

2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層のトレンチ掘削調査

Paleoseismological trench investigation of the surface rupture associated with the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (*Mj* 7.2), NE Japan

丸山 正¹・遠田晋次²・吉見雅行¹・小俣雅志³・郡谷順英³
梶谷忠司³・岩崎孝明⁴・石川 玲⁵・山崎 誠⁶

Tadashi Maruyama¹, Shinji Toda², Masayuki Yoshimi¹, Masashi Omata³, Yorihide Kohriya³,
Tadashi Kajitani³, Takaaki Iwasaki⁴, Akira Ishikawa⁵ and Makoto Yamasaki⁶

¹ 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, tadashi-maruyama@aist.go.jp)

² 京都大学防災研究所 (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

³ 株式会社アイ・エヌ・エー (INA Corporation)

⁴ アイ・エー・エス地質調査 (IAS Geologic Consultant)

⁵ いしかわ園芸 (Ishikawa Horticulture)

⁶ 山崎技術士事務所 (Yamazaki Geologic Consulting Office)

Abstract: The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (*Mj* 7.2) produced the surface rupture zone with a total length of ~20 km, along which none of active faults were previously mapped. In order to reveal repeatability of the surface-rupturing earthquakes and to understand the relationship between near-surface rupture geometry and pre-existing geologic structures, we excavated paleoseismological trenches across the rupture zone. Despite six trenches in total at four separated locations, we found robust evidence for the previous event(s) at only one site (Okayama site, Ichinoseki City, Iwate Prefecture), where 2.0-2.5 m of vertical offsets of the late Quaternary sedimentary package composed of a fluvial terrace were observed just beneath the ~10-cm throw of a paved road due to the 2008 earthquake. Deformation of the strata exposed in the trench and those of a flight of fluvial terrace surfaces suggest that the 2.0-2.5 m of vertical offsets of strata was formed by a single paleoseismic event rather than by accumulation of multiple events with small displacement, although we can not rule out the possibility of past occurrence of the 2008-type event(s) because the small stratal deformation associated with the 2008 event can not be detected in the trench wall. The eolian deposit overlying the fluvial sedimentary package contains a horizon of concentration of glass shards that may be correlated with the ca. 41-60 ka or 82±19 ka Yakeishi-Yamagata tephra (Yk-Y) erupted from the Yakeishi volcano, suggesting the vertical component of fault slip rate is tentatively estimated as <0.1 mm/yr. We infer that such a low slip rate will result in making detection of tectonic landforms along the surface rupture zone difficult. Although the other trenches did not exposed undoubted evidence of the pre-2008 event(s), they provide valuable information for near-surface geometry and activity of the fault(s) associated with the surface rupture zone. The trench and field geologic mapping along the highly sinuous rupture trace at Mochikorobashi (Oshu City, Iwate Prefecture) revealed that the surface rupture corresponds to bedding surface of the undulated upper Tertiary sedimentary rocks, implying the pre-existing geologic structure controls the near-surface behavior of the faulting. In contrast, the rupture at Hanokidachi (Ichinoseki City, Iwate Prefecture), which is characterized by straight rupture trace, cuts the gently dipping bedding surface of the upper Tertiary sedimentary rocks. The trenches across the meter-order-slip surface breaks at north of Aratozawa-dam (Kurihara City, Miyagi Prefecture) show minimum recurrence interval of ca 3 ka. From these results, we provisionally conclude that the 2008 rupture zone is appropriate to define as an active fault but the activity has not been fast enough to leave continuous and distinctive fault traces.

キーワード: 2008年岩手・宮城内陸地震, 地震断層, トレンチ掘削調査, 活断層, 活動度

Keywords: 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, earthquake surface rupture, trench investigation, active fault, fault activity

1. はじめに

2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震(M_j7.2)に伴い、岩手県奥州市から宮城県栗原市にかけてほぼ余震域東縁に沿うように全長20 km以上の地震断層が確認された(例えば, Toda *et al.*, 2008; 吉見ほか, 2008; 遠田ほか, 投稿中)(第1図, 第2図). このうち、奥州市衣川区餅転から一関市巖美町字柵木立南方では、水田や道路などを変位させる上下変位50 cm以下の逆断層タイプの地震断層が断続的に観察された(例えば, Toda *et al.*, 2008; 石山ほか, 2008; 鈴木ほか, 2008a; 堤ほか, 2008; 土井ほか, 2009; 遠田ほか, 投稿中). 一方、地震断層帯南北両端付近では、メートルオーダーの地表変位が生じた(遠田ほか, 投稿中). そのうち、栗原市の荒砥沢ダム北方では、山地斜面を横切ってメートルオーダーのすべりを伴う地震断層が700 m以上にわたって確認された(吉見ほか, 2008; 丸山ほか, 2009; 遠田ほか, 投稿中)(第2図). これらの地震断層は、いずれも従来活断層として認定、図示されていないところ(活断層研究会, 1991; 中田・今泉, 2002)に出現した. そのため、地形判読に基づく活断層の検出限界について議論を引き起こした. 地震後に実施された現地調査および空中写真・航空レーザ画像の詳細判読の結果、地震断層の一部が過去の活動を示唆する低崖に沿って出現したことが確認された(例えば, Toda *et al.*, 2008; 鈴木ほか, 2008a; 堤ほか, 2008; 丸山ほか, 2009). 鈴木ほか(2008a)は、地震前に撮影された空中写真判読およびトレンチ調査に基づき、柵木立周辺では今回の地震断層が完新世に繰り返し活動したことを報告している. しかしながら、これまでのところ柵木立を除き古地震調査は実施されておらず、2008年に先立つイベントの時期、地震時変位量、活動間隔、平均変位速度、地震断層と地質構造との関係などは十分明らかにされていない. そのため、地震断層沿いの変動地形が事前に認定できなかった理由についても詳しく議論するには至っていない. 今回の地震に伴う地震断層の古地震像を明らかにすることは、岩手・宮城内陸地震の変形像を理解するだけでなく、地形表現が不明瞭な活断層から発生する地震の評価手法の高度化を行う上で重要である. そこで、地震断層を対象としたトレンチ掘削調査を実施した. 調査地点は第2図に示した4地点(そのうち2地点では2箇所掘削したため計6箇所)である. 以下、北から順に調査結果を報告する.

2. 調査結果

2008年9月からトレンチ調査地点の選定を開始した. 選定に際しては、1) 2008年地震時の地表変位が明瞭、2) 地震前に撮影・計測された空中写真・航空レーザ画像の判読により既存の断層崖が推定され

る、3) 逆向き低崖など断層沿いに新しい堆積物が期待される地点を選び出した. 用地が民有地の場合は地権者交渉、官地の場合は管理機関に調査許可申請を行うとともに、いずれの地点とも埋蔵文化財指定地および砂防指定地・地すべり防止区域・急傾斜地崩壊危険区域でないことを確認した. トレンチ調査実施期間は2008年11月~2009年1月である.

各トレンチ壁面では、水平、鉛直に1 m間隔で水糸を張り、縮尺1/20のスケッチを行った. 各壁面の傾斜は50°~60°とした. トレンチ壁面に出現した地層の年代を推定するため、木片、炭、有機質シルトを採取し、¹⁴C年代測定を実施した(餅転、柵木立、荒砥沢ダム北方の各地点). 一方、¹⁴C年代試料が得られなかった岡山トレンチでは、火山灰質砂・シルト層(テフリックレス)中に含まれる鍵テフラの検出、同定を目的として、連続サンプリングを行い、火山ガラスおよび重鉍物の含有量計測と屈折率測定、火山ガラスの主成分化学組成分析を実施した. ¹⁴C年代測定は(株)加速器分析研究所に、テフラ分析は(株)古澤地質にそれぞれ依頼した.

2.1 餅転地点

2.1.1 2008年地震断層の性状

餅転では、東流する真打川を横切るように、「し」の字状に大きく湾曲する地震断層が長さ700 m以上にわたって出現した(例えば, Toda *et al.*, 2008; 丸山ほか, 2009; 遠田ほか, 投稿中)(第3図). 地震断層の断面形態は、逆断層にみられる相対的隆起側(上盤側)でバルジ状の膨らみを伴う撓曲崖で特徴付けられる. 地震断層が道路や橋を横切る付近では、ガードレールの湾曲やアスファルトの座屈など、水平短縮を示す変形が認められた. 上下変位は全区間で西~北側上りを示す. 一方で、北北東-南南西走向区間では左ずれ成分、東西走向区間では右ずれ成分を伴う. これらの横ずれ変位は、北西側のブロックが南東方向に移動し、南東側ブロックに衝上することで説明できる. ここでの上下変位と北西-南東方向の水平短縮量はいずれも最大50 cm程度と計測された.

2.1.2 周辺の地質構造

餅転での最大の特徴である大きく湾曲した断層トレースの成因を解明することを目的として、トレンチ掘削調査に並行して真打川沿いの地質踏査を実施した. その結果、1) 河床付近に連続的に分布する新第三系とみられる火山豆石を含む白色~灰白色凝灰質砂・シルト岩は波長数m~数10mの褶曲を繰り返していること、2) 特に地震断層上盤側では、層理面の走向が断層トレースと調和的に湾曲していること、3) その傾斜も北~西に約30°~40°と低~中角度であることが確認された(第3a図). 以上のことから、本地点の(少なくとも地表付近では)地震断層は褶

曲変形により傾斜した新第三系の層理面を利用した層面すべり断層であり、低角な断層傾斜を反映して地表トレースが湾曲したと推定される。

2.1.3 調査地点の選定理由

真打川右岸の休耕田（A トレンチ）と水田（B トレンチ）の2箇所地震断層を横切るようにトレンチを掘削した（第3図、第4図）。いずれの掘削地点とも真打川の現河床からの比高約2mの最低位の段丘面上に位置する。現河床からの比高から、最低位段丘面の形成年代は完新世後期と推定された。この地点でトレンチ掘削を実施した理由は、1) 周辺の地質踏査からトレンチ掘削深度範囲内で基盤岩に到達することが予想され、上述の周辺踏査から推定した基盤岩の地質構造と地震断層の性状の関係（層面すべり断層）を直接確認できる可能性があること、2) 本地点の地震断層は真打川の流向に対して上流側が低下する変位センスを示すことから、完新世後期に同様の活動があれば断層崖付近に堆積物がトラップされ完新世後期の活動履歴を詳細に検討できる可能性があること、の2点である。なお、この段丘面には、過去の活動を示唆する低崖は認められない。両地点とも2008年地震時には約40~50cmの上下変位を伴う北側上がりの撓曲変形が生じた（第3b図）。

2.1.4 餅転 A トレンチ

2.1.4.1 トレンチ壁面の地質

餅転 A トレンチでは、下位から砂礫層（4層）、それを整合的に覆う成層した砂・シルト層（3、2層）が分布し、盛土（1層）および耕作土（0層）が覆っている（第5図）。2層および4層は層相および色調によりさらに複数のユニットに区分される。壁面内の地層内には多数の木片・腐植土が挟在している。そのうち、壁面最下部の砂礫層（4b層）中に含まれる木片（未分解の木の枝）の¹⁴C年代測定を行ったところ、AD1683~1930年の暦年較正年代が得られた（MCA-N01：第1表；以下本文中の¹⁴C年代は暦年較正年代の2σの範囲を示す）。一方、層的にこれよりも上位にあたる壁面中部の細粒砂（2e層）中に含まれる腐植質シルトの年代はAD894~1018年（MCA-E02）と下位層よりも古く、年代値が逆転している。試料MCA-N01はほとんど炭化しておらず新鮮な産状を呈する木の枝であるものの、地層と平行に配列しており、側方および上方へ連続しないことから、あとで混入した木の根とは考えられない。したがって、試料MCA-E02に古い炭素が混入している可能性が高いと判断し、本トレンチ壁面内に分布する地層は17世紀より新しいものと解釈した。

2.1.4.2 断層変形構造とイベント解釈

壁面内に分布する各ユニットは、ちょうど地震断層出現位置（グリッド番号2~4）で南傾斜の緩やか

な撓曲変形を呈している（第4b図、第5図）。壁面内で撓曲構造の両側に分布する各ユニットの高度差はいずれも30~50cmと2008年の地表変位と同等である。このことから、本地点の地震断層は、古く見積もっても17世紀以降は今回の地震による変位のみと判断される。

2.1.5 餅転 B トレンチ

2.1.5.1 トレンチ壁面の地質

餅転 B トレンチには、下位から火山豆石を含む新第三系とみられる凝灰質砂岩・シルト岩（4層）、新第三系のシルト岩の角礫を主体とする砂礫（3b層）、腐植質シルトブロック混じりの砂礫（3a層）、旧耕作土とみられる腐植質シルト（2層）、砂礫（1層）、現耕作土（0層）が分布する（第4c,d図、第6図）。

このうち、3a層中に含まれる材（丸太）からAD1675~1942年（MCB-E01）の年代が得られた（第1表）。一方、同層中に不規則に含まれる腐植質シルトのブロック（MCB-E02、MCB-W01）および本層を覆う2層中の腐植質シルト（MCB-E03）の年代はいずれも試料MCB-E01より古く、餅転 A トレンチと同様に層序と年代値の逆転がみられる。ただし、試料MCB-E01は切り口が新鮮な丸太であり、その長軸がほぼ水平であること（第4c図）から、2層形成後に上方から侵入したとは考えられない。一方、3a層は、後述のようにその産状から、周囲から客土として運ばれてきた人為的な埋土の可能性もある。さらにそれを覆う2層は旧耕作土とみられる。したがって、3a層および2層中の腐植質シルトが二次堆積あるいは古い炭素が混入した可能性が高く、本トレンチに広く分布する3a層はAD1675~1942年以降に堆積したと判断した。

2.1.5.2 断層変形構造とイベント解釈

2008年地震の地震断層出現位置（グリッド番号2~4）では2~0層に北側上がりの撓曲変形が認められる（第4c,d図、第6図）。撓曲による各地層の上下変位量は50cm程度であり、これは地表で計測された上下変位量と同等である。

一方、その下方延長部では、基盤岩（4層）が3層に見かけ上高角度で衝上している（第6図）。東壁面に注目すると、3a層が断層下盤側（南側）で厚く堆積していることから、過去の地震イベントにより形成された南向きの断層崖を埋積した地層である可能性もある（第6図）。しかしながら、断層下盤側に分布する3aおよび3b層の砂礫ユニットを詳細に検討した結果、下位の角礫を主体とする3b層は、1) トレンチ地点周辺に分布する第三系砂岩・シルト岩と層相が似ていること、2) 堆積構造が認められないこと、3) 周囲の段丘構成層と異なり角礫~亜角礫からなること、4) 角礫間の空隙が不自然に多いことで特徴付けられる。また、3a層についても、i) 腐植質

シルトブロックが不規則に引きちぎられたように分布していること、ii) 人為的に切断されたとみられる切り口が新鮮な丸太 (MCB-E01) が含まれる。以上の特徴から、これら2層の砂礫ユニット (3b層および3a層) は、断層沿いの旧河道を人工的に埋積した地層の可能性が高いと解釈した。地元住民 (トレンチ掘削地点の地権者) への聞き取りによると、真打川は元来蛇行しており、現在の真打川は人工的に掘削、流路変更されたという言い伝えがある。ただし、流路変更の時期は不明である。断層下盤側に厚く分布する砂礫 (3層) はその際の掘削土塊の可能性が高い。この解釈が正しいとすると、トレンチ壁面内にみられる構造は今回の地震のみで生じた可能性が高い。その場合、本地点の地震断層は、AD1290~1400年以降今回のみ活動したと判断される。

ところで、餅転Bトレンチに出現した逆断層の走向・傾斜は、上盤側の4層中に発達する層理面とほぼ平行している (第6図)。真打川河床露頭と同様に地震断層は新第三系の層理面すべり断層である。

2.2 岡山地点

2.2.1 2008年地震断層の性状、周辺の地形・地質概要および調査地点の選定理由

磐井川とその支流産女川が形成した河成段丘面群が分布する一関市巖美町字岡山周辺では、2008年の地震に伴い、アスファルト舗装道路、コンクリート製水路などを破壊する地震断層が北北東-南南西方向に断続的に確認された (例えば、Toda *et al.*, 2008, 石山ほか, 2008; 堤ほか, 2008; 遠田ほか, 投稿中) (第7図)。

磐井川右岸の岡山では、アスファルト舗装道路に西側上がり10 cm程度、水平短縮20 cm程度の座屈変形が認められた (第7図, 第8a図)。この地表変形の南では、段丘面上に北北東-南南西走向に延びる高さ約2~3 mの南東向きの低崖が長さ約200 mにわたって認められる (堤ほか, 2008; 丸山ほか, 2009; 遠田ほか, 2009) (第7図, 第8a図)。前述の地震断層は、この低崖沿いにほぼ一致するように分布している。この崖の走向は東流する磐井川・産女川に対して大きく斜交しており、それらの侵食崖とは考えにくい。また、崖は撓曲崖に典型的な上に凸の断面形状を呈している (丸山ほか, 2009)。こうした特徴から、この低崖は段丘面を変位させる西側上がりの断層運動による撓曲崖と判断される。

実際にこの低崖が過去の断層運動で形成されたものか明らかにするとともに、その場合変形様式や活動履歴を検討するため、崖を横切るトレンチ掘削調査を実施した。今回の調査では、この撓曲崖をはさんだ牧草地内で、長さ20 m、幅10 m、深さ最大5 mの大規模なトレンチを掘削した (第8b図, 第9~11図)。

2.2.2 トレンチ壁面の地質

トレンチ壁面内に分布する地層は、下位から段丘面を構成する砂礫層 (4, 3層) とそれを覆う厚い褐色火山灰質ローム層 (テフリックレス) (2層) および表土 (1層) である (第11図)。2層中には肉眼で識別できるテフラは認められない。砂礫層はその層相、色調、締まり具合から第11図に示すように複数の堆積ユニットに区分される。各ユニットの特徴を第2表に示す。

砂礫層 (4, 3層) 中からは¹⁴C年代測定試料は得られなかった。そこで段丘堆積物の年代の上限値を推定するため、2層および1層中から厚さ10 cm毎に連続的に試料を採取し、各試料における火山ガラスと重鉱物の含有量の計測と屈折率の測定を試みた。屈折率の測定方法は古澤 (1995) に従う。分析の結果、第12図に示すように、2~1層全体にテフラ起源粒子が確認された。そのうち、上部 (試料番号2.1~1.7) は、1) パミスおよびバブルウォールタイプの火山ガラスが下位の層準に比べて濃集すること、2) 緑色普通角閃石の含有量にピークがみられることで特徴付けられる。試料番号2.1~1.7に含まれるテフラ起源粒子は、火山ガラスの屈折率や鉱物組成から、町田・新井 (2003) の鳴子 (鳴子柳沢, Nr-Y)、焼石 (焼石山形, Yk-Y; 焼石村崎野, Yk-M) あるいは西岩手 (西岩手雪浦, Iw-Y) 起源の後期更新世テフラである可能性がある。ただし、それらは火山ガラスの屈折率に明瞭な違いがないことから、屈折率のみでは明確な識別・同定は困難である。一方、最近青木・町田 (2006) は日本に分布する第四紀後期広域テフラの主要元素組成を整理し、K₂O-TiO₂図のパターンからテフラの識別が可能であることを指摘している。そこで、試料番号2.1, 1.8, 1.6の3試料の火山ガラスの主成分化学組成を分析した。分析方法は古澤 (2008) に従う。分析結果を第3表に示す。第13図は青木・町田 (2006) による東北地方の後期更新世テフラのK₂O-TiO₂図に本調査で実施した3試料の分析結果を重ねたものである。3試料のうち、特に2層上部の試料番号2.1および1.8の化学組成は、青木・町田 (2006) のYk-Y, Yk-MおよびIw-Yとほぼ一致するのに対して、Nr-Yとは明瞭に異なっている。また、鉱物組成に注目すると、Yk-Y, Yk-MおよびIw-Yのうち、主要鉱物として角閃石が含まれるのはYk-Yのみであり (町田・新井, 2003)、角閃石の屈折率の収束値も、町田・新井 (2003) のYk-Yのそれと近似している。こうしたテフラの特徴から、2層上部はYk-Yの降灰層準である可能性が高いと判断される。Yk-Yテフラの噴出年代に関しては、層位的検討に基づき、>41 kaもしくは50~60 ka (町田・新井, 2003) とされている。一方、渡辺ほか (2003) は同テフラ中に含まれるジルコン結晶のFT年代測定により、82±19 kaの年代を報告している。このテフラの同定が正しいとすると、掘削地点の段丘面の

離水時期は約4~10万年前よりも古いことになる。ただし、今回の分析では、Yk-Y テフラの可能性のあるテフラ以外は検出されず、火山灰質ローム層（テフリックレス層）の累重様式は十分明らかにされていないことから、二次堆積の可能性を完全に否定することはできない。今後、周辺に分布する複数の段丘面についても編年を進め、この年代観の妥当性を検証する必要がある。

2.2.3 断層変形構造とイベント解釈

南北両壁面において、4, 3層およびそれを覆う2層は今回の地震断層出現位置付近（グリッド番号5~9）で北西側上がりの明瞭な撓曲変形を受けている（第11図）。またこれに付随するとみられる低角西傾斜の逆断層が複数確認される。このうち北壁面の4c層内のグリッド番号5~10付近では、低角逆断層により弱いラミナをもつ粗砂~細礫層やレンズ状の細~中砂層に見かけ上10cm程度西側上がりの変位が生じている。一方、南壁面ではグリッド番号5~7に発達する4a層~3a層がヒンジ状に折れ曲がる部分の軸部に明瞭な逆断層が認定される。西壁面では、4b層の層厚が約2mとなり南北両壁面に比べて厚いが、これは同層が撓曲変形により折り畳まれた結果、見かけ上厚くなっているものと考えられる。地層の折り畳まれ具合から、上下変位とともに顕著な水平短縮が推定される。こうした変形様式は、2008年の地表変形と調和的である。ただし、砂礫層の各ユニットの上下変位量は撓曲を挟んで2~2.5mにおよんでいる。また、4a~3a層はグリッド番号6~8でほぼ直立している。こうした変形は、今回の地震による地表変位よりもはるかに大きいものの撓曲地形の変位量と調和的である。一方、壁面からは、今回の地震に伴うわずかな変形（上下変位、水平短縮とも10cm程度以下）を検出することはできない。こうしたことから、4, 3層および2層にみられる撓曲変形の大部分は、今回の地震に先行する地震イベントで生じたと判断される。

ところで、2008年地震時の変位量がごくわずかであったことから、トレンチ内での2.5mにおよぶ上下変位が小規模な変位の積み重ねで生じたとする見解もあり得よう。しかし、そのような小さなすべりが複数回繰り返したことを積極的に示す証拠はない。著者らは以下の理由からその可能性はきわめて低く、1回のイベントで生じたと考えている。1) 4, 3層の各ユニット間には上下変位に差が認められない（各地層ユニット間での上下変位量の多少の変化は、イベントを示唆するものではなく、層厚変化で説明可能である）、2) 撓曲構造の低下側を埋めるような地層が分布しない、3) 2層中にもイベントに関連するような崩落性堆積物（colluvial wedge：例えば、Carver and McCalpin, 1996）は存在しない、4) 撓曲変形に付随して生じた断層と地層の明瞭な切断・被

覆関係が認められない、5) 磐井川左岸側に広がる今回トレンチ掘削調査を行った段丘面よりも一段低位の段丘面（遠田ほか、2009のL2面）に低崖が認められない（第7図）（丸山ほか、2009）。つまり、撓曲崖は掘削した右岸の段丘面形成後で左岸側の段丘面離水時期より前の短期間に形成され、それは2層堆積後1回のみで、その際2~2.5m程度の上下変位を伴ったことで説明可能であり、先行するイベントでの地表付近のすべり量は今回よりもはるかに大きい。ただし、上述のようにトレンチ壁面内で今回の地震（2008年岩手・宮城内陸地震）に伴う変形が検出できないことから、過去に今回のような（地表でわずかなすべりを伴う）イベントを多少含んでいることを否定することはできない。

2.3 爪木立地点

2.3.1 2008年地震断層の性状

一関巖美町字爪木立では、長さ400m以上にわたり水田、牧草地、アスファルト舗装道路などを連続的に食い違わず北北東-南南西走向で南東側上がりの地震断層が生じた（例えば、Toda *et al.*, 2008；石山ほか、2008；鈴木ほか、2008a；遠田ほか、投稿中）（第14図）。地震断層は撓曲状の断面形態を示すことから、南東傾斜の逆断層による変形と推定された。地震断層に沿っては横ずれ変位は認められない。また、この地震断層の約100m東には、北西側上がりの撓曲変形や傾動変形が報告されている（鈴木ほか、2008a；遠田ほか、投稿中）（第14図）。鈴木ほか（2008a）は北西側上がりの断層を主断層とし、変位の明瞭な南東側上がりの変位を副断層によるものと解釈した。

2.3.2 調査地点の選定理由

爪木立周辺では、地震断層により段差が生じた水田の復旧工事が一関市によって2008年11月に実施されることになっていた。そこで、その復旧工事直前に約40cm北西側落ちの撓曲変形が生じた水田でトレンチ掘削を行った（第14~17図）。トレンチの規模は長さ20m、深さ最大約2.5mである。掘削地点は、鈴木ほか（2008a）による地形分類の上位沖積面にあたる。鈴木ほか（2008a, b）は、この地形面にわずかな南東側上がりの上下変位の可能性を指摘し、同地形面に対比される牧草地で掘削したトレンチ（Loc. 1, 第14図）において、約5千年前以降、2008年を含め複数回の地震イベントを見出している。

本地点での調査の目的は、1) 上述したように復旧に伴う地形改変で破壊される地震断層沿いの浅部地質構造を確認・記録すること、2) 鈴木ほか（2008a, b）に報告されているイベントを確認すること、3) 鈴木ほか（2008a, b）のLoc. 1のトレンチ底部で基盤岩が露出しているとの報告があることから、基盤岩の変形構造（既存地質構造）と活構造との関係を明らか

にすることの3点である。

2.3.3 トレンチ壁面の地質

本調査によるトレンチの壁面スケッチを第16図、壁面写真を第17a, b図に示す。壁面には、下位から上部第三系とみられる凝灰質砂岩・シルト岩からなる基盤岩(5層)とそれを不整合に覆う段丘礫層(4層)、洪水時に堆積したとみられる砂・シルト層(3層)、火山灰を挟在するローム層(2層)、旧耕作土の黒色土壌(1層)および現耕作土(0層)が分布している。そのうち、4層は主として層相の違いにより下位から4d~4a層に細分できる(第16図)。これらの地層のうち、4d層基底部からBC2276~2034年(HKD-S02)およびBC1425~1267年(HKD-S03)、4a層中からAD1682~1937年(HKD-S01)、3b層基底部からBC997~831年(HKD-N03)、3a層中からBC769~543年(HKD-N02)、1層中からAD1411~1463年(HKD-N01)の¹⁴C年代が得られた(第1表、第16図)。試料HKD-S01を除き、層序と計測年代とは整合的である。試料HKD-S01は層位に対して著しく若いこと、またトレンチ側方に細長く入り込む木の根状の産状を呈していることから、水田耕作前に生育していた木の根の可能性が高いと判断される。2層中には白色火山灰が挟在する。その層相や上下の地層の堆積年代などから、十和田aテフラ(To-a: AD915年、町田・新井、2003)と推定される。

2.3.4 断層変形構造とイベント解釈

今回の地震に伴う撓曲変形の下方向延長部では、基盤岩(5層)上面を南東側上がりに変位させる明瞭な断層が確認された(グリッド番号11~13、以下主断層と呼ぶ)(第16図、第17a, b図)。主断層は北北東-南南西走向で南東に60°~65°傾斜する逆断層である(第16図)。ここでみられる断層面は餅転地点と異なり、東に緩く傾斜する基盤岩の層理面を明瞭に切断している(第16図)。主断層周辺の幅約100cmの範囲は周囲に比べブロック化しており(第17a, b図)、主断層断層沿いで幅約10cmの断層ガウジ・角礫帯を形成している(第17c, d図)。これに対して、基盤岩を不整合に覆う4d層の基底面に断層変形が認められるのは、数条の小断層(例えば、第17e図)を除き主断層沿いに集中している(南壁面では、断層ガウジ・角礫帯の西縁で5層が4d層に見かけ衝上している)。こうした5層中の破碎帯の存在から、本断層は4層堆積前にも繰り返し活動したと判断される。

上述のように5層中に発達する主断層は単純で、最近活動したと考えられる部分は約10cm幅に限定される。その中に数条の剪断帯が認められる。この断層は4d層中では礫の再配列帯として認定できるものの、上方に向かって明瞭な断層ではなく緩やかな撓曲変形に変化する。

主断層を挟んだ5層上面の南東側上がりの上下変位は北壁面で約50cm、南壁面で約30cmである(第16図、第17a, b図)。5層上面の各所で凹凸が認められることを考慮すると、これらは2008年地震に伴う水田の上下変位(40~45cm程度)とほぼ同程度である。このように5層上面と地表変位が同程度であることに注目すると、4d層基底の変位は、今回の地震による変位のみで説明可能である。この場合、4d層基底部の¹⁴C年代測定結果から、BC2276~2034年以降の地震イベントは2008年のみとなる。

一方、4層堆積中に2008年に先行する断層変位が生じている可能性も完全には否定できない。4層は上述のように、層相から少なくとも4d層~4a層の4つの堆積ユニットに細分できる(第16図)。北壁面において4d層は主断層近傍で著しく変形し、一部の礫のみかけの長軸が主断層に平行に再配列している(第17c図)。再配列は基盤中の断層と直接接する部分で著しい。礫層中の剪断帯は明瞭でないものの、礫の配列様式から、4d層中には上部に開く剪断変形帯が存在すると推定される。これに対して、4c層は4d層を傾斜不整合的に覆い、礫の再配列は認められない。特に北壁面に分布する砂優勢の層相と礫優勢の層相とが互層状を呈する4c層は、4d層中に認められる断層延長付近において整然としており、断層による明瞭な層相のずれや再配列構造は認められない(第17c図)。このような4d層と4c層の変形様式の違いは、断層面に集中する基盤岩中の変位が上方にむかって幅広く変形する、いわゆる被覆層による座布団効果(例えば、上田、1993)でも概ね説明可能である。また、一般には堆積期間の短い礫層ユニット中に地震発生(断層変位)の記録が残される可能性はきわめて低い。ただし、両層境界で礫配列の変化が急に見える部分があるため、一連に見える両層間に明瞭な時間間隙が存在し、4d層堆積後4c層堆積前に西側下がりの断層運動が生じた可能性は完全に否定できない。この場合、2008年の地震に先行するイベントは、4d層と3b層の¹⁴C年代からBC1425年以降BC831年以前に限定される。ただし、このイベントを認定した場合、断層変位は2008年に比べてごくわずか(10cm前後以下)であったか、先述したように基盤上面と地表面の上下変位量がほぼ対応していることから、このイベント前の基盤の上面高度は、主断層を境に南東側が低下していたことになる。鈴木ほか(2008a)のトレンチ(Loc.1)では南東側が低下している基盤岩上面が露出しており、可能性は低い、全く考えられないシナリオではない。

ところで、その分布が主断層よりも西側に限定される壁面上部の細粒堆積物(3a層)とそれを覆う褐色ローム層(2層)は、主断層に向かって緩く引き上げられているように見え、かつそれらの傾斜は地表面のそれよりも急斜しているようにも見える(北壁面グリッド番号9~13、南壁面グリッド番号8~9)(第

16図). こうした傾斜の特徴から, 少なくとも3a層堆積後で2008年地震前に傾動イベントがなかったとも言い切れない. ただし, 1) 3a層は4層上面の凹地を埋積するように堆積していること(3a層の分布の北西縁にあたる北壁面のグリッド番号2~3では, (北壁面グリッド番号9~13とは逆に) 同層が北西に向かって緩やかに引き上げられるように分布している), 2) 南壁面における3a層および2層は, 主断層による変形域よりも西側のグリッド番号8付近から傾斜していることから, 北壁面に認められる3a層~2層の傾斜と2008年地震による地表面の傾動の差は, 断層変位を示すものではなく, 粘着力のあるシルト層を主体とする3a層が初生的に当時の凹地に堆積したものと解釈することも可能である.

このように, 今回掘削したトレンチの壁面観察のみに基づくと, 基盤岩を不整合に覆い壁面全域に分布する4d層堆積後の地震イベントは, 2008年のみの1回でほぼ説明可能である. しかしながら, 4層中に観察される変形構造の上方変化も無視しがたい. 今後, 周辺での追加トレンチ調査を実施するとともに, 鈴木ほか(2008a, b)の結果と合わせて総合的に解釈する必要がある.

ところで, 基盤岩の凝灰質砂岩・泥岩(5層)中には数条の小断層が発達しており, それらの一部には4d層基底面を数cm上下変位させているものもある(第17e図). 小断層は中~高角傾斜を示すものが多く, それらの断層面上には水平から緩く傾く条線が発達している(第17f図). こうした断層面の特徴から, 横ずれ変位が卓越するすべりもあったことが示唆される. ただし, 小断層の横ずれが主断層沿いの逆断層運動に付随して生じたものか, 小断層の横ずれ時に主断層も横ずれを伴ったのかは不明である.

2.4 荒砥沢ダム北方地点

2.4.1 2008年地震断層の性状, 周辺の地形・地質概要および調査地点の選定理由

今回の地震で最大規模の崩壊が生じた荒砥沢ダムの北方では, 山地斜面を横切る地震断層崖が700m以上にわたって確認された(吉見ほか, 2008; 丸山ほか, 2009; 遠田ほか, 投稿中)(第18図). 地震断層崖は, 1) 南北走向の西区間, 2) 東西~東北東~西南西走向の中央区間および3) 北東~南西走向の東区間の3つの区間からなる(第18b図). 中央区間では, アスファルト舗装道路, 林道, 涸れ沢が系統的に右横ずれし, 高角に傾斜する断層面上には, 水平から約20°~45°西に傾く条線が観察された. 本区間での右ずれ量は4~7mと計測された. 一方, 西と東の両区間は西側上がりの南北~北東~南西走向の逆断層であり, 双方とも山地斜面側が隆起するいわゆる「逆向き低崖」として認められる. 両区間とも撓曲崖状の断面形状を呈し, 崖近傍の下盤側ブロックの樹木が上盤側ブロックに突入している状況から

西北西~東南東~東西方向の短縮変形が推定される(吉見ほか, 2008). これは地震のメカニズムや測地データと調和的である. 両区間の上下変位は場所により変化するが, 最大3m以上である.

本地域の地表変状の成因については, 重力性の地すべりや地震動による側方移動との解釈もなされている(例えば, 向山ほか, 2009). しかしながら, 地表変状の変位センス, 幾何形状に加えて, 測地データに基づく断層モデルなどを総合的に検討した結果, 吉見ほか(2008)および遠田ほか(投稿中)はこのメートルオーダーのずれは, 重力性移動ではなくテクトニックな地震断層の可能性が高いと解釈している. また, 神谷ほか(2008, 2009)は, この地表変状を含む広範囲の地震前後の空中写真を用いた写真測量による水平変位パターン(第18a図)から, 本地点の地表変状が主として震源断層運動を反映している可能性が高いと判断している.

地震前に計測された航空レーザから作成したDEM陰影図の判読の結果, 中央右横ずれ区間および逆断層の東区間では, 今回出現した地震断層沿いに今回の変形パターンと調和的な低崖が認定され, 過去にも断層活動があった可能性が指摘されている(丸山ほか, 2009).

今回の調査では, 中部右横ずれ区間と南北走向逆断層区間(西区間)のそれぞれ1箇所を, 先行する地震イベントの検出を目的としてトレンチを掘削した. 両断層区間はいずれも市道から分け入った森林内にあり, 重機の搬入が困難なため, 地震断層崖の比高が比較的低い場所を掘削地点に選定して, 手掘りによって長さ3~4m, 深さ1.5mの小規模なトレンチを掘削した.

2.4.2 東トレンチ

2.4.2.1 トレンチ壁面の地質

東トレンチは, 北流する浅い谷を切断する比高約1.5mの逆向き低崖を横切って掘削された(第18b図, 第19a, b図). 壁面内には, 下位から順に山地斜面を構成する亜角~角礫混じりシルト(3層), 暗褐色腐植質シルト(2層), 暗褐色~灰褐色シルト(1層)が分布する(第20図). このうち, 1層は層相, 色調および腐植程度により下位から1d~1a層に細分される. 1a層はトレンチ最上部に一様に分布することから地震前の地表面を構成する地層と判断される. 3層からは年代試料が得られなかったが, 2層からはAD423~563年(ARE-E01), BC193~18年(ARE-W01)の¹⁴C年代値が得られた(いずれも腐植質シルト). なお, 1c層から採取した腐植質シルトはModernであった(第1表, 第20図).

2.4.2.2 断層変形構造とイベント解釈

東西両壁面ともグリッド番号1~2で上方に分散する複数の断層面が認定された. そのうち, 最も南側

に分布する北に急傾斜する明瞭な断層面を介して南側の2~1層に北側の3層がみかけ上衝上している様子が確認される(第19a, b図, 第20図). こうした見かけ高角逆断層の産状は掘削地点西方でみられた凝灰質シルト岩および凝灰角礫岩を切断する断層面(吉見ほか, 2008)と調和的である. 東壁面では断層面は地表に向かって低角化している. また, 東壁面では, 地震で生じた断層崖の崩壊により堆積した崩積土(0層)が断層を覆っている.

2層および1d~1b層は, 断層の南側(低下側)にのみ分布している. これについては, 2層~1b層が(過去の活動で変位した)断層を覆う状況が認められないことに加えて, 本地点では右横ずれが卓越すること(吉見ほか, 2008)を考慮すると, 過去の断層活動で生じた北側上がりの低崖を埋積するように堆積したものではなく, 今回の右横ずれ(6m程度)により断層を境に異なる地層が接していることで説明可能である. したがって, 本トレンチでは今回の地震に先行するイベントを積極的に示唆する証拠は認められない. 壁面から採取された地層の¹⁴C年代から, 少なくともBC193~18年以降2008年までの約2,000年間は明瞭な地表変位を伴う地震活動は生じていない.

2.4.3 西トレンチ

2.4.3.1 トレンチ壁面の地質

西傾斜する山地斜面に生じた東向きの低崖(いわゆる逆向き低崖)を掘削した西トレンチでは, 下位から順に山地斜面を構成する角礫混じりローム質シルト(4層), 黒~黒褐色腐植質シルト(3層), 暗褐色シルト(2層)および地震前の地表面を構成する地層である黒色土壌(1層)が分布する(第21図). 4層からは年代試料が得られなかったが, 3層からはBC1055~900年(ARW-S1), BC749~401年(ARW-S2), BC1299~1056年(ARW-S3), 2層からはBC4226~3959年(ARW-N01), 1層からAD1415~1469年(ARW-N03), AD1256~1384年(ARW-S04)の¹⁴C年代値が得られた(いずれも腐植質シルト)(第1表). このうち, ARW-N01は層位的に下位の試料よりも明らかに古い年代を示すことから, 二次堆積による古い炭素の混入の可能性が高い.

2.4.3.2 断層変形構造とイベント解釈

トレンチ南北両壁面とも約40°で西に傾斜する逆断層面が確認された(第19c, d図, 第21図). 北壁面では, 地震以前に地表に露出していたとみられる切株が逆断層運動により上盤側の地層に覆われ埋没している様子が認められる(第19c図). わずか2m離れているだけにもかかわらず, 両壁面の断層の出現状況に以下のような違いが認められる. 北壁面では一条の断層が出現し, 2層上面の断層面沿いのすべり量は約160cmである. これに対して, 南壁面

は3条の断層が出現した. それらを下位よりF1, F2, F3とする. 各断層沿いにおける2層上面のすべり量は, F1が約85cm, F2で65cm, F3で5cm, 計約155cmと見積もられ, これら3条のすべり量の総和は北壁面のすべり量とほぼ対応している. このことから, 北壁面で1条の主断層で解消された変形が南壁面では3条で分散して解消されたと考えられる. ただし, F2およびF3の先端は2層中で急に不明瞭になり, 明瞭な変位が認められなくなる. かわって, 両断層に挟まれた区間で2層がバルジ状の膨らみを呈している. このように変形モードがトレンチ壁面内で急変する. この成因については, 両断層の延長にある切株がすべりの障壁となり, そこで変形を解消するために2層が上方に絞り出されたためと考えられる. このことは, 地表変位の形態や出現位置が浅部地質の物性のみならず, 木や構造物など地物にも影響を受けることを示している.

本トレンチ壁面からは, 東トレンチと同様今回の地震に先行する活動の存在を示唆する構造は認められない. したがって, 地層の¹⁴C年代に基づくと本地点では, BC1299~1056年以降2008年までの約3,000年間明瞭な地表変位を伴う地震活動は生じていないと判断される.

3. 議論

3.1 地震断層の活動性

以上のように, 岩手・宮城内陸地震の地震断層沿いの4箇所6地点でトレンチ掘削調査を実施した結果, 今回の地震に先行する確実なイベントが確認されたのは, 岡山地点のみであった.

岡山で段丘面を変位させる比高2~3m程度の東向きの撓曲崖を横切るトレンチ掘削調査の結果, 崖の比高と調和するように段丘堆積物に2~2.5mの上下変位を伴う西側上がりの撓曲変形が確認された(第10図, 第11図). 地層の折り畳まれ方から, 上下変位に加えて顕著な水平短縮が生じていることがわかる. こうした変形パターンは, 2008年の地表変位と調和的である. ただし, その変位規模は2008年よりも1桁大きい.

2.2.3で述べたように, 壁面で見られる変形は, 今回の地震に先行する1回のイベントで生じたと解釈した. すなわち, 過去には今回と異なり, (地層や地形に明瞭な証拠を残すような)地表付近でメートルオーダーのすべりを伴うイベントがあった可能性を示唆する. 一方, 今回の地震に伴う変形は微小なため, 壁面内でその証拠を検出することはできなかった. そのため, 同様の小規模な変位が頻繁に発生し, 上記の2m以上の変位量まで成長したという見方もできよう. しかし, 若い段丘面上に変形は全く及んでいないため, 高頻度で低変位量の活動のみによる累積変形とするには無理がある. ただし, 2008年のよ

うな地震イベントが紛れている可能性は否定できない。

ところで、岡山地点で認定されたメートルオーダーのすべりは、掘削した地形面の推定形成年代から、過去数万年前以降1回のみである。この活動頻度は、一見鈴木ほか(2008a, b)で報告された杣木立での活動頻度(Loc. 1: 約5,000年前以降今回のイベントを含め少なくとも3回, Loc. 2: 低位段丘面形成以降今回のイベントを含め少なくとも4回, 第14図)と大きく異なっている。杣木立の古地震イベントの認定については、2.3.4で述べたように今後さらに検討する必要があるが、鈴木ほか(2008a, b)で報告された活動頻度が正しいとした場合、上述したように岡山では過去にも今回と同程度の微小なすべりを伴うイベントが生じた可能性は否定できないことから、杣木立で認定された断層活動時に岡山でも地表変位がなかったとは言い切れない。一方、岡山でのメートルオーダーのすべりの発生時期は、段丘面の変形の有無から、掘削した段丘面(遠田ほか, 2009のL1面)形成後で、これより一段低位の段丘面(遠田ほか, 2009のL2面)の形成前となる。この一段低位の段丘面の形成時期は不明であるが、杣木立の低位段丘面よりも古い場合には、杣木立でメートルオーダーのすべりイベントが検出できないとしても不思議ではない。こうした点を検討するため、今後岡山および杣木立の断層周辺に分布する段丘面の編年を進める予定である。

岡山では、2~2.5 mの上下変位を受けている段丘堆積物から年代測定に資する試料が得られなかったものの、それを覆う風成火山灰質層から約4.1~6万年前(町田・新井, 2003)、あるいは約8.2±1.9万年前(渡辺ほか, 2003)とされる焼石岳起源のテフラ(Yk-Y)が濃集する層準が認められた。この地形面の形成年代については、今後周辺の段丘面の編年を進めるなどして、慎重な検討が必要であるが、このテフラの対比が正しく、かつテフラ層準が二次堆積でないとする、段丘面の形成年代(Yk-Yよりも古い)とその変位量から、過去数万年前以降平均変位速度の上下成分は、0.1 m/千年未満と見積もられ、活動度はC級にランクされる。こうした低い断層活動度が断層変位地形の保存を弱め、活断層検出を困難なものにしている可能性がある。

今回の地震でメートルオーダーの地表変位が生じた荒砥沢ダム北方では、地震断層沿いに過去の活動を示唆する低崖地形が散点的ながら認められる(丸山ほか, 2009; 遠田ほか, 投稿中)。人力による限られた掘削深度のため2008年の地震に先行するイベントは検出されなかったものの、壁面に分布する地層の年代から、明瞭な地表変位を伴う断層活動は少なくとも約3,000年前まで遡ることが明らかになった。

3.2 地震断層が事前に活断層として認識できなかった理由

2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層沿いには、地震発生前には活断層が認定されていなかった。地震後、現地調査や空中写真・航空レーザ画像の詳細な判読により、地震断層出現位置の一部では過去の活動を示すと見られる断層変位地形が認められた。しかし、それらの分布は極めて散点的であり、マグニチュード7クラスの地震を引き起こす活断層として認定することは困難であったと評価されている(例えば, Toda *et al.*, 2008; 鈴木ほか, 2008a; 遠田ほか, 投稿中)。では、なぜ事前に明瞭な活断層として認定できなかったのだろうか。著者らは、今回のトレンチ掘削調査および周辺の地質踏査に鑑み、その理由を以下のように考える。

餅転地点では、真打川沿いに分布する幅狭い段丘面を横切って大きく湾曲した地震断層トレースが出現した。地震断層トレースの北東部の真打川左岸では段丘面上に累積変位の可能性を示唆する崖がわずかに認められる(丸山ほか, 2009)。しかしながら、地震断層はその南で真打川に沿うように大きく湾曲するため、崖を連続的に追跡することができない(第3図)。地質踏査およびトレンチ調査の結果、湾曲した地震断層は、褶曲変形により傾斜した新第三系堆積岩中の層理面を利用した層面すべり断層であることが確認された(第3図, 第6図)。すなわち、餅転地点では地下の震源断層が直接地震断層として地表まで連続しているとは限らない。地表で局在化したコサイスマミックな変形が特定の層理面を弱面として解消された可能性もある。言い換えれば、地下の震源断層による変位が地表で分散され、地表付近での既往の複雑な地質構造に規制されたと考えられることができる。この場合、湾曲する地表トレースなど複雑な形態も生じる。そのため、断層トレース検出が困難になるのではないだろうか。

岡山地点では、3.1で述べたように更なる検討が必要であるが、過去数万年前以降の平均変位速度の上下成分が0.1 m/千年未満と見積もられ、C級活動度の断層である可能性が高い。こうした低い活動度ゆえに、断層変位地形表現が弱く、活断層の認定が困難な原因となっている可能性が指摘できる。

荒砥沢ダム北方では、山地斜面を横切るメートルオーダーの明瞭な地震断層が確認された。地震断層の両端では大規模な崩壊が発生し、その周辺でも過去に崩壊が生じたことを示す地形が認められる。トレンチ調査の結果、2008年地震に先立つ約3,000年間に明瞭な地表変位を伴う断層活動は生じていないと判断された。こうした明瞭な地表変位を伴うイベントの発生頻度が数千年以上の間に1回と低頻度であることに加えて、多数の地すべり・崩壊地形が分布することが、活断層トレースの認定を困難にしているのではないだろうか。

以上のように、岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層は、1) 既存地質構造に規制され、湾曲、雁行を伴うなど、一部で複雑な地表トレスを呈すること、2) 活動度が低いこと、3) 植生が密で、地すべり・崩壊が多数発達する山地・丘陵内に分布することで特徴付けられ、そうした特徴が、活断層認定を困難にする要因になっていると考えられる。このような地形表現が不明瞭で、かつ活断層の証拠に乏しい断層を認定する上で最も期待されるのが、航空レーザ計測データを用いた詳細な地形解析であろう（例えば、中田ほか、2008；林ほか、2009；丸山ほか、2009）。今回の震源域で地震前後に計測された航空レーザ計測データから作成した細密 DEM 画像が、微小な変位を伴う地震断層や山地内の活断層の検出に威力を発揮することが既に報告されている（丸山ほか、2009）。今後、植生が密な山地・丘陵地域での微地形（特に断層変位地形）抽出に最適な計測仕様、フィルタリング手法、地形表現技法が開発・確立されることで、これまで見逃していた活断層の発見が期待される。さらに、断層幾何形状の詳細なデジタルマッピングが可能となり、地震ポテンシャル評価向上への貢献も期待される。

ところで、今回確認された地震断層は、活断層として認定されていないものの、その大部分の区間が第四系を切断する既知の地質断層（片山・梅沢、1958）に沿うように出現した（例えば、石山ほか、2008；遠田ほか、2009）。今回トレンチ調査を実施した岡山の比高 2~3 m 程度の撓曲崖は、地質断層沿いに生じている。こうしたことから、第四系を変位させるものの従来活断層としての証拠をもたない（あるいは乏しい）とされてきた断層の中には、大地震を引き起こすポテンシャルをもつ活断層も含まれているかもしれない。ただし、こうした第四系を切断する地質断層は多数存在するため、全てについて調査を行うことは現実的に無理がある。最近発生した内陸大地震は、既知の活断層の延長部（今回の場合は北上低地西縁断層帯の南延長）にあたる場合や周辺に活断層が分布する場合が多いので、こうした地質環境にある地域から優先的に検討を進めていく方策もありえる。

3.3 岩手・宮城内陸地震が古地震調査にもたらした課題

岡山トレンチでは、先行するイベントの地表変位量が、2008 年の地表変位より明らかに大きいことが示された（第 10, 11 図）。これは、断層沿いの同一地点における地表付近の変位量がいつも同じとは限らないことを意味している。こうした活断層沿いの同一地点で地震イベント毎のずれ量に顕著な違いが見られたケースは 2004 年新潟県中越地震の地震断層でも報告されている（Maruyama *et al.*, 2007）。

一方で、岡山地点では、今回の地震に伴う地表での小さなずれに対応する地層の変形をトレンチ壁面内で検出することは困難であった。岡山地点での地表変位が爪木立や餅転など周辺に比べてやや小さいことによる影響もあるが、マグニチュード 7 クラスの内陸型大地震であっても、地震断層沿いでその痕跡が地形や地層に記録されない場合があることを示している。

このような事実から、限定されたトレンチ掘削調査では古地震イベントの地表変形パターンや地震規模を適切に評価できないこと、古地震イベント全てを検出できないこと、などがあらためて認識された。将来の地震像を評価にする上で、こうした限界を打破する評価方法の開発に加え、変位量や断層破壊長の多様性をもたらす原因の究明が急がれる。

4. まとめ

2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層の過去の活動像を解明することを目的として、4 地点 6 箇所トレンチ掘削調査を実施した。その結果は以下のようにまとめられる。

1) 2008 年地震に先行する古地震イベントが確実に認定されたのは岡山トレンチのみであり、それ以外のトレンチでは明確な古地震イベントを認定することはできなかった。

2) 岡山トレンチで認定された先行イベントの上下変位は 2~2.5 m 程度と、2008 年地震に伴う同地点周辺の上下変位 (≤ 10 cm) よりも明らかに大きい。

3) 岡山トレンチを掘削した段丘面の形成年代の上限値とその変位量から、過去数万年間の平均変位速度の上下成分は 0.1 m / 千年未満と見積もられる。こうした低活動度が、本断層沿いの断層変位地形を不明瞭にする要因になっていると考えられる。

4) 著しく湾曲した地震断層トレスで特徴付けられる餅転地点周辺では、地震断層は褶曲変形した新第三系堆積岩の層理面を断層面とする層面すべり断層である。複雑な地表断層形状が既存地質構造に規制されている。

5) 爪木立トレンチでは、基盤岩（5 層）上面の落差と 2008 年地震に伴う地表変位に大きな違いがないことから、基盤岩を不整合に覆う砂礫層（4d 層）堆積以降今回の地震イベントしか生じていないとみられる。しかし、砂礫層中で変形程度に違いが認められることから、先行する地震イベントの可能性を完全に否定できない。今後、周辺で追加トレンチ調査を行い、本地域の活動履歴の詳細を明らかにすることが必要である。

6) 今回の地震に伴う最大級の地表変位が確認された荒砥沢ダム北方では、地震断層は少なくとも過去約 3,000 年間活動していない。

謝辞 本調査は、独立行政法人原子力安全基盤機構からの受託研究「変動地形に基づく伏在断層評価手法の高度化」の一部として実施したものです。本調査に際し、調査用地の地権者の皆様には調査の趣旨をご理解いただき、地震被害を受けた土地での調査を許可していただきました。また、東北森林管理局宮城北部森林管理署、岩手県県南広域振興局一関総合支所土木部、岩手県奥州地区合同庁舎県南広域振興局土木部、宮城県総務部危機対策課、宮城県北部土木事務所栗原地域事務所、宮城県北部地方振興事務所林業振興部、一関市消防本部防災課、同市農林部農地林務課、同市教育委員会、奥州市衣川総合支所、栗原市総務部危機管理室、同市教育委員会をはじめとする地元自治体機関には、調査に際して多大なご協力をいただきました。活断層・地震研究センターの岡村行信氏、杉山雄一氏、吉岡敏和氏、林舟氏、国土地理院の小荒井衛氏には現地でも議論していただきました。以上の方々に心からお礼申し上げます。

文 献

- 青木かおり・町田 洋 (2006) 日本に分布する第四紀後期広域テフラの主元素組成—K₂O-TiO₂ 図によるテフラの識別. 地質調査研究報告, 57, 239-258.
- Bronk Ramsey, C. (1995) Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program. Radiocarbon, 37, 425-430.
- Bronk Ramsey, C. (2001) Development of the radiocarbon calibration program OxCal. Radiocarbon, 43, 355-363.
- Carver, G. A. and McCalpin, J. P. (1996) Paleoseismology of Compressional Tectonic Environments. In: McCalpin, J. P. ed., Paleoseismology, Academic Press, CA, USA, 183-270.
- 土井宣夫・齋藤徳美・野田 賢 (2009) 2008年岩手・宮城内陸地震の地震断層—震源域東側の複数の地震断層列と西側栗駒山の断層群—. 東北地域災害科学研究, 45, 35-40.
- 古澤 明 (1995) 火山ガラスの屈折率測定および形態分類とその統計的な解析に基づくテフラの識別. 地質学雑誌, 101, 123-133.
- 古澤 明 (2008) ガラス包有物の主成分分析によるテフラ識別の試み—大山テフラDKP, DSP, DNPの識別を例として—. 地質学雑誌, 114, 618-631.
- 石山達也・今泉敏文・越谷 信・杉戸信彦・堤 浩之・廣内大助・丸島直史 (2008) 2008年岩手宮城内陸地震で一関市柵木立に出現した地表地震断層. 活断層研究, 29, iv.
- 神谷 泉・小荒井 衛・関口辰夫・岩橋純子・中埜貴元 (2008) 2008年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダム北方の水平変位. 写真測量とリモートセンシング, 47, 38-43.
- 神谷 泉, 小荒井 衛, 関口辰夫, 岩橋純子, 中埜貴元, 佐藤 浩 (2009) 岩手・宮城内陸地震における地表変位の写真計測. 日本写真測量学会 学術講演会 予稿, <http://www.gsi.go.jp/common/000047423.pdf>, 2009年6月30日参照.
- 片山信夫・梅沢邦臣 (1958) 7万5千分の1地質図幅「鬼首」および説明書. 地質調査所.
- 活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層—分布図と資料—. 東京大学出版会, 437p, 付図4葉.
- 岸本清行 (1999) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, 353, CD1 枚.
- 国土地理院 (2001) 数値地図 50 m メッシュ (標高) 日本—II. CD-ROM 版.
- 林 舟・金田平太郎・向山 栄・浅田典親・千葉達朗 (2009) 日本の山地における植生下の微小活断層地形の検出—根尾谷断層および駄口断層における高密度航空レーザ測量. 日本地球惑星科学連合 2009年大会予稿集, S147-P002.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編 火山灰アトラス [日本列島とその周辺]. 東京大学出版会, 336p.
- Maruyama, T., Iemura, K., Azuma, T., Yoshioka, T., Sato, M. and Miyawaki, R. (2007) Paleoseismological evidence for non-characteristic behavior of surface rupture associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, central Japan. Tectonophysics 429, 45-60, doi:10.1016/j.tecto.2006.09.008
- 丸山 正・遠田晋次・吉見雅行・小俣雅志 (2009) 2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層沿いの詳細地形—地震断層・変動地形調査における航空レーザ計測の有効性—. 活断層研究, 30, 1-12.
- 向山 栄・馬場俊行・浅田典親 (2009) 詳細DEMを用いた地震前後の地形比較から推定した平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震時に荒砥沢ダム北方に生じた断層の成因. 日本地球惑星科学連合 2009年大会予稿集, J232-004.
- 中田 高・今泉俊文 (2002) 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 60p, DVD2 枚, 付図1葉.
- 中田 高・隈元 崇・奥村晃史・後藤秀昭・熊原康博・野原 壯・里 優・岩永昇二 (2008) 空中レーザ計測による活断層変位地形の把握と変位量復元の試み. 活断層研究, 29, 1-13.
- Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Bronk Ramsey, C., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver,

- M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C. E. (2004) IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1029-1058.
- 鈴木康弘・渡辺満久・中田 高・小岩直人・杉戸信彦・熊原康博・廣内大助・澤 祥・中村優太・丸島直史・島崎邦彦 (2008a) 2008年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義——関市巖美町付近の調査速報——。活断層研究, 29, 25-34.
- 鈴木康弘・渡辺満久・中田 高・小岩直人・杉戸信彦・熊原康博・廣内大助・澤 祥・中村優太・丸島直史・島崎邦彦 (2008b) 2008年岩手・宮城内陸地震に関連する活断層。Programme and Abstracts, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and The 2008 Fall Meeting of Seismological Society of Japan, A11-02.
- Toda, S., Maruyama, T., Yoshimi, M., Awata, Y., Kaneda, H., Yoshioka, T. and Ando, R. (2008) The enigmatic 2008 Mw 6.9 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake: A large shallow thrust event with little surface displacement and scant evidence for paleoseismic slip. *Eos Trans. AGU*, 89 (53), Fall Meet. Suppl., Abstract T51C-04.
- 遠田晋次・丸山 正・吉見雅行・栗田泰夫・吉岡敏和・安藤亮輔・金田平太郎, 2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層—震源過程および活断層評価への示唆—。地震, 投稿中.
- 遠田晋次・丸山 正・吉見雅行・小俣雅志・郡谷順英・山崎 誠 (2009) 2008年岩手・宮城内陸地震の地震断層と地質境界断層との関係—岩手県—関市巖美町産女川沿いの断層露頭—。活断層研究, 30, 47-53.
- 堤 浩之・杉戸信彦・石山達也・今泉俊文・丸島直史・越谷 信・廣内大助 (2008) 2008年岩手・宮城内陸地震の地表地震断層および既存の断層変位地形との関係。日本活断層学会2008年度秋季学術大会プログラム, P-03.
- 上田圭一 (1993) 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討—地震断層・活断層の現地調査—, 電力中央研究所報告, U93007, 50p.
- 渡辺満久・檀原 徹・藤原 治 (2003) 北上低地南部における第四紀テフラのFT年代と河成段丘面の編年。日本地理学会春季学術大会予稿集, 111.
- 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の荒砥沢ダム北方地震断層トレース—。活断層研究, 29, i-ii.

(受付: 2009年8月3日, 受理: 2009年9月24日)

2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層のトレンチ掘削調査

第1表. ^{14}C 年代測定結果.
Table 1. Results of ^{14}C dating.

Lab.No. (IAAA-*)	Sample No.	Trench wall	Material	Pre- treat- ment	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ corrected Libby Age (yBP)	^{14}C age** pMC (%)	$\delta^{13}\text{C}$ uncorrected Age (yBP)	^{14}C age pMC (%)	^{14}C age used for calibration (yBP)	Calendric age range (1 σ)***	Calendric age range (2 σ)***
Mochikorobashi A trench												
81858	MCA-E02	E	Organic silt	HCl	-26.71 ± 0.71	1,080 ± 30	87.42 ± 0.35	1,110 ± 30	87.12 ± 0.33	1,079 ± 32	899AD - 919AD (18.6%) 950AD - 997AD (44.3%) 1005AD - 1012AD (5.2%) 1697AD - 1726AD (21.1%)	894AD - 1018AD (95.4%)
81859	MCA-N01	N	Wood	AAA	-27.61 ± 0.43	90 ± 30	98.9 ± 0.39	130 ± 30	98.37 ± 0.38	89 ± 31	1814AD - 1836AD (15.3%) 1847AD - 1851AD (2.4%) 1877AD - 1917AD (29.4%)	1683AD - 1735AD (26.7%) 1806AD - 1930AD (68.7%)
Mochikorobashi B trench												
81860	MCB-E01	E	Wood	AAA	-26.25 ± 0.59	130 ± 30	98.39 ± 0.37	150 ± 30	98.13 ± 0.35	130 ± 30	1683AD - 1706AD (12.1%) 1720AD - 1737AD (8.6%) 1758AD - 1761AD (1.1%) 1804AD - 1820AD (8.0%) 1833AD - 1883AD (27.0%) 1914AD - 1936AD (11.4%)	1675AD - 1778AD (37.9%) 1799AD - 1894AD (42.5%) 1905AD - 1942AD (15.0%)
81861	MCB-E02	E	Organic silt	HCl	-20.57 ± 0.44	550 ± 30	93.39 ± 0.34	480 ± 30	94.24 ± 0.33	549 ± 29	1326AD - 1343AD (22.7%) 1394AD - 1421AD (45.5%)	1314AD - 1357AD (38.3%) 1387AD - 1433AD (57.1%)
81862	MCB-E03	E	Organic silt	HCl	-22.12 ± 0.4	580 ± 30	93.02 ± 0.34	530 ± 30	93.57 ± 0.34	580 ± 29	1318AD - 1353AD (46.0%) 1390AD - 1407AD (22.2%)	1301AD - 1368AD (63.6%) 1382AD - 1418AD (31.8%)
81863	MCB-W01	W	Organic silt	HCl	-22.39 ± 0.49	620 ± 30	92.54 ± 0.35	580 ± 30	93.03 ± 0.34	623 ± 30	1298AD - 1321AD (27.4%) 1349AD - 1371AD (26.2%) 1379AD - 1392AD (14.6%)	1290AD - 1400AD (95.4%)
Hanokidachi trench												
81864	HKD-N01	N	Organic silt	HCl	-18.43 ± 0.51	470 ± 30	94.37 ± 0.35	360 ± 30	95.64 ± 0.34	465 ± 29	1426AD - 1447AD (68.2%) 789BC - 750BC (26.0%)	1411AD - 1463AD (95.4%) 796BC - 730BC (32.8%)
81865	HKD-N02	N	Organic silt	HCl	-29.33 ± 0.52	2,530 ± 30	72.97 ± 0.27	2,600 ± 30	72.32 ± 0.26	2,531 ± 30	687BC - 666BC (14.7%) 642BC - 592BC (25.4%) 576BC - 571BC (2.0%)	693BC - 659BC (17.8%) 652BC - 543BC (44.8%)
81866	HKD-N03	N	Organic soil	HCl	-16.93 ± 0.63	2,760 ± 30	70.91 ± 0.28	2,630 ± 30	72.09 ± 0.27	2,761 ± 31	969BC - 963BC (3.7%) 931BC - 888BC (35.7%) 883BC - 843BC (28.8%)	997BC - 986BC (2.1%) 980BC - 831BC (93.3%)
81867	HKD-S01	S	Wood	AAA	-29.3 ± 0.4	110 ± 30	98.64 ± 0.34	180 ± 30	97.77 ± 0.33	110 ± 27	1693AD - 1727AD (17.5%) 1813AD - 1891AD (45.2%) 1909AD - 1919AD (5.5%)	1682AD - 1737AD (27.5%) 1758AD - 1761AD (0.5%) 1803AD - 1937AD (67.5%)
81868	HKD-S02	S	Wood	AaA	-33.31 ± 0.6	3,740 ± 30	62.78 ± 0.26	3,880 ± 30	61.72 ± 0.24	3,739 ± 32	2276BC - 2255BC (4.0%) 2227BC - 2225BC (0.3%) 2209BC - 2034BC (91.1%)	2276BC - 2255BC (4.0%) 2227BC - 2225BC (0.3%) 2209BC - 2034BC (91.1%)
81869	HKD-S03	S	Wood	AAA	-28.29 ± 0.74	3,080 ± 30	68.14 ± 0.28	3,140 ± 30	67.68 ± 0.26	3,081 ± 33	1408BC - 1370BC (33.1%) 1357BC - 1315BC (35.1%)	1425BC - 1267BC (95.4%)
Aratozawa North trench (E trench)												
81870	ARE-E01	E	Organic silt	HCl	-24.37 ± 0.5	1,560 ± 30	82.32 ± 0.31	1,550 ± 30	82.43 ± 0.3	1,562 ± 30	435AD - 492AD (47.5%) 507AD - 520AD (9.5%) 527AD - 541AD (11.2%)	423AD - 563AD (95.4%)
81871	ARE-E02	E	Organic silt	HCl	-25.32 ± 0.53	Modern	101 ± 0.34	Modern	101 ± 0.32	Modern		
82430	ARE-W01	W	Organic silt	HCl	-24.59 ± 0.86	2,080 ± 30	77.2 ± 0.32	2,070 ± 30	77.27 ± 0.29	2,078 ± 33	159BC - 134BC (17.1%) 117BC - 49BC (51.1%)	193BC - 36BC (91.2%) 31BC - 19BC (2.0%) 13BC - 1BC (2.2%)
Aratozawa North trench (W trench)												
81872	ARW-N01	N	Organic silt	HCl	-21.6 ± 0.6	5,220 ± 40	52.22 ± 0.25	5,160 ± 40	52.58 ± 0.24	5,219 ± 38	4045BC - 3975BC (68.2%)	4226BC - 4204BC (4.3%) 4166BC - 4129BC (7.7%) 4113BC - 4101BC (1.3%) 4074BC - 3959BC (82.1%)
81873	ARW-N03	N	Organic silt	HCl	-20.87 ± 0.46	460 ± 30	94.49 ± 0.33	390 ± 30	95.29 ± 0.32	455 ± 28	1428AD - 1450AD (68.2%)	1415AD - 1469AD (95.4%)
81874	ARW-S01	S	Organic silt	HCl	-22.04 ± 0.36	2,820 ± 30	70.37 ± 0.26	2,770 ± 30	70.8 ± 0.25	2,822 ± 29	1009BC - 928BC (68.2%)	1055BC - 900BC (95.4%)
81875	ARW-S02	S	Organic silt	HCl	-21.16 ± 0.69	2,420 ± 30	73.98 ± 0.29	2,360 ± 30	74.57 ± 0.27	2,420 ± 31	538BC - 408BC (68.2%)	749BC - 687BC (15.9%) 666BC - 644BC (4.1%) 591BC - 578BC (1.2%) 563BC - 401BC (74.2%)
81876	ARW-S03	S	Organic silt	HCl	-24.4 ± 0.62	2,960 ± 30	69.15 ± 0.28	2,950 ± 30	69.24 ± 0.26	2,963 ± 32	1258BC - 1232BC (15.5%) 1219BC - 1129BC (52.7%)	1299BC - 1056BC (95.4%)
81877	ARW-S04	S	Organic silt	HCl	-21.88 ± 0.31	720 ± 30	91.48 ± 0.31	660 ± 30	92.06 ± 0.31	715 ± 27	1269AD - 1290AD (68.2%)	1256AD - 1303AD (89.5%) 1366AD - 1384AD (5.9%)
81878	ARW-S05	S	Organic silt	HCl	-21.25 ± 0.5	1,520 ± 30	82.71 ± 0.32	1,460 ± 30	83.35 ± 0.31	1,524 ± 30	465AD - 482AD (9.9%) 533AD - 596AD (58.3%)	432AD - 497AD (28.1%) 502AD - 605AD (67.3%)

*測定方法はAMS法. 測定機関は加速器分析研究所. **半減期はLibbyの5568年を使用. ***Bronk Ramsey (1995, 2001) のプログラム OxCal 4.1に, Reimer *et al.* (2004) のatmospheric curveデータセットを使用.

* All samples were analyzed by AMS method at Insitute of Accelerator Analysis Ltd., Japan. ** ^{14}C ages were calculated using Libby half-time of 5568 years. *** The calibration was conducted by OxCal 4.1program (Bronk Ramsey, 1995, 2001) with data set of IntCal04 atmospheric curve (Reimer *et al.*, 2004).

第2表. 岡山トレンチの層序記載.

Table 2. Description of stratigraphic units exposed on the Okayama trench.

Unit	Description	Sedimentary environment
0	Spoil (disturbed by excavation).	Man-made
1	Black soil (so-called "kuroboku"). This unit is distributed over the entire walls. The thickness varies from 10 cm to ≥ 60 cm. The boundary to the lower unit (unit 2) is usually indistinct.	Surface soil
2	Yellowish brown to pale brown loamy silt and sand. This unit is distributed over the entire walls, but thickens to the east from grid Nos. 7 and 8 in both the north and south walls. No distinct sedimentary structures developed. Lower part contains subangular andesitic and dacitic volcanic rocks granule to pebble gravel. Upper part contains glass shards possibly correlated with the Yk-Y tephra.	Eolian tephric loess
3a	Dark grey gravel (partly cross and parallel laminae developed). The unit is distributed over wide area on the south wall, whereas restricted like the lenses on the north wall. Thickness varies from 30cm to 100 cm. Gravel clast: subangular to subrounded andesitic and dacitic volcanic rocks with weathered granitic rocks. Matrix: fine to coarse sand.	Fluvial terrace deposit
3b	Yellowish grey massive silt with gravel. The unit is exposed continuously on the north wall. Thickness: 10 cm-100 cm. Gravel clast: granule to pebble of mainly weathered andesitic and dacitic volcanic rocks.	Fluvial terrace deposit
3c	Reddish brown massive silt with abundant gravel. The unit is distributed continuously on the south wall and eastern part of the north wall, whereas discontinuously with the shape of lenses in the western part of the north wall and west wall. Thickness varies from 10 cm to 90 cm. Gravel clast: subangular to subrounded andesite, dacitic and tuff.	Fluvial terrace deposit
4a	Pale grey massive silt with spotted sandy gravel. The unit is exposed over the entire walls with thickness up to 100 cm. Upper part: silt with gravel. Lower part: weakly laminated sandy silt with fine to coarse sand lenses.	Fluvial terrace deposit
4b	Grayish brown gravel containing boulder with ϕ 100 cm (partly cross laminated fine sand to granule lenses intercalated). Apparent thickness at the western wall is ≥ 3 m and thins to the east on the north and south walls. Gravel clast: granule to boulder, subangular to subrounded, andesitic and dacitic volcanic rocks and tuff. Matrix: fine to medium sand (partly silty sand).	Fluvial terrace deposit
4c	Pale greyish brown to pale brown sandy silt with weakly laminated coarse sand to granule lenses. This unit is limited in the lowermost part of the west wall and westernmost part of both the north and south walls. The unit is interpreted as contemporaneous heterotopic facies with unit 4d. A gently dipping thrust with apparent slip of 10 cm occurs at the north wall.	Fluvial terrace deposit
4d	Dark greyish brown gravel (partly parallel to cross laminae developed). The unit is exposed only the eastern side of both the north and south walls. Gravel clast: granule to boulder, subangular to subrounded. Matrix: medium sand to granule. Black colored portion due to precipitation of the manganese oxide is widely distributed.	Fluvial terrace deposit

第3表. 岡山トレンチで採取されたテフラ層準中の火山ガラスの主成分分析結果.

a) 試料番号 1.6. b) 試料番号 1.8. c) 試料番号 2.1. 分析試料位置は第11図に示す.

Table 3. Major element composition of volcanic glass shards taken from tephric-loess layers exposed on the Okayama trench walls.

a) Sample No. 1.6. b) Sample No. 1.8. c) Sample No. 2.1. Sampling horizons are shown in Fig. 11.

a)

Sample No. 1.6

Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Average	Std.dv
SiO ₂	74.61	72.70	72.48	71.48	74.30	75.70	75.58	75.40	76.97	75.14	73.89	75.50	76.32	75.10	74.85	74.67	1.49
TiO ₂	0.36	0.47	0.55	0.54	0.24	0.25	0.26	0.25	0.30	0.32	0.38	0.45	0.17	0.29	0.35	0.35	0.11
Al ₂ O ₃	11.30	12.64	12.73	12.58	11.64	10.90	11.45	10.26	11.31	11.06	11.49	11.19	11.19	11.11	10.89	11.45	0.70
FeO	1.61	2.64	2.53	2.25	1.34	1.50	1.23	2.31	1.50	1.39	1.86	1.97	1.58	1.73	1.65	1.81	0.44
MnO	0.07	0.19	0.17	0.10	0.07	0.00	0.04	0.00	0.14	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.05	0.06	0.06
MgO	0.25	0.64	0.55	0.61	0.14	0.17	0.13	0.43	0.15	0.19	0.32	0.22	0.15	0.16	0.23	0.29	0.18
CaO	1.34	2.64	2.62	2.67	1.24	1.66	1.34	1.89	1.36	1.20	1.76	1.77	1.58	1.48	1.66	1.75	0.51
Na ₂ O	3.38	3.56	3.73	3.74	3.54	3.03	3.07	3.26	3.48	3.00	3.32	3.23	2.38	3.58	3.05	3.29	0.35
K ₂ O	2.85	1.17	1.25	1.27	2.91	2.69	3.03	2.10	1.74	2.94	1.29	2.66	2.55	1.69	2.63	2.18	0.71
Total	95.77	96.65	96.61	95.24	95.42	95.90	96.13	95.90	96.95	95.24	94.40	97.01	95.92	95.14	95.36	95.94	

Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Average	Std.dv
SiO ₂	77.91	75.22	75.02	75.05	77.87	78.94	78.62	78.62	79.39	78.90	78.27	77.83	79.57	78.94	78.49	77.91	1.54
TiO ₂	0.38	0.49	0.57	0.57	0.25	0.26	0.27	0.26	0.31	0.34	0.40	0.46	0.18	0.30	0.37	0.36	0.12
Al ₂ O ₃	11.80	13.08	13.18	13.21	12.20	11.37	11.91	10.70	11.67	11.61	12.17	11.53	11.67	11.68	11.42	11.95	0.72
FeO	1.68	2.73	2.62	2.36	1.40	1.56	1.28	2.41	1.55	1.46	1.97	2.03	1.65	1.82	1.73	1.88	0.46
MnO	0.07	0.20	0.18	0.10	0.07	0.00	0.04	0.00	0.14	0.00	0.10	0.02	0.00	0.00	0.05	0.07	0.07
MgO	0.26	0.66	0.57	0.64	0.15	0.18	0.14	0.45	0.15	0.20	0.34	0.23	0.16	0.17	0.24	0.30	0.19
CaO	1.40	2.73	2.71	2.80	1.30	1.73	1.39	1.97	1.40	1.26	1.86	1.82	1.65	1.56	1.74	1.82	0.52
Na ₂ O	3.53	3.68	3.86	3.93	3.71	3.16	3.19	3.40	3.59	3.15	3.52	3.33	2.48	3.76	3.20	3.43	0.37
K ₂ O	2.98	1.21	1.29	1.33	3.05	2.81	3.15	2.19	1.79	3.09	1.37	2.74	2.66	1.78	2.76	2.28	0.74
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

b)

Sample No. 1.8

Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average	Std.dv
SiO ₂	75.81	76.42	75.58	74.74	75.17	75.50	74.50	74.94	74.90	75.30	74.87	74.04	75.15	0.63
TiO ₂	0.22	0.42	0.30	0.17	0.16	0.37	0.32	0.34	0.26	0.43	0.33	0.36	0.31	0.09
Al ₂ O ₃	11.37	11.47	11.38	11.73	11.55	11.52	11.35	11.04	11.32	11.61	11.55	12.12	11.50	0.26
FeO	1.41	1.28	1.36	1.22	1.37	1.60	1.67	1.97	1.56	1.43	1.34	1.67	1.49	0.21
MnO	0.05	0.12	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.04	0.09	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04
MgO	0.21	0.18	0.29	0.12	0.09	0.29	0.24	0.35	0.23	0.19	0.20	0.42	0.23	0.09
CaO	1.19	1.23	1.42	1.07	1.09	1.37	1.33	1.91	1.35	1.44	1.40	1.97	1.40	0.28
Na ₂ O	3.50	3.52	3.53	3.33	3.22	3.44	3.45	3.41	3.46	3.54	3.41	3.65	3.46	0.11
K ₂ O	2.73	2.80	2.70	3.33	3.24	2.75	2.85	2.05	2.76	2.76	2.79	1.44	2.68	0.50
Total	96.49	97.44	96.56	95.77	95.89	96.84	95.75	96.05	95.93	96.74	95.93	95.67	96.26	

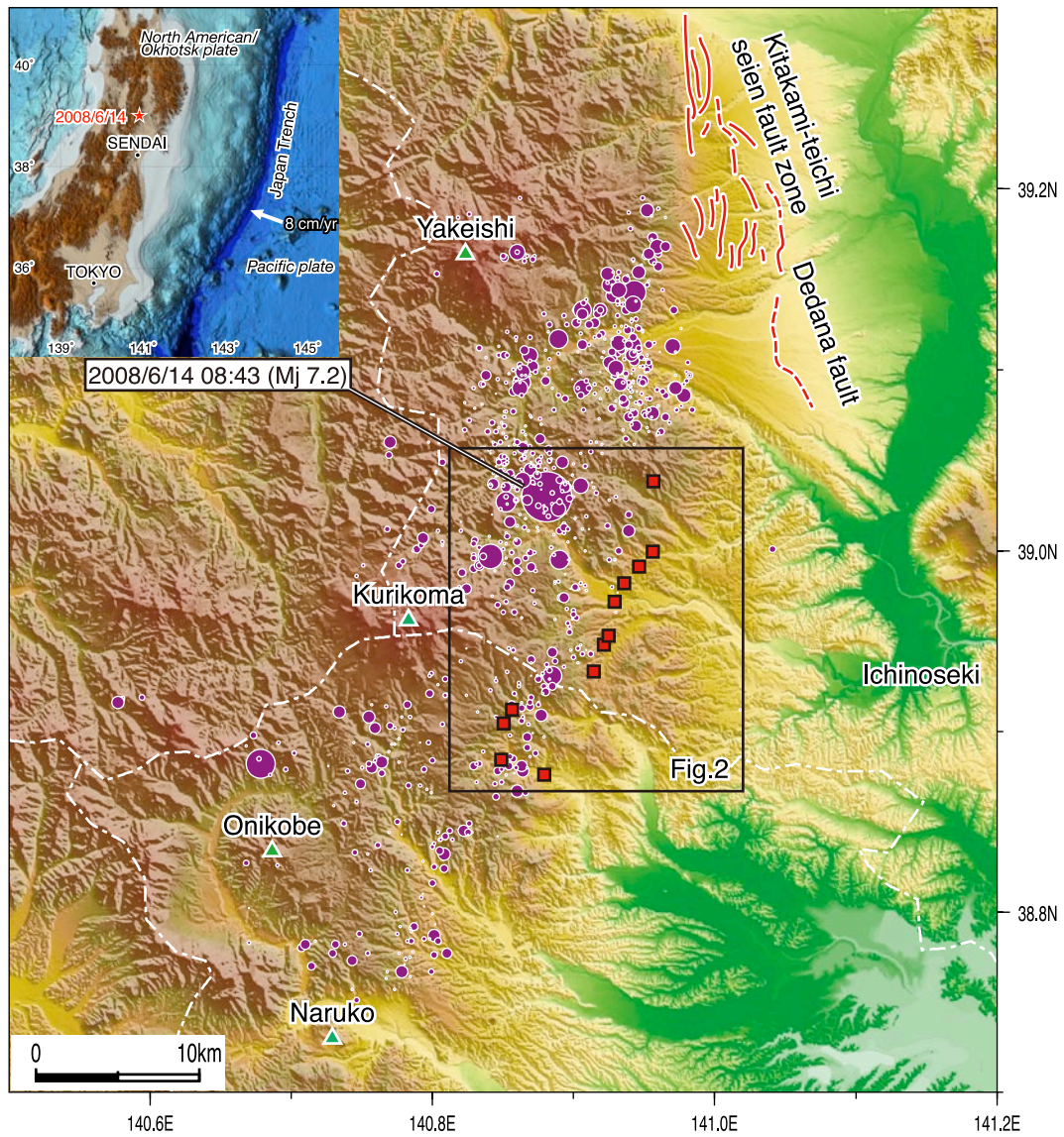
Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average	Std.dv
SiO ₂	78.57	78.43	78.27	78.04	78.39	77.96	77.81	78.02	78.08	77.84	78.05	77.39	78.07	0.32
TiO ₂	0.23	0.43	0.31	0.18	0.17	0.38	0.33	0.35	0.27	0.44	0.34	0.38	0.32	0.09
Al ₂ O ₃	11.78	11.77	11.79	12.25	12.05	11.90	11.85	11.49	11.80	12.00	12.04	12.67	11.95	0.29
FeO	1.46	1.31	1.41	1.27	1.43	1.65	1.74	2.05	1.63	1.48	1.40	1.75	1.55	0.22
MnO	0.05	0.12	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.04	0.09	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04
MgO	0.22	0.18	0.30	0.13	0.09	0.30	0.25	0.36	0.24	0.20	0.21	0.44	0.24	0.10
CaO	1.23	1.26	1.47	1.12	1.14	1.41	1.39	1.99	1.41	1.49	1.46	2.06	1.45	0.30
Na ₂ O	3.63	3.61	3.66	3.48	3.36	3.55	3.60	3.55	3.61	3.66	3.55	3.82	3.59	0.11
K ₂ O	2.83	2.87	2.80	3.48	3.38	2.84	2.98	2.13	2.88	2.85	2.91	1.51	2.79	0.52
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

c)

Sample No. 2.1

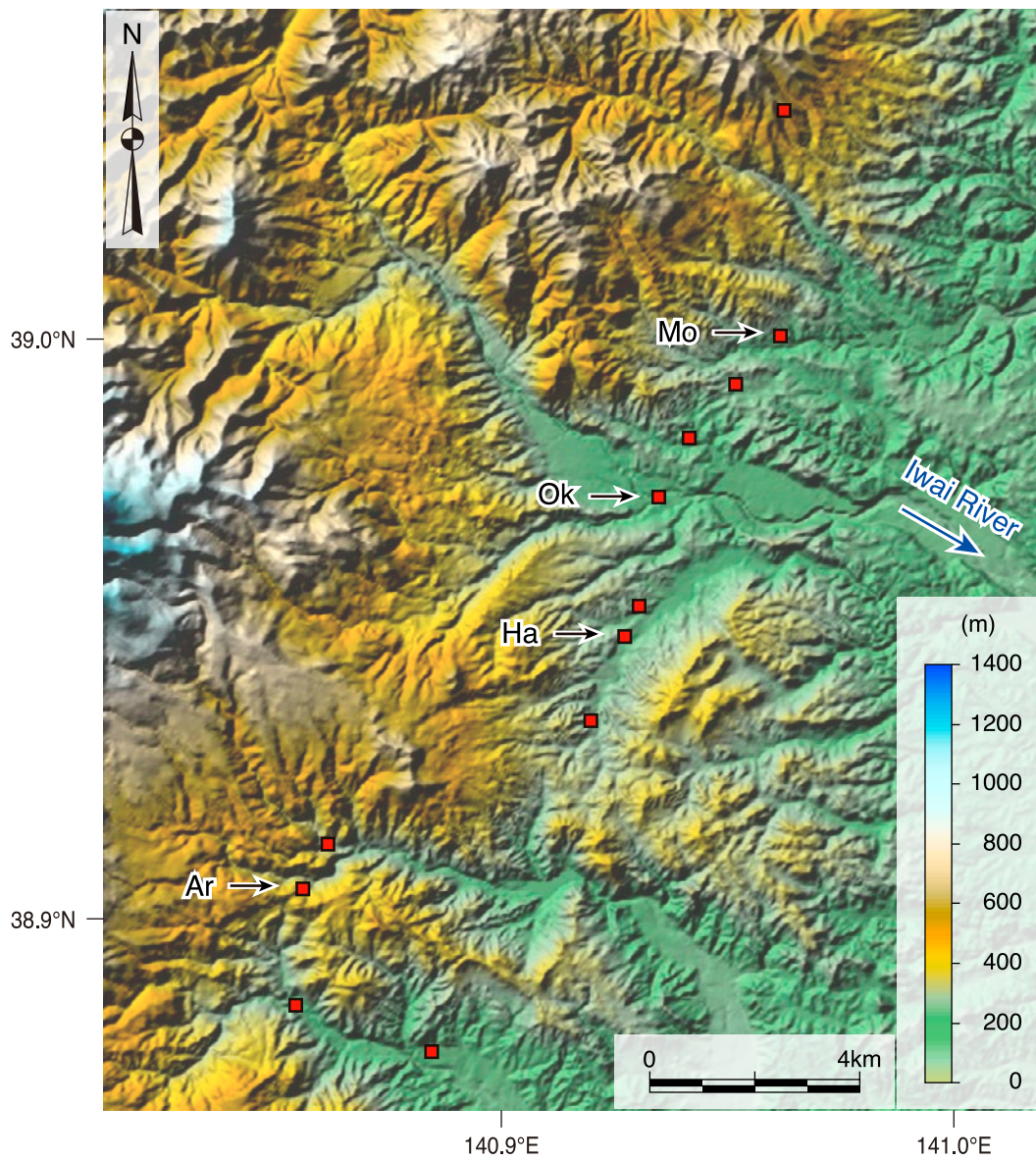
Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Average	Std.dv
SiO ₂	73.71	75.27	74.53	74.34	74.99	75.82	75.49	74.86	74.14	74.42	74.76	74.91	73.50	73.54	76.48	74.72	0.84
TiO ₂	0.25	0.21	0.38	0.24	0.19	0.32	0.27	0.12	0.29	0.28	0.32	0.05	0.21	0.25	0.30	0.25	0.08
Al ₂ O ₃	11.21	11.46	11.22	11.32	11.43	11.41	11.71	11.00	11.37	11.42	11.26	11.52	11.50	11.14	11.37	11.36	0.17
FeO	1.52	1.23	1.72	1.36	1.46	1.32	1.63	1.11	1.35	1.35	1.37	2.11	1.80	2.01	1.77	1.54	0.29
MnO	0.00	0.06	0.08	0.11	0.00	0.00	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.13	0.07	0.01	0.07	0.05	0.05
MgO	0.26	0.16	0.25	0.14	0.14	0.29	0.26	0.22	0.22	0.21	0.22	0.05	0.09	0.03	0.21	0.18	0.08
CaO	1.42	1.08	1.65	1.34	1.30	1.37	1.37	1.19	1.32	1.39	1.18	1.27	1.46	1.27	1.24	1.32	0.13
Na ₂ O	3.35	3.25	3.19	2.94	2.97	3.21	3.42	2.99	3.36	3.28	3.43	3.75	2.54	3.28	3.35	3.22	0.28
K ₂ O	2.66	2.67	2.54	3.18	3.16	2.76	2.69	3.08	2.84	2.89	2.74	2.63	3.34	2.84	1.76	2.79	0.37
Total	94.38	95.39	95.56	94.97	95.64	96.50	96.96	94.68	94.89	95.24	95.28	96.42	94.51	94.37	96.55	95.49	

Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Average	Std.dv
SiO ₂	78.10	78.91	77.99	78.28	78.41	78.57	77.86	79.07	78.13	78.14	78.46	77.69	77.77	77.93	79.21	78.30	0.47
TiO ₂	0.26	0.22	0.40	0.25	0.20	0.33	0.28	0.13	0.31	0.29	0.34	0.05	0.22	0.26	0.31	0.26	0.09
Al ₂ O ₃	11.88	12.01	11.74	11.92	11.95	11.82	12.08	11.62	11.98	11.99	11.82	11.95	12.17	11.80	11.78	11.90	0.14
FeO	1.61	1.29	1.80	1.43	1.53	1.37	1.68	1.17	1.42	1.42	1.44	2.19	1.90	2.13	1.83	1.61	0.30
MnO	0.00	0.06	0.08	0.12	0.00	0.00	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.13	0.07	0.01	0.07	0.05	0.05
MgO	0.28	0.17	0.26	0.15	0.15	0.30	0.27	0.23	0.23	0.22	0.23	0.05	0.10	0.03	0.22	0.19	0.08
CaO	1.50	1.13	1.73	1.41	1.36	1.42	1.41	1.26	1.39	1.46	1.24	1.32	1.54	1.35	1.28	1.39	0.14
Na ₂ O	3.55	3.41	3.34	3.10	3.11	3.33	3.53	3.16	3.54	3.44	3.60	3.89	2.69	3.48	3.47	3.37	0.28
K ₂ O	2.82	2.80	2.66	3.35	3.30	2.86	2.77	3.25	2.99	3.03	2.88	2.74	3.53	3.01	1.82	2.92	0.40
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	



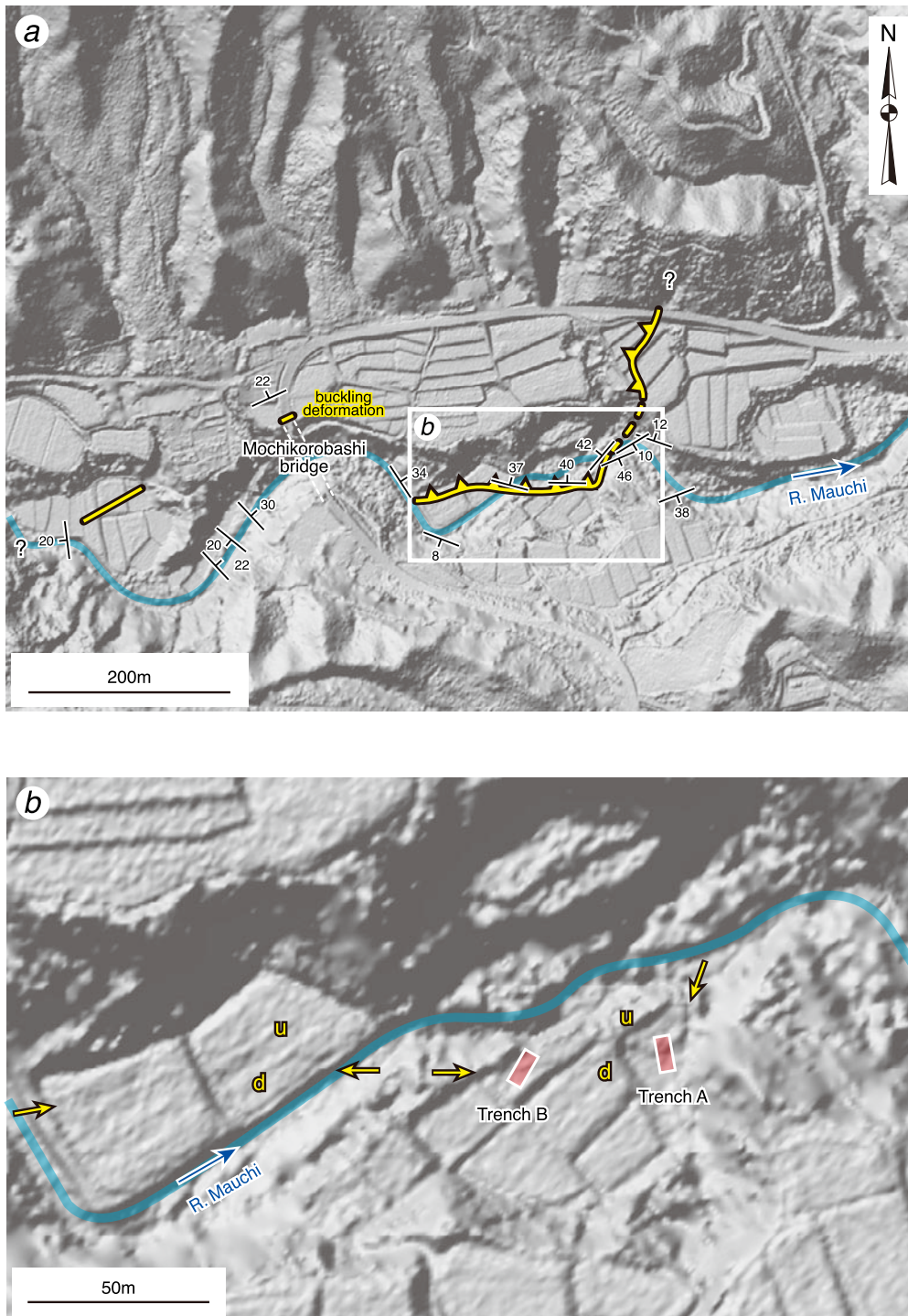
第1図. 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域と地震断層. 本震・余震の震央位置は防災科学技術研究所 Hi-net で公開されている気象庁一元化処理震源要素 (期間: 2008年6月14日 08:43~2008年6月18日 23:59) を使用. 左上: 調査地域概要. 基図は岸本 (1999) を使用.

Fig. 1. Map showing the epicentral area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake and the surface rupture. Epicentral locations of the mainshock and five-day aftershocks are from Japan Meteorological Agency. Inset map showing tectonic setting of the study area. Base map is from Kishimoto (1999).



第2図. 2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層出現位置(赤□)とトレンチ調査地点(→). Mo:餅転, Ok:岡山, Ha:栞木立, Ar:荒砥沢ダム北方. 基図は, 国土地理院(2001)を用いて三次元地図図作製ソフトウェア Surfer[®]8 (Golden Software, Inc., CO, USA)により作成.

Fig. 2. Map showing the locations of surface ruptures (red quadrangles) and trenching sites (black arrows). The shaded relief map is created using Surfer[®]8 software (Golden Software, Inc., CO, USA). DEM data is from Geographical Survey Institute (2001). M: Mochikorobashi, O: Okayama, H: Hanokidachi, A: north of Aratozawa dam reservoir (Aratozawa-dam north).



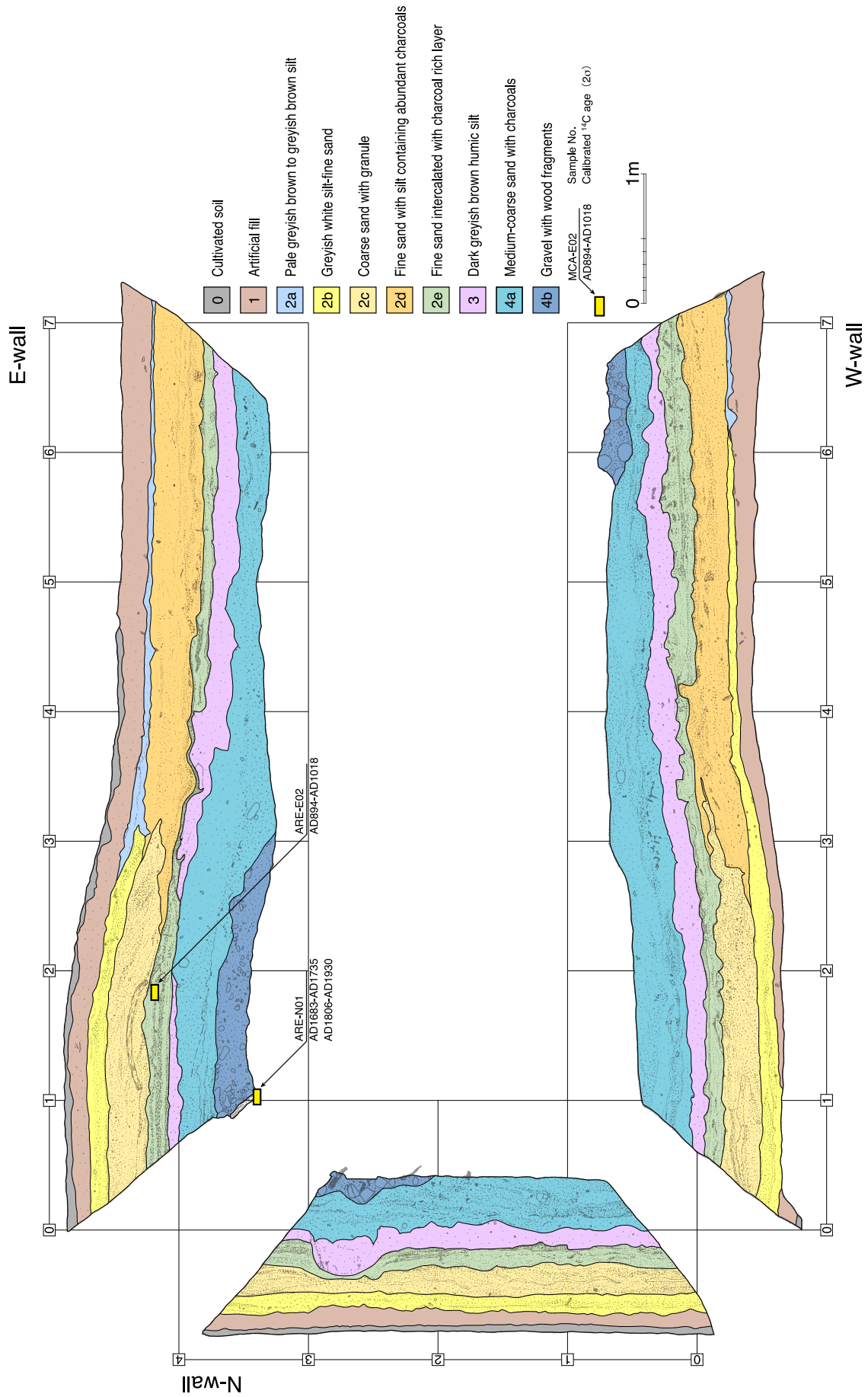
第3図 a) 餅転に出現した地震断層と地震断層沿いの地質構造。凝灰質シルト・砂岩中の層理面の走向・傾斜を表示している。地震断層トレースの▲印は上盤側を示す。b) 餅転トレンチA、Bの位置を□で示す。基図は朝日航洋株式会社による航空レーザ計測データを使用。u：隆起側，d：沈降側。

Fig. 3. a) Map showing the trace of the surface rupture along the Mauchi River (Mochikorobashi, Oshu City, Iwate Prefecture) and surficial geologic structure. Bedding attitude of the upper Tertiary(?) tuffaceous silt and sand along the surface rupture is shown. Barbs point to hanging wall of the thrust rupture. b) Locations of the Mochikorobashi A and B trenches are shown in red rectangles. Shaded relief map is created from airborne LiDAR data acquired after the earthquake by Aero Asahi Corporation. u: upthrown side, d: downthrown side.

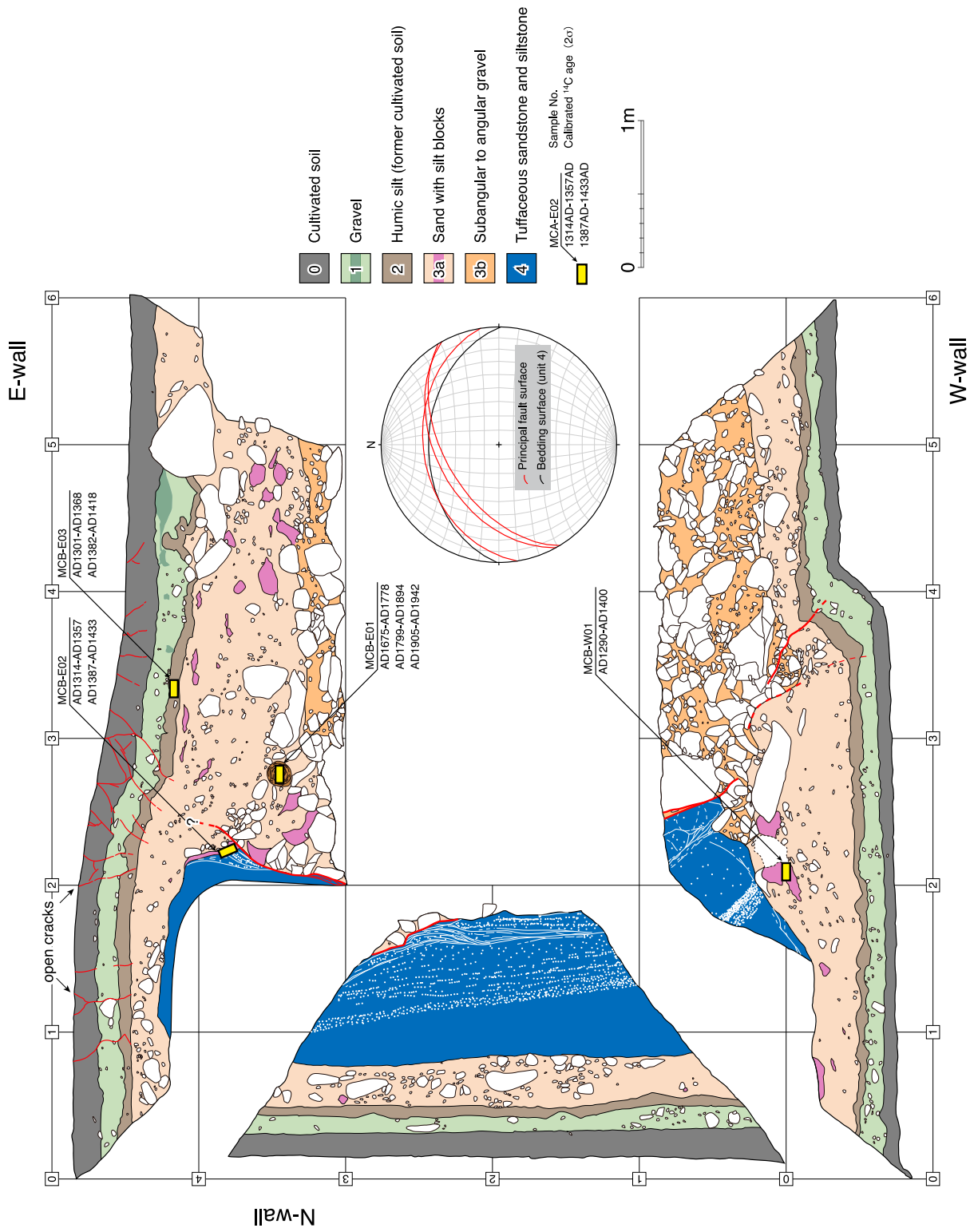


第4図. a) 餅転 A および餅転 B トレンチの位置. b) A トレンチ西壁面. 地層は緩やかな撓曲変形を示す. 各地層の上下変位は、2008年地震による地表変位と調和的である. c) B トレンチ東壁面. d) B トレンチ西壁面.

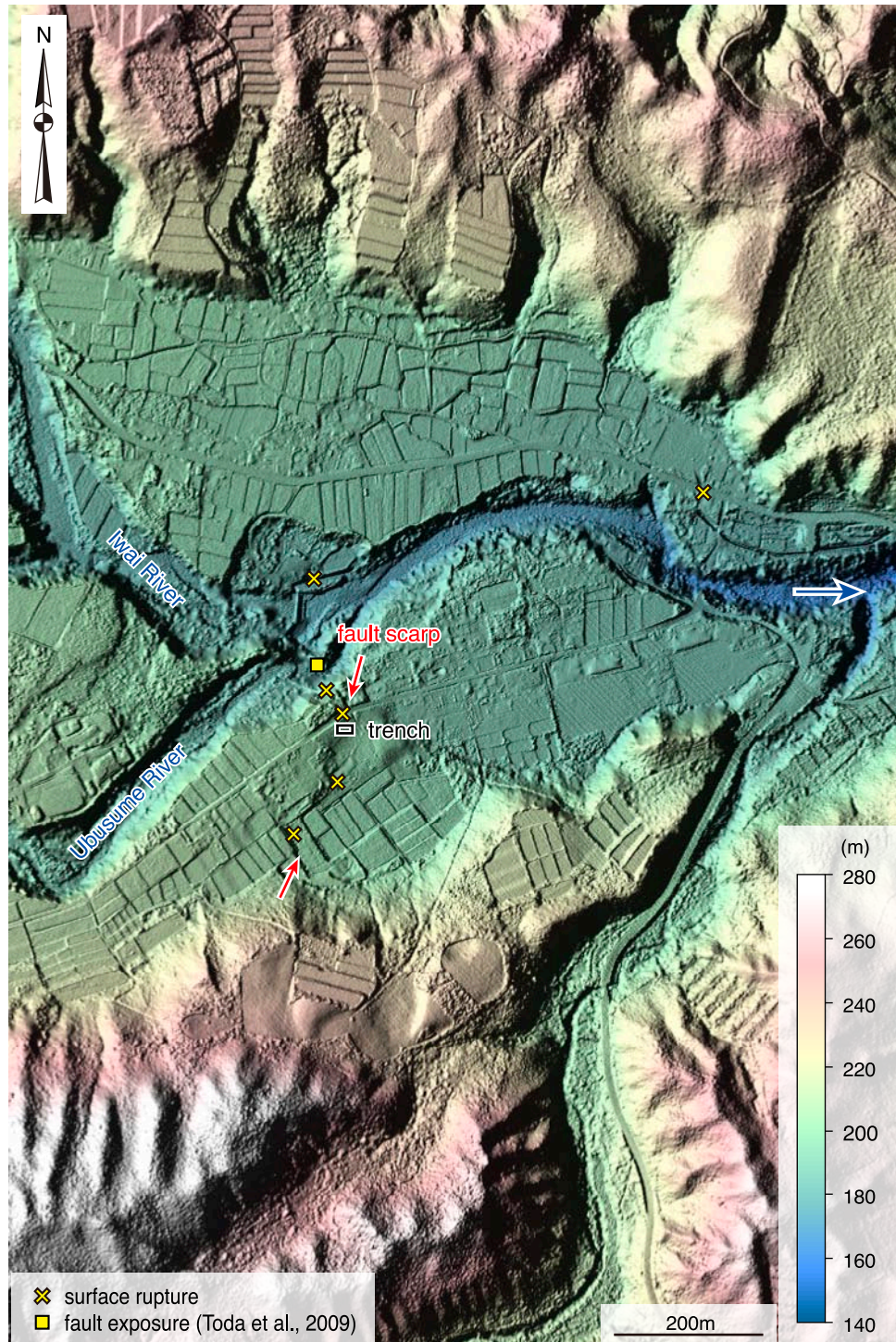
Fig. 4. a) Photograph showing locations of Mochikorobashi trenches A and B. b) West wall of the Mochikorobashi A trench. c) East and d) west walls of the Mochikorobashi B trench.



第5図. 餅転Aトレンチの壁面のスケッチ。
Fig. 5. Log of Mochikorobashi A trench walls.



第6図. 餅転Bトレンチの壁面スケッチ. 餅転Bトレンチ内に出現した基盤岩(4層)の層理面と断層面のステレオプロット(等積下半球投影)を図中央に示す. Fig. 6. Log of Mochikorobashi B trench walls. Equal-area stereo net diagram (lower-hemisphere projection) displaying attitude of the bedding surface of unit 4 (basement rock) and that of the fault surface exposed in the Mochikorobashi trench B is also shown. The surface rupture is parallel to the bedding surface in the consolidated tuffaceous rocks.



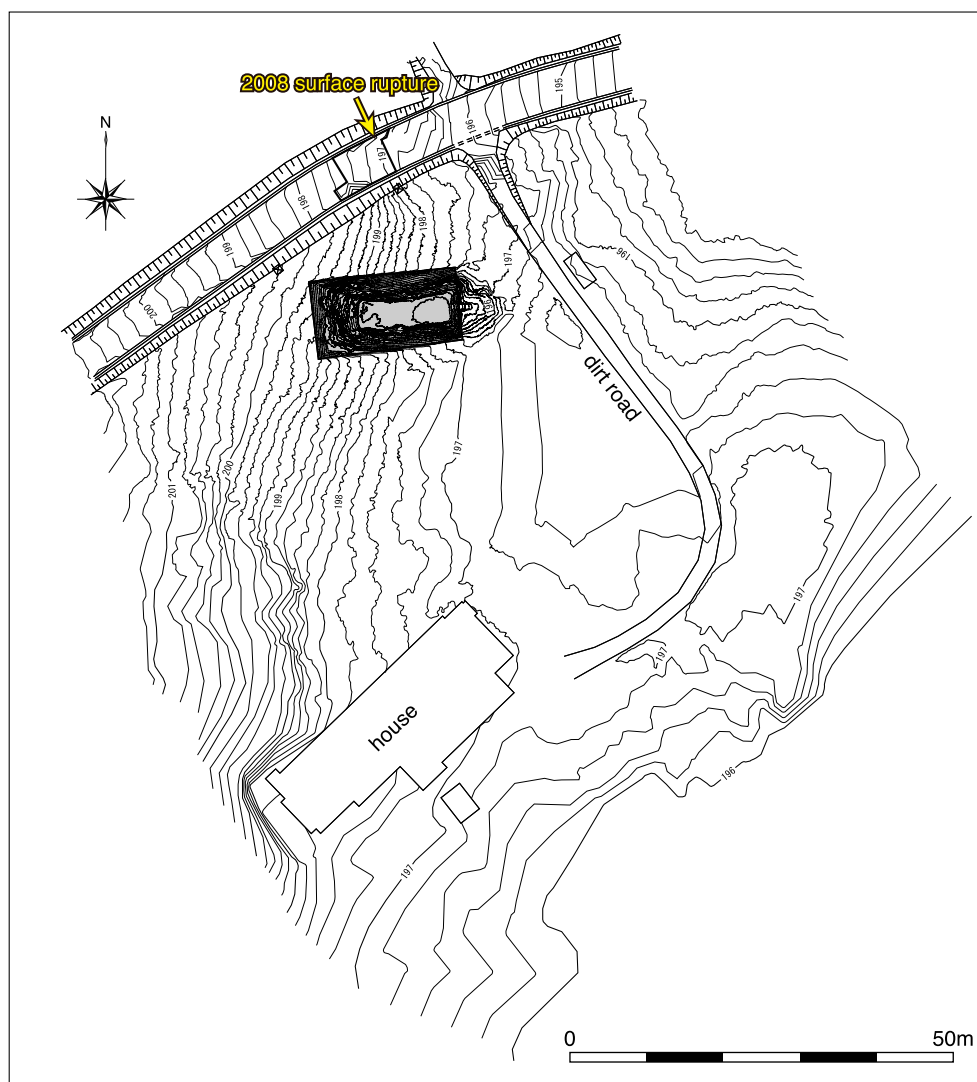
第7図. 岡山周辺の既存の撓曲崖, 2008年地震断層および岡山トレンチ位置. 基図は朝日航洋株式会社による航空レーザ計測データを使用.

Fig. 7. Airborne-LiDAR-derived color-coded shaded relief image shows the pre-existing 2-3-m high east-facing flexure scarp on fluvial terrace surface. Note that the surface breaks occurred at the basal part of the pre-existing scarp. Location of the Okayama trench is also shown. Base map is constructed from airborne LiDAR data acquired after the earthquake by Aero Asahi Corporation.



第 8 図. a) 岡山トレンチ周辺に出現した地震断層 (黄色矢印) (2008 年 8 月 10 日撮影). 地震断層は段丘面を変位させる既存の東向きの撓曲崖 (比高 2~3 m) の基部に沿って出現した. トレンチ位置を白破線で示す. b) 岡山トレンチ北壁面に出現した撓曲構造.

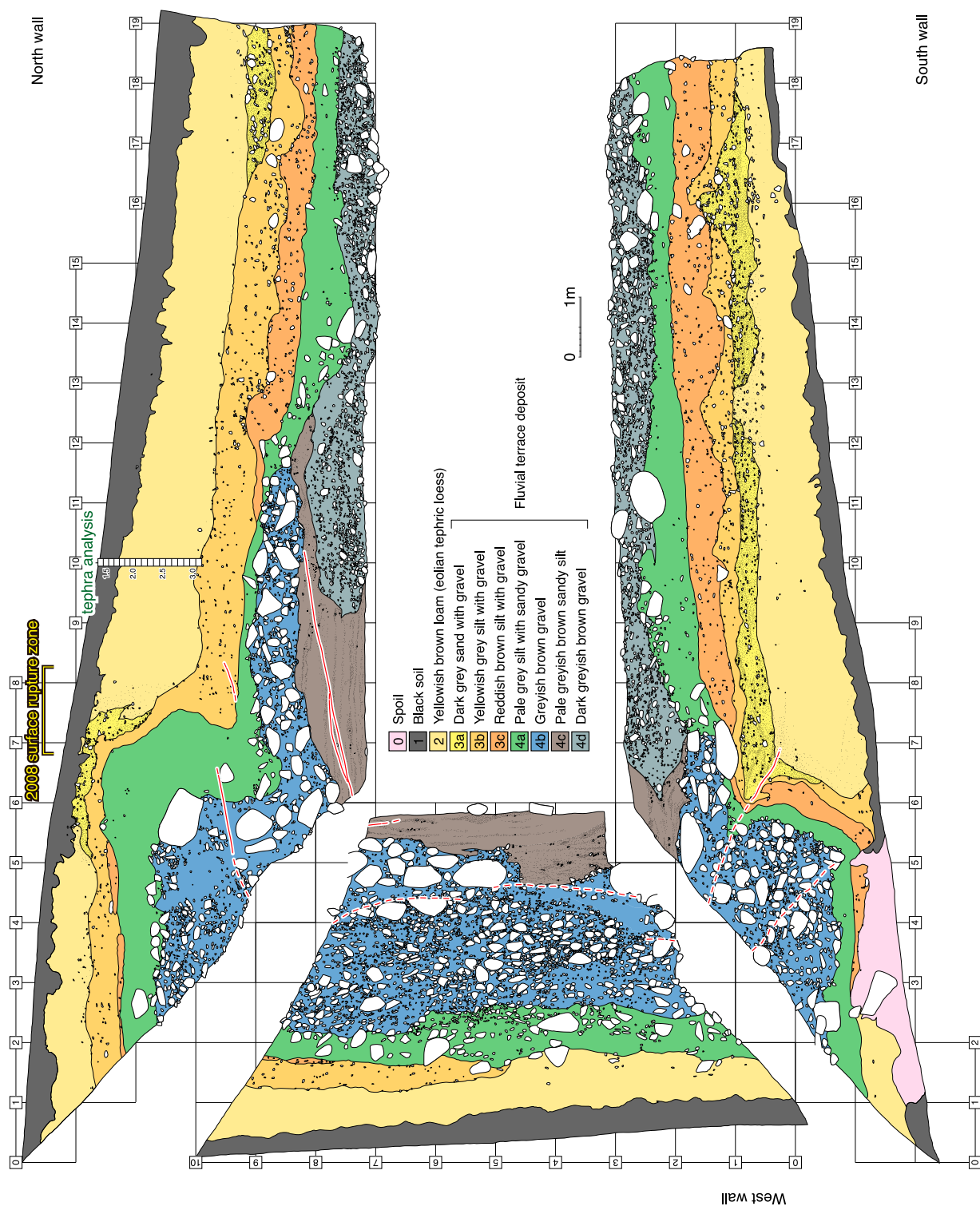
Fig. 8. a) Photograph showing that the 2008 surface break with ca. 10-cm-high east-facing scarp that occurred on the pre-existing 2-3-m high east-facing flexure scarp at Okayama (Ichinoseki City, Iwate Prefecture). Location of the trench is shown as a dashed white frame (photo taken 20 August 2008). b) Photograph showing the deformed strata exposed on north wall of the Okayama trench.



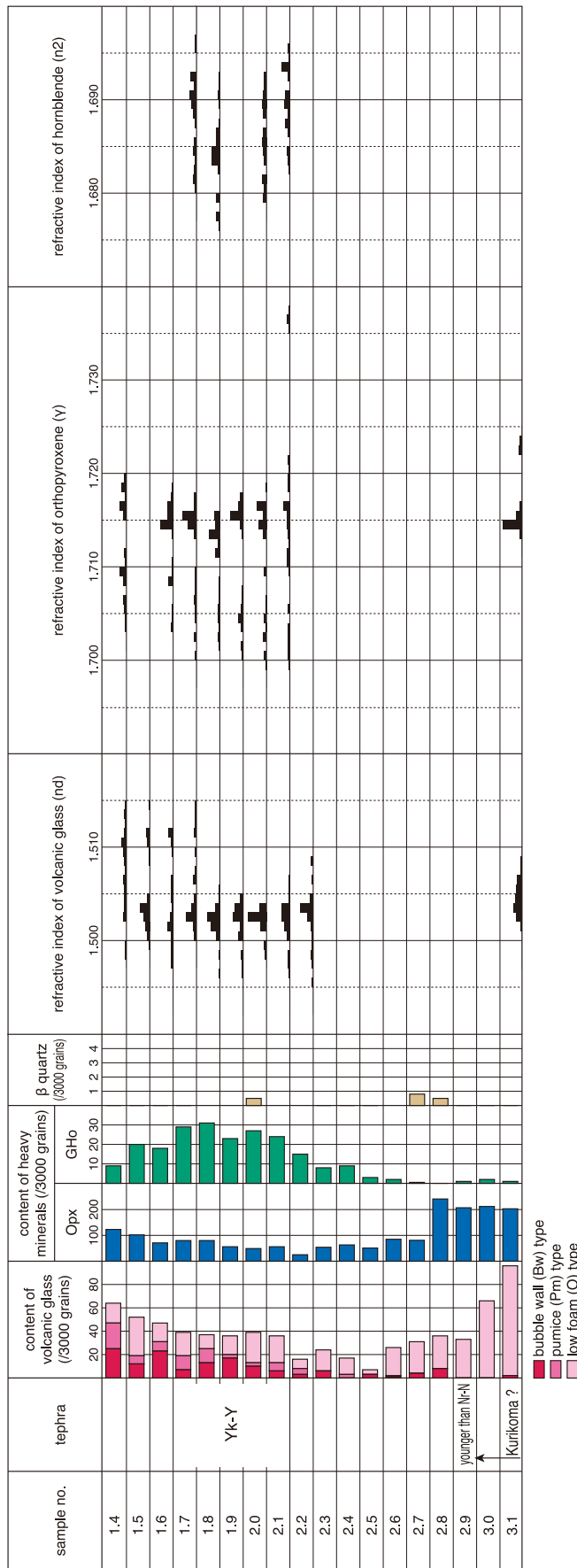
第9図. 岡山トレンチ地点周辺の詳細地形図. 地上型レーザ計測に基づく. 等高線間隔は 20 cm.
Fig. 9. Detailed topographic map showing the trench is excavated across the east-facing scarp at Okayama site. Contour interval is 20 cm. The map is constructed using ground-based LiDAR data (ground return data).



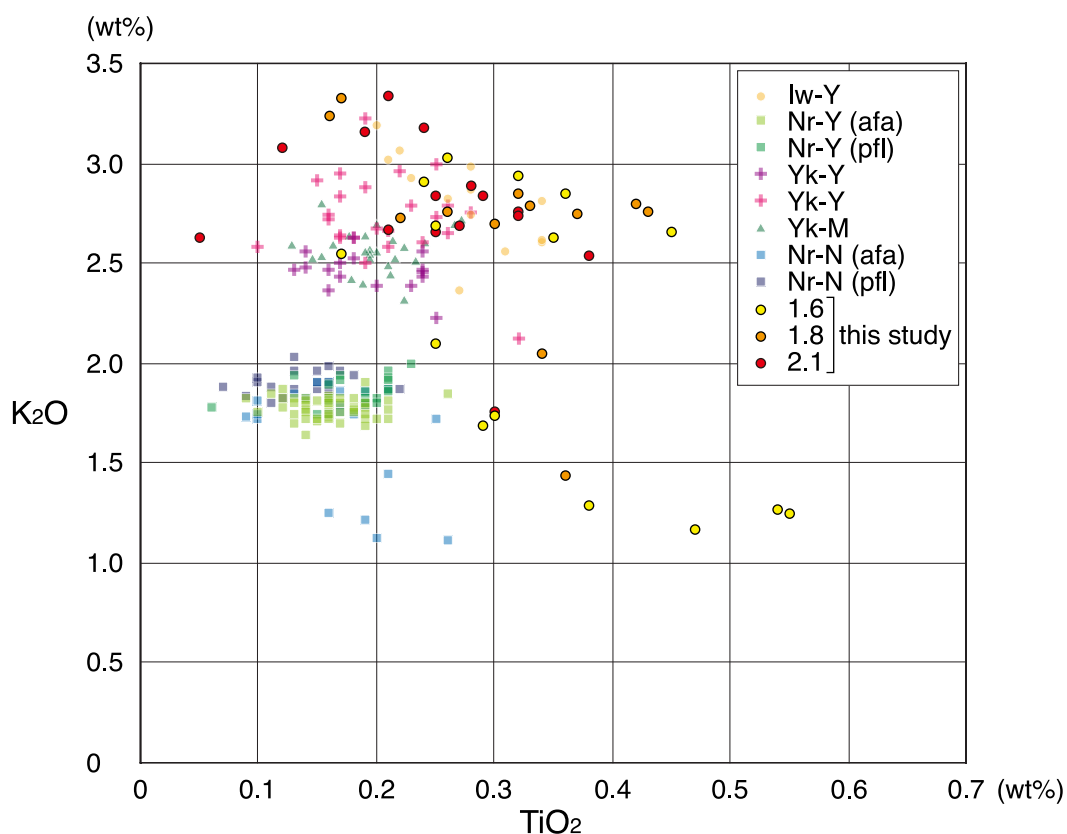
第10図. 岡山トレンチのモザイク写真.
Fig. 10. Mosaic photographs of the Okayama trench walls.



第11図. 岡山トレンチのスケッチ.
Fig. 11. Log of the Okayama trench walls.

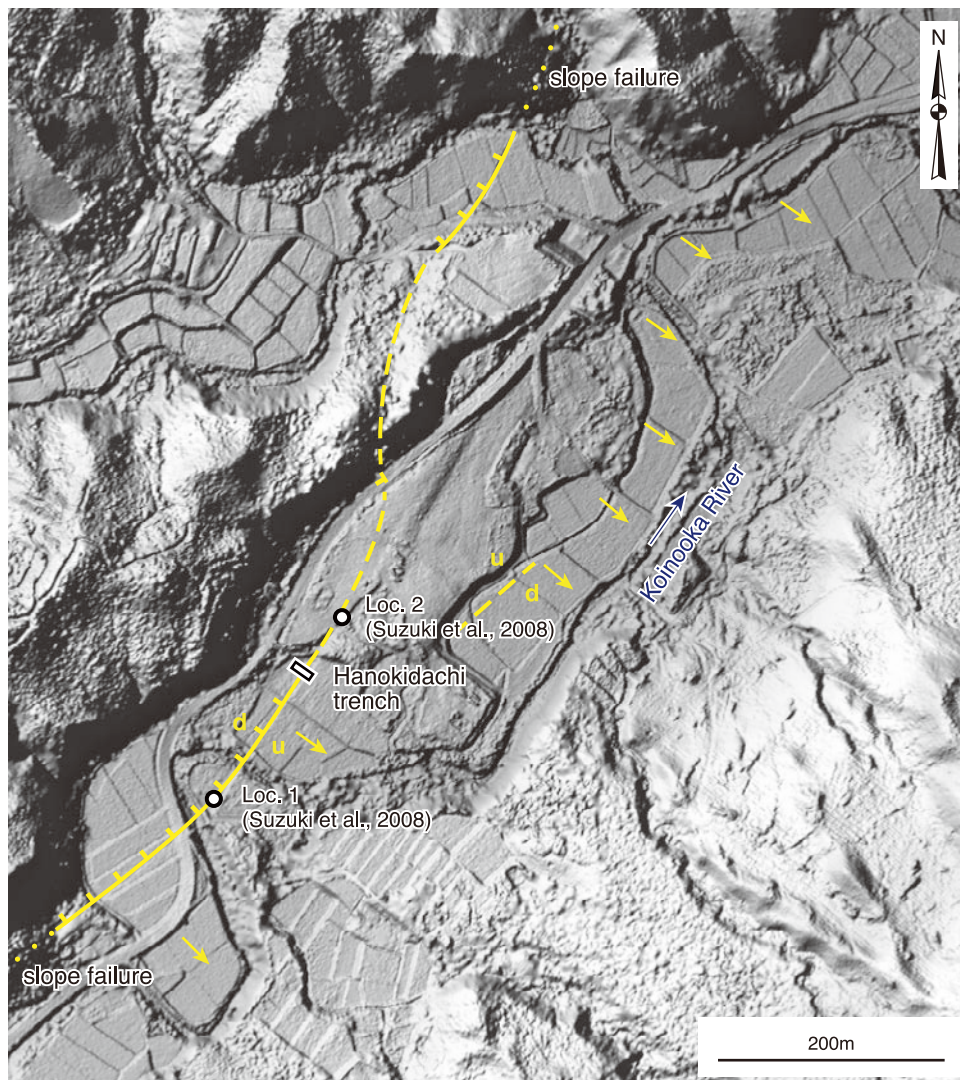


第12図. 岡山トレンチ北壁面から採取した1, 2層のテフラ分析結果, 試料採取位置を第11図に示す.
 Fig. 12. Diagram showing contents of volcanic glass, heavy minerals and β quartz and refractive indices of volcanic glass (nd), orthopyroxene (γ) and hornblende (n2) from black soil (Unit 1) and tephric-loess layer (Unit 2) exposed on Okayama trench. Sampling location is shown in Fig. 11.



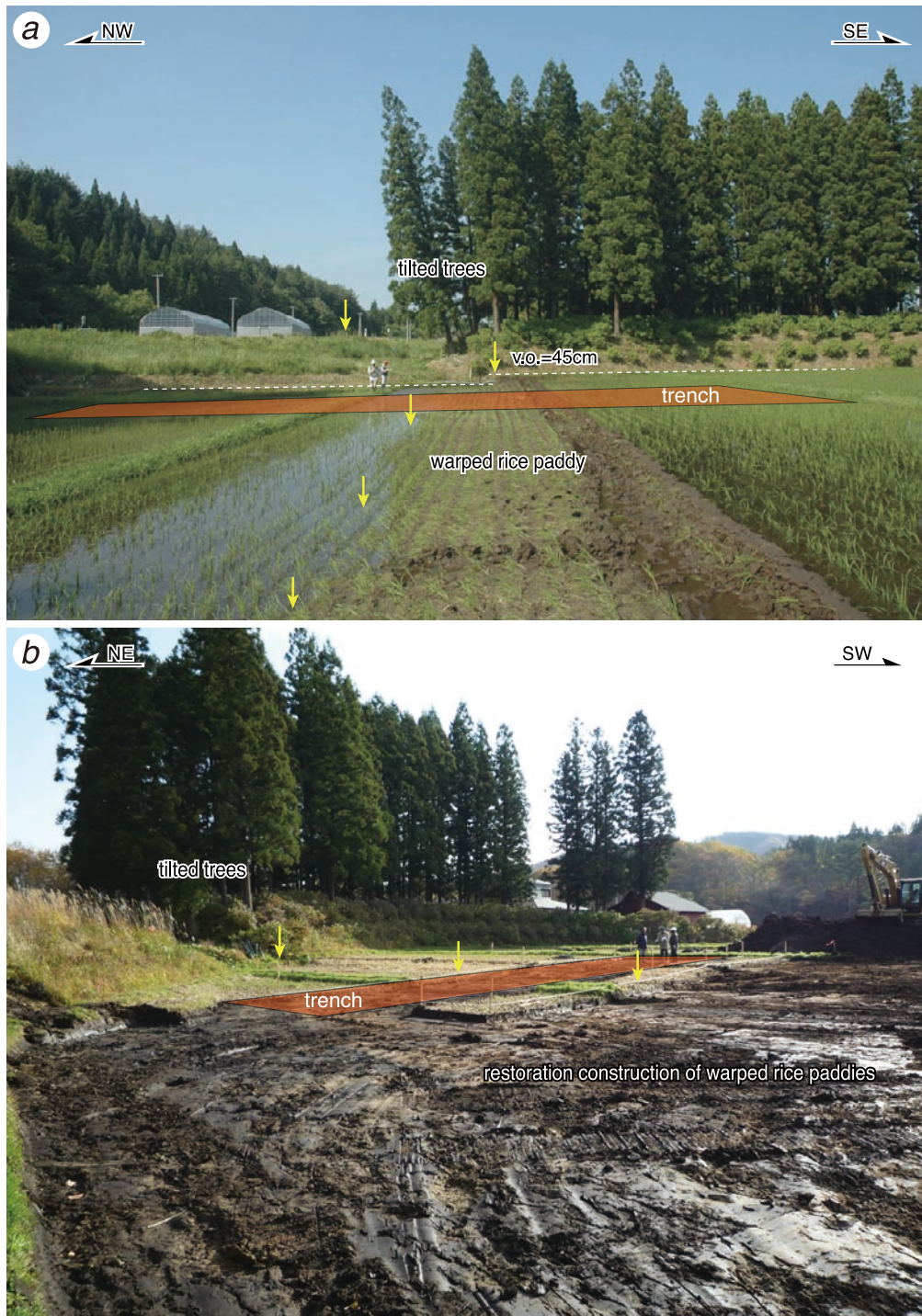
第13図. 東北地方岩手山・鳴子カルデラ・焼石岳起源の後期更新世テフラ中に含まれる火山ガラスの K_2O - TiO_2 図 (青木・町田, 2006) に, 本調査による試料番号 1.6, 1.8, 2.1 の値を追加. 3 試料の試料採取位置を第 11 図, テフラ分析結果を第 3 表および第 12 図に示す.

Fig. 13. K_2O - TiO_2 diagram of glass shards from Sample Nos. 1.6, 1.8, 2.1 and late Pleistocene marker tephra layers from Mt. Iwate, Naruko Caldera and Mt. Yakeishi volcanoes in the Tohoku district (modified from Aoki and Machida, 2006). Sampling location is shown in Fig. 11 and result of the tephra analysis is shown in Table 3 and Fig. 12.



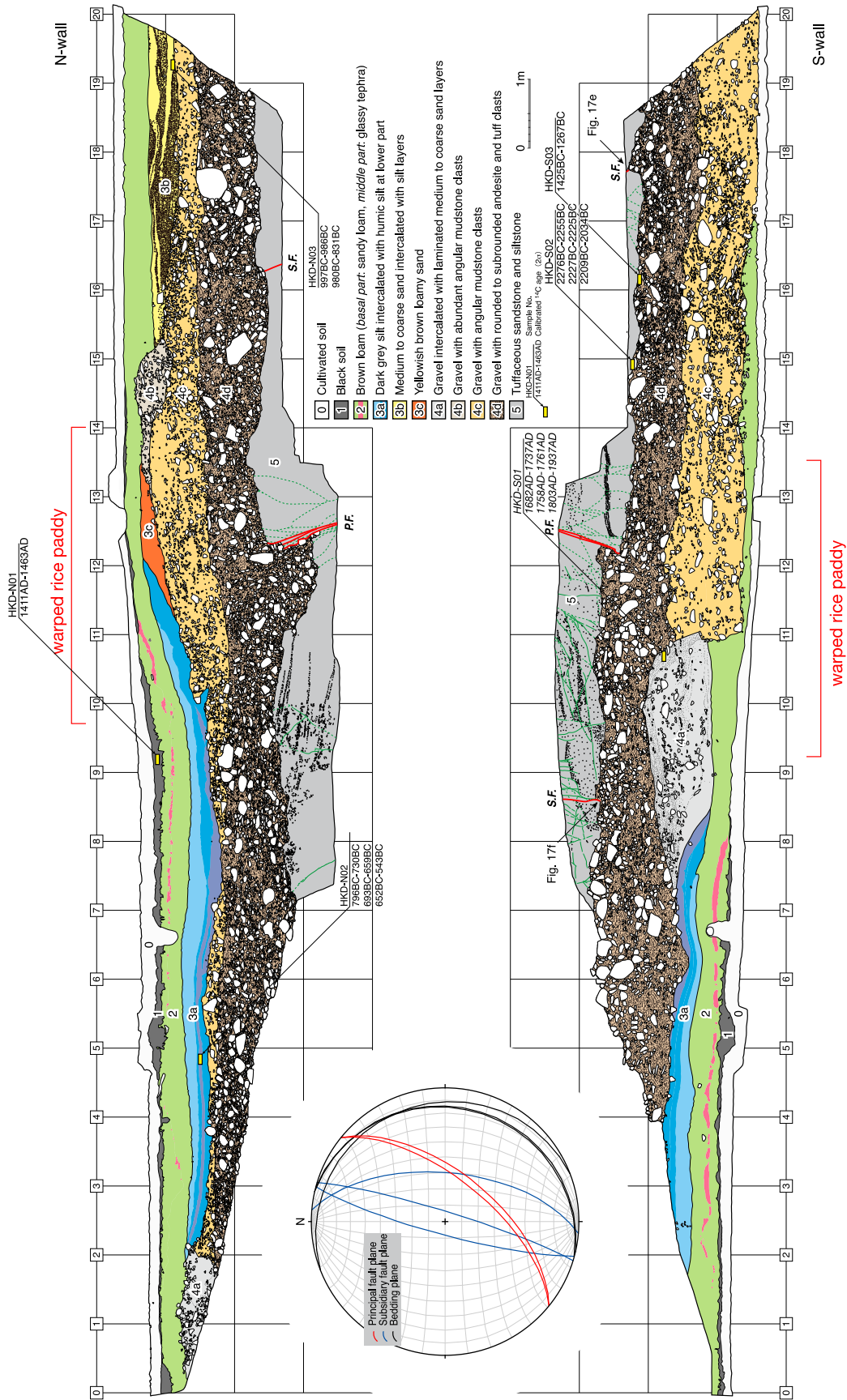
第14図. 爪木立トレンチ位置図. 地震断層は、遠田ほか(投稿中)による. ○印は鈴木ほか(2008a, b)によるトレンチ地点を示す. 基図は朝日航洋株式会社による航空レーザ計測データを使用.

Fig. 14. Shaded relief image showing the 2008 surface rupture and location of the Hanokidachi trench site (Hanokidachi, Ichinoseki City, Iwate Prefecture). Traces of the surface rupture are after Toda *et al.* (submitted). Circles mark the trench sites investigated by Suzuki *et al.* (2008a, b). Base map is created from airborne LiDAR data acquired after the earthquake by Aero Asahi Corporation.



第 15 図. a) 柵木立トレンチ地点に出現した地震断層. b) トレンチ掘削直前の状況. 変形した水田の復旧作業期間中に地権者と一関市役所の好意により調査を実施した.

Fig. 15. a) Surface rupture that warped the rice paddy at Hanokidachi. A view from southwest. b) The trench excavation was conducted during restoration work of the rice paddies by courtesy of landowner and Ichinoseki City. A view from northwest.



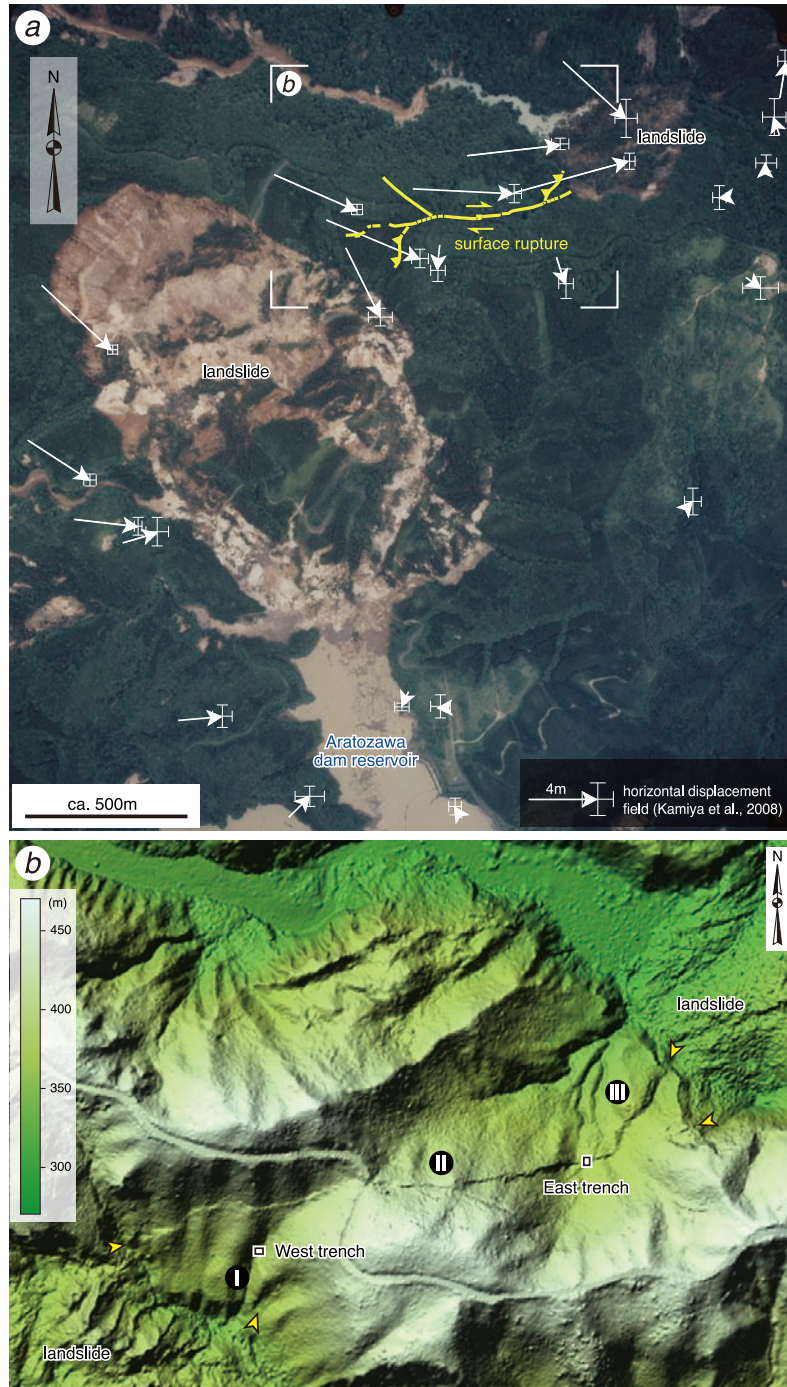
第16図. 柵木立トレンチの南北壁面スケッチ. ステレオプロットは柵木立トレンチ内の基盤岩(5層)の層理面, 主断層面, 小断層面の姿勢を示す(下半球投影). P.F.: 主断層, S.F.: 副次的断層.

Fig. 16. Log of the Hanokidachi trench. Equal-area stereo diagram (lower-hemisphere projection) of the attitude of unit 5 and the principal and subsidiary fault surfaces exposed in the trench is also shown. Note that the steeply east-dipping principal fault surface cuts the gently east-dipping bedding surfaces. P.F.: principal fault, S.F.: subsidiary fault.



第 17 図. 柵木立トレンチに出現した変形構造. a) 北壁面の主断層沿いの変形構造. b) 南壁面の主断層沿いの変形構造. c) 北壁面の主断層沿いの拡大写真. d) 南壁面の主断層沿いの拡大写真. e) 南壁面で観察される小断層 (グリッド番号 18). f) 基盤岩中の断層面沿いに発達するほぼ水平の条線 (南壁面グリッド番号 8.5).

Fig. 17. Photographs showing deformational characteristics exposed on the Hanokidachi trench. Stratal deformation along the principal fault zone in a) north and b) south walls. Close-up views of the stratal deformation along the principal fault zone in c) north and d) south walls. e) Minor fault displacing base of the fluvial gravel layer vertically exposed in the south wall (grid no. 18). f) Minor faults, which do not displace overlying gravel layer, expose slickenside striations plunging sub-horizontally (south wall, grid no. 8.5).



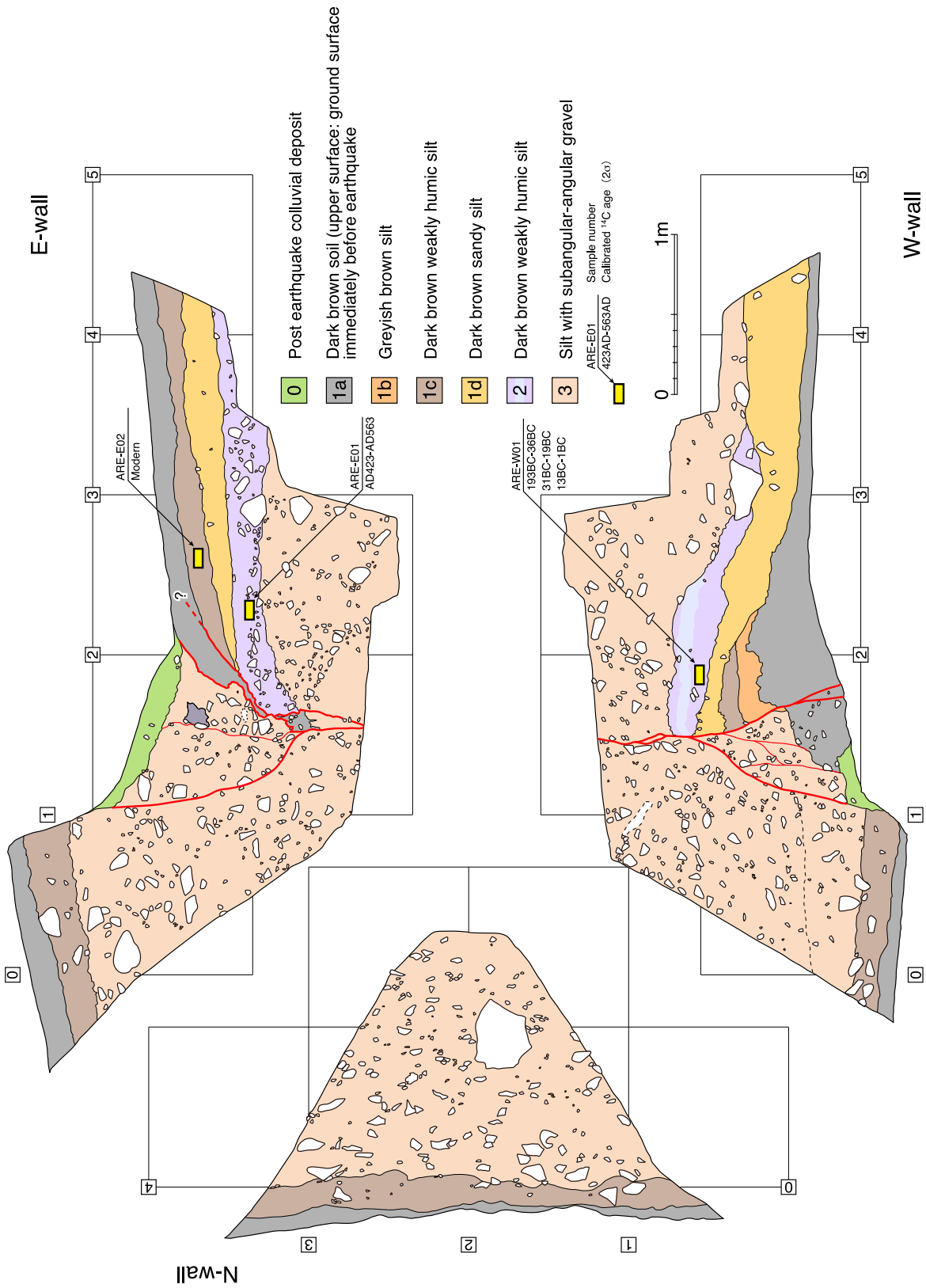
第18図. a) 荒砥沢ダム北方に出現した地震断層(黄色). 神谷ほか(2008)による空中写真測量に基づく水平変位場(白矢印)を示す. 基図には, 国土地理院撮影空中写真 http://www.gsi.go.jp/topographic/bousai/photo_h20-iwatemiyagi/photo/C006-0971.jpg の一部を使用. b) 地震断層トレンチ位置図. I: 南北走向の西区間(逆断層), II: 東西~東北東-西南西走向の中央区間(右横ずれ), III: 北東-南西走向の東区間(逆断層). 基図は朝日航洋株式会社による航空レーザー計測データを使用. 図の範囲を第18a図に示す.

Fig. 18. a) Aerial photograph taken immediately after the earthquake showing the surface rupture that displaces forested mountain slope at north of the Aratozawa dam reservoir (Aratozawa-dam north site) in Kurihara City, Miyagi Prefecture. Yellow solid lines are rupture zones. Paired half arrows show strike-slip sense. Tooth on the hanging wall side. White arrows depict horizontal displacement field (Kamiya *et al.*, 2008). Background aerial photograph from Geographical Survey Institute (http://www.gsi.go.jp/topographic/bousai/photo_h20-iwatemiyagi/photo/C006-0971.jpg). b) Shaded relief image showing the surface rupture zone and location of East and West trenches of Aratozawa-dam-north site. I: western thrust segment, II: central dextral strike-slip segment, III: eastern thrust segment. Base map is constructed from airborne LiDAR ground return data acquired immediately after the earthquake by Aero Asahi Corporation. Area of the image is shown in Fig. 18a.



第 19 図. 荒砥沢ダム北方地点の東および西トレンチに出現した地断層. a) 東トレンチ東壁面. b) 東トレンチ地点西壁面. c) 西トレンチ北壁面. d) 西トレンチ南壁面. 詳細は本文参照.

Fig. 19. Photographs showing the near-surface deformational features of the 2008 surface rupture exposed on the East and West trenches of Aratozawa-dam north site. a) East wall of the East trench. b) West wall of the East trench. c) North wall of the West trench. e) South wall of the West trench. For details see text.



第20図. 荒砥沢ダム北方地点東トレンチの壁面スケッチ。
Fig. 20. Log of the East trench of Arazawa-dam-north site.

