

3. 3 断層の三次元地下形状把握のための調査観測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層の三次元地下形状把握のための調査観測

(b) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 |
|---------------------|-----|-------|
| 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 | 教授 | 渡辺 俊樹 |
| 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 | 教授 | 山岡 耕春 |
| 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 | 准教授 | 田所 敬一 |
| 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 | 講師 | 市原 寛 |

(c) 業務の目的

恵那山－猿投山北断層帯の西半部と東半部の境界付近における複数の断層、ならびに屏風山断層と猿投山北断層の地下での連続性を把握するとともに、猿投山北断層、猿投－境川断層、恵那山断層の地下での三次元的形状を明らかにする。これらの結果を本断層帯の構成断層の妥当性や活動区間の検討、強震動の予測精度の高度化に活用する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 令和2年度：

恵那山断層、猿投山北断層、猿投－境川断層の境界付近で、過去に生じた微小地震の精密震源再決定を行った。得られた震源分布の三次元的形状を基に、各断層の地下での関係について検討した。浅部反射法探査を実施するために予備調査を行い、恵那山－猿投山北断層帯の西半部と東半部との境界付近、並びに屏風山断層と猿投山北断層との間において反射法探査の測線を選定し、調査仕様を検討した。

2) 令和3年度：

令和2年度に実施した予備調査により選定した測線と調査仕様に基づいて浅部反射法探査を実施した。また、当該地域の既存の反射法探査のデータの再解析に着手した。

3) 令和4年度：

令和3年度に実施した浅部反射法探査データの解析、及び既存の反射法探査のデータ解析と解釈を行う。令和2年度に実施した地震活動の再解析結果と合わせて、調査観測のまとめを行い、地下構造の観点から本断層帯の構成断層や活動区間の検討に活用する。

(2) 令和3年度の成果

(a) 業務の要約

1) 浅部反射法探査

昨年度実施した現地踏査をふまえて選定した測線や探査仕様に基づき2021年9月に浅部反射法探査を実施した。恵那山断層と猿投山北断層、猿投－境川断層を横切る約5～7

km長の計3本の測線において探査を実施した。反射法区間では発振点間隔5m、受振点間隔10mとし、発振周波数を10～140Hzあるいは200Hzとした高分解能な浅部反射法探査を実施した。また、各測線延長部において速度構造を求めるための屈折法のデータ取得を行った。猿投山北断層を横切る測線では、サブテーマ2で実施したトレンチ調査地点付近において、発振点間隔1m、受振点間隔2m、発振周波数の上限を384Hzとした極高密度高分解能探査を実施した。各探査において良好なデータが得られたことを確認した。

当該地域の既存の反射法調査のデータの再解析に着手した。1999年に実施された反射法探査のデータが再解析可能な状態で現存することを確認し、予備的解析として、データの読み出し、調査仕様や諸元の確認、波形の描画等を実施した。

2) 過去に発生した地震活動の再解析

恵那山断層の地表トレースがステップしている領域を対象に、Double Difference法によって微小地震の精密震源再決定を行った。その結果、当該領域の深さ約11kmに恵那山断層に平行、あるいは共役な面構造が存在することが明らかになった。また、昨年度に報告した恵那山断層と猿投山北断層の接合部で発生した地震の面的構造をそのまま地表まで延長した地点には、地質図上に断層の存在が示されている。

(b) 業務の実施方法

本年度の業務項目は、下記の2項目とした。

- 1) 浅部反射法探査の実施と既存の反射法調査のデータの再解析
- 2) 過去に生じた微小地震の精密震源再決定

各項目の実施方法は以下の通りである。詳しくは次節「(c)業務の成果」で述べる。

1)では、恵那山－猿投山北断層帯の西半部と東半部の境界付近における複数の断層、ならびに屏風山断層及び猿投山北断層との間の地下での連続性を把握するとともに、各断層の地下での三次元的形状や連続性等を明らかにするため、浅部反射法探査を実施した。本年度は、昨年度実施した予備調査により選定した測線と調査仕様に基づいて浅部反射法探査を実施した。また、当該地域の既存の反射法調査のデータの再解析に着手した。

2)では、恵那山断層、猿投山北断層、猿投－境川断層の境界付近、及び恵那山断層の地表トレースがステップしている地域や恵那山断層沿いに発生した地震群を対象にDouble Difference法によって精密震源再決定を行い、震源分布から深部における断層周辺の面構造の把握を行った。

(c) 業務の成果

1) 浅部反射法探査の実施と既存の反射法調査のデータの再解析

1-1) 浅部反射法探査の実施

昨年度に選定した探査測線は図1に示す測線1、2、3の3測線であり、測線長合計は約17.8kmである。

- ① 測線1：猿投山北断層地表位置及び猿投－境川断層地表位置を横切る全長約5.4km
(図2)

- ・ 測線概要：愛知県県道33号線上の東西約5.4km区間。

- ・断層との位置関係：測線西側において猿投山北断層を横断し、測線東側で猿投一境川断層を横切る。
- ② 測線 2：恵那山断層地表位置南端付近において猿投山北断層地表位置を横切る全長約 7.0 km（図 3）
 - ・測線概要：岐阜県県道 13 号線及び同県道 33 号線上の東南東－西北西方向の約 7 km 区間。
 - ・断層との位置関係：測線中央部において猿投山北断層地表位置を横切る。
- ③ 測線 3：恵那山断層地表位置を横断する全長約 5.3 km（図 4）
 - ・測線概要：富田川及び吉田川に沿う南東－北西方向の約 5.3 km 区間。
 - ・断層との位置関係：測線中央部の二か所で恵那山断層地表位置を横切る。

調査測線上に想定される地質構造に応じて、調査測線を浅層反射法区間と屈折法延長・接続区間及び極浅層反射法区間（測線 1 のみ）に以下のように区分した。

1. 浅層反射法区間

以下の計 4 区間で受振点間隔 10 m、発振点間隔 5 m の浅層反射法発振記録を取得する。

- ・測線 1：猿投山北断層地表位置を横断する 2 km 区間及び猿投一境川断層地表位置を横断する 2 km 区間
- ・測線 2：猿投山北断層地表位置を横断する 3 km 区間
- ・測線 3：恵那山断層地表位置を横断する 4 km 区間

2. 極浅層反射法区間

測線 1 のうち、猿投山北断層地表位置を横断する 200 m 区間において、受振点間隔 2 m、発振点間隔 1 m の極浅層反射法発振記録を取得する。

3. 屈折法区間

- ・全 3 測線について、受振点間隔 25m 以下（屈折法延長区間・接続区間を含む全受振点展開）、発振点間隔 100m の屈折法発振記録を取得する。

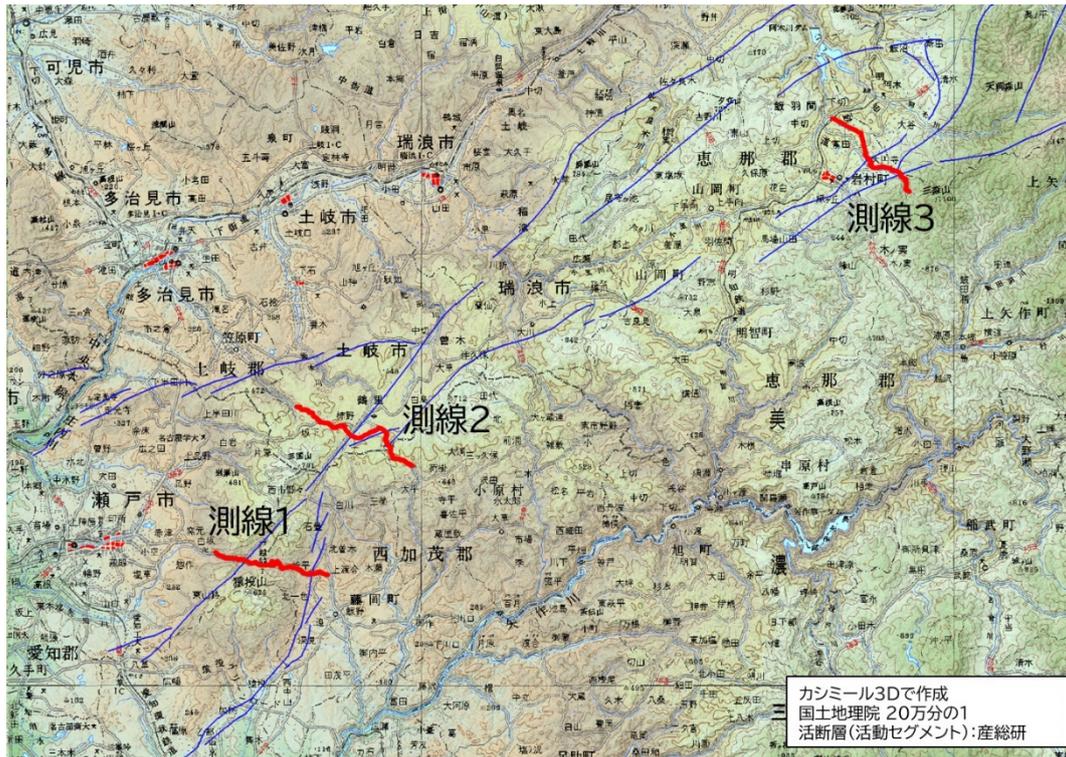


図1 選定した探査測線（全体）。国土地理院 20 万分の 1 地図に加筆。断層の地表トレースは産業技術総合研究所による活断層データベースによる。



図2 測線1（長さ約 5.4km）。国土地理院の地理院地図に都市圏活断層図（岡田・他，2017）の断層の地表トレースを参照して加筆。



図3 測線2 (長さ約 7.0 km)。国土地理院の地理院地図に都市圏活断層図 (岡田・他, 2017) の断層の地表トレースを参照して加筆。

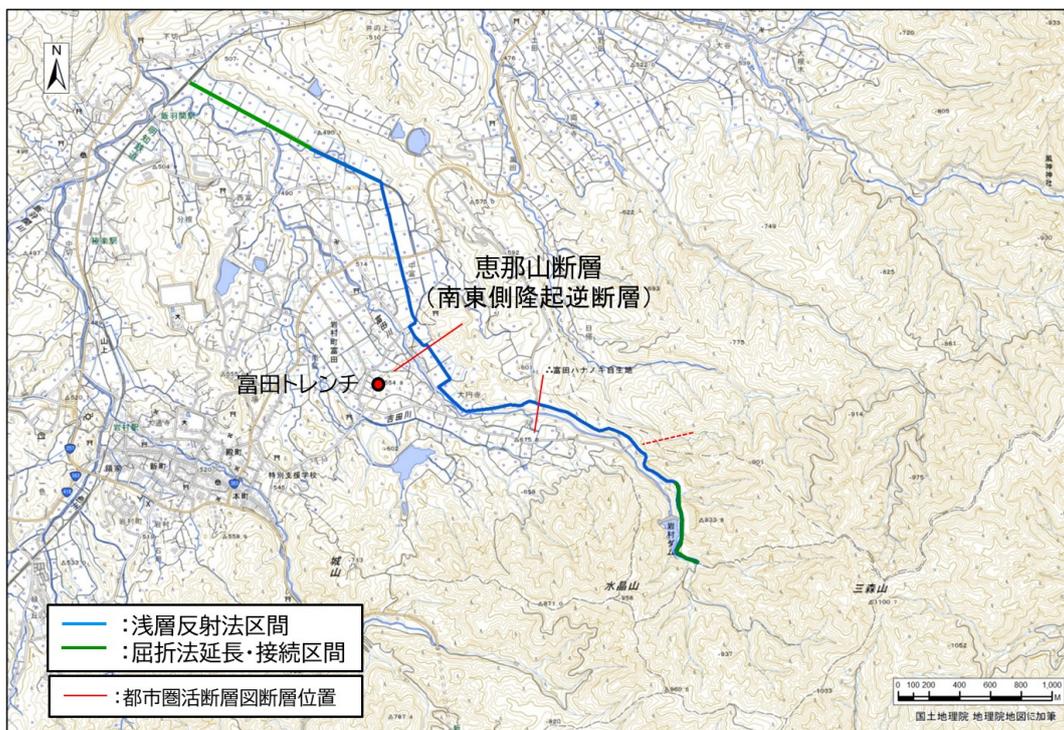


図4 測線3 (長さ約 5.3 km)。国土地理院の地理院地図に都市圏活断層図 (岡田・他, 2017) の断層の地表トレースを参照して加筆。

データ取得作業は（株）地球科学総合研究所に委託した。データ取得作業に先立って測量作業を2021年8月27日に開始し9月13日に完了した。データ取得作業は2021年9月1日から同年9月15日までの15日間に実施した。震源には大型バイブロサイス（UNIVIB2）1台を使用した。本観測の前にテスト発振を行い、記録の変化と周辺環境への影響（振動及び騒音）を考慮して、スイープ周波数及び出力と発振回数を決定した。さらに、発振作業中においても、発振点の路面状況及び民家等の周辺環境に応じて発振回数及び出力を適宜調整した。例えば、地下浅部に埋設管が通る箇所、民家や事務所の前といった場所での発振の際には出力や発振回数を減じた。なお、測線3では、調査直前に降雨による影響で測線南東端の橋が崩落し、大型車が進入できなくなったことから、南東端での屈折法発振を取りやめた。

以下に、浅層反射法、極浅層反射法、屈折法のデータ取得仕様を記載する。

1. 浅層反射法データ取得

[1] バイブロサイス震源仕様

| | |
|---------|--|
| 震源 | UNIVIB2 1台 |
| 発振点位置 | 受振点間中点 |
| 発振点間隔 | 5 m |
| スイープ数 | 2回 |
| スイープタイプ | Linear up Sweep |
| スイープ周波数 | 10-140 Hz (測線1東側、測線3) 10-200 Hz (測線1西側、測線2) |
| スイープ長 | 16 sec. |
| 発振点数 | 測線1：799点 測線2：519点 測線3：676点 |

[2] 受振仕様

| | |
|-------|---|
| 受振器 | SG-5、SM-5(固有周波数5Hz) |
| 受振点間隔 | 10 m |
| 受振点数 | 測線1：東側201点、西側292点 測線2：282点 測線3：378点 |

[3] 記録仕様

| | |
|------------|------------------------------------|
| 記録システム | Sercel社428XL Sercel社UNITE (測線2) |
| サンプル間隔 | 1 msec. |
| 記録長(相互相関後) | 3 sec. |
| 展開長 | 片側1km以上 |

2. 極浅層反射法データ取得

[1] バイブロサイス震源仕様

| | |
|--------------------|------------------------------------|
| 震源 | UNIVIB2 1台 |
| 発振点位置 | 受振点位置+受振点間中点 |
| 発振点間隔 | 1 m |
| スイープ数 | 1回 |
| スイープタイプ | Linear up Sweep |
| スイープ周波数 | 10-384 Hz |
| スイープ長 | 16 sec. |
| 発振点数 | 測線1：200点 |
| [2] 受振仕様 | |
| 受振器 | SG-5 (固有周波数 5 Hz) |
| 受振点間隔 | 2 m |
| 受振点数 | 100点 |
| [3] 記録仕様 | |
| 記録システム | Sercel社428XL |
| サンプル間隔 | 0.5 msec. |
| 記録長 (相互相関後) | 1 sec. |
| 展開長 | 200 m 固定展開 |
| 3. 屈折法データ取得 | |
| [1] バイプロサイス震源仕様 | |
| 震源 | UNIVIB2 1台 |
| 発振点位置 | 受振点位置 |
| 発振点間隔 | 100 m |
| スイープ数 | 8回 |
| スイープタイプ | Linear up Sweep |
| スイープ周波数 | 4-50 Hz (測線1、測線2) 6-50 Hz (測線3) |
| スイープ長 | 20 sec. |
| 発振点数 | 測線1：57点 測線2：61点 測線3：39点 |
| [2] 受振仕様 | |
| 受振器 | SG-5、SM-5 (固有周波数 5 Hz) |
| 受振点間隔 | 25 m以下 |
| 受振点数 | 測線1：554点 測線2：456点 測線3：434点 |
| [3] 記録仕様 | |
| 記録システム | Sercel社428XL Sercel社UNITE (測線2) |

| | |
|------------|---------|
| サンプル間隔 | 1 msec. |
| 記録長（相互相関後） | 4 sec. |
| 展開長 | 全点固定展開 |

図 5 に観測の状況を示す。



極浅層発振区間有線展開



独立型記録システム



測線 1 (RP436)



測線 2 (RP220)



測線 3 (RP445)



観測車

図 5 現場での観測の状況（写真は（株）地球科学総合研究所提供）。RP は受振点位置（番号）を表す。

各測線においてデータ取得仕様に基づいて得られた浅層反射法、極浅層反射法、屈折法のそれぞれの発振記録の特徴や品質について、以下にいくつか例をあげて記す。浅層反射法発振記録については、全体として、交通ノイズ等により品質の低い記録が一部に見られるものの、ほとんどの発振記録においてオフセット距離 1 km 程度までの範囲内の記録の品質は良好であり、浅層反射法の記録として高い品質が確保されていると判断できる。屈折法発振記録については、一部にノイズレベルの高い受振区間があること、及び結果的に震源の出力が不足した場合があったことから、一部の発振点－受振点距離が長い測線端において屈折波初動の不明瞭な記録が見られるものの、大半の記録で受振展開の全域で明瞭な初動が捉えられていた。よって、全般的に良質な記録が得られたと評価できる。

1. 反射法記録（共通発振点記録）

① 測線 1

この測線では、大型車両（ダンプ）を含む交通量の多い区間や時間帯があったことから、記録の信号とノイズの比（S/N 比）がやや低い記録が一部に含まれている。

測線中央における浅層反射法発振の記録（図 6）では、発振点の東側と西側ともオフセット距離約 1.5 km 程度まで屈折波初動を視認することができる。陸上、特に今回のような山間地における反射法探査の記録では、発振記録上では反射波は必ずしも明瞭でなく視認が困難であるのが一般的である。しかしながら、発振点の西側近傍（ニアオフセット領域）の往復走時 0.15 秒付近、東側オフセット距離約 1 km 程度の往復走時 0.3 秒付近に反射波と思われる双曲線上のイベント（波群）が認められる（赤矢印）。

測線西側における極浅層反射法発振では 384 Hz という陸上反射法探査としては我が国では過去に例を見ない極高周波数までの発振を実施した。記録（図 7）では、原記録では浅部の屈折波初動以降に低周波数の繰り返しが顕著であるが、周波数 50 Hz 以下を除去する Low-cut filter を適用した後の記録においては、一部の受振点で初動の遅れが認められる箇所が明確になった（オレンジ色矢印）。また、この箇所付近の往復走時 0.1 秒付近に反射波あるいは回折波と思われるイベントが確認できる（赤矢印）。これらの位置はトレンチや過去の調査から確認できる断層破碎帯付近に対応しているため、これらのイベントは断層破碎帯によって形成されている可能性が高いと考えられる。

② 測線 2

この測線の東側はおおむね静穏な区間であるが、測線の西側は大型車両を含め比較的交通量が多かったため S/N 比が低下すると予想された。測線中央よりやや西側における浅層反射法発振の記録（図 8）では、発振点から西側で、車両ノイズにより信号が見えなくなっている区間がある。また、測線東端では S/N 比が低く信号が視認しにくくなっている。測線中央やや西側での発振記録では浅部に反射波が視認できる。発振点の東側で 0.07 秒付近に反射波と思われるイベントが認められ（赤矢印）、断層が形成する谷部における堆積層下の基盤層上面からの反射波と考えられる。

③ 測線 3

この測線の東部は山間地を通り東端は行き止まりの道路であることや中央から西部は田園地域であることから、車両の往来が非常に少なくおおむね静穏な環境である。ただし、測線

西側の富田川沿いの区間では流水ノイズにより S/N 比がやや低下している。測線北西側からの浅層反射法発振の記録（図 9）では、発振箇所地盤がやや軟弱であったことから、測線東端に達するまでの発振力が不足していたと考えられるが、屈折波初動がおおむね追跡可能である。発振点の近傍（ニアオフセット領域）において表面波の振幅が相対的に強いが、往復走時 0.2 秒付近に平野部の基盤層上面からの反射波（赤矢印）が明瞭に認められ、それ以浅の浅部堆積層内の反射波も認められる。

2. 反射法記録（共通受振点記録）

今回の浅層反射法及び極浅層反射法の発振記録では発振点間隔が受振点間隔よりも小さいため、共通発振点記録よりも共通受振点記録の方が波群の水平方向の連続性を視認しやすい。

① 測線 1

測線西側の浅層反射法の記録（図 10）では、受振点（RP273）より西側で屈折波初動がオフセット距離 1.8 km 程度まで明瞭に確認できる。SP3940 付近で屈折波初動が屈曲していることが視認できる（赤矢印）。また、この初動の屈曲を生じさせた原因である構造不均質に由来すると考えられる回折波が確認できる。図 7 でも指摘したように、この位置は地表で確認できる断層の位置に対応していることから、この回折波は断層構造による不均質によって生じたと考えられる。

測線西側における極浅層反射法発振の記録（図 11）では、SP3965 付近の屈折波初動の屈曲が視認できる。150 Hz 以下の周波数を低減させる高周波成分の強調処理を適用した記録（右）では、受振点極近傍の往復走時 0.1 秒付近まで連続的に反射波と考えられるイベントが確認できる。

② 測線 2

測線ほぼ中央の受振点の記録（図 12）では、受振点（RP236）から東側にオフセット距離 0.7 km 付近までは見かけ速度 2000 m/s 程度で伝播する屈折波が認められる。それ以遠は初動の傾きが変化することから、深部に高速度層の存在が示唆される。同様に、受振点から西側にオフセット距離 0.2 km 付近までは屈折波の見かけ速度 2000 m/s 程度であるのに対して、以遠は見かけ速度 4000 m/s 程度の屈折波が確認できる。20 Hz Low-cut filter 適用後の浅部の拡大図（右）では、受振点のごく近傍に反射イベントが確認できる（赤矢印）。

③ 測線 3

測線東南の受振点の記録（図 13）では、受振点（RP69）から北西側にオフセット距離 1.5 km 程度まで屈折波初動が確認できるものの、それ以遠はノイズが覆っており視認が困難である。同 0.9 km 付近から下位の高速度層（基盤層）からの屈折波が認められる。往復走時 0.3 秒付近に反射波が認められ（赤矢印）、発振点位置からこれが断層からの反射波の可能性もあると考えられる。

3. 屈折法記録

① 測線 1（図 14）

両端の発振点からの発振では、初動が一部不明瞭な区間を含み、測線の反対側では S/N 比が低下するものの、おおむね端（オフセット距離約 4.5km）まで初動が確認できる。測線中央の発振では測線両端まで明瞭に初動を読み取ることができる。屈折波の見かけ速度は、オフセット距離 1 km 程度までは約 2800 m/s であるが、それ以降は約 3300 m/s、約 5000 m/s 変化することが屈折波初動の傾きから読み取ることができ、深さとともに速度が増加する層構造の存在が示唆される。西側と東側の発振記録で屈折波の初動の傾きが変化するオフセット距離が異なっていることから、構造（各層の深さ）の違いがあることが予見できる。また、中央発振の記録に見られる表面波の伝播速度からも、発振点の東側が西側よりも表層が高速度であることが読み取れる。

② 測線 2（図 15）

測線西側で S/N 比が低下していることから、東側の発振記録ではオフセット距離約 3.5 km まで屈折波初動が確認できるものの、それ以遠は初動の視認が困難である。一方、西側からの発振では測線東端（オフセット距離約 6 km）まで屈折波初動が読み取り可能である。両端からの発振では浅部から屈折波初動の傾きの明瞭な変化は見られないため、見かけ速度 4000 m/s 程度の高速度層が浅部から地下深部に連続的に存在することが示唆される。中央発振の記録では、発振点近傍での見かけ速度は東側では 2500 m/s 程度、西側では 1800 m/s 程度、遠方での見かけ速度は 4000 m/s 程度であり、測線中央部に堆積層が存在することに対応していると考えられる。

③ 測線 3（図 16）

発振点から測線端（オフセット距離約 4 km）までおおむね屈折波初動が確認できる。この測線は、特に測線の北西側で他の測線と比べて堆積層が厚く存在しており、そのため、初動の屈折が明瞭に現れている。オフセット距離約 2～3 km までの見かけ速度は 2000～3000 m/s 程度、それ以遠は 5000 m/s を越える屈折波速度が読み取れる。また、北西側発振の記録からは見かけ速度 3500 m/s 程度の中間層の存在も示唆される。

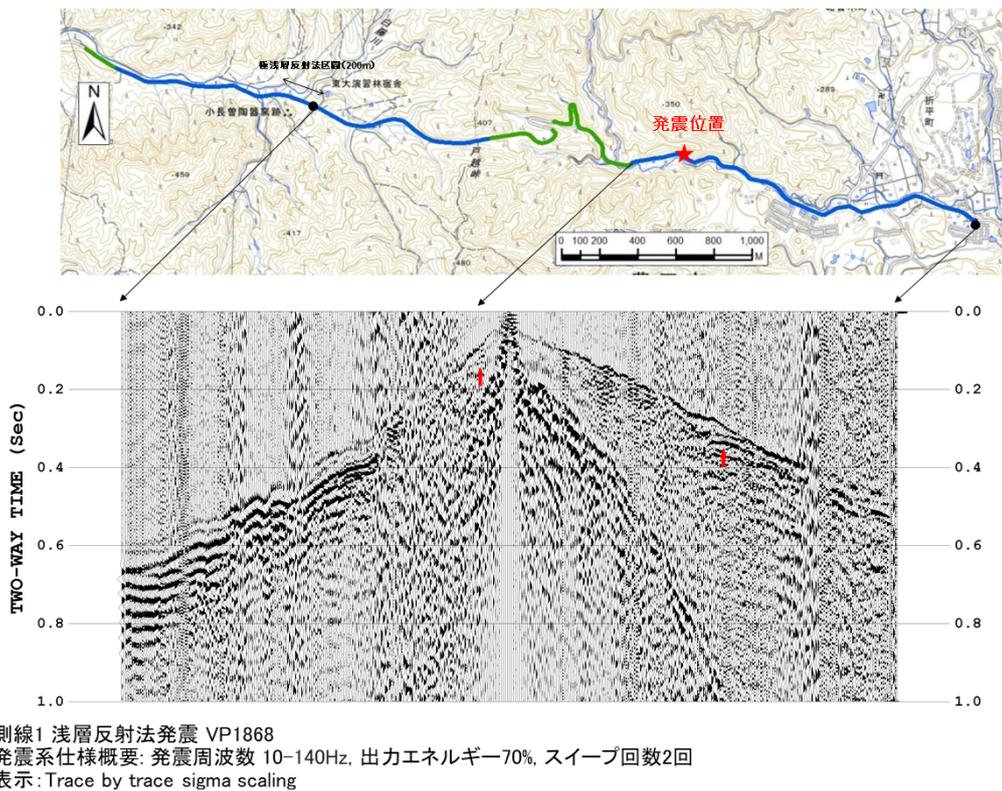


図6 浅層反射法の記録の例（測線1）。国土地理院の地理院地図に加筆。

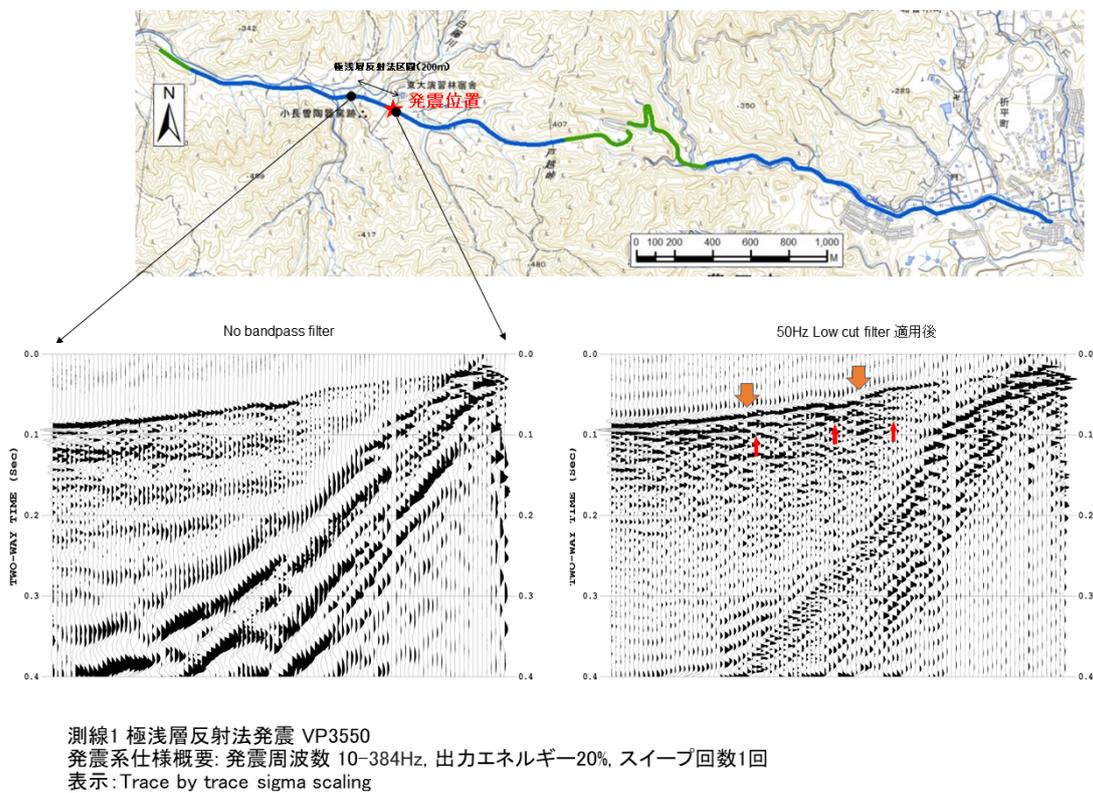


図7 極浅層反射法の記録の例（測線1）。国土地理院の地理院地図に加筆。

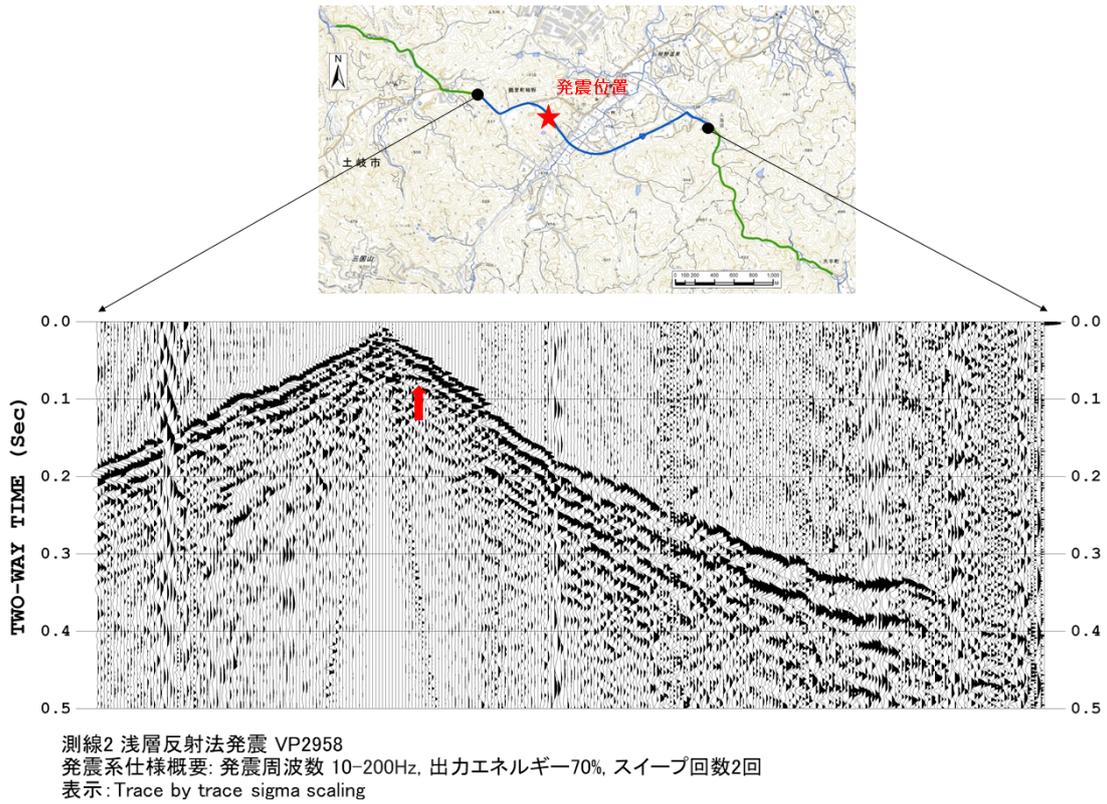


図8 浅層反射法の記録の例（測線2）。国土地理院の地理院地図に加筆。

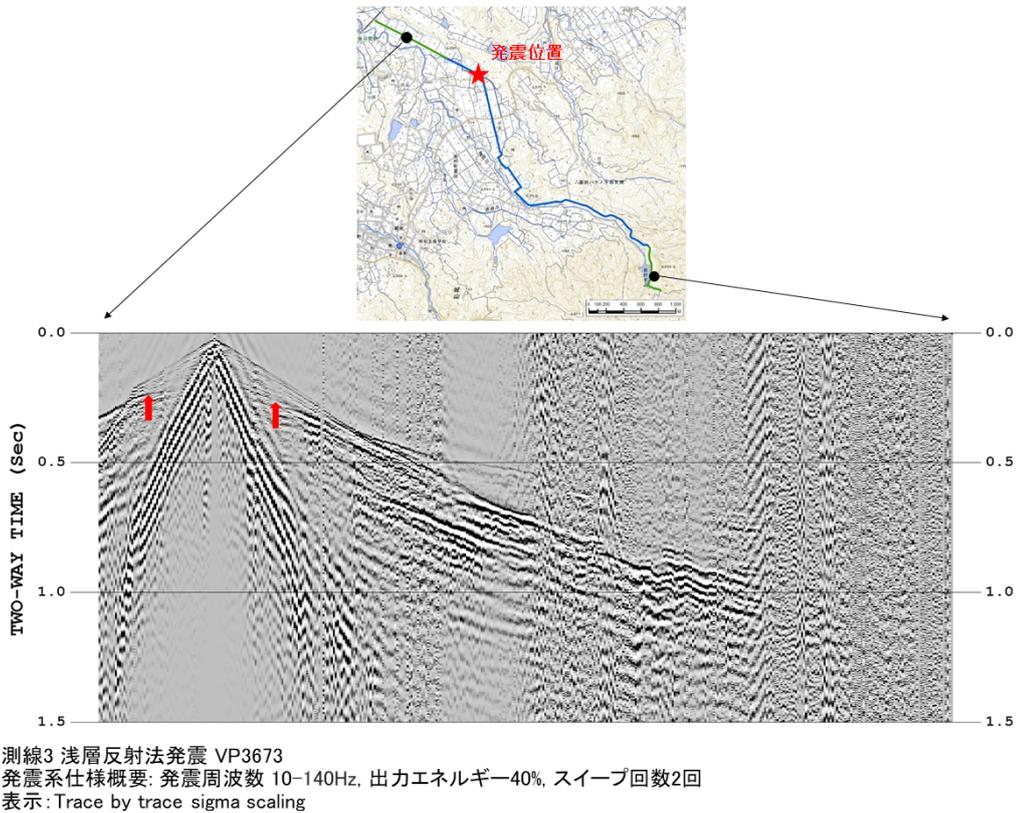
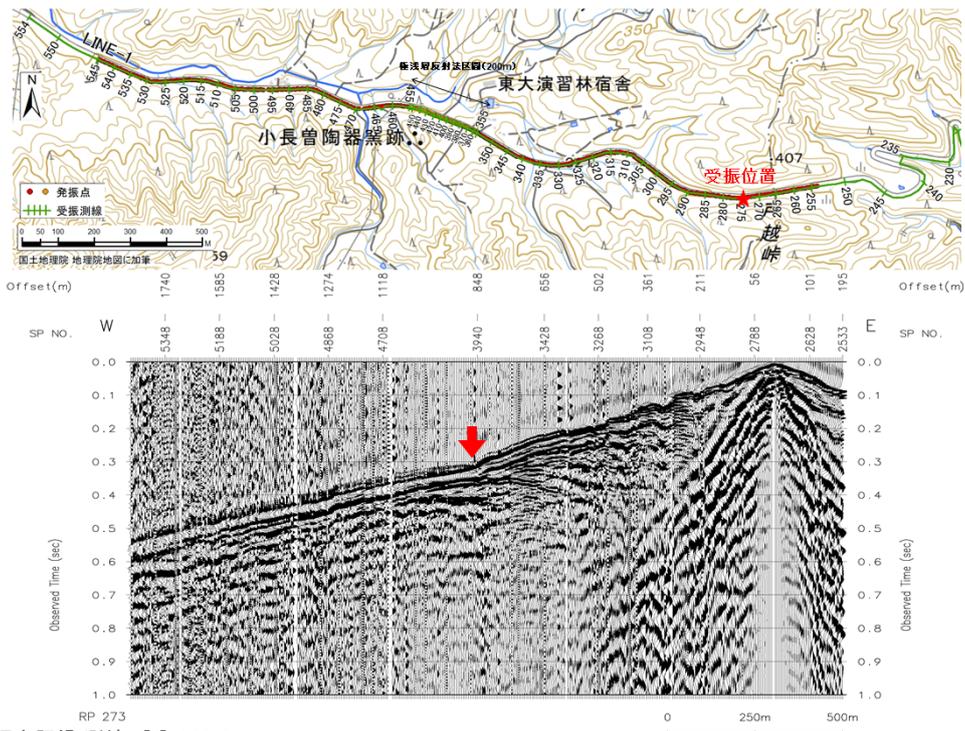
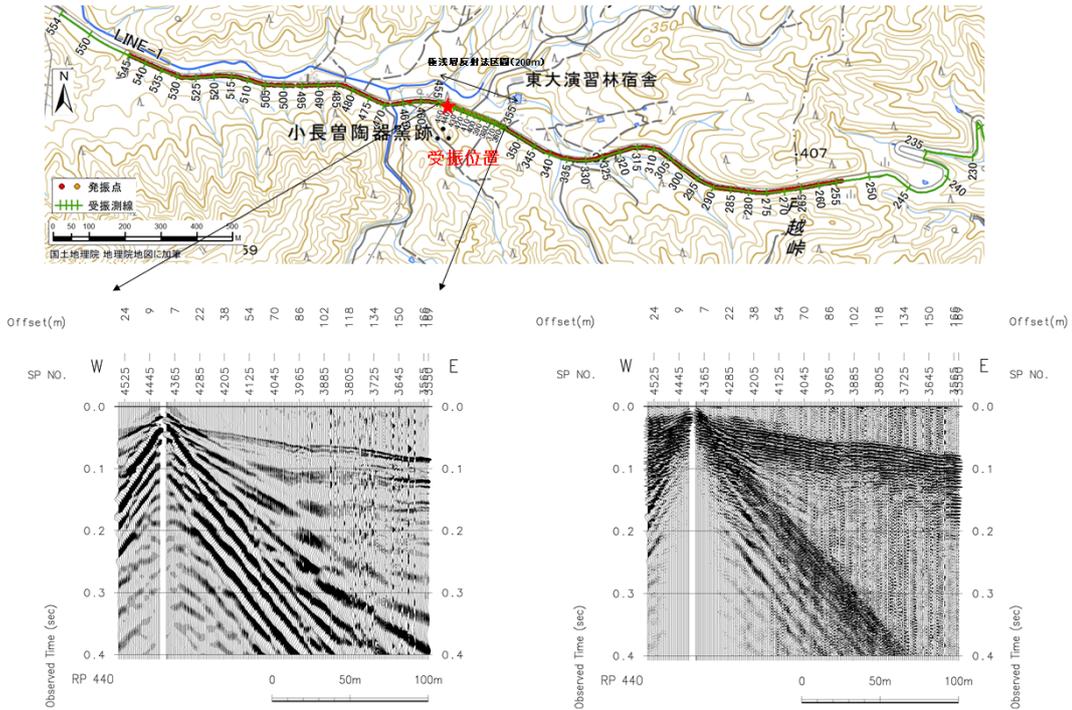


図9 浅層反射法の記録の例（測線3）。国土地理院の地理院地図に加筆。



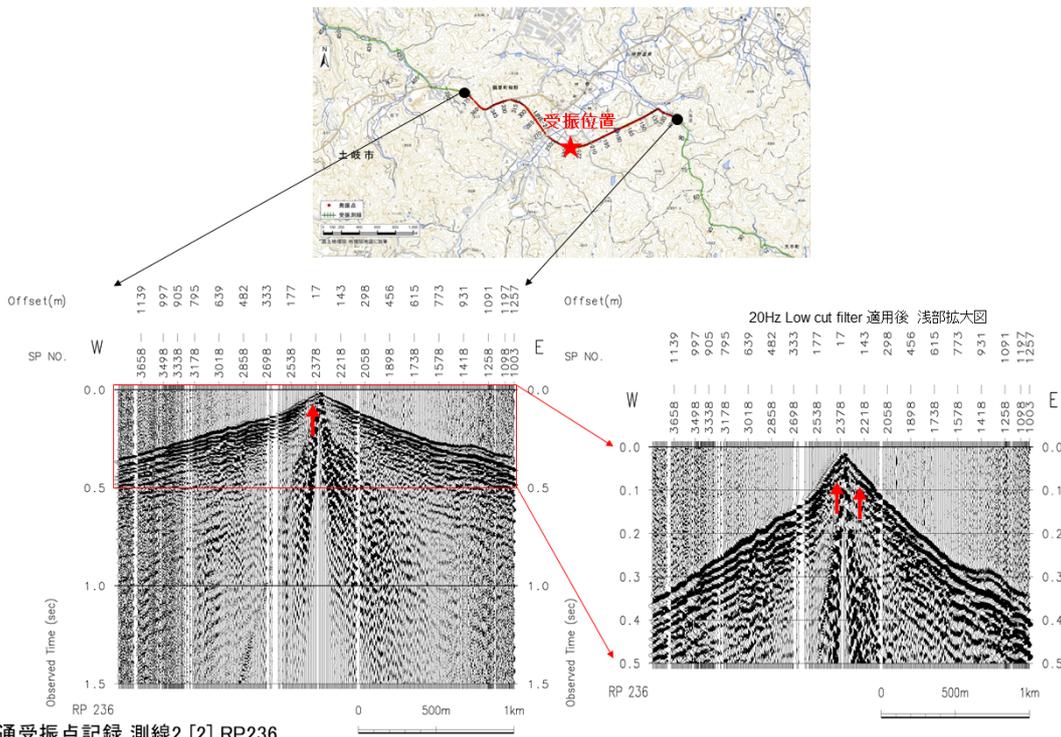
共通受振点記録 測線1 [8] RP273
 発震系仕様概要: 発震周波数 10-200Hz
 表示: Trace by trace sigma scaling

図 10 浅層反射法共通受振点記録の例 (測線 1)。国土地理院の地理院地図に加筆。



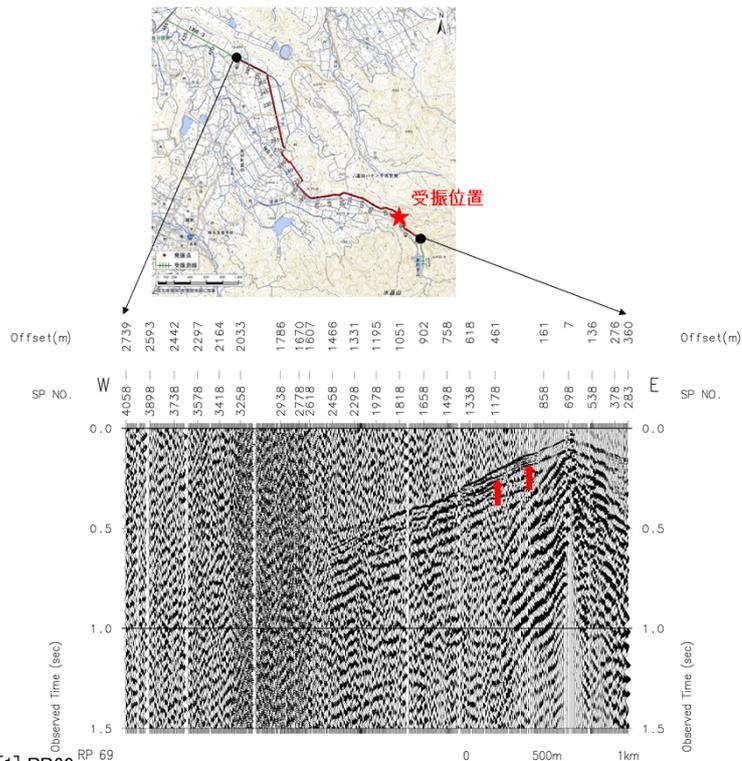
共通受振点記録 測線1 [7] RP440
 発震系仕様概要: 発震周波数 10-384Hz
 表示: Trace by trace sigma scaling

図 11 極浅層反射法共通受振点記録の例 (測線 1)。国土地理院の地理院地図に加筆。



共通受振点記録 測線2 [2] RP236
 発震系仕様概要: 発震周波数 10-200Hz
 表示: Trace by trace sigma scaling

図 12 浅層反射法共通受振点記録の例 (測線 2)。国土地理院の地理院地図に加筆。



共通受振点記録 測線3 [1] RP69
 発震系仕様概要: 発震周波数 10-140Hz
 表示: Trace by trace sigma scaling

図 13 浅層反射法共通受振点記録の例 (測線 3)。国土地理院の地理院地図に加筆。

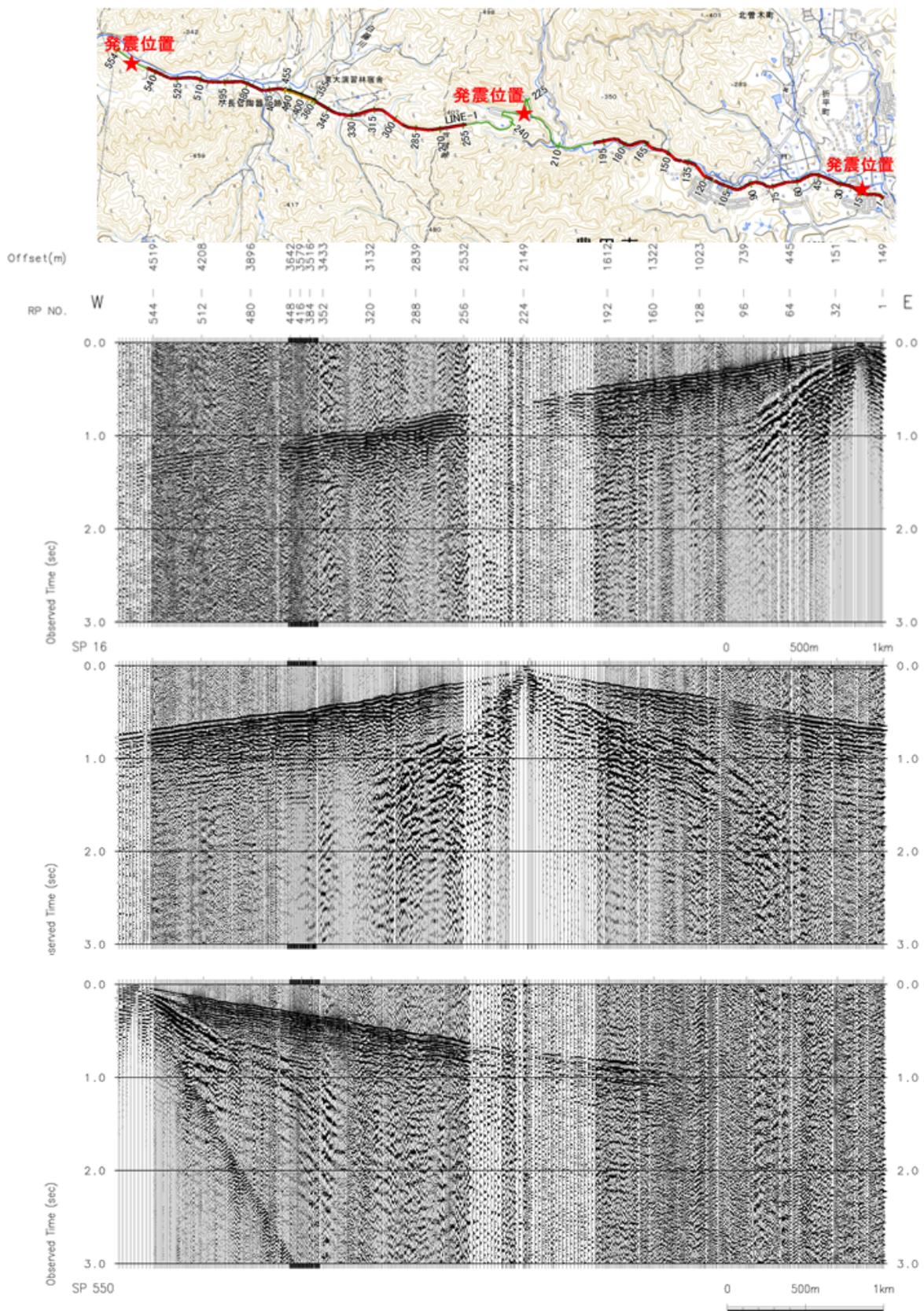


図 14 屈折法記録の例（測線 1）。国土地理院の地理院地図に加筆。

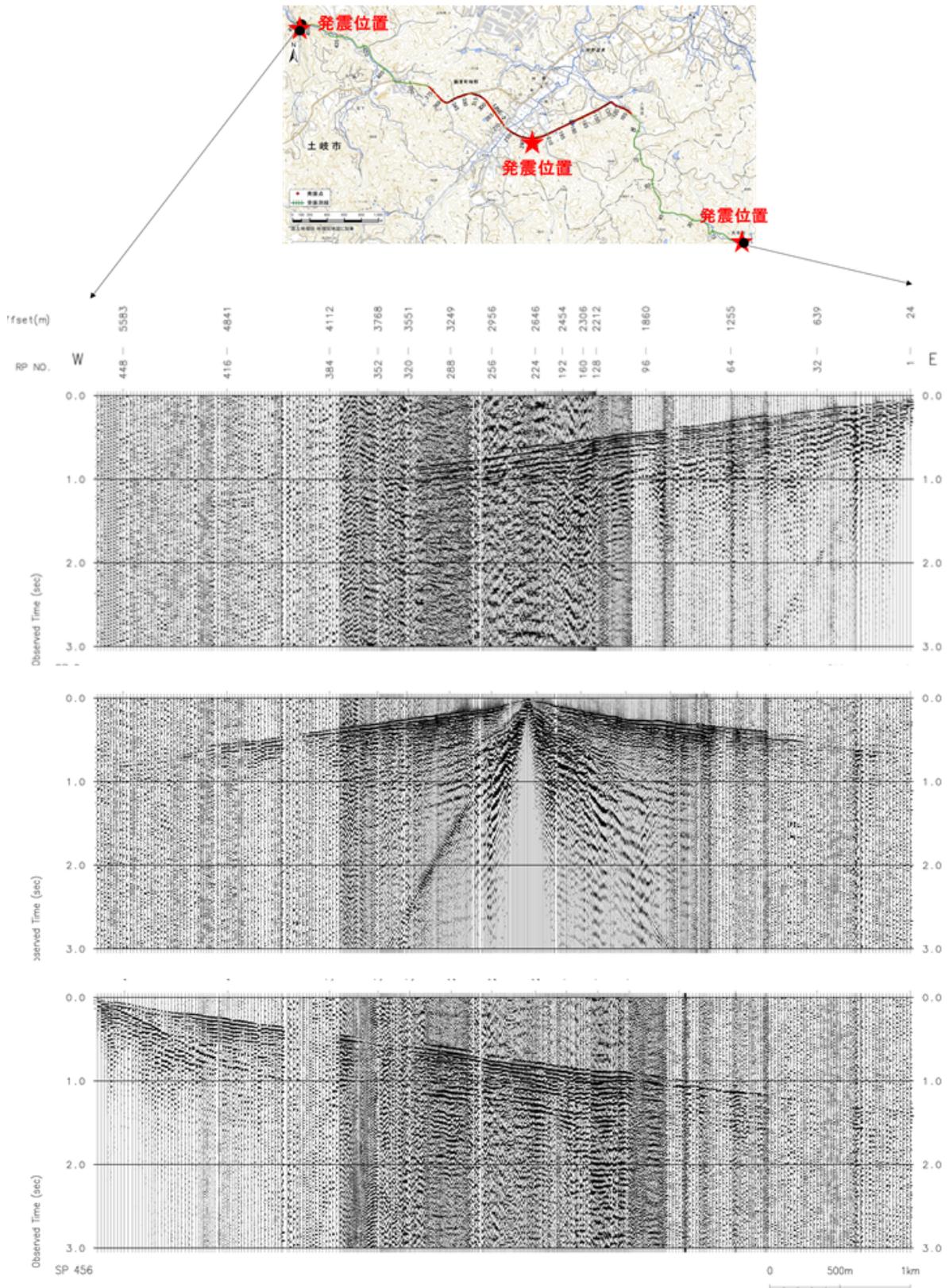


図 15 屈折法記録の例（測線 2）。国土地理院の地理院地図に加筆。

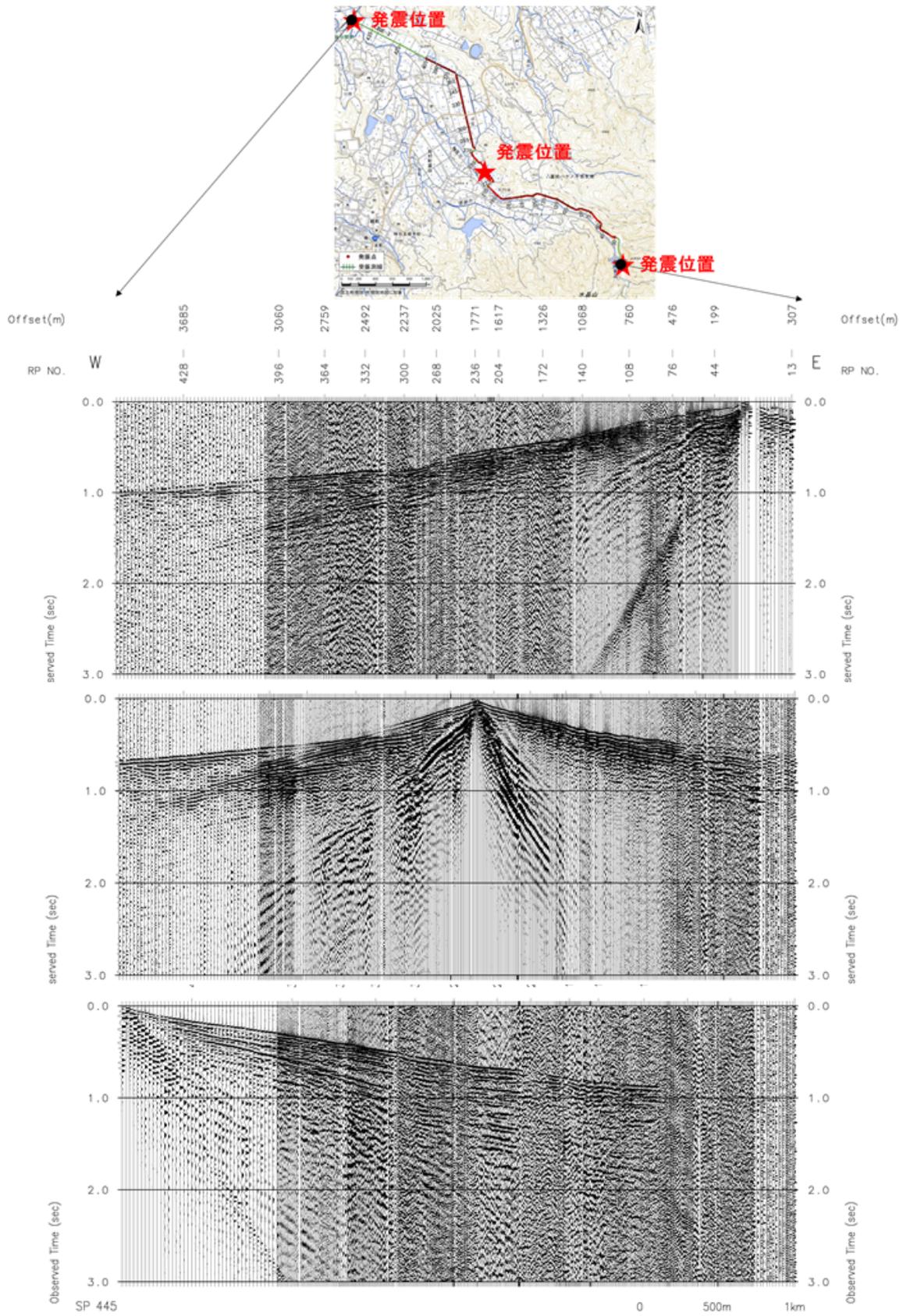


図 16 屈折法記録の例（測線 3）。国土地理院の地理院地図に加筆。

1-2) 既存の反射法調査のデータの再解析

本調査の地域で実施された既存の反射法調査として、1999年に財団法人地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所（当時）が実施した屏風山断層調査（財団法人地震予知総合研究振興会，2000）の一環として実施された反射法探査があり、知られている限りこの調査が比較的近年でこの断層帯を対象とした唯一の反射法調査である。同所の許諾を得て、このデータの再解析を行うこととした。以下、このデータを「東濃地震研1999」と称する。

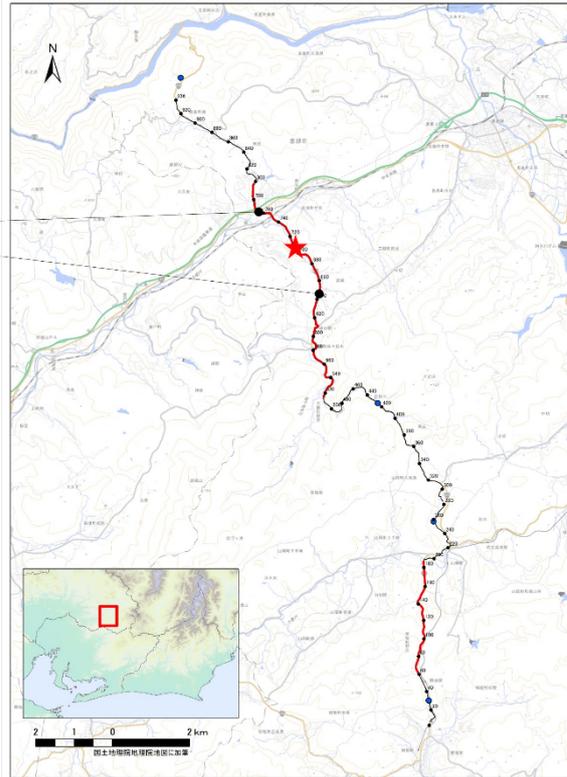
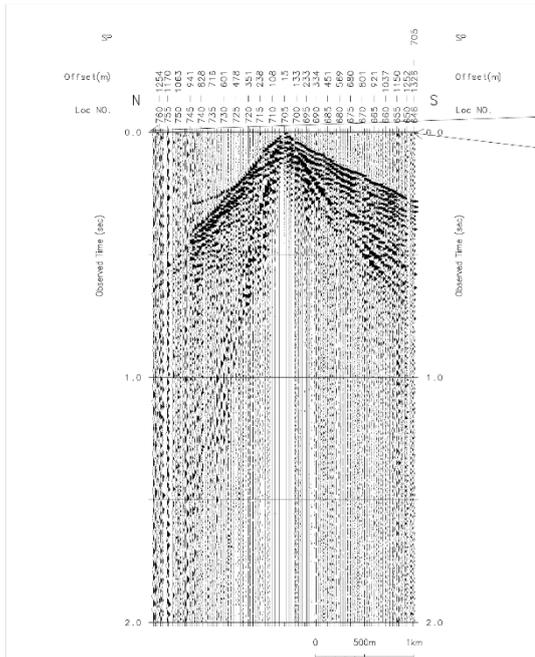
今回の調査にあたり、東濃地震研1999の調査のデジタルデータが存在することが確認された。そこで、波形データを記録メディアから読み取ることができること、解析に必要な調査ジオメトリや各種データ諸元が報告書及びデジタルデータとして利用可能な形で揃っていることを確認し、結果として、このデータを現在の最新の解析技術を用いて再解析することが可能であることがわかった。

表1に東濃地震研1999の主な調査仕様を示す。当時は受振チャンネル数に限りがあるため、例えば今回実施した調査のような受振点の固定展開ではなく、発振点にしたがって受振点展開を移動することが行われていた。図17に測線の一部で実施された浅層反射法記録（北部区間と南部区間の2区間）の観測波形の例を示す。

表1 既存探査データ（東濃地震研1999）の主な調査仕様

| | 深部探査法 | 浅部反射法 | | 屈折法 |
|---------|---------|--------|--------|---------|
| | | 北部区間 | 南部区間 | |
| 測線長 | 23.4 km | 7.0 km | 3.1 km | 23.4 km |
| 発振点間隔 | 100 m | 25 m | 25 m | |
| 受振点間隔 | 25 m | 25 m | 25 m | 25 m |
| 受振展開長 | 8 km | 3 km | 3 km | 固定展開 |
| サンプルレート | 4 ms | 4 ms | 4 ms | 4 ms |
| チャンネル数 | 320 ch | 120 ch | 120 ch | 936 ch |
| 記録長 | 20 s | 5 s | 5 s | 20 s |

平成10年度東濃地震科学研究所
 屏風山断層バイプロサイズ調査
 浅部区間(北側)発振記録例



平成10年度東濃地震科学研究所
 屏風山断層バイプロサイズ調査
 浅部区間(南側)発振記録例

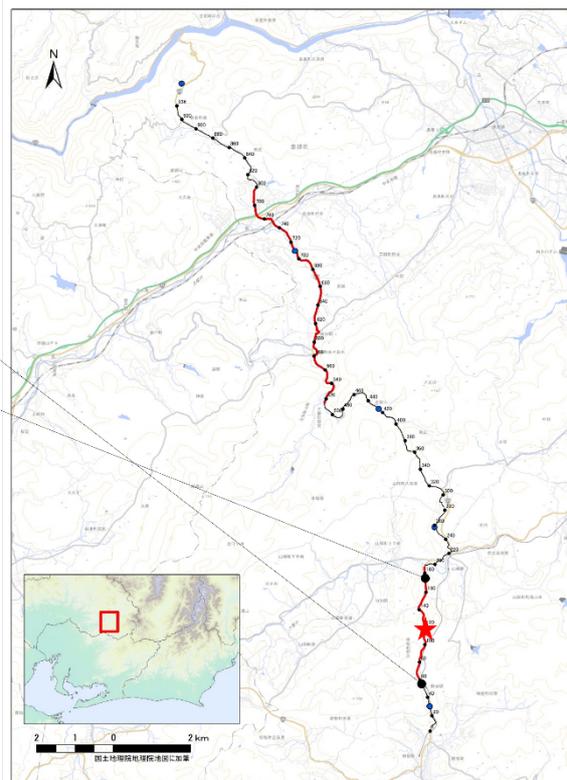
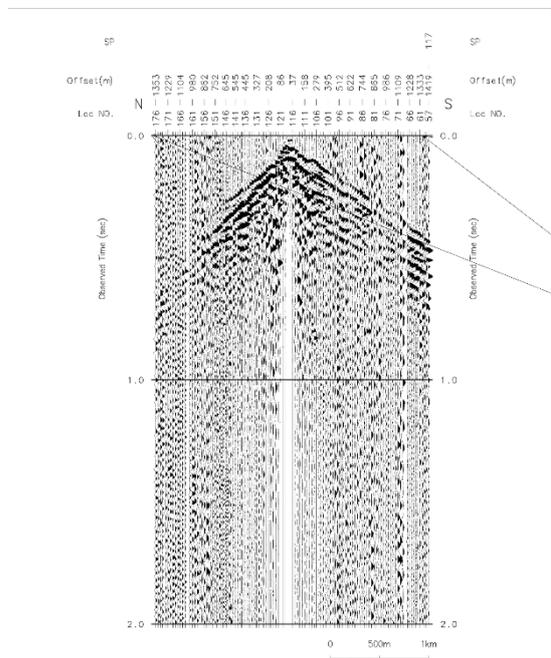


図 17 東濃地震研 1999 の浅層反射法記録の波形の例。(上) 北部区間、(下) 南部区間。赤星印が発振点位置、黒丸印が受振点配置の端を示す。国土地理院の地理院地図に加筆。

2) 過去に発生した微小地震の精密震源再決定

昨年度は、恵那山断層、猿投山北断層、猿投一境川断層の境界付近（領域A：図18）で過去に発生した微小地震の精密震源再決定を行い、当該領域の深部における面構造の推定を行った。本年度は、領域Aの解析期間を延長するとともに、恵那山断層の地表トレースがステップしている地点に発生した地震群（領域B：図18）についても同様の解析を行った。

領域A、領域Bともに2002年6月3日から2018年12月31日に深さ20km以浅で発生したマグニチュード（M）0.2以上の地震を解析対象とした。気象庁一元化震源リストから抽出した解析候補の地震は、領域Aが439個、領域Bが77個であった。精密震源決定に先立ち、防災科学技術研究所高感度地震観測網（Hi-net）、気象庁、名古屋大学、京都大学防災研究所、産業技術総合研究所の定常観測点（領域A：70点、領域B：77点）で収録された地震波形を用いて、P波及びS波の手動験測を行った。次に、hypoDDプログラム（Waldhauser, 2001）を用いてDouble Difference法（DD法；Waldhauser and Ellsworth, 2000）によって精密震源再決定を行った。初期震源位置は、上記の手動験測結果を用いてhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）によって決定した。地震波速度構造は、Matsubara *et al.*（2019）のP波速度構造を参照し、P波速度とS波速度の比（ V_p/V_s ）は1.73とした。解析候補とした地震の中から、地震ペアとの距離が60km以内に位置する観測点のうち8観測点以上でP波とS波の読み取り値がともに存在し、地震ペア間の距離が10km以内のものを選別した。この条件に適合した地震の数は領域Aが438個、領域Bが77個であり、走時差ペアの数は、領域Aが777941ペア、領域Bが31619ペアであった。また、DD法での解析に使用された観測点数は、領域A、領域Bともに防災科学技術研究所Hi-net、気象庁、名古屋大学、産業技術総合研究所の計36であった。

震源再決定結果を図19に示す。領域Aで発生した地震は、主に3つのグループ（①～③）に分離していることが明らかになった。地震群①は、深さ12～14kmに位置しており、2006年12月19日に発生したM4.4の地震を含む走向 235° （ $N55^\circ E$ 方向）、傾斜 $70\sim 80^\circ$ （ $70\sim 80^\circ NW$ ）の面上に分布している。走向、傾斜の値は、気象庁の初動発震機構解（走向 228° 、傾斜 63° ）や防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netで取得された地震波形から求められたモーメントテンソル解（走向 228° 、傾斜 70° ）と整合的である。この面的地震分布の傾斜の向きは近くに位置する猿投山北断層や恵那山断層とは異なるため、地震群①はこれらの断層面上で発生したものとは考えにくい。一方、愛知県（1999）は、瀬戸市東白坂地区においてボーリング調査を実施しており、猿投山北断層の傾斜を約 $78^\circ SE$ と報告している。地震群①付近においてもこの傾斜が保たれており、かつ地下深部まで一定であると仮定すれば、地震群①が分布する面の深部で猿投山北断層と接続することになる。また、この面的分布をそのまま地表まで延長した地点には、5万分の1地質図「明智」に断層の存在が示されている。領域Aでは、ほかにも走向 73° のほぼ鉛直（南西にやや傾斜）な地震群②や、走向 253° （ $N73^\circ E$ 方向）のほぼ鉛直な地震群③が分布している。地震群③は、2007年9月24日に発生したM2.9の地震を含む面上に分布しており、その走向、傾斜は気象庁の初動発震機構解（走向 240° 、傾斜 80° ）に近い。

領域Bで発生した地震も、主に3つのグループ（④～⑥）に分離していることが明らか

になった。地震群④は、走向 39° 、傾斜 45° (45° SE)の面上に分布している。この傾斜は恵那山断層の一般的な傾斜 ($30\sim 50^\circ$ SE ; 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2004)と整合的であり、恵那山断層の地表トレースがステップしている地点の深部約11kmに、恵那山断層と平行な面的地震分布が検出された。地震群⑤は、地震分布の連続性には乏しいが、走向は 230° ($N50^\circ$ E方向)であり、恵那山断層の一般的な走向である $N55^\circ$ Eとよく一致している。また、傾斜が約 40° (40° NW)であり、恵那山断層と共役な構造を成していると考えられる。この地震群も深さ約11kmに位置している。これらのほかに断層の地表トレースから離れた地点に走向 50° のほぼ鉛直 (南東にやや傾斜) な地震群⑥が分布している。

このような面状の地震分布は、恵那山断層沿いの深部におけるこの断層に関する小規模な面構造の存在を示唆している。DD法による精密震源決定結果から明らかになった深部における面構造を模式的に図20に示す。

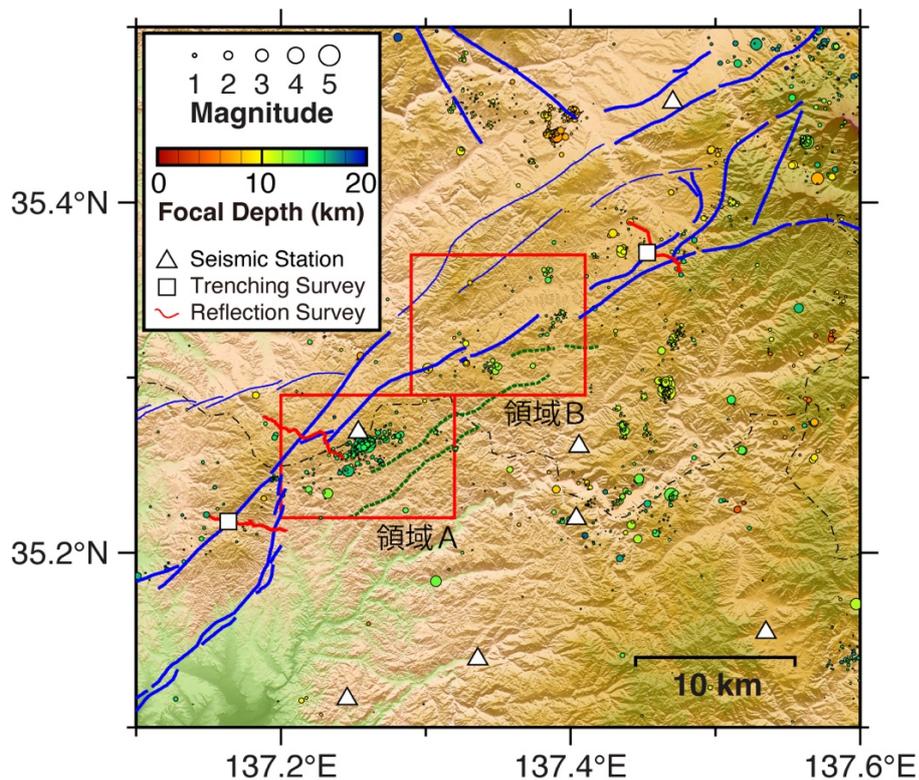


図18 2002年6月3日から2018年12月31日に深さ20km以浅で発生したM0.2以上の地震 (気象庁一元化震源リストによる) の震源分布、及び精密震源再決定の解析対象領域 (領域A及び領域B)。サブテーマ2で実施したトレンチ調査の位置とサブテーマ3で実施した浅部反射法探査の測線も併せて示す。地形データは国土地理院による基盤地図情報数値標高モデル (10mメッシュ) を使用した。青の実線は産業技術総合研究所による活断層データベースによる断層の地表トレース。緑の破線は産業技術総合研究所による5万分の1地質図「明智」 (山崎ほか, 2020) に記されている断層の地表トレース。

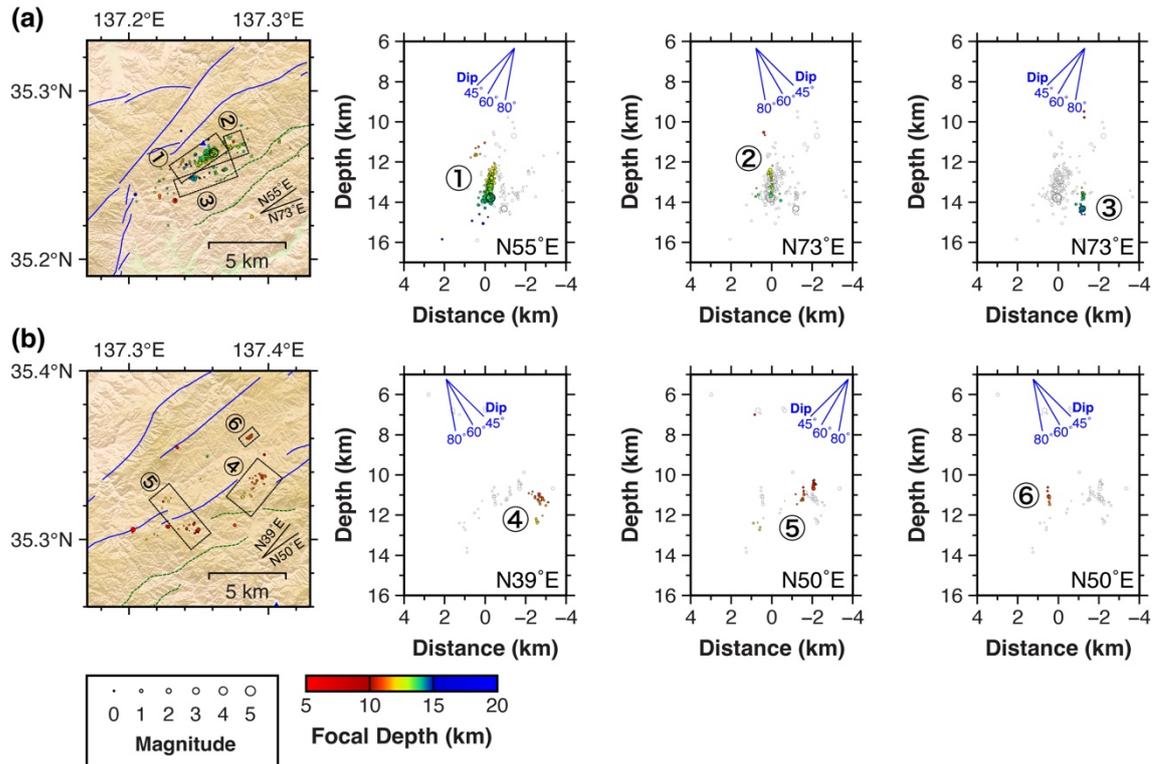


図19 (a)領域A及び(b)領域BにおけるDD法による精密震源再決定結果に見られる地震群(①～③及び④～⑥)の深さ分布。地震群ごとにそれぞれの地震群の並びの方向に投影している。青三角は地震観測点(気象庁愛知小原)。地形データは国土地理院による基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ)を使用した。青の実線は産業技術総合研究所による活断層データベースによる断層の地表トレース。緑の破線は産業技術総合研究所による5万分の1地質図「明智」(山崎ほか, 2020)に記されている断層の地表トレース。

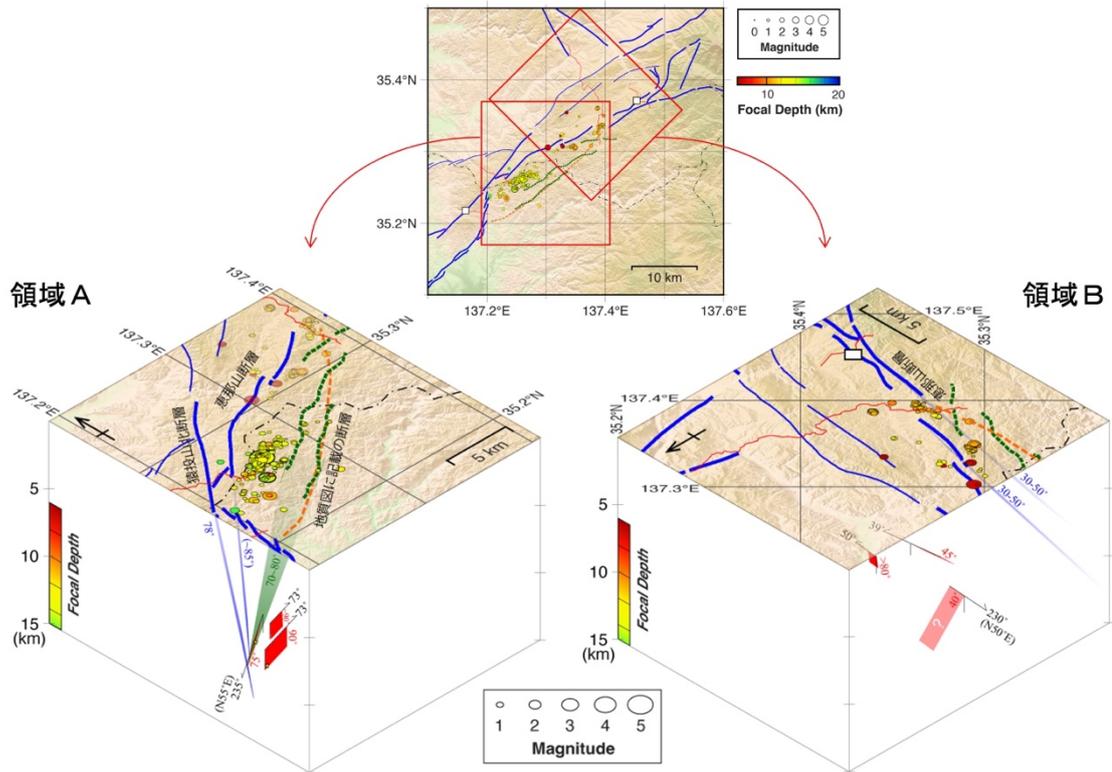


図20 DD法による精密震源決定結果から明らかになった深部における面構造の模式図。領域A、領域Bそれぞれについて別の断面に投影している。

(d) 結論ならびに今後の課題

昨年度選定した測線と探査仕様にに基づき2021年9月に浅部反射法探査を実施した。恵那山断層と猿投山北断層、猿投山-境川断層において、約5～7km長の計3本の測線において反射法探査及び屈折法探査を実施した。猿投山北断層測線においては極高密度高分解能探査を実施した。探査は計画通り実施され、一部の測線や受振点でS/N比が低かったものの、良好なデータが得られた。各測線で初動はほぼ全体にわたって視認でき、簡単な見かけ速度の算出結果でも各測線の地下構造を反映していることが推察できた。また、ほぼ原記録の状態でも基盤面からの反射波や基盤面での屈折波が明瞭に視認できた。断層からの反射波や断層構造を反映していると考えられる波形変化も確認できた。次年度はこのデータと既存の反射法調査のデータから地下構造断面を作成し、解釈を加えて、断層帯とその周辺の地下構造を明らかにする。記録された波形には断層の存在を示す兆候が認められるものの、断層構造そのものをどこまで詳細に描けるかは挑戦的な課題である。

過去に生じた微小地震の精密震源再決定によって、恵那山断層、猿投山北断層、猿投-境川断層の境界付近や、恵那山断層の地表トレースがステップしている地点の直下に合わせて6つの面状の地震分布が確認された。恵那山断層、猿投山北断層、猿投-境川断層の境界付近の深部12～14kmには、この地域としてはやや規模の大きいM4.4の地震を含む面構造が存在している。この面構造は、近くに位置する猿投山北断層や恵那山断層の断層面とは異なるものであり、そのまま地表まで延長した地点には地質図に断層の存在が示され

ている。恵那山断層の地表トレースがステップしている地点の直下約11kmには、恵那山断層と平行な面構造や共役な面構造が存在していることが明らかになった。

(e) 引用文献

愛知県, 「猿投山断層帯に関する調査成果報告書」, 1999.

防災科学技術研究所, 広帯域地震観測網 F-net ,
<https://www.fnet.bosai.go.jp/top.php>

Hirata, N. and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with original time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Int.*, 47, 50-61, 1987.

地震調査研究推進本部地震調査委員会, 屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯の評価, 2004.

気象庁, 地震月報(カタログ編),

<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>

国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス,

<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>

Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, K. Suzuki and S. Kamiya, Seismic velocity structure in and around the Japanese Island arc derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Seismic Waves - Probing Earth System*, IntechOpen, 1-19, 2019.

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0003, 2019.

岡田篤正・廣内大輔・松田信尚・宮内崇裕, 1:25,000都市圏活断層図屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯とその周辺「中津川」, 国土地理院技術資料, D1-No.758, 2017.

産業技術総合研究所, 活断層データベース2012年2月28日版, 産業技術総合研究所研究情報公開データベースDB095, 産業技術総合研究所, 2012.

https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html

Waldhauser, F. and W. Ellsworth, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90(6), 1353-1368, 2000.

Waldhauser, F., hypoDD: A program to compute double-difference hypocenter locations, U.S. Geological Survey Open-File Report 01-113, 2001.

山崎 徹・野田 篤・尾崎正紀, 明智地域の地質, 域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 2020.

財団法人地震予知総合研究振興会, 「屏風山断層帯調査研究委員会報告書」, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No. 5, 2000.