

## 地形量図を用いた地物抽出にグラウンドデータ点密度が与える影響

Effect of Ground Data Point Density on Extracting Topographic Irregularities Using Terrain Analysis Maps

中村 公一<sup>1)</sup>, 今西 将文<sup>2)</sup>

1) Koichi NAKAMUAR, 准教授, 鳥取大学工学部, nak\_x@tottori-u.ac.jp

2) Masafumi IMANISHI, (株)ウエスコ 技術推進本部, m-imanishi@wesco.co.jp

樹木などが無い平地に模擬地物を設置し、ドローン LiDAR で計測した結果を用いて、グラウンドデータ点密度がウェーブレット解析図と傾斜量図に及ぼす影響について検討を行なった。その結果、グラウンドデータ点密度約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>は、地形の外形を表わせるが、約 1 点/m<sup>2</sup>では地形の外形を表わせないことがわかった。地物にグラウンドデータがある箇所のウェーブレット係数は、約 1 点/m<sup>2</sup>であっても約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>のウェーブレット係数とほぼ同じ数値となることが確認できた。

キーワード：ウェーブレット解析図，傾斜量図，グラウンドデータ点密度

(IGC : C-01, C-04)

## 1. はじめに

近年、微地形表現図を作成し、業務に利用する事例が増加している。この微地形表現図は様々なフィルタを重ね合わせて作成されるため、その組み合わせにより様々な作成方法が提案されている<sup>1)8)</sup>。通常、グリッドデータをフィルタ処理して求めた係数に着色した地形量図を、2 つ重畳して作成される。また、微地形表現図は、航測 LP やドローン LiDAR により取得したグラウンドデータを用いて、グリッドサイズ 1.0m または 0.5m で作成されることが多い。グラウンドデータとは、航測 LP やドローン LiDAR により取得したオリジナルデータから人工構造物や植生など表面の遮蔽物を取り除き、表面のみを抽出した三次元データである。グリッドデータとは、グラウンドデータを必要に応じた任意のグリッドサイズに整理した数値標高モデル (Digital Elevation Model, DEM) である。グリッドサイズ 1.0m または 0.5m は、国土地理院の地形図や 5mDEM よりもグリッドサイズが小さい。このように作成される微地形表現図を用いて、地すべり地形、小崖や段差地形の抽出とともに、落石発生源の抽出に関する検討が行われている<sup>9)19)</sup>。

地形量図のひとつとしてウェーブレット解析図がある。ウェーブレット解析図は、斜面傾斜角度の影響を受けずに地形の凹凸を表現できるという特徴を持つ<sup>14)19)</sup>。ウェーブレット解析図と傾斜量図を重畳させた微地形表現図を用いて、落石発生源の机上調査による抽出が行われている。宮下ら<sup>9)</sup>はウェーブレット解析図と傾斜量図を重畳させた微地形表現図を用いて落石発生源を有する斜面に対し検討を行い、比高差 2m 以上の露岩を抽出可能としている。また Sakita ら<sup>11)</sup>は、等高線図、傾斜量図、ウェーブレット解析図を用いて、図面上で比高差 1.5m 以

上かつ傾斜角度 60 度以上の遷急線箇所であることを報告している。そして、ウェーブレット係数が正值から負値へ急激に変化している箇所に落石発生源等の遷急線が存在すると指摘している。また、崎田ら<sup>13)</sup>はウェーブレット解析図、標高図、傾斜量図のデータを用いて、機械学習による落石発生源の抽出を目的とした検討を行っている。これらの検討では、ウェーブレット係数と比高差の対応の検討例が無いため、ウェーブレット解析図または傾斜量図と重畳させた微地形表現図の色相変化から地物の抽出について検討している。今西らや中村らは、地物の比高差と平面的な大きさがウェーブレット係数に与える影響を報告している<sup>15)19)</sup>。

これら地形量図や微地形表現図の作成に用いられるのは、航空レーザ測量データをフィルタリングしグラウンドデータを作成してグリッド化した DEM (数値標高モデル) である。航空機や回転翼機、ドローンに登載された LiDAR より発射されたレーザーパルスは、特に山間部において樹木や下草の繁茂状況により表面にまで到達しないことが多い。このためグラウンドデータの点密度は低下する。グラウンドデータ点密度が大きく低下すると、DEM と実地形の対応は解離する。したがって、グラウンド点密度の低下は、DEM より作成される地形量図にも影響を与え、最終的には地形判読に大きく影響を及ぼすと考えられる。現在は 4 点/m<sup>2</sup> 以上の点密度が推奨されている<sup>例えば 20)</sup>。しかし、グラウンドデータ点密度の大小が地形量図にどの程度影響を与えるかに関する検討事例は無いため、4 点/m<sup>2</sup> が転石のような比較的小さい地物の抽出に十分な点密度であるかは不明である。そこで本検討では、グラウンドデータ点密度が大きいデータをダウンサンプリングすることで、樹木などの影響を受けた疎密のあるグラウンドデータを作成した。グラウンドデータ

点密度が大きいデータは、樹木などが無い平地に模擬地物を設置し、ドローン LiDAR で計測した。このように作成したグラウンドデータを用いて、グラウンドデータ点密度がウェーブレット解析図と傾斜量図に及ぼす影響について検討を行なった。

## 2. 検討方法

### 2.1 地形量図作成方法

#### 2.1.1 ウェーブレット解析図作成方法

2次元ウェーブレット解析は、「マザーウェーブレット関数」と呼ばれる波の関数を連続的に地表の起伏にあてはめ、地表の起伏とマザーウェーブレット関数の相関関係の程度を表すことができる<sup>4)5)</sup>。解析方法<sup>21)22)</sup>は、DEMから式(1)によりウェーブレット係数 $C(s, a, b)$ を求める。

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

ここで $a$ と $b$ は、それぞれ任意のグリッドの $x, y$ 座標であり、マザーウェーブレット関数の平行移動パラメータに対応する。 $z(x, y)$ は任意のグリッドの標高値である。各グリッドのウェーブレット係数は、 $a$ と $b$ を変化させてマザーウェーブレット関数を移動させて求めていく。

式(1)の関数 $\psi$ がマザーウェーブレット関数であり、本検討ではマザーウェーブレット関数に式(2)に示すメキシカンハット関数を用いる。

$$\psi(x, y) = (2 - x^2 - y^2)e^{-0.5(x^2+y^2)} \quad (2)$$

この演算では、メキシカンハット関数 $\psi$ と地表面形状との相関性を式(2)の畳み込み積分から算出しており、その結果が $C(s, a, b)$ となる。ここで式(1)内の $s$ は、メキシカンハット関数のスケールファクターである。1次元メキシカンハット関数の形状を図-1に示す。図-1の横軸はグリッド数 $x$ 、縦軸はマザーウェーブレット関数 $\psi$ 、そしてマザーウェーブレット関数の平行移動パラメータを $x=0$ とした図である。なお、図-1の $x=0$ が任意のグリッド $a$ と $b$ に対応する。 $x=0$ では $\psi$ が最大となり、 $x=0$ から離れるにしたがい $\psi$ は減少し、負の値をとったあと極限では $\psi=0$ となる。このとき、 $\psi$ が最大となる $x=0$ から極限値をとる距離 $x$ までの波長 $\lambda$ を、 $s$ を用いて次式で表すことができる<sup>4)</sup>。

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

ここで、DEMは離散化されたデータであるため、DEMをウェーブレット変換する場合、マザーウェーブレット関数であるメキシカンハット関数を離散化する必要がある。本検討では、 $s=0.5$ で検討を行うため式(3)より、 $s=0.5$ の $\lambda$ は2.0となる。したがって、離散化されたメキシカンハット関数は $s=0.5$ の場合、図-1に示すように-2~+2の9グリッドで表される。図-1の横軸はグリッドであることから、 $\lambda$ にグリッドサイズを乗じると、メキシカンハット関数の計算範囲(m)となる。本検討ではグリッドサイズを0.5mとするため、メキシカンハット関数の計算

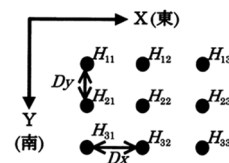
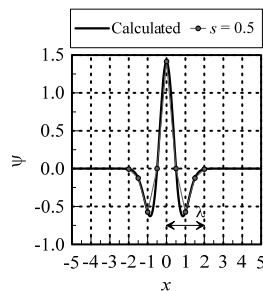


図-1 メキシカンハット関数 図-2 傾斜の計算に使用する格子点

範囲は任意のグリッド(式(1)の $a$ と $b$ )を中心として、 $s=0.5$ では-1.0~+1.0mとなる。

ウェーブレット係数は、マザーウェーブレット関数と任意の信号との相関関係の程度を表し、正の相関ではウェーブレット係数は正值、負の相関では負値となる。本研究ではマザーウェーブレット関数にメキシカンハット関数を用いており、地形に適用すると凸部が正值、凹部が負値で表現される。これより地形の凹凸の程度を、ウェーブレット係数の大小で表すことができる。ここで平坦地形のウェーブレット係数は、ゼロとならなければならない。DEMにメキシカンハット関数を適用するときスケールファクターを設定しなければならないが、上記に留意して設定しなければならない。メキシカンハット関数の離散化が適切でない場合、平坦地形であってもウェーブレット係数がゼロとならない結果が得られ、凹凸のある地形と表現することになる。このため、グリッドサイズ0.5mに適用することができるスケールファクターの最小値は0.5となる。

#### 2.1.2 傾斜量図作成方法

神谷ら<sup>1)</sup>は、地表面の傾斜を濃淡画像として表現した傾斜量図を用いて地形・地質の判読を試みている。これより、傾斜の計算式はRoberts型よりPrewitt型またはSobel型が判読に適していると報告している。本検討では、Prewitt型を用いて傾斜量図を作成しており、3×3近傍内の標高値(重み一定)で計算し傾斜量を求めている。具体的には、図-2のようにグリッドをとるとき、X方向の傾斜 $S_x$ およびY方向の傾斜 $S_y$ は、式(4)と式(5)により求められ、傾斜 $S$ は $S_x, S_y$ から式(6)より算出できる。傾斜量図は、傾斜 $S$ を式(7)により度数に換算した数値を用いて作成される。

$$S_x = \frac{(H_{11} + H_{21} + H_{31}) - (H_{13} + H_{23} + H_{33})}{6Dx} \quad (4)$$

$$S_y = \frac{(H_{12} + H_{13} + H_{23}) - (H_{31} + H_{32} + H_{33})}{6Dy} \quad (5)$$

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (6)$$

$$S \text{ (deg)} = \tan^{-1} S \cdot \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

### 2.2 計測方法と計測条件

鳥取大学乾燥地研究センター内に鳥取県が設置した建

設技術フィールドにおいて、地物を模擬したダンボール（1個  $0.5 \times 0.5 \times 0.5\text{m}$ ）を任意の個数設置し、計測を行った（図-3 参照）。模擬地物のサイズ一覧を表-1 に示す。このサイズとした理由は、前述のようにグリッドサイズ  $0.5\text{m}$ 、スケールファクターを  $s=0.5$  であることから、メキシカンハットの大きさは  $-1.0 \sim +1.0\text{m}$  となる。そこで、メキシカンハットより十分に大きいサイズ、メキシカンハットとほぼ同サイズ、メキシカンハットより小さいサイズの3種類とした。計測方法は、ドローンに搭載したSLAMを用い、ドローンは高度約  $10\text{m}$  で飛行させた（図-4 参照）。

表-1 模擬地物の大きさ

No	模擬地物の大きさ（ダンボール個数）
1	$5.5\text{m} \times 3.0\text{m}$ （11個 $\times$ 6個）
2	$2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ （5個 $\times$ 5個）
3	$1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ （3個 $\times$ 3個）

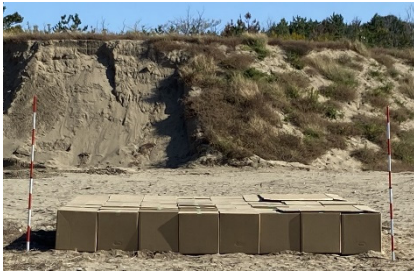


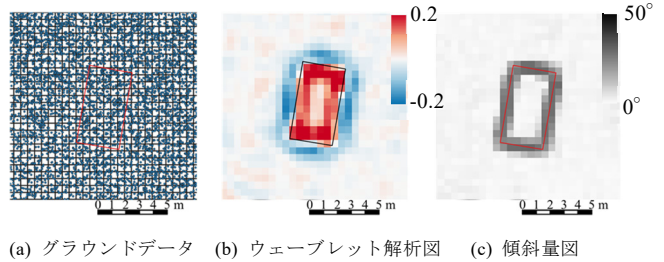
図-3 模擬地物の設置例



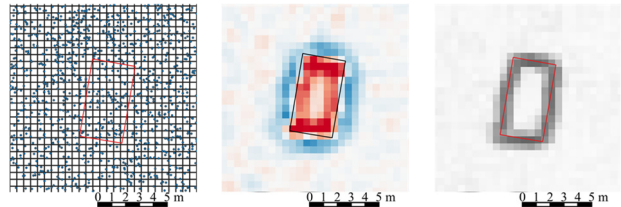
図-4 使用したドローンLiDAR

### 2.3 グラウンドデータ点密度調整とDEMデータ作成

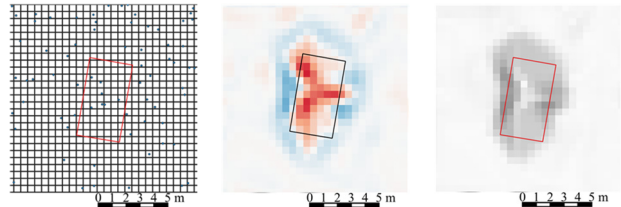
取得した点群に対し雑草などを取り除いて、グラウンドデータを作成した。ここで計測方法が低高度であること、樹木などがいないため、地物の壁面には多数のグラウンドデータが存在する。このため、平面で点密度を計算すると壁面の部分の点密度が他と比べて極端に大きくなること、これより作成するDEMに影響を与える。そこで、地物壁面のグラウンドデータを削除したものを点密度調整に用いることとした。点密度調整には、Pythonを用いた。Pythonのサンプリング手法には4つあり、Farthest Point Sampling, Inverse Density Importance Sampling, Random Sampling<sup>23)</sup>, Voxel Down Samplingがある。この4つのサンプリング手法のうち、点密度の疎密が大きくなるRandom Samplingを用いてダウンサンプリングを行なった。この処理より、約  $10 \text{ 点}/\text{m}^2$ 、約  $4 \text{ 点}/\text{m}^2$ 、約  $1 \text{ 点}/\text{m}^2$  のグラウンドデータを作成した。この作成したグラウンドデータからTINを作成し、このTINよりグリッドサイ



(a) グラウンドデータ (b) ウェーブレット解析図 (c) 傾斜量図  
約  $10 \text{ 点}/\text{m}^2$

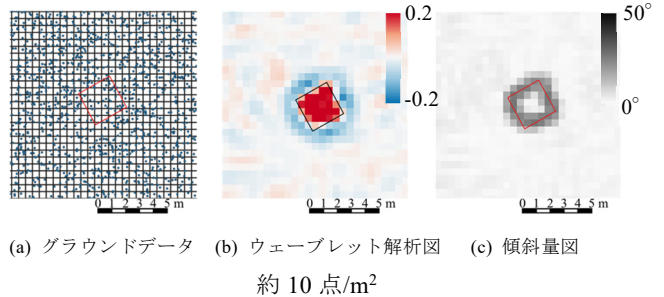


(a) グラウンドデータ (b) ウェーブレット解析図 (c) 傾斜量図  
約  $4 \text{ 点}/\text{m}^2$

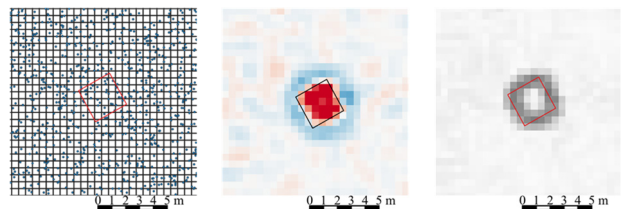


(a) グラウンドデータ (b) ウェーブレット解析図 (c) 傾斜量図  
約  $1 \text{ 点}/\text{m}^2$

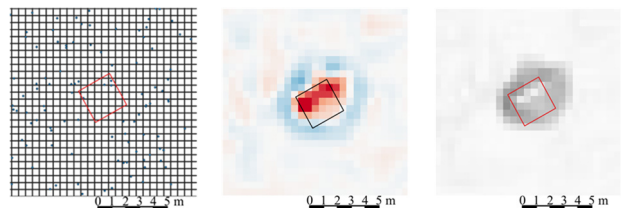
図-5  $5.5\text{m} \times 3.0\text{m}$



(a) グラウンドデータ (b) ウェーブレット解析図 (c) 傾斜量図  
約  $10 \text{ 点}/\text{m}^2$



(a) グラウンドデータ (b) ウェーブレット解析図 (c) 傾斜量図  
約  $4 \text{ 点}/\text{m}^2$



(a) グラウンドデータ (b) ウェーブレット解析図 (c) 傾斜量図  
約  $1 \text{ 点}/\text{m}^2$

図-6  $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$

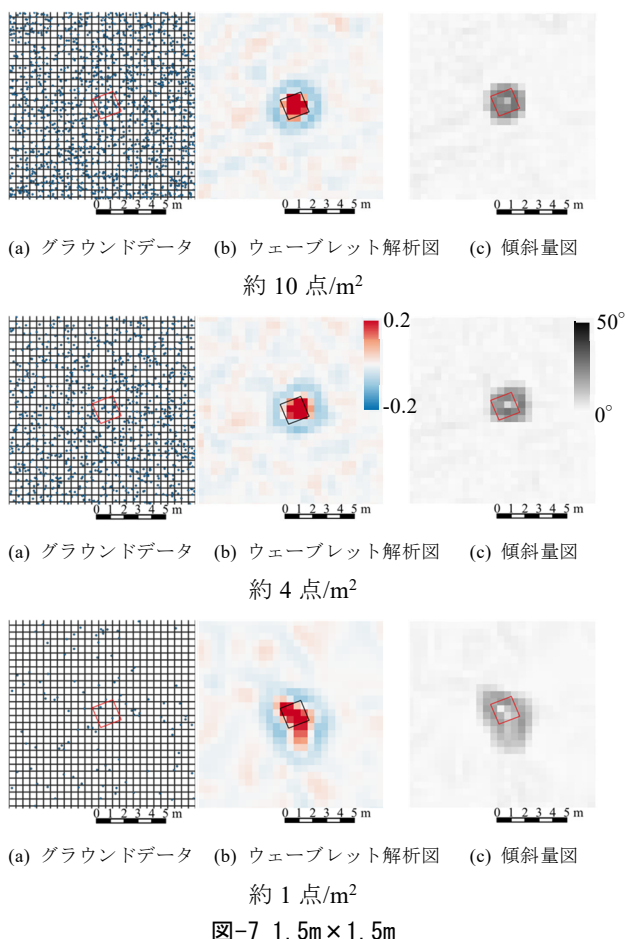


表-2 地物内のグラウンドデータ点密度

No	検討範囲内のグラウンドデータ点密度	地物内のグラウンドデータ点密度
1	約 10 点/m <sup>2</sup>	6.23 点/m <sup>2</sup>
	約 4 点/m <sup>2</sup>	3.94 点/m <sup>2</sup>
	約 1 点/m <sup>2</sup>	0.42 点/m <sup>2</sup>
2	約 10 点/m <sup>2</sup>	7.20 点/m <sup>2</sup>
	約 4 点/m <sup>2</sup>	4.80 点/m <sup>2</sup>
	約 1 点/m <sup>2</sup>	0.64 点/m <sup>2</sup>
3	約 10 点/m <sup>2</sup>	9.33 点/m <sup>2</sup>
	約 4 点/m <sup>2</sup>	4.89 点/m <sup>2</sup>
	約 1 点/m <sup>2</sup>	0.89 点/m <sup>2</sup>

ズ 0.5m の DEM を作成した<sup>24)</sup>。

### 3. グラウンドデータ点密度が異なる地形量図

図-5 から図-7 に、グラウンドデータ点密度ごとのグラウンドデータ ((a))・ウェーブレット解析図 ((b))・傾斜量図 ((c)) を示す。グラウンドデータには作成した 0.5m グリッドを示し、全ての図に地物の外形を示している。

表-2 に示したグラウンドデータ点密度は、検討範囲全体で求めている。ここでは地物内に存在するグラウンドデータ数を数え、これより地物内のグラウンドデータ点密度を求めた結果を表-2 に示す。約 4 点/m<sup>2</sup> は地物内の

点密度もほぼ同じであるが、約 10 点/m<sup>2</sup> と約 1 点/m<sup>2</sup> は地物内のグラウンドデータ点密度が小さい結果となった。これは、グラウンドデータの疎密によるものである。

図に示したウェーブレット解析図と傾斜量図より、約 10 点/m<sup>2</sup> と約 4 点/m<sup>2</sup> に視覚的な差異は小さく、地物の外形を表すことができている。なお、地物サイズ 5.5m × 3.0m のウェーブレット解析図は、他の地物サイズと異なり、地物中央部のウェーブレット係数が小さいため白色となっている。この理由は、前述のようにウェーブレット解析図はマザーウェーブレットであるメキシカンハット関数との相関を表わしているものである。このため、地物サイズがメキシカンハット関数よりも大きく、かつ地物中央部が平坦の場合、凹凸が無い箇所のウェーブレット係数はゼロとなる<sup>16)18)19)</sup>。約 1 点/m<sup>2</sup> は、どの地物サイズにおいても地物の外形を表せていない。約 10 点/m<sup>2</sup> と約 4 点/m<sup>2</sup> と比較して、ウェーブレット解析図と傾斜量図ともに着色された領域が大きくなっている。これは、グラウンドデータから TIN を作成し、TIN よりグリッドデータを作成する。グラウンドデータがない箇所は大きな TIN が作成されるため、設置した地物は外形と異なり、緩やかに標高が変化するグリッドデータが作成される。傾斜量図はこの影響を受け、地物外形の箇所は約 10 点/m<sup>2</sup> と約 4 点/m<sup>2</sup> よりも地物全体の黒色が薄くなり、傾斜量が小さくなっていることがわかる。ウェーブレット解析図においても、約 10 点/m<sup>2</sup> と約 4 点/m<sup>2</sup> よりも外側まで赤色となり、平坦部である箇所が凸部を表わす結果となっている。また、傾斜量図と異なり、グラウンドデータの分布がウェーブレット解析図に大きく影響を与えている。約 1 点/m<sup>2</sup> の地物付近についてウェーブレット解析図とグラウンドデータ分布状況を比較すると、グラウンドデータが無い箇所は、赤色からほぼ白色になっている。特に 5.5m × 3.0m は、地物の四隅にグラウンドデータが無いため地物中央部が赤色となり、前述の地物中央部が平坦であることを示す白色から変化していることがわかる。ウェーブレット係数は、前述のようにメキシカンハットとの相関性を求めているため、傾斜量よりもグラウンドデータの有無の影響が大きいといえる。以上よりウェーブレット解析図と傾斜量図ともに、約 10 点/m<sup>2</sup> と約 4 点/m<sup>2</sup> の違いはほとんど無く、約 1 点/m<sup>2</sup> は地物外形を表せないことは同様であるが、グラウンドデータの分布状況が与える影響は異なることがわかった。

### 4. グラウンドデータ点密度がウェーブレット解析図に与える影響

3. に記載したように、グラウンドデータ点密度が約 1 点/m<sup>2</sup> となると、ウェーブレット解析図と傾斜量図ともに地物外形を表わせないことがわかった。また、傾斜量図では約 10 点/m<sup>2</sup> と約 4 点/m<sup>2</sup> よりも約 1 点/m<sup>2</sup> では地物付近の傾斜量が小さくなっている。これに対しウェーブ

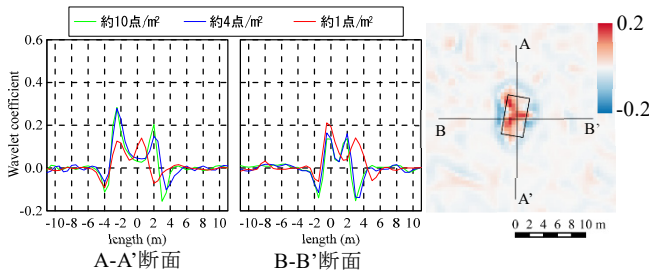


図-8 5.5m×3.0m

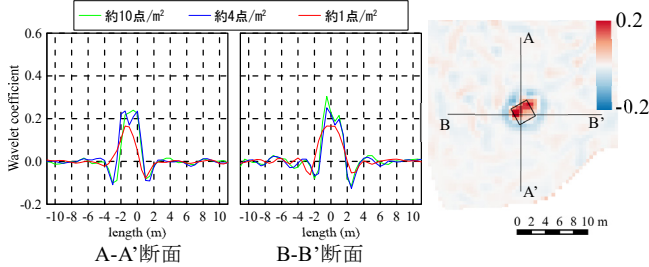


図-9 2.5m×2.5m

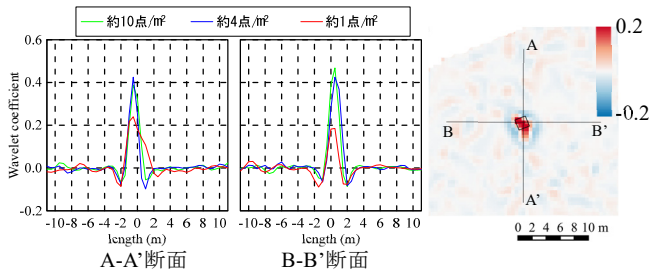


図-10 1.5m×1.5m

レット解析図は、グラウンドデータ点密度が減少しても、グラウンドデータが存在する箇所のウェーブレット係数はほぼ同じようである。本項では、グラウンドデータ点密度による地物のウェーブレット係数の変化について検討する。

図-8 から図-10 に、各断面のウェーブレット係数を示す。全ての地物において、約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>のウェーブレット係数変化状況は、ほぼ同じであることがわかる。なお、ウェーブレット係数はメキシカンハット関数との相関性を表わすものであり、2.に記載したように  $s=0.5$  であるためメキシカンハットの大きさは-1.0～+1.0m である。このため、平面的な大きさがメキシカンハットより 0.5m 小さい地物 No.3 が最も相関性がよいため、他の地物よりウェーブレット係数の最大値が大きい。他 2 つはメキシカンハットより大きいため、No.3 より相関性が低下し、ウェーブレット係数の最大値が約半分となっている。このように、ウェーブレット係数は比高差が同じであっても対象とする地物の平面的な大きさにより変化する。

地物 No.1 と No.2 の約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>では、前述のようにメキシカンハットより地物の平面的な大きさの方が大きい。このため、地物端より地物中央部のウェーブレット係数が小さくなっている。地物 No.1 は約 1 点/m<sup>2</sup>であっても、地物端より地物中央部のウェーブレット係数が小さくなっている。しかし、地物端のウェーブレット係数を約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>と比較すると、

最大値の地点が変化したり、ウェーブレット係数が減少している。しかし、グラウンドデータが存在する箇所のウェーブレット係数は、約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>とほぼ同じである。地物 No.2 は、約 1 点/m<sup>2</sup>になると地物中央部のウェーブレット係数の減少がみられず、約 1 点/m<sup>2</sup>のウェーブレット係数最大値と、約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>の地物中央部のウェーブレット係数がほぼ同じとなっている。これはグラウンドデータの分布に偏りがあることが影響している。地物 No.3 は、約 1 点/m<sup>2</sup>のウェーブレット係数最大値は、約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>と比較するとほぼ半減しているが、地物 No.2 と No.3 の最大値とほぼ同じである。メキシカンハットと地形の相関性が良いとウェーブレット係数は大きくなるが、地物 No.2 と No.3 にその傾向が表れたと考えられる。

以上の検討より、地物にグラウンドデータが存在すれば、グラウンドデータが存在する箇所のウェーブレット係数は、点密度に関わらずほぼ同じ値となることがわかった。

## 5. 結論

グラウンドデータ点密度がウェーブレット解析図と傾斜量図に与える影響に関する検討結果を以下に示す。

- (1) グラウンドデータ点密度約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>は、ウェーブレット解析図と傾斜量図ともに地物の外形を表わすことができる。
- (2) グラウンドデータ点密度約 1 点/m<sup>2</sup>は、ウェーブレット解析図と傾斜量図ともに地物の外形を表すことができない。また、傾斜量はグラウンドデータ点密度約 10 点/m<sup>2</sup>と約 4 点/m<sup>2</sup>よりも小さくなる。
- (3) 地物にグラウンドデータがあれば、点密度に関わらずウェーブレット係数はほぼ同じとなる。ただし、メキシカンハット関数との相関性により、比高差が同じでもウェーブレット係数は変化する。

公表論文と本検討結果より、ウェーブレット解析図を用いた机上調査の留意点を下記にまとめる。

ウェーブレット解析図は、斜面傾斜の影響を受けずメキシカンハット関数の大きさ（スケールファクターにより調整）に対応した凹凸を表現できることが特長である。ただし、これまでの検討<sup>18)</sup>により比高差 1～3m の凸地形とウェーブレット係数には正の相関関係がみられるが 3m 以上は対応していないこと、地物の平面的な大きさの影響を受けることがわかっている。これよりウェーブレット解析図は、1m 以上の比高差があることは判読できるが、着色の濃淡がそのまま比高差の大きさに対応していないこと、用いたスケールファクターを考慮して地物の平面的な大きさを判断する必要がある。さらに本検討結果より、グラウンドデータ点密度約 1 点/m<sup>2</sup>以下になるとウェーブレット解析図に影響を与えることを示し

た。これよりグラウンドデータ点密度約 1 点/m<sup>2</sup> 以下では比高差のある箇所が抽出されていないと考えるべきである。したがって、ウェーブレット解析図を用いた見逃しのない地形判読には、グラウンドデータ点密度を把握したうえでウェーブレット解析図を利用することが重要であり、グラウンドデータ点密度約 1 点/m<sup>2</sup> 以下の範囲は現地踏査などで確認する必要があるといえる。

#### 謝辞

鳥取大学工学部神田秀様と濱田知明様には、計測とデータ処理にご協力頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 神谷泉, 黒木貴一, 田中耕平: 傾斜量図を用いた地形・地質の判読, 情報地質, Vol.11, No.1, pp.9-22, 2000.
- 2) 千葉達朗, 鈴木雄介: 赤色立体地図-新しい地形表現手法-, 応用測量論文集, Vol.15, pp.81-89, 2004.
- 3) 戸田堅一郎: 航空レーザ測量データを用いた微地形図の作成, 砂防学会誌, Vol.65, No.2, pp.51-55, 2012.
- 4) 藤澤和範, 笠井美青: 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), 土木研究所資料, 第 4150 号, 2009.
- 5) 朝比奈利廣: ウェーブレット変換による微地形抽出, 地形表現とその周辺 その 4, pp.7-8, 2014.
- 6) 秋山幸秀, 世古口竜一: 微地形表現に優れた陰陽図, 地図, Vol.45, No.1, pp.37-46, 2007.
- 7) 鈴木敬子, 石川剛: 多重光源陰影と斜照法疑似陰影による地形表現に関わる研究: 武蔵野台地における例, 先端測量技術, Vol.109, pp.34-41, 2017.
- 8) 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, Vol.49, No.6, pp.318-330, 2009.
- 9) 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), Vol.73, No.2, pp.I\_92-I\_108, 2017.
- 10) 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, Vol.57, No.6, pp.277-288, 2017.
- 11) Sakita, K., Nishiyama, S., Miyashita, M., Ohnishi, Y.: Method for extracting the source of falling rock from microtopography highlight map created by high-density aerial laser data, 10th Asian Rock Mechanics Symposium The ISRM International Symposium for 2018, ISRM-ARMS10-2018-232, 2018.
- 12) 三浦健一郎, 小室宣孝, 蔵本直行: LP データを用いた道路防災落石危険個所の抽出, 地盤工学会誌, Vol.69, No.6, pp.30-33, 2021.
- 13) 崎田晃基, 菊地輝行, 西山哲: 地形量図を用いたサポートベクトルマシンによる落石発生源の検出, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.2, pp.147-157, 2022.
- 14) 崎田晃基, 菊地輝行, 西山哲: 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, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.45, pp.69-72, 2020.
- 15) 中村公一, 今西将文, 西山哲: 地形量図を用いた落石発生源抽出方法に関する基礎的検討, 第 63 回地盤工学シンポジウム, 3-2.3, 2022.
- 16) 今西将文, 中村公一, 西山哲: ウェーブレット解析図を用いた小規模な段差地形抽出手法に関する検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.22, 22-22052, 2023.
- 17) Imanishi, M., Nakamura, K., and Nishiyama, S.: Study of a method for extracting small-scale topographic irregularities using wavelet analysis, International Journal of GEOMATE, Vol.25, No.110, pp.148-158, 2023.
- 18) 中村公一, 今西将文, 西山哲: 落石発生源抽出に適したウェーブレット解析条件と可視化方法に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.19, No.1, pp.69-77, 2024.
- 19) 中村公一, 今西将文, 西山哲: 地物の大きさとウェーブレット係数の関係に関する検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.2, 23-00046, 2024.
- 20) 国土交通省: 三次元点群データを活用した道路斜面災害リスク箇所の抽出要領(案), <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001428667.pdf>, (参照 2024.6.21).
- 21) 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, Vol.109, No.3, pp.132-147, 2009.
- 22) P.S.アジソン: 図説 ウェーブレット変換ハンドブック, 朝倉書店, pp.11-15, 2005.
- 23) Open3D: [open3d.geometry.PointCloud](https://www.open3d.org/docs/release/python_api/open3d.geometry.PointCloud.html), [https://www.open3d.org/docs/release/python\\_api/open3d.geometry.PointCloud.html](https://www.open3d.org/docs/release/python_api/open3d.geometry.PointCloud.html), (参照 2024.6.21)
- 24) 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), <https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/download/re-za/310kouku.pdf>, (参照 2024.6.21).

(2024年6月26日 受付)