

2023年度成果報告会 プログラムNo.12

地熱発電導入拡大研究開発/
超臨界地熱資源技術開発/

光ファイバーDASによる超臨界地熱資源 探査技術開発

2023年1月31日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

エンジニアリング協会 笠原順三

(一財) エンジニアリング協会、(一財) ファインセラミックスセンター

問い合わせ先 エンジニアリング協会 E-mail: Kasahara.junzo@shizuoka.ac.jp TEL: 080-5055-4897

事業概要

1. 背景・目的

地熱開発の探査の精度の向上が求められているので、地熱フィールドにおいて**定量的に地熱貯留層を求められる汎用的手法を開発**する。

それを用いた地熱モデル構築法も一般化する。特に超臨界地熱系フィールドにおける地熱断裂系の深度、分布、広がりなどを求める手法を開発する

2. 実施期間

開始：2020年7月　　終了（予定）：2025年3月

3. 実施内容・目標（最終）

(1) 既存地熱井を利用した高精度実証試験

(2) 解析・イメージング技術の開発

【最終目標】 DASデータから地下構造を推定する理論的手法の確立
(推定誤差：深さ方向200m、水平方向500m)

(3) DAS用光ファイバーの信頼性向上技術開発

【最終目標】 超臨界水環境下（**目標400℃**）において**適用可能なDAS用光ファイバーシステム**構造の有効性を示す。

(4) 超臨界水候補地での高精度比較実証試験

【最終目標】 **1.5km程度の範囲で深さ4km程度**の地震波反射面の存在の有無を明らかにする。

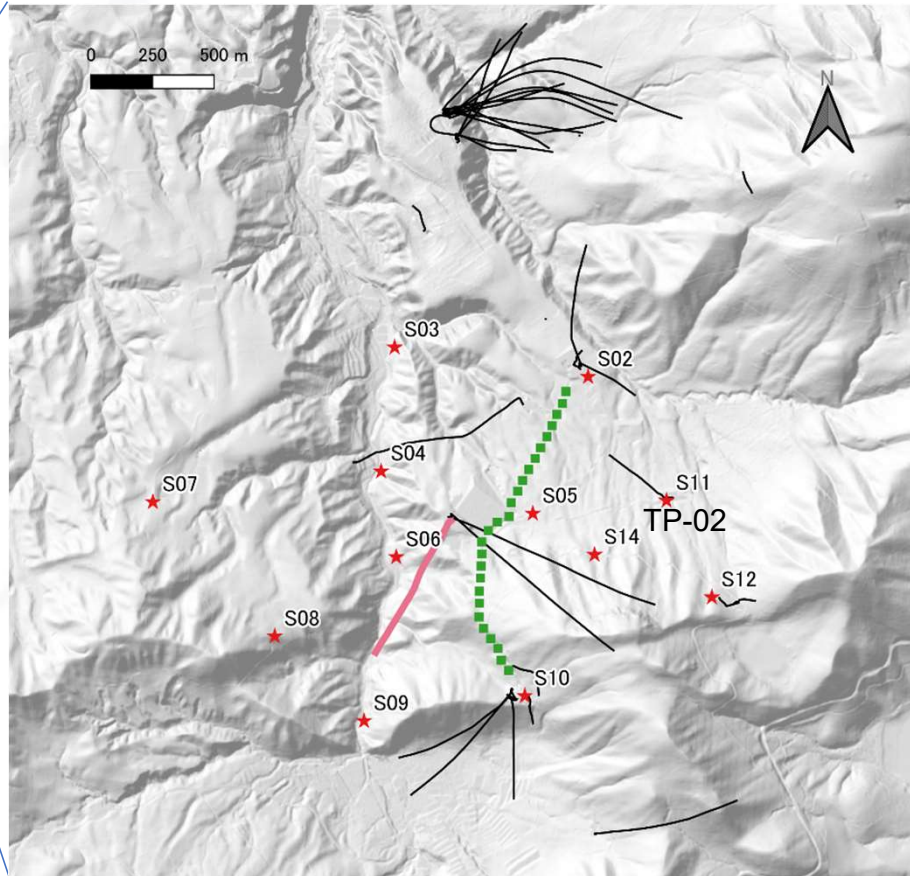
研究成果

テーマ①：既存地熱井を利用した高精度実証試験

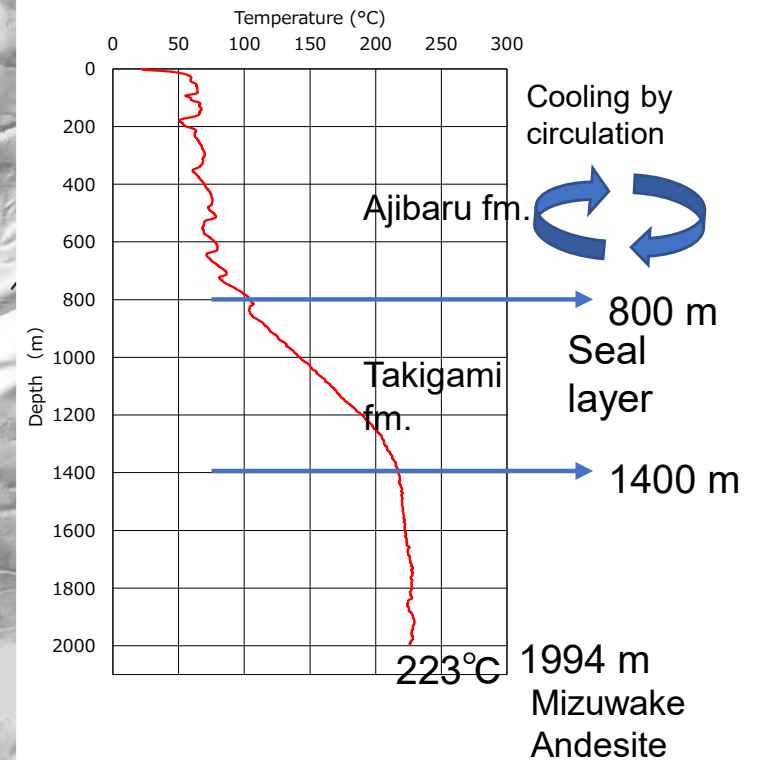
- ・ 2022年5月出光大分地熱社の滝上地熱フィールドにおいて光ファイバーを用いた地震・温度観測を行った。
 - ① TP-02 地熱坑井を用い、深度2 kmまでの温度と振動を計測した。
 - ② 滝上の地震波速度構造を求め、南北断層の位置を正確に求めた。
 - ③ DASの観測記録から反射波を抽出し、反射波のイメージングを行った。
 - ④ その結果、深さ1 kmと2-3 kmに分布する反射ゾーンがあることが分かった。
 - ⑤ DASおよび地表地震計の記録にS波からP波に代わる地震波群があり、その変換する深さは1 kmおよび2.5kmであった。
- ・ 2022年8月東北自然エネルギー社の木地山地熱フィールドにおいて光ファイバーを用いた地震・温度観測を行った。
 - ① 深度2 kmまで光ファイバーを挿入した。
 - ② DTSによる坑井内の温度は288°Cであった。
 - ③ 12か所の震源を用い、DASデータを取得した。
 - ④ 水平加振により横波の推定をおこなった。
 - ⑤ 縦波速度構造をもとめた。
 - ⑥ 反射波のイメージングを得た。

九州滝上の調査位置の温度分布の測定結果

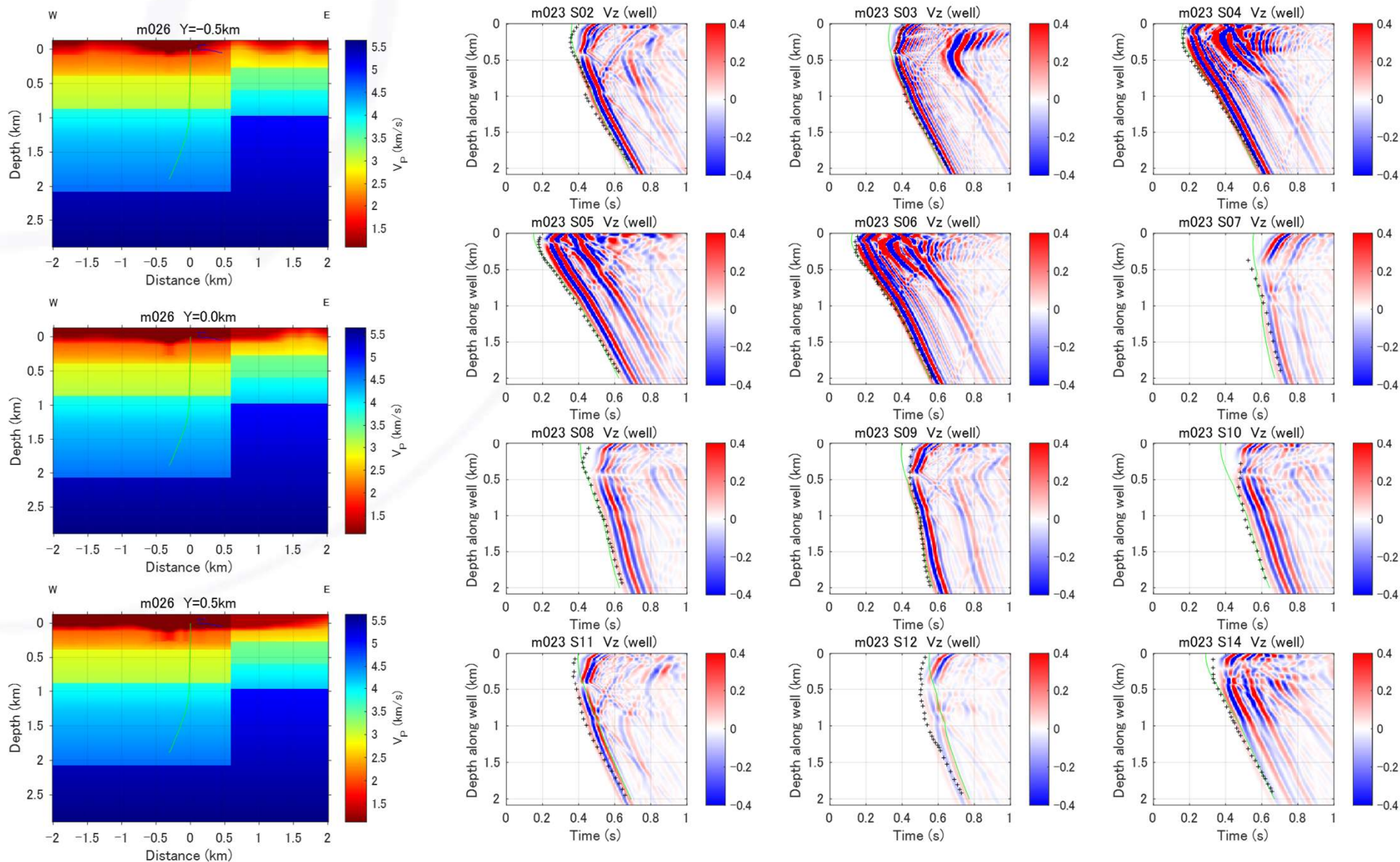
Thick red lin: TP-02 well
 ★: seismic sources
 ■: surface seismometers
 Black lines: other geothermal wells



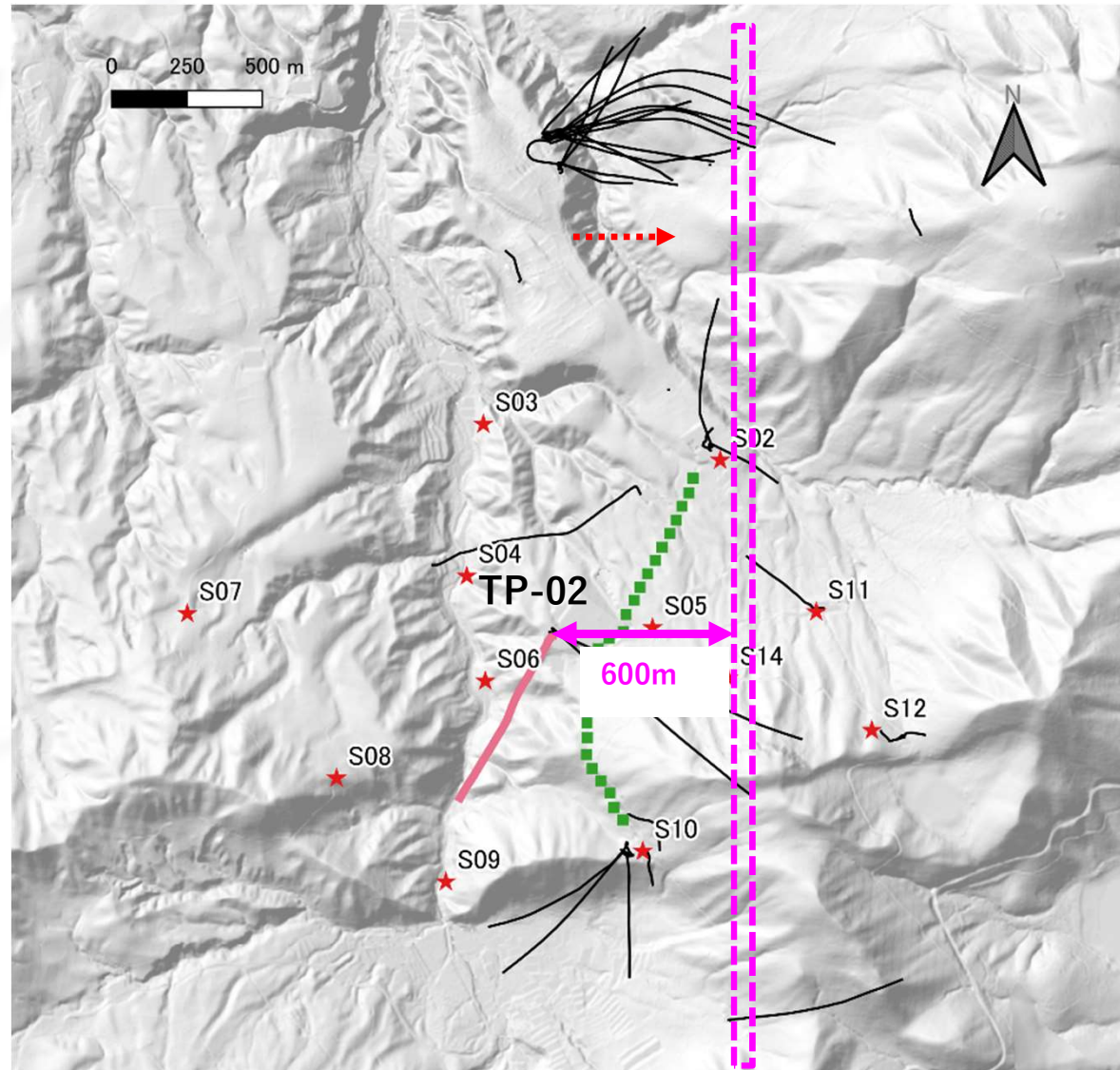
DTSによるTP-02 坑井内の温度分布



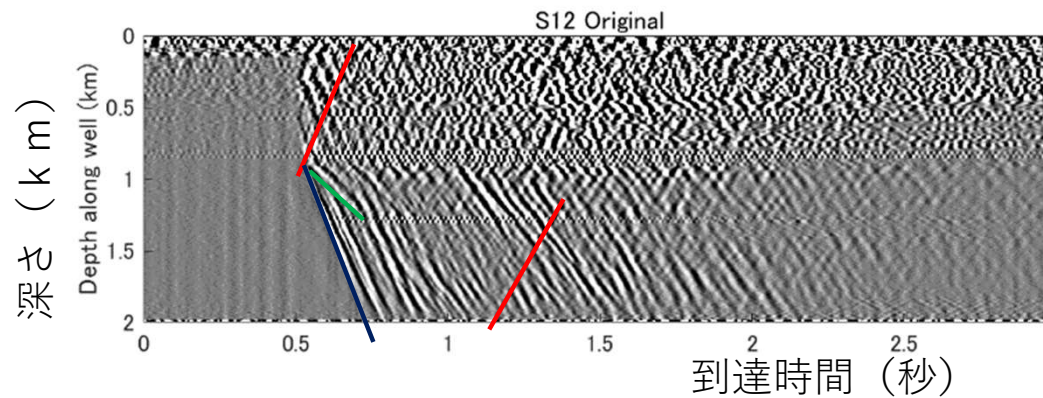
m023モデルによる理論波形と観測走時



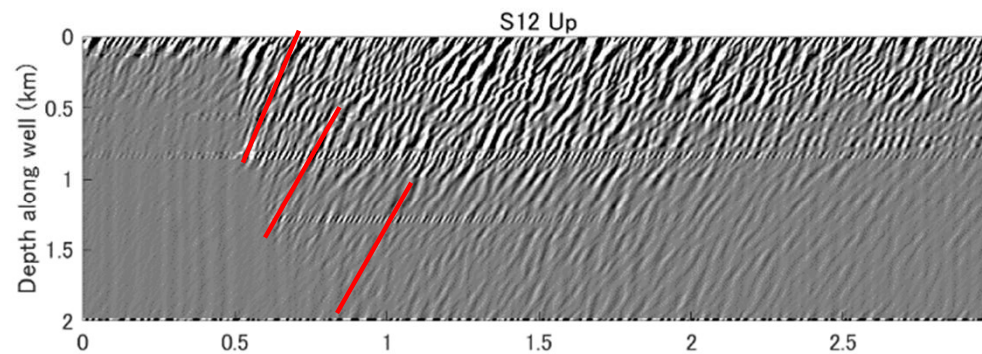
NS走行の断層位置



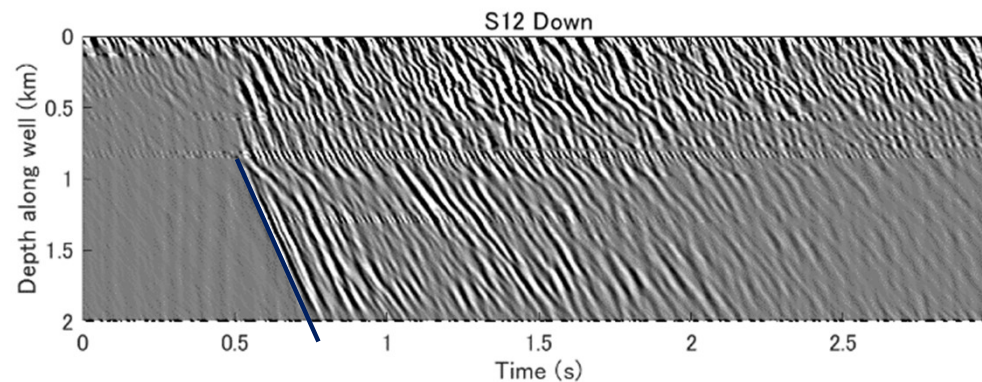
S12 震源での DAS波形例



元のDAS波形

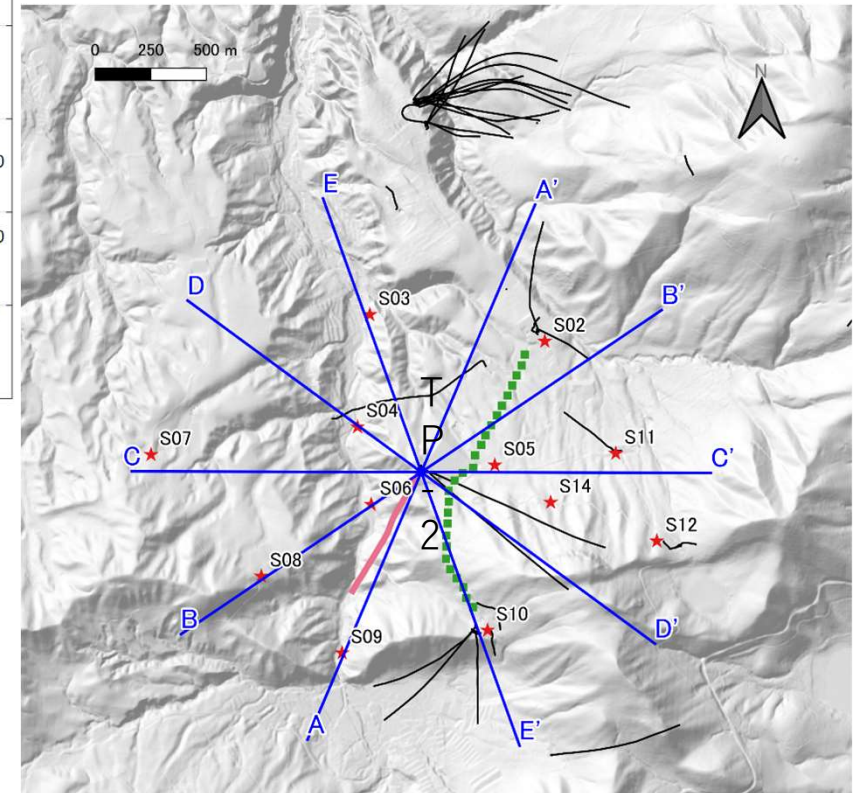
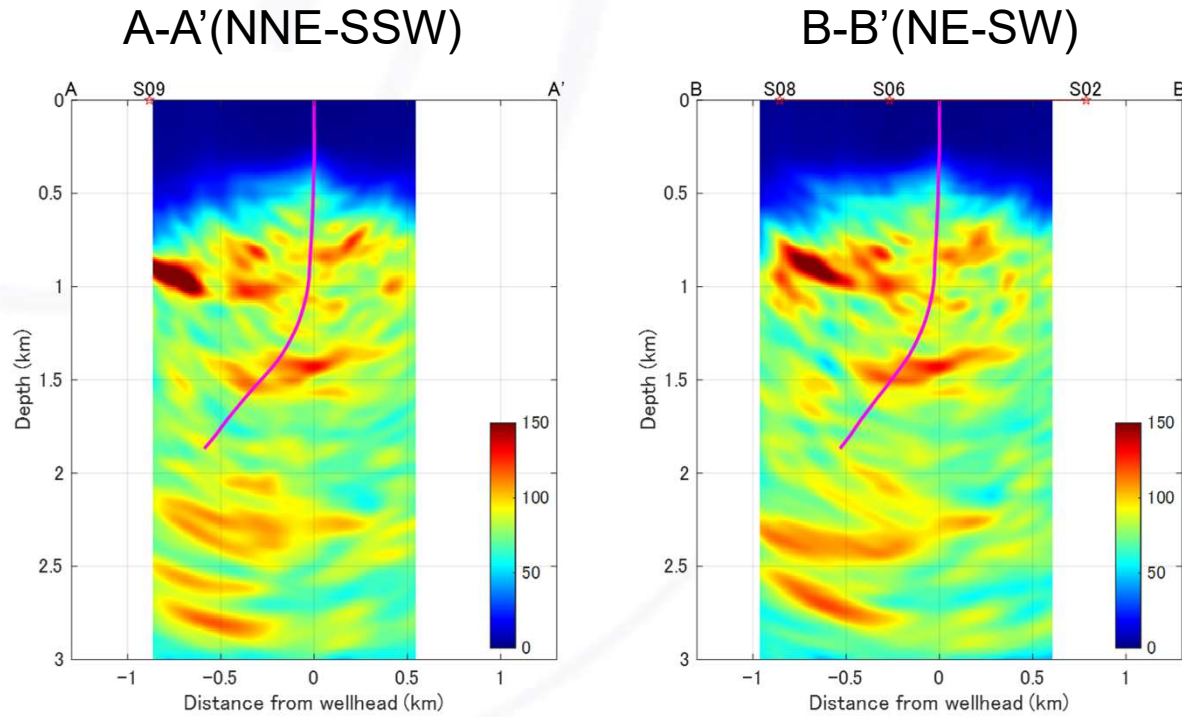


反射波を
取り出したもの



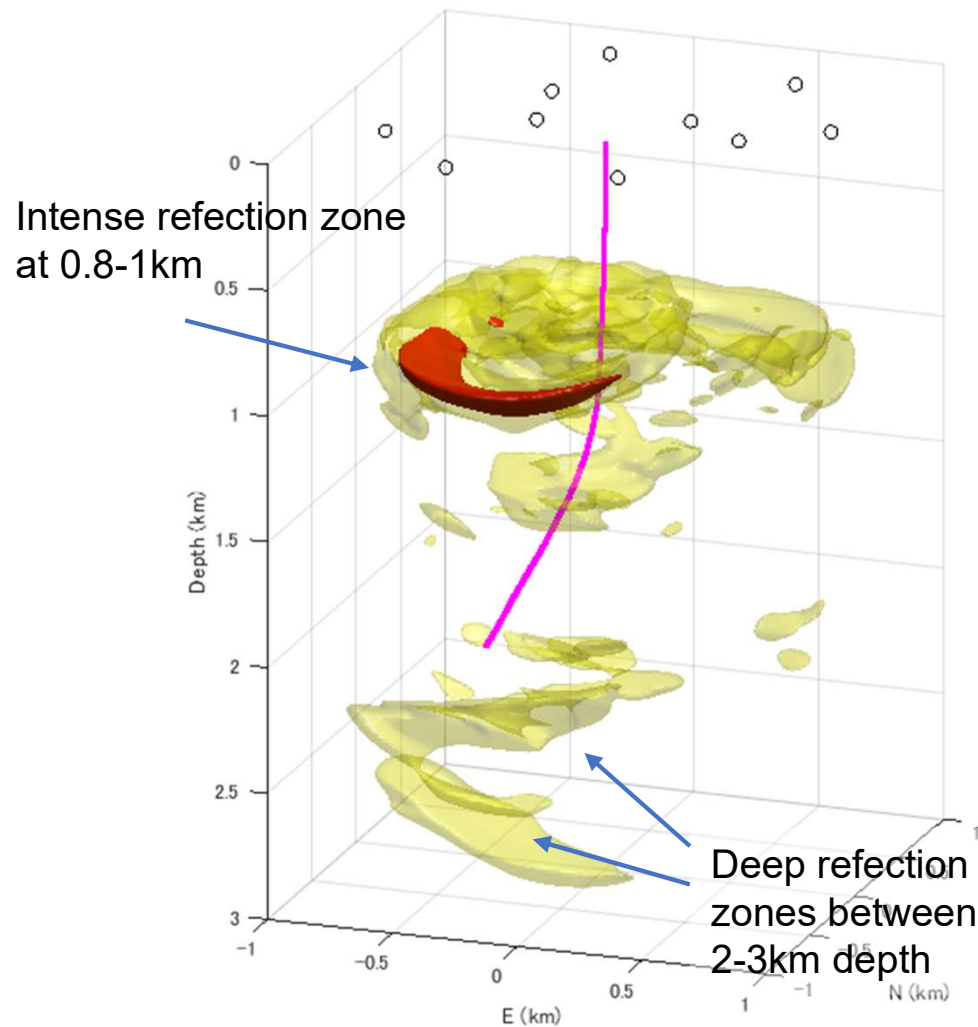
直達波

A-A' and B-B'の反射強度分布

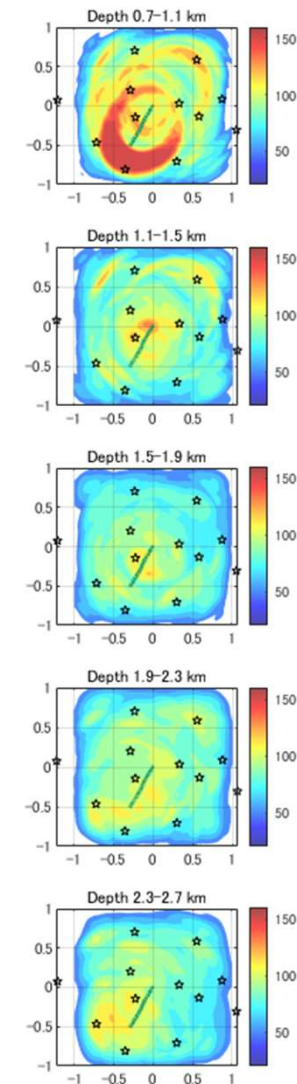


滝上の地震波反射強度の3D分布

3D反射面イメージング

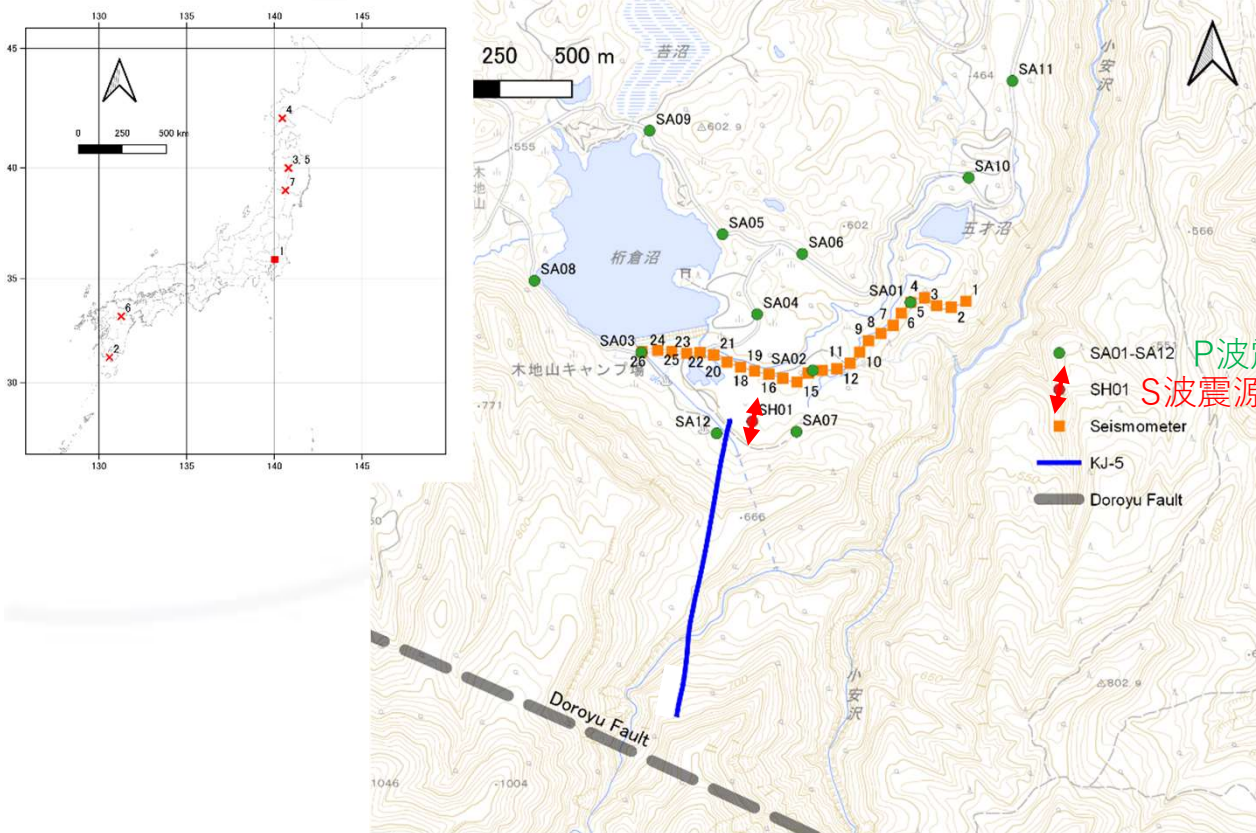


深度スライス

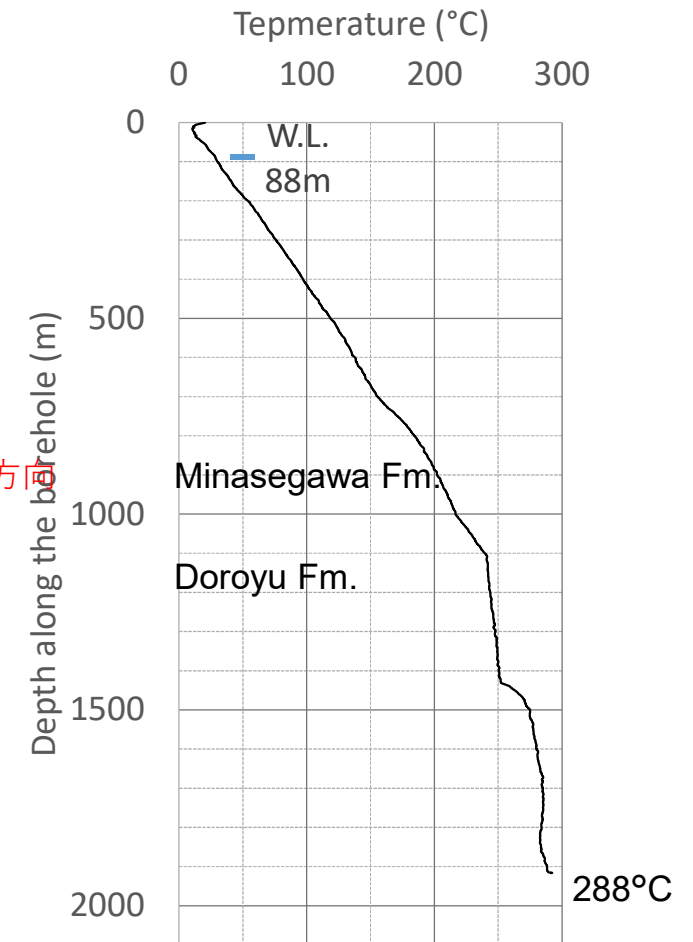


秋田県木地山での調査

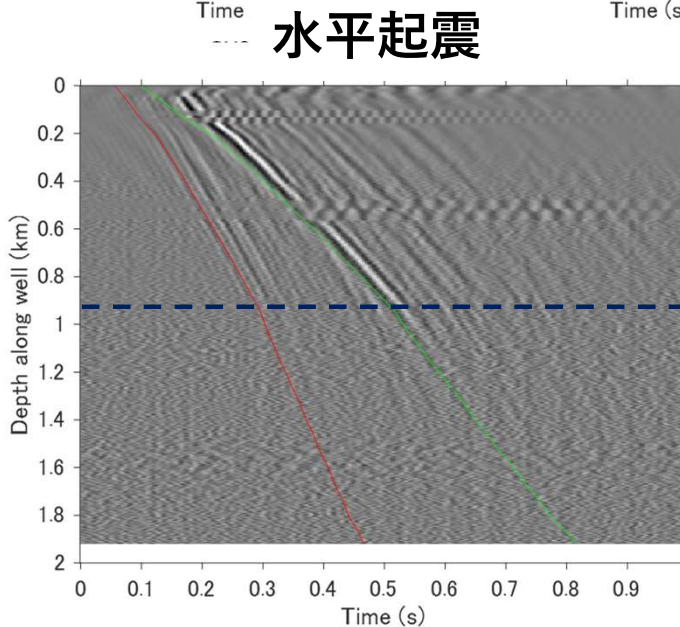
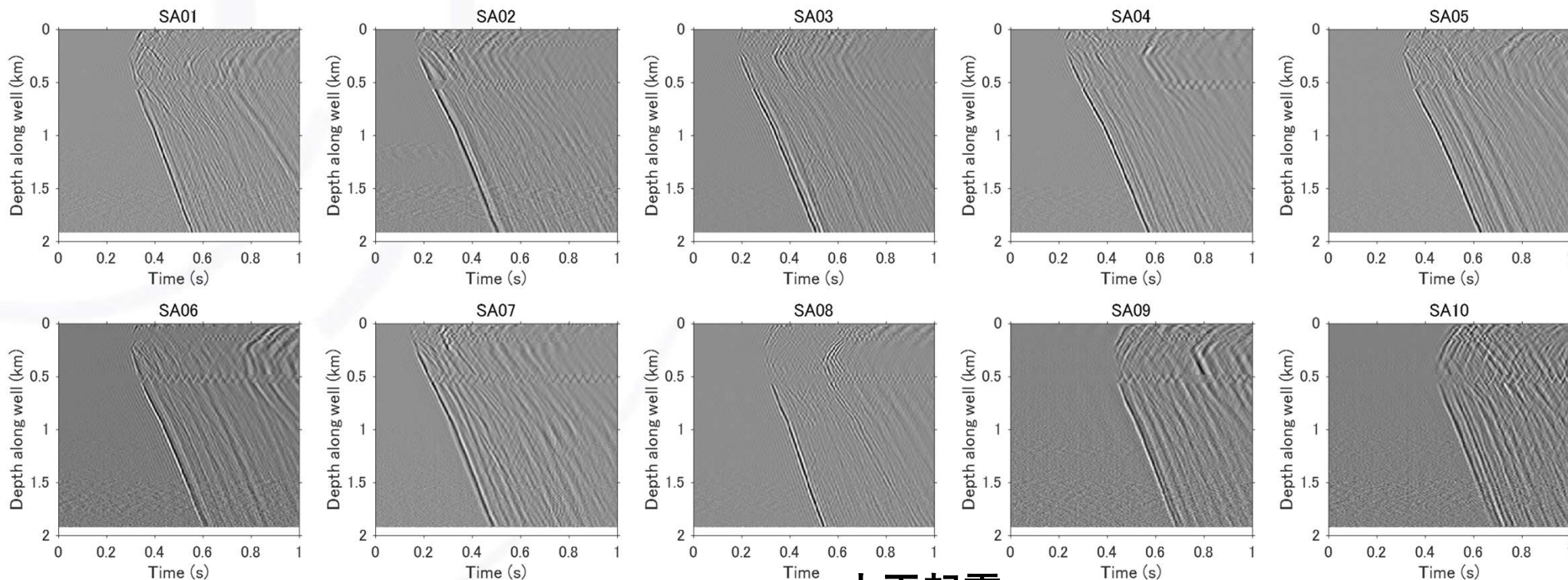
木地山観測点配置



温度プロファイル

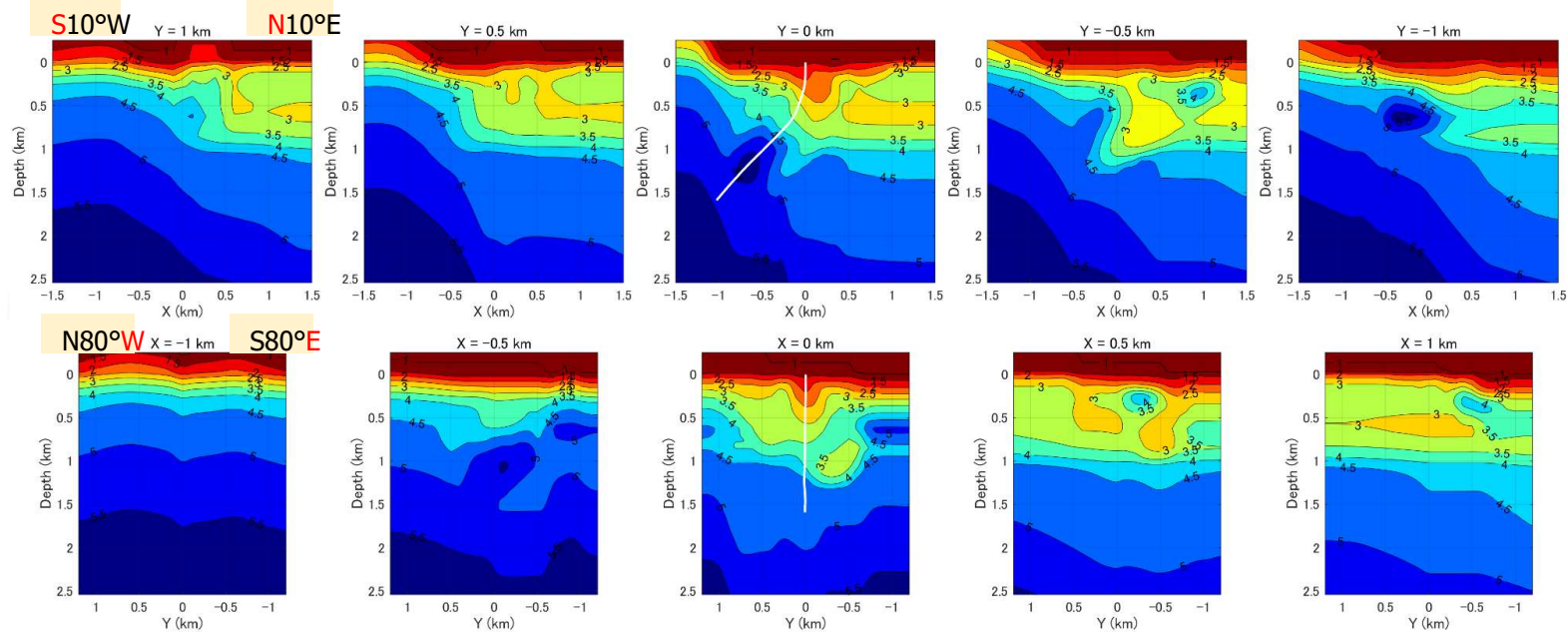


上下加振 観測DAS波形

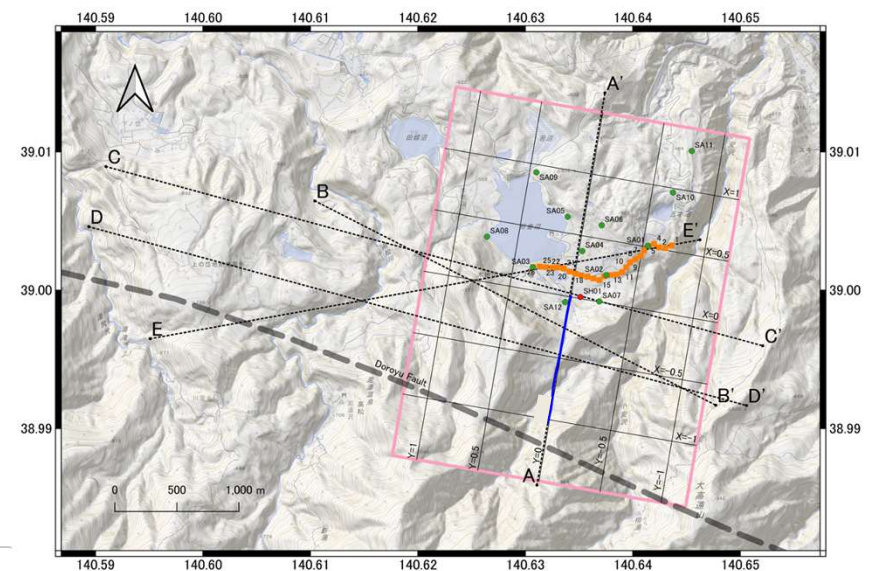
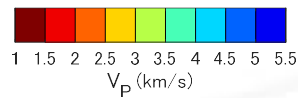


深度0.3~1.2 kmではほぼ $V_p/V_s=1.75$ と通常の横波速度であり、この振動方向のS波では断裂と流体の飽和による速度の低下は明らかではない。

初動走時から得た3次元Vp構造



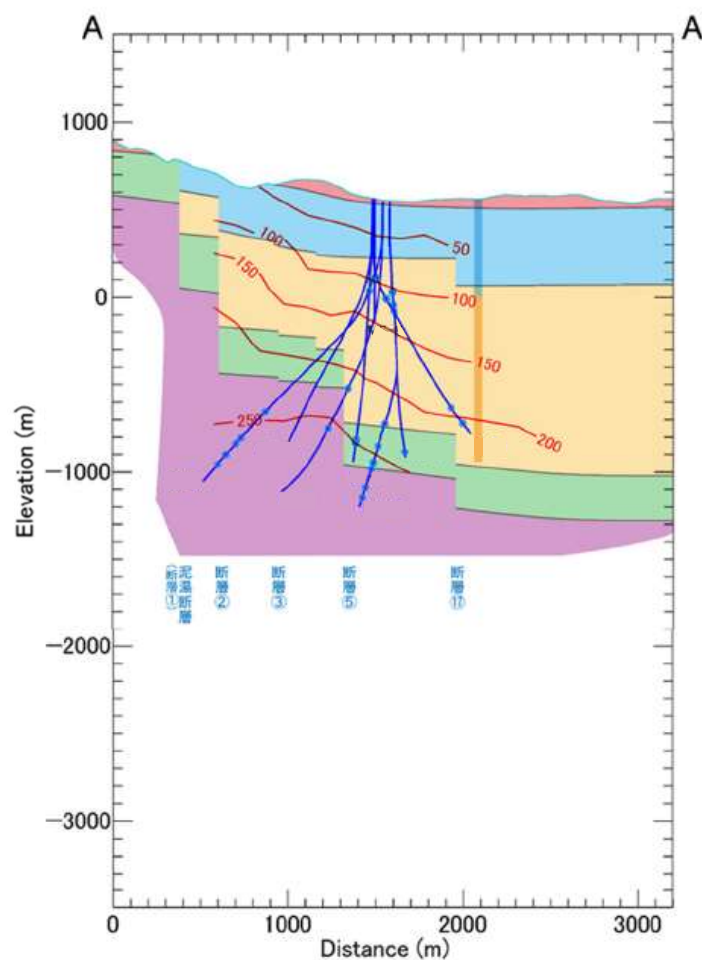
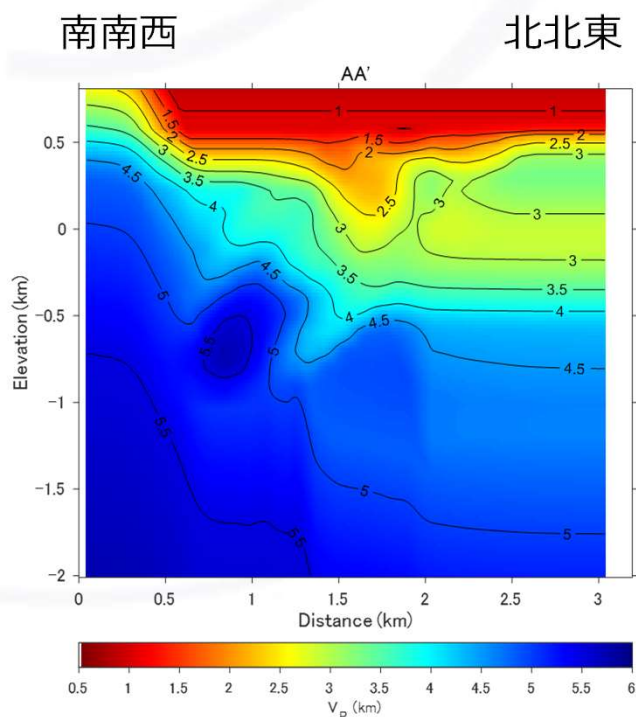
深度は坑口の標高544.6 mを基準



地熱・地質モデルと今回の結果の比較、3次元反射強度の分布

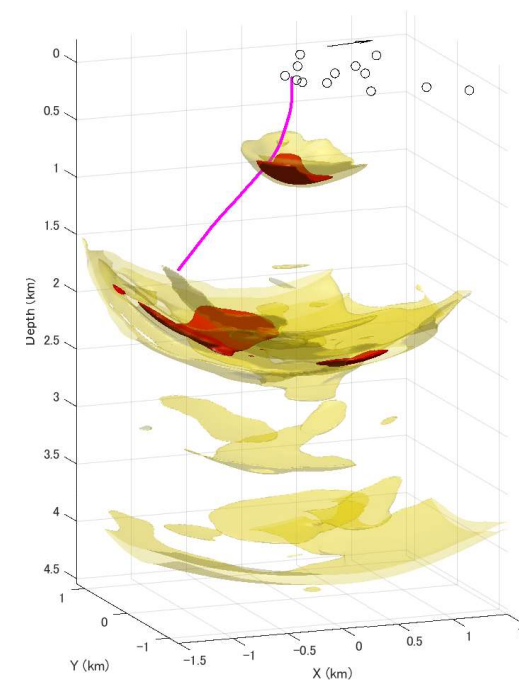


東北自然エネルギー社による、A-A'の地質構造と温度分布

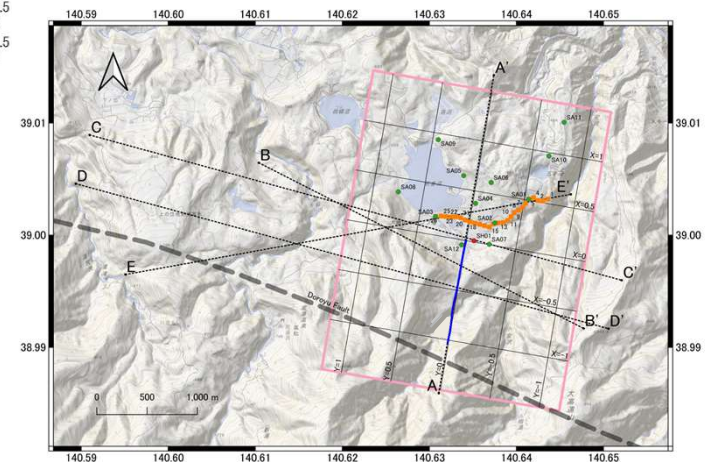
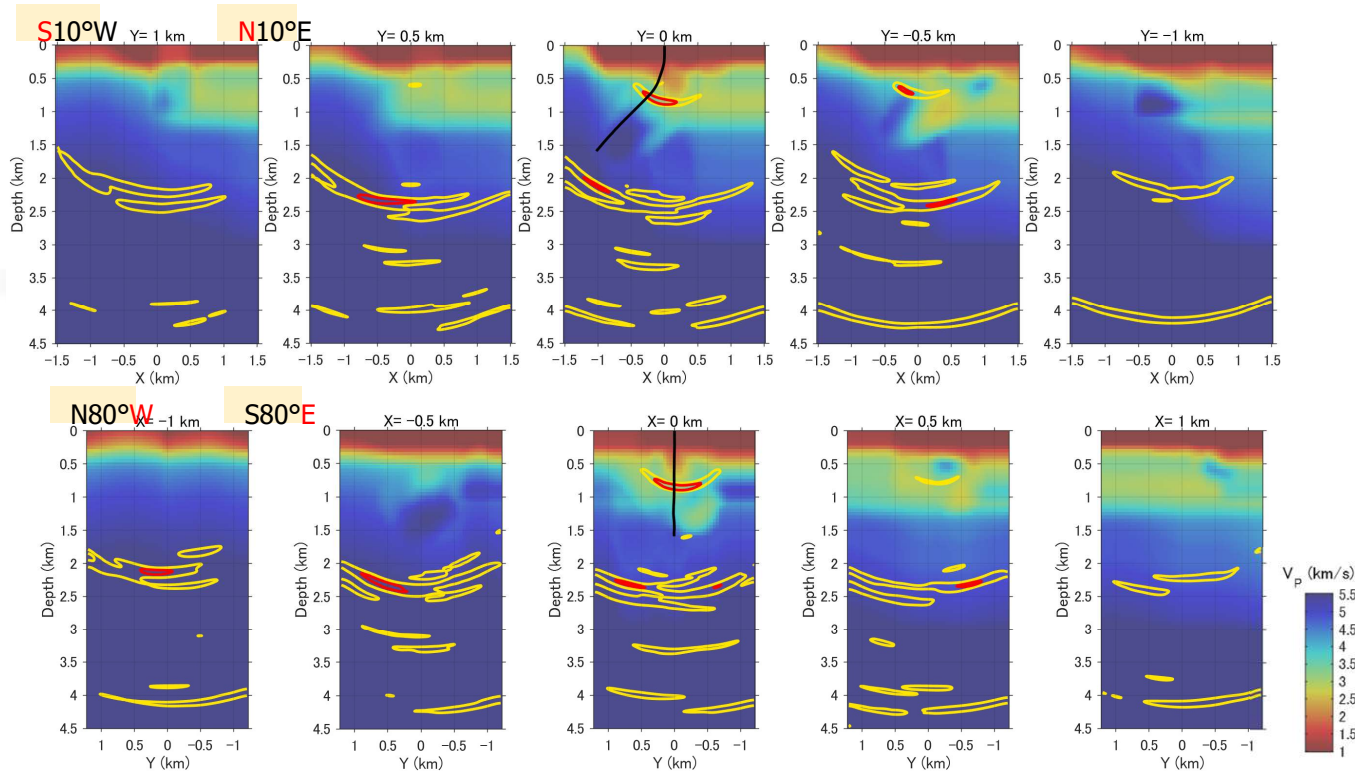


- 第四紀火山岩類
- 三途川層
- 皆瀬川層
- 泥湯層
- 先新第三系(基盤岩類)

3D V_p 構造から求めたA-A' 測線の速度構造



Vp速度構造と反射面の分布



研究成果

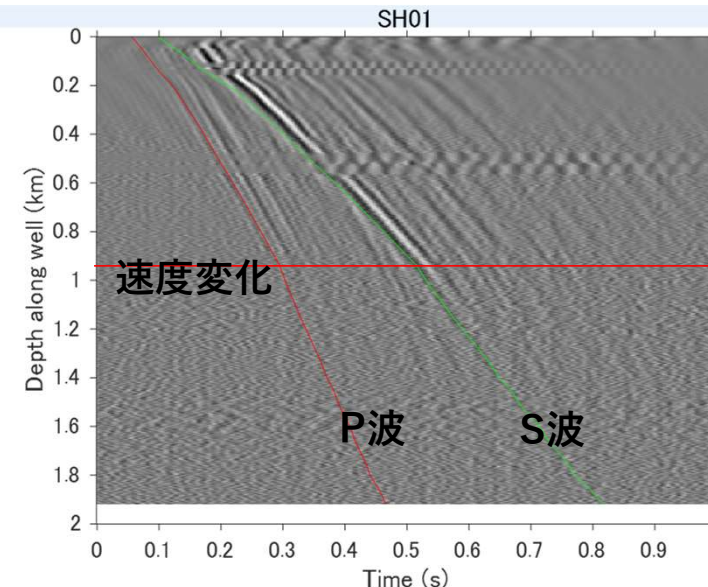
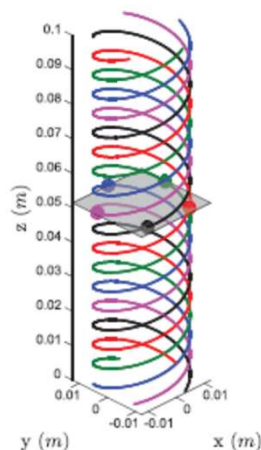
テーマ②：解析・イメージング技術の開発

(1) 木地山で得られたSH波の解析

- ・ 木地山においてS波の観測を試みDASによる深さ1200mまでのSH波を観測できた。
- ・ SH波は水平方向の断裂に敏感である。
- ・ これから、 $V_p/V_{SH} = 1.75$ であった。
- ・ これが示唆することは、深さ1200mまでは流体を包含する顕著な水平断裂は卓越しないだろう。

(2) ヘリカルファイバーの理論的考察

- ・ ヘリカルファイバーの理論的応答を検討した。
- ・ 地熱貯留層が振動をすると仮定しそれによるイメージングを検討した。油層のイメージング結果を示した。



DASによる横波の観測と V_p/V_s

- ・ 位相部分を省略したケーブルの外側における波動ポテンシャル

$$\varphi = \frac{i\alpha V}{\omega} \left[A_0 H_0^{(1)}(k_L r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n (A_n \cos n\theta + A'_n \sin n\theta) H_n^{(1)}(k_L r) \right]$$

$$\xi = \frac{\beta^2 V}{\omega^2} \left[B_0 H_0^{(1)}(k_S r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n (B_n \cos n\theta + B'_n \sin n\theta) H_n^{(1)}(k_S r) \right]$$

$$\psi = \frac{i\beta V}{\omega} \left[-C'_0 H_0^{(1)}(k_S r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n (C_n \sin n\theta - C'_n \cos n\theta) H_n^{(1)}(k_S r) \right]$$

- ・ ケーブル内の波動ポテンシャル(φ_c, ξ_c, ψ_c)も同様な形の関数となる。

係数 A_n, B_n, C_n を D_n, E_n, F_n で置換する。

ダッシュ付の係数はSH波、ダッシュの付かない係数はP波およびSV波。

研究成果

テーマ③：DAS用光ファイバーの信頼性向上技術開発

2021年度
実施

亜臨界から最高500℃までの超臨界水環境下に曝された光ファイバーの光透過損失の経時変化を連続的にその場で計測する装置を開発。

2022年度
実施

損傷度モニタリング技術の開発

C/ポリイミド被覆ファイバー

350℃までの高圧水環境で熱処理し光透過スペクトルのその場観察。

C/Cu被覆ファイバー

500℃までの高圧水環境で熱処理し光透過スペクトルのその場観察。

DAS用センシングシステムの構成要素の最適構成検討

2023年度
実施

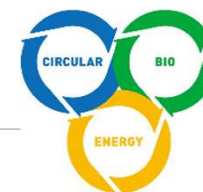
損傷度モニタリング技術の開発

C/ポリイミド被覆ファイバー、C/Cu被覆ファイバー：劣化メカニズムの詳細解析

- Evaluation of in-situ optical loss of **polyimide-coated optical fiber** under hydrothermal environments, **Optical Fiber Technology** 82 (2024) 103582. (accepted 2023.11.4)
- Evaluation of in-situ optical loss of **copper-coated optical fiber** under sub- and super-critical water, 28th Inter. Conf. on Optical Fiber Sensors (**OFS-28**), 2023.11.20-24, Th6.32 (ACT City, Hamamatsu, Japan).

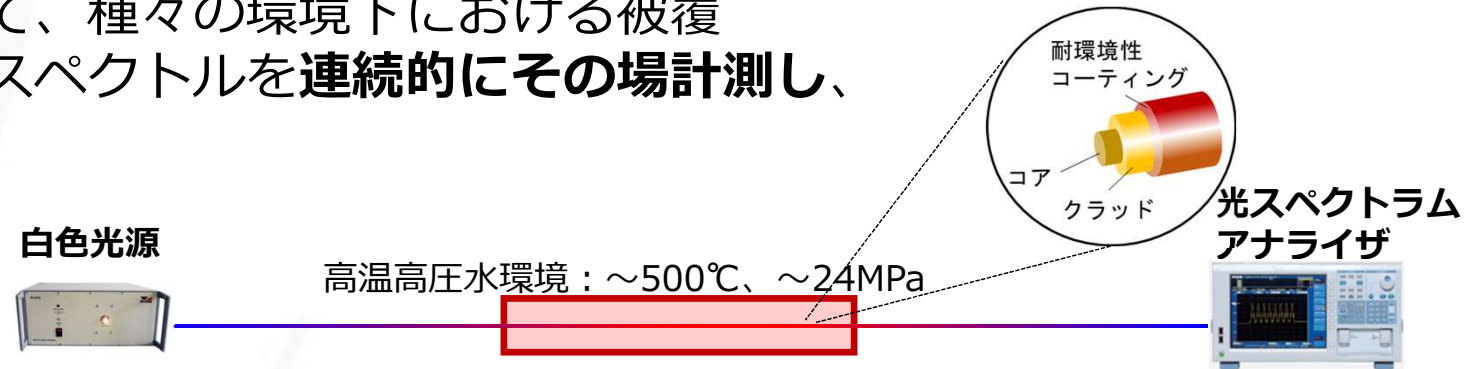
DAS用センシングシステムの構成要素の最適構成検討

センサーデバイス構成材料の水素透過挙動の評価。



光ファイバーその場計測

超臨界水腐食炉を用いて、種々の環境下における被覆光ファイバーの光透過スペクトルを**連続的にその場計測し**、その劣化挙動を評価。



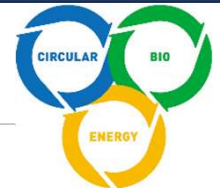
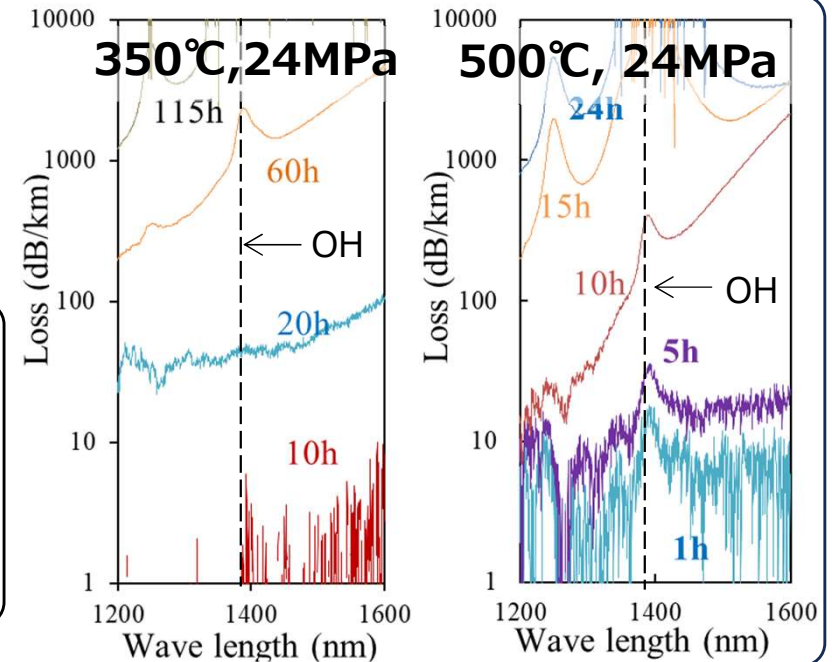
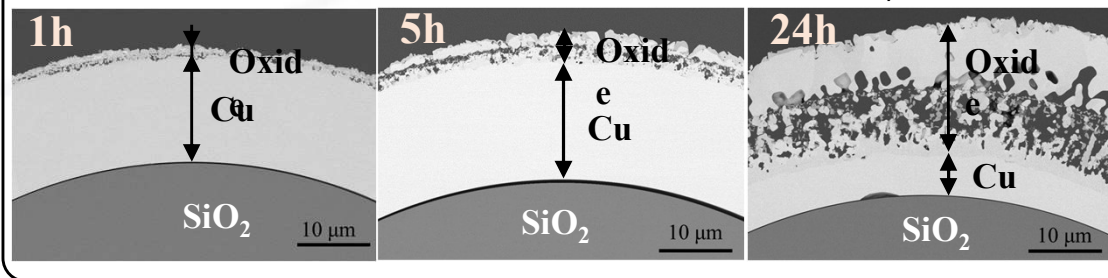
亜臨界～超臨界までの温度域での特性評価

C/Cu被覆ファイバー（超臨界域での評価）

耐熱性の高いC/Cu被覆ファイバーの劣化メカニズム

- Cu表面の腐食 →酸化相の形成
- Cu層の破損 →水侵入 →水素侵入

処理後のファイバー断面-コーティング層近傍 (500°C, 24MPa)



今後の技術課題

テーマ①：既存地熱井を利用した高精度実証試験

反射波の位置の決定度において水平の位置の誤差が大きい、これは加振点の数や分布が関係している。

S波利用を始めたが今後多くの場所でS波を用いた調査をしていく必要がある。

テーマ②：解析・イメージング技術の開発

ヘリカルファイバーはS波の検出に有効であるが、感度があまり高くないこと、ヘリカルの直径が2-3cmあり、巻き取りウインチが大きくなる、価格が高い、など解決すべき事項が多数あると考えられる。実例を検討する必要がある。

テーマ③：DAS用光ファイバーの信頼性向上技術開発

水素透過を実験的に評価し、水素による光ファイバーの損失の定量的評価を行ったうえで、現場での水素透過対策の検討が必要。

まとめ

総論

- ✓ 地熱抗井内に設置した光ファイバーを用い、温度測定（DTS）と地震波測定（DAS）をおこなうことにより、地熱貯留層の位置、物性を推定する手法の開発をおこなっている。
- ✓ 2022年度は大分県の滝上、秋田県の木地山、2023年度は大分県の八丁原において実証試験を行った。
- ✓ 地熱フィールドの温度分布は深さや場所ごとに異なり、地質、断裂などにより変化し、単純な深さによる温度勾配を示さない。
- ✓ 速度構造は地熱抗井から推定されている地質との相関性が高い。
- ✓ 反射波の分布は貯留層の分布と深い相関がありそうである。
- ✓ ヘリカルファイバーの理論的検討をおこなった。
- ✓ 高温・高圧下の水の媒質中でのその場観察および高温・高圧下で金属管を通して水素の透過量測定を開始した。