

## 2.3. 調査地点の地下構造及び副断層の3次元的な形状の検討

過年度事業で実施した副断層位置におけるトレンチ調査位置（福原、土林、陣内、下町、上陳東）（図 2.1.21）及び本業務によるトレンチ調査地点 2 ヶ所（図 2.2.2）を中心に、地中レーダ探査又は表面波探査を実施した。

調査は先行して地中レーダ探査又は表面波探査で広範囲の地下構造を計測し、その後、詳細調査として追加で地中レーダ探査を行い複数の並行した測線及びそれに直角に交わる測線にて断面を取得することで地下構造及び副断層の 3 次元的な形状を検討した。表面波探査は地中レーダ探査と同じ測線で実施することで、地質構造の詳細状況を把握した。

### 2.3.1. 調査概要

#### 2.3.1.1. 地中レーダ探査手法

地中レーダ探査は送信機から地中に電磁波を送信し、地中から反射して戻ってきた電磁波を受信機で取得して解析することにより地下構造を解明する手法である。探査手法には探査測線上を移動しながら計測を行う反射法調査および同一地点で連続して計測を行う CMP 法調査がある。調査イメージ図を図 2.3.1 に、現地において実施した地中レーダ探査状況を図 2.3.2～図 2.3.3 に、作業手順を以下に示す。

- ①調査測線を設定する。
- ②調査測線に沿って、巻尺を展開設置あるいは、チョークやペンを使ってマーキングを行う。
- ③主要点の位置出し測量を実施する。
- ④地中レーダ調査機材を測線沿いに移動させながら微弱な電磁波を地中へと送受信しデータを取得する。
- ⑤現地にて概略の調査結果を確認したのち、次の測線に移動する。

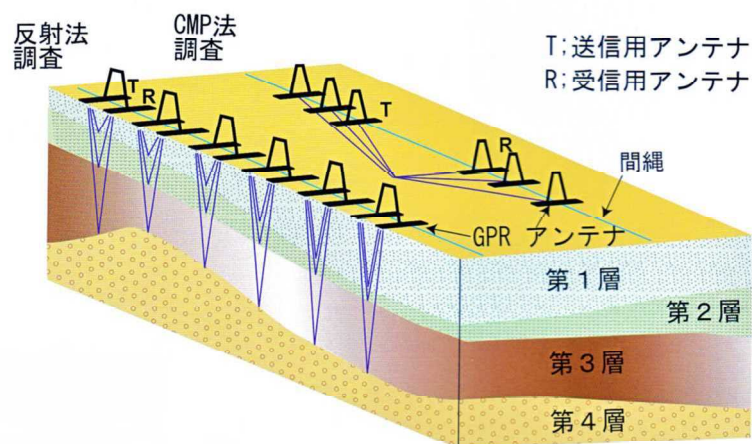


図 2.3.1 地中レーダ探査概念図



図 2.3.2 移動式のカートを用いた方法（使用しているアンテナは 50MHz）



図 2.3.3 手持ちによる方法（使用しているアンテナは 25MHz）

### 2.3.1.2. 表面波探査手法

#### (1) 探査概要

表面波探査は浅部地質構造調査に有効な手法の一つである。地表付近を伝播する表面波は S 波速度に敏感であり、減衰しにくいいため測定が容易である(例えば三浦,2017、林・他, 2001 など)。岩石の堅さと S 波速度には相関性があり、堅い岩石ほど S 波速度が大きくなる。そこで LC-InSAR 等により 2016 年熊本地震の際に地表変状が示唆された箇所では表面波探査を行い、浅部地下構造の検討を行った。

表面波探査は 2021 年 8 月 31 日から 9 月 2 日にかけて実施した。図 2.3.4 に表面波探査の測線一覧図を示す。各測線図を図 2.3.5 から図 2.3.12 に示す。

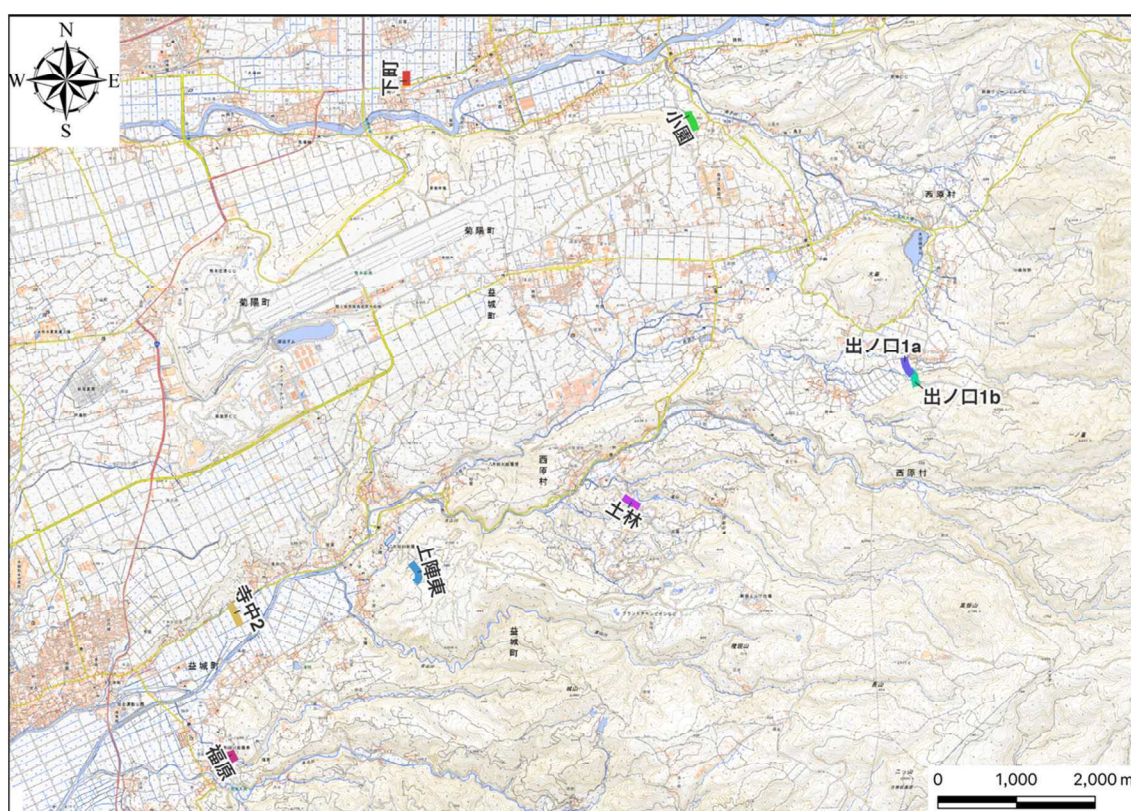


図 2.3.4 表面波探査測線位置一覧図

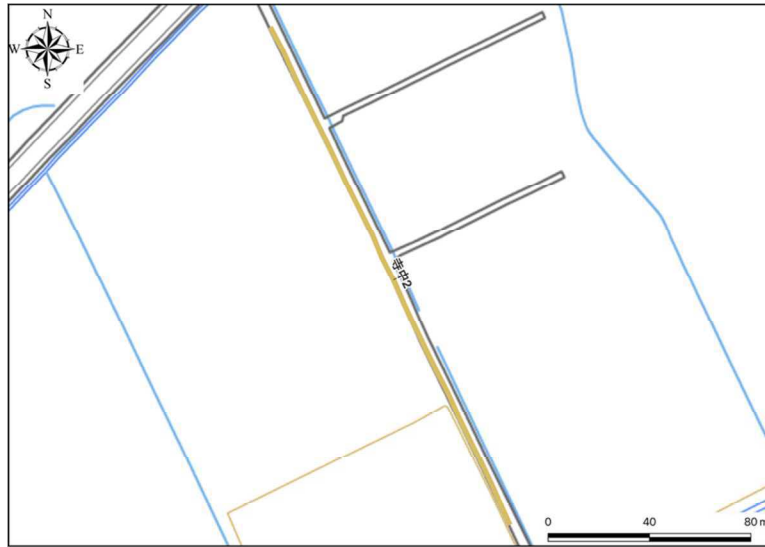


図 2.3.5 寺中 2 測線位置図

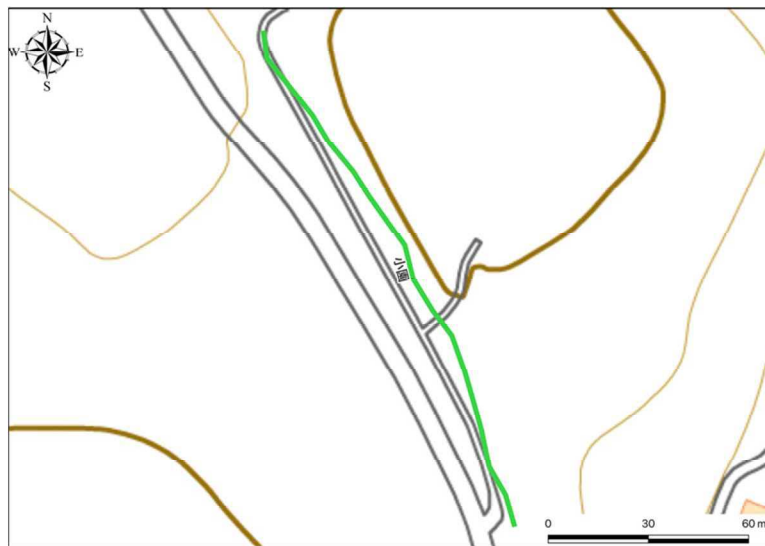


図 2.3.6 小園測線位置図



図 2.3.7 出口 1a 測線位置図

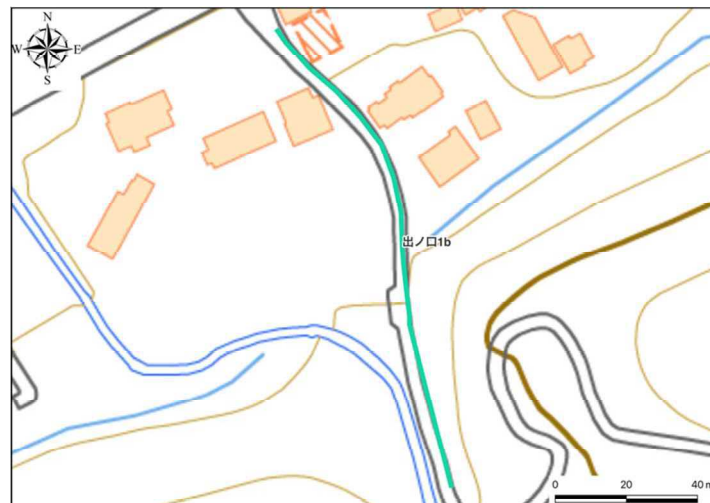


図 2.3.8 出口 1b 測線位置図

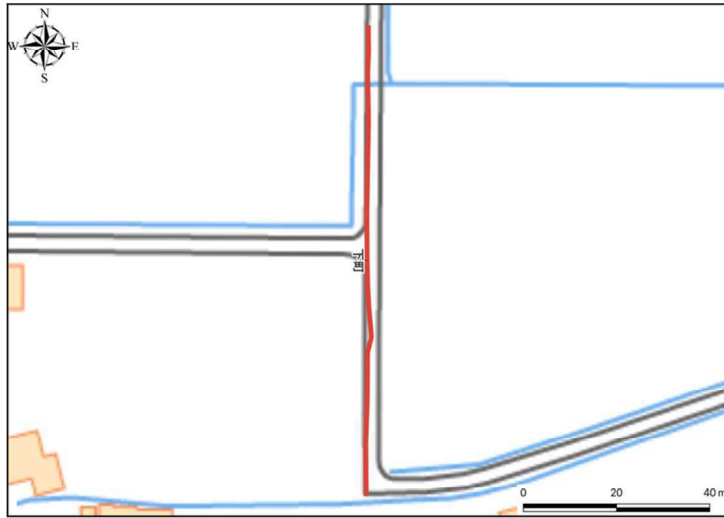


图 2.3.9 下町測線位置図

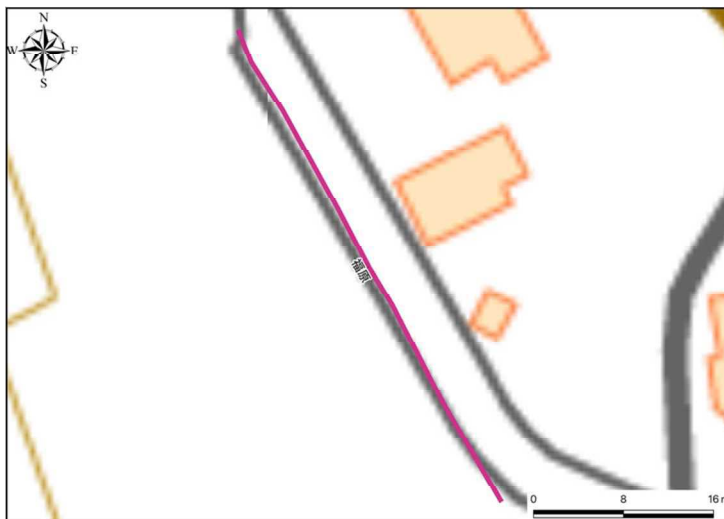


图 2.3.10 福原測線位置図



图 2.3.11 土林測線位置図

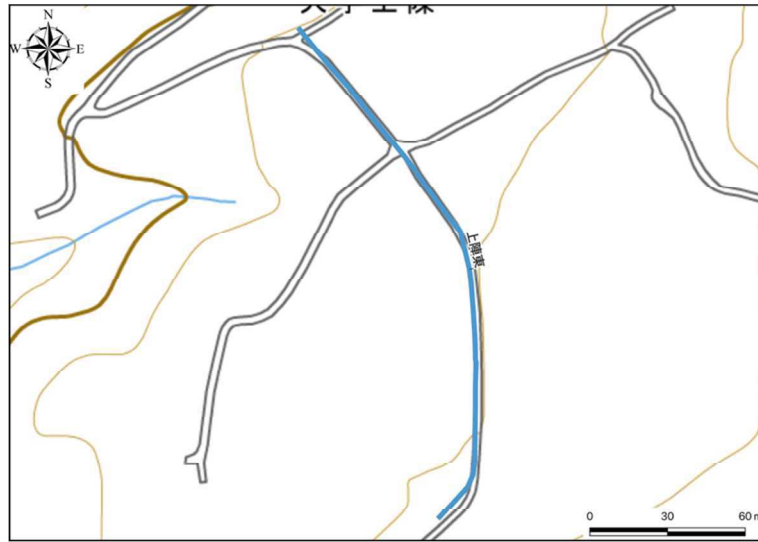


図 2.3.12 上陣東測線位置図

## (2) 測定および解析

探査に使用したシステムを図 2.3.13 (上図) に示す。1 回の測定における測線長は 24ch 分である。24 回起震を行い展開した測線の端部に達したら 12ch 分を移設し、12 回起震するごとに移設を繰り返して測定を行った (図 2.3.14)。表面波探査に使用するレイリー波は周波数によって位相速度が異なる特性をもつ。短い波長は浅部を反映し、長い波長は深部を反映した位相速度を示す。計測したデータから表面波の位相速度を求め (図 2.3.13 下図)、これを説明する地下構造を逆解析により推定する。解析には SeisImager/SW(Geometrics, 2019) を用いた。現地での測定状況を図 2.3.15 から図 2.3.24 まで示す。図 2.3.25 に波形記録例を示す。逆解析に用いた各測線の位相速度曲線を図 2.3.26 から図 2.3.33 に示す。ほとんどの測線の位相速度曲線は低周波側で高速度、高周波側で低速度を示しており、深くなるにつれて速度が増加する傾向にあると思われる。土林測線の位相速度曲線が他の測線の位相速度曲線と比べて複雑なカーブを示している。全体的に高速度で速度変化が複雑な構造をしていると思われる (例えば Tsuji et al.,2012)。

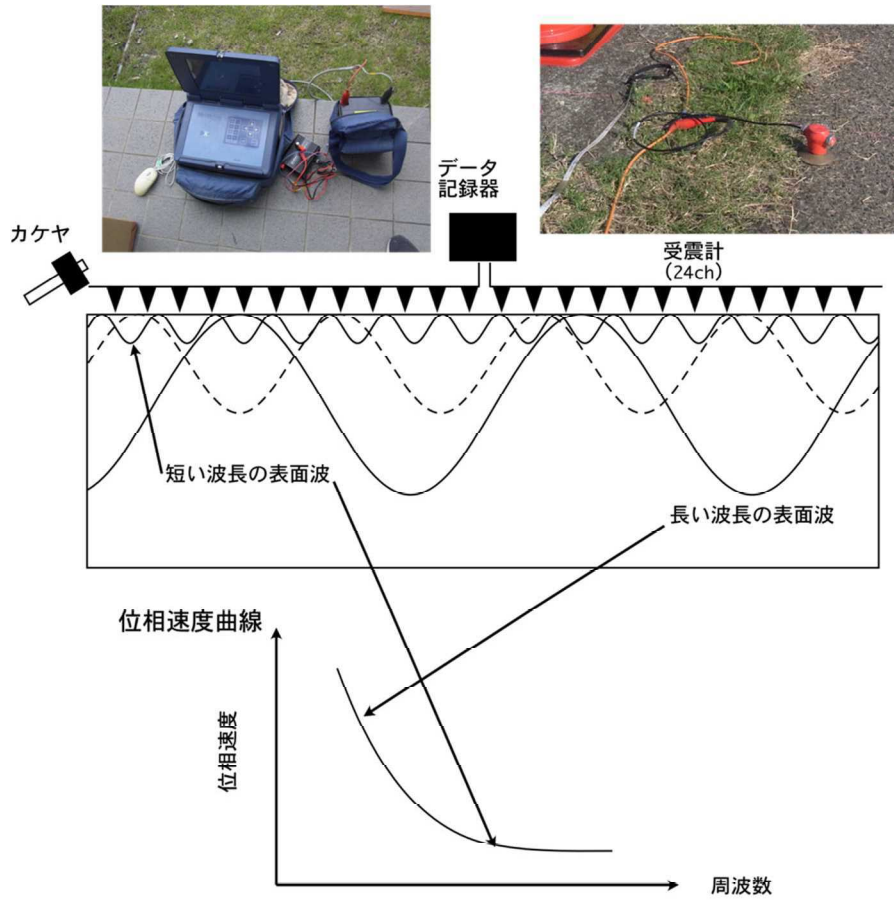


図 2.3.13 測定システム(上)と記録データから得られる位相速度曲線(下)

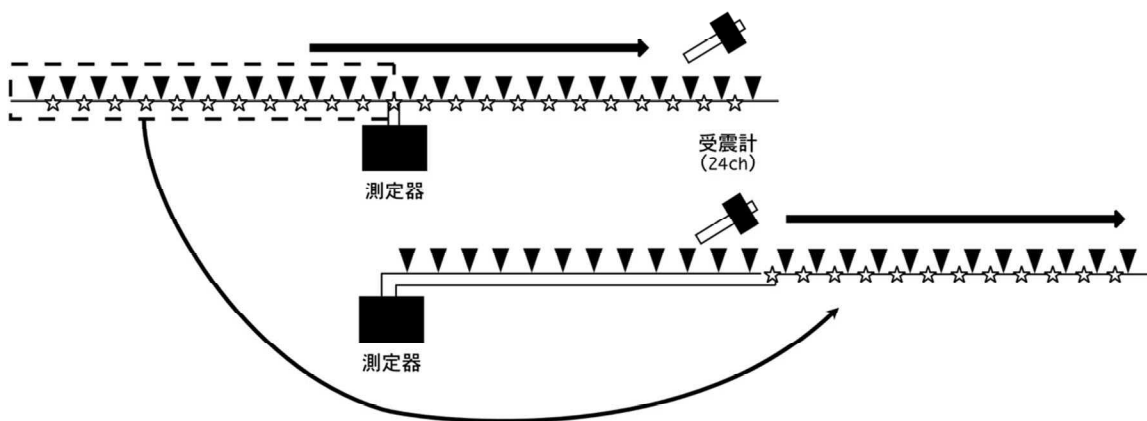


図 2.3.14 表面波探索の流れ





図 2.3.15 寺中 2 測線状況



図 2.3.16 カケヤによる起震の様子



図 2.3.17 起震とデータ収録



図 2.3.18 小園測線状況



図 2.3.19 出ノ口 1a 測線状況



図 2.3.20 出ノ口 1b 測線状況



図 2.3.21 下町測線状況



図 2.3.22 福原測線状況



図 2.3.23 土林測線状況



図 2.3.24 上陣東測線状況

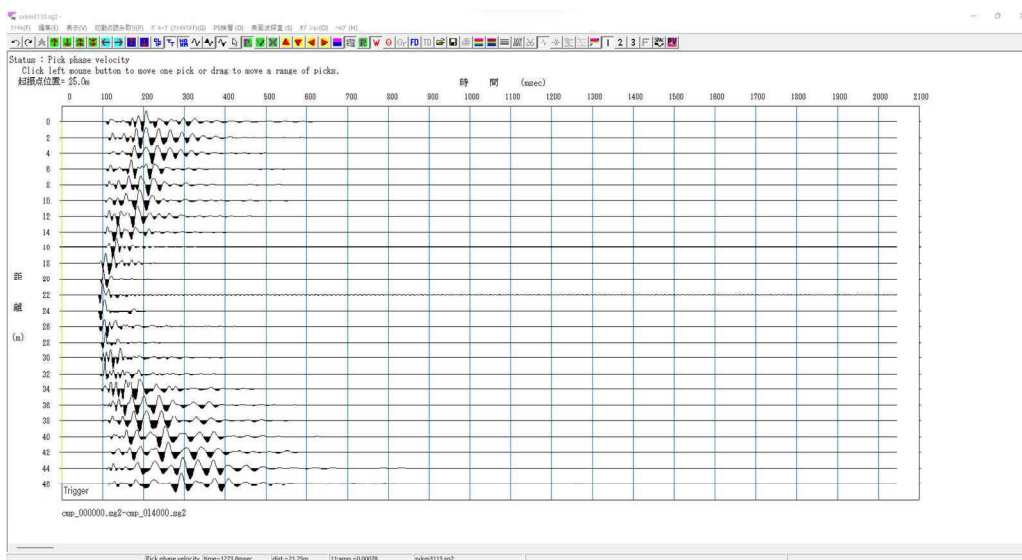


図 2.3.25 記録波形の例(出ノ口 1b 測線)

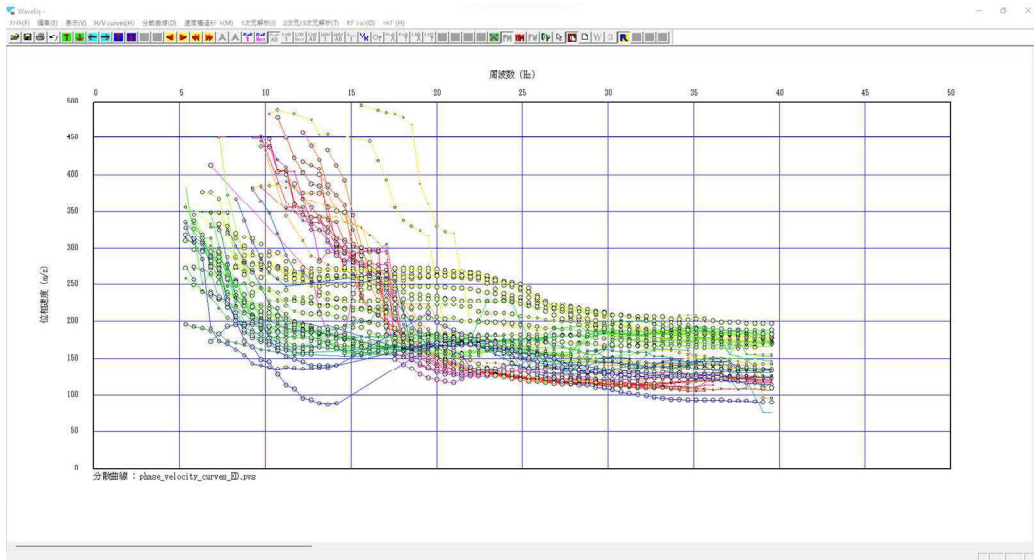


图 2.3.26 位相速度曲线（寺中 2 测线）

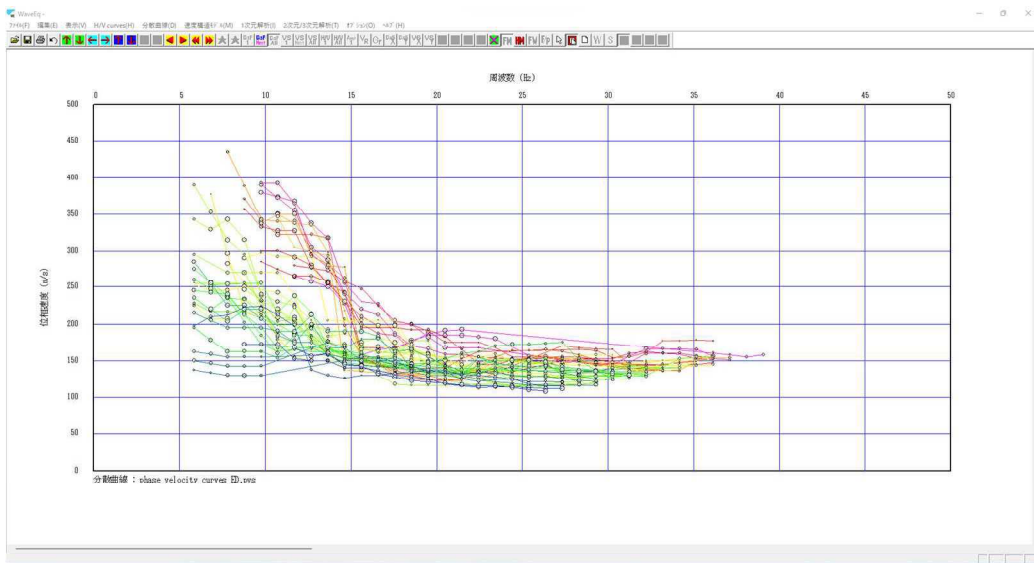


图 2.3.27 位相速度曲线（小圆测线）

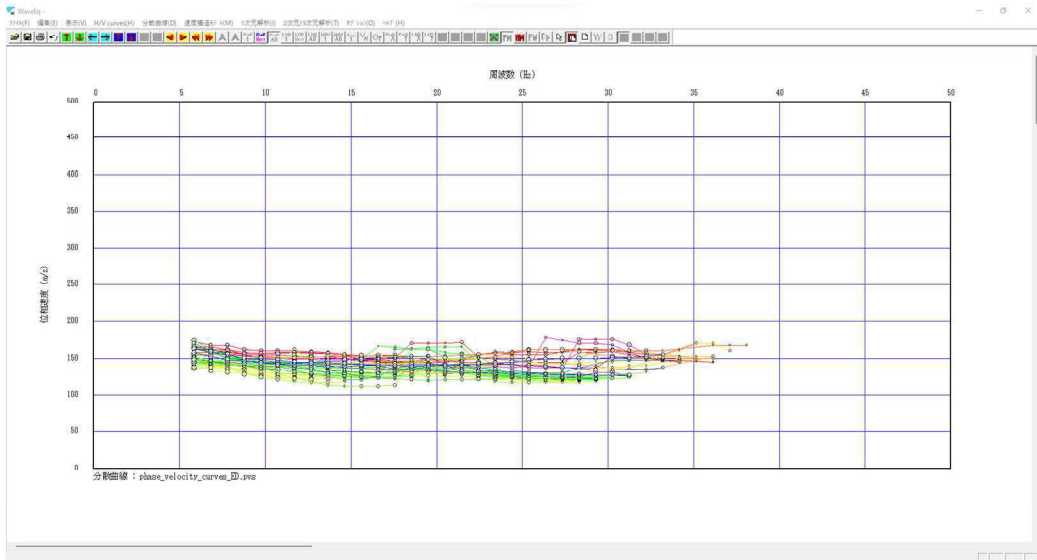


図 2.3.28 位相速度曲線（出ノ口 1a 測線）

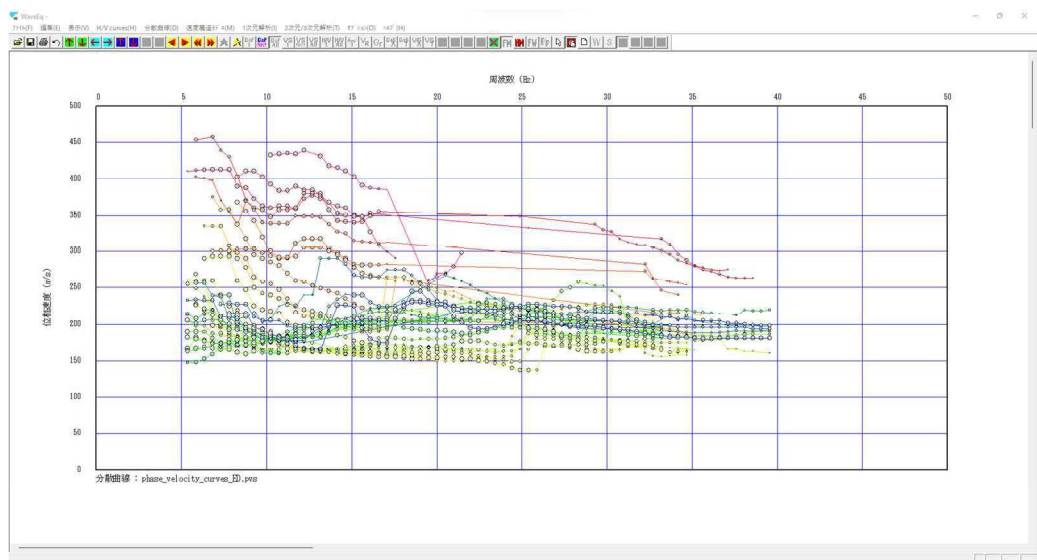


図 2.3.29 位相速度曲線（出ノ口 1b 測線）

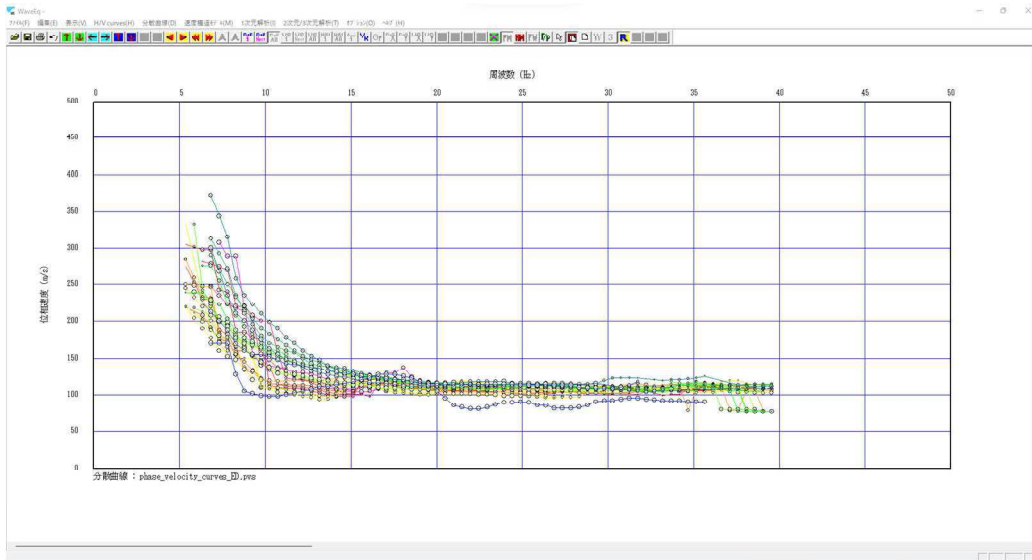


図 2.3.30 位相速度曲線（下町測線）

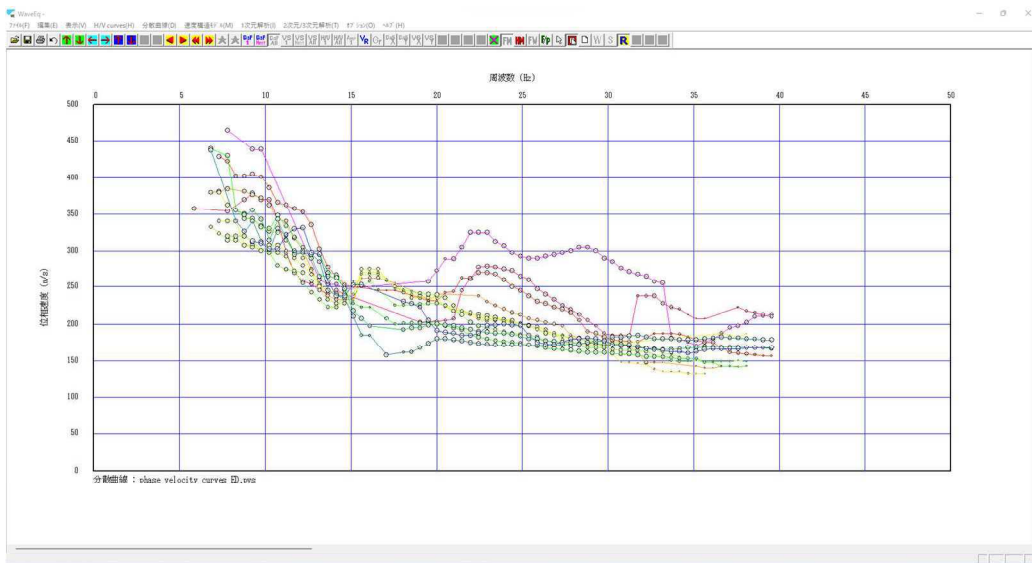


図 2.3.31 位相速度曲線（福原測線）

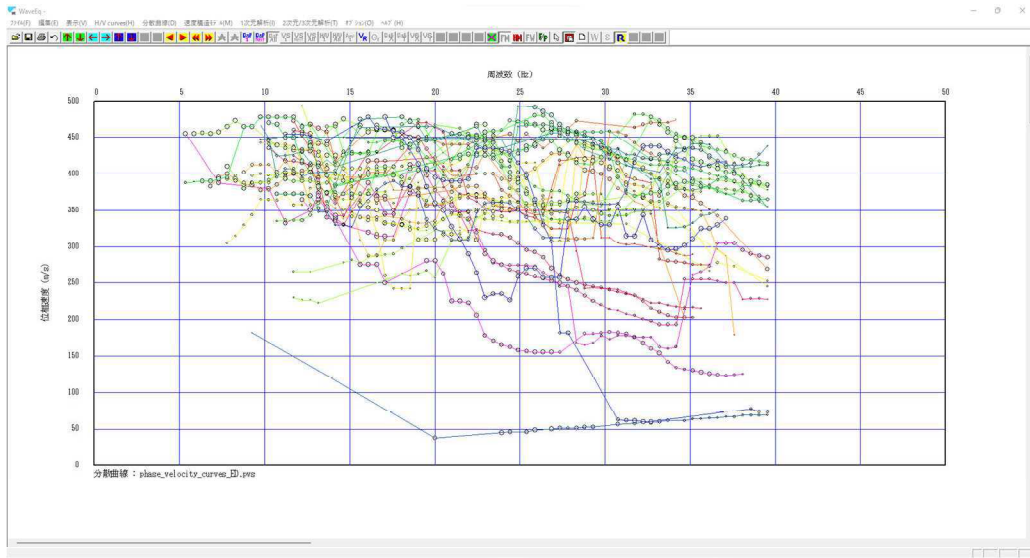


图 2.3.32 位相速度曲线（土林测线）

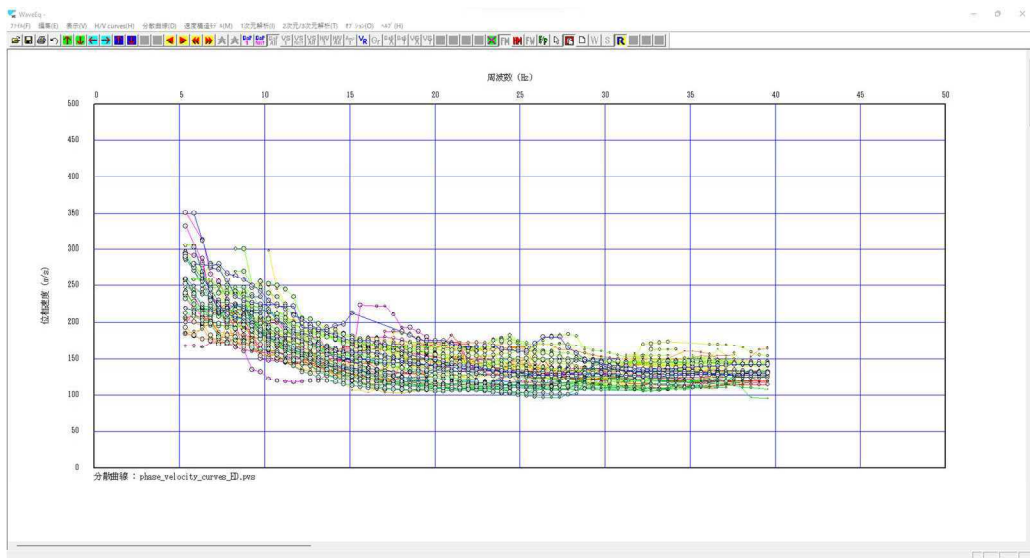


图 2.3.33 位相速度曲线（上陣東测线）



### 2.3.1.3. 使用した機材

本調査で使用した機材を表 2.2.1 に示す。

表 2.3.1 使用機材一式

機 材	仕様・規格	数量	単位
地中レーダ探査機材 ( Sensor &Software 社 pulseEKKO PRO システム)	コントロールパッケージ DVL-500 ウルトラレシーバー Model3200 トランスミッタ pulseEKKO PRO アンテナ 100MHz, 50MHz, 25MHz	1	式
表面波探査機材		1	式

## 2.3.2. 広域の地下構造把握のための調査

### 2.3.2.1. 調査箇所を選定

地中レーダ探査を行う調査箇所は、本事業でのトレンチ調査候補近傍4地域（出ノ口、小園、御船、砥川）、過年度関連事業での既往トレンチ近傍5地域（福原、上陳東、土林、陣内、下町）、他事業での既往トレンチ近傍3地域（寺中、下陳、堂園、宮地）および遠方の変状発生地点近傍3地域（新小屋、宮山、内牧）とした。計測を行った測線数は、25MHzを4測線、50MHzを22測線である。

表面波探査測線は上記計測箇所のうち、速度構造のコントラストが明瞭であると想定される地点とし、出ノ口測線、小園測線、福原測線、上陳東（隣接）測線、土林測線、下町測線および寺中2測線において計7測線の計測を行った。

調査測線を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 調査測線一覧

調査位置		トレンチ調査		物理探査			
地区	測線名	2021 候補	既往	調査対象	断層種別	地中レーダ探査	表面波
				探査実施前の考察	主	25MHz 20m	50MHz 10m
出ノ口	出ノ口	○		主断層 (出ノ口断層；正断層系) 近傍の副断層 (左横ずれ) 画像マッチング解析結果図・空中写真で明瞭に確認される	○	○	○
小園	小園	○		主断層から離れた位置の副断層 Lc-InSAR図で明瞭に確認される	○	○	○
御船	御船	○		画像マッチング解析結果図・Lc-InSAR図で確認される	○	○	○
砥川	砥川	○		画像マッチング解析結果図・Lc-InSAR図で確認される 地下水位が高いため反射波は明瞭でない可能性が高い	○	○	○
福原	福原		○	阿蘇火砕流堆積物の断層による変位の検出が期待される	○	○	○
	福原 (メイントレース)			補足測線：トレンチ位置から主断層位置まで延長、主-副の関係を把握	○		
上陳東	上陳東		○	阿蘇火砕流堆積物の断層による変位が期待される	○	○	○
	上陳東 (隣接)			補足測線：直線的に計測可能な隣接測線	○		
士林	士林		○	斜面堆積物の断層による変位の検出が期待される	○	○	○
陣内	陣内		○	阿蘇火砕流堆積物の断層による段差地形の検出が期待される	○	○	○
下町	下町		○	段丘面の断層による変位と、トレンチで確認されていない深部の断層構造の検出が期待される	○	○	○
寺中	寺中2		(堤)	主断層トレースのステップ部におけるグラベン構造の検出が期待される	○	○	○
	寺中1 (西側ステップ部)			補足測線：主断層トレースのステップ部におけるグラベン構造の検出	○		
下陳	下陳1 (下陳～三竹)		(電中研)	主断層間の副断層の地下構造の検出が期待される	○	○	○
	下陳2 (三竹～堤橋)			補足測線：トレンチ位置から主断層位置まで延長、主-副の関係を把握	○		
堂園	堂園1 (農道)		(Lin/中田)	副断層との比較のため、主断層トレースの地下構造を把握する	○	○	○
	堂園2 (道路)		(Lin/中田)	副断層との比較のため、主断層トレースの地下構造を把握する	○	○	○
宮地	宮地		(石村)	副断層ではあるが、阿蘇カルデラ内であり他の地点と離れているため、比較がやや難しい	○	○	○
新小屋	新小屋			遠方の副断層 (東西走向)	○	○	○
宮山	宮山			地盤流動原因の把握			
内牧	内牧1 (道路)			断層あるいは地盤流動原因の把握			
	内牧2 (商業施設)			断層あるいは地盤流動原因の把握			

2021トレンチ候補測線  
 既往トレンチ測線 (過年度関連事業)  
 既往トレンチ候補 (他事業)  
 補足測線  
 その他の測線

### 2.3.2.2. 表面波探査結果

逆解析より得られた S 波速度断面を図 2.3.34 から図 2.3.41 に示す。ほとんどの測線で深くなるにしたがい S 波速度は速くなる傾向にある。寺中 2 測線 (図 2.3.34) は北西側に高速度領域がみられる。地表で変状が確認されたところにむかって低速度層が厚くなる傾向を示す。小園測線 (図 2.3.35) は極表層は低速度層で覆われている。低速度層の下部は南側では高速度を示すのに対して、北側では低速度領域が厚く広がっているのがみとめられる。低速度層が厚くなる付近で LC-InSAR による位相不連続箇所がみられる。出ノ口 1a 測線 (図 2.3.36) は全体的に低速度となっているため、全測線と同じ S 波速度スケールで示すと、ほとんどコントラストがみとめられない。そこで、より狭い速度範囲のスケール (図 2.3.42) にすると、地表で変状がみられた周辺では比較的 low 速度層が厚くなっているようにみえる。出ノ口 1b 測線 (図 2.3.37) は山側の南で高速度領域となっているが、地表が急勾配となる付近で低速度の領域になっている。下町測線 (図 2.3.38) と福原測線 (図 2.3.39) は現地との関係で測線長を長くすることができず、得られた S 波速度構造にも明瞭な側方変化はみられない。士林測線 (図 2.3.40) は全体的に高速度で側方変化も大きい。地表変状が観察された付近でやや低速度になっている。上陣東測線 (図 2.3.41) は下町測線 (図 2.3.38) や福原測線 (図 2.3.39) 同様に明瞭な S 波速度の側方変化はみられなかった。

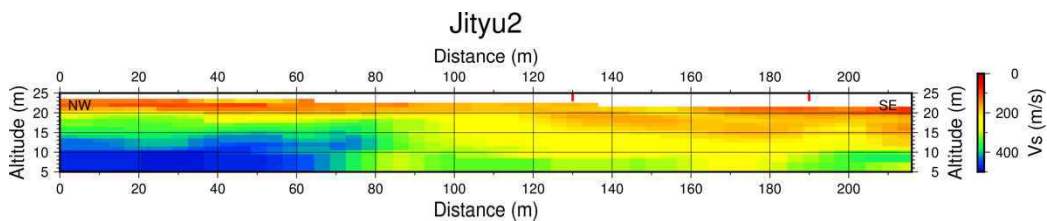


図 2.3.34 寺中 2 測線 S 波速度断面。赤実線は地表に変状が確認された箇所。

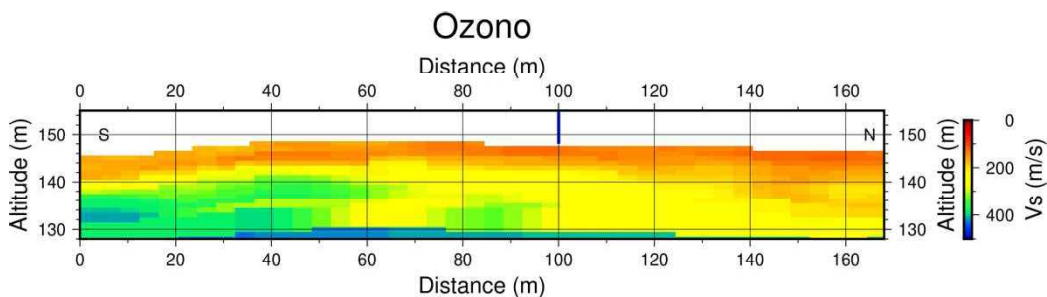


図 2.3.35 小園測線 S 波速度断面。青実線は LC-InSAR による位相不連続箇所。

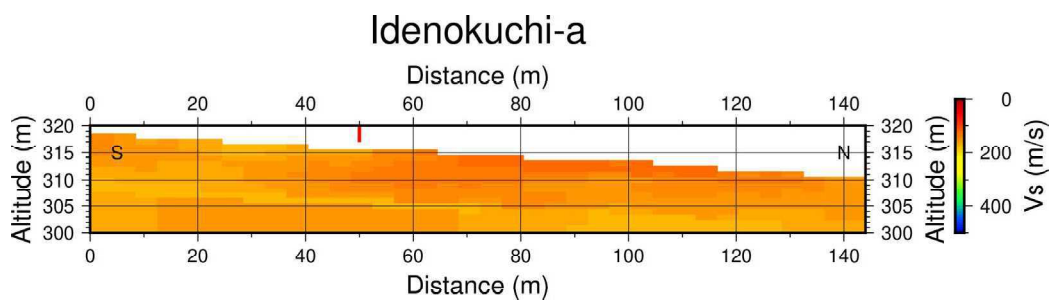


図 2.3.36 出ノ口 1a 測線 S 波速度断面。赤実線は地表に変状が確認された箇所。

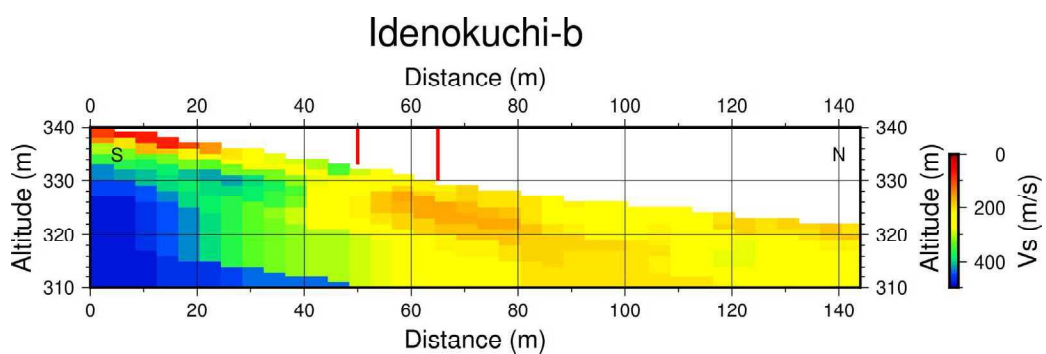


図 2.3.37 出ノ口 1b 測線 S 波速度断面。赤実線の間は地表の急勾配箇所を示す。

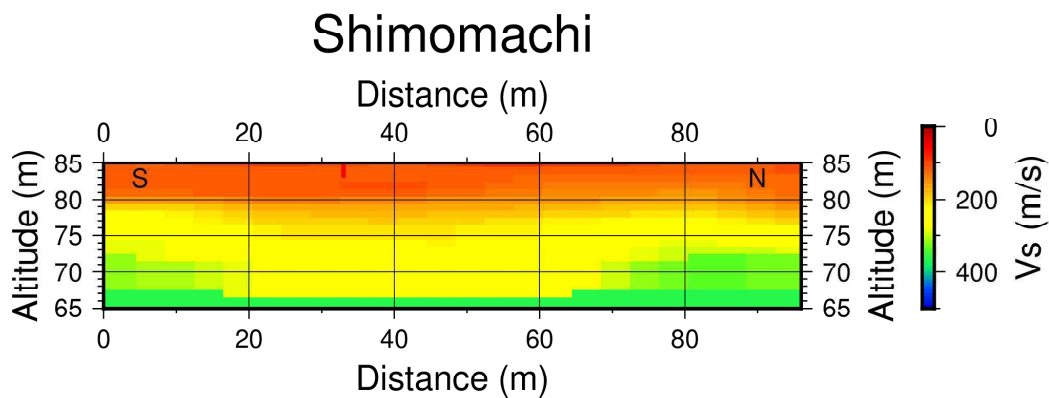


図 2.3.38 下町測線 S 波速度断面。赤実線は地表に変状が確認された箇所。

## Fukuhara

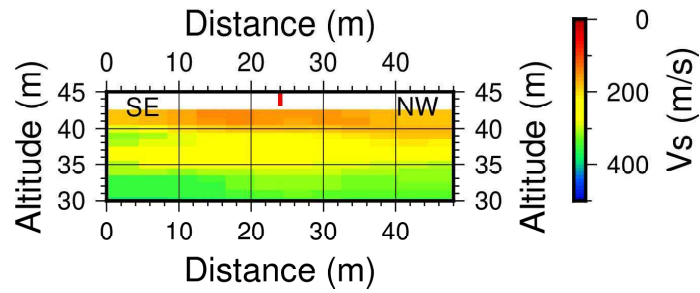


図 2.3.39 福原測線 S 波速度断面。赤実線は地表に変状が確認された箇所。

## Tsuchibayashi

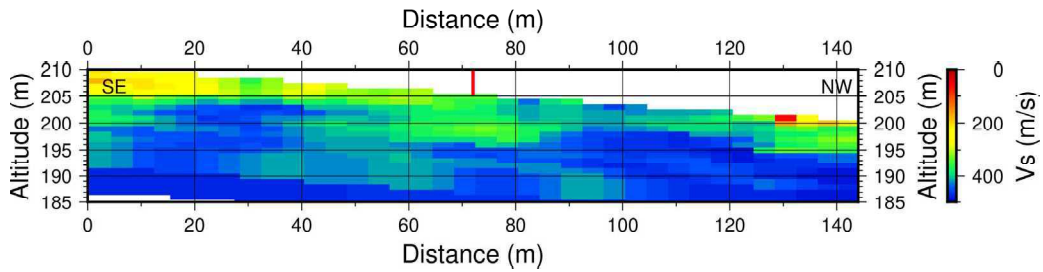


図 2.3.40 土林測線 S 波速度断面。赤実線は地表に変状が確認された箇所。

## Shimojin1

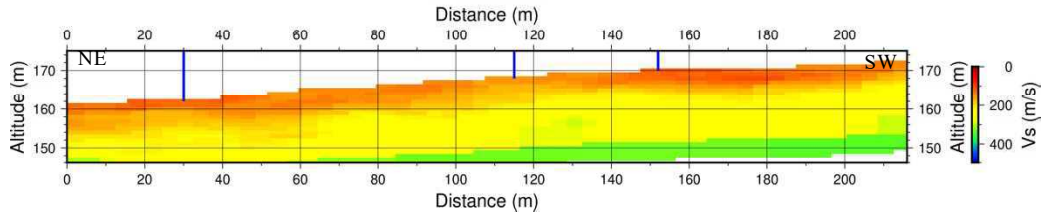


図 2.3.41 上陣東測線 S 波速度断面。青実線は LC-InSAR による位相不連続箇所。

## Idenokuchi-a

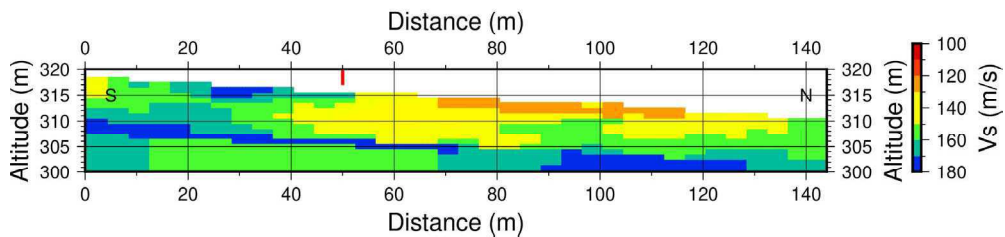


図 2.3.42 出ノ口 1a 測線 S 波速度構造(カラスケール変更)。赤実線は地表に変状が確認された箇所。

### 2.3.2.3. 地中レーダー探査結果

#### (1) 出ノ口地区

出ノ口地区では北側副断層測線および南側主断層測線において地中レーダー探査（25MHz、50MHz）ならびに表面波探査を実施した。調査内容を以下より示す。

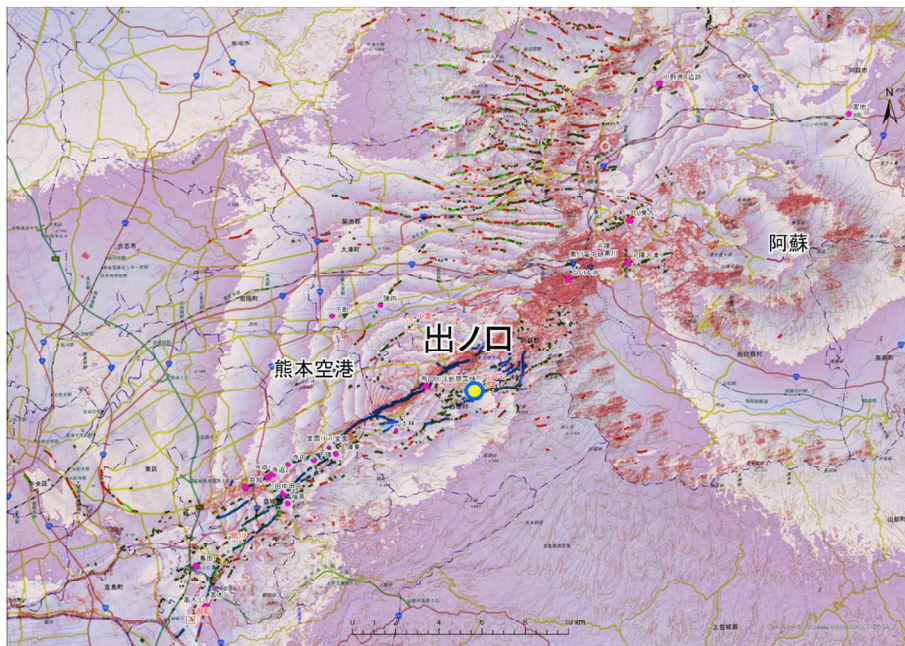


図 2.3.43 調査位置図（出ノ口）



農道から北西向き視点

図 2.3.44 現地状況（出ノ口：全景）



图 2.3.45 現地状況（出ノ口：副断層測線状況）

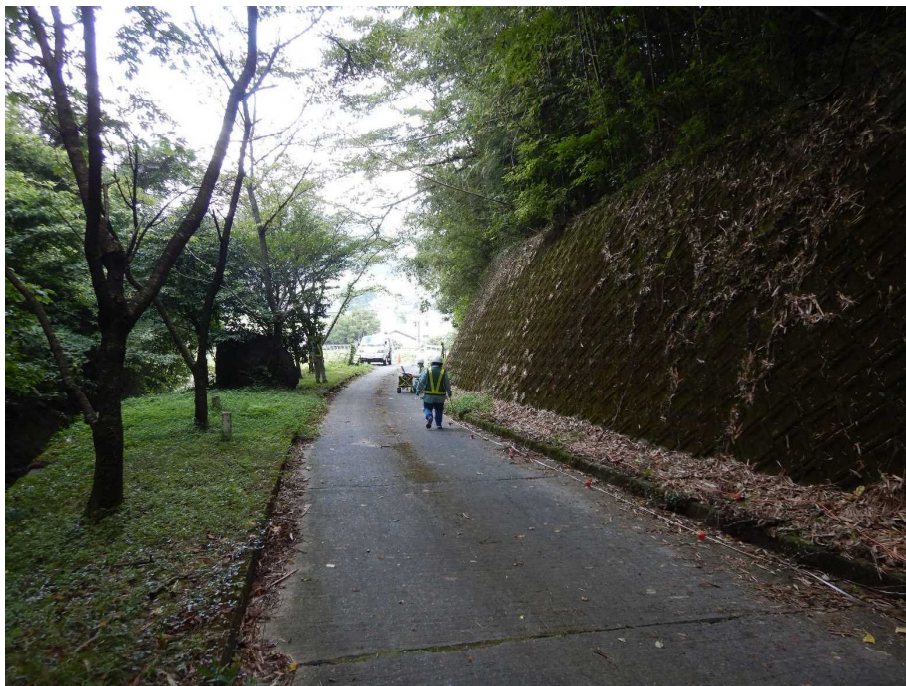


图 2.3.46 現地状況（出ノ口：主断層測線状況）



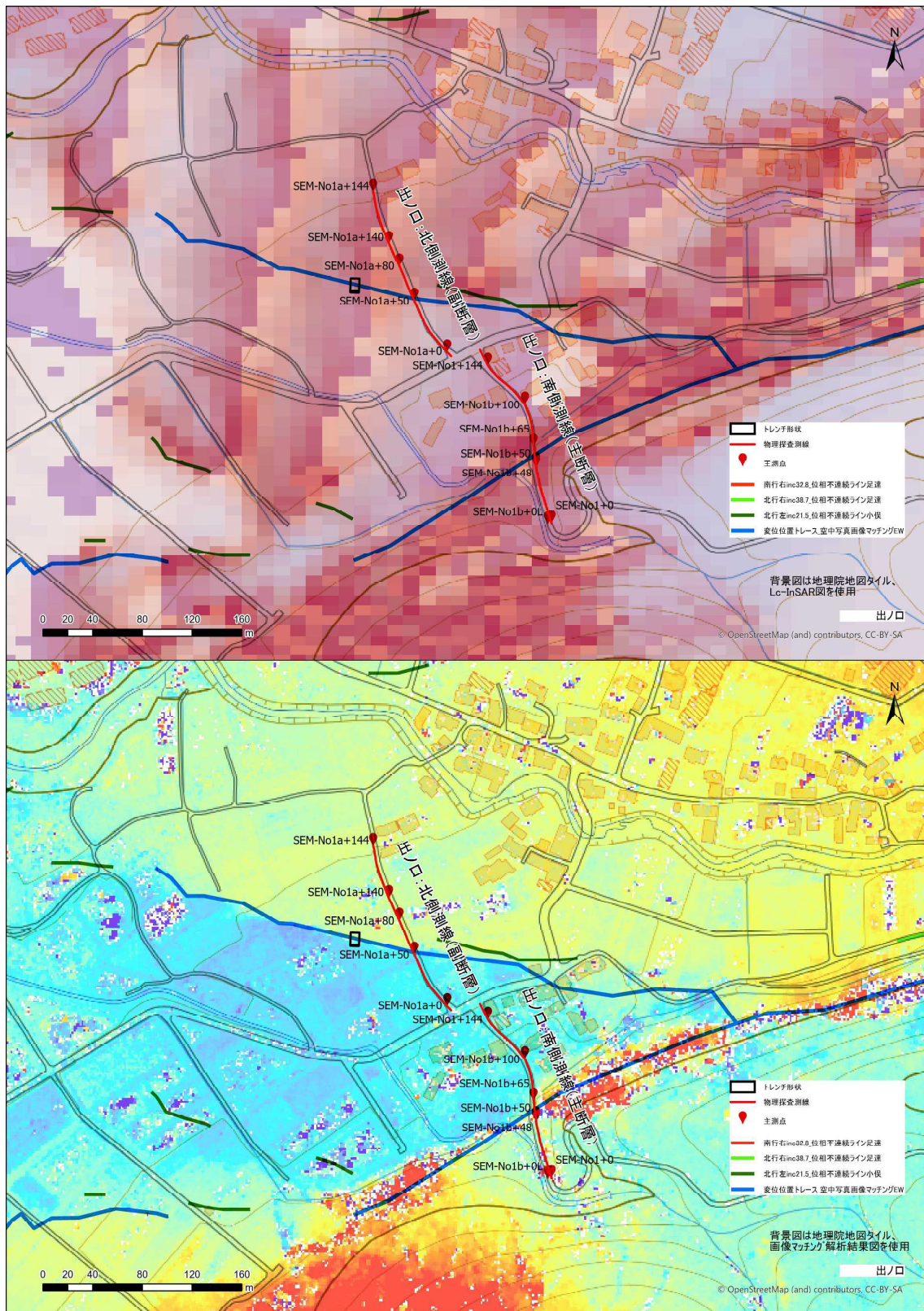


図 2.3.47 探査測線 (出ノ口)

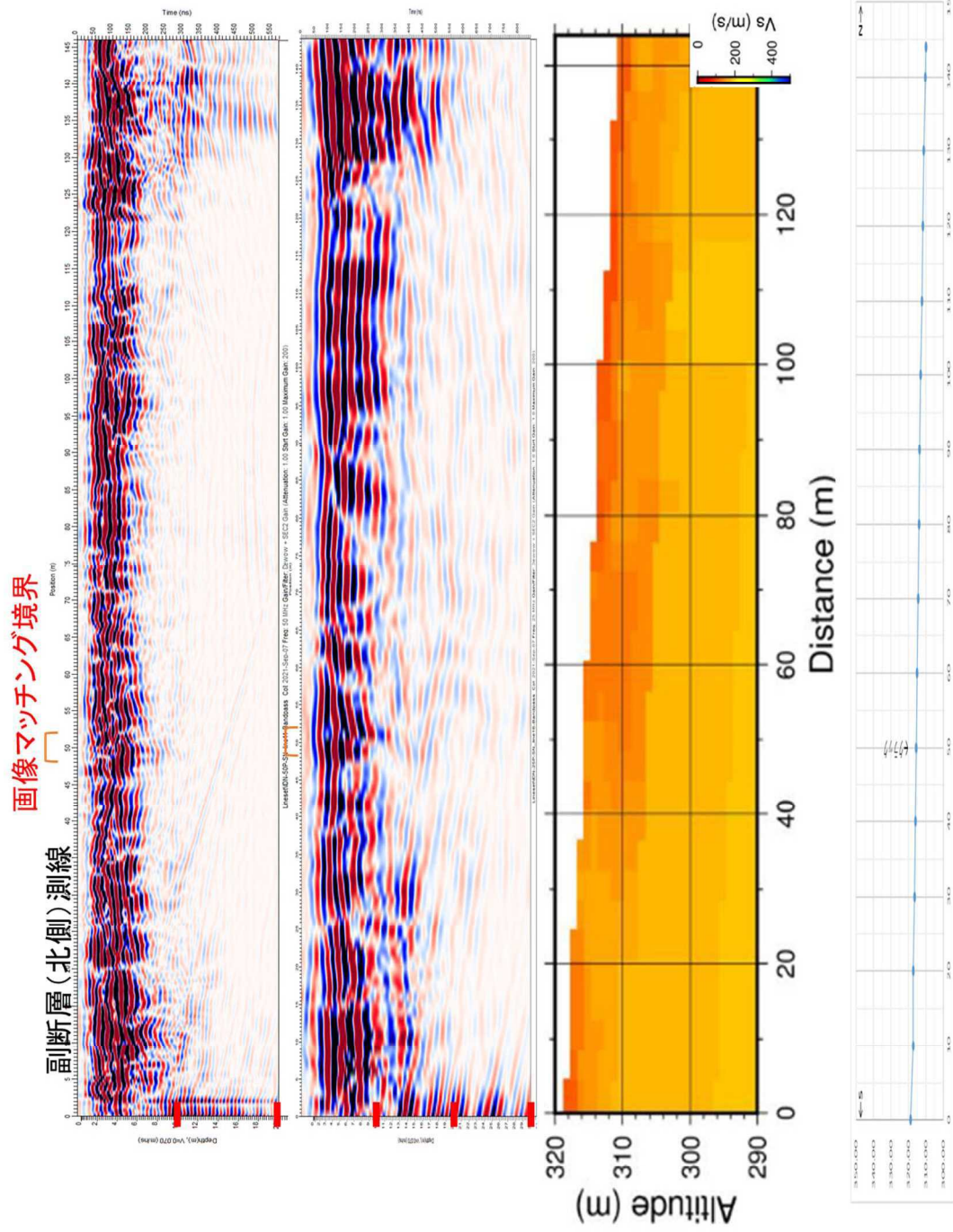


図 2.3.48 出ノ口地区 (北側：副断層測線) 調査結果 (上：GPR\_50MHz、中央 GPR\_25MHz、下：表面波調査)

出ノ口地区 50MHz 測線（北側：副断層測線）

断面全体にわたって、明瞭な反射面（黄色破線）が連続して確認される。深度 5-7m 付近を境に、それ以深では電磁波が大きく減衰する。画像マッチング境界をみると、測線位置 45-55m の範囲では、反射の不連続が確認される（赤色破線）。この反射の不連続は、断層変位によって生じた可能性がある。測線位置 0-5m・128-146m 付近にみられる反射強度の強い多重反射は、地上構造物からの反射（水色破線）と推定される。

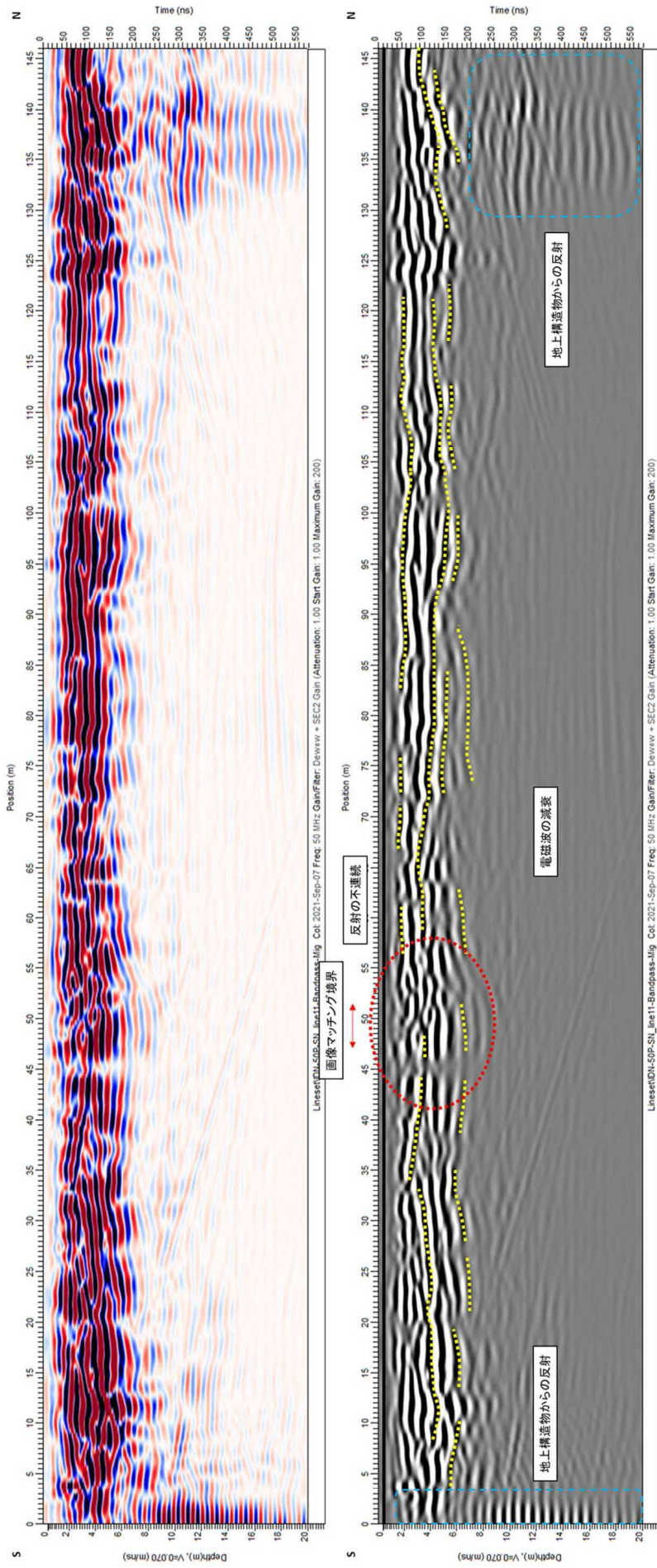


図 2.3.49 出ノ口地区（北側：副断層測線） 50MHz 断面解釈図（上：データ処理後カラー断面、下：解釈断面グレースケール）

出ノ口地区 25MHz 測線（北側：副断層測線）

断面全体にわたって、断続的ではあるが、反射面（黄色破線）が確認される。深度 9-10m 付近を境に、それ以深では電磁波が大きく減衰する。画像マッチング境界の範囲には、明瞭な反射面の不連続や高度差はみられない。測線位置 122-146m 付近にみられる反射強度の強い多重反射は、地上構造物からの反射（水色破線）と推定される。

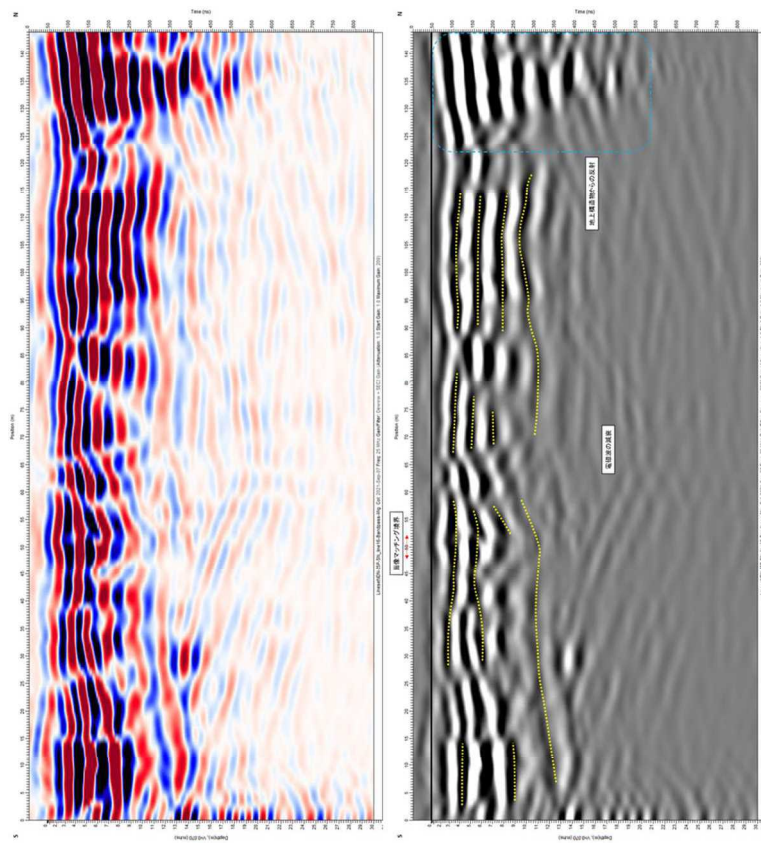


図 2.3.50 出ノ口地区（北側：副断層測線） 25MHz 断面解釈図（上：データ処理後カラー断面、下：解釈断面グレースケール）

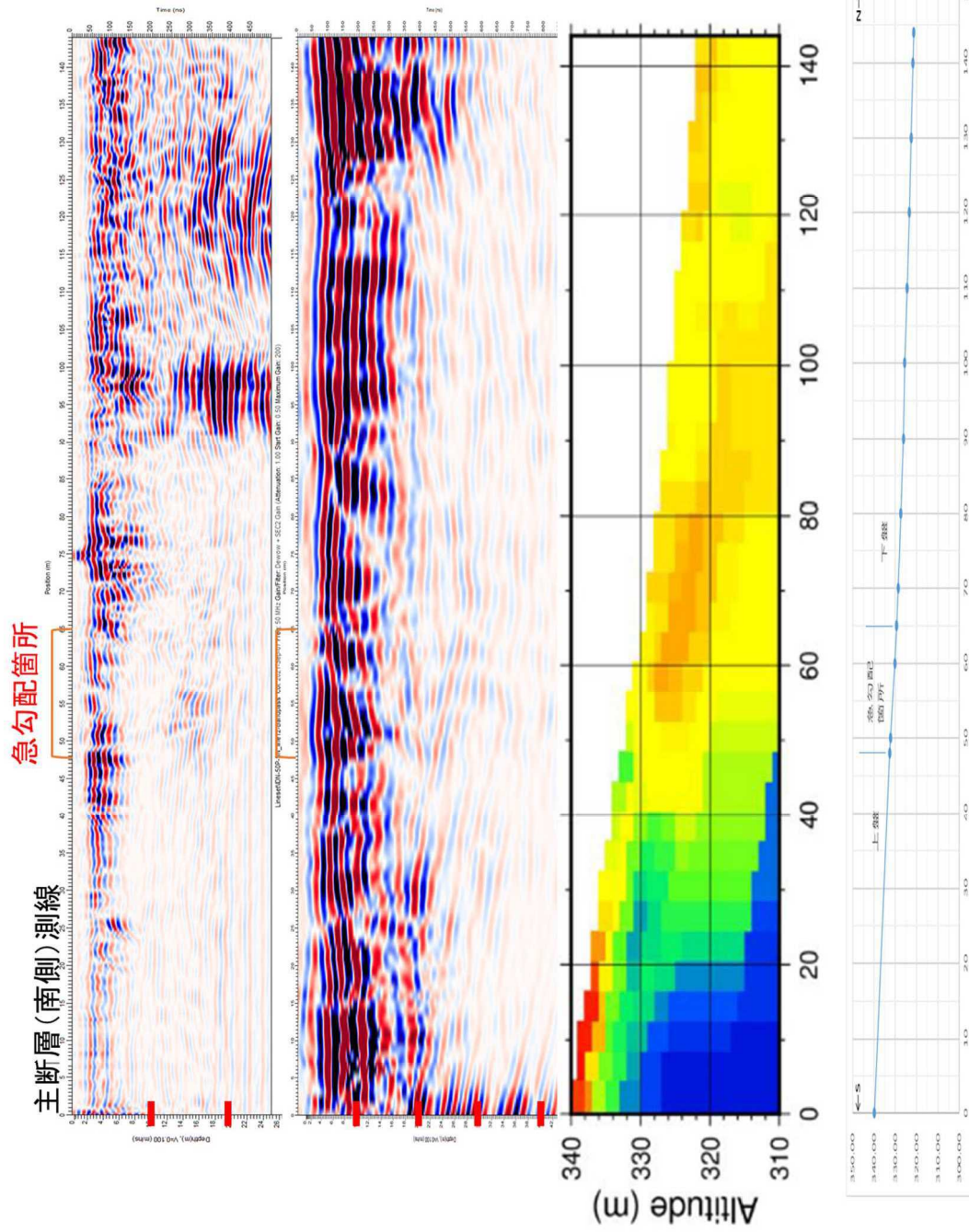


図 2.3.51 出口地区 (南側) 主断層) 探査結果 (上 : GPR\_50MHz、中央 GPR\_25MHz、下 : 表面波探査)

出ノ口地区 50MHz 測線 (南側・主断層)

断面は、測線位置 0-90m の範囲では、電磁波の減衰が大きく、また地下埋設物からの反射 (水色曲線) の影響を受けているため、良好な記録が得られていない。測線位置 90-145m の範囲では、地上構造物や地下埋設物からの反射 (水色破線・水色曲線) の影響を強く受けているため、地中からの反射が読み取れない。急勾配箇所をみると、測線位置 50m-54m の範囲では、反射面の不連続や反射強度の違いが確認される (赤色破線)。この反射の不連続は、断層変位によって生じた可能性がある。

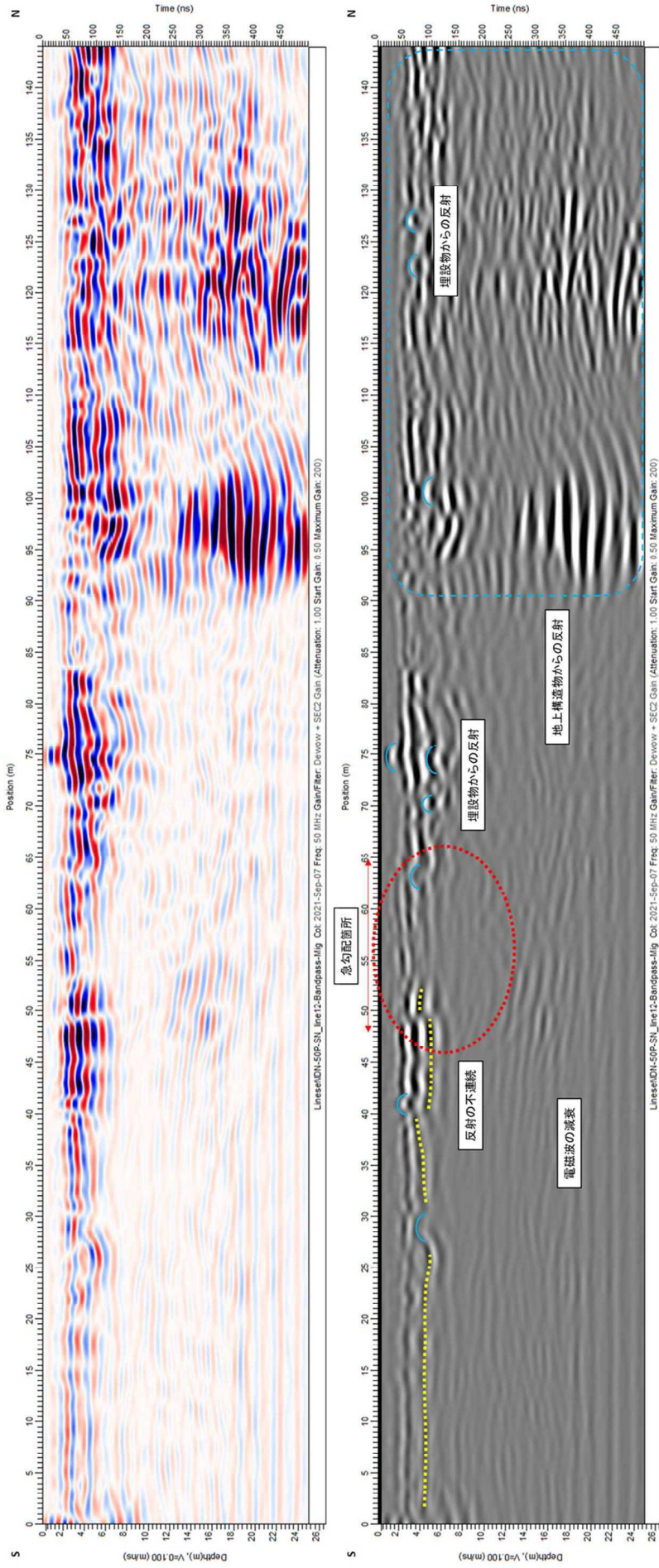


図 2.3.52 出ノ口地区 (南側：主断層) 50MHz 断面解釈図 (上：データ処理後カラールー断面、下：解釈断面グレースケール)

出ノ口地区 25MHz 測線（南側・主断層）

断面は、測線位置 0-80m の範囲では、電磁波の減衰が大きく、また地下埋設物の反射（水色曲線）の影響を受けているため、良好な記録が得られていない。測線位置 80-145m の範囲では、地上構造物や地下埋設物の反射（水色破線・水色曲線）の影響を強く受けているため、地中からの反射が読み取れない。急勾配箇所をみると、測線位置 60-76m の範囲では、反射面の不連続が確認される（赤色破線）。また、深度 6-12m の範囲では、反射面が傾き下がるようにみえる。この不連続は、断層変位によって生じた可能性がある。

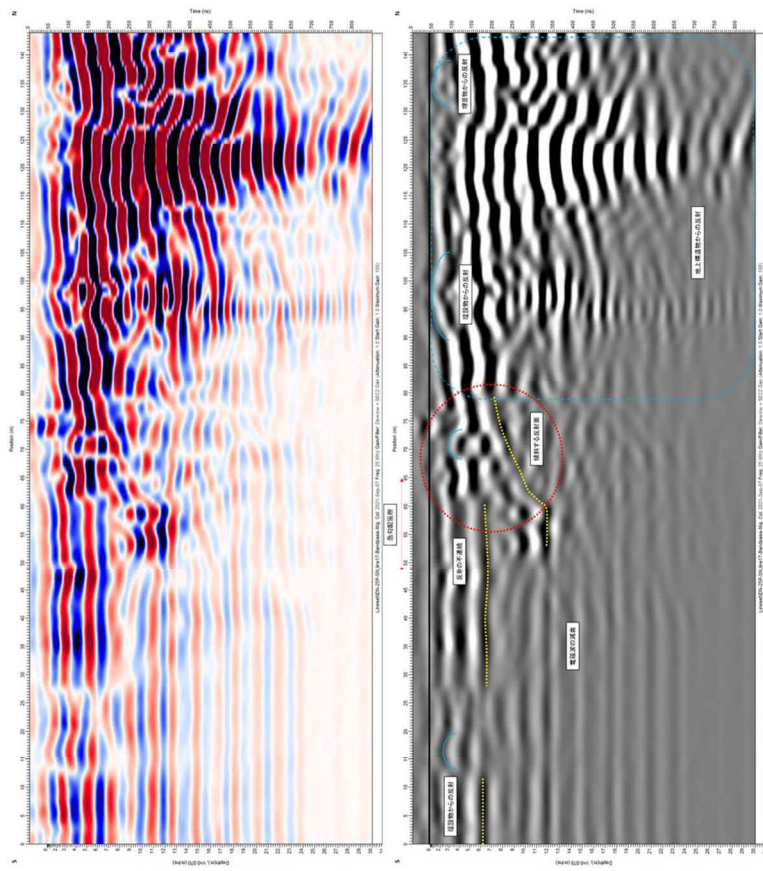


図 2.3.53 出ノ口地区（南側：主断層） 25MHz 断面解釈図（上：データ処理後カラー断面、下：解釈断面グレースケール）

(2) 小園地区

小園地区では地中レーダ探査(50MHz)ならびに表面波探査を実施した。調査内容を以下より示す。

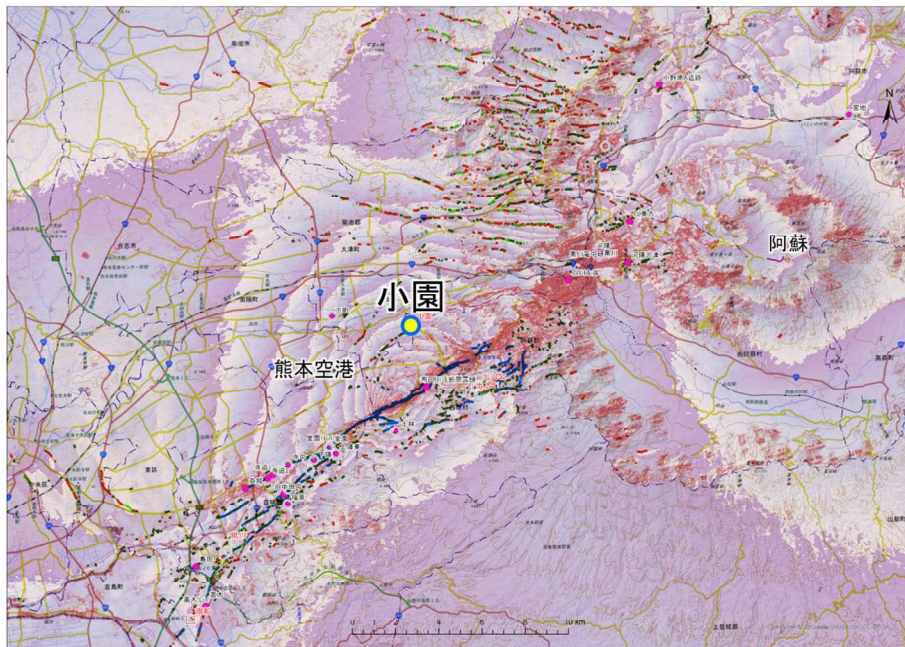


図 2.3.54 調査位置図(小園)



図 2.3.55 現地状況(小園)



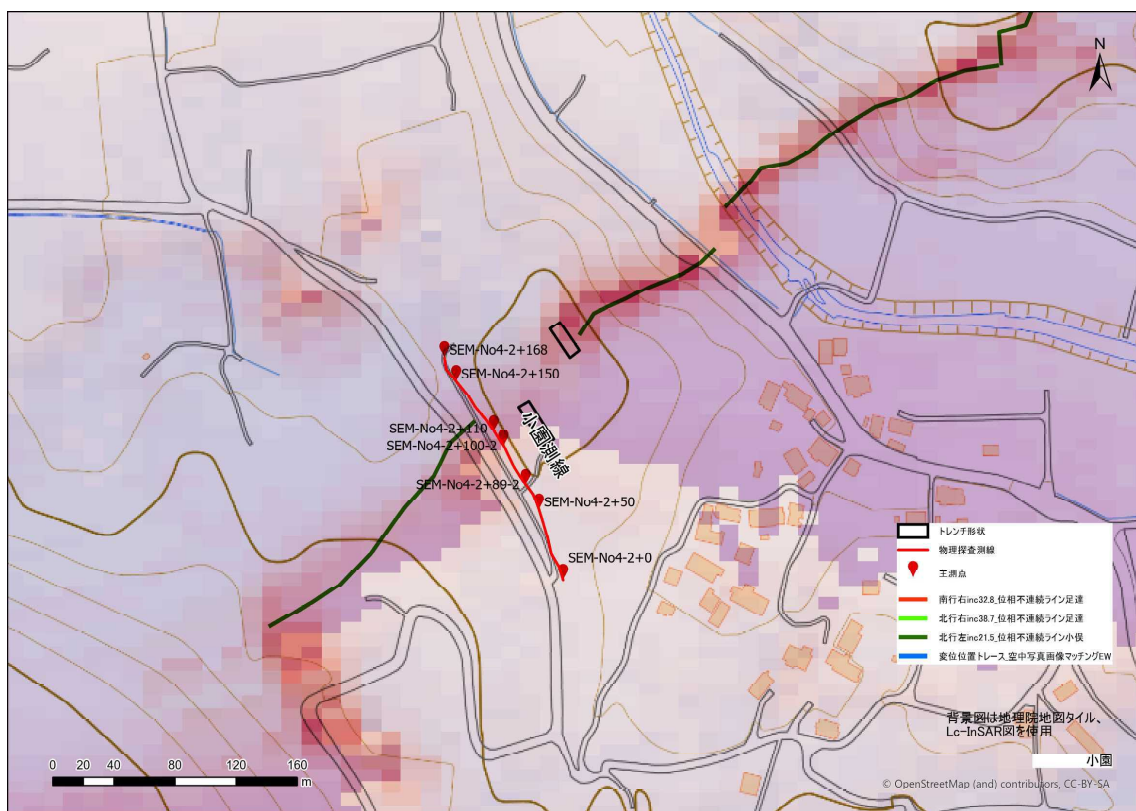


図 2.3.56 探査測線（小園）

※画像マッチング範囲外

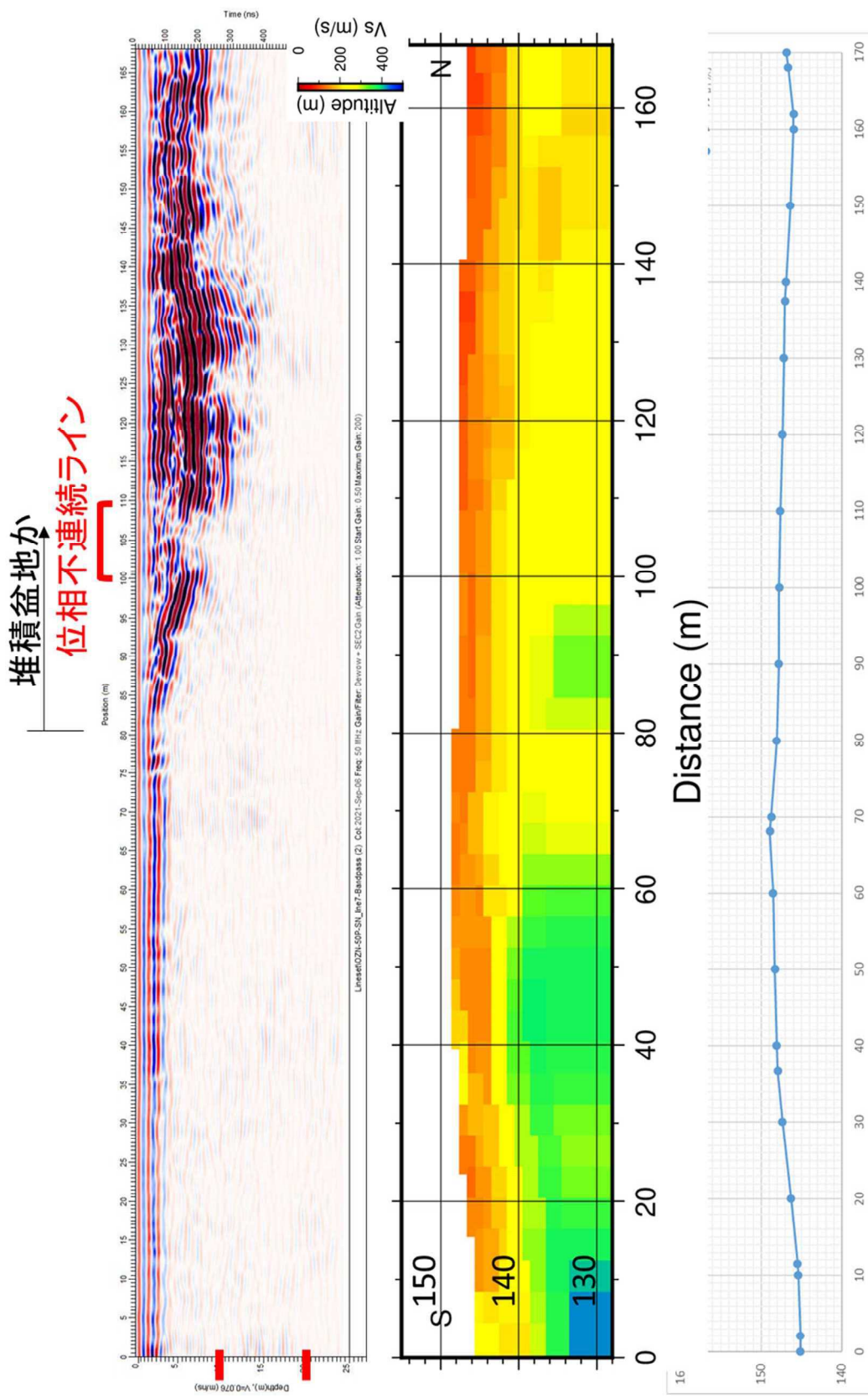


図 2.3.57 小園地区 探査結果 (上 : GPR\_50MHz、下 : 表面波探査)

### 小園地区 50MHz 測線

断面は、測線位置 0-85m の範囲では、比較的明瞭な連続性のよい反射面（黄色破線）が確認される。測線位置 85-168m の範囲では、反射面の連続性が下になるような形状を示し、その深度は 2m から最大で 15m 程度までとなる。また、測線位置 75-87m の範囲では、反射面の不連続が確認される（赤色破線）。位相不連続ラインをみると、測線位置 100-110m の範囲では、反射面の不連続や反射強度の違いが確認される（赤色破線）。これらの不連続や反射強度の変化は、断層変位によって生じた可能性がある。

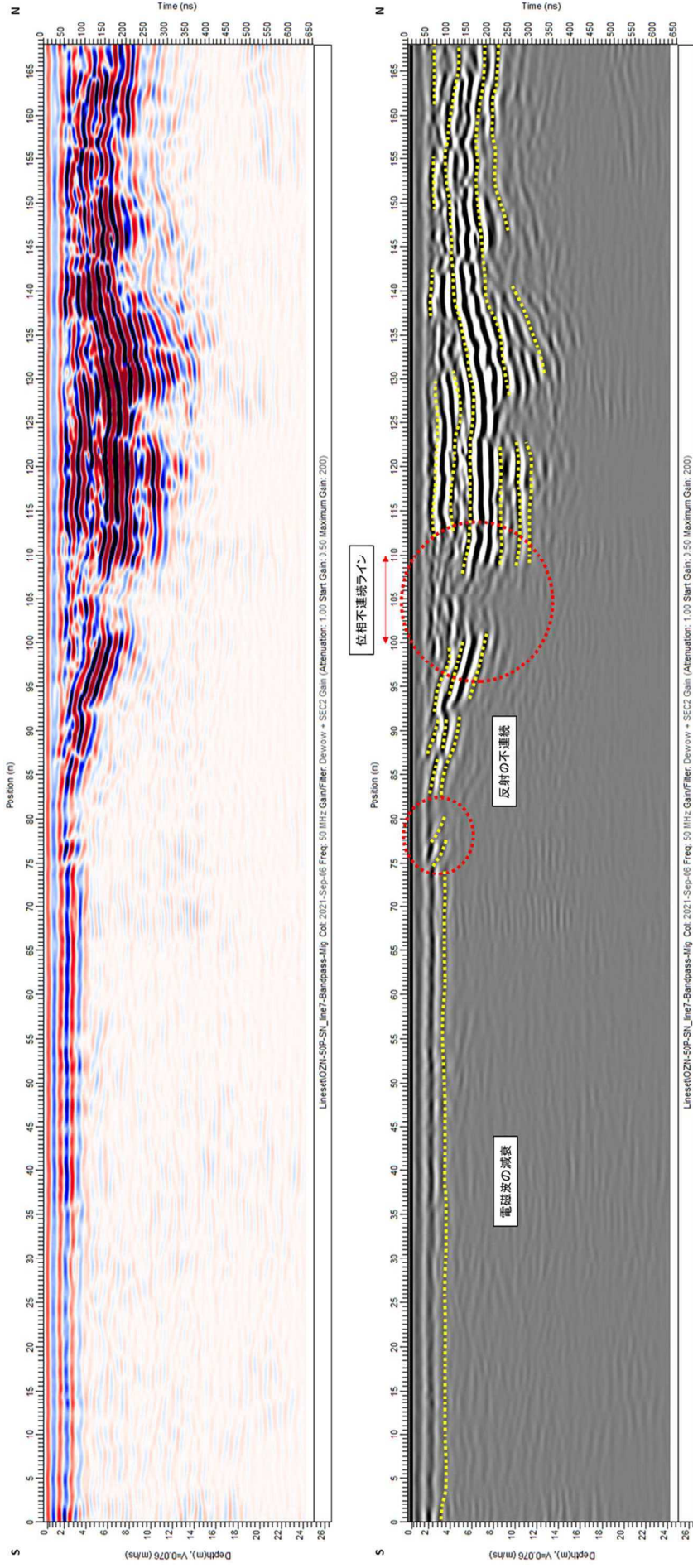


図 2.3.58 小園地区 50MHz 断面解釈図（上：データ処理後カラー断面、下：解釈断面グレースケール）

### (3) 御船地区

御船地区では地中レーダ探査（50MHz）を実施した。調査内容を以下より示す。

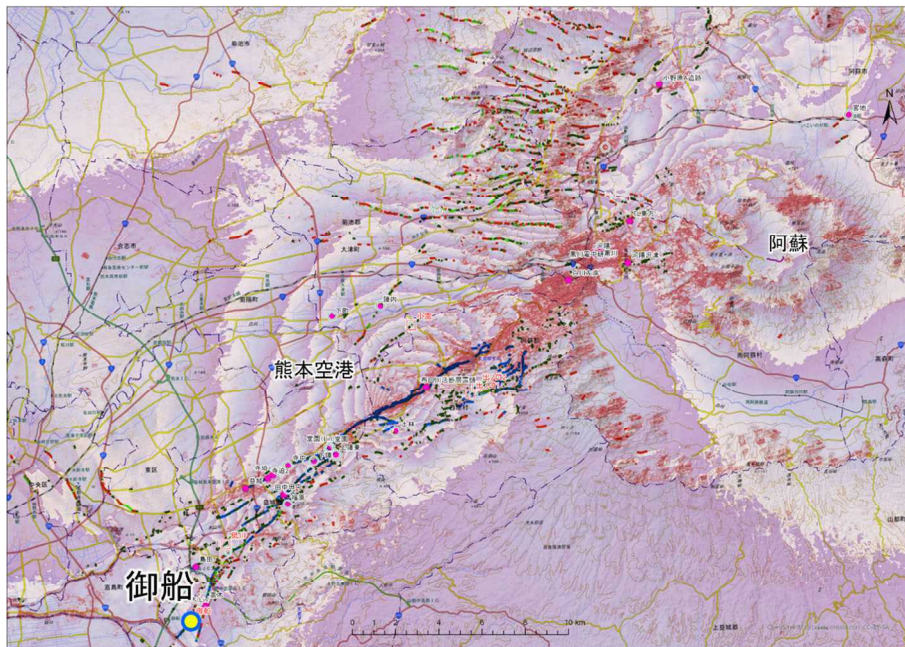


図 2.3.59 調査位置図（御船）



図 2.3.60 現地状況（御船）

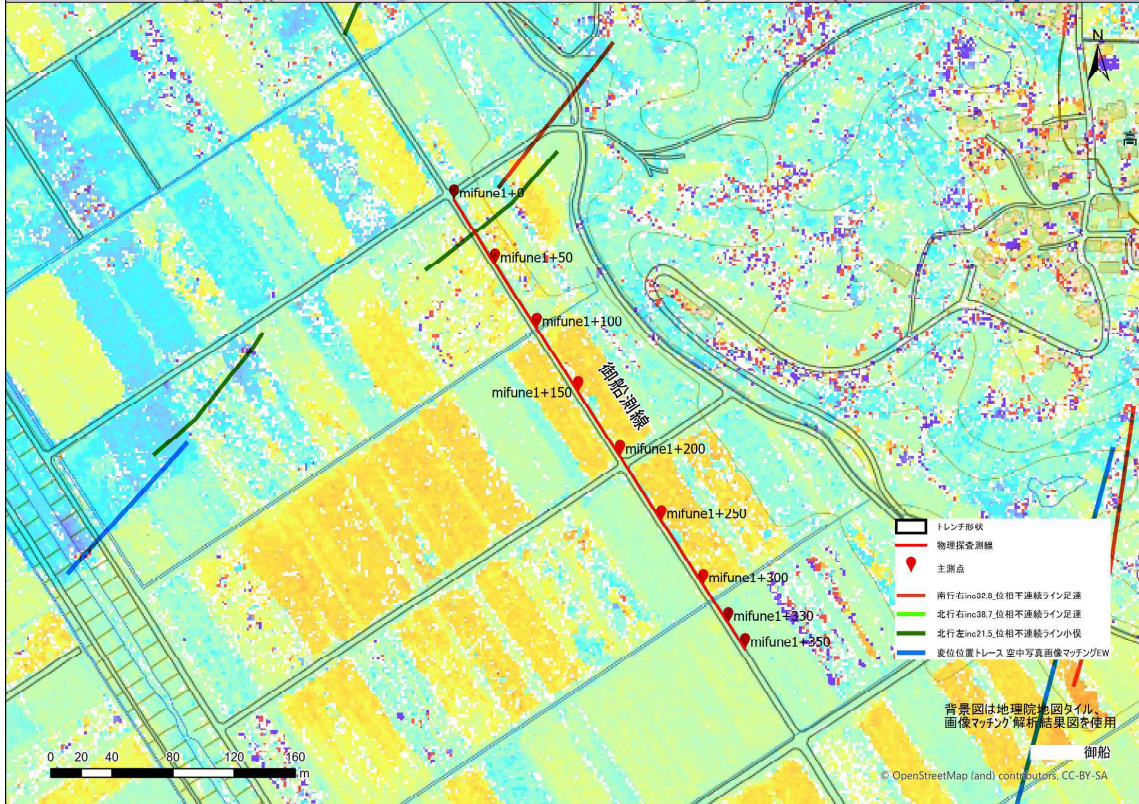
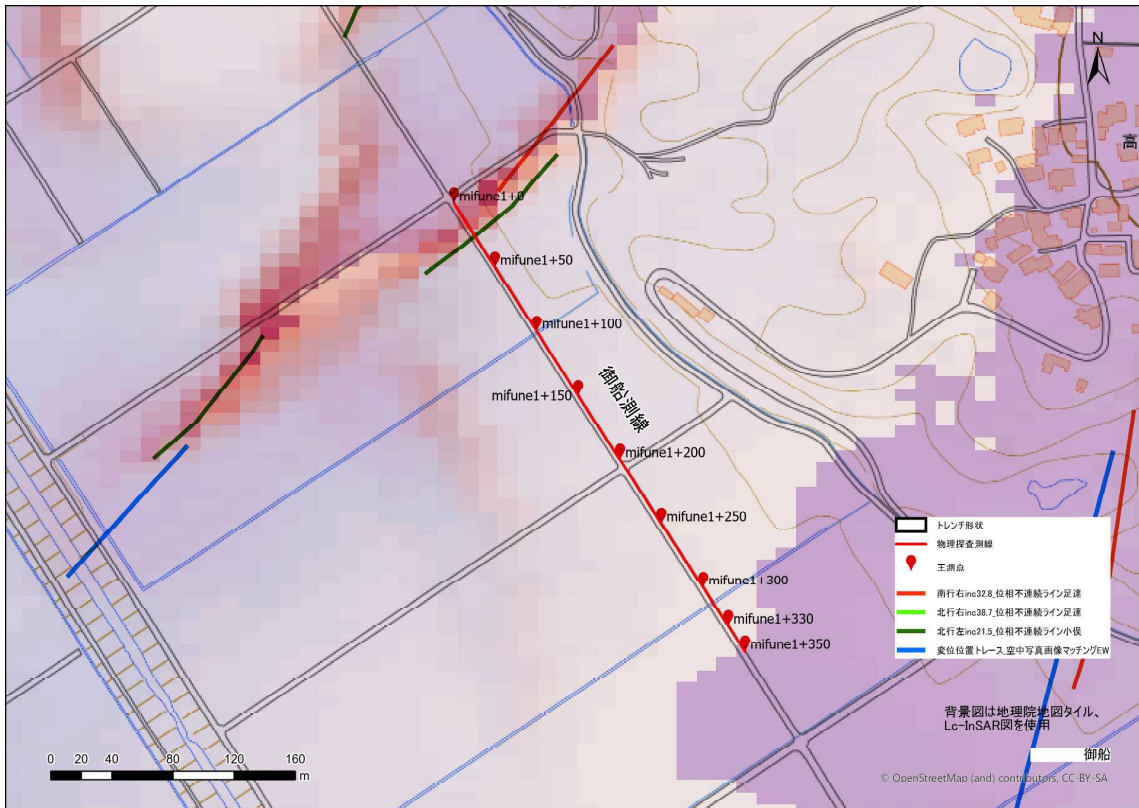


図 2.3.61 探査測線（御船）

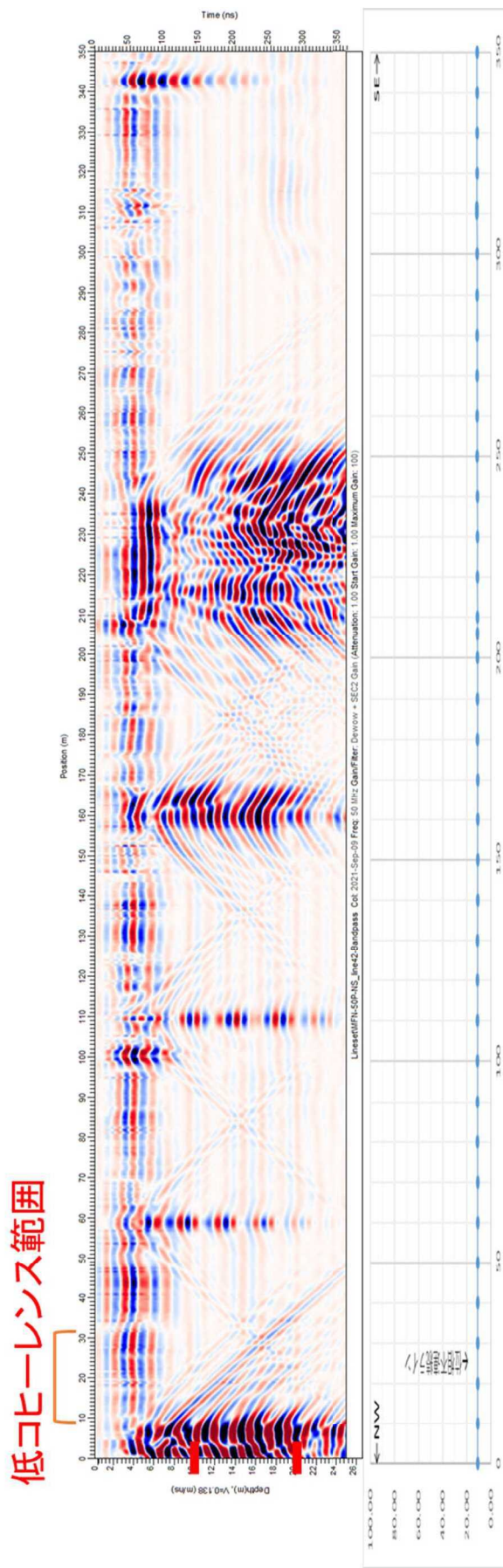


図 2.3.62 御船地区 探査結果 (GPR\_50MHz)

### 御船地区 50MHz 測線

断面は、電磁波の減衰が大きいが、深度 6m 付近に連続する反射面（黄色破線）が確認される。反射面の連続性が途切れる範囲では、地下埋設物や地下埋設物からの反射（水色破線・水色曲線）が確認される。低コヒーレンス範囲 10-30m の範囲では、反射面の不連続が確認される（赤色破線）。この不連続は、断層変位によって生じた可能性がある。複数箇所を確認される多重反射や双曲線状の反射形状は、地上構造物や地下埋設物からの反射（水色破線・水色曲線）であると推定される。

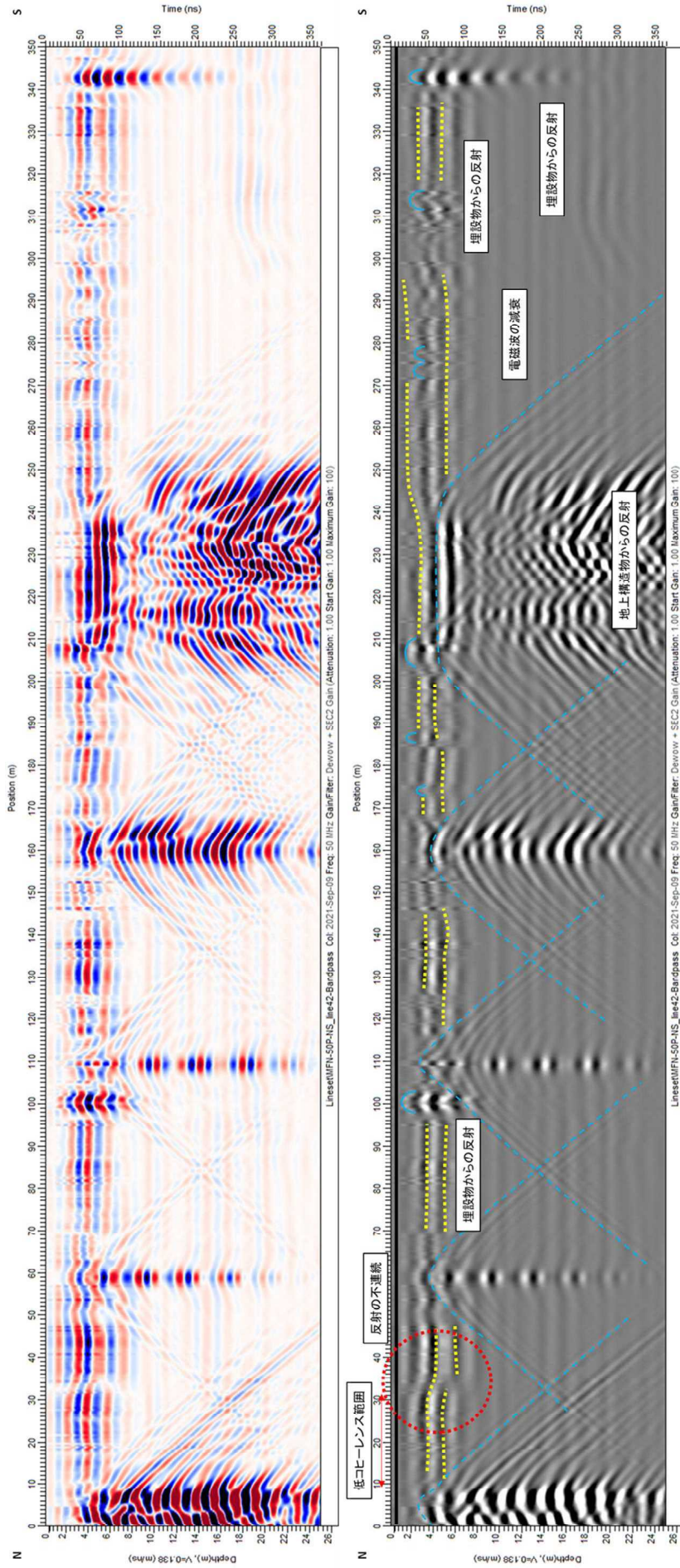


図 2.3.63 御船地区 50MHz 断面解釈図（上：データ処理後カラー断面、下：解釈断面グレースケール）

(4) 砥川地区

砥川地区では地中レーダ探査（50MHz）を実施した。調査内容を以下より示す。

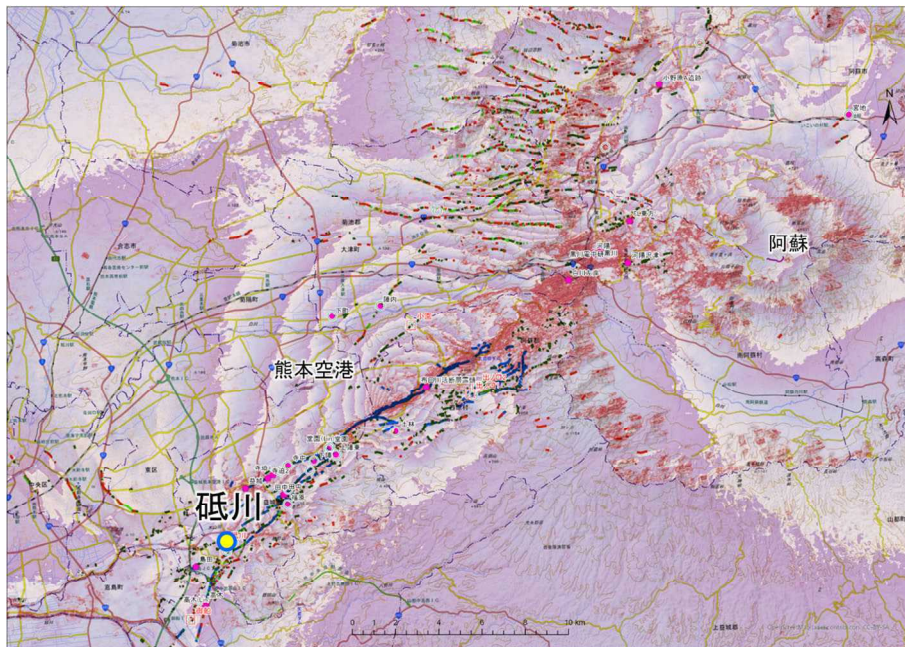


図 2.3.64 調査位置図（砥川）



図 2.3.65 現地状況（砥川）





図 2.3.66 探査測線（砥川）

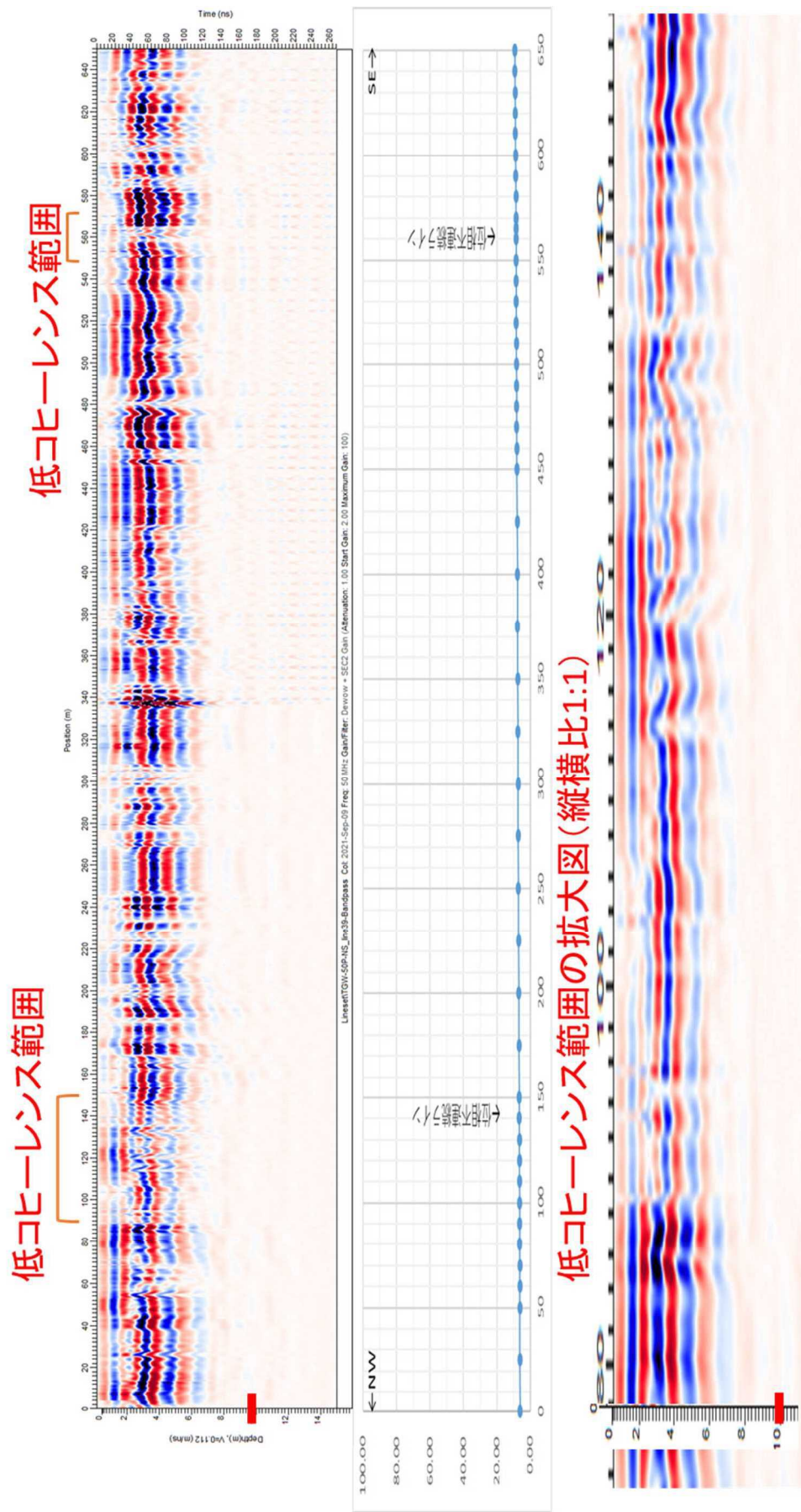


図 2.3.67 砥川地区 探査結果 (50MHz)

### 砥川地区 50MHz 測線

断面は、電磁波の減衰が大きく、また地下埋設物の反射（水色曲線）の影響を受けているため、良好な記録が得られていない。深度 5m の範囲では、断続的ではあるが、反射面（黄色破線）がみられる。反射面の連続性が途切れる範囲では、地下埋設物からの反射（水色曲線）がみられる。低コヒーレンス範囲 90-130m の範囲では、反射面の不連続がみられるが、周辺には地下埋設物からの反射（水色曲線）もあり、確実ではない（赤色破線）。測線位置 550-590m の範囲では、反射面の不連続がみられるが、周辺には地下埋設物からの反射（水色曲線）もあり、確実ではない（赤色破線）。

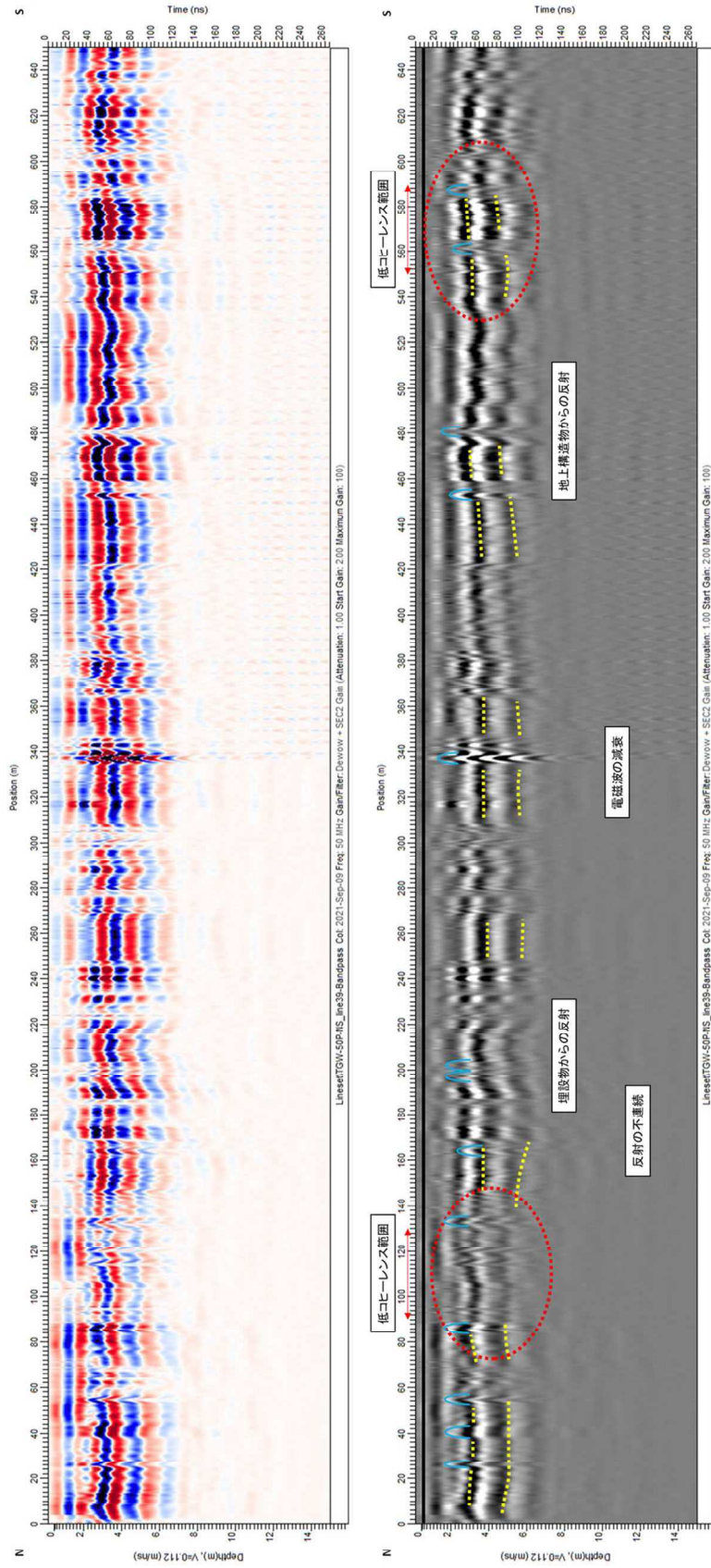


図 2.3.68 砥川地区 50MHz 断面解釈図（上：データ処理後カラー断面、下：解釈断面グレースケール）

### (5) 福原地区

福原地区では既往トレンチ近傍測線において地中レーダ探査（25MHz、50MHz）および表面波探査を、主断層トレース測線において地中レーダ探査（50MHz）を実施した。調査内容を以下より示す。

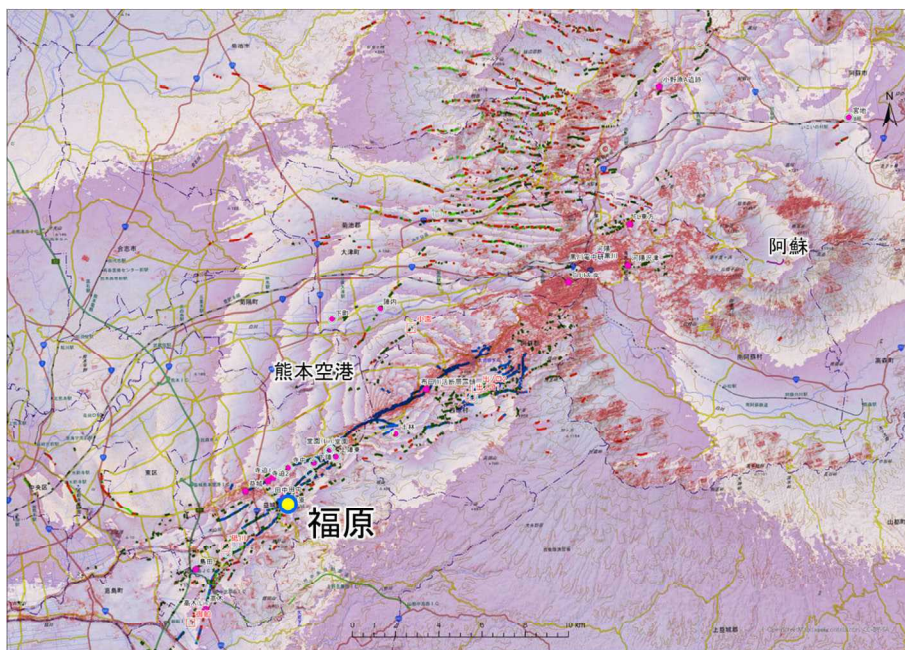


図 2.3.69 調査位置図（福原）



図 2.3.70 現地状況（福原）

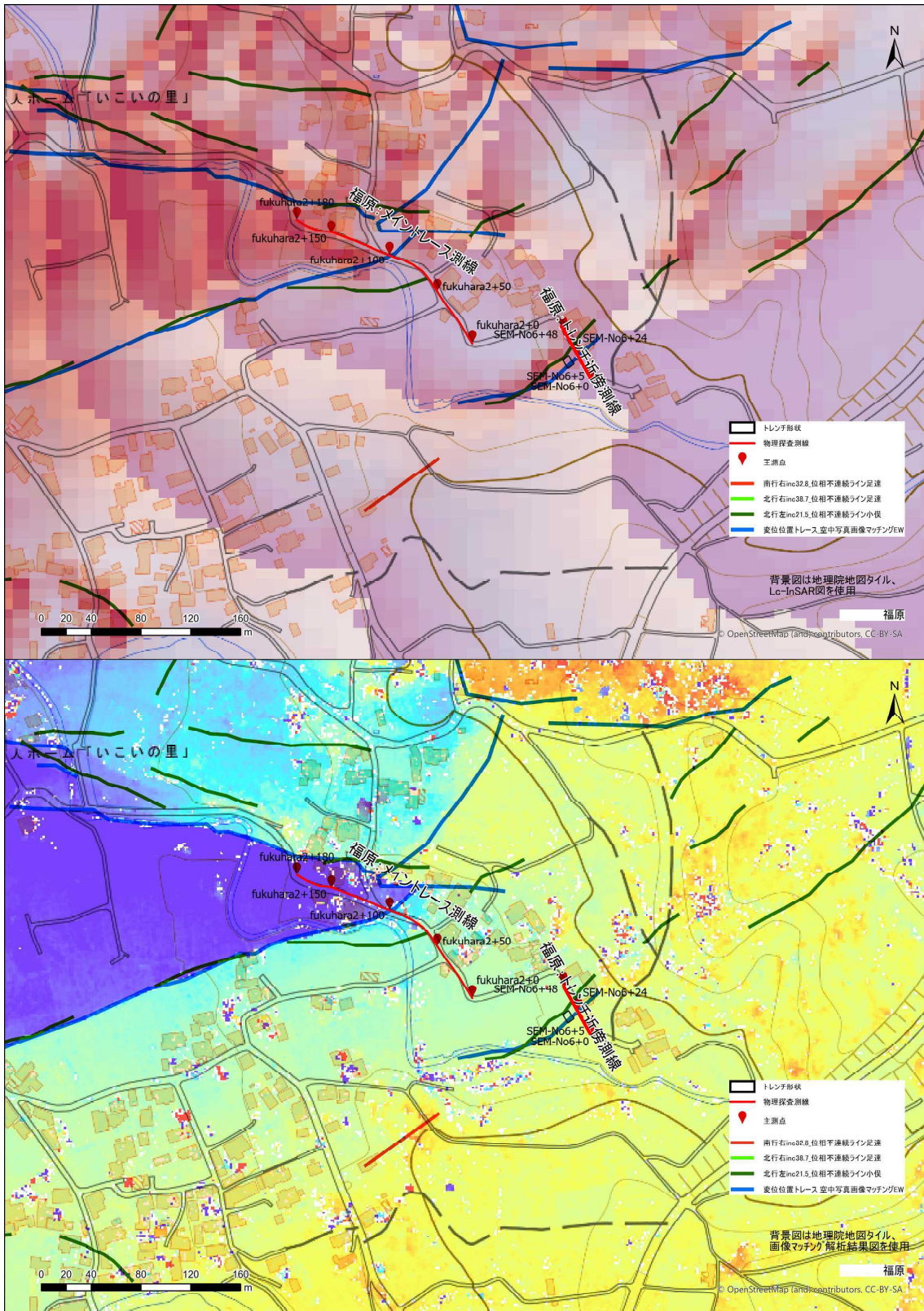


図 2.3.71 探査測線（福原）

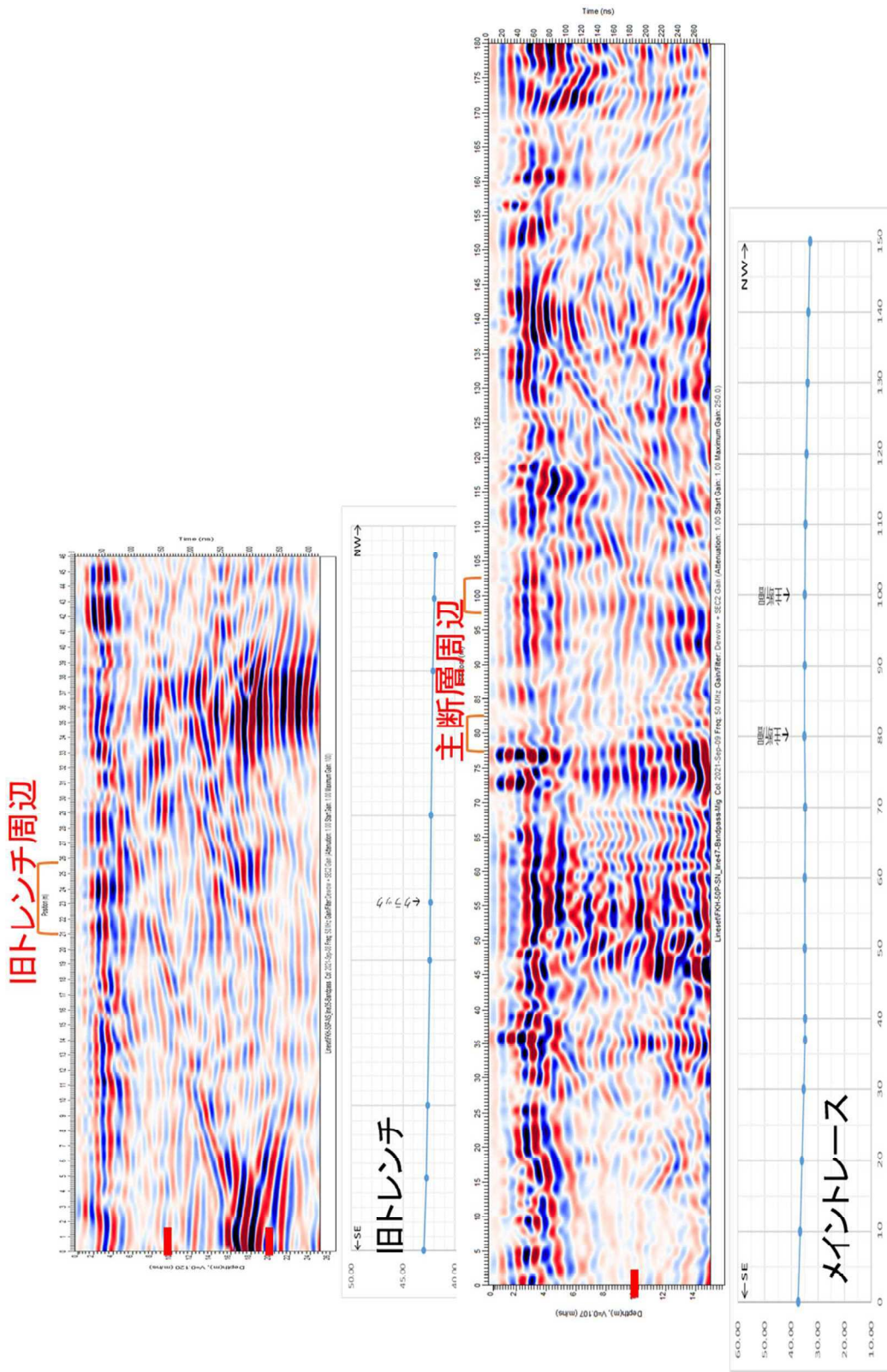


図 2.3.72 福原地区 探査結果 (GPR\_50MHz)

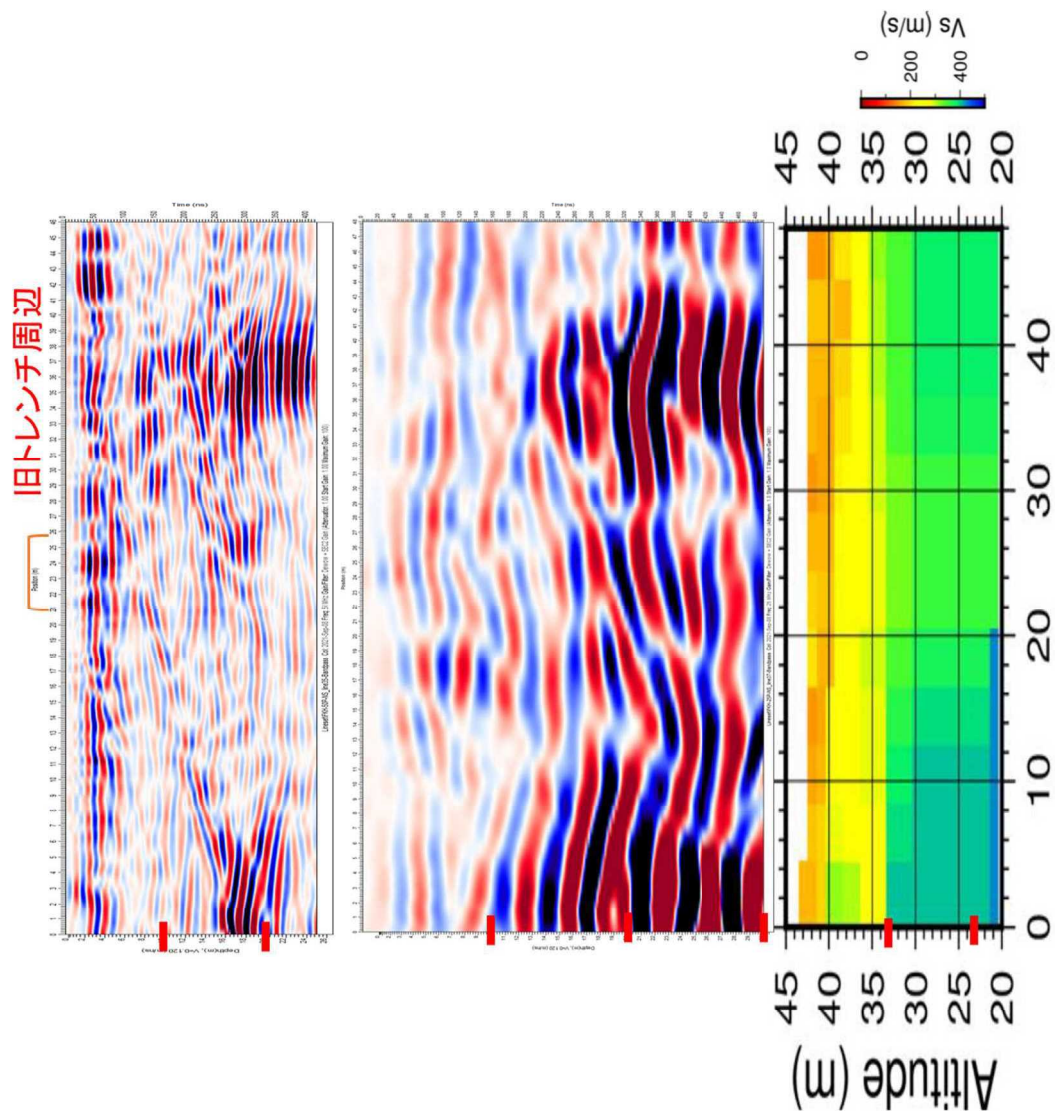


図 2.3.73 福原地区（既往トレンチ周辺拡大図） 探査結果（上：GPR\_50MHz、中央：GPR\_25MHz、下：表面波探査）

福原地区 50MHz 測線 (南側測線)

断面全体にわたって、比較的明瞭な連続性のよい反射面 (黄色破線) が確認される。深度 5m 付近を境に、それ以深では電磁波が大きく減衰する。測線位置 17m・26m 付近には、地下埋設物からの反射 (水色曲線) がみられる。トレンチ周辺の範囲では、反射面はほぼ水平に連続し、不連続などはみられない。測線位置 0-24m・30-40m 付近にみられる直線状の反射面の強い反射は、地上構造物からの反射 (水色破線) であると推定される。

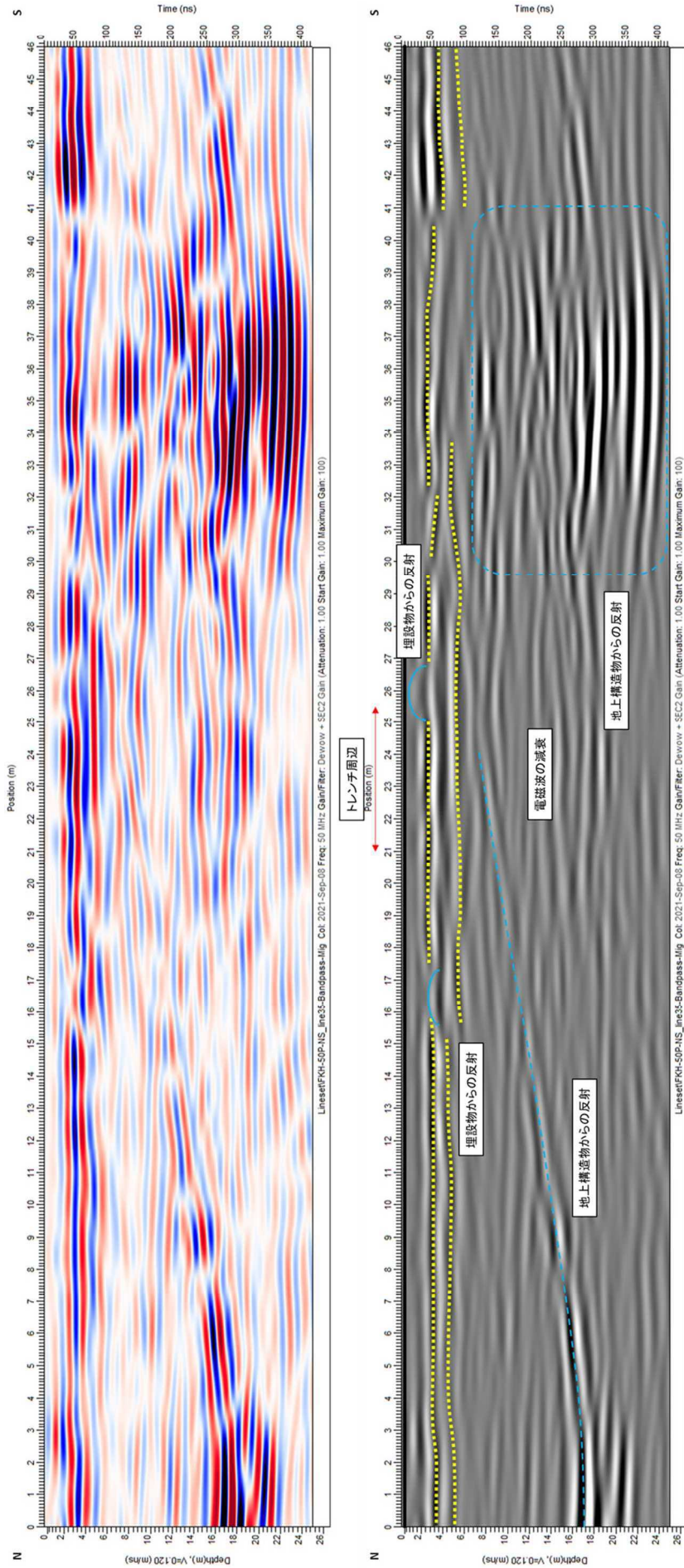


図 2.3.74 福原地区 (南側測線) 50MHz 断面解積図 (上: データ処理後カラー断面、下: 解積断面グレースケール)



福原地区 25MHz 測線 (南側測線)

断面は、電磁波の減衰が大きく、また地上構造物の反射 (水色破線) の影響が得られていない。深度 6-8m の範囲では、反射強度が弱く、非常に不明瞭であるが、反射面 (黄色破線) が確認される。トレンチ周辺の範囲では、反射面はほぼ水平に連続し、不連続などはみられない。測線位置 0-15m・28-45m 付近にみられる反射強度の強い多重反射は、地上構造物からの反射 (水色破線) であると推定される。

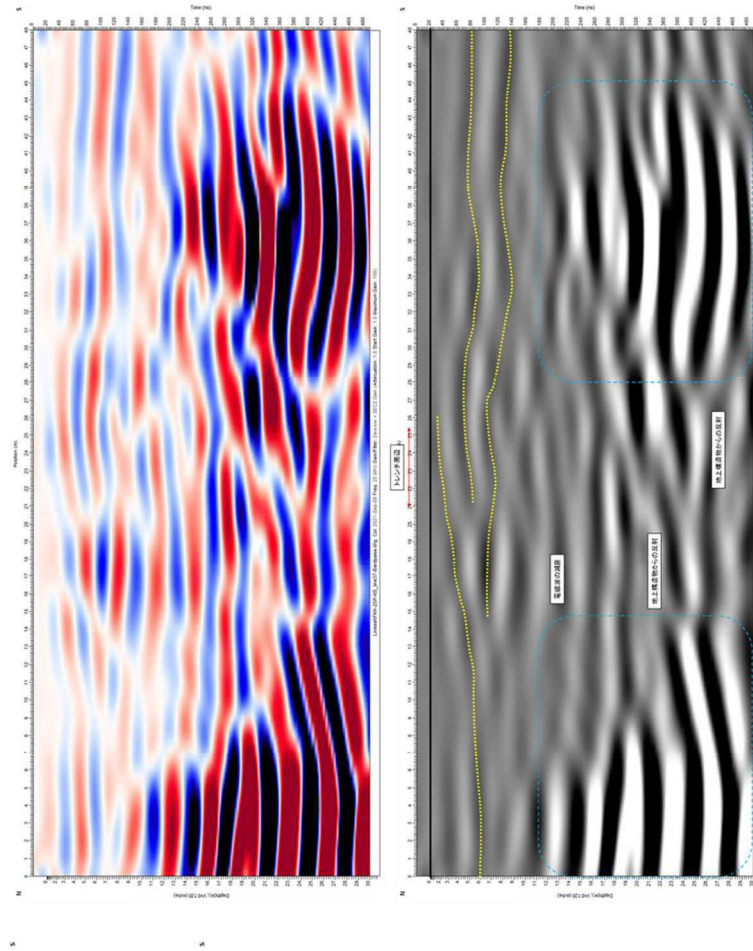


図 2.3.75 福原地区 (南側測線) 25MHz 断面解釈図 (上: データ処理後カラー断面、下: 解釈断面グレースケール)

福原地区 50MHz 測線 (北側測線)

断面は、電磁波の減衰が大きく、また地上構造物や地下埋設物の反射 (水色破線・水色曲線) の影響を強く受けているため、地中からの反射が読み取れない。深度 2-6m の範囲では、不明瞭ながらも反射面 (黄色破線) が確認される。主断面周辺をみると、測線位置 81-85m の範囲では、反射面の不連続や反射強度の違いが確認される (赤色破線)。また、測線位置 108m の範囲では、反射面の不連続が確認される (赤色破線)。これらの不連続は、断層変位によって生じた可能性がある。断面全体にわたって確認される強い多重反射や双曲線状の反射形状は、地上構造物や地下埋設物からの反射 (水色破線・水色曲線) であると推定される。

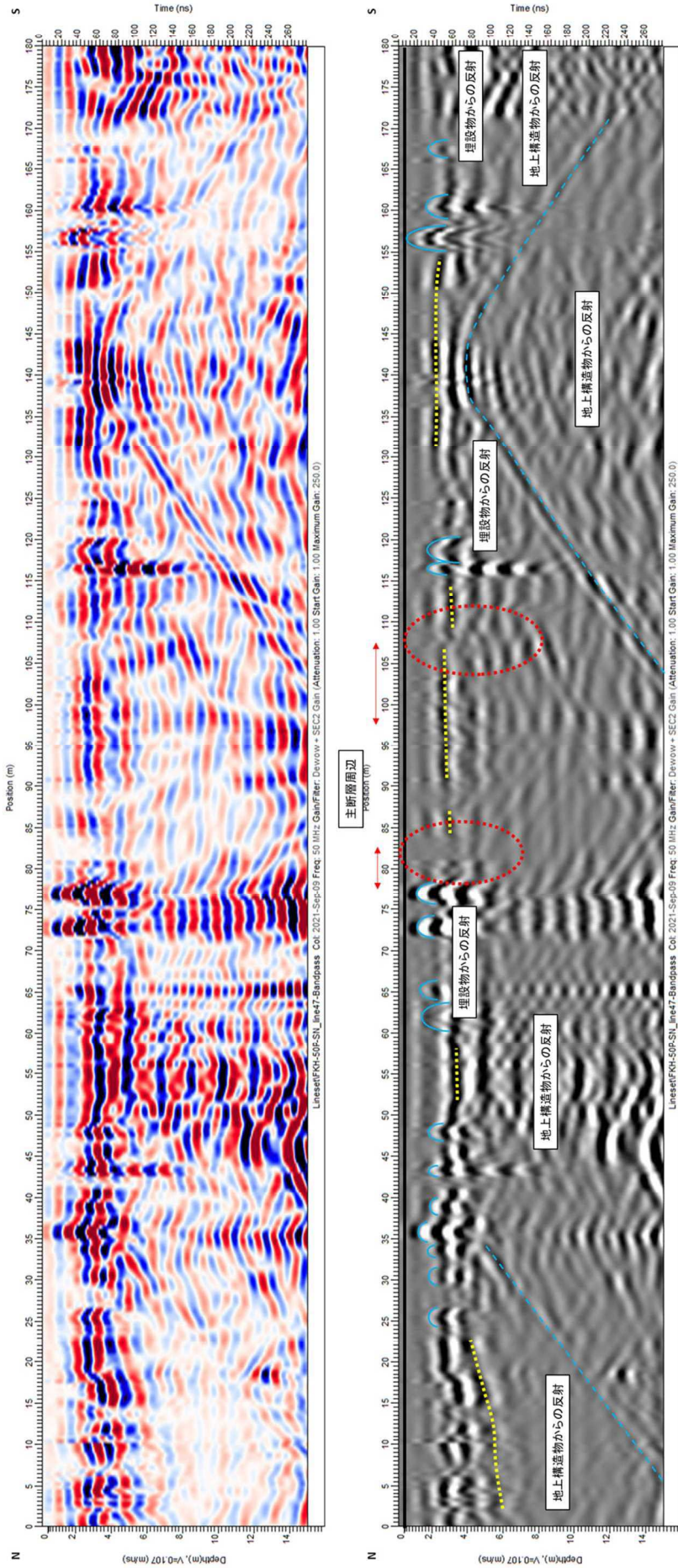


図 2.3.76 福原地区 (北側測線) 50MHz 断面解積図 (上: データ処理後カラー断面、下: 解積断面グレースケール)