ISSN　0386-5878
土木研究所資料第 4150 号

土 木 研 究 所 資 料

地すべり地における

航空レーザー測量データ解析マニュアル（案）

平成２１年６月

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

Copyright © (2009) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第 4150号　2009 年 6 月

地すべり地における
航空レーザー測量データ解析マニュアル（案）

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　　上席研究員　藤澤和範
研究員　笠井美青

要　旨

本書は、地すべり地における航空レーザー測量（レーザープロファイラ）データの解析手法について記したマニュアル（案）である。航空レーザー測量からは、高精度で詳細な地形データが得られる。数メートルサイズの微地形に注目して判読を行う地すべり地では、航空レーザー測量データの活用に対する期待が高く、データが将来ますます取得されていくことが考えられる。データの活用手法として、本書ではまず「開度―ウェーブレット解析図」を提案する。本図には、急斜面であっても微地形がはっきりと読み取れる利点があり、地すべり地形判読の精度の向上に貢献出来ると考えられる。また「活性度の高い地すべりでは微地形が発達している」との考えに基づき、地表の粗さの指標である「固有値比」を用いてデータを解析する、地すべり活性度推定手法についても述べる。

キーワード：地すべり　航空レーザー測量　DEM 視覚化　地すべり活性度推定
開度―ウェーブレット解析図　固有値比

目　次

1. はじめに
1.1. 背景と目的 ・・・・・ 1
1.2. 航空レーザー測量の概要 ・・・・・ 1

2. 地すべり地における航空レーザー測量データの活用
2.1. 地すべり地における航空レーザー測量データの視覚化 ・・・・・ 5
2.2. 航空レーザー測量データを用いた地すべり活性度の推定 ・・・・・16
2.3. 航空レーザー測量データ解析値を利用した地すべり判読 ・・・・・31

3. まとめ ・・・・・35

1.　はじめに

1.1.　背景と目的

近年発展の目覚ましい航空レーザー測量技術は、植生が生育している場であっても、高密度かつ高精度な地表測量を可能にしてきている。森林地帯でも地すべり地の亀裂や段差等を把えられるようになっており、航空レーザー測量を行うことで、地すべりの見落としを減少出来るとの期待が高い。

航空レーザー測量データは、地すべりを認識すること、またその範囲を的確に捉えることを目的に、詳細な等高線図や地形イメージ（例えば陰影図等）の作成に用いられる。また、地すべり地のデータを数値解析することで、地すべりの活性度を推定するような活用方法もある[1)]。しかし航空レーザー測量はいまだ発展中の技術であり、現時点ではデータの効果的な活用方法を模索している段階にあるともいえる。

今後も技術の発展とともに、レーザー測量の精度は高くなり、コストは下がっていくことが予想され、地すべり地での技術の利用は増加すると考えられる。航空レーザー測量データが効果的に活用され、地すべりの位置や大きさ、活性度に関してより的確な情報が得られれば、それらの情報を道路等施設の建設・維持計画事業に組み入れることにより、地すべり災害の軽減・抑制に大いに役立つはずである。

本マニュアル（案）では、航空レーザー測量データを地すべり調査で効果的に活用することを目的に、地すべり地に適したデータの「視覚化」手法、及びデータを利用した「地すべり活性度推定」手法について記す。

1.2.　航空レーザー測量の概要

航空レーザー測量では、航空機に搭載したレーザー測距装置、GPS 受信装置、IMU(慣性計測装置)から得たデータを統合して、地表の標高を求める。高さの精度は±15 cm 程度である。

(1)レーザー測距装置

レーザー測距装置では、装置から発射したレーザー光が地面や地物に反射して戻ってくる時間を測ることで、装置からレーザー到達点までの距離を求める（**図-1-2-1**）。レーザー光は、樹木や家等の地物に反射した後に地表でも反射するが、植生が密に地面を被覆していると、地面へ到達しないこともある。よって、計測は落葉期や融雪直後に行うことが望ましい。装置の最新の機種では、地表でのレーザー到達点間の距離が 50～60 cm、又はそれ以下になるように、レーザー光が照射出来る。

(2) GPS 受信機

複数の GPS 衛星からの電波を、航空機搭載の GPS 受信機と地上の電子基準点が同時に受信する連続キネマティック測量を実施することにより、航空機の位置を高精度で求めることが出来る（**図-1-2-1**）。

(3) IMU (慣性計測装置)

IMU は、航空機の姿勢や加速度を測る装置であり、レーザー光の発射された方向を正しく補正する為に用いられる。

得られた航空レーザー測量データは、一定間隔ごとに標高値を表す DEM（数値標高モデル）（図-1-2-2）に加工される。この加工では、まず全取得データから建物や植生などの地物のデータを除去するフィルタリング作業を行う。そして作業後に残った「地面」の標高データから、各 DEM 格子点の標高値が計算されることになる。格子の間隔（図-1-2-2 中の X）は、1 m や 2 m が主流であるが、0.5 m の DEM も最近作成されるようになってきた。一般にこの DEM を用いて、等高線図及び地形イメージの作成や、地形解析が行われる。

ここで留意すべきことは、フィルタリング作業では「地面」とみなされた測点が、実際には「地面」ではない場合もあることである。フィルタリングについては、航測会社によって独自の方法があり、作業内容も作業者に依存するところが大きい。また DEM の格子点の標高値を推定する際、植生が密生している等の理由でレーザー光が近傍の地面に到達していなければ、遠距離にある測点の標高から値を求めなければならなくなる。すなわち航空レーザー測量データより求められた図や値については、実際の地形や値との間に誤差があることを常に認識して、それらを取り扱うことが重要である。

ここで誤差が大きい例として、図-1-2-3（地上開度図：見通し距離 2 m）を示す。この図の DEM サイズは 1 m と細かく、測量範囲全体についての地上へのレーザー到達密度も十分に高い（1.0 点/m²）はずであるが（巻末参考資料：D 地区）、このイメージでは実際の地形には存在しない、小さな穴や三角形が各所に見られる。これらの架空の地形は、局所的に地表へのレーザー到達密度が低かった為に出現したと考えられるが、その他にも、フィルタリングの内容による影響は否めない。データのユーザーとしては、DEM が地形を適切に再現できているか、まず地形イメージ等で確認をした上で、データを取り扱うことが望ましい。

なお航空レーザー測量による地形データの取得が一般化したのは 2005 年頃からであり、これよりも前に取得されたデータは解析用として適さない場合もある。国土地理院によって標準仕様が制定されたのは、以下に記すように 2006 年になってからである。

・基本測量：

【航空レーザ測量による「数値地図 5 mメッシュ（標高）」作成作業規程】　2004 年 3 月

・公共測量：

【公共測量による数値標高モデル（DEM）作成マニュアル（案）】　2006 年 4 月

【公共測量の準則】　2008 年 3 月

図-1-2-1　航空レーザー測量模式図

図-1-2-2　DEM 作成模式図

図-1-2-3　地表に穴や三角形が出現している地形イメージ（航空レーザー測量：2004 年 11 月）

2. 地すべり地における航空レーザー測量データの活用

2.1. 地すべり地における航空レーザー測量データの視覚化

地すべり地を対象に取得された航空レーザー測量のデータを視覚化する際に求められることは、作成された地形イメージが、判読の鍵となる微地形[2]をはっきりと表していることである。例えば**図-2-1-2**では滑落崖、緩斜面等の地すべりブロック頭部の地形がよく表されており、地すべり地形を容易に抽出することが出来る。

陰影図（**図-2-1-2**）は一般的によく用いられるイメージ図であるが、仮想の光源を設定して陰影をつけていることから、光源の方向が図上の微地形の出現の仕方に影響を与えるという報告もある[3]。そこで以下に、仮想光源を必要としない地形のイメージ図の作成手法を記す。

図-2-1-1　等高線図（1m DEM より作成。等高線間隔は 1m。破線は地すべり範囲）

図-2-1-2　陰影図（1m DEM より作成。図-2-1-1 と同箇所。破線は地すべり範囲）

（1）斜面勾配

最も基本的な地形要素である斜面勾配は、DEM データを視覚化することにも優れている（例：**図-2-1-4**）。ここでは、DEM データを扱う上で一般的なソフトウェアである ArcGIS で用いられているアルゴリズムを紹介する[4)]。 3×3 のグリッドセルのウィンドウの勾配 I(度)は、

$$I = \arctan\left((dz/dx)^2 + (dz/dy)^2 \right)^{0.5} \times 57.29578$$

ここでウィンドウ内のグリッドセルの標高値が、**図-2-1-3** のように並んでいるのであれば、

$$dz/dx = \{(a + 2d + g) - (c + 2f + i)\} / (8\ D)$$
$$dz/dy = \{(a + 2b + c) - (g + 2h + i)\} / (8\ D)$$

D は、グリッドセルの大きさである。 得られた勾配は、ウィンドウの中心のグリッドセルの値として表される。

a	b	c
d	e	f
g	h	i

図-2-1-3　3×3 グリッドセルウィンドウ内の標高値

図-2-1-4　斜面勾配図（1mDEM より作成）

図-2-1-5　地上開度図（1mDEM、見通し距離 1m）

図-2-1-6　立体的に見えるように、図-2-1-5 の色相を変えた図（修正開度図）

図-2-1-7　地点 A の方位 D における断面図

(2)　開度

開度は、横山他 [5] により提案された解析要素である。地上開度と地下開度があるが、DEM データの視覚化に関しては、両者を用いた結果に大きな差はない。ある地点 A からの見通し距離 L の地上開度（Φ_L）及び地下開度（Ψ_L）は、次のように定義される。

$$\Phi_L = ({}_0\phi_L + {}_{45}\phi_L + {}_{90}\phi_L + {}_{135}\phi_L + {}_{180}\phi_L + {}_{225}\phi_L + {}_{270}\phi_L + {}_{315}\phi_L)/8$$

$$\Psi_L = ({}_0\psi_L + {}_{45}\psi_L + {}_{90}\psi_L + {}_{135}\psi_L + {}_{180}\psi_L + {}_{225}\psi_L + {}_{270}\psi_L + {}_{315}\psi_L)/8$$

ここで ${}_D\phi_L$ と ${}_D\psi_L$ は、ある地点 A の方位 D の方向について、地点 A からの見通し距離 L 以内の範囲での最大の地上角又は地下角を示す（**図-2-1-7**）。

地すべり地の微地形を明確に表す為に、見通し距離 L をグリッドサイズと同じにする場合には、方位 0，90，180，360 度方向の、対象点に隣接する 4 点について、${}_D\phi_L$ 又は ${}_D\psi_L$ を求める。またその際に、開度 90 度以上を 90 度として淡色に表せば、地形をより立体的に表現出来る（**図-2-1-5, -6**）。

DEM が実際の地形をよく再現している場合には、開度図では斜面勾配図よりも地表のテクスチャーを細かく表すことが出来る（**図-2-1-4, -5, -6**）。しかし**図-1-2-3** で示した例のように、DEM が実際の地形をあまりよく再現していない場合には、開度よりも斜面勾配を用いる方が、地すべり地形判読には無難である（**図-2-1-8, -9**）。

図-2-1-8　地上開度図（1m DEM、見通し距離 2m）。図-1-2-3 より抜粋。

図-2-1-9　斜面勾配図（1m DEM）

(3)ウェーブレット解析

地すべりの判読には、段差、亀裂、凹地、小丘等の微地形の分布が手がかりとなる。すなわち上述の地形イメージに加え、微地形を強調出来るような画像があれば、地すべり斜面の抽出の補助手段として活用出来るはずである。微地形を強調する目的で用いられる地形解析には、2 次元ラプラシアン解析[1]や、2 次元ウェーブレット解析[6]があげられる。ここでは特に近年、地すべり地での微地形の抽出にその有効性が報告され始めている「メキシカンハット」関数を用いたウェーブレット解析を紹介する[7]。

2 次元ウェーブレット解析では、「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、その波と起伏との相関関係の程度を表す（**図-2-1-10**）。ウェーブレット解析はフーリエ解析と類似しているが、フーリエ関数と異なる点は、様々なウェーブレット関数が存在することである。その中の１つであるメキシカンハット関数は、**図-2-1-11** に示した形を示す。2 次元のメキシカンハット関数は上方から見ると、円形をした関数形になる為、x 方向及び y 方向のスケールを同一に設定する限り、関数を当てはめていく方向の影響は、解析結果に表れない。関数と地表面の凹凸との相関性を表すウェーブレット係数，C は、以下のように表される。

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

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

ここで、z(x, y)は座標（x, y）の標高値、a, b は任意の座標（a, b）、 s はスケールである。メキシカンハットのスケール, s は、代表周波数, f と

$$\mathrm{f}=\sqrt{\frac{5}{2}}\times\frac{1}{2\pi\,\mathrm{s}}=\frac{0.252}{\mathrm{s}}$$

の関係があり、波長，λは 1 /f より

$$\lambda \fallingdotseq 4\,\mathrm{s}$$

となる。計算する DEM のサイズが１ｍであれば、s = 1 の時の波長は 4 ｍ、DEM のサイズが 2 ｍであれば、s = 1 の時の波長は 8 ｍとなる。

図-2-1-10　メキシカンハット関数を用いた地表面の解析模式図（Addison[8] に加筆）

図-2-1-11　メキシカンハット関数

図-2-1-12 は、ｘおよびｙ方向のスケールをｓ＝１に設定したメキシカンハット関数を用いて、ウェーブレット解析を行った例である。用いた DEM のサイズは１ｍである。図から、この解析では微地形がよく強調されることがわかる。

図-2-1-12 を同範囲の修正開度図（図-2-1-13）と重ね合わせると（図-2-1-14: 開度－ウェーブレット解析図)、急傾斜斜面の微地形が、修正開度図よりも明確に表れる立体的な図が出来る(図-2-1-15)。またこの図では、尾根が淡色、沢が暗色で表現される為、尾根と谷の区別がつきやすい（図-2-1-14、-15)。データの視覚化に光源を必要としない為、斜面方位の影響が微地形判読に表れないこともあり、開度―ウェーブレット解析図は地すべり判読に十分に活用出来る地形イメージであると考えられる。

図-2-1-12　地すべり多発地帯におけるメキシカンハットウェーブレット解析による解析画像

図-2-1-13　図-2-1-12 と同箇所の修正地上開度図（1 m DEM, 見通し距離= 1 m）

図-2-1-14　　開度－ウェーブレット解析図（図-2-1-12 と図-2-1-13 を重ね合わせた図）

図-2-1-15　修正開度図（上）と開度—ウェーブレット解析図（下）の比較。図-2-1-13 及び図-2-1-14 中の黒枠で囲まれた部分を拡大。開度—ウェーブレット解析図では、急斜面の微地形がよりはっきりと表現されること、また尾根（淡色）と沢（濃色）の区別がしやすいこと、が分かる。

2.2.　航空レーザー測量データを用いた地すべり活性度の推定

本項では、航空レーザー測量データを用いた地すべり活性度の推定手法について述べる。動いている地すべりは、一般的に段差、亀裂、凹地、小丘などの微地形を形成することから、その表面は「粗い」。また微地形分布の特徴は、地すべりの各発達段階にて異なり、その発達段階は斜面勾配と関係があると考えられる [9]。そこでここでは、地表の粗さを示す指標「固有値比」[10,11]と斜面勾配を用いた手法について記す。

2.2.1　固有値比

固有値比は、地表面の単位斜面における法線ベクトルのばらつきの大きさの指標である（**図-2-2-1**）。DEM を用いる時は、Woodcock の手法 [2, 10,11]に従い、以下のように求める。

(1) 求め方

ここでは 3×3 のグリッドセルのウィンドウを対象に、固有値比を求める。グリッドセル i (=1～9)における法線ベクトルを(x_i, y_i, z_i)とすると、法線ベクトルの方向テンソル Tは以下のとおりに示される。

$$T = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix}$$

ここで

$$x_i = \sin\theta_i \cos\varphi_i$$
$$y_i = \sin\theta_i \sin\varphi_i$$
$$z_i = \cos\theta_i$$

傾斜角, θ と方位角, φ は**図-2-2-2** に示す通りである。次に以下の行列から、3 つの解（固有値）を得る。固有値のうち、最大値を λ_1、最小値を λ_3 とする。

$$|T - \lambda E| = \begin{vmatrix} \sum x_i^2 - \lambda & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 - \lambda & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 - \lambda \end{vmatrix}$$

得られた固有値を次のように正規化する。

$$S_i = \lambda_i / n \qquad n = 9 \text{（グリッドセル数）}$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 1$$

ここでは、固有値比として $\ln(S_1/S_2)$ を用いる。なお図 2-2-3 にも固有値比の求め方のフローチャートを参考までに掲載する。

図-2-2-1　DEM グリッドセルの法線ベクトルのばらつき概念図（下図の地表が粗い）。「グリッドセルの法線ベクトル」は、グリッドを構成する三角形の法線ベクトルを平均して求める。

図-2-2-2　θ と φ によって定義される空間ベクトル OP

図-2-2-3　固有値の求め方例。Woodcock[11]による図をもとに作成

なお固有値比を概念的に捉えるのであれば、「なめらかな地表面であれば、ウィンドウの法線ベクトルが１方向を向き（**図-2-2-1** 上図）、ある方向を代表する固有値が突出して大きくなる」→「固有値比が大きくなる」、としてもよいかもしれない。これは逆に、「あれた地表面であれば、突出した値の固有値が存在しない（ベクトルがあらゆる方向を向く：**図-2-2-1** 下図）」→「固有値比が小さくなる」ということでもある。

(2) 固有値比と地形のタイプ

固有値比が示す地形のタイプが分かれば、固有値比の分布図より、その斜面部分の状況がある程度推定出来ると考えられる。3 箇所の地すべり多発地帯（**表-2-2-1**）にて、航空レーザー測量データ解析と現地調査を行い、固有値比と地形のタイプとの関係を調べた。**図-2-2-4** と-5 は B

地区と C 地区の開度-ウェーブレット解析図である。A 地区の開度-ウェーブレット解析図は図-2-1-14 に既に示している。どの地区も s＝1 に設定している。

表-2-2-1　調査地区の概要

地区	地質	平均斜面勾配	植生	グラウンドレーザー点密度	DEM サイズ
A	火山噴出物、 中新世堆積岩類・火山岩類 白亜紀花崗岩類 固結度弱	26 度	広葉樹林で一部が杉や桧の植林地	5.4 点/m²	1 m
B	中新世凝灰岩・溶結凝灰岩・砂岩と泥岩互層・花崗閃緑岩 固結度中	32 度	広葉樹林で一部が杉や桧の植林地	0.5 点/m²	2 m
C	白亜紀砂岩・頁岩・砂岩と頁岩互層・チャート・緑色岩類。 固結度強	36 度 ただし斜面勾配 40 度以上の急峻な斜面が川沿いに分布	杉や桧の植林地	1.1 点/m²	1 m

図-2-2-4　B 地区の開度-ウェーブレット解析図

図-2-2-5　C 地区の開度-ウェーブレット解析図

図-2-2-6　固有値比と地形タイプとの関係。各地形タイプについて、地形上に位置するグリッドセルの固有値比を小さい値から並べ、小さい方からの 25 %、大きい方からの 25 %をそれぞれ除いた範囲を緑色で表す。赤は最もグリッド数が多かった範囲。「凹凸のある斜面」は、小丘や凹地などによる凹凸がある地形。

表-2-2-1 で示した通り、各地区では地質や地形の特徴に加え、グラウンドレーザー点密度（地表に到達したレーザー点の密度）や DEM サイズが異なる。しかし図-2-2-6 に示されているように、各地形タイプは、各地区でほぼ同じ範囲の固有値比をとっていることがわかる。すなわち固有値比は、地表の粗さを微地形と絡めて検討する際に、様々な箇所で共通に当てはめることの出来る指標であるといえる。

(3) 固有値比と地すべり

クリープ的に滑動している岩盤すべりでは、段差や陥没帯、亀裂などが出現しやすい。これらの地形は固有値比が 5 以下、特に 2.5 から 4 までの範囲を主に示すことから（図-2-2-6）、地すべりの活性度の高さを推定する時は、この範囲にある固有値比をとるグリッドセルの分布を手掛かりに出来ると考えられる。また地すべり滑動が進んでいる緩勾配の地すべりでは、固有値比が 4 から 6 の範囲を主にとる、小丘や凹地などによる凹凸地形（図-2-2-6）が多く出現する。すなわち緩勾配の地すべりの活性度を推定する際には、この範囲の固有値比をとるグリッドセルの分布に注目することになる。

図-2-2-7 から-12 には、各地区から抜粋した、活性度が高い、又は低い地すべりの固有値比分布及び現場写真を示した。また比較の為に、各地すべりと、地区全体の固有値比と斜面勾配の密度分布も示した（図-2-2-7 から-12, -13）。その結果、図-2-2-14 に示すような地すべりの斜面勾配と活性度との関係を、地区間に共通して見いだすことが出来た。

図-2-2-7　A 地区の活性度の高い地すべり(AU タイプ：図-2-2-14)の開度—ウェーブレット解析図（図-2-1-14 から抜粋）と固有値比分布図。両図の矢印は同地点を指す。地すべり地表面には亀裂、凹地、小丘、沼などが数多く形成され、地すべり内の固有値比分布は値 4-5 に高いピークがくる一山のヒストグラムとなる。A 地区には同様の地すべりが多く存在する。

図-2-2-8　B 地区の活性度の高い地すべり(AB タイプ：図-2-2-14）の開度―ウェーブレット解析図（図-2-2-5 から抜粋）と固有値比分布図。両図の矢印は同地点を指す。凹地、亀裂、急崖の為に固有値比 4 以下の密度が高い。

図-2-2-9　B 地区の活性度の高い地すべり(AU タイプ：図-2-2-14) の開度—ウェーブレット解析図（図-2-2-5 から抜粋）と固有値比分布図。両図の矢印は同地点を指す。図-2-2-7 の地すべりと同様に、亀裂、凹地、小丘、沼などが数多く形成され、地すべり内の固有値比分布は値 4-5 に高いピークがくる一山のヒストグラムとなる。

図-2-2-10　B 地区の活性度の低い地すべり(DU タイプ：図-2-2-14) の開度―ウェーブレット解析図（図-2-2-5 から抜粋）と固有値比分布図。両図の矢印は同地点を指す。図-2-2-9 と比較して明らかなように、地すべり表面はかなり滑らかになっており、固有値比 5.5 以上の密度がかなり高くなる。また斜面の勾配もかなり緩やかである。

図-2-2-11　C 地区の活性度の高い地すべり(AB タイプ：図-2-2-14) の開度—ウェーブレット解析図（図-2-2-6 から抜粋）と固有値比分布図。両図の矢印は同地点を指す。写真に示す尾根の両側から浸食が進む。斜面下方の低い固有値比が分布している範囲には、弛んだ岩盤が見られる。

図-2-2-12　C 地区の活性度の低い地すべり(DB タイプ：図-2-2-14) の開度—ウェーブレット解析図（図-2-2-6 から抜粋）と固有値比分布図。斜面全体の勾配は周囲と比べてかなり緩やかであり、固有値比も高い。両図の矢印は同地点を指す。

図-2-2-13　各地区（A 地区: 30 km²、B 地区: 10 km²、C 地区: 5 km²）の、固有値比と斜面勾配の密度分布

図-2-2-14　地すべりのタイプと勾配、活性度についてまとめた概念図。A: active, D: dormant, B: bimodal, U: unimodal の略。固有値比「高」は、その地区の密度分布（図-2-2-13）と比較して相対的に高い、という意味である。

図-2-2-14 を文章にすると、以下の通りになる。ある地域にて航空レーザー測量データを用いて地すべりの活性度を推定する場合には、まず周辺の地区全体の固有値比及び斜面勾配の密度分布を求めた上で、

地すべり内の固有値比の密度分布が二山の場合は
　周囲と比較して
　固有値比 2.5-4 の密度が高く、勾配が急である場合　→　活性度の高い AB タイプ
　固有値比 4-6 の密度が高く、勾配が緩である場合　→　活性度の低い DB タイプ

地すべり内の固有値比の密度分布が一山の場合は
　周囲と比較して
　固有値比 4-6 の密度が高く、勾配が緩である場合　→　活性度の高い AU タイプ
　固有値比が 6 以上 の密度が高く、勾配が緩である場合　→　活性度の低い DU タイプ

であるといえる。

なお A 地区は地質が脆弱な地域にあり、主に AU タイプの地すべり等による斜面の浸食により、地区全体の変形・開析がかなり進んでいる。このことは、固有値比が 4-6 の範囲に密度が高い一山のヒストグラム分布（**図-2-2-13**）にも反映されている。一方で、ヒストグラムが二山にはっきりと分離している C 地区（**図-2-2-13**）では岩盤すべりが主であり、A 地区で見られるような、緩勾配で凹凸地形の発達が進んでいる地すべりは余り見られない。

2.3.　航空レーザー測量データ解析値を利用した地すべり判読

航空レーザー測量により、正確且つ詳細な地形図が作成されるようになっても、地すべりの判読や輪郭の決め方などは、個々の技術者の経験や感覚に依存するところが大きい。そこで、微地形の特徴を反映しているレーザー測量データの解析値を判断の参考として、地すべり判読の精度の向上に役立てることを考える。

（1）緩勾配の地すべり

緩勾配の地すべりは一般的に、地すべり滑動が進んでいて周囲の地形との違いが明らかであることが多い。従って判読の際の見落としも少ないと考えられるが、もし地すべりの見落としをチェックするのであれば、固有値比が 4 から 6 の範囲をとるグリッドセルが卓越する箇所を探す事が考えられる（例：図-2-3-1）。そのような地すべりの輪郭は、低い値の固有値比をとるグリッドセルの分布から、判断出来ることもある。例えば図-2-3-1 に示した地すべりの輪郭は地形イメージ上で引かれている。しかし固有値比分布からは、その周りの固有値比 4 以下（青色系）のグリッドセルにより形成されている線の方が、地すべりの輪郭である可能性が高いといえる。

図-2-3-1　AB タイプの地すべりの固有値比分布（B 地区）

(2) 岩盤すべり

岩盤すべりでは、頭部以外の地すべり地形が不明瞭であることが多く、航空レーザー測量データから作成された地形イメージや等高線図を用いても、地すべりを的確に判読・抽出することは難しい。岩盤すべり判読の手がかりとなるのは、固有値比が 4 以下のグリッドセルの分布であると考えられた。例えば図-2-3-2 に示す岩盤すべりは、固有値比 4 以下のセルが面的に卓越して分布している範囲である。図に示すように、岩盤すべりの上部にある斜面は、下部斜面からの浸食の影響をうけて少し粗くなり、6 以下の固有値比が分布する傾向にある。

図-2-3-2　C 地区の岩盤すべり（破線で囲まれた範囲）の固有値比分布

(3) 地すべりと崖錐斜面の判別

地図上の判読では地すべり地形である可能性が指摘されたものの、その後の現地での詳しい踏査やボーリング調査から、地すべりではなく崖錐斜面と判断される例もまれではない。地すべりと崖錐斜面ではその動態が異なり、対策の仕方も違ってくる。これらの斜面の見分け方は、その斜面勾配構成を参考にするとよいと考えられる（図-2-3-3）。これは崖錐斜面では地すべり斜面と比較して、安息角付近の斜面勾配をとる単位斜面が多くなるからである。

またC地区の、径5 cm程度の粗い角レキの転石がたまっている斜面では、安息角付近の勾配が卓越する他、固有値比2.75-4をとるセルも集中することが分かっている[12]（図-2-3-4）。

図-2-3-3　B地区での地すべりと崖錐斜面の勾配密度分布。上２カ所と下２カ所の斜面はそれぞれ、近傍に位置する。

図-2-3-4　C 地区の崖錐斜面における固有値比（上）と斜面勾配（下）の分布

3. まとめ

本マニュアル（案）では、地すべり調査分野における航空レーザー測量データの活用方法について記した。この分野でのレーザー測量データの主な活用目的は、「地すべり判読」であるといえる。より精度の高い「地すべり判読」を目指して、微地形判読を容易にする為の様々なデータ視覚化手法が提案されているところである。ここでは、開度―ウェーブレット解析図を新しく提案した。開度―ウェーブレット解析図の特徴には、以下の 3 点があげられる。

① 急傾斜の斜面でも微地形が明確に表される。
② 沢と尾根の色が異なって表される為、地形判読がしやすい。
③ 視覚化に光源を必要としないため、斜面方位の影響が地すべり判読に表れない。

今後、開度―ウェーブレット解析図は、色彩や、色の濃淡の調整を工夫することで、より見やすい視覚化図へと発展できる可能性もある。

航空レーザー測量データはデジタルデータであり、微地形の影響が反映された地形量を、コンピュータ上で容易に求めることが出来る。活発な地すべりでは様々な微地形が形成されると考えられることから、地すべりの活性度とこの地形量との関係が明らかになれば、地形量を「地すべり活性度推定」に役立てることが出来るはずである。2.2 では、固有値比と斜面勾配を指標とした、地すべり活性度推定手法を示した。この手法は、地質及び地形的背景の異なる地区でも、共通して適用できることも分かった。また両指標を組み合わせれば、地すべりの見落としや、見間違いを見つけるツールとして活用できる可能性があることも示した。

なお本マニュアル（案）で扱ったデータでは、A 地区と C 地区の地形イメージが、実際の地形をより詳細に、また的確に表していることが、現地調査からも確認された。両地区で実施された測量の共通点は、航空機の対地高度が低いこと（1200 m 以下）、対地速度が遅いこと（122 km/h 以下）、レーザー発射数が多いこと（100,000 回/秒）である（巻末参考資料）。これらの好条件により、他地区よりも、高精度で詳細な測量を実現出来たといえる。両地区ではグランドデータ点密度（地上へのレーザー光到達点密度）も高い（1 m^2 につき 1 点以上）が、地形イメージに穴や三角形等の架空の地形が現れた D 地区も同様の密度であることから、グランドデータ点密度自体は DEM データの信頼性の指標にはなり得ないことが分かる。これらの架空の地形の出現は、地表へのレーザー光の到達密度が局所的に低かったこと以外に、フィルタリングの仕方にも問題があったことが想定される。例えば、対地高度、対地速度、レーザー発射数とも、測量条件は他と比べて良くない B 地区では、おそらくフィルタリングが上手くなされたことで、地形イメージに架空の地形が目立って出現していない。本書で示したように、そのようなデータでは、A 地区や C 地区のように高質なデータと同様の地形解析を行うことが、十分に可能である。

地形を的確に表していないデータを用いれば、信頼性の低い解析結果を得ることになってしまう。

「はじめに」にも述べたように、データのユーザーは、DEM からまず地形イメージを作成し、地形が的確に表現されているかを確認した後、データを取り扱うことが望ましい。またその際に、DEM がある程度的確に地形を表現していると判断したとしても、データは「絶対正」ではないことに常に留意すべきである。

信頼性の高い DEM を用いて解析を進めたとしても、「航空レーザー測量データの活用は、地すべりの危険性が高い可能性のある範囲を抽出するに過ぎない」ことも忘れてはならない。抽出した後は必ず現地調査に赴いて地すべりの実態について調査し、必要であれば専門家に相談することが望ましい。現地での地すべり調査方法については、「地すべり防止技術指針及び同解説」[2)]に詳しい。

航空レーザー測量はいまだ発展中の技術であり、現在はデータの効果的な活用方法を模索している段階にあるといえる。第 1 章でふれたように、航空レーザー測量データを過信せず、また測量時点の技術水準を十分に理解したうえで、地すべり調査に有意義に取り入れ、用途に合わせて活用していくことが重要であると考える。

参考文献

1) McKean, J., Roering, J., 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry, *Geomorphology* 57, 331-351.

2) 国土交通省砂防部, 独立行政法人土木研究所, 2008. 地すべり防止技術指針及び同解説. 社団法人全国治水砂防協会.

3) Smith, M.J., Clark, C.D., 2005. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping, *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 885-900.

4) Burrough, P. A., McDonell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York. 190pp.

5) 横山隆三, 白沢道生, 菊池 祐, 1999. 開度による地形特徴の表示, *写真測量とリモートセンシング* 38, 26-34.

6) Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. America. Meteorological Society* 79, 61-78

7) Booth, A.M., Roering, J.J., Perron, J.T., 2009. Automated landslide mapping using spectral analyis and high-resolugion topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology* 109, 132-147.

8) Addison, P.S., 2002. The Illustrated Wavelet Transform Handbook, IOP Publishing Ltd.（新誠一・中野和司監訳, 2005. 図説ウェーブレット変換ハンドブック　朝倉書店）

9) 渡正亮, 1992. 岩盤地すべりに関する考察、地すべり 29, 1-7.

10) Woodcock, N.H., 1977. Specification of fabric shapes using an eigenvalue method, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 88, 1231-1236.

11) Woodcock, N.H., Naylor, M.A., 1983. Randomness testing in the three-dimensional data, J*our. Struct. Geol.* 5, 539-548.

12) Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., Fujisawa, K., *in press*. LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan, *Geomorphology*.

その他、以下の文献に本稿の詳しい内容を報告している。

1) 笠井美青, 藤澤和範, 池田学, 松田昌之, 2008. 航空レーザー計測による地すべり地形解析, 平成20年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 526-527.

2) 笠井美青, 池田学, 藤澤和範, 松田昌之, 鈴木雄介, 2008. 航空レーザー測量データから作成されたDEMの解析に基づく地すべり地形発達プロセスの推定, *日本地すべり学会誌* 45, 26-32.

3) 笠井美青, 池田学, 藤澤和範, 2008. レーザプロファイラデータを用いた初生地すべりの計測評価, *土木技術資料* 50, 12-15.

4) Kasai, M., Fujisawa, K., Ikeda, M., 2008. LiDAR-derived DEM analysis of landslide processes in differing geological setting in Japan, *Proceedings of the International Conference on*

Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region, pp. 427-433.

5) Kasai, M., Ikeda, M., Fujisawa, K., Asahina, T., Matsuda, M., 2008. Morphometric analysis of landslide-prone areas in Japan using LiDAR-derived DEMs, *Proceedings of the First World Landslide Forum*, pp.51-54.

6) Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., Fujisawa, K., *in press*. LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan, *Geomorphology* (DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.06.004).

巻末参考資料

本マニュアル（案）で用いた航空レーザー測量データ諸元

	A 地区	B 地区	C 地区	D 地区	E 地区
計測日	2004 年 11 月 6 日から 11 月 14 日	2003 年 5 月 1 日	2006 年 2 月 27 日、3 月 1 日	2004 年 11 月 24 日	2006 年 12 月 19 日
対地高度	1,000 m	2,000 m	1,200 m	1,500 m	800 m
対地速度	100 km/h	203.7 km/h	122 km/h	200 km/h	252 km/h
レーザー発射数	100,000 回/秒	24,000 回/秒	100,000 回/秒	24,000 回/秒	25,000 回/秒
ビーム径	0.3 m	0.3 m	0.25 m	0.3 m	0.2 m
グラウンドデータ点密度	5.4 点/ m^2	0.5 点/ m^2	1.1 点/ m^2	1 点/ m^2	0.3 点/ m^2
DEM サイズ	1 m	2 m	1 m	1 m	1 m
本マニュアル（案）内の図番号	図-2-1-12 図-2-1-13 図-2-1-14 図-2-2-7 図-2-2-8	図-2-2-4 図-2-2-9 図-2-2-10 図-2-3-1	図-2-1-4 図-2-1-5 図-2-1-6 図-2-2-5 図-2-2-11 図-2-2-12 図-2-3-2 図-2-3-4	図-1-2-3 図-2-1-8 図-2-1-9	図-2-1-1 図-2-1-2

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4150 June 2009

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754