

熊本県宇城市豊野町娑婆神峠北方における日奈久断層帯日奈久区間の 平均右横ずれ変位速度の推定

Estimation of average right-lateral strike-slip rate of the Hinagu section, Hinagu fault zone at north of Sabagami Pass, Kumamoto Prefecture

白濱吉起¹

Yoshiki Shirahama¹

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)

Abstract: At north of Sabagami pass, the NNE-trending Hinagu section of the Hinagu fault zone, having a predominantly right-lateral strike-slip component, crosses some terraces which formed after 90 ka. East-flowing small gullies incising into those terraces form terrace risers, which have recorded the cumulative lateral offset due to repeated faulting since their formation. I investigated an offset of each terrace riser and its formation age to estimate the averaged right-lateral slip rate of the Hinagu section. As a result of topographic classification, a right-lateral offset of 41 m was recognized at a terrace riser along a small gully that incises a formerly closed depression (terrace cd). Geological cross-sections oriented perpendicular to the trend of the fault were generated by arrayed boring surveys across the terrace cd and the incised gully. The geological structure as revealed by the cross-section strongly suggests that the closed depression was originally created as a pull-apart graben by the repeated movement of the faults that delimit the western and eastern margins of the depression. Detailed observations of sediments suggest that the sedimentary environment in the terrace cd changed from wetland to dryland in response to the gully incision that bring into the formation of the terrace riser. Radiocarbon dating and tephra analyses for the sediments indicate that the terrace riser that offset right-laterally by 41 m probably formed since 17487-24029 cal yBP. The average right-lateral slip rate of the Hinagu fault zone was estimated to be 1.7-2.3 m/kyr.

キーワード: 日奈久断層帯, 横ずれ断層, 段丘崖, 変動地形, 群列ボーリング調査, 熊本県
Keywords: Hinagu fault zone, strike-slip fault, terrace riser, tectonic geomorphology, arrayed boring survey, Kumamoto Prefecture

1. はじめに

1.1 これまでの研究と調査地の選定

日奈久断層帯は、北端の熊本県上益城郡益城町木山から南端の八代海に至る、北北東-南南西走向を示す総延長約 81 km の断層帯である (地震調査研究推進本部, 2013)。地震調査研究推進本部 (2013) によると、断層帯は主に右横ずれ断層で構成され、北から高野-白旗区間、日奈久区間、八代海区間の 3 つの区間に分けられる。平均変位速度は活断層の活動性を評価する上で重要な情報であるが、日奈久断層帯における右横ずれ平均変位速度は日奈久区間上の一地点で推定されているのみである。また、推定された値は定量的な編年手法を用いた検討はなされておらず信頼性が低い。そこで、著者は、文部科学省委託事業「平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な

活断層調査」の一環として日奈久断層帯日奈久区間における右横ずれ平均変位速度の推定を目的に、熊本県宇城市に位置する娑婆神峠の北方において地形地質調査およびボーリング調査を実施した (文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学, 2019)。本稿では、その調査結果について報告する。

日奈久断層帯における右横ずれ変位速度の推定は、日奈久区間に位置する熊本県宇城市小川町南小野南方の一地点における調査結果に基づく (千田, 1979)。千田 (1979) は、形成年代を 15000 yBP と推定した中位扇状地面を下刻する小河川の屈曲量 (右横ずれ変位約 12 m) から、右横ずれ平均変位速度を 0.8 m/kyr と見積もった。地震調査研究推進本部 (2013) では年代値の暦年較正を行い、平均変位速度 0.7 m/kyr と再計算した。しかし、ここでの中位扇状地面

の形成年代は、あくまで扇状地面を有明海研究グループ (1969) の報告する保田窪面に対比したときの相対年代であり、扇状地面の直接的な編年は行われていない。そもそも、保田窪面の編年が、最終氷期から最終間氷期にかけての温暖期に堆積した碎屑物に相当するという気候変動に基づいた推定であるため、大きな誤差を含む。また、1.2章で後述するように扇状地の形成年代と小河川の下刻が生じた時期は一致するとは限らない。つまり、変位が認められる小河川の形成年代からの厳密な推定は行われていないと言える。

横ずれ変位速度の推定には、横ずれ変位量が計測できる地形とその地形の編年が必要となる。日奈久断層帯沿いでは、右横ずれのセンスを示す河川の屈曲が多数認められている (千田, 1979, 熊原ほか, 2017, 後藤ほか, 2018)。特に熊本県宇城市豊野町下郷の娑婆神峠から南の日奈久区間では、断層は沖積低地と山地の境界に沿って延び、山地から流出する河川あるいは山地内において屈曲する様子が認められている。また、娑婆神峠の北側から高野-白旗区間北部の高木までの範囲では、低位~中位の段丘面が分布し (第1図A)、これらの段丘面の年代から変位速度の推定が可能とみられる。ただし、高野-白旗区間中央部では主断層の東側にこれと並走する断層が現れるため、断層帯の平均変位速度推定のためには、それらすべての断層線について変位速度を求めて合算する必要がある。これに対して、断層が分散しておらず、かつ段丘面に変位が認められる場所として挙げられるのが、日奈久区間北部の娑婆神峠からその北方の小畑までの範囲である (第1図B)。この範囲では、日奈久断層帯に沿って三角末端面や横ずれ谷、閉塞丘といった典型的な横ずれ変位地形が認められる (第1図B)。また、断層を横断して分布する段丘の段丘崖に右横ずれ変位が認められ、変位量の計測が容易である。本地点周辺の変動地形は、いくつかの先行研究でも着目され調査対象とされており、千田ほか (1991) 及び熊本県地域活断層調査委員会 (1997) による地形地質調査が実施されている。両研究では古地震履歴の調査が実施され、トレンチが掘削されたが、いずれも断層は確認されておらず、断層はトレンチ掘削範囲外にあると推定された。これらの研究では古地震履歴の解明に焦点が当てられ、平均変位速度の推定は行われていない。

本調査では、娑婆神峠から小畑の範囲を中心に、地形地質調査を行い地形分類図の作成を行った。その後、群列ボーリング調査を実施し、地質断面を推定するとともに断層線の位置を特定した。さらに、段丘崖を変位基準としたときの右横ずれ変位量を計測し、放射性炭素年代測定及び火山灰分析により推定された段丘崖の形成年代から平均変位速度を求めた。

1.2 河成段丘面による横ずれ変位速度の推定方法の概要

横ずれ断層による変位を受けた段丘面の横ずれ量の計測の指標としては、段丘崖がよく用いられる。この場合、段丘崖のずれから横ずれ変位速度を得るには、段丘崖が形成された年代の推定が必要となる。段丘崖の形成年代は、直接測定することが難しいため、通常段丘崖の上下に位置する地形面の形成年代から見積もられる。ただし、どちらの地形面の年代がより段丘崖の形成年代に近いかについては、その地域の地形形成過程に依り判断される場合が多い (例えば Cowgill, 2007; Carne *et al.*, 2011)。以下では、段丘崖に生じた右横ずれ変位を用いた変位速度の推定方法について簡単なモデル図を用いて説明する。

まず地形面 (高位面) が形成される (1: 第2図)。その後の河川の下刻によって、地形面が離水して段丘化し、河川の両岸に段丘崖が形成される (2: 第2図)。段丘崖の形成後、横ずれ断層が活動し、段丘崖に変位が生じる (3: 第2図)。この変位の保存には河川の側方侵食力が大きく影響する。すなわち、河川の侵食力が大きい場合、攻撃斜面側 (この場合、左岸側) の段丘崖は侵食されるため、変位が失われる。一方、上流側の河川幅が変化しない場合、対岸の段丘崖は侵食されにくいいため、変位が残る (4a: 第2図)。このため、その後新たな断層変位が生じると、右岸側と左岸側で変位量の不均衡が生じる (5a: 第2図)。このとき、攻撃斜面側の変位量を基準に平均変位速度を推定する場合は、段丘崖の年代として、その下側の地形面の年代を採用するのが適当である。一方、河川の侵食力が小さい、または殆どない場合、段丘崖が侵食されないため、左右両岸とも変位が残る (4b: 第2図)。こうした河川の状態が継続した場合、その後の断層変位が生じて、段丘崖に保存された変位量は右岸側と左岸側で等しい (5b: 第2図)。このときは、段丘崖の年代としてその上側の地形面の年代を採用するのが適当である。

まとめると、段丘崖の変位量を D 、段丘崖の上側の地形面の形成年代を T_H 、段丘崖の下側の地形面の形成年代を T_L としたとき、右横ずれ変位速度 S は次の (1) 式で表した範囲に必ず収まる。

$$D/T_H < S < D/T_L \quad (1)$$

段丘崖の変位が河川の侵食によって失われやすい場合、右横ずれ変位速度は D/T_L に近く、ずれが保存されやすい場合は D/T_H に近いと考えるのが妥当である。右横ずれ変位速度の正確な推定には、河川の側方侵食力の程度と、変位の保存されやすさを考慮する必要がある。

2. 地形形成時期及び形成過程の検討

2.1 娑婆神峠北方の地形・地質調査結果

娑婆神峠から小畑の区間にかけて実施した地形地質調査を元に作成した地形分類図を第3図に示した。北に流下する小熊野川の支流である谷口川と白岩山の間には複数の段丘面が分布する。小畑集落から南では、白岩山を含む南北方向に延びる稜線を分水界とする4本の小河川（小河川A～Dと呼ぶ）が段丘面を下刻しつつ、東へ流下し、谷口川に合流する。稜線と山麓線が南へ行くほど近接するため、小河川の集水域はどれも小さく、南ほど小さくなる傾向がある。小河川沿いの地質調査の結果、山麓沿いでは肥後変成岩類といった山地を構成する片麻岩と約90 kaに発生した阿蘇4火砕流の堆積物とみられる溶結凝灰岩（Aso-4）が認められた（Miyabuchi, 2009）。小河川Aと小河川Dに挟まれた領域の地形分類の結果、地形面は高位面（h面）、中位面（m面）、離水した閉塞凹地（cd面）、沖積面（al面）の4面に分類された。h面は凹凸が大きく、小河川Aと小河川Bの間に広く分布する一方、小河川Bと小河川Dの間では山麓沿いに細長く分布する。Aso-4は断層の両側に分布していることが確認され、h面が断層を横断して分布することは確実である（第3図）。m面は、小河川AとBに挟まれた段丘面の西側においてh面の南北縁に分布し、小河川BとDの間ではh面の東側に広く分布する。h面と比較して地表面の凹凸は小さい。小河川Cの右岸側では、シルト質の砂礫を主体とする厚さ3～3.5 mのm面を構成する段丘堆積物がAso-4を覆う様子が連続的に確認できる（第4図）。段丘堆積物中には級化構造や層理面が確認できるため、小河川Cの形成した扇状地の堆積物とみられる。小河川Bと小河川Dの間ではh面にアバットして堆積していると推定される。小河川A～Cでは幅50 m程度の細長いal面が河川沿いに形成されている。al面とm面またはh面との間の段丘崖の比高は5～15 m程度で、場所によっては急崖となる。小河川Bと農道との交差点より下流部では右岸側の崖がなだらかで、そこでal面の幅が狭まることから、北に向かって地すべりが生じた可能性がある。全ての小河川は、山地からの流出点付近でクランク状に右屈曲する。小河川Bの屈曲する地点では、南北方向に延びる幅約50 mの地溝状の凹地が形成され、かつて閉塞凹地（closed depression）であったことが推定される。その閉塞凹地は小河川Bによって下刻された結果段丘化し、cd面を形成している。

小河川Aの北側では、ほぼ農道沿いに西向き低崖が認められる。小河川A沿いのal面は農道から東側では分布が途切れることから、農道沿いに東上がりの成分を有する断層が延びると考えられる。断層の延長は小河川Aに沿った左岸側の段丘崖の屈曲点にほぼ一致しており、断層の活動によって生じた屈

曲と考えられる。屈曲点付近から南では小さい谷が約100 m南に延び、cd面に連続する。cd面の東側のh面は東へいくほど緩傾斜となるため、断層近傍で東に傾動していると見られる。cd面は東西両縁を急崖に挟まれていることから、断層はcd面の東西両縁に沿って南北方向に延びると推定される。cd面と小河川B沿いの沖積面との間の段丘崖には屈曲が認められ、断層活動によって形成された右ずれ変位と考えられる。cd面は小河川Bの南側にも分布する。小河川Bの右岸側の河岸にも不明瞭ではあるが、屈曲が認められるため、cd面西縁の断層は南へ延長すると見られる。一方、東縁の断層は小河川Bに屈曲が認められないため、横ずれ変位を与えていない可能性がある。千田ほか（1991）によるトレンチ調査は東縁の断層の延長部で実施されたが、明瞭な断層は認められなかった。したがって、東縁の断層は埋没しており、地表まで変位を与えていない可能性が高い。小河川Cとその屈曲箇所に向かって南西に延びる小河川Bの支流は、h面の西側に凹地を形成する。凹地の東側に沿って細長く延びるh面は、さらに東に分布するm面と比べて東への傾斜が大きく、東へ傾動していると考えられる。断層は傾動するh面の東側の崖に沿って南北に延びると考えられるが、正確な位置は不明である。小河川Cの右岸に沿って行った地質調査では、上流から続く肥後変成岩の分布が途切れ、下流側にAso-4が現れる箇所が認められた。崩積土によって境界そのものを見出すことができなかったが、境界地点付近を断層が通過すると考えられる。小河川Cから南側では、標高120～125 m付近を境に一旦山麓の東傾斜がゆるくなり、標高115～110 m付近からより傾斜の緩いm面へ連続する。傾斜の不連続部分の山地斜面においてAso-4が認められることから、山地とm面の間に東へ傾動するh面が南北に細長く分布しており、断層は山地とh面の境界に沿って延びると考えられる。小河川Dは山麓部において屈曲することから、断層は小河川Dと山麓部で交差した後、娑婆神峠へとつながる谷沿いに延びると考えられる。小河川Aの北側で逆向き低断層崖、小河川Aと小河川Dの間では高位面の東傾動が認められ、逆向き断層崖を形成することから、断層沿いでは主に東側隆起が生じているとみられる。小河川Bと交差する付近では、南北方向の地溝状地形が認められることから、断層がネガティブフラワー状に分岐し、プリアパート盆地が形成されている可能性がある。

小河川A～Dの中で、横ずれ変位速度推定に適した小河川は、小河川A、B及びCである（第3図）。小河川Dは右屈曲を示すものの、付近に断層を挟んで同一の地形面が存在しないため、変位量を正確に見積もることが出来ない。小河川Aについては、右岸側においてh面とal面とを境する段丘崖に約76 mの右ずれ変位が認められる。この変位はAso-4堆積

以降に形成されたことは間違いない。この約 76 m の右ずれを示す段丘崖は、小河川 A の右岸側に位置するため、h 面形成以降の変位が保存されている可能性があるが、下刻が生じた正確な時期は不明である。小河川 B の左岸側については、現在は宅地造成によって断層近傍の西側（上流側）が改変されているが、1970 年代の空中写真では、cd 面と al 面との段丘崖に約 41 m の右横ずれ変位が確認される（第 3 図）。流域が狭いことと、後述するように断層崖の屈曲の位置と断層の位置が近接することから、段丘崖の侵食はほとんど生じていないと考えられ、段丘崖のずれは cd 面が離水して以降の変位を記録していると推定される。小河川 C は、全体として右屈曲しているものの、変位基準が認定しづらい。西側の断層トレースの西方約 50 m における小河川 C の南北河岸（CN, CS）と、小河川 C と断層が交差する地点（CN', CS'）をずれの基準とすると、南北の川岸ではそれぞれ約 71 m, 約 79 m の右横ずれ変位が計測される（第 3 図）。基準点の選定に不確定要素が大きいため、小河川 A の右岸と小河川 B の左岸で計測した 2 地点と比較すると信頼性が低い。小河川 C では、山地側に沖積面が形成されていることや流域が狭いため、河川の侵食力は小さく、変位が失われまいと考えられ、h 面の離水後の変位が記録されていると考えられる。ただし、離水の時期は不明である。

こうした段丘崖の地形的特徴から、横ずれの変位速度の推定には河川 B の左岸の段丘崖が最適と判断し、ボーリング調査を実施した。

2.2 ボーリング調査結果

地形から読み取れる段丘崖の変位と断層の位置関係を明確にすること、及び cd 面と al 面を境する段丘崖の編年のため、小河川 B 左岸側の cd 面と小河川 B 沿いの al 面において群列ボーリングを実施した（第 5 図）。cd 面上では、SBG-1 および SBG-5 の 2 本のボーリングに加え、SBG-H1~H5 の 5 本のハンドボーリングを実施した。al 面上では SBG-2~SBG-4 の 3 本のボーリングを実施した。ボーリング調査結果は第 6 図および第 7 図にまとめ、第 8 図に推定される地質断面を示した。

cd 面上のボーリング位置は、地溝状凹地を東西に横切るように設定した。東西両縁に位置する SBG-1, SBG-H3 及び SBG-H4 地点では、表層 1.5~2.0 m は腐植質シルト~褐色シルト層であったが、その下部に Aso-4 とみられる溶結凝灰岩が認められた。凹地中央部の SBG-H1, SBG-H2 及び SBG-H5 地点では、深度 3 m 程度までは腐植質シルト~褐色シルト層が続き、Aso-4 は認められなかった。SBG-5 地点において深度 13 m まで掘削した所、10.8 m 以深から Aso-4 とみられる安山岩や溶結凝灰岩が認められた。SBG-5 地点で確認された Aso-4 上面深度は、同層からなる周辺の h 面に対して凹地内部が 16 m 以上落ち

込んでいることを示す。凹地内部でも東西両縁に対して 10 m 近く落ち込んでいる。このような Aso-4 上面深度の急激な変化から、SBG-H3 と H2 の間に東側低下の断層が、また SBG-H4 と H5 の間に西側低下の断層が位置すると考えられる（第 8 図 A）。中央部を落ち込ませる断層が地溝状凹地の両縁に存在することは、右横ずれ運動に伴うプリアパート盆地として閉塞凹地が形成されたという変動地形に基づく推定と一致する。

断層に挟まれた沈降側の堆積物では、上から一枚目の腐植質シルトに地溝状凹地の中央部に向かって厚みを増す傾向が認められた（第 8 図 A）。地質断面では同様の傾向が累積していると仮定して下位の地層境界を推定したが、SBG-5 コア以外に深度 3 m 以深の地層分布を規定する情報はない。地形断面は h 面が凹地内部に向かって撓み下がる様子を示しており、ネガティブフラワー状に分散する断層が複数存在するか、Aso-4 が凹地中央部に向かって引きずり込まれている可能性がある。

群列ボーリングが示唆する西側の断層の位置と段丘崖の変位の位置を比較すると、ほぼ一致する（第 3 図）。これは、小河川 B の侵食力が段丘崖の変位量を消失させる、あるいは変位した段丘崖の位置をずらすほど大きくないことを意味しており、第 2 図の 5b の左岸側に相当する。段丘崖のずれの計測にあたっては、閉塞凹地の外側まで延びる小河川 B の左岸側の崖を基準にしているため、断層帯全体の変位速度を計測していると考えられる（第 3 図）。

SBG-5 コアは下位から Aso-4, Aso-4 の二次堆積物を含むシルト層、砂礫混じりのシルト層となり、時々片麻岩の礫を含む。深度 6.1 m~4.45 m のシルトはそれより浅い深度のシルトと比較すると均質で砂礫の含有率が低く、粘土分が多い。時々河川性の礫が含まれるものの、主として湿地性の堆積物と推定される。その上位には深度約 4.45 m に明瞭な境界を伴って腐植質シルトが堆積し、三枚の腐植土層を挟んで表土となる。淘汰の悪い砂礫を含んだシルト層で、風成堆積物と斜面堆積物の入り混じった堆積物と見られる。深度約 4.45 m を境に堆積物の変化が認められることから、腐植土層が形成される時期には離水していたと考えられる。

沖積低地で掘削した SBG-2~4 孔のうち、SBG-2 及び SBG-4 地点は地溝の外側、SBG-3 地点は地溝の内側に選定した。SBG-3 地点及び SBG-4 地点は造成地内で掘削しているため、表層に厚い埋土が認められた。SBG-2 地点では、深度 0.88 m まで埋土、深度 4.4 m まで湿地堆積物で、深度 4.4 m 以深から片麻岩の礫と片麻岩の岩体が認められた。SBG-3 地点のコアは上から深度 1.70 m までは埋土、深度 1.70~5.20 m までは湿地堆積物、深度 5.20 m 以深は河川堆積物が認められた。湿地堆積物の上面にはかつての水田耕作土も含まれていると考えられる。SBG-2 地点にお

いては河川堆積物がほぼ認められないのに対し、SBG-3 地点では、4 m 以上の厚さで堆積している。SBG-3 地点における厚い河川堆積物層の存在は、SBG-3 地点が地溝内部に位置しており、断層運動に伴う沈降により河川堆積物が集積したためと考えられる。SBG-4 地点は、3.91 m までは Aso-4 が認められる。しかし、ボーリングコアや露頭で確認された Aso-4 と比較すると固結度が低く、SBG-3 地点の埋土層中にも火山砕屑岩が含まれていることから、周囲の Aso-4 を利用した埋土と推定される。それより下位は、一旦湿地堆積物を挟んだのち、深度 4.82 m から流域の肥後変成岩起源と推定される石英片が含まれ始めるため、河川性堆積物が主体となると考えられる。

2.3 火山灰分析及び放射性炭素年代測定結果

cd 面の離水年代および al 面を構成する地層の堆積年代を推定するため、掘削したボーリングコアから、放射性炭素 (^{14}C) 年代測定及び火山灰分析のための試料を採取した。 ^{14}C 年代測定は東京大学大気海洋研究所の横山研究室の所有する加速器質量分析装置を用いて測定を行った。以下に示す ^{14}C 年代値は OxCal v4.3.2 (Bronk-Ramsey, 2009) により IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013) を参照して暦年較正を行って得られた誤差 1σ の範囲の値である (第 1 表)。火山灰分析は (株) 古澤地質に依頼し、火山ガラスの洗い出し、プレパラートの作成、鉱物組成分析、屈折率測定を実施した (第 2 表及び第 9 図)。一部の試料については主成分分析を行った (第 10 図)。

cd 面で掘削した SBG-H1 のコアから採取した試料は 1410~1065 cal yBP, SBG-H2 コアから採取した試料は、12722~1557 cal yBP の年代値を示した。深度 1.5 m から採取した試料と深度 2.1 m から採取した試料が示す年代値は 12722~7328 cal yBP と、SBG-H1 コアと同深度付近の試料が示す年代と比較して古く、かつ年代の逆転が認められた (第 8 図 A)。これらは SBG-5 コアで認められた 2 枚目の腐食土層に相当する堆積物と考えられる。SBG-1 コアでは、Aso-4 中の深度 2.56 m にほぼ水平なすべり面が認められ、小規模な地すべりが生じた可能性が示唆される (第 7 図 A)。SBG-5 コアから採取した試料は年代測定の結果、39132~1078 cal yBP の年代が得られ、概ね下位ほど古い年代値を示した。離水年代は深度 3.0 m から採取した試料 SBG-5-b300 と上から三枚目の腐植土層直下の深度 4.5 m から採取した試料 SBG-5-b450 の年代から、28610~15152 cal yBP と推定される。深度 5.7 m から採取した試料 SBG-5-b570 は SBG-5-b450 より新しい年代を示しており、SBG-5-b450 が古い炭素により汚染されていると考え、離水年代は 24296~15152 cal yBP と推定される。

al 面で掘削した SBG-2 のコアの深度 4.1 m 及び深度 4.4 m からは、1173~796 cal yBP の年代値が得ら

れた。年代がやや逆転するのは、約 950 年前にごく短時間で堆積したためと推定される。SBG-3 コアの湿地堆積物の下面から得られた試料 SBG-3-510 は 1863-1710 cal yBP, 河川堆積物中の試料 SBG-3-760 は 17675-15375 cal yBP を示した。SBG-4 コアの深度 5.9 m から採取した試料は 14076-13768 cal yBP を示した。深度 5.8 m 及び 6.0 m には火山灰質の堆積物が認められたことから、火山灰分析を行ったところ、主に Aso-4 で構成されていることが明らかとなった (第 9, 10 図)。また、火山ガラスの形態、屈折率測定、主成分元素組成の結果によると、始良 Tn 火山灰 (町田・新井, 2003) 及び鬼界一アカホヤ火山灰 (K-Ah) (町田・新井, 2003) に相当する値を示す粒子が僅かに含まれていた。しかし、K-Ah 相当の屈折率を示す粒子は 1 粒子のみであることと、 ^{14}C 年代との整合性から、深度 5.8~6.0 m の火山灰質の堆積物は 14 ka 頃に堆積した Aso-4 の二次堆積物と考えられる。

2.4 推定される地形形成過程

地形判読、地形地質踏査およびボーリング調査の結果、調査地点では次のような地形形成過程が推定される。

1. 約 90 ka: 阿蘇 4 火砕流堆積物による h 面の形成。
2. 約 90 ka 以降, 24~15 ka 以前: 小河川 B 付近での右横ずれ運動に伴うプルアパート盆地としての閉塞凹地が形成され、湿地環境下において小河川 B から砕屑物が供給されるが、下刻には至らない。小河川 A や小河川 C は高位面を下刻し、中位面が形成される。
3. 24~15 ka: 閉塞凹地において小河川 B の下刻により cd 面が離水し、段丘崖を形成。
4. ~現在: 断層活動の繰り返しにより小河川 B 左岸側の段丘崖に約 41 m の右ずれ変位が形成される。また、河川沿いに al 面が形成される。

3. 日奈久断層帯日奈久区間の右横ずれ変位速度の検討

ここでは、小河川 A~C の示す右横ずれ変位の形成時期について、調査結果を元に検討し、横ずれ量とあわせて平均変位速度を見積もる。なお、千田 (1979) では、本調査で対象とした地域において小河川の右横ずれ変位を報告しているが、Aso-4 は段丘を薄く覆っているのみで、小河川の変位は基盤岩に生じた阿蘇 4 火砕流発生以前からの変位と解釈し、変位速度の推定は行っていない。しかし、本調査の結果、断層東側の小河川においては Aso-4 のみが認められ、肥後変成岩や Aso-4 に覆われた堆積物は認められなかった。したがって、阿蘇 4 火砕流は厚く本地域を覆っており、Aso-4 火砕流以前の地形は保存されていないと判断される。小河川 A の右岸の段丘崖の変位約 76 m は、Aso-4 が堆積した約 90 ka 以

降に生じたことは確実で、平均変位速度は 0.84 m/kyr より大きいと考えられる。小河川 C の段丘崖の変位 $71\sim 79 \text{ m}$ についても約 90 ka 以降に形成されたと考えられるため、 $0.79\sim 0.88 \text{ m/kyr}$ より大きい。小河川 C から得られた値は、上述したように他の小河川と比較して信頼性が低いものの、小河川 A から得られた値とほぼ一致する。このことから、小河川 A 及び小河川 C については、h 面の下刻が同時期に生じ、それ以降の変位が保存されていると考えられる。h 面の下刻が生じた時期は約 90 ka 以降としか言えないため、ここで得られた平均変位速度は理論上 (1) 式の左辺であり、取りうる値の下限値である。

小河川 B は、SBG-5 コアが示すように、下刻が生じるまでは閉塞凹地に流入する河川であったと考えられる。その凹地が下刻されて形成された段丘崖には、cd 面が段丘化して以降の変位が蓄積されてきたはずである。SBG-3 地点では Aso-4 は認められないため、河川堆積物は小河川 B が閉塞凹地を下刻した後堆積した堆積物と考えられる。したがって、SBG-3 コアの示す最も古い年代 $17675\sim 15375 \text{ cal yBP}$ は cd 面の下刻がそれ以前に生じたことを示している。離水後の堆積物とみられる SBG-5-b300 の示す ^{14}C 年代はそれより新しく、総合的な結果である。地形的にみて左岸側の段丘崖はほとんど侵食されていないことから小河川 B の側方侵食力は小さいと考えられ、第 2 図の 5b の条件を満たす。したがって、cd 面の離水年代は、ほぼ段丘崖の形成年代を示すといえる。沖積堆積物の示す最も古い年代 $17675\sim 15375 \text{ cal yBP}$ と、離水前の堆積物の示す最も新しい年代 $24296\sim 24088 \text{ cal yBP}$ から、離水が生じたと考えられる期間を OxCal 4.3 を用いてベイズ統計によって求めると、 $24029\sim 17487 \text{ cal yBP}$ (誤差 1σ) となる。段丘崖が示す変位約 41 m と合わせて、右ずれ平均変位速度は $1.7\sim 2.3 \text{ m/kyr}$ と見積もられる。

小河川 A および C が示す右横ずれ変位速度 $0.79\sim 0.88 \text{ m/kyr}$ は、これまでの推定値 0.7 m/kyr に近い値である。しかし、これらはあくまで下限値であることを考慮すれば、小河川 B から得られた結果と矛盾せず、本地点における日奈久断層帯日奈久区間の右横ずれ平均変位速度は $1.7\sim 2.3 \text{ m/kyr}$ と推定される。この結果は、本調査地点南方の小川町南小野付近で報告された値と比較して $2\sim 3$ 倍大きい。両地点が近接していることを考慮すると、この齟齬は、千田 (1979) が指標とした扇状地の形成年代がより新しいか、扇状地が下刻された時期と形成時期に隔たりがあったためと考えられる。日奈久断層帯日奈久区間の一回の変位量は約 3 m 程度と推定されている (地震調査研究推進本部, 2013)。この値を用いて今回推定された平均変位速度から活動間隔を推定すると、おおよそ $1800\sim 1300$ 年となり、従来の推定 ($3600\sim 11000$ 年) より高頻度であることが示唆される。この結果は、2016 年熊本地震の発生後に日奈久断層帯

で実施されたトレンチ調査の結果と整合的である (文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学, 2019)。

4. まとめ

日奈久断層帯日奈久区間は、熊本県宇城市豊野町の娑婆神峠から小畑集落周辺において、9 万年前以降に形成された段丘面とそれを下刻する河川が形成した段丘崖に右横ずれ変位を生じさせている。著者は段丘崖の変位の計測と段丘崖の上下の地形面の編年により、右横ずれ平均変位速度の推定を試みた。地形調査の結果、北北東-南南西に長軸をもつ閉塞凹地状の段丘面を下刻する河川が形成した段丘崖に 41 m の変位が認められた。また、地質調査と閉塞凹地内及び下刻した河川に沿って分布する沖積面において群列ボーリングを実施した結果、閉塞凹地の東西両縁付近に断層トレースが推定された。また、閉塞凹地と沖積面で実施したボーリングのコアから採取した試料について放射性炭素年代測定及び火山灰分析を実施した結果、閉塞凹地の離水つまり段丘崖の形成は、 $24029\sim 17487 \text{ cal yBP}$ に生じたことが推定された。右横ずれ変位量と段丘崖の形成年代をもとに、娑婆神峠から小畑集落周辺における日奈久区間の右横ずれ変位速度は $1.7\sim 2.3 \text{ m/kyr}$ と見積もられ、本調査地点南方の小川町南小野付近で従来報告されている推定値と比較すると大きい値を示した。

謝辞 本研究は東京大学大気海洋研究所共同利用研究 (受付番号 152, 2019) として行われた。本調査に当たり、調査への協力をしてくださった現地住民の方々、(株) ダイヤコンサルタントの亀高正男氏、小峰佑介氏ならびに岸山碧氏に厚く御礼申し上げます。

文献

- 有明海研究グループ (1969) 九州地方の第四系。地団研専報, 15, 411-427.
- Bronk-Ramsey, C. (2009) Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates, *Radiocarbon*, 51, 337-360.
- Carne, R. C., Little, T. A., Rieser, U. (2011) Using displaced river terraces to determine Late Quaternary slip rate for the central Wairarapa Fault at Waiohine River, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 54, 2, 217-36.
- 千田 昇 (1979) 日奈久断層の第四紀後期における断層運動, *東北地理*, 31 (3), 172-179.
- 千田 昇・堤 浩之・田辺 嵐・改發昌芳・諸岡達也 (1991) 1990 年日奈久断層系小野断層 (下郷地区) トレンチ調査, *活断層研究*, 9, 98-102.
- Cowgill, E. (2007) Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip

- faulting: Revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China. *Earth and Planetary Science Letters* 254, 3, 239–55.
- 後藤秀昭・楳原京子・熊原康博・小山拓志・千田 昇・中田 高 (2018) 1 : 25,000 都市圏活断層図「八代 (改訂版)」, 国土地理院技術資料, D・1-No.868.
- 地震調査研究推進本部 (2013) 布田川断層帯・日奈久断層帯の長期評価 (一部改訂), 地震本部, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/93_futagawa_hinagu_2.pdf (2019年4月3日参照)
- 国土地理院 (2019) 電子国土 Web, <https://maps.gsi.go.jp/> (2019年4月26日参照)
- 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.
- 熊本県地域活断層調査委員会 (1997) 熊本県 平成9年度 日奈久断層に関する調査成果報告書, 地震本部, <https://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Kumamoto2frm> (2019年4月3日参照).
- 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.
- Miyabuchi, Y. (2009) A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan, *Sedimentary Geology*, 220, 169–189.
- 文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学 (2019) 平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成28~30年度成果報告書, 地震本部, https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kumamoto_sogochousa/kumamoto_sogochousa-h28-h30/ (2019年9月26日参照).
- 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., Haffidason, 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.

(受付 : 2019年7月31日, 受理 : 2019年11月5日)

第 1 表. 放射性炭素年代測定結果.
Table 1. Results of ¹⁴C dating.

Sample ID	Core	Material	Code No.	δ ¹³ C (‰)	Conventional ¹⁴ C age (yBP)	Calibrated age (cal yBP; ±1σ)
SBG-2-410	SBG-2	sediment	YAUT-045302	-25.3	1134 ± 29	1173 - 965
SBG-2-440-1	SBG-2	sediment	YAUT-045303	-30.1	953 ± 27	927 - 796
SBG-3-510	SBG-3	sediment	YAUT-045304	-19.4	1841 ± 25	1863 - 1710
SBG-3-760	SBG-3	sediment	YAUT-045812	-80.7	13679 ± 407	17675 - 15375
SBG-4-590	SBG-4	sediment	YAUT-045813	-26.1	12071 ± 50	14076 - 13768
SBG-5-b120	SBG-5	sediment	YAUT-046436	-18.1	1216 ± 32	1220 - 1078
SBG-5-b300	SBG-5	sediment	YAUT-046437	-28.9	12795 ± 51	15315 - 15152
SBG-5-b450	SBG-5	sediment	YAUT-046438	-13.9	24400 ± 98	28610 - 28323
SBG-5-b570	SBG-5	sediment	YAUT-046613	-28.7	20126 ± 51	24296 - 24088
SBG-5-b650	SBG-5	sediment	YAUT-046615	-24.9	28709 ± 88	33037 - 32664
SBG-5-b880	SBG-5	sediment	YAUT-046616	-24	27614 ± 80	31459 - 31271
SBG-5-b960	SBG-5	sediment	YAUT-046439	-24.6	34419 ± 209	39132 - 38635
SBG-H1-110	SBG-H1	sediment	YAUT-045305	-21.5	1221 ± 21	1255 - 1065
SBG-H1-130	SBG-H1	sediment	YAUT-045306	-22	1497 ± 17	1410 - 1341
SBG-H2-150	SBG-H2	sediment	YAUT-045311	-23.5	10700 ± 28	12722 - 12590
SBG-H2-210	SBG-H2	sediment	YAUT-045817	-91.3	7588 ± 629	10175 - 7328
SBG-H2-50	SBG-H2	sediment	YAUT-045309	-22.3	1707 ± 19	1694 - 1557

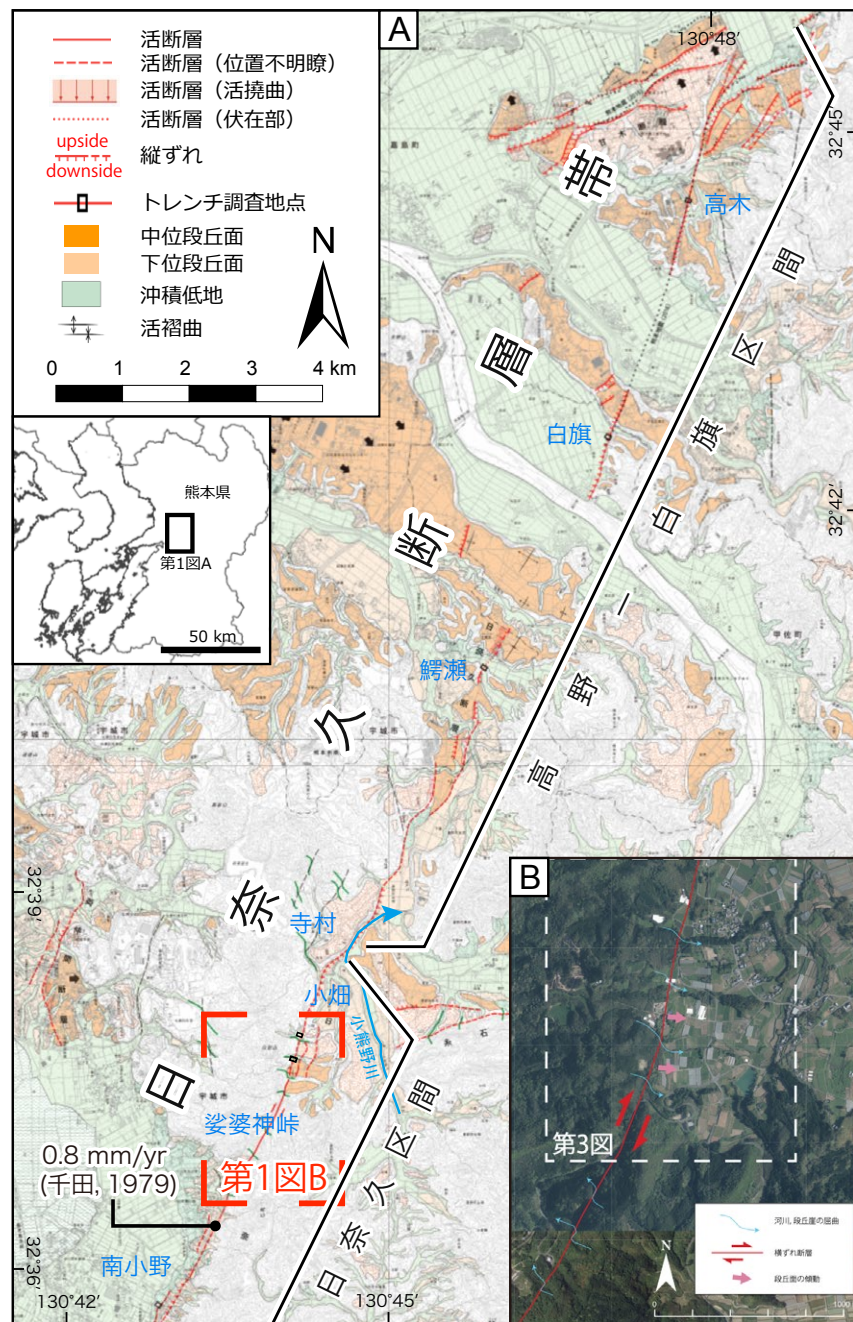
*Oxcal v4.3.2 Bronk Ramsey (2017); IntCal 13 atmospheric curve (Reimer et al., 2013)

第 2 表. 火山灰分析結果.
Table 2 Results of volcanic ash analyses.

試料名	Volcanic Glass			Light Mineral	Heavy Mineral						Rock	V.Rock
	Bw	Pm	O	Fl・Qu	Opx	Cpx	Gho	Ol	Ap	Opq		
SBG-4-580	1	0	0	58	6	2	3	0	5	16	209	0
SBG-4-600	4	0	0	120	11	3	3	0	8	24	127	0

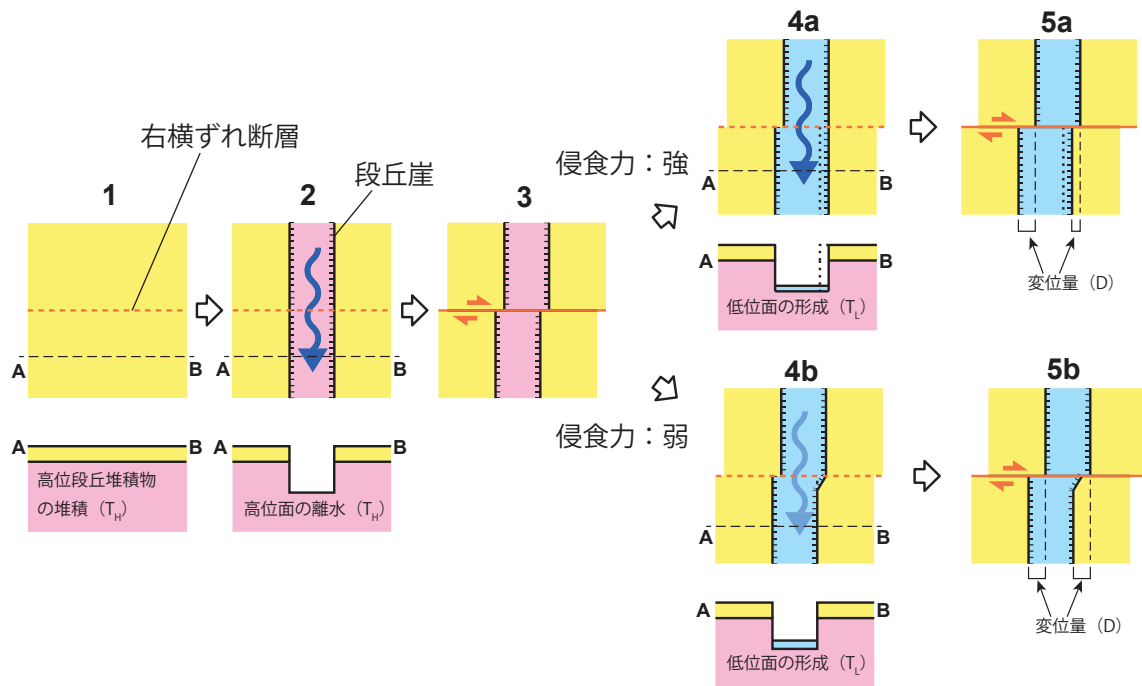
Bw: バブルウォールタイプ
Pm: パミスタイプ
O: 低反発タイプ

Fl・Qu: 長石・石英
Opx: 斜方輝石
Cpx: 単斜輝石
Gho: 緑色普通角閃石
Ol: カンラン石
Ap: 燐灰石
Opq: 不透明鉱物
Rock: 岩片・風化粒
V.Rock: 火山岩片



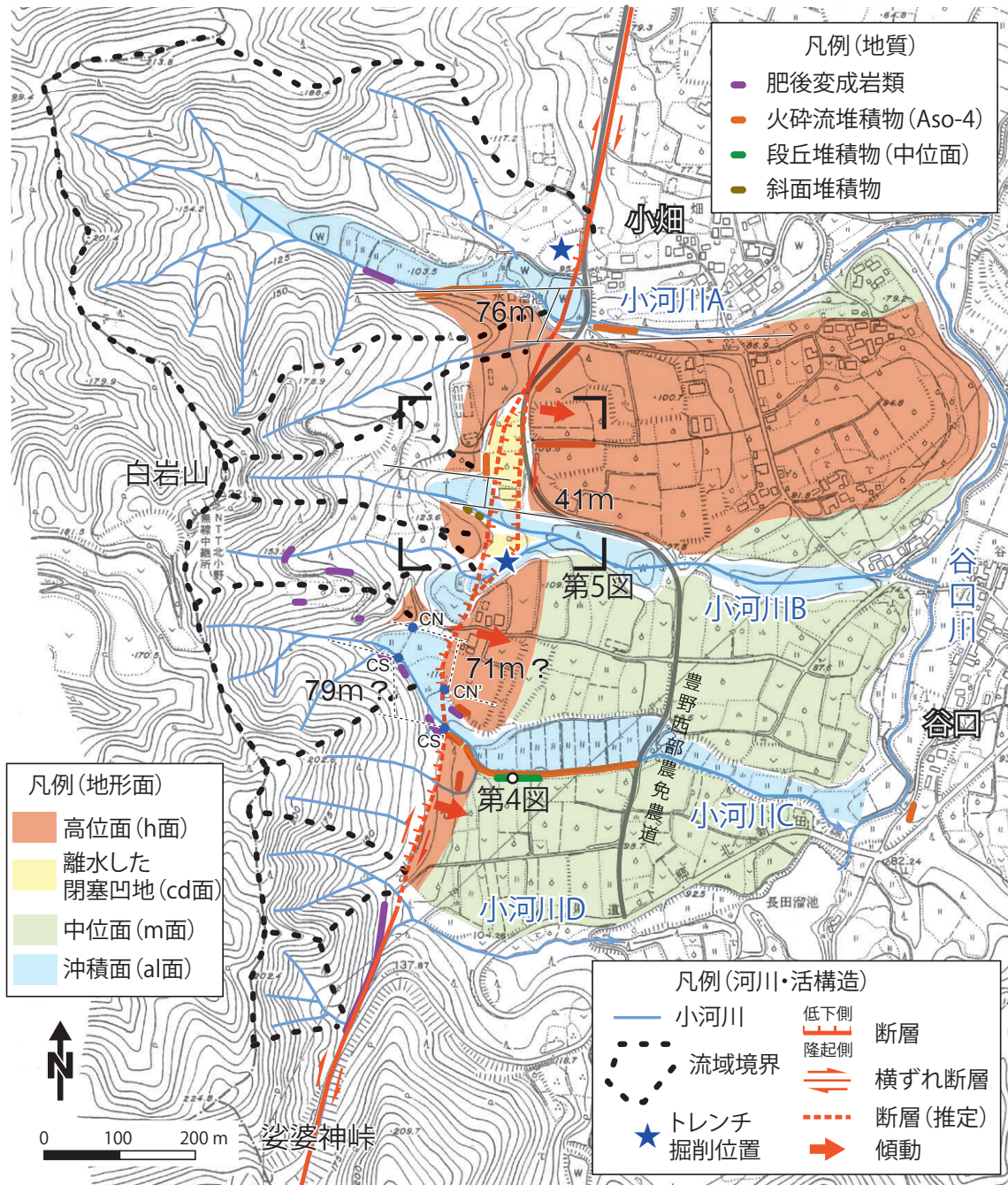
第1図. 日奈久断層帯北部の断層位置と娑婆神峠周辺の航空写真。(A) 基図は都市圏活断層図「熊本(改訂版)」(熊原ほか, 2017), および「八代(改訂版)」(後藤ほか, 2018)を使用した。断層名およびセグメント境界は地震調査推進本部(2013)を参照した。(B) 2016年4月に撮影された娑婆神峠から小畑地区付近の航空写真(国土地理院による, 2019年4月26日取得)。白点線は第3図の範囲。

Fig. 1. Fault trace at the northern part of the Hinagu fault zone and aerial photographs of the area around Sabagami Pass. (A) Place names and fault names are added on the Active Fault Map in Urban Area "Kumamoto (revised edition)" (Kumahara *et al.*, 2017), and "Yatsushiro (revised edition)" (Goto *et al.*, 2018). Names of fault segment and their boundaries referred Earthquake Research Committee, the Headquarters for Earthquake Research Promotion (2013). (B) Aerial photographs of the area from Sabagami Pass to Obata district in April 2016 (Geospatial Information Authority of Japan, downloaded on April 26, 2019). The white dashed box is the area of figure 3.



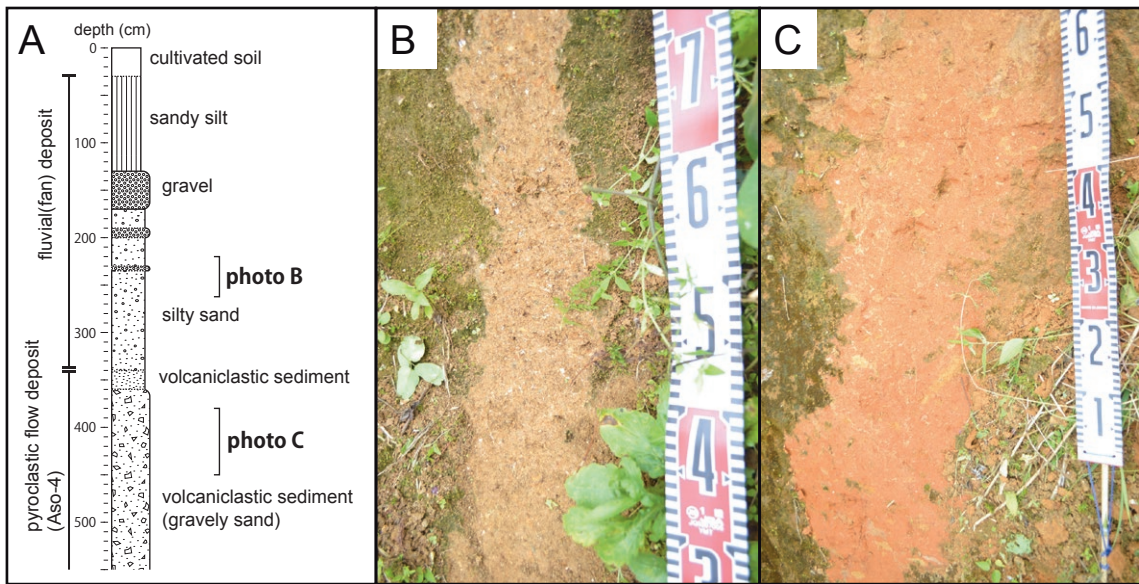
第2図. 段丘崖のずれの形成と保存過程の概念図. 1: 高位面を構成する堆積物の堆積. 2: 高位面が河川の下刻により離水し, 段丘崖が形成. 3: 断層活動により段丘崖に右横ずれ変位が生じる. 4a: 河川の掃流力が十分強い場合, 攻撃斜面側の段丘崖(図では左岸側)が侵食され, 変位が失われる. 反対の右岸側には変位が保存される. 5a: 河川の侵食力が継続した場合, 断層活動の繰り返しにより生じた変位量には, 右岸側と左岸側で差が生じる. 4b: 段丘崖がほとんど侵食されないほど河川の掃流力が弱い場合, 両岸とも段丘崖の変位が保存される. 5b: 断層の活動の繰り返しにより累積した変位量は, 右岸側と左岸側で等しい. 1, 2, 4a, 4bの下図は断面ABでの地質断面.

Fig. 2. Formation and preservation process of a faulted terrace risers. 1: Formation of a higher terrace. 2: The higher terrace is incised and a pair of terrace risers is formed. 3: Movement of strike-slip fault produces a right-lateral displacement of the terrace risers. 4a: If the erosive force of the river is strong enough, the terrace scarp on the left bank side is eroded and the displacement is lost. The displacement on the opposite right bank side has been still preserved. 5a: When the erosion of the river continues, the displacement caused by repeated faulting differs between the right bank and the left bank. 4b: The displacement of terrace risers on both the right and left banks is preserved when the erosive force is weak enough. 5b: If the erosive environment of the river continues, the amount of displacement accumulated by repeated fault activity is the same on the right and left banks. The lower figures of 1, 2, 4a, 4b are geological sections at section AB.



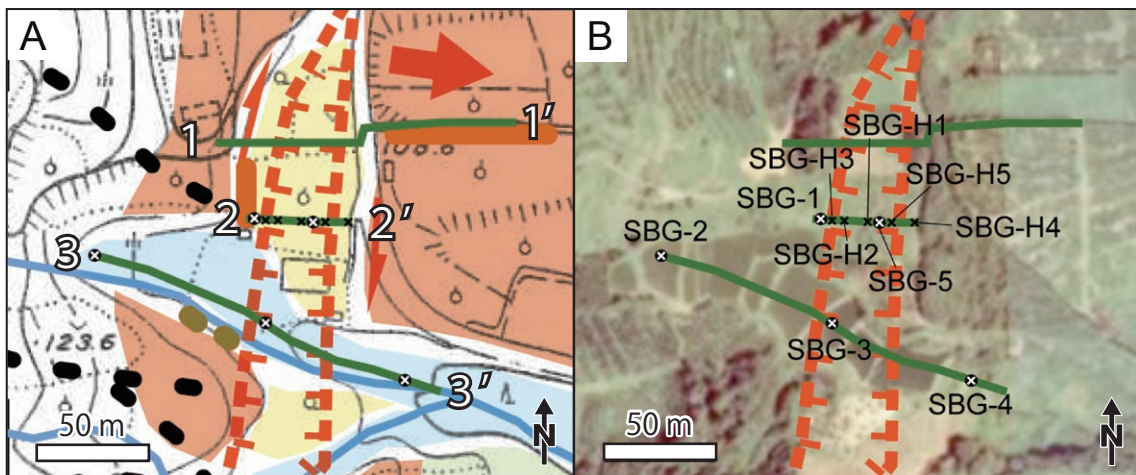
第3図. 小畑地区南部における地形地質調査結果. 背景は1/5000豊野村(現:豊野町)管内図を使用. 星印は千田ほか(1991)及び熊本県地域活断層調査委員会(1997)によるトレンチ調査位置. 小河川A~Cについては屈曲量の計測位置を示した. 白丸は柱状図の調査地点(第4図).

Fig. 3. Geomorphological and geological survey map in the southern part of Obata district. 1/5000 Toyono village (current: Toyono Town) district map is used for the background map. Asterisks are locations of trench survey by Chida *et al.* (1991) and Active Fault Research Committee of Kumamoto Prefecture (1997). On the small river A, B, and C, measurement positions of the displacement are plotted. The white dot is the survey point of fluvial deposits of the middle terrace (Fig. 4).



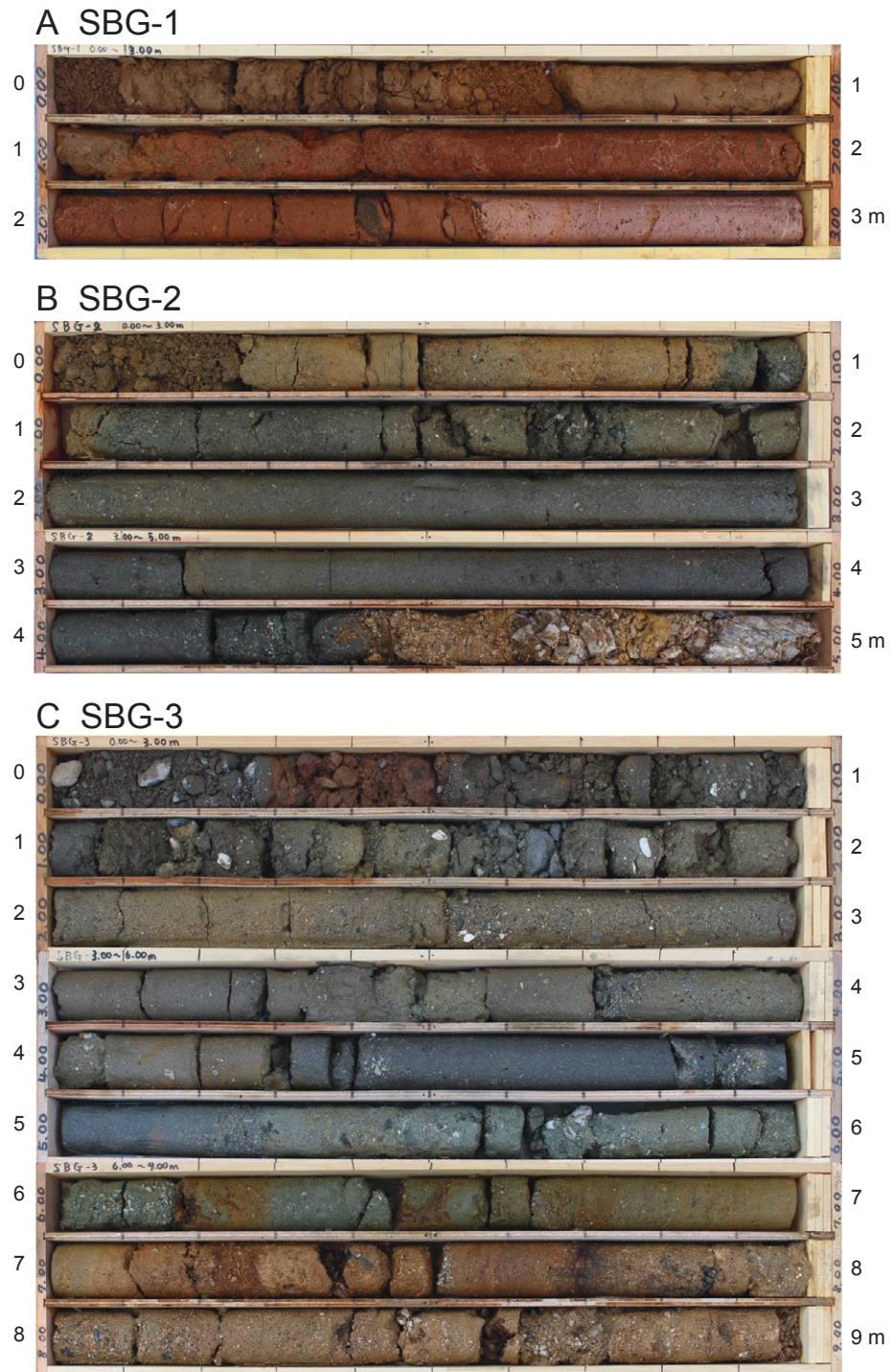
第4図. 中位段丘面堆積物と下位の阿蘇4火砕流堆積物の露頭。(A)中位段丘面堆積物の柱状図。(B)中位段丘堆積物。(C)風化した溶結凝灰岩(阿蘇4火砕流堆積物)の写真。

Fig. 4. Sediments of the middle terrace and underlying Aso-4 pyroclastic flow deposit. (A) The columnar section of the sediments of the middle terrace and underlying Aso-4 pyroclastic flow deposit. (B) Photograph of fluvial sediments. (C) Photograph of welded tuff (Aso-4 pyroclastic flow deposit)



第5図. ボーリング掘削位置. 図中の緑線は地質断面線を, 白色または黒色のクロスマークはそれぞれボーリング及びハンドオーガーによる掘削位置を示す。(A) ボーリング掘削位置周辺の地形分類図. 凡例, 図の範囲は第3図参照。(B) 1976年に撮影されたボーリング掘削位置周辺の空中写真(国土地理院による, 2019年4月26日ダウンロード)。

Fig. 5. Locations of boreholes. Green lines show the location of geological sections. White and black cross marks indicate the location of boring and hand coring sites, respectively. (A) Geomorphological map around the boring site. See figure 3 for the legend and location. (B) An aerial photograph taken in 1976 around the boring site (Geospatial Information Authority of Japan, downloaded on April 26, 2019).



第6図. (A) SBG-1孔, (B) SBG-2孔, および (C) SBG-3孔のボーリングコア写真.
Fig. 6. Photographs of boring cores of (A) SBG-1, (B) SBG-2, and (C) SBG-3.

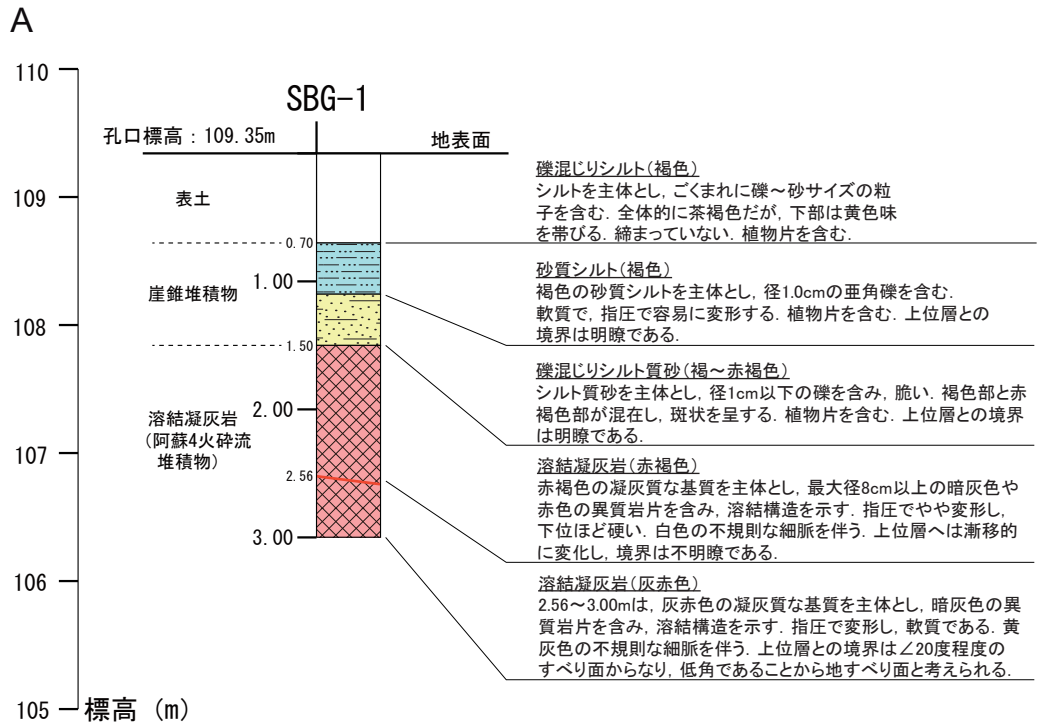
D SBG-4



E SBG-5

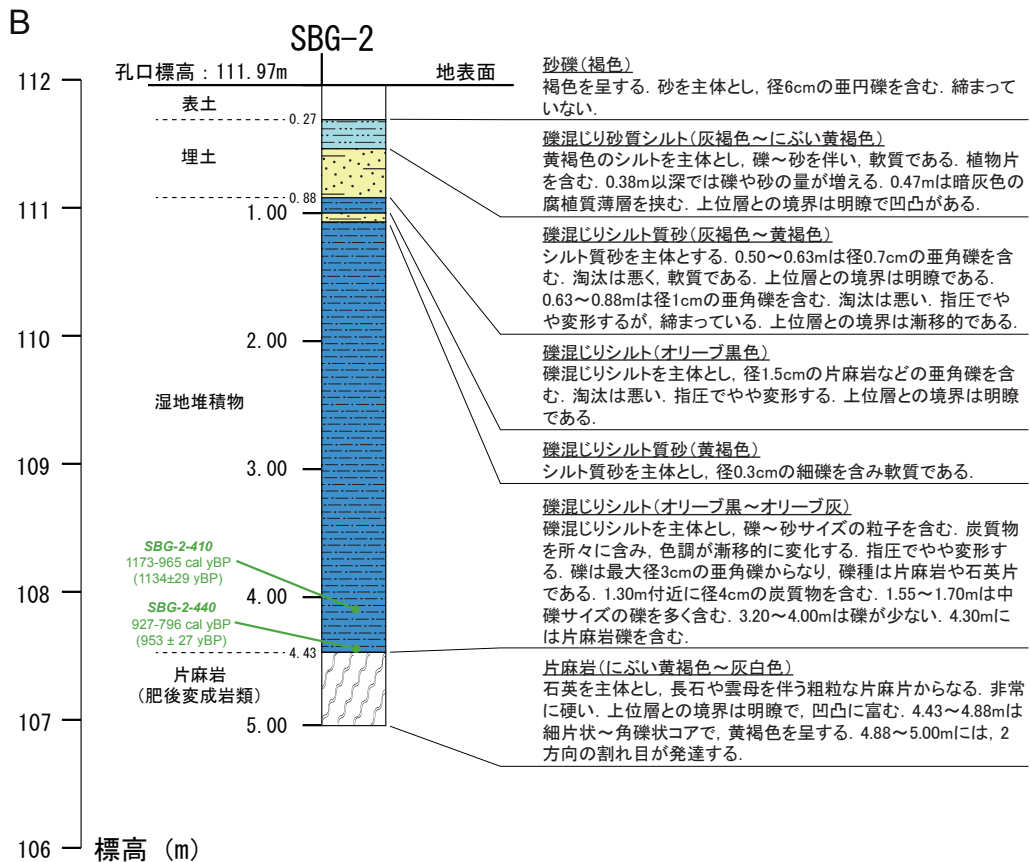


第6図. 続き. (D) SBG-4孔及び(E) SBG-5孔のボーリングコア写真.
Fig. 6 continued. Photographs of boring cores of (D) SBG-4 and (E) SBG-5.



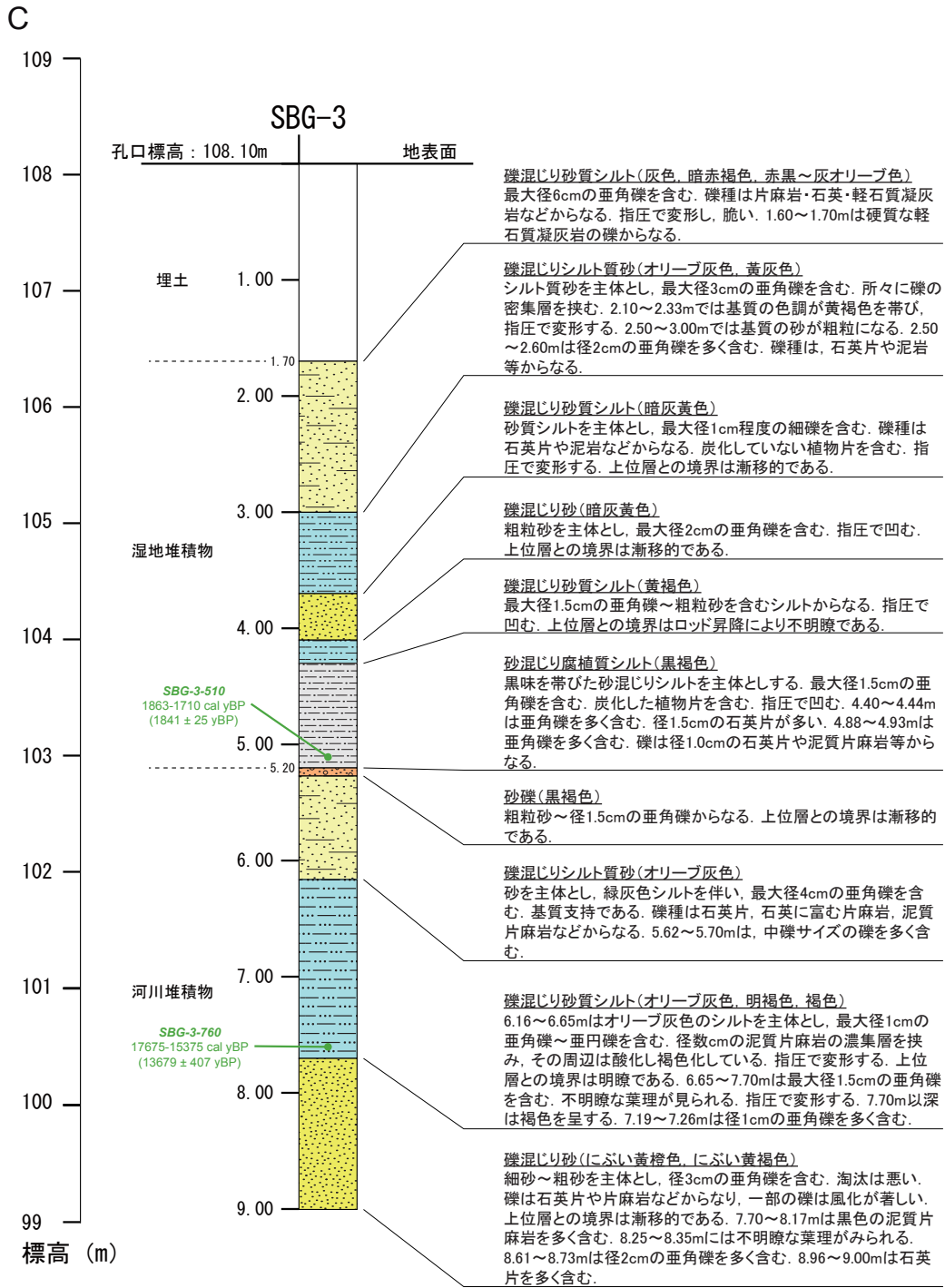
第7図. (A) SBG-1 孔のボーリング柱状図.

Fig. 7. (A) Columnar section and geologic description of core SBG-1.



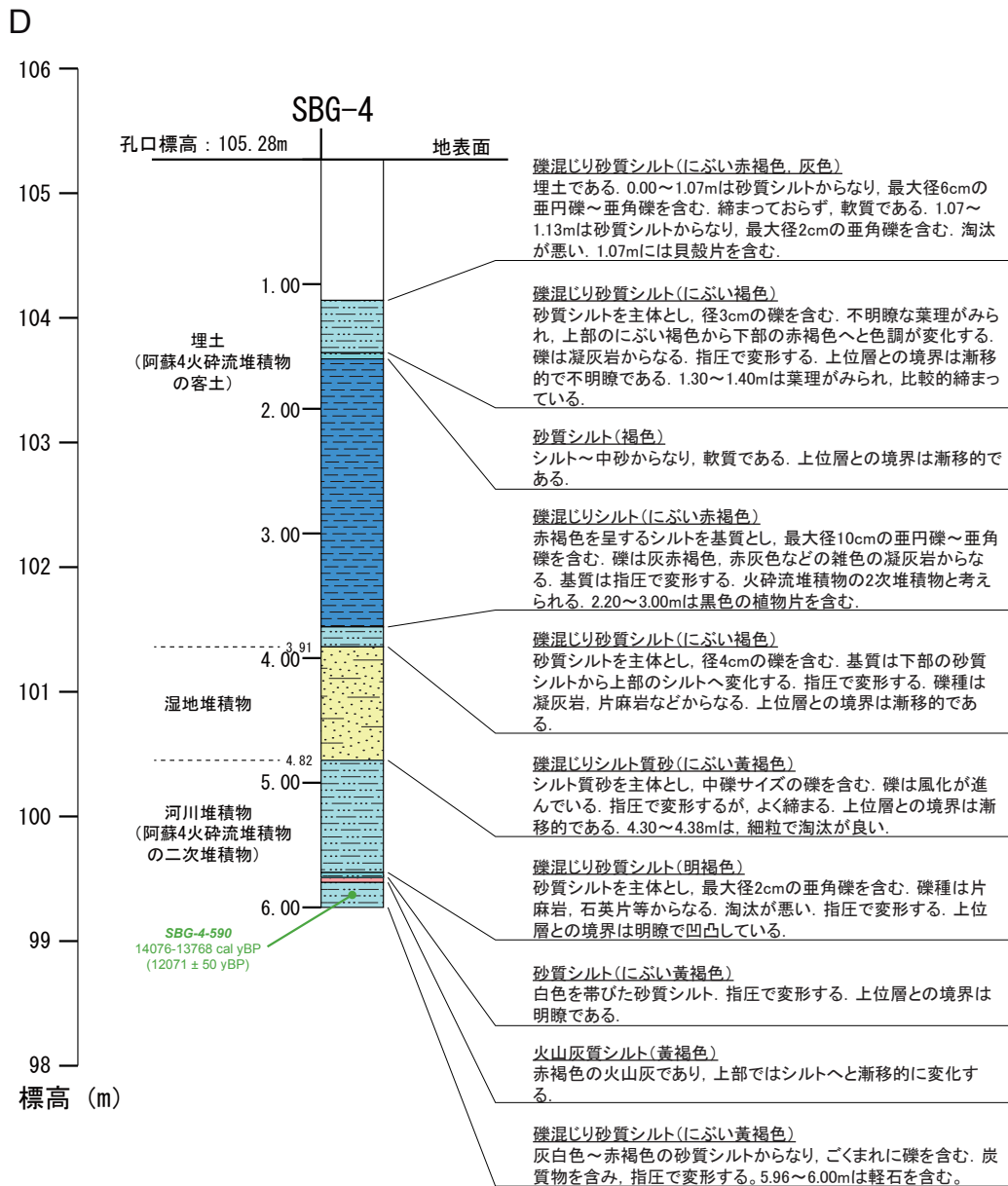
第7図. 続き. (B) SBG-2 孔のボーリング柱状図. 緑字は放射性炭素年代測定結果で、括弧内は校正前の年代を示す。誤差は1 σ 。

Fig. 7. continued. (B) Columnar section and geologic description of core SBG-2 with ^{14}C ages.



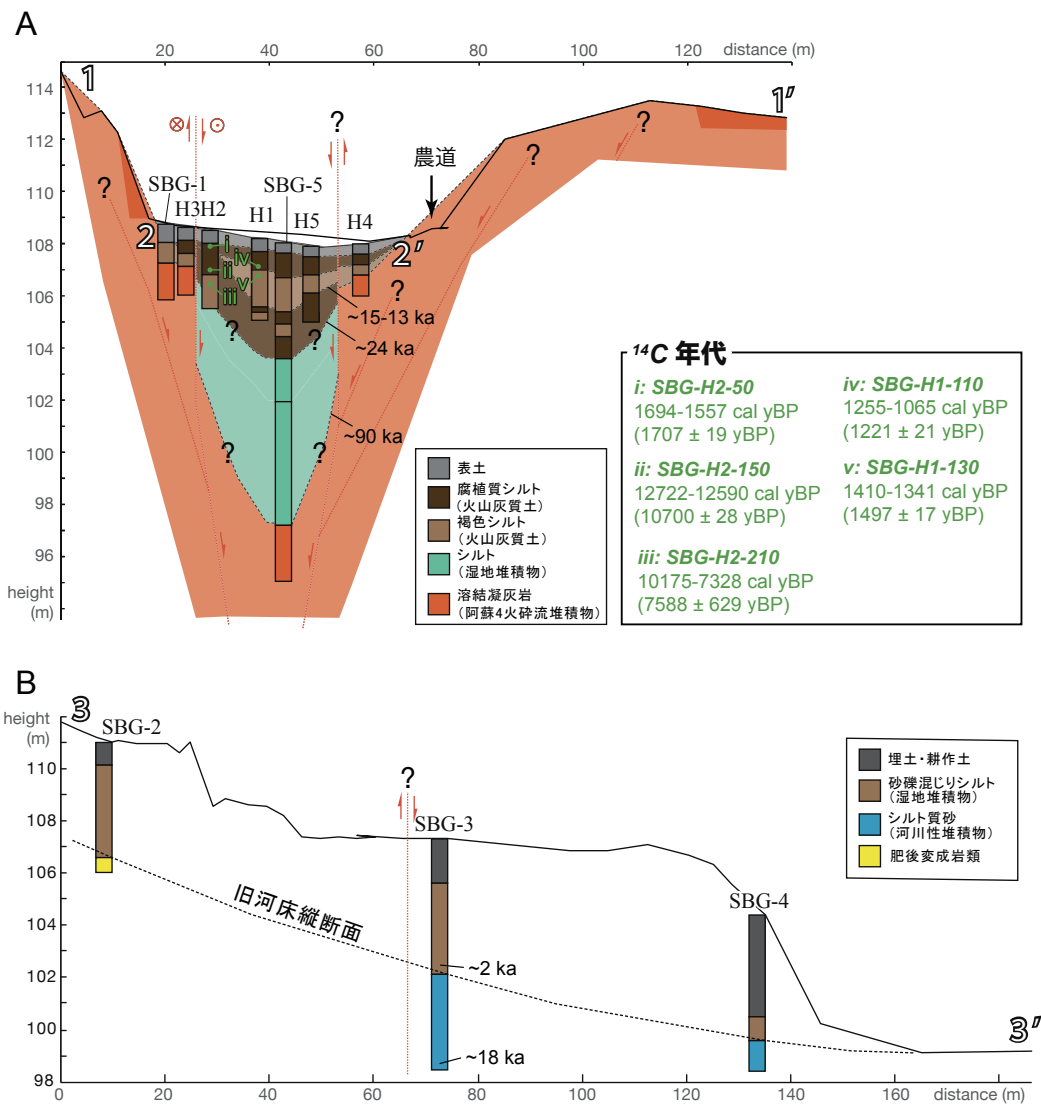
第7図、続き。(C) SBG-3孔のボーリング柱状図。緑字は放射性炭素年代測定結果で、括弧内は較正前の年代を示す。誤差は1σ。

Fig. 7. continued. (C) Columnar section and geologic description of core SBG-3 with ¹⁴C ages.

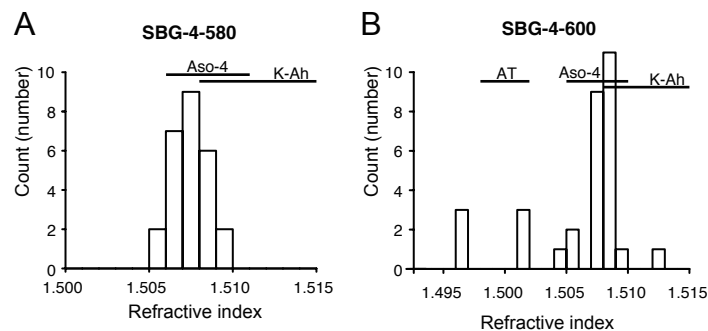


第7図. 続き. (D) SBG-4 孔のボーリング柱状図. 緑字は放射性炭素年代測定結果で、括弧内は較正前の年代を示す. 誤差は1σ.

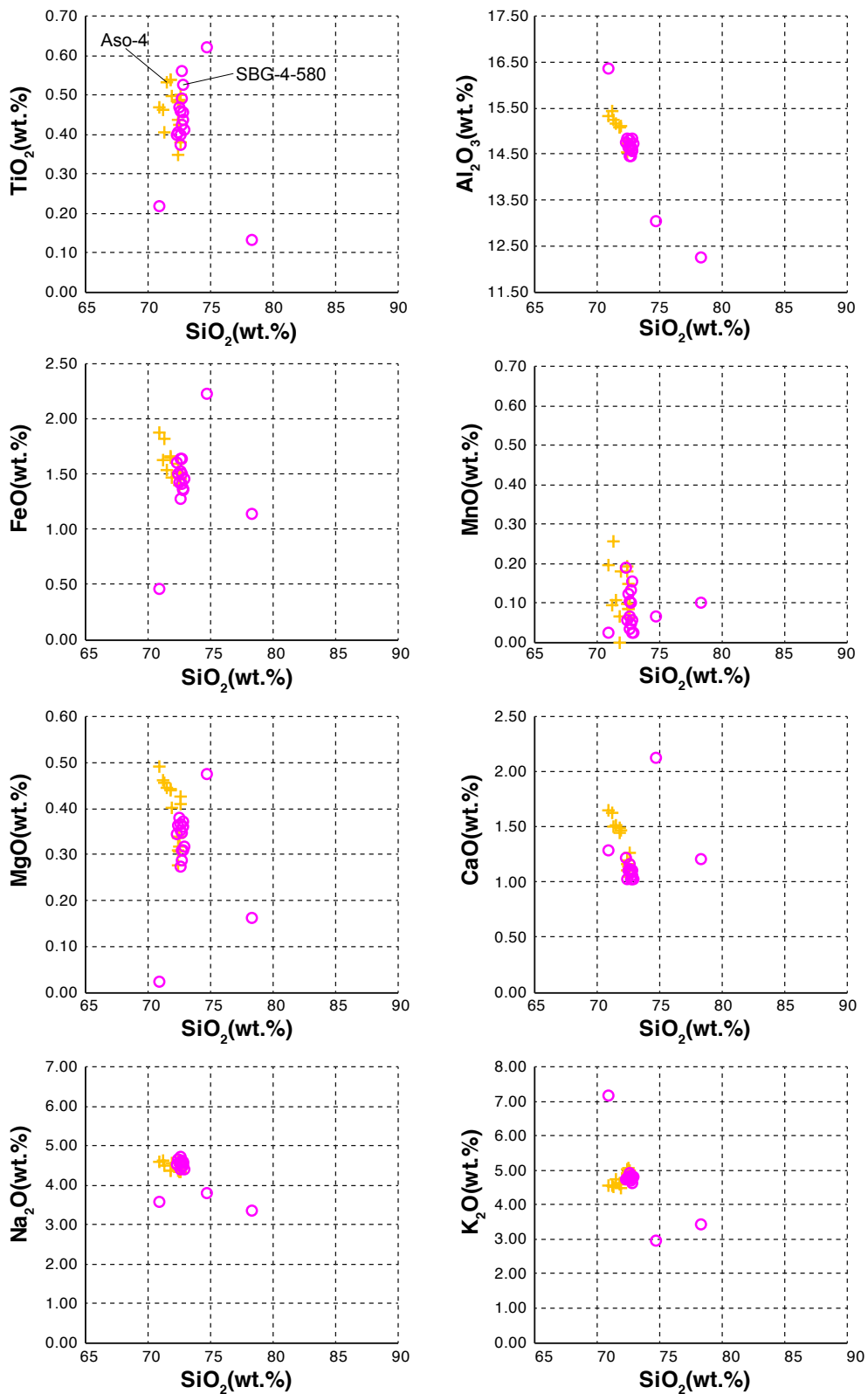
Fig. 7. continued. (D) Columnar section and geologic description of core SBG-4 with a ¹⁴C age.



第 8 図. 地質断面図. (A) 段丘化した閉塞凹地 (cd 面) を横切る地形地質断面 (1-1' および 2-2'). 測線は第 5 図参照. (B) 小川 B に沿う地形地質断面 (3-3'). 黒点線は推定される旧河床の縦断面形. Fig. 8. Geological cross-sections. (A) Geological cross-section (1-1' and 2-2') across the cd terrace. See figure 5 for section lines. (B) Geological cross-section along small river B (3-3'). The black dotted line is the inferred longitudinal profile of the paleo-riverbed.



第 9 図. 火山ガラスの屈折率. 鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah), 始良 Tn 火山灰 (AT), 阿蘇 4 火砕流堆積物 (Aso-4) の屈折率の範囲は町田・新井 (2003) から引用した. Fig. 9. Refractive indexes of volcanic glasses. Refractive indexes were referred from Machida and Arai (2003).



第10図. 火山ガラスの主成分分析結果. 紫の丸は火山灰分析用試料 (SBG-4-580), 黄色十字は阿蘇4火砕流堆積物 (Aso-4) の示す値 (町田・新井, 2003).

Fig. 10. Results of principal component analysis for volcanic glasses. Purple circles and yellow crosses show principal components of SBG-4-580 and Aso-4 (Machida and Arai, 2003), respectively.