

## 山地部活断層の地形的把握方法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 26

担当チーム：地質チーム

研究担当者：佐々木靖人 阿南修司(特命上席)

品川俊介 江口貴弘

## 【要旨】

山地部における地表地震断層周辺の地形的特徴を分析した結果、主断層のほとんどは従来の空中写真判読法で位置の把握が可能であったが、主断層から分岐したり平行に出現する副断層については、従来の判読法では位置の把握が困難な例が多かった。このことを踏まえ、副断層も含めた山地部活断層の地形的把握方法を提案した。

また航空レーザー測量データに基づく数値標高モデルの地形判読は、大局的には空中写真判読と概ね同様の結果が得られ、樹林に覆われた山地部においては特に微細な地形の判読に有効であることから、必要に応じて空中写真判読と併用することで、活断層判読の精度が向上できる。

さらに地表地震断層が発生した際の変位量分布の推定に、航空レーザー測量データの差分解析手法を適用したところ、概ね現地調査結果とよく整合し、本手法が調査に活用できることが分かった。

キーワード：活断層 地表地震断層 空中写真判読 副断層 航空レーザー測量

## 1. はじめに

活断層が活動した場合、その活動が重要土木構造物に与える影響は大きい。そのため、重要土木構造物の建設にあたっては活断層の与える影響を踏まえた対応が求められる。

活断層が構造物に与える影響としては、「ゆれ」と「ずれ」の2つが挙げられる。「ゆれ」は耐震設計でその影響に対応することができる。その場合「ゆれ」は断層の延長が長いほど発生地震動が大きい。そのため、「ゆれ」の大きさを設定するためには、断層端部の認定が必要である。活断層が「ずれ」際には、同時に活断層直上の構造物をも破断させる。そのため重要土木構造物の建設にあたっては、活断層の位置を把握し、その直上を避ける必要がある。

このように重要土木構造物の建設においては、構造物周辺にある活断層の長さ、位置を把握する必要がある。従来はこれらを空中写真判読や地形図判読などの地形的調査を用いて確認してきた。

しかし近年、地震に伴って地表に出現した活断層（地表地震断層という）には、従来の活断層調査でその位置が確認されなかった箇所にも出現したものがあつた。2000年の鳥取県西部地震や2008年の岩手・宮城内陸地震に見られた地表地震断層のように、もともと活動度の低いと考えられる活断層は、山地部において地形的に把握することが容易でないと考えられている。これは山地では、活断層による変位地

形が斜面の浸食や堆積により失われたり、地質構造に起因する浸食地形など（組織地形）と混同しやすいためと考えられる。また、2011年4月11日福島県浜通りの地震では、地震前に活断層として認識されていた場所のみならず、その延長部に約7kmにもわたって明瞭な地表地震断層が出現した。

これらの事例が示すように、今後重要土木構造物建設においては、このような活断層を確認するための調査手法の再検討が必要である。

このような背景から、本研究では、出現位置が明らかな地表地震断層周辺の地形分析の結果に基づき、活動度の低い山地部活断層の地形的把握手法を検討した。また地表地震断層の位置などの把握に際して、地形分析の革新的技術である航空レーザー測量データの利活用の検討を行った。

## 2. 研究方法

## 2.1 地表地震断層における地形分析

## 2.1.1 対象とする地表地震断層

活動度の低い山地部活断層の地形的特徴を確認するため、出現位置が明らかな地表地震断層周辺における地形判読を実施し、地表地震断層周辺の構成地形要素を整理した。

対象とした地表地震断層は、①昭和以降に発生したもので、②主な発生場所が山地部であるものを抽出した。また、③文献で地すべりや単なる地割れ、

発生状況から繰り返し活動性が考えられないといった、活断層でない可能性が指摘されているものを除外し、④発生が断続的かつ多方向におよび一連の断層形態としての説明ができないものは除外した。さらに、発生位置情報の精度が著しく低い断層も除外した。その結果対象断層数は7地震 11断層となった。表-1 にその一覧を示す。

表-1 対象地震断層一覧

番号	地震名	地表地震断層名	発生年	マグニチュード	長さ(km)
1	北丹後地震	郷村地震断層	1927	7.3	15
2	北伊豆地震	丹那断層	1930	7.3	6
3	北伊豆地震	浮橋中央断層	1930	7.3	3
4	鳥取地震	吉岡断層	1943	7.2	5
5	三河地震	深溝断層	1945	6.8	17
6	三河地震	横須賀地震断層	1945	6.8	9
7	伊豆半島沖地震	石廊崎中央地震断層	1974	6.9	5.5
8	伊豆大島近海地震	稲取-大峰山断層	1978	7	3
9	鳥取県西部地震	鳥取県西部地震断層	2000	7.3	2
10	福島県浜通りの地震	湯ノ岳断層	2011	7	17
11	福島県浜通りの地震	井戸沢断層	2011	7	17

今回対象とした地表地震断層は、文献で確認された位置を地理情報システム (GIS) 上で表記して整理した。その際、同一の地表地震断層であってもその位置は文献によって異なる。そのため、地表地震断層を GIS に表記する上で以下の点に留意した。

- ①文献を、地表地震断層位置を記載した図面の縮尺と地表地震断層や周辺地形の記載の詳細さでランク分けした。表-2 にランク分けの基準を、図-1 にランク A の文献での記載例、図-2 にランク B の文献での記載例を示す。
- ②各地震において地表地震断層出現位置が信頼できる文献を抽出した。A ランクの文献がある地震では、A ランクの文献にある地表地震断層位置を記載した。ただし A ランクの文献が、出現した地表地震断層全体をカバーしていない場合は、B ランクの文献も併用した。また、B ランク以下の文献しかない場合は、精度は劣るものの B ランクの文献で出現位置を記載した。
- ③それらの地表地震断層位置を参考に、一続きの連続性 (断続的であっても走向方向が概ね一致、もしくは曲がっていてもその延長が一続きと認められる) を持つ部分を主断層として設定した。またそこから分岐したり、平行に走っている断層は副断層として設定した。なお、主断層、副断層の長さは、対象となる全ての文献で記載した位置を網羅する長さとした。主断層、副断層の設定の概念

図を図-3 に示す。

表-2 文献のランク分け基準

ランク	判断の目安	GIS化の適否
A	該当図が比較的大縮尺 (おおよそ5万分の1以下) で、背景図も明瞭で位置の特定も容易である。	GIS化は可能
B	該当図が小縮尺であって精度が悪いか、背景図が不明瞭で位置の特定精度が悪い	GIS化は困難
C	該当図がかなり小縮尺であって、背景図が不明瞭で位置の特定が困難である。	GIS化は不可能
D	地表地震断層図が存在しない。	—

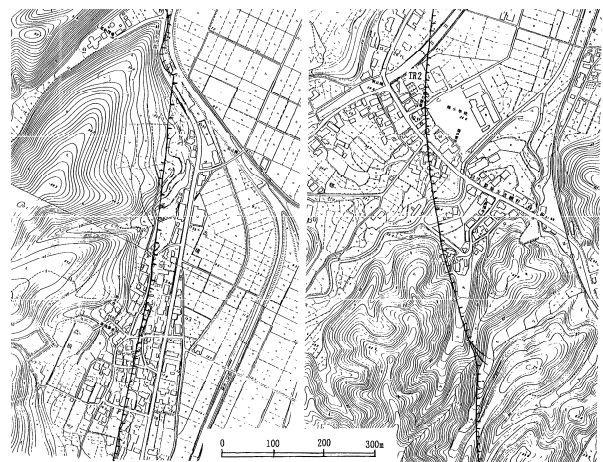


図-1 ランク A の資料例 (北丹後地震 郷村断層) <sup>1)</sup>  
(図面の文献での縮尺は約 7,300 分の 1)

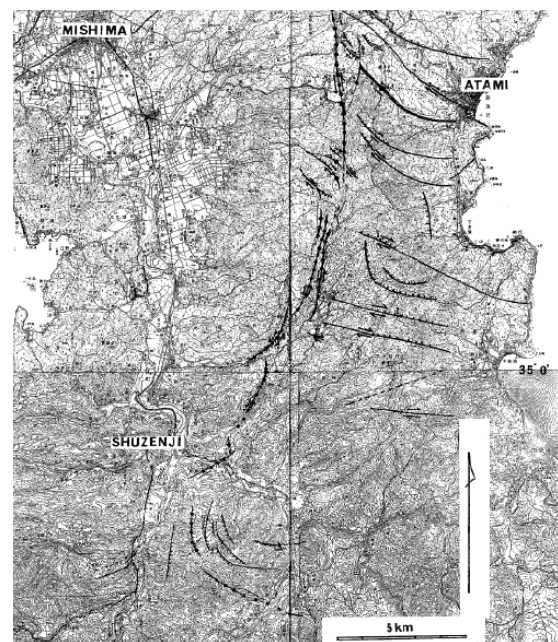


図-2 ランク B の資料例 (北伊豆地震 浮橋中央断層) <sup>2)</sup>  
(図面の文献での縮尺は約 130,000 分の 1)

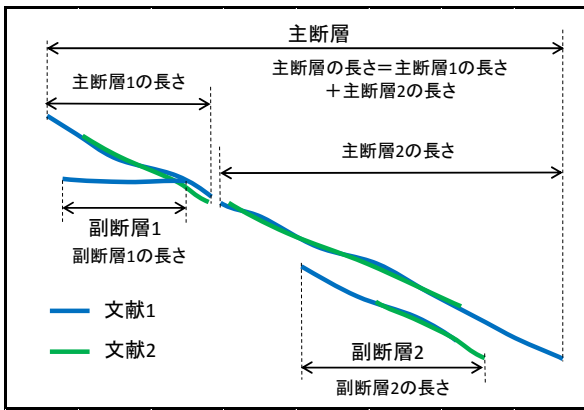


図-3 主断層と副断層の概念図

### 2. 1. 2 空中写真判読

判読に用いた空中写真の縮尺は、主に 10,000 分の 1~20,000 分の 1 とした。ただし、地表地震断層出現位置周辺でこれらの縮尺の写真が存在しなかった場合は、40,000 分の 1 の縮尺の空中写真を用いた。

空中写真判読では、断層変位地形と推定される地形を抽出し、まず 25,000 分の 1 地形図上に記載し、最終的には GIS 上に重ね合わせて記載した。

判読範囲は、それぞれの地表地震断層出現位置(主断層、副断層問わず) から約 2km 幅の範囲で実施し

た。また、断層の延長もまず約 2km 先まで判読を行い、地形要素が確認され線状模様の連続性が疑われる場合は、さらにその先で連続する地形要素が途切れる範囲まで判読を実施した。なお、地表地震断層周辺における空中写真判読にあたっては、人見(2000)<sup>3)</sup>の判読結果やその整理方法を参考にした。

そして空中写真判読の結果、断層変位地形が連続していると推定される直線上の構造が確認された場合、それを線状模様として抽出した。地形判読結果の一例を図-4 に示す。

### 2. 1. 3 地表地震断層と断層変位地形の関係

空中写真判読によって推定された線状模様を地表地震断層出現位置と重ね合わせて、その重なり具合を確認した。ここでは便宜的に、線状模様からの距離が 100m 程度の範囲内に地表地震断層が出現している場合、線状模様との位置関係が概ね一致していると判断し、判読可能なものとした。それ以上離れているもの、周辺に判読地形が確認できないもの、地形と断層の走向が異なっているものは判読不可能なものとした。そして断層延長に対して判読可能な断層の延長を「判読率」と定義する。



図-4 地形判読結果の例(伊豆半島沖地震 石廊崎中央断層 地表地震断層位置は文献<sup>4),5)</sup>より



各断層の出現位置を山地部（地表地震断層出現位置の地形が山地部、谷部にあるもの）、平野部（地表地震断層出現位置の地形が平野、山地平野境界、扇状地、都市部など）に分けた。そして出現位置が山地部にある地表地震断層に対して、線状模様との位置関係の一致する長さを判読可能延長として主断層と副断層に分けて算出した。

## 2.2 航空レーザー測量データに基づく数値標高モデルの地形判読への利用

井戸沢断層周辺について、航空レーザー測量データに基づき作成された数値標高モデル（2m DEM）から、傾斜量陰影図に1m間隔の等高線を重ねた図を作成し、地形判読を行った。判読例を図-5に示す。

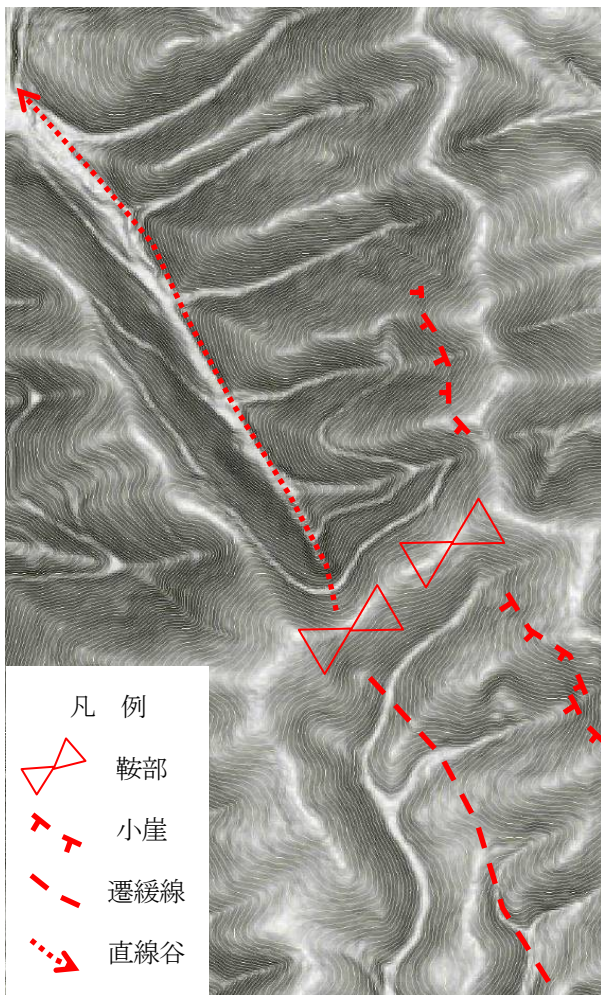


図-5 傾斜量陰影図に1m等高線を重ねた図を用いた地形判読例

そして、空中写真判読結果と比較（比較例を図-6に示す）を行い、地形判読における数値標高モデルと空中写真の特徴を整理した。

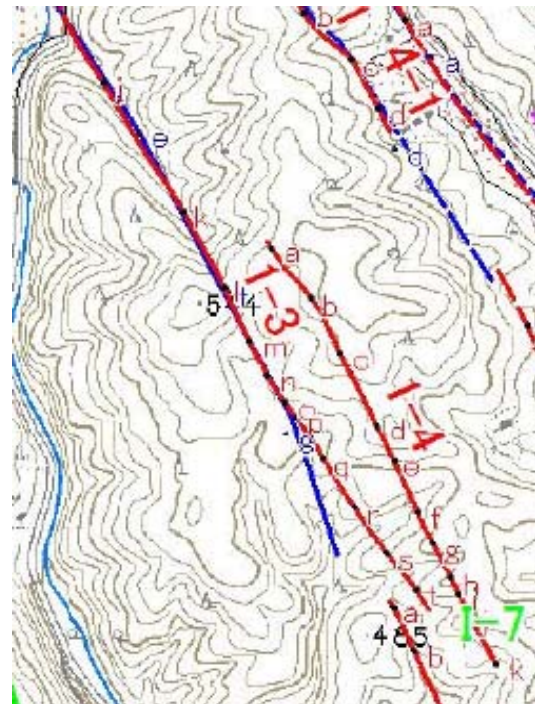


図-6 空中写真と数値標高モデルによる地形判読結果の比較例

（青：空中写真、赤：数値標高モデル）

## 2.3 新たに生じた地表地震断層の位置、変位量把握における航空レーザー測量データの差分解析手法の適用<sup>6)</sup>

2011年4月11日福島県浜通り地震に伴い、主に山地部に延長約29kmにわたって地表地震断層が生じ、土木研究所を含め、多くの組織で地表地震断層出現箇所の確認を行った<sup>7)</sup>。しかしながら長大な延長をもつ地表地震断層の出現位置を完全に記載するには至っていない。

一方、地震断層発生域では地震前後の2時期に取得された航空レーザー測量データが存在する。そこで航空レーザー測量データの新たな利用方法として、地表地震断層出現域に対し、2時期の数値標高モデルの差分解析を適用し、断層の位置およびその変位量分布が把握できるかどうか、現地調査結果との比較を行った。

地表地震断層の鉛直変位量分布を把握するためには、単純に地震前後の数値標高モデルの差分を得るだけでは不十分であり、水平移動量を考慮する必要がある（図-7）。本研究では、地震前後の2時期の数値標高モデルから地形量を画像化し、画像マッチングの手法を応用して移動量の水平成分と鉛直成分を求める手法（「地形画像を用いた地形変化の抽出手法

及びそのプログラム」特許第 4545219 号)を用いた。この手法は、地震前後の画像上のパターンを PIV 法などにより対比して水平移動量を求め、対応する座標点の標高値の差分と合わせて、3 次元の移動ベクトルを求める手法であり、地すべりなどの地表面変位量計測に適用されている<sup>8)</sup>。

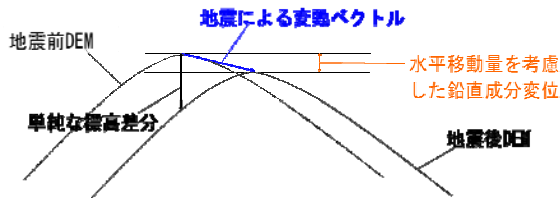


図-7 鉛直変位量推定模式図

### 2. 3. 1 差分解析手法の原理

起伏のある地表が変位した場合、傾斜変換線や谷線、尾根線などの地形的特徴はそれに応じて変位する。これらの地形的特徴を現す地形量を画像化すれば、変位は画像上の濃淡模様のずれとして認識できる。航空レーザー測量のような高密度点群計測による数値標高モデルを用いれば、地形的特徴を良く現す 3 次元の値を持った数値地形画像が容易に作成できる。このような画像から、任意の小領域内において場所ごとに固有の地表面の形状パターンを抽出し、それらを追跡すれば、地表面変位量を画像上で定量的に計測することができる。

数値標高モデルは、空中写真画像のように地物の種類を判定して同一点を特定できる情報は含まれない。また、2 時期の航空レーザー測量における地上計測点は厳密に同一点を計測することは一般的に不可能なので、2 時期の地形画像において対応付けされた形状パターンは厳密には同一の形状パターンを移動させたものにはならない。しかし各々の形状パターンを構成する画像数が充分に多く、それらに対して適切な平滑化処理(線形補間法、クリギング法、移動平均法、フーリエ変換など)を行えば、両者に最も良い相関を与える移動量を画像上で求めることができる。本手法は、固定点間の計測ではなく、有限の広がりと輪郭をもつ形状パターンの追跡を行うため、形状の内部変形が十分に小さければ、変位計測対象の一致度が確保される。

上記のような 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。しかし数値標高モデル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。この鉛直成分は、画像上のパターンの平均的な動きを表すものである。なお、算出されたベクトルの端点は格子点と必ずしも一致しない。そのため、数値標高モデルの標高値を直接付与することはできないが、格子間の 3 次元的位置に対応する標高値は適当な補間法によって算出できる。本研究では、線形補間法を用いた。

### 2. 3. 2 画像マッチングの手法

画像マッチングには各種の方法が既に開発されている。本研究では、主に流体の流速を測定する手法である PIV 法(Particle Imaging Velocimetry)を用いたソフトウェアとして公開されている手法として mpiv (森信人・Chang, Kuang-An 氏開発のフリーウェア)<sup>9)</sup>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 程度の変位を算出できる。本研究では、1 画素を数値標高モデルのグリッドサイズである 2m×2m とした。データ作成までに生ずる誤差を考慮すると、計測できる変位量として信頼できるのは±20cm 程度と考えられる。また、形状追跡を行う検索領域の大きさは 64 ピクセル×64 ピクセル (128m×128m) とし、領域内で計測された変位量の平均を検索領域の中心に描画するものとした。

### 2. 3. 3 解析に用いた数値標高モデル

解析対象区域は、2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に伴い、地表地震断層が発生した範囲を包含する範囲とした。

使用した数値標高モデルは、当該地震の前後の 2 時期に実施された航空レーザー測量結果から作成した 2m グリッドデータ(表-3)である。

表-3 航空レーザー測量データ諸元

	計測日	グリッド <sup>△</sup> サイズ <sup>△</sup>	備考
地震前	2006 年 9 月～ 2007 年 2 月	2m	国際航業(株) 撮影
地震後	2011 年 5 月～ 6 月	2m	国土地理院 提供*

\* 国土地理院が保有する「東日本大震災からの復旧復興及び防災対策のための高精度標高データ」

### 2. 3. 4 数値標高モデルの広域地殻変動の影響とその除去

本研究では、地震前後の航空レーザー測量に基づ

き作成された数値標高モデルを用いて、2011年4月11日福島県浜通りの地震前後の地表面変位量を計測した。解析対象区域は、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による地殻変動と、2011年4月11日福島県浜通りの地震による地殻変動、およびこれらの余効変動、さらにはデータ取得時から地震発生までの変動を重複して被っている。したがって対象となる地震に伴う地表面変位量を計測するには、それ以外の原因によって生じた変位量を除去する必要がある。

本研究においては、数値標高モデルの作成に使用した各電子基準点の、地震前の航空レーザー測量に用いた旧成果、2011年4月11日の地震発生直前の4月9日の「日々の値」および地震後のデータ作成に用いた新成果に基づいて解析を行い、下記の仮定を設定して、4月11日の地震による変位量を抽出した。

- ① 地震前データ取得時以降2011年3月11日までの経年変位量は無視する。
- ② 2011年3月11日の地震および2011年4月9日までの余効変動による狭い領域内の内部変形は無視する。
- ③ 2011年4月11日地震後から新期データ取得時までの余効変動は分離しない。
- ④ 2011年4月11日地震後の余効変動による狭い領域内の内部変形は分離しない。
- ⑤ 新期データ取得時から2011年5月31日新成果算定時点までの変位量は無視する。

### 2. 3. 5 解析の手順

解析の手順は以下の通りである。

変位量を求めるにあたり、地震前後の数値標高モデルから傾斜量陰影図を作成した。そして地震前後の傾斜量陰影図を小さな検索領域に分割し、画像マッチングにより水平変位量を求めた。さらに対応する領域について、地震前後の平均標高の差分を鉛直変位量とした。

画像マッチングにおいてパターンの検索領域を設定し、その中心に対して、領域内で算定された変位量の平均値を与えた(図-8)。本研究において、検索領域は128m×128mに設定した。すなわち、検索領域の中心位置を検索領域の1/2が重複するよう64mごとに南北・東西方向にずらして領域内の変位量を算出し、その結果を解析対象区域全域の64mメッシュに与えて変位量データを作成した。

また、地表地震断層出現箇所を挟む隆起側と沈降側の2つのグリッドの変位量の差分を求めることで、

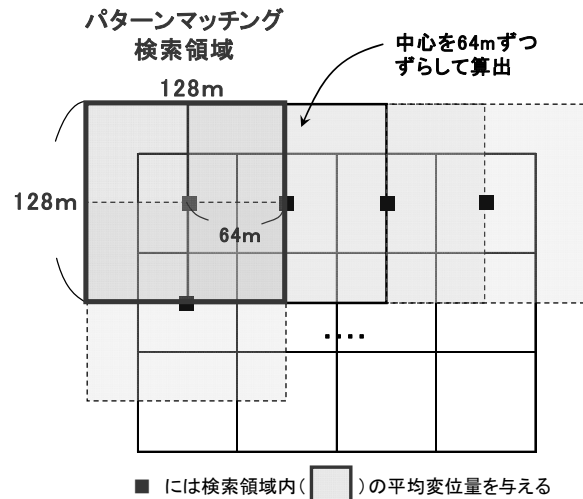


図-8 変位量算出領域の設定

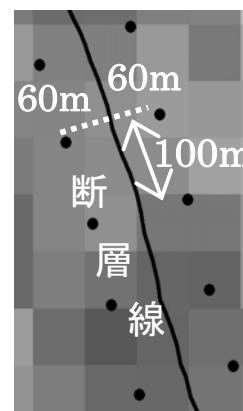


図-9 断層変位解析点群の設定

地表地震断層の変位量分布の詳細を明らかにすることを試みた。その手順を以下に示す。

- ① 画像マッチングにより計測した変位量分布から、断層線(断層位置)を推定した。
- ② 推定した断層線を基準とし、断層の両側に断層から等距離の測点を2点一組とし、断層線に沿って100m間隔で断層変位解析点群を設定した。一組の測点の断層からの距離は60mとした(図-9)。
- ③ 前述した64mメッシュの変位量と測点の位置関係を把握し、測点を含むメッシュの変位量の値を各測点に与えた。

算出された結果にはかなりのばらつきが認められ、現地では報告されていない大きな変位量や全体の傾向とは逆向きを示す値が含まれる。これらについては原因不明であるが何らかの理由で生じたエラーと考え、標準偏差の2倍の範囲を超えるものについて棄却した。

鉛直変位量に関しては北東側地塊が相対的に上昇



する動きを正の値とした。

また横ずれ量に関しては、断層の一般的な走向(湯ノ岳地震断層については N55°W、井戸沢地震断層については N20°W) 方向に対する値とした。すなわち、断層を挟む 2 点間の水平移動ベクトルについて、断層の一般的な走向に直交方向の成分を計算で求めた。なお、右横ずれが正の値、左横ずれが負の値を示す。

### 3. 研究結果

#### 3. 1 地表地震断層における地形分析結果

2. 1 に示した方法で、地表地震断層出現位置の空中写真判読による判読延長と判読率を断層毎に整理した。整理結果を表-4 および図-10 に示す。

表-4 主断層と副断層の判読延長と判読率

断層名	主断層延長 (km)	主断層判読延長 (km)	副断層延長 (km)	副断層判読延長 (km)	主断層判読率	副断層判読率
井戸沢断層	8.25	8.25	8.74	0	100	0
石廊崎断層	10.15	10.15	4.88	1.78	100	36.48
湯ノ岳断層	13.24	12.06	0.33	0.13	91.09	39.39
浮橋中央断層	7.65	6.80	3.18	0.65	88.89	20.44
丹那断層	7.91	7.91	0.93	0	100	0
郷村断層	5.37	3.61	2.15	0.6	67.23	27.91
深溝断層	5.52	1.35	0.35	0	24.46	0
鳥取西部地震断層	2.00	2.00	1.70	0	100	0
稲取-大峰山断層	2.56	2.56	0.30	0.3	100	100
横須賀断層	1.77	0.18	1.10	0	10.17	0
吉岡断層	1.04	0.94	0.37	0.14	90.38	37.84
合計	65.46	55.81	24.03	3.60	85.26	14.98

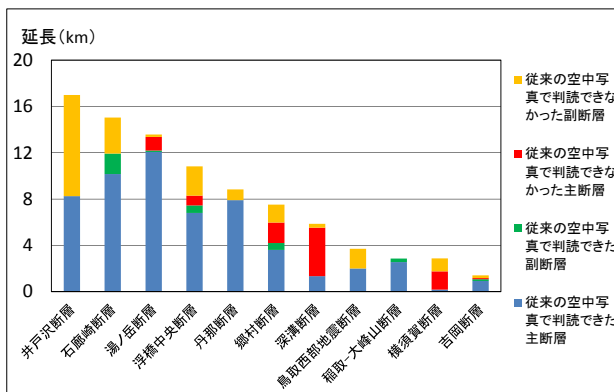


図-10 主断層と副断層の判読延長

主断層については、11 断層の内、5 つの断層で地表地震断層からの距離が 100m 以内に判読できなかった部分が確認された。特に、三河地震で発生した深溝断層、横須賀断層は判読率が著しく低くなった。これは、図-11 に示す通り、地表地震断層の出現が断続的かつ大きな屈曲を伴っており、変動地形の直線の連続を想定する線状模様の抽出方法では、出現位置を予測することが難しいことが挙げられる。

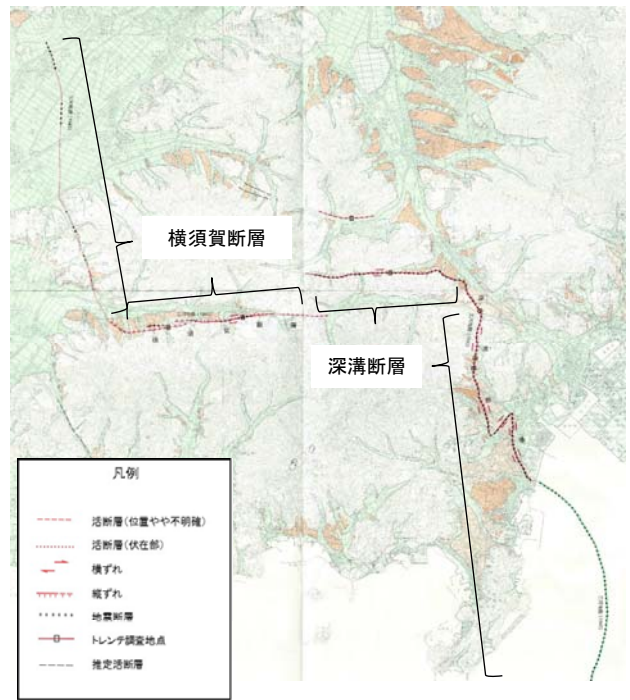


図-11 深溝断層、横須賀断層の分布 (文献<sup>10)</sup> に加筆)

残りの 3 つの断層については、浮橋中央断層および郷村断層は線状模様から 100m 以上離れた位置に地表地震断層が出現する箇所があり、判読できなかった箇所が出たものである。また、湯ノ岳断層は主断層の南東端部で走向が南東から北東に変化しており、この部分の判読が出来なかったものである。

しかし、主断層全体の延長 65.48km に対し、地表地震断層からの距離が 100m 以内に判読できた延長が 55.81km であり、判読率が 85.28% (深溝断層、横須賀断層を除いた場合、89.43%) であったことから、主断層に関しては、直線的に出現するものについては空中写真判読で概ね抽出可能であると考えられる。

副断層については、判読率が 100% だった断層は 1 つのみで、判読率が 0% のものが 5 つ、残りの 5 つも判読率は 20~39.4% 程度であった。副断層全体でも、延長 24.03km に対し、判読延長が 3.6km、判読率が 14.98% で判読率は全体的に低い傾向であった。

副断層の判読率が低かった事例として、井戸沢断層北部の判読結果を図-12、図-13 に示す。

井戸沢地震断層は「新編日本の活断層」<sup>11)</sup>で確実度Ⅱ~Ⅲとされる活断層である井戸沢断層のうちの西側の区間に一致するものであった。井戸沢地震断層の主断層の北端付近から分岐する、約 7km の副断層周辺の地形的特徴は次のようである。

井戸沢地震断層の主断層部と副断層部はいずれも、鞍部、直線谷、三角末端面および狭長な谷底平野の



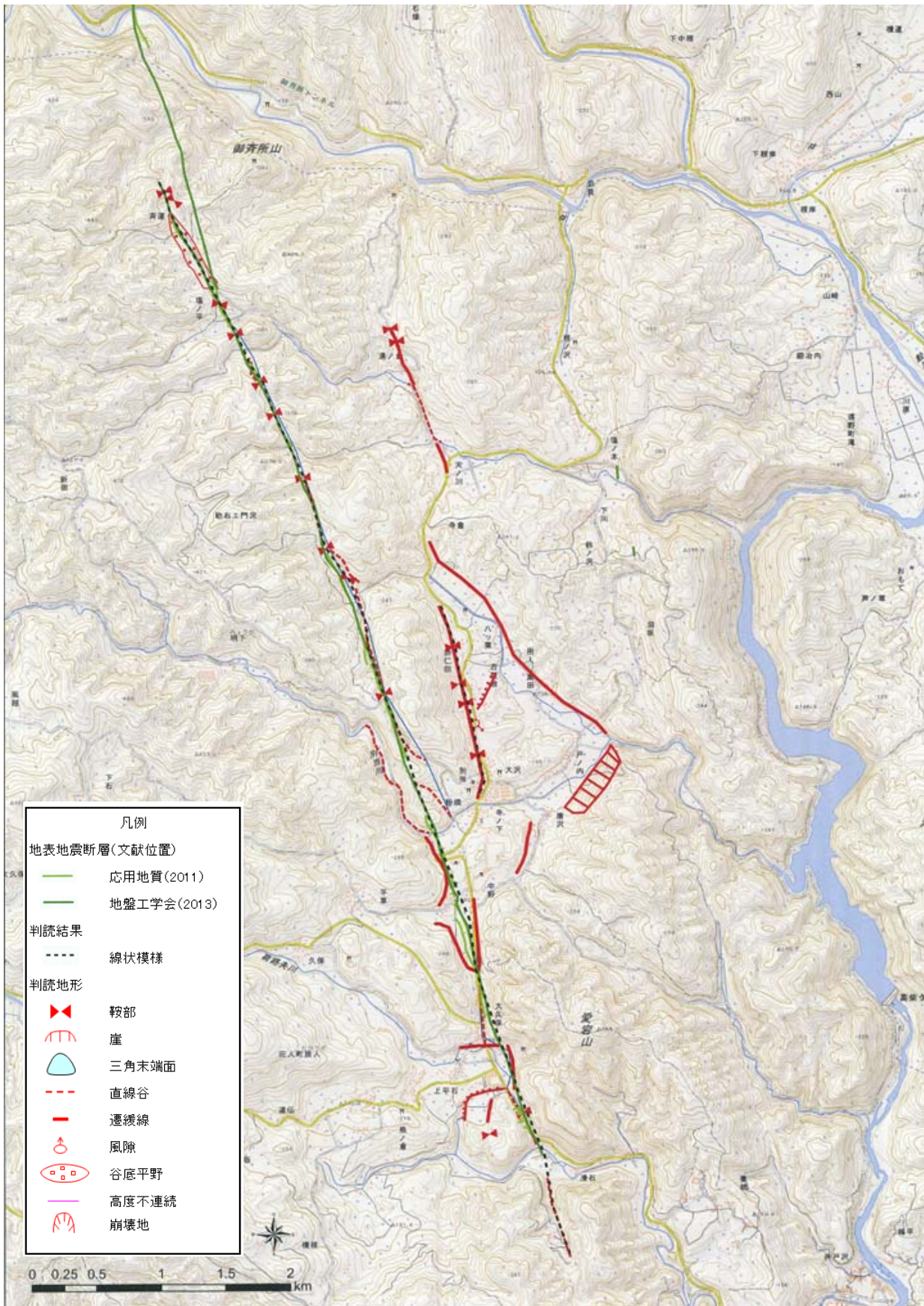


図-12 井戸沢断層主断層部における地形判読結果



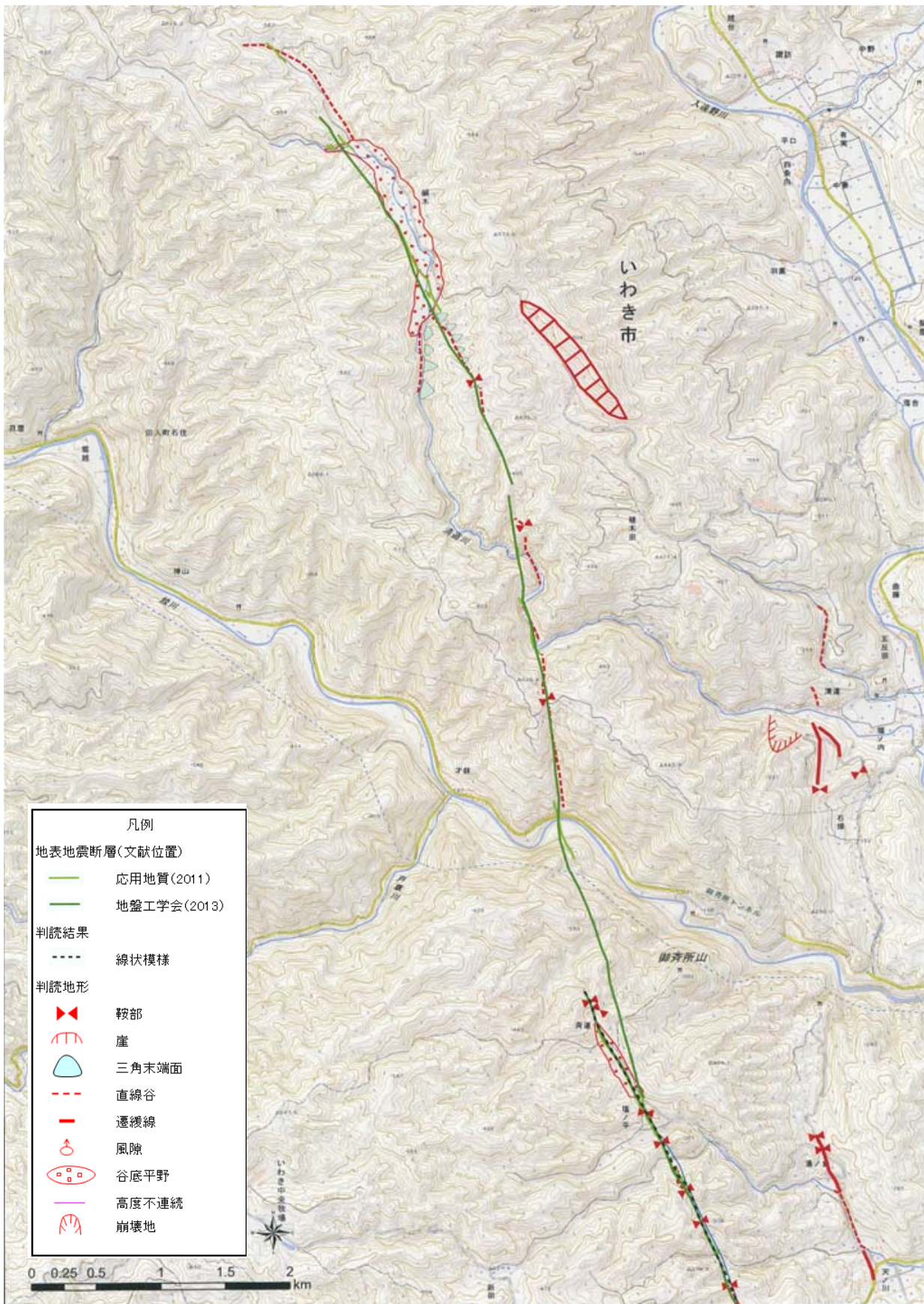


図-13 井戸沢断層副断層部における地形判読結果

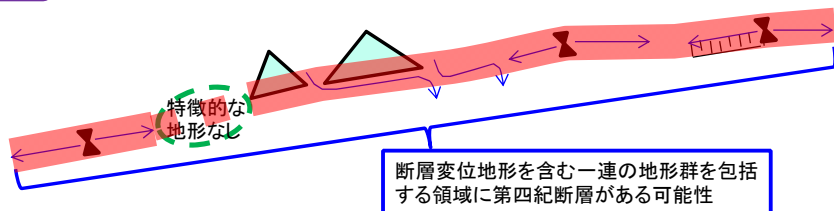
地形が分布する。主断層部については、鞍部や直線谷で地形要素の連続性がかなり良く変位を示す地形も確認されるが、副断層については一部で途切れ、断続的に組織地形として確認されるのみである。また、周辺の山地高度を見ると、大局的には東に向かって高度を減ずるが、主断層の南部においては断層を挟んだ東側の山地高度がわずかに隆起している様に見えることから、断層変位が示唆される。一方副断層ではそのような高度不連続は不明瞭である。

以上のように同じような地形要素によって構成されていても、変位を示唆する要素があるかどうかでそれぞれの地形要素を断層変位地形と見なすかどうかを判断した結果、主断層は断層変位地形の可能性があるとし、副断層は断層変位地形の可能性がないと判断しているのである。しかしながら山地部の活動度が低い活断層では、浸食や堆積の速度と断層変位の速度との関係で、変位を示唆する要素が認めにくくなるものと考えられる。このことから、山地部の活動度が低い活断層を把握するためには、組織地形の可能性が高い地形要素に着目することが考えられる。また、その連続性が悪い場合があることにも留意する必要があると考えられる。そこで地表地震断層からの距離が 100m 以内に判読できなかった副

表-5 地表地震断層からの距離が 100m 以内に判読できなかった副断層における主断層との位置関係

地震断層名	断層記号	未判読延長(km)	主断層との位置関係	分岐もしくは末端部からの角度	主断層からの距離(km)	副断層近傍における組織地形
丹那断層	B	0.53	平行		0.35	逆向き崖、鞍部、風跡
浮橋中央断層	C	1.68	平行		0.50	崖、連続線
石廊崎断層	J	0.25	平行		0.10	なし
石廊崎断層	K	1.10	平行		0.28	鞍部2つ
郷村断層	O	1.25	平行		2.00	鞍部と連続線
横須賀断層	Q	0.2	平行		1.10	なし
横須賀断層	R	0.1	平行		0.90	鞍部
横須賀断層	S	0.4	平行		0.50	東西延長部に崖、連続線が連続しているが、地表地震断層出現部自体にはない。
鳥取県西部地震	X	0.70	平行		1.10	なし
丹那断層	A	0.40	中間部からの分岐	50°	0.45	なし
石廊崎断層	L	1.75	中間部からの分岐	25°	0.58	鞍部
吉岡断層	Y	0.13	中間部からの分岐	13°	0.80	風跡
井戸沢断層	E	4.95	末端付近からの分岐	17°	0.00	鞍部、直線谷
井戸沢断層	F	3.38	末端付近からの分岐	17°	(4.00)	鞍部、直線谷
井戸沢断層	G	0.23	末端付近からの分岐	11°	(7.70)	鞍部、直線谷
井戸沢断層	H	0.08	末端付近からの分岐	6°	(8.91)	谷底平野
井戸沢断層	I	0.10	末端付近からの分岐	5°	(9.35)	直線谷、谷底平野
吉岡断層	Z	0.10	末端付近からの分岐	35°	1.00	なし
浮橋中央断層	D	0.85	延長(延長線上で横切る)		0.85	鞍部、三角末端面
湯ノ岳断層	M	0.20	延長	8°	0.90	連続線
郷村断層	N	0.30	延長	7°	1.00	なし
横須賀断層	P	0.25	延長	7°	0.65	なし
深溝断層	T	0.25	延長	7°	0.65	なし
深溝断層	U	0.1	延長	7°	(1.40)	なし
鳥取県西部地震	V	0.68	延長	30°	2.20	なし
鳥取県西部地震	W	0.32	延長	23°	(3.15)	なし

**従来法**



**本研究成果に基づく地形的把握方法案**

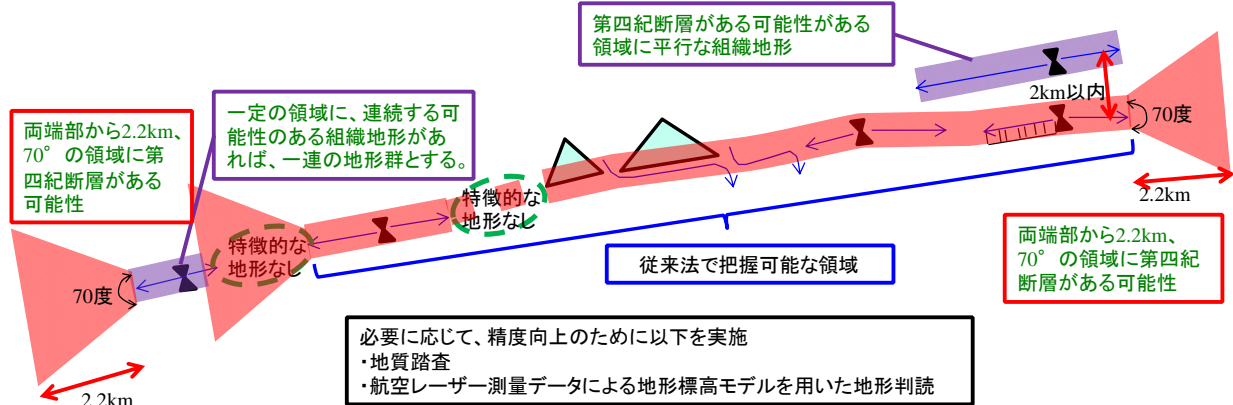


図-14 山地部活断層の地形的把握方法



断層において、主断層に対する位置関係と主断層からの距離および組織地形の有無について確認を行った。結果を表-5に示す。

主断層との位置関係が平行もしくは中間部からの分岐の場合、副断層の分布を確認するためには主断層に対して平行方向に幅を拡げてその分布を確認する必要がある。地表地震断層のうち地形判読で把握できなかったものについて、主断層との距離は最大で2kmであった。また、主断層との位置関係が末端付近からの分岐もしくは延長にある副断層の場合、副断層の分布を把握するためには主断層の末端からの延長方向に、一定の角度を持った範囲にある断層を主断層と関連づけて考えてみる必要がある。今回、地形判読により把握が困難であった副断層で主断層から離れているものについて、主断層からの距離を計測したところ、最大2.2kmであった。また副断層の主断層末端部の走向との角度は最大で35°であった。

なお、これらの地形判読により把握が困難であった副断層とその近傍における組織地形との関係を見ると、副断層の延長が1km以上のものについては、鞍部や逆向き崖などの地形が確認された。よって延長の長い副断層については、主断層近傍にある組織地形を確認することでその位置を推定することができる可能性がある。しかし、延長の短い副断層については、組織地形が確認できないものがあつた。

このように、地表地震断層が概ね直線的に出現するものについて、主断層部分については概ね地形判読で位置の推定が可能であることが確認できた。しかし、副断層については地表地震断層からの距離が100m以内に判読できないものが多数あつた。この場合、副断層の出現位置の事例からその出現範囲については確認を行う調査方法が必要になると考えられる。

これらの整理結果より、地表地震断層の出現状況を踏まえた活動度の低い山地部活断層の地形的把握方法を以下の通り考案した。

- ①従来では断層変位地形を含む一連の地形群を包括する領域を抽出しているが、本案では特に両端部の一定領域および一連の地形群については、組織地形も含めて抽出し、活断層の可能性を推定する。なお、延長方向の領域については2.2km、断層末端走向から35°の範囲両方向（合計70°）とする。
- ②活断層の可能性のある領域から2km以内の距離で平行する組織地形も抽出する。

③①、②の方法では延長の短い副断層が地表地震断層として発生した場合、判読できない可能性がある。そのため活断層が存在する可能性がある領域が、建設予定の重要土木構造物敷地より①および②の範囲以内に含まれ、かつその方向が構造物敷地に向かっている場合、必要に応じて航空レーザー測量データを用いた地形判読を併用するなどして、微地形を詳しく確認するとともに、活断層の延長となる可能性のある組織地形や地質断層（古い時代の断層）について、詳しく地質踏査を行う。

上記①～③によって、主断層の末端部の分岐断層や副断層の存在の可能性について、地形地質的に詳しく検討・評価することで、従来法より活断層の抽出精度が向上するものと考えられる。従来法および本案における山地部活断層の地形的把握方法の概念図を図-14に示す。

### 3.2 数値標高モデルの活断層地形判読への利用

空中写真および数値標高モデルの判読の結果、主要な線状模様については同様の結果が得られたが、同一と考えられる線状模様についてみると、空中写真判読では連続的に見えるものが、数値標高モデルでは断続的で、微妙に位置が異なって見える。これは空中写真と数値標高モデルの表示縮尺が異なることに起因するものと考えられる。

空中写真および数値標高モデルの判読の結果、それぞれの特徴について、以下のように整理できる。

#### a) 空中写真判読

- ・データが全国整備されており、昭和20年代より各時期のデータが存在するため、地形改変前の状況が把握できる可能性が高い。
- ・樹木等の存在により地形の解像度が悪い。
- ・陰影が判読結果に影響するため、谷底など影により見えない部分が存在したり、尾根や高原の反射により鞍部など地形要素の判読ができない場合がある。
- ・大局的にリニアメントの連続性を追跡できる。
- ・土地利用、人工地形なども踏まえて総合的に判定できる。

#### b) 詳細デジタル標高モデル

- ・一部にデータが存在しない地域があるほか、存在してもデータを民間が保有する場合には入手に高額な費用が掛かる場合がある。また、古くても最近10年程度しかデータがないため、地形改変前のデータが得られない。
- ・樹木等の影響が除去できることから一般に地形の

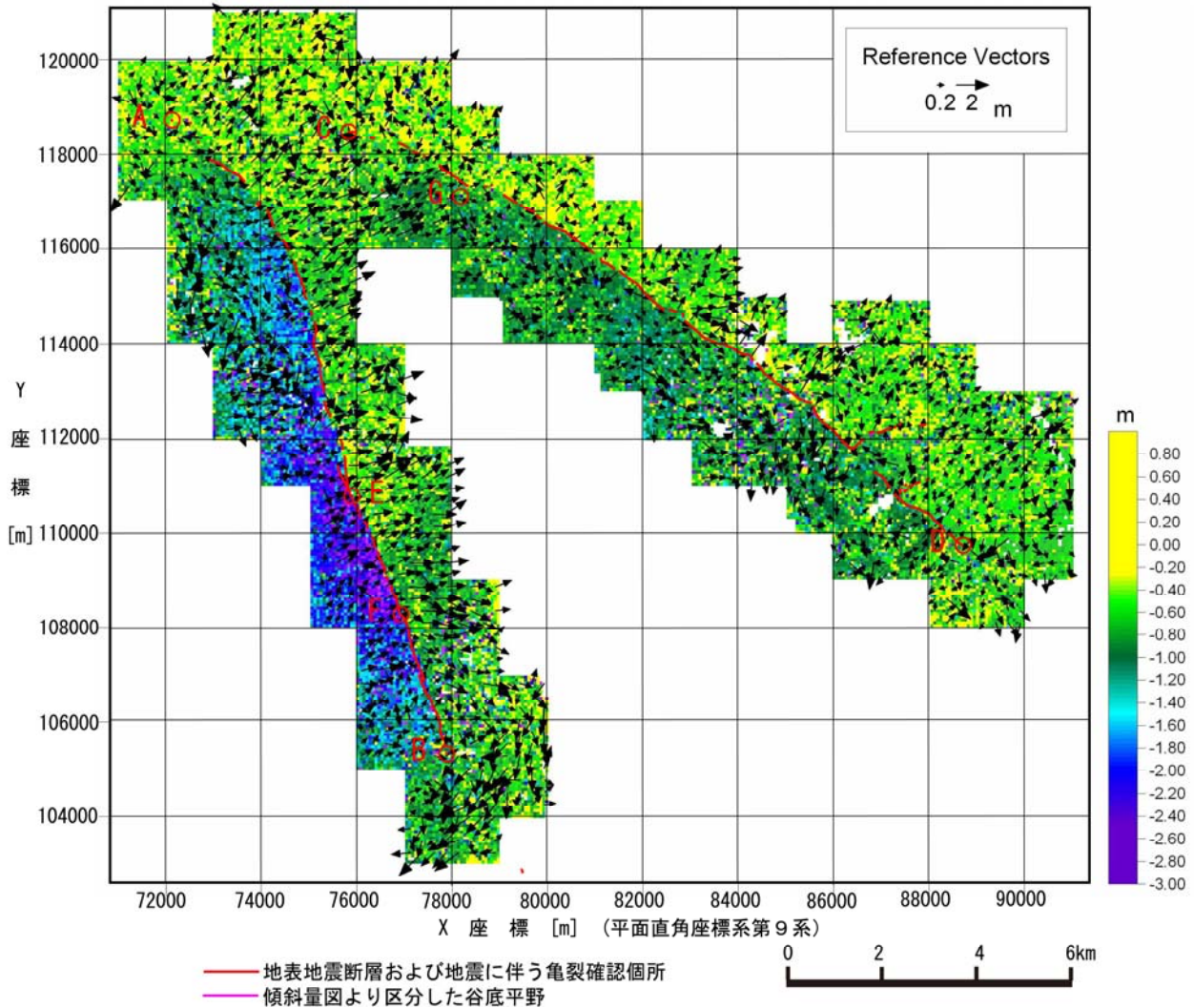


図-15 2 時期の数値標高モデルの差分解析に基づく、福島県浜通りの地震前後の地表面鉛直変位および水平変位ベクトル

解像度が高く、地表面の状況が詳細に把握できる。特に樹木に覆われた山地・丘陵地、斜面における鞍部、遷緩線・段差地形等の微細な地形の抽出・追跡に非常に有効である。

- 植生や影、斜面の方向に関係なく一様に地形が表現されているため、判読漏れや誤判読が少ない。
- データが詳細であるがゆえに、コンピュータの画面上で縮小表示すると画像がつぶれて判読できなくなり、拡大表示すると地形の連続などの全体像が見えにくくなるなど、判読目的に適した表示に工夫が必要な場合がある。
- 人工地形が存在する場合、空中写真と異なり土地利用状況等が識別できないため抽出精度が落ちることがある。

より精度よく活断層地形を判読するためには、空中写真で大局的な活断層地形を判読・抽出した上で、

詳細判読が必要な範囲において、数値標高モデルにより判読を行うことが考えられる。

### 3. 3 地表地震断層の現地調査時における航空レーザー測定の利用結果

#### 3. 3. 1 差分解析結果の概要

差分解析に基づく解析対象区域全域の鉛直変位量分布(セルの色で表現)および水平変位ベクトル(矢印の方向と長さで表現)を図-15に示す。

##### a) 鉛直変位量

解析結果と現地調査結果を比較すると、解析結果で鉛直変位が認められる領域と井戸沢地震断層と関連する亀裂(図中のA,B地点は現地で確認された亀裂の南北端)、湯ノ岳地震断層と関連する亀裂(図中のC,D地点は現地で確認された亀裂の東西端)の分布域はほぼ一致するようになる。ただし井戸沢地震断層南端部に関してはB地点よりやや南の延長ま



で解析結果で鉛直変位が認められる。

また、井戸沢地震断層において最大変位量を示す、いわき市塩ノ平集落南方（地点E；現地での鉛直変位量計測値 190cm）から赤仁田集落西方（地点F；現地での鉛直変位量計測値 180cm）の間では、解析結果では 250cm 程度となっているなど、全体的に解析結果が観察された地表地震断層の鉛直変位量よりやや大きめの値を示す。

さらに、解析範囲が変動範囲を十分包含していないものの、解析結果からは、井戸沢地震断層と湯ノ岳地震断層に挟まれる地塊は北東方向に傾動しているように見える。また、特に井戸沢地震断層の西側の地塊が地点Eから地点Fを中心に著しく沈降していることがわかる。これらの結果は合成開口レーダーを用いた地殻変動解析結果<sup>12)</sup>と調和的である。

### b) 水平変位

井戸沢断層西側トレースでは、地表の水平変位の方向は、断層と直交するようにおおむね東北東方向を示し、特に断層の東側ではそれが顕著で一様に認められる。しかし断層の西側ではやや異なる方向を示す傾向があり、特に北部では南向き成分が認められる。すなわち、地表面変位の向きや大きさが変化する場所に井戸沢地震断層が位置している。また、断層西側における地盤の沈降量が大きい地点F付近では、断層の東側での東北東～東方向への変位が特に大きい傾向がある。

湯ノ岳地震断層周辺では、断層の北東側は北東方向に移動する傾向が認められる。断層南西側では地点Gより北西側では同様に北東方向への変位が顕著に認められるが、中部および南部では全体的な変位方向の傾向は認められない。しかし断層線直近の南西側には南東方向に移動する帯状の地帯が認められる。

なお、井戸沢地震断層南端部付近の一部には南西方向への比較的大きな変位が認められるが、これは全体の傾向に対して特異である。この傾向はコース間調整などの処理過程で生じた見かけの変位である可能性があるが、原因の特定には至らなかった。

### 3. 3. 2 解析結果と現地調査結果との比較

解析結果に基づく、井戸沢地震断層、湯ノ岳地震断層の鉛直変位量、断層の平均的走向に投影した横ずれ変位量（いずれも断層からの測点距離を 60m にしたものを図-16～図-19 に示す。現地調査に基づく鉛直変位量および横ずれ変位量（丸山ほか<sup>13)</sup>、栗田ほか<sup>14)</sup>）を合わせて示す。

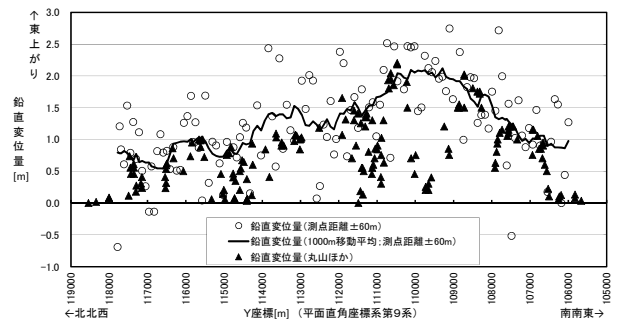


図-16 井戸沢地震断層の鉛直変位量分布

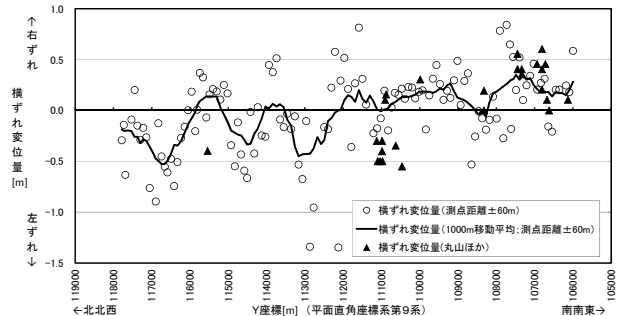


図-17 井戸沢地震断層の横ずれ変位量分布

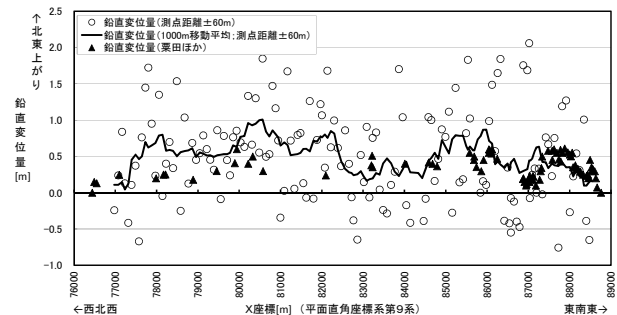


図-18 湯ノ岳地震断層の鉛直変位量分布

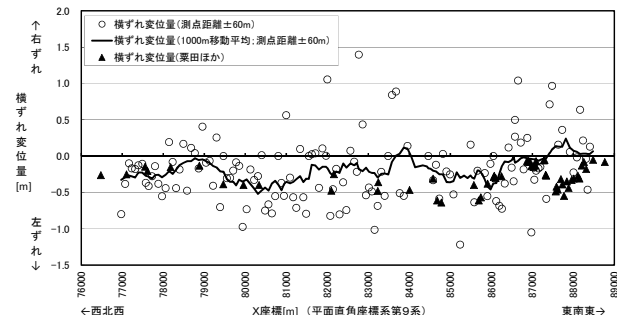


図-19 湯ノ岳地震断層の横ずれ変位量分布

変位の鉛直成分、水平成分ともに、変位方向、変位量とも値のばらつきが大きい。解析結果に基づく平均変位量と標準偏差（表-6）をみると、たとえば、湯ノ岳地震断層の鉛直変位量の平均値（0.554m）に対して、標準偏差（0.942m）が非常に大きく、湯ノ岳地震断層の鉛直変位量（図-18）では現地調査によると全て正の値であるにもかかわらず、個々の解析結果では負の値を示すものがかなりある。本研究の変

位置計測は、断層周辺の小領域における移動量を面的かつ平均的に算出するものである。そのため、地表地震断層における点的な計測値とは必ずしも一致しないことは予想できるが、個々の地点の計測から推定される全体の傾向と一致しない点があることについての理由は不明である。可能性としては、画像マッチングにおいてよく似た形状を誤って追跡したため誤判別が起こった、または断層からの距離が60mであるため、一部の地点では計測範囲に断層の上盤側の変位量が混入したことなどが考えられる。一方、現地調査結果についても場所により値の大小のばらつきが大きい。

表-6 解析に基づく断層変位量の算術平均と標準偏差

地震断層名	変位量計測方向	解析結果 (測点距離±60m)		
		算術平均 (m)	標本数	標準偏差 (m)
井戸沢	鉛直	1.304	134	0.788
	横ずれ	0.607	134	0.460
湯ノ岳	鉛直	0.554	148	0.942
	横ずれ	0.643	148	0.416

ここで、断層沿いに1000m区間の移動平均処理を行ってみると、現地調査結果の大きめの値を包含するような結果となっている。現地調査において、断層が水田面や建築物などの水平な基準面や構造物などの直線上の基準や水準測量路線を横断する場合を除き、断層位置におけるずれ量の計測値を変位量とせざるを得ない。そのため、現地調査結果は真の変位量と同じか、過小評価するものと考えられる。このことを考慮すると、解析結果の1000m移動平均値は、真の断層変位量に近い値を示しているものと考えられる。

ただし、現地調査と解析結果とが大きく異なる場所も認められる。たとえば井戸沢地震断層の鉛直変位量(図-16)における11000m付近、井戸沢地震断層の横ずれ変位量(図-17)における111000m付近および115500m付近、湯ノ岳地震断層の鉛直変位量(図-18)における78000mから82000m付近、湯ノ岳地震断層の横ずれ変位量(図-19)における84000m付近および88000m付近などである。

そのうち、井戸沢地震断層の鉛直変位量に関して、11000m付近は、現地調査では鉛直変位量の大きな地点に挟まれた、起伏量の大きな山地である。断層トレースは直線的であり、特に変形が収束すると考えられる要素がないことから、むしろ現地で明確な

地表地震断層が現れない形で変形が起こった可能性を検討する必要があると考えられる。

井戸沢地震断層の横ずれ変位量に関して111000m付近(いわき市塩ノ平集落)および115500m付近(いわき市綱木集落)はいずれも谷幅が一定で直線的な谷底平野である。このことから、地形の形状パターンが似ている箇所での誤判別によるマッチングエラーが生じた可能性がある。

湯ノ岳地震断層の鉛直変位量に関して、78000mから82000m付近については、断層の上盤側に沖積層が分布していると推定され、地震動による地盤の沈下が起こった可能性が考えられる。

湯ノ岳地震断層の横ずれ変位量に関して、84000m付近はマッチングできなかった箇所が連続して存在するため、正確でない結果が得られたものと考えられる。また、88000m付近は直線的な崖地形と平野の境界部であり、マッチングが適切に行われなかった可能性がある。

新たに地表地震断層が発生した際の位置およびその変位量の推定に、2時期の航空レーザー測量データの差分解析手法を適用したところ、概ね現地調査結果とよく整合し、本手法が調査に活用できることが分かった。

#### 4. まとめ

本研究では活動度の低い山地部活断層の地形的把握手法を提案することを目的として、地表地震断層周辺の地形分析を行い、地表地震断層の地形的特徴に基づく調査手法の再検討を実施した。

地表地震断層の主断層部分は、直線的に出現するものについては従来の空中写真判読で概ね抽出可能であった。副断層部分は空中写真判読による抽出が困難なものが多かったが、主断層周辺における組織地形を確認することで、副断層の抽出できる可能性がある。

これらを踏まえて、地表地震断層の出現状況を踏まえた活動度の低い山地部活断層の地形的把握方法を提案した。

また、断層変位地形の抽出における航空レーザー測量データの適用性について、主要な線状模様については空中写真判読結果と概ね同様の結果が得られ、樹林に覆われた山地部においては特に微細な地形の判読に有効であることから、必要に応じて空中写真判読と併用することで、活断層判読の精度が向上できるものと考えられた。



さらに、地表地震断層が発生した地域に地震前後の2時期に取得された航空レーザー測量の差分解析を適用した結果、地表変位の分布域が地表地震断層の分布域と概ね一致する結果が得られ、現地調査を実施するに当たって有用な資料となることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 岡田篤正・松田時彦：1927年北丹後地震の地震断層活断層研究, 16, pp.95-135, 1997年.
- 2) 松田時彦：1930年北伊豆地震の地震断層 星野・青木編「伊豆半島」, pp.73-93, 東海大学出版会, 1972年.
- 3) 人見美哉：平成11年度交流研究員報告書 活断層とリニアメントの位置のずれに関する研究, 建設省土木研究所環境部地質研究室, 2000年.
- 4) 村井勇・金子史朗：1974年伊豆半島沖地震の地震断層、とくに活断層および小構造との関係, 東京大学地震研究所研究速報, No.14, pp.159-203, 1974年.
- 5) 垣見俊弘・衣笠善博・鈴木尉元・小玉喜三郎・三梨昂：1974年伊豆半島沖地震に関する地質学的調査, 地質調査所特別報告, No.6, pp.1-35, 1977年.
- 6) 品川俊介・阿南修司・佐々木靖人・向山栄・本間信一・小林容子：2時期の航空レーザー測量による
- 7) 市川八州夫・小俣雅志・黒澤英樹・小荒井衛・佐々木靖人・品川俊介：地表断層変位の発生, 地盤工学会編, 東日本大震災合同調査報告, 共通編3, 地盤災害, pp.29-84, 丸善出版, 2014年.
- 8) Sakae Mukoyama : Estimation of ground deformation caused by the Earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the Geomorphic Image Analysis of high resolution LiDAR DEMs, Journal of Mountain Science, Vol.8, No.2, pp.239-245, 2010.
- 9) Nobuhito Mori ホームページ, <http://www.oceanwave.jp/softwares/mpiv/index.php>
- 10) 岡田篤正・鈴木康弘・堤浩之・東郷正美：1:25,000 都市圏活断層図「蒲郡」, 2004年.
- 11) 活断層研究会編：新編日本の活断層, Pp.162-163, 東京大学出版会, 1991年
- 12) 国土地理院(2011)：平成23年(2011年)4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)に伴う地殻変動 合成開口レーダー(SAR)解析による地殻変動, 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110425-index.html>.
- 13) 丸山正・斎藤英二・吾妻崇・谷口薫・吉見雅行・林田拓己(2011)：2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴い井戸沢断層に沿って出現した地震断層の緊急現地調査報告, 産業技術総合研究所活断層・地震研究センターホームページ, <http://unit.aist.go.jp/act-fault-eq/Tohoku/report/idosawa/idosawa.pdf>, 22p.
- 14) 栗田泰夫・楮原京子・杉山雄一・吉岡敏和・吾妻崇・安藤亮輔・丸山正(2011)：2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う湯ノ岳・藤原断層の地表変位ベクトル(速報), 産業技術総合研究所活断層・地震研究センターホームページ, [http://unit.aist.go.jp/act-fault-eq/Tohoku/report/yunotake\\_v3\\_120914.pdf](http://unit.aist.go.jp/act-fault-eq/Tohoku/report/yunotake_v3_120914.pdf), 14p.

## A STUDY ON GEOMORPHIC INVESTIGATION METHOD FOR ACTIVE FAULTS IN THE MOUNTAINOUS DISTRICT

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2013

**Research Team** : Geology and Geotechnical

Engineering Research Group

(Geology)

**Author** : SASAKI Yasuhito

ANAN Shuji

SHINAGAWA Shunsuke

EGUCHI Takahiro

**Abstract** : Geomorphic characteristics around the surface of the earthquake faults in the mountainous district were analyzed. As a result, most of the master fault was able to understand the positions by a past aerial photograph investigation method. On the other hand, most of auxiliary faults such as diverged or in parallel from the master faults couldn't understand the positions. Based on above, the geomorphic interpretation method for active faults in the mountainous district including the auxiliary fault has been proposed.

As for the geomorphic interpretation of the Digital Elevation Models, based on the Airborne LiDAR data, the comparable result was roughly obtained in the general situation with the geomorphic interpretation using aerial photographs. Moreover, the geomorphic interpretation of the Digital Elevation Models was effective in the investigation of especially the geomorphic interpretation of micromorphology in the mountainous district that had been covered with the forest. The accuracy of the active fault investigation can be improved if necessary by simultaneously using the aerial photographs and the Digital Elevation Models.

In addition, the differential analysis technique of the airborne LiDAR data was applied to the estimation of the displacement distribution. As a result, it has been understood to be able to often adjust to the field investigation result, roughly, and to use the proper move method to investigate.

**Key words** : Active fault, Earthquake fault, Aerial photo interpretation, Auxiliary fault, Airborne LiDAR