

多時期の航空レーザ測量データを用いた 地表面変動の抽出

国際航業株式会社 技術センター
向山 栄

1. はじめに

最近、航空レーザ測量により、広域のかつ解像度の高い地形データが比較的容易に得られるようになってきた。現在までに、公共的事業によってデータが取得された範囲は、既に国土の約40%以上の面積を占めており、今後はこれらのデータの効率的な利用法が求められると考えられる。

本稿では、航空レーザ測量によって取得した2時期の高解像度DEM（数値標高モデル）を用い、画像マッチングの手法を応用して地形的特徴の移動ベクトルを算出することにより、地表面の数10cm～1mオーダーの変動を、3次元的に定量的かつ容易に把握する手法について紹介する。

2. 地表面変動計測技術開発の背景

局所的な地表面の変形を精度良く定量的に計測

するには、通常、地上測量や各種の計器を用いた現地観測が行われる。また、変動量が十分大きく、ある程度広い範囲の変位や変形を計測するには、地上測量による図化や空中写真測量による計測が行われている¹⁾。さらに現在では、微少な変動量を広範囲に抽出する方法として、衛星干渉SARの計測が用いられるようになってきた。

しかし、広域の面的かつ詳細な現地測量は、コストが大きくなり、大量の計器や計測基準点を事前に設置し維持管理することも現実的でない。また、航測図化や写真計測は地被の条件によっては小規模な変動を必ずしも精度良く抽出できないという問題点がある。また、衛星干渉SARの解析は、衛星の軌道条件の制約や変動量が大きい場合の変位量の特定、地上分解能といった点で、どんな条件にも対応できるというわけではない。

3. 数値地形画像マッチング計測手法の原理

航空レーザ測量などによる高密度点群データから作成した地形モデルを用いて、時系列的に地形変化を計測する際に留意すべきことは、計測点群自体には、繰り返し計測における厳密な意味での再現性がないということである。それは、航空機搭載スキャナーから発射されるレーザビームによって、地表の全く同じ位置にある点を繰り返し計測することは原理的にできないからである。したがって、点群の個々の点の値から正確に時系列的な変位量を求めることは困難である。



図-1 地表面の移動を測定する既存手法の例
航空写真測量による新潟地震の液状化による側方流動の計測事例¹⁾

しかし、十分に稠密な点群データから発生させた面的に連続する地表面モデル、たとえば格子状の細密なDEMは、実地形との誤差は十分に小さく、それより大きな変化であれば地形モデル同士の変化量として抽出できる。このことを利用し、2時期のDEMの標高値の差分をとって、河床や斜面の土砂移動量などを算出することは、実際にしばしば行われている。また、大地震等によって地殻変動のあった地域においては、標高差分値には地表面の水平変動によって生じた標高値の変化も含まれることがある。そのような場合、地盤の隆起沈降量を計測するのに、水平移動による変化量を排除するため、平坦地のみを選んで差分値を採ることも行われている²⁾。

では、DEMから、水平移動量も含めた3次元的地表面移動量を抽出することはできないだろうか。DEMは、格子点における標高値以外の属性を持たないので、空中写真計測のように地物の種類を判定して同一点を特定することはできない。また、2時期のDEM格子点の3次元座標値のみから、地表面の局所的な移動量を数学的に求めることは不可能ではないが、真値を求めるのはかなり困難

である。しかし、DEMから適切な地形量を演算して平滑化を行ない、さらに任意の小領域内において画一でないような地表面の形状パターンを認識しそれを追跡すれば、地表面の移動をかなりよく再現できる。

こうして、地形形状を具体的に追跡する手法として開発したのが、DEMから演算した地形量を画像情報化し画像マッチングを応用する手法である（特許 第4545219号）。2次元画像のパターンマッチングで把握できる移動量はベクトルの水平成分である。しかしDEMから作成した画像の場合は、すべてのグリッドにおいて標高値を持つので、画像上で算出した移動ベクトルの始点と終点の標高値から鉛直成分を算出することができる。ベクトルの端点は格子点と一致するわけではないが、格子間の3次元的位置は適当な補間法によって算出できる。

画像マッチングには各種の方法が既に開発されているが、本稿の事例では、流体の流速を測定する手法であるPIV法(Particle Imaging Velocimetry)を用いた。画像マッチングではサブピクセル補間を行うので、通常はピクセルサイズの1/10程度の変

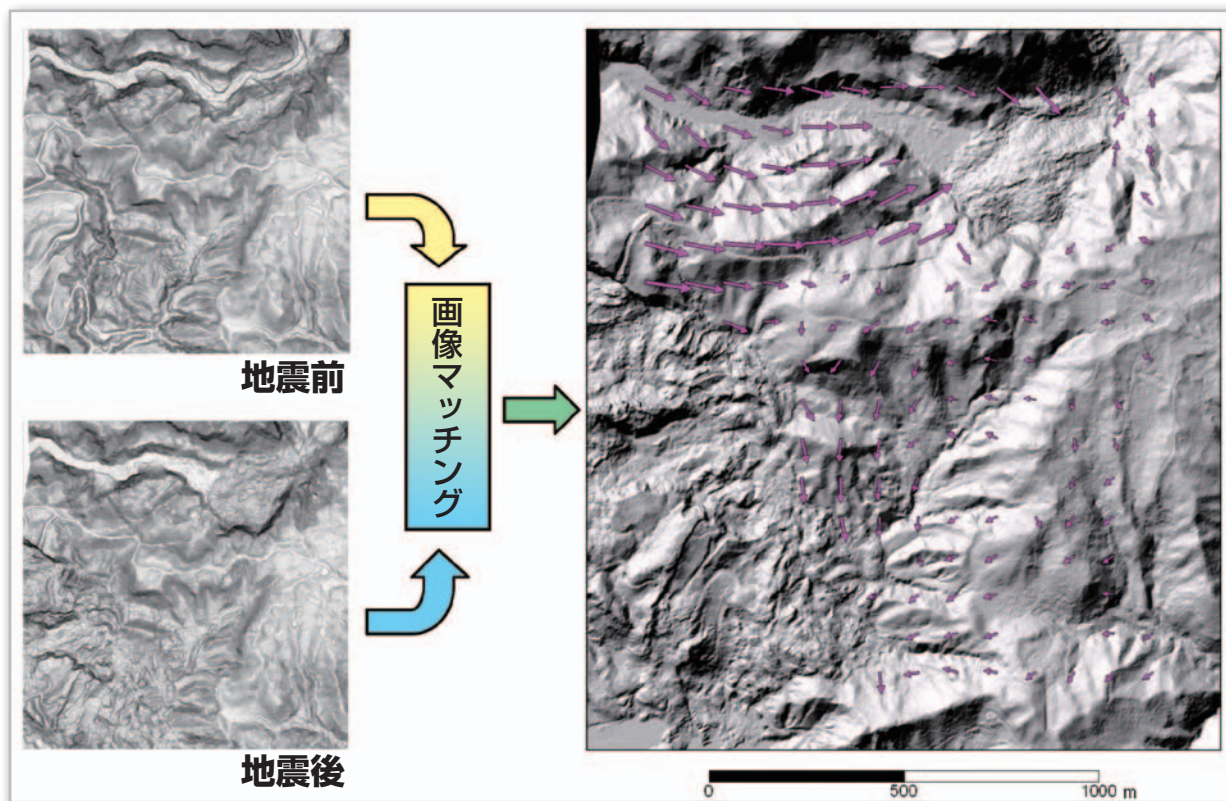


図-2 数値地形画像マッチング（国際航業 特許第4545219号）により算出した地表面移動ベクトル。
 検索領域内の平均を算出し、領域の中心に水平成分のみを描画したもの。左の数値地形画像はグレースケールであらわした傾斜量図。右図の背景は地震後の地形の陰影起伏図 使用データは2006年9月および2008年6月16日・18日 国際航業（株）計測。

位を算出できる。本稿の調査事例では、1画素をDEMのグリッドサイズである2m×2mとしたが、データ作成までに生ずる誤差を考慮すると、抽出できる変位量として信頼できるのは±50cm程度と考えられる。

4. 計測調査事例

調査事例として、2008年6月14日に発生した平成20年岩手・宮城内陸地震（M7.2）の震源域における地表変位の計測例を示す。この地域では、ダム湖の上流で大規模な地すべりが発生し、その北方の山中には最大上下変位量2～4m、右横ずれ変位量4～7mの顕著な亀裂群が形成された。この亀裂を挟んだ両側のかなり広い領域は、内部の大変形を伴わずに相対的に変位していると推定された。これらの亀裂群の発生メカニズムについては、震源断層の延長として地表に生じた地表地震断層の一部である可能性も考えられた³⁾。

使用した地形データは、2006年9月5日・30日および2008年6月16日・18日の航空レーザ測量によるグリッドサイズ2mのDEMである。画像マッチングに用いる数値地形画像のペアとしては、格子点における最大傾斜方向の傾斜角をグレースケールで表した傾斜度図を用いた。

数値地形画像解析の結果、大規模な地すべりや崩壊による大変形が発生した領域を除いて、数10cm～数mの水平成分を持つ地表面移動を面的に抽出することができた（図-2）。調査地域内の地表面変位は一様でなく、それぞれ異なる移動方向を持つ複数の小領域が認められる。また地表面の変動方向が急変する部分は、地表踏査などで確認された亀裂の発生位置と一致している。

さらに、移動の鉛直成分を解析した結果、移動領域には全体として低角度の高度低下の傾向が認められたことから、地表部分に生じた亀裂群の分布位置、規模および形態は、大きな破壊を伴わない重力性マスマーブメントの小ブロックの動きによって規制されており、地下の震源断層の位置や形態を直接反映していない可能性が高いと考えられた⁴⁾。

5. おわりに

地すべり地などにおいて微小な地表変動を面的に把握することは、周辺の影響範囲も含めた変位の全体像を理解して、調査を効率化し対策工事を適切に推進することに貢献できる。今後、航空レーザ測量などによって、高解像度DEMの整備範囲が拡大すれば、計測機器を設置しにくい場所でも、事前事後のDEMの比較により、地震や豪雨などに起因する地表面変動を面的に詳細に把握できる機会が増すものと考えられる。

引用文献

- 1) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利（1986）：液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, 376 Ⅲ-6, pp.211-220.
- 2) 野原幸嗣・野口猛雄・穴田文浩・浜田昌明・小野田敏・沼田洋一・山野芳樹・鈴木雄介・佐藤比呂志（2007）：航空レーザ計測による2007年能登半島地震の地殻変動, 地震研究所彙報, Vol.82, pp.321-331.
- 3) 吉見雅行・遠田晋次・丸山 正（2008）：2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層—最大右横ずれ量4-7mの荒砥沢ダム北方の地震断層トレス, 活断層研究, Vol.29, i-ii.
- 4) 向山 栄・江川真史（2009）：2時期の細密DEMから作成した地形画像解析により推定した平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダム周辺の地表変動, 平成21年度応用地質学会研究発表会論文集, pp.3-4.