

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

丸山 正（活断層評価研究チーム）・斎藤英二（地質調査情報センター）・吾妻 崇（活断層評価研究チーム）・谷口 薫（活断層評価研究チーム）・吉見雅行（地震災害予測研究チーム）・林田拓己（地震災害予測研究チーム）

はじめに

2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震（Mj 7.0, Mw 6.6 : 気象庁, 2011 ; 防災科学技術研究所, 2011）に伴い、活断層として認定されていた井戸沢断層および湯ノ岳断層（活断層研究会編, 1991 ; 中田・今泉編, 2002）に沿って正断層型の地震断層が出現したことが石山ほか（2011b）および阿南ほか（2011）によりそれぞれ速報された。この情報を受け、活断層・地震研究センターでは両地震断層の実体解明を目的として、地震発生約1週間後の2011年4月17日（日）から緊急現地踏査を開始した。そのうち、湯ノ岳断層沿に関する調査結果は栗田ほか（2011）により報告されている。井戸沢断層沿いの地震断層については、断層沿いの変位量分布、すべり方向（スリップベクトル）、断層変位形態の解明に焦点を当て、断層の分布（第1図）や変位センスを確認した上で、変位量を計測する（第2図）とともに、断層面が露出するところでは断層面上に認められる条線の計測を行い、断層面沿いのすべり方向を推定した（第3図）。さらに、地震後の復旧作業により消失する可能性のある変位した舗装道路やコンクリート製側溝および水田面などを対象にトータルステーションを用いた測量調査を実施し、地震断層の形状や変位量の詳細を記録した（第4～12図）。なお、ここで述べる井戸沢断層は、活断層研究会編（1991）で図示されている井戸沢断層のうち西側のトレースに該当し、石山ほか（2011a）で命名が提案された塩ノ平断層にあたる。

地震断層の概要

現地調査で確認された地震断層は、北北西－南南東走向で西に高角度で傾斜する断層面に沿って、西側が落下する正断層運動で特徴づけられる。こうした地震断層運動は地震のメカニズム解と調和的である。

地震断層が（谷底）低地を通過するところでは、水田面、あぜ道、アスファルト舗装道路などが系統的に西側低下の変位を受けている（石山ほか, 2011a, 2011b ; 土木研究所, 2011 ; 株式会社クレアリア 2011 ; 小荒井・岡谷, 2011 ; 応用地質株式会社, 2011）。低地を切断する地震断層は、地震断層崖と崖頂部での開口および西側（相対的沈降側）での幅広い撓み

からなる（第 13 図）。こうした地震断層の地表形態は、これまでに報告されている正断層型の地震断層と一致している。

地震断層はその大部分が山地内に出現した。山地内では、(1) 地震断層に沿って帯状に連続する木の傾きあるいは転倒（第 14 図）、(2) 東流する河川が西側下りの断層変位を受けたことにより多数発生した小規模な堰き止め（第 15 図）、(3) 断層変位による木の切断（第 16 図）、(4) 東向きの山地斜面が西側低下の断層変位を受けて生じた明瞭な逆向き低崖の形成（第 17 図）および (5) 新鮮な断層面の露出（第 18 図）、を手がかりに地震断層の追跡・認定が可能であった。なお、現地調査で確認できたところでは、地震断層面の姿勢は断層沿いに分布する御斎所変成岩類（例えば、加納ほか、1973）の片理面と平行しているようにみえる。

地震断層の分布

第 1 図にこれまでに地震断層を確認した地点（523 地点）を示す。地震断層のほぼ全域を踏査した結果、地震断層は 1) いわき市田人町大久保南方から同市綱木北西に至る約 13 km の区間にわたり全体として北北西-南南東走向に延びること、2) 小規模な右ステップを繰り返しながらもほぼ連続的に地表に出現すること、3) 全体は南トレースと北トレースの 2 条に分けられ地震断層中央部の塩ノ平付近で右ステップすること、4) 上記 2 条の断層トレースのうち、直線状の分布で特徴付けられる南トレースの位置は中田・今泉編（2002）に図示された井戸沢断層（の最も西側の）トレースにはほぼ一致すること、5) 従来活断層が認定されていなかった場所に出現した北トレースは、やや東に凸の平面形態を示すこと、などの特徴が認められた（第 1 図）。

変位量分布

地震断層沿いの 162 地点で変位量を計測（コンボックス、巻尺を用いた簡易計測とトータルステーションを用いた測量を含む）した結果を地震断層の一般走向である N20°W に投影したものを第 2 図に示す。この図から、1) 地震断層の全域で西側が（相対的に）低下する上下変位を示すこと、2) 上下変位（上下オフセット）の最大値は約 2.2 m に達すること、3) 南北両端部で上下変位量が急減すること、4) 西側低下の正断層変位に加えて横ずれ変位が生じていること、5) 右ステップで境される南北両トレースはいずれもその南部で右横ずれ、北部で左横ずれ成分を伴うこと、などが認められる。

すべり方位

地震断層沿いの 40 地点で計測した断層面沿いのすべり方向（スリップベクトル）の水平

成分を第 3 図に示す。この図から、南北両トレースとも、北部では左横ずれ、南部では右横ずれを伴い、すべり方位が断層上盤（断層西側ブロック）中央部に向かって収束する傾向を示している。こうしたすべりパターンは、ギリシャやイタリアで発生した正断層型の地震断層沿いや活断層沿いでも報告されており（例えば、Jackson et al., 1982 ; Roberts, 1996 ; Morewood and Roberts, 2000 など）、また食い違い弾性モデルから推定される正断層沿いのすべりパターンとも調和的である（Ma and Kuszniir, 1995）。こうした特徴と断層の平面形態から、井戸沢地震断層は塩ノ平付近で右ステップする 2 条の正断層セグメントが破壊した可能性がある。

地震断層の測量調査

復旧工事が行われる前に実施した測量調査により、地震断層の形状や変位量の詳細を記録した（第 4～12 図）。以下、今回の調査により 9 地点で実施した計測結果のうち、8 地点の特徴を南から順に紹介する。

[大久保地区]

地震断層南部の大久保地区では、右横ずれ成分を伴う地震断層がアスファルト道路に対して低角度で交差するため、局所的な圧縮変形が生じ、道路東端のコンクリート製側溝が座屈破壊している（第 4 図上）。コンクリート製側溝の西縁を変位基準として測量を行った結果、ここでの上下変位（上下オフセット）は約 70 cm と見積もられた（第 4 図下）。

[大久保北方]

大久保集落から田人中学校に至る区間では、地震断層は谷底低地に広がる水田およびあぜ道を切断している。畦道やトラクターの轍の食い違いに加えて開口亀裂が左ステップ雁行する様子から本地区では西側低下に加えて右横ずれ成分が認められる（第 5 図上）。一方、地震断層トレースは右ステップを繰り返しており、地震断層の変位センスと調和していない。これは、もともと左横ずれとして活動していた断層が今回の地震で正断層（ここでは右ずれ）として再活動した可能性を示唆している。

地震断層が右ステップしている状況および断層沿いの変位量を正確に計測するため、6枚の水田について縁部を計測した（第 5 図下）。その結果、計測範囲の水田は右ステップする 2 条の並走する断層による変位を受け、北に向かって西側トレースの上下変位量が減少する一方、東側トレースの上下変位量が増加している状況が確認でき、このように雁行する断層で変位が乗り移りながらも、両断層の上下変位量を足し合わせた値は 1.05～1.15 m と大きな増減はないことが認められた。

[台地区]

東流する別当川の右岸に分布する段丘面上の側溝や野菜列が西側低下とともに系統的に右横ずれしている（第6図上）。地震断層の走向にほぼ直交するように設置されていたコンクリート製側溝（長さ2 mの規格製品を並べたもの）の形態を復元する（地震前は一直線状に配列していたと仮定）ことにより、上下変位1.2 m、右横ずれ0.4 m、水平伸長0.6 mが計測された（第6図下）。

[赤仁田地区西方]

本地点では、別当地区から明下地区に通じるアスファルト舗装道路が西側低下の断層変位を受け切断され、高角度で西に傾斜する断層面が出現した。断層面上には明瞭な条線が認められた（第7図上）。重松ほか（2011）は、条線の軌跡を詳細に記録している。

ところで、本地点ではアスファルト舗装道路の南縁に単位長さ2 mの規格化されたコンクリート製側溝が設置されている（第7図）。地震断層の走向と約70度で交差する規格製品のコンクリート側溝を変位指標にすることで数cmの精度で変位量を計測することができると考え、側溝北縁および道路北縁を中心に計測を行った。測定の結果、上流側（西側）の側溝の曲率半径は55～56 mであるのに対して下流側（東側）は74～104 mと一致しないものの、いずれの区間とも断層までの延長距離がわずかであることから、曲率半径の違いによる誤差の累積は大きくないものと仮定して、断層面に沿った水平変位（横ずれオフセット）を見積もった。また、鉛直変位（上下オフセット）も同様に道路勾配を考慮して測定した。その結果、右ずれオフセット量0.19 m、上下オフセット量1.72 mと見積もられた（第7図中、下）。水平伸長量は、断層面の傾斜角度および側溝の開口量からいずれも約0.3 mと見積もられた。

[塩ノ平南方-1]

本地点は現在までの調査で上下変位量の最大値が計測された地点にあたる（第2図）。ここでは、湯ノ倉地区から新田地区に通じるアスファルト舗装道路が断層変位を受け、明瞭な西側下がりの段差が生じている（第8図上）。また、この道路のすぐ南方を東流する河川は下流側上がりの断層変位により堰き止めが生じている（第8図上）。道路の南北両端を変位指標として計測を行い、断層周辺の道路の勾配が地震前にほぼ一定であったと仮定すると、上下オフセットは2.1～2.2 mと計測された（第8図下）。横ずれ量に関しては、変位指標とした道路縁（アスファルトと周囲の草地との境界）が不明瞭な部分もあるため数 cm 程度の誤差はあるものの約 0.55 m の左横ずれが見積もられた（第8図中）。

[塩ノ平南方-2]

塩ノ平地区に通じるアスファルト舗装道路が断層変位を受け、明瞭な西側下がりの段差が生じている（第 9 図上）。また、道路のすぐ南方を東流する河川が下流側上がりの断層変位により堰き止めが生じている（第 9 図上）。塩ノ平南方-1 地区と同様に、道路の南北両端を変位指標として計測を行った結果、上下オフセットおよび左横ずれオフセットは、それぞれ 1.9~2.1 m および 0.3~0.4 m と見積もられた（第 9 図中，下）。ところで、本道路には道路工事に伴うとみられる（古い）鉋がほぼ等間隔に打ってある。この鉋間距離を計測したところ、断層を跨がない区間ではいずれも直線距離（斜距離）20 m と計測されたのに対して、断層をまたぐ区間のみ約 20.4 m と周囲に比べて約 0.4 m 長い。鉋が等間隔で打たれていたと仮定すると、本地点での開口量は約 0.4 m と推定される。

[塩ノ平地区-1]

塩ノ平地区では地震断層が大きく 2 条に分岐する。そのうち西方のトレースは塩ノ平地区から齊道地区に延びる谷底低地に広がる水田を切断する。ここでは、地震断層は西側下がりとともに左横ずれ変位を伴っていることあぜ道や水田内の仕切り材の系統的な屈曲により確認される（第 10 図上）。本調査ではこのような断層変位を受けた水田のうち 5 枚についてそれらの縁部を計測し、平面図および断面図を作成した（第 10 図下）。その結果、本地区では西側低下の上下変位が約 0.9~0.55 m と北に向かって徐々に減少すること、左横ずれ量が約 0.5 m であることが認められた。

[塩ノ平地区-2]

塩ノ平地区で大きく 2 条に分岐する地震断層のうち、東方のトレースは民家を通過し、その基礎が西側低下とともに右横ずれしている（第 11 図上）。こうした変位センスは、民家北方に出現した断層面上に記録された条線の姿勢から推定されたスループベクトルと調和的である（重松ほか，2011）。民家基礎を横ずれ変位指標として計測を行った結果、約 0.15 m の右ずれが見積もられた（第 11 図中）。一方上下変位は、地震前の地形状況が不明のため不正確さがあるものの、断層両側ともにもともと水平であったと仮定すると少なくとも 0.75 m 以上と見積もられる（第 11 図下）。

[綱木地区]

地震断層北部の綱木地区では、地震断層が水田面やあぜ道に西側下がり（と左横ずれ）の変位を与えている（第 12 図上）。本地区では、水田面の明瞭な切断に加え、その西側（低

下側)で幅広い範囲で緩やかな西向きの変曲が生じている。正断層型の地震断層では、このような低下側(上盤側)での幅広い変曲がしばしば生じることが報告されており、断層の上下変位を正確に見積もる際には変曲成分を考慮する必要がある(例えば、Yeats et al., 1996)。トータルステーションを用いて断層変位を受けた水田面の等高線図および断面図を作成した結果、水田は明瞭な地震断層崖部で約40~50 cmの変位が生じていることに加えて、その西方幅約10 mの区間で生じた緩やかな撓みにより約50 cmの西側下がりの変位を被っており、両者を併せた上下変位量は約1 mに達する(第12図下)。一方、地震断層下盤側(上昇側)ではほとんど変形は生じていない。

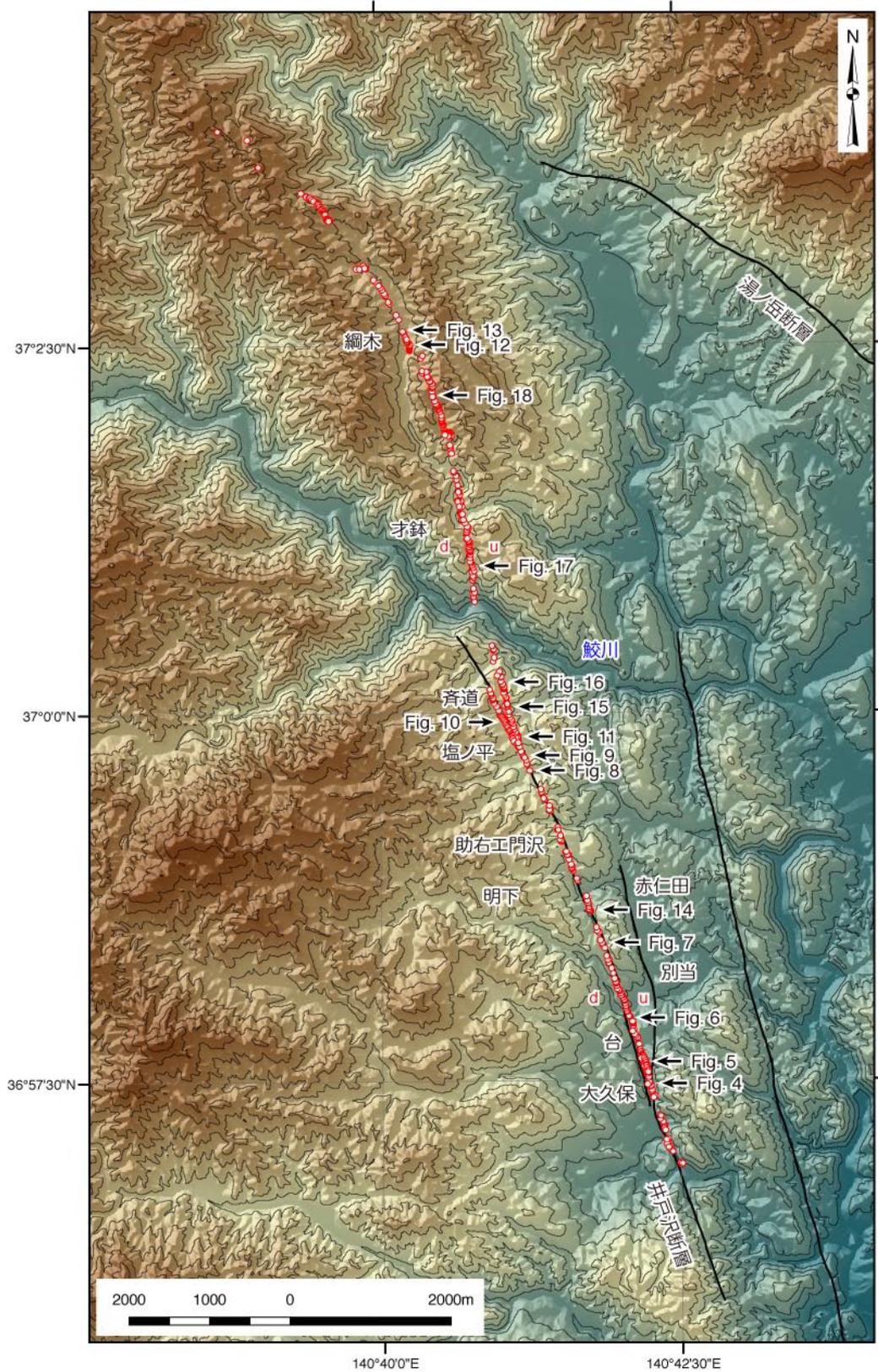
謝辞

地元住民の皆様には、地震断層の出現箇所や出現状況についてご教示いただくとともに所有地内での調査を快く許可していただきました。現地調査の一部には、株式会社ダイヤモンドコンサルタントの齋藤 勝氏にご協力いただきました。今回の地震で被害に遭われた方々に心よりお見舞い申し上げます。

引用文献

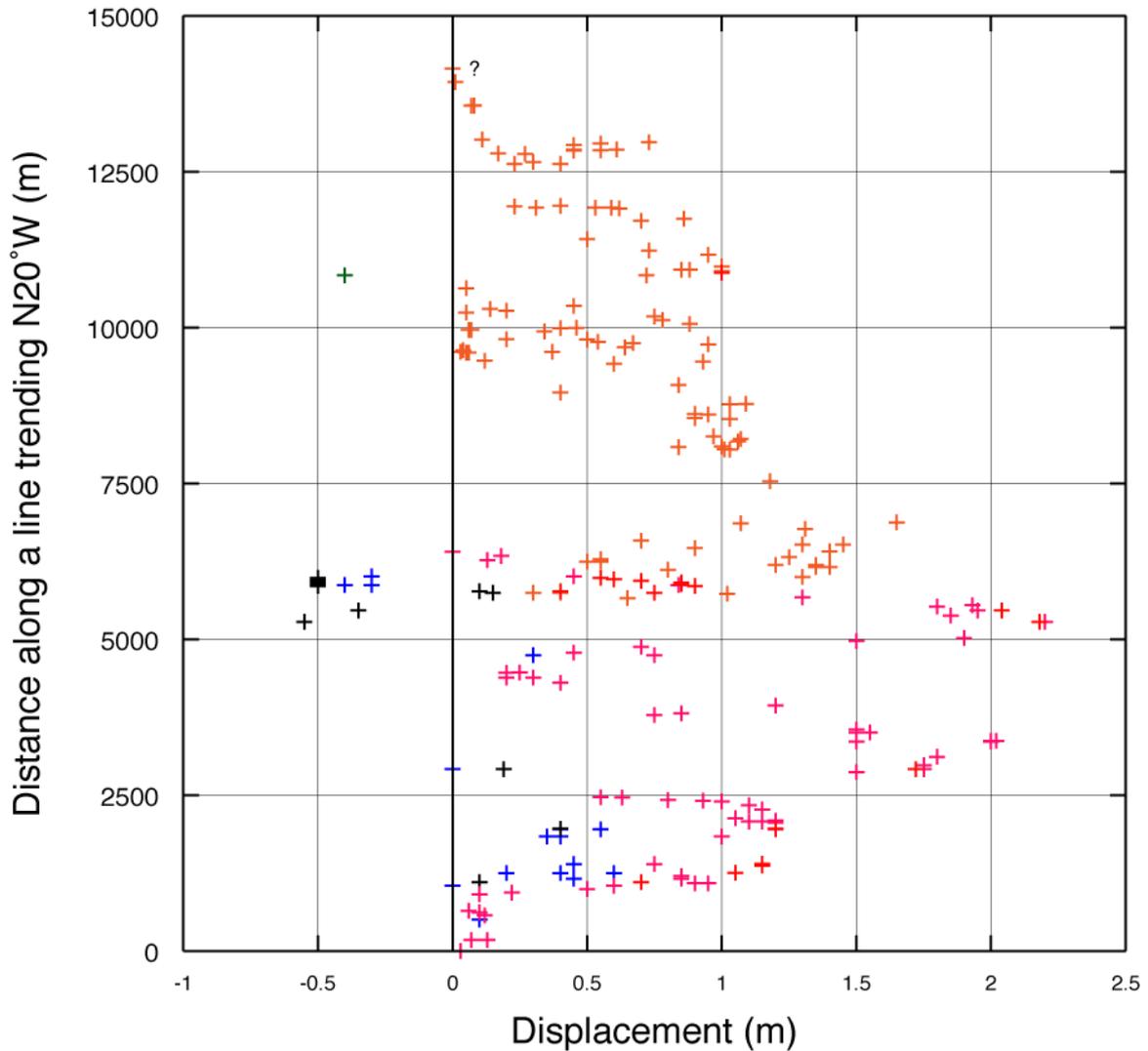
- 阿南修司・品川俊介・安元和己, 2011, 4月11日の余震でいわき市に出現した地表地震断層(第1報), <http://www.pwri.go.jp/news/2011/0313/img/yoshin.pdf>
- 粟田泰夫・楮原京子・杉山雄一・吉岡敏和・吾妻 崇・安藤亮輔・丸山 正, 2011, 2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う湯ノ岳・藤原断層の地表変位ベクトル(速報), <http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/Tohoku/report/fukushima.html>
- 防災科学技術研究所, 2011, 東北地方太平洋沖地震以降の茨城県北部・福島県東部の地震活動, <http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/n-ibaraki110319/>
- 株式会社クレアリア, 2011, 2011年4月11日福島県浜通りの地震—2011年4月11日17時16分に発生した福島県浜通りの地震(M7.0)に関する情報, <http://www.crearia.co.jp/project/fukushima/index.html>.
- 加納 博・黒田吉益・宇留野勝敏・濡木輝一・蟹沢聡史・丸山孝彦・梅村隼夫・光川 寛・瀬戸延男・大平芳久・佐藤 茂・一色直記, 1973, 竹貫地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 109 p.
- 気象庁, 2011, 「平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震」について(第35報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/11b/201104111820.html>
- 石山達也・佐藤比呂志・伊藤谷生・杉戸信彦・越後智雄・加藤直子・今泉俊文, 2011a, 2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について(第2報),

- http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/
- 石山達也・佐藤比呂志・加藤直子・八木浩司・宮城豊彦・今泉俊文, 2011b, 2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について(第1報), http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/#FukushimaNo1
- Jackson, J. A., Gagnepain, J., Houseman, G., King, G. C. P., Papadimitriou, P., Soufleris, C., Virieux, J., 1982, Seismicity, normal faulting, and the geomorphological development of the Gulf of Corinth (Greece): The Corinth earthquakes of February and March 1981, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 57, 377–397.
- 活断層研究会編, 1991, 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会, 437 p.
- 気象庁, 2011, 「平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震」について(第35報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/11b/201104111820.html>
- 小荒井 衛・岡谷隆基, 2011, いわき市内陸部における4月11日福島県浜通りの地震に係る災害現地調査報告, <http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40028.html>
- Ma, X. Q., Kuszniir, N. J., 1995, Coseismic and postseismic subsurface displacements and strains for a dip-slip normal fault in a three-layer elastic-gravitational medium, *Jour. Geophys. Res.*, 100, 12,813-12,828.
- Morewood, N. C., Roberts, G. P., 2000, The geometry, kinematics and rates of deformation within an en echelon normal fault segment boundary, central Italy, *Jour. Struct. Geol.*, 22, 1027–1047.
- 中田 高・今泉俊文編, 2002, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, DVD-ROM 2枚・付図1葉, 60p.
- 応用地質株式会社, 2011, 井戸沢断層沿いに出現した地表地震断層の現地調査報告, http://www.oyoene-db.com/web/topics_h_001.html.
- Roberts, G. P., 1996, Variation in fault-slip directions along active and segmented normal fault systems, *Jour. Struct. Geology*, 18, 835–845.
- 重松紀生・吾妻 崇・丸山 正・大坪 誠・谷口 薫・吉見雅行・今西和俊・高橋美紀・斎藤英二・安藤亮輔・藤本光一郎・大谷具幸, 2011, 2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層—断層条線と測量結果の比較—, 2011年地球惑星科学連合大会, MIS036-P104.
- Yeats, R. S., Sieh, K., Allen, C. R., 1997, *The Geology of Earthquakes*, Oxford Univ. Press, 568 p.



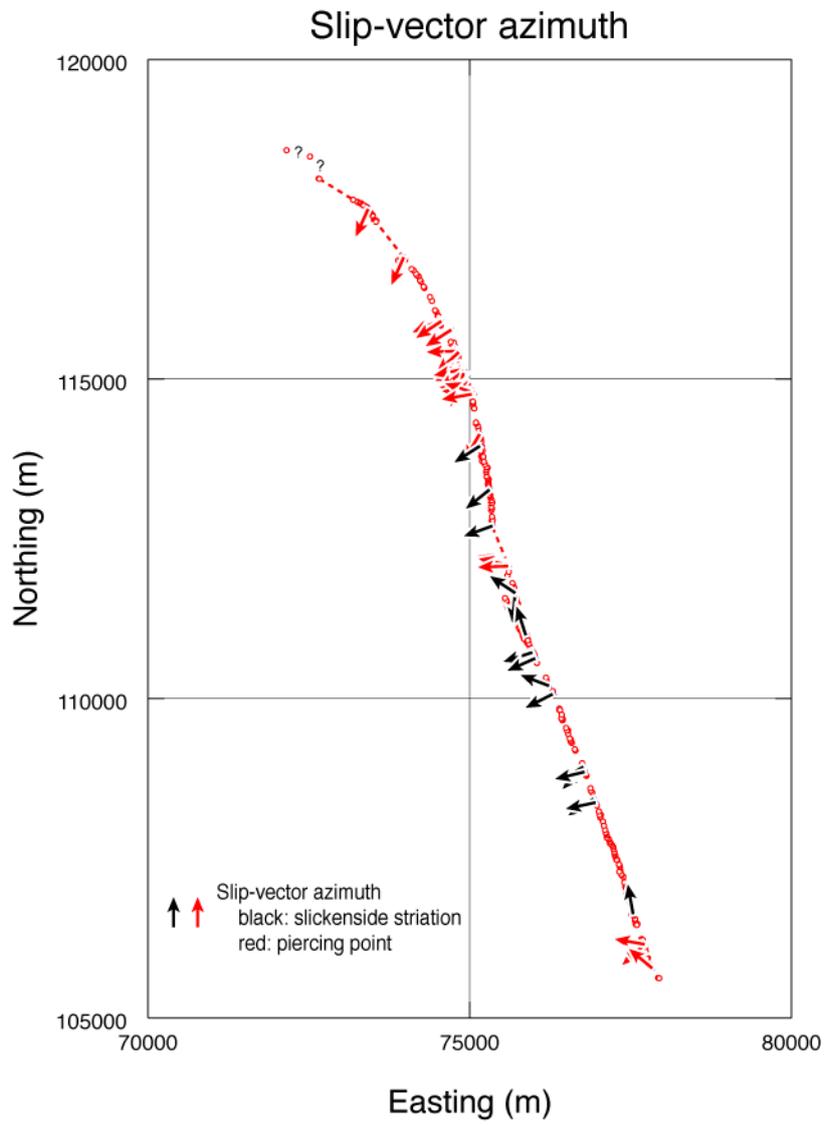
第1図. 井戸沢地震断層の分布. 赤丸は現地調査により地震断層を確認した地点. u: 相対的上昇側, d: 相対的低下側. 黒実線は中田・今泉編 (2002) により図示されている推定活断層線. 基図 (等高線間隔は 50 m) は, 国土地理院基盤地図情報 10 m DEM を使用した.

Slip distribution

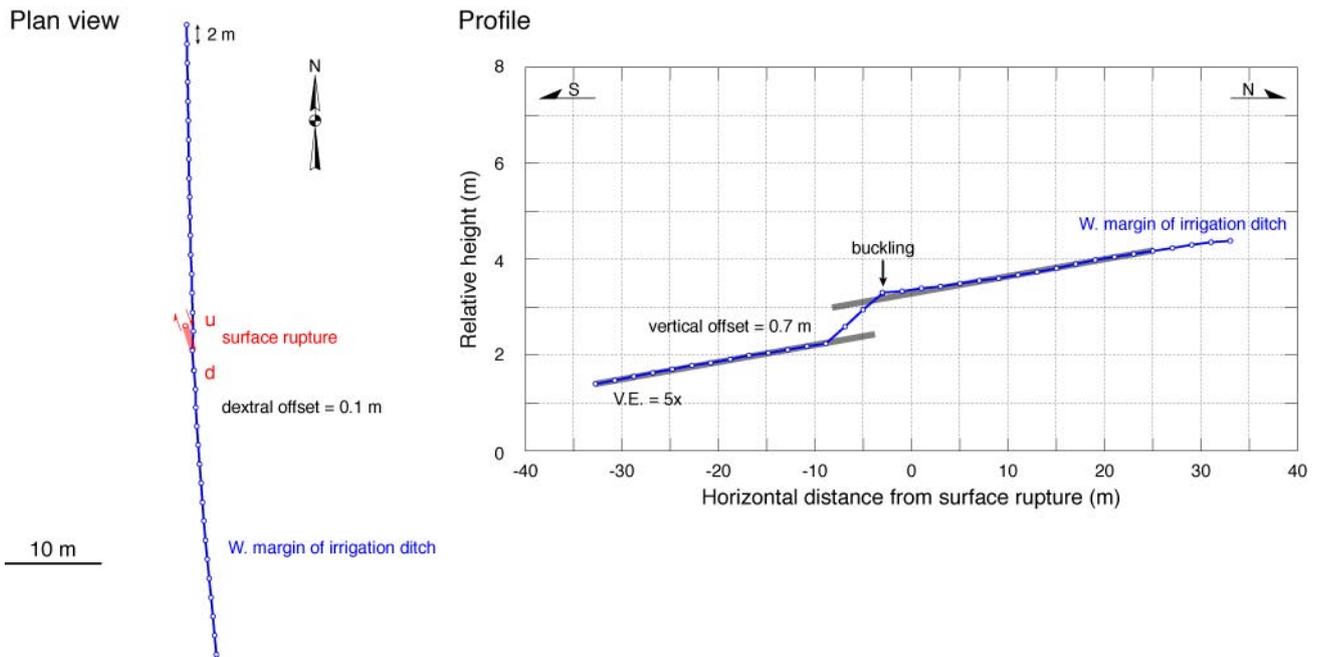


- + 上下変位(南トレース:簡易計測)
- + 横ずれ変位(南トレース:簡易計測)
- + 上下変位(北トレース:簡易計測)
- + 横ずれ変位(北トレース:簡易計測)
- + 上下変位(トータルステーション)
- + 横ずれ変位(トータルステーション)

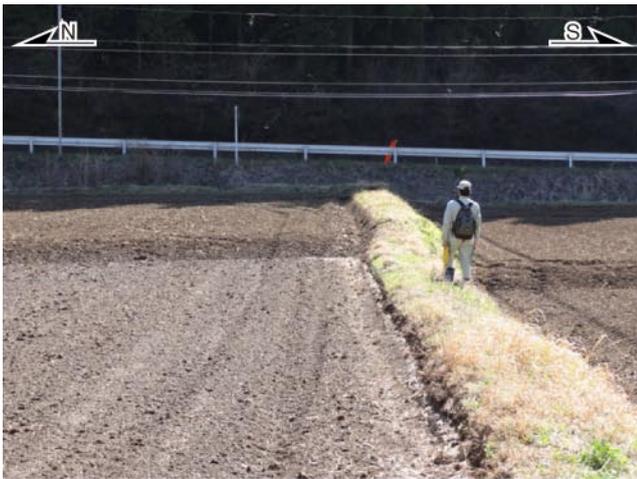
第2図. 井戸沢地震断層沿いの変位量(オフセット量)分布図(地震断層の一般走向であるN20°Wに投影). 東側上がりおよび右ずれを正(+)で示す. 複数の断層トレースが並走する塩ノ平~斎道間では計測値を足し合わせていないことに注意.



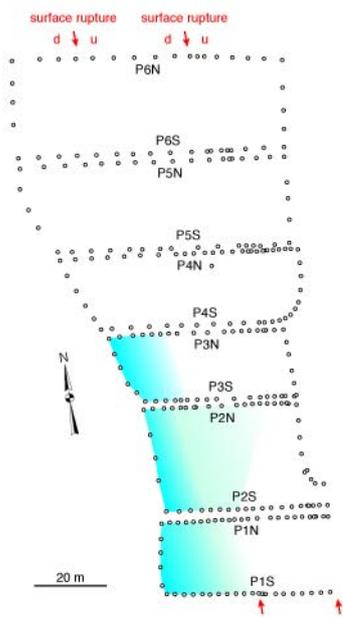
第3図. 井戸沢地震断層沿いで計測されたスリップベクトルの水平移動成分. 黒矢印および赤矢印は, それぞれ断層面上に発達する条線 (slickenline) および断層両側でもともと連続していた部分 (piercing point) の復元から推定される移動方向.



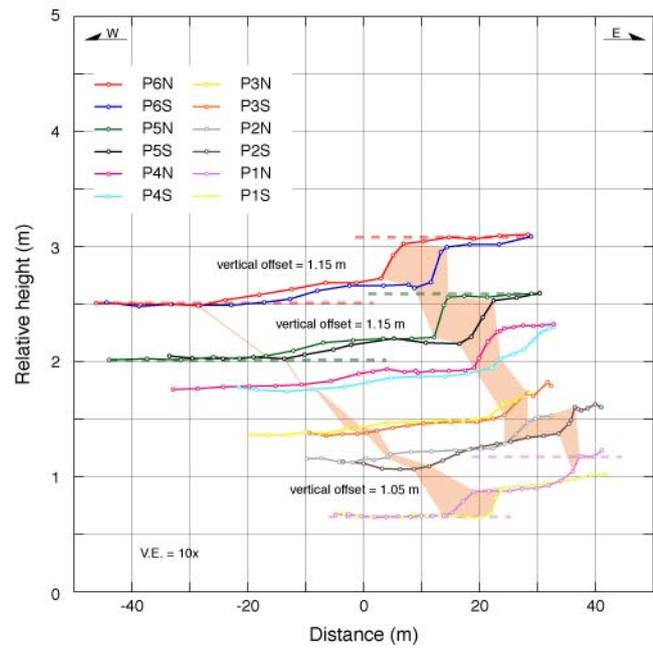
第4図. 大久保地区で実施した測量地点の現地状況（上）と調査結果（下）. 位置は第1図に示す.



Plan view



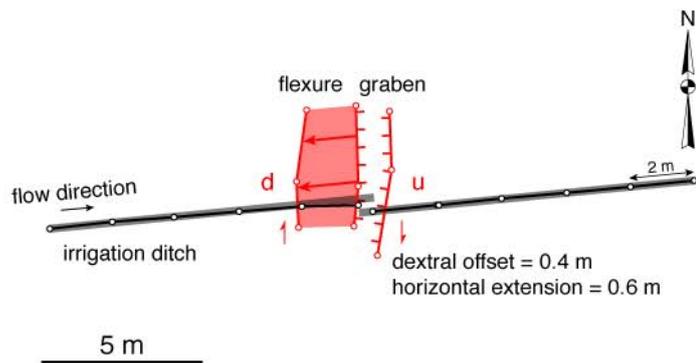
Profile



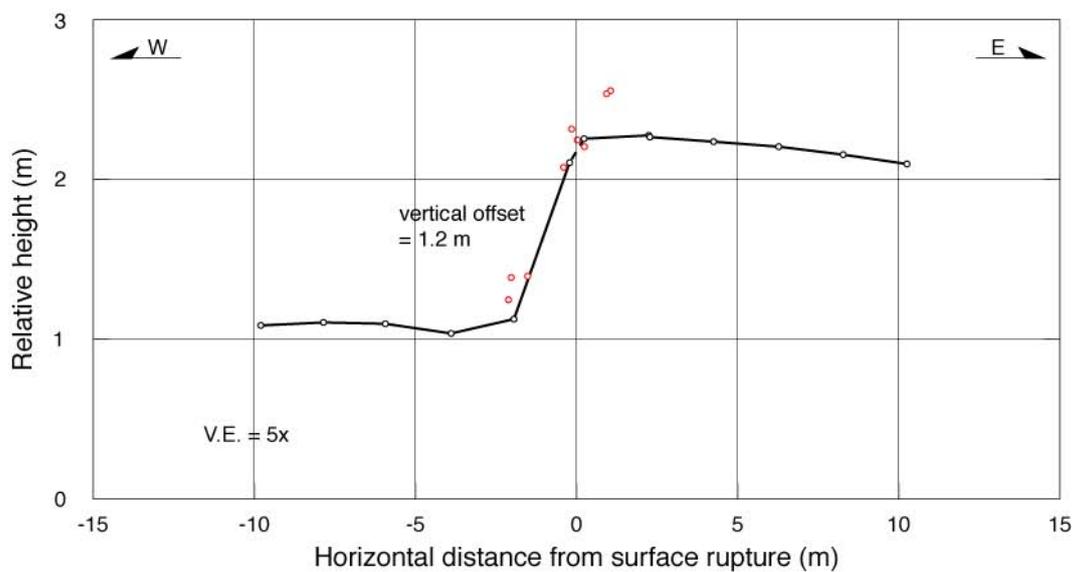
第 5 図. 大久保北方で実施した測量地点の現地状況 (上) と調査結果 (下). 位置は第 1 図に示す.



Plan view



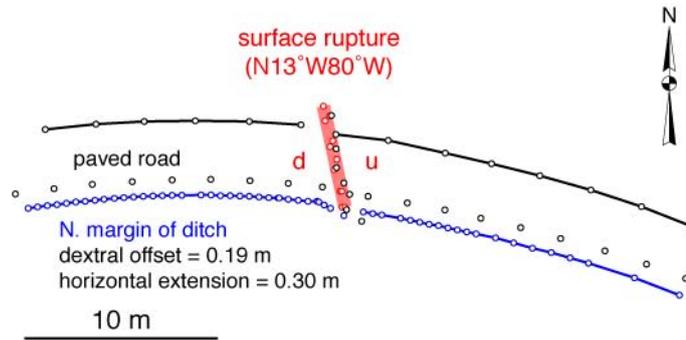
Profile



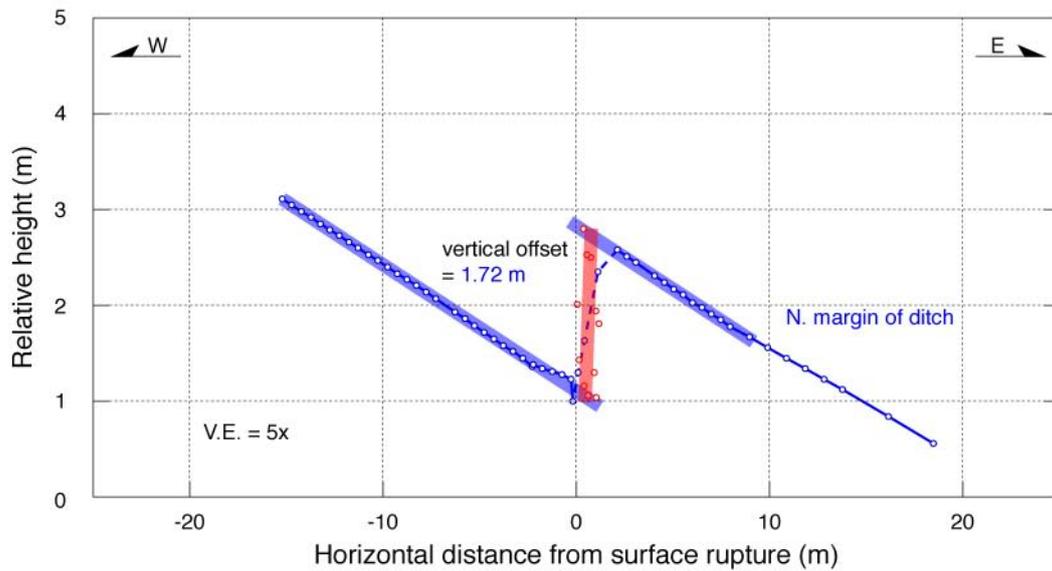
第 6 図. 台地区で実施した測量地点の現地状況 (上) と調査結果 (中, 下).
 測量は写真右端の水路 (人物の右) で行った. 位置は第 1 図に示す.



Plan view



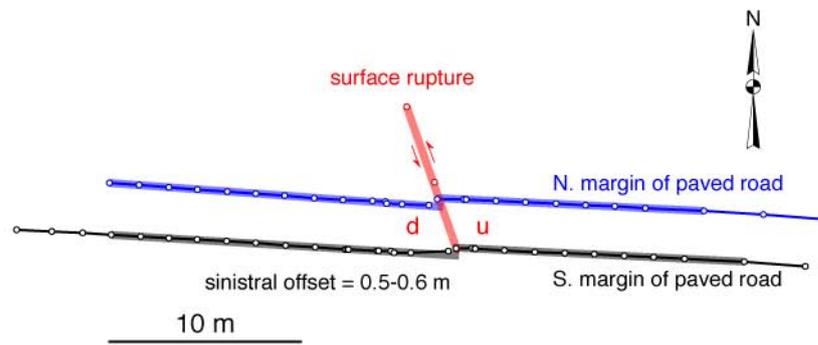
Profile



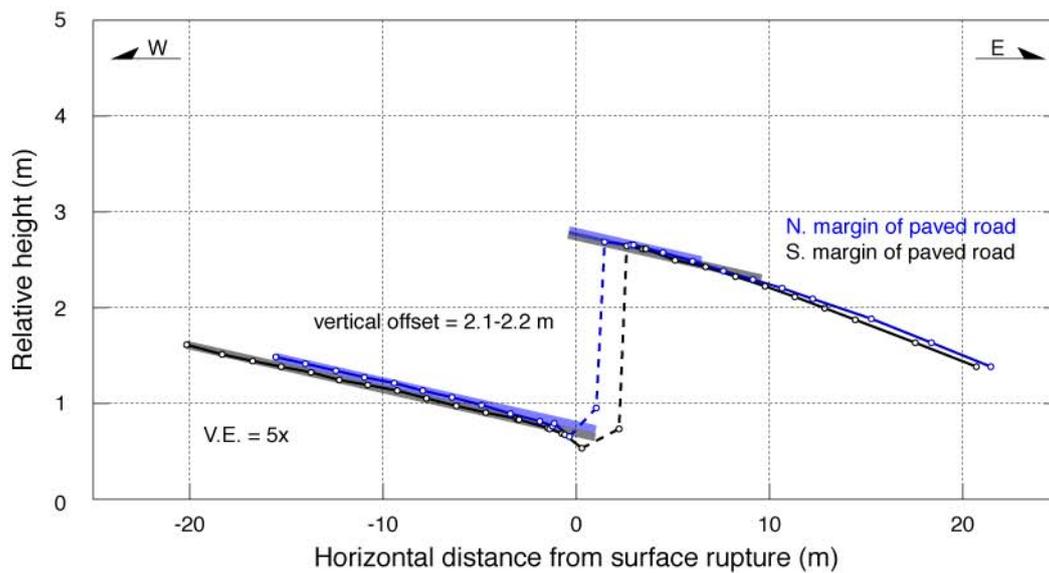
第7図. 赤仁田西方で実施した測量地点の現地状況（上）と調査結果（中,下）. 位置は第1図に示す.



Plan view



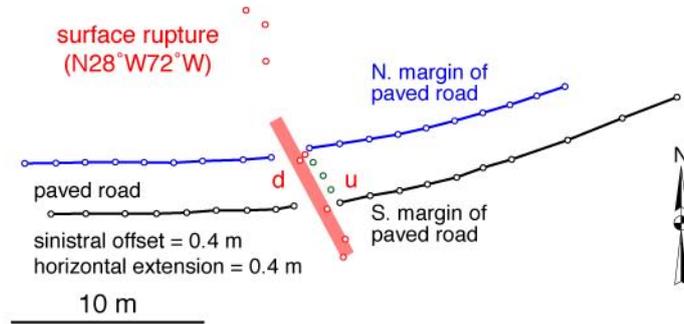
Profile



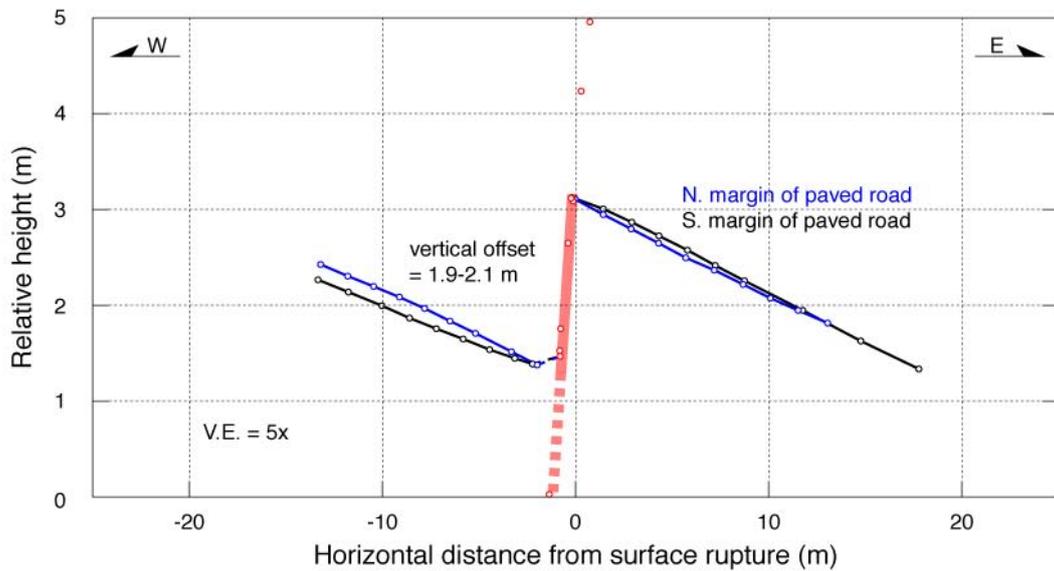
第8図. 塩ノ平南方-1で実施した測量地点の現地状況(上)と調査結果(中,下). 位置は第1図に示す.



Plan view



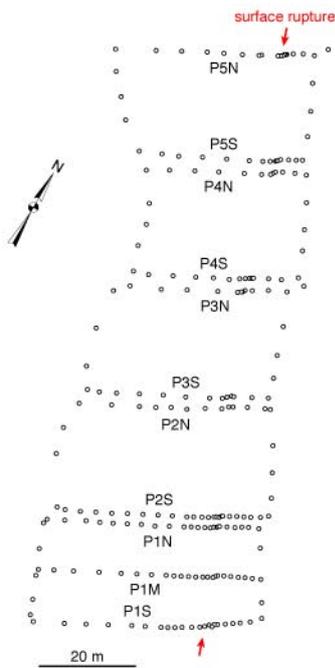
Profile



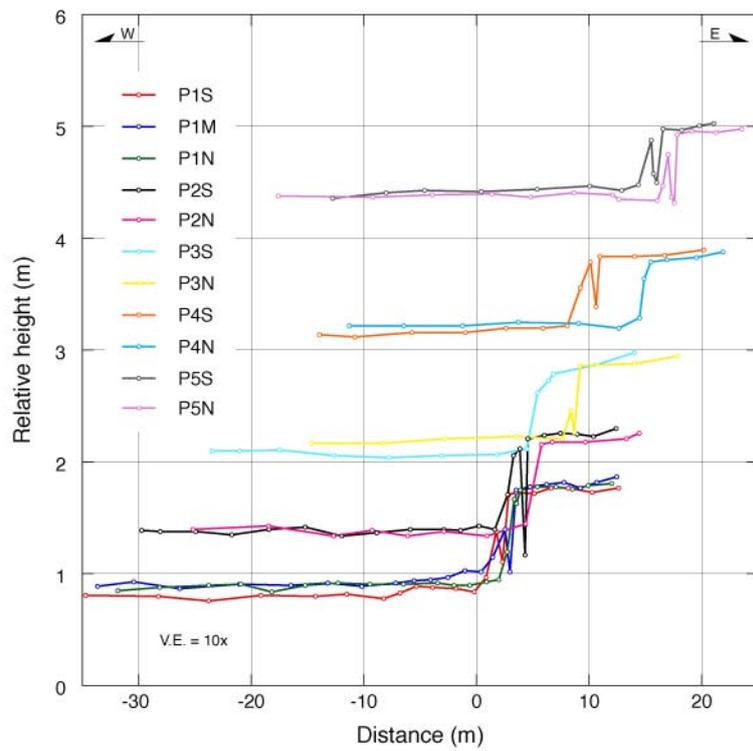
第9図. 塩ノ平南方-2で実施した測量地点の現地状況(上)と調査結果(中,下). 位置は第1図に示す.



Plan



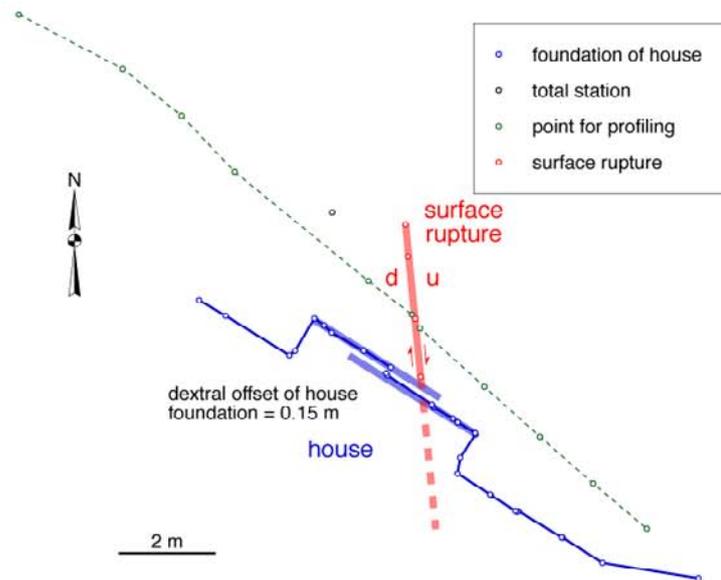
Profile



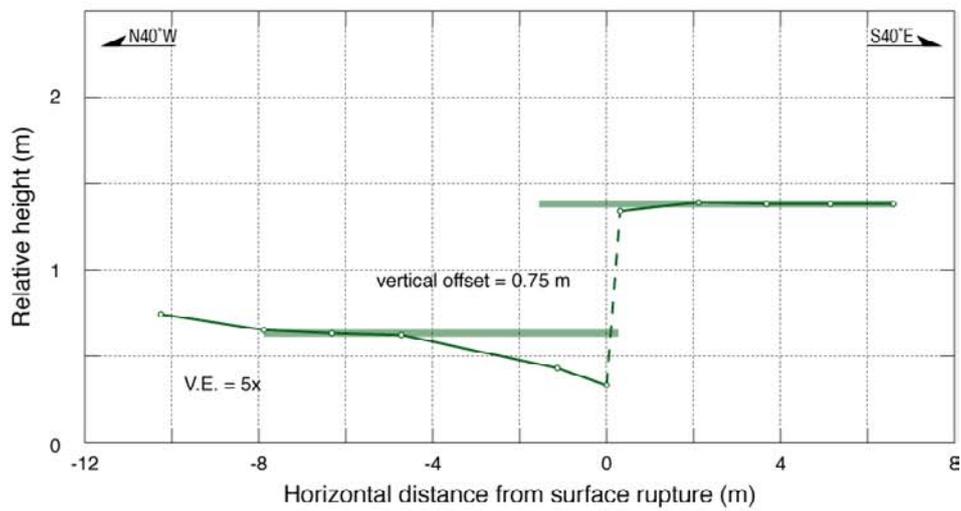
第 10 図. 塩ノ平地区-1 で実施した測量地点の現地状況(上)と調査結果(下). 位置は第 1 図に示す.



Plan view



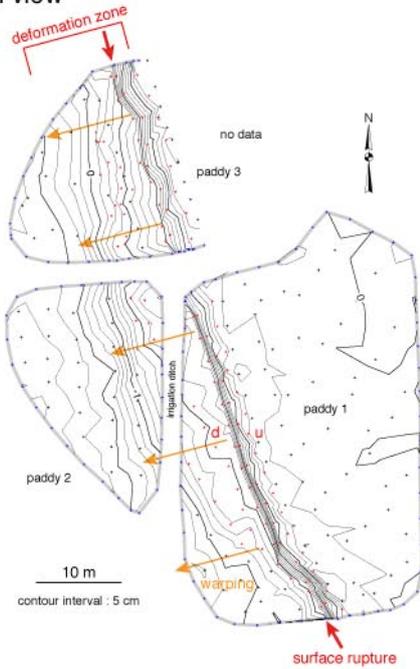
Profile



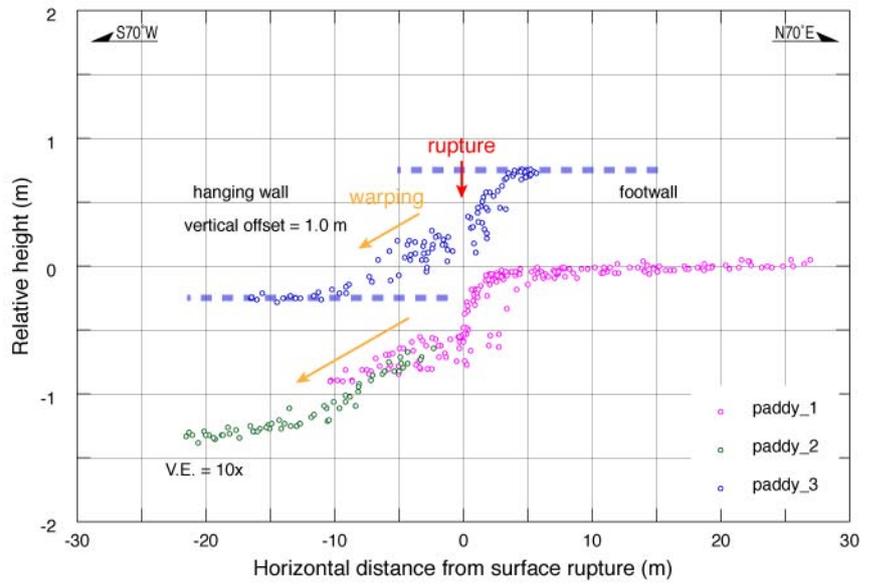
第 11 図. 塩ノ平地区-2 で実施した測量地点の現地状況(上)と調査結果(中,下). 位置は第 1 図に示す.



Plan view



Profile



第 12 図. 網木地区で実施した測量地点の現地状況 (上) と調査結果 (下). 位置は第 1 図に示す.



第 13 図. 崖頂部の開口列と低下側での幅広い撓曲で特徴づけられる地震断層（綱木地区）. ここでは開口列の右ステップから西側低下とともに左横ずれ変位が認定される. 位置は第 1 図に示す.



第 14 図. 傾いた木の集中帯で特徴づけられる山地内の地震断層（赤仁田地区西方）. 位置は第 1 図に示す.



第 15 図. 下流側上がりの断層変位により生じた塞き止め (齊道地区).
位置は第 1 図に示す.



第 16 図. 断層変位を受けて切断された木 (齊道地区北方). 位置は第 1 図に示す.



第 17 図. 東向き山地斜面を切断する逆向き低崖 (才鉢地区東方).
位置は第 1 図に示す.



第 18 図. 山地斜面に出現した西に高角度で傾斜する断層面 (綱木地区南方).
位置は第 1 図に示す.