

(18) ウェーブレット解析を用いた 落石発生源の調査に適した図化手法の高度化

崎田 晃基¹・菊地 輝行²・西山 哲³

¹ 学生会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail: pq1i4u6h@s.okayama-u.ac.jp

² 非会員 株式会社開発設計コンサルタント (〒101-0021 東京都千代田区外神田 2-16-2)

E-mail: kikuchi-t@jpde.co.jp

³ 正会員 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail: nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp

これまで落石の対策としては斜面の状況を反映した地形図を用いた調査が実施されてきたが、図面の表現性能の問題により点検時の見落としが課題となっていた。これを改善し質の高い点検を実施するため航空レーザ測量と地形解析手法が期待される。これらは斜面を計測した膨大な測量データから必要な地形特徴を強調して図化する技術である。ここでは効率的な点検手法の確立に向け、測量データにウェーブレット解析を用いて地図を作成し、測量条件と測量データの関係や、ウェーブレット解析を行う際のパラメータと落石発生源点検への適応性に着目した検証を実施した。一連の解析において各条件と落石発生源位置の抽出性に関して整理した結果から航空レーザ測量とウェーブレット解析による落石発生源点検への活用に関して言及する。

Key Words: rockfall source, aerial laser survey, rockfall inventory, two-dimensional wavelet analysis

1. 緒言

落石発生には地震や降雨など様々な要因がある。しかし、いずれの発生メカニズムにおいても、落石の発生源となるものは斜面に存在する遷急線や崖として表現される。周りの斜面と比べて傾斜が急で岩がむき出しとなっている岩盤部分である。斜面災害対策の観点においては、落石の発生源となる岩盤の状態を正確に把握し対策に講じること一番の対応策である。ここで重要になるのが点検用図面の作成である。落石の点検では図面をもとに点検個所の抽出を実施し、その情報をもとにした現地調査を通して最終的なリスク評価を行うことが一般的な方法である¹⁾。しかし、現在の点検で用いられているような防災カルテには正確な位置情報や地形を表現するだけの精度が足りていない²⁾。そのため、現地調査において点検員がしばしば点検個所の見落とし事例が発生することが課題となっていた。正確な点検を実施するためには広域の点検個所において精度の良い図面を作成する技術が求められている。

そこで、広範囲の高解像度地形データの取得が期待でき、多くのメリットがあげられるのが航空レーザ測量で

ある。この技術では、飛行機に搭載した複数のセンサーにより対象となる斜面の上空を飛行するだけで、斜面全体の形状を3次元のデータとして取得・管理することができる。さらに近年では、点群データから地形的特徴を抽出するための技術として地形解析手法を活用した図面の作成技術が複数提案されている³⁴⁾。先行研究⁵⁾では、航空レーザ測量をもとにウェーブレット解析図⁶⁾を用いて斜面全体から落石発生源の抽出に適した図面を作成し、実際の点検のフローに従い検証を行った。その結果、図面が広域の対象エリアから網羅的に落石発生源を把握することができ、比高差が約 1.0m 以上かつその傾斜角が約 60 度の落石発生源が表現されていることが確認された。

本研究では、落石発生源に対する効率的な点検手法の確立を目的に、既往研究同様に航空レーザ測量とウェーブレット解析から作成した図面を用いて落石発生源抽出の検証を行った。図面を用いた点検においては図面の性能と図面作成の条件との関係を明確化する必要がある。そこで、ウェーブレット解析における図化条件と作成された図面との関係について一連の点検用図面作成のフローに従い検証を行う。

2. ウェーブレット解析による地形図の作成

(1) 測量データの処理

航空レーザ測量は、上空数百メートルを航空機で飛行しながら計測を行う。計測データは対象とする地形を点の集まりで3次元的に構成し、これを点群と呼ぶ。斜面を対象とした計測では、電線や植生部分が計測される。これをフィルタリングし、斜面の地表部分を抽出したデータはグラウンドデータと呼ばれる(図-1)。さらに、図面の作成においては、グラウンドデータを構成する点を水平方向にグリッド化した DEM(Digital Elevation Model)を作成する。

(2) ウェーブレット解析図

ウェーブレット解析図は土木研究所が作成した地すべり地における航空レーザの解析マニュアルにも記載されている地形解析手法である⁷⁾。ウェーブレット解析図は連続ウェーブレット変換という手法を参考に、DEM内の凹凸性を強調するように作成される図面であり、既往の研究においても落石発生源位置抽出に有用性があることが述べられている⁴⁾。

$$C(s, a, b) = \frac{1}{s} \iint z(x, y) \psi\left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}\right) dx dy \quad (1a)$$

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

図面の作成では式-1a 従い計算されるウェーブレット係数 $C(s, a, b)$ の値に応じて色を割り当てる。なお、式内 (a, b) はDEMデータの任意の点の x, y 座標、 $z(x, y)$ は x, y 座標に対応した標高値を示し、式内の関数 ψ はマザーウェーブレットと呼ばれ、本研究では式-1b に示す関数を用いる。式-1b は図-2 に示す形状を有する関数であり、その形状から一般にメキシカンハット関数と呼ばれる。式-1a 内にある s はウェーブレット解析のパラメータであり、 s が大きい場合には ψ の範囲が広がり、DEMの1節点における解析窓が広くなることを示す。

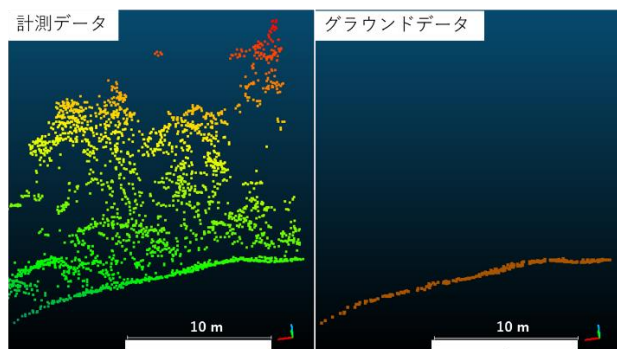


図-1 測量データのフィルタリング前後の断面図

3. 検証エリア

本研究では、落石発生源の抽出における地形図の検証として、岡山県の御津草生地区を検証区画として設定した。当該地区は大雨による落石の危険性から全交通規制課所に指定されている。そのため落石の対策として定期的に現地調査が行われており、その結果が防災カルテにまとめられている。ここで既往の防災カルテの例を図-3 に示す。図-3 は本研究の検証区画内の、防災カルテ内に記された点検地点位置図であり、点検時の要注意箇所や対策工に関して情報が記載されている。

実験を行うにあたり、当該地区を2016年2月に航空レーザ測量を実施した。なお、計測時の計画点密度は平均で10点/m²とした。この計画点密度とは、計測時に一平米あたりに何点計測するかを示す指標であり、この指標をもとに飛行高度や飛行速度を決定して計測を実施する。また、2017年12月には図-3 に示す防災カルテ等の資料を用いて現地調査を実施し、落石発生源の位置と形状に関する情報を得ている。現地調査の結果、斜面内には対象の落石発生源のほか、谷地形などの異なる微地形も存在しており、これらの情報も記録している。なお、測量データは株式会社ウエスコより提供いただいた。

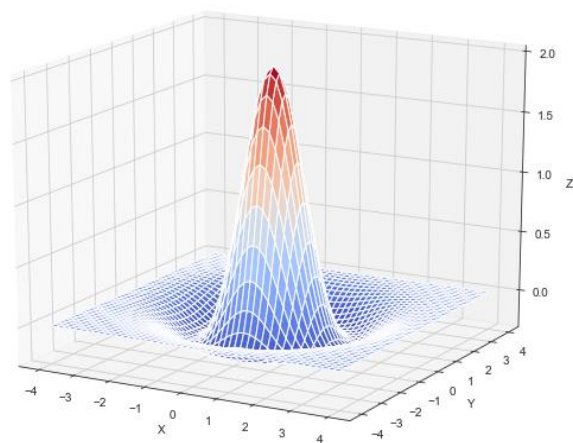


図-2 メキシカンハット関数

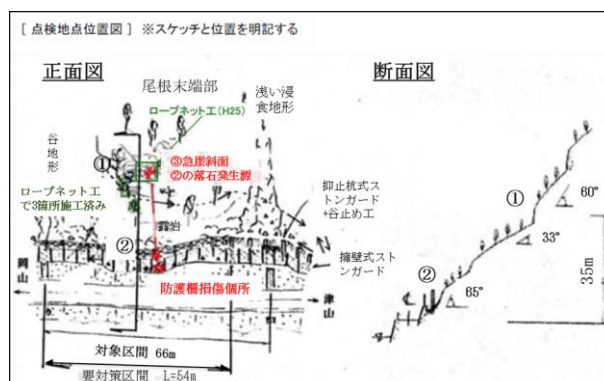


図-3 既往点検による防災カルテの点検地点位置図

4. 落石発生源抽出における図面作成条件の整理

本研究ではウェーブレット解析を用いた地形図の作成に当たり、図面の作成条件に関する検証を行った。本研究で用いるウェーブレット解析には式-1aに示すように一節点での解析範囲を操作するパラメータ s が存在する。このパラメータの変更がどのように図面に影響を及ぼすのかを評価し、図面作成における基礎情報を蓄積する必要がある。そこでパラメータの異なる図面を作成し、現地調査結果との比較から落石発生源位置の抽出性について検証を行う。図面作成のフローとしては、2章に示したように航空レーザ測量による計測データから植生部分をフィルタリングしグラウンドデータを作成する。さらに、グラウンドデータを元にデータ点をグリッド化したDEMを作成する。本研究ではDEMのグリッドサイズを一辺あたり0.5mとした。このDEMデータにウェーブレット解析を実施し、ウェーブレット解析図を作成する。本研究ではウェーブレット解析図を作成するにあたり、パラメータとなる s の値を $s=0.5, 1, 2$ の3パターンとした。これらの図面間での比較や、現地調査結果と図面との比較を通してウェーブレット解析図の特性について整理する。なお、この研究では比高差1.5m以上の落石発生源を点検の対象として議論する。また、測量データの処理に関してはフリーソフトの「Cloud compare⁹⁾」を利用している。

(1) ウェーブレット解析のパラメータの検証

落石発生源抽出のための図面作成においてウェーブレット解析図におけるパラメータ s の変化による表現性の検証を行う。計測を実施した範囲から、落石発生源が確認された図-3に示す防災カルテのエリアで図面を作成する。抽出したエリアのDEMデータに対してウェーブレット解析のパラメータを $s=0.5, 1, 2$ と変化させ作成した図面を図-4に示す。既往の研究によりウェーブレット係数が負の値から正の値に急激に変化する部分に落石発生源が存在していることがわかっており⁹⁾、図-4では赤色と白色が隣接して変化している部分がこれに該当する。この例として、図-4に示す色の変化がある部分(i), (ii)の2つの現地調査写真を図-5に示す。このうち(i)の落石発生源においては $s=2$ の図面上で色の変化が見られなかった。また、図-4の三つの図面を比較すると s が大きくなるにつれて、白く線状に示される尾根部がより明確に表現されるようになることもわかる。なお、図面内の色の変化が表れている部分はすべてが落石発生源とは限らず、谷のような異なる微地形も含まれていることが現地調査からわかっている。そこで、図面上の落石発生源の表現性能を検証するため、次項で現地調査の結果を踏まえた定量的な評価を行う。

(2) 現地調査結果を用いた図面条件の評価

ここでは現地調査の結果を用いて、図面上での抽出性を定量的に評価する。現地調査では、計44か所の微地形の形状と位置を把握しており、その中には谷型の微地形などの落石発生源の特徴に似た異なる微地形の12か所が含まれる。現地調査の結果をもとに図面上に先に示した色の変化が表れているか評価し、表-1にまとめた。なお、表は落石発生源の比高差ごとにカテゴリーを分けており、また、上述したように、色の変化がみられる部分には落石発生源以外にも谷地形などの異なる微地形も存在しているため、それらはその他としてカウントした。表より、 s の値が0.5では1.5m~2mの比高差を持つ

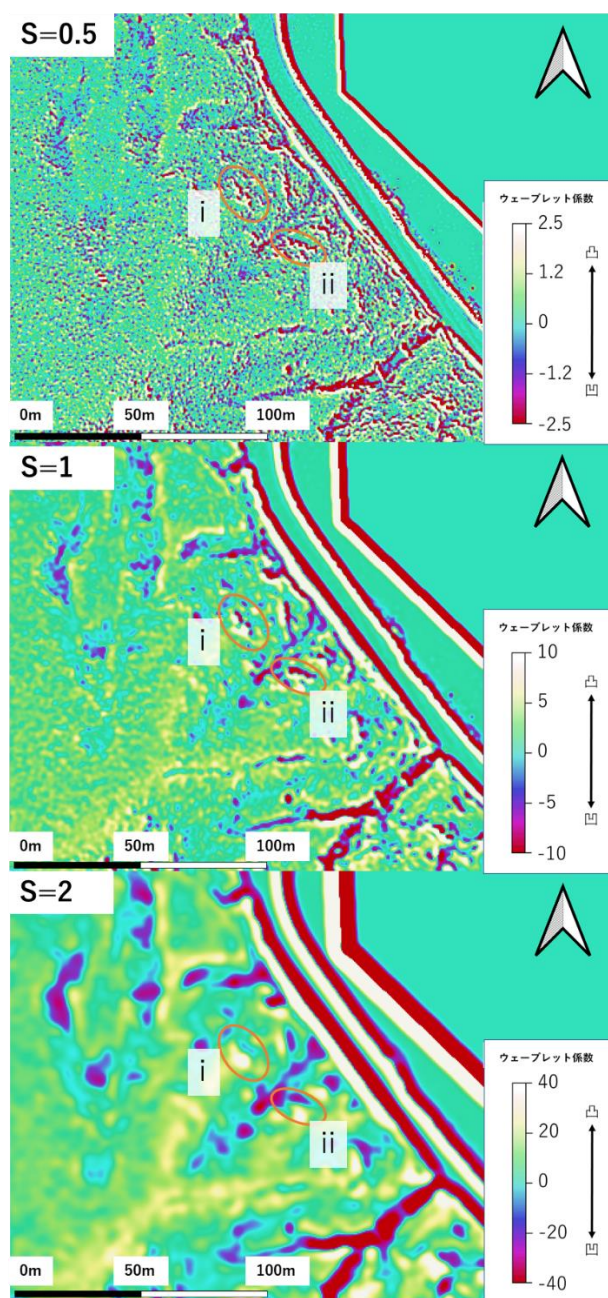


図-4 計測データを元にしたパラメータごとのウェーブレット解析図 (上から $s=0.5, s=1, s=2$)

落石発生源 8 つに対して 8 つすべてを図面上で確認することができたが、その他の地形も抽出数が 12 か所中 11 か所となった。次に、 s の値が 2 の場合では、1.5m~2m の比高差を持つ落石発生源は図面上では確認できず、2~3m の落石発生源 16 か所の内 4 か所を図面上で確認できた。しかし、 s が 2 の場合では、その他の地形が 1 つとなった。また、3m 以上の落石発生源に関してはパラメータに関わらず、すべて図面上に表現されていた。

5. 結論

本研究では、落石発生源に対する効率的な点検手法の確立を目的に、航空レーザー測量とウェーブレット解析を用いて図面を作成し、図面を用いた点検に関して検証を行った。ウェーブレット解析の解析スケールを変化させることで落石発生源の抽出性に影響があり、例として挙げた落石発生源の 1 つは $s=2$ では図面上では確認でき



図-5 図面上に表現された落石発生源の例

表-1 カテゴリー分けした地形に対する検証結果

S 値 (式-1)	比高差カテゴリー別抽出数 (カッコ内は調査した合計数)			
	落石発生源			その他 (12)
	1.5-2m (8)	2-3m (16)	3m- (8)	
0.5	8	16	8	11
1	6	16	8	8
2	0	4	8	1

なかった。また、現地調査の結果をもとにパラメータごとの図面を定量的に評価した結果、 s の大小により、図面上に表現される落石発生源とその他の微地形との間には両立しない関係が見られた。落石発生源となる地形は、緩んだ岩盤ブロックが常時崩落しているため露岩している。一方で浸食による崩壊では堅岩が露出しさらなる崩壊は起こりにくいが、緩んだ岩盤ブロックと同様の遷急線となる可能性がある。このような事例は地域によって異なることから、実際にこの手法を適用するには、点検の規模や必要とする精度に応じて計測計画やパラメータを決定する必要がある。効率的な点検を実施するには計測の目的を事前に明確化し、その成果について十分理解して使用することが重要である。

ウェーブレット解析ではマザーウェーブレットとして式 1b に示すメキシカンハット関数を用いた。しかし、ウェーブレット解析には様々な関数が存在しており、ウェーブレット関数の違いも考慮した評価も今後行う必要がある。また、本研究では落石発生源箇所を色の変化に基づき目視で抽出した。しかし、一番の課題となっている点検個所の見落としや見逃しはツールの表現精度だけでなく点検を行う専門家の判読技術に依存する部分にも問題がある。今後は人工知能技術を活用した、点検個所の自動抽出も視野に入れ研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 全国地質調査業協会連合会：点検要領, pp.2-18, 2006.
- 2) 石田高嗣：道路防災カルテの評価の妥当性, 平成 23 年度国土交通省国土技術研究会資料, 2011.
- 3) Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. and Chang, K.T.: Landslide inventory maps: New tools for an old problem, *Earth-Science Reviews*, 112, pp.42-66, 2012.
- 4) 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—航空機レーザスキャナ DEM を用いたカラー標高傾斜図(ELSAMAP)-, 応用地質, 49 巻 6 号, pp.318-330, 2009.
- 5) Sakita, K., Nishiyama, S., Miyashita, M. and Ohnishi, Y.: Method for Extracting the Source of Falling Rock from Microtopography Highlight Map Created by High-Density Aerial laser Data, *Proc. of 10th Asian Rock Mechanics Symposium*, no.542, 2018.
- 6) Booth, A.M., Roering, J.J. and Pron, J.T.: Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound Lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon, *Geomorphology*, 109, 132-147, 2012.
- 7) 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：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.11-13, 2009.
- 8) 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.
- 9) CloudCompare : Cloud Compare Download , <<https://www.danielgm.net/cc/>>, (2020/6/8).