

令和 3 年度原子力規制庁委託成果報告書

断層変位評価に係る調査

株式会社パスコ

令和 4 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

1 章 はじめに	1-1
1.1. 事業の概要	1-1
1.1.1. 事業実施の背景	1-1
1.1.2. 事業実施の基本方針	1-1
1.1.3. 事業内容	1-1
1.2. 用語の定義	1-4
1.3. 本事業で扱う主断層・副断層の考え方	1-6
1.4. 参考文献	1-8
2 章 副断層に関する調査	2-1
2.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討	2-1
2.1.1. 干渉 SAR 解析手法の高度化	2-2
2.1.2. 画像マッチング解析の高度化	2-9
2.1.3. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討まとめ	2-29
2.2. 地表付近の副断層の性状や活動履歴の検討	2-32
2.2.1. 調査概要	2-32
2.2.2. 出ノロトレンチ	2-41
2.2.3. 小園トレンチ	2-82
2.2.4. 追加検討	2-112
2.3. 調査地点の地下構造及び副断層の 3 次元的な形状の検討	2-121
2.3.1. 調査概要	2-121
2.3.2. 広域の地下構造把握のための調査	2-138
2.3.3. 詳細な地下構造及び副断層の 3 次元的な形状把握のための調査	2-225
2.3.4. 検討結果	2-325
2.4. 参考文献	2-326
3 章 断層変位に関する室内模擬実験	3-1
3.1. 模擬地盤の物性	3-1
3.1.1. 温度湿度状態	3-1
3.1.2. 模擬地盤の物性試験	3-2
3.1.3. 相似則について	3-11
3.1.4. 模擬地盤の物性のまとめ	3-11
3.2. 縦ずれ断層室内模擬実験	3-12
3.2.1. 実験装置	3-12
3.2.2. 実験方法	3-12
3.2.3. 実験結果	3-14

3.2.4.	縦ずれ室内模擬実験まとめ	3-52
3.3.	横ずれ断層室内模擬実験	3-64
3.3.1.	実験装置	3-64
3.3.2.	実験方法	3-64
3.3.3.	実験結果	3-65
3.3.4.	X線CT撮影による内部せん断構造	3-76
3.3.5.	横ずれ室内模擬実験まとめ	3-79
3.4.	断層変位に関する室内模擬実験のまとめ	3-81
3.5.	参考文献	3-81
4章	断層変位に関する数値解析	4-1
4.1.	事前検討について	4-1
4.1.1.	周期境界を適用した解析モデル	4-1
4.1.2.	粒径分布の影響の検討	4-2
4.1.3.	鈍りの小さい大変形ひずみの評価方法の検討	4-10
4.2.	室内模擬実験の再現解析	4-14
4.2.1.	微細粒子の付着力のモデル化	4-14
4.2.2.	強度パラメータ同定のための要素シミュレーション	4-15
4.2.3.	縦ずれ断層模型の解析モデル	4-20
4.2.4.	再現解析結果	4-22
4.3.	断層変位に関する数値解析のまとめ	4-32
4.4.	参考文献	4-34
5章	まとめ	5-1
5.1.	副断層に関する調査	5-1
5.1.1.	地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討	5-1
5.1.2.	表層付近の副断層の性状や活動履歴の検討	5-1
5.1.3.	調査地点の地下構造及び副断層の3次元的な形状の検討	5-2
5.2.	断層変位に関する室内模擬実験	5-2
5.2.1.	模擬地盤の物性	5-2
5.2.2.	縦ずれ断層室内模擬実験	5-3
5.2.3.	横ずれ断層室内模擬実験	5-3
5.2.4.	今後の課題	5-3
5.3.	断層変位に関する数値解析	5-3
5.3.1.	事前検討	5-4
5.3.2.	室内模擬実験の再現解析	5-4

【付属資料】

2章 付属資料

- ・ 施工写真集
- ・ 放射性炭素年代測定結果
- ・ 火山灰分析結果

3章 付属資料

- ・ 分析・試験結果データシート

1章 はじめに

1.1. 事業の概要

1.1.1. 事業実施の背景

原子力規制委員会の「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」は、耐震重要施設の設置許可条件として、将来活動する可能性のある断層等が活動することにより、変位が生ずる恐れがない地盤に設置することを定めている。また、「同規則の解釈」において、震源断層が敷地に極めて近い場合は、地表に変位を伴う断層全体を考慮して地震動評価することと定められている(仕様書より抜粋)。

国外においては、IAEAにおける原子力安全基準である SSG-9(Rev. 1) (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2022) や米国の ANSI/ANS-2.30-2015 (American Nuclear Society Standards Committee Working Group ANS-2.30, 2015) により、既存および新設の原子力発電所についての断層変位発生可能性の評価のためのガイドラインが示されている。

断層破壊による表層地盤の変形や変位を生じる過程は極めて複雑であることから、これらの変形や変位の生じる位置や量について評価することは困難である。そのため、地震により地表に発生する変位の位置や量について評価する際の、評価手法の適用前提や適用範囲について把握、整理し、知見を蓄積することは重要となっている。

また、最近の測地学的情報の蓄積により、地表に発生する変位はこれまで活断層として認識されていた主断層周辺の変位だけではなく、主断層から離れた位置に微小な断層変位が生じていることが認識されてきている。これら主断層から離れた位置に生じた副断層変位に関する知見を蓄積することが重要となってきている。

1.1.2. 事業実施の基本方針

断層変位の評価手法の構築は非常に重要であるが、強震動観測記録などと異なり、観測データに乏しいことなどから課題が多い。本事業では、実際の活断層の活動による地表変位に対する測地学的情報、変位を生じた副断層について現地での性状把握及び室内模擬実験並びに数値解析と、多様な手法により副断層変位に対してアプローチし、副断層変位に関する基礎的な知見を蓄積する。

1.1.3. 事業内容

1.1.3.1. 副断層に関する調査

内陸地殻内地震のうち、地表に断層変位を伴う規模の大きな地震は、再来周期が長く、断層変位データが限定されている。特に、既存の活断層トレース（以下、「主断層」という。）から離れた場所で副次的に生じた断層（以下、「副断層」という。）は、一般に連続性が乏しく断層変位量も小さいため、痕跡が地表に残りにくいのが特徴である。特に日本の場合、浸食等により副断層がそのままの状態と保存されることがなく、適時に情報収集や現地調査を行うことが重要である。また、近年の既往研究では、大地震発生前後の合成開口レーダー (Synthetic Aperture RADAR, SAR) データを用いた干渉解析（以下「干渉 SAR 解析」と

いう。)により、広域の地殻変動を把握できるため、断層変位評価への活用が期待されている。

そこで、本事業では、干渉 SAR 解析データ等に基づく副断層変位の抽出、及び副断層に着目した現地調査を実施し、副断層生成プロセスに関する知見を得ることを目的とした。まず、主断層から離れた場所で生じた副断層の検出手法の高度化を行うため、地表地震断層が現れた 2016 年熊本地震において、SAR 衛星データを用いる干渉 SAR 解析及び光学衛星データを用いる解析を行い、地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討を実施した。そして、こうして抽出された副断層を対象に、トレンチ調査を実施し、表層付近の副断層の性状や活動履歴について検討した。さらに、既往のトレンチ調査を含め、副断層が確認されたトレンチ調査地点を中心に、物理探査として地中レーダ探査（16 地区 26 測線）及び表面波探査（7 地区 7 測線）を実施し、調査地点の地下構造及び副断層の分布を検討した。加えて、本業務及び既往のトレンチ調査地点の 3 箇所において地中レーダ探査を高密度で実施し、地下構造及び副断層の 3 次元的な形状を捉えることを試みた。

1.1.3.2. 断層変位に関する室内模擬実験

既往研究では、副断層を含めて断層の変位量及び主断層からの相対位置等の情報を基に、断層変位の評価式が提案されている。ただし、こうした評価式による副断層変位の予測値は、主断層からの距離の増加によって減少する傾向が見られるものの、ばらつきが大きいことが特徴である。断層変位評価における不確かさを低減するため、地盤の物性値による影響の調査を含め、室内模擬実験を活用して副断層の生成プロセスを検討することが重要である。

そこで、本事業では、上記「副断層に関する調査」での調査結果等を踏まえて、縦ずれ断層型及び横ずれ断層型の室内模擬実験（模型地盤の縦横及び深さ：1 辺約 1m 以下）を実施し、断層変位に係る知見の蓄積を行った。縦ずれ断層型の室内模擬実験は、断層傾斜角が異なる実験を逆断層は 2 ケース、1 ケースあたり 2 回実験を行い、正断層は 2 ケース、1 ケースあたり 1 回の実験を行い、断層変位分布（出現位置や変位量等）の数値データを取得した上で、副断層に係る知見を整理した。縦ずれ断層型の室内模擬実験においては、模擬地盤の物性試験を実施して、数値解析の際に必要な物性情報を取得した。また、（傾斜角 90 度の）横ずれ断層型の室内模擬実験は、厚さ等の異なる模擬地盤を 2 ケース、1 ケースあたり 2 回実験を行い、せん断帯の出現有無を把握した。

1.1.3.3. 断層変位に関する数値解析

地表に断層が現れた内陸地殻内地震は、地震時の地下の震源断層の破壊によるせん断変形が表層まで至る過程において、基盤から地表までの距離に対応して 3 次元的に広がりを持つことが既往研究から知られている。既往の室内模擬実験においても、このような広がりを持つことが知られており、このような広がりを持った表層変状が進行する破壊過程も確認されている。自然地震と室内模擬実験は、それぞれのスケールや地盤の物性値が大きく異なるため、断層変位の数値解析を実施することにより、両者共通のプロセスを検討することが重要である。

そこで、本事業では、上記「断層変位に関する室内模擬実験」で実施した室内模擬実験により、縦ずれ断層を想定した室内模型実験を 1 セット設定し、その実験結果を再現するため、個別要素法を用いて 2 次元の数値解析を 4 ケース実施した。

1.2. 用語の定義

本事業で用いる、特に専門性・特殊性が高いと考えられる用語の解説を以下に示す。

(1) 活断層

「極めて近き時代まで地殻運動を繰り返した断層であり、今後もなお活動すべき可能性のある断層」（多田、1927）。「極めて近き時代」とは原子力規制庁の新規制基準では後期更新世（約 12~13 万年前）、必要な場合は、中期更新世(約 40 万年前)までとしている。

(2) 地表地震断層

地震時に地表に現れる断層のことを指す。兵庫県南部地震以降、「地震を起こした活断層の直接的な地表への現れ」として取り扱われるようになってきた（鈴木・渡辺、2006）。ここでは、1 回の地震活動で地表に出現した断層とする。

(3) 震源断層

地震時に断層運動を起こした断層。

(4) 主断層変位

震源断層の活動に起因する変位。

(5) 副断層変位

主断層変位以外の変位。既知の断層構造や誘発された変位、既存の弱線での変位。

(6) SAR（合成開口レーダー）

レーダーは、電磁波を対象物に照射し、反射して返ってきた信号を分析して対象物を観測する。合成開口レーダーとは、人工衛星などの飛行体が移動しながら電波を送受信して、大きな開口を持ったアンテナの場合と等価な画像が得られるように、人工的に「開口」を「合成」する技術。

(7) 干渉 SAR 解析

同一の軌道を飛行した SAR 衛星の異なる時期の 2 回の電磁波の位相差をとることで、衛星と地表面との距離の変化を詳細に求める解析方法。

(8) LC-InSAR 図

干渉 SAR 解析を実施して図化する際に、位相差を青→白の繰り返し、干渉性が悪くコヒーレンス値が低い部分を赤で示した図。（特許第 6889993 号）。

(9) 位相不連続ライン

LC-InSAR 図で、低コヒーレンス値がライン状に連続し、そのラインを境界として位相が不連続になる、すなわち衛星と地表の距離変化に不連続が生じているライン。地表地震断層等の地表変状が生じている可能性が高い。

(10) 画像マッチング

2枚の画像を比較し、その2枚の画像間で移動している部分がある場合に移動箇所の移動量を抽出する技術。

(11) ピクセルオフセット

2枚の SAR 強度画像の精密な位置合わせにより、地表変位を計測する技術。この方法では、2つの画像の位置合わせ（マッチング）をして残った局所的な位置ずれを地表変位とみなして計測する。

(12) DEM 解析（個別要素法）

解析の対象を自由に運動できる多角形や円形・球の要素の集合体としてモデル化し、要素間の接触・滑動を考慮して、各時刻におけるそれぞれの要素の運動を逐次追跡して解析する方法。

1.3. 本事業で扱う主断層・副断層の考え方

本事業における主断層（変位）及び副断層（変位）の定義は 1.2 に記載の通りであるが、より詳細な考え方は Nurminen et al. (2020) を踏襲する。ただし、本事業では、Nurminen et al. (2020) の副断層のランキング 1.5、2、21、22、3 を区別せず、これらをまとめて副断層と称することとする。

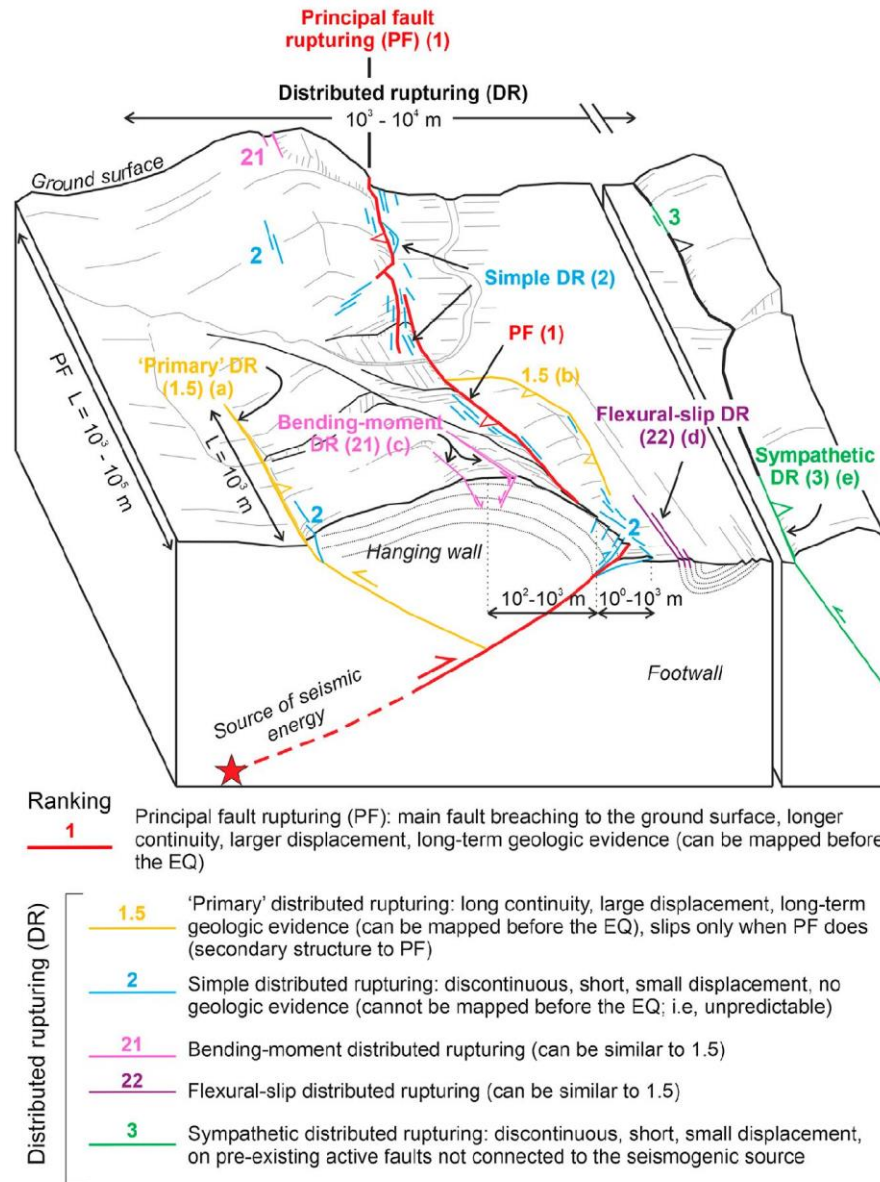


図 1.3.1 本事業における主断層・副断層の概念図（Nurminen et al., 2020 より）

数字は Nurminen et al. (2020)による断層のランキングを示す。

1：主断層（PF）：主要な地表地震断層、より長い連続性、より大きな変位、長期的な地質学的証拠を示す（地震前にマッピング可能）

以下、副断層のランキング。

- 1.5：“基本的な”副断層：長い連続性、大きな変位、長期的な地質学的証拠を示し（地震前にマッピング可能）、主断層が活動する場合にのみ活動する（主断層の二次的な構造）
- 2：単純な副断層：不連続、短い、小さな変位、地質学的証拠がない（地震の前にマッピング不可。つまり、予測不可能）
- 21：構造変形による副断層（1.5に類似している可能性有）
- 22：層面すべりによる副断層（1.5に類似している可能性有）
- 3：“同調的な”副断層*：震源断層に連続しない既存の活断層上での不連続、短い、小さな変位

*ランキング3の「同調的な副断層」は、藤原（2019）による「お付き合い地震断層」に相当すると考えられる。

1.4. 参考文献

本章における参考文献一覧を以下に示す。

- 1) American Nuclear Society Standards Committee Working Group ANS-2.30, (2015) Criteria for Assessing Tectonic Surface Fault Rupture and Deformation at Nuclear Facilities, American Nuclear Society
- 2) International Atomic Energy Agency (2022) Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations : specific safety guide. IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no.SSG-9 (Rev. 1)
- 3) 鈴木 康弘, 渡辺 満久 (2006) 新潟県中越地震にみる変動地形学の地震解明・地震防災への貢献ー地表地震断層認定の本質的意義ー, E-journal GEO, 1, 1, 30-41
- 4) 多田 文男 (1927) 活断層の二種類, 地理学評論, 3, 10, 980-983
- 5) 藤原 智 (2019) 干渉 SAR による地殻変動マッピングとお付き合い地震断層, 日本活断層学会 2019 年度秋季学術大会シンポジウム講演予稿集, 62-63.

2章 副断層に関する調査

2.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討

地震時の微小な地表地震断層を捉える方法として、過年度事業において干渉 SAR 解析のうち LC-InSAR 図や光学衛星データを用いた画像マッチング解析を行い、微小な変位の抽出を行ってきた。その結果、LC-InSAR 図と画像マッチングを組み合わせることで、微小な副断層変位から大きな主断層変位までを確認することができることがわかってきている。一方で、現在の LC-InSAR 図は、定性的な目視判読によってラインデータとして表現されていることや、光学衛星画像データを用いた画像マッチングでの変位計測の精度が 60cm 程度であり、微小な変位を検出することができないことが課題であった。

そこで、本事業では 2016 年熊本地震を対象として、定量的な LC-InSAR 図の作成及び画像マッチング解析の高精度化を行った。

2.1.1. 干渉 SAR 解析手法の高度化

干渉 SAR 解析手法の高度化を行う。過年度までの事業では、LC-InSAR 図(特許第 6889993 号)を用いて微小な変位の抽出を行ってきた。LC-InSAR 図は、二時期の位相の差分である「位相差画像」と、位相差の空間的ばらつき具合を表すコヒーレンス画像から値の低い部分を強調した「低コヒーレンス画像」を組み合わせ作成している(図 2.1.1)。この LC-InSAR 図を目視判読することによって変位箇所(位相不連続ライン)の抽出を実施している。

ただし、定性的な目視判読であることや、本来幅をもった範囲である変位境界を、ラインデータとして表現していること等に課題があった(図 2.1.2)。そこで、本事業において、LC-InSAR 図から定量的に変位境界を抽出する方法を検討する。

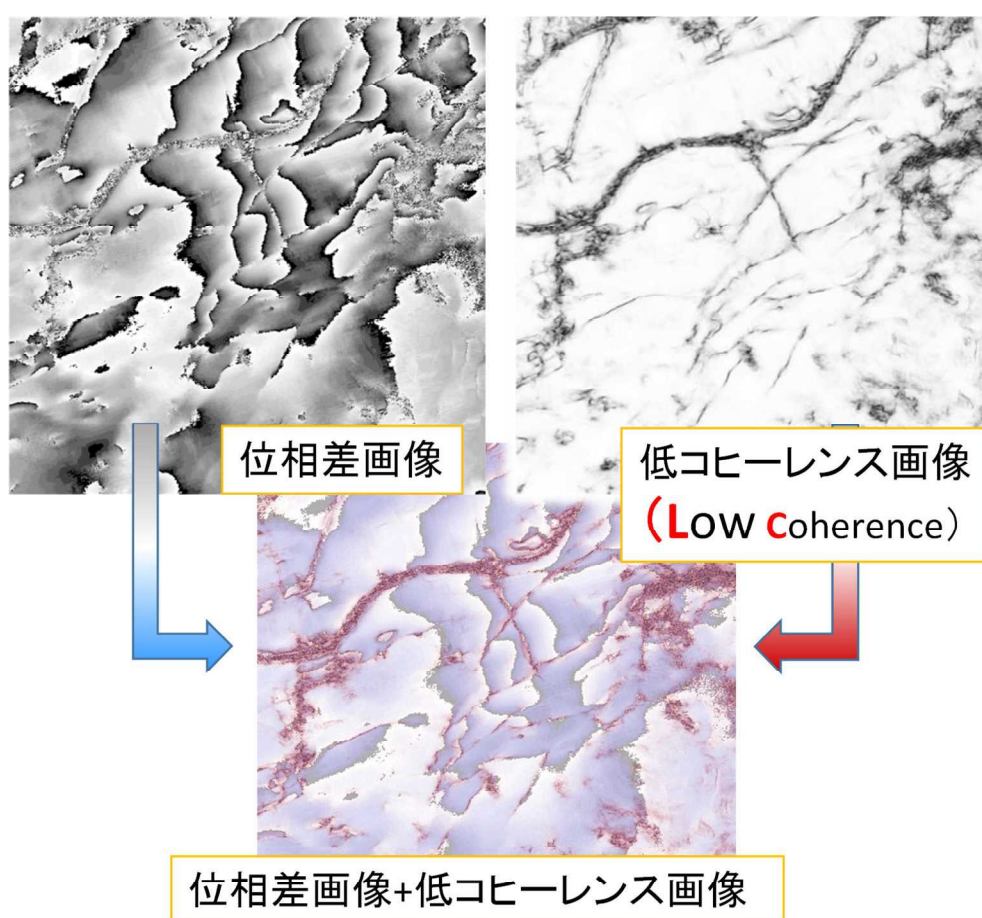


図 2.1.1 LC-InSAR 図の作成方法

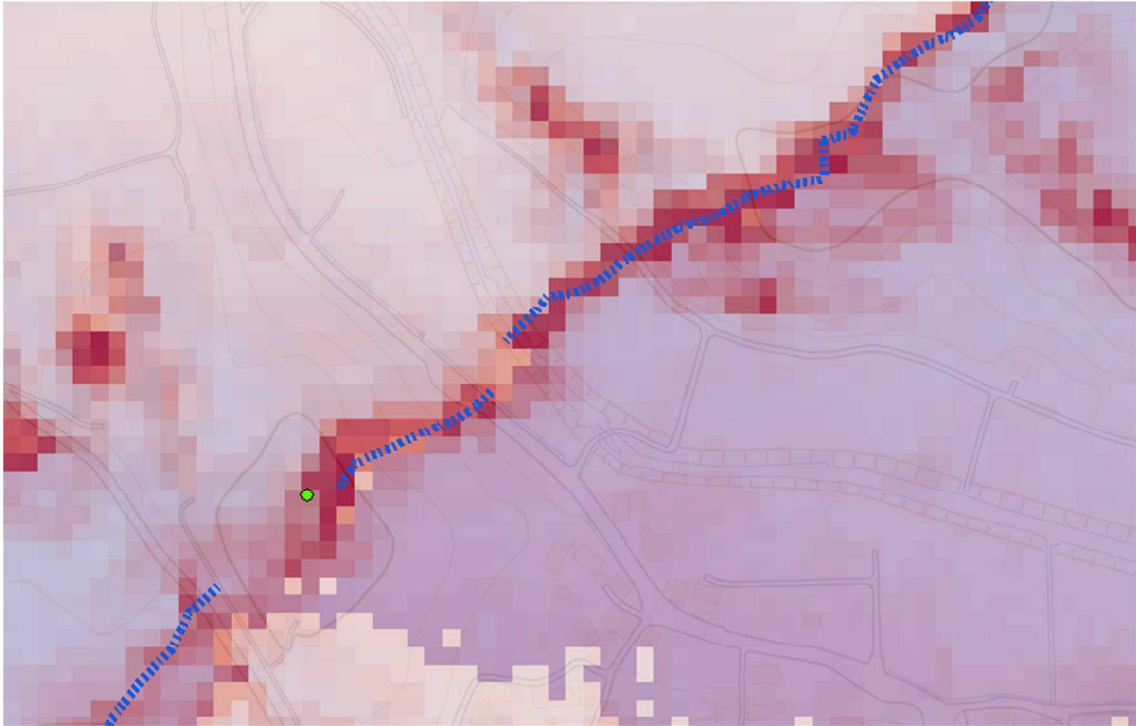


図 2.1.2 位相不連続ライン（青点線）の判読結果例

2.1.1.1. 方法

本事業においては、LC-InSAR 図に使用しているコヒーレンス値に着目した手法を検討する。コヒーレンス値とは「ある領域内の位相差の相関係数（ばらつき具合）」を計算したもので 0~1 の値をとり、0 に近いほど相関係数が低いことを示す。したがって、干渉 SAR で得られた位相差（変動量）が急激に変化したところが低コヒーレンス値となるため、変位箇所の抽出に有効である可能性がある。ただし、変位箇所以外にも面的に表面が変化した箇所、たとえば河川や耕作等でも低コヒーレンスとなる。このため、地震による局所的な変位とは関係のない面的な範囲も抽出されてしまうため、それらを分離する必要がある。そこで、コヒーレンス値を算出する際の相関係数計算ウィンドウサイズを変化させることで、地震による線的な変位と、それ以外の面的な変化を分離する手法を検討した。以下に手順を示す。

- 小さいウィンドウサイズで計算した低コヒーレンス画像 A（局所変位と面的な変化を含んだ画像）を作成する（図 2.1.3）
- 大きいウィンドウサイズで計算し、フィルタリング処理を行った低コヒーレンス画像 B（面的な変化を含んだ画像）を作成する（図 2.1.4）
- A から B を差し引いて低コヒーレンス差分画像 C（局所変位のみ）を作成し、「位相不連続範囲」（図 2.1.5）

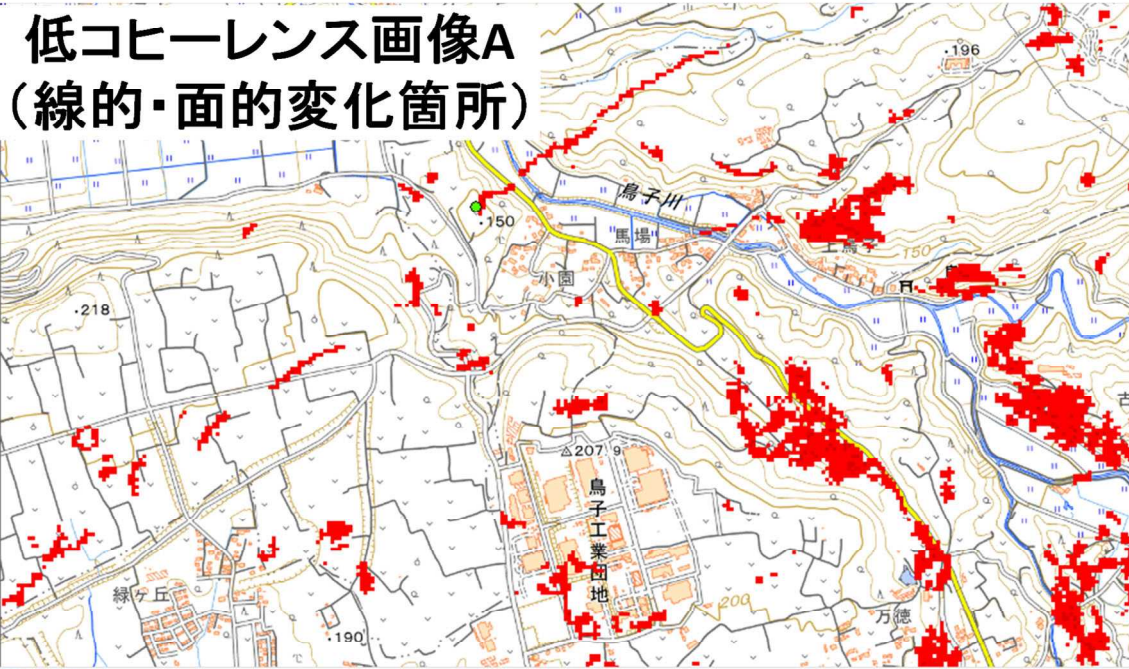


図 2.1.3 低コヒーレンス画像 A (局所変位と面的な変化を含んだ画像)



図 2.1.4 低コヒーレンス画像 B (面的な変化を含んだ画像)

低コヒーレンス画像C (線的箇所)



図 2.1.5 低コヒーレンス画像 C (局所変位のための画像)

2.1.1.2. 解析結果

作成した低コヒーレンス画像 C を「位相不連続範囲」とし、既往手法である「位相不連続範囲ライン」を図 2.1.6 に示す。「位相不連続範囲」は既往手法（小俣ほか, 2017a）の「位相不連続ライン」と整合していることが確認できるが、他の事例での検証が必要である。

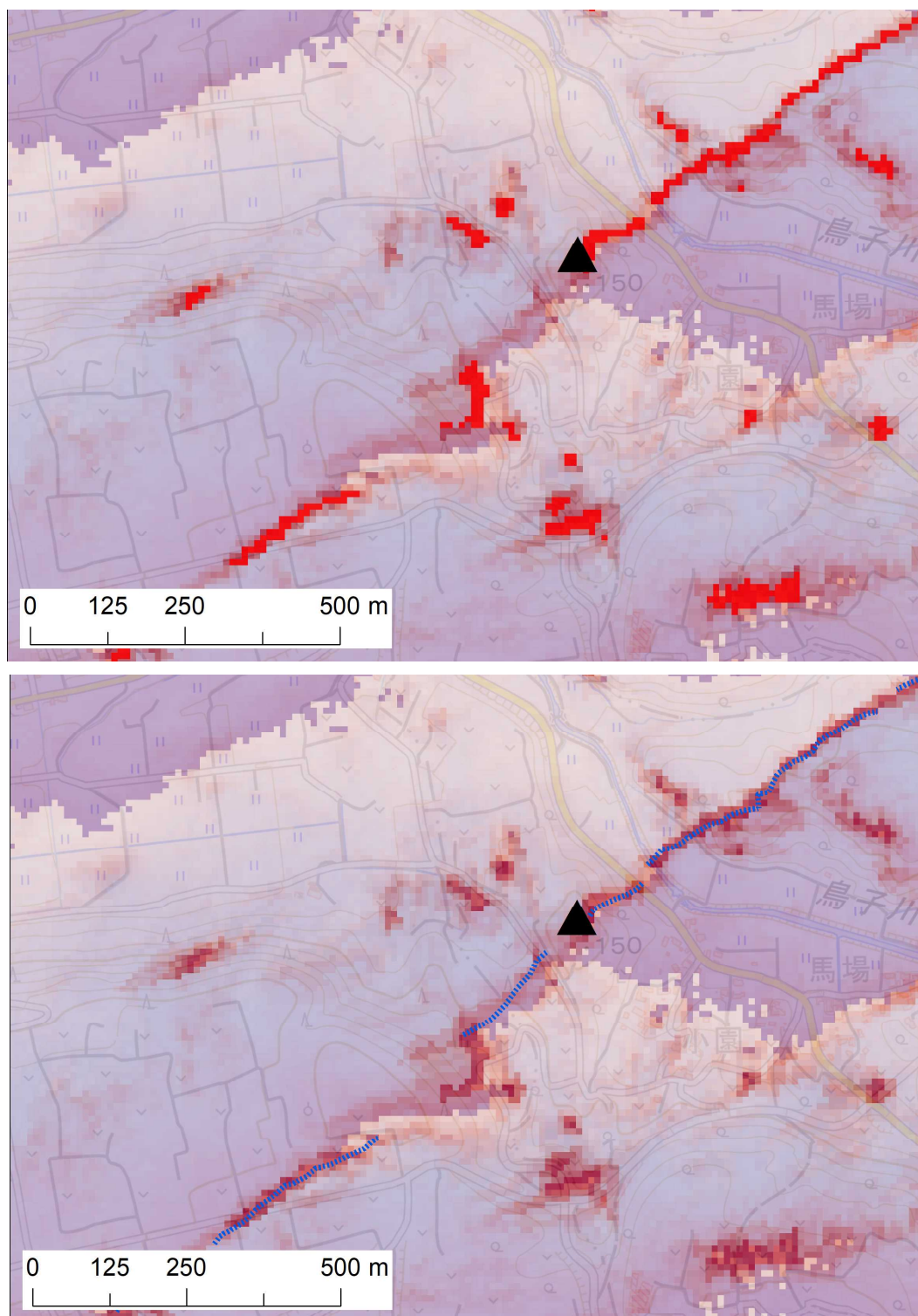


図 2.1.6 上：位相不連続範囲（検討手法）、下位相不連続ライン（既往手法）

2.1.1.3. 妥当性検証

過年度事業のトレンチ調査箇所にて定量的な抽出方法を適用し、位相不連続範囲として抽出することができるか検証を行った。検証対象は、2017年福原トレンチ、2017年土林トレンチ、2020年上陣東トレンチの3箇所とした。

福原トレンチ上の位相不連続ライン（青点線）を位相不連続範囲でカバーしており、他の位相不連続ラインもおおむねカバーできている。2017年土林トレンチでも同様であるが、トレンチ箇所の北東方向にある面的な位相不連続範囲は、位相不連続ラインよりも過抽出である。2020年上陣東トレンチでも同様に、位相不連続ラインをカバーできているが過抽出範囲も確認できる。これらが地震による変位箇所として誤抽出であるかの判断はできないが、低コヒーレンス範囲であるため何らかの変化があった可能性がある。

以上のように、検討手法である位相不連続範囲で、目視判読による位相不連続ラインをカバーできることが確認できたが過抽出気味の結果となった。過抽出箇所の検証と、除去方法が課題である。

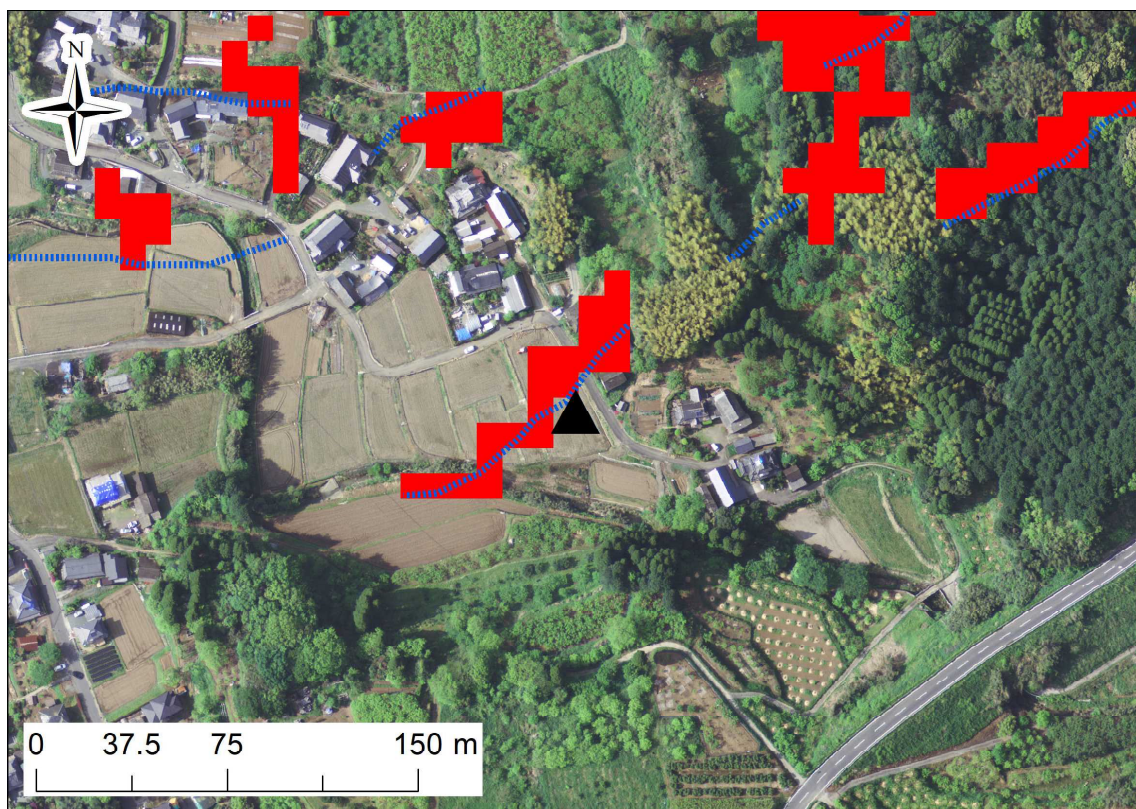


図 2.1.7 2017年福原トレンチにおける位相不連続範囲（検討手法）

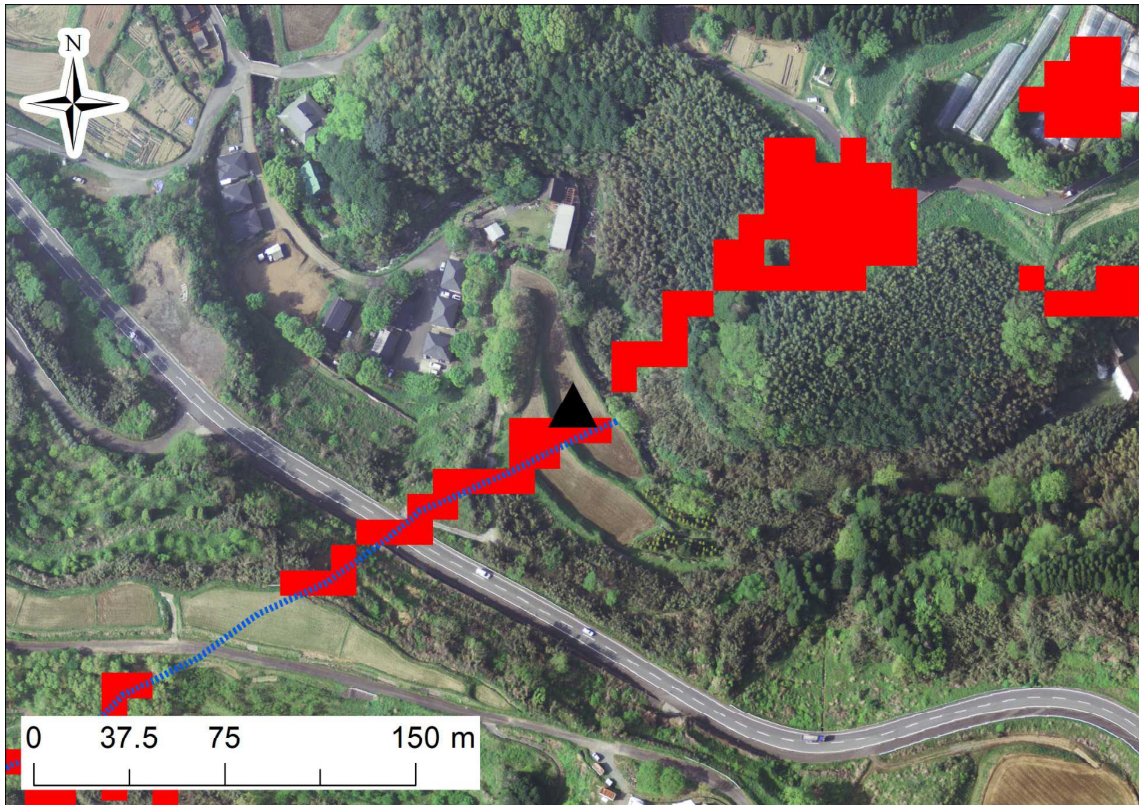


図 2.1.8 2017 年土林トレンチにおける位相不連続範囲（検討手法）

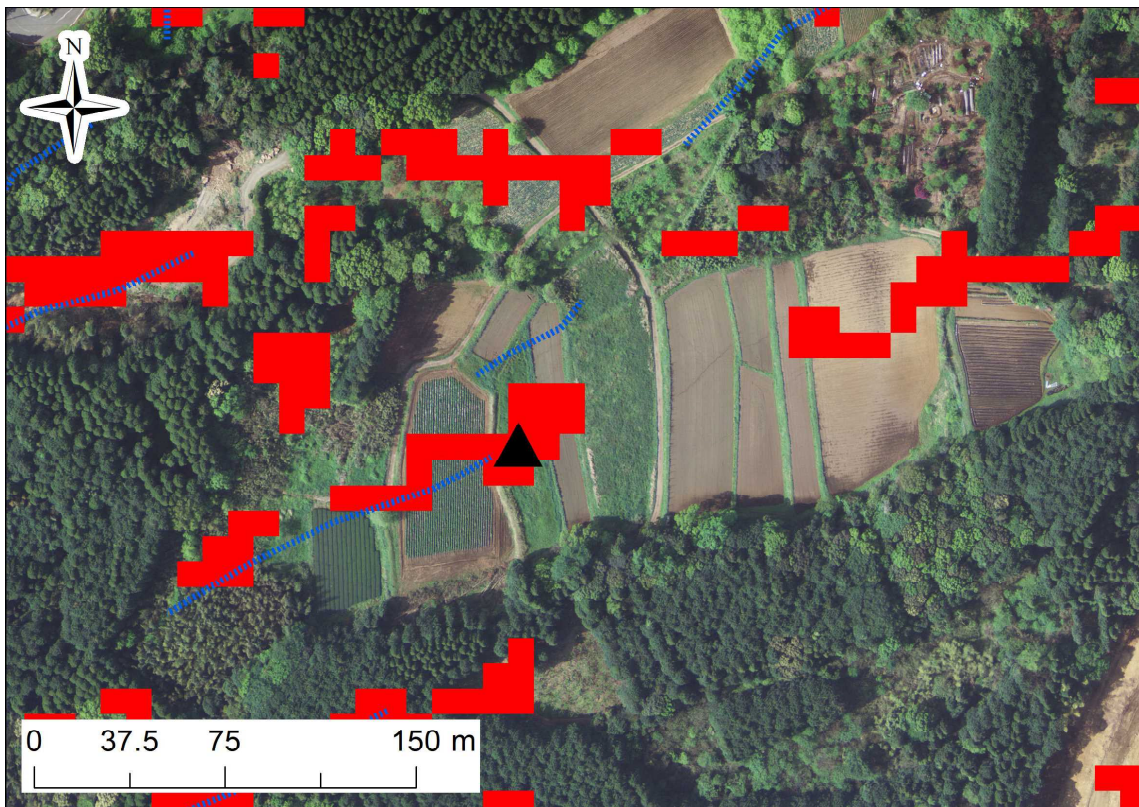


図 2.1.9 2020 年上陣東トレンチにおける位相不連続範囲（検討手法）

2.1.2. 画像マッチング解析の高度化

過年度事業の衛星画像（解像度 1.5m）解析を用いた画像マッチング解析では、精度が 60cm 程度であった。精度は解像度に依存することが示唆されたため、本事業においては高解像度の空中写真（20cm）を用いた解析を行い、より高精度の変位量分布図を作成する。

2.1.2.1. 方法

画像マッチング解析とは、地震前後に観測された光学画像のずれ量を計測する手法である（図 2.1.10）。水平方向（東西南北）の変位を計測することはできるが、鉛直方向の変位は計測することができない。またピクセルごとにずれ量を計測することから、解析原理上 1 ピクセルの大きさ（解像度）が小さいほどより微小な変位を計測することができる。そこで、本検討においては 2016 年熊本地震前後に観測された解像度 20cm の空中写真（株式会社パスコの災害緊急撮影成果、図 2.1.11）を使用して画像マッチング解析を実施する。表 2.1.1 に空中写真の撮影諸元、図 2.1.12 に撮影範囲を示す。

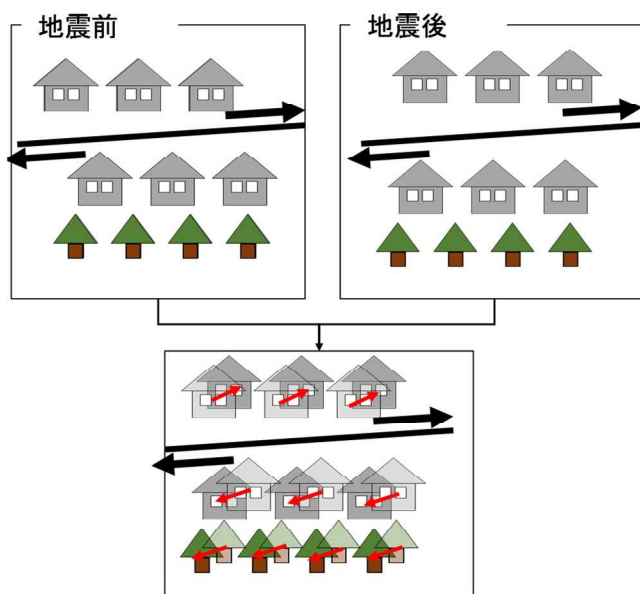


図 2.1.10 画像マッチング解析のイメージ



図 2.1.11 ADS80 による撮影イメージ (株式会社パスコ HP)

表 2.1.1 画像マッチング解析に使用する空中写真

光学画像	解像度	観測幅	観測日時
空中写真 (ADS80)	0.2m	数 km	2016年04月15日
			2016年04月19日

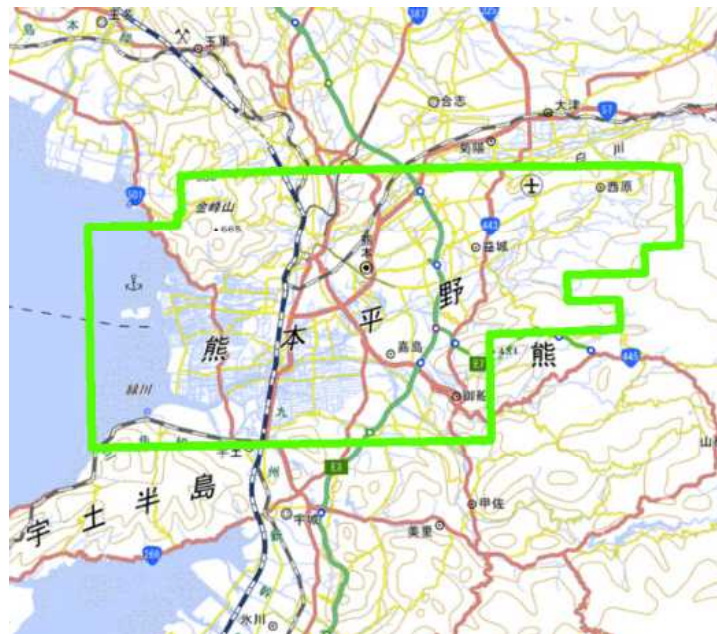


図 2.1.12 空中写真の撮影範囲

2.1.2.2. 解析結果

空中写真の画像マッチング解析結果を図 2.1.13 に示す。解析結果は X 成分（東西方向）と Y 成分（南北方向）で出力される。どちらの画像でも布田川断層を境に明瞭な変位の境界を確認できる。

主断層以外の細かい変位境界も確認することができる。図 2.1.14 に益城市街地周辺の東西方向変位量図を示す。黒矢印で示した主断層沿いの変位強化は明瞭に確認できることに加え、黒点線枠で示した微小な変位状況も把握することができる。一方で、黒実枠で示す住宅地では変位量の大きさ（赤色と青色）にばらつきがある。これは解像度がよいことから住宅の影や、駐車場の車両移動等を捉えて、画像マッチングがうまくいかなかったことが想定される。また南北方向変位量画像において横方向に顕著な縞模様が確認できる。これは実際の変位ではなく、空中写真の接合部に生じるノイズである。

明瞭な変位境界が確認できる堂園周辺の東西方向変位量図と、A-A'の変位量断面図、同範囲における現地計測の写真を図 2.1.15 に示す。A-A'断面では約 2m のずれ量が確認でき、現地計測のずれ量と整合的であることがわかる。ただし、変位量の計測精度については他の複数地点での検証が必要である。

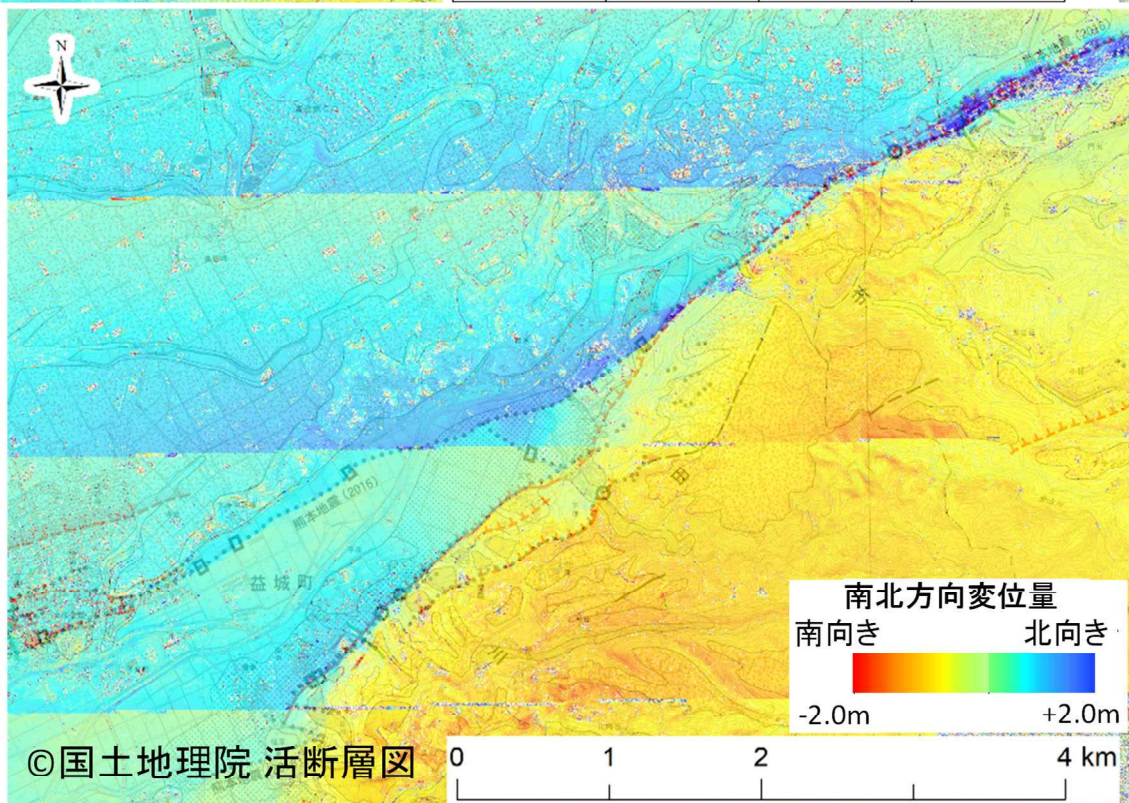
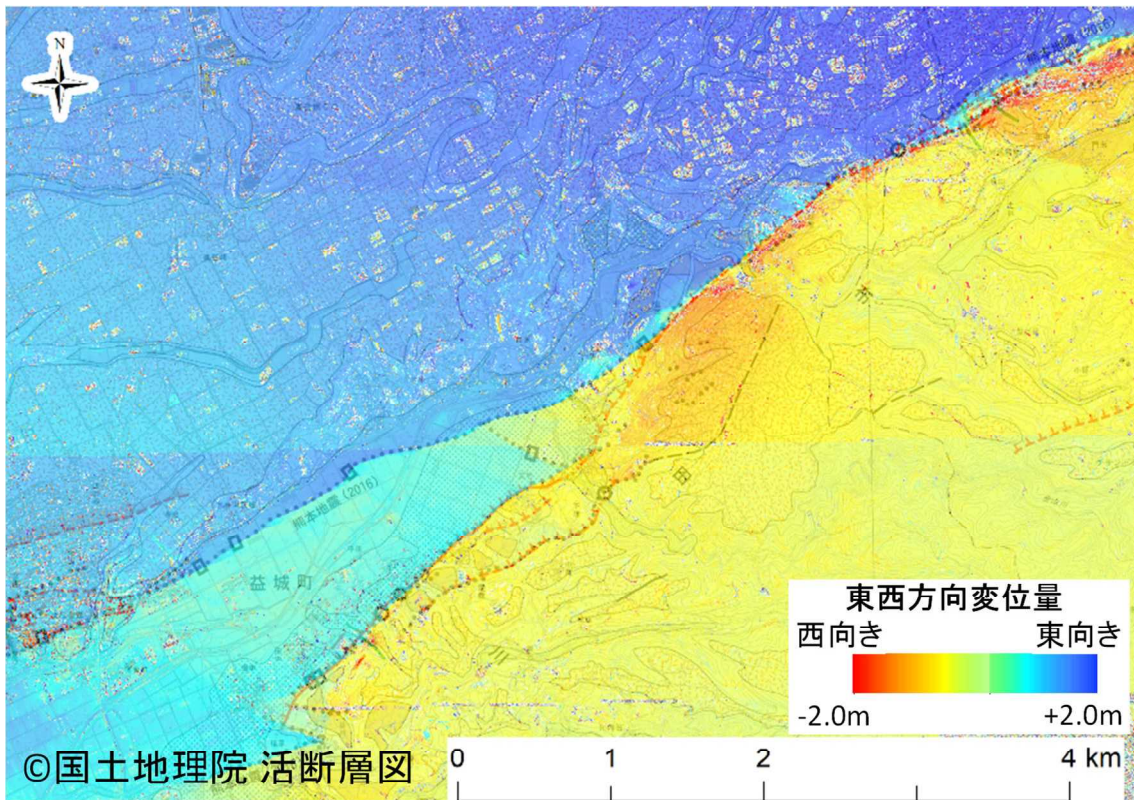


図 2.1.13 画像マッチングによる変動量図（上：東西方向、下：南北方向）

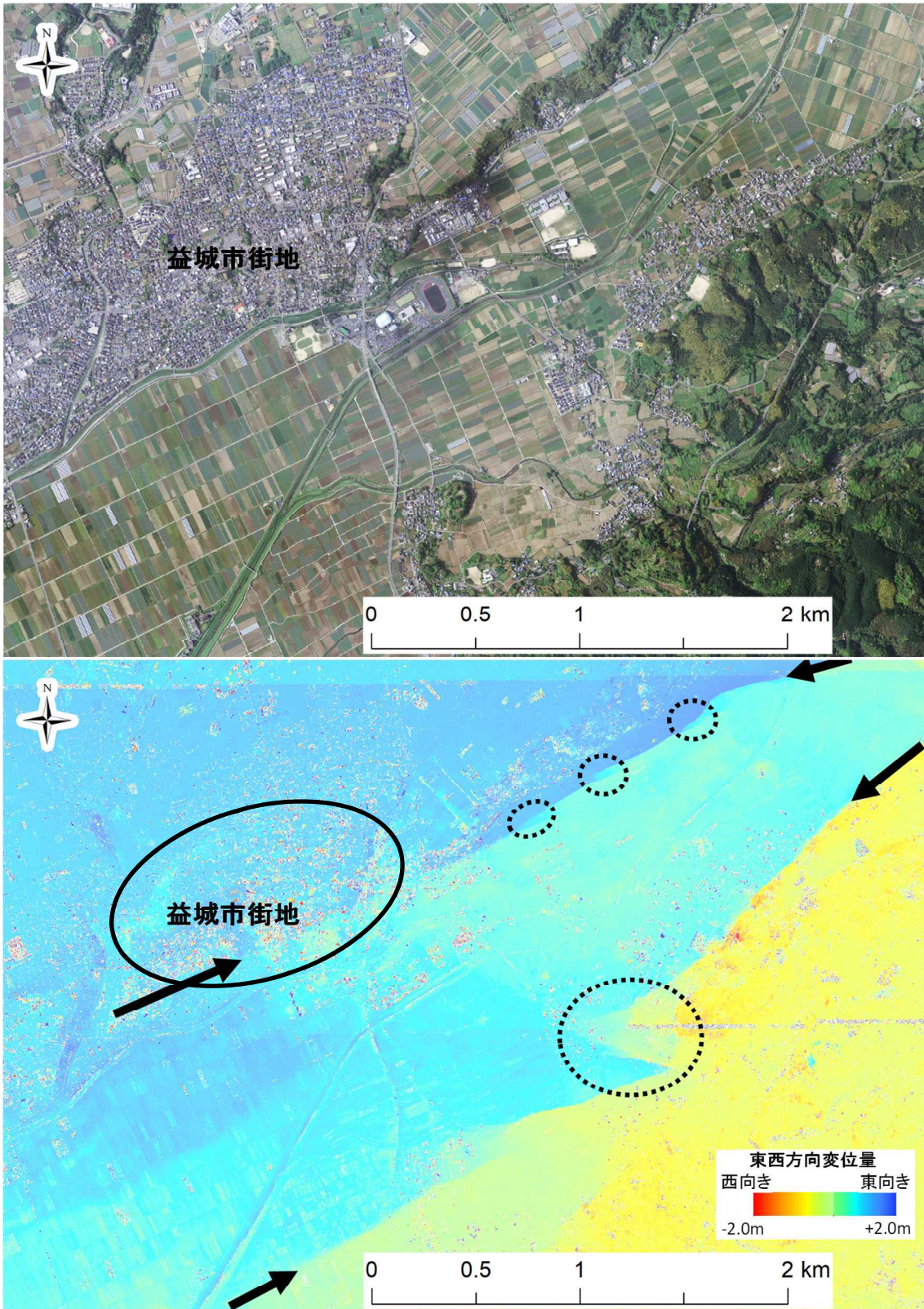


図 2.1.14 益城市街地の画像マッチング解析結果
 (上：地震後空中写真、下：東西方向変位量図)

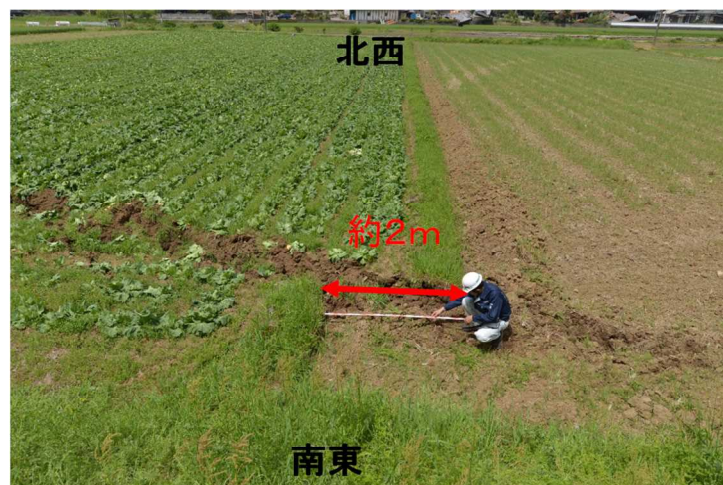
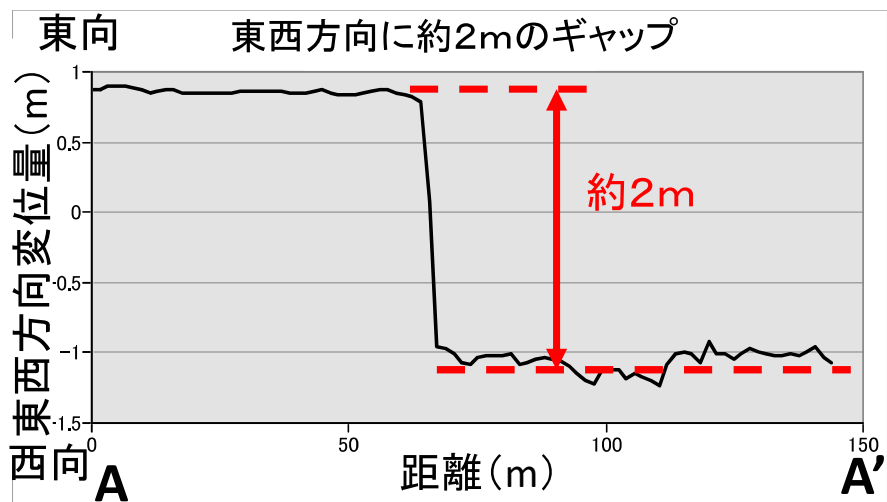
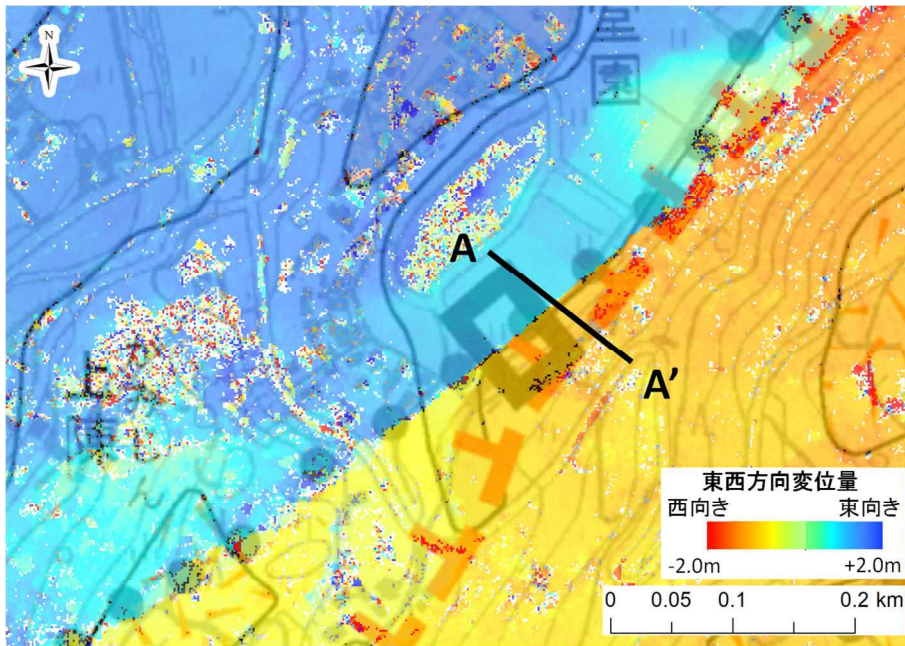


図 2.1.15 解析結果の妥当性確認
(上：東西方向変位量図、中：A-A'の断面図、下：現地計測結果)

2.1.2.3. 妥当性検証

画像マッチング解析結果がどの程度実現象を再現できているかについて、測量成果、現地での変位計測データ、既往トレンチ調査箇所と比較し、妥当性の検証を行う。

(1) 測量成果との比較

地震前後に測量が行われている国土交通省「熊本地震に伴う被災地域境界基本調査」の成果を用いて精度を検証した。

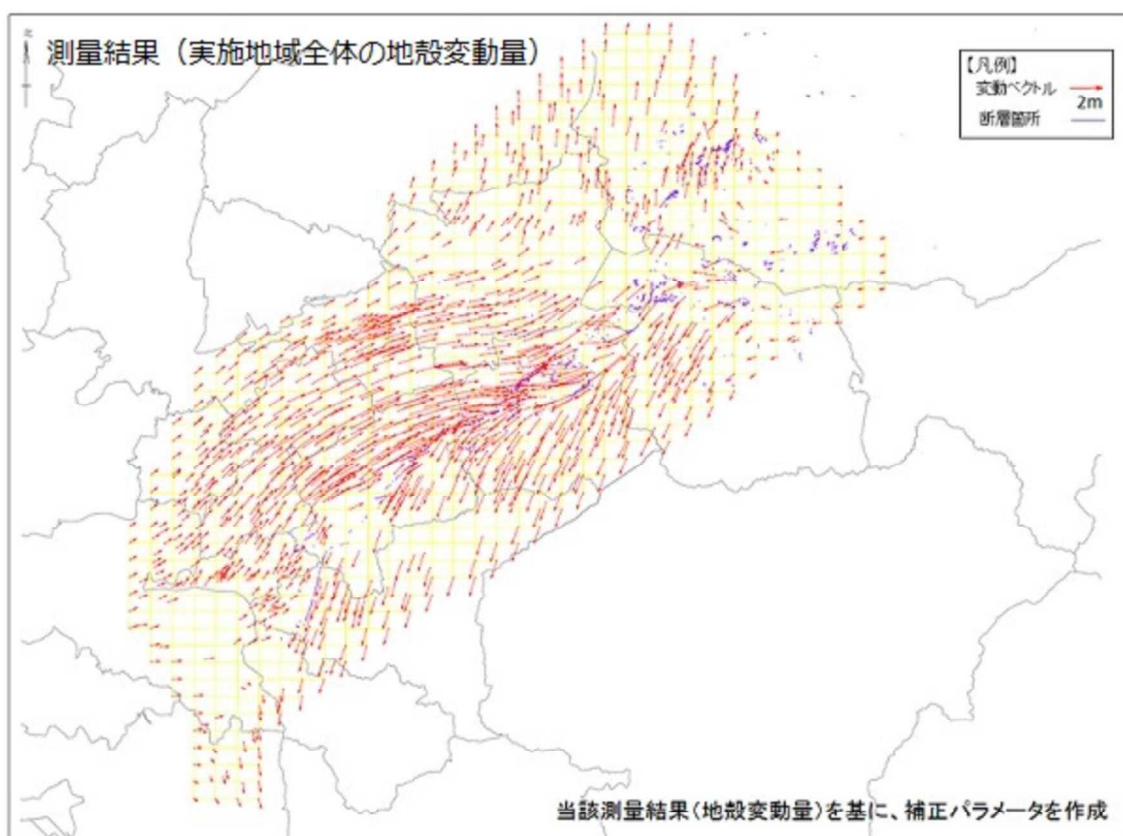


図 2.1.16 「熊本地震に伴う被災地域境界基本調査」

画像マッチング解析結果と測量成果との比較結果を図 2.1.17 に示す。横軸に測量成果、縦軸に解析結果の変位量を示す同図では、東西方向、南北方向のどちらでも明瞭な相関関係が確認できる。また「測量成果と解析結果の差が 0.5m 以内の範囲内」であることを示す黒点線内にほとんどの地点が含まれていることが確認できる。

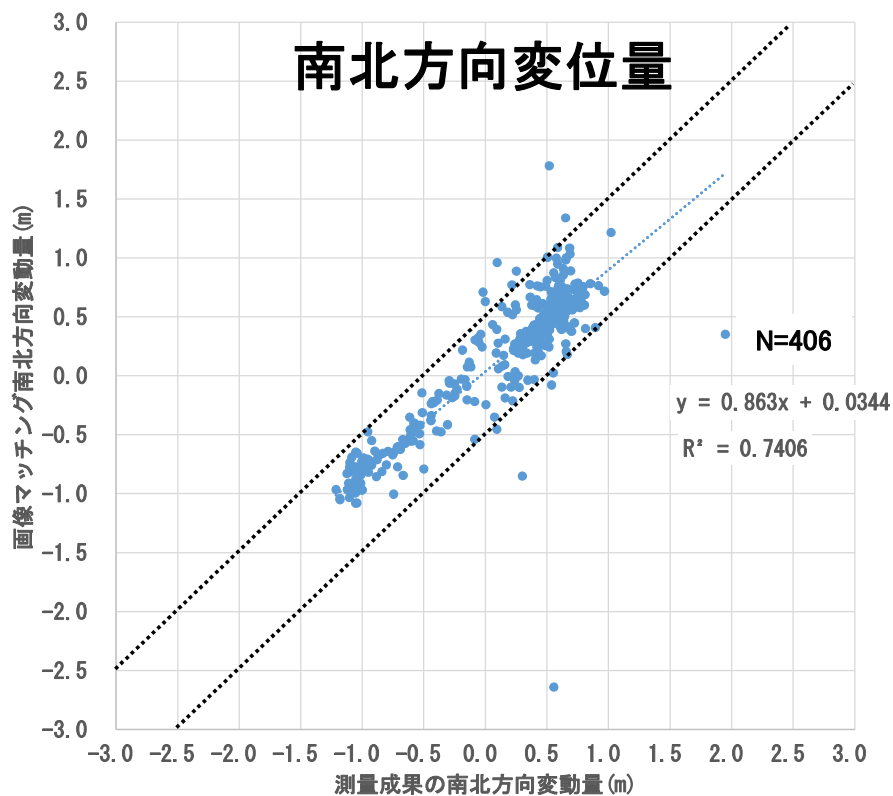
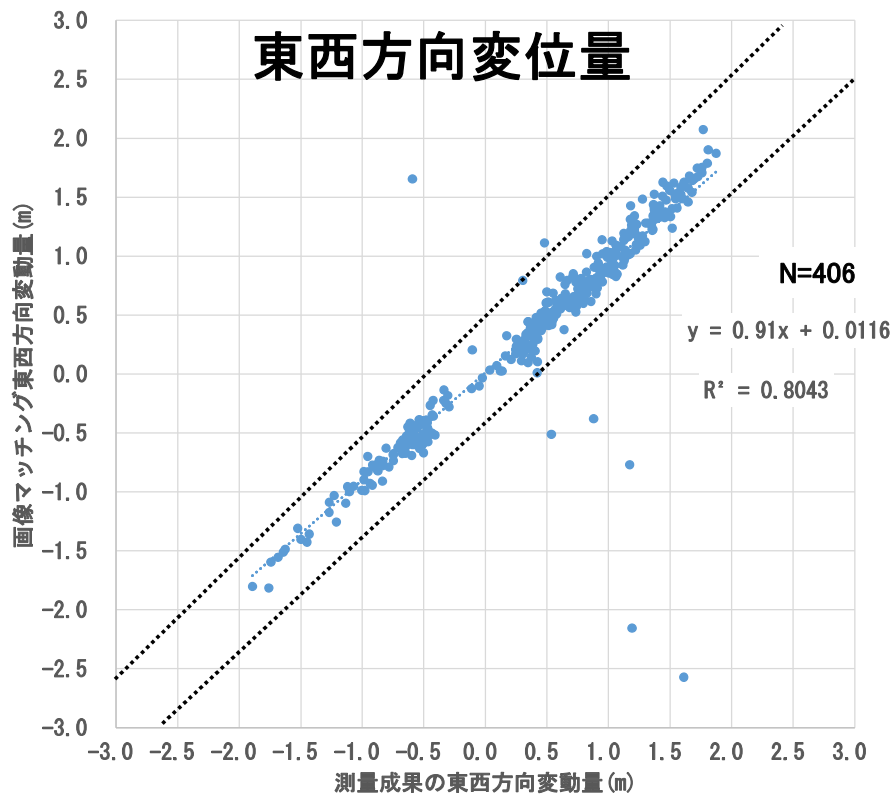


図 2.1.17 測量成果と画像マッチング解析結果の比較
 (上：東西方向変位量、下：南北方向変位量)

空中写真の画像マッチング解析結果と、昨年度事業で実施した SPOT7 号衛星の精度を合わせて表 2.1.2 に示す。なお、両者の撮影範囲が異なるため重複している範囲のみの測量成果と比較を行った。空中写真では RMSE（平均二乗誤差）が EW、NS とともに 0.26、RME（平均絶対誤差）は NE が 0.11、NS が 0.16 であった。RM 図 2.1.18SE は外れ値の影響を受けることから RME よりも悪い結果となったと考えられる。散布図をみると直線から大きく外れた点が数点確認できる。これはマッチングがうまくいかなかった点であるため大きな誤差が生じたと考えられる。これらの外れ値の影響を受けにくい RME をみると、EW で 0.11 と解像度の半分程度の精度となり SPOT7 号衛星の結果よりも大幅に精度が向上したことがわかる。

表 2.1.2 精度評価表

精度評価指標	空中写真(解像度 0.2m)		SPOT7 号(解像度 1.5m)	
	東西	南北	東西	南北
比較する 測量点数(点)	423		423	
画像マッチングで 変動量を取得できた 測量点数(点)	406		347	
較差が 0.1m 以下の 点数の割合(%)	62.1	47.0	9.2	12.4
較差が 0.15m 以下の 点数の割合(%)	84.7	60.1	16.1	18.4
較差が 0.2m 以下の 点数の割合(%)	93.3	71.7	23.6	24.5
較差が 0.5m 以下の 点数の割合(%)	98.5	97.0	57.6	59.9
較差が 1.0m 以下の 点数の割合(%)	98.8	99.0	95.1	83.9
較差の標準偏差(m)	0.26	0.26	0.39	0.67
RMSE(平均二乗誤差 m)	<u>0.26</u>	<u>0.26</u>	<u>0.58</u>	<u>0.40</u>
RME(平均絶対誤差 m)	<u>0.11</u>	<u>0.16</u>	<u>0.48</u>	<u>0.55</u>

(2) 現地調査との比較

地震後に現地調査が行われている Shirahama et al., 2016 データ（以下、現地測定）と空中写真画像マッチング解析結果の比較を行った。現地測定では 2016 年熊本地震後に現地計測でのずれ量計測（図 2.1.18）を実施し、点データとして整備している。この計測点において、画像マッチング解析結果で変位を検出できているかを確認した。



図 2.1.18 Shirahama et al., 2016 の現地計測

現地測定結果のうち、空中写真撮影範囲内の「横ずれ」のみを検証対象とした（図 2.1.19）。まず、東西方向変位量画像および、南北方向変位量画像を用いて変位境界を目視判読によってラインデータとして取得する（図 2.1.20）。次に取得したラインデータ周辺にある現地測定点を「抽出成功点」とし、それ以外を「抽出失敗点」とした。現地測定点には R_{slip} 値（ずれ量）が格納されているため、ずれ量の階級ごとに抽出成功率を算出する。

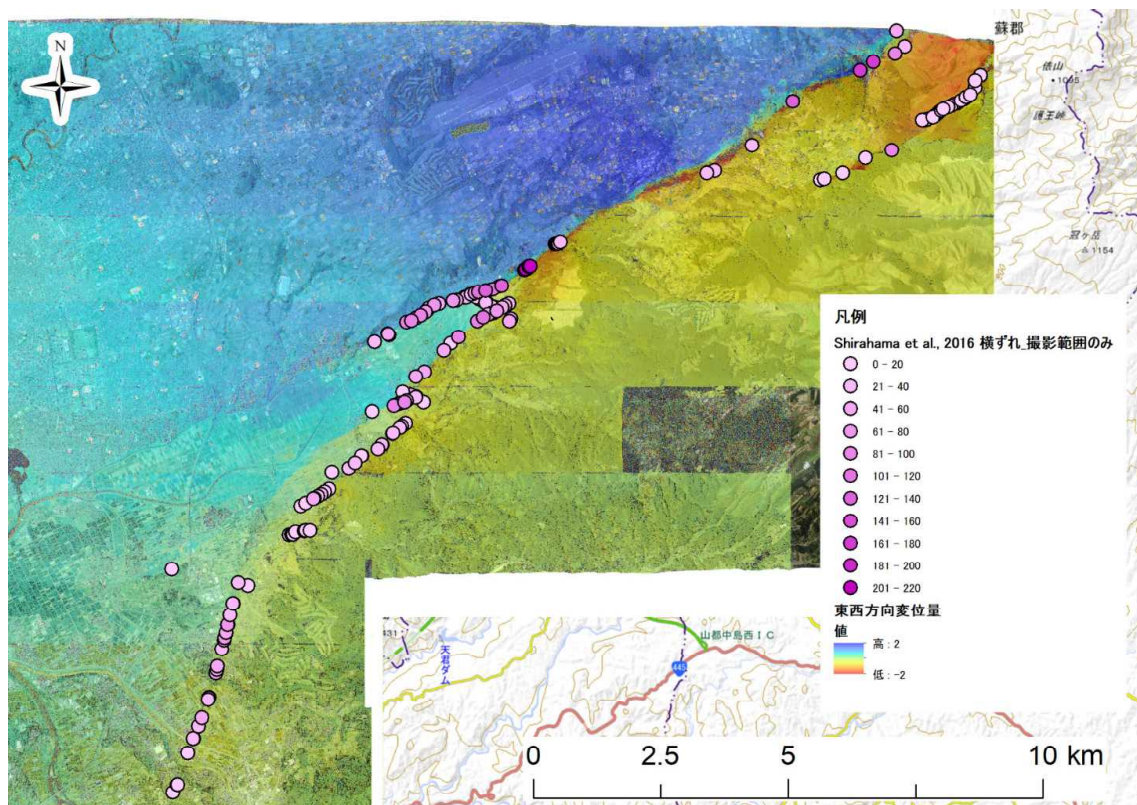


図 2.1.19 Shirahama et al., 2016 横ずれ_撮影範囲のみ

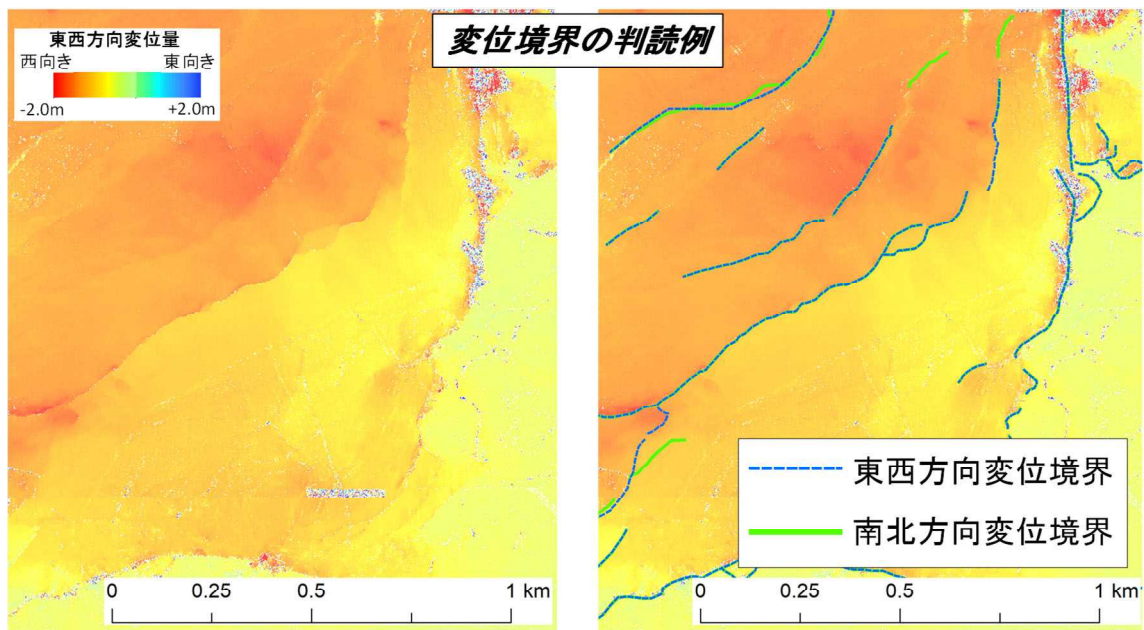


図 2.1.20 目視判読による変位境界ラインデータ取得例

以上の結果を表 2.1.3 に示す。ずれ量が 0 の極微小な変位の抽出成功率は 33%と低いが、1-10cm のときの抽出成功率は 86%、11-20 で 91%、21-30%、それより大きいずれ量では抽出成功率は 100%であった。cm 単位のずれが生じている場合の抽出成功率は高いことがわかった。cm 単位の変位境界を抽出する上では、空中写真の画像マッチング解析結果から目視判読した変位境界データを用いることで精度よく検出することができることが示唆された。

$$\text{抽出成功率} = \text{全現地測定点} / \text{抽出成功点}$$

表 2.1.3 R_slip 値階級ごとの抽出成功率

R_slip 値階級 (ずれ量[cm])	全現地 測定点	抽出 成功点	抽出 成功率
0	12	4	33%
1-10	14	12	86%
11-20	22	20	91%
21-30	39	38	97%
31-40	25	25	100%
41-50	16	16	100%
50-	56	56	100%

(3) 既往トレンチ調査箇所と比較

過年度事業にて実施済みのトレンチ調査箇所と、空中写真画像マッチング解析結果の比較を行い、変位を抽出できているかの確認を行った。既往トレンチ調査箇所の分布図を図 2.1.21 に示す。赤枠で示した箇所が過年度事業でトレンチ調査を実施済みの箇所である。黒の網掛け範囲が空中写真の撮影範囲であるため、本事業においては空中写真の撮影範囲である土林トレンチ、福原トレンチ、上陣東トレンチの3箇所における空中写真画像マッチング解析結果の確認を行った（表 2.1.4）。

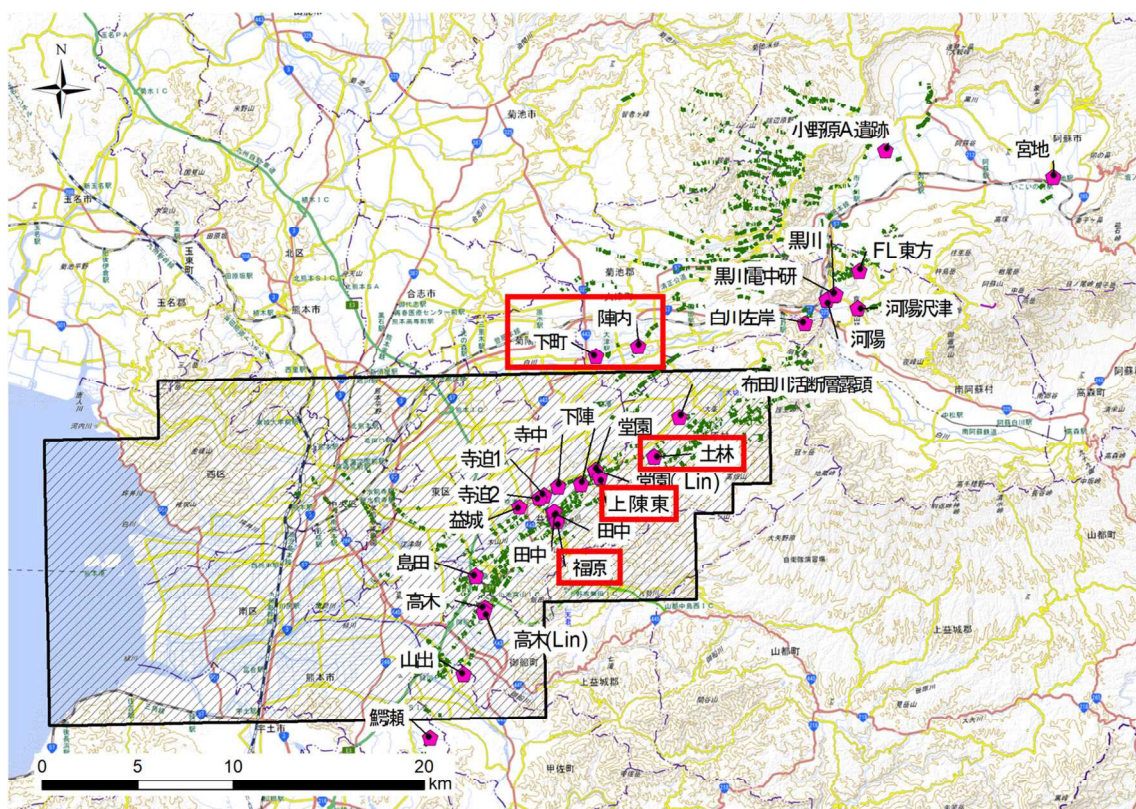


図 2.1.21 既往トレンチ調査箇所分布図

表 2.1.4 比較対象とするトレンチ調査箇所

No	トレンチ箇所名	実施年
1	土林	2017
2	福原	2017
3	上陣東	2020

①2017年福原トレンチ

2017年福原トレンチ周辺の空中写真と画像マッチング変位境界を図 2.1.22 に示す。同図をみるとトレンチ箇所には画像マッチング変位境界が確認できる。また現地調査結果からは、トレンチ箇所から東 10m に位置する道路に、10 数 cm の右横ずれを確認することができる(図 2.1.23)。

画像マッチング解析結果の東西方向変位量図を図 2.1.24 に、同図の黒線における変位量断面図を図 2.1.25 に示す。断面図をみると距離 50m の位置に福原トレンチが位置しており、それを境に北西側で変位量の絶対値が小さく、南東側で変位量の絶対値が大きい値を示しており、10 数 cm の右横ずれが確認できた。

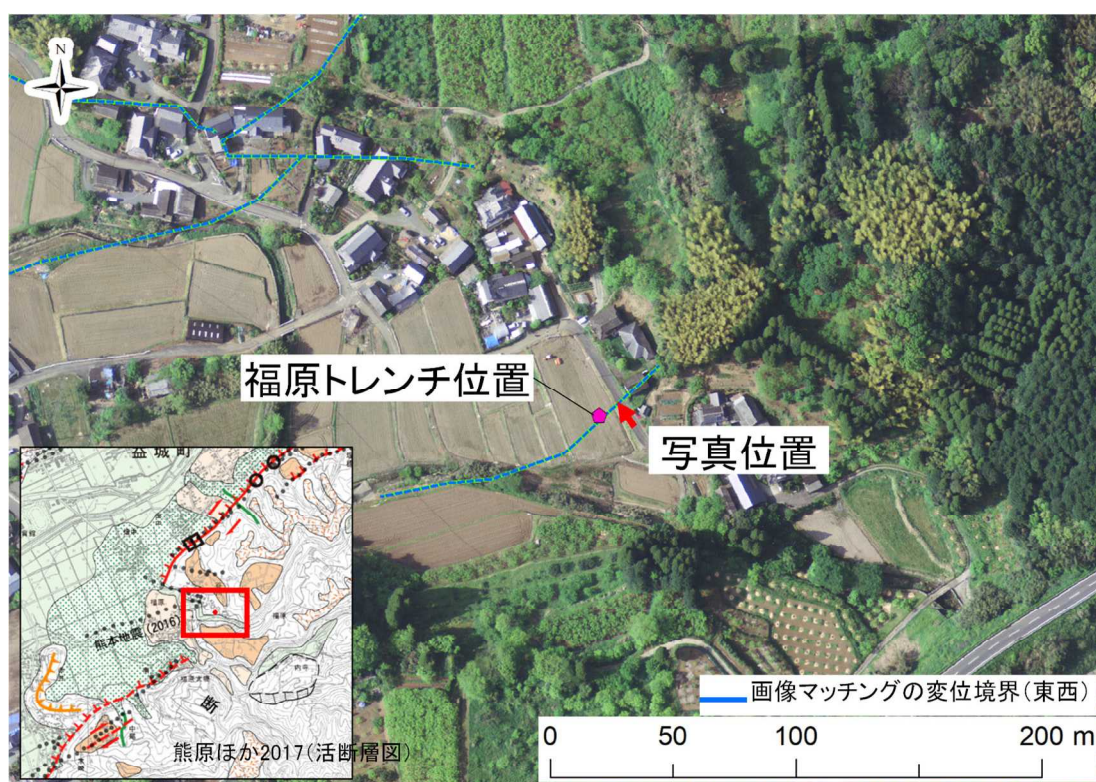


図 2.1.22 2017年福原トレンチ周辺の空中写真



図 2.1.23 2017年福原トレンチ周辺の現地写真

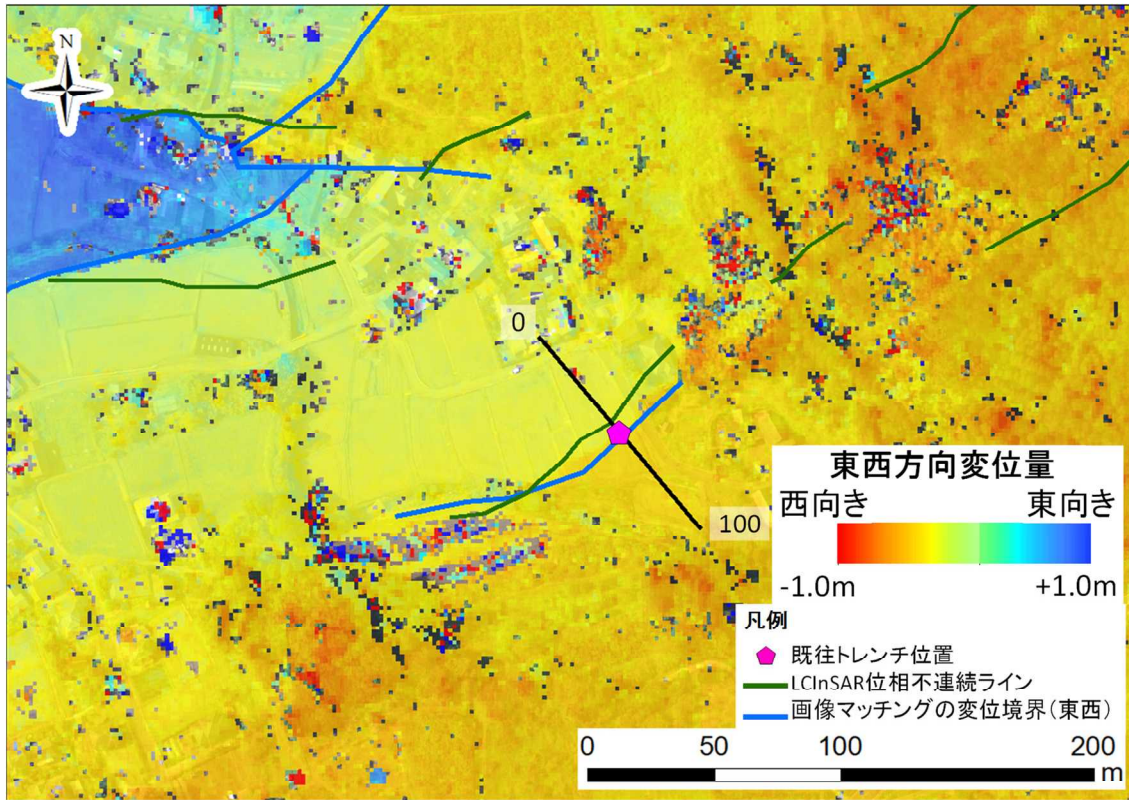


図 2.1.24 福原トレンチにおける東西方向変位量図

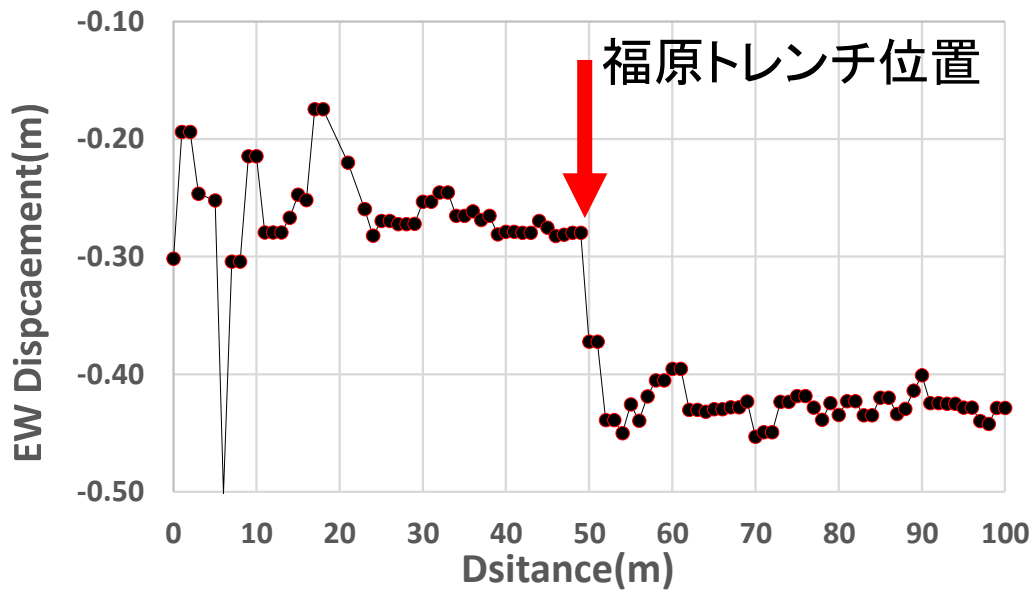


図 2.1.25 福原トレンチにおける東西方向変位量断面図

②2017年土林トレンチ

2017年土林トレンチ周辺の空中写真と画像マッチング変位境界を図 2.1.26 に示す。同図をみるとトレンチ箇所には画像マッチング変位境界が確認できる。また現地調査結果からは、トレンチ箇所から南西約 80m に位置する道路でアスファルトの右横ずれ（図 2.1.27）、南西約 40m 位置するコンクリート側道の右横ずれ（図 2.1.28）を確認することができる。

画像マッチング解析結果の東西方向変位量図を図 2.1.29 に、同図の黒線における変位量断面図を図 2.1.30 に示す。断面図をみると距離 60m の位置を境に北西側で変位量の絶対値が小さく、南東側で変位量の絶対値が大きい値を示しており、約 10cm の右横ずれが確認できた。



図 2.1.26 2017年土林トレンチ周辺の空中写真

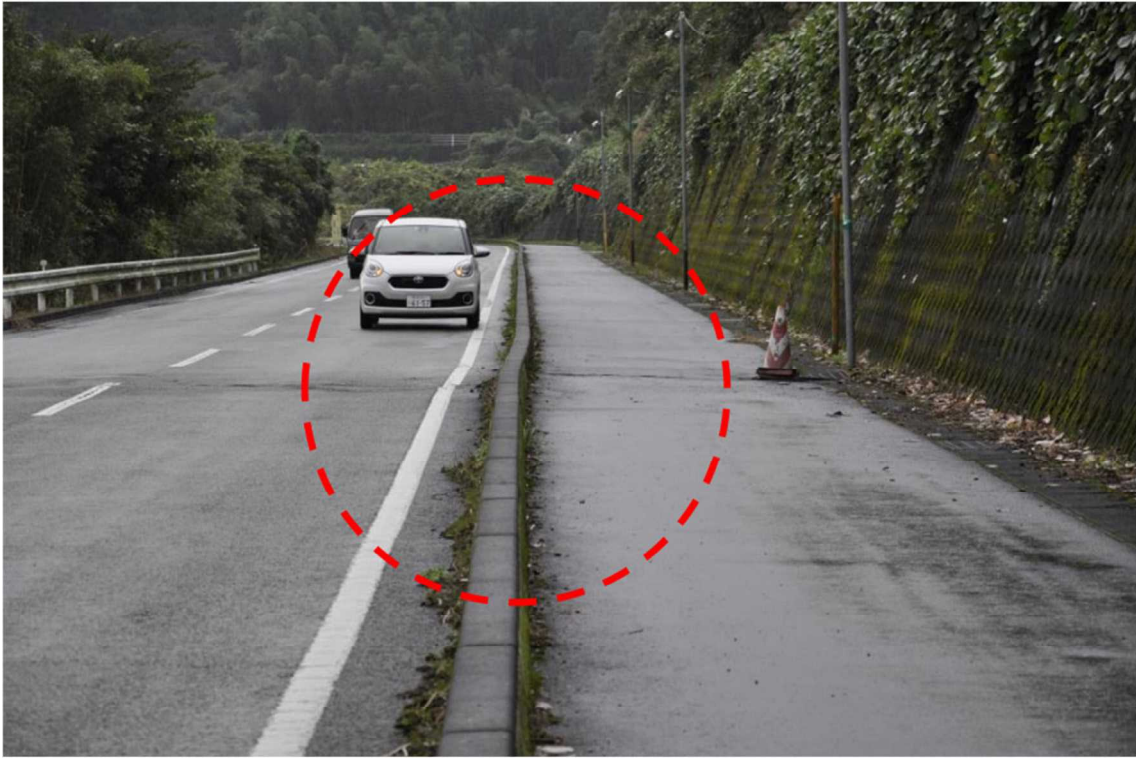


図 2.1.27 2017 年土林トレンチ周辺の現地写真①



図 2.1.28 2017 年土林トレンチ周辺の現地写真②

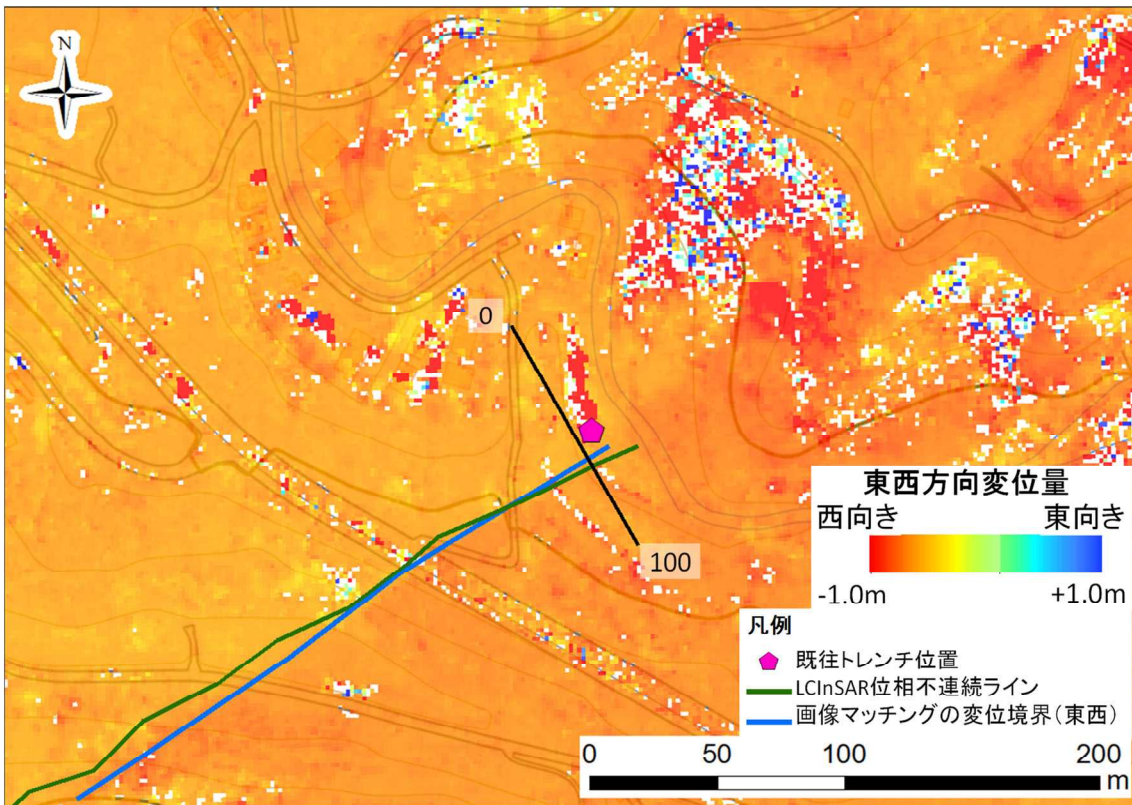


図 2.1.29 土林トレンチにおける東西方向変位量図

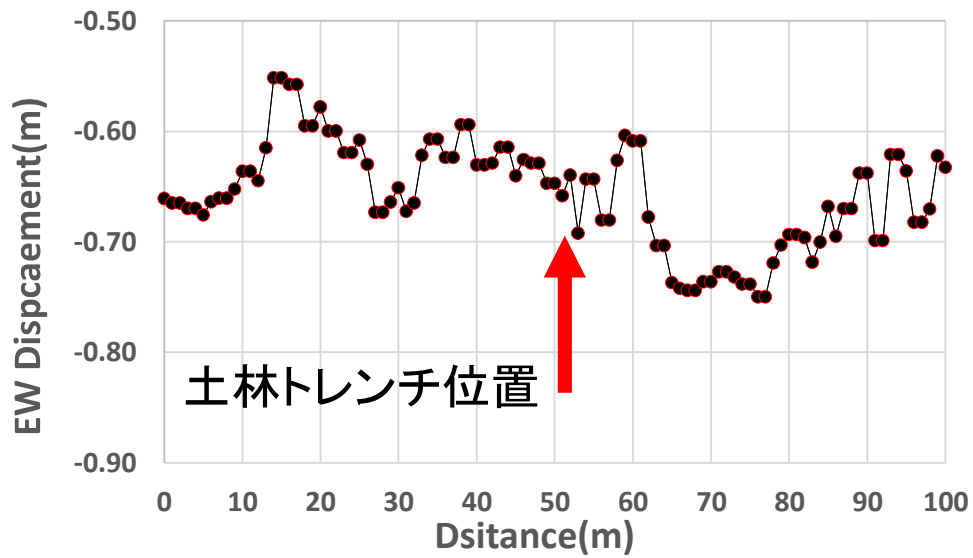


図 2.1.30 土林トレンチにおける東西方向変位量断面図

③2020 年上陣東トレンチ

2020 年上陣東トレンチ周辺の空中写真と画像マッチング変位境界を図 2.1.31 に示す。同図をみるとトレンチ箇所には画像マッチング変位境界は確認できない。また現地調査結果からも明瞭な変位境界は確認できない（図 2.1.32）。

画像マッチング解析結果の東西方向変位量図を図 2.1.33 に、同図の黒線における変位量断面図を図 2.1.34 に示す。断面図をみると距離 50m の位置に上陣東トレンチが位置している。トレンチ箇所から南南西側にいくほど徐々に変位量の絶対値が小さくなる左横ずれを示す変位が確認できるが、変位の境界は明瞭ではない。

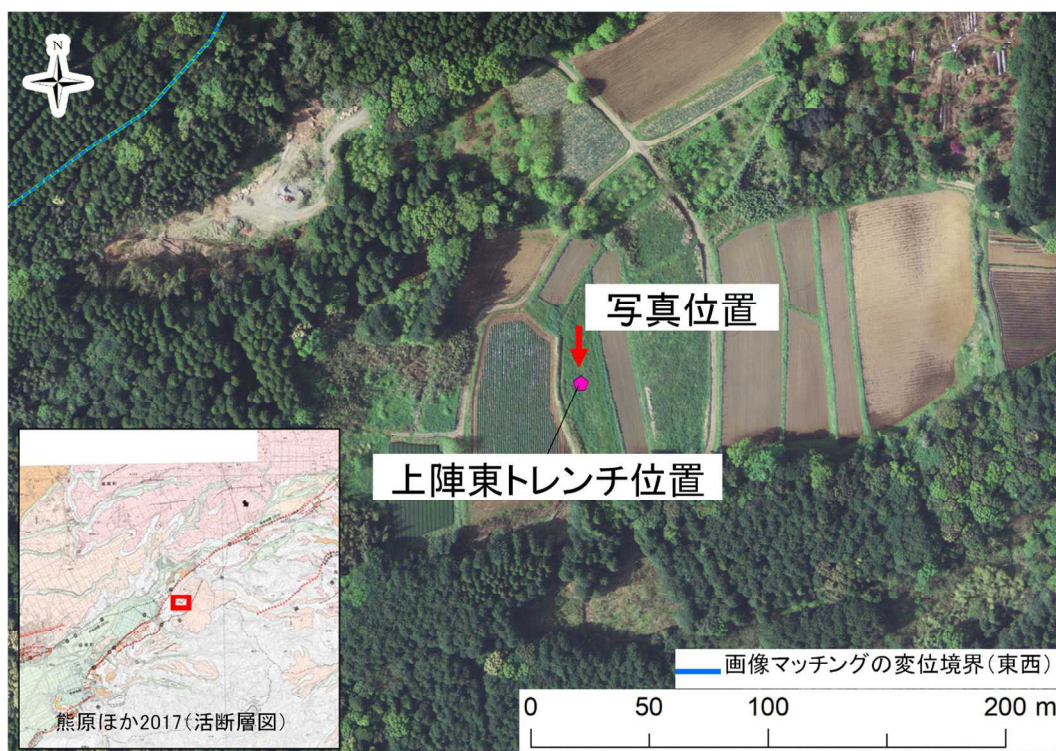


図 2.1.31 2020 年上陣東トレンチ周辺の空中写真



図 2.1.32 上陣東トレンチ周辺の現地写真

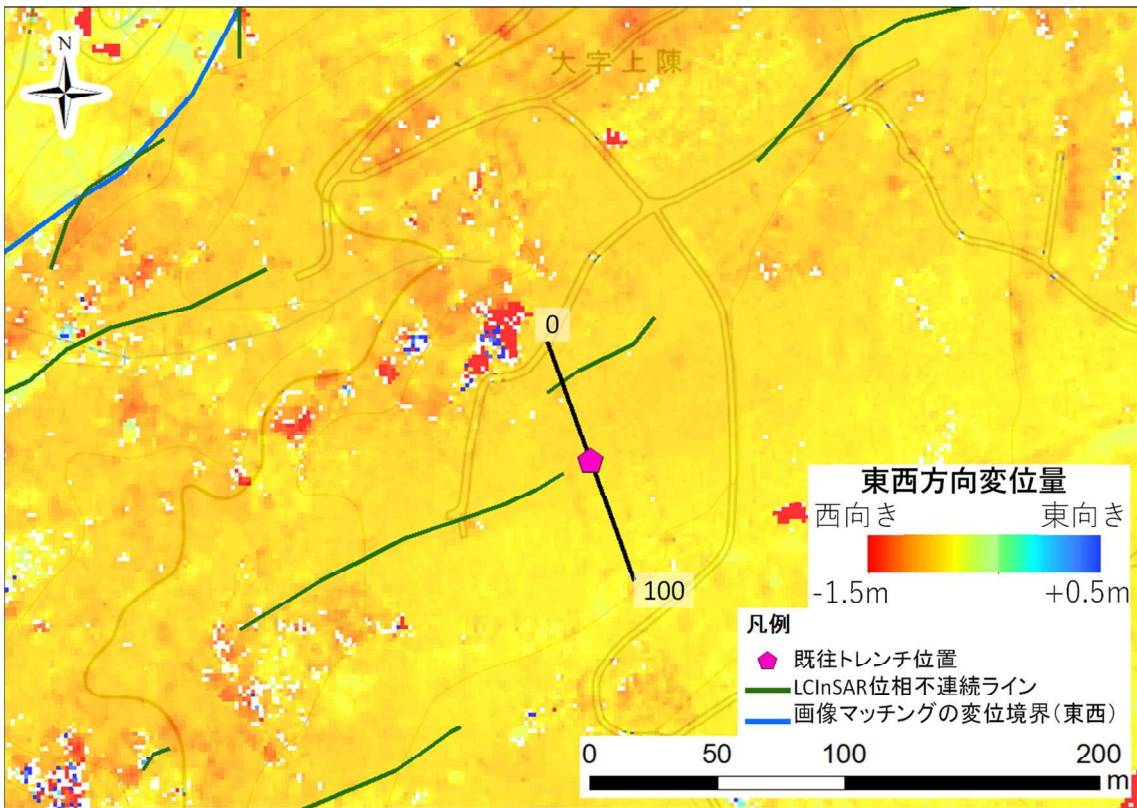


図 2.1.33 上陣東トレンチにおける東西方向変位量図

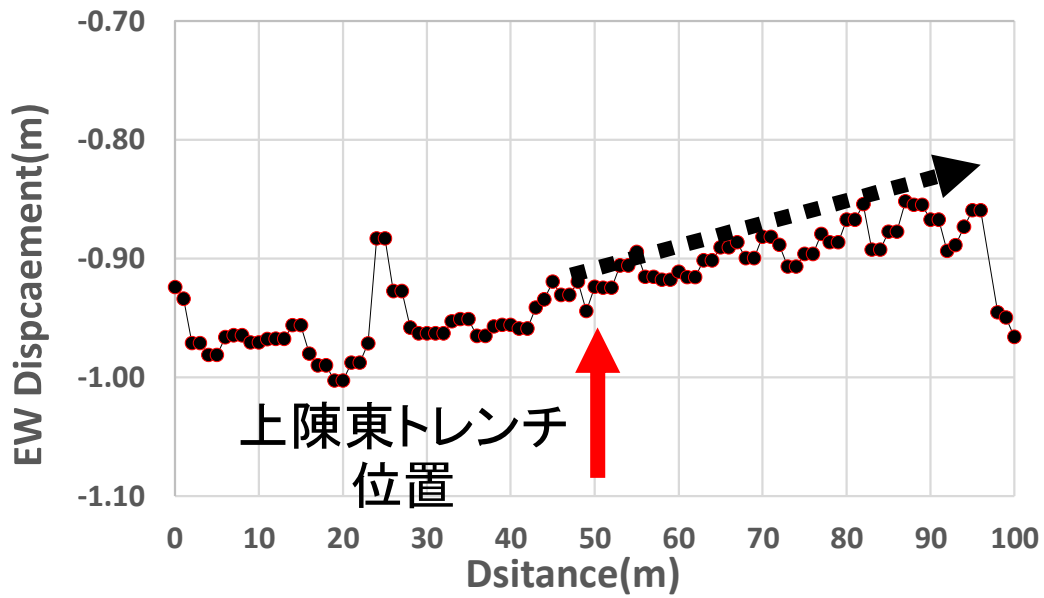


図 2.1.34 上陣東トレンチにおける東西方向変位量断面図

2.1.3. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討まとめ

本事業では 2016 年熊本地震を対象として、定量的な LC-InSAR 図の作成及び画像マッチング解析の高精度化を行った。

画像マッチング解析では、過年度事業の検討結果より、検出可能な変位量は解像度に依存することがわかっている。本事業では高解像度の 20cm 空中写真と測量成果と比較した結果、精度は 10~20cm 程度であることがわかった。さらに、地震によるずれ量を現地計測した shirahama et al.,2016 と比較した結果、ほとんどの箇所の変位を抽出することに成功しており、10cm 以下の変位も精度よく抽出することができていることがわかった。

干渉 SAR では熊本地震を対象とした ALOS-2 の LC-InSAR 図で微小な変位箇所を抽出することが可能であることが過年度事業で明らかとなっている。さらに、2019 年リッジレスト地震を対象とした、Sentinel-1 衛星の LC-InSAR 図では ALOS-2 よりも細かい変位箇所を抽出することができていることが示唆された（図 2.1.35）。ALOS-2 では、Sentinel-1 と比べて主断層沿いの変位勾配が大きい箇所も抽出可能（大きすぎると不可）である一方 Sentinel-1 では主断層から離れた位置での微小な変位も抽出することができている。これは両 SAR 衛星の波長が影響していると考えられる。一般に、波長が短いほど抽出することができる変位量は小さいが、変位勾配が大きい場合や植生域では干渉性は悪くなりやすい（変位量を得ることができない）。ALOS-2 の波長は約 24cm、Sentinel-1 では約 5.6cm であるため、主断層沿いの変位勾配が大きい変位は ALOS-2 の方がよく抽出でき、主断層から離れた位置の微小な変位は Sentinel-1 の方がよく抽出できたと考えられる。ただし、2019 年リッジレスト地震は植生のない砂漠地帯での検討結果であるため、日本のように植生の影響を考慮する必要がある地域では同様ではない可能性があることに留意する必要がある。

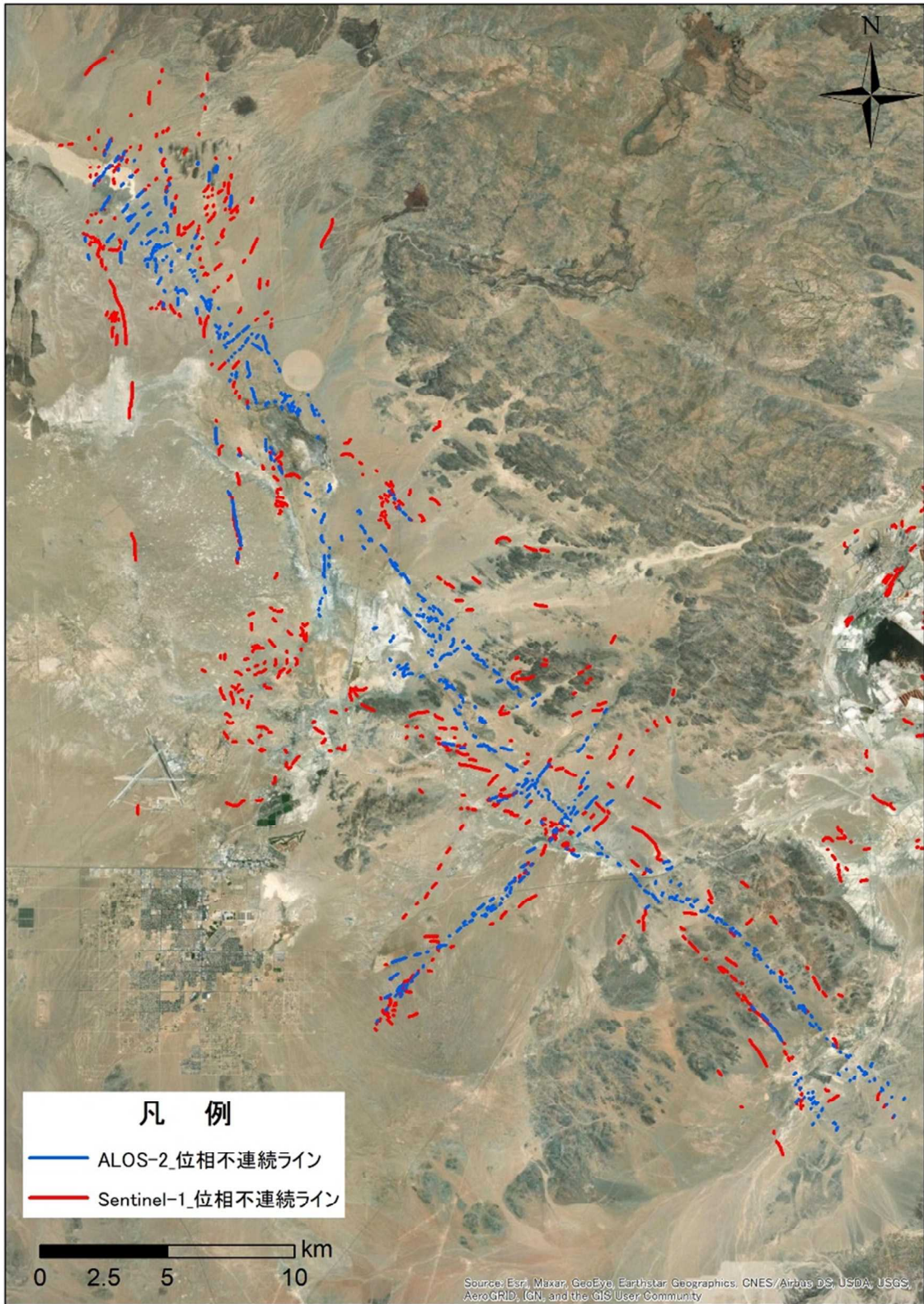


図 2.1.35 2019 年リッジクレスト地震における LC-InSAR 図

以上の検討結果をもとに測地的解析手法によって検出可能な変位のイメージを図 2.1.36 に整理した。画像マッチング解析では解像度の半分程度の精度で変位を抽出することが複数の光学画像の結果からわかっている。高精度の画像を使用すればさらなる高精度化が見込まれる。干渉 SAR で抽出できる変位量は波長に依存することがわかったが、短い波長では変位勾配の大きい主断層付近や、植生域での変位が抽出できないことが示唆された。対象とする地域や地震によって有効となる SAR 衛星を選択することが重要である。

画像マッチング解析は、主断層沿いの変位量の大きい範囲から 10cm 程度の変位量までの変位、干渉 SAR では主断層沿いは把握できないが、主断層から離れた位置の数 cm の微小な変位を把握可能である。2つの手法ををあわせて使用することにより、各手法で抽出することができない変位を補間することができる。

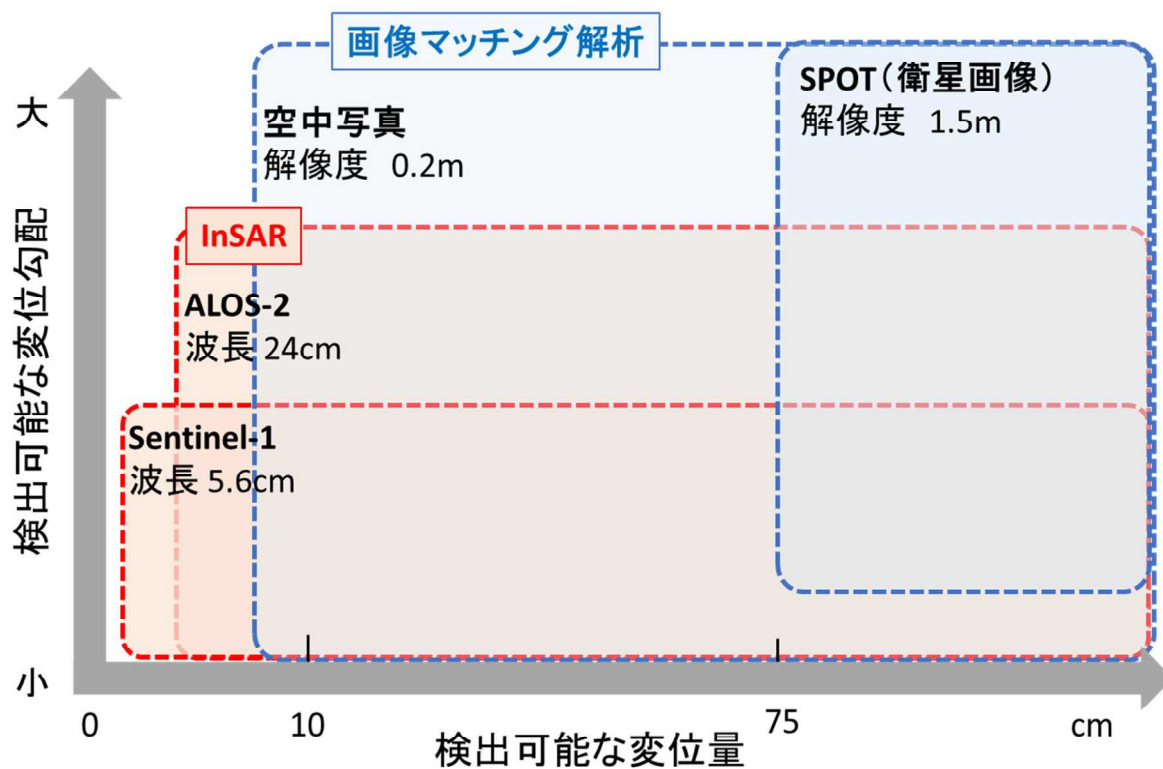


図 2.1.36 測地的解析手法によって検出可能な横ずれ変位のイメージ

2.2. 地表付近の副断層の性状や活動履歴の検討

2.2.1. 調査概要

SAR 衛星データ等を用いた解析から抽出した副断層をもとに、後述する物理探査（地中レーダ探査 16 地区、表面波探査 7 地区）を実施し、副断層トレンチ調査地点 2 箇所（出ノ口地区および小園地区）を選定した(図 2.2.1、図 2.2.2)。トレンチ調査では、壁面の詳細なスケッチ・記載を実施して、壁面の地質および変形構造(断層など)を詳細に記録した。あわせて、壁面を分割して撮影した写真をモザイクで組み合わせ、スケッチと同サイズで比較できるようにした。これにより、壁面の解釈を写真で検証することが可能となった。さらに、火山灰分析および炭素年代測定を実施し、年代制約の解釈を行った。事業の進捗にあわせて有識者を交えた検討会を実施することで、専門性の異なる複数の視点から副断層に係る知見の深化を図った。

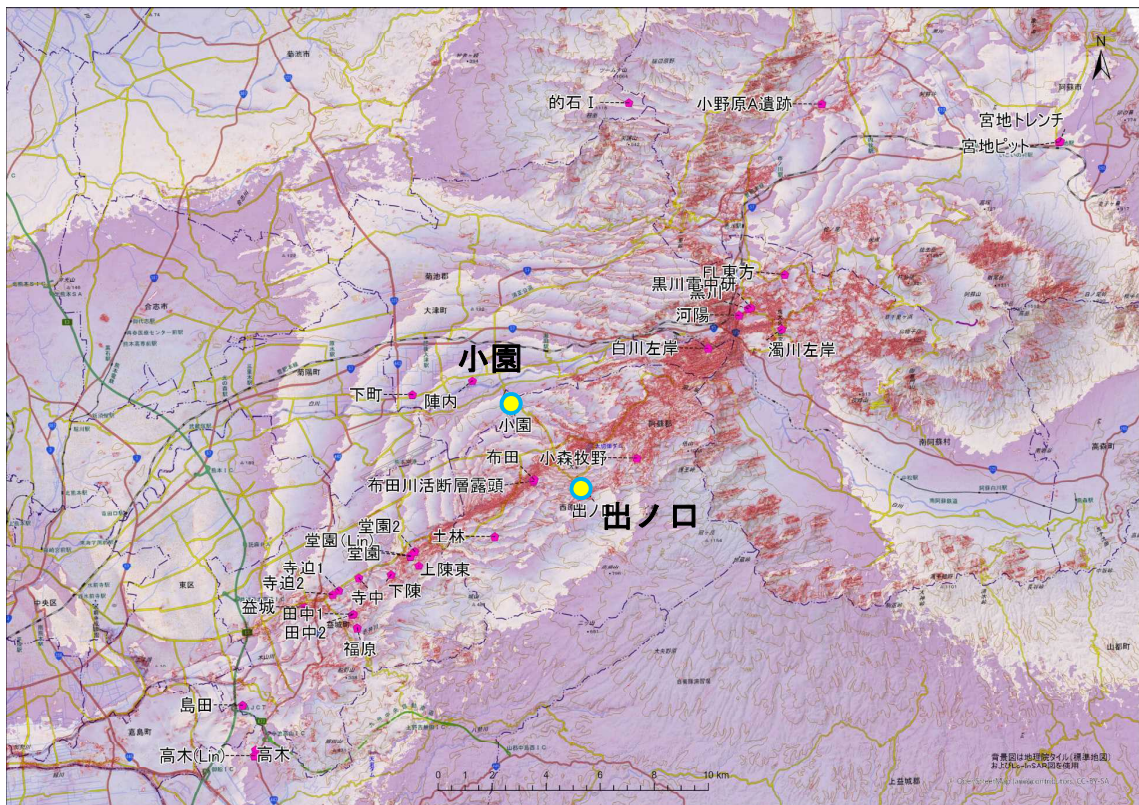


図 2.2.1 位置図(広域)

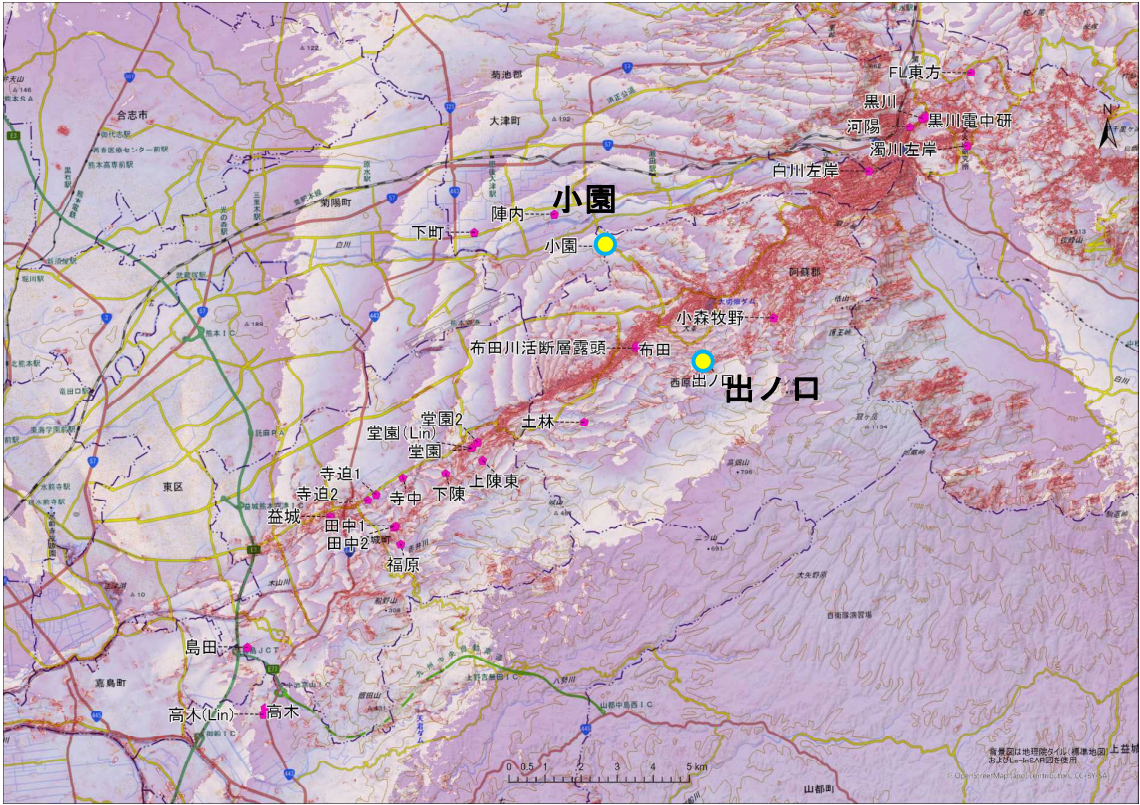


图 2.2.2 位置图(平野部)

2.2.1.1. トレンチ調査手法

(1) 数・規模および形状

トレンチは出ノロ地点で1箇所、小園地点で1箇所の計2箇所の掘削を行った。トレンチの規模は、開口部の大きさを8×10m、深さ4m、法面の傾斜は50～60°程度を予定した。実際には、断層の露出状況や地盤状況を鑑み、出ノロトレンチでは開口部の大きさを7m×10m・深さ4m（現地検討会后、一部増掘を実施）、小園トレンチでは開口部の大きさを8m×22m・深さ4m（再掘削箇所）とした。

(2) 現地作業期間

トレンチ調査（現地作業）は2021年10月4日（月）～2022年2月4日（金）の4カ月程度で実施した。

(3) 調査方法

トレンチ調査は以下に示す手順で実施した。トレンチ掘削状況については付属資料に取りまとめて示した。

- ①調査用地の境界設定
- ②調査用地周辺の平面図の作成
- ③調査用地および進入路の整備
- ④トレンチの掘削
- ⑤トレンチ法面の整形
- ⑥整形した法面に1.0mメッシュのグリッドの設置
- ⑦トレンチ壁面の詳細な観察、スケッチ（断層周辺）及び写真撮影
- ⑧トレンチ平面図の作成
- ⑨各種試験用サンプルの採取
- ⑩トレンチ埋め戻しと用地の現状復旧

2.2.1.2. 使用した機材

本調査で使用した機材を表 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 使用機材一式

機 材	仕様・規格	数量	単位
バックホウ	0.25m ³	1	台
〃	0.20m ³	1	台
〃	0.15m ³	2	台
簡易トイレ		2	台
発電機		1	台
オートレベル		1	台
水中ポンプ		1	台
エアーコンプレッサー		1	台
杭・安全柵他		1	式

2.2.1.3. 現地検討会

トレンチ掘削および整形が終了した段階で現地検討会を実施した。実施にあたっては、新型コロナウイルス対策として、マスク着用と消毒を徹底し密な状態とならないように配慮した。

現地検討会で委員より指摘のあった事項について追加調査および再検討を行い、業務成果に反映させた。

2.2.1.4. 放射性炭素年代測定

放射性炭素年代測定は(株)加速器分析研究所に依頼し、AMS法にて実施した。
測定方法の詳細を以下より示す。

1 化学処理工程

(1) 炭の化学処理

- 1) メス・ピンセットを使い、付着物を取り除く。
- 2) 酸-アルカリ-酸 (AAA : Acid Alkali Acid) 処理により不純物を化学的に取り除く。その後、超純水で中性になるまで希釈し、乾燥させる。AAA 処理における酸処理では、通常 1mol/l (1M) の塩酸 (HCl) を用いる。アルカリ処理では水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液を用い、0.001M から 1M まで徐々に濃度を上げながら処理を行う。アルカリ濃度が 1M に達した時には「AAA」、1M 未満の場合は「AaA」と表 1 に記載する。
- 3) 試料を燃焼させ、二酸化炭素 (CO₂) を発生させる。
- 4) 真空ラインで二酸化炭素を精製する。
- 5) 精製した二酸化炭素を、鉄を触媒として水素で還元し、グラファイト (C) を生成させる。
- 6) グラファイトを内径 1mm のカソードにハンドプレス機で詰め、それをホイールにはめ込み、測定装置に装着する。

(2) 土壌、黒褐色土壌の化学処理

- 1) 試料を超純水の中に入れ、超音波で分散させた後、ふるいにかけて根等の混入物を除去する。ふるいを通した土を乾燥させ、この後の処理に用いる。
- 2) 酸処理により不純物を化学的に取り除く。その後、超純水で中性になるまで希釈し、乾燥させる。処理には 1mol/l (1M) の塩酸 (HCl) を用い、表 1 に「HCl」と記載する。

以下、(1)3)以降と同じ。

2 測定方法

加速器をベースとした ¹⁴C-AMS 専用装置 (NEC 社製) を使用し、¹⁴C の計数、¹³C 濃度 (¹³C/¹²C)、¹⁴C 濃度 (¹⁴C/¹²C) の測定を行う。測定では、米国国立標準局 (NIST) から提供されたシュウ酸 (HOxII) を標準試料とする。この標準試料とバックグラウンド試料の測定も同時に実施する。

3 算出方法

- 1) δ¹³C は、試料炭素の ¹³C 濃度 (¹³C/¹²C) を測定し、基準試料からのずれを千分偏差 (‰) で表した値である (表 1)。AMS 装置による測定値を用い、表中に「AMS」と注記する。
- 2) ¹⁴C 年代 (Libby Age : yrBP) は、過去の大気中 ¹⁴C 濃度が一定であったと仮定して測定され、1950 年を基準年 (0yrBP) として遡る年代である。年代値の算出には、Libby の半減期 (5568 年) を使用する (Stuiver and Polach 1977)。¹⁴C 年代は δ¹³C によって同位体効果を補正する必要がある。補正した値を表 1 に、補正していない値を参考値として表 2 に示した。¹⁴C 年代と誤差は、下 1桁を丸めて 10 年単位で表示される。また、¹⁴C 年代の誤差 (±1σ) は、試料の ¹⁴C 年代がその誤差範囲に入る確率が 68.2% であることを意味する。

- 3) pMC (percent Modern Carbon)は、標準現代炭素に対する試料炭素の¹⁴C濃度の割合である。pMCが小さい(¹⁴Cが少ない)ほど古い年代を示し、pMCが100以上(¹⁴Cの量が標準現代炭素と同等以上)の場合 Modern とする。この値も $\delta^{13}\text{C}$ によって補正する必要があるため、補正した値を表1に、補正していない値を参考値として表2に示した。
- 4) 暦年較正年代とは、年代が既知の試料の¹⁴C濃度をもとに描かれた較正曲線と照らし合わせ、過去の¹⁴C濃度変化などを補正し、実年代に近づけた値である。暦年較正年代は、¹⁴C年代に対応する較正曲線上の暦年代範囲であり、1標準偏差(1 σ =68.3%)あるいは2標準偏差(2 σ =95.4%)で表示される。グラフの縦軸が¹⁴C年代、横軸が暦年較正年代を表す。暦年較正プログラムに入力される値は、 $\delta^{13}\text{C}$ 補正を行い、下1桁を丸めない¹⁴C年代値である。なお、較正曲線および較正プログラムは、データの蓄積によって更新される。また、プログラムの種類によっても結果が異なるため、年代の活用にあたってはその種類とバージョンを確認する必要がある。ここでは、暦年較正年代の計算に、IntCal20較正曲線(Reimer et al. 2020)を用い、OxCalv4.4較正プログラム(Bronk Ramsey 2009)を使用した。暦年較正年代については、特定の較正曲線、プログラムに依存する点を考慮し、プログラムに入力する値とともに参考値として表2に示した。暦年較正年代は、¹⁴C年代に基づいて較正(calibrate)された年代値であることを明示するために「cal BC/AD」または「cal BP」という単位で表される。

2.2.1.5. 火山灰分析

火山灰分析は古澤地質(株)に依頼し、粒子組成分析、屈折率測定および主成分元素組成分析を実施した。

実施方法の詳細を以下より示す。

前処理

古澤(2003)の方法を基本に前処理を行った。洗浄は、はじめにナイロン製使い捨て#255メッシュシート(糸径 $43\mu\text{m}$, オープニングワイド $57\mu\text{m}$)を用い、流水中で洗浄した。残砂を#125メッシュシート(糸径 $70\mu\text{m}$, オープニングワイド $133\mu\text{m}$)を用い水中で篩い分けした。これにより $1/8\sim 1/16\text{mm}$ に粒度調整した試料を超音波洗浄機を用いて洗浄し、表面に付着した粘土分などを洗い流した。

粒子組成分析用薄片作成

鉱物観察用スライドガラスの上に硬化後屈折率が1.545程度となる光硬化樹脂を載せ、この樹脂に上記洗浄・篩い分けを行った試料を攪拌・封入させ、カバーガラスで覆い粒子組成観察用薄片を作成した。樹脂の屈折率を1.545とする目的は石英や長石類の識別にある。

主成分分析用薄片作成

上記前処理試料を偏光顕微鏡を用い、火山ガラスのみを手選し、これをエポキシ樹脂を用いてスライドガラス上に包埋し、#3000カーボランダムで研磨し、 $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーパーストにて鏡面研磨した薄片を作成した。

検鏡(粒子組成分析)方法

前処理・プレパラートした粒子を偏光顕微鏡(100倍)を用いて観察し、300粒子(1000粒子の平均値)を古澤(2003)の区分手法にしたがって、火山ガラス、長石類・石英、斜方輝石、単斜輝石、普通角閃石、カミングトン閃石、その他の重鉱物(カンラン石、ジルコンなど)、不透明鉱物および岩片・風化粒に区分した。火山ガラスは発泡跡の大きさにより、発泡跡が 0.1mm 四方に2-3個以内しか見られない大きな発泡跡を有するバブルウォールタイプ(Bw)、発泡跡が 0.1mm 四方に4個以上見られるパミスタタイプ(Pm)、発泡跡同士が密着せずガラス中に細かい泡となって含まれるか全く含まれない急冷タイプ(O)の3タイプにまとめて区分した。また、重鉱物組成については、100粒子を目処に、斜方輝石、単斜輝石、普通角閃石、黒雲母、その他(不透明鉱物、ジルコン、アパタイト etc.)に区分し、粒子組成とは別に記載した。

屈折率測定方法

測定には、浸液の温度を直接測定しつつ屈折率を測定する温度変化型測定装置^{マイオット}"MAIOT"を使用した。測定精度は火山ガラスで±0.0001程度である（古澤,1995）。

顕微鏡は、ニコン顕微鏡 ECLIPSE600 シリーズ（偏光・位相差装置付）、位相差用対物レンズ（10倍および長作動20倍）、光源は12V100Wハロゲンランプ、全誘電体干渉フィルター（589.3nm）を使用した。温度変化装置として全面等温度透明加温板（0.1℃の精度で制御可能）、プログラム温度コントローラー（0.1℃の精度で制御可能）、高感度熱電対（0.1℃の精度で測定可能）、パーソナルコンピューターを使用した。

以下に測定の手順を示す。

顕微鏡ステージ上に設置した加温板に、浸液と試料および熱電対とを密封したごく薄いカプセルを載せる。カプセルは、大きさ18×24mm、厚さ0.12～0.17mmのガラス板（下板）と、直径18mmで同じ厚さのガラス板（上板）との間に、熱伝導性の高いシーリング材を使用して浸液と試料および熱電対を密封したもので、総厚が0.5～0.6mm程度である。浸液は単一化学式を有する有機化学合成液である。つぎに、加温板の温度を制御して、ほぼ一定の温度変化速度で、浸液および試料の温度を室温～60℃の範囲で変化させる。この様子を、位相差状態の顕微鏡で観察する。観察時の波長はナトリウムD線（589.3nm）である。この画像を観察しながら、ガラスの輪郭が消失する温度を記録する。実際には温度上昇あるいは下降時に1回パーソナルコンピューターに接続されたマウスを左クリックする。屈折率は、あらかじめ作成した各浸液の温度と屈折率との一次式から変換され、パーソナルコンピューターに記録される。測定個数の目処はガラスが30片、斜方輝石が10片である。ただし、値バラツキがある試料では、モードを把握できるまで測定した。記録された屈折率、熱電対の温度データはリアルタイムにパーソナルコンピューターに入力され、温度、測定個数などとともに屈折率ヒストグラムとしてモニターに表示される。

主成分元素組成分析方法

以下の分析装置および条件により、エネルギー分散型X線マイクロアナライザー（EDX）を用い、火山ガラスの主成分を分析した。

使用機材：SEM:HITACHI SU1510 EDX:HORIBA EMAXEvolution EX-270

検出器 液体窒素レス検出器 X-Max(80mm²)

加速電圧：15kV

試料電流：0.3nA.

ビーム径：4μm 四方の範囲を約90nmのビーム径にて走査させて測定。

ライブタイム：50sec.

主成分組成計算方法：ファイローゼット(φ(ρZ)補正)

スタンダードには高純度人工酸化物結晶（純度99.99%以上のSiO₂, Al₂O₃, TiO₂, MnO, MgO）、純度99.99%以上の単結晶NaCl, KCl, CaF₂を用いた。また、測定終了時毎に、主成分がほぼ均質なATテフラの火山ガラスを用い、測定値をチェックした。

2.2.1.6. その他

本調査では諸法令を遵守するとともに、法令や条例等による関連機関への手続き、ならびに調査用地の使用や借用のための交渉等については受注者側にて実施した。また、調査に伴い産出した土器片については、熊本県西原村の教育委員会に報告を行うとともに、出土品を提出した。

2.2.2. 出ノロトレンチ

2.2.2.1. 調査位置

出ノロトレンチは熊本県阿蘇郡西原村大字宮山字小牧鶴において実施した（図 2.2.3）。調査位置は画像マッチングによる変位抽出位置上に設定し、想定される変位を直角に横断するように掘削を行った。

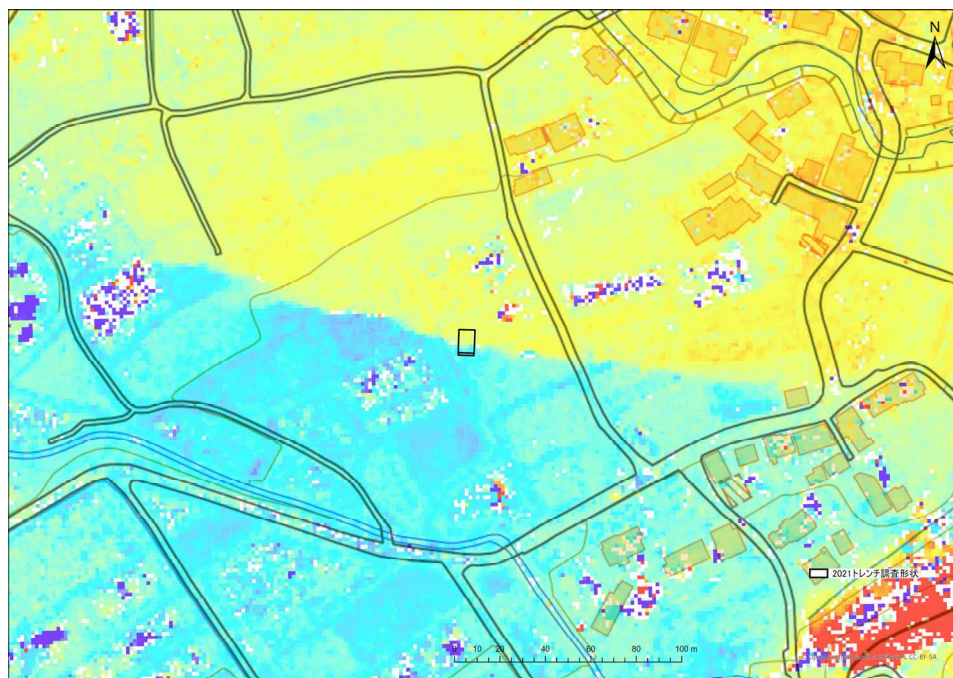


図 2.2.3 出ノロトレンチ位置図

2.2.2.2. 掘削結果

当初の掘削予定範囲では想定した断層変位が全て露出せず、断層の途中までしか観察できない状況となった。そのため、現地検討会後に増掘を行い、想定した断層変位を露出させた。最終的に、開口部の大きさを7m×11m・深さ4mとした（図 2.2.5～図 2.2.7）。

トレンチ法面は機械掘削後に手作業による整形を行い、水平方向1m毎×鉛直方向1m毎のグリッドを作成した。掘削を行ったトレンチ形状および高さの基準とした仮基準点（コンクリートブロック端部）についてRTK-GPS測量にて求めた。設置したグリッドの標高については、鉛直0m高（貫板上面）からレベル測量にて計測した。計測結果を表 2.2.2 に示す。

表 2.2.2 出ノロトレンチ測量成果

測定位置	標高(T.P.m)	測定方法	備考
コンクリートブロック端部	313.41	RTK-GPS	※1
鉛直方向 0.00m	312.85	レベル	貫板上面
鉛直方向-1.00m	311.85	レベル	
鉛直方向-2.00m	310.85	レベル	
鉛直方向-3.00m	309.85	レベル	
鉛直方向-4.00m	308.85	レベル	

※1：標高値は10秒間8Hz計測（合計80回）の平均値により求めた値



図 2.2.4 トレンチ全景

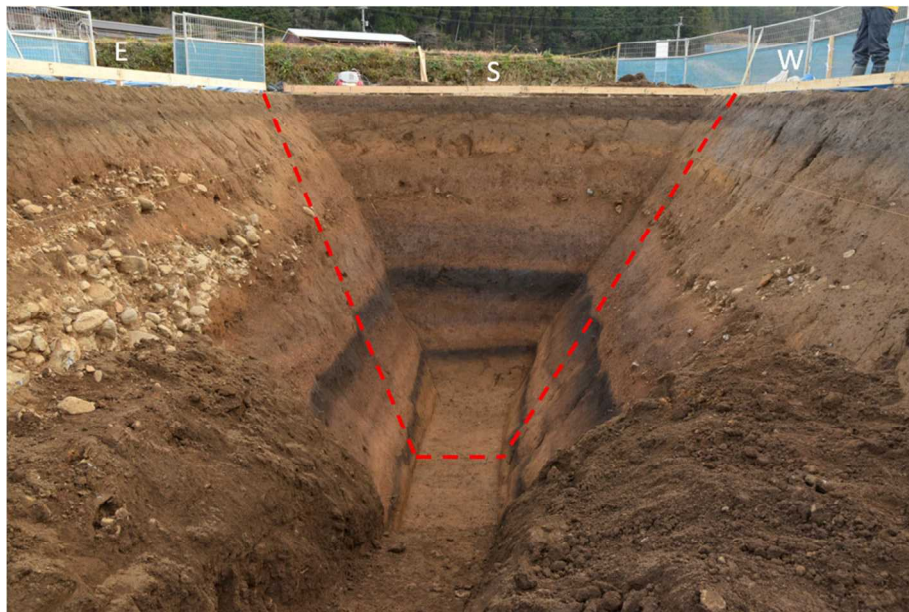


図 2.2.5 トレンチ掘削状況
※赤破線が増掘前の掘削範囲

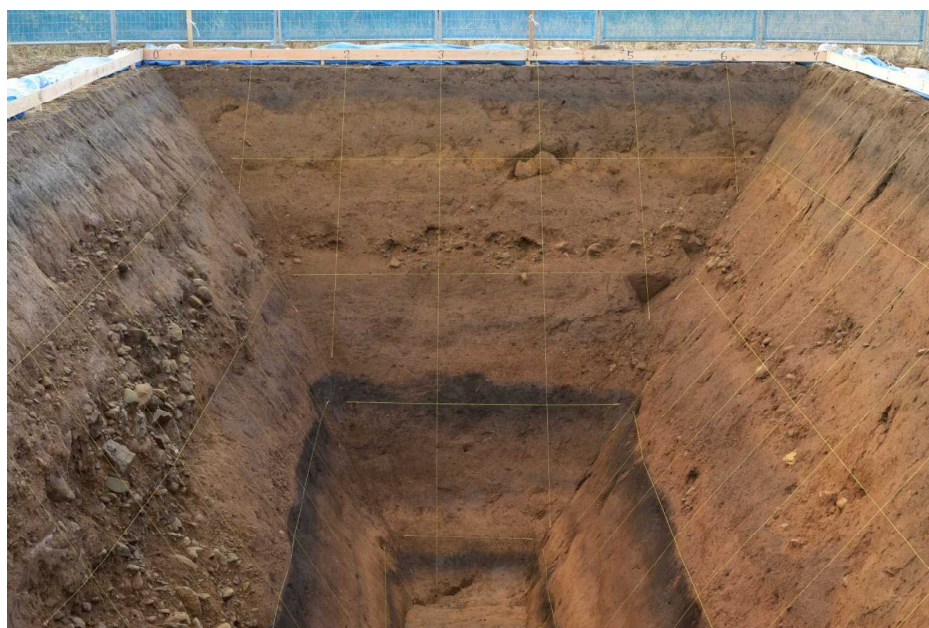


図 2.2.6 増掘前掘削状況

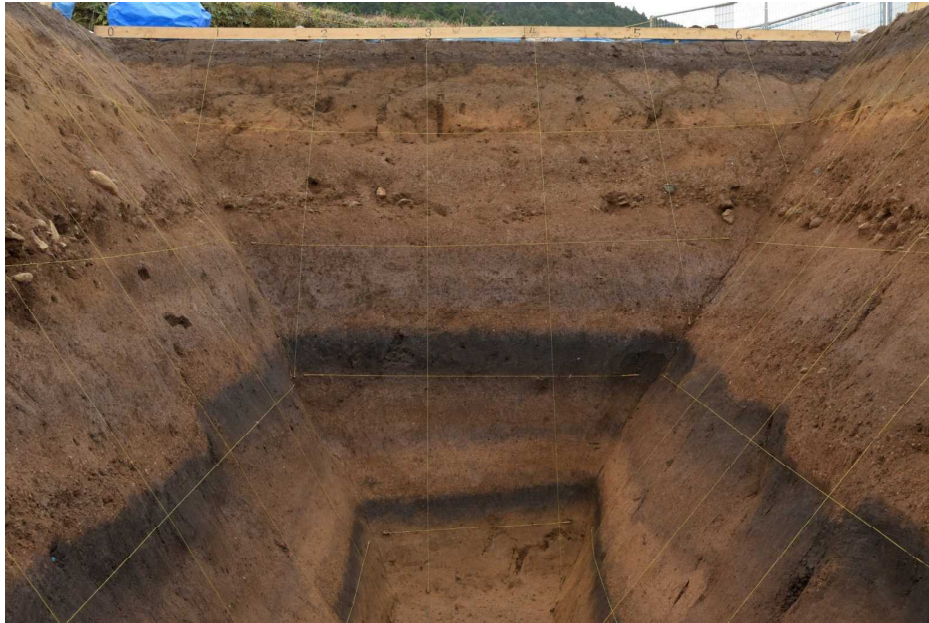


图 2.2.7 增掘後掘削状况

2.2.2.3. モザイク写真

トレンチ法面の写真撮影は極力歪みが少なくなるように実施した。撮影した写真画像は画像の歪み等を補正したうえで鉛直面に投影したモザイク写真を作成した。

作成したモザイク写真を次ページより示す。



図 2.2.8 出ノロトレンチモザイク写真（増掘前+増掘後合成）

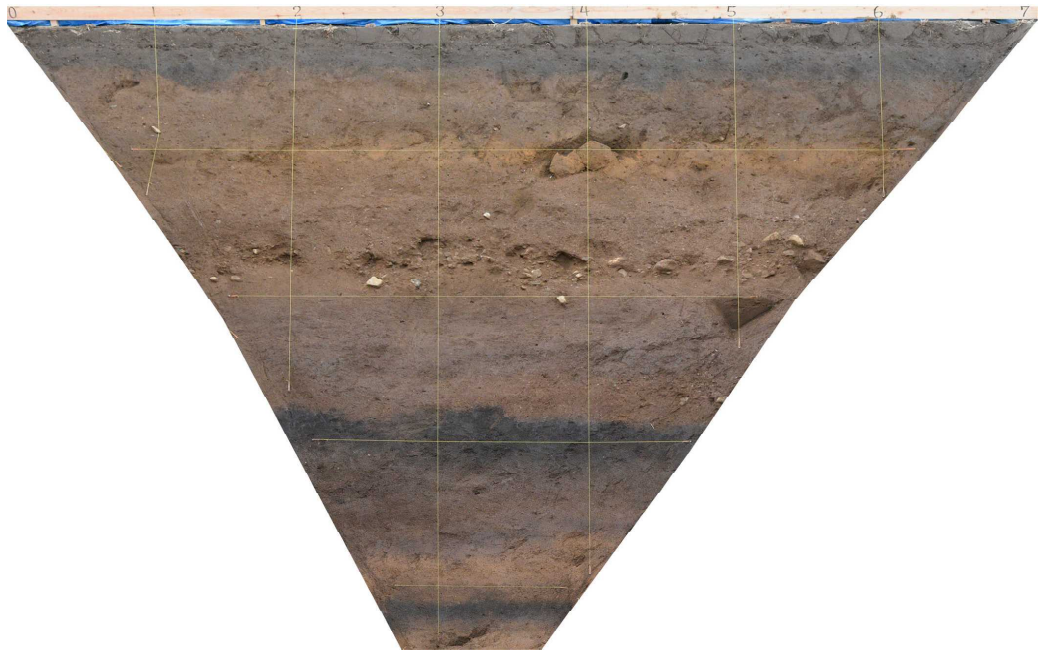


図 2.2.9 出ノロトレンチモザイク写真（増掘前-S面）

2.2.2.4. 法面スケッチ

法面スケッチは水平方向 1m×鉛直方向 1m で作成した水糸を基準とし、縮尺 1/20 鉛直面投影にて作成した。作成したスケッチを元に、地質区分ごとに着色を行うとともに、断層位置の加筆を行った。また、各地層の記載と併せて、試料採取位置の記録を行った。

法面スケッチを次ページより示す。

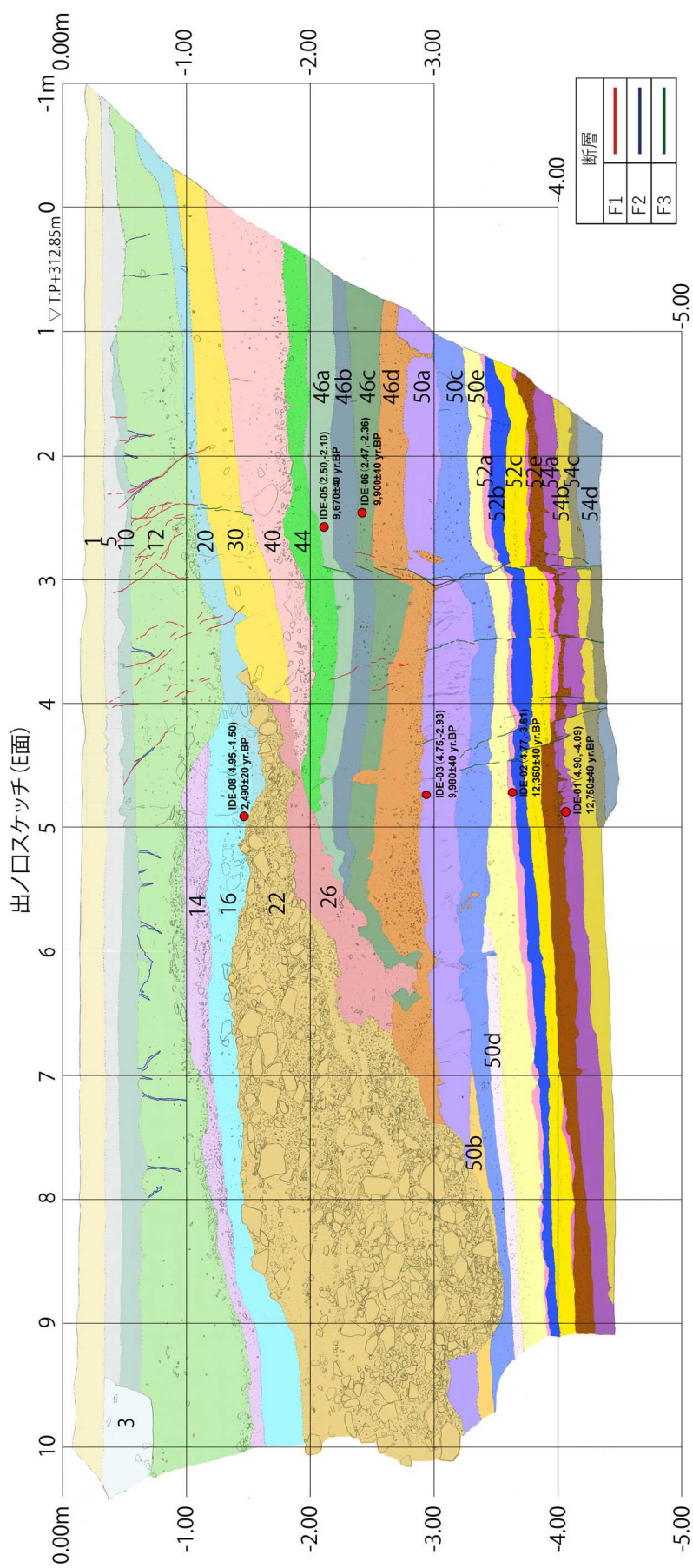


図 2.2.10 出ノロトレンチ E面スケッチ

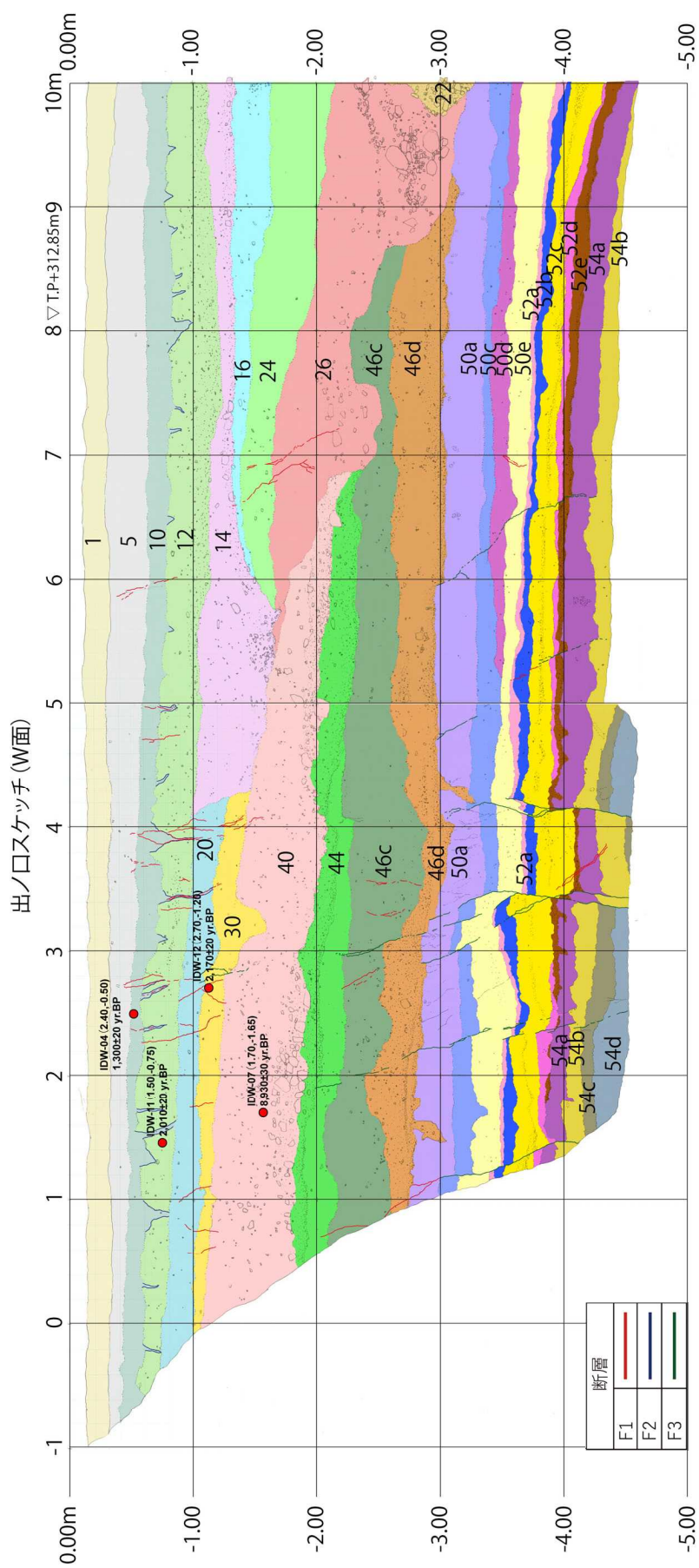


図 2.2.11 出ノロトレンチ W面スケッチ

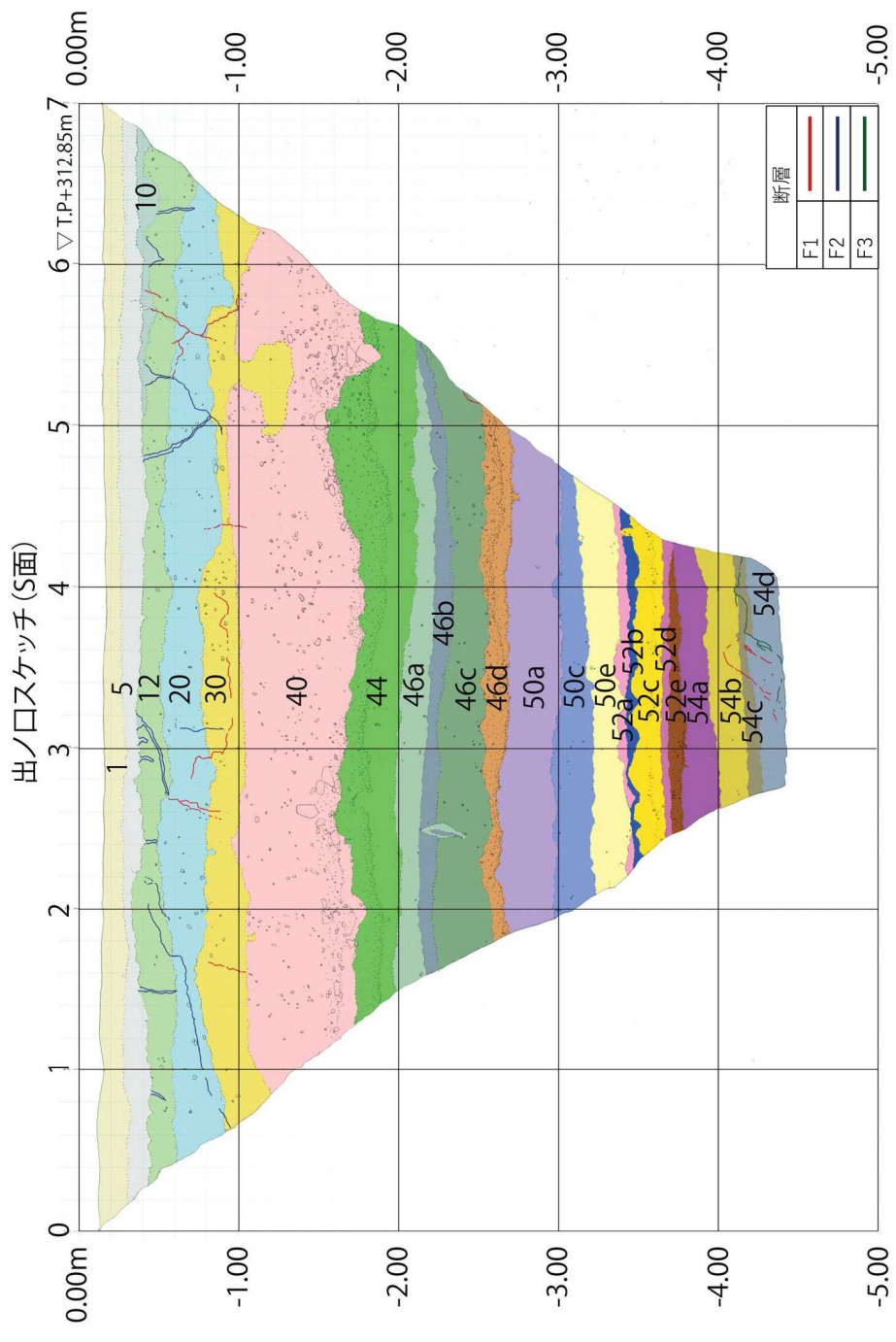


図 2.2.12 出ノロトレンチ S面スケッチ (増掘後)

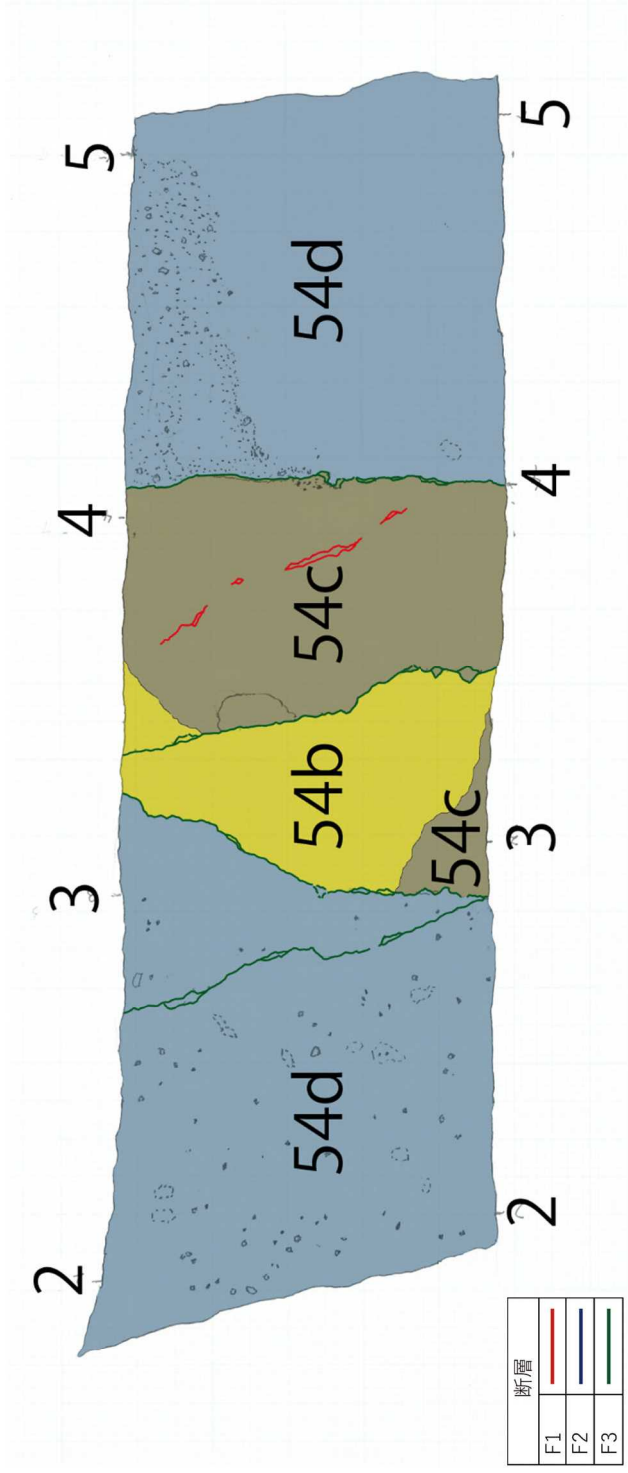


図 2.2.13 出ノロトレンチ 底面スケッチ (増掘後)

2.2.2.5. 地質概説

出ノロトレンチにおける地質層序表を表 2.2.3 に示す。

トレンチ法面において観察された人為的な影響のある層は、現耕作土層（1層）、埋土層（3、5層）および旧表土層（10層）である。それらより下位には、12～22層のチャンネル充填堆積物、24～30層からなるチャンネル斜面堆積物が分布する。これらの基底には、40～54層の堆積物が分布する。

表 2.2.3 出ノロトレンチ内における地質層序

地層名	層相	火山灰	放射性炭素年代 yrBP	
人工地盤	1 現耕作土			
	3 埋土			
	5 埋土			
自然地盤	10 旧表土 黒色土		bulk 1,300 ± 20	
	12 砂礫		carbon 2,010 ± 20	
	14 砂礫			
	16 砂混じりシルト		carbon	
	20 砂混じりシルト		2,490 ± 20	
	22 砂礫 チャンネル充填堆積物			
	24 礫混じりシルト質極細～細粒砂 斜面堆積物			
	26 シルト～極細粒砂 斜面堆積物			
	30 火山灰（シルト～極細粒砂） 斜面堆積物	K-Ah	carbon 2,170 ± 20	
	40 粘土質砂礫		carbon 8,930 ± 30	
	44 細礫～極粗粒砂混じり粗粒砂		carbon	
	46	a 礫混じり粘土 暗褐色土		bulk 9,670 ± 40
		b 礫混じり細粒砂質シルト		
		c 礫混じり粘土 暗褐色土		bulk 9,900 ± 40
		d 中礫混じり細礫		
	50	a 極細粒砂混じりシルト 黒色土		bulk 9,980 ± 40
		b 砂質シルト 暗褐色土		
		c 礫混じりシルト質砂～シルト		
		d 礫混じりシルト 暗褐色土		
		e 礫混じり砂質シルト		bulk
	52	a 粘土 黒色土		12,360 ± 40
		b 粘土		
c シルト～粘土				
d シルト～粘土 暗褐色土				
e 礫混じりシルト質砂				
54	a シルト 黒色土		bulk 12,750 ± 40	
	b シルト			
	c シルト			
	d シルト			

2.2.2.6. 地質各論

(1) 層序記載

【1層】トレンチ掘削範囲表層に20cm程度で分布する。砂混じりシルトを主体とし、植物の根を多く含む。最下部にφ1~2cmの超円礫が配列する。下位との境界は明瞭で緩く波打つ。現耕作土層。

【3層】E面グリッド10m付近のみに分布する。下位の12層および側方の5~10層を明瞭な削剥面で覆う。黒色を呈す不均質な礫混じり土からなる。

下に凸の分布形態を示す側方を削剥する不均質な土砂からなるため、埋土層と考えられる。

【5層】W面グリッド-1~10mに層厚5~30cm程度で、S面グリッド0~7mに層厚5~10cm程度で、E面グリッド-1~9.5mに層厚5~20cm程度で分布する。北側および西側ほど層厚が増大する。砂混じりシルトからなり、灰褐色を呈する。まれに細礫サイズの亜円礫から亜角礫を含む。最下部には下位の10層をブロック状に含む。下位層を明瞭な削剥面で覆う。

下位層を削剥する不均質な土質からなるため、盛土層と考えられる。

【10層】W面グリッド-1~10mに層厚5~20cm程度で、S面グリッド5~7mに層厚5~10cm程度で、E面グリッド1~9.5mに層厚5~20cm程度で分布する。細粒砂からなり、褐灰色<10YR4/1>を呈する。まれにφ1mm程度の岩片を含む。下位層ヘクラックを伴ってクサビ状に入り込む構造がみられる

下位層との境界がやや不明瞭な黒色土であることから、旧表土であると考えられる。

【12層】W面グリッド-0.5~10mに層厚10~20cm程度で、S面グリッド0.5~6.5mに層厚5~15cm程度で、E面グリッド-1~10mに層厚10~50cm程度で分布する。E面グリッド2~4.5m、7~10mのチャンネルの中央付近は層厚が増大し、最大層厚80cm程度になる。北側ほど含まれる礫が少なくなり、明黄褐色<10YR6/6>の砂質シルトが主体となる。下部はφ4~15cmの礫と細粒砂~中粒砂基質の淘汰の悪い砂礫からなる。含まれる礫は亜円礫~円礫で扁平な礫が多い。

【14層】W面グリッド4~10mに層厚5~20cm程度で、E面グリッド4.4~10mに層厚5~20cm程度で分布する。E面グリッド4~7mのチャンネル中央付近で層厚が増大し、最大層厚70cm程度になる。北側ほど含まれる礫が少なくなり、にぶい褐色<7.5YR5/3>の砂質シルトが主体となる。下部はφ4~10cmの礫と細粒砂~中粒砂の基質の淘汰の悪い砂礫からなる。含まれる礫は円礫が主体で扁平な礫が多い。礫種は軽石および安山岩からなり、軽石は赤~橙色および黄~オリーブ黄色青灰色を呈す。一部の礫は層状に配列する。下位層を侵食的に覆う。

【16層】W面グリッド6～10mに層厚5～20cm程度で、E面グリッド4～10mに層厚10～20cm程度で分布する。北側のチャンネル中央付近でやや厚く堆積する。砂混じりシルトを主体で明黄褐色～にぶい黄橙色<10YR6/6-6/3>を呈し、上部はやや暗色になる。含まれる礫は平均φ6～15mm程度の亜角礫から亜円礫で、まれにφ2cmほどの礫がみられる。礫種は軽石および安山岩からなり、軽石は赤色、オリーブ黄～黄橙色を呈す。E面グリッド4～6mにかけて、φ0.5～8cmの偽礫を多量に含む。偽礫は明黄褐色<2.5YR6/6>および橙色<5YR4/8>、赤褐色の斑点を含む明褐色<7.5YR5/6-5YR4/8>を呈す。炭質物片を多く含む。下位層の地形面の凹凸を覆うように分布する。

【20層】W面グリッド-0.4～4.2mに層厚15～20cm程度で、S面グリッド0.4～6.5mに層厚10～40cm程度で、E面グリッド-0.4～5mに層厚10～15cm程度で分布する。均質な砂混じりシルトを主体とし、褐色<7.5YR4/3>を呈す。含まれる礫は平均φ0.4～1.0cm程度の亜角礫から亜円礫で、まれにφ6cmほどの礫がみられる。礫種は軽石および安山岩からなり、軽石は赤色および黄色、白～灰白色を呈す。下位層の地形面の凹凸を覆うように分布する。

【22層】W面グリッド9.7～10mに層厚10～40cm程度で、E面グリッド3.8～10mに層厚10～100cm程度で分布する。E面グリッド6.5～9.3mのチャンネル中央付近では層厚が増大し、最大層厚2m程度になる。礫支持の淘汰の悪い砂礫を主体とし、基質は砂礫混じり中粒砂で暗褐色を呈す。含まれる礫は、平均φ5～10m程度および平均φ20～40cm程度が多くを占め、亜角礫～超円礫がインプリケーションを示す。最大礫径はφ1.2mに達する。礫種は軽石および安山岩からなり、軽石は赤～橙色および黄～オリーブ黄色、青灰色を呈す。チャンネル中心付近の上部に砂～シルトが40cm程度の厚さで分布している。層厚80cm程度の複数の小規模なトラフ状の構造が累重している。下位層を削剥して明瞭な境界面をもって覆っている。

トレンチを東西に横断するチャンネル構造を埋積する堆積物である。

【24層】W面グリッド5.8～10mに層厚10～40cm程度で分布する。北側のチャンネル中央付近でやや厚く堆積する。シルト質極細粒砂～細粒砂が主体で、明褐色を呈す。まれに含まれる礫はφ2～8mm程度の亜角礫から亜円礫で、まれにφ2cmほどの礫が見られる。礫種は軽石および安山岩からなり、軽石は赤色、オリーブ黄～黄橙色を呈す。

トレンチを東西に横断するチャンネル構造の壁部に分布する斜面堆積物である。

【26層】W面グリッド5.5～10mに層厚5～100cm程度で、E面グリッド4～6.5mに層厚5～40cm程度で分布する。北側のチャンネル中央付近で厚く堆積する。分級された淘汰のよい均質なシルト～極細粒砂が主体で、明褐色<7.5YR5/6>を呈す。きわめて軟質である。含まれる礫の礫径は、平均φ2cm～5cm程度が約50%、平均φ5～15cm程度が約30%を占め、亜角礫～亜円礫からなる。最大φ26cmの礫が見られる。礫種は軽石および安山岩からなり、軽石は赤色、下位との境界はやや不明瞭で漸移的に層準が変化する。軽石は赤色および黄色、明緑色を呈す。下位の傾斜した地形面を覆うように分布し、下位層との境界は不規則形状をなす。

トレンチを東西に横断するチャンネル構造の壁部に分布する斜面堆積物である。

【30層】W面グリッド0～4.2mに層厚5～15cm程度で、S面グリッド0.6～6.4mに層厚5～40cm程度で、E面グリッド-0.2～4mに層厚10～20cm程度で分布する。分級された淘汰のよいシルト～極細粒砂が主体で、明黄褐色を呈す。上位に点在する岩片は、平均φ1～2mm程度で、少量の明赤褐色が混じる白～淡黄色を呈す。上位から黄橙色、にぶい黄橙色、暗褐色へ漸移的に色の変化が見られ、下位層との境界は不明瞭である。下位層を傾斜して不整合に覆う。

【40層】W面グリッド0～7.8mに層厚10～80cm程度で、S面グリッド0.6～6.4mに層厚40～60cm程度で、E面グリッド-0.2～4.5mに層厚10～40cm程度で分布する。淘汰の悪い不均質な粘土質砂礫が主体で、基質は粘土質細粒砂で褐色<10YR4/4>を呈す。基本的には礫支持であるが、一部では基質支持となる。含まれる礫は平均φ4～16mm程度で亜角礫から円礫からなり、最大でφ70cm程度の礫が見られる。φ2cm程度以下はクサリ礫がほとんどで、φ2cm以上の大きさの礫も表面の風化が著しい。礫種は、軽石および安山岩からなり、軽石は赤色および黄色、緑褐色、灰白色を呈す。下位層をやや侵食的に覆う。

【44層】W面グリッド0～7.8mに層厚10～80cm程度で、S面グリッド0.6～6.4mに層厚40～60cm程度で、E面グリッド-0.2～4.5mに層厚10～40cm程度で分布する。塊状の細礫～極粗粒砂混じり粗粒砂が主体で、黄橙色<10YR7/8>を呈す。淘汰度は普通～やや悪い。含まれる礫は基質に浮いた状態で点在し、平均φ2～8mm程度で角礫から亜円礫からなる。最大でφ50cm程度の礫が見られる。礫種は風化した軽石および安山岩からなり、軽石は赤色および黄色、暗灰色に呈す。下位層をやや侵食的に覆う。

【46a層】S面グリッド1.2～5.8mに層厚5～15cm程度で、E面グリッド0.4～5.4mに層厚5～20cm程度で分布する。礫混じり砂質粘土が主体で、暗赤褐色<5YR3/2>を呈す。含まれる礫は、平均φ2～8mm程度で角礫から亜円礫からなる。最大でφ1cm程度の礫が見られる。礫種はクサリ礫もしくは粘土化した軽石が主で赤色および黄橙色、緑灰色、灰白色に呈す。下位層との境界は不明瞭で直線状である。

【46b層】S面グリッド1.4～5.5mに層厚5～10cm程度で、E面グリッド0.5～5.5mに層厚5～20cm程度で分布する。礫混じり砂質粘土が主体で、にぶい赤褐色<5YR4/4>を呈す。含まれる礫は、平均φ2～4mm程度で亜角礫から亜円礫からなる。最大でφ12mm程度の礫が見られる。礫種はクサリ礫あるいは粘土化した軽石が主で赤色および明黄褐色、明青灰色に呈す。下位層との境界は不明瞭で直線状である。

【46c層】W面グリッド0.5～8.8mに層厚15～40cm程度で、S面グリッド1.5～5.8mに層厚30～40cm程度で、E面グリッド0.5～6.5mに層厚5～20cm程度で分布する。礫混じり粘土が主体で、暗赤褐色<5YR3/2>を呈す。含まれる礫は、平均φ2～8mm程度で亜角礫から亜円礫からなる。最大でφ4cm程度の礫が見られる。礫種はクサリ礫あるいは粘土化した軽

石が主で、黄橙色および灰白色～白色を呈すものが 10%程度分布し、赤色～明赤褐色を呈すものも点在する。下位層との境界は不明瞭で直線状である。

【46d 層】 W 面グリッド 0.8～9.2m に層厚 10～40cm 程度で、S 面グリッド 1.8～5.4m に層厚 10～20cm 程度で、E 面グリッド 0.8～7.4m に層厚 10～40cm 程度で分布する。礫率 60%程度で礫支持の中礫混じり砂礫が主体で、基質の中粒砂～粗粒砂はにぶい褐色<7.5YR5/4>を呈す。含まれる礫は平均φ2mm～4mm 程度であるが南側ほど礫径が小さくなる。亜角礫から超円礫を多く含み、W 面グリッド 5.5m 付近でφ3～5cm の超円礫が多量に密集する。最大でφ15cm 程度の礫が見られる。礫種は、クサリ礫主体の軽石および安山岩からなり、軽石は赤色および黄色～橙色、青灰色に呈す。部分的に平板状斜交葉理がみられる。下位層との境界は明瞭で凹凸を伴う。

【50a 層】 W 面グリッド 1.0～10m に層厚 20～30cm 程度で、S 面グリッド 1.8～5.0m に層厚 30～40cm 程度で、E 面グリッド 0.8～7.6m および 9.3～9.8m に層厚 20～30cm 程度で分布する。細粒砂混じりシルトが主体で、黒色～黒褐色<無彩色 2/-7.5YR3/1>を呈す。上位から暗赤灰色、黒色、赤黒色へ漸移的に色の変化が見られる。全体的に粘性が低い、最上部 5cm 程度はやや粘性が高い。下位層との境界は砂がちで不明瞭で直線的である。上位層がクサビ状に入り込む箇所がみられる。

【50b 層】 E 面グリッド 7.0～9.8m に層厚 5～10cm 程度で分布する礫混じり砂質シルト～礫混じりシルト質砂が主体で、やや黒色がかった褐色～暗赤褐色を呈す。含まれる礫は、平均φ3～5mm 程度で亜角礫～亜円礫からなる。礫種は軽石が主で黄色および白色～青灰色のものが 20～25%程度散在し、赤色も少量含まれる。下位層との境界は不明瞭で直線的である。

【50c 層】 W 面グリッド 1.0～10m に層厚 10～20cm 程度で、S 面グリッド 1.0～4.8m に層厚 10～20cm 程度で、E 面グリッド 1.0～9.8m に層厚 10～20cm 程度で分布する。礫混じり砂質シルト～礫混じりシルト質砂が主体で、褐色<7.5YR4/3-3/3>～暗赤褐色を呈す。含まれる礫は、平均φ2～8mm 程度で亜角礫～亜円礫からなる。最大でφ15mm 程度の礫が見られる。礫種は軽石が主で、黄色および白色～青灰色のものが 20～25%程度散在し、赤色も少量含まれる。下位層との境界は不明瞭で直線的である。

【50d 層】 W 面グリッド 5.2～10m に層厚 5～15cm 程度で、E 面グリッド 5.8～9.4m に層厚 5～10cm 程度で分布する。礫混じりシルトが主体で、灰褐色<7.5YR4/2>を呈す。含まれる礫は、平均φ2～4mm 程度で角礫～亜円礫からなる。礫種は軽石が主で、黄色～黄橙色および白色～青灰色のものが 10～15%程度含まれる。下位層との境界はやや不明瞭で漸移的である。

【50e 層】 W 面グリッド 1.0～10m に層厚 5～20cm 程度で、S 面グリッド 2.0～4.6m に層厚 15～20cm 程度で、E 面グリッド 1.2～10m に層厚 10～20cm 程度で分布する。礫混じり砂質

シルトが主体で、にぶい褐色<7.5YR5/4>を呈す。下部 5cm は粘土混じりで、南側ほど砂がちになる。含まれる礫は、平均φ2~8mm 程度で亜角礫~亜円礫からなる。最大でφ2cm 程度の礫が見られる。礫種は軽石が主で、黄色および白色のものが5~10%程度散在する。下位層との境界は不明瞭で直線的である。

【52a 層】 W 面グリッド 1.2~10m に層厚 5~10cm 程度で、S 面グリッド 2.0~4.8m に層厚 5~10cm 程度で、E 面グリッド 2.2~9.2m に層厚 5~10cm 程度で北側にやや傾斜して分布する。E 面グリッド 6.8~9.2m では断続的に分布する。やや粘性のある均質で塊状な粘土が主体で、褐灰色<7.5YR4/1>を呈す。含まれる礫は、φ2mm 程度の軽石が主で赤色および淡黄色、緑灰色に呈す。下位層との境界は不規則で明瞭な凹凸を伴う。

【52b 層】 W 面グリッド 1.2~10m に層厚 5~10cm 程度で、S 面グリッド 2.2~4.8m に層厚 5~10cm 程度で、E 面グリッド 1.2~9.2m に層厚 5~10cm 程度で分布する。やや粘性のある均質で塊状な粘土が主体で、にぶい褐色<7.5YR6/3>を呈す。まれに含まれる岩片は、平均φ1~2mm 程度の軽石が主で赤色および灰色~白色、黄色に呈す。下位層との境界は不明瞭で凹凸を伴う。

【52c 層】 W 面グリッド 1.2~10m に層厚 10~20cm 程度で、S 面グリッド 2.4~4.8m に層厚 10~15cm 程度で、E 面グリッド 1.2~9.2m に層厚 10~20cm 程度で分布する。やや粘性のあるシルト~粘土が主体で、にぶい橙色<7.5YR7/4>を呈す。中央付近に礫混じり砂が層状に分布する。含まれる礫は、平均φ2~4mm 程度で亜角礫~亜円礫からなる。最大でφ1cm 程度の礫が見られる。礫種はクサリ礫あるいは粘土化した軽石が主で赤色~赤褐色および黄橙色~橙色、暗青灰色に呈す。下位層との境界は明瞭で凹凸を伴う。

【52d 層】 W 面グリッド 1.2~2.8m および 4.4~10m に層厚 5cm 程度で、S 面グリッド 2.4~4.8m に層厚 5~10cm 程度で、E 面グリッド 1.8~4.2m および 7.2~8.5m に層厚 5cm 程度で断続的に分布する。礫混じりシルト~粘土が主体で、にぶい黄橙色<10YR5/3>を呈す。含まれる礫は、平均φ2~4mm 程度で角礫から亜円礫からなる。礫種は軽石が主で赤色および明黄褐色、暗青灰色を呈す。下位層との境界は不明瞭である。

【52e 層】 W 面グリッド 1.5~10m および 4.4~10m に層厚 5~10cm 程度で、S 面グリッド 2.4~4.5m に層厚 5~10cm 程度で、E 面グリッド 1.4~9.2m に層厚 5~15cm 程度で断続的に分布する。北側ほどやや層厚を増し、W 面よりも E 面の層厚が大きい。不均質な礫混じりシルト質砂が主体で、橙色<7.5YR6/6>を呈す。含まれる礫は、平均φ2~6mm 程度で亜角礫から亜円礫からなる。最大でφ1.5cm 程度の礫が見られる。礫種はクサリ礫あるいは粘土化した軽石が主で赤色および黄色、緑灰色に呈す。まれに 54a 層をブロック状に含む。下位層との境界は明瞭で侵食的に覆う。

【54a 層】 W 面グリッド 1.2~10m に層厚 10~20cm 程度で、S 面グリッド 2.4~4.5m に層厚 10~20cm 程度で、E 面グリッド 1.5~9.2m に層厚 5~15cm 程度で北側にわずかに傾斜し

て分布する。シルトが主体で褐灰色<10YR4/1>を呈す。φ1mm以下の白色岩片を少量含む。下位層との境界は漸移的である。

【54b層】W面グリッド1.2~10mに層厚10~15cm程度で、S面グリッド2.5~4.5mに層厚10~15cm程度で、E面グリッド1.5~8.8mに層厚5~10cm程度で断続的に分布し、北側にわずかに傾斜する。シルトが主体で明黄褐色<2.5YR7/6>を呈す。平均φ2~5mmの軽石を含み、白色および黒色、黄色、赤色に呈す。下位層との境界は不明瞭である。

【54c層】W面グリッド1.5~5.0mに層厚5~10cm程度で、S面グリッド2.5~4.5mに層厚5~10cm程度で、E面グリッド1.5~5.0mに層厚5~10cm程度で分布する。灰オリーブ色の砂質シルト<5Y6/2>が主体で灰色シルト<5Y5/1>を斑状に含む。下位層との境界は不明瞭で漸移的に変化する。

【54d層】W面グリッド1.5~5.0m、S面グリッド2.5~4.5m、E面グリッド1.5~2.8mおよび4.0~5.0mに分布する。シルト質極細粒砂~細粒砂が主体で、明褐色を呈す。

(2) 断層記載

出ノロトレンチでは多くの断層およびクラックが確認される。断層およびクラックを性状によって F1～F3 まで分類した。なお、出ノロトレンチではトレンチ南東角を基準に水平、鉛直に 1m で水系によりグリッド表示されている。壁面の位置を示す際にはグリッドで表示する。例えば、W 面の横方向のグリッドが地表面上の横板に 6m と表示された水系の上で、深度方向には 2 本目の水系と 3 本目の水系の中間に位置し、板上面から 2.5m の深度にある場合は、W (6.0, -2.5) のように表示する。

①F1：充填物が認められない開口クラック

W 面および E 面、S 面には開口クラックが分布し、多くは -0.5～-1.5m 付近に確認される(図 2.2.14)。開口クラックの幅は、0.5～4cm 程度である。開口部には充填物は分布しないことから、比較的新しい時期に形成されたものと推定される。下位への延長大きな変位は認められない。

②F2：充填物が認められる構造

W 面および E 面、S 面には充填物を含むクサビ状や線状の構造がみられる(図 2.2.15)。とくに 12 層に多く分布し、上位の 10 層などの物質が充填物として流入する。一部、下位層の 20 層および 30 層まで達する構造や開口クラックを伴う。

③F3：地層の変形を伴う断層

[F3-1] W 面では W (1.4, -4.1) から W(1.0, -2.7) に分布する(図 2.2.16)。この面の走向傾斜は N86W86S である。断層によって 54d 層～50a 層までが変位を受けており、50a 層と 50c 層の境界で見かけ北落ち 12cm 程度の変位を与える。S 面では S (3.3, -4.4) から S(4.4, -4.2) に分布する。一部開口クラックを伴う。

[F3-2] W (2.6, -4.5) から W(1.9, -2.0) にステップを伴って断続的に分布する(図 2.2.16)。この面の走向傾斜は N74W～83E, 84N～88N である。断層によって 54d 層～44 層までが変位を受けており、46c 層と 44 層の境界で見かけ北落ち 5cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴うが、充填物は確認されない。

[F3-3] W 面では W (3.4, -4.5) から W(3.0, -2.2) に分岐・ステップを伴って断続的に分布する(図 2.2.17)。この面の走向傾斜は N64W～74E, 78N～76S である。断層によって 54d 層～44 層までが変位を受けており、46c 層と 44 層の境界で見かけ北落ち 5cm 程度の変位を与える。E 面では E (3.0, -4.3) から E(2.9, -2.1)、E (3.6, -4.4) から E(3.6, -3.0) に分岐・ステップを伴って断続的に分布する(図 2.2.18)。54d 層～44 層までが変位を受けており、46c 層と 44 層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴う。

[F3-4] W (2.9, -2.4) から W(2.8, -0.8) に分岐を伴って断続的に分布する(図 2.2.19)。この面の走向傾斜は N78E90 である。断層によって 40 層～30 層までが変位を受けており、40 層と

30層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴う。下位への延長はみられない。

[F3-5] W面では W(4.1, -4.5)から W(4.0, -3.0)に分岐を伴って断続的に分布する(図 2.2.17)。この面の走向傾斜は N74W~86W, 68S である。断層によって 54d 層~46 層までが変位を受けており、50c 層と 50a 層の境界で見かけ南落ち 15cm 程度の変位を与える。断層直上の 50a 層から 44 層までが南側沈降の変形を受けている。E 面では E(4.0, -4.4)から E(4.6, -3.2)に分岐・ステップを伴って断続的に分布する(図 2.2.18)。断層によって 54d 層~50a 層までが変位を受けており、50c 層と 50a 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴う。

[F3-6] W(5.5, -4.4)から W(4.7, -3.0)にステップを伴って断続的に分布する(図 2.2.20)。この面の走向傾斜は N87E86N である。断層によって 54b 層~46d 層までが変位を受けており、50a 層と 46d 層の境界で見かけ北落ち 5cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴う。

[F3-7] W(6.7, -4.3)から W(5.9, -2.9)にステップを伴って断続的に分布する(図 2.2.20)。この面の走向傾斜は N78W85N である。断層によって 54b 層~46d 層までが変位を受けており、50a 層と 46d 層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴う。

[F3-8] E(2.4, -1.5)から E(2.4, -1.2)に分布する(図 2.2.21)。断層によって 40 層~30 層までが変位を受けており、40 層と 30 層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。一部開口クラックを伴う。

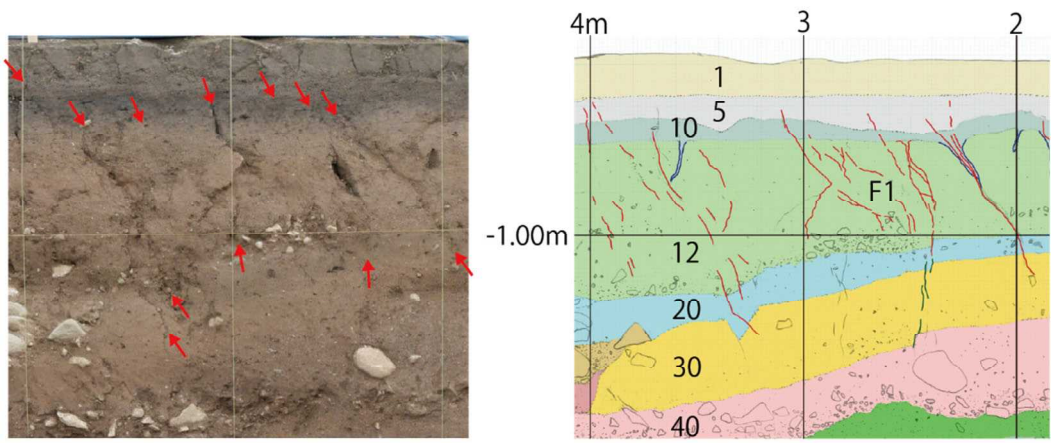


図 2.2.14 E(1.9~4.1, -0.3~-1.5)付近に分布する F1

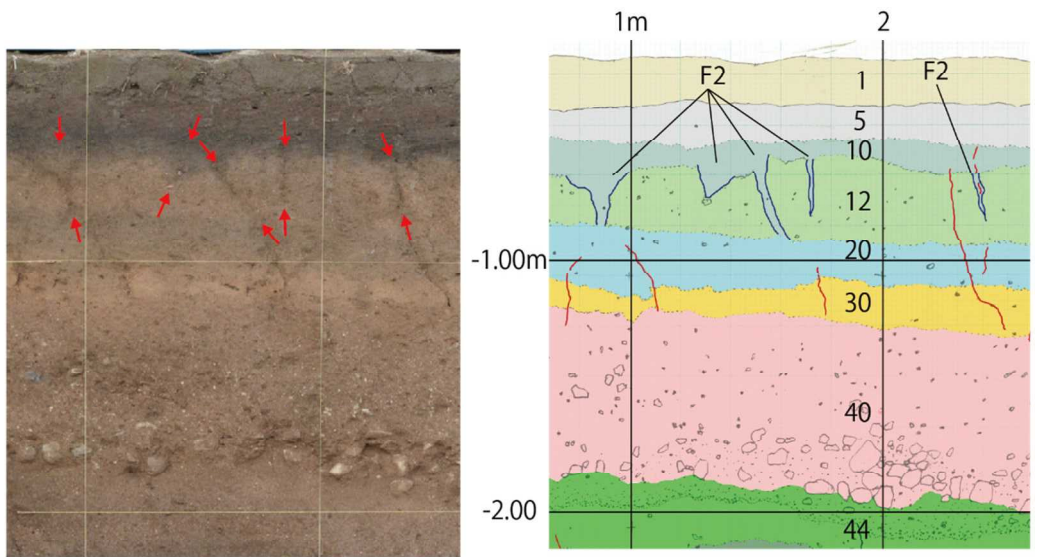


図 2.2.15 W(1.8~2.4, -0.5~-0.9)付近に分布する F2

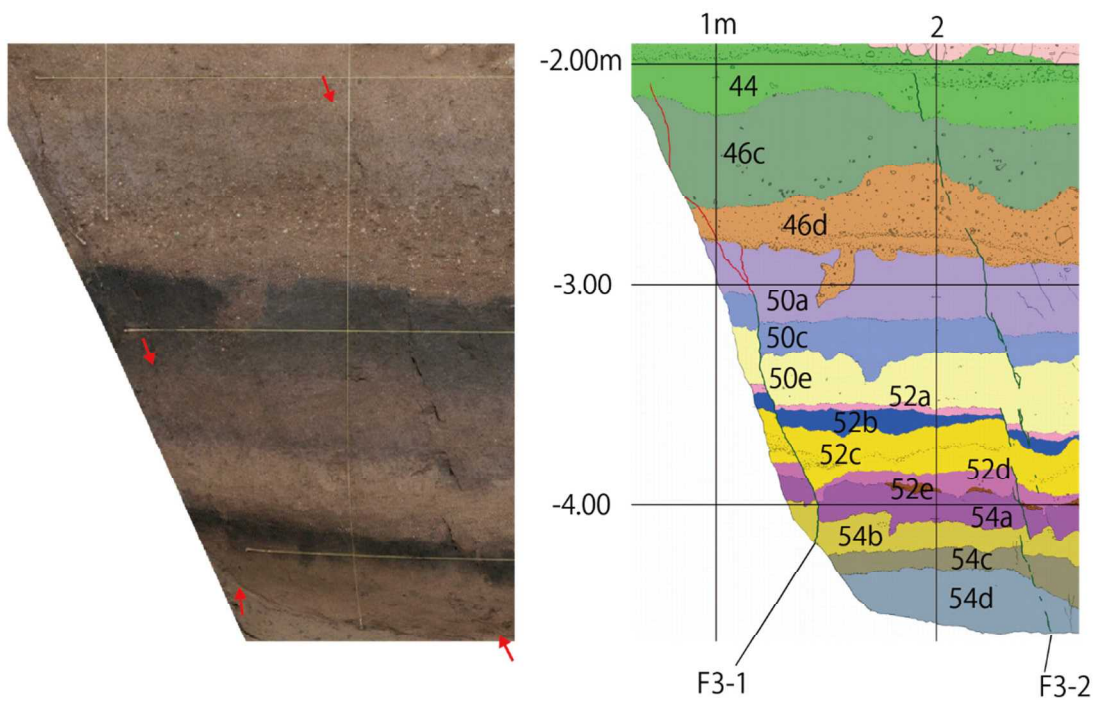


図 2.2.16 W(1.1~2.5, -2.1~-4.5)付近に分布する F3-1 および F3-2

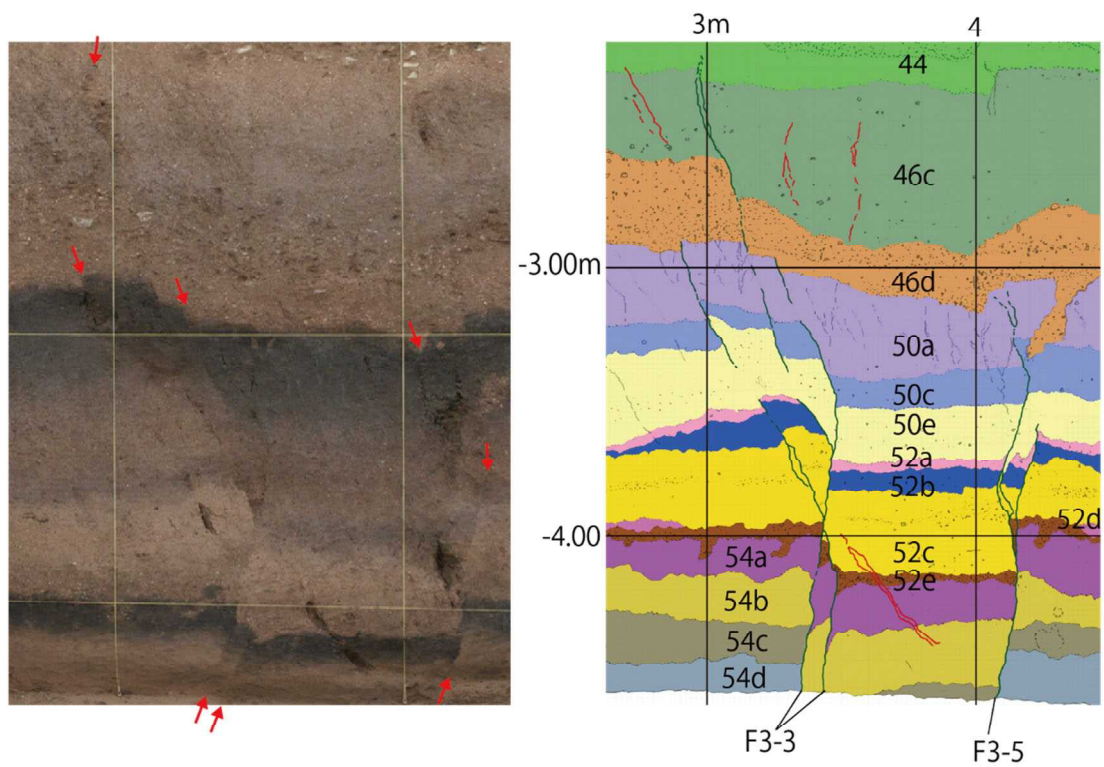


図 2.2.17 W(3.2~4.1, -2.3~-4.5)付近に分布する F3-3 および F3-5

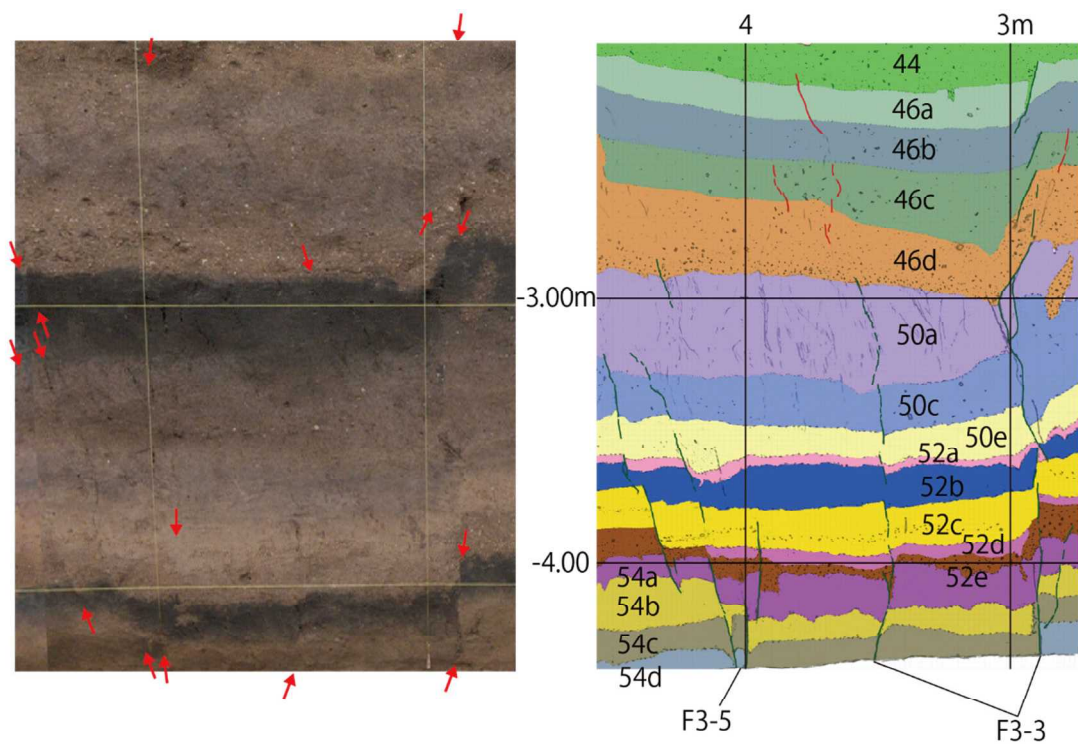


図 2.2.18 E(2.8~4.5, -2.2~-4.5)付近に分布する F3-3 および F3-5

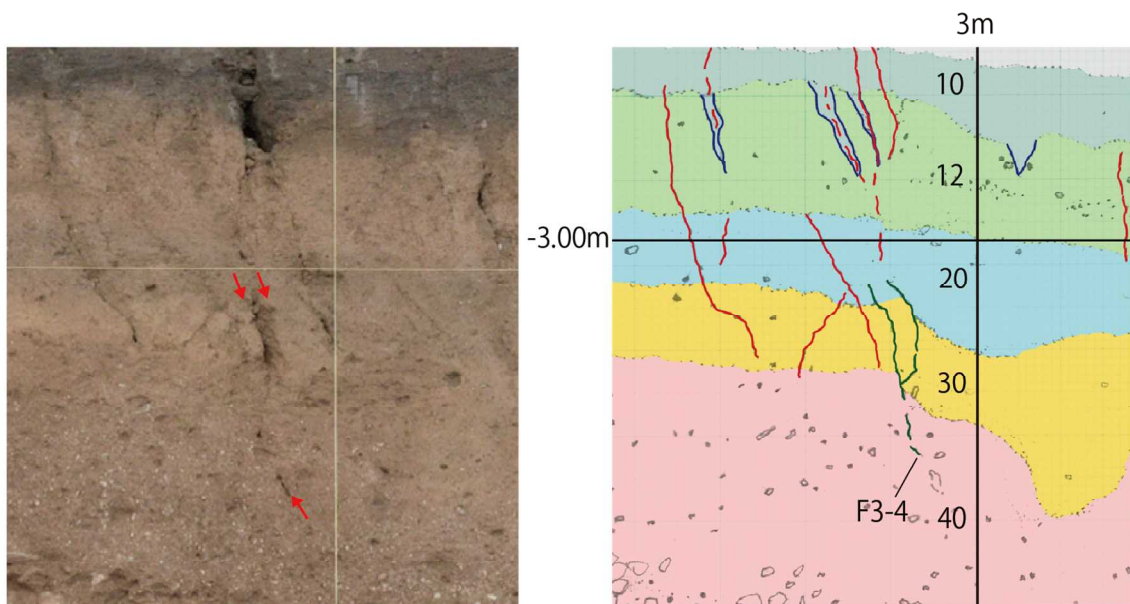


図 2.2.19 W(2.8~2.9, -0.8~-2.4)付近に分布する F3-4

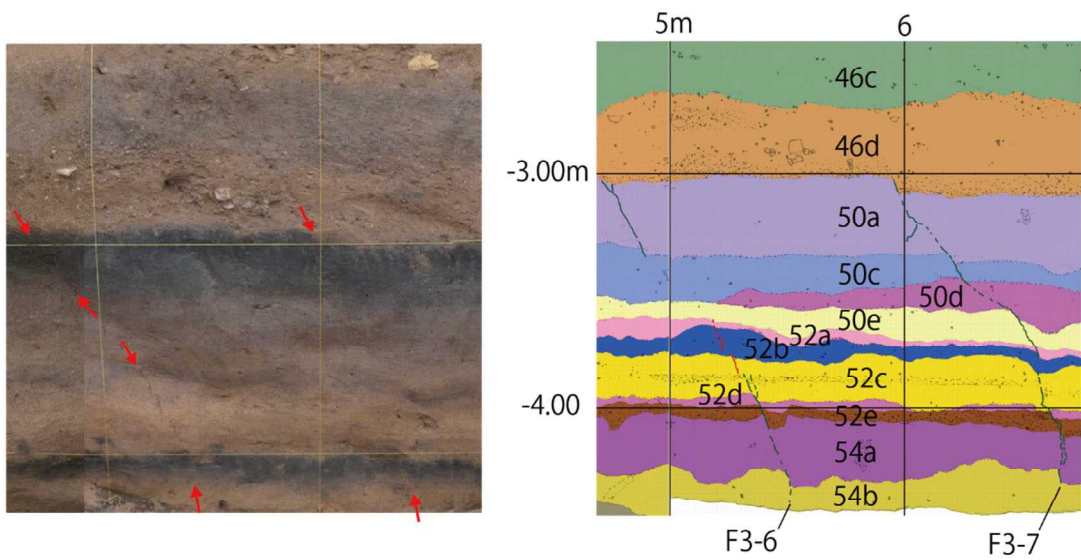


図 2.2.20 W(4.7~6.8, -3.0~-4.5)付近に分布する F3-6 および F3-7

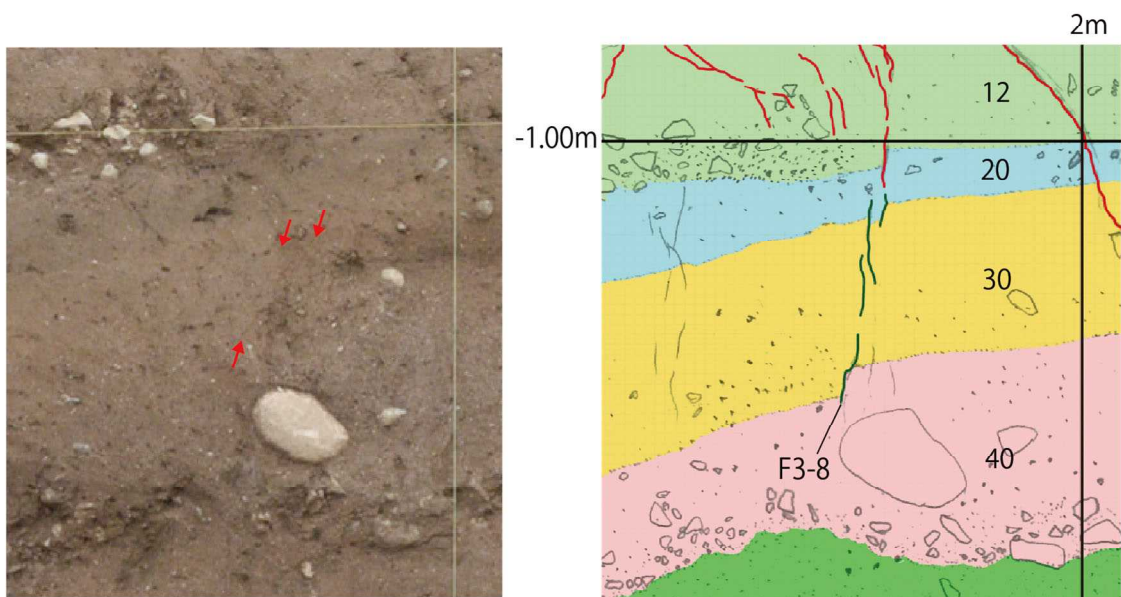


図 2.2.21 E(2.4, -1.2~-1.5)付近に分布する F3-8

(3) 断層構造解析

出ノロトレンチにおいて分布する断層およびクラックの性状ごとに F1～F3 に区分した。それぞれの断層面の走向傾斜からシュミットネットによる下半球等積投影で構造解析を実施した（図 2.2.22）。

①F1

開口クラックである F1 の傾向として、走向が東-西方向(N70E～70W 程度)、傾斜は 80～90° 程度で南北に振れるものが多い。一部、東北東-西南西方向(N50E～N60E 程度)のものもみられる。

②F2

充填物が認められる構造である F2 の傾向として、走向が東西方向～西北西-東南東方向(N75W～N90 程度)、傾斜は 80～90° 程度で北に振れるものが多い。

③F3

地層に変位を与える断層である F3 の傾向として、走向が東-西方向～西北西-東南東方向(N70W～N90 程度)、傾斜は 70～90° 程度で南北に振れるものが多い。

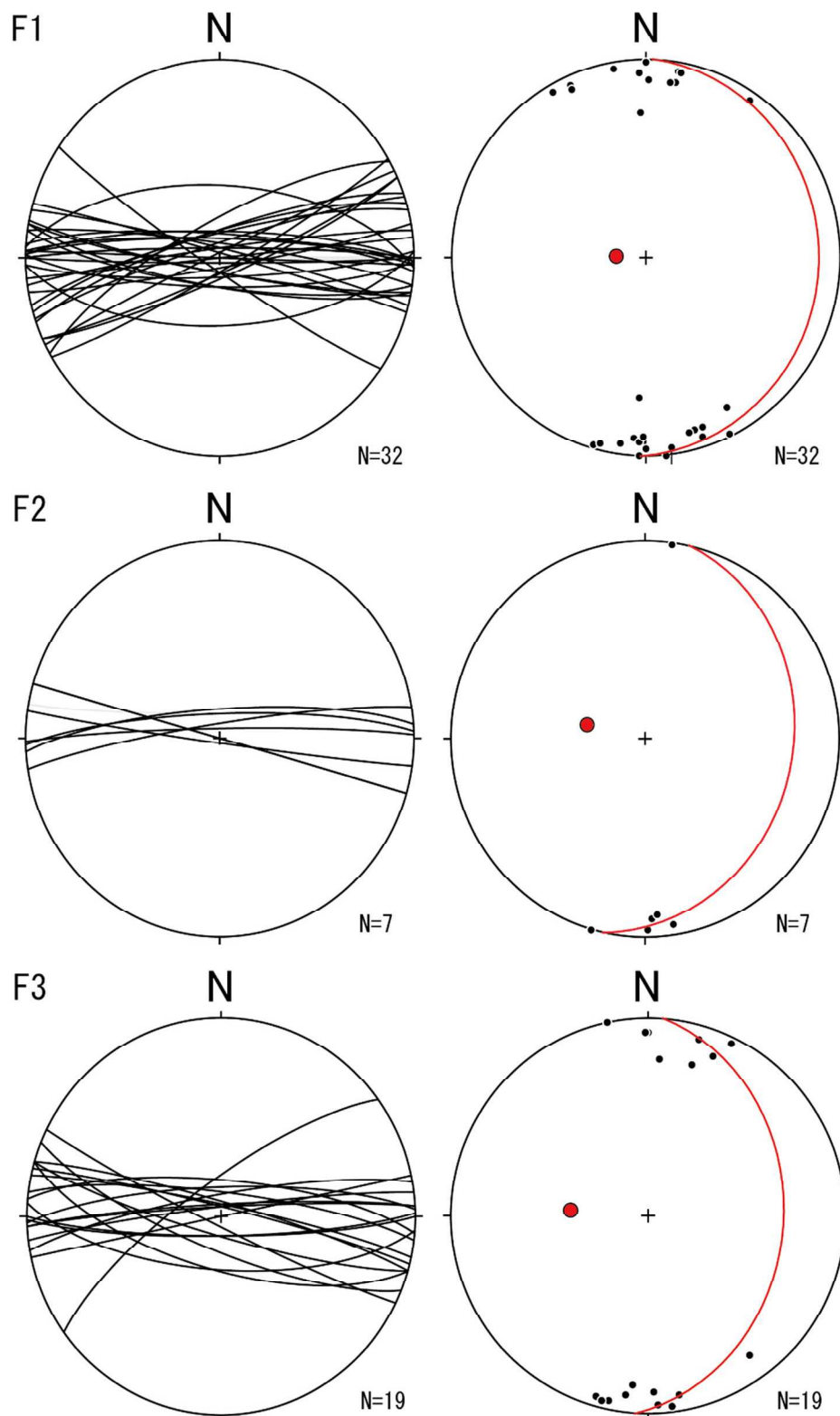


図 2.2.22 出ノロトレンチにおける F2~F5 の走向傾斜とその極
 赤色の円および極はそれぞれの最適大円とその極を示す。シュミットネット下半球等積
 投影

(4) 年代測定

年代測定は AMS 法による放射性炭素年代測定を実施した。

年代試料サンプリング位置を図 2.2.23～図 2.2.24 に示とともに、測定結果を表 2.2.4～表 2.2.5 および図 2.2.25～図 2.2.26 に示す。

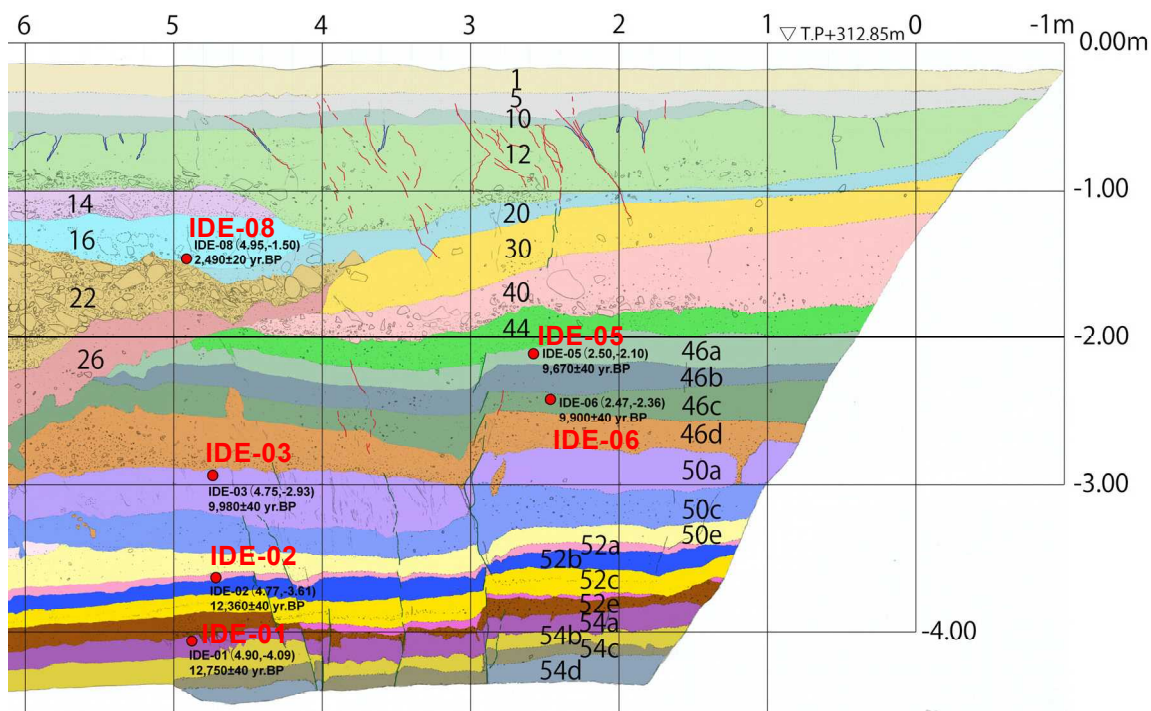


図 2.2.23 出ノロトレンチ 年代試料サンプリング位置 (E 面)

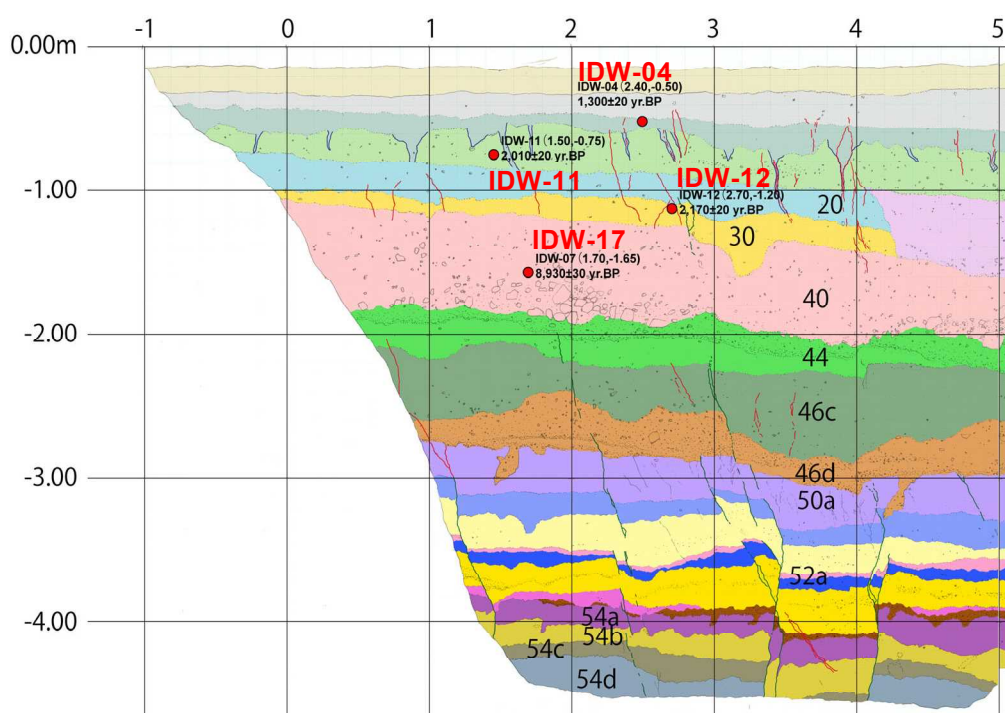


図 2.2.24 出ノロトレンチ 年代試料サンプリング位置 (W 面)

表 2.2.4 出ノロトレンチ 放射性炭素年代測定結果 (1)

測定番号	試料名	試料形態	処理方法	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
					Libby Age(yrBP)	pMC(%)
IAAA-211539	IDE-01	土壌	HCl	-20.19 ± 0.18	12,750 ± 40	20.45 ± 0.11
IAAA-211540	IDE-02	土壌	HCl	-22.66 ± 0.25	12,360 ± 40	21.47 ± 0.11
IAAA-211541	IDE-03	土壌	HCl	-17.63 ± 0.27	9,980 ± 40	28.86 ± 0.13
IAAA-211542	IDE-05	土壌	HCl	-18.73 ± 0.23	9,670 ± 40	29.99 ± 0.14
IAAA-211543	IDE-06	土壌	HCl	-19.53 ± 0.20	9,900 ± 40	29.16 ± 0.13
IAAA-211544	IDE-08	炭化物	AaA	-27.02 ± 0.20	2,490 ± 20	73.35 ± 0.23
IAAA-211707	IDW-04	土壌	HCl	-14.21 ± 0.19	1,300 ± 20	85.05 ± 0.24
IAAA-211708	IDW-07	炭化物	AAA	-22.81 ± 0.24	8,930 ± 30	32.90 ± 0.14
IAAA-211709	IDW-11	炭化物	AAA	-26.73 ± 0.21	2,010 ± 20	77.87 ± 0.22
IAAA-211710	IDW-12	炭化物	AaA	-25.97 ± 0.24	2,170 ± 20	76.34 ± 0.22

表 2.2.5 出ノロトレンチ 放射性炭素年代測定結果 (2)

測定番号	試料名	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用 (yrBP)	1 σ 暦年代範囲	2 σ 暦年代範囲
		Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-211539	IDE-01	12,670 ± 40	20.65 ± 0.11	12,749 ± 43	15273calBP - 15136calBP (68.3%)	15351calBP - 15047calBP (95.4%)
IAAA-211540	IDE-02	12,320 ± 40	21.58 ± 0.11	12,357 ± 42	14793calBP - 14724calBP (15.6%) 14458calBP - 14211calBP (52.7%)	14833calBP - 14683calBP (23.9%) 14581calBP - 14151calBP (71.6%)
IAAA-211541	IDE-03	9,860 ± 40	29.30 ± 0.13	9,983 ± 37	11605calBP - 11554calBP (14.6%) 11500calBP - 11430calBP (21.4%) 11406calBP - 11314calBP (32.2%)	11689calBP - 11671calBP (2.1%) 11623calBP - 11267calBP (93.4%)
IAAA-211542	IDE-05	9,570 ± 40	30.38 ± 0.14	9,673 ± 37	11187calBP - 11084calBP (58.7%) 10918calBP - 10894calBP (9.6%)	11202calBP - 11068calBP (65.4%) 11024calBP - 11009calBP (1.3%) 10956calBP - 10868calBP (23.5%) 10849calBP - 10805calBP (5.3%)
IAAA-211543	IDE-06	9,810 ± 40	29.49 ± 0.13	9,898 ± 36	11321calBP - 11243calBP (68.3%)	11399calBP - 11224calBP (95.4%)
IAAA-211544	IDE-08	2,520 ± 20	73.04 ± 0.22	2,489 ± 24	2706calBP - 2685calBP (9.9%) 2644calBP - 2628calBP (7.5%) 2620calBP - 2613calBP (3.3%) 2598calBP - 2553calBP (21.9%) 2547calBP - 2496calBP (25.6%)	2721calBP - 2488calBP (95.4%)
IAAA-211707	IDW-04	1,120 ± 20	86.95 ± 0.24	1,300 ± 22	1281calBP - 1261calBP (23.7%) 1253calBP - 1249calBP (4.2%) 1209calBP - 1179calBP (40.4%)	1289calBP - 1241calBP (44.4%) 1230calBP - 1176calBP (51.1%)
IAAA-211708	IDW-07	8,900 ± 30	33.04 ± 0.14	8,931 ± 34	10186calBP - 10120calBP (32.6%) 10064calBP - 10037calBP (12.8%) 10028calBP - 10010calBP (7.1%) 9991calBP - 9960calBP (15.7%)	10197calBP - 10110calBP (36.4%) 10086calBP - 9909calBP (59.0%)
IAAA-211709	IDW-11	2,040 ± 20	77.60 ± 0.22	2,009 ± 23	1991calBP - 1925calBP (68.3%)	1999calBP - 1879calBP (95.4%)
IAAA-211710	IDW-12	2,180 ± 20	76.19 ± 0.21	2,168 ± 22	2298calBP - 2260calBP (34.6%) 2155calBP - 2118calBP (33.6%)	2305calBP - 2229calBP (46.8%) 2204calBP - 2198calBP (0.5%) 2181calBP - 2097calBP (45.7%) 2084calBP - 2063calBP (2.4%)

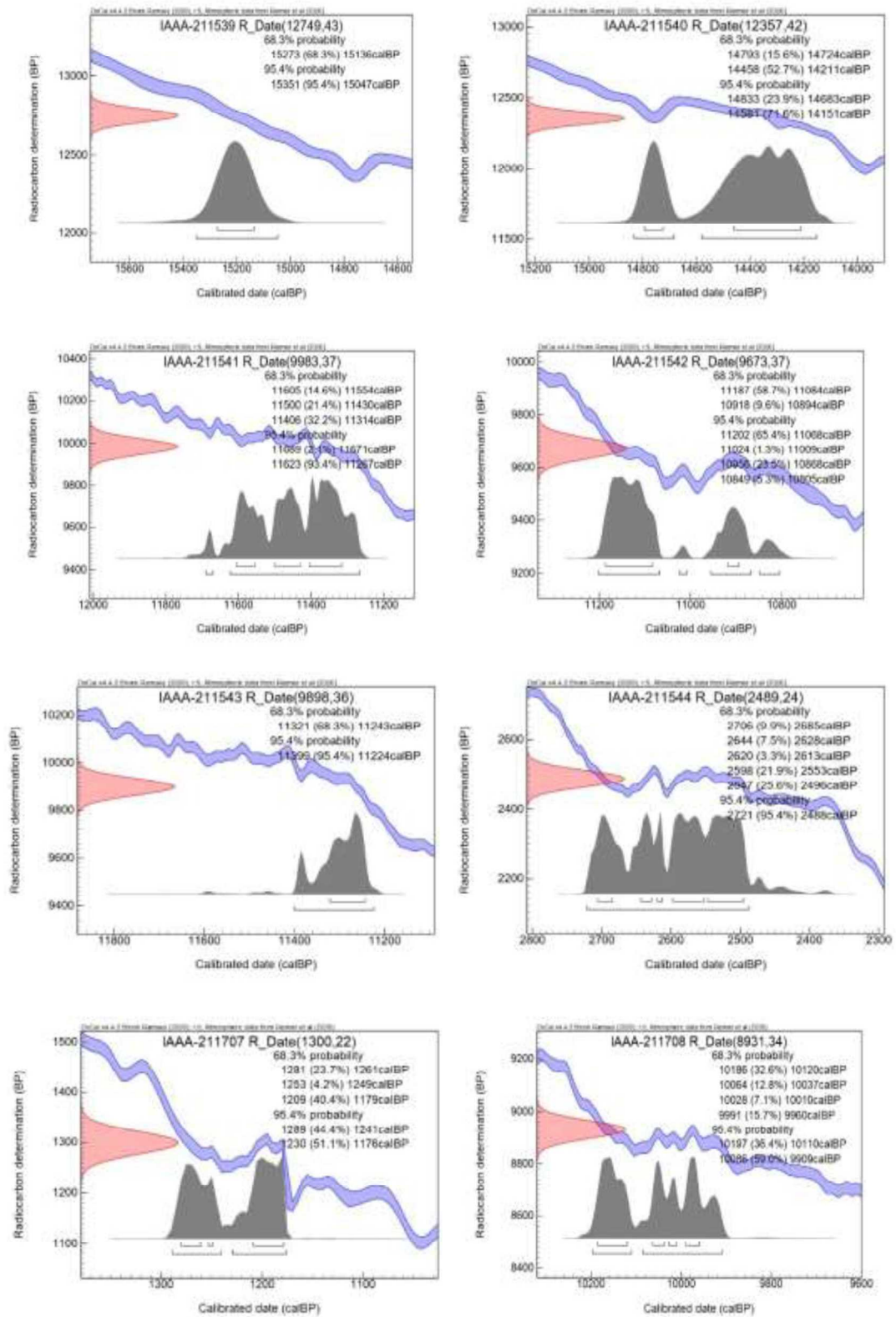


図 2.2.25 出ノロトレンチ 暦年較正年代グラフ (1)

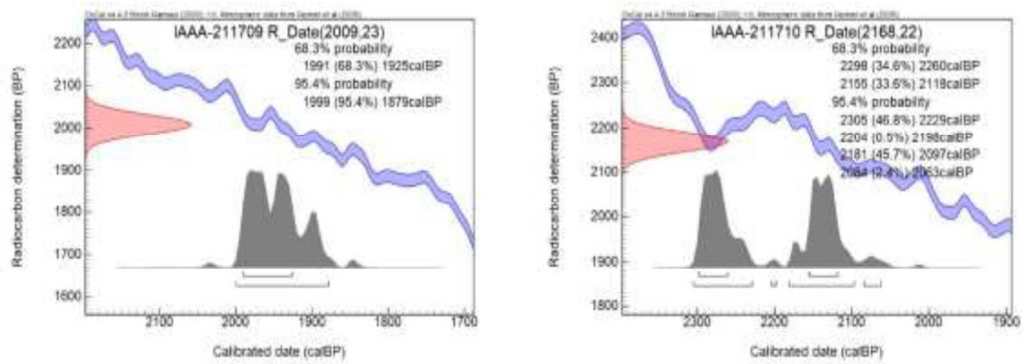


図 2.2.26 出ノロトレンチ 暦年較正年代グラフ (2)

(5) 火山灰分析

① IDW-03 (0.5-0.7,-1.1)

バブルウォールタイプ火山ガラスを多く含む(図 2.2.28)。有色鉱物としては斜方輝石および単斜輝石を多く含む。火山ガラスの屈折率は 1.509-1.515 である。斜方輝石の屈折率(γ)は 1.705-1.714 で 1.709-1.713 にモードが見られる。主成分元素組成は、含有率平均値が SiO₂ で 74.5wt.%程度、Na₂O が 3.8 wt.%、K₂O が 2.9 wt.%程度にまとまる。色付きガラスを含む。

火山ガラスの形態、屈折率および主成分元素組成は K-Ah テフラの特徴(町田・新井, 2003)と一致する。斜方輝石の屈折率も K-Ah テフラの特徴(町田・新井, 2003)と一致することから、本試料は K-Ah 降灰層準から採取されたと考えられる。

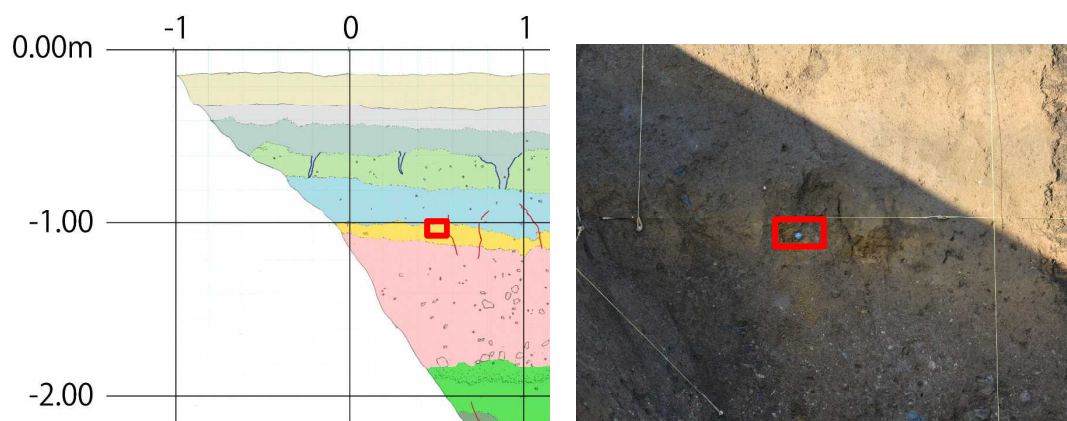


図 2.2.27 IDW-03(0.5-0.7,-1.1)サンプリング位置



図 2.2.28 IDW-03(0.5-0.7,-1.1) 検鏡写真

②測定結果

本ページより火山灰分析の測定結果を取りまとめて示す。

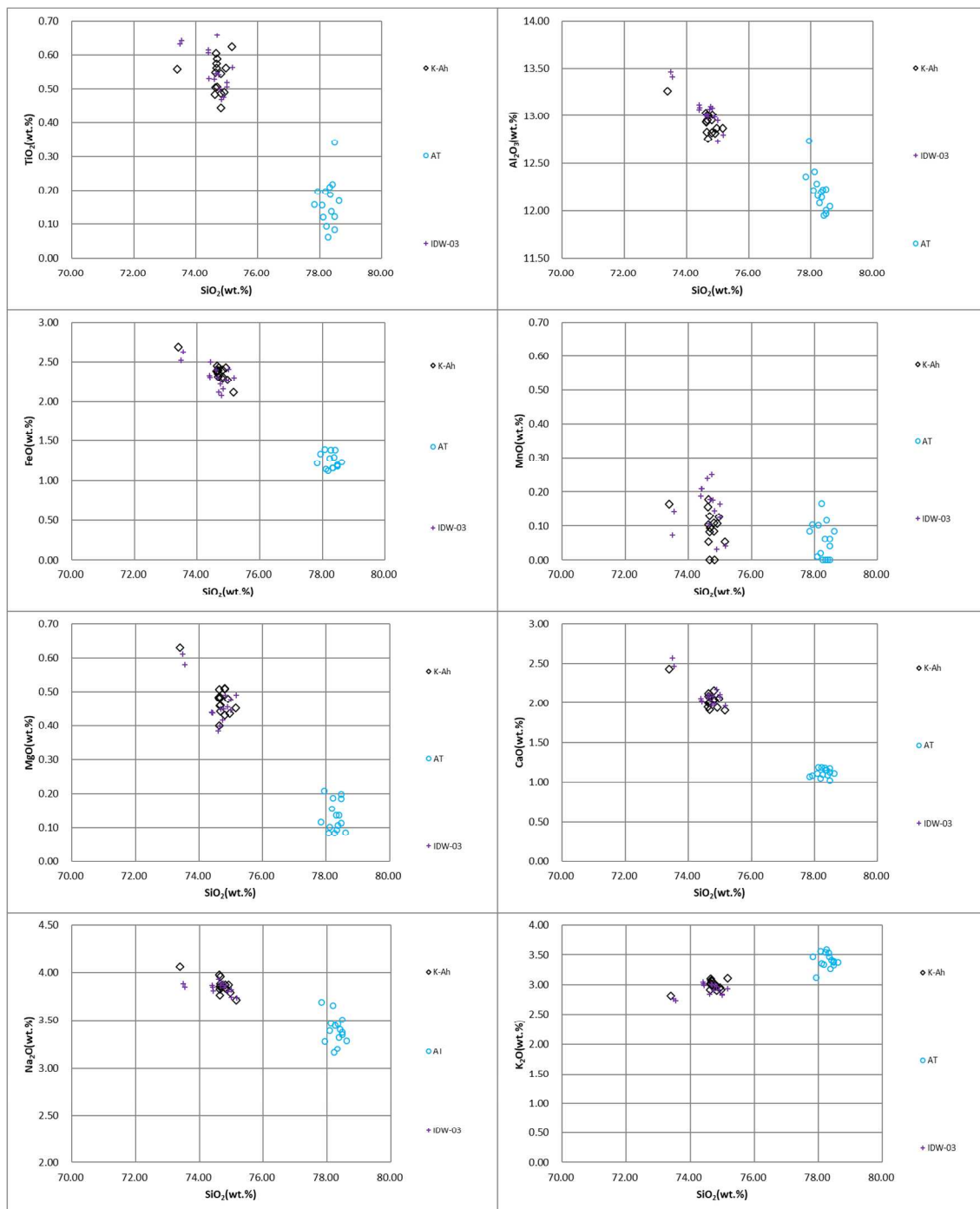


図 2.2.29 主成分元素組成分析結果（紫：IDW-03、黒：K-Ah、青：AT）

表 2.2.6 粒子組成分析および屈折率測定結果

試料名	Volcanic Glass		Light Mineral		Heavy Mineral					Rock	V.Rock	Total	備考	火山ガラスの屈折率	斜方輝石の屈折率	テフラ名
	Bw	Pm	O	Fl・Qu	Opx	Cpx	Gho	OTH	Opq							
IDW-03(0.5-0.7-0.9)	121	6	3	50	29	6	0	2	55	28	0	300	橄輝石含む	1.509-1.515(1.517-1.518少量含む)	1.705-1.714(モード1.709-1.713)	K-Ah

Bw:バブルウオーラルタイプ Fl・Qu:長石・石英

Pm:バミスタタイプ Opx:斜方輝石 Cpx:単斜輝石 Gho:緑色普通角閃石 OTH:その他

O:低発泡タイプ Opq:不透明鉱物 Rock:岩片・風化粒 V.Rock:火山岩片

(6) 連続サンプリング

出ノロトレンチの西側法面で連続サンプリングを2箇所実施した。



測線	上端	下端	メモ	測線	上端	下端	メモ
IDW-8.3	-0.40	-0.50	埋土	IDW-8.3	-2.50	-2.60	
IDW-8.3	-0.50	-0.60	旧表土	IDW-8.3	-2.60	-2.65	
IDW-8.3	-0.60	-0.70	旧表土	IDW-8.3	-2.65	-2.70	
IDW-8.3	-0.70	-0.80		IDW-8.3	-2.70	-2.80	
IDW-8.3	-0.80	-0.90		IDW-8.3	-2.80	-2.90	
IDW-8.3	-0.90	-1.00		IDW-8.3	-2.90	-3.00	
IDW-8.3	-1.00	-1.10		IDW-8.3	-3.00	-3.10	
IDW-8.3	-1.10	-1.20		IDW-8.3	-3.10	-3.20	
IDW-8.3	-1.20	-1.30		IDW-8.3	-3.20	-3.25	
IDW-8.3	-1.30	-1.40		IDW-8.3	-3.25	-3.30	
IDW-8.3	-1.40	-1.50		IDW-8.3	-3.30	-3.40	
IDW-8.3	-1.50	-1.60		IDW-8.3	-3.40	-3.50	
IDW-8.3	-1.60	-1.70		IDW-8.3	-3.50	-3.60	
IDW-8.3	-1.70	-1.80		IDW-8.3	-3.60	-3.70	
IDW-8.3	-1.80	-1.90		IDW-8.3	-3.70	-3.80	
IDW-8.3	-1.90	-2.00		IDW-8.3	-3.80	-3.90	
IDW-8.3	-2.00	-2.10		IDW-8.3	-3.90	-4.00	
IDW-8.3	-2.10	-2.20		IDW-8.3	-4.00	-4.10	
IDW-8.3	-2.20	-2.30		IDW-8.3	-4.10	-4.20	
IDW-8.3	-2.30	-2.40		IDW-8.3	-4.20	-4.30	
IDW-8.3	-2.40	-2.45		IDW-8.3	-4.30	-4.40	
IDW-8.3	-2.45	-2.50					

図 2.2.30 出ノロトレンチでの連続サンプリング① 西側法面 測線 8.3m位置



測線	上端	下端	メモ	測線	上端	下端	メモ
IDW-1.3	-0.30	-0.40	埋土	IDW-1.3	-1.70	-1.80	
IDW-1.3	-0.40	-0.50	旧表土	IDW-1.3	-1.80	-1.90	
IDW-1.3	-0.50	-0.60		IDW-1.3	-1.90	-2.00	
IDW-1.3	-0.60	-0.70		IDW-1.3	-2.00	-2.10	
IDW-1.3	-0.70	-0.80		IDW-1.3	-2.10	-2.20	
IDW-1.3	-0.80	-0.90		IDW-1.3	-2.20	-2.30	
IDW-1.3	-0.90	-1.00		IDW-1.3	-2.30	-2.40	
IDW-1.3	-1.00	-1.10	火山灰	IDW-1.3	-2.40	-2.50	
IDW-1.3	-1.10	-1.20	火山灰	IDW-1.3	-2.50	-2.60	
IDW-1.3	-1.20	-1.30		IDW-1.3	-2.60	-2.70	
IDW-1.3	-1.30	-1.40		IDW-1.3	-2.70	-2.80	
IDW-1.3	-1.40	-1.50		IDW-1.3	-2.80	-2.90	
IDW-1.3	-1.50	-1.60		IDW-1.3	-2.90	-3.00	
IDW-1.3	-1.60	-1.70					

図 2.2.31 出ノロトレンチでの連続サンプリング② 西側法面 測線 1.3m

(7) その他

①出土品

掘削土砂から出土したため、算出層準不明。

西原村教育委員会に提出したところ、縄文晩期ごろの土器ではないかとのことであった。



図 2.2.32 出土土器（掘削土砂中）

②予備サンプリング

以下、出ノロトレンチでの予備サンプル位置(図 2.2.33～図 2.2.35)およびリスト(図 2.2.36)を示す。

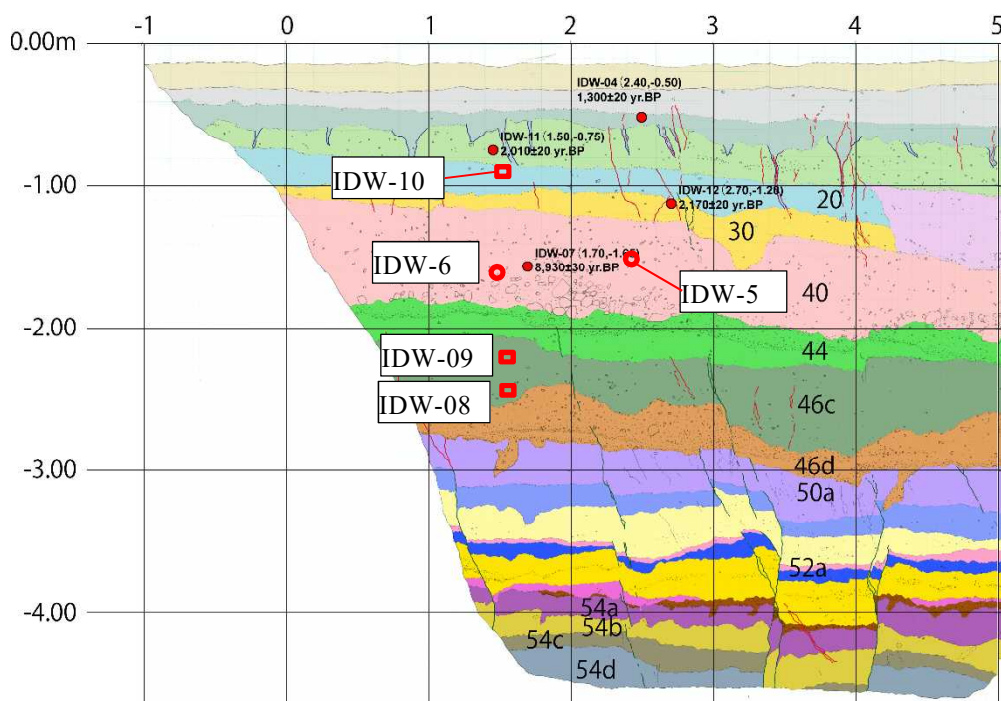


図 2.2.33 予備サンプル位置①

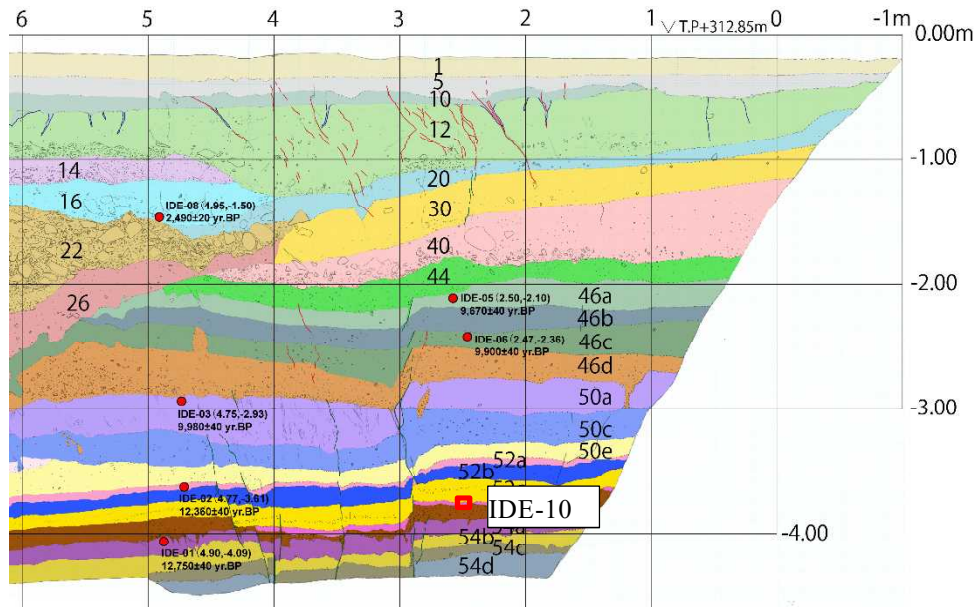


図 2.2.34 予備サンプル位置②

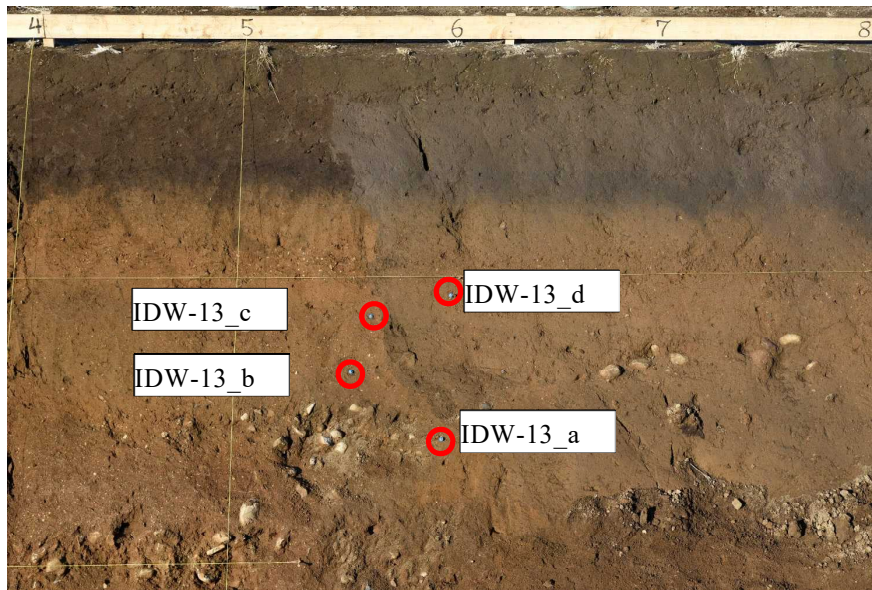


図 2.2.35 予備サンプル位置③

試料名	測線	深度	採取物	メモ
IDW-05	2.5	-1.5	炭(小)	礫の上の断層の年代の抑え
IDW-06	1.5	-1.6	炭(小)	礫の上の断層の年代の抑え
IDW-13	5.9	-1.4	炭(小～中)	a
IDW-13	5.5	-1.35	炭(小～中)	b
IDW-13	5.6	-1.15	炭(小～中)	c
IDW-13	5.95	-1.1	炭(小～中)	d
IDW-09	1.6	-2.2	土壌	上側
IDW-08	1.6	-2.45	土壌	下側
IDW-10	2.45	-3.75	土壌	下の方の薄い層準
IDW-10	2.45	-3.75	土壌	下の方の薄い層準

図 2.2.36 予備サンプルリスト

2.2.2.7. 考察

(1) 断層構造解析

出ノロトレンチでみられるクラックは全般的に東-西から西北西-東南東方向が多くを占める。このことは、トレンチ付近でみられる西北西-東南東方向の位相不連続ラインおよび東西方向の地表クラックと調和的である。また、開口クラックである F1 の一部には東北東-西南西方向の傾向がみとめられることや、断層面の傾斜角において F1・F2・F3 で傾向に差異があることから、それぞれのイベントによって活動する断層の性状に違いがあると考えられる。

(2) 断層活動履歴

出ノロトレンチにおける総合模式柱状図を表 2.2.7 に示す。

火山灰分析の結果、30 層は K-Ah 火山灰層に対比された。同層準で計測された ^{14}C 放射性炭素年代は 2,305-2,063 cal.BP であり有意に新しい年代となっている。法面スケッチ結果からは、30 層は平坦面～斜面上で堆積したことが示されており、離水後に長期間露出していたことが想定される。そのため、計測された ^{14}C 放射性炭素年代は混入した炭質物の測定値と考え、K-Ah 火山灰層の年代値を採用した。

出ノロトレンチにおいて識別された断層活動イベントは、熊本地震を除いて最低でも 3 回の活動が識別された。イベント I は現耕作土の直下まで連続する開口亀裂から 2016 年熊本地震と考えられる。イベント II は 10 層（旧表土）にクサビ状の落ち込みとして識別される変状を生じさせており、10 層の堆積年代である 1,289 cal BP 以降の活動である。イベント III は 30 層（K-Ah 火山灰）に見かけ数 cm 程度の段差を生じさせ、20 層に覆われている。識別されている年代値では K-Ah の降灰年代である 7.3 ka cal.BP 以降、22 層の堆積年代である 1,879 cal.BP 以前の活動である。イベント IV は 46 層に見かけ 10cm 程度の段差を生じさせ、44 層に覆われる。識別されている年代値では 46a 層の堆積年代である 11,202 cal.BP 以降、40 層の堆積年代である 9,909 cal.BP 以前の活動である。

表 2.2.7 出ノロトレンチにおける総合模式柱状図

地層名		層相	火山灰	放射性炭素年代 yrBP	イベント層準	
人工地盤	1	現耕作土			イベント I 2016熊本地震	
	3	埋土				
	5	埋土				
自然地盤	10	旧表土 黒色土		bulk 1,300 ± 20	イベント II	
	12	砂礫		carbon 2,010 ± 20		
	14	砂礫				
	16	砂混じりシルト		carbon 2,490 ± 20	イベント III 30以降20以前	
	20	砂混じりシルト				
	22	砂礫 チャンネル充填堆積物				
	24	礫混じりシルト質極細～細粒砂 斜面堆積物				
	26	シルト～極細粒砂 斜面堆積物		carbon 2,170 ± 20		
	30	火山灰 (シルト～極細粒砂) 斜面堆積物	K-Ah	6,500 yrBP		
	40	粘土質砂礫		carbon 8,930 ± 30	イベント IV	
	44	細礫～極粗粒砂混じり粗粒砂		bulk 9,670 ± 40		
	46	a	礫混じり粘土 暗褐色土		bulk 9,900 ± 40	
		b	礫混じり細粒砂質シルト			
		c	礫混じり粘土 暗褐色土		bulk 9,980 ± 40	
		d	中礫混じり細礫			
		e	極細粒砂混じりシルト 黒色土			
	50	a	砂質シルト 暗褐色土			
		b	礫混じりシルト質砂～シルト			
		c	礫混じりシルト 暗褐色土			
		d	礫混じりシルト質砂		bulk 12,360 ± 40	
		e	粘土 黒色土			
	52	a	粘土			
		b	粘土			
		c	シルト～粘土			
		d	シルト～粘土 暗褐色土			
		e	礫混じりシルト質砂		bulk 12,750 ± 40	
54	a	シルト 黒色土				
	b	シルト				
	c	シルト				
	d	シルト				

2.2.3. 小園トレンチ

2.2.3.1. 調査位置

小園トレンチは熊本県阿蘇郡西原村大字鳥子小字持矢倉において実施した（図 2.2.37）。調査位置は位相不連続ライン（小俣ほか, 2017a）ならびに物理探査結果（図 2.2.38）をもとに、想定される変位を直角に横断するように掘削を行った。掘削の結果、当初想定位置において人工地盤（埋土層）が出現したため、調査位置を北東側に再設定し、追加掘削を行った。物理探査結果の詳細は 2.3 項にて後述する。



図 2.2.37 小園トレンチ位置図（南西側：当初位置、北東側：再掘削位置）

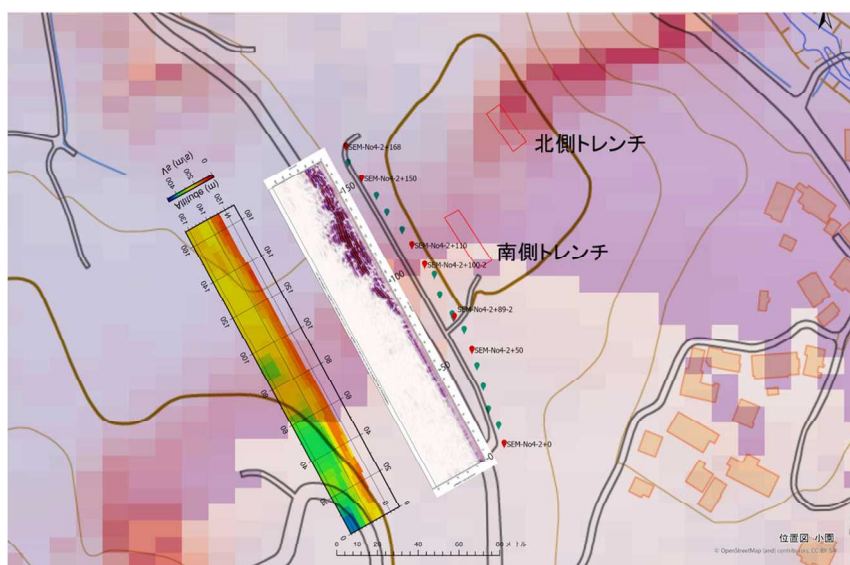


図 2.2.38 トレンチ位置と物理探査結果の関係

2.2.3.2. 掘削結果

当初掘削予定範囲（南側トレンチ）は想定した物理探査結果の谷地形を横断するように30m程度として掘削を開始したが、埋土層が出現した（図 2.2.39～図 2.2.40）。そのため、北東側（北側トレンチ）に移動して、再度、位相不連続ラインを横断するように追加掘削をおこなった。最終的には、北側トレンチは開口部の大きさを8m×22m・深さ5mとした（図 2.2.41、図 2.2.42）。

北側トレンチ法面は機械掘削後に手作業による整形を行い、水平方向1m毎×鉛直方向1m毎のグリッドを作成した。掘削を行ったトレンチ形状および高さの基準とした仮基準点（近傍に設置した杭高）について RTK-GPS 測量にて求めた。設置したグリッドの標高については、仮基準点からレベル測量にて計測した。計測結果を表 2.2.8 に示す。

表 2.2.8 小園トレンチ測量成果

測定位置	標高(T.P.m)	測定方法	備考
杭の上側	150.58	RTK-GPS	※1
鉛直方向 0.00m	150.75	レベル	貫板上面
鉛直方向-1.00m	149.75	レベル	
鉛直方向-2.00m	148.75	レベル	
鉛直方向-3.00m	147.75	レベル	
鉛直方向-4.00m	146.75	レベル	

※1：標高値は10秒間8Hz計測（合計80回）の平均値により求めた値



図 2.2.39 南側トレンチ全景



図 2.2.40 南側トレンチ 埋土状況



図 2.2.41 北側トレンチ掘削状況



図 2.2.42 北側トレンチ全景

2.2.3.3. モザイク写真

トレンチ法面の写真撮影は極力歪みが少なくなるように実施した。撮影した写真画像は画像の歪み等を補正したうえで鉛直面に投影したモザイク写真を作成した。

作成したモザイク写真を次ページに示す。



図 2.2.43 小園トレンチモザイク写真（北側トレンチ）

2.2.3.4. 法面スケッチ

法面スケッチは水平方向 1m×鉛直方向 1m で作成した水系を基準とし、縮尺 1/20 鉛直面投影にて作成した。作成したスケッチを元に、地質区分ごとに着色を行うとともに、断層位置の加筆を行った。また、各地層の記載と併せて、試料採取位置の記録を行った。

法面スケッチを次ページより示す。

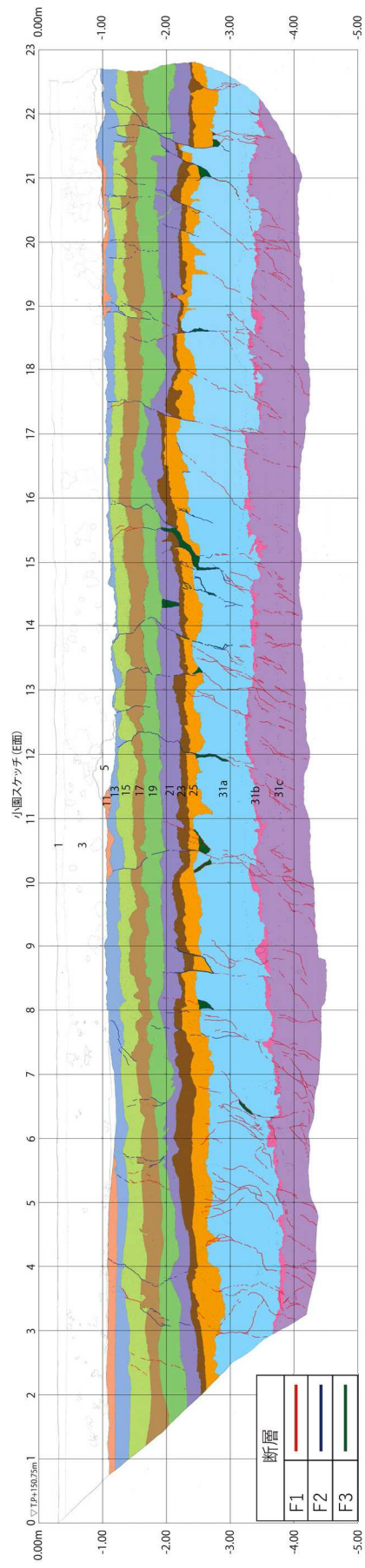


図 2.2.44 小園トリレンチ法面スケッチ (E面)

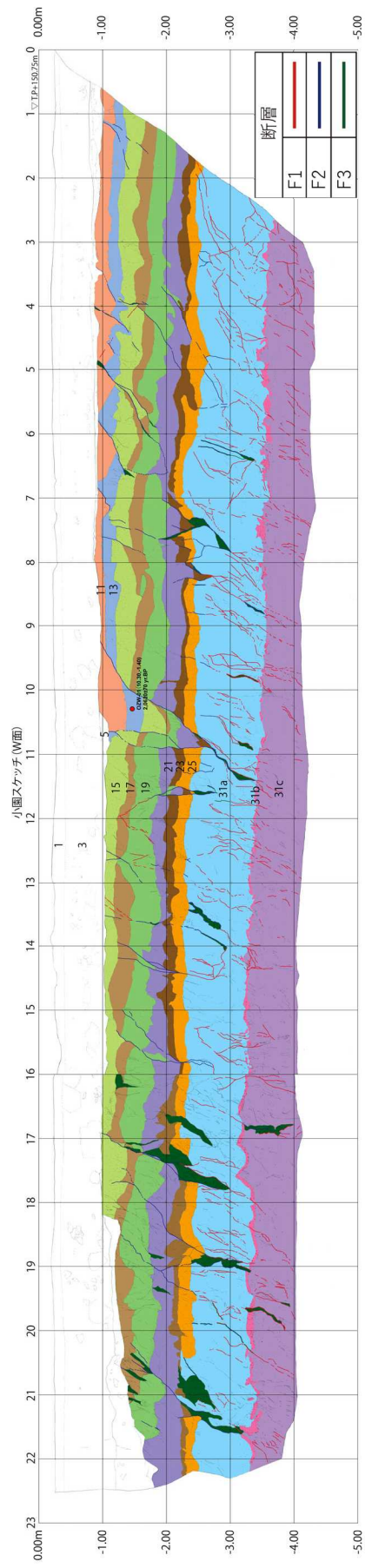


図 2.2.45 小園トレンチ法面スケッチ (W面)

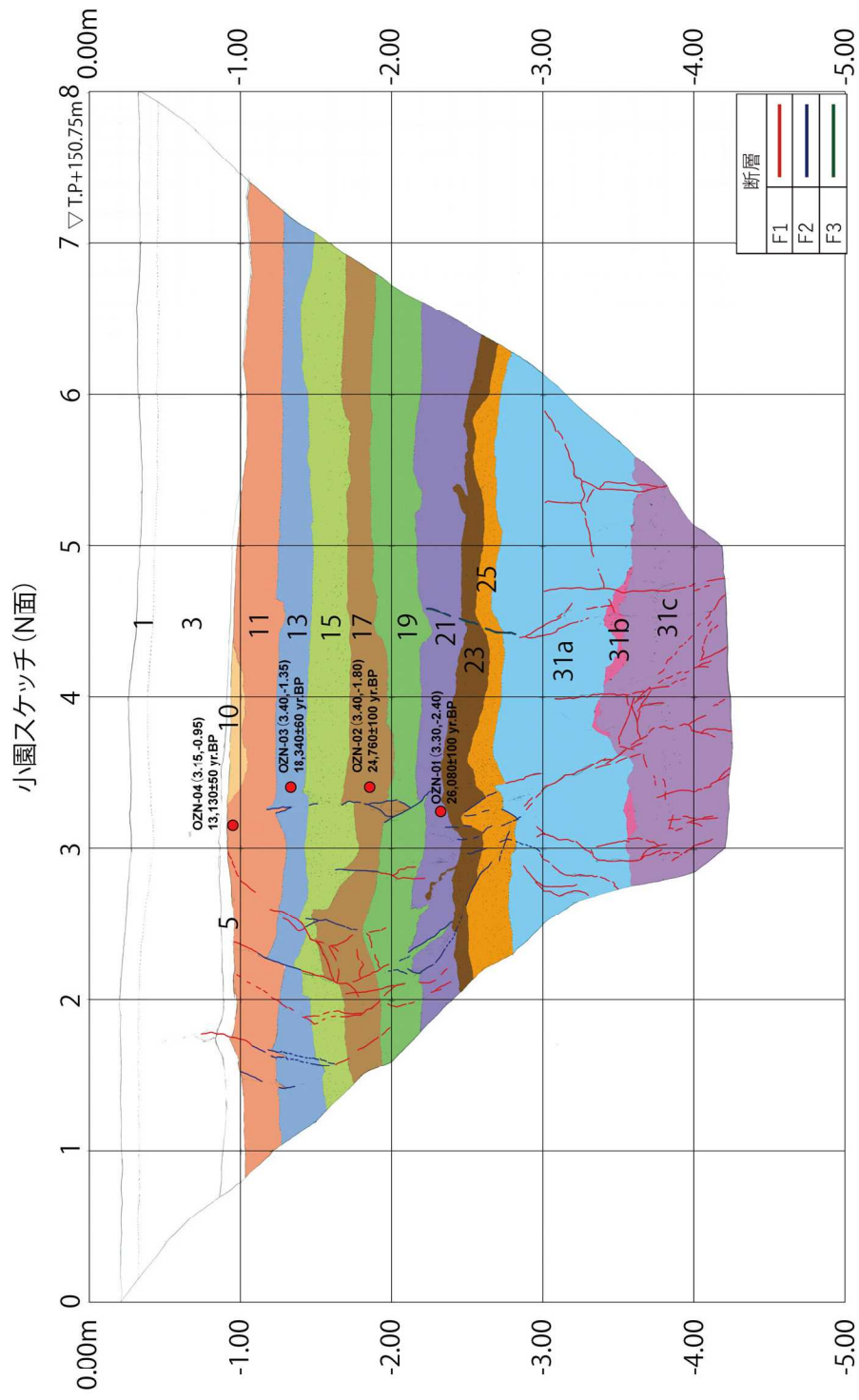


図 2.2.46 小園トレンチ法面スケッチ (N面)

2.2.3.5. 地質概説

小園トレンチにおける地質層序表を表 2.2.9 に示す。

トレンチ法面において観察された人為的な影響のある層は、現耕作土層（1層）、盛土層（3、5層）である。それらより下位には、自然地盤としての10～31c層の堆積物が分布する。

表 2.2.9 小園トレンチ内における地質層序

地層名		層相	火山灰	放射性炭素年代 yrBP	
人工地盤	1	現耕作土			
	3	盛土			
	5	盛土			
自然地盤	10	砂混じりシルト (暗褐色)			
	11	シルト (にぶい橙色)		13,130 ± 50	
	13	砂質シルト (黒色土)		18,340 ± 60	
	15	火山灰 (シャリシャリ)	AT	20,620 ± 70	
	17	砂質シルト (淡色の黒色土)		24,760 ± 100	
	19	シルト混じり極細粒砂			
	21	砂質シルト (黒色土)		26,080 ± 100	
	23	シルト (茶色ホクホク)			
	25	シルト (黄色ホクホク)			
	31	a	シルト (黄褐色)		
		b	パミス火山灰 (橙～明黄褐色)	ACP6	
c		シルト (黄橙色)			

2.2.3.6. 地質各論

(1) 層序記載

【1層】トレンチ掘削範囲表層に5～15cm程度で分布する。シルト質土を主体で植物の根を含む。下位層との境界は明瞭で平滑である。現耕作土層。

【3層】W面グリッド0～22.5mに層厚50～80cm程度で、N面グリッド0～8mに層厚60～80cm程度で、E面グリッド0～22.7mに層厚60～80cm程度で分布する。ほぼシルトブロックからなる盛土でφ20～30cmが主体である。W面グリッド10m、12～13m、18～20m、22m、E面グリッド9～10m、11～13m、14～16m、19～22mの断層直上ではしまりが非常に悪い。下位層に凹凸を伴う明瞭な削剥面で覆う。

下位層を削剥する自然地盤と同質な偽礫を含む不均質な土質からなるため、盛土層と考えられる。

【5層】W面グリッド0.5～8m、10.5～11.2m、16.0～22.5mに層厚5～50cm程度で、N面グリッド0.8～7.5mに層厚5～10cm程度で、E面グリッド0.8～8.0m、11.2～12.5m、19.0～22.6mに層厚5～20cm程度で断続的に分布する。しまりの悪いシルト質砂からなり、黒色を呈する。31aと同質なφ4～10cmのシルトブロックを多量に含む。下位境界は直線的で明瞭な削剥面で覆う。

下位層を削剥する不均質な土質からなるため、盛土層と考えられる。

【10層】N面グリッド3.3～4.5mに層厚5～15cm程度で分布する。やや軟質な塊状砂混じりシルトからなり、暗褐色<10YR3/3>を呈する。地層の大部分は上位の盛土によって削剥されている。下位層との境界は不明瞭でやや不規則形状をなす。

【11層】W面グリッド0～10.8mに層厚5～40cm程度で、N面グリッド0.8～7.6mに層厚20～30cm程度で、E面グリッド10.0～11.5m、18.8～21.3mに層厚5～10cm程度で分布する。しまりのよい塊状シルトからなり、にぶい橙色<5YR7/4>を呈する。亀甲状に5cm程度で細かく割れやすい。下位層との境界は不明瞭で凹凸を伴う。

【13層】W面グリッド0.8～10mに層厚10～20cm程度で、N面グリッド1.0～7.2mに層厚20～40cm程度で、E面グリッド1.0～22.7mに層厚10～20cm程度で断続的に分布する。塊状の砂質シルトを主体とし、やや濃い褐色<7.5YR4/3>を呈す。乾燥により裂かが発生しやすい。下位層との境界は不明瞭で凹凸を伴い、漸移的に変化する。

【15層】W面グリッド0.9～18.2mに層厚5～40cm程度で、N面グリッド1.3～7.1mに層厚20～40cm程度で、E面グリッド1.0～22.5mに層厚10～20cm程度で分布する。均質な細粒砂を主体とし、明黄褐色<10YR7/6>を呈す。粒径幅が狭く淘汰が良い。φ1mm程度のパミスが5%程度散在する。下位層との境界は不明瞭で漸移的に変化する。

【17層】W面グリッド1.2～21.2mに層厚5～30cm程度で、N面グリッド1.2～7.0mに層厚10～30cm程度で、E面グリッド1.2～22.7mに層厚10～20cm程度で分布する。塊状の砂質シルトを主体とし、にぶい褐色<7.5YR5/4>を呈す。乾燥により裂かが発生しやすい。下位層との境界はやや不明瞭で漸移的に変化する。

【19層】W面グリッド1.2～21.7mに層厚10～40cm程度で、N面グリッド1.7～6.9mに層厚20～30cm程度で、E面グリッド1.5～23.9mに層厚10～30cm程度で分布する。シルト混じり極細粒砂を主体とし、にぶい黄橙色<10YR6/4>中に斑状の黒色部<10YR4/1>が30～40%混じる。基質中には極細粒砂サイズの白～明褐色粒子が多量に見られる。層厚5mm程度の弱い層状構造が分布する。下位層との境界はやや不明瞭で漸移的に変化する。

【21層】W面グリッド1.4～22.5mに層厚20～50cm程度で、N面グリッド1.7～6.8mに層厚10～30cm程度で、E面グリッド1.8～23.9mに層厚10～20cm程度で分布する。塊状の砂質シルトが主体で黒褐色<10YR3/2-3/1>を呈し、部分的に淡色部がある。クラック中や付近で下位層に流入する箇所が見られる。下位層との境界はやや不規則形状をなし、漸移的に変化する。

【23層】W面グリッド1.5～22.3mに層厚5～20cm程度で、N面グリッド2.0～6.5mに層厚10～20cm程度で、E面グリッド2.0～23.9mに層厚10～20cm程度で断続的に分布する。やや軟質な塊状シルトを主体とし、褐色～暗褐色<7.5YR4/6-3/4>を呈す。下位層との境界はやや不規則形状をなし、漸移的に変化する。

【25層】W面グリッド1.7～22.2mに層厚10～20cm程度で、N面グリッド2.1～6.6mに層厚5～20cm程度で、E面グリッド2.1～23.9mに層厚5～30cm程度で断続的に分布する。やや軟質な塊状シルトを主体とし、黄橙色<10YR5/6>を呈す。クラック中や付近で下位層に流入する箇所が見られる。下位層との境界はやや不明瞭で漸移的に変化する。

【31a層】W面グリッド1.8～22.5mに層厚100～120cm程度で、N面グリッド2.2～6.5mに層厚80～100cm程度で、E面グリッド2.2～22.8mに層厚80～100cm程度で分布する。やや均質でしまりのよい塊状シルトを主体とし、黄褐色～橙色<10YR5/6>を呈す。下位層の32b層から20～30cm上位にやや粗粒な層序が2層見られる。下位層との境界はやや不明瞭で凹凸を伴う。

【31b層】W面グリッド2.6～22.1mに層厚5～10cm程度で、N面グリッド2.5～5.9mに層厚5～10cm程度で、E面グリッド2.9～22.2mに層厚5～10cm程度で断続的に分布する。不均質なシルト質細粒砂を主体とし、橙色～明黄褐色<7.5YR6/8-10YR6/8>を呈す。平均φ2～8mm程度、最大φ16cmの軽石を多量に含み、赤色、黄橙色、灰白色を呈す。上位にかけて軽石が少なくなり31a層に漸移する。下位層との境界はやや不明瞭で凹凸を伴う。

【31c 層】 W 面グリッド 2.6～22.2m に、N 面グリッド 2.3～5.6m に、E 面グリッド 2.9～22.2m に分布する。しまりのよい塊状シルトを主体とし、にぶい黄橙色<10YR7/4>を呈す。上位層の 32b 層から 20～30cm 下位に、 ϕ 1～2mm の赤色軽石が層状に点在する基質粒子のやや粗い層序が見られる。

(2) 断層記載

小園トレンチでは多くの断層およびクラックが確認される。断層およびクラックは、変位および挟在する物質に違いがあることから、性状によって F1～F3 まで分類した。なお、小園トレンチではトレンチ北西角を基準に水平、鉛直に 1m で水系によりグリッド表示されている。壁面の位置を示す際にはグリッドで表現する。例えば、W 面の横方向のグリッドが地表面上の横板に 6m と表示された水系の上で、深度方向には 2 本目の水系と 3 本目の水系の中間に位置し、板上面から 2.5m の深度にある場合は、W (6.0, -2.5) のように表示する。

①F1

W 面および E 面、S 面には開口クラックが分布し、多くは 33c 層から 33a 層中に確認される(図 2.2.47)。開口クラックの幅は 1～8cm 程度である。開口部には挟在物は分布しないことから比較的新しい時期に形成されたものと推定される。このように開口したクラックは -3.5m 前後まで断続的に続くものが多いが、S(1.6～3.0, -2.4～-0.9)の範囲に分布するクラック、のように -3.5m 以浅の 3 層まで達する。

②F2

断層の剪断面の間隙に物質が充填する構造を F2 とする(図 2.2.48)。W 面および E 面、S 面の 33c 層から 21 層の範囲に多く分布し、一部は 21 層から 11 層に分布する。充填物は付近の地層の物質から構成され、W(16.8～19.1, -3.8～-2.4)の範囲で見られる F2 では 21 層の黒褐色砂質シルトや 31c 層の角礫化したシルトが含まれる。

③F3

地層に変形をあたえ、剪断面が密着している断層を F3 とする。W 面および E 面、S 面の -3.0m 以浅の範囲に多く分布し、31a 層から 11 層までが見かけ 10～30cm 程度の変位を受ける。断層が隣接する箇所では花卉構造が発達し、W(9.4～10.8, -2.8～-0.9)の範囲では複雑な変形が認められる(図 2.2.49)。

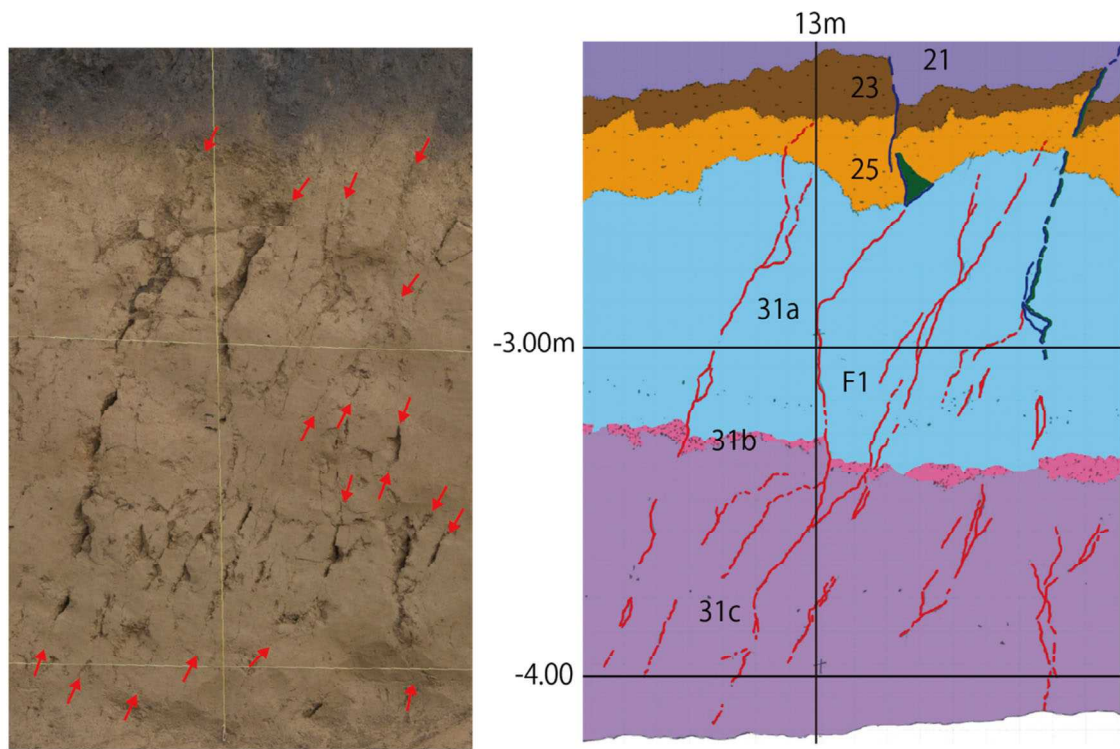


図 2.2.47 E(12.2~13.6, -2.2~-4.2)付近に分布する F1

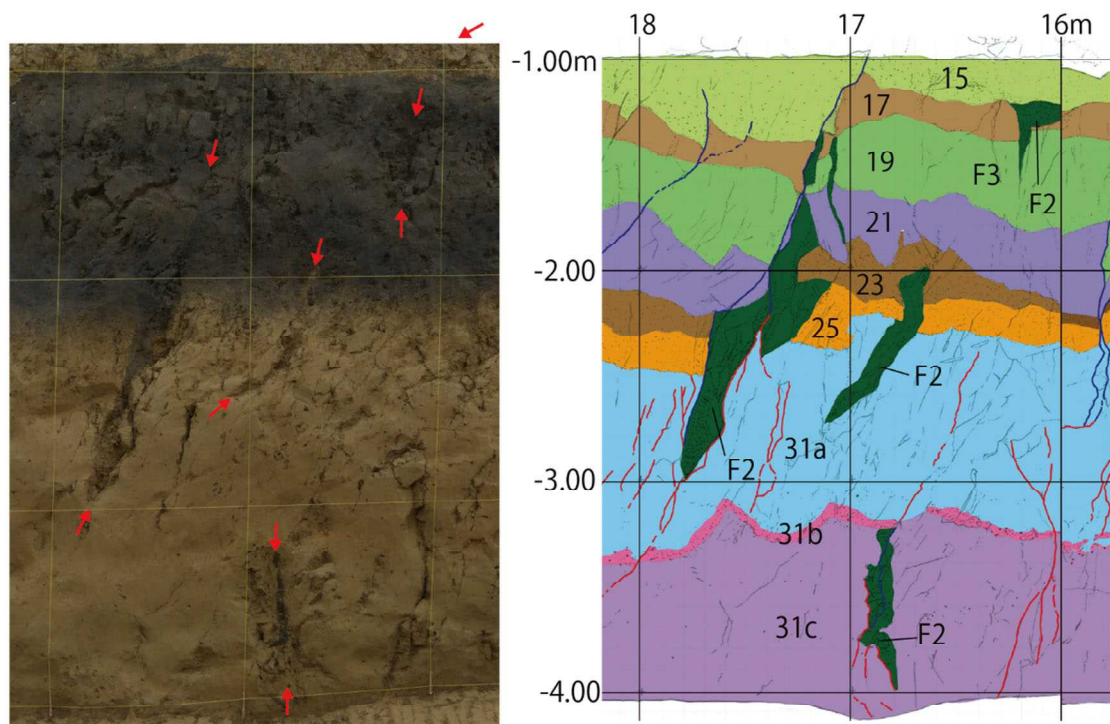


図 2.2.48 W(16.0~17.8, -1.3~-4.0)付近に分布する F2

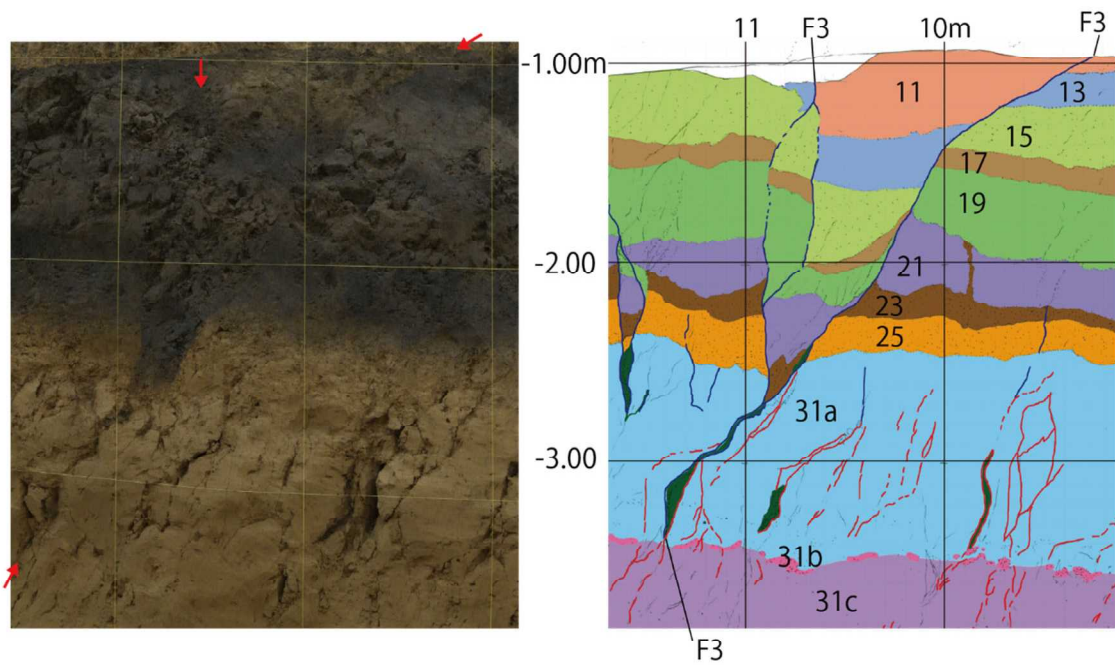


図 2.2.49 W(9.4~10.8, -2.8~-0.9)付近に分布する F3

(3) 断層構造解析

①F1

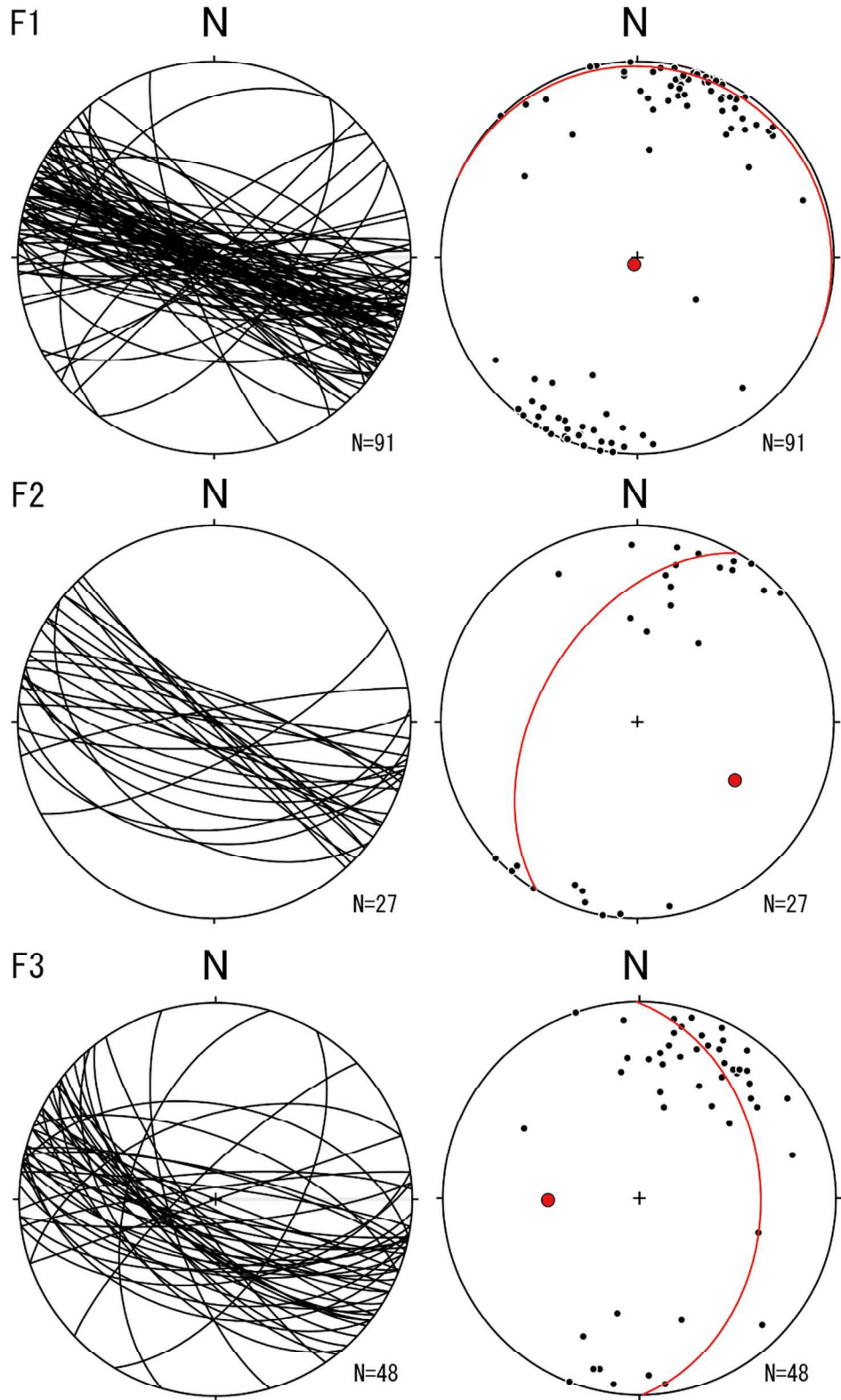
開口クラックである F1 の傾向として、走向が北西-南東方向から東西方向(N44W~N90 程度)、傾斜は 70~90° 程度で南北に振れるものが多い。一部、北東-南西から東北東-西南西方向(N55E~N80E)のものもみられる。

②F2

充填物が認められる構造である F2 の傾向として、走向が北西-南東方向から東-西方向(N60W~N90 程度)、傾斜は 70~90° 程度で南傾斜のものがやや多い。

③F3

地層に変位を与える断層である F3 の傾向として、走向が北西-南東方向から西北西-東南東方向(N60W~N80W)、傾斜は 50~90° 程度で、やや中角度南傾斜に振れるものが多い。



(4) 年代測定

年代測定は AMS 法による放射性炭素年代測定を実施した。

年代試料サンプリング位置を図 2.2.50～図 2.2.51 に示とともに、測定結果を表 2.2.10～表 2.2.11 および図 2.2.52 に示す。

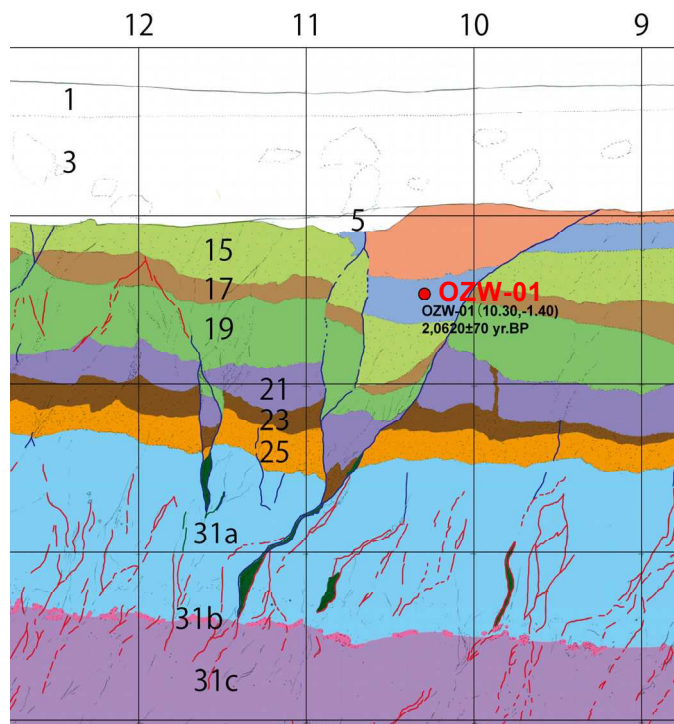


図 2.2.50 小園トレンチ 年代試料サンプリング位置 (W 面)

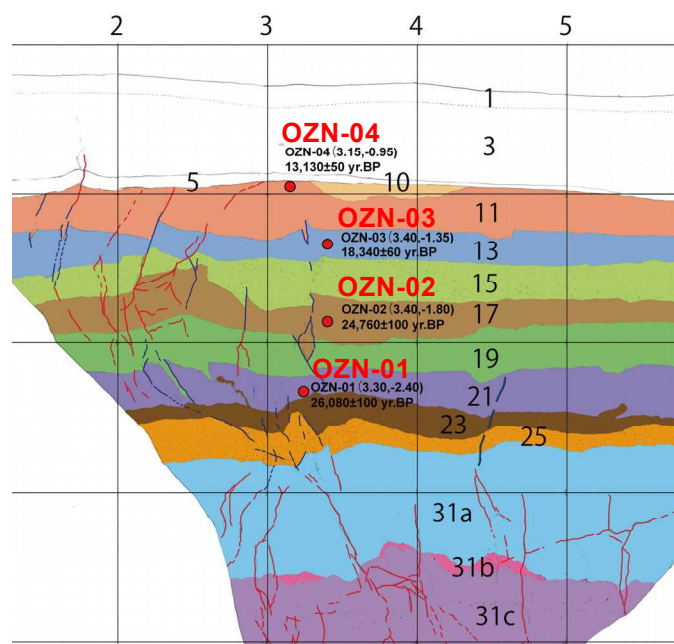


図 2.2.51 小園トレンチ 年代試料サンプリング位置 (N 面)

表 2.2.10 小園トレンチ 放射性炭素年代測定結果 (1)

測定番号	試料名	試料形態	処理方法	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
					Libby Age(yrBP)	pMC(%)
IAAA-211711	OZN-01	土壌	HCl	-17.08 ± 0.22	26,080 ± 100	3.89 ± 0.05
IAAA-211712	OZN-02	土壌	HCl	-14.55 ± 0.27	24,760 ± 100	4.58 ± 0.06
IAAA-211713	OZN-03	土壌	HCl	-18.42 ± 0.21	18,340 ± 60	10.20 ± 0.08
IAAA-211714	OZN-04	土壌	HCl	-21.23 ± 0.23	13,130 ± 50	19.50 ± 0.11
IAAA-211715	OZW-01	土壌	HCl	-16.51 ± 0.21	20,620 ± 70	7.68 ± 0.07

表 2.2.11 小園トレンチ 放射性炭素年代測定結果 (2)

測定番号	試料名	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用 (yrBP)	1 σ 暦年代範囲	2 σ 暦年代範囲
		Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-211711	OZN-01	25,950 ± 100	3.96 ± 0.05	26,075 ± 104	30370calBP - 30118calBP (68.3%)	30737calBP - 30530calBP (11.4%) 30485calBP - 30057calBP (84.1%)
IAAA-211712	OZN-02	24,590 ± 100	4.68 ± 0.06	24,762 ± 99	29127calBP - 28895calBP (68.3%)	29182calBP - 28783calBP (95.4%)
IAAA-211713	OZN-03	18,230 ± 60	10.34 ± 0.08	18,337 ± 62	22362calBP - 22222calBP (68.3%)	22421calBP - 22137calBP (95.4%)
IAAA-211714	OZN-04	13,070 ± 50	19.66 ± 0.11	13,130 ± 46	15821calBP - 15662calBP (68.3%)	15925calBP - 15590calBP (95.4%)
IAAA-211715	OZW-01	20,480 ± 70	7.81 ± 0.07	20,616 ± 69	24980calBP - 24715calBP (68.3%)	25085calBP - 24599calBP (95.4%)

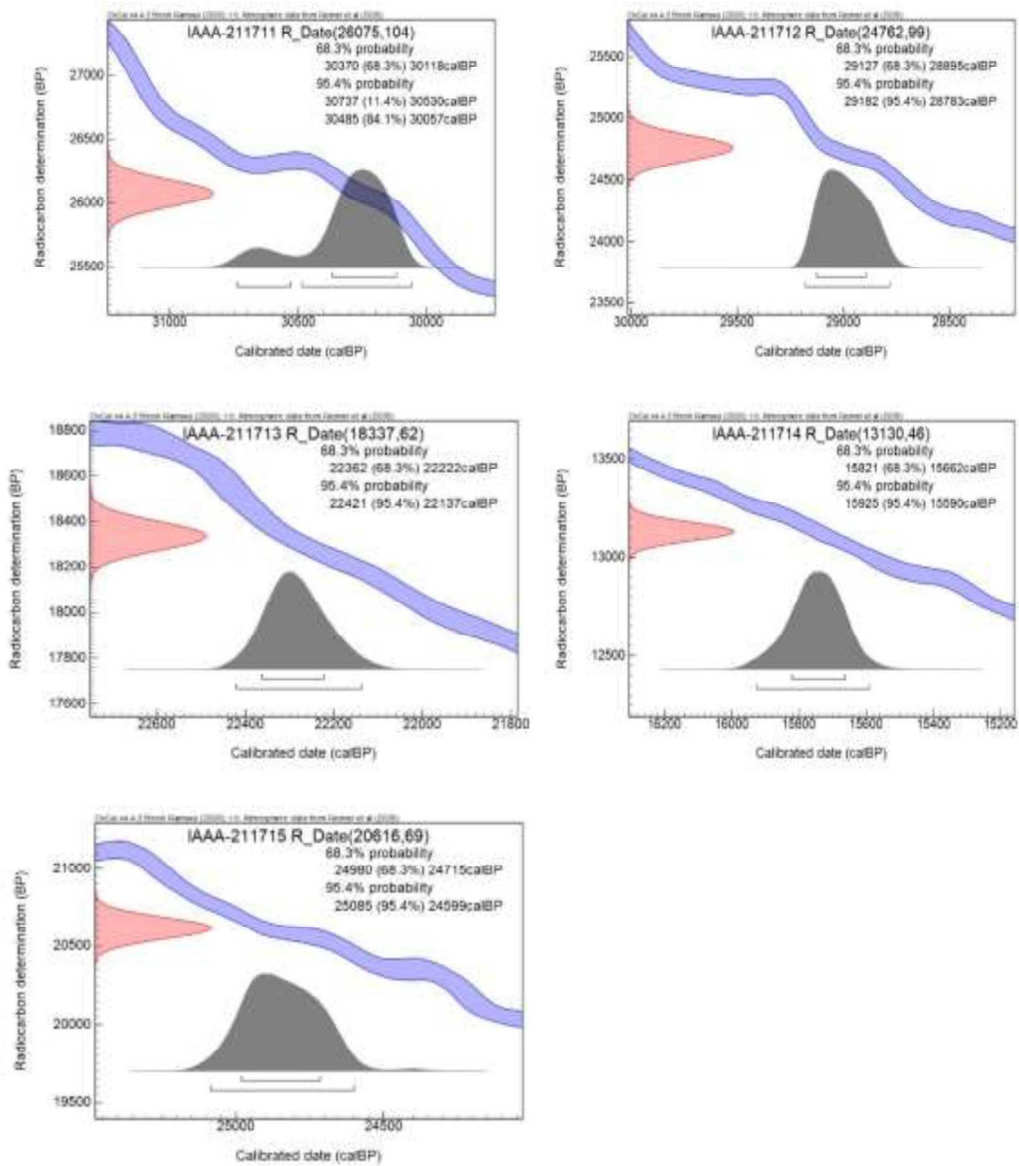


図 2.2.52 小園トレンチ 暦年較正年代グラフ

(5) 火山灰分析

① OZE-02 (7.7,-3.55)

低発泡タイプ火山ガラスをやや多く含む(図 2.2.54)。有色鉱物としては斜方輝石および単斜輝石を多く含む。緑色普通角閃石も含む。火山ガラスの屈折率は 1.508-1.515 である。斜方輝石の屈折率(γ)は 1.702-1.706 付近にまとまる。主成分元素組成は、含有率平均値が SiO₂ で 71.4wt.%程度、Na₂O が 4.1 wt.%、K₂O が 4.9 wt.%程度にまとまる。アルカリ元素を多く含む。色付きガラスを含む。

本試料は斜方輝石の屈折率(町田・新井, 2003)が異なることから、草千里浜テフラとは別のテフラである。火山ガラスの主成分元素組成はアルカリ元素を多く含む特徴を有し、阿蘇カルデラ起源テフラ(Aso-4 や Aso-ABCD)の特徴(町田・新井(2003); Tsuji et al,2017)と類似する。阿蘇カルデラでは Aso-4 噴出以降 ACP と記載された 6 枚の降下軽石が知られている(高田, 1989)。このうち角閃石を含む軽石層は ACP6 と呼ばれる飯田火砕流の上位に挟まれる軽石層のみである。したがって、本試料は ACP6 と呼ばれる軽石層降灰層準から採取された可能性がある。

確度の高い対比には上記 ACP 軽石の主成分元素組成の把握が必要である。

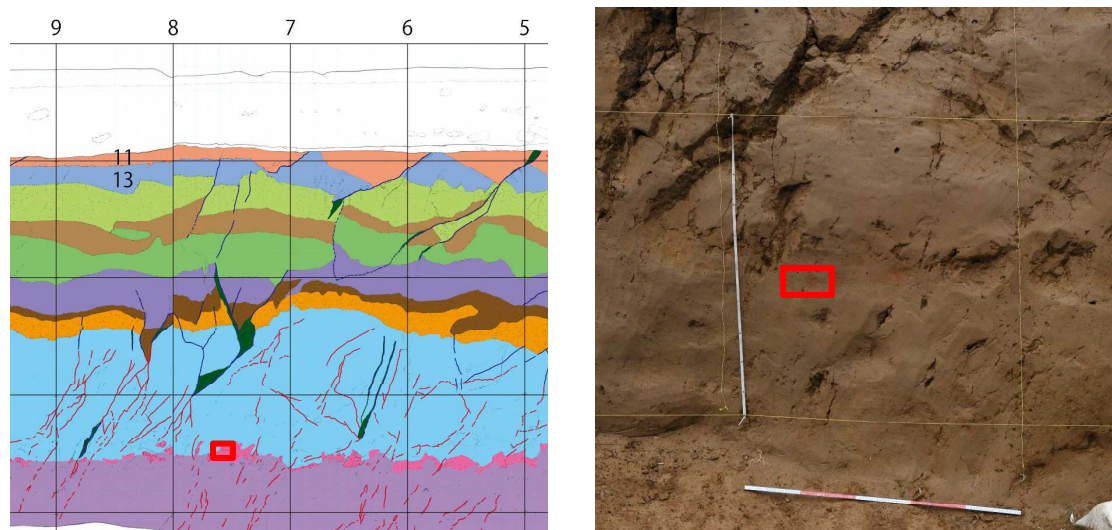


図 2.2.53 OZE-02(7.7,-3.55) サンプル位置

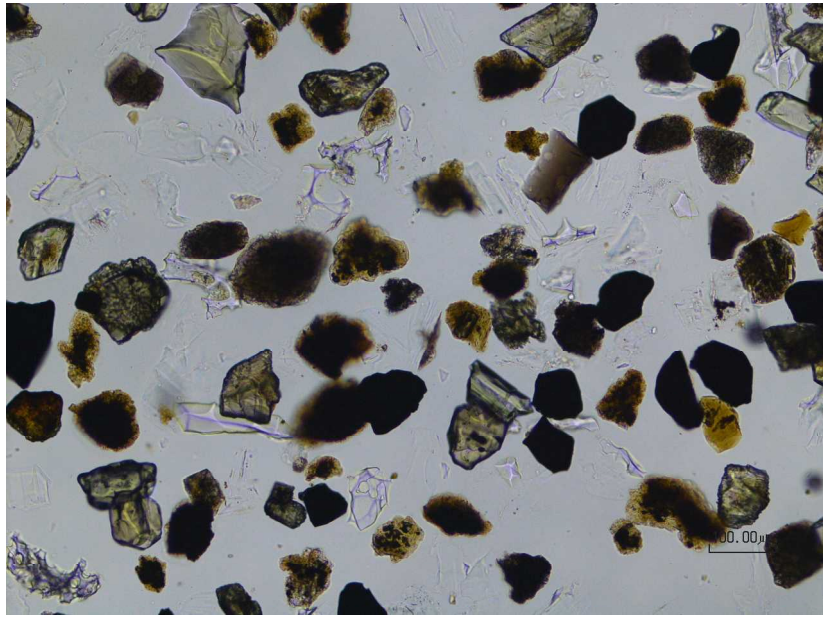


图 2.2.54 OZW-02 檢鏡写真

②OZE-01 (2.2,-1.5)

バブルウォールタイプ火山ガラスを多く含む(図 2.2.56)。有色鉱物としては斜方輝石および単斜輝石を多く含む。火山ガラスの屈折率は 1.497-1.501 である。斜方輝石の屈折率(γ)は 1.703-1.735 で 1.730-1.735 と高い値を示すものを多く含む。主成分元素組成は、含有率平均値が SiO₂ で 78.1wt.%程度、Na₂O が 3.4 wt.%、K₂O が 3.4 wt%程度にまとまる。

火山ガラスの形態、屈折率および主成分元素組成は AT テフラの特徴(町田・新井, 2003)と一致する。斜方輝石の屈折率も AT テフラの特徴(町田・新井, 2003)と一致することから、本試料は AT 降灰層準から採取されたと考えられる。

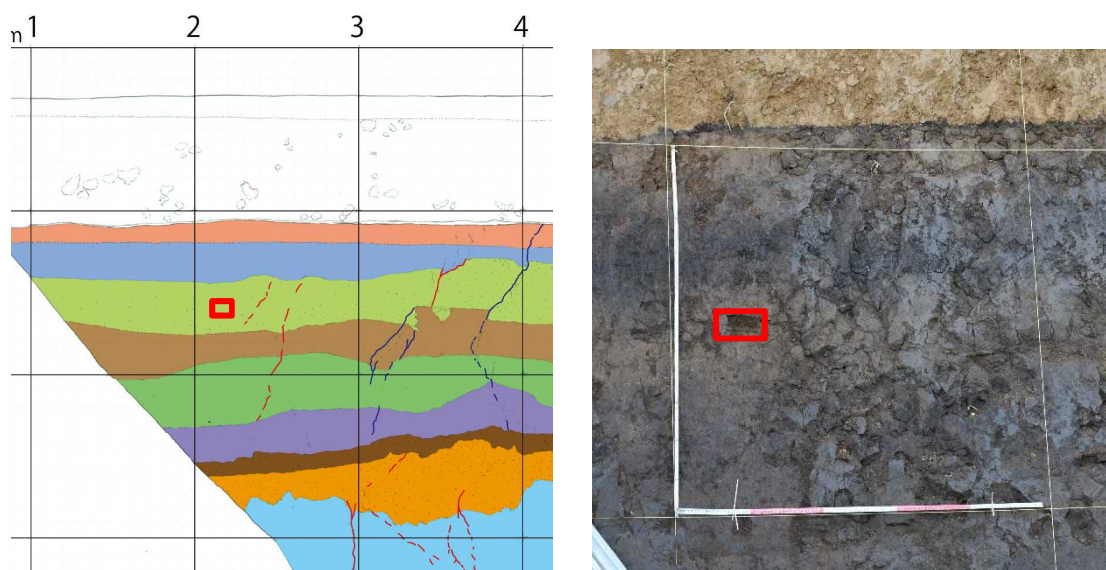


図 2.2.55 OZE-01(2.2,-1.5) サンプル位置

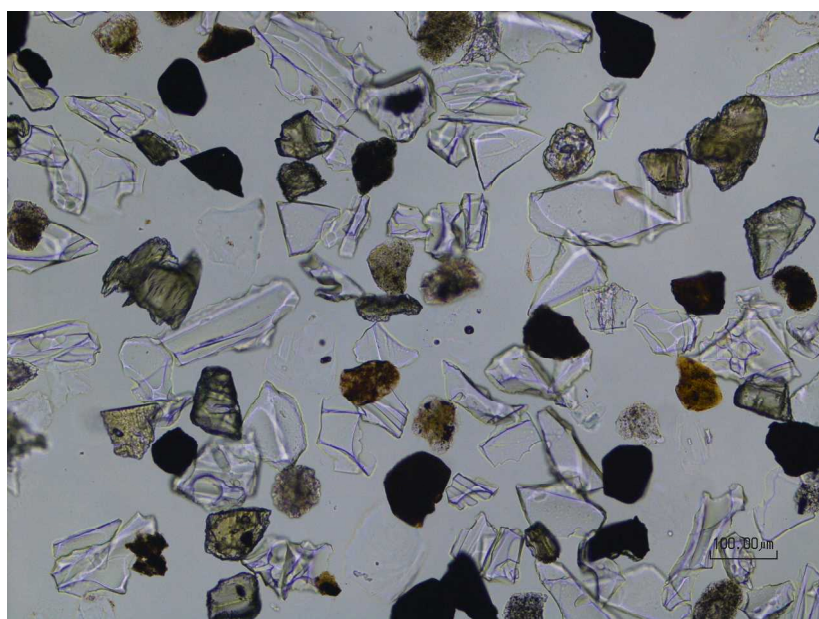


図 2.2.56 OZE-01 検鏡写真

③測定結果

次ページより火山灰分析の測定結果を取りまとめて示す。

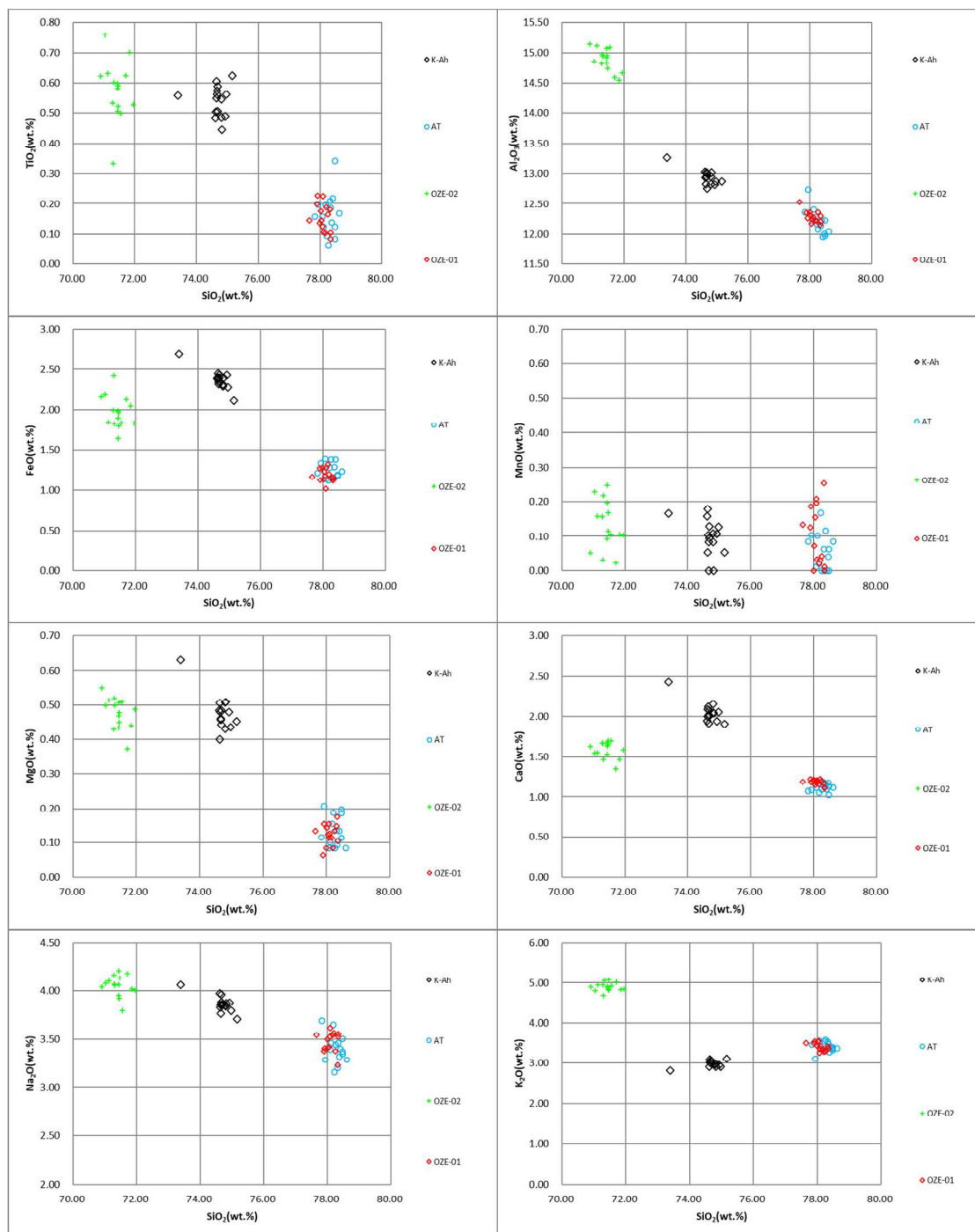


図 2.2.57 主成分元素組成分析結果 (赤 : IDE-01、緑 : OZE-02、黒 : K-Ah、青 : AT)

表 2.2.12 粒子組成分析および屈折率測定結果

試料名	Volcanic Glass		Light Mineral		Heavy Mineral				Rock	V.Rock	Total	備考	火山ガラスの屈折率	斜方輝石の屈折率	テフラ名
	Bw	Pm	O	Fl・Qu	Opx	Opx	Gpx	Opx							
OZE-01(2.2-1.5)	111	0	10	52	31	13	0	0	38	45	0	300	1.497-1.501	1.703-1.735(1.730-1.735と高い値含む)	AT
OZW-02(7.7-3.55)	0	0	11	117	38	11	1	0	52	70	0	300	1.508-1.515(1.499-1.500少量含む)	1.702-1.706	Aso ACP6?

Bw: バブルウォールタイプ
 Pm: パミスタタイプ
 O: 低義泡タイプ

Fl・Qu: 長石・石英
 Opx: 斜方輝石 Cpx: 単斜輝石 Gho: 緑色普通角閃石 OTH: その他
 Opq: 不透明鉱物 Rock: 岩片・風化粒 V.Rock: 火山岩片

(6) 連続サンプリング

小園トレンチの北側法面で連続サンプリングを実施した(図 2.2.58)。

測線	上端	下端	メモ
OZN-3.15	-0.90	-1.00	
OZN-3.15	-1.00	-1.10	
OZN-3.15	-1.10	-1.20	
OZN-3.15	-1.20	-1.30	
OZN-3.15	-1.30	-1.40	1枚目クロ
OZN-3.15	-1.40	-1.50	AT
OZN-3.15	-1.50	-1.60	AT
OZN-3.15	-1.60	-1.70	AT
OZN-3.15	-1.70	-1.80	AT-2枚目クロ境界
OZN-3.15	-1.80	-1.90	2枚目クロ
OZN-3.15	-1.90	-2.00	
OZN-3.15	-2.00	-2.10	
OZN-3.15	-2.10	-2.20	
OZN-3.15	-2.20	-2.30	
OZN-3.15	-2.30	-2.40	3枚目クロ～茶色ホクホク
OZN-3.15	-2.40	-2.50	茶色ホクホク

測線	上端	下端	メモ
OZN-3.15	-2.50	-2.60	茶色ホクホク
OZN-3.15	-2.60	-2.70	
OZN-3.15	-2.70	-2.80	
OZN-3.15	-2.80	-2.90	
OZN-3.15	-2.90	-3.00	
OZN-3.15	-3.00	-3.10	
OZN-3.15	-3.10	-3.20	
OZN-3.15	-3.20	-3.30	
OZN-3.15	-3.30	-3.40	赤パミス散る
OZN-3.15	-3.40	-3.50	
OZN-3.15	-3.50	-3.60	上の行色パミス、赤パミスも散る
OZN-3.15	-3.60	-3.70	下の黄パミス
OZN-3.15	-3.70	-3.80	黄パミス
OZN-3.15	-3.80	-3.90	黄パミス散る最下部
OZN-3.15	-3.90	-4.00	赤パミス入り
OZN-3.15	-4.00	-4.10	
OZN-3.15	-4.10	-4.20	



図 2.2.58 深度 3m 以深(右)および深度 3m 以浅(左)の連続サンプリング状況

2.2.3.7. 考察

(1) 断層構造解析

小園トレンチでみられるクラックは全般的に北西-南東から西北西-東南東方向が多くを占め、トレンチ付近の位相不連続ラインの方向とは $45\sim 60^\circ$ で交わる。また、開口クラックである F1 の一部には北東-南西方向の傾向がみとめられることや、断層面の傾斜角において、F1・F2・F3 で傾向に差異があることから、それぞれのイベントによって活動する断層の性状に違いがあると考えられる。

(2) 断層活動履歴

小園トレンチにおける総合模式柱状図を表 2.2.13 に示す。

火山灰分析の結果、15 層は AT 火山灰層に、31b 層は不確実ながらも ACP6 層に対比された。これらの火山灰層と計測された ^{14}C 放射性炭素年代は整合的である。

小園トレンチにおいて識別された断層活動イベントは、熊本地震を含めて最低でも 3 回の活動が識別された。イベント I は 2016 年熊本地震である。イベント II およびイベント III については、自然地盤の上部が人工地盤によって切除されているため、断層イベントを細かく分離・識別することができなかった。そのため、2016 年熊本地震に先立つ断層活動イベントは、15,925 cal.BP 以降、最低でも 2 回である。

表 2.2.13 小園トレンチにおける総合模式柱状図

地層名		層相	火山灰	放射性炭素年代 yrBP	イベント層準	
人工地盤	1	現耕作土			← イベント I 2016熊本地震	
	3	盛土				
	5	盛土				
自然地盤	10	砂混じりシルト (暗褐色)			← イベント II イベント III (W面断層部年代)	
	11	シルト (にぶい橙色)		13,130 ± 50		
	13	砂質シルト (黒色土)		18,340 ± 60		
	15	火山灰 (シャリシャリ)	AT	20,620 ± 70		
	17	砂質シルト (淡色の黒色土)	25,000	24,760 ± 100		
	19	シルト混じり極細粒砂	yrBP			
	21	砂質シルト (黒色土)		26,080 ± 100		
	23	シルト (茶色ホクホク)				
	25	シルト (黄色ホクホク)				
	31	a	シルト (黄褐色)			
		b	パミス火山灰 (橙～明黄褐色)	ACP6		
c		シルト (黄橙色)				

2.2.4. 追加検討

2.2.4.1. 上陳東トレンチにおける追加検討

過年度事業（(株)パスコ，2021）で実施された上陳東トレンチにおいて取得された試料について分析を行った。

(1) 年代測定

年代測定は AMS 法による放射性炭素年代測定を実施した。

年代試料サンプリング位置を図 2.2.59 に示とともに、測定結果を表 2.2.14～表 2.2.15 および図 2.2.60 に示す。

また、過年度成果および本業務成果における暦年校正年代を表 2.2.18～表 2.2.19 に取りまとめた。

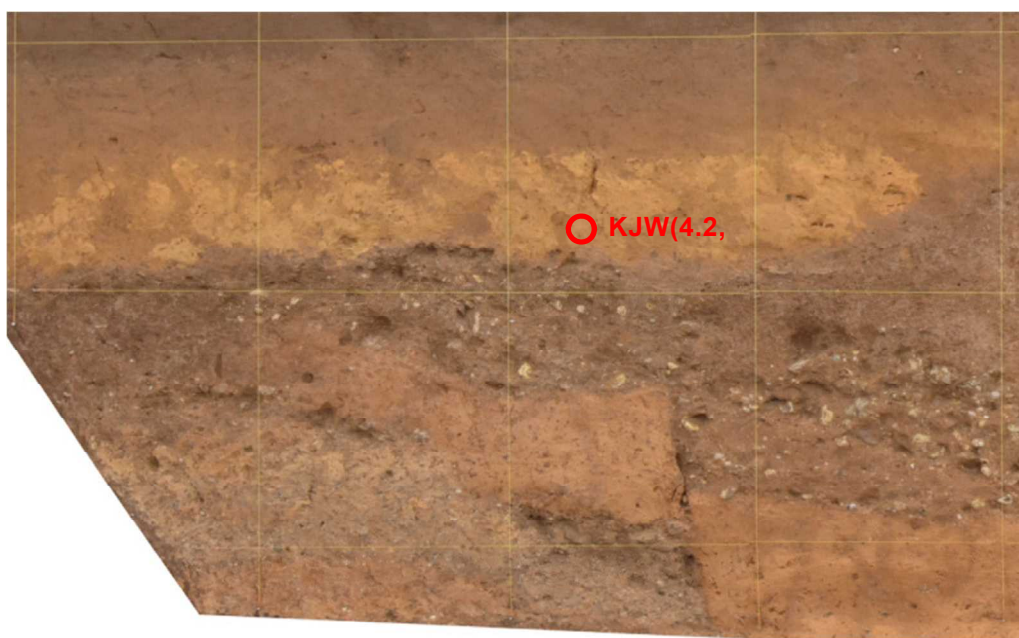


図 2.2.59 (既往)上陳東トレンチ 年代試料サンプリング位置

表 2.2.14 上陳東トレンチ 放射性炭素年代測定結果 (1)

測定番号	試料名	試料形態	処理方法	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
					Libby Age(yrBP)	pMC(%)
IAAA-211545	KJW(4.2,-2.7)	炭化物	AAA	-21.90 ± 0.20	3,070 ± 20	68.24 ± 0.21

表 2.2.15 上陳東トレンチ 放射性炭素年代測定結果 (2)

測定番号	試料名	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用 (yrBP)	1 σ 暦年代範囲	2 σ 暦年代範囲
		Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-211545	KJW-04	3,020 ± 20	68.67 ± 0.21	3,070 ± 24	3344calBP - 3282calBP (40.9%) 3275calBP - 3237calBP (27.3%)	3360calBP - 3214calBP (95.4%)

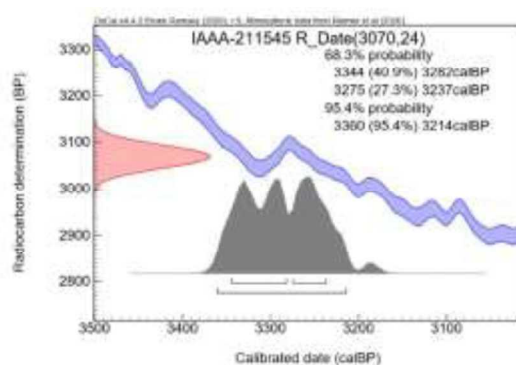


図 2.2.60 上陳東トレンチ 暦年較正年代グラフ

(2) 火山灰分析

①KJW-03(4.6,-2.8)

バブルウォールタイプ火山ガラスを多く含む(図 2.2.61)。有色鉱物としては斜方輝石および単斜輝石を多く含む。火山ガラスの屈折率は 1.509-1.518 である。斜方輝石の屈折率(γ)は 1.705-1.714 で 1.709-1.713 にモードが見られる。主成分元素組成は、含有率平均値が SiO₂ で 74.4wt.%程度、Na₂O が 3.8 wt.%、K₂O が 2.9 wt%程度にまとまる。色付きガラスを含む。

火山ガラスの形態、屈折率および主成分元素組成は K-Ah テフラの特徴(町田・新井, 2003)と一致する。斜方輝石の屈折率も K-Ah テフラの特徴(町田・新井, 2003)と一致することから、本試料は K-Ah 降灰層準から採取されたと考えられる。

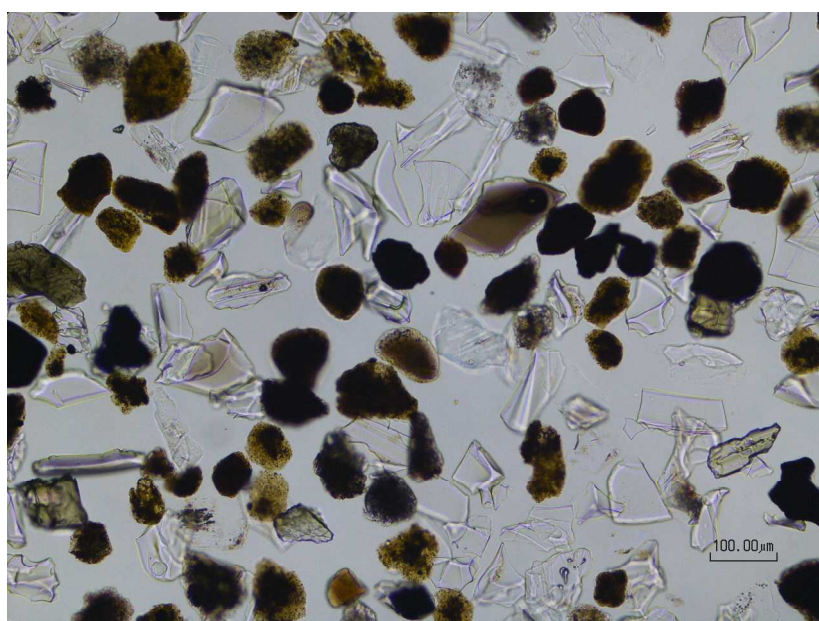


図 2.2.61 KJW-03 検鏡写真

②測定結果

次ページより火山灰分析の測定結果を取りまとめて示す。

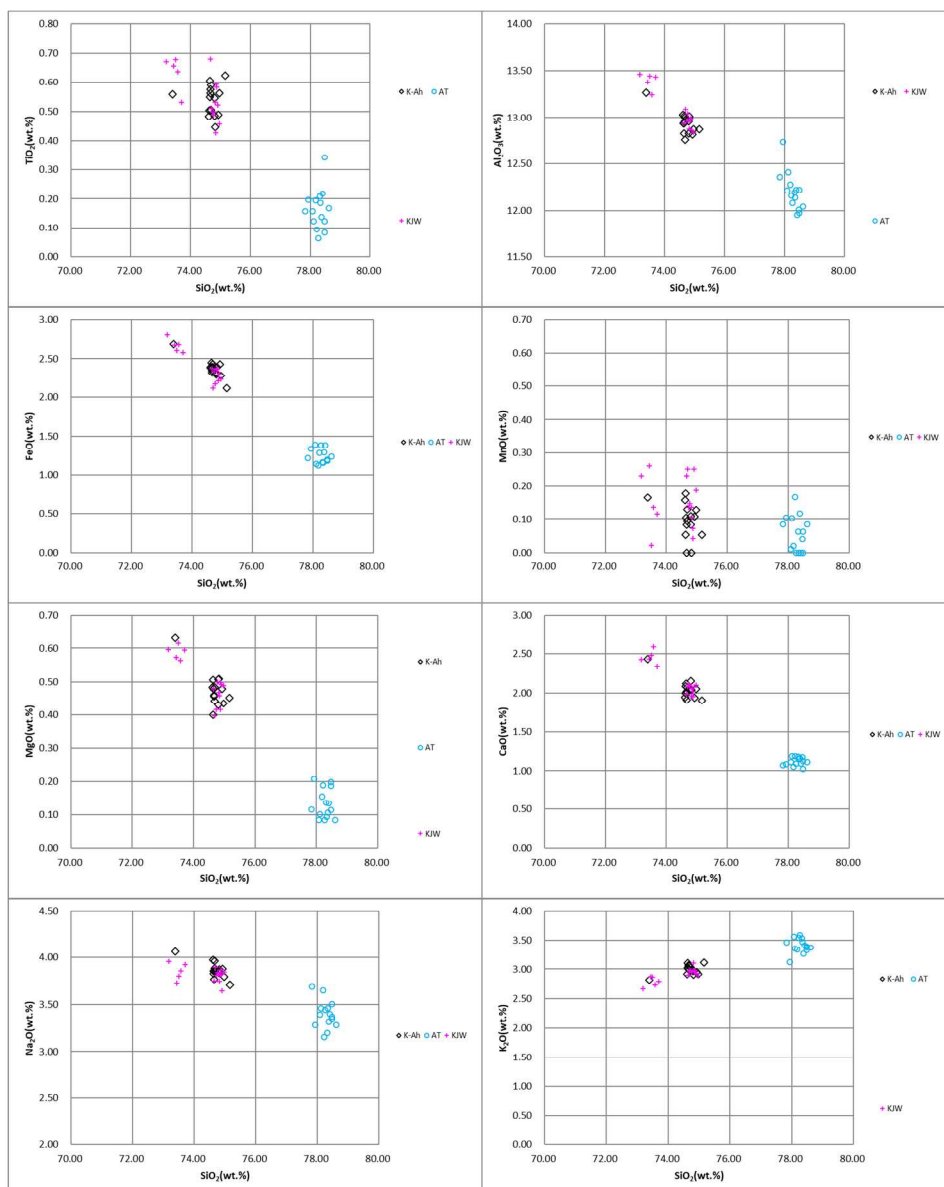


圖 2.2.62 主成分元素組成分析結果 (桃：KJW-03、黑：K-Ah、青：AT)

表 2.2.16 粒子組成分析および屈折率測定結果

試料名	Volcanic Glass		Light Mineral		Heavy Mineral				Rock	V.Rock	Total	備考	火山ガラスの屈折率	斜方輝石の屈折率	テフラ名
	Bw	Pm	O	Fl	Qu	Opx	Cpx	Gho							
KJW(4.6-2.8)	120	4	4	30	7	6	0	0	22	107	0	300	1.509-1.518	1.704-1.713(モード1.709-1.713)	K-Ah

Bw:バブルウォールタイプ
Pm:パミスタタイプ
O:低発泡タイプ
Fl:石英
Opq:不透明鉱物
Rock:岩片
V.Rock:火山岩片
Opx:斜方輝石
Cpx:単斜輝石
Gho:緑色普通角閃石
OTH:その他

(3) 考察

過年度事業（(株)パスコ，2021）において採取された17層（黄色火山灰層）はK-Ah テフラに対比され、炭質物の放射性炭素年代測定結果ではおよそ3,000年前の年代値となった。これは上下位の地層の放射性炭素年代測定結果と調和的である。17層（黄色火山灰層）は過年度事業（(株)パスコ，2021）において想定されたAT テフラではないことがほぼ確実であることから、南側堆積盆は約11,000年前以降、約2,000年前にかけて埋積されたものと結論付けられる。

表 2.2.17 上陳東トレンチ総合模式柱状図 加筆

地層名	層相	備考	火山灰	放射性炭素年代 yrBP	イベント層準
人工地盤	2	現耕作土			← イベント I 2016熊本地震
	4	旧耕作土			
自然地盤	12	黒色シルト	堆積盆は トレンチの 南側に広がる	2,120 ± 20	← イベント II (時期不明) ← イベント III (複数回の 可能性あり)
	14	暗褐色シルト			
	16	褐色シルト		2,850 ± 30	
	17	黄色火山灰		3,070 ± 70	
	18	赤灰色シルト			
	19	クロボク		11,090 ± 40	
	24	浅黄橙色粘土	堆積盆は トレンチの 北側に広がる		
	26	橙色砂質シルト			
	28	シルト質砂礫			
	32	火砕流堆積物		Aso-4	
34	砂礫		約90,000年前		
36	強風化礫混じりシルト				

2.2.4.2. 14C 放射性炭素年代測定結果とりまとめ

本事業および既往成果における年代測定結果を整理し、取りまとめた。
次ページ以降に詳細を示す。

表 2.2.18 既往 ¹⁴C 放射性炭素年代 整理とりまとめ結果

調査 年度	地区	測定試料				¹⁴ C年代		
		地層名	採取位置	番号	内容	yr.BP ($\sigma^{13}C$ 補正あり)	cal.BP (確率法-2 σ)	2 σ 範囲
2017	福岡	21	旧表土	中部	FKbE-2	炭	1,150 ± 30 (95.4%)1174-979	1174-979 cal.BP
		31	暗褐色砂質シルト層	最下部	FKbW-3	炭	5,070 ± 30 (95.4%)5905-5745	5905-5745 cal.BP
		35	シルト質砂礫層	最上部	FKbE-1	堆積物	4,190 ± 30 (71.5%)4765-4620, (23.9%)4840-4785	4840-4620 cal.BP
		45	砂礫層 3	中部	FKbW-2	炭	3,870 ± 30 (89.7%)4414-4227, (4.3%)4200-4178, (1.4%)4169-4160	4414-4160 cal.BP
2019	士林	45	砂礫層 3	最下部	FKbW-1	材	2,900 ± 30 (78.8%)3083-2953, (16.6%)3156-3090	3156-2953 cal.BP
		31	灰色シルト	中部	TBW-1	堆積物	10440 ± 30 (79.2%)12437-12124, (16.2%)12526-12460	12526-12124 cal.BP
				下部	TBW-2	堆積物	10500 ± 30 (95.4%)12559-12398	12559-12398 cal.BP
				最下部	TBW-4	堆積物	10230 ± 30 (95.4%)12107-11815	12107-11815 cal.BP
				上部	TBW-3	堆積物	10340 ± 30 (67.5%)12246-12017, (27.9%)12384-12264	12384-12017 cal.BP
		41	黒色シルト	中部	TBW-5	堆積物	10120 ± 30 (76.0%)11846-11609, (18.6%)11987-11856, (0.8%)11520-11508	11987-11508 cal.BP
2019	陣内	32	斜面堆積物	下部	TBW-6	堆積物	10650 ± 30 (95.4%)12697-12565	12697-12565 cal.BP
				中央	JN-S06B_19	堆積物	3440 ± 30 (71.2%)3734-3613, (15.4%)3827-3787, (8.8%)3778-3741	3827-3613 cal.BP
		44	腐植質堆積物	下部	JN-S04B_19	堆積物	10480 ± 30 (90.6%)12562-12380, (3.9%)12277-12238, (0.9%)12325-12306	12562-12238 cal.BP
				上部	JN-S05B_19	堆積物	9790 ± 30 (95.4%)11245-11185	11245-11185 cal.BP
		46b-1	腐植質堆積物	-	JN-S11B_19	堆積物	12010 ± 40 (95.4%)13999-13749	13999-13749 cal.BP
				低下側	JN-S13B_19	堆積物	12120 ± 40 (95.4%)14131-13820	14131-13820 cal.BP
		46b-2	腐植質堆積物	-	JN-S12B_19	堆積物	11960 ± 30 (81.5%)13863-13723, (13.9%)13971-13880	13971-13723 cal.BP
		54a	腐植質堆積物	低下側	JN-S14B_19	堆積物	12520 ± 40 (95.4%)15090-14434	15090-14434 cal.BP
		54b	斜面～谷埋堆積物	-	JN-S02B_19	堆積物	11200 ± 40 (95.4%)13141-12996	13141-12996 cal.BP
				-	JN-S03B_19	堆積物	12220 ± 40 (95.4%)14256-13984	14256-13984 cal.BP
2020	下町	27	チャネル1(極細粒砂)	中部	SMMW(8.8.3.2)	堆積物	2530 ± 20 (45.7%)2595-2498, (33.0%)2740-2692, (16.8%)2640-2612	2740-2498 cal.BP
		31	チャネル2(シルト-砂五層)	上部	SMMW(8.9.3.8)	堆積物	2430 ± 20 (70.9%)2513-2357, (17.3%)2695-2638, (7.3%)2615-2593	2695-2357 cal.BP
		34	有機質シルト～砂	-	SMMW(5.8.3.7)	堆積物	2140 ± 20 (74.7%)2154-2044, (16.0%)2295-2264, (4.8%)2023-2005	2295-2005 cal.BP
		56	黒色シルト	水平層	SMMW(9.9.4.8)	堆積物	2760 ± 20 (83.5%)2890-2779, (12.0%)2931-2896	2931-2779 cal.BP
		F3	断面包有物	斜面上	SME(12.9.2.8)	堆積物	11750 ± 40 (73.8%)13669-13500, (21.7%)13751-13677	13751-13500 cal.BP
上陳東	上陳東	12	黒色シルト(南側堆積益)	下部	SME(4.9.4.2)	炭	8280 ± 30 (78.5%)9421-9194, (16.9%)9184-9135	9421-9135 cal.BP
		16	褐色シルト(南側堆積益)	中部	SMMW(5.05.3.7)	堆積物	2750 ± 20 (92.0%)2882-2774, (3.5%)2921-2904	2921-2774 cal.BP
		19	黒色シルト(南側堆積益)	下部	KJE(1.1.0.5)	堆積物	2120 ± 20 (92.4%)2148-2001, (3.0%)2287-2276	2287-2001 cal.BP
				中部	KJE(4.6.2.5)	炭	2850 ± 30 (95.4%)3060-2878	3060-2878 cal.BP
				下部	KJE(4.5.3.4)	堆積物	11090 ± 40 (95.4%)13099-12910	13099-12910 cal.BP

表 2.2.19 本事業における¹⁴C放射性炭素年代 整理とりまとめ結果

調査 年度	地区	測定試料					¹⁴ C年代		
		地層名	採取位置	番号	内容	yr.BP ($\sigma^{13}\text{C}$ 補正あり)	cal.BP (確率法- 2σ)	2 σ 範囲	
2021	上棟東	17	黄色火山灰 (南側堆積層)	中部	KIW(4.2,-2.7)	炭	3070 ± 20	(95.4%)3360-3214	3360-3214 cal.BP
		10	旧表土	下部	IDW-04	堆積物	1300 ± 20	(51.1%)1230-1176, (44.4%)1289-1241	1289-1176 cal.BP
	12	砂礫	中部	IDW-11	炭	2010 ± 20	(95.4%)1999-1879	1999-1879 cal.BP	
	16	砂混じりシルト	下部	IDE-08	炭	2490 ± 20	(95.4%)2721-2488	2721-2488 cal.BP	
	30	火山灰 (斜面堆積物)	上部	IDW-12	炭	2170 ± 20	(46.8%)2305-2229, (45.7%)2181-2097, (2.4%)2084-2063, (0.5%)2204-2198	2305-2063 cal.BP	
	40	粘土質砂礫	中部	IDW-07	炭	8930 ± 30	(59.0%)10086-9909, (36.4%)10197-10110	10197-9909 cal.BP	
	46a	礫混じり粘土 (暗褐色土)	上部	IDE-05	堆積物	9670 ± 40	(65.4%)11202-11068, (23.5%)10956-10868, (5.3%)10849-10805, (1.3%)11024-11009	11202-10805 cal.BP	
	46c	礫混じり粘土 (暗褐色土)	上部	IDE-06	堆積物	9900 ± 40	(95.4%)11399-11224	11399-11224 cal.BP	
	50a	極細粒砂混じりシルト (黒色)	上部	IDE-03	堆積物	9980 ± 40	(93.4%)11623-11267, (2.1%)11689-11671	11689-11267 cal.BP	
	52a	粘土 (黒色土)	-	IDE-02	堆積物	12360 ± 40	(71.6%)14581-14151, (23.9%)14833-14683	14833-14151 cal.BP	
	54a	シルト (黒色土)	上部	IDE-01	堆積物	12750 ± 40	(95.4%)15351-15047	15351-15047 cal.BP	
	11	シルト	上部	OZN-04	堆積物	13130 ± 50	(95.4%)15925-15590	15925-15590 cal.BP	
	13	砂質シルト (黒色土)	上部	OZN-03	堆積物	18340 ± 60	(95.4%)22421-22137	22421-22137 cal.BP	
	17	砂質シルト (黒色土)	断面	OZW-01	堆積物	20620 ± 70	(95.4%)25085-24599	25085-24599 cal.BP	
21	砂質シルト (黒色土)	上部	OZN-02	堆積物	24760 ± 100	(95.4%)29182-28783	29182-28783 cal.BP		
		下部	OZN-01	堆積物	26080 ± 100	(84.1%)30485-30057, (11.4%)30737-30530	30737-30057 cal.BP		