

# 2011年福島県浜通りの地震で活動した井戸沢断層西側トレース北セグメント および東側トレースの古地震調査

Paleoseismic investigation of the northern segment of the western trace and eastern trace of the Itozawa fault ruptured during the 2011  $M_{JMA}$  7.0 Fukushima-ken Hamadori earthquake, Fukushima Prefecture, Japan

丸山 正<sup>1</sup>・吉見雅行<sup>1</sup>・斎藤英二<sup>2</sup>・齋藤 勝<sup>3</sup>

Tadashi Maruyama<sup>1</sup>, Masayuki Yoshimi<sup>2</sup>, Eiji Saito<sup>3</sup> and Masaru Saito<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, tadashi-maruyama@aist.go.jp)

<sup>2</sup> 地質情報基盤センター (AIST, Geoinformation Service Center)

<sup>3</sup> 株式会社ダイヤコンサルタンツ (Dia Consultants Co., Ltd.)

**Abstract:** The 2011  $M_{JMA}$  7.0 ( $M_w$  6.6) Fukushima-ken Hamadori earthquake generated multiple east-side-up normal faulting surface ruptures along parts of the previously mapped active faults, including distinct slip on the NNW-trending western trace of the Itozawa fault and the NW-trending Yunodake fault, and faint slip on the NNW-trending eastern trace of the Itozawa fault. Of these, the surface rupture on the western trace of the Itozawa fault has extended beyond the previously mapped portion further to the north. This raised serious question about the limitations for locating active faults. We conducted tectonic-geomorphic mapping, a stratigraphic pit excavating, and paleoseismic trenching at Saido, Iwaki City, located at the southernmost part of the northern extension of the western Itozawa fault trace, in order to assess whether or not retrospectively we could have located this section. Direct evidence for repetitive faulting was not exposed in trenching, but topographic analyses with high-resolution DEMs created from airborne and terrestrial LiDAR (Light Detection And Ranging) and a total station survey suggest multiple east-side-up slip events with penultimate event having substantially smaller slip than the 2011 slip, although their timing are not constrained. This result implies the possibility that some active faults might occur larger surface slip than paleoseismically determined slip. We also performed a trenching at Kamanosawa, Iwaki City, on the eastern trace of the Itozawa fault aiming at understanding its slip history, but we could not find evidence for paleoearthquakes.

**キーワード:** 古地震, 変動地形, 井戸沢断層, 地震断層, 正断層, 2011年福島県浜通りの地震  
**Keywords:** paleoseismology, tectonic geomorphology, Itozawa fault, surface rupture, normal fault, 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake

## 1. はじめに

2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震 ( $M_{JMA}$  7.0,  $M_w$  6.6) に伴い, 正断層成分を主体とする地震断層が北西-南東走向の湯ノ岳断層<sup>注1</sup>と北北西-南南東走向の井戸沢断層<sup>注1</sup> (活断層研究会編, 1991; 中田・今泉編, 2002) に概ね沿うように出現した (Mizoguchi *et al.*, 2012; 堤・遠田, 2012; Toda and Tsutsumi, 2013 など) (第1図). 両断層は, 地質断層として認定され (例えば, 久保ほか, 2007), その多くの部分が活断層と推定されていた (活断層研究会編, 1991; 中田・今泉編, 2002) (第1図および第2図). これらのうち, 近接して並走する2条の断層トレースからなる井戸沢断層では, 西側トレースに沿って最大上下変位約2.1 mに達する顕著な地震

断層が出現した (例えば, Mizoguchi *et al.*, 2012; 堤・遠田, 2012; Toda and Tsutsumi, 2013). 西側トレースの地震断層は, 連続性がよく, 単純な地表形態を示すが, その中央からやや南方の塩ノ平集落南端付近で, 北方に向かって2条に分岐する. 以下では, 井戸沢断層西側トレース沿いの地震断層のうち, この部分より北側を北セグメント, 南側を南セグメントと呼ぶ (第1図および第3図a). 約2.1 mの最大上下変位量が生じた南セグメント付近には, 2011年の地震以前に推定活断層が図示されていた (活断層研究会編, 1991; 中田・今泉編, 2002). 北セグメントにおいても, 上下変位量が1 mを越える明瞭な地震断層が出現した (例えば, Mizoguchi *et al.*, 2012; 堤・遠田, 2012; Toda and Tsutsumi, 2013). 地震後に実施

された空中写真判読による変動地形の再検討により、鮫川以北の北セグメントに沿って断続的な短い活断層トレースが認められた(堤・遠田, 2012)ものの、地震前には活断層あるいは推定活断層として認定されていなかった(第2図)。また、既存の地質図には北セグメント周辺に地質断層も示されていない。このように、活断層があらかじめ認定されていない場所で明瞭な地震断層が出現したことは、今回の地震断層がプレート境界型巨大地震の誘発地震活動に伴う(堤・遠田, 2012; Toda and Tsutsumi, 2013)という特殊な地質環境にあったとしても、活断層の認定やそれに基づく地震評価に大きな課題を投げかけたといえる。活断層が認定されていないところに地震断層が出現した原因を明らかにすることは、活断層調査の有効性と限界を正しく把握する上で重要である(例えば, Hsieh *et al.*, 2001)。

南セグメントでは、これまでにトレンチ調査やボーリング調査が実施され、今回の地震に先行する断層活動の存在が指摘されている(石山ほか, 2011; 黒澤ほか, 2012; 堤・遠田, 2012; Toda and Tsutsumi, 2013; 丹羽ほか, 2013)(第1図)。これに対して、北セグメントでは、塩ノ平地区における南北両セグメントを横切る群列ボーリング調査に基づいて、先行する断層活動の存在が丹羽ほか(2013)により報告されているものの、活動履歴に関するデータは十分とはいえない。そこで、本研究では、地震前に活断層が認定されていなかったところに明瞭な地震断層が出現した原因を検討するための基礎データの取得のため、北セグメント南端部に位置するいわき市田人町(田人町)地区を対象として変動地形、層序ピットおよびトレンチ調査を実施した。

井戸沢断層東側トレースについては、断層沿いで散点的にセンチメートルオーダーから最大約30 cmまでの上下変位を伴う地表変位(国土地理院地殻活動研究センター, 2011; 東京電力株式会社, 2011など)、および300~400 m東側で同トレースに平行して直線状に並ぶ地表変位(堤・遠田, 2012)が報告されているが、連続した地震断層は出現していない。また、同トレースの全体的な形状や第四紀後期の活動性についての実体は不明である。本研究では、東側トレースのメートルオーダーの変位を生じさせるポテンシャルの有無を検討することを目的として、同トレース沿いの地表変位の確認を行うとともに、いわき市遠野町釜ノ沢地区においてトレンチ調査を実施した。なお、本稿で述べる調査結果の概要は丸山ほか(2012)で速報しているが、その後の調査結果とあわせて再検討を行ったところ、解釈の一部を修正する必要があるが生じた。以下では、丸山ほか(2012)では紙面の制限により報告していない各種分析結果(その後の分析により新たに得られたデータを含む)、トレンチ壁面の写真およびスケッチを示し、記載を追加するとともに、修正後の解釈について述べる。

## 2. 井戸沢断層の地形・地質概要

調査対象とする井戸沢断層は、阿武隈高地の南東部の山頂高度約200~650 mの山地内に分布している(第1図)。久保ほか(2007)によると、井戸沢断層周辺には、主として苦鉄質火山岩や珪質岩を原岩として前期白亜紀に変成作用を受けた御斎所変成岩が広く分布し、並走する2条の断層トレースの間に前期中新世の砂岩、礫岩を主体として石炭層を含む櫛平累層(須貝ほか(1957)による滝夾炭層に相当)が分布する(第2図)。須貝ほか(1957)の地質図および地質断面図によると、島状に分布する櫛平累層の分布東縁が西傾斜の井戸沢断層東側トレースによって途切れ、同トレースの正断層運動により櫛平累層基底に200 m程度の西側低下の落差が生じている(第2図b)。一方、御斎所変成岩内に分布する西側トレースの両側では、変位指標となる地層が分布していないため、その累積変位量は不明である。なお、井戸沢断層東側トレースおよび西側トレース南セグメントについては、既存地質図に地質断層として分布が示されているのに対して、西側トレース北セグメントは示されていない(第1図および第2図)。両断層沿いには部分的に谷底低地面(沖積面)が分布するものの段丘面の分布は乏しい。

井戸沢断層について、活断層研究会編(1991)は、山地頂面の西側上がりの高度不連続から、東西2条のトレースを含む複数の確実度IIおよびIIIの活断層を長さ10 kmにわたって認めた。しかし、これらの断層と第四紀層との関係についての資料が乏しく、活断層であると確定できないとも述べている。中田・今泉編(2002)は、両トレースを推定活断層としてその詳細な位置を示した。ただし、上述したように、西側トレースの北セグメントは活断層研究会編(1991)および中田・今泉編(2002)では推定活断層としても図示されていない。これに対して、堤・遠田(2012)は、福島県浜通りの地震の震源域について、地震前に撮影された空中写真判読に基づいて断層変位地形の検討を行い、鮫川以北の地震断層の北セグメントに沿って断続的な短い活断層トレースを認めた。しかし、沖積低地が変位している箇所が認められず、第四紀後期の活動の確実な地形学的証拠がないため推定活断層としている。

井戸沢断層の両トレースに沿っては、阿武隈高地南東縁の東向き斜面が、西側低下の正断層運動に伴い形成されたとみられる逆向き(西向き)崖や鞍部列、また上流域(断層西側)の沈降を反映した低地、断層トレース東側の風隙地形が認められる(例えば、堤・遠田, 2012)。こうした西傾斜の正断層による西側低下の変位地形は、2011年の地震で出現した地震断層の全般的な性状と調和的である。

2011年の地震の際には、西側トレースの南北両セグメントにおいて、全長約14 kmにわたって最大上

下変位約 2.1 m に達する正断層成分が卓越する地震断層が出現した(第 1 図)。一方、東側トレースに沿っては散点的に一部開口亀裂を伴う落差数 cm から最大約 30 cm の地表変位が生じた(国土地理院地殻活動研究センター, 2011; 東京電力株式会社, 2011)。

### 3. 井戸沢断層西側トレース北セグメント南端付近の調査結果

#### 3.1. 斉道地区における変動地形調査

井戸沢断層西側トレースに沿う地震断層の分岐が生じた塩ノ平地区から北方の斉道地区にかけては、地震断層の南セグメントの北端と北セグメントの南端とが長さ約 700 m にわたって並走する(第 1 図および第 3 図 a)。そのうち、南セグメントの地震断層は、北北西-南南東方向に延びる谷底低地とその東に分布する比高約 10~20 m で直線的に延びる西向きの崖の境界付近に沿って出現した(第 3 図)。この崖の崖頂には風隙が点在し、また崖は大局的に東に緩傾斜する斜面に対して逆向き崖状を呈する(第 3 図 a, b)。南セグメントの東方に出現した北セグメントでは、東に緩く傾斜する斜面に西側低下の正断層変位が生じた結果、斜面基部に逆向き低崖が形成されるとともに、山地斜面を開析して東に流下する谷が堰止められ、多数の堰止め池が断層沿いに形成された(第 4 図)。

地震前後に取得された航空レーザ測量データと、地震断層沿いの地形状況の詳細を記録するために 2012 年 2 月 23, 24 日に実施した地上型レーザスキャナーとトータルステーションを用いた測量データから作成した各種地形図(陰影図, 等高線図等)を判読した結果、斉道地区では地震断層の北セグメントに一致して長さ約 150 m の区間で累積変位の可能性がある地形が認められた(第 3, 5, 6 図)。

第 3 図 a, b に地震直後に朝日航洋(株)により計測された航空レーザ測量による 1 m グリッド DEM データから作成した同地区の陰影図と等高線図を、また第 6 図 a, b に地上型レーザスキャナーとトータルステーション測量データから作成した詳細陰影図を示す。これらによると、今回の地震で出現した地震断層を横切る小河川(谷 a, b および c)は、地震断層を境に下流側(東側)では谷幅が狭く深く切れ込んでいるのに対して、堰止め池が生じた箇所の上流側(図の左側)には浅い谷が広がり凹地状の低地を形成している。このことは、過去にも今回の地震と同様の下流側が相対的に隆起するイベントにより上流側が一時的に堰止められ、下流側は流路の下刻が進んだことを示唆している。こうした凹地状の地形を利用して、上流側の低地はかつて水田として利用されていた(第 6 図 a, b および地元住民への聞き取りによる)。

水系の平面パターンだけでなく、地形断面からも今回の地震に先行する断層活動が推定される。斉道地区では、2つの林道が 2011 年の地震により変位している(第 4 図および第 6 図 a)。このうち、御斎所山熊野神社の参道(第 6 図 a の林道 A)の上下変位量は、地震直後の簡易計測により西側低下約 1.3 m と計測された。また、地上型レーザスキャナーによる測量データから作成した 2つの林道(第 6 図 a の林道 A および B)の地形断面図によると、いずれも上下変位量は約 1.3 m である(第 6 図 c の断面図 E-E' および F-F')。このことから、斉道地区における 2011 年の地震に伴う北セグメントの上下変位量は約 1.3 m と見積もられる。なお、ここでは地震断層を横切る林道の縁や谷の軸部に明瞭な横ずれは認められなかった(第 4 図 a および第 6 図 a)。堤・遠田(2012)でも本区間において横ずれの報告はない(堤・遠田, 2012 の Fig. 7)。斉道地区には、やせ尾根状ながらも背面が保存された平坦面が北セグメントの両側に分布しており、分布高度から低位の I 面と高位の II 面に区分できる(第 3 図 b)。地震前に国際航業(株)により計測された航空レーザの 2 m グリッド DEM から作成した地形断面図によると、谷 a と谷 b の間に分布する I 面にはわずかに西向きの低崖(緩傾斜部)が存在するように見え、その傾斜変換部付近に地震断層が出現した。このことは、2011 年の地震前から存在していた低崖に沿って地震断層が出現した可能性を示している(第 3 図 c)。地震後に実施した測量データから作成した地形断面図によると、谷 a と谷 b の間の I 面上に生じた低崖の比高は約 1.6~1.8 m と見積もられる(第 6 図 c, d の断面図 G-G' および H-H')。これは、上述した林道や後述するトレンチにより確認された谷 a 付近の地震断層崖の比高で示される当地区における今回の地震に伴う上下変位量(約 1.3 m)よりも大きい。さらに、この I 面を開析する谷 a および谷 b が断層西方で凹地状の形態を呈している。以上より、I 面は今回の地震に先行する活動も記録している可能性が指摘できる。さらに南方に分布するより高い(古い)II 面にも 2011 年の地震断層出現位置に西向きの崖が地震前に生じていたことが認められる(第 3 図 d)。地震後の航空レーザデータから作成した II 面を横切る地形断面図から、同面の上下変位量は 5.0 m 程度と見積もられる(第 5 図)。異なる時期に形成されたとみられる変位指標に累積的な西側低下の変位の可能性が認められることから、北セグメントが過去にも今回と同様の西側が低下するセンスで活動してきた可能性がある。

斉道地区における南セグメントの西側低下の変位の累積性については、上述したように地震断層が出現した比高 10~20 m 程度の西向きの崖とその崖頂における風隙の存在(第 3 図)から、その可能性が示唆される。

## 3.2. 齊道地区におけるトレンチおよび層序ピット掘削調査

上述した地形解釈の正否を確認し、北セグメントの活動履歴を検討するため、谷 a に沿って形成された堰止め池のすぐ北の地点 A でトレンチ掘削調査、また I 面の形成時期を推定するための層序確認ピット掘削調査を地点 B で行った(第 3 図および第 7 図)。

### 3.2.1. トレンチ掘削調査

先行する断層活動によって生じた堰止め堆積物や断層崖の崩壊堆積物など、古地震履歴解明の手がかりとなる地層の確認と断層形態の把握のため、地点 A において、断層上盤側(低下側)を掘削し、南北両壁面の観察、記載を行った(第 8 図および第 9 図)、また、トレンチ壁面に出現した地層の分布や連続性、地層の変位量を把握するため、トレンチ東壁面を含む長さ約 9 m の区間で 2011 年の地震で露出した断層面(第 7 図の区間 I-I')、一部は地震後の崩壊等により崖は若干後退している;以下、東壁面と呼ぶ)を観察、記載した。さらに、断層上盤側の堰止め池中軸部の 2 箇所ですべて予備的ピットを掘削し、地層の観察と記載を行った(第 7, 10, 11 図)。

#### 3.2.1.1. トレンチ壁面にみられる地層

トレンチ壁面には、下位から基盤岩(礫岩, 5 層)、河道充填堆積物(4 層)、斜面堆積物(3 層)、耕作土壌および表土(2 層)と、2011 年の地震の際に断層崖が崩壊して堆積したと考えられるくさび状の崩積土(1 層)が出現した(第 9 図および第 11 図)。これらの地層のうち、2 層および 3 層については色調や粒度など、また 5 層については破碎の有無によりさらに細分した。各地層の詳しい記載を第 1 表に示す。

トレンチ壁面において、断層上盤側に分布する基盤岩(5 層)は、第 11 図の地震断層面にみられる下盤側の礫岩と同じものである。既存地質図には本地域に堆積岩の分布は示されていないが、その固結状況、礫種(斑れい岩、閃緑岩、花崗岩の巨礫を多数含む)や周辺の地層分布から、ここでは本層を櫛平累層に対比した。ただし、調査地域の南方の井戸沢断層東側トレース沿いに分布が示されている古第三紀の礫岩(久保ほか, 2007)に対比される可能性もある。

#### 3.2.1.2. 地層の年代

5 層を覆う 4 層および 3 層から採取した炭および植物片試料の  $^{14}\text{C}$  年代測定結果を第 2 表に示す。 $^{14}\text{C}$  年代値を暦年較正すると、95.4% 確率範囲内で 4 層から採取した試料は西暦 1280~1400 年および西暦 1640 年以降、3 層から採取した試料は西暦 1030~1210 年、西暦 1290~1410 年および西暦 1640 年以降となる。このように 4 層と 3 層の  $^{14}\text{C}$  年代値は、層

序と調和していないが、試料はいずれも炭および植物片の多産部から採取したものであることから、生物擾乱や乾燥割れ目などを通して新しい年代試料が混入した可能性は低いと考えられる。こうしたことから、これらの地層は平安時代後期あるいはそれ以降に堆積した非常に新しい地層であると推定される。

### 3.2.1.3. 地質構造

南北両壁面の東端では、基盤岩(礫岩: 5a 層)中に高角度で西に傾斜する明瞭な剪断帯(5b 層)が認められ、厚さ数 cm の断層ガウジを伴う。2011 年の地震で西側低下の変位を生じた西傾斜の主断層面はこの剪断帯に沿っている。また、剪断帯のうち、今回の地震で活動した断層面よりも西側の部分は 3 層に覆われている(第 9 図 a)。こうした剪断帯の産状から、今回の地震断層は過去に繰り返し活動した断層が再活動したものであると判断される。5 層中において、今回の地震で変位が生じた断層面の走向・傾斜は、 $\text{N}11^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{W}$ ,  $70^{\circ}\sim 78^{\circ}\text{W}$  と計測された(第 9 図)。

北壁面においては、高角度で西に傾斜する正断層とそれから西方に分岐あるいは折れ曲がって中角度で東に傾斜する複数の正断層が認められ、これらの断層に挟まれた領域が漏斗状の形態を呈して落ち込んでいる様子が確認された(第 8 図 a および第 9 図 a)。一方、南壁面では、高角度で西に傾斜する正断層の西方において複数の断層が認められた。これらの断層は連続性に乏しいものが多く、また変位量も小さい。断層帯の幅は北壁面と同様に上方に向かって広がるものの、北壁面で見られるような明瞭な地層の落ち込みは認められない(第 8 図 b および第 9 図 b)。

北壁面において、漏斗状落ち込み部の西縁およびそこから上方に分岐する断層群は 2 層まで変位を与え、1 層(2011 年の地震で生じた断層崖の崩壊堆積物)に覆われることから、2011 年の地震に伴ったものである。東壁面および予備的ピット調査により確認された 2011 年の地震前の地表面の落差は区間 I-I' の全域にわたって約 1.3 m である(第 11 図)。これは、上述したトレンチ地点北方の林道の上下変位量と一致している。このことから、トレンチ地点周辺の 2011 年の地震の上下変位量は約 1.3 m と考えられる。南北両壁面において、断層の両側に分布する 3 層の上面の落差は、人工改変による凹凸があるものの、約 1.2~1.4 m である。また、上盤側にのみ分布する 4 層は、下盤側にあたる東壁面では南壁面より南方に分布しており(第 11 図)、断層両側におけるその上面の高度差は約 1.2~1.3 m である。このように 4 層~2 層の上下変位量が 2011 年の地震の上下変位量とほぼ一致することから、4 層~2 層は 2011 年の地震のみを記録していると考えられる。

ところで、丸山ほか(2012)では、約  $64^{\circ}$  南に傾斜したトレンチ北壁面に沿って、断層面を境に東側

(下盤側)を1.3 m低下させ、2011年の地震直前の状態に復元したところ、基盤岩(5a層)上面に約50 cmの西側低下の高度差が認められたことから、これが2011年の地震に先行する西側落下の断層変位により生じた西向き低崖である可能性を指摘した。しかしながら、東壁面の地層分布をみると、トレンチ掘削範囲周辺が谷aの左岸谷壁に位置することを反映して、下盤側の5a層上面は南に傾斜している(第10図および第11図)。こうした南に傾斜する5a層上面に対して、同じく南に傾斜するトレンチ北壁面で変位を復元した場合に生じる高度差は見かけ上のものであり、真の上下変位量ではない。また、南壁面について同様に断層面を境に東側(下盤側)を1.3 m低下させると、断層の両側で5a層上面には有意な高度差が認められない。トレンチ北および南壁面において、上盤側の5a層上面が2011年の断層面に接する位置を第11図に×で示す。これらの位置から下盤側の5a層上面までの鉛直線分が真の上下変位量である。その変位量は北壁面で約1.6 m、南壁面で約1.5 mである(第11図に灰色矢印で示す)。断層上盤側における5a層上面の分布高度は、谷a付近の断層上盤側で実施した予備的ピット調査でも確認できた(第11図)。なお、2つの予備的ピット調査は断層面から約1~2 m西方で掘削しており(第7図)、そこでみられる5a層上面は2011年に活動した断層面との交点を示していないが、ここでは上盤側の5a層上面深度と仮定した。このように、トレンチ壁面および谷a付近での予備的ピット調査で確認された5a層上面をなめらかにつないで推定した上盤側の5a層上面(第11図に灰色破線で示す)は、下盤側の5a層上面の高度分布とほぼ平行しており、その落差は約1.3~1.6 mに収まる。推定された断層両側での5a層上面の落差は、本地区で確認された2011年地震の上下変位量(約1.3 m)よりもやや大きい場所があるものの、5a層上面の凹凸を考慮すると必ずしも有意な差があるとは言い切れない。

以上より、南北壁面に加えて東壁面および予備的ピット調査の観察の結果、齊道地区トレンチからは2011年の地震に先行する断層活動を示す直接的な地質学的情報は得られなかった。

### 3.2.2. 層序確認ピット掘削調査

累積変位を記録していると考えられるI面の形成年代を把握するため、地点Bにおいて深さ約1.2 mの層序ピットを掘削した(第3図bおよび第7図)。その結果、ピット壁面には、上位から層厚約0.1~0.2 mの表土、層厚約0.7~0.9 mの風化火山灰質土(ローム層)およびそれに直接覆われる基盤岩(礫岩)が深度約0.9 mからピット底(深度約1.3 m)まで分布していることが確認された(第12図)。この基盤岩は、角閃岩を主体とし、閃緑岩、斑レイ岩および花崗岩類を含むやや風化した主として径0.5~20 cm

の垂円礫からなる礫岩である。その岩相や分布から、本層はトレンチの5層に対比される。基盤岩の上面は平滑であり、I面が侵食面であることを示している。礫が点在する塊状砂質シルトからなる風化火山灰質土には肉眼で認定できるテフラはみられない。この風化火山灰質土および基盤岩最上部について、鉛直方向に10 cm刻みに試料を採取してテフラ分析を行った結果、いずれの試料からも火山ガラスが検出された(第3表)。火山ガラスのうちバブルウォール型のものは試料TSDP-5以浅の試料に多く含まれている。多量の火山ガラスが混入する試料TSDP-2~TSDP-7について火山ガラスの形態や屈折率を分析したところ、いずれも約2.8~3.0万年前の始良Tnテフラ(ATテフラ;町田・新井,2011)に対比されるテフラが含まれていた。丸山ほか(2012)は、ATテフラに特徴的なバブルウォール型の火山ガラスを多産しはじめ、ATテフラ起源の火山ガラスの含有率が最も高い試料TSDP-5をATテフラの降灰層準とし、I面の形成年代を少なくともATテフラ降灰時期よりも古いとした。しかしながら、風化火山灰質土のほぼ全ての層準からATテフラが産出すること、また試料TSDP-5のATテフラの含有率がその上下の試料に比べて顕著に高いわけではないことから、風化火山灰質土が周辺からの再堆積によるものである可能性もある。その場合、I面の形成年代は逆にATテフラ降灰時期よりも新しくなる。

## 4. 井戸沢断層東側トレースの調査結果

### 4.1. 地震断層調査

井戸沢断層東側トレースにおける活動履歴調査の適地選定のために断層沿いを踏査した結果、国土地理院地殻活動研究センター(2011)や東京電力株式会社(2011)などにより報告されている地点以外にも地震断層の可能性が高い地表変位が散点的に認められた。

いわき市川部町佐倉地区<sup>さくら</sup>北方では、アスファルト舗装道路に東側上がり約7 cmの段差が認められた(第13図)。段差の肩に生じた開口亀裂が左雁行を示すことから、右横ずれ成分を伴っていることがわかる(第13図b)。この段差の出現場所は、逆向き崖やその前面の凹地状の地形の分布から認定される井戸沢断層東側トレースの位置に一致している(第13図a)。この地点は井戸沢断層西側トレース沿いで確認された地震断層出現位置の南端よりもさらに南に位置する(第1図)。なお、佐倉地区では、これ以外にも複数地点でアスファルト道路や林道等に開口亀裂や小段差が認められた(第13図a)。その一部は東京電力株式会社(2011)でも報告されている。ただし、それらは散点的であるうえ、走向やずれのセンスも系統的ではないことから、地震動により生じた表層部の変形である可能性がある。

いわき市遠野町釜ノ沢地区でも井戸沢断層東側トレース沿いで地表変位が確認された(第14図)。ここでは、下流側(東側)上りの西向きの崖の手前で凹地状に広がる低地とその東方の山地の境界付近において、東に流下する天ノ川の南北両岸でコンクリート製護岸擁壁が破壊し、開口しつつ5 cm程度西側が低下している(第15図a)。南北両岸の擁壁破壊箇所を繋いだ部分付近の河床に堆積した砂礫をさらったところ、東の御斎所変成岩と西の柵平累層に挟まれる石炭層が接する走向、傾斜がN13°W, 80°Wの不連続面が認められた(第15図b)。水中のため両層の関係の詳細を確認することはできなかったが、両層の境界部が厚さ10~15 cmにわたって細粒化、粘土化していること、その出現位置や走向、傾斜が地形から推定される井戸沢断層東側トレースの位置、形状と一致することおよび周辺の地質状況などからみて、この不連続面は、地層境界をなす断層と考えられる。

#### 4.2. いわき市遠野町釜ノ沢地区におけるトレンチ調査

釜ノ沢地区の天ノ川で確認された地表変位の北方延長には、南に流下して天ノ川に注ぐ沢がある。この沢沿いを踏査したところ、東岸(左岸)側には御斎所変成岩が、西岸(右岸側)には柵平累層が分布していた(第16図)。断層露頭を確認することはできなかったが、地質の分布状況から非常に狭い範囲で断層位置を限定することができる。さらにその北では御斎所変成岩からなる西向き山地斜面とその西側の平坦面の地形境界が認められる(第14図および第16図)。こうした地質および地形の状況から、釜ノ沢地区では、御斎所変成岩と柵平累層を境する断層を出現させ、それを覆う平坦面を構成する地層との関係が確認できる可能性があると考え、トレンチ掘削調査を行った。なお、本調査では、井戸沢断層東側トレース全域において、前述した斉道地区でみられたような地形面の累積変位を示唆する地形表現は確認できなかった。

トレンチ南北両壁面には、東から西に向かって、ブロック化した御斎所変成岩(基盤岩, VIII層)と、これを覆う東方の山地斜面からもたらされた変成岩の巨大な岩塊を含む崖錐堆積物(VII~VI層)が分布し、その上位にトレンチ地点北方に分布する崩壊地から供給された斜面堆積物とみられる柵平累層を起源とするきわめてルーズな砂質シルト層(V~III層)が分布し、さらに表土(II層)および埋土(I層)が下位層を覆う状況が確認された(第17図および第18図)。このうち、III層, VII層とVIII層については、礫径やマトリクス粒径、破碎状況などによりさらに細層に区分した。第4表に区分した地層を詳しく記載した。

多数の炭化木片が含まれるIV層およびV層から

採取した試料の<sup>14</sup>C年代測定結果を暦年較正すると、95.4%確率範囲で西暦1690~1930年、西暦1670~1940年およびModernとなり、基盤岩を覆う地層がきわめて新しいことを示す(第5表)。

南北両壁面とも、御斎所変成岩(VIII層)の上面は西に向かって急激に分布高度を減じるとともに、VIII層起源の岩塊(VIIb層)を含む砂質礫を主体とする塊状の崖錐堆積物(VII層)に覆われている状況が確認された。VIII層には南北走向の片理面が発達し、一部に厚さ10 cm程度の破碎部(VIIIb層)が認められるが、この破碎部はVII層に不整合に覆われている。破碎部のうち最も明瞭な断層面の走向・傾斜はN6°W, 79°Wと計測された(第18図a)。

深さ約4 mまでの掘削範囲内には、出現を予想した柵平累層は出現しなかった。またトレンチ壁面内にはVII層より上位の堆積物を変位させるような断層は確認されない。以上より、トレンチ地点における御斎所変成岩と柵平累層の境界をなす井戸沢断層東側トレースを構成する断層の形態や活動性は不明である。

#### 5. 議論と今後の課題

上述したように、井戸沢断層西側トレースのうちの北セグメントは、地震発生前に活断層として認定されていなかった。堤・遠田(2012)は、福島県浜通りの地震の震源域について、地震前に撮影された空中写真判読に基づいて断層変位地形の検討を行い、鮫川以北の地震断層の北セグメントに沿って断続的な短い活断層トレースを認めている。しかしながら、それらについては沖積低地が変位している箇所が認められないことから、第四紀後期の活動の確実な地形学的証拠がないため推定活断層としている(堤・遠田, 2012)。今回の変動地形調査の結果、同セグメント南端部にあたる斉道地区では、約150 mの区間において複数の地形面に累積的な西側低下の変位が認められた。2011年の地震とそれに先行する断層活動を記録している可能性があるI面の形成時期については、今回のピット調査からは明確にすることができなかった<sup>註2</sup>。北セグメントの第四紀後期の活動度を把握するためには、今後I面およびII面の編年調査を進める必要がある。

今回の調査により、斉道地区では林道のずれとトレンチ地点周辺の断層崖の比高計測から、2011年の地震に伴う北セグメントの西側低下の上下変位量は約1.3 mであることが確認された。2011年の活動に先行するイベントについては、その時期は明らかではないものの、変位量はI面上下変位量(約1.6~1.8 m)から2011年の地震に伴う上下変位量(約1.3 m)を差し引いた0.3~0.5 m程度と推定され、2011年の地震の変位量に比べて有意に小さい可能性があることが示された。これまでに西側トレースで実施され

たトレンチ調査や群列ボーリング調査でも先行する地震に伴うずれ量が小さかった可能性が指摘されている（堤・遠田，2012；丹羽ほか，2013；Toda and Tsutsumi, 2013）．堤・遠田（2012）および Toda and Tsutsumi（2013）は，田人町掛橋の別当川右岸でトレンチ調査を実施し，先行する地震イベントを認定し，その時期が12,500～17,000年前であり，その際の上下変位量（約0.3 m）が2011年地震のそれ（約1.2 m）に比べて有意に小さいことを示した．また，丹羽ほか（2013）は，塩ノ平地区で南北両セグメントを横切る群列ボーリングを行い，2011年の地震に先行する断層活動のうち，少なくとも1つは約50,000年前に発生し，先行する断層活動による累積変位量が2011年の変位量に比べて著しく小さいことを報告している．斉道地区において可能性が示された先行する地震イベントが，西側トレースでこれまでに認定された先行地震イベントと時期が対応するかどうかは不明であるが，いずれの調査結果とも変位量が断層活動毎に最大で3～4倍程度の大きなばらつきが生じる可能性を示している．このことは，場合によっては古地震調査で確認された過去の地震イベントで生じたずれよりも明らかに大きなずれを伴うイベントが将来発生する可能性がある活断層が存在することを示唆している．その逆のケース，つまり古地震調査で認められた過去の地震イベントで生じたずれよりも明らかに小さなずれを伴うイベントもあり得る．

井戸沢断層東側トレースについては，今回の調査により，佐倉地区北方および釜ノ沢地区において約5～7 cm 西側が低下する地震断層の可能性が高い地表変位を確認した．その出現位置は，東京電力株式会社（2011）が記載した地表変位の延長部にあたり，地質境界をなす井戸沢断層にはほぼ一致している．井戸沢断層東側トレースに沿っては，変動量は小さいものの干渉SARの解析によりほぼ連続的な変位が検出されている（例えば，Kobayashi *et al.*, 2012; Fukushima *et al.*, 2013）．地表で確認された変位が散点的な理由としては，堤・遠田（2012）でも指摘しているように変位量が小さいため現地調査で見落とししている可能性が考えられる．一方，井戸沢断層東側トレースの過去の活動に関する具体的な情報を得るには至らず，第四紀後期にメートルオーダーの地表変位を伴う活動があったかは不明である．

**脚注** 注1 湯ノ岳断層と井戸沢断層に関する初期の英語表記（須貝ほか，1957；Mitsui, 1971；三井，1971）では，それぞれ“Yunotake：ゆのたけ”，“Idosawa：いどさわ”と表記されているが，ここでは地震断層名として定着している“Yunodake：ゆのだけ”および“Itozawa：いとざわ”を採用する．

注2 丸山ほか（2012）では，I面の形成時期がATテフラ降灰時期よりも古いとして，同面の上下変位

量から上下方向の平均変位速度が約0.07 m/千年以下であり，活動度がC級あるいはそれ以下と推定した．しかしながら，本論においてI面とATテフラとの関係を再検討した結果，I面の形成年代がATテフラ降灰時期よりも新しくなる可能性も否定できないこと（3.2.2. 参照）から，ここでは平均変位速度については議論しない．

**謝辞** 本研究の実施に際して，斉道地区ならびに釜ノ沢地区の区長，トレンチ地点の地権者をはじめ地元関係者の皆様には多大なるご協力をいただきました．栗田泰夫氏ならびに宮下由香里氏には原稿の不備をご指摘いただくとともに，原稿を改善するうえで貴重なコメントをいただきました．また，栗田泰夫氏には，第1図に示した湯ノ岳断層および井戸沢断層東側トレース（一部）の地震断層確認地点（栗田ほか，2011）の座標データを提供していただきました．以上の皆様に厚くお礼申し上げます．本調査の一部には，平成23年度地震調査研究関係政府三次補正予算「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価」を使用しました．

## 文 献

- 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．地震予知連絡会会報，86，170–172．
- Bronk Ramsey, C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51, 337–360.
- Fukushima, Y., Takada, Y. and Hashimoto, M. (2013) Complex Ruptures of the 11 April 2011  $M_w$  6.6 Iwaki Earthquake Triggered by the 11 March 2011  $M_w$  9.0 Tohoku Earthquake, Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1572–1583, doi:10.1785/0120120140.
- Hsieh, M.-L., Lee, Y.-H., Shih, T.-S., Lu, S.-T. and Wu, W.-Y. (2001) Could we have pre-located the northeastern portion of the 1999 Chi-Chi earthquake rupture using geological and geomorphic data? *TAO*, 12, 461–484.
- Imanishi, K., Ando, R. and Kuwahara, Y. (2012) Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39, L09306, doi:10.1029/2012GL051491.
- 石山達也・杉戸信彦・越後智雄・佐藤比呂志（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のトレンチ掘削調査（速報）．日本地震学会ニュースレター，23-5，36–38．
- 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，437p．

- Kobayashi, T., Tobita, M., Koarai, M., Okatani, T., Suzuki, A., Noguchi, Y., Yamanaka, M. and Miyahara, B. (2012) InSAR-derived crustal deformation and fault models of normal faulting earthquake (Mj 7.0) in the Fukushima-Hamadori area. *Earth Planets Space* 64, 1209–1221, doi:10.5047/eps.2012.08.015.
- 国土地理院地殻活動研究センター (2011) いわき市周辺における地震災害の現地調査 (2 回目) の報告. <http://www.gsi.go.jp/common/000060960.pdf> (2014 年 9 月 11 日最終閲覧).
- 久保和也・柳沢幸夫・山元孝広・中江 訓・高橋 浩・利光誠一・坂野靖行・宮地良典・高橋雅紀・駒澤正夫・大野哲二 (2007) 20 万分の 1 地質図幅「白河」, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 黒澤英樹・楮原京子・三輪敦志・佐藤ふみ・今泉俊文・宮内崇裕・橋本修一・中島秀敏・白澤道生・内田淳一 (2012) 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層—いわき市田人町塩ノ平における露頭観察とボーリング調査 (速報) —. *活断層研究*, 36, 23–30.
- 町田 洋・新井房夫 (2011) 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.
- 丸山 正・吉見雅行・斎藤英二・齋藤 勝 (2012) 変動地形・古地震学的検討に基づく 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に関連する断層の活動性. *AFERC News*, 34, 1–9.
- 松田時彦 (1966) 跡津川断層の横ずれ変位, *地震研究所彙報*, 44, 423–445.
- 松田時彦 (1975) 活断層としての石廊崎断層系の評価, 1974 年伊豆半島沖地震災害調査研究報告, 121–125.
- Mitsui, S. (1971) Studies on the mechanism of deformation of sedimentary rocks in the Iwaki area of the Joban coal-field, Fukushima Prefecture. *Science Reports of the Tohoku University, Second Series (Geology)*, 42, 199–272.
- 三井 忍 (1971) 岩石物性と地質現象—常磐炭田石城地区を例として—. *地質学雑誌*, 77, 265–271.
- Mizoguchi, K., Uehara, S.-I. and Ueta, K. (2012) Surface fault ruptures and slip distributions of the M<sub>w</sub> 6.6 11 April 2011 Hamadori, Fukushima Prefecture, Northeast Japan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102, 1949–1956, doi:10.1785/0120110308.
- 中田 高・今泉俊文編 (2012) 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 68p.
- 丹羽雄一・遠田晋次・小俣雅志・森 良樹 (2013) 井戸沢断層の 2011 年福島県浜通りの地震に先行する断層活動: 福島県いわき市塩ノ平地区におけるボーリング調査. *活断層研究*, 39, 1–8.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Grootes, P. M., Guilderson, T.P., Hafliðason, H., Hajdas, I., HattĹ, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M., and van der Plicht, J. (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55, 1869–1997.
- 須貝貫二・松井 寛・佐藤 茂・喜多河庸二・佐々木 実・宮下美智夫・河内英幸 (1957) 常磐炭田地質図および同説明書, 日本炭田図 I. 地質調査所, 143p.
- Toda, S. and Tsutsumi, H. (2013) Simultaneous reactivation of two, subparallel, inland normal faults during the M<sub>w</sub> 6.6 11 April 2011 Iwaki earthquake triggered by the M<sub>w</sub> 9.0 Tohoku-oki, Japan, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1584–1602, doi:10.1785/0120120281.
- 東京電力株式会社 (2011) 「平成 23 年東北地方太平洋沖地震を踏まえた新耐震指針に照らした既設発電用原子炉施設等の耐震安全性の評価結果に係る原子力安全・保安院における検討に際しての意見の追加への対応について (追加指示)」に基づく報告, <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11083001-j.html> (2014 年 9 月 11 日最終閲覧).
- 堤 浩之・遠田晋次 (2012) 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震の地震断層と活動履歴. *地質学雑誌*, 118, 559–570, doi:10.5575/geosoc.2012.0057.

(受付: 2014 年 7 月 22 日, 受理: 2015 年 10 月 1 日)



第1表. 齊道地区トレンチ壁面に分布する地層の区分と記載.

Table 1. Division and description of stratigraphic units exposed on the trench at Saido.

Unit	Inferred environment	Subunit	Facies	<sup>14</sup> C age <sup>1</sup> and correlative strata and rocks
1	Colluvium	—	Debris (containing sand, silt, gravel, fallen leaves, and twigs) shed from the steep fault scarp formed by the 2011 earthquake (post-earthquake colluvial wedge)	—
2	Top soil, slope deposit	2a	Organic soil occasionally containing gravel with abundant roots (upper surface: ground surface at the time of the 2011 earthquake)	—
		2b	Silty fine sand and medium sand (slope deposit)	—
		2c	Organic silt (buried former top soil)	—
3	Slope deposit (filling valley)	3a	Stratified silty fine sand and sandy silt	—
		3b	Sandy silt with gravel partly interbedded with lenticular medium sand	220 ± 30 yBP
		3c	Organic sandy silt interbedded with organic silt. Occasionally containing rip-up clasts derived from strongly weathered facies of unit 5. Containing channel fill with dense charcoal at the basal part.	610 ± 30 yBP
		3d	Sandy silt (partly organic silt) with gravel. Occasionally containing rip-up clasts derived from strongly weathered facies of unit 5 filled with a sandy silt matrix.	910 ± 30 yBP
4	Valley fill deposit	—	Weakly stratified (partly imbricated) clast-supported gravel with fresh amphibolite, gabbro, and granite clasts with 1-8 cm (max. 12 cm) in diameter, filled by a weakly organic sandy silt matrix	210 ± 30 yBP 640 ± 30 yBP
5	Debris flow deposit	5a	Semi-consolidated stratified conglomerate with weakly weathered or fresh amphibolite, diorite, gabbro, and granite clasts with 0.5-15 cm (up to 50 cm) in diameter filled with a medium sand to granule matrix	Kunugidaira Formation (Early Miocene)?
		5b	Sheared and fractured part of unit 5a with thin fault gouge	

<sup>1</sup> Conventional <sup>14</sup>C age with 1σ (See Table 2 for detail).

第2表. 齊道地区トレンチ壁面から採取した試料の<sup>14</sup>C年代測定結果.

Table 2. <sup>14</sup>C ages for samples collected from trench at Saido.

Lab. No. <sup>1</sup>	Sample Name	Unit <sup>2</sup>	Trench wall	Sample material	Pre-treatment	δ <sup>13</sup> C (‰)	Conventional <sup>14</sup> C age (yBP) (1σ) <sup>3</sup>	Calendric age range (AD) (95.4% probability) <sup>4</sup>	
								Oldest	Youngest
Beta-322944	CSHTE-3	3c	E	Plant	acid/alkali/acid	-28.8	220 ± 30	1640	post-1950
Beta-319230	CSHTN-1	3c	N	Charcoal	acid/alkali/acid	-24.7	610 ± 30	1290	1410
Beta-319231	CSHTN-2	3d	N	Plant	acid/alkali/acid	-27.5	910 ± 30	1030	1210
Beta-322945	CSHTE-4	4	E	Plant	acid/alkali/acid	-27.1	210 ± 30	1640	post-1950
Beta-321452	CSHTN-26	4	N	Charcoal	acid/alkali/acid	-25.9	640 ± 30	1280	1400

<sup>1</sup> Beta- : Beta Analytic, Florida, USA.

<sup>2</sup> Units correspond to those of Table 1.

<sup>3</sup> Conventional <sup>14</sup>C age represents the measured <sup>14</sup>C age corrected for isotopic fractionation, calculated using the δ<sup>13</sup>C.

<sup>4</sup> Calendric age is calculated using a calibration program OxCal 4.2 (Bronk Ramsey, 2009) with calibration curve of IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013). Age is shown with rounded to nearest decade.

第3表. 齊道地区層序ピットから採取した試料のテフラ分析結果.  
Table 3. Result of tephra analysis for samples taken from pit at Saido.

Sample No.	Content of volcanic glass (number/3,000 grains)			Content of heavy minerals (number/3,000 grains)			$\beta$ quartz (number/3,000 grains)	Refractive index of volcanic glass (n)	Content of AT glass
	Bw	Pm	O	Opx	Gho	Cum			
TSDP-1	56	69	153	96	49	3	2.1		
TSDP-2	54	37	162	103	51	4	2.1	1.4986-1.5029, 1.5054	7/30
TSDP-3	88	70	135	93	55	3	1.2	1.4988-1.5028	7/30
TSDP-4	66	39	168	90	25	2	0.8	1.4982-1.5030	5/30
TSDP-5	52	34	85	75	20	2	0.9	1.4972-1.5030	10/30
TSDP-6	37	21	99	47	22	2	0	1.4992-1.5032	6/30
TSDP-7	31	24	67	19	11	1	0	1.4996-1.5025, 1.5051	8/30
TSDP-8	19	4	18	7	10	1	0		
TSDP-9	1	0	2	2	9	1	0		

Bw : Bubble wall type      Opx: Orthopyroxene  
Pm : Pumice type          Gho: Green hornblende  
O : Other type              Cum: Cummingtonite

第4表. 釜ノ沢地区トレンチ壁面に分布する地層の区分と記載.  
Table 4. Division and description of stratigraphic units exposed on the trench at Kamanosawa.

Unit	Inferred environment	Subunit	Facies	<sup>14</sup> C age <sup>1</sup> and correlative strata and rocks
I	Man-made fill	—	Mixture of silt, sand, and gravel with garbage, including vinyl sheet, lumber, and pipe	—
II	Top soil	—	Organic silt, sand with roots and fallen leaves	—
III	Slope deposit	IIIa	Sand with gravel	—
		IIIb	Weakly stratified silty fine sand with gravel, containing abundant rip-up clast of siltstone and sandstone derived from the Kunugidaira Formation	—
IV	Slope deposit	—	East of grids N5 and S5: gravel with mainly subangular clast with 1 cm in diameter. West of N5 and S5: silt with gravel, containing abundant charcoal and wood fragments.	120 ± 30 yBP
V	Slope deposit	—	Exposed west of grids N5.3 and S4.5. Silty fine sand with gravel (chiefly 1 to 10 cm in diameter subangular clast, with abundant rip-up clasts from the Kunugidaira Formation) and charcoal.	70 ± 30 yBP
VI	Talus deposit	—	Gravelly sand with mainly angular clast derived from the Gosaisho metamorphic rock. Exposed only west of grids N5 and S4.8.	—
VII	Talus deposit	VIIa	Gravel with angular to subangular clast, filled by a fine to very coarse sand matrix	—
		VIIb	Angular to subangular blocks of the Gosaisho Metamorphic rock (unit VIII) up to 200 cm in diameter	—
VIII	Metamorphic rock	VIIIa	Green schist with well-developed NS-striking schistsity (friable along the schistsity)	Gosaisho Metamorphic rock
		VIIIb	Brecciated to pulverized schist	rock (Early Cretaceous)

<sup>1</sup> Conventional <sup>14</sup>C age with 1 $\sigma$  (See Table 5 for detail).

第5表. 釜ノ沢地区トレンチ壁面から採取した試料の<sup>14</sup>C年代測定結果.  
Table 5. <sup>14</sup>C ages for samples collected from trench at Kamanosawa.

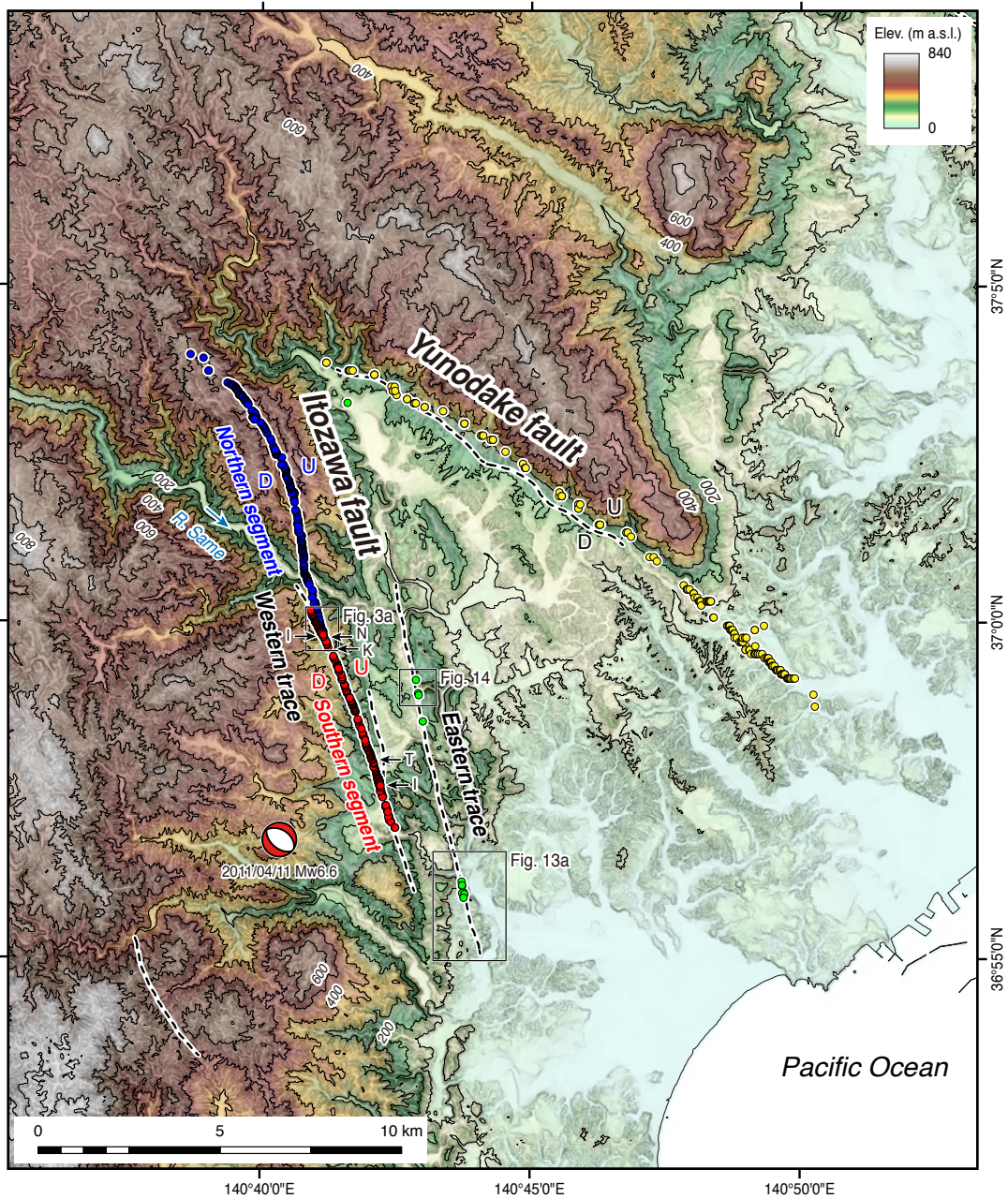
Lab. No. <sup>1</sup>	Sample Name	Unit <sup>2</sup>	Sample material	Pre-treatment	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Conventional <sup>14</sup> C age (yBP) (1 $\sigma$ ) <sup>3</sup>	Calendric age range (AD) (95.4% probability) <sup>4</sup>	
							Oldest	Youngest
Beta-321453	CKSTS-1	IV	Wood fragment	acid/alkali/acid	-26.2	Modern (162.7 ± 0.4 pMC)	—	—
Beta-321454	CKSTS-2	IV	Wood fragment	acid/alkali/acid	-26.6	Modern (168.5 ± 0.4 pMC)	—	—
Beta-322946	CKSTS-5	IV	Charcoal	acid/alkali/acid	-29.0	120 ± 30	1670	1940
Beta-321455	CKSTS-3	V	Charcoal	acid/alkali/acid	-23.6	70 ± 30	1690	1930

<sup>1</sup> Beta- : Beta Analytic, Florida, USA.

<sup>2</sup> Units correspond to those of Table 4.

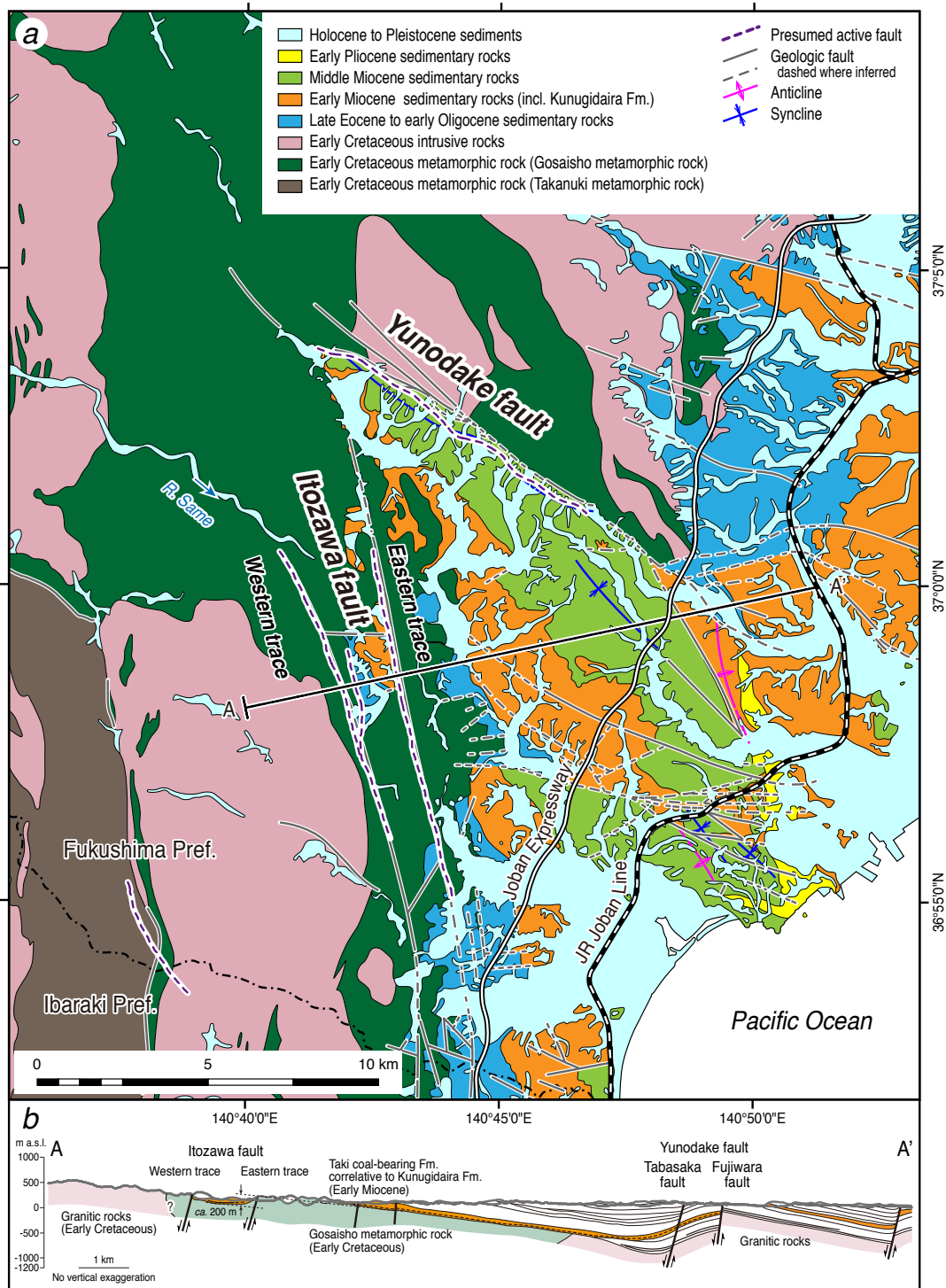
<sup>3</sup> Conventional <sup>14</sup>C age represents the measured <sup>14</sup>C age corrected for isotopic fractionation, calculated using the  $\delta^{13}\text{C}$ .

<sup>4</sup> Calendric age is calculated using a calibration program OxCal 4.2 (Bronk Ramsey, 2009) with calibration curve of IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013). Age is shown with rounded to nearest decade.



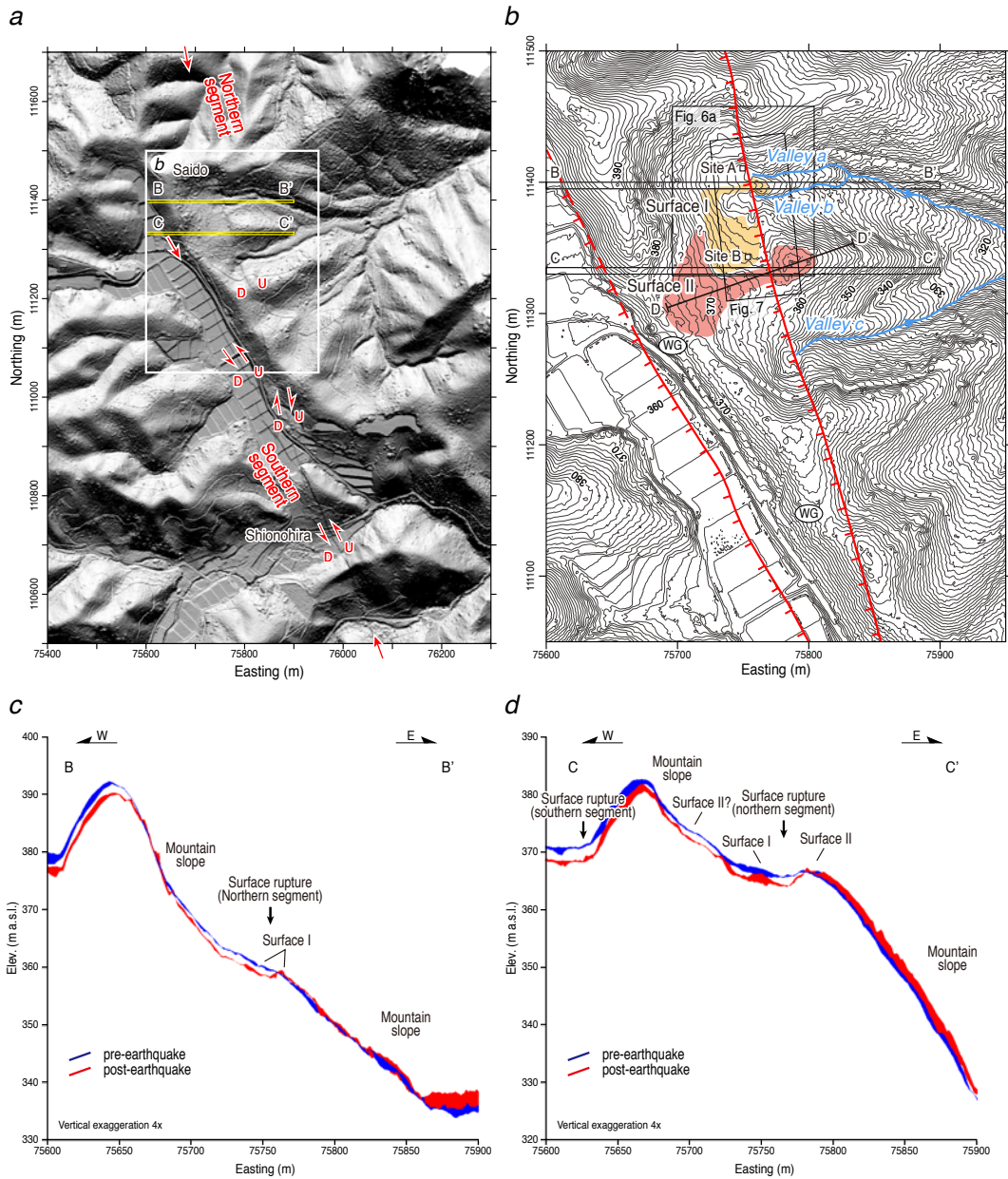
第1図. 井戸沢断層および湯ノ岳断層の分布と2011年福島県浜通りの地震に伴い出現した地震断層. 井戸沢断層西側トレース沿いの地震断層確認地点のうち北セグメントを青丸, 南セグメントを赤丸で示す. 井戸沢断層東側トレース沿いで確認された地表変位を緑丸で示す. 湯ノ岳断層沿いの地震断層を黄丸で示す. U, Dはそれぞれ相対的隆起側, 低下側を示す. 第3図a, 第13図aおよび第14図の範囲を黒枠で示す. 推定活断層(黒破線)の分布は中田・今泉編(2002)による. 湯ノ岳断層沿いの地震断層および井戸沢断層東側トレース沿いの地震断層の一部は栗田ほか(2011)に基づく. 井戸沢断層を対象とした既存古地震調査地点(I:石山ほか, 2011, K:黒澤ほか, 2012, T:堤・遠田, 2012, Toda and Tsutsumi, 2013, N:丹羽ほか, 2013)を図中に示す. 基図は, 国土地理院基盤地図情報数値標高モデル10mメッシュを使用. 等高線間隔は100m.

Fig. 1. Map showing distribution of the Itozawa fault and Yunodake fault and field observation points of the surface ruptures associated with the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake. Of the observation points for the surface ruptures along the western trace of the Itozawa fault, those of the northern segment are shown by the blue circles, whereas the southern segment by the red circles. The surface fractures appeared on the eastern trace of the Itozawa fault and the surface ruptures on the Yunodake fault are marked by the green and yellow circles, respectively. U and D denote upthrown side and downthrown side, respectively. Areas of Fig. 3a, Fig. 13a and Fig. 14 are outlined by black boxes. Location of presumed active faults is shown in broken line after Nakata and Imaizumi (2000). Location of the surface ruptures along the Yunodake fault and a part of eastern trace of the Itozawa fault is based on Awata *et al.* (2011). Sites for previous paleoseismic study on the Itozawa fault are also shown (I: Ishiyama *et al.*, 2011, K: Kurosawa *et al.*, 2012, T: Tsutsumi and Toda, 2012, Toda and Tsutsumi, 2013, N: Niwa *et al.*, 2013). Topographic image is created from 10 m mesh digital elevation model (DEM) distributed by Geospatial Information Authority of Japan. Topographic contour interval is 100 m.



第2図. a) 調査地域周辺の地質図 (久保ほか, 2007 を簡略化). 推定活断層 (黒破線) の分布は中田・今泉編 (2002) による. b) 井戸沢断層東側トレースを横切る地質断面図 (A-A', 須貝ほか, 1957 に加筆・簡略化). 第2図 a) の範囲は第1図と同じ. 断面図の位置は第2図 a) に示す.

Fig. 2. a) Geologic map around the study area (simplified from Kubo *et al.*, 2007). Location of presumed active faults is after Nakata and Imaizumi (2000). b) Geologic cross section A-A' across the Itozawa fault (modified and simplified from Sugai *et al.*, 1957). Area of Fig. 2a is same as Fig. 1. For location of the section see Fig. 2a.



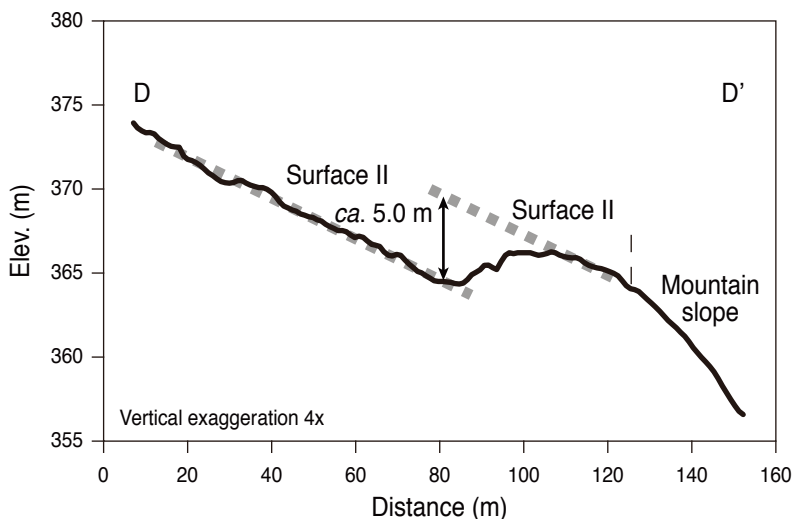
第3図. 齊道地区周辺に出現した地震断層、断層沿いの地形、調査地点を示す図および地震断層を横切る地震前後の地形断面図。a) 陰影図。地震断層を赤矢印で示す。U、Dはそれぞれ相対的隆起側、沈降側を示す。半矢印のペアは横ずれを示す。B-B'とC-C'は、第3図c、dの地形断面位置。(b) 第3図aの白枠範囲の等高線図(1m間隔)と地震断層(赤線:ケバは低下側を示す)、地形面(I面およびII面)および小河川(青線)の分布。右側の地震断層(北セグメント)を境に上流側と下流側で谷a、bおよびcの下刻状況の顕著な違いが認められる。WG: 風隙。c) 地形断面図B-B'とd) C-C'。いずれも青線が地震前、赤線が地震後。両測線とも地震断層は地震前から存在した逆向き(西向き)低崖に沿って出現。地震前と地震後の断面の(位置の)ずれは、2011年4月11日の断層変位によるものに加えて、3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う東北日本弧の広域的な東方への移動による影響も含まれている。いずれの図も座標系は平面直角座標系IX。

Fig. 3. Map showing location of the surface rupture, trench and pit, topography around Saido, and topographic profiles. a) Shaded relief image created from post-earthquake 1 m resolution DEM. The surface ruptures are marked by red arrows. U and D indicate upthrown and downthrown, respectively. A pair of half arrows denotes strike-slip component. Sections B-B' and C-C' are locations of topographic profiles shown in Fig. 3c and d. b) Topographic contour map in the area of white rectangle in Fig. 3a, showing distribution of surface rupture (red lines; barbs on downthrown side), geomorphic surfaces (surfaces I and II) and small valleys (blue lines). Contour interval of topographic map is 1 m. Note the significant dissection of valleys a, b, and c on the downstream side of the surface rupture appeared on the northern segment of the western trace of the Itozawa fault. WG: wind gap. Topographic profiles c) B-B' and d) C-C' across the surface rupture appeared on the northern segment of the western trace of the Itozawa fault (blue: pre-earthquake; red: post-earthquake). Note that the surface rupture occurred on the base of pre-existing west-facing scarp for both profiles. Shift in the profiles is influenced not only by displacement associated with the April 11 (Fukushima-ken Hamadori) earthquake, but also by eastward movement due to the March 11 Great East Japan Earthquake and its afterslip. Easting and Northing in meters (Japan Plane Rectangular Coordinate System IX).



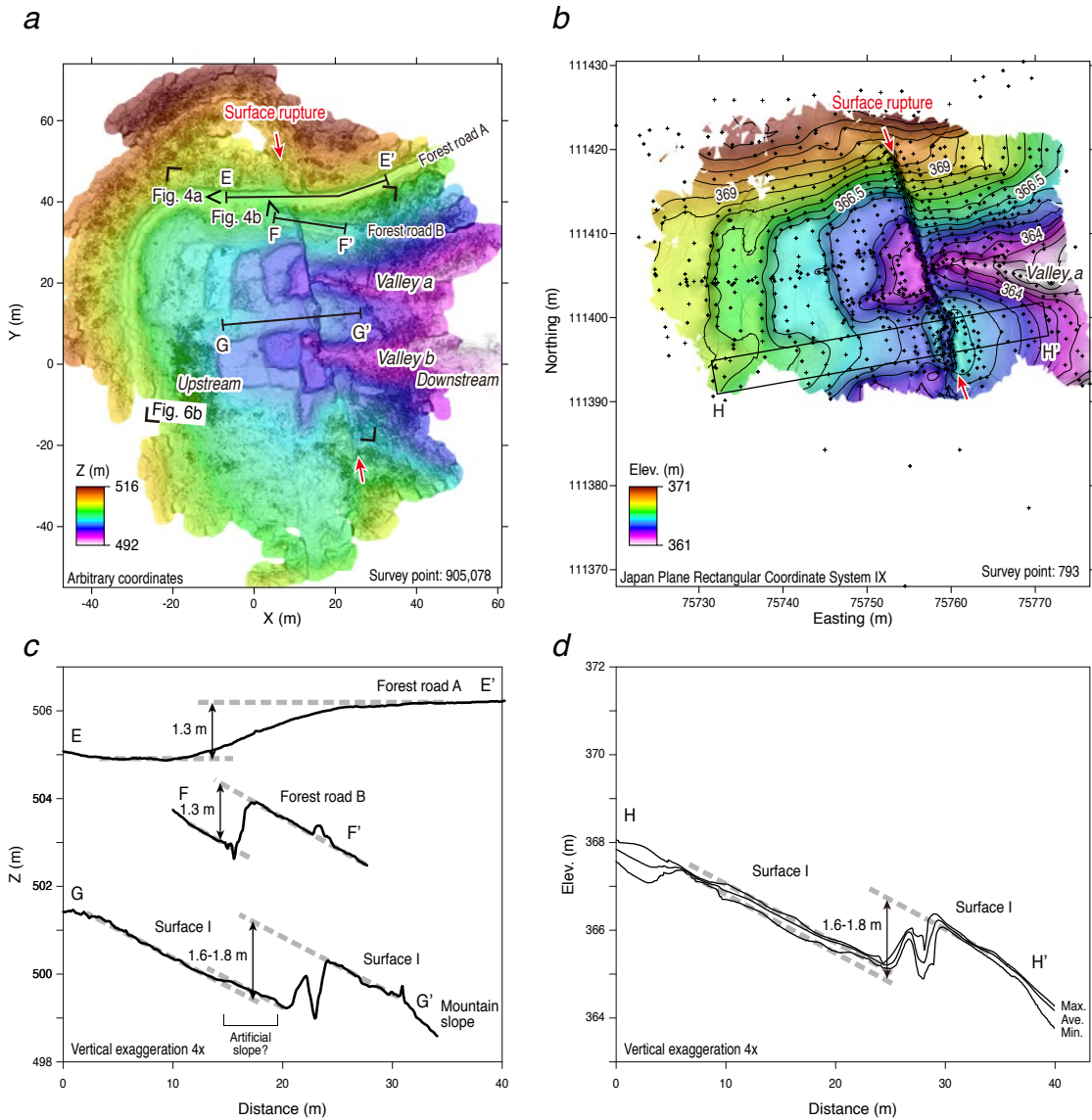
第4図. 齊道地区に出現した地震断層とトレンチ掘削地点. a) 東に向かって撮影. 地震直後の簡易計測による林道(第6図aの林道A)の上下変位(鉛直隔離)は約1.3 m. b) 南に向かって撮影. 写真左手の林道(第6図aの林道B)は第4図a右端のそれと同じ. トレンチ掘削地点は林道と断層変位による堰止め池との間の低崖に位置する. おおよその写真撮影位置と方位を第6図aに示す.

Fig. 4. Photographs showing the surface rupture appeared at Saido viewed from a) west and b) north. Vertical offset of forest road (forest road A in Fig. 6a) is measured to be ca. 1.3 m by means of conventional tape measurement carried out immediately after the earthquake. The forest road (forest road B in Fig. 6a) shown in left margin of the Fig. 4b corresponds to that shown in right edge of the Fig. 4a. Trench excavation site is located between the forest road B and temporal pond created by downstream-side-up displacement. Approximate location and orientation of photo shoot is shown in Fig. 6a.



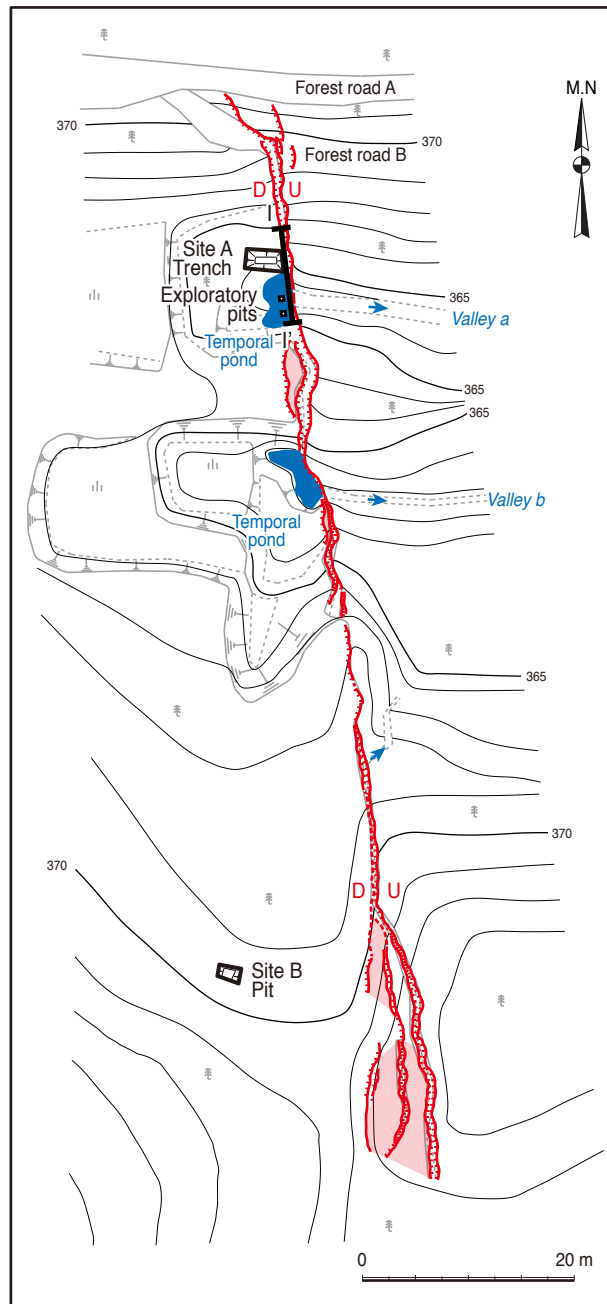
第5図. 地形断面図D-D' (地震後の航空レーザ測量による1 m DEMから作成). 断面図の位置を第3図bに示す.

Fig. 5. Topographic profile D-D' constructed from 1 m resolution post-earthquake DEM. For location of the profile see Fig. 3b.



第 6 図. 齊道地区トレンチ調査地点周辺の詳細地形および地形断面図. a) 地上型レーザスキャナー, b) トータルステーションを用いた計測結果. いずれも 2012 年 2 月 23, 24 日に計測. 第 6 図 b の黒+は計測地点を示す. 第 6 図 a の範囲を第 3 図 b に黒枠で示す. 第 6 図 b のフレームの四隅を第 6 図 a に示す. 図中の谷 a, b は第 3 図 b に示した谷 a, b に対応. c) 地上型レーザスキャナー計測データから作成した地形断面図 E-E' ~ G-G'. 断面 E-E' は復旧工事により断層崖の形態が改変している. d) トータルステーション計測データから作成した地震断層を横切る I 面のスワス地形断面図 H-H' (スワス幅は 4 m). 地形断面図の位置を第 6 図 a, b に示す.

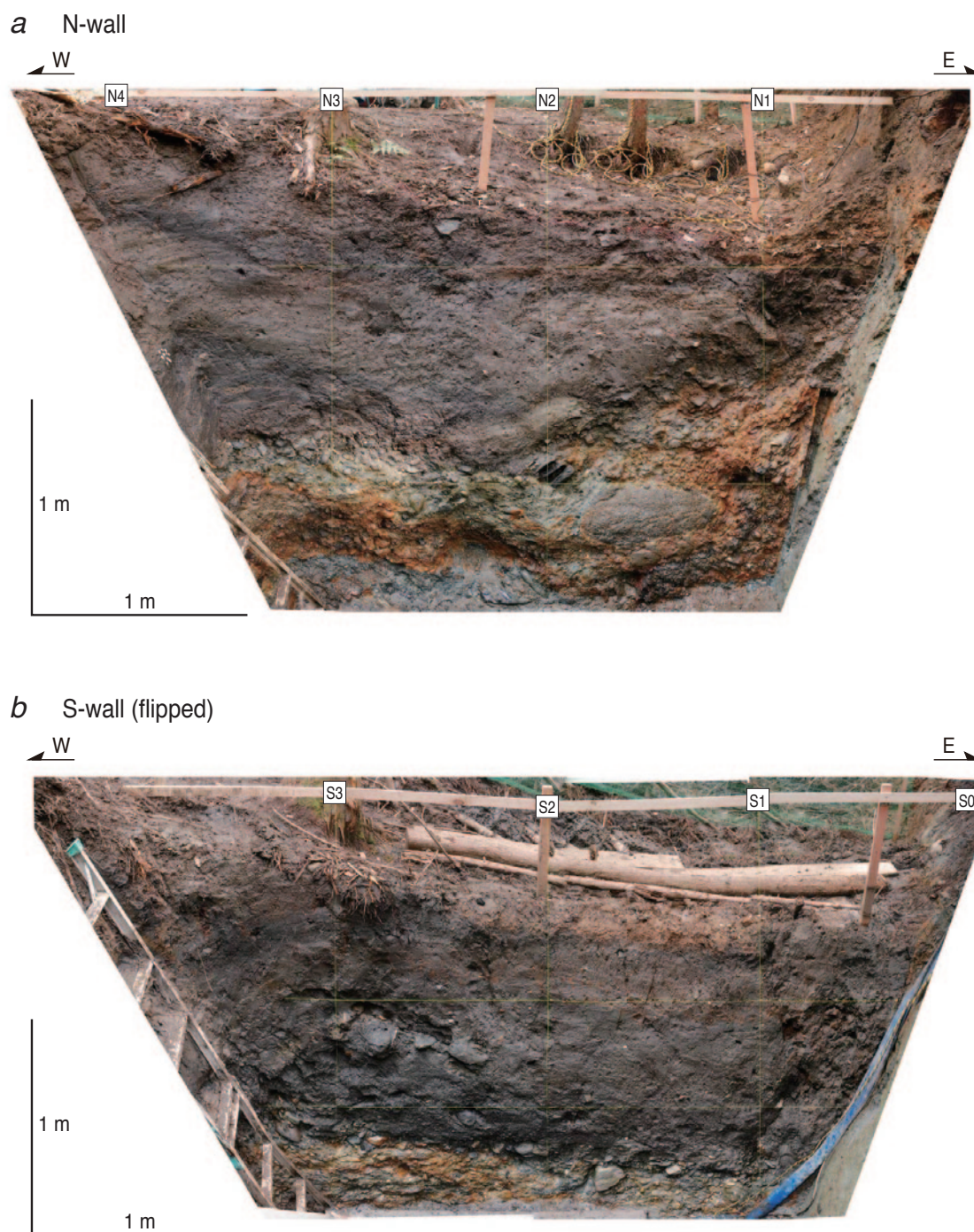
Fig. 6. Detailed topographic map around Saido site created using a) a terrestrial LiDAR and b) a total station surveying data. Black crosses in Fig. 6b denote the survey points. Area of Fig. 6a is outlined by black rectangle in Fig. 3a. The four corners of frame of Fig. 6b are shown in Fig. 6a. Valleys a and b are the same as those in Fig. 3b. Both the terrestrial LiDAR and total station surveys were conducted on February 23 and 24, 2012. c) Topographic profiles E-E' to G-G' constructed from the terrestrial LiDAR data. Note that the scarp morphology of profile E-E' is modified to be gentle slope due to the post-earthquake repair work. d) Swath topographic profile H-H' constructed from the total station data. Width of swath is 4 m. Location of topographic profiles E-E' to G-G' is shown in Fig. 6a and b. Note that the vertical offset from profiles E-E' and F-F', which record only the 2011 displacement, are smaller than that from profiles G-G' and H-H' across the surface I.



第7図. 齊道地区のトレンチ掘削地点ならびにピット掘削地点と地震断層との関係. 基図はトータルステーションを用いた等高線図 (等高線間隔は1 m). 地震断層 (赤線) の分布は現地調査による. 図中の谷 *a, b* は第3図 b および第6図 a, b に示した谷 *a, b* に対応. 図の範囲を第3図 b に黒枠で示す.

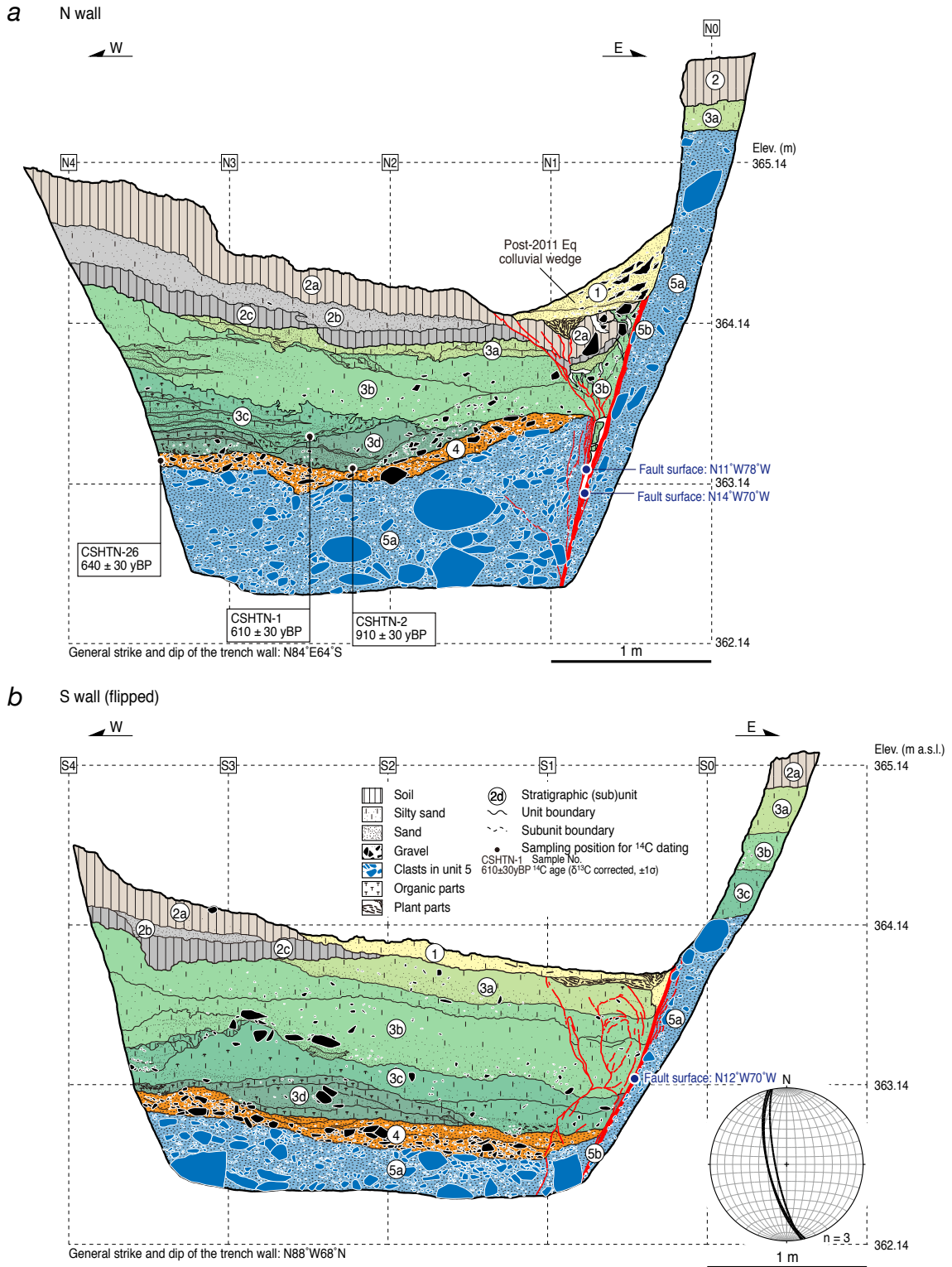
Fig. 7. Map showing distribution of surface rupture based on our field mapping and locations of a trench and exploratory pits (Site A), and a pit (Site B) at Saido site. Base topographic contour map (contour interval is 1 m) was created using total station surveying data. Note that the east-side-up 2011 surface ruptures occurred on or near the base of pre-existing west-facing scarp. Valleys *a* and *b* are the same as those in Fig. 3b and Fig. 6a, b. Area of figure is outlined by black rectangle in Fig. 3b.





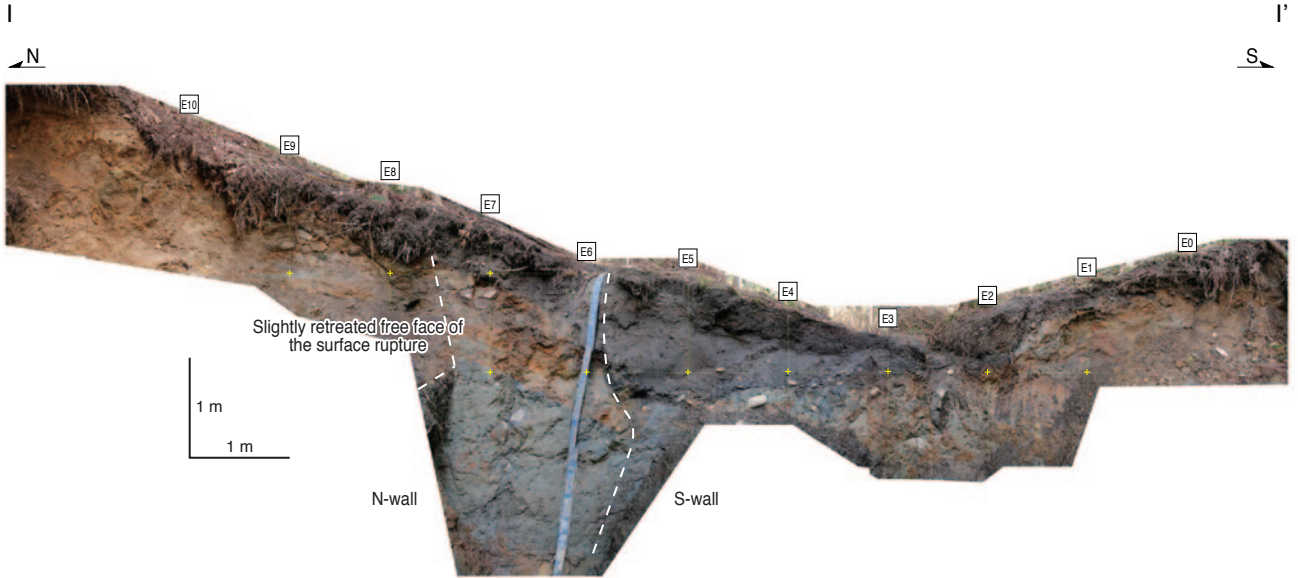
第 8 図. 齊道地区トレンチ北壁面 (a) および南壁面 (b) の写真. トレンチ掘削位置を第 3 図 b および第 7 図 (地点 A) に示す.

Fig. 8. Photographs showing a) the north wall and b) the south wall of trench at Saido site. For location of the trench, see Figs. 3b and 7 (Site A).

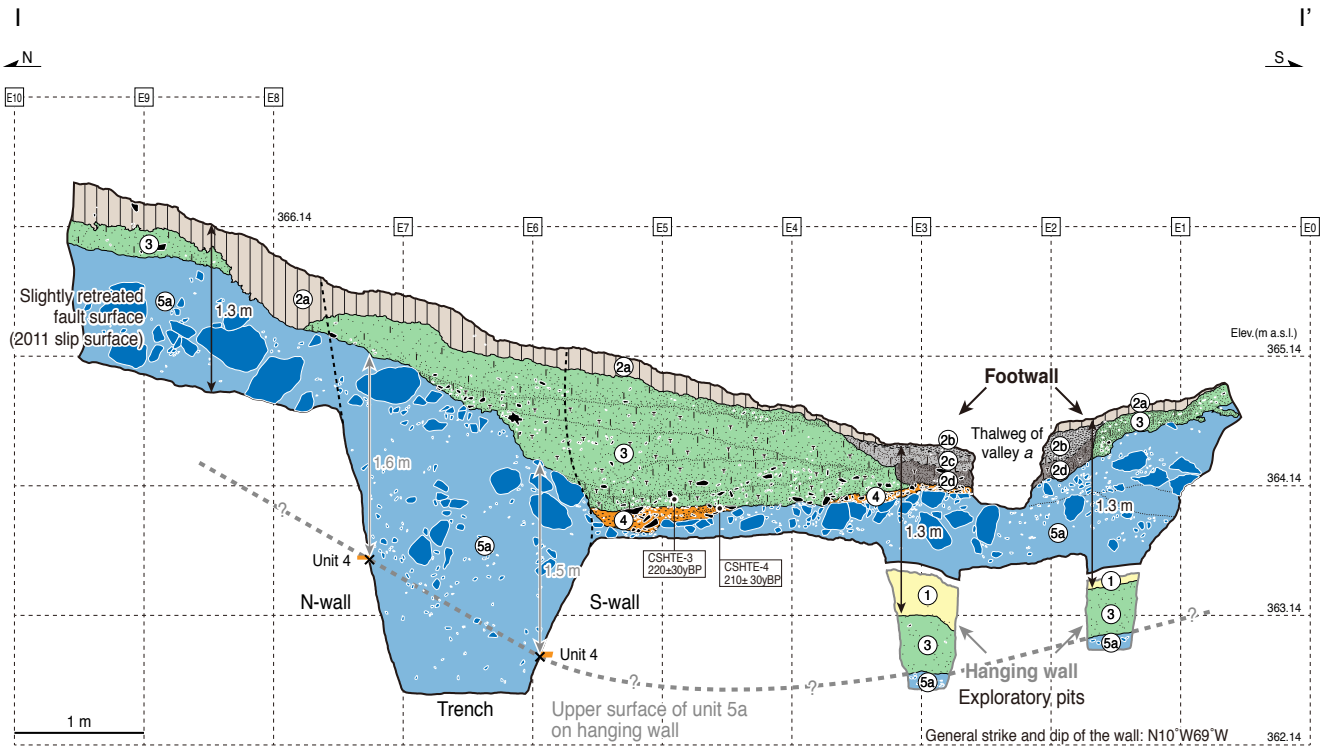


第9図. 齊道地区トレンチ北壁面 (a) および南壁面 (b) のログ. グリッド間隔は1 m. 図中の白丸内の数字は、本文及び第1表の地層区分と対応 (アラビア数字+アルファベットは地層区分を細分したもの). 図中の黒丸および青丸は、それぞれ  $^{14}\text{C}$  年代測定用試料採取位置および断層面の走向・傾斜計測地点を示す. 図中の年代値は Conventional  $^{14}\text{C}$  年代を示す. 第9図b右下のシュミットネット (下半球投影) はトレンチ北および南壁面に出現した主断層面の走向・傾斜を示す.

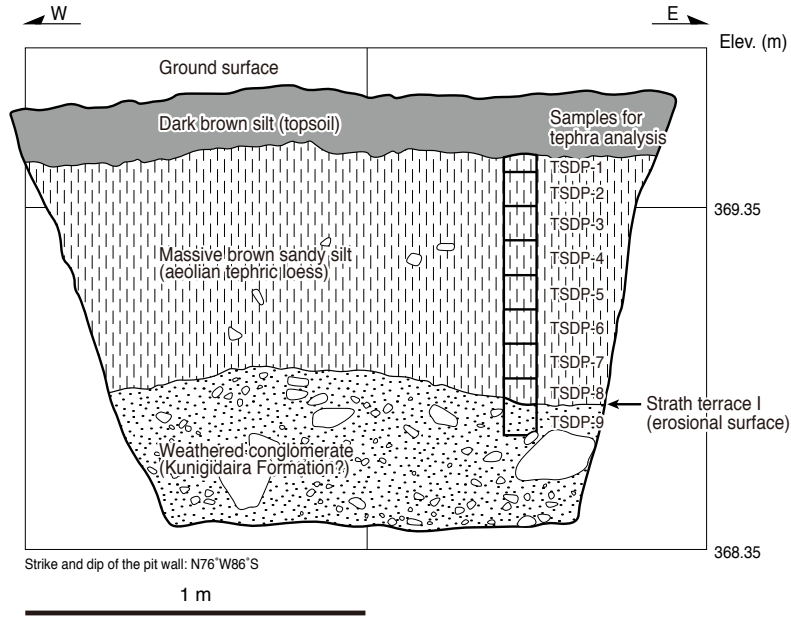
Fig. 9. Log of a) the north wall and b) the south wall of trench at Saido site. Grid interval is 1 m. Arabic numerals (with alphabet) in white circle are stratigraphic (sub) units, which correspond to those of Table 1. Black circle and blue circle is position where sample for  $^{14}\text{C}$  dating was collected and position where attitude of the fault surface was measured, respectively. Note that the  $^{14}\text{C}$  age given is conventional age. Equal area stereonet in Fig. 9b shows attitude of the main fault exposed and measured on the north and south walls of trench.



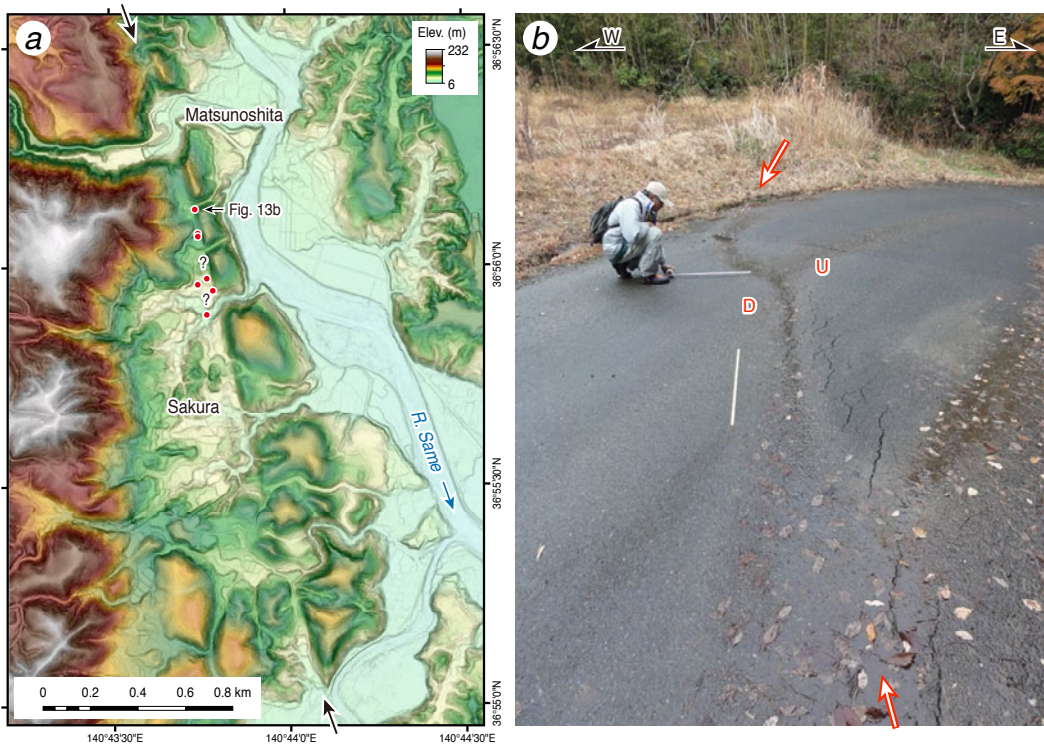
第 10 図. 齊道地区トレンチ東壁面および地震断層崖の写真. トレンチ北および南壁面の概略位置を白破線で示す. 写真の範囲は第 7 図の測線 I-I' に示す. グリッド間隔は鉛直, 水平ともに 1 m. グリッドの交点を十字で示す.  
 Fig. 10. Photograph showing the slightly retreated free face of surface rupture at Saïdo including the east wall of trench and. Approximate position of north and south walls is indicated by white dashed line. Grid interval is 1 m. Intersections of grids are marked by cross. Location of the photo is shown in Fig. 7 (section I-I').



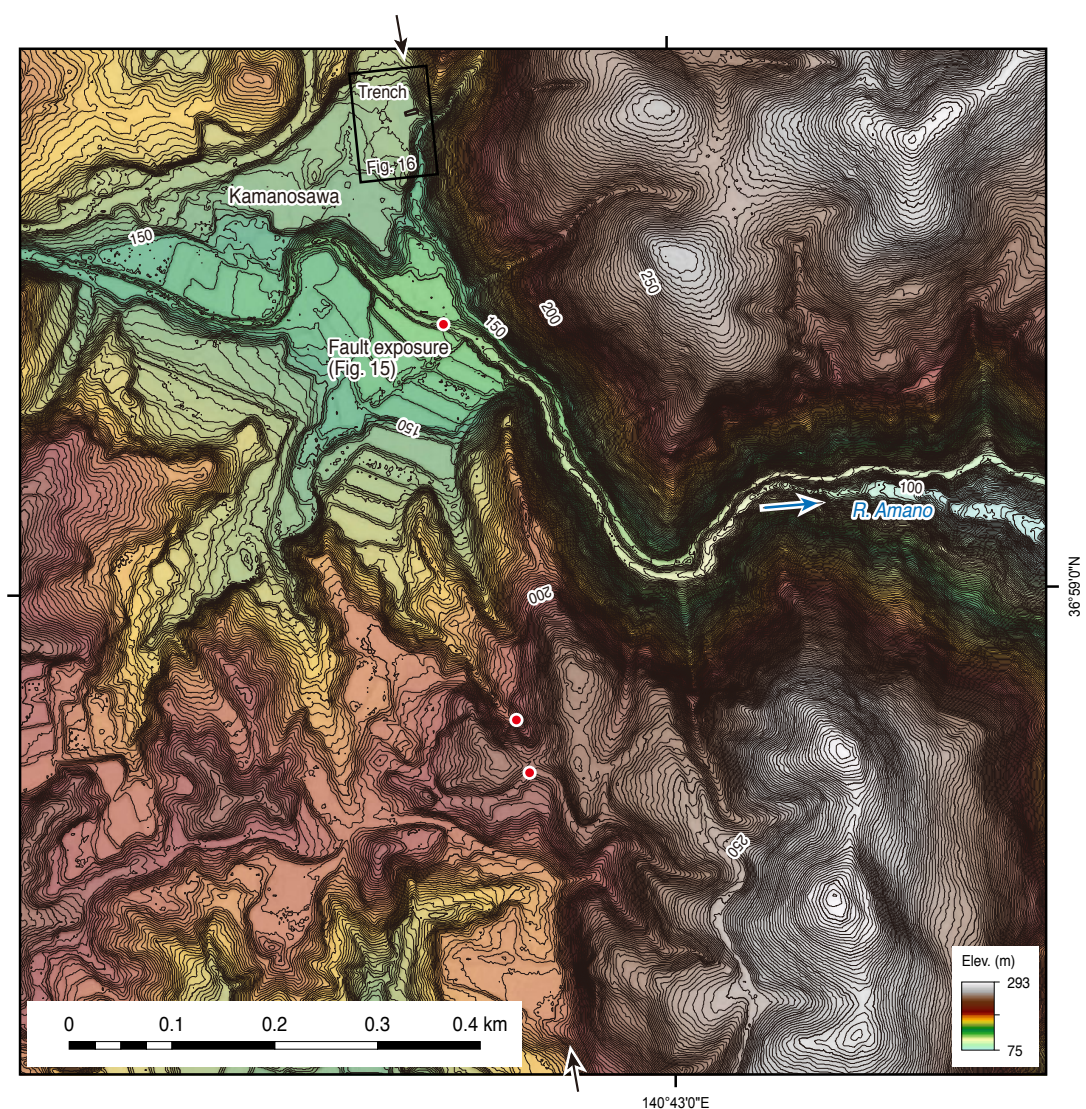
第 11 図. 齊道地区トレンチ東壁面および地震断層崖のログ. トレンチ北および南壁面の概略位置を黒破線で示す. グリッド間隔は 1 m. 図中の白丸内の数字は, 本文及び第 1 表の地層区分と対応 (アラビア数字+アルファベットは地層区分を細分したもの). 図中の黒丸は,  $^{14}\text{C}$  年代測定用試料採取位置を示す. 灰色破線は, 断層上盤側断層近傍における 5a 層上面の推定分布高度. 図中の年代値は Conventional  $^{14}\text{C}$  年代を示す. 凡例は第 9 図と同じ.  
 Fig. 11. Log of the east wall of trench and the free face of surface rupture at Saïdo site. Approximate position of north and south walls is indicated by black dashed line. Grid interval is 1 m. Arabic numerals (with alphabet) in white circle are stratigraphic (sub) units, which correspond to those of Table 1. Black circle is position where sample for  $^{14}\text{C}$  dating was collected. Broken gray line indicates inferred upper surface of unit 5a on hanging wall of the fault. Note that the  $^{14}\text{C}$  age given is conventional age. Explanation for figure is same as Fig. 9.



第 12 図. 齊道地区層序ピット北壁面のログ. ピット掘削位置を第 3 図 b および第 7 図 (地点 B) に示す. TSDP-1~9 は火山灰分析試料番号 (第 3 表を参照).  
 Fig. 12. Log of the northern wall of pit excavated on surface I at Saïdo site. For location of the pit, see Figs. 3b and 7 (Site B). Sampling number of TSDP-1 to 9 for tephra analysis is given in right side of the column (see Table 3).



第 13 図. (a) 川部町佐倉地区周辺の詳細地形図 (地震前の航空レーザ測量による 2 m DEM から作成). 井戸沢断層東側トレースの位置を黒矢印で示す. 井戸沢断層東側トレース周辺の地表変位出現箇所を赤丸で示す. (b) 井戸沢断層東側トレース沿いでみられたアスファルト道路を切断する地表変位の写真. U, D はそれぞれ相対的隆起側, 低下側を示す. 地表変位を矢印で示す. 北に向かって撮影. 第 13 図 a に位置を示す.  
 Fig. 13. a) Detailed topography around Sakura, Kawabe Town, showing location of surface fractures on and around the eastern trace of the Itozawa fault (shown in red circles). The map is created from 2 m resolution pre-earthquake LiDAR DEM. Location of the eastern trace of the Itozawa fault is marked by black arrows. Blue arrow indicates flow direction of the Same River. b) Photograph of surface rupture at Sakura (marked by white arrows), where the asphalt-paved road is offset with minor east-side-up vertical and right lateral slip (viewed from south). U and D denote upthrown side and downthrown side, respectively. For location see Fig. 13a.



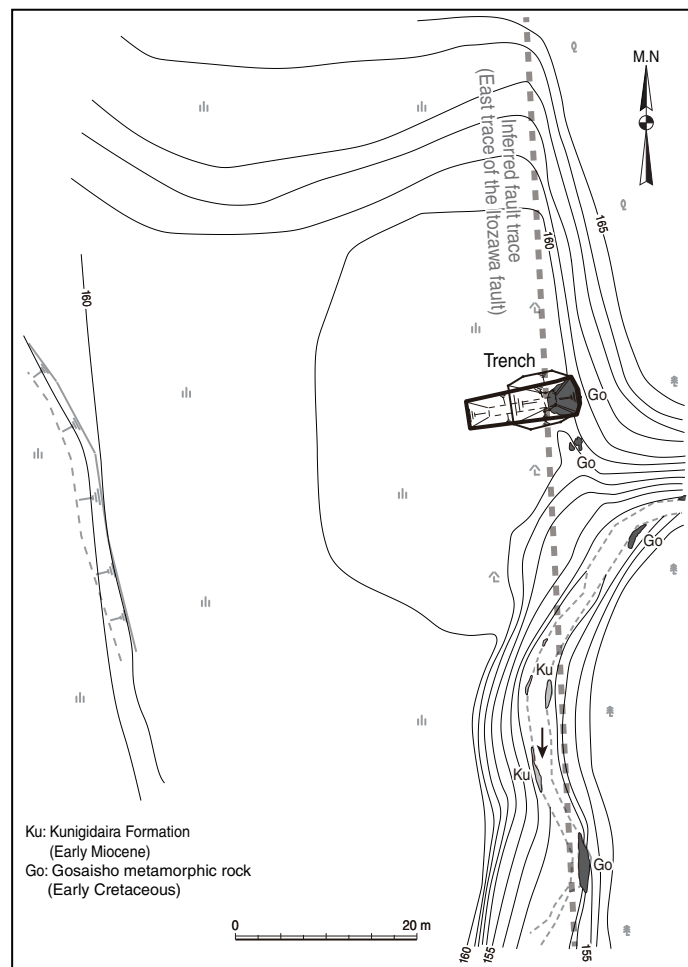
第 14 図. 遠野町釜ノ沢地区周辺の詳細地形とトレンチ, 断層露頭および地表変位の位置を示す図. 等高線図は地震前の航空レーザ測量による 2 m DEM から作成. 等高線間隔は 1 m. 井戸沢断層東側トレースの位置を黒矢印, 天ノ川の流下方向を青矢印で示す. 井戸沢断層東側トレース周辺の地表変位出現箇所を赤丸で示す. 図中の黒枠は第 16 図の範囲を示す.

Fig. 14. Detailed topography around Kamanosawa, Tono Town, showing location of the trench, fault exposure and surface fractures along the eastern trace of the Itozawa fault. The map is created from 2 m resolution pre-earthquake LiDAR DEM. Contour interval is 1 m. Location of the eastern trace of the Itozawa fault and flow direction of the Amano River are shown in black arrows and blue arrow, respectively. Location of surface fractures on the eastern trace of the Itozawa fault is shown in red circles. Rectangle shows area of Fig. 16.



第 15 図. a) 遠野町釜ノ沢を流れる天ノ川右岸側護岸擁壁を切断する地表変位の写真. 地表変位を矢印で示す. 南に向かって撮影. b) 天ノ川河床にみられる御齋所変成岩 (東側) と堆積岩 (西側) の境界をなす井戸沢断層 (矢印で示す). 第 15 図 a の擁壁の破壊箇所の延長部河床に位置する. 北北西に向かって撮影.

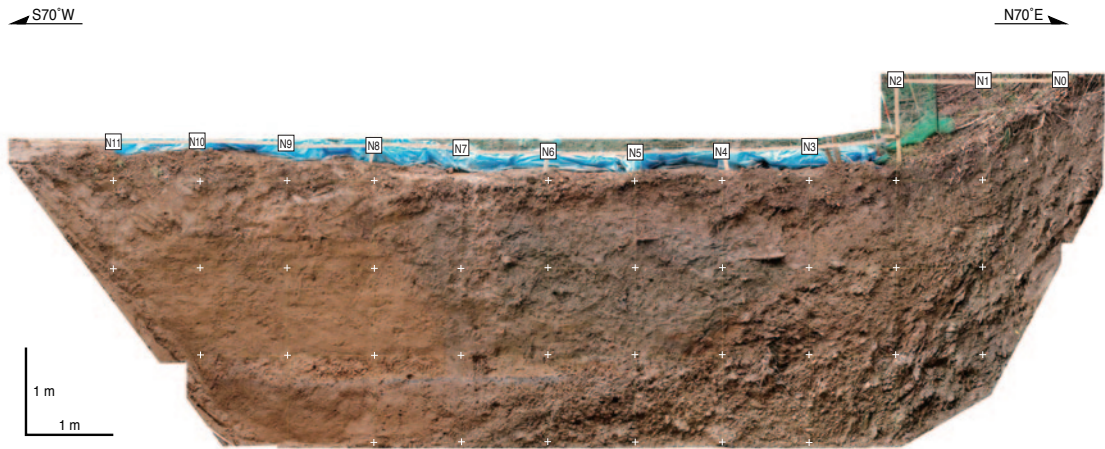
Fig. 15. a) Photograph showing the surface crack with ca. 5 cm east-side-up on the southern retaining wall of the Amano River. b) Photograph showing the fault exposed on the riverbed, which separates the Kunugidaira Formation on the west from the Abukuma metamorphic rocks on the east.



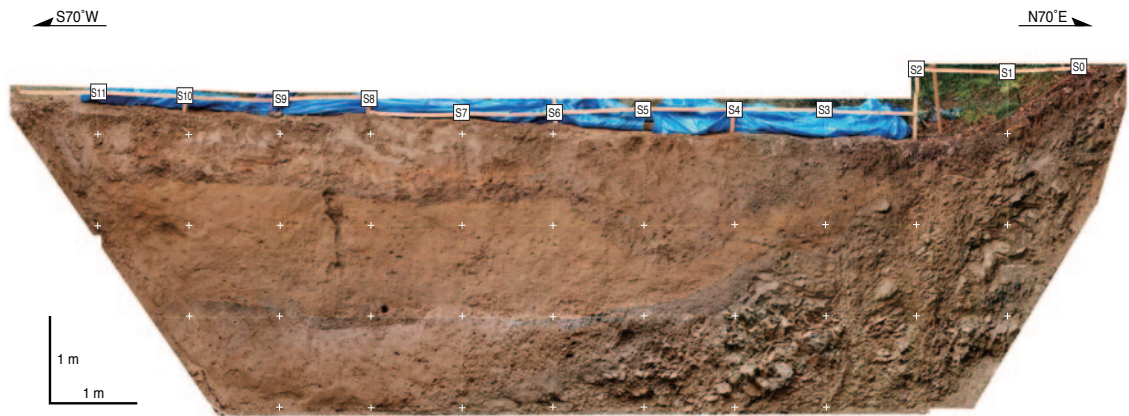
第 16 図. 釜ノ沢地区トレンチ地点周辺の地形および地層分布. 等高線図 (等高線間隔 1 m) はトータルステーションを用いて作成. 地層分布は現地調査に基づく. 図中矢印は小河川の流下方向を示す.

Fig. 16. Map showing topography and geological route map around the location of trench at Kamanosawa site. Basal topographic contour map (contour interval is 1 m) was constructed using a total station. Geologic route map was made by field mapping. Black arrow denotes flow direction of the small river.

a N-wall

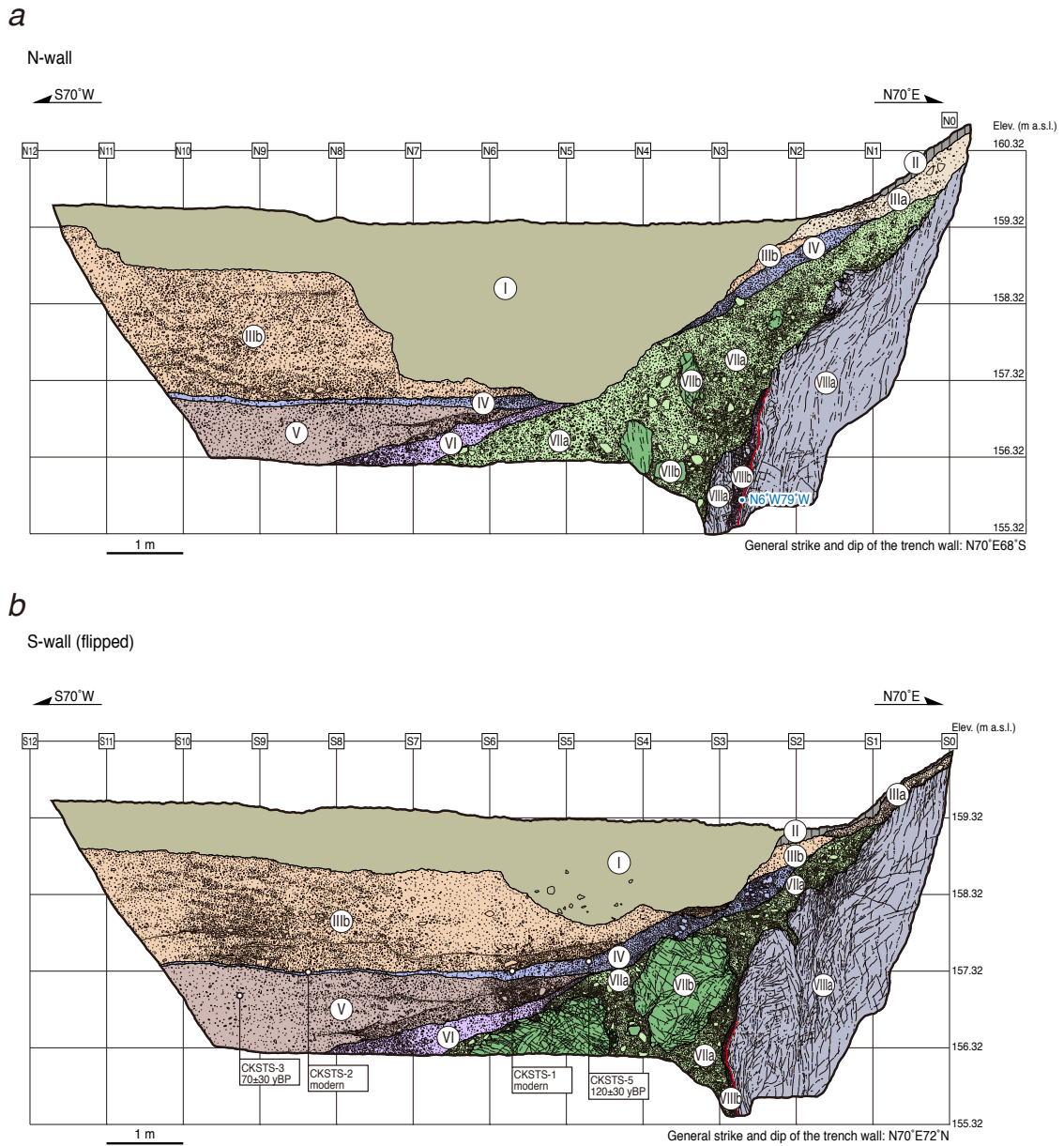


b S-wall (flipped)



第 17 図. 釜ノ沢地区トレンチ北壁面 (a) および南壁面 (b) の写真. グリッド間隔は 1 m.

Fig. 17. Photograph of a) the north wall and b) the south wall of trench at Kamanosawa site. Grid interval is 1 m.



第 18 図. 釜ノ沢地区トレンチ北壁面 (a) および南壁面 (b) のスケッチ. グリッド間隔は 1 m. 図中の白丸内の数字は, 本文及び第 4 表の地層区分と対応 (ローマ数字+アルファベットは地層区分を細分したもの). 図中の白丸および青丸は, それぞれ  $^{14}\text{C}$  年代測定用試料採取位置および断層面の走向・傾斜計測地点を示す. 図中の年代値は Conventional  $^{14}\text{C}$  年代を示す (第 5 表).

Fig. 18. Logs of a) the north wall and b) the south wall of trench at Kamanosawa site. Grid interval is 1 m. Roman numerals (with alphabet) in white circle are stratigraphic (sub) units, which correspond to those of Table 4. White circle and blue circle is position where sample for  $^{14}\text{C}$  dating was collected and position where attitude of the fault surface was measured, respectively. Note that the  $^{14}\text{C}$  age is conventional age (Table 5).