

トレンチ調査と放射性炭素年代高密度測定によって明らかとなった熊本県甲佐町白旗山出地区における堆積環境の変遷

Sedimentary environment changes at Yamaide district, Kosa town, Kumamoto prefecture revealed by the trench investigation and densely spaced radiocarbon dating

白濱吉起¹・宮下由香里¹・亀高正男²・鈴木悠爾²・宮入陽介³・横山祐典³

Yoshiki Shirahama¹, Yukari Miyashita¹, Masao Kametaka², Yuji Suzuki²,
Yosuke Miyairi³ and Yusuke Yokoyama³

¹ 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, y.shirahama@aist.go.jp)

² 株式会社ダイヤコンサルタント (Dia Consultants Co. Ltd.)

³ 東京大学大気海洋研究所 (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

Abstract: Associated with the 2016 Kumamoto earthquake, surface ruptures were produced along the Futagawa Fault Zone and the Takano-Shirahata segment in the northern part of the Hinagu Fault Zone. Occurrence of a large-scale earthquake in the unbroken region along the Hinagu Fault Zone has been concerned. Even though we need to accurately estimate the probability of large-scale earthquake occurrence, the paleoseismic history of the Hinagu fault zone is not well known. We, therefore, conducted boring and trench investigations and densely spaced radiocarbon dating at the Yamaide site in the Takano-Shirahata segment to obtain a detailed paleoseismic history of the Hinagu Fault Zone. In this paper, we report the observations and descriptions of those investigations and discuss the sedimentary environment changes. Soon after the 2016 Kumamoto earthquake, we found small surface deformation at Yamaide. After the boring survey, the trench, which is 14 m long, 10 m wide, and 4 m deep, was excavated across the southernmost part of the surface ruptures. Some reverse faults and deformed layers possibly deposited by fluvial processes since late Pleistocene were obvious on the trench's walls. Two strands of reverse faults on the northern wall which was facing the south and four strands on the southern wall steeply dipped to the east. The vertical displacements along some of the faults increase to older (lower) layers. Sediments for ¹⁴C dating were systematically and densely collected even from low carbon content layers along some vertical sections on the trench walls. These results demonstrated continuous deposition and the oldest humic silt layer in the trench deposited about 15 ka. This suggests that these faults were active at least during the period of the last 15 ka. The results made clear that such ¹⁴C dating method is useful for the paleoseismic survey, even though sediments for dating contain only low carbon.

キーワード: 変動地形, 古地震調査, 横ずれ断層, 日奈久断層帯, 高野-白旗区間, 甲佐町, 平成 28 年熊本地震, 地表地震断層, トレンチ調査, ボーリング調査, 放射性炭素年代連続測定
Keywords: tectonic geomorphology, paleoseismology, Hinagu Fault Zone, Takano-Shirahata Segment, Kosa Town, 2016 Kumamoto earthquake, surface rupture, trench survey, boring survey, densely spaced radiocarbon dating

1. はじめに

日奈久断層帯は熊本平野から八代海にかけて延びる総延長約 81 km に渡る断層帯である。地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013) は、断層帯を北から高野-白旗区間、日奈久区間、八代海区間の 3 つに区分した。高野-白旗区間は、北北東-南南西走向の活断層であり、長さは約 16 km である (第 1 図)。この区間は益城町木山付近から宇城市豊野町山崎付近まで延びており、右横ずれと上下変位が認められ

ているが、上下変位の向きは場所によって異なる (熊原ほか, 2017)。北部の高木付近では、西上がりの低断層崖を形成するが、御船川と緑川に挟まれた領域では東側隆起の傾向を示す。緑川から南側の上田口付近から娑婆神峠にかけては再び西側隆起の断層崖が認められる。高野-白旗区間における断層面の傾斜は、1999 年から 2000 年にかけて発生した一連の地震活動の震源が断層と平行する向きにほぼ垂直に並ぶことと、断層の隆起側が一定でないことから、

高角であると考えられているが、詳しい事はわかっていない（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2013）．断層の活動性については，熊本地震の発生前に実施されたトレンチ調査から得られた結果に基づき，約 1600～1200 年前以前に最新活動があったと推定されているが（原子力発電技術機構，1997；下川ほか，1999），それ以前の活動についてはデータが得られていない．

平成 28 年熊本地震に伴い，布田川断層帯布田川区間の全域と日奈久断層帯高野－白旗区間の北部約 6 km に渡って地震断層が出現した（熊原ほか，2017；Shirahama *et al.*, 2016）．高野－白旗区間では上下変位がほとんどない右横ずれ変位のみが生じており，その変位量は高木付近の 70 cm を最大とし，南に向かって減衰する傾向が見られた（Shirahama *et al.*, 2016）．上述のように，日奈久断層帯に沿って出現した地震断層は高野－白旗区間の北部のみに限られた．一方，余震域は時間とともに震源から次第に南へと広がり，日奈久区間全域にまで及んだ（Uchide *et al.*, 2016）．この余震の発生域が，熊本地震後に連鎖的に破壊して大きな地震を発生させる可能性があったため，改めて活動履歴を見直し，布田川断層帯の活動との関連性を含め，大地震の切迫性を迅速に確認する必要があった．そこで，日奈久断層帯の活動履歴を詳細に把握することを目的に，産総研は日奈久断層帯高野－白旗区間の山出（やまいで）地点並びに日奈久区間の南部田（みなみべた）地点において古地震調査を行った（宮下ほか，2017）（第 1 図）．本稿ではこのうち山出地点の調査結果を報告する．ただし，活動履歴の詳細については別途報告することとし，ここではボーリングコア及びトレンチ壁面にみられる地質の記載と ^{14}C 年代分析及び火山灰分析結果を中心に報告する．

2. 調査手法

活動履歴解明のための手順として，まず地形判読による候補地点の絞り込み，候補地点の地質，ボーリングデータの収集，ボーリング調査による層序及び断層変位の確認を行った．そして，断層が存在する可能性が最も高く，また細粒堆積物が分布し，年代測定試料が豊富に含まれていることが予想される地点を選定し，トレンチを掘削した．掘削した後，壁面を整形し，詳しい観察に基づいた層序区分と断層変位の分布を判断した．同時に， ^{14}C 年代測定試料を採取し，得られた年代の分析結果から各地層の堆積年代を推定した．さらに，トレンチ壁面から採取した連続試料について火山灰分析を行い，検出されたテフラの降下年代から ^{14}C 年代測定に基づく地層の堆積年代の妥当性を検討した．

3. トレンチ調査候補地点の選定

トレンチを掘削した上益城郡甲佐町白旗山出地区は，日奈久断層帯高野－白旗区間の中央部付近に位置する（第 1 図）．この区間における断層位置は，中位段丘面上の断層崖や，沖積面と段丘面の境界として確認できる（池田ほか，2001）（第 2 図）．断層崖は上田口と滝川の間では西向き，その北側と南側では東向きであり，隆起側が北から西，東，西と一定しない．滝川の中位段丘面上では，約 500 m 西側に東向きの低断層崖が並走しており，東上がりとなりがりの断層の間が地溝状に落ち込んでいる．山出地区では，断層は中位段丘面と沖積面の境界付近に位置しており（第 3a 図），低断層崖は段丘崖基部から 10 数 m 西側の沖積面内に見られる（第 3b, c 図）．

平成 28 年熊本地震直後に行われた地震断層調査では，上記低断層崖に並走して伸びる，右横ずれ変位を示す地震断層が確認された（熊原ほか，2017；Shirahama *et al.*, 2016）．地震断層は，布田川断層帯と日奈久断層帯の交点付近から，高野－白旗区間沿いの約 6 km の範囲に出現した．山出地区はその南端に位置し，右横ずれ変位量が北側の滝川地区における 20～30 cm から数 cm へと急激に減衰する位置に当たる（Shirahama *et al.*, 2016）．この山出地区においてトレンチ調査の候補地点を 2 箇所選定し，それぞれ山出 A, 山出 B 地点とした（第 3a 図）．山出 A 地点では，地震断層が低断層崖から数 m 西側に出現し，わずかな右横ずれとともに東側が撓み上がる変位を呈していた（第 3d 図）．地形計測により，地震断層を基部とする幅約 4 m の撓曲崖が形成されており，東側がなだらかに約 8 cm 隆起する様子が確認された．一方，山出 B 地点では，低断層崖にほぼ沿う位置にわずかな右横ずれ変位のみが確認された．上記 2 地点とも，地震断層ははっきりと確認できるが，地表の変位量はごくわずかであった．こうした地点は，断層位置を明確に特定できる場所であるとともに，平成 28 年熊本地震のように布田川断層帯が主体的に活動した際の変位と，主に高野－白旗区間を含む日奈久断層帯が活動する際の変位が区別できる場所と考えられる．そのため，高野－白旗区間の活動履歴推定に適していると考えられ，トレンチ調査候補地点として選定した．いずれの地点とも水田または畑地として利用されているためトレンチの掘削は可能であった．しかし，緑川が南から北に流れていた際の旧河道上に位置するため，河川性の礫が地表付近まで堆積していることが予想された．その場合，細粒物に乏しく，活動履歴の推定に適さない可能性が考えられた．そこで，トレンチ調査に先行して層相及び年代測定に適した堆積物の有無，基盤岩の上面高度の分布等を確認するため，候補地点において地震断層を挟むように深さ 6 m のボーリングを掘削した．

3.1 ボーリング調査結果

山出 A 地点でのボーリング掘削調査の詳細位置と地質断面図を第 4 図に、コア写真及び柱状図を第 5～8 図に示す。地震断層より南東側の YMD-1 孔では、深度 0.11 m まではシルト主体の耕作土が、深度 0.56 m までは礫・砂混じり砂質シルトからなる旧耕作土が見られる。深度 2.14 m までが礫混じりシルト層、2.14 m～6.00 m はシルト混じり砂礫層が分布している。

一方、地震断層より北西側の YMD-2 孔では、深度 0.25 m までは礫・砂混じりシルトからなる耕作土が、深度 0.74 m までは礫・砂混じりシルトからなる旧耕作土が分布している。深度 2.85 m までは礫・砂混じりのシルト層、2.85 m～6.00 m までは主にシルト混じり砂礫層が分布している。

YMD-1 孔及び YMD-2 孔では、ともに上位より耕作土、旧耕作土、主に礫・砂混じりシルトからなる層、主にシルト混じり砂礫からなる層に大きく区分される。こうした層相及び層序の類似性から、YMD-1 孔の地層は YMD-2 孔の地層と概ね対比され、かつ、いずれの地層も YMD-1 孔が高位に位置していることがわかった。東側隆起の傾向は、山出地区周辺の変位地形と調和的であり、地震断層の示す変位とも調和的であった。

次に、山出 B 地点におけるボーリング掘削調査の詳細位置と地質断面図を第 9 図に、コア写真及び柱状図を第 10～13 図に示す。地震断層より南東側の YMD-3 孔では、深度 0.19 m まではシルト主体の耕作土、深度 4.18 m までは風化した砂岩・泥岩起源の砂・礫を含むシルト～砂礫、深度 6.00 m までは礫・砂混じりシルト～シルトが分布する。一方、地震断層より北西側の YMD-4 孔では、深度 0.26 m まではシルト主体の耕作土、深度 1.80 m までは風化した砂岩・泥岩起源の砂・礫を含むシルト、深度 6.00 m までは礫・砂混じりシルト層～砂・砂礫が分布する。

YMD-3 孔及び YMD-4 孔では、上位より耕作土、主に風化した砂岩・礫岩起源の砂・礫を含む層、褐灰～黒灰色のシルト層が認められ、含まれる礫や砂の粒度や色調が類似している。しかし、YMD-4 孔の 2.31 m 以深に分布する砂や砂礫からなる層は YMD-3 孔では認められない。また、YMD-3 孔の 2.60 m～4.18 m の崖錐堆積物と見られる非常に淘汰の悪い亜角礫主体の砂礫層は、YMD-4 孔では認められない。以上より、YMD-3 孔及び YMD-4 孔では、構成層の違いが著しく、対比可能な地層に乏しいため、断層変位を推定しにくい。また、YMD-4 孔は砂礫主体であり、年代試料に乏しい。

以上をまとめると、山出 A 地点は断層両側の地層の対比が可能で、ボーリングコアから推定される地層の変位センスが周囲の変位地形と調和的であった。一方で、山出 B 地点は断層両側の地層の対比が難しく、年代試料に乏しい。さらに、山出 B 地点は掘削

にあたっては畦道や農道を破壊する必要があり、現地住民の方の理解を得られない可能性があった。以上の理由により、山出 A 地点を適地と判断し、トレンチ掘削調査を実施した。以降ではこのトレンチを「山出トレンチ」と呼ぶ。

4. トレンチ調査

4.1 トレンチ掘削範囲の選定

地形調査及びボーリング調査の結果、断層は地表地震断層から予想される通り YMD-1 孔と YMD-2 孔の間を通過すると推定された。そこで、トレンチを地表地震断層の走向に直交するように長軸を設定し掘削を行った(第 4 図)。トレンチの深さは、壁面にボーリング調査で確認された腐植質シルト層の出現深度に基づき 4 m 程度とした。また、上位の地層は軟質であるため、壁面が崩壊しないよう 45° の法面勾配を確保した。

4.2 壁面の記載

山出トレンチでの観察壁面は北東に面した S 面、南西に面した N 面、そして北西に面した E 面である。トレンチの壁面展開写真を第 14 図に、スケッチ展開図を第 15 図に示した。N 面と S 面の拡大スケッチはそれぞれ第 16 図及び第 17 図に、スケッチの凡例は第 18 図にまとめた。トレンチ壁面に現れた地層を、層相及び堆積環境の差異、地層の分布や連続性に基づいて、上位より耕作土(A層)、旧耕作土(B層)、氾濫原堆積物(C層)、扇状地堆積物(D層)に区分した。各層は、色調、層理面の特徴、有機質の有無、砂礫の礫種、粒度、円磨度、淘汰度などの差異に基づいて細分した。断層は(N面、S面ともに)トレンチの中部から東部にかけて、5～7条出現した。これらの断層を、北壁面ではトレンチ東側より、F-N1～F-N5断層、南壁面ではF-S1～F-S7断層と呼ぶ。断層には、上方に向かって分岐するものが認められ、この部分については、F-N2a断層等、枝番をつけて表記した。

なお、トレンチ壁面の位置は壁面のグリッド記号を用い、横方向はN0～N14(N面)或いはS0～S14(S面)、縦方向はH1～H4で示す。

4.2.1 地層の記載

A-1 層(耕作土):

腐植混じり砂質シルトからなる。灰黄褐色(10YR5/2)、塊状で、地表面全域に概ね水平に分布し、層厚は暗渠部を除けば概ね 10～30 cm である。細(～粗)粒円形砂を含み、細～中礫サイズの円～亜円礫が散在し、上方へ減少する傾向を示す。水田である為、稲の根茎が発達し、下位との境界はやや漸移的である。乾裂に沿って酸化鉄が分布し、その周辺は鈍い黄褐色(10YR5/4)を呈する。僅かに石英・斜長石・粗粒角閃石を含む。

A-2 層 (埋土) :

礫混じり砂質シルトからなる。暗渠埋設時の埋土とみられる。φ2~3 cm の礫を含む。

A-3 層 (耕作土) :

砂質シルトからなる。鈍い黄橙色 (10YR6/3), 塊状で, A-1 層とセットで全域に概ね水平に分布し, 層厚約 15~45 cm である。細 (~粗) 粒の円~亜円形砂を含み, 細~中礫サイズの円~亜円礫を伴うが, 基底部に集積し, 上方へ減少・細粒化する傾向を示す。上位よりシルト分が多く, 網状に乾裂が発達する。乾裂に沿って酸化鉄が分布し, その周辺は鈍い黄褐 (10YR6/4) 色を呈し, 全体に上位層より酸化鉄が集積している。石英・斜長石・粗粒角閃石をやや含む。下位との境界は比較的明瞭である。

B-1 層 (旧耕作土) :

砂混じりシルトからなる。灰黄褐色 (10YR6/2), 塊状で, 層厚約 20~35 cm である。細~中礫サイズの円 (~亜円) 礫が点在し, 脆弱な腐り亜角礫を伴う。酸化鉄が斑状または縦筋状 (φ: 2~3 mm) に分布する。上位と比較するとやや脱色している。石英・斜長石・粗粒角閃石をやや含む, 下位とは漸移的である。

B-2 層 (旧耕作土) :

砂礫混じりシルト~シルト混じり砂礫からなる。灰褐色 (7.5YR4/2), 塊状で, 層厚約 10~20 cm である。やや風化した細~中礫サイズの (円~) 亜円礫を含み, 上方へ減少・細粒化する傾向を示す。N7~S5 より西側では酸化鉄が斑状 (φ: 2~5 mm) に分布する一方, 東側では礫が多くなりシルト混じり砂礫に側方変化する。摩耗した土器片が点在する。上位と比較するとやや酸化鉄が集積している。僅かに石英・斜長石・粗粒角閃石を含み, 下位との境界は明瞭である。

B-3 層 (旧耕作土) :

礫混じり砂質シルトからなる。黄灰色 (2.5Y5/1), 塊状で, 層厚約 20 cm である。中礫サイズの円~亜円礫を主体とし最大礫径は 10 cm, 平均礫径は 1.5 cm で, 含礫率 5~10 % である。酸化鉄が斑状 (φ: 1~3 mm) に分布する。石英・斜長石・粗粒角閃石が散在し, 下位との境界はやや明瞭である。

B-4 層 (旧耕作土) :

腐植・シルト混じり礫質中 (~粗) 粒砂からなる。灰褐色 (7.5YR4/2), 塊状, 淘汰不良で, 層厚約 15 cm 以下である。中礫サイズの (円~) 亜円礫を主体とし, 最大礫径 10 cm, 平均礫径 3 cm, 含礫率 20~25 % で, 剥片 (フリント)・摩耗した土器片を稀に包含する。僅かに石英・斜長石・粗粒角閃石を含み, 下位との境界は明瞭である。

C-1 層 (河川成堆積物) :

砂礫混じり砂混じり~砂質シルトからなる。灰色 (10Y6/1), 塊状, 層厚約 10 cm 以下で, 亜角~亜円形の腐り礫 (φ: 1~5 mm) を多く含み, 稀に堅硬な中礫サイズの円礫を伴う。酸化鉄が斑状 (φ: 2~

5 mm) に散在し, 僅かに石英・斜長石・粗粒角閃石を含む。下位との境界はやや明瞭で, 北側法面のみに認められる。

C-2 層 (河川成堆積物) :

シルト質砂礫からなる。灰黄褐色 (10YR4/2), 塊状で, 層厚約 10~45 cm である。(細~) 中礫サイズの円 (~亜円) 礫を主体とし, 最大礫径 5 cm, 平均礫径 1.5 cm, 含礫率 35~40 % で, 剥片 (フリント)・摩耗した土器片が点在する。上部に酸化鉄が斑状もしくは縦筋状 (φ: 2~3 mm) に分布する。上位と比較するとやや脱色している。石英・斜長石・粗粒角閃石を含む。下位との境界は不規則かつ不明瞭である。

C-3 層 (河川成堆積物) :

礫混じりシルト質細~中粒砂からなる。灰色 (10Y5/1-4/1), 塊状, 淘汰不良で, 最大層厚約 60 cm である。中~大礫サイズの円~亜円礫が点在し, 北側法面では最大礫径 16 cm, 平均礫径 5 cm, 含礫率 5 % である一方, 南側法面では最大礫径 7 cm, 平均礫径 1 cm, 含礫率 15~20 % で, 脆弱な腐り緑色岩亜円~亜角礫を伴い, 摩耗した土器片を稀に包含する。斑状の酸化鉄 (φ: 1~3 mm) が散在し, 下位との境界は明瞭である。

C-4 層 (河川成堆積物) :

シルト・礫混じり極細粒砂からなる。浅黄色 (5Y7/3), 塊状で, 団子状をなす角~亜角形の火山ガラス粒子を多量に含む。後述する火山灰分析の結果, この火山ガラスは鬼界-アカホヤ火山灰 (町田・新井, 2003) に対比された。腐り亜角~亜円礫を混入し, やや酸化鉄が形成される。酸化鉄が斑状に分布し, 中空なものも認められる。概ね幅約 10~20 cm の幅で N10 及び S9 より西側に分布する。

C-5 層 (河川成堆積物) :

礫混じりシルト質 (細~) 中粒砂からなる。灰色 (10Y5/1-5 Y 5/1), 塊状で, 層厚約 45~100 cm である。中礫サイズの亜円~亜角礫を点在し, 最大礫径 10 cm, 平均礫径 0.5~1.0 cm, 含礫率 10~15 % で, 淘汰が悪く, 不均質である。脆弱な腐り亜円~亜角礫を多く含み, 堅硬な礫はレンズ状に集積している。上部では斑状の酸化鉄 (φ: 20~30 mm) が分布するが, 下部ではそれが不明瞭になると共に灰オーリーブ色 (5Y6/2) を呈し, 腐り礫が主体となる。下位との境界は明瞭である。割れ目に沿って湧水が多く認められる。なお, 南側では酸化鉄の分布が北側ほど見られない。

C-6 層 (河川成堆積物) :

礫混じり砂質シルトからなる。暗灰黄色 (2.5Y5/2-4/2), 塊状で, 層厚約 15~85 cm である。中礫サイズの亜円~亜角礫が不均質に点在する。不鮮明な斑状の酸化鉄が認められ, 堅硬な礫と腐り礫が混在する。下位との境界は明瞭である。基底部 0.3~0.4 m には不連続ながら細~中礫サイズの円~亜円礫から

なる砂礫がレンズ状に発達し、最大礫径 5 cm, 平均礫径 0.5 cm, 含礫率 40~55% である。

D-1 層 (河川成堆積物) :

腐植質シルトからなる。褐灰色 (7.5YR5/1) ~ 灰褐色 (7.5YR5/2) を呈する。分布は東面全域と、北面の N2 より東側、及び南面の S7 より東側に限られ、層厚は約 5 cm と薄い連続性はよい。中粒~細粒砂を含み、下位との境界はやや不明瞭である。

D-2 層 (河川成堆積物) :

均質な砂質シルト~礫混じり砂質シルトからなる。暗灰黄色 (2.5Y5/2-4/2) を呈する。基底部 0.1~0.2 m には不連続ながら細~中礫サイズの円~亜円礫からなる砂礫がレンズ状に発達し、最大礫径 5 cm, 平均礫径 0.5 cm, 含礫率 40~55% である。

D-3 層 (河川成堆積物) :

礫混じりシルト質中~粗粒砂からなる。灰黄褐色 (10YR4/2), 塊状で、層厚約 10~25 cm である。礫は細~中礫サイズの堅硬な円~亜円礫と腐り垂角~亜円礫が混在し、淘汰が悪い。全体に不均質に酸化鉄が分布し、特に最上部では褐色 (10YR4/6) を呈す。下位との境界は不規則でやや明瞭である。

D-4 層 (河川成堆積物) :

腐植混じり砂礫質シルト (~シルト質砂礫) からなる。灰褐色 (7.5YR4/2), 塊状で、最大層厚約 25 cm である。細~中礫サイズの垂角~亜円礫を主体とする。東側では礫が多くなり、最大礫径 3 cm, 平均礫径 0.5~0.6 cm, 含礫率 25~30% となる。僅かに斑状または縦筋状 (ϕ : 5~20 mm) に酸化鉄が点在する。下位との境界はやや不明瞭である。

D-5 層 (河川成堆積物) :

腐植混じりシルトからなる。褐灰色 (5YR6/1-6/2) で層厚約 15 cm である。斑状または縦筋状 (ϕ : 1~6 mm) に酸化鉄が点在する。下位との境界はやや漸移的である。

D-6 層 (河川成堆積物) :

腐植混じりシルトとシルト混じり細~中粒砂の互層からなる。前者は明褐色 (5YR7/1) で後者は鈍い黄橙色 (10YR6/3) を呈する。層厚約 10~50 cm, 不規則・不連続で、上部は後者主体、下部は前者を 2~3 層 (層厚: 3~5 cm) 挟む。斑状や縦筋状の酸化鉄 (ϕ : 1~7 mm) が散在する。下位との境界は不規則でやや明瞭である。

D-7 層 (河川成堆積物) :

砂礫・シルト質砂礫互層からなり、灰オリーブ色 (5Y6/2)~灰黄褐色 (10YR6/2) を呈する。砂礫層には葉理が認められ、シルト質砂礫層はやや腐植を含む。層厚約 40~55 cm で、下位との境界は明瞭である。

D-8 層 (河川成堆積物) :

礫・砂混じり腐植質シルト層からなり、灰褐色 (5YR5/2)~灰黄色 (7.5YR5/2) を呈する。腐植質シルトが主体であるが、下位ほど砂の含有量が増加する。礫は硬い細~中礫サイズの円~亜円礫及び中礫

サイズの腐り垂角~亜円礫からなり、最大礫径 7 cm, 平均礫径は 0.5 cm 程度である。礫率 5~30% で、東側ほど高い傾向がある。斑状や縦筋状 (ϕ : 1~5 mm) に酸化鉄が分布する。下位との境界は不明瞭である。

D-9 層 (河川成堆積物) :

シルト混じり砂礫からなり、鈍い黄橙色 (10YR6/3) を呈する。腐り垂角~亜円細~中礫 (ϕ : <10 mm) 及び硬い円~亜円礫が混在し、後者は塊状・レンズ状を成して不均質に集積する。全体としては最大礫径 6 cm, 平均礫径 0.5 cm, 含礫率 35~40% であり、層厚約 40~60 cm である。斑状や縦筋状 (ϕ : 1~10 mm) に酸化鉄が分布する。また、層状もしくはレンズ状の砂質シルトを不規則に挟在し、縞状の酸化鉄が軽微に認められる。S4~S5 間には下部に砂質シルトが発達し、下位との境界には縞状の酸化鉄が存在する。

D-10 層 (河川成堆積物) :

砂質~砂混じりシルトからなる。鈍い黄橙色 (10YR7/2-7/3)。全体に酸化鉄が斑状 (ϕ : <10 mm) に分布するが最上部に最も多く見られる。層厚約 5~35 cm で、砂質部が上部と下部に分布し、砂混じり部が間に挟まれる。下位との境界はやや漸移的である。

D-11 層 (河川成堆積物) :

腐植混じり砂礫質シルト (~シルト質砂礫) からなり、鈍い黄橙色 (10YR7/3-6/3) を呈する。上方ほど砂の含有量が増加し、上部にはシルト・円礫混じり (粗~) 極粗粒砂を塊状・レンズ状に伴う。含まれる砂粒は強く風化する。斑状または縞状に酸化鉄が分布し、最上部に多く分布する。層厚約 5~15 cm で、下位との境界はやや明瞭である。

D-12 層 (河川成堆積物) :

砂混じり腐植質シルトからなり、褐灰色 (7.5YR5/1) ~ 灰褐色 (7.5YR5/2) を呈する。層厚約 10~30 cm で、風化した極粗粒砂や斑状 (ϕ : 1~3 mm) の酸化鉄が散在する。最上部と下部では灰褐色を呈し、腐植分がやや減少する。下位との境界は不規則でやや明瞭である。

D-13 層 (河川成堆積物) :

細礫混じり砂質シルトを伴うシルト混じり砂礫からなり、鈍い黄橙色 (10YR7/3) を呈する。葉理に沿って砂質シルト (2~20 cm) を挟み、層厚は約 55~80 cm である。礫は腐り礫が少なく円~亜円礫を主体とし、礫密集部では最大礫径 2 cm, 平均礫径 0.5 cm で、含礫率 40~60% である。下位との境界は漸移的である。

D-14 層 (河川成堆積物) :

シルト混じり砂礫からなり、鈍い褐色 (7.5YR5/4) を呈する。全体に酸化鉄が分布し、層厚 50~55 cm 以上である。基質はシルト混じり細~中粒砂からなる。礫は硬い円 (~亜円) 礫からなり、最大礫径

7 cm, 平均礫径 0.7~1.0 cm で, 含礫率 65~70 % である。

D-15 層 (河川成堆積物) :

比較的淘汰の良い礫・シルト混じり中粒砂からなり, 鈍い褐色 (7.5YR5/4) を呈する。礫径 2~4 mm の円~亜円礫が点在する。

4.2.2 N 面及び S 面の記載

地層は, N 面及び S 面において概ね低下側ではやや下に凸に撓み下がり, N10~N11 あるいは S9~S11 付近で最も厚くなる。断層を挟んで上盤側では東に向かって緩やかに上に凸に撓み上がっており, その程度が上位から下位にかけて大きくなる様子が認められた。

トレンチ N 面では, N5~N9 区間のトレンチ底面付近に 5 条の断層が認められた (第 16 図)。N7~N8.5 区間では, C-3 層途中より下位の地層を明瞭に切断する東傾斜の高角逆断層群が存在する。いずれも相対的に東上りを示す高角な見かけ逆断層である。最も変位量が大きい F-N2 断層下部では, 幅 10 cm 程度にわたって複数条の断層が存在するとともに, これらが複雑に分岐・収斂を繰り返し, 断層帯を形成している。F-N2 断層は地表面までを明瞭に切断・変位させてはいないものの (第 19a 図), C-3 層の途中まで追跡できる断層を上方に延長すると, 平成 28 年熊本地震に伴う地震断層の出現位置に相当するように見える。F-N2 断層の下端 1 m 付近では, D-10 層から下位の層準にのみ引きずり構造が認められる (第 19b 図)。

トレンチ S 面では, S5 から S9 までの間に北壁面より多い 7 条の断層が分布しており, 上位に向かって北壁面より多くの断層に分岐発散する (第 17 図)。すべての断層は相対的に東上りを示す高角な見かけ逆断層で, その傾斜は 70~80° である。一条の断層に変位が集中する北壁面に対し, 南壁面では変位がすべての断層にほぼ均等に分散する。いくつかの断層には地層との切断被覆関係が認められる。例えば, C-7 層を構成する礫層で F-S7 断層は明らかに止まっていることが確認できる (第 19c 図)。また, F-S2a 断層, F-S1a 断層, F-S4b 断層, F-S5b 断層及び F-S6 断層は D-6 層または D-7 層中で消滅し, D-5 層を切っていない (第 19d 図)。こうした構造や断層沿いにおける地層の上下変位量の累積性が確認できることから, 複数回の活動があったことは明らかである。

5. 堆積時期の推定

トレンチで確認された地層の年代を推定するため, 放射性炭素年代測定を行った。本トレンチは, D 層中の腐植質層や B 層を除くと, 主に砂~礫質シルト層で構成され, 有機物や炭化物に乏しい。C 層

の年代値を得るため, 本調査では従来測定の対象とされてこなかった有機物含有量の乏しい砂礫層まで測定対象として試料採取を行った。このとき, 得られる年代値は堆積物試料中の全有機, 無機炭素を対象にした値であるため, 新しい有機物や再堆積物が混入していた場合, 真の年代値を示していない可能性がある。そのため, 生物遺骸の示す年代値や火山灰降灰層準との比較によりコンタミネーションの可能性を考慮する必要がある。そこで, トレンチ壁面で上下方向にいくつかの測線を設定し, そこから系統的に試料採取を行い, 年代測定を実施することで堆積曲線の復元を試みた (第 16, 18 図)。また, 火山灰分析により, 広域火山灰の降灰層準を検出し, それによる年代値の検討を行った。

5.1 放射性炭素年代測定結果

トレンチ壁面から得られた放射性炭素年代を第 1 表に示す。放射性炭素年代測定は東京大学大気海洋研究所 (Atmosphere and Ocean Research Institute : 以下, AORI と表記) 及び (株) 地球科学研究所 (Geo Science Laboratory : 以下, GSL と表記) を通じてベータアナリティック社に依頼した。得られた年代値は, OxCal 4.3 (Bronk Ramsey, 2009) を使用し, 校正曲線に INTCAL13 (Reimer *et al.*, 2013) を参照して, 暦年校正を行った。C-5 層及び C-6 層から採取した炭化木片 (YMD-T-C26, yw1-1, yw1-2, YMD-T-C25, yw2-1, yw2-2) について GSL と AORI で測定したところ, 両者ともほぼ同じ年代値を示した。したがって, 両研究機関から得られた年代値の差は測定誤差以下に収まると考えられる。

N11.2 及び S10.1 に沿って実施した連続サンプリングにより得られた試料の採取深度と年代値の関係を第 20a 図及び第 20b 図にそれぞれ示した。また, 第 21 図にそれ以外の場所から採取した試料から得られた年代値を層序ごとにまとめた。連続サンプリングによって得られた測線では, C 層中では 2000~3000 年のばらつきがあるものの, 概ね下位の層準から採取した試料ほど古い年代値を示した (第 20 図)。C 層より下位の層準についても, 腐植質シルト層 (D-1, D-4, D-8, 及び D-12 層) については下位層準ほど古くなる傾向が見られた (第 21 図)。AORI において測定された試料については炭素含有率が得られているため, その結果を第 22 図のグラフにまとめた。グラフからは B-1 層や C-3 層から採取した #4, #5 を除くとすべて 0.7% 以下であることがわかった。また, C 層中では, 概ね炭素含有率が下位ほど低くなる傾向が示された。各地層の年代については, 火山灰分析結果と合わせて 5.3 章で議論する。

5.2 火山灰分析結果

トレンチの N 面及び S 面の低下側に火山ガラス濃集層 (C-4 層) が確認された。現地での観察の結果,

ガラス質の火山灰が厚さ 5 cm でパッチ状に層をなす特徴から、約 7300 年前に降下したとされる鬼界ーアカホヤ火山灰 (K-Ah) と推定された (町田・新井, 2003)。K-Ah が降灰層準であるのか、また隆起側へ連続するか否かを確認するため、N2, N6.5, N11, S2, 及び S10 の 5 測線において深度 10 cm ほどの連続採取を行い、火山灰分析を行った (第 16, 17 図)。分析は株式会社古澤地質に依頼し、洗浄、プレパレードの作成、検鏡を行った (第 23 図)。一部の試料については屈折率の測定及び主成分分析を実施した (第 23, 24 図)。

N2 測線についてはバブルウォールタイプの火山ガラスが試料全体に含まれており、含有率に大きな差はないものの、YMD-N2-H1.1-1.2 (以下、H1.1-1.2 と略する) に最も多く含まれる (第 23a 図)。ガラスの屈折率には 1.495-1.500 と 1.501-1.514 の 2 つのモードが見られた。このうち、小さい値のグループは始良 Tn 火山灰 (AT) 起源 (町田・新井, 2003)、大きい値のグループは K-Ah または阿蘇 4 火砕流 (Aso-4) 起源と考えられる (町田・新井, 2003)。そこで、H1.1-1.2 及び H1.8-1.9 について主成分分析を行ったところ、H1.1-1.2 に K-Ah が検出された (第 24a, b 図)。火山ガラスの含有率が増加すること、K-Ah 起源と考えられる屈折率を持つ火山ガラスの含有率が増加することから、H1.1-1.2 が K-Ah 降灰層準と考えられる。

N6.5 測線では N2 測線同様バブルウォールタイプの火山ガラスが全体的に見られた (第 23b 図)。その中でも H1.9-2.1 に最も多く含まれていた。屈折率測定では 1.495-1.502, 1.504-1.514 にモードが見られた。主成分分析を H2.0-2.1 及び H2.7-2.8 で行ったところ、H2.0-2.1 に K-Ah が検出された (第 24c, d 図)。したがって、H2.0-2.1 が K-Ah 降灰層準と考えられる。

N11 測線では H2.5-2.6~H2.7-2.8 にバブルウォールタイプの火山ガラスが多量に含まれる (第 23c 図)。H2.6-2.7 の屈折率測定からは、K-Ah のみが含まれていることがわかる。火山ガラスの濃集層は壁面上では H2.5-2.6 に相当するが、それより下位の H2.6-2.7 及び H2.7-2.8 で K-Ah 相当の火山ガラスが多量に検出された。後述するように、S10 測線においてもガラス濃集層より下位から K-Ah 相当と見られる火山ガラスが確認された。しかし、N11 測線ほど深い深度からは検出されておらず、C-4/C-5 境界を基準としたときの検出される深度に差が見られる。これは火山ガラスが C-5 層上位から移動したことによって生じた結果と考えられる。C-5 層は淘汰の悪い礫質のシルト層であり、地下水が浸透しやすい。そのため、テフラが下層に移動しており、スケッチに示した C-4 層の範囲以上に分散した可能性がある。従って、K-Ah が C-5 層堆積中に降下し、それが再堆積したとは考えにくく、壁面におけるガラスの濃集層準に相当する H2.5-2.6 が K-Ah 降灰層準と考えられる。

S2 測線では、H1.3-1.7 区間でバブルウォールタイ

プのガラスが多量に含まれ、それより下位で減少する (第 23d 図)。H1.4-1.5 において屈折率の測定及び主成分分析を行ったところ、AT, Aso-4 に加え K-Ah が検出された (第 24e 図)。したがって、H1.4-1.5 付近が K-Ah 降灰層準と考えられる。

S10 測線では、屈折率から K-Ah とみられる火山ガラスが H2.4-2.5 付近に多量に含まれ、H2.5-2.6 にも含まれるが、それより下位では急激に減少する (第 23e 図)。前述したように、H2.5-2.6 は移動した火山ガラスが含まれると考えられるため、H2.4-2.5 が K-Ah 降灰層準と考えられる。

火山灰分析の結果、すべての測線において K-Ah が検出された。また、検出層より下位に顕著な K-Ah 濃集層が検出されないことから、再移動堆積物ではなく、降灰層準と考えられる。K-Ah 濃集層である C-4 層は肉眼では N14 から N10 あるいは S14 から S9 付近までしか追跡できないが、実際には K-Ah 降灰層準は断層をまたいで上盤側と下盤側に連続するようである。C-4 層が C-3 層に直接的に覆われることから、C-5 層の分布しない上盤側において、この K-Ah 検出層は C-3 層と C-6 層の境界を示すと考えられる。

5.3 放射性炭素連続測定結果と火山灰分析による堆積時期の推定

放射性炭素年代測定結果と火山灰分析結果から、各層準の堆積・形成年代を推定する。まず、B-1 層、B-2 層、B-3 層、D-4 層、D-8 層、D-12 層については下位の地層ほど古い年代を示しており、層序関係と年代測定値が矛盾しない (第 21 図, 第 1 表)。したがって、B-3 層から B-1 層までは約 1400 年前から約 550 年前頃、D-12 層から D-4 層までは約 15000 年前から約 11000 年前頃にかけてほぼ連続的に堆積したと推定される。C-3 層、C-4 層、及び C-5 層については概ね下位ほど古い年代を示し、低下側においては約 9600 年前頃から約 2000 年前頃にかけてほぼ定常的に堆積場にあったことが推定される (第 20 図)。

C 層中の年代値にはややばらつきが認められた。また、C-5 層と C-6 層から採取した炭化木片 (木材) の年代は約 2300~2200 年前を示しており、堆積曲線と矛盾する結果となった。まず、矛盾する木材の年代について考察する。これらの年代値は、上述のように GSL と AORI の両機関による測定を行いそれらの測定結果が一致していることから、コンタミネーションや測定環境による影響は考えられない。木材は C-5 層と C-6 層の異なる層準からそれぞれ得られたにもかかわらず、それらの年代はほぼ一致する。しかし、木材の年代を除けば C 層全体の堆積年代は、それを上下に挟む B 層や D 層の堆積年代と調和的であった。木材の年代を地層の堆積年代とみなすと、2300 年前以降に再堆積物を含む土砂が再堆積したことになるが、その場合、C 層から得られる年代は順

不同に分散するはずで、下位ほど古い年代を示す事実と矛盾する。したがって、これらの木材は堆積後に貫入した植物根あるいは建築材とみられる。木材の出土状況、全体形状及び断面の様子を第 25 図に示した。木材は壁面に対してほぼ垂直、つまり、地面や堆積面に対しては斜めに埋没しており、堆積構造と調和しない。また、断面には放射状の構造は見られるものの、年輪が認められず、根として特徴的な構造を示す。木材は全体的に撓んでおり、建築材には向かない形状をしており、表面には樹皮が付着していた。これらの特徴は木材が建築材ではなく根の一部であることを示している。おそらく、約 2300～2200 年前にトレンチ近傍で生育していた木の根が C-5 層、C-6 層まで貫入し、そのまま残されたものと考えられる。

次に、C 層中の年代のばらつきについて考察する。C 層中の試料の炭素含有率を比較すると、下位ほど低い傾向が見られた (第 22 図)。この中で、#4 と #5 の含有率は、他の C 層中の試料と比較すると異常に高く、旧耕作土の値に近いが、それを超えた値を示した。これは、試料中に上位の堆積物等のコンタミネーションが生じた可能性を示唆している。また、#127 については含有率が 0% に近いので、大きい誤差を持つ。したがって、これらの試料から得られた年代値については信頼性が低いと考えられるため、除外して考察を進める。堆積物試料中の全ての無機及び有機炭素を対象に測定された年代をもとに地層の堆積年代を推定する上で注意すべき点は、これらの年代は試料中に含まれるあらゆる無機及び有機炭素を対象とした平均値を示している点である。古い時代の有機物が混入した層準は実際より古い年代を示し、新しい時代の有機物が混入すると実際より新しい年代を示す。特に C 層中の堆積物の炭素含有率は低く、生物擾乱や堆積物の再移動、地下水による影響が出やすいことが想定される。N11.2 測線の結果 (第 20a 図) を見ると、C-5 層下位から C-3 層下位まで約 10000 年前から 4000 年前にかけて堆積したとみられる。しかし、C-4 層 (K-Ah 降灰層準) 付近の年代値は K-Ah の降灰時期と一致せず、概して 2000 年ほど新しい年代値を示す。降灰層準を基準とすると、これらは実際より若い年代を示していると考えられる。K-Ah と調和的な試料 C24 は堆積物中の炭化物を対象に測定しており、これより新しい年代が想定される。図中の堆積曲線は #1～#18 及び C24 の中で、古い年代値を選択して推定した堆積曲線である。ただし、#2, #3, #6, #15 については堆積曲線が階段状に折れ曲がるため、一定の堆積速度での堆積が生じていた場合、これらも若返りを示している可能性は否定できない。S10.1 (第 20b 図) について同様に検討すると、#112 及び #119 を除くことで、K-Ah 降灰層準や上下関係と矛盾しない堆積曲線を描くことができる。#112 及び #119 もまた、若

返りを示していると思われる。これらの堆積曲線から C 層の堆積年代を推定すると、C-7 層は約 11000 年前、C-6 層は約 11000～10000 年前、C-5 層は約 10000～7300 年前、C-4 層は約 7300～6000 年前、C-3 層は約 6000～1400 年前となる。年代値が若返った要因としては、植物根などによる生物擾乱、地下水による新しい有機物の供給が挙げられる。これらは北壁面の C-5 層や C-6 層に植物根が混入していることと矛盾せず、北壁面の試料の多くに若返りが見られたことを説明できる。また、C 層が軟質で、含水率が高く、C 層からの湧水が多数見られたこととも矛盾しない。これらのどちらか、あるいは両方の要因によって若返りが生じた可能性がある。

C-7 層より下位の堆積年代についてであるが、腐植質シルトの年代については、矛盾は見られないため、これらについては、実際の堆積年代を示していると考えられる。逆転が生じているのが D-9 層から採取された #160 及び D-13 層から採取された #47 である。どちらもシルト混じりの砂礫層で、有機物含有率が上下の腐植質シルト層と比較すると小さい (第 22 図)。これらについても C 層で確認されたような若返りが生じていると考えられる。#160 の年代が上位の D-8 層の最も若い年代に近く、#47 の年代が上位の D-12 層の年代に近いことは、これらに上位の腐植質シルト層由来の炭素が混入した可能性を示唆する。腐植質シルト層の堆積年代は D-12 層が約 15000 年前、D-8 層が約 15000 年前～13000 年前、D-4 層が約 13000 年前～12000 年前、D-1 層が C-7 層とほぼ同じ約 11000 年前と推定される。

6. 地質断面

山出トレンチは YMD-1 地点と YMD-2 地点を結ぶ直線に長軸を合わせるように掘削された (第 4 図)。YMD-1 地点は E 面の E5 地点近傍に位置し、YMD-2 地点はトレンチ西端から約 15 m 北西に位置する。ボーリングとトレンチ壁面との対比とそれに基づく地質断面図を第 26 図に示す。地層の対比は、主として層相及びボーリングコアから得られた年代値を元に行った。YMD-1 孔から採取した試料の放射性炭素年代測定結果は、YMD-1-D0.6 が約 8000 年前、YMD-1-D1.5 が約 11000 年前、YMD-1-D2.1 が約 5800 年前、YMD-1-D3.0 が約 15500 年前を示した。このうち、YMD-1-D2.1 は上下の試料より著しく若く、正確な年代値が得られていない可能性が高いため以下の考察では採用しない。年代と層相から推定すると、YMD-1-D0.6 がトレンチの C-6 層上部、YMD-1-D1.5 が D-4 層上部、YMD-1-D3.0 が D-12 層に相当する堆積物と見られる。一方、YMD-2 孔については、YMD-2-D3.0 が約 13000 年前、YMD-2-D3.4 及び D3.8 が約 15000 年前、YMD-2-C021701D4.6 が約 16800 年前を示した。年代と層相から推定すると、

YMD-2-D3.0 が C-4 層, YMD-2-D3.4 及び D3.8 が D-12 層, YMD-2-C021701D4.6 がトレンチ壁面より下位の腐植層に相当する堆積物と見られる。

YMD-2 孔の各地層の深度とトレンチ西端の N14 及び S14 付近でそれらに対比される地層の深度を比較すると, 断層に向かって緩やかに傾き下がる様子が認められる。地層は N10~N11 付近を最低部として下に凸の形状を示す。一方, 上盤側はトレンチ内部では緩やかに撓み上がるが, N2~N3 付近をピークに上に凸の形状を示す。これは, 低下側が撓み下がり, 反対に隆起側が撓み上がった結果であり, 東上がりの逆断層成分を伴う横ずれ変位が繰り返されてきたと考えられる。B-2 層上面, C-3 層上面, C-4 層, C-6 層上面, D-4 層上面, D-8 層上面は上盤側, 下盤側に広く分布することから, 各層準について撓曲成分を含めた上下変位量が推定できる。これらのうち, C-3 層上面については圃場整備により表層が削剥されている可能性があるため, 以下で示す上下変位量は最小値である。D-8 層についても, N10~N12 付近で地層が途切れるため, 同様である。南壁面と北壁面それぞれの撓みを含めた上下変位量は B-2 層上面で約 0.4~0.5 m, C-3 層上面で約 0.8 m, C-4 層上面で約 1.4 m, C-6 層上面で約 2.0 m, D-4 層上面で約 2.3 m, D-8 層上面で約 2.6 m と見積もられる。上下変位にも累積変位が確認できることから, 東上がりの変位を伴った断層運動が繰り返し生じたことは明らかである。

7. 山出トレンチにおける堆積環境の変遷

山出トレンチ壁面で観察される堆積物と周囲の地形から堆積環境の変遷を復元した。低下側に分布する扇状地堆積物の古流向はトレンチの長軸に直交する方位を示しており, これは沖積面上の微地形や段丘崖の形状から判読される古流向と一致する(第2図)。したがって, 最終氷期の海水準が低下していた時期, 山出 A 地点には緑川の扇状地あるいは網状河川が発達していたと推定される。その後, 海水準の上昇に伴って, 約 1 万年前以降には後背湿地環境へと漸移し, 主に河川の氾濫によって堆積物が供給される環境へと変化したと推定される。本地域では江戸時代頃まで緑川がたびたび氾濫していた記録が残されており, 上記の堆積環境はこれと矛盾しない(甲佐町史編纂委員会編, 2013)。その間, 断層運動に伴って北西側が低下すると, そこに氾濫堆積物が効率的にトラップされていったと考えられる。このとき堆積物は洪水時に間欠的に供給されるため, 供給される堆積物がある間に形成された断層崖を埋めきれないような場合は, C-5 層のように低下側のみが埋積されたのだろう。

本トレンチでは, 断層沿いのずれ量はもとより, 地層全体の撓曲を含めた上下変位量にも累積性が見

られることから, 本トレンチでみられた断層は東上がりの上下変位成分を伴う活動を頻繁に起こしていたと考えられる。同時に, 日奈久断層は右横ずれ成分が卓越するため, 古い地層ほど大きく側方にも移動していることが予想される。しかし, 本トレンチは地層の連続性がよく, 断層を挟んだ地層の対比が容易である。トレンチ下部において地層の対比が容易であることは, トレンチ掘削箇所の周辺において同時代の地層が広く均質に堆積していたことを示唆する。

8. 活断層トレンチへの高密度年代測定への応用

これまでトレンチ調査では, 腐植物に富む地層や地層中に含まれる炭化物のみを対象として放射性炭素年代測定が実施されてきた。しかし, こうした試料がイベントに係る地層から得られず, 結果的にイベント年代が狭められないケースが多々あった。今回の調査では炭素含有量の低い堆積物にまで年代測定を拡張し, 年代推定を試みた。こうした堆積物に対して一定深度ごとの連続サンプリングを行い, 多数の試料を分析した結果, C 層群がほぼ定期的に堆積していたことを明らかにできた。また, この分析結果により, 従来であれば重要視されていたであろう, C-5 層や C-6 層から出土した木材の年代を棄却する根拠となり, 混入の原因を検討するきっかけが得られた。同時に, 炭素含有量の低い試料については, 高密度での分析が必要であることもまた明らかとなった。また, 今回北壁面で測定した試料の多くには若返りが生じたことが確認された。これは炭素含有量が低いため, 生物擾乱や地下水による影響を受けやすいためと考えられる。したがって, 信頼性を高めるためには, 本研究で行ったように火山灰分析や堆積物中に含まれる炭化物などの他の年代指標や種類の異なる試料からの年代値を参考にした年代の取捨選択や吟味が必要となる。年代の信頼性が吟味できれば, 堆積曲線を見積もり, 周囲の地層の堆積年代推定が可能となるだろう。また, 連続測定は, 南壁面で見られるように異常値の検出を可能にする。散発的な分析では, 信頼性の検討が難しいと思われる。

本研究では, 放射性炭素の高密度分析によって, 従来年代測定が行われてこなかったような堆積物の年代を決定することに成功した。高密度年代分析はイベント年代の決定に寄与するだけではなく, 複数の測線を設定することで, 地層境界を定めるのにも有効であろう。今後の活断層トレンチへの応用が期待される。

9. まとめ

平成 28 年熊本地震に伴い日奈久断層帯高野一白旗区間において出現した地震断層の南端部において古

地震履歴解明を目的としたトレンチ調査を実施した。壁面の詳細な観察の結果、本トレンチ地点では、緑川を給源とする堆積物が定常的に堆積しており、15000年前以降の継続的な東上がりの変動を伴う活動が記録されていることがわかった。また、炭素含有量の低い堆積物であっても、放射性炭素年代の高密度測定によって精度の高い年代測定が可能であることがわかった。

謝辞 熊本県教育庁教育総務局文化課、甲佐町役場、御船町役場のご担当者各位には様々な便宜を図って頂きました。甲佐町山出地区のボーリング並びにトレンチ掘削地点の土地所有者様には調査の趣旨をご理解頂き、ご尽力頂きました。産業技術総合研究所の丸山 正氏と岡村 行信氏には、本稿の改善にあたり有益な助言を頂きました。以上の方々に対し、ここに記して感謝いたします。なお本調査は文部科学省並びに九州大学からの委託業務「平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」の一環として実施したものです。

文 献

- Bronk-Ramsey, C. (2009) Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates, *Radiocarbon*, 51, 337–360.
- 原子力発電技術機構 (1997) 平成 8 年度原子力発電立地確認調査に関する報告書 (1), 136p.
- 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.
- 中田 高・今泉俊文 編 (2002) 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会.
- 池田安隆・千田 昇・中田 高・金田平太郎・田力正好・高沢信司 (2001) 都市圏活断層図「熊本」, D1-No.388.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013) 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価 (一部改訂), 地震調査委員会, 66p.
- 甲佐町史編纂委員会編 (2013) 新甲佐町史, 甲佐町, 1200p.
- 熊原康博・岡田真介・楳原京子・金田平太郎・後藤秀昭・堤浩之 (2017) 1 : 25,000 都市圏活断層図「熊本 (改訂版)」, 国土地理院技術資料, D・1-No.868.
- 宮下由香里・白濱吉起・東郷徹宏・吾妻 崇・亀高正男・鈴木悠爾・酒井 亨・杉田匠平・松浦一樹 (2017) 熊本県日奈久断層帯におけるトレンチ調査, *活断層研究*, 46, 5–7.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, 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., van der Plicht, J. (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP, *Radiocarbon*, 55 (4), 1869–1887.
- 下川浩一・衣笠善博・田中竹延 (1999) 日奈久断層系の活動履歴及び活動性調査 平成 10 年度活断層・古地震研究調査報告, 地質調査所速報, no.EQ/99/3, 253–262.
- Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D., Miyakawa, A. (2016) Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68 (1), 1–12.
- Uchide, T., Horikawa, H., Nakai, M., Matsushita, R., Shigematsu, N., Ando, R., Imanishi, K. (2016) The 2016 Kumamoto--Oita earthquake sequence: aftershock seismicity gap and dynamic triggering in volcanic areas, *Earth, Planets and Space*, 68 (1), 180.

(受付：2018 年 7 月 31 日, 受理：2018 年 9 月 20 日)

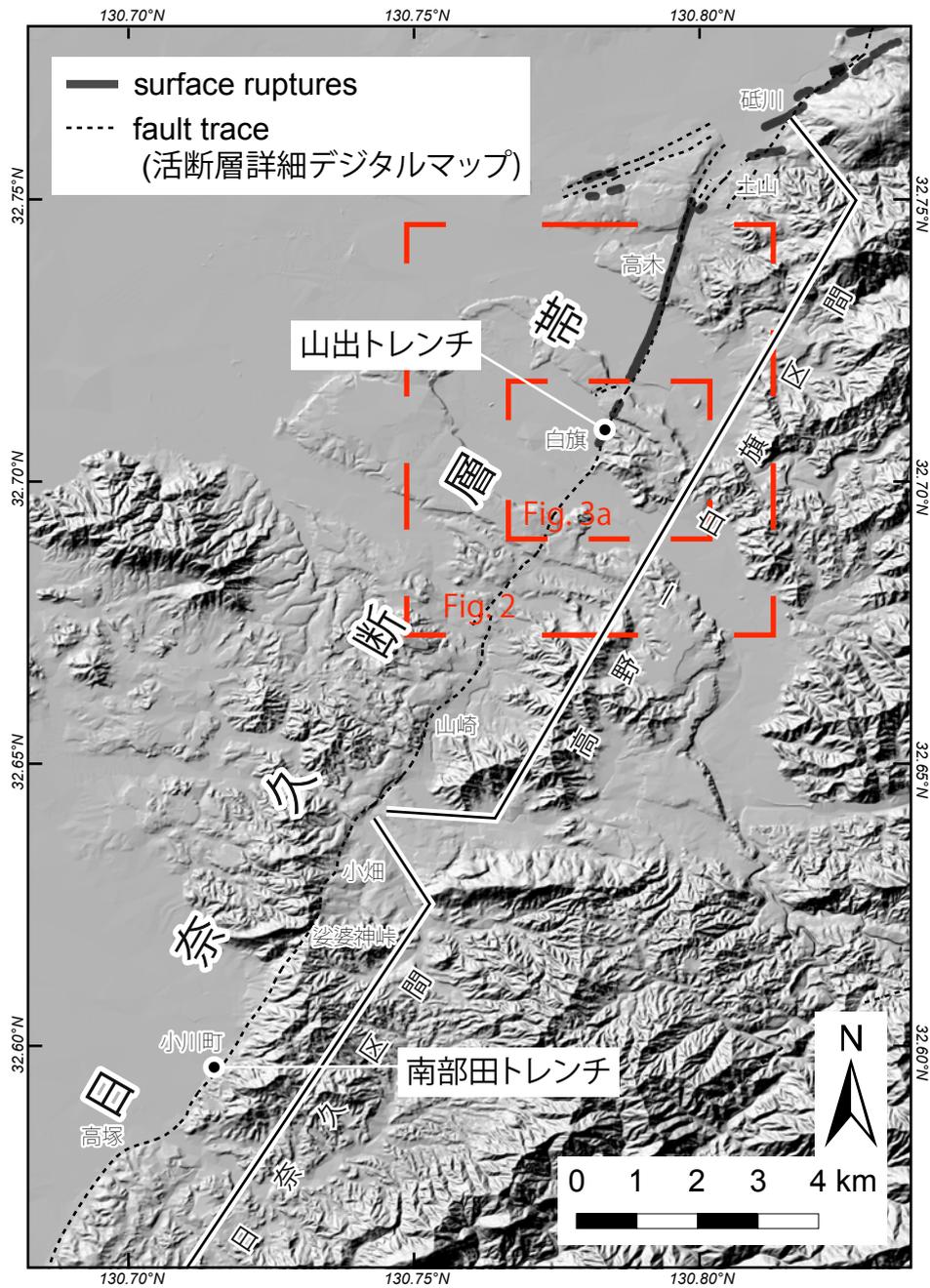
熊本県甲佐町白旗山出地区における堆積環境の変遷

第1表. 山出トレンチにおける放射性炭素年代測定結果.

Table 1. Results of ¹⁴C dating of samples collected from boreholes and the trench at the Yamaide site.

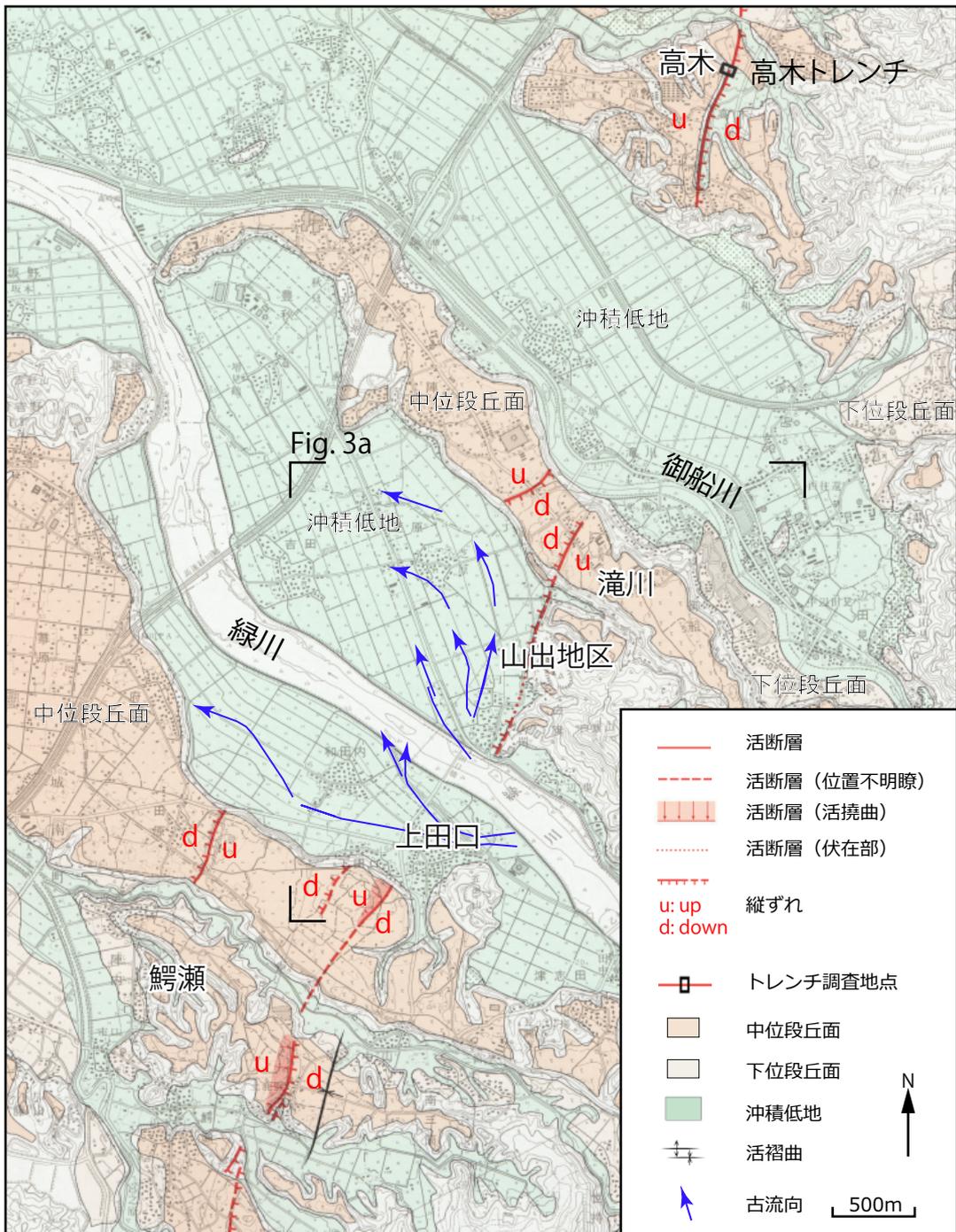
Sample ID	Unit	Material	Code No.	δ ¹³ C (‰)	Conventional ¹⁴ C age (yBP)	Calibrated age* (cal yBP; ±1σ)	Calibrated age* (cal yBP; ±2σ)	Carbone content (%)
YMD-T-C030602	B-1	sediment	Beta-460395	-22.9	962 ± 20	925 - 803	930 - 796	-
#102	B-1	sediment	YAUT-033216	-21	634 ± 26	655 - 562	664 - 554	1.11
YMD-T-C030601	B-2	sediment	Beta-460394	-21.3	1282 ± 21	1266 - 1185	1280 - 1181	-
YMD-T-C030604	B-3	sediment	Beta-460396	-24.7	1478 ± 21	1386 - 1341	1400 - 1315	-
#104	C-2	sediment	YAUT-033217	-10.4	2034 ± 28	2038 - 1945	2106 - 1901	0.34
#1	C-3	sediment	YAUT-028602	-8.1	2282 ± 112	2457 - 2131	2703 - 2005	0.57
#2	C-3	sediment	YAUT-028603	-7.5	2459 ± 70	2703 - 2383	2723 - 2356	0.54
#3	C-3	sediment	YAUT-028604	-7.4	2384 ± 184	2725 - 2185	2853 - 1991	0.63
#4	C-3	sediment	YAUT-028605	-3.4	1274 ± 178	1336 - 983	1546 - 799	2.26
#5	C-3	sediment	YAUT-028606	3.2	2202 ± 50	2307 - 2152	2341 - 2067	0.98
#6	C-3	sediment	YAUT-028612	-26	4004 ± 50	4525 - 4420	4785 - 4297	0.44
#7	C-3	sediment	YAUT-028613	-10.9	3936 ± 31	4431 - 4297	4513 - 4256	0.48
#8	C-3	sediment	YAUT-028615	-13.8	4602 ± 54	5454 - 5084	5567 - 5053	0.48
YMD-T-C24	C-3	charcoal	Beta-456388	-19.9	6231 ± 31	7247 - 7030	7252 - 7019	-
#107	C-3	sediment	YAUT-033218	-16.3	2901 ± 32	3075 - 2968	3159 - 2951	0.53
#109	C-3	sediment	YAUT-033219	-6.2	3093 ± 29	3360 - 3253	3376 - 3230	0.64
#111	C-3	sediment	YAUT-033503	-29.3	5172 ± 26	5981 - 5910	5990 - 5901	0.51
#9	C-4	sediment	YAUT-028616	-19.5	4724 ± 55	5580 - 5328	5586 - 5322	0.4
#112	C-4	sediment	YAUT-033504	-31.1	3824 ± 24	4245 - 4155	4377 - 4100	0.53
#10	C-5	sediment	YAUT-028617	-34.4	4028 ± 39	4529 - 4431	4783 - 4417	0.33
#11	C-5	sediment	YAUT-028618	-25.9	5835 ± 82	6740 - 6540	6850 - 6443	0.24
#12	C-5	sediment	YAUT-028619	-14.9	6155 ± 88	7168 - 6940	7259 - 6800	0.24
#13	C-5	sediment	YAUT-028624	-18.3	7717 ± 105	8595 - 8407	8952 - 8329	0.29
#14	C-5	sediment	YAUT-028625	-10.6	7147 ± 59	8020 - 7880	8154 - 7844	0.27
#15	C-5	sediment	YAUT-028626	-17.5	7679 ± 149	8644 - 8327	8976 - 8186	0.24
#16	C-5	sediment	YAUT-028628	-29	7536 ± 70	8413 - 8218	8450 - 8185	0.27
#17	C-5	sediment	YAUT-028629	-19.4	8627 ± 47	9626 - 9536	9693 - 9527	0.29
#18	C-5	sediment	YAUT-028631	-9.6	8653 ± 93	9742 - 9530	10115 - 9476	0.26
YMD-T-C26	C-5	wood	Beta-456390	-27.5	2281 ± 19	2343 - 2315	2349 - 2185	-
#113	C-5	sediment	YAUT-033505	-27.2	6308 ± 27	7268 - 7178	7290 - 7167	0.22
#116	C-5	sediment	YAUT-033506	-25.5	8699 ± 33	9681 - 9563	9739 - 9548	0.23
#118	C-5	sediment	YAUT-033509	-26.6	8857 ± 34	10148 - 9895	10158 - 9780	0.3
yw1-1	C-5	wood	YAUT-028902	-26	2274 ± 43	2347 - 2184	2354 - 2155	-
yw1-2	C-5	wood	YAUT-028903	-23.3	2369 ± 43	2458 - 2343	2690 - 2320	-
YMD-T-C25	C-6	wood	Beta-456389	-29	2242 ± 19	2320 - 2183	2334 - 2158	-
#119	C-6	sediment	YAUT-033511	-28	7905 ± 30	8763 - 8635	8972 - 8600	0.22
#122	C-6	sediment	YAUT-033512	-33.4	9516 ± 33	11063 - 10710	11072 - 10692	0.17
yw2-1	C-6	wood	YAUT-028904	-29.7	2304 ± 246	2710 - 2067	2923 - 1734	-
yw2-2	C-6	wood	YAUT-028905	-25.4	2328 ± 43	2423 - 2214	2489 - 2160	-
#125	C-7	sediment	YAUT-033513	-57.7	9819 ± 33	11244 - 11210	11265 - 11195	0.1
#169	D-1	sediment	YAUT-033518	-26.5	9196 ± 34	10398 - 10272	10486 - 10249	0.21
#28	D-3	sediment	YAUT-033212	-11.4	10231 ± 44	12056 - 11827	12119 - 11770	0.25
#127	D-3	sediment	YAUT-033515	31.9	3598 ± 718	4874 - 3008	5913 - 2341	-
YMD-T-C18	D-4	sediment	Beta-456383	-19.3	10194 ± 32	11980 - 11815	12046 - 11760	-
YMD-T-C20	D-4	sediment	Beta-456385	-19.6	10076 ± 31	11758 - 11418	11802 - 11402	-
#30	D-4	sediment	YAUT-033213	-20	10210 ± 45	12012 - 11820	12105 - 11755	0.53
#128	D-4	sediment	YAUT-033516	-28.6	10281 ± 36	12125 - 11980	12372 - 11829	0.45
YMD-T-C15	D-8	sediment	Beta-456382	-19.2	11276 ± 42	13161 - 13080	13225 - 13058	-
YMD-T-C19	D-8	sediment	Beta-456384	-19	11107 ± 33	13061 - 12945	13078 - 12846	-
YMD-T-C21	D-8	sediment	Beta-456386	-21.6	12102 ± 34	14054 - 13859	14108 - 13810	-
YMD-T-C021701	D-8	sediment	Beta-458876	-21.9	12319 ± 37	14351 - 14129	14576 - 14084	-
#160	D-9	sediment	YAUT-033517	-39.1	10653 ± 37	12675 - 12590	12701 - 12562	0.13
YMD-T-C22	D-12	sediment	Beta-456387	-18.9	12766 ± 43	15276 - 15139	15368 - 15058	-
#46	D-12	sediment	YAUT-033215	-12	12659 ± 52	15187 - 14968	15249 - 14787	0.5
#47	D-13	sediment	YAUT-033502	-47.4	12413 ± 45	14665 - 14305	14833 - 14179	0.09
YMD-1-D0.6	YMD-1	sediment	YAUT-033519	-35.3	7228 ± 32	8150 - 7980	8159 - 7970	0.19
YMD-1-D1.5	YMD-1	sediment	YAUT-033523	-30.2	9764 ± 33	11225 - 11185	11241 - 11165	0.37
YMD-1-D2.1	YMD-1	sediment	YAUT-033524	-24.5	5023 ± 29	5885 - 5715	5892 - 5661	0.51
YMD-1-D3.0	YMD-1	sediment	YAUT-033525	-38.1	13051 ± 40	15762 - 15550	15834 - 15384	0.12
YMD-2-C021701D4.6	YMD-2	sediment	Beta-458879	-20.1	13870 ± 40	16930 - 16689	17009 - 16573	-
YMD-2-D3.0	YMD-2	sediment	YAUT-033526	-21.6	11307 ± 36	13193 - 13103	13249 - 13075	0.35
YMD-2-D3.4	YMD-2	sediment	YAUT-033528	-20.6	12516 ± 39	14992 - 14666	15085 - 14422	0.39
YMD-2-D3.8	YMD-2	sediment	YAUT-033529	-16.5	12803 ± 40	15315 - 15170	15433 - 15104	0.37

*OxCal 4.3(Bronk Ramsey, 2017), INTCAL13(Reimer et al, 2013)



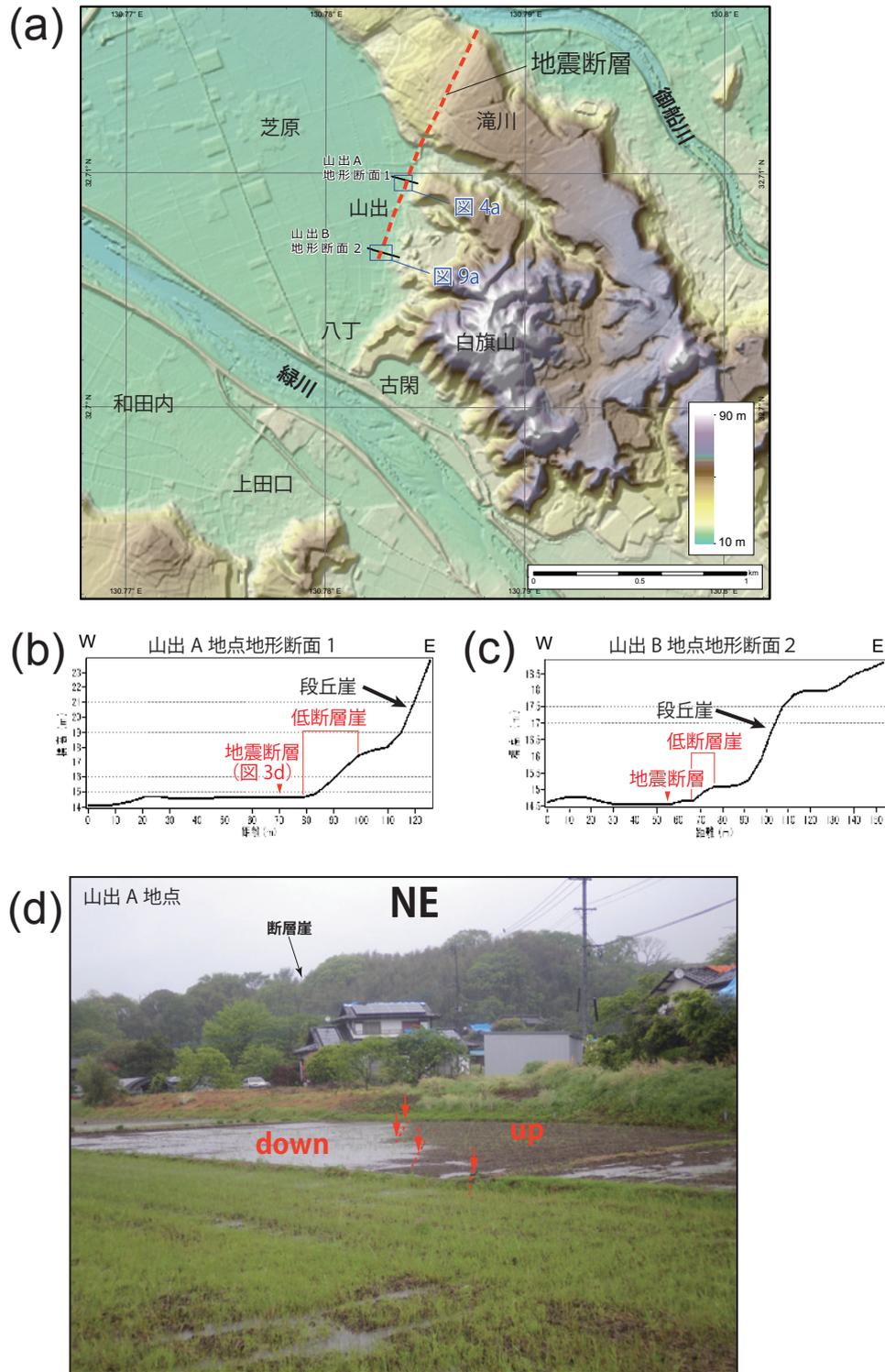
第 1 図. 日奈久断層帯高野-白旗区間及び日奈久区間北部の地形. 背景は国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル (10 m メッシュ標高) から作成した地形陰影図. 黒太線は地震断層 (Shirahama *et al.*, 2016), 黒点線は活断層線 (中田・今泉編, 2002) を示す.

Fig. 1. Map of the Takano-Shirahata segment and the northern part of Hinagu segment of Hinagu Fault Zone. Shaded relief map made from 10m mesh digital elevation model provided by Geospatial Information Authority of Japan (GSI) is used for the base map. Black bold lines show traces of surface ruptures produced by the 2016 Kumamoto earthquake (Shirahama *et al.*, 2016). Black dashed lines show the active fault trace (Nakata and Imaizumi, 2002).



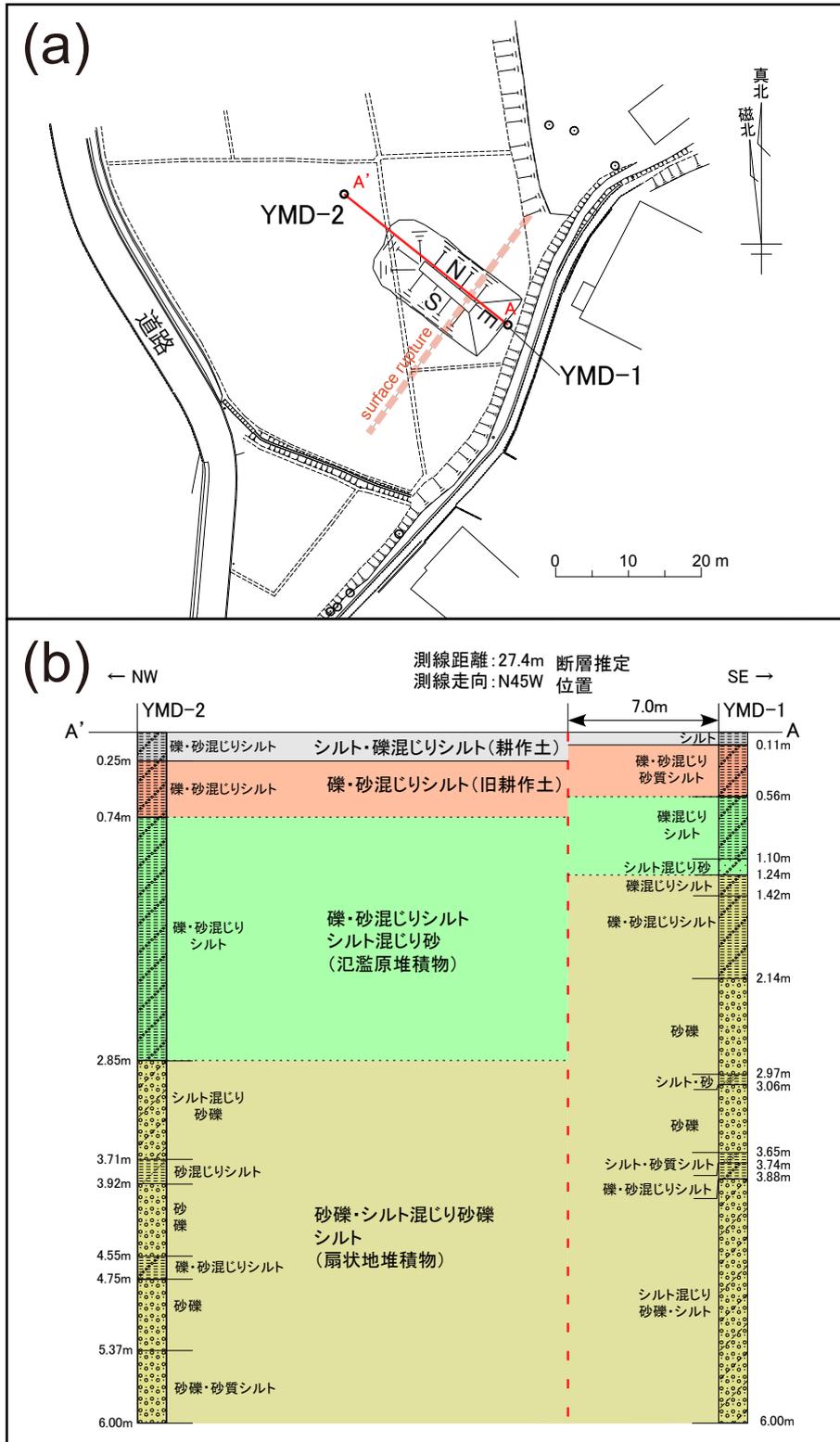
第2図. 高野-白旗区間北部の地形. 都市圏活断層図 (池田ほか, 2001) に地名と微地形から推定される緑川の古流向 (甲佐町史編纂委員会編, 2013) を追記した.

Fig. 2. Map of the northern part of the Takano-Shirahata segment. Place names were added on the Active Fault Map in Urban Area; "Kumamoto" (Ikeda *et al.*, 2001). Paleo-current directions of the Midorikawa River (Compilation committee of history of Kosa town, 2013) by the interpretation of microtopography were also added.



第3図. 山出地区及びトレンチ掘削箇所周辺の地形. (a) 山出地区周辺の地形陰影図. 赤破線は平成28年熊本地震に伴う地震断層の位置を示す. (b) 国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル(5mメッシュ標高)から作成した地震断層を横切る山出A地点の地形断面1. (c) 同様に作成した山出B地点の地形断面2. (d) 山出A地点に出現した地震断層の様子. 地震時に西側が低下したため、片側のみ水がたまっている. 平成28年4月20日(株)ダイヤコンサルタント撮影. 赤破線、赤矢印は地震断層の位置を示す.

Fig. 3. Topography around of the Yamaide trench site. (a) Shaded relief map of the Yamaide district. Red dashed lines show traces surface ruptures. (b) Topographic cross section of line 1 across the surface rupture at the site of Yamaide A made from digital elevation model provided by GSI. (c) Topographic cross section of line 2 at the site of Yamaide B. (d) Photograph of surface ruptures at the site of Yamaide A taken by Dia Consultants Co. Ltd in April 20, 2016. Since the west side of a rice paddy subsided during the earthquake, the west side was covered with water. Red dashed lines and arrows indicate traces of the surface ruptures.



第4図. 山出A地点のボーリング孔位置及びトレンチ掘削範囲と地質断面図. (a) ボーリング掘削位置(YMD-1, -2) 及びトレンチ掘削範囲. (b) ボーリングコアの観察結果および地質断層の出現位置から推定したYMD-1~YMD-2間の地質断面図.

Fig. 4. Location map of boreholes and a trench site at the site of Yamaide A, and geological cross section along the line of boreholes. (a) Survey map showing locations of boreholes (YMD-1 and YMD-2, shown by black circles) and trench. (b) Geological cross section estimated by logs of boreholes and location of the surface rupture.

YMD-1



第5図. 山出A地点のYMD-1孔ボーリングコア写真.
Fig. 5. Photograph of core YMD-1 at the site of Yamaide A.

YMD-1

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	地層区分	柱状図	層相区分	色調	風化	記 事						
1	14.50	0.11	耕作土		シルト	褐		0.00~0.11m シルト(耕作土) やや軟質で、粒度は均質である。植物根(イネ)を含む。						
	14.05	0.56	旧耕作土・埋土		礫・砂混じり砂質シルト	黄褐		0.11~0.56m 礫・砂混じり砂質シルト(旧耕作土・埋土) 粒度が不均質な砂質シルト主体である。酸化し部分的に黄褐色を示す。礫はφ2~5mmの円~亜角礫主体である。						
								0.56~1.10m 礫混じりシルト 比較的しまったシルト主体である。石英、長石、角閃石が散在する。礫はφ2mm程度の亜円~亜角礫主体で、最大礫径は5mm程度である。						
	13.51	1.10	氾濫原堆積物		シルト混じり砂	暗褐		1.10~1.24m シルト混じり砂 φ1mm程度の砂主体である。石英、角閃石を多く含む。						
	13.37	1.24						1.24~1.42m 礫混じりシルト 比較的しまったシルト主体である。部分的に軟質である。石英、長石、角閃石などの鉱物が散在する。礫径は主にφ2~3mmで、まれにφ5~10mm程度のものが含まれる。礫の形状は亜円礫主体で、亜角礫も含む。礫種は安山岩、砂岩、泥岩などである。						
	13.19	1.42						下礫・砂混じりシルト	暗褐		1.42~2.14m 礫・砂混じり砂質シルト 比較的しまった砂質シルト主体である。部分的に軟質である。砂粒子程度の大きさの石英、角閃石を含む。礫はφ2~4mmの円~円礫主体である。礫種は火山岩類、砂岩、泥岩である。			
											1.83~2.13m 礫・砂の含有量がやや多い。			
	2	12.47	2.14	扇状地堆積物・河川堆積物		砂礫	褐		2.14~2.57m 砂礫 礫径はφ2~8mm主体で、最大φ40mmである。礫の形状は亜円~亜角礫主体である。礫種は砂岩、泥岩、火山岩類からなる。礫率は20~30%程度である。基質は砂質シルト~シルトで、全体的に石英、長石、角閃石が散在する。					
		11.64	2.97						砂礫	黄褐		2.57~2.97m 砂礫 礫径はφ2~3mm主体で、最大φ15mm程度である。礫の形状は、円~亜角礫主体である。礫率は10~30%程度である。基質はシルト混じり砂からなる。		
												2.57~2.97m 礫の分布が不均質である。3~5cm間隔で礫の多い層、少ない層が互層状に分布する。		
3		11.55	3.06						扇状地堆積物・河川堆積物		シルト・砂	明褐		2.97~3.06m シルト・砂 上位よりシルト~中粒砂が漸的に分布し、上方細粒化が認められる
		10.96	3.65											砂礫
	10.87			3.74	シルト・砂質シルト	明黄		3.65~3.74m シルト~砂質シルト。 上位が褐色、下位灰色、中位~上位寄り茶褐色の木片のようなものも含む。5°程度、層理面に傾斜が認められる。						
10.73	3.88	礫・砂混じりシルト	明黄					3.74~3.88m 礫・砂混じりシルト。 基質は比較的しまったシルトからなる。石英、長石、角閃石を含む。礫径はφ2~5mm、礫の形状は亜円~亜角主体である。礫種は砂岩、泥岩である。						
4	8.61				6.00	扇状地堆積物・河川堆積物		シルト混じり砂礫・シルト	黄褐		3.88~6.00m シルト混じり砂礫・シルト。 礫径はφ2mm~15mm主体で、最大φ40mm程度である。礫の形状は円~亜円主体である。礫種は砂岩、泥岩、安山岩。礫率は30~50%程度である。基質はシルト~砂からなる。粗粒砂は砂岩、泥岩片からなり、石英、長石、角閃石が散在する。			
		5	黄褐								橙くにぶい褐			
												褐		

第6図. 山出A地点のYMD-1孔ボーリングコア柱状図。

Fig. 6. Columnar section and geologic description of core YMD-1 at the site of Yamaide A.

YMD-2



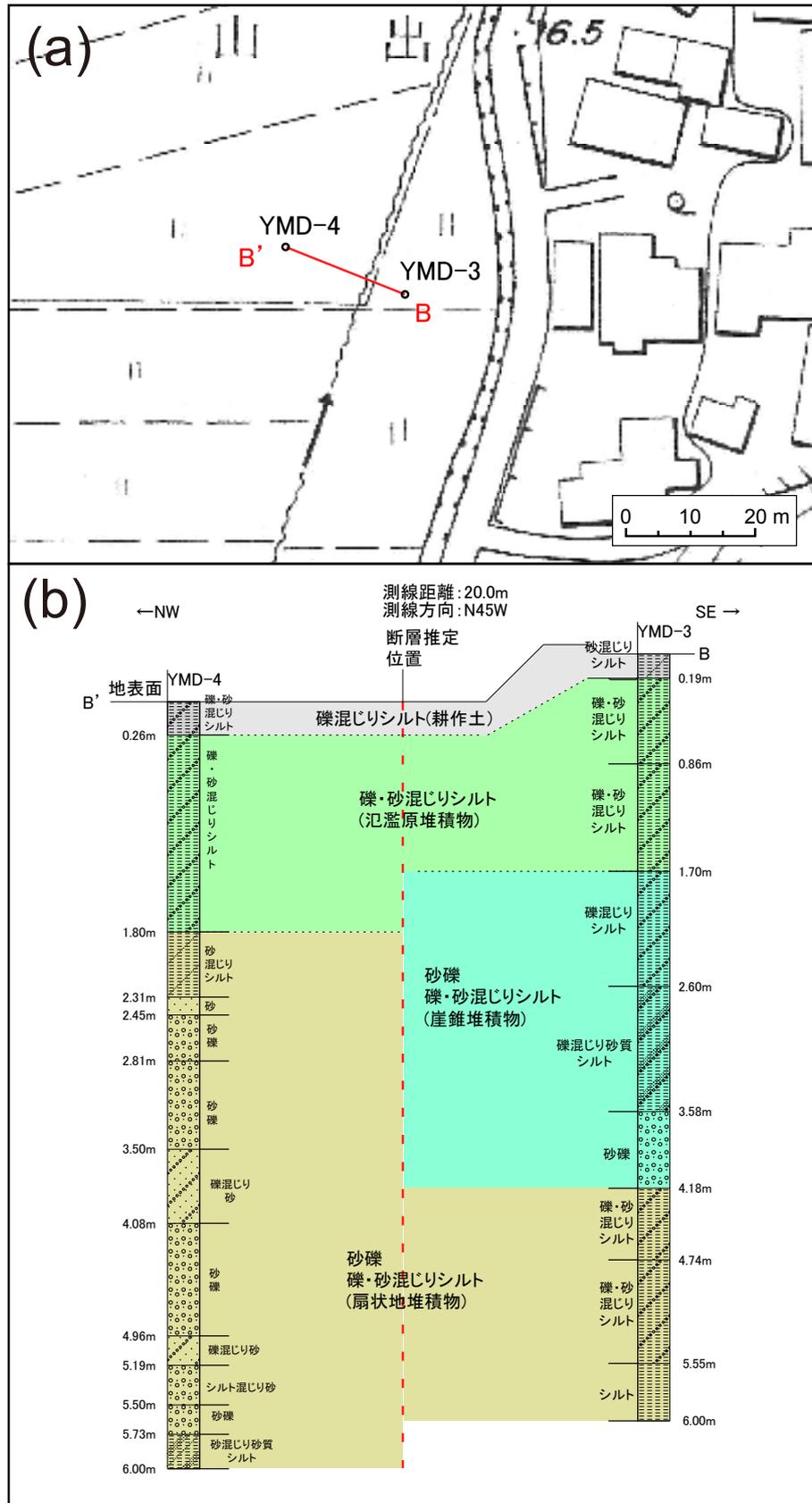
第7図. 山出 A 地点の YMD-2 孔ボーリングコア写真.
Fig. 7. Photograph of core YMD-2 at the site of Yamaide A.

YMD-2

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	地層区分	柱状図	層相区分	色調	風化	記 事
1	14.40	0.25	耕作土 旧耕作土・埋土		礫・砂混じりシルト	褐		0.00~0.25m 礫・砂混じりシルト (耕作土) 均質なシルトからなり、軟質である。極少量の細礫・砂と植物片 (イネ) を含む。
	13.91	0.74			礫・砂混じりシルト			0.25~0.74m 礫・砂混じりシルト。 均質なシルトからなり、石英、長石、角閃石を含む。酸化しており、全体的に褐色である。φ2~15mmの礫を含む。植物根を少量含む。0.25~0.40mに分布する礫は暗渠とともに埋設した砂利と考えられる。
2	11.80	2.85	氾濫原堆積物		礫・砂混じりシルト	灰褐		0.74~2.85m 礫・砂混じりシルト。 主に灰~暗灰色のシルトからなる。砂や鉱物片は全体的に均質に分布する。礫は、φ2~4mmの円~亜円礫主体である。礫種は、安山岩や泥岩主体である。礫の含有量は深度によりばらつくが、比較的下位ほど多くなる。全体的に軟質で、1.5~2.5m付近は特に軟質で、水分を多く含む。
					暗褐	1.70~2.85mにかけて礫率が少しずつ増加する。 1.93~2.18m 礫・砂の含有量が周囲よりやや多い。		
3	10.94	3.71	扇状地堆積物・河川堆積物		シルト混じり砂礫	暗褐		2.85~3.71m シルト混じり砂礫 礫、砂の分布が不均質。シルト、砂礫の互層状である。礫は主にφ2~10mmの円~亜角礫からなる。礫種は、泥岩、砂岩、安山岩である。礫率は10~20%である。砂は角張っており、鉱物片が多く含まれる。基質は砂混じりシルトからなる。 下位のシルト層との境界は不明瞭で、漸移的である。 3.29~3.36m付近はシルト優性で、植物片を含む。
	10.73	3.92			砂混じりシルト			3.71~3.92m 砂混じりシルト 比較的しまったシルトからなり、少量の砂、鉱物片を含む。下位ほど砂の量は増加し、漸移的に礫層へと変化する。
4	10.10	4.55			砂礫	褐		3.92~4.55m 砂礫 礫はφ2~10mmの亜角礫主体で、まれに亜円礫を含む。礫種は泥岩、砂岩主体である。礫率は40~50%である。基質は砂混じりシルトからなる。角閃石を多く含む。
	9.90	4.75			礫・砂混じりシルト			4.55~4.75m 礫・砂混じりシルト 比較的しまったシルトからなる。全体的に礫・砂が含まれるが、含有量は少ない。上部約5cmは褐色である。 4.6mから16955-16655 calyBPの年代が得られている
5	9.28	5.37			砂礫	褐・橙		4.75~5.37m 砂礫 礫径は、φ2~10mm主体で、まれにφ15~30mm程度のものも含まれる。礫の形状は、主に円~亜角礫からなる。礫種は泥岩、砂岩主体である。礫率は40~50%である。淘汰は非常に悪い。
	8.65	6.00			砂礫・砂質シルト			5.37~6.00m 砂礫・砂質シルト互層。 砂礫優勢で、厚さ4~6cmの砂質シルト層が複数挟まる。礫は、φ2~4mmの円~亜角礫主体である。礫率は10~20%である。基質はシルト混じり砂からなり、鉱物片を多く含む。 5.52~5.58m, 5.63~5.65m シルト層が分布する。 5.77~5.81m, 5.85~5.88m, 5.94~6.00m 砂質シルト層が分布する。 各層比較的粒度が整っている。

第8図. 山出A地点のYMD-2孔ボーリングコア柱状図。

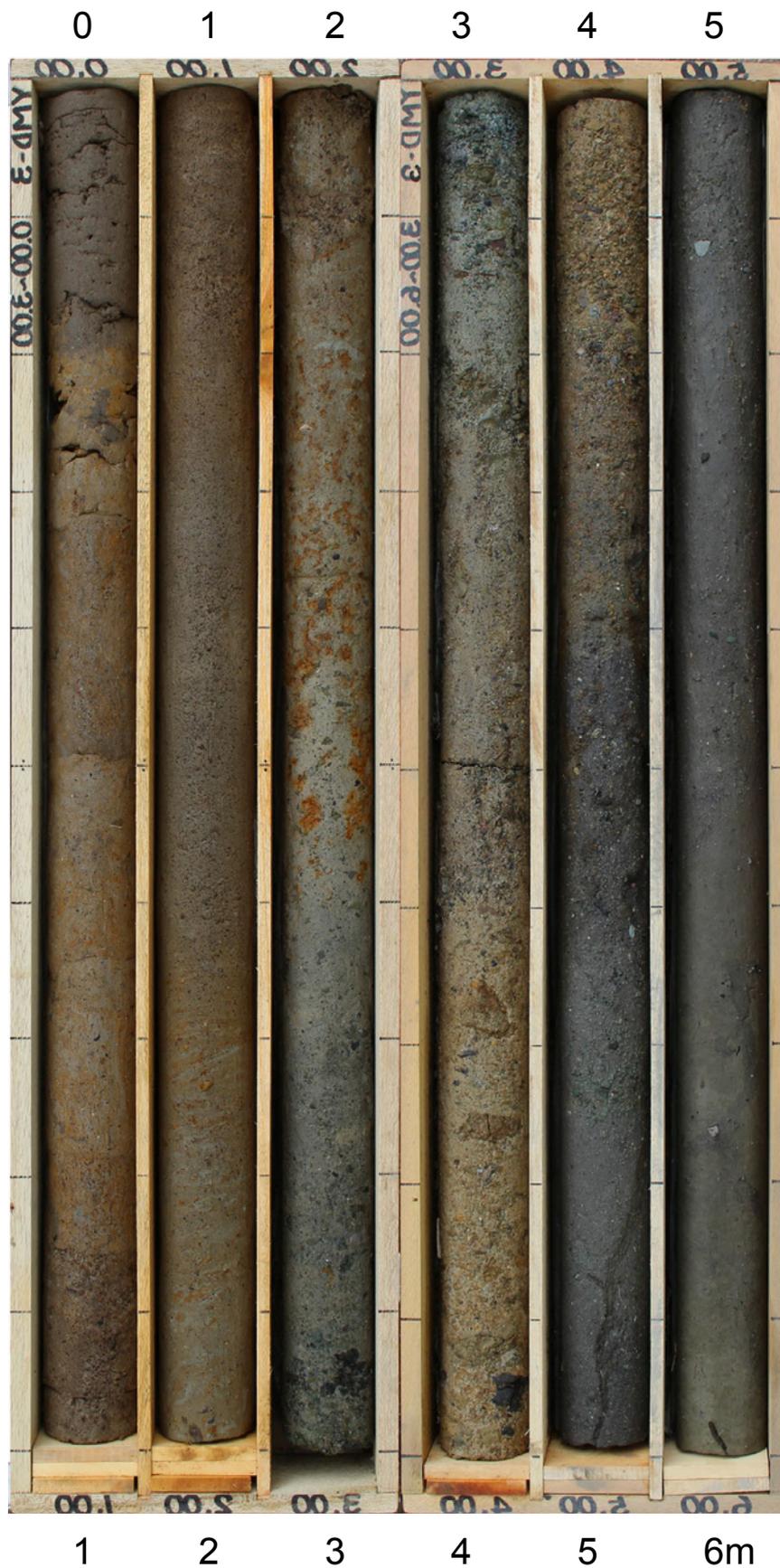
Fig. 8. Columnar section and geologic description of core YMD-2 at the site of Yamaide A



第9図. 山出B地点のボーリング孔位置図と地質断面図。(a) ボーリング掘削位置 (YMD-3, -4)。(b) ボーリングコアの観察から推定した地質断面図。

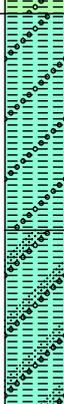
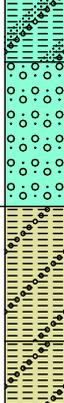
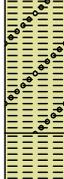
Fig. 9. Location map of boreholes at the site of Yamaide B, and geological cross section along the line of boreholes. (a) City Planing Map of Mifune town showing locations of boreholes (YMD-3 and YMD-4 shown by black circles). (b) A geological cross section between YMD-3 and YMD-4 estimated by logs of boreholes.

YMD-3



第10図. 山出B地点のYMD-3孔ボーリングコア写真.
Fig. 10. Photograph of core YMD-3 at the site of Yamaide B.

YMD-3

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	地層区分	柱状図	層相区分	色調	風化	記 事
1	14.79	0.19	氾濫原堆積物		砂混じりシルト	褐		0.00~0.19m 砂混じりシルト (耕作土) シルト主体で、極少量砂が混じる。
	14.12	0.86			礫・砂混じりシルト	にぶい褐		0.19~0.86m 礫・砂混じりシルト やや軟質なシルトからなる。粒径のまばらな砂が混じる。
2	13.28	1.70	崖錐堆積物		礫・砂混じりシルト	褐		0.86~1.70m 礫・砂混じりシルト 均質なシルト主体である。混在する礫や砂はφ1~4mm程度。形状は歪角~角礫で、礫種は主に砂岩である。全体に偏りなく分布する。
	12.38	2.60			礫混じりシルト	灰褐・褐		1.70~2.60m 礫混じりシルト 比較的しまったシルト主体である。礫はφ2~4mmの歪円礫主体で、礫種は主に泥岩である。色調は灰褐色主体で、赤褐色の部分はまだら状に分布する。
3	11.40	3.58	扇状地堆積物		礫混じり砂質シルト	灰褐		2.60~3.58m 礫混じり砂質シルト 基質は比較的しまった砂質シルトからなり、鉱物片が多く含まれる。礫はφ2~15mmの歪円礫主体である。礫種は主に砂岩や火山岩である。
	10.80	4.18			砂礫	暗褐		3.58~4.18m 砂礫 礫はφ2~4mmの歪円~歪角礫主体で、礫種は砂岩、泥岩である。礫率は40~50%である。淘汰は非常に悪い。φ30~40mmの風化した砂岩礫が認められる。
5	10.24	4.74	扇状地堆積物		礫・砂混じりシルト	黒褐		4.18~4.74m 礫・砂混じりシルト 主に不均質な砂混じりシルトからなる。礫はφ2~4mmの円~歪円礫主体である。礫種は砂岩および泥岩主体である。下位ほど礫の含有量が低下する。4.40m付近を境に色調が著しく変化する(暗褐→黒褐)。
	9.43	5.55			礫・砂混じりシルト			4.74~5.55m 礫・砂混じりシルト 基質は砂混じりシルトからなり、不均質である。砂や鉱物片が散在する。φ10mm程度の礫を少々含む。植物茎のようなものが認められる。
	8.98	6.00			シルト	褐	5.55~6.00m 礫混じりシルト 軟質で均質なシルトからなる。φ10mm程度の礫が点在する。	

第 11 図. 山出 B 地点の YMD-3 孔ボーリングコア柱状図.

Fig. 11. Columnar section and geologic description of core YMD-3 at the site of Yamaide B.

YMD-4



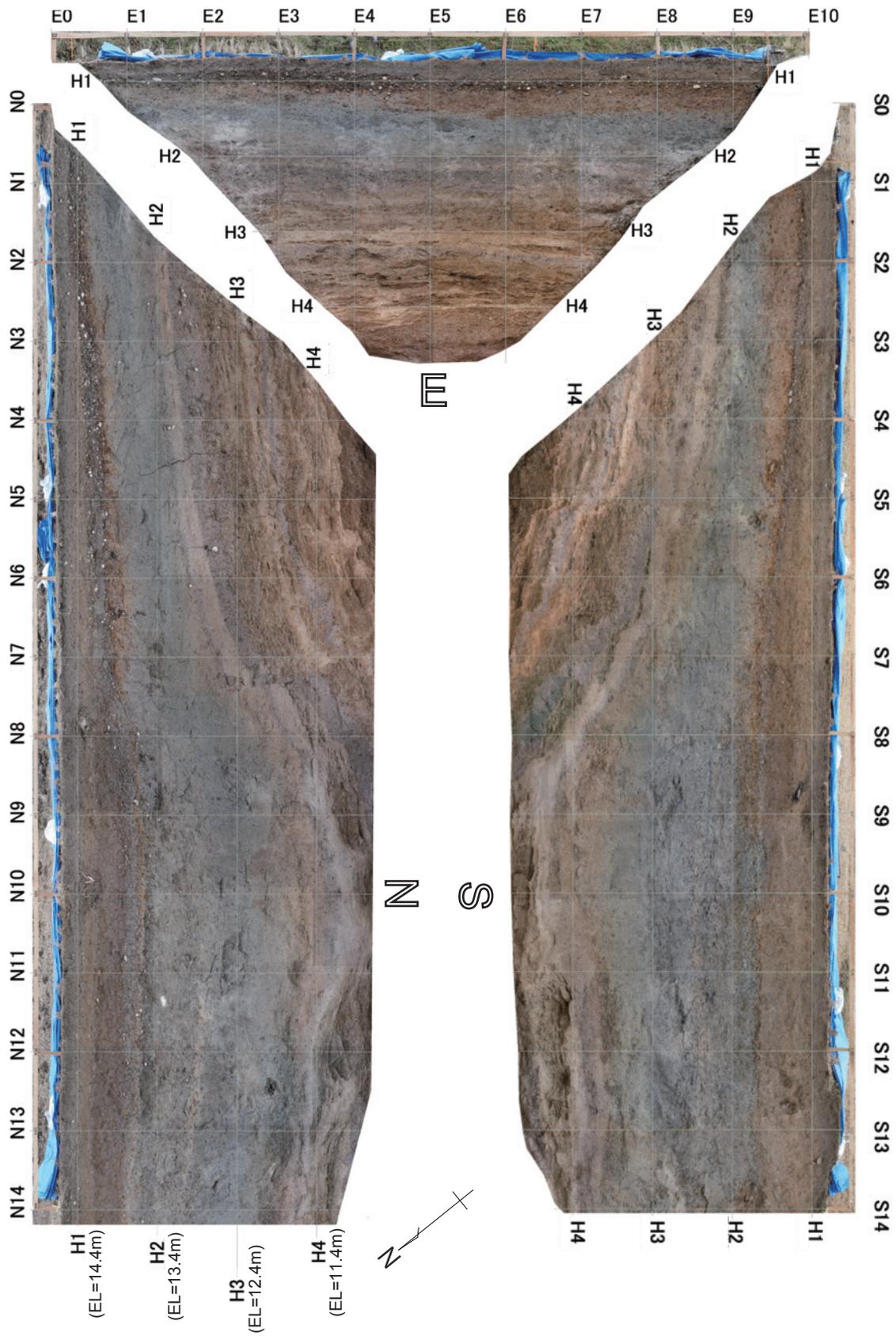
第 12 図. 山出 B 地点の YMD-4 孔ボーリングコア写真.
Fig. 12. Photograph of core YMD-4 at the site of Yamaide B

YMD-4

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	地層区分	柱状図	層相区分	色調	風化	記 事
1	14.16	0.26	氾濫原堆積物		礫・砂混じりシルト	褐		0.00~0.26m 礫・砂混じりシルト（耕作土） シルト主体で、少量の細砂、礫と植物根・茎含む。
					礫・砂混じりシルト	明褐		0.26~1.80m 礫・砂混じりシルト やや軟質なシルトからなる。φ2mm程度の風化した砂岩の礫や砂が点在する。
2	12.62	1.80	扇状地堆積物		砂混じりシルト	暗褐		1.80~2.31m 砂混じりシルト 軟質なシルトからなり、風化した砂岩起源の砂が点在する。 腐食木片が多く含まれる。下位はとくに軟質で、水を多く含む。
	12.11	2.31			砂			2.31~2.45m 砂 極細粒砂～中粒砂からなり、上方細粒化が認められる。
11.97	2.45	砂礫					2.45~2.81m 砂礫 礫はφ4~30mmの円～垂円礫主体で、礫種は主に安山岩である。基質はやや角ばった中～粗粒砂主体である。礫率は30~40%である。	
3	11.61	2.81			砂礫			2.81~3.50m 砂礫 礫はφ2~20mmの円～垂角礫主体である。基質はシルト混じり細～中粒砂からなる。礫率は10~30%である。礫の含有量は下位ほど減少する。 3.43~3.50mのみ礫多く含む。
	10.92	3.50			礫混じり砂	褐灰		3.50~4.08m 礫混じり砂 極細粒砂～中粒砂からなり、上方細粒化が認められる。下位ほど礫の含有量が多い。含まれる礫は、φ2~8mmの垂円～垂角礫主体である。
4	10.34	4.08			砂礫			4.08~4.96m 砂礫 礫はφ2~10mmの円～垂円礫主体で、比較的均質に分布する。礫率は10~20%である。基質はシルト混じり砂で、シルトの含有量は深度によりばらつきがある。とくに、4.08~4.51mはシルトの含有量が多い。
	5	9.46			4.96	礫混じり砂		
9.23		5.19			シルト混じり砂			5.19~5.50m シルト混じり砂 上位から、シルト～砂礫からなる。下位の礫層（5.50~5.73m）も含め、上方細粒化が認められる。
	8.92	5.50			砂礫			5.50~5.73m 砂礫 礫はφ8mmの円～垂角礫主体である。礫率は70~80%である。基質は粗粒砂主体で、中粒砂も含まれる。
	8.69	5.73			砂混じり砂質シルト	暗褐		5.73~6.00m 砂混じり砂質シルト 比較的均質な砂質シルトからなる。細～中粒砂が点在する。
	8.42	6.00						

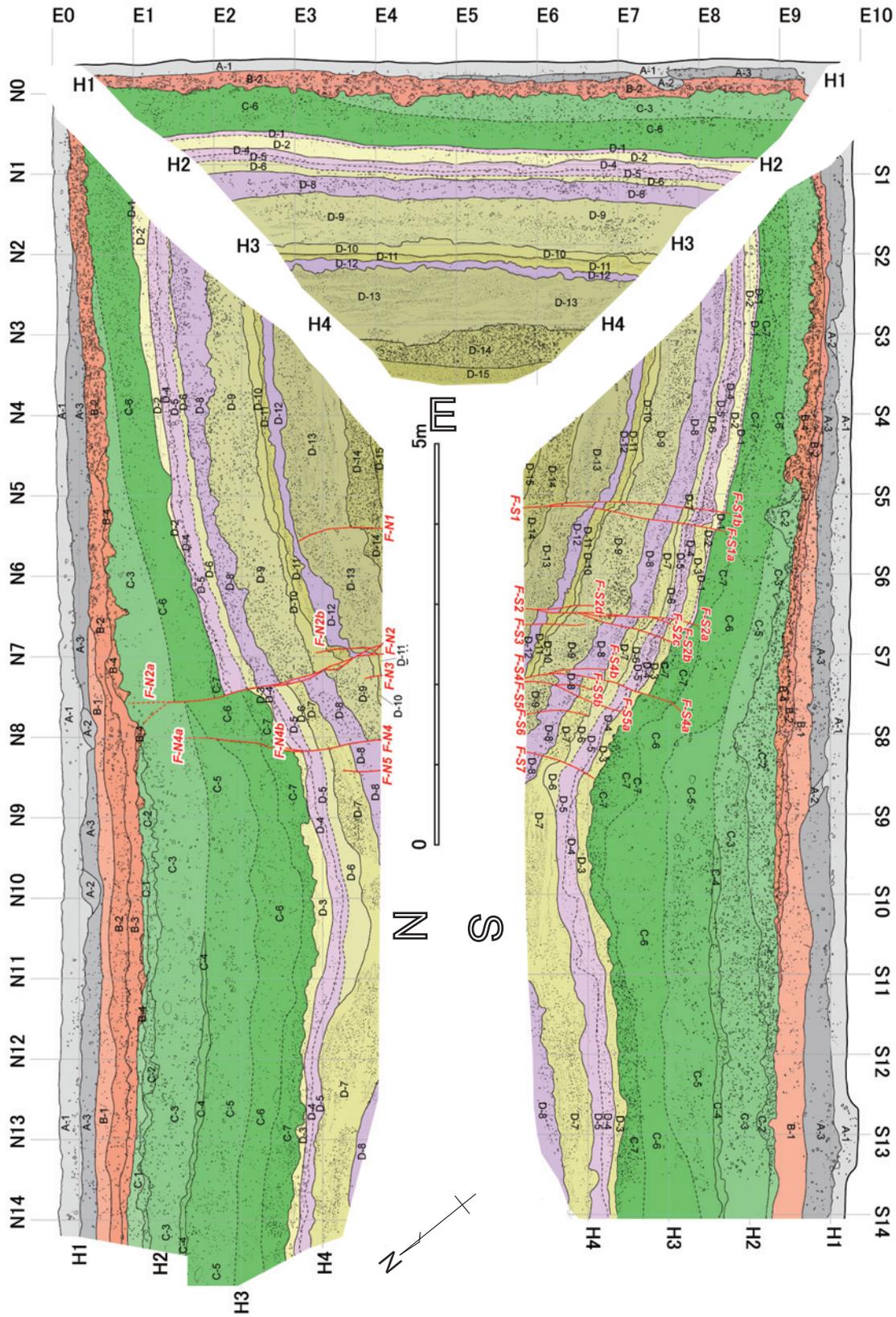
第13図. 山出B地点のYMD-4孔ボーリングコア柱状図.

Fig. 13. Columnar section and geologic description of core YMD-4 at the site of Yamaide B.



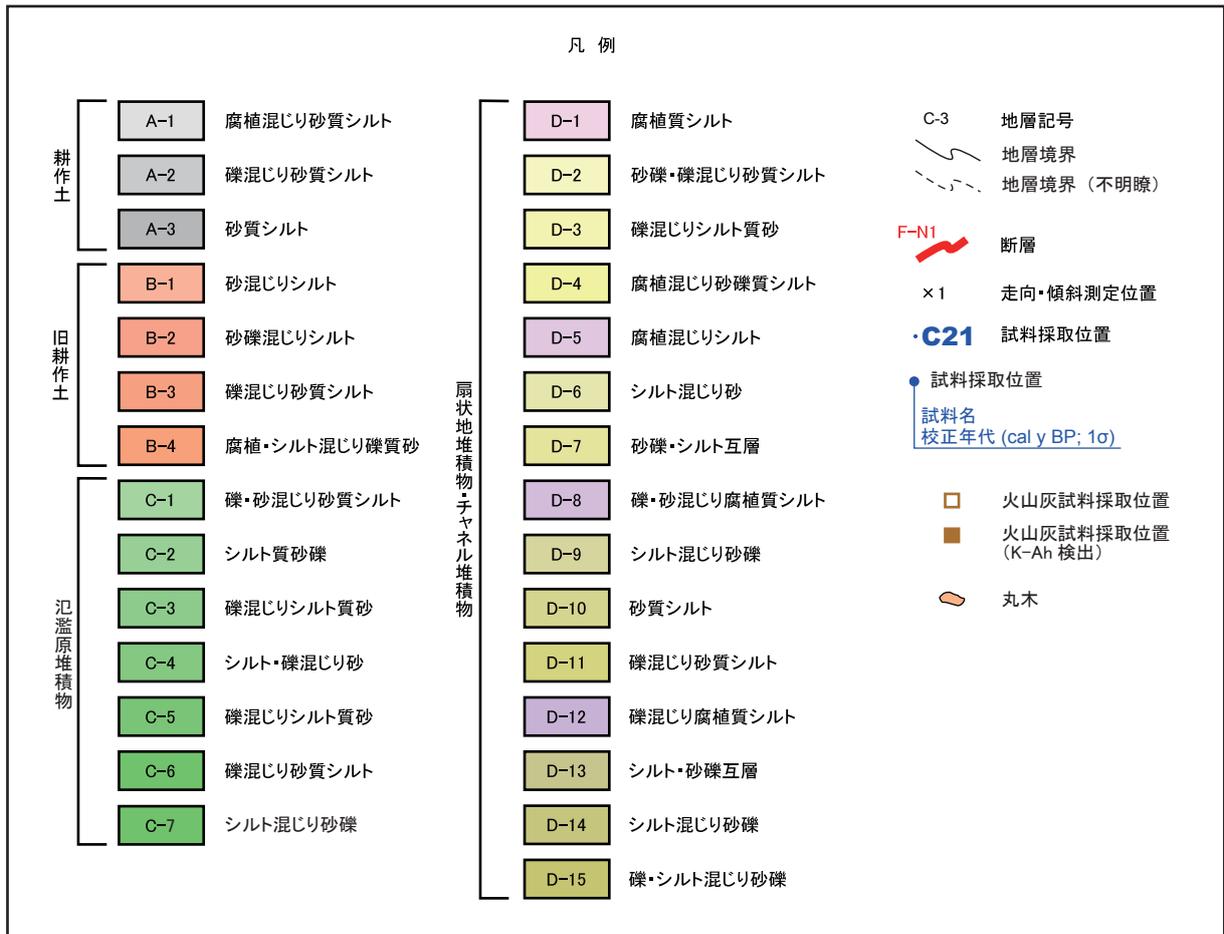
第14図. トレンチ壁面写真展開図.

Fig. 14. Plan view of photomosaic of the trench at the Yamaide site.

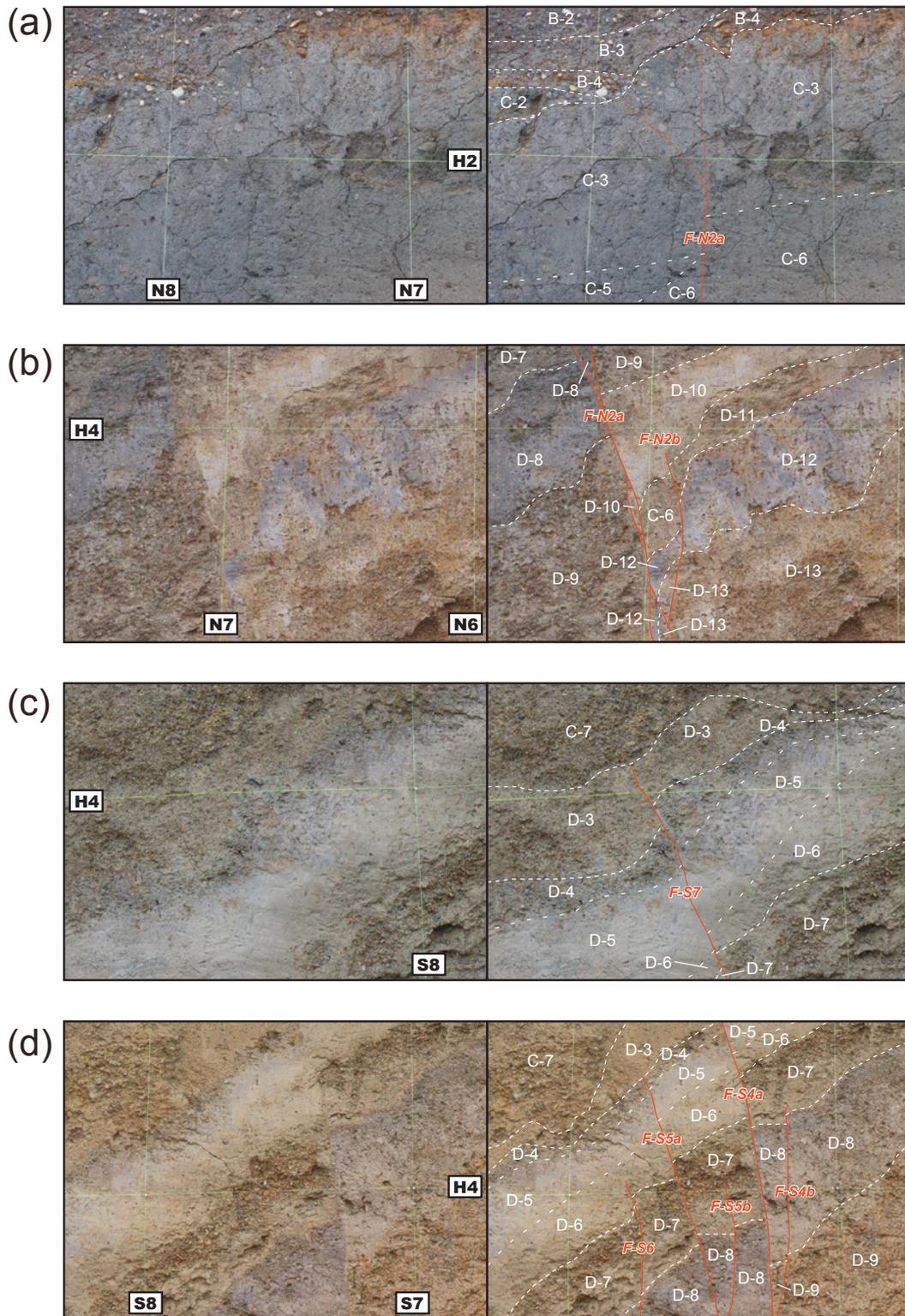


第15図. トレンチ壁面スケッチ展開図.

Fig. 15. Plan view of logs of the trench at the Yamaiide site.

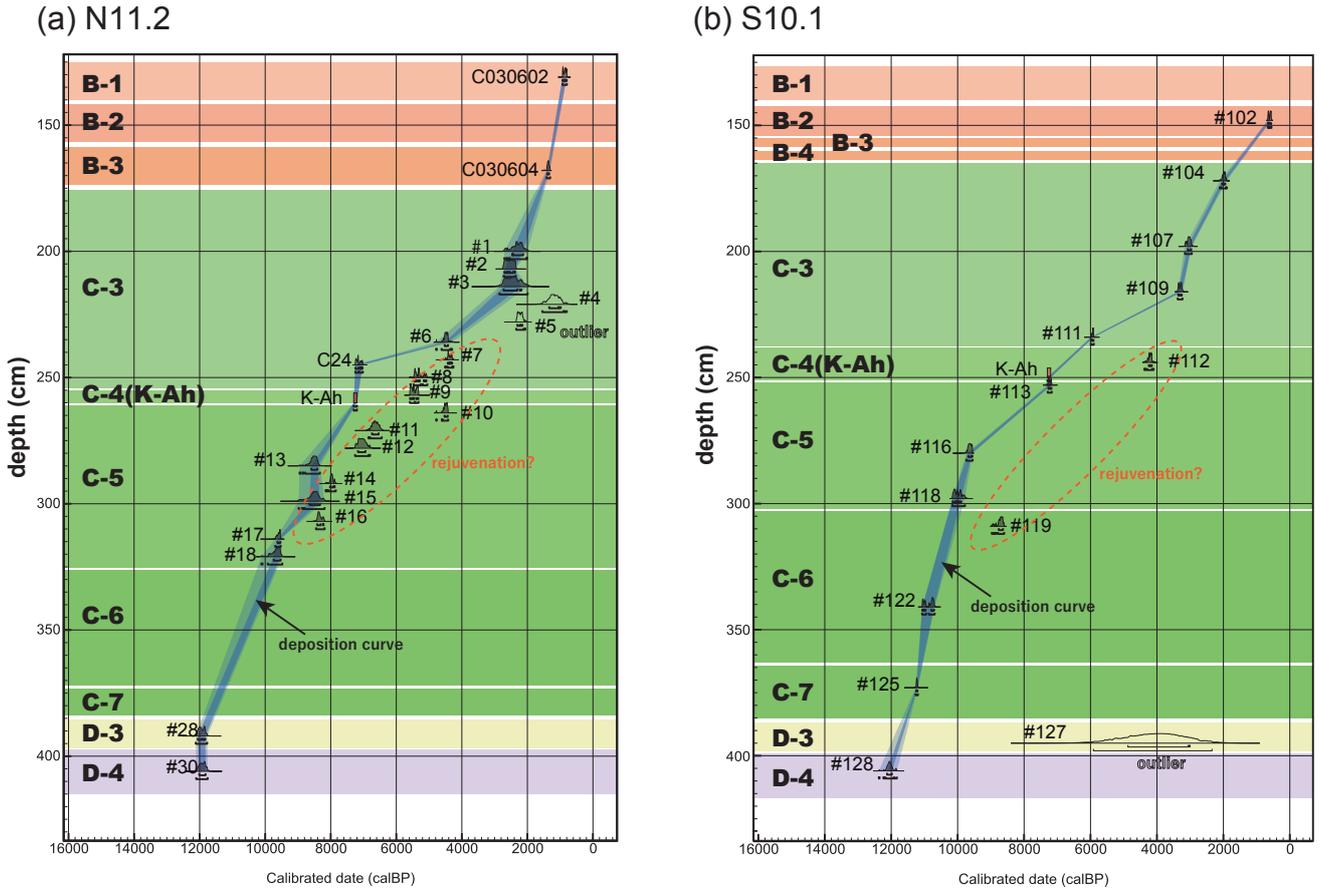


第 18 図. トレンチ壁面スケッチ凡例.
Fig. 18. Legend of logs of the trench.



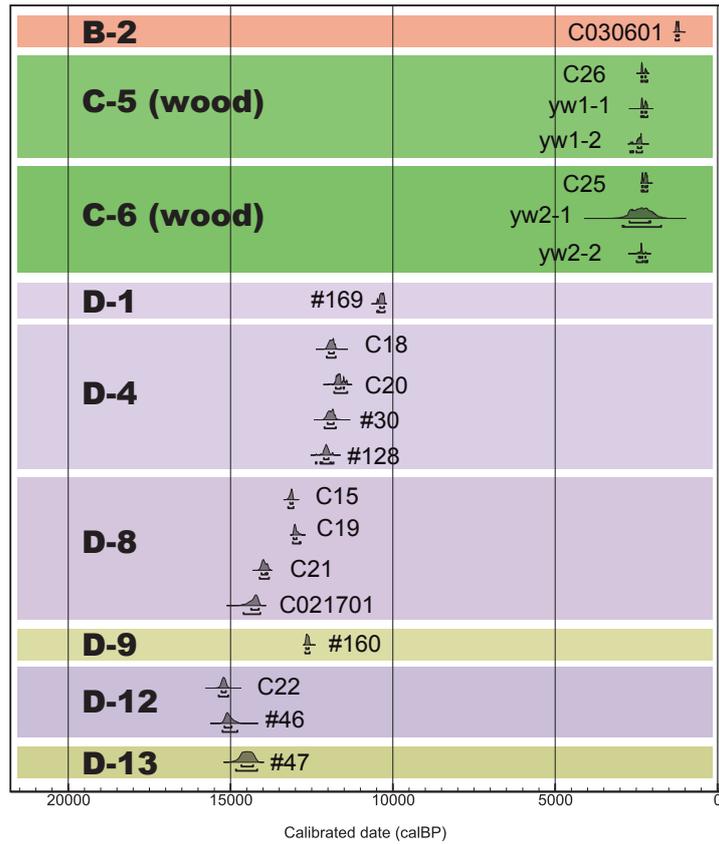
第 19 図. 壁面拡大写真. 左が解釈なし, 右が解釈線を記入した写真. (a) F-N2a 断層上端部. (b) F-N2a 断層及び F-N2b 断層に沿う D-7 層~D-13 層の変形構造. (c) F-S7 断層の上端部. (d) F-S6 断層, F-S5b 断層, 及び F-S4b 断層上端部.

Fig. 19. Close-up photographs of trench walls at the Yamaide site. The photographs on the left and right sides are without and with interpretation respectively. (a) The upper termination of the fault F-N2a. (b) Dragged structure of layers D-7 ~ D-13 along faults F-N2a and F-N2b. (c) The upper termination of the fault F-S7. (d) Upper terminations of faults F-S6, F-S5b, and F-S4b.

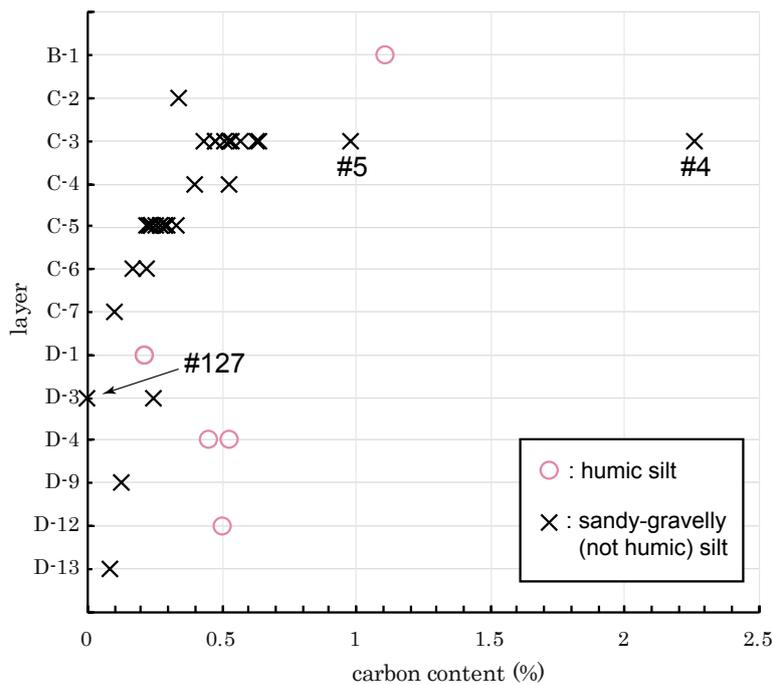


第 20 図. ^{14}C 年代測定結果から推定される堆積曲線。(a) N 面 N11.2 に沿って採取した試料の示す堆積曲線。縦軸は地表からの深度、横軸は暦年校正後の年代を示す。確率密度分布、堆積曲線は OxCal 4.3 (Bronk Ramsey, 2009) を使用して作成した。(b) 同様に作成した S 面 S10.1 に沿って採取した試料の示す堆積曲線。

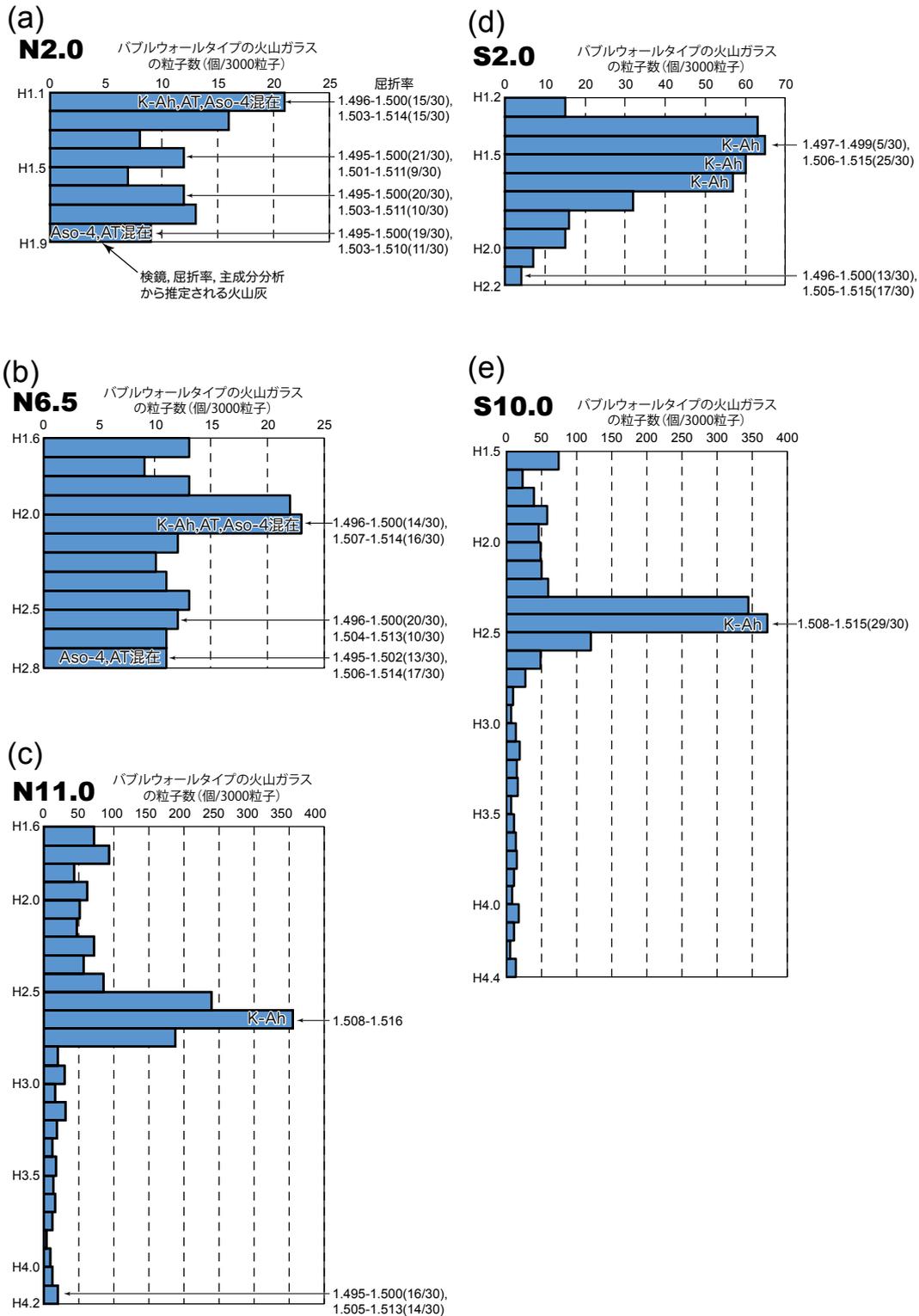
Fig. 20. Deposition curves estimated from results of ^{14}C dating. (a) Deposition curve indicated from ^{14}C ages of samples collected along the section N11.2 on the north wall. The vertical axis shows the depth of the sampling point (from the surface of the ground). The horizontal axis shows calibrated ages. Probability density functions and depositional curves are calculated by OxCal 4.3 (Bronk Ramsey, 2009). (b) Deposition curve indicated from ^{14}C ages of samples collected along the section S10.1 on the south wall.



第 21 図. N 面 N11.2 測線及び S 面 S10.1 測線以外の試料から得られた ^{14}C 年代値の分布. 確率密度分布は OxCal 4.3 (Bronk Ramsey, 2009) を使用して作成した.
 Fig. 21. Distribution of ^{14}C ages excluding the sections N11.2 on the north wall and S10.1 on the south wall at the Yamaide site. Probability density functions and depositional curves have been calculated by OxCal 4.3 (Bronk Ramsey, 2009).

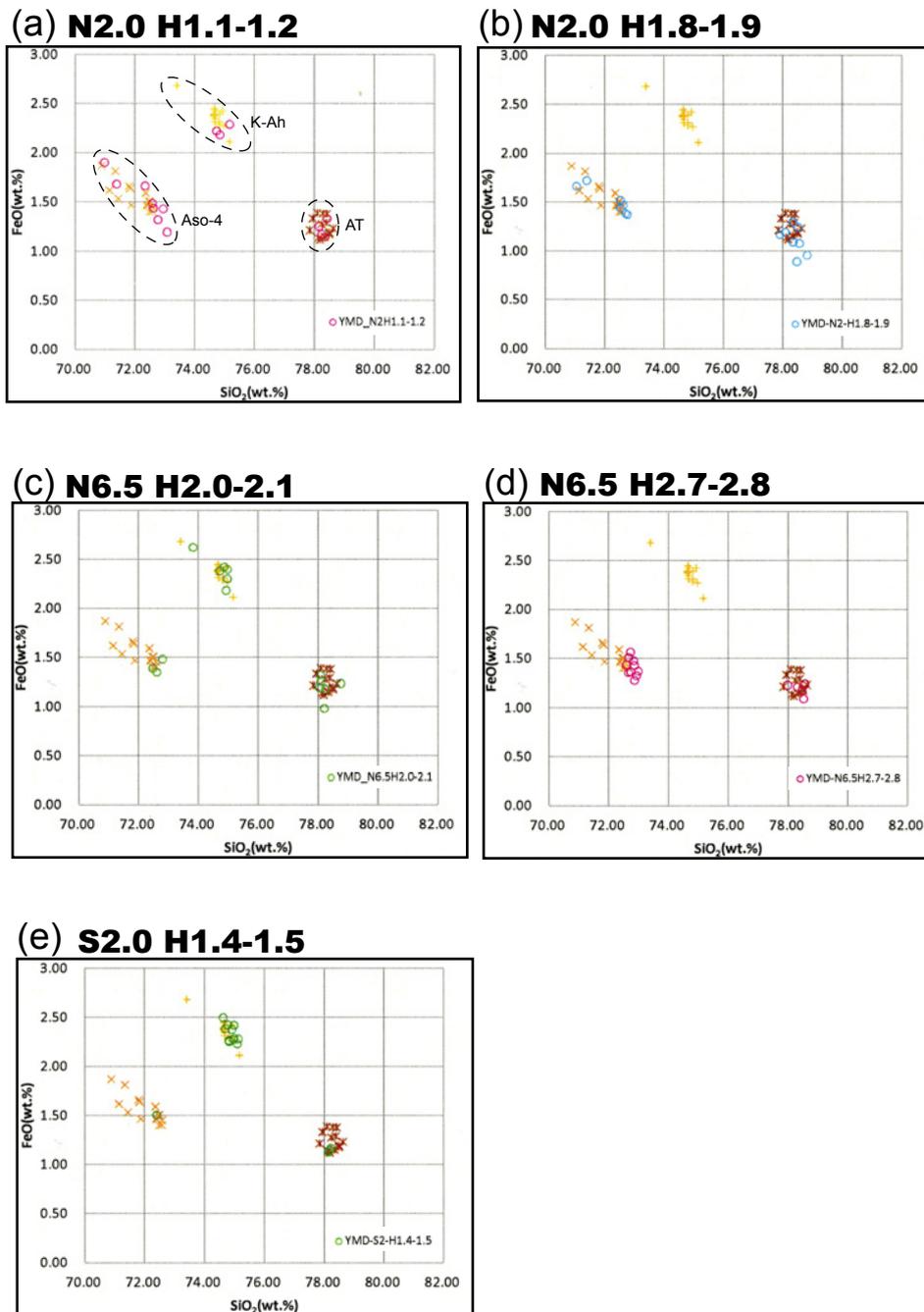


第 22 図. 炭素含有率の分布. 測定試料の炭素含有率を層準ごとにプロットした. 地層は上位層から順に並べた.
 Fig. 22. Distribution of carbon content. Carbon contents of samples are plotted on each layer. Layers are arranged from top to bottom.



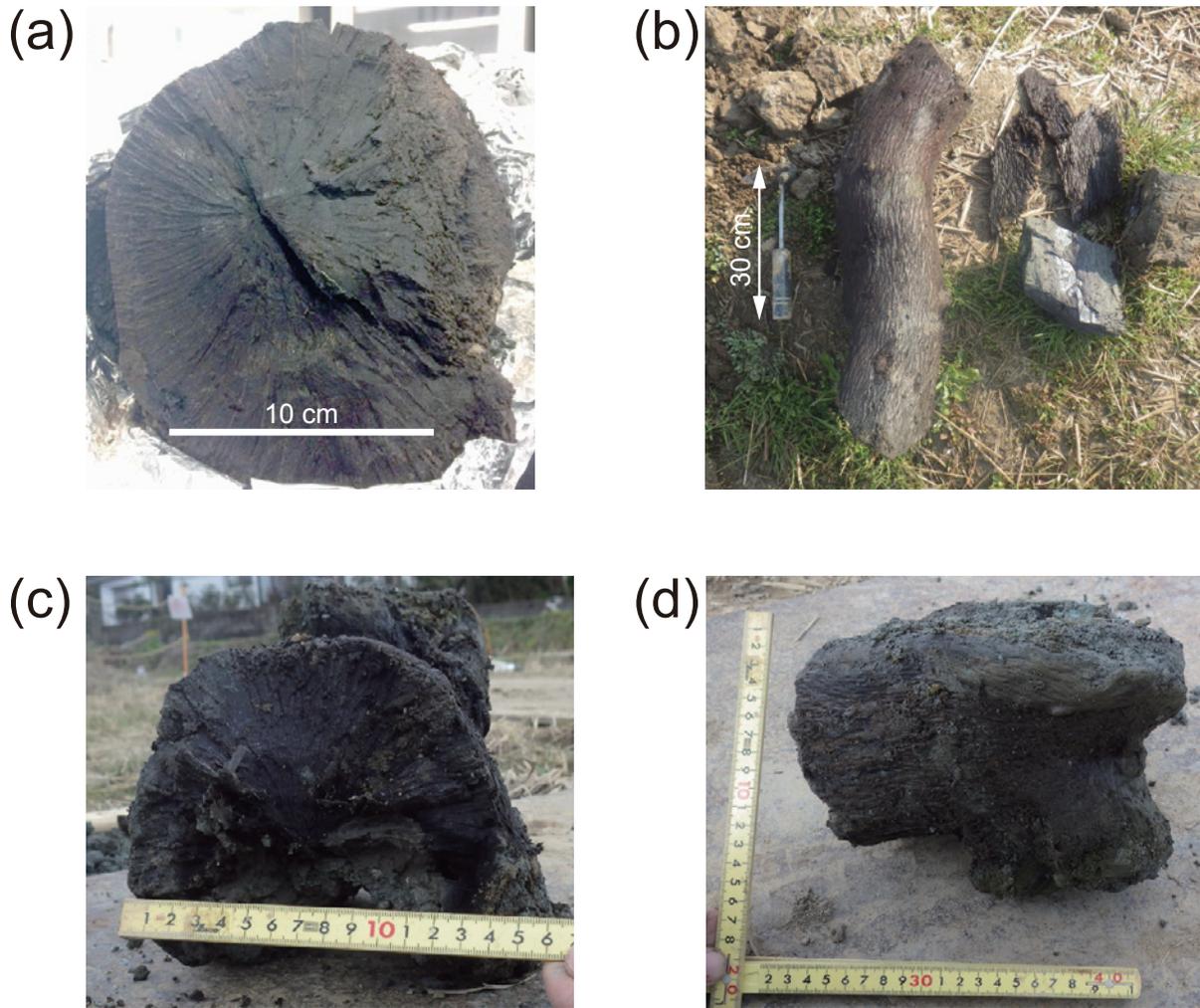
第 23 図. 火山灰分析結果. N 面の N2, N6.5, N11 測線及び S 面の S2, S10 測線から採取した試料の火山灰分析結果. バブルウォール型火山ガラスの含有量と測定された屈折率を示した. また, 検鏡, 屈折率, 主成分分析により含まれると推定される火山灰名を併記した.

Fig. 23. Results of tephra analysis. Results of tephra analysis of samples collected along the sections N2, N6.5, and N11 on the north wall, and S2 and S10 on the south wall at the Yamaide site. The number of bubble-wall shaped shares have been shown with their histograms. Measured reflective indices and detected volcanic ashes by optical microscopy, measurement of reflective indices, and principle component analysis are written together.

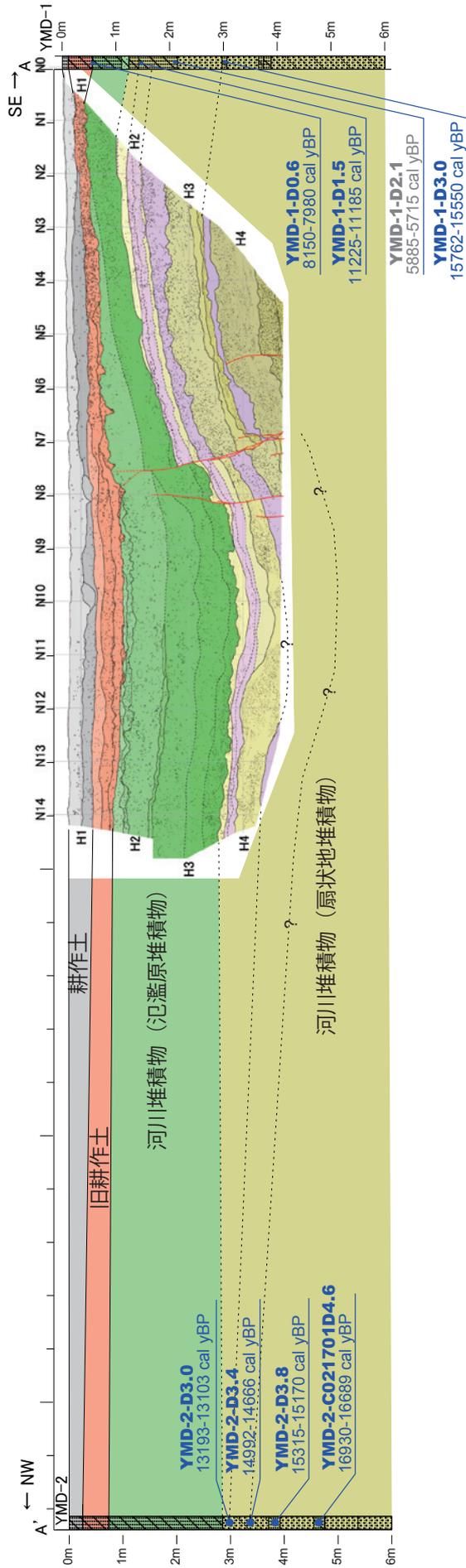


第 24 図. 主成分分析結果. N2, N6.5, S2 測線から採取した試料の主成分分析結果. 主成分分析では SiO₂, TiO₂, FeO, MgO, Na₂O, K₂O, CaO, MnO, Al₂O₃ の濃度を測定した. その内 SiO₂ 濃度に対する FeO 濃度の分布を一例として示した.

Fig. 24. Results of principle component analysis. Results of principle component analysis of samples collected along the sections N2 (H1.1-1.2, H1.8-1.9), N6.5 (H2.0-2.1, H2.7-2.8), and S2 (H1.5-1.5) at the Yamaide site. Concentrations of SiO₂, TiO₂, FeO, MgO, Na₂O, K₂O, CaO, MnO, and Al₂O₃ were measured. The concentrations of FeO are plotted with respect to SiO₂ as an example.



第 25 図. 出土した材の拡大写真. (a) 山出トレンチ北壁面 C-5 層中から採取された木材の断面写真と (b) 全体形状. (c) C-6 層中から採取された木材の断面写真と (d) 全体形状.
Fig. 25. Close-up photographs of woods collected from the north wall at Ymaide site. (a) Photograph of cross section of the wood taken from the layer C-5 and (b) the overall shape of it. (c) Photograph of cut surface of the wood taken from the layer C-6 and (d) the overall shape of it.



第26図. 山出A地点の地質断面図. トレンチ北壁面, YMD-1孔, 及びYMD-2孔を投影した. 縦横比は1:1. ボーリングコアから得られた¹⁴C年代を記した.
 Fig. 26. Geological cross-section at the site of Yamaide A. A geological cross section based on columnar sections of boreholes and log of the trench wall. Columnar sections of boreholes with ¹⁴C ages and exposure of N wall of the trench are projected onto the orientation of N45°W. No vertical exaggeration.