

令和 5 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 6 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. 測地学的手法による地表変状分布と変位量に関する検討	2-1
2.1.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出手法の検討	2-2
2.1.2. 地表変状の変位量の検討	2-7
2.1.3. 変位境界と変位量を用いた検討	2-9
2.1.4. 海外で発生した地震	2-18
2.1.5. 測地学的手法による地表変状分布と変位量に関する検討のまとめ	2-29
2.2. 物理探査による地下構造の検討	2-31
2.2.1. 地中レーダ探査の原理	2-31
2.2.2. 地中レーダ探査結果	2-40
2.2.3. 下野地区	2-44
2.2.4. 平川馬場地区	2-54
2.2.5. 陣内地区	2-69
2.2.6. 岩坂地区	2-76
2.2.7. 緑ヶ丘地区	2-81
2.2.8. 河原団地地区（トレンチ東側）	2-90
2.2.9. 河原団地地区（トレンチ地点）	2-117
2.2.10. 福原地区	2-133
2.2.11. 物理探査による地下構造の検討結果	2-154
2.3. ボーリング調査による地質構造の検討	2-156
2.3.1. ボーリング調査概要	2-156
2.3.2. 緑ヶ丘地区	2-157
2.3.3. 福原地区	2-168
2.3.4. ボーリング調査による地質構造の検討結果	2-176
2.4. 表層付近の副断層の性状及び活動履歴の検討	2-177
2.4.1. トレンチ調査概要	2-177
2.4.2. 下野地区	2-180

2.4.3.	河原団地地区	2-234
2.4.4.	表層付近の副断層の性状及び活動履歴の検討結果	2-289
2.5.	参考文献	2-293
2.6.	Appendix	2-297
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	3-13
3.1.4.	模擬地盤の物性のまとめ	3-14
3.2.	横ずれ断層型の室内模擬実験	3-15
3.2.1.	実験装置および実験方法	3-15
3.2.2.	実験結果	3-16
3.2.3.	画像相関法（DIC）解析結果	3-51
3.2.4.	実験結果による副断層形成過程	3-75
3.2.5.	実験で得られた副断層と既往距離減衰データとの比較	3-94
3.3.	断層変位に関する室内模擬実験のまとめ	3-101
3.3.1.	模擬地盤の物性	3-101
3.3.2.	横ずれ断層型の室内模擬実験	3-101
3.3.3.	課題	3-101
3.4.	参考文献	3-102
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.	粒径分布について	4-3
4.1.3.	未圧密条件における強度パラメータと間隙率の関係	4-5
4.1.4.	大変形ひずみの評価方法について	4-9
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	4-11
4.2.1.	要素試験結果に基づく目標強度	4-11
4.2.2.	要素シミュレーションの解析モデル	4-11
4.2.3.	要素シミュレーション結果	4-13
4.2.4.	粉体層強度の確認について	4-14
4.3.	室内模擬実験の再現解析	4-16
4.3.1.	解析ケースと解析モデル	4-16
4.3.2.	再現解析結果	4-19
4.3.3.	各ケースの表層変位量の整理	4-36
4.3.4.	強度の高い条件を想定した検討	4-38
4.4.	断層変位に関する数値解析のまとめ	4-40

4.5. 参考文献	4-42
5 章 確率論的断層変位評価に関する検討	5-1
5.1. 既往研究によるデータや経験式の整理	5-1
5.2. 確率論的断層変位ハザード評価で用いられる経験式の検証	5-3
5.2.1. 副断層変位出現確率	5-3
5.2.2. 副断層変位距離減衰式	5-6
5.3. 確率論的断層変位ハザード試計算	5-9
5.4. 確率論的断層変位評価に関する検討のまとめ	5-12
5.4.1. 確率論的断層変位ハザード評価	5-12
5.4.2. 課題	5-13
5.5. 参考文献	5-13
6 章 まとめ	6-1
6.1. 副断層に関する調査	6-1
6.2. 断層変位に関する室内模擬実験	6-4
6.3. 断層変位に関する数値解析	6-5
6.4. 確率論的断層変位評価に関する検討	6-5
6.5. 過年度事業のまとめ	6-6
6.5.1. 副断層に関する調査	6-6
6.5.2. 断層変位に関する室内模擬実験	6-11
6.5.3. 断層変位に関する数値解析	6-13
6.5.4. 確率論的断層変位評価に関する検討	6-16

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、変位が生ずるおそ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。

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た。

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 2016 年熊本地震を対象として現地での性状把握を行うとともに、断層変位に関する室内模擬実験及び数値解析、並びに確率論的断層ハザード試解析を実施し、多様な手法により副断層変位に対してアプローチすることで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（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保存されることがなく、変位量が小さい断層の分布を詳細に把握するには、地震発生直後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（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方法の高精度化、及び副断層に着目した現地調査を実施し、既存知見も踏まえて副断層生成プロセスに関する知見を取りまとめることとした。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精度化を行うため、地表地震断層が現れた 2016 年熊本地震を対象とした既往研究結果（SAR 衛星データを用いた干渉 SAR 解析及び航空機による空中写真を用いた光学画像相関解析）等を用いて、地表変状発生位置の定量的な抽出方法について検討した。干渉 SAR 解析による LC-InSAR 図を用いて位相不連続ラインを検討し、熊本県阿蘇郡南阿蘇村下野地区においてトレンチ調査①（23m×8m×深さ 3.5m×1 箇所、10m×3m×深さ 1～1.5m×1 箇所、4m×1m×深さ 1m×1 箇所）を実施した。空中写真による光学画像相関解析結果を用いて、熊本県阿蘇郡西原村河原団地地区においてトレンチ調査②（14m×7m×深さ 4.5m×1 箇所）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、既往のトレンチ調査箇所を含めて物理探査として地中レーダ探査（7 地区 56 測線）を実施し、調査地点の地下構造を検討した。加えて、熊本県阿蘇郡南阿蘇村下野地区のトレンチ調査地点近傍 2 箇所及び既往トレンチ調査箇所並びに地中レーダ探査箇所を追加の高密度地中レーダ探査を実施した。また、過年度事業（パスコ, 2023）でボーリング調査を実施した熊本県上益城郡益城町福原地区及び本事業で実施した地中レーダ探査地点の熊本県菊池郡大津町緑ヶ丘地区の計 2 箇所においてボーリング調査（φ86mm、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層厚が異なる実験を 2 ケースすることとし、1 ケースあたり 2 回以上実験を行い、断層変位分布（出現位置、変位量等）の数値データを取得した上で、副断層に係る知見を整理した。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 次元的に広がりを

持つことが既往研究から知られている。既往の室内模擬実験においても、このような広がりを持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., 2020）。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。

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層厚の異なる 2 ケースを選定し、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、室内模型実験では十分に締め固められた条件の模擬地盤を作成しているが、解析では緩詰の条件も想定して、層厚と間隙率の違いを考慮して合計 4 ケースの解析を実施した。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。

1.1.3.4. 確率論的断層変位評価に関する検討

断層変位評価において、前述した現地調査、室内模擬実験及び数値解析のような決定論的評価のほかに、実際の断層変位データを用いて地表地震断層変位出現率、断層変位評価式等の経験式を回帰し、評価地点における 1 年あたりの変位一超過頻度関係を算出する確率論的評価がある（例えば、Youngs et al., 2003）。しかしながら、断層変位のデータは数が限られており、最新のデータを用いて、それらの経験式の妥当性を検証する必要がある。

本事業では、本事業及び本事業に係る過年度事業（構造計画研究所, 2018, 2019, 2020; パスコ, 2021, 2022, 2023）を含めた既往研究で取得されたデータ（野外調査、測地学的分析、室内模擬実験及び数値解析によるデータ）を用いて確率論的断層変位ハザード評価に用いられる経験式（例えば、Petersen et al., 2011）の検証を行い、経験式の更新について検討した。この更新した経験式を用いて、過年度事業（構造計画研究所, 2018, 2020; パスコ, 2021, 2022）で実施したトレンチ調査地点を対象とした確率論的断層変位ハザード試計算を行い、既往経験式による結果との違いを考察し、課題を整理した。

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。地表地震断層として変位量が大きく連続性が良い断層。

(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を含む。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 3.2.5 章を参照。

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

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）図

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

(9) 位相不連続ライン

LC-InSAR 図で、低コヒーレンス値を示す領域が線状に連続し、地表面が乱れていることを示す。かつ、そのラインを境界として位相が不連続になり、衛星と地表の距離変化に不連続が生じている線状の箇所。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) 位相不連続エリア

LC-InSAR 図で、低コヒーレンス値を示し地表面が乱れている領域を自動抽出すると細長い面上に連続する。かつ、そのエリアを境界として位相が不連続になり、衛星と地表の距離変化に不連続が生じている領域。地表地震断層等の地表変状が生じている可能性が高い。

(11) 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。画像相関解析と同義。

(12) 光学画像相関解析

2 枚の光学画像を比較し、その 2 枚の画像で相関を求め、画像が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。光学画像の画像マッチングと同義。

(13) 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。

(14) 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 3.2.5 章を参照。

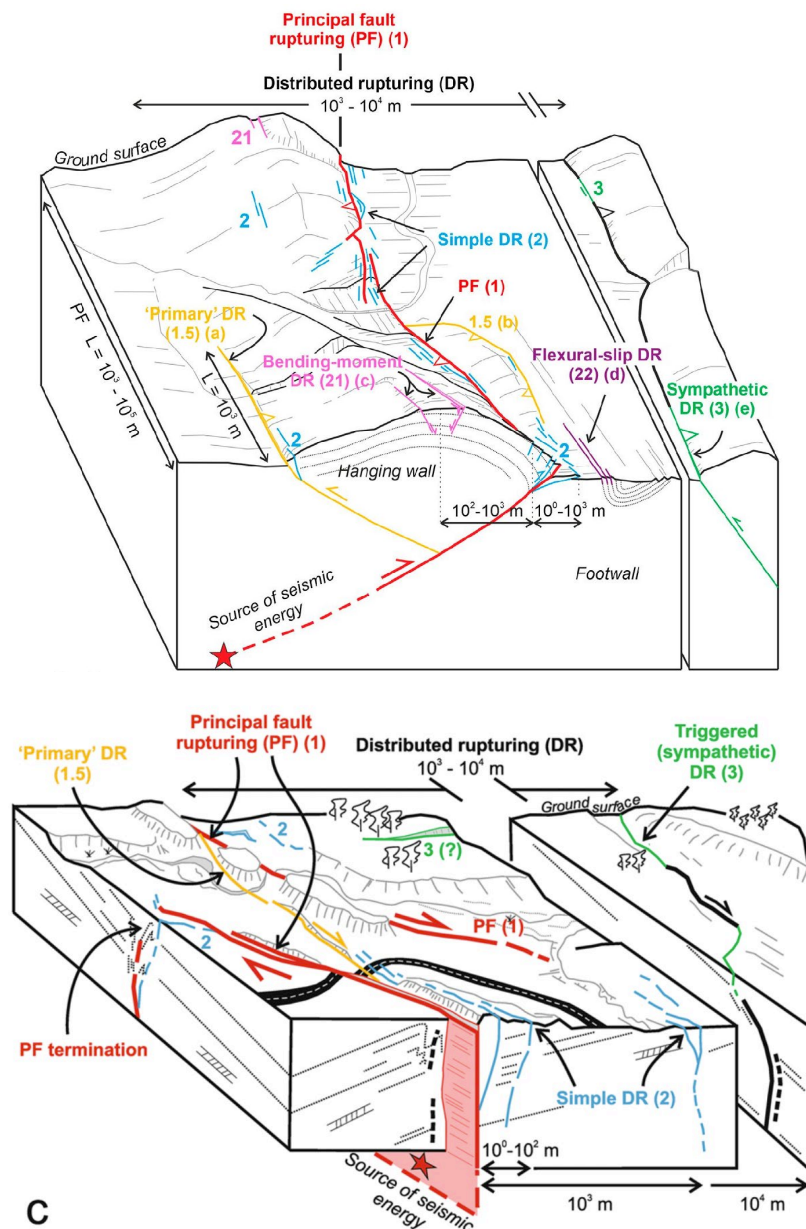
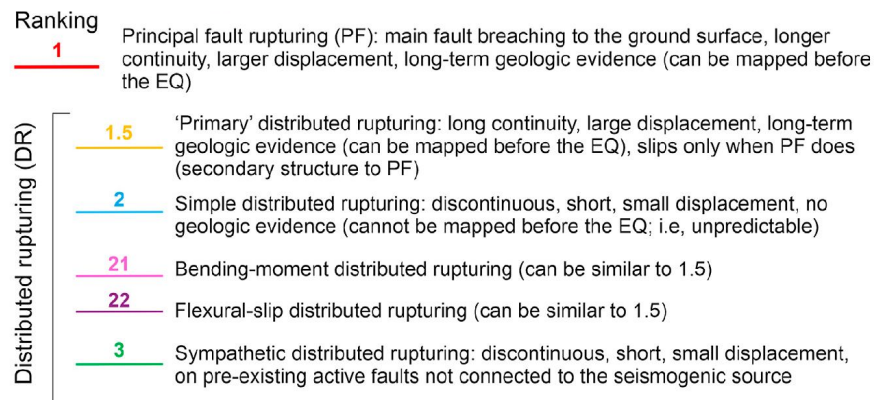


図 1.3.1 本事業における主断層・副断層の概念図

(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) 構造計画研究所(2018) 「断層変位評価に係る知見の整備」平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書
- 4) 構造計画研究所(2019) 「断層変位評価に係る知見の整備」平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書
- 5) 構造計画研究所(2020) 「断層変位評価に係る知見の整備」平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書
- 6) Nurminen, Fiia, 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
- 7) 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
- 8) パスコ(2021) 「断層変位評価に係る調査」, 令和 2 年度原子力規制庁委託成果報告書
- 9) パスコ(2022) 「断層変位評価に係る調査」, 令和 3 年度原子力規制庁委託成果報告書
- 10) パスコ(2023) 「断層変位評価に係る調査」, 令和 4 年度原子力規制庁委託成果報告書
- 11) Petersen D.Mark, Timothy E. Dawson, Rui Chen, Tianqing Cao, Christopher J.Wills, David P. Schwartz, and Arthur D. Frankel (2011) Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, No.2, 805-825
- 12) 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
- 13) 多田 文男 (1927) 活断層の二種類, *地理学評論*, 3, 10, 980-983
- 14) 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
- 15) Takemura, J., C. Yao, and O.Kusakabe (2020) Development of a fault simulator for soils under large vertical stress in a sentrifuge, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 20, 3, 118-131
- 16) 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

- 17) Youngs R. Robert, Walter J. Arabasz, R. Ernest Anderson, Alan R. Ramelli, Jon P. Ake, David B. Slemmons, James P. McCalpin, Diane I. Doser, Christopher J. Fridrich, Frank H. Swan III, Albert M. Rogers, James C. Yount, Laurence W. Anderson, Kenneth D. Smith, Ronald L. Bruhn, Peter L.K. Knuepfer, Robert B. Smith, Craig M. dePolo, Dennis W. O'Leary, Kevin J. Coppersmith, Silvio K. Pezzopane, David P. Schwartz, John W. Whitney, Susan S. Olig, and Gabriel R. Toro (2003) A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), Earthquake Spectra, 19, No.1, 191-219

2章 副断層に関する調査

2.1. 測地学的手法による地表変状分布と変位置に関する検討

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、ALOS-2 衛星データを用いた干渉 SAR 解析及び空中写真を用いた光学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置の検討を実施した。

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、干渉 SAR 解析による LC-InSAR 図と 2.5 次元解析で検討する。また、主断層周辺の変位置境界と変位置の分布を検出する手法として、光学画像による画像相関解析（以下、光学画像相関解析）を実施した。主断層から離れた位置で生じた変位置境界と変位置の分布に加え、主断層周辺で生じた変位置境界と変位置の分布をマッピングした。さらに、マッピングしたデータと過年度事業で実施されたトレンチ箇所との比較を実施した。

また、2019 年リッジレスト地震を対象として、ALOS-2 衛星及び Sentinel-1 衛星データを用いた干渉 SAR 解析を実施し、現地で確認した地表変状と比較を行った。

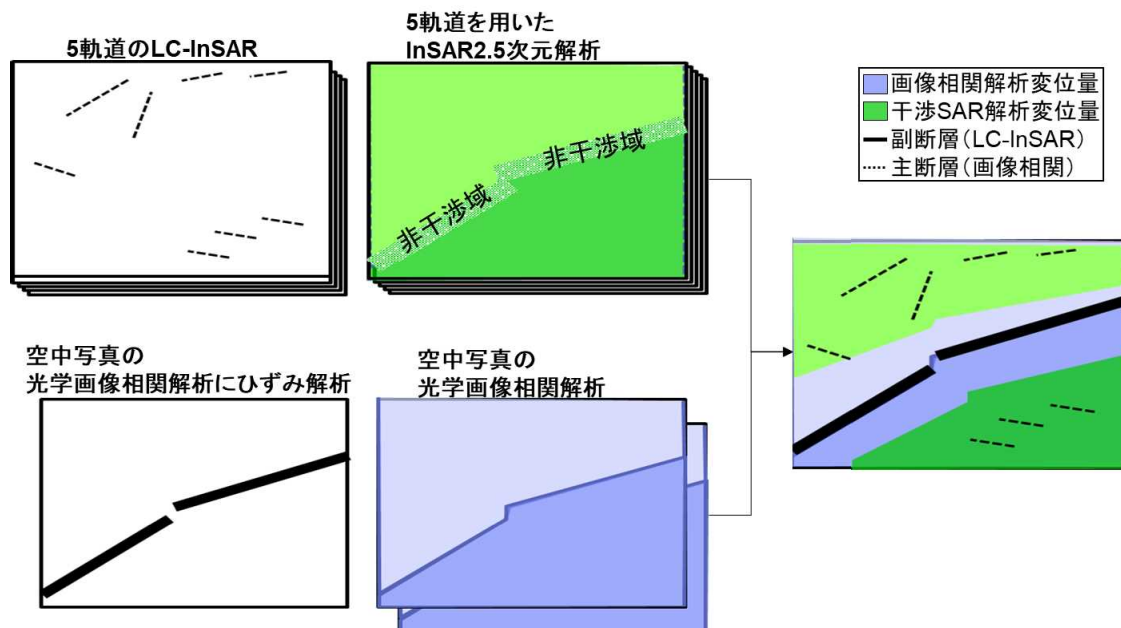


図 2.1.1 検討のイメージ

2.1.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出手法の検討

過年度事業（パスコ, 2023）において、主断層から離れた位置の断層分布を、LC-InSAR 図から自動算出した。また、過年度事業（パスコ, 2023）では主断層付近の変位境界の分布は、空中写真の画像相関解析によって算出した変位量分布図から目視判読で抽出した。本事業では定量的に変位境界の分布を把握するため、変位量図のひずみ分布図から変位境界を抽出した。

2.1.1.1. 主断層から離れた位置での地表変状の抽出

過年度事業（パスコ, 2023）で作成した 5 軌道を用いた定量的な変位境界分布図を図 2.1.2 に示す。また、以上の分布図作成に使用した LC-InSAR 図の複数の干渉 SAR ペアを用いた LC-InSAR の諸元を表 2.1.1、観測のイメージ図を図 2.1.3 に示す。

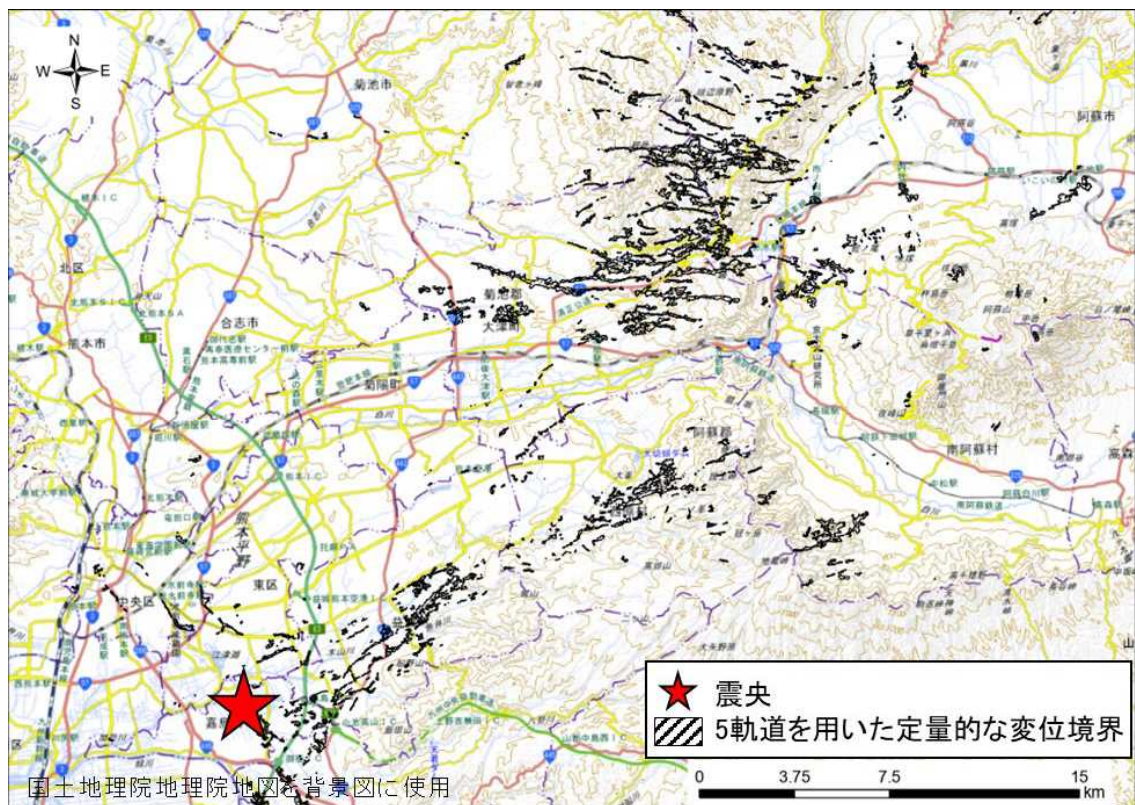


図 2.1.2 5 軌道を用いた定量的な変位境界分布図

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)

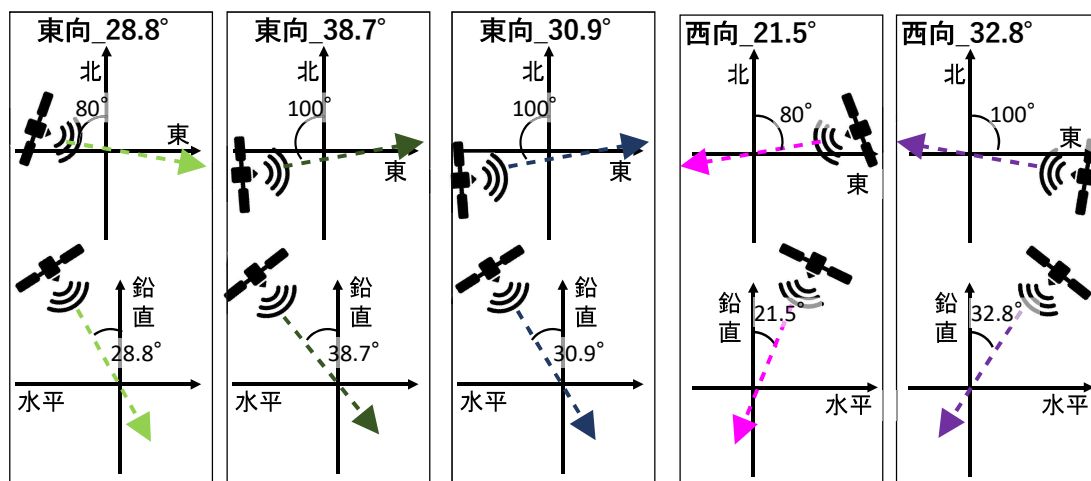


図 2.1.3 5 方向からの観測イメージ

2.1.1.2. 主断層周辺の地表変状抽出

過年度事業（パスコ, 2023）では主断層付近の変位境界分布は、空中写真の画像相関解析によって算出した変位量分布図から目視判読で抽出した。本事業では定量的に変位境界を把握する手法を検討した。

画像相関解析で算出できるのは変位量画像であるため、そのままでは地表変状発生位置の抽出はできない。Antoine et al. (2021) では、衛星画像の光学画像相関解析結果を用いてひずみ解析を実施することで、2019 年リッジクレスト地震で生じた地表変状の発生位置を抽出している。

そこで、本事業では Antoine et al. (2021) の手法を過年度事業（パスコ, 2022～2023）で実施した空中写真の画像相関解析に適用し、主断層周辺の地表変状発生位置の定量的な抽出を実施した。図 2.1.4 に光学画像相関解析結果を示す。同じ範囲のひずみ解析を実施した結果を図 2.1.5、さらにひずみ解析結果から地表変状発生位置（変位境界）を抽出した結果を図 2.1.6 に示す。なお、変位境界分布は図 2.1.7 に示すように空中写真の撮影範囲の主断層周辺で実施した。また、その他の範囲でひずみ解析を実施した結果を Appendix に整理した。

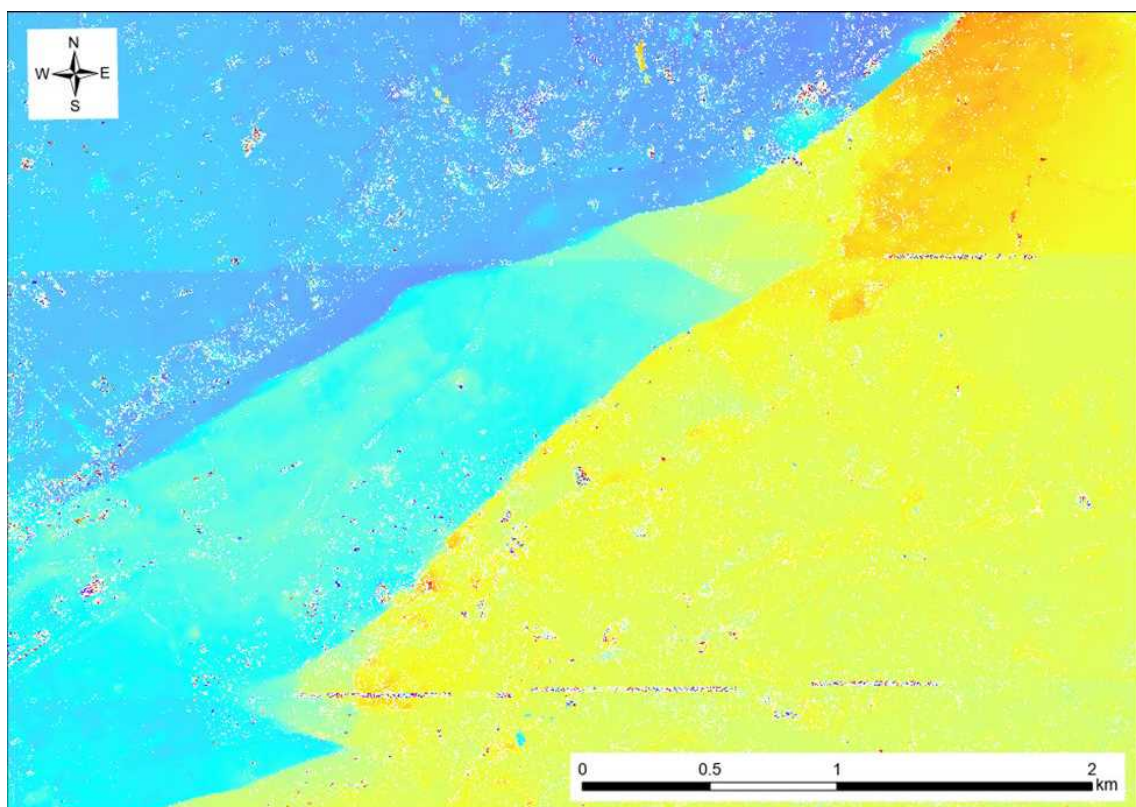


図 2.1.4 画像相関解析変位量画像

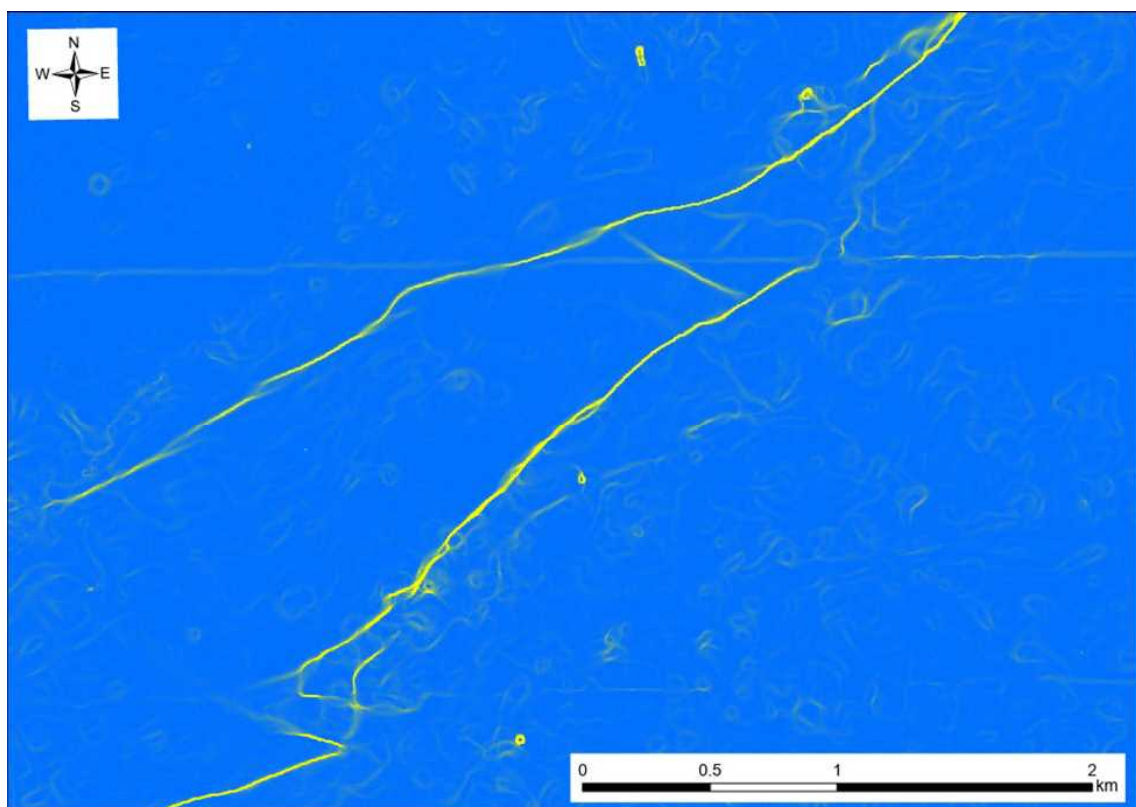


図 2.1.5 画像相関解析から得られたひずみ分布

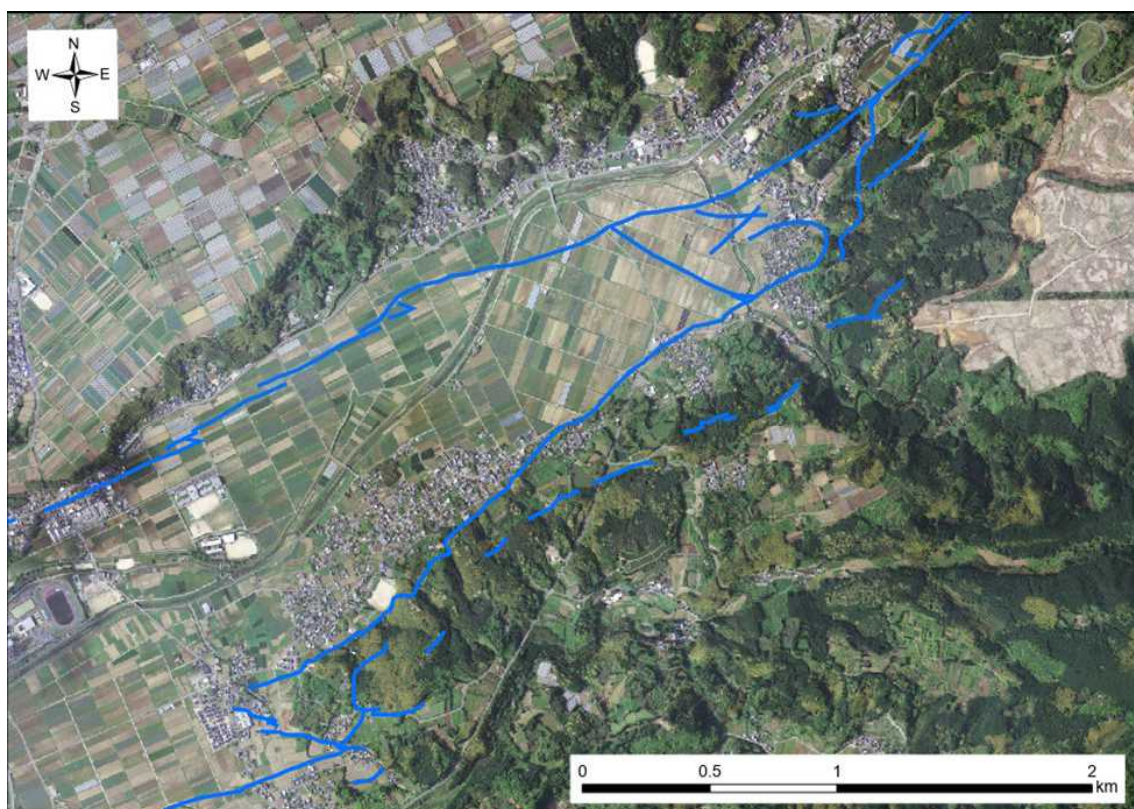


図 2.1.6 画像相関解析ひずみ分布から抽出した変位境界分布

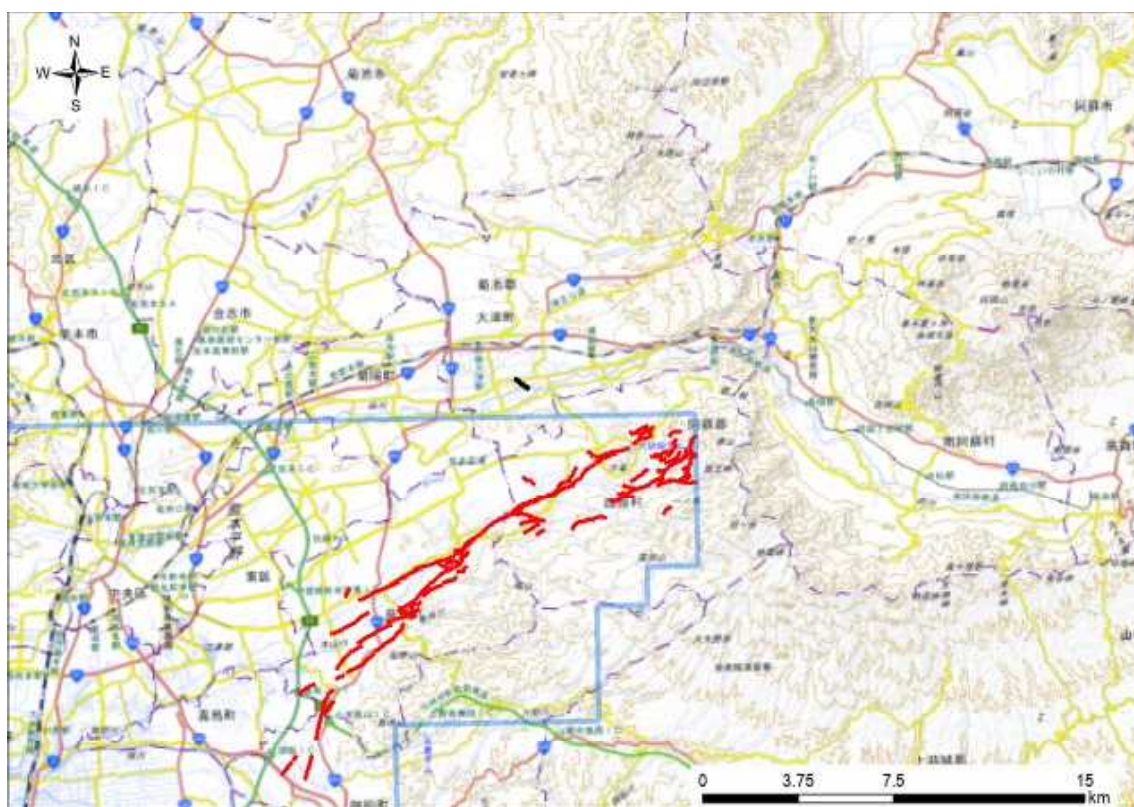


図 2.1.7 画像相関解析ひずみ分布に基づいて作成した変位境界分布（広域）

2.1.2. 地表変状の変位量の検討

過年度事業（パスコ, 2023）において、主断層周辺の変位量を空中写真を用いた光学画像
相関解析から算出した。一方で、主断層から離れた位置での変位量は算出出来ていない。そ
こで、本事業では、広域を観測している SAR を使用して変位量を算出した。

2.1.2.1. 主断層から離れた位置での変位量検出

2.1.1 章で示したように 5 軌道を用いた干渉 SAR 解析結果がある。これらを利用して 2.5
次元解析（Fujiwara et al., 2000）を行った。なお、複数の軌道の合成方法は Morishita et al.,
2022 の手法を用いた。

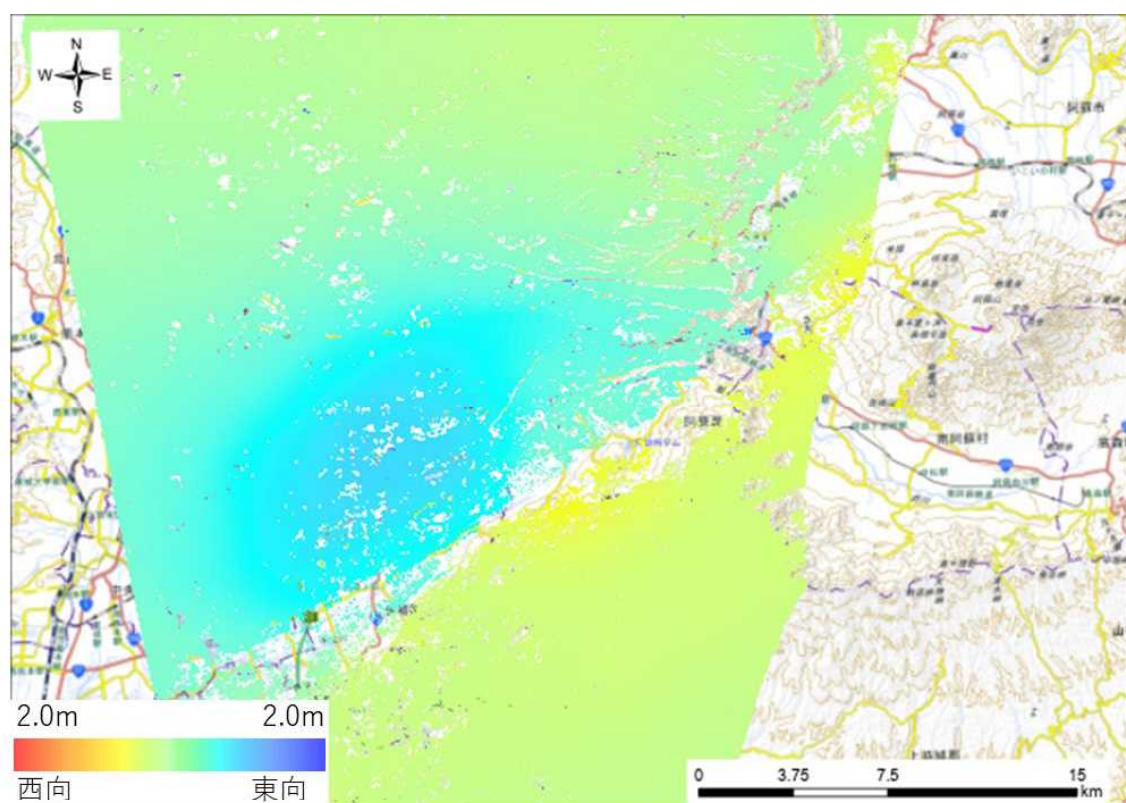


図 2.1.8 複数の軌道を組み合わせて作成した変位量分布図

2.1.2.2. 主断層周辺の変位量算出

過年度事業（パスコ, 2023）において、主断層周辺の変位量について空中写真を用いた光学画像相関解析から変位量を算出した。

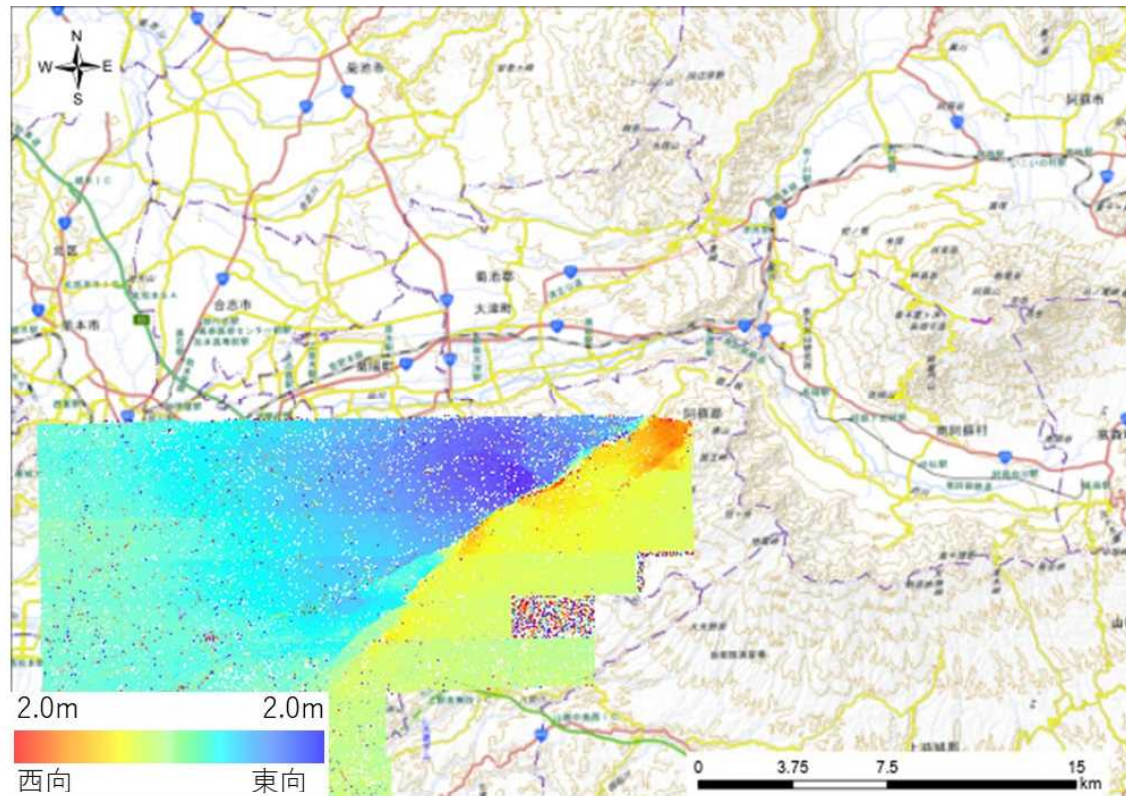


図 2.1.9 光学画像相関解析で得られた変位量分布図

2.1.3. 変位境界と変位置量を用いた検討

これまでの検討で得られた成果を統合し、主断層周辺及び主断層から離れた位置の変位境界と変位置量について検討を行った。図 2.1.10 にこれまで得られた成果の範囲と過年度事業（2018～2023）でトレンチ調査が実施された箇所 8 地点（以下、既往トレンチ箇所）及び本事業で実施したトレンチ調査箇所 2 地点を示す。

まず、複数の変位境界の中からトレンチ調査箇所周辺のラインを選定する。次に選定した変異境界の変位置量データを収集した。最後にトレンチ調査箇所ごとに変位置量の断面図を作成して個別の変位置量の傾向について確認した。

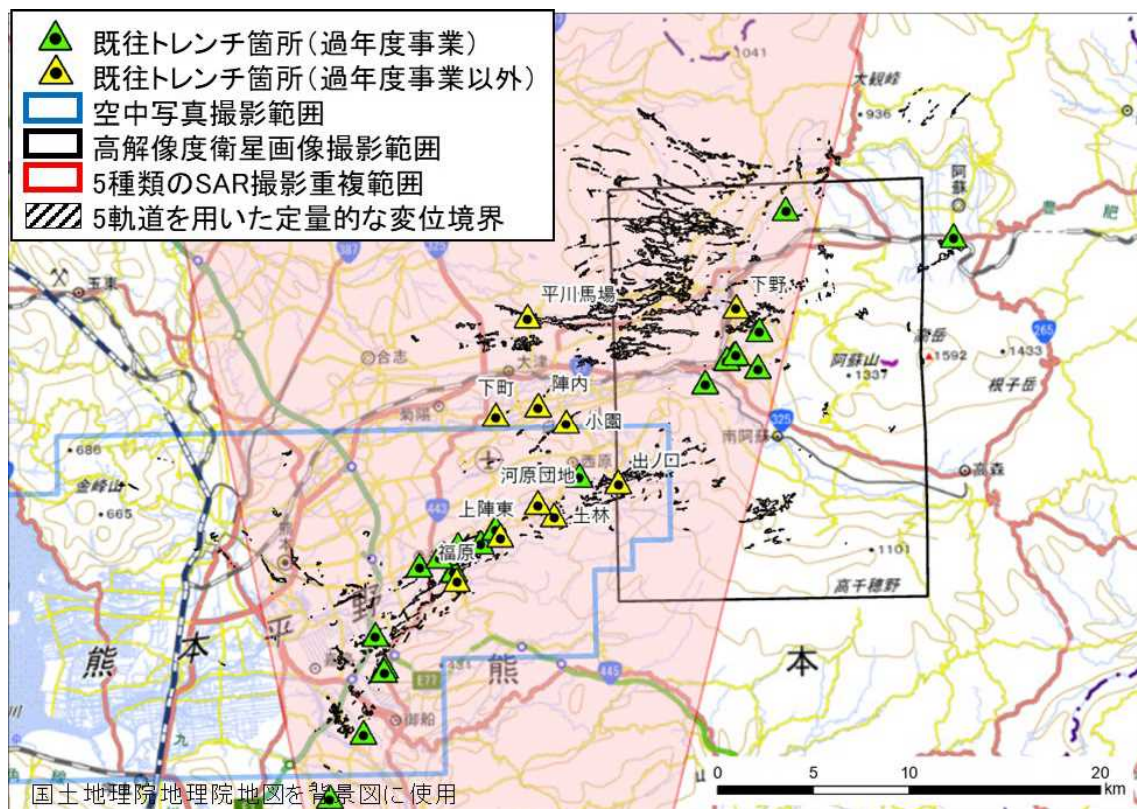


図 2.1.10 これまでの検討で得られた成果の分布図と過年度事業（2017～2022）と本事業で実施したトレンチ調査箇所

2.1.3.1. 対象選定

複数の変位境界の中からトレンチ調査箇所周辺の変位境界を選定する。これまでの成果で得られた変位分布と変位置量を図 2.1.11 に示す。トレンチ調査箇所付近の変位境界に絞った結果図 2.1.12 のとおりとなった。

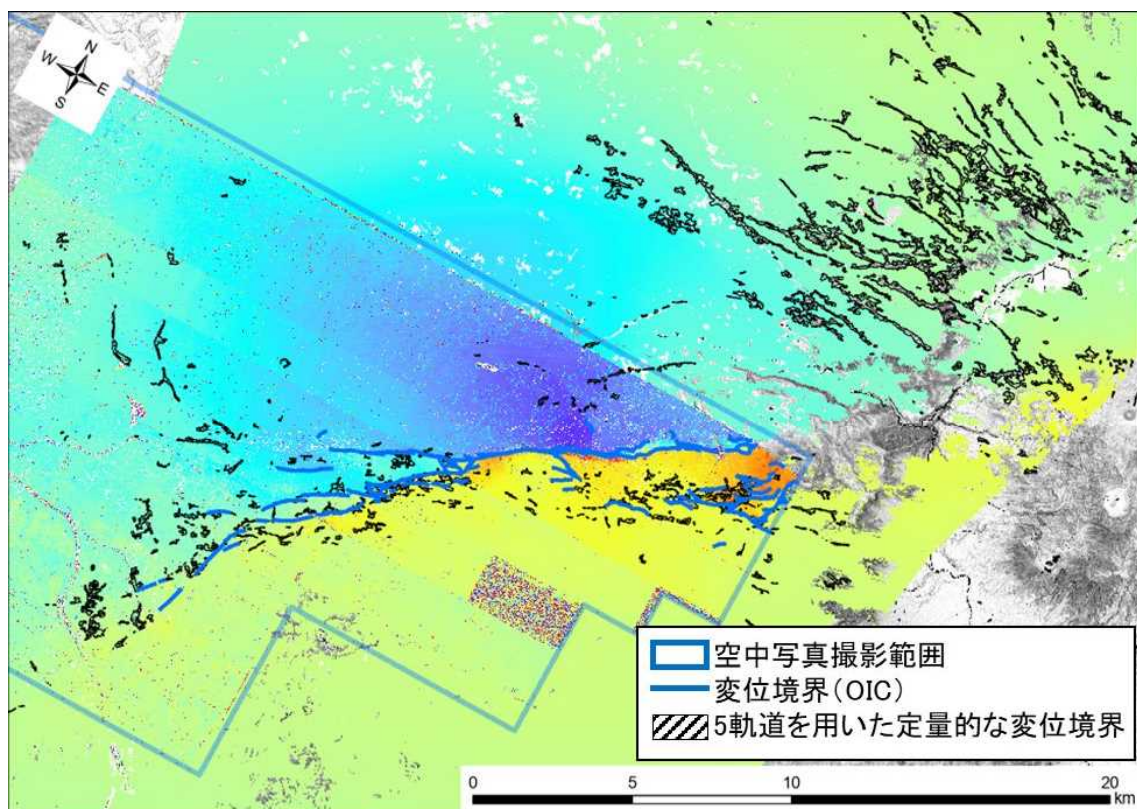


図 2.1.11 これまでの成果を重ねた図

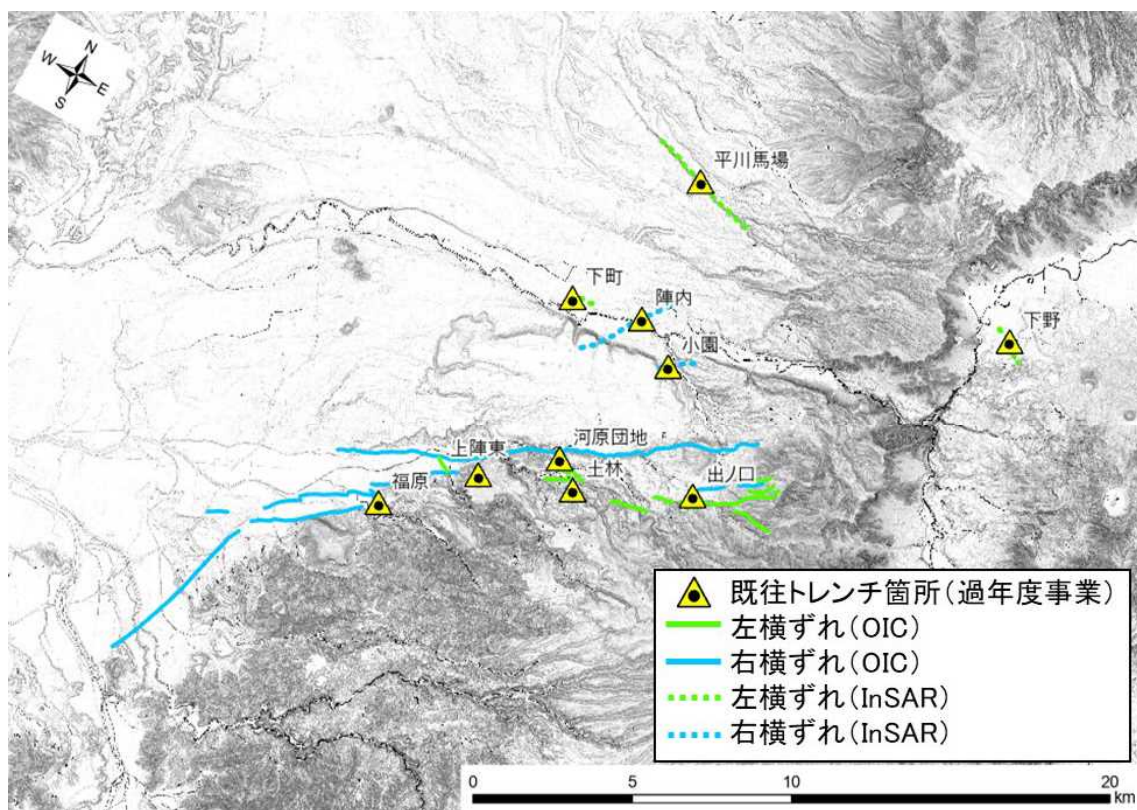


図 2.1.12 選定した変位境界分布図

2.1.3.2. 変位量データの収集

選定した対象において、変位量のデータを収集する。以下の①～⑤に収集方法、図 2.1.13 にイメージ図を示す。収集した変位量のデータは表 2.1.2 にように整理した。

- ① 変位境界のライン上に 10m ごとのポイントを作成する
- ② 1 のポイントの両側 30m にポイントを作成する
- ③ 2 の対となるポイントの走行方向変位量差を算出する
- ④ 1 のポイントと、既往活断層の最短距離を計測する
- ⑤ 1 のポイントに 3 と 4 の値と、位置座標を読み込ませる

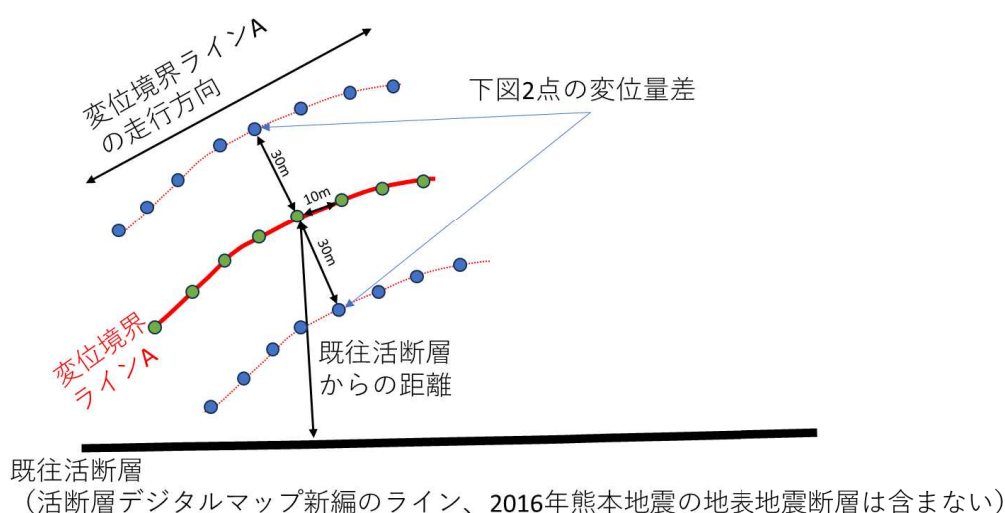


図 2.1.13 変位量データ収集イメージ

表 2.1.2 収集した変位量データの整理結果

ID	走行方向の変位量差（負の値が右ずれ）	走行方向の変位量差（絶対値）	既往活断層からの距離	x	y
0			1634.553512	670185.63	3629229.707
1	-1.0	1.0	1630.382302	670192.91	3629236.595
2			1626.211092	670200.19	3629243.484
3	1.8	1.8	1622.039882	670207.47	3629250.372
4			1617.878616	670214.74	3629257.26
5			1613.76518	670222.02	3629264.148
6	-0.6	0.6	1609.703617	670229.30	3629271.036
7	0.4	0.4	1605.69432	670236.58	3629277.925
8	-1.1	1.1	1601.737681	670243.86	3629284.813
9	-1.1	1.1	1595.374568	670252.77	3629289.312
10			1588.806744	670261.83	3629293.596
11			1582.238919	670270.89	3629297.881
12	-1.1	1.1	1575.671094	670279.95	3629302.166
13	-1.1	1.1	1569.10327	670289.00	3629306.451
14			1562.511986	670298.06	3629310.736
15	1.7	1.7	1555.906226	670307.12	3629315.021
16	1.5	1.5	1549.300467	670316.18	3629319.306
17			1542.694707	670325.24	3629323.591

2.1.3.3. 測地学的解析で得られた既往トレンチ箇所の変位量

トレンチ調査箇所ごとに変位量の断面図を作成して個別の変位量の傾向について確認した。図 2.1.14 にトレンチ箇所と対象とした変位境界を重ねた図を、表 2.1.3 にトレンチ箇所 10 地点の一覧をそれぞれ示す。

代表して SAR から変位量を得た下野トレンチと、画像相関解析から変位量を得た河原団地トレンチの変位量について縦横断の断面図を用いて確認した。その他のトレンチ箇所については Appendix に示す。

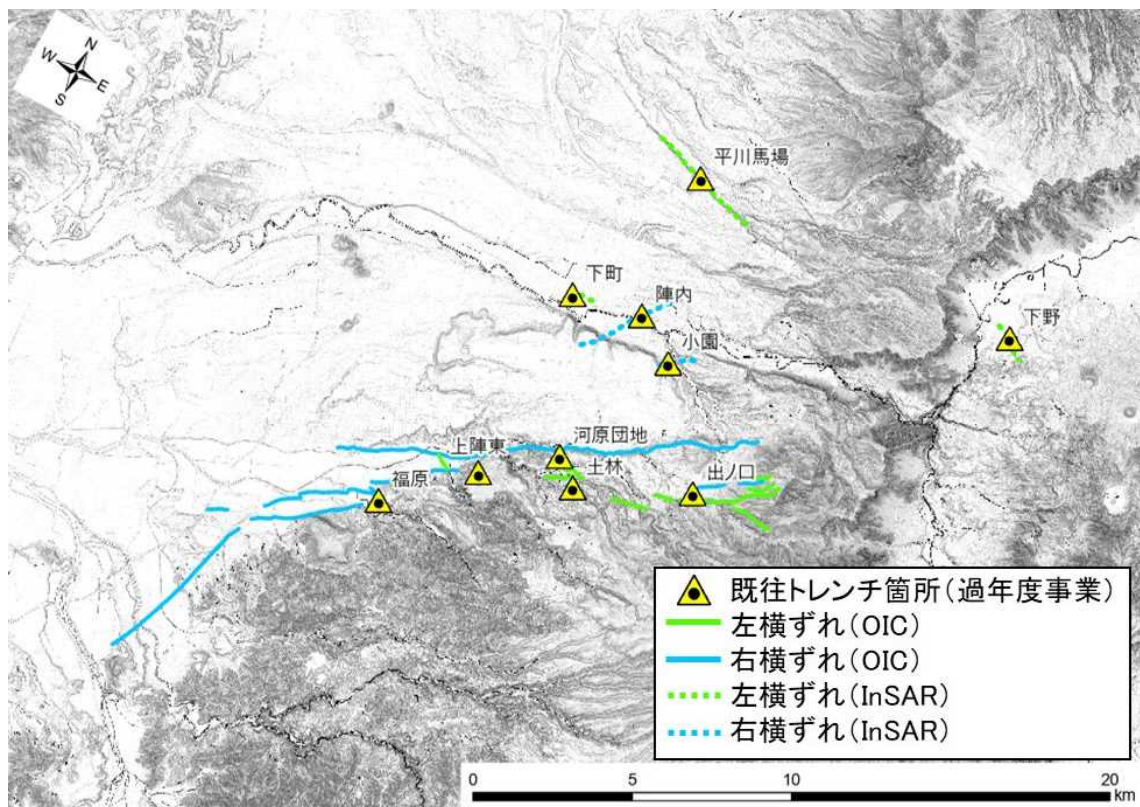


図 2.1.14 トレンチ箇所と対象とした変位境界分布図

表 2.1.3 トレンチ地点の変位状況一覧

No.	調査地区		実施年度	主断層 (既往活断層) からの距離(m)	変位を確認した 測地学的手法	表層の変位		トレンチ掘削前における 表層の変位状況	トレンチ内における 2016年熊本地震時の変位状況 (変位センサ等)
						現地状況	空中写真		
1	下野	阿蘇カルデラ内	2023年度	3139	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ地点を通過 する位相不連続ライ ンの延長で道路上に 左横ずれ変位を確認	トレンチ地点では確 認できず	耕作により確認できず	耕作土直下まで連続する開 口亀裂として確認
2	平川馬場	布田川断層遠方 NW-SE走向	2022年度	5049	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ調査地点か ら断続する位相不連 続ラインの延長部で 舗装道路にクラック	トレンチ地点では確 認できず	耕作により確認できず	確認できず
3	下町	布田川断層遠方 E-W走向	2020年度	4842	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ近傍の舗装 道路にクラックを確 認	地震直後の写真無し	耕作により確認できず	人工地盤を切断する断層と して確認
4	陣内	布田川断層遠方 NE-SW走向	2019年度	3886	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ地点を通過 する位相不連続ライ ンの延長上に右横ず れ変位を確認	トレンチ地点は全壊 した家屋があり確認 できないが延長方向 の畑にクラックあり	整地により確認できず	地表面まで連続する亀裂に より確認
5	小園		2021年度	2303	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ地点を通過 する位相不連続ライ ンの延長上に右横ず れ変位を確認	確認できず	耕作及びその後の耕作放 棄により確認できず	耕作土直下までの開口する 断層右横ずれセンサを示す 開口クラック
6	出ノ口	出ノ口断層近傍	2021年度	181	画像相関解析で変位 境界を確認	画像相関解析で変位 境界を確認	トレンチ地点にク ラック、隣畑に左 横ずれ変位を確認	耕作により確認できず	耕作土直下の埋土まで連続 する開口亀裂として確認
7	土林		2017年度	914	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ地点を通過 する位相不連続ライ ンの延長の舗装道路 上に右横ずれ変位を 確認	確認できず	耕作により確認できず	確認できず
8	河原団地	布田川断層近傍	2023年度	242	画像相関解析で変位 境界を確認	トレンチ地点を通過 する画像相関解析の 変位境界の延長で道 路上に左横ずれ変位 を確認	耕作地にクラックを 確認	耕作により確認できず	耕作土直下まで連続する開 口亀裂として確認
9	上陣東		2020年度	374	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ地点を通過 する位相不連続ライ ン延長の舗装道路 上にクラックを確認	確認できず	耕作により確認できず	耕作土まで連続する開口亀 裂により確認
10	福原		2017年度	253	LC-InSARで 位相不連続ラインを 確認	トレンチ地点脇の舗 装道路上に右横ずれ 変位を確認	耕作地にクラックを 確認	トレンチ地点の耕作地を 挟んで道路と畔の右横ず れ変位を確認	耕作土直下まで連続する断 層及び耕作土が落ち込むク ラックを確認

(1) 下野地区

熊本県阿蘇郡南阿蘇村下野地区は過年度事業（パスコ, 2023）において GPR 探査（3D）を、本事業に置いてトレンチ調査及び追加 GPR 探査（2D）を実施した地区である。

下野地区の変位量断面図を作成し、変位量の傾向について検討を行った。

下野トレンチの周辺の変位量図を図 2.1.15 示す。正の値が東、負の値が西方向を示す。

図 2.1.16 上に変位境界と直行する方向（A-A'）の断面図を示す。縦軸は東西方向の変位量と標高値、横軸は A-A' 断面の距離を表わす。下野トレンチを挟んだ両側 30m 付近では、約 0.04m の左横ずれを確認することができる。

図 2.1.16 下に変位境界に沿った方向（B-B'）の断面図を示す。縦軸は変位境界から 30m の位置の東西方向の変位量差（図 2.1.13 のイメージ図）と標高値、横軸は B-B' 断面の距離を表わす。下野トレンチ付近では約 0.04m の左横ずれが確認でき、下野トレンチより西側でも約 0.04~0.05m の左横ずれが確認できる。

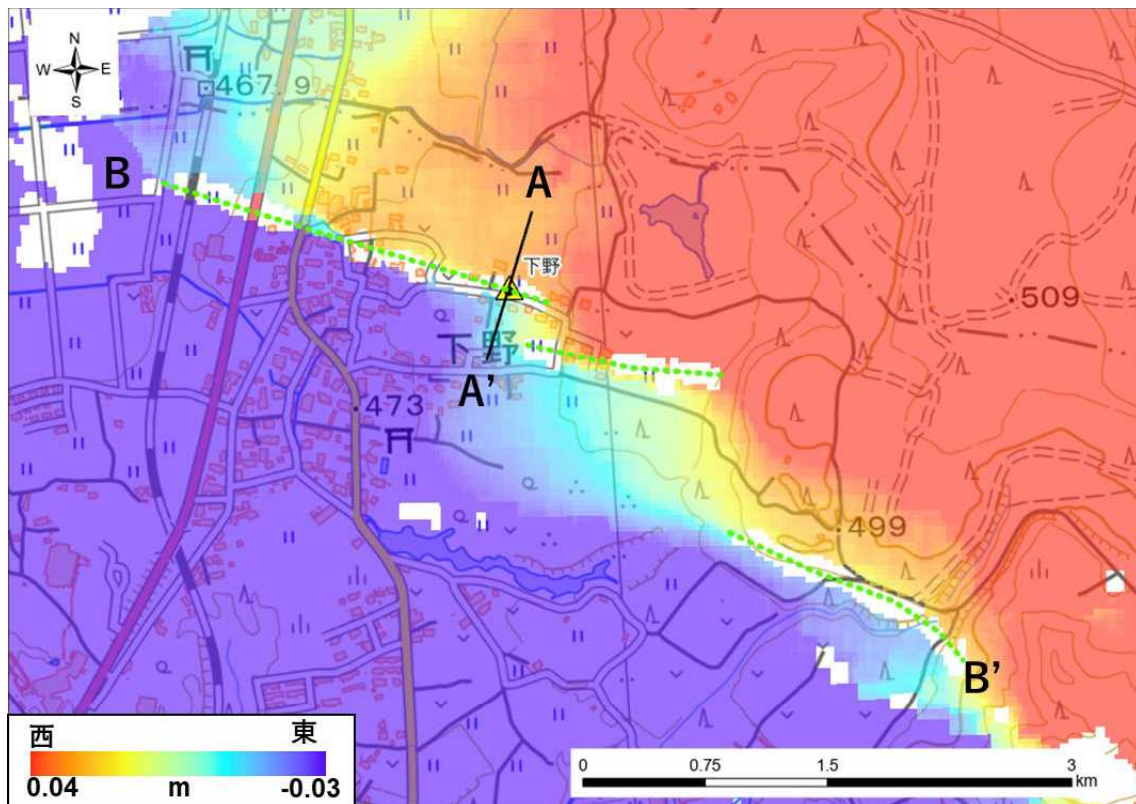


図 2.1.15 下野トレンチ周辺の変位量

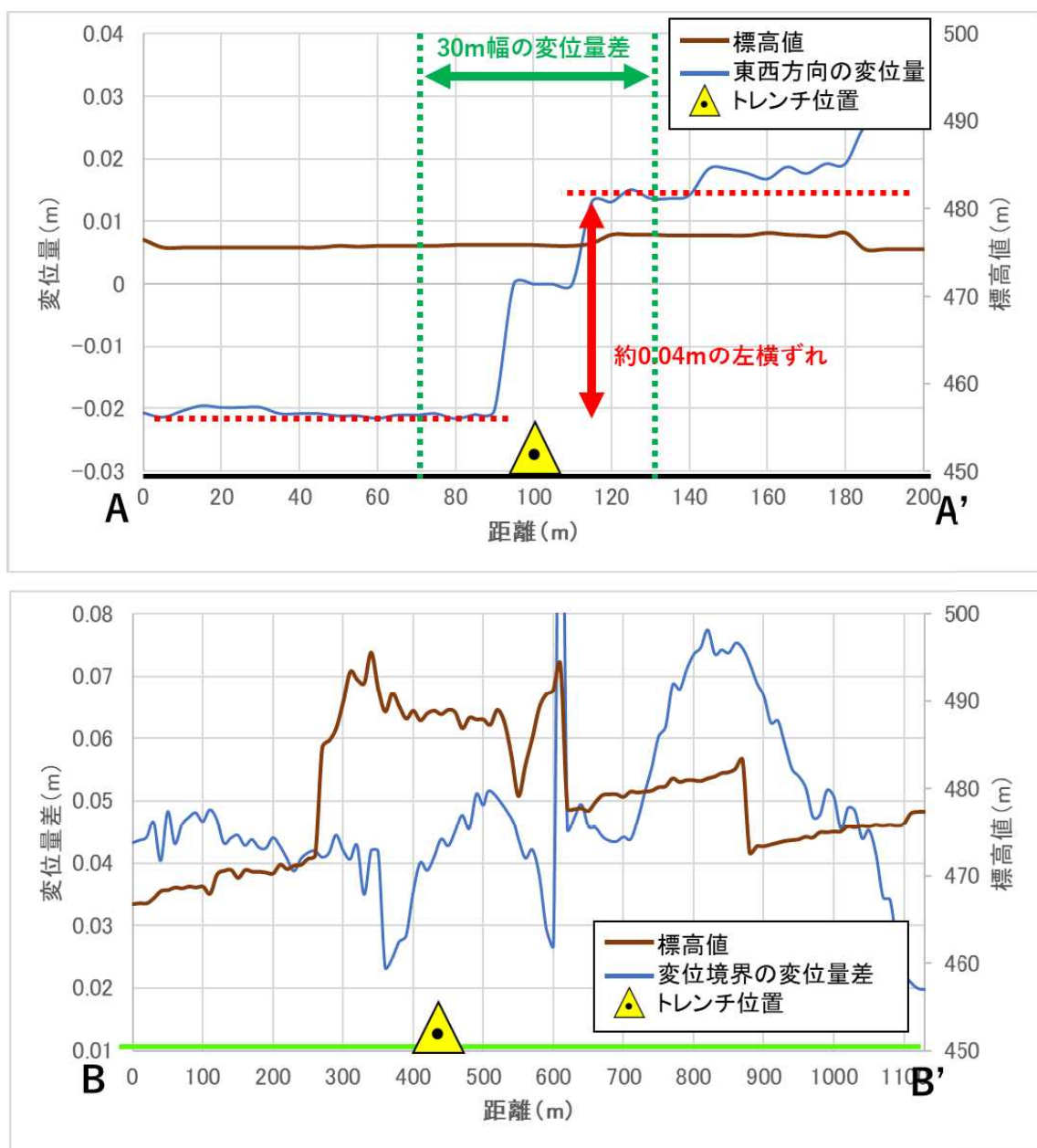


図 2.1.16 下野トレンチの横断方向断面図（上）と縦断方向断面図（下）

(2) 河原団地地区

熊本県阿蘇郡西原村河原団地地区は本事業で GPR 探査（2D・3D）及びトレンチ調査を実施した地区である。

河原団地トレンチの変位量断面図を作成し、変位量の傾向について検討を行った。

河原団地トレンチの周辺の変位量図を図 2.1.17 示す。正の値が東、負の値が西方向を示す。

図 2.1.18 上に変位境界と直行する方向（A-A'）の断面図を示す。縦軸は変位境界の走向方向の変位量と標高値、横軸は A-A'断面の距離を表わす。河原団地トレンチを挟んだ両側 30m 付近では、約 0.5m の左横ずれを確認することができる。

図 2.1.18 下に変位境界に沿った方向（B-B'）の断面図を示す。縦軸は変位境界から 30m の位置の走向方向の変位量差（図 2.1.13 のイメージ図）と標高値、横軸は B-B'断面の距離を表わす。河原団地トレンチ付近では約 0.5m の左横ずれが確認でき、河原団地トレンチから B'方向に近づくにつれて変位量差は小さくなることが読み取れる。

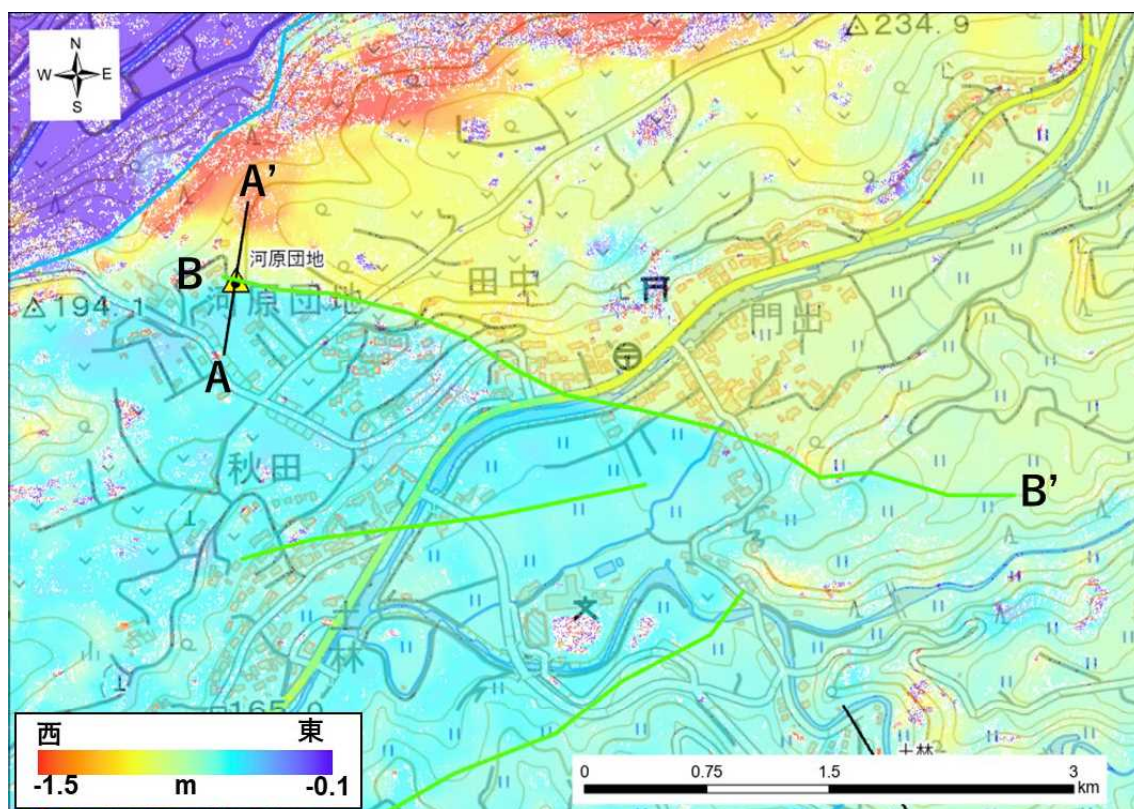


図 2.1.17 河原団地トレンチ周辺の変位量

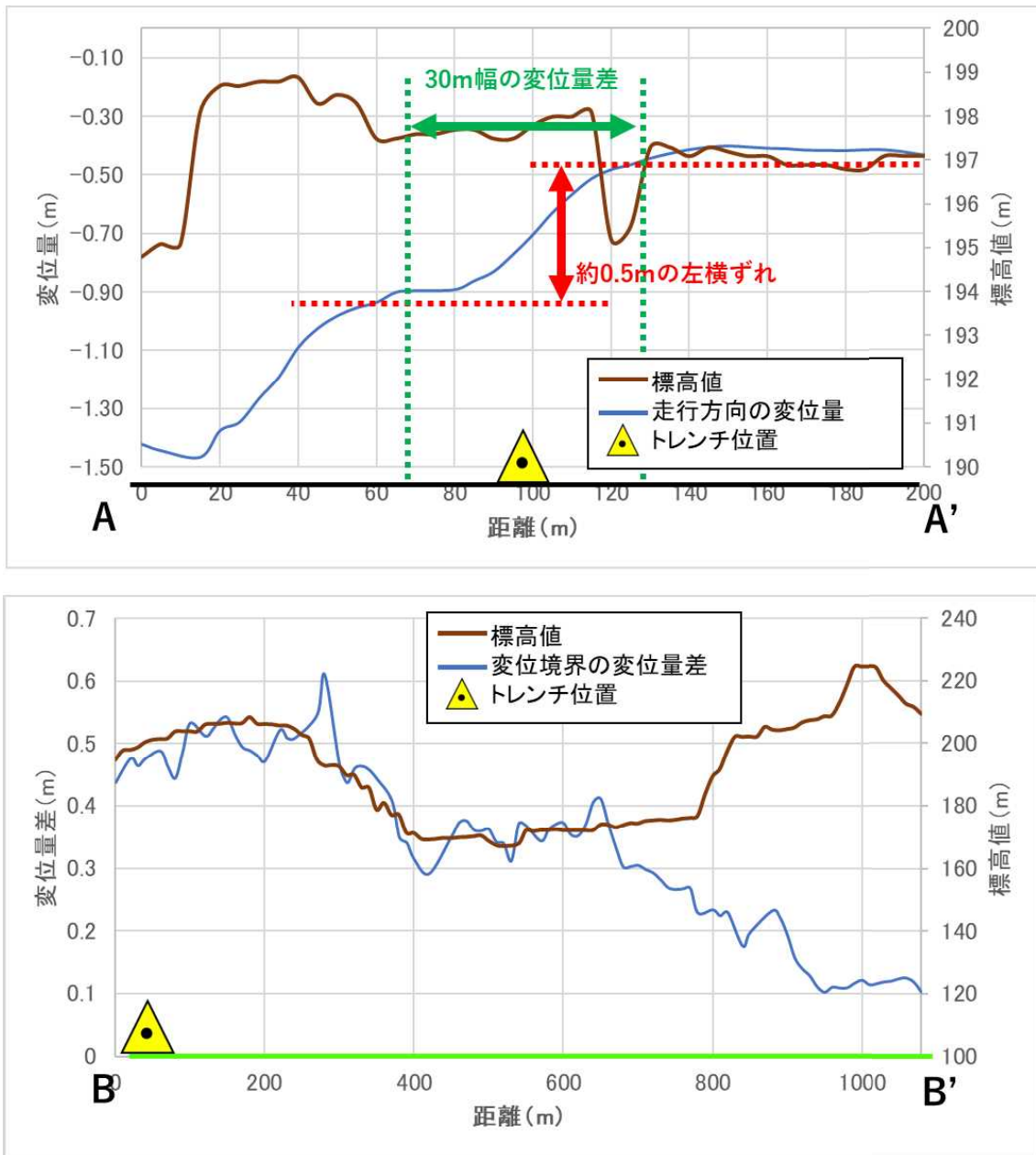


図 2.1.18 河原団地トレンチの横断方向断面図（上）と縦断方向断面図（下）

2.1.4. 海外で発生した地震

2.1.4.1. 調査概要

2019 年にアメリカ合衆国カリフォルニア州で発生したリッジレスト地震を対象として、SAR 衛星データを利用して地表変状の把握を試みた。リッジレスト地震は、現地時刻の 2019 年 7 月 4 日に Mw 6.4 の前震が、翌 5 日に Mw 7.1 の本震が発生した。前震が北東－南西走向の左横ずれ断層、本震が北西－南東走向の右横ずれ断層であり、地表に変状が出ていることが報告されている（例えば、DuRoss et al., 2020 や Xu et al., 2020）。

地表変状の把握にあたっては、波長の異なる L バンド衛星の ALOS-2 と C バンド衛星の Sentinel-1 より撮影された SAR 画像を使用して LC-InSAR 図を作成し、地表変状を示唆するコヒーレンスが低いエリア（位相不連続エリア）を抽出した。そのうえで両者の検出性能の違いについて比較した。また、SAR 衛星データにより抽出された位相不連続エリアの状況を実際に確認するために、現地調査を実施した。

2.1.4.1. 調査方法

(1) 使用した SAR 衛星データ

調査には L バンド衛星の ALOS-2（波長：23.5 cm）と C バンド衛星の Sentinel-1（波長：5.6 cm）より撮影された SAR 画像を使用した。使用したデータ及び観測範囲を表 2.1.4 及び図 2.1.19 にそれぞれ示す。

表 2.1.4 使用した SAR データ

Satellite	Flight Direction	Looking Direction	Master	Slave	Remarks
ALOS-2	Ascending	Right	2018/6/2	2019/11/16	West
	Ascending	Right	2018/10/20	2019/10/19	East
Sentinel-1	Ascending	Right	2019/6/28	2019/7/10	

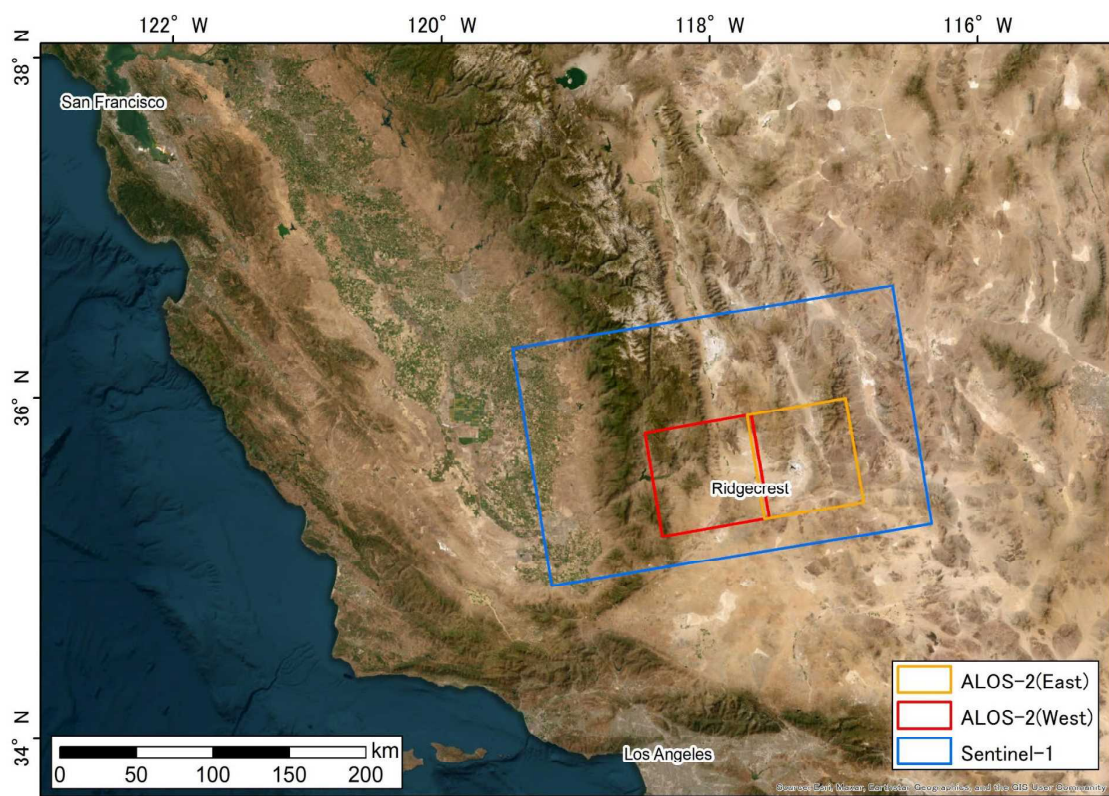


図 2.1.19 観測範囲

(2) 地表変状検出方法

LC-InSAR 図は、差分干渉 SAR 画像、コヒーレンス画像及び DEM データによる傾斜量図の 3 画像の重ね合わせによって生成される。LC-InSAR 図を使用することで、これまでの現地調査で地表地震断層として報告されていないような地点において微小でブロードな地表の変形を捉えることが可能である。

本調査では、過年度事業（パスコ、2023）で検討した LC-InSAR 位相不連続の定量的抽出方法を適用し、干渉縞の不連続があり、かつ低コヒーレンス値が連続するエリアを位相不連続エリア（Phase discontinuity area）として抽出した。この際、水域や土地被覆変化、季節性の植生変化等の地震と無関係なエリアに留意しながら位相不連続エリアを作成した。

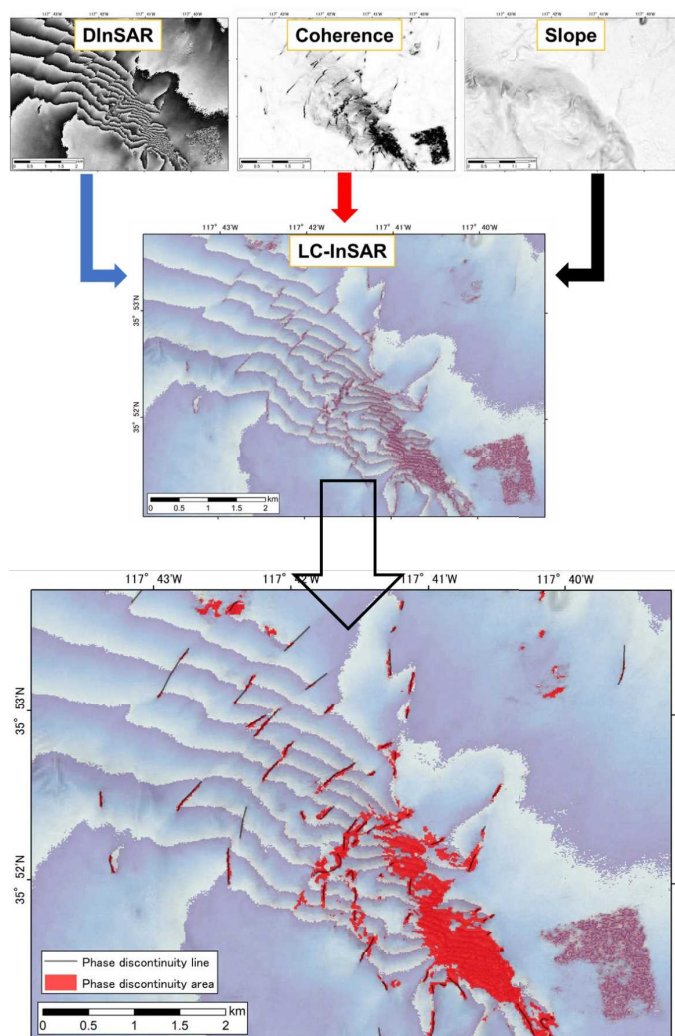


図 2.1.20 位相不連続エリアの作成イメージ

2.1.4.2. 調査結果

(1) 位相不連続エリアの分布の特徴

ALOS-2 と Sentinel-1 の LC-InSAR 図から抽出された位相不連続エリアをそれぞれ図 2.1.21 及び図 2.1.22 に示す。位相不連続エリアの分布状況に着目すると、ALOS-2 と Sentinel-1 のいずれの位相不連続エリアも北西－南東方向に長く連続する分布と、北東－南西方向に短く連続する分布が認められ、一連の地震による共役関係にある地表変状を捉えていると考えられる。現地調査主体の既往文献（DuRoss et al., 2020）により報告されている地表地震断層のトレースと比較をしても、SAR により捉えられた変状の分布状況が地表地震断層と整合的であることが確認された（図 2.1.23）。また、既往文献で報告されていない箇所を LC-InSAR 図では位相不連続エリアとして抽出している場合があることから、現地調査では網羅しきれていない変状も SAR では捉えられている可能性が考えられる。

ALOS-2 と Sentinel-1 のそれぞれの位相不連続エリアの抽出結果を比較すると、大局的には位相不連続エリアの分布状況は一致しているものの、Sentinel-1の方がより位相不連続エリアが面的な広がりを持っているのに対し、ALOS-2 は比較的線状に変状を抽出していることが分かる。これは実際の変動量に対するそれぞれの SAR の波長の違いに起因していると推定され、波長が長い ALOS-2 の方がより変動量の大きいメインの断層に比較的近い地表変状分布を詳細に捉えられるのに対して、Sentinel-1 はメイン断層に近いところではコヒーレンスが広い範囲で低くなって微小な変位が捉えられないが、メインの断層から離れたより微小な地表変状を捉えることに適していると考えられる。

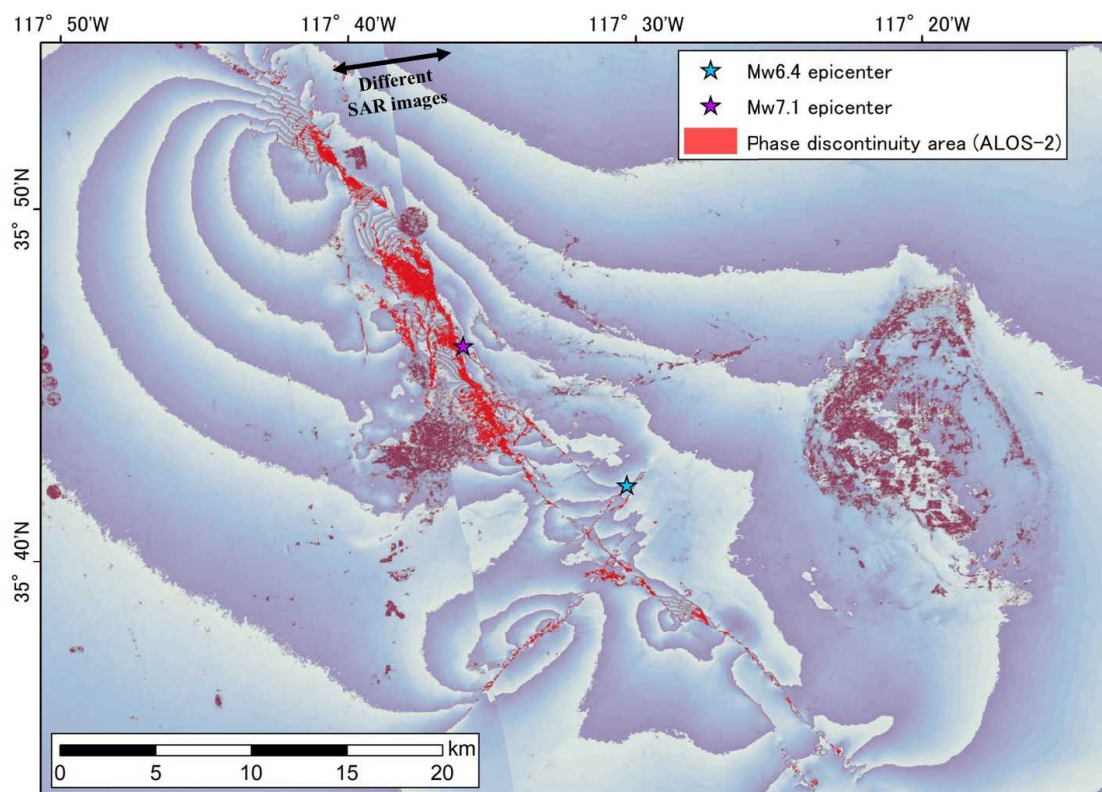


図 2.1.21 ALOS-2 の LC-InSAR 図から抽出された位相不連続エリア

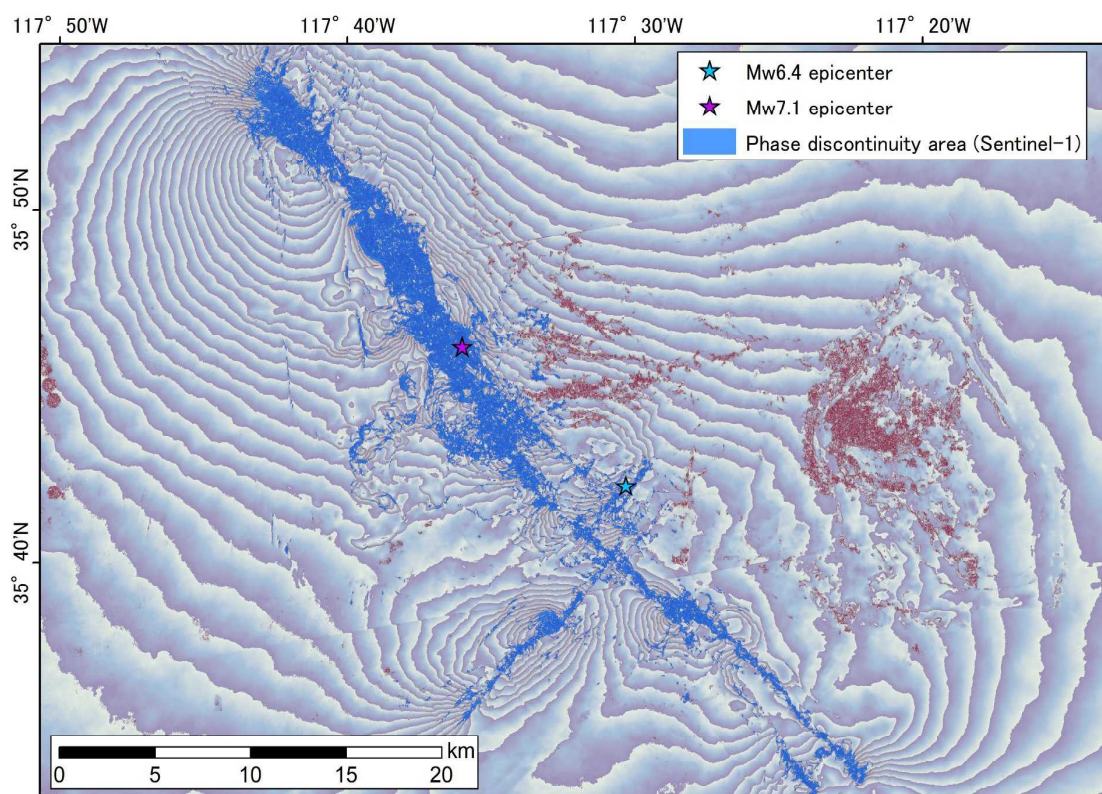


図 2.1.22 Sentinel-1 の LC-InSAR 図から抽出された位相不連続エリア

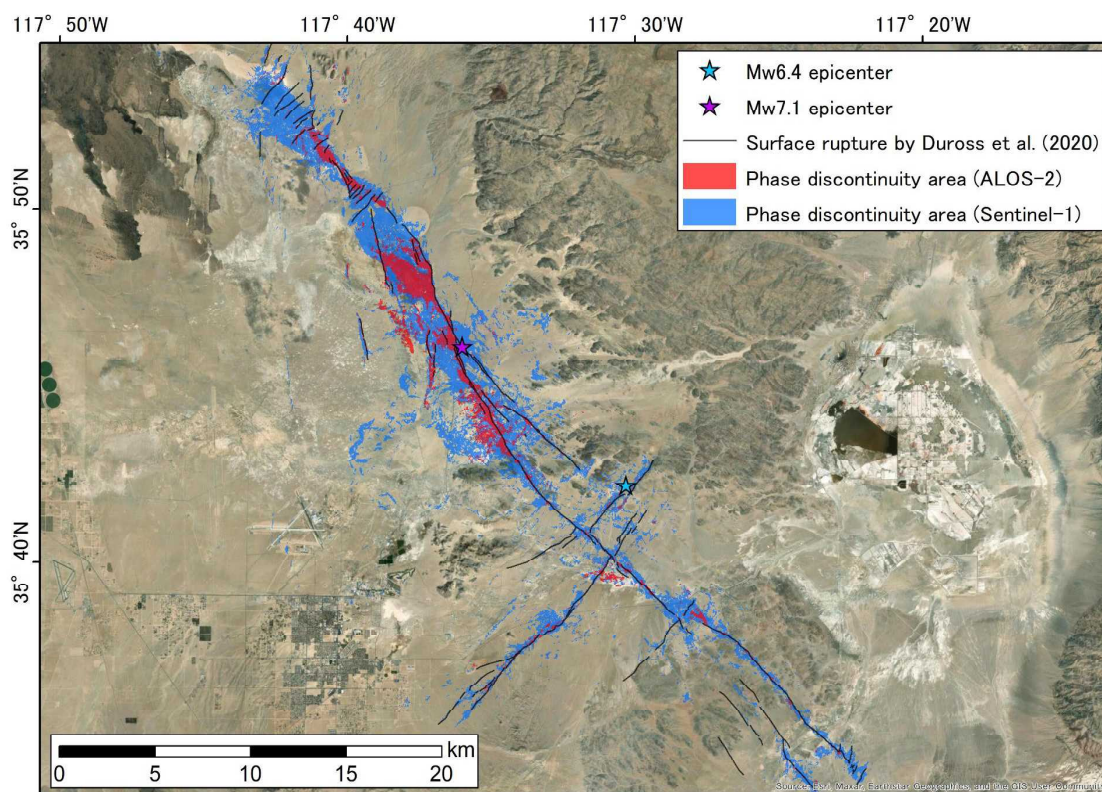


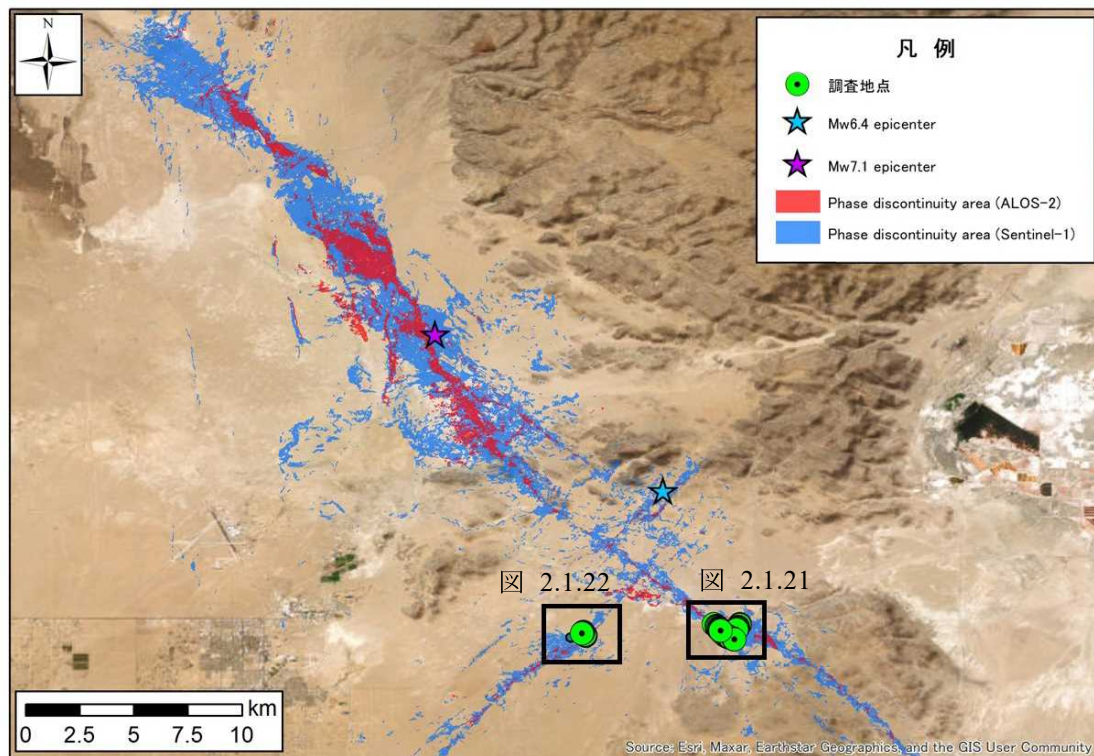
図 2.1.23 位相不連続エリアと既往報告による地表地震断層の関係

(2) 現地調査結果

LC-InSAR 図から抽出された位相不連続エリアについて、現地にて地表変状の確認及び走向の計測を実施した。現地調査地点（51 点）の全体図を図 2.1.24 に示す。また、調査地点の拡大図及び当該範囲の既往文献による地表地震断層を図 2.1.25 及び図 2.1.26 に示す。

図 2.1.25 に示すエリアでは、本震によって地表変状が生じたと考えられ、既往文献で報告されている右横ずれの主断層と、LC-InSAR 図によって新たに抽出された左横ずれの副断層に区分される。現地調査では、主断層沿いで最大 1m 程度の右横ずれの変位を確認できた（図 2.1.27）ことに加えて、既往文献で報告されていない副断層においても約 10cm 未満の開口幅を有する地表面の亀裂を確認することができ（図 2.1.28）、LC-InSAR 図により抽出された位相不連続エリアは実際の地表変状を捉えていることが明らかになった。主断層と副断層のそれぞれの断層沿いで確認された地表面の亀裂の走向のローズダイアグラムを図 2.1.29 に示す。右横ずれの主断層における亀裂は位相不連続エリアの連続方向と概ね整合的（やや杉型の雁行配列）なのに対して、副断層における亀裂は位相不連続エリアの連続方向に対してミ型の雁行状に配列しており、左横ずれを示唆していることが確認された。

図 2.1.26 に示すエリアでは、前震によって地表変状が生じたと考えられる。本エリアでは、一部、既往文献で図示されていない箇所に位相不連続エリアが確認され、現地調査によって、当該箇所においても数 10cm 程度の左横ずれの変位や約 10cm 未満の開口幅を有する地表面の亀裂を確認することができた（図 2.1.30）。前震により発生した地表面の亀裂の走向のローズダイアグラムを図 2.1.31 に示す。断層沿いの亀裂は位相不連続エリアの連続方向に対してミ型の雁行状に配列していることが確認され、既往文献による報告されている左横ずれの変動と整合的であることが確認された。



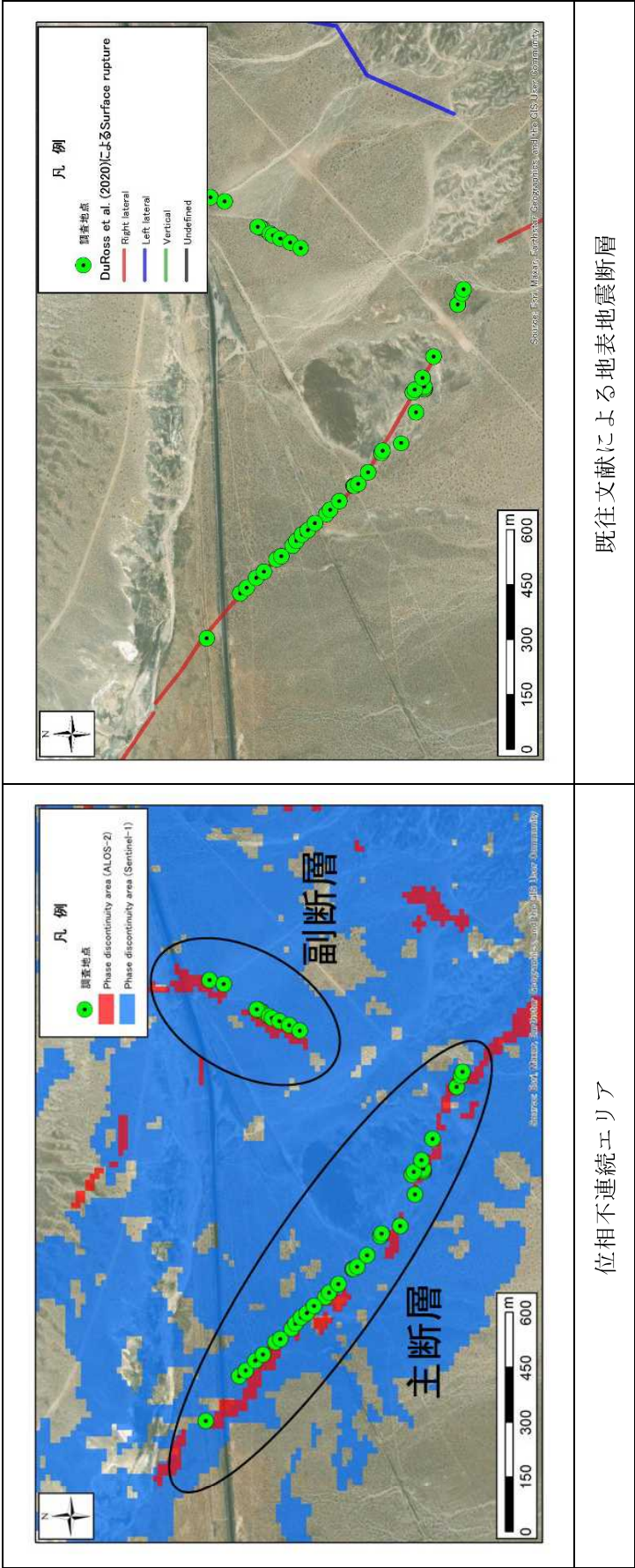


図 2.1.25 現地調査地点（43 点）の拡大図①

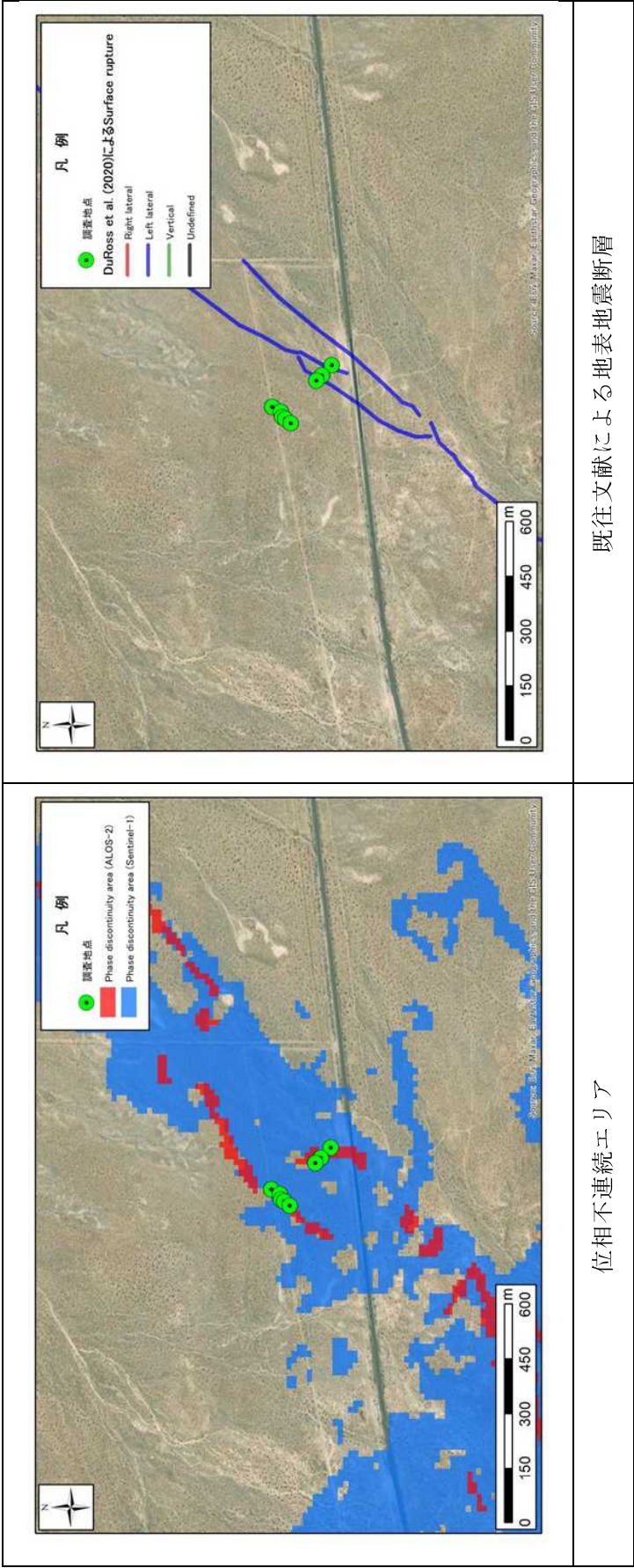


図 2.1.26 現地調査地点（8 点）の拡大図②

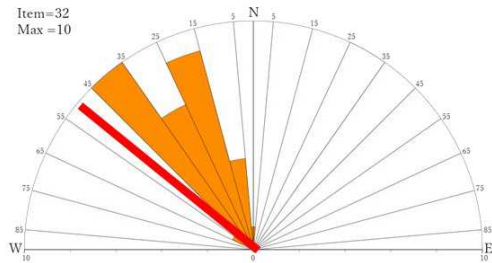


図 2.1.27 主断層沿いで確認された地表変状

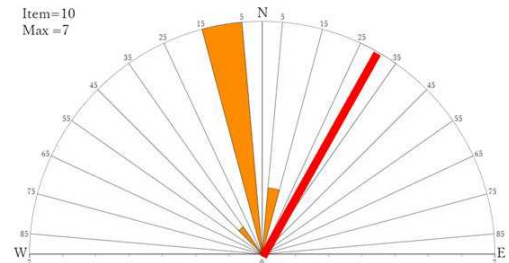


図 2.1.28 副断層沿いで確認された地表変状

主断層(右横ずれ)



副断層(左横ずれ)



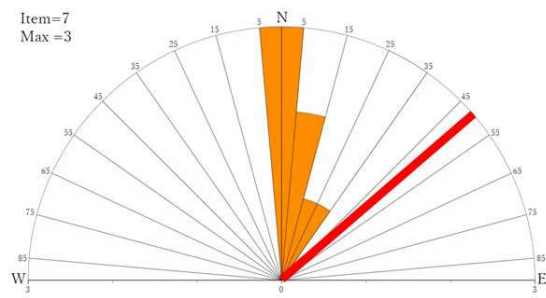
— 位相不連続エリアの連続方向

図 2.1.29 主断層と副断層沿いで確認された地表面の亀裂の走向のローズダイアグラム



図 2.1.30 前震により発生した地表面亀裂

左横ずれ断層



— 位相不連続エリアの連続方向

図 2.1.31 前震により発生した地表面の亀裂の走向のローズダイアグラム

2.1.5. 測地学的手法による地表変状分布と変位置に関する検討のまとめ

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、2016 年熊本地震において、ALOS-2 衛星データを用いた干渉 SAR 解析及び空中写真を用いた光学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置を求めた。

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、干渉 SAR 解析による LC-InSAR 図と 2.5 次元解析で検討した。また、主断層周辺の変位置分布と変位置を検出する手法として、光学画像による光学画像相関解析を実施した。主断層から離れた位置で生じた変位置分布と変位置に加え、主断層周辺で生じた変位置分布と変位置をマッピングした。その結果、干渉 SAR では非干渉のためデータを得ることが出来なかった主断層付近でも変位置分布と変位置のマッピングができた。また、主断層から離れた位置では、空中写真の撮影範囲外でデータを得ることが出来なかったが、干渉 SAR の複数の軌道を用いた LC-InSAR 図や 2.5 次元解析を用いることで変位置分布と変位置をマッピングすることが出来た。2 つの手法の欠点を補間することで、2016 年熊本地震で生じた広域の変位置の状況を確認することができた。

これらマッピング結果をもとに過年度事業で実施されたトレンチ箇所周辺の変位置を抽出し、主断層との距離に応じた変位置との関係や、地形条件と変位置との関係等を検討するための基礎データを整理した。

また、2019 年リッジクレスト地震を対象として、ALOS-2 衛星及び Sentinel-1 衛星のデータを用いて LC-InSAR 図を作成した。両者の LC-InSAR 図から位相不連続エリアを自動抽出し、現地調査を実施した。Sentinel-1 による位相不連続エリアは面的に広がり、地表地震断層分布箇所のだけでなく、周辺領域も位相不連続エリアとなっている。一方で、ALOS-2 の位相不連続エリアの範囲は狭い領域となったことから、現地調査において地表地震断層を確認するのに適していた。この検出性能の差異は、両者の観測波長帯の違いによるものである。

光学画像相関解析や干渉 SAR 解析は、地表変状の抽出と変位置の把握に有効である。また、測地学的手法を用いた検討を行うにあたっては、それぞれの手法の特性に合わせた利用が効果的である。本事業によって検討した測地学的手法の検出条件のイメージを図 2.1.32 に示す。手法の使い分けや必要に応じて組み合わせて使用することで、広域の変位置分布と変位置を把握することが出来ることが示唆された。

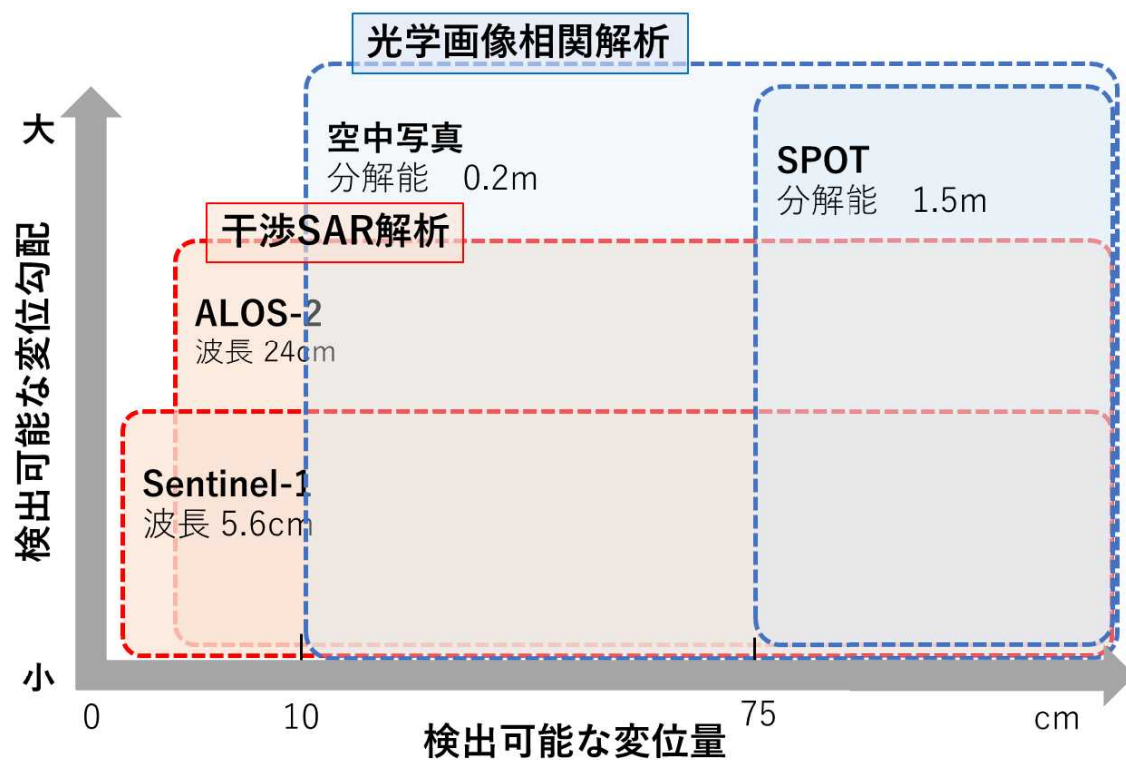


図 2.1.32 測地学的解析手法によって検出可能な横ずれ変位のイメージ

2.2. 物理探査による地下構造の検討

2.2.1. 地中レーダ探査の原理

2.2.1.1. 概要

地中レーダ探査は、送信アンテナから地中に照射した電磁波が地中で反射して受信アンテナで捉えるまでの伝播時間を計測し、地質構造や埋設物の有無を画像化する非破壊探査法である。画像処理した断面に現れる反射形状のパターンから、空洞及び埋設物などの異質物の存在や地下構造の形状を推定することが出来る。

地中レーダ探査の概要を図 2.2.1 に示す。

なお、測定データは、1 ナノ秒*（10 億分の 1 秒； 1×10^{-9} 秒）と非常に速い速度で取得するため、人の歩行速度で探査した場合において、地中から反射したデータを取り逃がすことはない。

*：光は 1 ナノ秒間に 29.9792458 センチメートル進む。

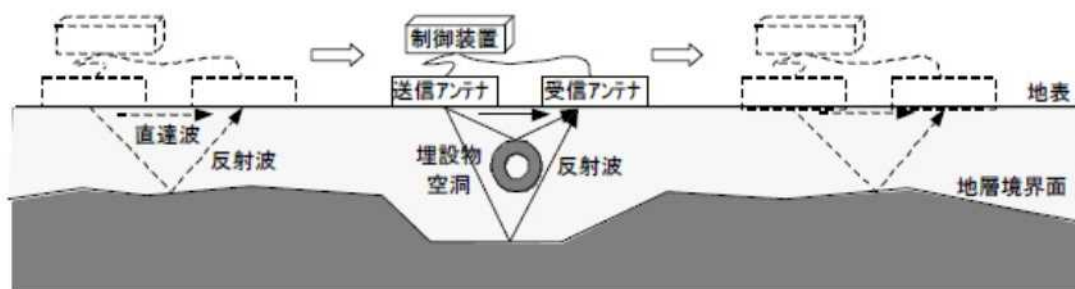


図 2.2.1 地中レーダ探査模式図

「物理探査適用の手引き」（2000）より引用

2.2.1.2. 測定原理

地中レーダ探査は、電波の波動性を利用し、地表部で発信した電磁パルスが地中の「電氣的性質が異なる物質同士の境界面」で反射する性質を利用した探査手法である。

(1) 反射画像

地中に向かって放射した電磁波は、円錐形状に広がりながら伝播する（図 2.2.2）。

送受信アンテナを次の探査箇所へ移動させるまで、少なくとも 2500～3000 回程度の電磁波送受信が完了する。この作業を複数回行って取得したデータを平均し、その箇所のデータとして表示する。

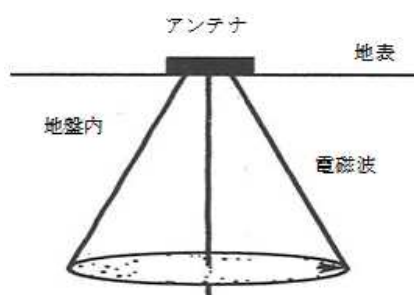


図 2.2.2 電磁波の放射範囲

「Ground-Penetrating Radar An Introduction for Archaeologists」（1997）に加筆

反射信号は実際には波形として記録される。この波形記録を処理することにより画像記録として表示される。したがって、得られた反射画像は、物質そのものの形状を表しているものではなく、画像上では虚像として表示される（図 2.2.3）

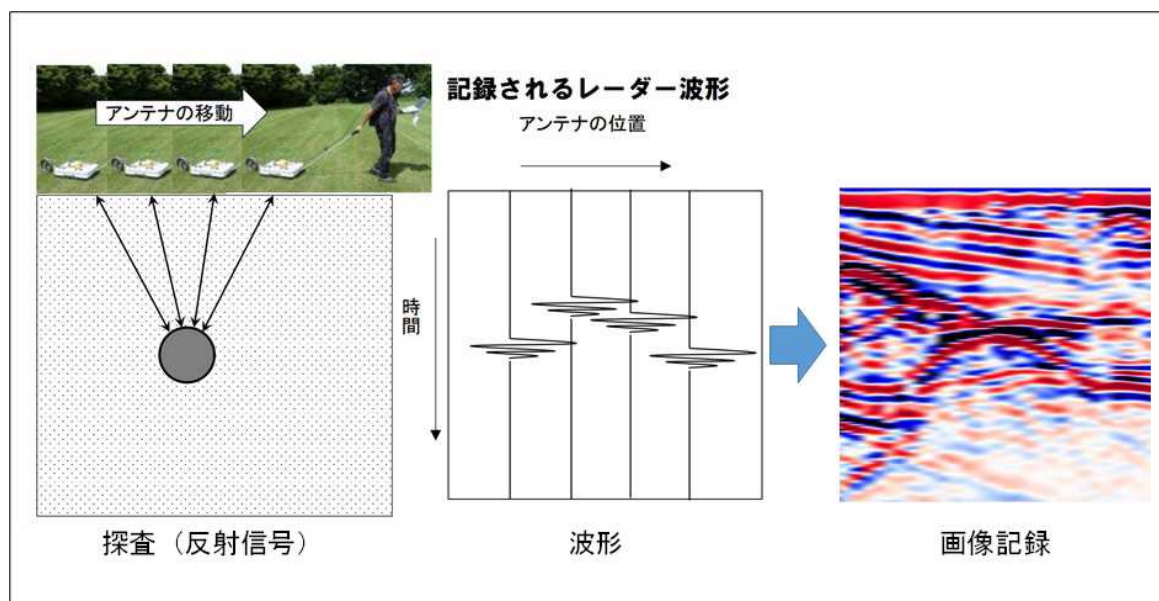


図 2.2.3 反射波の振幅

「地中レーダー技術に関する調査検討会報告書」（2017）に加筆

反射走時 t は、深度 h の地中に半径 r の球状の物質があり、アンテナがこの球体上を左から右へ通過するとき地表の各点で得られるとして（式 2.1）で表される。ただし、 d は地表の各点におけるアンテナと地中の物質との水平距離を、 v は電磁波の地中での伝播速度を表す。

$$t = 2 \cdot \frac{(h^2 + d^2)^{1/2} - r}{v} \dots\dots\dots \text{(式 2.1)}$$

上式は図 2.2.4 に示した距離 $d = 0$ （球体の直上）を頂点とした双曲線を表している。地中レーダ探査による反射画像は、物質の形状をそのまま表しているのではなく、このような双曲線上の虚像として現れる場合が多い。このときの球体の平面的な位置は、最も浅く表れた反射面（双曲線の頂部）の地点に相当する。空洞の場合も、このような双曲線（円弧）状の反射形状で現れる。

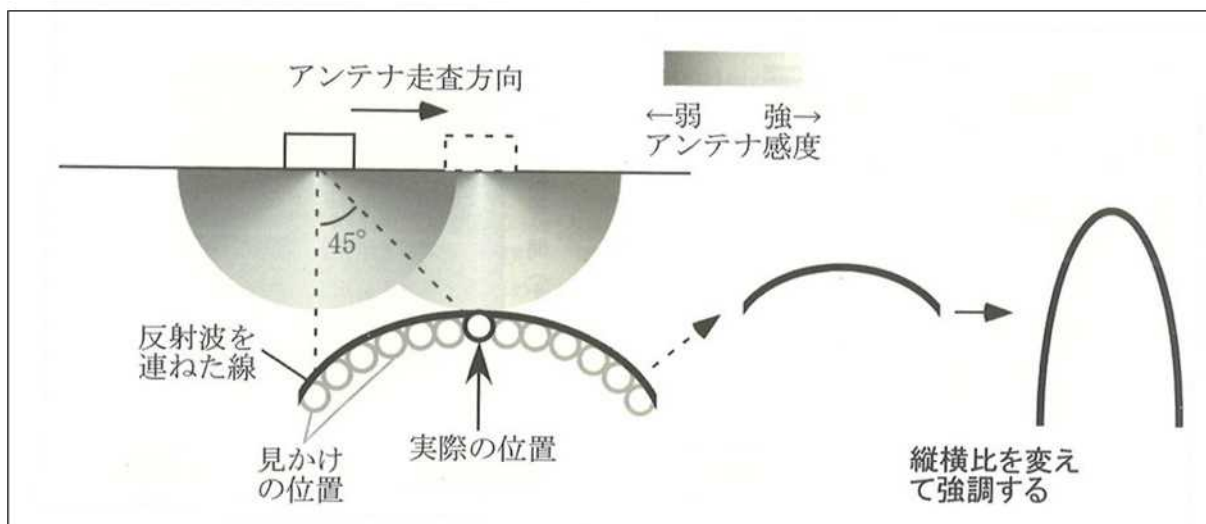


図 2.2.4 反射波の虚像
「新版 物理探査適用の手引き」（2008）より引用

(2) 深度変換

収録したデータは、電磁波を送信してから反射波が観測されるまでの往復走時で表示されている。深度への変換には（式 2.2）に示すように電磁波の地中伝播速度を用いて、時間表示から深度に変換することができる。

$$D = V \cdot \frac{T}{2} \dots\dots\dots \text{(式 2.2)}$$

ここに、

D : 深度 (m)

V : 電磁波の地中伝播速度 (m/s)

T : 往復走時 (s)

電磁波の伝播速度は、伝播媒質（地盤など）によって異なる。これは地質（土質）や物質により電氣的性質が異なるためであり、比誘電率（単に誘電率とも呼ばれる）で表される。比誘電率と伝播速度とは（式 2.3）の関係がある。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots \text{(式 2.3)}$$

ここに、

c : 電磁波の空中伝播速度 (m/s)

ϵ_r : 比誘導率

地盤の比誘電率を直接、測定することは実際には難しい。そのため通常は、地盤中の埋設管など深度が判明している波形が検出された場合には、その深度を基準として全体の深度変換を行う。周辺の地下埋設物や地質に関する情報がない場合には、ワイドアングル（CMP）測定を実施し、得られた電磁波速度の解析結果から時間断面を深度断面に変換する方法がある。

また地盤の伝播速度（比誘電率）を仮定して深度変換する場合もある。

代表的な地球構成物質の電磁波速度を表 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 代表的な地球構成物質の電磁波速度

「Sensors & Software Inc. EKKO_Project LineView & Interpretation Modules
User's Guide」に加筆

Material: 物質		Velocity: 電磁波速度 (m/ns)
Air	空気	0.30
Ice	氷	0.16
Dry Soil	乾燥した土壌	0.15
Granite	花崗岩	0.13
Dry Salt	乾燥した塩	0.13
Dry Rock	乾燥した岩石	0.12
Limestone	石灰岩	0.12
Wet Rock	湿潤な岩石	0.10
Concrete	コンクリート	0.08-0.12
Pavement	舗装	0.10
Shale	頁岩	0.09
Silt	シルト	0.07
Wet Soil	湿潤な土壌	0.06
Clay	粘土	0.06
Fresh Water	水	0.03

(3) 対象物の深度推定における留意点

地中レーダ探査では、対象物の深さを求めるにあたって、i) 深度変換に伴う誤差、ii) レーダ分解能の限界による誤差について留意する必要がある。

① 深度変換に伴う誤差

地中レーダ探査では「2.2.1.1 概要」に記載の通り、対象物から跳ね返ってきた電波の強さと往復時間を記録している。対象物の深度は（式 2.2）で計算されるが、一般に地中の伝播速度は未知数である。伝播速度は表 2.2.1 や CMP 法を用いて推定するが、地中の地質構造は一樣ではないため、速度分布もまた一樣ではない。したがって、（式 2.2）で計算される深度は、推定した伝播速度を用いており、かつ地質構造が一樣であると仮定した場合であるため、あくまで推定値であることに留意する必要がある。

実際の伝播速度を V 、対象物の深度を D とした場合、往復時間 T は

$$T = 2D/V \cdots \cdots \cdots \text{(式 2.4)}$$

で表される。速度の推定値を V' とすると、比例定数を α として、

$$V' = \alpha V \cdots \cdots \cdots \text{(式 2.5)}$$

で表される。以上から、推定深度 D' は

$$D' = \frac{V'T}{2} = \frac{(\alpha V)}{2} \left(\frac{2D}{V} \right) = \alpha D \cdots \cdots \cdots \text{(式 2.6)}$$

したがって、例えば、深さ 3 m と 6 m に対象物がある場合、仮に速度の推定値が $\pm 10\%$ の誤差（ $\alpha = 0.9$, $\alpha = 1.1$ に相当）があるとする、深さ 3 m では ± 0.3 m、深さ 6 m では ± 0.6 m の推定誤差が生じる。

② レーダ分解能の限界による誤差

一般に地中レーダ探査では、低周波数の探査機の方がより探査深度が深い、使用する電波の周波数帯域が狭いため分解能が低い。断面画像では図 2.2.3 のように波形が帯状に表示されるが、分解能が低くなるほど波形の帯が太くなり、厳密な深さを決定することは困難となる。

(4) パターン分類

本業務での断面解析は、下記の一般的な反射パターンと過去の探査例を基準とした。反射パターン例を図 2.2.5、過去の探査例を図 2.2.6 に示す。

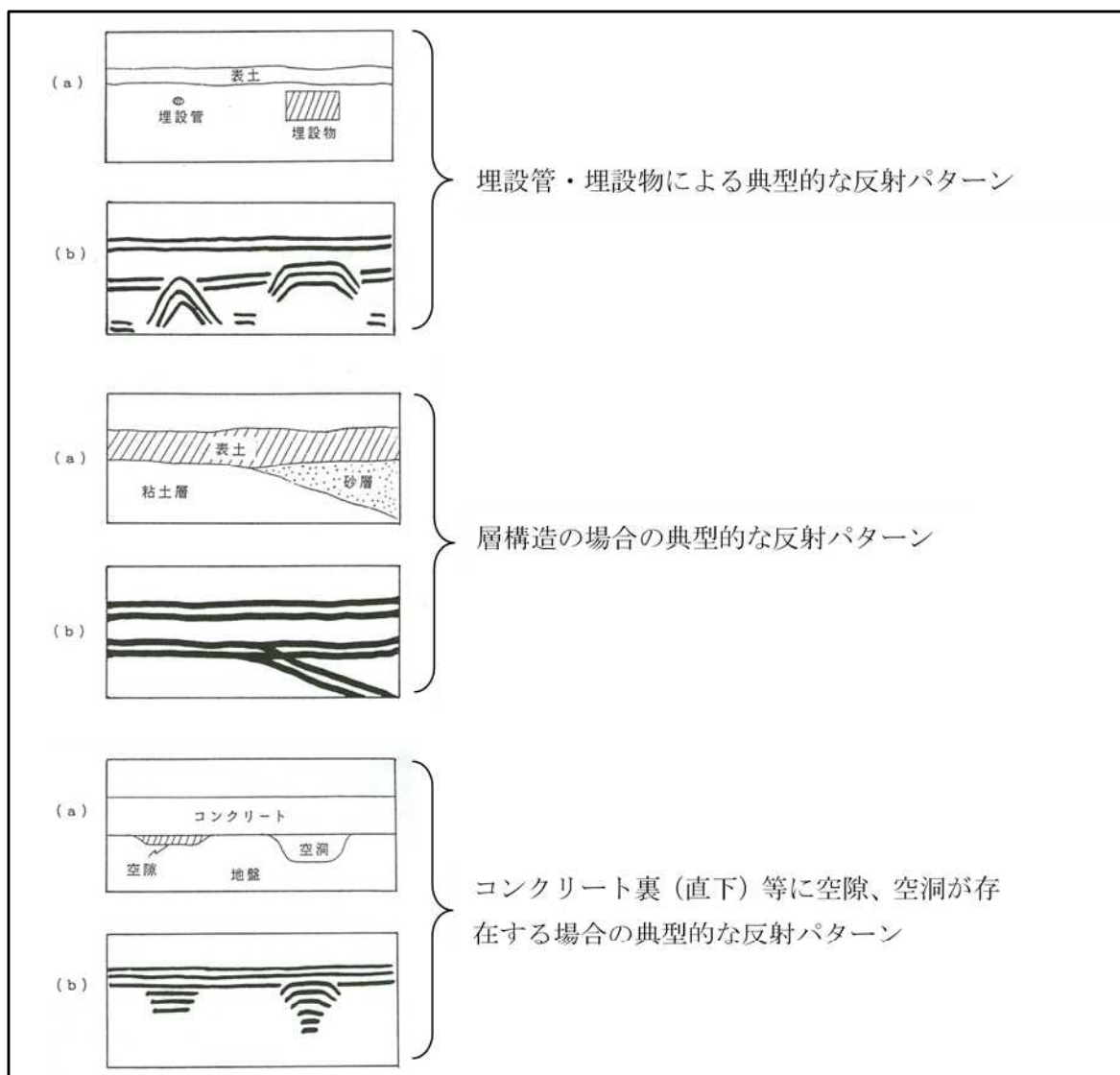
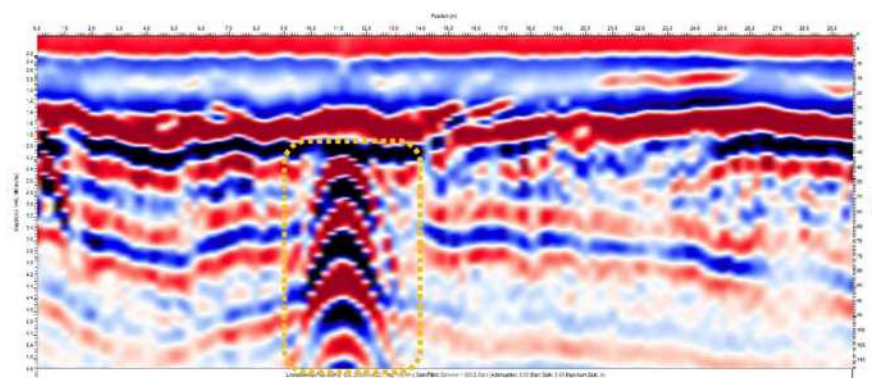
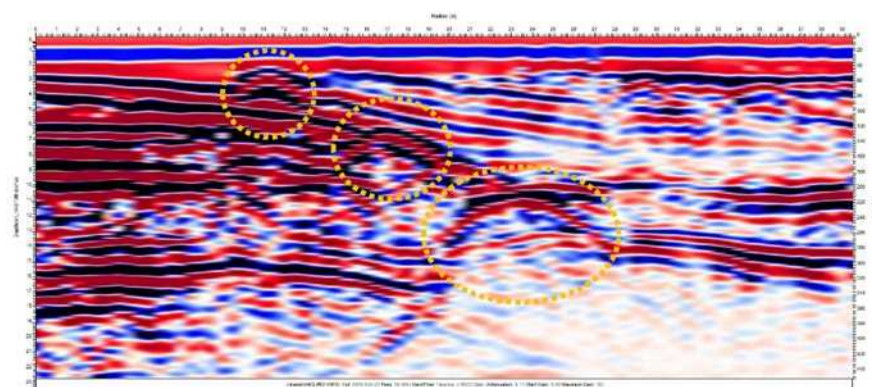


図 2.2.5 反射パターン例
「物理探査ハンドブック」(1998)に加筆



空洞探査断面(周波数:100 MHz)



埋設管探査断面(周波数:50 MHz)

図 2.2.6 過去の探査事例（上図：空洞探査，下図：埋設管探査）

2.2.1.3. データ処理方法

(1) 断面データの処理（プロファイル測定）

地中レーダ探査のデータ処理は、Sensors & Software 社製のデータ解析ソフト EKKO Project LineView を用いて実施した。一般的なデータ処理のフローを図 2.2.7 に示す。

まず、DC Removal 処理で直流成分を除去し、Repick First Break 処理で探査記録の最初の波形を再選択した後、Background Average Subtraction 処理により探査記録全体に対して、直達波と地表反射波を除去した。

次に、Horizontal spatial 処理にて距離方向に信号を平均化するとともに、ランダムなノイズを抑制し、水平または緩やかに傾く反射波を強調した。その後、Bandpass filter 処理で必要な周波数帯だけの信号を通過させ、各処理で生じたノイズを除去した。

さらに、Gain recovery 処理により反射信号の振幅の減少や減衰率を補正し、深部での小さい信号をより大きくし、波形を見やすくした。

上記の処理後に、Depth Conversion 処理にて、別途実施したワイドアングル（CMP）測定から得られた電磁波速度の解析結果から時間断面を深度断面に変換した。

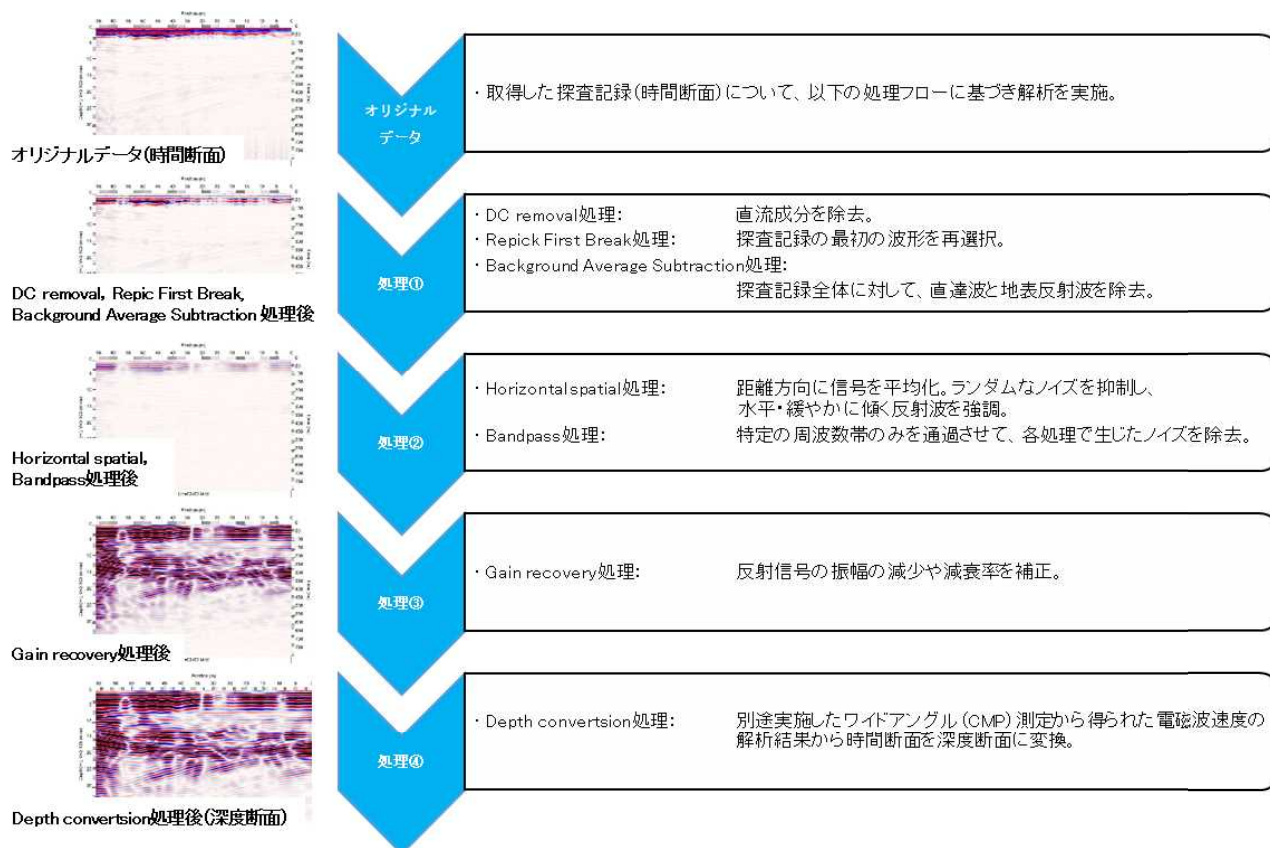


図 2.2.7 データ処理のフローおよびデータ処理ごとの処理結果例

2.2.2. 地中レーダ探査結果

2.2.2.1. 調査概要

本業務によるトレンチ調査、ボーリング調査候補地点を中心に、地中レーダ探査を実施した。探査地区は測地学的解析によって位相不連続ラインや2016年熊本地震時に地表変状が確認されている南阿蘇村下野、大津町平川馬場、同町陣内、同町岩坂、同町緑ヶ丘、西原村河原団地および益城町福原で実施した（図 2.2.8）。実施した総測線数は56測線である（表 2.2.2）。

西原村河原団地および益城町福原での探査は3次元形状把握のための解析手法検討のため、想定される変状に対して直交方向および平行方向に測線を設定し、反射記録を取得した。また探査目的に応じて、周波数帯を変えて同一測線で探査を実施することで、地表下5.0 m・10.0 m・30.0 mまでの各深度について、より解像度の高い反射記録を得ることで詳細な地下構造を把握することを目的として探査を計画、実施した。

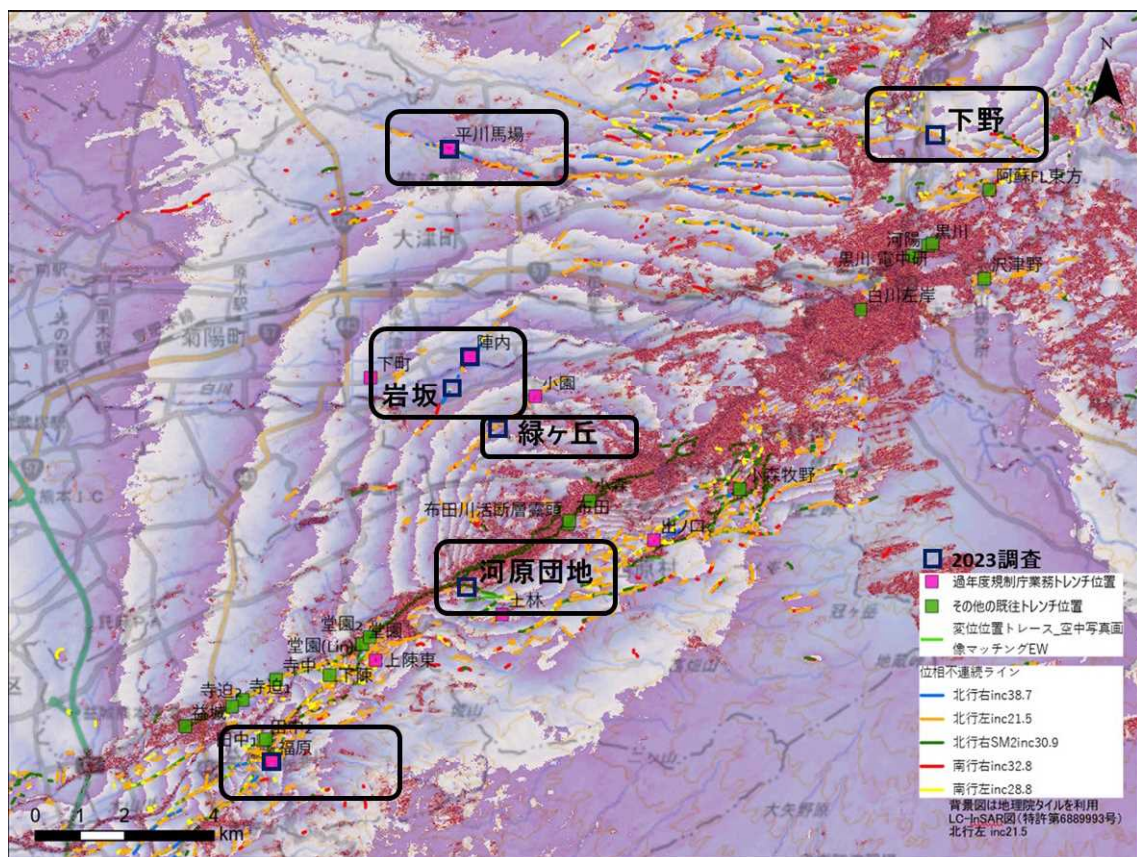


図 2.2.8 地中レーダ探査実施箇所

表 2.2.2 地中レーダ探査諸元

地点名	測線番号			周波数 (MHz)	測定 方法	測線方向			測線長 (m)		アンテナ 間隔 (m)	サンプリング 間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
南阿蘇村下野	MSM - 21	-	100	P	-	S	- N	0.0	34.0	1.0	0.20	2048	ハンドル		R5トレンチ調査実施 トレンチ西側測線
			50							0.40					
			25							0.80					
	MSM - 22	-	100	P	-	S	- N	0.0	28.0	1.0	0.20	2048	ハンドル		トレンチ東側測線
			50							0.40					
			25							0.80					
大津町平川馬場	OHR - 01	- 01	- 50	P	-	S	- N	0.0	140.0	1.0	0.40	2048	カート		
	OHR - 02	-	25	P	-	S	- N	0.0	60.0	4.0	0.80	2048	ハンドル		R4トレンチ調査実施 トレンチ延長測線
			50						2.0	0.40					
	OHR - 03	-	25	P	-	S	- N	0.0	136.0	4.0	0.80	2048	ハンドル		トレンチ西側測線
			50						1.0	0.40					
	OHR - 04	- 04	- 50	P	-	S	- N	0.0	60.0	1.0	0.40	2048	ハンドル		斜面東側測線
	OHR - 05	- 05	- 50	P	-	S	- N	0.0	10.0	1.0	0.40	2048	ハンドル		斜面西側測線
	OHR - 06	- 06	- 50	P	-	S	- N	0.0	50.0	1.0	0.40	2048	カート		
大津町障内	OJN - 01	- 01	- 50	P	-	N	- S	0.0	300.0	1.0	0.40	2048	カート		
	OJN - 02	- 02	- 50	P	-	W	- E	0.0	250.0	1.0	0.40	2048	カート		
	OJN - 03	- 03	- 50	V	-	-	-	0.5	5.0	-	0.05	2048	ハンドル		
	OJN - 04	- 04	- 50	P	-	W	- E	0.0	240.0	1.0	0.40	2048	カート		
	OJN - 05	-	50	V	-	-	-	0.5	5.0	-	0.05	2048	ハンドル		
			50					0.05							
大津町岩坂	OIW - 01	- 01	- 50	P	-	N	- S	0.0	150.0	1.0	0.40	2048	カート		
	OIW - 02	- 02	- 50	P	-	N	- S	0.0	150.0	1.0	0.40	2048	カート		
	OIW - 03	- 03	- 50	V	-	-	-	0.5	5.0	-	-	2048	ハンドル		
大津町緑ヶ丘	OMD - 01	-	50	P	-	N	- S	0.0	100.0	1.0	0.80	2048	カート		R5ボーリング調査実施
			25						96.0	4.0			ハンドル		
	OMD - 02	-	50	P	-	N	- S	0.0	90.0	1.0	0.80	2048	カート		
			25						88.0	4.0			ハンドル		
	OMD - 03	- 03	- 50	P	-	N	- S	0.0	180.0	1.0	0.40	2048	カート		
西原村河原 R5トレンチ東側	NKW - 01	- 01	- 50	P	-	S	- N	0.0	38.0	1.0	0.40	2048	カート		3次元解析実施箇所
	NKW - 02	- 02	- 50	P	-	S	- N	0.0	38.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 03	- 03	- 50	P	-	S	- N	0.0	24.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 04	- 04	- 50	P	-	S	- N	0.0	22.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 05	- 05	- 50	P	-	S	- N	0.0	20.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 06	- 06	- 50	P	-	S	- N	0.0	18.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 07	- 07	- 50	P	-	S	- N	0.0	14.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 08	- 08	- 50	P	-	E	- W	0.0	28.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 09	- 09	- 50	P	-	E	- W	0.0	32.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 10	- 10	- 50	P	-	E	- W	0.0	38.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 11	- 11	- 50	P	-	E	- W	0.0	34.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 12	- 12	- 50	P	-	E	- W	0.0	32.0	1.0	0.40	2048	カート		
	NKW - 13	-	50	V	-	-	-	0.5	5.0	-	0.05	2048	ハンドル		
			50					0.05							
西原村河原 R5トレンチ地点	NKW - 21	- 21	- 50	P	-	S	- N	0.0	40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル		R5トレンチ調査実施
	NKW - 22	-	50	P	-	S	- N	0.0	40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル		
			25						4.0	0.80					
	NKW - 23	-	50	P	-	S	- N	0.0	40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル		
			25						2.0	0.40					
	NKW - 24	- 24	- 50	P	-	S	- N	0.0	40.0	4.0	0.80	2048	ハンドル		
NKW - 25	- 25	- 50	P	-	S	- N	0.0	40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル			
益城町福原	MFK - 21	-	25	P	-	S	- N	0.0	20.0	4.0	0.80	2048	ハンドル		3次元解析実施箇所 R5ボーリング調査実施
			50						1.0	0.40					
	MFK - 22	-	50	P	-	S	- N	0.0	20.0	1.0	0.40	2048	ハンドル		
			25						4.0	0.80					
	MFK - 23	-	50	P	-	S	- N	0.0	20.0	1.0	0.40	2048	ハンドル		
			25						4.0	0.40					
	MFK - 24	- 24	- 50	P	-	E	- W	0.0	4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル		
	MFK - 25	- 25	- 50	P	-	E	- W	0.0	4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル		
MFK - 26	- 26	- 50	P	-	E	- W	0.0	4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル			
MFK - 27	- 27	- 50	P	-	E	- W	0.0	4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル			

探査機器は、カナダ Sensors & Software 社製の PulseEKKO PRO システム（図 2.2.9）で、アンテナは中心周波数 100 MHz、50 MHz および 25 MHz を用いた（図 2.2.10）。探査機器の諸元は表 2.2.3 に示す。地下断面はプロファイル測定法によって取得した。プロファイル測定は、送信アンテナと受信アンテナの間隔を一定に保ったまま、測線に沿って送受信アンテナをほぼ一定の速度で移動させて測定する方法である（図 2.2.11，図 2.2.12）。



図 2.2.9 地中レーダ探査機器（pulseEKKO PRO システム）



図 2.2.10 送受信機およびアンテナ（pulseEKKO PRO システム，製品カタログより抜粋）
（左写真：周波数 50 MHz，右写真：周波数 25 MHz）

表 2.2.3 地中レーダ探査使用機器一覧（pulseEKKO PRO システム）

探査機器	コントロールパッケージ DVL-500		
	ウルトラレシーバ Model 3200*1		
	トランスミッタ pulseEKKO 100		
周波数	100 MHz	50 MHz	25 MHz
探査深度*2	5.0 m	10.0 m	30.0 m
アンテナ間隔	1.0 m	1.0 m or 2.0 m	4.0 m
アンテナ幅	1.0 m	2.0 m	4.0 m

*1 スタック数は65536まで設定が可能（旧モデルは2048まで）。

*2 地質の状況、地下水位などの影響により異なる。

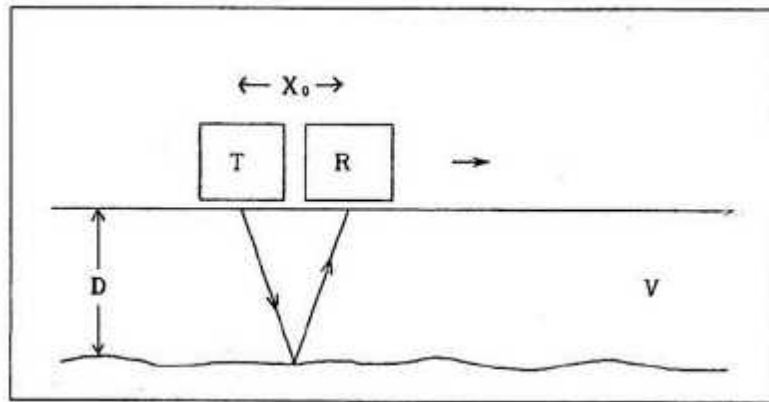


図 2.2.11 プロファイル測定の様式図（物理探査学会，1998）

D ：反射面までの深度、 T ：送信アンテナ、 R ：受信アンテナ、
 X_0 ：送信・受信アンテナ間隔、 V ：地中における電磁波伝播速度



図 2.2.12 地中レーダ探査風景（R3 年度小園地区での探査例，周波数 50 MHz）

2.2.3. 下野地区

下野地区では、今年度トレンチ掘削地点の西側および東側にて、周波数 100MHz・50MHz および 25MHz を用いて、同一測線上で探査を実施した（図 2.2.13）。各周波数ともにトレンチ西側の MSM-21 測線及び東側の MSM-22 測線で実施し、測線数は計 6 測線である（表 2.2.4）。

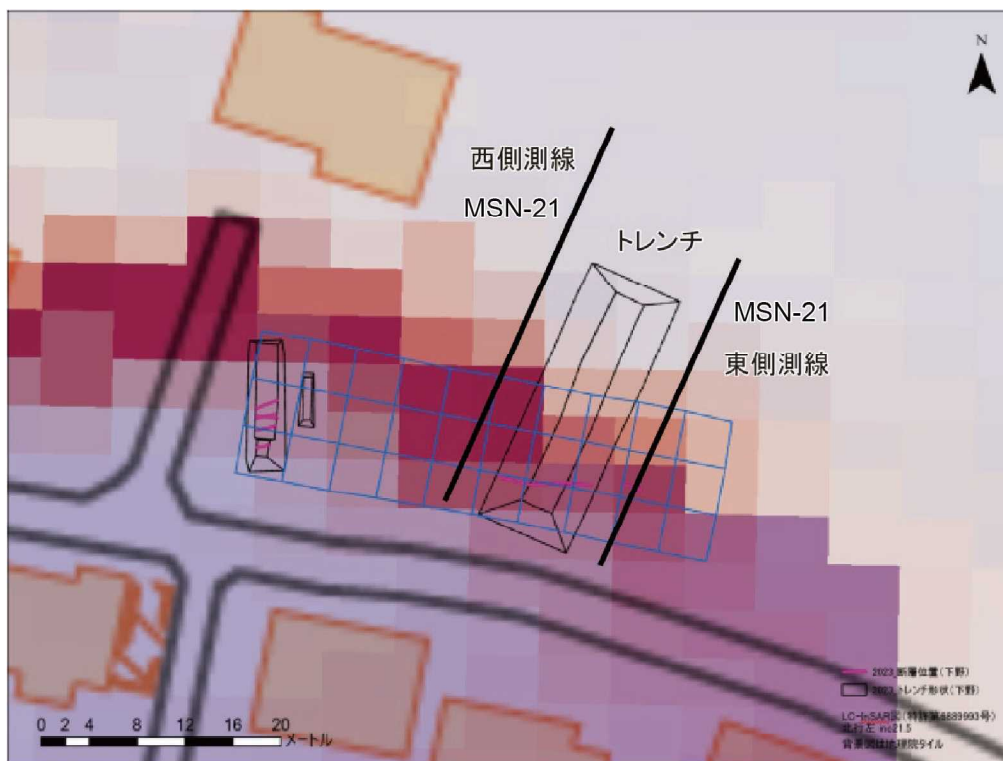


図 2.2.13 探査測線図（下野地区）

表 2.2.4 探査測線諸元（下野地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ 間隔 (m)	サンプリング 間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
南阿蘇村下野	MSM-21	100	P	S-N	0.0 - 34.0	1.0	0.20	2048	ハンドル	R5トレンチ調査実施 トレンチ西側測線
		50					0.40			
		25					0.80			
	MSM-22	100	P	S-N	0.0 - 28.0	1.0	0.20	2048	ハンドル	トレンチ東側測線
		50					0.40			
		25					0.80			

(1) MSM-21 測線（トレンチ西側，図 2.2.14）

トレンチ西側の測線について、100MHz 探査では、深度 2-9m の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.15）。深度 8m 以浅の反射は、測線位置 8-21m の範囲で連続が途切れ、形状は凹地状をなす。測線位置 4-5m の範囲では、深度 2-10m までの反射に傾斜変換がみられる。

50MHz 探査では、深度 4-10m の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.16）。深度 8m 以浅の反射は、測線位置 13-20m の範囲で連続が途切れ、形状は凹地状をなす。測線位置 5-6m の範囲では、深度 4-12m までの反射に不連続や傾斜変換がみられる。

25MHz 探査では、深度 6-12m の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.17）。深度 7m 以浅の反射は、測線位置 8-20m の範囲で連続が途切れるが、100MHz 探査・50MHz 探査でみられる凹地状の反射形状は明瞭ではない。測線位置 3m より北側では、反射が下がっていくような傾向がみられるが、明瞭な反射の不連続や傾斜変換はみられない。

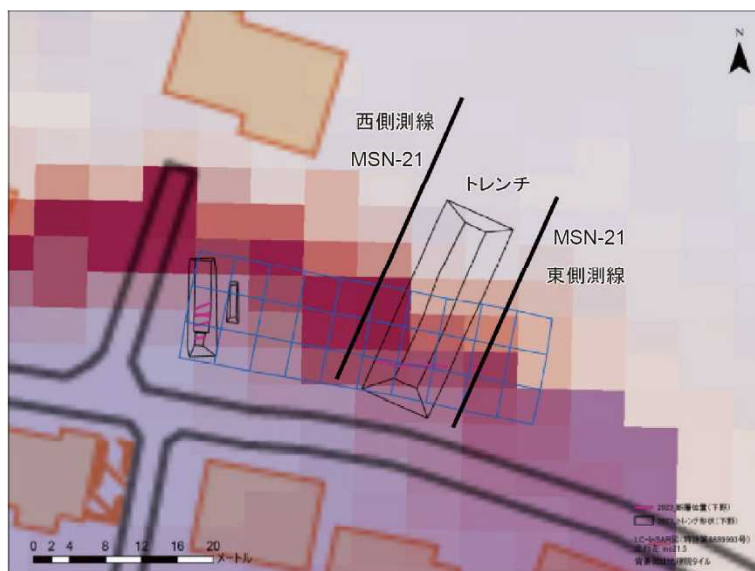


図 2.2.14 探査測線図（MSM-21 測線，再掲）

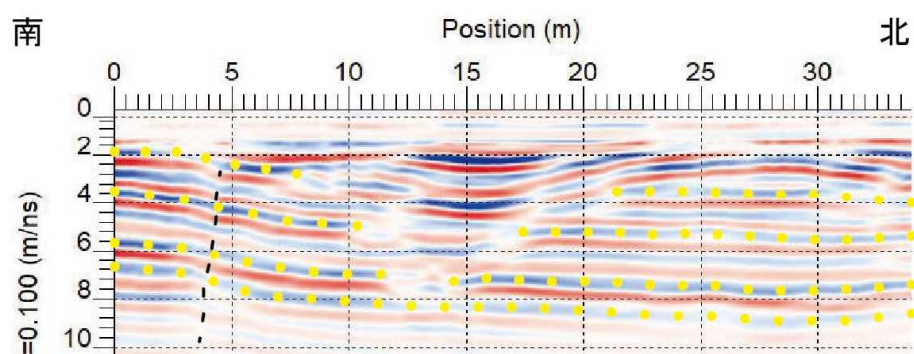
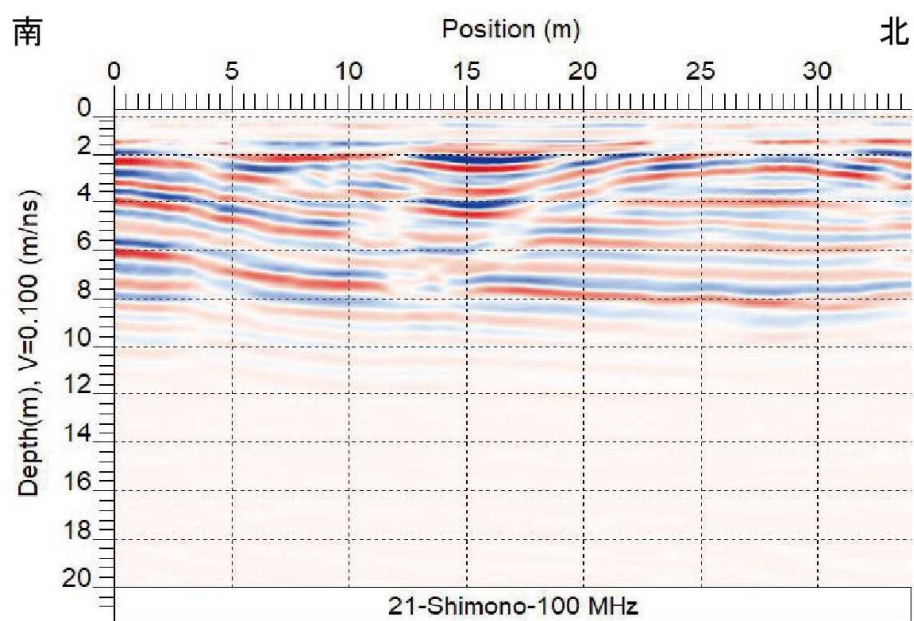


図 2.2.15 MSM-21-100MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 10m 以下の記録を除去した

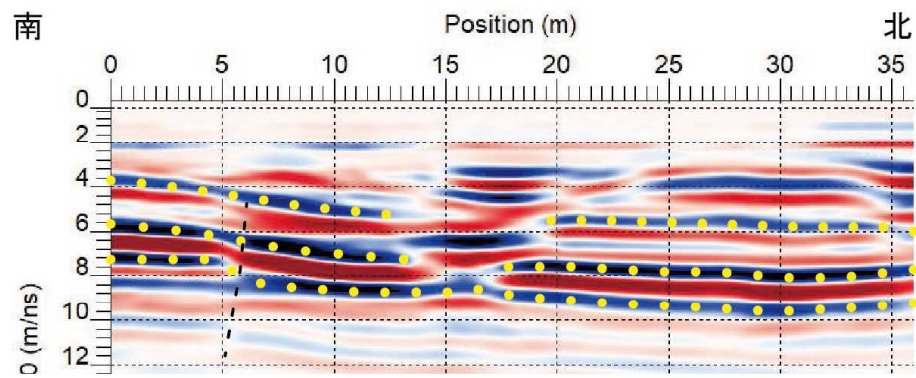
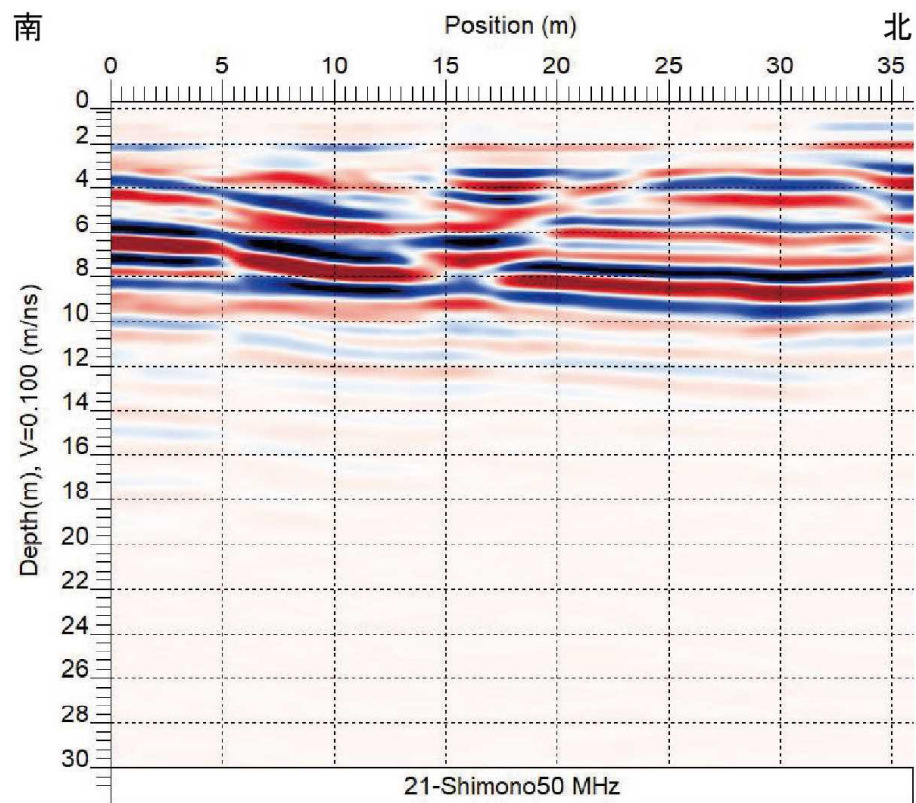


図 2.2.16 MSM-21-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）
 黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換
 下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

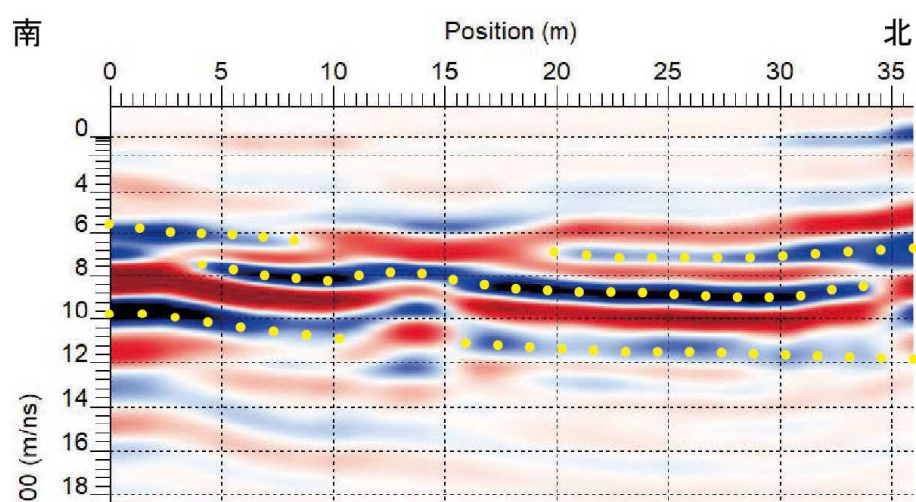
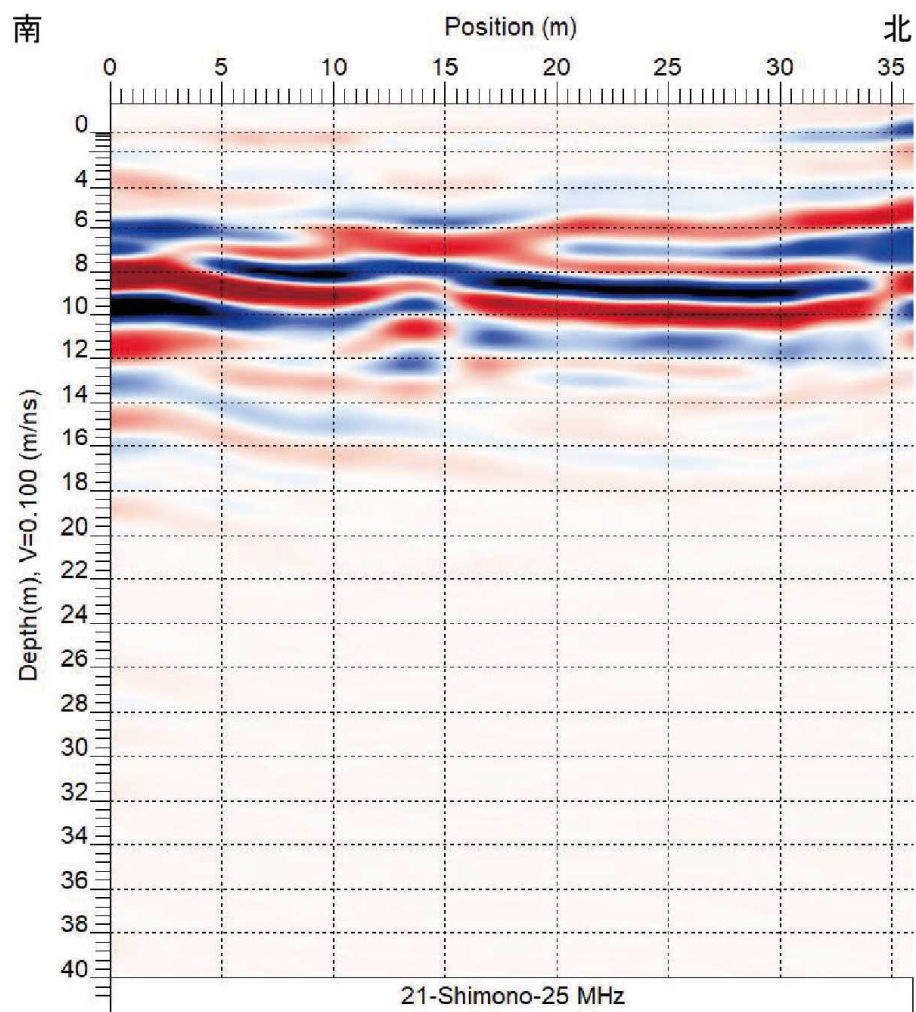


図 2.2.17 MSM-21-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射

下図では減衰の大きい深度 18m 以下の記録を除去した

(2) MSM-22 測線（トレンチ東側，図 2.2.18）

トレンチ東側の測線について、100MHz 探査では、深度 2-10m の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.19）。深度 7m 以浅の反射は、測線位置 15-21m の範囲で連続が途切れ、形状は凹地状をなす。測線位置 5-6m の範囲では、深度 2-10m までの反射に傾斜変換がみられる。

50MHz 探査では、深度 4-10m の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.20）。深度 7m 以浅の反射は、測線位置 15-20m の範囲で連続が途切れ、形状は凹地状をなす。測線位置 5-6m の範囲では、深度 3-10m までの反射に傾斜変換がみられる。

25MHz 探査では、深度 6-12m の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.21）。深度 6m 以浅の反射は、測線位置 15-23m の範囲で、減衰した反射の不連続や反射強度の違いがみられるが、100MHz 探査・50MHz 探査でみられる反射の不連続や凹地状の反射形状は明瞭ではない。測線位置 5m より北側では、反射が緩やかに下がっていくような傾向がみられるが、明瞭な反射の不連続や傾斜変換はみられない。

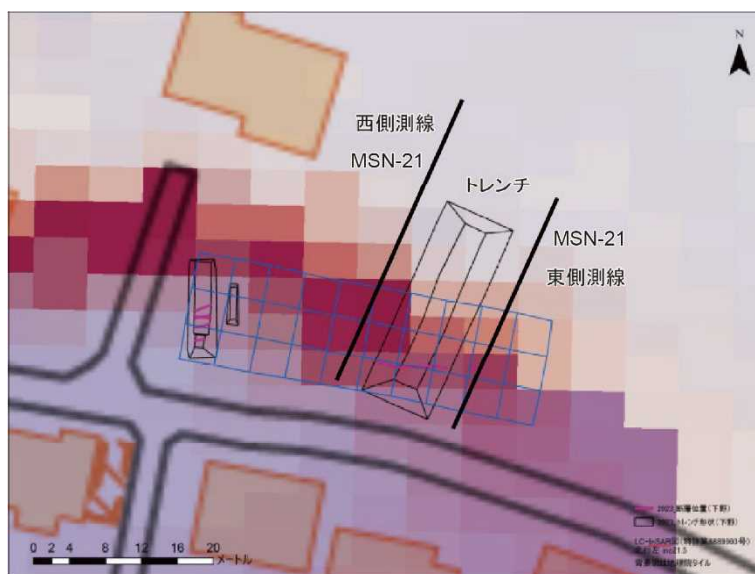


図 2.2.18 探査測線図（MSM-22 測線，再掲）

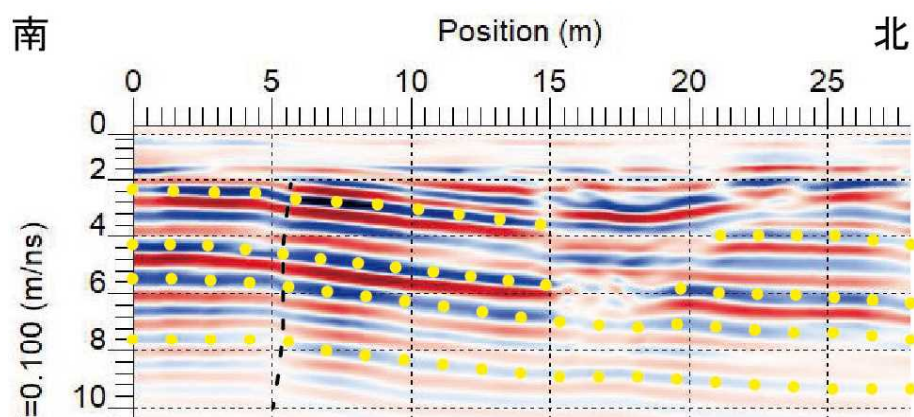
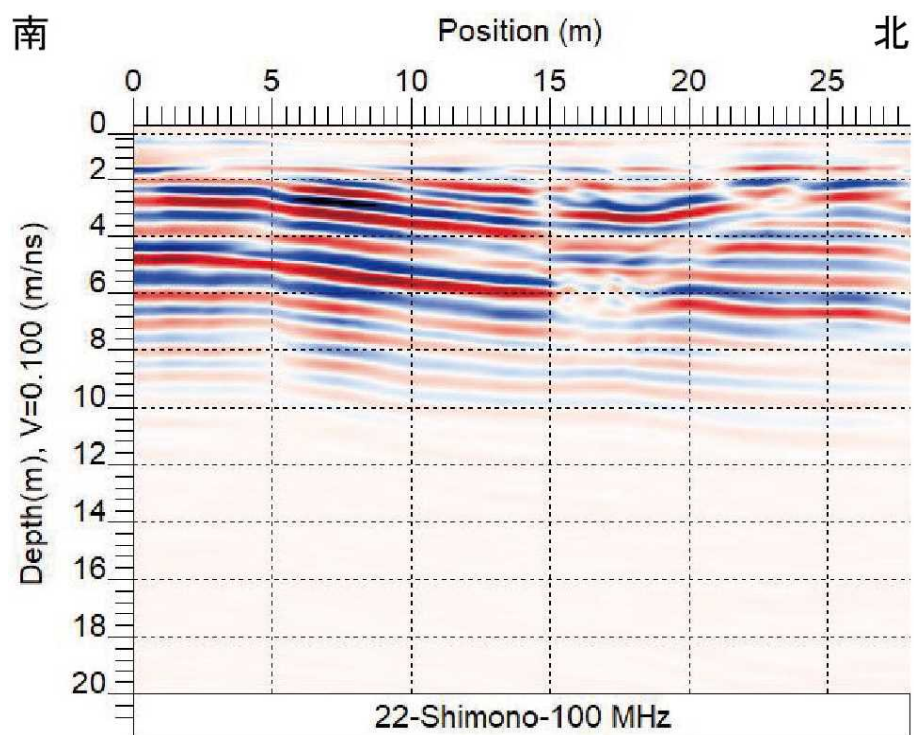


図 2.2.19 MSM-22-100MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 10m 以下の記録を除去した

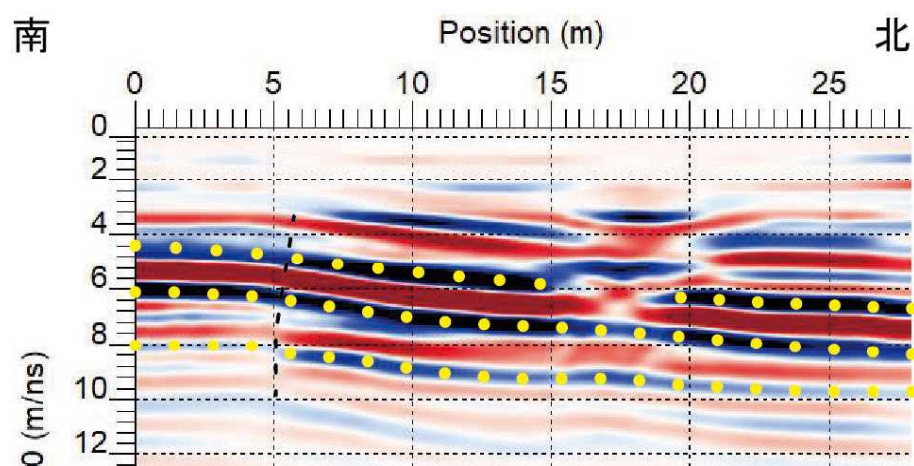
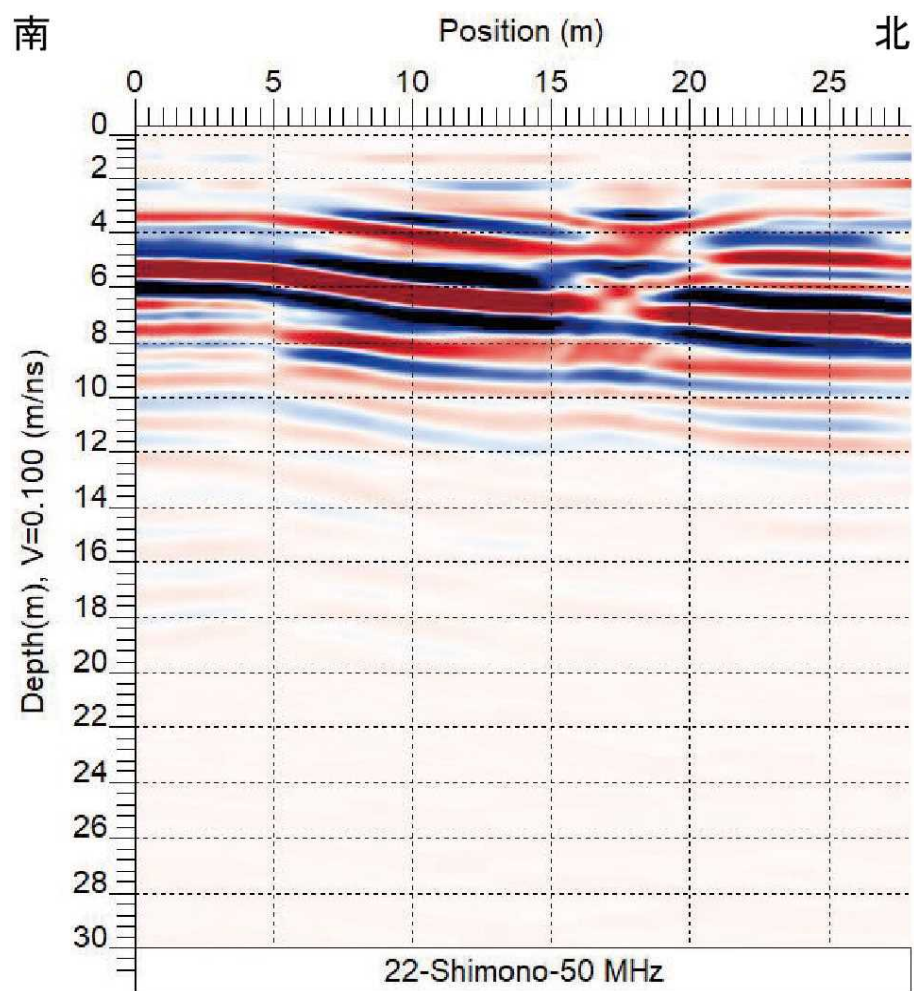


図 2.2.20 MSM-22-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

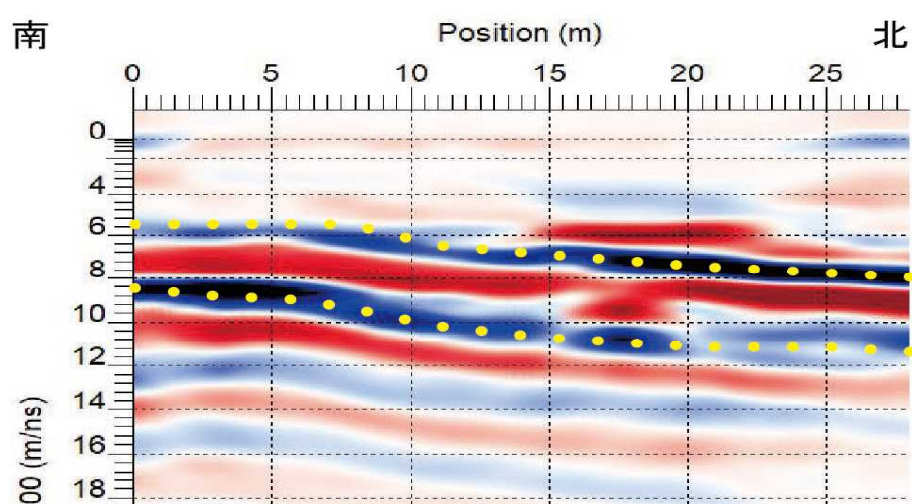
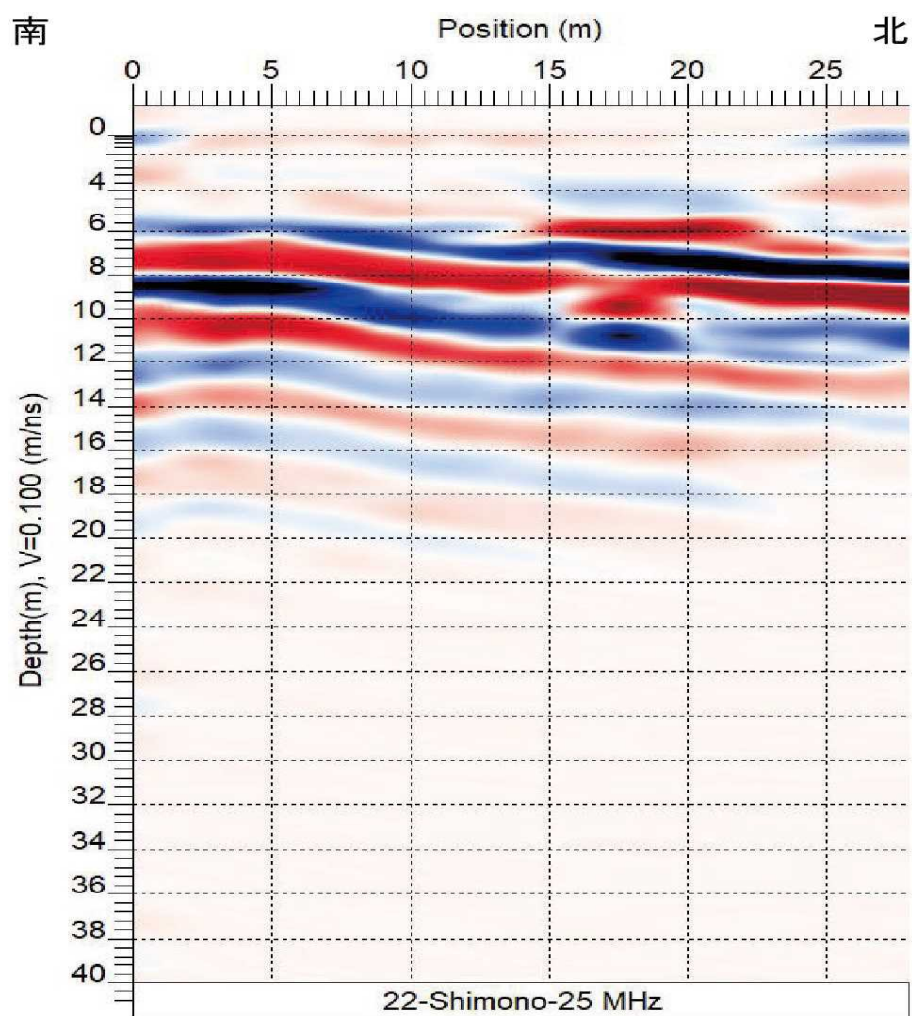


図 2.2.21 MSM-22-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射

下図では減衰の大きい深度 18m 以下の記録を除去した

(3) トレンチ調査結果との比較 (図 2.2.22)

ここでは、トレンチ西側壁面の近傍で実施した MSN-21-100 MHz 測線とトレンチ西側壁面を比較した。反射断面の測線位置 8-23m・深度 2-3.5m 付近の凹地状の反射形状が、後述するトレンチ壁面でみられるチャネル構造に対応する。

測線位置 4m・深度 2m 以深にみられる反射の不連続は、トレンチ壁面で確認される断層に対応する。

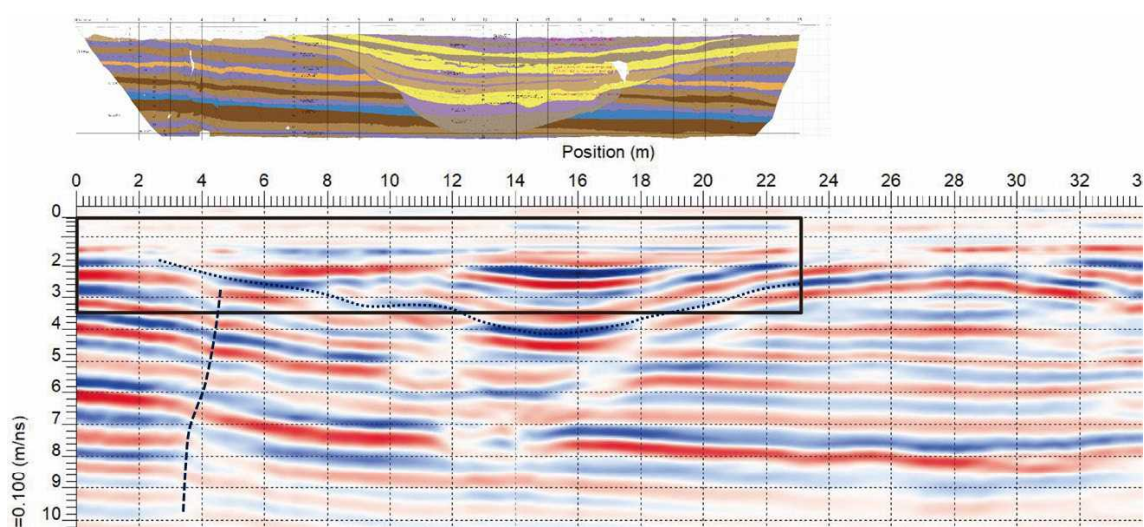


図 2.2.22 調査断面とトレンチ壁面との比較

(上図：トレンチ西側壁面，下図：MSN-21-100 MHz 調査結果)

青色細破線：凹地状の反射 青色太破線：反射の傾斜変換

調査結果は深度 10m 以深の記録を除去した

2.2.4. 平川馬場地区

平川馬場地区では、位相不連続ライン、地表変状および想定される断層位置を横切るように、周波数 50MHz 探査を実施した。過年度トレンチ調査を実施した東側および西側については、同一測線上で 25MHz 探査を実施した（図 2.2.23）。測線数は周波数 50MHz で 6 測線、25MHz で 2 測線、計 8 測線である（表 2.2.5）。

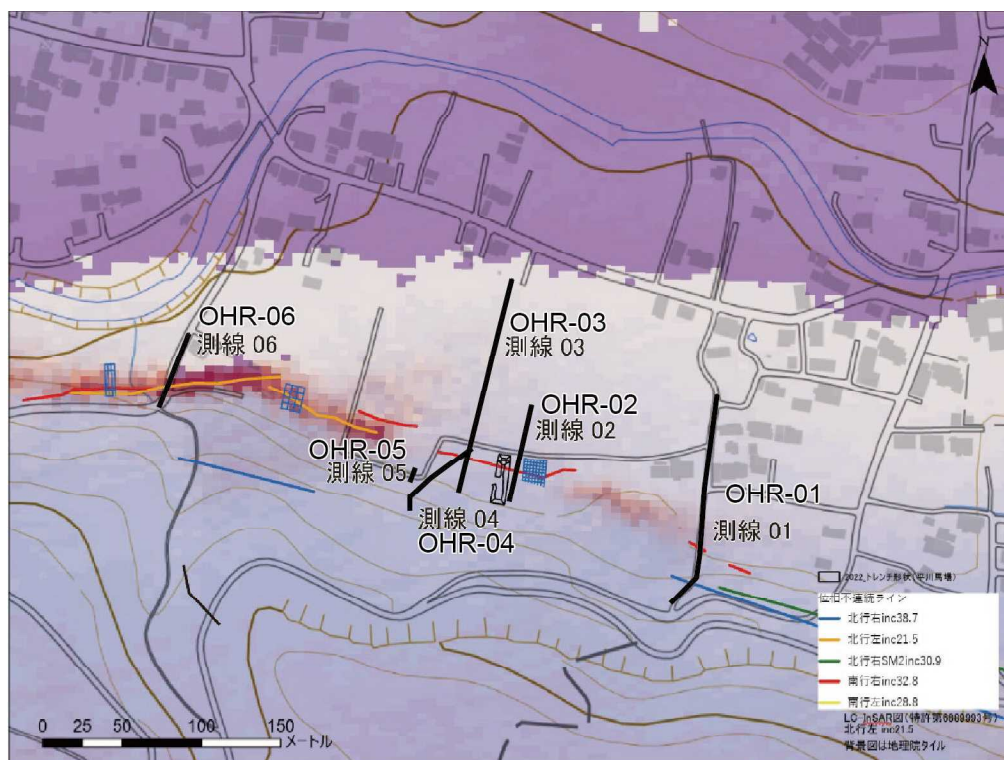


図 2.2.23 探査測線図（平川馬場地区）

表 2.2.5 探査測線諸元（平川馬場地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ間隔 (m)	サンプリング間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
大津町平川馬場	OHR-01	50	P	S-N	0.0 - 140.0	1.0	0.40	2048	カート	R4トレンチ調査実施
	OHR-02	25	P	S-N	0.0 - 60.0	4.0	0.80	2048	ハンドル	
	OHR-03	50	P	S-N	0.0 - 136.0	2.0	0.40	2048	ハンドル	トレンチ延長測線
	OHR-04	25	P	S-N	0.0 - 60.0	4.0	0.80	2048	ハンドル	トレンチ西側測線
	OHR-05	50	P	S-N	0.0 - 10.0	1.0	0.40	2048	ハンドル	斜面東側測線
	OHR-06	50	P	S-N	0.0 - 50.0	1.0	0.40	2048	カート	斜面西側測線

(1) OHR-01 測線（測線 01，図 2.2.24）

測線位置 35m 付近を境にして、南側は傾斜地、北側は平坦面となる。

測線位置 0-35m の範囲では、深度 2-6m 付近に反射が確認される（図 2.2.25）。これらの反射は、非常に不連続で乱れた構造をなす。なお、測線位置 35m 付近でみられる反射の不連続は、傾斜地と平坦地の基部に相当する。

測線位置 35-78m・深度 2m 付近の範囲でみられる明瞭な反射は、周辺の地形・地質から道路盛土を示しているものと考えられる。

測線位置 78m から北側の範囲では、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強く、地下構造の検討は困難である。

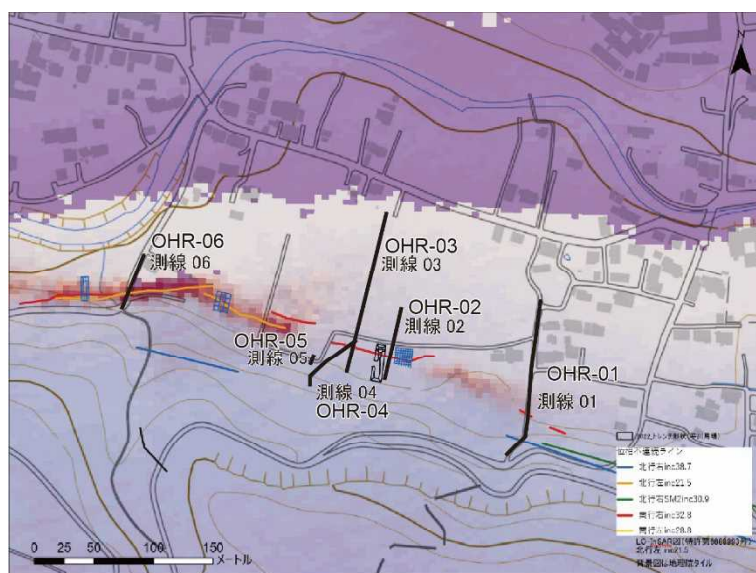


図 2.2.24 探査測線図（OHR-01 測線，再掲）

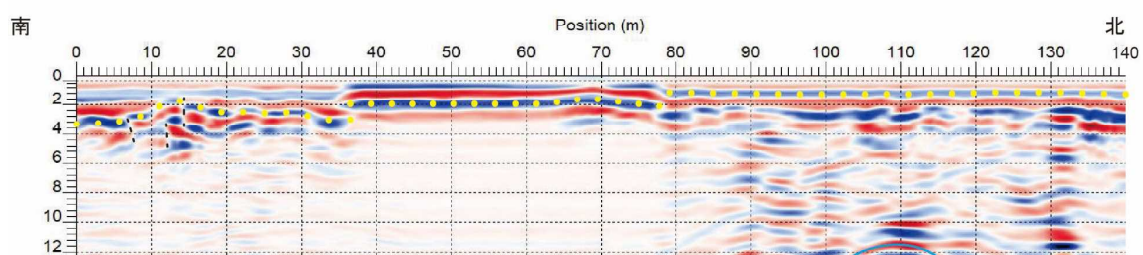
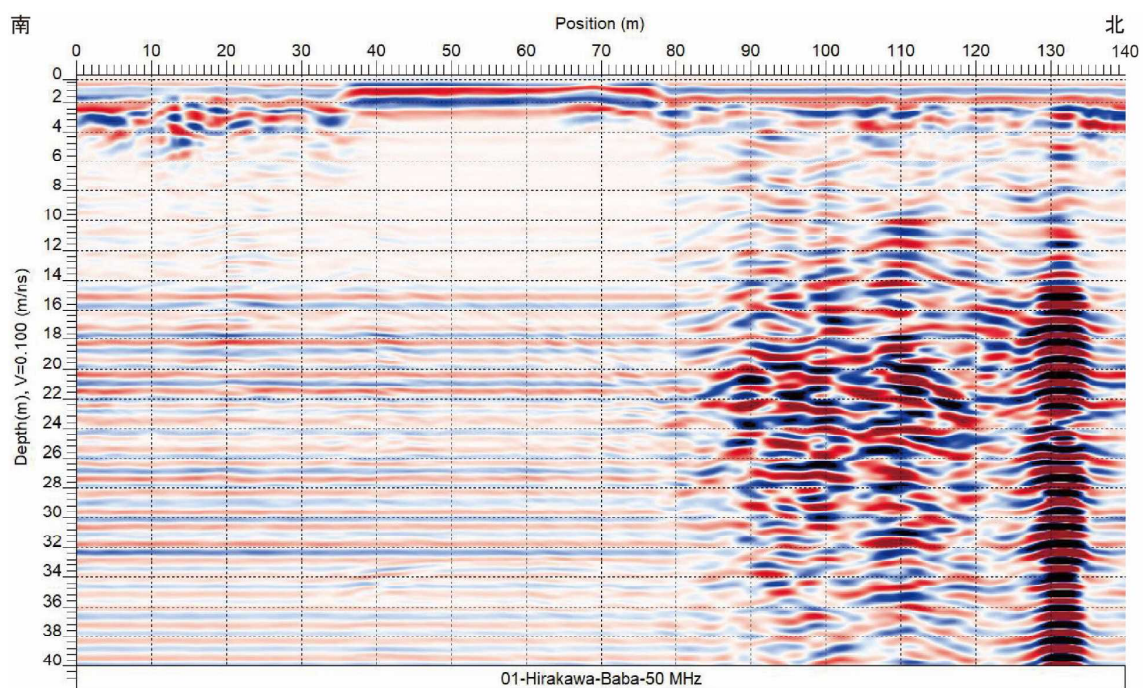


図 2.2.25 OHR-01-50MHz 探索結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

(2) OHR-02 測線 (測線 02, 図 2.2.26)

測線位置 0-30m の範囲が概ねトレンチ東側壁面に相当する。

50MHz 探査では、深度 2-7m 付近の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.27）。反射の不連続や傾斜変換は、測線位置 2-4m・10-14m・23-25m・29-40m の範囲でみられる。

25MHz 探査では、深度 6-12m 付近の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.28）。反射の不連続や傾斜変換は、測線位置 2-5m・14-15m・25-29m・30-39m の範囲でみられる。

これらの不連続のうち、測線位置 0-30m の範囲でみられる反射の不連続や傾斜変換は、過年度実施したトレンチ調査の結果から地層境界であることが確認されている。

深度 12m 以深では、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強く、地下構造の検討は困難である。

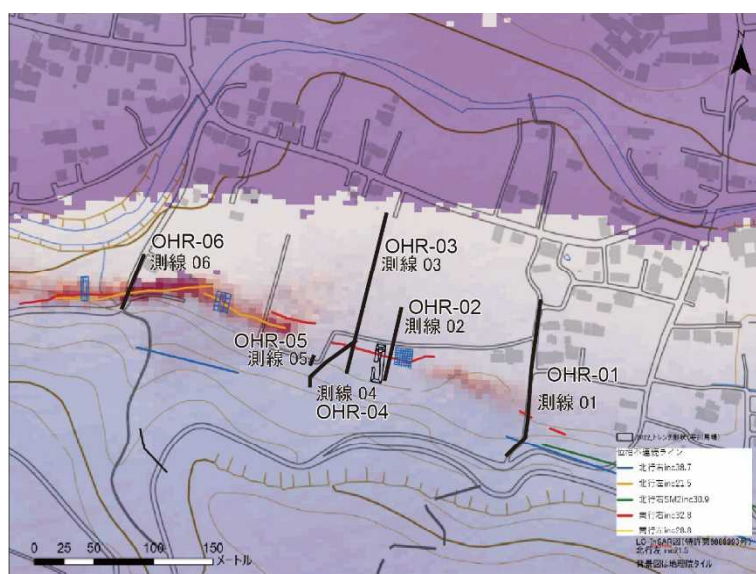


図 2.2.26 探査測線図（OHR-02 測線，再掲）

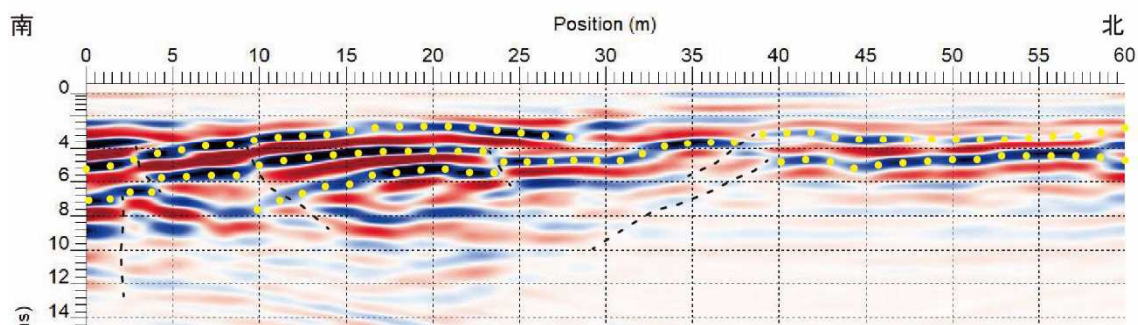
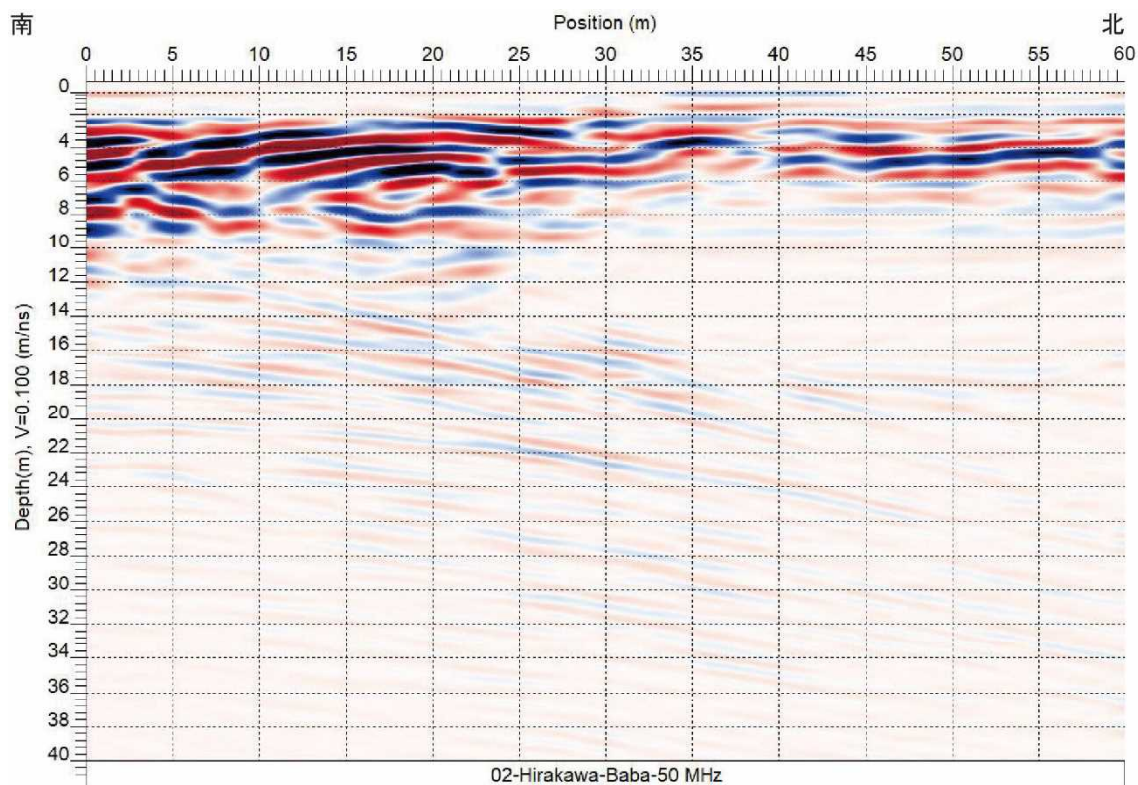


図 2.2.27 OHR-02-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

測線位置 0-30m が概ねトレンチ調査を実施した範囲

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

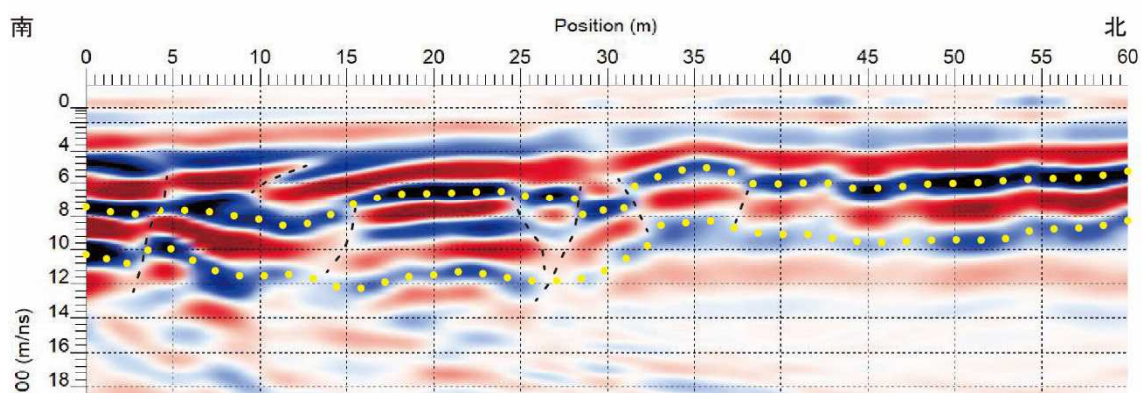
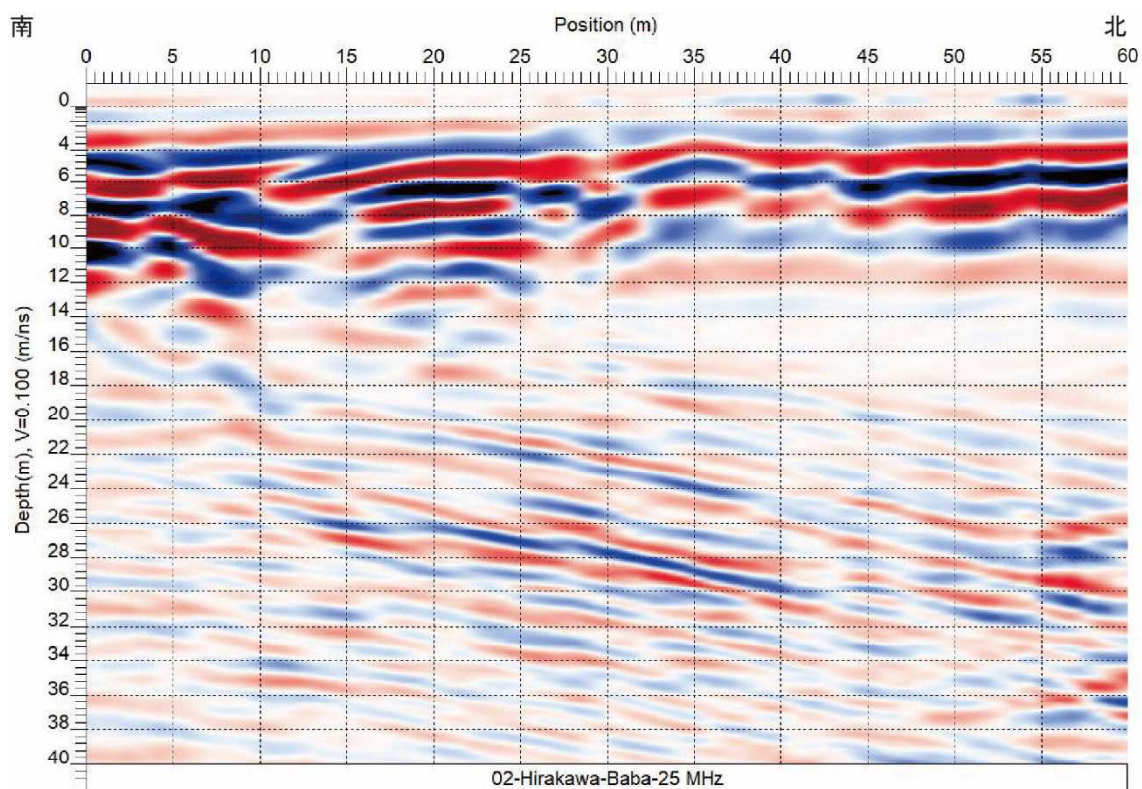


図 2.2.28 OHR-02-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

測線位置 0-30m が概ねトレンチ調査を実施した範囲

下図では減衰の大きい深度 18m 以下の記録を除去した

(3) OHR-03 測線 (測線 03, 図 2.2.29)

測線位置 0-30m の範囲が概ねトレンチ西側壁面に相当する。

50MHz 探査では、深度 2-6m 付近の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.30）。反射の不連続や傾斜変換は、測線位置 0-4m・26-28m・44-46m・60-62m・88-90m・100-108m・120-122m の範囲で見られる。

25MHz 探査では、深度 3-8m 付近の範囲で、複数の反射が確認される（図 2.2.31）。反射の不連続や傾斜変換は、測線位置 20-28m・42m・94-106m・120-128m の範囲でみられる。

これらの不連続のうち、測線位置 0-30m の範囲でみられる反射の不連続や傾斜変換は、過年度実施したトレンチ調査の結果から地層境界であることが確認されている。

深度 12m 以深では、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強く、地下構造の検討は困難である。

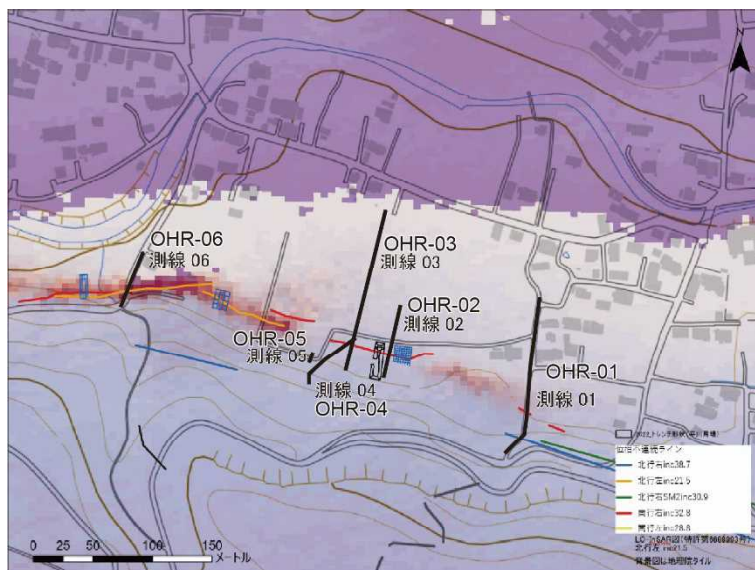


図 2.2.29 探查測線図（OHR-03 測線，再掲）

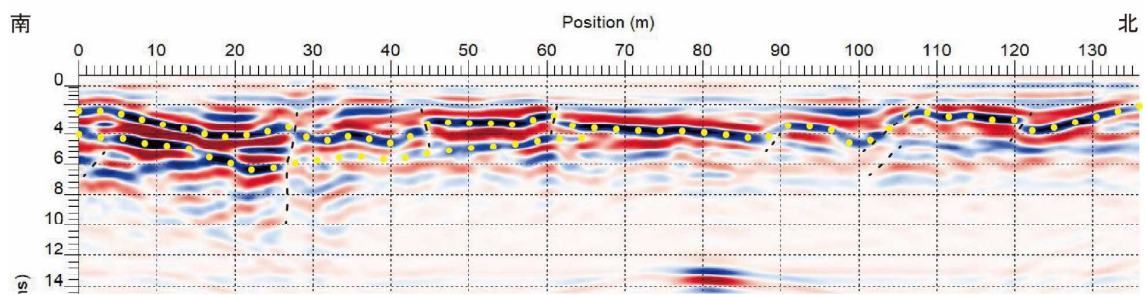
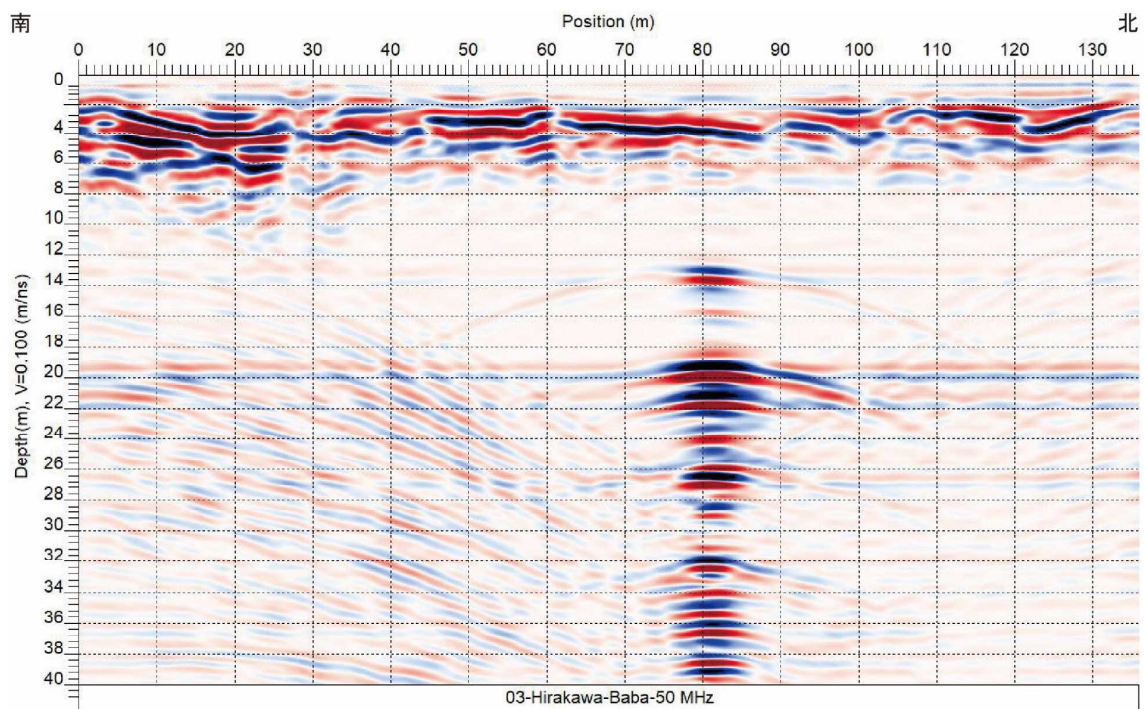


図 2.2.30 OHR-03-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

測線位置 0-30m が概ねトレンチ調査を実施した範囲

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

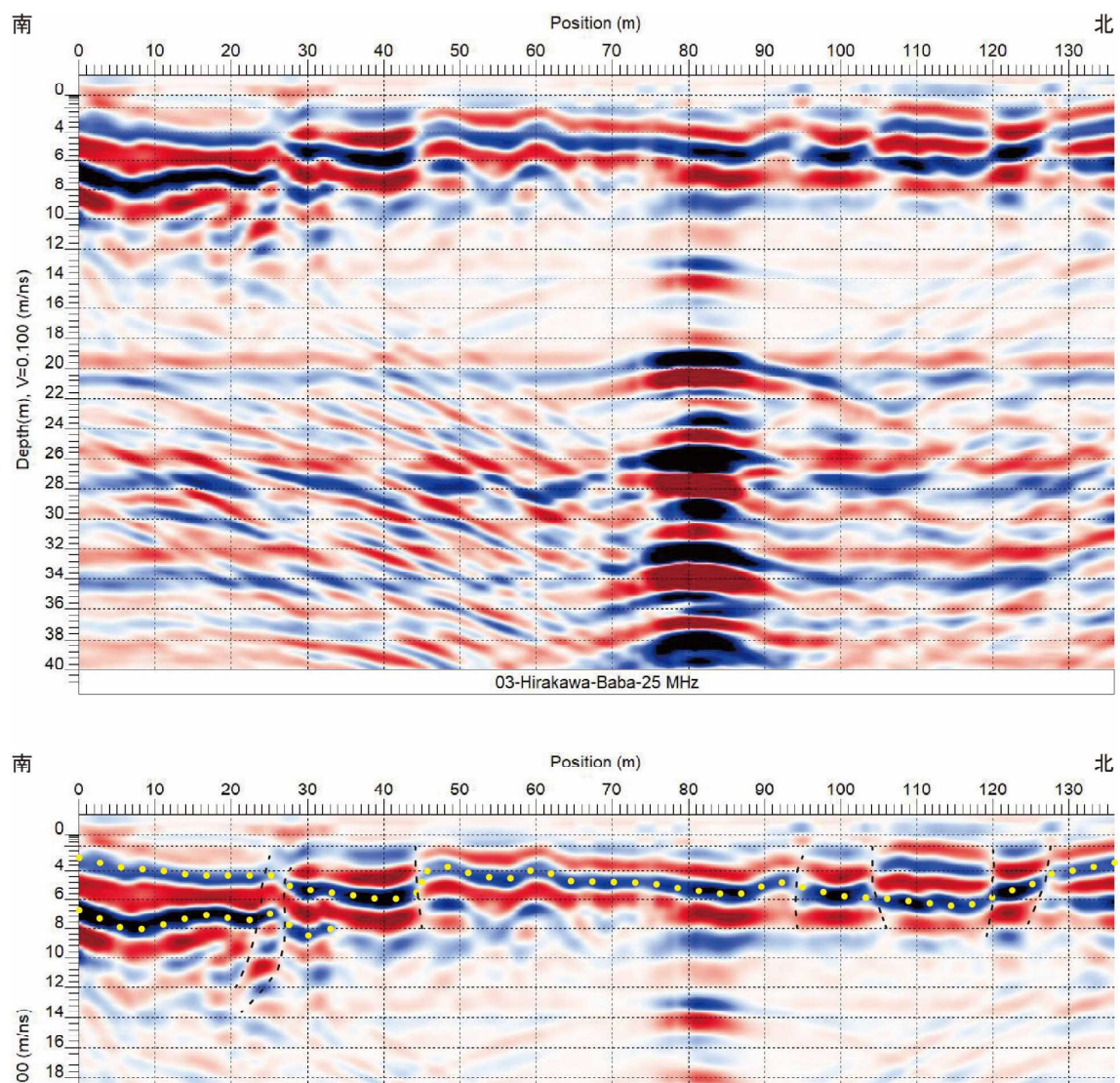


図 2.2.31 OHR-03-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

測線位置 0-30m が概ねトレンチ調査を実施した範囲

下図では減衰の大きい深度 18m 以下の記録を除去した

(4) OHR-04 測線（測線 04，図 2.2.32）

測線位置 30m 付近を境にして、南側は傾斜地、北側は平坦面となる。

測線位置 0-30m の範囲では、深度 2-7m 付近に反射が確認される（図 2.2.33）。測線位置 12-14m の範囲では、不明瞭ではあるが、深度 1-4m 付近の減衰した反射に不連続がみられる。また、平坦地側の測線位置 48m 付近において、深度 7-6m 付近の反射に不連続がみられる。なお、測線位置 30m 付近でみられる反射の不連続は、傾斜地と平坦地の基部に相当する。

深度 12m 以深では、反射の減衰が大きいため、地下構造の検討は困難である。

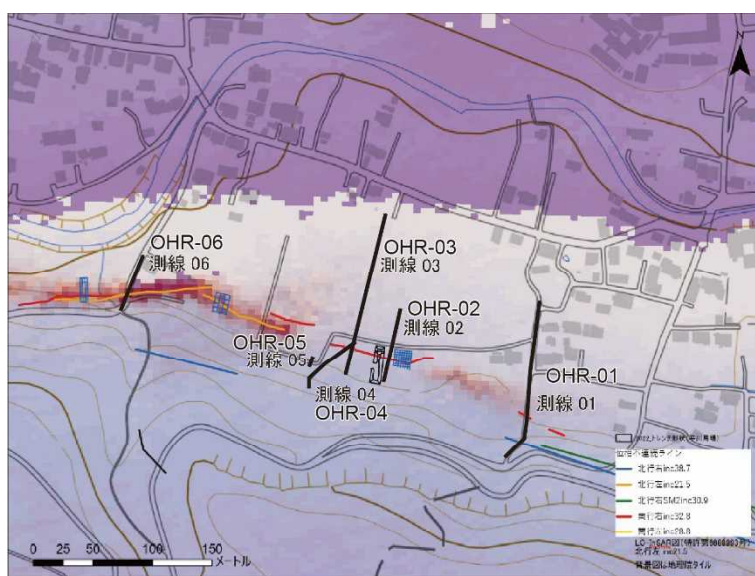


図 2.2.32 探査測線図（OHR-04 測線，再掲）

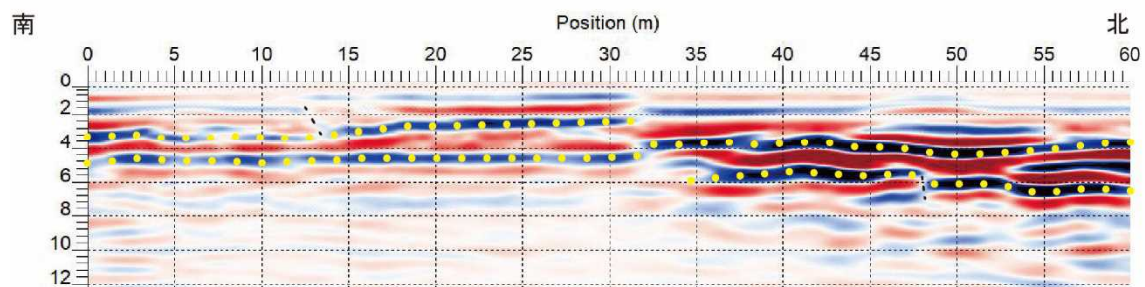
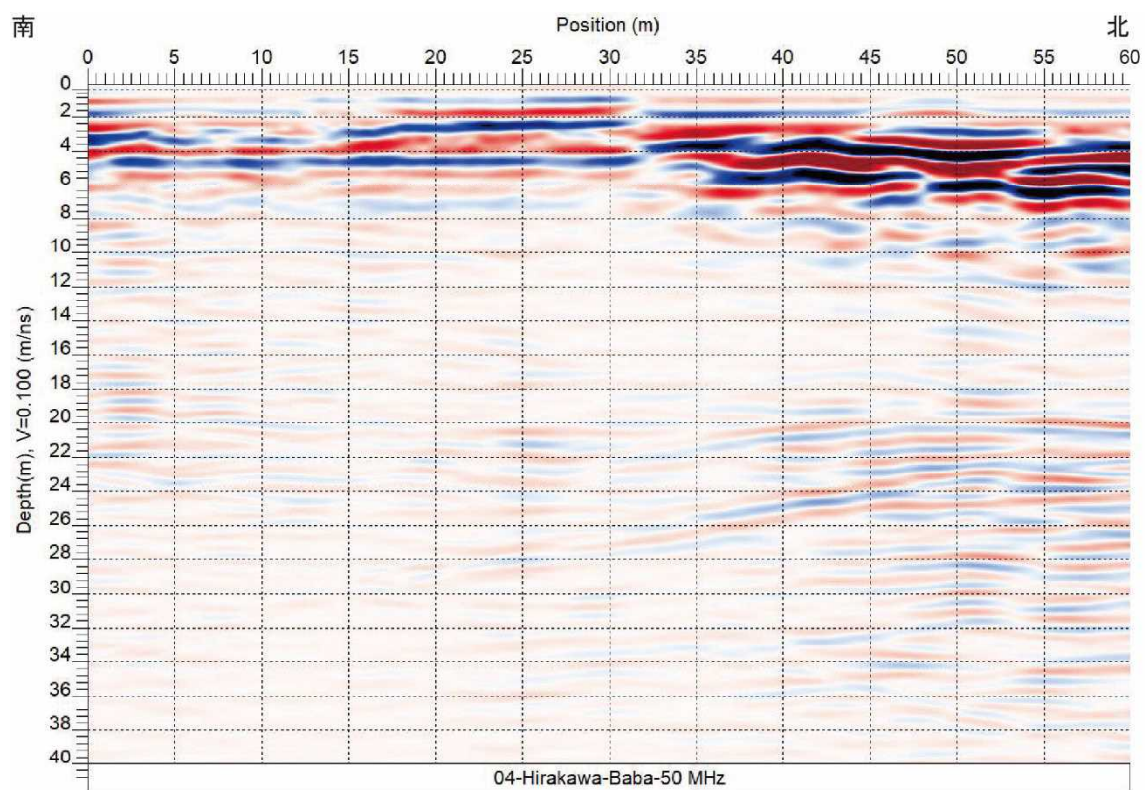


図 2.2.33 OHR-04-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

(5) OHR-05 測線（測線 05，図 2.2.34）

測線位置 4m 付近を境にして、南側は傾斜地、北側は平坦面となる。

測線位置 0-4m の範囲では、深度 2-4m 付近に反射が確認される（図 2.2.35）。傾斜地および平坦地では、反射の不連続や傾斜変換はみられない。なお、測線位置 4m 付近でみられる反射の不連続は、斜面と平坦面の基部に相当する。

深度 12m 以深では、反射の減衰が大きいため、地下構造の検討は困難である。

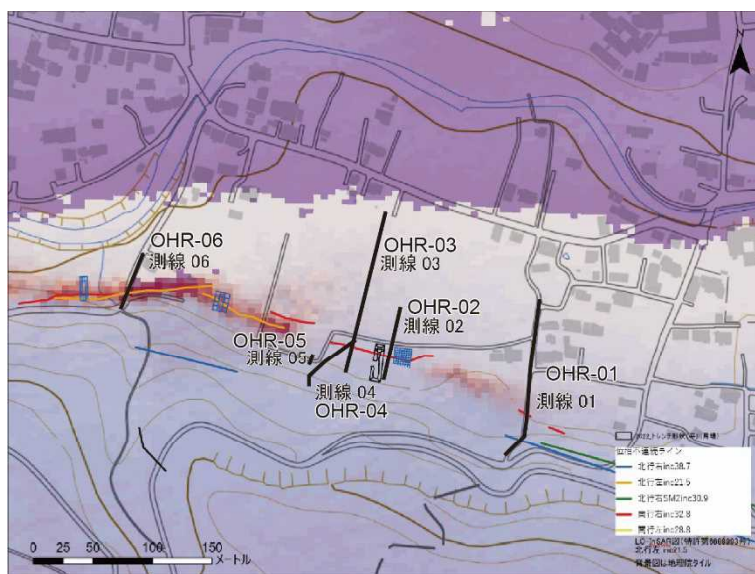


図 2.2.34 探査測線図（OHR-05 測線，再掲）

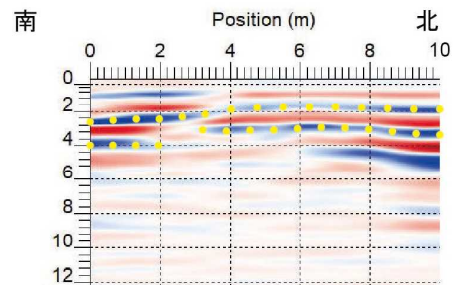
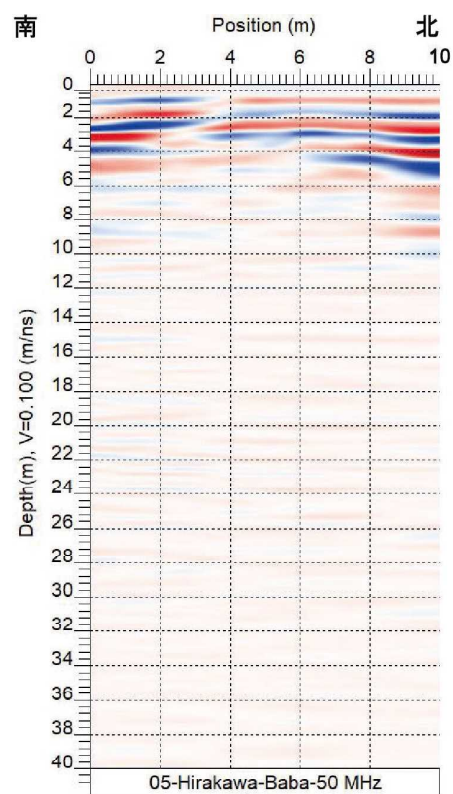


図 2.2.35 OHR-05-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

(6) OHR-06 測線（測線 06，図 2.2.36）

探査測線では、深度 2-4m 付近に反射が確認される（図 2.2.37）。反射の不連続は、測線位置 2-5m の範囲では、深度 2-5m 付近の反射に不連続がみられる。この不連続部の地表延長では、路面に変状が確認される。

深度 12m 以深では、反射の減衰が大きく、かつ測線位置 30m より北側では地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。

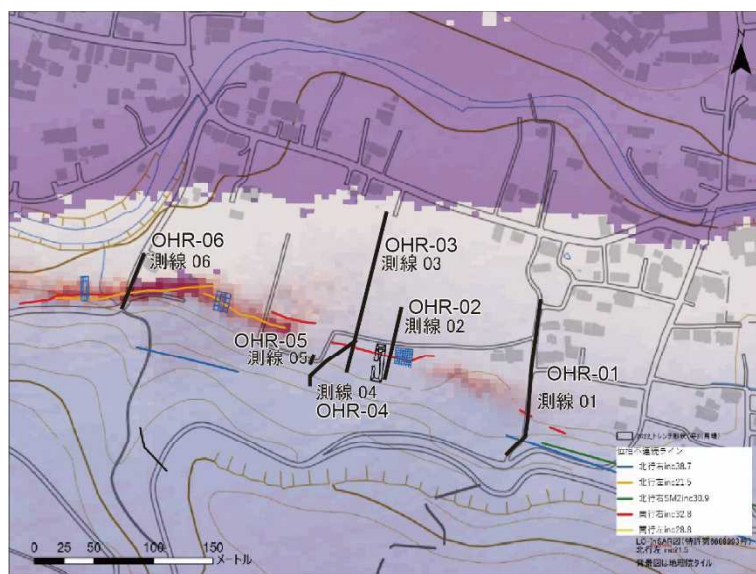


図 2.2.36 探査測線図（OHR-06 測線，再掲）

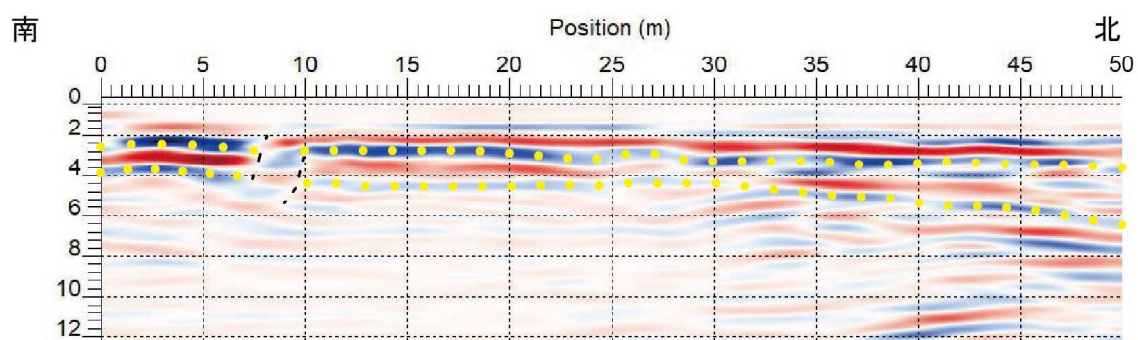
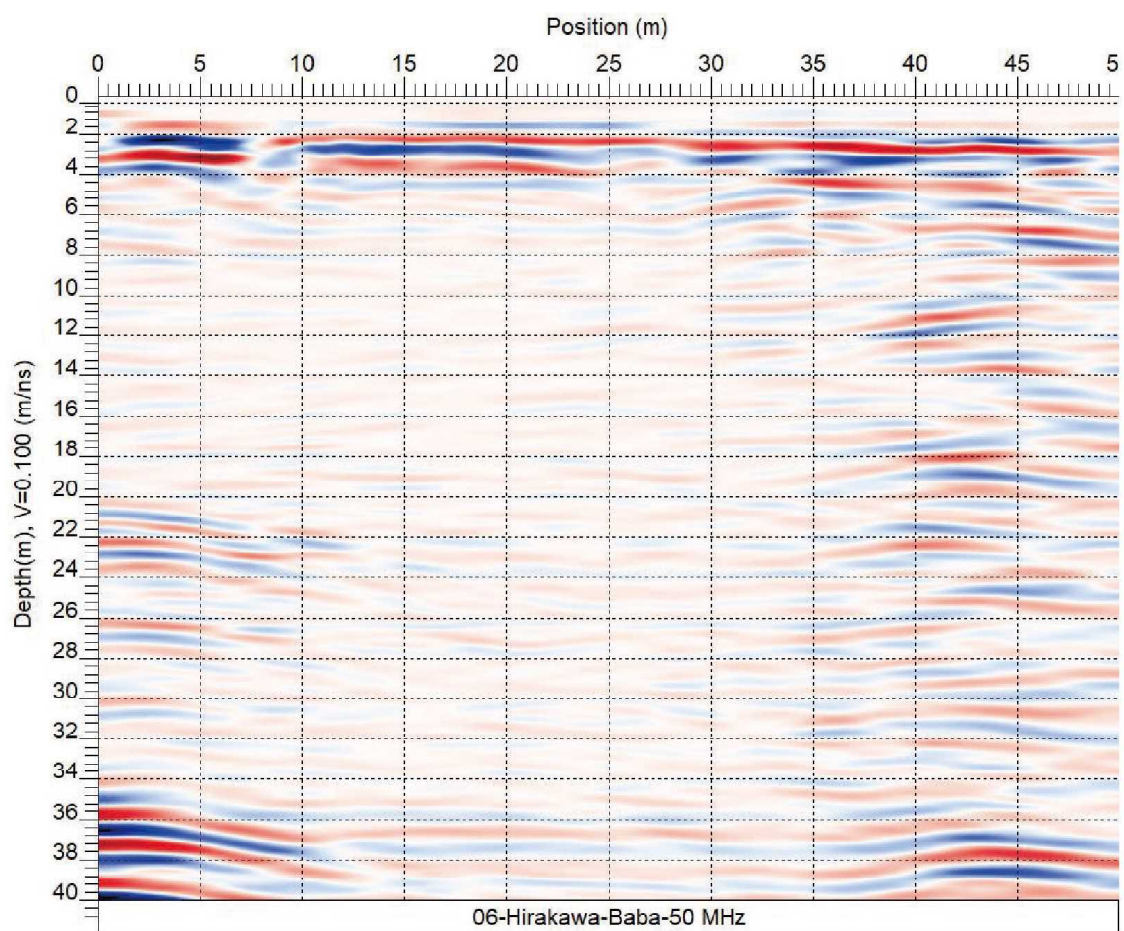


図 2.2.37 OHR-06-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

2.2.5. 陣内地区

陣内地区では、想定される位相不連続ラインおよび地表変状位置を横切るように、周波数50MHz 探査を実施した（図 2.2.38）。測線数はプロファイル測定が3 測線、ワイドアングル（CMP）測定が2 測線、計5 測線である（表 2.2.6）。



図 2.2.38 探査測線図（陣内地区）

表 2.2.6 探査測線諸元（陣内地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定 方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ 間隔 (m)	サンプリング 間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
大津町陣内	OJN-01	50	P	N-S	0.0 - 300.0	1.0	0.40	2048	カート	
	OJN-02	50	P	W-E	0.0 - 250.0	1.0	0.40	2048	カート	
	OJN-03	50	V	-	0.5 - 5.0	-	0.05	2048	ハンドル	
	OJN-04	50	P	W-E	0.0 - 240.0	1.0	0.40	2048	カート	
	OJN-05	50	V	-	0.5 - 5.0	-	0.05	2048	ハンドル	

(1) OJN-01 測線（測線 01，図 2.2.39）

測線位置 0-50m の範囲で、反射強度の強い連続性のよい反射がみられる（図 2.2.40）。探査測線は北側から南側に向かっていく測線（図 2.2.41）であり、この反射は周辺の地形・地質から造成盛土を示していると考えられる。

測線位置 58-80m 付近、測線位置 105-120m 付近、測線位置 155-282m 付近では、やや不明瞭ながらも反射が連続する。

測線位置 200-240m が、地表変状の範囲となるが、若干周辺とくらべて反射の減衰が大きいが、明瞭な反射の不連続や傾斜変換はみられない。また、反射の連続性が途切れる箇所はいくつかの箇所を確認されるが、地上構造物や地下埋設物などの位置と概ね一致する。

測線位置 0-50m の範囲を除くと、深度 4m 以深では、反射の減衰が大きく、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。



図 2.2.39 探査測線図（OJN-01 測線，再掲）

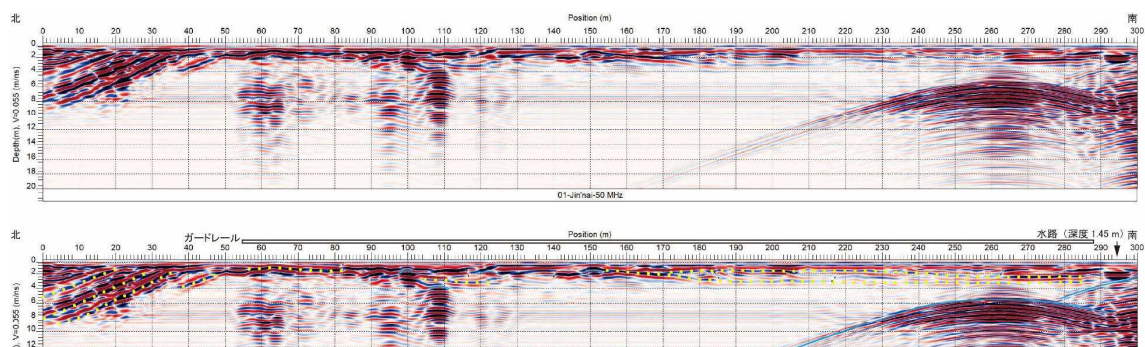


図 2.2.40 OJN-01-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

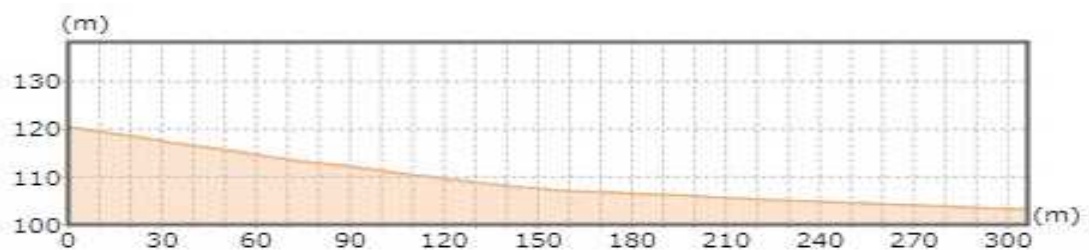


図 2.2.41 OJN-01 測線沿いの地形断面図（地理院地図上で作成）

(2) OJN-02 測線（測線 02，図 2.2.42）

測線位置 0-75m の範囲で、反射強度の強い連続性のよい反射がみられる（図 2.2.43）。
探査測線は西側から東側に傾き下がる測線（図 2.2.44）であり、この反射は周辺の地形・地質から造成盛土を示していると考えられる。

測線位置 120-240m の範囲では、不連続部があるものの反射が連続する。

測線位置 170-180m が、地表変状の範囲となるが、明瞭な反射の不連続や傾斜変換はみられない。また、反射の連続性が途切れる箇所はいくつかの箇所を確認されるが、地上構造物や地下埋設物などの位置と概ね一致する。測線位置 0-75m の範囲を除くと、深度 4m 以深では、反射の減衰が大きく、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。



図 2.2.42 探査測線図（OJN-02 測線，再掲）

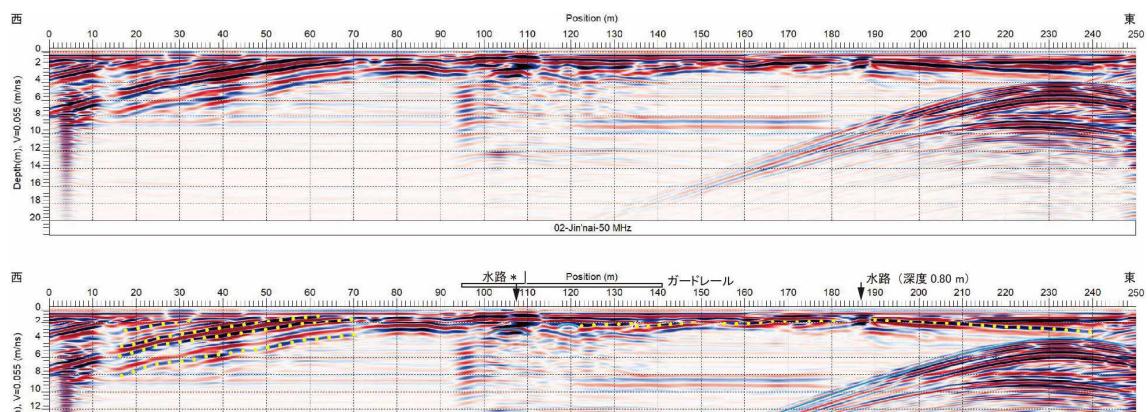


図 2.2.43 OJN-02-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 12m 以下の記録を除去した

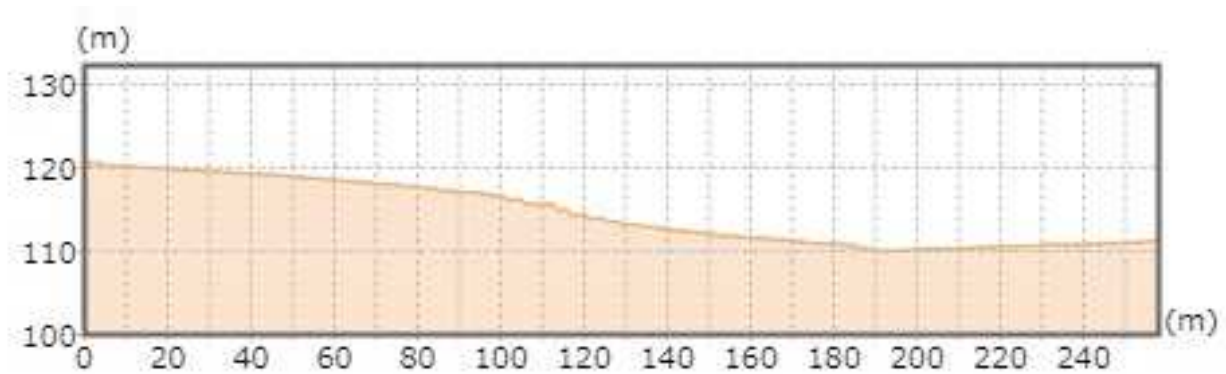


図 2.2.44 OJN-02 測線沿いの地形断面図（地理院地図上で作成）

(3) OJN-04 測線（測線 03，図 2.2.45）

測線位置 11-120m の範囲では、不連続部はあるが、やや不明瞭ながらも反射が連続する（図 2.2.46）。測線位置 185-240m の範囲では、不明瞭ながらも 2 条の反射が連続する。

測線位置 80-100m が、想定される地表変状の範囲となるが、探査測線の範囲では、明瞭な反射の不連続や傾斜変換はみられない。また、反射の連続性が途切れる箇所はいくつかの箇所で確認されるが、地上構造物や地下埋設物などの位置と概ね一致する。

深度 4m 以深では、反射の減衰が大きく、測線位置 40m から東側では、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。



図 2.2.45 探査測線図（OJN-04 測線，再掲）

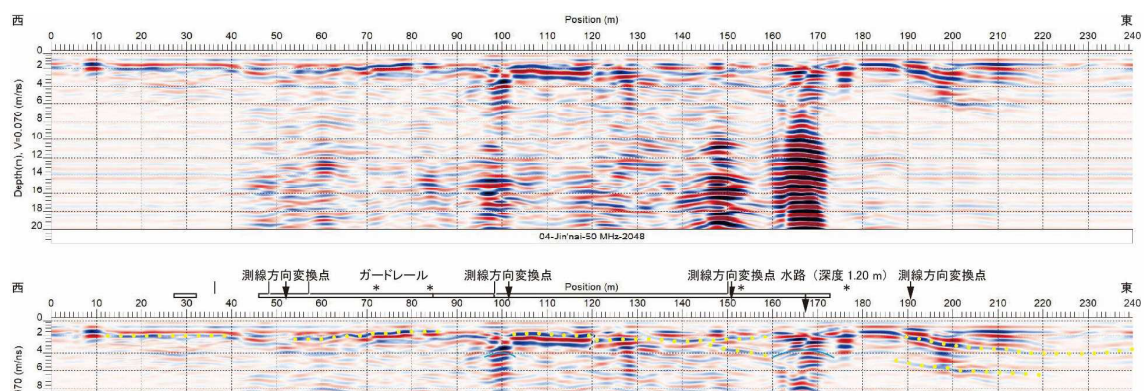


図 2.2.46 OJN-04-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 8m 以下の記録を除去した

2.2.6. 岩坂地区

岩坂地区では、想定される位相不連続ラインおよび地表変状位置を横切るように、周波数50MHz 探査を実施した（図 2.2.47）。測線数はプロファイル測定が2 測線、ワイドアングルの（CMP）測定が1 測線、計2 測線である（表 2.2.7）。

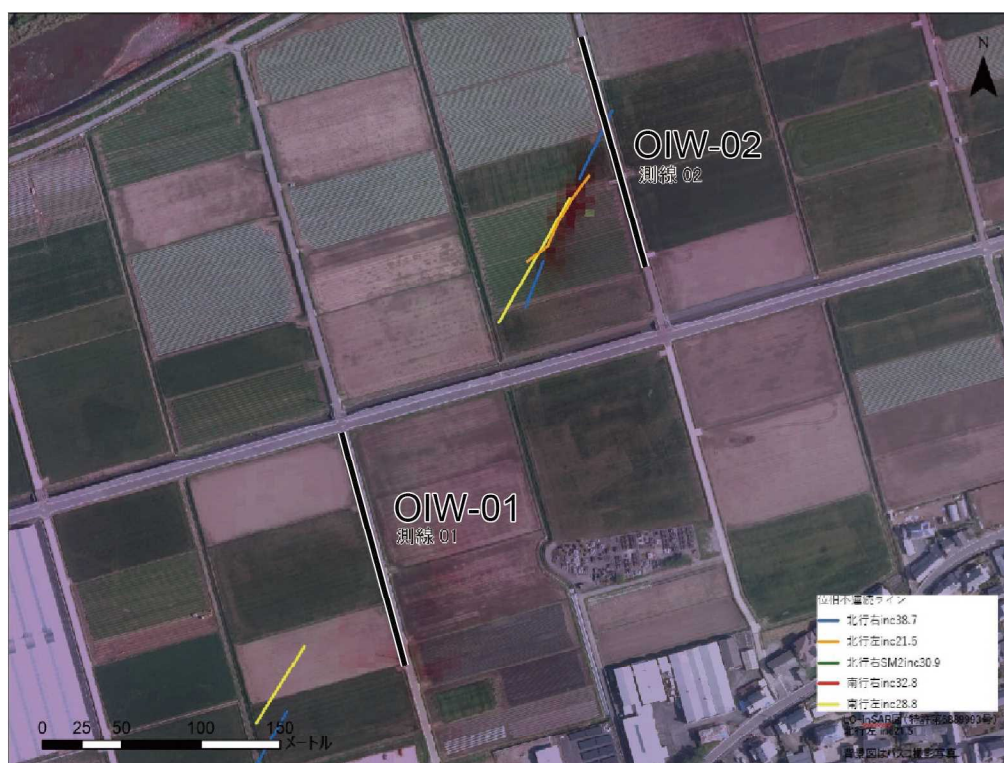


図 2.2.47 探査測線図（岩坂地区）

表 2.2.7 探査測線諸元（岩坂地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ 間隔 (m)	サンプリング 間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
大津町岩坂	OIW-01	50	P	N-S	0.0-150.0	1.0	0.40	2048	カート	
	OIW-02	50	P	N-S	0.0-150.0	1.0	0.40	2048	カート	
	OIW-03	50	V	-	0.5-5.0	-	-	2048	ハンドル	

(1) OIW-01 測線（測線 01，図 2.2.48）

探査測線では、深度 2-6m の範囲で、不明瞭ではあるが反射が連続する（図 2.2.49）。

測線位置 60-80m が地表変状の範囲と推定され、測線位置 68-80m の範囲では、路面のアスファルトが回収されている。測線位置 68-74m・80m 付近では、深度 3-6m 付近の反射に不連続がみられる。

深度 6m 以深では、反射の減衰が大きく、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。



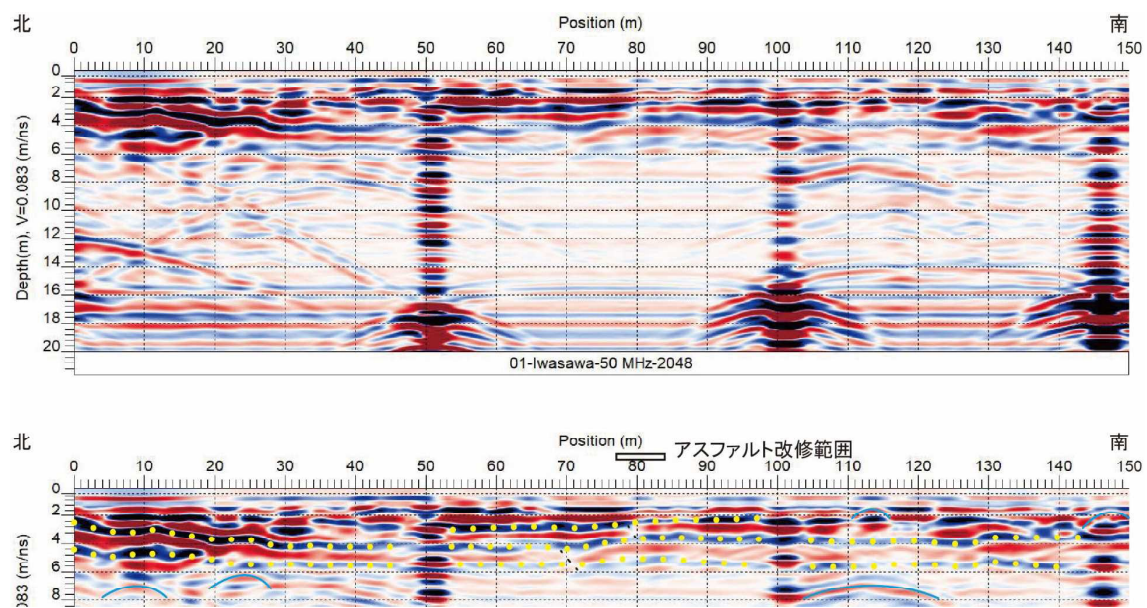


図 2.2.49 OIW-01-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 8m 以下の記録を除去した

(2) OIW-02 測線（測線 02，図 2.2.50）

探査測線では、深度 3-6m の範囲で、不明瞭ではあるが反射が連続する（図 2.2.51）。

測線位置 65-90m が地表変状の範囲と推定され、測線位置 66-80m の範囲では、路面のアスファルトが回収されている。この範囲では、いくつかの箇所では反射の不連続がみられるが、探査断面全体として 2m 以浅の反射が非常に乱れており、地上構造物の位置とも概ね一致する。測線位置 34-50m の範囲では、深度 2-5m 付近の反射に不連続がみられる。

深度 6m 以深では、反射の減衰が大きく、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。



図 2.2.50 探査測線図（OIW-02 測線，再掲）

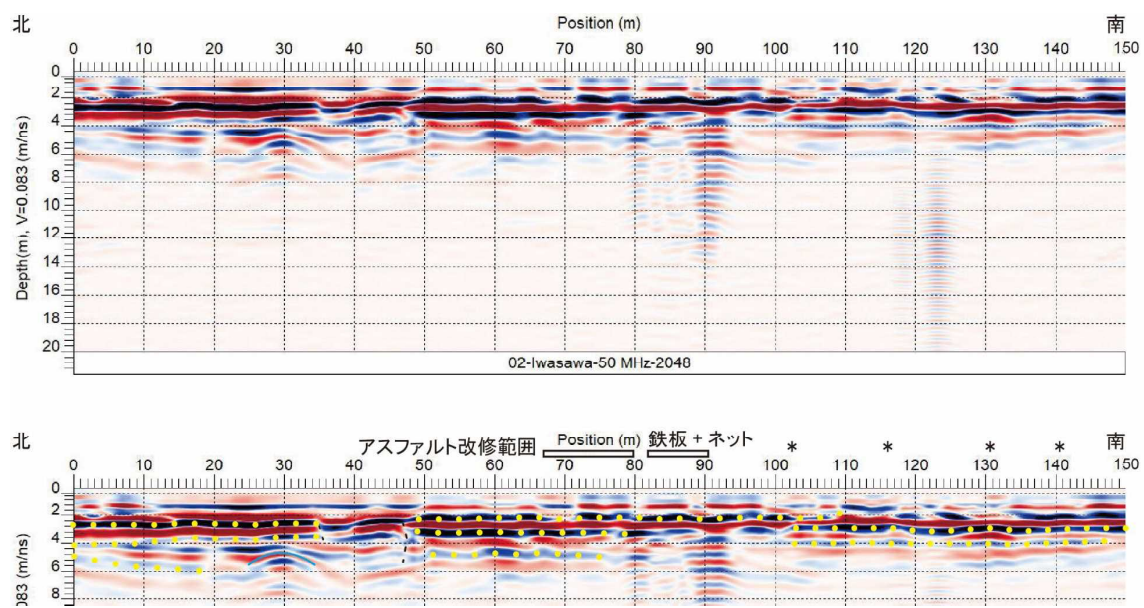


図 2.2.51 OIW-02-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 8m 以下の記録を除去した

2.2.7. 緑ヶ丘地区

緑ヶ丘地区では、位相不連続ラインおよび地表変状位置を横切るように、周波数 50MHz 探査を実施した。測線 01 および測線 02 については、同一測線上で 25MHz 探査を実施した（図 2.2.52）。測線数は周波数 50MHz で 3 測線、25MHz で 2 測線、計 5 測線である（表 2.2.8）。

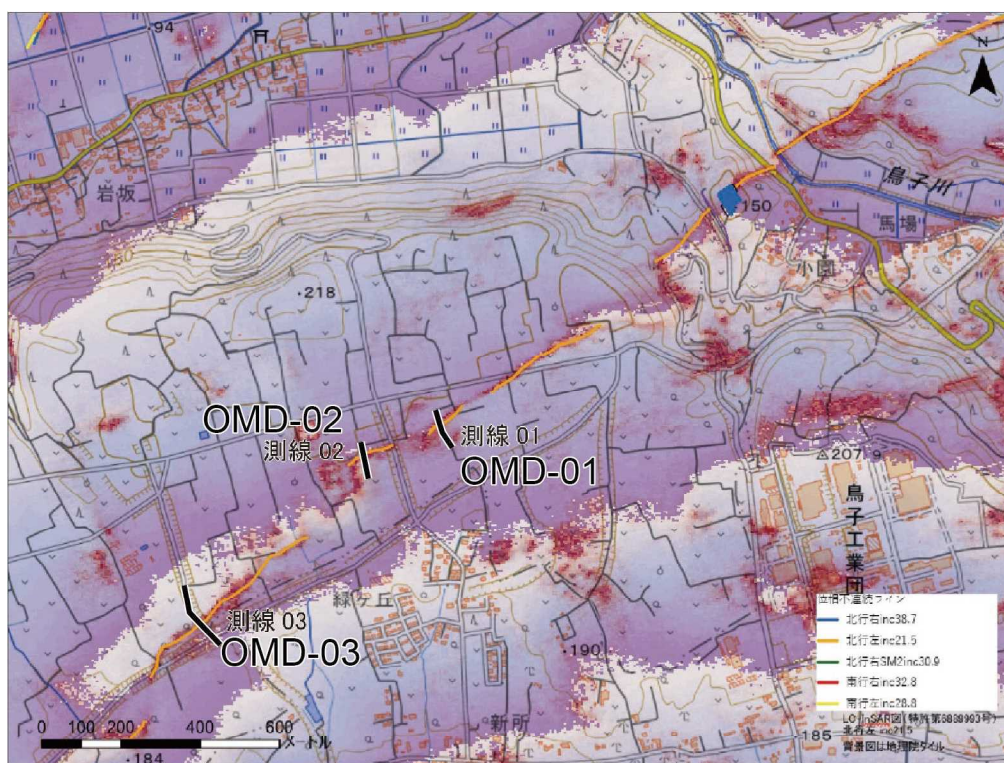


図 2.2.52 探査測線図（緑ヶ丘地区）

表 2.2.8 探査測線諸元（緑ヶ丘地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ間隔 (m)	サンプリング間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考	
大津町緑ヶ丘	OMD - 01	50	P	N - S	0.0	100.0	1.0	0.80	2048	カート	R5ボーリング調査実施
		25	P		96.0	4.0	2048		ハンドル		
	OMD - 02	50	P		0.0	90.0	1.0	0.80	2048	カート	
		25	P		88.0	4.0	2048		ハンドル		
	OMD - 03	50	P		0.0	180.0	1.0	0.40	2048	カート	
		50	P		0.0	180.0	1.0		2048	カート	

(1) OMD-01 測線（測線 01，図 2.2.53）

50MHz 探査では、深度 3-20m の範囲で、反射強度の違いから、ほぼ比較的明瞭な複数の反射が連続して確認される（図 2.2.54）。これらの反射は、測線位置 10-30m の範囲で凹地状の形状をなす。深部で確認される反射ほど、凹地状の形状が増傾斜するような傾向がみられる。この形状の両縁では、反射の不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 40m 付近では、深度 8-24m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

測線位置 60m・深度 12-16m 付近を境にして、反射の不連続の南側で反射強度が弱くなる傾向がみられる。

25MHz 探査では、深度 4-21m の範囲で、反射強度の違いから、比較的明瞭な複数の反射が連続して確認される（図 2.2.55）。これらの反射は、測線位置 10-30m の範囲で凹地状の形状をなす。深部で確認される反射ほど、凹地状の形状が増傾斜するような傾向がみられる。この形状の両縁では、反射の不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 60m 付近では、深度 6-24m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

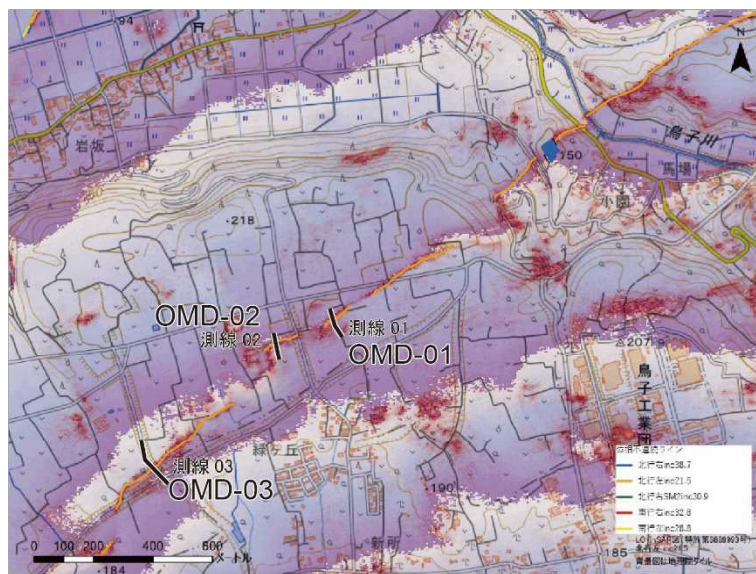


図 2.2.53 探査測線図（OMD-01 測線，再掲）

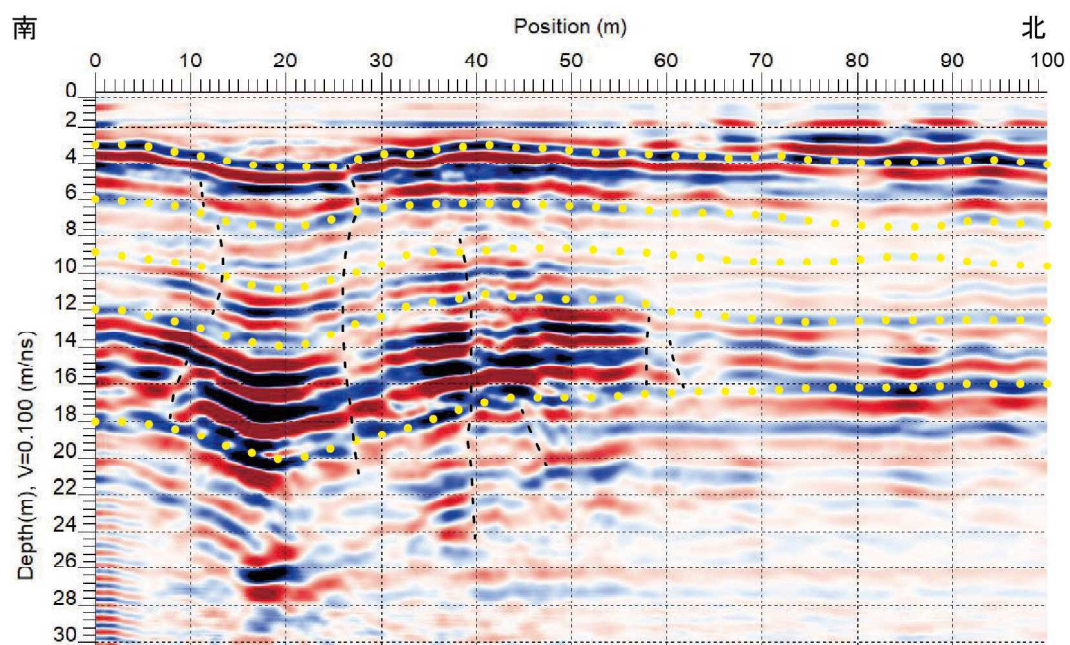
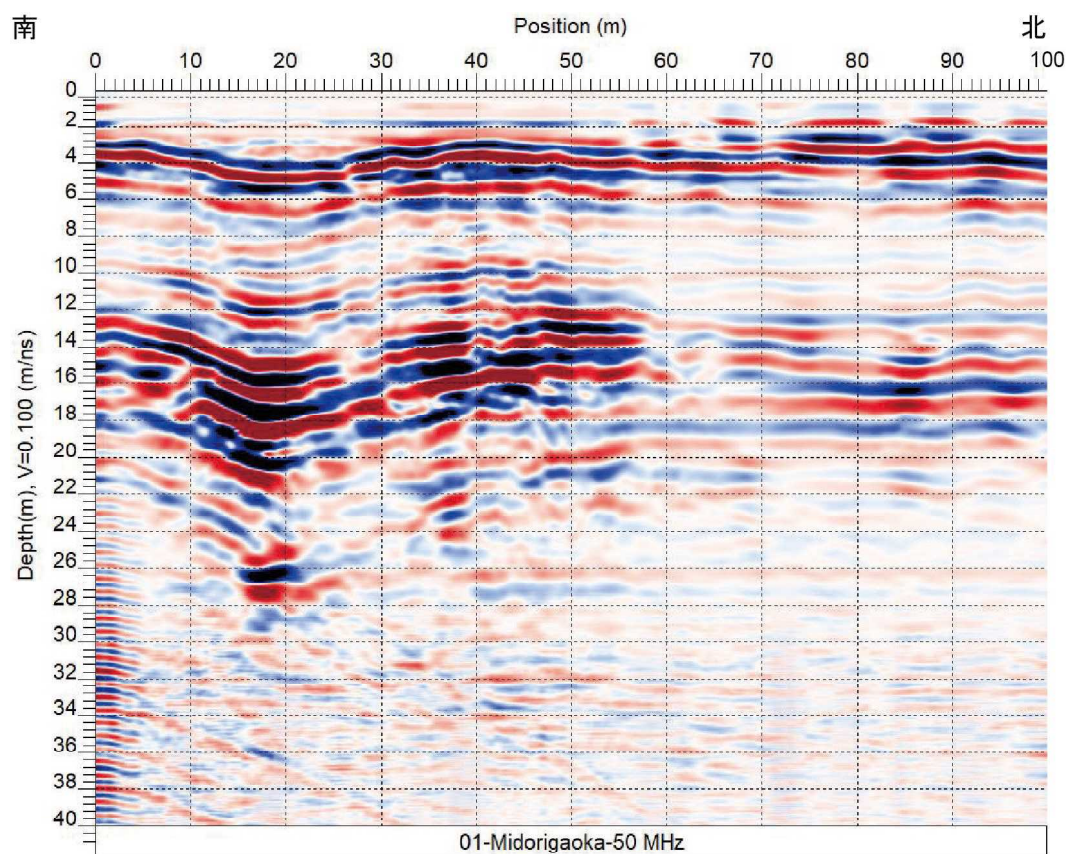


図 2.2.54 OMD-01-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 30m 以下の記録を除去した

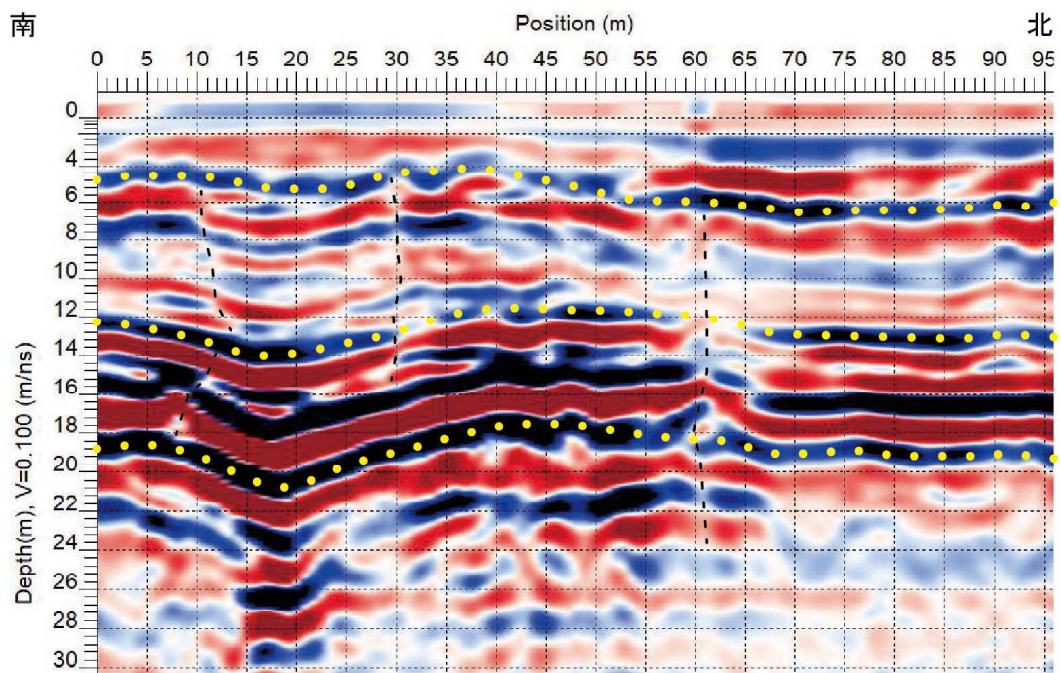
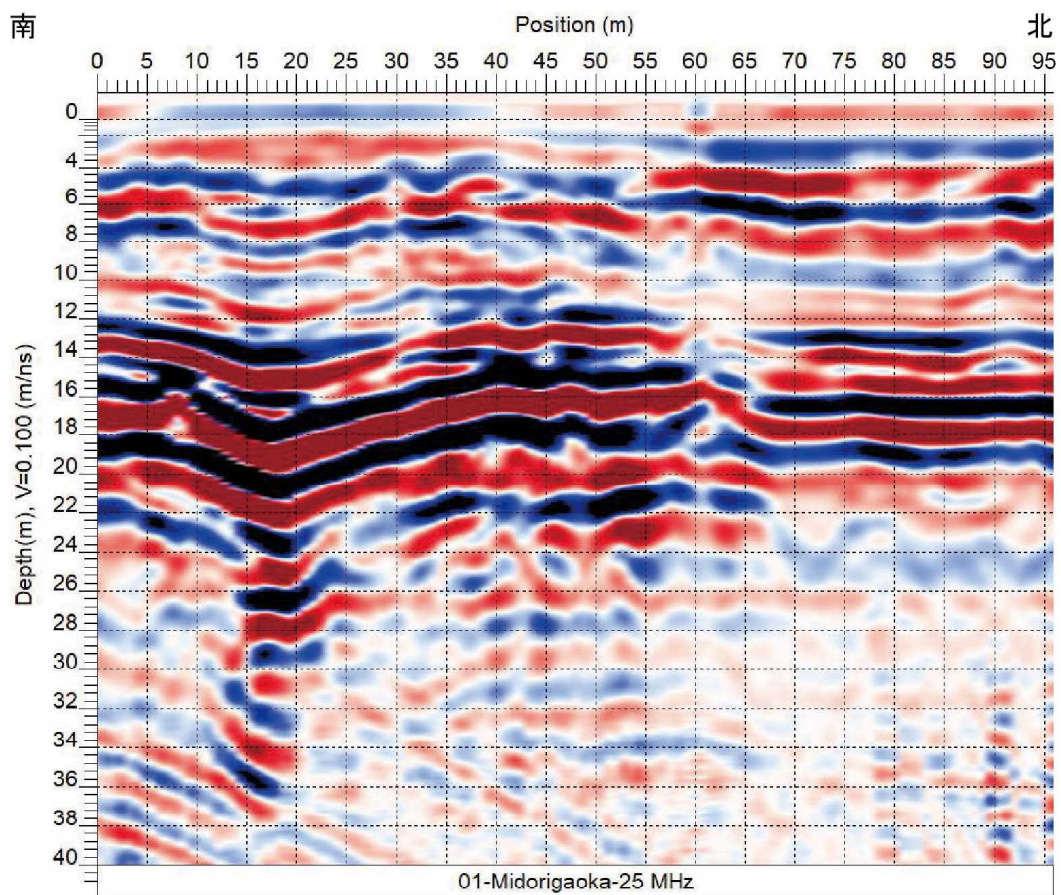


図 2.2.55 OMD-01-25MHz 探索結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 30m 以下の記録を除去した

(2) OMD-02 測線（測線 02，図 2.2.56）

50MHz 探査では、深度 3-25m の範囲で、反射強度の違いから、比較的明瞭な複数の反射が連続して確認される（図 2.2.57）。これらの反射は、測線位置 10-42m の範囲で、北側に増傾斜するような傾向がみられる。この傾斜変換の両縁では、反射の不連続がみられる。

25MHz 探査では、深度 7-28m の範囲で、反射強度の違いから、比較的明瞭な複数の反射が連続して確認される（図 2.2.58）。これらの反射は、測線位置 10-45m の範囲で、北側に増傾斜するような傾向がみられる。この傾斜変換の両縁では、反射の不連続がみられる。また、測線位置 54-60m 付近では、深度 6-30m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

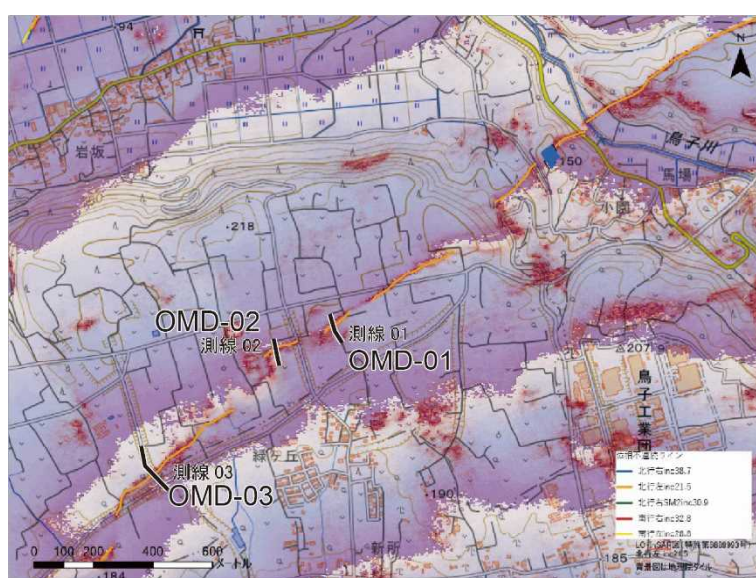


図 2.2.56 探査測線図（OMD-02 測線，再掲）

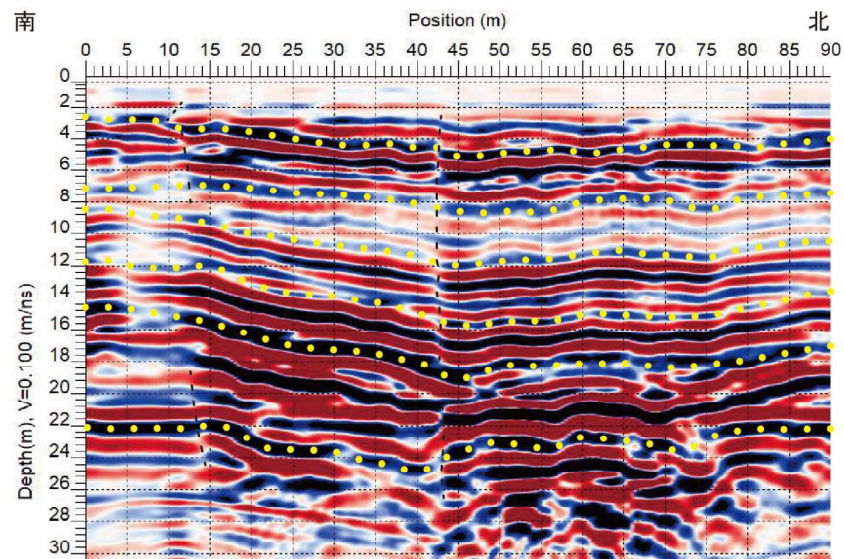
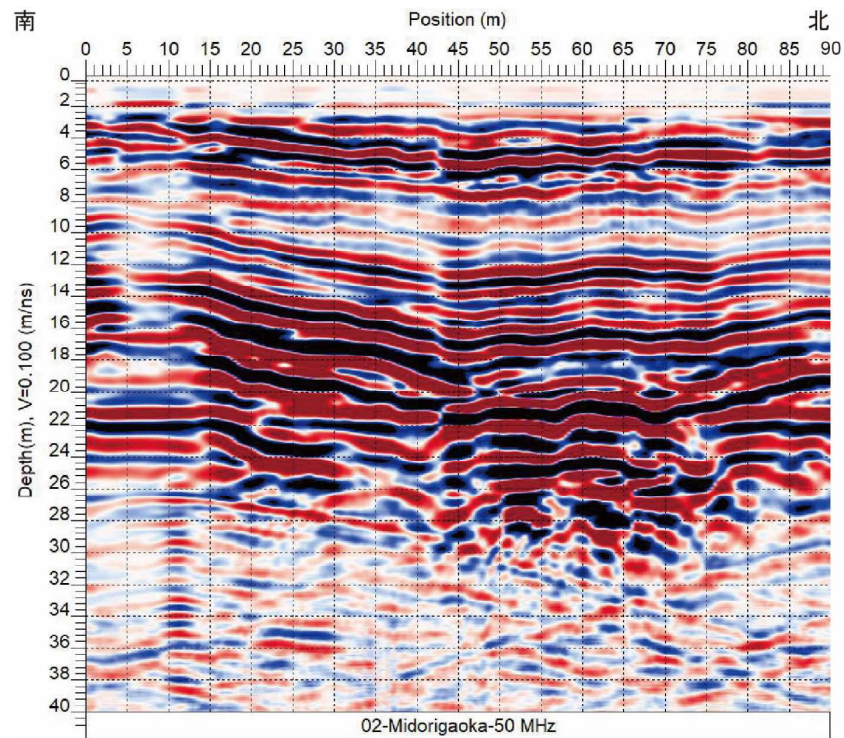


図 2.2.57 OMD-02-50MHz 探索結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 30m 以下の記録を除去した

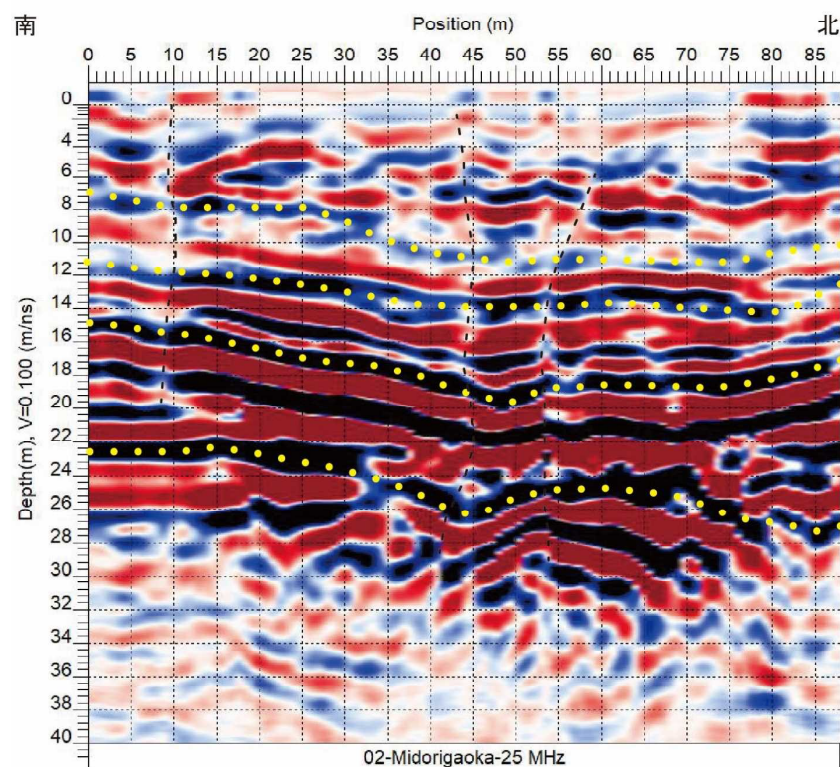
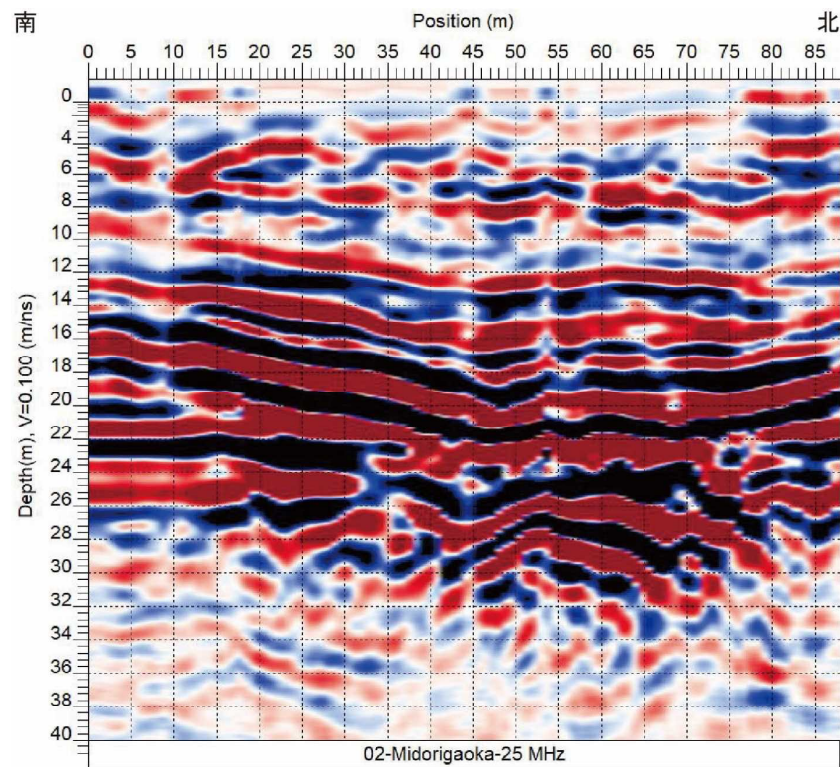


図 2.2.58 OMD-02-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）
 黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(3) OMD-03 測線（測線 03，図 2.2.59）

反射断面では、反射強度の違いから、深度 4-16m の範囲で、不明瞭ながらも断続的に反射がみられる（図 2.2.60）。

ここでは、反射の減衰が大きく、地上構造物からの影響が大きく、双曲線状の反射や多重反射など、地上構造物からの反射の影響が強いため、地下構造の検討は困難である。

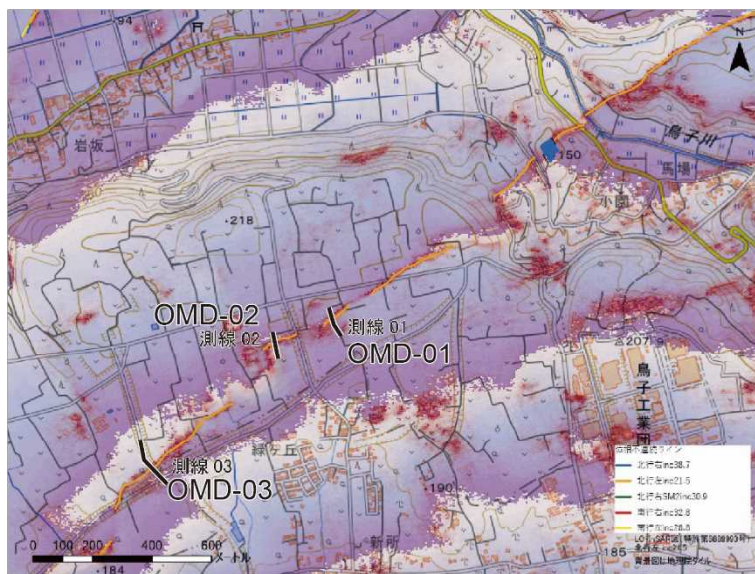


図 2.2.59 探査測線図（OMD-03 測線，再掲）

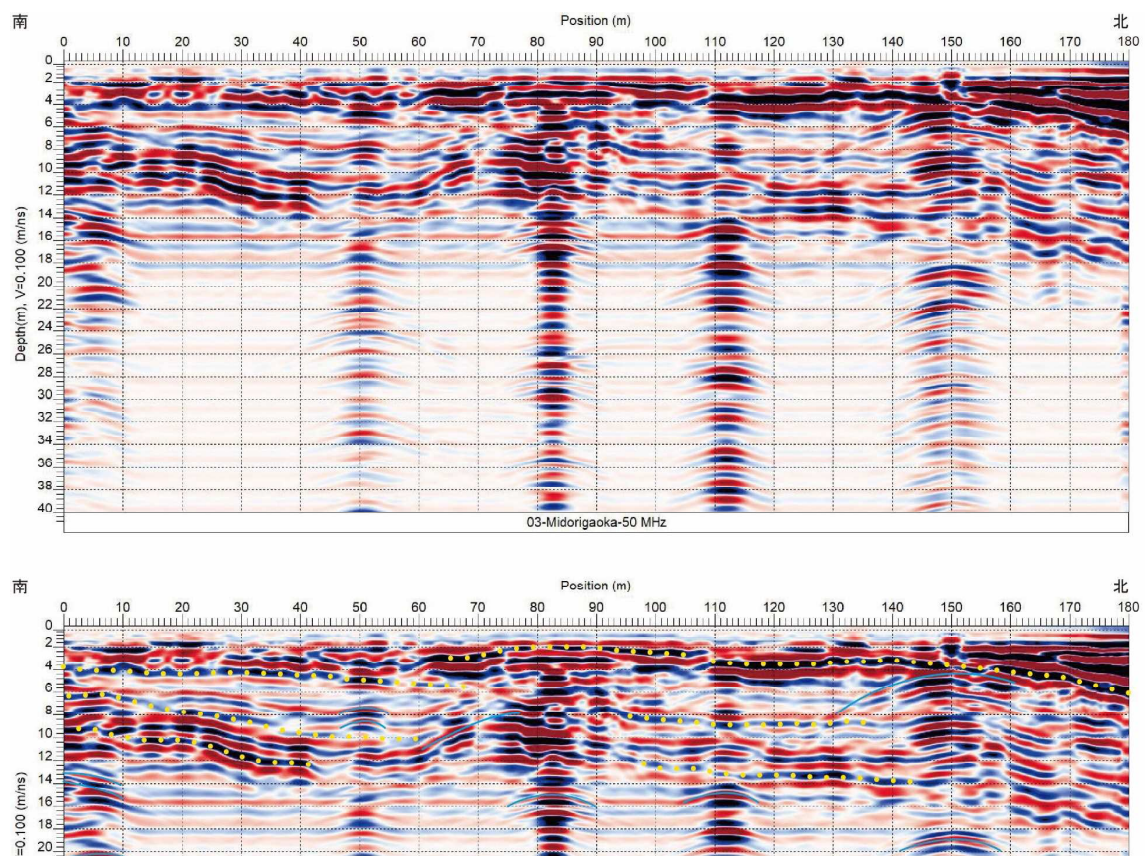


図 2.2.60 OMD-03-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）
 黄色点線：特徴的な反射 水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射
 下図では減衰の大きい深度 20m 以下の記録を除去した

2.2.8. 河原団地地区（トレンチ東側）

河原団地地区では、光学画像相関解析結果および地震後の空中写真で確認される地表変状位置を横切るように、周波数 50MHz 探査を実施した（図 2.2.61）。探査測線は、3 次元形状把握のための解析手法検討のため、想定される変状に対して直交方向および平行方向に設定し、反射記録を取得した。測線数は、プロファイル測定として南北測線は 7 測線、東西測線は 5 測線、ワイドアングル（CMP）測定が 1 測線、計 13 測線である（表 2.2.9）。

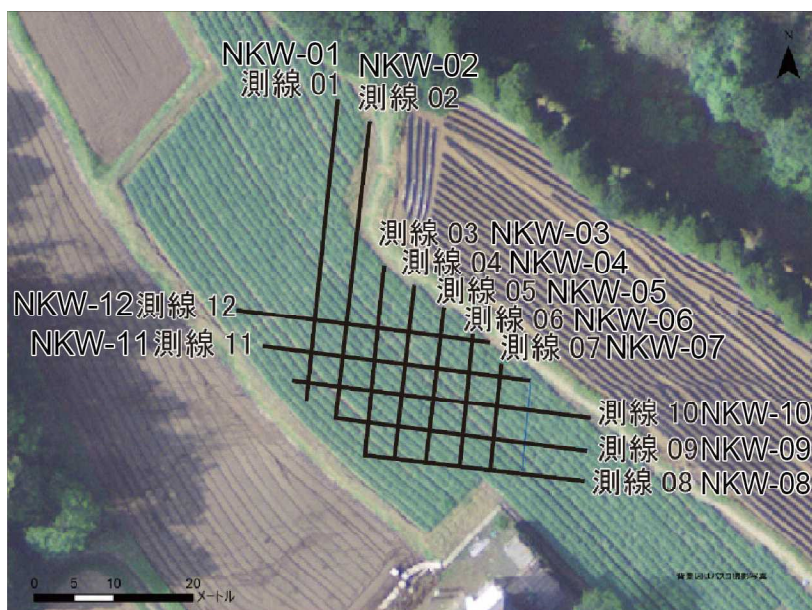


図 2.2.61 探査測線図（河原団地トレンチ東側地区）

表 2.2.9 探査測線諸元（河原団地トレンチ東側地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ 間隔 (m)	サンプリング 間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
西原村河原団地 R5トレンチ東側	NKW-01 測線 01	50	P	S-N	0.0 - 38.0	1.0	0.40	2048	カート	3次元解析実施箇所
	NKW-02 測線 02	50	P	S-N	0.0 - 38.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-03 測線 03	50	P	S-N	0.0 - 24.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-04 測線 04	50	P	S-N	0.0 - 22.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-05 測線 05	50	P	S-N	0.0 - 20.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-06 測線 06	50	P	S-N	0.0 - 18.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-07 測線 07	50	P	S-N	0.0 - 14.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-08 測線 08	50	P	E-W	0.0 - 28.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-09 測線 09	50	P	E-W	0.0 - 32.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-10 測線 10	50	P	E-W	0.0 - 38.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-11 測線 11	50	P	E-W	0.0 - 34.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-12 測線 12	50	P	E-W	0.0 - 32.0	1.0	0.40	2048	カート	
	NKW-13 測線 13	50	V	-	0.5 - 5.0	-	0.05	2048	ハンドル	

(1) NKW-01 測線（測線 01，図 2.2.62）

反射断面では、深度 2-8m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.63）。測線位置 5-10m・深度 2-10m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 30-33m・深度 4-7m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

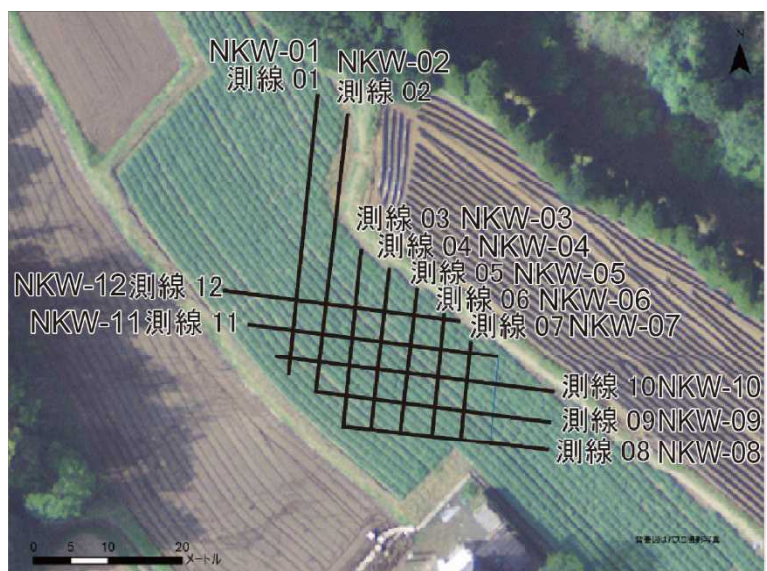


図 2.2.62 探査測線図（NKW-01 測線，再掲）

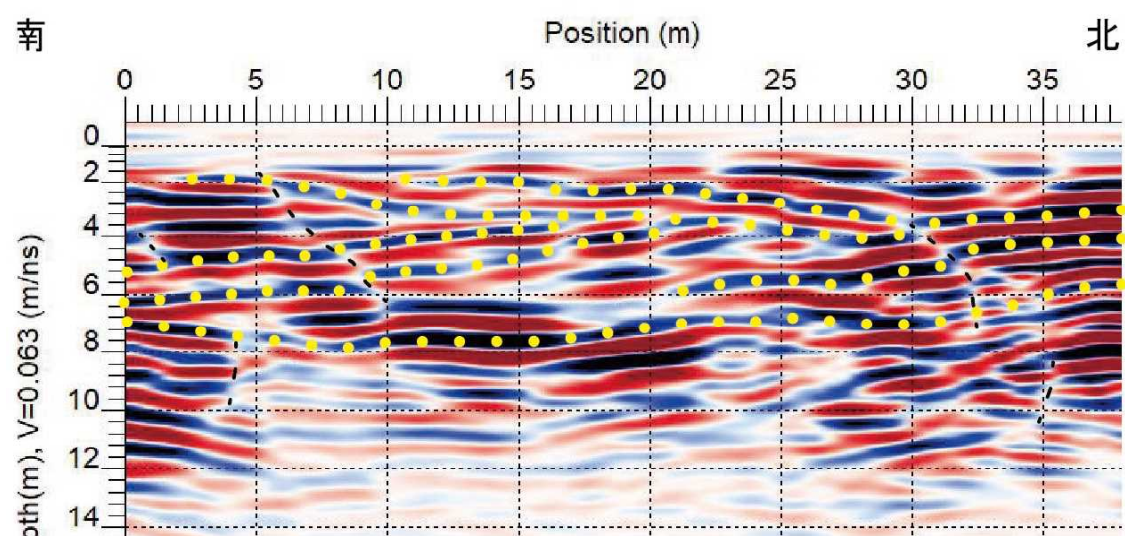
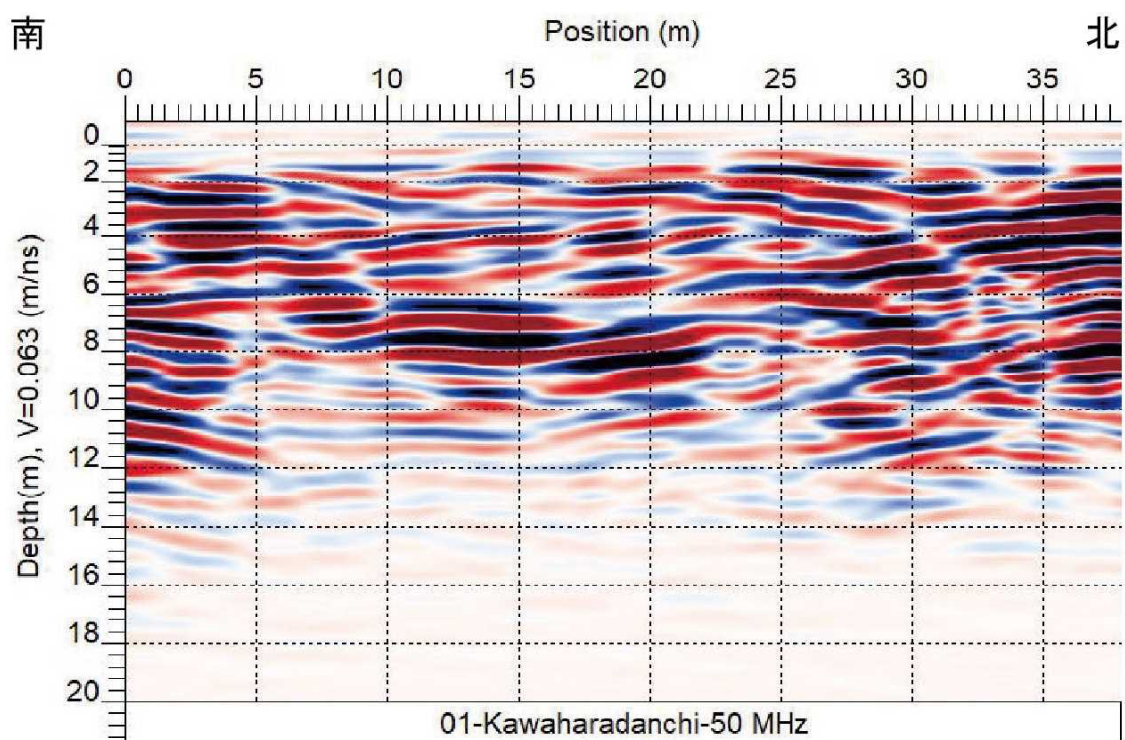


図 2.2.63 NKTW-01-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(2) NKW-02 測線（測線 02，図 2.2.64）

反射断面では、深度 1-7m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.65）。測線位置 2-5m・深度 1-13m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 25-33m・深度 2-8m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

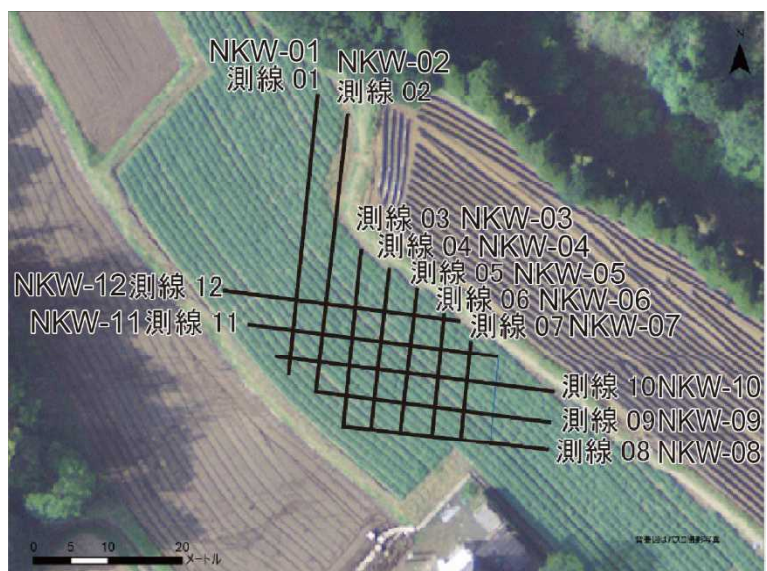


図 2.2.64 探査測線図（NKW-02 測線，再掲）

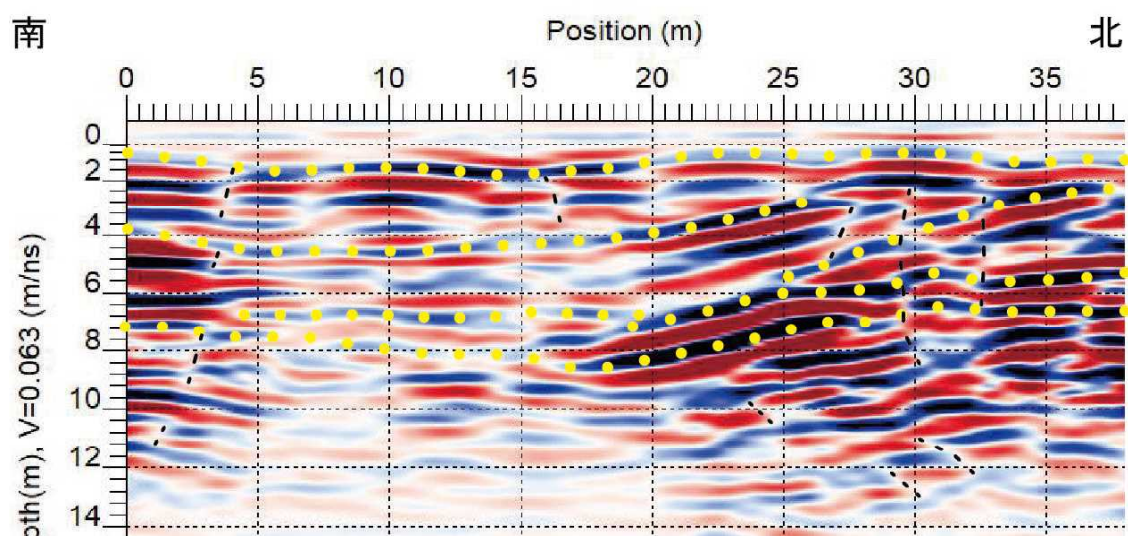
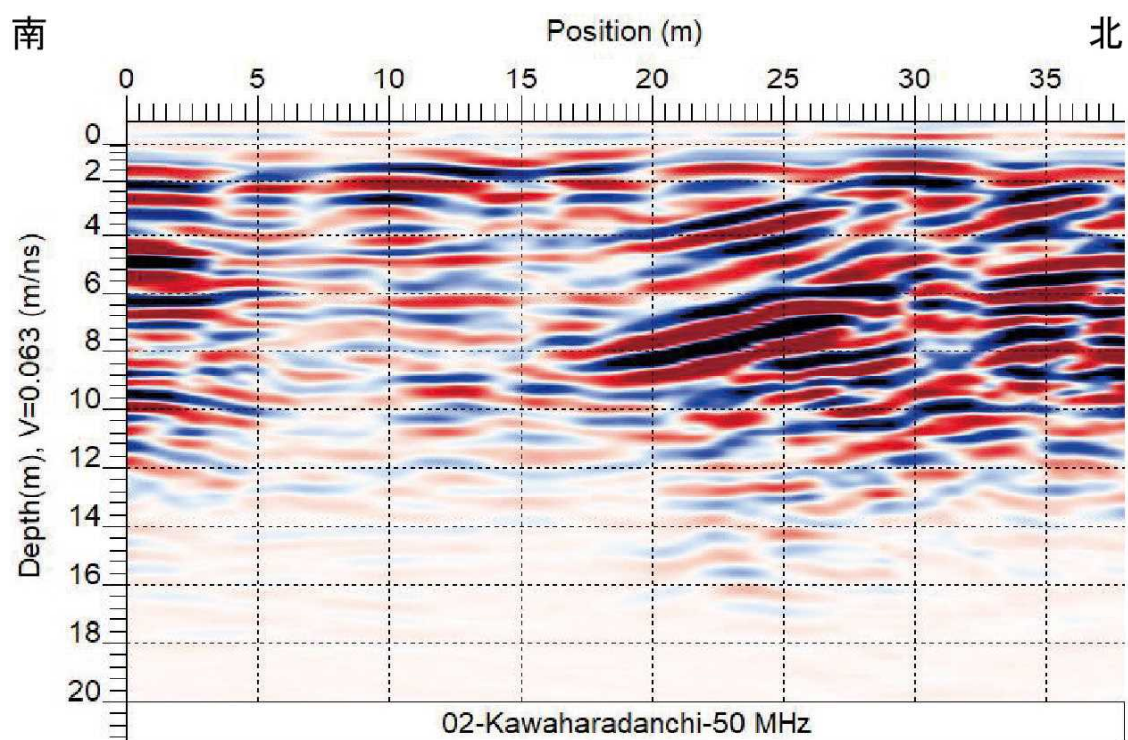


図 2.2.65 NKW-02-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(3) NKW-03 測線（測線 03，図 2.2.66）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.67）。測線位置 7-9m・深度 2-7m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 7-10m・深度 8-11m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

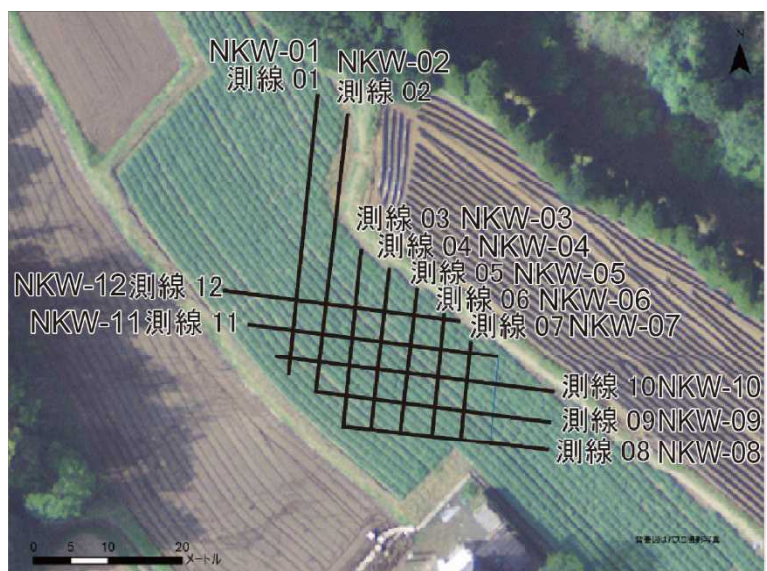


図 2.2.66 探査測線図（NKW-03 測線，再掲）

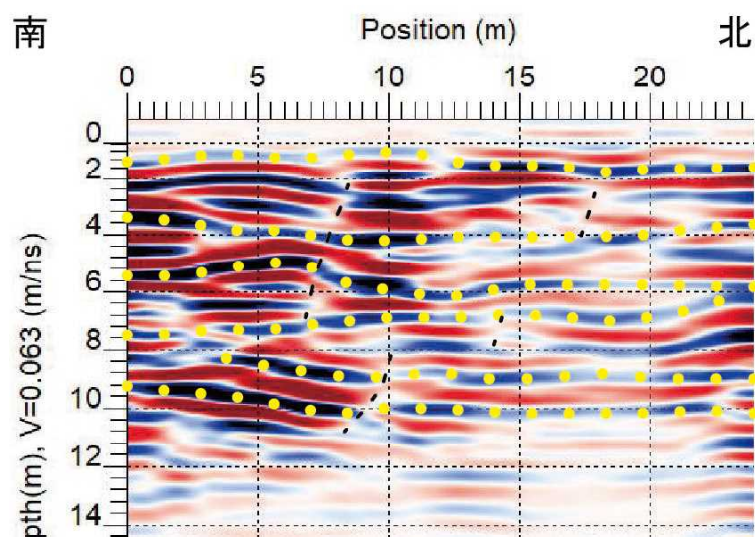
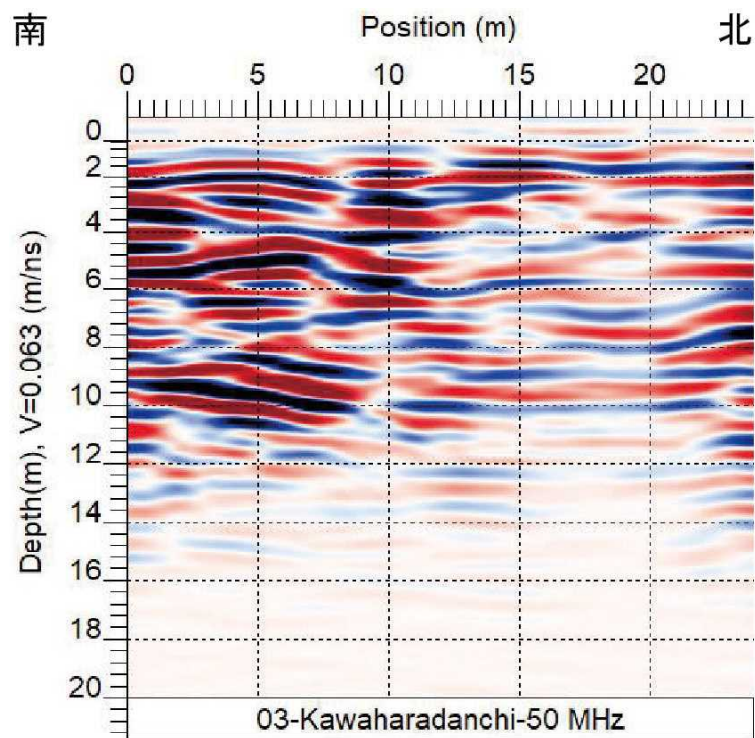


図 2.2.67 NKW-03-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(4) NKW-04 測線（測線 04，図 2.2.68）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.69）。測線位置 6-7m・深度 5-10m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 10-15m・深度 4-10m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

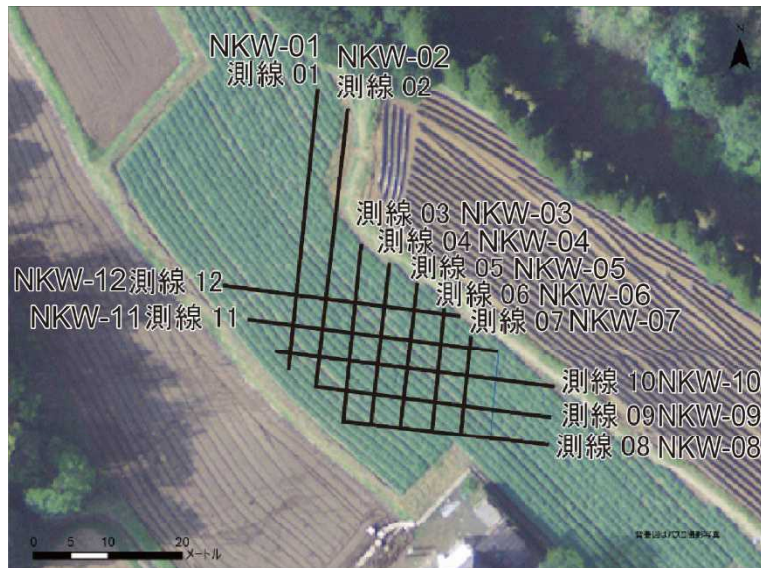


図 2.2.68 探査測線図（NKW-04 測線，再掲）

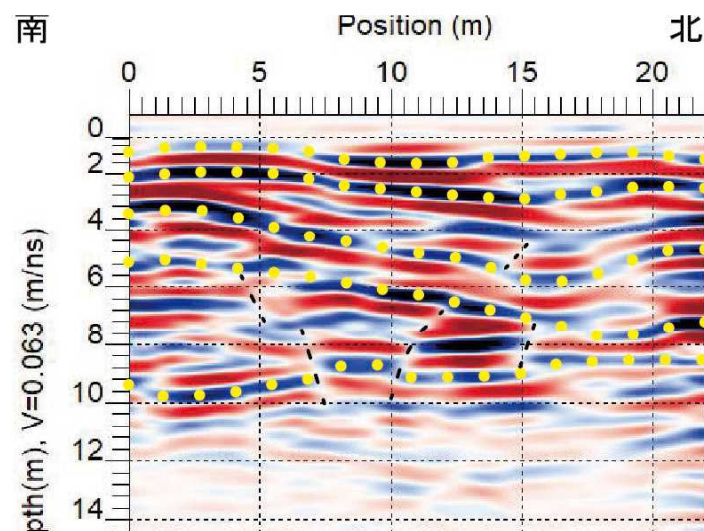
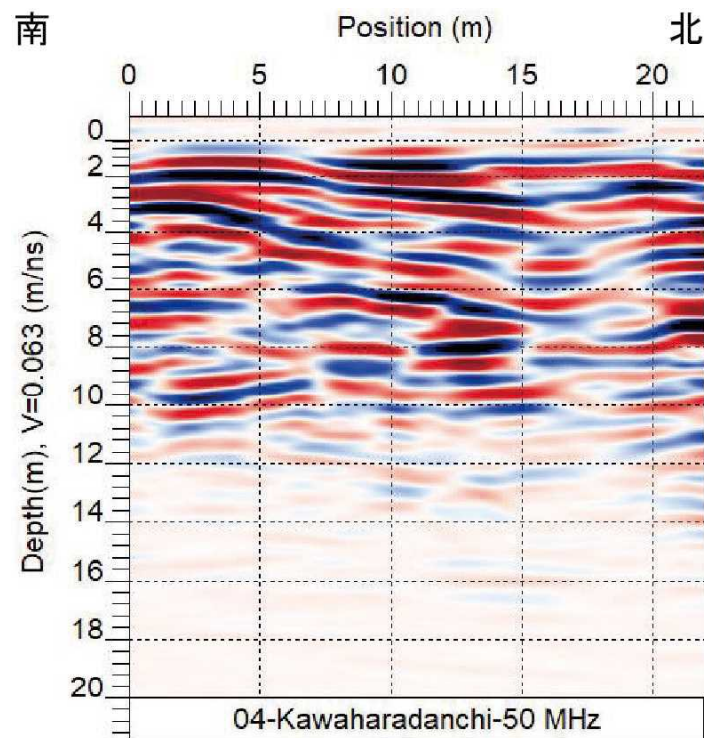


図 2.2.69 NKW-04-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(5) NKW-05 測線（測線 05，図 2.2.70）

反射断面では、深度 1-8m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.71）。測線位置 6-12m・深度 4-9m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 15-17m・深度 4-10m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

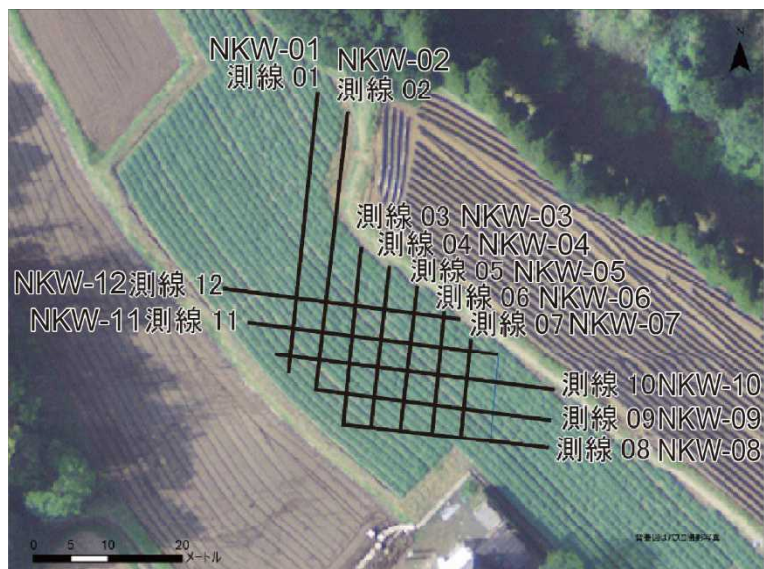


図 2.2.70 探査測線図（NKW-05 測線，再掲）

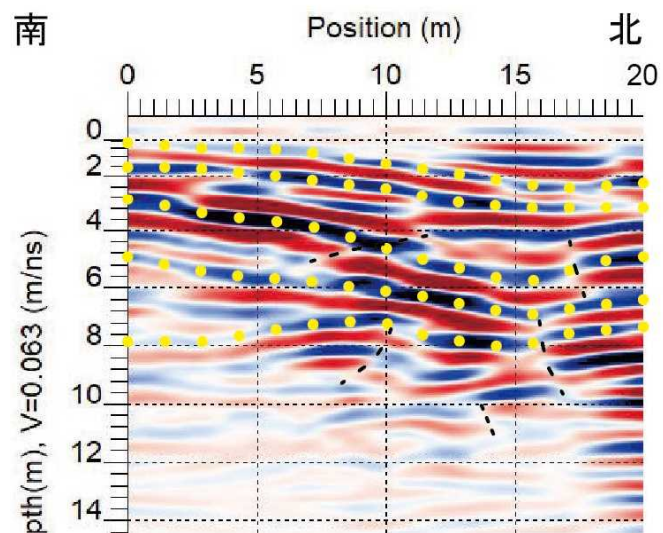
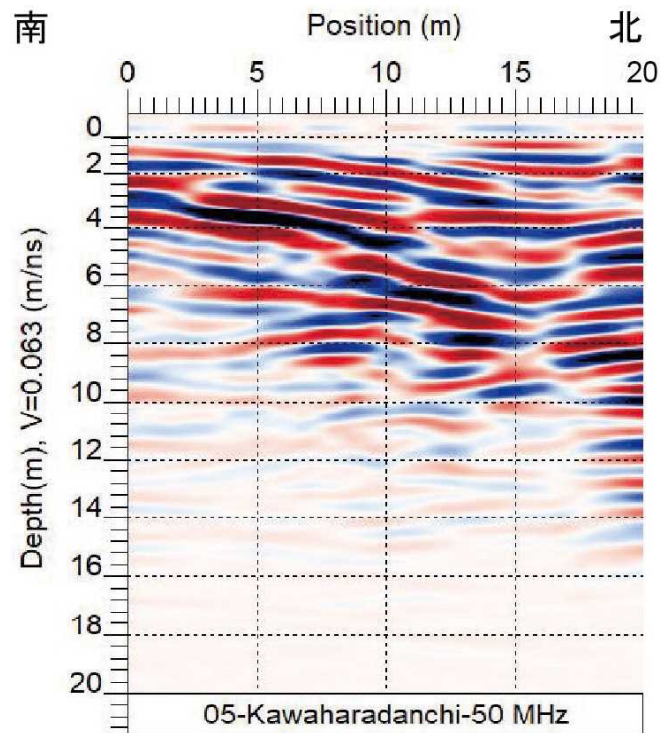


図 2.2.71 NKW-05-50MHz 探索結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(6) NKW-06 測線（測線 06，図 2.2.72）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.73）。測線位置 0-10m・深度 6-11m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 12-17m・深度 4-7m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

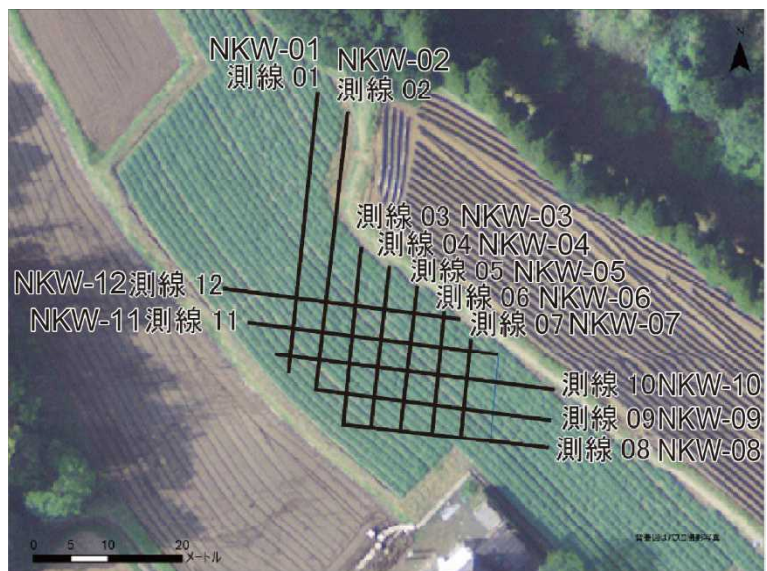


図 2.2.72 探査測線図（NKW-06 測線，再掲）

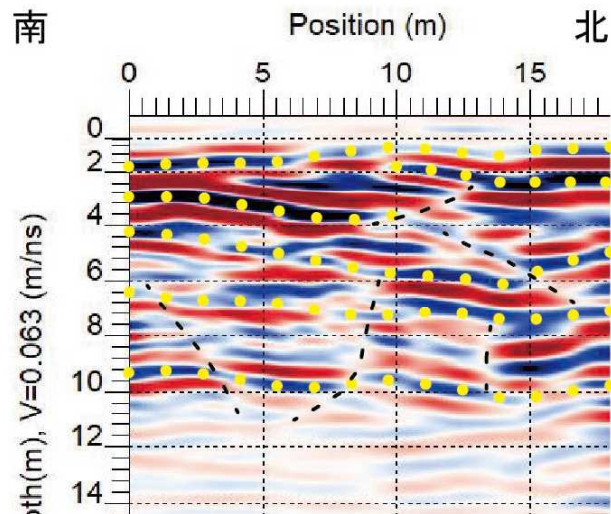
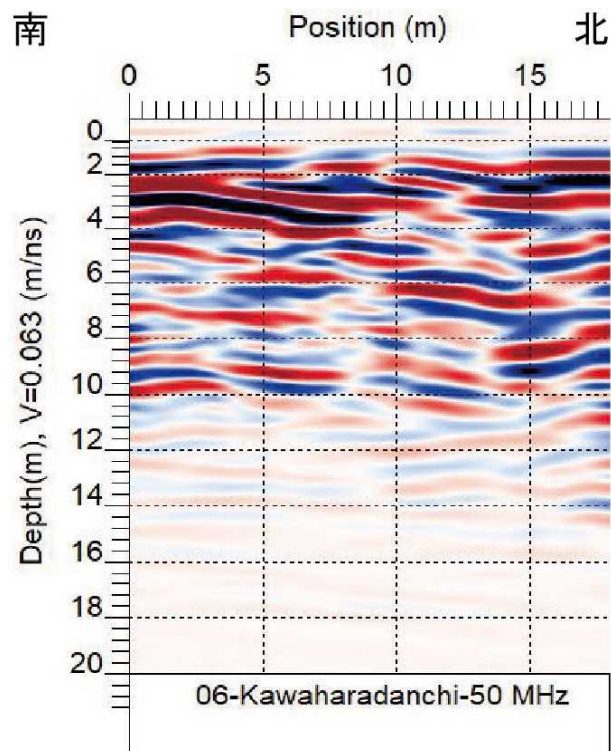


図 2.2.73 NKW-06-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(7) NKW-07 測線（測線 07，図 2.2.74）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.75）。測線位置 0-4m・深度 2-8m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 3-8m・深度 6-10m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

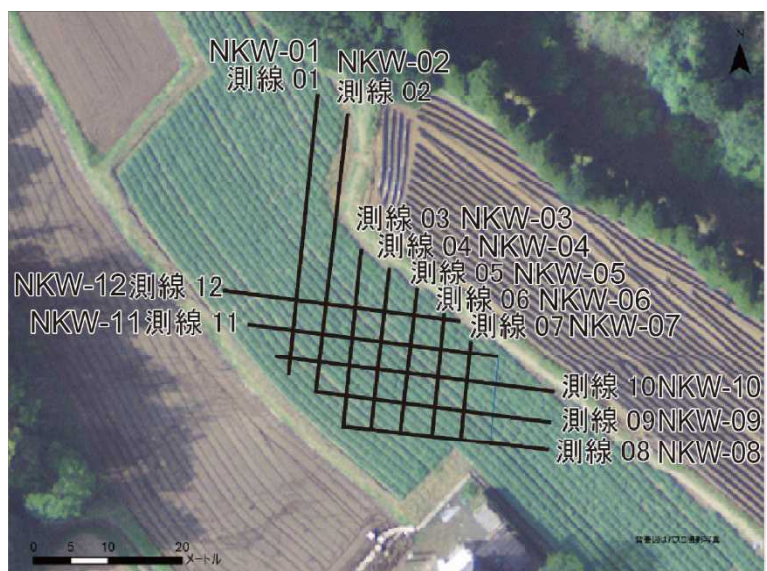


図 2.2.74 探査測線図（NKW-07 測線，再掲）

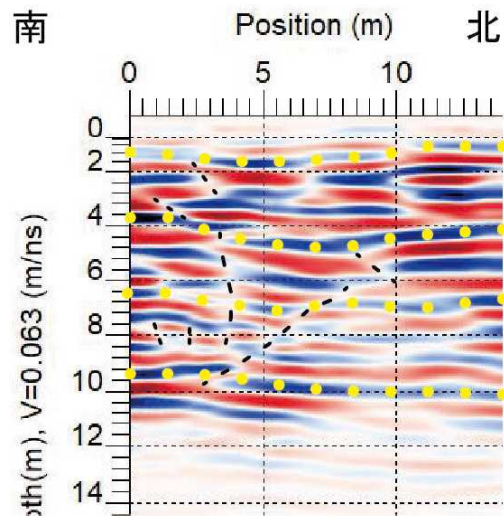
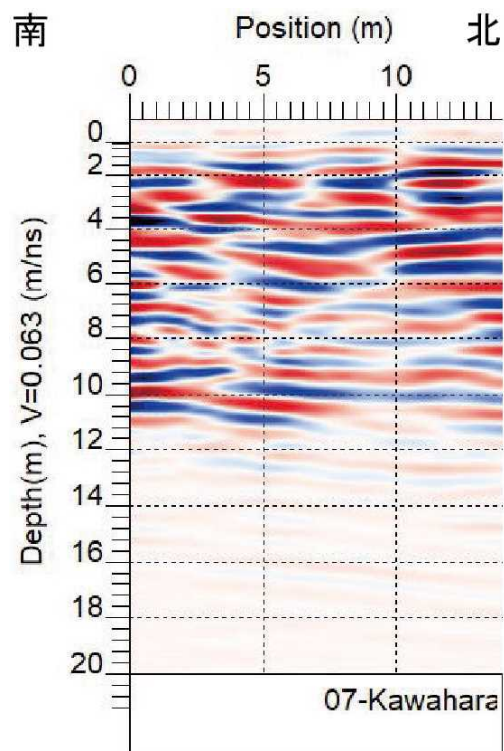


図 2.2.75 NKW-07-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(8) NKW-12 測線（測線 12，図 2.2.76）

反射断面では、深度 2-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.77）。測線位置 17-23m・深度 8-10m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

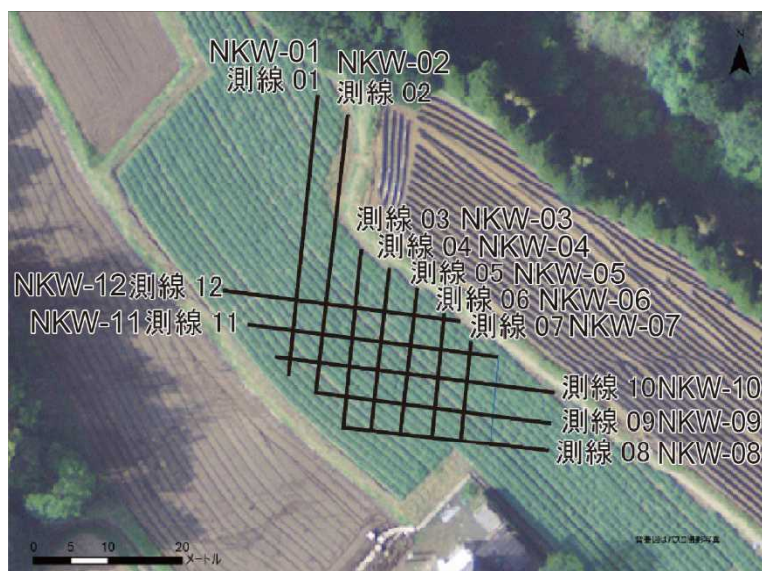


図 2.2.76 探査測線図（NKW-12 測線，再掲）

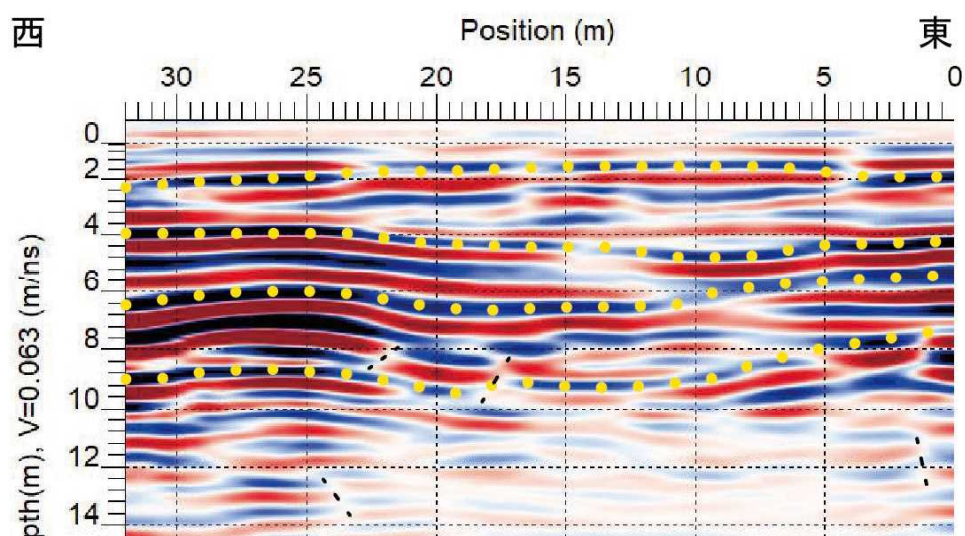
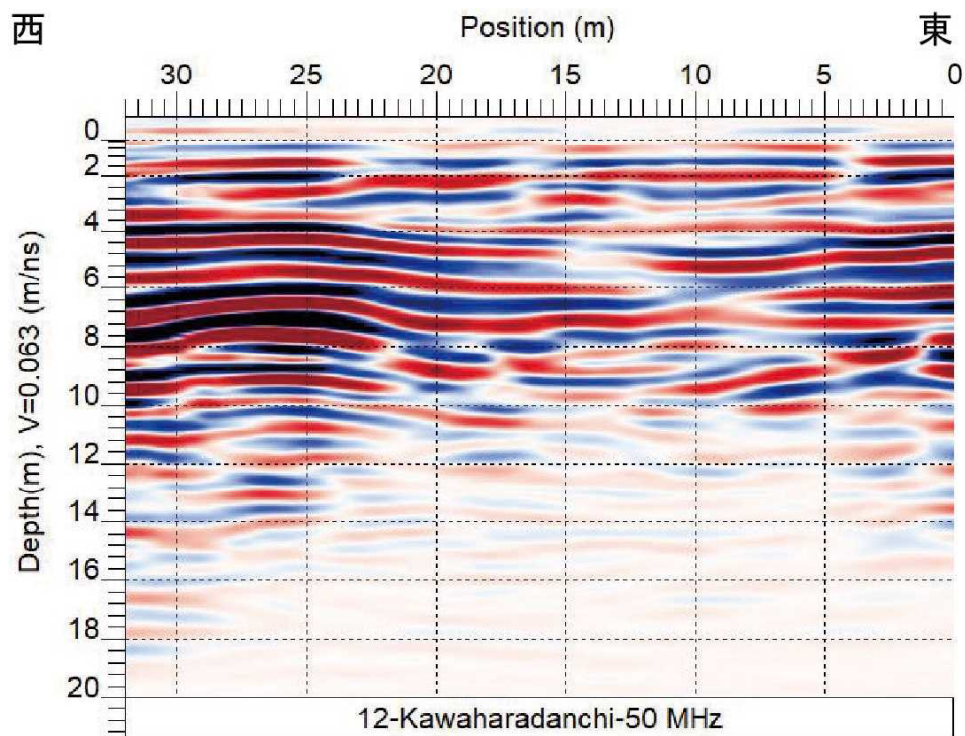


図 2.2.77 NKW-12-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(9) NKW-11 測線（測線 11，図 2.2.78）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.79）。測線位置 13-20m・深度 7-12m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 2-6m・深度 4-10m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

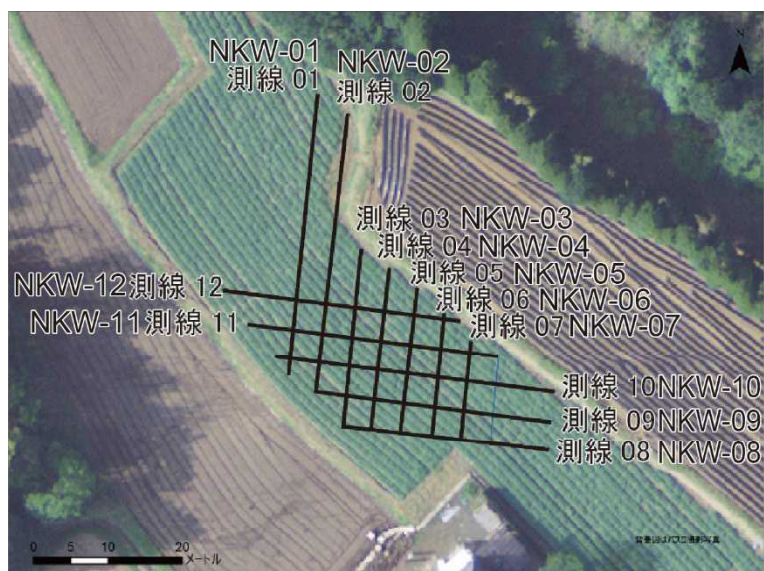


図 2.2.78 探査測線図（NKW-11 測線，再掲）

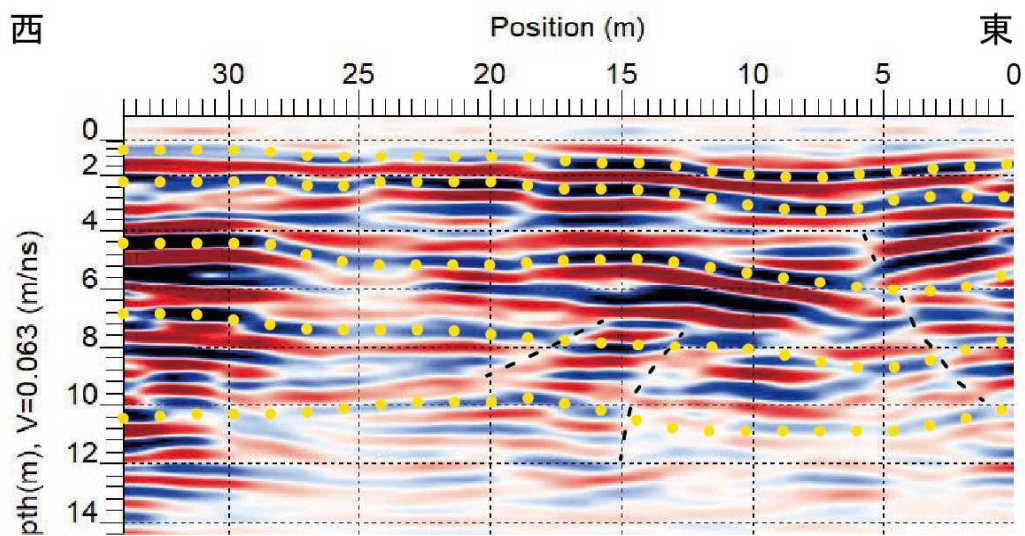
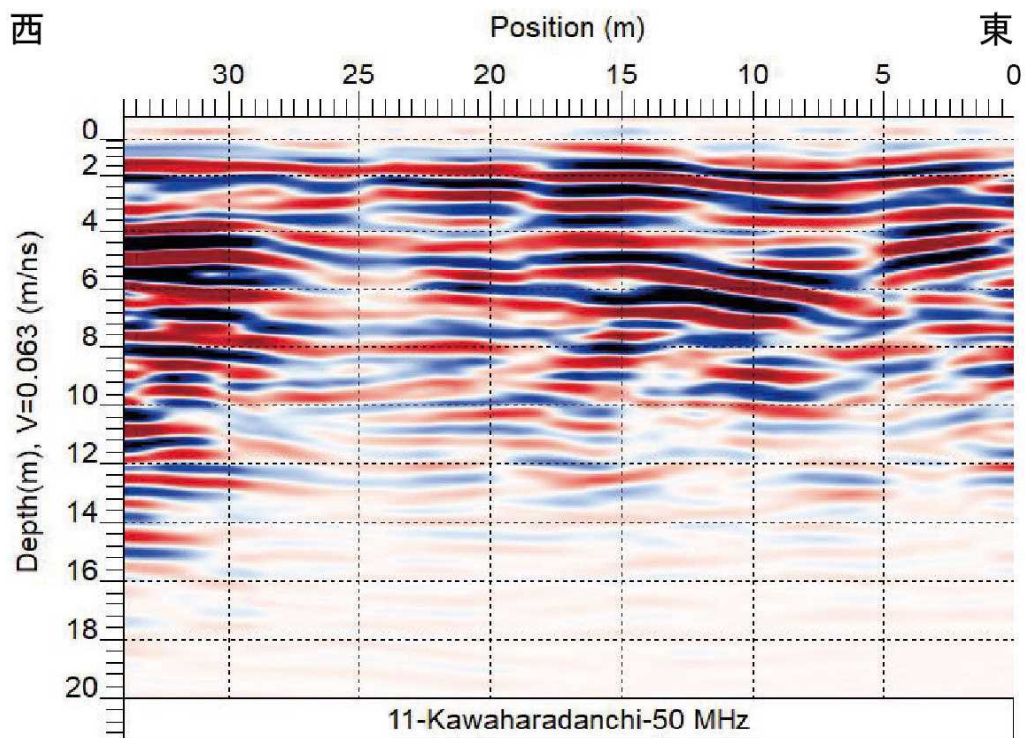


図 2.2.79 NKW-11-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(10) NKW-10 測線（測線 10，図 2.2.80）

反射断面では、深度 1-11m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.81）。測線位置 30-35m・深度 5-12m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 2-5m・深度 8-11m・2-4m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

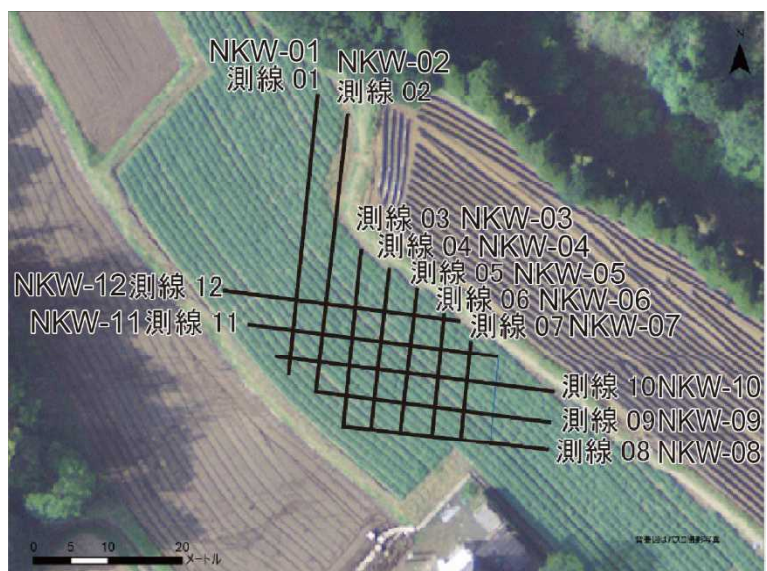


図 2.2.80 探査測線図（NKW-10 測線，再掲）

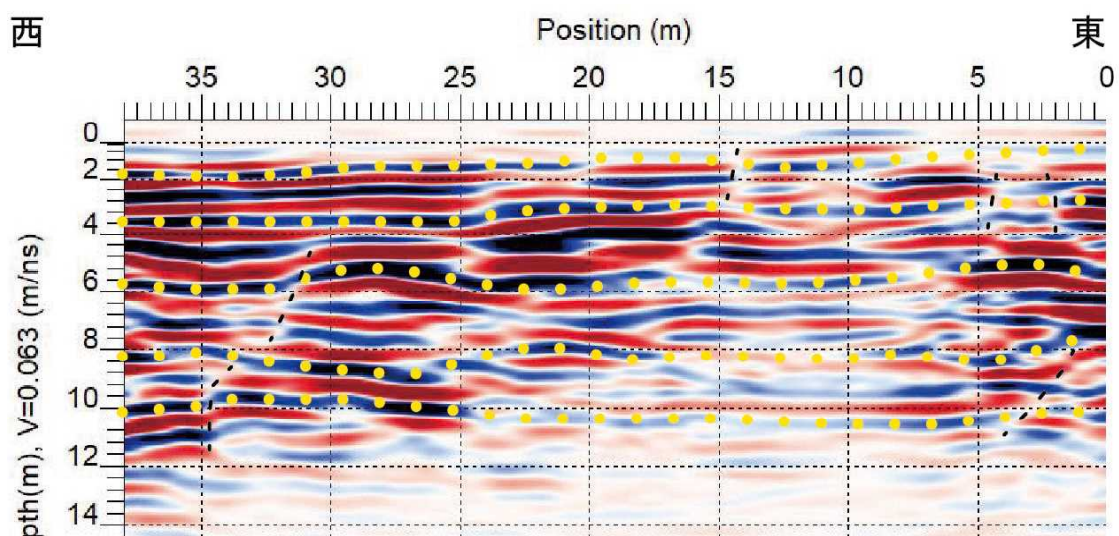
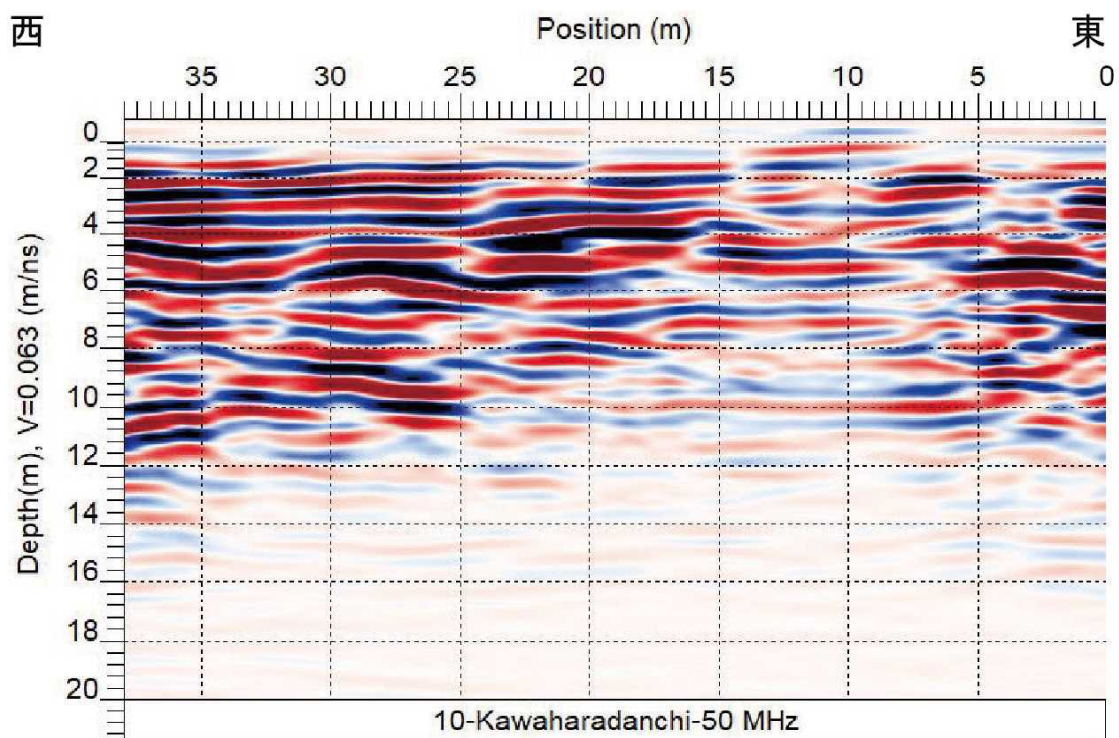


図 2.2.81 NKW-10-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(11) NKW-09 測線（測線 09，図 2.2.82）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.83）。測線位置 20-28m・深度 6-10m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 3-12m・深度 5-10m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

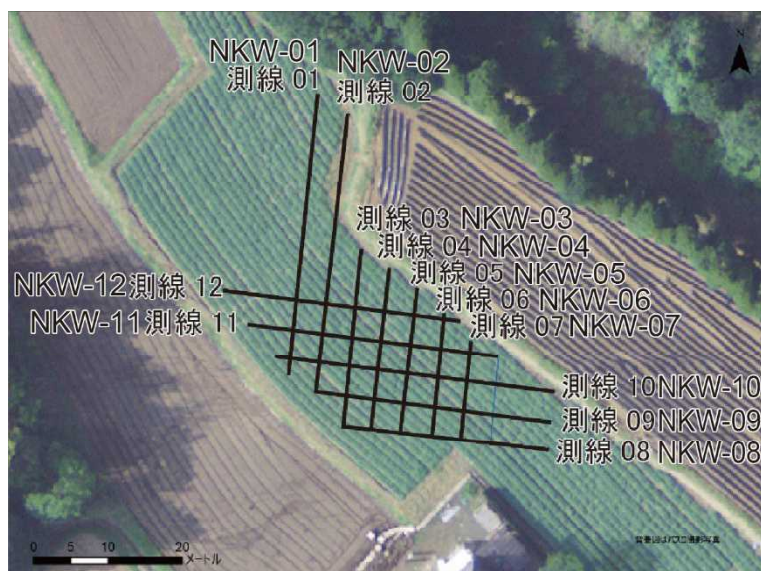


図 2.2.82 探査測線図（NKW-09 測線，再掲）

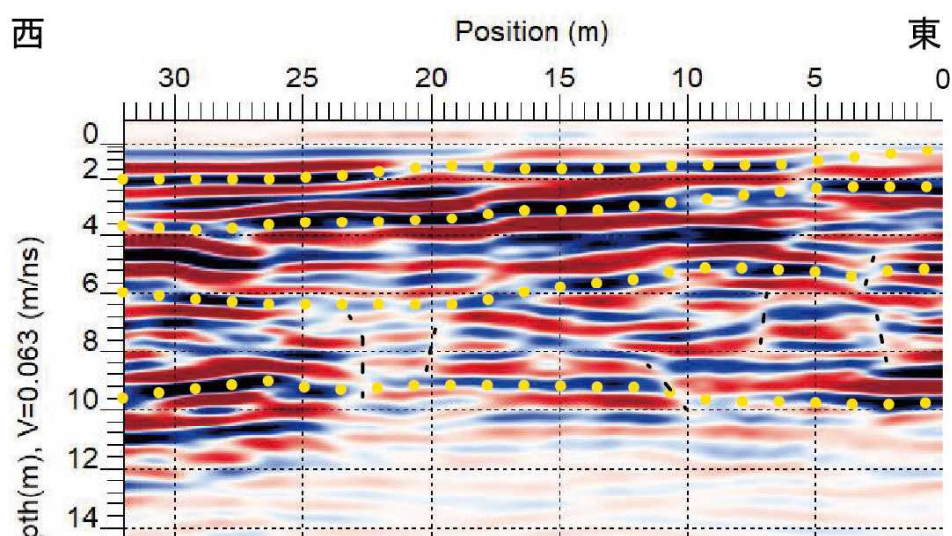
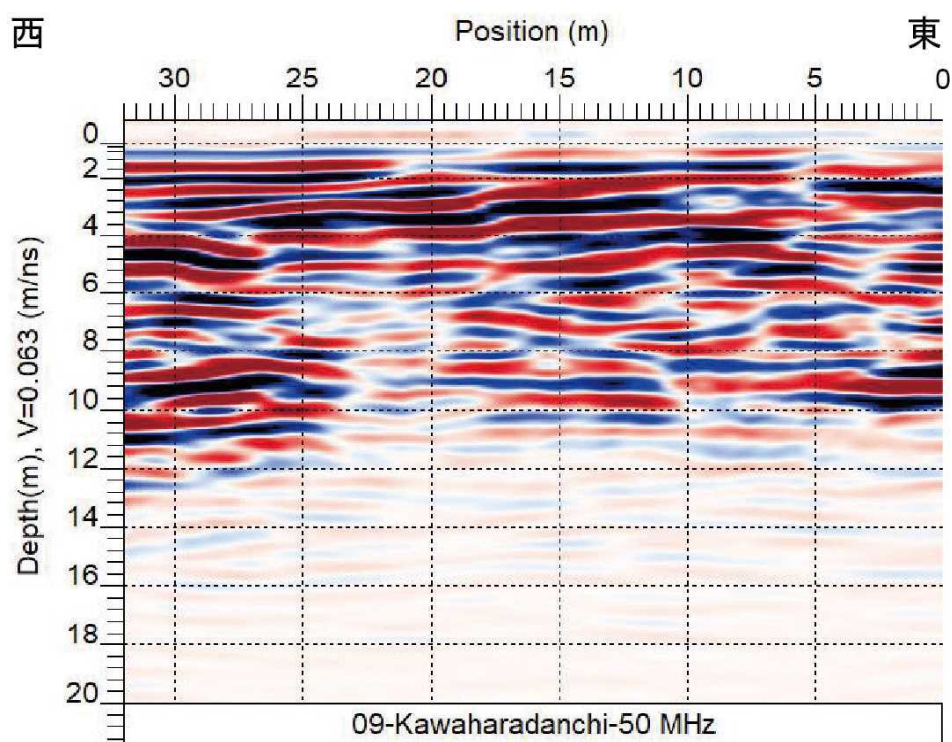


図 2.2.83 NKW-09-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(12) NKW-08 測線（測線 08，図- 2-84）

反射断面では、深度 1-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.85）。測線位置 23-28m・深度 8-10m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 0-5m・深度 3-6m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

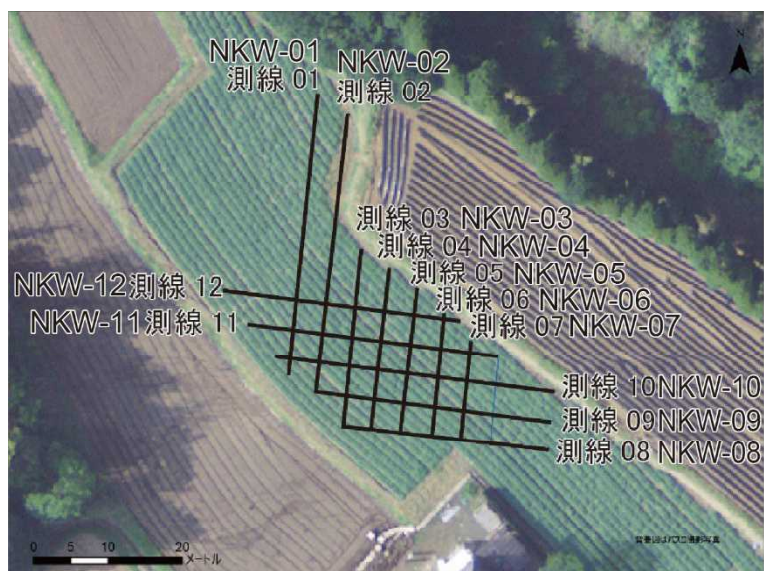


図 2.2.84 探査測線図（NKW-08 測線，再掲）

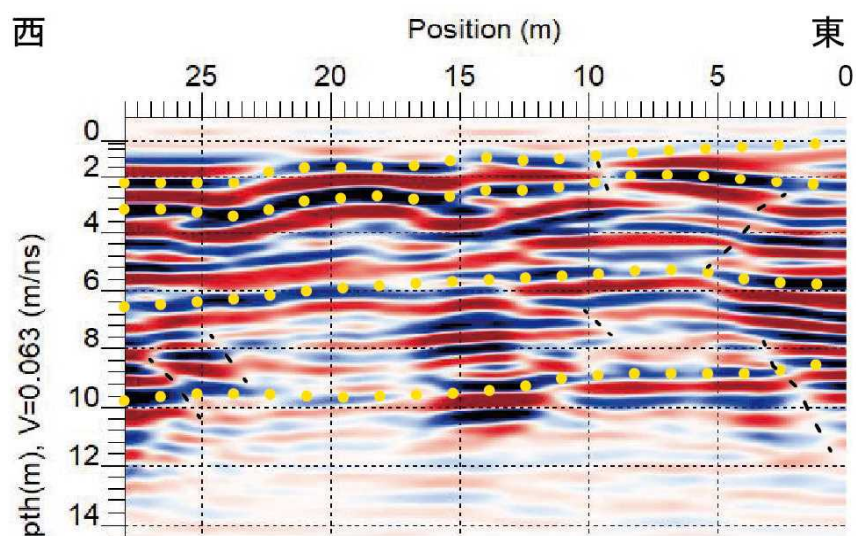
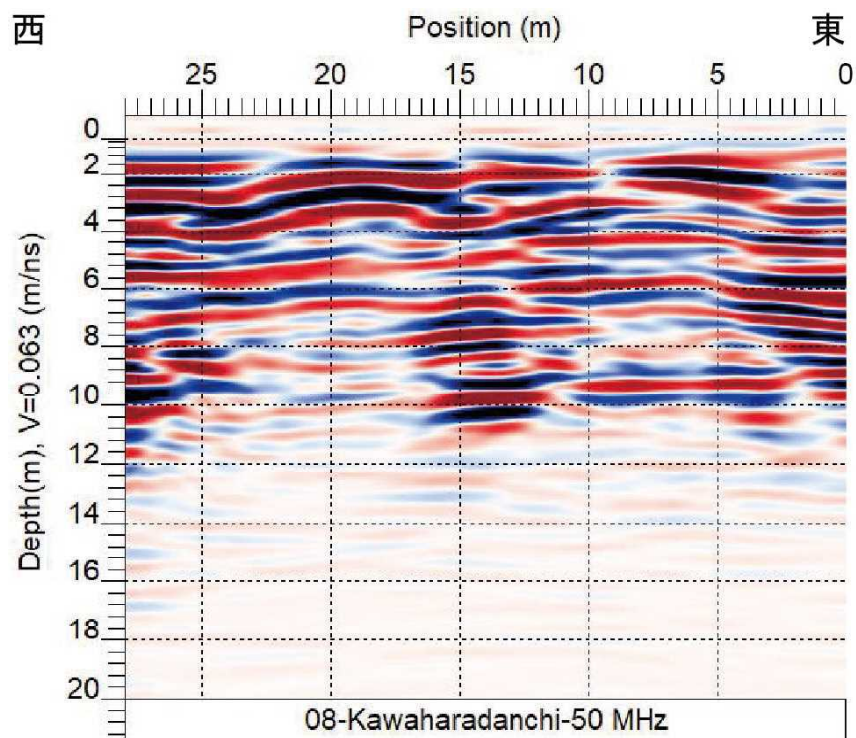


図 2.2.85 NKTW-08-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(13) 3次元形状把握のための解析手法検討

取得した探査断面から抽出した特徴的な反射について、その3次元形状を把握するために地下構造モデルを作成した（図 2.2.86, 図 2.2.87, 図 2.2.88, 図 2.2.89）

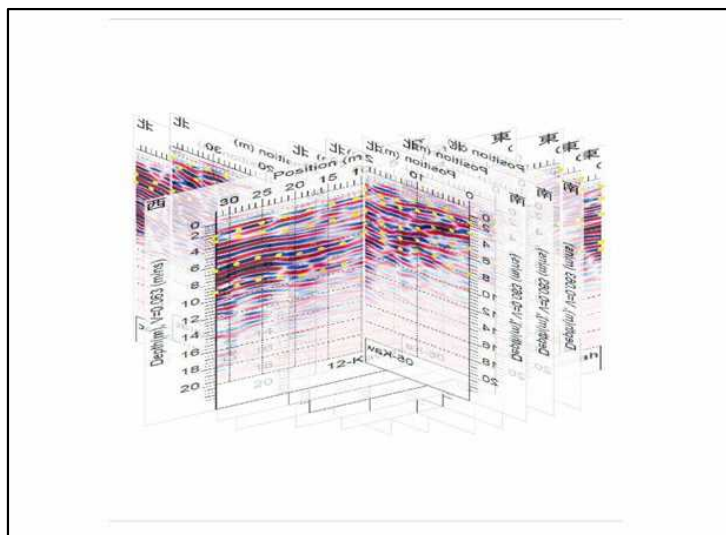


図 2.2.86 パネルダイアグラム（南西から北東方向）

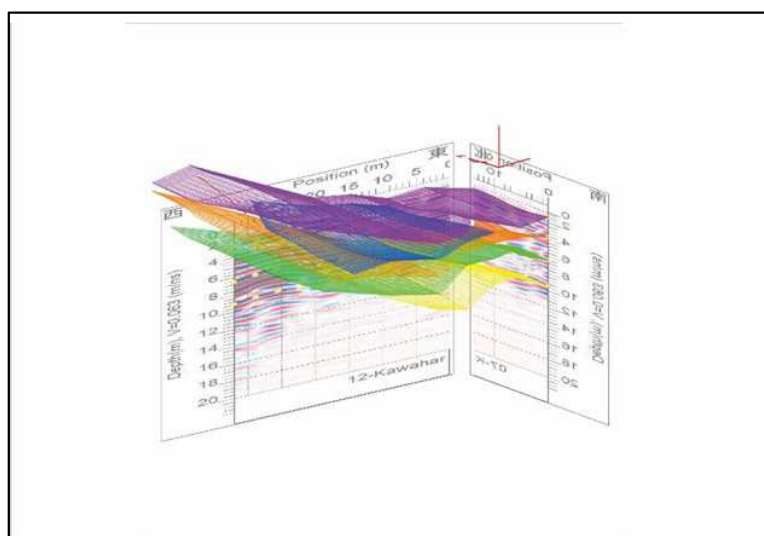


図 2.2.87 探査断面と反射面（南西から北東方向）

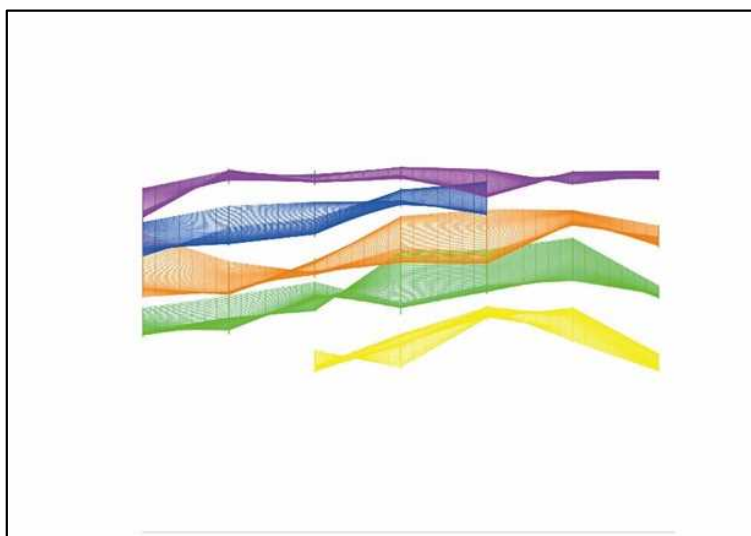


図 2.2.88 反射面のみ（東から西方向）

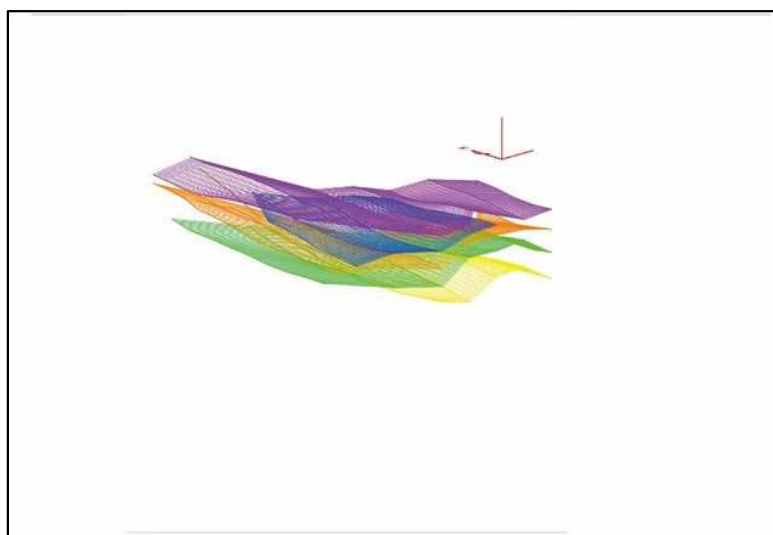


図 2.2.89 反射面のみ（南西から北東方向）

2.2.9. 河原団地地区（トレンチ地点）

河原団地地区では、トレンチ調査に先立ち、光学画像相関解析結果および地震後の空中写真で確認される地表変状位置を横切るように、周波数 50MHz 探査を実施した（図 2.2.90）。測線 22 および測線 24 については、同一測線上で 25MHz 探査を実施した。測線数は周波数 50MHz で 5 測線、25MHz は 2 測線、計 7 測線である（表 2.2.10）。

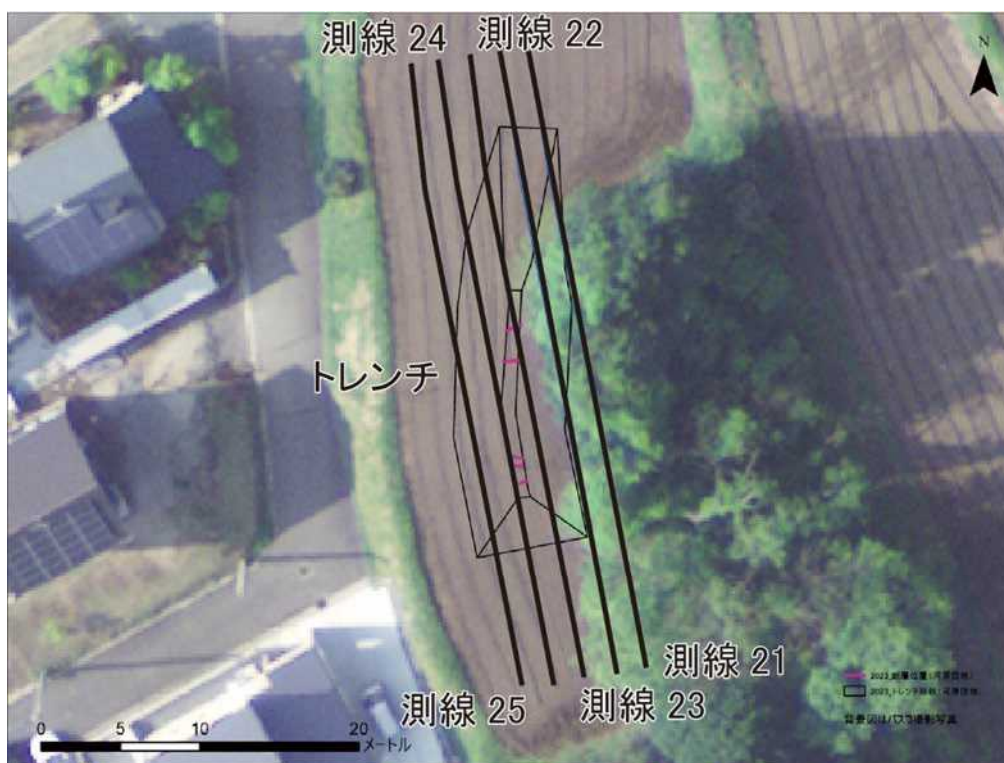


図 2.2.90 探査測線図（河原団地トレンチ地区）

表 2.2.10 探査測線諸元（河原団地トレンチ地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ間隔 (m)	サンプリング間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
西原村河原 R5トレンチ地点	NKW - 21	50	P	S - N	0.0 - 40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル	R5トレンチ調査実施
	NKW - 22	50 25	P	S - N	0.0 - 40.0	2.0 4.0	0.40 0.80	2048	ハンドル	
	NKW - 23	50	P	S - N	0.0 - 40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル	
	NKW - 24	50 25	P	S - N	0.0 - 40.0	2.0 4.0	0.40 0.80	2048	ハンドル	
	NKW - 25	50	P	S - N	0.0 - 40.0	2.0	0.40	2048	ハンドル	

(1) NKW-25-50MHz 測線（測線 25，図 2.2.91）

反射断面では、深度 1-7m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.92）。測線位置 0-6m・深度 4-12m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

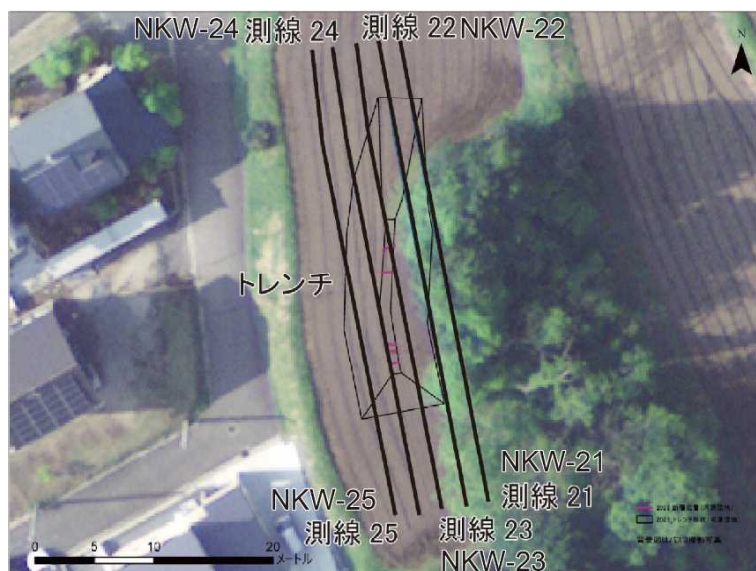


図 2.2.91 探査測線図（NKW-25 測線，再掲）

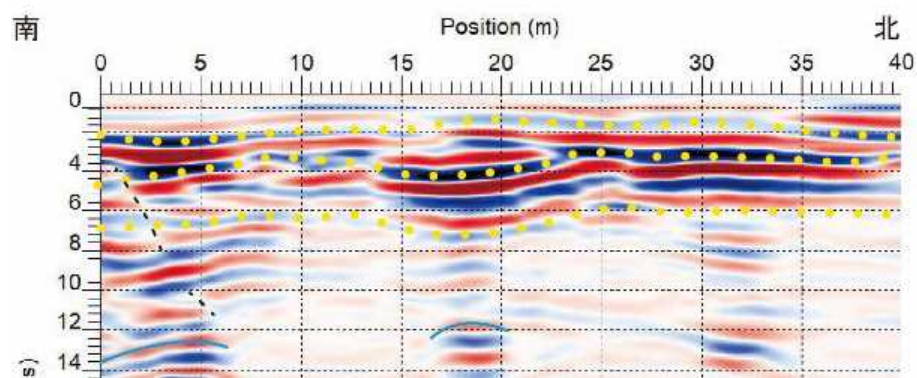
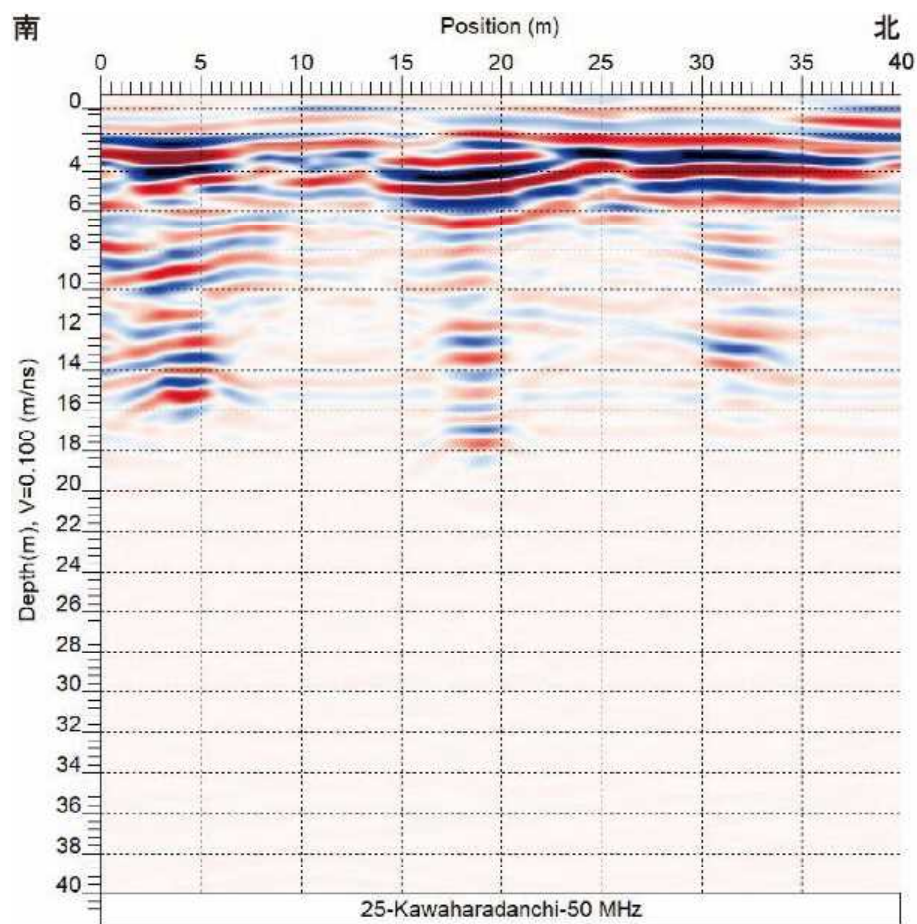


図 2.2.92 NKW-25-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(2) NKW-24-50MHz 測線（測線 24，図 2.2.93）

反射断面では、深度 1-8m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.94）。測線位置 16-17m・深度 7-12m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

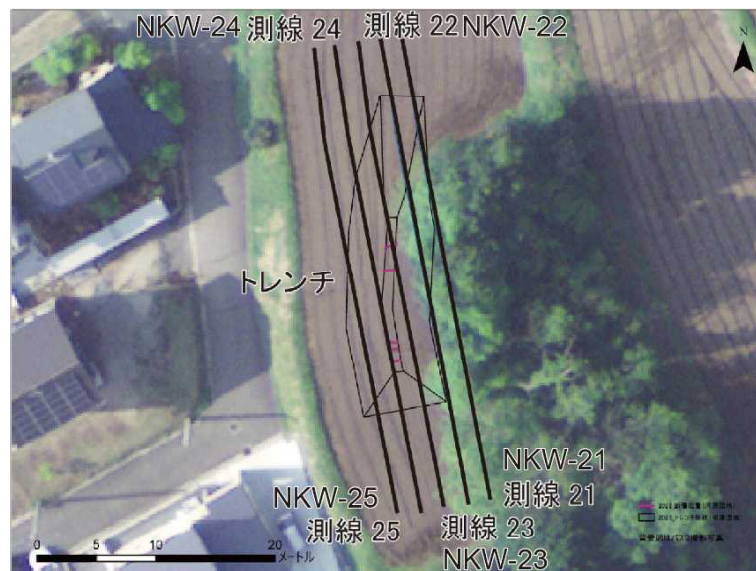


図 2.2.93 探査測線図（NKW-24 測線，再掲）

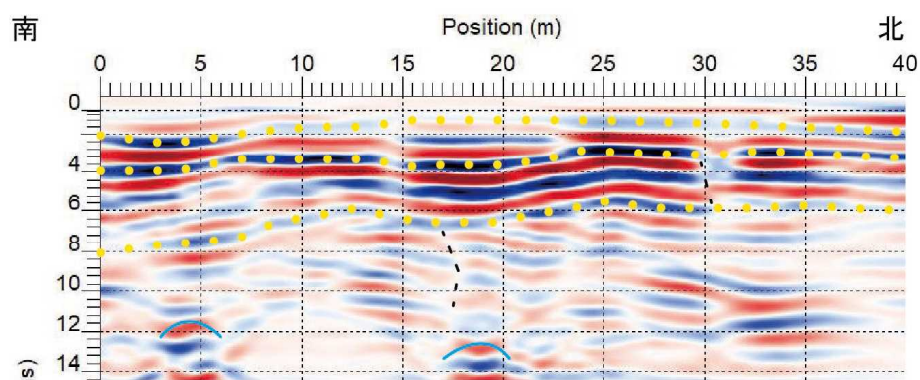
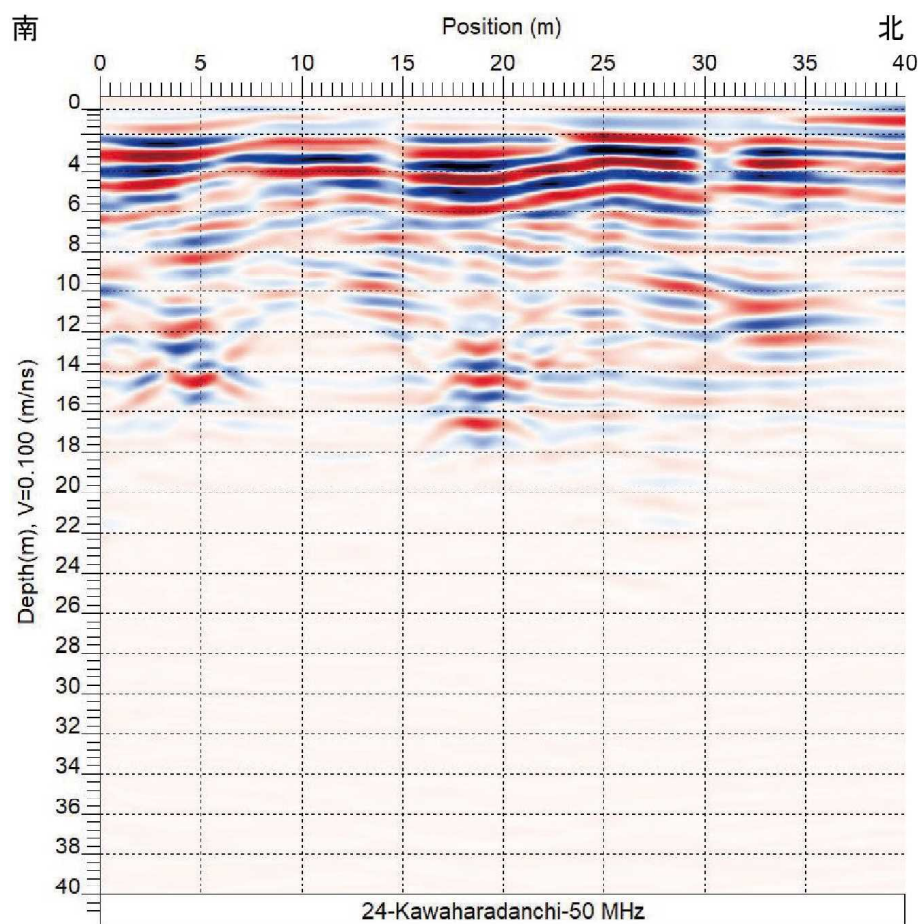


図 2.2.94 NKW-24-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(3) NKW-23-50MHz 測線（測線 23，図 2.2.95）

反射断面では、深度 2-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.96）。測線位置 3-5m・深度 1-6m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 18-25m・深度 10-12m・6-8m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

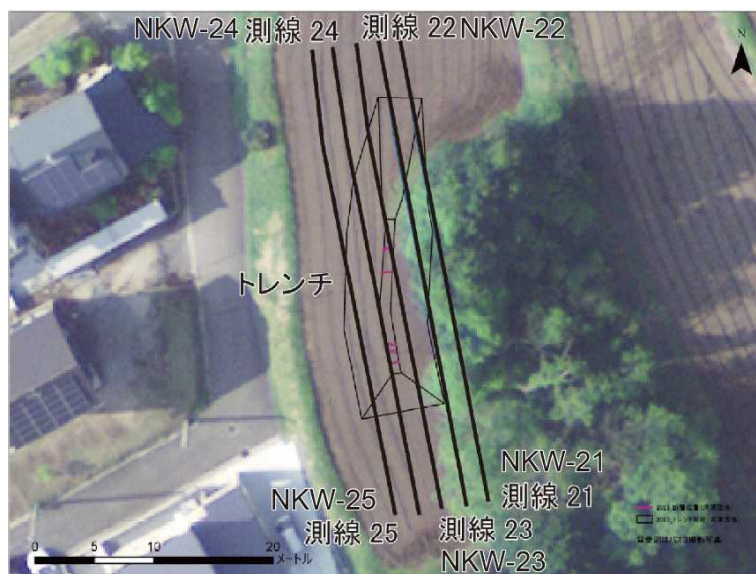


図 2.2.95 探査測線図（NKW-23 測線，再掲）

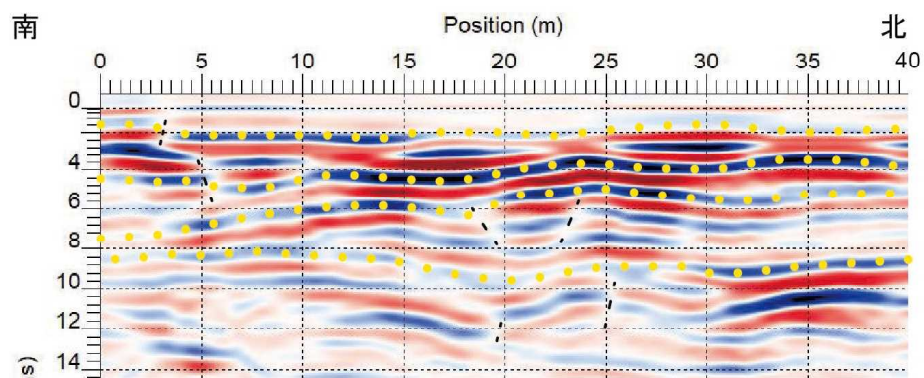
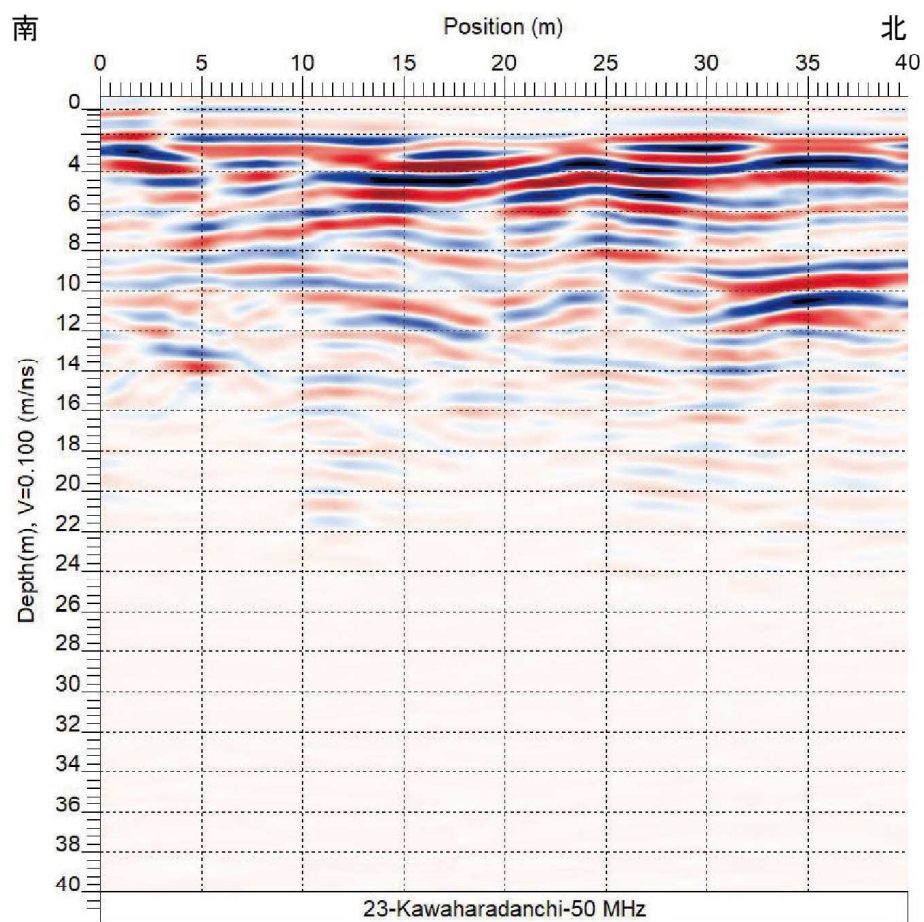


図 2.2.96 NKW-23-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(4) NKW-22-50MHz 測線（測線 22，図 2.2.97）

反射断面では、深度 1-9m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.98）。測線位置 5-10m ・深度 1-6m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

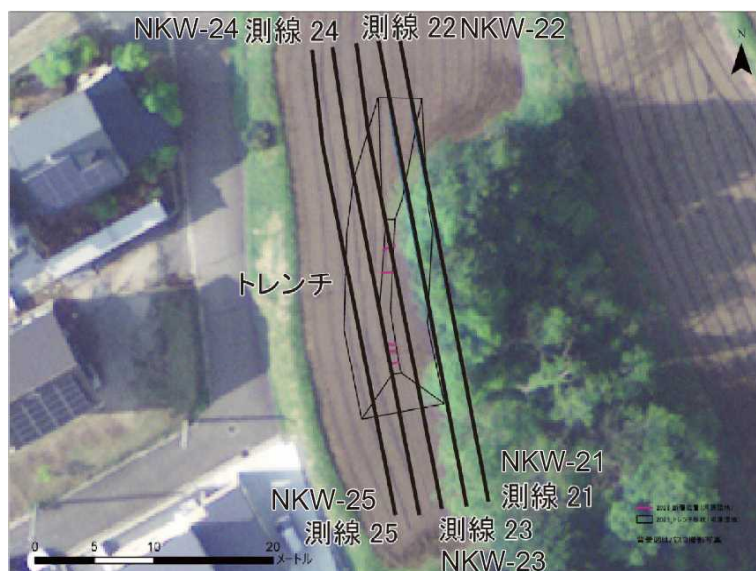


図 2.2.97 探査測線図（NKW-22 測線，再掲）

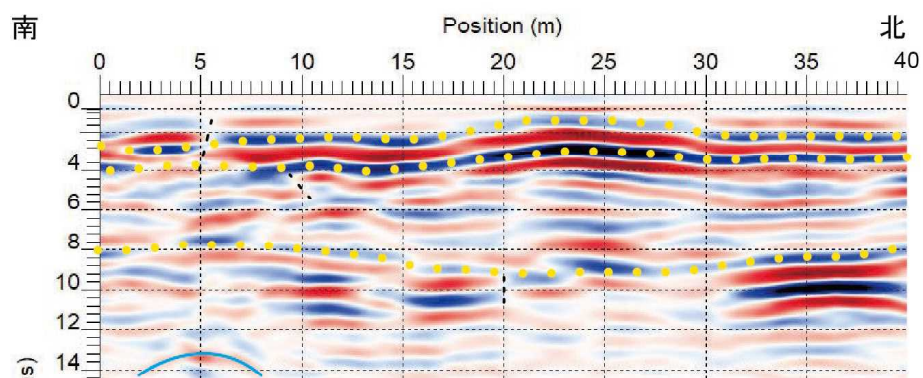
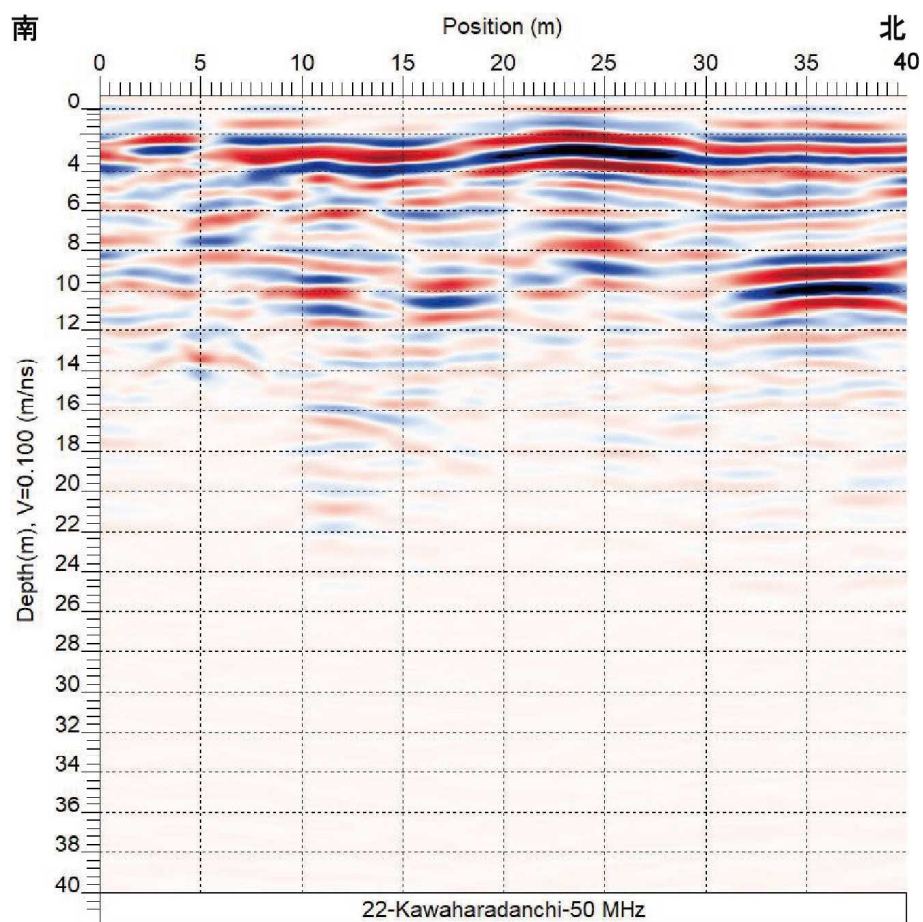


図 2.2.98 NKW-22-50MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(5) NKW-21-50MHz 測線（測線 21，図 2.2.99）

反射断面では、深度 1-9m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.100）。測線位置 27-30m・深度 2-4m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 37-40m・深度 3-6m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

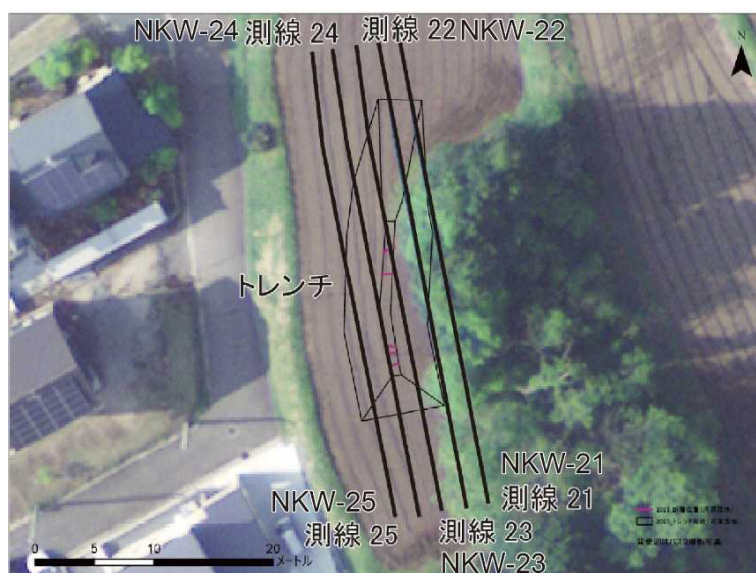


図 2.2.99 探査測線図（NKW-21 測線，再掲）

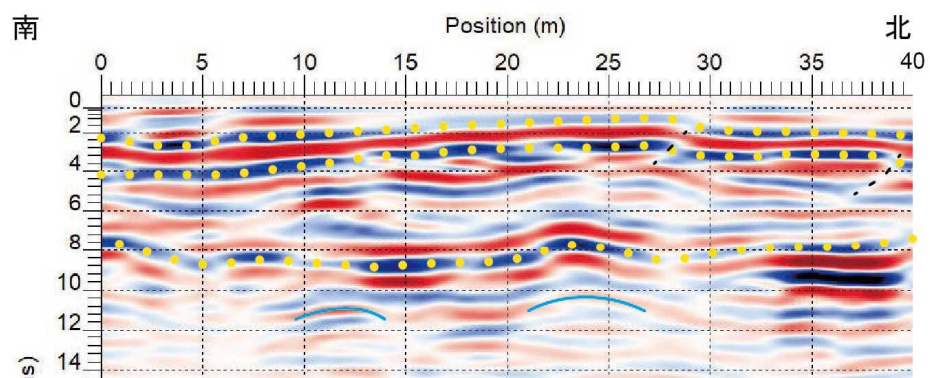
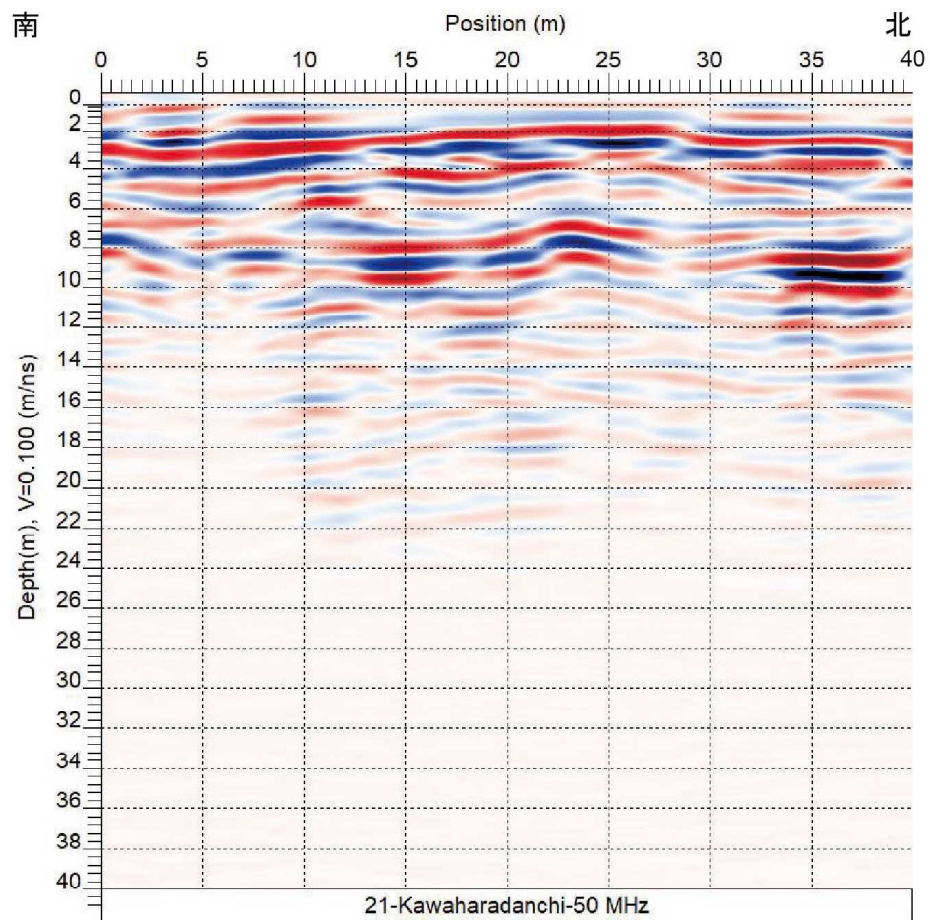


図 2.2.100 NKW-21-50MHz 探査結果（上図：解釈あり，下図：解釈なし）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 14m 以下の記録を除去した

(6) NKW-24-25MHz 測線（測線 24，図 2.2.101）

反射断面では、深度 2-14m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.102）。測線位置 14-21m・深度 8-16m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

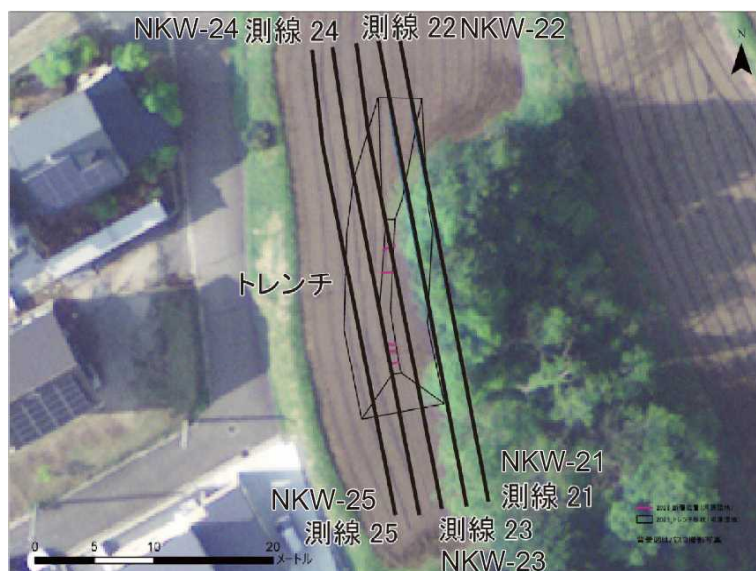


図 2.2.101 探査測線図（NKW-24 測線，再掲）

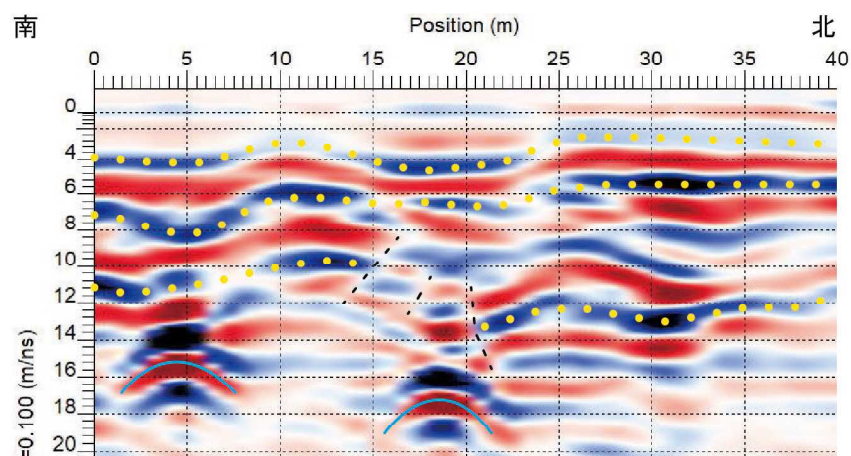
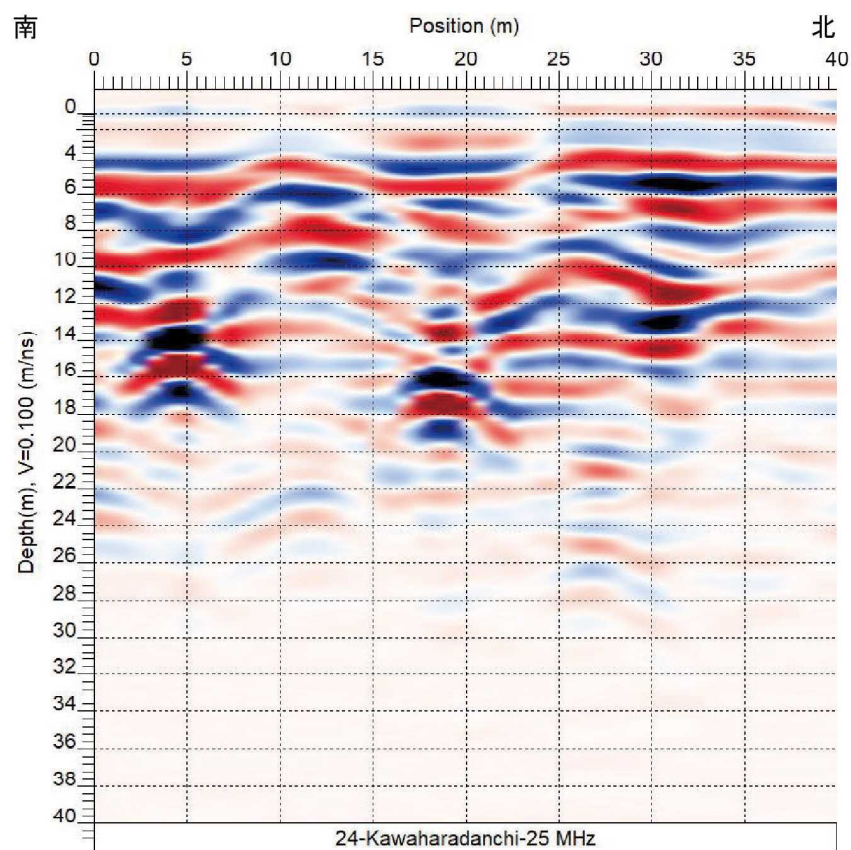


図 2.2.102 NKW-24-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 20m 以下の記録を除去した

(7) NKW-22-25MHz 測線（測線 24，図 2.2.103）

反射断面では、深度 2-12m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.104）。測線位置 13-15m・深度 4-12m 付近の反射に不連続や傾斜変換がみられる。また、測線位置 27-31m・深度 9-11m の反射に不連続や傾斜変換がみられる。

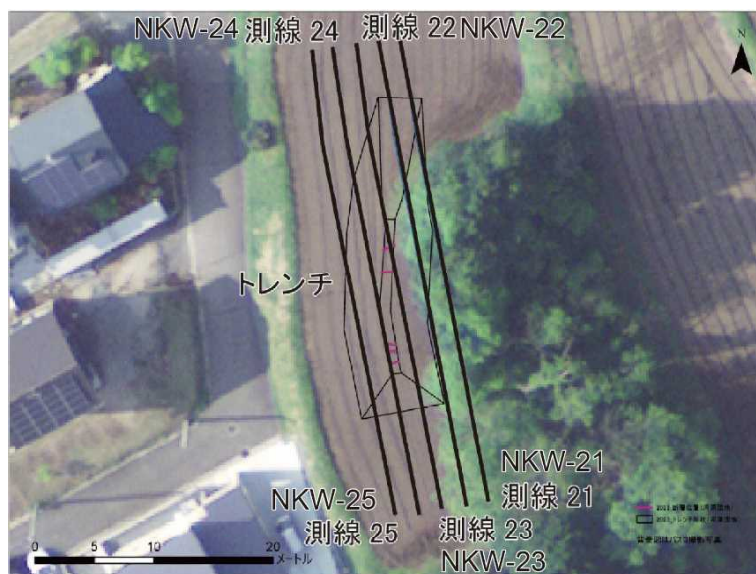


図 2.2.103 探査測線図（NKW-22 測線，再掲）

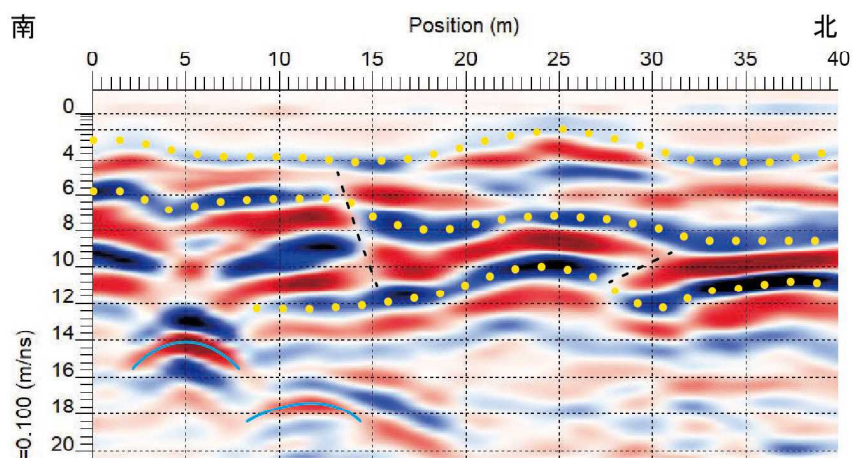
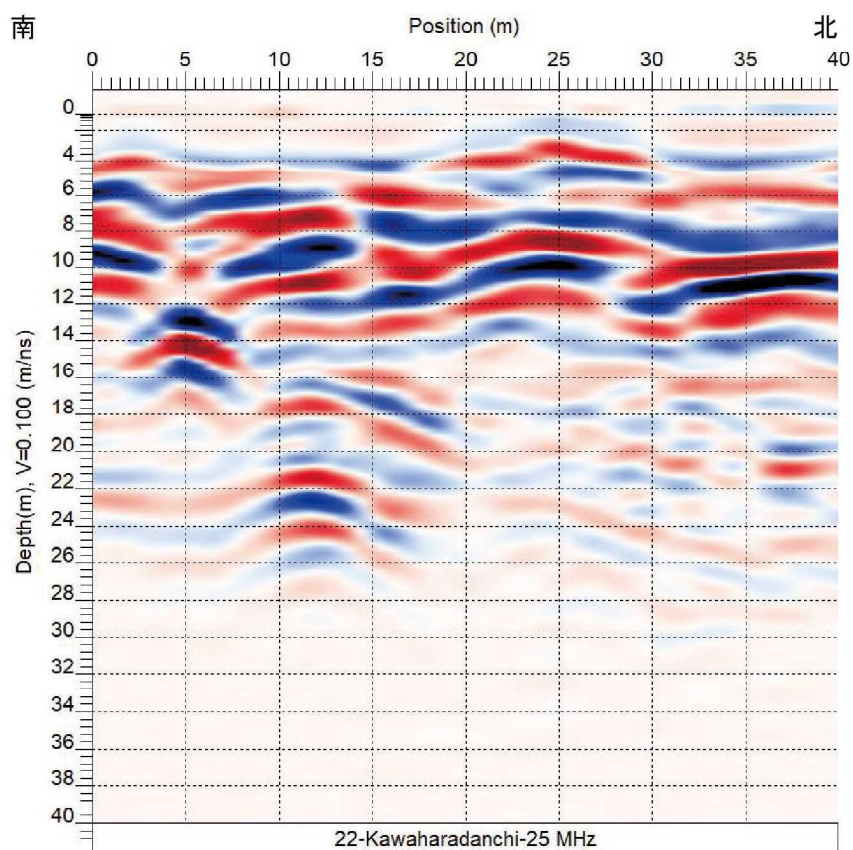


図 2.2.104 NKW-22-25MHz 探査結果（上図：解釈なし，下図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

水色実線：地上構造物や地下埋設物からの反射

下図では減衰の大きい深度 20m 以下の記録を除去した

(8) トレンチ調査結果との比較 (図 2.2.105)

ここでは、トレンチ西側壁面の近傍で実施した NKW-25-50 MHz 測線とトレンチ西側壁面を比較した。反射断面の黒色破線丸印で示した範囲の反射に高度差や不連続がみられる。これらの形状がトレンチ壁面でみられる地層の分布や変形を示しているものと考えられる。

また、測線位置 1-6m・深度 4-16m 付近に反射の不連続や反射強度の違いみられる。

深度 7m 以深では減衰が大きく、測線位置 16-20m の範囲には多重反射がみられるため、地下構造の検討は困難である。

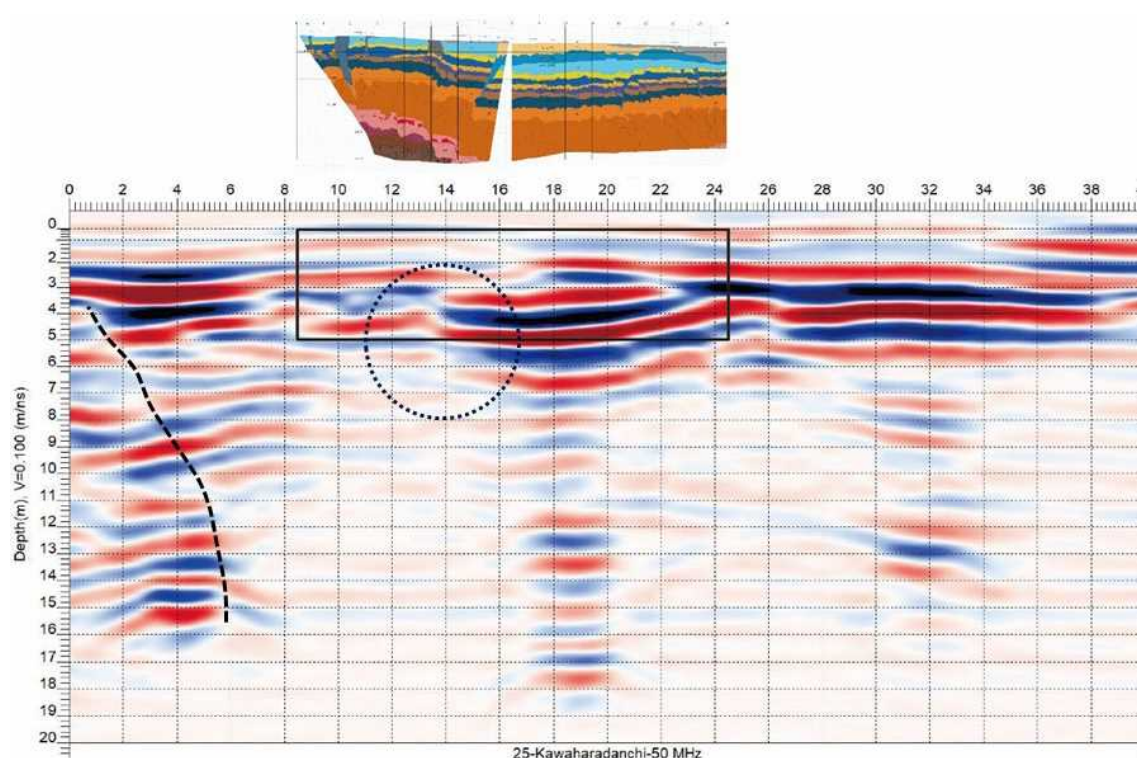


図 2.2.105 探索断面とトレンチ壁面との比較

黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(上図：トレンチ西側壁面，下図：NKW-25-50 MHz 探索結果)

2.2.10. 福原地区

福原地区では、位相不連続ライン、地震時の地表変状位置を横切るように、周波数 50MHz 探査を実施した（図 2.2.106）。測線 21 および 23 については、同一測線上で 25MHz 探査を実施した。測線数は周波数 50MHz では南北測線の 3 測線、東西測線の 4 測線、25MHz では南北測線の 2 測線、計 9 測線である（表 2.2.11）。

探査測線は、想定される変状に対して直交方向および平行方向に設定し、反射記録を取得した後、過年度に実施した探査結果も含めて、3 次元形状把握のための解析手法を検討した。



図 2.2.106 測線位置図（福原地区）

表 2.2.11 探査測線諸元（福原地区）

地点名	測線番号	周波数 (MHz)	測定方法	測線方向	測線長 (m)	アンテナ間隔 (m)	サンプリング間隔 (m)	スタック数	探査方法	備考
益城町福原	MFK - 21	25 50	P	S - N	0.0 - 20.0	4.0 1.0	0.80 0.40	2048	ハンドル	3次元解析実施箇所 R5ボーリング調査実施
	MFK - 22	50	P	S - N	0.0 - 20.0	1.0	0.40	2048	ハンドル	
	MFK - 23	25 50	P	S - N	0.0 - 20.0	4.0 1.0	0.80 0.40	2048	ハンドル	
	MFK - 24	50	P	E - W	0.0 - 4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル	
	MFK - 25	50	P	E - W	0.0 - 4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル	
	MFK - 26	50	P	E - W	0.0 - 4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル	
	MFK - 27	50	P	E - W	0.0 - 4.0	1.0	0.40	2048	ハンドル	

(1) MFK-23-50MHz 測線（測線 23，図 2.2.107）

反射断面では、深度 3-6m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.108）。また、深度 18-19m 付近・深度 23-26m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。

反射の不連続は、不明瞭ではあるが、測線位置 4-8m ・深度 1-4m 付近にみられる。



図 2.2.107 探査測線図（MFK-23 測線，再掲）

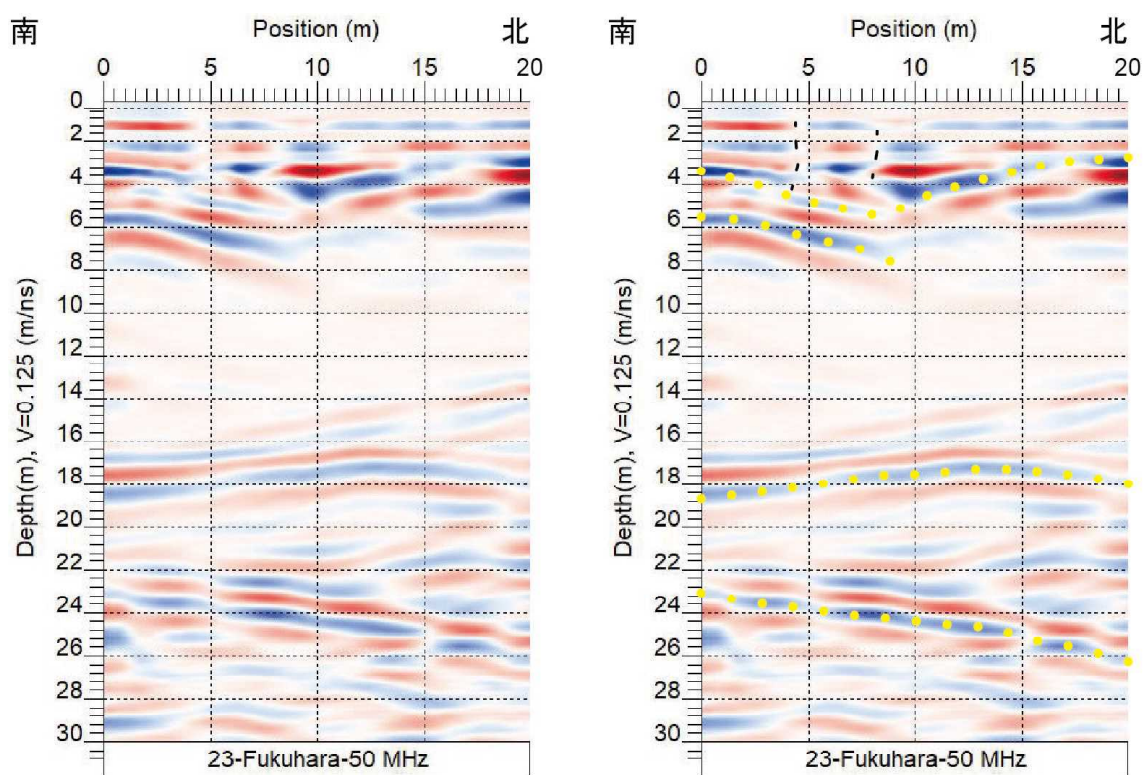


図 2.2.108 MFK-23-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(2) MFK-22-50MHz 測線（測線 22，図 2.2.109）

反射断面では、深度 4-8m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.110）。また、深度 16-18m 付近・深度 21-26m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。

反射の不連続は、不明瞭ではあるが、測線位置 4-10m ・深度 1-4m 付近にみられる。



図 2.2.109 探査測線図（MFK-22 測線，再掲）

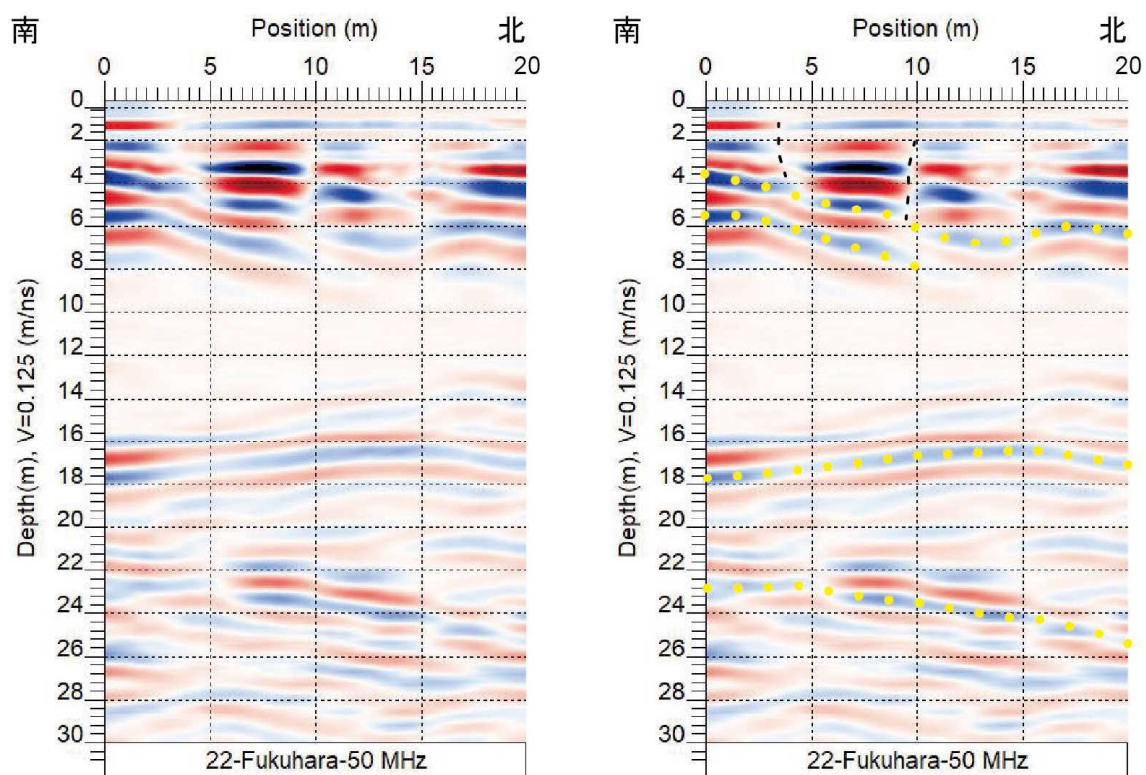


図 2.2.110 MFK-22-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(3) MFK-21-50MHz 測線（測線 21，図 2.2.111）

反射断面では、深度 2-9m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.112）。また、深度 16-17m 付近・深度 22-24m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。

反射の不連続は、不明瞭ではあるが、測線位置 3-4m・深度 1-4m 付近にみられる。



図 2.2.111 探査測線図（MFK-21 測線，再掲）

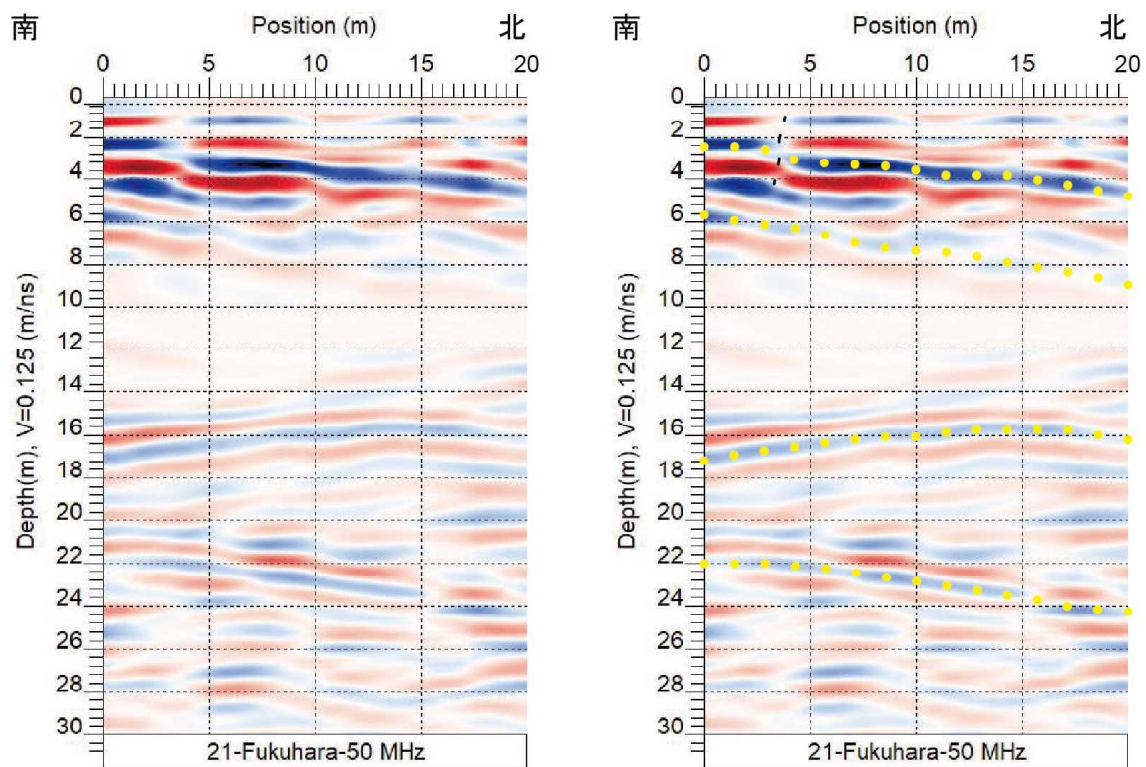


図 2.2.112 MFK-21-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(4) MFK-23-25MHz 測線（測線 23，図 2.2.113）

反射断面では、深度 6-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.114）。また、深度 18-21m 付近・深度 22-25m 付近・25-29m 付近に、反射がみられる。

反射の不連続は、測線位置 5-6m・深度 0-4m 付近にみられる。



図 2.2.113 探査測線図（MFK-23 測線，再掲）

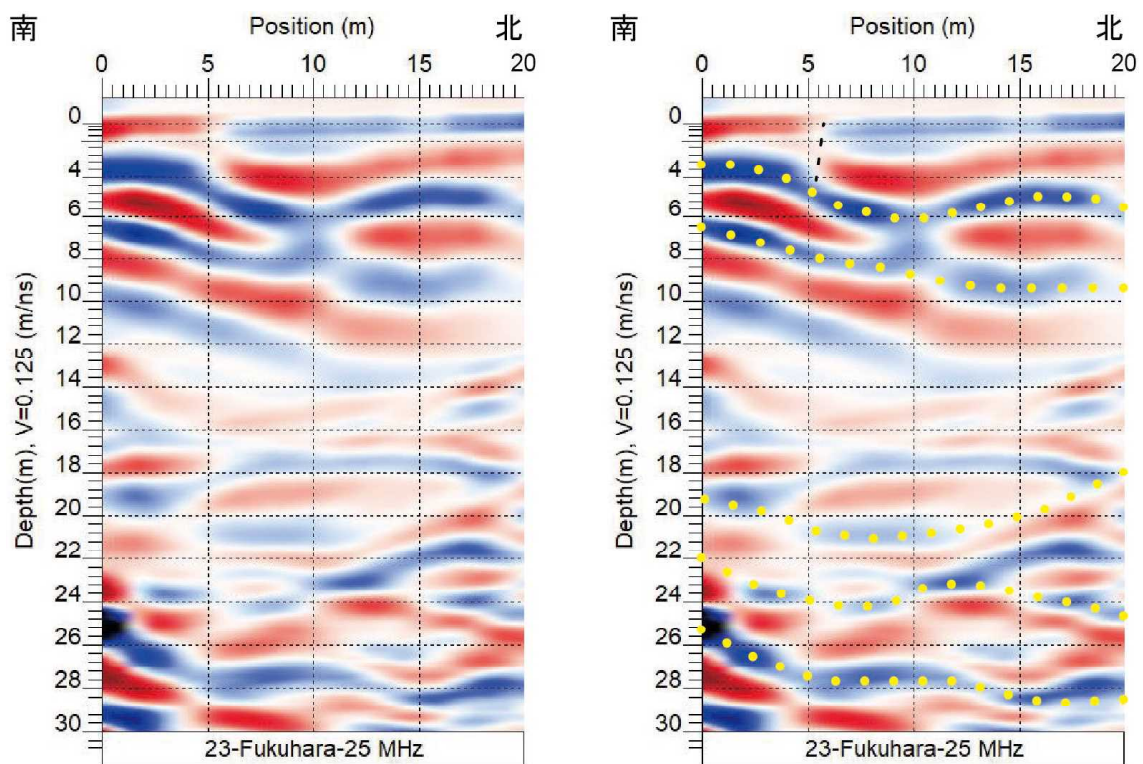


図 2.2.114 MFK-23-25MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(5) MFK-21-25MHz 測線（測線 21，図 2.2.115）

反射断面では、深度 4-10m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.116）。また、深度 16-18m 付近・深度 22-25m 付近・24-27m 付近に、反射がみられる。

反射の不連続は、測線位置 5-10m・深度 0-6m 付近にみられる。



図 2.2.115 探査測線図（MFK-21 測線，再掲）

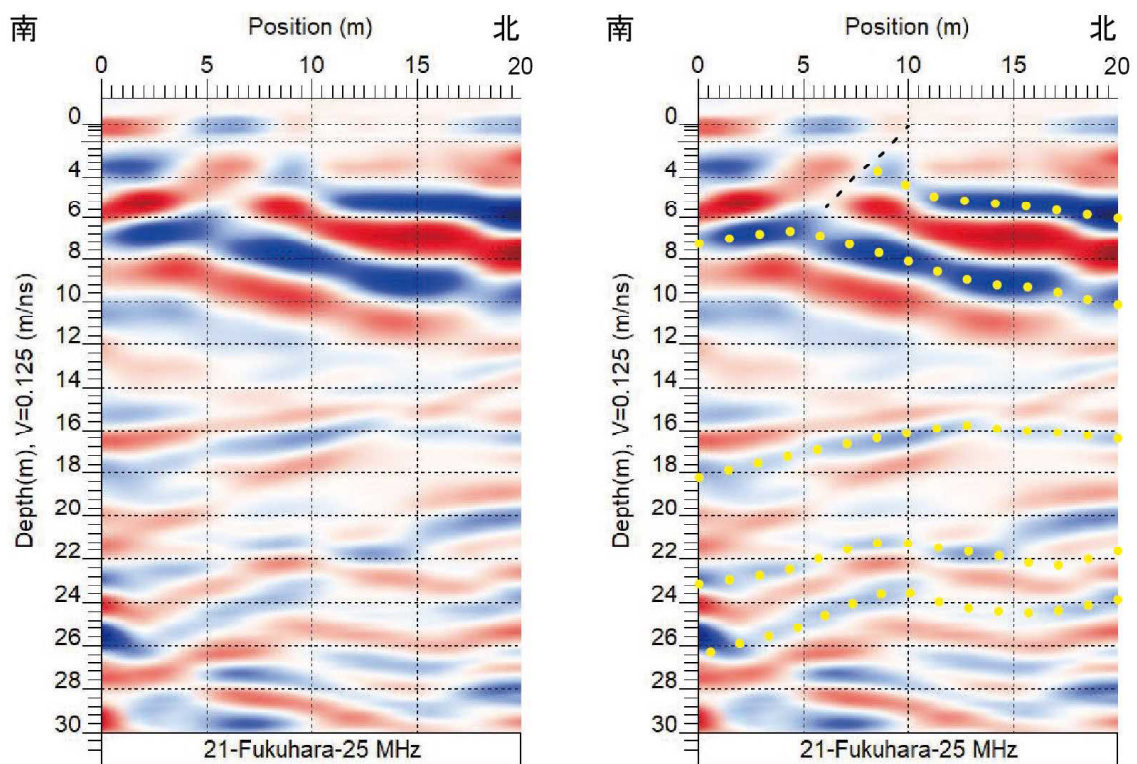


図 2.2.116 MFK-21-25MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）

黄色点線：特徴的な反射 黒色破線：反射の不連続・傾斜変換

(6) MFK-24 測線（測線 24，図 2.2.117）

反射断面では、深度 3-6m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.118）。また、深度 25-26m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。



図 2.2.117 探査測線図（MFK-24 測線，再掲）

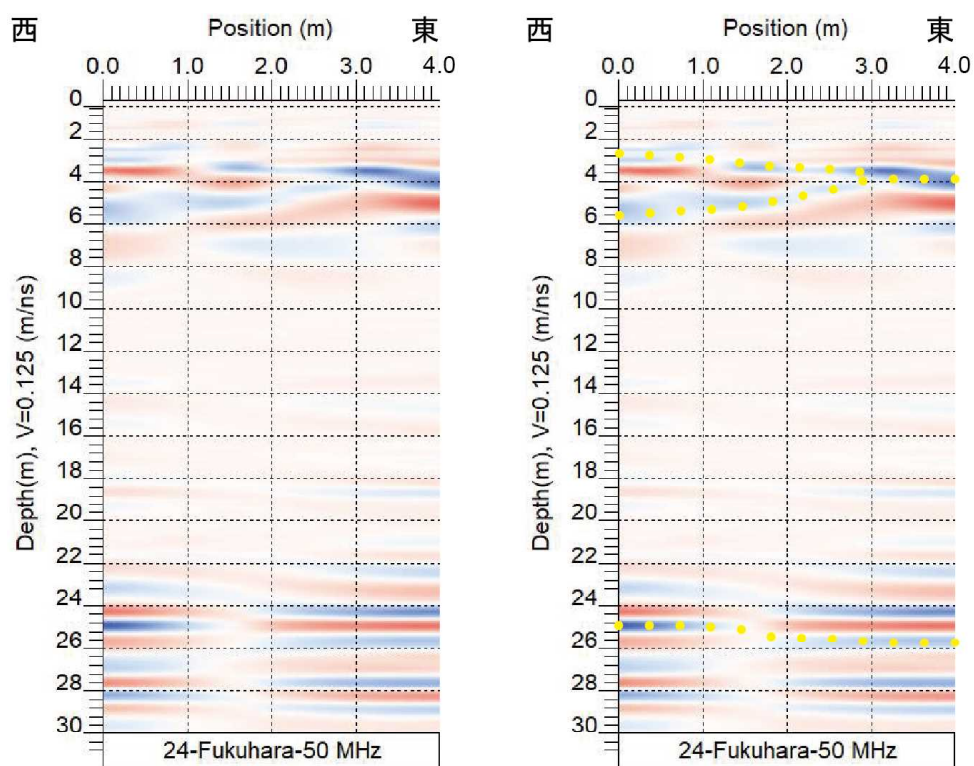


図 2.2.118 MFK-24-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）
黄色点線：特徴的な反射

(7) MFK-25 測線（測線 25，図 2.2.119）

反射断面では、深度 4-7m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.120）。また、深度 26-27m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。



図 2.2.119 探査測線図（MFK-25 測線，再掲）

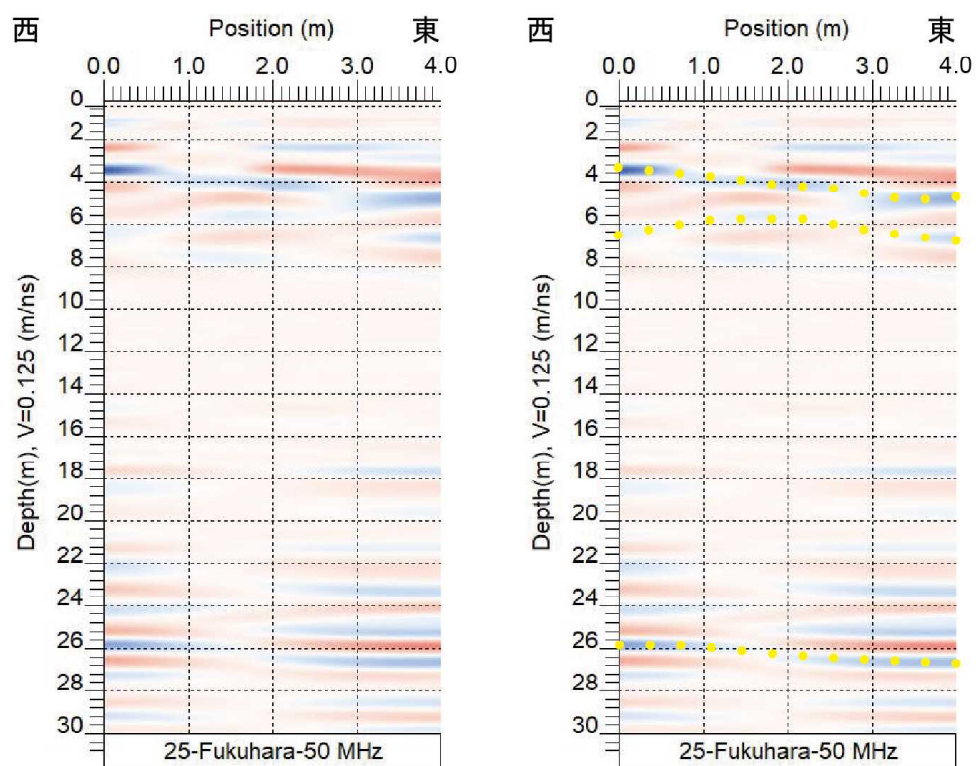


図 2.2.120 MFK-25-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）
黄色点線：特徴的な反射

(8) MFK-26 測線（測線 26，図 2.2.121）

反射断面では、深度 3-7m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.122）。また、深度 28m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。



図 2.2.121 探査測線図（MFK-26 測線，再掲）

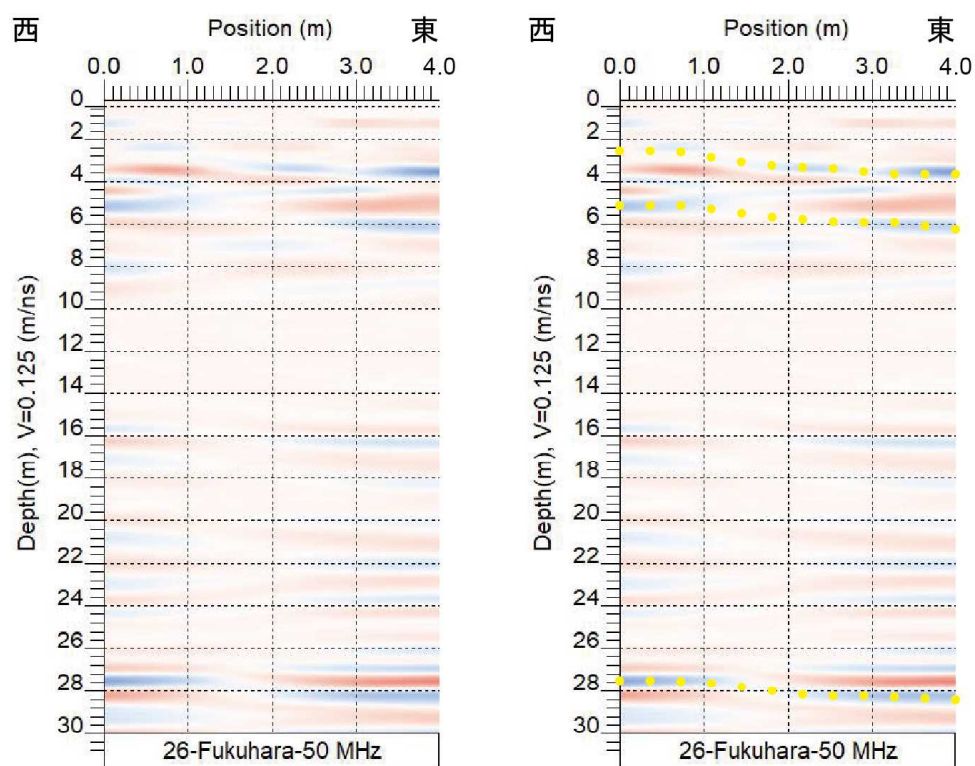


図 2.2.122 MFK-26-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）
黄色点線：特徴的な反射

(9) MFK-27 測線（測線 27，図 2.2.123）

反射断面では、深度 3-7m の範囲で複数の反射が連続して確認される（図 2.2.124）。また、深度 27-28m 付近に、不明瞭ではあるが、反射がみられる。



図 2.2.123 探査測線図（MFK-27 測線，再掲）

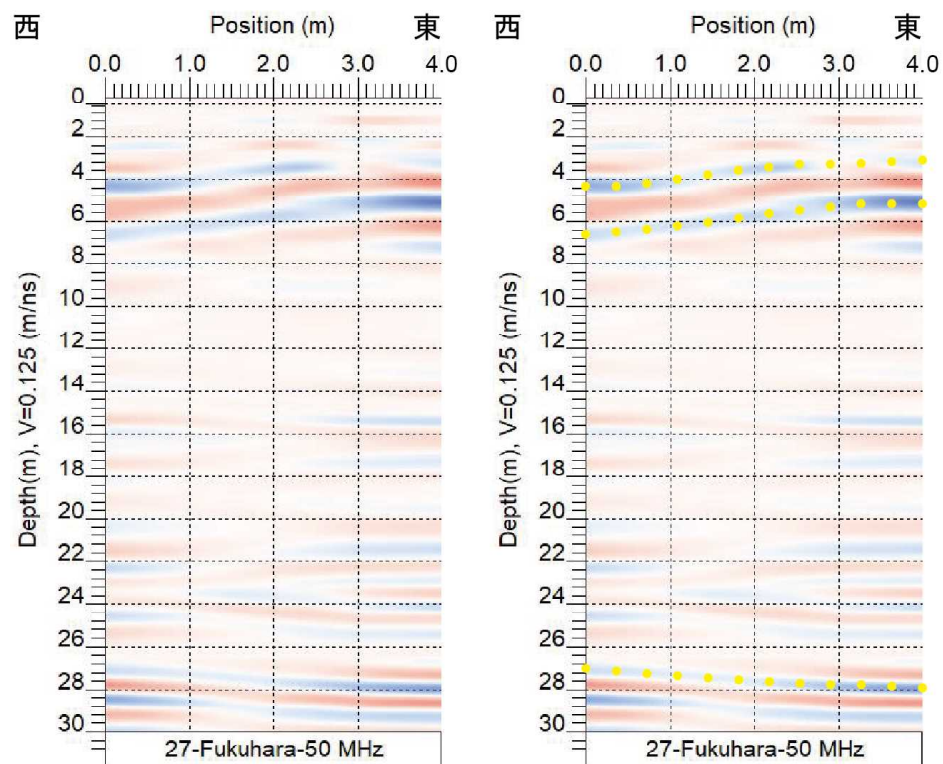


図 2.2.124 MFK-27-50MHz 探査結果（左図：解釈なし，右図：解釈あり）
黄色点線：特徴的な反射

(10) 3次元形状把握のための解析手法検討

取得した探査断面から抽出した特徴的な反射について、その3次元形状を把握するために地下構造モデルを作成した（図 2.2.125、図 2.2.126、図 2.2.127、図 2.2.128）

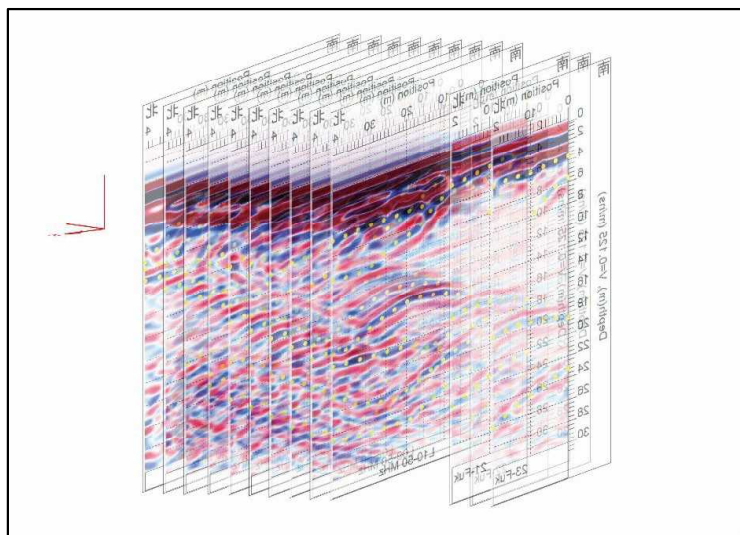


図 2.2.125 パネルダイアグラム（北西から南東方向）

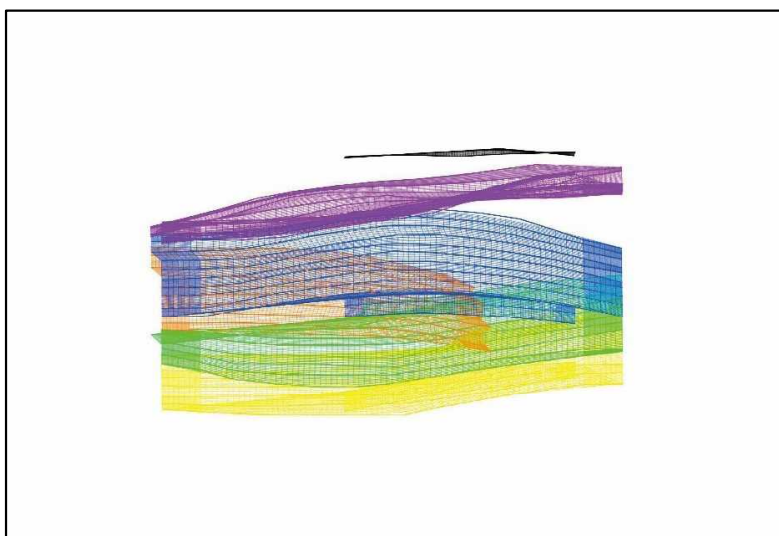


図 2.2.126 反射面のみ（西から東方向）

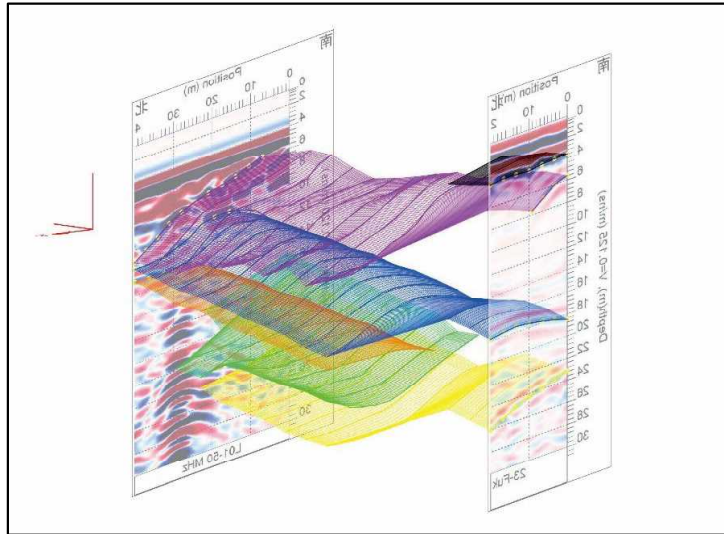


図 2.2.127 調査断面と反射面（北西から南東方向）

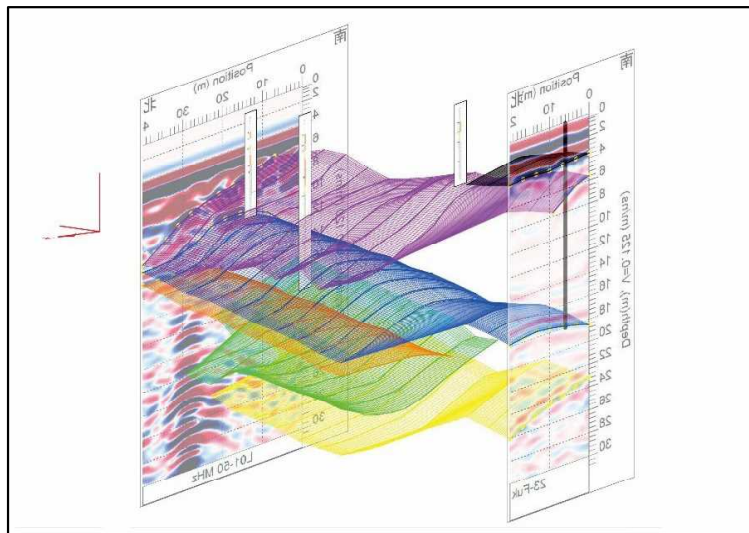


図 2.2.128 調査断面と反射面・ボーリング柱状図（北西から南東方向）

2.2.11. 物理探査による地下構造の検討結果

過年度に実施したトレンチ・ボーリング地点および今年度のトレンチ・ボーリング調査地点を中心に地中レーダ探査を実施した。実施した総測線数は56測線である。用いた周波数帯は100MHz・50MHz・25MHzであり、探査地区での探査目的に応じて、周波数を変更して探査を実施した。

下野地区では、トレンチ調査実施箇所の西側・東側延長部にて100MHz・50MHz・25MHz探査を実施した。100MHz探査では、反射の減衰が大きい、トレンチ壁面でみられる地層の分布や形状、断層による地層の不連続や傾斜変換が探査結果からも確認された。ここで確認されるチャンネル構造より深部の反射記録は減衰が大きく、25MHz探査の結果においても地下構造の検討はできない。

平川馬場地区では、過年度に位相不連続ラインを横断するように地中レーダ探査を実施した。複数の探査記録に反射の不連続が確認されることから、その結果に基づき、トレンチ掘削調査を実施した。トレンチ壁面には断層による変位・変形は認められず、探査結果で確認された反射の不連続は、侵食によって生じた地層境界であると判断された。しかしながら、本地域周辺では2016年熊本地震時の地表変状が確認されていることから、トレンチ掘削範囲の北側または南側に断層が存在することは否定できない。このような理由により、今年度は探査測線を南側・北側に延長して設定し、6測線で追加探査を実施した。その結果、南側の斜面を横断して実施した2測線の探査では、反射の不連続や乱れが確認された。また、地表変状が確認されている箇所を横断して実施した探査の結果では、地表下の反射に明瞭な不連続が確認された。トレンチ掘削範囲を含めて、北側に延長した2測線では、複数の範囲で反射の不連続が確認された。反射の不連続のうち、トレンチ掘削範囲内にある不連続は、トレンチ壁面解釈に基づき断層構造ではなく、河川の侵食などによる地層境界であると判断される。トレンチ掘削範囲外となる探査測線の北側でみられた反射の不連続は、不連続が認められる範囲に位相不連続ラインや地表変状が確認されないこと、北側には河川が流下していることから、河川の侵食によって生じたものと判断し、本調査地点周辺の断層は、南側（山側）に存在する可能性が高いと判断した。

陣内地区は、過年度実施した陣内地区のトレンチ調査位置の北東延長部、岩坂地区はトレンチ調査位置の南西延長部にあたり、位相不連続ラインに一致して構造物が横ずれ変位を示す地点である。また、陣内地区トレンチ調査地点の西側には、地塁状の地形が分布していることから、この地形の成因が、断層変位によって生じたものか、河川侵食によって生じたものかが不明である。この成因を検討するため、陣内地区で3測線、岩坂地区で3測線の探査を実施した。探査結果をみると、想定される変位位置には明瞭な反射の不連続や傾斜変換はできなかった。また、反射の減衰や地上構造物・地中埋設物の影響が想定以上に大きかったため、地下構造を検討するための良好な探査記録を得ることができず、地形成因について検討することが出来なかった。

緑ヶ丘地区は、過年度実施した小園トレンチに分布する位相不連続ラインの南西部にあたる。小園地区のトレンチ調査および地中レーダ探査と同様な地下構造が得られる可能性が高いと判断し、3測線で探査を実施した。それらのうち、OMD-01測線（測線01）・OMD-02測線（測線02）では、50MHz探査・25MHz探査のそれぞれにおいて、明瞭な反射の境界

が複数の反射の連続が確認された。これらの反射は、凹地状の形状をなし、その両縁では複数の反射に不連続や傾斜変換が連続して確認されることから、断層の存在や複数の地震イベントによる累積変位が推定される。OMD-01 測線（測線 01）沿いで実施したボーリング調査結果および活断層の有無や動性に関する検討は、「2.3. ボーリング調査による地質構造の検討 2.3.2. 緑ヶ丘地区」にて行う。

河原団地地区では、光学画像相関解析結果や 2016 年熊本地震直後に撮影された空中写真から地表変状が確認されている。それらの変状位置に直交・平行するように探査測線を設定し、各断面の 2 次元解析をするとともに、抽出した特徴的な反射から 3 次元モデルを作成し、地下構造の検討をおこなった。実施した南北測線・東西測線において、比較的明瞭な比較的明瞭な複数の反射が連続して確認された。これらの反射には、測線ごとに位置や深度が異なるものの、不連続や傾斜変換がみられる。不連続が確認される範囲は、光学画像相関解析結果と地震後の空中写真で確認される変状位置と概ね一致することから、断層の存在が推定される。また、探査箇所 の西側延長部にあたる平坦地でトレンチ掘削調査に先立ち 50MHz 探査 5 測線、25MHz 探査 2 測線を実施した。探査結果をみると、深度 4m 以浅では、比較的明瞭な反射の連続が確認され、これらの反射に不連続や傾斜変換が確認される。しかしながら、深度 4m 以深では反射の減衰が大きく、かつ双曲線状の反射や多重反射が多くみられる。探査後に掘削されたトレンチ壁面と 50MHz 探査結果を比較すると、トレンチ壁面で確認される明瞭な断層変位は確認されないものの、反射の不連続や高度差が確認される。探査結果でみられる特徴的な反射形状は、トレンチ壁面で確認される地層の分布や断層変位を示しているものと考えられる。

福原地区では、地表変状が確認されている位置の延長上で実施した過年度のトレンチ調査により明瞭な断層が確認されている。また、トレンチ掘削地点を含めて実施した地中レーダ探査結果においても、想定される断層位置と概ね一致する範囲に反射の不連続が確認され、ボーリング調査を実施して断層による横ずれ変位量算出を試みた。今年度は、更なる断層構造解明を目的として、過年度調査箇所 の南西側で追加の地中レーダ探査を実施し、過年度探査結果も含めて特徴的な反射を抽出して 3 次元モデルを作成し、地下構造の検討をおこなった。いずれの探査断面においても、複数の反射の連続が確認され、深度 8-4m 付近に連続する反射には、不連続がみられる。反射の不連続位置は、位相不連続ラインや地表変状位置およびトレンチ調査から推定される断層位置と概ね一致していることから、断層の存在が推定される。横ずれ変位量などの断層の活動性については、「2.3. ボーリング調査による地質構造の検討 2.3.3. 福原地区」にて今年度実施したボーリング調査結果とあわせて検討する。

2.3. ボーリング調査による地質構造の検討

2.3.1. ボーリング調査概要

本事業においてボーリング調査地点として 2 地区（熊本県菊池郡大津町緑ヶ丘地区および同県上益城郡益城町福原地区）を選定し、ボーリング調査を実施した。ボーリング調査地区を図 2.3.1 に、調査内容・数量を表 2.3.1 に示す。

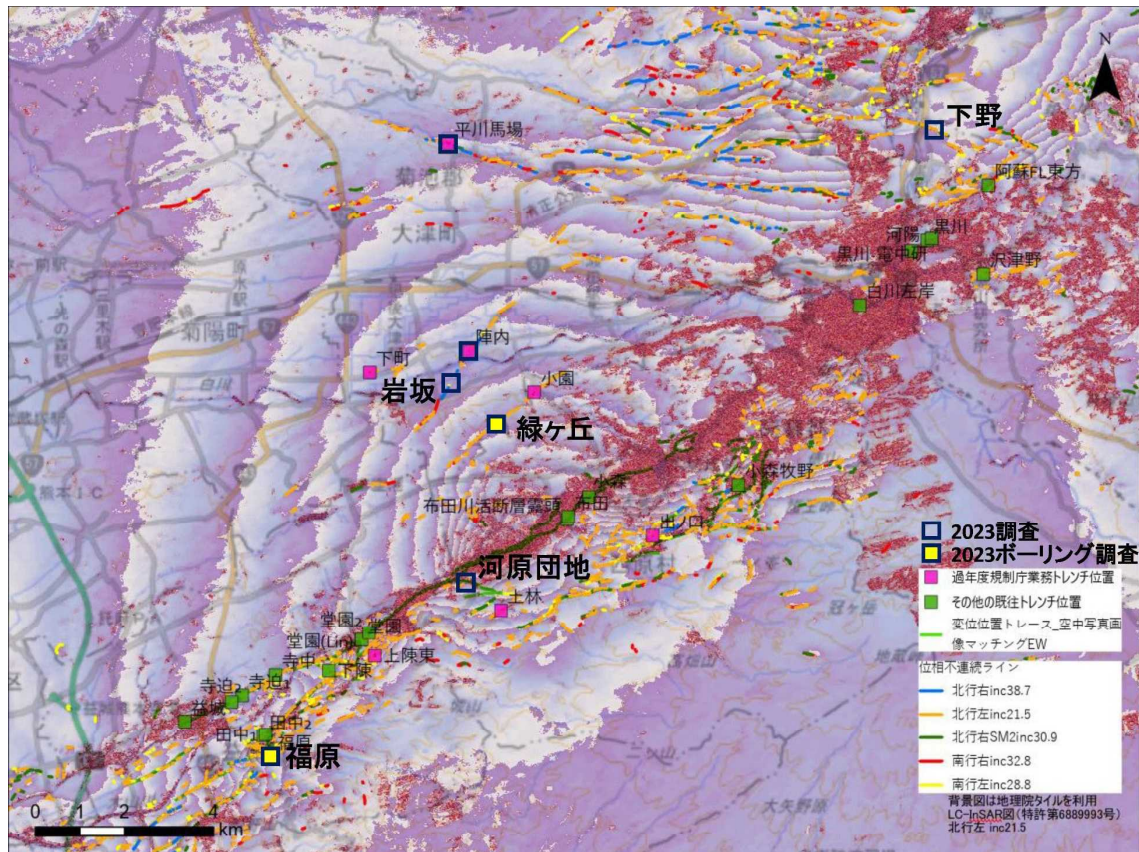


図 2.3.1 ボーリング調査地区概要

表 2.3.1 ボーリング調査内容・数量

地区	調査位置	孔名	調査深度	調査内容
緑ヶ丘地区	小園地区から連続した位相不連続ライン近傍	MO1-02	15.0m	深度方向の地層分布の確認
		MO1-18	21.0m	深度方向の地層分布の確認
		MO1-42	26.0m	深度方向の地層分布の確認
福原地区	既往福原ボーリング位置近傍	FB-4	11.0m	火砕流堆積物（61 層）確認

2.3.2. 緑ヶ丘地区

2.3.2.1. 調査目的・位置

(1) 調査目的

緑ヶ丘地区でのボーリング調査は、小園地区から連続する位相不連続ラインの延長線上で、断層活動イベントの把握を目的に実施した。

(2) 調査位置

ボーリング調査位置は、「2.2 物理探査による地下構造の検討」において実施した GPR 探査結果を参考にして、断層活動による影響が想定される位置およびその前後に設定した（図 2.3.2）。

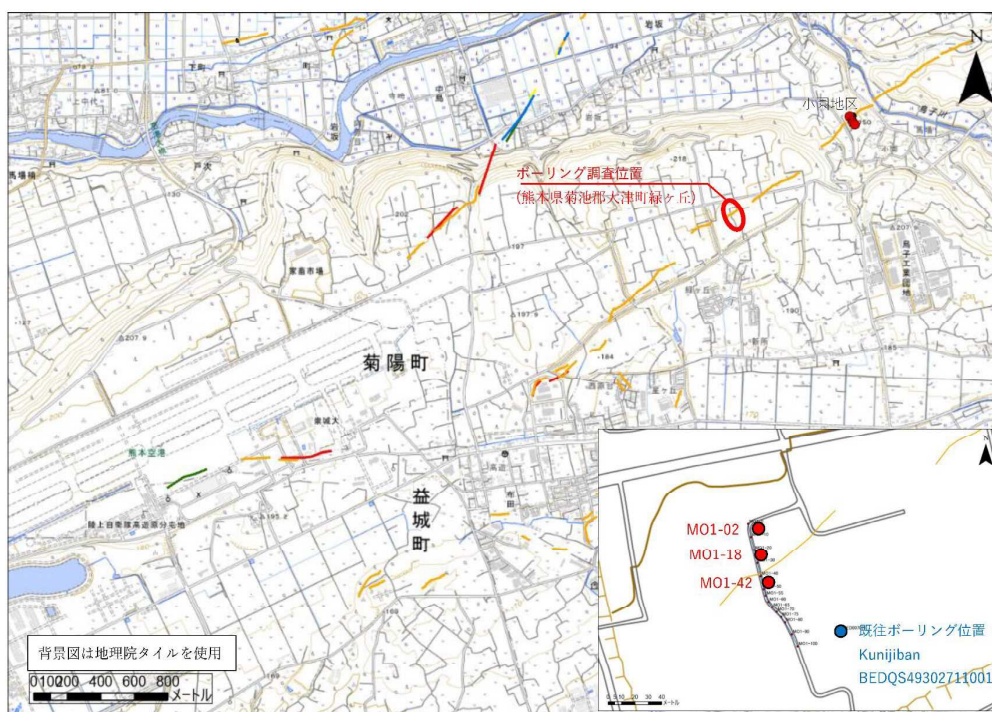


図 2.3.2 ボーリング調査位置図（緑ヶ丘地区）

2.3.2.2. 調査計画

ボーリング調査は GPR 探査結果および既往ボーリング（Kunijiban BEDQS49302711001）をもとに、高遊原溶岩の上面を確認できる深度まで掘削することとし、30m×3 本（φ 86mm、オールコア）で計画した（図 2.3.3）。

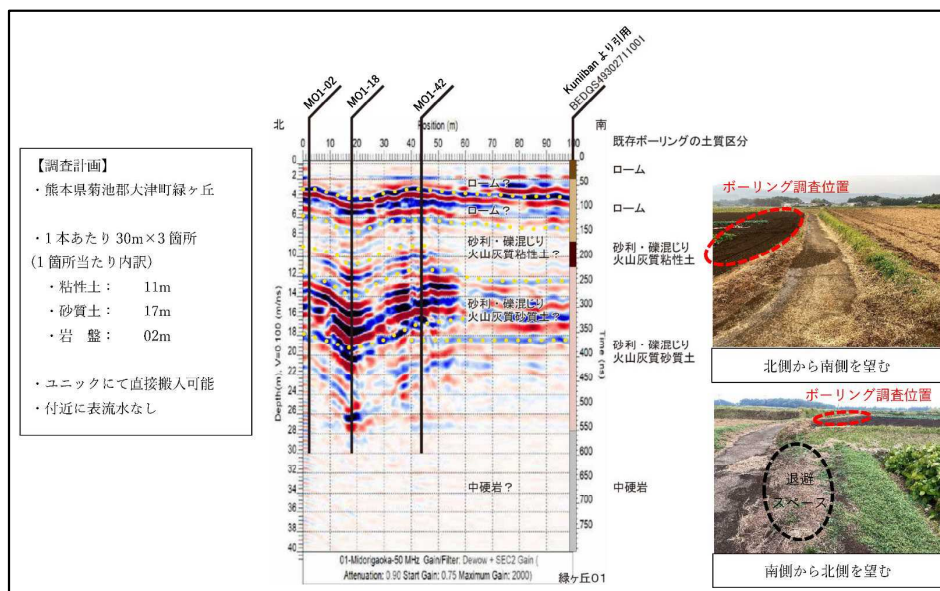


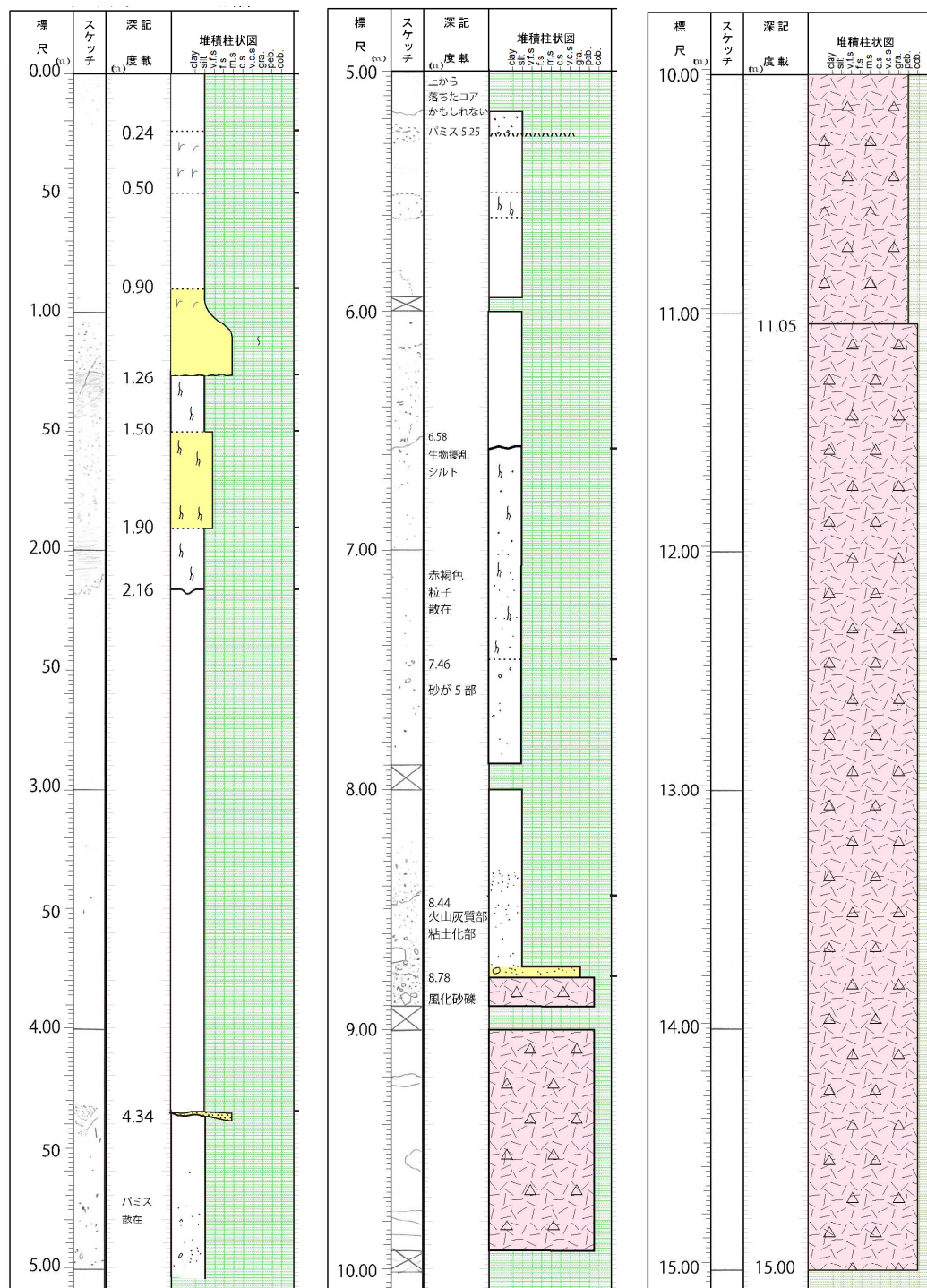
図 2.3.3 ボーリング調査計画図（緑ヶ丘地区）

2.3.2.3. 調査結果

(1) MO1-02

①ボーリングコア記載

ボーリンコアは 1/20 で記載を行い、添付資料に取りまとめて示す。



②ボーリングコア写真

