

令和 4 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 5 年 3 月

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

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

1 章 はじめに	1-1
1.1. 事業の概要	1-1
1.1.1. 事業実施の背景	1-1
1.1.2. 事業実施の基本方針	1-1
1.1.3. 事業内容	1-1
1.2. 用語の定義	1-4
1.3. 本事業で扱う主断層・副断層の考え方	1-6
1.4. 参考文献	1-8
2 章 副断層に関する調査	2-1
2.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討	2-1
2.1.1. 複数ペアを用いた干渉 SAR 解析 (LC-InSAR 図)	2-1
2.1.2. 光学画像相関解析を用いた変位量図の作成	2-39
2.1.3. カルデラ内の光学画像相関	2-39
2.1.4. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討結果	2-46
2.2. 測地学的手法によって検出された変位量の検討	2-47
2.2.1. 主断層沿いの変位量分布	2-48
2.2.2. 主断層から離れた位置の変位量分布	2-51
2.2.3. 測地学的手法によって検出された変位量の検討結果	2-61
2.3. 物理探査による地下構造の検討	2-62
2.3.1. 地中レーダ探査の原理	2-62
2.3.2. 地中レーダ探査結果	2-69
2.3.3. 物理探査による地下構造の検討結果	2-129
2.4. ボーリング調査による地質構造の検討	2-130
2.4.1. ボーリング調査概要	2-130
2.4.2. 福原地区	2-131
2.4.3. 小園地区	2-151
2.4.4. ボーリング調査による地質構造の検討結果	2-177
2.5. 地質構造及び副断層の 3 次元形状把握のための解析手法の検討	2-178
2.5.1. 3 次元化を行うための 2 次元データの作成	2-178
2.5.2. 3 次元モデルの作成	2-187
2.5.3. 3 次元形状把握のための解析手法の検討結果	2-192
2.6. 表層付近の副断層の性状及び活動履歴の検討	2-193
2.6.1. トレンチ調査概要	2-193
2.6.2. トレンチ調査結果	2-199
2.6.3. ¹⁴ C 放射性炭素年代測定結果のとりまとめ	2-230

2.6.4.	活断層活動履歴のとりまとめ	2-242
2.6.5.	表層付近の副断層の性状及び活動履歴の検討結果	2-247
2.7.	参考文献	2-248
3 章	断層変位に関する室内模擬実験	3-1
3.1.	模擬地盤の物性	3-1
3.1.1.	温度湿度状態	3-1
3.1.2.	模擬地盤の物性試験	3-4
3.1.3.	相似則について	3-16
3.1.4.	模擬地盤の物性のまとめ	3-17
3.2.	横ずれ断層型の室内模擬実験	3-18
3.2.1.	実験装置および実験方法	3-18
3.2.2.	実験結果	3-19
3.2.3.	実験結果による副断層形成過程	3-49
3.2.4.	実験で得られた副断層と既往距離減衰データとの比較	3-65
3.2.5.	横ずれ断層型室内模擬実験まとめ	3-70
3.3.	X線CT撮影による内部せん断構造	3-71
3.3.1.	室内模擬実験	3-73
3.3.2.	コア試料	3-83
3.3.3.	まとめ	3-85
3.4.	断層変位に関する室内模擬実験のまとめ	3-86
3.4.1.	模擬地盤の物性	3-86
3.4.2.	横ずれ断層型の室内模擬実験	3-86
3.4.3.	X線CT撮影による内部せん断構造	3-86
3.4.4.	課題	3-87
3.5.	参考文献	3-88
4 章	断層変位に関する数値解析	4-1
4.1.	事前検討	4-1
4.1.1.	解析モデルについて	4-1
4.1.2.	粒径分布の影響について	4-2
4.1.3.	大変形ひずみの評価方法について	4-4
4.1.4.	微細粒子の付着力のモデル化について	4-5
4.2.	強度パラメータ同定のための要素シミュレーション	4-7
4.2.1.	要素試験結果に基づく目標強度	4-7
4.2.2.	要素シミュレーションの解析モデル	4-8
4.2.3.	要素シミュレーション結果	4-9
4.3.	室内模擬実験の再現解析	4-14
4.3.1.	モデル化範囲と境界条件	4-14
4.3.2.	解析ケースと解析モデル	4-14

4.3.3.	再現解析結果	4-17
4.4.	断層変位に関する数値解析のまとめ	4-41
4.5.	参考文献	4-42
5 章	まとめ	5-1
5.1.	副断層に関する調査	5-1
5.1.1.	地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討	5-1
5.1.2.	画像相関解析により検出された変位量の検討	5-1
5.1.3.	物理探査による地下構造の検討	5-2
5.1.4.	ボーリング調査による地質構造の検討	5-2
5.1.5.	地質構造及び副断層の3次元形状把握のための解析手法の検討	5-3
5.1.6.	表層付近の副断層の性状及び活動履歴の検討	5-3
5.2.	断層変位に関する室内模擬実験	5-4
5.3.	断層変位に関する数値解析	5-5

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

断層破壊によって、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が地表に発生す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、地震による断層破壊によって発生する変位の位置や量について評価手法、適用条件や適用範囲について把握することは重要である。

また、最近の測地学的な情報の取得技術及び解析手法の発展により、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も微小な断層変位が生じていることが認識されてきている。これら主断層から離れた位置に生じた副断層変位に関する知見を蓄積することが重要となってきている。

1.1.2. 事業実施の基本方針

断層変位の評価手法の構築は非常に重要であるが、強震動観測記録などと異なり、観測データに乏しいことなどから課題が多い。本事業では、実際の活断層の活動による地表変位に関する測地学的情報、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、多様な観点から副断層変位に対してアプローチし、副断層変位に関する基礎的な知見を蓄積することとした。

1.1.3. 事業内容

1.1.3.1. 副断層に関する調査

内陸地殻内地震のうち、地表に断層変位を伴う規模の大きな地震は、再来周期が長く、断層変位データが取得できる地震は限定されている。特に、既存の活断層トレースから離れた場所で副次的に生じた断層は、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ことが特徴である。特に日本の場合は、侵食等により副断層がそのままの状態では保存されることがなく、適時に情報収集及び現地調査を行うことが重要である。また、近年、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、広域の地殻変動及び微小な変位を把握できることから、断層変位評価への活用が期待されている。

本事業では干渉 SAR 解析データ等に基づく副断層変位の抽出、及び副断層に着目した現地調査を実施し、副断層生成プロセスに関する知見を得ることとした。まず、主断層から離れた場所で生じた副断層の検出手法の高度化を行うため、地表地震断層が現れた 2016 年熊本地震を対象とし、SAR 衛星データを用いた干渉 SAR 解析および光学衛星データを用いた画像相関解析を行い、地表変状発生位置の定量的な抽出方法及び検出された変位量の検討を実施した。そして、こうして抽出された位相不連続ラインのうち熊本県大津町平川馬場地区において、トレンチ調査（8m×28m×深さ 3～4m 程度）を実施し、表層付近の副断層の性状及び活動履歴について検討した。さらに、位相不連続ラインが確認された熊本県大津町平川地区（本事業にてトレンチ調査を実施した地点近傍の 3 箇所）及び同県南阿蘇村下野地区（1 箇所）において物理探査（地中レーダ探査）を実施し、調査地点の地下構造を検討した。また、過年度事業（構造計画研究所, 2018; パスコ, 2022）でトレンチ調査を実施した熊本県益城町福原地区及び同県西原村小園地区においてボーリング（φ 86mm、福原地区 3 本、小園地区 4 本）を実施し、物理探査によって推定される地下構造に関して地質構造の検討を行った。

1.1.3.2. 断層変位に関する室内模擬実験

既往研究では、副断層を含めて断層の変位量、主断層からの相対位置等の情報を基に、断層変位の評価式が提案されている（例えば、高尾ほか, 2013）。ただし、こうした評価式による副断層変位の予測値は、主断層からの距離の増加によって減少する傾向が見られるものの、ばらつきが大きいことが特徴である。断層変位評価における不確かさを低減するため、地盤の物性値による影響の調査を含め、室内模擬実験を活用して副断層の生成プロセスを検討することが重要である。

本事業では、横ずれ断層型の室内模擬実験（模型地盤の縦横及び深さ:1 辺約 1m 以下）を実施し、断層変位に係る知見を蓄積した。室内模擬実験は、模擬地盤物性が異なる実験を 2 ケース、模擬地盤層厚が異なる実験を 2 ケース、計 4 ケース実施することとし、1 ケースあたり 2 回実験を行い、断層変位分布（出現位置、変位量）の数値データを取得した上で、副断層に係る知見を整理した。また、室内模擬実験において、模擬地盤の物性試験を実施して、4 章の数値解析の際に必要な物性情報を取得した。

1.1.3.3. 断層変位に関する数値解析

地表に断層が現れた内陸地殻内地震は、地震時の地下の震源断層の破壊によるせん断変形が表層まで至る過程において、基盤から地表までの距離に対応して 3 次的に広がりを持つことが既往研究から知られている。既往の室内模擬実験においても、このような広がりを持った表層変状が進展する破壊過程が確認されている（例えば、Takemura et al., 2018）。自然地震及び室内模擬実験においては、それぞれのスケール及び地盤の物性値が大きく異なるため、断層変位の数値解析を実施することにより、両者共通のプロセスを検討することが重要である。

本事業では、3章で実施した横ずれ断層を想定した室内模型実験より4 ケース選定し、その実験結果を再現するため、個別要素法を用いて3次元の数値解析を実施した。なお、用いる数値解析モデルは、3章の模擬地盤物性を参照して構築した。

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。なお、3 章における室内模擬実験データの整理にあたっての副断層の定義については 3.2.4 章を参照。

(6) SAR（Synthetic Aperture RADER、合成開口レーダー）

観測で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する。合成開口レーダーとは、人工衛星などの飛翔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（Low Coherence Interferometric SAR）

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

(9) 位相不連続ライン

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

(10) 画像マッチング

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

(11) ピクセルオフセット

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

(12) DEM 解析（個別要素法）

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

1.3. 本事業で扱う主断層・副断層の考え方

本事業における主断層（変位）及び副断層（変位）の定義は 1.2 に記載の通りであるが、より詳細な考え方は Nurminen et al. (2020) および Nurminen et al. (2022) を踏襲する。ただし、本事業では、Nurminen et al. (2020) の副断層のランキング 1.5、2、21、22、3 を区別せず、これらをまとめて副断層と称することとする。なお、3 章における室内模擬実験データの整理にあたっての副断層の定義については 3.2.4 章を参照。

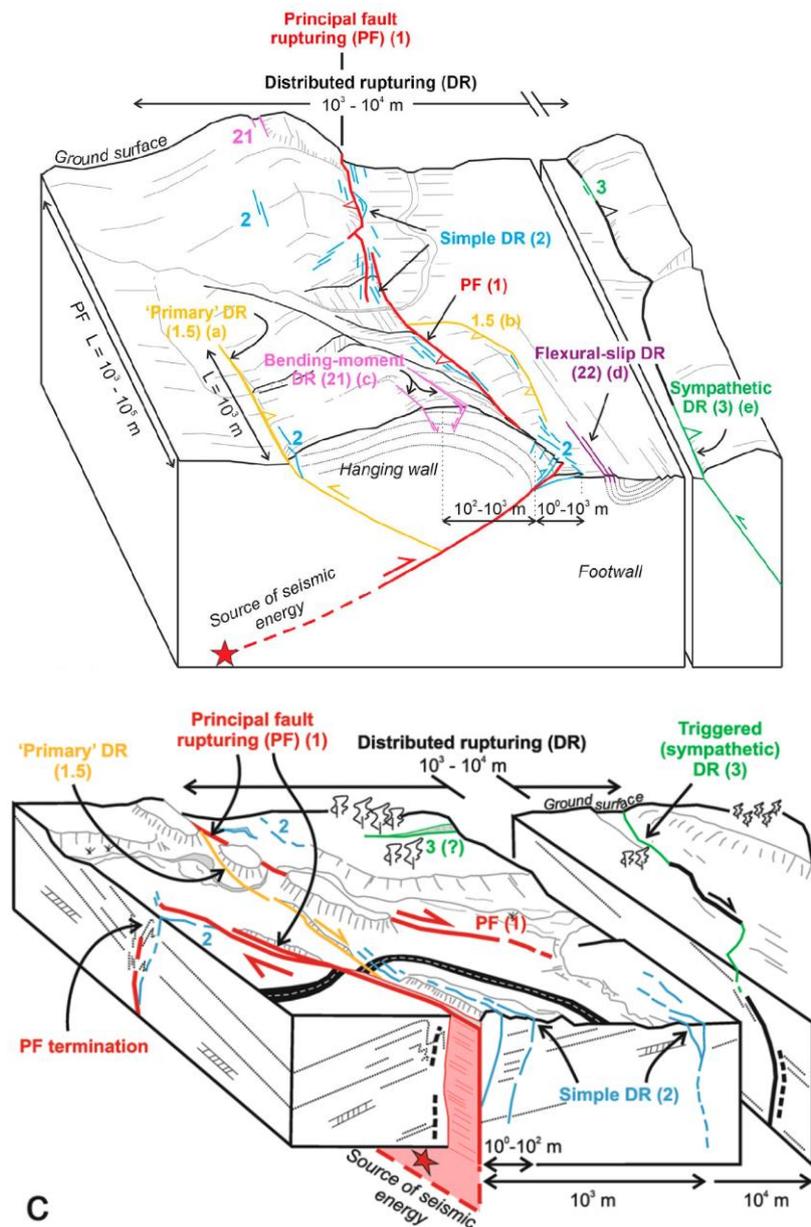
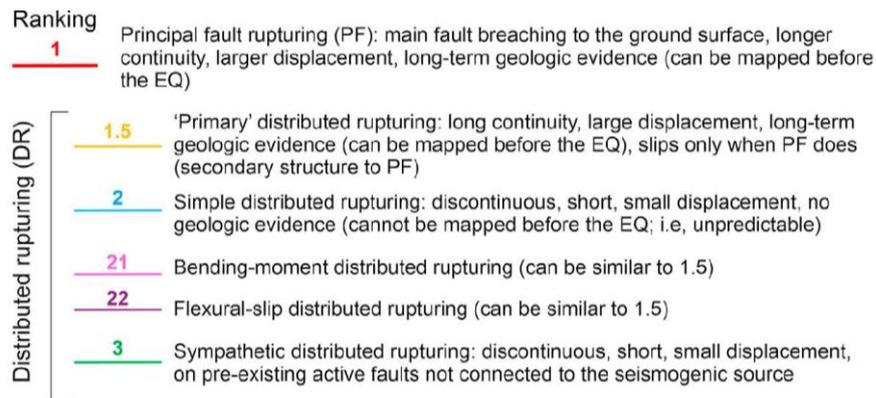


図 1.3.1 本事業における主断層・副断層の概念図

(上図：Nurminen et al., 2022 より、下図：Nurminen et al., 2022 より 引用)



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

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

以下、副断層のランキング。

1.5：“基本的な”副断層：長い連続性、大きな変位、長期的な地質学的証拠を示し（地震前にマッピング可能）、主断層が活動する場合にのみ活動する（主断層の二次的な構造）

2：単純な副断層：不連続、短い、小さな変位、地質学的証拠がない（地震の前にマッピング不可。つまり、予測不可能）

21：構造変形による副断層（1.5に類似している可能性有）

22：層面すべりによる副断層（1.5に類似している可能性有）

3：“同調的な”副断層*：震源断層に連続しない既存の活断層上での不連続、短い、小さな変位

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

1.4. 参考文献

本章における参考文献一覧を以下に示す。

- 1) American Nuclear Society Standards Committee Working Group ANS-2.30, (2015) Criteria for Assessing Tectonic Surface Fault Rupture and Deformation at Nuclear Facilities, American Nuclear Society
- 2) International Atomic Energy Agency (2022) Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations : specific safety guide. IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X ; no.SSG-9 (Rev. 1)
- 3) Nurminen, Fiiia, Paolo Boncio, Francesco Visini, Bruno Pace, Alessandro Valentini, Stéphane Baize, and Oona Scotti (2020), Probability of Occurrence and Displacement Regression of Distributed Surface Rupturing for Reverse Earthquakes, *Frontiers in Earth Science*, Vol. 8, 456.
- 4) Nurminen, F., Baize, S., Boncio, P., Blumetti, A. M., Cinti, F. R., Civico, R., and Guerrieri, L. (2022), SURE 2.0-New release of the worldwide database of surface ruptures for fault displacement hazard analyses, *Scientific Data*, Vol. 9, No. 729.
- 5) 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説明・地震防災への貢献—地表地震断層認定の本質的意義—, *E-journal GEO*, 1, 1, 30-41
- 6) 多田 文男 (1927) 活断層の二種類, *地理学評論*, 3, 10, 980-983
- 7) 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*, 第13巻, 第1号
- 8) Takemura, J., C. Yao, and O.Kusakabe (2018), Development of a fault simulator for soils under large vertical stress in a centrifuge, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 20, 3, 118-131
- 9) 藤原 智 (2019) 干渉 SAR による地殻変動マッピングとお付き合い地震断層, *日本活断層学会 2019 年度秋季学術大会シンポジウム講演予稿集*, 62-63.

2章 副断層に関する調査

2.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討

主断層から離れた場所で生じた副断層の検出手法の高度化を行うため、地表地震断層が現れた 2016 年熊本地震において、SAR 衛星データを用いて干渉 SAR 解析及び光学衛星データを用いて画像相関解析を行い、地表変状発生位置の定量的な抽出方法及び検出された変位量の検討を実施した。

2016 年熊本地震を対象として、主断層から離れた場所で生じた副断層の検出手法として、光学画像による画像相関解析（以下、光学画像相関解析）と干渉 SAR 解析による LC-InSAR 図で検討する。

光学画像相関解析は過年度事業（パスコ, 2021）の画像相関解析において地震前後の空中写真を用いることで、高精度な変位量分布を作成することが可能であることが確認できている。しかながら、地震の直前の空中写真撮影範囲は、熊本地震によって生じた微小な変位分布範囲全域をカバーしておらず、全域を空中写真で検討がなされていない。そこで、空中写真撮影範囲外のエリアである阿蘇カルデラ周辺域において高解像度衛星画像を用いた画像相関解析を実施する。

2.1.1. 複数ペアを用いた干渉 SAR 解析（LC-InSAR 図）

干渉 SAR 解析では、LC-InSAR 図による変位抽出を、定量的な位相不連続ラインの抽出を目指して検討を進めているが、一つのペアの LC-InSAR 図では地震による地表変位以外の誤抽出も生じることが分かってきている。そこで、複数ペアの干渉 SAR 解析を実施して複数の定量的 LC-InSAR 図を作成し、これらを重ね合わせることで、より精度の高い微小な変位分布及び副断層の抽出を実施する。

2.1.1.1. 複数の LC-InSAR 図を用いた変位境界の目視判読

2016 年熊本地震では、ALOS-2 による複数の観測が行われている。一方で、過年度事業（パスコ, 2021）で LC-InSAR 図を使用しているものは 3 軌道分であった。干渉 SAR は衛星視線（以下、LOS）方向の変位しか感度がないため、単一の LC-InSAR 図からでは検出できない変位が存在する。そこで、本事業においては 2016 年熊本地震前後に観測されている ALOS-2 画像 5 軌道を選定して検討を行うこととした。本事業において実施する画像の諸元を表 2.1.1 に、観測方向のイメージを図 2.1.1 に示す。

表 2.1.1 使用する LC-InSAR 図一覧

照射方向	衛星の観測条件	入射角	名前	観測日※		実施年度
				地震後	地震前	
東向照射	南行軌道 左向観測	28.8°	東向_28.8°	2016/4/19	2016/4/15	新規
	北行軌道 右向観測	38.7°	東向_38.7°	2016/4/26	2016/3/29	2020 年度
	北行軌道 右向観測	30.9°	東向_30.9°	2016/4/21	2015/12/3	新規
西向照射	北行軌道 左向観測	21.5°	西向_21.5°	2016/4/19	2016/4/15	小俣ほか 2017
	南行軌道 右向観測	32.8°	西向_32.8°	2016/4/18	2016/3/7	2020 年度

※2016 年熊本地震は、2016 年 4 月 14 日 (M6.5) 及び 2016 年 4 月 15 日 (M7.3) に発生 (気象庁)

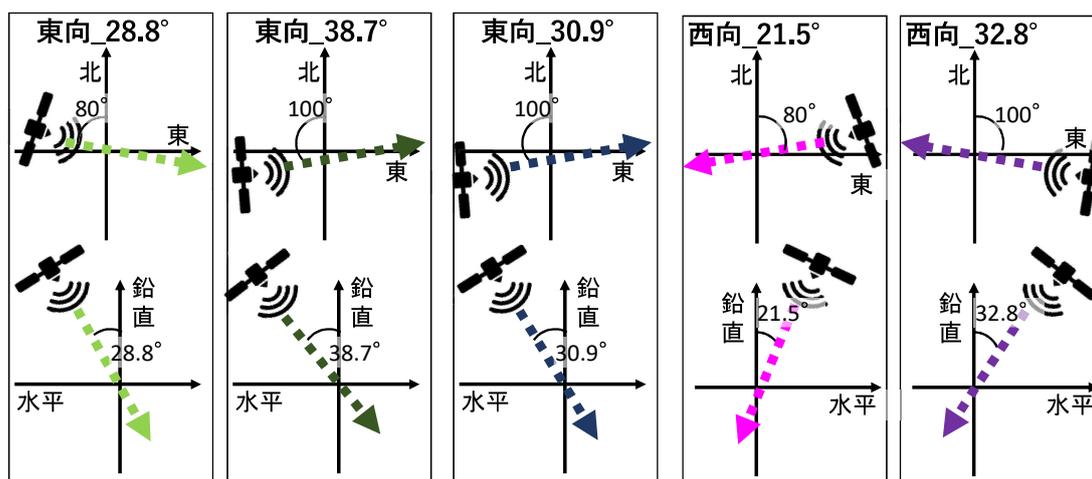


図 2.1.1 5 方向からの観測イメージ

上記の 5 軌道の観測方向の LC-InSAR 図を作成し、それぞれの図から位相不連続ラインの目視判読を行った (図 2.1.2、図 2.1.3、図 2.1.4、図 2.1.5、図 2.1.6)。また、5 軌道の位相不連続ラインを重ね合わせて表示した (図 2.1.7)。以下のことが確認できる。

- ・ 異なる軌道の LC-InSAR 図では位相不連続ラインの位置が異なる
- ・ 観測向きが同じ軌道の位相不連続ラインは似た傾向にあるが、細部が異なる

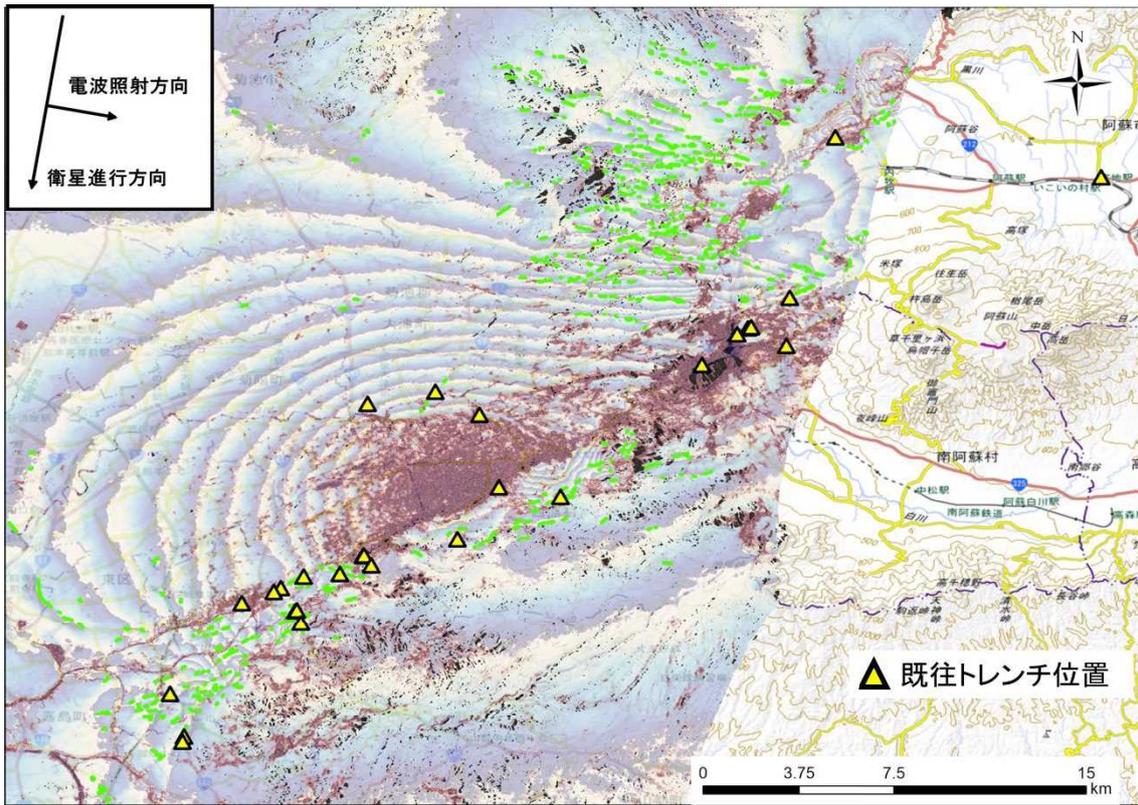


図 2.1.2 東向 $_{28.8^{\circ}}$ の位相不連続ライン判読結果

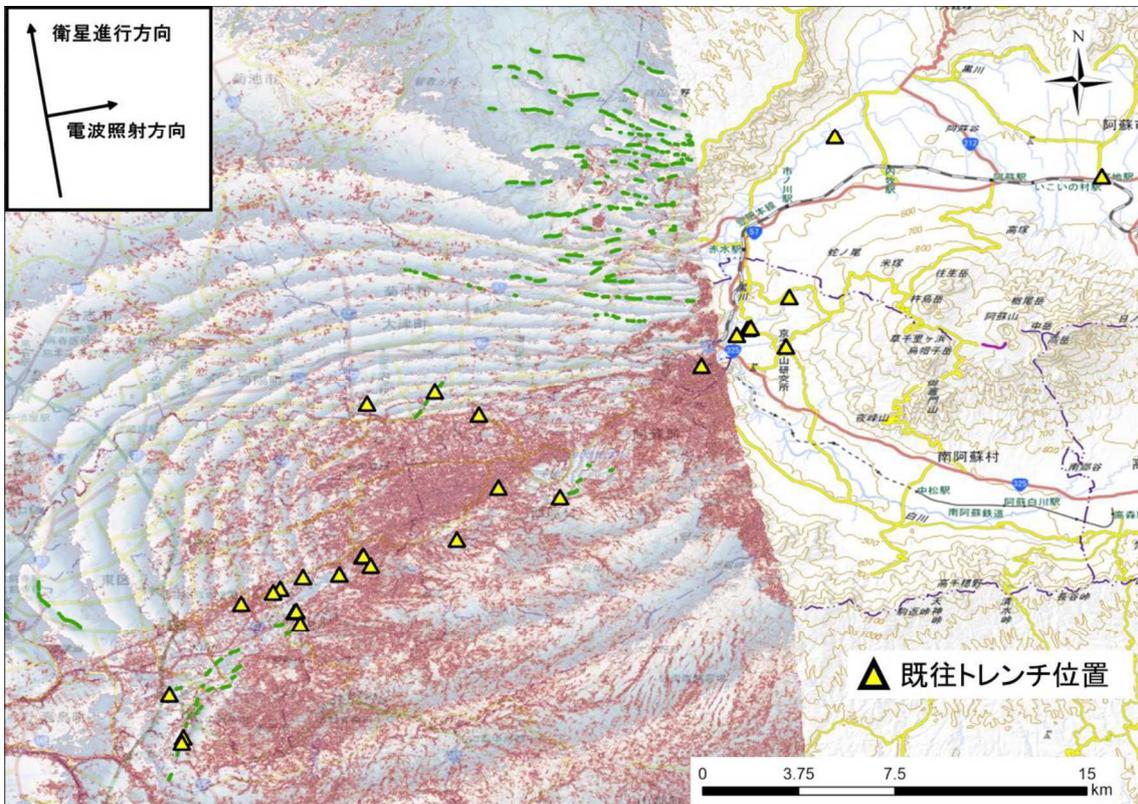


図 2.1.3 東向 $_{38.7^{\circ}}$ の位相不連続ライン判読結果

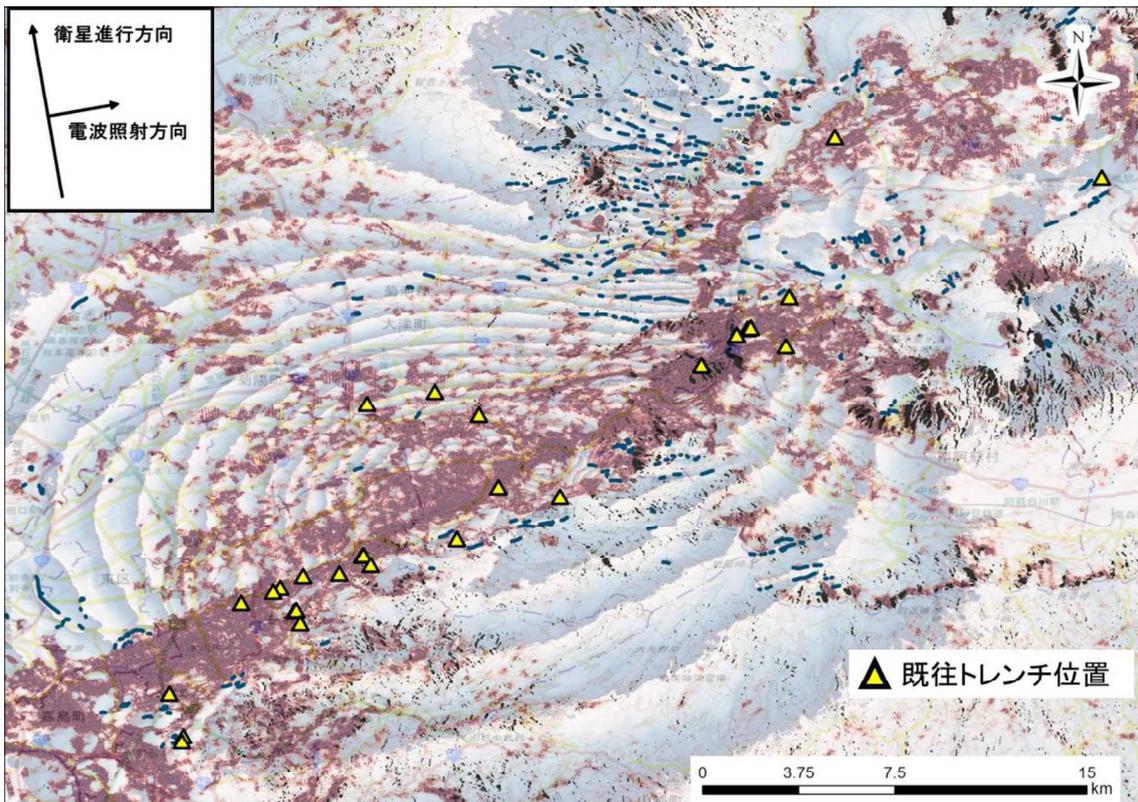


図 2.1.4 東向 $_{30.9^{\circ}}$ の位相不連続ライン判読結果

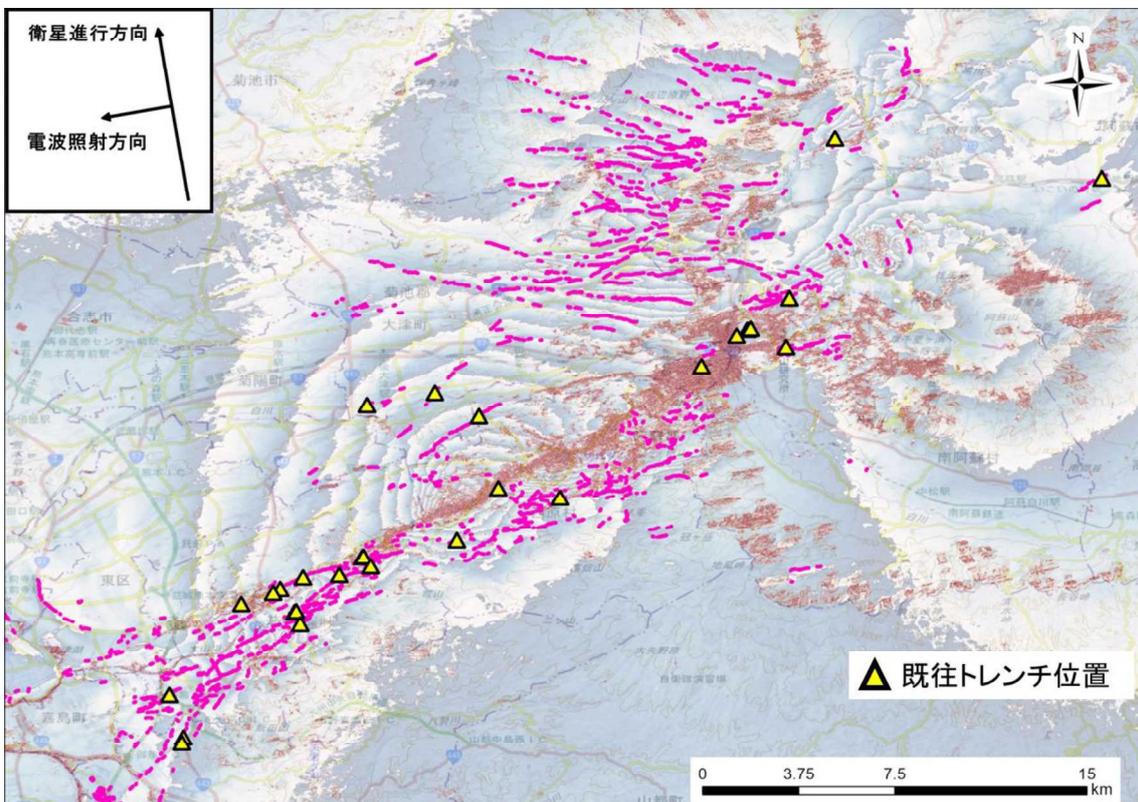


図 2.1.5 西向 $_{21.5^{\circ}}$ の位相不連続ライン判読結果

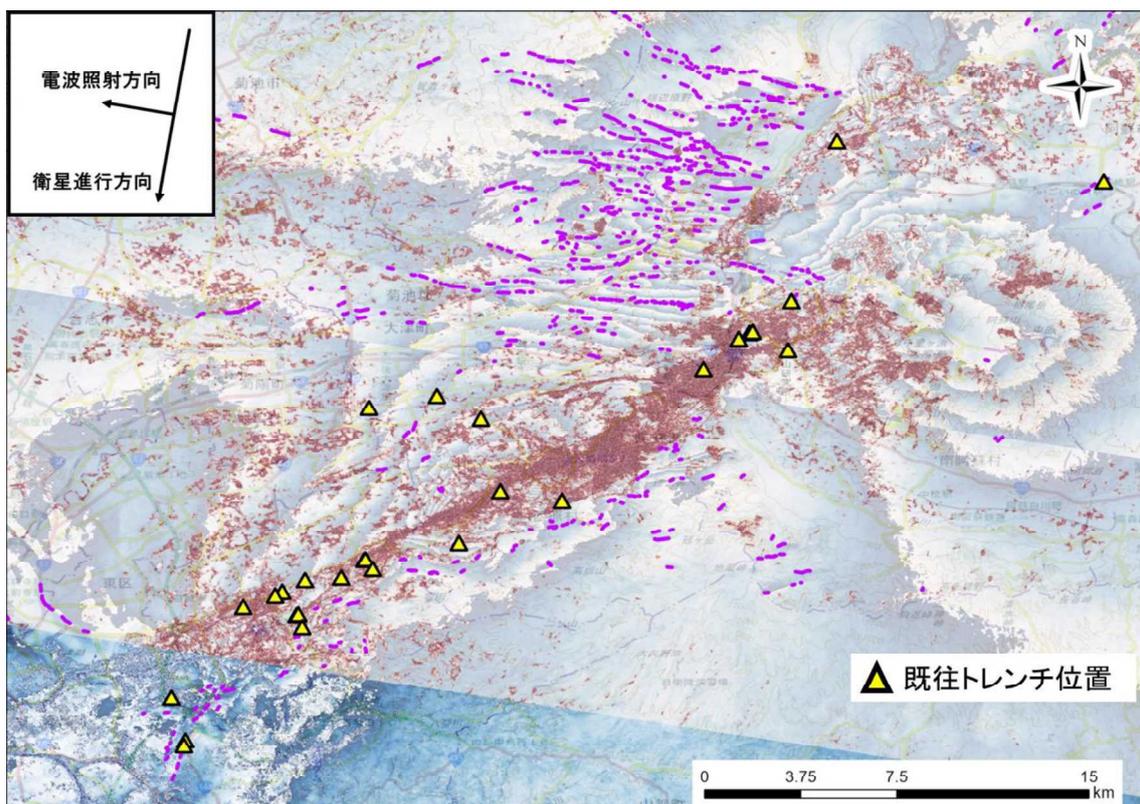


図 2.1.6 西向 $_{32.8^{\circ}}$ の位相不連続ライン判読結果

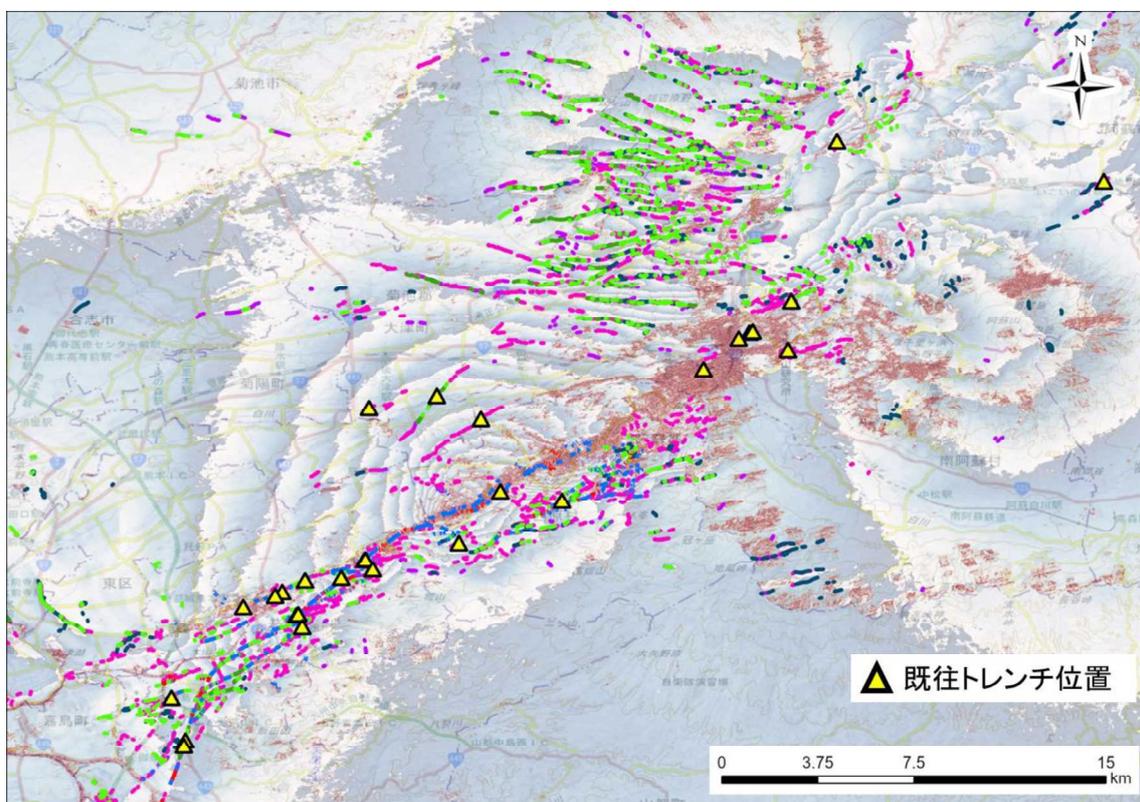


図 2.1.7 5 軌道の位相不連続ライン判読結果合成

次に、布田川断層周辺箇所について、中縮尺の図で詳細な分布の傾向を確認した（図 2.1.8 図 2.1.14）。

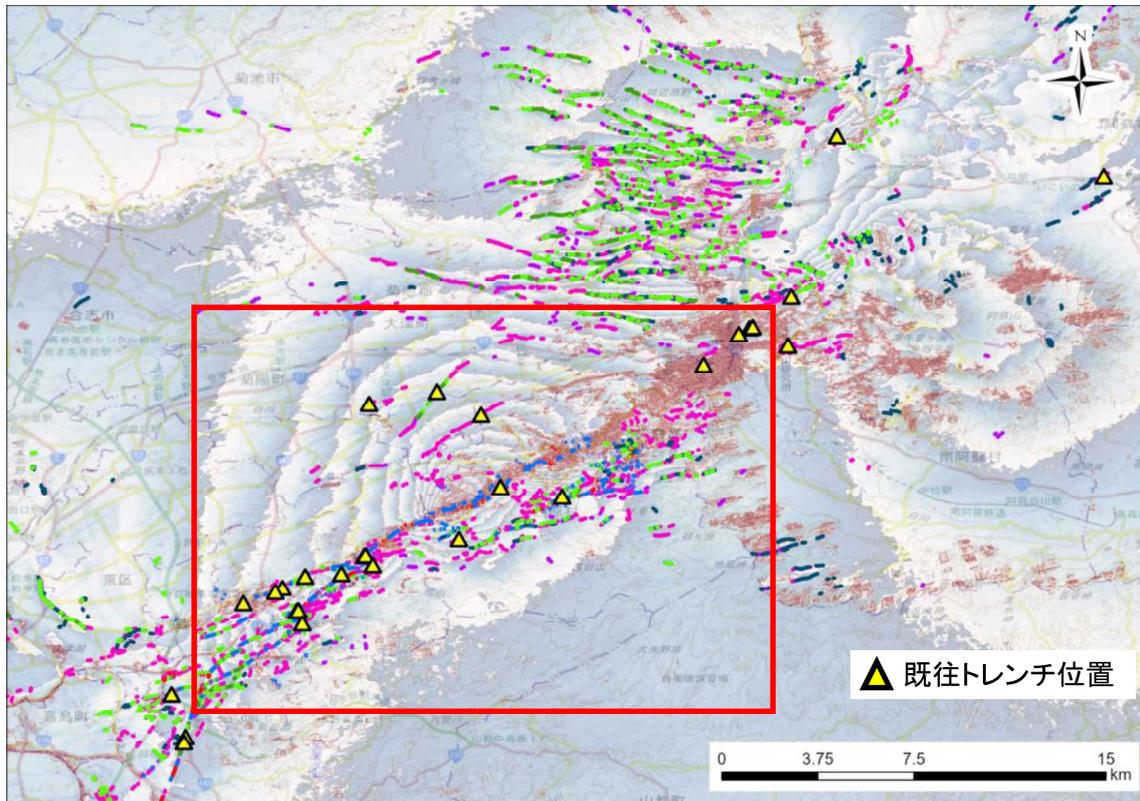


図 2.1.8 図 2.1.9～図 2.1.14 の範囲

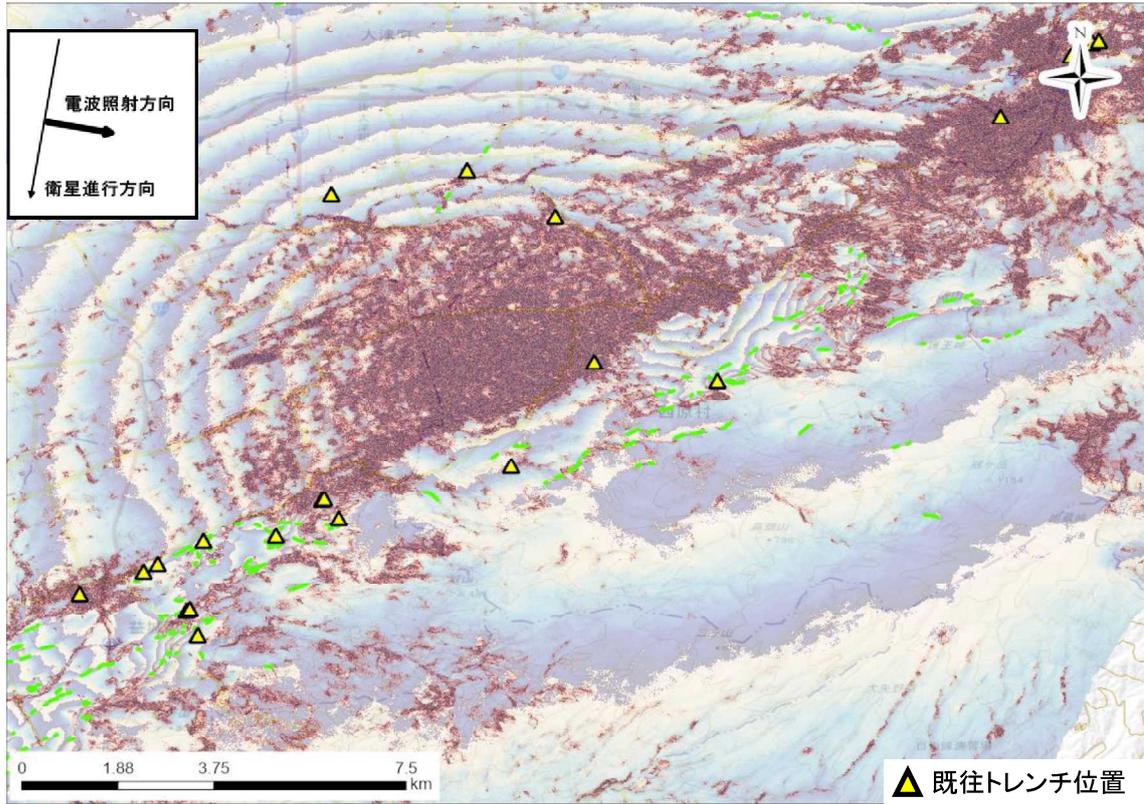


図 2.1.9 東向_28.8° の位相不連続ライン判読結果

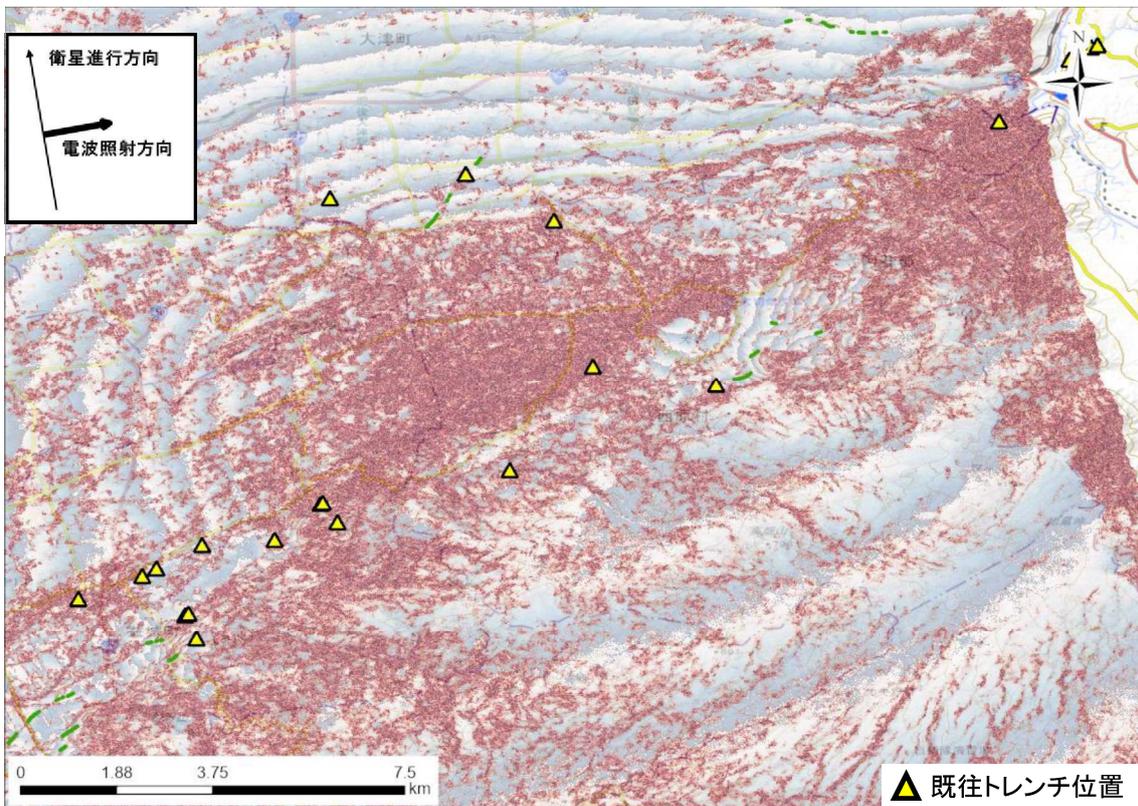


図 2.1.10 東向_38.7° の位相不連続ライン判読結果

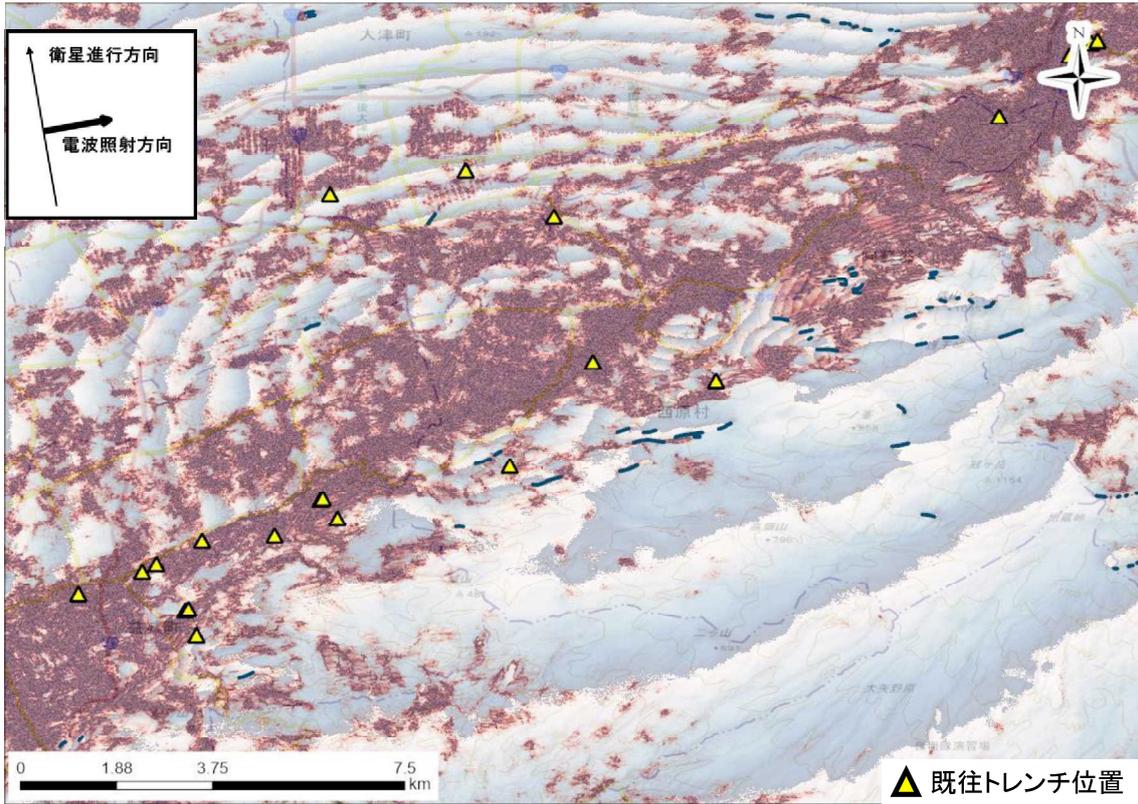


図 2.1.11 東向_30.9° の位相不連続ライン判読結果

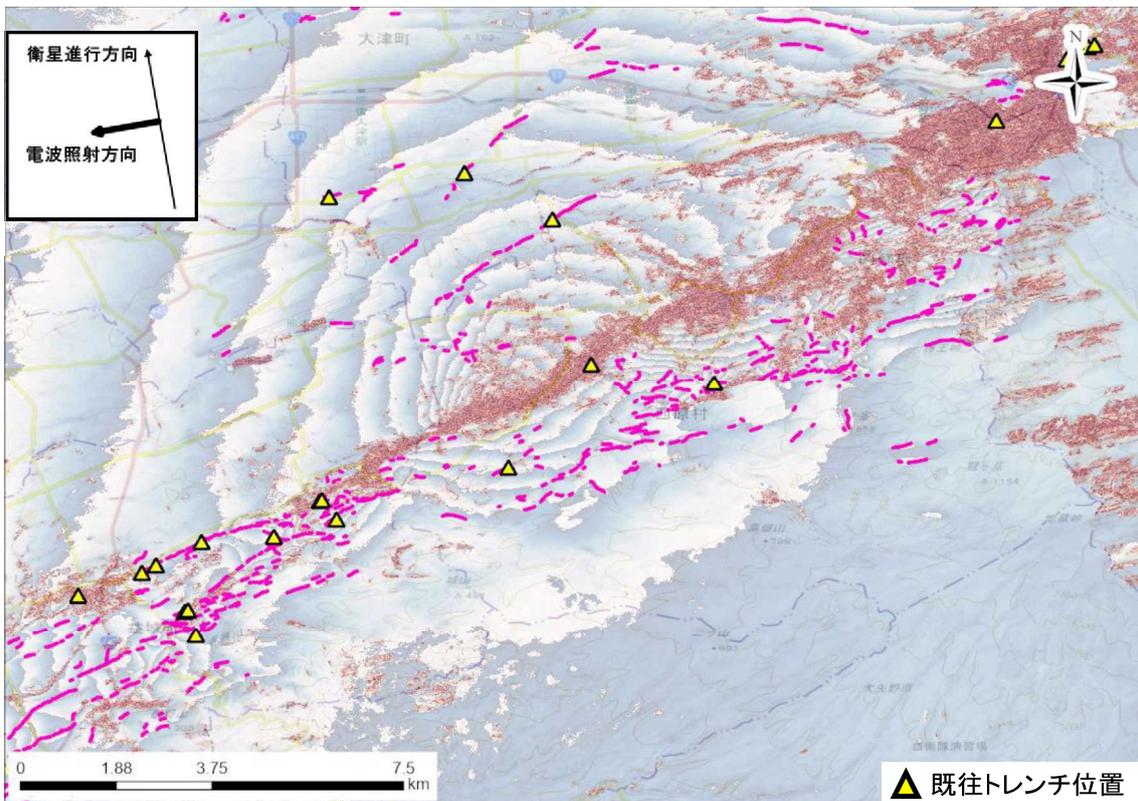


図 2.1.12 西向_21.5° の位相不連続ライン判読結果

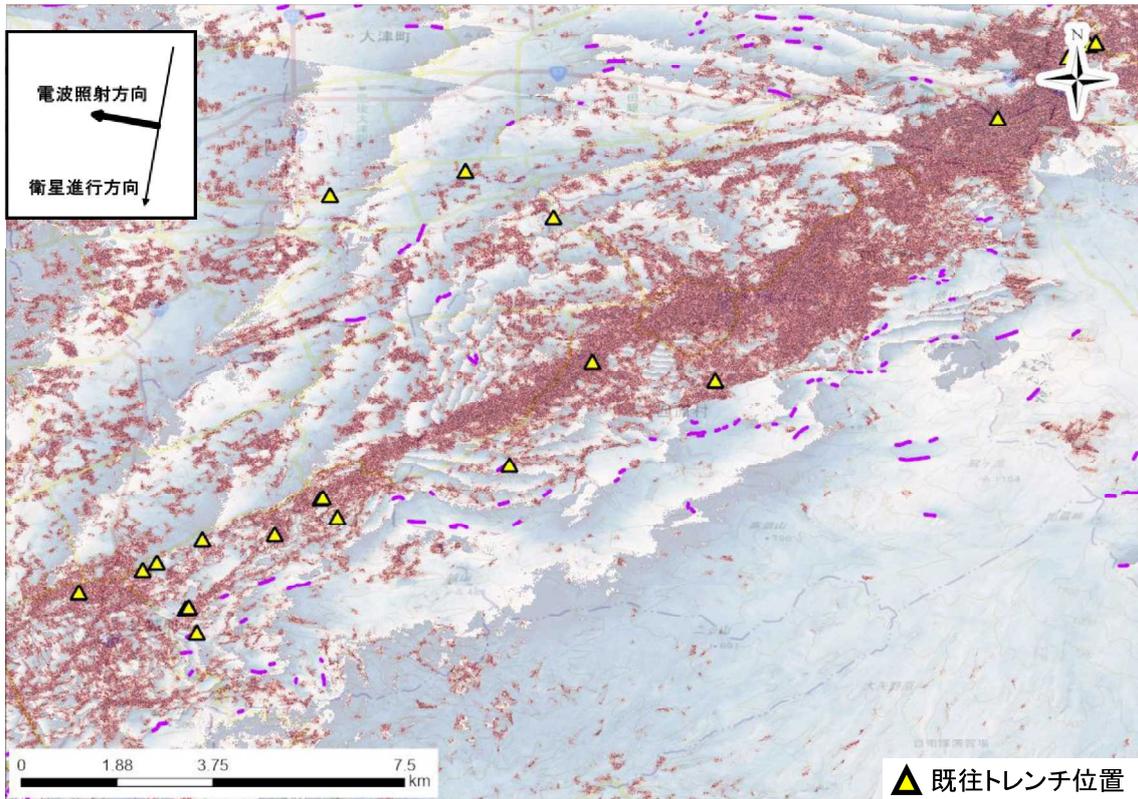


図 2.1.13 西向_32.8° の位相不連続ライン判読結果

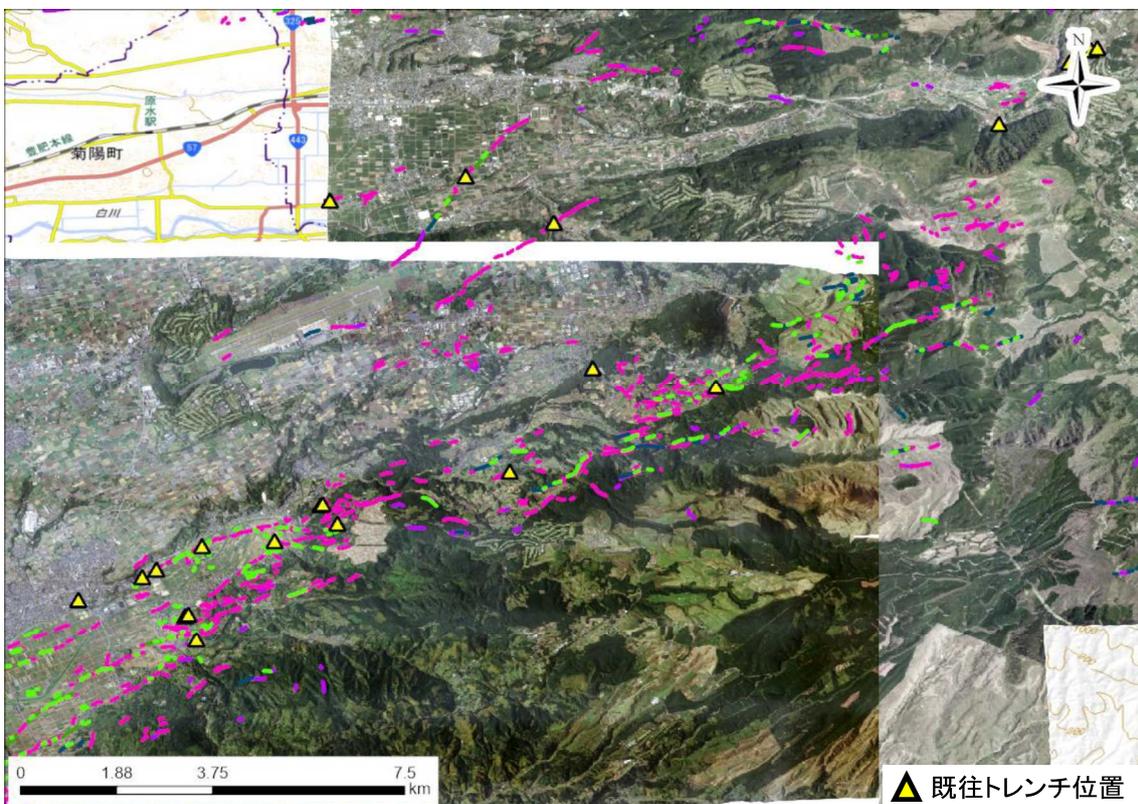


図 2.1.14 5 軌道の位相不連続ライン判読結果合成

次に、雛具川断層周辺について、中縮尺の図で詳細な分布の傾向を確認した（図 2.1.15～図 2.1.21）。

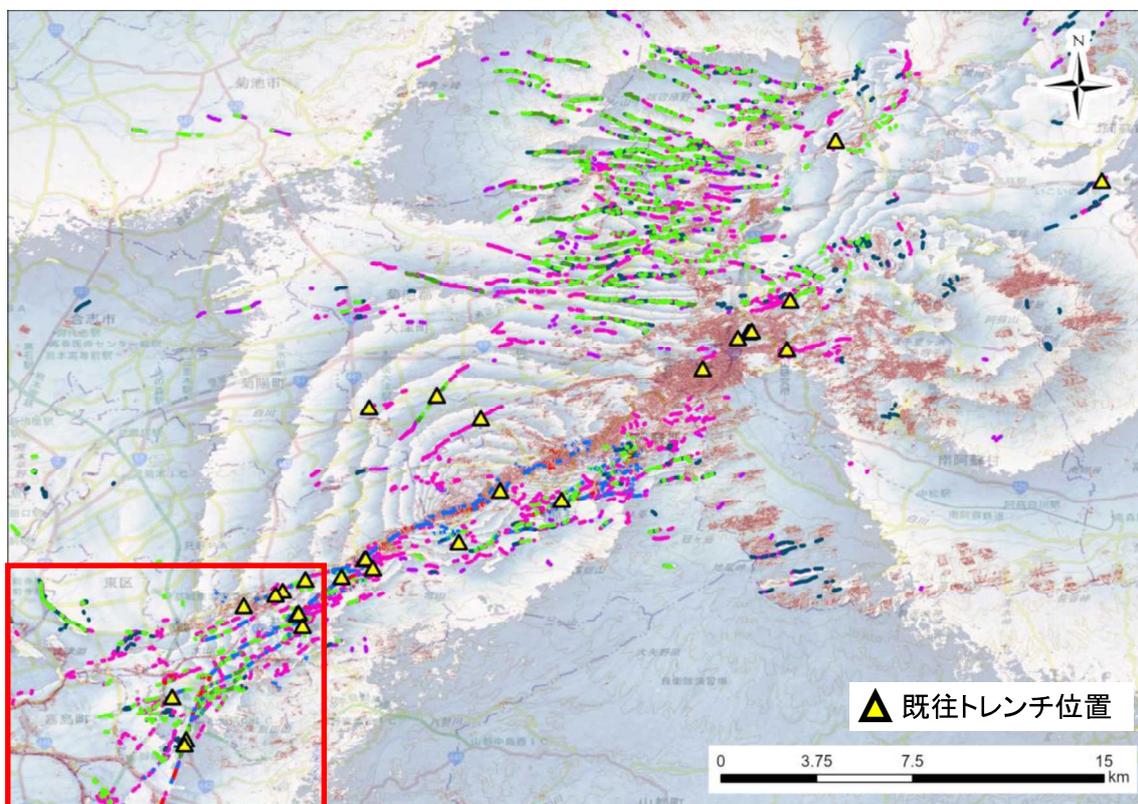


図 2.1.15 図 2.1.16～図 2.1.21 の範囲

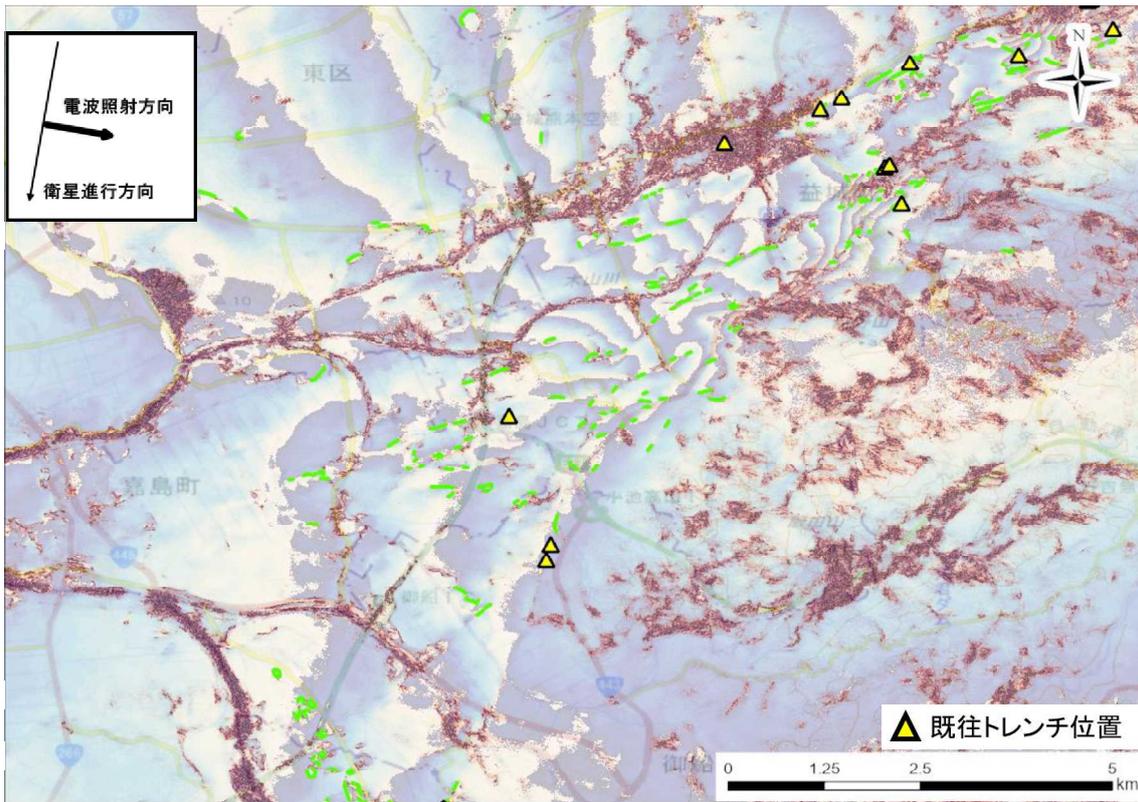


図 2.1.16 東向_28.8° の位相不連続ライン判読結果

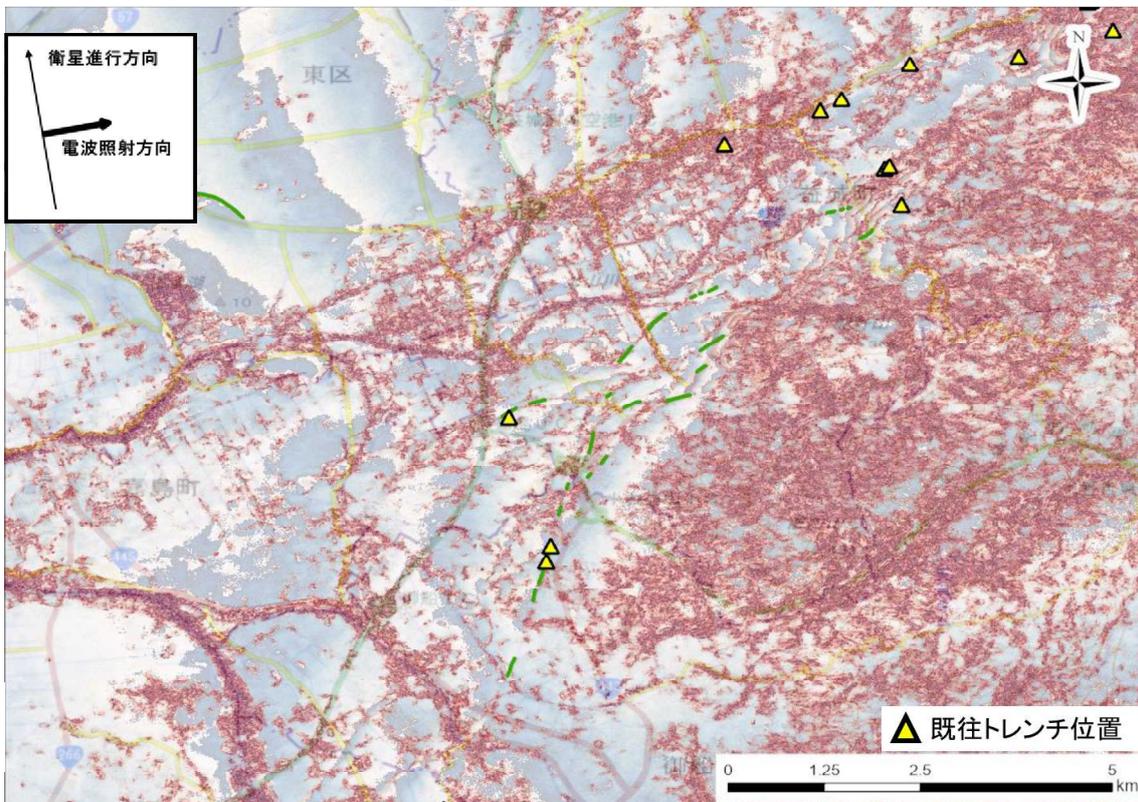


図 2.1.17 東向_38.7° の位相不連続ライン判読結果

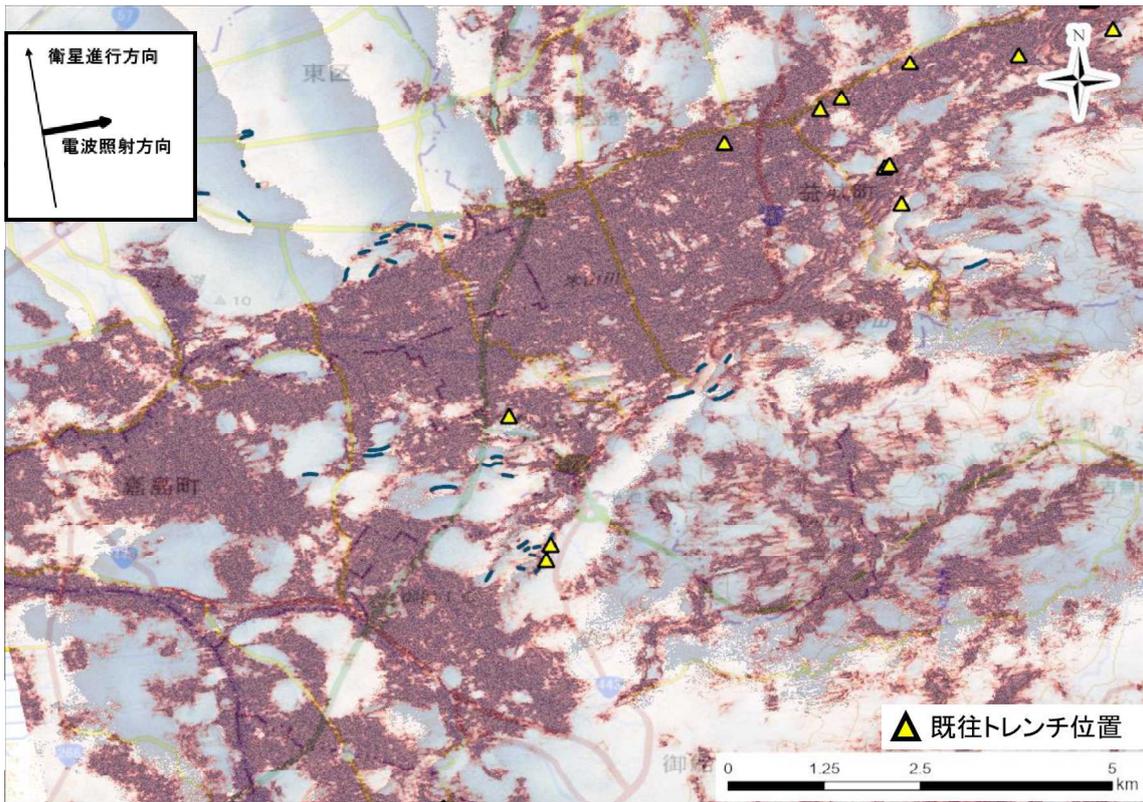


図 2.1.18 東向_30.9° の位相不連続ライン判読結果

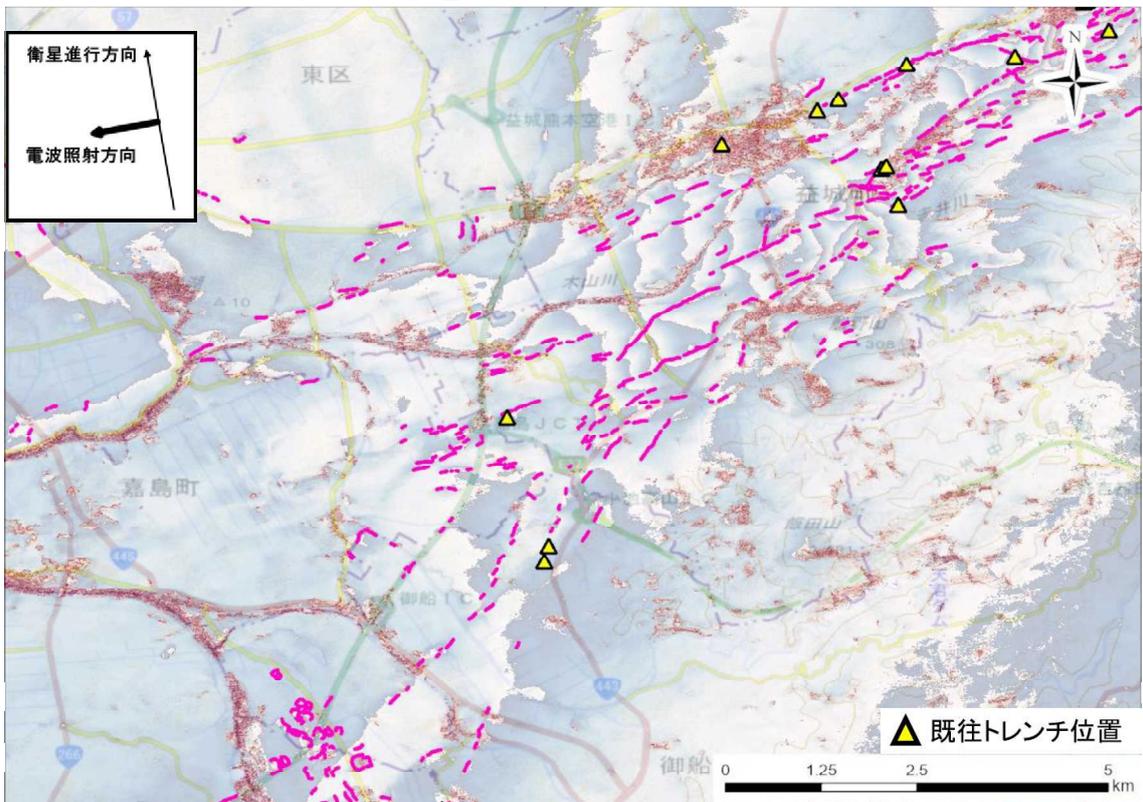


図 2.1.19 西向_21.5° の位相不連続ライン判読結果

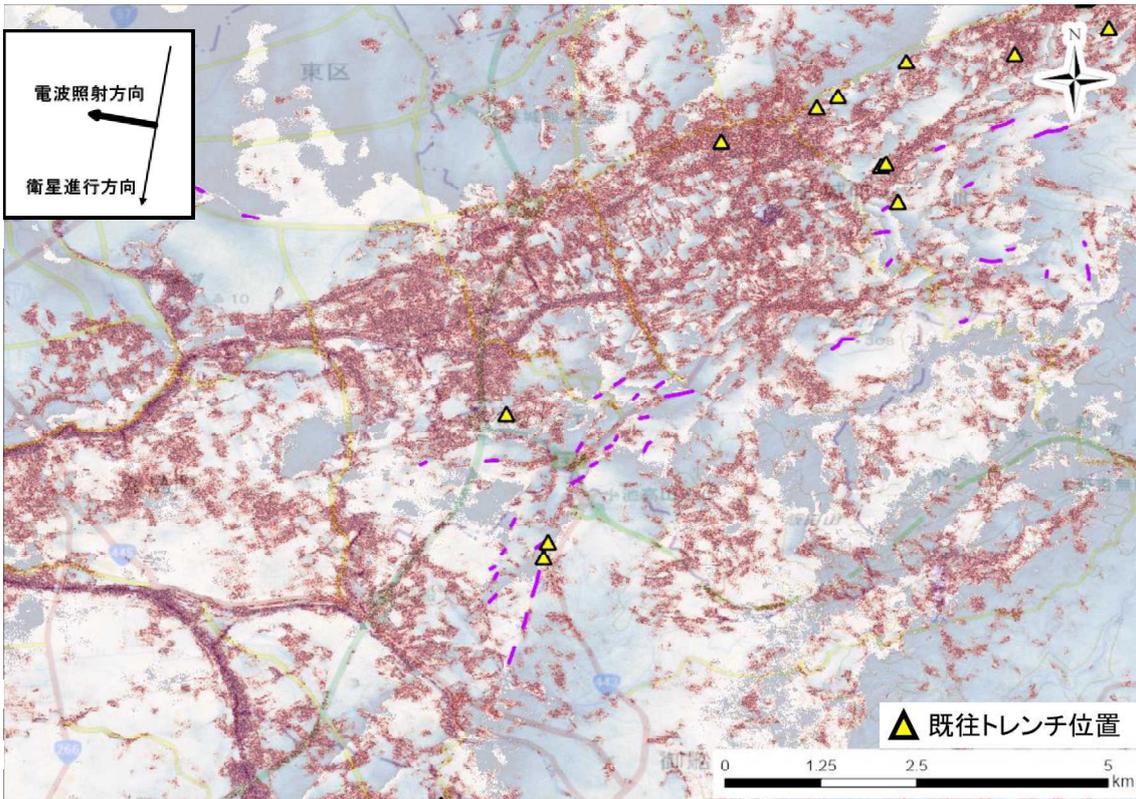


図 2.1.20 西向 32.8° の位相不連続ライン判読結果

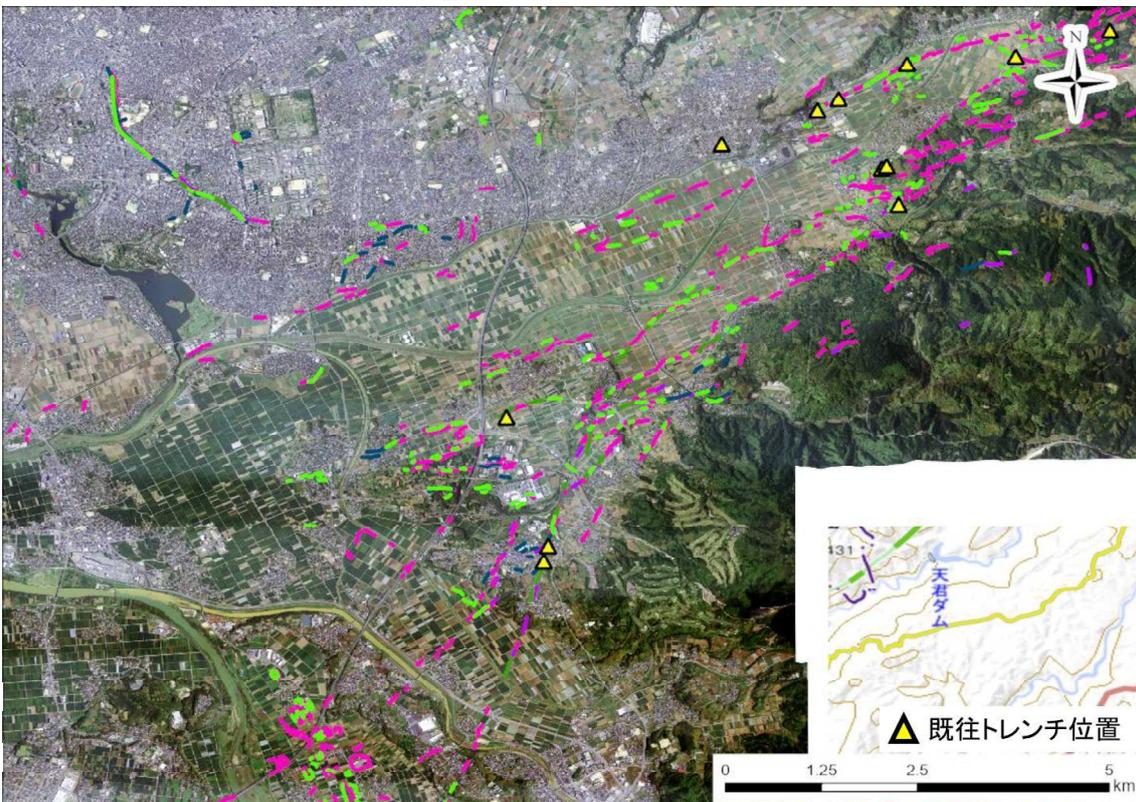


図 2.1.21 5軌道の位相不連続ライン判読結果合成

次に、中縮尺の図で詳細箇所を確認した。図 2.1.22 に示すカルデラ北西部の位相不連続ラインが密集する範囲で5軌道の目視判読結果を比較した(図 2.1.23~図 2.1.28) 結果、以下のことが確認できる。

- ・ 異なる軌道の LC-InSAR 図では位相不連続ラインの位置が異なる
- ・ 合成した図では単一軌道の位相不連続ラインでは細切れだった線が繋がり、連続した変位境界として見えるようになる

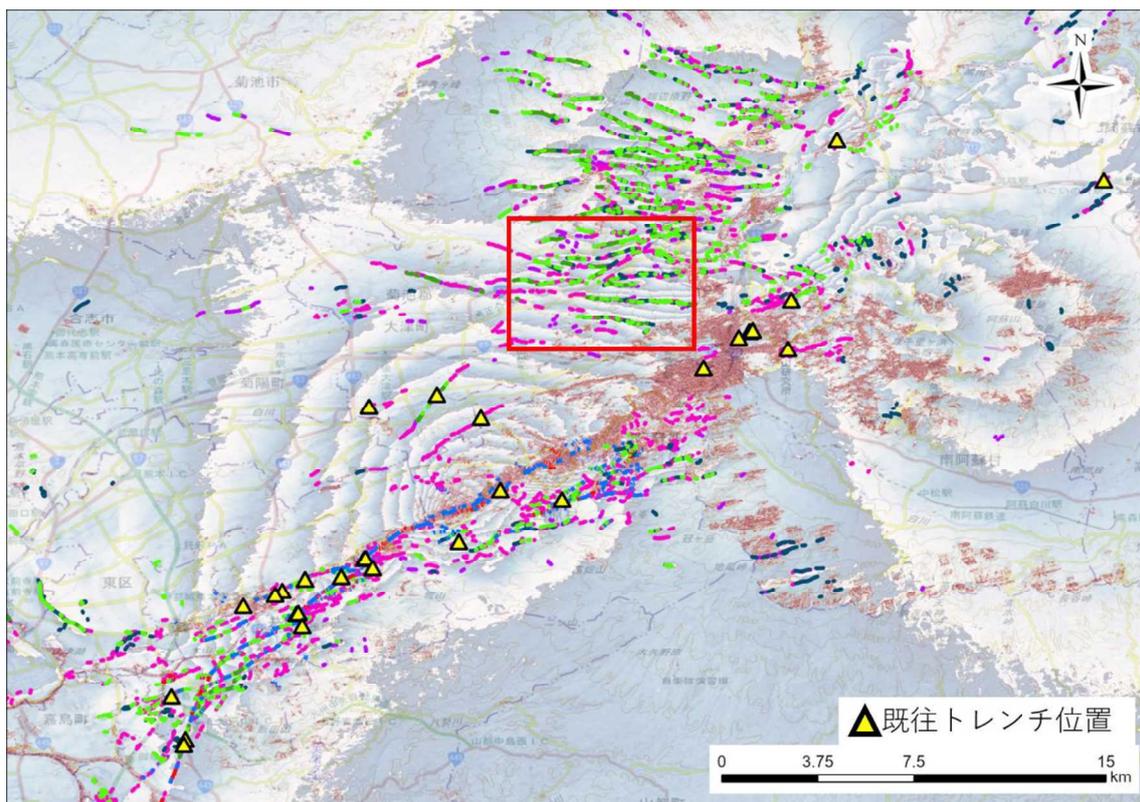


図 2.1.22 図 2.1.23~図 2.1.28 の範囲

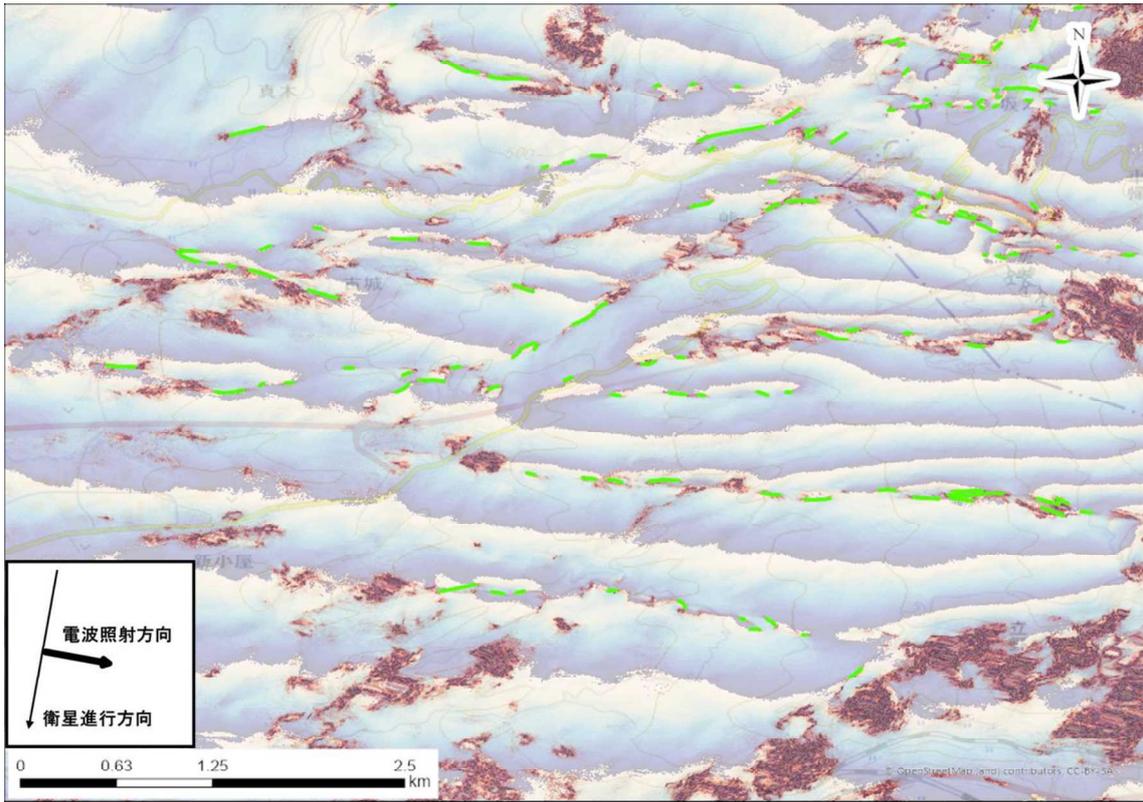


図 2.1.23 東向_28.8° の位相不連続ライン判読結果

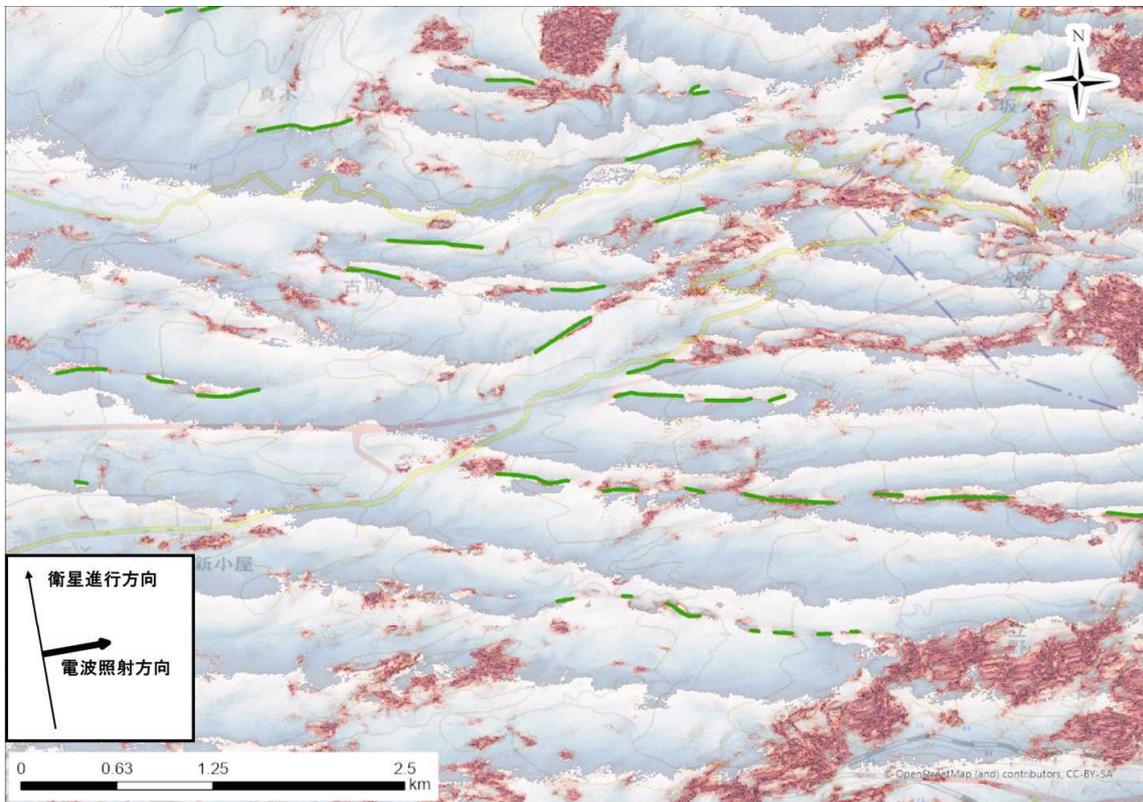


図 2.1.24 東向_38.7° の位相不連続ライン判読結果

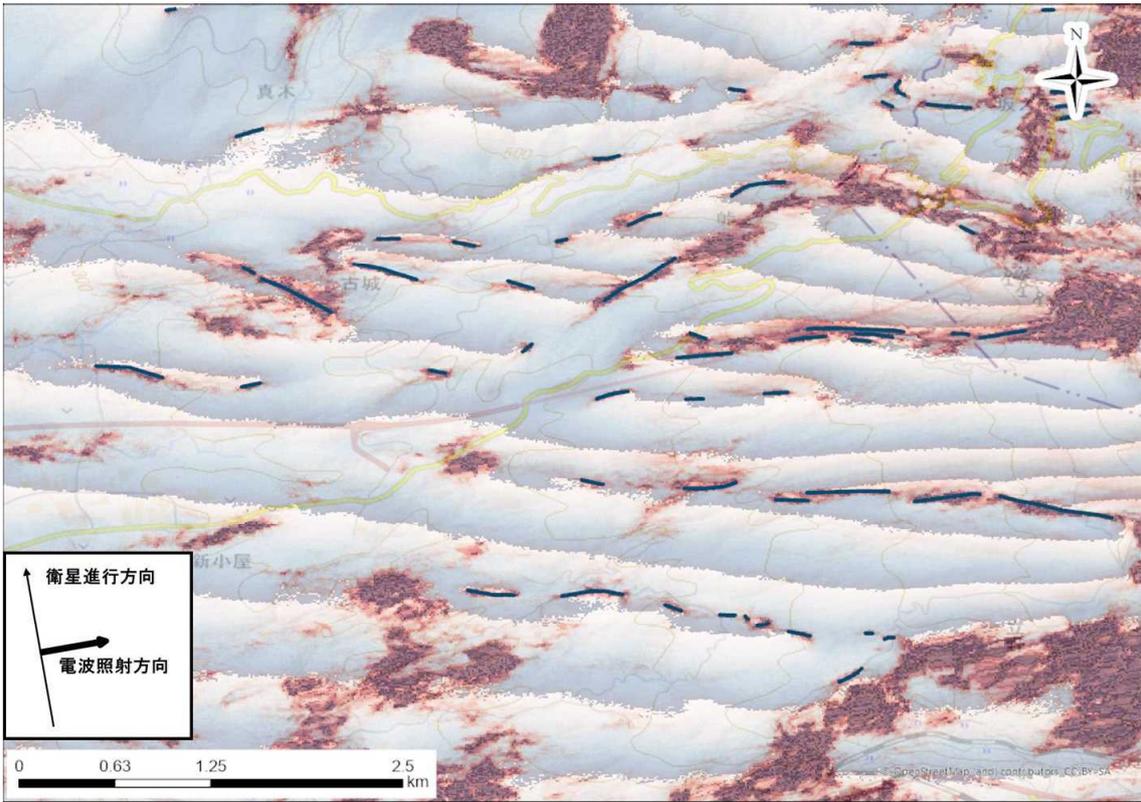


図 2.1.25 東向_30.9° の位相不連続ライン判読結果

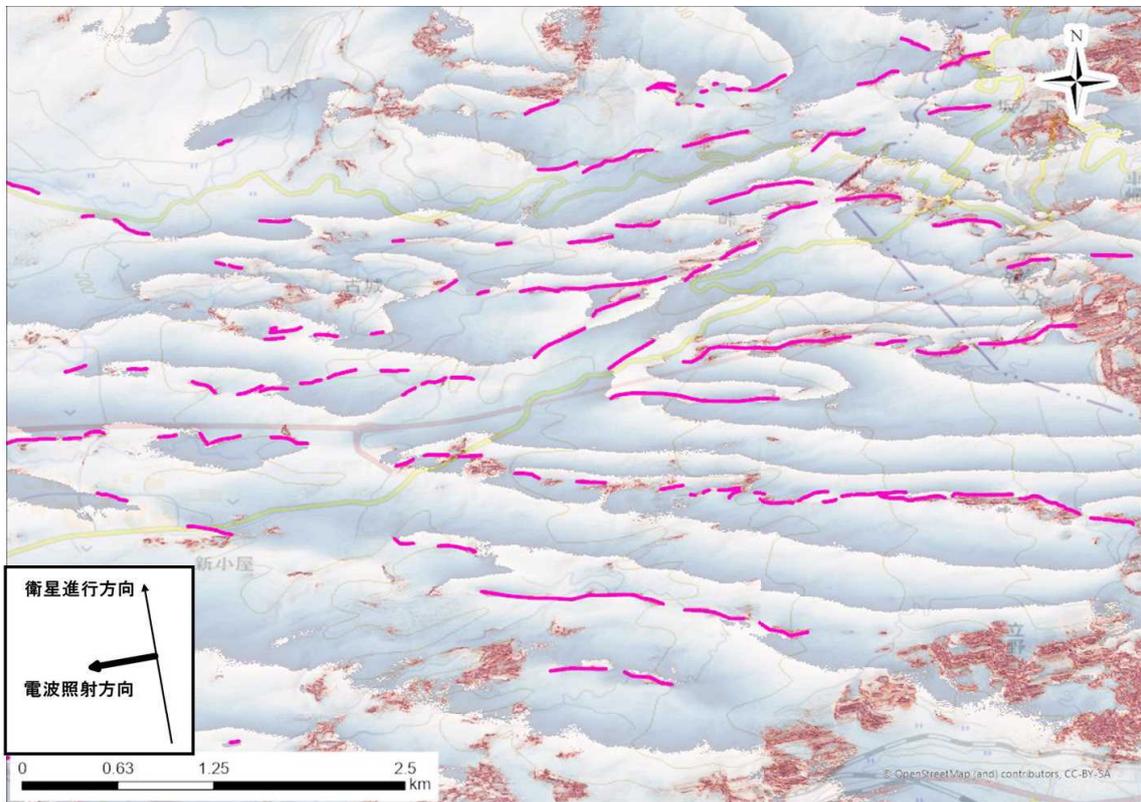


図 2.1.26 西向_21.5° の位相不連続ライン判読結果

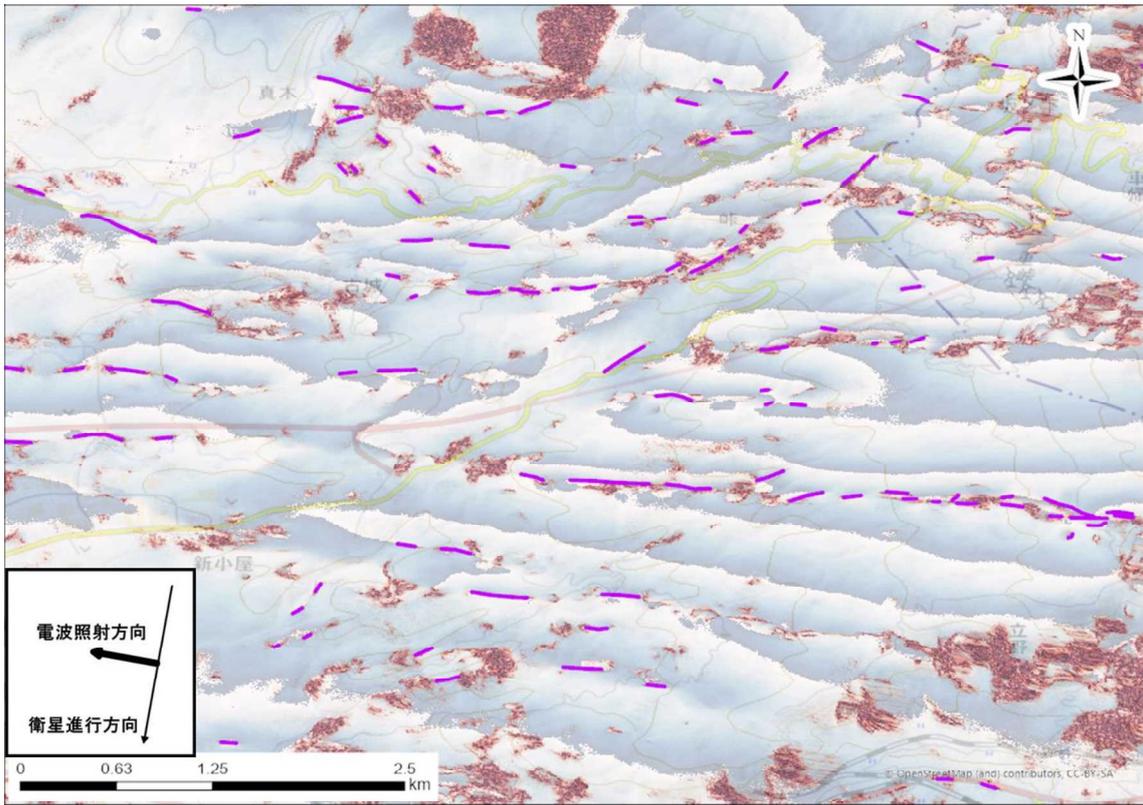


図 2.1.27 西向_{32.8°} の位相不連続ライン判読結果

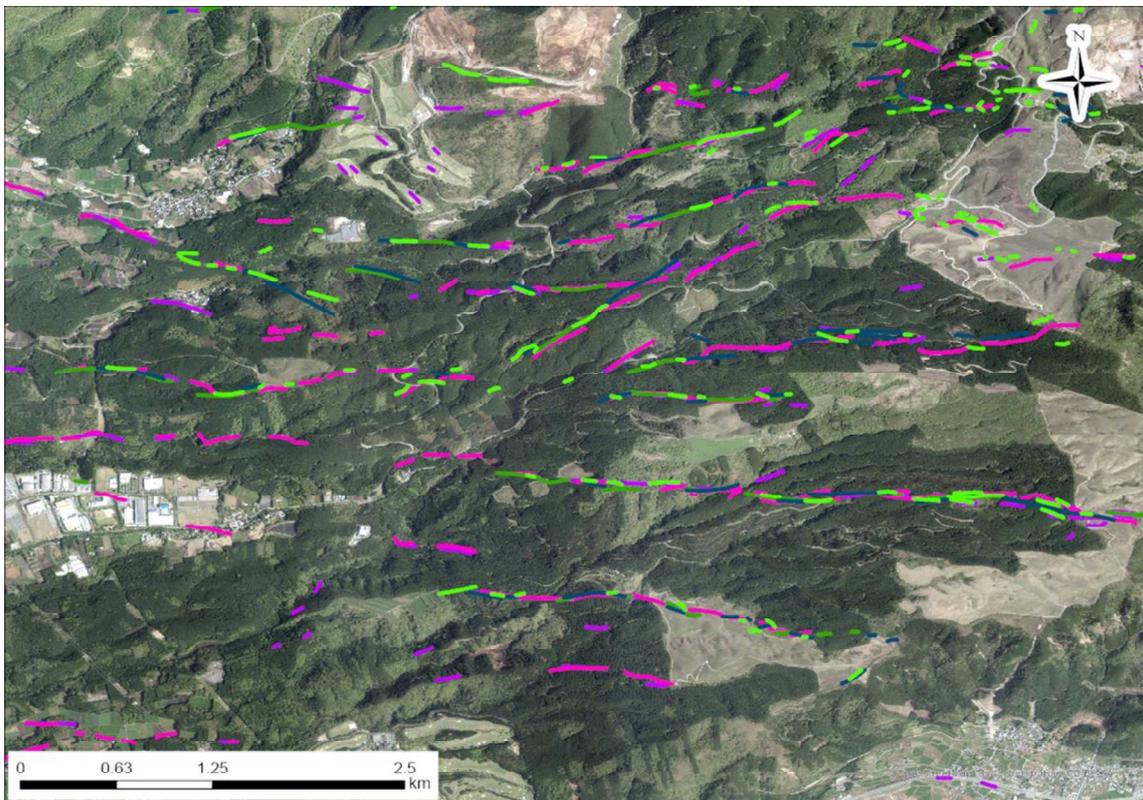


図 2.1.28 5 軌道の位相不連続ライン判読結果合成

同様に、図 2.1.29 に示す大津北側の西北西-東南東に連続する位相不連続ライン周辺の範囲で5軌道の目視判読結果を比較した(図 2.1.30~図 2.1.35)結果、以下のことが確認される。

- ・ 異なる軌道の LC-InSAR 図では位相不連続ラインの位置が異なる
- ・ 合成した図では単一軌道の位相不連続ラインでは細切れだった線が繋がり、崖に沿って連続した変位境界が確認できる

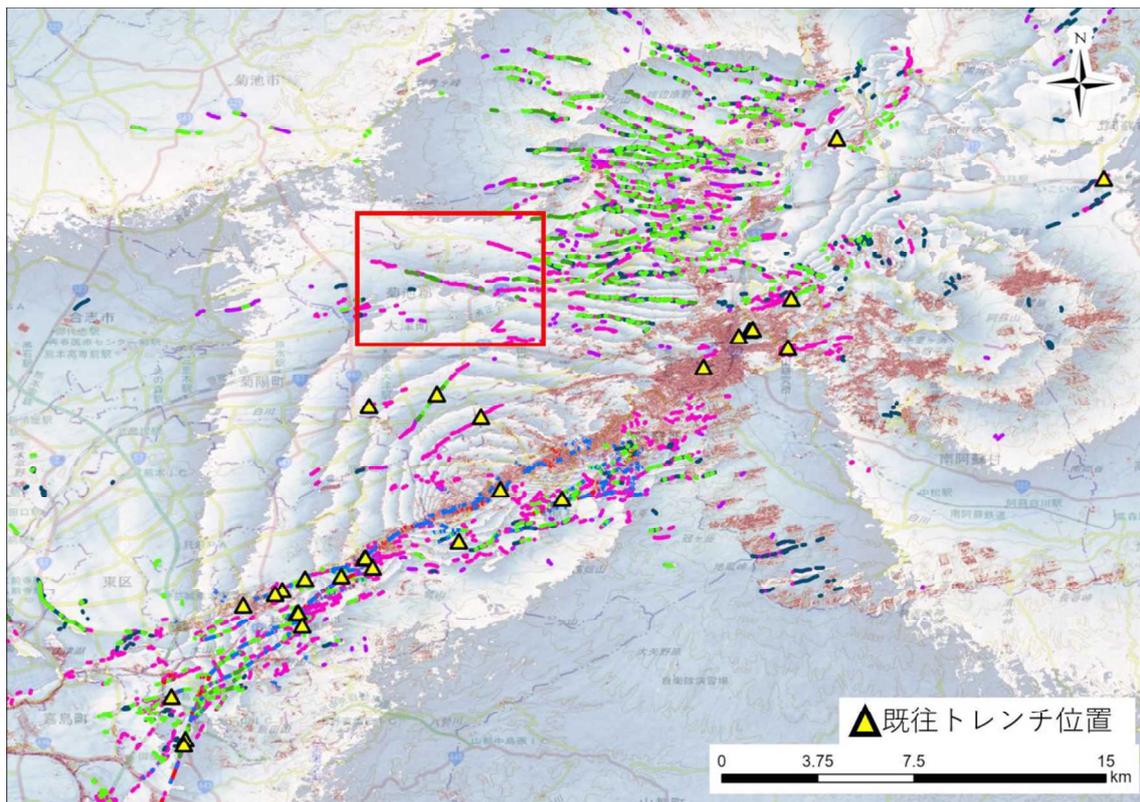


図 2.1.29 図 2.1.30~図 2.1.35 の範囲

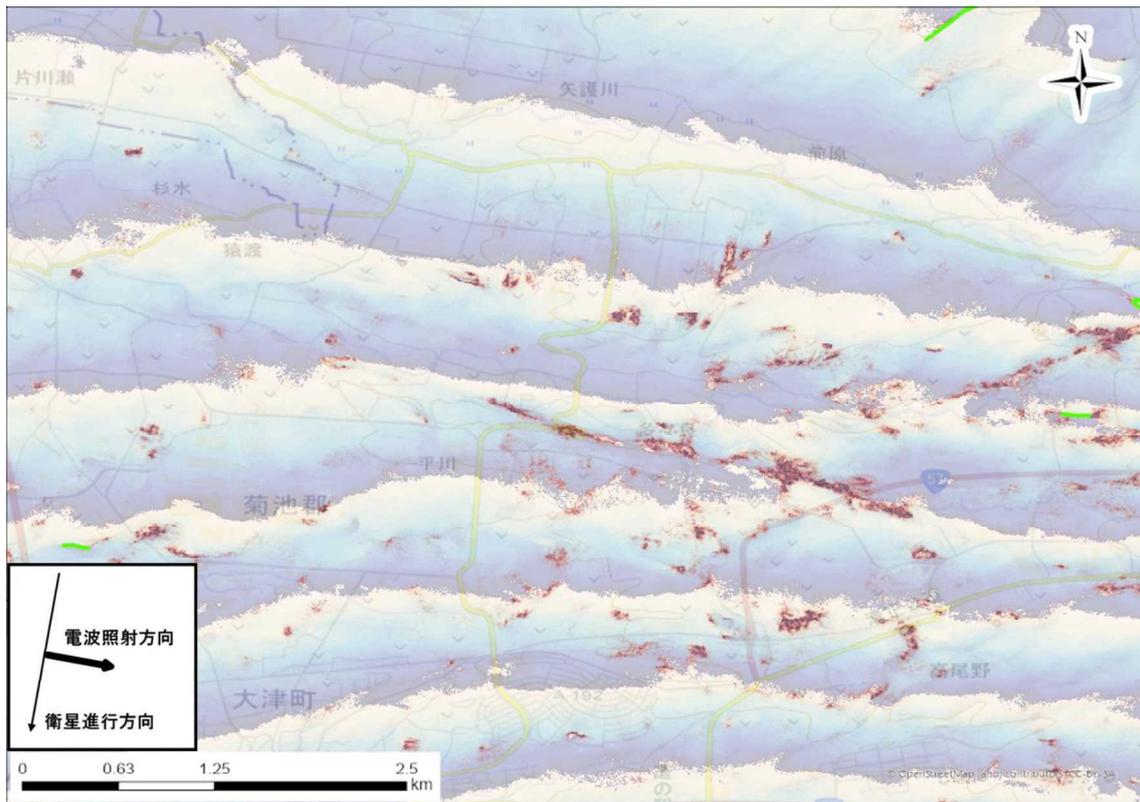


図 2.1.30 東向_28.8° の位相不連続ライン判読結果

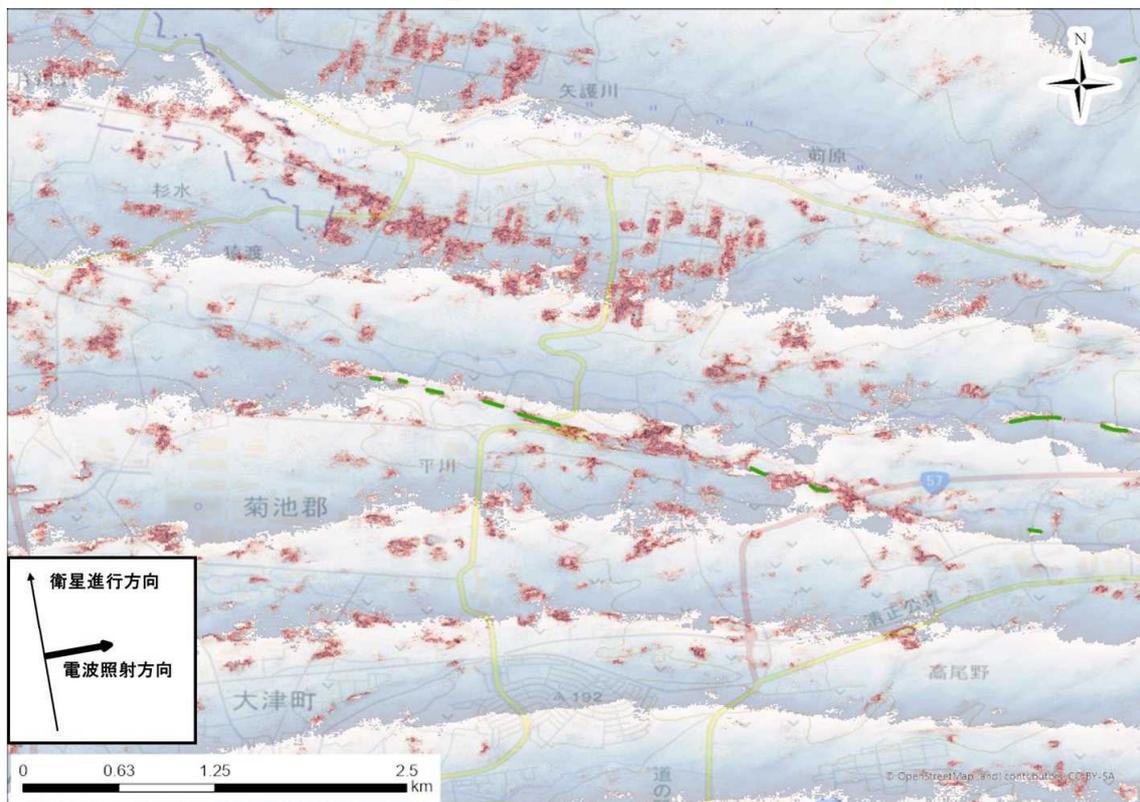


図 2.1.31 東向_38.7° の位相不連続ライン判読結果

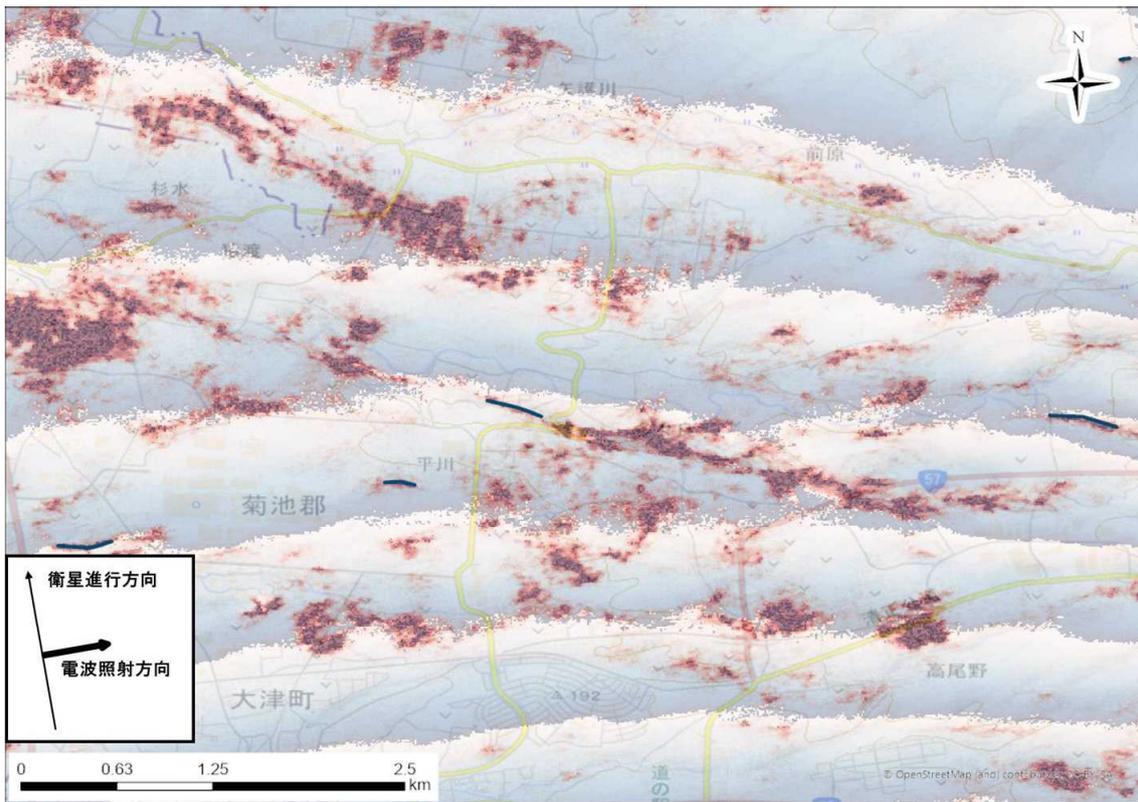


図 2.1.32 東向_30.9° の位相不連続ライン判読結果

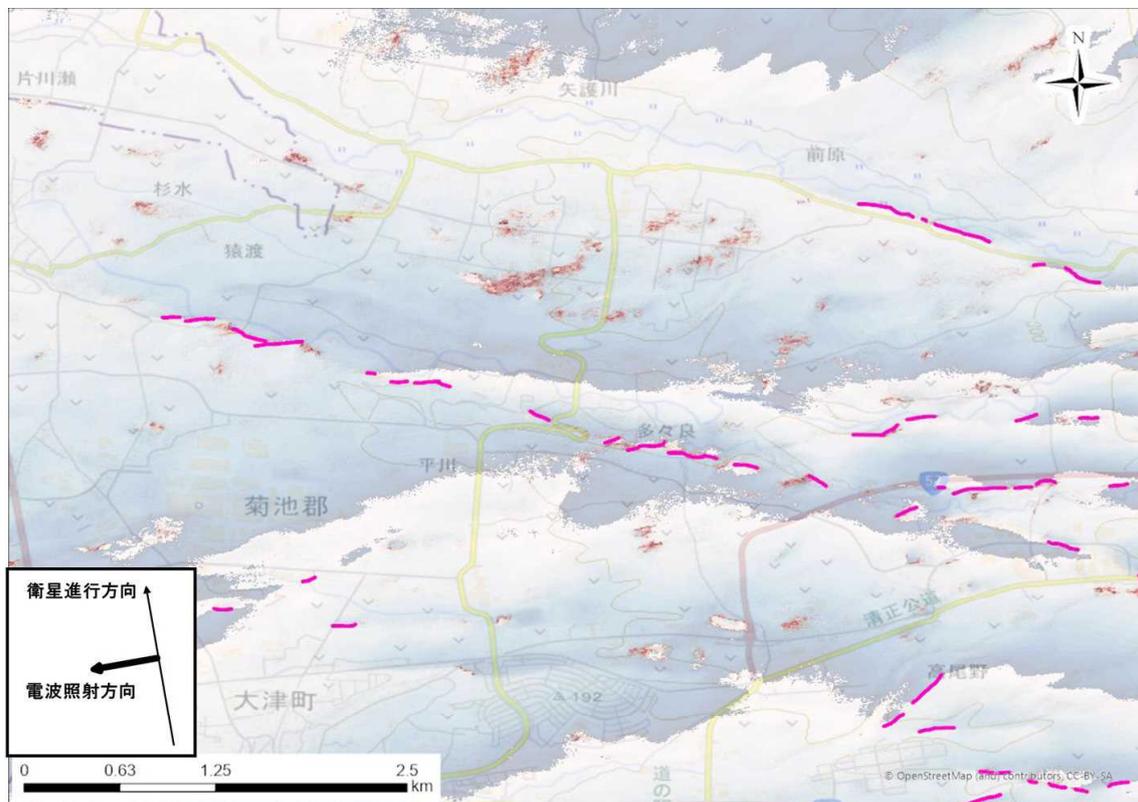


図 2.1.33 西向_21.5° の位相不連続ライン判読結果

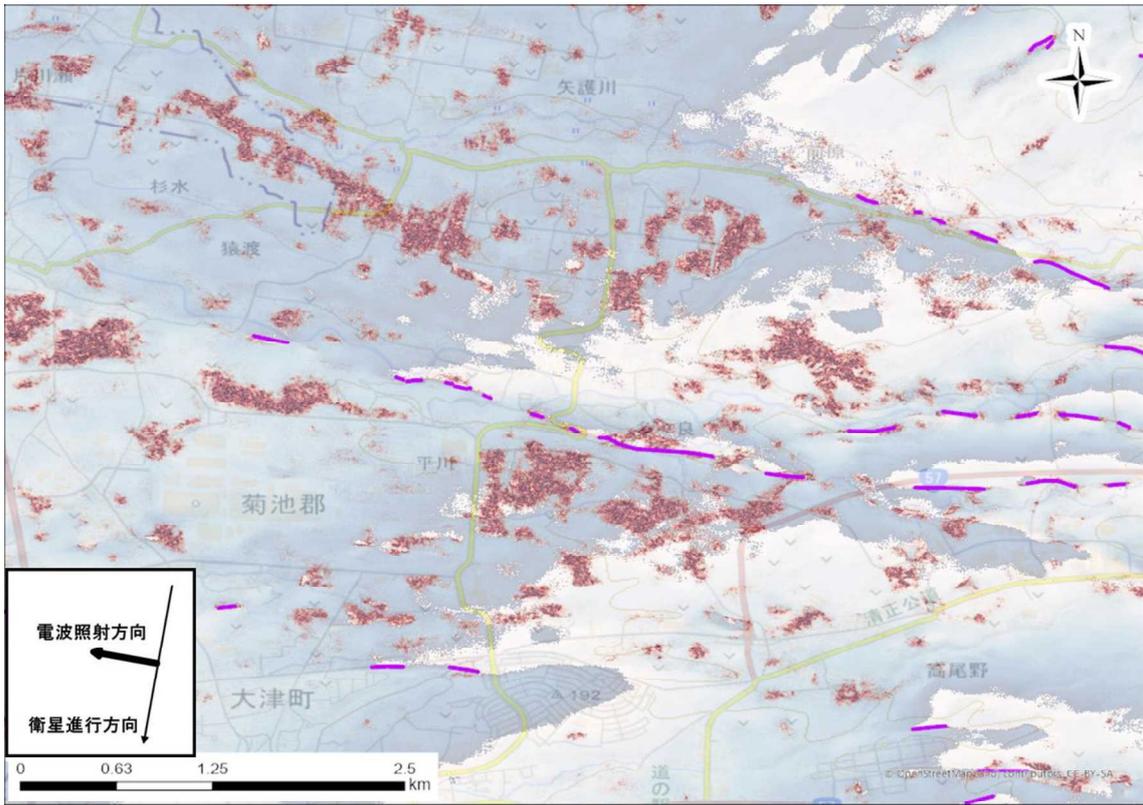


図 2.1.34 西向_32.8° の位相不連続ライン判読結果

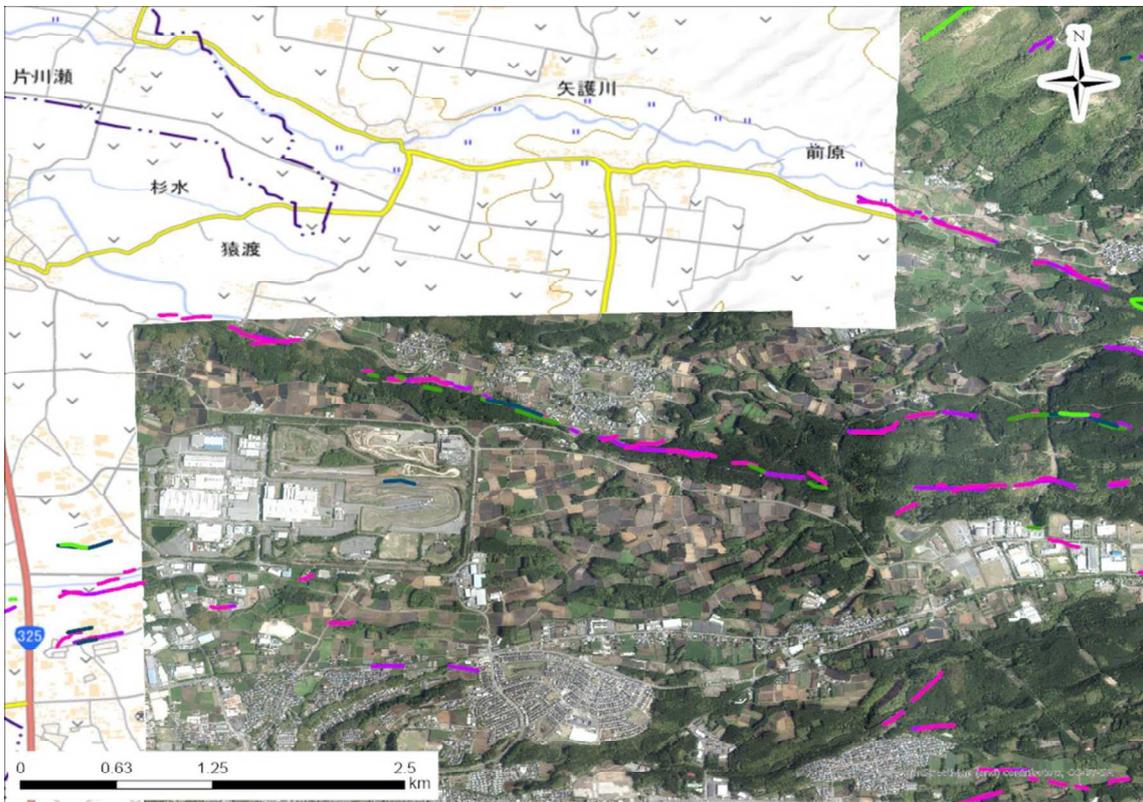


図 2.1.35 5 軌道の位相不連続ライン判読結果合成

異なる 5 軌道の LC-InSAR 図を組み合わせることで、単一軌道では不連続であった変位境界が連続的な線としてつながることが確認された。これは LC-InSAR 図では、観測方向や入射角の違いにより軌道ごとに検出可能な変位が異なっていることを示しており、検出された変位が相互に補完されたものと考えられる。そのため、5 軌道の SAR 衛星を使用することで検出される変位境界がより連続的に抽出された。

2.1.1.2. 複数の LC-InSAR 図を用いた変位境界の定量的な抽出

これまで目視判読によって変位境界の抽出が行われてきたが、判読者の主観に左右されることや、幅を持った変位境界を線として抽出することになる等の課題があった。そこで、目視判読をした 5 軌道の LC-InSAR 図を用いて変位境界を定量的に抽出する手法を検討した。

LC-InSAR 図の仕組みは図 2.1.36 に示すとおり、一般的な干渉 SAR 解析結果である位相差画像のみではわかりづらい変位境界を、コヒーレンス画像と重ね合わせることで鮮明にすることができる手法である（小俣ほか 2017）（特許第 6889993 号）。LC-InSAR 図から位相不連続ラインを目視判読する際のフローを図 2.1.37 に示す。

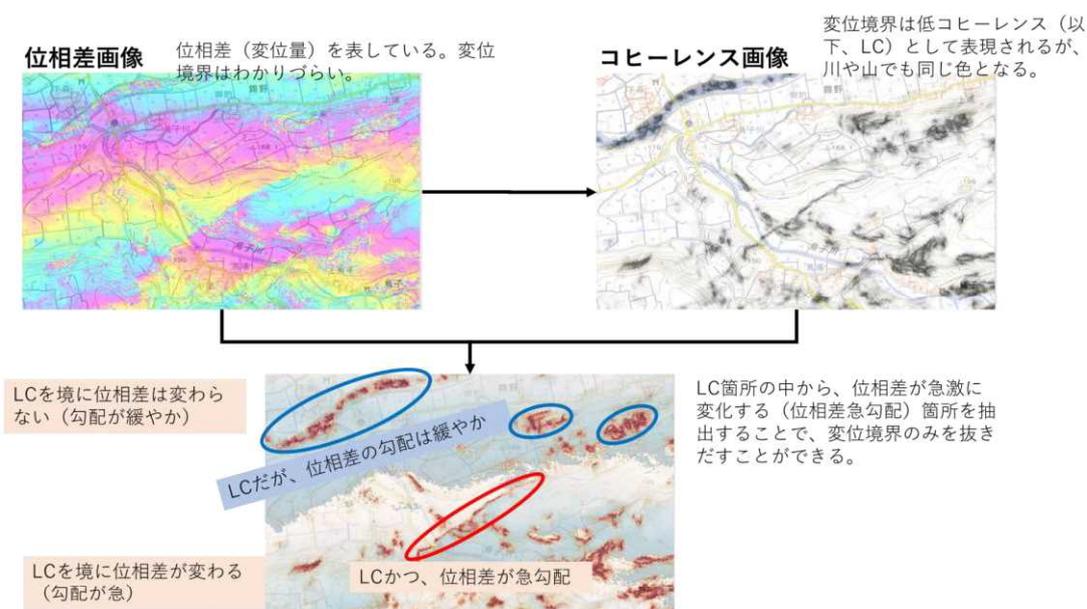


図 2.1.36 LC-InSAR 図の見え方

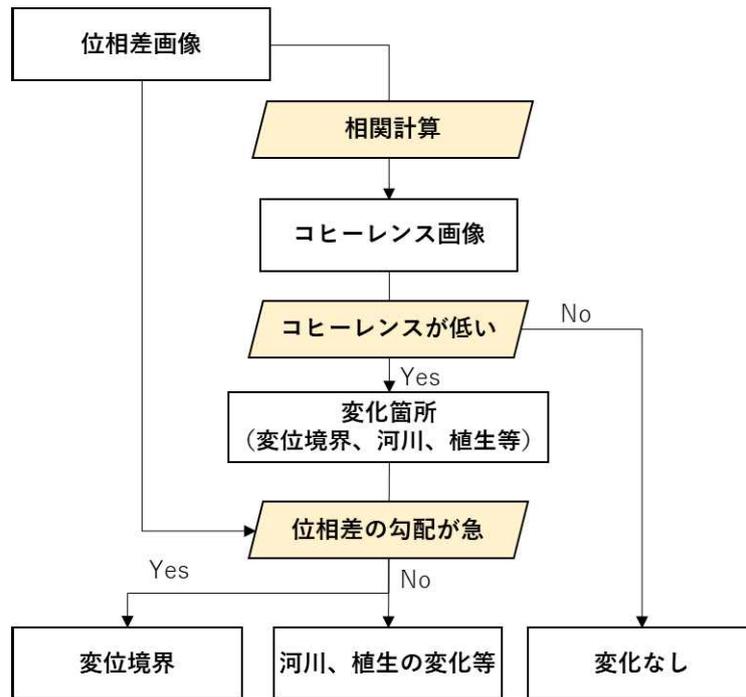


図 2.1.37 LC-InSAR 図から位相不連続ラインを目視判読する際のフロー

上記のフローの「コヒーレンスが低い」および「位相差の勾配が急」を定量化することで判読者の主観によらない定量的な変位境界の抽出が可能となる。

(1)「コヒーレンスが低い」の定量化

「コヒーレンスが低い」を定量化するため、これまでの目視判読データ（図 2.1.7）から統計値を取得し、判読者が感覚的に変位境界としていた値を数値化し閾値を設定する。またコヒーレンスが低いとする閾値が持つ意味についても統計値を取得し、LC-InSAR 図から抽出される変位境界の意味を整理した。

①コヒーレンスの算出方法の整理

目視判読でみている「コヒーレンスが低い」を数値的に表現する必要がある。コヒーレンス画像とは干渉 SAR 解析で出力される位相差画像の空間的ばらつき具合を指標化したものである（図 2.1.38）。具体的には、コヒーレンス値を求めるピクセル周辺 5 ピクセル×5 ピクセルのばらつき具合で計算される（図 2.1.39）。

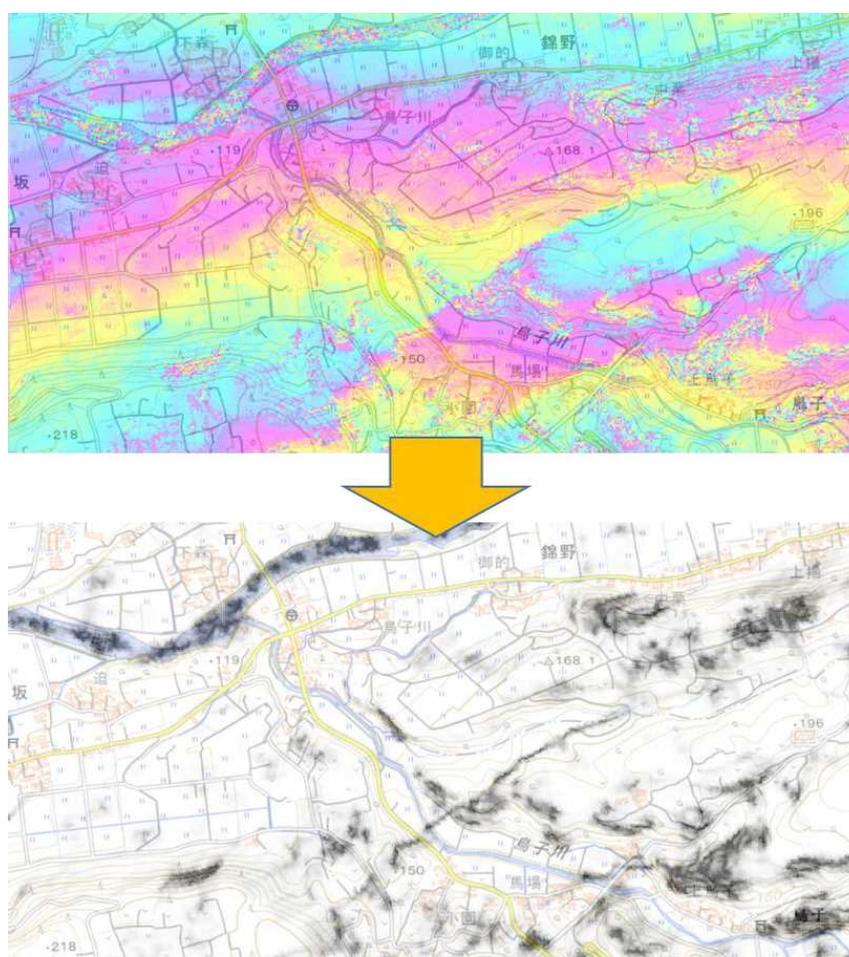


図 2.1.38 コヒーレンス画像作成イメージ

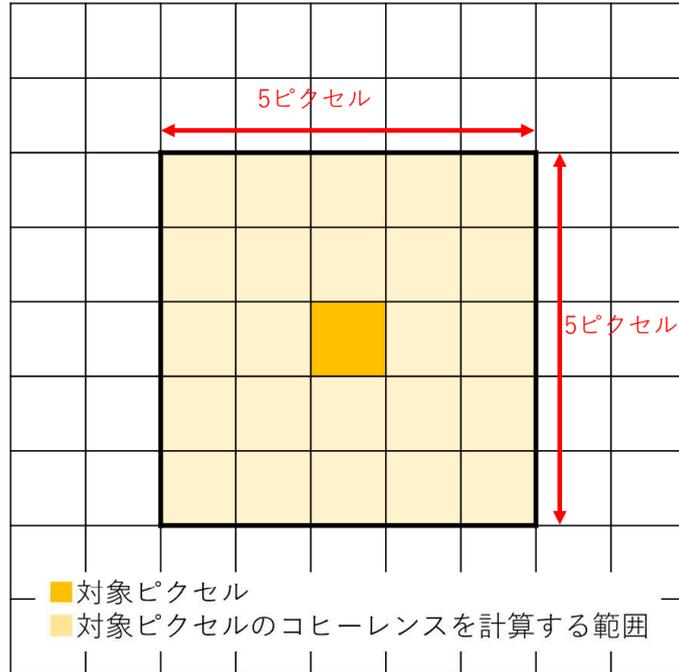


図 2.1.39 コヒーレンス計算のイメージ

②コヒーレンスが低い値の調査（閾値検討）

以下の手法でこれまでの目視判読データから統計値を取得し、判読者が感覚的に変位境界としていた値を数値化する（図 2.1.40）。

- ・ ライン上に 10m ごとのポイントを発生させる
- ・ ポイントにコヒーレンス値を読み込ませる
- ・ ポイントの統計値を整理する

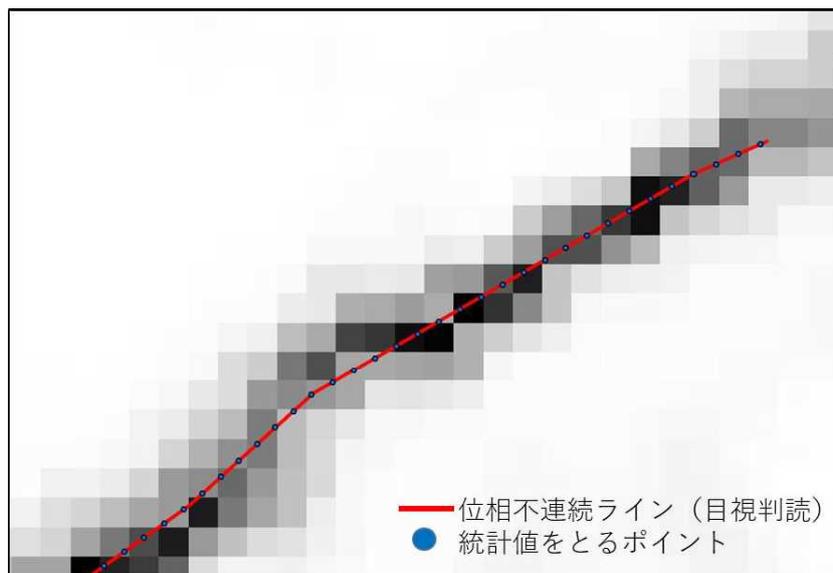


図 2.1.40 これまでの目視判読データからコヒーレンス値を取得するイメージ

以上の方法で統計値を集計した（表 2.1.2、図 2.1.41）。コヒーレンス値の平均値はどの軌道でも 0.6 程度で、標準偏差は 0.2 程度であった。そこで、平均値 0.6+ 標準偏差 0.2=0.8 以下を「コヒーレンス値が低い」範囲と定義した時、片側 1σ 範囲となるため、目視判読による位相不連続ラインの約 84%をカバーできることになる。ただし、目視の位相不連続ラインは、精度の悪い範囲（コヒーレンスが低い箇所以外も判読している）も存在するため、閾値 0.8 以下でカバーできる範囲のほとんどに、これまでの位相不連続ラインが含まれていると推定される。

以上の検討から「コヒーレンスが低い」範囲を「0.8 以下」と設定することとした。

表 2.1.2 目視判読データのコヒーレンス平均値と標準偏差

	東向_28.8°	東向_38.7°	東向_30.9°	西向_21.5°	西向_32.8°
平均値	0.58	0.59	0.56	0.60	0.55
標準偏差	0.22	0.24	0.21	0.22	0.21

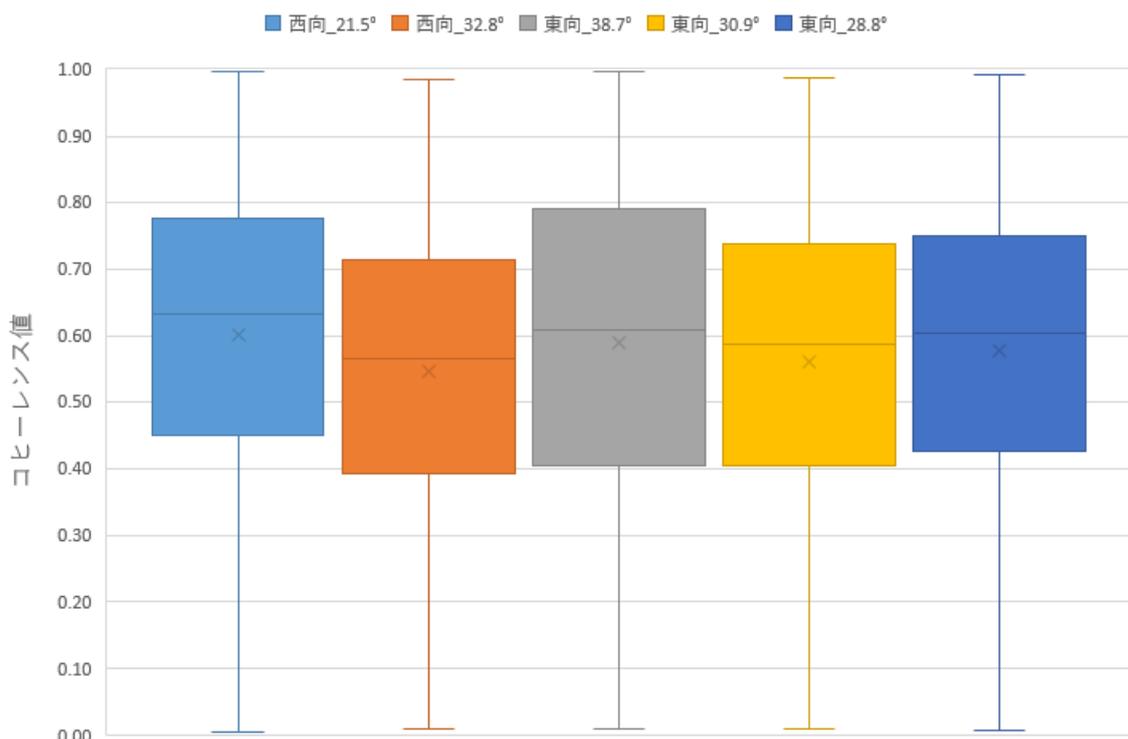


図 2.1.41 目視判読データのコヒーレンス値箱ひげ図

③コヒーレンスが低い範囲の意味

上記の検討で設定したコヒーレンス値 0.8 以下が意味することを調査する。コヒーレンス値とは前述のとおり 5×5 ピクセルの位相差のばらつきを示す。そこで、位相差（変位量）がどれだけばらつけば、コヒーレンス値が 0.8 以下となるかを以下の方法で調査する（図 2.1.42、図 2.1.43）。

- ・ コヒーレンス値が 0.8 以下かつ、位相不連続ライン周辺のポイントを設定する
- ・ ポイントに LOS 方向変位量の 5×5 ピクセルの標準偏差値を読み込ませる
- ・ ポイントの統計値を整理する

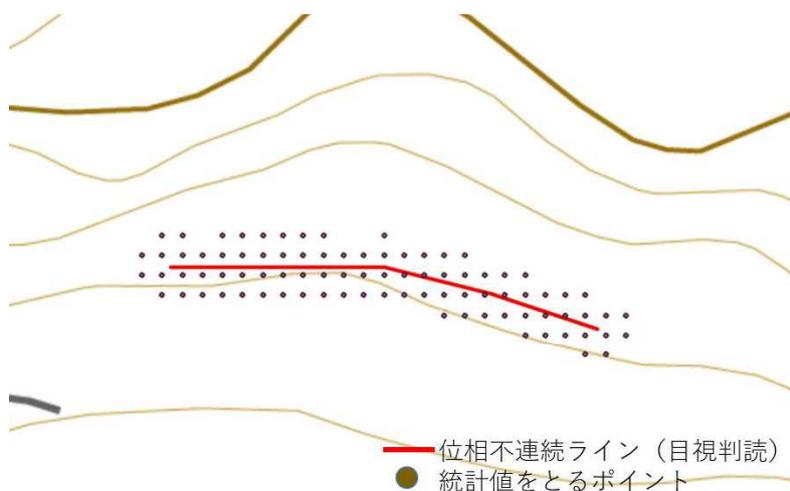


図 2.1.42 コヒーレンス値 0.8 以下のポイントに LOS 方向変位量の標準偏差を読み込ませるイメージ

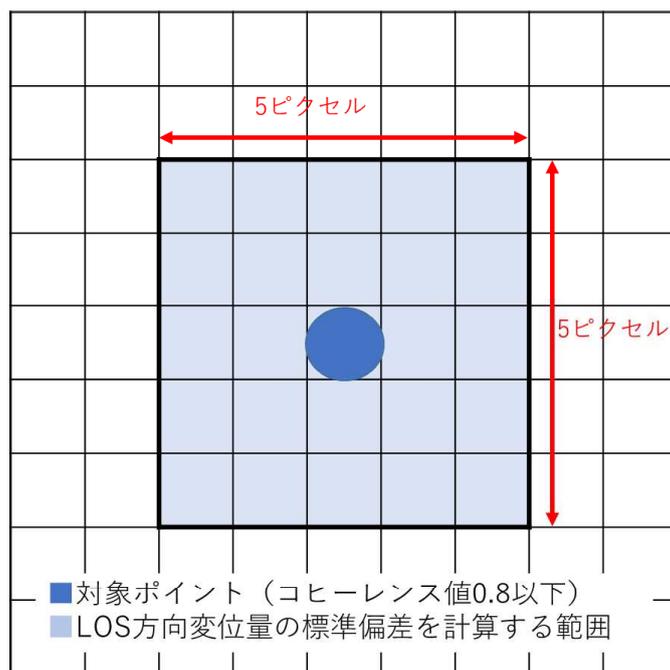


図 2.1.43 コヒーレンス計算のイメージ

以上の方法で集計した結果を表 2.1.3 に、軌道ごとのヒストグラムを図 2.1.44～図 2.1.48 に示す。ほとんどが 1～5cm の範囲内に分布し、平均値はどの軌道でも 3cm 程度であった。

以上の検討から、5 ピクセル×5 ピクセル内の標準偏差が 3cm 程度となると、「コヒーレンス値が 0.8 以下」となることがわかった。

表 2.1.3 LOS 方向変位量のばらつき

	東向_28.8°	東向_38.7°	東向_30.9°	西向_21.5°	西向_32.8°
平均値 (cm)	3.21	3.00	3.37	3.33	2.78
標準偏差 (cm)	2.14	1.69	1.79	2.45	1.92

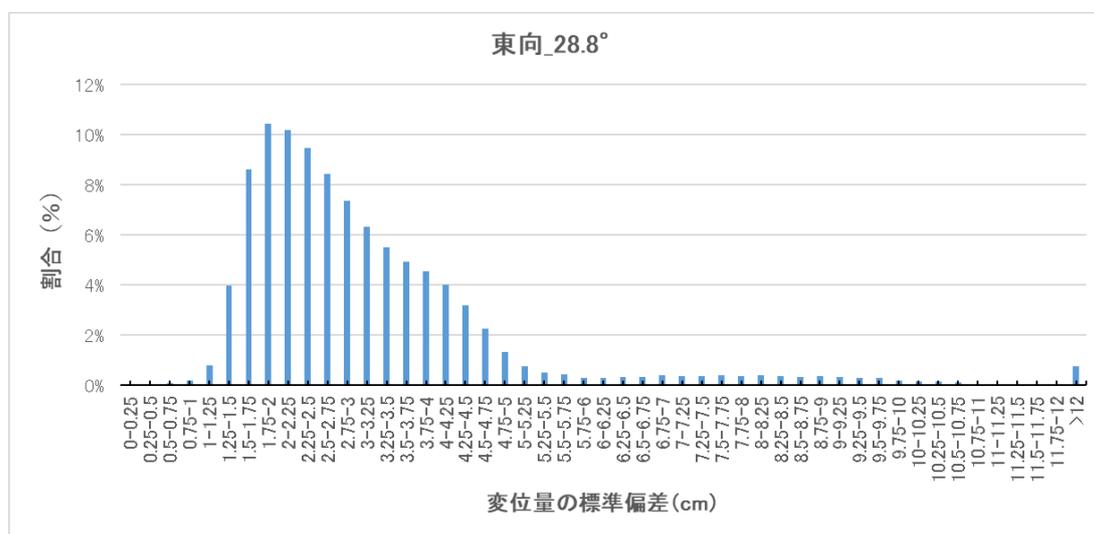


図 2.1.44 東向_28.8° の LOS 方向変位量の標準偏差のヒストグラム

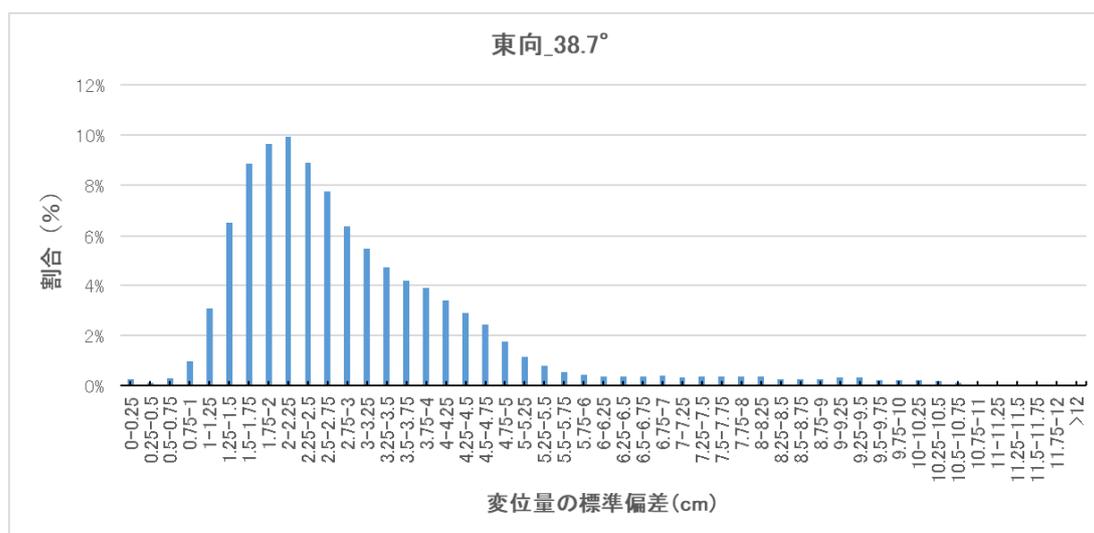


図 2.1.45 東向_38.7° の LOS 方向変位量の標準偏差のヒストグラム

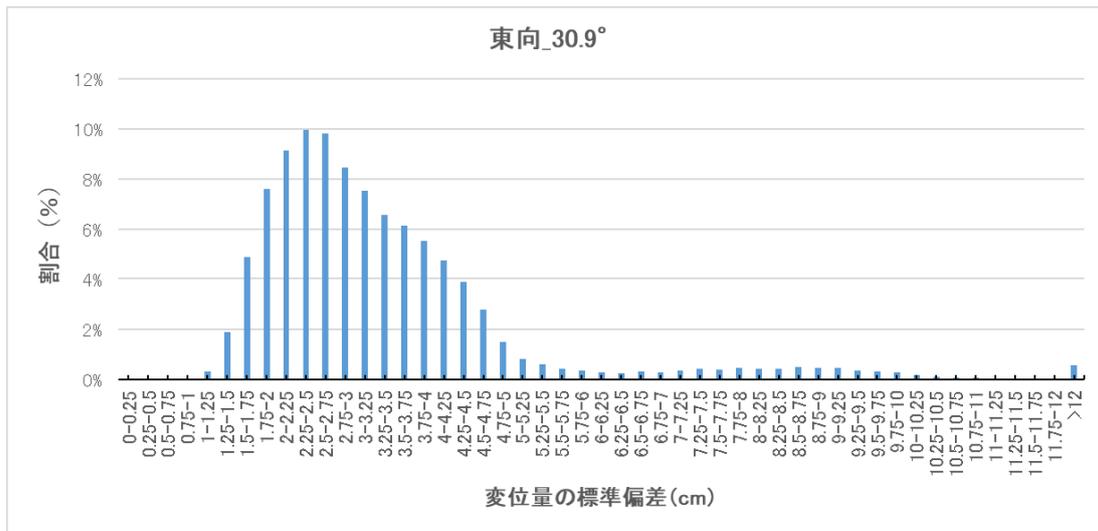


図 2.1.46 東向_30.9° の LOS 方向変位量の標準偏差のヒストグラム

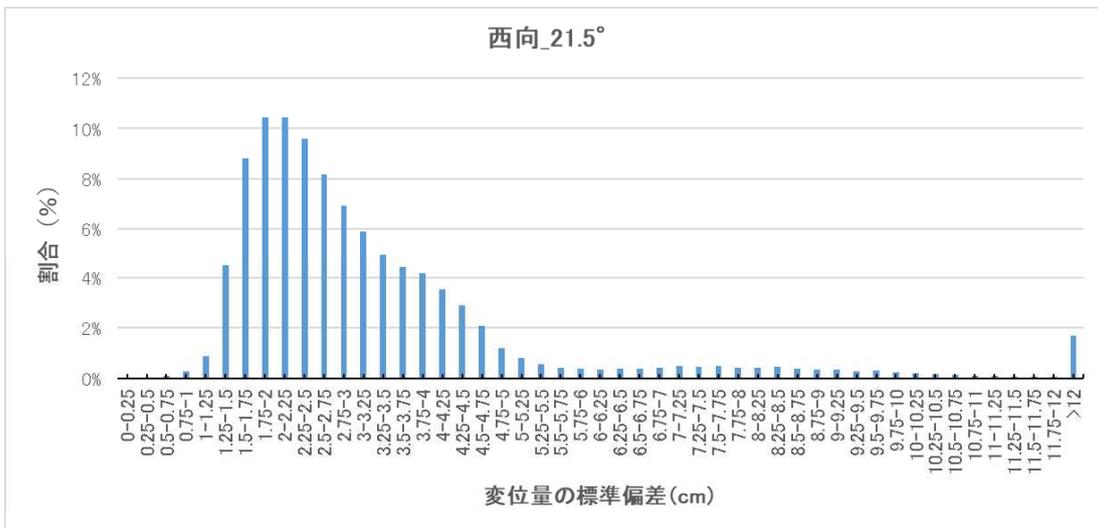


図 2.1.47 西向_21.5° の LOS 方向変位量の標準偏差のヒストグラム

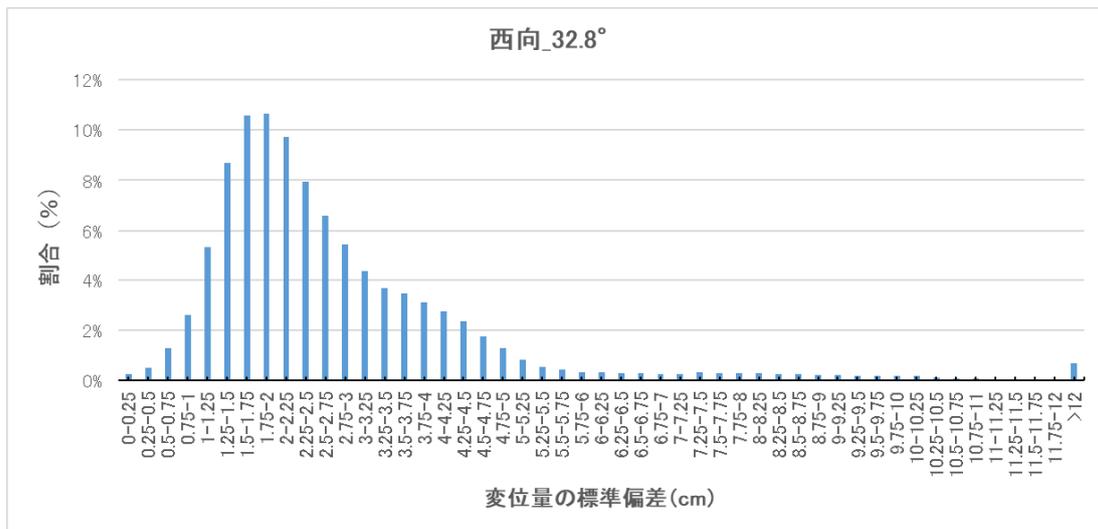


図 2.1.48 西向_32.8° の LOS 方向変位量の標準偏差のヒストグラム

(2)「位相勾配が急」の定量化

「位相差が急」を定量化するため、位相差画像から値が急激に変化する（エッジ）範囲を抽出する必要がある。エッジ抽出にはラプラシアンフィルタ等の微分フィルタが用いられる。位相差画像（図 2.1.49）にラプラシアンフィルタを適用した結果を図 2.1.50 に示す。勾配が急な箇所は強調されたが、線が不連続になる箇所もありラプラシアンフィルタのみでは定量化が困難であることが示唆される。

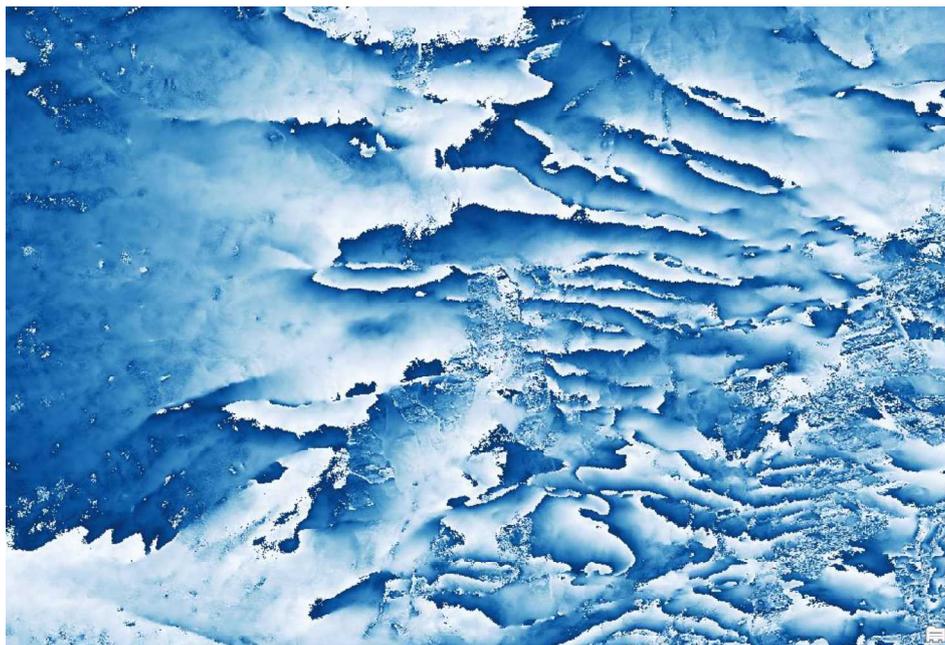


図 2.1.49 元の位相差画像



図 2.1.50 位相差画像にラプラシアンフィルタを適用した結果

(3) LC-InSAR 位相不連続の定量的抽出方法

以上で整理した結果、位相不連続ラインの目視判読の定量化は、「コヒーレンスが低い」の定量化はできたが、「位相差の勾配が急」には課題が残る。そこで、「コヒーレンスが低い」を閾値設定で抽出した後、変位境界を目視で判別していくこととする。手順を以下に示す（図 2.1.51）。

- ・ コヒーレンス値 0.8 以下をポリゴン化する。
- ・ 位相差画像を参照しながら河川や植生、地形などの変位境界ではない（変位勾配が緩やかな）ポリゴンを取り除いていく

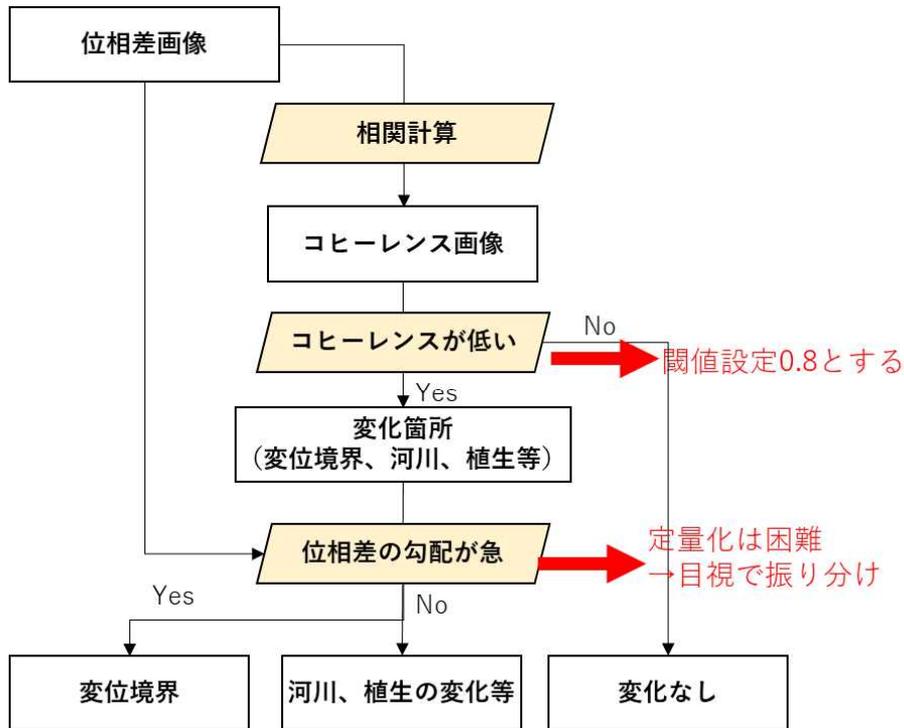


図 2.1.51 変位境界の判読フロー

以上の手順で抽出した結果と、従来の目視による判読結果の比較図を図 2.1.52 に示す。従来の目視判読では線として引いていた部分が幅を持った範囲として表現できるようになった。

広域の抽出結果を、図 2.1.53～図 2.1.57 に示す。また、5 軌道を合成した結果を図 2.1.58 に、目視判読の 5 軌道合成を図 2.1.59 に示す。定量化抽出結果では幅を持った変位境界を範囲で取得することができていることや、これまで取りすぎていたラインが消え、より定量的な抽出結果となっている。

布田川断層周辺における Shirahama et al.2016 の変位境界位置（図 2.1.60）と本検討の抽出結果(図 2.1.61)をみると、Shirahama et al.2016 変位境界位置以外の箇所で変位境界を抽出することができていることがわかる。一方で、主断層沿いの変位境界は抽出されておらず、LC-InSAR 図を用いた従来の目視判読結果と同様である。

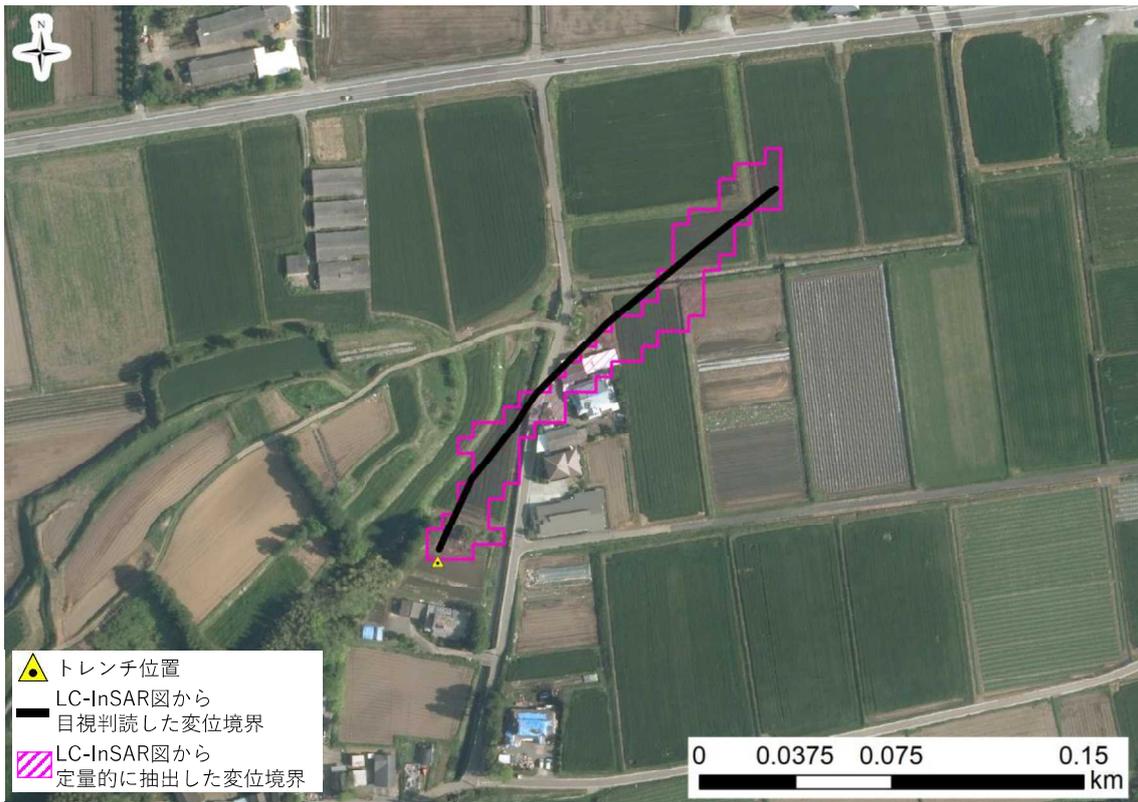


図 2.1.52 LC-InSAR 図から目視判読した変位境界と定量的に抽出した境界の比較

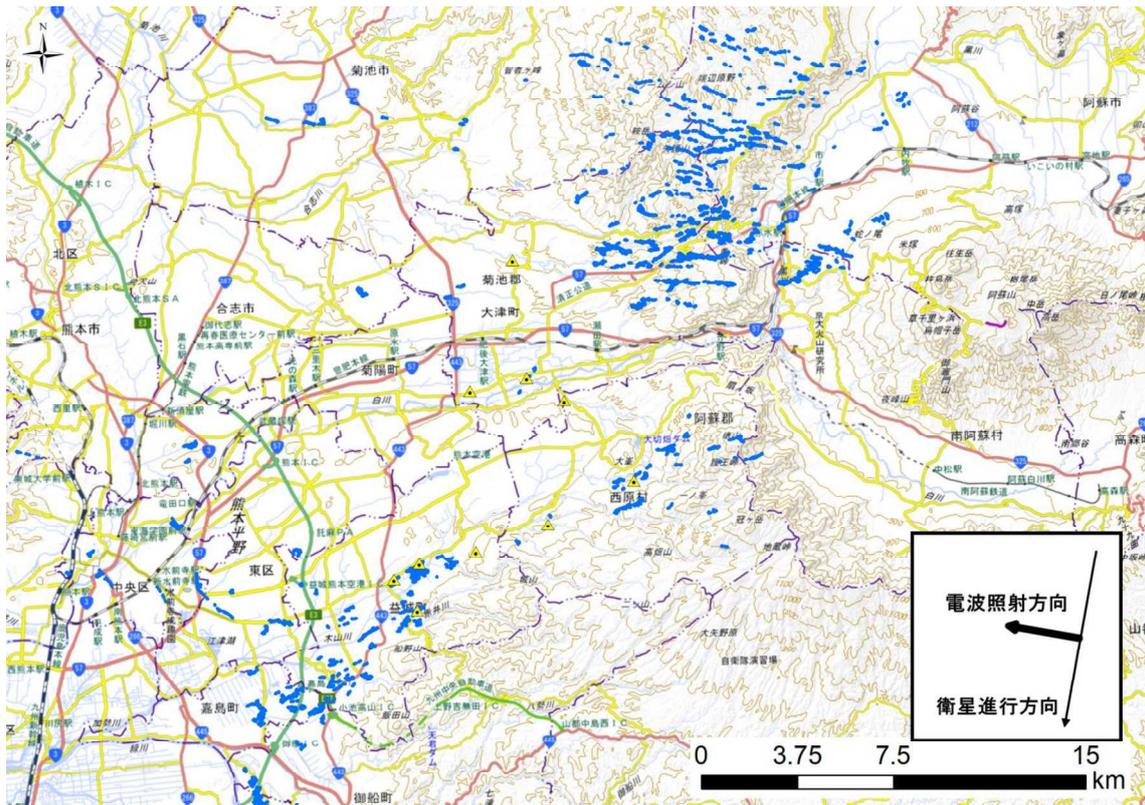


図 2.1.53 東向_28.8° の定量的な変位境界抽出結果

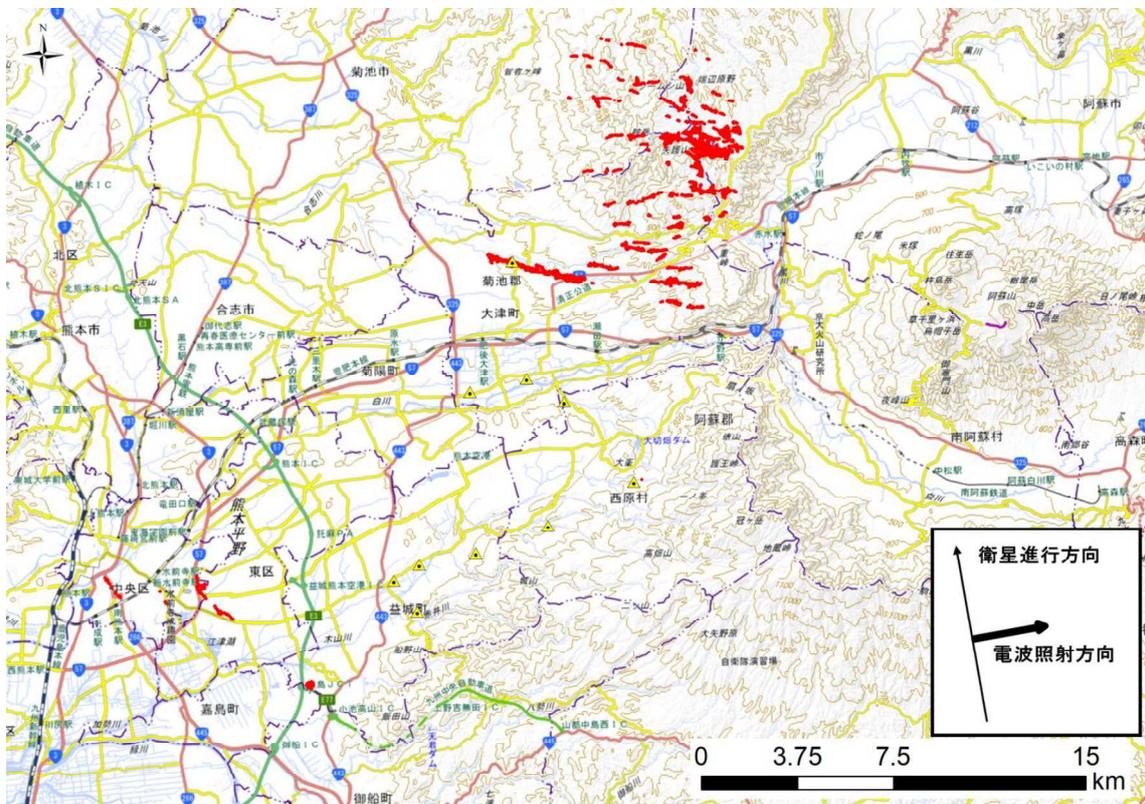


図 2.1.54 東向_28.8° の定量的な変位境界抽出結果

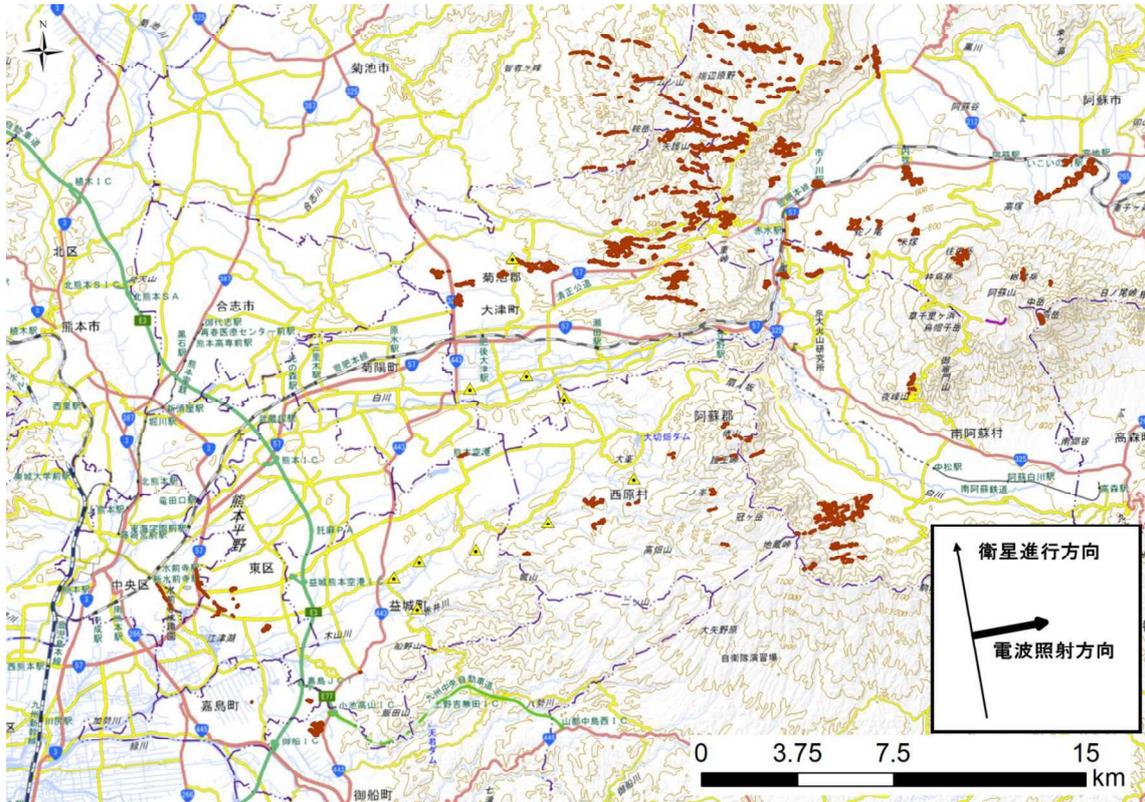


図 2.1.55 東向_28.8° の定量的な変位境界抽出結果

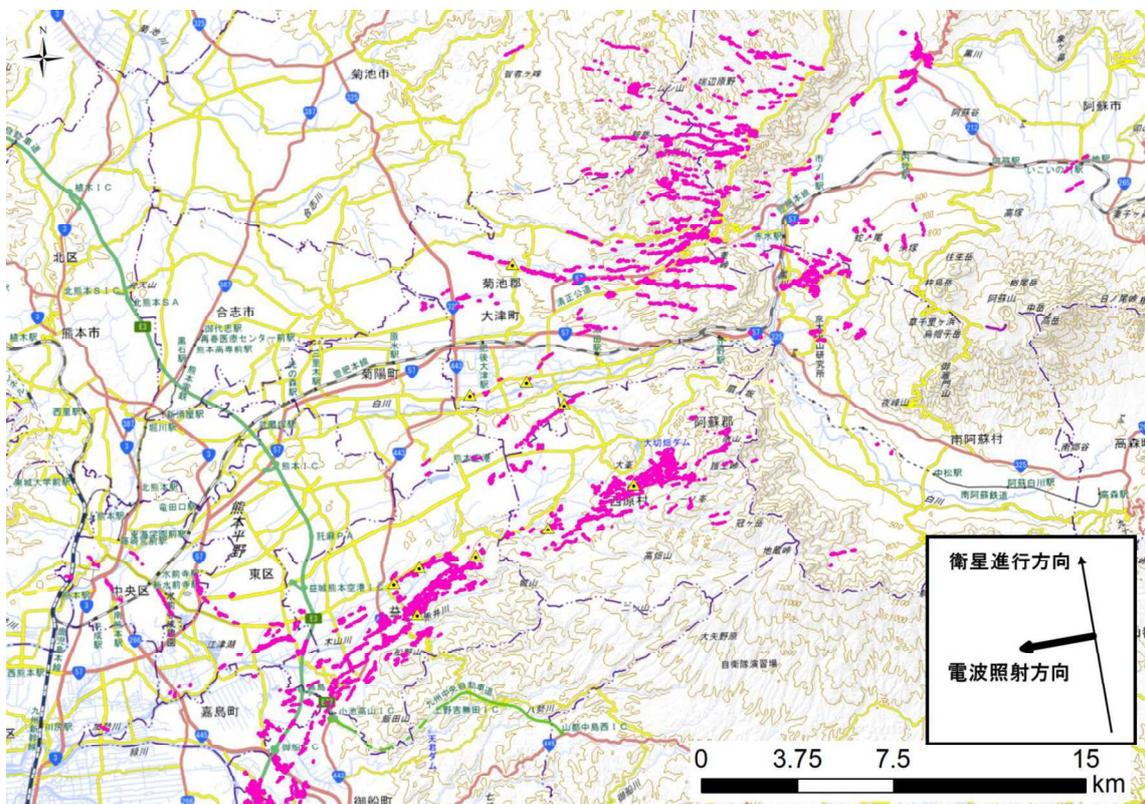


図 2.1.56 東向_28.8° の定量的な変位境界抽出結果

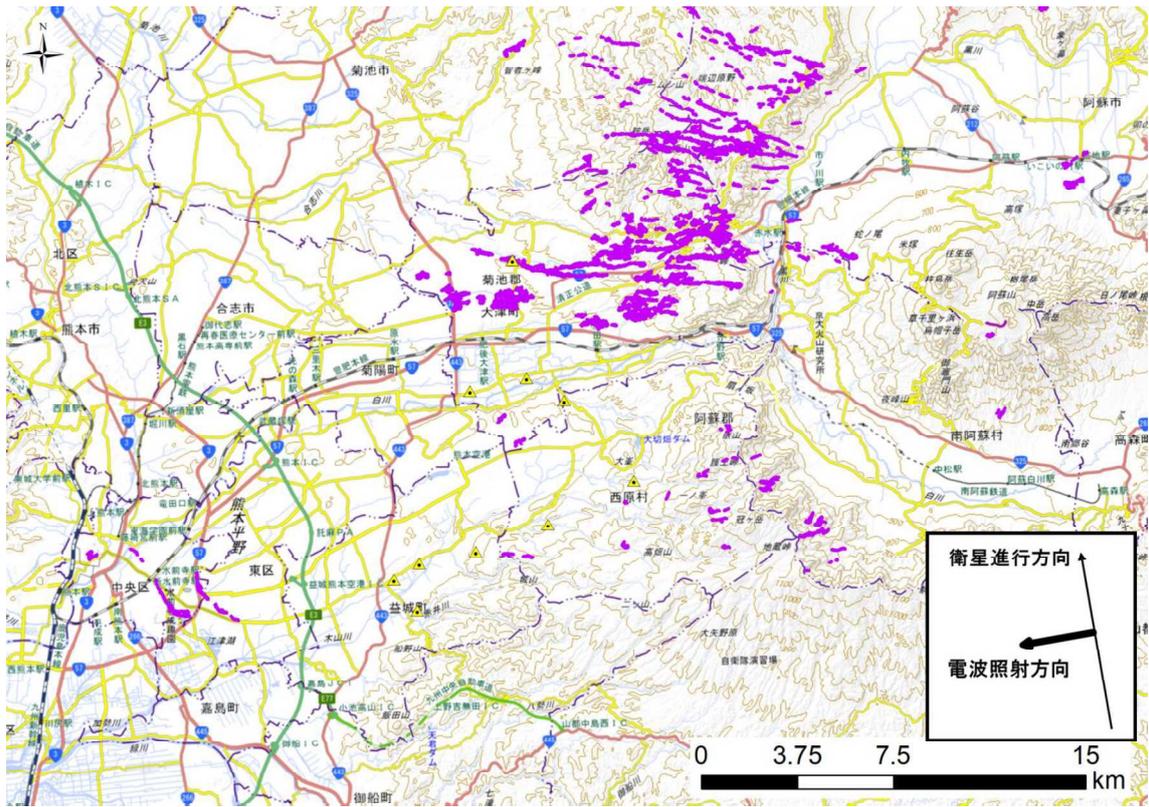


図 2.1.57 東向_{28.8°} の定量的な変位境界抽出結果

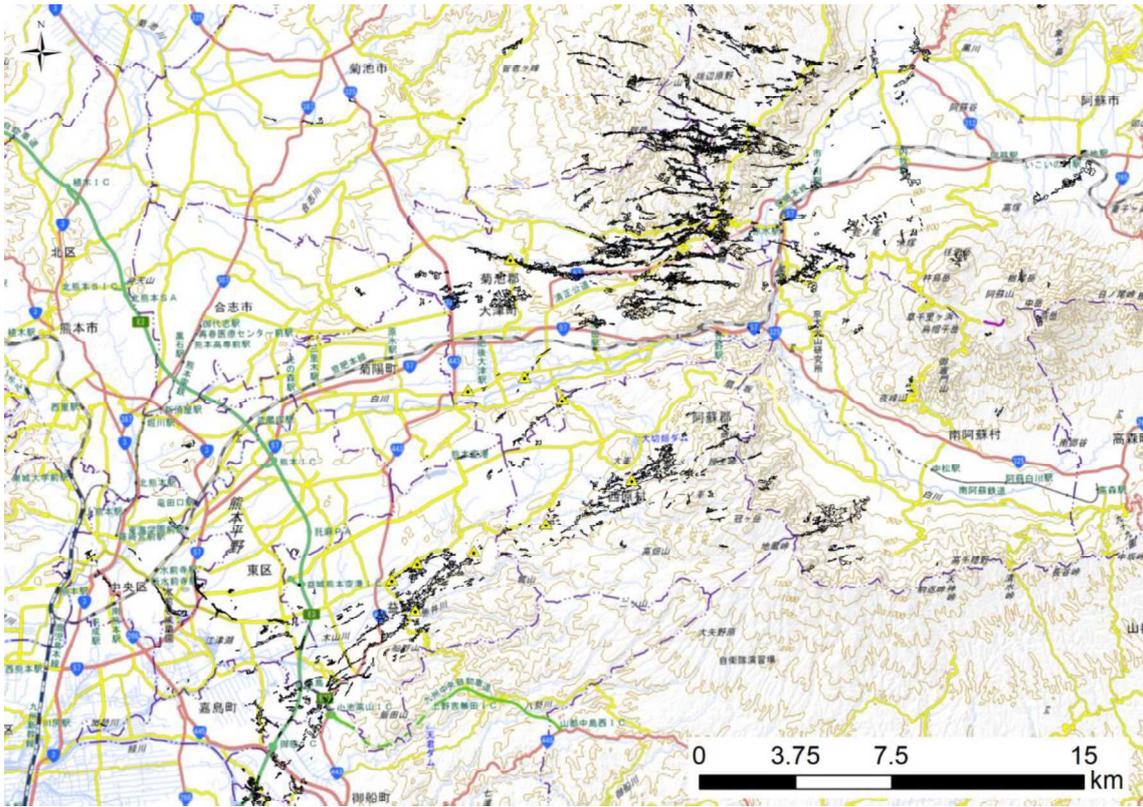


図 2.1.58 5 軌道の定量的な変位境界抽出結果合成

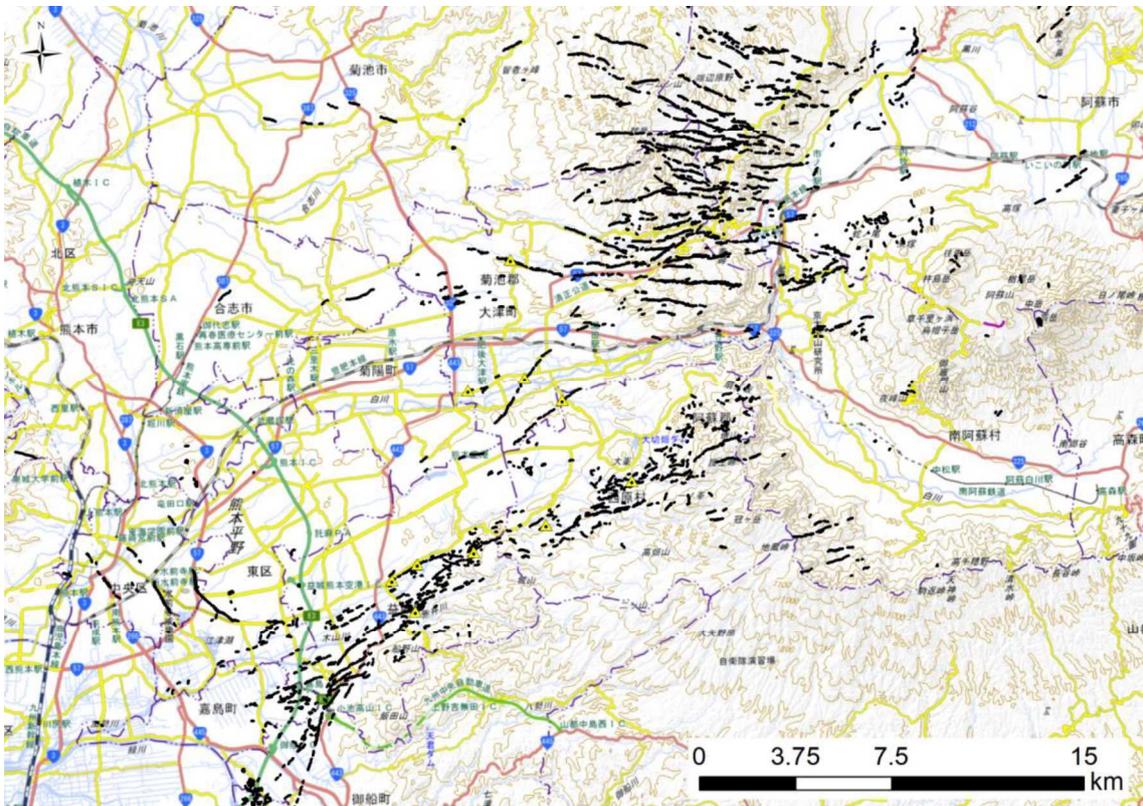


図 2.1.59 5 軌道の位相不連続ラインの目視判読結果合成

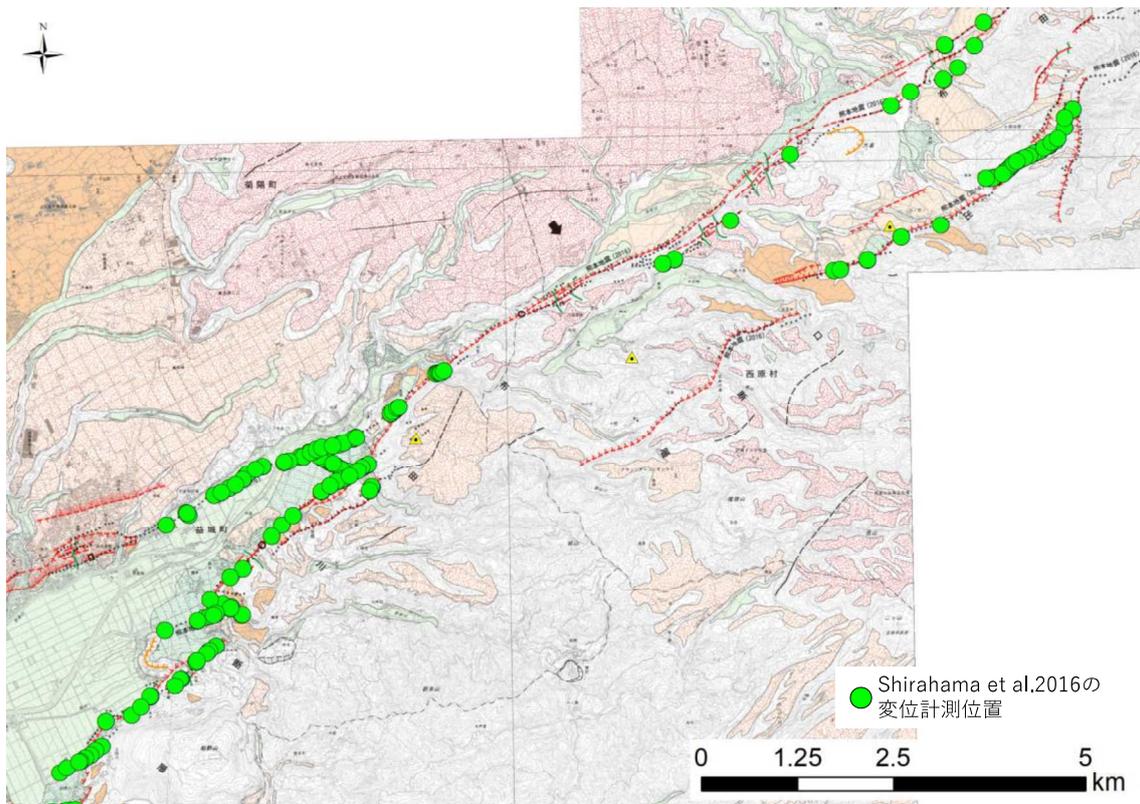


図 2.1.60 Shirahama et al2016 の変位継続位置と活断層

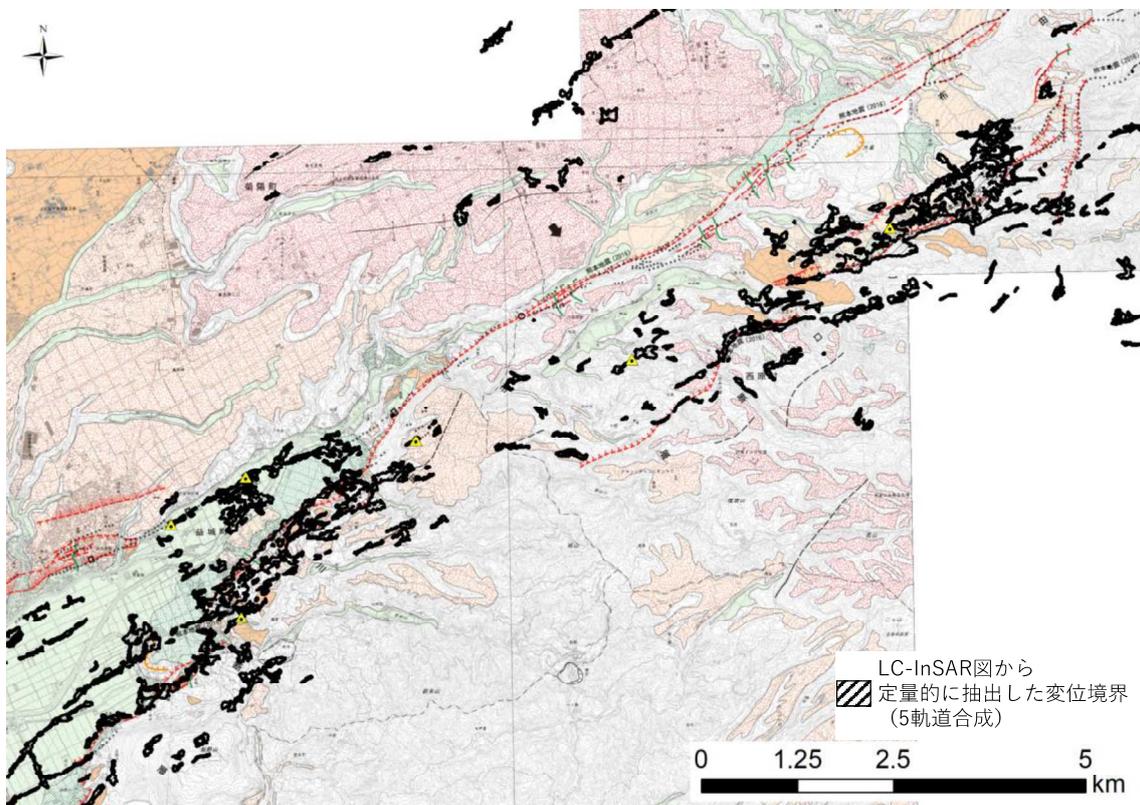


図 2.1.61 布田川断層周辺における定量的な変位境界抽出結果 5 軌道合成

2.1.1.3. 干渉 SAR 解析のまとめ

主断層から離れた場所で生じた副断層の検出手法の高度化を行うため、異なる 5 軌道の LC-InSAR 図（目視判読）を作成し、あわせて定量的な抽出方法の検討を実施した。まず、異なる 5 軌道の LC-InSAR 図（目視判読）を組み合わせることで、単一軌道では不連続であった変位境界が連続的な線としてつながることが確認された。これは SAR 衛星では、観測方向や入射角の違いにより軌道ごとに検出可能な変位が異なっていることを示しており、検出された変位が相互に補完されたものと考えられる。そのため、5 軌道の SAR 衛星を使用することで検出される変位境界がより連続的に抽出された。次に、LC-InSAR 図から変位境界を定量的に抽出する手法を検討した。これまで目視判読によって変位境界の抽出が行われてきたが、判読者の主観に左右されることや、幅を持った変位境界を線として抽出することになる等の課題があった。そこで、変位境界の定量的な抽出を行うため、これまでの目視判読データから統計値を取得し、判読者が感覚的に変位境界としていた値を数値化することで、変位境界とする閾値を設定した。この閾値を用いて画像処理を行うことで、幅を持った変位境界として定量的な抽出が可能となった。ただし、現状の手法ではすべての工程を自動化できておらず、手動でノイズを除去する必要があるため定量的な抽出方法について改良の余地が残されている。

2.1.2. 光学画像相関解析を用いた変位量図の作成

光学画像相関解析は干渉 SAR 解析で結果を得ることができない主断層付近の変位や、南北方向の変位を検出できることが過年度事業で確認されている（パスコ, 2020 およびパスコ, 2021）。本事業では、既往の空中写真による解析に加え、空中写真の撮影範囲外の阿蘇カルデラ内の解析を実施し、より広域の変位量分布を得ることを目的とする。

2.1.3. カルデラ内の光学画像相関

過年度事業（パスコ, 2021）で使用した空中写真の撮影範囲（図 2.1.62 の赤斜線部）と、本事業で実施する高解像度の衛星画像の撮影範囲（図 2.1.62 の青斜線部）及び、使用する画像の諸元を表 2.1.4 に示す。

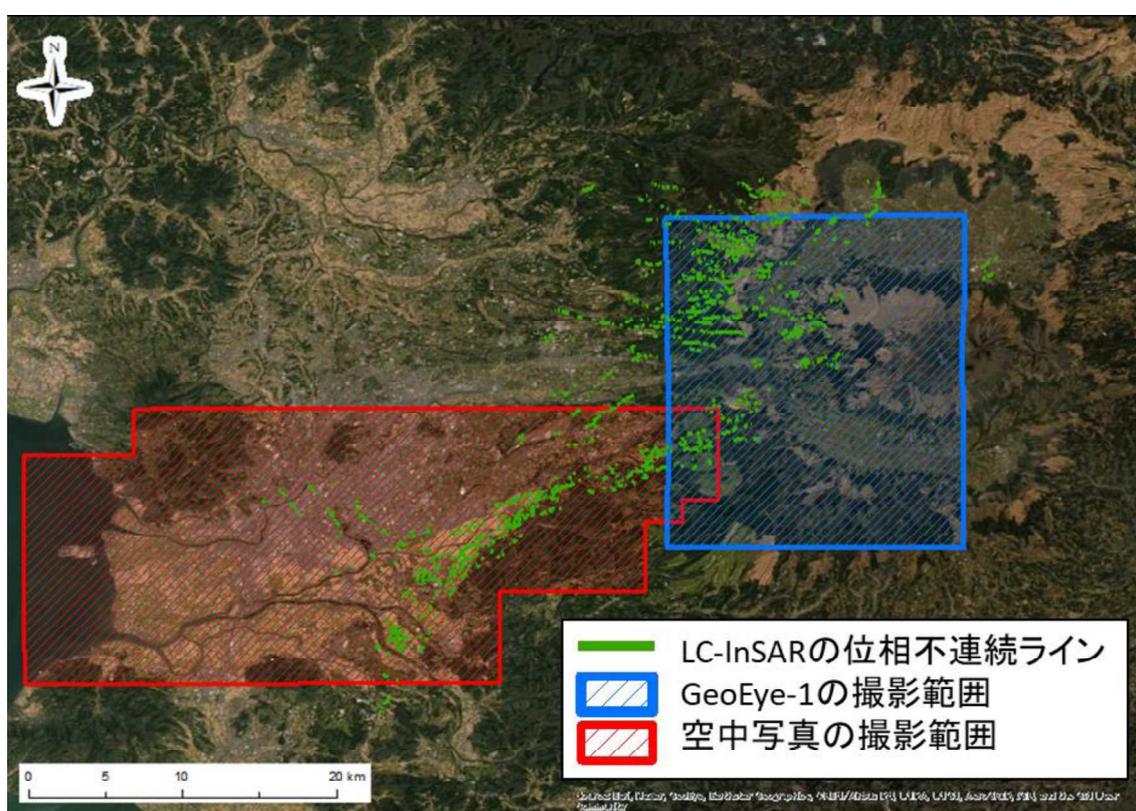


図 2.1.62 光学画像相関解析の実施範囲（位相不連続ラインは、小俣ほか（2017）による）

表 2.1.4 光学画像相関解析に使用する画像

光学画像	解像度
空中写真 (ADS80)	0.2m
GeoEye-1	0.4～0.5m

2.1.3.1. 高解像度衛星画像の光学画像相関解析の実施

使用する高解像度衛星画像（GeoEye-1）衛星画像一覧表 2.1.5 に示す。使用する画像の諸元は以下のとおりである（表 2.1.5、図 2.1.63）。地震前の撮影は同日に撮影されていることから、連続して撮影されたものである。したがって、2枚の画像を1枚の画像として合成して使用することとする。地震後は同年10月10日の画像を使用する。なお、過年度事業（パスコ, 2020）では入射角や、太陽高度の違いが精度に影響をおよぼすことが指摘されていることから同条件のものを選定している。

表 2.1.5 阿蘇カルデラ内の光学画像相関解析に使用する衛星画像

No.	地震	観測日	解像度 (m)	入射角 (度)	太陽高度 (度)
1	地震*前_北側	2016/3/17	0.4	8.2	51.6
2	地震前_南側	2016/3/17	0.4	10.6	51.7
3	地震後	2016/10/10	0.4	12.3	48.8

※2016年4月14日（M 6.5）及び4月16日（M 7.3）発生

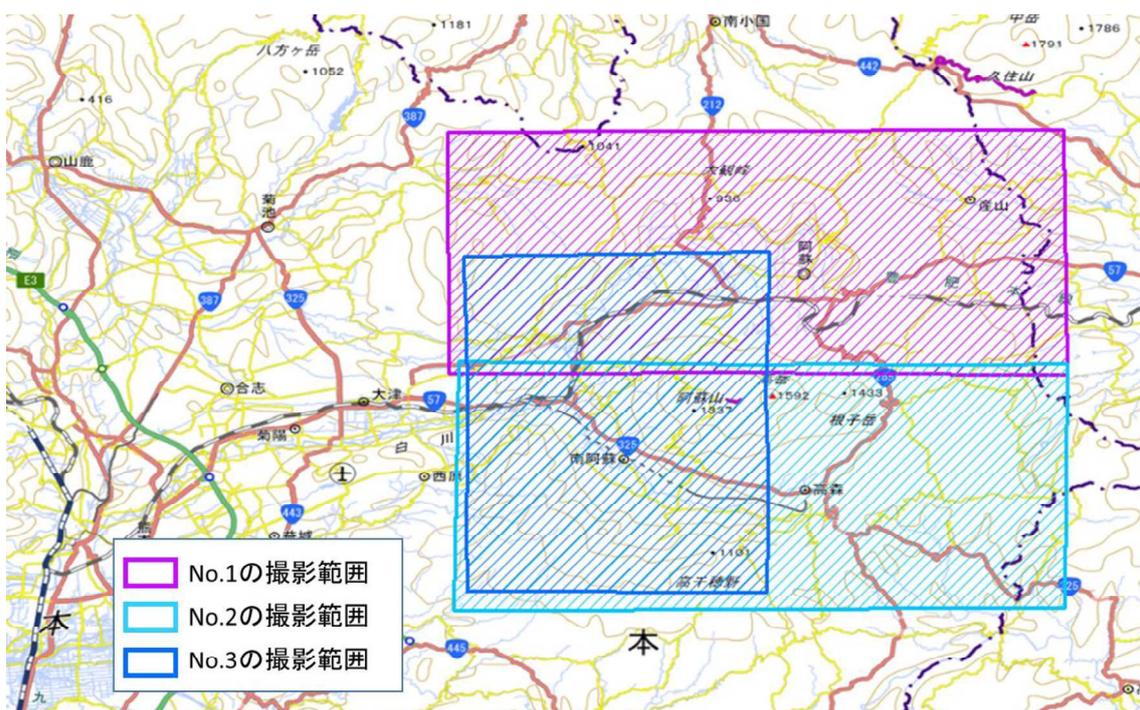


図 2.1.63 GeoEye-1 の撮影範囲

図 2.1.64、図 2.1.65 に地震前後の GeoEye-1 パンクロマチック画像を示す。

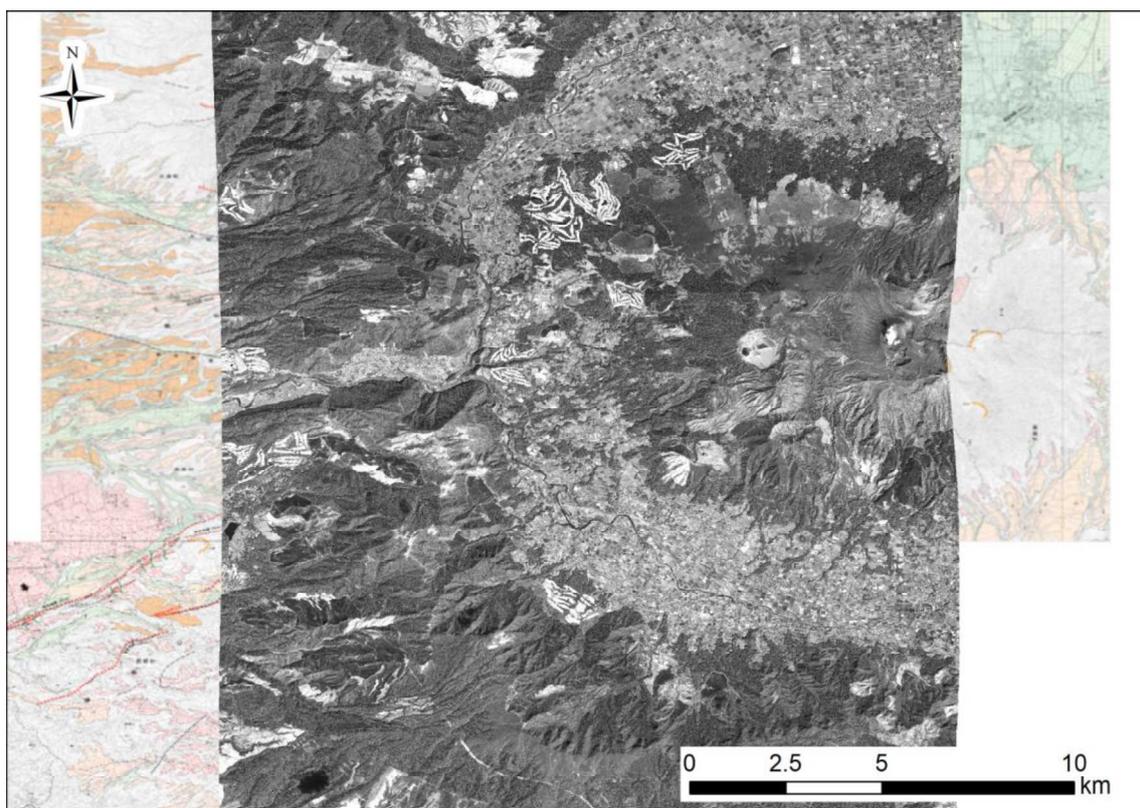


図 2.1.64 地震前の GeoEye-1 画像 (No.1、No.2 の画像を合成したもの)

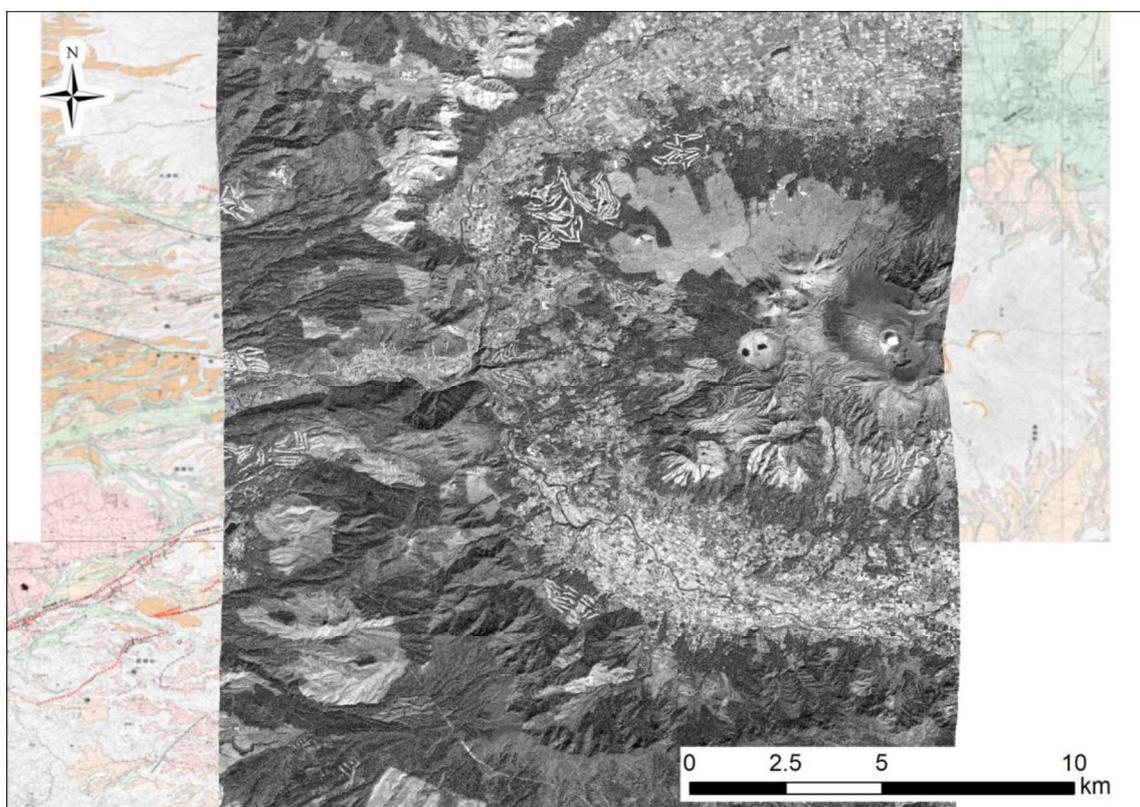


図 2.1.65 地震後の GeoEye-1 画像 (No.3)

次に光学画像相関解析の東西方向変位量図を図 2.1.66 示す。全体位に東向の変位が確認されるが、これは森林域でのノイズと考えられる。活断層図の主断層沿いでは赤と青の色の境界を確認することができる。一方で、広域に青（東向）の変位がみられるため以降の大きい縮尺図面で詳細を確認する。

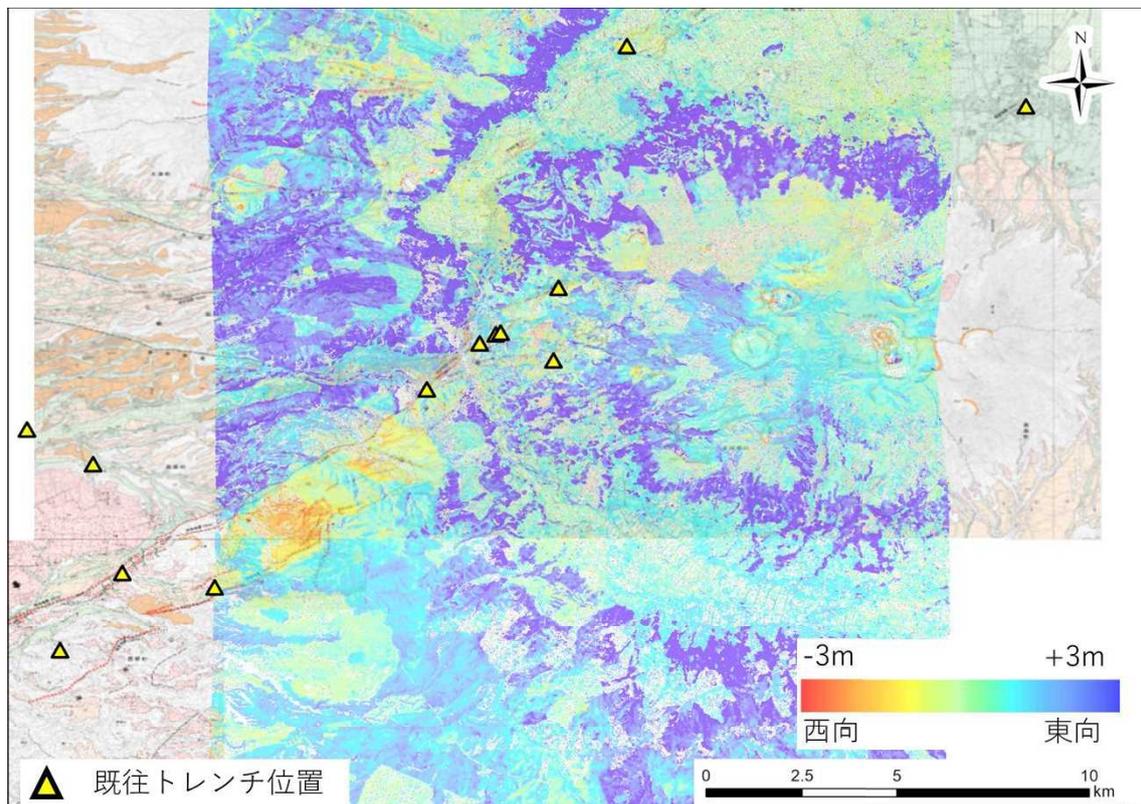


図 2.1.66 東西方向変位量画像（解析範囲全域）

主断層沿いの大縮尺の図と、同範囲の LC-InSAR 図を図 2.1.67～図 2.1.70 に示す。背景図は活断層図で、赤線は活断層を示している。LC-InSAR 図では特定することができない主断層沿いの変位境界を確認することができる。一方で、森林域では東向の変位が出てしまっている。これは、入射角や太陽高度の違いによって、高さのある物体が倒れこんでみえるためと考えられる。

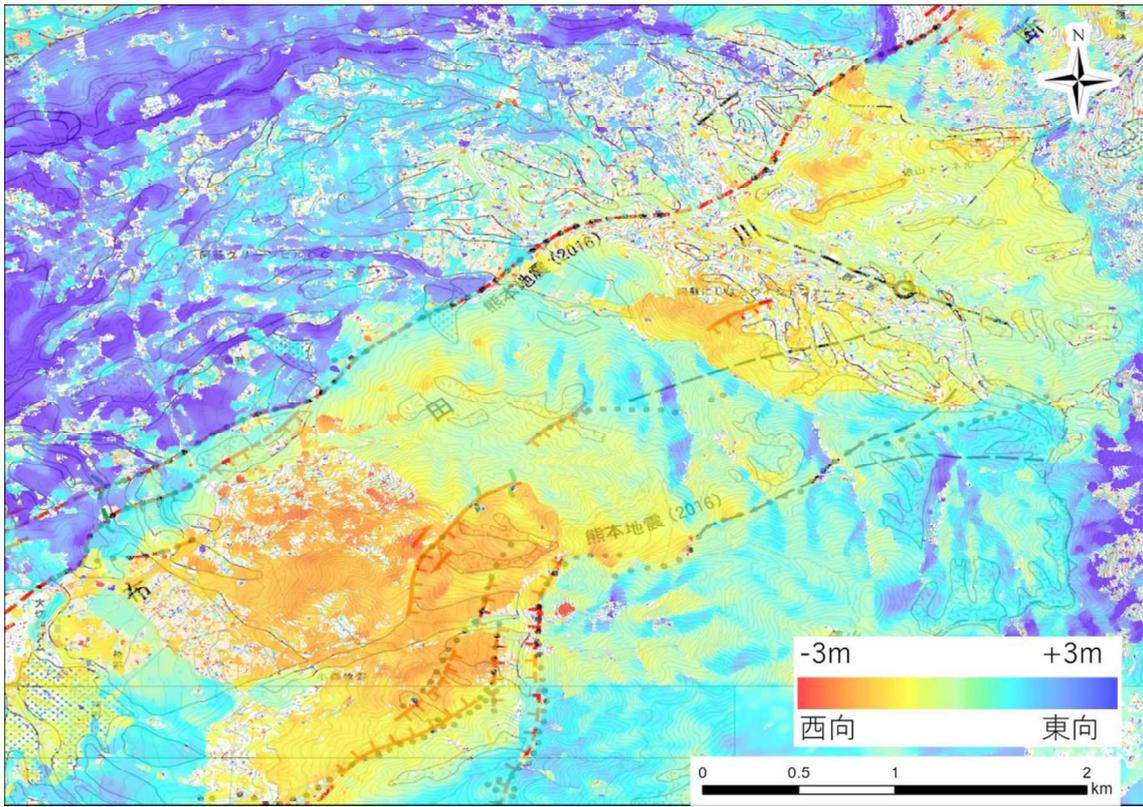


図 2.1.67 東西方向変位量画像詳細図 (俵山周辺)

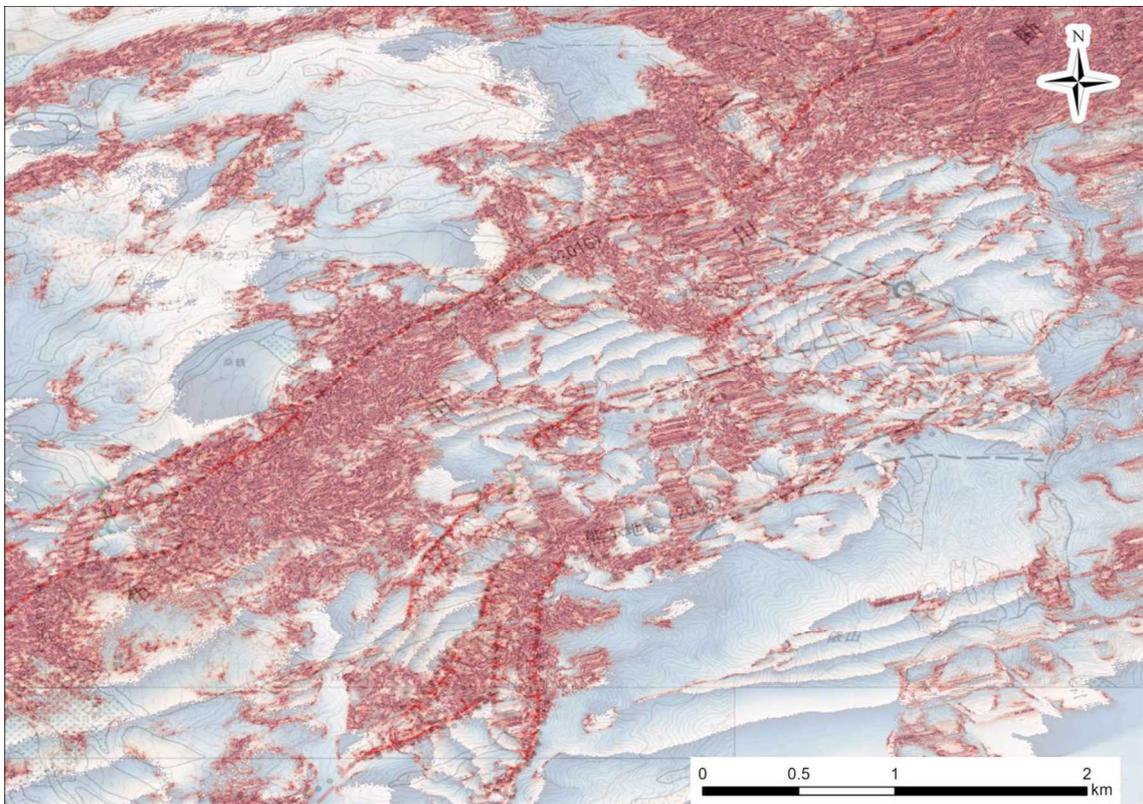


図 2.1.68 LC-InSAR 図 (俵山周辺)

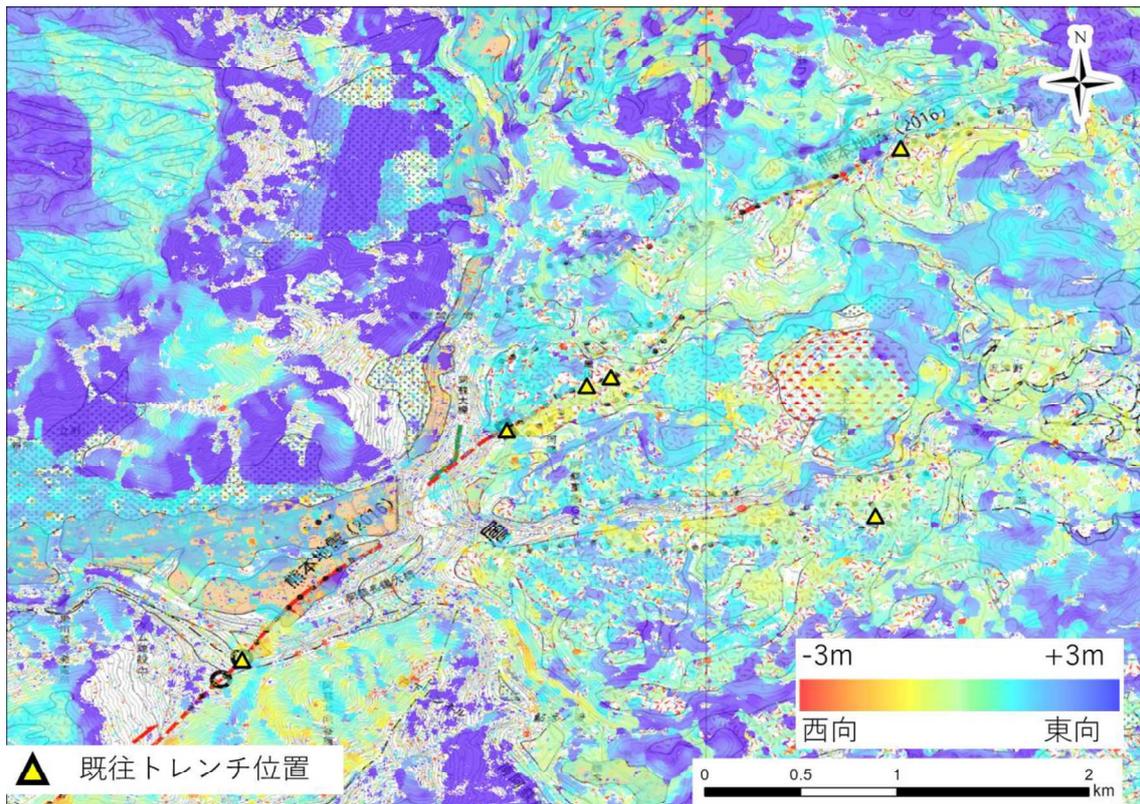


図 2.1.69 東西方向変位量画像詳細図（阿蘇大橋周辺）

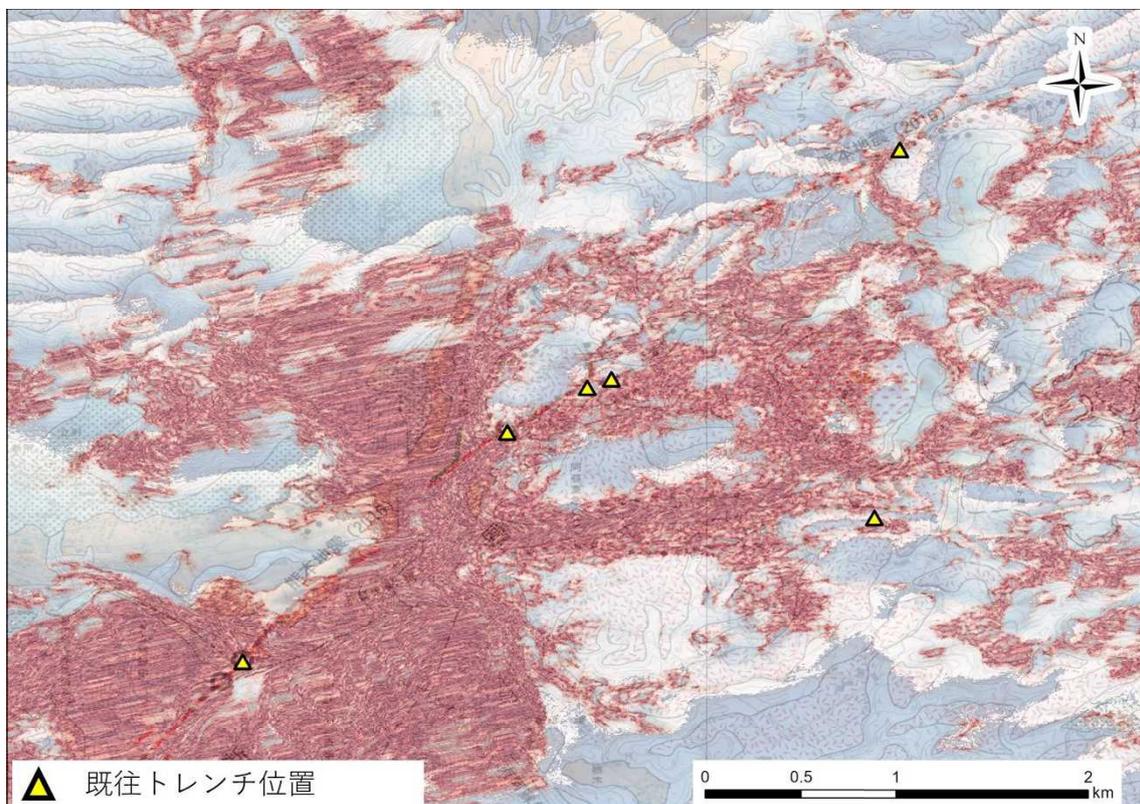


図 2.1.70 LC-InSAR 図（阿蘇大橋周辺）

2.1.3.2. 光学画像相関解析のまとめ

主断層沿いの変位量を検出するため、空中写真に加えて、高解像度の衛星画像を用いた光学画像相関解析を実施した。過年度事業（パスコ, 2021）の検討では阿蘇カルデラ内の光学画像相関解析は行われておらず、変位量分布は不明であった。そこで、高解像度の衛星画像（GeoEye-1）を用いて変位量分布図を作成し、主断層沿いの変位境界付近について地震前後の変位量を得ることができた。ただし、今回の光学画像相関解析では森林域において画像の倒れこみによる解析精度の低下が生じた。そのため、高解像度の衛星画像を使用する場合は、入射角や太陽高度の違いが解析結果の精度に大きく影響を与えることに留意する必要がある。

2.1.4. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討結果

主断層から離れた場所で生じた副断層の検出手法の高度化を行うため、異なる 5 軌道の LC-InSAR 図を作成し、あわせて定量的な抽出方法の検討を実施した。まず、異なる 5 軌道の LC-InSAR 図を組み合わせることで、単一軌道では不連続であった変位境界が連続的な線としてつながることが確認された。これは SAR 衛星では、観測方向や角度の違いにより軌道ごとに検出可能な変位が異なっていることを示しており、検出された変位が相互に補完されたものと考えられる。そのため、5 軌道の LC-InSAR 図を使用することで検出される変位境界がより連続的に抽出された。次に、LC-InSAR 図から変位境界を検出する手法の定量化を実施した。これまで目視判読によって変位境界の抽出が行われてきたが、判読者の主観に左右されることや、幅を持った変位境界を線として抽出することになる等の課題があった。そこで、定量的な変位境界の抽出を行うため、これまでの目視判読データから統計値を取得し、判読者が感覚的に変位境界としていた値を数値化することで、変位境界とする閾値を設定した。この閾値を用いて画像処理を行うことで、幅を持った変位境界として定量的な抽出が可能となった。ただし、現状の手法ではすべての工程を自動化できておらず、手動でノイズを除去する必要があるため定量的な抽出方法について改良の余地が残されている。

主断層沿いの変位量を検出するため、空中写真に加えて、高解像度の衛星画像を用いた光学画像相関解析を実施した。過年度の検討では阿蘇カルデラ内の光学画像相関解析は行われておらず、変位量分布は不明であった。そこで、高解像度の衛星画像 (GeoEye-1) を用いて変位量分布図を作成し、主断層沿いの変位境界付近について地震前後の変位量を得ることができた。ただし、今回の光学画像相関解析では森林域において画像の倒れこみによる解析精度の低下が生じた。そのため、高解像度の衛星画像を使用する場合は、入射角や太陽高度の違いが解析結果の精度に大きく影響を与えることに留意する必要がある。

2.2.1. 主断層沿いの変位量分布

主断層の変位量分布について、空中写真の光学画像相関解析結果を用いて検討した。図 2.2.2 上段に変位量分布図、中段に色別標高図、下段に投影線上の変位量を示す。上段、中段で示されている主断層線の色は、下段のグラフ中の線の色とリンクしている。また、変位境界のずれ量は正の値が右横ずれ、負の値は左横ずれをあらわす。以下のことが確認された。

- ・ 布田川断層では多くの場所で 2~3m 程度のずれが連続して分布しているが、断層が分岐すると個々の断層の変位量は減少する。分岐した断層の変位量について総和をとると、総変位量は 2~3m のままである。
- ・ 日奈久断層では南にいくほど変位量が減少する。
- ・ 同様の検討を実施した Shirahama et al. (2016)の変位量分布（図 2.2.3）と整合的であることに加え、面的な変位の傾向を取得することができている。
- ・ 2013 年パキスタン地震（Mw 7.7）で、光学画像相関解析を実施した Antoine et al. (2022) でも分岐しても総変位量が変わらないことを示している（図 2.2.4）。

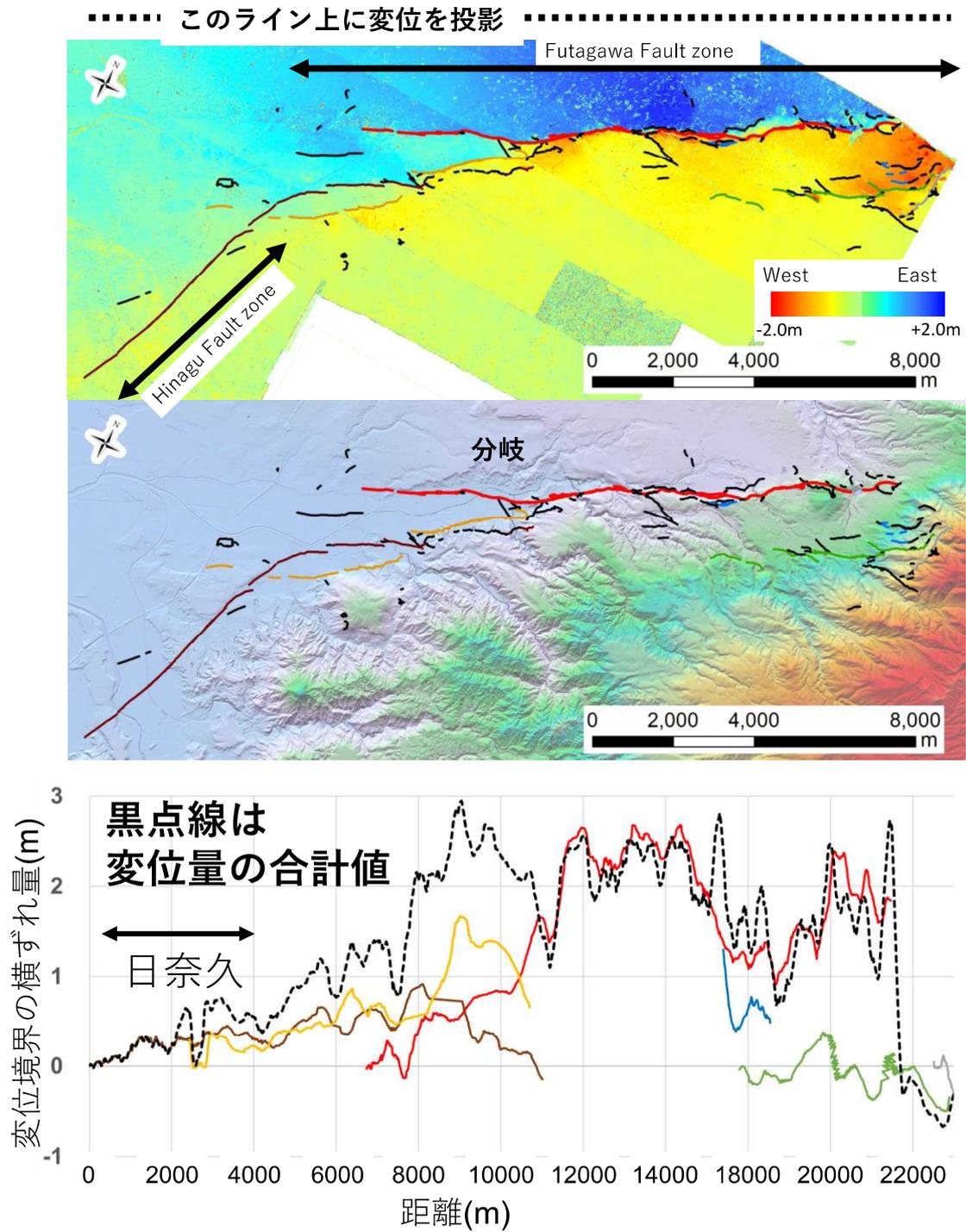


図 2.2.2 主断層沿いの変位量分布

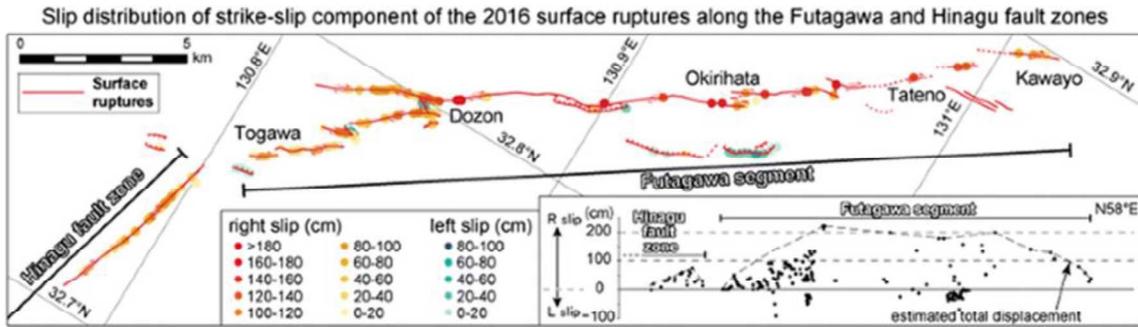


図 2.2.3 Shirahama et al.(2016)の Fig.6

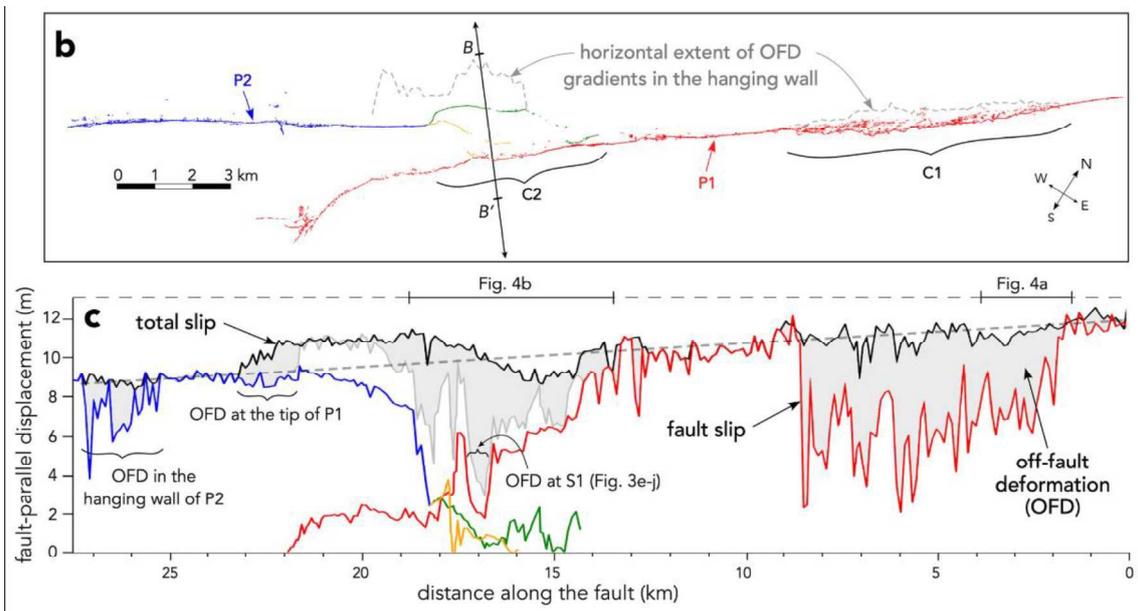


図 2.2.4 Antoine et al.(2022)の変位量分布図 (一部加工)

2.2.2. 主断層から離れた位置の変位量分布

主断層沿いの変位量分布と同様に、主断層から離れた位置の副断層における変位量分布図を作成した。副断層とする地点は、過年度事業（パスコ, 2020, 2021）及び本事業でトレンチ調査を実施した地点とした。また上記の副断層地点において、2.1.1.2 で実施した定量的まるを参考にラインを作成し、副断層変位境界とした。以上の4箇所と過年度事業のトレンチの分布図を図 2.2.5 に示す。主断層（以降では光学画像相関解析の連続した変位境界（パスコ, 2021）を主断層とする）の北側に分布する4箇所としている。

- ・ 2022 年度平川馬場トレンチ
- ・ 2021 年度小園トレンチ
- ・ 2020 年度下町トレンチ
- ・ 2019 年度陣内トレンチ

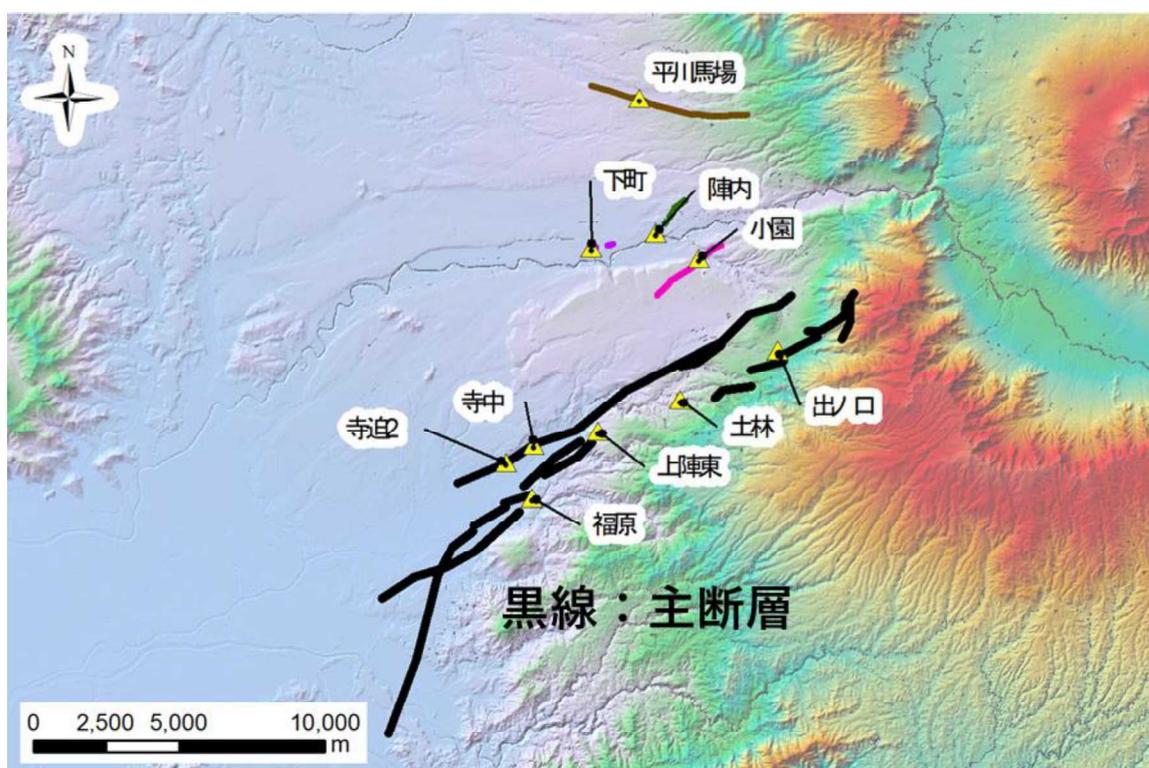


図 2.2.5 主断層と対象とする副断層の位置図

2.2.2.1. 副断層の変位量(トレンチ箇所ごと)

選定した副断層のトレンチ箇所の変位量断面図を以降に示す（図 2.2.6～図 2.2.14）。なお変位量は干渉 SAR の 2.5 次元解析結果を使用している。

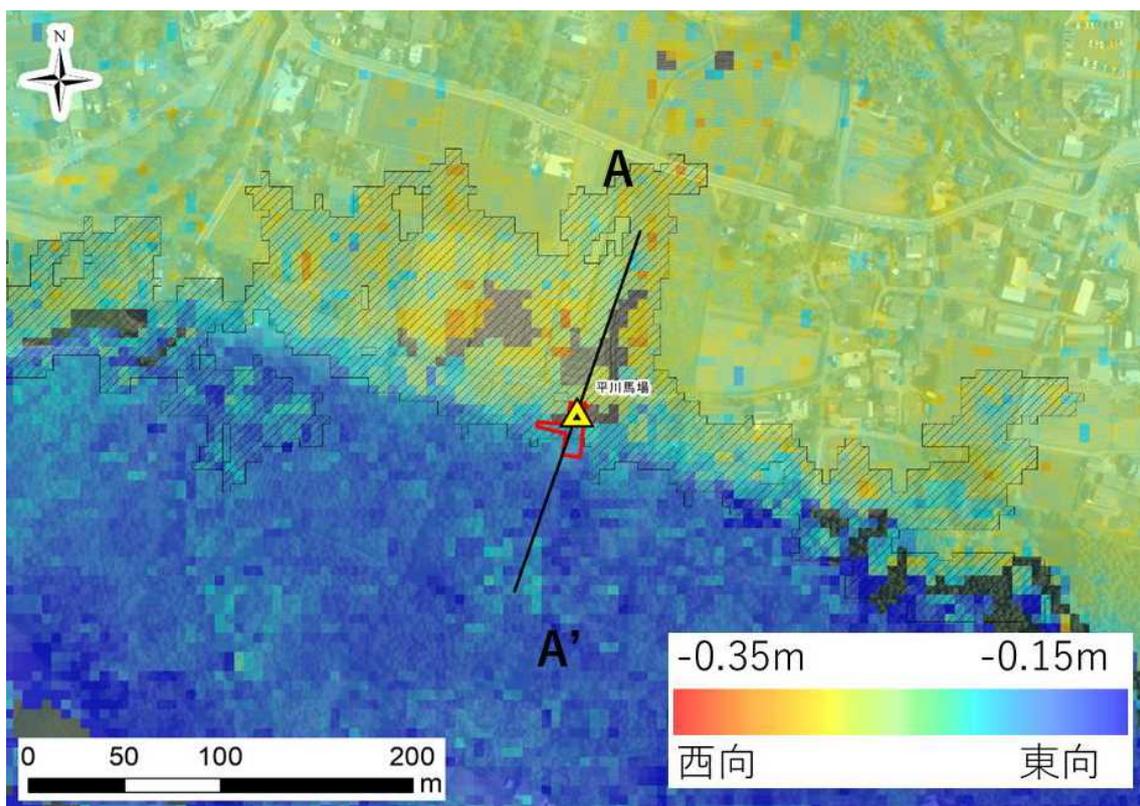


図 2.2.6 平川馬場トレンチの東西方向変位量図（赤枠はトレンチ形状）

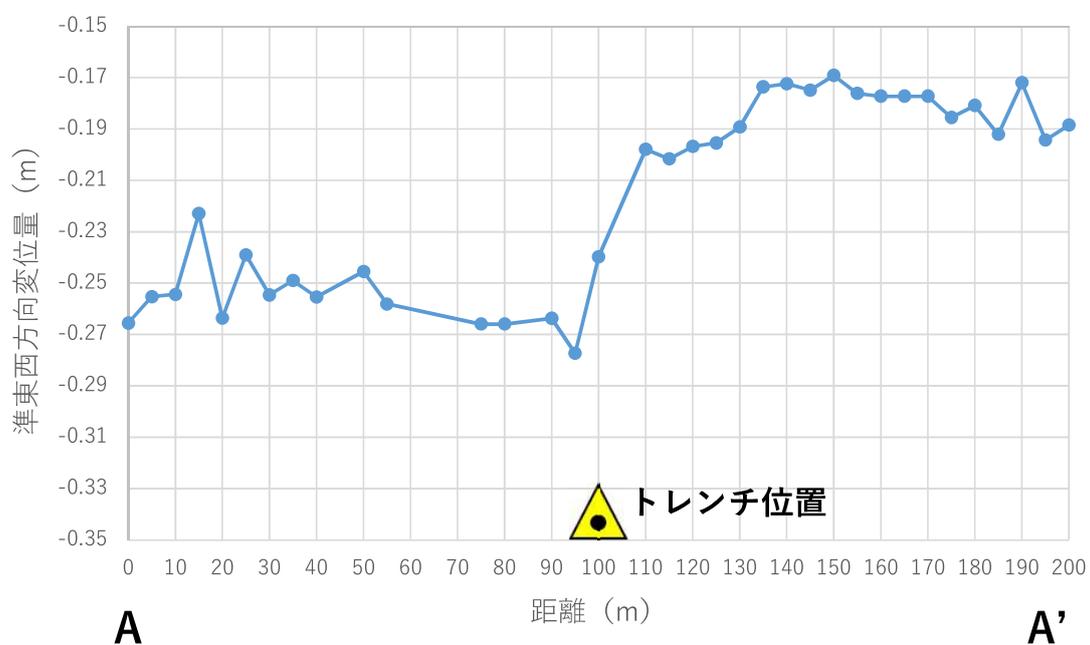


図 2.2.7 平川馬場トレンチの東西方向変位量の A 断面図

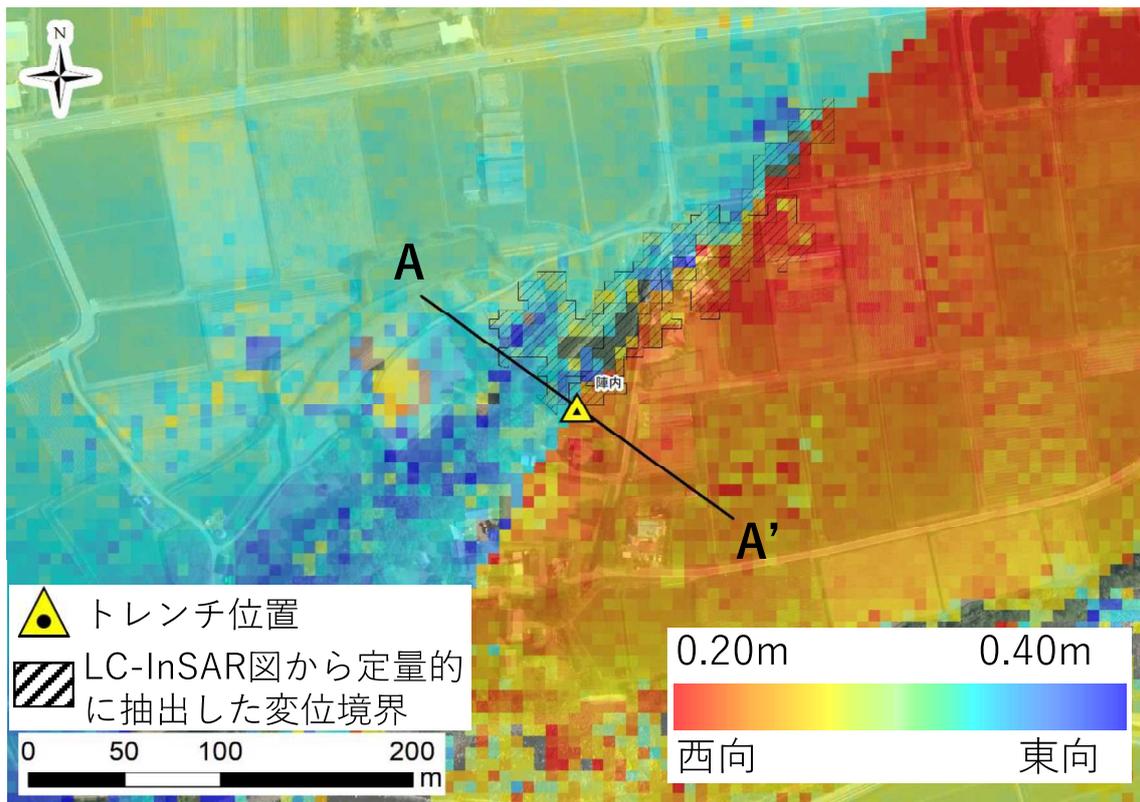


図 2.2.8 陣内トレンチの東西方向変位量図

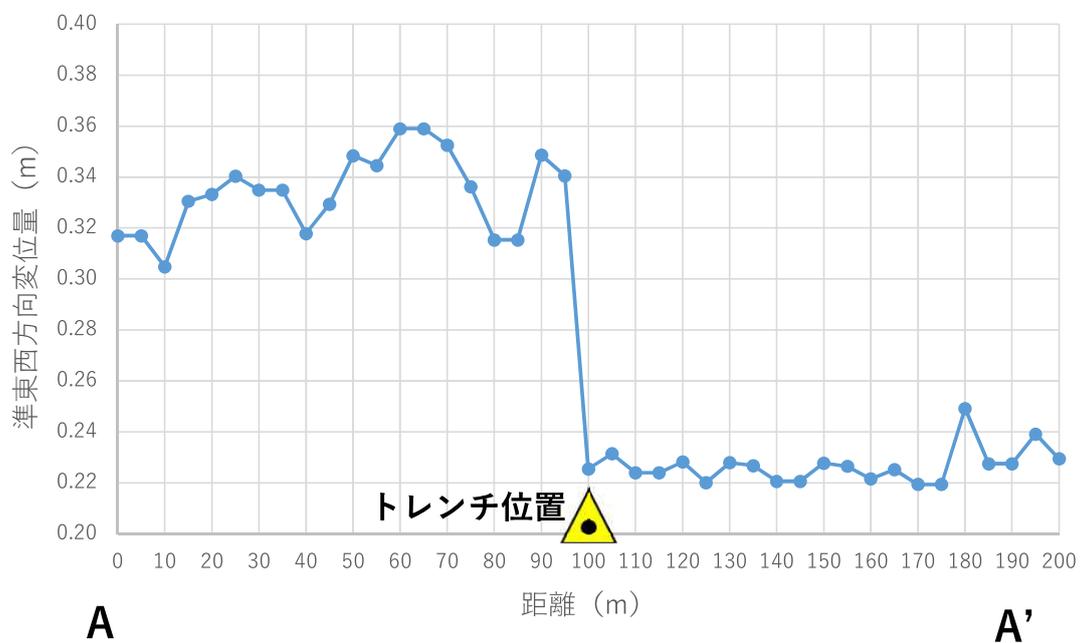


図 2.2.9 陣内トレンチの東西方向変位量の A 断面図

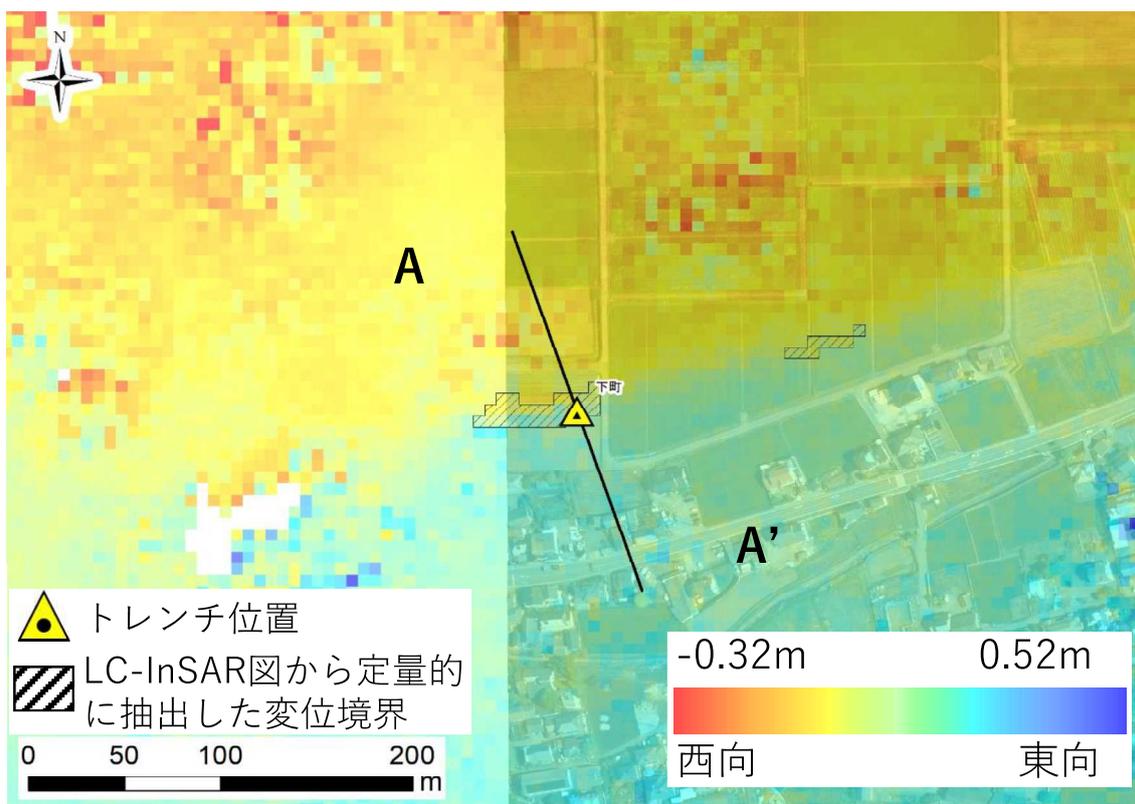


図 2.2.10 下町トレンチの東西方向変位量図

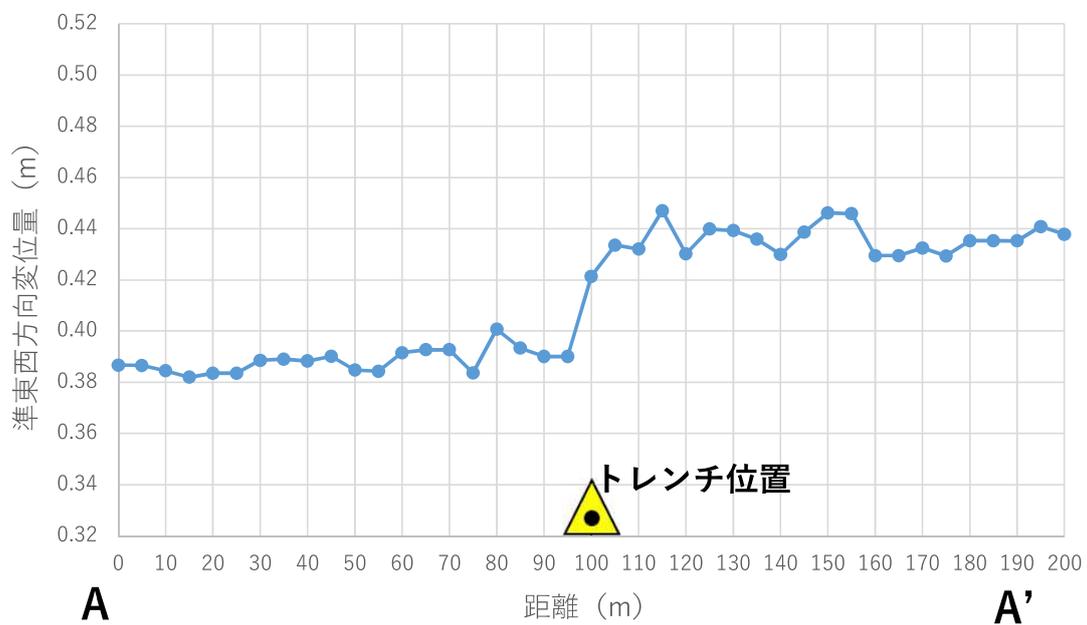


図 2.2.11 下町トレンチの東西方向変位量の A 断面図

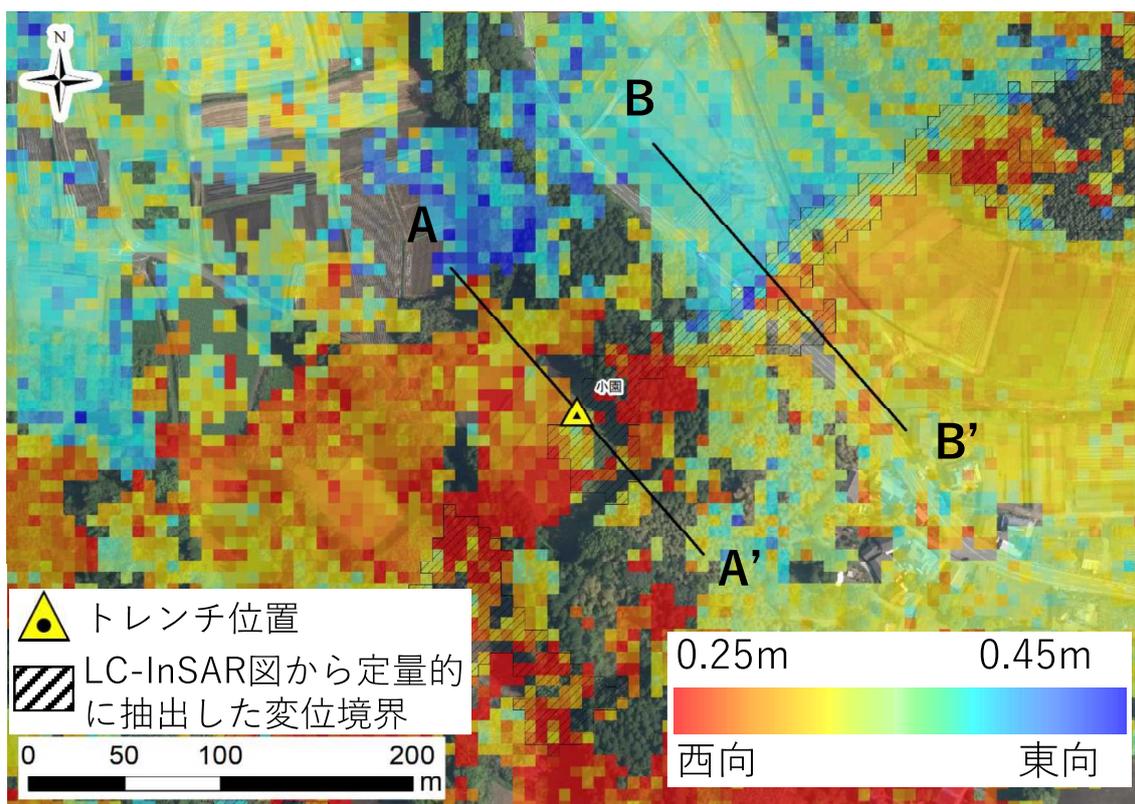


図 2.2.12 小園トレンチの東西方向変位量図

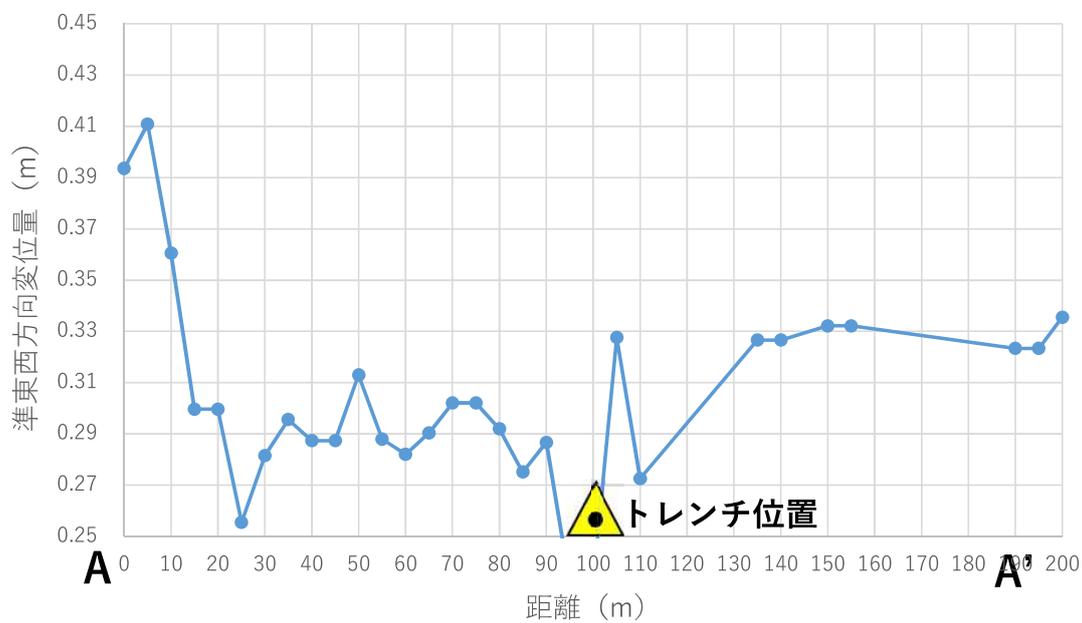


図 2.2.13 小園トレンチの東西方向変位量の A 断面図

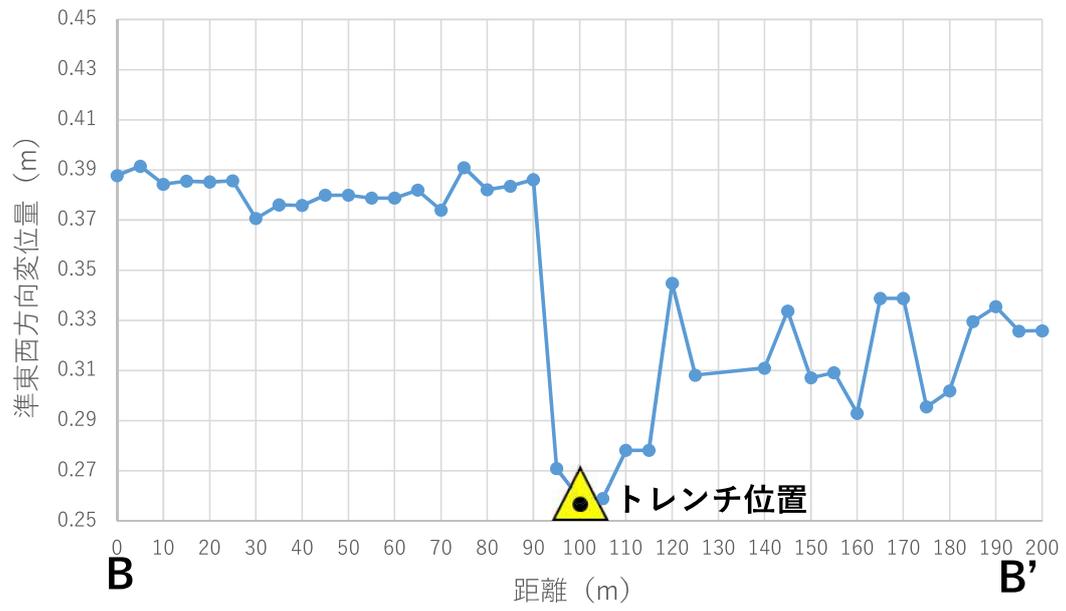


図 2.2.14 小園トレンチの東西方向変位量の B 断面図

2.2.2.2. 副断層の変位量と主断層からの距離との関係

副断層の変位量と主断層からの距離を以下の方法で整理した。

- ・ 光学画像相関の変位境界を主断層とする。
- ・ 干渉 SAR2.5 次元解析結果を用いて、副断層（選定した 4 トレンチの連続線）の主断層からの距離と、東西方向ずれ量をを計測する。まず、連続線上に 20m ごとの点を配置し、各点における主断層との最短距離を計測し、「主断層からの距離」とする。さらに 20m ごとの点の変位境界を挟んで、両側の干渉 SAR2.5 次元解析結果（東西方向）の変位量差を「東西方向のずれ量」とした（図 2.2.15～図 2.2.17）。
- ・ なお、主断層沿いの変位量は SAR で得ることができないため使用しない。また、副断層（LC-InSAR の抽出結果）は無数にあるため、過年度事業でトレンチ対象となった箇所を代表トレンチとする。

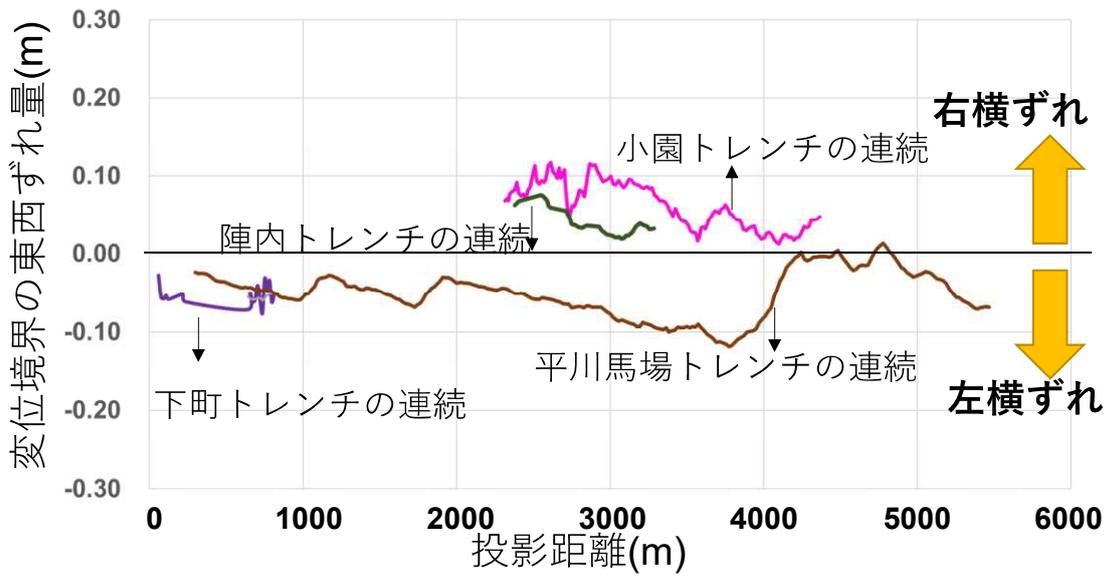
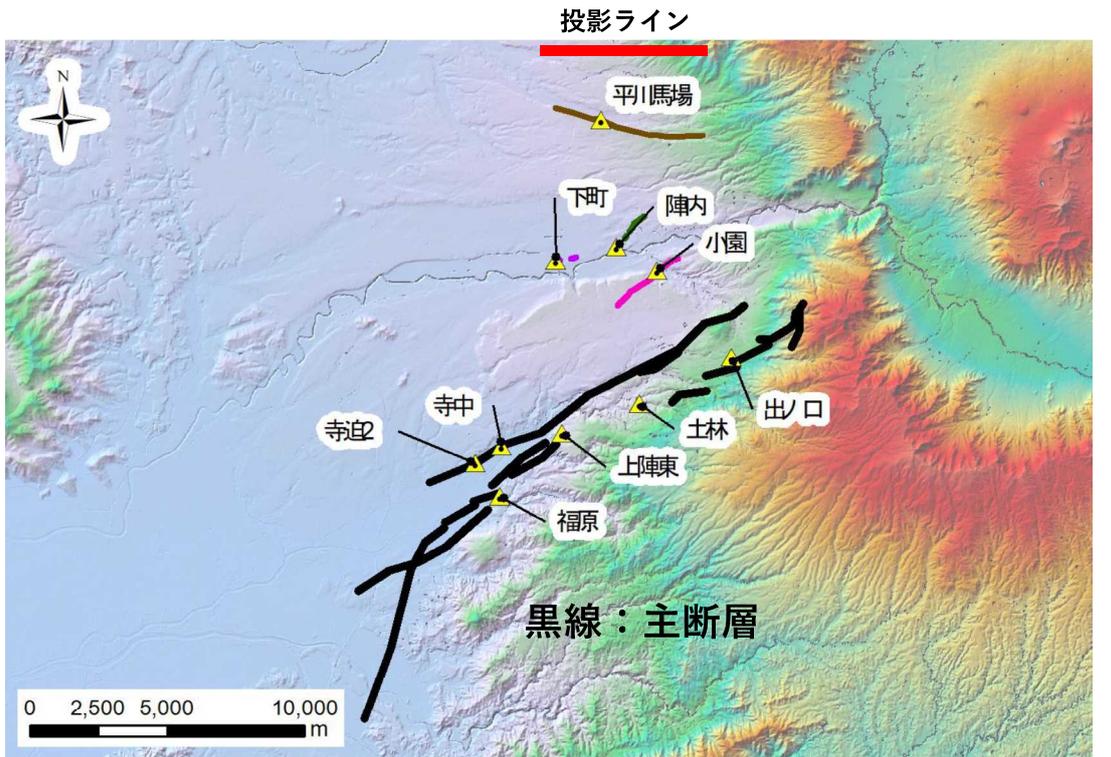


図 2.2.15 副断層周辺の変位量分布

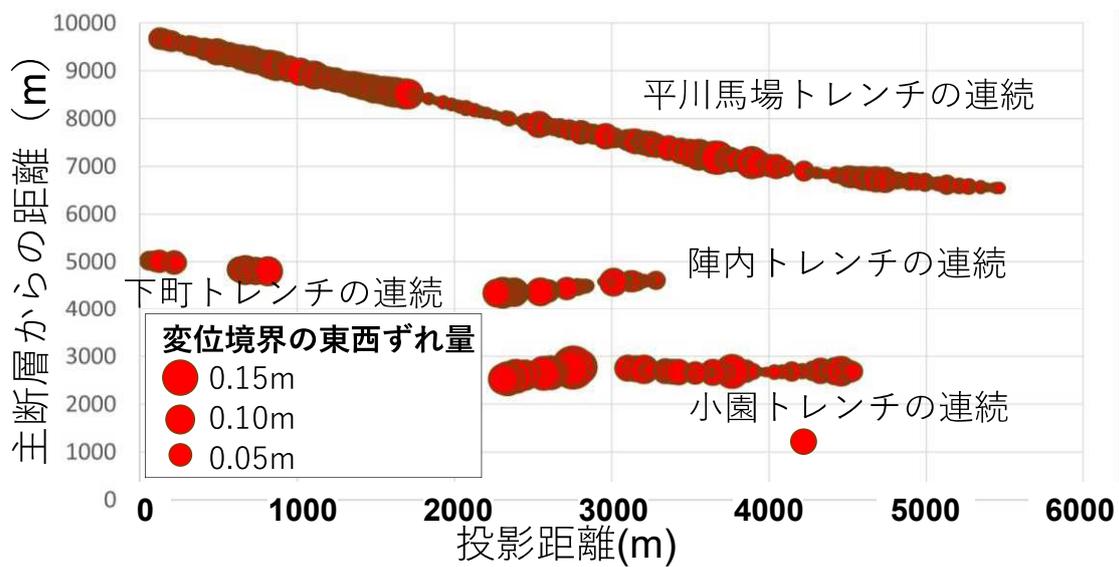
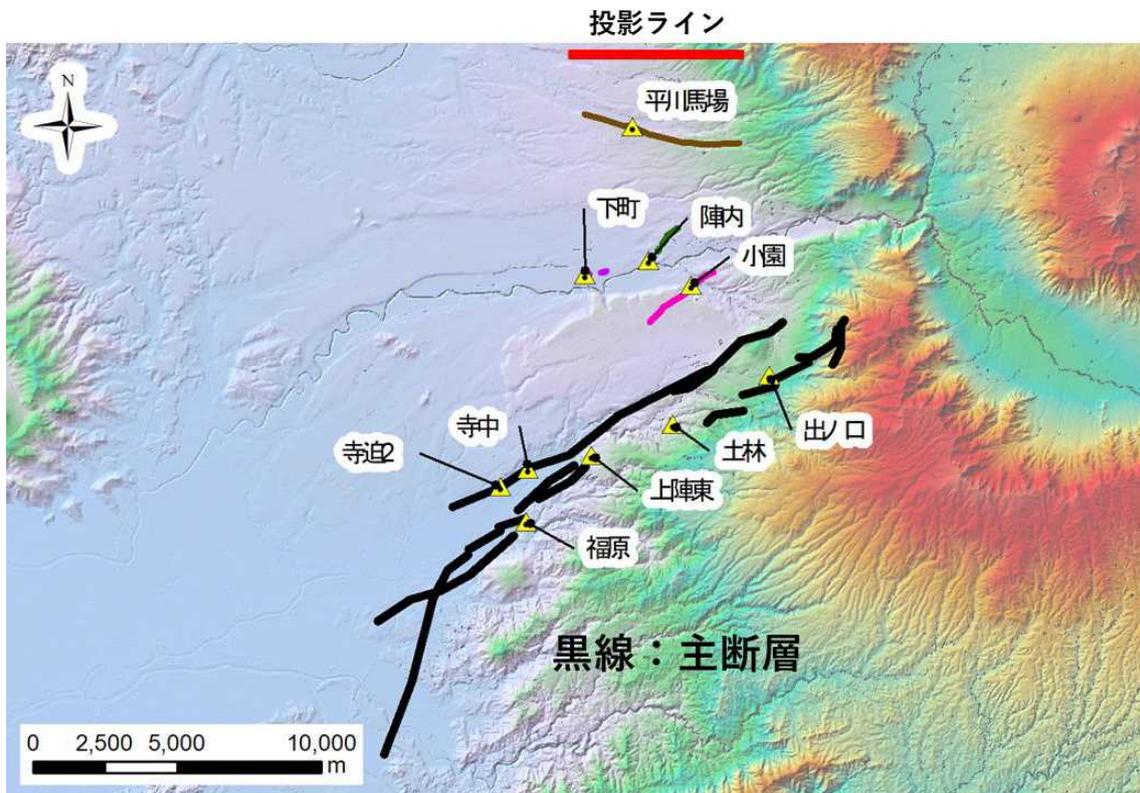


図 2.2.16 副断層の主断層からの距離と変位量の関係

※主断層の平均変位量は上図の
光学画像相関変位量平均値（2.35m）として計算

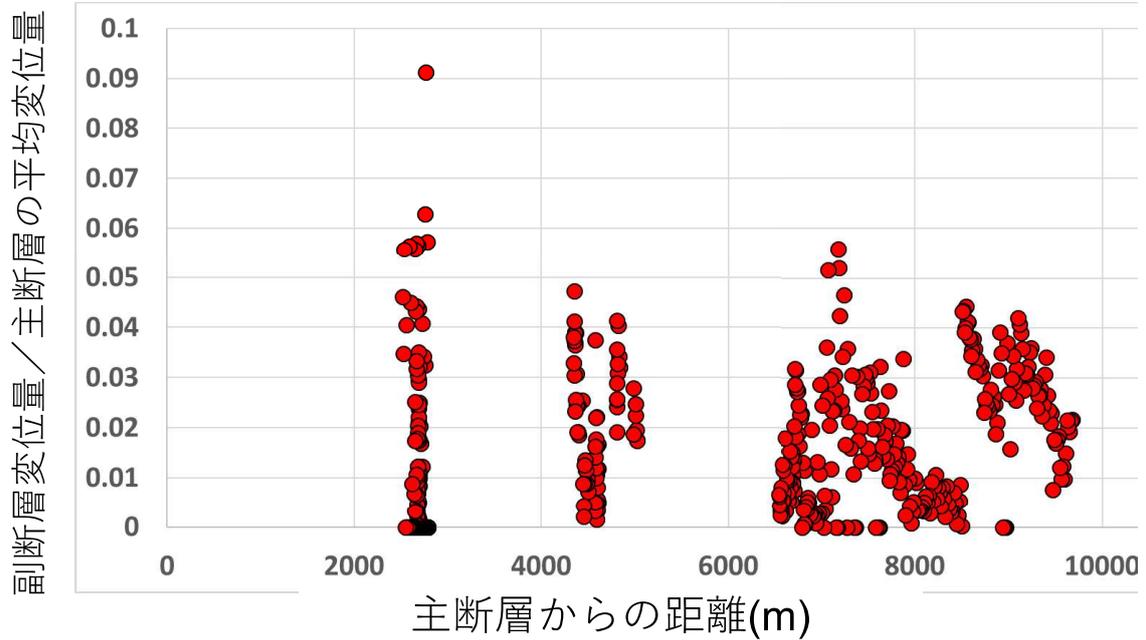


図 2.2.17 主断層からの距離と副断層変位量（主断層の平均変位量で正規化）

※主断層の最大変位量は上図の
光学画像相関変位量最大値（4.04m）として計算

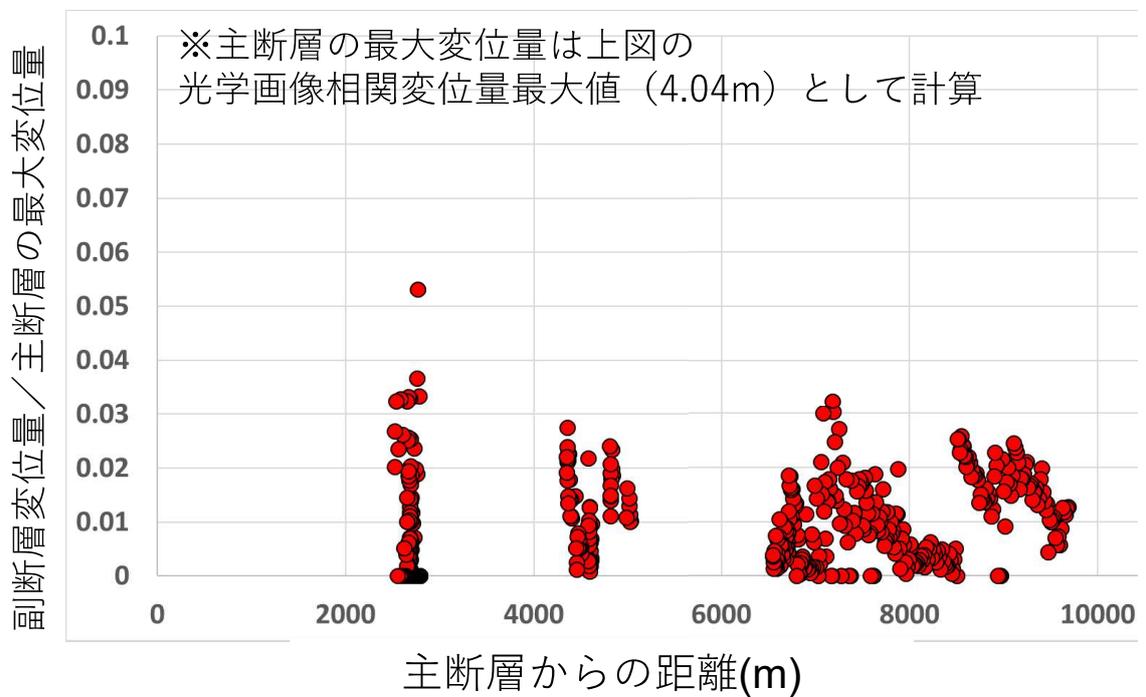


図 2.2.18 主断層からの距離と副断層変位量（主断層の最大変位量で正規化）

2.2.3. 測地学的手法によって検出された変位量の検討結果

LC-InSAR 図を用いた定量的な変位境界や、光学画像相関解析や干渉 SAR2.5 次元解析による変位量分布を用いて、主断層沿いや副断層の変位量について検討を行った。まず主断層の変位量分布について、空中写真の光学画像相関解析結果を用いて算出した。布田川断層では多くの場所で 2~3m 程度の横ずれが連続して分布しているが、断層が分岐すると個々の断層の変位量は減少する。しかし、分岐した断層の変位量について総和をとると、総変位量は 2~3m のままであることがわかった。一方、日奈久断層では南にいくほど変位量が減少することがわかった。

次に副断層の変位量について、干渉 SAR による 2.5 次元解析を用いて検討を行った。過年度のトレンチ箇所付近の副断層を対象として、副断層の変位量と主断層からの距離を整理した。