

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026 プログラムNo.B1-2-15

地熱発電導入拡大研究開発/地熱発電高度利用化技術開発/

地熱フィールドの面的詳細構造を確立する 革新的技術開発(2025年度)

発表：2026年07月22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

発表者名 笠原順三

団体名 (株) WELMA、西日本技術開発(株)、(国)九州大学

問い合わせ先 株式会社WELMA E-mail:Kasahara.junzo@shizuoka.ac.jp TEL:080-5055-4897

背景

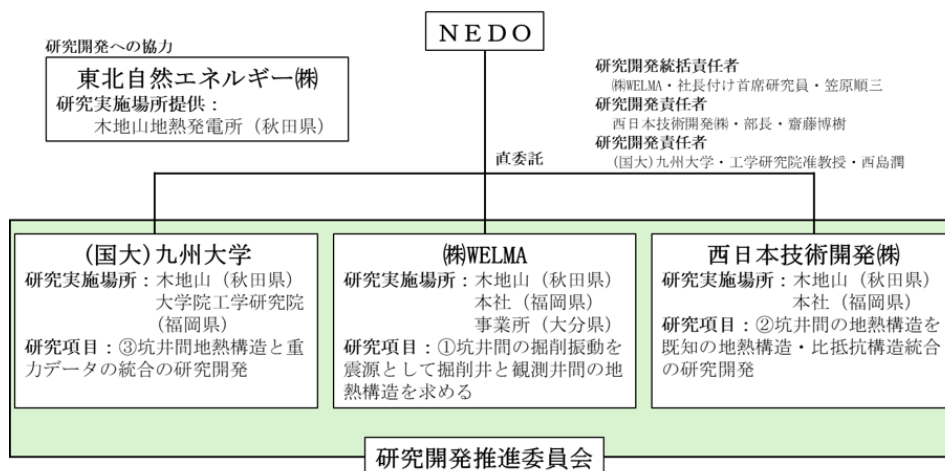
地熱資源開発では、高精度な地熱系概念モデルの構築が掘削成功率向上の鍵となり、地熱系概念モデル構築までに要する費用と比較して、**調査井掘削段階では多額の費用を要する。そのため、掘削リスクを低減し、成功率向上に寄与する技術開発**が重要な課題となっている。

これを実現できるような技術を開発して、結果として**地熱開発にかかる経費を10%以上削減**につなげ、再生可能エネルギーとしての地熱の重要性を高めたい。

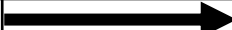
研究開発項目

- ① 坑井間の掘削振動を震源として掘削井と観測井間の地熱構造を求める研究開発
- ② 坑井間の地熱構造を既知の地熱構造・比抵抗構造統合の研究開発
- ③ 坑井間地熱構造と重力データの統合の研究開発
- ④ 探査コストを踏まえた開発コスト削減についての検討

研究開発実施体制



研究スケジュール

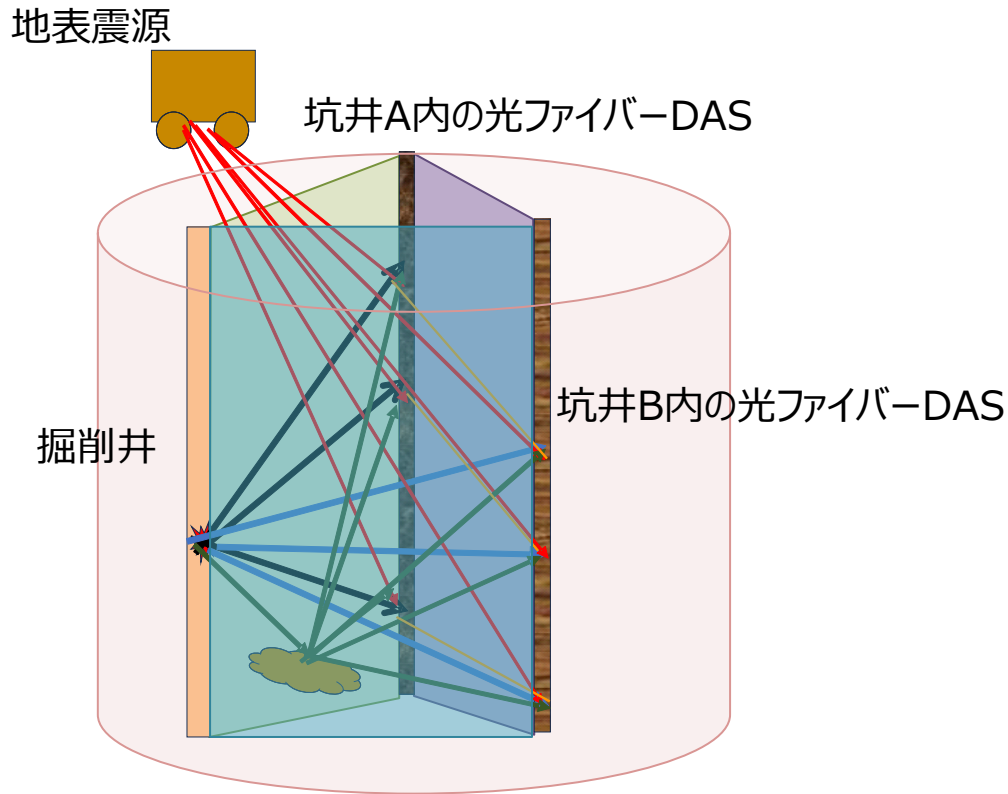
研究開発項目	担当	2025			
		1Q	2Q	3Q	4Q
(1-1) 地下の地熱貯留層の高精度イメージング：現地データ収集	WELMA	 			
(1-2)：相関処理	WELMA			 	
(1-3)：人工震源DAS処理	WELMA			 	
(1-4)：トモグラフィ処理	WELMA			 	
(1-5)：反射面分布処理	WELMA			 	
(2-1) 既存の物理探査（MT法探査、重力探査等）、坑井データの整理および3次元モデル構築	西日本技術開発	 			
(2-2) 速度構造・反射面分布を3次元モデルに統合して対比・検討	西日本技術開発			 	
(3-1) 既存重力データおよび地下構造データ収集	九州大	 			
(3-2) 重力及び地質情報を用いた密度構造インバージョン解析	九州大		 		
(3-3) 地震波速度構造を拘束条件にいた密度構造インバージョン解析	九州大			 	

研究項目 実施内容

①坑井間の掘削振動を震源として掘削井 と観測井間の地熱構造を求める研究開発

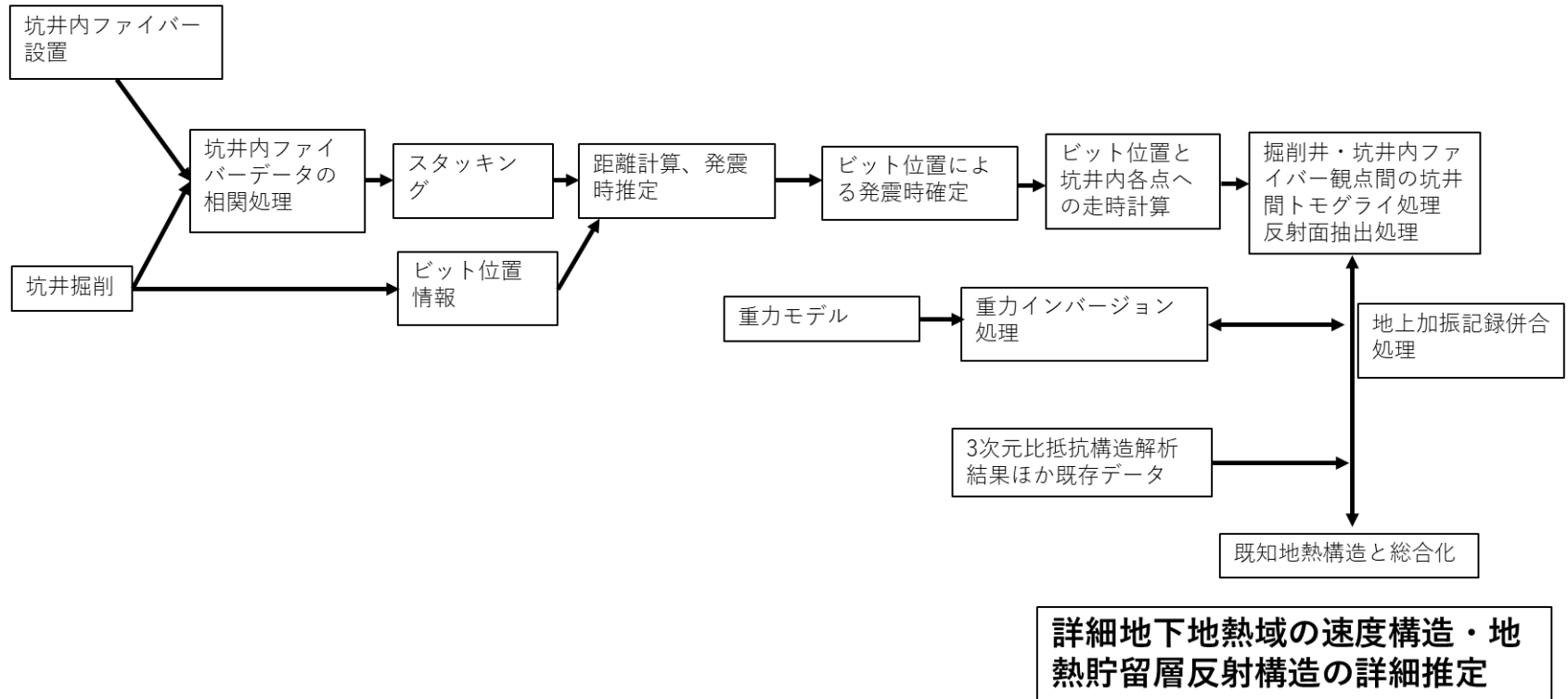
- 掘削時に生じる振動と地上起震車を震源として用い**1.5 km × 1.5 km × 深さ2 kmの地熱フィールドの縦波速度分布、地震波の反射面分布**を求める。
- 3次元地震波速度構造と地震波の反射面分布について、**地震波速度の精度を0.1 km/s、反射面の位置精度を0.1 km程度まで高める。**
- 本調査では**坑井掘削の振動を震源として用いることにより坑井間トモグラフィ**を実現し、坑井間に存在する流体含有層の深さと形状を求め既知地熱モデルを正確にする。

雑音の総合相関処理と坑井間トモグラフィによる 地熱貯留層のイメージングの概念



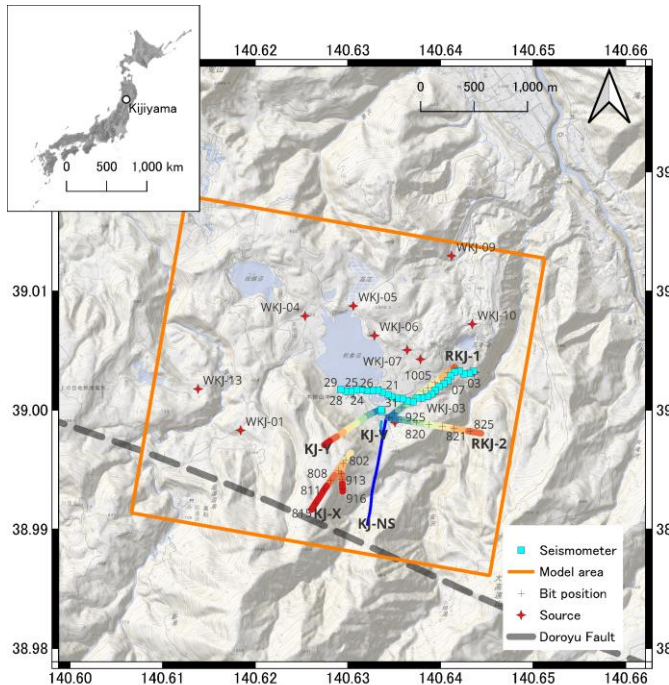
掘削井の掘削振動雑音を坑井Aの光ファイバーで受信し、坑井内の波形記録の相互相関を行うことによりドリルビットから相互相関を行った地点まで伝搬する地震波を再現できる。

処理の流れ



研究の概要

- NEDOプロジェクトの一環として、2025年、東北自然エネルギー社の建設中の**木地山地熱フィールド**において本研究を実施した。
- 期間中KJ-Xの掘削井、**RKJ-1,RKJ-2の還元井の掘削**が行われた。
- 同じ期間**KJ-NS,KJ-Vの2坑井内に光ファイバーを入れDAS観測**を行った。
- 同時に12か所に地表震源を用いた。



木地山地熱フィールドにおける坑井配置

木地山フィールド調査の概要

坑井内の光ファイバーDAS調査

KJ-NS : 2025年8月1日～10月7日

KJ-V : 2025年8月1日～9月12日

人工震源調査

2025年8月23日～8月31日

地上地震計調査

29点 : 2025年8月20日～9月17日

1点 : 2025年8月1日～8月21日、9月19日～10月9日

坑井掘削

KJ-X : 8月3日～8月18日

RKJ-1 : 9月10日～10月6日

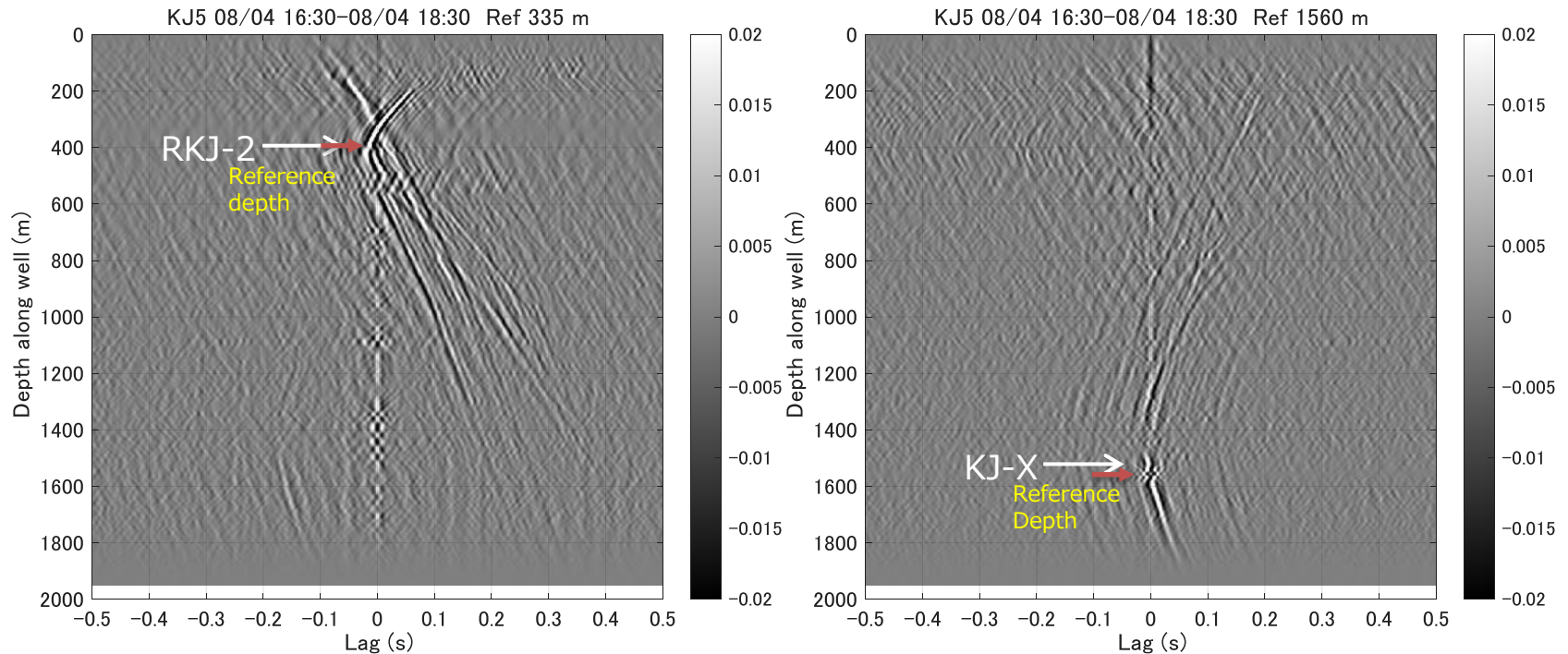
RKJ-2 : 8月4日～8月27日

研究成果

研究開発項目①：坑井間の掘削振動を震源として掘削井と観測井間の地熱構造を求める研究開発

- 掘削ドリルビットのノイズを2坑井に挿入した光ファイバーで記録した。
- その記録を用い、同じ坑井内の異なった深さの記録同士の相関処理を行った。
- このデータに加え、地上震源を坑井内の光ファイバーおよび地上地震計で受けた地震波形と走時データを作成した。
- ドリルビットの掘削中のノイズの相関処理によって得た波形データにより坑井間の速度プロファイルを作成できた。
- これまで不可能であった地下の震源の活用が可能になるため、今後の新探査技術になり得る。
- 目標であった1.5 km × 1.5 km × 深さ2 kmを超えて、**3km × 3.4km × 4kmの領域**の地熱フィールドについての縦波速度分布を求めた。
- また、地震波の反射面分布を求めた。3次元地震波速度構造と地震波の反射面分布について、**地震波速度の精度を0.1 km/s、反射面の位置精度を0.1 km程度**まで高めることが目標であった。
- シミュレーションを実施し、**位置精度は上下、水平とも0.1 kmで求まることを示した。地震波速度精度もほぼ0.1 km/sを達成**できた。

ドリルビットノイズの相互相関処理の例(1)



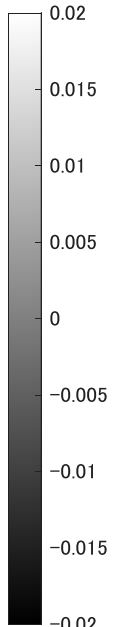
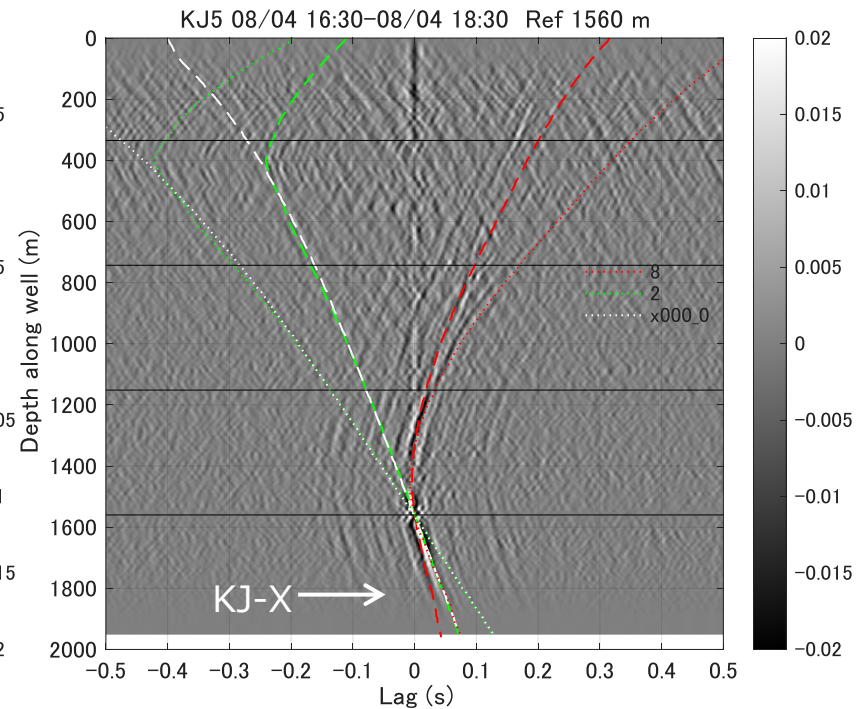
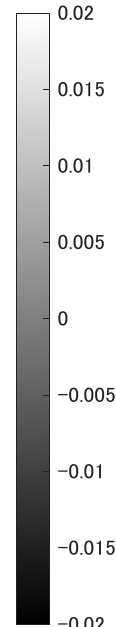
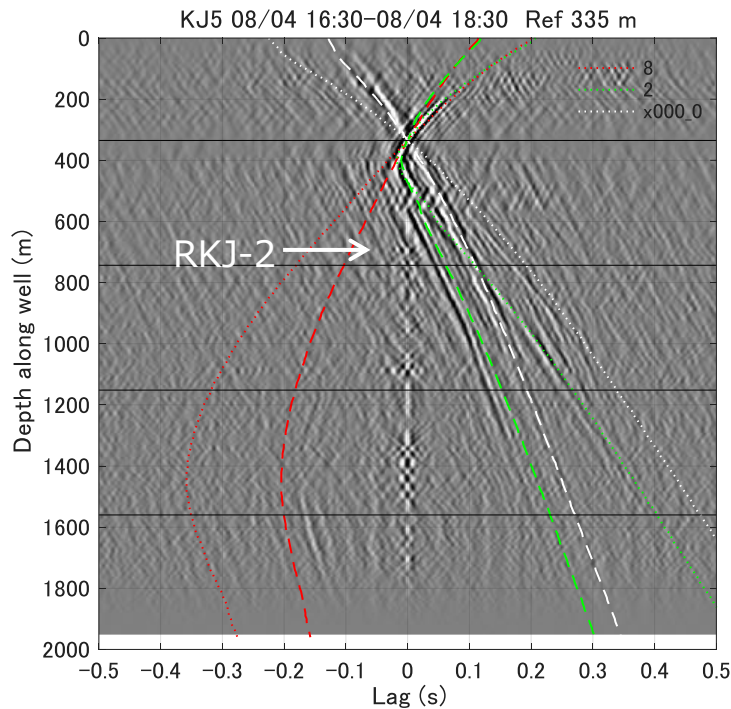
Date	KJ-X掘削深度 (m)	RKJ-2掘削深度 (m)	RKJ-1掘削深度 (m)
2025/8/4 17:30	1516	412	

RKJ-2とKJ-X掘削中のドリルビット雑音をKJ-NS坑井内の光ファイバーで測定し、坑井内記録同士で相関処理をした結果

ドリルビットノイズの相互相関処理の例(1)

理論走時との比較

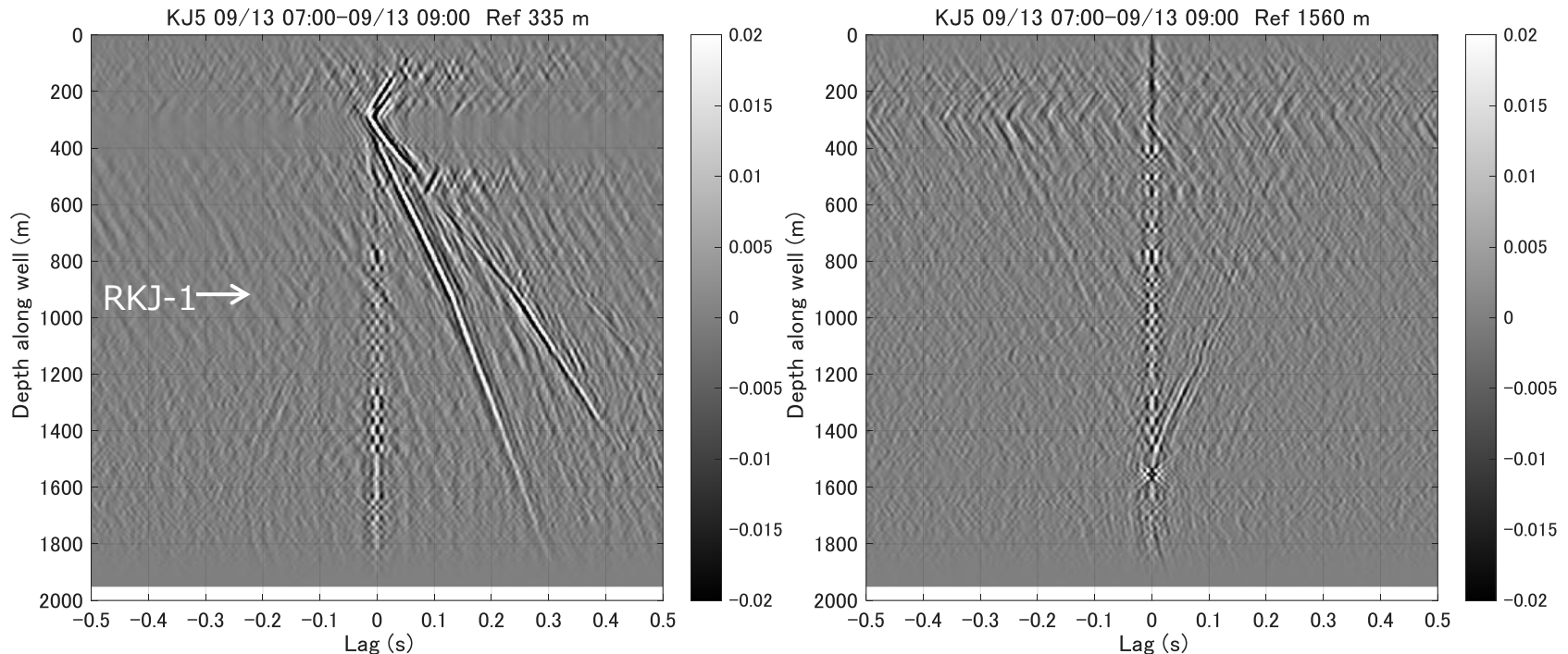
----- P波理論走時
 S波理論走時



Date	KJ-X掘削深度 (m)	RKJ-2掘削深度 (m)	RKJ-1掘削深度 (m)
2025/8/4 17:30	1516	412	

RKJ-2とKJ-X掘削中のドリルビット雑音をKJ-NS坑井内の光ファイバーで測定し、坑井内記録同土で相関処理をした結果

ドリルビットノイズの相互相関処理の例(2)



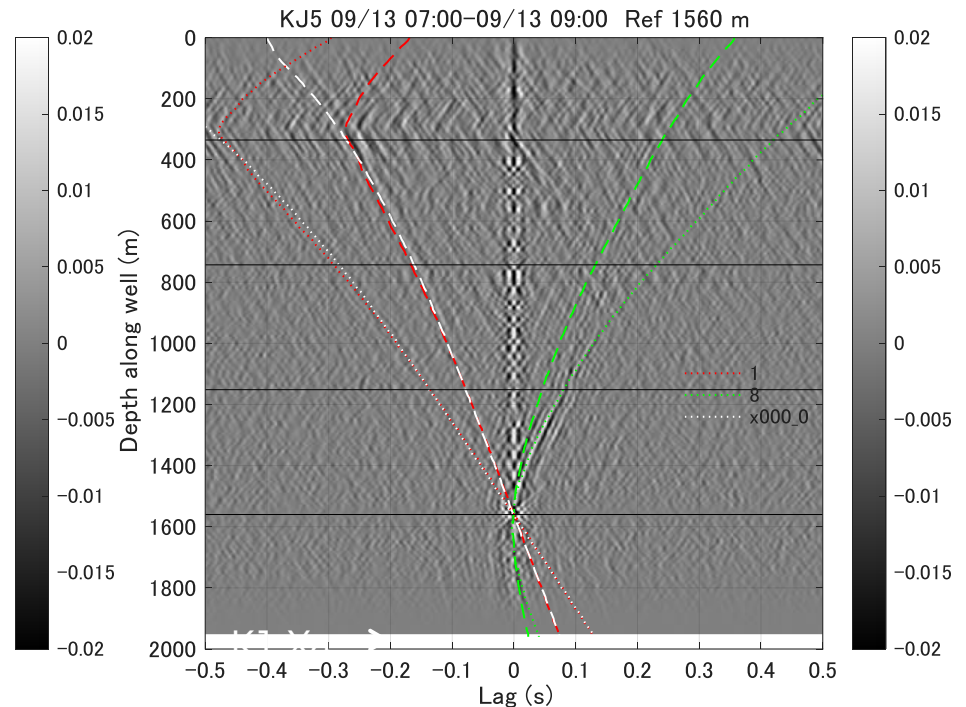
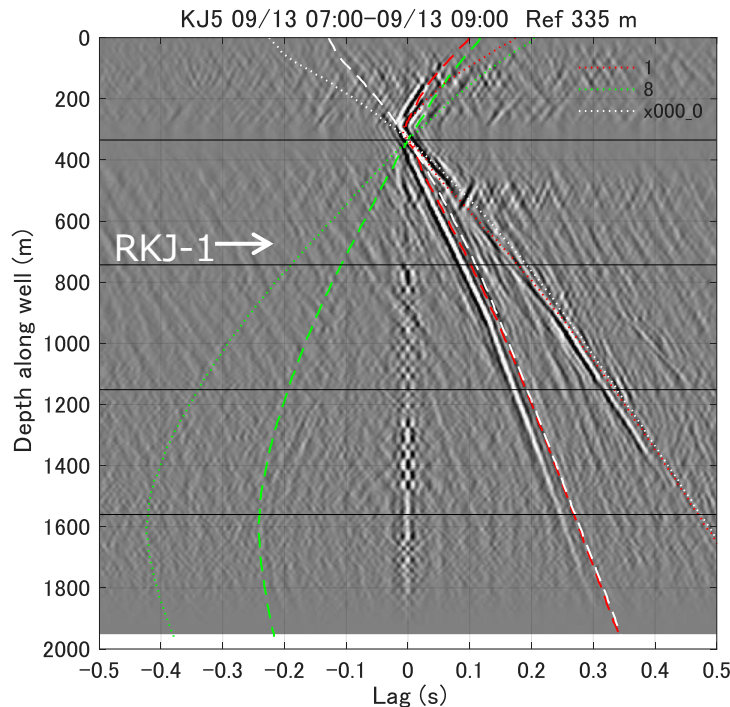
Date	KJ-Xa掘削深度 (m)	RKJ-2掘削深度 (m)	RKJ-1掘削深度 (m)
2025/9/13 8:00	1708		304

RKJ-1とKJ-Xa掘削中のドリルビット雑音をKJ-NS坑井内の光ファイバーで測定し、坑井内記録同士で相関処理をした結果

ドリルビットノイズの相互相関処理の例(2)

理論走時との比較

----- P波理論走時
 S波理論走時

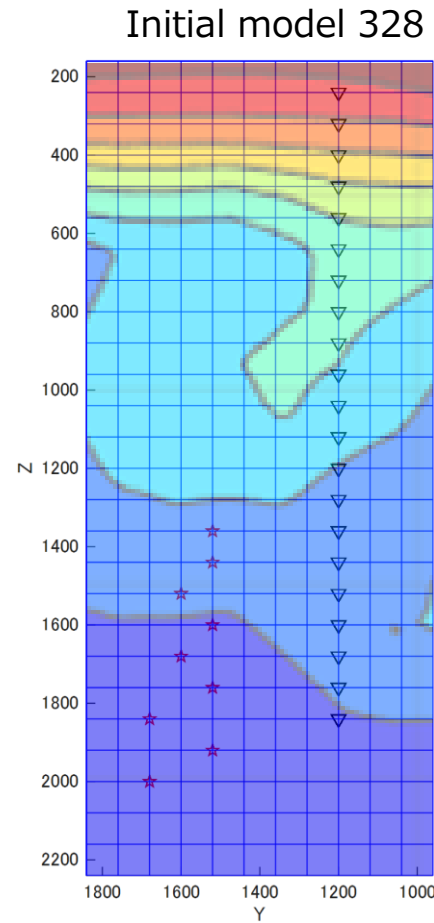
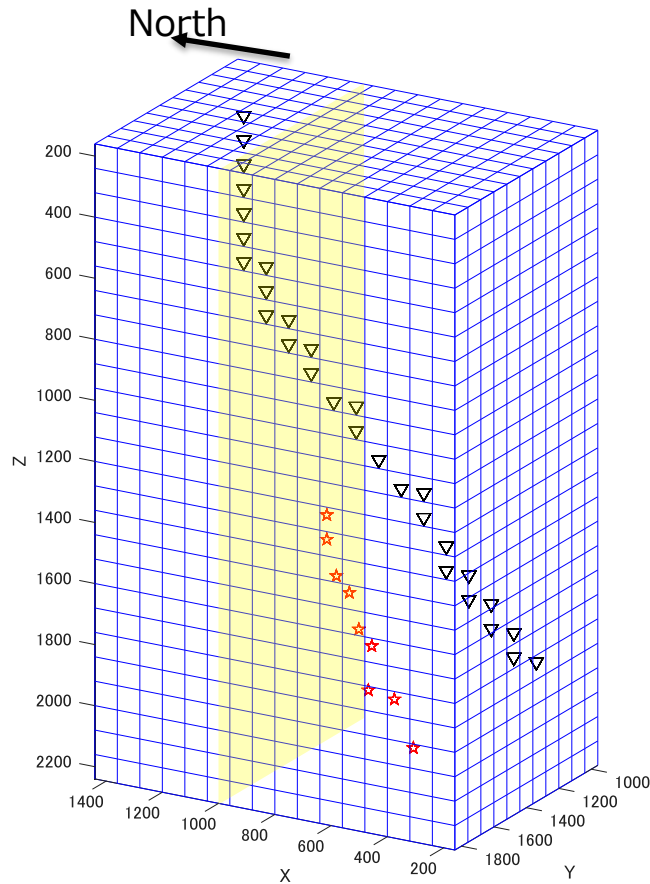


Date	KJ-Xa掘削深度 (m)	RKJ-2掘削深度 (m)	RKJ-1掘削深度 (m)
2025/9/13 8:00	1708		304

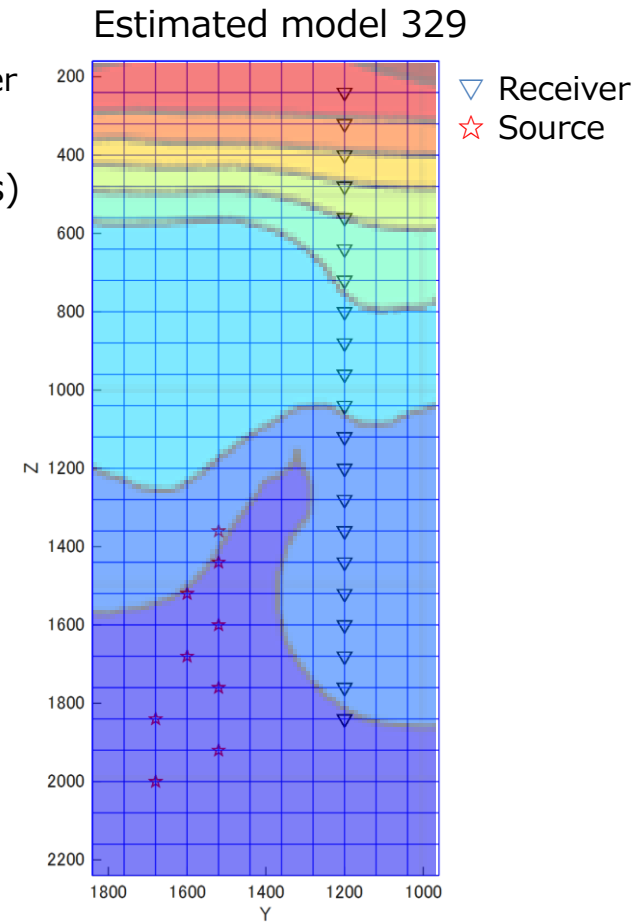
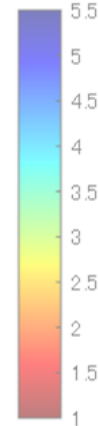
RKJ- 1とKJ-Xa掘削中のドリルビット雑音をKJ-NS坑井内の光ファイバーで測定し、坑井内記録同士で相関処理をした結果

ドリルビットノイズを用いたクロスホールトモグラフィのメッシュ(Y-Z平面)と解析結果

X=1 km (KJ-5坑口から約300m南側)鉛直断面



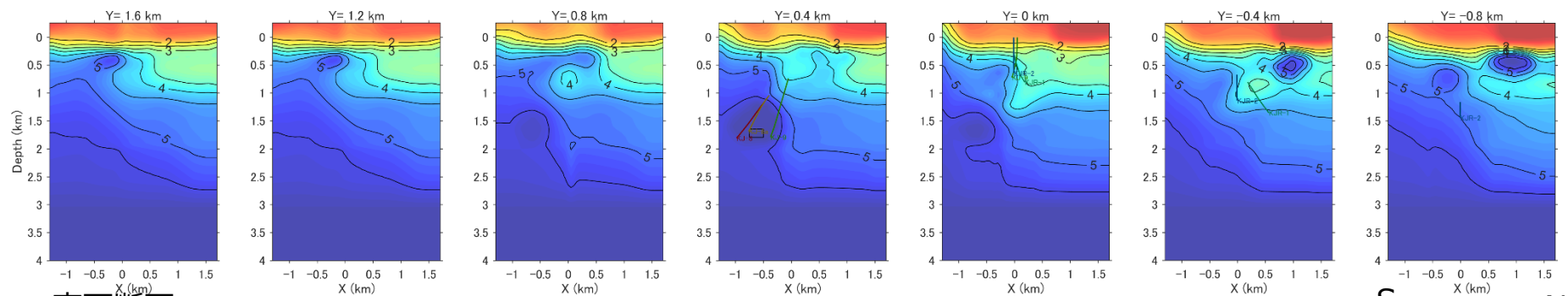
▽ Receiver
☆ Source
Vp (km/s)



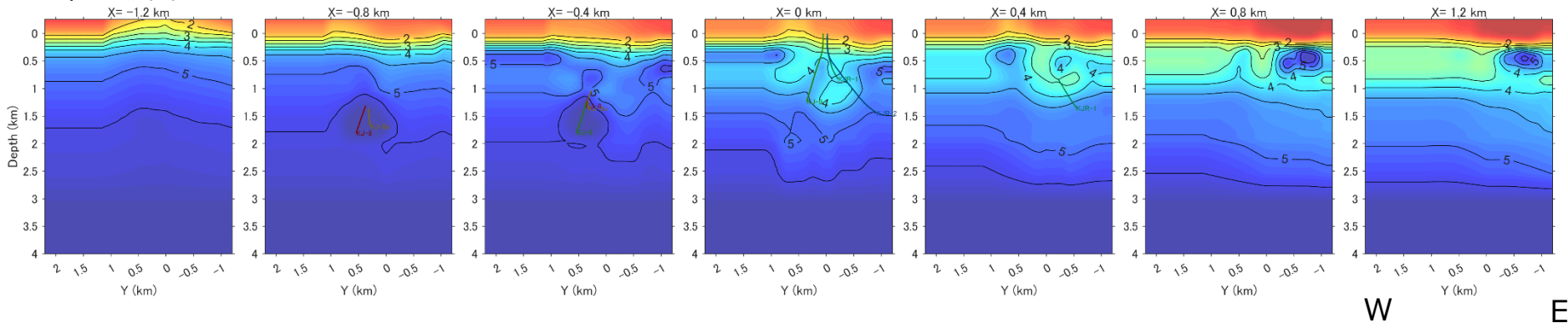
得られた木地山地区の3次元縦波速度分布

モデル339速度構造

南北断面

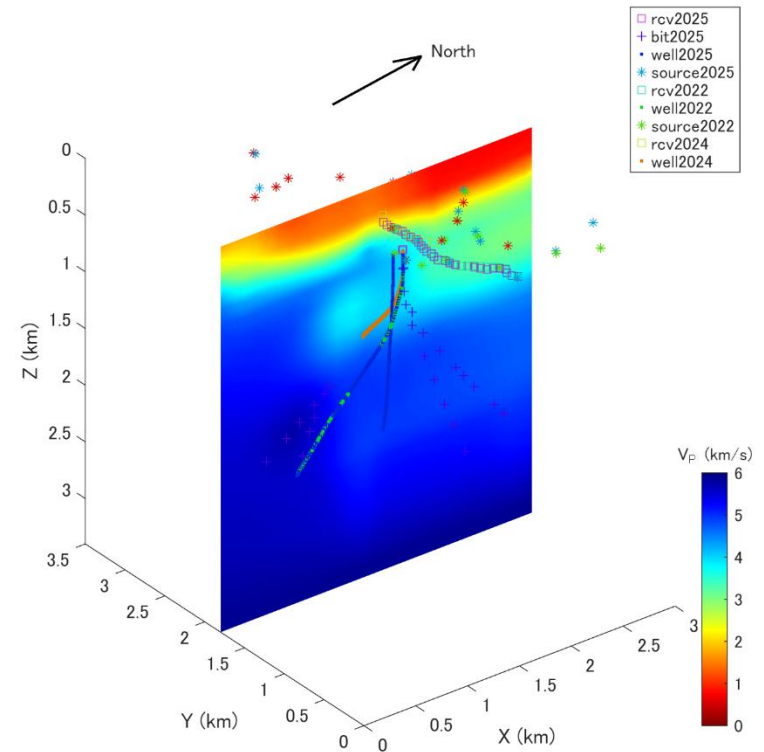
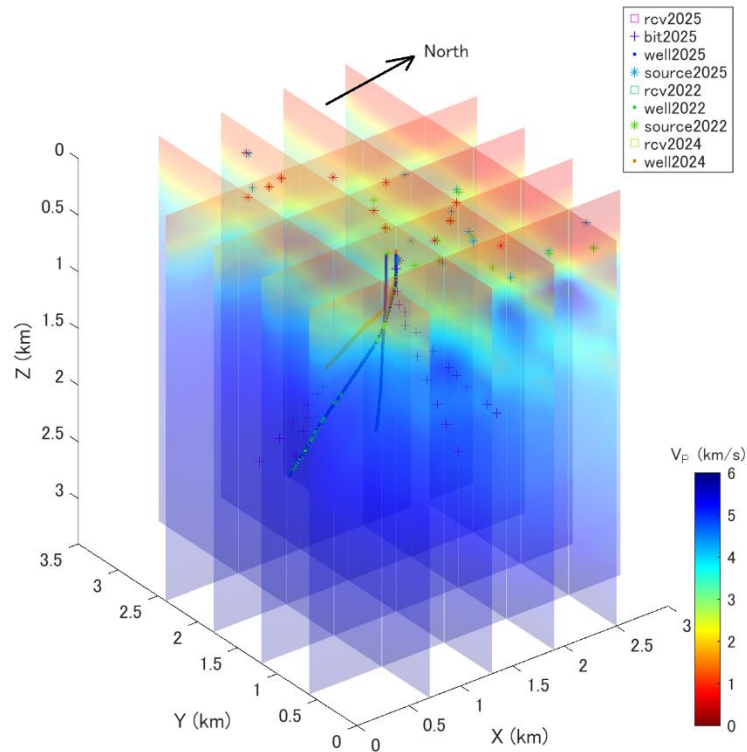


東西断面



P波速度 (km/s)

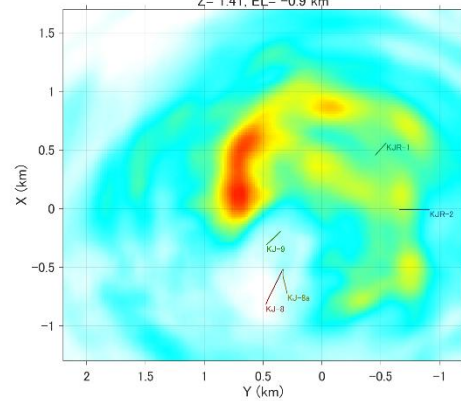
木地山の3次元速度構造



木地山の地震波反射面分布

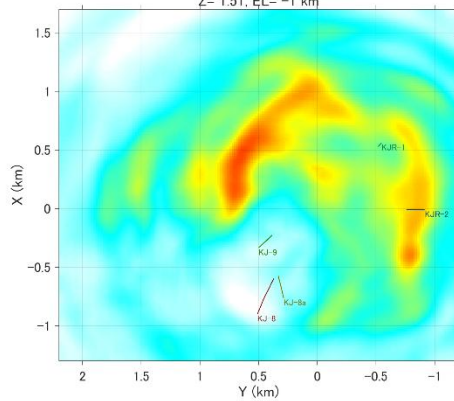
1.41km

$Z = 1.41, EL = -0.9 \text{ km}$



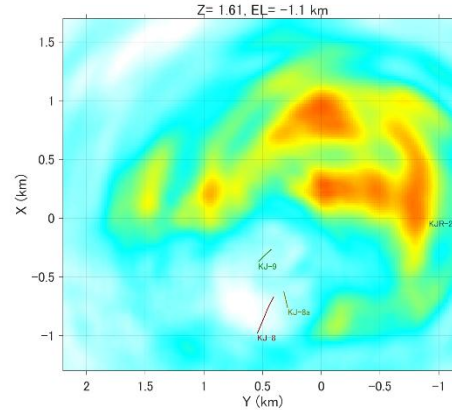
1.51km

$Z = 1.51, EL = -1 \text{ km}$



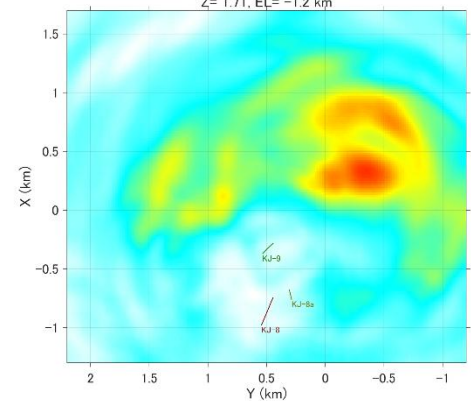
1.6km

$Z = 1.61, EL = -1.1 \text{ km}$



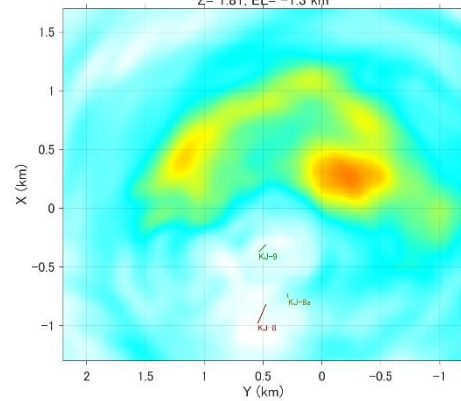
1.71km

$Z = 1.71, EL = -1.2 \text{ km}$



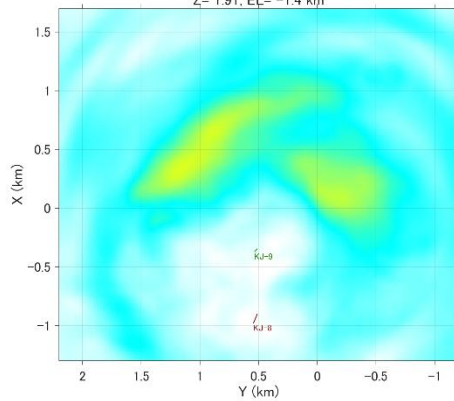
1.81km

$Z = 1.81, EL = -1.3 \text{ km}$



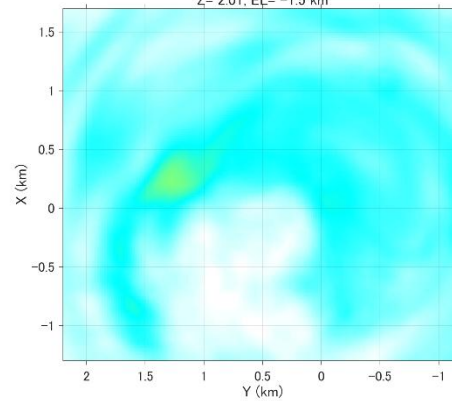
1.9km

$Z = 1.91, EL = -1.4 \text{ km}$



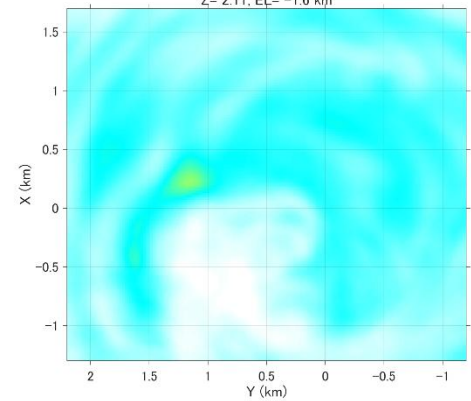
2.01km

$Z = 2.01, EL = -1.5 \text{ km}$

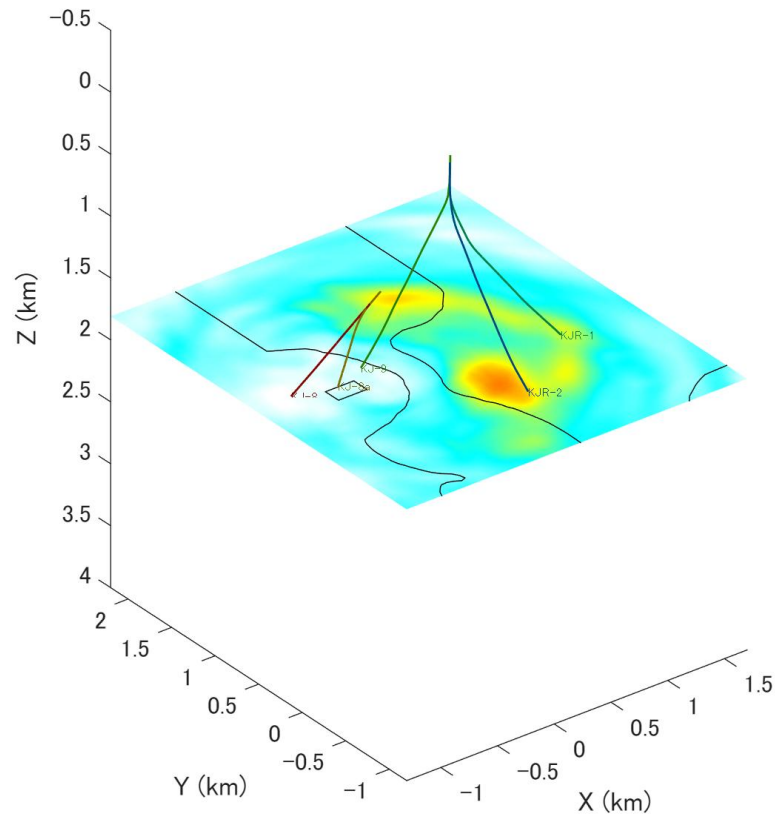


2.11km

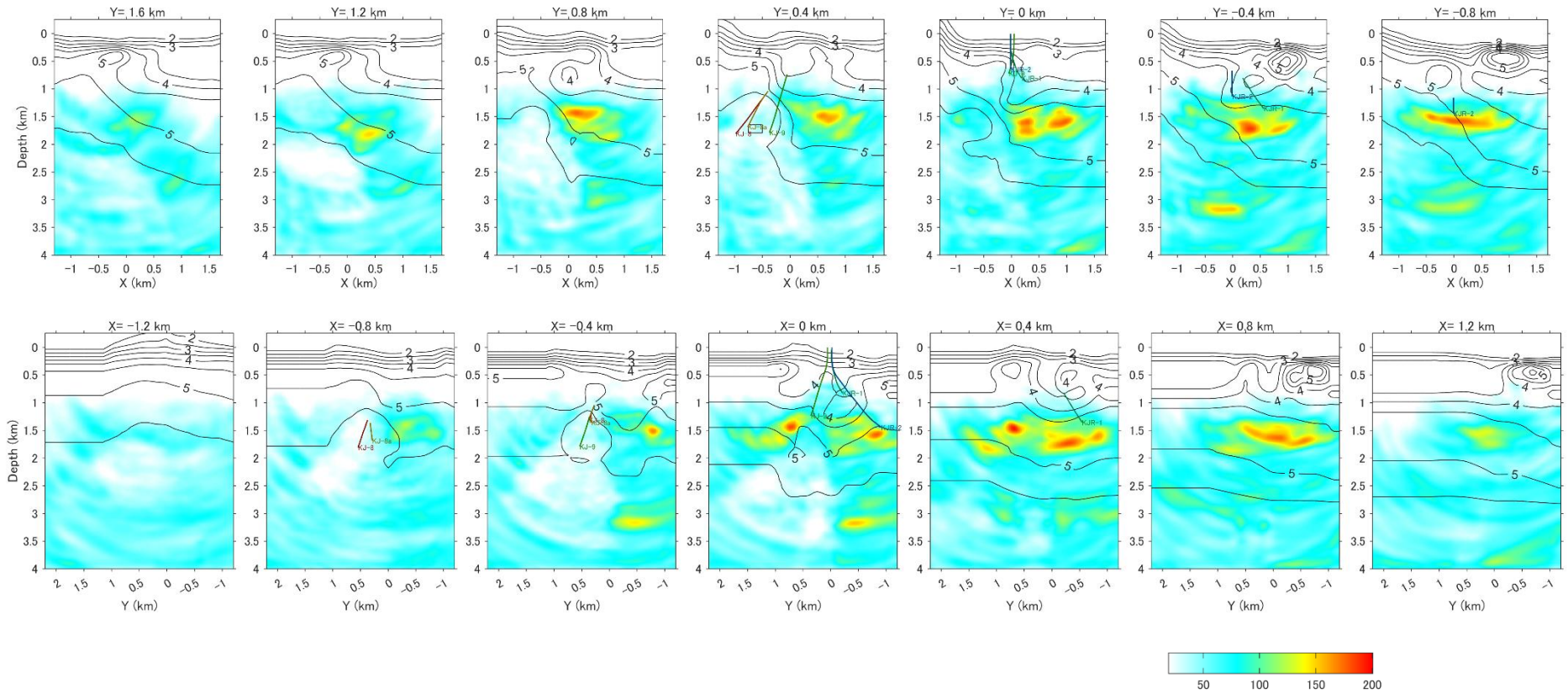
$Z = 2.11, EL = -1.6 \text{ km}$



木地山の地震波反射面分布の深さスライス



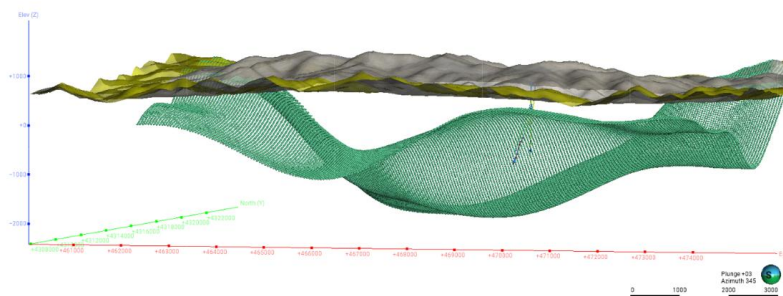
木地山の地震波速度構造と地震波反射構造



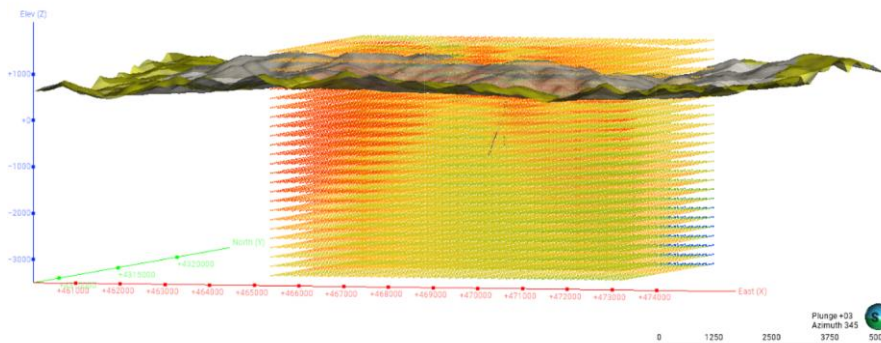
②坑井間の地熱構造を既知の地熱構造・ 比抵抗構造統合の研究開発

研究課題

3次元比抵抗構造を含む**既存データ類と本技術の解析結果を対比**することで、速度構造や反射面が地層由来のものなのか、もしくは地熱貯留層を示唆するものなのか等の評価を行い、既知地熱系概念モデルの精緻化につなげる。

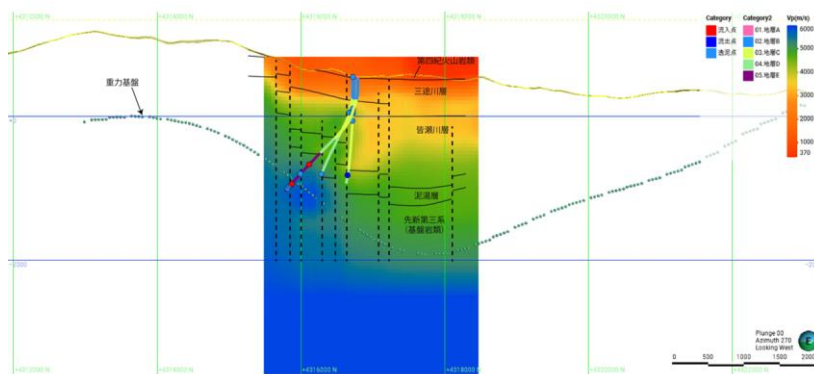
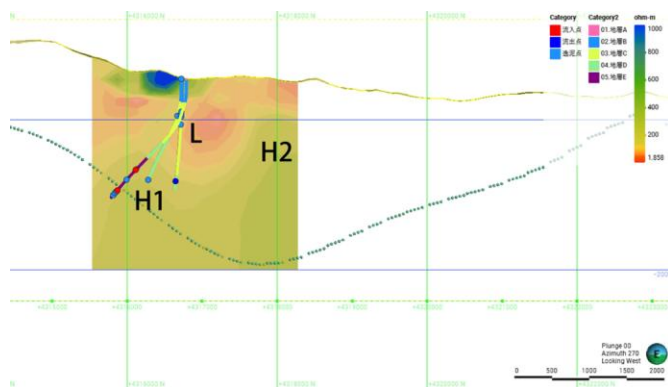


重力基盤構造と坑跡の鳥瞰図



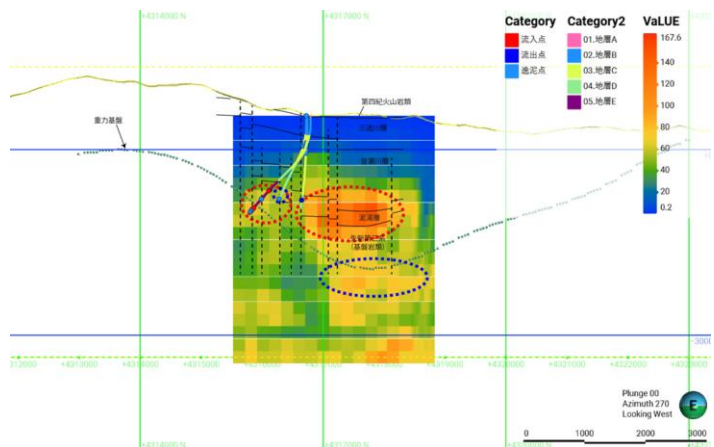
比抵抗構造の鳥瞰図

②坑井間の地熱構造を既知の地熱構造・ 比抵抗構造統合の研究開発



選定断面位置における比抵抗断面図

選定断面位置における地質構造と速度構造断面図



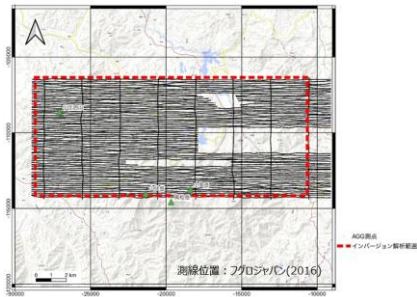
選定断面位置における反射断面図

- 比抵抗構造と速度構造の間には概ね整合的な対応関係が認められる。一部には不一致も確認され、各探査手法が異なる感度を有する物性値の違いに起因するものと考えられる。
- 複数手法の調査を実施して総合的に評価・解釈することで地熱系概念モデルの精緻化に繋がることが示唆される。
- 基盤深度の推定においては、重力探査が面的把握に有効であるのに対し、DAS計測はより高精度な評価が可能であることが示された。
- 速度構造の屈曲部と坑井で確認された逸泥点・流入点の分布が対応することから、断層や割れ目に起因する透水性構造の存在が支持されるとともに、反射断面においても地層境界や断層周辺の亀裂（閉塞性を含む）を反映した強反射面が高精度に把握された。
- 以上より、DAS計測は地質構造の精緻化に寄与し、結果として地熱系概念モデルの高度化に有効であることが示唆される。

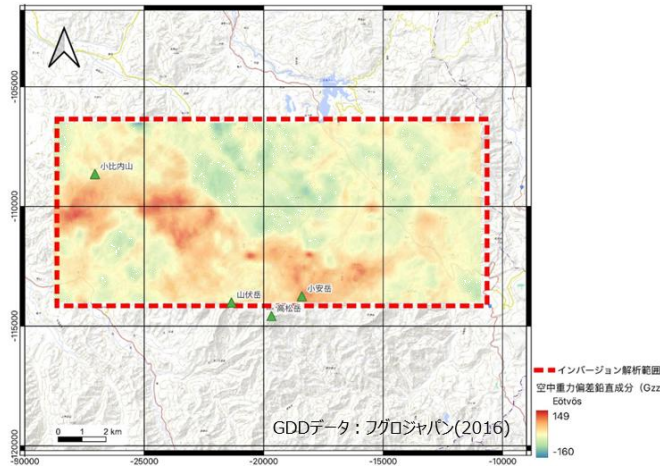
③坑井間地熱構造と重力データの統合の研究開発

研究課題

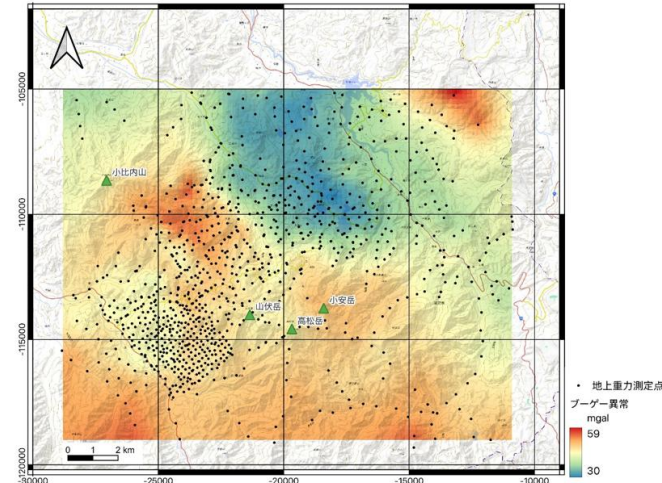
重力はポテンシャル場に依存するため解の冗長性があるが、本技術で取得されるデータ解析から求まる地下の地震波速度構造を先見的情報として与えるインバージョン解析を行う。求める地下構造の深さ分解能を300 m程度にする。



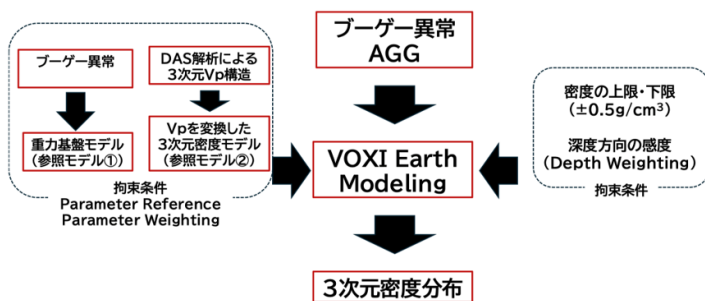
3次元密度構造インバージョンに使用したAGG測線



3次元密度構造インバージョンに使用した入力データ(GDD)



地上重力データに基づくブーゲー異常 ($\rho=2,370 \text{ kg/m}^3$)

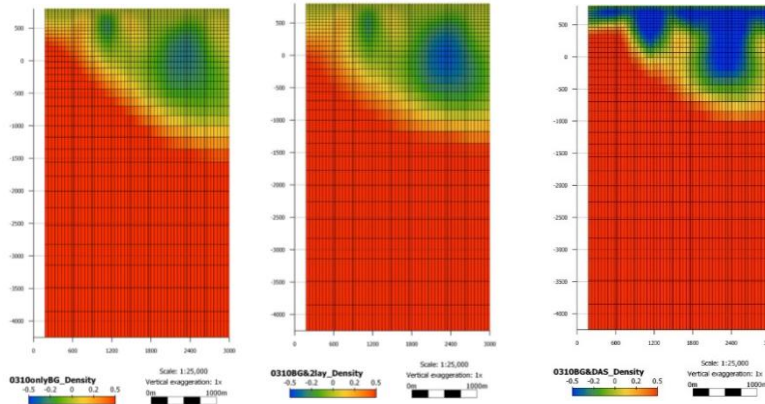


3次元重力・重力偏差 (AGG) インバージョン解析の流れ

本解析では3次元インバージョンコードにSeequent社Oasis MontajのアドインであるVOXI Earth Modelingを使用し、以下の3ケースの解析を行った。

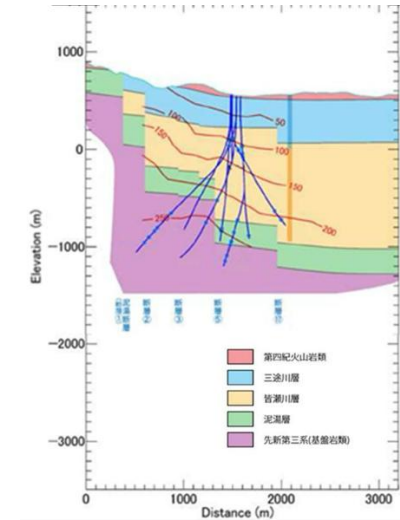
- ① 参照モデル無し
- ② 地上重力長波長データに基づく基盤形状 (西島・藤光(2015)) を参照
- ③ 速度構造からBrocher (2005)の式に基づいて密度構造に変換したモデルを参照

③坑井間地熱構造と重力データの統合の研究開発

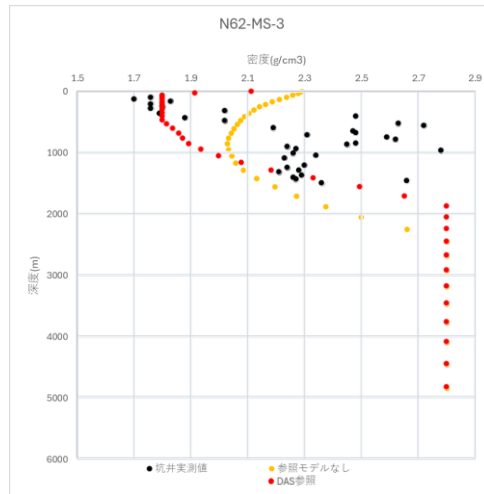


選定断面位置における3次元密度分布断面図

(左：参照モデルなし、中央：重力基盤参照、右：3次元速度構造を密度変換して参照)



地質断面図



既存坑井(N62-MS-3)密度と解析値の比較

(黄色：参照モデルなし、赤：3次元速度構造を参照)

- **重力長波長データに基づく基盤形状や速度構造を拘束条件として導入することで、より現実的で地質・速度構造と整合的な密度構造モデルが得られた。**
- **特に速度構造を参照した密度構造モデルが坑井密度と最も良好に一致し、所期の目的である地下構造の深さ分解能300 m程度を達成できたものと考えられる。**
- 一方で、検証データが限定的であるため、今後の追加検証が必要である。

④ 探査コストを踏まえた開発コスト削減についての検討

- ・ Beckers・Young（2018）は、高精度な地熱資源量評価には貯留層温度、化学組成、透水性および流量データの取得が重要であり、そのためにはフローテストや干渉試験の実施が不可欠であると整理している。
- ・これらの試験には**少なくとも2本、望ましくは3本の掘削成功井が必要**とされることから、
- ・本研究では掘削成功井を2～3本確保するために必要となる可能性が高い掘削本数について、DAS計測実施有無の2ケースで検討した。

坑井掘削費用は1坑あたり約10億円（掘削長2,000 m程度）、DAS計測費用は約0.7億円と設定した。
サニエル・安川（2016）に示されるカモジャン地域の掘削成功率を参考に、

- ・DAS計測を1本目の坑井で実施することで2本目以降の掘削成功率が70%まで向上するケースを想定し、ベルヌーイ試行（ポアソン二項分布）により必要掘削本数を試算した。

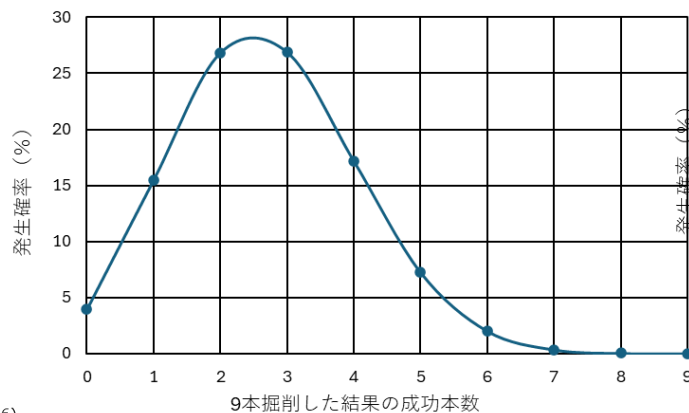
・その結果、DAS計測を実施する場合は5坑井、実施しない場合は9坑井において成功井2～3本となる確率が高くなる結果となった。総費用はそれぞれ約50.7億円、約90億円と試算され、本検討条件の下では

・本検討条件下では約40%以上のコスト削減が見込まれ、目標である10%以上を大きく上回る結果となった。

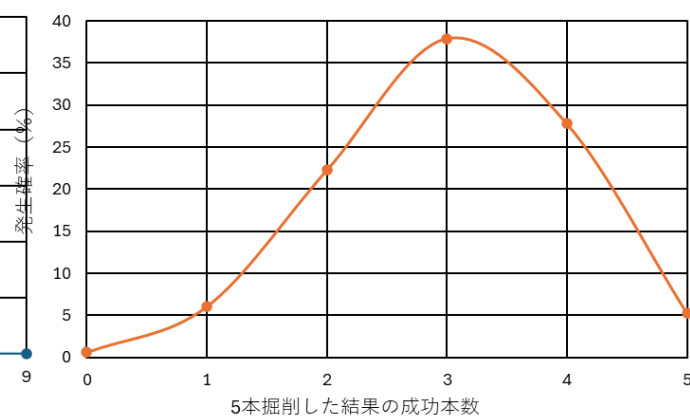


図4 カモジャンにおける坑井掘削数 n （横軸）と掘削成功率（縦軸）の推移（Sanyal, 2011）。

Fig. 4 Average Drilling Success Rate vs. Number of Wells Drilled at Kamojangan Field, Indonesia (Sanyal, 2011). 出典：サニエル・安川(2016)



DAS未実施で9本掘削に対する成功本数の確率



DAS実施で5本掘削に対する成功本数の確率

まとめと今後の課題/1

【研究開発項目①：坑井間の掘削振動を震源として掘削井と観測井間の地熱構造を求める研究開発】

- 掘削ドリルビットのノイズを2坑井に挿入した光ファイバーで記録した。
- その記録を用い、同じ坑井内の異なった深さの記録同士を相関処理を行いドリルビット位置から坑井まで伝達する地震波を再現できた。
- 掘削井と観測井間のクロスホールトモグラフィを実施した。
- 地上震源のDAS記録も解析した。
- これらから3D地震波速度構造、3D反射面分布も求めた。
- 3D地震波反射面分布とlost-circulation, flow-in, flow-outとの比較をし、断裂系と地震波反射面分布の密な関係を確認した。
- 相関処理によって得た波形データは、地中震源として、今後の新探査技術になるであろう。
- 特許申請中である。
- 今後の課題として、ドリルビットの相関処理による地震波伝搬距離が現状の< 1 kmから、~2km程になると良い。

【研究開発項目②：坑井間の地熱構造を既知の地熱構造・比抵抗構造統合の研究開発】

- 選定断面位置において、DAS計測により得られた3次元速度構造および反射面強度を既存のMT探査、重力探査、坑井データと比較した。
- 基盤岩上面深度を既存手法より坑井実績と整合的に評価できることが確認された。
- 速度構造の屈曲部は断層構造や坑井で確認された逸泥・流出入点と対応し、強反射面は地層境界や断層周辺の亀裂群（閉塞性を含む）を反映している可能性が示された。
- これらの結果から、DAS計測は地質構造モデルの精緻化を通じて地熱系概念モデルの高度化に有効であり、掘削成功率向上への貢献が期待される。
- 深部の高速度域や強反射面については坑井データによる検証が不足しており、亀裂の透水性評価や他地域への適用性には今後の検証が必要である。

まとめと今後の課題/2

【研究開発項目③：坑井間地熱構造と重力データの統合の研究開発】

- 既存の重力データと空中重力偏差法探査データを用いた密度構造解析では、基盤形状やDASから得られた**3次元速度構造を拘束条件として導入**することで、従来よりも地質構造や坑井データと整合的な高精度の密度構造モデルを構築できた。
- 特に速度構造を活用したモデルは坑井密度との一致度が高く、目標としていた約300 mの深さ分解能を達成したと考えられる。
- 検証は限られた地質断面および坑井データに基づいており、モデルの妥当性や他地域への適用性については今後さらなる検証が必要である。

【研究開発項目④：探査コストを踏まえた開発コスト削減についての検討】

- DAS計測技術は地熱開発初期段階における**地質構造の不確実性低減に有効**であり、
- 地熱系概念モデルの高度化や掘削成功率向上に寄与する可能性が示された。
- 掘削成功率向上を仮定した確率論的評価の結果、必要な掘削本数の削減によるコスト低減効果が確認され、
- **本検討条件下では約40%以上のコスト削減が見込まれ、目標である10%以上を大きく上回る結果となった。**一方で、本評価は仮定条件に基づく試算であり、今後は実フィールドにおける適用事例の蓄積および検証を通じて、評価の信頼性向上を図ることが重要である。

今後の課題

- ドリルビットの相関処理による地震波伝搬距離が現状の<1kmから、～2km程になると良い。