

令和 2 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 3 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 .....                      | 1-3   |
| 1.3. 参考文献 .....                       | 1-5   |
| 2 章 断層変位データの収集分析 .....                | 2-1   |
| 2.1. 断層変位（2019年以降）最新データの収集・分析 .....   | 2-1   |
| 2.1.1. 最新データ収集一覧表 .....               | 2-1   |
| 2.1.2. 熊本地震関連の文献の概要 .....             | 2-4   |
| 2.1.3. Ridgecrest 地震関連の文献の概要 .....    | 2-11  |
| 2.1.4. Ridgecrest 地震における変動量分析 .....   | 2-54  |
| 2.2. 測地学的情報を用いた解析 .....               | 2-74  |
| 2.2.1. 測地学的情報を用いた解析手法整理 .....         | 2-74  |
| 2.2.2. 熊本地震 .....                     | 2-81  |
| 2.2.3. リッジレスト地震 .....                 | 2-136 |
| 2.2.4. 測地学的情報を用いた解析のまとめ .....         | 2-159 |
| 2.3. 副断層に関する現地調査 .....                | 2-162 |
| 2.3.1. 調査概要 .....                     | 2-162 |
| 2.3.2. 上陳東トレンチ .....                  | 2-167 |
| 2.3.3. 下町トレンチ .....                   | 2-199 |
| 2.3.4. 既往成果との比較検討 .....               | 2-241 |
| 2.4. 断層変位データの収集分析結果 .....             | 2-243 |
| 2.4.1. 断層変位（2019年以降）最新データの収集・分析 ..... | 2-243 |
| 2.4.2. 測地学的情報を用いた変動地形学的解析 .....       | 2-243 |
| 2.4.3. 副断層に関する現地調査 .....              | 2-244 |
| 2.5. 参考文献 .....                       | 2-245 |
| 3 章 断層変位に関する室内模擬実験・物性調査 .....         | 3-1   |
| 3.1. 地盤物性調査 .....                     | 3-1   |
| 3.1.1. はじめに .....                     | 3-1   |
| 3.1.2. 分析試料 .....                     | 3-2   |
| 3.1.3. 分析方法 .....                     | 3-9   |
| 3.1.4. 分析結果 .....                     | 3-17  |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 3.1.5.     | 物性調査まとめ                   | 3-19       |
| 3.2.       | 室内模擬実験の計画立案のための技術的知見の整理   | 3-20       |
| 3.2.1.     | 既往アナログ実験の整理               | 3-20       |
| 3.2.2.     | 副断層の検討に適したアナログ実験について      | 3-44       |
| 3.2.3.     | 室内模擬実験まとめ                 | 3-54       |
| 3.3.       | 文献                        | 3-54       |
| <b>4 章</b> | <b>断層変位に関する数値解析</b>       | <b>4-1</b> |
| 4.1.       | 室内模擬実験の再現解析 1・横ずれタイプ      | 4-1        |
| 4.1.1.     | 室内模擬実験概要                  | 4-1        |
| 4.1.2.     | 再現解析                      | 4-7        |
| 4.2.       | 室内模型実験の再現解析 2・逆断層タイプ      | 4-40       |
| 4.2.1.     | 室内模型実験概要                  | 4-40       |
| 4.2.2.     | 再現解析                      | 4-44       |
| 4.3.       | まとめ                       | 4-50       |
| 4.4.       | 参考文献                      | 4-52       |
| <b>5 章</b> | <b>まとめ</b>                | <b>5-1</b> |
| 5.1.       | 断層変位データの収集・分析             | 5-1        |
| 5.1.1.     | 断層変位（2019 年以降）最新データの収集・分析 | 5-1        |
| 5.1.2.     | 測地学的情報を用いた変動地形学的解析        | 5-1        |
| 5.1.3.     | 副断層に関する現地調査               | 5-2        |
| 5.2.       | 断層変位に関する室内模擬実験・物性調査       | 5-2        |
| 5.3.       | 断層変位に関する数値解析              | 5-3        |

## 【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

### 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（INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2010）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、適用条件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必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確立は重要施設の規制にとって非常に重要であるが、難しい課題である。本年度は、既往成果を踏まえて、評価手法および関連技術により、特に副断層変位に関する基礎的な知見を蓄積するために、以下の事業内容に示す調査・解析内容について実施した。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する。

### 1.1.3. 事業内容

#### 1.1.3.1. 断層変位データの収集・分析

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。特に日本の場合には、浸食等により副断層がそのままの状態で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、近年の先行研究では、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する可能性が示唆されており、断層変位評価への活用が期待されている。

そこで、本事業は、干渉 SAR 解析データ等を含めて、地表地震断層が現れた国内外地震に関する断層変位の (2019 年以降) 最新データを収集・分析した。さらに、副断層生成プロセスに関する知見を得るため、副断層に関する現地調査を実施した。現地調査にあたっては、震源域において測地学的情報 (干渉 SAR 解析データや衛星画像データ等) を用いた変動地形学的な観点等での解析結果を分析した上で、国内内陸地殻内地震において地表に出現した副断層を対象としてトレンチ調査 (2 カ所、深さ 5m 程度) を実施し、表層における副断層変位の性状や活動履歴等について検討した。

### **1.1.3.2. 断層変位に関する室内模擬実験・物性調査**

先行研究は、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、断層変位の評価式を提案している。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、ばらつきは大きいのが特徴である。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を調査し、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、本事業は、上記「断層変位データの収集・分析」のトレンチ調査地点を含めて、2 カ所の地点の地盤物性の調査を行った。さらに、断層変位に関する複数の既往の室内模擬実験から、用いられている模型地盤の物性及び変形分布を調査し、その結果を地震時に生成された副断層の地点の物性と比較・検討、ならびに副断層の検討に適した室内模擬実験の計画立案のための技術的知見の整理を行った。

### **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と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、このように広がりを持った表層変状が進行する破壊過程が確認されている。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は大きく異なっているため、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、本事業は、上記「断層変位に関する室内模擬実験・物性調査」で調査した既往の室内模擬実験を 1 セット選定し、その実験結果を再現するため、個別要素法等に基づき、3 次元の数値解析を 8 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。特許出願中の技術（特願 2016-175628）。

(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. 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 (2010) Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations : safety guide. IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no.SSG-9
- 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

## 2章 断層変位データの収集分析

### 2.1. 断層変位（2019年以降）最新データの収集・分析

#### 2.1.1. 最新データ収集一覧表

断層変位の（2019年以降）最新データを収集・分析した。文献資料の整理結果を表 2.1.1～表 2.1.3 に取りまとめて示し、2.1.2～2.1.3 項に主要論文の概要を示す。

表 2.1.1 熊本地震関連の文献一覧表

| 著者                                     | タイトル   | 雑誌名         | 巻号         | 掲載ページ     | 年月日        | キーワード                                    | 概要 |
|--|--|-------------|------------|-----------|------------|--|----|
| Chelsea Scott et al.                   | The 2016 M7 Kumamoto, Japan, Earthquake Slip Field Derived From a Joint Inversion of Differential Lidar Topography, Optical Correlation, and InSAR Surface Displacements | GRL         | Vol.46, 12 | 6341-6351 | 2019/4/10  | InSAR, 光学, LiDAR                         |    |
| Ping He et al.                         | Complete three-dimensional near-field surface displacements from imaging geodesy techniques applied to the 2016 Kumamoto earthquake                                      | RSE         | Vol.232    |           | 2019/7/19  | InSAR(ALOS-2, Sentinel-1), LiDAR         |    |
| Yuji Himematsu and Masato Furuya       | Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Associated With the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Revealed by PALSAR-2 Pixel Tracking and InSAR                        | ESS         | Vol.7, 10  |           | 2020/9/14  | InSAR, Pixel Tracking                    |    |
| Satoshi Fujiwara et al.                | Detection of triggered shallow slips caused by large earthquakes using L-band SAR interferometry   | EPS         | Vol.72     |           | 2020/8/13  | InSAR(ALOS-2)                            | ○  |
| Manabu Hashimoto                       | Postseismic deformation following the 2016 Kumamoto earthquake detected by ALOS-2/PALSAR-2   | EPS         | Vol.72     |           | 2020/10/20 | Postseismic deformation, ALOS-2/PALSAR-2 | ○  |
| 遠田 晋次、鳥井 真之、小俣 雅志、三五大輔、石澤 堯史           | 平成28年熊本地震後に日奈久断層北端部で確認された余効すべり   | 地震学会秋季大会    | S10-08     |           | 2020/10/30 | 余効変動                                     |    |
| 遠田 晋次、鳥井 真之、小俣 雅志、三五大輔、石澤 堯史           | 日奈久断層北端部で確認された熊本地震の地表余効すべり   | 活断層学会秋季学術大会 | O-6        |           | 2020/11/22 | 余効変動                                     |    |
| 岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・細矢卓志・竹内峻・後藤拓実・住谷侑也・西口颯真 | 布田川断層帯と日奈久断層帯の境界部の活動履歴－熊本県御船町高木における2016年地震断層のトレンチ調査－   | 活断層学会秋季学術大会 | P-6        |           | 2020/11/22 | トレンチ調査                                   |    |
| 住谷侑也・岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・竹内峻・後藤拓実・西口颯真      | 2016年熊本地震の地表地震断層に沿った本震後の変位の分布とその特徴   | 活断層学会秋季学術大会 | P-7        |           | 2020/11/22 | 余効変動                                     |    |



表 2.1.2 リッジクレスト地震関連の文献一覧表 (1)

| 著者  | タイトル   | 雑誌名                   | 巻号            | 掲載ページ       | 年月日        | キーワード   | 概要 |
|---|--|-----------------------|---------------|-------------|------------|---|----|
| Jonathan P. Stewart                       | Preliminary Report on Engineering and Geological Effects of the July 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence   | GEER                  | Vol.64        | 69          | 2019/7/19  | 現地調査, DEM                                       | ○  |
| William D. Barnhart                       | The July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence: Kinematics of Slip and Stressing in Cross - Fault Ruptures  | GRL                   | Vol.46, 21    | 11859-11867 | 2019/10/15 | InSAR, 光学画像                                     | ○  |
| Zachary E. Ross et al.                    | Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence  | Science               | Vol.366, 6463 | 346-351     | 2019/10/18 | InSAR(ALOS-2), DPM(Sentinel-1), すべり分布           | ○  |
| Chengli Liu et al.                        | Coseismic Rupture Process of the Large 2019 Ridgecrest Earthquakes From Joint Inversion of Geodetic and Seismological Observations   | GRL                   | Vol.46        | 11820-11829 | 2019/10/25 | ジョイントインバージョン                                    |    |
| Kejie Chen et al.                         | Cascading and pulse-like ruptures during the 2019 Ridgecrest earthquakes in the Eastern California Shear Zone  | Nature Communications | Vol.11, 22    |             | 2020/1/7   | 光学SAR画像 (Sentinel-2)、GPS                        | ○  |
| Xiaohua Xu et al.                         | Coseismic Displacements and Surface Fractures from Sentinel-1 InSAR: 2019 Ridgecrest Earthquakes   | SRL                   | Vol.91, 4     | 1979-1985   | 2020/1/15  | InSAR(Sentinel-1)                               | ○  |
| Elizabeth S. Cochran                      | The U.S. Geological Survey's Rapid Seismic Array Deployment for the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence  | SRL                   | Vol.91, 4     | 1952-1960   | 2020/1/15  | 地震波解析 (アレイ)                                     |    |
| D. E. Goldberg et al.                     | Complex Rupture of an Immature Fault Zone: A Simultaneous Kinematic Model of the 2019 Ridgecrest, CA Earthquakes   | GRL                   | Vol.47, 3     |             | 2020/1/21  | InSAR, GNSS, 強振動                                |    |
| Christopher Milliner and Andrea Donnellan | Using Daily Observations from Planet Labs Satellite Imagery to Separate the Surface Deformation Between the July 4th Mw6.4 Foreshock and July 5th Mw7.1 Mainshock During the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence | SRL                   | Vol.91, 4     | 1986-1997   | 2020/1/22  |   |    |
| Kang Wang and Roland Burgmann             | Co- and Early Postseismic Deformation Due to the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence Constrained by Sentinel - 1 and COSMO - SkyMed SAR Data   | SRL                   | Vol.91, 4     | 1998-2009   | 2020/2/5   | InSAR(Sentinel-1, COSMO-SkyMed), GNSS           | ○  |
| Susan E. Hough                            | Near-Field Ground Motions from the July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence   | SRL                   | Vol.91, 3     | 1542-1555   | 2020/2/26  | 近傍地震動解析   |    |
| Eric Jameson Fielding et al.              | Surface Deformation Related to the 2019 Mw 7.1 and 6.4 Ridgecrest Earthquakes in California from GPS, SAR Interferometry, and SAR Pixel Offsets  | SRL                   | Vol.91, 4     | 2035-2046   | 2020/3/4   | InSAR(Sentinel-1A, 1B, ALOS-2), GNSS, ピクセルオフセット | ○  |
| Kevin R. Milner                           | Operational Earthquake Forecasting during the 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence with the UCERF3 - ETAS Model  | SRL                   | Vol.91, 3     | 1567-1578   | 2020/3/4   | シミュレーション, 地震予測評価                                |    |

表 2.1.3 リッジレスト地震関連の文献一覧表（2）

| 著者                               | タイトル  | 雑誌名     | 巻号         | 掲載ページ     | 年月日       | キーワード                                   | 概要 |
|----------------------------------|---|---------|------------|-----------|-----------|---|----|
| 三宅 弘恵                            | 2019年カリフォルニア・リッジレスト地震   | 地震ジャーナル | Vol.69     | 25-30     | 2020/6/1  | 地震波解析                                   |    |
| Qiang Qiu et al.                 | Slip Complementarity and Triggering between the Foreshock, Mainshock, and Afterslip of the 2019 Ridgecrest Rupture Sequence         | BSSA    | Vol.110, 4 | 1701-1715 | 2020/6/2  | InSAR, GNSS, ジョイントインバージョン               |    |
| Grace A. Parker                  | Repeatable Source, Path, and Site Effects from the 2019 M 7.1 Ridgecrest Earthquake Sequence  | BSSA    | Vol.110, 4 | 1530-1548 | 2020/6/9  | 地震波解析                                   |    |
| Sarah E. Minson et al.           | Real-Time Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Method during the 2019 M 6.4 and 7.1 Ridgecrest, California, Earthquakes | BSSA    | Vol.110, 4 | 1887-1903 | 2020/6/16 | PLUM法評価                                 |    |
| K.Z. Nanjo                       | Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?  | Nature  |            |           | 2020/6/17 | b値計算                                    |    |
| Christopher B. DuRoss et al.     | Surface Displacement Distributions for the July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Ruptures                                    | BSSA    | Vol.110, 4 | 1400-1418 | 2020/6/23 | 現地調査 (50km×25km)                        | ○  |
| Yohai Magen et al.               | Fault Rapture during the July 2019 Ridgecrest Earthquake Pair from Joint Slip Inversion of InSAR, Optical Imagery, and GPS          | BSSA    | Vol.110, 4 | 1627-1643 | 2020/6/23 | InSAR(Sentinel-1)/ピクセルオフセット, GPS, すべり分布 | ○  |
| Zeyu Jin and Yuri Fialko         | Finite Slip Models of the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence Constrained by Space Geodetic Data and Aftershock Locations           | BSSA    | Vol.110, 4 | 1660-1679 | 2020/6/30 | SAR, GNSS, すべり分布                        |    |
| Kang Wang et al.                 | Rupture Process of the 2019 Ridgecrest, California Mw 6.4 Foreshock and Mw 7.1 Earthquake Constrained by Seismic and Geodetic Data  | BSSA    | Vol.110, 4 | 1603-1626 | 2020/7/7  | 地震データ, 測地データ, 震源モデリング                   |    |
| Jessica Ann Thompson Jobe et al. | Evidence of Previous Faulting along the 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Ruptures  | BSSA    | Vol.110, 4 | 1427-1456 | 2020/7/21 | 現地調査 (Teagle Wash~Coso Basin)           |    |
| William H. Savran et al.         | Pseudoprospective Evaluation of UCERF3 - ETAS Forecasts during the 2019 Ridgecrest Sequence   | BSSA    | Vol.110, 4 | 1799-1817 | 2020/7/21 | シミュレーション, 地震予測評価                        |    |
| Daniel J. Ponti et al.           | Documentation of Surface Fault  | SRL     | Vol.91, 5  | 2942-2959 | 2020/7/29 | 現地調査                                    | ○  |

## 2.1.2. 熊本地震関連の文献の概要

### 2.1.2.1. Hashimoto(2020), EPS

2018年までに取得したALOS-2/PALSAR-2を用いて、2016年熊本地震後の地震後の変動を捉えた。熊本市と阿蘇カルデラ周辺の一部の地点で、熊本地震後の変形が2年間で10cmを超えている。日奈久断層の南東側では6cm/年以下の西向きの動きが支配的であったが、布田川断層軌層の両側では西向きの移動が検出された。後者の変形の領域は、火砕流堆積物の分布と相関があるようである。布田川断層東部と阿蘇カルデラの南西部で顕著な隆起が見られ、その速度は4cm/年に達している。布田川、日奈久、出ノ口断層など、いくつかの地震時の地表地震断層分布箇所で見られる大きな変動が見られる。布田川断層と出ノ口断層の間の大きな沈降も見られる。本震時に新たに出現した熊本市の水前寺断層に沿って地盤沈下が続いていることが確認された。阿蘇カルデラでも最大4cm/年の西向きの動きを伴う沈下が見られた。地震後の1か月から600日の範囲での地震後の変形を見てみると、熊本平野では、最初の1~2回解析分の変形が支配的である。これらの結果は、複数の変形発生源を示唆している。日奈久断層周辺の西向きの動きは、この断層の浅い部分の右横ずれの余効すべりで説明できるかもしれない。水前寺断層に沿った沈下は、西向きに傾斜した正断層に起因する可能性がある。日奈久断層と出ノ口断層周辺の変形は、布田川断層の右横ずれでは説明できず、他の原因が必要である。阿蘇カルデラ北部の変形は、伏在断層の右横ずれ余効すべりの結果である可能性がある。

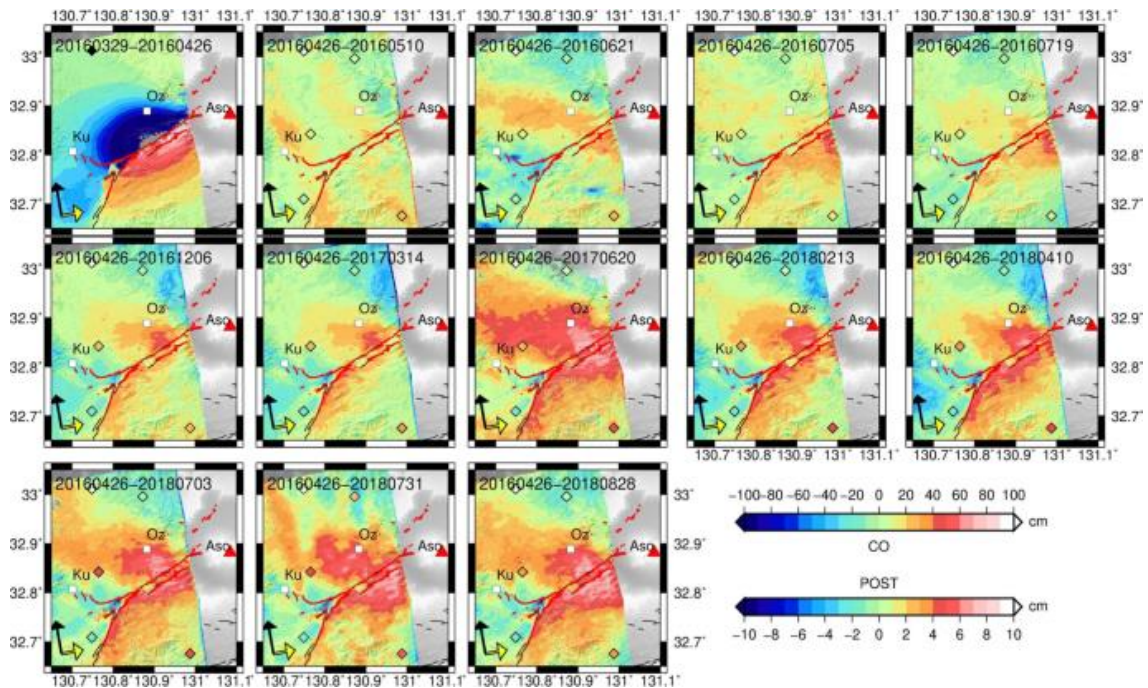


図 2.1.1 熊本市付近の北行軌道右照射の干渉 SAR 時系列解析図



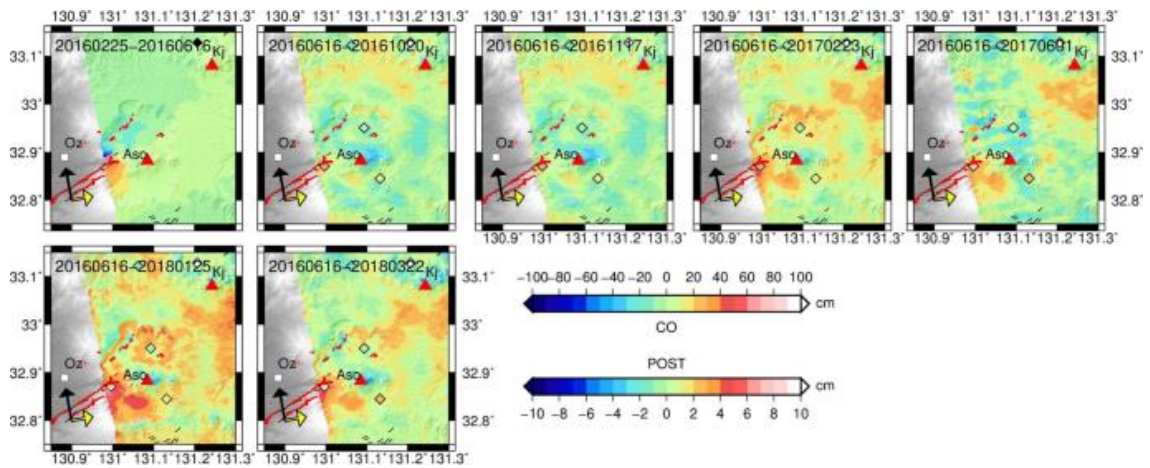


図 2.1.2 阿蘇カルデラ付近の北行軌道右照射の干渉 SAR 時系列解析図

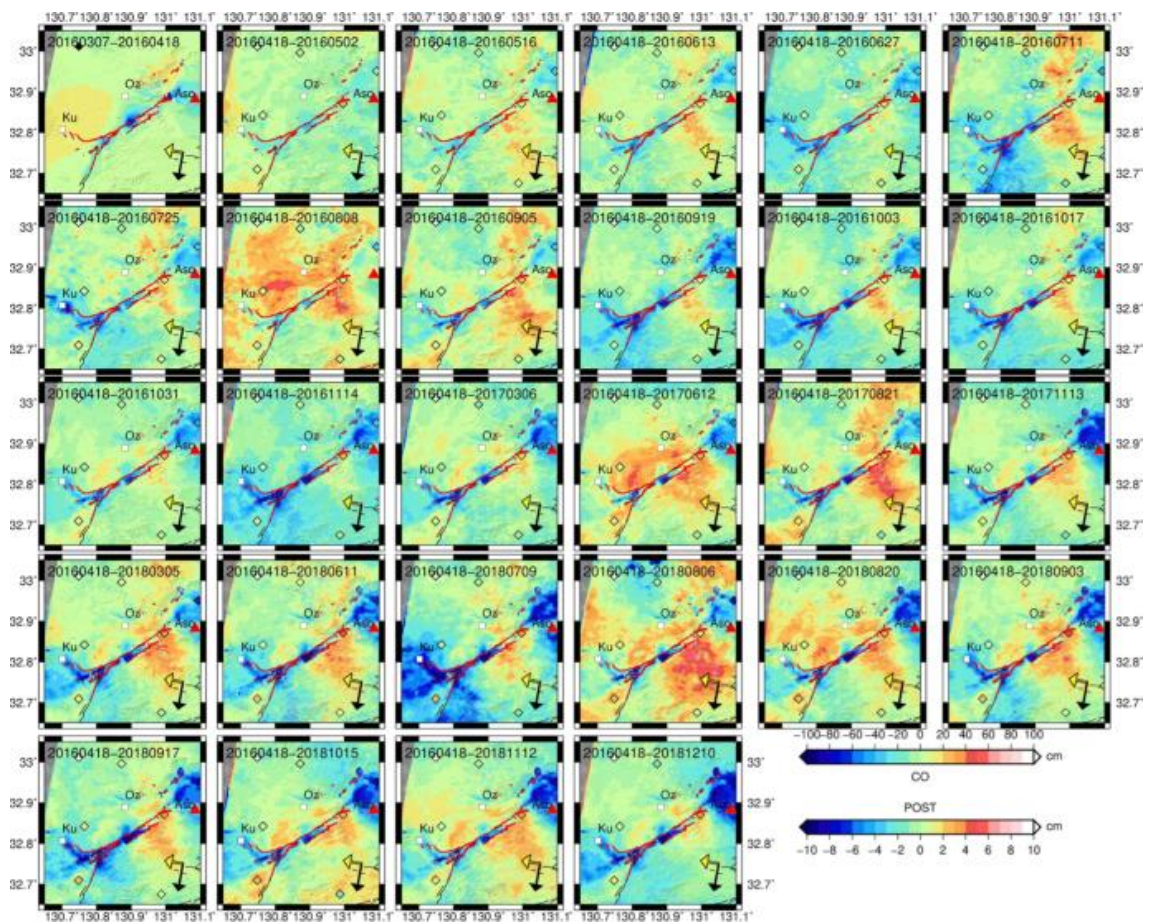


図 2.1.3 北行軌道右照射の干渉 SAR 時系列解析図

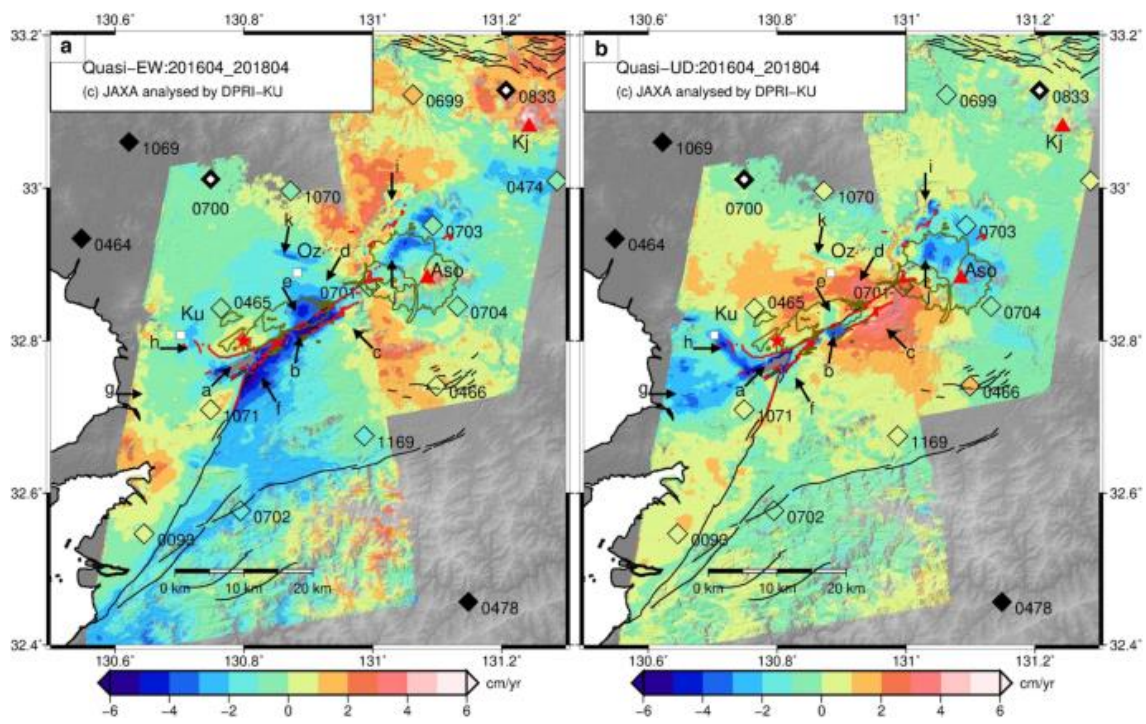


図 2.1.4 東西成分 (a) と上下成分 (b) の余効変動の年平均速度

### 2.1.2.2. Fujiwara et al. (2020), EPS

Lバンドの InSAR を使用して大地震によって引き起こされた浅いスリップの検出を試みた。まず過去の変位リニアメント (DL) 検出の事例をレビューし、新しい分析も行った。続いてこれらの分析に照らして浅いスリップ (TSS) の性質を明らかにした。

ほとんどの断裂は連続的な亀裂として存在しないため、地表踏査や航空写真だけでは DL の特性を把握することは困難である。衛星ベースのリモートセンシング技術は、地上での計測を必要とせずに、高精度 (最大数 cm の精度) で広域の変形場をマッピングすることができる (図 2.1.5)。ALOS-2 / PALSAR-2 の InSAR データを使用して、2016 年の熊本地震における水前寺周辺および阿蘇カルデラ外縁の北西部を対象に DL の詳細な分析を行った。

水前寺周辺の ALOS-2 の 3 次元干渉 SAR 解析結果を図 2.1.6 に示す。赤と青の領域は、それぞれ上下の変位を表し、赤い実線は識別された DL を示す。表面ひずみは、この領域で支配的な ENE-WSW 方向の引張を明らかに示している。したがって、この地域の東に存在する布田川断層の右横ずれによる ENE 方向に沿った大きな水平変位が、DL 発生の基になっていると考えられる。東部にはより大きな水平変位が存在するため、この領域は ENE-WSW 拡大場と、地溝または半地溝構造の変位によって特徴付けられ、観測された DL の動きは、地震発生させた主断層の  $\Delta$ CFF の増加と一致する。

阿蘇カルデラ外縁の北西では、数十条の DL が確認された。これらの DL は、WNW-ESE 方向に沿って分布し、典型的な縦ずれ変位を含んでいる。図 2.1.8a は、ハイパスフィルター処理された上下変位マップとともに阿蘇北西部で観測された DL を示している。図 2.1.8b は、各 DL の北と南の垂直変位の違いを示している。最大の上下変位量 (40cm を超える) は阿蘇北西部の南部で観察された。図 2.1.8 a に示された 2 つの典型的な断面を示す。

以前の研究では、DL は必ずしも大地震だけに関連しているわけではなく、自発的あるいは偶発的にも発生する可能性が示されている。しかし、ほぼ同時に非地震時に動く多数の DL の例は見つからない。一方、InSAR によって確認できる DL は、TSS だけでなく、断層帯の変形によっても引き起こされる可能性がある。この場合、InSAR の特徴は、急な位相の不連続性ではなく、ある程度の幅のある位相変動ゾーンを示している。断層が地表面に到達しない場合、InSAR は同様の変動ゾーンを示し、これら 2 つの現象を区別することは困難である。これらの変位はどちらも断層などの力学的に弱い場所で地震時に発生するため、本研究では TSS として扱っている。以上より TSS の一般的な特徴は次のようにリスト化した。

(1) 典型的な TSS は、長さが数キロメートル以上で、線形または緩やかな曲線形状を持っている。その変位量は数センチメートルから数十センチメートルまでである。

(2) 典型的な TSS の深さは、数百メートルから数キロメートルの間である。

(3) ほとんどの TSS は地震発生断層から離れて分布し、直接つながることはほとんどない。

(4) TSS が本震時に強い地震波を発生させたという証拠がない。つまり、TSS は、大きな地震波を生成することなく「ゆっくり」移動する可能性がある。

(5) TSS は受動的に移動し、主な地震の原因ではなく、結果であると見なされる。

(6) TSS の変位と特定の地域の地形との間には相関関係があるため、一部の TSS は、その地形的特徴に基づいて活断層として認識されている。したがって、過去に同じ場所で同様の TSS 運動が発生したことが示唆される。

(7) TSS の運動方向と変位パターンは、広範囲にわたる周囲の応力場または近くの大地震断層によって引き起こされた二次応力場と一致している。したがって、特定の場所で観察された TSS 形状はランダムではなく、互いに整列している。

(8) 過去に M7 クラスの地震を引き起こした断層は、他の小さな地震に関連する TSS を形成する可能性もある。

上記の結果は、次の仮説につながる。DL が移動する前は、広域応力場の蓄積や近くの大地震の断層運動により、DL 周辺のひずみが大きくなる。大地震は、地震波の通過中の静的応力変化および動的揺れによって TSS の動きを引き起こす。その後、TSS は大きな地震波を発生させることなく移動し、蓄積されたひずみは断層運動によって解放され、DL を形成する。TSS の動きは浅い地域に限定されており、浅い場所だけが断層の動きを経験する。このような断層が発生すると、TSS は移動しやすい弱い断層面として現れ、将来的には、このような断層面は同じ場所で繰り返し移動すると考えられる。以上の仮説は、他の地震に関連する TSS を調べることによって検証する必要がある。

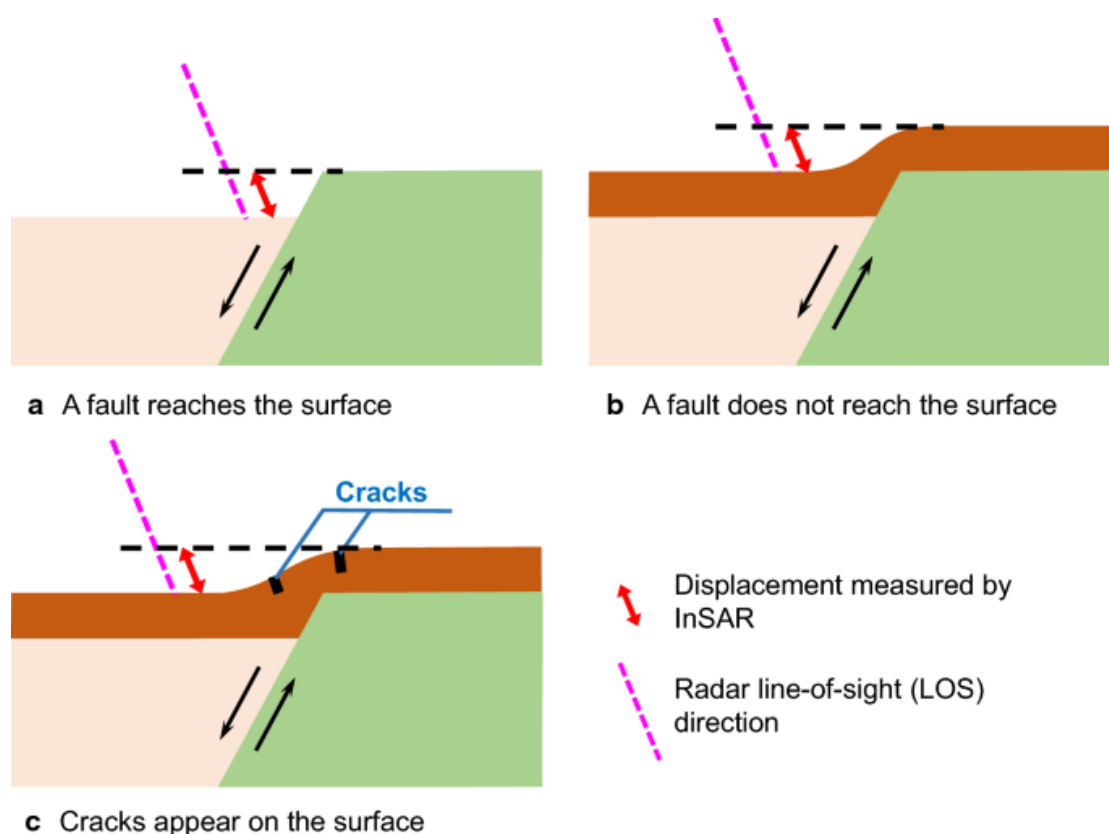


図 2.1.5 表面断層運動に InSAR を使用した変位測定の概略図



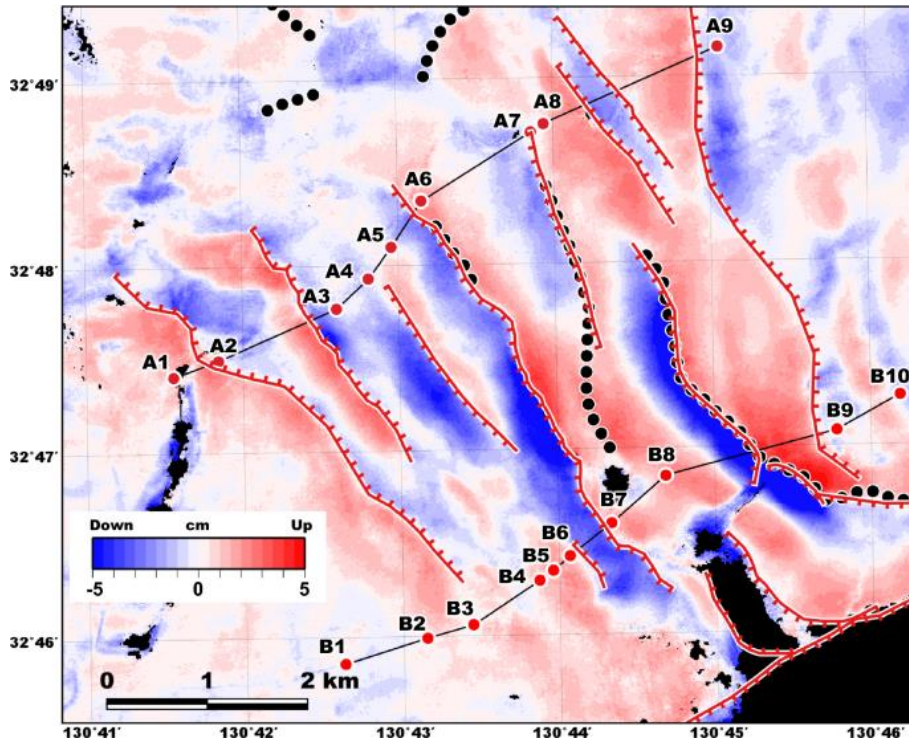


図 2.1.6 水前寺周辺のハイパスフィルター処理された上下変位マップ

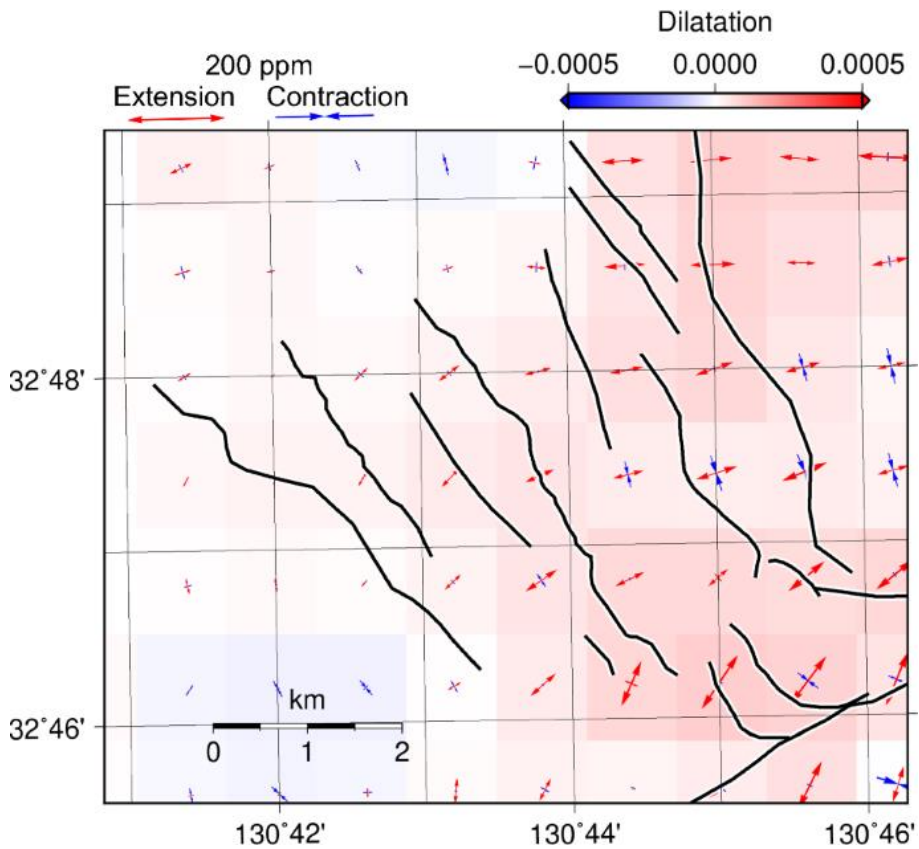


図 2.1.7 だいち 2 号のデータを用いて計算された水前寺周辺の地震時ひずみ場



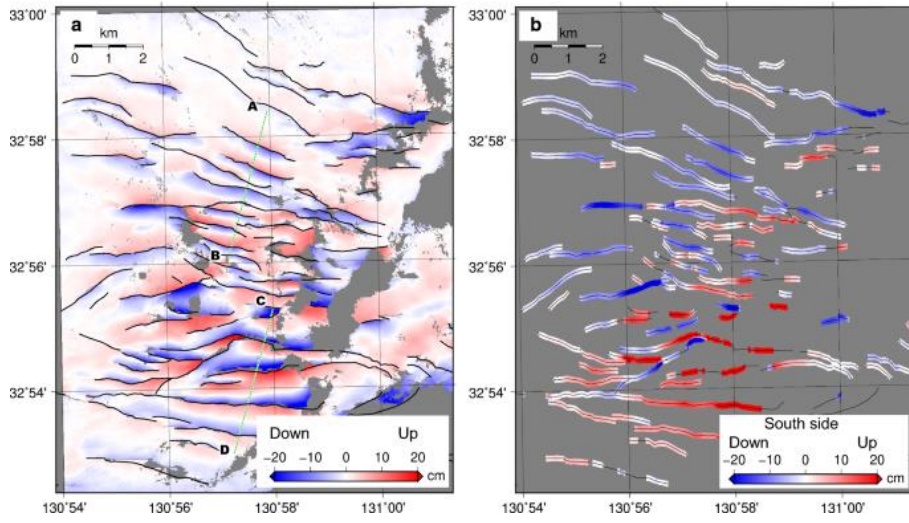


図 2.1.8 阿蘇カルデラの外縁北西付近の DL と上下図

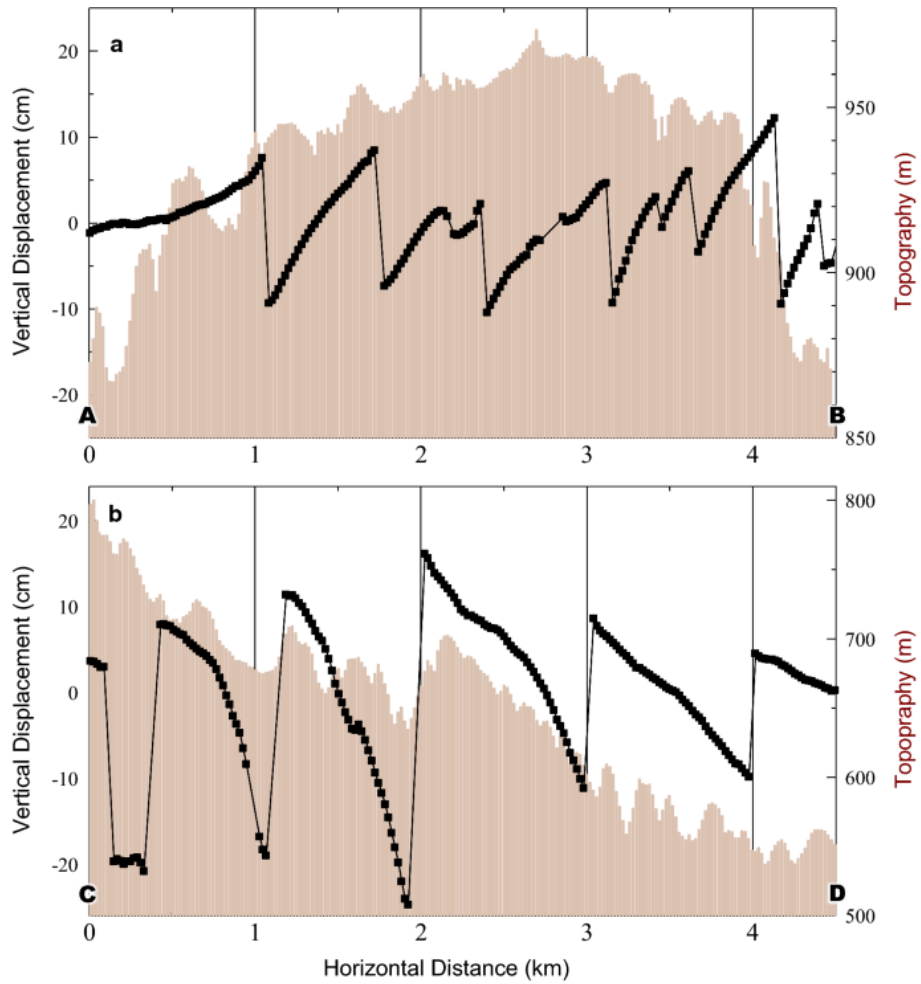


図 2.1.9 図 2.1.8 に示されている位置 A-B および C-D の垂直変位と地形の断面図

### 2.1.3. Ridgecrest 地震関連の文献の概要

#### 2.1.3.1. Christopher B. DuRoss et al. (2020), BSSA

この論文では、リッジクレスト地震（前震 Mw6.4、本震 Mw7.1）に伴う地表断層について、650箇所以上における現地調査結果をまとめている。これらのデータをもとに変位勾配や累積変位を計算し、この東部カリフォルニアせん断帯で過去に発生した地震と比較をしている。前震に関しては、北東の走向で長さ 18km の地表断層における 96 の変位データを報告している。ここでは、0.3~0.5m の右横ずれ、0.7~1.6m の左横ずれとなっている。垂直方向の平均変位はほぼ 0 に近い。変位分布をみると、本震の断層面との交差点の南西で大きく動いていることがわかる。本震は北西の走向で、変位分布では震央付近の 12km 長の断層面で最大変位が発生している。このセグメントが占める地表断層の割合は全長のうち 24%だが、66%もの地震モーメントがここで解放されている。本震に関しては、変位分布から変位勾配を計算している。結果は最大で 1~3m/km となっており、最大変位のある 12km 長のセグメントの側面に位置している。1992 年のランダース地震 (Mw7.3) や 1999 年のヘクターマイン地震 (Mw7.1) では 0.6m/km 未満であったため、今回の方が急勾配であるといえる。

図 2.1.10 では現地調査を基にした変位分布が 50cm 未満から最大 520cm の範囲で描かれている。また右横ずれ、左横ずれおよび垂直変位に分類した断層位置が図 2.1.11 にまとめられている。地表変位をグラフにしたものが図 2.1.12 で、縦軸に変位量、横軸にそれぞれの断層に沿った距離を置いている。リアトレース上だけでなく周辺の断層も含めた変位分布と、それをもとにした累積変位についてもまとめられている (図 2.1.13)。変位勾配を表す図では (図 2.1.14)、今回の地震はランダース地震とヘクターマイン地震に比べて勾配が急であることを示している。さらにそれらの変位勾配が 0.1~0.6m/km となっている範囲でも、本地震では変位が 1m 未満まで減少していることがわかる。

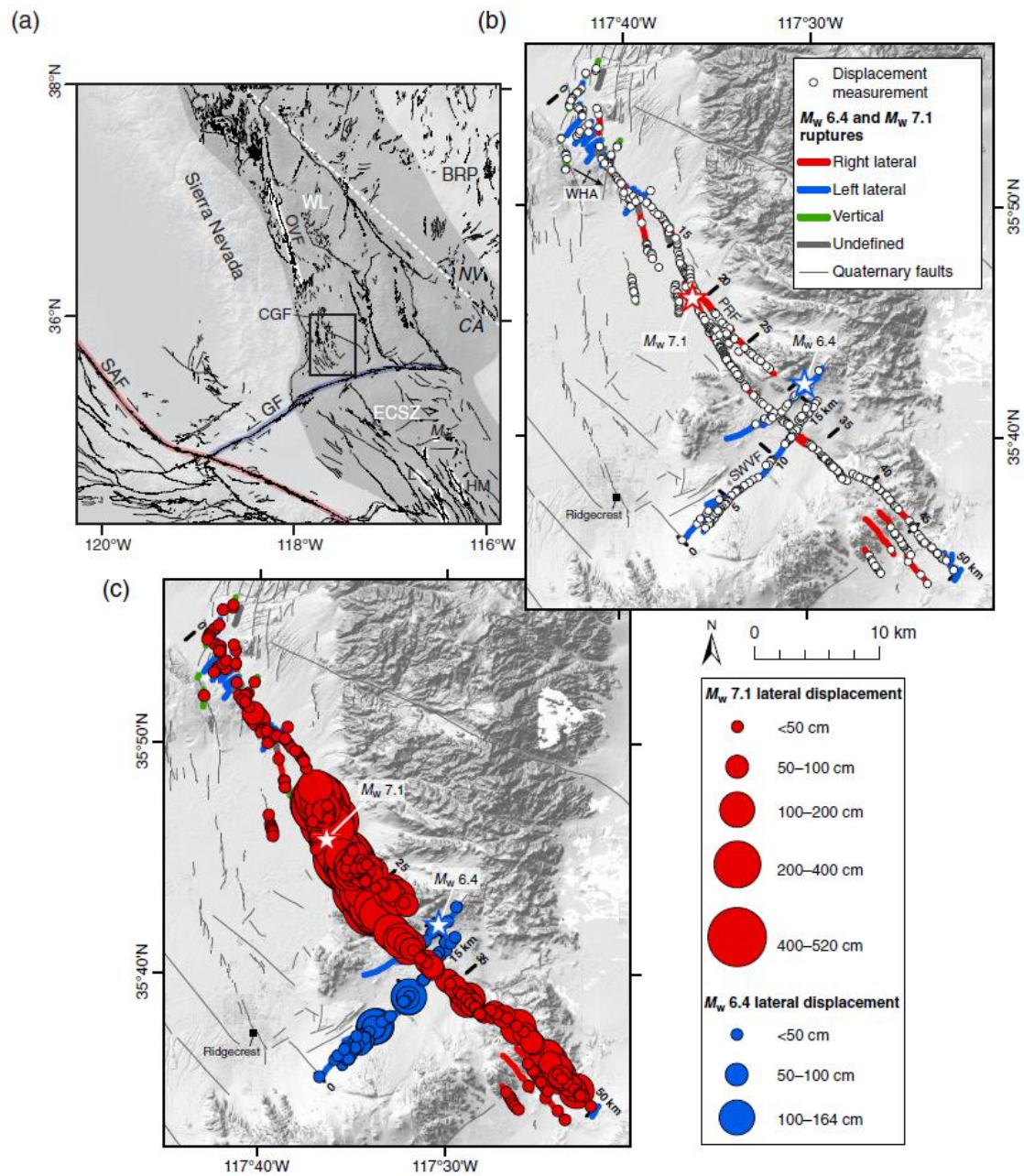


図 2.1.10 リッジレスト地震による地表断層

(a)東カリフォルニアせん断帯 (ECSZ)とウォーカー・レーン (WL)における既知断層 (HM: Hector Mine 1999, L:Landers 1947, M:Manix 1947, OVF Owens Valley Fault) (b)(a)における黒四角範囲の拡大図と調査地点 (c)現地調査結果に基づく変位分布  
断層マッピングは Ponti et al.,2020 および Barnhart et al., 2019 に基づく。

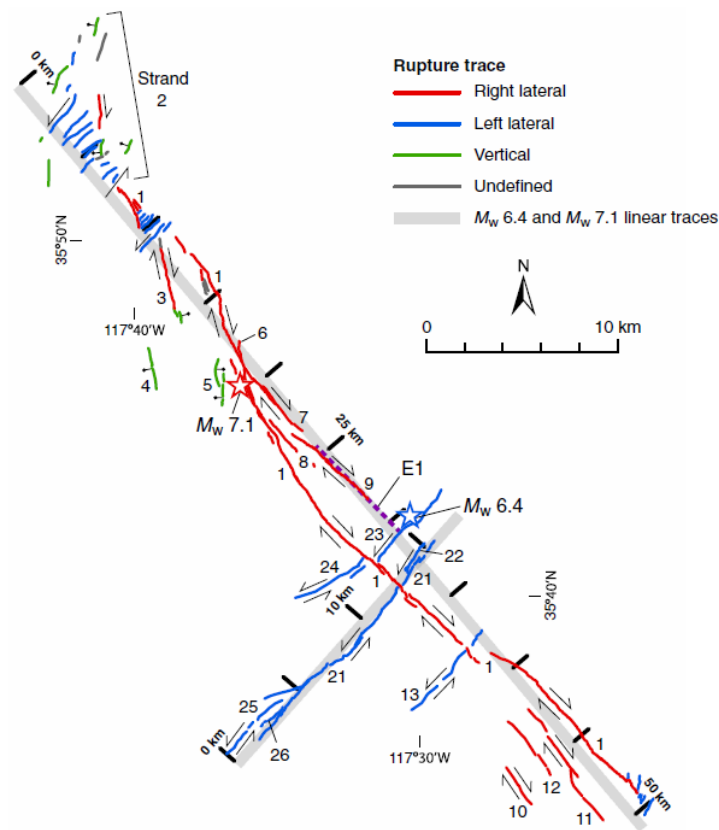


図 2.1.11 地表断層の概略図

赤は右横ずれ、青は左横ずれ、緑は垂直の断層変位を表している。

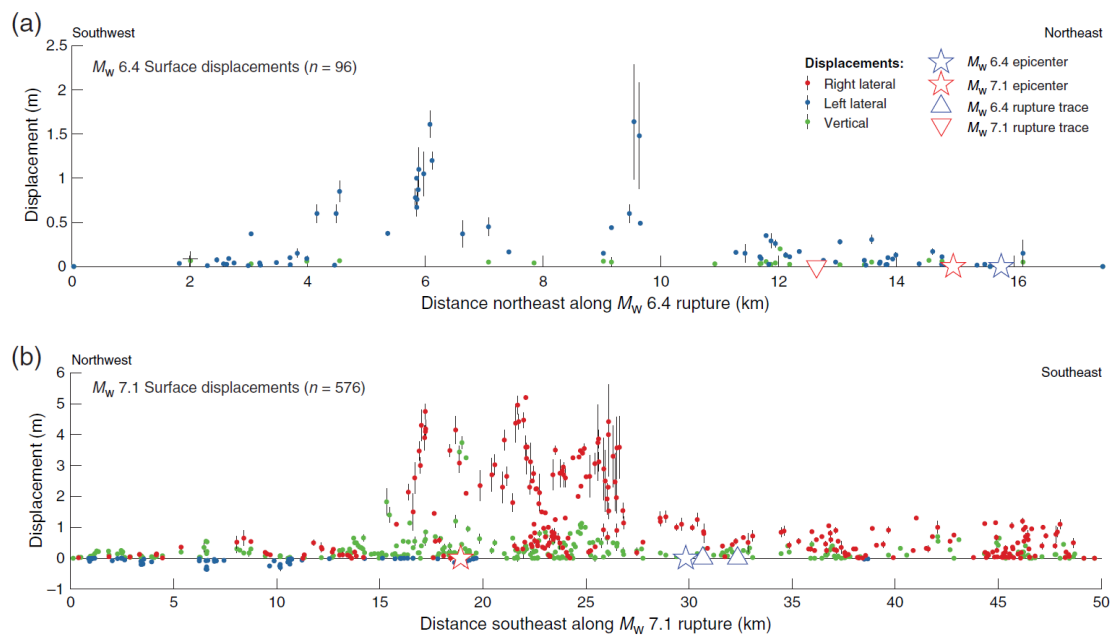


図 2.1.12 地表変位分布図 (a)前震, 18km 長 (b)本震, 50km 長

横軸は図 2.1.11 中のグレー線に沿っている。垂直の黒線は不確実度を表す。

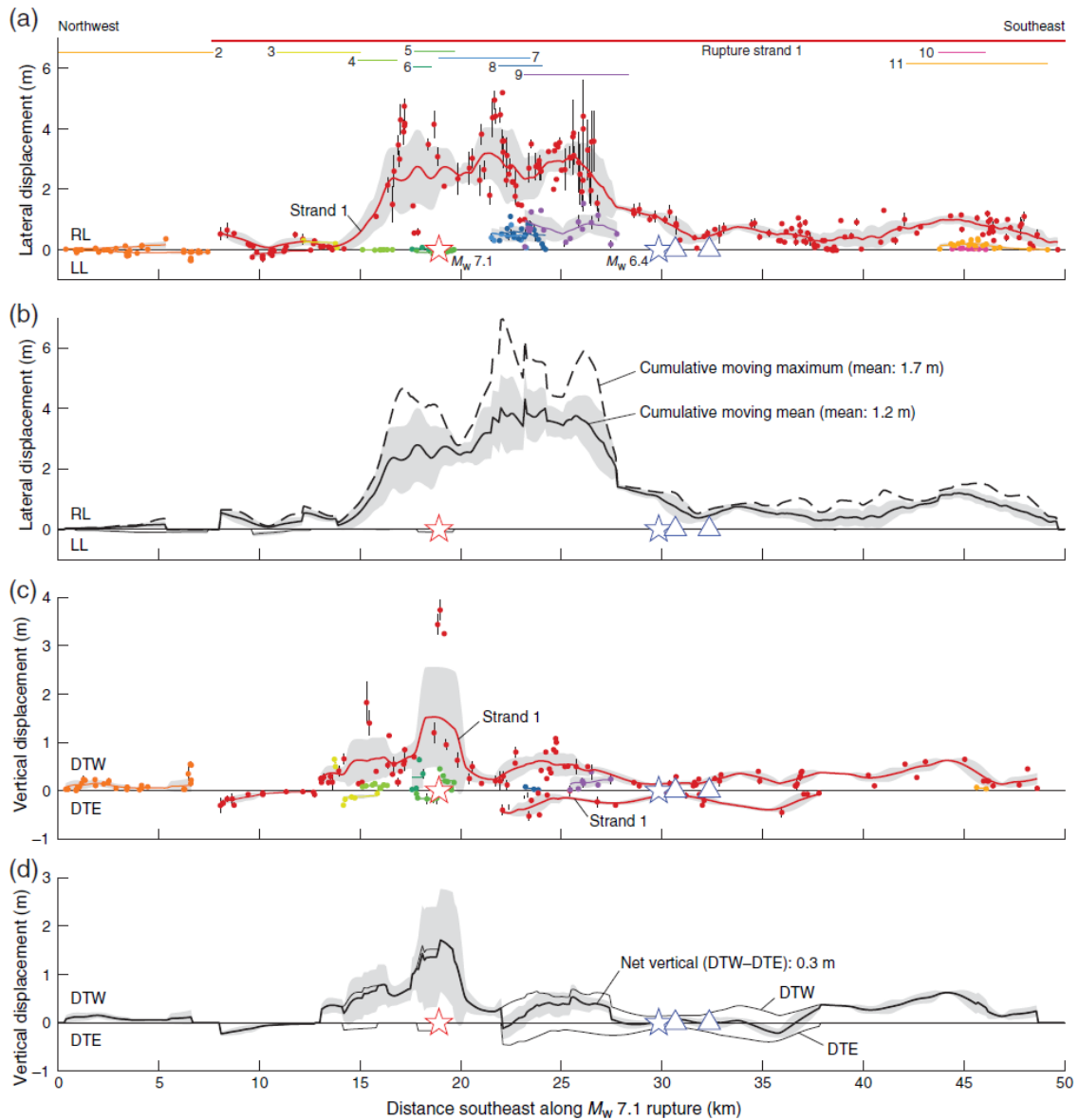


図 2.1.13 本震におけるセグメントごとの変位分布とその累積値

- (a) 1~11 のセグメントにおける横ずれ変位値。右横ずれが正としてプロットされている。  
 (b) 実線：移動平均の累積値 点線：移動平均の最大累積値 (c) 垂直変位。(d) 太い実線：平均垂直変位の累積値。西落ちを正とし、東西差に基づき計算している。  
 セグメント番号は図 2.1.11 に記載されている。グレーの範囲は  $1\sigma$  の不確定性を表す。

表 2.1.4 本論文で使用している基本パラメータ

| TABLE 1<br>Rupture Parameters, Seismic Moment, and Magnitude for the 2019 $M_w$ 6.4 and 7.1 Ridgecrest, California, Ruptures |                       |                                    |                     |                     |                        |                           |                               |                          |                          |                          |
|--|-----------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Rupture*   | SRL (km) <sup>†</sup> | RA (km <sup>2</sup> ) <sup>‡</sup> | MD (m) <sup>§</sup> | AD (m) <sup>§</sup> | AD-FP (m) <sup>§</sup> | $M_0$ (N·m) <sup>  </sup> | $M_w$ ( $M_0$ ) <sup>  </sup> | $M_w$ (SRL) <sup>¶</sup> | $M_w$ (RA) <sup>**</sup> | $M_w$ (AD) <sup>††</sup> |
| $M_w$ 6.4 LL—mean displacement curve   | 17.5                  | 192                                | 0.74 ± 0.26         | 0.27                | 0.30                   | 1.70 × 10 <sup>18</sup>   | 6.1                           | 6.6                      | 6.3                      | 6.6                      |
| $M_w$ 6.4 LL—maximum displacement curve  | 17.5                  | 192                                | 1.63                | 0.50                | 0.55                   | 3.15 × 10 <sup>18</sup>   | 6.3                           | —                        | —                        | 6.8                      |
| $M_w$ 7.1 RL—mean displacement curve   | 50.3                  | 509                                | 4.31 ± 0.83         | 1.17                | 1.18                   | 1.81 × 10 <sup>19</sup>   | 6.8                           | 7.0–7.1                  | 6.7                      | 7.1                      |
| $M_w$ 7.1 RL—maximum displacement curve  | 50.3                  | 509                                | 6.97                | 1.73                | 1.75                   | 2.68 × 10 <sup>19</sup>   | 6.9                           | —                        | —                        | 7.3                      |
| $M_w$ 7.1 RL—northwest (0–16 km; mean curve)   | 16                    | 162                                | —                   | 0.20                | 0.20                   | 9.84 × 10 <sup>17</sup>   | 5.9                           | —                        | —                        | —                        |
| $M_w$ 7.1 RL—central (16–28 km; mean curve)  | 12                    | 121                                | —                   | 3.00                | 3.04                   | 1.11 × 10 <sup>19</sup>   | 6.6                           | —                        | —                        | —                        |
| $M_w$ 7.1 RL—southeast (28–50 km; mean curve)  | 22                    | 223                                | —                   | 0.70                | 0.71                   | 4.74 × 10 <sup>18</sup>   | 6.4                           | —                        | —                        | —                        |

\*Displacement curves (Figs. 7 and 8) used to calculate rupture parameters; LL, left lateral; RL, right lateral.  
<sup>†</sup>SRL, linear surface rupture length (SRL) based on linear fault trace.  
<sup>‡</sup>RA, rupture area using a rupture depth of 10 km (Ross *et al.*, 2019) and fault dips of 66° northwest ( $M_w$  6.4) and 81° northeast ( $M_w$  7.1) after Barnhart, Hayes, and Gold (2019).  
<sup>§</sup>MD, maximum displacement; AD, average displacement; calculated using cumulative mean and maximum displacement curves (Figs. 7 and 8). AD-FP is fault parallel average displacement.  
<sup>||</sup> $M_0$  is the product of RA, AD-FP, and a shear modulus of  $3 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> after Field *et al.* (2014).  $M_w$  as a function of  $M_0$ ; Hanks and Kanamori (1979):  $M_w = \log(M_0) - 9.1 \times (2/3)$ .  
<sup>¶</sup> $M_w$  as a function of SRL based on Wells and Coppersmith (1994) and Wesnousky (2008) using strike-slip regressions:  $M_w = 1.12 \times \log(\text{SRL}) + 5.16$ ;  $M_w = 0.87 \times \log(\text{SRL}) + 5.56$ .  
<sup>\*\*</sup> $M_w$  as a function of RA based on Wells and Coppersmith (1994) and Hanks and Bakun (2002) using strike-slip regressions:  $M_w = 3.98 + (1.02 \times \log(\text{RA}))$ ;  $M_w = 1.02 \times \log(\text{RA}) + 3.98$ .  
<sup>††</sup> $M_w$  as a function of AD based on Wells and Coppersmith (1994) strike-slip regression  $M_w = 0.89 \times \log(\text{AD}) + 7.04$ .

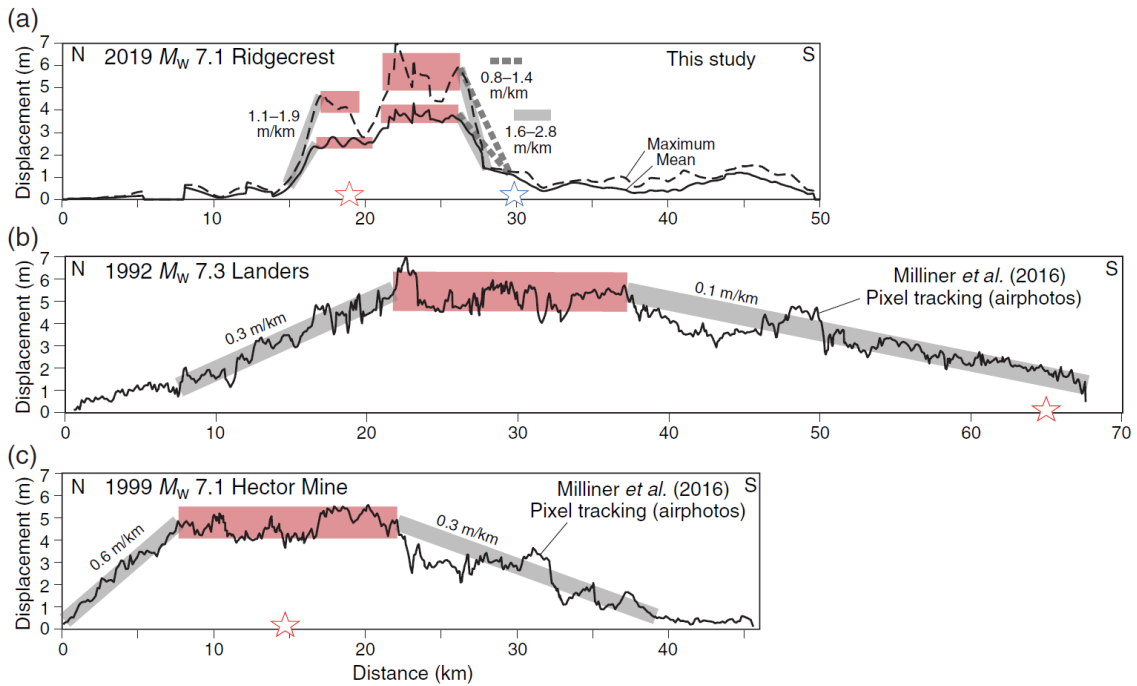


図 2.1.14 本震と過去地震の変位勾配比較

(a)本震 (2019,  $M_w$ 7.1) (b)ランダース地震 (1992,  $M_w$ 7.3) (c)ヘクターマイン地震 (1999,  $M_w$ 7.1) 赤塗りの範囲は最大変位勾配を示す。(b)(c)は Milliner *et al.*,2016 を基にしている。



### 2.1.3.2. Daniel J. Ponti et al. (2020), SRL

Mw6.4 および Mw7.1 の一連するリッジレスト地震は 2019 年 7 月 4 日および 5 日に南カリフォルニア地域に位置する東カリフォルニアせん断帯内で発生した。

一連の地震により、IndianWellsValley および Searles Valley で地表断層と地表変状が広域的に発生した。その後の数週間で、政府および学界、民間部門から 36 名以上の科学者が地表断層と地表変状の特徴について記載を実施した。2019 年 12 月の時点で、合計 6500 地点以上で航空撮影が行われ、約 1500 地点で地表断層または地形変化の現地調査によってスケッチおよび写真を含めた記載が行われた。加えて、1100 地点以上では、水平および鉛直方向のすべり量や地表変位の定量測定も実施された。地表断層および地形変状のマッピング手法としては、GPS・GNSS を用いた現地踏査および航空写真からの GIS ソフトウェアによる線描などが実施された。

調査を通して、2つの一連の地震による 68km 以上の地表地震断層および液状化や斜面崩壊による多数の地形変状を明らかにすることができた。とくに、Mw6.4 の地震による北東方向の地表断層と Mw7.1 の地震による北西方向の地表断層が分布し、3~4m の右横ずれ変位が北西-南東方向に 10km 程度分布することが明らかとなった。また、北西方向の地表断層の北端付近では、北東から北方向の不連続な断層の領域も確認された。本成果は、一連の地震の発生要因を理解するための基礎研究となり、被災地域の被害推定の改善につながるとしている。

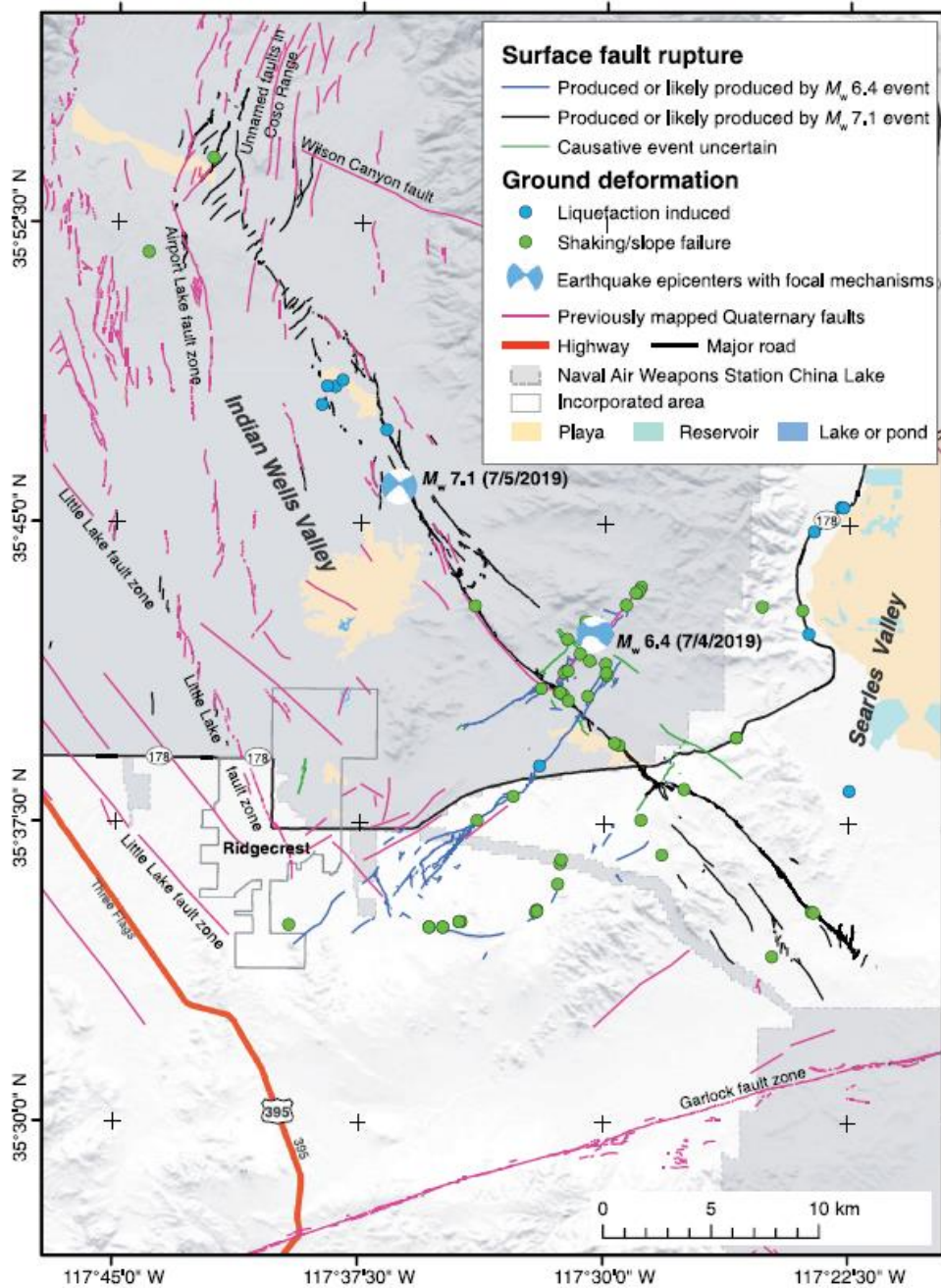


図 2.1.15 地表断層の範囲

一連の Ridgecrest 地震( $M_w$ 6.4・ $M_w$ 7.1)による地表断層(黒線、青線、緑線) 地形変状が現れた地点(緑円、青円) U.S. Geological Survey および California Geological Survey による第四紀断層のトレース(マゼンタ線) ベースマップは USGS の The National Map, 3D Elevation Program, and Hydrography Dataset による(2020年1月更新)。



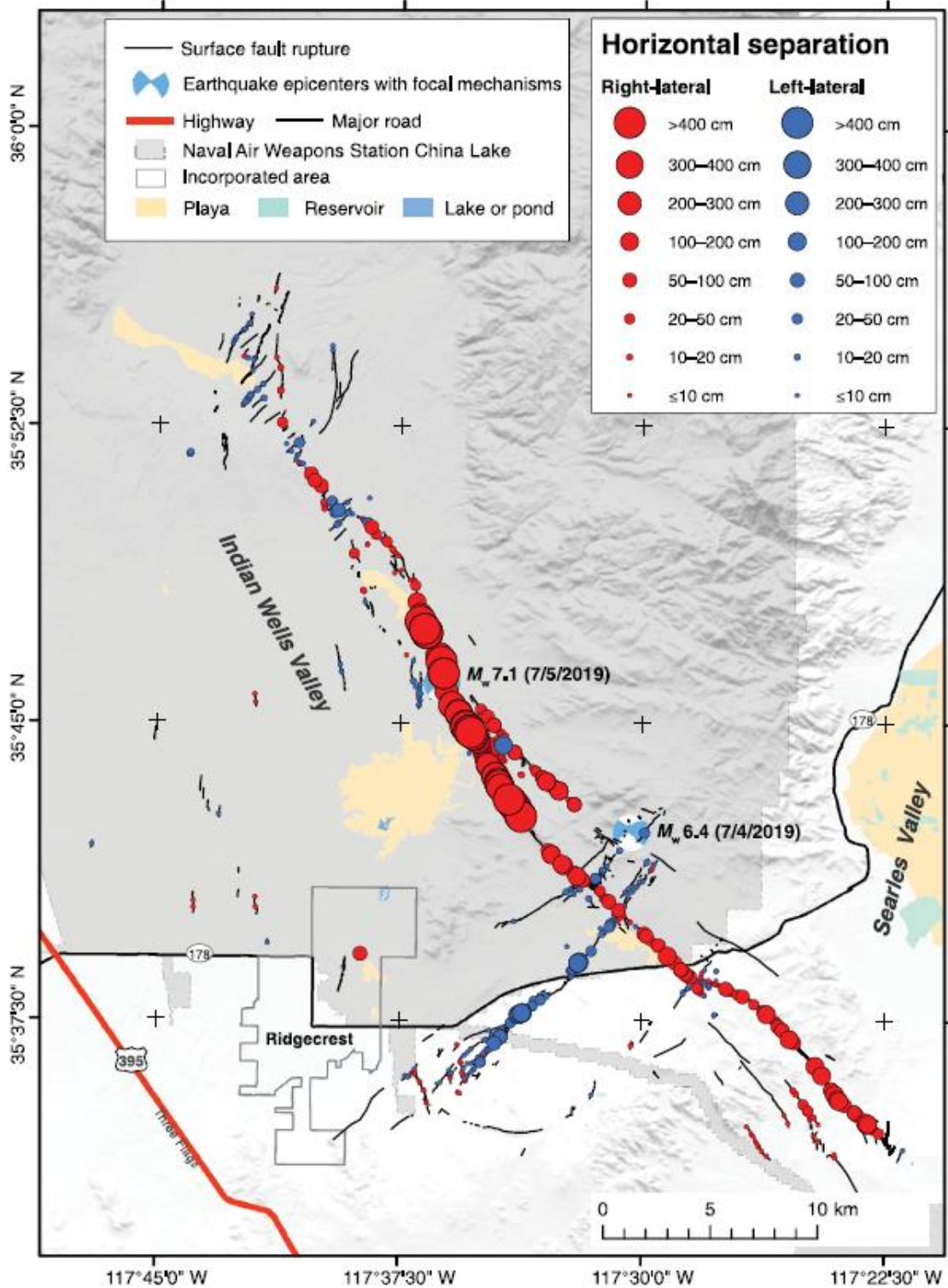


図 2.1.16 水平変位の現地調査結果

現地調査で見出された地表変状の分布。赤円は右横ずれ、青円は左横ずれを示し、円の大きさは水平変位量(cm)を表す。ベースマップは USGS の The National Map, 3D Elevation Program, and Hydrography Dataset による(2020年1月更新)。

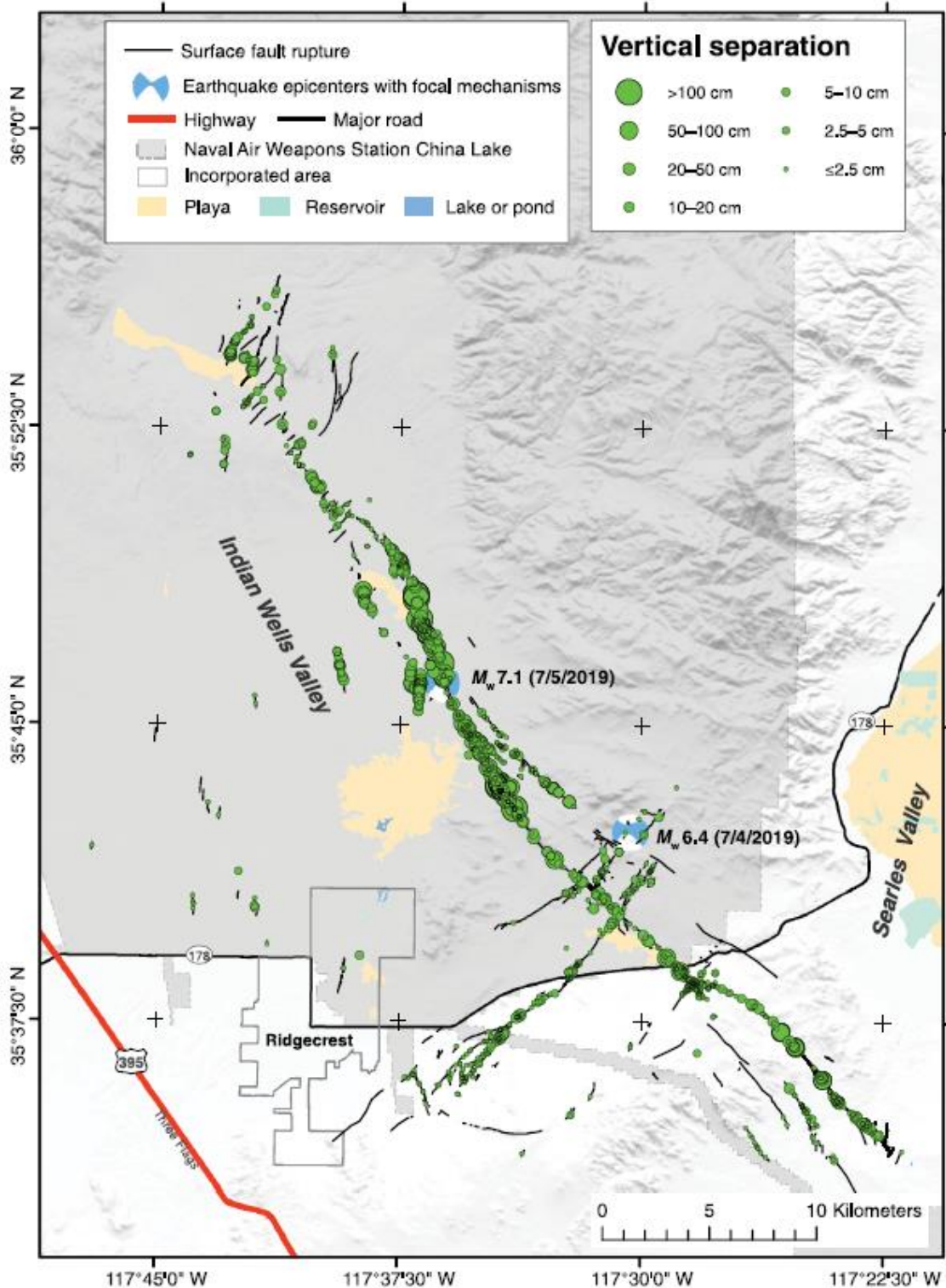


図 2.1.17 垂直変位の現地調査結果

現地調査で見出された地表変位の分布。赤円は右横ずれ、青円は左横ずれを示し、円の大きさは水平変位量(cm)を表す。ベースマップは USGS の The National Map, 3D Elevation Program, and Hydrography Dataset による(2020年1月更新)。

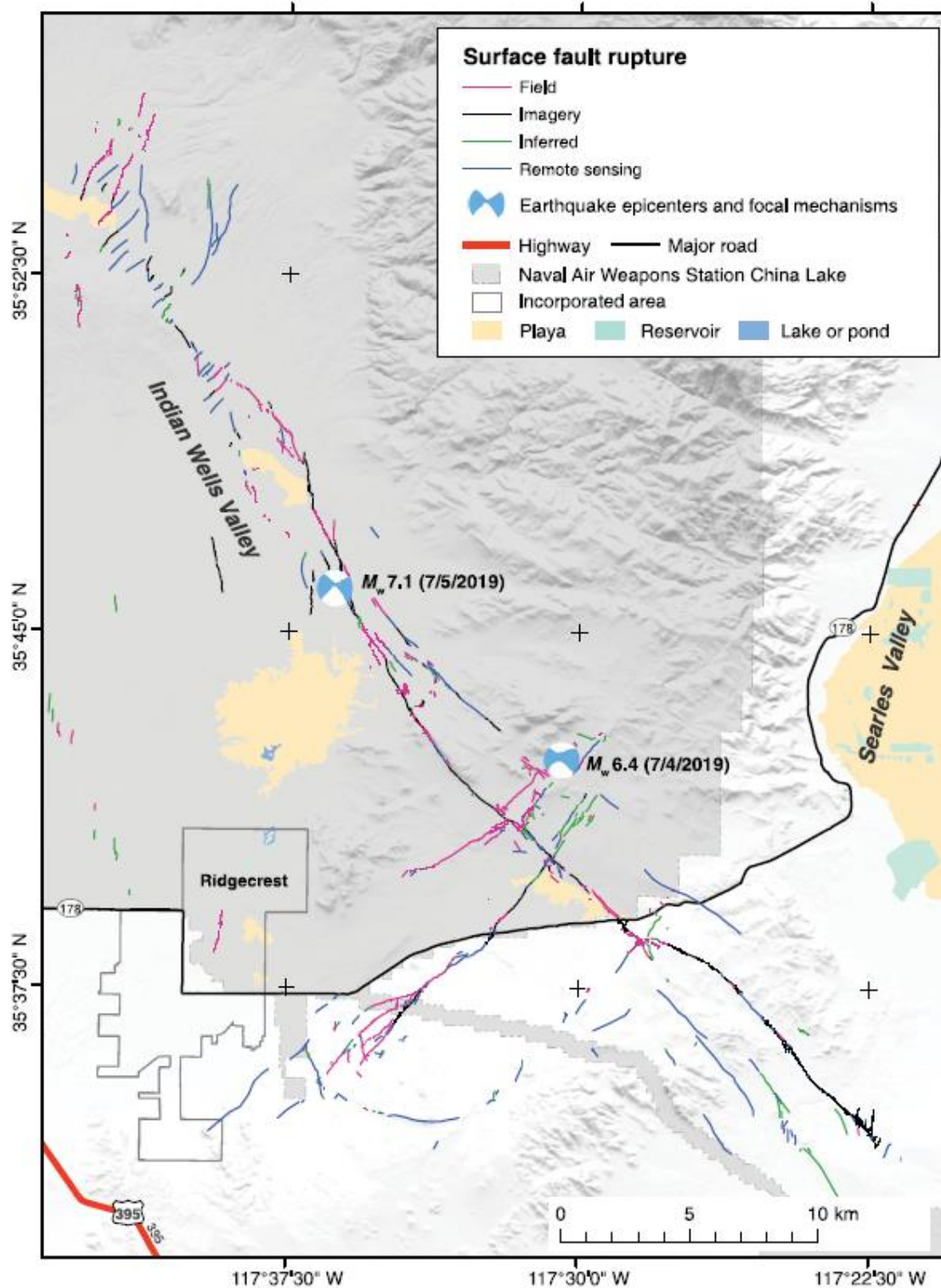


図 2.1.18 現地調査結果と衛星画像解析結果の比較

見出された地表変状を色別に区分した。ベースマップは USGS の The National Map, 3D Elevation Program, and Hydrography Dataset による(2020 年 1 月更新)。



### 2.1.3.3. Jonathan P. Stewart et al. (2019), GEER

2019年7月4日現地時間10時33分のMw 6.4の前震では北東-南西走向の共役断層が、翌5日現地時間20時19分のMw 7.1の本震では北西-南東走向の主断層が破壊したとしており、現地調査や航空写真を用いた推定によって"surface rupture"の分布を示している。

現地調査では、地表変状および人工構造物の変形に着目した調査が行われた。とくに、微小地形の変位記載や断層付近の高速道路の白線を用いた地表変位および余効すべりの記載などが詳細に実施された。加えて、無人航空機による地表変状の詳細な写真から、周辺のDEMデータの作成などを行った。結果として、多数かつ詳細な"surface rupture"の分布および変位を明らかにした。

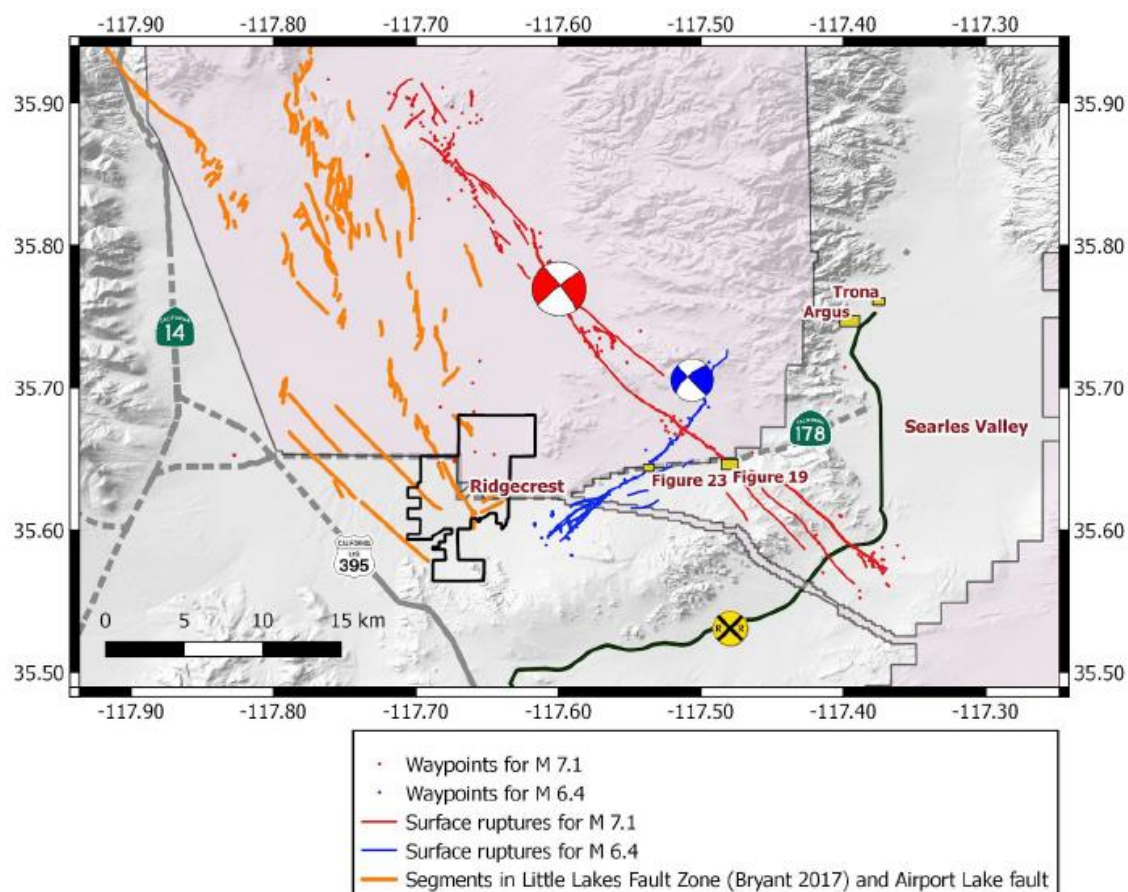


図 2.1.19 リッジレスト地震の"Surface rupture"分布

Mw7.1の地震の地表変状(赤線) Mw6.4の地震の地表変状(青線) Little Lakes Fault Zone (Bryant 2017)および Airport Lake fault (橙線)

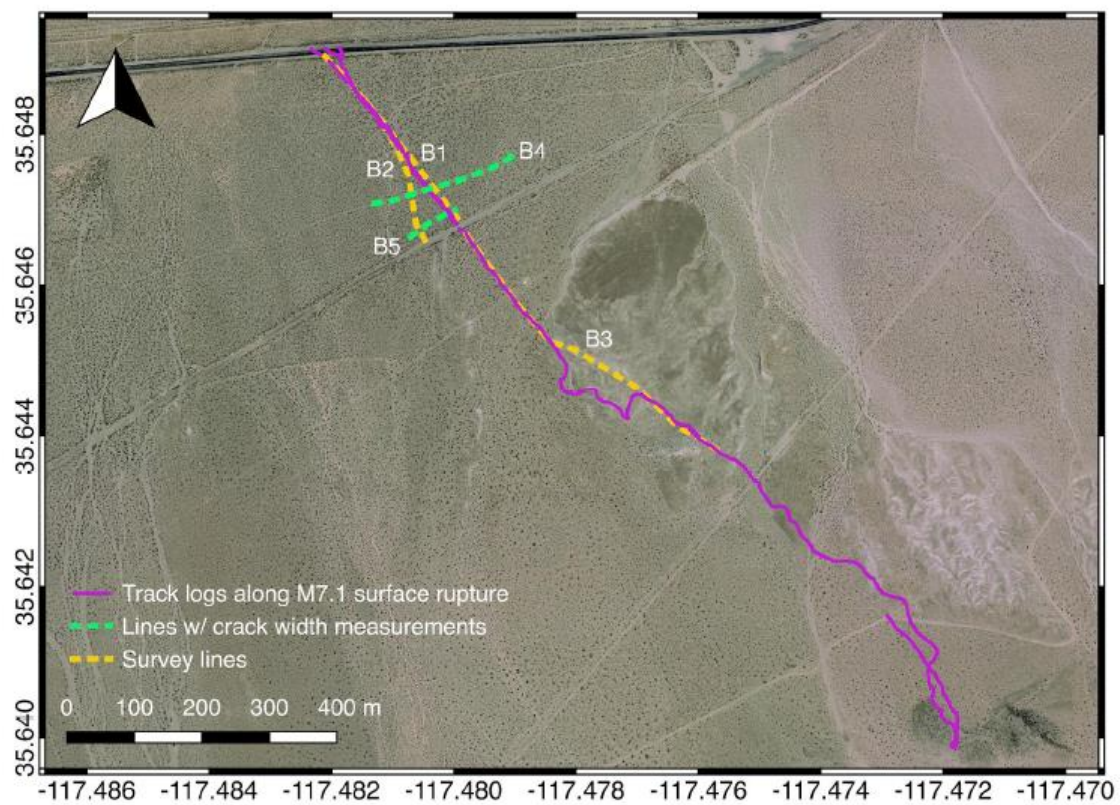


図 2.1.20 光学画像による Highway 178 における地表断層（図 1 中 Figure19 より抜粋）

### 2.1.3.4. Eric J. Fielding et al (2020), AGU

2019年 Ridgecrest 地震(Mw6.4, Mw7.1)の発生後、Sentinel-1 からのCバンドおよびALOS-2のLバンドによるSAR画像を使ったInSAR解析およびピクセルオフセット解析を行った。InSARコヒーレンスの変化から地表変動および地表断層の分布を見出した。

Mw6.4の地震による北東方向の地表変動は、Mw7.1の地震による北西方向の地表断層と交差している。主断層は南東に向かって2つに分岐し、ガーロック断層から3km付近で取れんする。ガーロック断層は約15mm、主断層に沿って変位している。Mw7.1の地震の震源から約3km北西では、地表断層が分岐しプルアパートによる1mの沈降を引き起こすなど複雑な変位領域が存在する。USGSのInSARデータおよび新たに導入したGPS観測点データから、余効変動を捕捉した。地震数週間でプルアパートが反転し始め、最大のすべり量を起こした震源付近に向かって主断層の実質的な余効すべりが生じている。さらに、主要な地表断層の北端でのすべり領域では、北東および北西方向の傾向をもつ多数の変位によって複雑な地表変状を示している。

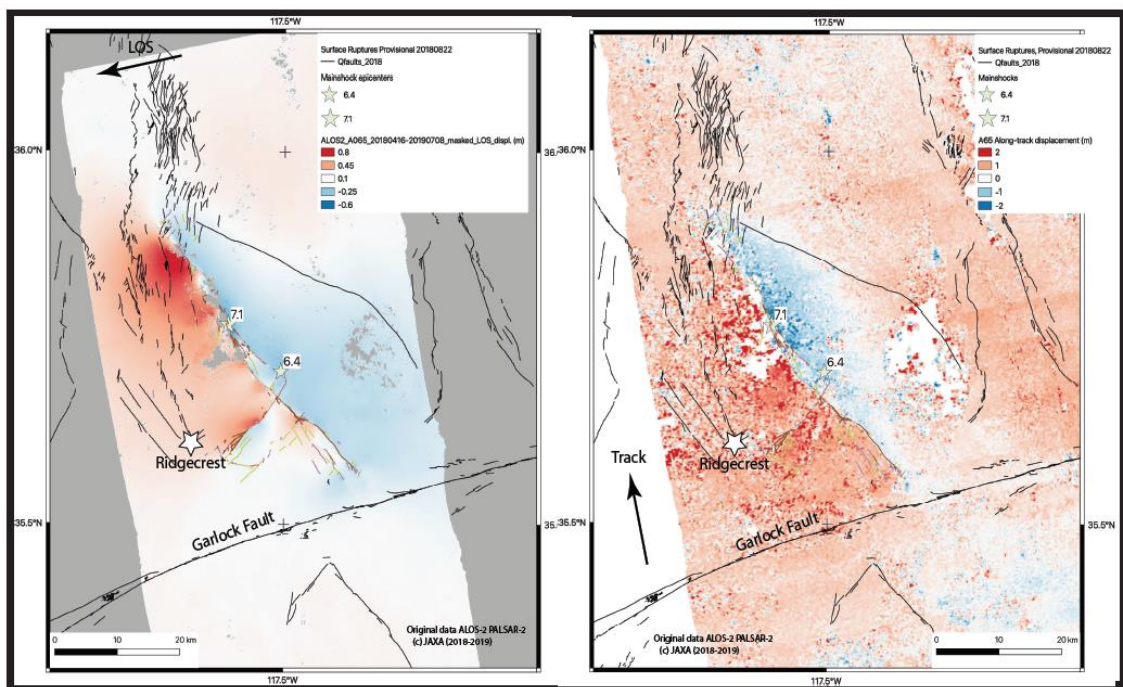


図 2.1.21 ALOS-2による地震時変位 (ascending) . 左: 2018/4/16-2019/7/8, 右: 2016/8/8-2019/7/8 黒線は第四紀断層の位置(USGS, 2018)を示す。

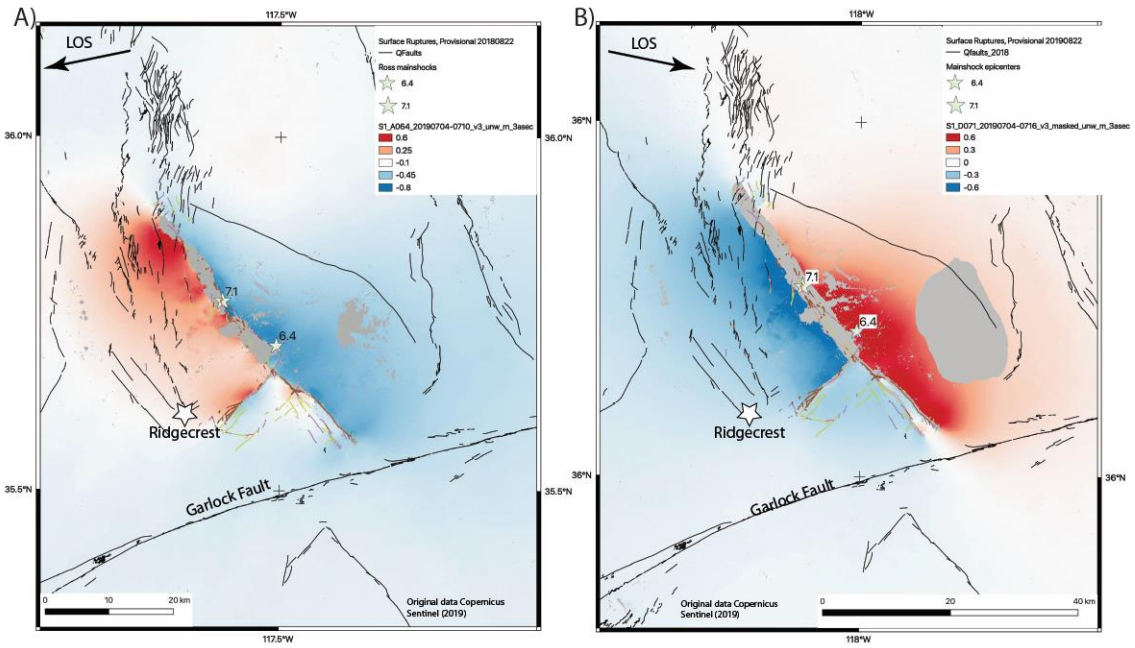


図 2.1.22 ALOS-2 による地震時変位. 左: ascending, 2019/7/4-2019/7/10 右: descending, 2019/7/4-2019/7/16 黒線は第四紀断層の位置(USGS, 2018)を示す。



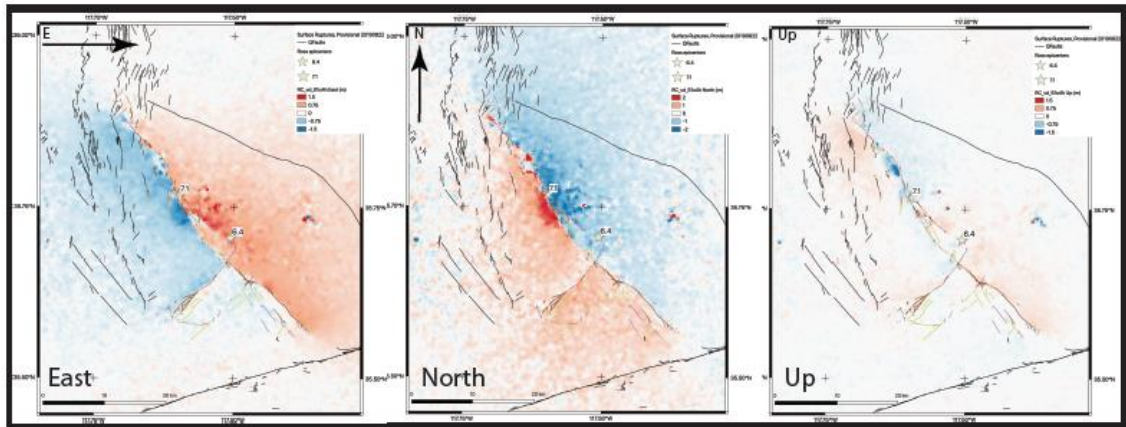


図 2.1.23 ピクセルオフセット解析結果. 地震時の三次元変位（正:東,北,上）を示す黒線は USGS による第四紀断層の位置。



### 2.1.3.5. Yohai Magen et al. (2020), BSSA

2019年7月6日に起こった Mw7.1 の地震は、34時間前に発生した Mw6.4 の地震によって引き起こされたと考えられている。この論文では、Sentinel-1 による InSAR 解析結果、光学画像、GPS 観測結果を合わせたジョイントインバージョンをおこない、その結果を元に、これら 2 つの地震に対するすべり分布を求めている。近年では、空間分解能の高い InSAR などのデータと、時間分解能の高い GPS などのデータを合わせて解析することが注目されている。さらにこの論文では、断続的なデータ空間とモデル空間の中でインバージョンを収束させるようなデータ・モデル間の離散化について、新しいアプローチが使われている。これにより、小さな観測値がモデル空間において大きな値を生み出すような矛盾がなくなる。前震の地震時すべりは、直行した断層間に 3 つのアスペリティが含まれるためやや複雑だが、一方で本震は南西走向の主断層のみであり、比較的単純である。さらに本震の主断層は前震のアスペリティのうちの 1 つを有している。前震におけるすべりがせん断応力を増加させ、その位置が本震の震源となり、2 回目の地震が発生した。著者らは、前震に対し、そのアスペリティでは本震が発生している間に 6 回以上の破壊活動が起きているとしている。この繰り返しは不完全な応力降下を示している。

図 2.1.24 では GPS データのみを使用したモデル値と観測値が比較されている。さらに図 2.1.26 では SAR データ (図 2.1.25) を使用したピクセルオフセット処理により、水平方向の変位がわかるようになっている。この図を拡大したものが図 2.1.27 である。北東走向の断層沿いに最大で 1.2m のオフセットを示しているが、北西走向の断層沿いにはノイズレベルを超えるほどの地表変位はないように見える。

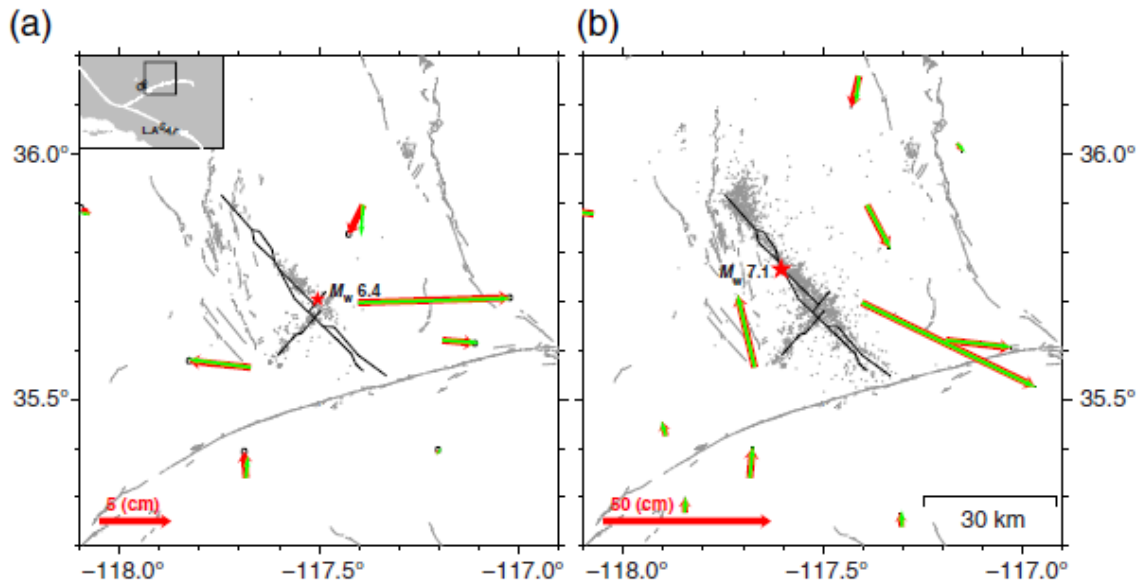


図 2.1.24 GPS データの観測値とモデル値の変位ベクトルの比較

(a)前震および(b)本震における比較結果。緑矢印が観測値、赤矢印がモデル値を示している。それぞれの地震発生後 34 時間内に発生した余震をグレーの点としてプロットしている。またグレーの線は既知断層、黒線はモデリングにおいて設定した地表断層を示している。

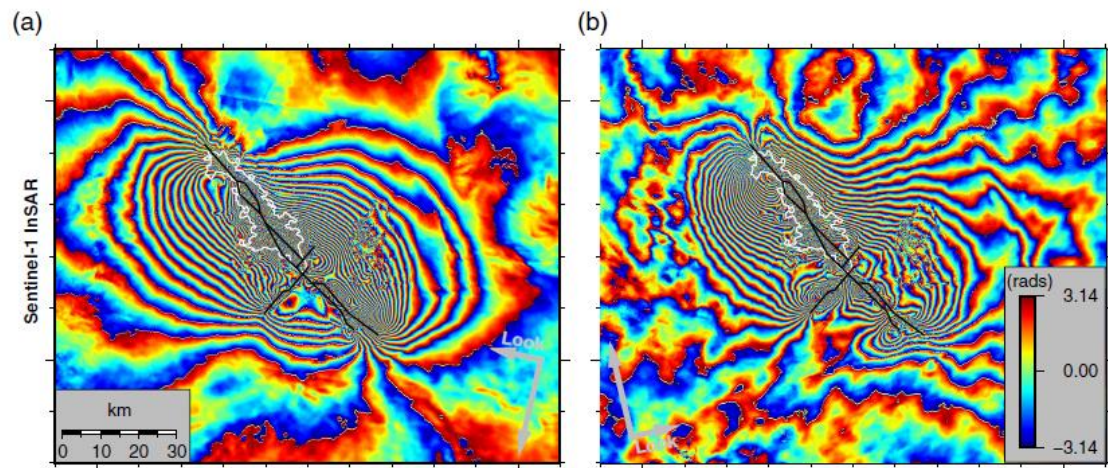


図 2.1.25 Sentinel-1 の地震時 InSAR 画像

(a)Descending 軌道、期間は 2019/7/4~2019/7/10 (b)Ascending 軌道、期間は 2019/7/4~2019/7/16

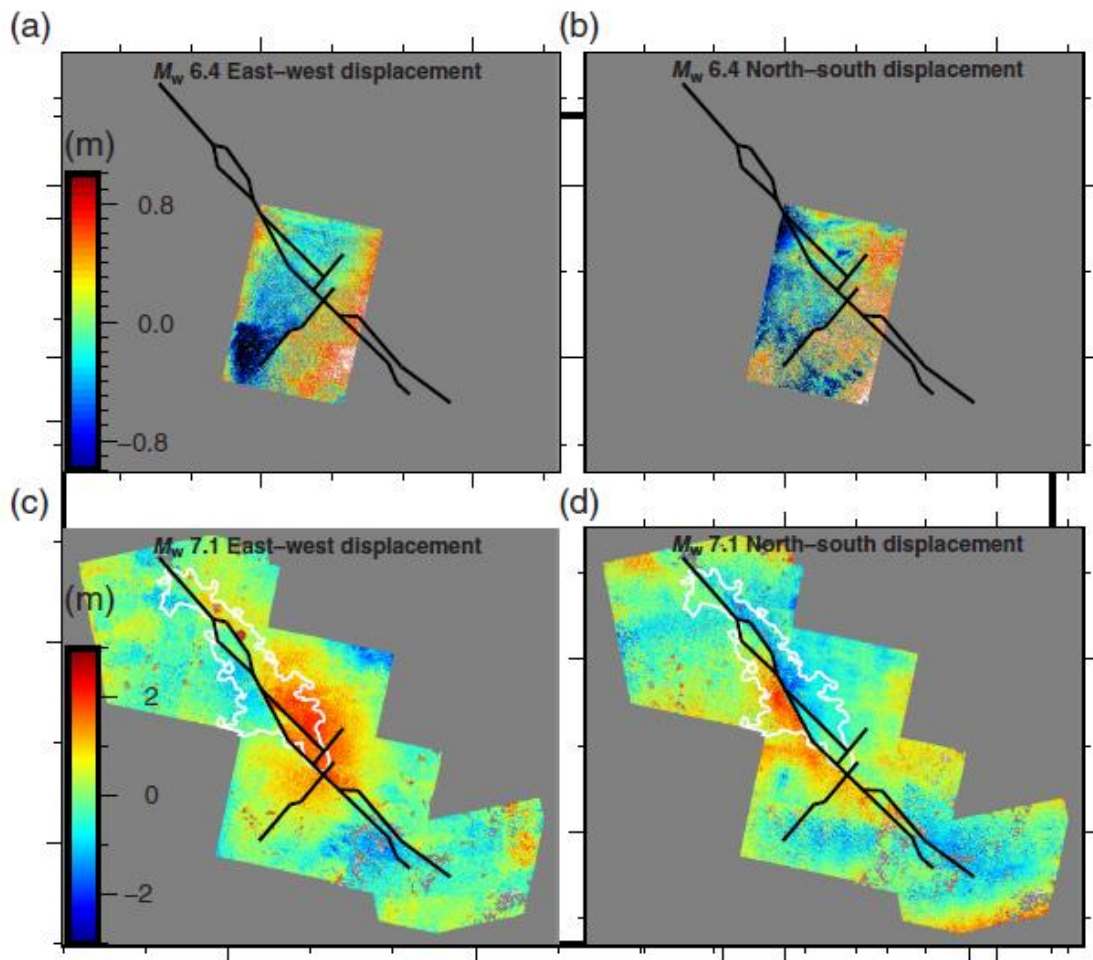


図 2.1.26 ピクセルオフセット解析結果

(a,b) 2019/7/1~2019/7/4 (c,d)2019/6/27, 2019/7/30, 2019/7/4 と 2019/7/6, 2019/7/12 東および北方向を正とする。黒線はモデリングにおける断層の位置である。

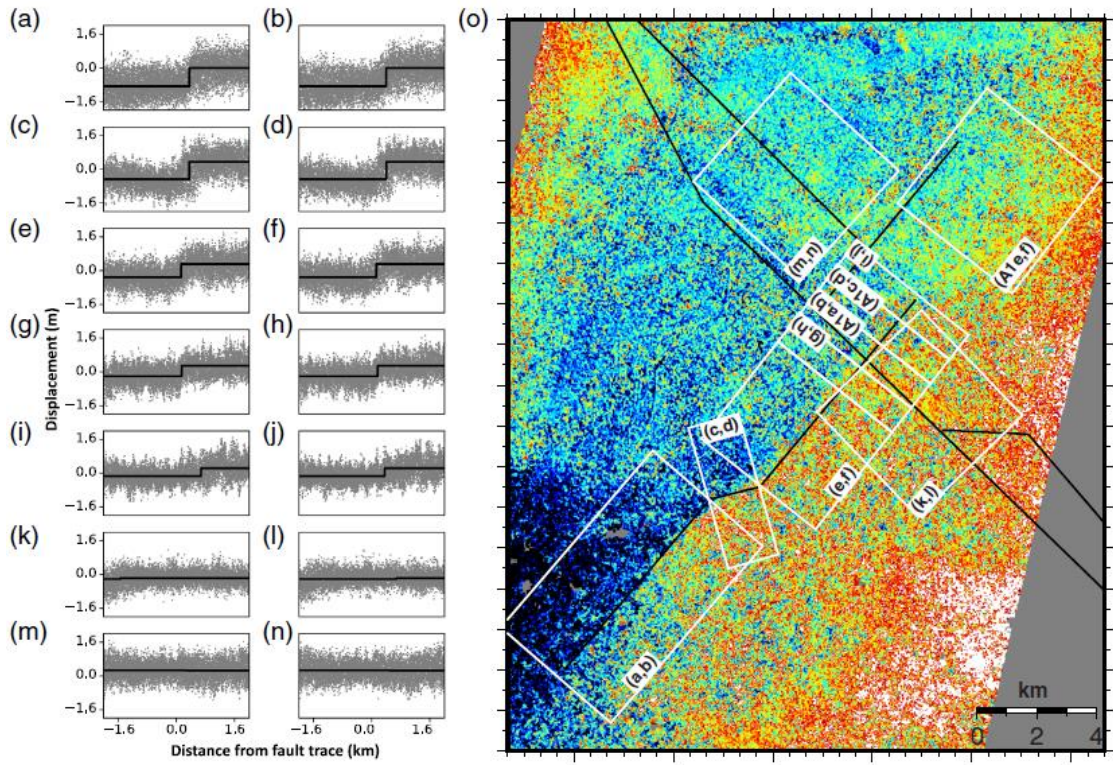


図 2.1.27 ピクセルオフセットの結果による断層変位のプロフィール

(o) 図 3(a) の拡大図. (a,c,e,g,i,k,m) 白四角範囲の東西方向の変位 (b,d,f,h,j,l,n) 白四角範囲の南北方向の変位を示す。それぞれの黒線は最小二乗法により求めたステップ関数となっている。

### 2.1.3.6. William D. Barnhart (2019), GRL

2019年7月に発生した左横ずれの Mw6.4 と右横ずれの Mw7.1 のリッジレスト地震群によって、交差した断層破壊が起きた。著者らは InSAR 解析と光学画像を用いて、地表変位と浅部における変動を考察している。衛星データからは、本震において～46km の地表断層が存在することや～5m の最大すべりなどが明らかになった。さらにガーロック断層中央の 20～25km の部分では、リッジレスト地震の影響でクリープ運動が発生していることもわかった。静的応力変化の解析結果は、前震が本震を促したことを示している。ガーロック断層では、地表でクリープ運動が観測されたところでのみ、静的応力変化によってさらにすべっていることがわかる。これは、この断層が静的応力変化に弱いことを示している。ガーロック断層によってさらなる Mw6.7～Mw7.0 クラスの地震が起こる可能性もあるとしている。

図 2.1.28 において、著者らは Sentinel-1 の SAR データを使った地震時の InSAR 画像および Sentinel-2 のデータを使ったピクセルオフセット解析の結果を載せている。ピクセルオフセットの結果からは、10m の解像度で水平変位がわかるようになっており、右横ずれおよび左横ずれの地表変位が示されている。



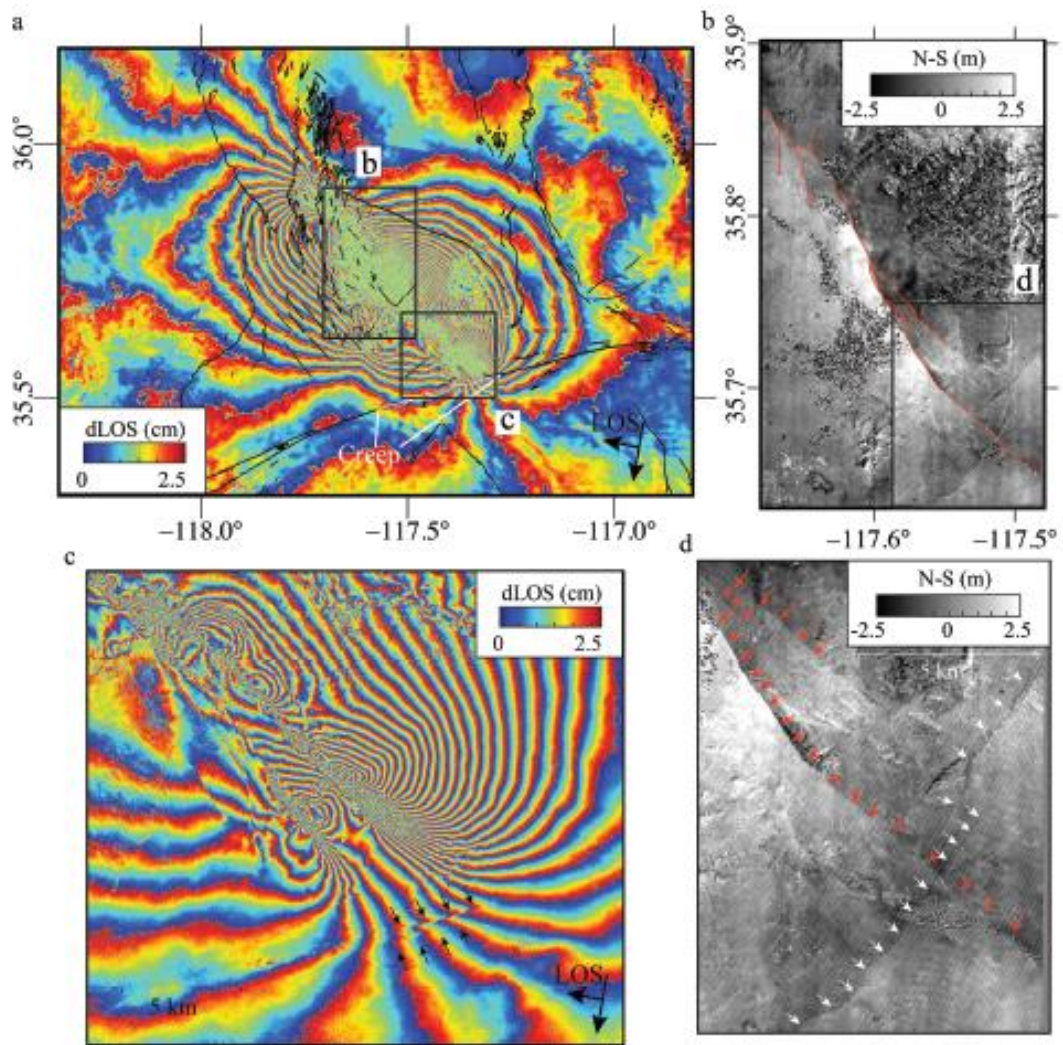


図 2.1.28 Sentinel-1 による地震時の InSAR 画像

(a) Descending 軌道、期間は 2019/7/4~2019/7/16 である。カラーバーは衛星に近づく方向を正としている。(b) 南北方向のピクセルオフセットの結果。期間は 2018/7/22 と 2019/7/14 の 2 画像を使用している。赤線は地表断層を示す。(c) (a) の拡大図。黒矢印はガーロック断層を表している。カラーバーは北を正としている。(d) (b) の拡大図。赤矢印は Mw7.1 の本震、白矢印は Mw6.4 の前震を示す。

### 2.1.3.7. Kang Wang and Roland Bürgmann (2020), SRL

2019年のリッジレスト地震は東部カリフォルニアせん断帯の広範囲で発生した。東部カリフォルニアせん断帯はモハーヴェ砂漠の北側にある。この地域のGNSS観測点の間隔は平均で20-30kmと、震源メカニズムを決定するには十分な精度ではない。著者らは、Sentinel-1およびCOSMO-SkyMed (CSK)のSARデータを使用し、リッジレスト地震に伴う地震時および地震後の地表変位を高精度に獲得している。Sentinel-1とCSKから得たLOS変位は、どちらもGNSSデータによく整合している。本震の最大地震時変位は、北西走向沿いに~4.5mと推定される。CSKデータによるピクセルオフセット解析結果からは、別の北西走向の断層セグメントに~1mの地表変位があり、これが前震の主たる変動であることが分かった。この前震の主変動は、本震の最大変位位置の2~3km東で観測された。前震に関する断層上で地表変位が明瞭でない場所については、おそらく2度目の本震による、より大きくかつ浅い断層破壊のためだと考えられる。またSentinel-1とCSKの両データは、地震後の変動についてもよく表しており、本震の震央における累積LOS変位は2か月で~5cmとなることがわかった。著者らは、この変動はアフタースリップ(余効すべり)および間隙弾性反発が原因である可能性が高いと述べている。

Sentinel-1とCSKによる地震時LOS変位とGNSS観測値との比較がそれぞれ図2.1.30と図2.1.31でなされている。図2.1.32ではアジマスオフセット解析の結果がまとめられている。図2.1.32(a)および(d)中の赤い矢印は、前震と本震の両方によって動いたのではないかと考えられている。スタッキング前の大気誤差除去について、図2.1.33で示されている。この論文ではGACOSモデルを使用することで地形誤差をモデリングし、残差から地殻変動を求めている。スタッキングの結果が図2.1.34である。CSKの結果に関しては、データの少なさのため明瞭な干渉縞を示したのはわずかであった。

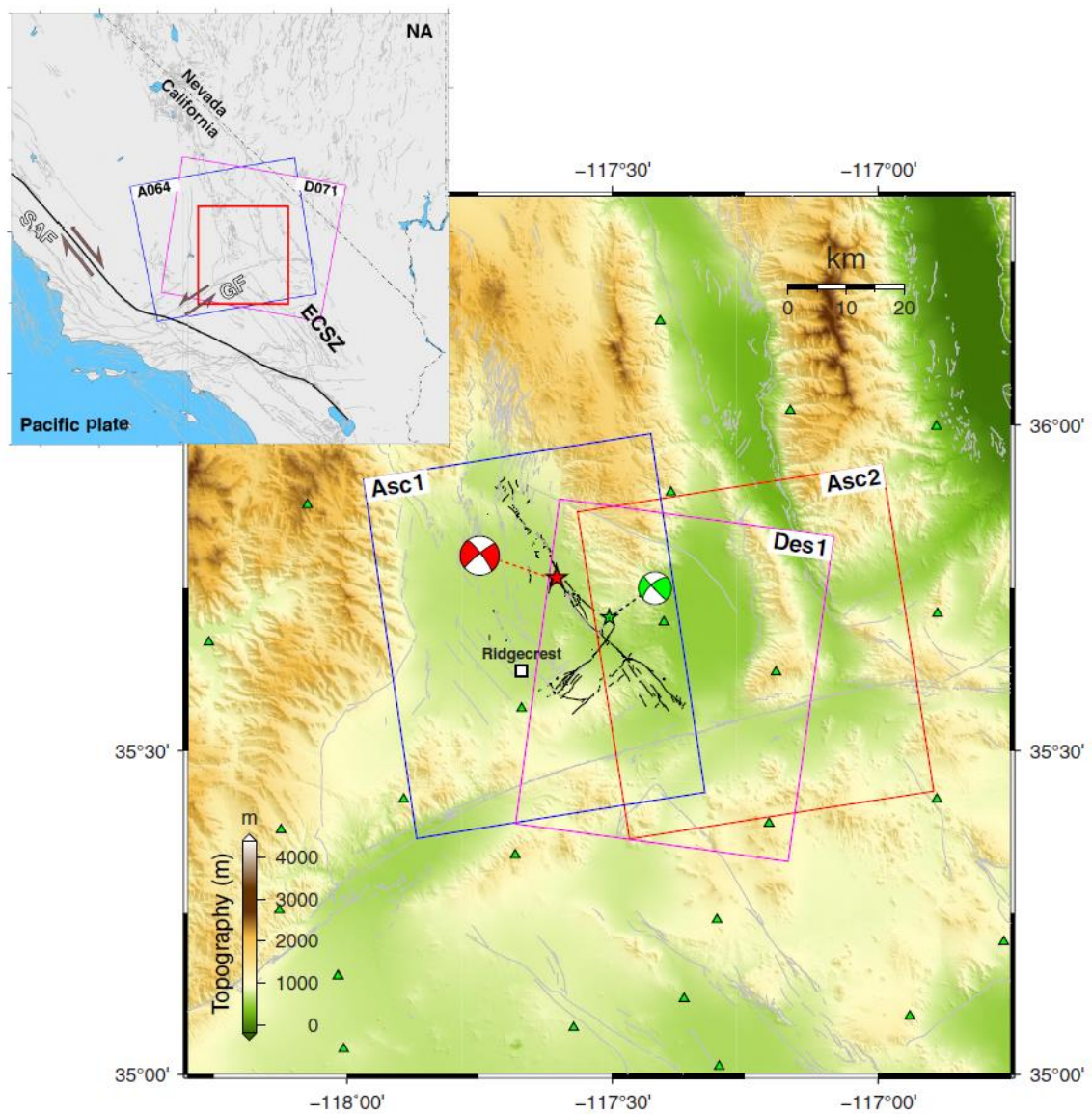


図 2.1.29 対象地域の地形および観測範囲

(上) Sentinel-1 の観測範囲。赤枠は下図の範囲を示す。(下) CSK の観測範囲。黒線はリッジレスト地震の地表断層トレース (Ponti et al., 2019)、緑三角は GNSS 観測点を示す。図中における ECSZ は東部カリフォルニアせん断帯、GF はガーロック断層、SAF はサンアンドレアス断層を示している。



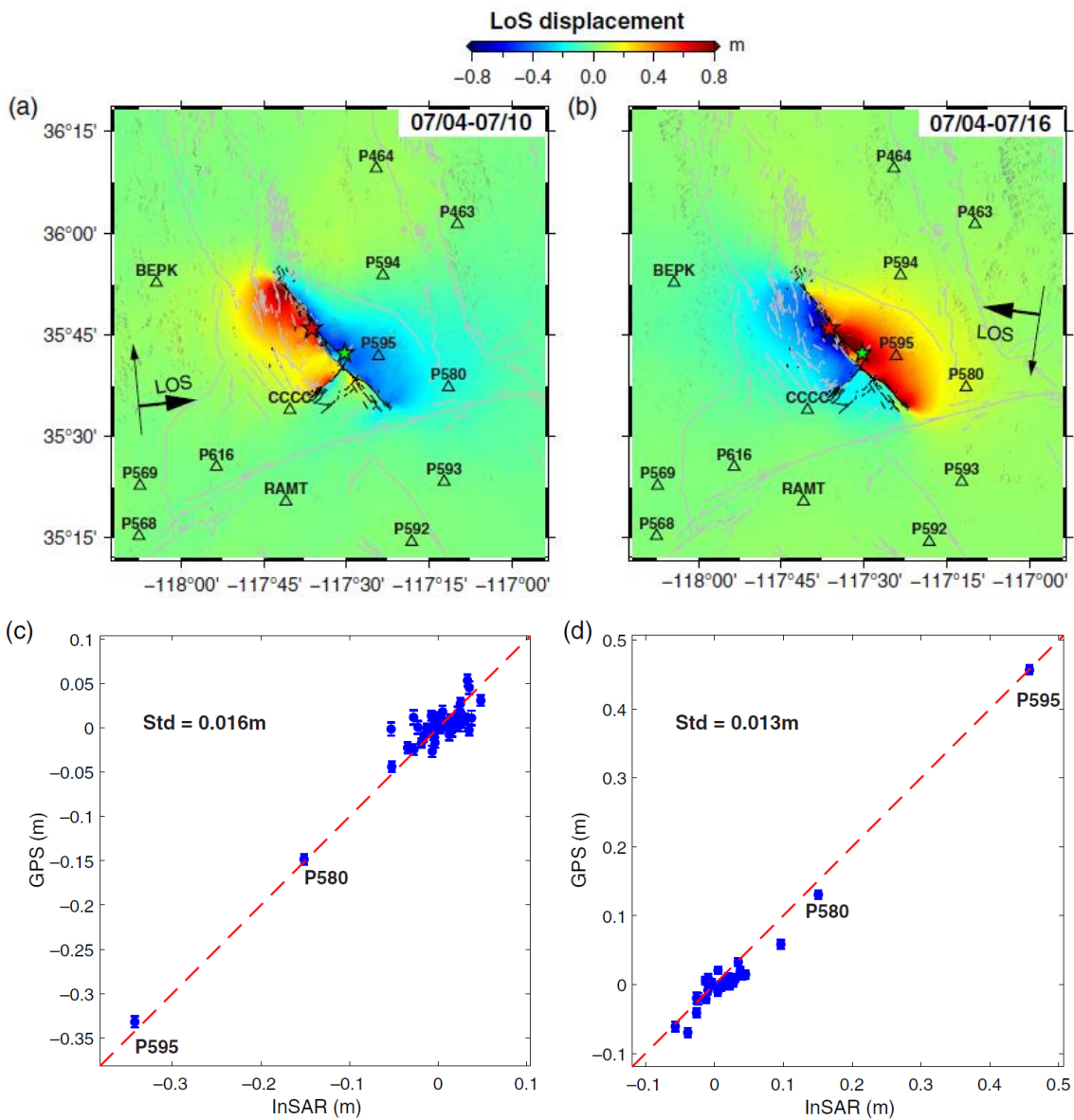


図 2.1.30 Sentinel-1 における地震時 LOS 変位と GNSS 観測値

(a)Ascending 軌道 (b)Descending 軌道を示す。カラーバーは赤が衛星に近づく方向、青が衛星から離れる方向を表す。(c)と(d)はそれぞれの LOS 変位と GNSS 観測値の比較を示している。

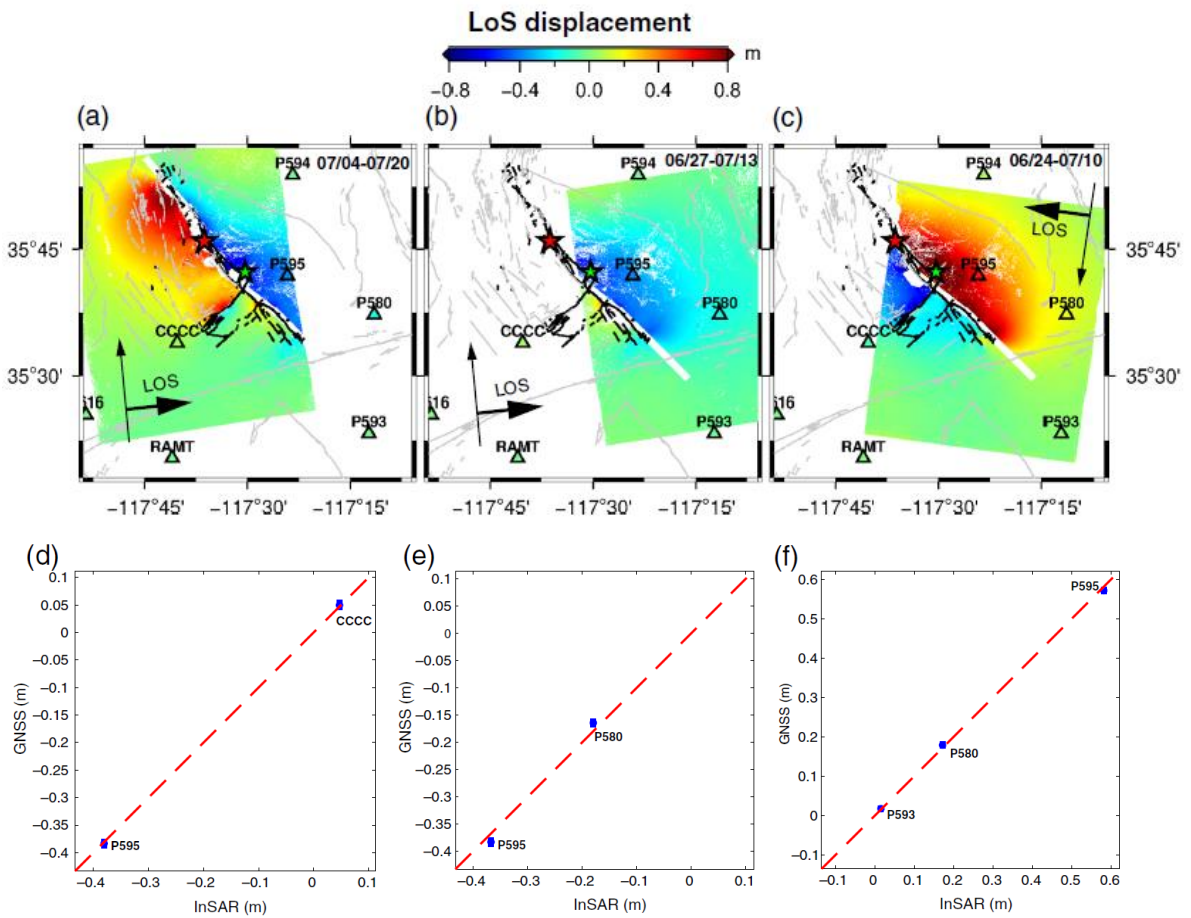


図 2.1.31 CSKにおける地震時 LOS 変位と GNSS 観測値

(a)(b)Ascending 軌道 (c)Descending 軌道を示す。カラーバーは赤が衛星に近づく方向、青が衛星から離れる方向を表す。(c)~(e)はそれぞれの LOS 変位と GNSS 観測値の比較を示している。

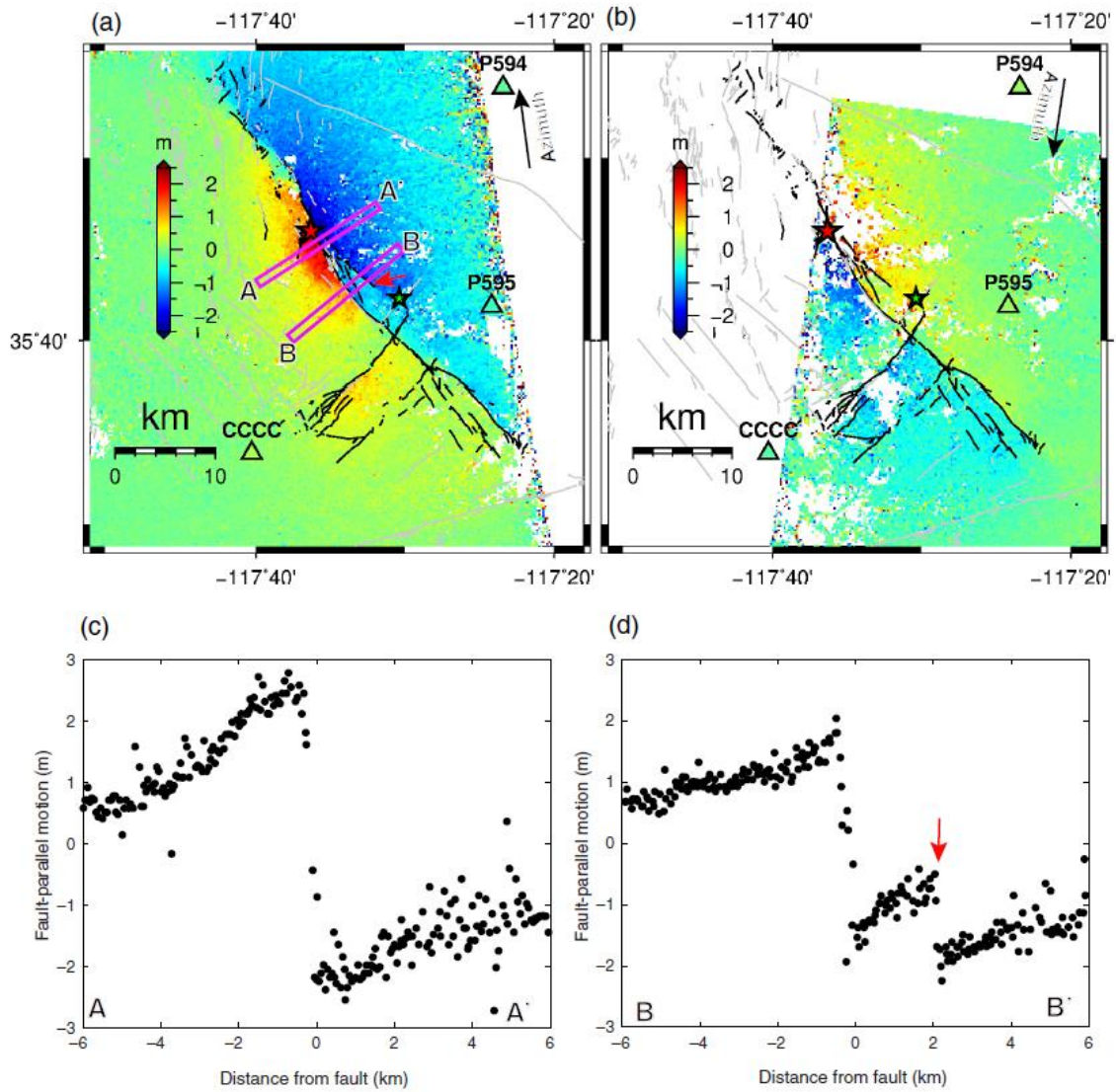


図 2.1.32 CSKにおけるアジマスオフセット解析結果 (a)Ascending 軌道 (b)Descending 軌道の解析結果。カラーバーはアジマス方向（衛星進行方向）が正としている。(c)A-A'のアジマス方向の変位 (d)B-B'のアジマス方向の変位で、縦軸は断層方向にどれだけずれたかを示している。

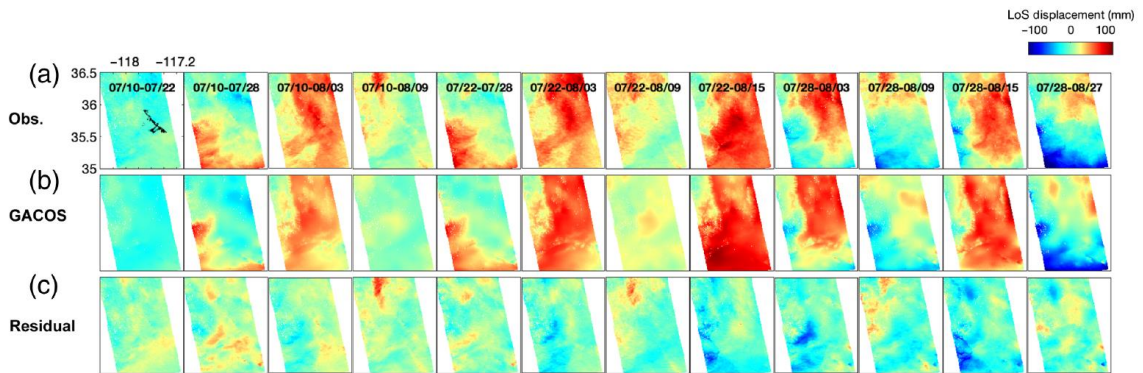


図 2.1.33 地震後地殻変動の検出

(a)観測値 (b)GACOS モデルによる地形由来誤差の計算値 (c)観測値とモデル値の残差をそれぞれ示す。



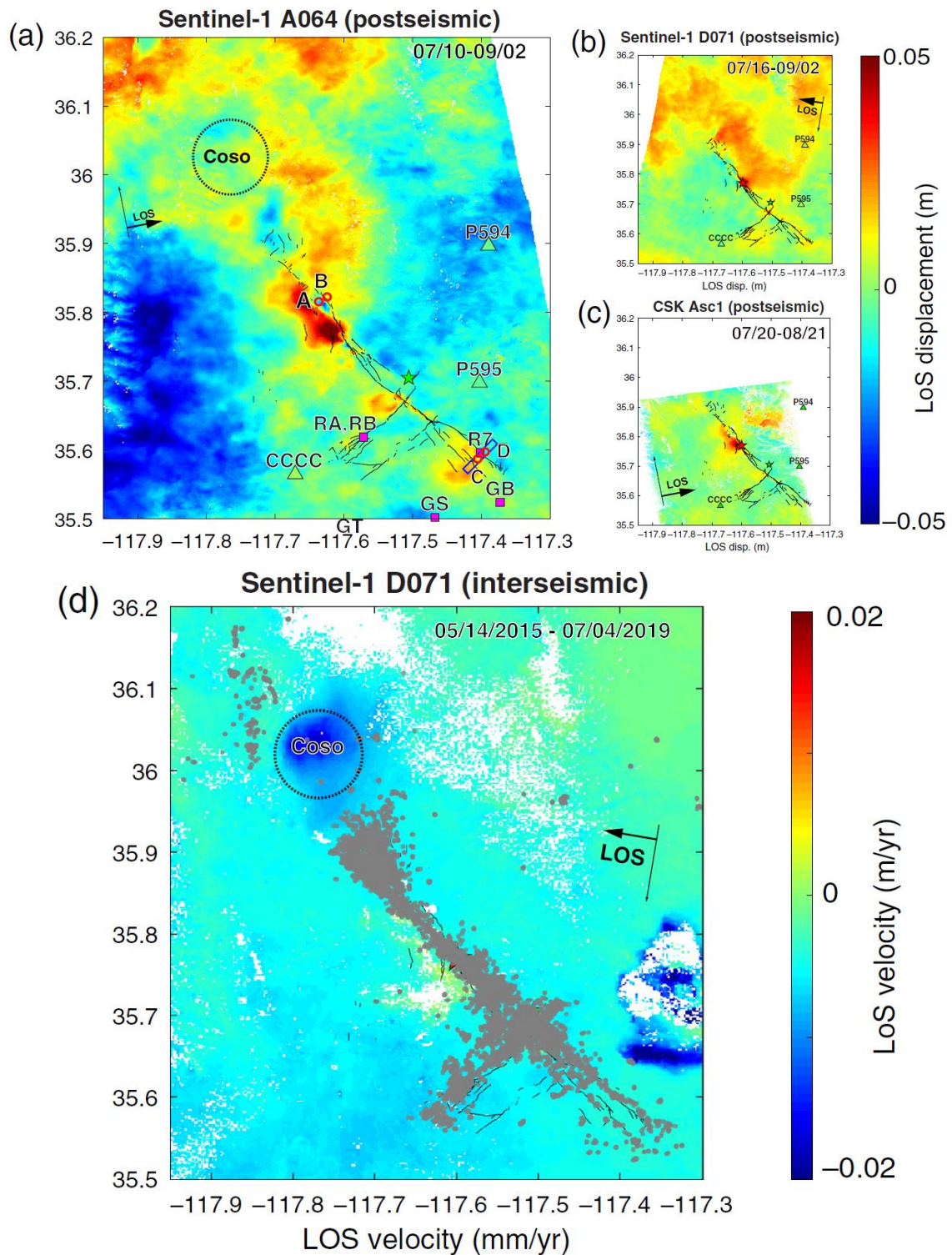


図 2.1.34 地震後および地震前地殻変動

(a)~(c)は累積 LOS 変位で、(a)(b)が Sentinel-1、(c)が CSK の結果である。軌道間距離はすべて 30m 未満である。(a)中のマゼンタの四角は Bilham and Castillo (2019)におけるクリープメーターの位置である。カラーバーは衛星に近づく方向が正としている。(d) Sentinel-1 を使用したリッジレスト地震の~4 年前の変動速度を示す。グレーの点は前震発生から 2019/9/11 までの震源分布を表す (Huang et al., 2019)。

### 2.1.3.8. Zachary E. Ross et al. (2019), Science

2019年7月4日、カリフォルニア南部の地震活動がおよそ20年ぶりに活発化した。場所はリッジレスト付近で、断層が交差するような形で一連の地震が発生した。前震はMw6.4で、34時間後にM7.1の本震が発生した。測地および地震データを統合的にみると、かなり小さなスケールで未知の断層が互いに直交し、複雑に組み合わさっていることがわかる。これら断層のジオメトリは地震発生深度全域に影響する。本震はガーロック断層を数km破壊し、浅部のクリープと地震群を誘発させている。今回のような、繰り返し起こる複数断層破壊は現代の測地技術により少しずつ明らかにされている。そして地震災害を定量的に把握し、評価するというさらなる課題を我々に提起させている。

図 2.1.35 ではリッジレストにおける一連の地震活動がまとめられている。南部では断層が南東・南西方向に分岐していることや、北端では震源分布が馬の尾のように広がっていることが視覚的によくわかる。また図 2.1.35 下図の深度分布では、少なくとも20の断層が存在していることがわかる。この論文では、ALOS-2/PALSAR-2 を用いて InSAR 解析を行っている。地震時の解析結果が図 2.1.36 であり、地表断層の位置がわかる。図 2.1.37 に地表断層位置の概略図が示されている。まず前震は北から南へ3つの断層を破壊していき、本震を徐々にと誘発していった。本震は全部で4つの断層を破壊しており、左右のずれを含んでいる。両イベントのすべり速度はとても遅く、 $\sim 2\text{km/s}$  と見積もっている。さらに著者らは GPS データのインバージョンをおこない、InSAR データと合わせてその整合性を考察している (図 2.1.38)。



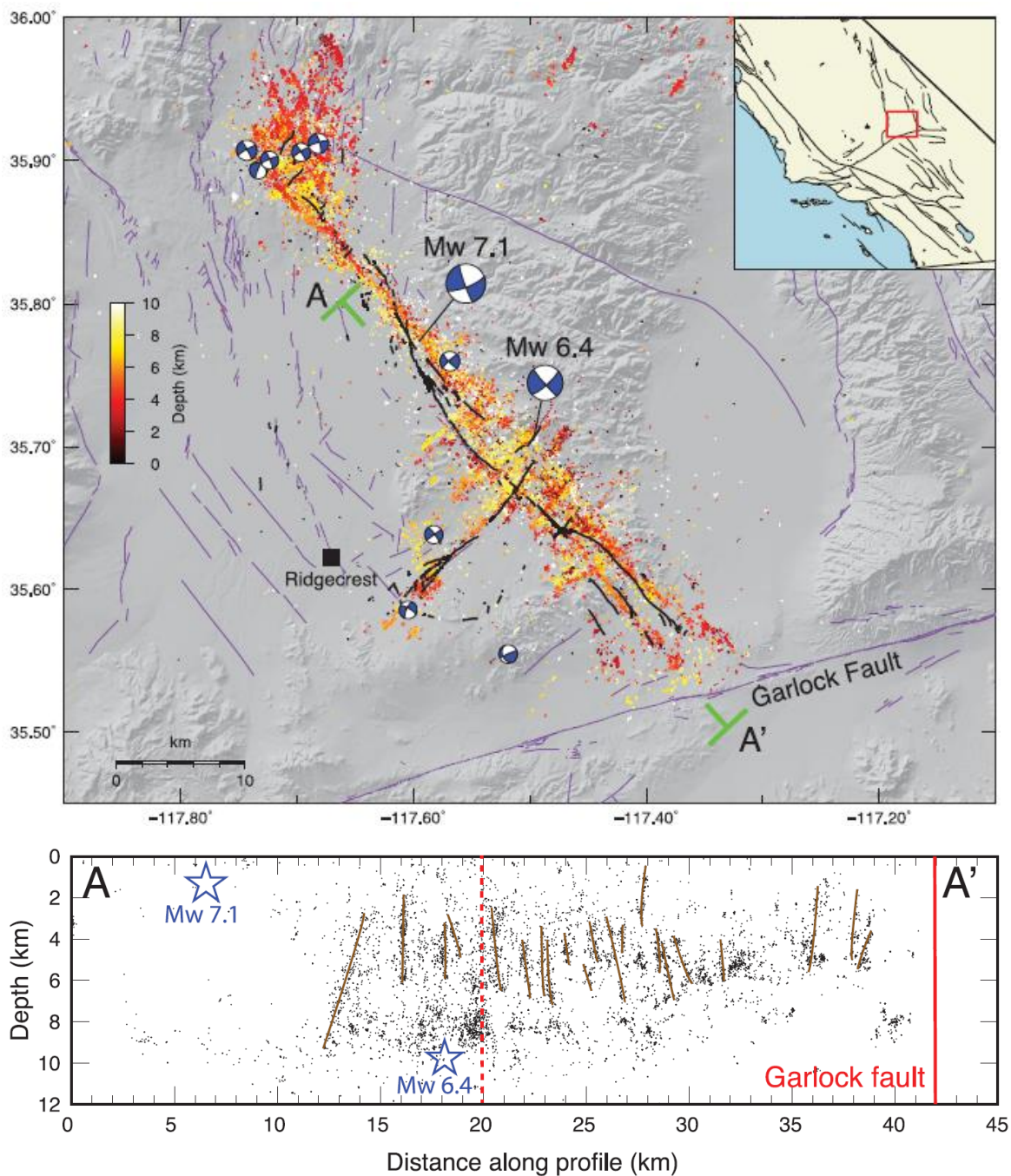


図 2.1.35 リッジレスト地震における震源分布

(上) 黒線は地表断層のトレース (31)、紫線は第四紀断層を示す。Mw4.5 より大きな地震はメカニズム解、それ以下の地震はその深度に応じた色のプロットで表されている。  
 (下) 上図 A-A'における震源の深度分布を表す。赤点線は前震 (Mw6.4) における南西方向の地表断層の位置を示している。

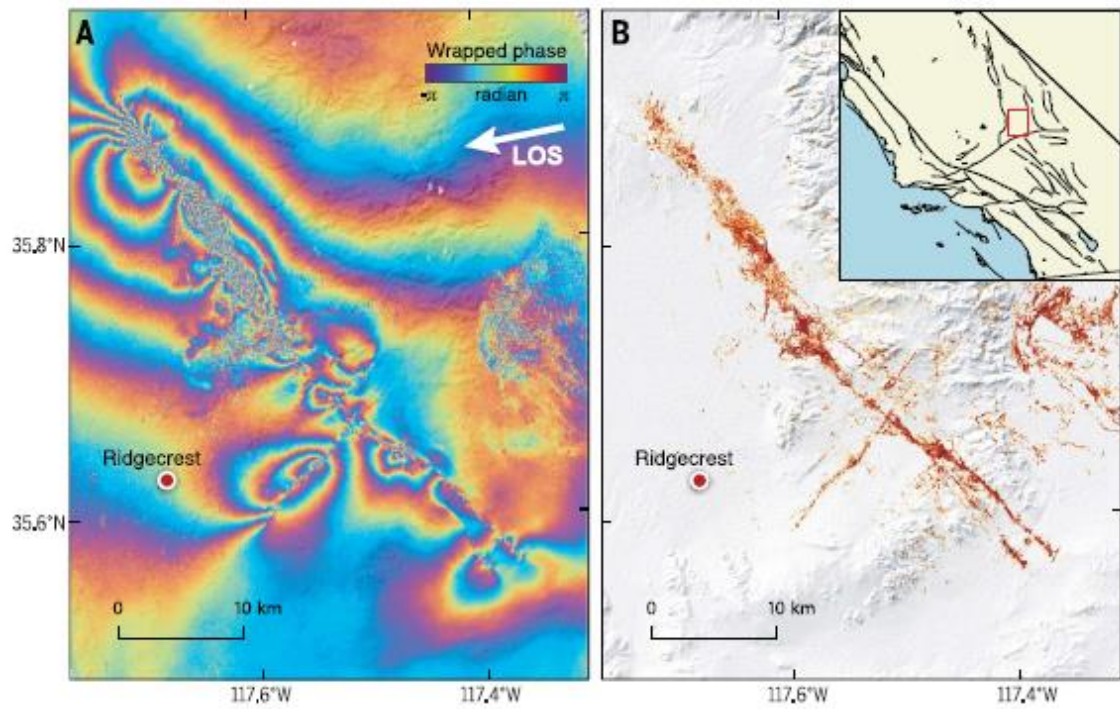


図 2.1.36 地震時の InSAR 画像

(A)軌道は Ascending、期間は 2018/4/16~2019/7/8 である。カラーバーは、赤が衛星へ近づく方向、青が衛星から離れる方向を示す。(B) Sentinel-1 の地震前後の SAR データから求めたコヒーレンスによる DPM の図である。色が濃いほどコヒーレンスが低いことを示す。

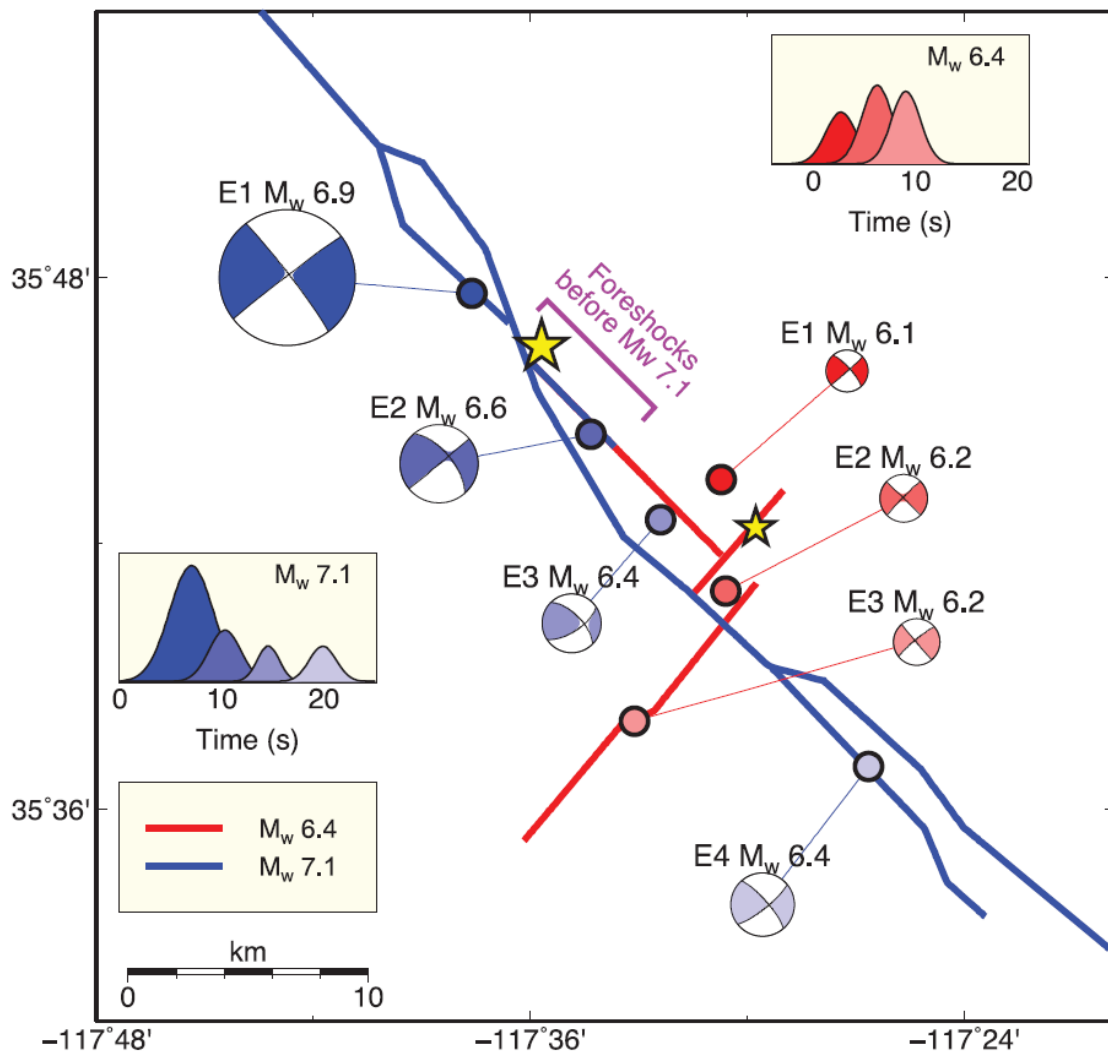


図 2.1.37 リッジレスト地震における断層概略図

それぞれ図中におけるポイントおよびメカニズム解の色が発生順に対応している。



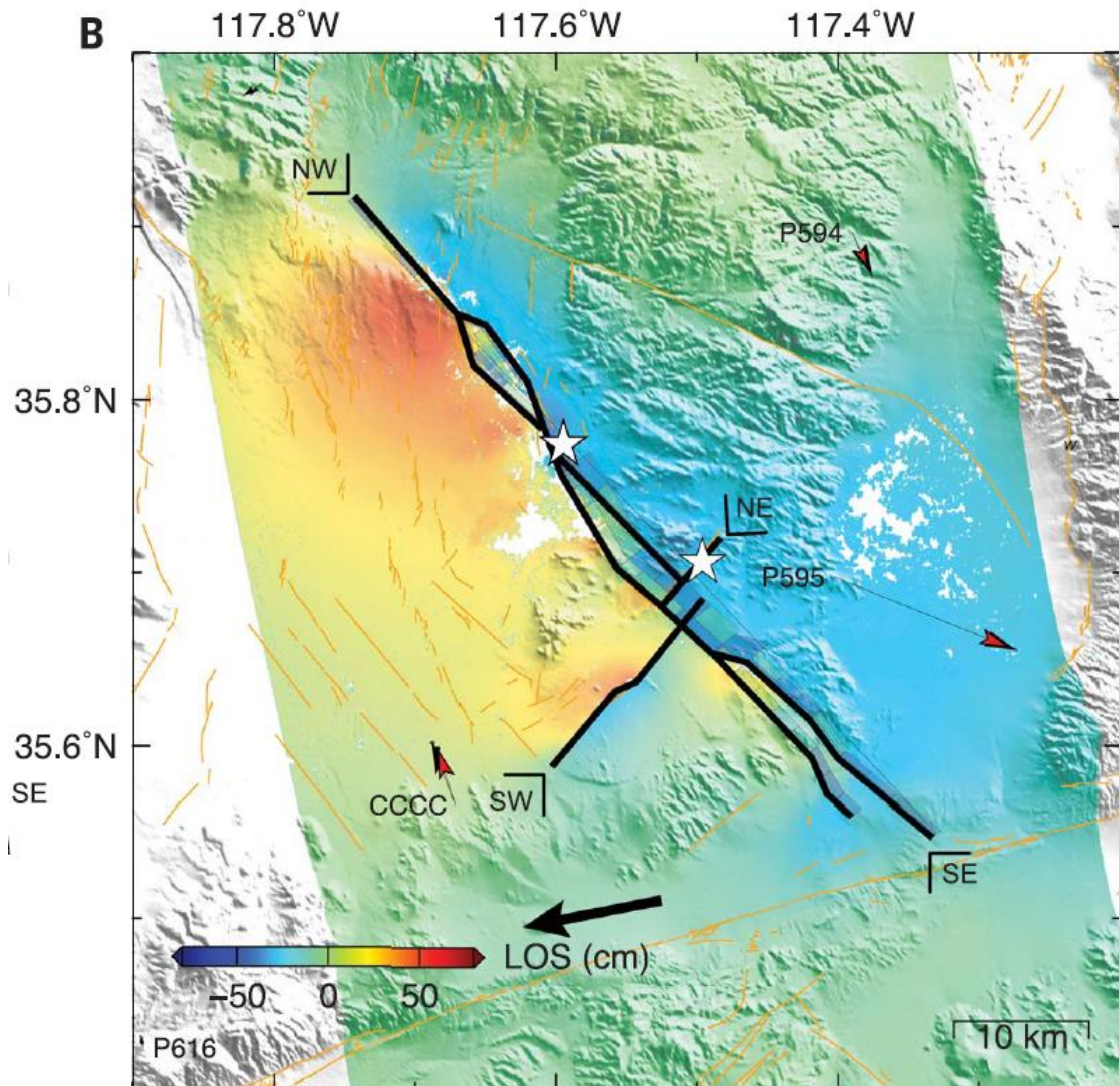


図 2.1.38 GPS データのインバージョン結果

黒矢印は GPS データの観測値、赤矢印はモデル値を示す。背景は Ascending (ALOS-2) 軌道の地震時における LOS 変位値である。赤が衛星へ近づく方向、青が衛星から離れる方向を示す。

### 2.1.3.9. Xiaohua Xu et al. (2020), SRL

この論文では (1)通常の InSAR 画像、(2)地震時の InSAR 画像のスタッキングによる位相勾配、(3)InSAR 画像より求めた 2.5 次元変位を求めている。(2)の結果からは、地震のトリガーとなった Garlock 断層を含む 300 か所以上で地表断層による変位を検出することができた。またハイパスフィルターをかけた(3)の東西変位からは、多くの地表断層が左横ずれと右横ずれの両方の変動を示すことを明らかにした。さらに著者らは、そのうちのいくつかの地表断層の応力は元に戻りつつあると述べている。これは 1999 年に起きた Mw7.1 のヘクターメイン地震に似ているが、今回のリッジレスト地震は Sentinel-1 による鮮明で高解像度な観測データを持ち合わせており、より詳細に地表をとらえることができている。また応力が戻りつつあるという地表断層について、既存の断層を伴ってさらにすべるかどうか、応力変化へ応答する断層変位、あるいはクーロン応力変化については、モデリングなどのさらなる研究が必要である。

図 2.1.39 で示されている赤枠部分の InSAR 画像が図 2.1.40 であり、それぞれ Descending と Ascending の地震時の変動をとらえている。何枚もの画像をスタッキングし(図 2.1.41)、求めた LOS 変位が図 2.1.42 である。著者らはそこから 2.5 次元解析も行い、東西変位と南北および上下変位に分けて変動量を求めている。最後に、それらの結果をまとめ、衛星データより求めた地表断層変位の位置を図 2.1.43 に表している。

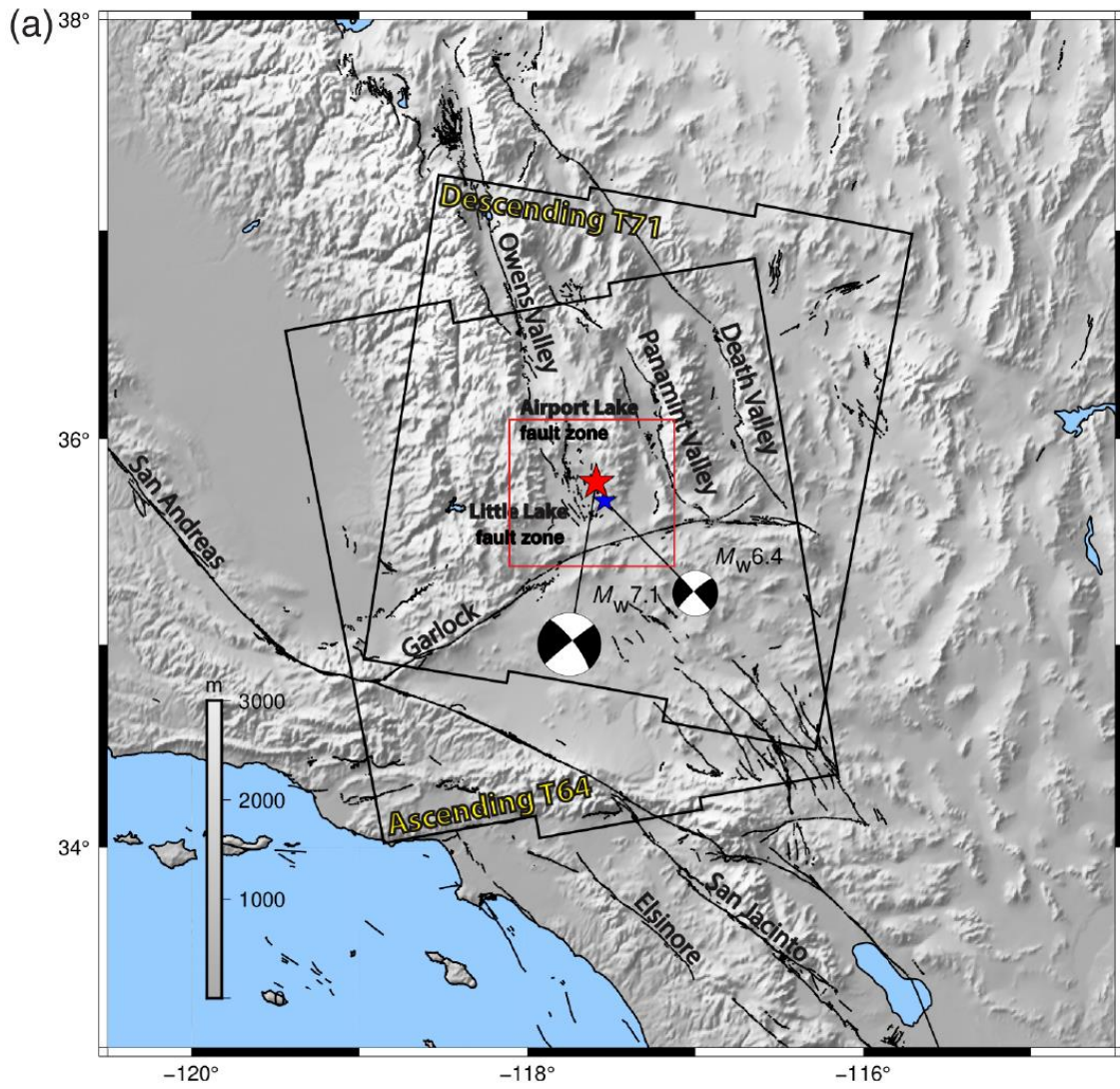


図 2.1.39 (a)対象地域の地形及び断層と SAR 画像の範囲  
赤枠は図 2.1.31 における InSAR 画像の範囲



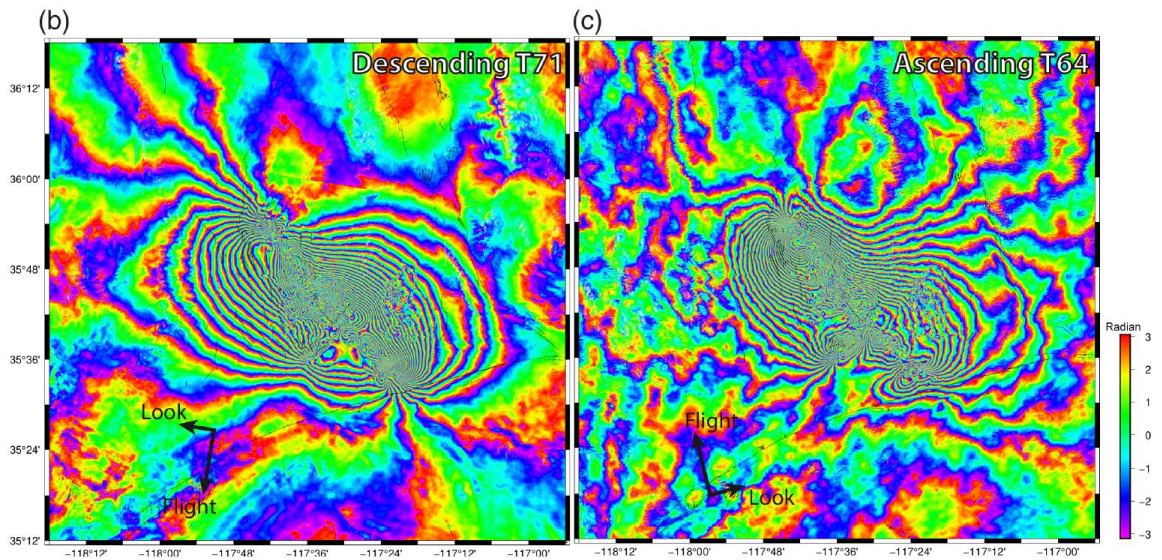


図 2.1.40 (b)Descending, 期間は 2019/7/4~2019/7/16 (c)Ascending, 期間は 2019/7/4~2019/7/10 カラーバーは正が衛星から離れる方向、負が衛星に近づく方向の変動を表す。

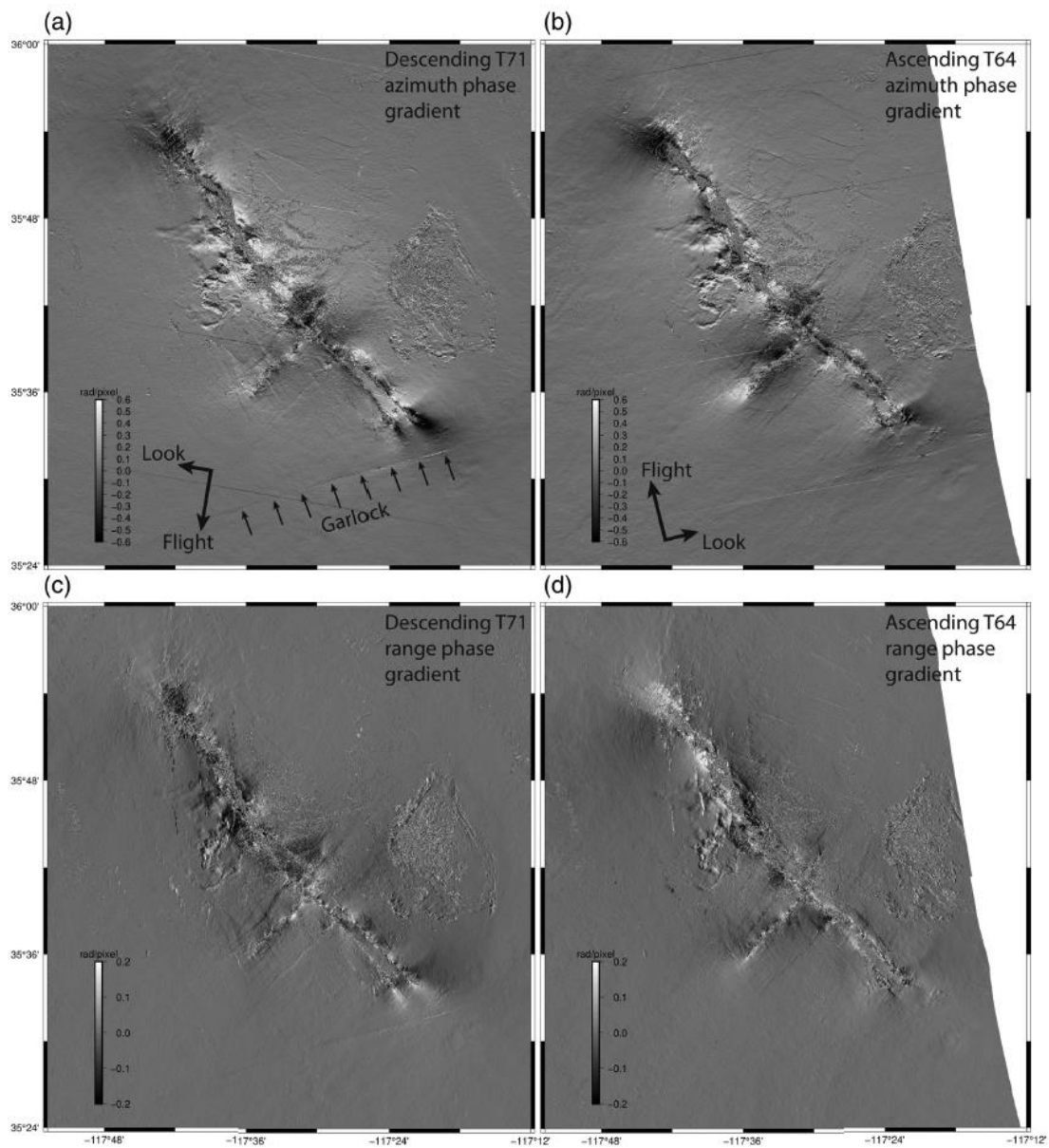


図 2.1.41 スタッキング後の位相勾配  
 (a)(b)がアジマス方向、(c)(d)がレンジ方向となっている。

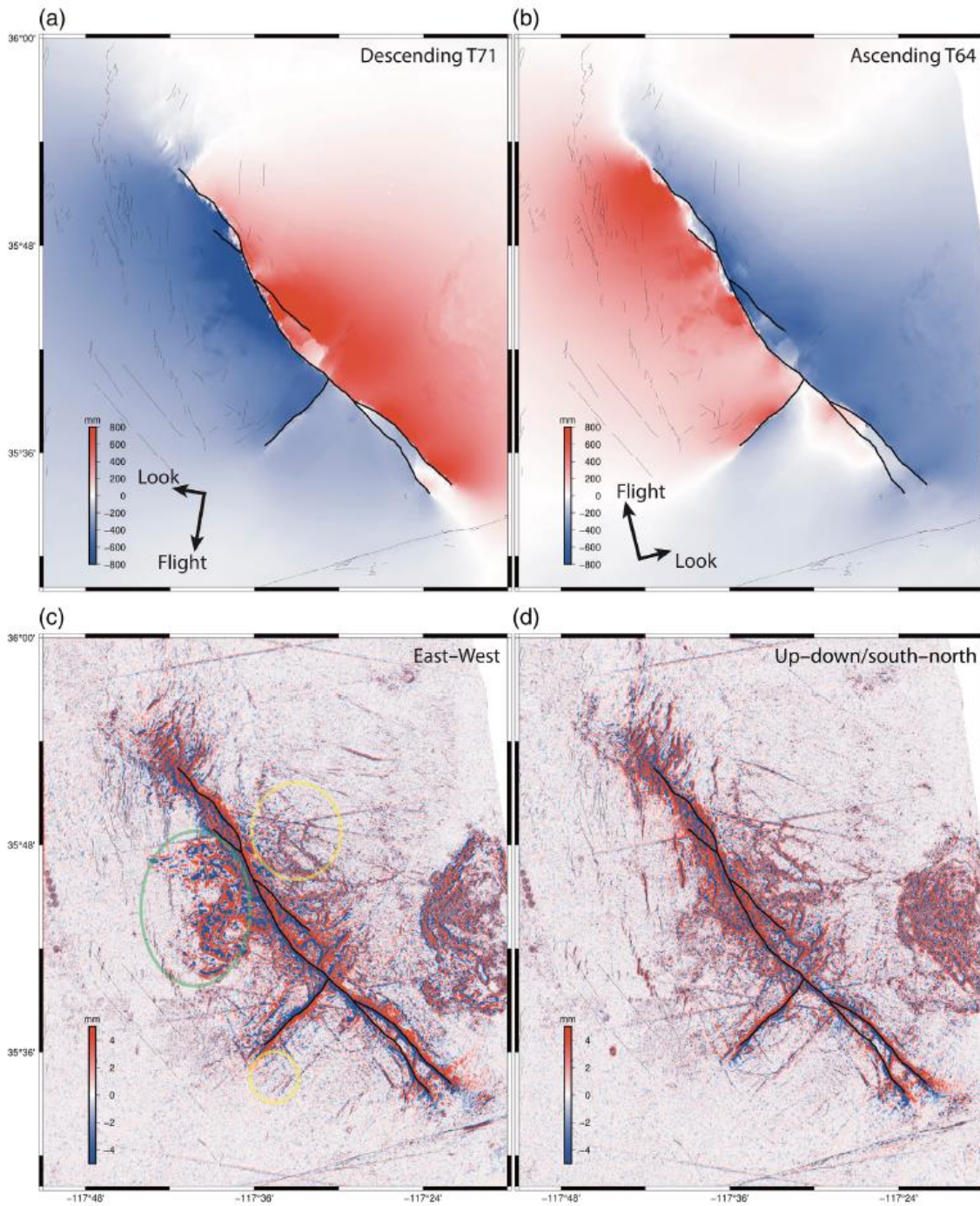


図 2.1.42 スタッキング後の LOS 変位

スタッキングには(a)Ascending に 10 枚、(b)Descending に 4 枚の画像を使用している。青が衛星から離れる方向、赤が衛星へ近づく方向を示している。

(c)(d)は 2.5 次元解析後の結果である。(c)東西方向の変位（東が正） (d)上下方向と南北方向の変位（上および南が正）。緑丸は東西変位が卓越し、黄丸はテクトニックな応力方向とは異なる変位を示す領域である。



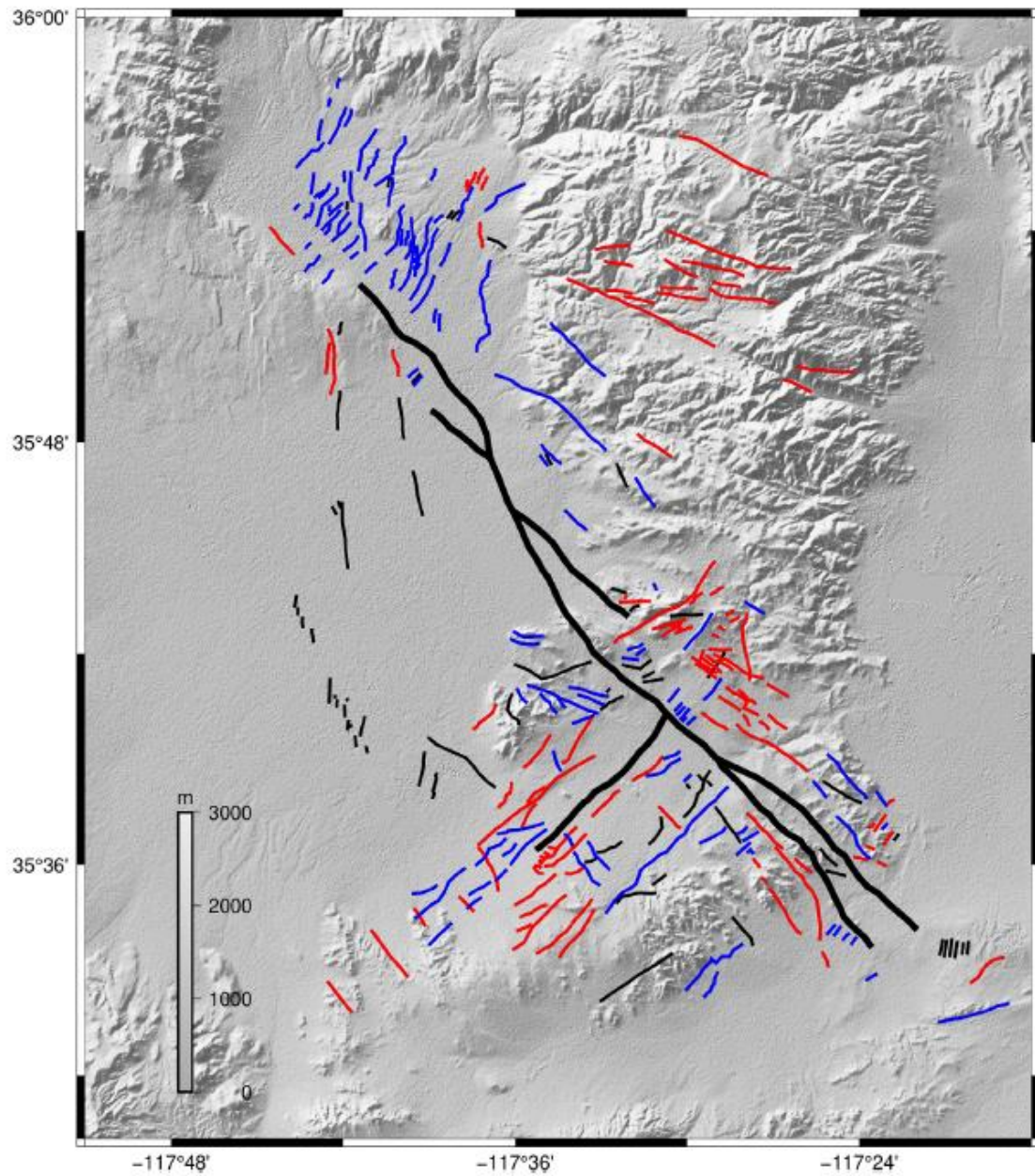


図 2.1.43 InSAR 解析結果より求めた地表断層変位の分布。黒線は主断層および横ずれ変位が卓越していない地表断層を、赤線は右横ずれ断層、青線は左横ずれ断層をそれぞれ示している。

### 2.1.3.10. Kejie Chen et al. (2020), Nature Communications

東カリフォルニアせん断帯は 1872 年に活動を開始した断層帯であるが、近年、ひずみ速度が一時的に増加しているといわれている。この論文では、リッジレスト地震における断層の破壊過程を研究している。著者らは、前震がまず北西の走向で右横ずれに破壊され、次に左横ずれに破壊され地表断層に現れたことを明らかにしている。この前震がトリガーとなり、本震の右横ずれのすべりを発生させている。本震は、前震の地表断層付近のセグメント上において開口のようなずれで始まった。その後、断層破壊は比較的ゆっくりとした速度 (2km/s) で、前震では破壊されなかったセグメントに沿ってパルス状に伝播した。破壊は Coso 火山域と Garlock 断層に妨げられたことにより、周辺の断層を巻き込み、最終的に収束したと考えられる。

Sentinel-1 および Sentinel-2 と Planet Labs の光学画像を解析に使用している。前震と本震を含むような Sentinel-2 の 2 時期画像から相関を取り、数百メートル単位でサンプリングした地表水平変位を推定している (図 2.1.44)。また図 2.1.45 の c では本震に関し、横軸とする全長約 60km の断層において平均  $1.6 \pm 0.22\text{m}$  の右横ずれ変位を示している。垂直変位は  $0.3 \pm 0.15\text{m}$  となっておりかなり小さいため、今回はほぼ水平変位と考えてよい。同様に前震に関しても、~15km 長の断層において平均  $0.55\text{m} \pm 0.08\text{m}$  の左横ずれ変位で、垂直変位は  $0.08 \pm 0.08\text{m}$  となりほぼゼロと考えてよい。またこの論文は GPS の観測結果にも触れており、衛星画像を含む観測データをもとにした断層面上のすべり分布のモデリングへと進んでいる (図 2.1.46)。



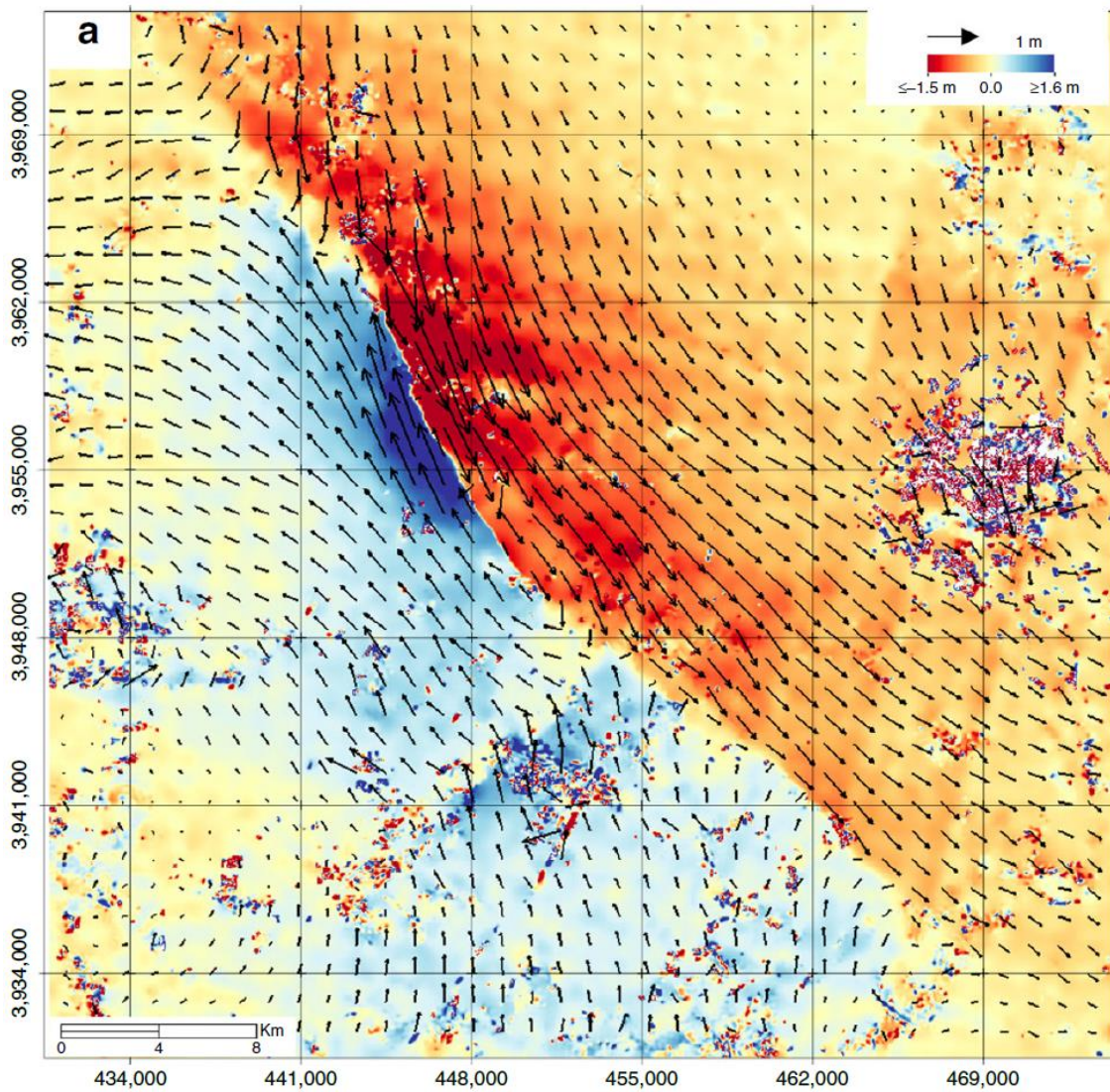


図 2.1.44 光学画像の相関解析より得た地表水平変位  
 矢印は変位ベクトルを示し、色分布は南北方向の振幅を表している。  
 光学画像は Sentinel-2 の 2019/6/28 と 2019/7/8 のデータを使用している。

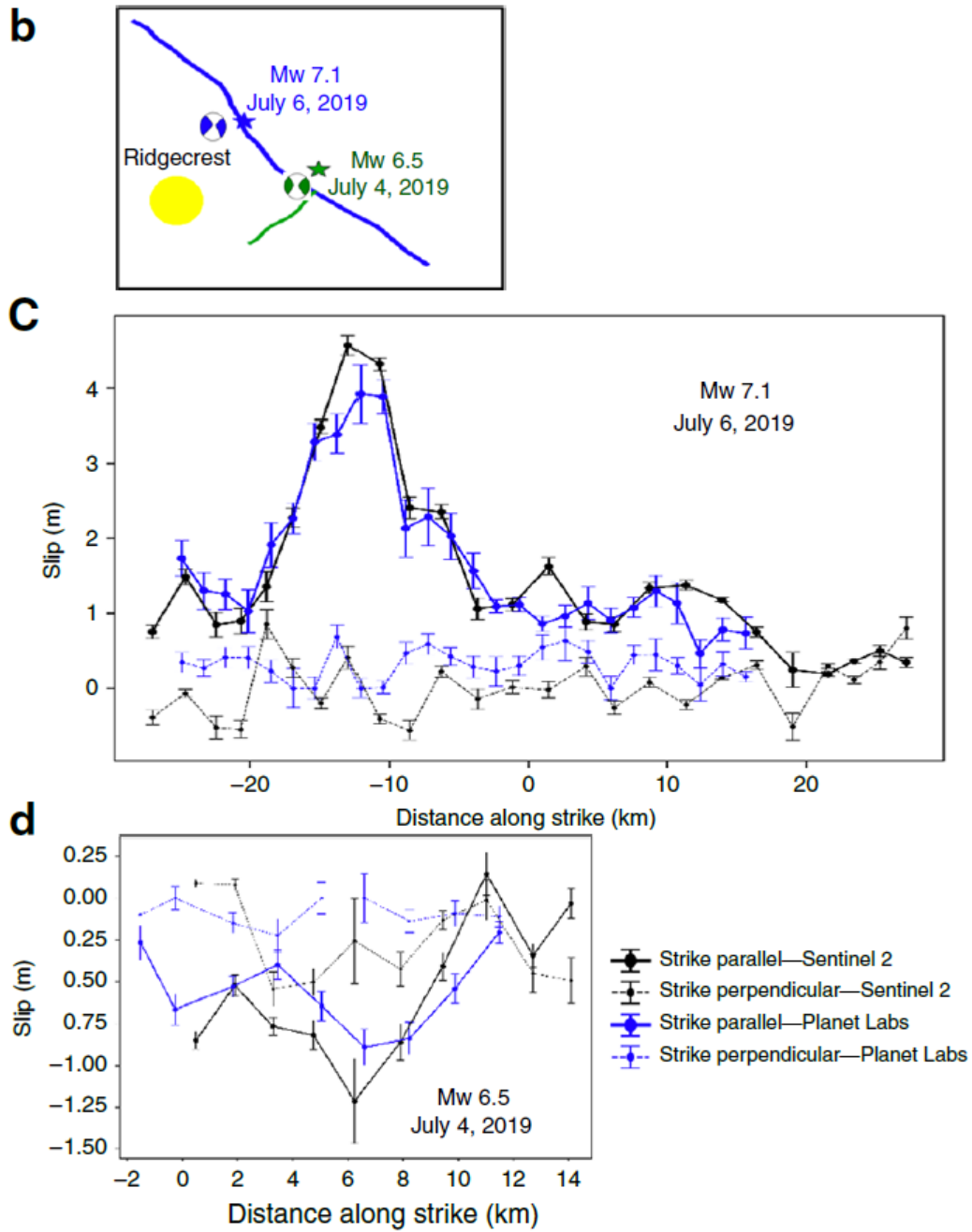


図 2.1.45 Sentinel-1 と Planet Labs データによる比較

(b)地表断層の簡略図。GCMT のメカニズム解を使用している。(c)本震に対し、実線：走向に平行な変位（右横ずれが正）点線：垂直な変位（引張が正）(d)前震に対し、(c)と同様

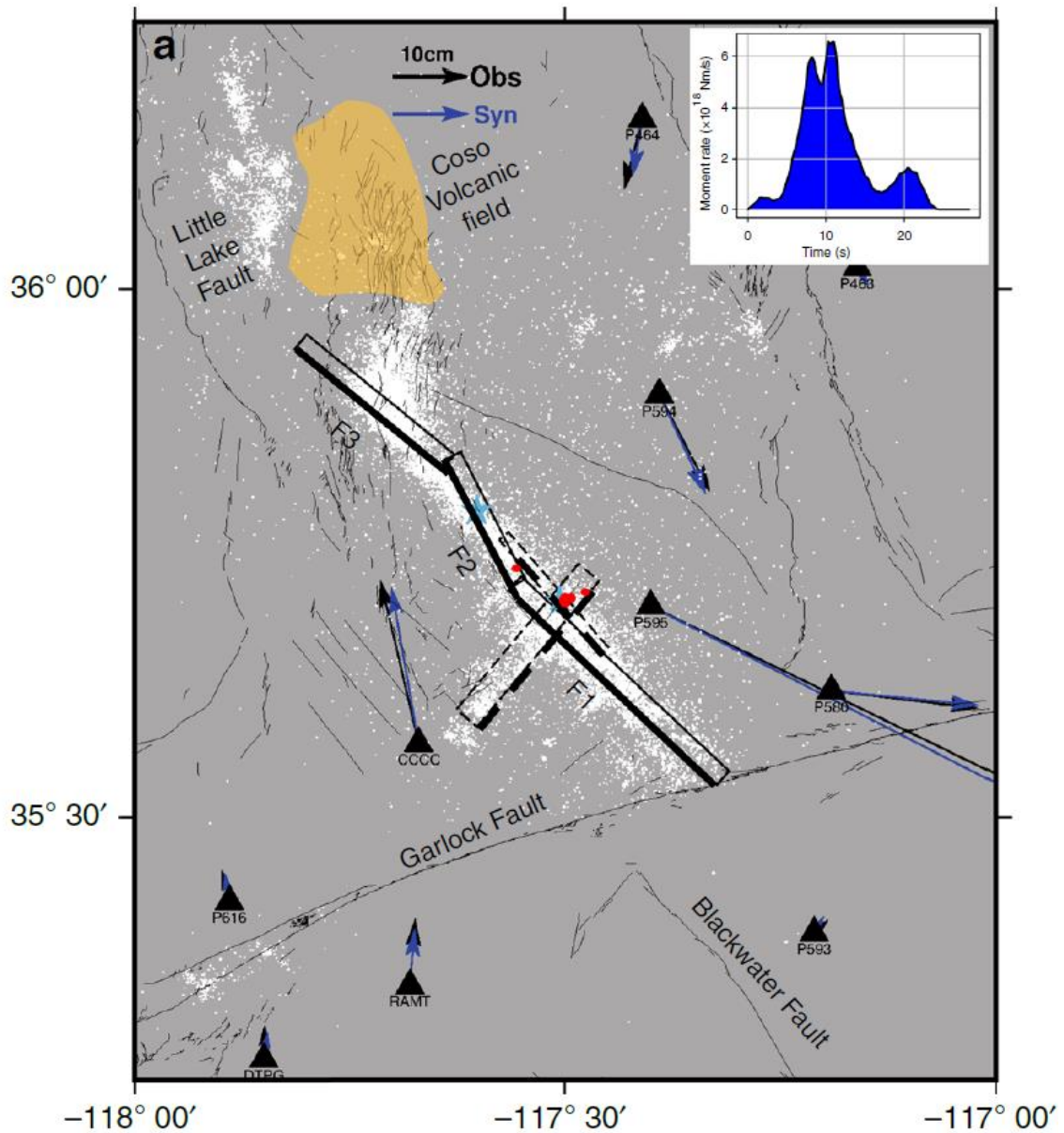


図 2.1.46 地震時の GPS 観測結果

白点は前震後から 2019 年 8 月 1 日までに発生した余震、赤点は前震よりも先に起きた地震を示している。データは Southern California Seismic Network を使用している (<https://scedc.caltech.edu/eq-catalogs/index.html>)。

## 2.1.4. Ridgecrest 地震における変動量分析

### 2.1.4.1. 分析手法の検討

活断層による変動量の分析手法については様々な方法・各種評価式が提案されている。Youngs et.al (2003)では正断層のデータに基づき確率論的断層変位ハザード解析手法 (PFDHA 手法) が提案されている。日本国内においても、高尾ほか (2013) により日本の逆断層および横ずれ断層のデータに対して PFDHA 手法を適用し、断層変位評価式を策定している。また、高尾ほか (2014) では、格子寸法依存性の検討による日本のデータを用いた整理 (図 2.1.47~図 2.1.48)、模型実験および個別要素法による数値解析結果の評価式への追加 (図 2.1.49) を行い、PFDHA 手法の信頼性向上を図っている。

本検討においては、高尾 (2014) を参考に、Ridgecrest 地震による変位量の公表データを用いて、主断層からの距離 (m) と副断層の変位量/主断層の最大変位量 (DD/PMD) の分析を行うことにした。

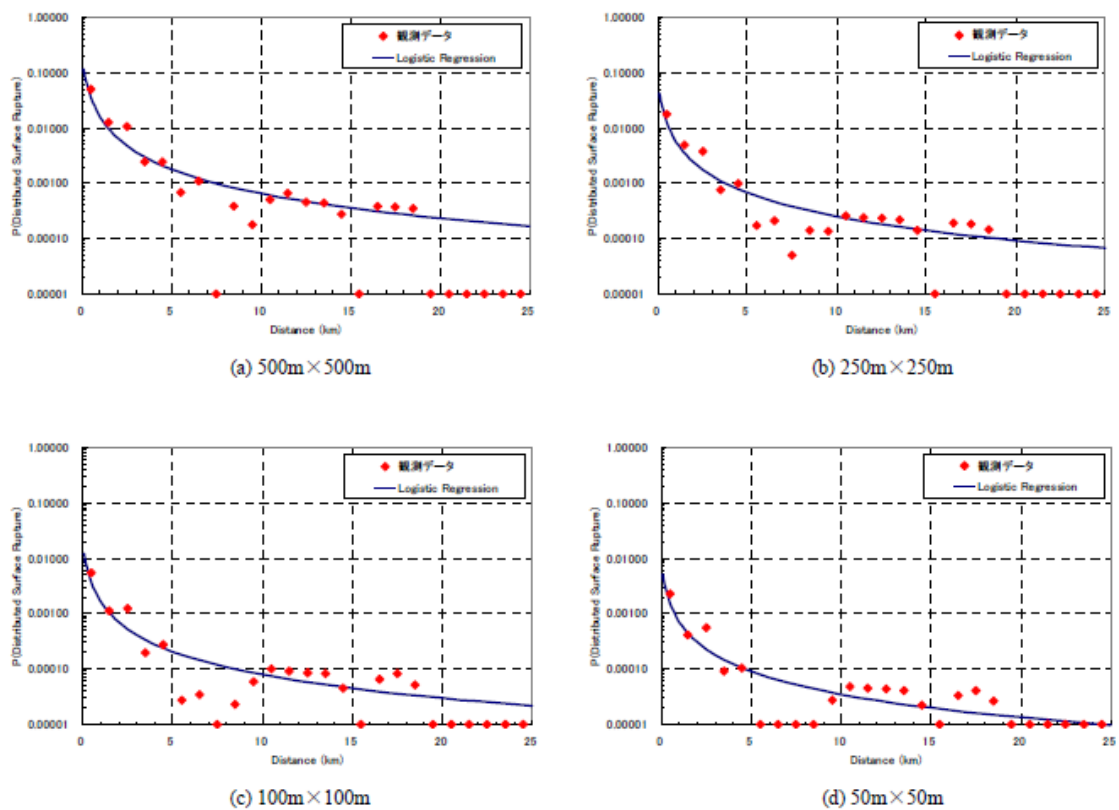


図 2.1.47 格子寸法依存性の分析結果 (全データ) [高尾ほか,2014 抜粋]



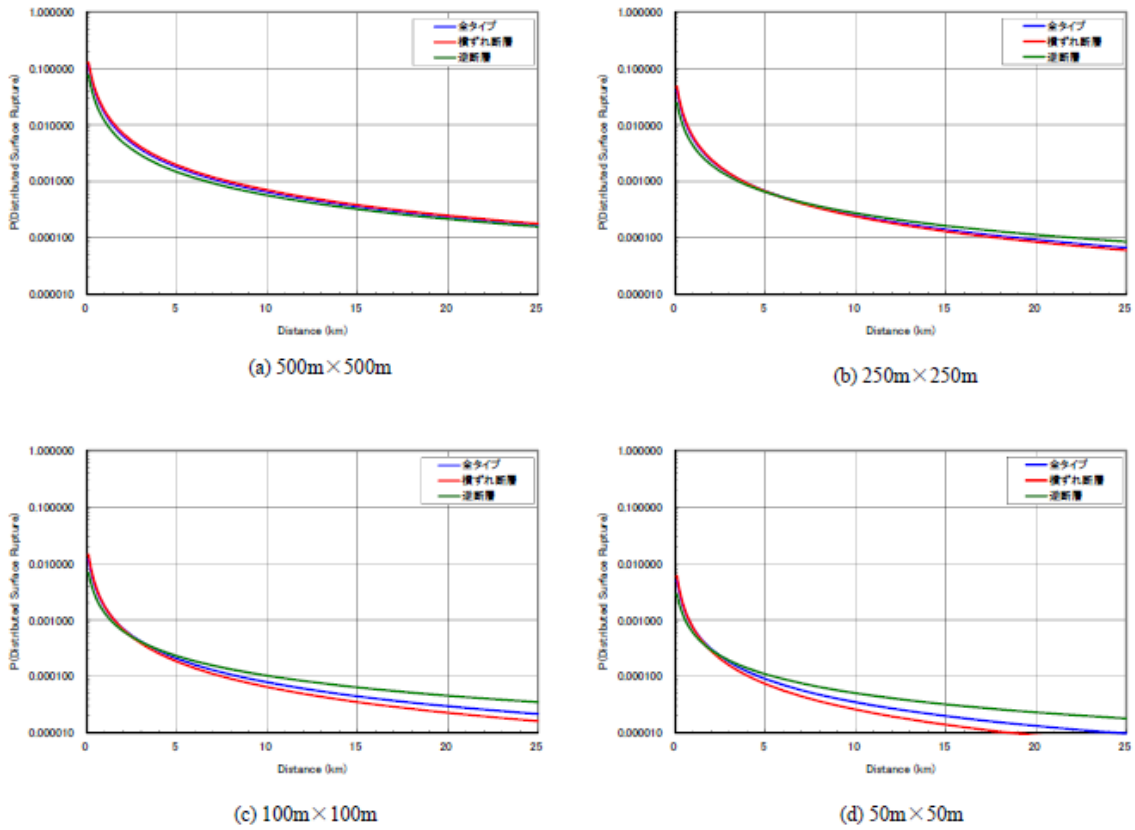


図 2.1.48 格子寸法依存性の分析結果（断層タイプ別） [高尾ほか,2014 抜粋]

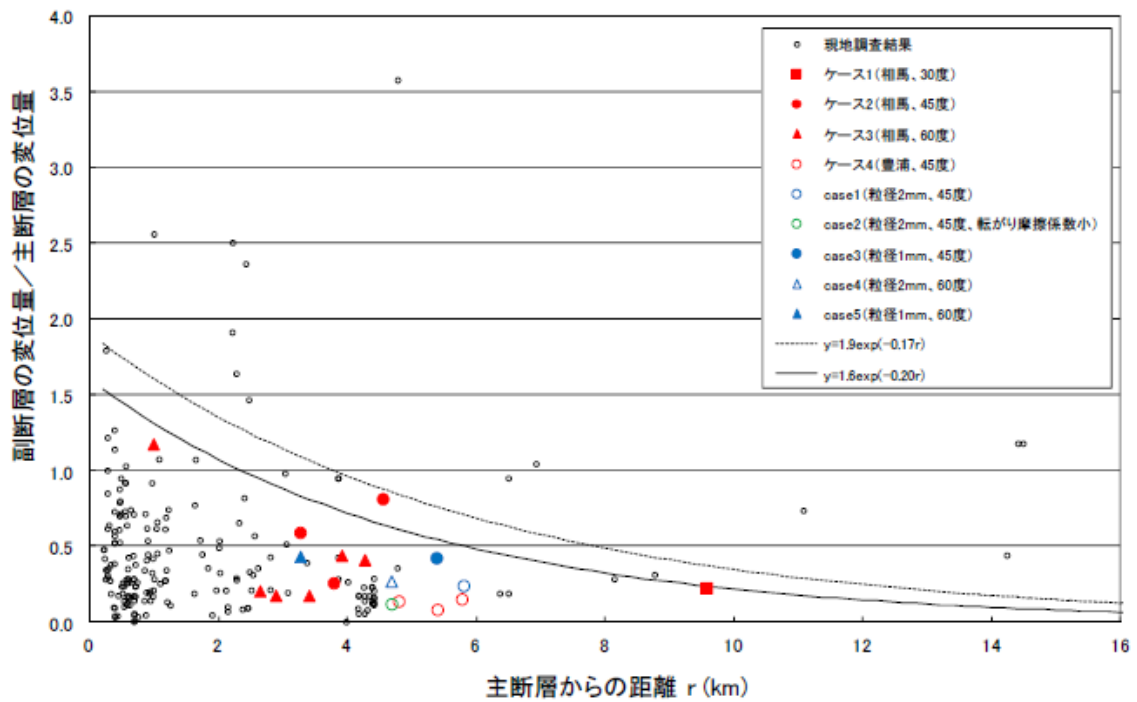


図 2.1.49 解析結果と実験結果・現地調査結果の比較 [高尾ほか,2014 抜粋]



#### 2.1.4.2. 既往データ収集整理

収集した既往データは USGS の Science Base-catalog 「Surface Displacement Observations of the 2019 Ridgecrest, California Earthquake Sequence」 として整理されている以下のデータ群である。本検討においては、以下のデータ群を用いて断層形状を「rupturetrace\_v4.kml」から、M7.1 の地震における断層変位データを「M7.1\_surface\_displacement\_v5.txt」から抽出した。抽出データを次ページより示す。

- Ridgecrest\_readme.rtf
- Surface Displacement Observations of the 2019 Ridgecrest, California Earthquake SequenceReview.xml
- Ridgecrest\_thumbnail.png
- rupturetrace\_v4.kml
- M6.4\_surface\_displacement\_v1.txt
- M7.1\_surface\_displacement\_v5.txt

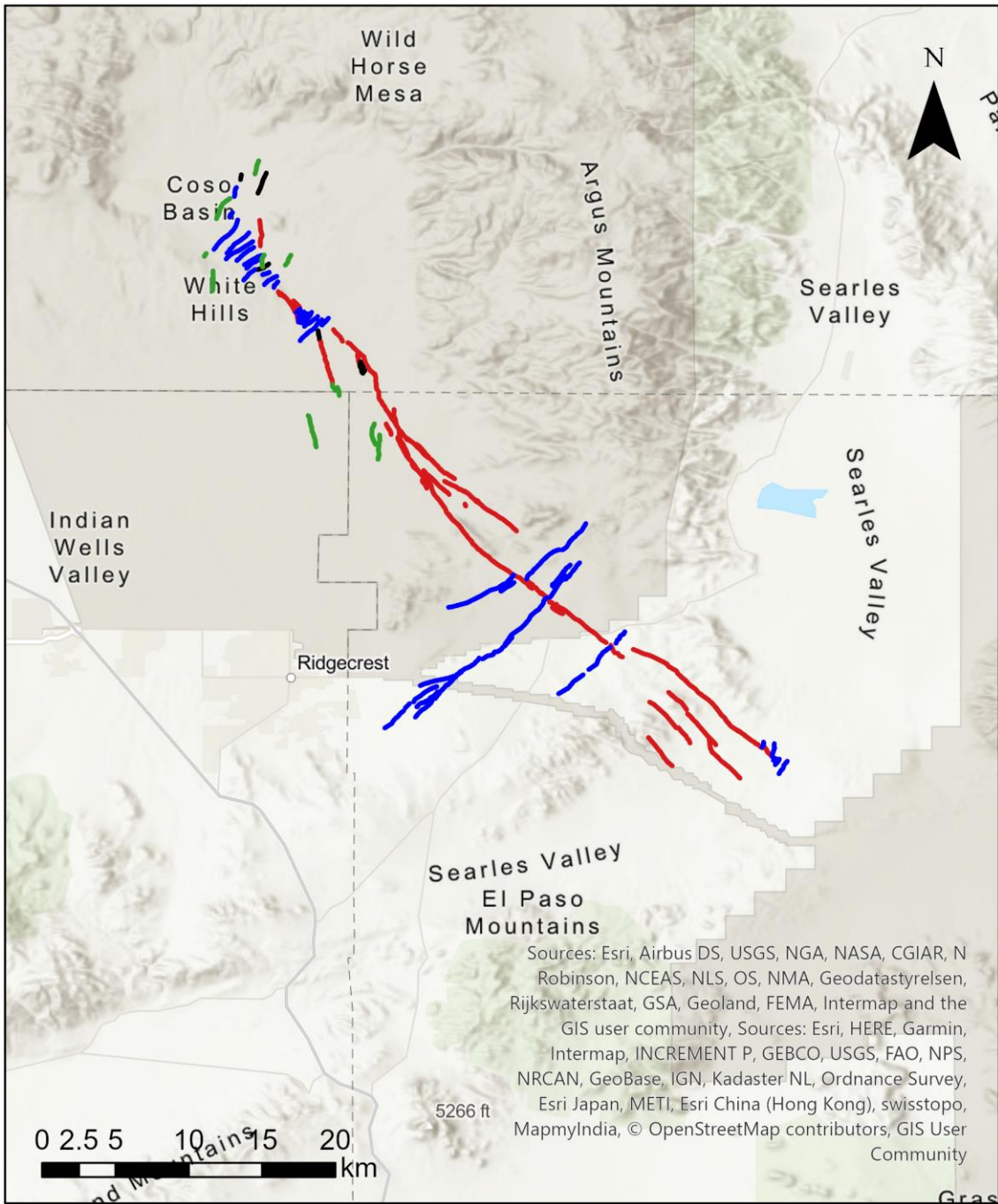


図 2.1.50 kml ファイルの表示

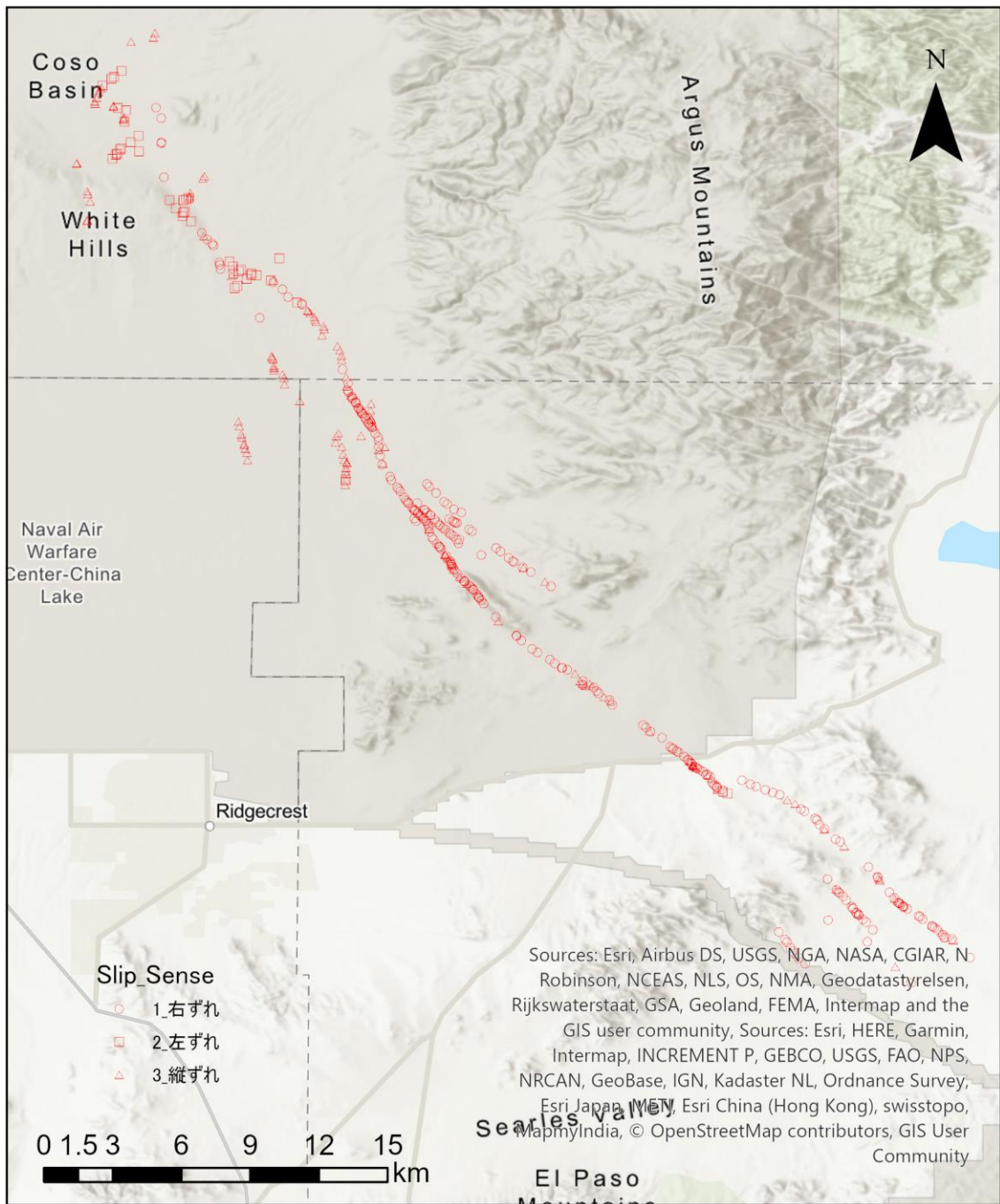


図 2.1.51 M7.1 変位量データが取得されている位置

表 2.1.5 M7.1 変位量データ (1/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 3          | 2      | 391        | NaN            | NaN           | 0           | NaN         | 0          | NaN         | 3976326.75 | 436881.5938 | 123.6499198 |
| 3          | 1      | 189        | NaN            | NaN           | 0           | NaN         | 0          | NaN         | 3965939.25 | 441848.75   | 11268.39845 |
| 3          | 4      | 238        | NaN            | NaN           | 0           | NaN         | 0          | NaN         | 3958141    | 440882.2813 | 16610.06769 |
| 1          | 11     | 121        | NaN            | NaN           | 0           | 0           | 0          | 0           | 3935326    | 464311.7813 | 49153.78331 |
| 1          | 1      | 117        | NaN            | NaN           | 0           | 0           | 0          | 0           | 3936418.25 | 466410.3125 | 49670.37289 |
| 3          | 4      | 155        | 2              | NaN           | 0           | 0.5         | 8          | 1           | 3959818.5  | 440573.875  | 15128.3285  |
| 3          | 4      | 161        | 2              | NaN           | 0           | 0.5         | 11         | 0.5         | 3958462    | 440857.2188 | 16348.36619 |
| 3          | 4      | 160        | 2              | 4             | 0           | 0.5         | 12         | 0.5         | 3958642.5  | 440806.8438 | 16178.04266 |
| 3          | 2      | 96         | 2              | 35            | 0           | 2           | 15         | 3           | 3973913.75 | 435642.4375 | 1171.008175 |
| 3          | 2      | 201        | 2              | NaN           | 0           | NaN         | 16         | NaN         | 3972993.5  | 436594.5938 | 2488.234553 |
| 3          | 5      | 175        | 2              | NaN           | 0           | 0.5         | 17         | 0.5         | 3957046.75 | 444336.6875 | 19672.47541 |
| 3          | 1      | 227        | 2              | 300           | 0           | NaN         | 17.5       | 14          | 3964127.25 | 443361.125  | 13628.61975 |
| 3          | 6      | 135        | NaN            | NaN           | 0           | 10          | 19         | 10          | 3959532.5  | 445354.125  | 18426.79376 |
| 3          | 2      | 200        | NaN            | NaN           | 0           | NaN         | 25         | NaN         | 3973057.75 | 436615.8125 | 2452.73587  |
| 3          | 4      | 159        | 2              | NaN           | 0.5         | 0.5         | 5          | 0.5         | 3958852.75 | 440768.1563 | 15992.20663 |
| 3          | 4      | 451        | 2              | NaN           | 0.5         | 0.5         | 5          | NaN         | 3958792    | 440769.4375 | 16039.52725 |
| 1          | 10     | 349        | NaN            | NaN           | 0.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3936176.5  | 460555.7813 | 46083.5147  |
| 2          | 2      | 192        | NaN            | 35            | 1           | 2           | 0          | 1           | 3975057.75 | 436542.0625 | 875.4747046 |
| 3          | 2      | 196        | 2              | 1.2           | 1           | 1           | 6          | 5           | 3974270.25 | 435779.7813 | 986.6893301 |
| 3          | 2      | 197        | 2              | 1.1           | 1           | 2           | 8          | 3           | 3974122.75 | 435723.7813 | 1063.487937 |
| 3          | 2      | 398        | 2              | 167           | 1           | 1           | 8          | NaN         | 3969404.5  | 435386.1875 | 4454.662125 |
| 2          | 2      | 93         | 2              | 10            | 1           | 1           | 14         | 2           | 3973346.5  | 436679.3438 | 2272.70442  |
| 3          | 3      | 151        | 1              | 4             | 1           | 1           | 18         | NaN         | 3962038.75 | 441857.6875 | 14257.28226 |
| 1          | 8      | 173        | NaN            | 10            | 1           | 1           | NaN        | NaN         | 3954478.5  | 448341.6875 | 24216.84037 |
| 1          | 1      | 379        | NaN            | NaN           | 1           | NaN         | NaN        | NaN         | 3943823    | 457463.6563 | 38243.23054 |
| 1          | 1      | 378        | NaN            | NaN           | 1           | 1           | NaN        | NaN         | 3943734.25 | 457617.5    | 38410.20085 |
| 3          | 6      | 136        | 2              | 17            | 1.5         | 0.5         | 2.5        | 2.5         | 3960563.25 | 445276.9063 | 17588.69144 |
| 3          | 2      | 393        | 2              | NaN           | 1.5         | 1.5         | 3          | NaN         | 3976696.75 | 437726.9375 | 385.2611468 |
| 3          | 2      | 392        | 2              | NaN           | 1.5         | 1.5         | 3          | NaN         | 3976503.75 | 437671.4375 | 497.1240849 |
| 3          | 4      | 158        | 2              | NaN           | 1.5         | 1           | 15         | 2           | 3959128    | 440695.5938 | 15734.85244 |
| 2          | 1      | 416        | NaN            | NaN           | 1.5         | 0.5         | NaN        | NaN         | 3966885    | 442069.9063 | 10687.51598 |
| 2          | 1      | 188        | NaN            | NaN           | 1.5         | 0.5         | NaN        | NaN         | 3964962.25 | 442680.4063 | 12551.31352 |
| 2          | 2      | 194        | 2              | 5             | 2           | 0.5         | 0.5        | 1           | 3974720    | 436181.625  | 901.6718988 |
| 2          | 5      | 176        | 2              | NaN           | 2           | 0.5         | 1.5        | 0.5         | 3957225.75 | 444356.1875 | 19548.05295 |
| 3          | 2      | 401        | 2              | NaN           | 2           | 1           | 3          | 1           | 3970475    | 439437.5938 | 6246.019939 |
| 3          | 11     | 343        | NaN            | NaN           | 2           | 0.5         | 3.5        | 1           | 3936038.75 | 463756.5938 | 48250.91677 |
| 3          | 5      | 181        | 1              | 2             | 2           | 0.5         | 6          | 0.5         | 3959290    | 444102.3438 | 17805.85345 |
| 2          | 1      | 384        | NaN            | NaN           | 2           | NaN         | NaN        | NaN         | 3943573.5  | 457830.0938 | 38670.06981 |
| 1          | 1      | 438        | NaN            | NaN           | 2           | 1           | NaN        | NaN         | 3943514.25 | 459680.2188 | 39907.28637 |
| 1          | 10     | 346        | NaN            | NaN           | 2           | NaN         | NaN        | NaN         | 3936422.5  | 460318.0313 | 45742.2195  |
| 3          | 5      | 177        | 2              | NaN           | 2.2         | 0.2         | 6          | 0.5         | 3957271.5  | 444375.0625 | 19525.29368 |
| 2          | 2      | 193        | 2              | 0.75          | 2.5         | 1           | 1.5        | 1           | 3974797    | 436271.5938 | 900.752537  |
| 1          | 1      | 381        | NaN            | 0.5           | 2.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3943896    | 457432      | 38166.8916  |
| 1          | 1      | 380        | NaN            | 3             | 2.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3943845.25 | 457445.2188 | 38214.3707  |
| 1          | 11     | 450        | NaN            | NaN           | 2.5         | 1           | NaN        | NaN         | 3939842.5  | 461361.1875 | 43798.60684 |
| 1          | 10     | 350        | NaN            | 3             | 2.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3937562    | 459619.5313 | 44420.75319 |
| 1          | 10     | 344        | NaN            | NaN           | 2.5         | 0.5         | NaN        | NaN         | 3936868.25 | 460032.9375 | 45217.59445 |
| 1          | 10     | 348        | NaN            | 30            | 2.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3936616    | 460184.375  | 45508.14365 |
| 2          | 1      | 9          | NaN            | NaN           | 3           | 1           | 0          | NaN         | 3966172    | 441056.375  | 10579.9657  |
| 3          | 1      | 16         | 2              | 500           | 3           | 2           | 66         | 11          | 3963536.75 | 443556.7813 | 14206.33093 |
| 2          | 2      | 206        | NaN            | NaN           | 3           | NaN         | NaN        | NaN         | 3971257.75 | 436182.8125 | 3550.550874 |
| 2          | 1      | 224        | NaN            | NaN           | 3           | 1           | NaN        | NaN         | 3966150    | 441259.6875 | 10727.77905 |
| 2          | 1      | 40         | NaN            | NaN           | 3           | NaN         | NaN        | NaN         | 3943653    | 457661.3125 | 38500.47836 |
| 1          | 11     | 370        | NaN            | NaN           | 3.5         | 0.5         | 0          | NaN         | 3937633.25 | 462960.375  | 46518.48002 |
| 3          | 2      | 195        | 2              | 1.6           | 3.5         | 1           | 6.5        | 2           | 3974339    | 435820.8438 | 960.5378855 |
| 1          | 2      | 205        | NaN            | 1             | 4           | NaN         | 3          | 1           | 3973456    | 437746.0938 | 2876.291548 |
| 2          | 2      | 85         | NaN            | NaN           | 4           | NaN         | NaN        | NaN         | 3968894.75 | 438682.9375 | 6968.342223 |
| 1          | 10     | 351        | NaN            | NaN           | 4           | NaN         | NaN        | NaN         | 3937221.75 | 459834.7188 | 44819.56185 |
| 1          | 99     | 347        | NaN            | NaN           | 4           | NaN         | NaN        | NaN         | 3938064.5  | 461376.5313 | 45168.24874 |
| 1          | 10     | 353        | NaN            | NaN           | 4           | NaN         | NaN        | NaN         | 3936731    | 460110.2188 | 45372.28024 |
| 1          | 10     | 352        | NaN            | NaN           | 4.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3937119    | 459911.5938 | 44947.7218  |
| 3          | 2      | 94         | 2              | NaN           | 5           | NaN         | 10.5       | 0.5         | 3973512.25 | 436239.0625 | 1862.276529 |
| 1          | 1      | 409        | NaN            | NaN           | 5           | 5           | NaN        | NaN         | 3948328.25 | 452711.8125 | 31736.05958 |
| 2          | 2      | 203        | NaN            | NaN           | 5.5         | 0.5         | 3          | NaN         | 3972851.25 | 436630.1875 | 2619.979224 |
| 1          | 1      | 365        | NaN            | NaN           | 6           | 0.5         | 0          | NaN         | 3937299    | 465550.25   | 48442.56582 |
| 3          | 5      | 178        | 2              | NaN           | 6           | 1           | 18.5       | 1           | 3957509.25 | 444389.0625 | 19352.52564 |
| 2          | 1      | 225        | NaN            | NaN           | 6           | 2           | NaN        | NaN         | 3965925    | 441763.1563 | 11224.10072 |
| 1          | 11     | 374        | NaN            | NaN           | 6           | 2           | NaN        | NaN         | 3938367.25 | 462396.4063 | 45593.70173 |
| 2          | 1      | 222        | NaN            | 1.5           | 6.5         | NaN         | 1          | NaN         | 3965609.75 | 440477.4375 | 10636.97986 |
| 1          | 7      | 302        | NaN            | 1.5           | 6.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955822.25 | 448445.3438 | 23255.95276 |

表 2.1.6 M7.1 変位量データ (2/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 1          | 11     | 342        | NaN            | NaN           | 7           | 1.5         | 1.5        | 0.5         | 3937118.75 | 462763.375  | 46785.1072  |
| 3          | 5      | 261        | 1              | 220           | 7           | 2           | 15.5       | 12          | 3958137.5  | 444308.6875 | 18820.18645 |
| 3          | 1      | 226        | 2              | 150           | 7           | 2           | 29.5       | 7           | 3964214.5  | 443316.6875 | 13533.20413 |
| 3          | 3      | 148        | NaN            | 10            | 7           | NaN         | 50         | NaN         | 3962524.5  | 441816.5938 | 13859.37294 |
| 2          | 2      | 216        | NaN            | NaN           | 7           | 2           | NaN        | NaN         | 3969084.75 | 438419.9688 | 6653.732858 |
| 2          | 2      | 217        | NaN            | NaN           | 7           | 2           | NaN        | NaN         | 3968508.5  | 438955.4688 | 7439.309155 |
| 3          | 6      | 234        | NaN            | 5             | 7.5         | 7.5         | 18         | NaN         | 3959907.5  | 445280.2813 | 18092.43624 |
| 1          | 1      | 387        | NaN            | NaN           | 8           | 5           | 7          | 2           | 3944395.5  | 457132.1875 | 37591.71732 |
| 3          | 5      | 263        | NaN            | NaN           | 8           | 1           | 10         | 0.5         | 3957981.25 | 444401.8125 | 18999.69074 |
| 2          | 2      | 199        | NaN            | NaN           | 8           | NaN         | NaN        | NaN         | 3973447    | 436407.625  | 2020.962529 |
| 2          | 2      | 86         | NaN            | NaN           | 8           | NaN         | NaN        | NaN         | 3969424.5  | 438686.5    | 6565.557282 |
| 1          | 8      | 174        | NaN            | NaN           | 8           | NaN         | NaN        | NaN         | 3954642    | 448369.8438 | 24109.92551 |
| 2          | 2      | 80         | NaN            | NaN           | 8.5         | 1.5         | NaN        | NaN         | 3969432.75 | 438195.5938 | 6242.981856 |
| 2          | 2      | 84         | NaN            | NaN           | 8.5         | 1.5         | NaN        | NaN         | 3968737.5  | 438652.0938 | 7068.848534 |
| 2          | 1      | 7          | NaN            | NaN           | 8.5         | NaN         | NaN        | NaN         | 3966558.25 | 440416.4375 | 9872.286866 |
| 3          | 5      | 179        | 2              | NaN           | 9           | 2           | 20         | 2           | 3957650    | 444364.3125 | 19228.9581  |
| 1          | 1      | 41         | NaN            | 5             | 9           | 2           | NaN        | NaN         | 3944144    | 458341.2813 | 38563.14378 |
| 2          | 2      | 95         | NaN            | 8             | 10          | 3           | 3          | 1           | 3974423.75 | 435864.4688 | 924.000436  |
| 3          | 1      | 15         | 2              | 50            | 10          | 5           | 17         | 5           | 3964327.75 | 443294.75   | 13432.46521 |
| 3          | 1      | 14         | 2              | 15            | 10          | 4           | 25         | 6           | 3964626.5  | 443048.1563 | 13045.13171 |
| 2          | 2      | 92         | NaN            | 10            | 10          | NaN         | NaN        | NaN         | 3972237.25 | 437125.5    | 3408.679911 |
| 2          | 2      | 83         | NaN            | NaN           | 10          | NaN         | NaN        | NaN         | 3968934.75 | 438739.8125 | 6974.440948 |
| 2          | 1      | 415        | NaN            | NaN           | 10          | 3           | NaN        | NaN         | 3966001    | 440909.7813 | 10616.28328 |
| 1          | 9      | 303        | NaN            | NaN           | 10          | NaN         | NaN        | NaN         | 3955546.75 | 448015.4688 | 23189.63447 |
| 1          | 11     | 377        | NaN            | NaN           | 10          | 10          | NaN        | NaN         | 3939243.75 | 461785.2188 | 44529.54011 |
| 2          | 2      | 91         | 2              | 9             | 10.1999998  | NaN         | 7.5        | NaN         | 3971959.5  | 436837.4375 | 3435.509929 |
| 1          | 1      | 10         | 1              | 100           | 11          | 3           | 2          | 1           | 3965843.75 | 441839.3438 | 11335.36502 |
| 1          | 2      | 210        | 2              | NaN           | 11          | 3           | 11         | 2           | 3971942.5  | 437927.4063 | 4150.644876 |
| 3          | 1      | 185        | 2              | 12            | 11          | 8           | 27.5       | 7.5         | 3964512    | 443146.9063 | 13196.34421 |
| 1          | 1      | 6          | NaN            | NaN           | 11          | 3           | NaN        | NaN         | 3966432.25 | 439976.8125 | 9685.446882 |
| 2          | 2      | 209        | NaN            | NaN           | 11.5        | 1.5         | 5          | 2           | 3971562    | 437131.0938 | 3928.594781 |
| 1          | 1      | 341        | NaN            | NaN           | 12          | NaN         | NaN        | NaN         | 3937292.75 | 465490.5625 | 48408.92617 |
| 2          | 1      | 223        | NaN            | 4             | 12.5        | 2.5         | 0          | NaN         | 3966246.75 | 441078.7813 | 10537.19424 |
| 1          | 1      | 386        | NaN            | NaN           | 12.5        | 4.5         | 5.5        | 5           | 3944296    | 457224.4375 | 37727.3647  |
| 1          | 2      | 204        | NaN            | NaN           | 12.5        | 4.5         | 12         | NaN         | 3972999.75 | 437928.5    | 3342.729832 |
| 1          | 11     | 368        | NaN            | 90            | 13.5        | 3.5         | NaN        | NaN         | 3938080.5  | 462615.1563 | 45953.92919 |
| 3          | 5      | 260        | 1              | 350           | 14          | 5           | 18.5       | 7           | 3958368.25 | 444277.4688 | 18623.61307 |
| 1          | 2      | 210        | NaN            | NaN           | 14          | 3           | NaN        | NaN         | 3971912.5  | 437920.5938 | 4169.301312 |
| 1          | 1      | 5          | NaN            | NaN           | 14          | 2           | NaN        | NaN         | 3966613.75 | 439957.6875 | 9534.135598 |
| 1          | 11     | 375        | NaN            | NaN           | 14          | 3           | NaN        | NaN         | 3938398.75 | 462365.6875 | 45549.85055 |
| 1          | 11     | 448        | NaN            | NaN           | 15          | 3           | NaN        | NaN         | 3939279.75 | 461749.375  | 44479.06468 |
| 1          | 11     | 118        | NaN            | NaN           | 15          | 5           | NaN        | NaN         | 3938659.75 | 462208.6563 | 45249.04235 |
| 1          | 1      | 388        | NaN            | NaN           | 17          | 3           | 1.5        | 1.5         | 3944404    | 457070.9375 | 37545.82922 |
| 1          | 1      | 108        | 2              | 15            | 17          | 5           | 7          | NaN         | 3947949.25 | 453269.1875 | 32385.16185 |
| 2          | 2      | 207        | NaN            | NaN           | 17.5        | NaN         | NaN        | NaN         | 3971471    | 436356.375  | 3499.089036 |
| 3          | 9      | 311        | 2              | 1             | 18          | 10          | 24         | 10          | 3952803.75 | 451392.5938 | 27463.17313 |
| 3          | 1      | 434        | 1              | NaN           | 18          | 4           | NaN        | NaN         | 3944703.75 | 456715.1563 | 37087.39031 |
| 1          | 1      | 389        | NaN            | NaN           | 18          | 8           | NaN        | NaN         | 3944395.5  | 457077.9375 | 37556.7877  |
| 1          | 11     | 369        | 2              | NaN           | 18.5        | 1.5         | 4          | NaN         | 3937970.75 | 462725.5938 | 46109.01356 |
| 1          | 8      | 172        | NaN            | 0.4           | 19          | 5           | 0          | NaN         | 3954639.75 | 448269.625  | 24047.07286 |
| 2          | 2      | 89         | 1              | NaN           | 19          | NaN         | 2          | NaN         | 3971420.5  | 436306.0625 | 3505.299782 |
| 2          | 1      | 144        | NaN            | NaN           | 19          | 3           | 3          | 2           | 3965692.25 | 440574.9688 | 10636.66689 |
| 1          | 1      | 218        | 1              | 5             | 19          | 5           | 7.5        | 2           | 3966722    | 439940.875  | 9440.504975 |
| 1          | 11     | 449        | NaN            | NaN           | 19          | 3           | NaN        | NaN         | 3939375.75 | 461679.25   | 44360.39083 |
| 2          | 2      | 90         | 2              | NaN           | 20          | 4           | 2.5        | 0.5         | 3971691.75 | 436495.3125 | 3419.934525 |
| 1          | 1      | 187        | 1              | NaN           | 20          | 5           | 3          | 2           | 3964922    | 442847.7188 | 12690.04086 |
| 2          | 1      | 221        | 1              | 20            | 20          | 5           | 5          | 2           | 3966415    | 440703.0313 | 10166.45173 |
| 2          | 2      | 208        | 2              | NaN           | 20          | 4           | 6          | NaN         | 3971637.25 | 436453.7813 | 3434.803142 |
| 3          | 5      | 180        | 2              | NaN           | 20          | 2           | 31         | 2           | 3957778.75 | 444372.6875 | 19135.74621 |
| 3          | 3      | 147        | 2              | NaN           | 20          | NaN         | 50         | NaN         | 3962591    | 441775.4063 | 13781.90405 |
| 1          | 99     | 305        | NaN            | NaN           | 20          | 10          | NaN        | NaN         | 3953967.5  | 449146.5938 | 25126.34302 |
| 1          | 11     | 120        | NaN            | NaN           | 20          | NaN         | NaN        | NaN         | 3939094    | 461914.3438 | 44727.24357 |
| 1          | 11     | 119        | NaN            | NaN           | 20          | 1           | NaN        | NaN         | 3938578.75 | 462259.0938 | 45343.55081 |
| 1          | 1      | 48         | NaN            | 3             | 20          | 3           | NaN        | NaN         | 3937411    | 465446      | 48289.82254 |
| 1          | 9      | 306        | NaN            | NaN           | 24.5        | NaN         | 9          | NaN         | 3954275.5  | 449671.2188 | 25228.63761 |
| 1          | 1      | 319        | NaN            | 5             | 25          | 5           | 0          | NaN         | 3945423.25 | 456023.8125 | 36091.77345 |
| 1          | 1      | 322        | 2              | 60            | 25          | 10          | 10         | 5           | 3945026.25 | 456446.25   | 36667.45807 |
| 2          | 1      | 98         | NaN            | NaN           | 25          | NaN         | NaN        | NaN         | 3966752    | 440303.4688 | 9651.221231 |
| 2          | 1      | 220        | NaN            | 5             | 25          | 5           | NaN        | NaN         | 3966222    | 440438.2813 | 10143.46209 |
| 1          | 1      | 327        | NaN            | NaN           | 25          | 10          | NaN        | NaN         | 3944661.25 | 456774.3438 | 37158.05248 |



表 2.1.7 M7.1 変位量データ (3/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 1          | 1      | 44         | NaN            | NaN           | 25          | 5           | NaN        | NaN         | 3942884.75 | 460428.9063 | 40871.07472 |
| 1          | 11     | 447        | NaN            | NaN           | 25          | 5           | NaN        | NaN         | 3938918    | 462021.625  | 44931.12644 |
| 1          | 1      | 38         | 1              | 110           | 28          | 5           | 7          | 2           | 3944726.5  | 456680.8125 | 37047.77067 |
| 2          | 2      | 212        | 2              | NaN           | 28          | 3           | 15         | 5           | 3969472.25 | 438790.4063 | 6596.020239 |
| 1          | 1      | 13         | 1              | 10            | 29          | 5           | 8          | 5           | 3964866.75 | 442867.1875 | 12744.69609 |
| 3          | 1      | 433        | 2              | NaN           | 29          | 4           | NaN        | NaN         | 3944758    | 456648.1875 | 37002.80569 |
| 1          | 1      | 110        | NaN            | 1             | 30          | 7           | 0          | NaN         | 3945546    | 455870.6563 | 35899.20547 |
| 1          | 7      | 426        | NaN            | NaN           | 30          | 5           | 5          | 5           | 3956948.25 | 447311.7188 | 21664.30284 |
| 2          | 1      | 8          | 1              | 15            | 30          | 10          | 8          | 3           | 3966343.25 | 440627.6563 | 10172.69967 |
| 1          | 3      | 145        | NaN            | NaN           | 30          | NaN         | NaN        | NaN         | 3964312    | 441356.9063 | 12196.04149 |
| 1          | 8      | 162        | 1              | NaN           | 30          | 5           | NaN        | NaN         | 3956237    | 446886.2188 | 21934.22361 |
| 1          | 1      | 317        | NaN            | 0.25          | 30          | 5           | NaN        | NaN         | 3945612.75 | 455799.0938 | 35801.92749 |
| 1          | 1      | 383        | NaN            | NaN           | 30          | 5           | NaN        | NaN         | 3944029.5  | 457304.375  | 37982.65467 |
| 1          | 1      | 382        | NaN            | NaN           | 30          | NaN         | NaN        | NaN         | 3943942.75 | 457356.3125 | 38082.34458 |
| 1          | 1      | 441        | NaN            | NaN           | 30          | 10          | NaN        | NaN         | 3942407.5  | 460998.0313 | 41602.72619 |
| 1          | 1      | 446        | NaN            | NaN           | 30          | NaN         | NaN        | NaN         | 3938624.25 | 464088.5625 | 46487.27934 |
| 1          | 11     | 371        | NaN            | NaN           | 30.5        | 3.5         | NaN        | NaN         | 3938276.5  | 462470.8125 | 45711.16806 |
| 1          | 7      | 301        | NaN            | NaN           | 32          | 6           | NaN        | NaN         | 3955952.5  | 448191.0938 | 22992.40524 |
| 1          | 1      | 252        | 2              | NaN           | 32          | NaN         | NaN        | NaN         | 3948970.75 | 452168.4375 | 30894.65257 |
| 1          | 1      | 440        | NaN            | NaN           | 32          | 3           | NaN        | NaN         | 3942471.25 | 460928.6563 | 41509.26901 |
| 1          | 11     | 376        | NaN            | NaN           | 32.5        | 7.5         | 0          | NaN         | 3938562.75 | 462266.2188 | 45360.32143 |
| 1          | 8      | 171        | 2              | 0.4           | 34          | 5           | 2          | 2           | 3954791.5  | 448164.125  | 23863.06662 |
| 1          | 1      | 39         | NaN            | NaN           | 35          | 20          | 0          | NaN         | 3944528.75 | 456965.5625 | 37382.58274 |
| 1          | 1      | 12         | 1              | 10            | 35          | 15          | 2          | 1           | 3965204.75 | 442364.0938 | 12162.09144 |
| 3          | 2      | 214        | 2              | NaN           | 35          | 5           | 55         | 5           | 3969617    | 438921.5625 | 6569.824684 |
| 3          | 1      | 431        | 2              | NaN           | 35          | 5           | NaN        | NaN         | 3944810.25 | 456603.5    | 36934.06308 |
| 1          | 2      | 88         | NaN            | NaN           | 36          | 5           | 20         | 5           | 3970430.25 | 438006.9688 | 5358.477686 |
| 2          | 2      | 87         | 2              | NaN           | 36          | 5           | 22         | 3           | 3969519.5  | 438869.3438 | 6610.623967 |
| 1          | 8      | 166        | NaN            | NaN           | 36          | NaN         | NaN        | NaN         | 3955511.5  | 447506.0938 | 22888.48656 |
| 1          | 11     | 372        | NaN            | NaN           | 36          | 4           | NaN        | NaN         | 3938296    | 462465.4688 | 45692.70643 |
| 1          | 9      | 54         | 2              | 2             | 37          | 5           | 2          | 1           | 3954123.5  | 449824.3125 | 25443.46039 |
| 1          | 99     | 240        | 1              | 2             | 38          | 5           | 34         | 5           | 3955566.5  | 446784.7188 | 22381.6701  |
| 3          | 1      | 432        | 2              | NaN           | 38          | 5           | NaN        | NaN         | 3944784.75 | 456631.1875 | 36971.38125 |
| 1          | 1      | 254        | 2              | 50            | 39.5        | 6.9000001   | 17.5       | NaN         | 3948485.75 | 452721.4375 | 31621.86317 |
| 1          | 7      | 61         | NaN            | NaN           | 40          | 10          | 0          | NaN         | 3957059.25 | 447236.0625 | 21530.75338 |
| 1          | 7      | 60         | NaN            | NaN           | 40          | 3           | 2          | NaN         | 3956185    | 447947.0313 | 22657.35785 |
| 1          | 1      | 335        | NaN            | 6             | 40          | 10          | 5          | NaN         | 3938223.5  | 464593.9063 | 47119.34244 |
| 1          | 1      | 338        | 2              | NaN           | 40          | 8           | 12         | 4           | 3937788.5  | 465059.2188 | 47751.85633 |
| 1          | 8      | 419        | 1              | NaN           | 42          | 5           | 13         | 2           | 3955287    | 447656.3125 | 23156.95121 |
| 1          | 1      | 49         | 2              | 0.7           | 42          | 10          | 20         | 5           | 3946266.5  | 455109.5938 | 34857.75215 |
| 1          | 1      | 329        | NaN            | NaN           | 42          | 5           | NaN        | NaN         | 3943873    | 458839.8438 | 39091.44833 |
| 1          | 8      | 418        | NaN            | NaN           | 44          | 2           | 0          | NaN         | 3955703.75 | 447355.5938 | 22644.49619 |
| 1          | 1      | 413        | 1              | NaN           | 44          | 2           | 20         | 2           | 3948187.75 | 453104.7188 | 32096.65053 |
| 1          | 8      | 163        | NaN            | 30            | 45          | 5           | NaN        | NaN         | 3955928.25 | 447150.8438 | 22340.89133 |
| 1          | 1      | 43         | NaN            | NaN           | 45          | 10          | NaN        | NaN         | 3943724.5  | 459171.9375 | 39418.9806  |
| 1          | 1      | 321        | 2              | 28            | 46          | 8           | 10         | NaN         | 3945060.75 | 456417.75   | 36622.64324 |
| 1          | 8      | 57         | NaN            | 1.3           | 49          | 20          | 0          | NaN         | 3954875.25 | 448066      | 23735.75344 |
| 1          | 1      | 366        | 2              | NaN           | 50          | 15          | 5          | NaN         | 3937226.25 | 465775.4063 | 48643.30488 |
| 1          | 8      | 167        | 2              | NaN           | 50          | 15          | 8          | 2           | 3955236.25 | 447699.2813 | 23223.38545 |
| 1          | 1      | 190        | NaN            | 40            | 50          | 10          | NaN        | NaN         | 3965536.25 | 442170.25   | 11783.80998 |
| 1          | 1      | 113        | NaN            | NaN           | 50          | 5           | NaN        | NaN         | 3939025.5  | 463723.375  | 45945.08026 |
| 1          | 1      | 314        | 2              | NaN           | 51          | 30          | 20         | 10          | 3947652    | 453657.875  | 32862.79665 |
| 1          | 9      | 51         | NaN            | 0.1           | 52          | 5           | 0          | 1           | 3952593.75 | 451607.5625 | 27762.34225 |
| 1          | 1      | 0          | 1              | 20            | 52          | 20          | 30.5       | 14          | 3968009.25 | 439329.8438 | 8062.403489 |
| 1          | 7      | 102        | NaN            | NaN           | 52          | 4           | NaN        | NaN         | 3956675.75 | 447558.0625 | 22031.5423  |
| 1          | 8      | 165        | NaN            | NaN           | 53          | NaN         | NaN        | NaN         | 3955713.25 | 447347.3125 | 22631.90854 |
| 1          | 1      | 4          | 1              | 150           | 54          | 2           | 30         | 5           | 3967458.25 | 439737.0313 | 8746.191316 |
| 1          | 1      | 361        | NaN            | NaN           | 55          | 5           | 6.5        | 1.5         | 3938785.75 | 463907.7813 | 46247.32995 |
| 1          | 1      | 328        | 1              | 120           | 55          | 3           | 7          | NaN         | 3944616.75 | 456834.25   | 37230.56495 |
| 1          | 1      | 45         | 2              | NaN           | 55          | 5           | 27.5       | 2.5         | 3941574.75 | 461651.25   | 42660.42911 |
| 1          | 1      | 72         | 2              | 25            | 55          | NaN         | 70         | NaN         | 3960152.25 | 444947.5625 | 17690.78417 |
| 1          | 1      | 414        | NaN            | 10            | 55          | 10          | NaN        | NaN         | 3948046    | 453200.125  | 32266.57479 |
| 1          | 1      | 35         | NaN            | 20            | 55          | 10          | NaN        | NaN         | 3946009.25 | 455517.0313 | 35317.02129 |
| 1          | 99     | 241        | NaN            | 2             | 57          | 10          | 0          | 5           | 3955451    | 446844.4688 | 22508.58217 |
| 1          | 1      | 73         | 1              | 15            | 58          | 10          | NaN        | NaN         | 3959989    | 445051.4688 | 17882.68302 |
| 1          | 1      | 334        | 2              | 15            | 60          | 7           | 10         | NaN         | 3938635.5  | 464045.4688 | 46450.98997 |
| 1          | 1      | 324        | 2              | 120           | 60          | 10          | 30         | 8           | 3944855.75 | 456571.5938 | 36878.54369 |
| 1          | 1      | 320        | NaN            | 5             | 60          | 5           | NaN        | NaN         | 3945372.5  | 456094      | 36175.68106 |
| 1          | 9      | 428        | NaN            | NaN           | 61          | NaN         | NaN        | NaN         | 3955408.25 | 448193.0625 | 23410.06066 |
| 1          | 1      | 2          | 1              | 12            | 65          | 24          | 17         | 5           | 3967721.25 | 439513.625  | 8401.011568 |

表 2.1.8 M7.1 変位量データ (4/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 1          | 9      | 429        | NaN            | NaN           | 65          | NaN         | NaN        | NaN         | 3954998    | 448822.7813 | 24129.52509 |
| 1          | 8      | 170        | 2              | 2             | 66          | 15          | 3          | 2           | 3954943.5  | 448001.9063 | 23642.28256 |
| 3          | 1      | 312        | 2              | NaN           | 67          | NaN         | 25         | 5           | 3947793.75 | 453469.5313 | 32633.1746  |
| 1          | 1      | 358        | NaN            | NaN           | 67.5        | 7.5         | NaN        | NaN         | 3939907.75 | 463154.2813 | 44903.67429 |
| 1          | 9      | 308        | 2              | 54            | 68          | 5           | 20         | 5           | 3953695    | 450258.3438 | 26050.82571 |
| 1          | 8      | 58         | NaN            | NaN           | 69          | 3           | NaN        | NaN         | 3955401    | 447594.875  | 23030.12843 |
| 1          | 1      | 36         | NaN            | NaN           | 70          | 5           | 0          | NaN         | 3945187.25 | 456289.4063 | 36443.30013 |
| 1          | 8      | 59         | NaN            | NaN           | 70          | NaN         | NaN        | NaN         | 3955944    | 447132.0938 | 22316.77819 |
| 1          | 9      | 427        | NaN            | NaN           | 70          | 20          | NaN        | NaN         | 3955364    | 448238.375  | 23473.13507 |
| 1          | 1      | 111        | NaN            | NaN           | 70          | 5           | NaN        | NaN         | 3942212    | 461081.9063 | 41806.30698 |
| 1          | 1      | 115        | NaN            | NaN           | 70          | 10          | NaN        | NaN         | 3938731    | 463958.625  | 46322.02916 |
| 1          | 9      | 56         | NaN            | 115           | 71          | 10          | NaN        | NaN         | 3955448    | 448138.0938 | 23344.16667 |
| 1          | 1      | 50         | NaN            | 290           | 72          | 17          | 2.5        | 2.5         | 3947444.5  | 453758.1563 | 33086.17767 |
| 1          | 1      | 336        | NaN            | 1.5           | 72.5        | 7.5         | NaN        | NaN         | 3938090.75 | 464733.625  | 47310.97583 |
| 1          | 1      | 355        | NaN            | NaN           | 75          | 5           | 0          | NaN         | 3941465.25 | 461815.5313 | 42850.10872 |
| 1          | 1      | 114        | NaN            | 14            | 75          | 15          | NaN        | NaN         | 3938654    | 464030.4688 | 46427.18158 |
| 1          | 1      | 337        | NaN            | NaN           | 77.5        | 27.5        | 12         | NaN         | 3937760.25 | 465093.5938 | 47795.65682 |
| 1          | 1      | 406        | 2              | NaN           | 80          | 30          | 15         | 5           | 3949051.5  | 451990.25   | 30718.17292 |
| 1          | 8      | 169        | NaN            | 15            | 81          | 15          | 0          | NaN         | 3955078.5  | 447874.8438 | 23457.15496 |
| 1          | 1      | 37         | 2              | 107           | 81          | 10          | 27.5       | 7.5         | 3944880.75 | 456554.2813 | 36848.41193 |
| 1          | 7      | 239        | NaN            | NaN           | 82          | NaN         | NaN        | NaN         | 3956289.25 | 447844      | 22511.23749 |
| 1          | 1      | 109        | NaN            | 7             | 84          | 15          | 15         | 5           | 3946556    | 454843.5938 | 34464.95925 |
| 1          | 8      | 168        | 1              | 1             | 85          | 10          | 8          | 5           | 3955150.25 | 447795.7813 | 23351.31585 |
| 1          | 1      | 47         | NaN            | NaN           | 85          | 15          | NaN        | NaN         | 3937722.75 | 465161.9375 | 47868.26025 |
| 1          | 1      | 34         | 2              | NaN           | 86          | NaN         | 29         | NaN         | 3949054.25 | 451969.4063 | 30702.54141 |
| 1          | 1      | 318        | 1              | 2             | 86          | 5           | 45         | 10          | 3945510    | 455920.6875 | 35958.945   |
| 1          | 1      | 315        | NaN            | 1.4           | 88          | 15          | NaN        | NaN         | 3946455    | 454941.8438 | 34605.57717 |
| 1          | 1      | 435        | NaN            | NaN           | 90          | 10          | 0          | 0           | 3944687    | 456746.25   | 37120.17632 |
| 1          | 9      | 52         | 2              | 1.7           | 90          | 20          | 39         | 15          | 3953419.75 | 450617.9688 | 26493.09872 |
| 1          | 1      | 330        | NaN            | NaN           | 91          | 10          | 10         | 5           | 3943608.5  | 459429.25   | 39673.50705 |
| 1          | 9      | 307        | 2              | NaN           | 92          | 20          | 4          | 3           | 3953839.25 | 450114.625  | 25848.06577 |
| 1          | 1      | 333        | 2              | NaN           | 93          | 8           | 20         | NaN         | 3938797.75 | 463887.1875 | 46224.8017  |
| 1          | 1      | 362        | NaN            | NaN           | 95          | 5           | 0          | NaN         | 3938538    | 464191.0938 | 46619.36698 |
| 1          | 1      | 42         | NaN            | NaN           | 96.5        | 5.5         | NaN        | NaN         | 3943970.25 | 458644      | 38890.93663 |
| 1          | 1      | 26         | NaN            | 2.8           | 97          | 8           | 34         | 5           | 3955242.25 | 447278.625  | 22947.83203 |
| 1          | 1      | 107        | 1              | NaN           | 99          | 10          | 7          | 0           | 3949416.5  | 451552.3438 | 30156.84935 |
| 1          | 1      | 106        | NaN            | NaN           | 100         | 10          | 5          | 5           | 3949884.5  | 450922.7813 | 29393.36935 |
| 1          | 1      | 27         | NaN            | NaN           | 100         | NaN         | 10         | NaN         | 3954984.5  | 447322.125  | 23172.96151 |
| 1          | 1      | 364        | NaN            | NaN           | 100         | NaN         | 40         | NaN         | 3938737.25 | 463960.25   | 46313.15075 |
| 1          | 1      | 442        | NaN            | NaN           | 100         | 20          | 70         | NaN         | 3942034.75 | 461264.375  | 42059.49704 |
| 1          | 1      | 363        | NaN            | 30            | 100         | NaN         | NaN        | NaN         | 3938197.75 | 464643.1563 | 47170.70147 |
| 1          | 1      | 430        | NaN            | NaN           | 105         | 5           | NaN        | NaN         | 3944935    | 456509.1563 | 36777.76235 |
| 1          | 1      | 332        | NaN            | NaN           | 105         | 10          | NaN        | NaN         | 3939263.5  | 463560.0625 | 45657.87515 |
| 1          | 1      | 339        | NaN            | 17            | 110         | 15          | 0          | NaN         | 3937632.25 | 465254.4688 | 47997.04381 |
| 1          | 1      | 18         | 2              | 50            | 110         | NaN         | 40         | NaN         | 3962050    | 444271.8438 | 15803.98293 |
| 1          | 8      | 164        | NaN            | NaN           | 110         | 3           | NaN        | NaN         | 3955818    | 447232.375  | 22477.6892  |
| 1          | 1      | 251        | NaN            | NaN           | 110         | 20          | NaN        | NaN         | 3949731    | 451119.6875 | 29637.5838  |
| 1          | 1      | 356        | NaN            | NaN           | 112         | 6           | NaN        | NaN         | 3940361.25 | 462820.8125 | 44341.99195 |
| 1          | 9      | 310        | 2              | 5             | 114         | 20          | 12         | 5           | 3953220    | 450897.375  | 26825.88441 |
| 1          | 1      | 357        | NaN            | NaN           | 115         | 5           | NaN        | NaN         | 3939937    | 463136.7188 | 44869.98452 |
| 1          | 1      | 250        | 2              | 20            | 119         | 14          | 17         | 5           | 3950450.75 | 450378.875  | 28609.80418 |
| 1          | 1      | 46         | 2              | NaN           | 120         | 10          | 20         | NaN         | 3938830.75 | 463851.0938 | 46176.47688 |
| 1          | 1      | 33         | 2              | 10            | 125         | 20          | 15         | 5           | 3949243    | 451719.2813 | 30397.16368 |
| 1          | 9      | 55         | NaN            | 30            | 125         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955365.25 | 448297.0625 | 23509.96455 |
| 1          | 9      | 304        | NaN            | NaN           | 130         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955089.25 | 448722.0938 | 23994.90029 |
| 1          | 1      | 405        | NaN            | NaN           | 130         | 20          | NaN        | NaN         | 3950462.5  | 450367.5    | 28593.60568 |
| 1          | 1      | 331        | NaN            | NaN           | 130         | NaN         | NaN        | NaN         | 3942795    | 460558.4688 | 41023.2239  |
| 1          | 1      | 32         | 2              | NaN           | 134         | 19          | 10         | 5           | 3950248    | 450546.375  | 28872.90512 |
| 1          | 1      | 129        | NaN            | 24            | 145         | NaN         | NaN        | NaN         | 3960198.25 | 444918.7188 | 17637.01156 |
| 1          | 1      | 276        | NaN            | 160           | 147         | 5           | 85         | 6           | 3955151.75 | 447294.125  | 23027.01918 |
| 1          | 1      | 19         | 2              | NaN           | 150         | 60          | 34         | 2           | 3961142.5  | 444454.7188 | 16615.90519 |
| 1          | 1      | 275        | NaN            | 20            | 150         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955336.25 | 447243.1875 | 22853.19938 |
| 1          | 9      | 53         | 2              | NaN           | 153         | 25          | 15         | 8           | 3953661.5  | 450298.7188 | 26102.58533 |
| 1          | 1      | 31         | 1              | 25            | 154         | 25          | 23         | 10          | 3951856    | 449219.4063 | 26788.044   |
| 1          | 1      | 273        | 2              | NaN           | 176.5       | NaN         | 57         | NaN         | 3955470.25 | 447181.5313 | 22710.98386 |
| 1          | 1      | 266        | NaN            | NaN           | 180         | 30          | 65         | 5           | 395486.75  | 446424.3438 | 21445.63378 |
| 1          | 1      | 30         | NaN            | 60            | 192         | 50          | 65         | 20          | 3952518    | 448819.75   | 26024.23092 |
| 1          | 1      | 105        | NaN            | 20            | 196         | 50          | NaN        | NaN         | 3952124.25 | 449052.625  | 26475.45351 |
| 1          | 1      | 290        | 2              | NaN           | 200         | NaN         | 85         | NaN         | 3953703    | 448044.125  | 24618.27294 |
| 1          | 1      | 101        | 2              | 140           | 210         | NaN         | 325        | NaN         | 3958692.5  | 445533.2813 | 19184.58947 |

表 2.1.9 M7.1 変位量データ (5/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 1          | 1      | 274        | 2              | 40            | 212         | 60          | 80         | 10          | 3955441    | 447199.25   | 22744.69585 |
| 1          | 1      | 230        | 2              | NaN           | 214         | 25          | 53         | 7           | 3961455    | 444464.4063 | 16383.21586 |
| 1          | 1      | 271        | NaN            | NaN           | 224         | 4           | 23         | 3           | 3955578.25 | 447089      | 22568.74698 |
| 1          | 1      | 272        | NaN            | 0.1           | 225         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955555.5  | 447116.7813 | 22604.06462 |
| 1          | 1      | 22         | 2              | 3             | 230         | 50          | NaN        | NaN         | 3956926.25 | 446177.0313 | 20950.27198 |
| 1          | 1      | 269        | NaN            | NaN           | 230         | 22          | NaN        | NaN         | 3955809    | 446893.125  | 22266.00849 |
| 1          | 1      | 300        | NaN            | NaN           | 230         | NaN         | NaN        | NaN         | 3952473.5  | 448848.8438 | 26077.06777 |
| 1          | 1      | 294        | 2              | NaN           | 233         | NaN         | 100        | NaN         | 3953560    | 448089.5313 | 24756.87118 |
| 1          | 1      | 404        | NaN            | NaN           | 235         | 50          | NaN        | NaN         | 3957902    | 445647.5938 | 19862.85983 |
| 1          | 1      | 246        | 2              | 20            | 247         | 93          | NaN        | NaN         | 3952177.25 | 449015.6563 | 26411.19627 |
| 1          | 1      | 270        | NaN            | 0.2           | 250         | NaN         | 0          | NaN         | 3955710.25 | 446977.0625 | 22395.5835  |
| 1          | 1      | 244        | NaN            | 5             | 250         | 100         | NaN        | NaN         | 3952592.75 | 448765.7188 | 25932.3942  |
| 1          | 1      | 283        | 2              | NaN           | 260         | 30          | 42         | NaN         | 3954241    | 447724.0938 | 24000.70355 |
| 1          | 1      | 232        | 2              | NaN           | 260         | 50          | 55         | 15          | 3961065    | 444479.9375 | 16691.52509 |
| 1          | 1      | 299        | NaN            | NaN           | 263.5       | NaN         | NaN        | NaN         | 3953314.75 | 448188.7188 | 25008.50128 |
| 1          | 1      | 142        | NaN            | NaN           | 265         | 30          | 0          | NaN         | 3956752.75 | 446288.7813 | 21154.82754 |
| 1          | 1      | 28         | 2              | 17            | 265         | 67          | 50         | NaN         | 3953175.75 | 448289.9063 | 25179.90543 |
| 1          | 1      | 21         | 2              | 105           | 270         | 54          | 25         | 10          | 3957391.25 | 445929.4688 | 20435.09216 |
| 1          | 1      | 282        | 1              | NaN           | 270         | 40          | 50         | NaN         | 3954314.5  | 446768.2813 | 23914.95288 |
| 1          | 1      | 277        | 1              | 17            | 270         | 48          | 52.5       | 9           | 3954758.25 | 447396.75   | 23394.13781 |
| 1          | 1      | 25         | NaN            | 0.25          | 274         | 25          | 20         | 5           | 3955660.5  | 447014.5    | 22457.8647  |
| 1          | 1      | 62         | NaN            | 0.15          | 275         | 45          | 35         | 5           | 3954456    | 447574.9688 | 23740.21124 |
| 1          | 1      | 280        | 1              | NaN           | 282.5       | 17.5        | 5          | NaN         | 3954367.5  | 447643.6563 | 23852.18014 |
| 1          | 1      | 103        | NaN            | NaN           | 289         | 100         | NaN        | NaN         | 3952642    | 448718.625  | 25864.28382 |
| 1          | 1      | 281        | NaN            | NaN           | 295         | NaN         | NaN        | NaN         | 3954326    | 447667.1563 | 23899.98414 |
| 1          | 1      | 67         | NaN            | 20            | 300         | 25          | 0          | NaN         | 3960813.5  | 444610.5938 | 16967.92924 |
| 1          | 1      | 140        | 2              | 65            | 302.5       | 32.5        | 50         | 10          | 3957241.25 | 445972.125  | 20577.21934 |
| 1          | 1      | 29         | 2              | NaN           | 306         | 34          | 0          | 10          | 3952964    | 448426.6875 | 25429.91599 |
| 1          | 1      | 74         | 2              | 75            | 308         | 30          | 344        | 20          | 3959102.75 | 445516.6563 | 18860.10646 |
| 1          | 1      | 78         | 2              | 8             | 312         | 60          | 12         | 10          | 3955773    | 446915.8438 | 22308.24076 |
| 1          | 1      | 422        | NaN            | 3.8           | 312         | 30          | NaN        | NaN         | 3952813.25 | 448552.75   | 25626.4463  |
| 1          | 1      | 267        | 2              | 10            | 323         | 50          | 30         | 10          | 3955922    | 446794.2813 | 22115.94222 |
| 1          | 1      | 63         | NaN            | 0.15          | 325         | NaN         | 0          | NaN         | 3953920    | 447912.4375 | 24367.54567 |
| 1          | 1      | 291        | NaN            | NaN           | 327.5       | 2.5         | NaN        | NaN         | 3953656.25 | 448056.3125 | 24661.87351 |
| 1          | 1      | 104        | 2              | 60            | 330         | 100         | 50         | NaN         | 3952266.25 | 448972.5    | 26315.29577 |
| 1          | 1      | 296        | NaN            | NaN           | 340         | NaN         | NaN        | NaN         | 3953470.25 | 448101.0625 | 24832.95025 |
| 1          | 1      | 66         | 2              | 18            | 347         | 30          | 17.5       | 7.5         | 3960870    | 444585.3438 | 16908.54572 |
| 1          | 1      | 293        | 2              | NaN           | 348         | NaN         | 80         | NaN         | 3953585    | 448079      | 24731.00343 |
| 1          | 1      | 20         | NaN            | NaN           | 348.5       | 19.5        | 40         | 10          | 3959533.25 | 445306.375  | 18395.47396 |
| 1          | 1      | 279        | 1              | 6             | 350         | 14          | 20         | NaN         | 3954653.5  | 447455.1875 | 23511.96751 |
| 1          | 1      | 297        | NaN            | NaN           | 355         | 15          | NaN        | NaN         | 3953397    | 448144.1875 | 24916.74544 |
| 1          | 1      | 425        | 2              | 5.4000001     | 357         | 100         | NaN        | NaN         | 3952100.75 | 449063.5    | 26500.54639 |
| 1          | 1      | 247        | NaN            | NaN           | 359         | 100         | NaN        | NaN         | 3952004.75 | 449136.625  | 26620.92744 |
| 1          | 1      | 24         | 1              | 10            | 359.5       | 37.5        | 40         | 10          | 3955949.75 | 446772.8438 | 22080.88532 |
| 1          | 1      | 268        | NaN            | 0.15          | 360         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955899.25 | 446814.9375 | 22146.64731 |
| 1          | 1      | 420        | NaN            | 9             | 374         | 123         | 59         | NaN         | 3952849.75 | 448521.3438 | 25578.37725 |
| 1          | 1      | 141        | 2              | NaN           | 382.5       | 32.5        | 15         | NaN         | 3956849.75 | 446223.4688 | 21038.56972 |
| 1          | 1      | 421        | NaN            | 8.5           | 386         | 30          | NaN        | NaN         | 3952824.25 | 448542.4375 | 25611.46895 |
| 1          | 1      | 69         | 2              | 2             | 390         | 40          | 55         | 5           | 3960637.25 | 444717.25   | 17171.51786 |
| 1          | 1      | 423        | 2              | 9             | 400         | 135         | NaN        | NaN         | 3952462.25 | 448854.875  | 26089.64188 |
| 1          | 1      | 71         | 2              | 3.3           | 410         | 20          | 61         | 20          | 3960603.75 | 444739      | 17211.0518  |
| 1          | 1      | 403        | 2              | 20            | 415         | 45          | 120        | 20          | 3959262.75 | 445422.8125 | 18677.27652 |
| 1          | 1      | 70         | 2              | NaN           | 418.5       | 28.5        | 85         | NaN         | 3960588.75 | 444741.4688 | 17224.17137 |
| 1          | 1      | 68         | 2              | 18            | 430         | 50          | 40         | NaN         | 3960765.75 | 444627.3125 | 17015.28403 |
| 1          | 1      | 64         | NaN            | 45            | 437         | 62          | 26         | NaN         | 3956356.5  | 446488.9063 | 21586.95239 |
| 1          | 1      | 76         | 2              | 13.5          | 442         | 25          | 20         | 10          | 3956232.25 | 446570.8438 | 21734.69803 |
| 1          | 1      | 424        | 2              | 9             | 442         | 120         | NaN        | NaN         | 3952456.75 | 448858      | 26095.71137 |
| 1          | 1      | 23         | 2              | 80            | 447         | 24          | 20         | 20          | 3956032.75 | 446705.5625 | 21974.1472  |
| 1          | 1      | 123        | NaN            | NaN           | 475         | 25          | NaN        | NaN         | 3960609.5  | 444735      | 17204.18699 |
| 1          | 1      | 77         | NaN            | 26            | 495.5       | 30          | 0          | 10          | 3956278.5  | 446549.0313 | 21685.37245 |
| 1          | 1      | 65         | NaN            | NaN           | 520         | NaN         | NaN        | NaN         | 3955951    | 446775.0313 | 22081.28202 |
| 3          | 3      | 154        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 0.5        | 1           | 3961424.25 | 442216.9688 | 14958.89696 |
| 3          | 2      | 396        | 2              | 31            | NaN         | NaN         | 2          | NaN         | 3969846    | 435282.75   | 4050.341388 |
| 3          | 2      | 402        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 3          | NaN         | 3970368.75 | 439379.25   | 6289.562265 |
| 3          | 2      | 395        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 4          | NaN         | 3971051.25 | 434914.5    | 2891.346047 |
| 3          | 1      | 390        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 4          | 1           | 3944365    | 457114.4063 | 37603.68751 |
| 3          | 2      | 394        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 5          | NaN         | 3971069.5  | 434923.625  | 2883.174088 |
| 3          | 6      | 233        | 2              | 3             | NaN         | NaN         | 5          | 5           | 3960268    | 445251.9375 | 17798.28543 |
| 3          | 1      | 385        | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 5          | NaN         | 3944214.75 | 457251.7813 | 37807.01354 |
| 3          | 1      | 436        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 5          | 2           | 3943753.5  | 457458.6563 | 38293.13964 |

表 2.1.10 M7.1 変位量データ (6/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 3          | 3      | 256        | 1              | 10            | NaN         | NaN         | 5.5        | 1           | 3960695.75 | 442751.0938 | 15860.09354 |
| 3          | 2      | 397        | 2              | 36            | NaN         | NaN         | 6          | NaN         | 3969721.25 | 435310.4063 | 4163.64855  |
| 3          | 11     | 373        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 7          | NaN         | 3938341.75 | 462427.875  | 45633.54848 |
| 3          | 1      | 219        | NaN            | 15            | NaN         | NaN         | 7.5        | 2.5         | 3966136.25 | 440371      | 10165.68844 |
| 3          | 1      | 255        | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 7.5        | 2.5         | 3948360.5  | 452950.9375 | 31865.58918 |
| 3          | 1      | 286        | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 9          | NaN         | 3953975.25 | 447875.875  | 24301.73325 |
| 3          | 4      | 156        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 10         | 1           | 3959612.25 | 440601.875  | 15304.27204 |
| 3          | 6      | 236        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 10         | NaN         | 3959617.75 | 445335.8438 | 18349.80899 |
| 3          | 1      | 253        | 1              | 4             | NaN         | NaN         | 10         | 5           | 3948809.75 | 452440.375  | 31193.04551 |
| 3          | 1      | 407        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 10         | NaN         | 3948478.25 | 452616.6875 | 31560.06994 |
| 3          | 1      | 439        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 10         | 2           | 3943124    | 460227.7813 | 14582.05042 |
| 3          | 4      | 157        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 12         | 1           | 3959258.75 | 440674      | 15621.11098 |
| 3          | 1      | 410        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 12         | NaN         | 3948382    | 452702.875  | 31689.35878 |
| 3          | 3      | 152        | 1              | 190           | NaN         | NaN         | 13         | NaN         | 3961859.75 | 442149.2188 | 14826.05042 |
| 3          | 1      | 323        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 14         | 11          | 3944983    | 456474.25   | 36718.60145 |
| 3          | 1      | 367        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 14         | NaN         | 3937172.75 | 465814.6875 | 48709.48867 |
| 3          | 1      | 184        | 2              | 200           | NaN         | NaN         | 14.5       | 2.5         | 3963058.25 | 444101.9688 | 14923.43626 |
| 3          | 3      | 153        | 1              | 160           | NaN         | NaN         | 15         | NaN         | 3961696    | 442196.6563 | 14737.96257 |
| 3          | 5      | 257        | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 15         | 3           | 3959161.75 | 444039      | 17863.09817 |
| 3          | 99     | 237        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 15         | 1           | 3959171.75 | 444918.6875 | 18422.12409 |
| 3          | 11     | 345        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 15         | NaN         | 3939401.25 | 461655.1563 | 44325.42691 |
| 1          | 1      | 3          | 1              | 145           | NaN         | NaN         | 17         | 10          | 3967536.5  | 439694.1875 | 8658.630734 |
| 3          | 1      | 186        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 17         | 3           | 3964598.5  | 443080.3125 | 13087.21746 |
| 3          | 5      | 259        | 1              | 440           | NaN         | NaN         | 17         | 11          | 3958704.75 | 444222.4375 | 18330.75401 |
| 3          | 1      | 183        | 2              | 20            | NaN         | NaN         | 17.5       | 3           | 3962890    | 444185.4063 | 15105.90494 |
| 3          | 1      | 122        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 17.5       | 2.5         | 3960915    | 444564.5313 | 16860.67702 |
| 3          | 1      | 445        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 20         | 3           | 3938992.5  | 463734.7813 | 45977.73781 |
| 3          | 2      | 202        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 20.5       | 4.5         | 3972952    | 436605.1563 | 2526.623474 |
| 3          | 2      | 143        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 21.5       | 0.5         | 3973640.75 | 435591.1875 | 1346.63144  |
| 3          | 2      | 198        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 23         | 3           | 3973549.5  | 436244.9375 | 1837.628048 |
| 3          | 2      | 97         | 2              | 9             | NaN         | NaN         | 23.5       | 6.6999998   | 3973738.25 | 435580.1563 | 1265.006421 |
| 3          | 1      | 411        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 24         | 2           | 3948281.5  | 452807.0313 | 31833.28941 |
| 3          | 7      | 264        | 1              | 3958681.75    | 445755.6563 | NaN         | 25         | NaN         | 3958681.75 | 445755.6563 | 19336.03923 |
| 3          | 1      | 285        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 25         | NaN         | 3953995.25 | 447862.625  | 24277.85724 |
| 3          | 1      | 1          | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 26         | 5           | 3967879.5  | 439401.4063 | 8207.700111 |
| 3          | 5      | 258        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 29         | 3           | 3958895.25 | 444006.2188 | 18045.78788 |
| 3          | 3      | 150        | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 30         | NaN         | 3962130.5  | 441844.5313 | 14178.66725 |
| 3          | 1      | 249        | 1              | 40            | NaN         | NaN         | 30         | NaN         | 3951100.75 | 449733.1563 | 27696.64442 |
| 3          | 1      | 412        | 1              | NaN           | NaN         | NaN         | 30         | 5           | 3948265    | 453060.9688 | 32009.50951 |
| 3          | 1      | 437        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 32         | 3           | 3943295.5  | 459955.25   | 40251.77295 |
| 3          | 1      | 143        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 33         | NaN         | 3947591.75 | 453701.625  | 32937.04099 |
| 3          | 3      | 319        | NaN            | 4             | NaN         | NaN         | 34         | 5           | 3962226    | 441844.625  | 14105.7172  |
| 3          | 2      | 215        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 35         | 15          | 3969757    | 438932.5625 | 6469.816945 |
| 3          | 1      | 228        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 35         | 5           | 3963805    | 443636.5    | 14052.43697 |
| 3          | 6      | 235        | 2              | 6             | NaN         | NaN         | 35         | 10          | 3959861.25 | 445284.6563 | 18130.45264 |
| 3          | 1      | 288        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 37         | NaN         | 3953815.5  | 447970.5313 | 24484.85603 |
| 3          | 1      | 325        | 2              | 115           | NaN         | NaN         | 38         | 3           | 3944817.75 | 456594.4063 | 36922.33288 |
| 3          | 1      | 316        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 40         | NaN         | 3946310.75 | 455055.625  | 34789.16418 |
| 3          | 1      | 326        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 40         | 4           | 3944795    | 456621.4688 | 36957.27404 |
| 3          | 1      | 100        | 2              | 410           | NaN         | NaN         | 41         | 10          | 3963934    | 443622.2188 | 13944.63484 |
| 3          | 1      | 360        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 42         | 5           | 3939827.5  | 463206.2188 | 44998.67769 |
| 3          | 5      | 262        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 45         | 2           | 3958024    | 444402.5313 | 18967.53594 |
| 3          | 1      | 287        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 45         | NaN         | 3953884.5  | 447934.0313 | 24408.47934 |
| 3          | 1      | 340        | 2              | 50            | NaN         | NaN         | 45         | NaN         | 3937528.5  | 465393.25   | 48165.86476 |
| 3          | 9      | 309        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 48         | NaN         | 3953410    | 450635.9688 | 26512.19699 |
| 3          | 1      | 243        | 2              | 10            | NaN         | NaN         | 50         | 15          | 3952734    | 448631.8438 | 25738.0993  |
| 3          | 1      | 359        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 50         | 15          | 3939896.25 | 463161.5938 | 44917.33874 |
| 3          | 1      | 242        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 51         | NaN         | 3953039.75 | 448367.8438 | 25334.1118  |
| 3          | 2      | 213        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 53         | 5           | 3969544.25 | 438908.4375 | 6616.93767  |
| 3          | 1      | 229        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 55         | NaN         | 3961723.5  | 444397.625  | 16134.86212 |
| 3          | 1      | 354        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 55         | NaN         | 3942012.25 | 461265.4063 | 42077.21909 |
| 3          | 1      | 443        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 60         | 5           | 3941275    | 461965.3438 | 43092.01016 |
| 3          | 1      | 265        | 2              | 10            | NaN         | NaN         | 63         | 15          | 3957968.5  | 445685.3125 | 19836.35258 |
| 3          | 6      | 137        | 2              | 5             | NaN         | NaN         | 64         | 5           | 3960044.5  | 445213.9375 | 17944.91978 |
| 3          | 3      | 146        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 65         | NaN         | 3962653.75 | 441768.7813 | 13729.76397 |
| 3          | 1      | 448        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 65         | 5           | 3939777    | 463219.25   | 45045.62062 |
| 3          | 1      | 274        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 72         | NaN         | 3955106.25 | 447293.9063 | 23061.74077 |
| 3          | 1      | 284        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 80         | NaN         | 3954038.5  | 447843.3125 | 24232.35011 |
| 3          | 1      | 417        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 95         | 10          | 3958559.5  | 445527.25   | 19282.39904 |
| 3          | 1      | 298        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 100        | NaN         | 3953348.5  | 448163      | 24966.02902 |

表 2.1.11 M7.1 変位量データ (7/7)

| Slip_Sense | Strand | Pt_Identif | Scarp_Face_Dir | Local_Width_m | H_Offset_cm | H_Uncert_cm | V_Separ_cm | V_Uncert_cm | Northing   | Easting     | Distance_m  |
|------------|--------|------------|----------------|---------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 3          | 1      | 292        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 108        | NaN         | 3953600.25 | 448081.75   | 24721.22935 |
| 3          | 1      | 295        | NaN            | NaN           | NaN         | NaN         | 113        | NaN         | 3953521    | 448092.875  | 24788.95301 |
| 3          | 1      | 231        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 114        | NaN         | 3961323.5  | 444413.125  | 16450.65817 |
| 3          | 1      | 99         | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 140        | 25          | 3962469.5  | 444248.5625 | 15468.22024 |
| 3          | 1      | 182        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | 182.5      | 42.5        | 3962648.25 | 444240.9375 | 15326.53399 |
| 1          | 1      | 138        | 2              | 60            | NaN         | NaN         | 374        | 20          | 3958956.75 | 445533.9688 | 18982.97365 |
| 3          | 2      | 399        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | NaN        | 4           | 3968593.75 | 435277.6563 | 5004.932115 |
| 3          | 2      | 400        | 2              | NaN           | NaN         | NaN         | NaN        | 5           | 3968559.75 | 435273.1563 | 5028.028048 |
| 1          | 1      | 124        | NaN            | 25            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3960388    | 444820.5938 | 17428.61043 |
| 1          | 1      | 125        | NaN            | 14            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3960354.25 | 444837.1875 | 17465.23043 |
| 1          | 1      | 126        | NaN            | 5             | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3960341.75 | 444842.9688 | 17478.55664 |
| 1          | 1      | 127        | NaN            | 33            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3960253    | 444910.625  | 17590.02836 |
| 1          | 1      | 128        | NaN            | 14            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3960119.25 | 444973.5938 | 17732.84411 |
| 1          | 1      | 130        | 1              | 12            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3959922.5  | 445069.75   | 17945.21293 |
| 1          | 1      | 131        | 1              | 30            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3959802.75 | 445130.9688 | 18076.33786 |
| 1          | 1      | 132        | 1              | 30            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3959723.75 | 445175.125  | 18165.15927 |
| 1          | 1      | 133        | NaN            | 10            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3959691    | 445201.875  | 18207.47878 |
| 1          | 1      | 134        | 2              | 20            | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3959603.5  | 445242.125  | 18300.25658 |
| 1          | 1      | 139        | NaN            | 245           | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3958308    | 445583.1875 | 19510.86933 |
| 1          | 1      | 248        | NaN            | 140           | NaN         | NaN         | NaN        | NaN         | 3951280.75 | 449643.0625 | 27500.9139  |



### 2.1.4.3. 変動量分析

#### (1) メイントレースの設定

既往資料の kml ファイルを元に、変位データとの距離を計測する基準となるメイントレースを設定した。メイントレースは北西-南東方向の走向を持つ連続性の良いライン（図 2.1.52 の黄色着色したライン）に設定した。

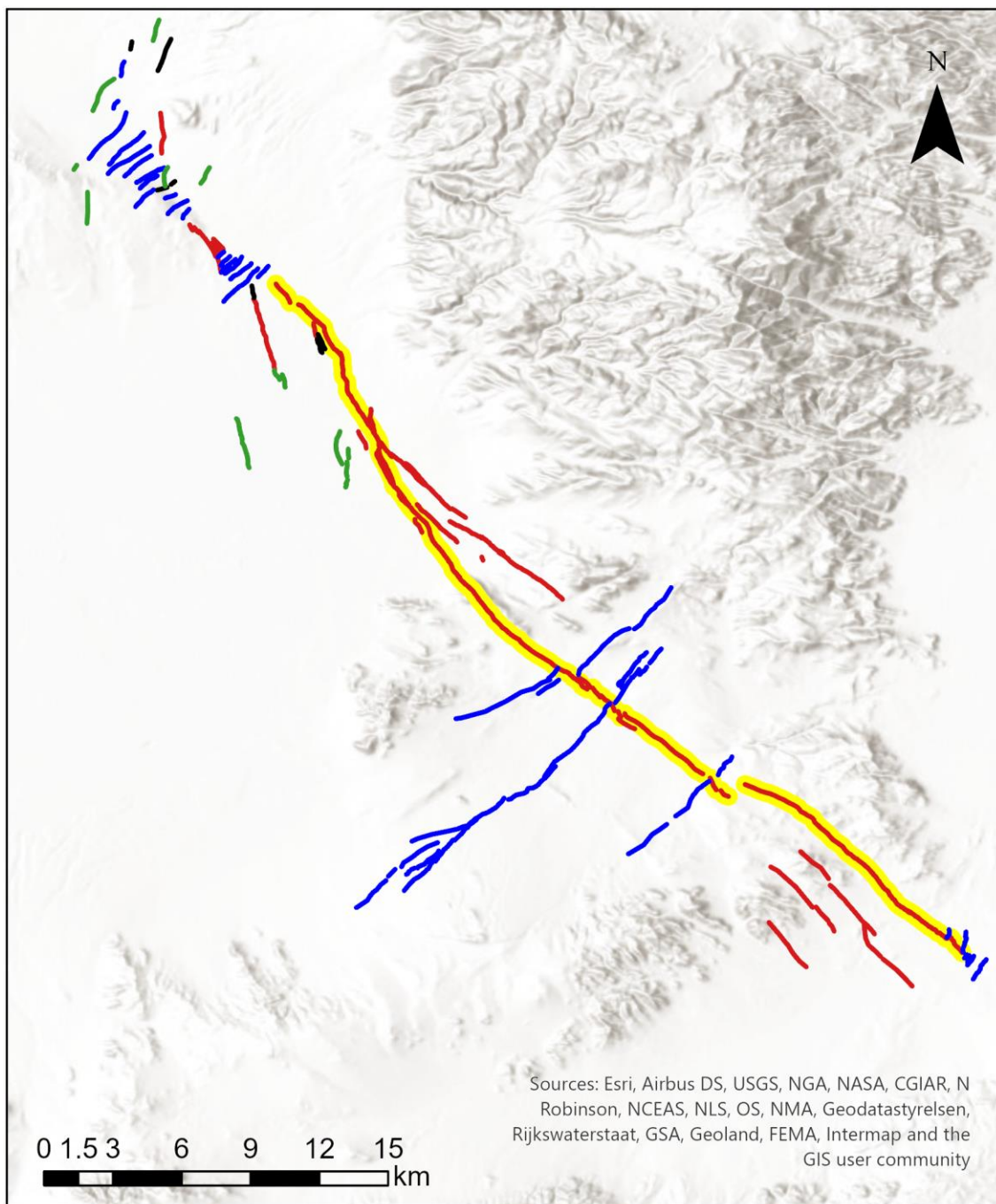


図 2.1.52 メイントレース設定結果（黄色着色部が選定したメイントレース）

## (2) 変位データのクリーニング

変位データの解析を行うにあたり、メイントレースからの離隔距離の設定が困難なデータを除去するクリーニングを実施した。クリーニングを行うための基本方針を以下の通り設定した。クリーニング結果を図 2.1.53 に示す。

- メイントレース走行方向に分布するデータは、断層からの隔離を計測できないため省く
- 断層がステップする区間にあるデータは、離隔距離を計測する対象を決められないため省く

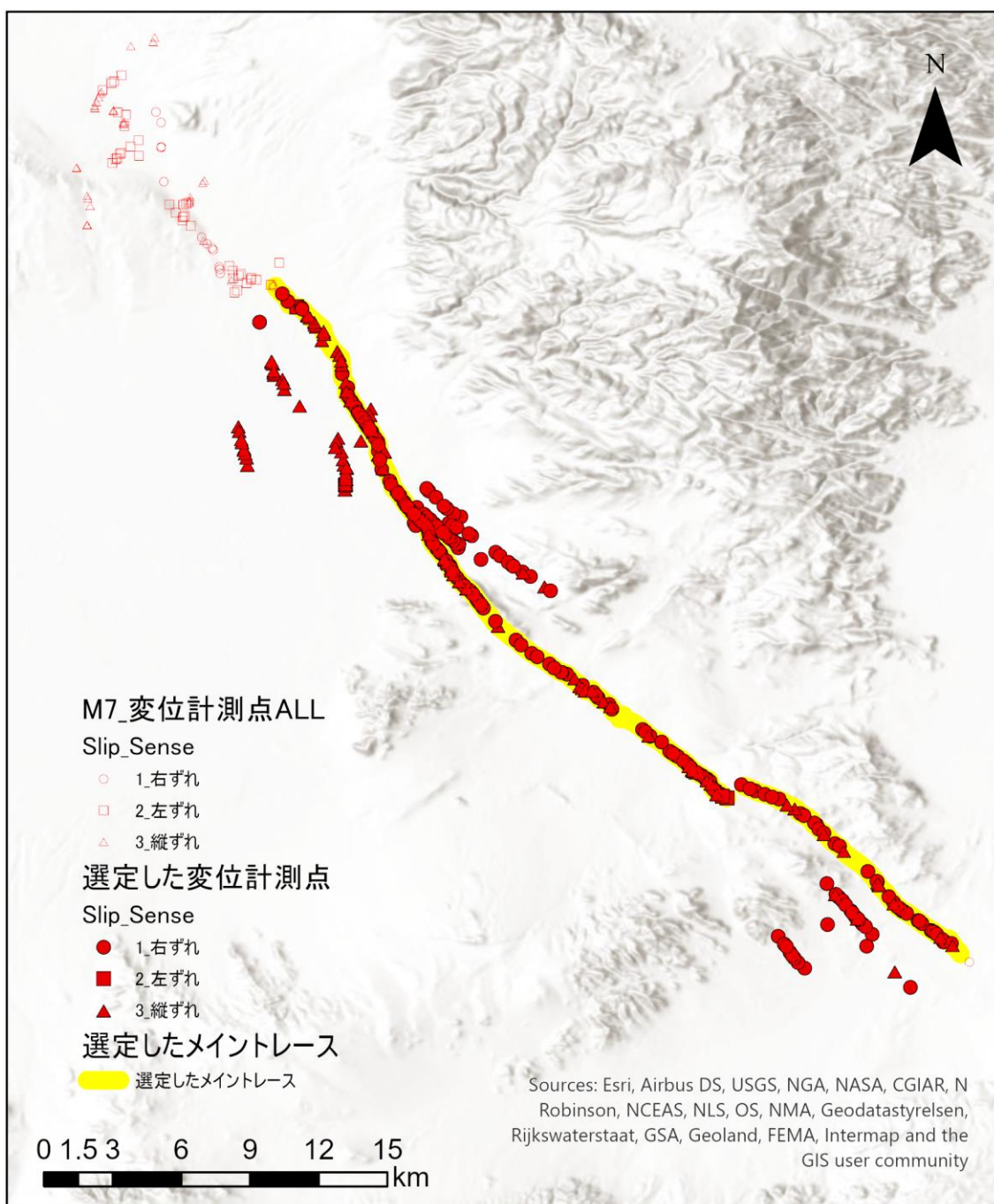


図 2.1.53 データクリーニング設定結果（赤色着色部が選定しデータ）

### (3) メイントレースと変位計測点のデータ結合

変位計測点と断層メイントレースの離隔距離を計測し、変位量と離隔距離、メイントレース位置とを関連付けた。断層メイントレースは湾曲しているため、変位計測点のメイントレースにおける位置は走向方向の投影線上の位置で表現した。変位計測点と断層トレースを関連付けの手順を以下に示すとともに、作成した作業データを図 2.1.55 に示す。

- ① メイントレースをポイントに分割したうえで、変位計測点との最近接解析を実施し、離隔距離を変位計測点の属性に追加する。
- ② 投影線をポイントに分割したうえで、変位計測点との最近接解析を実施し、最短距離にある投影線上のポイント ID を変位計測点の属性に追加する。
- ③ 投影線上にある各ポイントに対して投影基点との最近接解析を実施し、投影基点からの距離を属性に加える。
- ④ 変位計測点の属性に追加されている投影線上のポイント ID (②) と、投影線上のポイント ID とを紐づけることで、変位計測データ、メイントレースからの離隔距離および投影線上の投影基点からの距離を関連づける。この作業データを用いて、以後の解析を実施する。

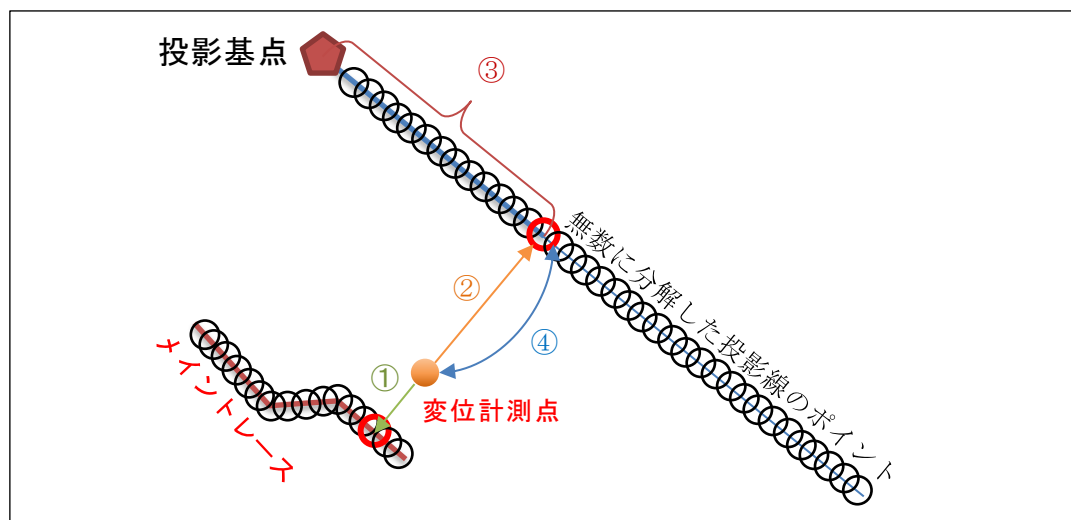


図 2.1.54 投影方法

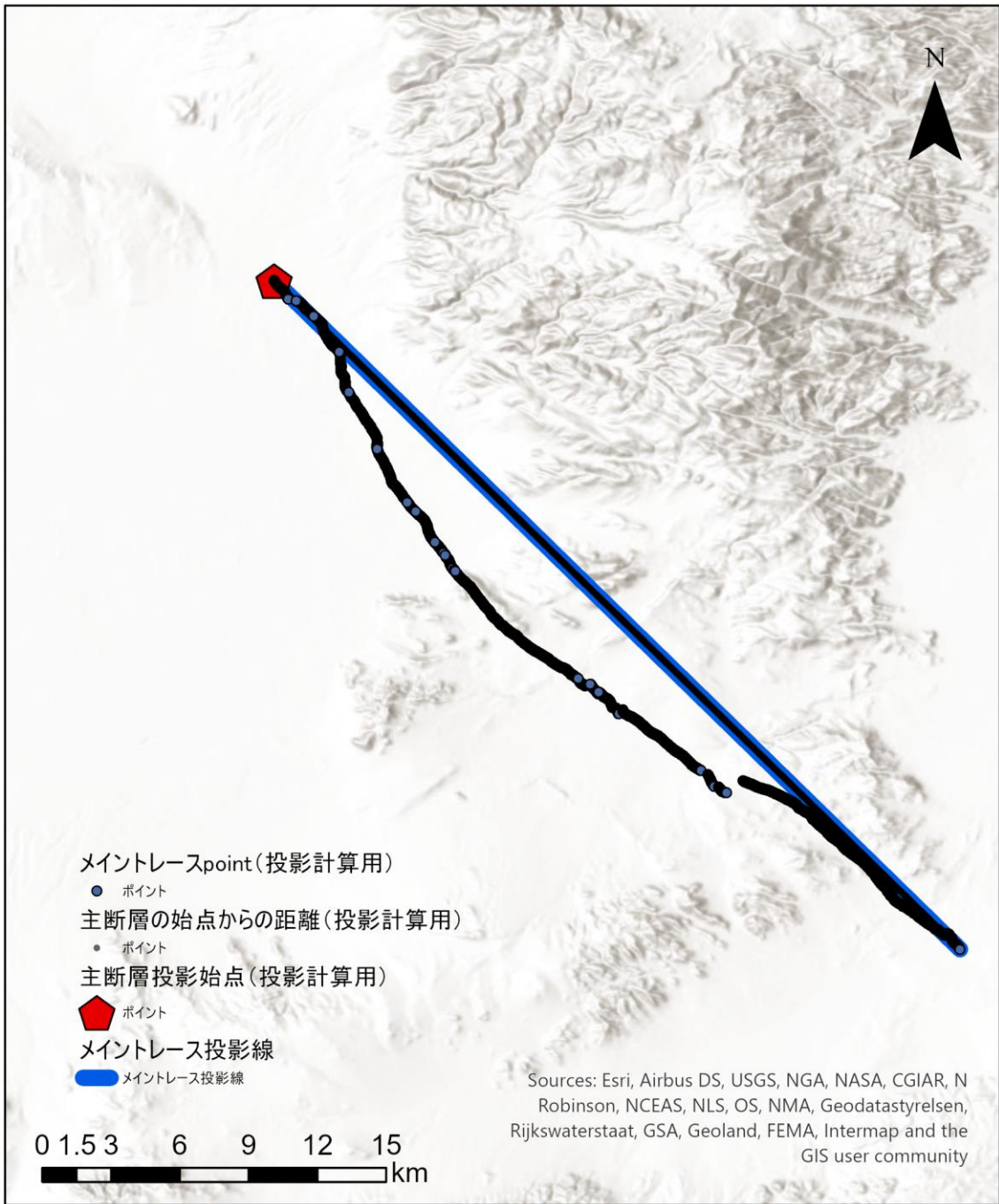


図 2.1.55 作成した作業データ



#### (4) 分析結果

##### ①最大変位量の分布

計測された最大変位量のうち、特に大きな変位量が計測された区間は投影基点から 5km ~15km の区間に集中している。特に大きな変位量が計測された区間のうち、中心付近に全区間での最大変位量が位置している（図 2.1.56）。

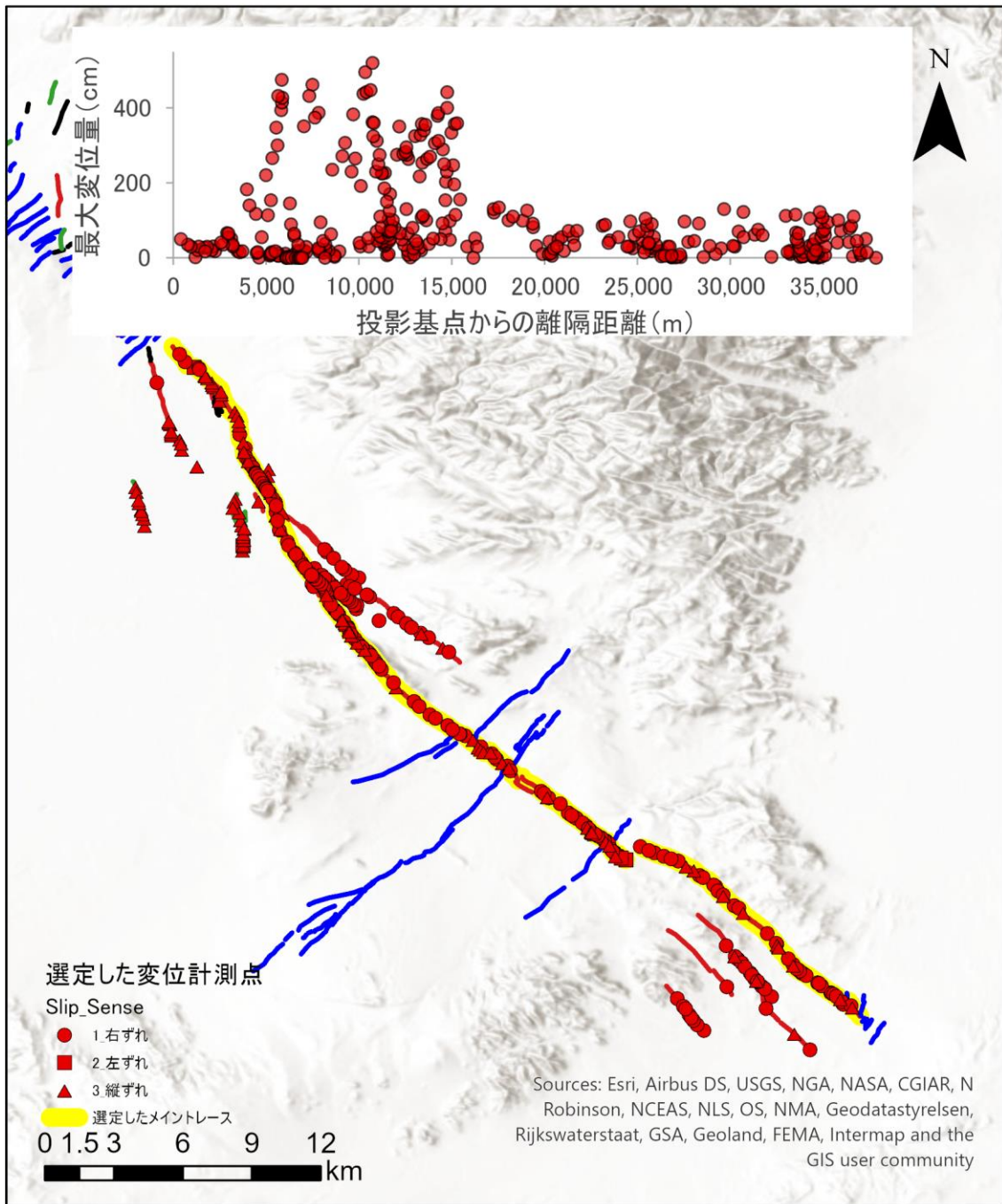


図 2.1.56 最大変位量の分布



## ②主断層からの離隔距離と変位量

計測された主断層からの離隔距離が同じような断層においても、メイントレースからの分岐断層では変位量が大きく、メイントレースから分岐せず独立した断層で変位量が小さい(図 2.1.57)。一方で、4km 以上離れた断層においても一定量の変位が計測されている。このようなメイントレースから外れた位置での微小な変位の位置は、現地踏査で見つけることが困難であるが、測地学的手法では検出できる可能性がある。

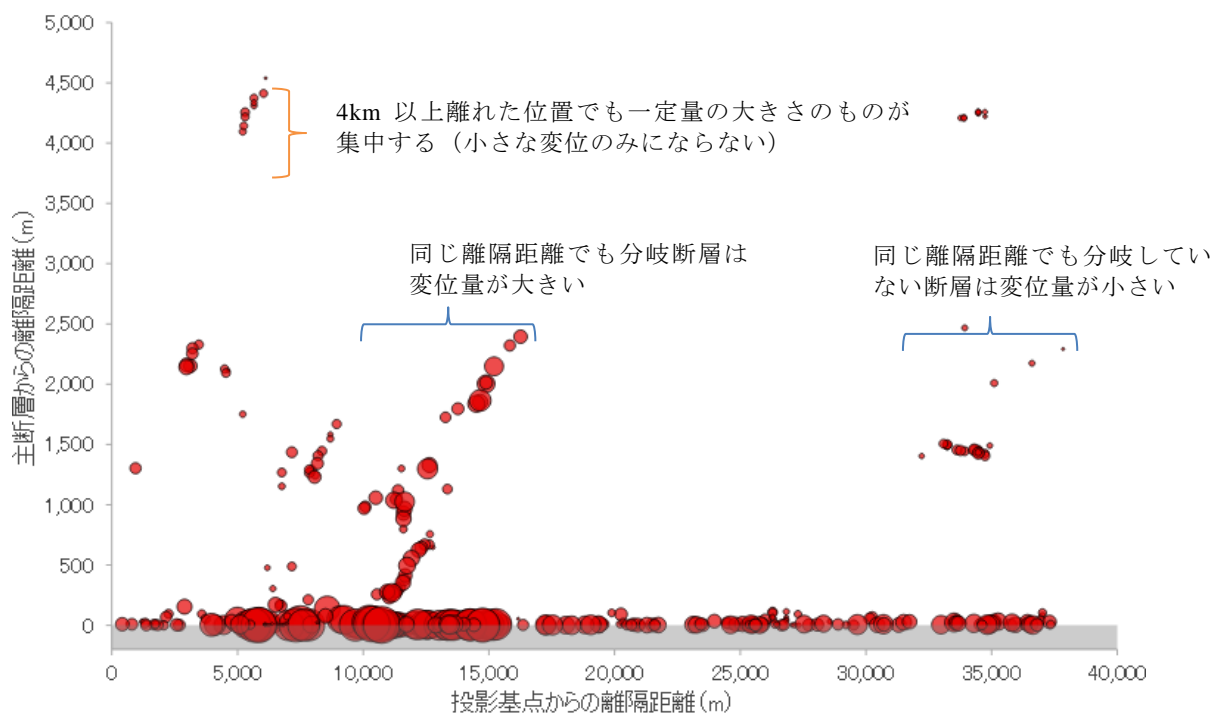


図 2.1.57 投影基点からの距離とメイントレースからの離隔距離および変位量 (変位量を円のサイズで表示)

### ③距離減衰式

計測された変位量について、メイントレースからの離隔距離を用いて主断層と副断層に分離することを試みた。分離の目安として、Jan and Christopher (1998) に示された process zone (変位の一連の幅は断層長の  $10^{-2}$  の比例定数で変化する) を参考に、断層長の 1% を境界値と想定した。選定したメイントレースのラインに沿った断層長を求め、その合計値の 1% を主断層と副断層の境界値とする離隔距離とした。なお、メイントレースの北方延長および南方延長については断層の走向方向が異なり、同一の条件で延長を求められないことから本検討の断層長に含めないこととした。検討の結果、主断層と副断層の境界値とする離隔距離は 386m、主断層の変位量の平均値は 123cm となった (表 2.1.12)。なお、分岐断層も存在するが、今回の検討では機械的にメイントレースからの離隔距離のみで検討を行っており、分岐断層と副断層を区別していない。

表 2.1.12 主断層と副断層の境界値および主断層変位 (平均値) の検討結果

| 項目         | 内容      | 備考                  |
|------------|---------|---------------------|
| 主断層延長      | 38,576m | 計測した断層長の合計値         |
| 断層長の 1%    | 386m    | 主断層と副断層の境界値         |
| 主断層の変位の平均値 | 123cm   | 単純平均 (小数点第 1 位四捨五入) |

メイントレースからの離隔距離が 386m 以上の変位量の計測値を主断層の変位の平均値 (123cm) で除し、比率を計算した。これらを主断層トレースからの離隔距離で整理したものを図 2.1.58 に示す。

400m~2500m にかけて多くのプロットが集中し、4000~4500m の位置にも変位量の小さなデータが集中して分布している。このデータを高尾ほか (2014) における「解析結果と実験結果・現地調査結果の比較」と重ね合わせた (図 2.1.59)。その結果、計測された副断層の変位は既往距離減衰式の下側にプロットされた。本検討でプロットした断層変位のうち、比率 (副断層の変位量 / 主断層の平均変位量) が 1.0~1.5 付近に分布するやや大きな変位は分岐断層の計測値の可能性はある。

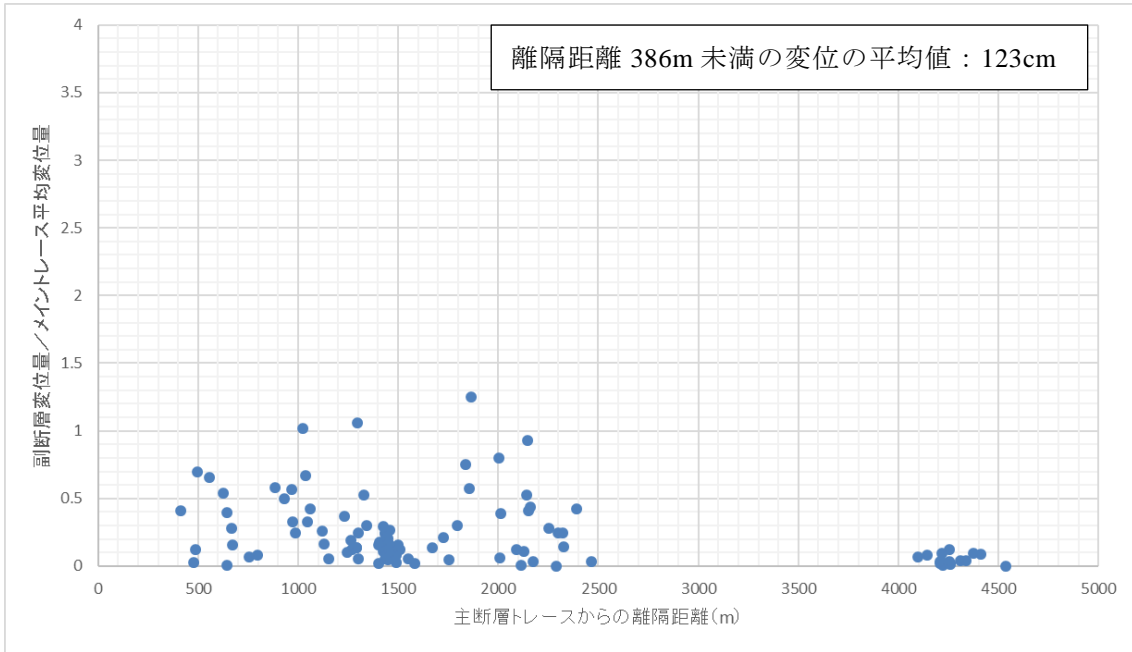


図 2.1.58 離隔距離と変位量の関係（離隔距離 386m で分離）

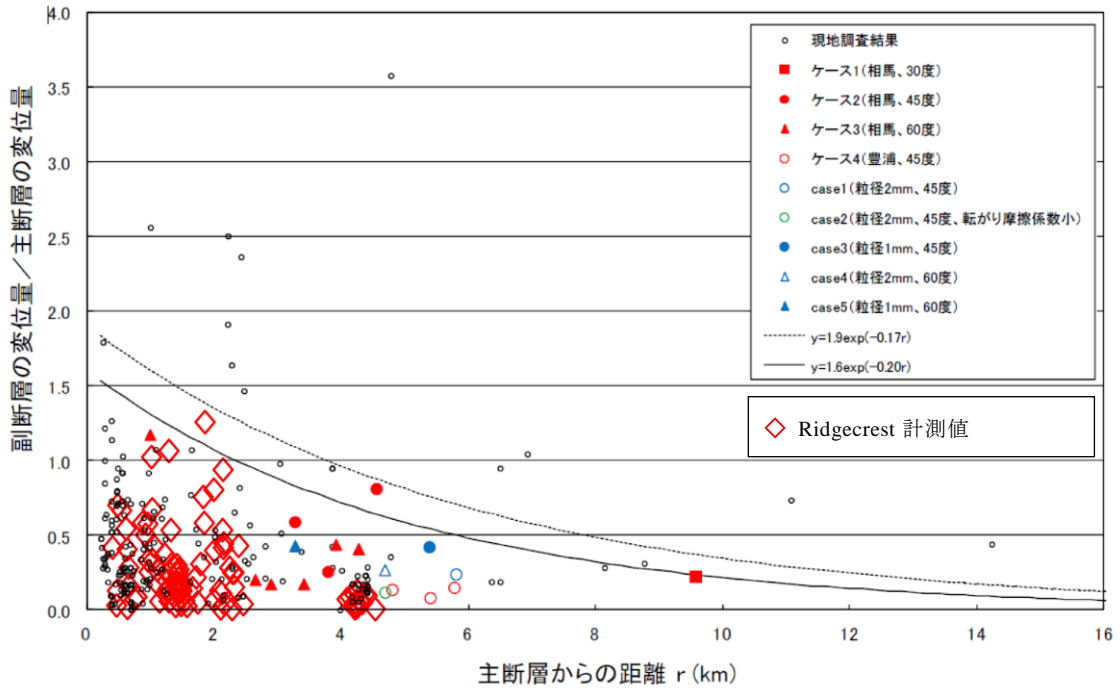


図 2.1.59 高尾ほか（2014）と重ね合わせた変位量（離隔距離 386m で分離）

## 2.2. 測地学的情報を用いた解析

### 2.2.1. 測地学的情報を用いた解析手法整理

測地学的情報を用いた変動地形学的解析を実施した。解析手法は目的ごとに表 2.2.1 とした。解析手法の詳細は次ページ以降に取りまとめて示す。

表 2.2.1 測地学的情報を用いた解析手法一覧

| データ         | 解析手法                |                     | 対象         | 目的                       | 課題                                      |
|-------------|---------------------|---------------------|------------|--------------------------|---|
| SAR<br>データ  | 差分干渉<br>SAR 解析      | LC-InSAR<br>解析      | 地震時の<br>変動 | 微小な変位箇<br>所抽出            | 変位が大きい箇所<br>は抽出できない                     |
|             |                     | 2.5次元<br>解析         | 地震時の<br>変動 | 準東西、準上<br>下方向の変位<br>量算出  | 変位が大きい箇所<br>の変位量は算出で<br>きない             |
|             | 時系列<br>干渉 SAR<br>解析 | SBAS<br>解析          | 余効変動       | 余効変動の時<br>系列変位量算<br>出    | 土地被覆変化が激<br>しい箇所の変位量<br>は算出できない         |
|             | SAR 強度<br>画像解析      | ピクセル<br>オフセッ<br>ト解析 | 地震時の<br>変動 | 衛星視線・衛<br>星進行方向の<br>変位算出 | 変位が小さい箇所<br>の変位量は算出で<br>きない<br>空間分解能が低い |
| 光学衛星<br>データ | 画像マッチング<br>解析       |                     | 地震時の<br>変動 | 東西、南北方<br>向の変位量算<br>出    | 変位が小さい箇所<br>の変位量は算出で<br>きない             |

### 2.2.1.1. 差分干渉 SAR 解析

差分干渉 SAR 解析 (InSAR) とは 2 時期の SAR データの位相差を用いて変位を得る技術である。

Fujiwara et al 2020 が示した InSAR による断層運動の変位測定概念図を図 2.2.1 に示す。InSAR を用いることで断層運動による亀裂が地表に届いた場合 (図 2.2.1a)、亀裂が地表に届かない場合 (b)、クラックが地表に現れた場合 (c) のどのパターンでも高精度に広域の変位をマッピングすることが可能であることを指摘した。

本検討では差分干渉 SAR 解析として、地震時の微小な変位箇所の把握には LC-InSAR 解析、変位量の算出には 2.5 次元解析を実施した。

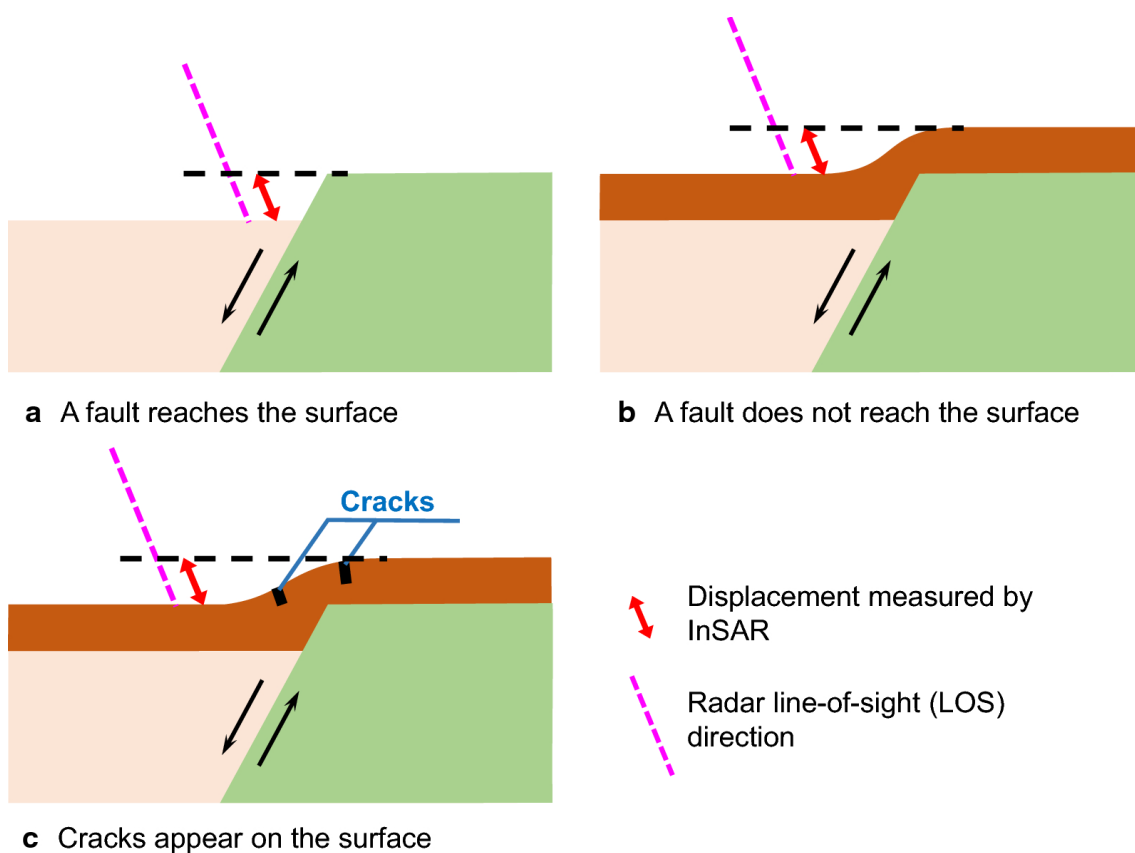


図 2.2.1 InSAR による変位測定概念図

※Fujiwara et.al (2020) より引用



### (1) LC-InSAR

LC-InSAR 図は、干渉 SAR による干渉縞、低コヒーレンス値分布図及び DEM データによる傾斜量図の 3 画像の重ね合わせ（図 2.2.2）によって生成される（三五ほか，2016，小俣ほか，2016）。小俣ほか(2016)は、2016 年熊本地震において LC-InSAR 図を作成し、現地調査でこれまで地表地震断層として報告されていない地点に干渉縞の不連続があり低コヒーレンス値が連続するラインが確認でき、これらが現地調査では確認できない程度の微小な変位の地表変状が分布している可能性があることを示した。小俣ほか(2017a)では、これらの低コヒーレンスで位相が不連続なラインを現地調査したところ、明瞭な地表地震断層は確認できないものの道路や水路にはわずかな亀裂が認められることを明らかにした。干渉 SAR 解析で干渉縞と低コヒーレンス図を重ねて検討することで、地表地震断層の分布位置を明らかにするとともに、地表地震断層として認識することが困難な微小でブロードな地表面の変形を捉えることが出来ることが明らかとなった。

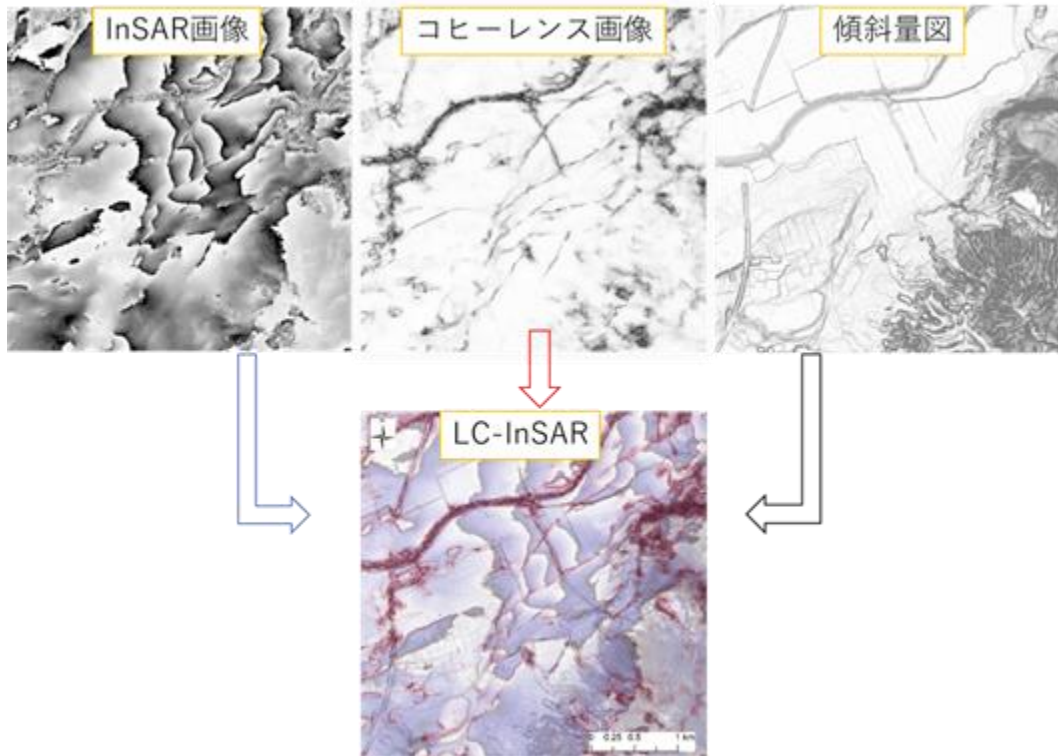


図 2.2.2 LC-InSAR 解析図の作成方法

## (2) 2.5 次元解析

Fujiwara et al. (2000) は観測方向が異なる 2 つのペアの InSAR 解析結果を用いて準東西および準上下方向の変位量を算出する方法を提案した。この 2.5 次元解析では南行軌道と北行軌道の 2 軌道の差分干渉 SAR 解析結果を用いて南北方向の変位を固定することによって準東西および準鉛直方向の変位量を算出することができる。変動量を算出するためには基準点を設定し、基準点からの相対変位量を求めることとなる。2.5 次元解析の概念図を図 2.2.3 に示す。

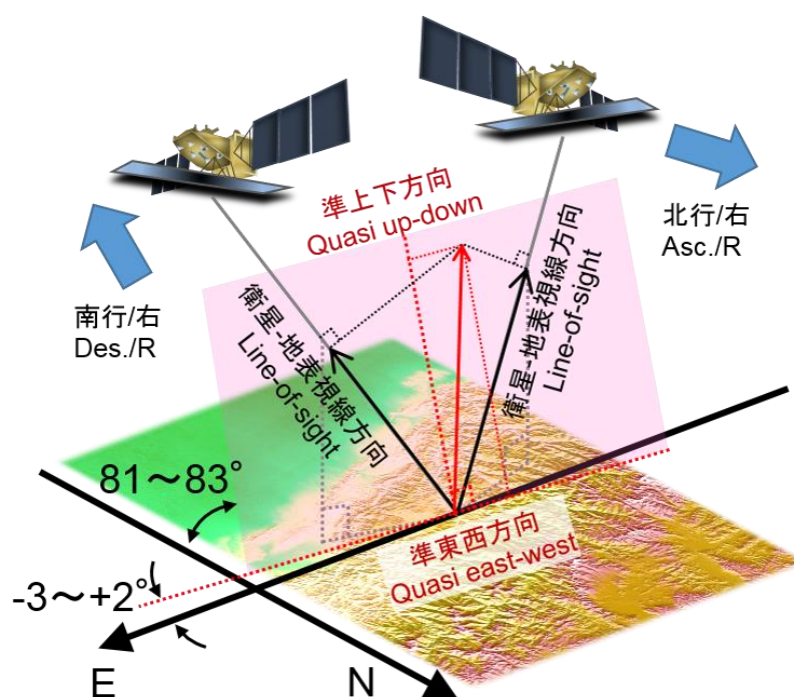


図 2.2.3 2.5 次元解析の概念図

※国土地理院 HP (<https://www.gsi.go.jp/common/000139926.pdf>) より引用

### 2.2.1.2. 時系列干渉 SAR 解析

余効変動を把握するため、長期間の変動量を面的に取得可能な SBAS 解析(Berardino et al., 2002)を実施する。SBAS 解析とは複数の差分干渉 SAR 解析結果から、良好な結果を使用して長期間の変位量を求める方法である(図 2.2.4)。SBAS 解析では 2.5 次元解析と同様に基準点からの相対変位量を算出する。算出された変位量は衛星視線方向からの変位量であることに留意する必要がある。

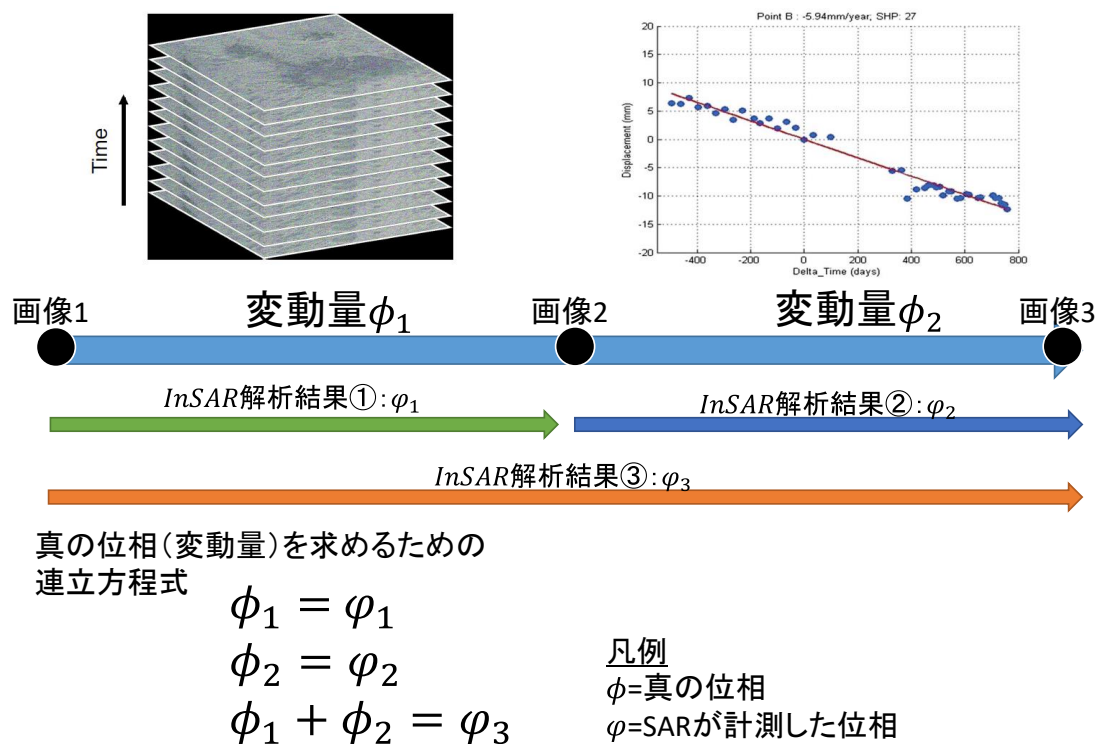


図 2.2.4 SBAS 解析の概念図

### 2.2.1.3. ピクセルオフセット解析

ピクセルオフセット解析は、小林ほか(2011)によれば、2枚の SAR 振幅画像を用いて画像全体の位置合わせ後にも残る画像内の局所的な位置ずれ量を、実際の地物の位置変化、すなわち地表変位量として解釈し、対応する各ピクセル間の残差変位量を計測する技術である(図 2.2.5)。InSAR による地殻変動検出においては、計測可能な地表変位成分は衛星-地表間の距離変化の 1 成分であるが、ピクセルオフセット解析では、衛星-地表間の成分(レンジ成分)に加えて、衛星の飛行方向に平行な地表面上の変位成分(アジマス成分)が計測可能である。これらオフセット量は、レンジオフセット(Range Offset)、アジマスオフセット(Azimuth Offset)と呼ばれている。また、InSAR ではマイクロ波の位相差情報を利用することで cm オーダーの高精度の地表変位計測を行うが、ピクセルオフセット解析は振幅情報を利用することで m オーダーの計測を可能としている。

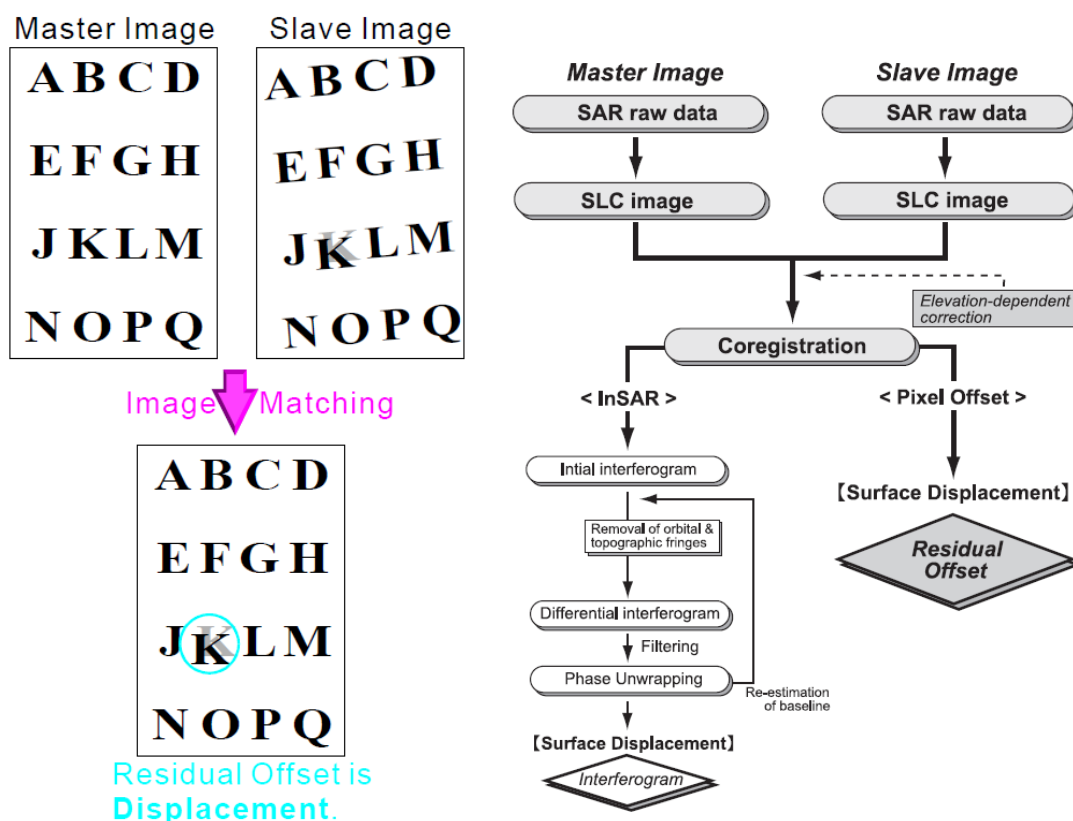


図 2.2.5 ピクセルオフセット解析のイメージ(左)および解析フロー(右)

※小林ほか(2011)より引用

#### 2.2.1.4. 衛星画像データ解析

地震時の水平方向の変位を把握するため光学衛星画像を使用した画像マッチング解析を実施した。画像マッチング解析とは 2 時期の光学衛星画像の相関をとることにより変動量を算出する解析である。画像マッチング解析は 2 時期のずれ量を計算する技術であることから、前処理のオルソ補正は正確に行う必要がある。解析のイメージ図を図 2.2.6 に示す。

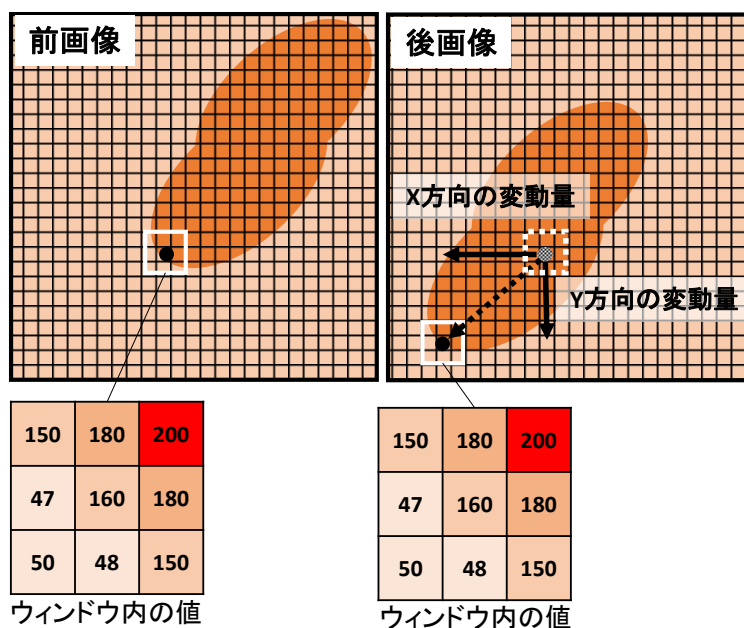


図 2.2.6 画像マッチング解析のイメージ図



## 2.2.2. 熊本地震

### 2.2.2.1. 差分干渉 SAR 解析

差分干渉 SAR 解析には表 2.2.2 に示す SAR 画像を使用した。作成した LC-InSAR 解析図を図 2.2.7 に、2.5 次元解析結果を図 2.2.8～図 2.2.9 に示す。

表 2.2.2 差分干渉 SAR 解析に使用した画像

| No | 解析ペア名 | シーン ID                | 観測日       | オフナディア角 | ビーム番号 | 手法       |
|----|-------|-----------------------|-----------|---------|-------|----------|
| 1  | 北行左   | ALOS2102390670-160415 | 2016/4/15 | 21.9    | U1-4  | LC-InSAR |
| 2  |       | ALOS2104460670-160429 | 2016/4/29 | 21.9    | U1-4  |          |
| 3  | 北行右   | ALOS2099880640-160329 | 2016/3/29 | 38.2    | U2-9  | 2.5 次元解析 |
| 4  |       | ALOS2104020640-160426 | 2016/4/26 | 38.2    | U2-9  |          |
| 5  | 南行右   | ALOS2096552950-160307 | 2016/3/7  | 32.4    | U2-7  |          |
| 6  |       | ALOS2096552960-160307 | 2016/3/7  | 32.4    | U2-7  |          |
| 7  |       | ALOS2102762950-160418 | 2016/4/18 | 32.4    | U2-7  |          |
| 8  |       | ALOS2102762960-160418 | 2016/4/18 | 32.4    | U2-7  |          |

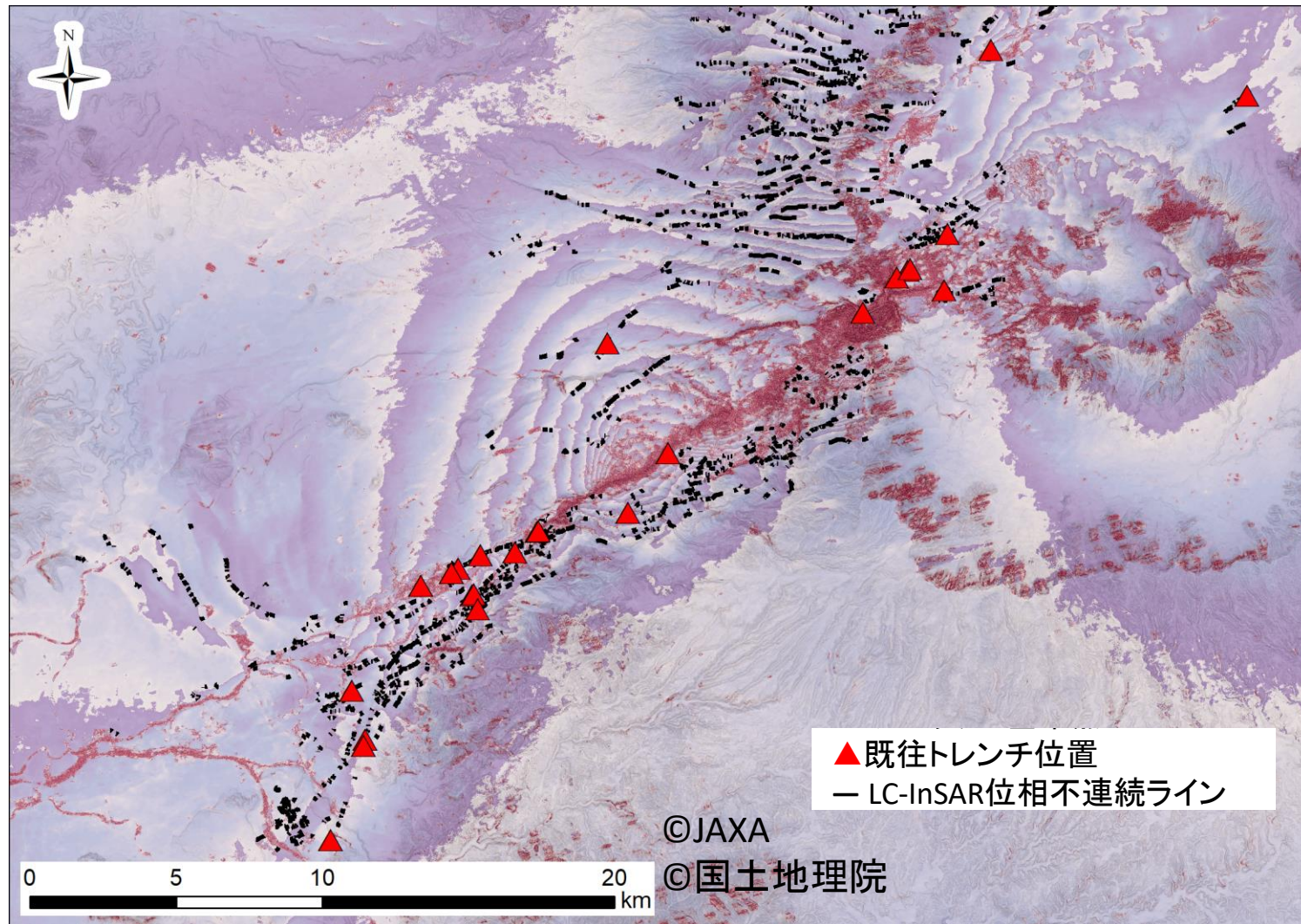


図 2.2.7 LC-InSAR 解析図



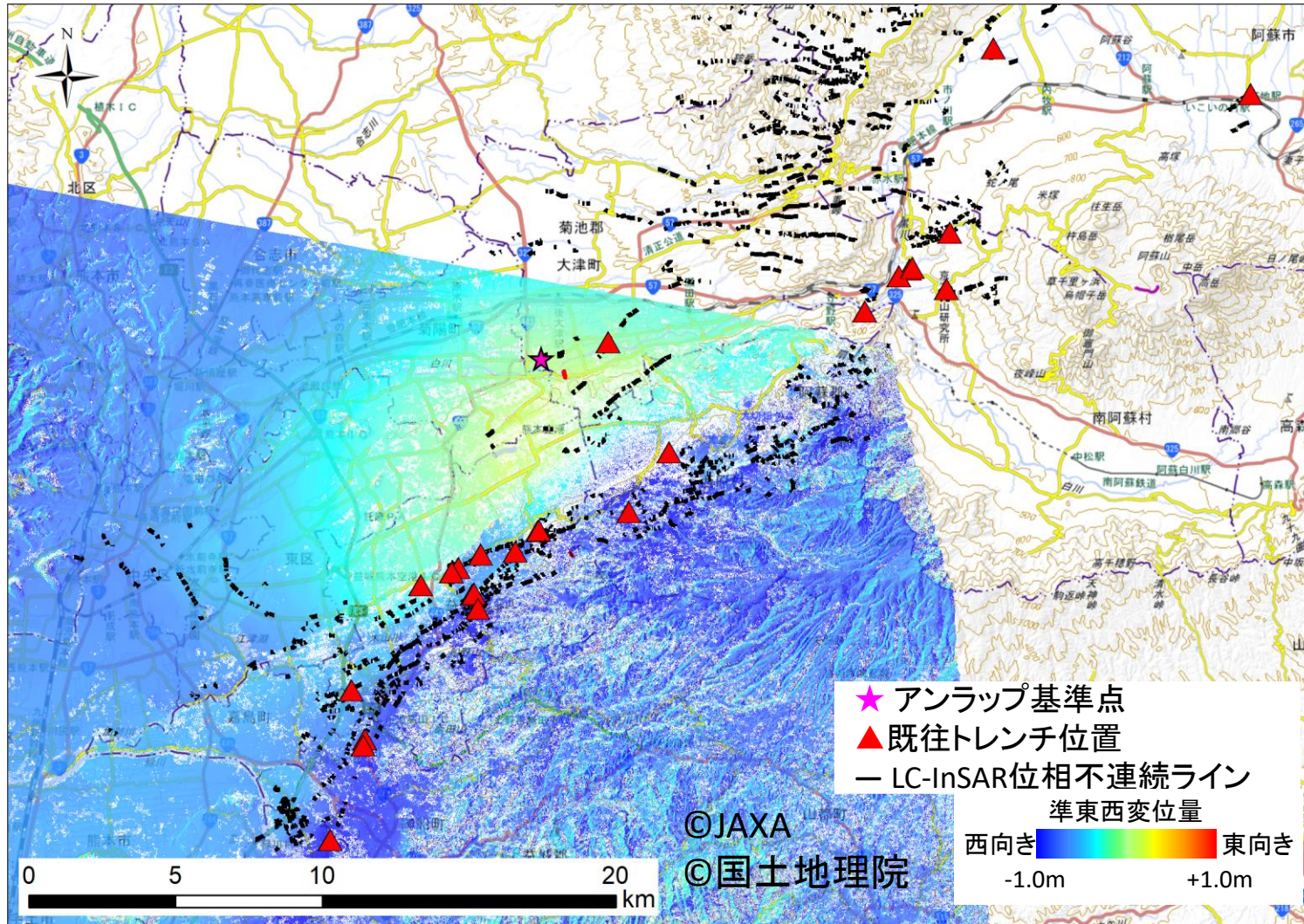


图 2.2.8 2.5次元解析結果（準東西方向変位量画像）



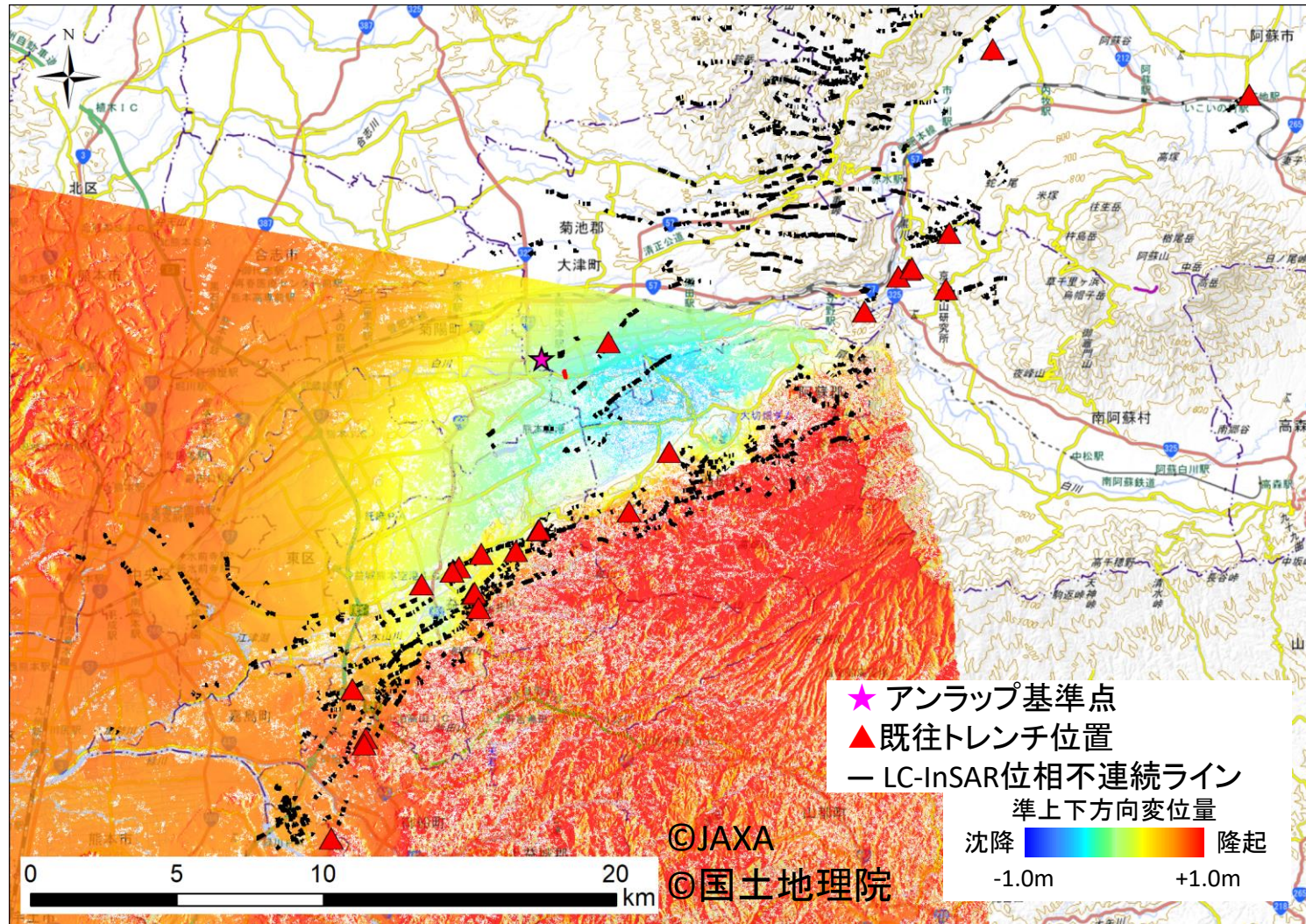


図 2.2.9 2.5次元解析結果（準上下方向変位量画像）

### 2.2.2.1. 時系列干渉 SAR 解析

時系列干渉 SAR 解析は余効変動を把握するために実施し、解析手法は SBAS 解析を用いた。解析期間は 2016 年 4 月～2018 年 10 月までとし、画像を選定した（図 2.2.10）。図中丸印で示したものが ALOS-2 画像のある日付を示す。2018 年をまでの期間において一定間隔かつ条件の悪い画像を使用しないように 11 枚を選定した SBAS 解析結果を図 2.2.11 に示す。

SBAS 解析結果の妥当性を確認するため、変位が生じている箇所の現地踏査を行い変位の有無を確認した。また断面図を作成し変位境界の縦断方向断面図および時系列変位量図を作成し余効変動について検討した。

またその他の箇所でも余効変動の可能性のある箇所の確認を行った。

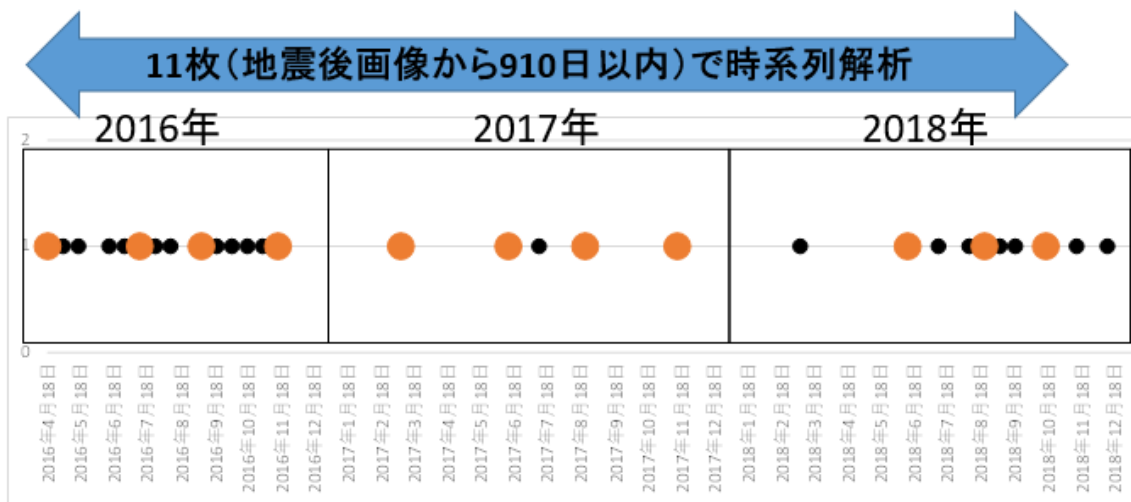


図 2.2.10 SBAS 解析に使用した画像



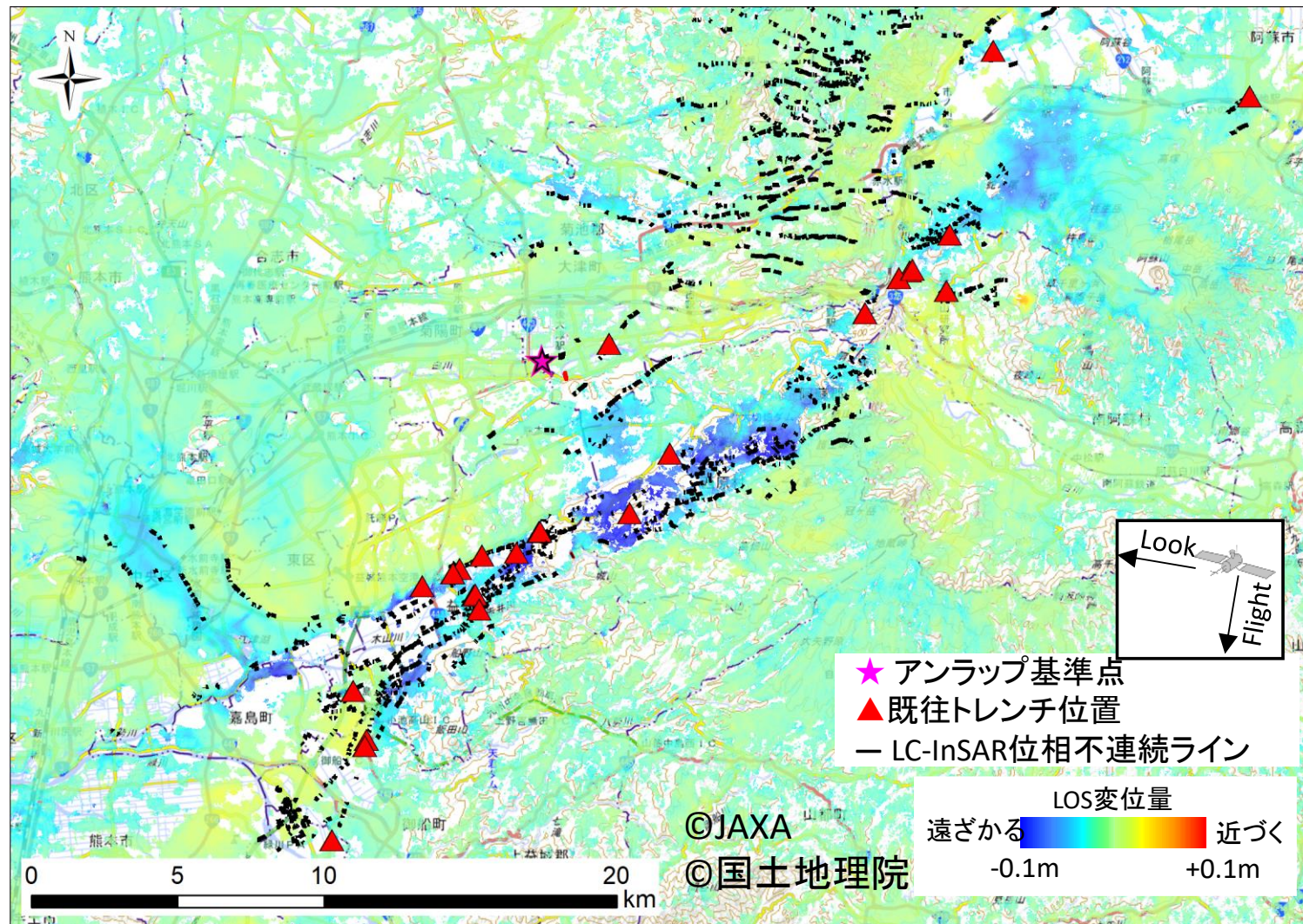


図 2.2.11 SBAS 解析結果

### (1) 現地踏査結果との比較

SBAS 解析において明瞭な変位境界を確認することができた高木周辺で現地踏査を行った。

Profile1 周辺には地震後に補修された道路に亀裂が確認された (図 2.2.12)。この亀裂よりも東側において衛星から遠ざかる方向に 4cm 程度の変位が生じている (図 2.2.13)。この変位は 2016 年 4 月の地震発生後から半年間で大きく生じ、その後は緩やかとなっている (図 2.2.14)。

Profile2 も同様に地震後に補修された道路に亀裂が確認され (図 2.2.12) 亀裂よりも東側において衛星から遠ざかる方向に 6cm 程度の変位が生じている (図 2.2.15)。この変位は Profile1 と同様に 2016 年 4 月の地震発生後から半年間で生じ、その後は緩やかとなっている (図 2.2.16)。Profile2 において、変位境界は LC-InSAR の位相不連続ラインと一致していることがわかる (図 2.2.15)。

Profile3 周辺ではブロック塀の変形が確認され (図 2.2.12)、これを境とした南側では衛星から遠ざかる方向に 7cm 程度、北側では 10cm 程度の変位が生じている (図 2.2.17)。変位の大きかった北側においては 2016 年 4 月の地震発生後からの半年間で 7cm 程度の変位が生じ、その後 2018 年 10 月までに 3cm 程度の変位が生じている (図 2.2.18)。Profile3 でも変位境界は LC-InSAR の位相不連続ラインと一致していることがわかる。

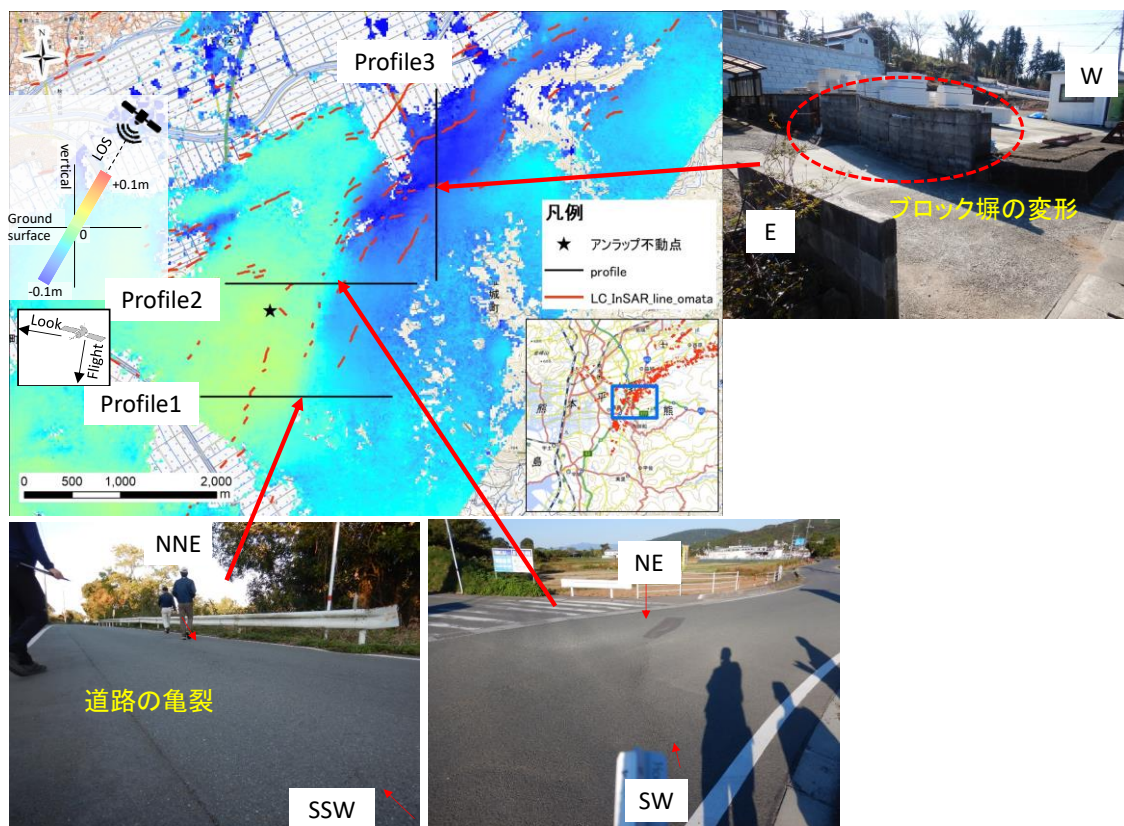


図 2.2.12 SBAS で余効変動を確認した箇所と Profile 取得位置



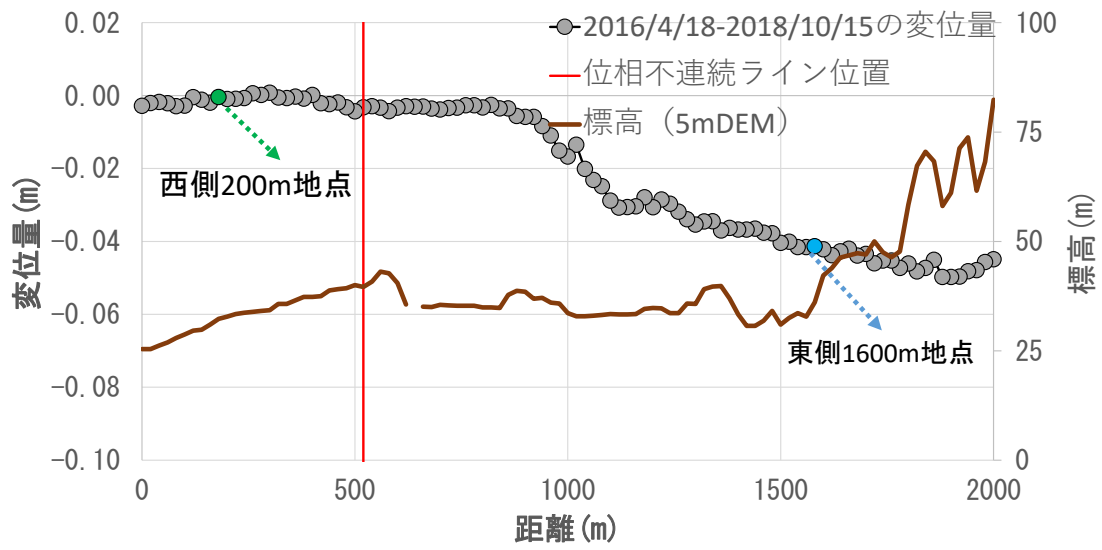


図 2.2.13 プロファイル 1 2016/4/18-18/10/15 までの累積変位量

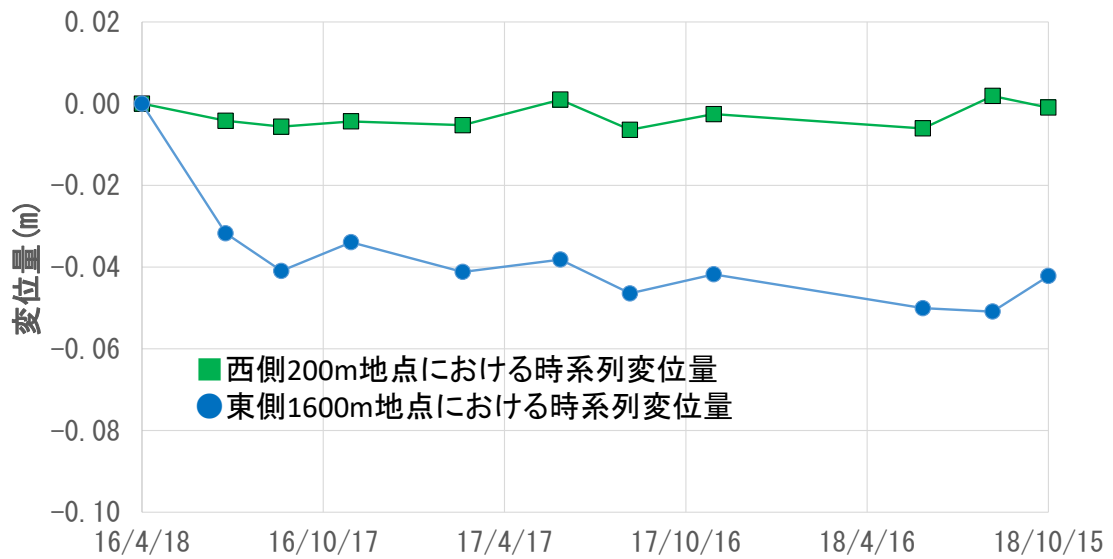


図 2.2.14 プロファイル 1 地点ごとの時系列変位量

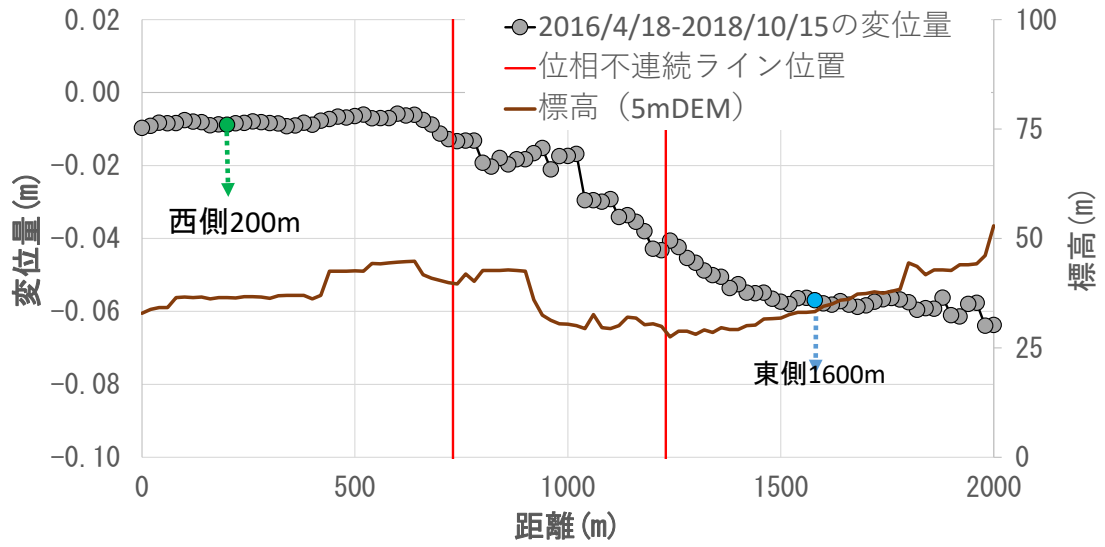


図 2.2.15 プロファイル 2 2016/4/18-18/10/15 までの累積変位量

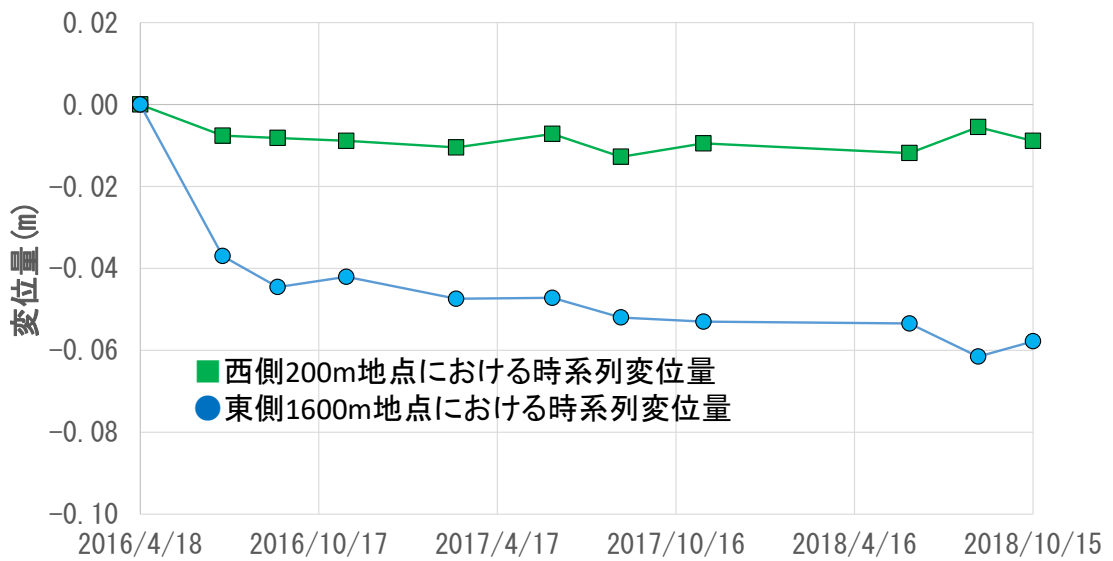


図 2.2.16 プロファイル 2 地点ごとの時系列変位量

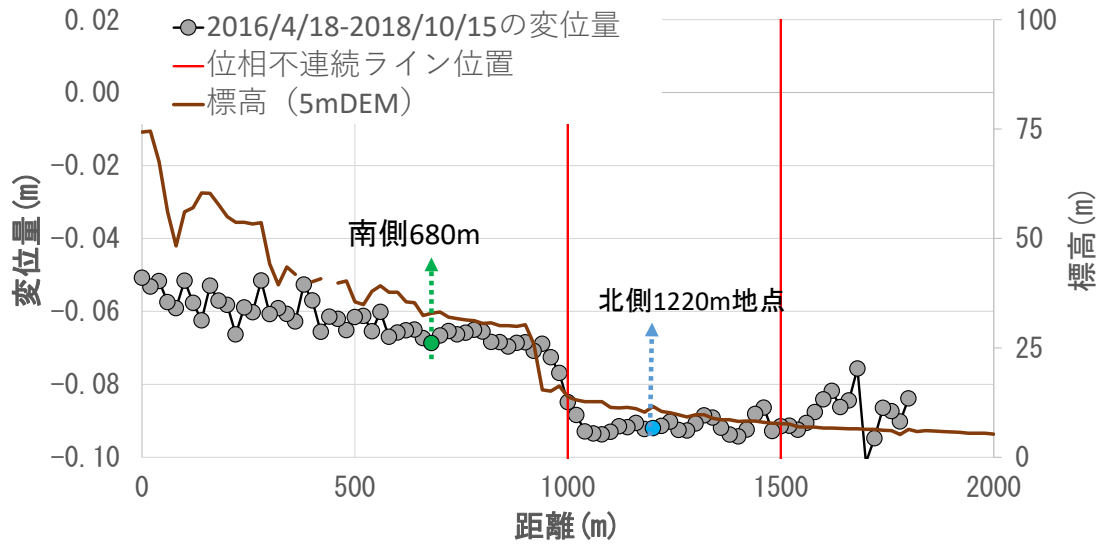


図 2.2.17 プロファイル 3 2016/4/18-18/10/15 までの累積変位量

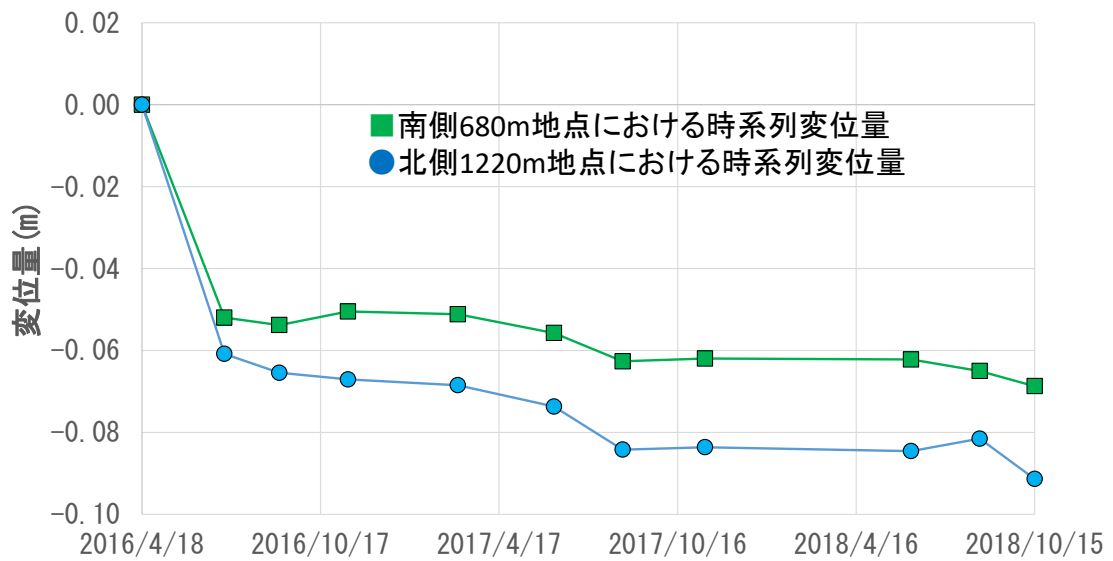


図 2.2.18 プロファイル 3 地点ごとの時系列変位量



(2) その他の箇所の余効変動

SBAS 解析結果において余効変動と考えられる箇所を調査した。出ノ口断層周辺や大津周辺でも余効変動が確認され、大津周辺では LC-InSAR の位相不連続ラインを境界に余効変動によって 3cm 程度の変位が生じていることが確認できる。

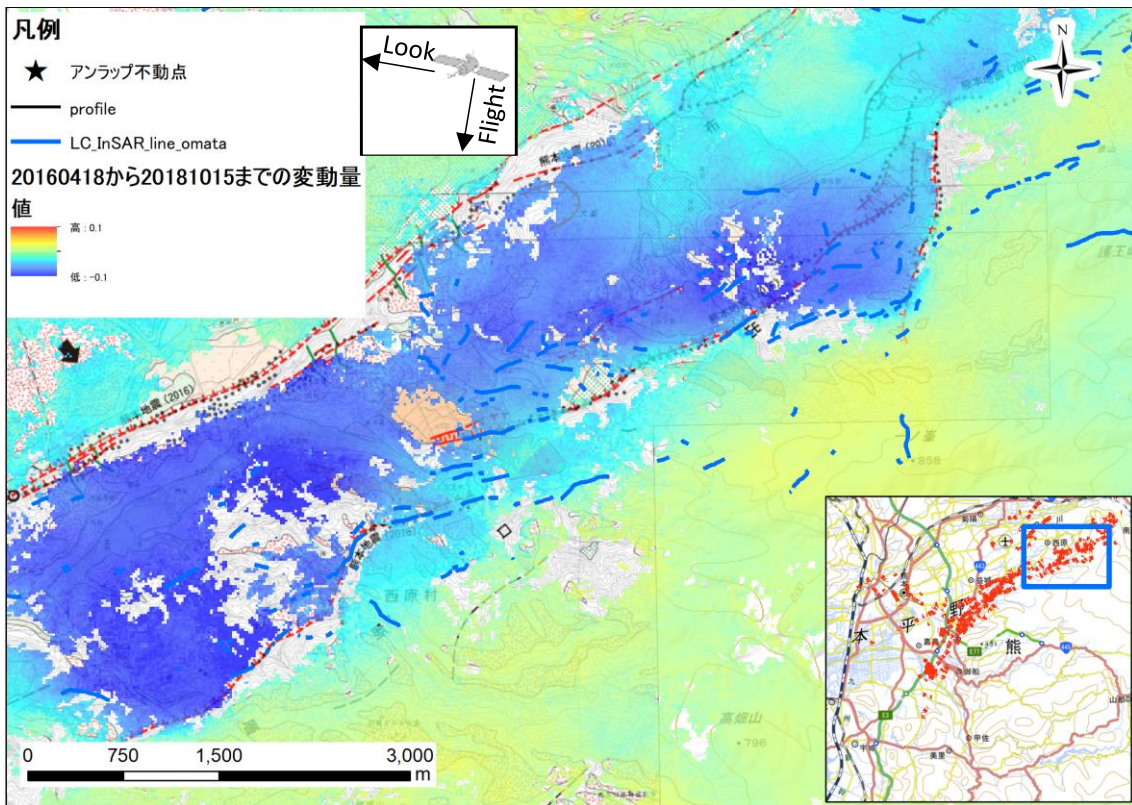


図 2.2.19 出ノ口断層周辺の SBAS 解析結果

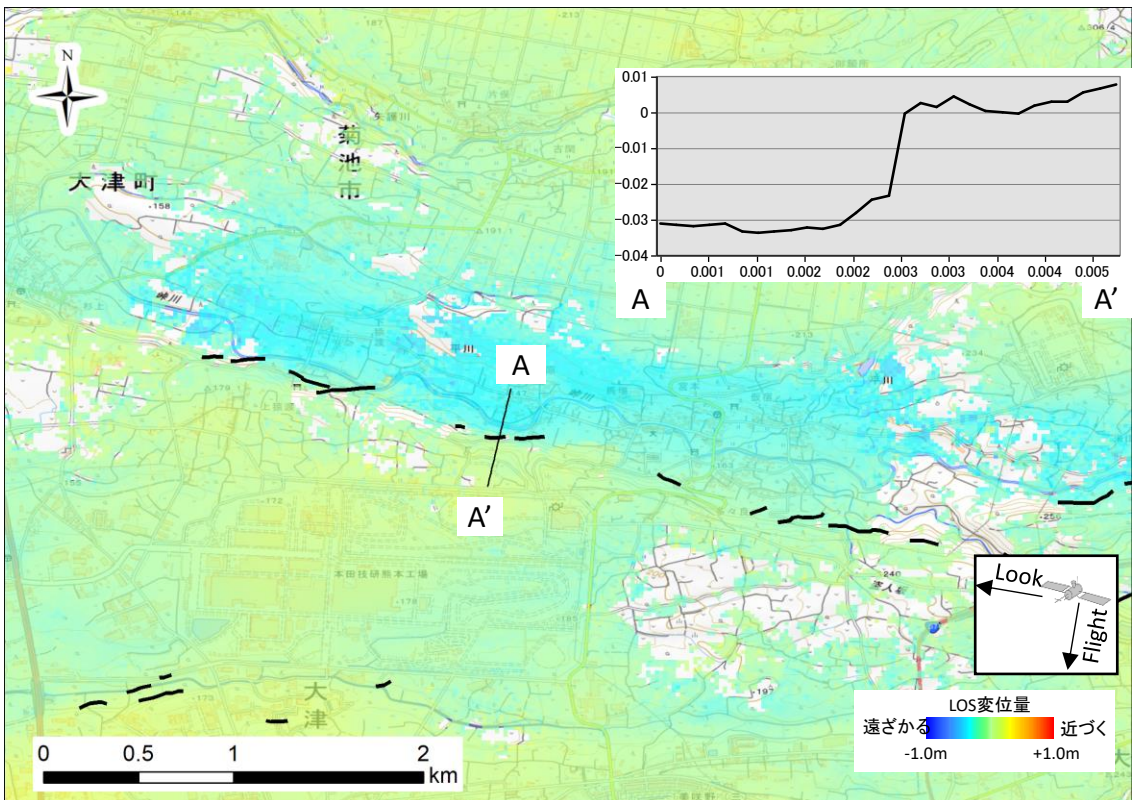


図 2.2.20 大津周辺の SBAS 解析結果

### 2.2.2.2. 衛星画像データ解析

衛星画像データを用いて画像マッチング解析を実施した。画像マッチング解析は 2 期間の画像のずれからずれ量を算出する解析手法である。解析によって求められるずれ量には誤差を含んでいる可能性がある。SPOT 衛星画像を用いた画像マッチング解析の精度は明らかではないことから、2つの手法により画像マッチング解析の精度検証を行った上で、画像マッチング解析を実施した。

#### (1) 画像マッチング解析

画像マッチング解析では地震前 2 枚および地震後 2 枚の計 4 枚を使用した（表 2.2.3）。オルソ補正の実施にあたっては、地震前の衛星画像に対して地震前に撮影されている空中写真を使用して（図 2.2.21 の上）、地震後の衛星画像に対して地震後に撮影されている空中写真を使用して（図 2.2.21 の下）GCP を設定し、解析精度を高めた。

画像マッチング解析では Cosi-Corr ソフトウェアを使用し画像相関計算を実施した。一例として No2 と No4 を用いた画像マッチング解析結果を実施した。図 2.2.22 は 2 期間の東西方向変位量画像、図 2.2.23 は南北方向変位量画像である。どちらの図でもメイントレスを境に変位方向が変化していることが確認できる。

表 2.2.3 画像マッチング解析に使用した画像

| No | 時期  | 日付         | 入射角<br>(度) | 太陽方位角<br>(度) | 太陽高度<br>(度) |
|----|-----|------------|------------|--------------|-------------|
| 1  | 地震前 | 2015/12/14 | 8.0        | 155.9        | 30.2        |
| 2  |     | 2016/1/16  | 1.9        | 150.4        | 30.2        |
| 3  | 地震後 | 2016/4/29  | 3.0        | 124.9        | 61.3        |
| 4  |     | 2017/1/1   | 3.6        | 152.9        | 29.0        |



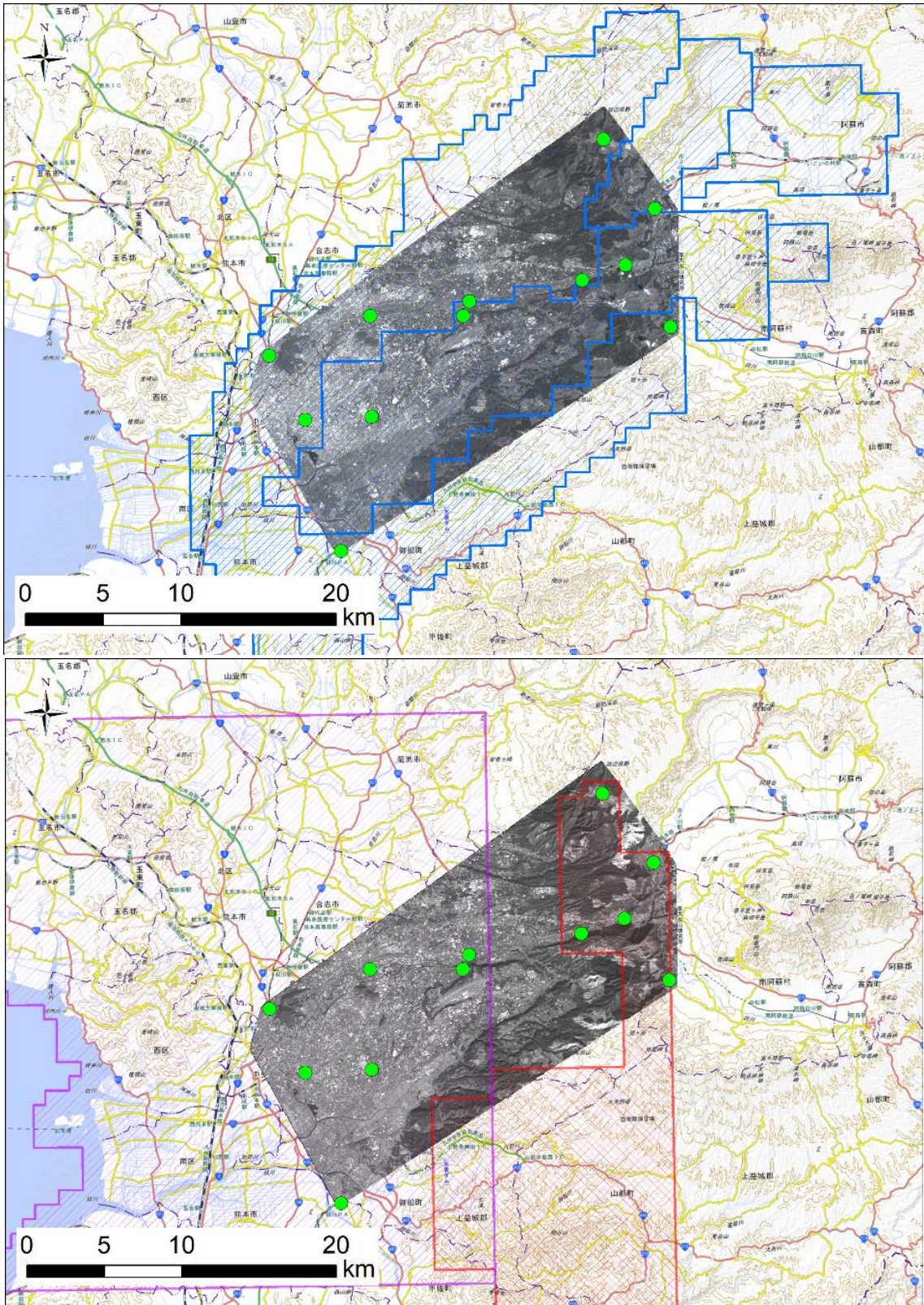


図 2.2.21 オルソ補正に使用した GCP 位置（上：地震前、下：地震後）



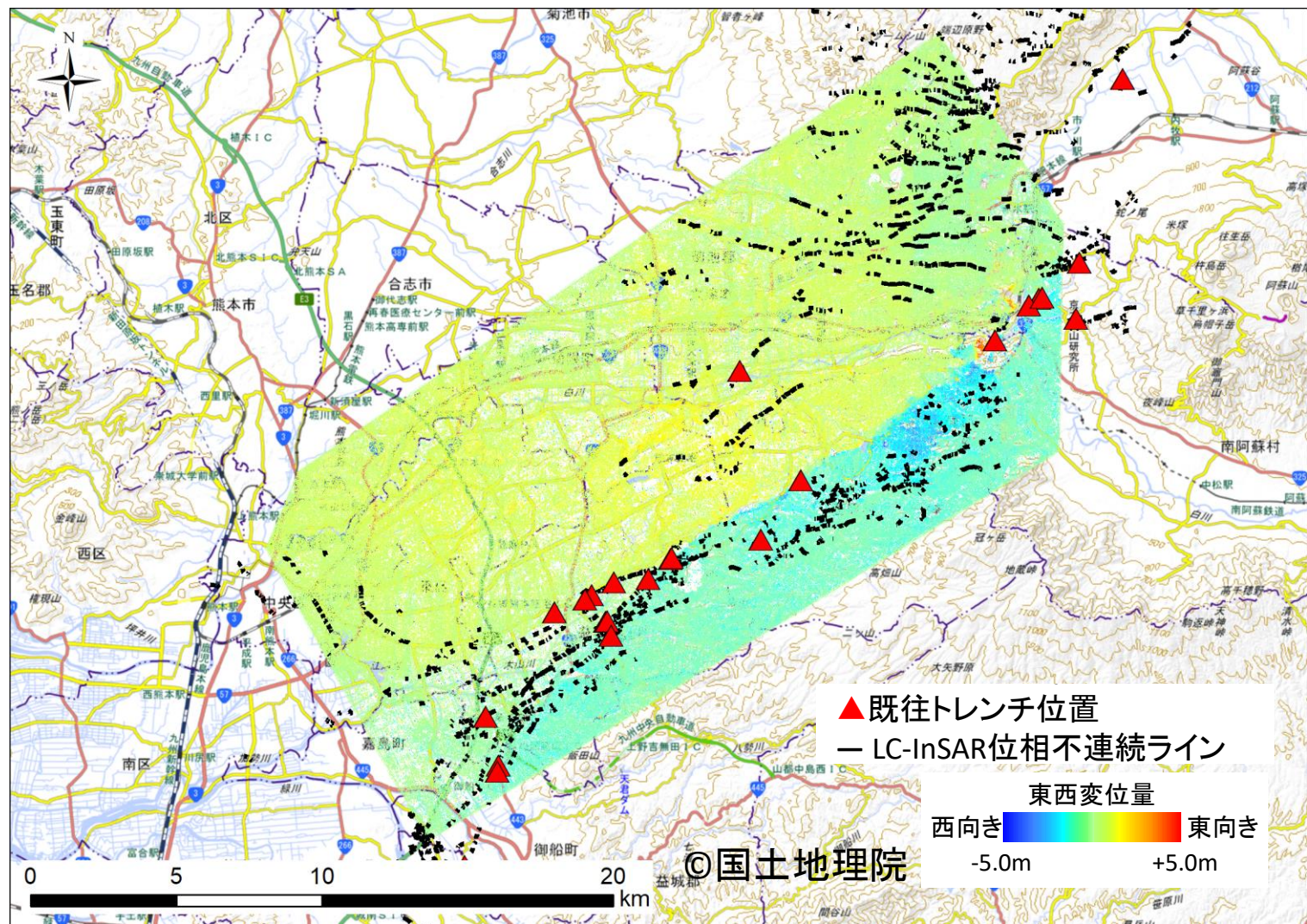


図 2.2.22 画像マッチング解析結果（東西方向変位量画像）



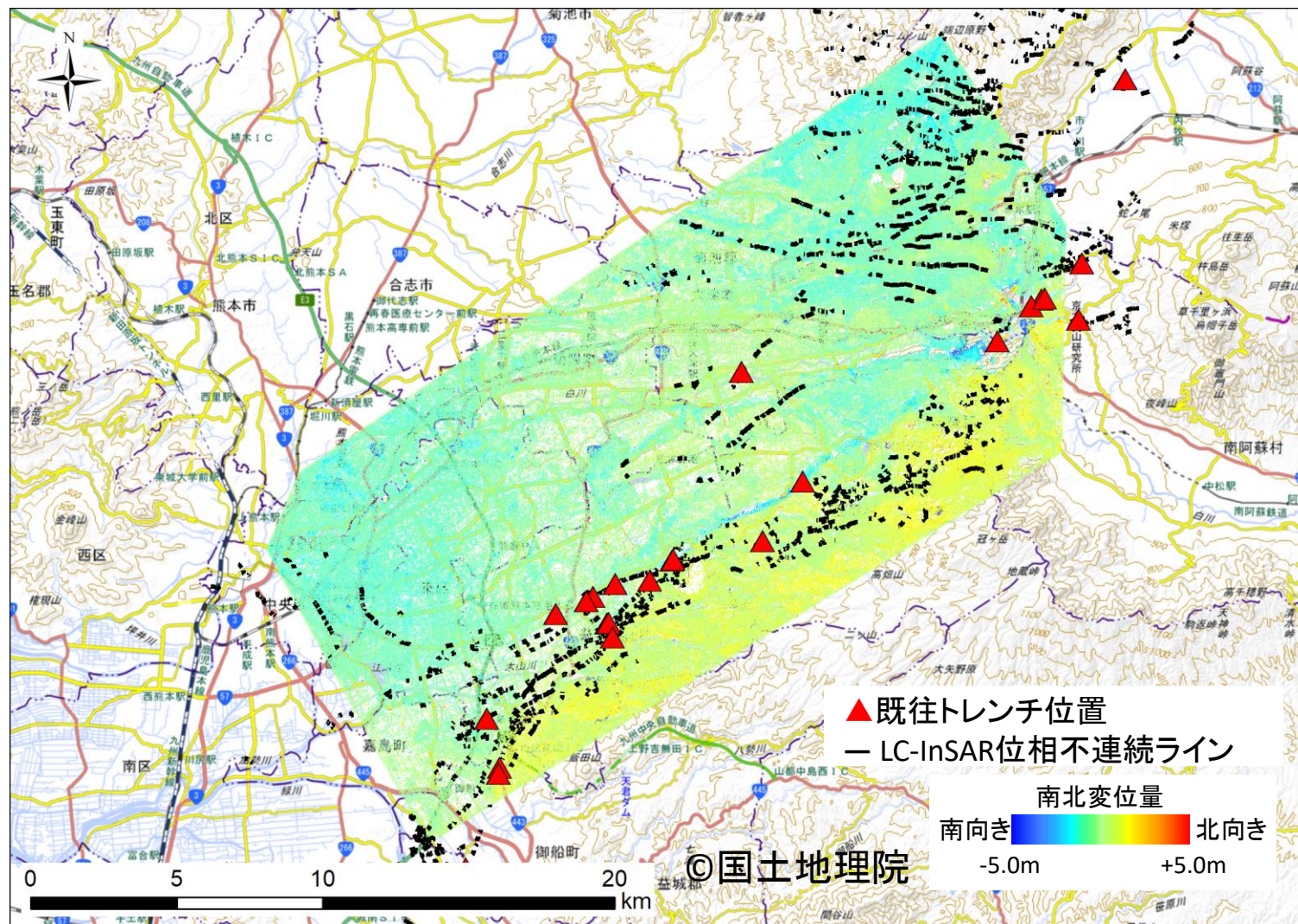


図 2.2.23 画像マッチング解析結果（南北方向変位量画像）

## (2) 変位がない時期間の解析による精度検証

変位が生じていない時期同士のペアを用いた解析結果では、理想状態での変位量は 0 になるはずであるが、誤差が発生している場合には変位として表れることとなる。そこで、地震発生前同士の解析ペア（地震前前）と、地震発生後同士の解析ペア（地震後後）を用いて画像マッチング解析を行い精度の検証を行った。

精度検証を行う解析ペアは地震前前では入射角が異なり、地震後後では季節が異なる観測条件が違う 2 つの解析ペアとした（表 2.2.4）。衛星位置と解析結果を図 2.2.24 に示す。

表 2.2.4 精度検証に使用する解析ペア

| 解析ペア | 入射角 | 季節    |      |
|------|-----|-------|------|
|      |     | 太陽方位角 | 太陽高度 |
| 地震前前 | 異なる | 同じ    | 同じ   |
| 地震後後 | 同じ  | 異なる   | 異なる  |



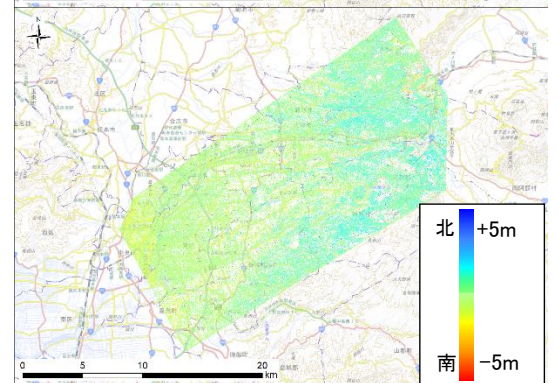
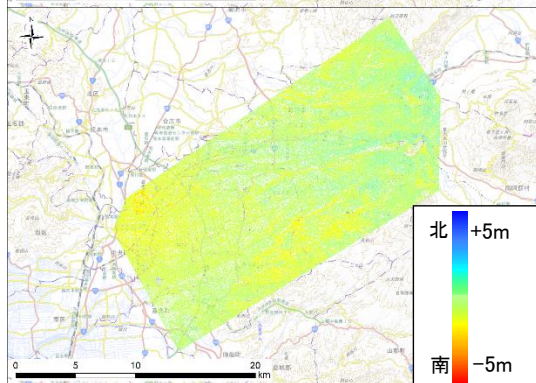
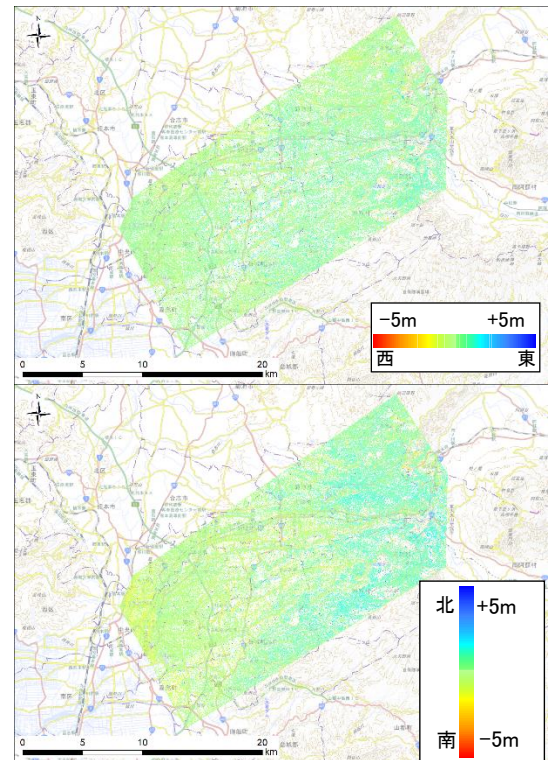
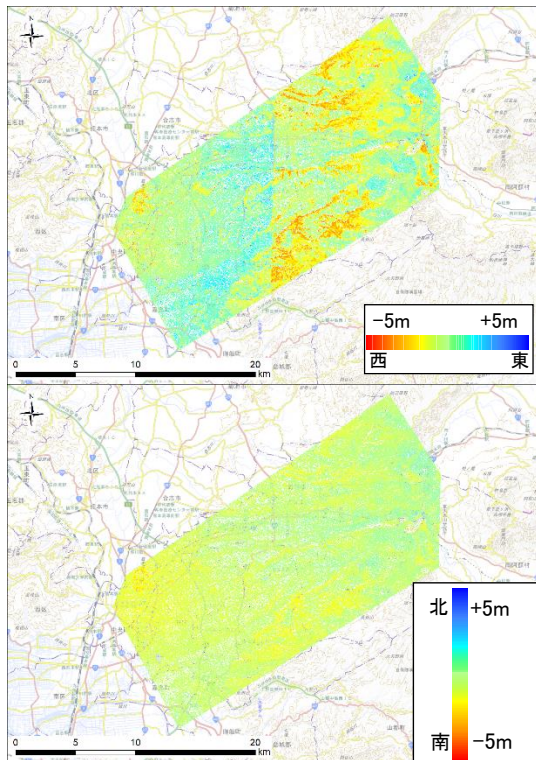
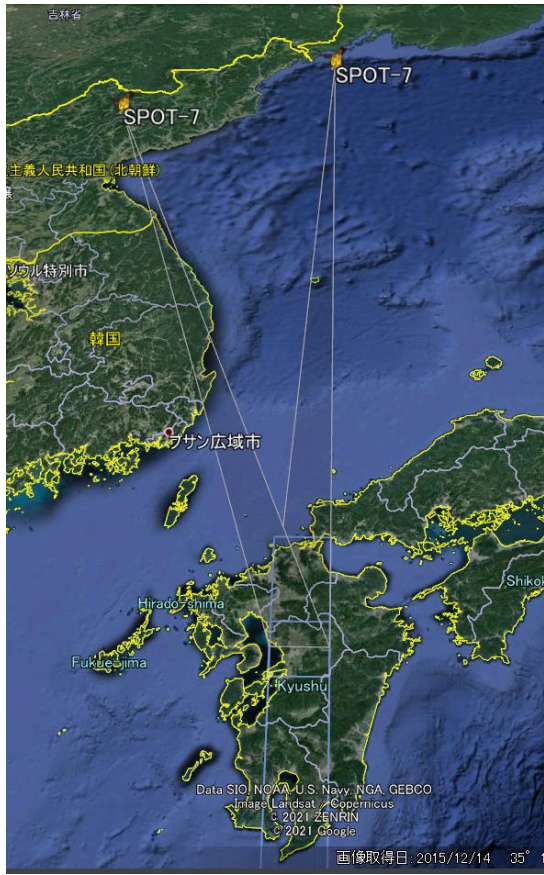


図 2.2.24 条件ごとの画像マッチング解析結果  
(左：地震前前は入射角が異なる、右：地震後は入射角に近い)

観測条件が異なる 2 つのペアを用いて、入射角の違いおよび季節の違いについての検証を試みた。画像マッチング解析では 2 時期の相関がとれず解析できない範囲が生じる。図 2.2.25 に画像マッチング解析結果と、同範囲の光学衛星画像を示す。着色域は変位量の値を表し、色がついていない領域は解析結果が得られなかった（相関がとれなかった）ことを示す。たとえば、市街地ではよく解析結果が得られているが、水田や農地では色の抜けが多く解析結果が得られていない。以上より、解析可能な範囲の違いについて詳細に把握するため、解析可能範囲率について検証した。検証にあたっては、土地被覆ごとに精度が異なることが想定されるため、JAXA が作成・提供している「高解像度土地利用・被覆被覆図」を用いて、土地被覆ごとに解析可能範囲率の検討を行った。（図 2.2.26）。

解析可能範囲率（図 2.2.27）では、都市および森林域で解析範囲率が高く、水田および畑地で低い結果となった。また、地震前前（入射角異、季節同）の解析ペアの方が地震後後（入射角同、季節異）の解析ペアと比較して解析可能範囲率が高い結果となった。

解析精度（図 2.2.28）では、都市および畑地などの平地の精度が高く、森林域は低い結果となった。また、地震後後（入射角同、季節異）の解析ペアの方が地震前前（入射角異、季節同）の解析ペアと比較して解析精度が高い結果となった。

以上の検証の結果、以下の 2 点が明らかとなった。

- 解析可能範囲率には季節の違いが大きく影響する。
- 解析精度には入射角の違いが大きく影響する。



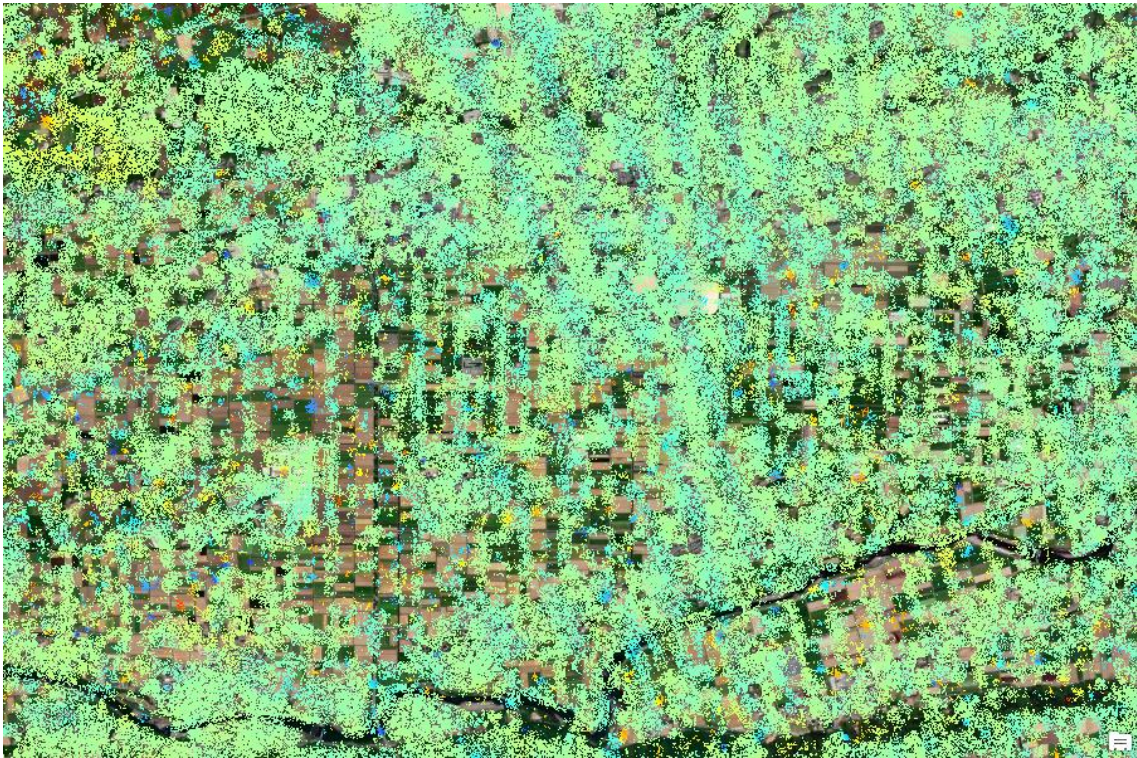


図 2.2.25 画像マッチング解析結果（上）と同範囲の光学衛星画像（下）



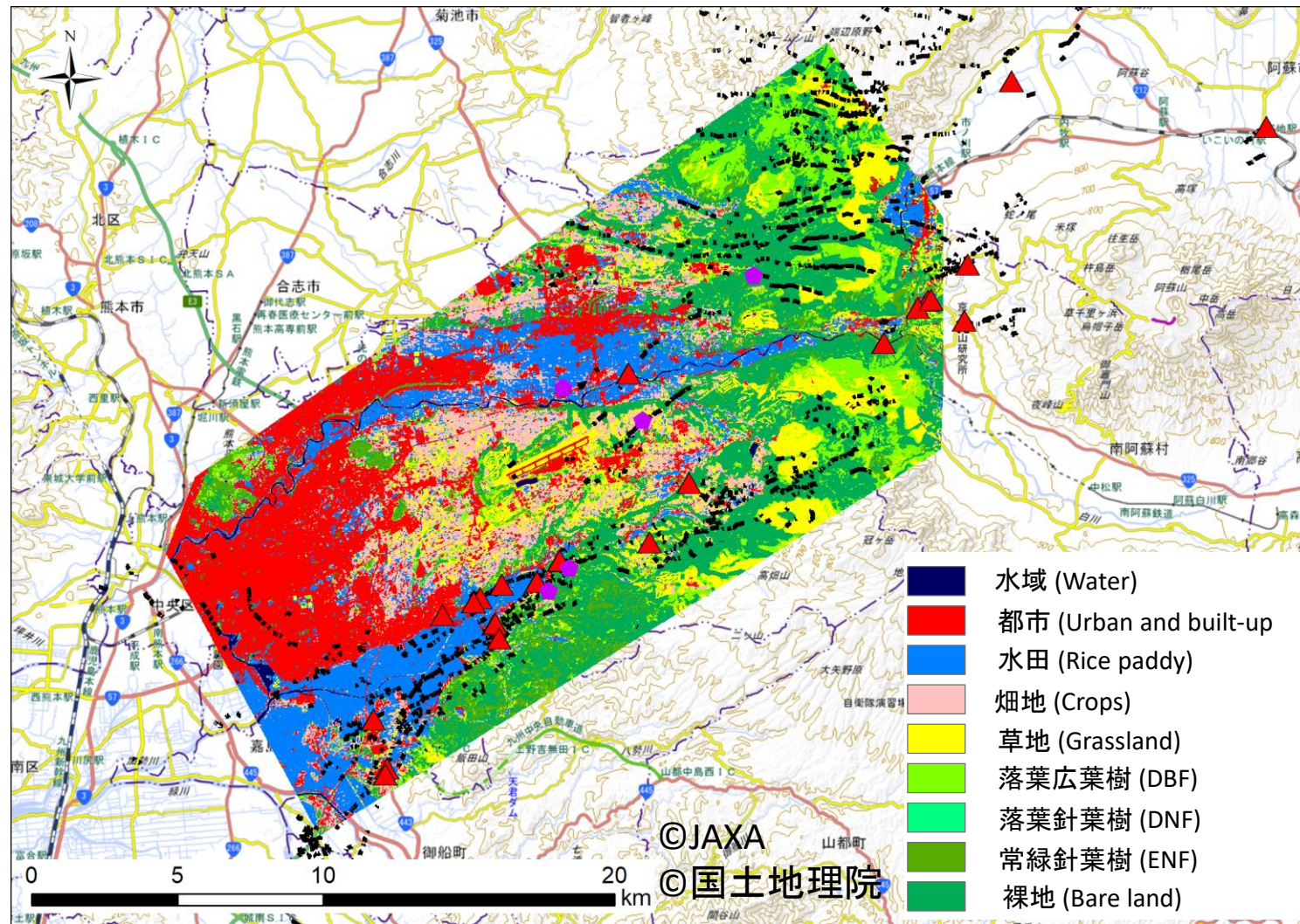


図 2.2.26 対象範囲の高解像度土地利用・土地被覆図

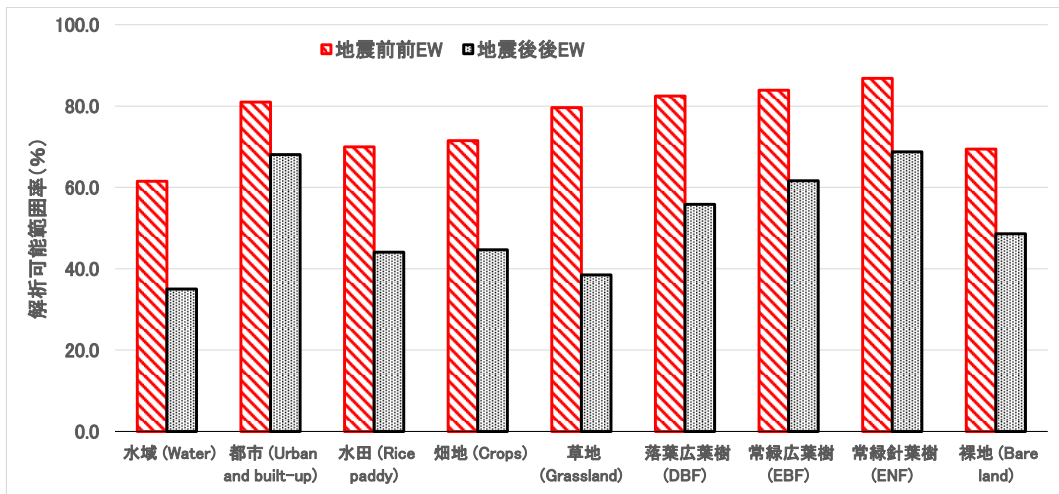


図 2.2.27 解析可能範囲率

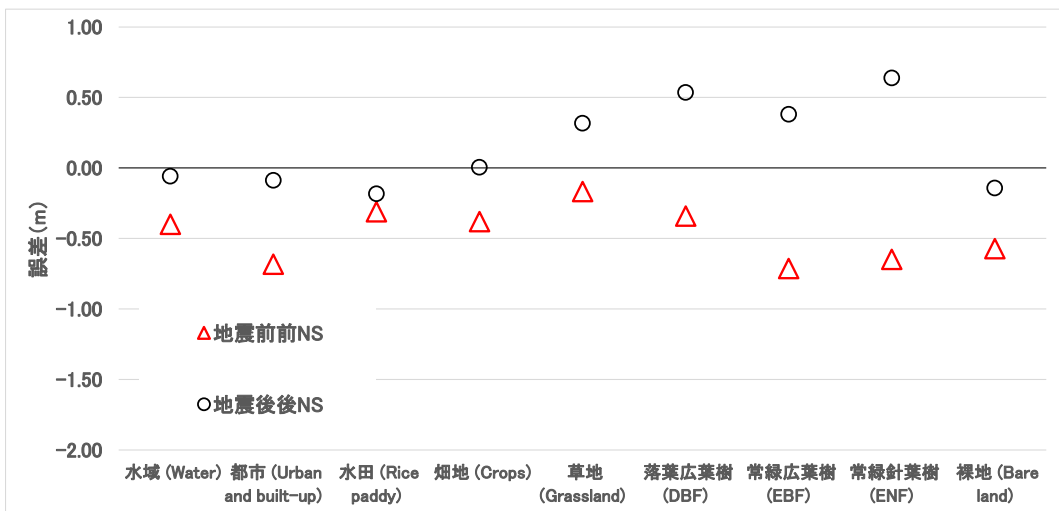
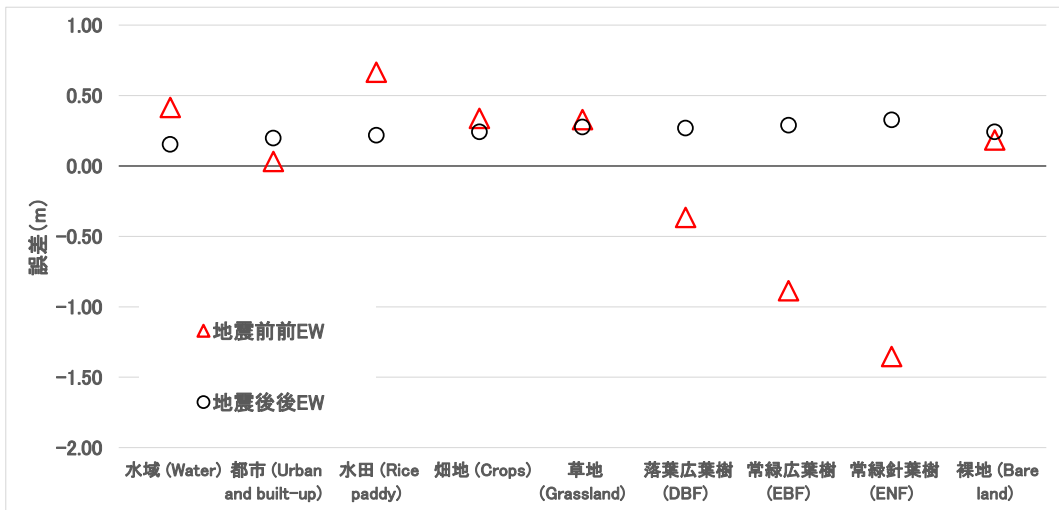


図 2.2.28 解析精度 (上：東西方向変位量画像、下：南北方向変位量画像)



### (3) 測量成果を用いた精度検証

変位がない時期における解析の精度検証結果を踏まえ、良好な画像ペアとして、地震前は2016/1/16を地震後は2017/1/1を選定した(表 2.2.5)。そのうえで、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精度検証を行うこととした。対比する実現象としては、国土交通省土地・建設産業局地籍整備課が公表している「熊本地震に伴う被災地域境界基本調査」における測量成果を用いた。画像マッチング解析範囲と測量成果の分布図を図 2.2.29 に、画像マッチング解析結果を図 2.2.30～図 2.2.31 に示す。

表 2.2.5 画像マッチング解析に使用した画像

| No | 時期  | 日付         | 入射角(度)         | 太陽方位角(度) | 太陽高度(度)         |
|----|-----|------------|----------------|----------|-----------------|
| 1  | 地震前 | 2015/12/14 | <del>8.0</del> | 155.9    | 30.2            |
| 2  |     | 2016/1/16  | 1.9            | 150.4    | 30.2            |
| 3  | 地震後 | 2016/4/29  | 3.0            | 124.9    | <del>61.3</del> |
| 4  |     | 2017/1/1   | 3.6            | 152.9    | 29.0            |

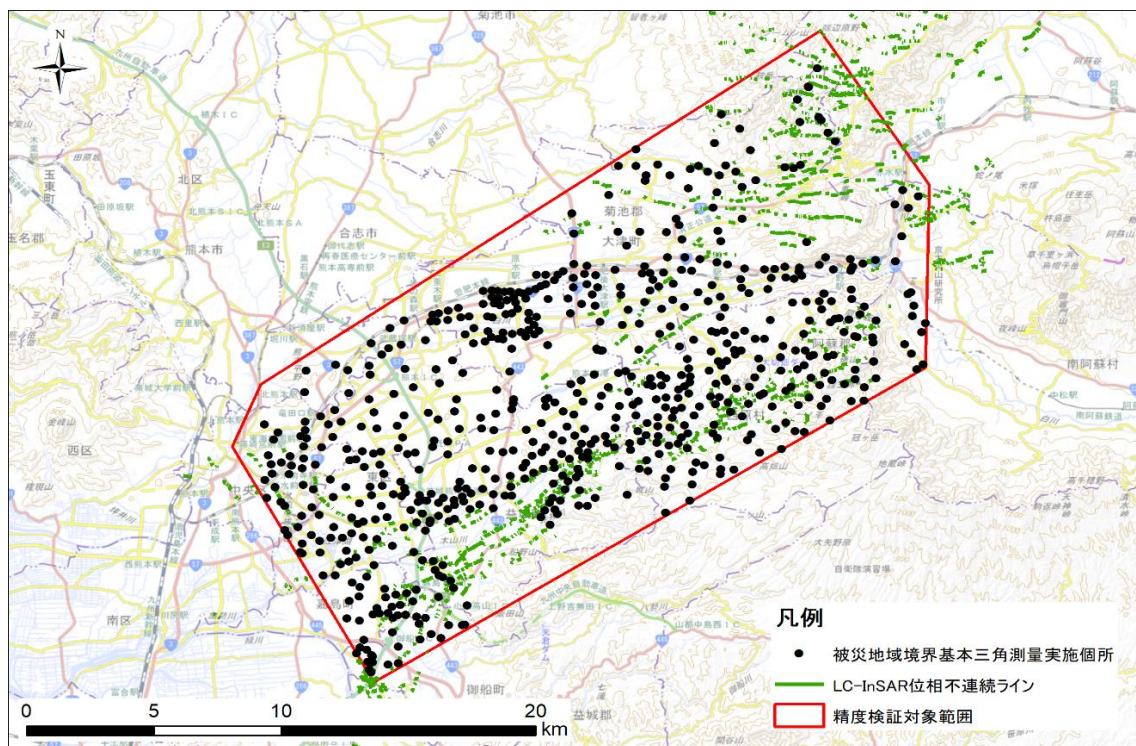


図 2.2.29 画像マッチング解析範囲と測量成果分布



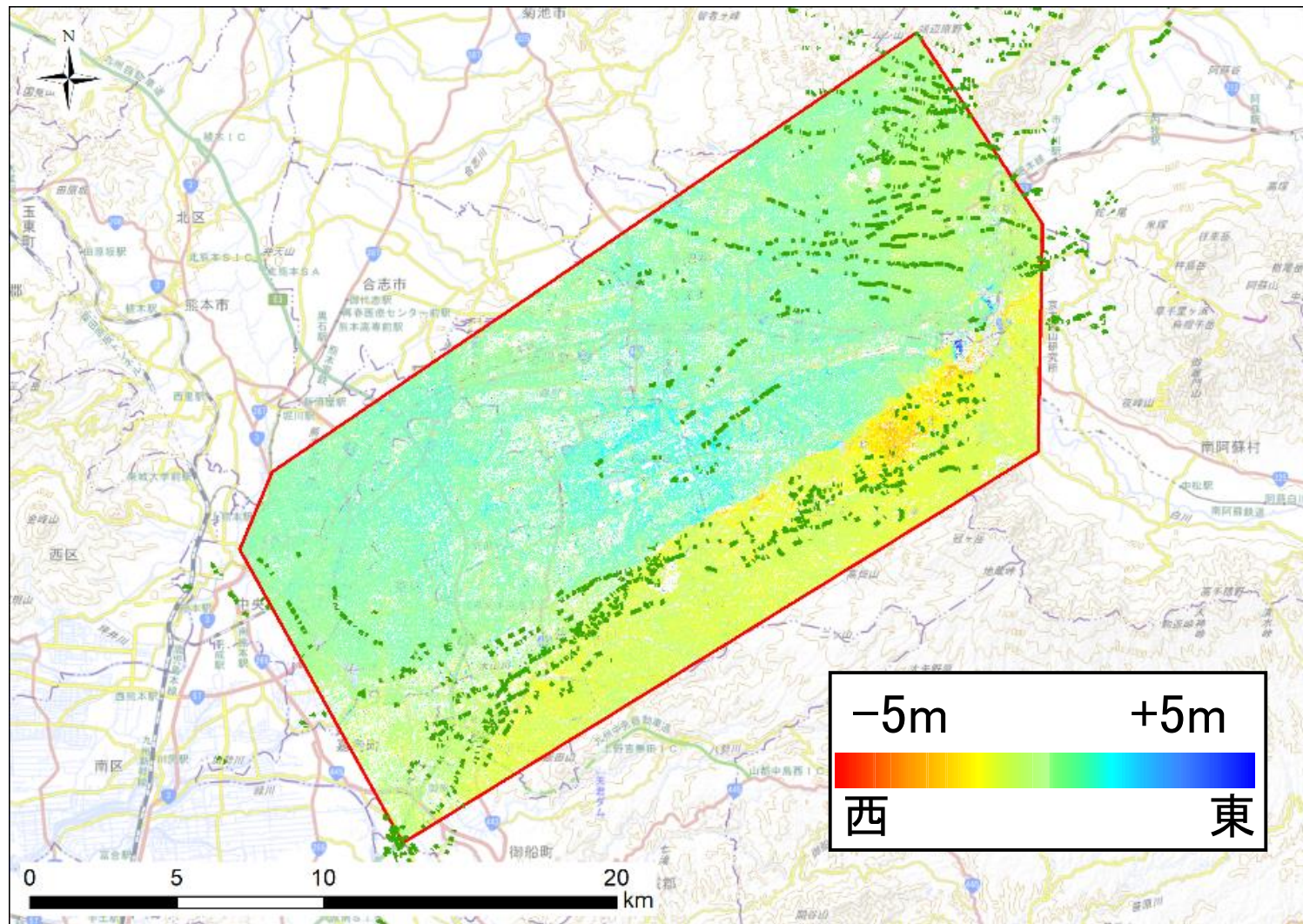


図 2.2.30 地震前後の画像マッチング解析結果（東西方向変位量画像）



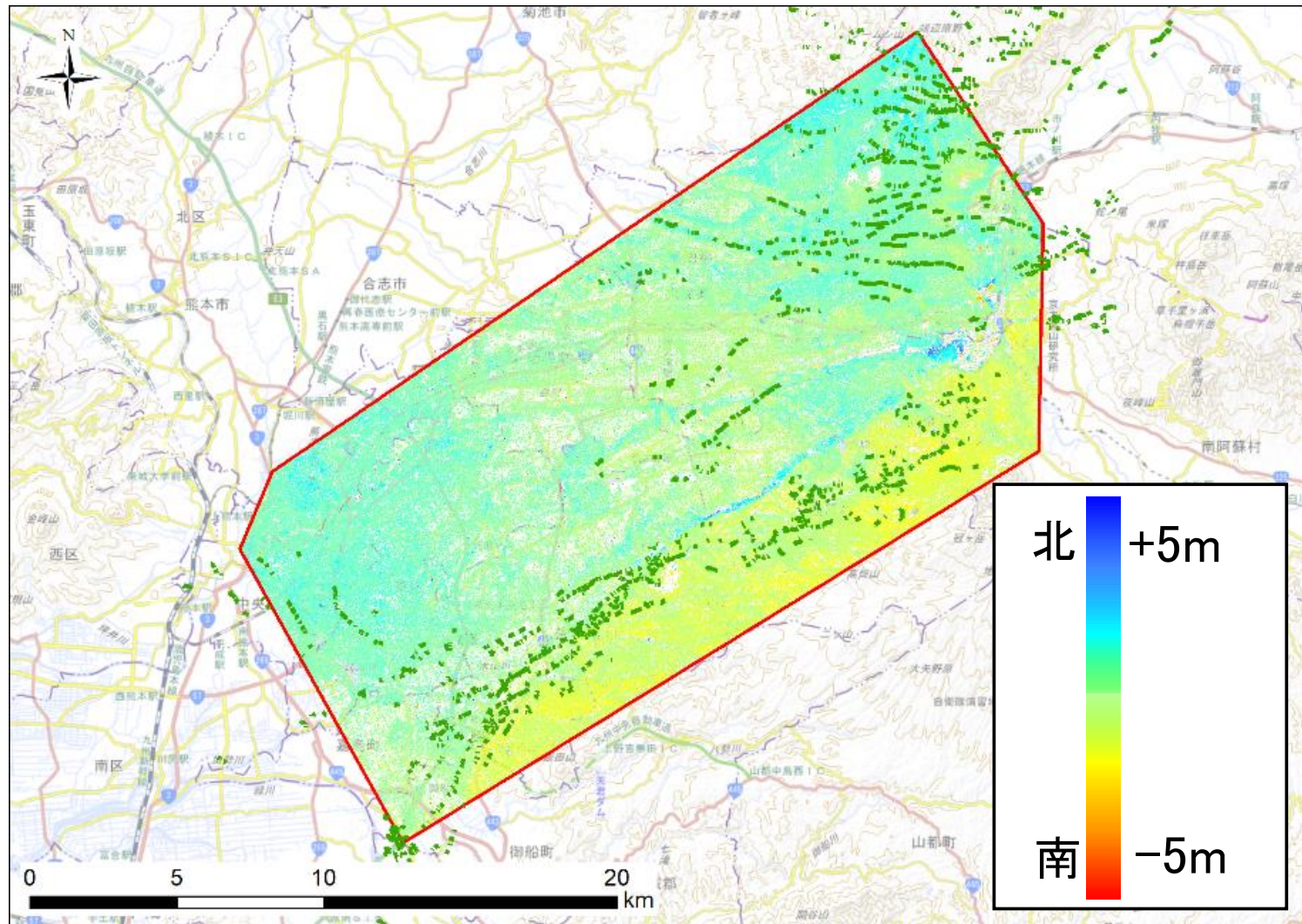


図 2.2.31 地震前後の画像マッチング解析結果（南北方向変位量画像）

画像マッチング解析結果と測量成果との比較結果を図 2.2.32～図 2.2.33 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、東西方向および南北方向のどちらでも決定係数が 0.6 以上で相関関係が確認できる。また「測量成果と解析結果の差が 1.0m 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、精度が高いことがわかる。一方で、東西方向変位量では切片が-0.3807、南北方向変位量では-0.069 で、どちらも解析結果が測量成果よりも過小評価されて算出されている。特に実際の変位量（測量成果）が大きい東西方向で顕著であった。

指標ごとに整理した精度評価内容を表 2.2.6 に示す。比較結果からは、決定係数が有意に高く、相関性を有していることが読み取れる。評価の結果、RMSE はともに SPOT6/7 衛星画像の解像度（1.5m）の半分以下と判断できる。

表 2.2.6 精度評価結果

| 精度評価指標                       | 地震前後 2016/1/16 - 2017/1/1 |             |
|------------------------------|---------------------------|-------------|
|                              | EW                        | NS          |
| 比較する測量点数（点）                  | 669                       |             |
| 画像マッチングで変動量を取得できた<br>測量点数（点） | 544                       |             |
| 較差の標準偏差                      | 0.36                      | 0.36        |
| 較差が 0.5m を超える<br>点数の割合（%）    | 59.9                      | 47.8        |
| 較差が 1.0m を超える<br>点数の割合（%）    | 19.3                      | 10.5        |
| 較差が 1.5m を超える<br>点数の割合（%）    | 5.0                       | 0.7         |
| 決定係数 $R^2$                   | 0.81                      | 0.69        |
| RMSE                         | <u>0.55</u>               | <u>0.37</u> |

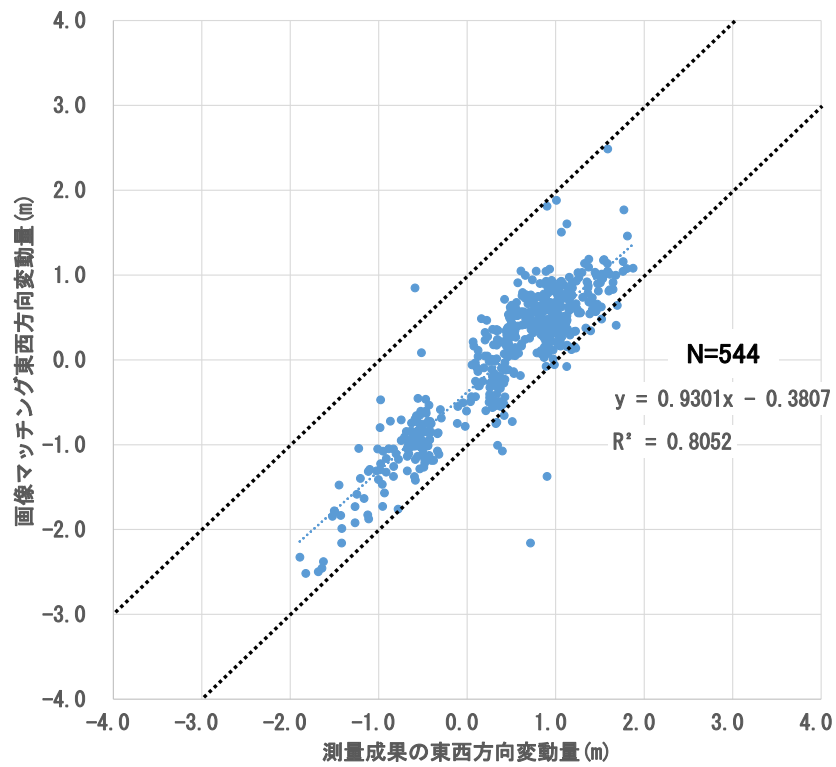


図 2.2.32 測量成果と画像マッチング解析結果の比較（東西方向変位量）

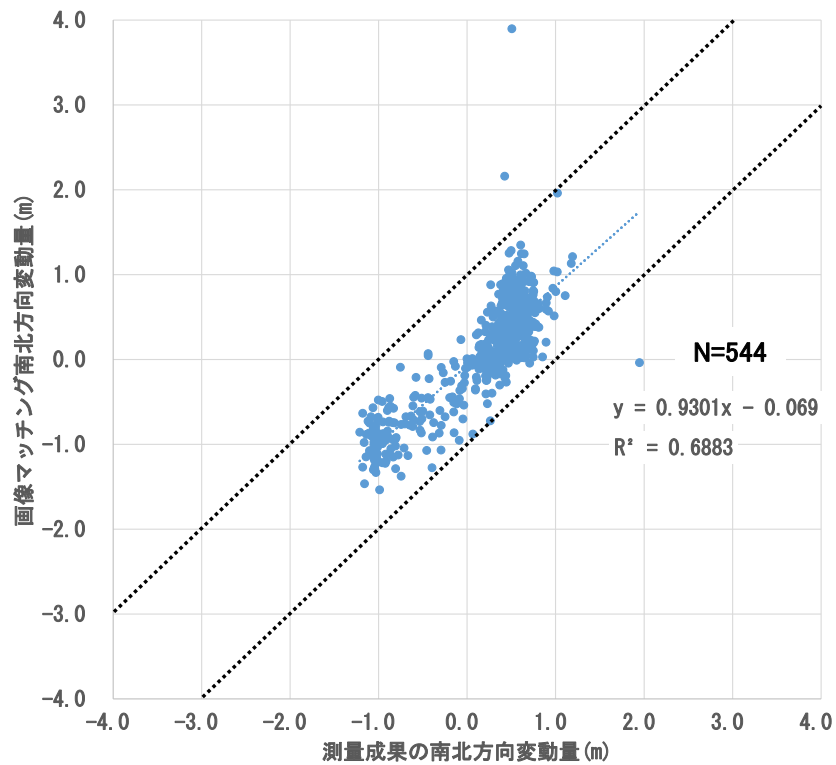


図 2.2.33 測量成果と画像マッチング解析結果の比較（南北方向変位量）



### 2.2.2.3. 地表地震断層の詳細形状検討

#### (1) トレンチ候補地点の選定

LC-InSAR 解析図と画像マッチング解析結果を合わせてトレンチ箇所を選定した。全域から候補を 5 箇所（図 2.2.34）抽出した。抽出した候補地を図 2.2.35～図 2.2.39 に示す。

トレンチ調査箇所は、現地調査において変状が確認された地点、かつ、地権者との交渉の結果、トレンチ調査の了解の得られた 2 地点（下町および上陳東）を選定した。

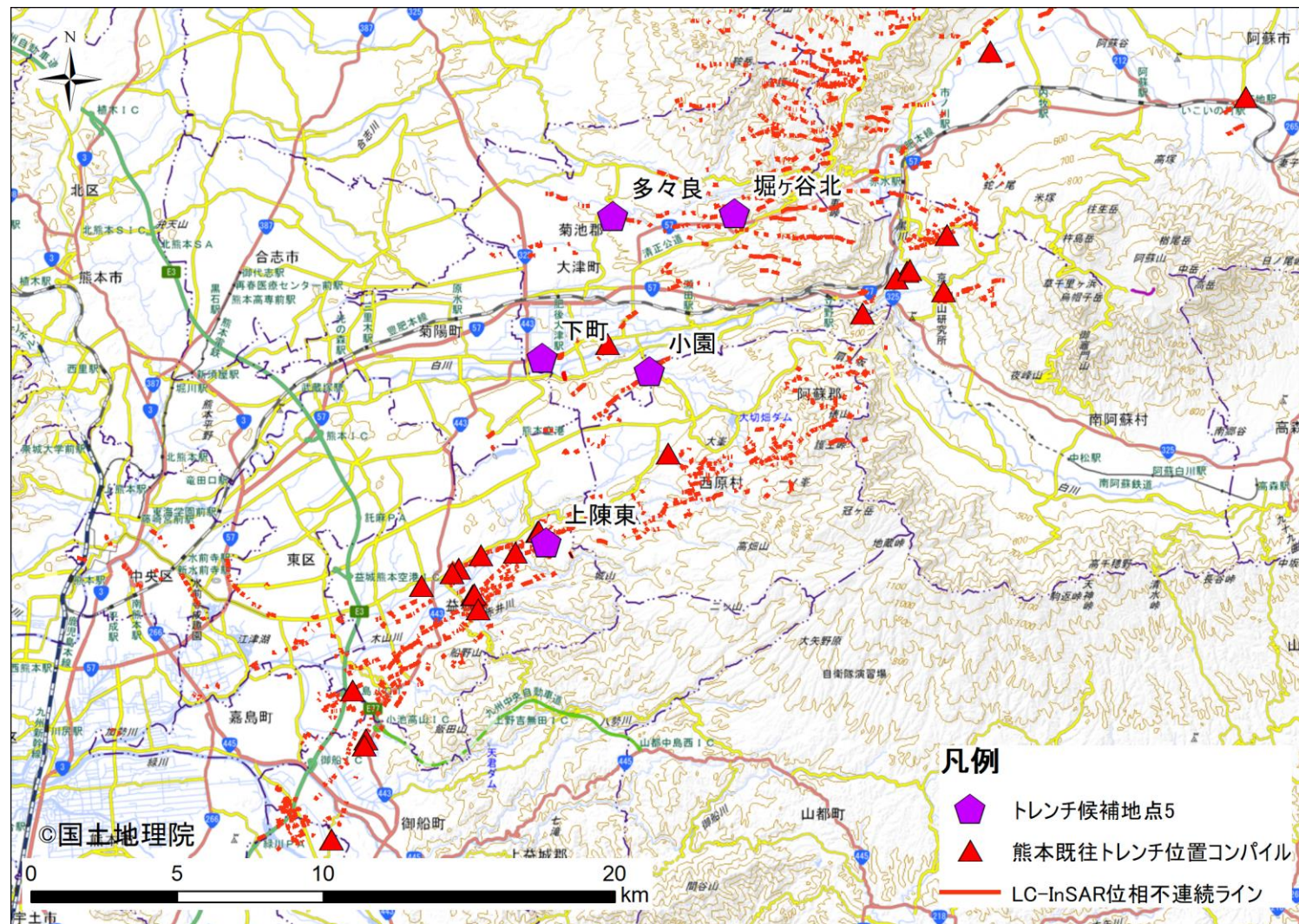


図 2.2.34 トレンチ候補 5 箇所



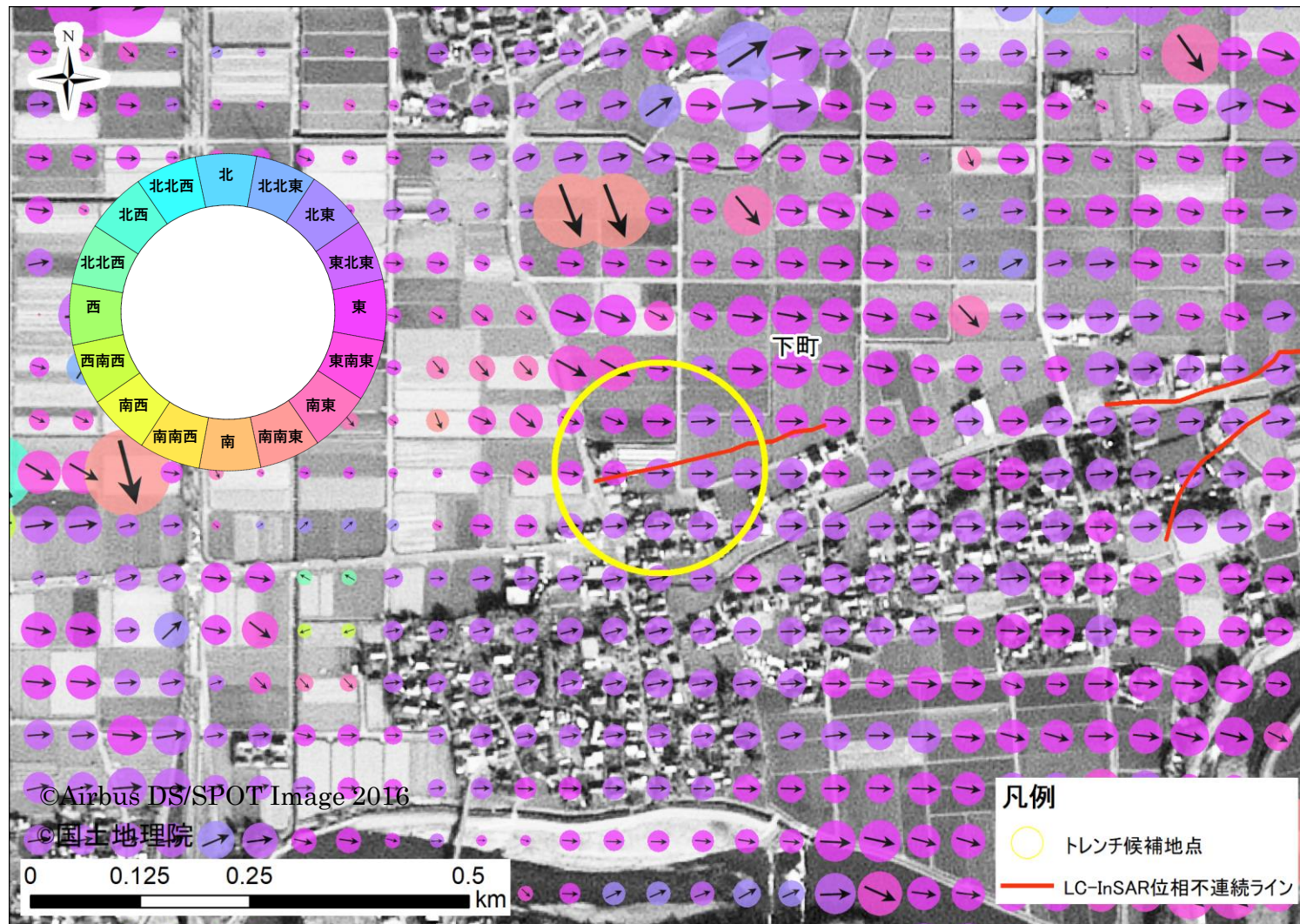


図 2.2.35 画像マッチング解析結果および位相不連続ライン（トレンチ候補地点 下町）



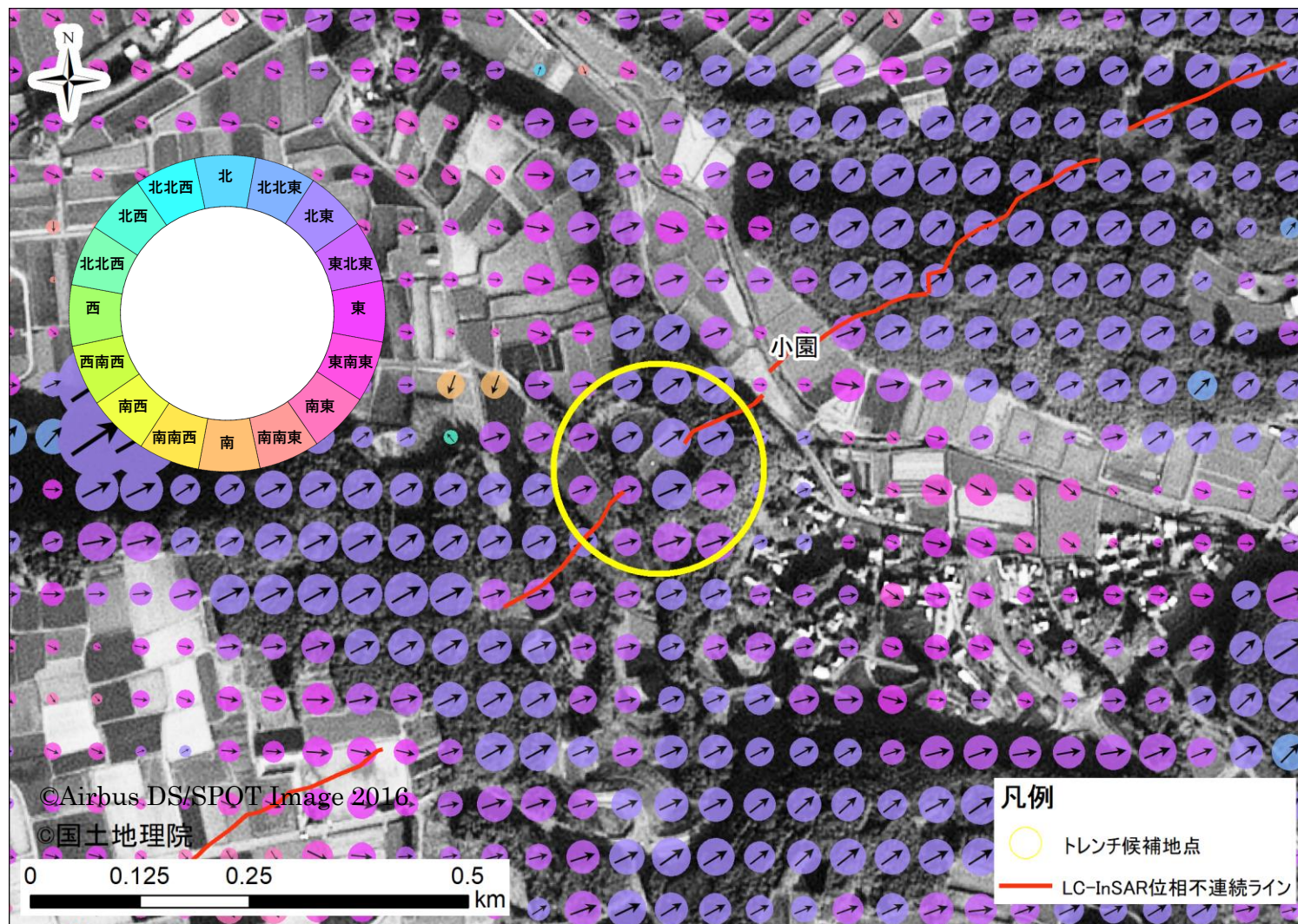


図 2.2.36 画像マッチング解析結果および位相不連続ライン（トレンチ候補地点 小園）



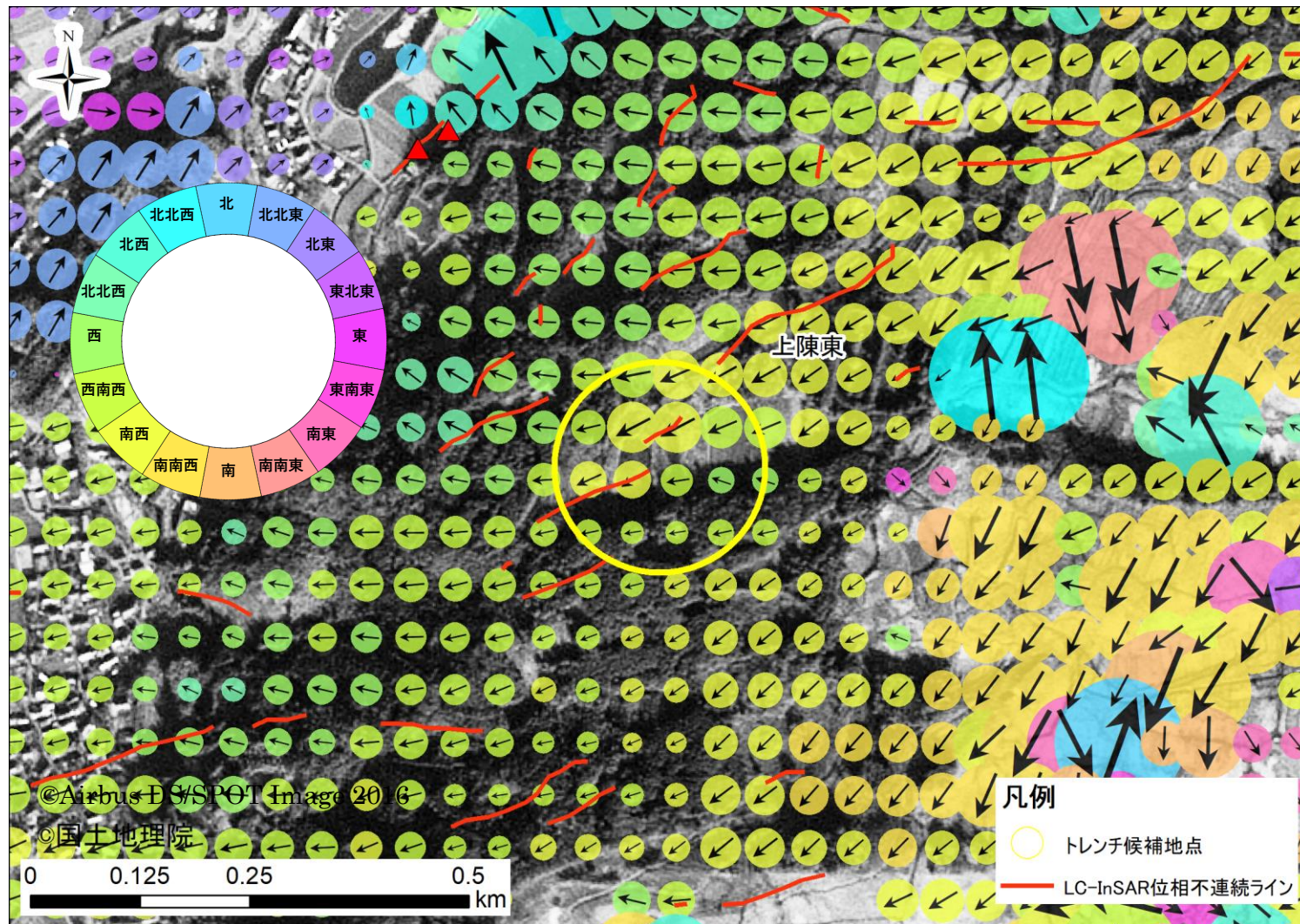


図 2.2.37 画像マッチング解析結果および位相不連続ライン（トレンチ候補地点 上陳東）



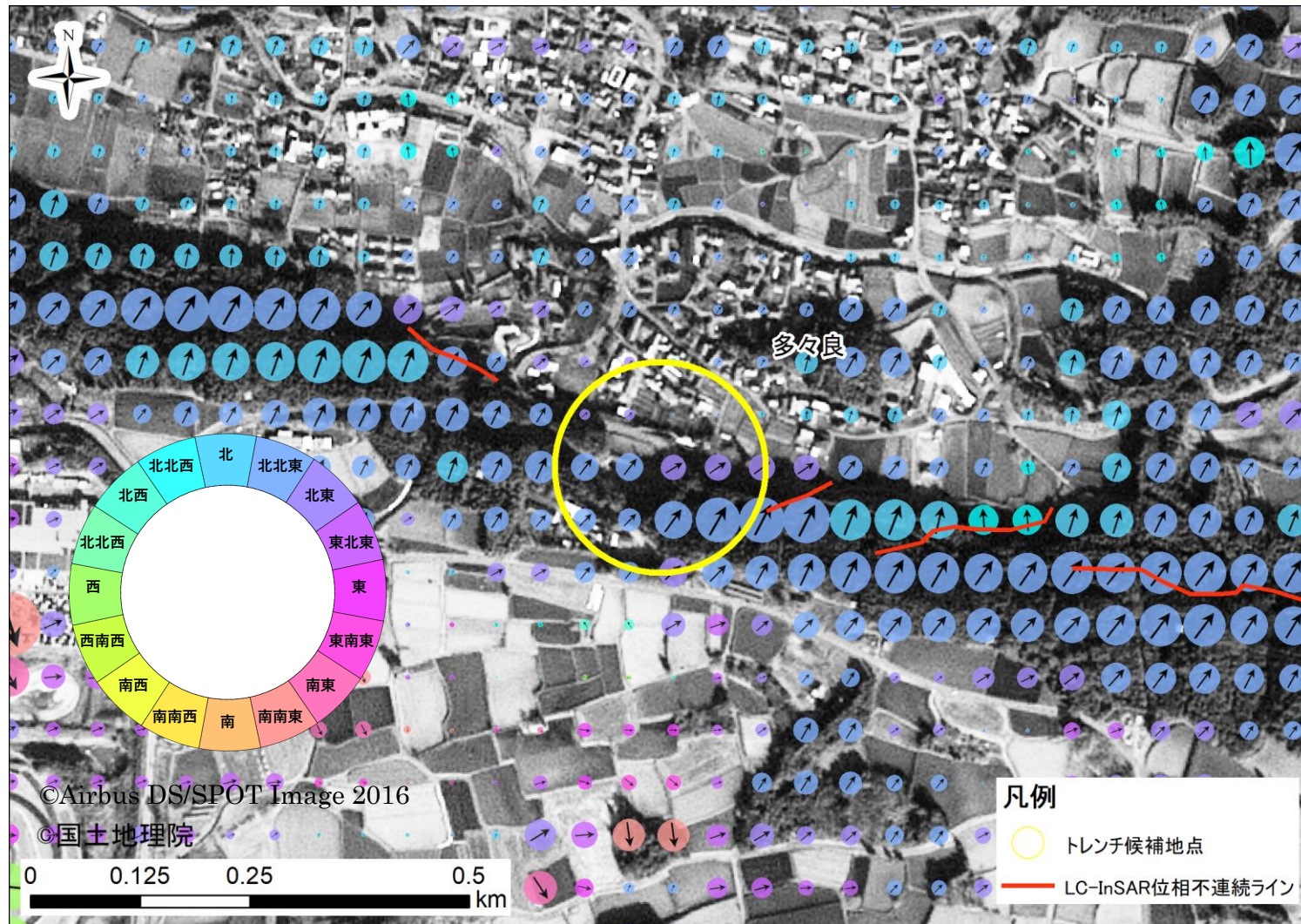


図 2.2.38 画像マッチング解析結果および位相不連続ライン（トレンチ候補地点 多々良）



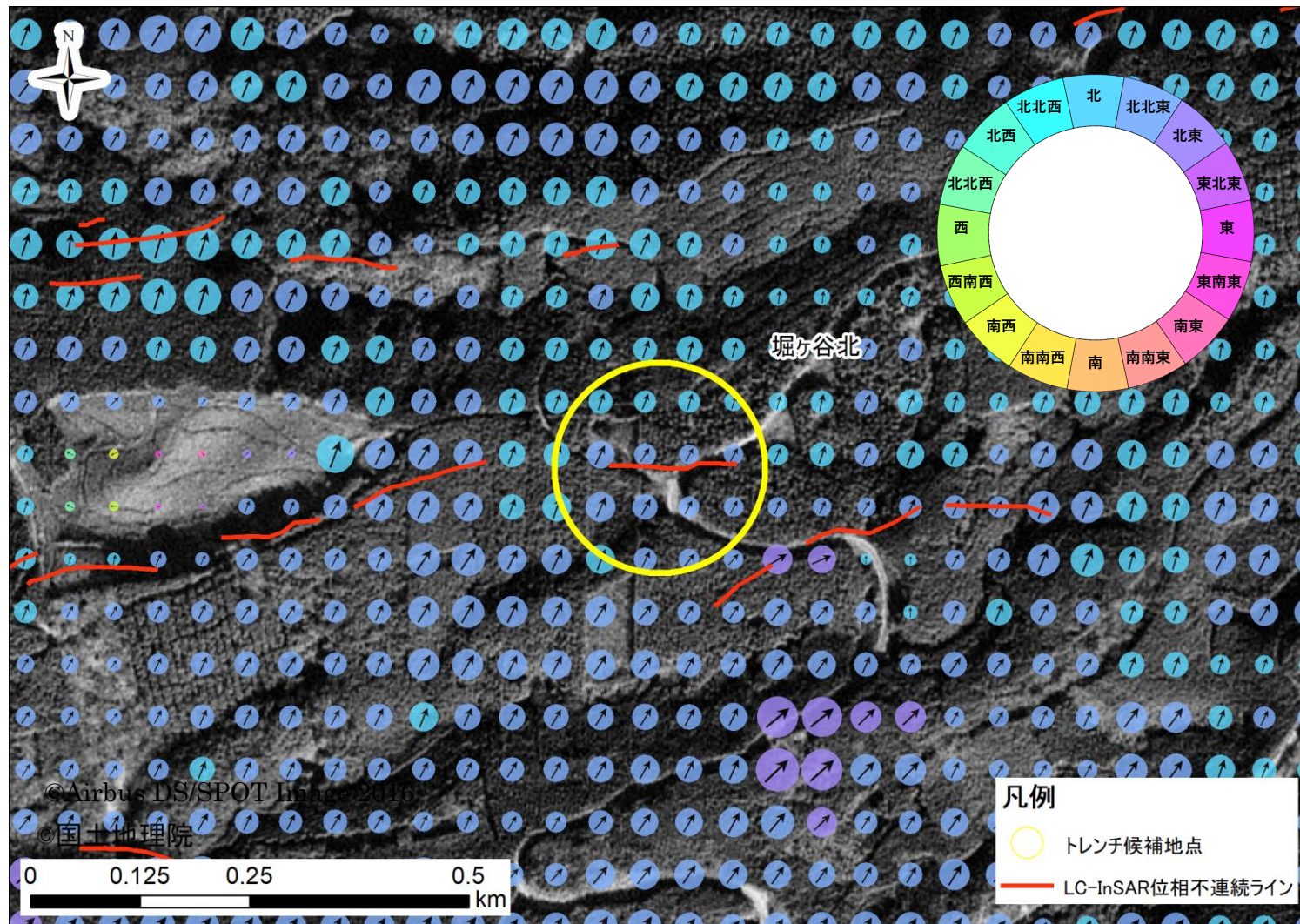


図 2.2.39 画像マッチング解析結果および位相不連続ライン（トレンチ候補地点 堀ヶ谷北）

## (2) 下町トレンチ地点周辺における衛星画像解析結果

下町トレンチ地点周辺における LC-InSAR 解析図 (図 2.2.40)、2.5 次元解析解析結果 (図 2.2.41～図 2.2.42)、画像マッチング解析結果 (図 2.2.43～図 2.2.44)、SBAS 解析結果 (図 2.2.45) を次ページ以降に示す。トレンチ箇所周辺の変位は 2.5 次元解析解析結果において識別できた。一方で、画像マッチング解析結果および SBAS 解析においては優位な変位を確認できなかった。



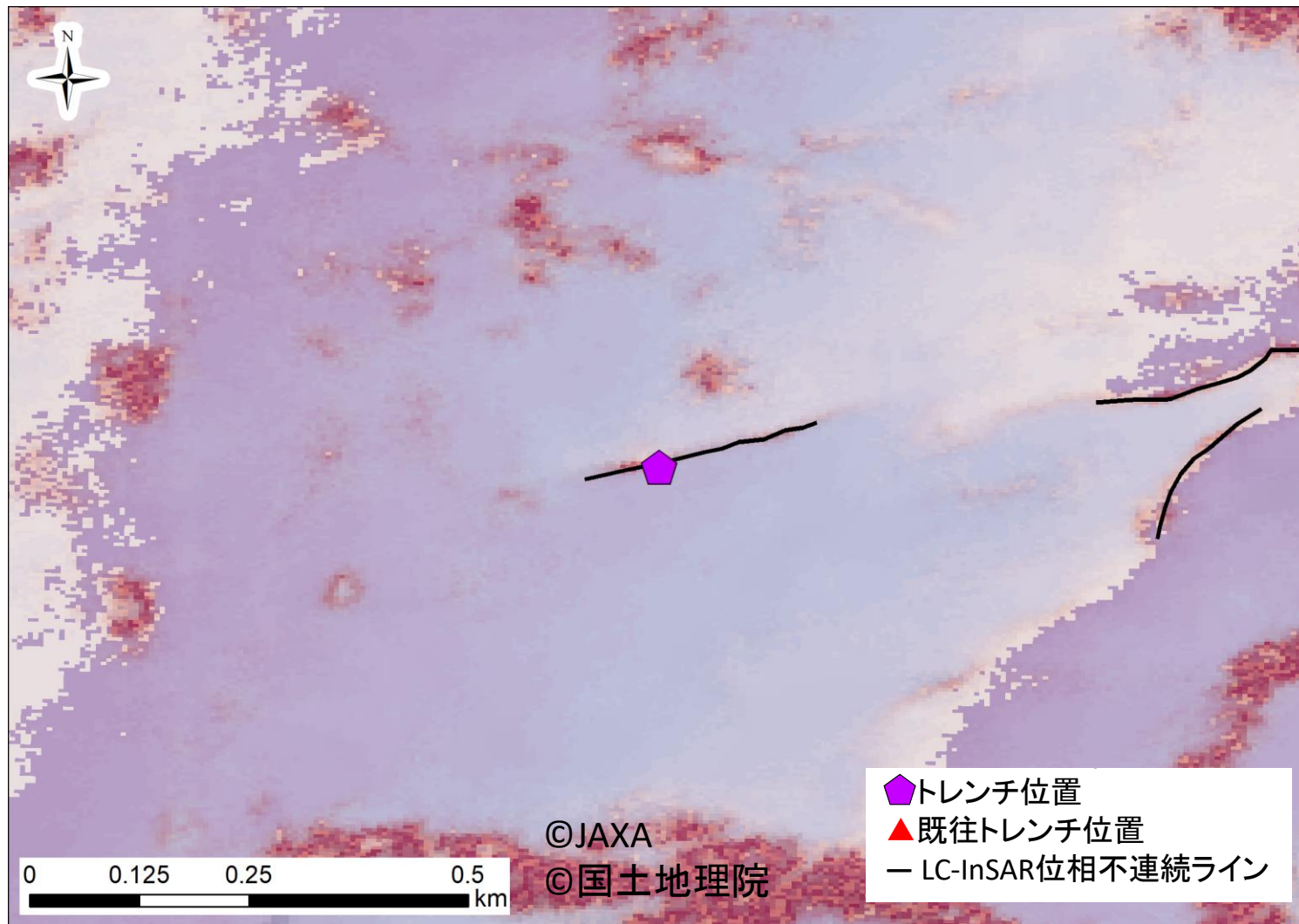


図 2.2.40 LC-InSAR 解析図

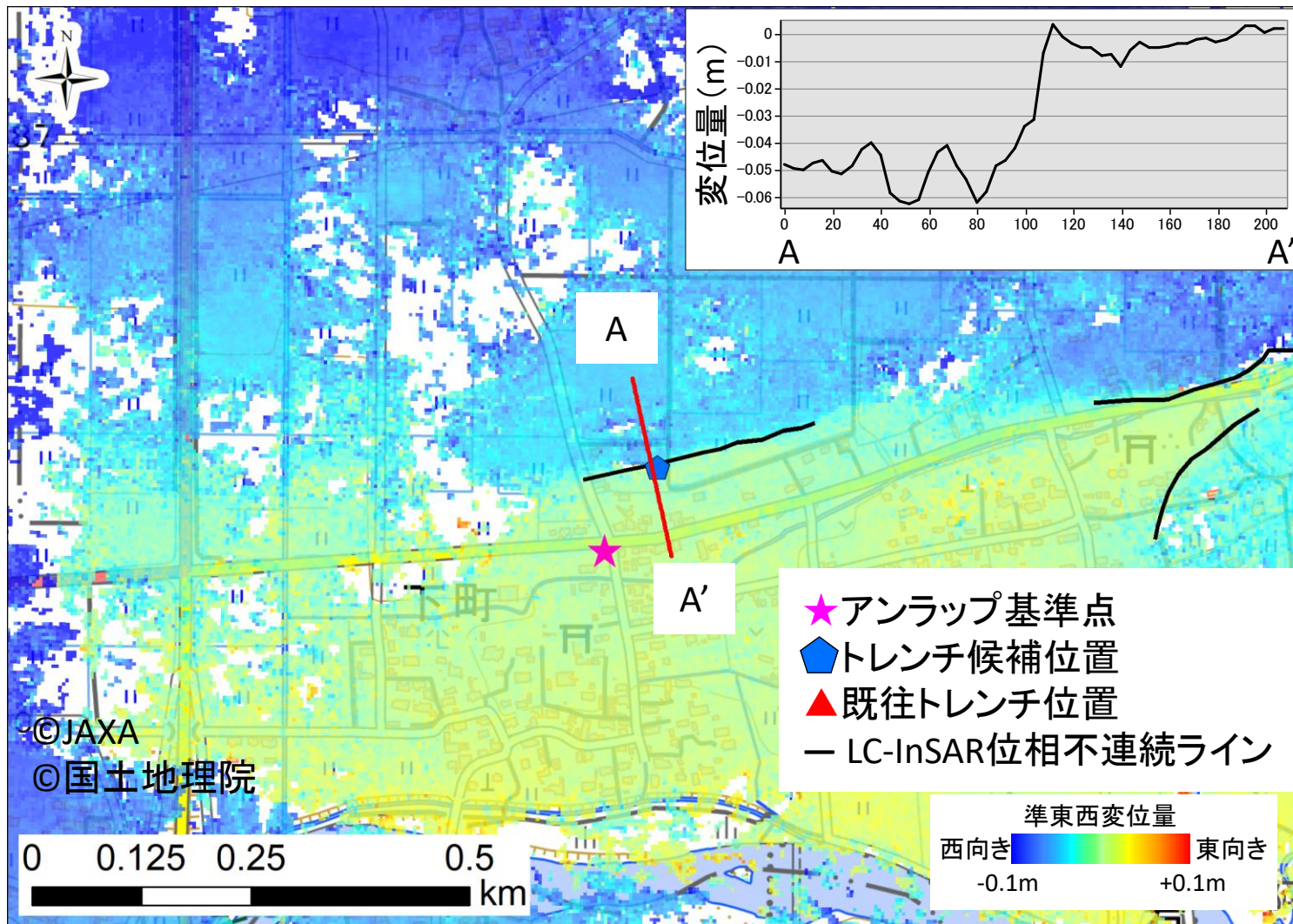


図 2.2.41 2.5次元解析結果（準東西方向変位量画像）



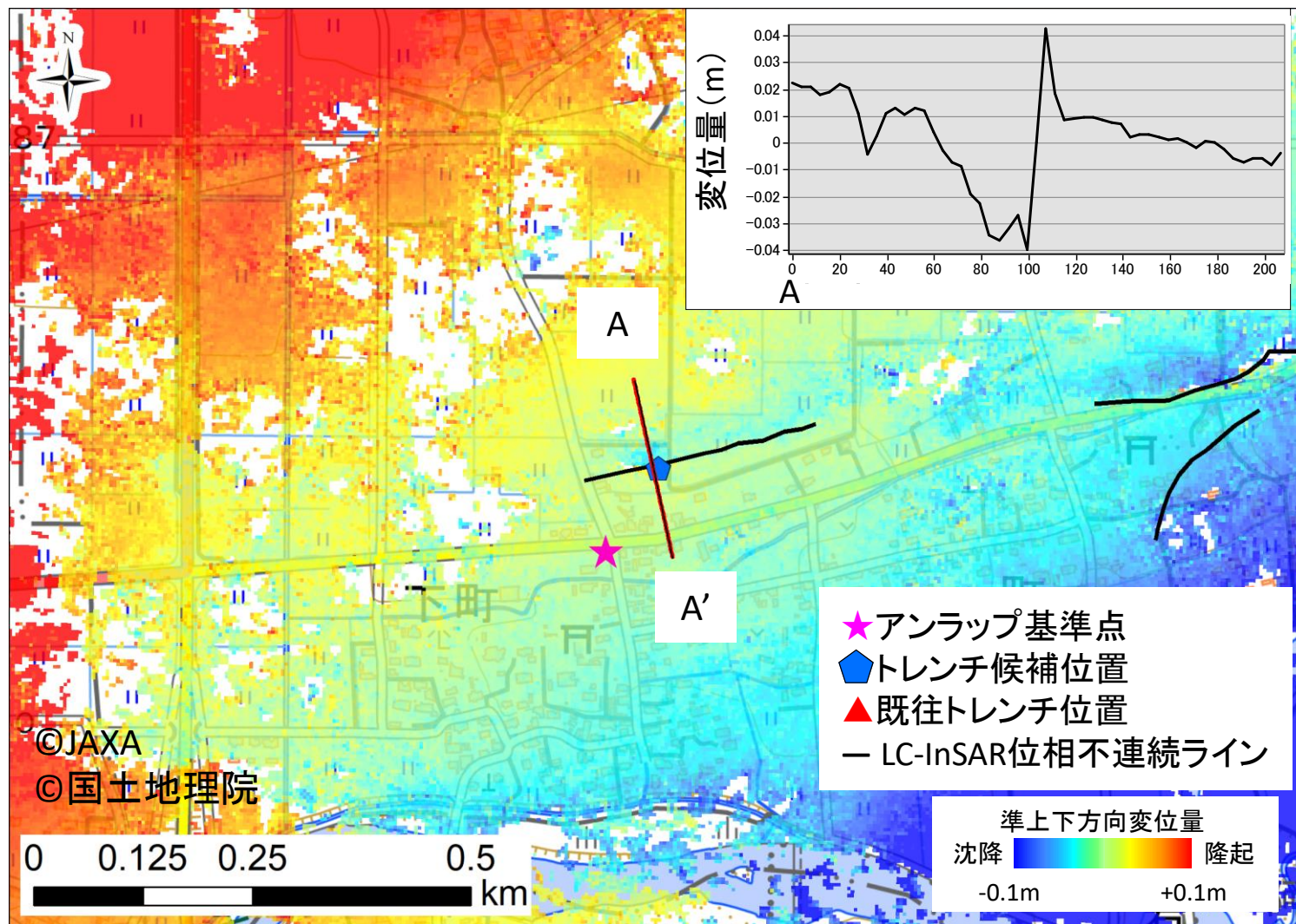


図 2.2.42 2.5次元解析結果（準上下方向変位量画像）

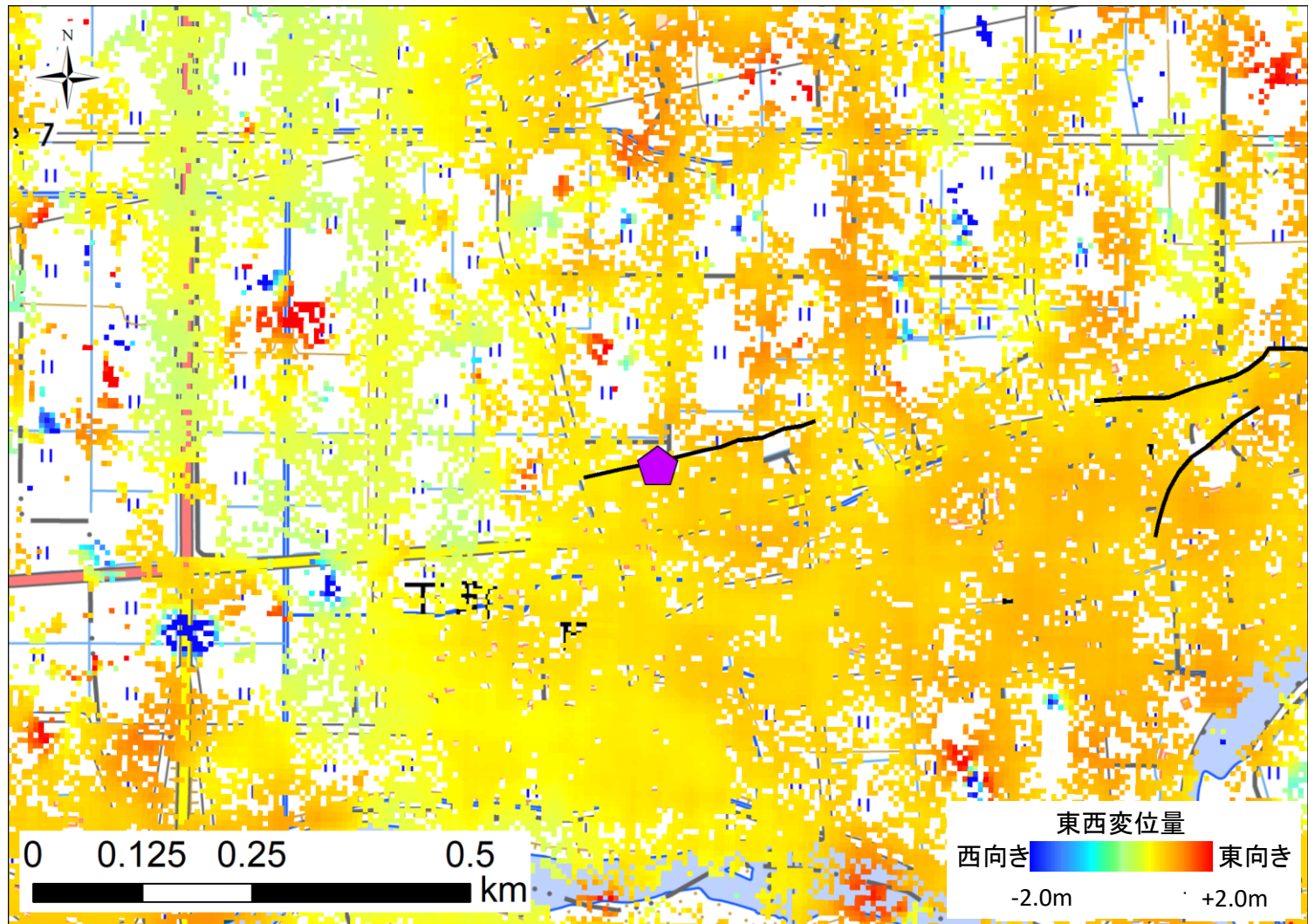


図 2.2.43 画像マッチング解析結果（東西方向変位量画像）



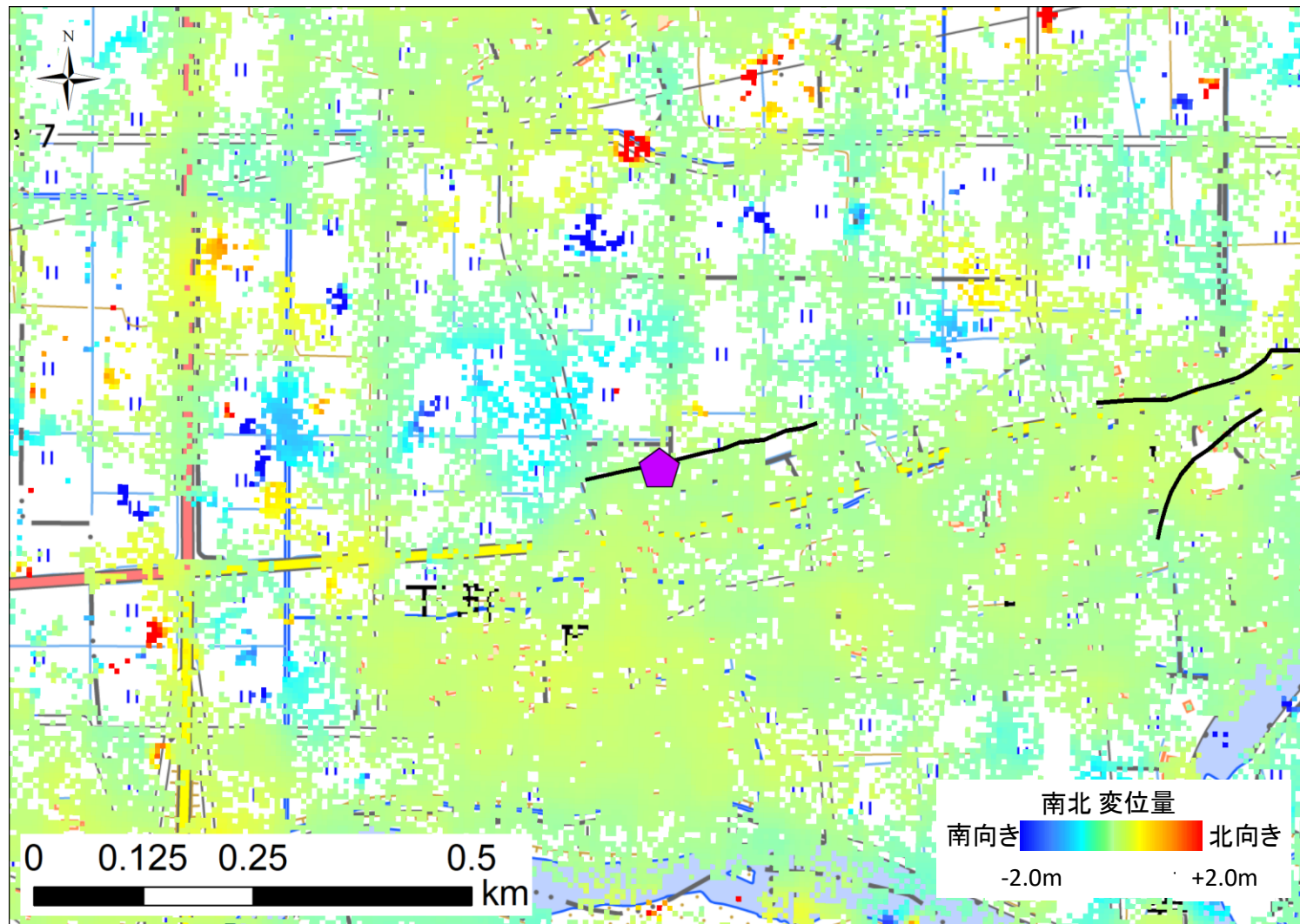


図 2.2.44 画像マッチング解析結果（南北方向変位量画像）

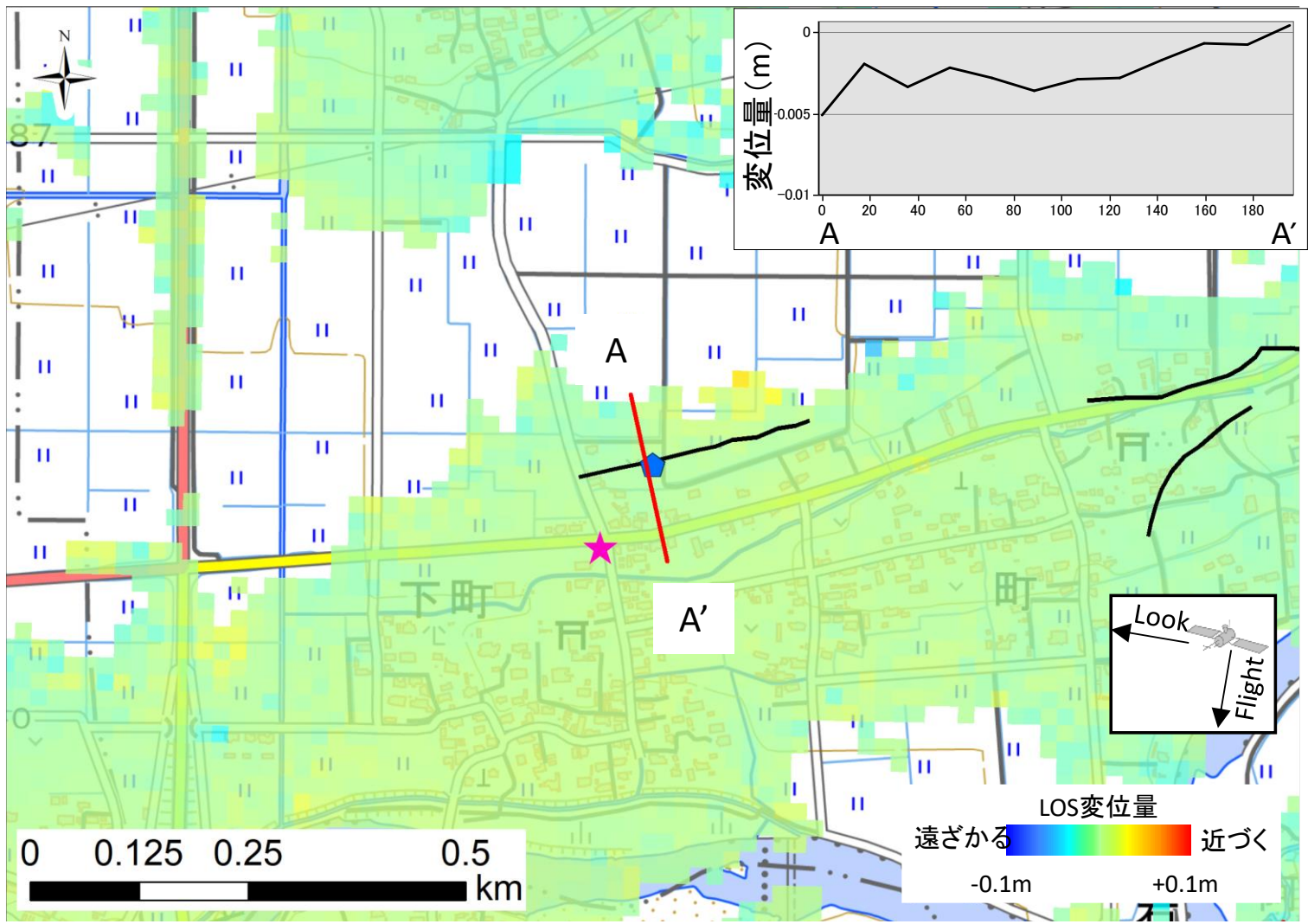


図 2.2.45 SBAS 解析結果余効変動 2016 年 4 月-2018 年 10 月

### (3) 上陳東トレンチ地点周辺における衛星画像解析結果

上陳東トレンチ地点周辺における LC-InSAR 解析図（図 2.2.46）、2.5 次元解析解析結果（図 2.2.47～図 2.2.48）、画像マッチング解析結果（図 2.2.49～図 2.2.50）、SBAS 解析結果（図 2.2.51）を次ページ以降に示す。トレンチ箇所周辺の変位は画像マッチング解析結果にて識別できた。一方で、2.5 次元解析解析結果においては優位な変位を確認できなかった。なお、SBAS 解析においては地表面の変化が激しく変位量を算出することができなかった。

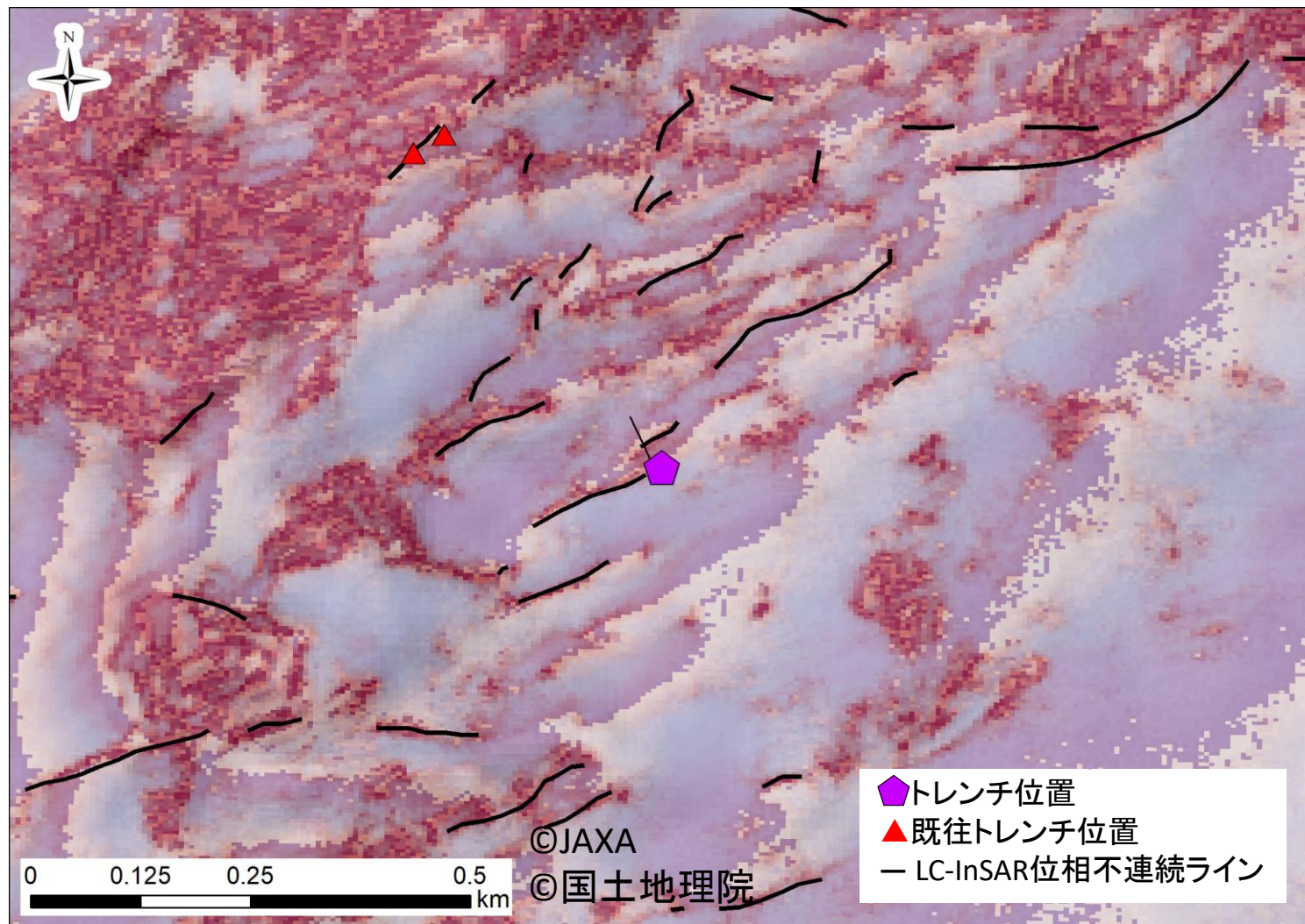


図 2.2.46 LC-InSAR 解析図



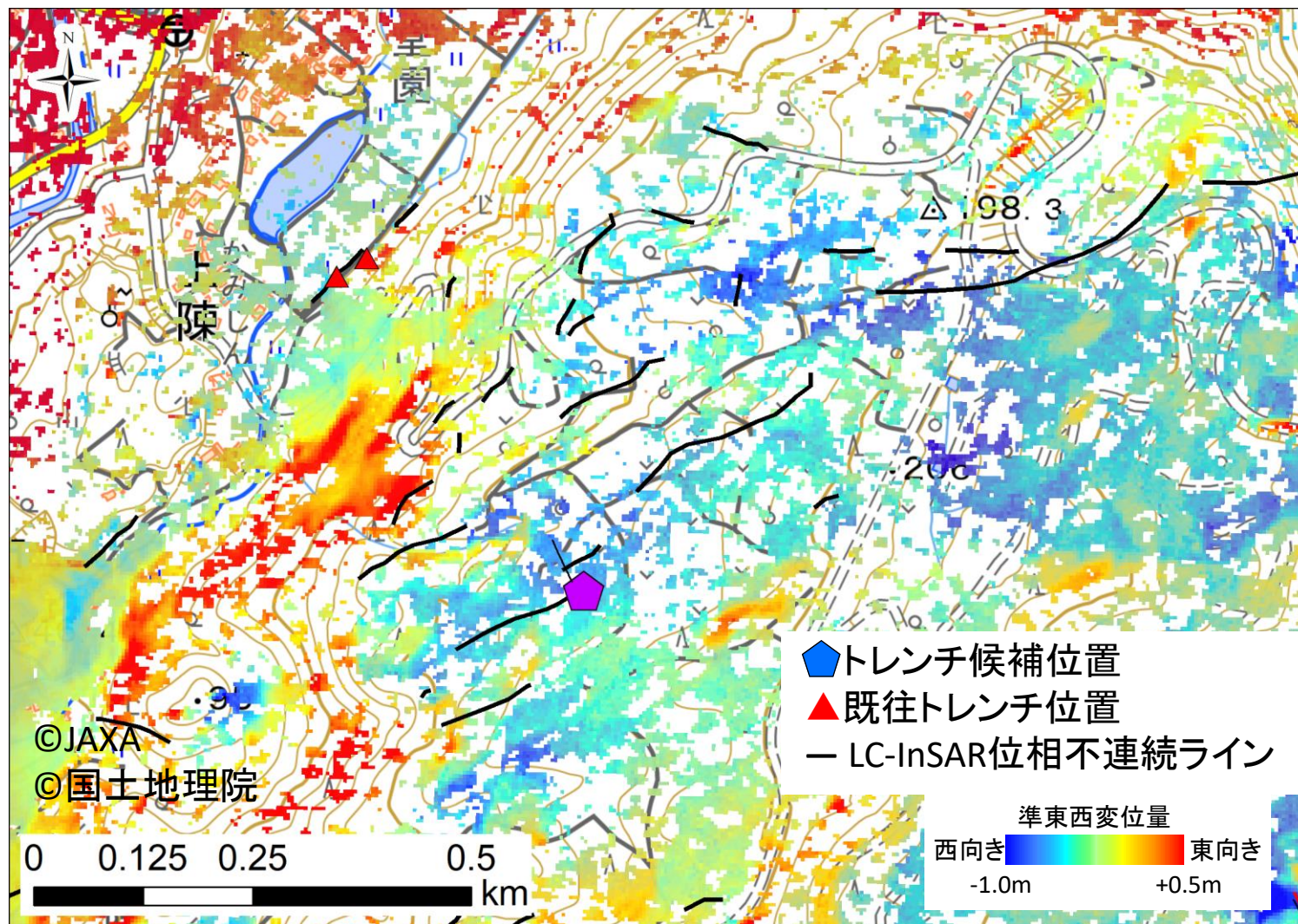


図 2.2.47 2.5次元解析結果（準東西方向変位量画像）



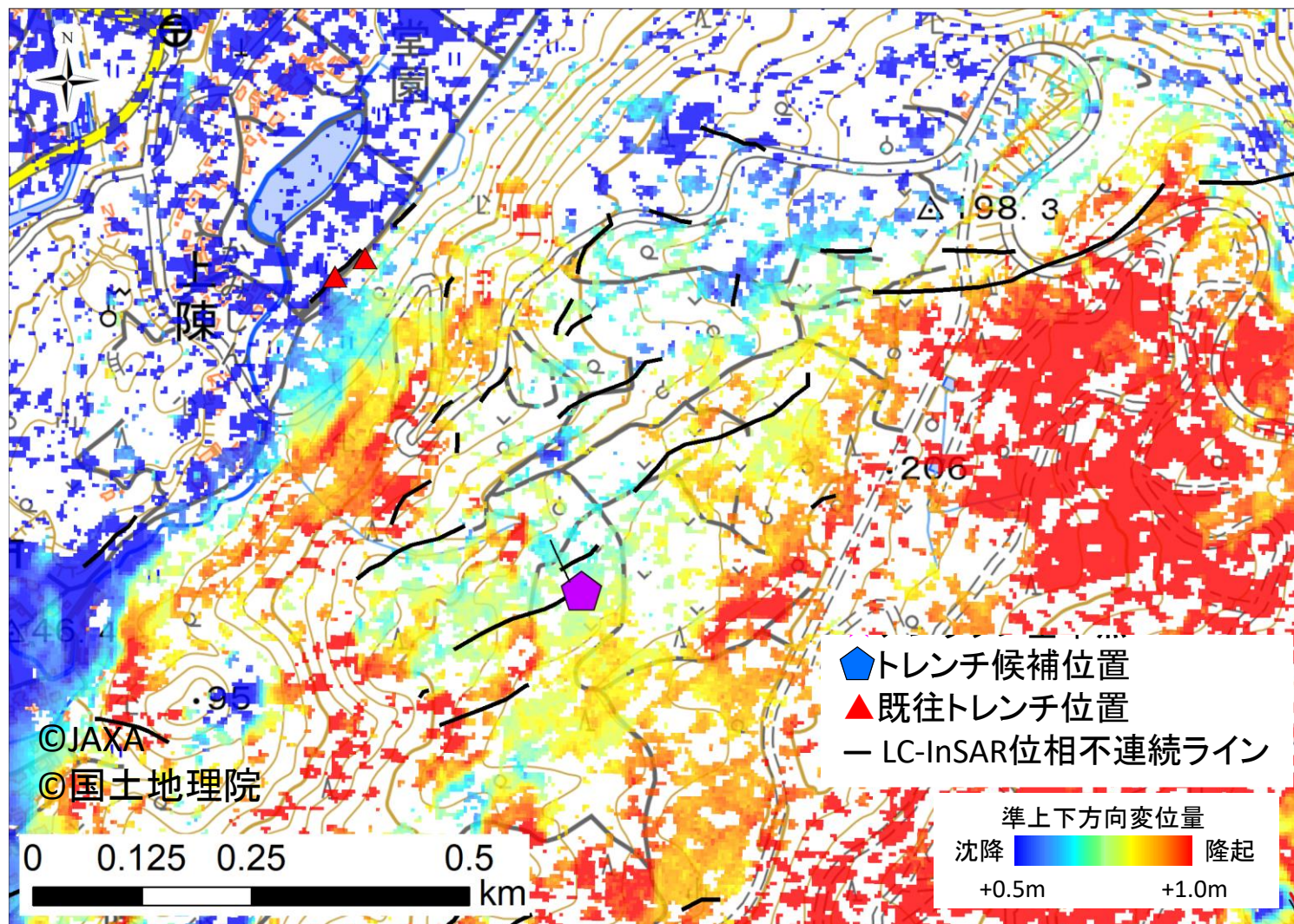


図 2.2.48 2.5次元解析結果（準上下方向変位量画像）

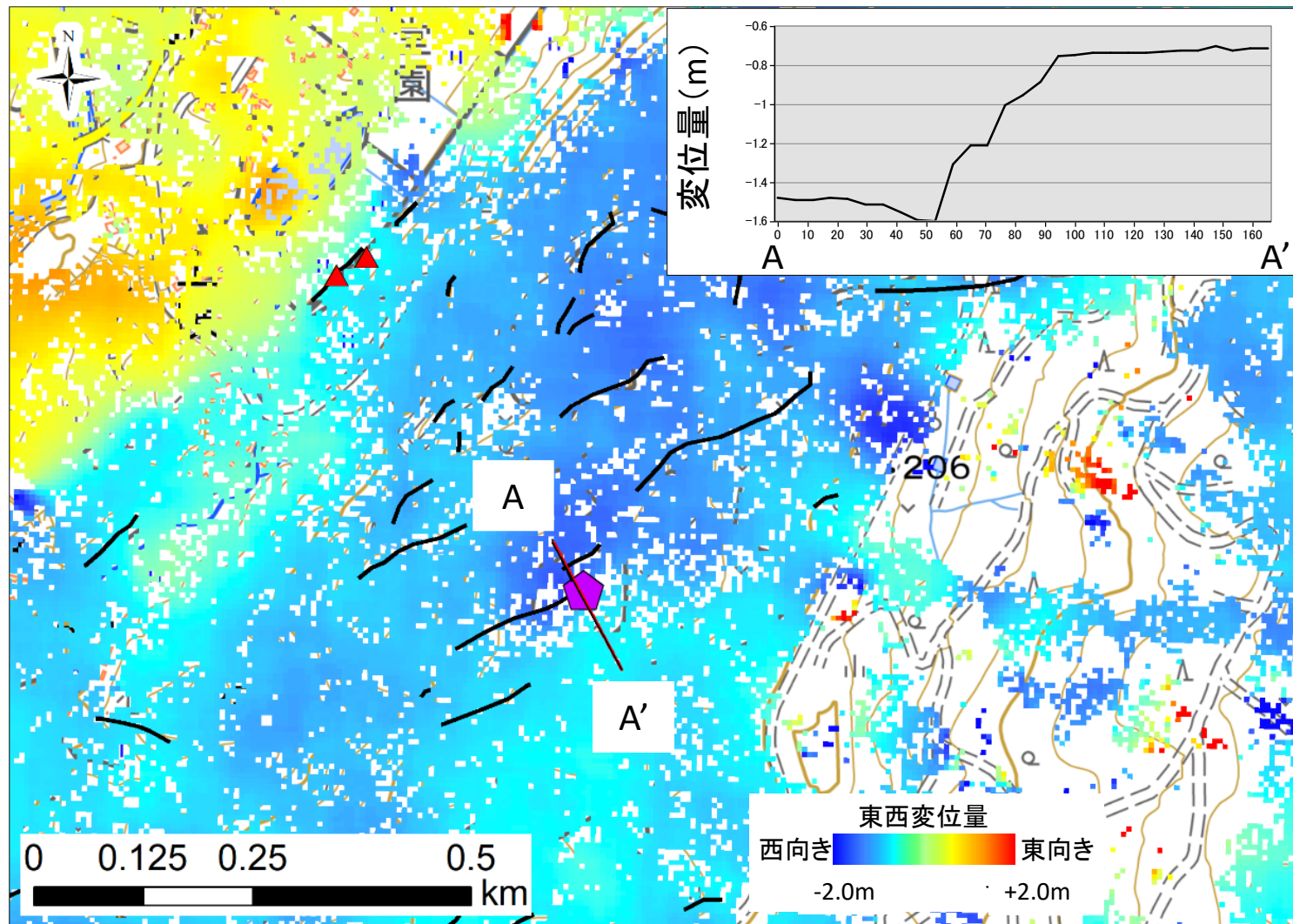


図 2.2.49 画像マッチング解析結果 (東西方向変位量画像)



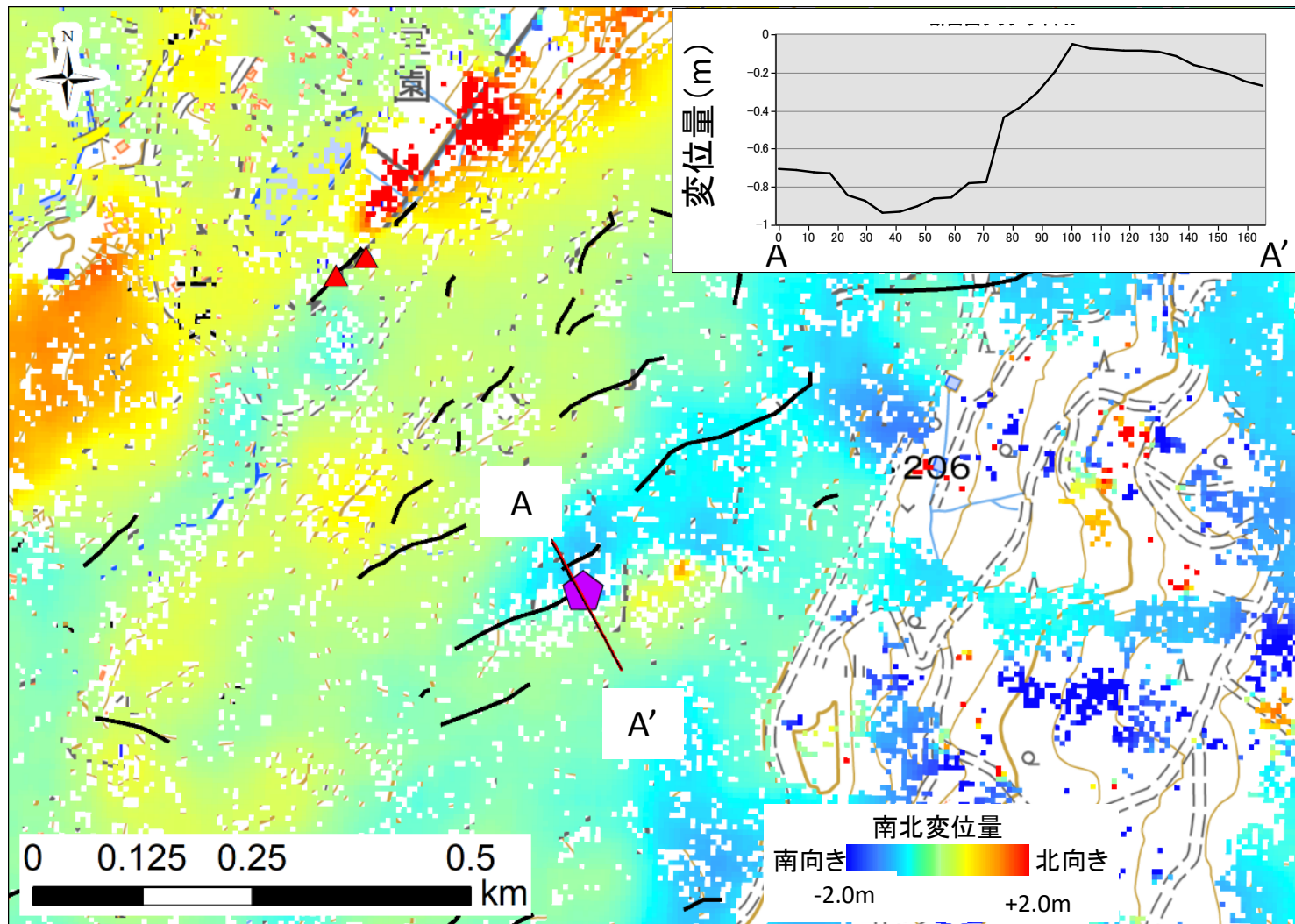


図 2.2.50 画像マッチング解析結果（南北方向変位量画像）



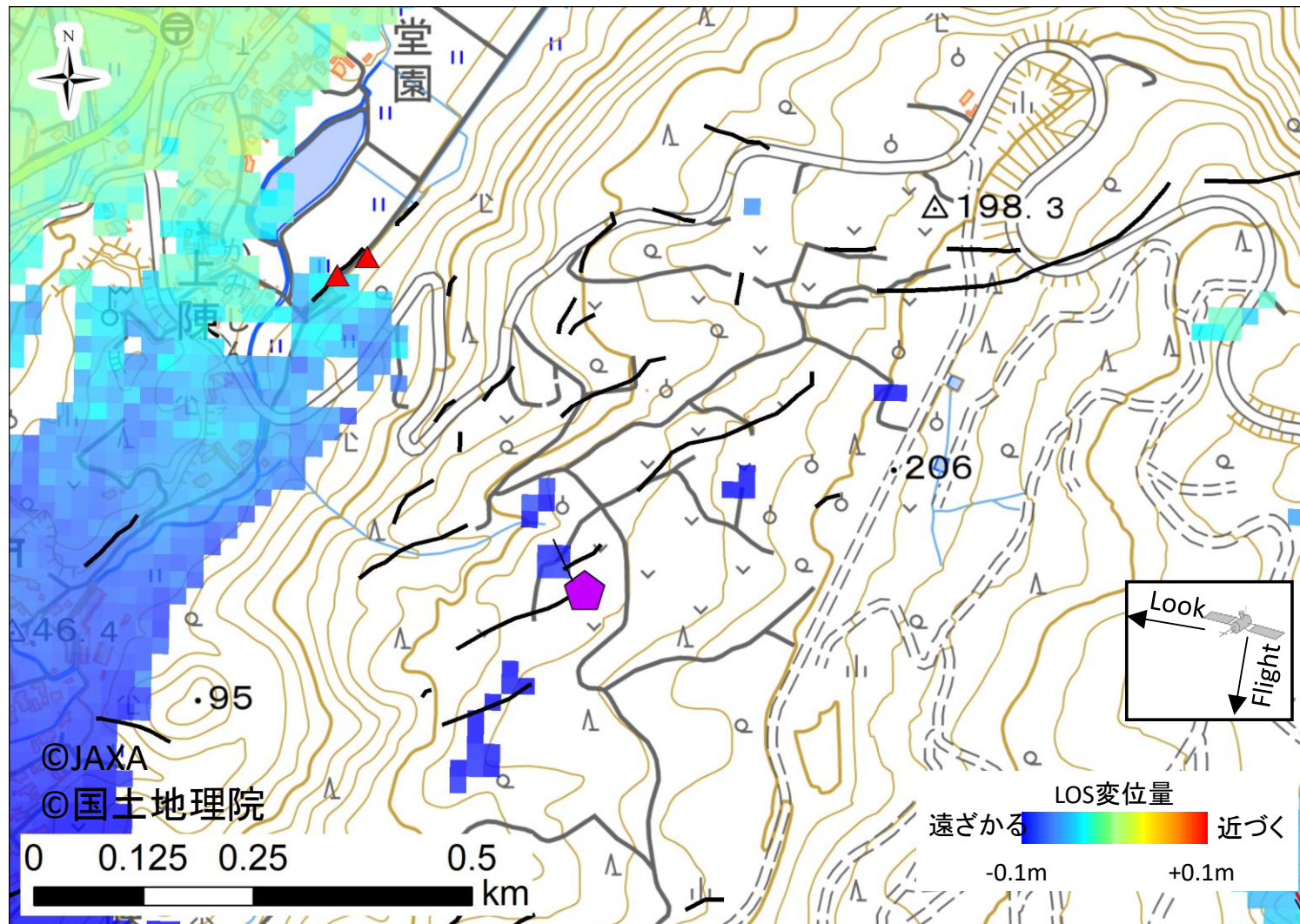


図 2.2.51 SBAS 解析結果余効変動 2016 年 4 月-2018 年 10 月

#### 2.2.2.4. 地表地震断層のせん断面変位抽出

今後実施される室内模擬実験及び数値解析による断層変位分布と、現地で生じている地表地震断層の断層変位分布を比較するためのデータを得るために、熊本地震で生じた地表地震断層の詳細構造から変位分布を求める試みを行った。使用した地表地震断層のデータは、小俣ほか(2016a)及び小俣ほか(2016b)で作成した3次元モデルを使用した。

小俣ほか(2016a)及び小俣ほか(2016b)が作成したこの3次元モデルは、上陳地区の田圃に生じた地表地震断層をヘリコプターから撮影した斜め写真(図 2.2.52)から SfM (Structure From Motion) ソフトウェア (Smart 3D Capture : Acute3D 社製) を使用して3次元モデルの生成したものである。3次元モデルを作成することによって様々な角度で、拡大縮小しながら観察可能である。小俣ほか(2016b)による3次元モデルを直上から鉛直に平面的に投影した(図 2.2.53)。この中で、変位の基準となる稲の刈り取り跡が明瞭な地点を検討箇所として選定した。検討箇所の拡大図を図 2.2.54 に示す。画像ソフトウェア (Photoshop : Adobe 社製) によって亀裂を抽出した画像を図 2.2.55 に示す。この割れ目に対して、交わる稲の刈り取り跡で明瞭なものを赤線として引いた(図 2.2.56)。これらの刈り取り跡からもともとは連続していたと考えられる線を見つけ出し、その変位量を計測しグラフ化した(図 2.2.57)。メイントレースと考えられる変位量及び派生した割れ目での変位を細かく分離できなかった変位量を青で、メイントレースの南側にある派生断層のトレースを黄色、メイントレースの北側にある派生断層のトレースを桃色としてグラフ化した。

全体としての変位量はおおよそ 1m 程度であるが、稲の刈り取り跡の線番号が 16~20、30~35 の部分が派生断層も加えた変位量の値が周囲と比較してやや小さめの値を示している。これら2箇所は平面図で見ると地表地震断層のメイントレースと比較的大きな派生断層が分岐している場所に位置していることが分かった。

熊本地震の地表地震断層の分布は、1本の断層線で表されるのではなく、派生断層や共役断層が分布して複雑である。、上陳地区の田圃に生じた地表地震断層もせん断面の分布形状や派生断層の分布は複雑である。熊本地震で布田川断層沿いに生じた地表地震断層全体と上陳地区の田圃に発生した地表地震断層の細かな分布形状はフラクタル的である可能性がある。上陳地区の実際の地震の地表地震断層の地表面での詳細な分布形状が得られていることから、これらのデータを使用して今後実施する室内模擬実験及び数値解析によって求められた断層分布形状と比較し、布田川断層全体の断層分布形状と比較検討することで副断層の分布を推測することが期待される。



図 2.2.52 ヘリコプターからの斜め写真の例





図 2.2.53 SfMによって3次元モデルを直上から鉛直に平面的に投影した図 地表地震断層全体





図 2.2.54 地表地震断層検討範囲拡大図 稲の刈り取り跡が線状に読み取れる



図 2.2.55 地表地震断層の画像をカラー調整により割れ目を抽出





図 2.2.56 地表地震断層周辺の稲の刈り取り跡をトレースした図

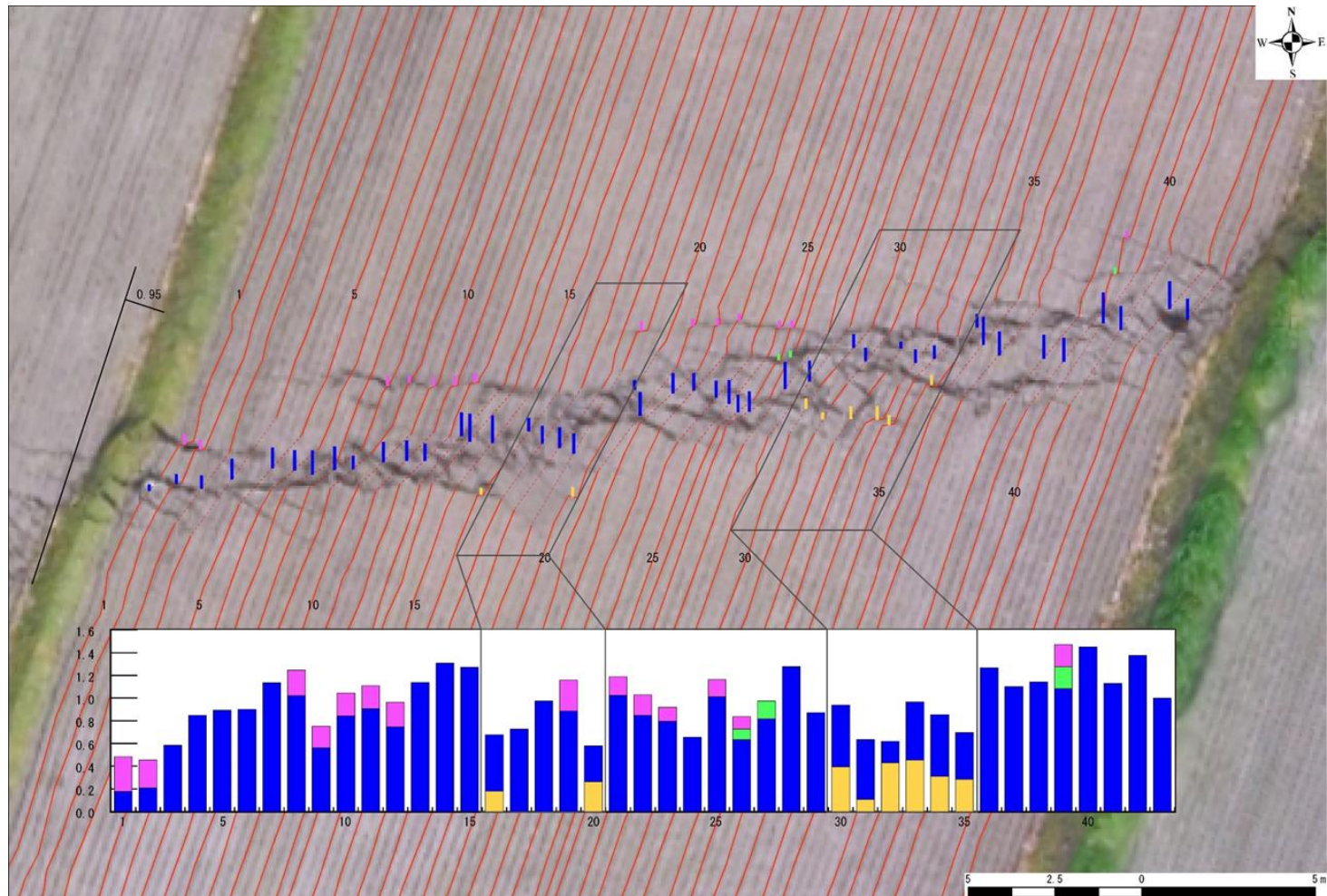


図 2.2.57 稲の刈り取り跡から変位量を計測しグラフ化



### 2.2.3. リッジレスト地震

これまで熊本地震で適用してきた測地学的手法が海外の地震でも適用できるか検討するために 2019 年 7 月 4 日から 5 日にかけて発生したリッジレスト地震において SAR 衛星によるデータを用いて解析を行い、適用性の検討を行った。

#### 2.2.3.1. 差分干渉 SAR 解析

##### (1) LC-InSAR 解析の実施

LC-InSAR 解析では表 2.2.7 に示す ALOS-2 画像を使用した。ALOS-2 画像の位置図を図 2.2.58 に、撮影時期と地震発生時期の関係を図 2.2.59 に、作成した LC-InSAR 解析図を図 2.2.60 に示す。

表 2.2.7 使用した衛星画像の仕様

| No. | 解析ペア | シーン ID                | 観測日        | 分解能  | オフナディア角 | ビーム番号 |
|-----|------|-----------------------|------------|------|---------|-------|
| 1   | 北行西  | ALOS2217380700-180602 | 2018/6/2   | 約 4m | 32.5°   | F2-6  |
| 2   |      | ALOS2296040700-191116 | 2019/11/16 | 約 4m | 32.5°   | F2-6  |
| 3   | 北行東  | ALOS2238080700-181020 | 2018/10/20 | 約 4m | 36.2°   | F2-7  |
| 4   |      | ALOS2291900700-191019 | 2019/10/19 | 約 4m | 36.2°   | F2-7  |



図 2.2.58 使用した衛星画像の位置図

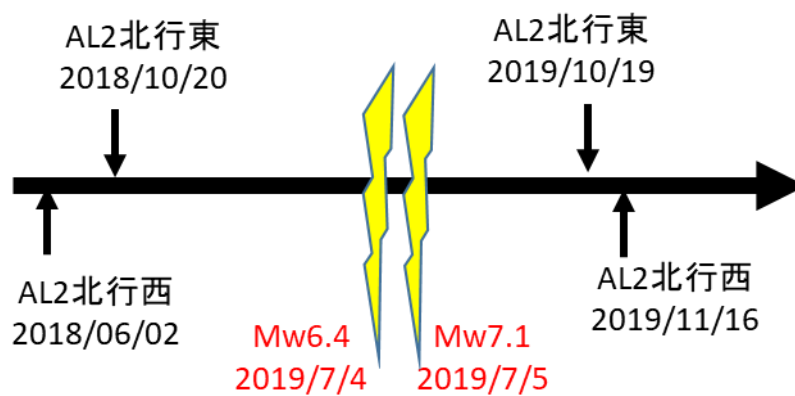


図 2.2.59 ALOS-2 画像撮影時期と地震発生時期の関係

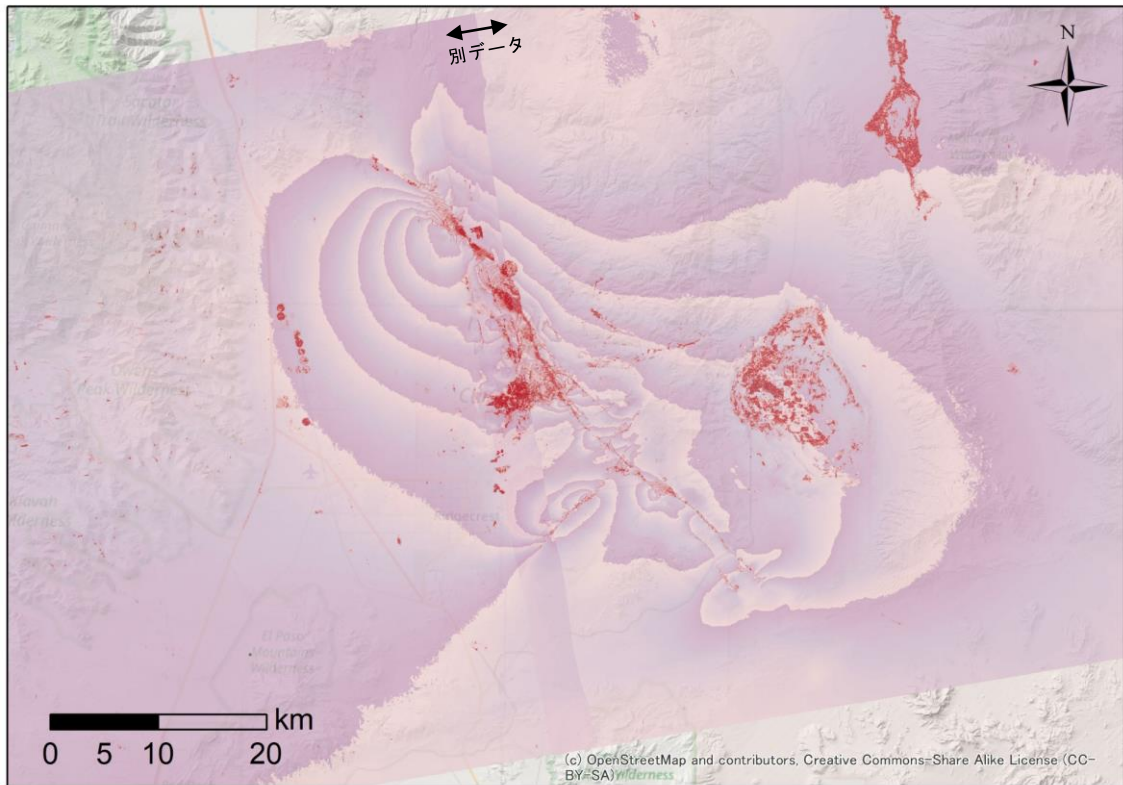


図 2.2.60 作成した LC-InSAR 図



## (2) 位相不連続ラインの判読

作成した LC-InSAR 解析図より、地表変状の可能性のある位相不連続ラインの判読を行った。抽出にあたっては、干渉位相の不連続が明瞭に確認できるか否かによって2段階に分けて記載した。連続性のある低コヒーレンス部を境に干渉位相が不連続である場合を確実度 I、連続性のある低コヒーレンス部があるものの、その低コヒーレンス部分を境にして干渉位相の不連続が明瞭に認められないものを確実度 II とした。判読結果を図 2.2.61 に示す。

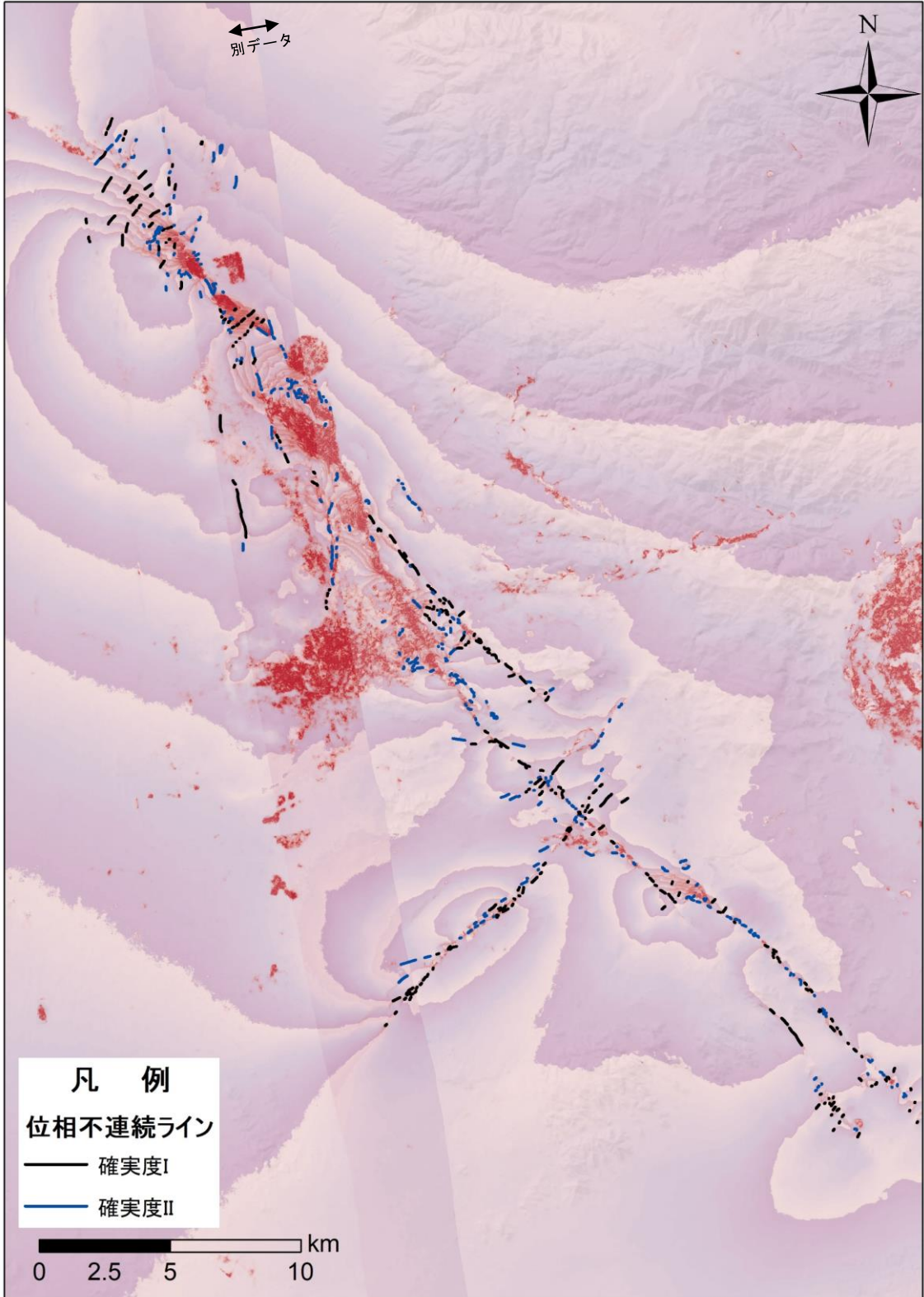


図 2.2.61 位相不連続ライン判読結果

### (3) 既往文献トレースとの比較

LC-InSAR 図より判読した位相不連続ラインと既往文献により報告されているトレースとの対比を行った。対比に使用する既往文献トレースは DuRoss et al. (2020)および Xu et al. (2020)を用いた。位相不連続ラインとこれらの文献との比較結果を図 2.2.62～図 2.2.79 に示す。ここで、DuRoss et al. (2020)では現地調査に基づき”surface rupture”をマッピングしており、Xu et al. (2020)では C バンド衛星である Sentinel-1 画像の解析により”inferred fracture”をマッピングしていることに留意する必要がある。

DuRoss et al. (2020)との対比の結果、LC-InSAR 図において、Mw 6.4 の地震時に生じた北東－南西走向のトレースと、Mw 7.1 の地震時に生じた北西－南東走向のトレースが大局的にはほぼ一致して抽出されていることが確認された。特に、Mw6.4 の地震時の北東－南西走向のトレースでは、精度よく抽出されている（図 2.2.68）。北西－南東走向の主断層の北西延長部において、LC-InSAR 図で北東－南西走向の微小な変位が抽出されており、DuRoss et al. (2020)においても同様の走向を有するトレースが図示されている（図 2.2.63 および図 2.2.64）。低コヒーレンスが線として表れている箇所では、既往文献のトレースで良い一致を示す一方、面的に広がりを持つ低コヒーレンス値域においては、LC-InSAR 図では断層位置を特定することが困難であった（図 2.2.65 および図 2.2.66）。これらの他にも、主断層の周辺には DuRoss et al. (2020)で図示されていない変位を LC-InSAR 図では判読されており、現地調査では認識できない微小な変位を捉えられている可能性が考えられる。一方で、DuRoss et al. (2020)で報告されている変位のうち主断層から離れているものの中には、LC-InSAR 図で判読できていない箇所も散見され、変位の規模と L バンドである ALOS-2 で捉えることができる精度の限界との関連が示唆された（図 2.2.70）。

Xu et al. (2020)との対比においては、主断層では上述の DuRoss et al. (2020)との対比結果と同様の傾向がみられるが、主断層周辺ではトレースの分布形態が大きく異なることが確認された。例えば、北西－南東走向の主断層の北西延長部では、位相不連続ラインと Xu et al. (2020)によるトレースでは、いずれも北東－南西走向を有する変位を抽出しているものの長さ、位置、本数が異なっている部分がある（図 2.2.72）。このほかにも主断層の周辺には Xu et al. (2020)で図示されていない変位を LC-InSAR 図では判読されている箇所や、Xu et al. (2020)で報告がされているものの LC-InSAR 図で判読できていない箇所も散見された。Xu et al. (2020)では、Sentinel-1 を用いた 2.5 次元解析により”fracture”を推定している。C バンド衛星である Sentinel-1（波長 5.6 cm）は、本調査で使用した L バンド衛星である ALOS-2（波長 23.8 cm）と比べて波長が小さい。そのため、Sentinel-1 では変位の小さい箇所を捉えやすく、ALOS-2 では変位の大きい箇所を捉えやすい波長の違いを示している可能性がある。

以上を踏まえると、LC-InSAR 図による位相不連続ラインと既往文献のトレースの正確な位置関係については、トレースの取得手法及び計測精度の違いや図面のジオリファレンスによるずれ等があるためか完全に一致することは難しいものの、主断層の分布特性については概ね整合的であることが確認された。また、既往文献では報告されていない LC-InSAR 図による位相不連続ラインについては、既往の手法では把握が困難な微小な変位を検出している可能性を示唆しており、さらなる検討が必要である。さらに、本調査地域は植生の少ない砂漠であることから、Sentinel-1 を使用した微小な変位の抽出が有効である可能性が考えられる。

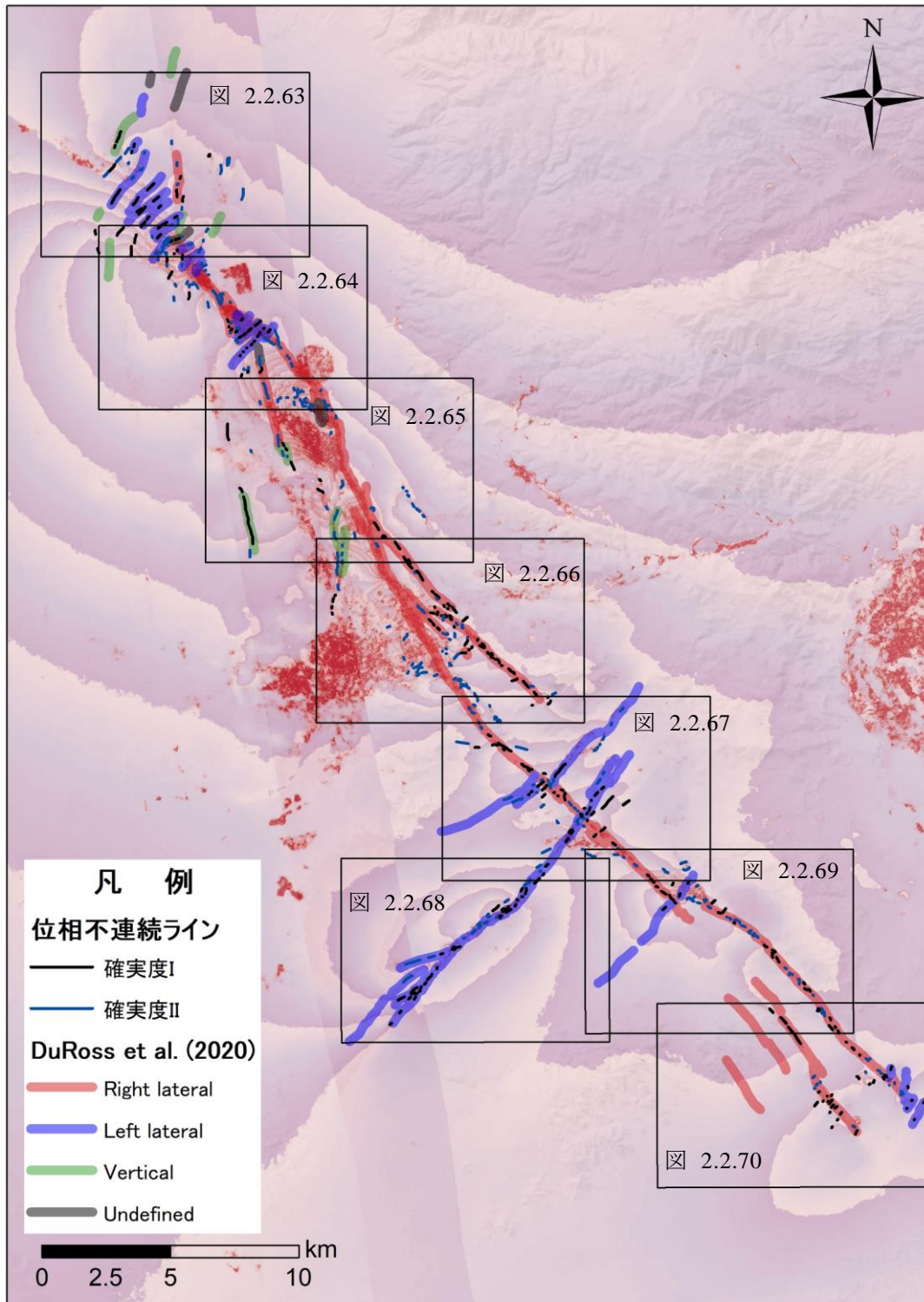


図 2.2.62 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較 (全体図)



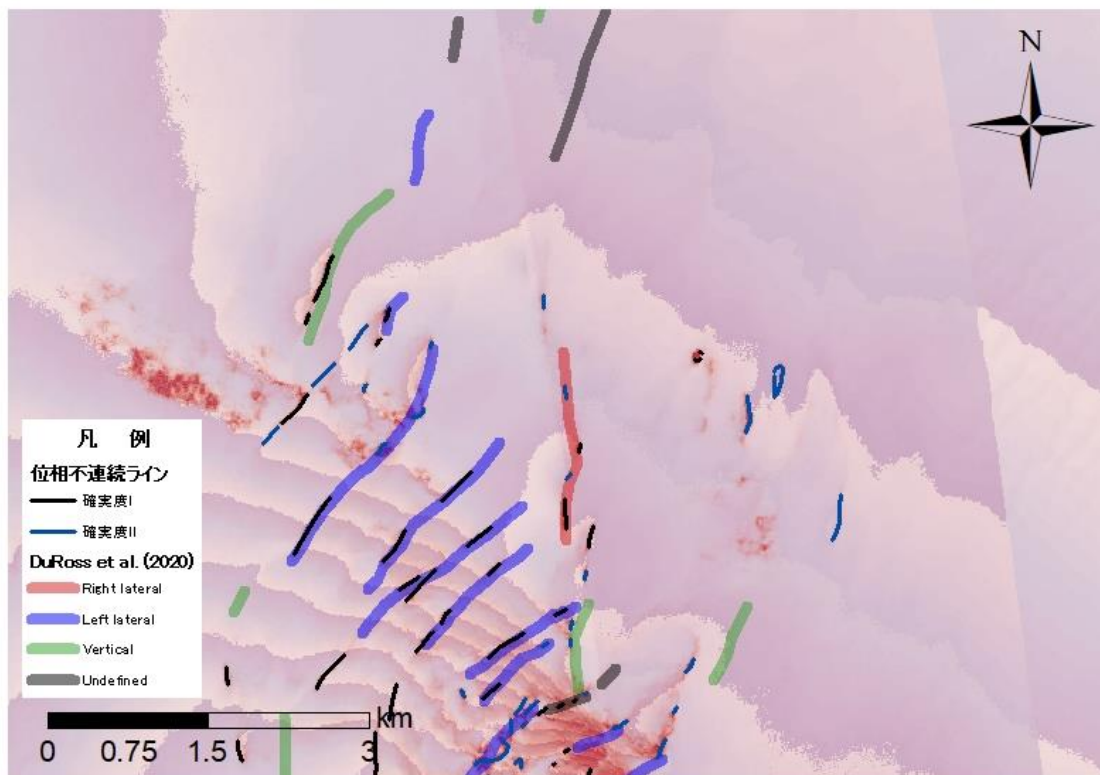


図 2.2.63 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較①

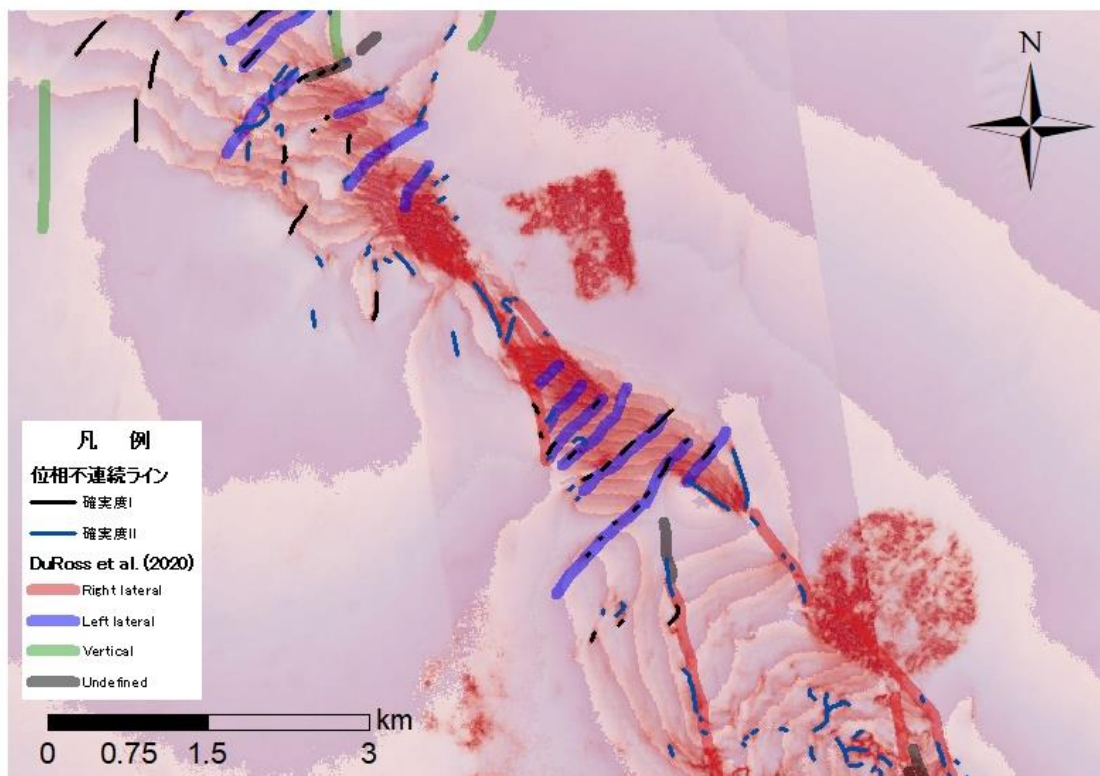


図 2.2.64 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較②

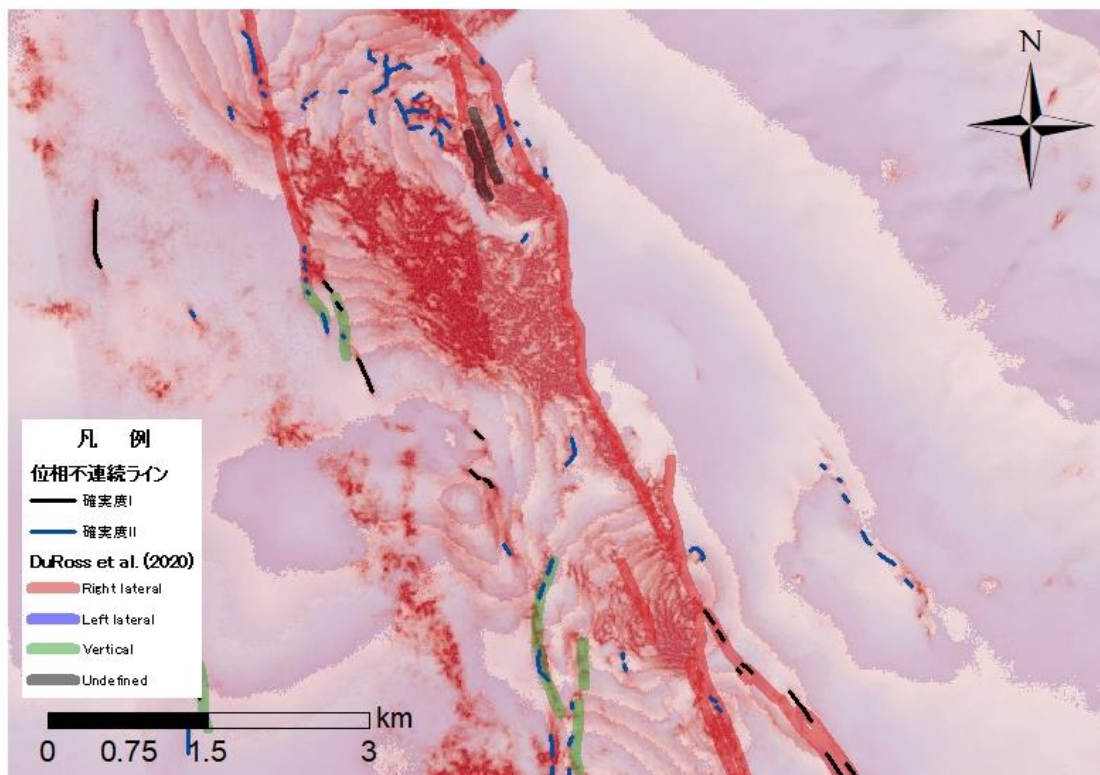


図 2.2.65 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較③

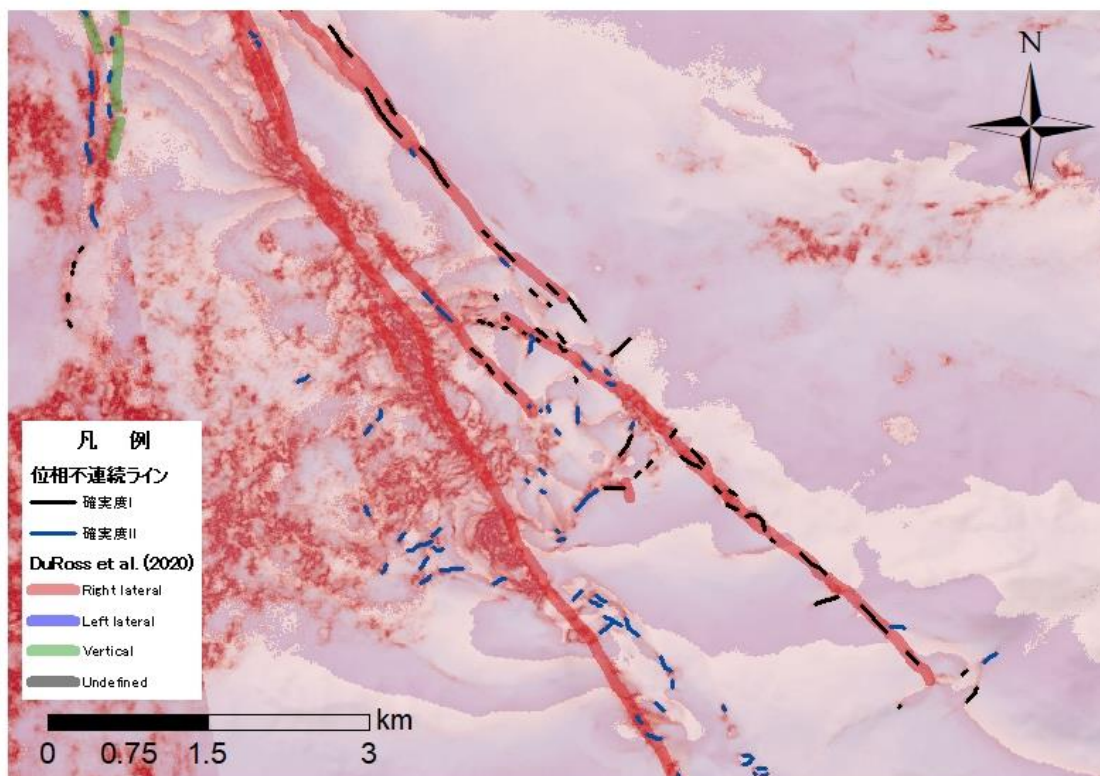


図 2.2.66 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較④



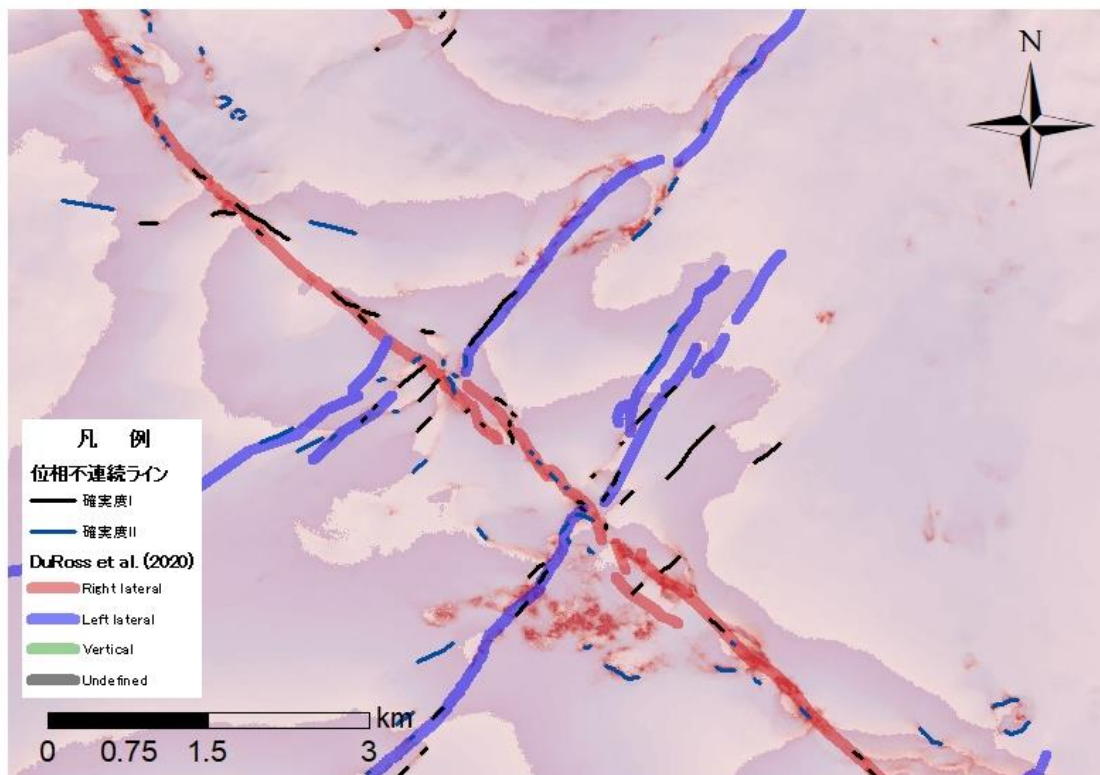


図 2.2.67 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較⑤

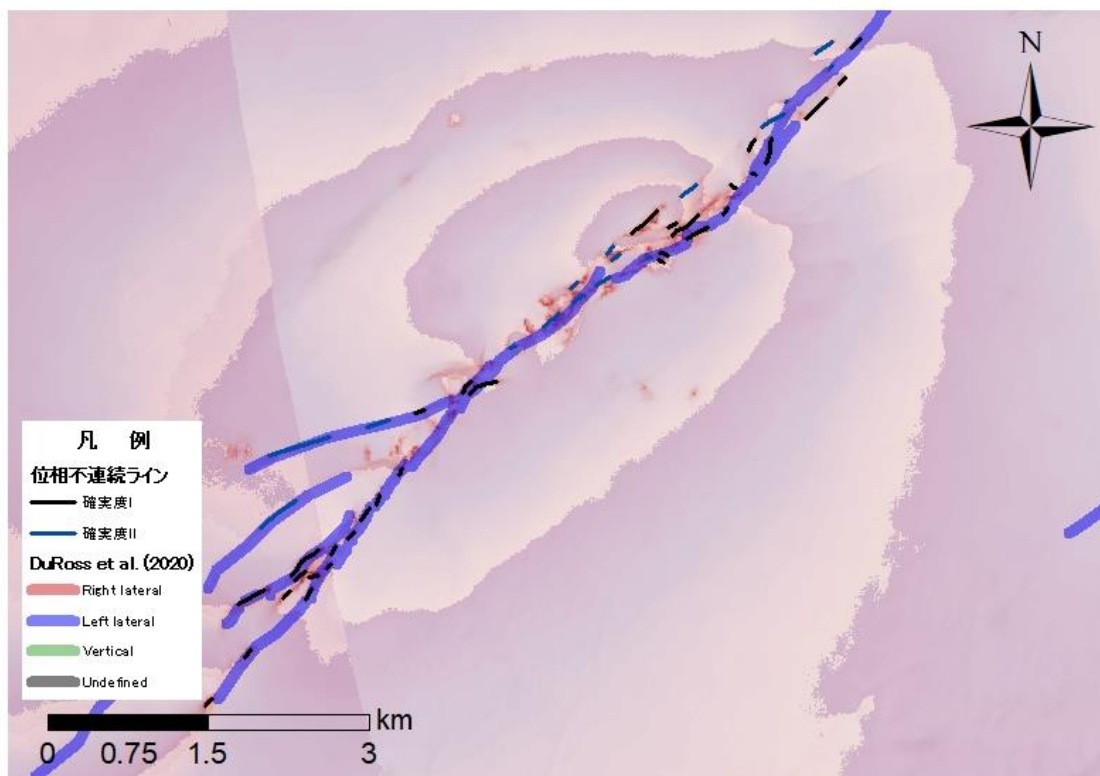


図 2.2.68 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較⑥

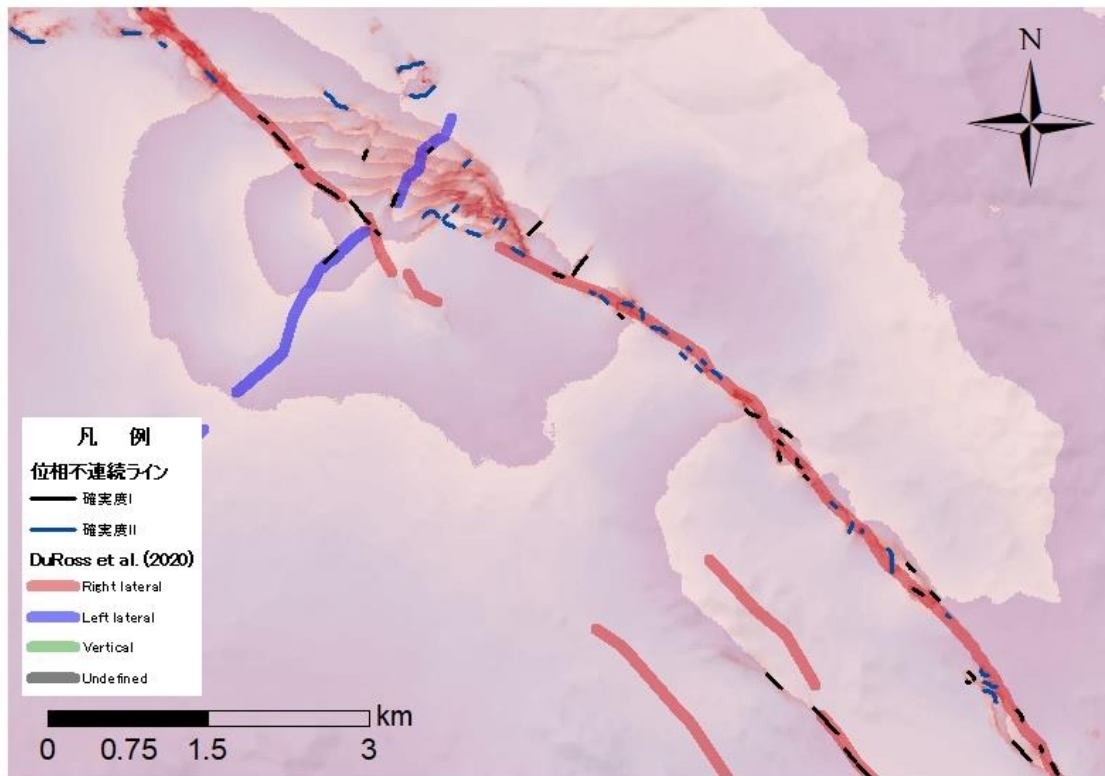


図 2.2.69 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較⑦

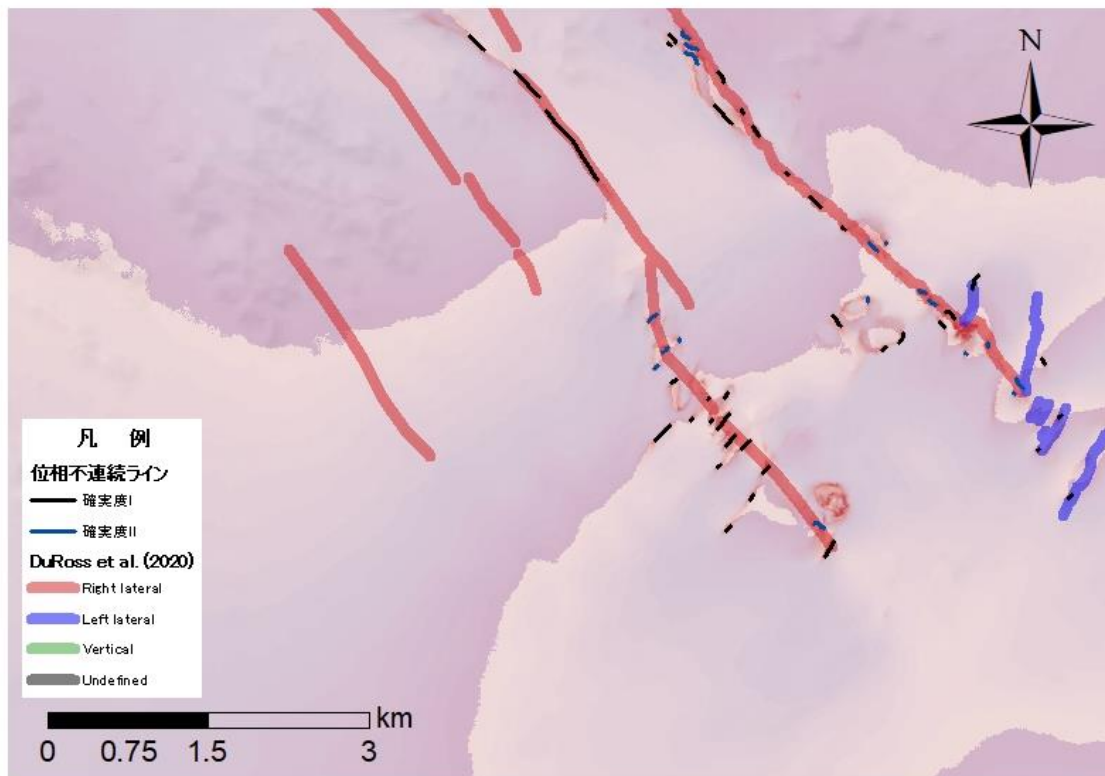


図 2.2.70 位相不連続ライン判読結果と  
DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較⑧



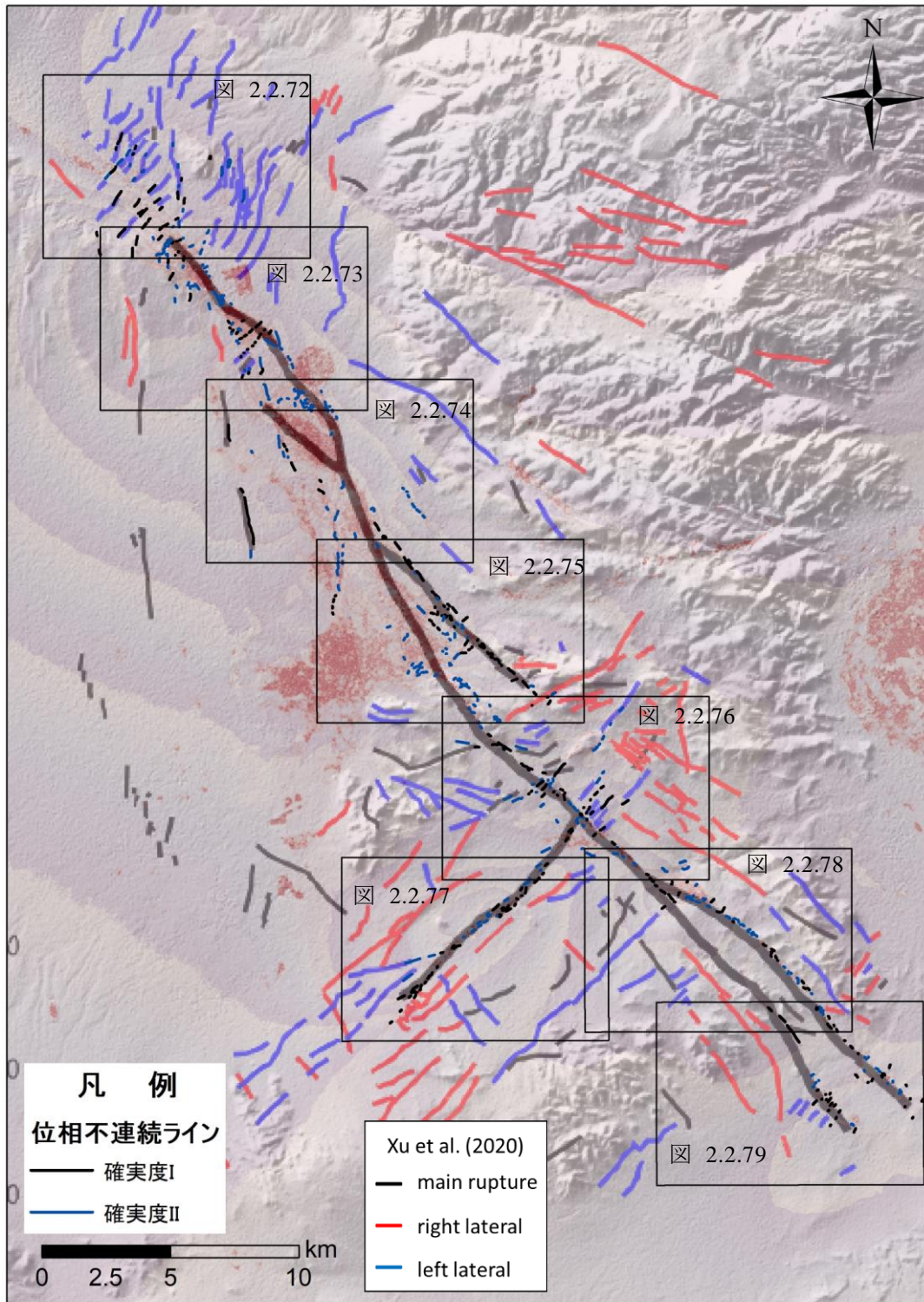


図 2.2.71 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較 (全体図)

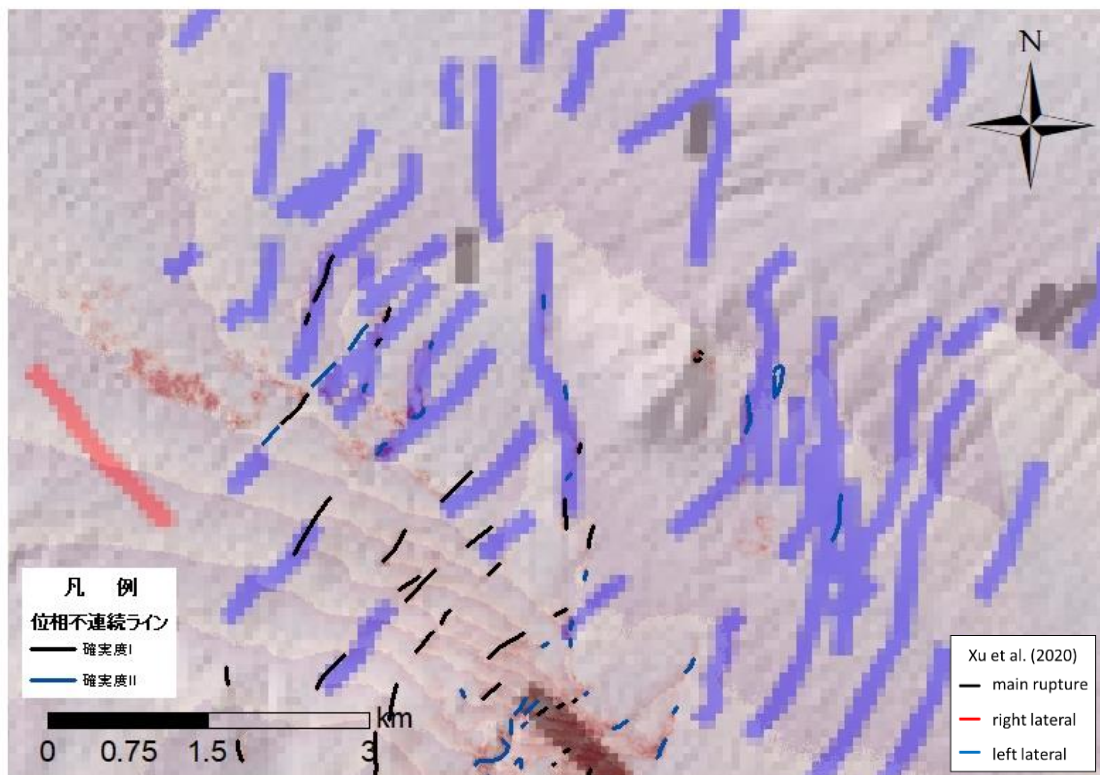


図 2.2.72 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による "inferred fracture" との比較①

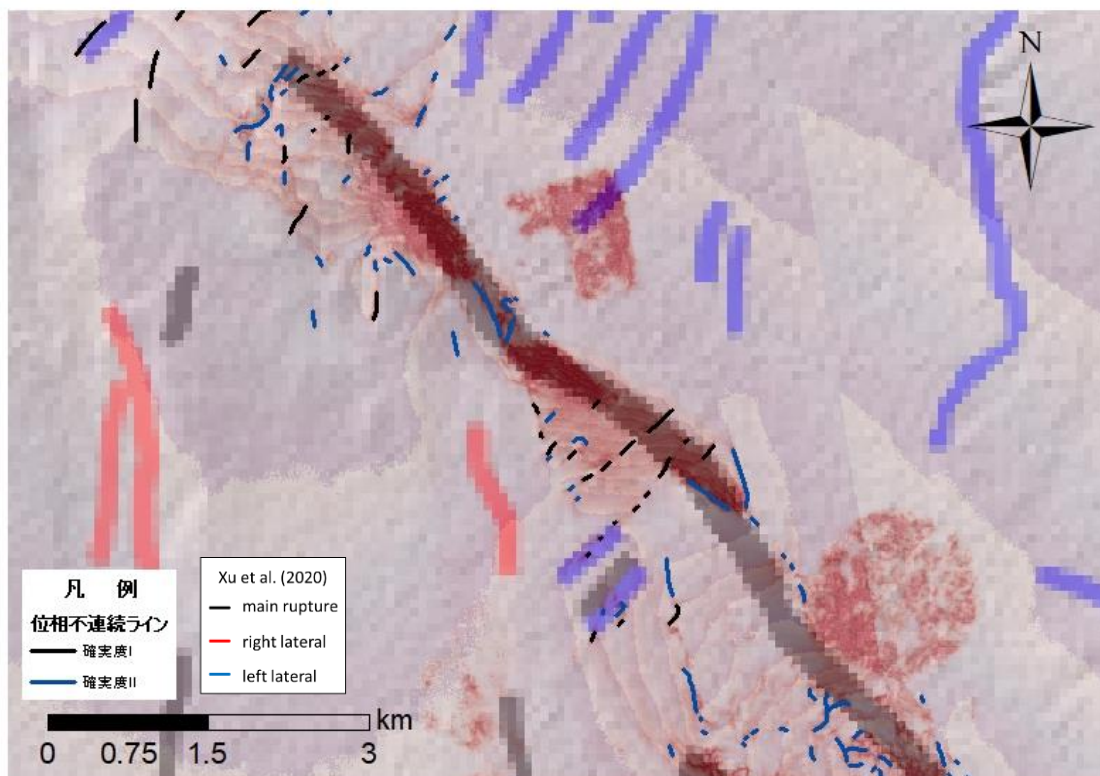


図 2.2.73 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による "inferred fracture" との比較②



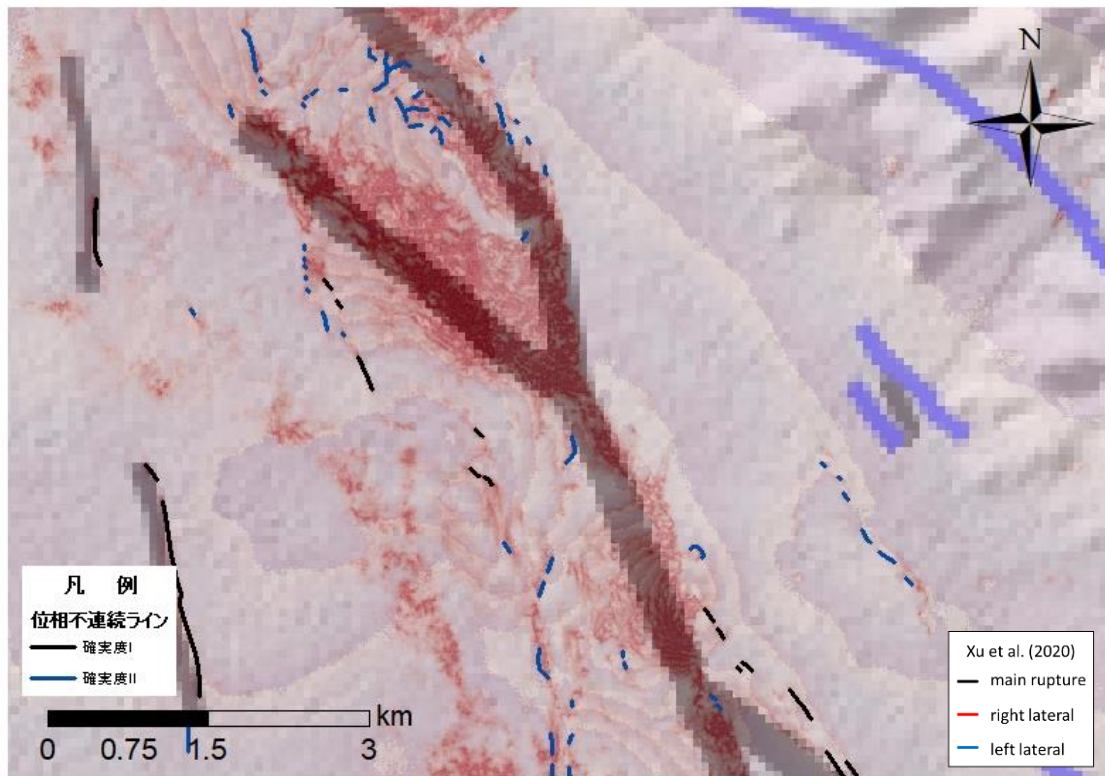


図 2.2.74 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較③

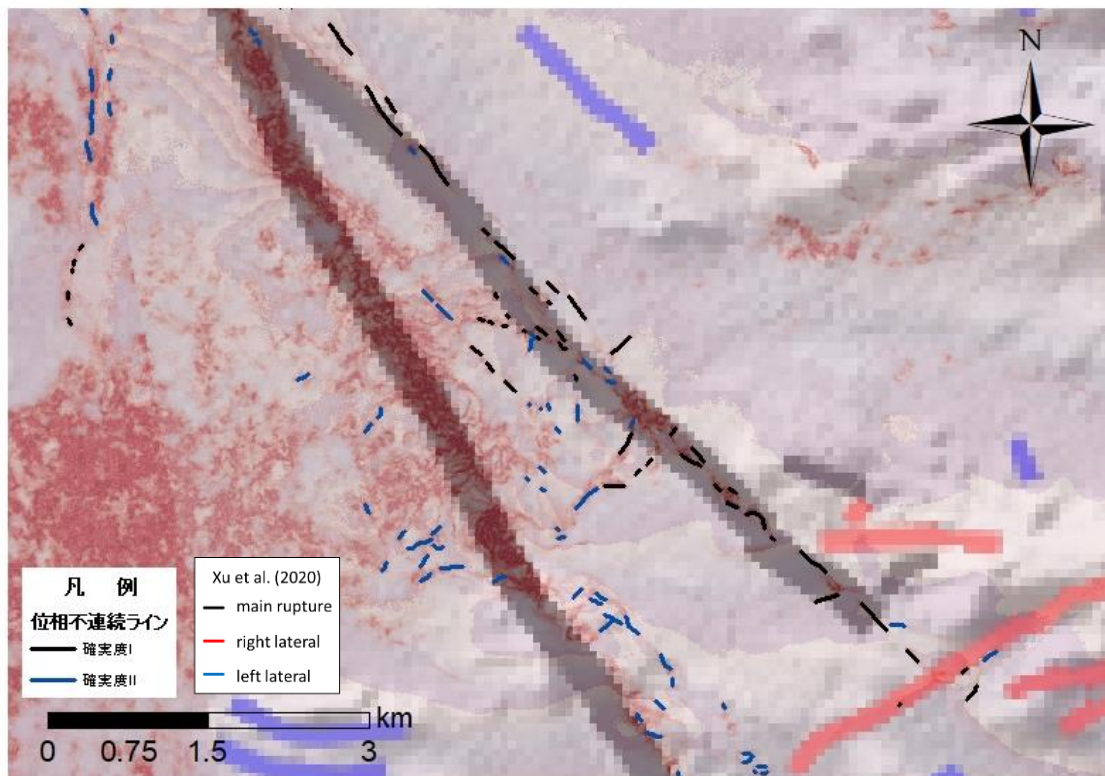


図 2.2.75 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較④

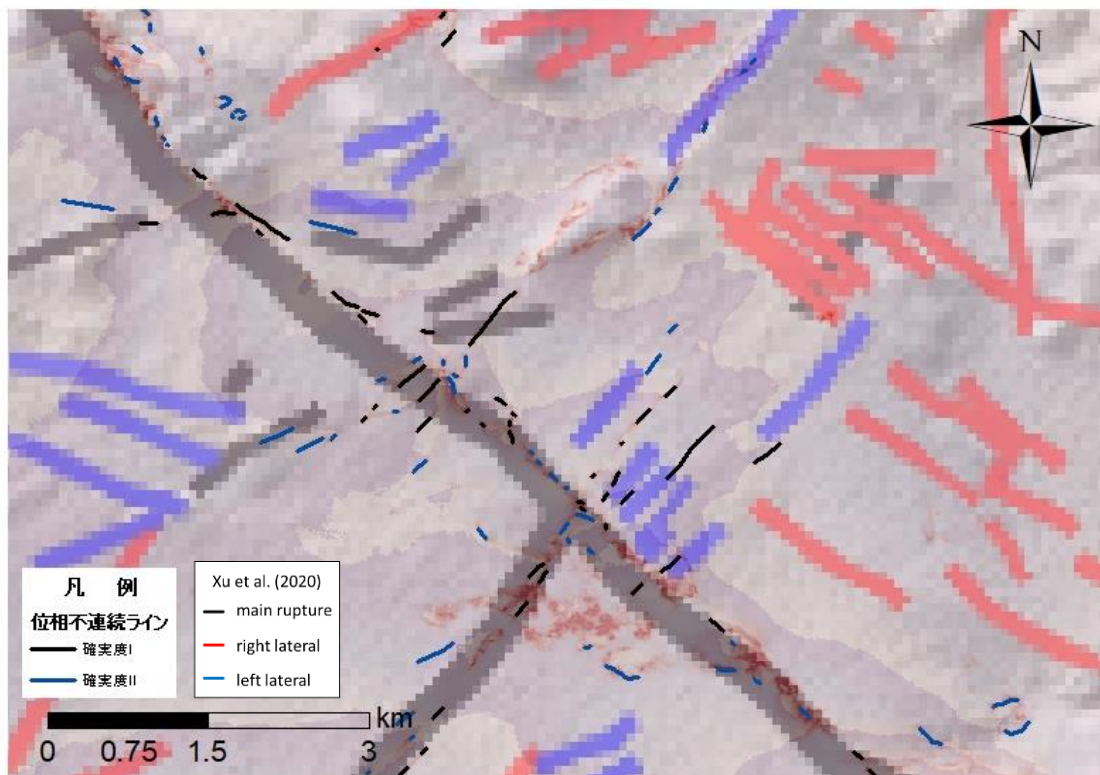


図 2.2.76 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較⑤

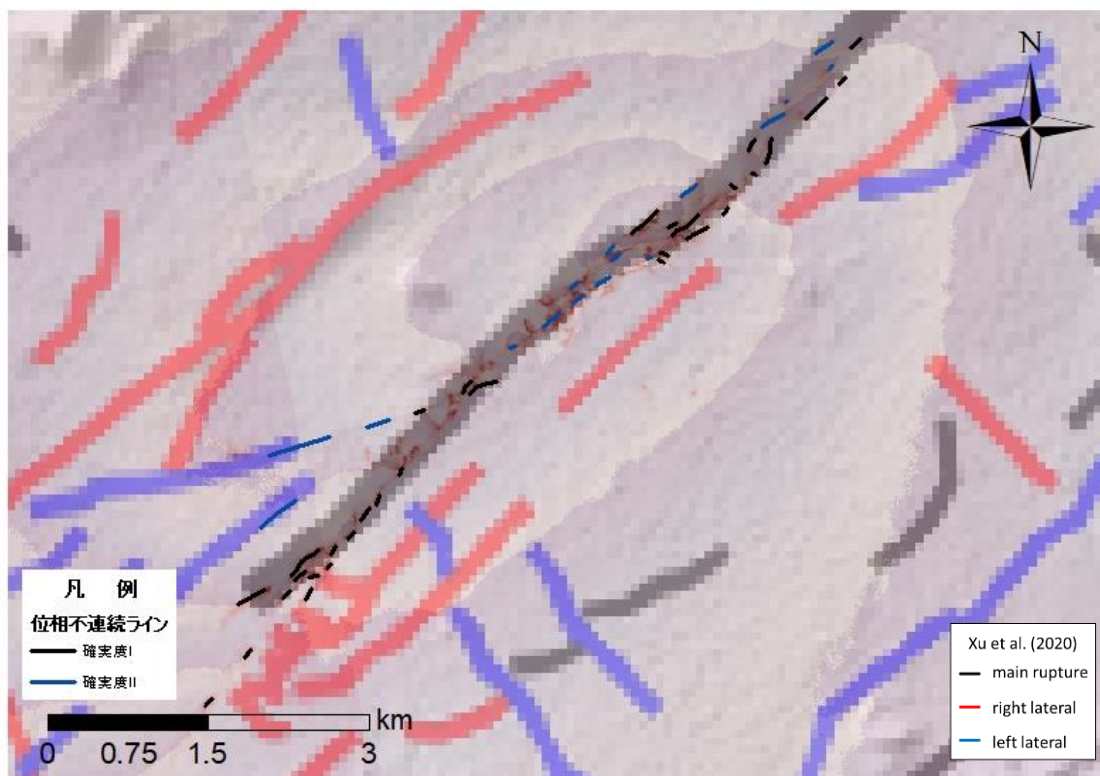


図 2.2.77 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較⑥



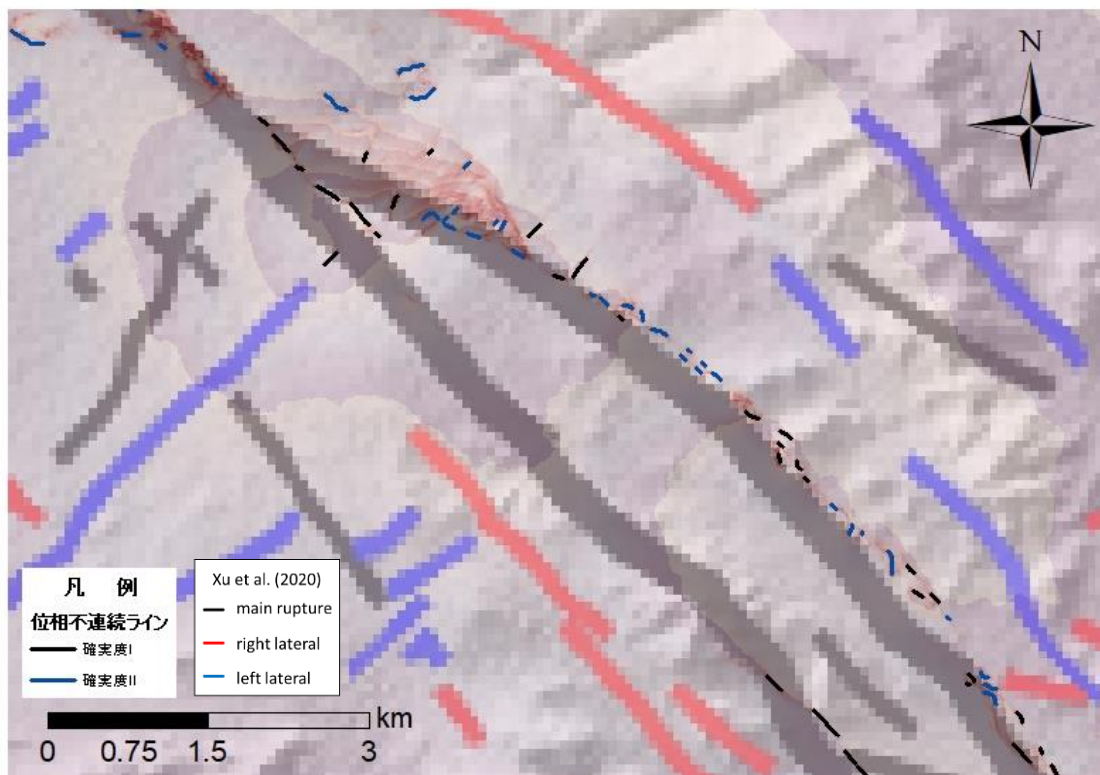


図 2.2.78 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較⑦

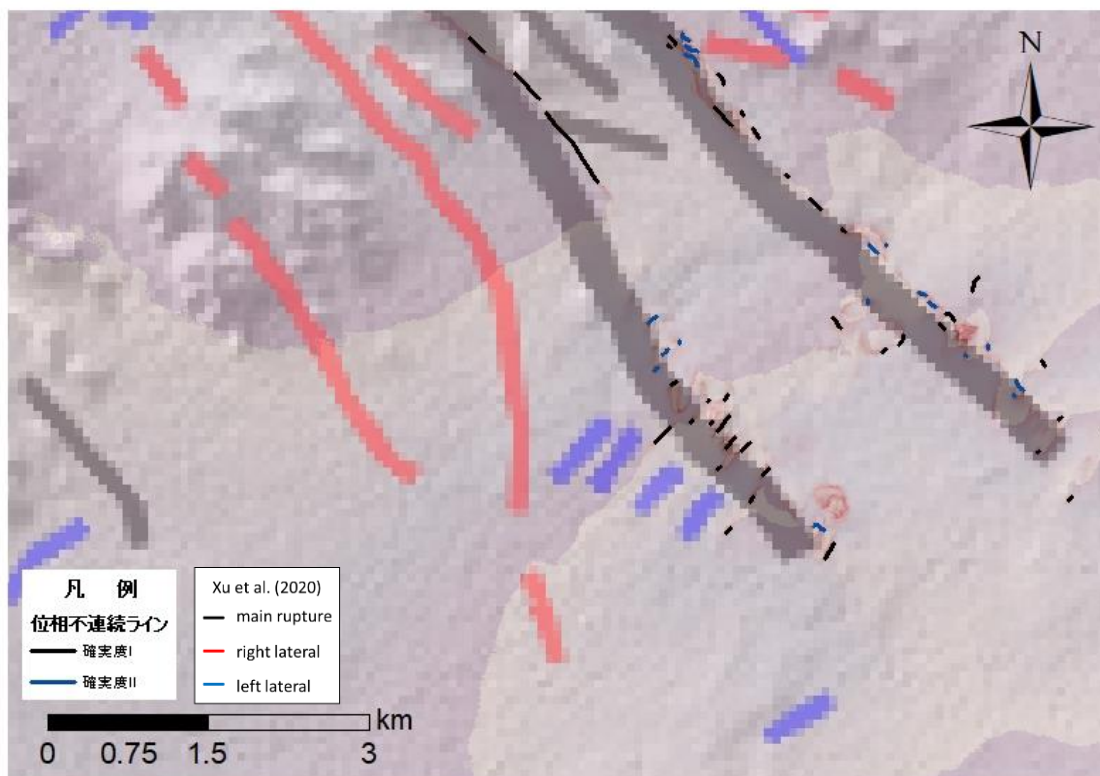


図 2.2.79 位相不連続ライン判読結果と  
Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較⑧

### 2.2.3.2. ピクセルオフセット解析

ALOS-2 画像を用いてピクセルオフセット解析を実施した。ピクセルオフセット解析の実施結果として、LC-InSAR 図による位相不連続ラインとともにアジマス方向（準南北方向）の解析結果を図 2.2.80 に、レンジ方向（準東西方向）の解析結果を図 2.2.81 に示す。ピクセルオフセット解析は、東西で異なるエリアの ALOS-2 画像（図 2.2.58）を用いて実施しており、基準点はエリアごとに取得している点に留意する必要がある。アジマス方向及びレンジ方向のピクセルオフセット解析結果と既往文献（DuRoss et al. (2020)及び Xu et al. (2020)）のトレースとの比較結果を図 2.2.82～図 2.2.85 に示す。

ピクセルオフセット解析の結果、大局的には位相不連続ラインを境に変動方向が異なっていることが確認できる。つまり、アジマスオフセットは、北西－南東走向の主断層の南側では正の方向に、北側では負の方向に変動しており、右横ずれ方向の動きを示唆している（図 2.2.80）。また、レンジオフセットは、北西－南東走向の主断層と共役関係にある北東－南西走向の主断層の北側では正の方向に、南側では負の方向に変動しており、左横ずれ方向の動きを示唆している（図 2.2.81）。主断層での変動は、DuRoss et al. (2020)により報告されている変位方向と整合的であることが確認された（図 2.2.82～図 2.2.83）。一方で、DuRoss et al. (2020)や Xu et al. (2020)により報告されている主断層周辺の多数の小規模な変位についての変動方向の把握は困難であった。同様に、位相不連続ラインのうち、微小な変位を示唆している変動についても把握できなかった。小林ほか(2011)で指摘されているように、ピクセルオフセット解析では、変位勾配の大きな局所的大変位の計測が可能であるものの、解析における空間解像度や計測精度が低いことが課題である。

以上、ピクセルオフセット解析では主断層の境界が明瞭に識別でき、変位の方向を把握することが可能であるが、LC-InSAR 図で抽出できたような微小な変位の把握は困難である。

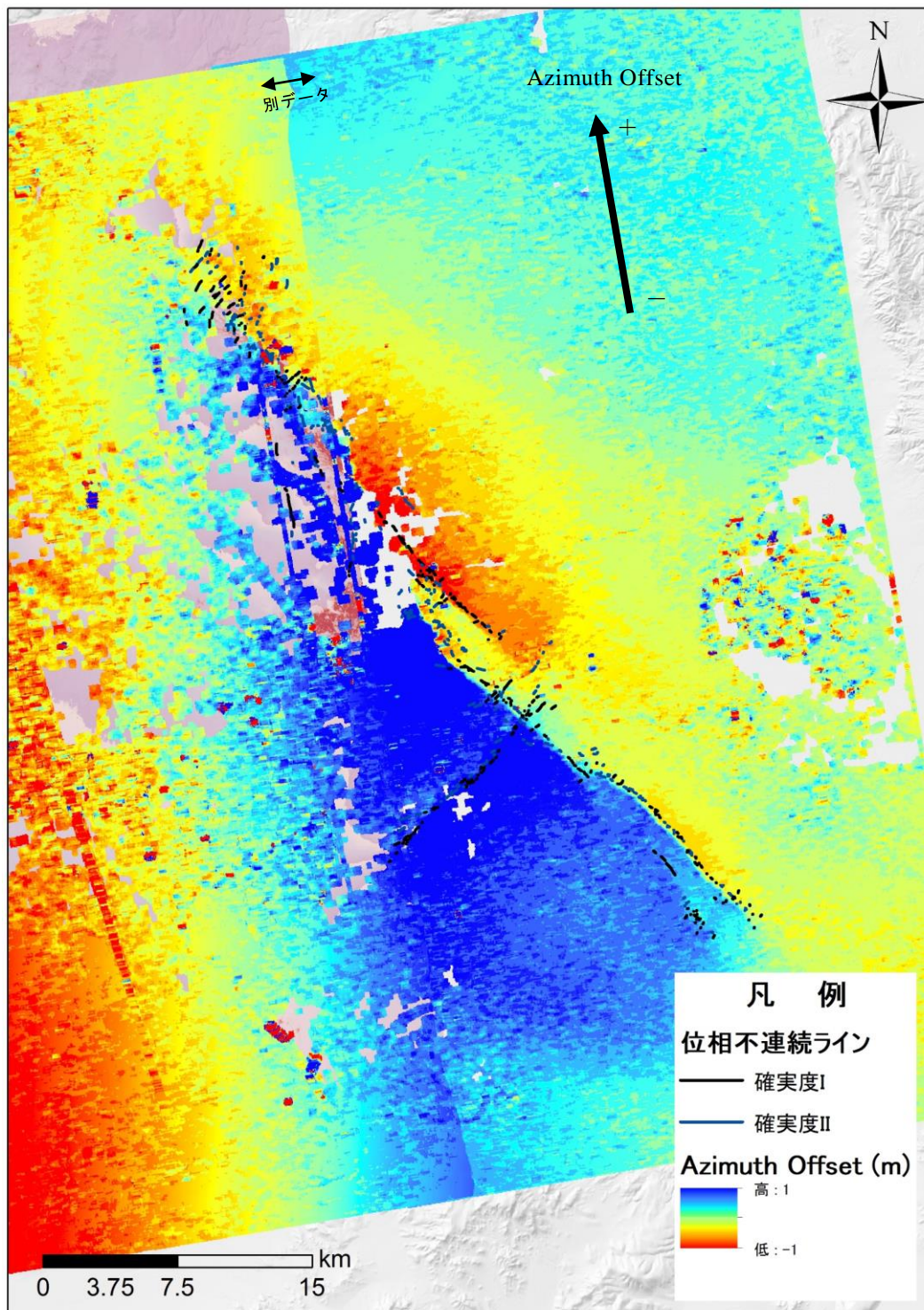


図 2.2.80 アジマス方向のピクセルオフセット解析結果



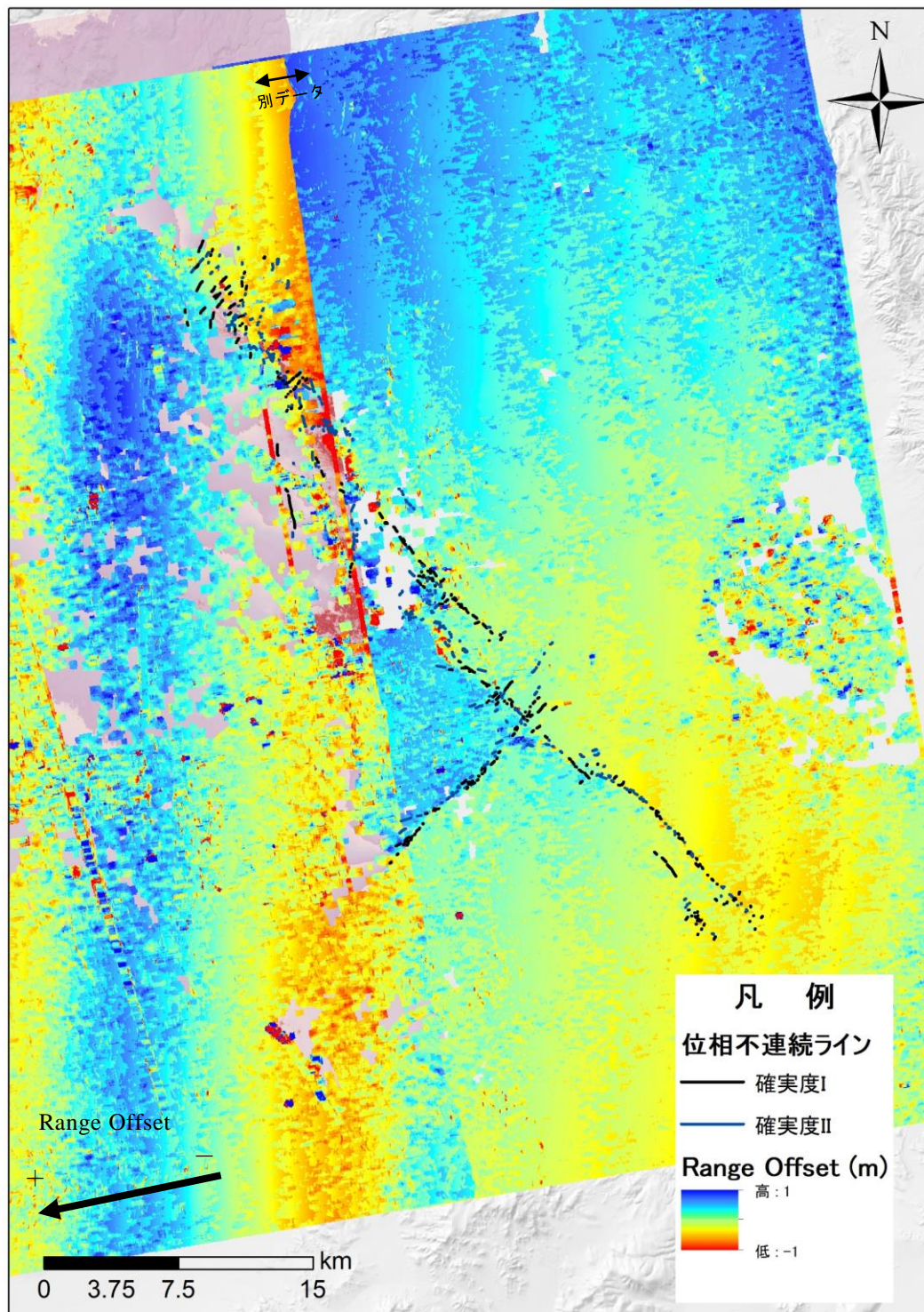


図 2.2.81 レンジ方向のピクセルオフセット解析結果



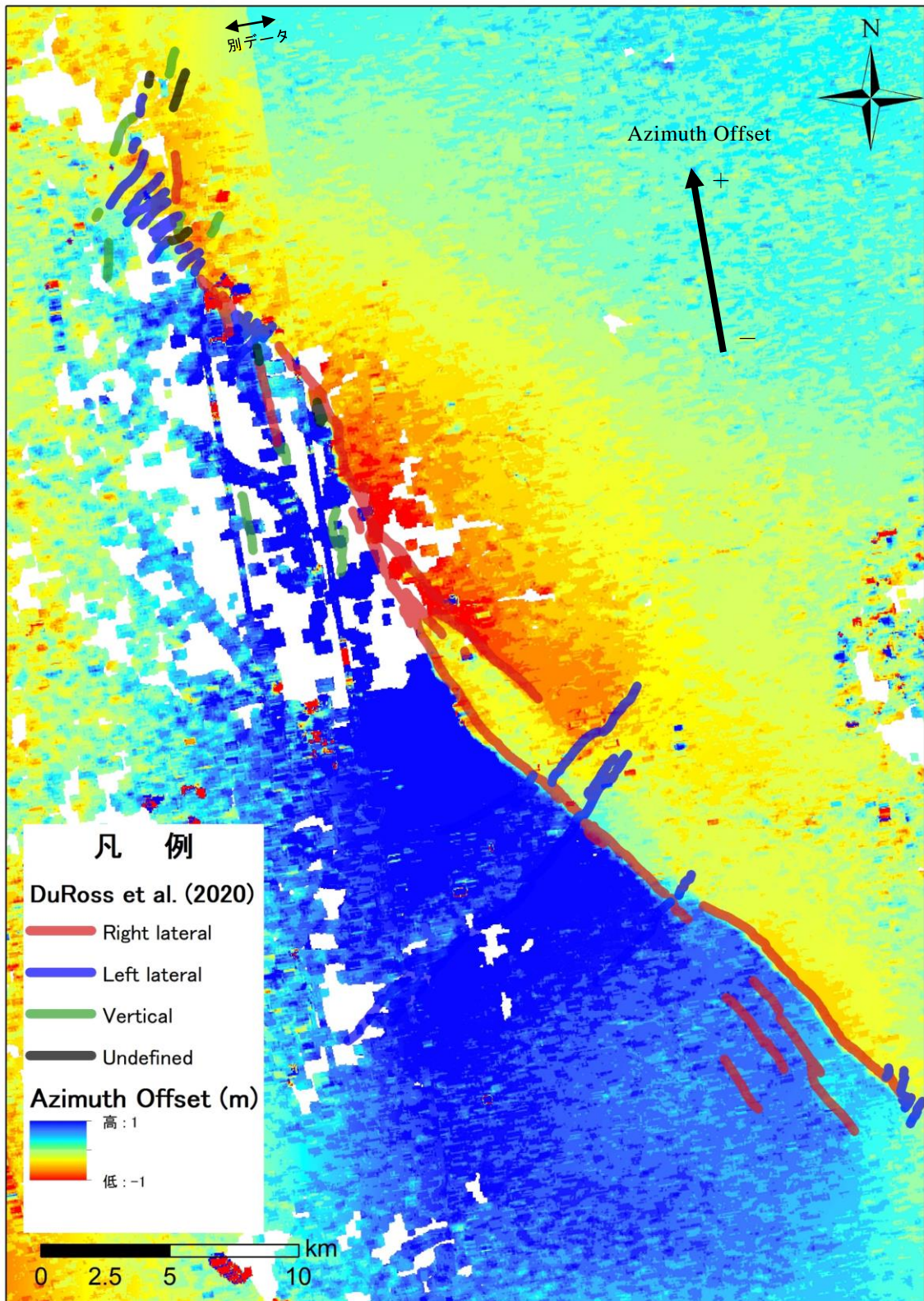


図 2.2.82 アジマス方向のピクセルオフセット解析結果と DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較



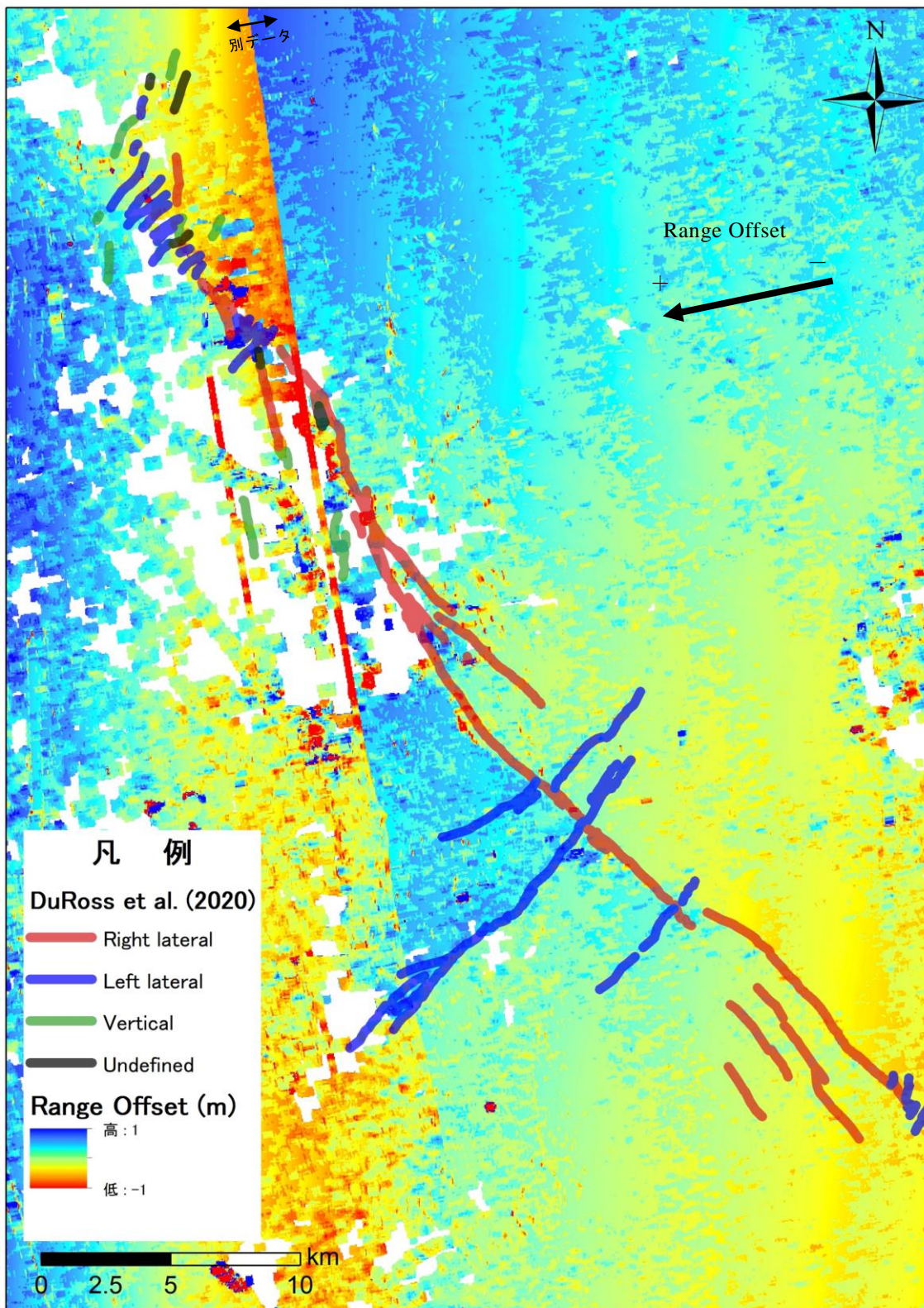


図 2.2.83 レンジ方向のピクセルオフセット解析結果と DuRoss et al. (2020)による"surface rupture"との比較



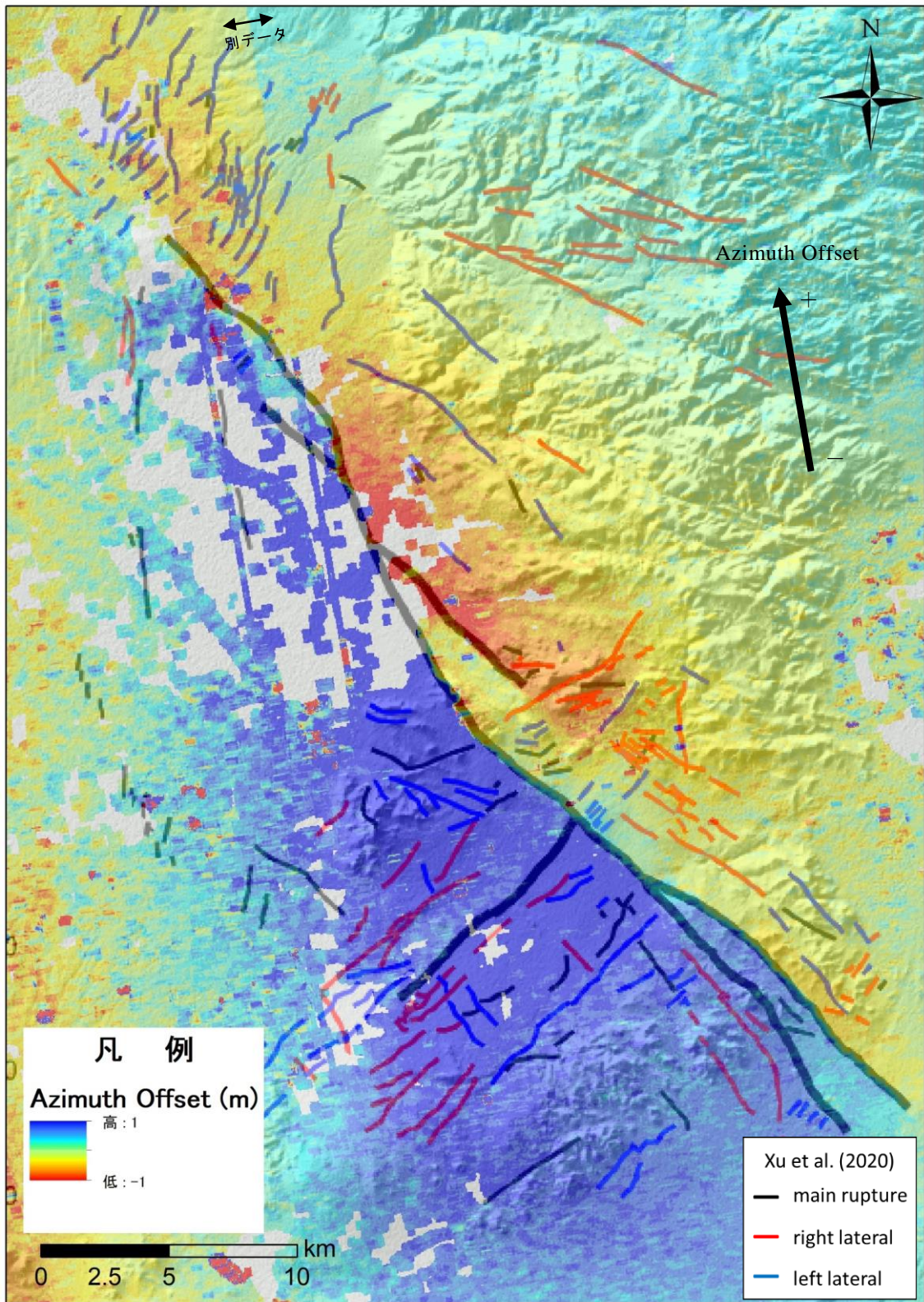


図 2.2.84 アジマス方向のピクセルオフセット解析結果と Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較



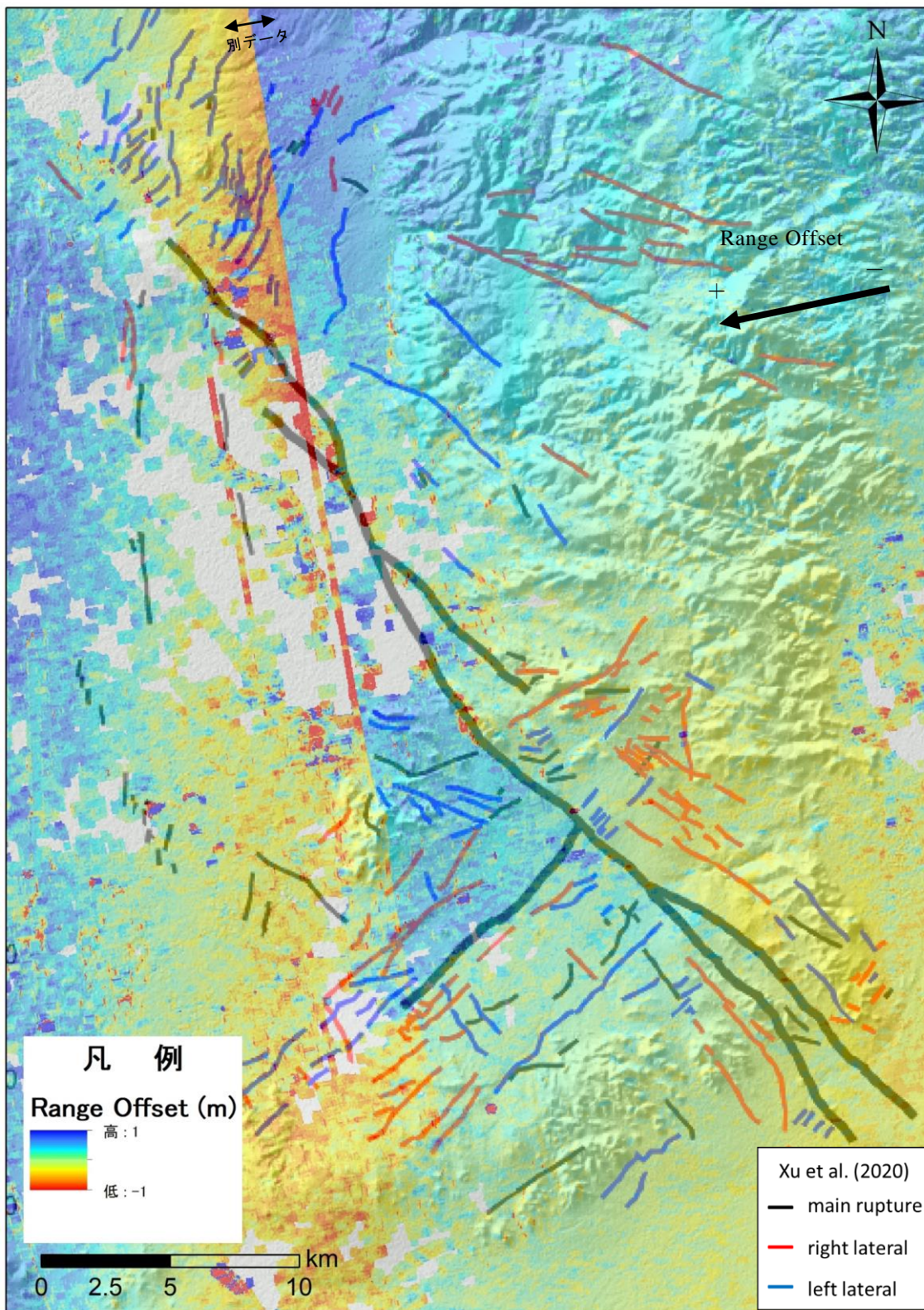


図 2.2.85 レンジ方向のピクセルオフセット解析結果と Xu et al. (2020)による"inferred fracture"との比較

## 2.2.4. 測地学的情報を用いた解析のまとめ

### 2.2.4.1. 熊本地震の解析結果のまとめ

下町トレンチおよび上陳東トレンチを対象に衛星画像解析を適用した。その結果、変位の小さい下町トレンチでは SAR による 2.5 次元解析が有効であったが、画像マッチング解析では有意な変位を確認することはできなかった。一方で、変位の大きい上陳東トレンチでは SAR による 2.5 次元解析は変位を得ることができず、画像マッチング解析が有効であった。したがって、測地学的情報を用いた解析では有効な解析手法が変動の大きさによって異なることが示唆された。さらに、変動の大きさに応じて解析手法を使い分けることで変位量についても算出が可能となった。測地学的情報を用いた解析手法について、解析可能な変位量と変位方向のイメージ図を図 2.2.86 に示す。

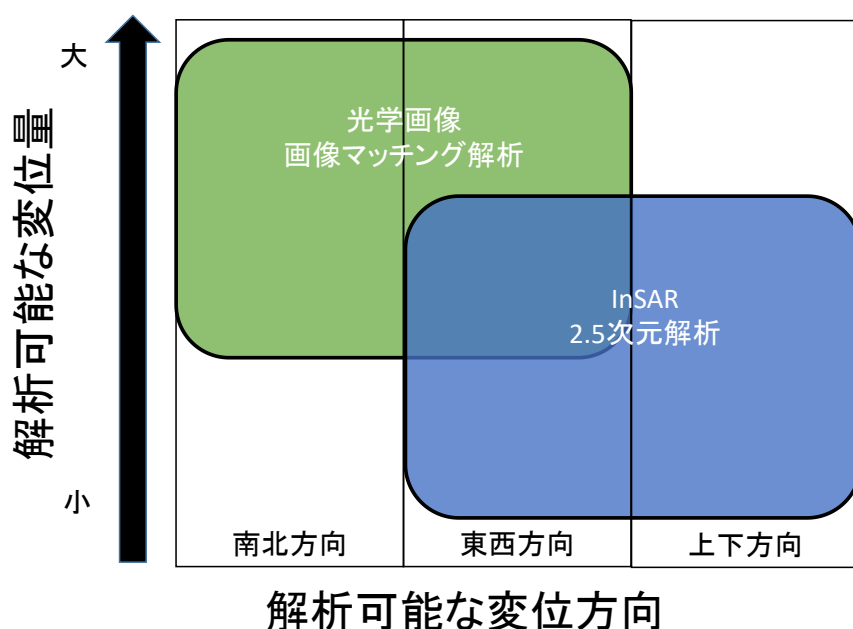


図 2.2.86 衛星画像解析手法ごとの解析可能な変位のイメージ図

2021 年 3 月現在、光学衛星画像による画像マッチング解析は分解能 1.5m である SPOT6/7 を使用している。検討の結果、SPOT6/7 による画像マッチング解析は分解能の半分以下の精度で変位量を把握可能であった。2021 年以降に打ち上げ予定の ALOS-3 においては、分解能が 80cm とされている。したがって、ALOS-3 打ち上げ以降に発生する地震においては画像マッチング解析により識別可能な変位量が 40 cm 程度と想定され、より詳細な解析が可能になるものと考えられる。



#### 2.2.4.2. 海外の事例(リッジレスト地震)のまとめ

##### (1) LC-InSAR 図とピクセルオフセット解析図の比較

リッジレスト地震を対象として差分干渉 SAR 解析により LC-InSAR 図から位相不連続ラインの判読を行った。あわせて、SAR 衛星画像データからピクセルオフセット解析図を作成して変位発生箇所を判読した。作成した図面及び既往文献との比較検討の結果、LC-InSAR 図とピクセルオフセット解析図の特徴は次のように整理される。

##### 【LC-InSAR 図】

- メイントレースおよび微小な変位の両方を抽出可能である。
- 変動の規模が大きいと位相不連続部分が面的となり、断層線として抽出が困難となる場合がある。

##### 【ピクセルオフセット解析図】

- メイントレースの境界が明瞭に識別でき、変位の方向も把握可能である。
- 微小な変位の抽出は困難である。

このように、SAR 衛星によるデータを用いた地表地震断層の調査では、変位の規模・方向等の把握する目的に応じた使い分けや併用が重要である。

##### (2) 海外事例への適用性

今回、L バンド SAR 衛星である ALOS-2 のデータを使用して海外の地表地震断層を抽出し、現地調査による地表地震断層の分布と比較検討した。大きな変位を伴う地表地震断層ではピクセルオフセット解析により、小さな変位を伴う地表地震断層は LC-InSAR 図により抽出が可能であることがわかった。既往文献では C バンドの SAR 衛星である Sentinel-1 を使用したものもあるが、C バンドは波長が短いためコヒーレンス値が低くなり変位が捉えられない範囲においても L バンドの ALOS-2 は変位を捉えられている箇所があった。一方で、リッジレスト地震の地表地震断層が分布している地域は砂漠地帯で植生が乏しいため、ALOS-2 ではとらえられないより細かい地表変位まで Sentinel-1 は捉えていることが分かった。地震発生箇所の植生の状況や SAR 衛星の観測頻度によって、これらの衛星、あるいはほかの衛星を使用し海外の地表地震断層及び副断層の分布状況を捉えることが出来る。日本国内の事例だけでは副断層の知見を拓げるのは困難であることから、今後は海外の事例も加えて副断層の知見を増やすことが望ましいと考えられる。

#### 2.2.4.3. 測地学的情報を用いた解析のまとめ

地震時の微小な地表地震断層を捉える方法として、これまで干渉 SAR 解析のうち LC-InSAR 図を用いて微小な変位の抽出を行ってきた。LC-InSAR 図で捉えた副断層についてトレンチ調査を行うと、ほぼ全ての地点で先行する断層活動イベントが認定されてきた。一方で LC-InSAR 図では主断層周辺の変位量が大きな箇所では干渉性が悪くなりコヒーレンス値が低く、断層位置を捉えることが出来ない。また、断層沿いの変位量及び変位分布が捉えられないという欠点がある。そこで、本事業では光学衛星による画像マッチングを実施した。その結果、画像マッチングは断層変位が大きな主断層沿いの変位分布の確認は有効であり、LC-InSAR 図の欠点を補完することが出来ることが分かった。干渉 SAR 解析に光学衛

星の画像マッチングの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確認することができ、断層分布抽出の精度向上が期待できる。しかしながら現段階では画像マッチングによって副断層の微小変位量までは検出できていない。今後も画像マッチングの範囲を限定してマッチングさせる等、手法の検討が必要である。また、SAR 衛星による 2.5 次元解析を本事業で実施した。様々な解析手法を試みたところ、条件により有効な解析手法が異なることが示唆された。対象とする断層の変動量に応じて解析手法を使い分けることが重要であることが判明した。

熊本地震では布田川断層や日奈久断層、出ノ口断層等の主断層で余効変動が生じていることが分かってきた。副断層箇所において余効変動が生じていないか検証するために、干渉 SAR 時系列解析 (SBAS 解析) を実施した。主断層以外にも余効変動が確認されたが、今年及びこれまでトレンチ調査を実施してきた副断層位置では変位量が微小すぎるのか、余効変動は検出できなかった。

ALOS-2 のデータを使用して海外の地表地震断層を抽出し、現地調査による地表地震断層の分布と比較検討した。大きな変位を伴う地表地震断層ではピクセルオフセット解析により、小さな変位を伴う地表地震断層は LC-InSAR 図により抽出が可能であることがわかった。地震発生箇所の植生の状況や SAR 衛星の観測頻度によっては、ALOS-2 以外の衛星を使用し海外の地表地震断層及び副断層の分布状況を捉えることができるので、海外の事例も含めて副断層に関する知見を増やすことが可能であることが分かった。

## 2.3. 副断層に関する現地調査

### 2.3.1. 調査概要

#### 2.3.1.1. 調査目的

副断層に関する現地調査では、地表に変位が現れた内陸地殻内地震を対象に、断層変位の性状の野外調査を含める断層変位データの収集・分析を行い、表層における副断層変位の性状や活動履歴等について検討し、断層変位評価に係る知見を蓄積することを目的とした。

#### 2.3.1.2. 調査内容

副断層に関する現地調査は 2.2 節において測地学的情報を用いた変動地形学的な観点等での解析結果を分析して選定した上陳東地点および下町地点で実施した。トレンチ調査では壁面を縮尺 1/20 で詳細にスケッチを実施して、壁面に現れた地質および変形構造の詳細な記録を行った。さらに、壁面を分割して撮影した写真をモザイクで組み合わせた壁面写真を作成し、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である。また、トレンチ壁面よりサンプリングを行い、放射性炭素年代測定および火山灰分析を実施した。

断層に係る知見は、トレンチ現場での現地検討会を実施することで、専門性の異なる複数視点から深化を図った。

調査の結果、2016 年熊本地震に先立つ断層イベントを上陳東地点では Aso-4 以降で少なくとも 2 回、下町地点では K-Ah 以降で少なくとも 3 回分を識別できた。

##### (1) トレンチの数・規模および形状

トレンチは上陳東地点で 1 箇所、下町地点で 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 9×20m、深さ 5m、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、上陳東トレンチでは開口部の大きさを 9m×22m・深さ 5m（現地検討会后、一部増掘を実施）、下町トレンチでは開口部の大きさを 9m×20m・深さ 5m とした。

##### (2) 現地作業期間

トレンチ調査（現地作業）は 2020 年 12 月 7 日（月）～2021 年 2 月 12 日（土）の 2 カ月程度で実施した。



### (3) 調査工法

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

### (4) 使用した機材

本調査で使用した機材を表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 使用機材一式

| 機 材        | 仕様・規格              | 数 量 | 単 位 |
|------------|--------------------|-----|-----|
| バックホウ（上陳東） | 0.25m <sup>3</sup> | 1   | 台   |
| 〃（下町）      | 0.75m <sup>3</sup> | 1   | 台   |
| 〃（下町）      | 0.15m <sup>3</sup> | 1   | 台   |
| 簡易トイレ      |                    | 2   | 台   |
| プレハブ小屋     | 現地調査事務所            | 1   | 台   |
| 発電機        |                    | 1   | 台   |
| オートレベル     |                    | 1   | 台   |
| 水中ポンプ      |                    | 1   | 台   |
| エアークンプレッサー |                    | 1   | 台   |
| 杭・安全柵他     |                    | 1   | 式   |

### (5) 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、議論時には 1 人 1 台のテーブルを用意して人と人の間隔を広く取り 3 密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。

現地検討会実施状況を図 2.3.1～図 2.3.2 に示す。



図 2.3.1 現地検討会実施状況（上陳東トレンチ）



図 2.3.2 現地検討会実施状況（下町トレンチ）

## (6) 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 (CO<sub>2</sub>) 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 <sup>14</sup>C-AMS 専用装置 (NEC 社製) を使用し、<sup>14</sup>C の計数、<sup>13</sup>C 濃度 (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C)、<sup>14</sup>C 濃度 (<sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C) 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) δ<sup>13</sup>C は、試料炭素の <sup>13</sup>C 濃度 (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C) 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) <sup>14</sup>C 年代 (Libby Age : yrBP) は、過去の大気中 <sup>14</sup>C 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)。<sup>14</sup>C 年代は δ<sup>13</sup>C 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。<sup>14</sup>C 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、<sup>14</sup>C 年代の誤差 (±1σ) は、試料の <sup>14</sup>C 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<sup>14</sup>C濃度の割合である。pMCが小さい(<sup>14</sup>Cが少ない)ほど古い年代を示し、pMCが100以上(<sup>14</sup>C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<sup>14</sup>C濃度をもとに描かれた較正曲線と照らし合わせ、過去の<sup>14</sup>C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、<sup>14</sup>C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 $\sigma$ =68.3%)あるいは2標準偏差(2 $\sigma$ =95.4%)で表示される。グラフの縦軸が<sup>14</sup>C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<sup>14</sup>C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、<sup>14</sup>C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。

#### (7) 火山灰分析

火山灰分析は採取した試料を水洗し、試料表面の汚れを落とした後、透過光および上方からの反射光にて観察を行った。

#### (8) 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、熊本県益城町の教育委員会に報告を行うとともに、出土品を全て提出した。

## 2.3.2. 上陳東トレンチ

### 2.3.2.1. 調査位置

上陳東トレンチは 2.2 節で決定した熊本県上益城郡益城町大字上陳字高野地先において実施した（図 2.3.3）。調査位置は位相不連続ライン（小俣ほか, 2017a）の東北東延長部に設定し、想定される変位を直角に横断するようにして掘削を行った。

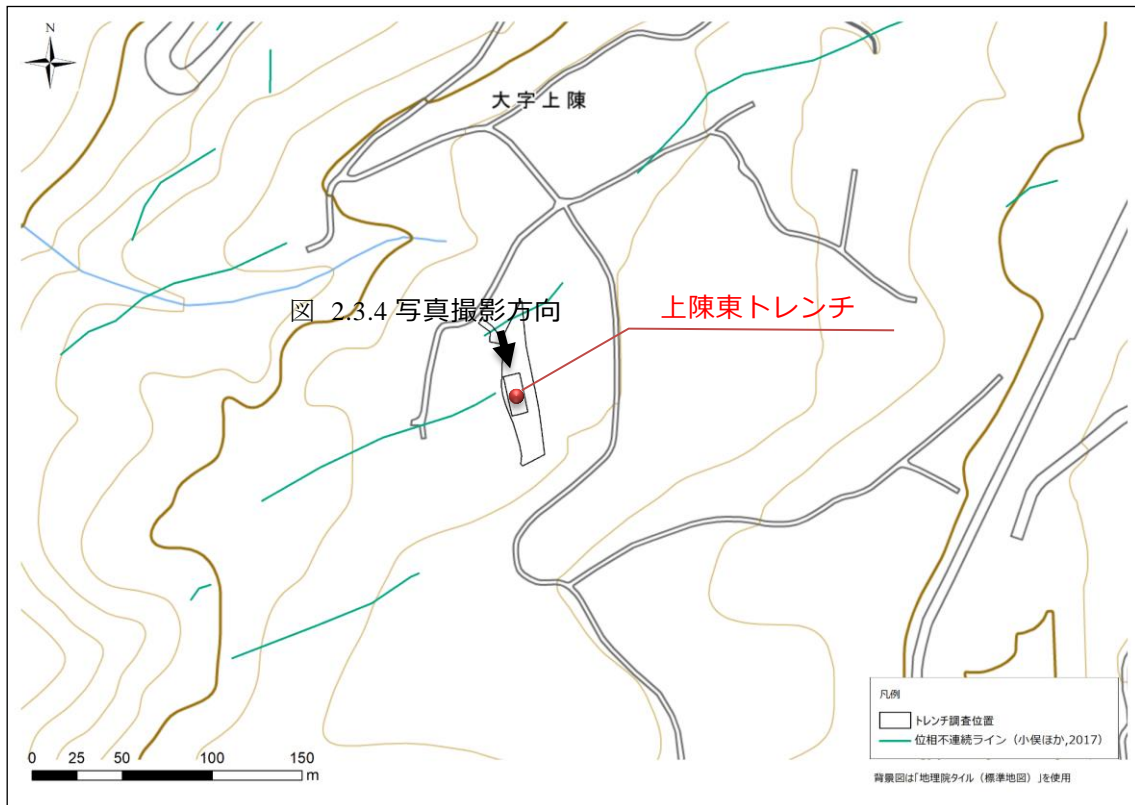


図 2.3.3 上陳東トレンチ位置

### 2.3.2.2. 掘削結果

当初掘削予定範囲は想定した位相不連続ラインを中心に両側に 10m としたが、断層の出現状により南面を追加で 2m 拡張して掘削を行い、開口部の大きさを 9m×22m・深さ 5m とした（図 2.3.4）。さらに、現地検討会実施時においては位相不連続ラインの延長線上に明瞭な断層が認められなかったことから、底面の掘削が不足している可能性が議論となった。そのため、位相不連続ライン付近から北側にかけて一部深度方向の増掘を行った（図 2.3.5～図 2.3.6）。

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 毎のグリットを作成した。掘削を行ったトレンチ形状および高さの基準とした貫板上面 0m 高について、RTK-GPS 測量にて求めた。設置したグリットの標高については、0m 高からレベル測量にて計測した。計測結果を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 上陳東トレンチ測量成果

| 測定位置       | 標高(T.P.m) | 測定方法    | 備考      |
|------------|-----------|---------|---------|
| 鉛直方向 0.00m | 170.880   | RTK-GPS | 貫板上面 ※1 |
| 鉛直方向-1.00m | 169.880   | レベル     |         |
| 鉛直方向-2.00m | 168.880   | レベル     |         |
| 鉛直方向-3.00m | 167.880   | レベル     |         |
| 鉛直方向-4.00m | 166.880   | レベル     |         |
| 鉛直方向-5.00m | 165.880   | レベル     |         |
| 鉛直方向-6.00m | 164.880   | レベル     |         |

※1：標高値は貫板上面 4 地点で 10 秒間 8Hz 計測（合計 80 回）の平均値を取得し、平均により求めた値（観測値：170.8759976、170.8761510、170.8836183、170.8824833）

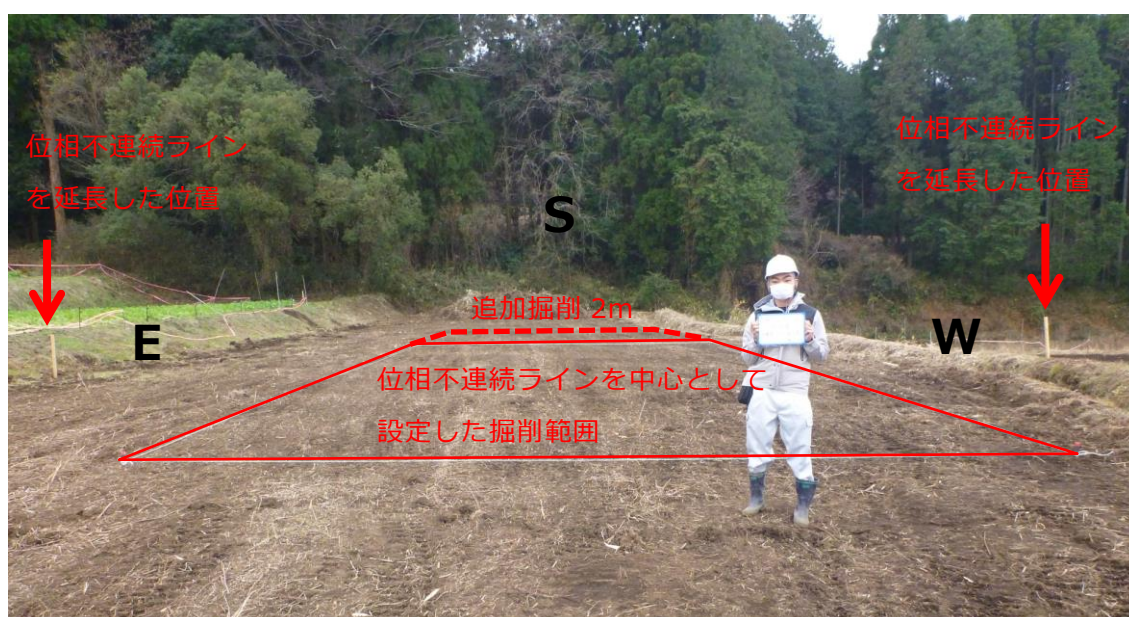


図 2.3.4 上陳東トレンチ掘削前状況





図 2.3.5 上陳東トレンチ完成時状況



図 2.3.6 上陳東トレンチ底面増掘後状況

### **2.3.2.3. 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 2.3.7 上陳東トレンチモザイク写真（全体図：増掘前）





図 2.3.8 上陳東トレンチモザイク写真（全体図：増掘後）

#### **2.3.2.4. 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。

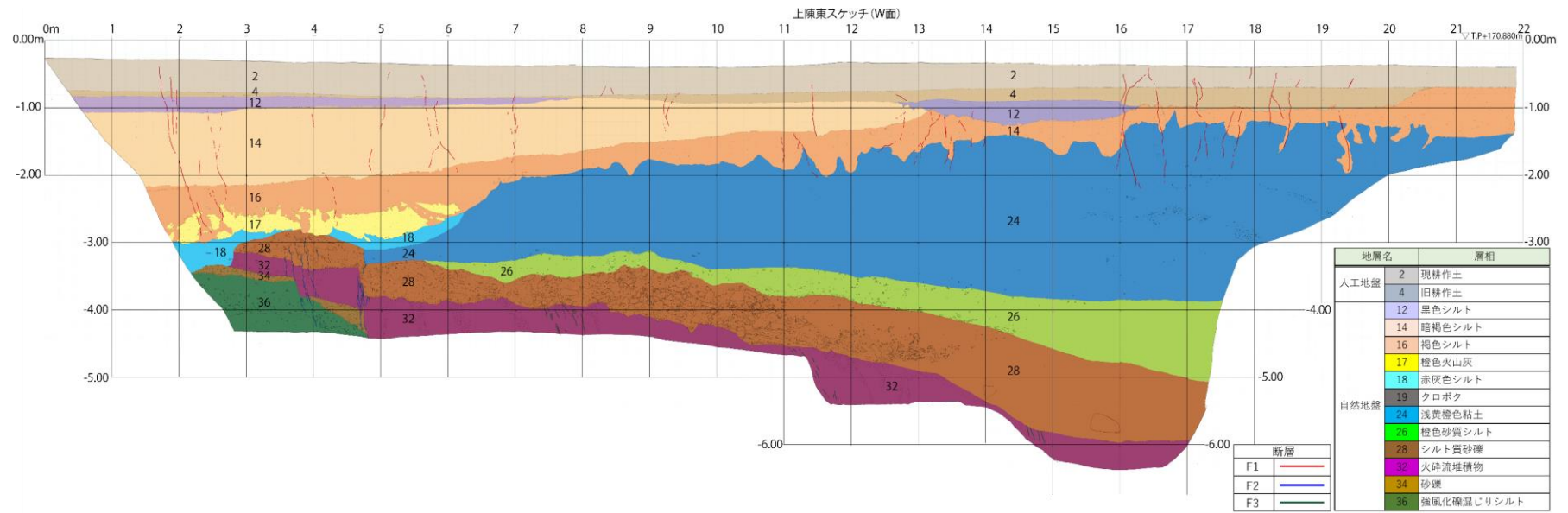


図 2.3.9 上陳東トレンチ法面スケッチ (W面)



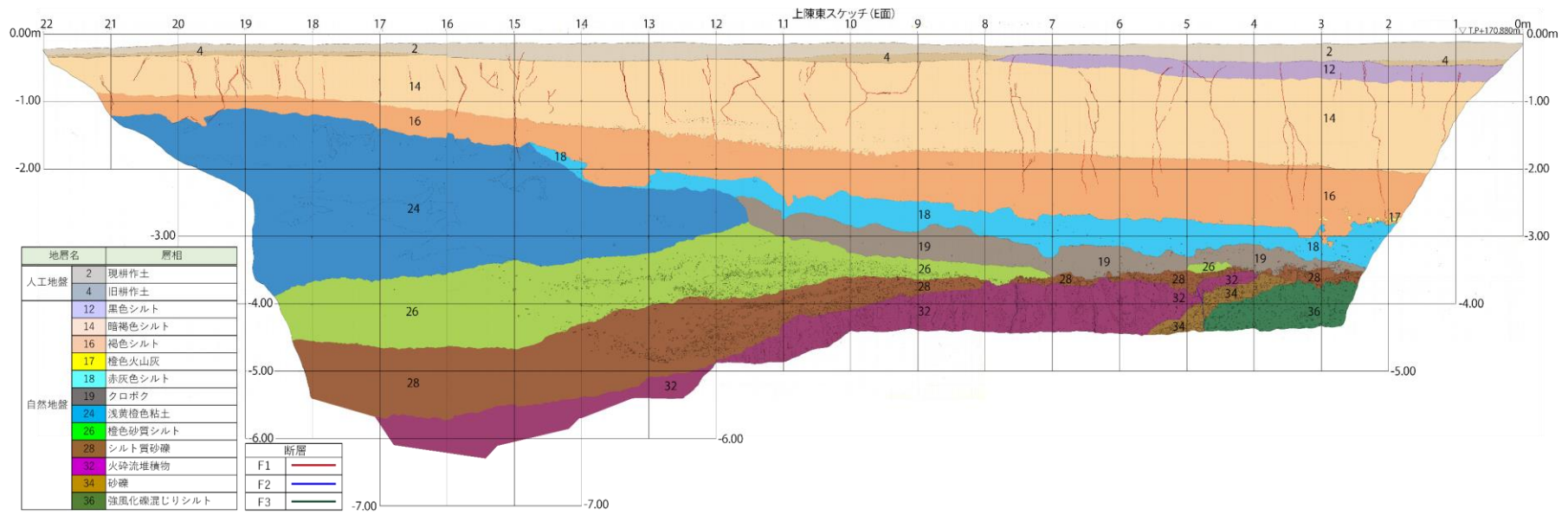


図 2.3.10 上陳東トレンチ法面スケッチ (E面)

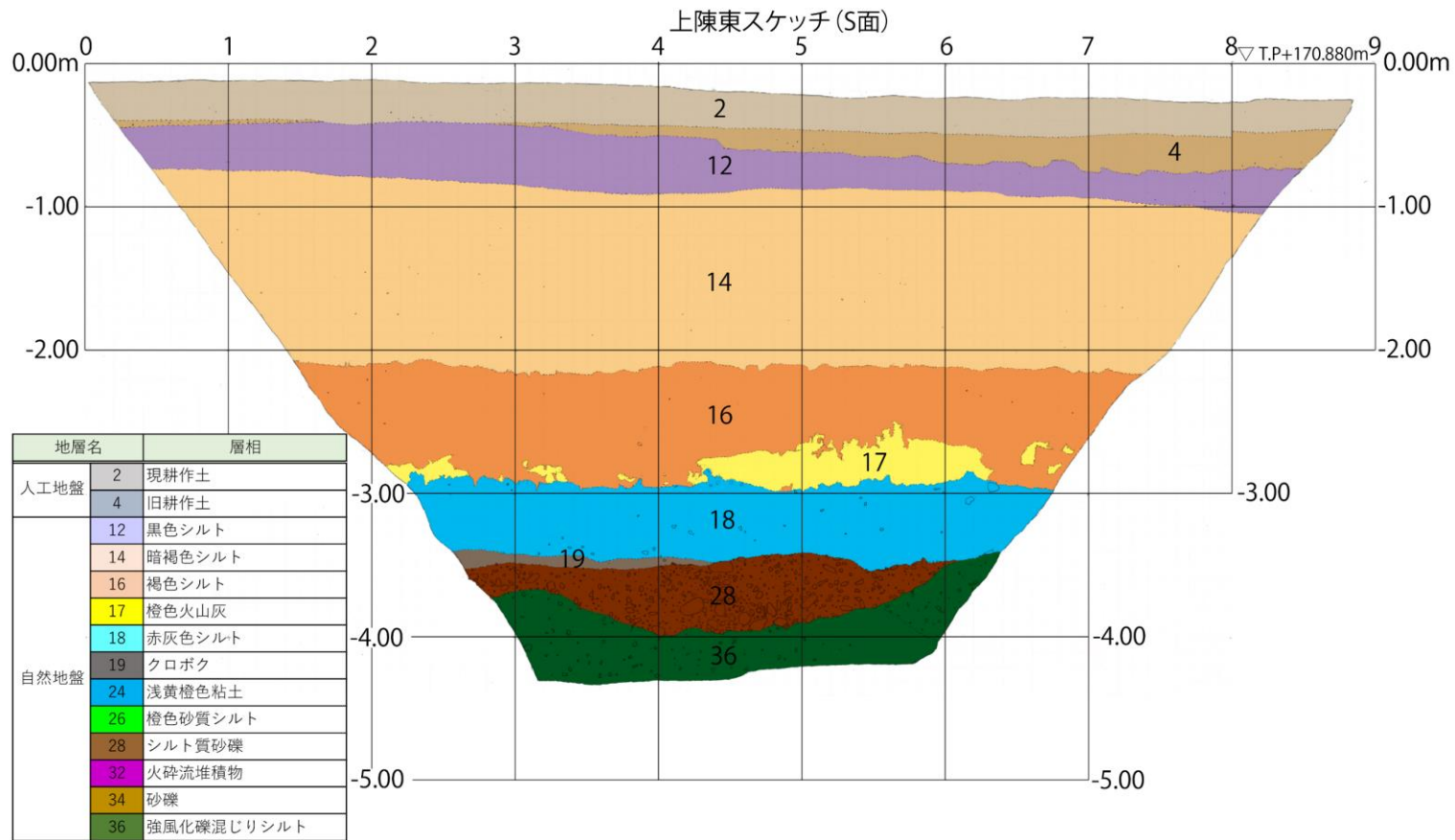


図 2.3.11 上陳東トレンチ法面スケッチ (S面)

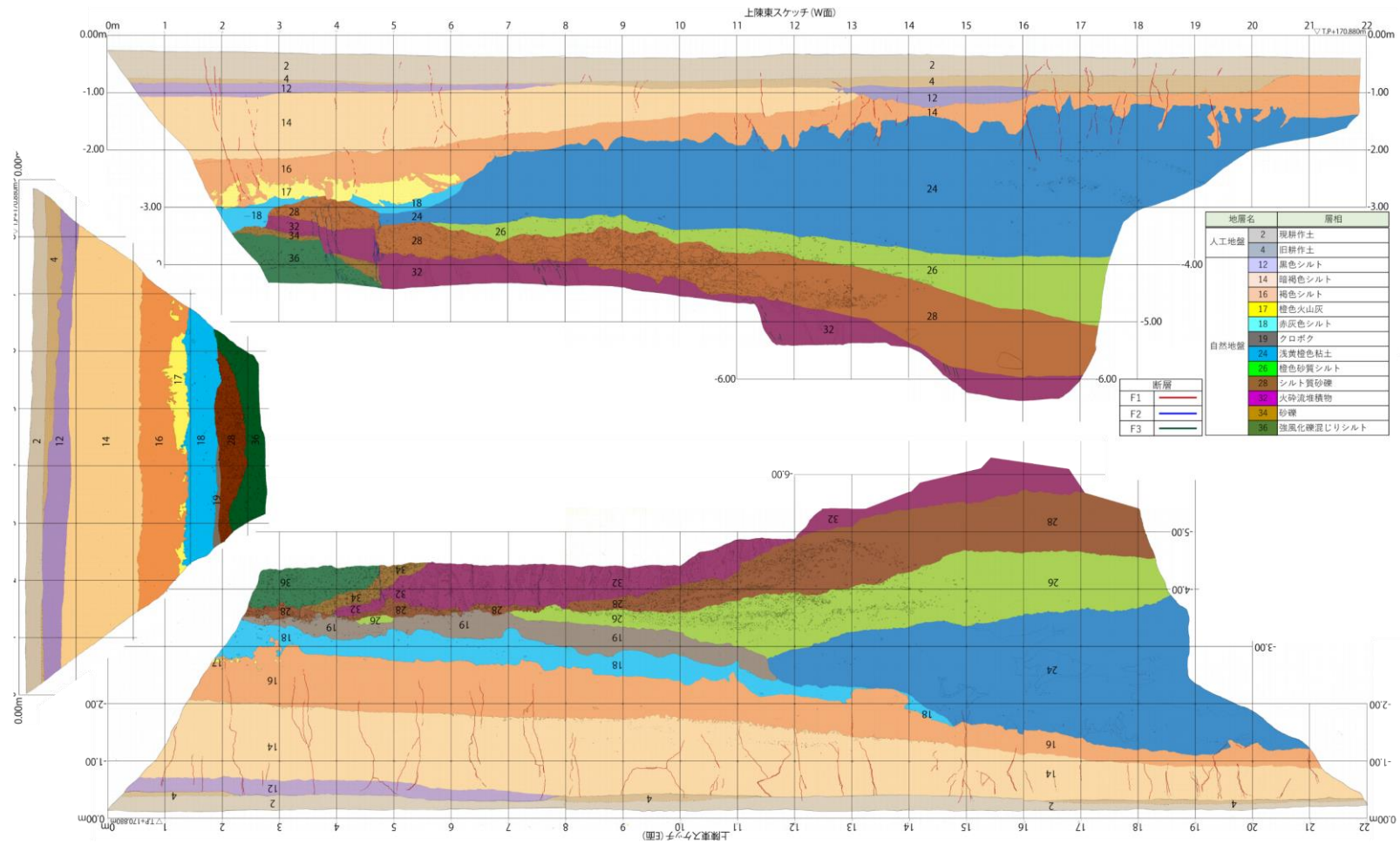


図 2.3.12 上陳東トレンチ法面スケッチ (全体面)



### 2.3.2.5. 地質概説

上陳東トレンチにおける地質層序表を 2.3.3 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（2層）および旧耕作土層（4層）となっており、ともに黒色の農業用マルチシートを含むのが特徴である。それらより下位にはトレンチの南側に広がる谷地形を埋積した 12～19層、トレンチの北側に広がる谷地形を埋積した 24～28層、これらの基底には広く火砕流堆積物（32層）が分布している。トレンチの南端付近には火砕流堆積物より下位に強風化堆積物（34～36層）が確認できる。

表 2.3.3 上陳東トレンチ内における地質層序

| 地層名           | 層相         | 備考                      |
|---------------|------------|-------------------------|
| 人工地盤          | 2 現耕作土     |                         |
|               | 4 旧耕作土     |                         |
| 自然地盤          | 12 黒色シルト   | 堆積盆は<br>トレンチの<br>南側に広がる |
|               | 14 暗褐色シルト  |                         |
|               | 16 褐色シルト   |                         |
|               | 17 黄色火山灰   |                         |
|               | 18 赤灰色シルト  |                         |
|               | 19 クロボク    | 堆積盆は<br>トレンチの<br>北側に広がる |
|               | 24 浅黄橙色粘土  |                         |
|               | 26 橙色砂質シルト |                         |
|               | 28 シルト質砂礫  |                         |
|               | 32 火砕流堆積物  |                         |
|               | 34 砂礫      |                         |
| 36 強風化礫混じりシルト |            |                         |

### 2.3.2.6. 地質各論

#### (1) 層序記載

【2層】トレンチ掘削範囲表層に比較的平坦に分布する。W面での層厚は30～50cmで、グリッド22mに向かってやや薄くなる。E面での層厚は10～30cmで、グリッド7～9mおよび17～22m付近でやや薄くなる。S面での層厚は15～20cmである。黒褐色の細粒砂～中粒砂からなり、弱い層状構造が見られる。農業用ビニールや植物根を多く含む。表土。

【4層】W面グリッド0～21mからS面グリッド3～9mに層厚5～30cm程度で、E面グリッド0～2mおよび8～11m、16～22mからS面グリッド0～2mに層厚5～30cm程度で分布する。E面グリッド0～2mおよび8～11m、16～22mに層厚5～15cm程度で比較的平坦に分布する。やや不均質な細粒砂～中粒砂からなり、暗褐色を呈する。細礫サイズで黄色の細粒砂からなる偽礫を含む。農業用ビニールを含む。旧耕作土。

【12層】W面グリッド0～8mおよび13～16m、E面グリッド0～8mおよびS面グリッド0～9mの基礎地盤最上部に層厚5～20cm程度で分布する。シルト～シルト質砂からなり、黒褐色～黒色を呈す。

本層は放射性炭素年代測定結果から  $2,120 \pm 20$  yrBP（バルク）の年代値が得られている。

【14層】W面グリッド0～13mに層厚20～110cm程度で、E面グリッド0～22mに層厚40～130cm程度で分布する。トレンチ北側のチャンネル中央部へ厚く堆積する。含水のやや低い塊状シルト～シルト質砂を主体とし、灰褐色～にぶい褐色を呈す。W面では、下位との境界は比較的平滑であるが、グリッド5～6m付近では不規則な凹凸がやや多い。E面の下位境界ではグリッド6～15m付近で不規則な凹凸に富んだ形状を示し、境界面付近に偽礫が少量散在する。

トレンチ北側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。

【16層】W面グリッド0～22mに層厚20～80cm程度で、E面グリッド0～22mに層厚30～100cm程度で、S面グリッド1～8mに層厚110～120cm程度で分布する。トレンチ北側のチャンネル中央部へ厚く堆積する。にぶい橙色～にぶい褐色の塊状シルト～シルト質砂からなり、含水がやや低い。上方でやや粗粒化する。下部には17層(後述)が断片的に含まれる。W面グリッド8～22m付近およびE面グリッド2～4m、11m、19～20m付近では、下位境界が不規則な凹凸を繰り返し、凹部で下位層と入り混じる。また、E面グリッド13～14mでは下位層を削剥する構造が確認される。

トレンチ北側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。

本層は放射性炭素年代測定結果から  $2,850 \pm 30$  yrBP（炭質物）の年代値が得られている。

【17層】W面グリッド0～6mに、S面グリッド4.5～6.5mにブロック状に分布し、E面グリッド1～8mおよびS面グリッド6.5～7m、2～4mでは16層中に断片状に分布する。トレンチ北側のチャンネル中央部へやや厚く堆積する。カマで削るとシャリシャリとしたガラス質火山灰で黄色を呈し、最下部の一部でゴマシオ状の有色鉱物の含有が確認される。

トレンチ北側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。

【18層】W面グリッド1～6mに層厚10～40cm程度で分布し、グリッド4m付近で一度せん滅、グリッド2m付近で層厚が厚くなる。また、E面グリッド0～15mに層厚10～40cm程度で、S面グリッド2～7mに層厚40～50cm程度で分布する。チャンネル構造に沿って北側の分布標高がやや低い。赤灰色～紫灰色の砂混じり粘土～シルトを主体とし、中礫サイズの亜円礫～亜角礫をまれに含む。E面では、下位層の19層と凹凸を含むやや不明瞭な境界で接する。

トレンチ北側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。

【19層】E面グリッド2～12mに層厚10～40cm程度で、S面グリッド2～4.5mに層厚5～10cm程度で分布する。チャンネル構造に沿って北側の分布標高がやや低い。黒褐色のシルト～砂質シルトを主体とし、上方粗粒化する。上部では細礫サイズの亜円礫～亜角礫をまれに含む。

トレンチ北側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。

本層は放射性炭素年代測定結果から11,090±40 yrBP（バルク）の年代値が得られている。

【24層】W面グリッド5～22mに層厚30～260cm程度で分布し、グリッド5～7m付近では上位の地層に削剥されて層厚が減少する。E面グリッド12～21mに層厚30～280cm程度で分布し、グリッド12～15m付近では上位の地層に削剥されて層厚が減少する。トレンチ南側のチャンネル中央部へ厚く堆積する。均質塊状粘土を主体とし、浅黄橙色～淡赤橙色を呈す。まれに細礫～中礫と砂を層状に含む含水がやや高く、粘性も高いため掘削時はカマで削ることが困難なほどであった。

トレンチ南側に存在するチャンネル構造を埋積する堆積物である。

【26層】W面グリッド6～18mに層厚5～110cm程度で分布する。E面グリッド4～5mおよび7～18mに層厚5～120cm程度で分布し、グリッド5～7mおよび7～12m付近では、上位の地層に削剥されて層厚が減少する。トレンチ南側のチャンネル中央部へやや厚く堆積する。礫を含む塊状砂質シルトを主体とし、にぶい赤褐色を呈する。中粒砂～粗粒砂が散在する。中礫～大礫サイズの円礫～亜角礫を含む。

トレンチ南側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。

【28層】W面グリッド3～17mに層厚10～110cm程度で、S面グリッドは2～6mに層厚20～50cm程度で分布する。E面ではグリッド2～18mに層厚5～100cm程度で分布し、グリッド2～8m付近では上位の地層に削剥されて、せん滅もしくは層厚が減少する。チャンネル構造に沿って南側の分布標高がやや低い。基質支持の砂礫を主体とし、含まれる礫は亜円礫～超円礫で最大φ30cm程度となる。礫種は火山岩が多くを占め、赤色の火山岩も散見される。下位との境界は削剥による不規則な凹凸に富んだ形状を示す。トレンチ南側では塊状粘土が次第に優勢となる。

トレンチ南側のチャンネル構造を埋積する堆積物である。



【32層】W面グリッド3～17mに、E面グリッド4～14mに分布する。火山灰を主体とし、黄橙～橙色を呈す。φ3～20mm程度の軽石を多量に含み、全体が黄色風化した軽石と中心部が黒色風化した軽石を含む。また、φ3～20mm程度の亜円礫～亜角礫をまれに含む。上位との境界付近には灰白色粘土状の風化部が断続的に分布する。部分的に風化が進む。

【34層】W面グリッド2～5mに層厚10～20cm程度で、E面グリッド3～6mに層厚10～15cm程度で分布し、グリッド3m付近で上位に削剥されてせん滅する。W面では、礫支持の砂礫が主体で、基質は明黄褐色～黄褐色の中粒砂～粗粒砂、含まれる礫はφ3～5cmの円礫～超円礫からなる。E面では、基質支持の砂礫が主体で、基質は褐色細粒砂、中礫サイズの亜円礫～亜角礫を多く含む。礫種は火山岩が多くを占める。まれに大礫サイズの礫を含む。上位との境界付近はやや風化した褐色細粒砂が断続的に分布する。下位層を浸食的に覆い、凹凸が目立つ。

【36層】W面グリッド2～5mに、E面グリッド2～5mに、S面グリッド2.5～7.5mに分布し、境界面が南側へ傾斜する。本トレンチ掘削面における最下部層である。基質支持の砂礫が主体で、基質は明黄褐色～黄橙色の粘土質砂からなる。含まれる礫は風化が著しく、カマで削れる程度に強風化している。W面では、φ1～2cmの礫の含有量により3つに細区分される。E面では、φ3～40mmの亜円礫～亜角礫が主体で、礫種は軽石および火山岩が多くを占める。

## (2) 断層記載

上陳東トレンチでは多くの断層およびクラック確認される。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、上陳東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面には開口クラックが分布し、多くは14層中に確認される。F1の一部は、2層まで分布する。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-2m前後まで断続的に続くものが多いが、W(1.8, -0.5)付近からW(2.2, -3.0)まで断続するクラック(図 2.3.13 W(1.8, -0.5)付近からW(2.2, -3.0)まで断続するクラック)、およびE(2.4, -0.4)付近からE(2.0, -2.8)まで連続するクラックのように-3m付近まで達するものも分布する。

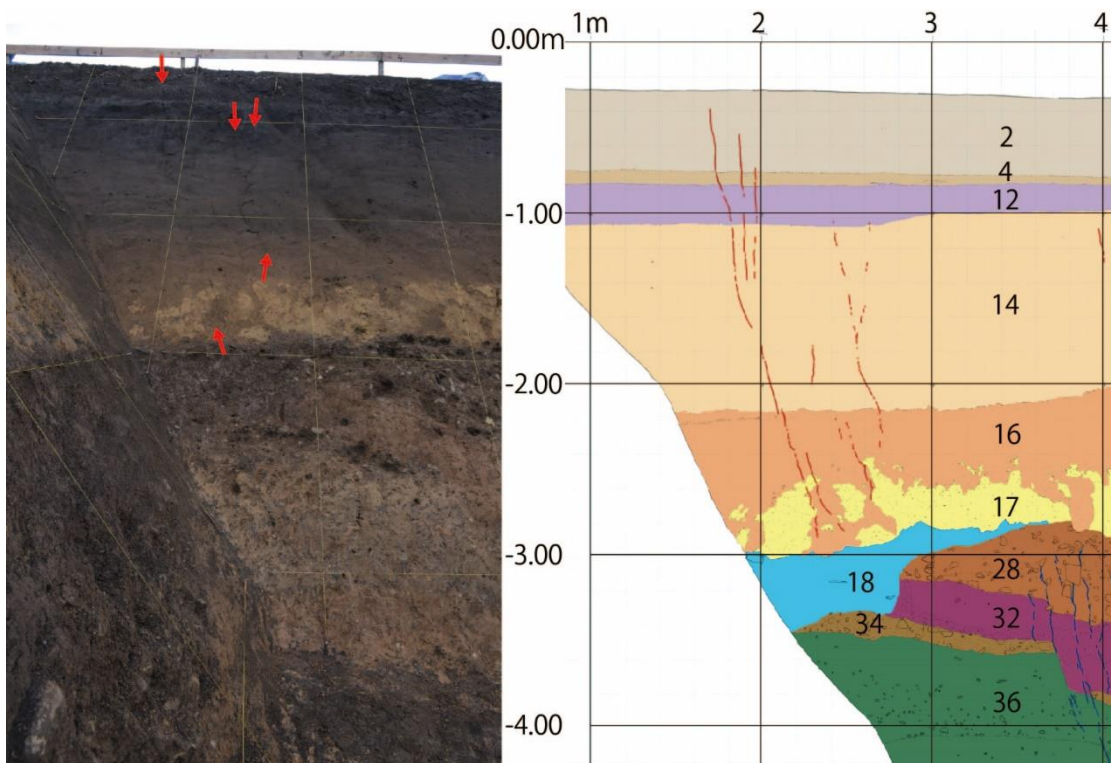


図 2.3.13 W(1.8, -0.5)付近からW(2.2, -3.0)まで断続するクラック

②F2

24層以深の地層に変位を与える断層をF2とする。西側法面では、W(4.8, -4.4)付近からW(4.7, -3.2)付近にかけて連続する(図 2.3.14 W(4.0~3.8, -4.3~-4.4)およびW(4.8~4.7, -4.4~-3.2)のF2)。32層と28層の境界で見かけ北落ち50cm程度の変位を与える。32層と36層、34層と32層、28層と24層は断層で接する。18層以上の地層には変位は認められない。

W(4.0, -4.3)付近からW(3.8, -2.8)付近にかけて断続する数条の断層(図 2.3.14 W(4.0~3.8, -4.3~-4.4)およびW(4.8~4.7, -4.4~-3.2)のF2)は、32層と28層の境界で見かけ北落ち5~15cm程度の変位を与える。32層と34層は断層で接する。18層以上の地層には変位は認められない。この断層面の走向傾斜はN45E~71E, 74SE~78Nである。

東側法面では、E(4.6, -4.8)付近から分岐しつつE(4.7, -3.4)付近まで分布する(図 2.3.15)。32層と34層の境界で見かけ北落ち20cm程度の変位を与える。28層と32層の境界で見かけ北落ち5~10cm程度の変位を与える。34層と36層は断層で接する。

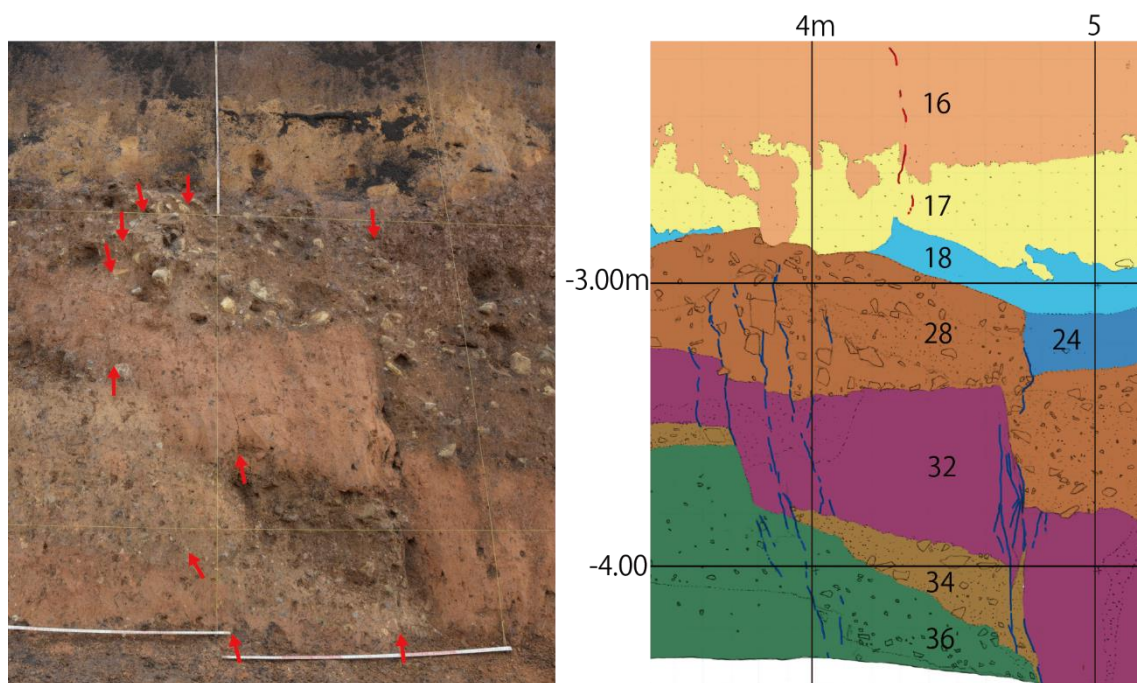


図 2.3.14 W(4.0~3.8, -4.3~-4.4)およびW(4.8~4.7, -4.4~-3.2)のF2



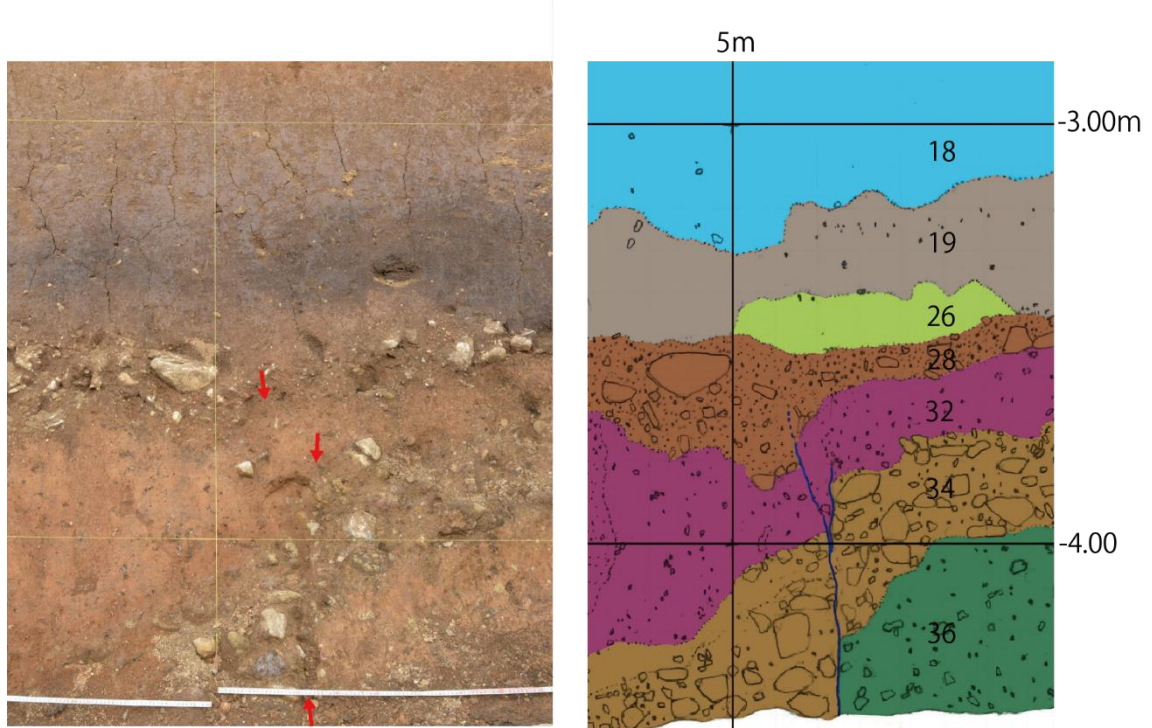


図 2.3.15 E(4.6, -4.8)付近から E(4.7, -3.4)付近まで分布する F2

②F3

32層中のみに認められるせん断構造をF3とする。W(7.8, -4.3)付近からW(7.7, -3.8)付近にかけて、およびW(11.8, -5.4)付近からW(11.1, -4.7)付近にかけて、W(14.8, -6.0)付近からW(14.6, -5.7)付近にかけて、せん断構造が分布する(図 2.3.16)。せん断面付近には、32層に含まれる軽石が変形により引きのばされたような構造が認められる。

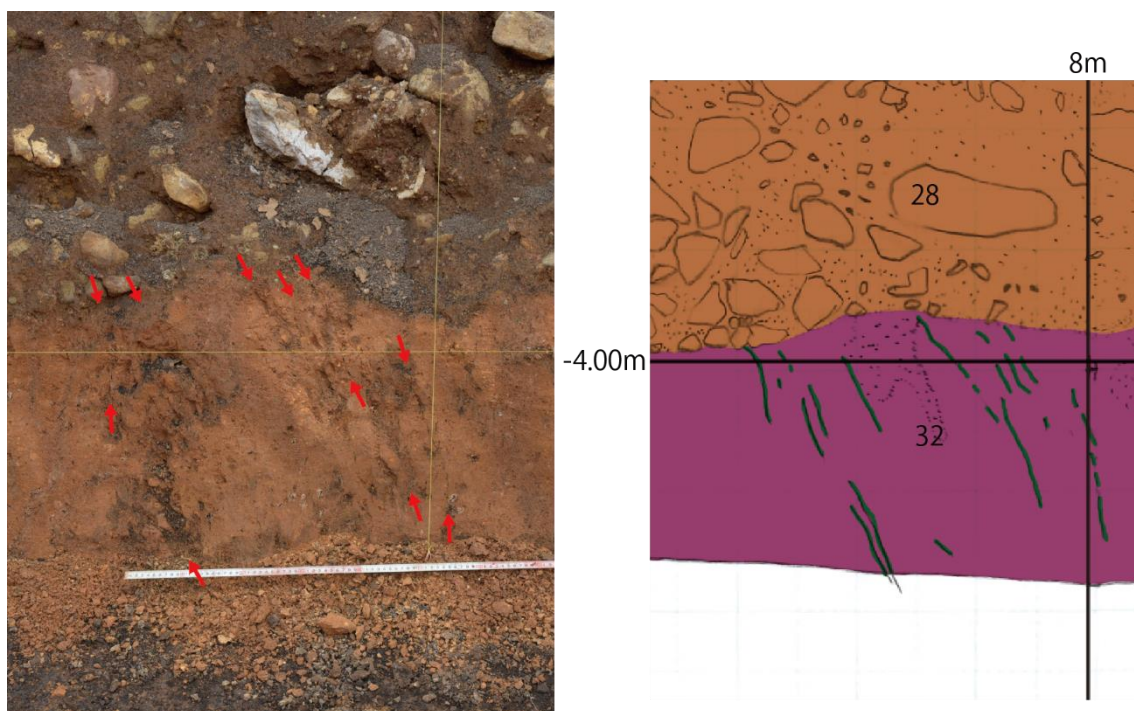


図 2.3.16 W(7.8, -4.3)付近からW(7.7, -3.8)付近に分布するF3

### (3) 断層構造解析

上陳東トレンチにおいて分布する断層およびクラックは面構造ごとの特徴で 3 つに区分できる。そのうち F1～F3 について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 2.3.17)。

#### ①F1

開口クラックの傾向として、走向が N50～80E で、傾斜は 80～90° のほぼ鉛直でわずかに南北に振れるものが多い。

#### ②F2

この断層面の走向傾斜は N65～85E, 78～82N である。F2 のせん断面は開口し、挟在物を挟まないため F1 の開口クラックである可能性が考えられる。見かけの垂直変位は 50cm 程度であるが、W(4.7, -4.2)付近には、西北西-東南東方向のせん断面に対してほぼ水平でわずかに西北西にプランジした条線が認められることから、横ずれ変位を持つ断層運動が考えられる。

W(4.0, -4.3)付近から W(3.8, -2.8)付近にかけて断続する数条の断層面の走向傾斜は N45E～71E, 74SE～78N である。

これらの断層の直上付近の地層には、F1 の開口クラックが多数分布し、走向傾斜は同様の傾向を示す。

#### ③F3

せん断面の走向傾斜は N37～61E, 78N～80S である。これらの構造は 32 層の上面に変位が認められず、上位の地層にも分布しない。よって、上位層が堆積する以前の構造であると考えられる。これらの構造の走向傾斜は F1 の開口クラックおよび F2 の断層の走向傾斜と同様の傾向を示す。



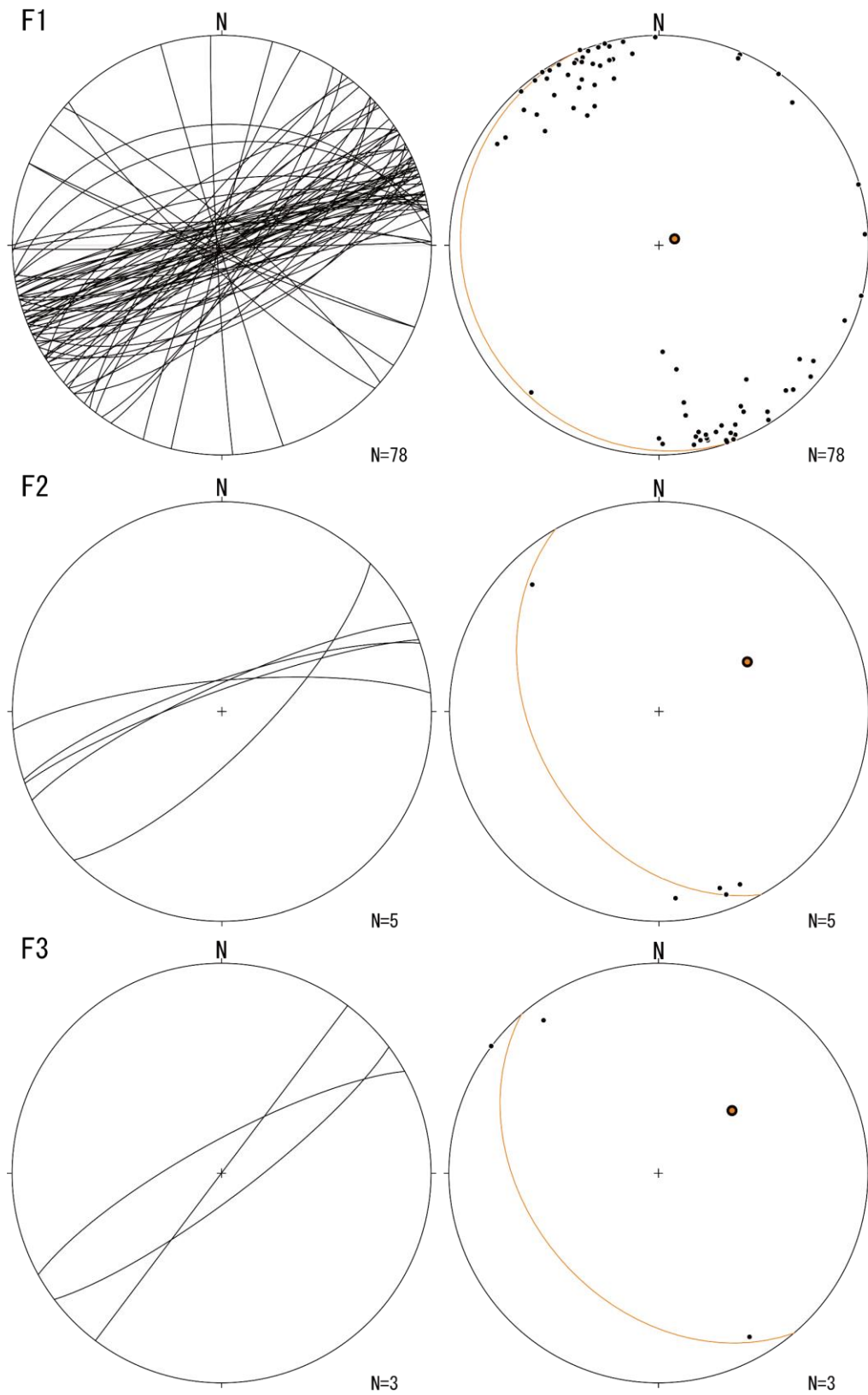


図 2.3.17 上陳東トレンチにおける F1~F3 の走向傾斜とその極  
 橙色の大円および極はそれぞれの最適大円とその極を示す。シュミットネット下半球等積  
 投影。

#### (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 2.3.18 に示とともに、測定結果を表 2.3.4 および図 2.3.19 に示す。測定の結果、19 層で  $11,090 \pm 40$  yrBP (バルク)、16 層で  $2,850 \pm 30$  yrBP (炭質物)、12 層で  $2,120 \pm 20$  yrBP (バルク) の年代値を得た。

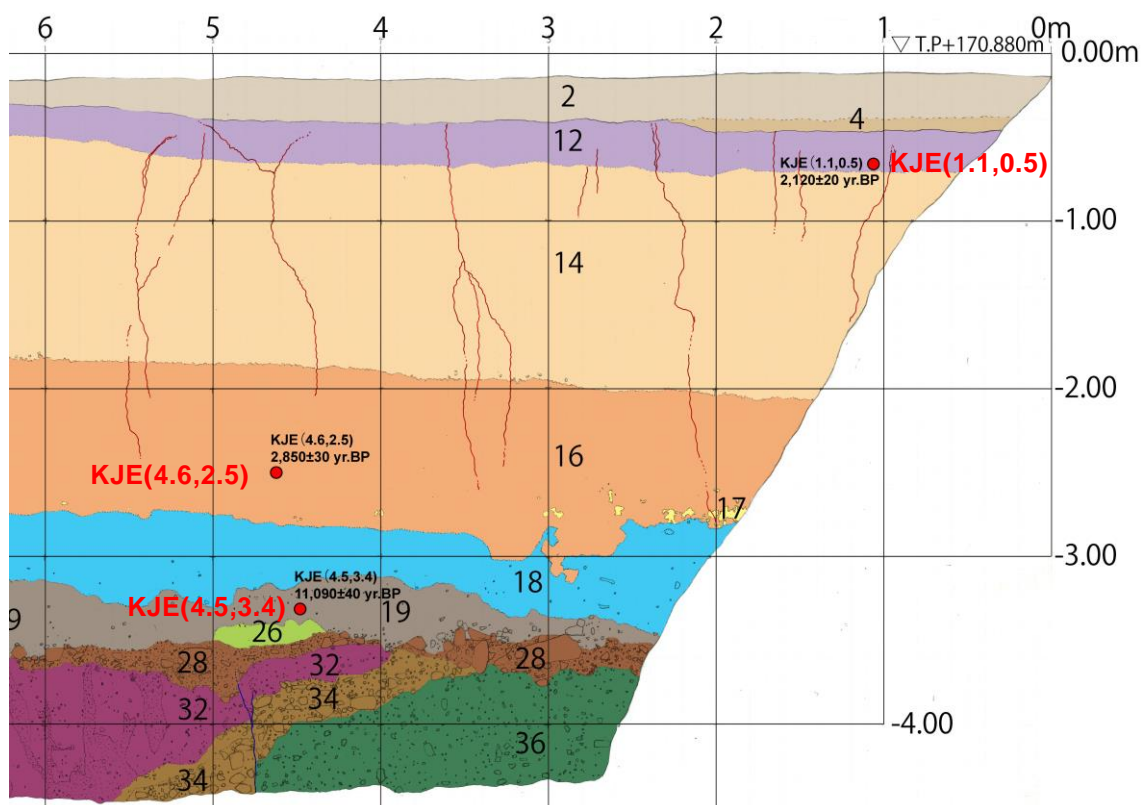


図 2.3.18 上陳東トレンチ (E 面) 年代試料サンプリング位置

表 2.3.4 上陳東トレンチ 放射性炭素年代測定結果

| 測定番号        | 試料名          | 試料形態 | 処理方法 | $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$<br>(AMS) | $\delta^{13}\text{C}$ 補正あり |                  |
|-------------|--------------|------|------|--|----------------------------|------------------|
|             |              |      |      |  | Libby<br>Age(yrBP)         | pMC(%)           |
| IAAA-201720 | KJE(1.1,0.5) | 土壌   | HCL  | $-17.98 \pm 0.19$                        | $2,120 \pm 20$             | $76.80 \pm 0.23$ |
| IAAA-201721 | KJE(4.6,2.5) | 炭    | AAA  | $-24.62 \pm 0.20$                        | $2,850 \pm 30$             | $70.11 \pm 0.22$ |
| IAAA-201722 | KJE(4.5,3.4) | 土壌   | HCL  | $-21.66 \pm 0.24$                        | $11,090 \pm 40$            | $25.15 \pm 0.12$ |

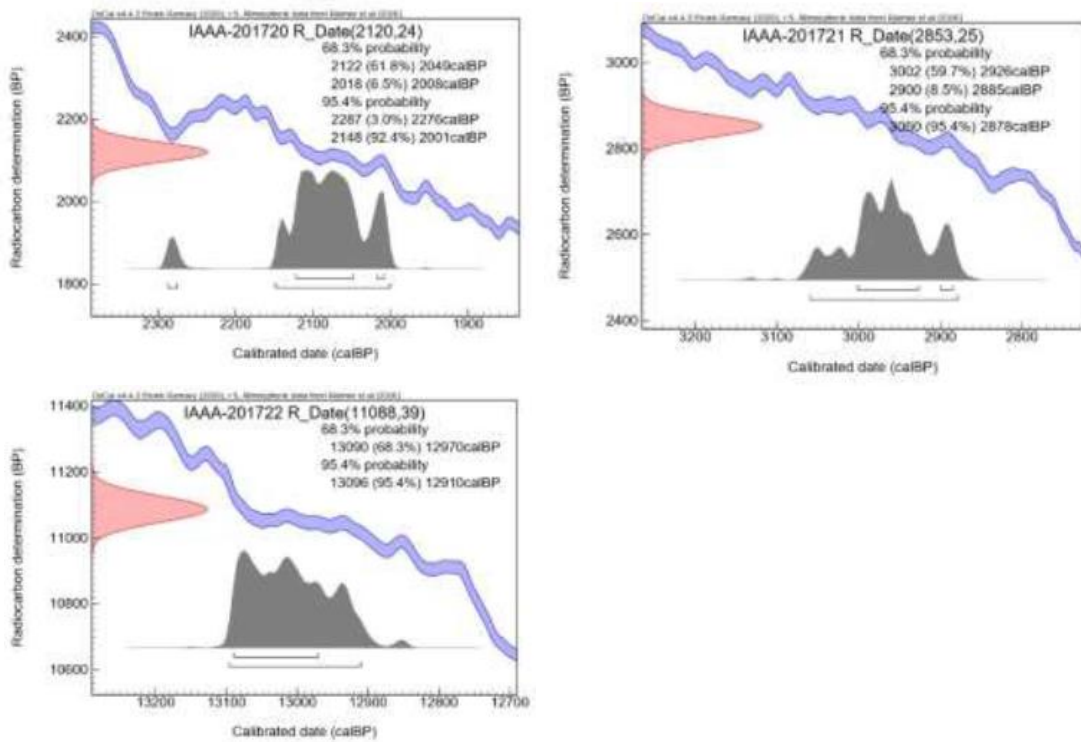


図 2.3.19 上陳東サンプルの暦年較正年代グラフ  
 左上 : IAAA-201720, 右上 IAAA-201721, 左下 IAAA-201722



(5) 火山灰分析

トレンチ下面に広く分布している黄橙色～橙色火山灰（32 層）およびトレンチ南側堆積盆に堆積した黄色火山灰（17 層）を対象に、試料の採取を行い構成粒子の同定を行った。火山灰分析試料のサンプリング位置を図 2.3.20～図 2.3.21 に示す。

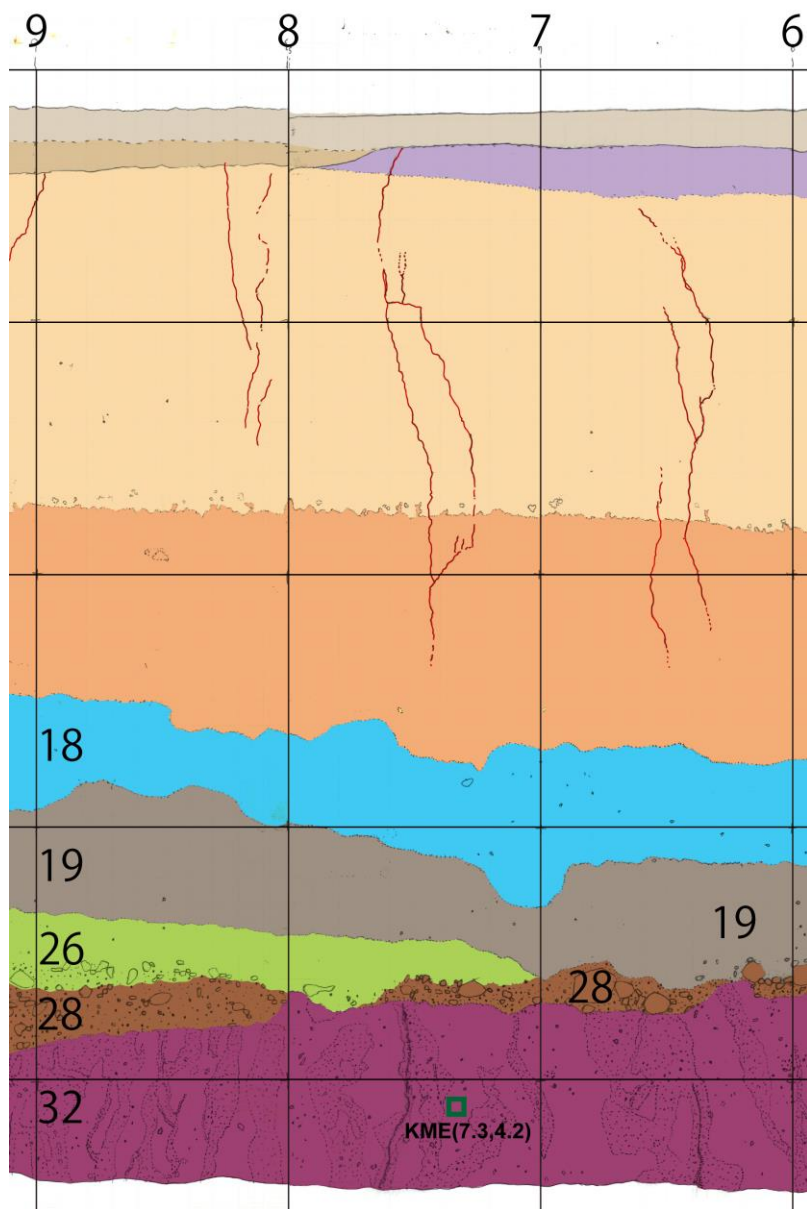


図 2.3.20 32 層サンプリング位置：緑枠内 KME(7.3,4.2)

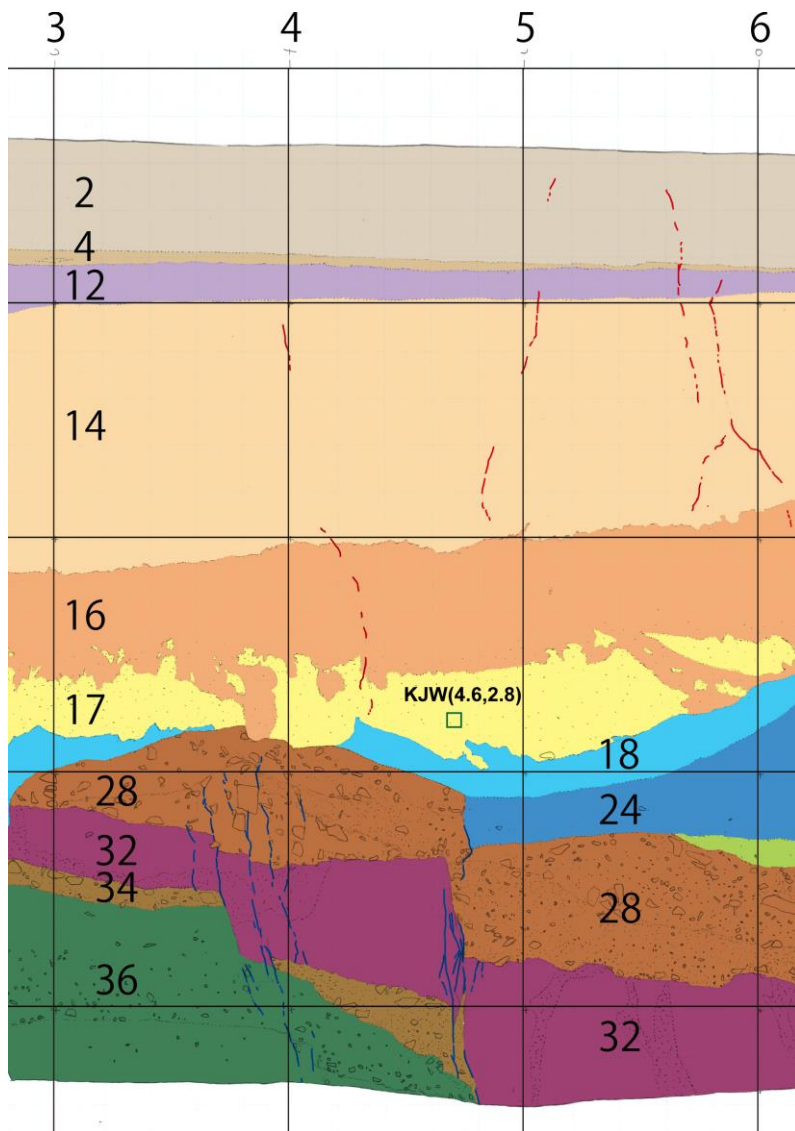


図 2.3.21 17 層サンプリング位置：緑枠内 KJW(4.6,2.8)

① サンプル番号【KJE7.3, 4.2】

本試料は上陳東トレンチ E 面の 32 層をサンプリングしたものである（図 2.3.22）。

試料の状況および観察結果を図 2.3.23 に示す。本試料には普通角閃石（ho）が特徴的に含まれ、火山ガラスをほとんど含まない。

本試料は普通角閃石が含まれることから、Aso-4 火砕流堆積物に対比される可能性が高いものと推察される。

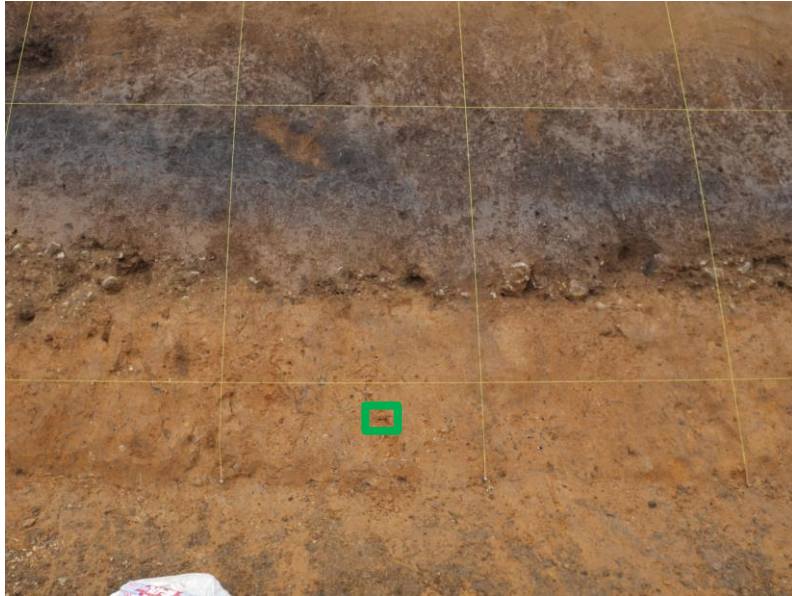


図 2.3.22 KJE(7.3,4.2)サンプリング位置（緑枠内）



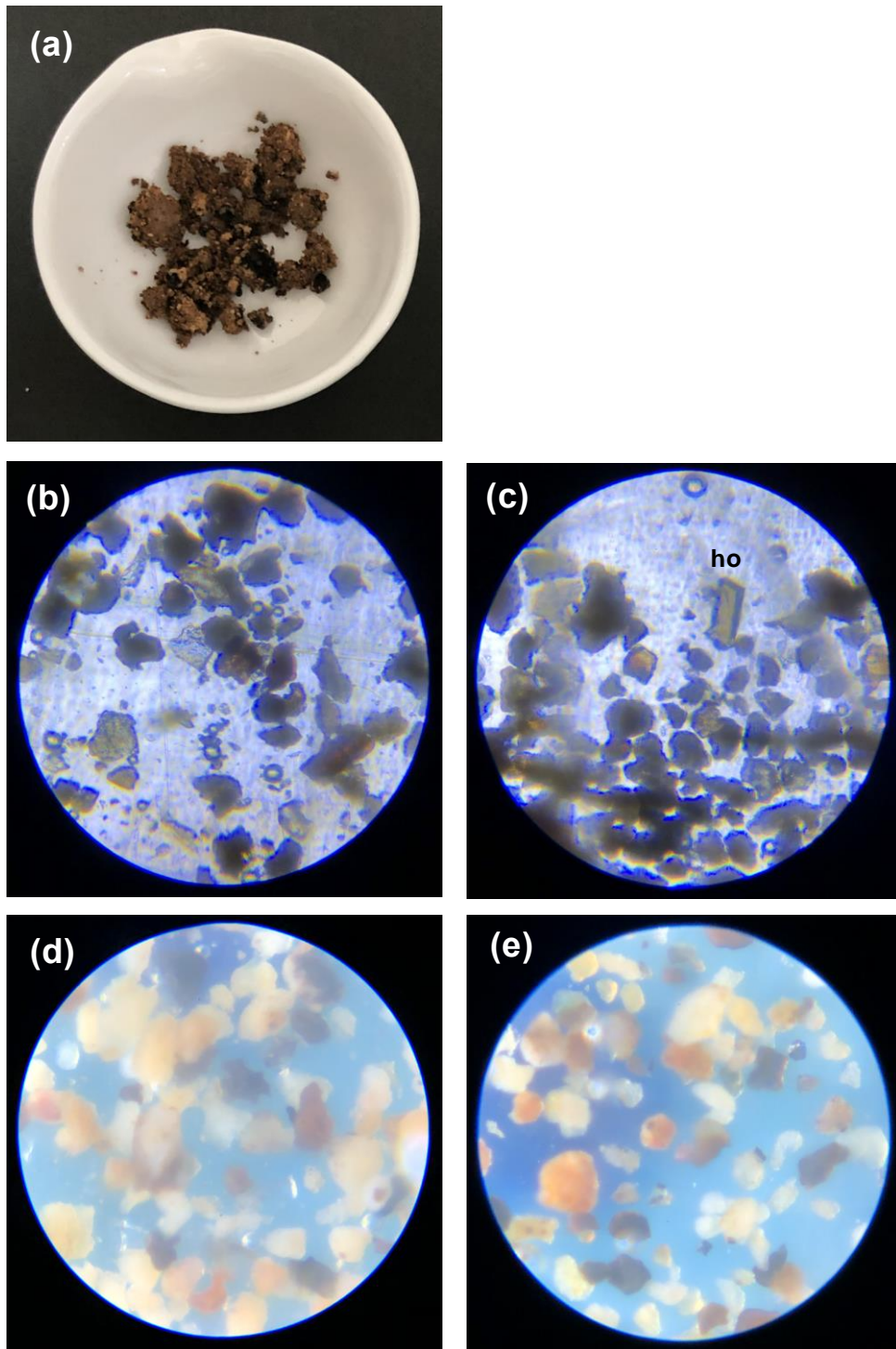


图 2.3.23 KJE7.3, 4.2 (a)試料, (b,c)透過光, (d,e)反射光

②サンプル番号【KJW4.6, 2.8】

本試料は上陳東トレンチ W 面の 17 層をサンプリングしたものである（図 2.3.24）。

試料の状況および観察結果を図 2.3.25 に示す。本試料には軽石型火山ガラス（pm-gl）、次いでバブルウォール型火山ガラス（pm-gl）を多く含み、有色の火山ガラスは確認されない。

本層を含んでいる 16 層から  $2,850 \pm 30$  yrBP の放射性炭素年代が得られており、17 層の堆積年代も同じような年代値を示すものと推察される。本試料と対比される 3,000 年前前後の火山灰層は阿蘇中央火口丘群の活動に由来する火山灰層の可能性が考えられるが、詳細は不明である。

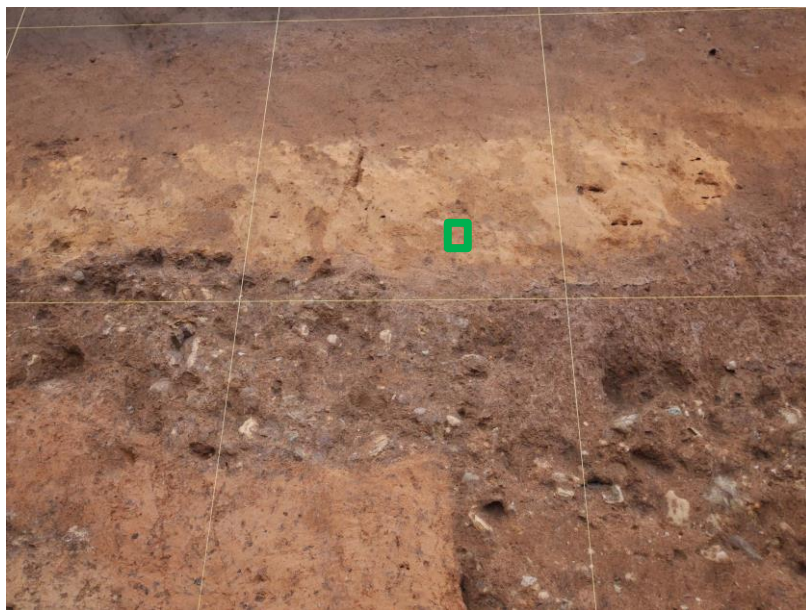


図 2.3.24 KJW(4.6,2.8)サンプリング位置（緑枠内）

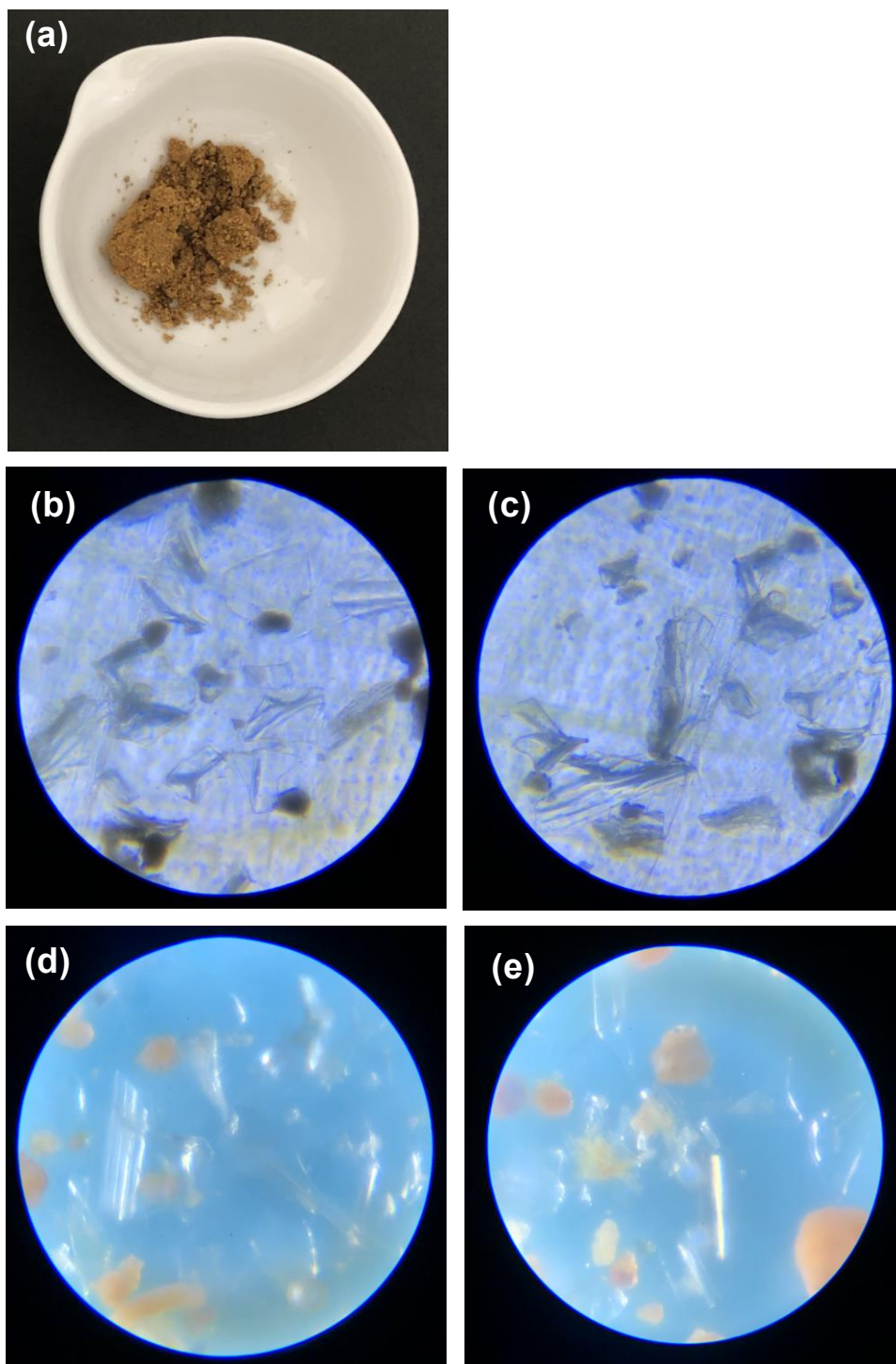


图 2.3.25 KJW4.6, 2.8 (a)試料, (b,c)透過光, (d,e)反射光



(6) 出土物（土器片）

上陳東トレンチでは法面掘削中に複数の土器片が産出した（図 2.3.26～図 2.3.27）。産出した各土器片は全体的に摩耗が著しく、異地性の碎屑物として評価できる。

土器の文様および焼かれた表面の状況から、縄文時代終～晩期の土器片とされ（土器片を提出した益城町教育委員会および熊本県文化財関連担当者からの聴取）、これらの製作年代はおおよそ 3,000 年前程度である。これは 16 層（炭質物）での放射性炭素年代  $2,850 \pm 30$  yrBP と調和的である。



図 2.3.26 東側法面より算出（左：旧耕作土直下の 14 層最上部、右：14 層中）



図 2.3.27 西側法面より算出（14 層最下部～16 層最上部）

### 2.3.2.7. 考察

上陳東トレンチにおける掘削範囲の層序は、下位より段丘構成層（34～36層）、Aso-4火砕流堆積物（32層）、トレンチ北側堆積盆を埋積した堆積物（28～24層）、トレンチ南側堆積盆を埋積した堆積物（19～12層）および人工地盤（4～2層）に区分される（図 2.3.28）。

トレンチ法面では以下に示す少なくとも3回の断層活動イベントが識別された。2016年熊本地震で発生した副断層による地表変状位置において、過去にも断層活動があった事が判明した。

**(1) イベントⅠ:** トレンチ内の南側の地表付近において多数の亀裂が確認される F1断層に該当する。一部の亀裂は地表面付近から17層付近まで断続的に連続する。その下位の32層と28層を境する断層位置においても開口亀裂が確認され、下記イベントⅡの断層面が再活動して開口したと推定される。トレンチ中央部でも亀裂が地表面付近に複数存在している。開口亀裂が保存されていることから、この開口亀裂を伴う断層は2016年熊本地震によって形成されたと判断できる。しかし、これらの開口亀裂位置において32層の上面を変位させる断層変位は確認できなかった。

**(2) イベントⅡ:** 密着した剪断面が36層～24層を切断し、19層～16層に覆われる F2断層に該当する。断層変位の中でも西側法面の32層上面の上下変位が最も大きく、最大で50cm程度である。イベントⅡの活動時期は24層堆積後、19層堆積以前である。24～28層からは年代値が得られていないため、32層（Aso-4）堆積年代約90,000年前、19層（クロボク）堆積年代11,090±40yrBPより、イベント時期は90,000年前以降、11,050yrBP以前である。

**(3) イベントⅢ:** 32層内でのみ確認されるせん断構造および層状に引き延ばされた軽石の配列から認定できる F3断層に該当する。このせん断面は上位層準に変位を与えていない。活動年代はAso-4堆積後、28層堆積以前である。24～32層からは年代値が得られていないため、32層（Aso-4）堆積年代約90,000年前、19層（クロボク）堆積年代11,090±40yrBPより、イベント時期は90,000年前以降、11,050yrBP以前で、活動回数は不明である。

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

図 2.3.28 上陳東トレンチ 総合模式柱状図



### 2.3.3. 下町トレンチ

#### 2.3.3.1. 調査位置

下町トレンチは 2.2 節で決定した熊本県菊池郡大津町下町地先において実施した（図 2.3.3）。調査位置は位相不連続ライン（小俣ほか, 2017a）上に設定し、想定される変位を直角に横断するようにして掘削を行った。

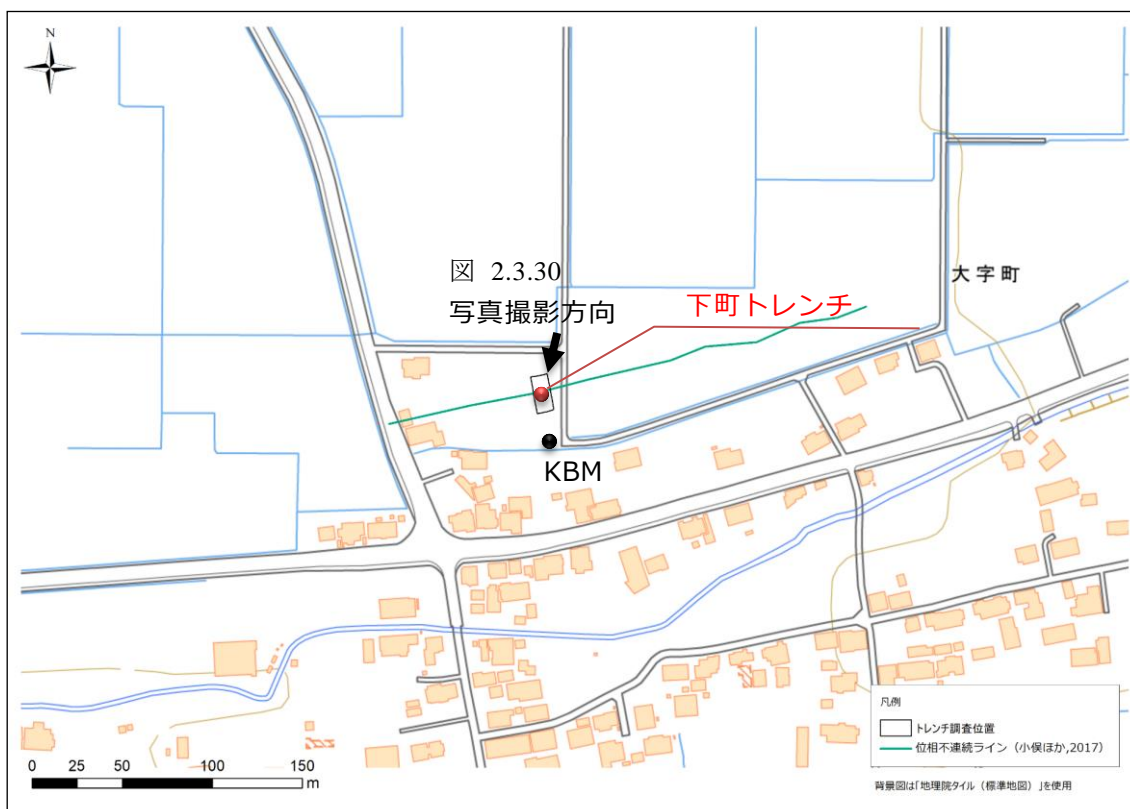


図 2.3.29 下町トレンチ位置



図 2.3.30 トレンチ調査位置周辺

### 2.3.3.2. 掘削結果

当初掘削予定範囲は想定した位相不連続ラインを中心に両側に 10m とした。最終的に開口部の大きさを 9m×20m・深さ 5m とした（図 2.3.31）。

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ベンチマーク（KBM）標高について、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、KBM からレベル測量にて計測した。計測結果を表 2.3.5 に示す。

表 2.3.5 下町トレンチ測量成果

| 測定位置       | 標高(T.P.m) | 測定方法    | 備考         |
|------------|-----------|---------|------------|
| KBM        | 88.629    | RTK-GPS | U字溝カド ※1   |
| 鉛直方向 0.00m | 88.355    | レベル     | KBM-0.274m |
| 鉛直方向-1.00m | 87.355    | レベル     |            |
| 鉛直方向-2.00m | 86.355    | レベル     |            |
| 鉛直方向-3.00m | 85.355    | レベル     |            |
| 鉛直方向-4.00m | 84.355    | レベル     |            |
| 鉛直方向-5.00m | 83.355    | レベル     |            |

※1：標高値は 10 秒間 8Hz 計測（合計 80 回）の平均値である（計測値：88.62870284）



図 2.3.31 下町トレンチ完成時状況

#### **2.3.3.3. 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より示す。



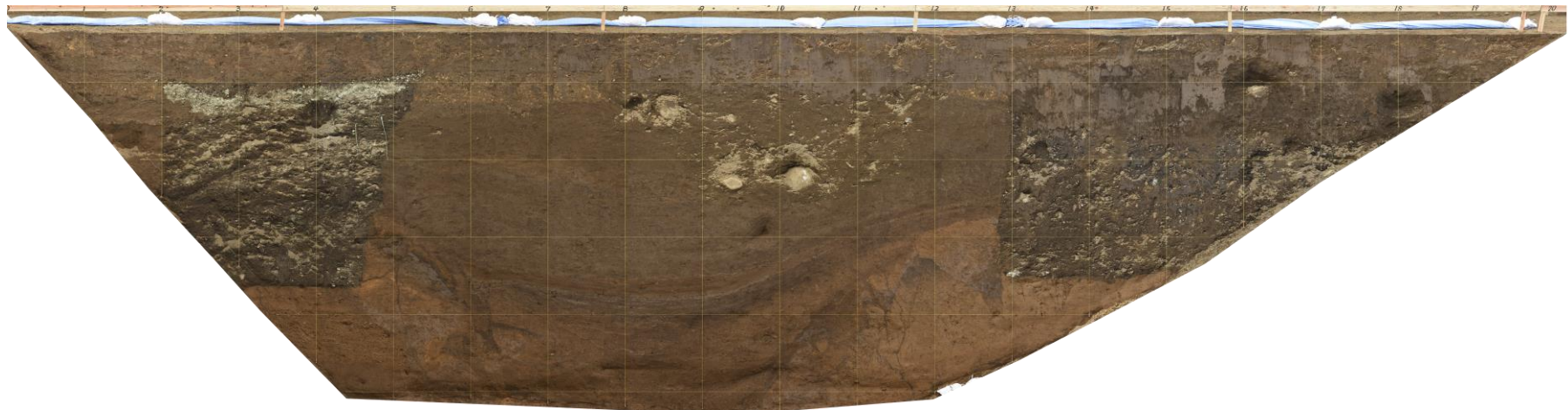


図 2.3.32 下町トレンチモザイク写真 (W 面)

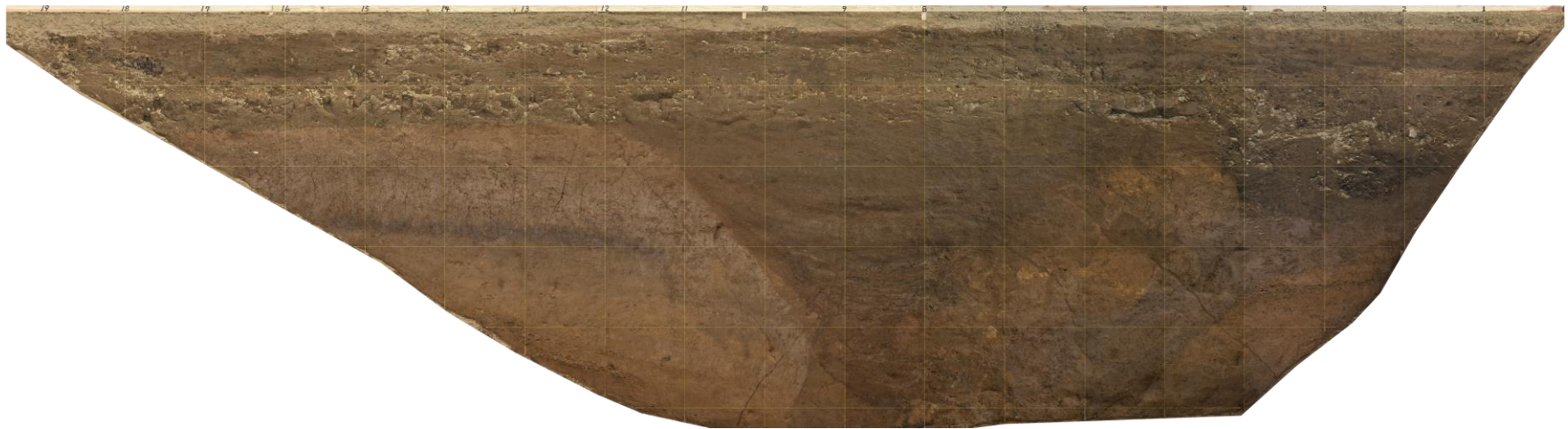


図 2.3.33 下町トレンチモザイク写真 (E面)

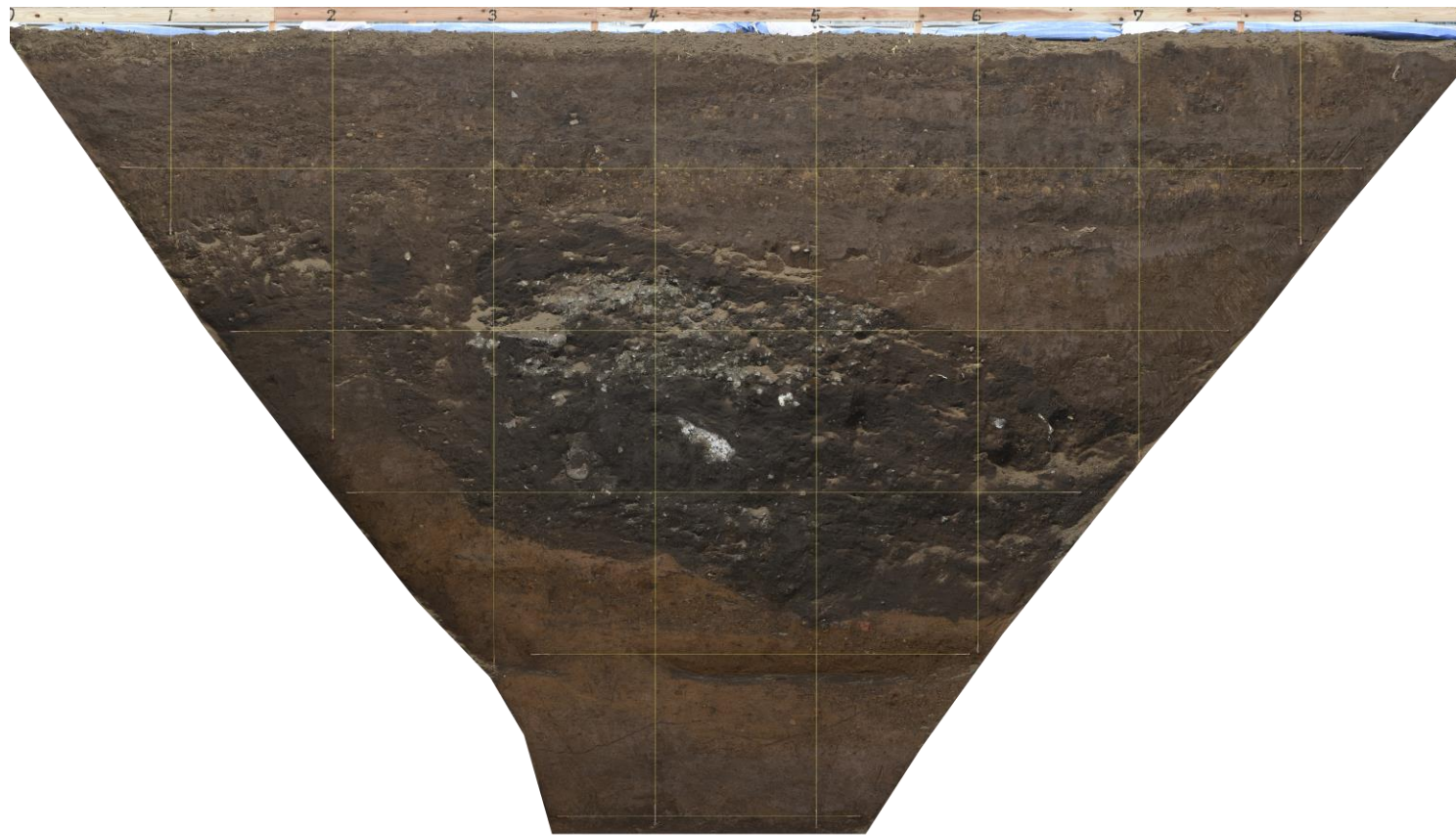


図 2.3.34 下町トレンチモザイク写真 (S面)



図 2.3.35 下町トレンチモザイク写真（底面）



(E面)



(S面)

(M面)

図 2.3.36 下町トレンチモザイク写真 (全体図)

#### **2.3.3.4. 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。

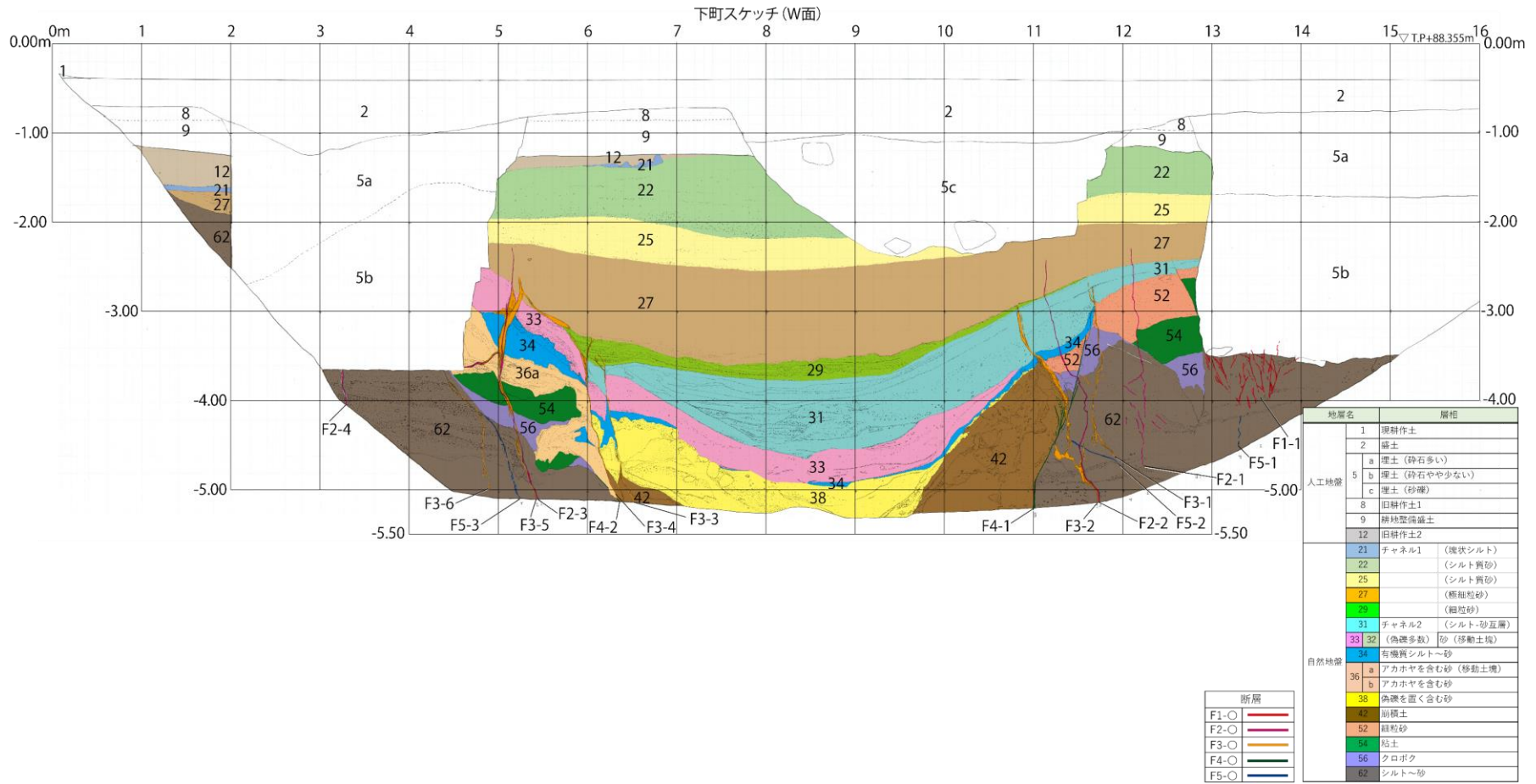


図 2.3.37 下町東トレンチ法面スケッチ (W面)

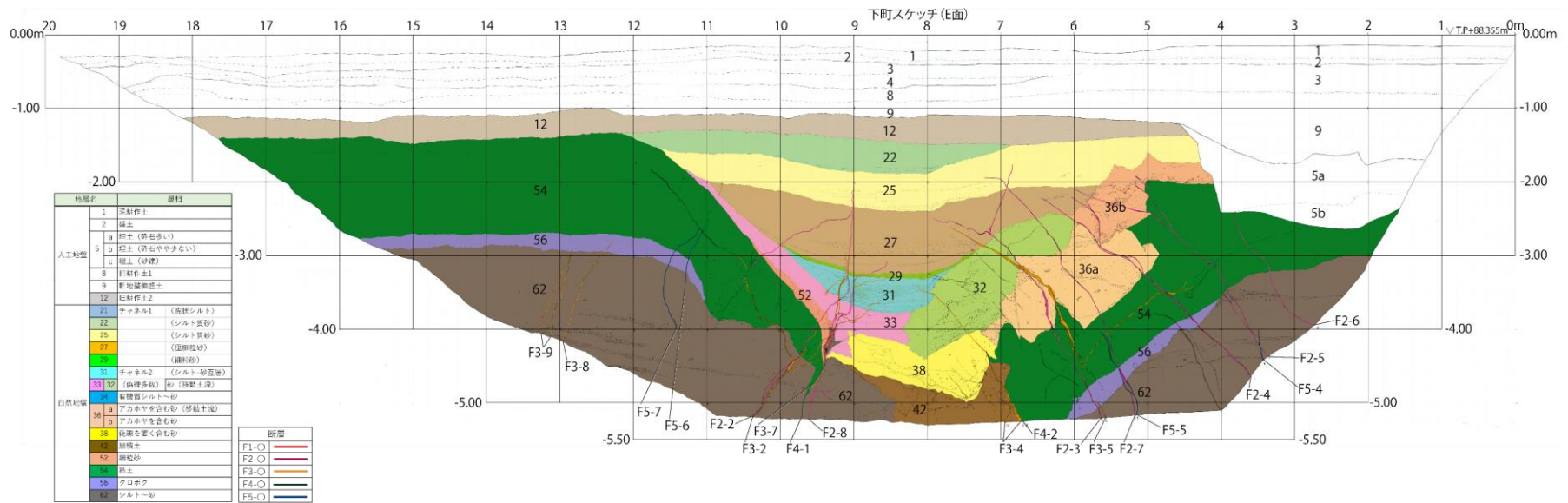


図 2.3.38 下町トレンチ法面スケッチ (E面)



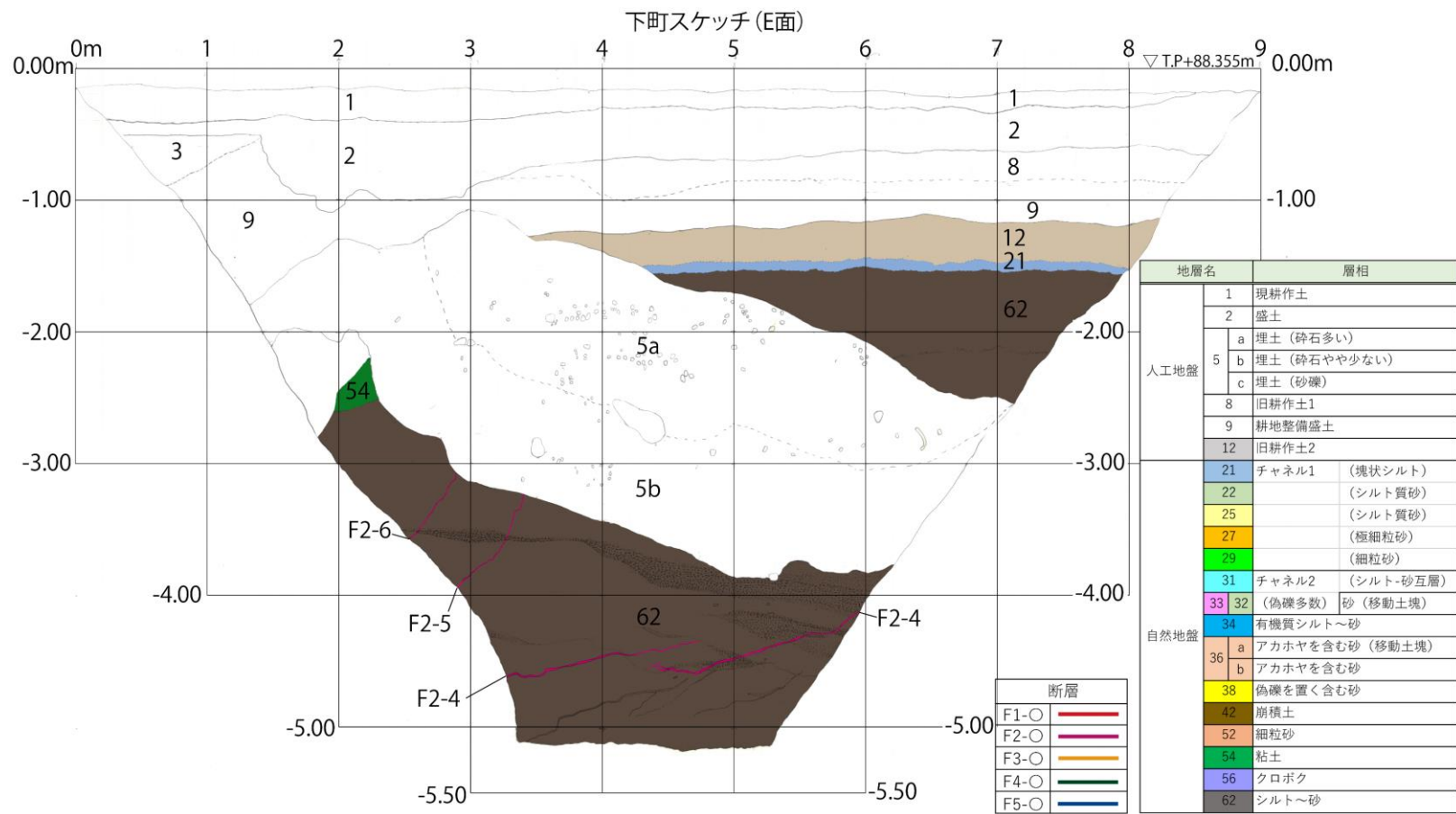


図 2.3.39 下町トレンチ法面スケッチ (S面)

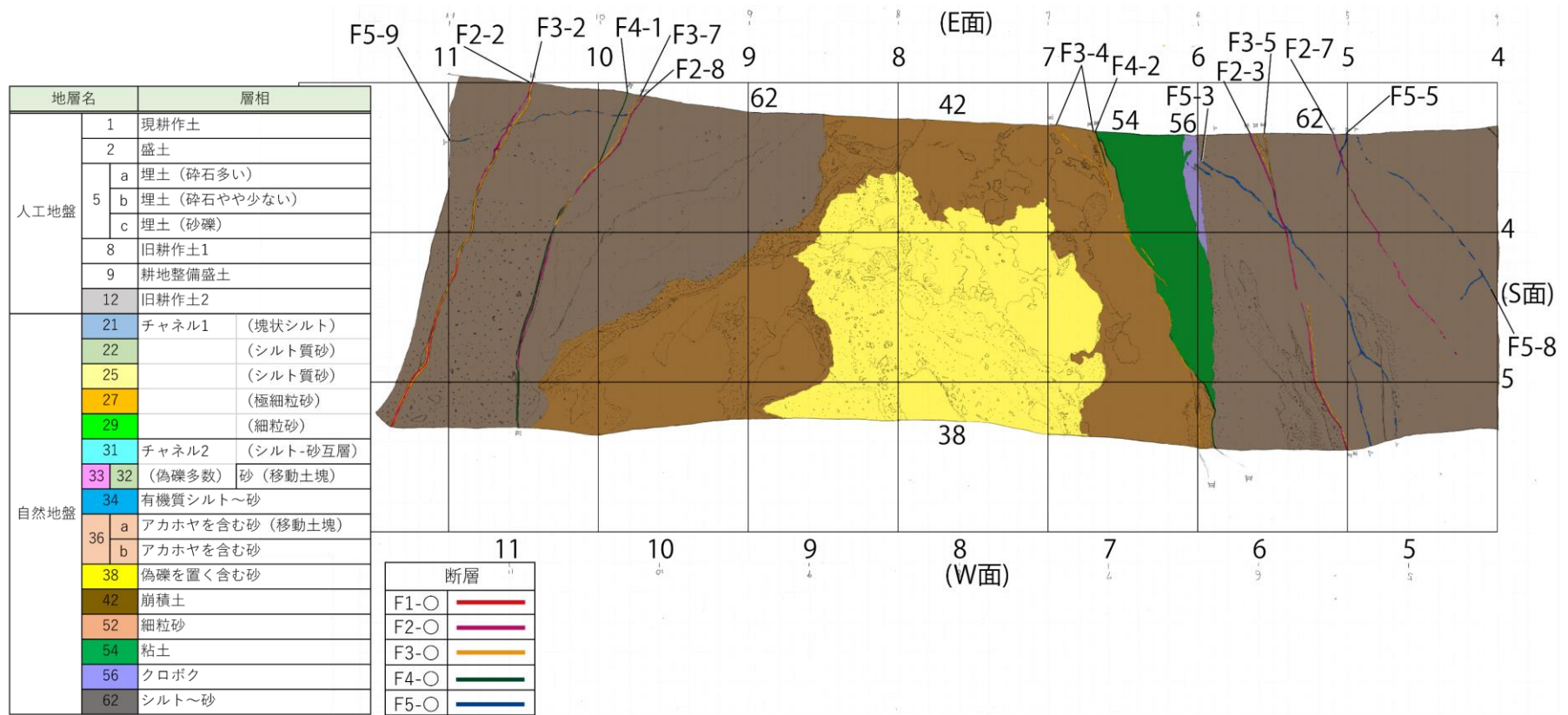


図 2.3.40 下町トレンチ法面スケッチ (底面)

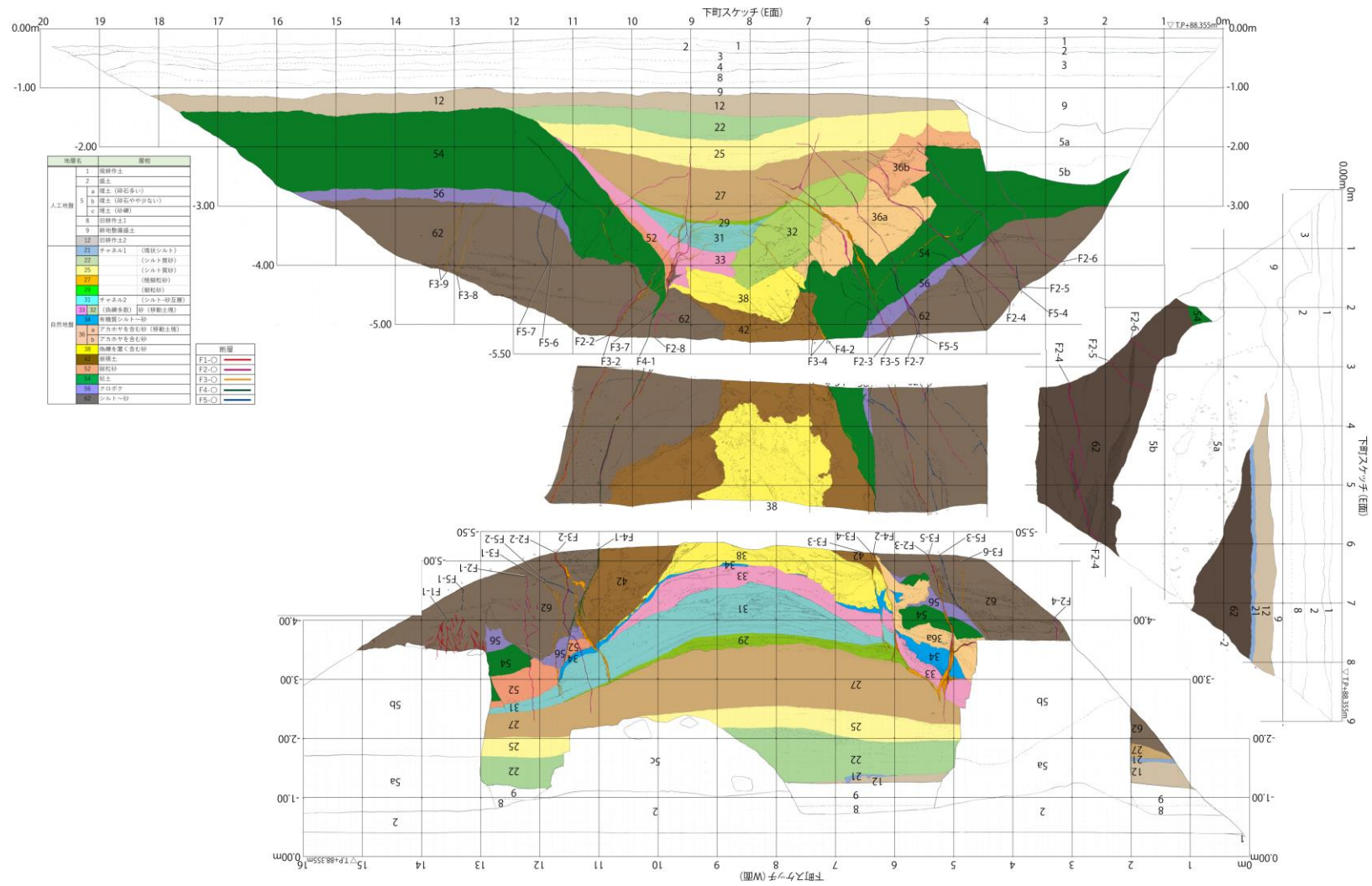


図 2.3.41 下町トレンチ法面スケッチ (全体図)

### 2.3.3.5. 地質概説

下町トレンチにおける地質層序表を表 2.3.6 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）および様々な時代の盛土（2,8,9,12層）および砕石やコンクリート片を含む埋土（5層 a～c）である。それらより下位には複数のチャンネル構造が確認され、21～29層の比較的均質な堆積物からなるチャンネル1、偽礫を多く含む不均質な31層ならびに33層からなるチャンネル2、ブロック状の碎屑物を多く含む38層、および原位置で崩積土として堆積した42層が凹地状の地形を埋積するように分布している。これらの下位には堆積盆の基底を形作る52～62層が分布する。32層と36a層は明瞭な下位境界と立った構造から、重力性の移動土塊と考えられる。

表 2.3.6 下町トレンチ内における地質層序

| 地層名  |       | 層相              |                |
|------|-------|-----------------|----------------|
| 人工地盤 | 1     | 現耕作土            |                |
|      | 2     | 盛土              |                |
|      | 5     | a               | 埋土（砕石多い）       |
|      |       | b               | 埋土（砕石やや少ない）    |
|      |       | c               | 埋土（砂礫）         |
|      | 8     | 旧耕作土1           |                |
|      | 9     | 耕地整備盛土          |                |
| 12   | 旧耕作土2 |                 |                |
| 自然地盤 | 21    | チャンネル1（塊状シルト）   |                |
|      | 22    | （シルト質砂）         |                |
|      | 25    | （シルト質砂）         |                |
|      | 27    | （極細粒砂）          |                |
|      | 29    | （細粒砂）           |                |
|      | 31    | チャンネル2（シルト-砂互層） |                |
|      | 33    | （偽礫多数）          |                |
|      | 32    | 砂（移動土塊）         |                |
|      | 34    | 有機質シルト～砂        |                |
|      | 36    | a               | アカホヤを含む砂（移動土塊） |
|      |       | b               | アカホヤを含む砂       |
|      | 38    | 偽礫を置く含む砂        |                |
|      | 42    | 崩積土             |                |
|      | 52    | 細粒砂             |                |
|      | 54    | 粘土              |                |
| 56   | クロボク  |                 |                |
| 62   | シルト～砂 |                 |                |



### 2.3.3.6. 地質各論

#### (1) 層序記載

【1層】トレンチ掘削範囲表層に層厚 20cm 程度で、E 面グリッド 4.5～20m は掘削の影響でやや薄く層厚 10～15cm 程度で分布する。W 面は掘削時に除去したため分布しない。シルト質細粒砂～中粒砂を主体とし、暗褐色を呈す。下位との境界は明瞭で緩く波打つ。現耕作土層。

【2層】W 面グリッド 0～16m に層厚 30～80cm 程度で分布し、グリッド 2～3m 付近で層厚が大きくなる。E 面グリッド 0～20m に層厚 10～15cm 程度で分布し、グリッド 18～19m 付近では層厚 3cm 程度となる。不均質なシルト質中粒砂を主体とし、暗褐色を呈す W 面では層厚 10～20cm 程度で弱い層状構造が確認できる。黄～黄橙色シルトの偽礫が散在する。礫率 10～20%程度。まれに硬質な円礫を含む。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。

【3層】E 面グリッド 6～20m で層厚 10cm 程度、グリッド 0～6m 付近では下位層 4 層および 8 層との境界が不明瞭になり、地層を分離できない。そのため便宜的にすべてを 3 層としたため、グリッド 0～6m 付近の層厚が 40cm 程度になる。S 面ではグリッド 1.5m 付近でせん滅する。不均質なシルト質中粒砂を主体とし、暗褐色を呈す。黄色シルトの偽礫を含む。旧耕作土。

【4層】E 面グリッド 6～18m に層厚 10～20cm 程度で分布し、グリッド 6～7m 付近およびグリッド 18m 付近でせん滅する。不均質なシルト質中粒砂を主体とし、暗褐色を呈す。黄色シルトの偽礫を多く含む。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。

【5a層】W 面グリッド 2～5m 付近に層厚 40～200cm 程度で、E 面グリッド 1～5m 付近に層厚 45～85cm 程度で、S 面グリッド 2～7m および 13～16m 付近に層厚 20～120cm 程度で分布する。極めて不均質な碎石を主体とする砂礫で基質は黒色のシルト質砂からなる。ビニール袋やプラスチック紐が混じる。5b 層とともに側方の地層を直線的かつ鉛直方向に切断している。

側方の地層を鉛直方向に切断するため、地盤を人工的に掘削して投入された土砂からなる埋土層と考えられる。

【5b層】W 面グリッド 2～5m および 13～16m 付近に層厚 80～160cm 程度で、E 面グリッド 1～4m 付近に層厚 15～40cm 程度で、S 面グリッド 1～7m 付近に層厚 30～150cm 程度で分布する。極めて不均質な碎石を多く含む砂礫で、基質は黒色のシルト質砂からなる。碎石のほかにコンクリート片、プラスチック紐、円礫、黄褐色偽礫が混じる。5a 層とともに側方の地層を直接的かつ鉛直方向に切断し、下位層を水平に切断している。

側方の地層を鉛直方向に切断するため、地盤を人工的に掘削して投入された土砂からなる埋土層と考えられる。

【5c層】W面グリッド2～5mおよび13～16m付近に層厚20～160cm程度で分布する。礫混じり中～粗粒砂を主体とする。最大礫径φ50cm。側方および下位層を明瞭な切断面で接する。

側方の地層を鉛直に切断し、下位層とも明瞭な切断面で接するため、地盤を人工的に掘削して投入された土砂からなる埋土層と考えられる。

【8層】W面グリッド0～2m、5～8mおよび12.5m付近に層厚10～20cm程度で、E面グリッド6～19m付近に層厚10～30cm程度で、S面グリッド3～9m付近に層厚10～15cm程度で分布する。E面グリッド5～6m付近で上位層の3層および4層との境界が不明瞭となり、地層を分離できない。そのため当該区間を便宜的に3層とした。塊状の灰～褐灰色シルトを主体とする。黄色シルトの偽礫をまれに含む。下位との境界には、黒色重鉱物が層状に厚さ2mm程度で濃集する。下位境界は比較的平坦な形状をなす。後述する農地整備による盛土層の9層の表層にあたり、旧耕作土と考えられる。

【9層】W面グリッド0～2m、4.5～8mおよび12～13m付近に、E面グリッド0～19m付近に、S面グリッド0～9mに層厚20～40cm程度で分布する。E面グリッド4.5mからS面グリッド3mにかけては層厚が増加し、最大層厚100cm程度になる。やや均質な暗褐色シルトを主体とする。φ2～5cm程度の黄～黄橙色シルトの偽礫を30～40%含む。境界面はやや不規則な形状をなし、下位層を削剥的に覆う。

下位層を切断する比較的均質な土砂が全体的に分布しているため、機械施工での近代の耕地整備による盛土層と考えられる。

【12層】基礎地盤最上部に層厚20～40cm程度で広く分布する。5層の埋土および9層の耕地整備により一部欠損している。固結の低い灰色シルト～砂質シルトを主体とする。褐鉄鉱を斑状に含む。φ0.5～1cmの礫をまれに含む。

斑状に含まれる褐鉄鉱は植生による根跡であると推測され、堆積構造もみられないため風成土壌と考えられる。

【21層】W面グリッド1～2mおよびS面グリッド3～9mに層厚8～10cm程度で分布する。また、W面グリッド6～7m付近にも不規則に分布する。塊状シルトで、やや紫がかつた黄褐色を呈す。乾燥すると1～2cm程度の亀甲状のクラックが発達する。下位境界は明瞭で、緩く凹凸を示すが比較的直線状である。

【22層】W面グリッド5～9mおよび11～13mに層厚50～85cm程度でE面グリッド7～12m付近に層厚10～40cm程度で分布する。褐色の砂質シルトが主体で、E面では地層下部に細粒砂からなる1～3mm程度の葉理が見られる。W面では、地層下部にやや上方細粒化する細粒砂～中粒砂が存在する。全体的に褐色土壌化が進行している。

トレンチ中央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。

【25層】W面グリッド5～10mおよび11～13mに層厚30～45cm程度で、E面グリッド4～12mに層厚20～50cm程度で分布する。チャンネル構造に沿って中央付近の分布標高がやや低い。褐色のシルト～砂質シルトを主体とし、下位との境界部には、やや上方細粒化する細粒砂～中粒砂が分布する。E面では細粒砂～中粒砂からなる1～3mmの葉理を含む。

トレンチ中央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。

【27層】W面グリッド1～2mおよび5～13mに層厚10～100cm程度で、E面グリッド6～11mに層厚15～90cm程度で分布する。チャンネル構造の中央付近でやや厚く堆積する。砂質シルト～シルト質砂を主体とし、褐灰色～褐色を呈す。W面では地層内に弱い層状構造を示し、E面では地層下部にやや上方細粒化する細粒砂～中粒砂が存在する。

トレンチ中央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。

本層は放射性炭素年代測定結果から2,630±20 yrBP（バルク）の年代値が得られている。

【29層】W面グリッド5～12mに層厚5～25cm程度で分布し、E面グリッド7～10mに層厚5～10cm程度で分布する。チャンネル構造の中央付近でやや厚く堆積する。細粒砂～中粒砂を主体とし、橙色～明褐色を呈す。W面では、細粒砂～中粒砂からなる発達した平行～斜交葉理およびコンポリュート葉理が見られ、明灰色シルトを薄く挟む。分級はよく、上位へ漸移する。最下部には、シルト～極細粒砂が層厚3cm程度でチャンネル壁に沿うように分布する。E面では、層厚1～5mm程度の細粒砂～中粒砂からなる平行葉理が見られる。

トレンチ中央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。

【31層】W面グリッド6～13mに層厚10～90cm程度で、E面グリッド7～10mに層厚5～40cm程度で分布する。チャンネル構造の中央付近でやや厚く堆積する。明灰色の塊状シルトおよび橙色～明褐色の細粒砂～中粒砂の互層からなる。W面では、層厚4cm程度のシルトと砂が互層をなし、砂が下位のシルトにやや浸食的に重なり、明瞭な境界を示す。E面では、層厚3～10cm程度のシルトと砂がほぼ等量に互層をなす。砂は比較的均質で分級されている。偽礫はほとんど含まない。シルトは均質塊状で少量の褐鉄鉱を含む。また、グリッド12～13m付近では黒褐色に土壌化している。

トレンチ中央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。

本層は放射性炭素年代測定結果から2,430±20 yrBP（バルク）の年代値が得られている。

【32層】E面グリッド6～8mに層厚50～100cm程度でグリッド8～9m付近に向かって傾斜して分布する。細粒砂主体で、下部に層状構造が発達する。33層の側方に分布し、33層を变形させている。下位層とは直線状、あるいは円弧状の明瞭な境界で接する。

側方の地層を变形させていることから移動土塊と考えられ、明瞭な下位境界は、すべり面の可能性がある。

【33層】W面グリッド5～11mに層厚10～40cm程度で、E面グリッド8～11mに層厚5～70cm程度で分布する。偽礫を多量に含むシルト質細粒砂が主体で暗褐色を呈す。含まれる偽礫はφ0.5～5cm程度のシルトおよび細粒砂～中粒砂で地層全体に層状配列する。

【34層】W面グリッド5～7m および8～12m に層厚5～40cm 程度でチャンネル壁面に沿って層状に分布、あるいは断片的に分布する。塊状の灰色砂質シルトおよび暗褐色シルト質細粒砂からなり、堆積構造はみられない。上位面は比較的平坦で下位面は不規則な形状をなす。

本層は放射性炭素年代測定結果から 2,760±20 yrBP（バルク） および 2,140±20 yrBP（バルク）の年代値が得られている。

【36a層】W面グリッド5～6m に層厚10～70cm 程度で、E面グリッド5～7m に不規則な形状で分布する。鬼界アカホヤ火山灰層(K-Ah)を含むシルト混じりの細粒砂主体。E面では、境界に沿って灰褐色シルトが分布し、円弧状の明瞭な境界面をもつ。境界面は東から西に向かって急勾配となっている。

急勾配で円弧状の境界面をもつことから、すべり土塊と考えられ、最下部シルトはすべり面の可能性がある。

【36b層】E面グリッド4～6m に層厚30～80cm 程度で分布する。分級された細粒砂を主体とし、褐色を呈す。堆積構造はみられないが、鬼界アカホヤ火山灰層(K-Ah)と推定されるブロックが比較的成層している。下位境界は明瞭で直線状な地層境界は比較的緩勾配である。全体的にやや土壌化している。

36a層と層相は類似するものの下位境界は緩やかで、36a層の初生的あるいは移動量の少ない部分と考えられる。

【38層】W面グリッド6～11m に、E面グリッド7～9m に層厚5～80cm 程度でチャンネル壁面に沿って分布する。細粒砂の基質支持で明瞭な堆積構造はみられない。明褐灰色の粘土、シルトおよび細粒砂からなるφ1～3cmの偽礫およびブロックを多量に含む。層厚1mm程度の層状のシルトを断続的に挟む。

チャンネル構造の最下部に堆積している。

【42層】W面グリッドでは6～7m および10～11m に、E面グリッドでは7～9m および10～11m に分布する。シルトおよび砂のブロックを多量に含み、ブロックの間を暗褐色の砂が充填する。ブロックは、褐灰色～黒褐色粘土および灰赤色シルト、62層の砂、黄褐色の土壌化した砂などからなる。W面では最上部を褐灰色～明褐灰色シルトが覆う。明瞭な堆積構造は見られない。

チャンネル壁面に急勾配で堆積しており、現地で生産されたと考えられるブロック状の堆積物を含むことから、堆積空間発生初期に斜面上に堆積した崩積土と考えられる。

【52層】W面グリッド11～13m に層厚5～50cm 程度で、E面グリッド9～11m にチャンネル壁に沿うように層厚5～10cm 程度で分布する。W面では、橙色の細粒砂を主体とし、均質塊状である。グリッド11～12m 付近において、下位の56層との境界は明瞭で不規則な形状をとり、上位の明灰褐色に土壌化した34層に覆われる。E面では、細粒砂～粗粒砂を主



体とし、明褐色を呈す。φ2～3cmの垂円礫を含む。また、クラックが見られ、その間を33層が充填する。

【54層】W面グリッド5～6mおよび11～13mに層厚5～40cm程度で、E面グリッド1～7mおよび9～18mに層厚40～100cm程度で、S面グリッド1～2mに層厚5～40cm程度で分布する。塊状シルトを主体とし、にぶい黄褐色を呈す。ごくまれにφ2～3mmほどの軽石を含む。また、下位の56層とは不明瞭な境界となる。W面では断層運動による変形が著しく、初生的な構造をほとんど残していない。E面では、56層および62層の凹凸を埋めるように堆積している。

【56層】W面グリッド5～6mおよび12～13mに層厚10～40cm程度で、E面グリッド4～6mおよび11～16mに層厚5～20cm程度で分布する。優黒質のシルト～極細粒砂を主体とし、暗褐色～黒褐色を呈す。W面では、上位の52層および54層と伴ってブロック状に分布する。

本層は放射性炭素年代測定結果から11,750±40 yrBP（バルク）および8,280±30 yrBP（炭質物）の年代値が得られている。

【62層】W面グリッド1～2mおよび3～6m、11～15mに、W面グリッド2～6mおよび9～16mに、S面グリッド2～8mに分布する。チャンネルを挟んで台地状の高まりとして存在する。上部の砂と下部の粘土からなる。砂は、黄褐色からにぶい黄褐色の極細粒砂～中粒砂主体で、層状に密集した礫を含む。砂の分級は普通～良く、平行葉理が発達し、やや斜交葉理もみられる。わずかに級化もみられるが明瞭ではない。含まれる礫は平均φ3～15mm程度の垂角礫～超円礫で、まれにφ4～15cmほどの礫もみられる。礫種は火砕岩が主体で、赤色化した礫もみられる。粘土は、にぶい黄色～明赤灰色の塊状粘土が主体で、まれにφ1cm未満の赤色礫を含む。

## (2) 断層記載

下町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～F5 まで分類した。なお、下町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：挟在物が認められない開口クラック

[F1-1] W 面グリッドの(13～14, -4～3.5)に W(13.3, -4.0)から上方に向かって広がるように複数条認められる(図 2.3.45)。主に 62 層中に分布するが、一部は 5b 層中に分布する。開口部には挟在物は認められない。下位への延長および 62 層や 5b 層の変位は認められない。

### ①F2：灰色シルトを充てんするクラック

[F2-1] W(12.2, -4.7)から W(12.2, -2.3)に分布する。下位への延長は認められない。W(12.2, -4.4)から W(12.2, -3.7)までは分岐し断続的になる。変位が認められるのは 52 層および 54 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。27 層まで分布しているが 31 層、27 層では変位は認められない。

[F2-2] W 面では、W(11.8, -5.1)から W(11.2, -2.4)に分布する(図 2.3.42)(図 2.3.43)。この面の走向傾斜は N85E62N である。トレンチ底面を経由し E 面では、E(10.4, -5.0)を起点に E(9.0, -3.5)で F2-8 と合流する。この面の走向傾斜は N61～66W, 70～78N である。0.1～1cm 程度の幅で充てん物を含む。底面(10.8, 4.0)付近で右ステップによる左横ずれを示す。27 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。W(11.8, -5.1)から W(11.7, -4.6)までは F3 と交わり、E(10.4, -5.0)から E(9.5, -3.7)まで F3-2 と並走する。F3-2 を W(11.7, -4.6)および E(9.8, -4.4)、E(9.2, -3.6)で、F5-2 を W(11.5, -4.5)で、F4-1 を W(11.5, -3.7)で切断する。F5-9 を底面(11.4, 5.6)付近で切断する。

[F2-3] W 面では、W(5.4, -5.1)から W(5.1, -2.3)に分布する。この面の走向傾斜は N53E85NW である。W(5.0, -3.4)で分岐し W(4.6, -3.2)まで分布する(図 2.3.44)。底面を経由し E 面では、E(5.6, -5.2)から E(7.9, -2.5)に分布する。この面の走向傾斜は N23E70W である。E(7.2, -2.7)で分岐し E(6.8, -1.8)まで分布する。E 面において 27 層と 32 層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度、32 層と 36a 層の境界で見かけ北落ち 20cm 程度の変位を与える。25 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。F3-5 と並走しながら、各所で F3-5 の構造と交わり切断する。F5-3 に底面(5.4, 4.0)で 1cm 程度の左横ずれ変位を与える(図 2.3.48)。

[F2-4] W(3.0, -3.8)および W(3.3, -4.0)から S 面に連続し、S(6.0, -3.9)から S(5.4, -4.6)に分布する。S(5.4, -4.5)付近で右ステップによる左横ずれを示す(図 2.3.46)。S(4.9, -4.3)から S(3.2, -4.6)で E 面に連続し、W(3.6, -4.6)から W(6.5, -2.2)に分布する。E 面での走向傾斜は N28E68E、S 面での走向傾斜は N59～63E, 77～80S である。0.1～4cm 程度の幅で充てん

物を含む。E(5.1, -3.3)で分岐し E(6.0, -2.2)まで分布する。E 面において、36a 層と 36b 層および 32 層と 36b 層が断層で接している。27 層まで分布し、27 層と 36b 層の境界で北落ち 5cm 程度の変位を与える。F3-5 を E(5.2, -3.5)で切断する。

[F2-5] S(3.4, -3.2)および S(2.9, -3.9)から E 面に分布し、E(3.4, -4.4)から E(6.0, -2.1)に分布する。この面の走向傾斜は N38E71SE である。0.1～1cm 程度の幅で充てん物を含む。E(4.6, -2.7)および E(3.6, -4.0)で分岐しせん滅する。E 面において 36b 層と 54 層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。27 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。F5-4 を E(3.4, -4.4)で切断する。

[F2-6] S(2.9, -3.1)から S(2.5, -3.6)で E 面に分布し、E(2.8, -3.9)から E(3.8, -2.4)に分布する。この面の走向傾斜は N56E88S である。0.1～1.5cm 程度の幅で充てん物を含む。54 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。

[F2-7] E(5.2, -5.0)から E(7.2, -1.9)に分布する。この面の走向傾斜は N36E90 である。底面に続くが、せん滅する。25 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。F2-7 は F5-5 と並走するが E(5.2, -4.8)で切断し、底面(5.0, 3.5)で 0.5cm 程度の左横ずれ変位を与える。

[F2-8] E(9.7, -5.2)から E(9.0, -2.0)に分布し、多数分岐する(図 2.3.42)。この面の走向傾斜は N59～66W, 55～85E である。底面に続くが、せん滅する。31 層と 33 層の境界で見かけ南落ち 5～10cm 程度の変位を与える。29 層と 31 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。27 層と 29 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。25 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。F3-7 と並走しながら、F3-7 の構造と交わり切断する。

## ②F3 : 黒褐色シルトを充てんするクラック

[F3-1] W(12.1, -4.6)から W(12.4, -2.7)に断続しながら分布し、多数分岐する。31 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。下位への延長および変位も認められない。

[F3-2] W 面では、W(11.7, -5.1)から W(11.6, -2.7)に断続しながら分布し、多数小さく分岐する(図 2.3.42)(図 2.3.43)。0.1～5cm 程度の幅で充てん物を網目状に含む。56 層および 52 層、34 層について見かけ北落ち 2～15cm 程度の引きずり変形が認められる。29 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。F4-1 を W(11.4, -4.0)で切断し、F2-2 に W(11.5, -4.5)で切断される。底面を経由し E 面では、E(10.4, -5.0)から E(9.3, -4.0)に分布する。この面の走向傾斜は N62～86W, 71～85N である。途中で多数分岐し、とくに E(9.8, -4.2)で分岐し、E(10.8, -3.0)に分布するものが大きい。31 層と 33 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。29 層と 31 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。27 層と 29

層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。F2-2 に E(9.8, -4.4)で切断される。F5-9 を底面(11.4, 5.6)付近で切断する。

[F3-3] W 面では W(6.4, -5.1)から分岐しつつ E(6.2, -3.4)に分布する。この面の走向傾斜は N84E84S である。断層面付近の 42 層および 38 層、34 層、33 層、31 層について 10~40cm 程度の見かけ北落ちの引きずり変形が認められる。29 層と 31 層の境界で見かけ南落ち 3~5cm 程度の変位を与える。

[F3-4] W 面では W(6.3, -5.1)から E(6.0, -3.3)に分布する。この面の走向傾斜は N71E82N である。底面で分岐し、E(7.1, -5.1)から E(7.4, -5.0)に分布するものと E(6.9, -5.1)から E(8.1, -3.2)に分布するものとなる。この面の走向傾斜は N38E78E である。E(7.2, -4.5)付近で断層面に対して東へ 14° プランジする条線が認められる(図 2.3.49)。W 面では 36a 層と 42 層、36a 層と 38 層、31 層と 33 層が断層で接している。33 層と 34 層の境界で見かけ北落ち 30cm 程度の変位を与える。底面(6.4, 4.2)付近で右ステップによる左横ずれを示す。E 面では、54 層と 42 層および 54 層と 38 層が断層で接している。32 層と 38 層の境界で見かけ南落ち 1cm 程度の変位を与える。31 層と 32 層の境界で見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。底面において、F4-2 と並走しながら F4-2 の構造と交わり切断する。

[F3-5] W 面では W(5.4, -5.1)から途中で数条に分岐しながら W(5.2, -2.7)に分布する(図 2.3.44)。この面の走向傾斜は N53E85NW である。W 面において 27 層に分布するが大きな変位および変形は認められない。断続的に底面を経由し E 面では E(5.6, -5.1)から E(7.5, -3.4)に分布し、E(5.9, -4.4)で分岐し E(4.4, -3.4)に分布する。この面の走向傾斜は N38E78NW である。E 面において 27 層まで分布するが大きな変位および変形は認められない。F5-5 を E(4.6, -3.9)で切断する。各所で F2-3 と並走しながら合流し、F2-3 に構造を切断される(図 2.3.48)。また、F2-4 に E(5.2, -3.5)で、F2-7 に E(4.6, -3.9)で切断される。

F3-5 の充填物の放射性炭素年代測定結果から、 $2,750 \pm 20$  yrBP (バルク) の年代値が得られている。

[F3-6] W(5.2, -4.8)から W(6.2, -3.4)に分布する(図 2.3.44)。62 層に分布するが大きな変位および変形は認められない。下位への延長も認められない。

[F3-7] E(9.6, -4.7)から途中で数条に分岐しながら E(9.1, -2.9)に分布する(図 2.3.42)。この面の走向傾斜は N45W85NW である。62 層および 54 層、52 層、33 層について見かけ南落ち 20~60cm 程度の引きずり変形が認められる。また、31 層と 33 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。29 層と 31 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。27 層と 29 層の境界で見かけ南落ち 10cm 程度の変位を与える。とくに 29 層と 31 層では E(9.2, -3.4)で十数 cm の左横ずれ変位を与える。F2-8 と並走しながら交わり、F2-8 に構造を切断される。F4-1 と E(9.6, -4.7)と交わり、F2-2 に E(9.2, -3.6)で切断される

[F3-8] E(13.0, -4.1)から E(12.4, -2.9)に分布する(図 2.3.43)。この面の走向傾斜は N45~87W72NE~88S である。56 層に分布するが大きな変位および変形は認められない。



[F3-9] 2条の断層が E(13.1, -4.1)から E(12.8, -3.0)で合流して分布する。この面の走向傾斜は N57~86W, 71N~84N である。56層に分布するが大きな変位および変形は認められない。

③F4：せん断面を境に地層が大きく異なり、地層の変形が顕著な断層

[F4-1] W面では、W(11.0, -5.2)から途中で小さな分岐をしながら W(12.4, -3.3)に分布する(図 2.3.42)(図 2.3.43)。この面の走向傾斜は N89W68S である。断層を介して 62層と 42層が接しており、52層と 56層の境界で見かけ南落ち 40cm 程度の変位を与える。底面を経由して E面では、E(10.3, -5.2)から E(9.6, -4.7)に分布して F3-7 と交わる。断層面付近の 62層および 54層について見かけ南落ち 40cm 程度の引きずり変形が認められる。底面では F2-8 および F3-7 と並走しながら交わり、F2-2 に W(11.5, -3.7)で、F3-2 に W(11.4, -4.0)で切断される。F5-9 を底面(9.8, 5.8)付近で切断する(図 2.3.47)。

[F4-2] W面では、W(6.4, 5.1)から W(6.1, -4.8)に分布する(図 2.3.44)。断層を介して 62層と 36a層が接している。底面を経由して E面では、F3-4 と E(6.7, -5.2)で交わる。この面の走向傾斜は N62E49SE である。断層を介して 62層と 42層が接している。底面では F3-4 と並走しながら交わる。

④F5：白色物質を充てんし、やや不明瞭なクラック

[F5-1] W(14.7, 4.5)から W(14.7, -4.2)に分布する(図 2.3.45)。62層に位置するが変位は認められない。

[F5-2] W(11.9, 4.7)から W(12.6, -4.4)に分布する(図 2.3.43)。62層に位置するが変位は認められない。F2-2 に W(11.5, -4.5)で切断される。

[F5-3] W(5.2, -5.1)から W(4.8, -4.1)に分布する(図 2.3.44)。この面の走向傾斜は N38E90 である。62層に位置するが変位は認められない。底面に続くがせん滅し、F2-3 に底面(5.4, 4.0)で 1cm 程度の左横ずれ変位を与えられる。

[F5-4] E(3.4, -4.4)から E(3.5, -4.0)に分布する。62層中の層理に見かけ北落ち 10cm 程度の変位を与える。底面に続くがせん滅し、F2-5 に E(3.4, -4.4)で切断される。

[F5-5] E(5.2, -5.0)から E(5.6, -4.0)に分布する。この面の走向傾斜は N47E86S である。62層に位置するが変位は認められない。底面に続くがせん滅し、F2-7 に E(3.4, -4.4)で、F3-5 に E(4.6, -3.9)で切断される。F2-7 に底面(5.0, 3.5)で 0.5cm 程度の左横ずれ変位を与えられる。

[F5-6] E(11.3, -3.5)から E(11.0, -2.6)に分布する。54層に分布するが変位は認められない。

[F5-7] E(11.4, -4.0)から E(11.0, -2.6)に分布する。54 層に分布するが変位は認められない。

[F5-8] 底面(4.0, 4.6)から底面(5.0, 5.6)に分布する。62 層に分布するが変位は認められない。

[F5-9] 底面(11.0, 5.6)から底面(9.8, 5.8)に分布する。62 層に分布するが変位は認められない。F4-1 に底面(9.8, 5.8)付近で切断される(図 2.3.47)。F2-2 および F3-2 に底面(11.4, 5.6)付近で切断される(図 2.3.48)。

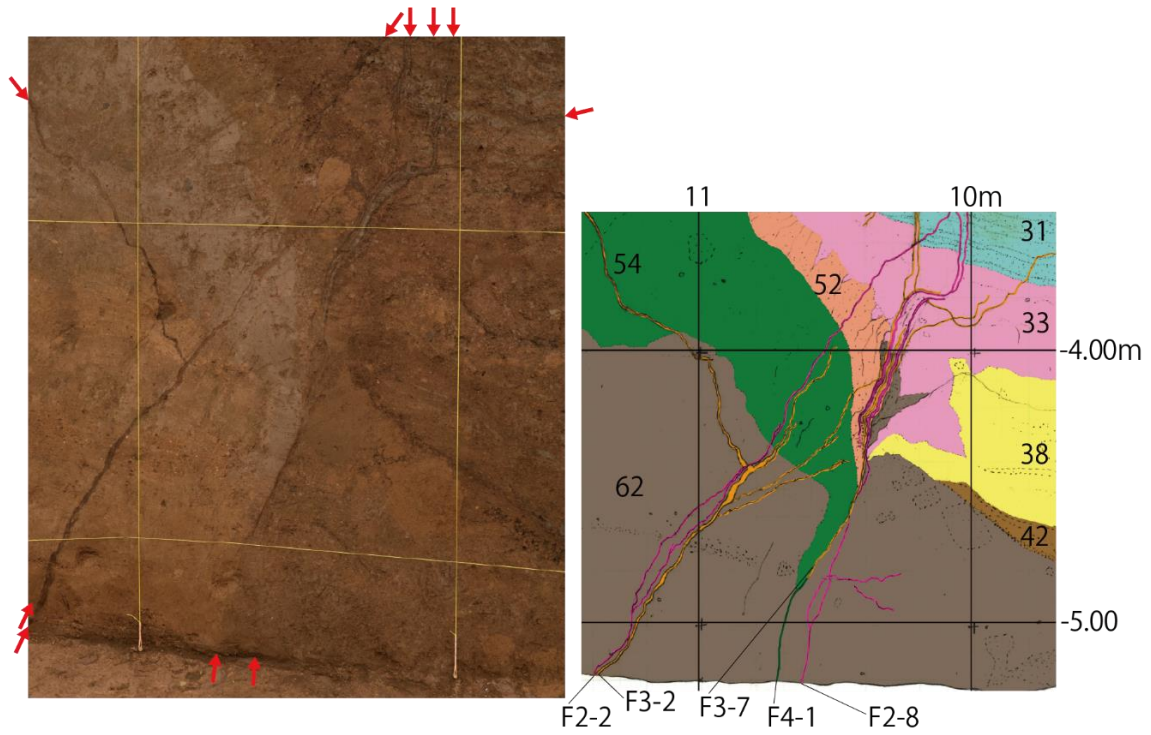


図 2.3.42 E(9.6~11.5, -3.5~-5.2)付近に分布する F2~F4

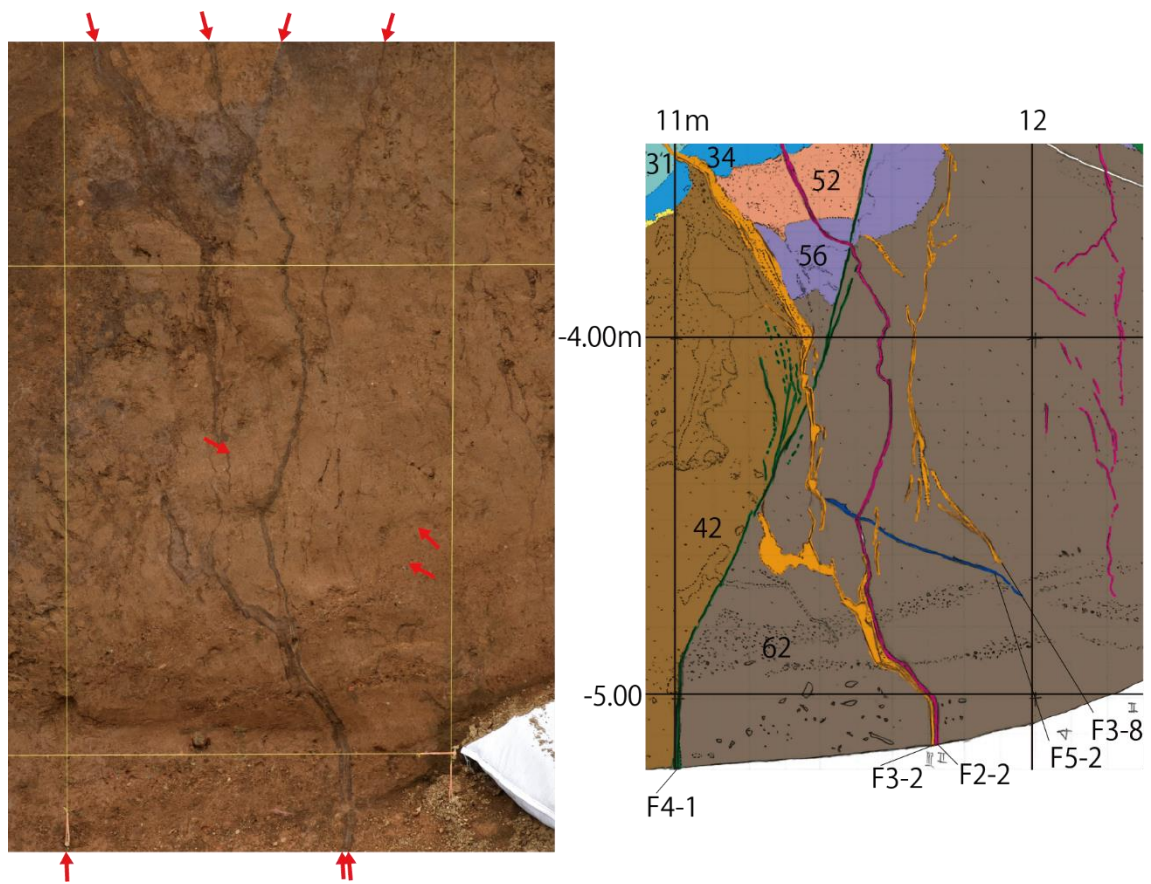


図 2.3.43 W(10.9~12.5, -3.5~-5.2)付近に分布する F2~F5

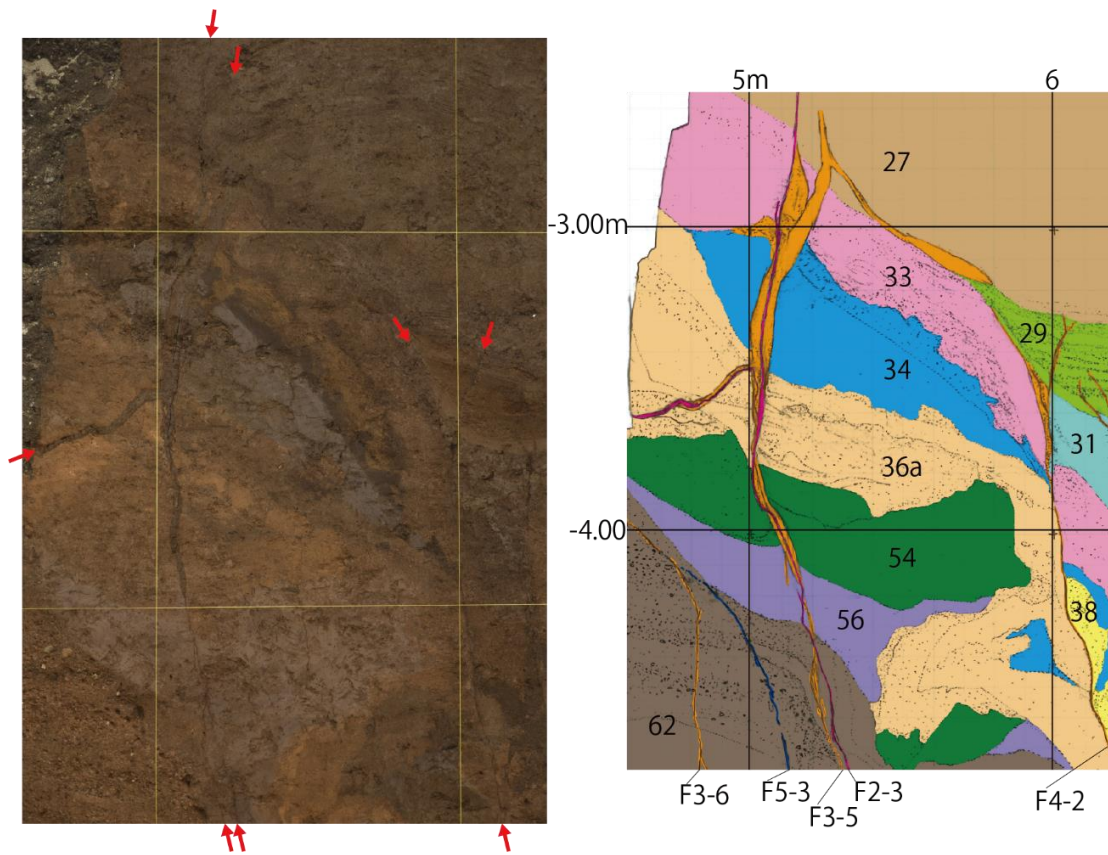


図 2.3.44 W(4.5~6.3, -2.5~-4.8)付近に分布する F2~F5

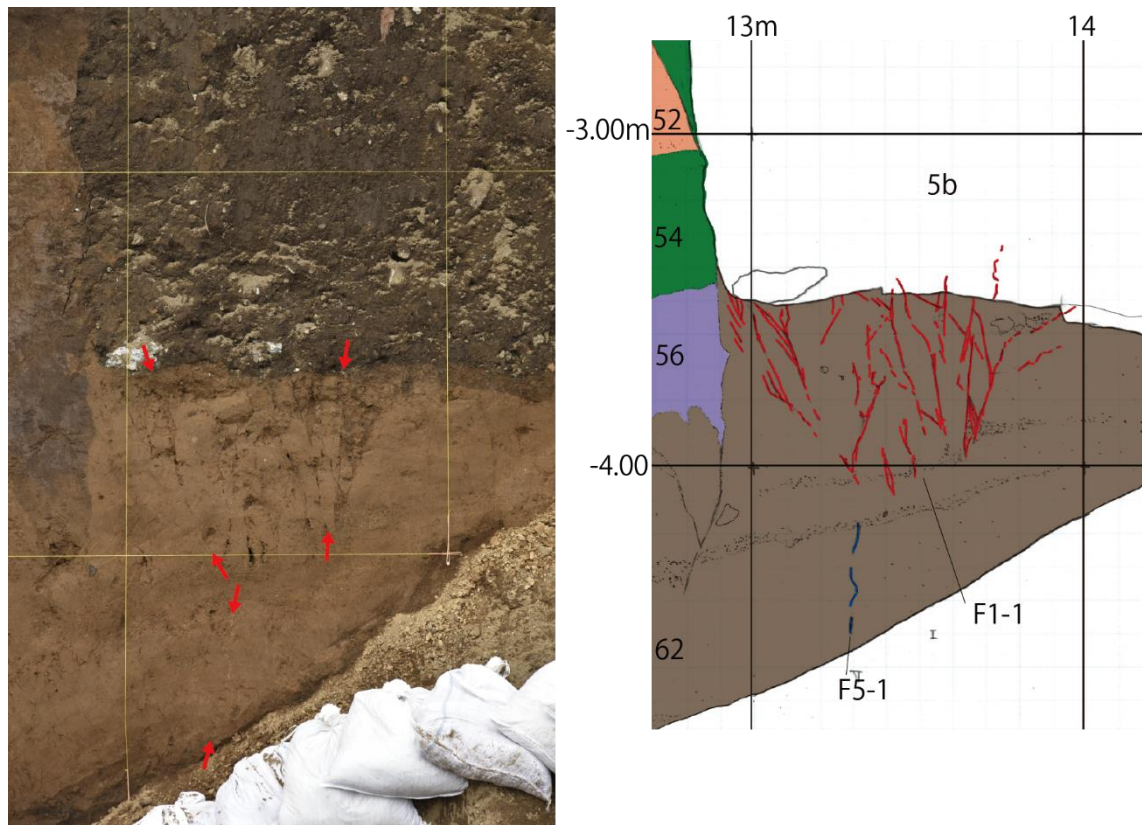


図 2.3.45 W(12.9~14.0, -3.5~-4.6)付近に分布する F1・F5



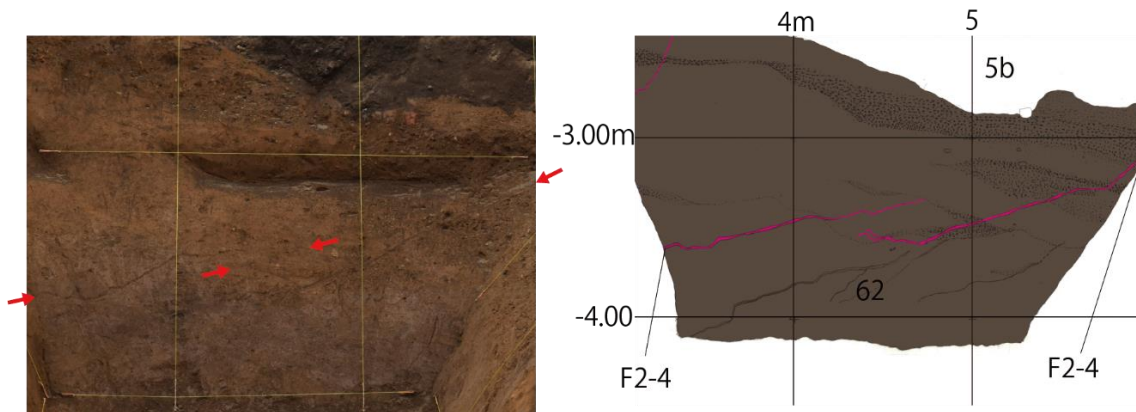


図 2.3.46 S面でステップする F2-4

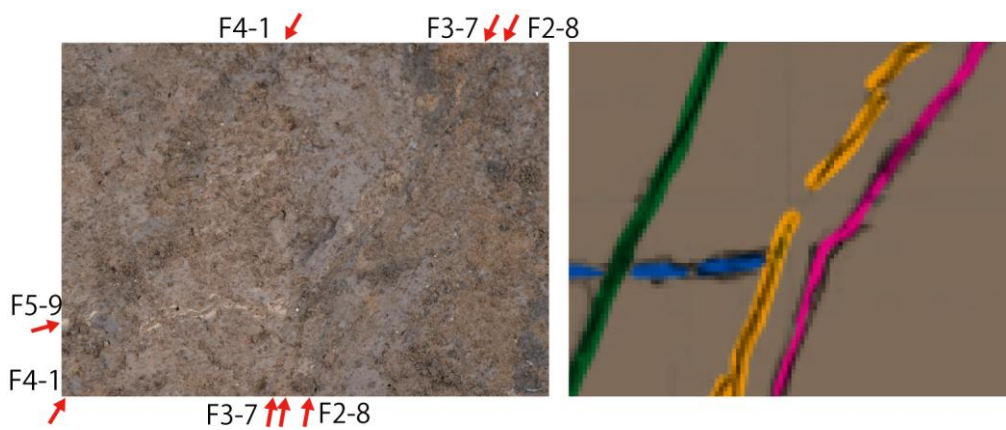


図 2.3.47 F5-9がF4-1に切断される

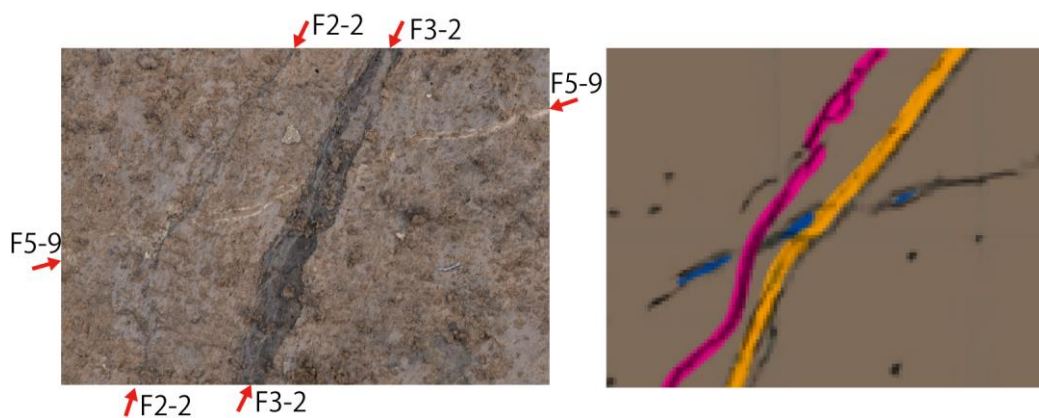


図 2.3.48 F5-9がF2-2とF3-2に切断される



図 2.3.49 F3-4 の条線

### (3) 断層構造解析

下町トレンチにおいて分布する断層およびクラックは面構造ごとの特徴で 5 つに区分できる。そのうち F2～F5 について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 2.3.50)。

#### ①F2

地層を切断するクラックのうち灰色シルトを充填するものを F2 とする。得られた面の走向傾斜から構造解析を行った。F2 の走向傾斜は、走向が N36～66E で傾斜が 70W～71SE のものと、走向が N59～66W で傾斜が 70E～85W のものに分けられる。F2-2 は底面(10.7, 4.0)付近で右ステップによる左横ずれを示す。F2-3 は F5-3 に底面(5.4, 4.0)で 1cm 程度の左横ずれ変位を与える。F2-4 は S(5.4, -4.5)付近で右ステップによる左横ずれを示す。F2-7 は F5-5 に底面(5.0, 3.5)で 0.5cm 程度の左横ずれ変位を与える。これらの左横ずれ成分をもつクラックは北東－南西走向を示している。

#### ②F3

地層を切断するクラックのうち黒褐色シルト～砂を充填するものを F3 とする。得られた面の走向傾斜から構造解析を行った。F3 の走向傾斜は、走向が N62～86W で傾斜が 70～85N のものが卓越し、走向が N38～53E で傾斜が 78～85NW、および走向が N45～49W で傾斜が 72NE～88SW のものも分布する。F3-4 は底面(6.4, 4.2)付近で右ステップによる左横ずれを示す。F3-7 は 29 層に E(9.2, -3.4)で十数 cm の左横ずれ変位を与える。北東－南西方向および北西－南東方向のクラックはともに横ずれを示す。

#### ③F4

変位量が大きく、異なる地層同士が接する断層を F4 とする。F4 の走向傾斜は、N89W68S および N62E49SE である。

#### ④F5

地層を切断するクラックのうち白色物質を充てんし、やや不明瞭なものを F5 とする。F5 の走向傾斜は、N38W,90 および N47E80S である。

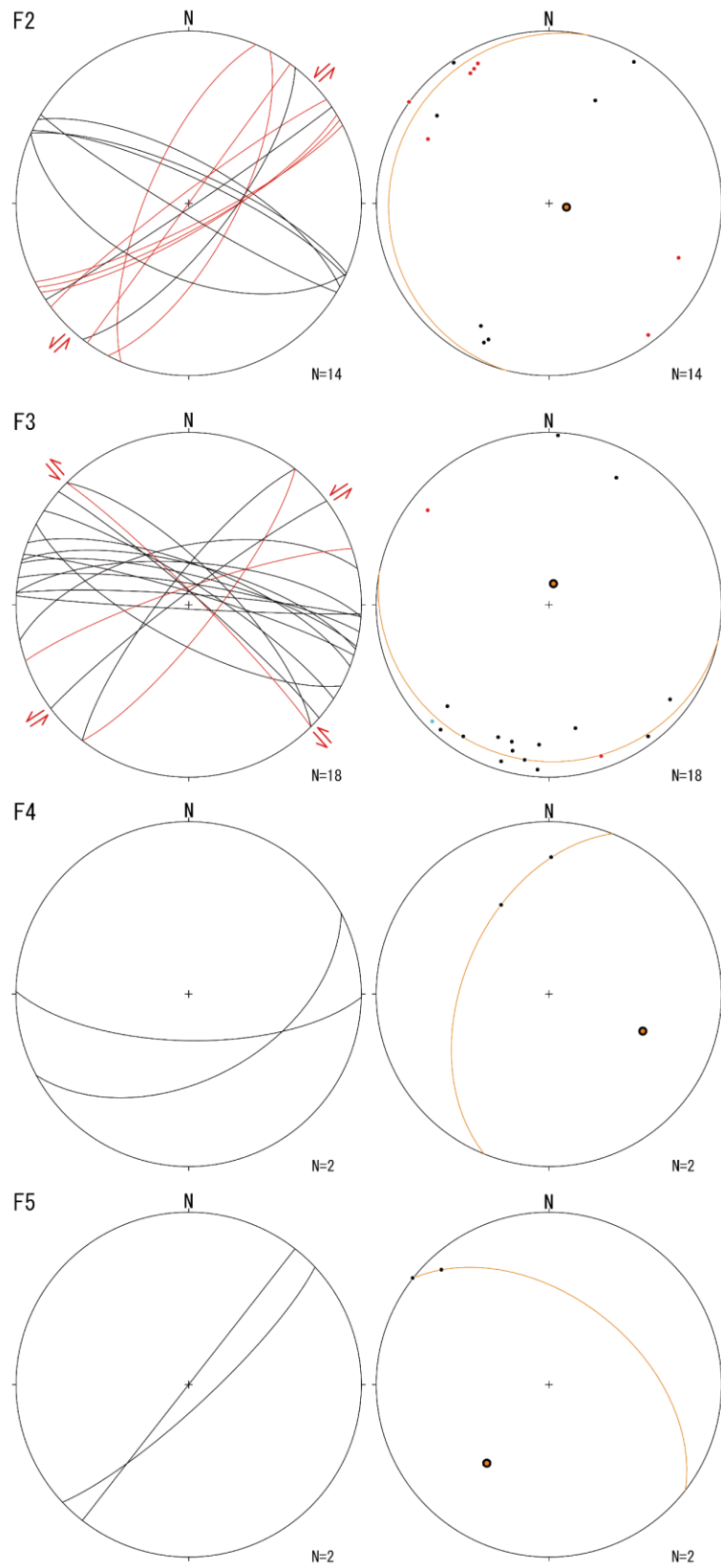


図 2.3.50 下町トレンチにおける F2~F5 の走向傾斜とその極  
 橙色の大円および極はそれぞれの最適大円とその極を示す。赤色の大円および極はトレン  
 チ内で左横ずれ変位が認められたものを示す。シュミットネット下半球等積投影。



### ⑤考察

下町トレンチに存在するクラックは、走向が N36~66E で傾斜が 70W~85NW、および走向が N45~66W で傾斜が 70E~85W のものが分布する。とくに、F2 および F3 は、北東-南西方向および北西-南東方向で左横ずれ成分をもつものが認められる。また、F2 系および F3 系から求められる最適大円に対する極の姿勢が類似することから、似たようなせん断系で生じた構造であると推定される。また、変位量の大きな F4 の走向傾斜は N89W68S および N62E49SE である。これらのことから、F2 および F3 にあたる北東-南西方向および北西-南東方向にあたるせん断面は、F4 にあたる東-西方向に近い左横ずれの主せん断面による副次的なせん断面である可能性が推定される（図 2.3.51）。この東-西方向に近い左横ずれの主せん断面の想定は、本トレンチ付近の位相不連続ラインの方向である東西方向と調和的である。このことから、熊本地震に先行するイベントでも熊本地震と似たような変動を生じてクラックが発生していたことが示唆される。

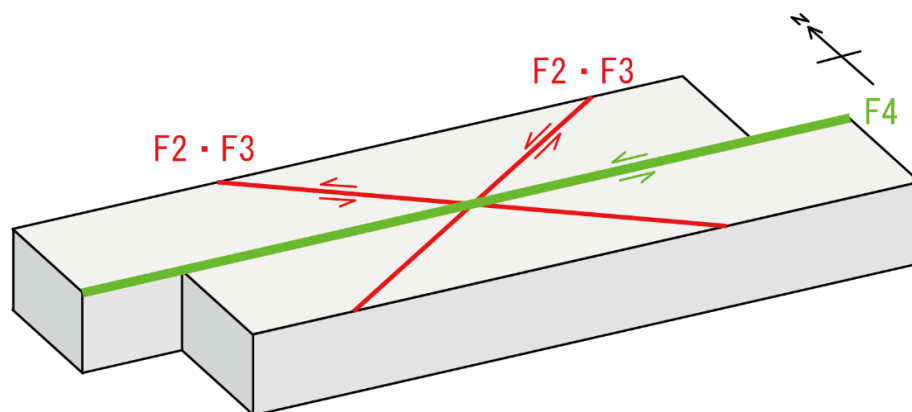


図 2.3.51 推定されるせん断モデル

赤線が F2 および F3、緑線が推定される主せん断面(F4)を示す。

#### (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 2.3.52～図 2.3.54 に、測定結果を表 2.3.7 に示す。測定の結果、56層で  $11,750 \pm 40$  yrBP (バルク) および  $8,280 \pm 30$  yrBP (炭質物)、34層で  $2,760 \pm 20$  yrBP (バルク) および  $2,140 \pm 20$  yrBP (バルク)、31層で  $2,430 \pm 20$  yrBP (バルク)、27層で  $2,630 \pm 20$  yrBP (バルク) の年代値を得た。また、F3断層に取り込まれている砂質堆積物からは  $2,750 \pm 20$  yrBP (バルク) の年代値を得た。

34層から27層の年代測定結果には年代の逆転が生じている。これらの年代測定値は土壌の年代を測定していることから、再堆積によって年代値が古くなっている可能性がある。

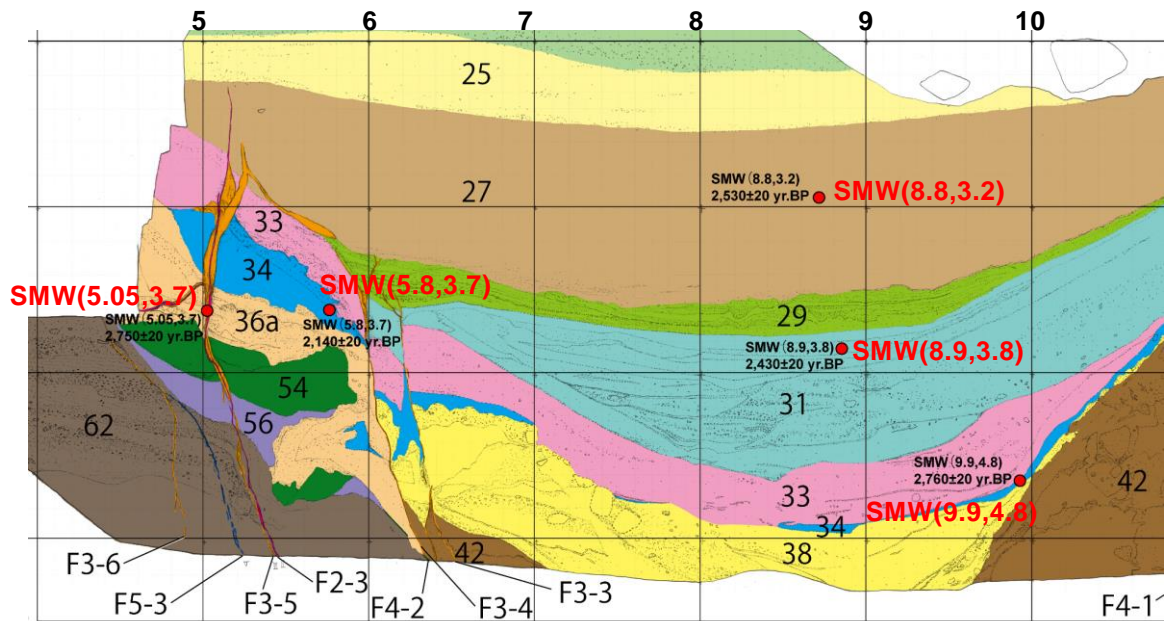


図 2.3.52 下町トレンチ (W 面) 年代試料サンプリング位置

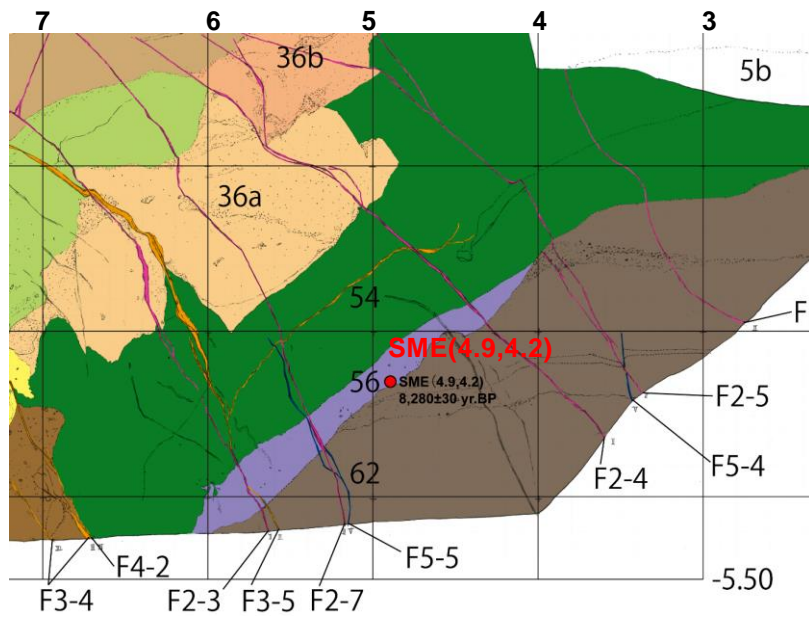


図 2.3.53 下町トレンチ (E 面) 年代試料サンプリング位置 (1)

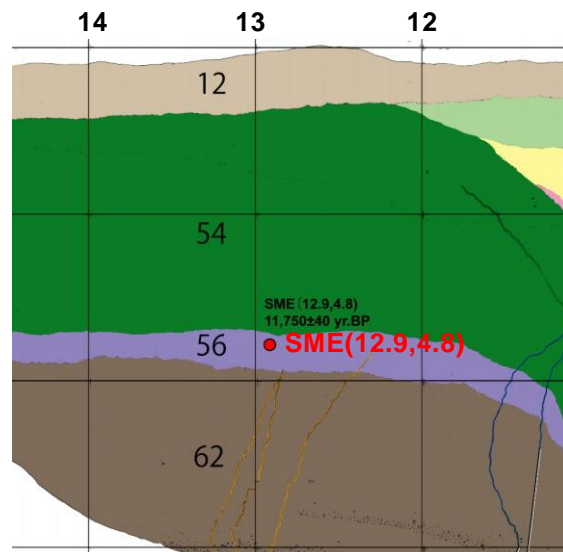


図 2.3.54 下町トレンチ (E 面) 年代試料サンプリング位置 (2)

表 2.3.7 下町トレンチ 放射性炭素年代測定結果

| 測定番号        | 試料名           | 試料形態  | 処理方法 | $\delta^{13}\text{C}$ (‰)<br>(AMS) | $\delta^{13}\text{C}$ 補正あり |              |
|-------------|---------------|-------|------|------------------------------------|----------------------------|--------------|
|             |               |       |      |                                    | Libby<br>Age(yrBP)         | pMC(%)       |
| IAAA-201723 | SMW(8.8,3.2)  | 土壌    | HCl  | -17.42 ± 0.21                      | 2,530 ± 20                 | 72.96 ± 0.22 |
| IAAA-201724 | SMW(8.9,3.8)  | 土壌    | HCl  | -17.30 ± 0.22                      | 2,430 ± 20                 | 73.87 ± 0.22 |
| IAAA-201725 | SMW(5.05,3.7) | 土壌    | HCl  | -14.33 ± 0.29                      | 2,750 ± 20                 | 71.01 ± 0.22 |
| IAAA-201726 | SMW(5.8,3.7)  | 土壌    | HCl  | -16.27 ± 0.23                      | 2,140 ± 20                 | 76.61 ± 0.22 |
| IAAA-201727 | SMW(9.9,4.8)  | 黒褐色土壌 | HCl  | -16.91 ± 0.24                      | 2,760 ± 20                 | 70.90 ± 0.21 |
| IAAA-201728 | SME(12.9,4.8) | 土壌    | HCl  | -21.77 ± 0.25                      | 11,750 ± 40                | 23.15 ± 0.12 |
| IAAA-201729 | SME(4.9,4.2)  | 炭     | AaA  | -24.27 ± 0.25                      | 8,280 ± 30                 | 35.65 ± 0.15 |

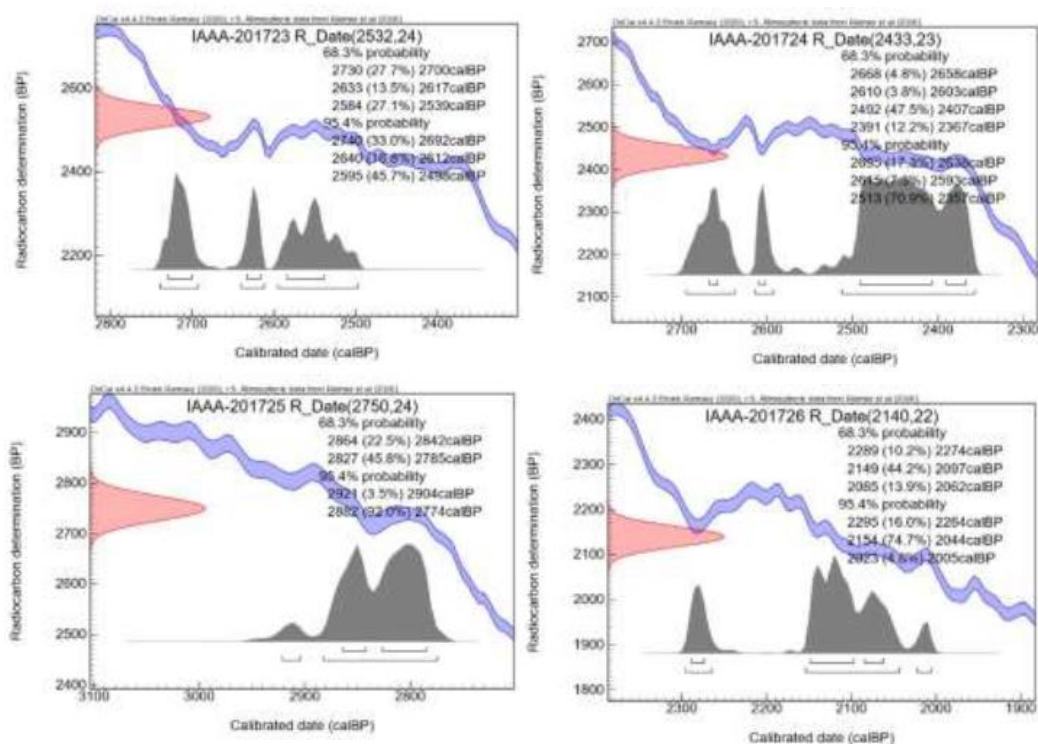


図 2.3.55 下町サンプルの暦年較正年代グラフ (1/2)

左上 : IAAA-201723, 右上 IAAA-201724, 左下 IAAA-201725, 右下 IAAA-201726



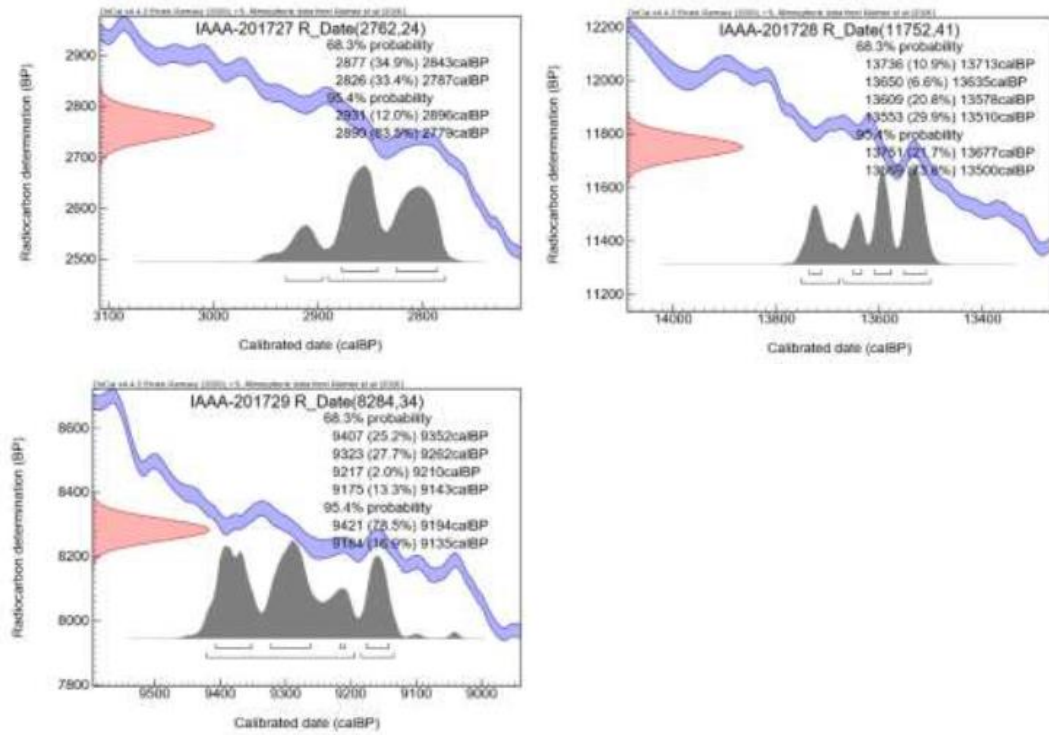


図 2.3.56 下町サンプルの暦年較正年代グラフ (2/2)  
 左上 : IAAA-201727, 右上 IAAA-201728, 左下 IAAA-201729

(5) 火山灰分析

トレンチ内で層状～ブロック状に分布している黄色火山灰を対象に、試料の採取を行い構成粒子の同定を行った。火山灰分析試料のサンプリング位置を図 2.3.57 に示す。

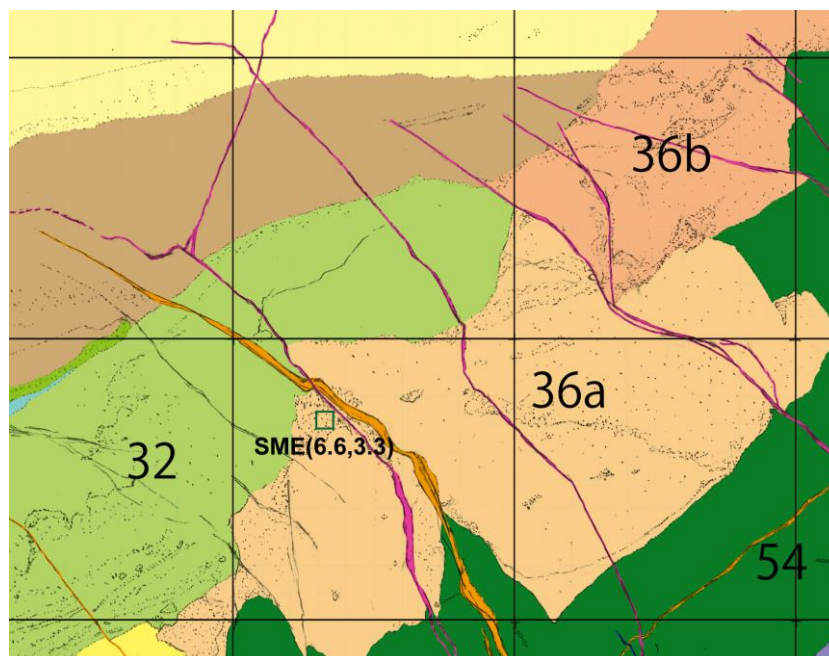


図 2.3.57 黄色火山灰サンプリング位置：緑枠内 SME(6.6,3.3)

①サンプル番号【SME6.6, 3.3】

本試料は下町トレンチ E 面の黄色火山灰をサンプリングしたものである（図 2.3.58）。

試料の状況および観察結果を図 2.3.59 に示す。本試料にはバブルウォール型火山ガラス（pm-gl）、次いで軽石型火山ガラス（pm-gl）が多く含まれ、有色の褐色を帯びた火山ガラスが確認される。

本試料には有色ガラスが確認されることから、鬼界-アカホヤ火山灰（K-Ah）に対比される可能性が高いものと推察される。

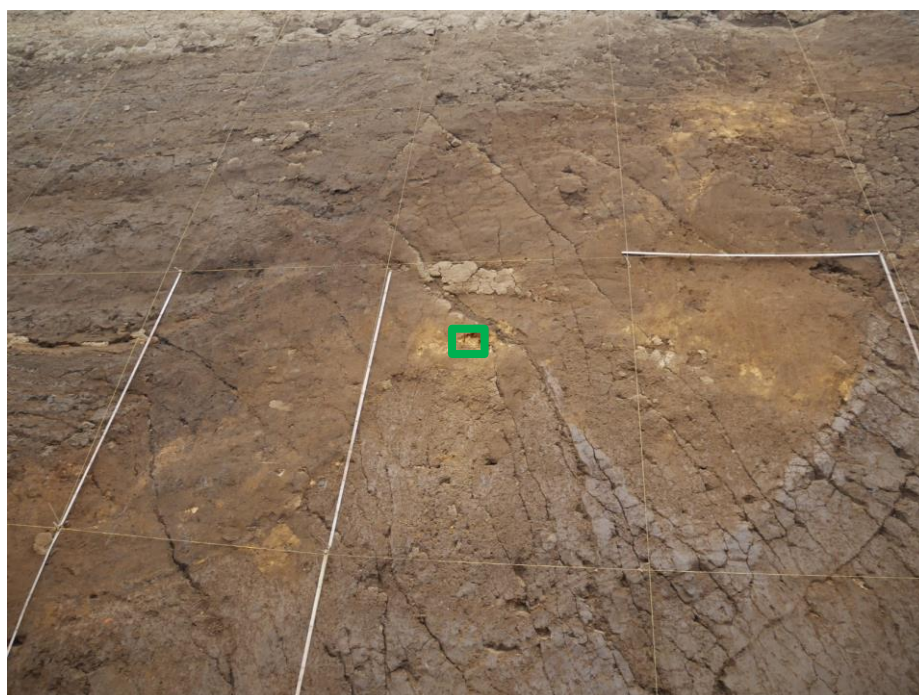


図 2.3.58 黄色火山灰サンプリング位置：緑枠内 SME(6.6,3.3)

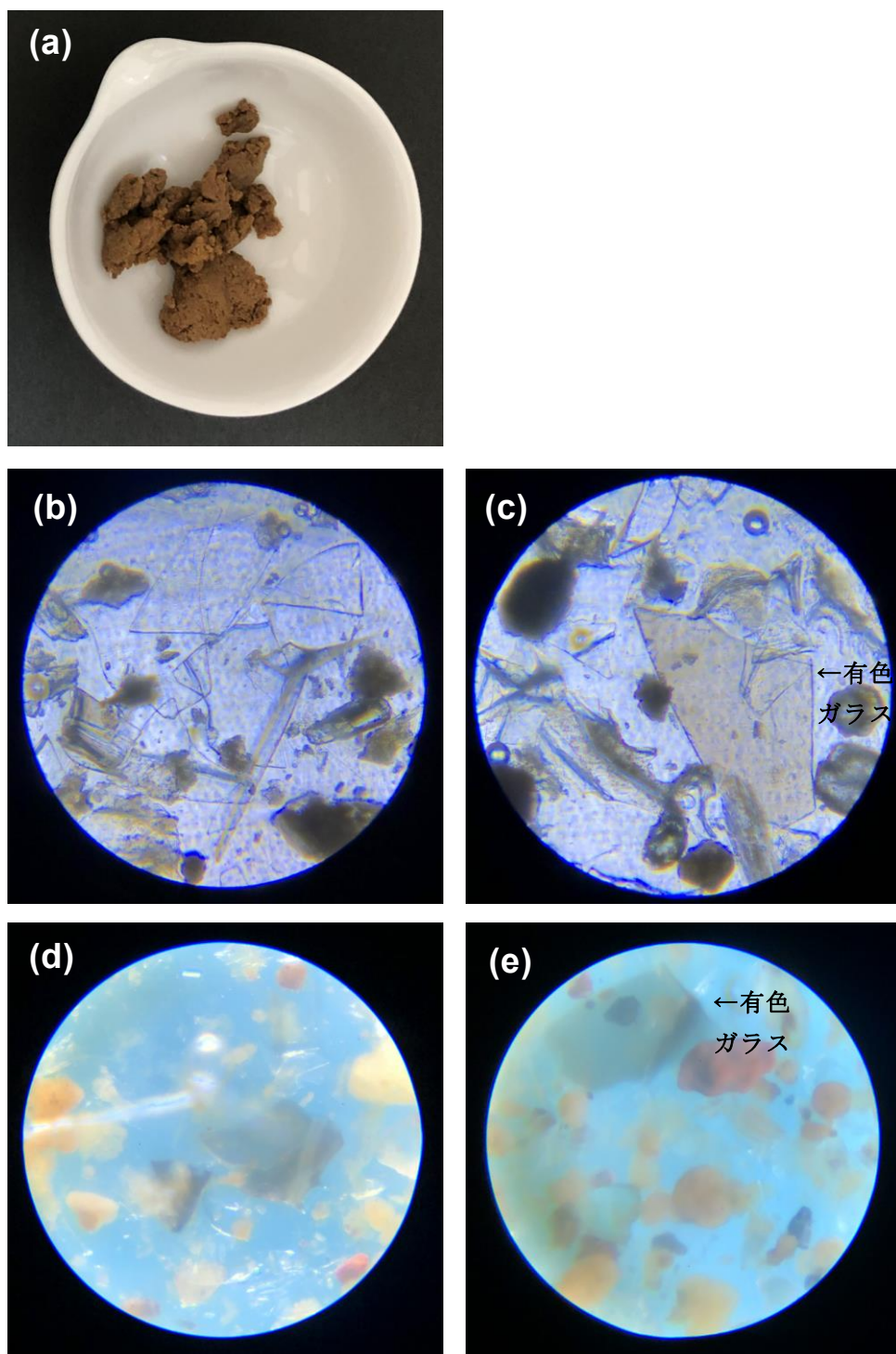


図 2.3.59 SME6.6, 3.3 (a)試料, (b,c)透過光, (d,e)反射光



### 2.3.3.7. 考察

下町トレンチにおける掘削範囲の層序は、下位より段丘構成層（62～52層）、斜面上に堆積した崩積土層（42層）、凹地状の地形を埋積した（38～21層）および人工地盤（1～12層）に区分される（図 2.3.60）。

トレンチ法面では以下に示す少なくとも 5 回の断層活動イベントが識別された。2016 年熊本地震で発生した副断層による地表変状位置において、過去にも繰り返し断層活動があった事が判明した。

**(1) イベントⅠ：**トレンチ西面の埋土直下に多数の開口亀裂が確認される F1 断層群に該当する。開口亀裂は一部で埋土中に達する。また埋土と自然地盤の境界を緩ませている。開口亀裂が人工地盤を切断していることから、この開口を伴う断層は 2016 年熊本地震によって形成されたと判断できる。

**(2) イベントⅡ：**トレンチ壁面全体において 27 層より下位の地層に 1cm 前後の上下変位を与えている F2 断層群に該当する、せん断面に灰色のシルト～砂を挟在する断層である。複数の場所でイベントⅢの F3 断層群を切断していることが確認される。せん断面の最上部は 25 層あるいは 27 層中で尖滅あるいは不明瞭となる。よってこのイベントⅡは、25 層堆積後もしくは堆積中に生じたと考えられる。25 層の下位の 27 層の堆積年代は  $2,530 \pm 20\text{yrBP}$  が得られているものの、31 層で  $2,430 \pm 20\text{yrBP}$ 、34 層で  $2,140 \pm 20\text{yrBP}$ 、 $2,760 \pm 20\text{yrBP}$  となっており年代測定結果に逆転が生じている。これらの年代測定値は土壌の年代を測定していることから、再堆積によって年代値が古くなっている可能性がある。したがって、イベント時期はこれらの地層の年代の中から最も若い年代である  $2,140 \pm 20\text{yrBP}$  以降である可能性が高い。

**(3) イベントⅢ：**トレンチ壁面全体において 29 層より下位の地層に数 cm 前後の上下変位を与えている F3 断層群に該当する。せん断面に灰色～茶褐色の砂を挟在する断層である。底面および東側法面において F4 断層群および F5 断層群を切断していることが確認される。せん断面の最上部は 27 層中に尖滅あるいは境界が不明瞭になることから、27 層堆積中の断層イベントで形成されたものと考えられる。27 層の堆積年代は  $2,530 \pm 20\text{yrBP}$  が得られているものの、31 層で  $2,430 \pm 20\text{yrBP}$ 、34 層で  $2,140 \pm 20\text{yrBP}$ 、 $2,760 \pm 20\text{yrBP}$  となっており年代測定結果に逆転を生じている。これらの年代測定値は土壌の年代を測定していることから、再堆積によって年代値が古くなっている可能性がある。したがって、イベント時期はこれらの地層の年代の中から最も若い年代である  $2,140 \pm 20\text{yrBP}$  以降である可能性が高い。一方、F3 断層群の断層挟在される土壌の年代測定結果は  $2,750 \pm 20\text{yrBP}$  であり、やや古い年代となっている。

**(4) イベントⅣ：**トレンチ壁面において 62 層、56 層、52 層を切断し、34 層で覆われる F4 断層群に該当する。チャンネルを挟み凹地状の構造を形成している。西側壁

面では 42 層あるいは 36 層との岩相境界をなす。せん断面はイベントⅡおよびイベントⅢのせん断面と一部共有することから、繰り返し再活動していることが示唆される。34 層の堆積年代は  $2,760 \pm 20 \sim 2,140 \pm 20 \text{yrBP}$ 、56 層の堆積年代は  $11,750 \pm 40 \sim 8,280 \pm 30 \text{yrBP}$  である。したがって、イベント時期は  $11,790 \text{yrBP}$  以降、 $2,120 \text{yrBP}$  以前である。K-Ah テフラとの直接の関係は不明である。

**(5) イベントⅤ：**62 層内および底面の 56 層内、東側法面では 54 層内で尖滅する F5 断層群に該当する。灰白色の不明瞭な剪断構造である。せん断面は底面で F2,F3,F4 の各断層群により切断される。56 層の堆積年代は  $11,750 \pm 40 \sim 8,280 \pm 30 \text{yrBP}$ 、より上位の層は 34 層の堆積年代の  $2,760 \pm 20 \sim 2,140 \pm 20 \text{yrBP}$  しかないため、イベント活動時期は  $11,790 \text{yrBP}$  以降、 $2,120 \text{yrBP}$  以前である。K-Ah テフラとの直接の関係は不明である。

| 地層名  | 層相    | 火山灰                | 放射性炭素年代<br>yrBP                   | イベント層準                           |         |
|------|-------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------|
| 人工地盤 | 1     | 現耕作土               |                                   |                                  |         |
|      | 2     | 盛土                 |                                   | ← イベントⅠ<br>2016熊本地震              |         |
|      | 5     | a                  | 埋土 (碎石多い)                         |                                  |         |
|      |       | b                  | 埋土 (碎石やや少ない)                      |                                  |         |
|      |       | c                  | 埋土 (砂礫)                           |                                  |         |
|      | 8     | 旧耕作土1              |                                   |                                  |         |
|      | 9     | 耕地整備盛土             |                                   |                                  |         |
| 12   | 旧耕作土2 |                    |                                   |                                  |         |
| 自然地盤 | 21    | チャンネル1 (塊状シルト)     |                                   |                                  |         |
|      | 22    | (シルト質砂)            |                                   |                                  |         |
|      | 25    | (シルト質砂)            |                                   | ← イベントⅡ                          |         |
|      | 27    | (極細粒砂)             |                                   | ← イベントⅢ                          |         |
|      | 29    | (細粒砂)              |                                   | (F3断層挟在物年代<br>$2,750 \pm 20$ )   |         |
|      | 31    | チャンネル2 (シルト-砂互層)   |                                   | $2,530 \pm 20$                   |         |
|      | 33    | 32 (偽礫多数) 砂 (移動土塊) |                                   | $2,430 \pm 20$                   |         |
|      | 34    | 有機質シルト～砂           |                                   | $2,140 \pm 20$<br>$2,760 \pm 20$ |         |
|      | 36    | a                  | アカホヤを含む砂 (移動土塊)                   |                                  |         |
|      |       | b                  | アカホヤを含む砂                          |                                  |         |
|      | 38    | 偽礫を置く含む砂           |                                   |                                  |         |
|      | 42    | 崩積土                | K-Ah<br>約7,300年前                  |                                  |         |
|      | 52    | 細粒砂                |                                   |                                  | ← イベントⅣ |
| 54   | 粘土    |                    | (谷地形の中)                           | } イベントⅤ                          |         |
| 56   | クロボク  |                    | $8,280 \pm 30$<br>$11,750 \pm 40$ |                                  |         |
| 62   | シルト～砂 |                    | (段丘面上)                            |                                  |         |

図 2.3.60 下町トレンチ 総合模式柱状図

#### 2.3.4. 既往成果との比較検討

陣内トレンチにおける調査結果をもとに、既往成果との比較検討を行った。

地震調査研究推進本部地震調査委員会（2013）の「布田川断層帯・日奈久断層帯の活動の時空間分布」に近傍の既往調査成果および過年度成果（福原、陣内）ならびに本調査成果（上陳東、下町）を加筆した結果を図 2.3.61 に示す。加筆した結果は以下のとおりである。堂園地点は Lin et al.(2017)による。下陳地点および寺迫地点は上田ほか（2017）による。寺中地点は堤ほか（2018）による。益城地点は国土交通省都市局（2017）による。黒川地点は遠田ほか（2018）による。黒川地点では上田ほか（2018）でも調査を行っており、黒川電中研とした。阿蘇ファームランド東方（阿蘇 FL 東方）も上田ほか（2018）による。上田ほか（2018）、Lin et al.(2017)、遠田ほか（2018）の年代値を組み合わせると、布田川断層帯の 2016 年熊本地震に先行する断層活動イベントはおおよそ 1,900~2,000cal.BP に限定される。

副断層において、福原トレンチでは、おおよそ 3,000cal.BP~1,000cal.BP に最新の断層活動イベントが確認されており、この活動年代範囲は布田川断層主断層の断層活動時期を含むことから、先行する断層活動イベントは布田川断層本体と同時期である可能性が高いとされた。主断層から離れた副断層位置で掘削された陣内トレンチでは、2016 年熊本地震に先行する断層活動イベントの年代は 9,820 cal.BP 以降 3,410 cal.BP 以前である。この年代は布田川断層主断層で実施されている 2016 年熊本地震に先行するおおよそ 2,000 年前のイベントとは一致しない。しかし、この年代は布田川断層主断層のひとつ前のおおよそ 4,000~9,000 年前に確認される断層活動イベント時期と一致しているとされた。

本年度実施した下町トレンチでは熊本地震に先立つ最新の断層活動イベントを 2,160 cal.BP 以降に 2 回確認できた。これは布田川断層主断層の断層活動時期のおおよそ 4,500 年前~1,500 年前程度および 2,000 年前~800 年前（1 回あるいは 2 回）の活動イベントと重なることから、副断層の活動イベントは布田川断層本体と同時期である可能性が高い。これは福原地区副断層活動年代とも一致する。さらに、11,790 cal.BP 以降 2120 cal.BP 以前の 2 回の活動イベントについても、おおよそ 10,000 年前~2,000 年前および 13,000 年前~10,000 年前の 2 回のイベントと活動イベントが重なり、副断層の活動イベントは布田川断層本体と同時期である可能性が高い。これは陣内地区副断層活動年代 A および B とも一致する。上陳東トレンチでは熊本地震に先立つ断層活動イベントは 90,000 年以降 11,050 cal.BP の少なくとも 2 回が確認される。おおよそ 11,000 年前以降は断層活動イベントが記録されていなかった。

下町トレンチにおいて、熊本地震に先行するおおよそ 2,000 年前以降 2 回およびおおよそ 10,000 年前以降 2 回の合計 4 回の断層活動イベントが識別された。これらは主断層の活動と同時期に活動したことが想定され、過年度の副断層の活動時期とも調和的である。一方で、上陳東トレンチでは、おおよそ 11,000 年前以降、地震活動イベントは確認できなかった。このような副断層における活動履歴の差がどのような理由で生じたかについては、現在のところ不明である。





## 2.4. 断層変位データの収集分析結果

### 2.4.1. 断層変位（2019年以降）最新データの収集・分析

国内外地震に関する断層変位のデータとして、2019年7月にアメリカで発生したリッジクレスト地震及び熊本地震に関する最新の文献を収集した。リッジクレスト地震の現地での変位計測データを用いて断層変位と空間分布の検討を行った。検討はメイントレースと断層変位計測地点との離間距離と変位量の分布から、高尾ほか(2014)による主断層からの距離と断層変位量のグラフと重ねた。その結果、主断層からの距離に対する変位量が全体的に小さい値を示していることが判明した。

ALOS-2のデータを使用してリッジクレスト地震の位相不連続ラインを抽出し、現地調査及び Sentinel-1による地表変状の分布と比較検討した。大きな変位を伴う地表地震断層はピクセルオフセット解析により、小さな変位を伴う地表変状は LC-InSAR 図により抽出が可能であることが判明した。地震発生箇所の植生の状況や SAR 衛星の観測頻度によっては、ALOS-2 以外の衛星を使用して海外の地表地震断層及び副断層の分布状況を捉えることができるので、海外の事例も含めて副断層に関する知見を増やすことが可能であることが分かった。

### 2.4.2. 測地学的情報を用いた変動地形学的解析

地震時の微小な地表地震断層を捉える方法として、これまで干渉 SAR 解析のうち LC-InSAR 図を用いて微小な変位の抽出を行ってきた。LC-InSAR 図で捉えた副断層についてトレンチ調査を行うと、ほぼ全ての地点で先行する断層活動イベントが認定されてきた。一方で LC-InSAR 図では主断層周辺の変位量が大きな箇所では干渉性が悪くなりコヒーレンス値が低く、断層位置を捉えることが出来ない。また、断層沿いの変位量及び変位分布が捉えられないという欠点がある。そこで、本事業では光学衛星による画像マッチングを実施した。その結果、画像マッチングは断層変位が大きな主断層沿いの変位分布の確認は有効であり、LC-InSAR 図の欠点を補完することが出来ることが分かった。干渉 SAR 解析に光学衛星の画像マッチングの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確認することができ、断層分布抽出の精度向上が期待できる。しかしながら現段階では画像マッチングによって副断層の微小変位量までは検出できていない。今後も画像マッチングの範囲を限定してマッチングさせる等、手法の検討が必要である。また、SAR 衛星による 2.5 次元解析を本事業で実施した。様々な解析手法を試みたところ、条件により有効な解析手法が異なることが示唆された。対象とする断層の変動量に応じて解析手法を使い分けることが重要であることが判明した。

熊本地震では布田川断層や日奈久断層、出ノ口断層等の主断層で余効変動が生じていることが分かってきた。副断層箇所において余効変動が生じていないか検証するために、干渉 SAR 時系列解析 (SBAS 解析) を実施した。主断層以外にも余効変動が確認されたが、今年及びこれまでトレンチ調査を実施してきた副断層位置では変位量が微小すぎるのか、余効変動は検出できなかった。

### 2.4.3. 副断層に関する現地調査

測地学的情報を用いた変動地形学的解析により副断層を抽出した。抽出した副断層地点 2 箇所にてトレンチ調査を実施し、いずれのトレンチでも熊本地震に先行する断層イベントが確認できた。

上陳東トレンチは熊本地震を含めて 3 回の断層活動イベントが確認された。熊本地震に先行するイベントⅡおよびⅢは約 90,000 年前以降約 11,000 年前以前の活動であり、イベントⅡの 11,000 年前以降、断層活動が無いとすると、布田川断層本体の活動時期に同時に活動していないこととなる。下町トレンチでは、熊本地震を含めて 5 回の断層活動イベントが確認された。熊本地震に先行するイベントⅡおよびイベントⅢは約 2000 年前以降に生じている。イベントⅣは約 10,000 年前以降約 2,000 年前以前の活動であり、イベントⅤは 10,000 年前より以前の活動である。これらの活動年代は布田川断層本体の活動年代とも整合的であり、同時に活動している可能性がある。

これまでの副断層位置でのトレンチの結果、どの副断層も布田川断層本体の断層活動と同時に活動していると解釈可能であった。上陳東トレンチのように布田川断層本体と同時に活動しない副断層はどのようなところに位置しているのか今後検討していく必要がある。

## 2.5. 参考文献

本章における参考文献一覧を以下に示す。

- 1) Ann, J., J. Thompson, P. Belle, C. Colin, D. Timothy, B. K. E. Scott, G. Ryan, C. DuRoss, L. Tyler, K. Kendrick, H. Elizabeth, P. Ian, B. Swanson, and S. Gordon (2020), Evidence of Previous Faulting along the 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Ruptures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp. 1427-1456
- 2) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2375–2383.
- 3) Chen, K., P-A. Jean, S. Aat, C. Milliner., Z. Fu, and C. Shi (2020), Cascading and pulse-like ruptures during the 2019 Ridgecrest earthquakes in the Eastern California Shear Zone. *Nature Communications*, Vol.11, 22
- 4) Daniel, P. J., B. L. James, R. M. Carla, K. Thomas, P. J. Alexandra, A. Sinan, A. Stephen, A. P. Jean, B. Jeffrey, B. Steven, B. Nicolas, B. Scott, B. Kelly, B. Stephan, B. Benjamin, B. Thomas, B. Paul, C. Colin, D. Timothy, D. Michael, D. Jaime, D. Stephen, D. James, D. Andrea, C. DuRoss, T. Ericksen, E. Frost, F. Gareth, G. Ryan, G. Nicholas, G. Carlos, H. Elizabeth, H. Alexandra, H. John, H. Janis, C. Hitchcock, H. Peter, H. Kenneth, K. Katherine, K. Richard, K. Ozgur, L. Tyler, L. Robert, M. Christopher, M. Maxime, M. James, M. Devin, M. Christopher, M. Daniel, M. Alexander, N. Stephanie, N. Johanna, O. Matt, O. Brian, O. Michael, P. Salena, P. Jason, P. Belle, P. Ian, P. Cynthia, R. Nathaniel, S. David, S. Katherine, S. Gordon, S. Drake, S - K. Bridget, S. Eleanor, S. Brian J., T. Jessica, V. F. T. Jerome, V. Joshua, A. Williams, X. Xu, J. Zachariasen, Z. Jade, and Z. Robert (2020), Documentation of Surface Fault Rupture and Ground - Deformation Features Produced by the 4 and 5 July 2019 Mw 6.4 and Mw 7.1 Ridgecrest Earthquake Sequence, *Seismological Research Letters* Vol.91, 5, pp2942-2959
- 5) DuRoss, B. C., D. R. Gold, E. T. Dawson, M. S. Katherine, K. J. Katherine, A. O. Sinan, J. A. Stephen, J. Bachhuber, B. Steven, B. E. K. Scott, B. Luke, B. A. Benjamin, B. Thomas, W. B. Paul, C. Colin, D. Michael, J. Delano, D. F. James, F. Erik, G. Nick, H. K. Elizabeth, H. E. Alexandra, L. H. Janis, H. Christopher, H. Kenneth, J. T. Jessica, K. Richard, K. Ozgur, L. Tyler, M. Christopher, M. S. Devin, M. Christopher, M. Alexander, O. Brian, P. Jason, P. Belle, P. J. Alexandra, P. Ian, P. J. Daniel, S. Gordon, S. Eleanor, S. Brian, T. Kate, T. Jerome, V. Francesca, A. Williams, and Z. Robert (2020), Surface Displacement Distributions for the July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Ruptures *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp. 1400-1418
- 6) Elizabeth, S. C. (2020), Complex Rupture of an Immature Fault Zone: A Simultaneous Kinematic Model of the 2019 Ridgecrest, CA Earthquakes. *Seismological Research Letters* Vol.91, 4, pp. 1952-1960

- 7) Fielding, J. E., Z. Liu, O. L. Stephenson, M. Zhong, C. Liang, A. Moore, S - H. Yun, and M. Simons (2020), Surface Deformation Related to the 2019 Mw 7.1 and 6.4 Ridgecrest Earthquakes in California from GPS, SAR Interferometry, and SAR Pixel Offsets. *Seismological Research Letters* Vol.91, 4, pp. 2035-2046
- 8) Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, and P. A. Rosen (2000) : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2049-2052.
- 9) Fujiwara, S, N. Takayuki, and Y. Morishita (2020), Detection of triggered shallow slips caused by large earthquakes using L-band SAR interferometry. *Earth, Planets and Space* 72:119
- 10) Goldberg, E. D., D. Melgar, V. J. Sahakian, A. M. Thomas, X. Xu, B. W. Crowell, and J. Geng (2020), Complex Rupture of an Immature Fault Zone: A Simultaneous Kinematic Model of the 2019 Ridgecrest, CA Earthquakes *Geophysical Research Letters* Vol. 47, 3
- 11) Hashimoto, M. (2020), Postseismic deformation following the 2016 Kumamoto earthquake detected by ALOS-2/PALSAR-2. *Earth, Planets and Space* Vol 72, 191
- 12) He, P., Y. Wen., C. Xu., and Y. Chen (2019), Complete three-dimensional near-field surface displacements from imaging geodesy techniques applied to the 2016 Kumamoto earthquake. *Remote Sensing of Environment*, 232 (2019), 111321
- 13) Himematsu, Y., and M. Furuya (2020), Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Associated With the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Revealed by PALSAR - 2 Pixel Tracking and InSAR. *Earth and Space Science*, Vol. 7, 10
- 14) 岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・細矢卓志・竹内峻・後藤拓実・住谷侑也・西口颯真 (2020) 布田川断層帯と日奈久断層帯の境界部の活動履歴－熊本県御船町高木における 2016 年地震断層のトレンチ調査－, 日本活断層学会 2020 年秋季学術大会講演予稿集
- 15) Jan, M. V. and S. H. Christopher(1998), The process zone: A microstructural view of fault growth. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, B6, pp.12223-12237
- 16) Jin, Z. and F. Yuri (2020), Finite Slip Models of the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence Constrained by Space Geodetic Data and Aftershock Locations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp. 1660-1679
- 17) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「布田川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂)」, [http://jishin.go.jp/main/chousa/13feb\\_chi\\_kyushu/k\\_11.pdf](http://jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_11.pdf), 2013.
- 18) 小林知勝・飛田幹男・村上亮 (2011) 局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析, *測地学会誌*, 57, 71-81
- 19) 国土交通省 (2017) 熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する報告書 最終報告, 126pp (令和元年 7 月に最終報告の一部を修正) [http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi08\\_hh\\_000034.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi08_hh_000034.html)
- 20) Liu, C., T. Lay, E. E. Brodsky, D. C. Kelian, and X. Xiong (2019), Coseismic Rupture Process of the Large 2019 Ridgecrest Earthquakes From Joint Inversion of Geodetic and Seismological Observations. *Geophysical Research Letters* Vol. 46, pp.11820-11829



- 21) Lin A., P. Chen, T. Satsukawa, K. Sado, N. Takahashi, and S. Hirata (2017), Millennium Recurrence Interval of Morphogenic Earthquakes on the Seismogenic Fault Zone That Triggered the 2016 Mw 7.1 Kumamoto Earthquake, Southwest Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 6, pp. 2687–2702
- 22) Milliner, C., D. Andrea (2020), Using Daily Observations from Planet Labs Satellite Imagery to Separate the Surface Deformation Between the July 4th Mw6.4 Foreshock and July 5th Mw7.1 Mainshock During the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence. *Seismological Research Letters* Vol.91, 4, pp.1986-1997
- 23) Milner, R. K. (2020), Operational Earthquake Forecasting during the 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence with the UCERF3 - ETAS Model, *Seismological Research Letters* Vol.91, 3, pp.1567-1578
- 24) 三宅 弘恵 (2020) 2019 年カリフォルニア・リッジクレスト地震, *地震ジャーナル*, Vol.69, pp.15-30
- 25) 文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学 (2017) 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 年度成果報告書, 270pp, 地震調査研究推進本部, [https://www.jishin.go.jp/database/project\\_report/kumamoto\\_sogochousa-h28/](https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kumamoto_sogochousa-h28/) 2018/3/12 確認
- 26) Nanjo, Z. K. (2020), Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? *Nature*
- 27) 小俣 雅志・郡谷 順英・三五大輔 (2016) 干渉 SAR を使用した新たな地表地震断層検出方法, 日本活断層学会 2016 年秋季学術大会講演予稿集
- 28) 小俣雅志・郡谷順英・三五大輔・渋谷典幸・谷口薫 (2017a) LC-InSAR 解析によって抽出される平成 28 年熊本地震の微小な地表変状, 日本活断層学会 2017 年秋季学術大会講演予稿集
- 29) 小俣 雅志・三五大輔・郡谷 順英・谷口 薫 (2017b) 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震において新たな干渉 SAR 解析によって見出された地表変状, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017 SSS12-11*
- 30) Parker, A. G. (2020), Repeatable Source, Path, and Site Effects from the 2019 M 7.1 Ridgecrest Earthquake Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, 1530-1548
- 31) Paula, R. J., A. N. E. William, B. Edouard, B. Alex, G. Paul, B. R. Christopher, B. Martin, C. Hai, L. R. Edwards, F. Michael, G. M. Pieter, G. P. Thomas, H. Irka, H. J. Timothy, H. G. Alan, H. A. Konrad, K. Bernd, M. W. Sturt, M. Raimund, P. G. Jonathan, P. Charlotte, P. Johannes, R. W. Ron, R. A. David, E. M. Scott, S. R. John, T. M. S. Christian, W. Lukas, A. Florian, B. Ulf, C. Manuela, F. M. Simon, F-S. Alexandra, F. Ronny, K. Peter, K. Sabrina, M. Fusa, O. Jesper, R. Frederick, M. Sakamoto, S. Adam, and T. Sahra (2020), The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP), *Radiocarbon* 62, 4, pp.725-757

- 32) Qiu, Q., S. Barbot, T. Wang, and S. Wei (2020), Slip complementarity and triggering between the foreshock, mainshock, and afterslip of the 2019 Ridgecrest rupture sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol.110, 4, pp.1701-1715
- 33) Ross, E. Z., I. Benjamín, Z. Jia, S. L. Oliver, M. Zhong, X. Wang, Z. Zhan, S. Mark, E. J. Fielding, S-H. Yun, H. Egill, M. W. Angelyn, Z. Liu, and J. Jung (2019), Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence. *Science* Vol.366, 6453, pp. 2687–2702
- 34) 三五大輔・小俣雅志・郡谷順英 (2016) 干渉 SAR 解析と地形表現図とを組み合わせた新たな地表断層抽出手法の研究, 日本リモートセンシング学会 第 61 回 (平成 28 年度秋季) 学術講演会論文集, 147-148
- 35) Sarah, E. M., S. K. Jessie, B. J. Julian, C. S. Elizabeth, B. S. Annemarie, K. L. Deborah, M. Hoshiba, and Y. Kodera (2020), Real-Time Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Method during the 2019 M 6.4 and 7.1 Ridgecrest, California, Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp.1887-1903
- 36) Scott, C., C. Johann, K. Yann, N. Edwin, T. Maruyama, T. Chiba, and A. Ramon (2019), The 2016 M7 Kumamoto, Japan, Earthquake Slip Field Derived From a Joint Inversion of Differential Lidar Topography, Optical Correlation, and InSAR Surface Displacements. *Geophysical Research Letters* Vol. 46, 12, pp.6341-6351
- 37) Stewart, P. J. (2019) Preliminary Report on Engineering and Geological Effects of the July 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence. *Geotechnical Extreme Event Reconnaissance Association*, Vol.64, 69
- 38) 住谷侑也・岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・竹内峻・後藤拓実・西口颯真 (2020) 2016 年熊本地震の地表地震断層に沿った本震後の変位の分布とその特徴, 日本活断層学会 2020 年秋季学術大会講演予稿集
- 39) Susan, E. H. (2020), Near-Field Ground Motions from the July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence. *Seismological Research Letters* Vol.91, 3, pp.1542-1555
- 40) 高尾 誠・土山滋郎・安中 正・栗田哲史 (2013) 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用, 日本地震工学会論文集, 13, 1, 17-36
- 41) 高尾 誠・上田圭一・安中 正・栗田哲史・中瀬 仁・京谷孝史・加藤準治 (2014) 確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上, 日本地震工学会論文集, 14, 2, 16-36
- 42) 遠田晋次・鳥井真之・奥野 充・今野明咲香・小野大輝・高橋直也 (2019) 熊本地震地表地震断層の阿蘇カルデラ内の完新世活動履歴－南阿蘇村黒川地区トレンチ調査－, *活断層研究*, 51, 13-25, 2019
- 43) 遠田晋次・鳥井真之・小俣雅志・三五大輔・石澤 堯史 (2020) 平成 28 年熊本地震後に日奈久断層北端部で確認された余効すべり, 地震学会 2020 年秋季学術大会講演予稿集
- 44) 遠田晋次・鳥井真之・小俣雅志・三五大輔・石澤 堯史 (2020) 日奈久断層北端部で確認された熊本地震の地表余効すべり, 日本活断層学会 2020 年秋季学術大会講演予稿集

- 45) 堤 浩之・遠田 晋次・後藤 秀昭・熊原 康博・石村 大輔・五味 雅宏・高橋 直也・谷口 薫・小俣 雅志・郡谷 順英・浅野 公之・岩田 知孝 (2018) 熊本県益城町寺中における 2016 年熊本地震断層のトレンチ調査, 活断層研究 49, P.31-39
- 46) 上田 圭一・宮脇 理一郎・家村 克敏・横山 俊高・宮脇 明子 (2017) 2016 年熊本地震時に出現した 2 系統の地表地震断層群の活動履歴: 益城町寺迫および下陳における都連著調査結果 (序報) 日本地質学会第 124 年学術大会講演要旨, p253.
- 47) 上田 圭一・宮脇 理一郎・家村 克敏・横山 俊高・宮脇 明子 (2018) 2016 年熊本地震時に出現した 2 系統の地表地震断層群の活動履歴: 益城町および南阿蘇村におけるトレンチ調査 (序報) 日本地球科学連合 2018 年大会 S-SS08
- 48) Wang, K. and B. Roland (2020), Co- and Early Postseismic Deformation Due to the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence Constrained by Sentinel-1 and COSMO-SkyMed SAR Data. *Seismological Research Letters* Vol.91, 4, pp.1998-2009
- 49) Wang, K., D. S. Douglas, E. Tinti, B. Roland, and T. Taira (2020), Rupture Process of the 2019 Ridgecrest, California Mw 6.4 Foreshock and Mw 7.1 Earthquake Constrained by Seismic and Geodetic Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp. 1603-1626
- 50) William, D. B., Hayes G. P., and Ryan D. G. (2019), The July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence: Kinematics of Slip and Stressing in Cross - Fault Ruptures. *Geophysical Research Letters* Vol. 46, 21, pp.11859-11867
- 51) William, H. S., W. J. Maximilian, M. Warner, A. R. David, J. D. David, M. Kevin, F. Edward, and A. Michael (2020), Pseudoprospective Evaluation of UCERF3 - ETAS Forecasts during the 2019 Ridgecrest Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp. 1799-1817
- 52) Xu, X., S. T. David, and K. B. Smith (2020), Coseismic Displacements and Surface Fractures from Sentinel-1 InSAR: 2019 Ridgecrest Earthquakes. *Seismological Research Letters* Vol.91, 4
- 53) Yohai, M., Z. Alon, I. Asaf, G. Baer, and H. James (2020), Fault Rapture during the July 2019 Ridgecrest Earthquake Pair from Joint Slip Inversion of InSAR, Optical Imagery, and GPS. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, 4, pp. 1627-1643
- 54) Youngs, R.R., A. J. Walter, R. A. Ernest, R. R. Alan, A. P. Jon, S. B. David, M. P. James, D. I. Diane, F. J. Christopher, S. H. Frank, R. M. Albert, Y. C. James, A. W. Laurence, S. D. Kenneth, B. L. Ronald, L. K. K. Peter, S. B. Robert, C. M. Polo, O. W. Dennis, C. J. Kevin, P. K. Silvio, P. S. David, W. W. John, O. S. Susan, and T. R. Gabriel (2003), A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), *Earthquake, Spectra*, Vol.19, 1, pp.191-219