2004年新潟県中越地震による中越中山間地の伏在地すべりの検出

菅原　千尋[1]・福田　圭吾[2]・小長井　一男[3]

[1] 正会員　元　横浜国立大学理工学部（〒240-8501 横浜市 保土ケ谷区常盤台 79−1）
E-mail: sugawara.chihiro@obayashi.co.jp
[2] 学生会員　横浜国立大学 都市イノベーション学府（〒240-8501 横浜市 保土ケ谷区常盤台 79−1）
E-mail: fukuda-keigo-pc@ynu.jp
[3] フェロー　横浜国立大学 都市イノベーション学府 教授（〒240-8501横浜市 保土ケ谷区常盤台79−1）
E-mail: konagai@ynu.ac.jp

新潟県中越地震による被災地を対象として、航空写真では容易に検出できない伏在地すべり地の検出を行う。このためには実際の土粒子の動きであるラグランジアン変位を抽出しなければならないが、InSAR や航空レーザー計測ではオイラー変位が直接的に抽出される。そこでオイラー変位からラグランジアン変位を抽出する手法（Konagai et al.(2009)[1]、Z.A.Kazmi et al.(2013)[2]など）をさらに発展させ、地殻変動や人為的な改変による変位成分から伏在地すべりによる変位を分離抽出する方法を提案する。

Key Words : *landslides, Remote Sensing ,earthquake,lagrangian-displacement,*

1.　研究の背景

2004 年（平成 16 年）10 月 23 日 17 時 56 分，新潟県中越地方を震源にマグニチュード 6.8 の直下型地震が発生した [1]．中越地方は地震以前から融雪時の地すべりや土石流の多い地域として知られており，地震によって発生したとされる 1353 箇所の斜面崩壊が道路，鉄道，上下水道，電気，ガスなどのライフラインや農地，家屋などにも甚大な被害をもたらした [2),3)]．地震発生が 10 月末であったため，まもなく始まる降雪期前での復旧工事が急がれた．

しかし一方で，この地域の社会基盤施設復旧には慎重にならざるを得ない理由があった．中越の中山間地では，地すべり発生の30～40%が融雪期に集中するといわれている [4)]．したがって，地震後の融雪期に不安定なまま残された斜面が動き出すことも懸念され，復旧に先立ってこのような伏在地すべりへの対策を行うことが喫緊の課題となったからである [3),5)]．

中越地方の中山間地に地すべりが多いということには，ここが活褶曲地帯であるということと関係している．活褶曲地形とは何層にも堆積した軟岩が水平方向に圧縮され，現在もその褶曲構造を発達させている地帯のことを指す [4)]．傷ついた地盤の侵食が速く，地形変形が長期にわたり進行するという特徴があり，これが再滑動地すべりが多数存在していることに繋がっている．活褶曲地帯では復旧対応も慎重に計画されなければならないのである．

そこで伏在地すべりの存在を確認し、その対応を検討することが必要になる．地すべり箇所の把握は主に航空写真の視認や現地調査により行われているが，航空写真の視認のみでは容易に発見できない伏在地すべりも存在すると思われ、これらの存在を検出することは災害復旧において重要な意味を持つのである．

地すべりも含め地盤の絡む災害では実際の土粒子の動きであるラグランジアン変位を抽出しなければならない．一方で衛星や航空機によるリモートセンシングでは，空間に固定された座標軸上での変位であるオイラー変位が直接的に抽出されてしまう．航空レーザー計測データ（DEM）から得られるオイラー変位からラグランジアン変位を抽出する既往の研究には，例えばKonagaiら[6),7),8)]やZ.A.Kazmiら[9)]による，新潟県中越地震による被災地でのラグランジアン変位抽出の試みがある．これらの研究はラグランジアン変位の中でも広域にわたってその変動の緩やかな地殻変動成分にのみ焦点が当てられている．しかし地震時においては抽出されなかった局所的な変動である地すべりなどの情報こそが構造物やライフラインの迅速な被害調査・緊急復旧にとって不可欠なであり，局所的な標高変化の中には田畑や住居，構造物など人為的な改変も含まれていることから，これらを除去する方

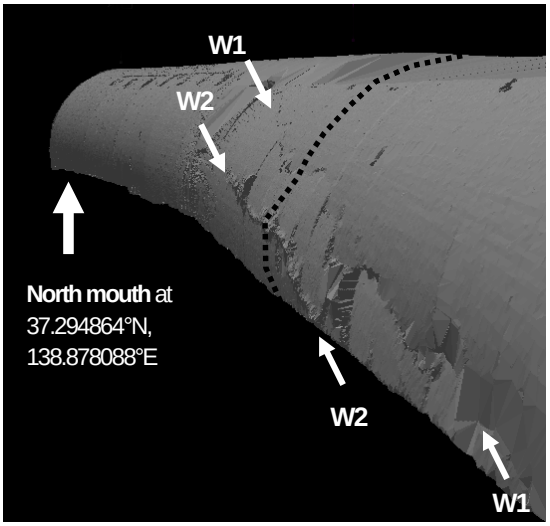
法も併せて確立する必要がある．

一般に浅いところで起こる地盤変位ほど、表面近くの複雑な境界条件などを反映してその空間的変動の波長が短くなる。そこで本論文では、地下数十メートルに存在し、伏在地すべりの影響を受けた道路トンネルの計測された変位を用い、地表のラグランジアン変位からこの変位を分離抽出するための空間フィルターの最適な切断波長を設定する。その上で、中越地域の伏在地すべりのマップの構築を試みるものである。

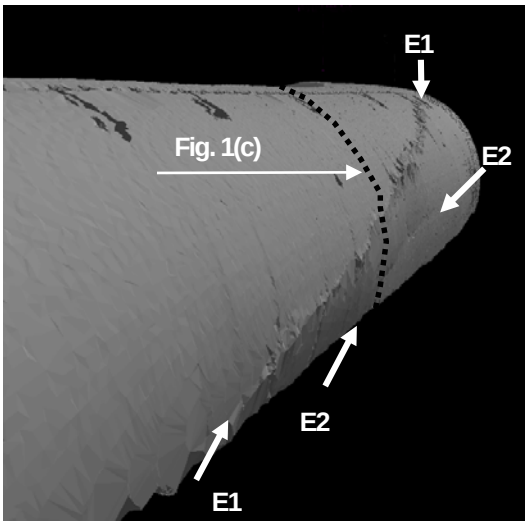
2. 移動平均法による伏在地すべりの抽出法

地震前後の航空レーザー測量で得られた地盤標高モデルの差分値は，空間に固定されたオイラー座標上の変位であって，まずこれを土粒子の動きであるラグランジアン変位に変換しなければならない．Konagaiら[6),7),8)]やZ.A.Kazmiら[9)]は一体として動く土塊のラグランジアン変位を抽出している．こうして得られたラグランジアン変位には，伏在地すべりによる変位に加えて，地殻変動成分や田畑・道路などの人工改変が重畳されている．地下深くに生じる地殻変動に比べ，より浅い部分で起こる地すべり，さらには地表部での人工改変になるほどその変動の空間スケールが小さくなるという特徴があるため，サイズの異なる矩形ウィンドウを用いた移動平均法でこれらを分離・抽出，あるいは分離・棄却することができる．Konagaiら[6),7),8)]やZ.A.Kazmiら[9)]は地殻変動成分の分離抽出を行っているが，さらに伏在地すべりのみを分離抽出するため，人為的改変を棄却できる適切なウィンドウサイズを決定しなければならない．そのためには，伏在地すべりが発生したことが確実でかつその地すべりの変位が明瞭に計測できていることが必須であり，そのための唯一の適切な調査地として県道71号線上にある木沢トンネルを選定した．この延長305mの道路トンネルは，中越地震時に当初地表で確認できなかった地すべり面によってその覆工コンクリートが被害を受けた（図-1）[7),8)]．顕著な被害はトンネルの北坑口付近のコンクリート両壁面のそれぞれに現れた二本の並行する斜め亀裂であり，それによりトンネルの天端がインバートに対し相対的にトンネルの横断方向東側に約0.5m横ずれを起こすこととなった．加えて，地すべり土塊がわにあったトンネルが南南東に向かって1.5mほど引き伸ばされていることも観測されている[7),8)]．

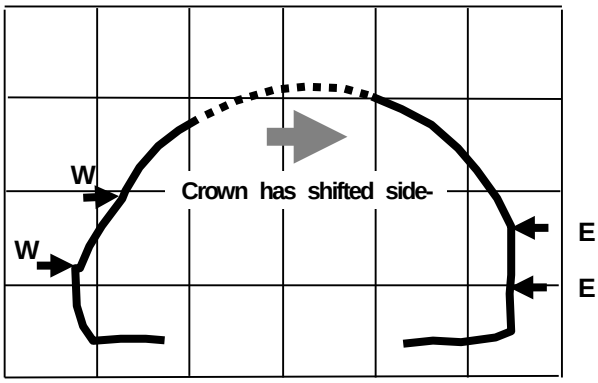
この木沢地区の地表面の標高変形から抽出されたラグランジアン地盤変位に対し、まず矩形ウィンドウのサイズを100m×100m，150m×150m，200m×200m，250m×250m，300m×300m，350m×350mと変化させ，それぞれ



(a) West wall



(b) East wall



(c) Tunnel cross-section at 59m from the north mouth (Looking northward)

図-1　レーザーで計測された木沢トンネルの亀裂
木沢トンネル北坑口付近の覆工の状況をレーザーで計測したものである。(a) は西側壁面，(b)は東側壁面，(c)は北坑口から 59m 地点の横断面である[7),8)]．

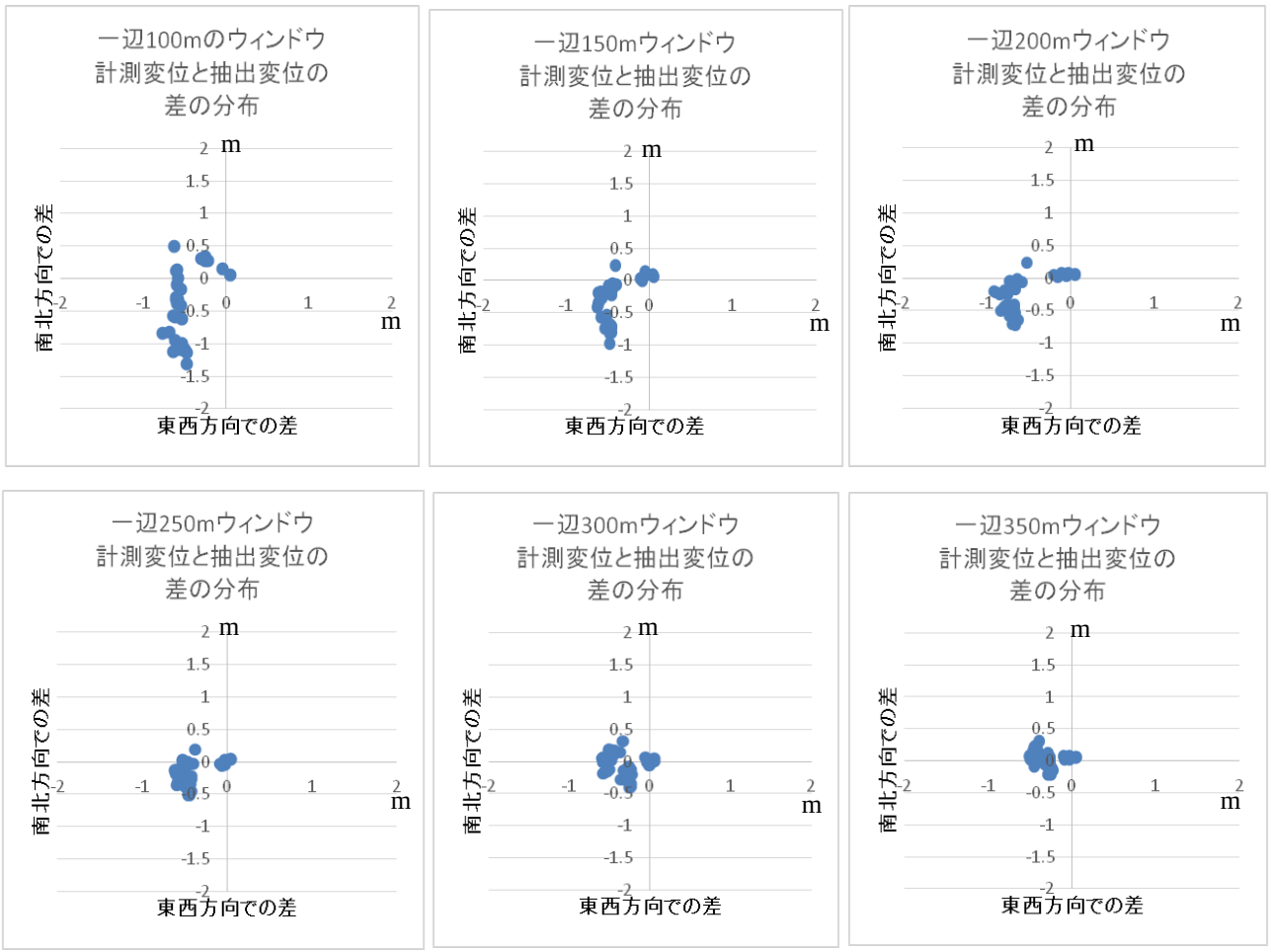


図-2　計測された木沢トンネルの変位と、矩形ウィンドウによる移動平均法で抽出された変位の差

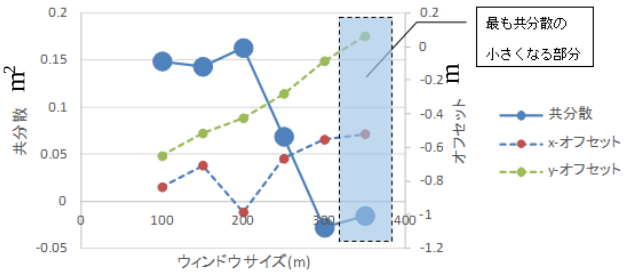


図-3　トンネルでの実測変位と移動平均法で抽出された地表変位との差の散布図から得られる平均的なオフセットと共分散

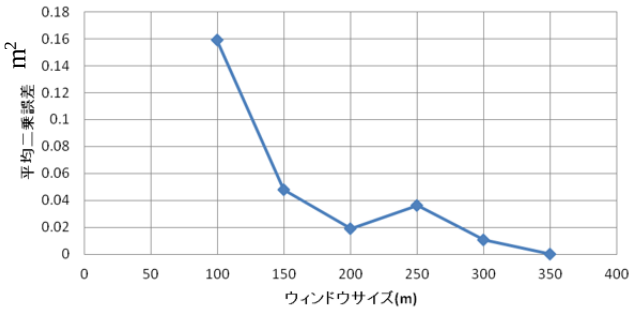


図-4　350m×350mのウィンドウサイズでの抽出変位を基準とした，各ウィンドウサイズでの抽出変位との平均二乗誤差

のウィンドウによる平滑結果から，1500m×1500mの矩形ウィンドウによる平滑化解析により抽出された地殻変動成分を除去する．その上で抽出された変位が地下30～50mの木沢トンネルの変位とどの程度符合しているかについて検討を加えた．**図-2**はトンネル軸上で地すべりの影響を受けない北坑口を基準に計測された変位に対し、矩形ウィンドウのサイズを変えて検出された変位がどの程度、東西・南北方向にずれているのかを散布図で示したものである．当然のことながら，フィルターとしてのウィンドウのサイズが大きくなる程，表面近くの人工改変の影響が除去されるので，計測されたトンネルの変位との差が小さくなる．これらの散布図について，計測トンネル変位からのオフセット(x_{offset}　y_{offset})の，共分散を求めたものを**図-3**に示す．ウィンドウサイズが300mを超えると顕著に共分散が小さくなり，この時点でトンネル変位からのオフセット(x_{offset}　y_{offset})も東西方向に0.5m，南北方向にほぼ0mとその絶対値は小さくなり，トンネル変位に近づいていく．したがってウィンドウサイズが300m～350mあたりで，トンネルの埋設深度30～50m程度の深度での伏在地すべりの影響が最

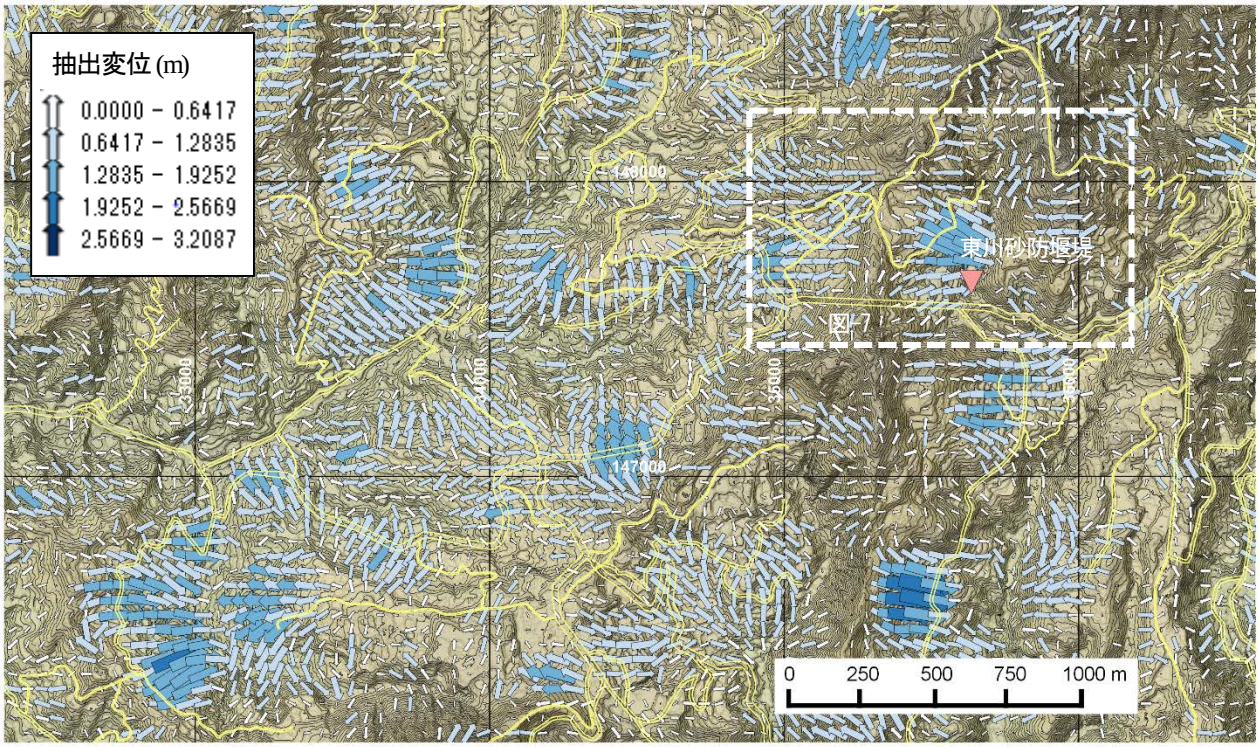


図-5　山古志北部の伏在地滑り
（平面直角座標系第 VIII 系）

も明瞭に表れているものと推定される．

一方、当該箇所の伏在地すべりそのものの変位は，すべり面直近のトンネル部分の変位に比べ大きいものと推測され、300m×300m、あるいは350m × 350mの矩形ウィンドウをそのまま採用するのは問題があろう．したがって次に，350m × 350mの矩形ウィンドウで人工改変の影響がほとんど除去され尽くされていると判断し，この時の抽出地表変位を基準に地表のみの変位がウィンドウサイズを小さくしていく過程でどう解離していくかを確認した（**図-4**）．この結果ウィンドウサイズ200m×200mを境に飛躍的に平均二乗誤差が大きくなっているので人工改変を抽出棄却するためのウィンドウサイズの下限値を200m×200mと決定した．

3.　伏在地すべりの抽出

上記の手法を，航空写真判読で明確な地すべりの存在が認められなかった山古志北部に適用した（**図-5**）．伏在地すべりと思われる1～3m程度の変位ベクトルの集合部分が虫亀地区、菖蒲地区、東川砂防堰堤付近を含む複数個所で認められる．これらの箇所の多くは再活動型の地すべりとして中越地震以前から確認されていた場所であり，著者らの現地調査でも既に排水工や表面保護工などの対応がなされていることが確認されている．地震による地表面変位が1～3m程度に留まったことも，このような対応の効果の現れとみることもできるであろう．

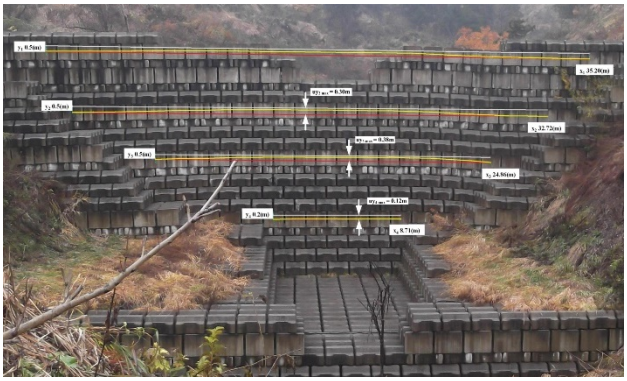


図-6　東川砂防堰堤

地震後に新たに対応がなされた箇所の一つが，東川砂防堰堤である（**図-6**）．この付近の伏在地すべり変位図を**図-7**に示す．東川砂防堰堤は中越地震後の2006年，復旧の進む県道を土砂災害から守るため急を要して造られたブロック積みの砂防堰堤である．著者らのレーザー距離計による現地計測の結果この砂防ダムはアバットメント部に対し中央部が相対的に30～40cmほど弓なりに反り上がっていることが確認された．当初ダムが変形した原因として，**図-7**に示すようにダム右岸側（西側）の斜面が伏在地すべり斜面であり，ダム竣工後にこの斜面が谷筋に向かって動き，ダム軸が圧縮されたためかとも考えられた．そこで地震後の2007年の地形データから地震後の伏在地すべりの動きの検出を試みたが，本手法で検

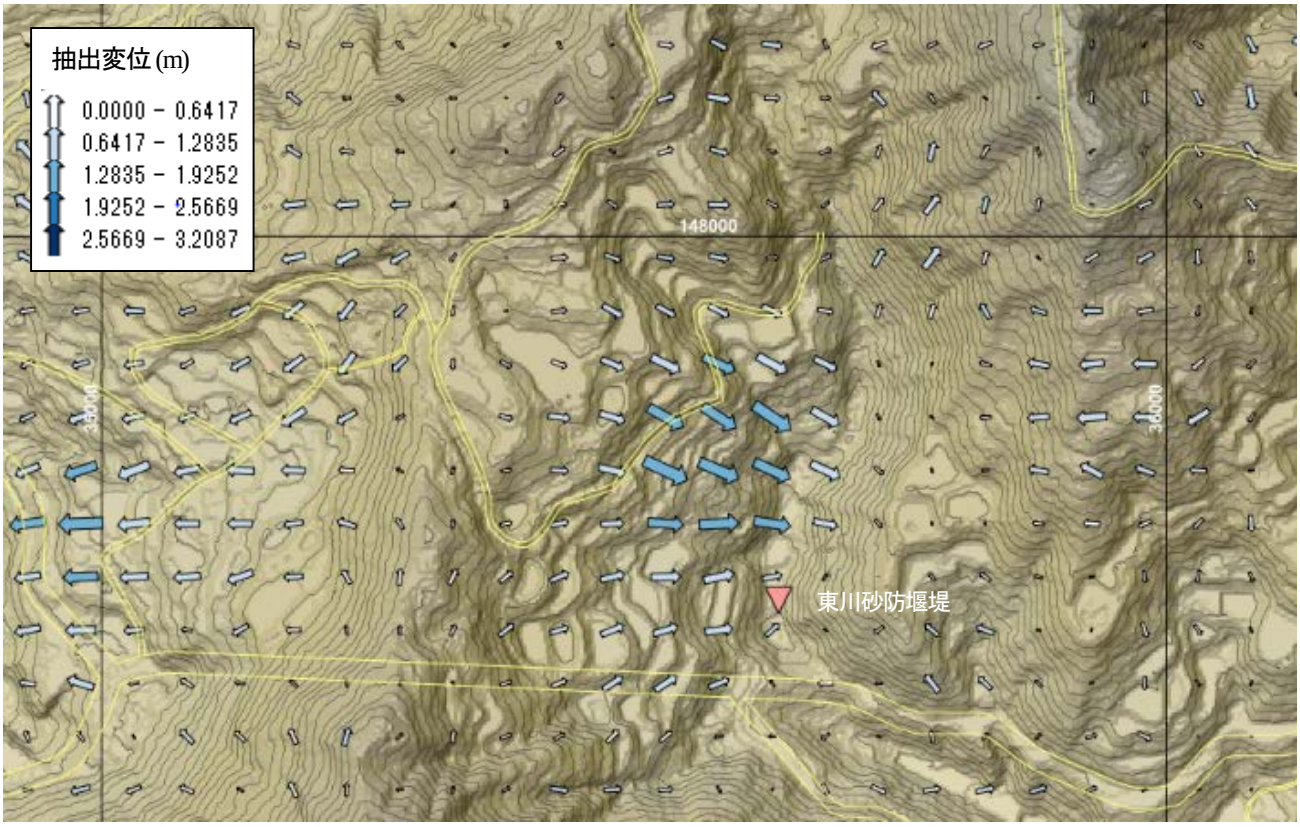


図-7　東川砂防堰堤付近の伏在地滑り
（平面直角座標系第 VIII 系）

出できる最小の変位を下回り，明確な移動の痕跡は見いだせなかった．このダムを管轄する国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所によれば，この変形はダム軸の圧縮ではなく，施工中にブロックを積み上げる過程で進行したアバット部分の沈下によるものとのことであった．いずれにしてもこれらはアバット部分の斜面が軟らかい地すべり末端部であることを示唆している．変形に追従するブロック積堰堤とした対応も，このような地盤条件で的確な判断であったように考えられる．この東川堰堤付近も含め検出された伏在地すべりについては今後さらに経年変化をたどる必要がある．

4.　まとめ

過去の多くの直下型の被害地震では，地震によって発生した斜面崩壊以上に，地震で傷つきながらもその存在が分からず，地震後かなりの時間を経て顕在化する事例が相当数に上ることが報告されている．本研究では，地震でわずかに動きながらもその変位が小さく，航空写真では視認できない伏在地すべりを地震前後のディジタル標高モデル（DEM）から認識抽出する手法を提示し，これを2004年中越地震の被災地である山古志地域の中山間地に適用したものである．

Konagaiら[6),7),8)],の先行研究によって抽出される地表面でのラグランジアン変位成分には伏在地すべりに加えて人工改変や深層の地殻変動の影響が重畳されている．一般に浅層の変位ほど複雑な地表の影響を受けて卓越する変形の空間周波数が高くなることから，移動平均法でラグランジアン変位の中から人為的改変を最も効率的に分離できる矩形ウィンドウサイズの設定が本研究の中心的な課題であった．このため伏在地すべりの影響を確実に受け，その変位が計測されている木沢トンネルとその周辺域を対象に検討を行った結果，200m×200mの域矩形ウィンドウが最適という結果を得た．

さらにこの手法を山古志北部地域全域に適用して伏在する地すべりの抽出を行った．これらの抽出された伏在地すべりの多くは再活動型の地すべりであり，その痕跡を現地でも確認することができた．伏在地すべりは今後も長期にわたりその変位を累積していく可能性もあり，地域保全のためにも道路などの補修記録と地形変形状況を対比しながら状況の変化を確認していくことが必要であろう．

謝辞：ラグランジアン変位の抽出に当たっては，Kazmi Z. A[9)].氏の開発したプログラムを使用した．また本研究の中で東川砂防堰堤については国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所から貴重な情報を得た．ここに厚く御礼申し上げます．

参考文献

1) 平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震, 気象庁, 災害時自然現象報告書 2004 年第 7 号, 対象地域 甲信越, 2004.
2) 佐藤　浩・関口辰夫・神谷　泉・長谷川裕之, 新潟県中越地震で生じた斜面崩壊と地質，積雪深等データの重ねあわせ, 国土地理院時報，107 集，79-90, 2005.
3) 有田博之，宮澤紗文：新潟県中越地震後の時間経過と農業生産基盤の被害発現，農業農村工学会論文集 Vol. 79, No. 3, 187-194 , 2011.
4) 柳沢幸夫・小林巌雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一: 小千谷地域の地質．地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅「小千谷」．地質調査所，177p, 1986.
5) 鳥居宣之：地震を起因とする盛土ならびに自然斜面の崩壊発生機構とその危険度評価に関する研究，神戸大学大学院自然研究科博士論文, 2008.
6) Konagai, K, Fujita, T., Ikeda, T. andTakatsu, S.: Tectonic deformation buildup in folded mountain terrains in the October 23, 2004, Mid-Niigata earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(2), 261-267, 2009.
7) Konagai, K, Takatsu, S. Kanai, T., Fujita, T., Ikeda, T. and Johansson, J.: Kizawa tunnel cracked on 23 October 2004 Mid-Niigata earthquake: An example of earthquake-induced damage to tunnels in active-folding zones, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(2), 394-403, 2009.
8) Konagai, K. Earthquake-induced soil displacements and their impact on rehabilitations, Accepted for publication in the Proc., Japan Academy, 69(5) (Ser.B), 2011.
9) Kazmi Z. A., Konagai K., Sekiguchi H. and Fujita T.: Extracting earthquake induced Lagrangian ground displacements and their implication for source inversion analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 48, 198-208, 2013.

Detection of Hidden Landslides in the Mountain Terrain affected by the Mid-Niigata Earthquake of Oct. 23rd,2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake

Chihiro SUGAWARA, Keigo FUKUDA and Kazuo KONAGAI

Hidden-landslides that appeared in an earthquake are not always visible in aerial photographs. All the more because these hidden landslides are at risk of reactivation in heavy rains and snow melting times that follow the earthquake, it is often an urgent need for us to detect their presence for rational rehabilitations Recent development of remote sensing technologies allows us to observe changes in terrains in a very precise manner. However, to deal with land concervation issues, we need to extract Lagrandian soil displacements first, and then separate the hidden landslides. For the separate extraction of hidden landslides, moving average method is used herein to create a series of averages of different subsets of the full data set of the detected Lagrangian displacements, and the most appropriate square-window size for the hidden landslides is examined at Kizawa area where a 300m-long road tunnel was deformed by a hidden landslide.