

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、調査井掘削段階に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。掘削成功率の向上は、開発コストの削減を通じて地熱資源開発の促進につながる事が期待される。

目的

- 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。

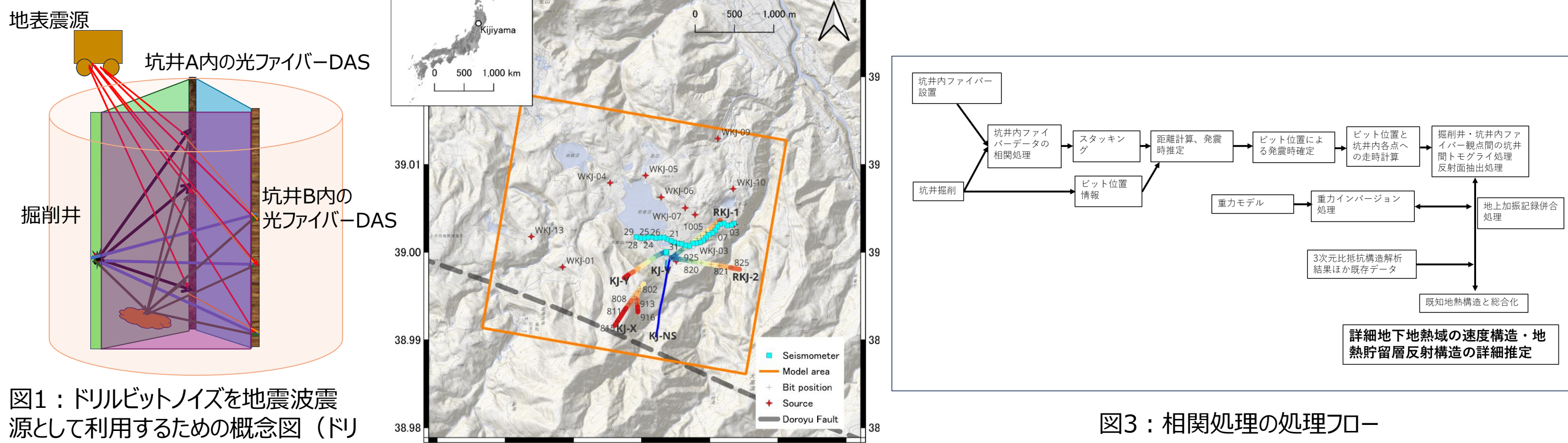


図1：ドリルビットノイズを地震波震源として利用するための概念図（ドリルビットノイズを坑井Aで受振し、A内のDAS相互相関処理を行う）

図2：本調査に用いた木地山での地熱坑井位置

図3：相関処理の処理フロー

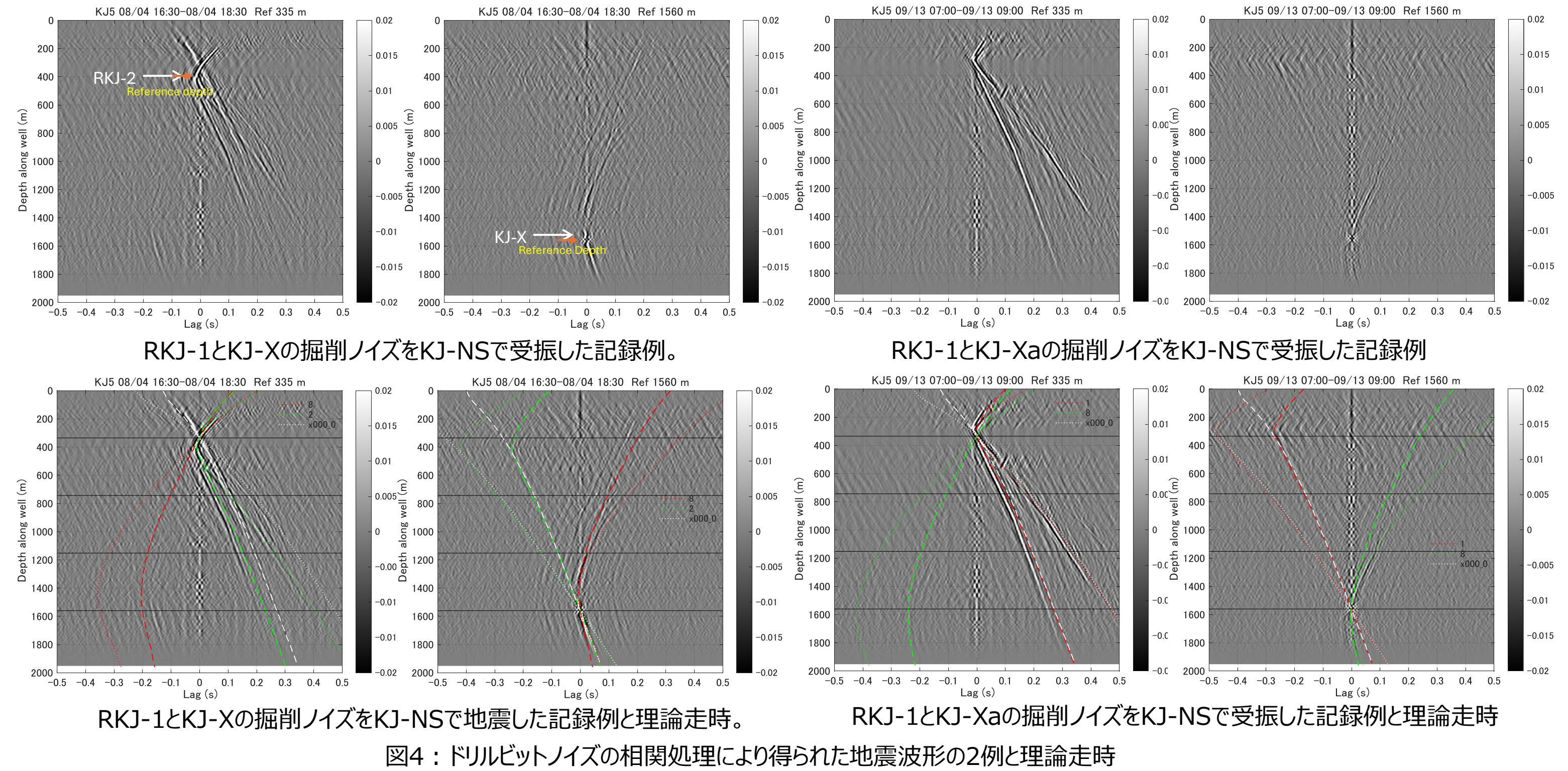


図4：ドリルビットノイズの相関処理により得られた地震波波形の2例と理論走時

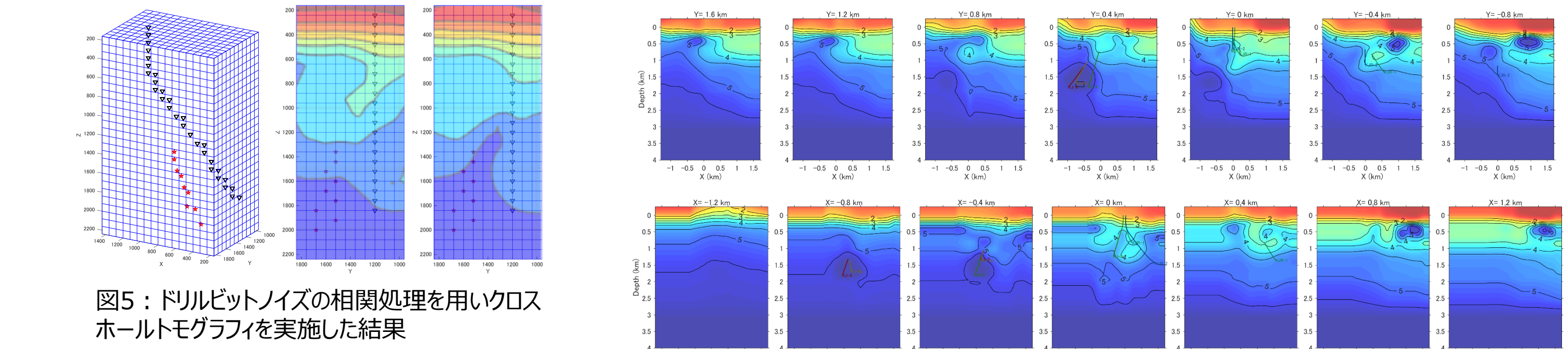
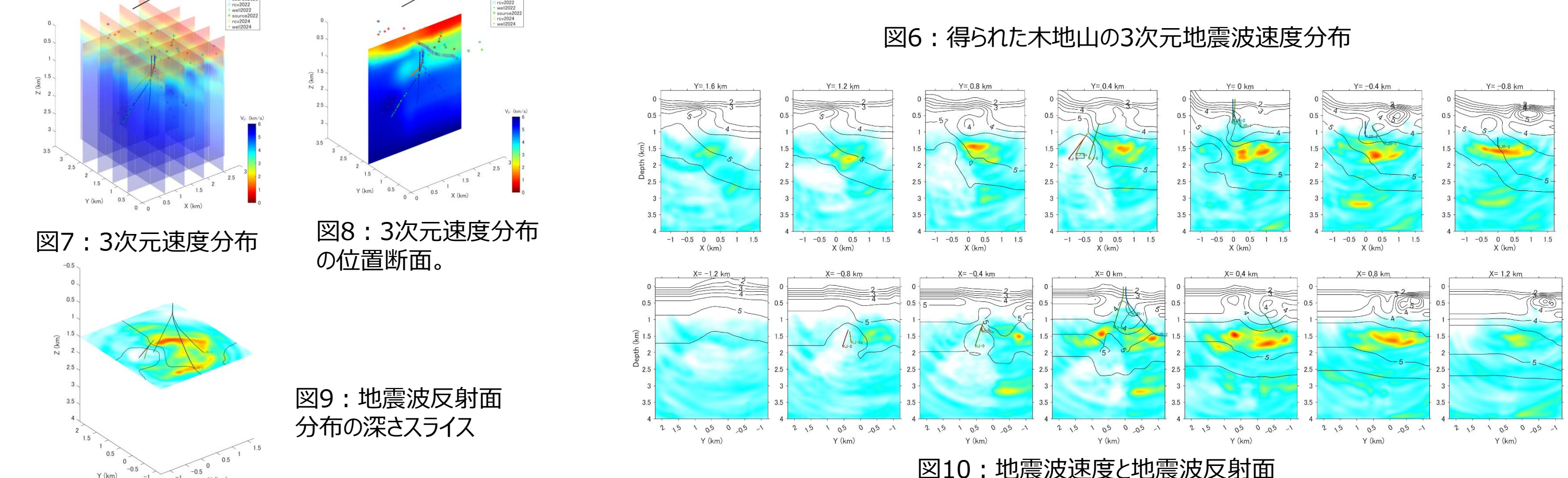


図5：ドリルビットノイズの相関処理を用いたクロスホールトモグラフィを実施した結果



研究開発項目①：成果

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、3 km x 3.4 km x 4 km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。

課題と今後の取り組み

- 事業化に取り組む努力をしていく必要がある。
- ドリルビットを利用した伝搬距離の向上は今後の課題であろう。

実用化・事業化の見通し

- 本事業で開発したドリルビットの掘削振動を地震波震源として用い地熱構造を精緻化できた。
- また反射面分布は断層系の存在を示唆する。
- 重力解析には速度構造を考慮した重力解析は既存地熱・地質構造との一致が良い。
- 本調査手法を取り入れることにより地熱開発コストを40%以上削減可能であろう。
- これらから、十分な事業化の要素を備えていると思われる。

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

3次元比抵抗構造を含む既存データ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。

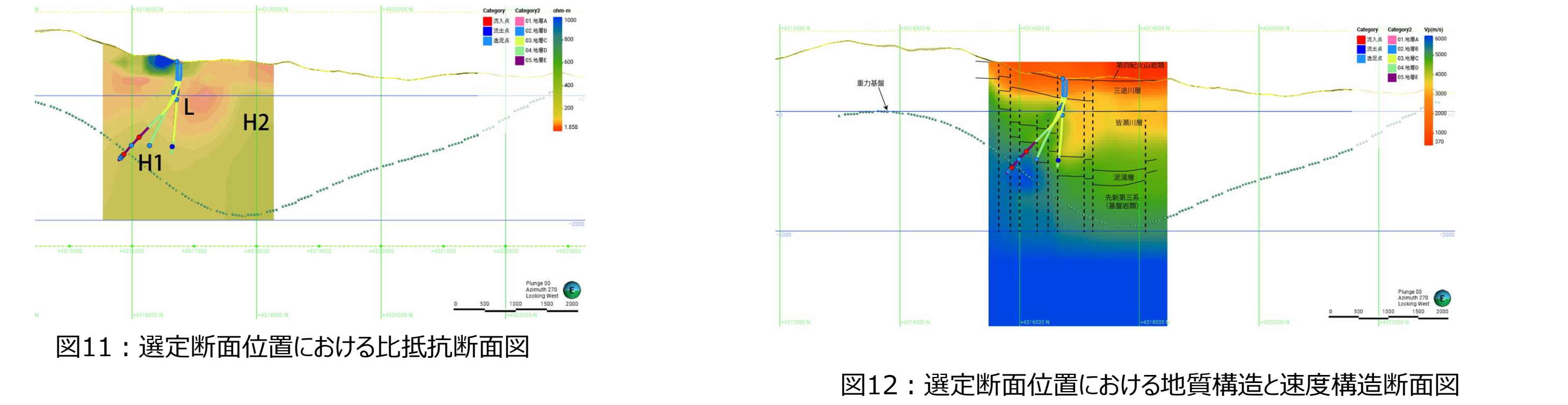


図11：選定断面位置における比抵抗断面図

図12：選定断面位置における地質構造と速度構造断面図

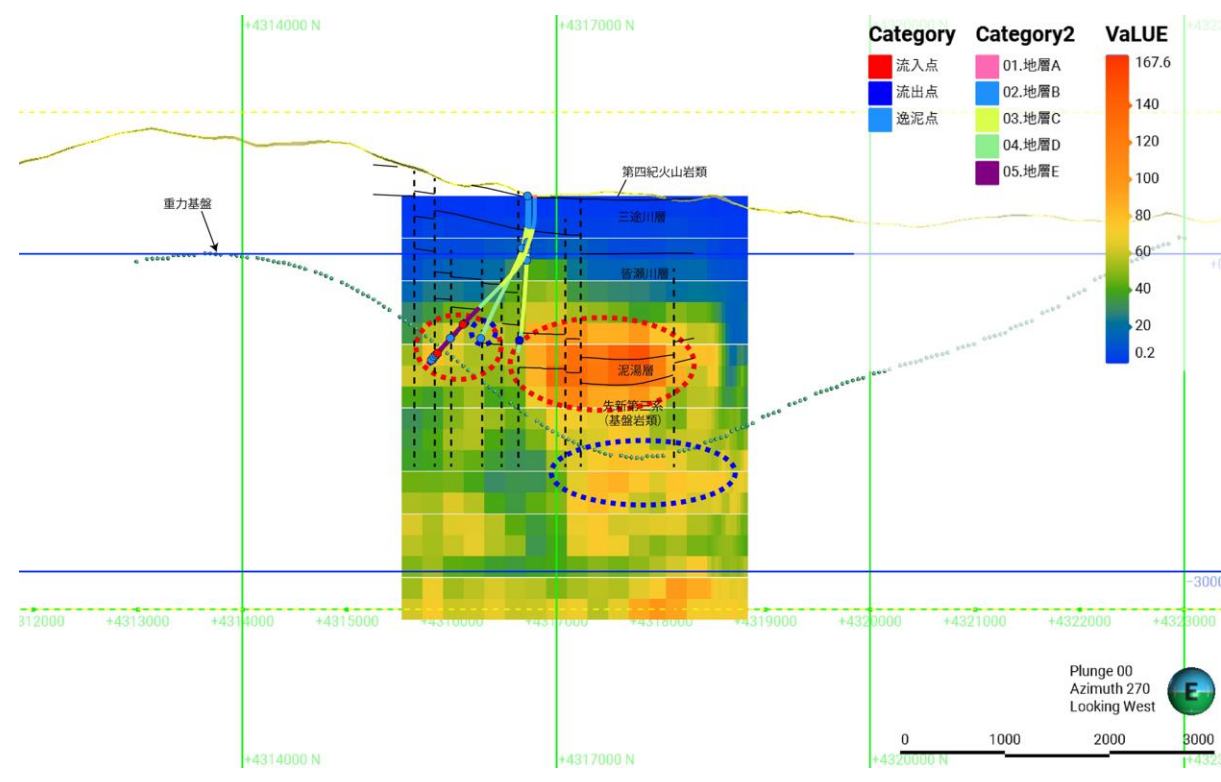


図13：選定断面位置における反射断面図

研究開発項目②：成果

- 地熱開発事業者から提供された各種データとDAS計測による速度構造を統合的に評価した。
- その結果、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・流出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。
- 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。

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

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。

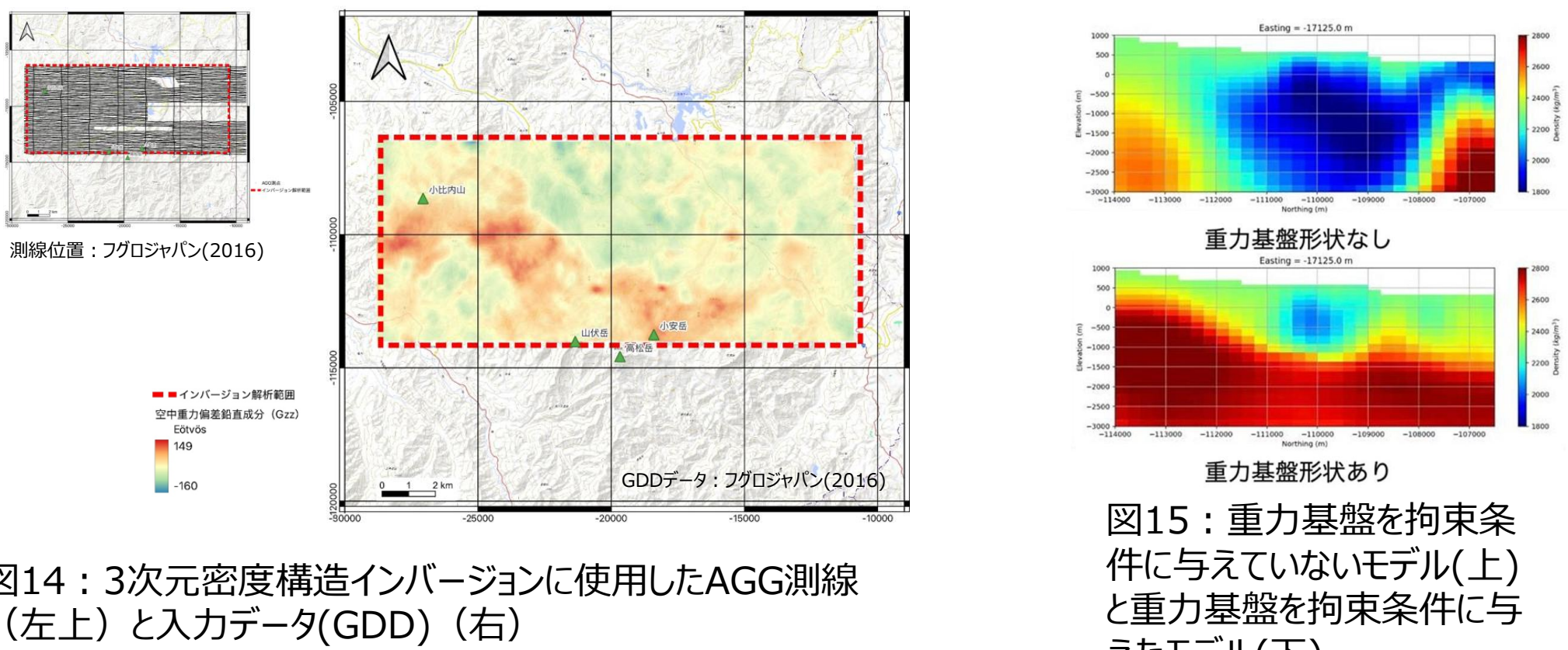


図14：3次元密度構造インバージョンに使用したAGG測線（左上）と入力データ(GDD)（右）

図15：重力基準を拘束条件に与えないモデル(上)と重力基準を拘束条件に与えたモデル(下)

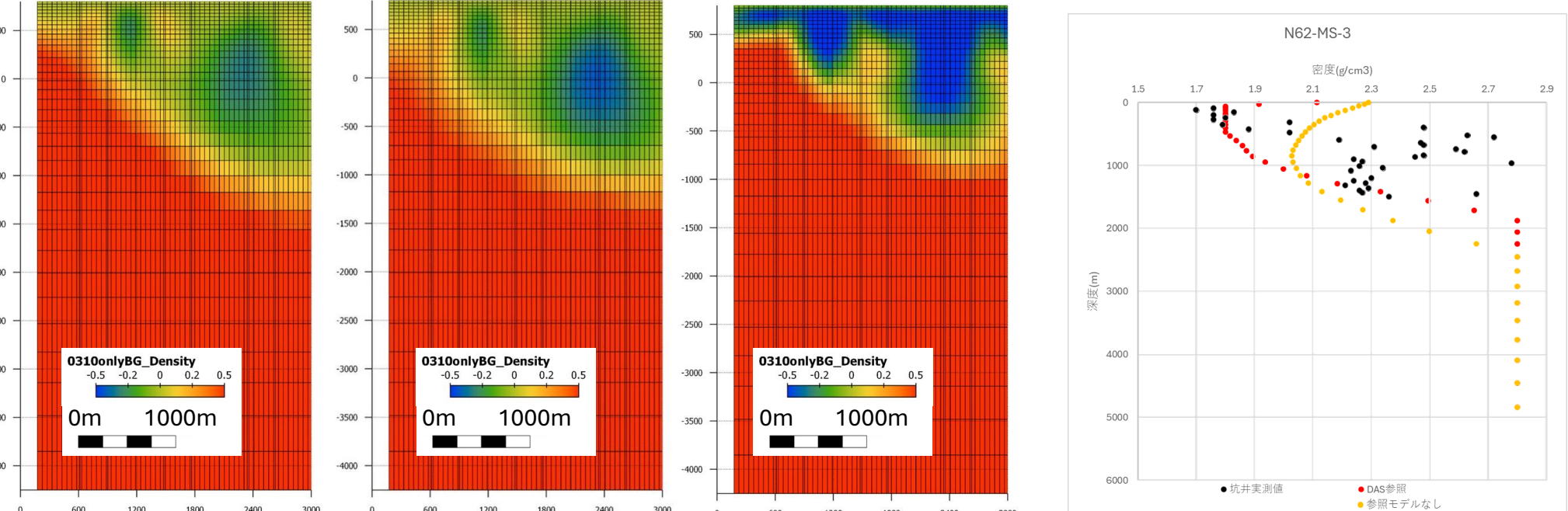


図16：選定断面位置における3次元密度分布断面図（左：参照モデルなし、中央：重力基準参照、右：3次元速度構造を密度変換して参照）

図17：既存坑井(N62-MS-3)密度と解析値の比較（黄色：拘束条件なし、赤：速度構造を考慮）

研究開発項目③：成果

- 既存地上重力データおよびJOGMECの重力偏差法探査データを用いた3次元密度構造インバージョン解析（Oasis Montaj）において、通常の解析では、モデル底面から上面にかけて円柱状もしくは円錐状の高密度体あるいは低密度体の集合となることがあった。
- 本事業では、重力長波長データに基づく基盤形状（西島・藤光(2015)）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。
- 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。
- 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。

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

- 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 km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DAS計測の活用により約39.3億円(約43%)のコスト削減可能性が示された。ただし、実際の掘削成功率や掘削費用は地質条件等に大きく依存するため、本結果は一定の仮定に基づく試算である。

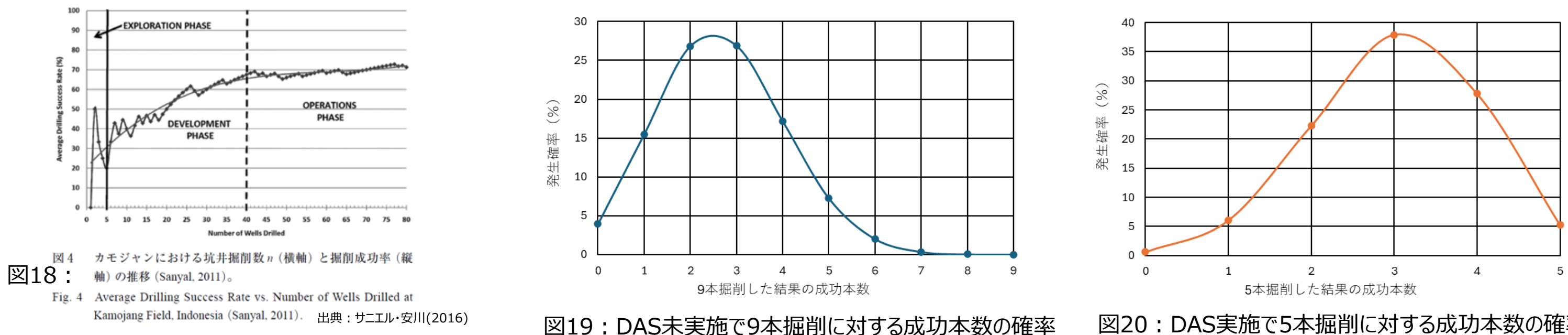


図18：カモジャンにおける坑井掘削数（横軸）と掘削成功率（縦軸）の推移（Sanyal, 2011）。

図19：DAS未実施で9本掘削した結果の成功率

図20：DAS実施で5本掘削した結果の成功率

研究開発項目④：検討結果

- 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。