

航空レーザスキャナを利用した 崩壊地抽出支援手法



佐藤 匠¹・久保 毅¹・本間 信一¹・今井 靖晃¹・浅田 典親¹

1. はじめに

地震や豪雨により地すべり・斜面崩壊が発生した場合、土砂移動現象の把握および二次被害を防ぐ対策計画立案のためには、早急な被害状況把握および土砂量算出が必要となる。従来は航空機に搭載したアナログカメラにより対象地域を緊急的に撮影し、空中写真判読によって崩壊規模を把握してきたが、近年は従来の撮影と並行して衛星リモートセンシングによる画像解析や航空レーザスキャナ（LIDAR）による計測が実施されるようになってきている。

従来の空中写真判読を用いた被害把握手法は緊急時における即時応答性に優れてはいるものの、災害規模が大きい場合は多数の空中写真判読技術者の労力が必要となる。また、技術者の判読スキルの違いや長期間の判読作業に伴う疲労による誤差が含まれる可能性が常に存在し、場合によっては抽出漏れが発生する危険性がある。その一方で、近年さかんに打ち上げられている陸域観測衛星を用いた衛星リモートセンシングでは、結果を出力するまでの応答性や抽出精度に課題があり、現時点では被害状況把握の要求を満たすレベルには至っていない。

一方、LIDARは研究レベルから実用レベルに移行し、災害前後の地形を高精度・高分解能で取得できるツールとして一般的になりつつある。LIDARは地形情報を直接的かつ高い精度で取得できることから土砂災害の状況把

握に適しており、特に土砂量の把握に関して他の手段とは一線を画した優れた性能が期待される。

そこで本論文では、土砂災害状況の把握を支援するために、山間部において発生した崩壊地の候補となる裸地を、LIDARによって取得される情報から自動的に抽出する手法について提案する。

2. 使用する情報

2.1 LIDARで取得されるデータの概要

LIDARによって取得される点群データ情報はASPRS（米国写真測量学会）のLASフォーマット規定により制定されている。LASフォーマットver.1.1で制定されている項目を表2.1に示す。

本論文で使用するデータは表2.1の項目のうち、パルス情報（Return Number）および反射強度（Intensity）である。反射強度に関し

表2.1 LASフォーマット（ver.1.1 Format 0）

Item	Format	Size	Required
X	Long	4 bytes	*
Y	Long	4 bytes	*
Z	Long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits	3 bits	*
Num of Returns	3 bits	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank	Char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*

LAS Specification Version 1.1¹⁾ から抜粋

¹ 国際航業株式会社

ては取得必須項目に指定されていないものの、LASフォーマットver.1.1に準拠している形式でデータが取得されており、反射強度情報が格納されていれば、機種を選ばず本手法を適用することが可能である。

なお本論文ではLeica Geosystems社のALS-50によって計測されたデータを利用して解析を行った。

2.2 パルス番号 (Return Number)

パルス番号は照射された1発のレーザパルスが地物の形状によって分割反射された際に、反射波が観測（取得）された順に振られる番号の情報である。

レーザが照射された地物が平面構造の場合、1発のレーザパルスは1つの反射波として観測されるため、1stパルスのみが存在する（図2.1 (a)）。一方、樹木や建物のエッジ（縁）部など、1発のレーザパルスのビーム径以内に複数の高さを持つ地物が存在した場合、それぞれの高さで反射波が発生する（図2.1(b)）。地物が高い方から先に反射波が発生し、観測された順に1st、2nd、3rdと順番がつけられ

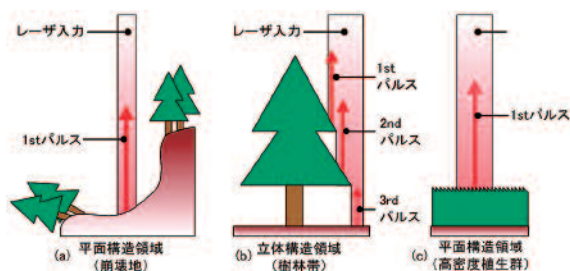


図2.1 パルス番号情報概念図

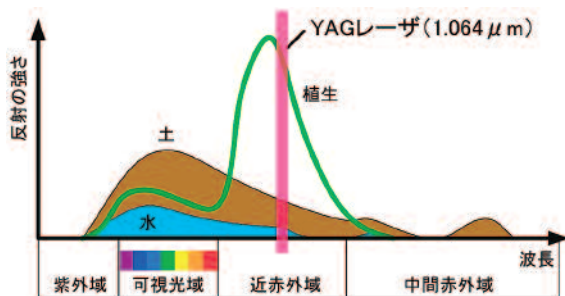


図2.2 地物ごとの反射特性

る。なお、1発のレーザに対して複数の反射波が発生した場合、最後に取得された反射波のことをラストパルスと呼ぶ²⁾。

ただし、高密度に植えられた若齢人工林や、ヨシ・ササなどの高密度植生群においては地表までレーザが到達できずに植生表面で全て反射されることから、平面構造領域（即ち崩壊地候補）に含まれる（図2.1 (c)）³⁾。

2.3 反射強度情報 (Intensity)

反射強度情報はレーザパルスが地物によって反射され、観測（取得）されたときのレーザ光の強さを示す値である。ALS-50では8bit（256段階）の値として取得されるが、この数値は相対的な値であり、計測機器によってその値の絶対値が持つ意味は異なる。

一般的にLIDARで使用されているレーザの媒質にはYAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: イットリウム・アルミニウム・ガーネット) が採用されており、この媒質で出力されるレーザの波長は $1.064\mu\text{m}$ である。この波長は近赤外域に位置しており、植生域における反射効率はその他の自然地上被覆物に対して卓越している特徴を持つ（図2.2）。そのため、反射強度は植生域と非植生域を分離するのに有効な情報となる。

一方で、反射強度はレーザパルスが地物に対して進入する角度や、2ndパルス以降の発生の有無によってもその値は大きく変動する。そのため、地上被覆構造が単純であれば微細な分析が可能となるが⁴⁾、さまざまな地物構造・斜面方位・傾斜によって複雑に構成される山間部では、反射強度単体での地上被覆分析は困難である。

反射強度情報は各反射波（1stパルス～ラストパルス）それぞれについて取得されるが、本手法では地上被覆の判断に利用するため、1stパルスの反射強度のみを使用する。

3. 裸地の抽出方法

3.1 抽出手順

裸地の抽出フローを図3.1に示す。

まずLASのオリジナルデータ（ランダム点群）からパルス番号と反射強度を抽出する（①）。続いてパルス番号情報より2ndパルスが発生した領域、すなわち立体構造領域を抽出する（②）。この領域には細かい虫食い状の穴が発生しているため、画像処理手法として一般的に用いられる膨張・収縮処理を1回ずつ実施して最低限のノイズを潰す処理を行う（③）。計測範囲全体の領域から得られた立体構造領域を除去し、得られた領域が裸地の候補となる平面構造領域となる（④）。

取得された平面構造領域は2.2で述べたように高密度植生群を含んでいるため、得られた平面構造領域に対して反射強度による判別を行い、設定した閾値（⑤）以上の反射強度を示す平面構造領域は高密度植生群、閾値以下は裸地と見なす（⑥）。

以上の基礎処理に続き、裸地として取得された領域には人工構造物（道路・田畑・建築物）が含まれるため、傾斜等の地形的アプローチにより人工構造物の除去を行い、最後に面積フィルタ等によって微小ノイズを除去することで裸地を得る。

3.2 反射強度の閾値の設定

平面構造領域を裸地と高密度植生群に判別するために利用する反射強度の閾値設定には、対象領域全体の反射強度頻度分布を利用する。

山間部を対象としてLIDAR計測を行った場合、反射強度頻度分布は一般的に図3.2のような2つのピークを持つ形状を呈する。

近赤外レーザの反射強度は裸地・人工構造物・水域において低く、植生域において高いため、反射強度が低い側のピークが裸地・水

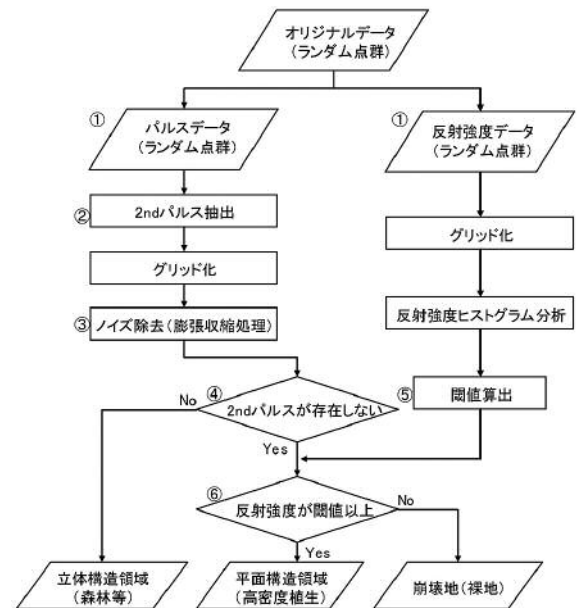


図3.1 裸地抽出フロー

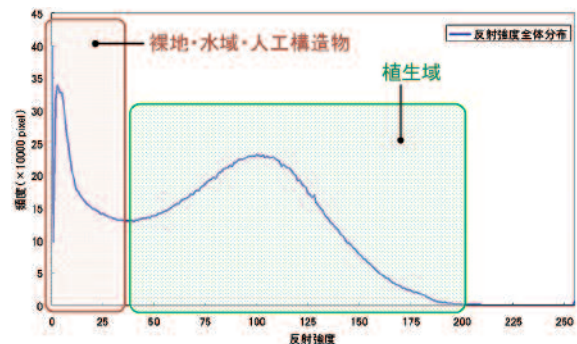


図3.2 反射強度ヒストグラム（例：日光稲荷川流域）

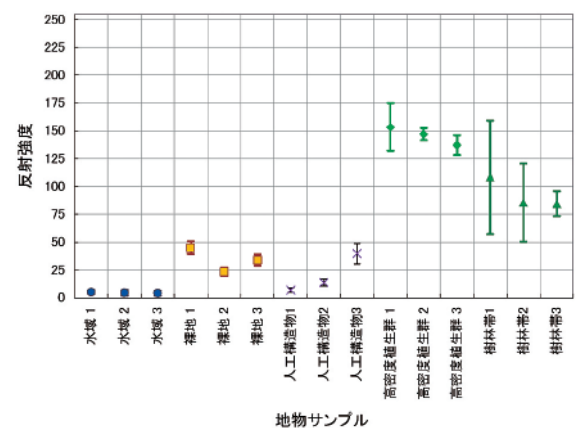


図3.3 地物サンプル別平均反射強度（エラーバーは1σ）

域・人工構造物、高い側のピークが植生となる。地物のサンプル別平均反射強度分布を図3.3に示す。サンプルは計測対象領域内の水域・裸地・人工構造物・草地（高密度植生群）・樹林帯の5種類に対し、5×5ピクセル

の正方形 (25m²) で抽出した。

図3.3から、植生の中でも樹林帯は高密度植生群に比べ反射強度が低いことがわかる。これは樹林帯が立体構造を呈していることから、物質そのものの反射強度は同じであってもレーザ入力自体が分割されることから反射強度が低いパルスとして取得されることが原因と考えられる (図3.4)。

植生のうち立体構造領域を呈する樹林帯は、ほとんどの部分が2ndパルス領域の除去処理によって存在していないため、高密度植生群と裸地を分離する閾値を設定すれば良いことになる。

ここで図3.2に示した反射強度ヒストグラムの波形に着目し、植生域のピークより右側を見ると正規分布に近い形状であることが読み取れる。この形状に近似した正規分布を植生による頻度分布と仮定し、全体波形から植生域を差し引いた残りの頻度分布を非植生域に

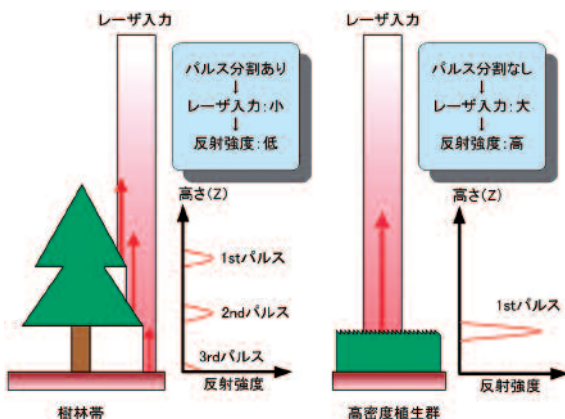


図3.4 植生構造による反射強度（模式図）

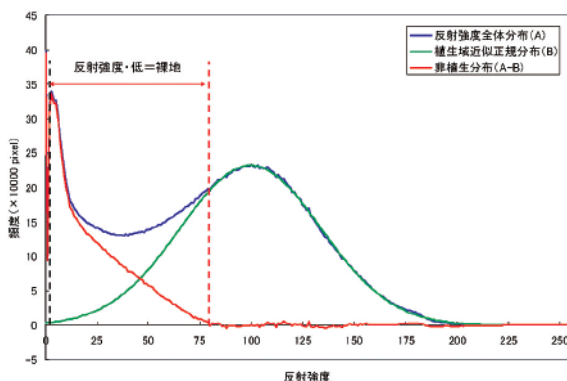


図3.5 反射強度頻度分布を用いた植生・非植生の分離

よるものであるとした場合の分布図を図3.5に示す。

この頻度分布分解処理により得られた非植生分布の最大値が裸地の取り得る最大の反射強度とし、この値を平面構造領域の裸地と高密度植生群を判別する閾値とした。

3.3 不要領域の除去

3.3.1 道路の除去（傾斜フィルタ）

3.2までのパルス番号および反射強度による裸地抽出は、計測対象領域から植生域を除去した非植生領域であるため、裸地と同様の特徴を持つ人工構造物が抽出結果に含まれることになる。その中でも特に多く含まれるのが道路および畑である。

この領域を除去するために、傾斜量を使用して一定以下の傾斜を持つ領域を人工構造物と見なし、抽出結果から除去する処理を行う。その閾値は対象領域の状況によって最適な値は異なるが、経験上15°を閾値とすればおよそその人工構造物は除去することが可能である。

ただしLIDARのオリジナルデータによって傾斜量を算出した場合、元となる地形モデルはDSMであり、住宅地や工場などの建造物はその縁部において大きな傾斜を示すため、予め解析対象から外す等の処理を行う必要がある。

3.3.2 微小ノイズの除去（ベクタ変換）

抽出結果にはパルスの入射角や地物の構造によって細かい虫食い状のノイズが全体的に発生する。このノイズは除去方法によっては形状の劣化が発生し、現実世界とは異なる形状として取得される可能性が高い。そのため、抽出結果に対してラスタデータをベクタデータ（ポリゴン）に変換し、崩壊地ごとにグルーピングを行う。

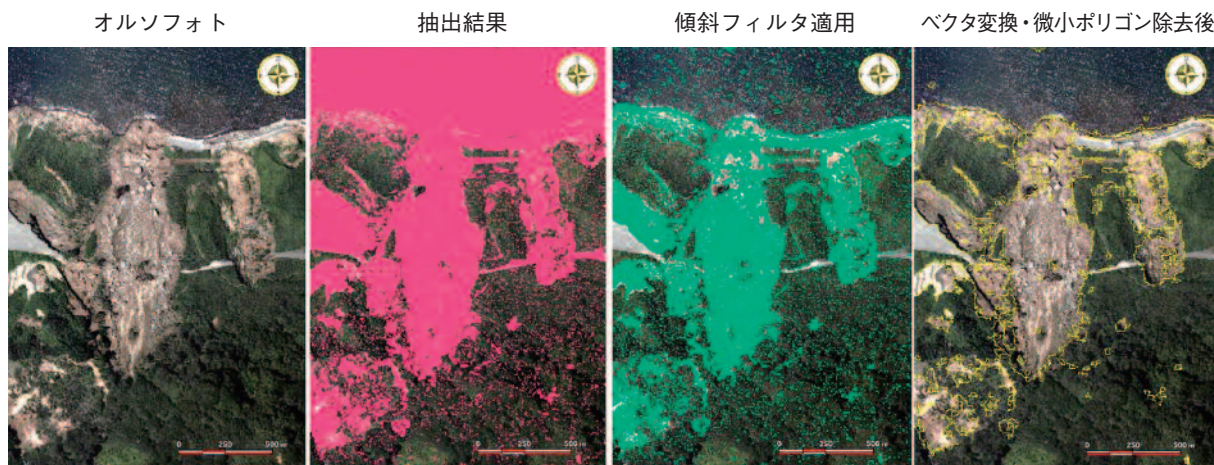


図3.6 不要領域の除去の例（新潟県中越沖地震・柏崎市米山・聖ヶ鼻）

ポリゴン化された抽出結果のうち、一定面積以下のポリゴンを除去する処理を加えることにより、形状を劣化することなくノイズ除去することが可能となる。

また、この処理を行うことにより抽出された裸地がベクタデータとして得られるため、崩壊地の面積集計および箇所集計への利用も可能になる。

不要領域の除去の例を図3.6に示す。

4. 結果および考察

4.1 抽出結果

4.1.1 新潟県中越沖地震に伴う崩壊事例

新潟県中越沖地震により崩壊した事例を図

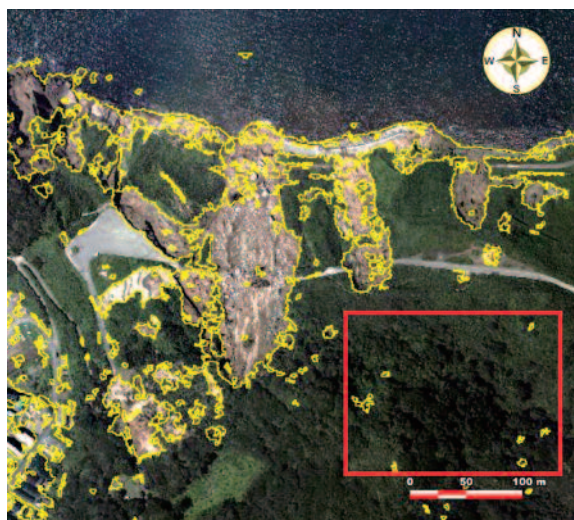


図4.1 新潟県柏崎市・米山

4.1および図4.2に示す。図4.1には、本手法により抽出された裸地を示した。道路が傾斜フィルタによって分離されているため、裸地として抽出されていないことが確認できる。

図4.1および図4.2の一部植生域において、2ndパルスが発生せずかつ反射強度の低い地域が見られた（図4.1、図4.2の赤箱枠）。これは樹形が針状であり、レーザ進入角が浅いためにレーザ入力分散した結果と推測される。

図4.2では、法面对策工等の傾斜を持つ人工構造物が裸地として抽出されている（図4.2の赤丸）。

本手法ではこのような急傾斜の人工構造物と裸地を区別することが困難である。



図4.2 新潟県柏崎市・椎谷

4.1.2 日光稲荷川流域（既往崩壊地）

既往崩壊地の解析例として、日光稲荷川流域の例を図4.3および図4.4に示す。

図4.3の崩壊地縁部において、空中写真判読や画像解析が困難となる影部も問題なく崩壊地が抽出されていることが確認できる（図4.3赤箱枠）。

一方、稲荷川流域最上流部（図4.4）において、一部ではあるが裸地であるにもかかわらず反射強度がササ並みの高い数値を示す箇所が存在した。

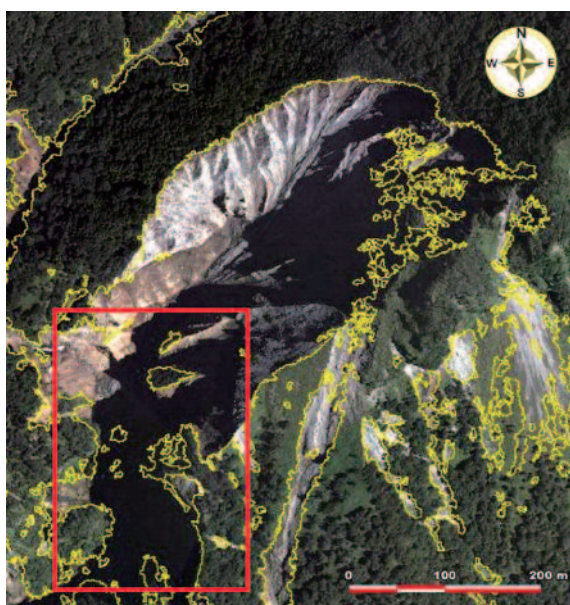


図4.3 栃木県日光市・大鹿落とし

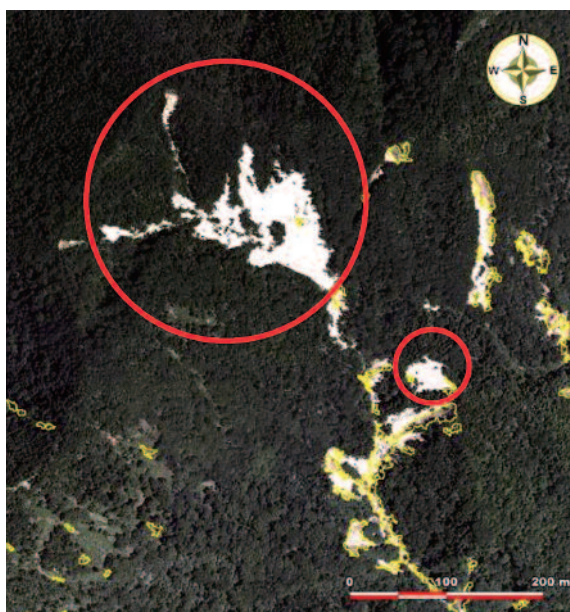


図4.4 栃木県日光市・稲荷川流域最上流部

所が存在した。この箇所においては閾値以上の反射強度となるため高密度植生群との区別ができず、抽出することが出来なかった（図4.4の赤丸）。

4.2 現地確認

日光稲荷川流域最上流部において反射強度が高く抽出されなかった崩壊地について現地確認を行った。

該当する崩壊地は径2mm～10mm程度の軽石に覆われており、白色を呈しているため空中写真撮影では白飛びを起こしていた。崩壊地内が軽石によって構成されている箇所においては高い反射強度を示しており、植生との区別がつかない（図4.6）。同一崩壊地内の異なる土壌では反射強度が低く、軽石の面はすべて反射強度が高いことからこの現象はレーザ



図4.5 近赤外レーザが強い反射を示す崩壊地（栃木県日光市・稲荷川流域最上流部）

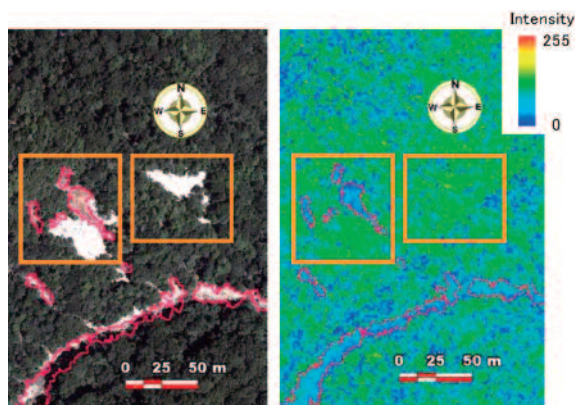


図4.6 高い反射強度を呈する裸地

の入射角によって引き起こされているものではなく、土砂の地質的要因による反射強度の違いが原因と考えられる。

なおこの地区は日光国立公園・特別保護地区に指定されており、サンプル採取が許可されなかったため、分光反射計測等は実施していない。

4.3 精度検証

本手法の精度を検証するため、日光稲荷川流域・七滝付近において40ha強（413,731m²）の検証プロットを設定し、抽出結果の精度検証を実施した。なお、抽出結果に対して正とする裸地はLIDAR計測時の垂直写真のオルソフォトによるトレースポリゴンを利用した。

抽出精度は判読ポリゴンと抽出ポリゴンを重ね合わせ、判読結果に対して抽出結果が合致した面積比率を的中率（％）として評価した。精度検証結果を表4.1に示す。

オルソトレースの結果に合致する抽出結果を個別に評価した個別的中率は裸地で81.5%、植生では95.9%となり、全体での的中率は93.1%となった。

本手法では抽出されたがオルソトレースでは抽出されなかった小規模崩壊地（図4.7：緑のポリゴンのみの領域が該当）や崩壊地の微細な形状が表現しきれないことを考慮すると、実際の裸地抽出精度はこの的中率を概ね上回るものと考えられる。

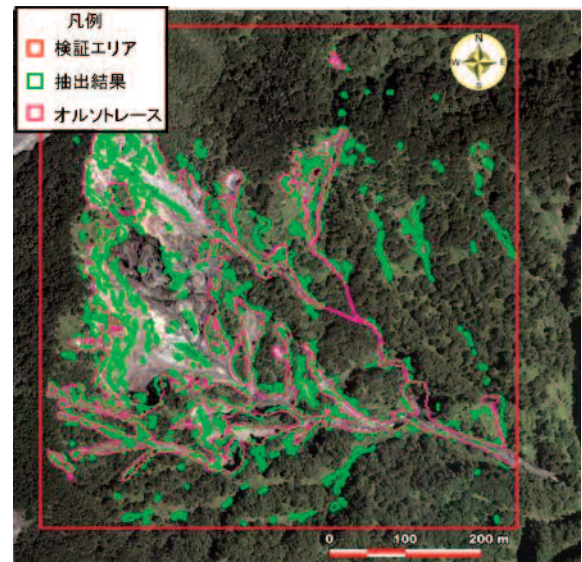


図4.7 精度検証エリア（稲荷川流域・七滝）

表4.1 精度検証結果

抽出項目	抽出結果／判読結果 (m ²)	個別的中率 (%)	全体的中率 (%)
裸地	65,104 / 79,925	81.5	93.1
植生	319,938 / 333,749	95.9	

度低下）の分類処理に優れており、互いのノイズフィルターとして機能していることも精度向上に貢献している。

2）光環境の影響を受けにくい計測手法

山間部では深い谷や急斜面で影が発生し、空中写真の判読や画像解析では分析不能な領域が発生しがちである。一方、本手法は能動的にレーザを発射し、その反射波を分析するアクティブ（能動）リモートセンシングに属する手法であるため、光環境の影響を受けにくい。

3）処理の高速化

本手法は一般的なLIDARデータの処理で必要となる高度なフィルタリング処理は必要とせず、前処理として必要なのはコース間データの位置あわせと最低限の統計的な処理だけである。そのためLIDARで計測してから本手法による解析を開始するまでに要する時間は短くなり、計測翌日から翌々日には出

5. まとめと課題

5.1 本手法の特長

1）高い形状再現性

本手法の利点の1つは高い形状再現性にある。これはLIDARが有する高い地上分解能に加えて、反射強度とパルス番号情報がそれぞれもう一方のデータにおけるノイズ発生箇所（高密度植生群や2ndパルス発生による反射強

力が完了する。この処理時間の短さは地震や豪雨による災害対応に強い効力を発揮する。

4) 処理の客観性

空中写真判読では、技術者スキルの違いによる判読精度の違い、疲労度などによる誤差が含まれる可能性などの課題がある。本手法はデジタル処理で完結しており、閾値等の必要パラメータは機械的に算出できるため、第三者による照査が可能で抽出に対する客観性が確保される。

5.2 適用分野

1) 崩壊地の抽出

本手法が最も効力を発揮するのは、地震等によって広域に発生した崩壊地の抽出である。

5.1で述べたように処理時間が短く、影の影響を受けず、空中写真判読で起こりがちな移写時の形状や位置のずれ・特に小規模崩壊地において発生しやすい抽出漏れなどのエラーが発生しないため、客観的かつ高精度で崩壊地を広域に抽出する手段として有効である。

ただし前処理および解析処理時間が短いとは言えども、アナログ空中写真の印刷速度に現時点で劣ることは事実である。そのため従来の空中写真判読と本手法を並行して実施し、規模の大きい箇所から優先的に空中写真判読を行い、一方で本手法により広域を処理して小規模崩壊地を網羅して被害状況を総合的に把握するなど、両者の優れた点を組み合わせ利用することが望ましい。

2) 土砂移動モニタリング

近年、複数時期のLIDARによって取得された地形モデルの差分演算等によって土砂移動のモニタリングを行うことが一般的になってきている。その解析範囲は植生の季節変動等

による微細な変化から発生する誤差を避けるためオルソフォトのトレースによるデジタル化に依存しているが、この場合特に川原に繁茂する下層植生と土砂の切り分けが曖昧になり、解析結果の精度に影響を与えるケースも少なくない。本手法を土砂移動モニタリングの解析範囲の設定に利用することにより、客観的に解析対象領域を取得でき解析範囲を最大限に取りながら高い精度で解析を行うことが可能になる。

3) 植生分析

本手法は山間部における裸地の抽出を目的として開発されたが、一方で植生領域を高精度で抽出する目的でも利用できる。崩壊地・裸地等における植生範囲の拡大、および樹林構造の変化のモニタリングに適用できる可能性がある。

5.3 課題

これまでの適用事例により3点の課題が把握されている。

①反射強度によって高密度植生群と裸地の分離を行うが、植生の反射強度は季節に伴い変動する。秋期から冬期にかけては反射強度が低下するため、裸地と高密度植生群の反射強度が近くなり、解析が困難になるケースが確認されている。

②植生の表面が水滴に覆われている場合やガス（霧・モヤ等）が上空に存在する場合、その水分によってレーザの減衰が発生し、反射強度の低下を招く。この場合、高密度植生群において裸地と誤認識されるケースが確認されている。

③地質に起因すると思われる反射強度が高い値を示す崩壊地もごく一部であるが確認されている。この箇所に関しては高密度植生群と同じと認識され、本手法による分離は困難と

なる。

5.4 今後の展望

本手法により従来リモートセンシング分野で困難とされていた山間部における地上被覆分類が可能となった。本手法は極めて単純な処理のみを行っているが、これに加えてレーザ照射距離によるレーザ減衰モデル等のパラメータを導入することにより、さらなる解析精度および汎用性の向上が期待できる。

また本手法そのものは1つの波長の反射強度と反射波の発生状況を利用しているため機能が限定的である。近年出現してきたアクティブ・マルチスペクトラル・リモートセンシング（複数の波長レーザによる反射強度および波長変調計測）が実用化されることにより、アルゴリズムが高度化し、多面的な分析が可能となり、さらなる高精度化・多機能化が進むものと考えられる。

6. まとめ

航空レーザスキャナのパルス番号情報と反射強度情報を用いた崩壊抽出の支援方法を開発した。この手法は地震時に広域的に発生した崩壊地を把握する手法として非常に有用である。

また植生と裸地を分離する点に優れていることから崩壊地形状の経年変化をモニタリングする手法としても利用することが可能である。

なお、本手法に関しては特許出願中である（特願2008-140124）。

発表日：2008年6月18日

■謝辞

本研究の実施にあたり国土交通省日光砂防事務所関係各位のご協力により貴重な資料のご提供を頂きました。国際航業株式会社の

佐々木寿博士からのコメントは、本稿を改善するにあたり大変有益でした。心より深く感謝の意を表します。

■参考文献

- 1) ASPRS, LAS Specification Version 1.1, ASPRS, pp.11, 2005
- 2) (財) 日本測量調査技術協会、図解航空レーザ計測、(財) 日本測量調査技術協会、pp208、2008
- 3) 宮田直樹・中筋章人・丸山智康・本多繁：レーザスキャナデータを用いた崩壊地の半自動抽出、平成17年度砂防学会研究発表会概要集、pp.48-49、2005
- 4) Francesco Mazzarini, Maria Teresa Pareschi, Massimiliano Favalli, Ilaria Isola, Simone Tarquini, and Enzo Boschi: Lava flow identification and aging by means of lidar intensity: Mount Etna case, J. Geophys. Res., vol.112, B02201, doi:10.1029/2005JB004166.

■発表者

佐藤 匠（さとう たくみ）

国際航業株式会社 砂防・地質事業部 砂防部 応用調査グループ

E-mail : takumi_sato@kkc.co.jp