

## 反射法地震探査およびボーリング調査に基づく布田川断層帯宇土区間東部の断層形状および活動性

Subsurface geometry and long-term slip rate of the eastern part of Uto segment, a constituent fault of the Futagawa fault zone, central Kyushu, as inferred from seismic reflection profiling and coring

丸山 正<sup>1</sup>・杉山雄一<sup>1</sup>・末廣匡基<sup>2</sup>・秋永康彦<sup>2</sup>・新谷加代<sup>2</sup>

Tadashi Maruyama<sup>1</sup>, Yuichi Sugiyama<sup>1</sup>, Masaki Suehiro<sup>2</sup>, Yasuhiko Akinaga<sup>2</sup> and Kayo Shintani<sup>2</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> 株式会社阪神コンサルタンツ (Hanshin Consultants Co., Ltd.)

**Abstract:** We have integrated high-resolution seismic reflection profiling and drilling to infer subsurface geometry and slip rate for the Uto segment, a blind section of the ENE-trending active Futagawa fault zone, central Kyushu. Our P-wave seismic reflection profiling across the eastern part of the Uto segment with NNW-trending survey lines, perpendicular to the general trend of the Futagawa fault zone, allows us to define the cross-sectional geometry and cumulative deformation of two flexure zones in depth ranging from 1 km to shallower than 100 m, from employment of two different sources (a vibroseis and a hydraulic impactor). The axial surface of the northern flexure and that of the more widely and remarkably deformed southern flexure dips to the south and north, respectively. Furthermore, deformation pattern of reflectors shows that both the northern and southern flexure have a normal-slip component, forming a graben-like depression between them. Those flexures are probably associated with the north-side-downthrown Uto fault on the south and the south-side-downthrown Kiyama fault on the north. Two cores drilled on the downthrown (hanging wall) and upthrown (footwall) sides of the Uto fault exposed the Togawa lava, whose age is determined with K-Ar dating to be *ca.* 150 ka. If we assume that the upper surface of lava was level at the time of its emplacement and that no significant erosion occurred subsequently, *ca.* 57 m of elevation difference of the top of the Togawa lava between two cores suggests a vertical slip rate of *ca.* 0.4 mm/yr for the easternmost part of the Uto fault. For properly assessing earthquake hazard posed by the Uto segment, further integrated study as performed in this study should be conducted in the central and western parts of this segment.

**キーワード:** 宇土区間, 布田川断層帯, 反射法地震探査, ボーリング, 伏在活断層, 木山断層, 砥川溶岩

**Keywords:** Uto segment, Futagawa fault zone, seismic reflection profiling, coring, active blind fault, Togawa lava

### 1. はじめに

布田川断層帯は、阿蘇外輪山の西側斜面から熊本平野南部を経て宇土半島の先端にかけて東北東-西南西に延びる全長約 64 km 以上の断層帯であり、東から布田川区間、宇土区間、宇土半島北岸区間の 3 区間から構成される (地震調査研究推進本部地震調査委員会 (以下、地震調査委員会, 2013a; 第 1 図)。

地震調査委員会 (2013a) によると、宇土区間は同区間北東部の北甘木断層とその南西に分布する宇土断層からなり、上益城郡益城町木山付近から宇土市中心部に延びる長さ約 20 km の区間で、南東側が相対的に隆起する上下成分を伴う可能性があると考え

ている (第 2, 3 図)。北甘木断層は、北甘木台地において、数百メートル程度の間隔で並走する断層からなり、これらの断層により小規模な地溝帯 (木山-嘉島地溝) を形成している。北甘木断層の位置やずれの向きについては、鶴田・渡辺 (1978)、渡辺ほか (1979)、活断層研究会編 (1980, 1991)、九州活構造研究会編 (1989)、石坂ほか (1992)、池田ほか (2001)、中田・今泉編 (2002) など図示されている。これに対して、宇土区間の大部分をなす宇土断層は、宇土半島北岸区間とともに活断層研究会編 (1980, 1991)、九州活構造研究会編 (1989)、池田ほか (2001)、中田・今泉編 (2002) では活断層として認定されて

おらず、重力異常の急変帯の分布などに基づいて、北甘木断層の西端から熊本平野の南縁に沿って宇土市中心部に伏在する活断層として新たに推定されたものである（地震調査委員会，2013a；第2, 3図）。ただし、石坂ほか（1992）は、熊本平野のボーリング情報に基づいて、木山-嘉島地溝が西方の熊本平野地下にも伏在して延びる可能性を指摘している（第3図）

宇土区間の過去の活動については、石坂ほか（1992）が木山-嘉島地溝を横切る測線に沿ったボーリング資料を検討し、後期更新世における地溝を限る南東側隆起の断層の上下方向の平均変位速度を0.2~0.5 m/千年と推定している。地震調査委員会（2013a）は、石坂ほか（1992）による調査結果に基づいて、宇土区間の平均変位速度の上下成分は0.2~0.5 m/千年程度もしくはそれ以上の可能性があるとして評価した。また、断層の長さに基づく経験式（松田，1975；松田ほか，1980）から、同区間ではM7.0程度の地震が発生すると推定され、その際には断層の南側が北側に対して相対的に高まる段差を伴い、全体として2 m程度のずれを生じる可能性があるとして評価されているものの、将来このような地震が発生する確率を求めることはできないとした。このため、地震調査委員会（2013a）は、「今後に向けて」の中で、「布田川断層帯の宇土区間では、活断層の詳細な位置や形状、平均活動間隔や最新活動時期に関するデータが得られていない。同区間が活動した際の地表のずれや撓みが生じる位置やずれの量を正確に予測し、また地震発生確率を算出するうえで、これらのデータを取得するための調査が必要である。」と言及している。

こうした課題を踏まえて、本調査では、布田川断層帯宇土区間の詳細な位置、形状および活動性を明らかにすることを目的として、同区間東部においてP波反射法地震探査およびボーリング調査を実施した。

2016年4月16日に熊本地方を震源とするM7.3の地震（熊本地震）が発生した。地震調査委員会（2016）によると、この地震と前震（4月14日，M6.5；4月15日，M6.4）は、それぞれ主に布田川断層帯布田川区間、日奈久断層帯高野-白旗区間の活動であったと評価されている（第1図）。これらの地震およびその後の余震を含む一連の地震活動に伴い、布田川断層帯布田川区間および日奈久断層帯高野-白旗区間の北部で明瞭な地震断層が出現し、宇土区間東端部の北甘木台地北方でも小規模な地表変状が出現したことが報告されている（例えば、産業技術総合研究所地質調査総合センター，2016；Shirahama *et al.*, 投稿中）。熊本地震に伴う地震断層の出現状況の正確な把握は、現状の布田川断層帯および日奈久断層帯の長期評価の妥当性を評価するうえで重要であるが、本稿作成時点では、地震断層の実体は十分に解明さ

れているとはいえない。したがって、本稿では宇土区間の活動性についての考察には、熊本地震発生以後に取得された資料は用いない。

## 2. 反射法地震探査

### 2.1 探査測線の概要と探査仕様

宇土区間を構成する断層の地下での分布・形状およびずれの向きを明らかにするため、同区間のうち断層変位地形が保存されている北甘木断層の西方延長にあたる熊本県上益城郡嘉島町から熊本市東区において、同区間を横断するようにP波反射法地震探査を実施した（第1表，第2~4図）。調査測線は、地震調査委員会（2013a）により示された宇土断層の東端部を横切り、かつ布田川区間を構成する断層の一つである木山断層の西方延長部をカバーし、それらの走向と直交する北北西-南南東方向に設定した。道路交通量、家屋の密集度、調査期間中に実施される工事などを勘案し、第4図に示す2本の測線を設けた。測線の総延長は約5.6 kmであり、標準発震点間隔10 m、標準受振点間隔10 m、展開長約1 kmとした。このうち、南東側の測線1の延長は3,232 m、北西側の測線2は2,375 mであり、両者には測線に直交する方向に約600 mの隔りがある。こうした隔りのある2測線間での探査記録の最適な接合箇所を検討できるように、約1 kmのオーバーラップ区間を設けた。

本探査では、深度1 km程度までの地質構造の把握とともに、後述する本調査で実施した掘削深度70 mおよび30 mのボーリング調査結果との対比に基づいた浅部の詳細な地質構造の解明を目的として、2測線ともに発震地点毎に、深部の探査を対象とする中型パイプロサイズと、浅部の探査を目的とした油圧インパクトの2種類の震源による発震を行った。主な探査の仕様および使用機器を第2表に示す。探査は、2016年1月に実施した。

収録された記録のデータ処理および解析においては、反射法地震探査で一般に用いられる共通中間点（Common Midpoint: CMP）重合法によりS/N比を高めた時間断面を作成した。これに速度解析結果等に基づいたFKマイグレーション処理を施し、時間断面内の反射面の位置を補正した後、深度変換によりマイグレーション後時間断面を深度断面に変換した。解析測線とCMP番号を第4図に示す。また、データ処理および解析に使用した主なパラメータを第3表に示す。

### 2.2 推定される地質構造

#### (1) 深度1 km程度までの地下構造

中型パイプロサイズを震源とした測線1と測線2の時間断面図、深度断面図および解釈図を第5~8図に示す。これらの断面図では、最大深度1 km程度ま

での地下地質構造を読み取ることができる。また、測線 1 と測線 2 を接合した深度断面図を第 9 図（鉛直誇張なし）、第 10 図（鉛直誇張 2 倍）に示す。ここでは、第 9、10 図ともに接合部の違和感が少なく、また反射面の側方への連続や積み重なり方から、同一と推定される反射面のずれが小さい測線 1 の CMP 番号 100 と測線 2 の CMP 番号 380 で接合している。

探査測線付近における熊本平野東部の地下地質は、大局的には連続性のよい明瞭な反射面の繰り返しで特徴付けられる地質体と、その下位で反射面の発達に乏しい地質体に区分できる（第 5～10 図）。両地質体の境界は深度を増すにつれて必ずしも明瞭ではなくなるが、加勢川付近の地下（測線 2 の CMP 番号 280～320 付近・標高 -1,000 m 付近）に向かって深くなる凹地状の分布を示す。この境界は南に向かって緩やかに浅くなる。調査地域周辺の表層地質は、測線南方では白亜系御船層群の堆積岩を基盤岩として、第四紀の阿蘇火砕流堆積物がそれを覆って分布する（例えば、社団法人熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会編、2003；星住ほか、2004；第 3 図）。測線 1 の約 700 m 南方には、御船層群が分布している（星住ほか、2004；第 3 図）。こうしたことから、連続性のよい反射面の繰り返しで特徴付けられる地質体と反射面の発達に乏しい地質体の境界は、御船層群（基盤岩）とそれを覆う堆積層との境界である可能性が高い。

深度断面図を詳しく解釈した結果、基盤岩上面やそれを覆う堆積層内の反射面の不連続や撓みなどから、堆積層に変形を与える断層ないし変形帯が推定された（第 5～10 図）。

測線 2 の CMP 番号 340 付近から測線 1 の CMP 番号 330 付近にかけての区間では、比較的連続性のよい反射面群が系統的かつ累積的に北に傾斜する。この反射面の北への傾斜は、浅部では緩く、深部ほど急になる。これらの北傾斜する反射面は、測線 1 の CMP 番号 180・標高 -150 m 付近から測線 2 の CMP 番号 360・標高 -800 m 付近を結んだ線を境に北に向かって急に傾斜を減じ、一部ではほぼ水平に転じる。こうした反射面の変形の特徴から、傾斜変換線付近またはその南側に、北に中～高角度（深部に向かって傾斜を増す）で傾斜し、北落ちの正断層成分を伴う幅 650 m 程度の撓曲（傾動変形）帯の存在が推定される（第 5～10 図）。この推定される変形帯のずれの向きは宇土断層のずれの向きと対応し、その位置も重力異常の急変帯から推定される同断層の位置と概ね一致する。また、推定される変形帯の後端部（南端部）の地表投影位置は、測線 1 の CMP 番号 350 付近となり、北甘木断層の西方延長部にほぼ一致する（第 4 図）。一方、変形帯の前縁部（北縁部）の地表投影位置は、測線 1 の CMP 番号 190～210 付近となり、測線東方に分布する北甘木台地と沖積低地との地形境界の西方延長付近にあたる（第 4 図）。

この幅広い変形帯の北側の測線 2 の CMP 番号 220～290 付近の区間では、不明瞭ながらも南落ちの断層を示唆する反射面の南落ちの撓みや傾斜変化が認められる（第 7～10 図）。この反射面の撓みの基部や傾斜変化部を連ねた線は、深部に向かって測線 2 の CMP 番号 220・標高 -100 m 付近から CMP 番号 280～290・標高 -900 m 付近まで連続しており、高角度で南に傾斜する（第 7～10 図）。また、明瞭ではないものの深部ほど変形の程度が大きくなるようにみえる。こうした変形帯の傾斜と落ちの向きから、変形帯は高角度で南に傾斜する正断層成分を伴う断層の可能性がある。

以上のように、中型パイプロサイズを震源とした P 波反射法地震探査により、探査測線内では中～高角度で北に傾斜する幅広い変形帯と高角度で南に傾斜する変形帯が推定され、基盤岩上面は両変形帯に挟まれた部分に向かって深くなる地溝状の変形を示す（第 9、10 図）。この地溝は、渡辺ほか（1979）や石坂ほか（1992）により推定されている木山－嘉島地溝に対応する可能性がある。渡辺ほか（1979）および石坂ほか（1992）では、木山－嘉島地溝の北縁をなす断層を木山断層としており、本探査で認定された地溝の北縁を限る断層は木山断層に対応する可能性が高い（第 9、10 図）。

先に述べた地溝の南縁に位置する変形帯は、重力異常の急変帯と概ね一致し、ずれの向きも宇土断層と調和的であることから、宇土断層に関連した変形の可能性もある（第 2、9、10 図）。また、宇土断層が北甘木断層の西方延長部に分布し、両断層のずれの向きも一致することから、両者は一連の構造である可能性がある。一方、宇土断層は重力異常の急変帯の分布から推定されたものであるため、同断層の詳細な分布や位置は不明確である。特に探査測線が宇土断層の東端部付近であることを考慮すると、宇土断層と北甘木断層が一連の構造ではない場合には、本探査測線沿いまで宇土断層が延長していない可能性も否定できない（文部科学省近藤久雄博士私信）。その場合、本探査で地溝の南側に認められた変形帯は宇土断層に関連するものではなく、北甘木断層に対応している可能性もある。ただし、この場合北甘木断層は、変動地形学的に認定される断層トレース付近を南端とし、地下約 1 km 以浅では幅広い撓曲帯を形成していると考えられる。ここでは、地震調査委員会（2013a）により示された宇土断層の東端部を横切る測線において、同断層と調和する変形構造が推定されたことを重視して、地溝の南側に位置する変形帯を宇土断層に関連したものと解釈した。

## (2) 深度 100 m 以浅の地下構造

中型パイプロサイズを震源とした探査でイメージングされた地質構造の浅層部への連続を検討するため、油圧インパクトを震源として取得したデータ

を前述と同様の処理を施して作成した深度断面に、反射法探査記録を使用した屈折波トモグラフィ解析により推定されたP波速度構造を重ね合わせた図(第11図は鉛直誇張なし、第12図は鉛直誇張10倍)を作成した。これらの断面図は、測線1のCMP番号170と測線2のCMP番号450を接合したものである。断面図からは、中型パイプロサイズの探査記録ではイメージングが困難な深度100m程度以浅の地下地質構造の詳細を把握できる。

木山-嘉島地溝の南側に位置し、中~高角度で北に傾斜する宇土断層の活動に伴うとみられる反射面の北への傾動は、測線2のCMP番号380付近から測線1のCMP番号310付近までの区間で認められ、測線2のCMP番号380・標高-50m付近から南に立ち上がる明瞭な反射面の傾動は、撓みや不連続を伴いながら測線1のCMP番号310では標高-15m付近まで及んでいるように見える(第11, 12図)。反射面に顕著な北傾斜が認められる測線1のCMP番号200~300の東方延長では、北甘木台地の北方に孤立して分布する段丘面に北向きの傾動が認められている(池田ほか, 2001; 第4図)。また、測線1のCMP番号310~350付近では、反射面のパターンや推定P波速度構造から、小規模な凹地の存在が推定される。この凹地は、変動地形学的に認定されている北甘木断層沿いの小地溝の西方延長部に位置する。こうした反射面の傾動や凹地状の落ち込みは、幅広い撓曲帯で特徴づけられる宇土断層の活動に関連している可能性があり、また探査測線で認められた変形構造と北甘木台地に発達する変動地形の類似性から、少なくとも探査測線で推定された宇土断層は北甘木断層と一連の構造である可能性がある(第4図)。

木山断層に対応するとみられる南傾斜の断層は、地下浅部では測線2のCMP番号170~200でみられる南落ちの撓みと200~240でみられるように反射面の凹地状の落ち込みから推定される(第11, 12図)。この反射面の南落ちの撓みと落ち込みは、中型パイプロサイズを震源とした探査断面でも表現されている(第9, 10図)。

このように、中型パイプロサイズを震源とした探査断面から推定された地溝を形成する断層は、いずれも地下浅部の地層にも変形を与えている可能性がある。そこで、探査測線内でもっとも顕著な変形を伴う宇土断層の活動性を把握するため、同断層の相対的低下側にあたる測線2のCMP番号350付近で1孔(KA-1)、隆起側にあたる測線1のCMP番号460付近で1孔(KA-2)のボーリング調査を実施した(第4, 11, 12図)。

### 3. ボーリング調査

#### 3.1 調査地点の概要

反射法地震探査でイメージングされた反射面の地

質状況を把握し、また宇土区間の活動性を検討するため、探査測線の近傍においてボーリング調査を行った。掘削は、反射法地震探査により推定された宇土断層の相対的沈降側(北側)で1孔(KA-1コア:嘉島町総合運動公園敷地内)、隆起側(南側)で1孔(KA-2コア:嘉島町上六嘉公民館敷地内)の計2孔とした(第4表, 第4, 11, 12図)。本調査では、探査測線付近を分布の西縁とし、宇土区間の南北両側に埋没(一部地表に露出)していることが知られている(とがわ)砥川溶岩(例えば、松本, 1974; 渡辺ほか, 1979; 水田ほか, 1990; 社団法人熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会編, 2003; 第3図)の上面を断層の変位基準とした。そこで掘削深度は、既往研究をもとに同溶岩上面を確実に貫く深度(KA-1コアで70m, KA-2コアで30m)とした。掘削は、2015年12月から2016年2月にかけて実施した。

#### 3.2 ボーリングコアにみられる地質

コア観察に基づくKA-1コアとKA-2コアの柱状図を第13, 14図に示す。各コアにみられる地質は以下のように区分される。

##### KA-1 コア

- ・深度 0.00~1.48 m (標高 5.68~4.20 m) : 表土・埋土。
- ・深度 1.48~2.04 m (標高 4.20~3.64 m) : 古土壌 (腐植質砂混じり粘土)。
- ・深度 2.04~9.10 m (標高 3.64~3.42 m) : 粘土質層 (粘土, 粘土質砂, 砂混じり粘土, 砂質粘土, 砂・粘土互層, 腐植質粘土。炭化物, 材片, 腐植片が混じる)。
- ・深度 9.10~18.78 m (標高 -3.42~-13.10 m) : 砂質層 (粘土混じり砂, 粘土質砂, 砂, 礫混じり砂。炭質物片および材片が混じり, 生物擾乱の痕も認められる。18.41~18.78 m は腐植質砂混じり粘土)。
- ・深度 18.78~35.00 m (標高 -13.10~-29.32 m) : 砂礫層 (粘土混じり砂礫, 礫混じり砂。29.74~29.87 m は砂混じり粘土, 30.19~30.33 m は砂礫混じり粘土)。
- ・深度 35.00~39.76 m (標高 -29.32~-34.08 m) : 火砕流の二次堆積物 (火山灰および軽石質砂礫, 砂礫, 礫混じり砂)。
- ・深度 39.76~53.68 m (標高 -34.08~-48.00 m) : 火砕流堆積物 (火山灰質砂礫。基質は火山灰質な中粗砂で, 礫は軽石が多いが, スコリアや安山岩等も含まれる)。
- ・深度 53.68~54.67 m (標高 -48.00~-48.99 m) : 砂礫層 (直径 40 mm までの安山岩亜角礫を多く含む)。
- ・深度 54.67~59.00 m (標高 -48.99~-53.32 m) : 火砕流堆積物 (直径 70 mm までの角, 亜角礫が多いが, 大礫も含む。礫は安山岩, 軽石, ス

コアを主体とする)。

- ・ 深度 59.00~61.10 m (標高 -53.32~-55.42 m) : 火砕流堆積物 (火山灰質砂礫。基質は火山灰質な中粗砂で、礫はスコリアが多いが、軽石や安山岩等も含まれる。61.00~61.10 m は黄褐色火山灰質砂)。
- ・ 深度 61.10~70.00 m (標高 -55.42~-64.32 m) : 安山岩溶岩 (気泡が発達する。気泡は上部で多く、下部ほど少なくなる。亀裂が発達する)。

#### KA-2 コア

- ・ 深度 0.00~5.22 m (標高 7.18~1.96 m) : 粘土質層 (ローム質砂質シルト、砂混じり粘土、砂質粘土、粘土混じり砂。炭質物片が点在する (表層 30 cm は現土壌))。
- ・ 深度 5.22~5.76 m (標高 1.96~1.42 m) : 砂礫層 (礫は主に安山岩からなる)。
- ・ 深度 5.76~30.00 m (標高 1.42~-22.82 m) : 安山岩溶岩 (気泡が発達する。気泡は上部で多く、下部ほど少なくなる。亀裂が発達する)。

KA-1 コアおよび KA-2 コアの最深部に認められる溶岩は、それぞれ類似した岩相を示すことから、同一の溶岩の可能性がある。

### 3.3 ボーリングコア試料分析結果

#### (1) $^{14}\text{C}$ 年代測定

KA-1 コアには、深度 18.78 m 以浅の砂や粘土を中心とする細粒堆積物中に多数の木片や植物片が含まれる。ここでは、熊本平野東部における層序と年代を把握することを目的として、1~2 m 程度の間隔で植物片、木片、炭質物試料を採取し、そのうち計 8 試料 (浅いものから順に、試料名 KA-1-C04、採取深度 3.22 m ; -C03, 同 5.14 m ; -C02, 同 6.88 m ; -C01, 同 8.75 m ; -C08, 同 10.72 m ; -C07, 同 12.49 m ; -C06, 同 15.56 m ; -C05, 同 17.23 m) について、AMS 法による  $^{14}\text{C}$  年代測定を行った (第 13, 14 図)。分析は、株式会社地球科学研究所に依頼し、Beta Analytic 社により実施された。得られた年代値は、OxCal 4.2 (Bronk Ramsey, 2009) を用いて暦年較正を行った。補正のためのデータセットは、Reimer *et al.* (2013) を使用した。年代測定結果を第 5 表に示す。一部で層位に対して年代値に逆転がみられるものの、層位と年代値はおおむね調和している。また、最上部の KA-1-C04 とその下位の KA-1-C03 を除いて年代値に大きなギャップは認められない。KA-1-C06 および KA-1-C05 の年代値から、深度 18.78 m 以浅の砂や粘土などの細粒堆積物からなる地層は沖積層であり、本地点周辺では、約 9 千年前から約 4 千年前にかけてほぼ連続的に地層が堆積したと考えられる。

#### (2) 火山灰分析

KA-1 コアでは、上述したように深度 35.00 m から溶岩直上の深度 61.10 m にかけて、軽石を含む火砕

流堆積物とその再堆積物が厚く分布している (第 13, 14 図)。これらの堆積物は後期更新世の阿蘇火山の火山活動に伴い噴出したものと考えられるが、層相からどの活動ステージの堆積物かを同定することは困難である。ここでは、ほぼ 5 m 間隔で軽石試料を 6 点 (上位から試料名 KT-1-T01, 深度 35.05 m ; -T02, 40.09 m ; -T03, 44.03 m ; -T04, 50.12 m ; -T05, 55.68 m ; -T06, 60.10 m) 採取し、溶岩直上の火山灰質砂 1 試料 (KT-1-T06, 61.00~61.10 m) を加えた計 7 試料について鉍物組成分析および火山ガラスと斜方輝石の屈折率の測定を実施した (第 13, 14 図)。

一方、KA-2 コアでは溶岩を覆う堆積物中には肉眼で検出できる火砕流堆積物や降下火山灰は認められなかったが、堆積物の年代を推定するため、溶岩とその上位の砂礫層を覆う細粒堆積物についてほぼ 50 cm 間隔で試料を採取し、計 11 試料 (上位から試料名 KA-2-T01, 深度 0.25~0.35 m ; -T02, 0.70~0.80 m ; -T03, 1.26~1.36 m ; -T04, 1.87~1.97 m ; -T05, 2.13~2.23 m ; -T06, 2.70~2.80 m ; -T07, 3.05~3.15 m ; -T08, 3.65~3.75 m ; -T09, 4.05~4.15 m ; -T10, 4.75~4.85 m ; -T11, 5.05~5.15 m) について鉍物組成分析および火山ガラスと斜方輝石の屈折率の測定を実施した (第 13, 14 図)。分析は株式会社古澤地質に依頼した。両コアの分析結果を第 15 図に示す。

KA-1 コアについては、KA-1-T01~T05 の 5 試料で検出された火山ガラスの屈折率には、1.513-1.540 および 1.506-1.510 の 2 つの範囲に集中することが認められた。火山ガラスの屈折率および鉍物組成は、前者は Aso-3 (火砕流堆積物) (120? ka, 135? ka (ka: 1 千年前); 町田・新井, 2003), 後者は Aso-4 (85~90 ka; 町田・新井, 2003) のそれらと一致する。こうしたことから、深度 39.76~53.68 m (標高 -34.08~-48.00 m) および深度 54.67~59.00 m (標高 -48.99~-53.32 m) に分布する火砕流堆積物は、Aso-4 火砕流堆積物の流下、堆積時に下位の Aso-3 火砕流堆積物が取り込まれたものや再堆積物である可能性がある。一方、角閃石の含有量が少ないことと、Aso-4 火砕流堆積物が Aso-3 火砕流堆積物を大量に取り込んだ場合、温度低下により火砕流形成が困難であることから、KA-1-T01~KA-1-T05 を含む火砕流はすべて Aso-3 火砕流堆積物である可能性もある (産総研星住英夫博士私信)。KA-1-T01~T05 の対比、同定にはさらに多方面からの検討が必要であるが、ここでは本分析結果に基づき、深度 39.76~53.68 m (標高 -34.08~-48.00 m) および深度 54.67~59.00 m (標高 -48.99~-53.32 m) の火砕流堆積物を“Aso-3 と Aso-4 の混在層?”とする。

KA-1-T06 および溶岩直上の KA-1-T07 については、火山ガラスの屈折率の分布が上記の“Aso-3 と Aso-4 の混在層?”とした KA-1-T01~T05 のそれらと大きく異なる (第 15 図)。

KA-2 コアでは、すべての試料でバブルウォールタイプとパミスタイプの火山ガラスが検出された。また、KA-2-T01, KA-2-T07, KA-2-T10 および KA-2-T11 では、火山ガラスの屈折率の分布が 1.506-1.516 の範囲に集中する (第 15 図)。こうした特徴から、Aso-4 と鬼界アカホヤテフラ (K-Ah, 7.3 ka; 町田・新井, 2003) が混在している可能性がある。したがって、KA-2 コアでは溶岩およびその上位の砂礫層を覆う地層は、K-Ah テフラ降下以後の完新世の地層と考えられる。

上述したように、鉍物組成分析および火山ガラスと斜方輝石の屈折率測定の結果、KA-1 コアの KA-1-T01~T05 の 5 試料は、Aso-3 と Aso-4 の混在層である可能性があること、また KA-1-T06 および砥川溶岩直上の KA-1-T07 については、火山ガラスの屈折率の分布が KA-1-T01~KA-1-T05 と大きく異なっており、Aso-3 あるいは Aso-4 とは異なる火砕流堆積物の可能性が高いことが判明した。そこで、鉍物組成分析および火山ガラスと斜方輝石の屈折率の測定を行った 7 試料 (KA-1-T01~T07) について、さらにテフラの識別精度を向上させるために EDX による火山ガラス片の主要成分化学組成分析を実施した。分析は株式会社古澤地質に依頼した。分析結果を第 6 表に示す。

今回の分析結果と既往研究による Aso-1, Aso-2 (141±50 ka, 町田・新井, 2003), Aso-3 および Aso-4 の各テフラの火山ガラスの主要成分化学組成分析結果 (町田・新井, 2003; 長橋ほか, 2004, 2007; 青木・町田, 2006) を比較した結果、KA-1-T01~T05 の各成分の分布範囲は、Aso-3 および Aso-4 テフラの範囲内に位置するのに対し、KA-1-T06 および KA-1-T07 の各成分の分布範囲は、Aso-2 あるいは Aso-1 テフラと一致しているようにみえる (第 16 図)。後述するように、コア中に認められる溶岩が Aso-2 と近接して噴出した砥川溶岩に同定されることから、溶岩の直上から採取された KA-1-T06 および KA-1-T07 を含む深度 59.00~61.10 m (標高 -53.32~-55.42 m) の火砕流堆積物は Aso-2 火砕流堆積物に対比される可能性が高い。

### (3) 溶岩試料の全岩化学組成分析

KA-1 コアおよび KA-2 コアの最深部で確認された溶岩について、蛍光 X 線分析 (XRD 分析: ガラスビード法) による全岩化学組成分析を行った。分析は株式会社蒜山地質年代学研究所に依頼した。分析に際しては、肉眼観察に基づいた両コアの溶岩の対比の妥当性の検証および同一コア中の溶岩の化学組成のばらつきを検討するため、KA-1 から 1 試料 (KA-1-1: 深度 69.38~69.65 m), KA-2 から 2 試料 (KA-2-1: 深度 19.76~20.00 m, KA-2-2: 深度 27.18~27.43 m) を分析に供した。試料の選定に際しては、肉眼観察により新鮮かつ緻密な部分を採取した。分析では、

波長分散型蛍光 X 線分析装置 (リガク製 RIX2000) を用いて、Kimura and Yamada (1996) の手順に従った。分析結果を第 7 表に示す。得られた全岩化学組成は 3 試料とも類似しており、またこれまでに報告されている砥川溶岩の全岩化学組成 (水田ほか, 1990; Miyoshi *et al.*, 2013) と一致している (第 8 表)。このことから、KA-1 コアおよび KA-2 コア最深部の溶岩はいずれも砥川溶岩と考えられる。

### (4) 溶岩試料の K-Ar 年代測定

XRD 分析により砥川溶岩に同定された KA-1 コアおよび KA-2 コアの溶岩について、噴出年代を明らかにするため、石基部分の K-Ar 年代測定を行った。測定は株式会社蒜山地質年代学研究所に依頼した。分析に際しては、肉眼観察および XRD 分析による両コアの溶岩試料の対比の妥当性を年代値に基づいて検証し、また試料の年代値の信頼度を検討するため、KA-1 から 1 試料、KA-2 から 2 試料を測定に供した。測定には上記 XRD 分析に用いた 3 試料を用いた。分析の結果、KA-1-1, KA-2-1, KA-2-2 は、それぞれ 0.15±0.05 Ma, 0.16±0.02 Ma, 0.17±0.02 Ma (Ma: 100 万年前) の年代値を示す (第 9 表)。いずれの年代値もおおむね一致することから、両コア間の溶岩の対比の妥当性および得られた年代値の信頼度は高いといえる。

今回得られた砥川溶岩の K-Ar 年代は、松本ほか (1991) により報告された同溶岩の K-Ar 年代 (145±8 ka, 223±34 ka) および同溶岩の噴出源である赤井火山の K-Ar 年代 (148±7 ka) と調和的である一方で、Miyoshi *et al.* (2013) により報告された同溶岩の年代値 (±1σ で 132±5 ka, 136±5 ka) よりもやや古い値を示す。この年代値の隔たりの理由は不明であるが、今回得られた年代値は、同溶岩を直接覆う Aso-2 の噴出年代 (141±50 ka; 町田・新井, 2003) と整合的であることから、後述する宇土区間の活動性の検討には、本調査によって新鮮なコア試料から得られた約 15 万年前を砥川溶岩の噴出年代として採用する。

### 3.4 地層の年代と対比

ボーリングコアの層相および各種分析結果に基づく KA-1 および KA-2 コアの地質柱状対比図を第 14 図に示す。柱状図には、分析試料採取地点、分析から推定されたテフラの対比、<sup>14</sup>C 年代値および K-Ar 年代分析結果を示した。KA-1 コアと KA-2 コアで確実に対比できる地層は砥川溶岩のみである。KA-1 コアおよび KA-2 コアにみられる砥川溶岩上面の標高は、それぞれ -55.42 m および 1.42 m であり、両者の高度差は 56.84 m である。砥川溶岩には、上方ほど気泡の密度が増加し、下部に向かって減少するという傾向が両コアともに認められる (第 17 図)。

## 4. 考察

### 4.1 宇土区間を構成する断層

宇土区間東部において、地震調査委員会（2013a）により示された宇土断層の東端部を横切る測線で実施した反射法地震探査の結果、従来変動地形学的に認定されていた北甘木断層の南西方の熊本平野東部において、地溝状の変形が認められ、その南縁に中～高角度で北傾斜する相対的に南側隆起の撓曲（傾動変形）帯、北縁に高角度で南傾斜する相対的に北側隆起の断層が推定された（第9～12図）。

北縁の断層は、その位置、形状およびずれの向き（後述）から、渡辺ほか（1979）、石坂ほか（1992）の木山断層に対応する可能性がある（第3図）。したがって、木山断層は宇土区間まで延長している可能性がある。なお、地震調査委員会（2013a）は、木山断層を布田川断層帯布田川区間を構成する断層の一つとして評価しており、同断層は宇土区間には含まれていない。

木山断層の南に位置し、相対的に南側隆起の変形を与えている南縁の変形帯は、2. 反射法地震探査でも述べたように、地震調査委員会（2013a）により示された宇土断層の東端部を横切る測線において、同断層と調和する変形構造であることから、宇土断層によるものと解釈した。ただし、宇土断層が北甘木断層の西方延長部に分布し、両断層のずれの向きも一致することから、両者は一連の構造である可能性もある。

### 4.2 断層面の位置・形状

宇土区間東部で実施した反射法地震探査から推定された木山断層および宇土断層は、断層面の傾斜方向が異なる（木山断層は南傾斜、宇土断層は北傾斜）が、それぞれ地下1 km以浅では高角度および中～高角度で傾斜する。反射法地震探査結果によると、宇土区間東部では宇土断層がもっとも顕著な変形を示す。このことから、宇土区間はより深部の地下では北（北西）に中～高角度で傾斜する断層面をもつと推定される。

### 4.3 変位の向き

本調査で実施した反射法地震探査の結果、宇土断層は相対的に南側隆起の正断層成分を伴い、木山断層は相対的に北側隆起の正断層成分を伴う（第9～12図）。ただし、基盤岩上面および堆積層の落差からみると、宇土区間は全体的としては南側隆起の正断層成分をもつと考えられる。

宇土断層および木山断層は、それぞれ地下1 km以浅では、中～高角度および高角度で傾斜している。また、既存研究（渡辺ほか、1979；石坂ほか、1992）によると、両断層の走向は、右ずれ成分を伴う布田川断層帯布田川区間と同様に東北東－西南西に延び

る。こうした特徴から、宇土断層および木山断層は右横ずれ成分を伴っている可能性がある。

### 4.4 平均変位速度

反射法地震探査により認定された宇土断層に関連する可能性がある南側隆起の変形構造の相対的沈降側（KA-1）と隆起側（KA-2）で実施したボーリング調査により、砥川溶岩上面に約57 mの北側下がり的高度差が確認された（第4、14図）。両コアの砥川溶岩は、いずれも上方に向かって気泡の割合が増加するという特徴を有する（第13、17図）。水田ほか（1991）は、複数のボーリングコアの観察に基づき、砥川溶岩は上部および下部で気泡を多く含み、中部に向かって気泡が減少し、緻密になることを報告している。両コアで認められた砥川溶岩の気泡の発達状況は、水田ほか（1991）による溶岩最上部の特徴と類似している。したがって、両コアの砥川溶岩は、流下、定置した後、大きく侵食を受けた可能性は低いと考えられる。

砥川溶岩が流下、定置した際の地表（溶岩上面）がほぼ水平であったと仮定すると、KA-1コアとKA-2コアの砥川溶岩上面の高度差は、宇土断層による落差を示している可能性がある。この場合、落差と砥川溶岩のK-Ar年代測定結果（約15万年前）から、平均変位速度の上下成分は約0.4 mm/年と見積もられる。ただし、反射法地震探査記録によると、宇土断層東端部ではその北方に相対的に北側隆起の木山断層が推定され、両断層に挟まれた区間が地溝状に落ち込んでいるようにみえる。KA-1は、地溝の最深部付近に位置することから、木山断層を含めた断層帯全体としての上下変位量は、上述した値より小さくなる可能性がある。

上述したように、宇土区間東部では右横ずれ成分を伴う可能性があるが、その平均変位速度に関する情報は得ることができなかった。

## 5. 今後の課題

本調査で実施した反射法地震探査およびボーリング調査により、宇土区間東部では従来変動地形学的に認定されていた北甘木断層の西方延長部において、宇土断層および木山断層が伏在する可能性があることが示された。宇土断層による砥川溶岩の落差からみて、同断層が探査測線付近で急に消滅するとは考えにくく、西方の熊本平野地下に延長している可能性が高い。熊本平野南部に伏在する宇土断層および木山断層の位置や活動性を解明することは、布田川断層帯の活動区間をより正確に推定し、西方の宇土半島北岸区間や雲仙断層群と連動する可能性を検討するうえで重要である。そのため、宇土区間中西部においても本調査と同様に反射法地震探査とボーリング調査の実施が望まれる。

**謝辞** 本調査を実施するにあたり、上益城郡嘉島町ならびに熊本市の関係機関の皆様には、多大なるご協力をいただきました。栗田泰夫氏には、投稿前の原稿を読んでいただき、原稿を改善する上で重要なお指摘をいただきました。星住英夫氏には、Aso-3火砕流堆積物とAso-4火砕流堆積物の識別について貴重な情報をいただきました。査読を担当された堀川晴央氏ならびに編集担当の阿部信太郎氏には、修正点をご指摘いただきました。以上の皆様にお礼申し上げます。本稿は、文部科学省委託調査事業「地域評価のための活断層調査（九州地域）」平成27年度成果報告書「3. 布田川断層帯／宇土区間」の一部をまとめたものである。

## 文 献

- 青木かおり・町田 洋 (2006) 日本に分布する第四紀後期広域テフラの主元素組成－ $K_2O$ - $TiO_2$  図によるテフラの識別。地質調査研究報告, 57, 239–258.
- Bronk Ramsey, C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51, 337–360.
- 星住英夫・尾崎正紀・宮崎一博・松浦浩久・利光誠一・宇都浩三・内海 茂・駒沢正夫・広島俊男・須藤定久 (2004) 20 万分の1 地質図幅「熊本」。1:200,000 地質図幅, NI-52-11, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 池田安隆・千田 昇・中田 高・金田平太郎・田力正好・高沢信司 (2001) 1:25,000 都市圏活断層図「熊本」。国土地理院技術資料 D・1-No. 388.
- 石坂信也・渡辺一徳・高田英樹 (1992) 熊本平野地下における第四系の最近 15 万年間の沈降速度。第四紀研究, 31, 91–99.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2006) 「雲仙断層群の評価（一部改訂）」。48p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013a) 「布田川断層帯・日奈久断層帯の評価（一部改訂）」。66p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013b) 「緑川断層帯の長期評価」。12p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016) 「平成28年（2016年）熊本地震の評価（平成28年5月13日）」。2p+資料21p, [http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016\\_kumamoto\\_3.pdf](http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf) (2016年5月15日閲覧)。
- 活断層研究会編 (1980) 「日本の活断層—分布図と資料—」。東京大学出版会, 363 p.
- 活断層研究会編 (1991) 「新編日本の活断層—分布図と資料—」。東京大学出版会, 437 p.
- Kimura, J. and Yamada, Y. (1996) Evaluation of major and trace element XRF analyses using a flux to sample ratio of two to one glass beads. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 91, 62–72.
- 気象庁 (2016) 震度データベース検索。 <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php> (2016年6月22日閲覧)。
- 九州活構造研究会編 (1989) 「九州の活構造」。東京大学出版会, 553 p.
- 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.
- 松田時彦 (1975) 活断層から発生する地震の規模と周期について。地震第2輯, 28, 269–283.
- 松田時彦・山崎晴雄・中田 高・今泉俊文 (1980) 1896年陸羽地震の地震断層。地震研究所彙報, 55, 795–855.
- 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山岩類のK-Ar年代測定—火山層序との整合性と火砕流試料への適用—。日本火山学会講演予稿集, 1991(2), 73.
- 松本幡郎 (1974) 砥川溶岩について。火山第2集, 19, 19–24.
- Miyoshi, M., Shinmura, T., Sumino, H., Sano, T., Miyabuchi, Y., Mori, Y., Inakura, H., Furukawa, K., Uno, K., Hasenaka, T., Nagao, K., Arakawa, Y. and Yamamoto, J. (2013) Lateral magma intrusion from a caldera-forming magma chamber: Constraints from geochronology and geochemistry of volcanic products from lateral cones around the Aso caldera, SW Japan. *Chemical Geology*, 352, 202–210.
- 水田敏夫・小畑正明・江上桂子 (1990) 砥川安山岩溶岩中の気泡の形態と分布。火山第2集, 35, 249–262.
- 長橋良隆・佐藤孝子・竹下欣宏・田原敬治・公文富士夫 (2007) 高野層ボーリングコア (TKN-2004) に挟在する広域テフラ層の層序と編年。第四紀研究, 46, 305–325.
- 長橋良隆・吉川周作・宮川ちひろ・内山 高・井内美郎 (2004) 近畿地方および八ヶ岳山麓における過去43万年間の広域テフラの層序と編年—EDS分析による火山ガラス片の主要成分化学組成—。第四紀研究, 43, 15–35.
- 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, 60 p, 付図1葉, DVD2枚。
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafflidason, H., Hajdas, I., Hatte, 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, 1869–1887.

齋藤 眞・宝田晋治・利光誠一・水野清秀・宮崎一博・星住英夫・浜崎聡志・阪口圭一・大野哲二・村田泰章 (2010) 20 万分の 1 地質図幅「八代及び野母崎の一部」. 1:200,000 地質図, NI-52-12,18, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

産業技術総合研究所地質調査総合センター(2016)「第四報」緊急現地調査報告 [2016 年 5 月 13 日] 2016 年熊本地震に伴った出現した地表地震断層. <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/kumamoto2016/kumamoto20160513-1.html> (2016 年 5 月 15 日閲覧).

Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K.,

Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A. (in review) Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. *Earth Planets and Space*.

社団法人熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会編 (2003)「熊本市周辺地盤図」. 社団法人熊本県地質調査業協会, 270p+付図 8 葉.

鶴田孝三・渡辺一徳 (1978) 熊本平野南東部に見られる活断層群. 熊本県地学会誌, 58, 2–4.

渡辺一徳・靱倉克幹・鶴田孝三 (1979) 阿蘇カルデラ西麓の活断層群と側火口の位置. 第四紀研究, 18, 89–101.

(受付: 2016 年 8 月 18 日, 受理: 2016 年 10 月 24 日)

第1表. 反射法地震探査測線の概要.

Table 1. Outline of the survey lines for seismic reflection profiling.

測線名	測線長	所在地
測線1	3,232 m	熊本県上益城郡嘉島町下六嘉～上六嘉付近
測線2	2,375 m	熊本県熊本市東区上無田～嘉島町下六嘉付近

第2表. 反射法地震探査の仕様および使用機器.

Table 2. Specifications and equipment used for seismic reflection profiling.

項目	内容		備考
探査手法	P波反射法地震探査		
測線数	2		
測線名	測線1	測線2	
調査測線長	3,232 m	2,375 m	
解析測線長	3,195 m	2,355 m	
標準発震点間隔	10 m(一部区間5 m)	測線1の測点200～測点440区間のみ油圧インパクターは約5 m間隔で発震	
標準受振点間隔	10 m		
標準収録チャンネル数	100チャンネル以上 (展開長:原則1 km以上)		
収録記録長	3秒		
サンプリング間隔	2ミリ秒		
収録様式	SEG-D		
標準垂直重合数	5～10回(中型バイプロサイズ) 4～10回(油圧インパクター)		
標準スイープ周波数	10～120 Hz		
震源	中型バイプロサイズ 1台 油圧インパクター 1台	中型バイプロサイズ: EnviroVibe (IVI社製) 油圧インパクター: JMI-200II (地球科学総合研究所社製) 2測線とも同一発震地点で中型バイプロサイズと油圧インパクターにより発震	
受振器	速度型地震計 (固有周波数:10 Hz, 6個グループ ピング/地点)	SM-4 (I/O Sensor社製) スピリアスノイズの発生: 約180 Hz以上	
収録装置(探鉱機)	独立型デジタルレコーダー (A/D分解能:24ビット)	GSRあるいはGSX (OyoGeospace社製) GPS機能付独立型収録装置	

第3表. データ処理および解析に使用した主なパラメータ.

Table 3. Main parameters used for processing and analyses of seismic reflection profiling data.

処理名	パラメータ	設定値	備考
プレフィルタ	バンドパスフィルタ帯域	15~120 Hz	
位相補正	-	インパルスに変換するオペレータを設計し適用	
振幅回復	ゲインカーブ算出用時間ウィンドウ幅	20ミリ秒	
デコンボリューション	自己相関演算用ゲート長	1,200ミリ秒	タイムバリエーション スペクトラル ホワイトニング等
	フィルタ長	120ミリ秒	
	ホワイトノイズ	1%	
静補正	メッシュサイズ	1 m × 1 m	
	初期速度モデル	深度とともに単調増加(300~1,500 m/秒)	
	最大オフセット距離	300 m	
	再構成速度範囲	300~3,500m/秒	
	トモグラフィ繰り返し回数	60回(測線1), 67回(測線2)	
	置換速度	1,500 m/秒	
	標高補正用速度	1,500 m/秒	
速度フィルタ	種類	tau-p: 1,500 ミリ秒~NMO補正後の波形に適用	
残差静補正	最大許容時間シフト量 (1回あたり)	6ミリ秒	補正量 自動算出
	繰り返し算出回数	5回	
NMO補正	ストレッチミュート適用比率	1.75	
帯域通過フィルタ	タイムバリエーションフィルタ	0~1,500ミリ秒: 20~80 Hz 1,500ミリ秒~: 15~65 Hz	マイグレーション処理後の時間断面に適用

第4表. ボーリング地点の位置情報.

Table 4. Coordinates of cores KA-1 and KA-2.

孔名	平面直角座標(II)		標高 TP (m)	緯度	経度
	Y (m)	X (m)			
KA-1コア	-27031.83	-22972.74	5.68	32°45'21.57"	130°45'17.38"
KA-2コア	-28495.82	-21431.56	7.18	32°44'34.15"	130°46'16.71"

第5表. コア KA-1 から採取された試料の  $^{14}\text{C}$  年代測定結果.Table 5. Result of  $^{14}\text{C}$  dating of samples taken from core KA-1.

試料名	採取深度 (m)	測定年代 (yBP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	補正年代 (yBP)	暦年代 (68.2%) <sup>1</sup>	試料の 種類	分析方法	測定コード
KA-1-C01	8.75	5,130±30	-28.0	5,080±30	3,960-3,930 BC (5,900-5,870 cal yBP ) 3,880-3,800 BC (5,830-5,750 cal yBP )	植物片	AMS-Standard	Beta-431260
KA-1-C02	6.88	5,400±30	-28.7	5,340±30	4,250-4,220 BC (6,200-6,170 cal yBP) 4,210-4,160 BC (6,160-6,110 cal yBP) 4,140-4,070 BC (6,080-6,020 cal yBP)	植物片	AMS-Standard	Beta-431261
KA-1-C03	5.14	4,010±30	-30.1	3,930±30	2,480-2,400 BC (4,430-4,350 cal yBP) 2,390-2,340 BC (4,330-4,290 cal yBP)	植物片	AMS-Standard	Beta-431262
KA-1-C04	3.22	1,780±40	-26.6	1,750±40	AD 230-340 (1,720-1,610 cal yBP)	炭質物	AMS-Micro- sample	Beta-431263
KA-1-C05	17.23	7,290±30	-30.4	7,200±30	6,080-6,020 BC (8,030-7,970 cal yBP)	材片	AMS-Standard	Beta-431925
KA-1-C06	15.56	8,060±30	-23.3	8,090±30	7,090-7,040 BC (9,040-8,990 cal yBP)	材片	AMS-Standard	Beta-431926
KA-1-C07	12.49	6,730±30	-27.0	6,700±30	5,650-5,610 BC (7,600-7,560 cal yBP) 5,590-5,560 BC (7,540-7,510 cal yBP)	植物片	AMS-Standard	Beta-431927
KA-1-C08	10.72	6,270±30	-25.7	6,260±30	5,300-5,210 BC (7,250-7,160 cal yBP)	植物片	AMS-Standard	Beta-431928

<sup>1</sup> 較正曲線としてIntCal13(Reimer *et al.*, 2013)を用い, OxCal4.2(Bronk Ramsey, 2009)により暦年補正を行った.

第 6-1 表. KA-1 コアから採取された火山ガラス片の主要成分化学組成 (KA-1-T01 (35.05 m)).  
 Table 6-1. Major element chemical composition of volcanic glass shards taken from core KA-1 (sample KA-1-T01 (35.05 m)).

試料名	KA-1 T01(35.05m)																
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	67.71	69.02	67.27	67.84	68.10	67.00	67.89	67.63	69.33	67.72	69.81	69.12	67.60	69.24	67.54	68.19	0.87
TiO <sub>2</sub>	0.51	0.48	0.52	0.44	0.45	0.58	0.52	0.51	0.52	0.42	0.48	0.59	0.49	0.41	0.53	0.50	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.81	14.17	14.64	14.72	14.58	15.25	14.80	14.52	14.20	14.96	14.41	14.13	14.86	14.20	14.60	14.59	0.33
FeO	1.65	1.72	2.06	1.70	1.60	1.90	1.84	1.71	1.56	1.74	1.39	1.64	1.94	1.70	1.77	1.73	0.16
MnO	0.06	0.15	0.13	0.04	0.19	0.14	0.15	0.08	0.06	0.00	0.17	0.15	0.20	0.09	0.00	0.11	0.07
MgO	0.49	0.40	0.55	0.50	0.36	0.47	0.51	0.58	0.35	0.51	0.43	0.34	0.52	0.42	0.58	0.47	0.08
CaO	1.42	1.11	1.46	1.48	1.43	1.47	1.56	1.57	1.10	1.48	1.12	1.11	1.47	1.03	1.47	1.35	0.19
Na <sub>2</sub> O	4.76	4.16	4.55	4.63	4.46	4.87	4.55	4.72	4.45	4.47	4.30	4.32	4.63	4.54	4.64	4.54	0.19
K <sub>2</sub> O	4.46	4.68	4.37	4.35	4.44	4.30	4.35	4.35	4.47	4.59	4.75	4.51	4.29	4.71	4.37	4.47	0.15
Total	95.87	95.89	95.55	95.70	95.61	95.98	96.17	95.67	96.04	95.89	96.86	95.91	96.00	96.34	95.50	95.93	

試料名	KA-1 T01(35.05m)																
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	70.63	71.98	70.40	70.89	71.23	69.81	70.59	70.69	72.19	70.62	72.07	72.07	70.42	71.87	70.72	71.08	0.76
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.50	0.54	0.46	0.47	0.60	0.54	0.53	0.54	0.44	0.50	0.62	0.51	0.43	0.55	0.52	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.45	14.78	15.32	15.38	15.25	15.89	15.39	15.18	14.79	15.60	14.88	14.73	15.48	14.74	15.29	15.21	0.35
FeO	1.72	1.79	2.16	1.78	1.67	1.98	1.91	1.79	1.62	1.81	1.44	1.71	2.02	1.76	1.85	1.80	0.17
MnO	0.06	0.16	0.14	0.04	0.20	0.15	0.16	0.08	0.06	0.00	0.18	0.16	0.21	0.09	0.00	0.11	0.07
MgO	0.51	0.42	0.58	0.52	0.38	0.49	0.53	0.61	0.36	0.53	0.44	0.35	0.54	0.44	0.61	0.49	0.08
CaO	1.48	1.16	1.53	1.55	1.50	1.53	1.62	1.64	1.15	1.54	1.16	1.16	1.53	1.07	1.54	1.41	0.20
Na <sub>2</sub> O	4.97	4.34	4.76	4.84	4.66	5.07	4.73	4.93	4.63	4.66	4.44	4.50	4.82	4.71	4.86	4.73	0.20
K <sub>2</sub> O	4.65	4.88	4.57	4.55	4.64	4.48	4.52	4.55	4.65	4.79	4.90	4.70	4.47	4.89	4.58	4.66	0.15
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

第 6-2 表. KA-1 コアから採取された火山ガラス片の主要成分化学組成 (KA-1-T02 (40.09 m)).  
 Table 6-2. Major element chemical composition of volcanic glass shards taken from core KA-1 (sample KA-1-T02 (40.09 m)).

試料名	KA-1 T02(40.09m)																
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	67.88	67.84	68.57	67.14	67.46	69.03	67.66	67.60	67.54	68.88	68.37	67.79	69.07	67.81	67.91	68.04	0.60
TiO <sub>2</sub>	0.45	0.54	0.45	0.34	0.44	0.36	0.41	0.62	0.69	0.45	0.60	0.49	0.37	0.39	0.64	0.48	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.77	14.95	15.07	14.63	14.91	14.22	14.77	14.56	14.95	14.41	14.16	14.77	14.15	14.80	14.54	14.64	0.30
FeO	1.79	1.82	1.84	1.71	1.78	1.51	1.94	1.68	1.86	1.79	1.61	1.77	1.61	1.70	1.60	1.73	0.12
MnO	0.03	0.13	0.12	0.16	0.16	0.00	0.13	0.09	0.14	0.01	0.02	0.07	0.03	0.23	0.04	0.09	0.07
MgO	0.59	0.56	0.57	0.56	0.54	0.34	0.53	0.41	0.55	0.48	0.42	0.53	0.40	0.52	0.49	0.50	0.07
CaO	1.65	1.60	1.63	1.36	1.60	1.09	1.59	1.60	1.54	1.30	1.19	1.65	1.11	1.57	1.36	1.46	0.20
Na <sub>2</sub> O	4.74	4.72	4.51	4.66	4.68	4.31	4.37	4.64	4.57	4.26	4.62	4.73	4.55	4.37	4.58	4.55	0.16
K <sub>2</sub> O	4.35	4.47	4.43	4.22	4.32	4.61	4.48	4.55	4.37	4.58	4.50	4.31	4.63	4.47	4.56	4.46	0.12
Total	96.25	96.63	97.19	94.78	95.89	95.47	95.88	95.75	96.21	96.16	95.49	96.11	95.92	95.86	95.72	95.95	

point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	70.52	70.21	70.55	70.84	70.35	72.31	70.57	70.60	70.20	71.63	71.60	70.53	72.01	70.74	70.95	70.91	0.66
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.56	0.46	0.36	0.46	0.38	0.43	0.65	0.72	0.47	0.63	0.51	0.39	0.41	0.67	0.50	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.35	15.47	15.51	15.44	15.55	14.89	15.40	15.21	15.54	14.99	14.83	15.37	14.75	15.44	15.19	15.26	0.27
FeO	1.86	1.88	1.89	1.80	1.86	1.58	2.02	1.75	1.93	1.86	1.69	1.84	1.68	1.77	1.67	1.81	0.12
MnO	0.03	0.13	0.12	0.17	0.17	0.00	0.14	0.09	0.15	0.01	0.02	0.07	0.03	0.24	0.04	0.09	0.07
MgO	0.61	0.58	0.59	0.59	0.56	0.36	0.55	0.43	0.57	0.50	0.44	0.55	0.42	0.54	0.51	0.52	0.08
CaO	1.71	1.66	1.68	1.43	1.67	1.14	1.66	1.67	1.60	1.35	1.25	1.72	1.16	1.64	1.42	1.52	0.21
Na <sub>2</sub> O	4.92	4.88	4.64	4.92	4.88	4.51	4.56	4.85	4.75	4.43	4.84	4.92	4.74	4.56	4.78	4.75	0.17
K <sub>2</sub> O	4.52	4.63	4.56	4.45	4.51	4.83	4.67	4.75	4.54	4.76	4.71	4.48	4.83	4.66	4.76	4.64	0.13
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

第 6-3 表. KA-1 コアから採取された火山ガラス片の主要成分化学組成 (KA-1-T03 (44.03 m)).  
Table 6-3. Major element chemical composition of volcanic glass shards taken from core KA-1 (sample KA-1-T03 (44.03 m)).

試料名	KA-1-T03(44.03m)																
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	67.36	69.71	68.16	67.13	69.24	67.38	69.00	69.26	67.91	67.19	68.41	67.28	67.83	66.84	67.13	67.99	0.93
TiO <sub>2</sub>	0.56	0.42	0.48	0.52	0.44	0.51	0.50	0.45	0.51	0.51	0.53	0.53	0.54	0.50	0.54	0.50	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.75	14.14	14.72	14.52	14.32	14.82	14.32	14.28	14.71	15.14	14.24	14.88	14.97	14.60	14.80	14.61	0.30
FeO	1.62	1.49	1.66	1.76	1.56	1.92	1.52	1.46	1.72	2.02	1.62	2.22	1.76	1.97	2.09	1.76	0.23
MnO	0.27	0.11	0.00	0.16	0.04	0.02	0.14	0.00	0.14	0.16	0.22	0.14	0.13	0.15	0.11	0.12	0.08
MgO	0.55	0.47	0.52	0.55	0.42	0.59	0.39	0.39	0.50	0.61	0.44	0.56	0.52	0.56	0.59	0.51	0.07
CaO	1.63	1.09	1.56	1.48	1.19	1.67	1.16	1.04	1.39	1.84	1.27	1.75	1.59	1.44	1.84	1.46	0.27
Na <sub>2</sub> O	4.63	4.21	4.61	4.57	4.15	4.38	4.30	4.27	4.31	4.40	4.22	4.64	4.56	4.49	4.40	4.41	0.17
K <sub>2</sub> O	4.29	4.52	4.60	4.21	4.52	4.46	4.33	4.61	4.49	4.19	4.54	4.17	4.30	4.31	4.20	4.38	0.16
Total	95.66	96.16	96.31	94.90	95.88	95.75	95.66	95.76	95.68	96.06	95.49	96.17	96.20	94.86	95.70	95.75	
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	70.42	72.49	70.77	70.74	72.22	70.37	72.13	72.33	70.98	69.95	71.64	69.96	70.51	70.46	70.15	71.01	0.91
TiO <sub>2</sub>	0.59	0.44	0.50	0.55	0.46	0.53	0.52	0.47	0.53	0.53	0.56	0.55	0.56	0.53	0.56	0.53	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.42	14.70	15.28	15.30	14.94	15.48	14.97	14.91	15.37	15.76	14.91	15.47	15.56	15.39	15.46	15.26	0.30
FeO	1.69	1.55	1.72	1.85	1.63	2.01	1.59	1.52	1.80	2.10	1.70	2.31	1.83	2.08	2.18	1.84	0.24
MnO	0.28	0.11	0.00	0.17	0.04	0.02	0.15	0.00	0.15	0.17	0.23	0.15	0.14	0.16	0.11	0.12	0.08
MgO	0.57	0.49	0.54	0.58	0.44	0.62	0.41	0.41	0.52	0.64	0.46	0.58	0.54	0.59	0.62	0.53	0.08
CaO	1.70	1.13	1.62	1.56	1.24	1.74	1.21	1.09	1.45	1.92	1.33	1.82	1.65	1.52	1.92	1.53	0.28
Na <sub>2</sub> O	4.84	4.38	4.79	4.82	4.33	4.57	4.50	4.46	4.50	4.58	4.42	4.82	4.74	4.73	4.60	4.61	0.17
K <sub>2</sub> O	4.48	4.70	4.78	4.44	4.71	4.66	4.53	4.81	4.69	4.36	4.75	4.34	4.47	4.54	4.39	4.58	0.16
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

第 6-4 表. KA-1 コアから採取された火山ガラス片の主要成分化学組成 (KA-1-T04 (50.12 m)).  
 Table 6-4. Major element chemical composition of volcanic glass shards taken from core KA-1 (sample KA-1-T04 (50.12 m)).

試料名 KA-1-T04(50.12m)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	標準偏差
point No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
SiO <sub>2</sub>	68.20	69.15	68.68	67.94	68.65	68.70	68.40	70.66	68.64	68.14	68.88	68.17	68.54	70.43	68.68	68.80	68.80	0.81
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.48	0.40	0.55	0.43	0.33	0.42	0.43	0.40	0.54	0.34	0.58	0.46	0.37	0.54	0.45	0.45	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.04	14.16	14.27	14.77	14.26	13.90	14.18	14.66	14.32	14.29	14.16	14.81	13.98	14.42	14.15	14.37	14.37	0.33
FeO	1.82	1.37	1.52	1.74	1.50	1.31	2.36	1.44	1.61	1.58	1.53	1.60	1.52	1.45	1.52	1.60	1.60	0.26
MnO	0.07	0.00	0.13	0.12	0.04	0.14	0.16	0.07	0.13	0.11	0.12	0.18	0.10	0.04	0.09	0.10	0.10	0.05
MgO	0.64	0.36	0.35	0.52	0.44	0.39	0.37	0.38	0.48	0.49	0.40	0.47	0.47	0.41	0.42	0.44	0.44	0.08
CaO	1.45	1.15	1.05	1.46	1.17	1.03	1.20	1.23	1.30	1.23	1.04	1.44	1.12	1.11	1.04	1.21	1.21	0.15
Na <sub>2</sub> O	4.45	4.31	4.41	4.59	4.36	4.52	4.46	4.34	4.50	4.45	4.41	4.53	4.38	4.50	4.38	4.44	4.44	0.08
K <sub>2</sub> O	4.35	4.92	4.70	4.60	4.78	4.79	4.53	4.88	4.67	4.70	4.75	4.54	4.67	4.82	4.72	4.69	4.69	0.15
Total	96.57	95.90	95.51	96.29	95.63	95.11	96.08	98.09	96.05	95.53	95.63	96.32	95.24	97.55	95.54	96.11	96.11	

試料名 KA-1-T04(50.12m)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	標準偏差
point No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
SiO <sub>2</sub>	70.62	72.11	71.91	70.56	71.79	72.23	71.19	72.04	71.46	71.33	72.03	70.77	71.97	72.20	71.89	71.59	71.59	0.60
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.50	0.42	0.57	0.45	0.35	0.44	0.44	0.42	0.57	0.36	0.60	0.48	0.38	0.57	0.47	0.47	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.57	14.77	14.94	15.34	14.91	14.61	14.76	14.95	14.91	14.96	14.81	15.38	14.68	14.78	14.81	14.95	14.95	0.28
FeO	1.88	1.43	1.59	1.81	1.57	1.38	2.46	1.47	1.68	1.65	1.60	1.66	1.60	1.49	1.59	1.66	1.66	0.27
MnO	0.07	0.00	0.14	0.12	0.04	0.15	0.17	0.07	0.14	0.12	0.13	0.19	0.10	0.04	0.09	0.10	0.10	0.05
MgO	0.66	0.38	0.37	0.54	0.46	0.41	0.39	0.39	0.50	0.51	0.42	0.49	0.49	0.42	0.44	0.46	0.46	0.08
CaO	1.50	1.20	1.10	1.52	1.22	1.08	1.25	1.25	1.35	1.29	1.09	1.50	1.18	1.14	1.09	1.26	1.26	0.15
Na <sub>2</sub> O	4.61	4.49	4.62	4.77	4.56	4.75	4.64	4.42	4.69	4.66	4.61	4.70	4.60	4.61	4.58	4.62	4.62	0.09
K <sub>2</sub> O	4.50	5.13	4.92	4.78	5.00	5.04	4.71	4.98	4.86	4.92	4.97	4.71	4.90	4.94	4.94	4.88	4.88	0.16
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	



第 6-5 表. KA-1 コアから採取された火山ガラス片の主要成分化学組成 (KA-1-T05 (55.68 m)).  
 Table 6-5. Major element chemical composition of volcanic glass shards taken from core KA-1 (sample KA-1-T05 (55.68 m)).

試料名	KA-1 T05(55.68m)															平均値	標準偏差
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
SiO <sub>2</sub>	68.15	68.13	69.33	68.66	68.04	69.24	69.52	68.00	68.68	67.75	68.64	69.26	67.56	69.36	68.62	68.59	0.66
TiO <sub>2</sub>	0.44	0.41	0.31	0.37	0.39	0.47	0.41	0.44	0.51	0.54	0.41	0.30	0.70	0.34	0.4	0.43	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.83	14.66	14.70	14.02	14.65	14.19	14.76	14.49	15.02	14.88	14.39	14.41	14.58	14.21	14.68	14.56	0.29
FeO	1.72	1.59	1.63	1.44	1.62	1.48	1.26	1.89	1.79	2.03	1.72	1.54	1.62	1.41	1.47	1.62	0.20
MnO	0.13	0.23	0.02	0.12	0.13	0.18	0.10	0.08	0.14	0.00	0.13	0.11	0.03	0.26	0.04	0.12	0.07
MgO	0.47	0.49	0.47	0.34	0.52	0.30	0.51	0.52	0.57	0.52	0.37	0.34	0.48	0.34	0.48	0.45	0.09
CaO	1.44	1.47	1.36	0.96	1.38	0.91	1.34	1.40	1.51	1.47	1.16	1.04	1.54	1.09	1.36	1.29	0.21
Na <sub>2</sub> O	4.45	4.40	4.44	4.09	4.32	4.28	4.38	4.43	4.64	4.43	4.35	3.99	4.69	4.56	4.39	4.39	0.19
K <sub>2</sub> O	4.61	4.51	4.58	4.87	4.45	4.78	4.71	4.52	4.39	4.52	4.68	5.06	4.28	4.88	4.5	4.63	0.21
Total	96.24	95.89	96.84	94.87	95.50	95.83	96.99	95.77	97.25	96.14	95.85	96.05	95.48	96.45	95.94	96.08	
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	70.81	71.05	71.59	72.37	71.25	72.25	71.68	71.00	70.62	70.47	71.61	72.11	70.76	71.91	71.52	71.39	0.63
TiO <sub>2</sub>	0.46	0.43	0.32	0.39	0.41	0.49	0.42	0.46	0.52	0.56	0.43	0.31	0.73	0.35	0.42	0.45	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.41	15.29	15.18	14.78	15.34	14.81	15.22	15.13	15.44	15.48	15.01	15.00	15.27	14.73	15.30	15.15	0.25
FeO	1.79	1.66	1.68	1.52	1.70	1.54	1.30	1.97	1.84	2.11	1.79	1.60	1.70	1.46	1.53	1.69	0.21
MnO	0.14	0.24	0.02	0.13	0.14	0.19	0.10	0.08	0.14	0.00	0.14	0.11	0.03	0.27	0.04	0.12	0.08
MgO	0.49	0.51	0.49	0.36	0.54	0.31	0.53	0.54	0.59	0.54	0.39	0.35	0.50	0.35	0.50	0.46	0.09
CaO	1.50	1.53	1.40	1.01	1.45	0.95	1.38	1.46	1.55	1.53	1.21	1.08	1.61	1.13	1.42	1.34	0.22
Na <sub>2</sub> O	4.62	4.59	4.58	4.31	4.52	4.47	4.52	4.63	4.77	4.61	4.54	4.15	4.91	4.73	4.58	4.57	0.19
K <sub>2</sub> O	4.79	4.70	4.73	5.13	4.66	4.99	4.86	4.72	4.51	4.70	4.88	5.27	4.48	5.06	4.69	4.82	0.23
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

第 6-6 表, KA-1 コアから採取された火山ガラス片の主要成分化学組成 (KA-1-T06 (61.00-61.10 m)).  
 Table 6-6. Major element chemical composition of volcanic glass shards taken from core KA-1 (sample KA-1-T06 (61.00-61.10 m)).

試料名	KA-1 T06(61.00-61.10m)																
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	62.07	64.65	62.67	67.58	66.46	64.64	67.65	63.93	63.51	66.57	65.45	62.82	65.34	64.82	62.96	64.74	1.78
TiO <sub>2</sub>	0.94	0.92	0.93	0.56	0.74	0.64	0.63	0.91	0.97	0.59	0.67	0.79	0.64	0.79	0.95	0.78	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.02	14.76	15.01	14.30	14.56	14.78	14.02	14.85	14.98	14.29	14.62	14.86	14.23	14.83	14.77	14.66	0.31
FeO	4.54	3.59	4.31	2.29	2.72	3.41	2.08	3.53	3.51	2.39	3.44	4.32	2.60	3.31	4.16	3.35	0.79
MnO	0.06	0.12	0.22	0.22	0.13	0.23	0.07	0.00	0.16	0.05	0.20	0.18	0.05	0.16	0.17	0.13	0.07
MgO	1.42	0.95	1.33	0.36	0.75	1.07	0.45	1.08	1.09	0.59	0.93	1.30	0.66	0.93	1.14	0.94	0.32
CaO	3.57	2.55	3.55	1.50	1.91	2.72	1.59	2.80	2.78	1.54	2.60	3.34	1.77	2.71	3.34	2.55	0.73
Na <sub>2</sub> O	4.15	4.22	4.04	4.24	4.15	4.02	4.28	3.95	4.17	4.16	4.06	4.17	4.04	4.22	4.26	4.14	0.10
K <sub>2</sub> O	3.74	4.30	3.84	4.79	4.66	4.24	4.97	4.20	4.11	4.75	4.39	3.97	4.84	4.26	4.01	4.34	0.38
Total	95.51	96.06	95.90	95.84	96.08	95.75	95.74	95.25	95.28	94.93	96.36	95.75	94.17	96.03	95.76	95.63	
point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均値	標準偏差
SiO <sub>2</sub>	64.99	67.30	65.35	70.51	69.17	67.51	70.66	67.12	66.66	70.13	67.92	65.61	69.39	67.50	65.75	67.70	1.90
TiO <sub>2</sub>	0.98	0.96	0.97	0.58	0.77	0.67	0.66	0.96	1.02	0.62	0.70	0.83	0.68	0.82	0.99	0.81	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.73	15.37	15.65	14.92	15.15	15.44	14.64	15.59	15.72	15.05	15.17	15.52	15.11	15.44	15.42	15.33	0.31
FeO	4.75	3.74	4.49	2.39	2.83	3.56	2.17	3.71	3.68	2.52	3.57	4.51	2.76	3.45	4.34	3.50	0.82
MnO	0.06	0.12	0.23	0.23	0.14	0.24	0.07	0.00	0.17	0.05	0.21	0.19	0.05	0.17	0.18	0.14	0.08
MgO	1.49	0.99	1.39	0.38	0.78	1.12	0.47	1.13	1.14	0.62	0.97	1.36	0.70	0.97	1.19	0.98	0.33
CaO	3.74	2.65	3.70	1.57	1.99	2.84	1.66	2.94	2.92	1.62	2.70	3.49	1.88	2.82	3.49	2.67	0.76
Na <sub>2</sub> O	4.35	4.39	4.21	4.42	4.32	4.20	4.47	4.15	4.38	4.38	4.21	4.36	4.29	4.39	4.45	4.33	0.10
K <sub>2</sub> O	3.92	4.48	4.00	5.00	4.85	4.43	5.19	4.41	4.31	5.00	4.56	4.15	5.14	4.44	4.19	4.54	0.41
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

第7表. XRF分析によるKA-1コアおよびKA-2コアから採取された溶岩試料の全岩化学組成.  
Table 7. Whole-rock chemical compositions of lava samples based on XRF analysis.

試料名	KA-1-1	KA-2-1	KA-2-2	KA-1-1	KA-2-1	KA-2-2
SiO <sub>2</sub> (wt.%)	57.98	58.36	58.39	58.21	58.60	58.62
TiO <sub>2</sub>	1.20	1.20	1.21	1.20	1.20	1.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.82	15.80	15.77	15.88	15.87	15.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.31	9.03	9.15	9.34	9.07	9.19
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
MgO	2.46	2.40	2.40	2.47	2.41	2.41
CaO	5.24	5.19	5.11	5.27	5.21	5.13
Na <sub>2</sub> O	3.76	3.76	3.73	3.77	3.78	3.74
K <sub>2</sub> O	3.30	3.29	3.31	3.31	3.30	3.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.39	0.40	0.40	0.39	0.41	0.41
Total	99.60	99.58	99.61	100.00	100.00	100.00
LOI	-0.12	-0.11	-0.05			

LOI: loss on ignition

第 8 表. 既存研究による砥川溶岩の全岩化学組成.

Table 8. Whole-rock chemical compositions of the Togawa lava reported from previous studies.

水田ほか(1990)						
試料名	NY5840	NY8440	NY11060	NY5840	NY8440	NY11060
SiO <sub>2</sub> (wt.%)	59.10	58.70	58.30	58.34	58.54	58.79
TiO <sub>2</sub>	1.26	1.13	1.18	1.24	1.13	1.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.00	15.40	15.70	15.79	15.36	15.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	9.14	8.99	8.44	9.02	8.96	8.51
MnO	0.16	0.13	0.10	0.16	0.13	0.10
MgO	2.49	2.38	2.30	2.46	2.37	2.32
CaO	5.52	5.54	5.21	5.45	5.52	5.25
Na <sub>2</sub> O	3.60	3.81	3.68	3.55	3.80	3.71
K <sub>2</sub> O	3.43	3.43	3.25	3.39	3.42	3.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.38	0.39	0.38	0.38	0.39	0.38
H <sub>2</sub> O+	0.12	0.10	0.28	0.12	0.10	0.28
H <sub>2</sub> O-	0.10	0.28	0.34	0.10	0.28	0.34
Total	101.30	100.28	99.16	100.00	100.00	100.00

\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とFeOを足したもの.Miyoshi *et al.* (2013)

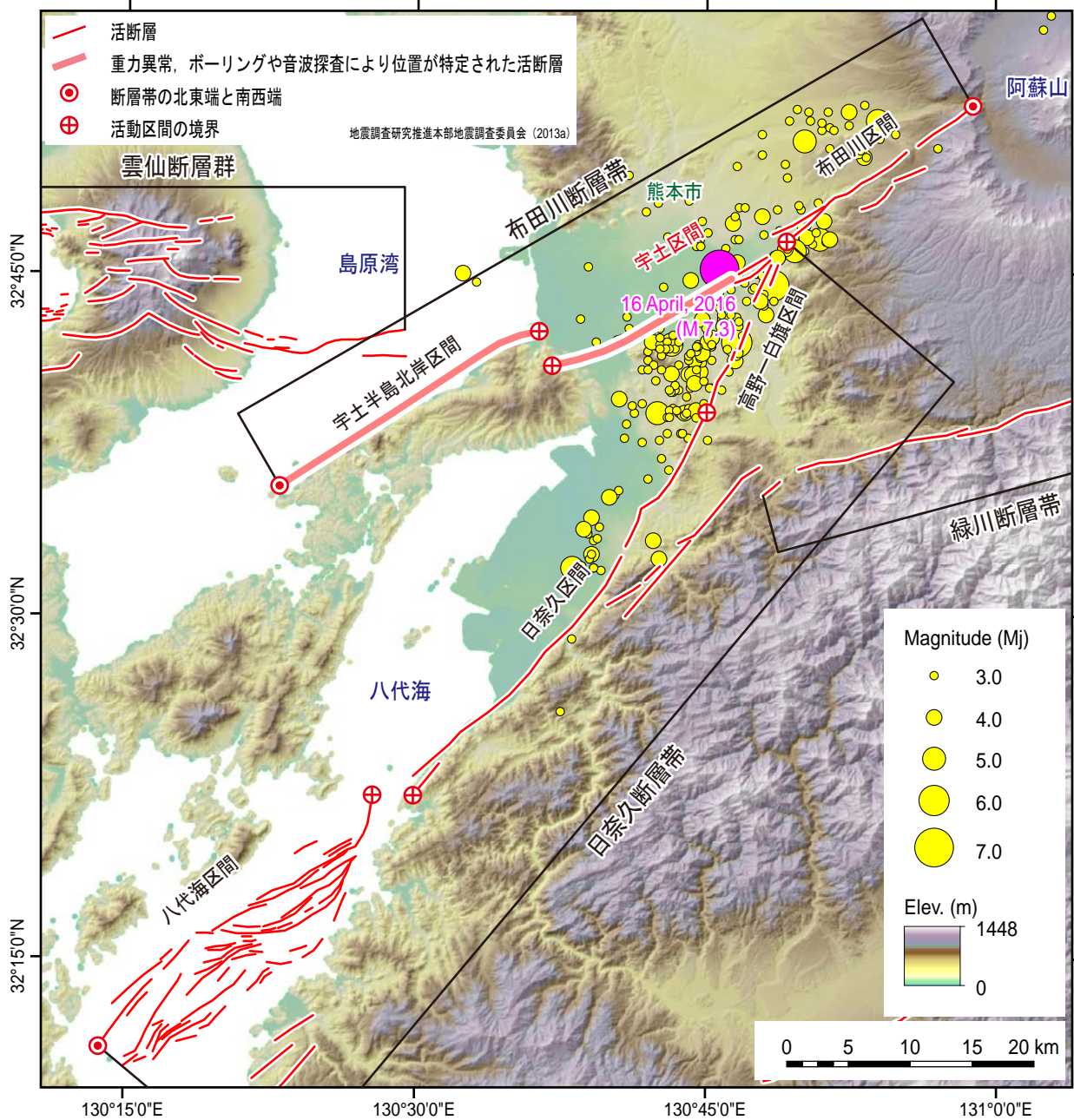
試料名	11092202	11092202
SiO <sub>2</sub> (wt.%)	58.67	59.07
TiO <sub>2</sub>	1.18	1.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.58	15.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.58	8.64
MnO	0.14	0.14
MgO	2.31	2.33
CaO	5.22	5.26
Na <sub>2</sub> O	3.80	3.83
K <sub>2</sub> O	3.44	3.46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.41	0.41
Total	99.33	100.00

第9表. KA-1 コアおよび KA-2 コアから採取された溶岩の K-Ar 年代測定結果.  
Table 9. Result of K-Ar dating of lava samples taken from cores KA-1 and KA-2.

試料名	測定対象 (メッシュサイズ)	カリウム含有 量 (wt.%)	平均値 (wt.%)	再現性 (%)*	カリウム含有量 (wt.%)	放射性起源 <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-8</sup> cc STP/g)**	K-Ar年代 (Ma)	非放射性起 源 <sup>40</sup> Ar (%)
KA-1-1	石基 (#60-80)	2.8266	2.827	0.04	2.827 ± 0.057	1.66 ± 0.53	0.15 ± 0.05	95.3
GL-69.38-69.65		2.8278						
KA-2-1	石基 (#60-80)	2.8676	2.851	1.20	2.851 ± 0.057	1.74 ± 0.18	0.16 ± 0.02	85.7
GL-19.76-20.00		2.8334						
KA-2-2	石基 (#60-80)	2.8743	2.863	0.79	2.863 ± 0.057	1.86 ± 0.20	0.17 ± 0.02	86.4
GL-27.18-27.43		2.8516						

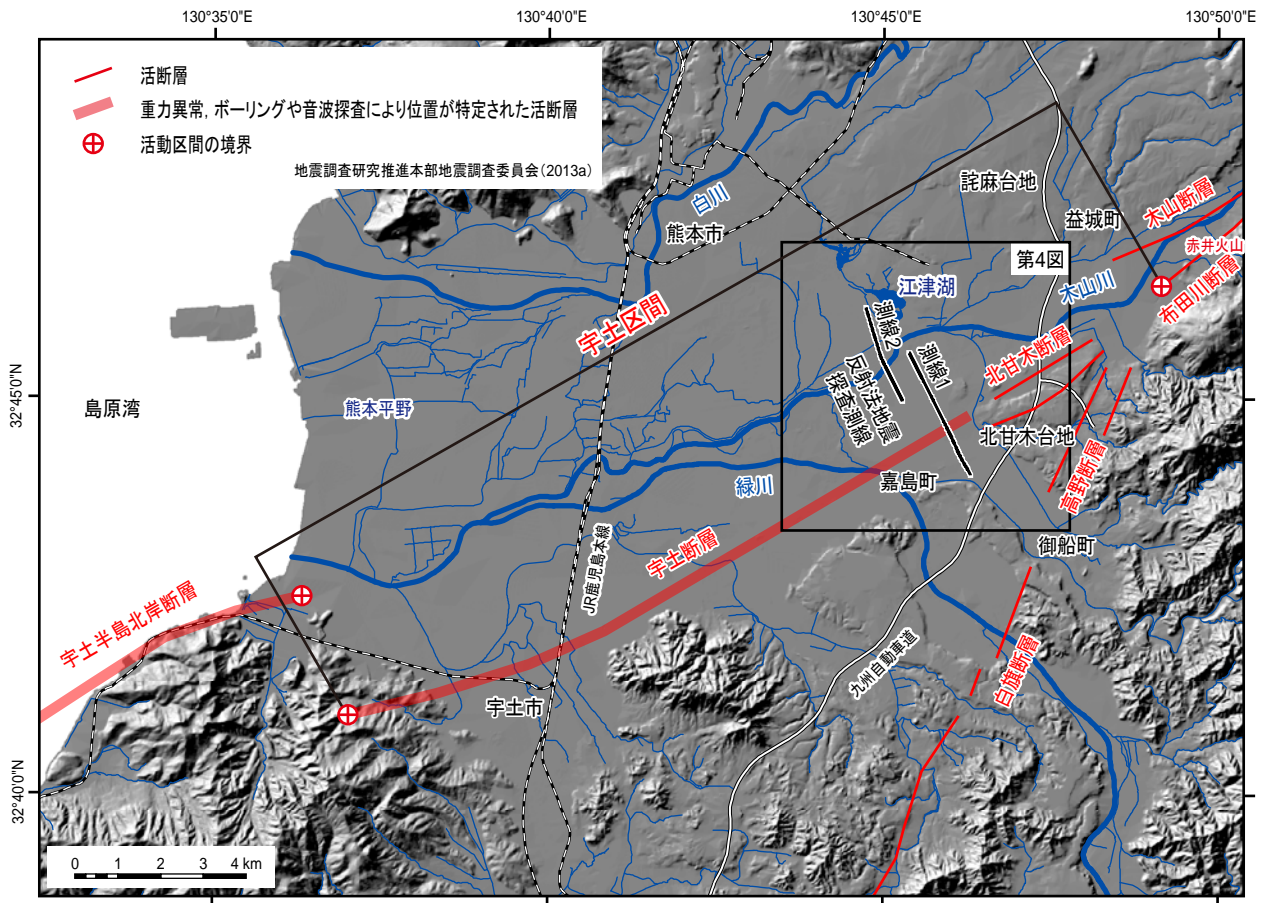
\*再現性 = (2回の分析結果の差/2回の分析結果の平均値) × 100 (%)

\*\*試料1 g中に存在するアルゴンの標準状態(0°C 1気圧)における体積. STP: Standard Temperature and Pressure.



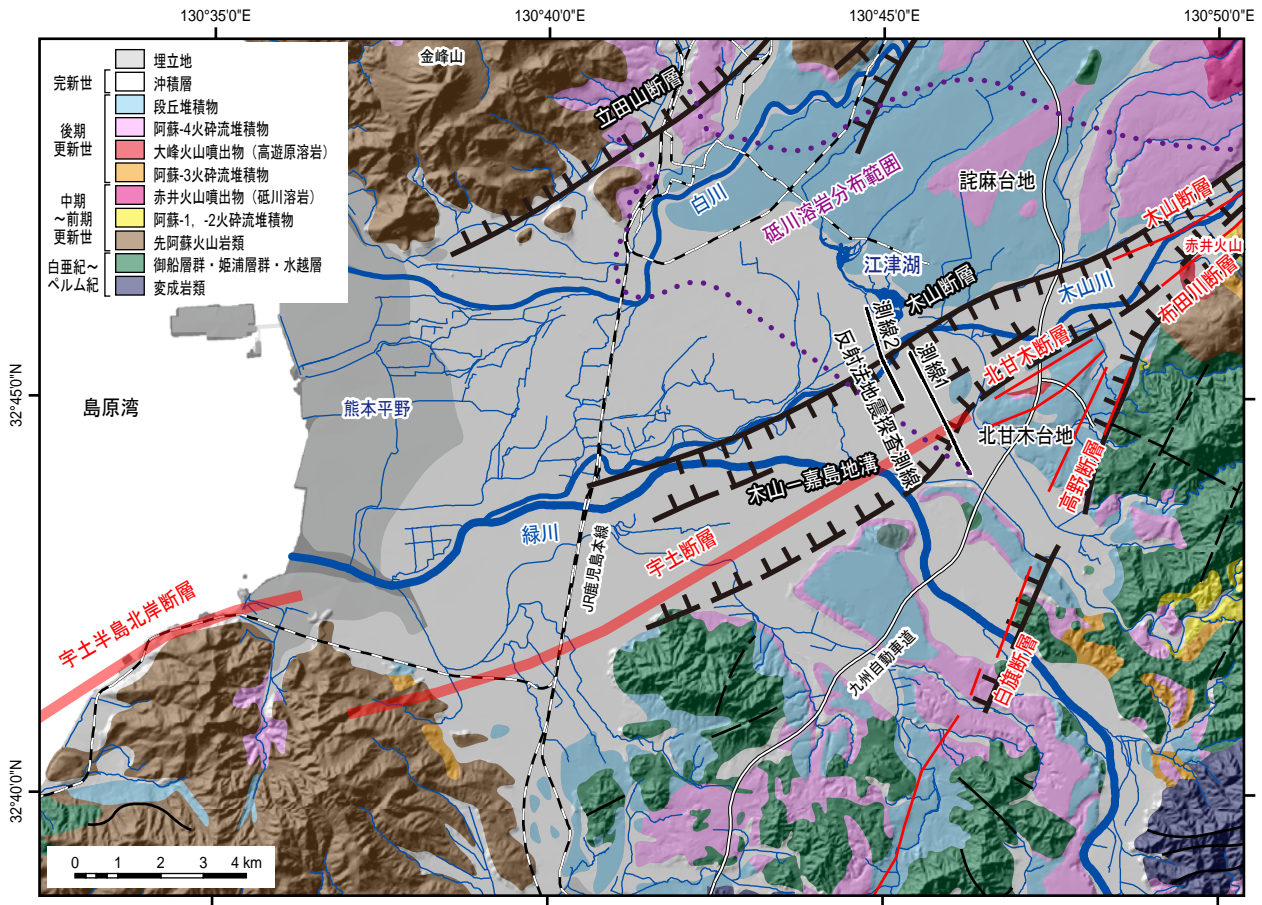
第1図. 布田川断層帯および周辺の主要な活断層の分布. 断層の位置, 名称および活動区間の境界は地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2006, 2013a, b) による. 陰影図は, 国土地理院刊行数値地図 50 m メッシュ (標高) 日本-III から作成. 震央分布 (黄色丸, 本震を桃色で示す) は, 気象庁 (2016) による 2016 年 4 月 14 日~30 日までに発生した M3 以上, 震源の深さ 30 km 以浅のものを表示.

Fig. 1. Map showing distribution of the Futagawa fault zone and other major active faults. Location, name and behavioral segment boundary of the fault (zone) are after Earthquake Research Committee, the Headquarters for Earthquake Research Promotion (2006, 2013a, b). Shaded relief image is created from Digital Map 50 m Grid (Elevation) issued from Geographical Survey Institute (Geospatial Information Authority of Japan). The epicenters of the earthquakes of  $M \geq 3.0$  and focal depth of  $\leq 30$  km that occurred from 14 to 30 April 2016 are shown with yellow circles while the epicenter of the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence is plotted with a pink circle. These epicenters are after Japan Meteorological Agency (2016).



第2図. 布田川断層帯宇土区間の分布. 断層の位置は地震調査研究推進本部地震調査委員会(2013a)による. 陰影図は, 国土地理院基盤地図情報数値標高データ(10mメッシュ)から作成.

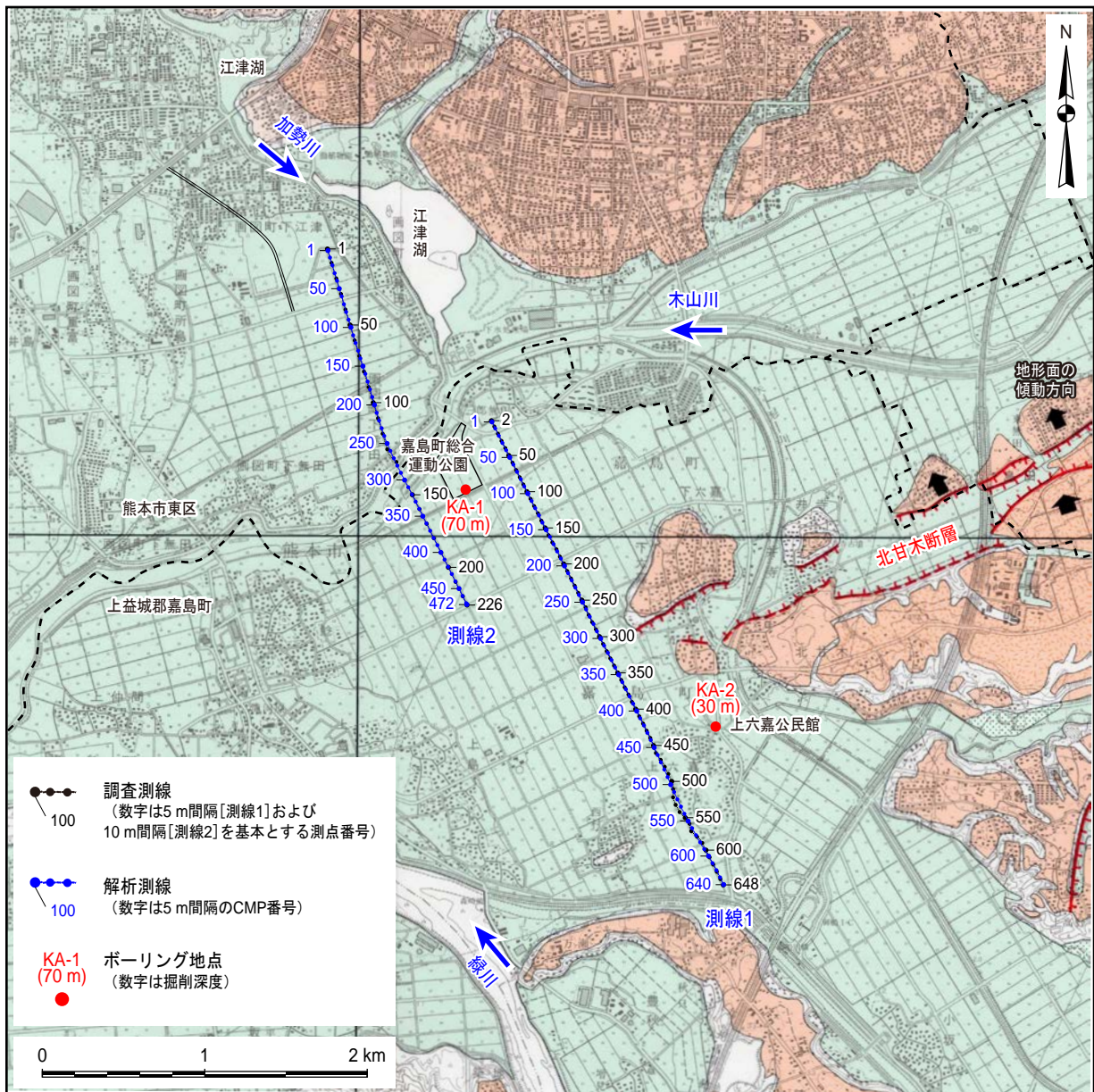
Fig. 2. Map showing distribution of the Uto segment of the Futagawa fault zone. Location of the Uto segment is after Earthquake Research Committee, the Headquarters for Earthquake Research Promotion (2013a). Shaded relief image is created from 10 m mesh digital elevation model (DEM) distributed by Geospatial Information Authority of Japan.



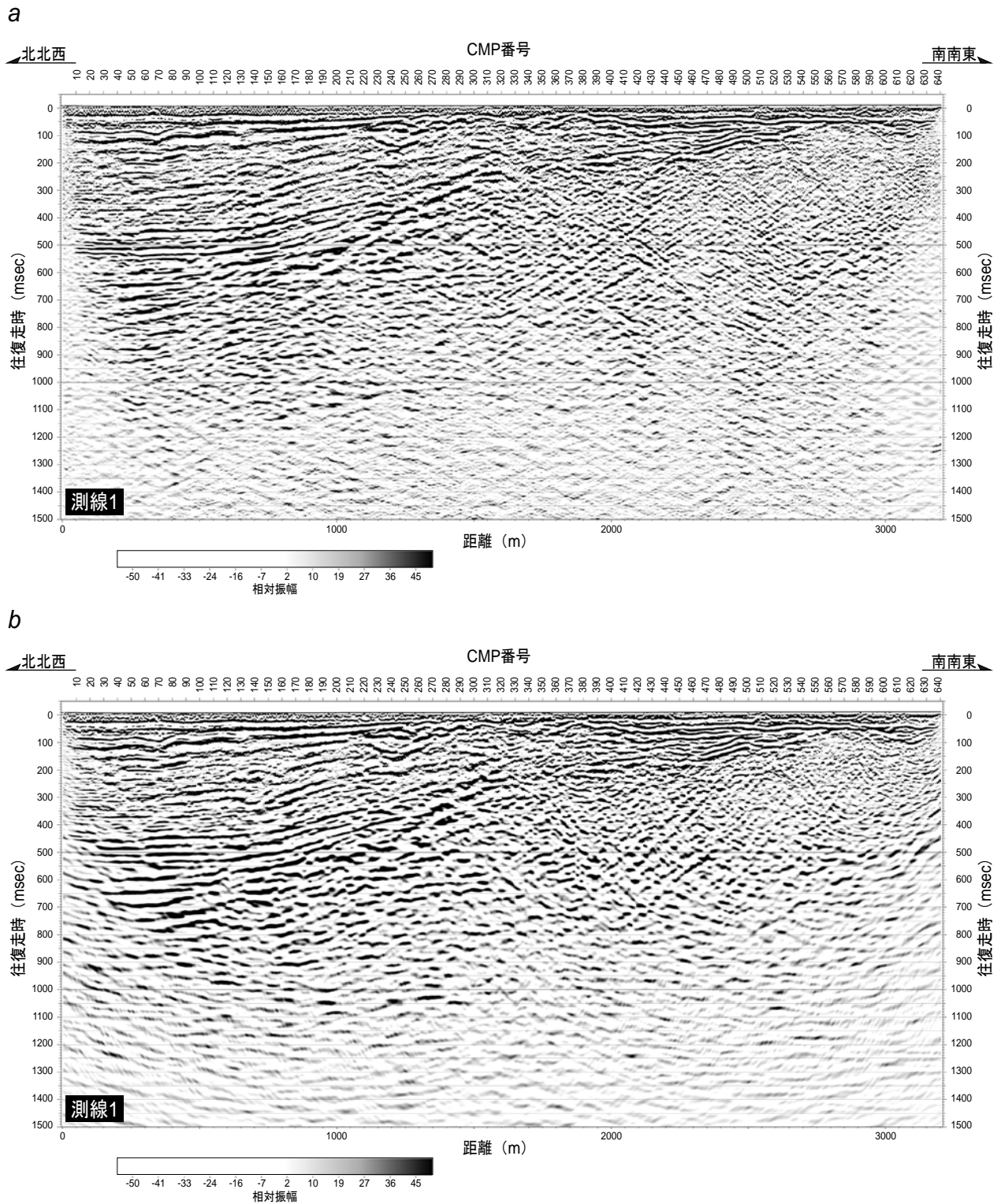
第3図. 宇土区間とその周辺の表層地質図(星住ほか, 2004; 斎藤ほか, 2010 を編集). 図の範囲は第2図と同じ. 赤色実線および赤色薄太線は, 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2013a)による活断層の地表トレースおよび伏在活断層の位置を示す. 黒色実線および黒色破線は, 石坂ほか(1992)による活断層および推定活断層を示す. ケバは低下側を示す. 木山断層, 立田山断層, 木山-嘉島地溝は石坂ほか(1992)による. 図中の紫色点線は, 社団法人熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会編(2003)による砥川溶岩分布範囲.

Fig. 3. Surficial geology in and around the Uto segment (simplified from Hoshizumi *et al.*, 2004 and Saito *et al.*, 2010). The extent of this figure is same as Fig. 2. Red solid line and pale red bold line show geologically confirmed active fault and blind active fault inferred from geophysical information, respectively (Earthquake Research Committee, the Headquarters for Earthquake Research Promotion, 2013a). Black solid line and black dashed line show active fault and inferred active fault, respectively (Ishizaka *et al.*, 1992). Hatches denote downthrown side of fault. The Kiyama fault, Tatsutayama fault, and Kiyama-Kashima graben are after Ishizaka *et al.* (1992). Purple dotted line denotes extent of the Togawa lava beneath the eastern Kumamoto Plain after Editing Committee for Subsurface Geotechnical Map, Association of Geological Survey in Kumamoto Prefecture (2003).



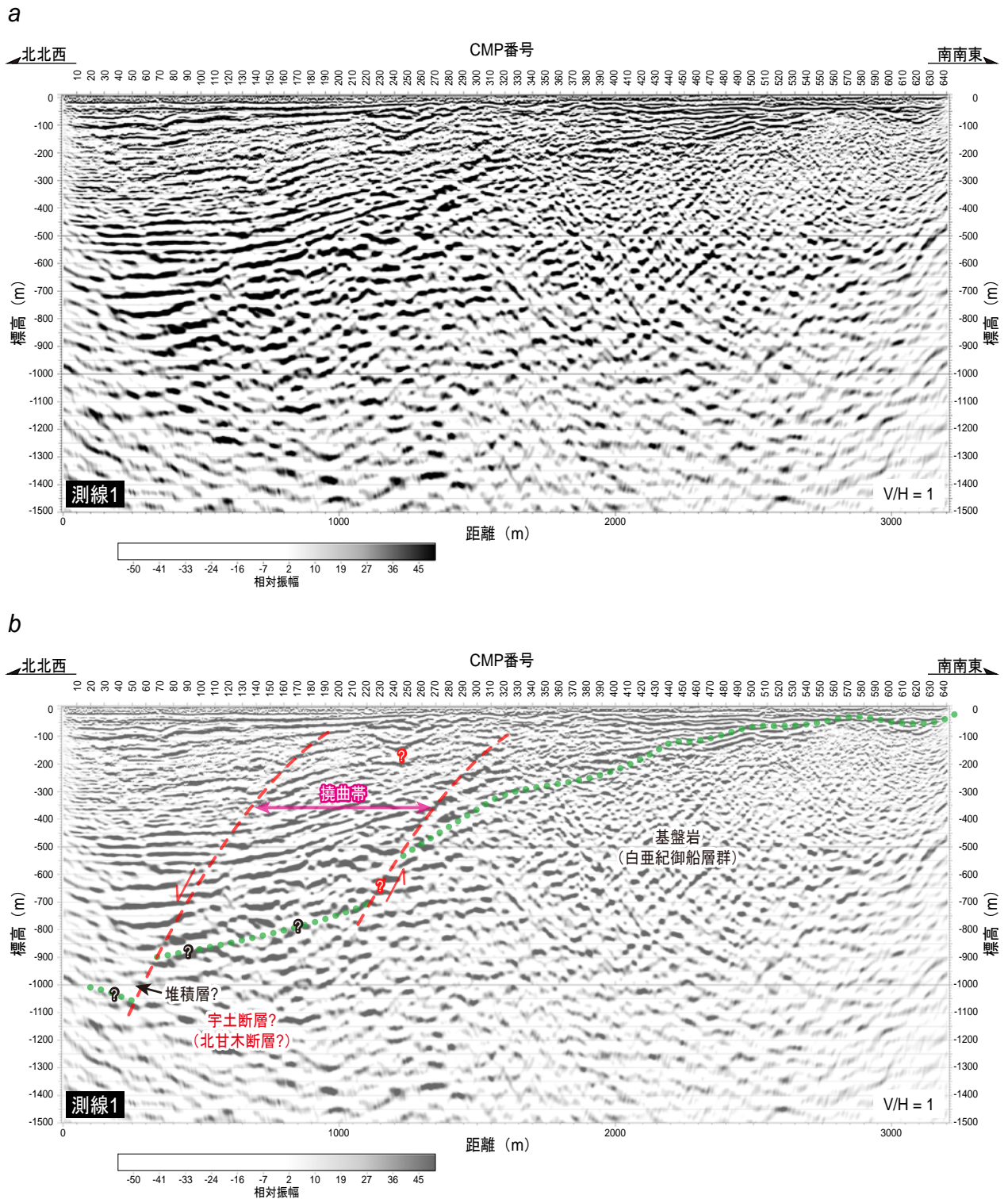


第4図. 反射法地震探査測線(調査測線・解析測線)およびボーリング調査地点位置図. 基図は池田ほか(2001)を使用. 本図の範囲を第2図に黒枠で示す.  
 Fig. 4. Map showing the lines for seismic reflection profiling (survey lines and analytical lines) and sites of coring. Base map is after Ikeda *et al.* (2001). Area of this figure is shown in Fig. 2.



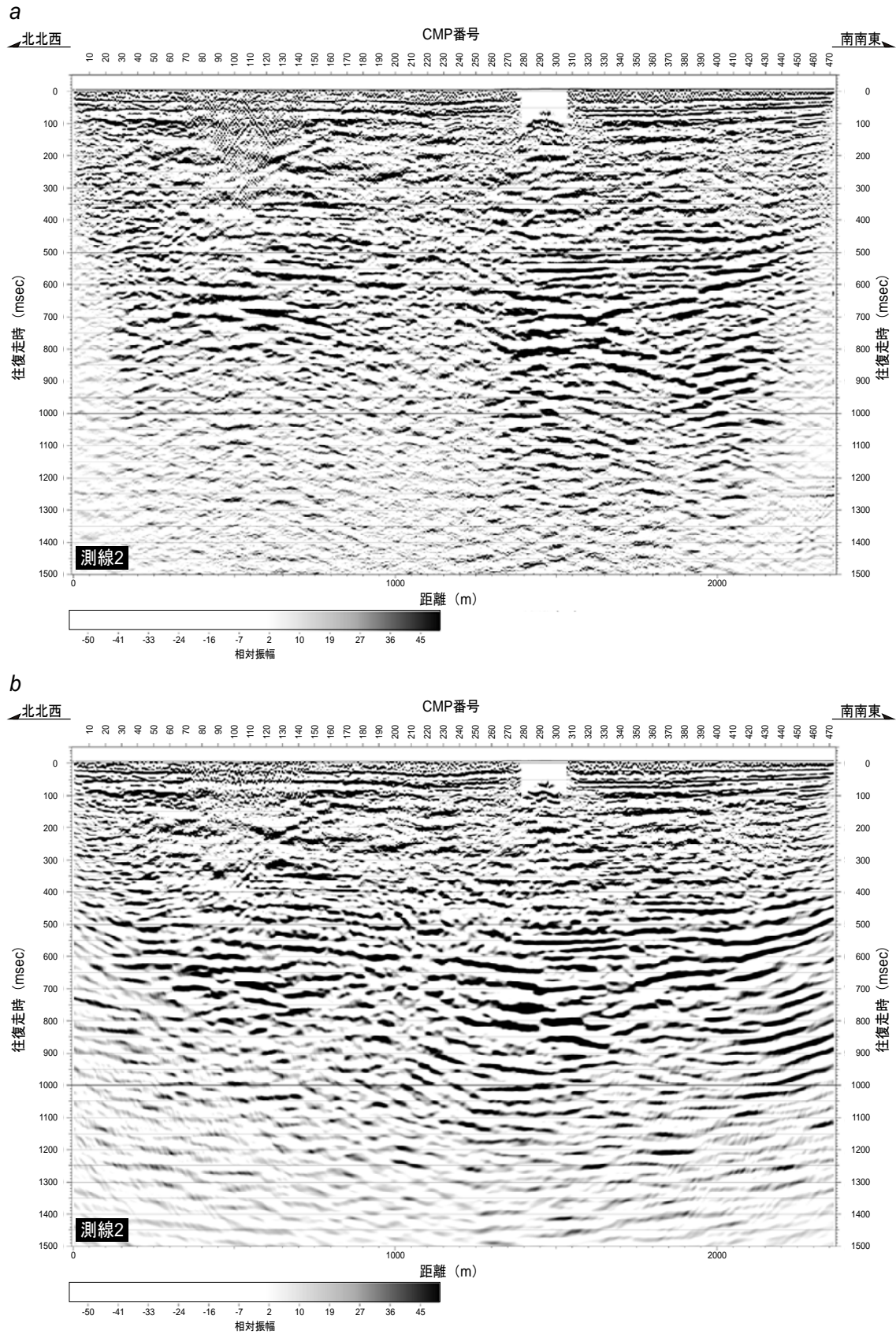
第 5 図. 中型バイブロサイスを震源とした反射法地震探査による測線 1 の重ね後時間断面 (a) とマイグレーション処理後時間断面 (b). 解析測線の位置を第 4 図に示す.

Fig. 5. (a) Post-stacking and (b) post-migration P-wave seismic reflection time section of line 1. The data were acquired with a vibroseis source. See Fig. 4 for the location of the CMP line.



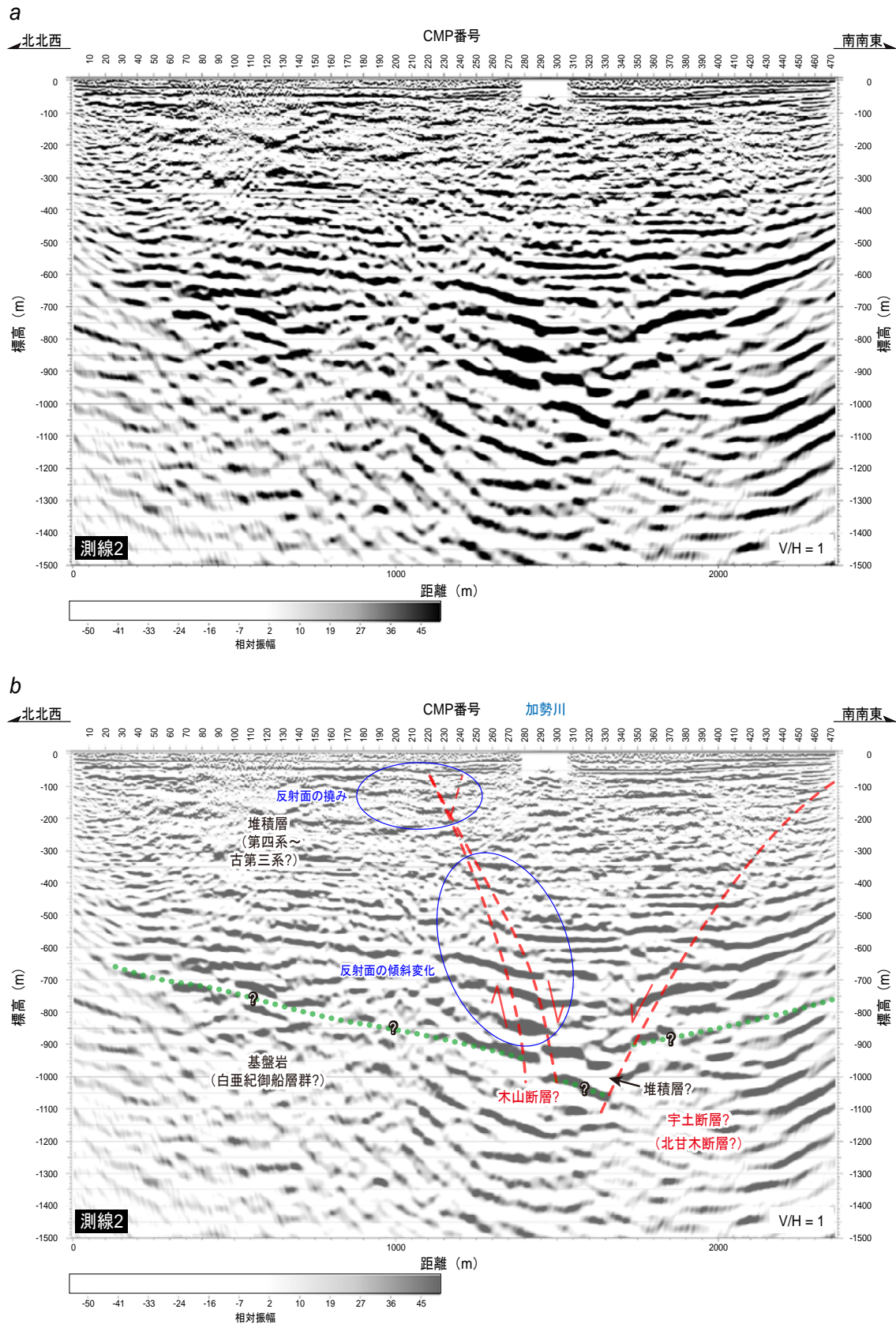
第 6 図. 中型バイブロサイスを震源とした反射法地震探査による測線 1 の深度断面図 (a) と解釈断面 (b). 鉛直誇張なし. 解析測線の位置を第 4 図に示す.

Fig. 6. (a) Depth-converted P-wave seismic reflection profile and (b) interpreted profile of line 1 (no vertical exaggeration). The data were acquired with a vibroseis source. See Fig. 4 for the location of the CMP line.



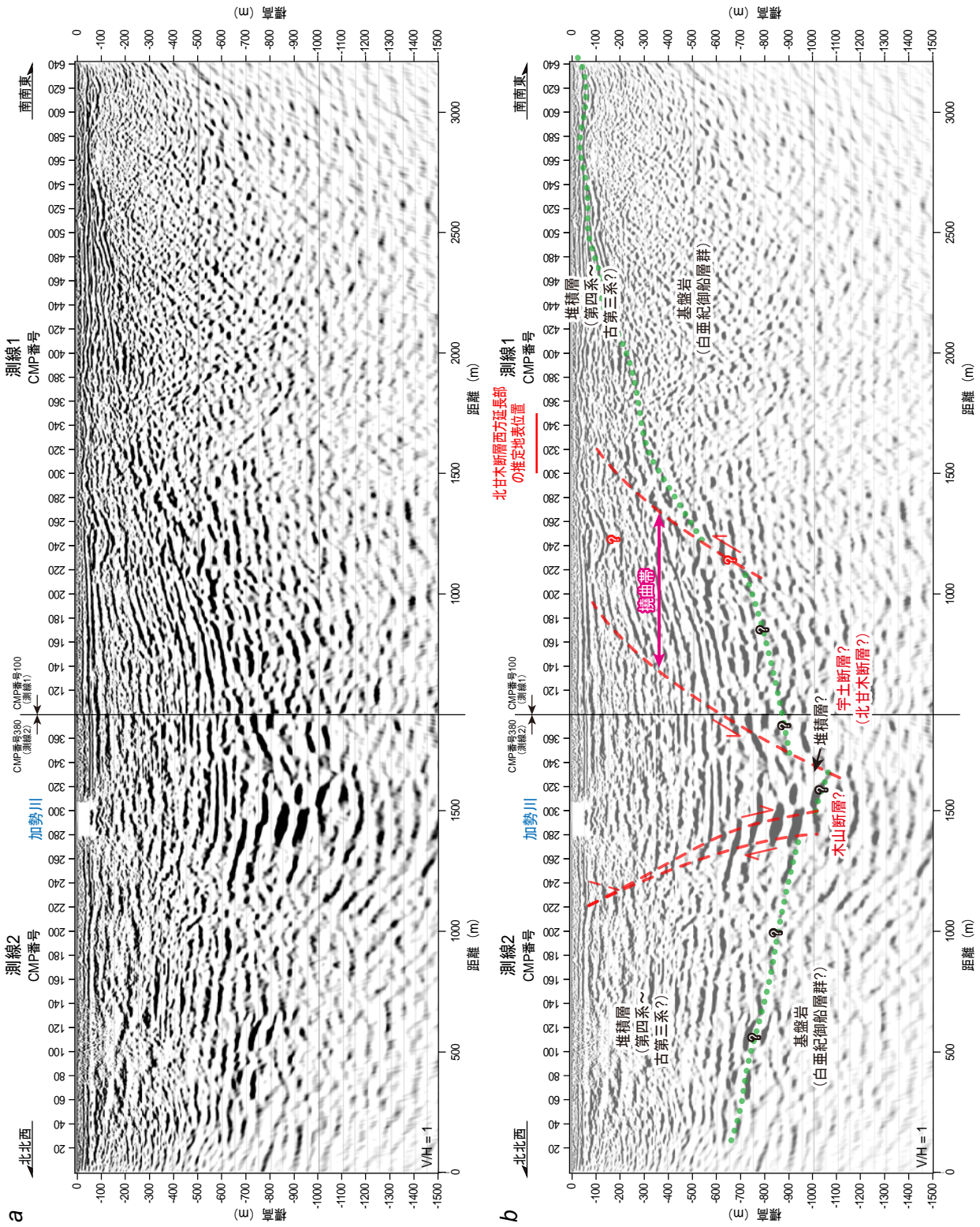
第7図. 中型パイプソースを震源とした反射法地震探査による測線2の重合後時間断面 (a) とマイグレーション処理後時間断面 (b). 解析測線の位置を第4図に示す.

Fig. 7. (a) Post-stacking and (b) post-migration P-wave seismic reflection time section of line 2. The data were acquired with a vibroseis source. See Fig. 4 for the location of the CMP line.

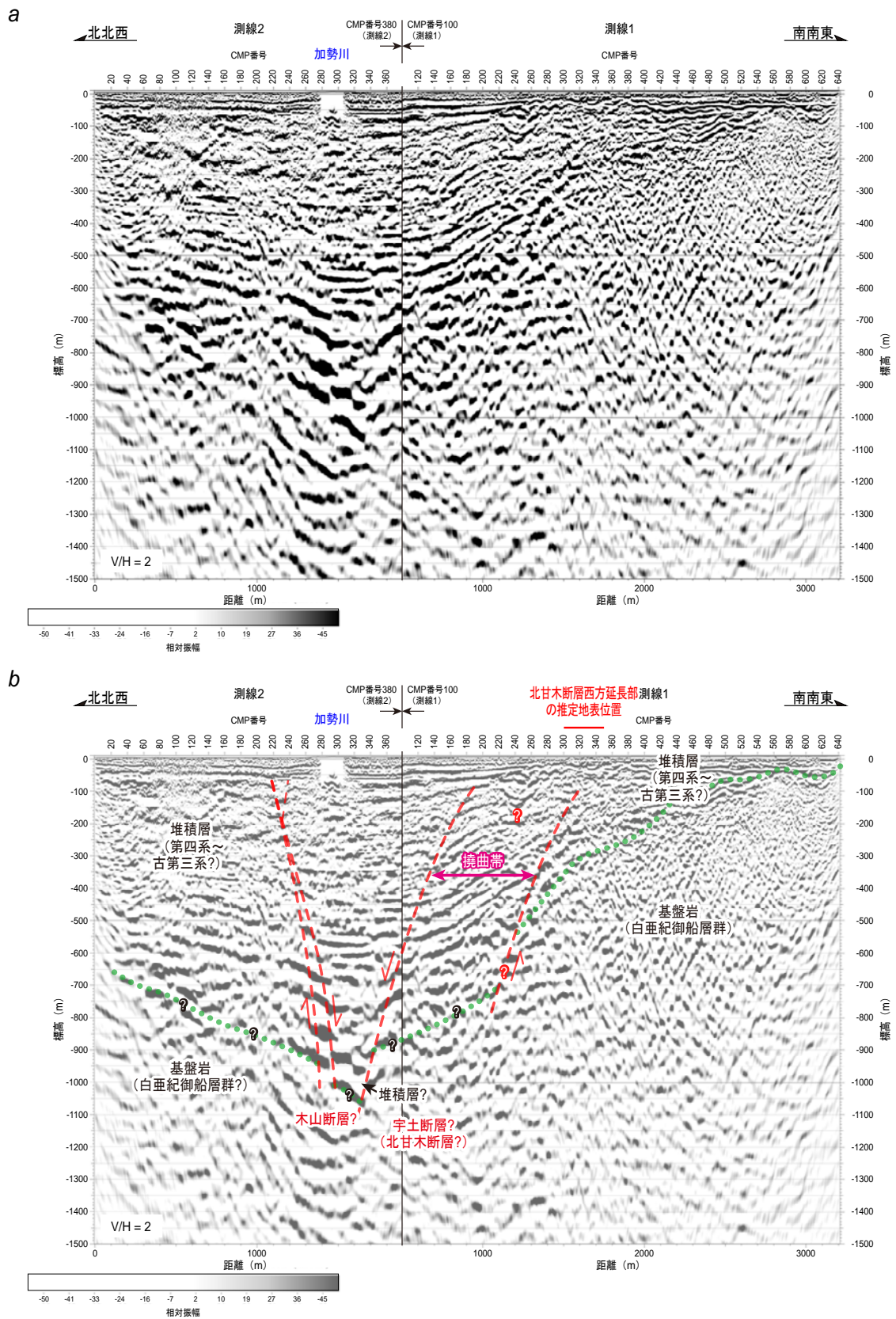


第8図. 中型パイプソースを震源とした反射法地震探査による測線2の深度断面図(a)と解釈断面(b). 鉛直誇張なし. 解析測線の位置を第4図に示す.

Fig. 8. (a) Depth-converted P-wave seismic reflection profile and (b) interpreted profile of line 2 (no vertical exaggeration). The data were acquired with a vibroseis source. See Fig. 4 for the location of the CMP line.

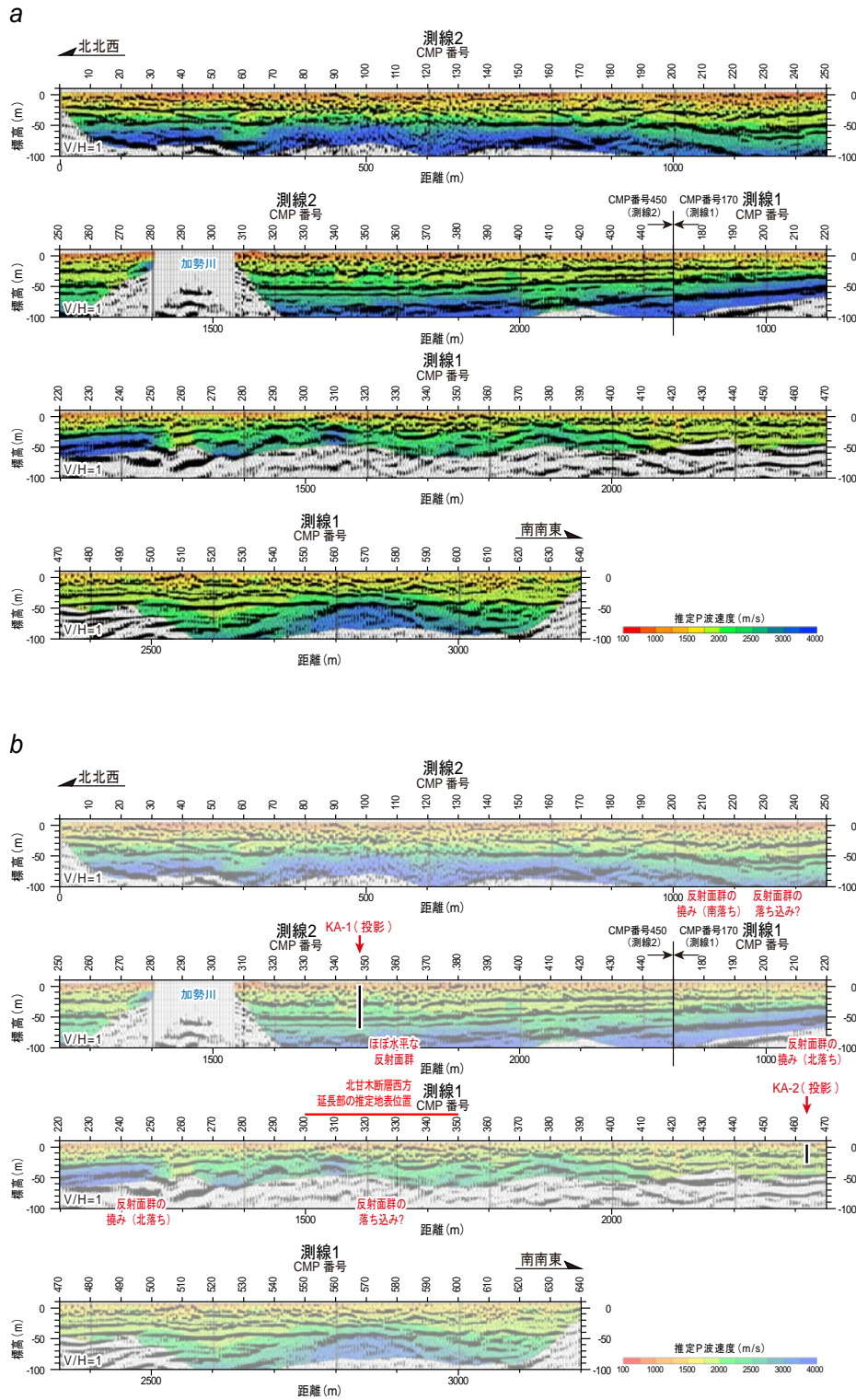


第9図. 中型バイブロサイスを震源とした反射法地震探査による深度断面図 (測線1と2を接合) (a) と解釈断面図 (b). 鉛直誇張なし.  
 Fig. 9. (a) Depth-converted P-wave seismic reflection profile after merging lines 1 and 2 and (b) interpreted profile. No vertical exaggeration.



第 10 図. 中型パイプロサイズを震源とした反射法地震探査による深度断面図 (測線 1 と 2 を接合) (a) と解釈断面図 (b). 鉛直誇張 2 倍.

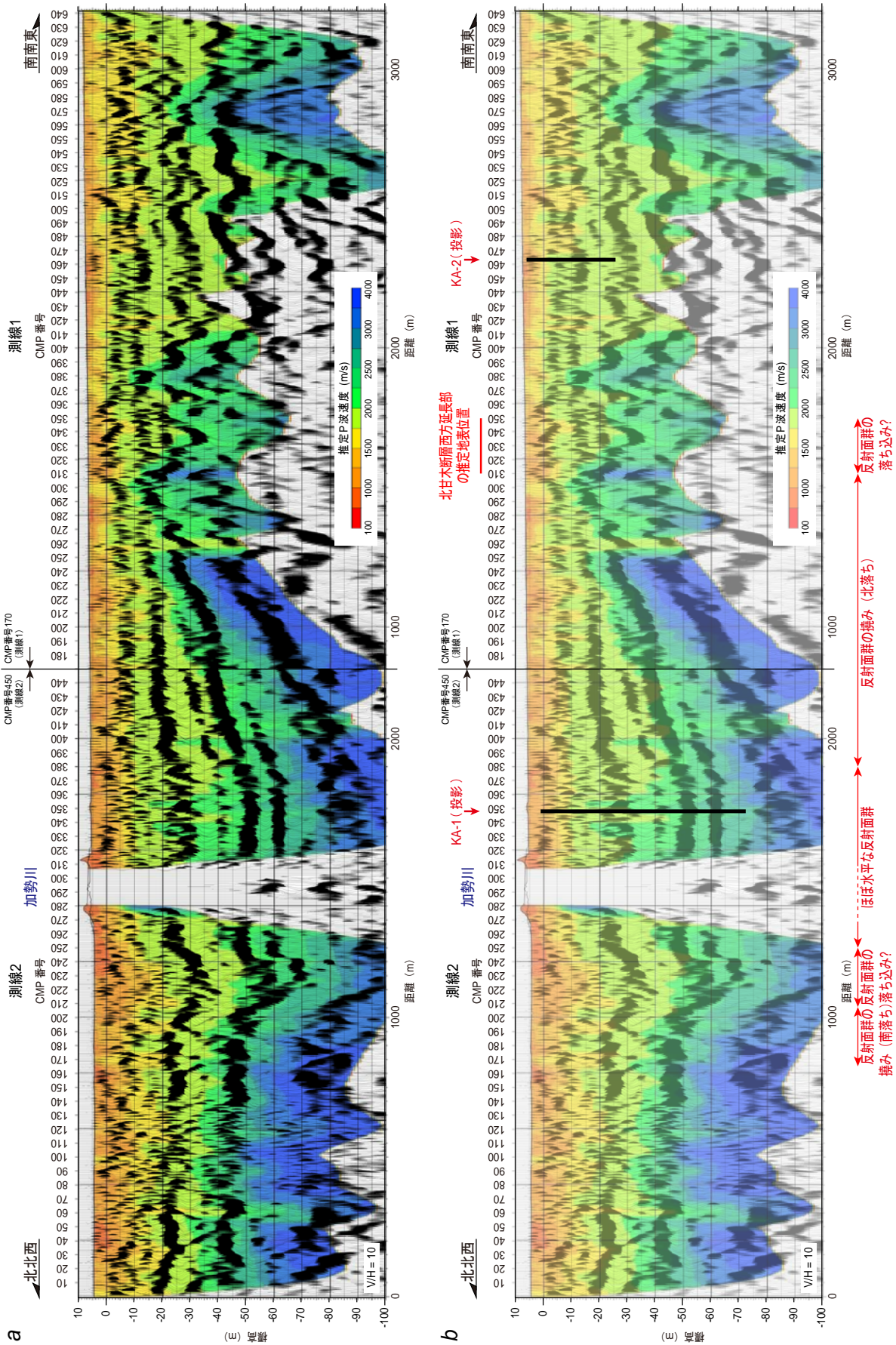
Fig. 10. (a) Depth-converted P-wave seismic reflection profile after merging lines 1 and 2 and (b) interpreted profile. Vertical exaggeration is 2.



第 11 図. 油圧インパクターを震源とした反射法地震探査による地下浅部の深度断面に、反射法探査記録を使用した屈折波トモグラフィ解析により推定された P 波速度構造を重ね合わせた図 (a) と解釈断面図 (b). 鉛直誇張なし. 第 11 図 b 中の黒色太線は、ボーリング掘削地点の投影位置と掘削長を示す.

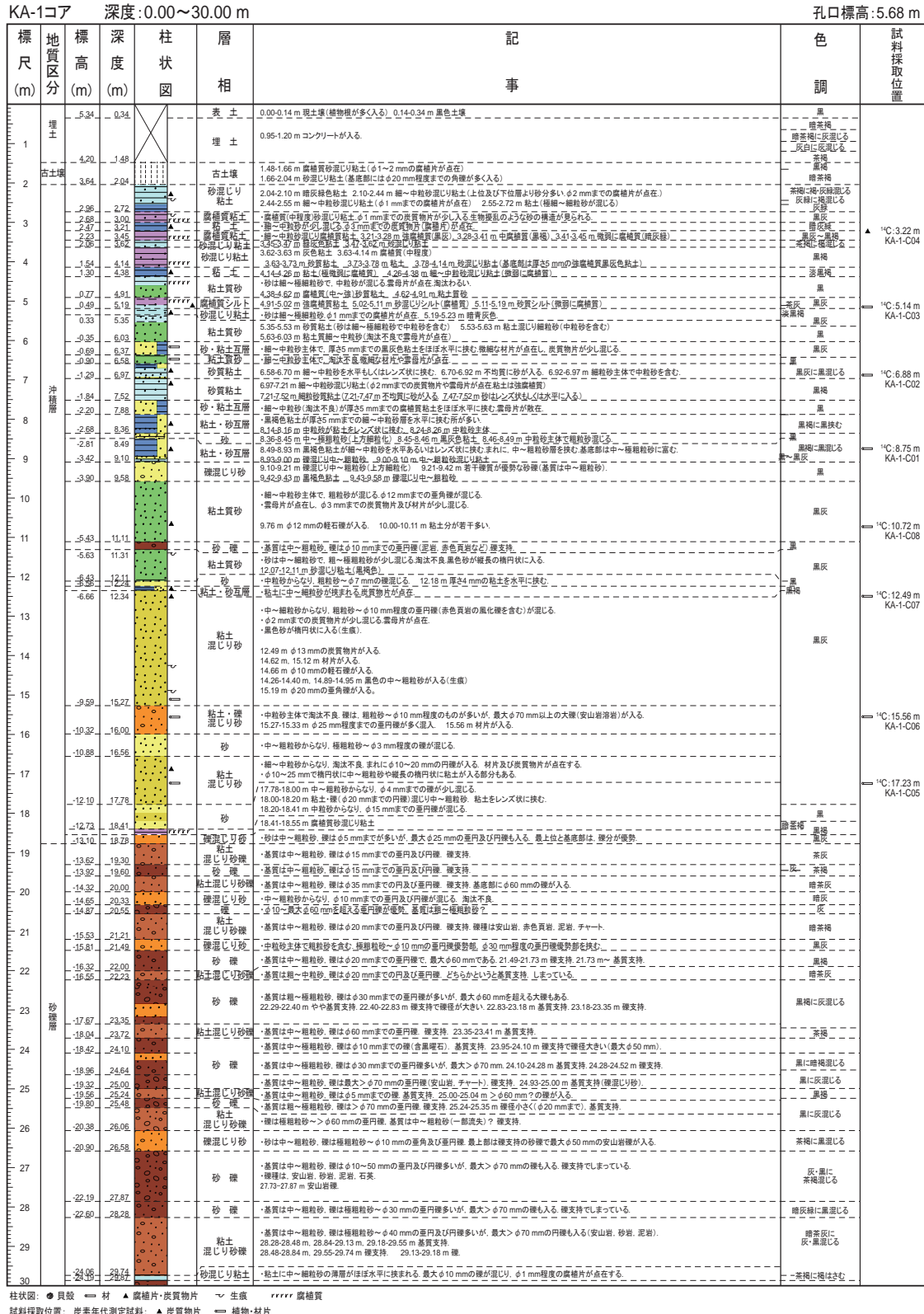
Fig. 11. (a) Depth-converted P-wave seismic reflection profile superimposed on the P-wave velocity structure inferred from tomography analysis using the seismic reflection record and (b) interpreted profile. No vertical exaggeration. The data were acquired with a hydraulic impactor source. Bold black lines in Fig. 11b show the projected position and length of cores KA-1 and KA-2.





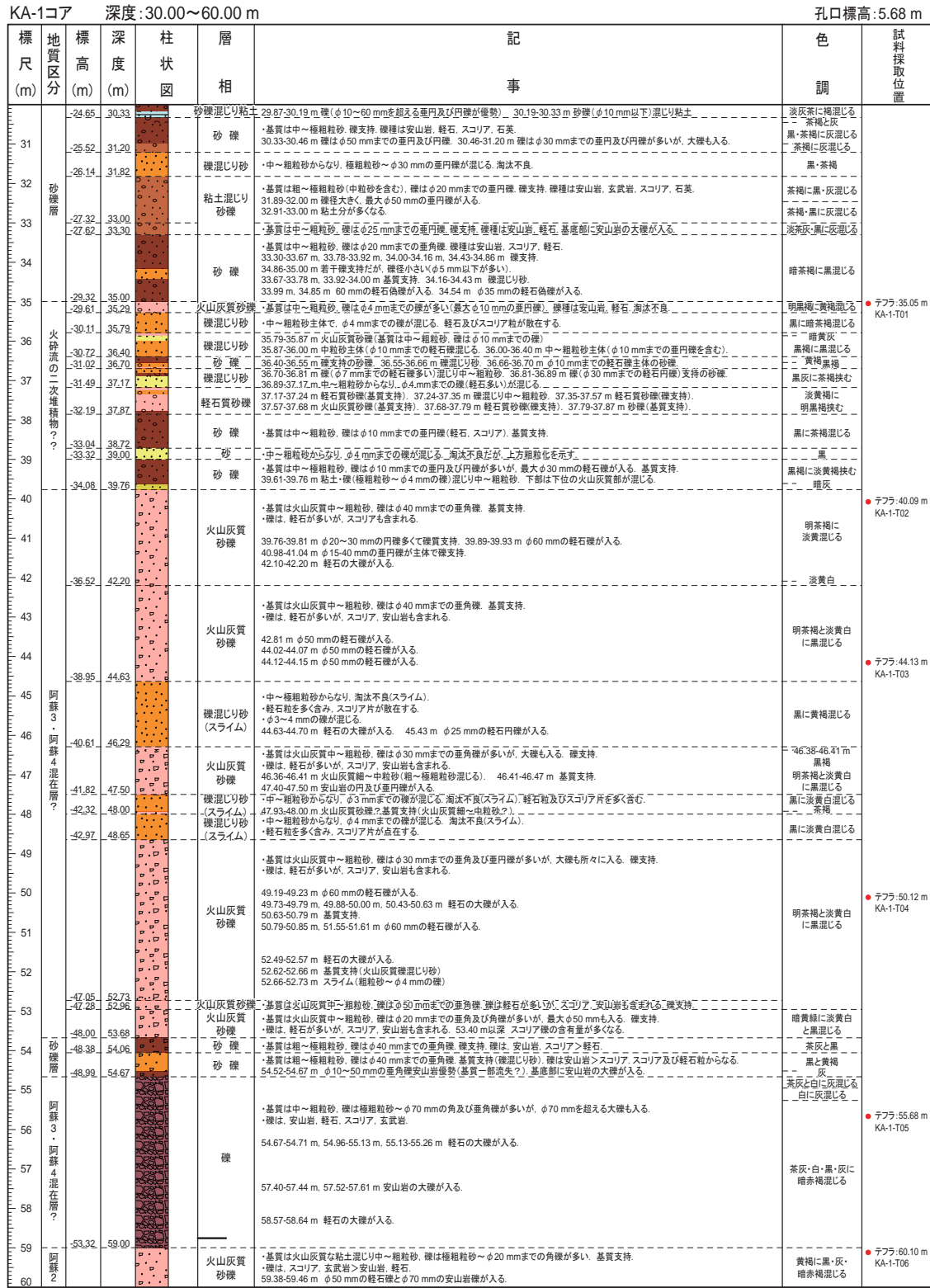
第12図 油圧インパクトを震源とした反射法地震探査による地下浅部の深度断面に、反射法探査記録を使用した屈折波トモグラフィ解析により推定されたP波速度構造を重ね合わせた図 (a) と解釈断面図 (b)。鉛直誇張10倍。第12図b中の黒色太線は、ボーリング掘削地点の投影位置と掘削長を示す。  
 Fig. 12. (a) Depth-converted P-wave seismic reflection profile superimposed on the P-wave velocity structure inferred from tomography analysis using the seismic reflection record and (b) interpreted profile. Vertical exaggeration is 10. The data were acquired with a hydraulic impactor source. Bold black lines in Fig. 12b show the projected position and length of cores KA-1 and KA-2.

a



第 13 図. KA-1 コアおよび KA-2 コアの地質柱状図とコア記載. ボーリングの位置を第 4, 11, 12 図に示す. (a) KA-1 コア深度 0~30 m. (b) KA-1 コア深度 30~60 m. (c) KA-1 コア深度 60~70 m. (d) KA-2 コア深度 0~30 m. Fig. 13. Geologic columnar sections and descriptions of cores KA-1 and KA-2. Location of cores is shown in Figs. 4, 11, and 12. (a) Core KA-1 (depth between 0 m and 30 m). (b) Core KA-1 (depth between 30 m and 60 m). (c) Core KA-1 (depth between 60 m and 70 m). (d). Core KA-2 (depth between 0 m and 30 m).

b



第13図。(続き)  
Fig. 13. (continued)

C

KA-1コア 深度:60.00~70.00 m 孔口標高:5.68 m

標尺 (m)	地質区分	標高 (m)	深度 (m)	柱状図	層相	記 事	色 調	試料採取位置
61	阿蘇 2	-55.42	61.10		火山灰質砂礫	<ul style="list-style-type: none"> <li>下部(50.75 m以深)は礫質支持で、下位ほど礫径が大きくなり(φ20~40 mmが入る)、礫質も多くなる。</li> <li>60.10 m φ15 mmの粒石礫が入る。60.44 m φ50 mmの安山岩礫が入る。60.94-61.00 m 礫質支持(礫混じり火山灰質砂)</li> <li>61.00-61.10 m 黄褐色火山灰質砂(火山灰)-粘土混じり細~中粒砂で、φ10 mmまでの歪角礫が混じる。</li> </ul>	黄褐色に黒・灰・暗赤褐色混じる	● テフラ:基質部 61.00-61.10 m KA-1-T07
62		-56.03 -56.32	61.71 62.00		弱風化安山岩	<ul style="list-style-type: none"> <li>弱風化安山岩で、コア肌荒れる。亀裂沿いに粘土化すすむ箇所もある。</li> <li>61.16-61.24 m φ3 mmまでの気泡が密集する(横長)。61.59-61.71 m φ10 mm(φ4 mmまでが多い)までの気泡が密集する。</li> <li>強風化安山岩で、赤褐色粘土化が進む。未風化岩では、φ2 mmまでの気泡が入る。</li> <li>φ10 mmまでの気泡が密集する。60°程度の亀裂が入る。</li> <li>62.00-62.37 m 横長の気泡が優勢。62.36-62.42 m φ60 mmの気泡が入る。</li> <li>62.37-62.49 m φ3 mmまでの気泡が多く、充填されている。62.49-63.00 m たて長の気泡が優勢。</li> </ul>	暗灰に淡黄混じる 暗灰 赤褐色に暗灰混じる	
63		-57.32 -57.78 -58.08 -58.39	63.00 63.46 63.76 64.07		安山岩	<ul style="list-style-type: none"> <li>63.00-63.06 m φ3 mmまでの気泡が少し入る。63.06-63.10 m φ10 mmまでの気泡が密集(斜めたて長)。63.10-63.14 m 気泡少産。</li> <li>63.14-63.17 m φ3 mmまでの気泡が密集。63.17-63.27 m φ2 mmまでの気泡が少し入る。63.27-63.46 m φ10 mmまでの気泡を多含。</li> <li>φ10 mmまでの気泡が密集する(斜め横長)。40°程度の亀裂が入る。</li> <li>63.76-63.86 m φ3 mmまでの気泡を多含。63.86-64.00 m φ3 mmまでの気泡密集。64.00-64.07 m φ2 mmまでの小気泡を多含。</li> <li>φ10 mmまでの気泡が密集する(横長、斜め横長)。下位ほど気泡は大きくなる。</li> <li>10°、60°、70°程度の亀裂が入る。</li> <li>64.67 m以深: φ20 mmの横長の気泡が入り、気泡の大きさ大きくなる。</li> </ul>	暗灰	
64					安山岩	<ul style="list-style-type: none"> <li>φ35 mmまでの気泡が多く入る(横長、斜め横長)。細長い気泡も多い(とくに65.22-66.00 m)。</li> <li>60°~70°、30°、45°、20°程度の亀裂が入る。</li> </ul>	灰	
65	碓氷川 溶岩	-59.54	65.22		安山岩			
66					安山岩			
67					安山岩			
68					安山岩			
69		-63.70 -64.32	69.38 70.00		安山岩	<ul style="list-style-type: none"> <li>68.73-69.08 m 80°~90°、0°~10°程度の亀裂が多く入る。</li> <li>69.31-69.38 m φ1 mmまでの小気泡が密集する。</li> <li>φ40 mmまでの気泡が多く入る(横長、斜め横長)。60°、40°程度の亀裂が入る。</li> </ul>		■ K-Ar, XRF 63.38-69.65m KA-1-1

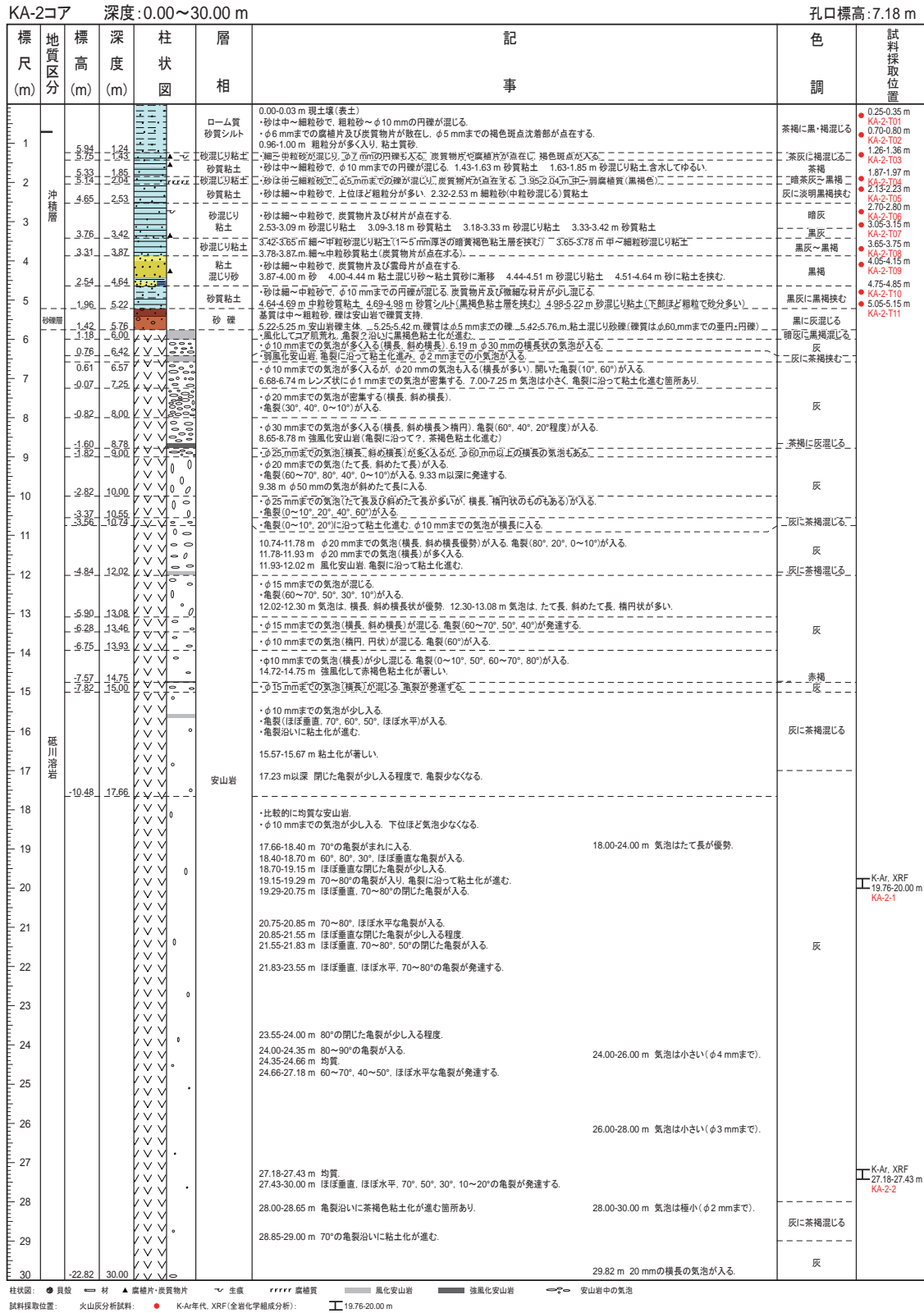
柱状図: 弱風化安山岩 安山岩中の気泡

試料採取位置: K-Ar年代, XRF(全岩化学組成分析): 69.38-69.65 m 火山灰分析試料: ●

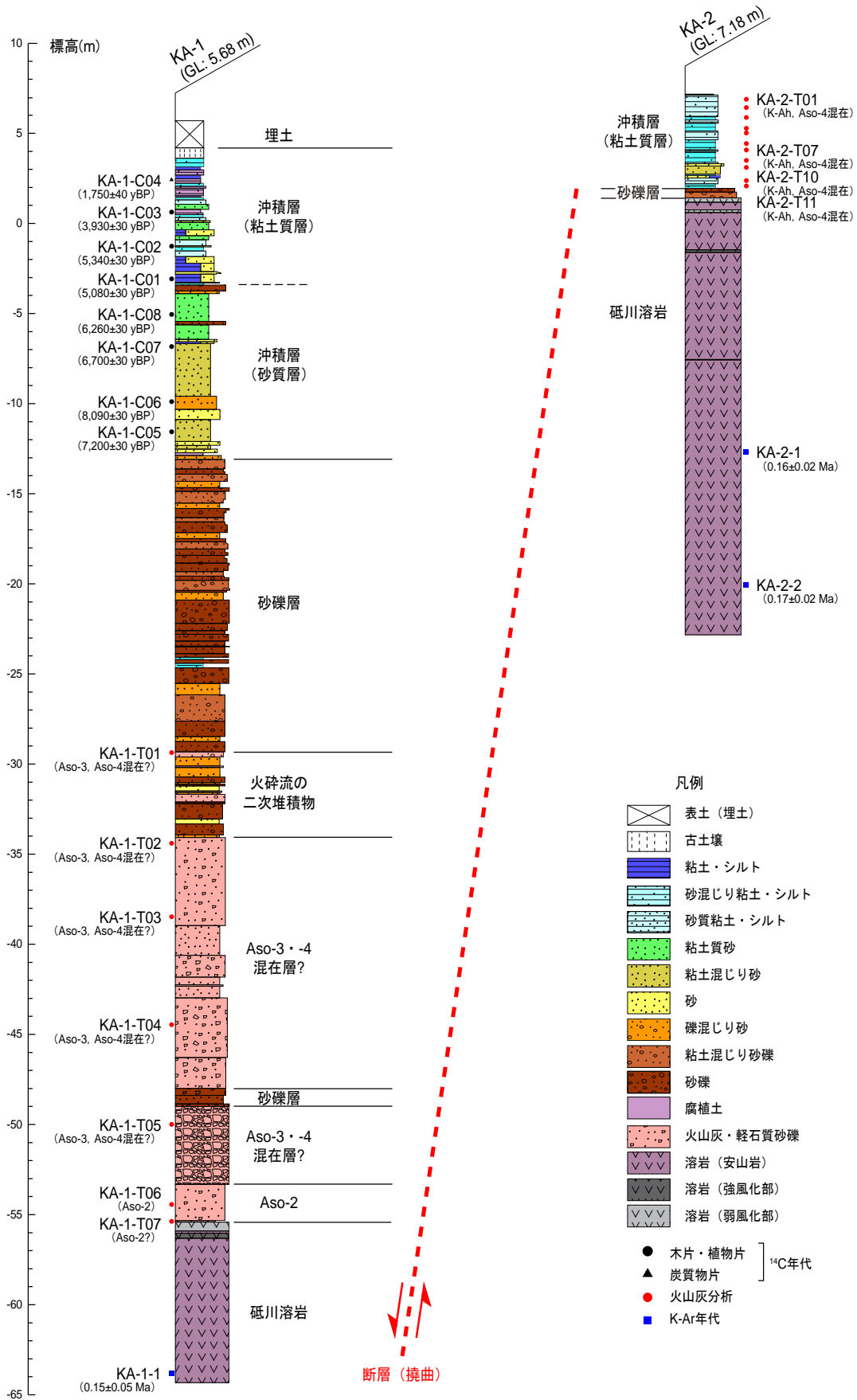
第13図. (続き)  
Fig. 13. (continued)

反射法地震探査およびボーリング調査に基づく布田川断層帯宇土区間東部の断層形状および活動性

d

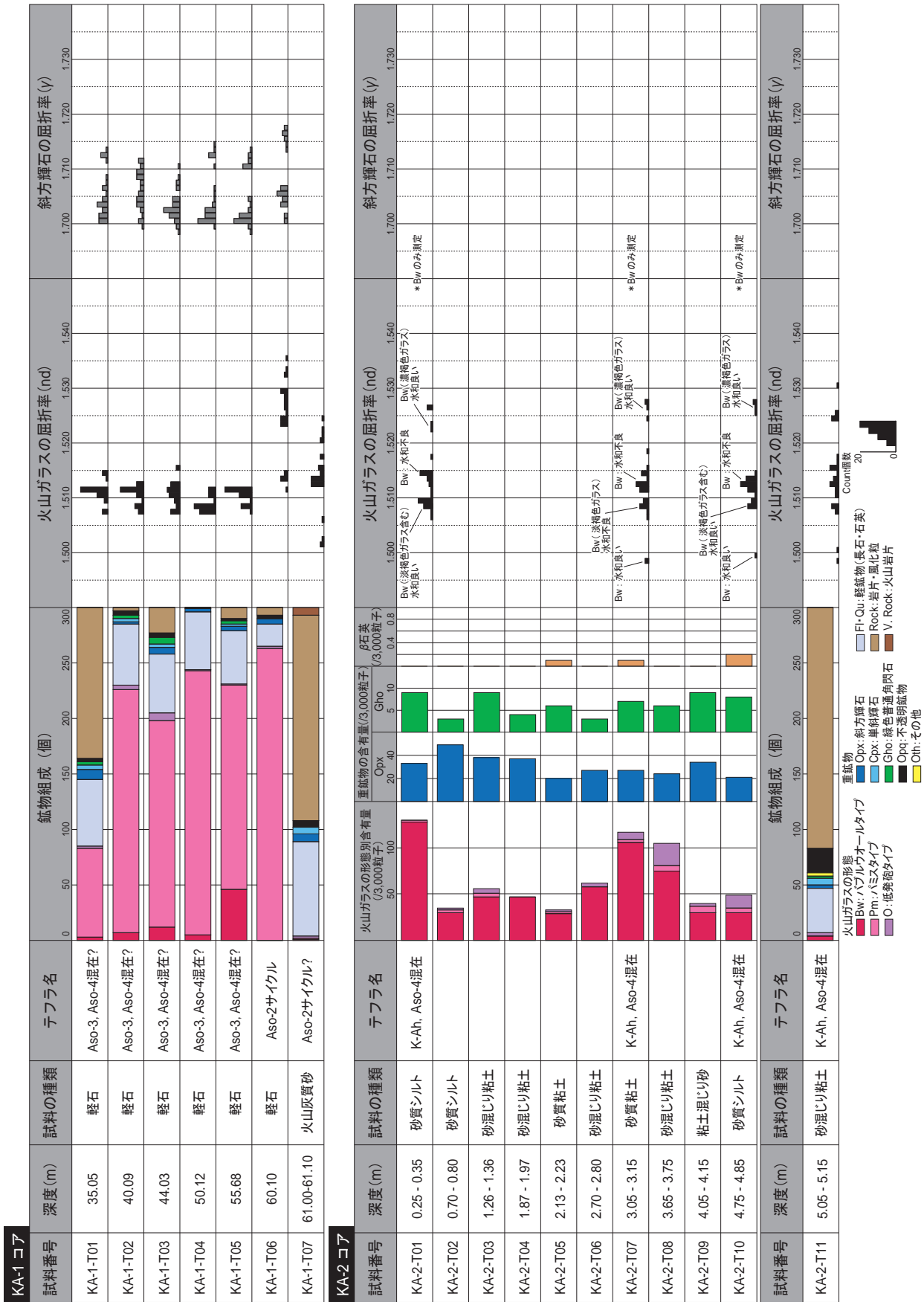


第13図. (続き)  
Fig. 13. (continued)

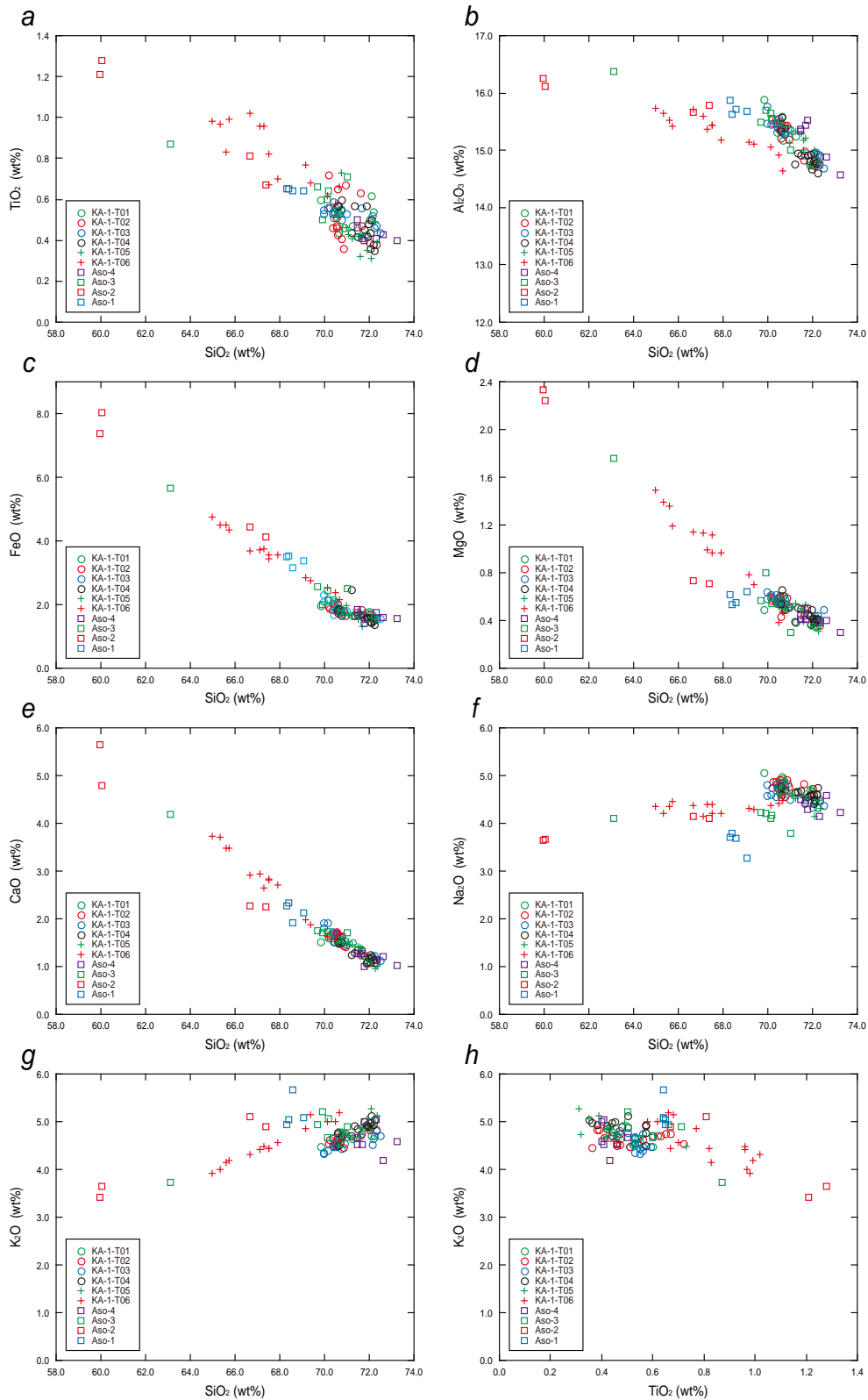


第 14 図. KA-1 コアおよび KA-2 コアの地質柱状対比図.

Fig. 14. Simplified geologic columnar sections of cores KA-1 and KA-2.



第 15 図. KA-1 コアおよび KA-2 コアのテフラ分析 (鉱物組成, 火山ガラスおよび斜方輝石の屈折率) 結果.  
 Fig. 15. Result of tephra analyses (count of minerals and measurement of refractive indexes of glass and orthopyroxene) of samples taken from cores KA-1 and KA-2.



第 16 図. KA-1 コアから採取された火山ガラスと阿蘇火砕流堆積物の火山ガラスの主要成分化学組成の比較. Aso-1, Aso-2, Aso-3 および Aso-4 テフラの火山ガラスの主要成分化学組成分は, 町田・新井 (2003), 長橋ほか (2004, 2007), 青木・町田 (2006) による. a) SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 図. b) SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図. c) SiO<sub>2</sub>-FeO 図. d) SiO<sub>2</sub>-MgO 図. e) SiO<sub>2</sub>-CaO 図. f) SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O 図. g) SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 図. h) TiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 図.

Fig. 16. Comparison of major element chemical compositions of volcanic glass shards taken from core KA-1 and those of the Aso pyroclastic flow deposits. Major element compositions of volcanic glass shards from the Aso-1, -2, -3, and -4 are after Machida and Arai (2003), Nagahashi *et al.* (2004, 2007) and Aoki and Machida (2006). a) SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> diagram, b) SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram, c) SiO<sub>2</sub>-FeO diagram, d) SiO<sub>2</sub>-MgO diagram, e) SiO<sub>2</sub>-CaO diagram, f) SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O diagram, g) SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram, h) TiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram.



a

KA-1 コア ( 深度 : 54 m-70 m )



第 17 図. KA-1 コアおよび KA-2 コアにみられる砥川溶岩の産状. (a) KA-1 コアの深度 54 m~70 m のコア写真.  
(b) KA-2 コアの深度 0 m~15 m のコア写真. (c) KA-2 コアの深度 15 m~30 m のコア写真.

Fig. 17. Photographs showing occurrence of the Togawa lava taken from cores KA-1 and KA-2. (a) Core KA-1 (depth between 54 m and 70 m). (b) Core KA-2 (depth between 0 m and 15 m). (c) Core KA-2 (depth between 15 m and 30 m).

b

KA-2 コア ( 深度 : 0-15 m )



第 17 図. ( 続き )  
Fig. 17. (continued)

C

KA-2 コア ( 深度 : 15 m-30 m )



第 17 図. ( 続き )  
Fig. 17. (continued)