータが主流となっているため、山地部では低密度となり、地形が正しく表現されず、落石発生源抽出に適していない（図2.3.1）。このため、本研究においては、高密度データが取得できる航空ヘリレーザ（回転翼）を使用した。

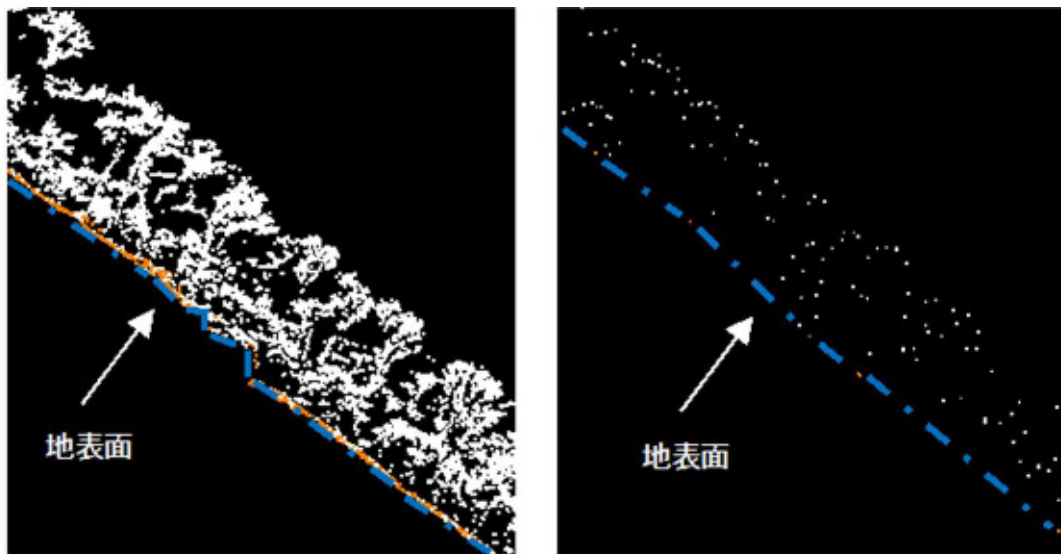


図2.3.1

航空ヘリレーザにより取得した高密度点群（左）と
地図情報レベル2500の低密度点群（右）

参考文献

- 【2.1】 公益財団法人 日本測量調査技術協会：航空レーザ測量による災害対策事例集，pp. 12，2013.
- 【2.2】 公益財団法人 日本測量調査技術協会：航空レーザ測量による災害対策事例集，pp. 17-18，2013.
- 【2.3】 国土交通省国土地理院：航空レーザ測量による数値標高モデル（DEM）作成マニュアル（案），2006.
- 【2.4】 公益財団法人日本測量調査技術協会：航空レーザ測量データポータルサイト，
<<http://www.sokugikyo.or.jp/laser/>>，（2018.09.16）
- 【2.5】 国土交通省：公共測量 作業規程の準則，2016.

第3章 微地形強調図の提案

3.1 微地形表現手法

高密度航空レーザデータの数値解析から、さまざまな微地形表現が可能となる。微地形表現手法として、等高線図、高度段彩図、傾斜量図、ウェーブレット解析図等がある。しかしながら、下記に示す微地形表現手法単体では、落石発生源の抽出は難しい。

3.1.1 等高線図

図 3.1.1 等高線図は、同一標高の点を結んだ軌跡を地図上に描画した曲線である。粗密による表現では、低角から中角の斜面は比較的わかりやすいが、等高線間の地形変化点が表現できないため、山道等の微地形を判断できないことがある。

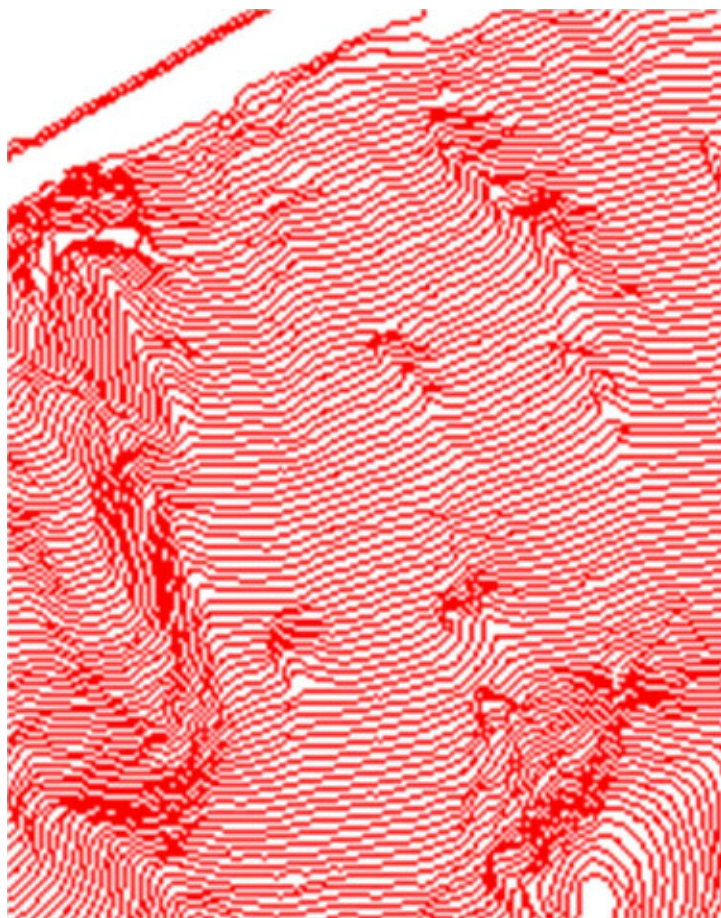


図 3.1.1 等高線図

3.1.2 高度段彩図

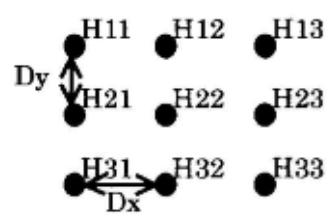
図 3.1.2 高度段彩図は、同一標高に任意の色を割り当て、標高の違いを色相や明暗の違いで連続的に表現するものである。標高変化の全体的傾向はわかりやすいが、色相のみで微地形を表現することは難しい。このため、他の表現方法と組み合わせて利用されることが多い。



図 3.1.2 高度段彩図【3.1】

3.1.3 傾斜量図

図 3.1.3 傾斜量図は、グリッドデータのピクセル毎の傾斜量を計算し、この値に応じて明度を変化させて地形を表現した画像である。3×3の正方グリッドにおいて、中央点周辺の標高を最も良く説明する平面を最小自乗法で当てはめた場合の最大傾斜方向の傾斜の大きさを表現したものである【3.2】。緩斜面は明るく（白色）、急斜面は暗く（黒色）表され、落石発生源となる急崖を抽出できる。しかし、高低差を示す情報がないため、地形が入り組んだところでは尾根や谷の区別がつきにくい。



$$S_x = \frac{H11 + H21 + H31 - (H13 + H23 + H33)}{6 \times Dx}$$

$$S_y = \frac{H11 + H12 + H13 - (H31 + H32 + H33)}{6 \times Dy}$$

$$\text{傾斜量} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

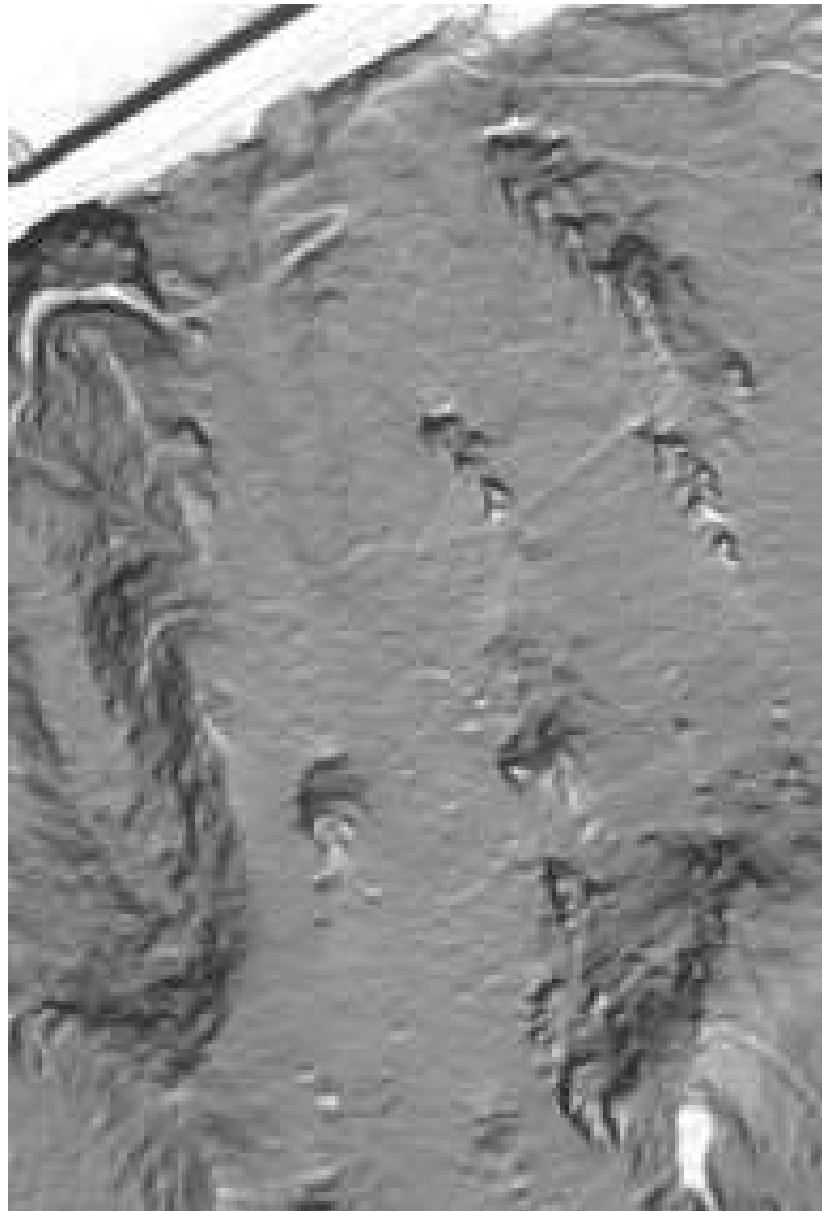


图 3.1.3 傾斜量图

3.1.4 ウェーブレット解析図

凹凸の変化を強調して微地形を表現した画像である。具体的には、2次元ウェーブレット解析によって微地形を強調する。これはマザーウェーブレットと称される関数を連続的に拡大縮小させながら座標に沿ってシフトさせ、式(1)のような座標値との畳み込み積分を行なう。この式によって求まる相関係数の大きさを地形の起伏を表す手法である。

$$C(s, a, b) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) \Psi\left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}\right) dx dy \quad (1)$$

C は関数と地表面の凹凸との相関性を表す係数、 Ψ はマザーウェーブレット、 $z(x, y)$ は座標 (x, y) の標高値、 a, b は任意の座標 (a, b) および s はスケールである。

ここでは、マザーウェーブレットとして、式(2)で表されるガウス関数の2次導関数を用いる。この関数は、図3.1.4に示すようにメキシカンハットのような形状となり、ウェーブレット解析の計算が簡単であり、また地形の起伏を強調する際においても有効であるとの報告もある【3.3】【3.4】。

$$\Psi(x, y) = (2 - x^2 - y^2) e^{-\frac{1}{2}(x^2 + y^2)} \quad (2)$$

本研究では、 x 方向および y 方向のスケールを同一に設定し、関数を当てはめていく方向の影響が現れないようにする。図3.1.4に示す波長 λ は、DEMのメッシュサイズに応じて決定するスケール s と式(3)の関係がある。

$$\lambda \doteq 4s \quad (3)$$

図3.1.4は1.0mのメッシュサイズのDEMにおいてスケール s の値を1に設定したときの波長 λ を表している。本研究ではメッシュサイズ0.5mのDEMを用い、スケールの値を1に設定するので、波長 λ は2.0mとなる。

解析結果は、尾根谷の凹凸を明瞭にするため、畳み込み積分によって求められた相関係数に応じて、白、黄、緑、青および赤と係数の値に応じたカラーパレットで表現する。しかし、高低差を示す情報や傾斜を示す情報がないため、微地形の判断がつきにくい(図3.1.5)。

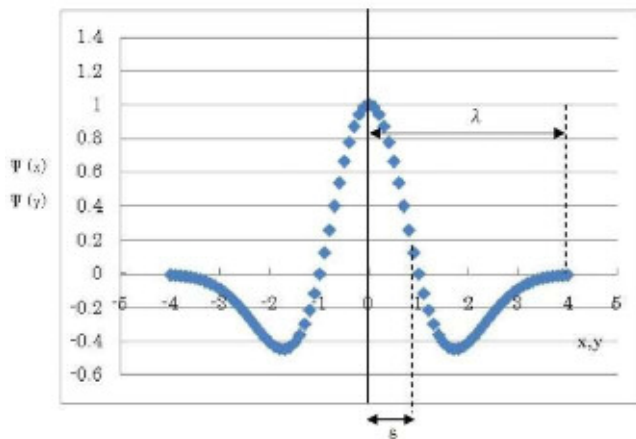


図 3.1.4 メキシカンハット関数説明図

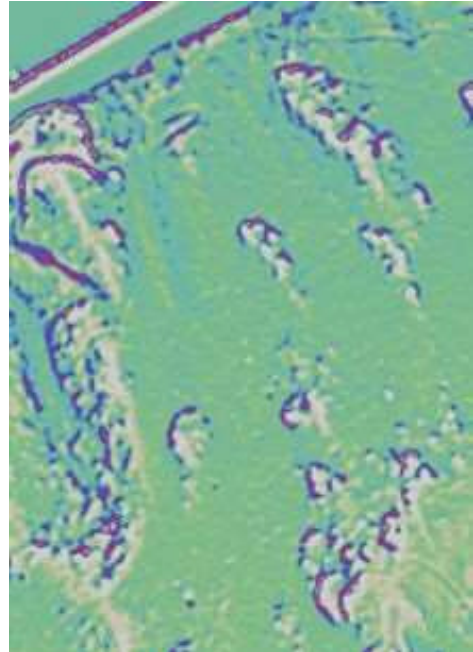


図 3.1.5 ウェーブレット解析図

ウェーブレット係数による着色凡例を示すため、ウェーブレット解析図の一部を抜粋した(図 3.1.6)。ウェーブレット解析図による地形表現例を図 3.1.7 で示す。図 3.1.6 で抜粋した箇所のウェーブレット解析図の拡大図を図 3.1.7 左側に示す。緑色の点は、抜粋した箇所のグリッドデータによる断面図である。また、ウェーブレット係数による色での表現例を図右側にカラーパレットで示す。ウェーブレット解析図は斜面とマザーウェーブレットとの相関係数を算出することで色によって凹凸の地形判読が可能である。A 点のウェーブレット係数は 9 である。そのため、緑色で表現され、起伏のない斜面を表す傾向にある。B 点、E 点のウェーブレット係数は 15 である。そのため、図面では白色で表現され、天端部の凸型の地形を示す。C 点、D 点が急崖部であり、C 点が -2、D 点が -15 のウェーブレット係数で表される。そのため、図面において C 点は青色、D 点は赤色を示す。これにより、D 点は凹地形を示していることが分かる。また、急崖部であることから赤色は落石発生源を表現しているといえる。F 点のウェーブレット係数は -15 である。そのため、図面では赤色で表現され凹地形を示す。点群では谷地形であることが推測され、落石発生源、谷地形が赤色で表現されていると考えられる。

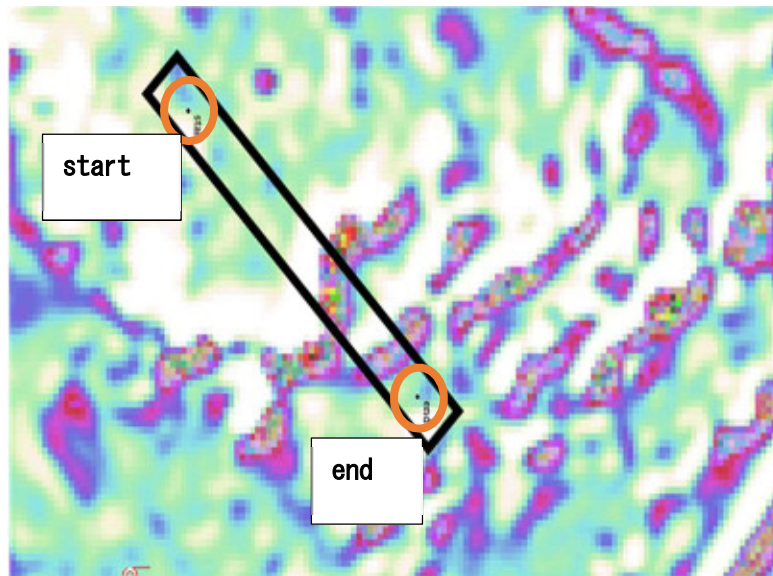


図 3.1.6 ウェーブレット解析図 (抜粋)

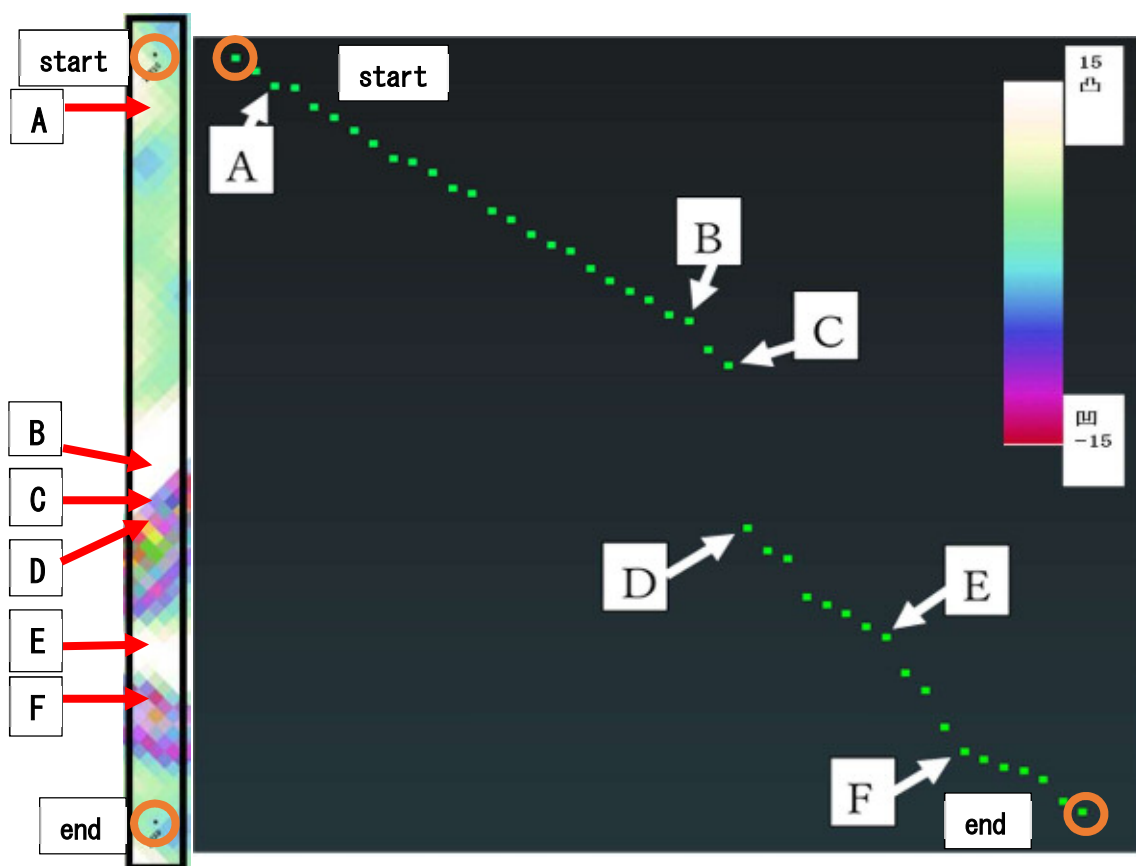


図 3.1.7 ウェーブレット解析図による微地形表現

3.2 微地形表現手法の透過合成

パソコンの性能向上により，複数の微地形表現手法を透過合成できるようになった．その結果，地形の凹凸の相対的値を明度の差で表現し，それに赤色などの彩度に割り当てた傾斜量を合成して起伏感を表現するもの（赤色立体図）【3.5】，あるいは高度段彩図に傾斜量図を重ね合わせたもの（ELSAMAP）【3.6】が開発されてる．それぞれの手法の特徴を以下に示す．

3.2.1 赤色立体図

赤色立体図は，地上開度と地下開度から尾根谷度を求め，これを明度に比例させた画像に微地形である斜面の傾斜を赤の彩度に割り当てて合成する方法である．光源要素が不要で，どの向きから見ても同じように見え，経験や特殊な装置を使わずに一枚の画像でさまざまな地形が立体表現できる．傾斜が急な面が赤く，尾根は明るく谷が暗くなるように表現されるのが一般的である．しかしながら，標高情報を伴わずに，凹凸感の生成により擬似的に立体感を得る方法であるため，広範囲の高低差を定量的に得ることが難しく，緩傾斜地などの地形判読には向いていない．



図 3.2.1 赤色立体図【3.7】

3.2.2 ELSAMAP

ELSAMAPは、数値標高データから色相に割り当てた高度段彩図とグレースケールの明暗に割り当てた傾斜量図を透過合成したものである。同じ標高は同じ色となるため、段丘や平野での微細な凹凸や段差、地形の広がりを見るのに適している。しかしながら、同じ標高は同色となるため、急峻な山岳地形では、凹凸が強調されにくく、落石発生源抽出には向いていない。

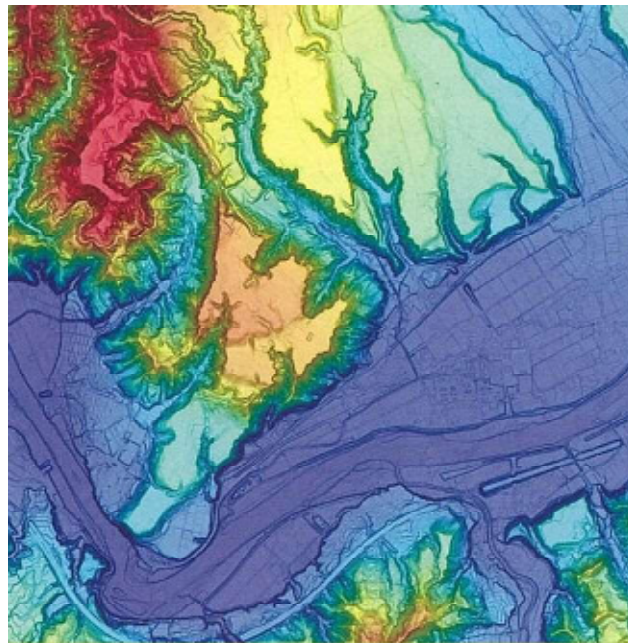


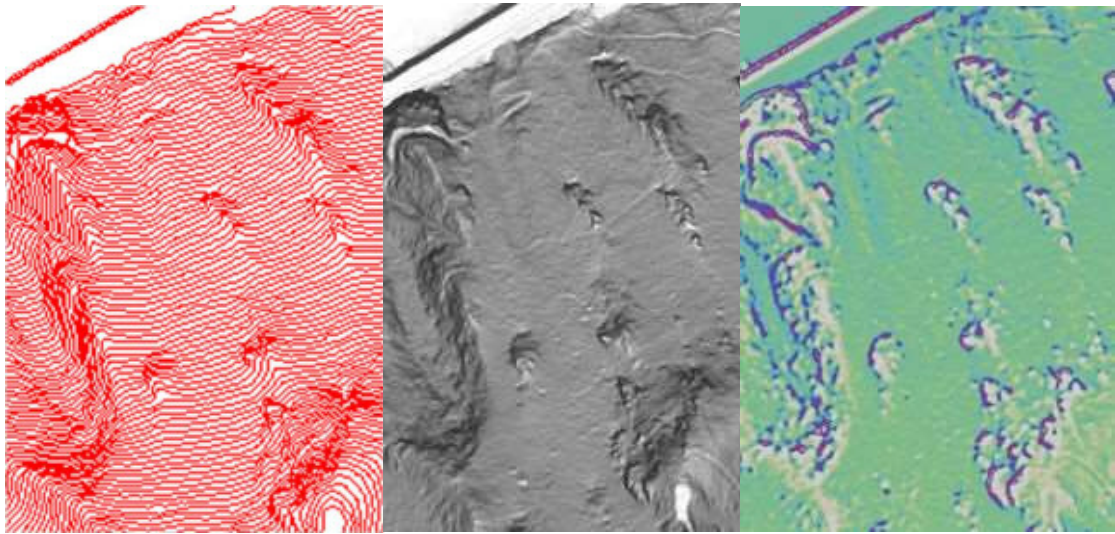
図 3.2.2 ELSAMAP 【3.8】

3.3 微地形強調図の提案

落石発生源を抽出するための高精度な図面として、前述した各表現手法の強みを生かし、弱点を補うように、傾斜の変化に感度が高い図である『傾斜量図』と尾根・谷の区別が付きやすい図である『ウェーブレット解析図』を透過合成し【3.9】、『等高線図』を重ねることによって斜面の起伏の状態を表現する手法を提案する。傾斜量図、ウェーブレット解析図および等高線図の作成は、GISソフトを使用して作成した。【3.10】

落石発生源は、山の斜面に存在する。ウェーブレット解析図を使用することにより、多色のカラーパレットで表現することで、尾根谷の凹凸具合を明確にし、山地のイメージに適した緑色系の着色となり、視覚に訴えることができる。

傾斜量図+ウェーブレット解析図（多色のカラーパレットで表現）+等高線図を『微地形強調図』と呼び、落石発生源抽出のための高精度図面として本研究に使用する（図 3.3.1）。



等高線図

傾斜量図
【透過合成】

ウェーブレット解析図

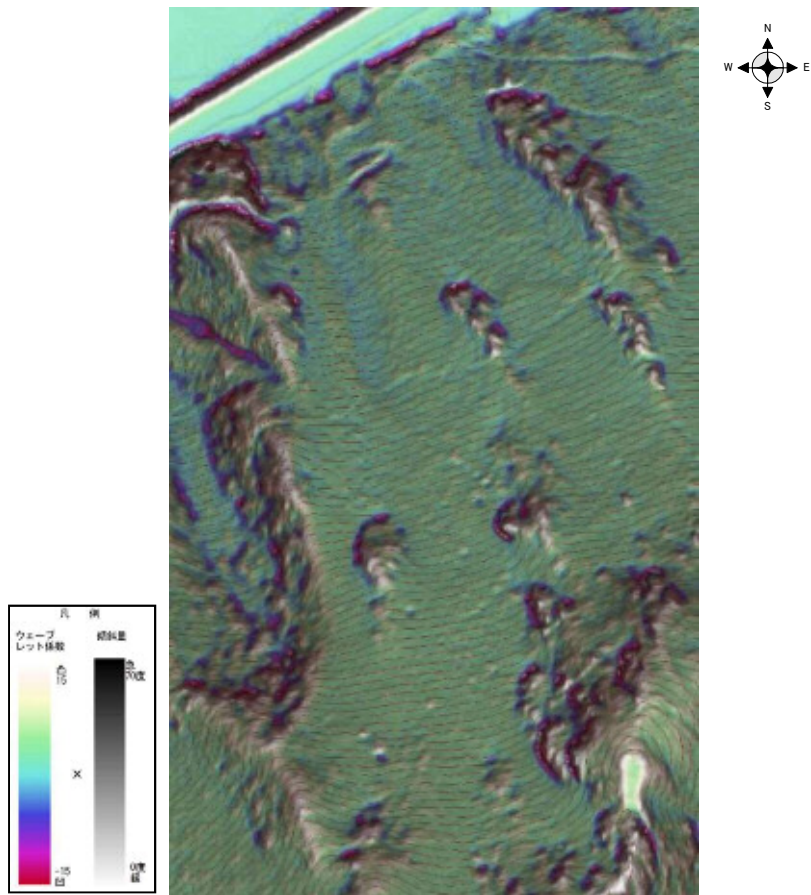


図 3.3.1 微地形強調図（傾斜量図＋ウェーブレット解析図＋等高線図）

3.4 微地形強調図による落石発生源抽出方法

微地形強調図による落石発生源抽出の手順は以下の通りであり、フローを図 3.4.1 に示す。

- (A) 落石対策事業対象現場の高密度航空レーザデータを入手する。
- (B) オリジナルデータよりグラウンドデータを作成する。
- (C) グラウンドデータから 50cm 間隔のグリッドデータを作成する。
- (D) 50cm グリッドデータを使用して、傾斜量図，ウェーブレット解析図，等高線図を作成する。そのデータを重畳させ微地形強調図を作成する。
- (E) 微地形強調図により落石発生源を机上抽出する。
- (F) 抽出結果を記載した微地形強調図を GNSS 機能を有したタブレットに取り込み，自己位置と落石発生源位置を確認しながら現地調査を行い，落石発生源の正確な位置と高さを確認する。

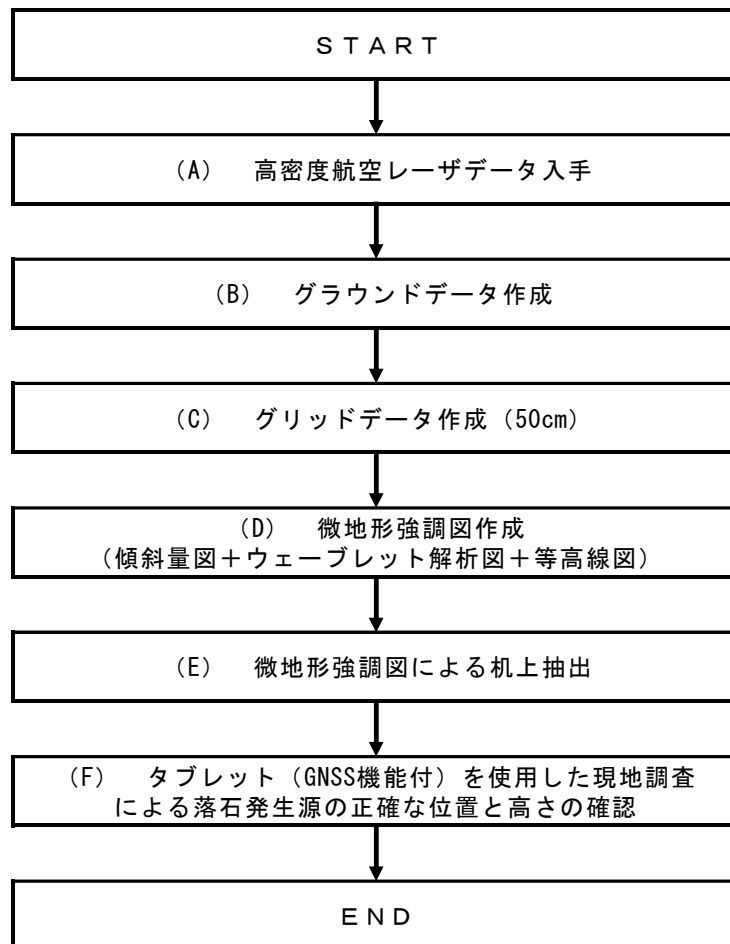


図 3.4.1 微地形強調図による落石発生源抽出フロー

参考文献

- 【3.1】 公益財団法人 日本測量調査技術協会：航空レーザ測量による災害対策事例集，
pp. 35, 2013.
- 【3.2】 神谷泉，田中耕平，長谷川裕之，黒木貴一，早田靖博，小田切聡子，政春尋志：傾斜
量図の作成とその応用，情報地質 Vol.10 No.2, pp.76-79, 1999.
- 【3.3】 Booth, A.M., Roering, J.J., Perron, J.T. : Automated landslide mapping using
spectral analysis and high-resolution topographic data, Puget Sound
lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. Geomorphology 109,
pp.132-147, 2009.
- 【3.4】 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：土木研究所資料，地
すべり地における航空レーザ測量データ解析マニュアル(案)，pp.11-12, 2009.
- 【3.5】 千葉達朗：地形表現が生み出す地図の可能性 赤色立体地図 -新し地形表現手法-，
地図 Vol.44 No. Supplement, pp.14-15, 2006,
- 【3.6】 向山栄，佐々木寿：新しい地形情報図 ELSAMAP，地図 第45巻第1号，pp.47-56，
2007.
- 【3.7】 財団法人 日本測量調査技術協会：図解 航空レーザ計測 基礎から応用まで，
pp.138, 2008.
- 【3.8】 財団法人 日本測量調査技術協会：図解 航空レーザ計測 基礎から応用まで，
pp.140, 2008.
- 【3.9】 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：土木研究所資
料，航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する
手引き(案)，p.38, 2016.
- 【3.10】 MAPCOM WORLD, PC-MAPPING ONLINE SUPPORT, <<https://www.mapcom.co.jp/>>,
(2018.09.16)

第4章 微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証

4.1 微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証フロー

航空レーザ測量データにより微地形強調図を作成し、机上抽出した落石発生源について抽出、規模、位置の精度を現地にて確認検証した。精度検証は、図 4.1.1 のフローにしたがっている。

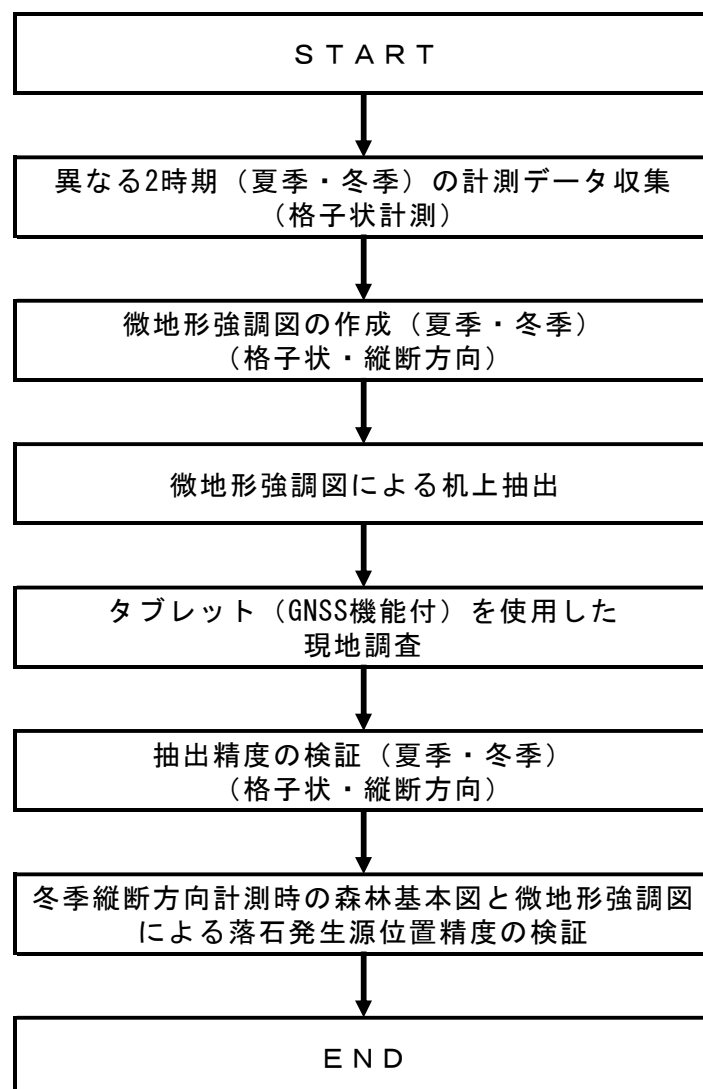


図 4.1.1 微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証フロー

4.2 検証フィールド

微地形強調図による落石発生源抽出の検証フィールドAとして、岡山県一般国道180号高梁市高倉町田井付近を選定した(図4.2.1)。一般国道180号は、高梁と新見を結ぶ緊急輸送道路に指定されており、一級河川高梁川と急峻な地形に沿った路線である。当現場は、夏季は植生が繁茂し、過去に落石が発生して道路に到達した場所である。検証フィールドAにおいて、2013年に森林基本図を使用して落石発生源抽出調査を実施している。



図 4.2.1 検証フィールドA

4.3 計測諸元

道路縦断方向のみの航空レーザ測量では、植生繁茂状況により地表面点群が粗となる懸念があったため、横断方向も計測し、格子状とした(図 4.3.1)。計測密度は、1 コース 3.5 (点/m²) に対し、50%ラップで計測することにより 7.0 (点/m²) となり、格子状に計測することにより 14.0 (点/m²) となる。

本計測に使用した航空レーザ測量システムの性能一覧表(表 4.3.1) および計測用ヘリコプター(図 4.3.2)を示す。

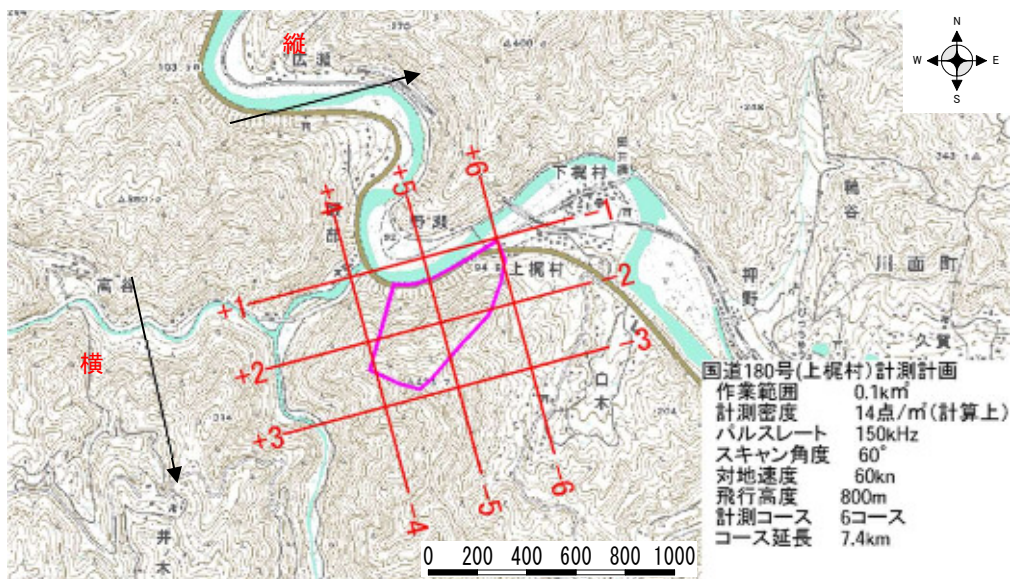


図 4.3.1 計測ルート説明図

表 4.3.1 航空レーザ測量システムの性能一覧表

LiteMapper6800-400		
運用対地高度	30 - 1600m	
スキャン角	45° - 60°	
パルスレート	80,000 - 400,000Hz	
スキャン回数	10Hz - 200Hz	
ビーム径	0.5 m rad	
レーザの安全基準	クラス 3R	
公称眼障害区域	>1.5m (NOHD), >10m (ENOH)	
計測可能高度	パルスレート	最大運用対地高度 AGL
	80,000Hz	1600m
	200,000Hz	1100m
	300,000Hz	950m
400,000Hz	800m	
装備	GNSS/IMU : IGI AEROcontrol-II デジタルカメラ : DigiCAM-50	



図 4.3.2 計測用ヘリコプター

4.4 異なる2時期の計測データの差異

異なる2時期（植生繁茂状況より時期を設定_夏季：2014年10月7日計測、冬季：2015年12月30日計測）において、格子状に計測したオリジナルデータとグラウンドデータに差異があるか検証した。

照射数に対するオリジナルデータ数を調べた。冬季は夏季に比べて、樹冠より下にレーザー光が到達しやすく、中間の枝葉や地表面からの反射が増えるためオリジナルデータ数が多くなることがわかった（図4.4.1）。

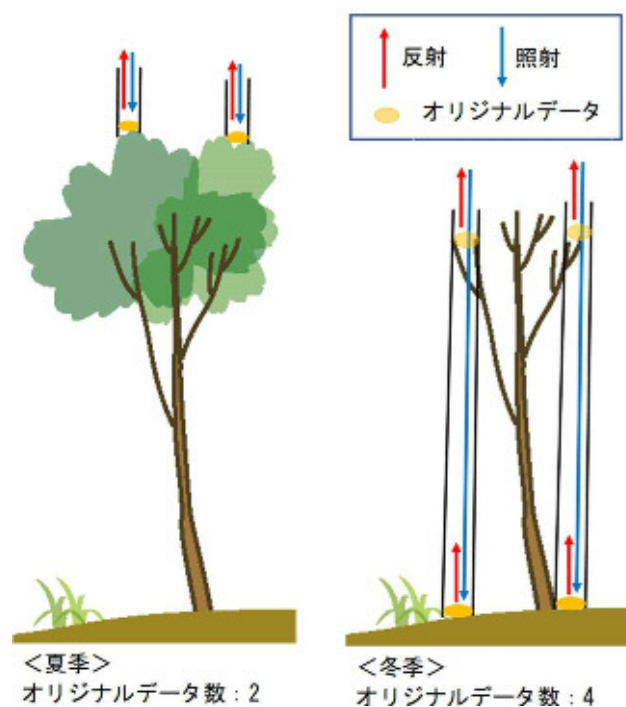


図4.4.1 異なる2時期の植生繁茂状況によるオリジナルデータの差異（左：夏季，右：冬季）

グラウンドデータについて、点密度（点/m²）を調べた。夏季は1.84（点/m²）に対し、冬季は6.86（点/m²）で、3倍以上となった。冬季の方がより地表面を捉えているといえる（表4.4.1）。

表4.4.1 航空レーザーデータ一覧表

比較対象面積：168284.194(m²)

ヘリレーザ計測日	時期	計画密度 (点/m ²)	オリジナルデータ 点密度 (点/m ²)	グラウンドデータ 点密度 (点/m ²)	グラウンドデータ 点密度比 (夏季冬季)	オリジナルデータ 点数	照射数	照射数： オリジナル データ数	グラウンドデータ 点数
2014/10/7	夏季	14	51.496	1.840	1	8,666,033	4,454,825	1:1.94	309,668
2015/12/30	冬季	14	82.755	6.859	3.728	13,926,429	3,912,460	1:3.55	1,154,295

4.5 机上抽出

異なる2時期において、50cm間隔のグリッドデータから微地形強調図を作成した。

微地形強調図における落石発生源は、天端部は、凸型地形となっているため、斜面の傾斜量によって白～茶色傾向で表現される。崖部は、急傾斜となっているため、黒色傾向で表現される。下部は凹型となっているため、赤色傾向で表現される（図4.5.1）。

上記を考慮し、机上にて抽出を行う。

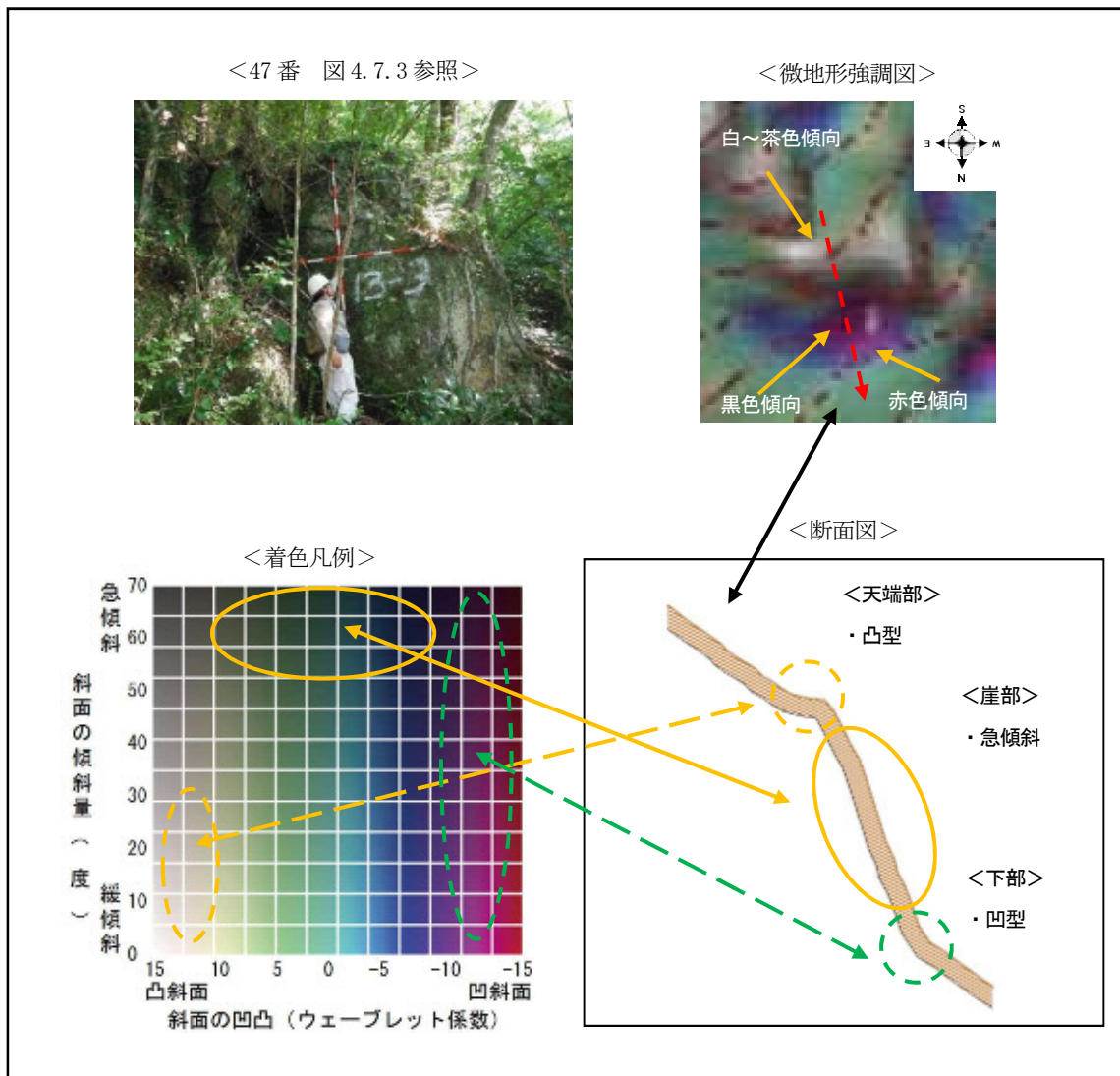


図 4.5.1 微地形強調図による落石発生源の表示例

4.6 タブレット（GNSS機能付）を使用した現地調査

山中では図面のみでの自己位置の把握が困難であり，微地形強調図と実際の落石発生源との相関を確認するには時間を要する．そこで，図 4.6.1 に示す自己位置を取得可能な端末【4.1】と端末上で微地形強調図（机上抽出済）と自己位置を重畳できる GIS【4.2】を用いて現地調査を行った．

端末には位置情報に関する機能として A-GPS（Assisted GPS）および GNSS（Global Navigation Satellite System）受信の機能が搭載されている．端末の位置情報で使用する A-GPS は，各携帯キャリアが提供するネットワーク網を利用し，各基地局から得られる概の位置や GPS 衛星の軌跡情報など，GPS 測位に必要なデータを端末へ配信し，端末側では GPS 時刻情報を衛星から受信することで測位できる方式である．通常の GPS 測位に比べ，比較的受信しやすい GPS 時刻のみを利用するため，樹木などで上空視界が開けていない山中においても測位が可能である（図 4.6.2）．



図 4.6.1 自己位置取得可能端末

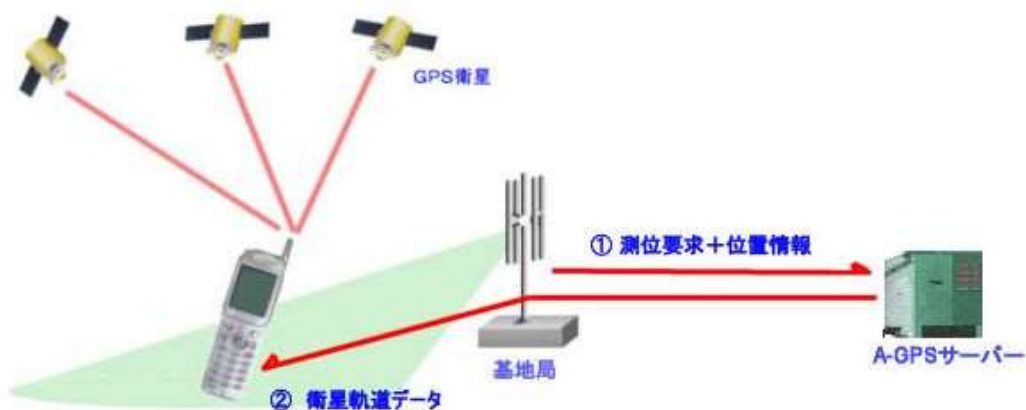


図 4.6.2 A-GPS の仕組み【4.3】

使用した GIS のイメージを図 4.6.3 に示す。落石調査では、図面に加え、カメラや防災カルテ等の既存資料を持ちながらの調査を実施し、現場から戻った後、写真やメモと調査箇所を突合整理することが一般である。現地にて調査箇所にポイント情報を作成し、端末の機能を用いて作成・撮影したメモや写真をポイント情報の属性として自動的に結びつけることが可能となる。また、事前に電子化した防災カルテ等を登録することで、現地調査に持っていく荷物を極力減らすことができる。【4.4】

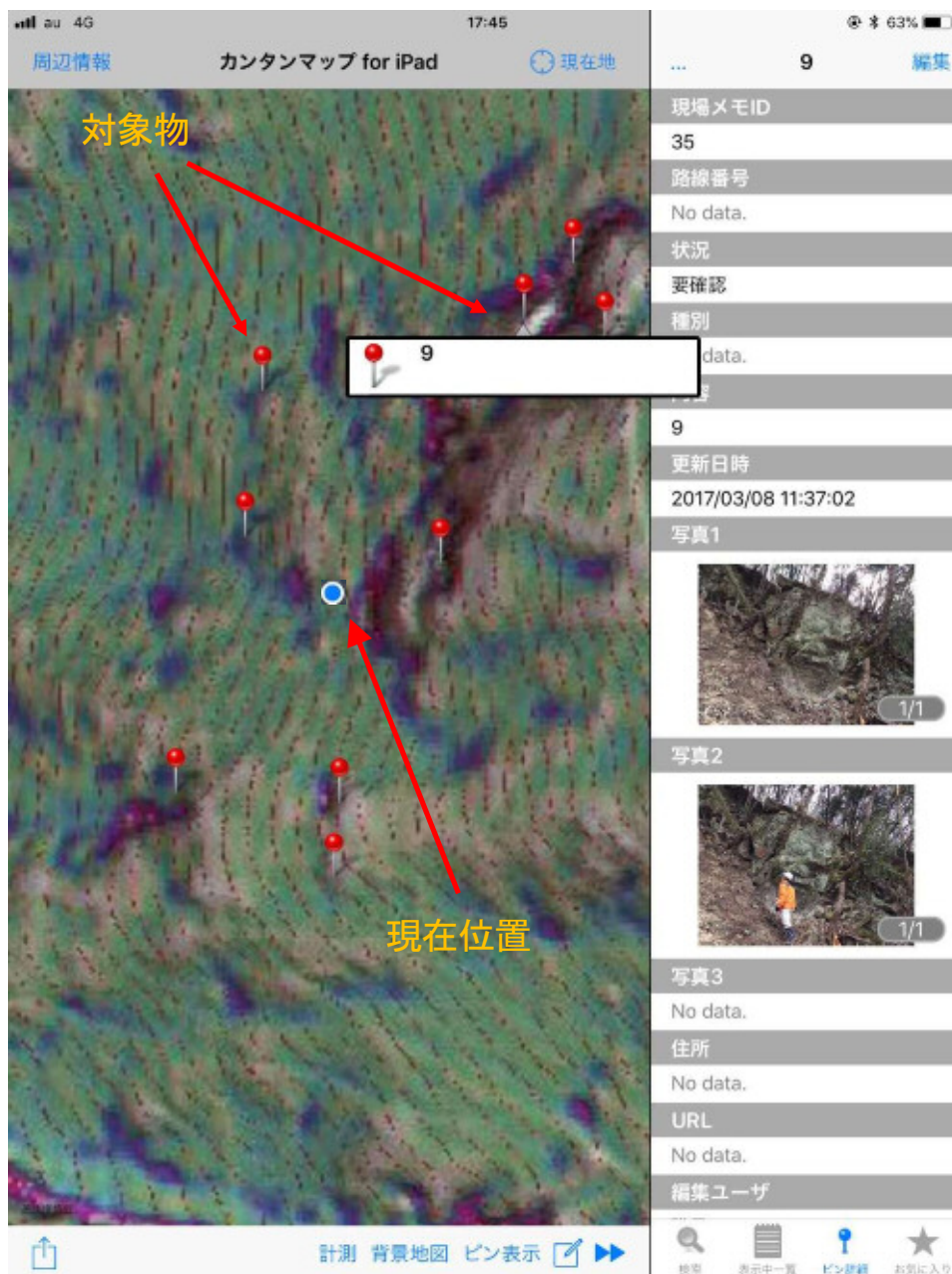


図 4.6.3 GIS イメージ

4.7 異なる2時期の微地形強調図による落石発生源抽出の差異

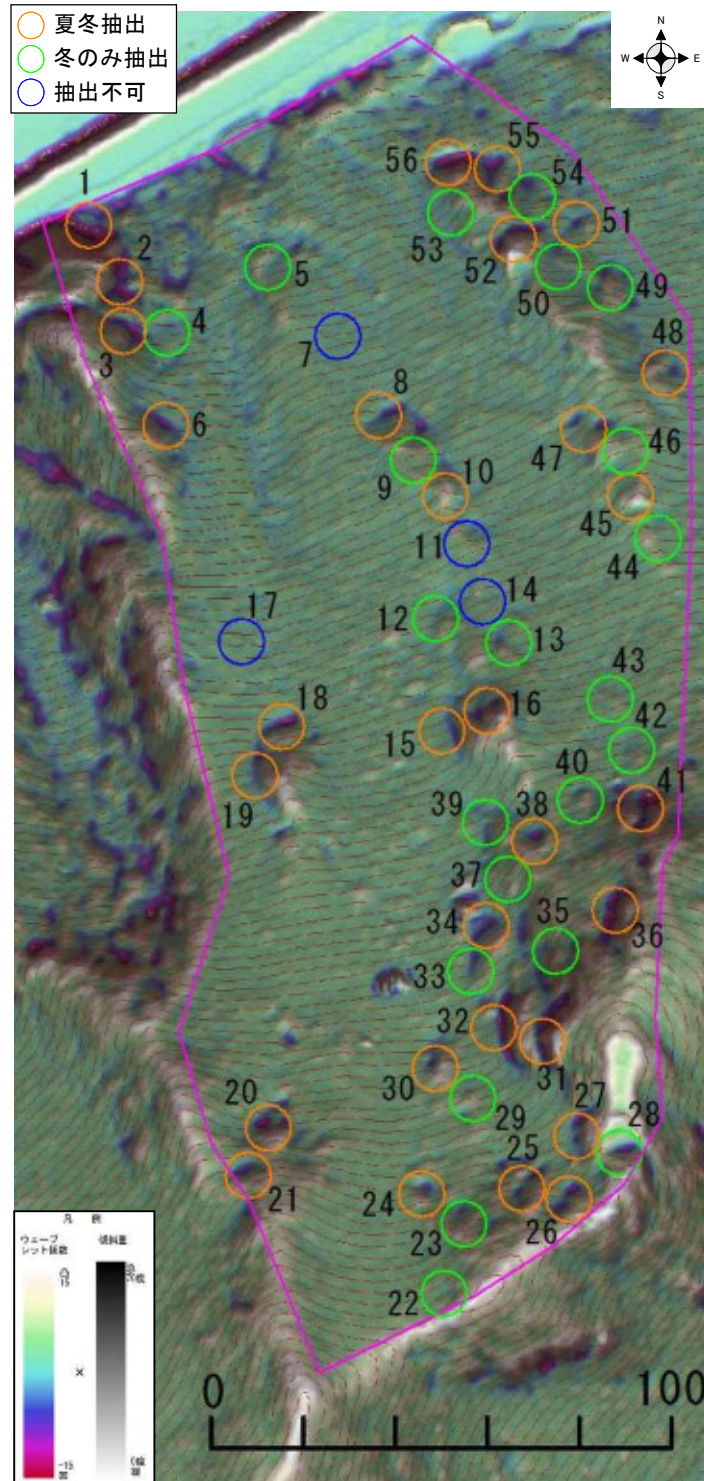


図 4.7.1 微地形強調図による落石発生源抽出結果（背景図：夏季）

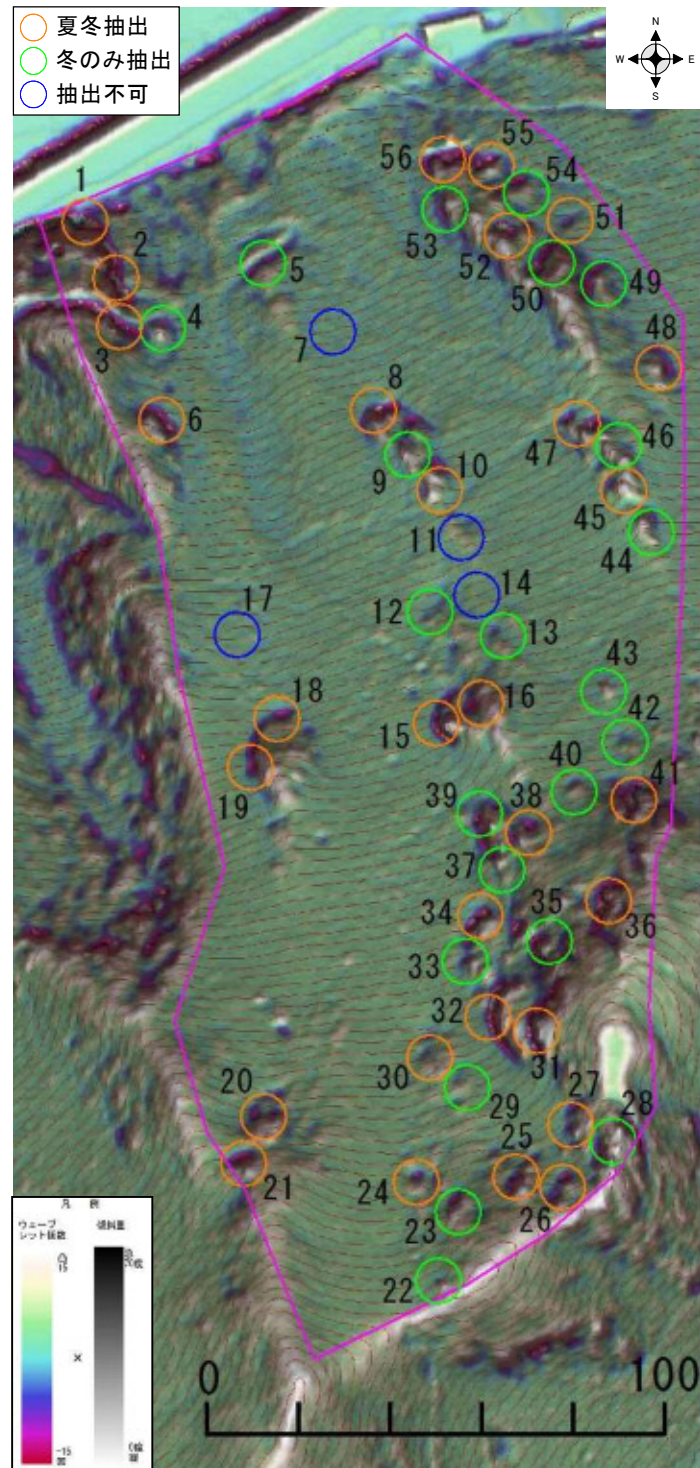


図 4.7.2 微地形強調図による落石発生源抽出結果（背景図：冬季）

落石発生源について、机上抽出結果と現地調査結果の整合性の確認を行った【4.5】（図 4.7.1, 4.7.2）。落石発生源抽出結果および現況写真を図 4.7.3～4.7.5 に示す。

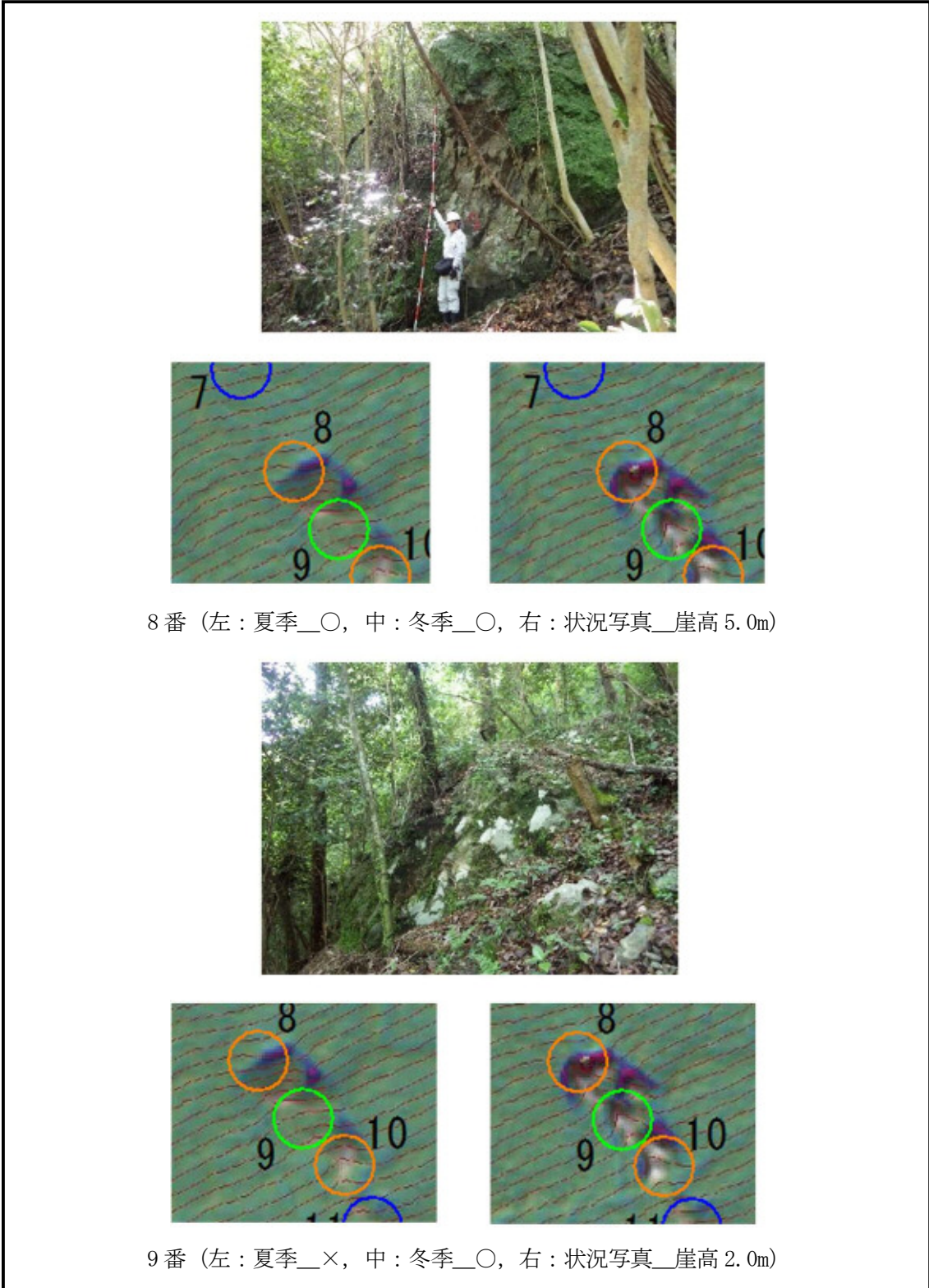


図 4.7.3 落石発生源抽出結果および現況写真 (その1)

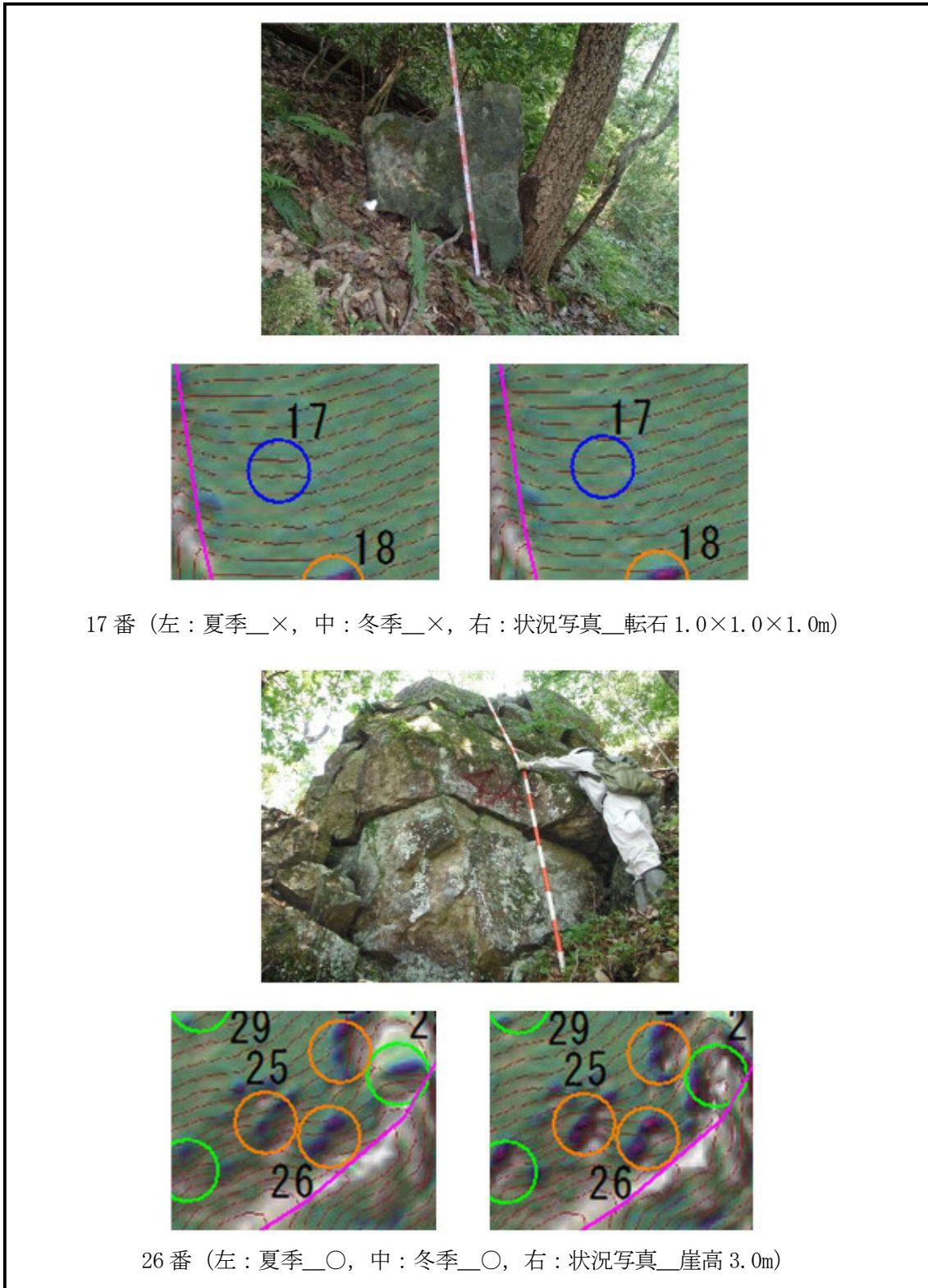


図 4.7.4 落石発生源抽出結果および現況写真 (その2)



図 4.7.5 落石発生源抽出結果および現況写真 (その3)

微地形強調図により落石発生源の机上抽出を行い、現地にて抽出結果の確認を行った。落石発生源（急崖）の抽出率は、夏季は 55.6%に対し、冬季は 96.3%となり（表 4.7.1），冬季においては、ほぼ抽出することができた。

14 番については、3.0m の高さがあるにも関わらず、落葉がなかった影響で抽出できなかった（図 4.7.6）。

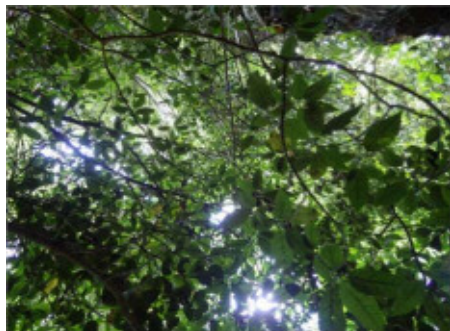


図 4.7.6 落石発生源（14 番）

夏季においては、植生の影響により、高さが 6.0m（39, 49 番）ある箇所でも抽出できない箇所があった（図 4.7.7）。落石発生源（転石）は、2.0m 角以下であり、夏季・冬季とも抽出できなかった（図 4.7.8）。

冬季に計測すれば、落石発生源（急崖）は、ほぼ抽出できることがわかった。

当現場において夏季・冬季の点群で断面表示したものを作成した。夏季は植生の影響でグラウンドに到達している点が少ない。冬季は多くのレーザー光がグラウンドに届いていることがわかった（図 4.7.9）。

表 4.7.1
微地形強調図による落石発生源の抽出率（夏季・冬季）

落石対象物番号	転石（石径）			急崖高（m）	微地形強調図による抽出	
	縦	横	高		夏	冬
1	-	-	-	10.0	○	○
2	-	-	-	6.0	○	○
3	-	-	-	3.0	○	○
4	-	-	-	3.0	×	○
5	-	-	-	3.0	×	○
6	-	-	-	4.0	○	○
7	1.0	1.0	1.0	-	×	×
8	-	-	-	5.0	○	○
9	-	-	-	2.0	×	○
10	-	-	-	4.0	○	○
11	-	-	-	2.0	×	×
12	-	-	-	2.0	×	○
13	-	-	-	2.0	×	○
14	-	-	-	3.0	×	×
15	-	-	-	4.0	○	○
16	-	-	-	3.0	○	○
17	1.0	1.0	1.0	-	×	×
18	-	-	-	4.0	○	○
19	-	-	-	4.0	○	○
20	-	-	-	4.0	○	○
21	-	-	-	4.0	○	○
22	-	-	-	2.0	×	○
23	-	-	-	3.0	×	○
24	-	-	-	3.0	○	○
25	-	-	-	4.0	○	○
26	-	-	-	3.0	○	○
27	-	-	-	5.0	○	○
28	-	-	-	5.0	×	○
29	-	-	-	2.0	×	○
30	-	-	-	2.0	○	○
31	-	-	-	8.0	○	○
32	-	-	-	6.0	○	○
33	-	-	-	2.0	×	○
34	-	-	-	4.0	○	○
35	-	-	-	4.0	×	○
36	-	-	-	8.0	○	○
37	-	-	-	2.0	×	○
38	-	-	-	6.0	○	○
39	-	-	-	6.0	×	○
40	-	-	-	3.0	×	○
41	-	-	-	4.0	○	○
42	-	-	-	2.0	×	○
43	-	-	-	2.0	×	○
44	-	-	-	3.0	×	○
45	-	-	-	2.0	×	○
46	-	-	-	2.0	○	○
47	-	-	-	4.0	○	○
48	-	-	-	4.0	○	○
49	-	-	-	6.0	×	○
50	-	-	-	4.0	×	○
51	-	-	-	2.0	○	○
52	-	-	-	3.0	○	○
53	-	-	-	4.0	×	○
54	-	-	-	4.0	×	○
55	-	-	-	6.0	○	○
56	-	-	-	6.0	○	○
転石抽出率					0	0
急崖抽出率					55.6	96.3



図 4.7.7 落石発生源 (39 番)



図 4.7.8 落石発生源 (7 番)

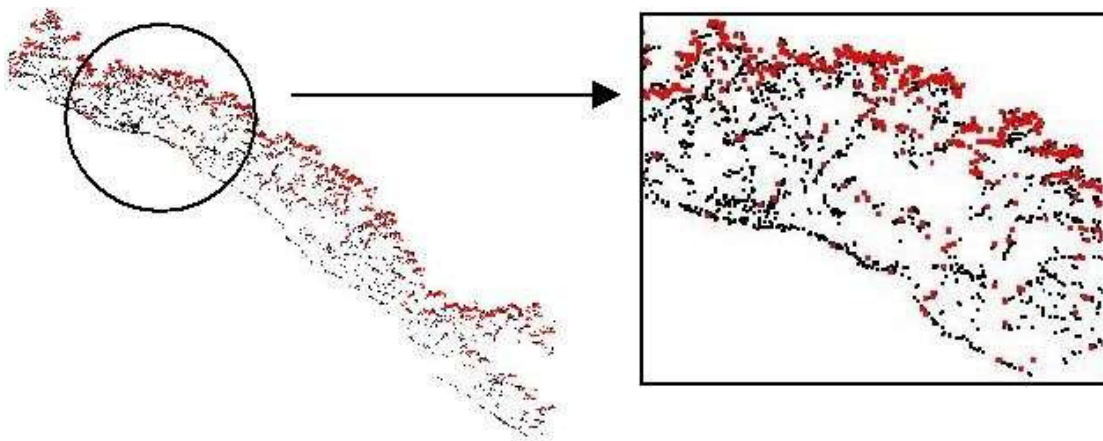


図 4.7.9 点群断面表示 (赤：夏季 黒：冬季)

微地形強調図により，落石発生源以外のものも捉えることができた (図 4.7.10) .

緑丸は倒木状況である．上空が解放されるため，夏季・冬季とも抽出できていた．根こそぎ倒壊した状態であれば，周辺の色の変化がなく，黒く円状に表現される．落石対象物の表現とは違うことがわかった (図 4.7.11) .

橙丸は，幅 2.0m 程度の未整備の山道であるが，冬季は鮮明に表現されている (図 4.7.12) .

赤丸は，夏季においては，落石群があるように見えるが，実際は 2.0m 前後の密集した低木や草地であることが現地踏査により判明し，地表面のデータがほぼ取れておらず，植生の上をグラウンドとして分類していた．冬季では表現されていない (図 4.7.13) .



図 4.7.10 微地形強調図その他特記事項 (背景図：左_夏季, 右_冬季)

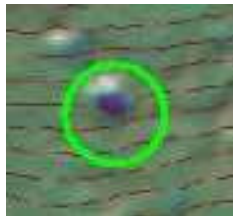


図 4.7.11 倒木状況図
(図 4.7.10 : 緑丸参照)



図 4.7.12 現況状況写真
(図 4.7.10 : 橙丸参照)



図 4.7.13 現況状況写真 (図 4.7.9 : 赤丸参照, 夏季)

4.8 冬季における道路縦断方向計測データと格子状計測データの微地形強調図による落石発生源抽出の差異

異なる 2 時期 (夏季・冬季) の高密度航空レーザデータについて検証した結果, 冬季に計測すべきことがわかった。

異なる 2 時期 (夏季・冬季) の比較では, 格子状計測データを使用した, 通常のレーザ計測業務は, 計測延長が長くなれば費用が高くなるため, 道路縦断方向のみの計測が一般的である。

そこで, 冬季において, 道路縦断方向計測データを使用した 50cm 間隔のグリッドデータから微地形強調図を作成し, 落石発生源 (急崖, 転石) について机上抽出結果と現地照査結果の整合性の確認を行った (図 4.8.1, 図 4.8.2) . 冬季における道路縦断方向計測データと格子状計測データとの微地形強調図による差異を検証した。

微地形強調図による落石発生源 (急崖) の抽出率は, 道路縦断方向では 88.9%に対し, 格子状では 96.3%となった (表 4.8.1) . 道路縦断方向のグラウンドデータの点密度は, 格子状の半分の 3.4 (点/m²) であるが, 抽出率は微減であった。

微地形強調図による落石発生源 (転石) は, 2.0m 角以下であり, 両タイプとも抽出できなかった。

冬季に道路縦断方向計測データのみを使用しても, 落石発生源 (急崖) をほぼ抽出できることがわかった。

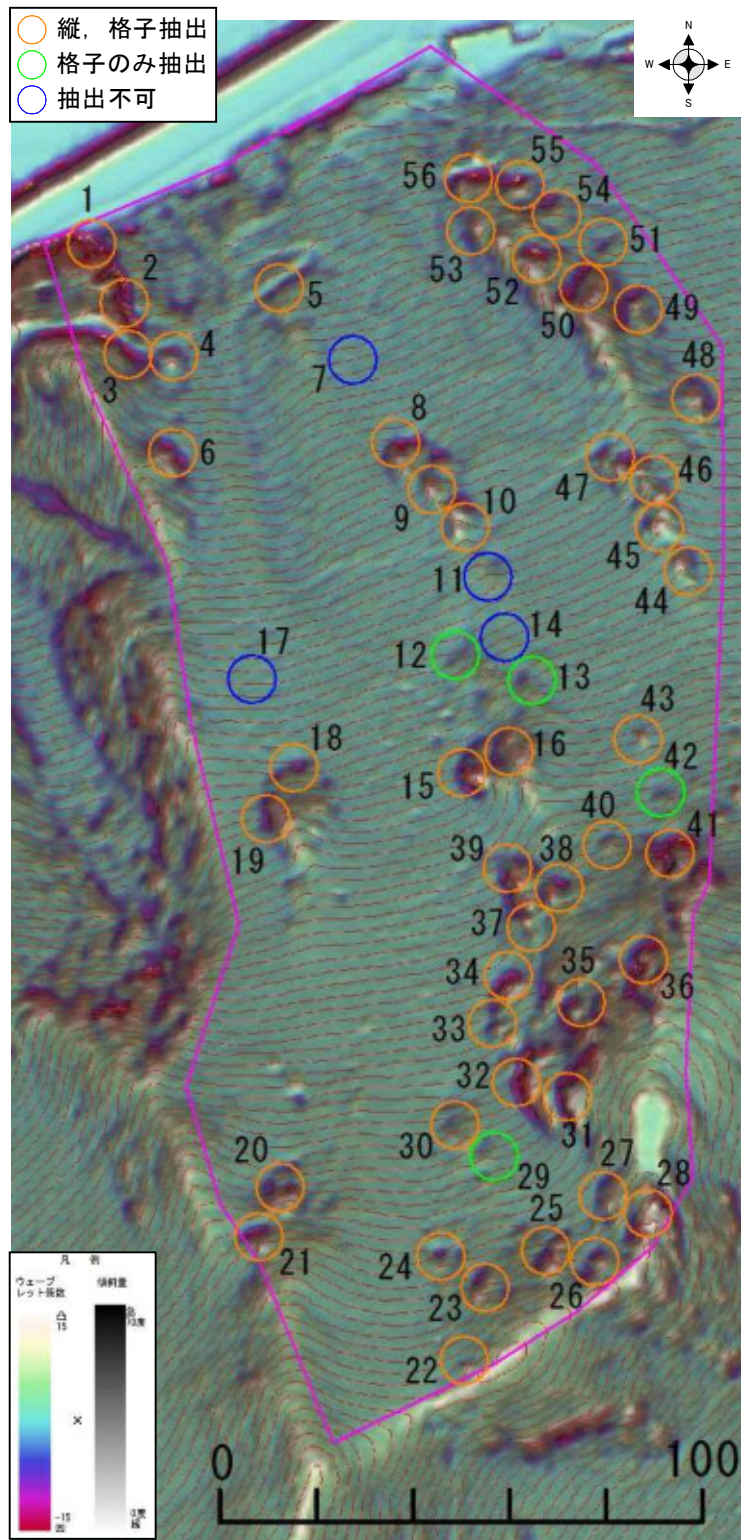


図 4.8.1 微地形強調図による落石発生源抽出結果
 (背景図：冬季，道路縦断)

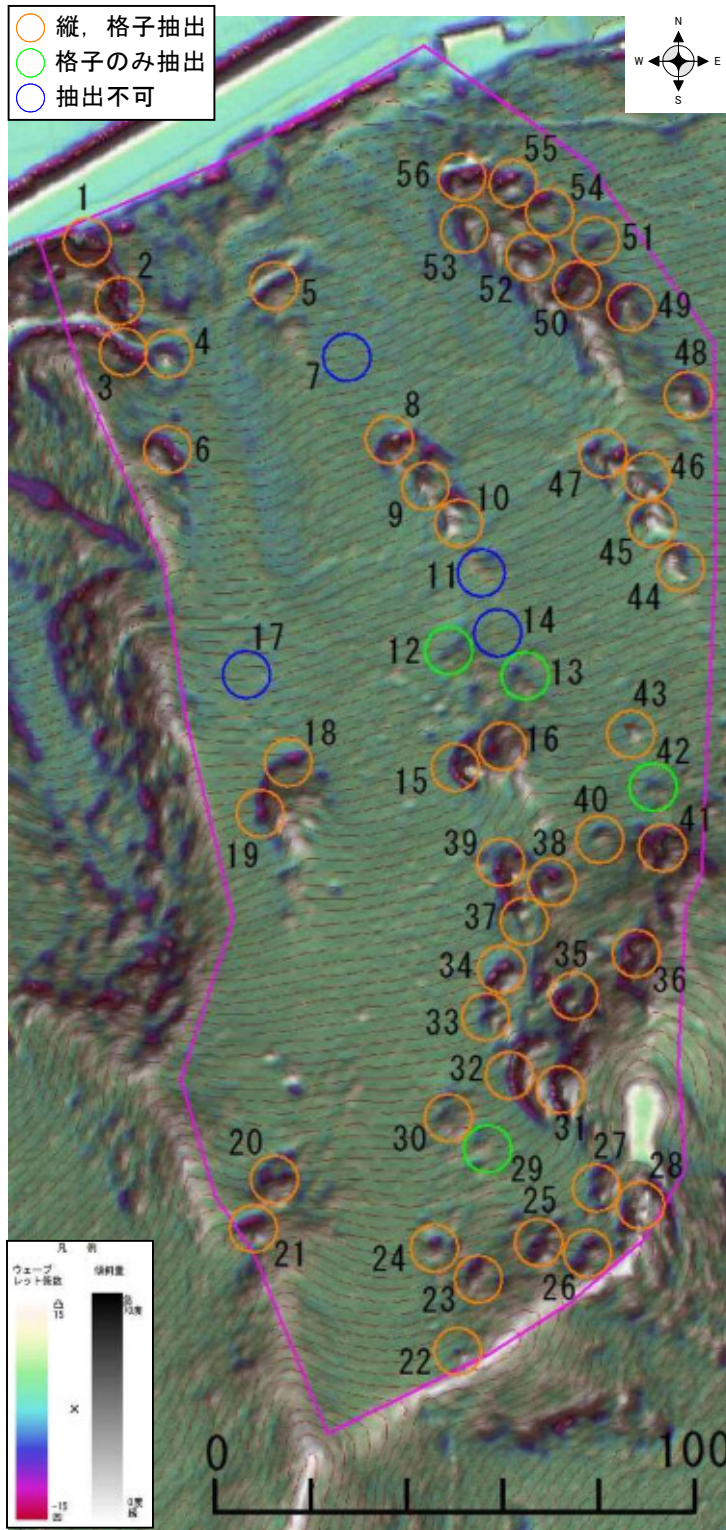


図 4.8.2 微地形強調図による落石発生源抽出結果
(背景図：冬季，格子状)

表 4.8.1 微地形強調図による落石発生源の抽出率（冬季：道路縦断，格子状）

落石対象物番号	転石(石径)		急崖高(m)	微地形強調図による抽出		
	縦(m)	横(m)		冬	縦	冬
1	-	-	10.0	○	○	○
2	-	-	6.0	○	○	○
3	-	-	3.0	○	○	○
4	-	-	3.0	○	○	○
5	-	-	3.0	○	○	○
6	-	-	4.0	○	○	○
7	1.0	1.0	1.0	-	×	×
8	-	-	5.0	○	○	○
9	-	-	2.0	○	○	○
10	-	-	4.0	○	○	○
11	-	-	2.0	×	×	×
12	-	-	2.0	×	×	○
13	-	-	2.0	×	×	○
14	-	-	3.0	×	×	×
15	-	-	4.0	○	○	○
16	-	-	3.0	○	○	○
17	1.0	1.0	1.0	-	×	×
18	-	-	4.0	○	○	○
19	-	-	4.0	○	○	○
20	-	-	4.0	○	○	○
21	-	-	4.0	○	○	○
22	-	-	2.0	○	○	○
23	-	-	3.0	○	○	○
24	-	-	3.0	○	○	○
25	-	-	4.0	○	○	○
26	-	-	3.0	○	○	○
27	-	-	5.0	○	○	○
28	-	-	5.0	○	○	○
29	-	-	2.0	×	×	○
30	-	-	2.0	○	○	○
31	-	-	8.0	○	○	○
32	-	-	6.0	○	○	○
33	-	-	2.0	○	○	○
34	-	-	4.0	○	○	○
35	-	-	4.0	○	○	○
36	-	-	8.0	○	○	○
37	-	-	2.0	○	○	○
38	-	-	6.0	○	○	○
39	-	-	6.0	○	○	○
40	-	-	3.0	○	○	○
41	-	-	4.0	○	○	○
42	-	-	2.0	×	×	○
43	-	-	2.0	○	○	○
44	-	-	3.0	○	○	○
45	-	-	2.0	○	○	○
46	-	-	2.0	○	○	○
47	-	-	4.0	○	○	○
48	-	-	4.0	○	○	○
49	-	-	6.0	○	○	○
50	-	-	4.0	○	○	○
51	-	-	2.0	○	○	○
52	-	-	3.0	○	○	○
53	-	-	4.0	○	○	○
54	-	-	4.0	○	○	○
55	-	-	6.0	○	○	○
56	-	-	6.0	○	○	○
転石抽出率				0	0	0
抽出率				88.9	96.3	96.3

4.9 森林基本図を利用した落石発生源抽出調査との差異

平成 25 年に森林基本図を利用した落石発生源の調査を実施した結果がある。森林基本図の等高線のみを頼りにして現地調査を実施した経緯がある。その調査結果と微地形強調図を利用しての調査結果を比較した（図 4.9.1）。比較の結果、両者には高低差 20m、平面位置 20m 以上差が出ている箇所もあった。高低差の精度不良は、落石エネルギーに影響する。平面位置の精度不良は、落石捕捉影響範囲（落石方向）に影響する。

微地形強調図を利用して、落石発生源位置を抽出すれば位置精度が向上することがわかった。

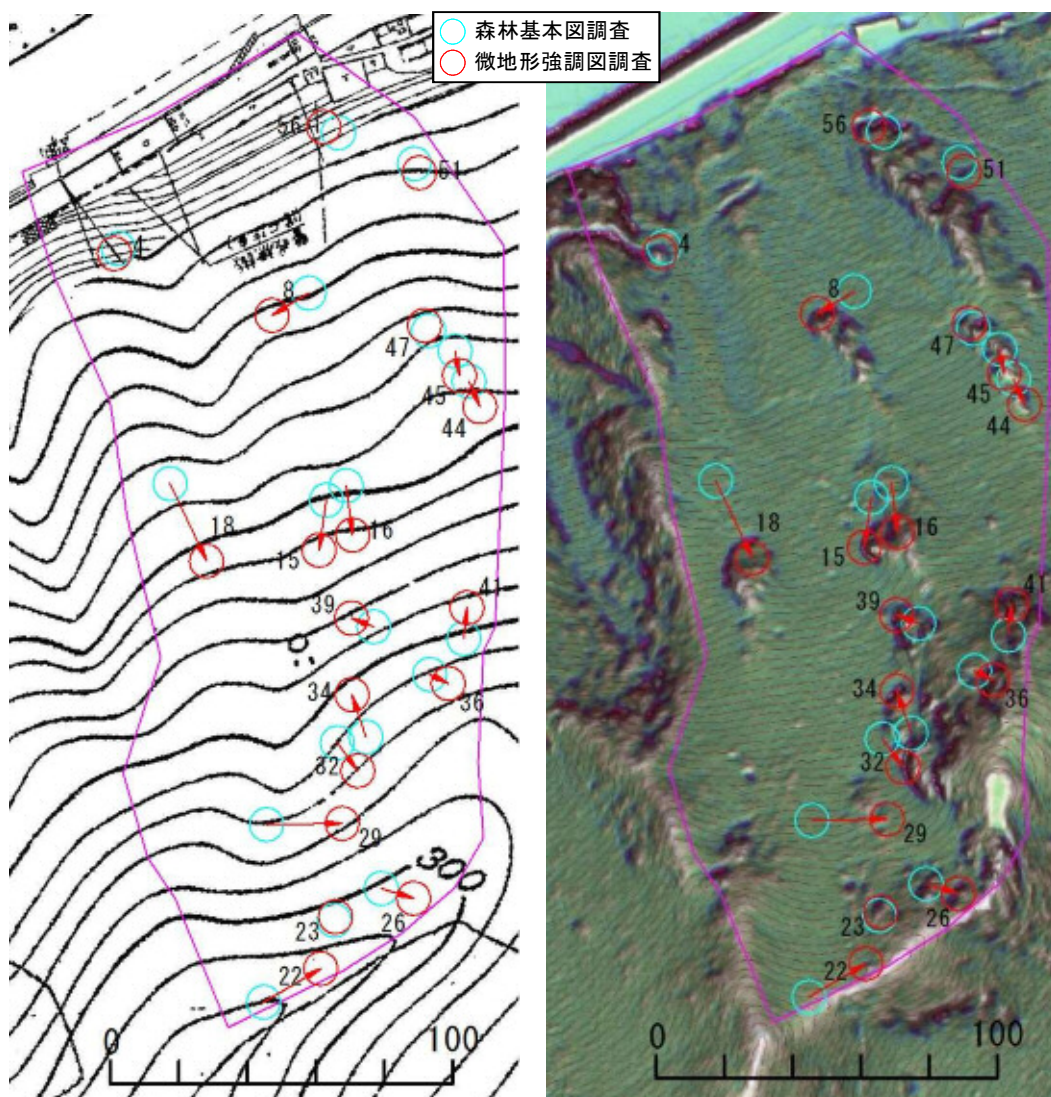


図 4.9.1 森林基本図を利用した落石発生源抽出結果と微地形強調図による落石発生源抽出結果の差異

参考文献

- 【4.1】 Apple Inc. : iPad, <<https://www.apple.com/jp/ipad/>>, (2018.09.16)
- 【4.2】 あっとクリエーション株式会社 : かんたんマップ, <<http://www.at-creation.co.jp/system/map.html>>, (2018.09.16)
- 【4.3】 ケータイ Watch : ケータイ用語の基礎知識, <<https://k-tai.watch.impress.co.jp/img/ktw/docs/350/721/html/agps.jpg.html>>, (2018.09.16)
- 【4.4】 吉川慶, 宮下征士, 嶋田幸二, 市原学, 崎田晃基, 鈴木茂之, 西山哲 : 微地形強調図とタブレット端末を用いた落石調査の効率化に向けた基礎的検証, 平成30年度(第70回) 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp. 318-321, 2018.
- 【4.5】 菊地輝行, 秦野輝儀, 千田良道 : 航空レーザ測量を用いた急崖・転石群の判読精度向上の試み, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 35-36, 2014.

第5章 微地形強調図による落石発生源抽出検証（美作市）

5.1 検証フィールド

微地形強調図による落石発生源抽出について検証した結果、冬季に道路縦断方向のみ計測することで、多くの落石発生源が抽出できることがわかった。

他現場でも同様の結果が得られるか検証した。検証フィールドB（図 5.1.1）として、落石事故が発生した岡山県一般県道福本和気線美作市真神地内を選定した。中国自動車道美作ICとTIサーキットを結ぶ重要路線である。



図 5.1.1 検証フィールドB

5.2 計測諸元

冬季に高密度航空レーザデータを入力するために、航空レーザ測量を実施した。本計測に使用した航空レーザ測量システムの性能一覧表（表 4.3.1）および計測用ヘリコプター（図 4.3.2）を示す。2017年2月8日の落葉した状況下で道路縦断方向に計測（図 5.2.1）し、グラウンドデータの点密度は4.0（点/m²）であった。

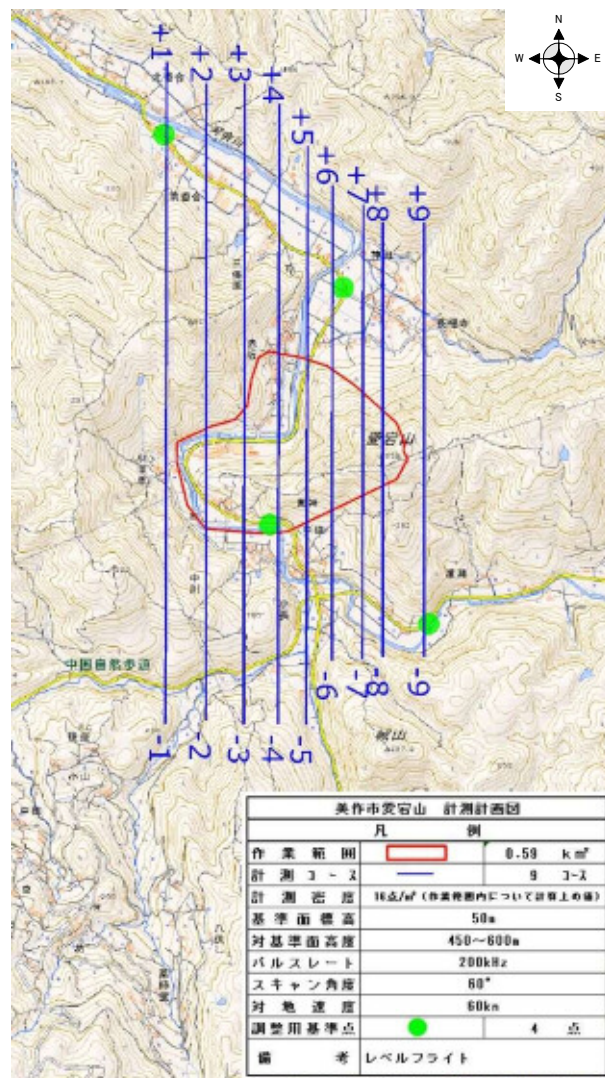


図 5.2.1 計測ルート説明図

5.3 微地形強調図による落石発生源抽出結果

50cm 間隔のグリッドデータから微地形強調図を作成し、机上抽出結果と現地調査結果の整合性の確認を行った (図 5.3.1)。

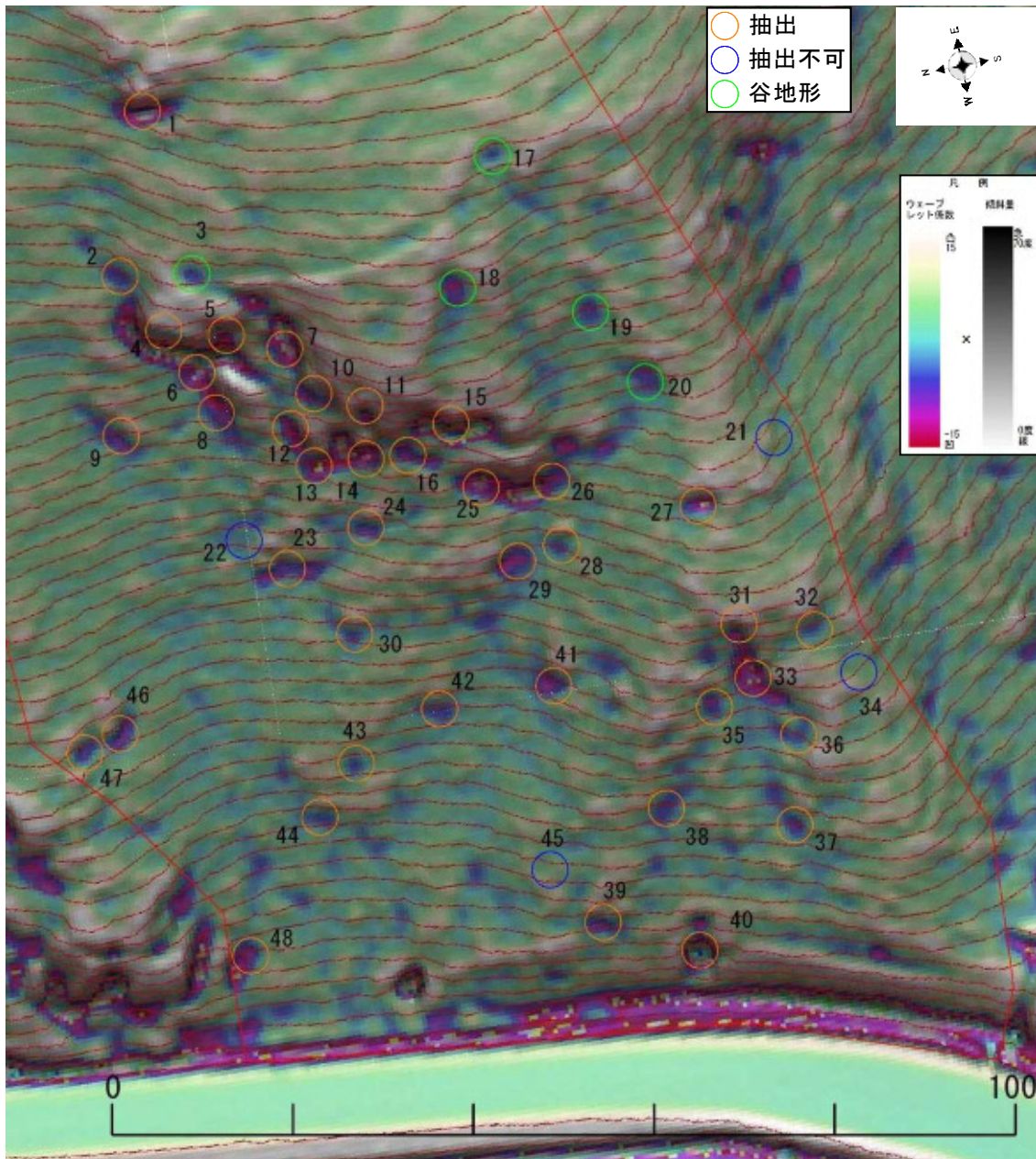


図 5.3.1 微地形強調図による落石発生源抽出結果 (検証フィールドB)

落石発生源（急崖）の抽出率は、97.5%であり（表5.3.1）、ほぼ抽出することができた。

21番については、崖高が2.0mであったが、落葉がなかった影響で抽出できなかった。

落石発生源（転石）は、2.0m角以下であり、抽出できなかった。

谷形状で崩壊地形（3, 17, 8, 19, 20）となっている箇所が確認された。落石発生源との違いは、黒ずんでいる箇所の上方および側面が白みがる特徴があることがわかった（図5.3.2）。

検証の結果、冬季の道路縦断方向計測データを使用することにより、落石発生源（急崖）をほぼ抽出できることがわかった。

落石発生源抽出結果および現況写真を図5.3.3に示す。

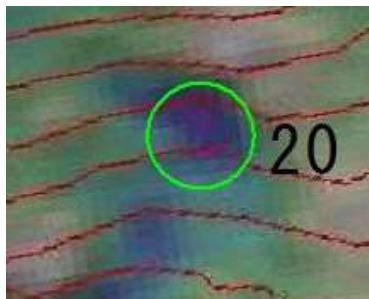


図 5.3.2 谷地形崩壊状況抽出（20 番）

表 5.3.1 微地形強調図による落石発生源の抽出率（検証フィールドB）

落石対象物番号	転石（石径）			急崖高（m）	微地形強調図による抽出
	縦	横	高		
1	-	-	-	4.0	○
2	-	-	-	2.0	○
3	谷地形			-	-
4	-	-	-	8.0	○
5	-	-	-	8.0	○
6	-	-	-	5.0	○
7	-	-	-	6.0	○
8	-	-	-	5.0	○
9	-	-	-	3.0	○
10	-	-	-	6.0	○
11	-	-	-	6.0	○
12	-	-	-	3.0	○
13	-	-	-	4.0	○
14	-	-	-	4.0	○
15	-	-	-	4.0	○
16	-	-	-	3.0	○
17	谷地形			-	-
18	谷地形			-	-
19	谷地形			-	-
20	谷地形			-	-
21	-	-	-	2.0	×
22	1.0	1.0	1.5	-	×
23	-	-	-	3.0	○
24	-	-	-	2.0	○
25	-	-	-	6.0	○
26	-	-	-	8.0	○
27	-	-	-	3.0	○
28	-	-	-	2.0	○
29	-	-	-	4.0	○
30	-	-	-	2.0	○
31	-	-	-	4.0	○
32	-	-	-	2.0	○
33	-	-	-	4.0	○
34	1.0	1.0	1.0	-	×
35	-	-	-	3.0	○
36	-	-	-	2.0	○
37	-	-	-	3.0	○
38	-	-	-	3.0	○
39	-	-	-	3.0	○
40	-	-	-	12.0	○
41	-	-	-	3.0	○
42	-	-	-	2.0	○
43	-	-	-	3.0	○
44	-	-	-	2.0	○
45	0.5	1.0	1.0	-	×
46	-	-	-	3.0	○
47	-	-	-	3.0	○
48	-	-	-	8.0	○
抽出率					97.5

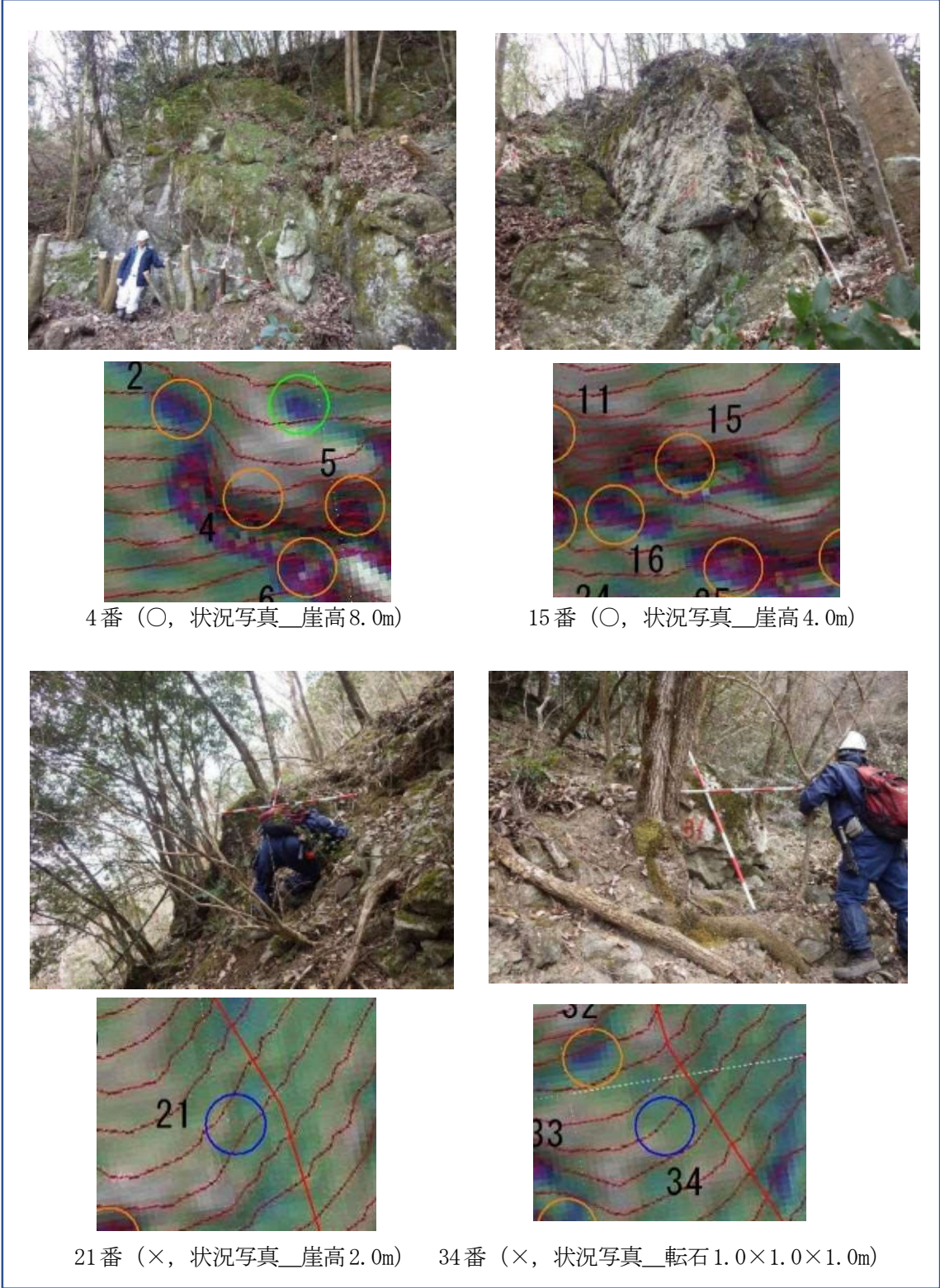


図 5.3.3 落石発生源抽出結果および現況写真 (検証フィールドB)

第6章 微地形強調図による落石発生源抽出検証（岡山市）

6.1 検証フィールド

検証フィールドB（美作市）においても落石発生源の抽出率が高い結果となった。信憑性を高めるために、さらに別の検証フィールドCを選定し、微地形強調図による落石発生源抽出の検証を行った。交通量の多い緊急輸送路である岡山県一般国道53号岡山市北区草生地内の道路防災カルテの要対策箇所を選定した。



図 6.1.1 検証フィールドC

6.2 計測諸元

冬季に高密度航空レーザデータを入手するために、航空レーザ測量を実施した。本計測に使用した航空レーザ測量システムの性能一覧表（表 4.3.1）および計測用ヘリコプター（図 4.3.2）を示す。2016年2月22日の落葉した状況下で道路縦断方向に計測（図 6.2.1）し、グラウンドデータの点密度は6.0（点/m²）であった。

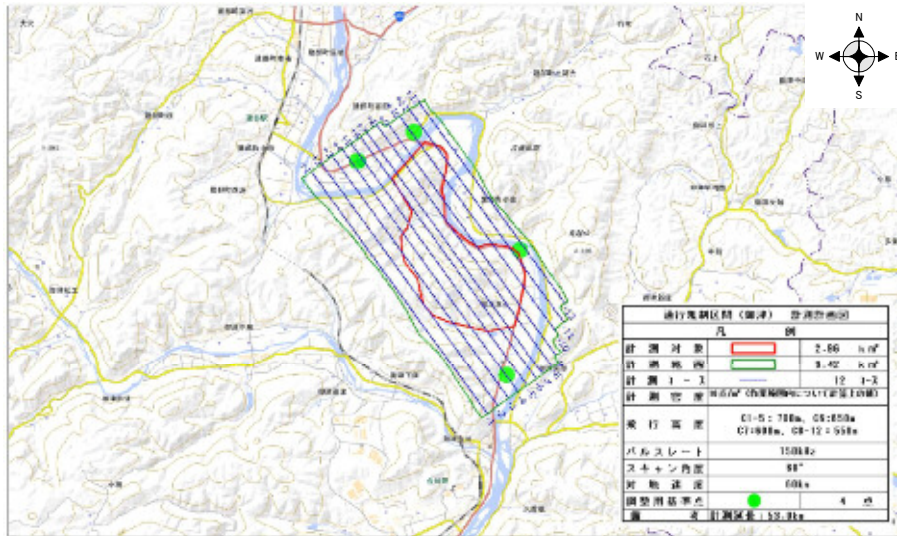


図 6.2.1 計測ルート説明図

6.3 微地形強調図による落石発生源抽出結果

防災カルテのカルテ対応箇所の中から3つのエリアを選定し（図 6.3.1）、検証した。エリア1、エリア2、エリア3において、50cm 間隔のグリッドデータから微地形強調図を作成し、机上抽出結果と現地調査結果の整合性の確認を行った。点密度が多いため、2.0m 以下の落石発生源についても検証した。【6.1】

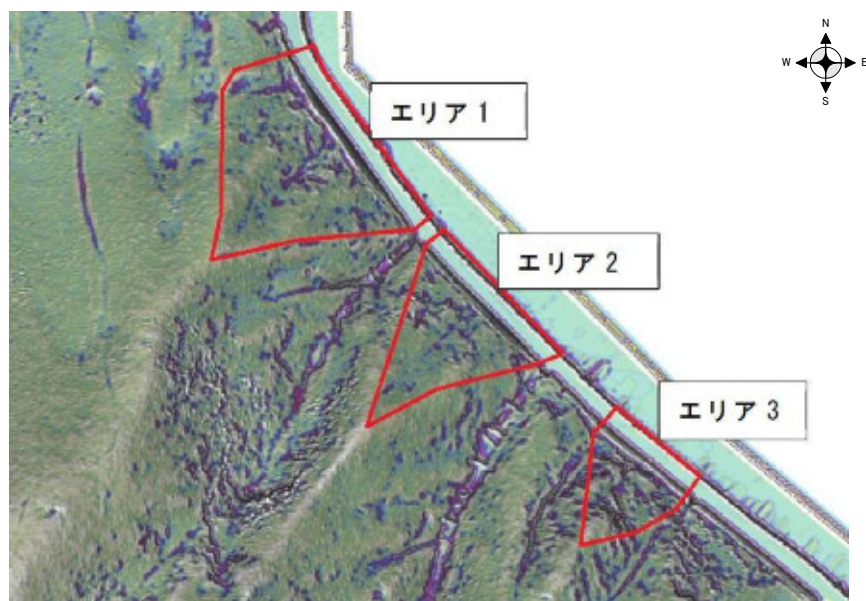


図 6.3.1 調査箇所説明図

6.3.1 エリア1

エリア1における微地形強調図による落石発生源抽出結果を図6.3.2に示す。落石発生源抽出結果および現況写真を図6.3.3に示す。

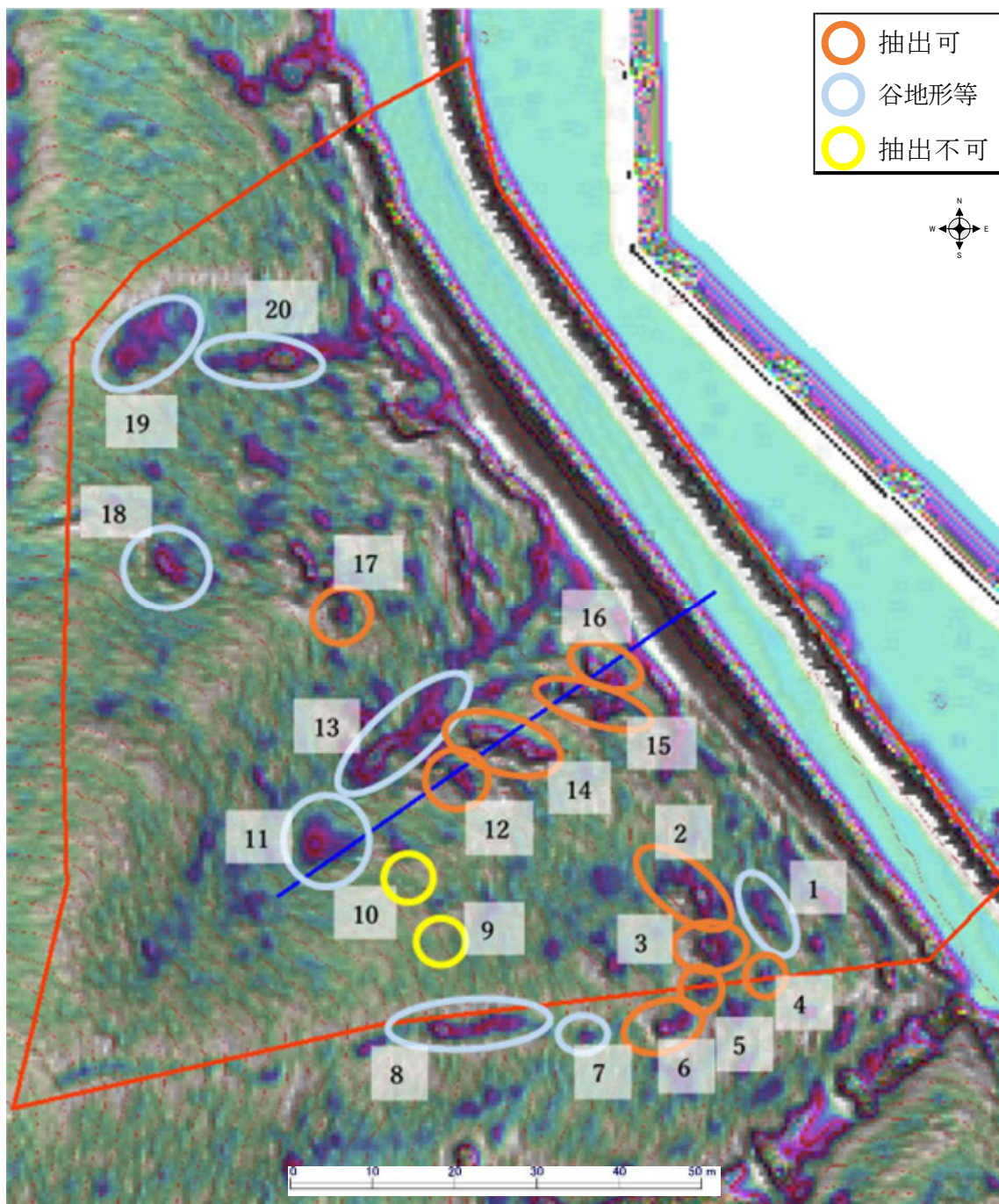


図6.3.2 微地形強調図による落石発生源抽出結果 (エリア1)

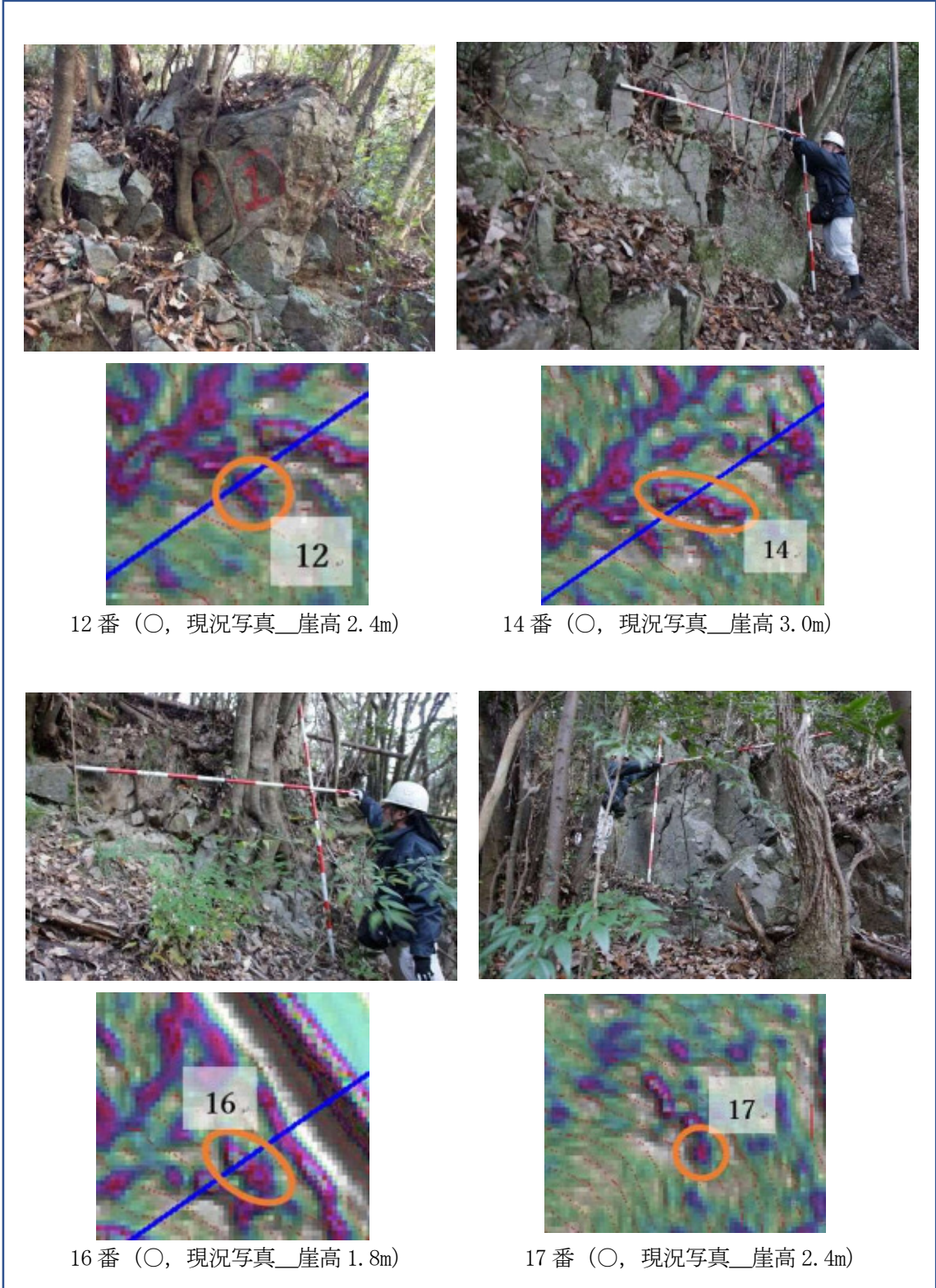


図 6. 3. 3 落石発生源抽出結果および現況写真 (エリア 1)

落石発生源の抽出率は、高さ2.0m以上では100%、高さ2.0m以下では66.7%であった(表6.3.1)。

1番については、遷緩線より急斜面となっており、赤黒く表現されたと考えられる(図6.3.4)。

11番については、微地形強調図において地表面近くの常緑樹が赤黒く表現され、急斜面として捉えられていた。常緑樹の葉の密度が高かったため、レーザが地表面に届かず、常緑樹の上部を地表面と捉えていた(図6.3.5)。

8, 13, 18, 19, 20番については、谷地形となっている(図6.3.6)(図5.3.2参照)。

7番については、斜面上方が白色傾向となっておらず、さらに谷形状でもない。現地確認した結果、崩壊地形であった(図6.3.7)。

9, 10番については、ともに急崖高さ1.2mの落石発生源であり、抽出できなかった。9番の上空は植生により覆われており、植生の影響でレーザが地表面に届かず、正確な地表面を捉えることができなかった(図6.3.8)。10番においては、上空の写真より、植生の影響は考えにくい。50cmグリッドであるため、抽出できなかった(図6.3.9)。

表 6.3.1 微地形強調図による落石発生源の抽出率 (エリア 1)

落石対象物番号	地形形状	急崖		微地形強調図による抽出	
		①高(2m以上)	②高(2m以下)	①	②
		(m)	(m)		
1	急斜面	-	-	-	-
2	-	3.0	-	○	-
3	-	-	1.6	-	○
4	-	-	1.2	-	○
5	-	-	1.6	-	○
6	-	2.0	-	○	-
7	崩壊地形	-	-	-	-
8	谷地形	-	-	-	-
9	-	-	1.2	-	×
10	-	-	1.2	-	×
11	常緑樹	-	-	-	-
12	-	2.4	-	○	-
13	谷地形	-	-	-	-
14	-	3.0	-	○	-
15	-	2.6	-	○	-
16	-	-	1.8	-	○
17	-	2.4	-	○	-
18	谷地形	-	-	-	-
19	谷地形	-	-	-	-
20	谷地形	-	-	-	-
抽出率				100.0	66.7

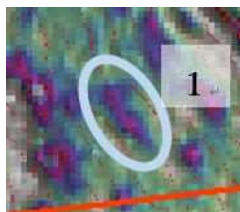


図 6.3.4 急斜面状況 (1番)

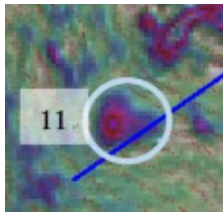


図 6.3.5 常緑樹 (11番) 急傾斜面と認識



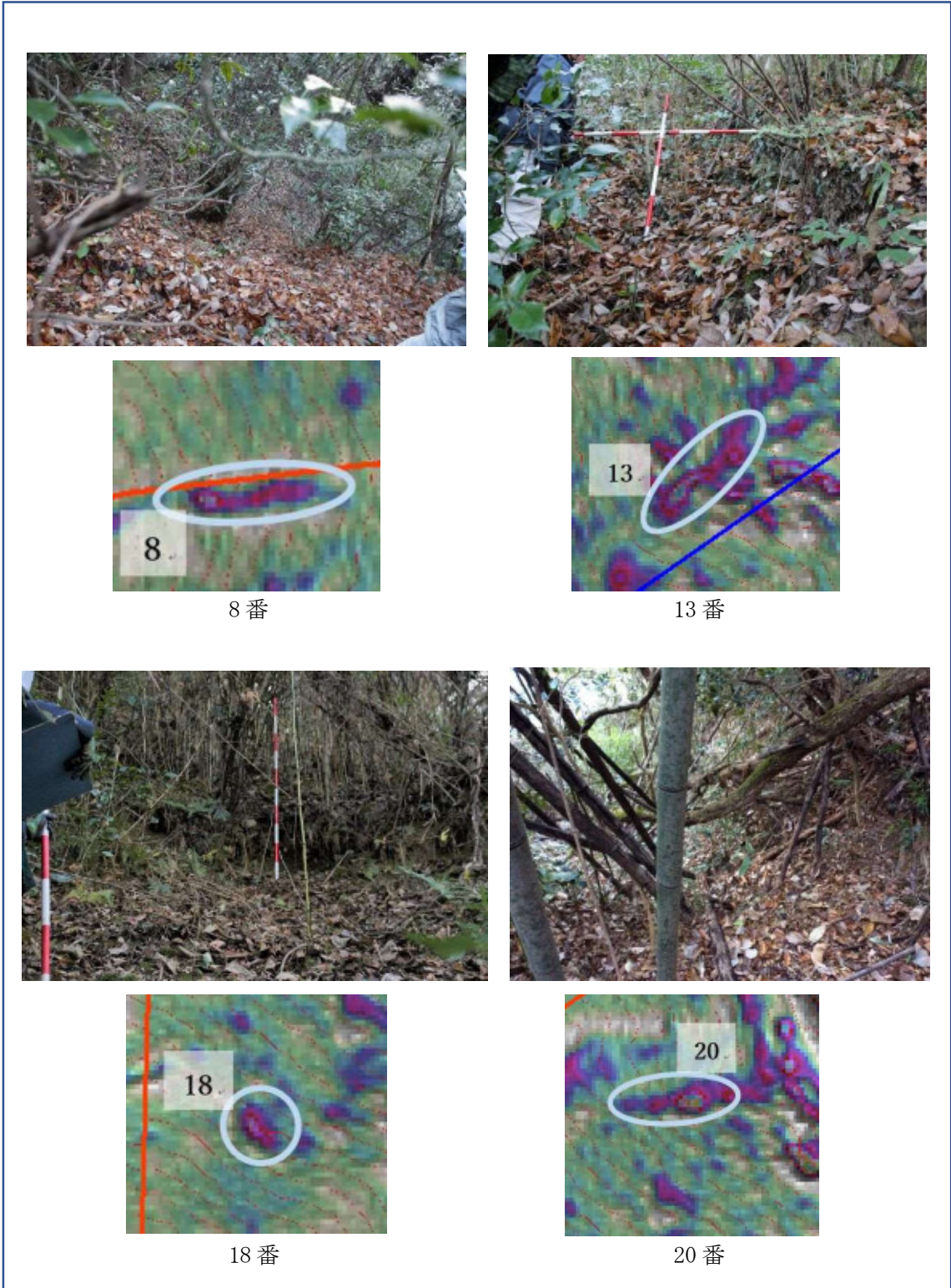


図 6.3.6 谷地形状況 (エリア 1)



图 6.3.7 崩壊地形状況 (7 番)

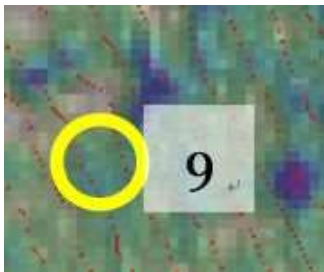


图 6.3.8 落石発生源__× (9 番)

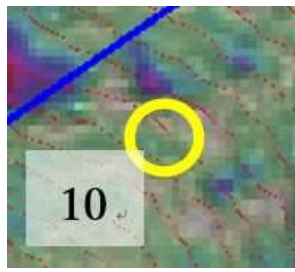


图 6.3.9 落石発生源__× (10 番)

6.3.2 エリア2

エリア2における微地形強調図による落石発生源抽出結果を図6.3.10に示す。落石発生源抽出結果および現況写真を図6.3.11に示す。

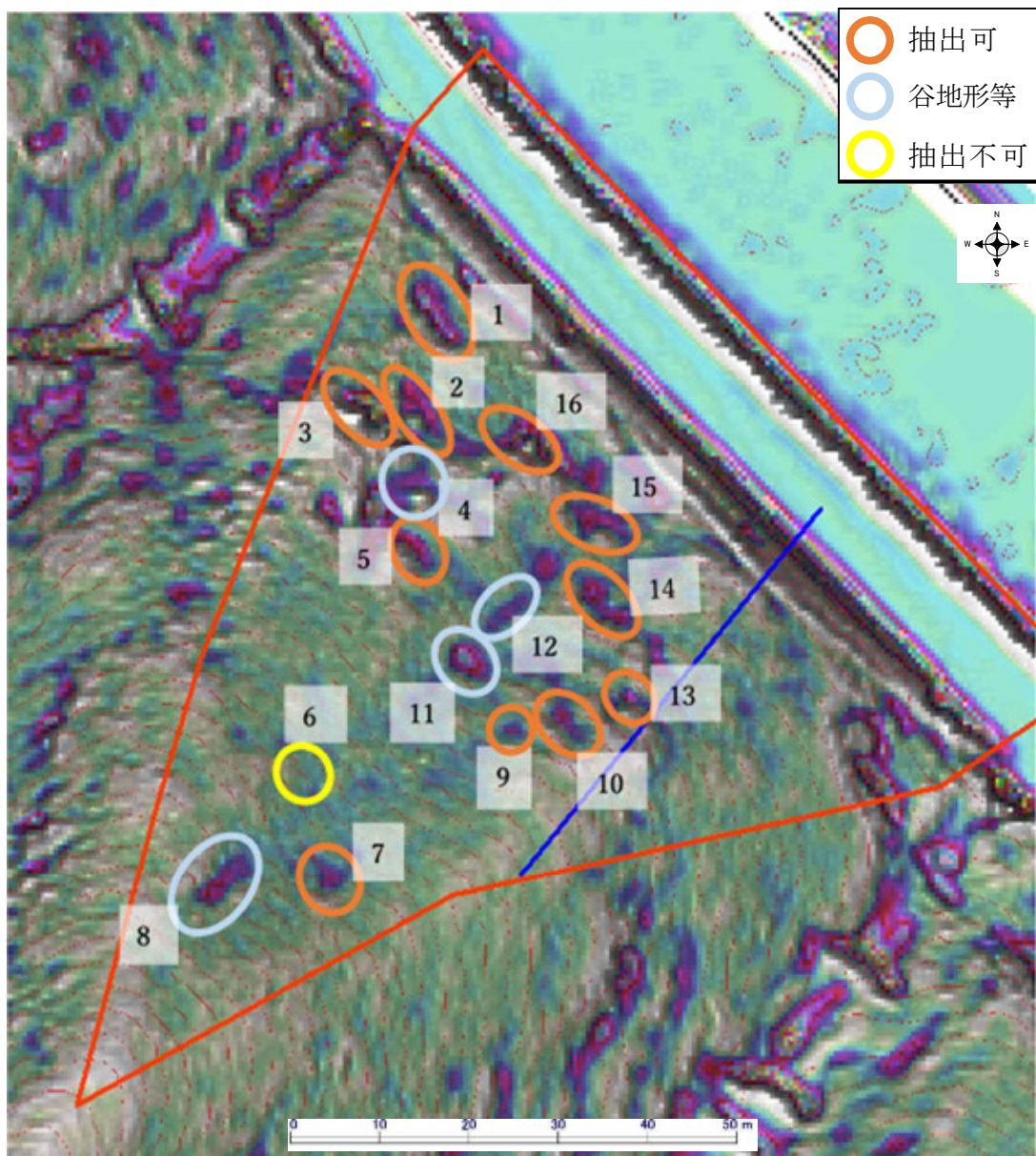


図 6.3.10 微地形強調図による落石発生源抽出結果（エリア2）



図 6.3.11 落石発生源抽出結果および現況写真 (エリア 2)

落石発生源の抽出率は、高さ 2.0m 以上では 100%，高さ 2.0m 以下では 75.0%であった（表 6.3.2）。

11 番については、斜面上方が白色傾向となっておらず、さらに谷形状でもない。現地確認した結果、崩壊地形であった（図 6.3.12）。

6 番については、急崖高さ 0.6m の落石発生源であり、抽出できなかった。上空の写真より、植生の影響は考えにくい。50cm グリッドであるため、抽出できなかった（図 6.3.13）。

4, 8, 12 番については、谷地形となっている（図 6.3.14）（図 5.3.2 参照）。

表 6.3.2 微地形強調図による落石発生源の抽出率（エリア 2）

落石対象物番号	地形形状	急崖		微地形強調図による抽出	
		①高 (2m以上)	②高 (2m以下)	①	②
		(m)	(m)		
1	-	2.2	-	○	-
2	-	5.0	-	○	-
3	-	2.2	-	○	-
4	谷地形	-	-	-	-
5	-	3.0	-	○	-
6	-	-	0.6	-	×
7	-	2.4	-	○	-
8	谷地形	-	-	-	-
9	-	-	1.2	-	○
10	-	2.4	-	○	-
11	崩壊地形	-	-	-	-
12	谷地形	-	-	-	-
13	-	2.0	-	○	-
14	-	-	1.4	-	○
15	-	-	1.9	-	○
16	-	4.2	-	○	-
抽出率				100.0	75.0

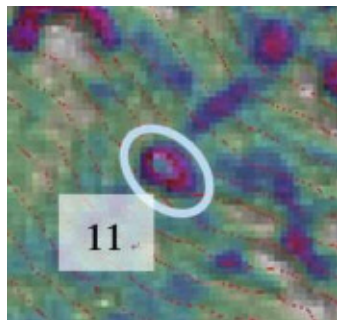


図 6.3.12 崩壊地形状況（11 番）

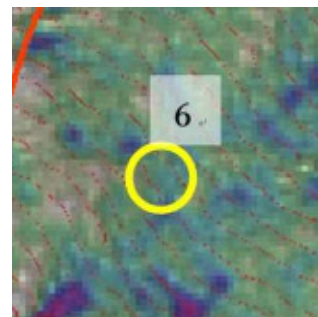
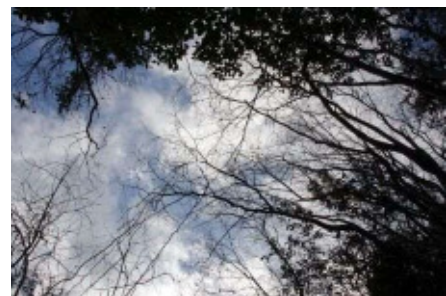


図 6.3.13 落石発生源__×（6 番）

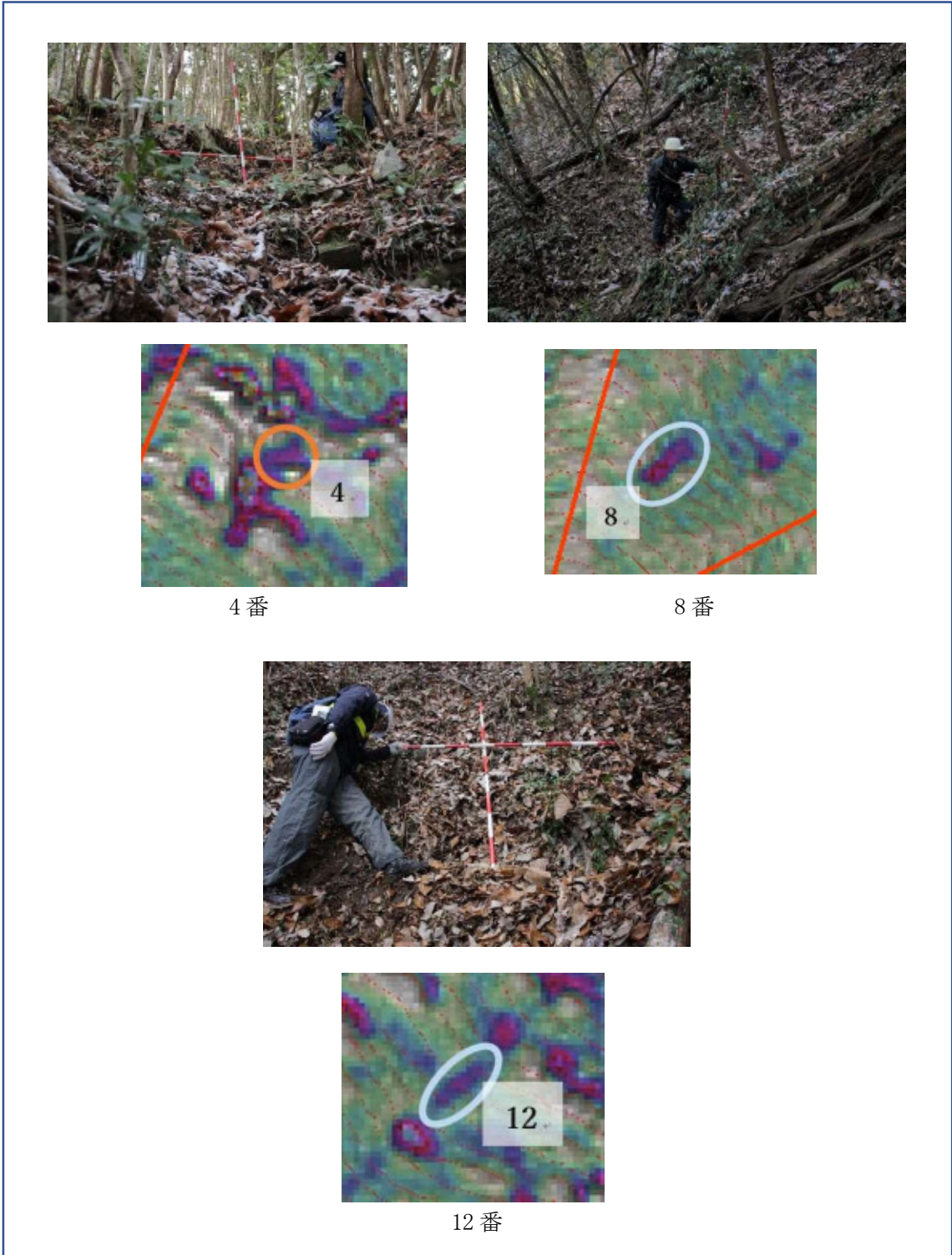


図 6.3.14 谷地形状況 (エリア 2)

6.3.3 エリア3

エリア3における微地形強調図による落石発生源抽出結果を図6.3.15に示す。落石発生源抽出結果および現況写真を図6.3.16に示す。

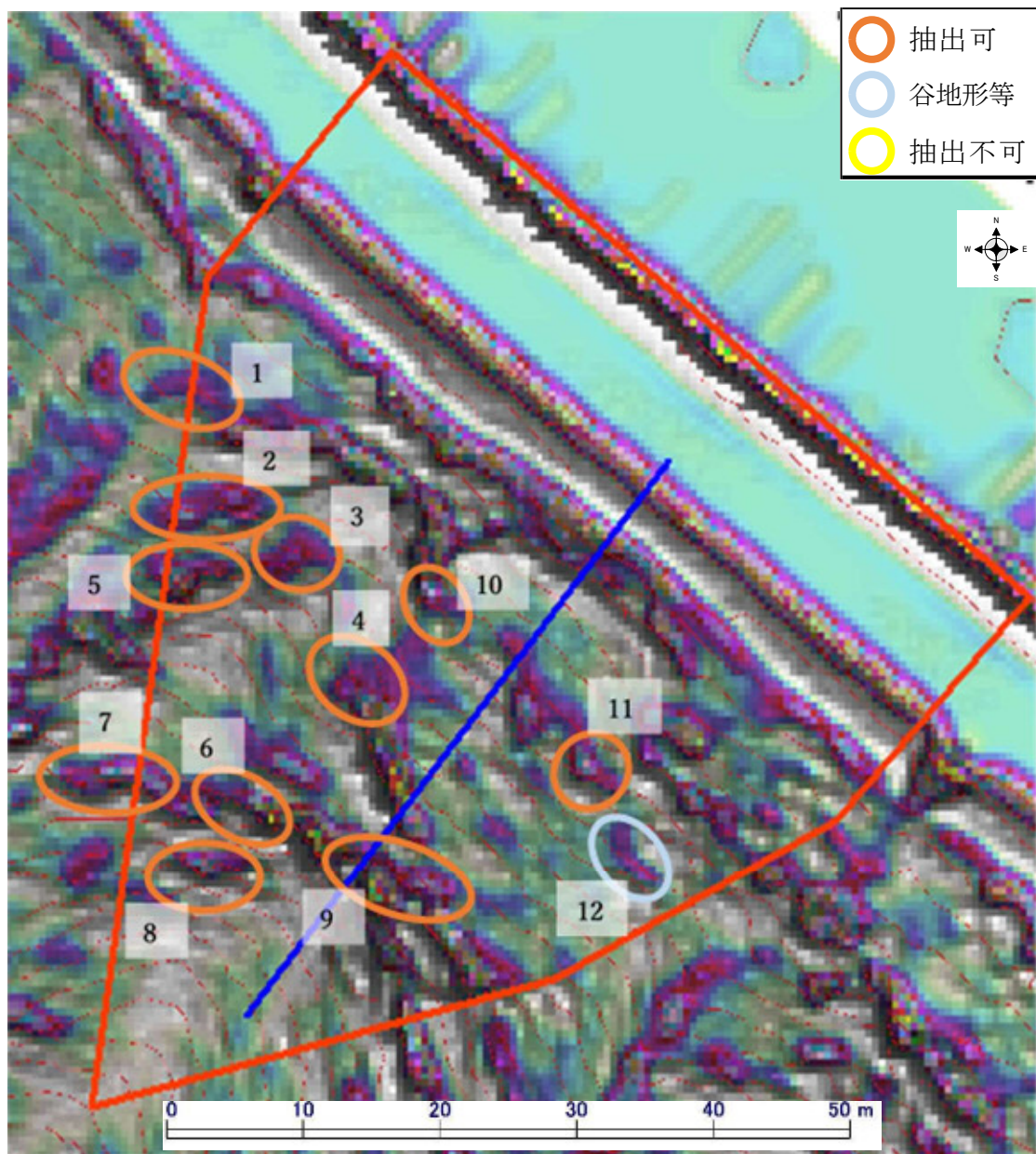


図 6.3.15 微地形強調図による落石発生源抽出結果 (エリア3)



図 6.3.16 落石発生源抽出結果および現況写真 (エリア 3)

落石発生源の抽出率は、高さ 2.0m 以上で 100%であった (表 6.3.3).

12 番については、斜面上方が白色傾向となっておらず、さらに谷形状でもない。現地確認した結果、崩壊地形であった (図 6.3.17)。微地形強調図により机上抽出されていたため調査したが、木々が生い茂った場所であり、机上抽出されていなかったら見逃していた可能性がある。落石発生源であった場合、このような箇所が確実に調査されているとは言えず、机上抽出が見落とし・見逃しのない調査に大変重要な要素であることが分かった。

表 6.3.3 微地形強調図による落石発生源の抽出率 (エリア 3)

落石対象物番号	地形形状	急崖		微地形強調図による抽出	
		①高 (2m以上)	②高 (2m以下)	①	②
		(m)	(m)		
1	-	2.0	-	○	-
2	-	2.0	-	○	-
3	-	4.0	-	○	-
4	-	3.0	-	○	-
5	-	2.0	-	○	-
6	-	6.0	-	○	-
7	-	2.0	-	○	-
8	-	2.6	-	○	-
9	-	7.0	-	○	-
10	-	2.4	-	○	-
11	-	2.0	-	○	-
12	崩壊地形	-	-	-	-
抽出率				100.0	-

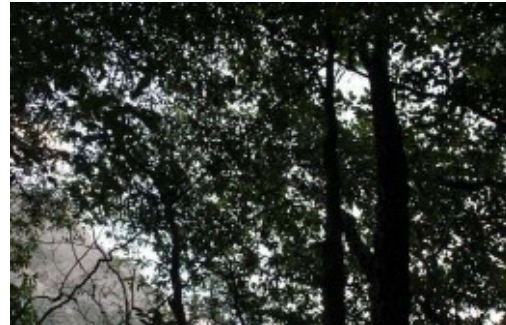
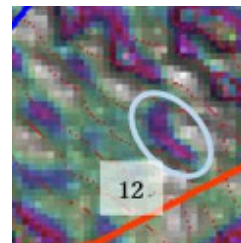


図 6.3.17 崩壊地形状況 (12 番)

6.3.4 結果

検証の結果、冬季の道路縦断方向計測データを使用することにより、高さ 2.0m 以上の落石発生源を抽出できることがわかった。本現場においては、点密度が多かったことにより、高さ 1.6m まで抽出することができた。

参考文献

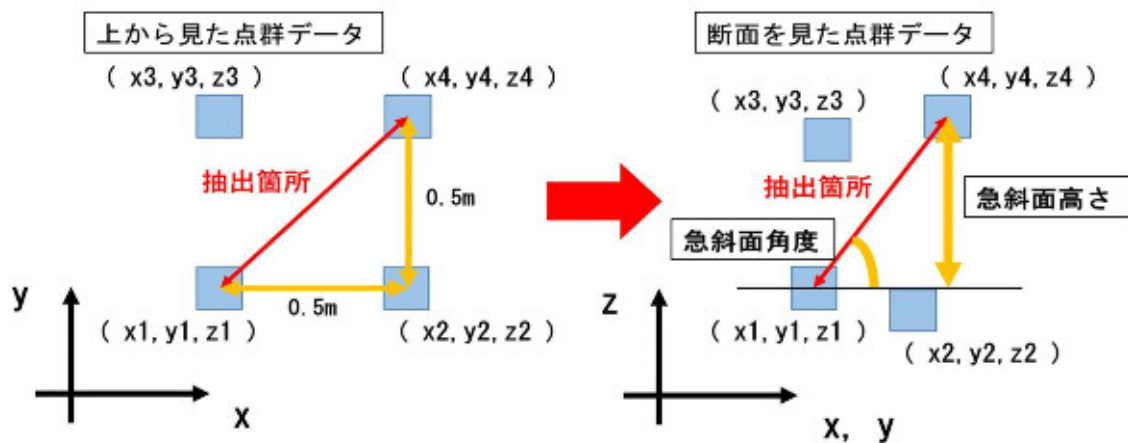
- 【6.1】 崎田晃基，西山哲，宮下征士，吉川慶：落石対策事業効率化のための微地形強調図による落石発生源抽出の研究，平成 30 年度（第 70 回）土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp. 519-522，2018.

第7章 高密度点群データによる落石発生源（急崖）抽出

検証フィールドC（岡山市）において、グラウンドデータからグリッドデータに変換された点群データから、現地調査によって得られた位置情報をもとに急斜面を抽出し、データによる急斜面の抽出結果の評価を行った。

点群データ内の各点は、水平方向にx, y座標、鉛直方向にz座標を持っている。隣接する点の距離は、50cmメッシュをかぶせているため、x, y軸方向にそれぞれ0.5mである。

微地形強調図で机上抽出できた箇所、できなかった箇所それぞれのx, y座標をGIS(地理情報システム)ソフトにより取り出し、その座標に対応した急斜面となっている線分を点群データから抽出した。机上抽出できなかった箇所については、正確な座標を取り出すことができなかったため、現地調査による位置情報をもとに近辺の座標値から急斜面部を抽出した。これにより、点群データから現地調査した48箇所について、急斜面高さおよび急斜面角度を算出した(図7.1.1)。



$$\text{急斜面高さ} = |z4 - z1|$$

$$\text{急斜面角度} = \text{atan} \frac{|z4 - z1|}{\sqrt{(x4 - x1)^2 + (y4 - y1)^2}}$$

図 7.1.1 点群データからの落石発生源（急崖）抽出方法

落石発生源の現地調査による実測高さと同様な箇所を点群データから抽出していることが表7.1.1で示される。図7.1.2から、青色部分で示した高さ1.0m以上かつ角度60度以上の落石発生源は抽出可能であったことが点群データによる検証で確認された。また、抽出できなかった落石発生源については、高さ1.0mかつ角度50～55度であった。植生の影響でレーザ密度が低くなったことにより落石発生源が表現されなかったことが考えられ、グラウンドデータで点密度を確認したが、例の不足で定量化することはできなかった。これにより、机上抽出できなかった要因は急崖の角度であると考えられる。谷地形は、高さ0.8m～2.5m、角度約55～75度のものが抽出されており、高さ・角度が小さくてもウェーブレット解析図による凹部の表現により抽出されたと考えられる。本調査地における落石発生源の抽出率は91.4%であった。微地形強調図により1m程度の急崖も抽出可能であり、見落とし・見逃しのない道路防災点検、現地調査への活用が期待される。

表7.1.1 落石発生源の抽出率

エリア	番号	現地高さ(m)	点群データ高さ(m)	点群データ角度(度)	抽出	
1	2	3.0	2.800	75.83	○	
	3	1.6	1.600	66.16	○	
	4	1.2	1.300	61.46	○	
	5	1.6	1.400	63.20	○	
	6	2.0	2.000	70.53	○	
	9	1.2	1.010	51.47	×	
	10	1.2	0.990	53.44	×	
	12	2.4	2.500	74.21	○	
	14	3.0	3.000	76.74	○	
	15	2.6	2.500	74.21	○	
	16	1.8	1.800	68.55	○	
	17	2.4	2.600	79.11	○	
	2	1	2.2	2.000	70.53	○
		2	5.0	5.100	82.11	○
		3	2.2	2.300	72.91	○
		5	3.0	3.100	77.15	○
		6	0.6	1.050	54.99	×
7		2.4	2.200	72.18	○	
9		1.2	1.400	63.20	○	
10		2.4	2.500	74.21	○	
13		2.0	2.000	70.53	○	
14		1.4	1.500	64.76	○	
15		1.9	1.800	68.55	○	
16		4.2	4.100	80.21	○	
3		1	2.0	1.900	69.59	○
		2	2.0	2.000	70.53	○
		3	4.0	3.800	69.59	○
		4	3.0	3.100	70.53	○
	5	2.0	2.100	71.39	○	
	6	6.0	5.800	83.05	○	
	7	2.0	2.000	70.53	○	
	8	2.6	2.500	78.69	○	
	9	7.0	7.300	79.04	○	
	10	2.4	2.300	72.91	○	
	11	2.0	2.100	71.39	○	
落石発生源抽出率(%)					91.4	

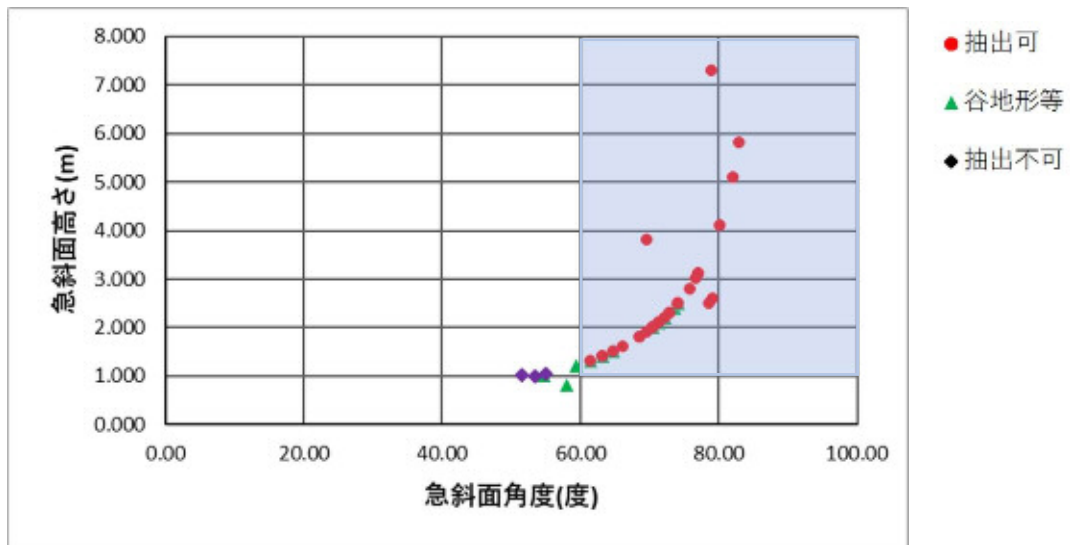


図7.1.2 高さと角度の関係

8.2 微地形強調図と道路防災カルテの比較検証

8.2.1 微地形強調図と道路防災カルテの比較検証

微地形強調図が，道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）の代替えになるか確認を行った。

道路防災カルテの着目点が，微地形強調図に表現されているか現地にて確認を行った。道路防災カルテに添付されている着目点の写真および微地形強調図を参照し，現地にて着目点箇所を抽出した。

8.2.2 検証フィールド

3つのフィールドにおいて検証した結果，冬季の道路縦断方向計測データから微地形強調図を作成使用することにより，高さ2.0m以上の落石発生源を抽出できることがわかった。

落石対策事業においては，点検後，道路防災カルテにまとめ，その中で要対策となった箇所において災害防除設計施工を実施する流れがある。道路防災カルテは落石対策事業において重要な位置を占める。

検証フィールドCの3エリアは，道路防災カルテ【8.2】において，カルテ対応となっており，落石発生源の見逃し見落としがないか確認を行った。（図8.2.1）

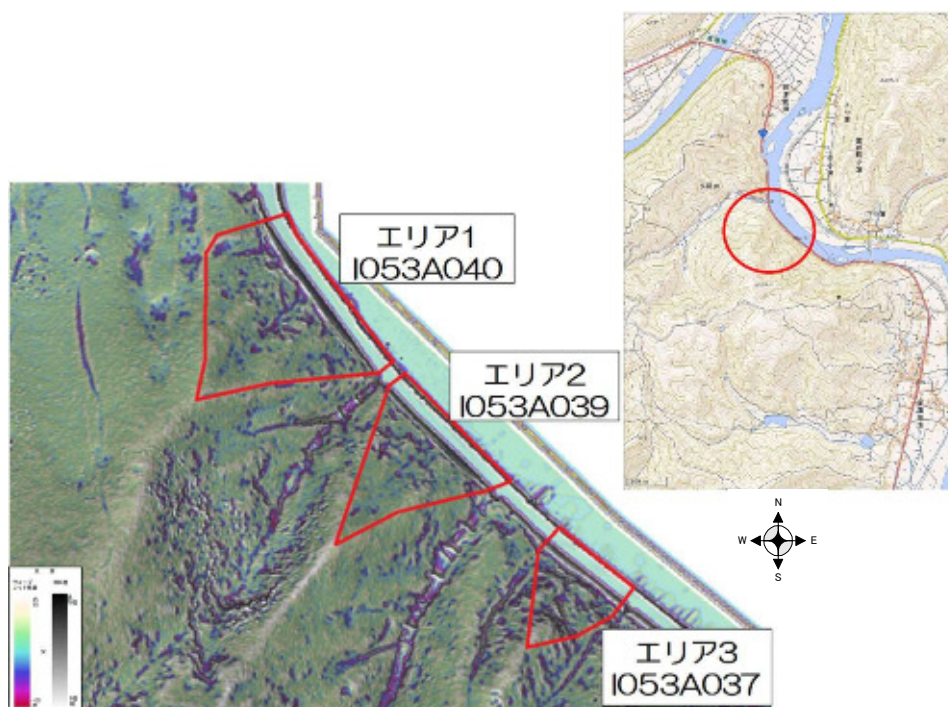


図8.2.1 道路防災カルテ__カルテ対応箇所位置図

8.2.3 エリア1 (I053A040)

エリア1 (I053A040) 地内には、似たような落石発生源が多数存在し、位置関係が不明瞭な道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）では、着目点箇所の位置把握に時間を要した。道路防災カルテに添付されている着目点の写真および微地形強調図を参照し、タブレットを使用して現地確認した結果、早期に発見することができた。着目点は、擁壁背面の落石以外は微地形強調図に表現されていた。

着目点の道路防災カルテ添付写真を図8.2.2に示す。着目点の本現地検証時写真を図8.2.3に示す。道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）と着目点転記微地形強調図を図8.2.4に示す。



①コアストーン変位



②擁壁背面の落石

図8.2.2 道路防災カルテ添付写真_着目点



図8.2.3 本現地検証時写真_着目点 (①)

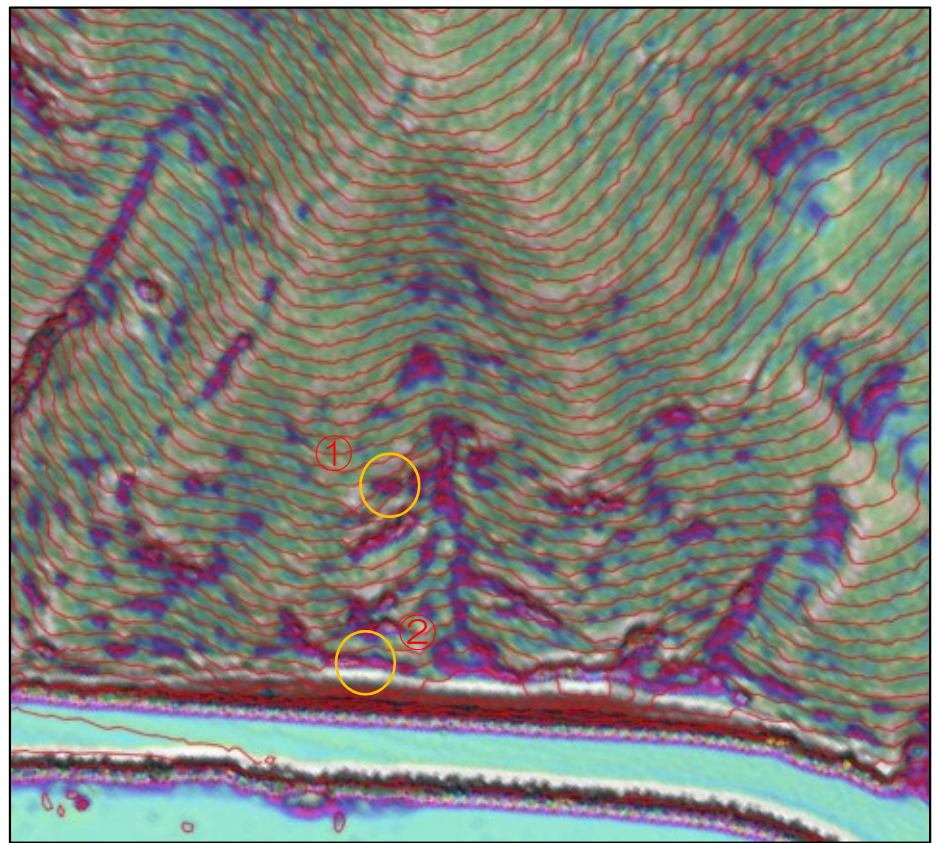
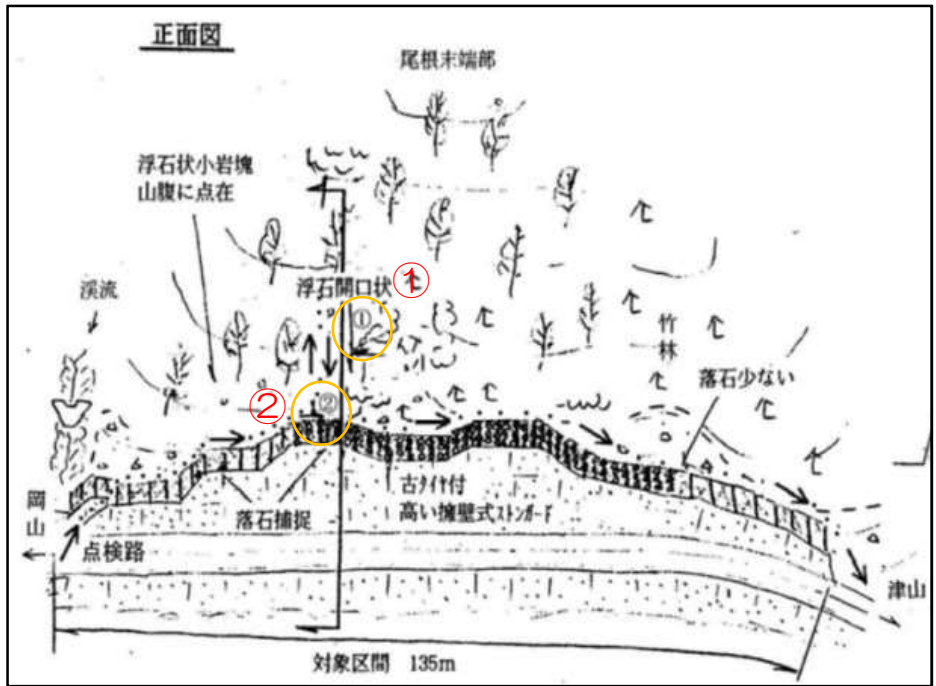
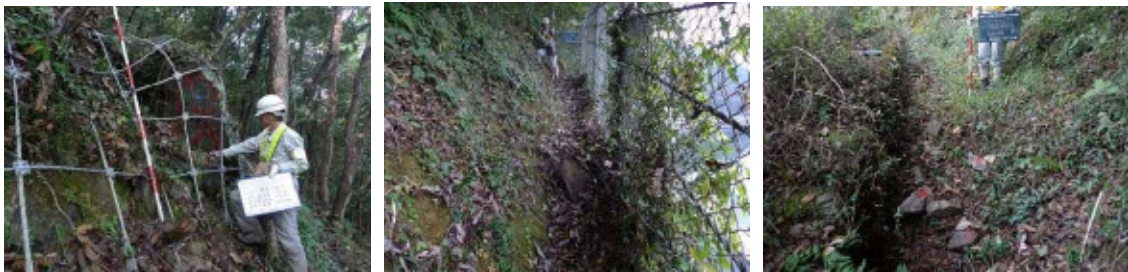


図8.2.4 エリア1 (I053A040)
 道路防災カルテの点検地点位置図 (正面図) [上]および着目点転記微地形強調図[下]

8.2.4 エリア2 (I053A039)

エリア1 (I053A039) 地内には、似たような落石発生源が多数存在し、位置関係が不明瞭な道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）では、着目点箇所の位置把握に時間を要した。道路防災カルテに添付されている着目点の写真および微地形強調図を参照し、タブレットを使用して現地確認した結果、早期に発見することができた。着目点は、防護柵への落石以外は微地形強調図に表現されていた。

着目点の道路防災カルテ添付写真を図8.2.5に示す。着目点の本現地検証時写真を図8.2.6に示す。道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）と着目点転記微地形強調図を図8.2.7に示す。



①ロープ伏工

②防護柵への落石

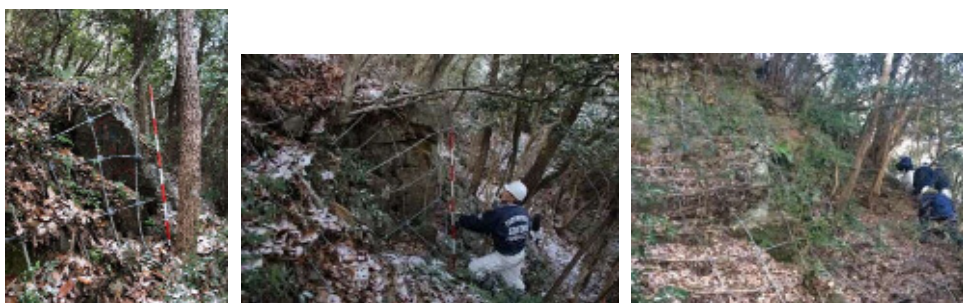
③防護柵への落石



④ロープ伏工

⑤ロープ伏工

図8.2.5 道路防災カルテ添付写真__着目点



①ロープ伏工

④ロープ伏工

⑤ロープ伏工

図8.2.6 本現地検証時写真__着目点

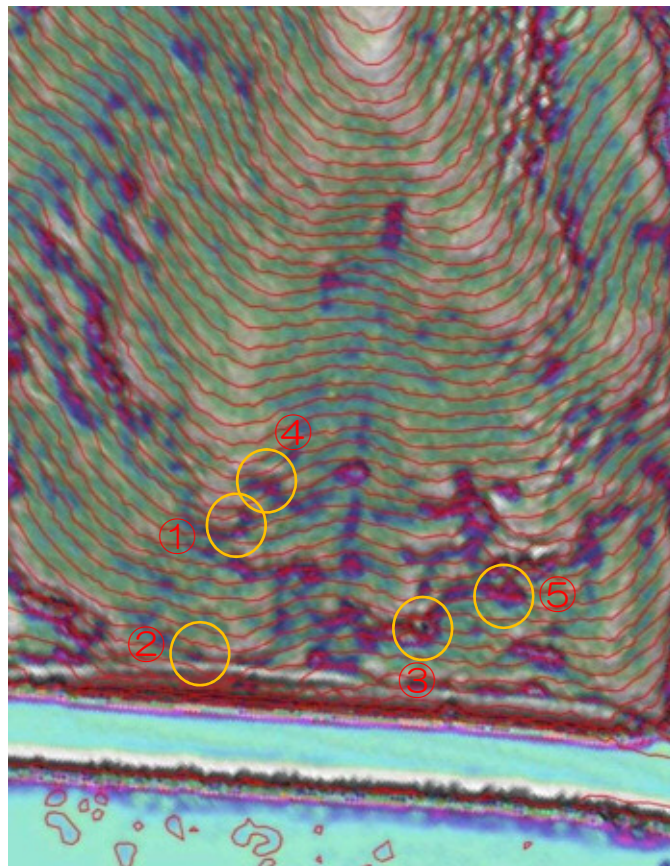
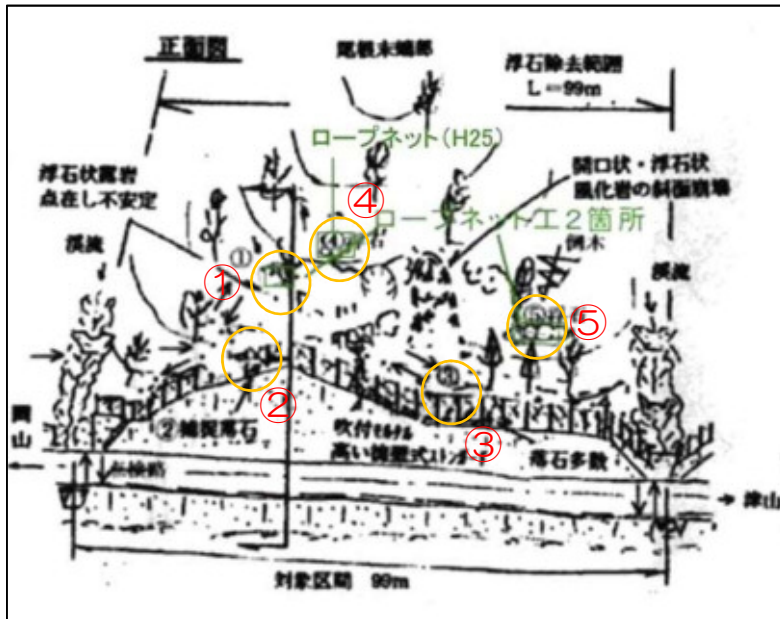


図8.2.7 エリア2 (I053A039)

道路防災カルテの点検地点位置図 (正面図) [上]および着目点転記微地形強調図[下]

8.2.5 エリア3 (I053A037)

エリア3 (I053A037) 地内には、似たような落石発生源が多数存在し、位置関係が不明瞭な道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）では、着目点箇所的位置把握に時間を要した。道路防災カルテに添付されている着目点の写真および微地形強調図を参照し、タブレットを使用して現地確認した結果、早期に発見することができた。着目点は、防護柵への落石以外は微地形強調図に表現されていた。

着目点の道路防災カルテ添付写真を図8.2.8に示す。着目点の本現地検証時写真を図8.2.9に示す。道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）と着目点転記微地形強調図を図8.2.10に示す。



図8.2.8 道路防災カルテ添付写真__着目点



図8.2.9 本現地検証時写真__着目点

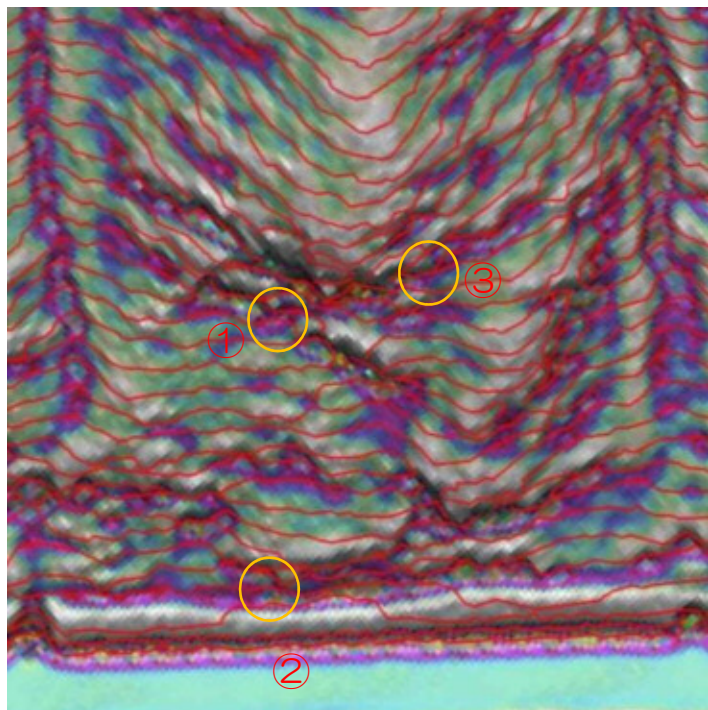
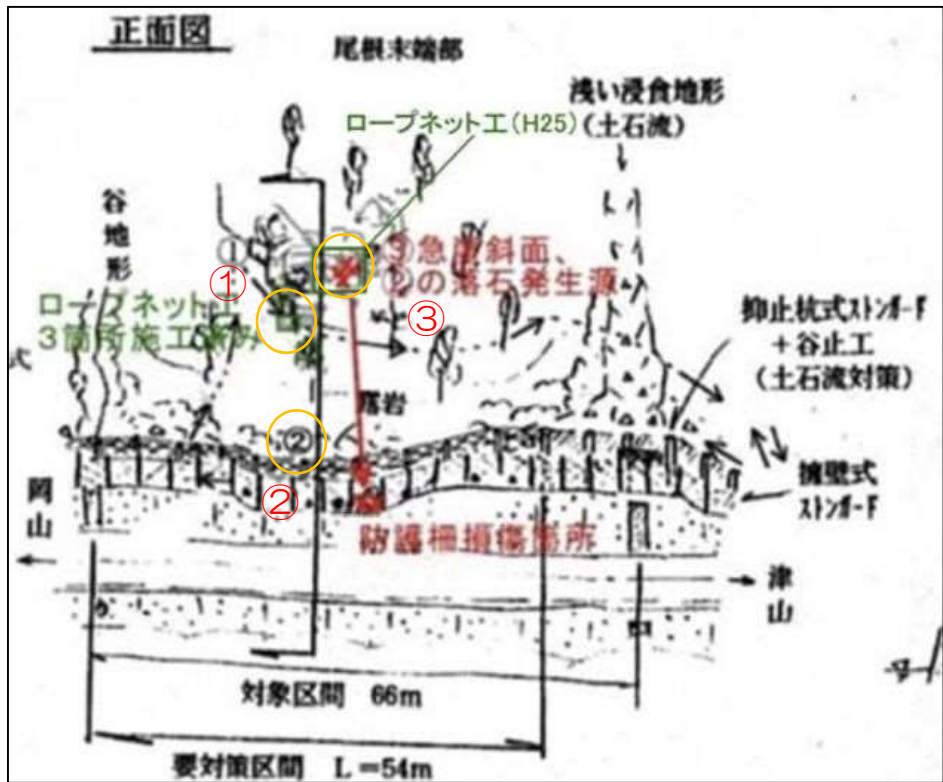


図8.2.10 エリア3 (I053A037)
道路防災カルテの点検地点位置図 (正面図) [上]および着目点転記微地形強調図[下]

8.3 道路防災カルテの精度

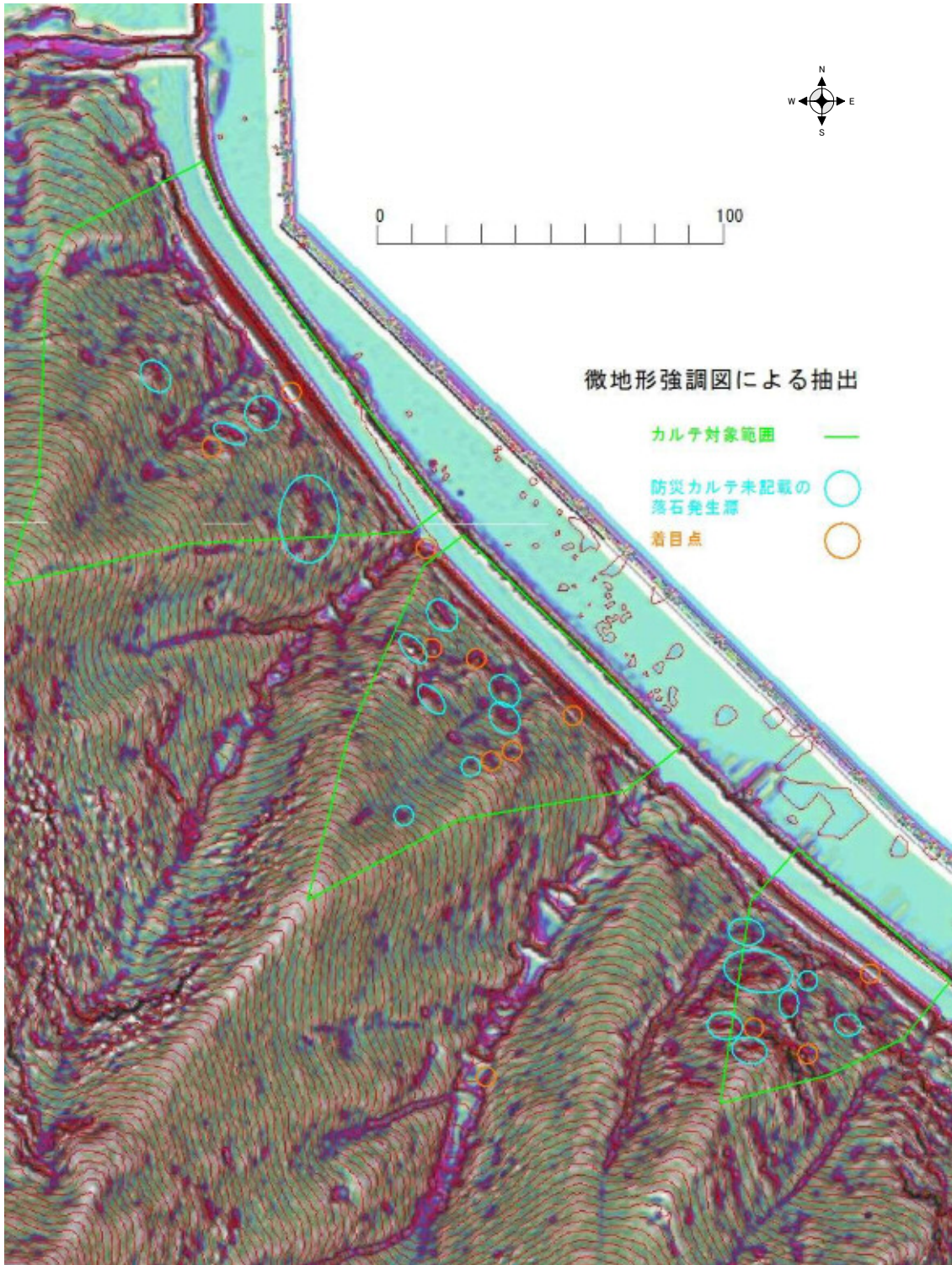


図 8.3.1 微地形強調図落石発生源抽出図

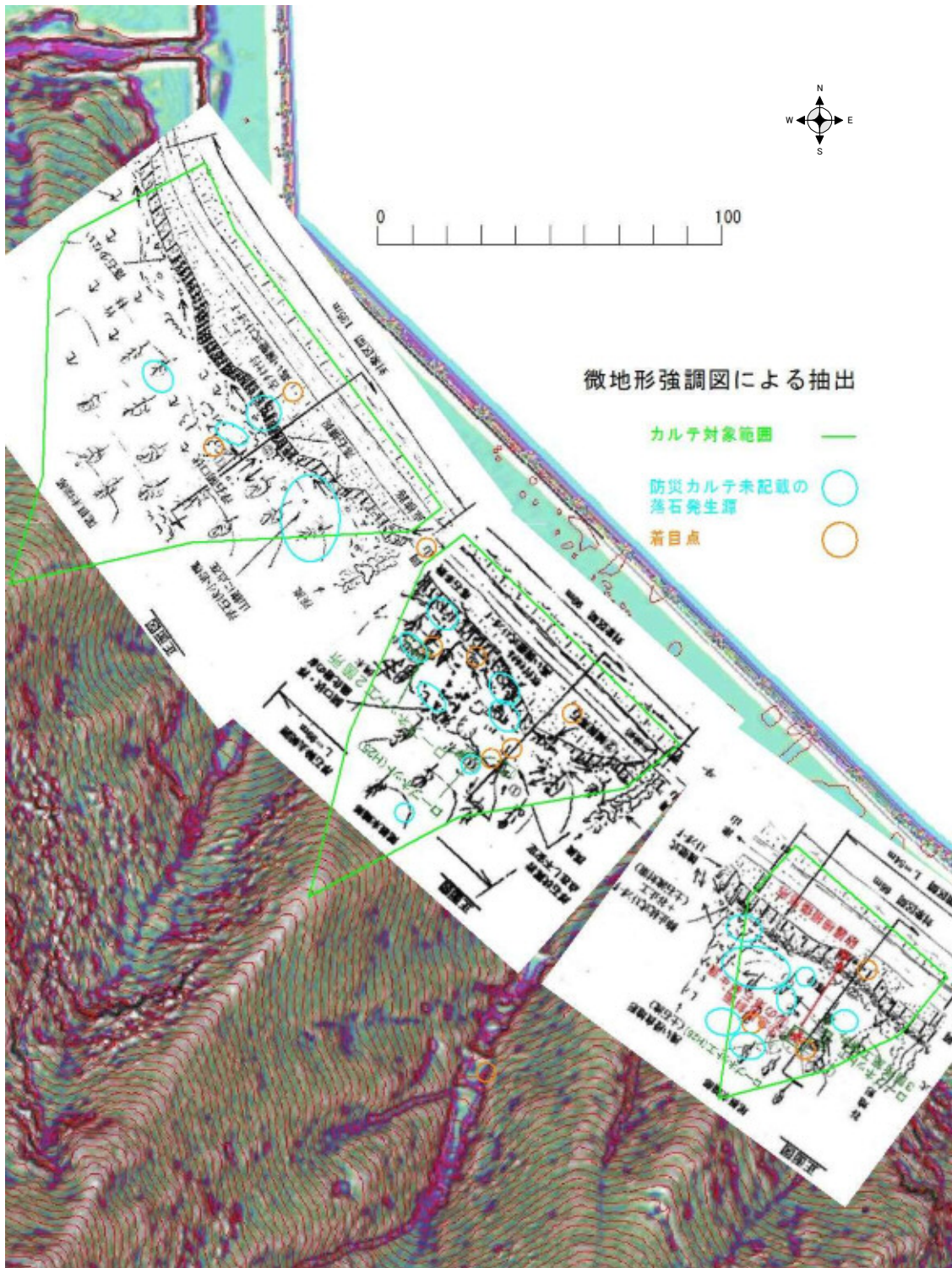


図 8.3.2 微地形強調図落石発生源抽出図
 (道路防災カルテの点検地点位置図 (正面図) を重ね合わせ)

検証した3エリア全てにおいて、位置関係が不明瞭な道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）のみでは、着目点箇所的位置把握に時間を要した。道路防災カルテに添付されている着目点の写真および微地形強調図を参照し、タブレットを使用して現地確認した結果、早期に発見することができた。

微地形強調図による落石発生源抽出結果（図8.3.1）に道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）を重ね合わせて、位置精度の確認を行った（図8.3.2）。正面図であるため、既設対策工は面積が広く表現され、着目点の擁壁背面の落石、防護柵への落石は、既設対策工の中に表現された。山中の着目点は、全て表現されていたが、位置については、正面図であることも理由ではあるが、位置が合致しているといえるものは無かった。

エリア内に着目点以外の落石発生源（急崖）が多数存在するが、道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）には記載が無いものが多く存在した。記載が無いものについては、過去に現地にて安定度の確認をしたかどうか確認できない。

道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）の代替えとして微地形強調図を使用することにより、着目点の正確な位置情報が提供できるだけでなく、着目点以外の箇所も調査した履歴が残り、見逃し見落としの無い道路防災点検が実施できることがわかった。さらにタブレットを併用することにより、確認したい場所に簡単に到達することができ、効率的な調査を実現できることもわかった。

今後、箇所別記録表を再作成し、微地形強調図を利用することにより、道路防災カルテへもデータが引き継がれ、見逃し見落としの無い道路防災点検が実施できる。

時短効果も大きく、現在、国土交通省で推進しているi-Construction（ICT技術を活用した生産性向上）【8.3】へも寄与することができる。

参考文献

- 【8.1】 一般社団法人全国地質調査業協会連合会：地質関連情報WEB,
〈<https://www.zenchiren.or.jp/geocenter/lec-road/>〉, (2018.09.16)
- 【8.2】 国土交通省岡山国道事務所：道路防災カルテ, 2014.
- 【8.3】 国土交通省：i-Construction, 〈<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>〉, (2018.09.16)

第9章 結論, 今後の課題

9.1 本研究の成果

本研究により、高密度航空レーザデータを使用した微地形強調図による落石発生源抽出手法を提案するとともに、抽出精度の検証を実施した。

本研究によって得られた成果を以下に示す。

第1章では、研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の構成を取りまとめた。

第2章では、本研究で使用する高密度航空レーザの概要について取りまとめた。

第3章では、高密度航空レーザデータを使用した様々な微地形表現手法を紹介した。落石発生源を抽出するための図面として、微地形表現手法の傾斜量図、ウェーブレット解析図、等高線図を透過合成した微地形強調図を提案した。

第4章では、提案する微地形強調図による落石発生源抽出精度の検証を行った。異なる2時期（夏季・冬季）の格子状計測データを使用して、微地形強調図により落石発生源の抽出検証を実施し、落石発生源（急崖）については、冬季においてほぼ抽出することができた。落石発生源（転石）については、2.0m角以下が主体であり、夏季・冬季とも抽出できなかった。冬季の道路縦断方向計測データと格子状計測データを使用して、微地形強調図により落石発生源の抽出検証を実施した。冬季に道路縦断方向計測データのみを使用することにより、落石発生源（急崖）は、ほぼ抽出できることがわかった。森林基本図を利用した落石発生源抽出調査との差異を検証した結果、微地形強調図を利用して、落石発生源位置を抽出すれば位置精度が向上することがわかった。

第5章では、第4章の結果の妥当性を確認するために、検証フィールドB（美作市）において冬季の道路縦断方向計測データにより、微地形強調図で机上抽出を行い、現地調査により抽出精度の検証を行った。落石発生源（急崖）は、ほぼ抽出できることがわかった。

第6章では、第4章の結果の妥当性を確認するために、検証フィールドC（岡山市）において冬季の道路縦断方向計測データにより、微地形強調図で机上抽出を行い、現地調査により抽出精度の検証を行った。落石発生源（急崖）は、ほぼ抽出できることが分かった。本現場においては、点密度が多かったことにより、高さ1.6mまで抽出することができた。

第7章では、検証フィールドC（岡山市）において、グリッドデータによって変換された点群データから、現地調査した落石発生源の高さと角度の関係を整理した。本フィールドにおいては、角度が60度以上あれば、高さ1.4mの落石発生源を抽出することができた。

第8章では、微地形強調図が、道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）の代替えになるか確認するために、着目点が微地形強調図に表現されているか現地にて確認を行った。また、道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）の着目点位置精度の検証を行った。道路防災カルテの点検地点位置図（正面図）の代替えとして微地形強調図を使用することにより、着目点の正確な位置情報が提供できるだけでなく、着目点以外の箇所も調査した履歴が残り、見逃し見落としの無い道路防災点検が実施できることがわかった。さらにタブレットを併用

することにより、確認したい場所に簡単に到達することができ、効率的な調査を実現できることもわかった。

9.2 今後の課題

今後は、本論文で検証できていない以下の課題に取り組み、高密度航空レーザデータを使用した微地形強調図による落石発生源の抽出精度を向上する必要がある。

①点群データによる落石発生源（急崖）の抽出サイズの数値的検証

第7章において、グラウンドデータからグリッドデータに変換された点群データから、落石発生源（急崖）の高さと角度の関係を示した。今後は、グラウンドデータも利用し、抽出サイズの数値的特徴を検証する必要がある。

②グラウンドデータにおける落石発生源抽出漏れの実態検証

落石発生源抽出漏れ箇所において、植生、地形、点密度等を整理し、抽出漏れの要因を検証する必要がある。

③道路防災点検のタブレットパッケージ化

微地形強調図により、落石発生源（急崖）が、ほぼ抽出できることがわかった。自己位置を取得可能な端末（タブレット）を利用することにより、カルテ着目点以外の箇所も調査した履歴が残り、見逃し見落としの無い道路防災点検が実施できることがわかった。

自己位置を取得可能な端末（タブレット）と端末上で微地形強調図（机上抽出済）と自己位置を重畳できるGISを用い、落石発生源（急崖）の現地調査を行う。タブレットで写真撮影を行い、落石発生源の評価を現場でGIS上に書き込めるようにし、カルテをほぼ現地で完成させる。自己位置が表現されるため再現地調査が容易となり、過去の調査結果をGIS上に示すことにより、現地で過去との比較が可能となる。紙から電子カルテに変更することにより安全性、生産性が向上するか検証する必要がある。

本手法で微地形強調図により落石発生源（急崖）を抽出できるが、危険度までは判別できない。危険度を判別するには、専門技術者による現地踏査が必要である。

落石対策事業へ取り組む機運は、さらに高まってくると想定される。

本研究において、高密度航空レーザデータを使用した微地形強調図により、落石発生源の抽出精度および位置精度が向上することが証明された。今後は、微地形強調図を使用して、道路防災点検のタブレットパッケージ化、エリア毎の落石発生源数を考慮した落石対策事業のスクリーニング等に活用したいと考える。

謝辞

本論文は、岡山大学大学院環境生命科学研究科博士後期課程環境科学専攻在学中に行った研究成果を取りまとめたものである。

岡山大学大学院環境生命科学研究科__西山哲教授には主任指導教官として本研究の機会を与えていただき、その遂行にあたり、ご指導ご鞭撻をいただきました。深く感謝の意を表します。岡山大学大学院自然科学研究科__鈴木茂之教授、岡山大学大学院環境生命科学研究科__小松満准教授には、副査として細部にわたりご指導いただきました。岡山理科大学生物地球学部生物地球学科__佐藤丈晴准教授には、岡山国道との共同研究「道路防災事業における防災対策の手法検討」において、さまざまなアドバイスをいただきました。

岡山大学大学院環境生命科学研究科西山研究室出身の菊地輝行博士（株式会社開発設計コンサルタント）には、地質の専門家としての多くのアドバイスをいただきました。西山研究室の社会人博士後期課程の方々、ならびに大学院生、学部生の皆様との年齢や地位に分け隔てない議論、雑談は、筆者にとってとても有意義な時間でした。ここに感謝いたします。

学位取得という貴重な機会を与えてくださった、株式会社ウエスコ__松原利直社長、舞原一郎監査役をはじめ株式会社ウエスコの皆様から心から感謝いたします。與那城稔岡山支社長、藤原身江子地盤調査事業部部長、岩元浩二技術推進副本部長には、論文執筆に際してアドバイスをいただきました。本研究の根幹部分である微地形強調図の立案に際して、今西将文地盤調査事業部鳥取地盤調査課長には、多大なご協力をいただきました。地理情報事業部空間情報課宮田真考氏には、航空レーザ全体においてアドバイスをいただきました。筆者より1年半遅れて西山研究室に博士後期課程で入学した地理情報事業部情報システム課吉川慶氏には、あらゆる面で協力いただき心から感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、暖かく見守ってくださいました、筆者が所属する岡山支社設計部の岡田賢一郎部長、秋田悦史課長をはじめ大勢の先輩後輩に多大なるご協力いただきましたことに、深く感謝いたします。

最後に筆者を支えてくれた家族に心から感謝の意を表します。