

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

## AIを利用した在来型地熱貯留層の構造・状態推定

山谷 祐介

(国研)産業技術総合研究所

2023年2月2日

【委託先】

(国研)産業技術総合研究所  
(国)室蘭工業大学  
(国)東京工業大学(～2022.3)  
(公)兵庫県立大学(2022.4～)  
(国)京都大学  
地熱エンジニアリング(株)

【再委託先】

(国)東北大学  
(国)九州大学  
(国)名古屋大学

問い合わせ先

(国研)産業技術総合研究所  
<https://www.aist.go.jp/fukushima/>  
TEL: 024-963-1805

# 事業概要

## 1. 背景・目的

地熱開発においては、地下の高温かつ高透水性ゾーンの位置を特定し、掘削目標を如何に絞り込むかが開発リスク低減のために重要である。本事業では、坑井、地質学的情報、物理探査等の地表で得られる多項目データを人工知能（AI）的手法によって総合的に解釈し、地下の温度分布および高透水性領域の分布を高精度で推定可能な技術を確立にすることを目的とする。また、それらの時間変化を検出する手法の可能性についても検討する。

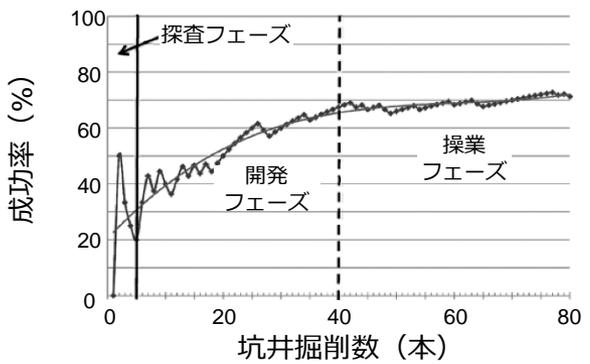
## 2. 実施期間

開始 : 2021年6月  
終了（予定） : 2024年3月

## 3. 実施内容・最終目標

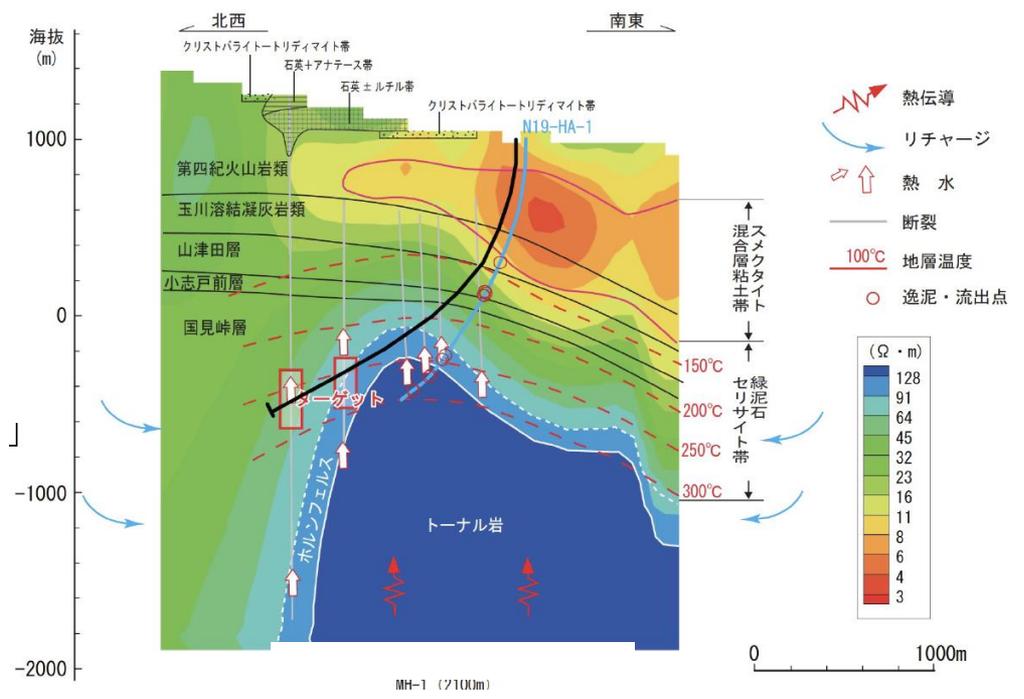
実施内容	最終目標
①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発	AI的手法により温度・高透水性領域分布を推定可能にする。温度は、15%以下の誤差で推定する。
②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上	地下2～3kmの比抵抗構造について、従来手法よりも高分解能な解析手法の開発を完了する。

# 背景



インドネシア・カモジャン地熱地域の掘削成功率 (Sanyal, 2011を改変)

- 掘削失敗の要因** (サニエル・安川、2013)
- 掘削上のメカニカルな問題
  - 温度が不十分**
  - 貯留層圧力が低すぎる
  - 貯留層の容量不足
  - 貯留層の透水性が低すぎる**
  - 坑井周辺のスキン・ダメージ
  - 地熱流体の化学性状の問題



総合解析によるターゲット選定 (NEDO, 2011)

\* 地熱掘削における成功率は約7割程度であり、特に開発初期段階では3割にとどまることが開発の大きなリスクとなっている。

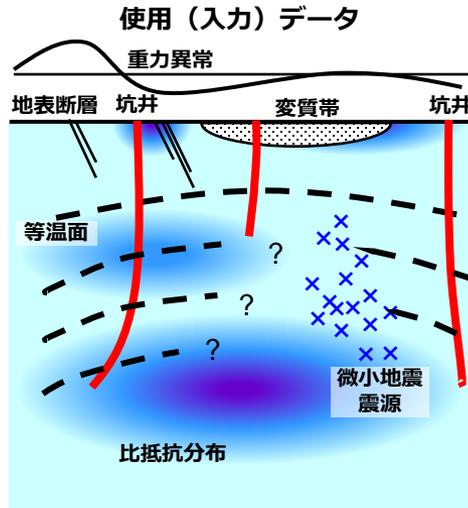
# 研究開発の目的と課題

## 目的

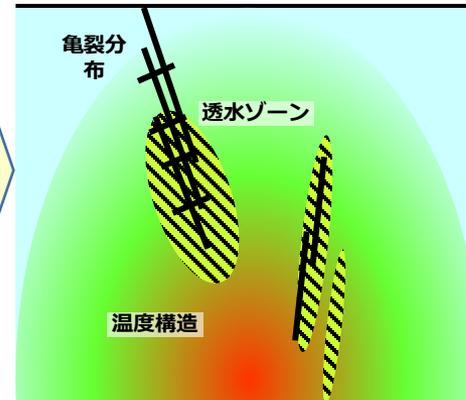
地表調査データ、坑井データからAIによって地下の高温・高透水ゾーン的位置推定を行う技術を開発し、掘削ターゲットの高精度推定サービスとして展開することで、掘削成功率の向上に寄与する。さらに、地下状態の時間変化抽出から生産・還元影響域を特定する技術を検討する。

## 貯留層構造・状態推定における現状の問題点

- \* 間接的かつ多様なデータから経験的に推定せざるを得ない。
- \* 開発初期段階では特にデータ数が限られている。
- \* 解釈方法は技術者の熟練に依存する。
- \* 物理探査の空間分解能は必ずしも十分ではない。
- \* 貯留層状態の時間変化の抽出、生産・還元影響域の特定が困難。



## 推定（出力）



## 本研究開発の成果

- \* AIによる多項目データ解釈に基づく貯留層構造・状態推定法の開発
- \* 比抵抗分布の空間分解能の向上



- \* 高温・高透水ゾーンの高精度推定
- \* 生産・還元影響域の特定

## 課題

- AI的手法による多項目データの解釈技術、高透水ゾーン抽出技術、時間変化抽出技術の開発。
- AI評価・学習用のデータセット整備、入力する物理探査データの高分解能化。
- 実証試験を通じた実フィールド適用時の課題抽出と解決。

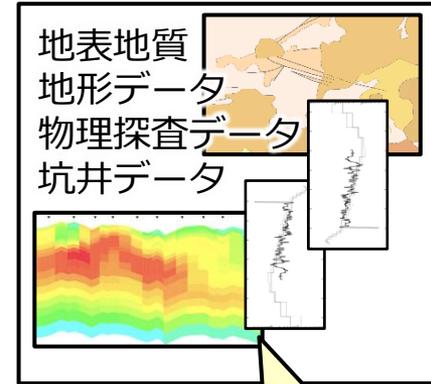
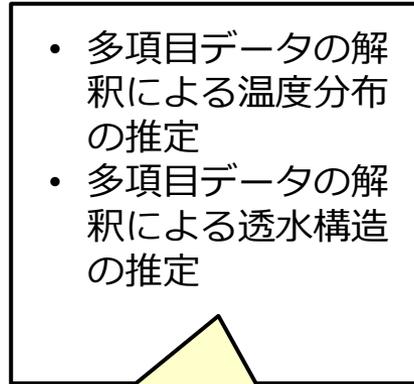
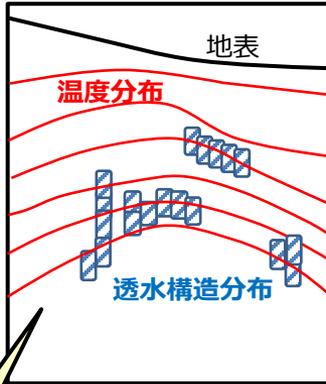
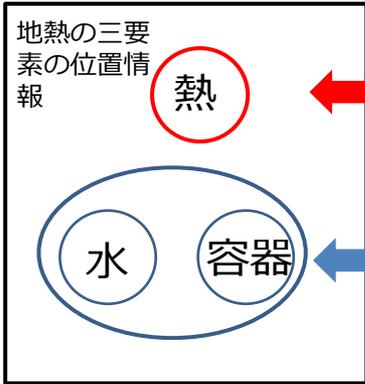
# 研究開発内容

掘削のために欲しい情報

推定可能な情報

開発するAI機能

持っている情報



ユーザー利用支援

- 可視化ツール
- 入出力サポートツール
- インターフェースソフトの整備
- マニュアル化

それぞれの項目で実施

①-(a) AIによる貯留層構造・状態の推定

有望領域  
(透水性) 推定AI  
平面データの画像解釈

温度推定AI

- CNNによる多項目データ解釈

①-(d) 実フィールド  
人工データ収集

- AI検証用データの収集、整備

①-(c) 物性データの収集

- 物理モデル構築

②-(a) 比抵抗構造の  
空間分解能の向上

- スパース逆解析コードの開発

# 開発スケジュール

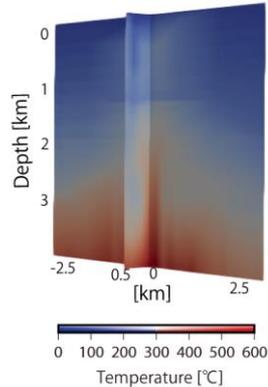
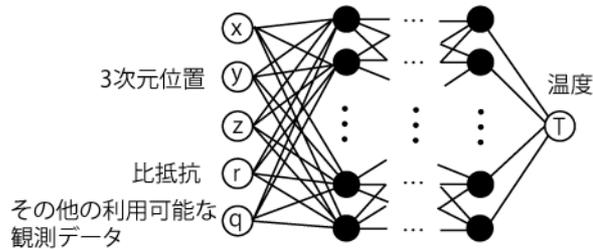
研究開発項目	担当	2021年度	2022年度	2023年度
① AIによる坑井、地表、物理探査データの解釈技術 (a) AIによる貯留層構造・状態の推定	○産総研、室工大、兵県大、名大、京大、Geo-E、東北大、九大	機能・データ仕様策定	AI機能開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>CNN機能</li> <li>有望領域推定</li> </ul>	性能評価・実証試験
(b) AIによる貯留層状態の時間変化の推定	○産総研、室工大、兵県大、京大、Geo-E、名大	機能・データ仕様策定	AI機能開発	性能評価
(c) 物性データの収集	○Geo-E、九大、産総研、兵県大、名大	物性データ収集 <ul style="list-style-type: none"> <li>室内実験</li> <li>モデル化</li> </ul>		
(d) 実フィールド・人工データ収集	○Geo-E、東北大、産総研	実フィールドデータ収集 <ul style="list-style-type: none"> <li>意味画像作成</li> </ul> 人工データ整備 <ul style="list-style-type: none"> <li>比抵抗追加</li> <li>重力追加</li> </ul>		
② 物理探査データ逆解析における空間分解能の向上 (a) 比抵抗構造の空間分解能の向上	○京大、兵県大、産総研、室工大、名大	コード開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>1D/2Dコード作成</li> <li>最適化手法評価</li> <li>3Dコード作成</li> </ul> 性能評価		

- ユーザIFの完成
- マニュアル整備

# 研究成果 温度推定AI：機能設計

## <既存手法>

既存手法のNNアーキテクチャ



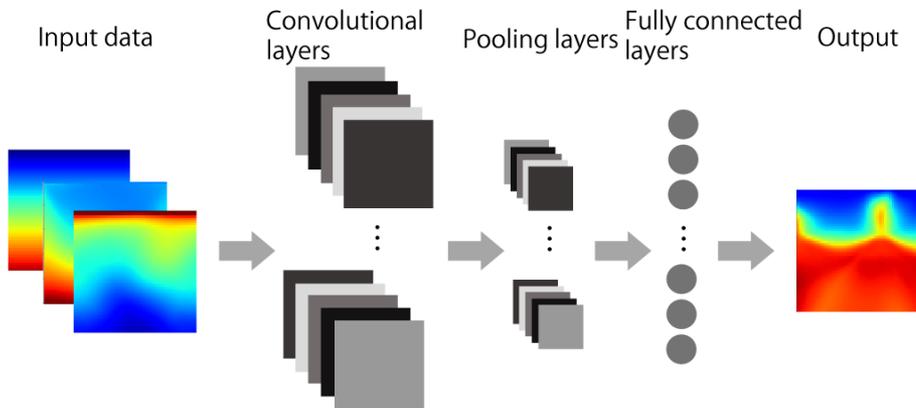
(Ishitsuka et al., 2021)

## (既存手法の課題)

- 多種の観測データが得られているのに拘わらず、十分に活用できていない
- 十分な量の観測データがないと高精度の予測が難しい

## <本研究開発での取り組み>

Convolutional neural network (CNN)を用いた多種データの統合による予測



**Input data:** MTによる比抵抗  
断層・リニアメント分布に関する情報  
震源分布  
ブーゲー重力異常 等

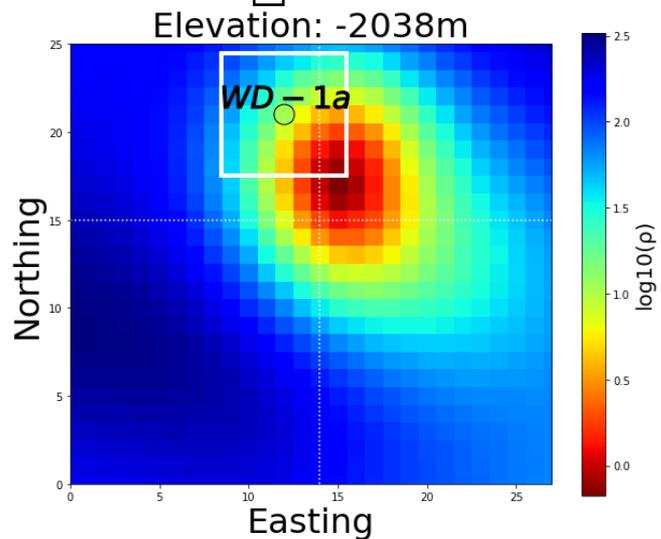
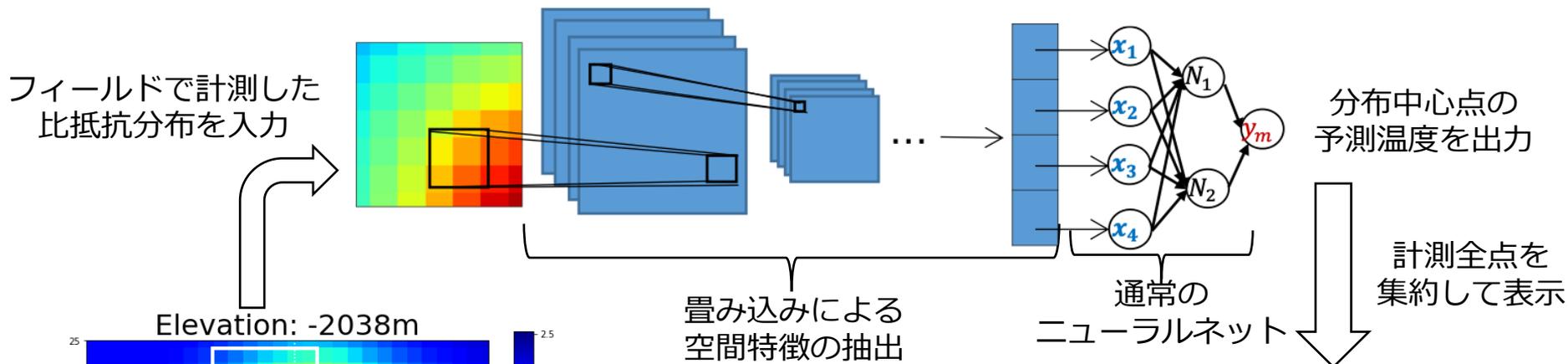
**Output:**  
温度

## (CNNを用いる利点)

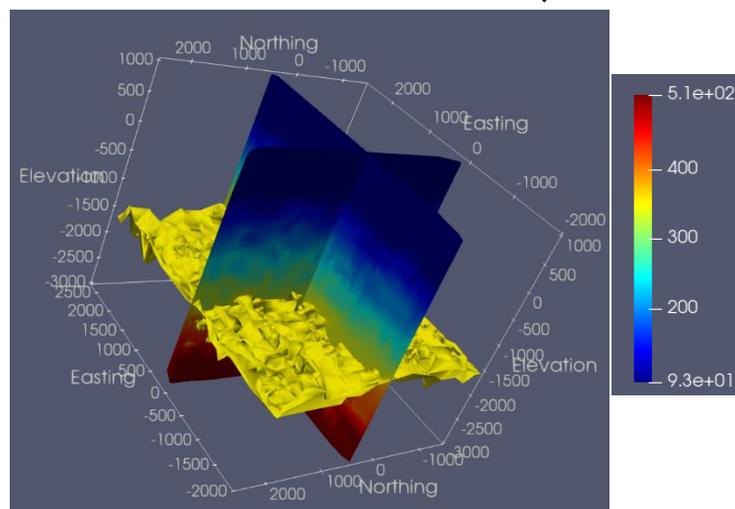
- ✓ 入力データの空間的に隣接する情報も考慮
- ✓ 入力データの種類や形式を検討し、多種データを用いることで、予測精度の向上を検討

# 研究成果 温度推定AI : CNNによる実装

方針 : 従来型の比抵抗の点入力(坑井各深度)でなく周囲の**平面分布を入力**して中心温度を出力



葛根田地域における  
海拔-2038 mにおける比抵抗分布  
(東西4480 m, 南北4160 m)

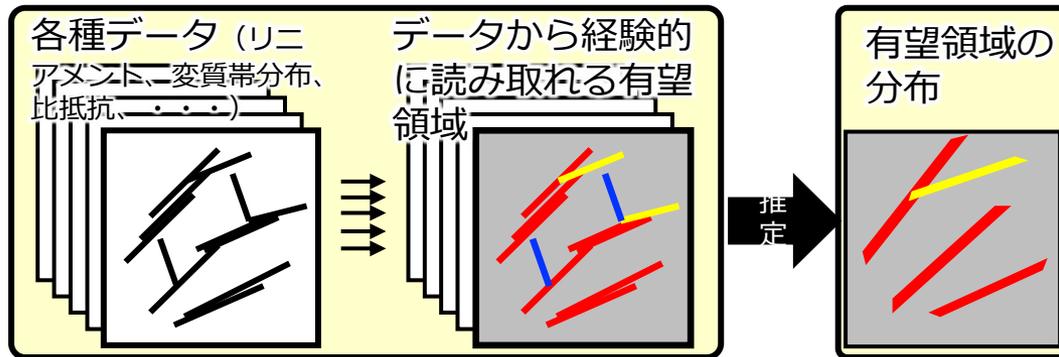


CNNによる葛根田地域の温度分布  
(立体表示は本委託研究で開発したWindowsアプリを利用)

# 研究成果

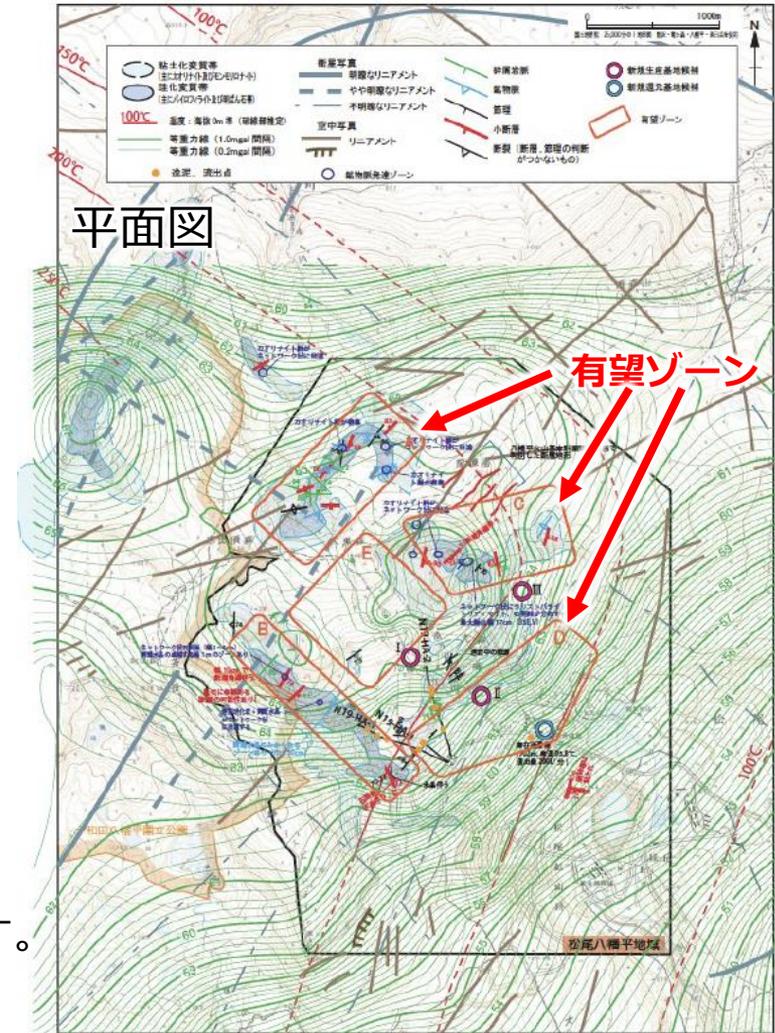
## 有望領域（透水性）推定AIの概念

- 「透水性」を特定の物理パラメータで代表させるのは困難。掘削ターゲット設定に必要な情報は、「断裂が存在する可能性が高い場所」。
- 各種データと人間による経験的な解釈データを学習し、断裂構造の存在可能性分布を推定する機能を開発する。



### 開発により期待される成果

- 平面図を使用した有望ゾーン自動推定の実現。
  - 現在、変質帯分布やリニアメント分布を適用。
  - 今後、物理探査等データを導入し総合解釈を目指す。
- 新規開発地条件でのAIの適応性と利用価値を向上。
  - 多数の解釈データの利用により推定精度の向上が期待される。



一般的な有望ゾーンの解釈 (NEDO, 2011)

# 研究成果

## 有望領域（透水性）推定AIの開発

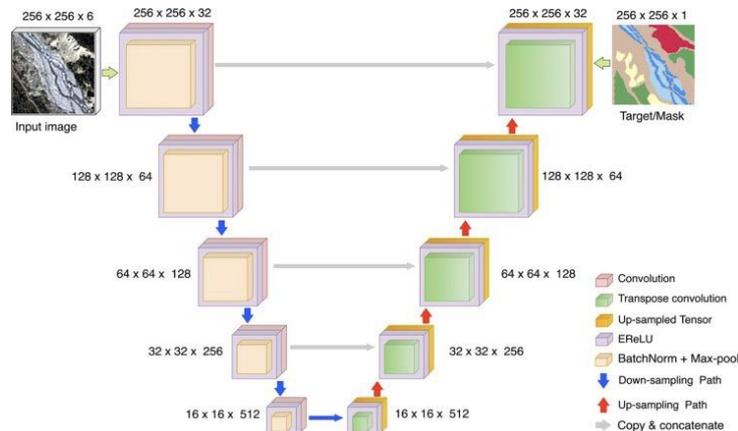
### アプローチ

入力：地表調査データ（平面図）

出力：透水性の高い有望領域

（経験のあるエンジニアの判断を作成）

ネットワーク：画像処理用U-netを転移学習で利用



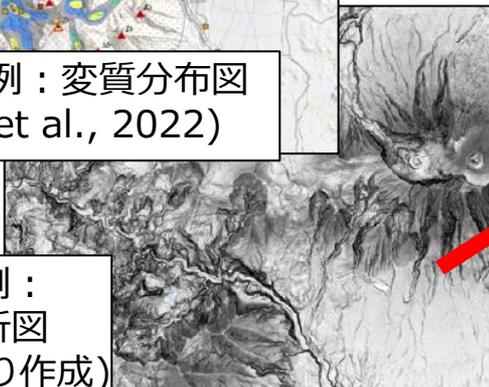
衛星画像の地理的解釈 (Malik et al., 2021)

### データ作成

透水性に関連する既存調査データから入力画像・意味画像 (正解画像) の対を作成。

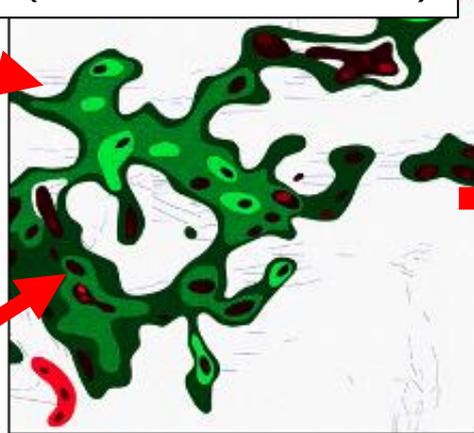


元データの例：変質分布図 (Akatsuka et al., 2022)

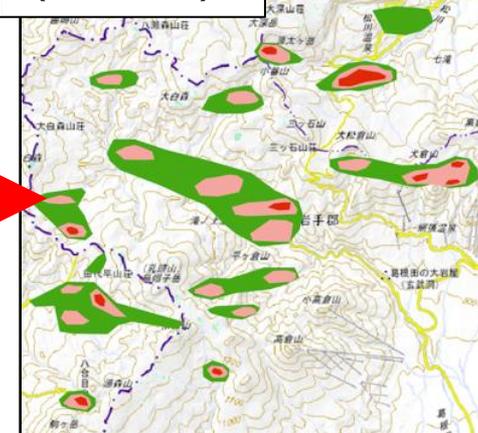


元データの例：立体地形解析図 (5mDEMより作成)

入力画像の例 (変質帯+リニアメント)



意味画像の例 (有望領域)



➤ 今後、物理探査データ等も活用する予定。

# 研究成果

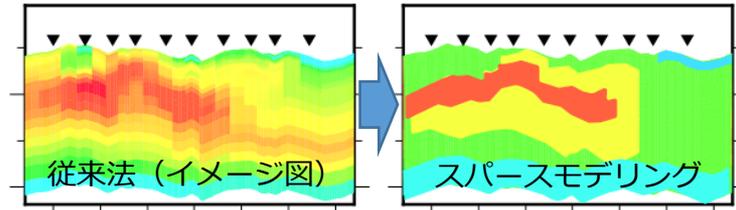
## 比抵抗構造の空間分解能向上：概要

目的：AI入力データの一つである比抵抗構造の高分解能化（シャープな構造境界の再現）

方法：**スパースモデリング**の手法を導入し、MT法データを用いた2次元および3次元の比抵抗構造逆解析技術を開発。逆解析により得られるモデルの解像度向上を目指す。

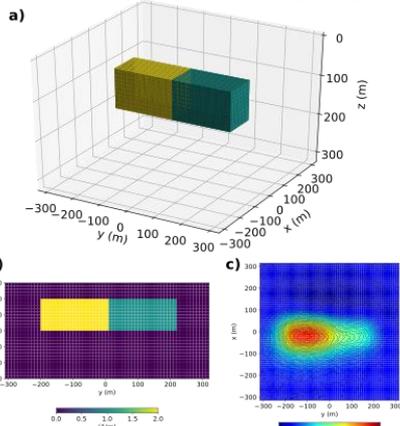
従来方法と何が違う？

従来手法で特徴的な滲んだ構造は除去され**シャープな構造**が得られやすい  
貯留層周辺の構造を正確に把握できる

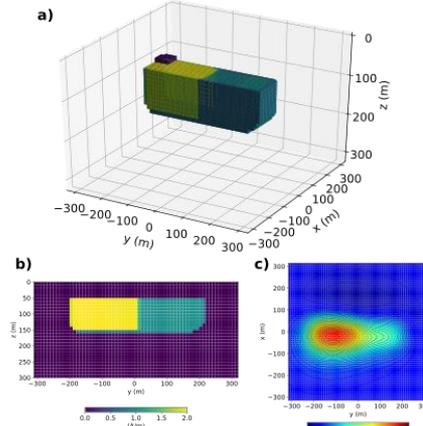


### 線形インバージョン・シンセティック計算例（3次元磁化）

真の磁化モデル  
(磁化異常体が地中に存在)



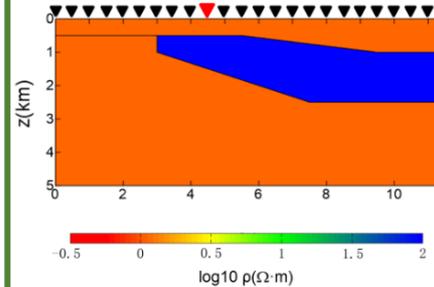
スパースインバージョン  
(構造正則化) による解析結果



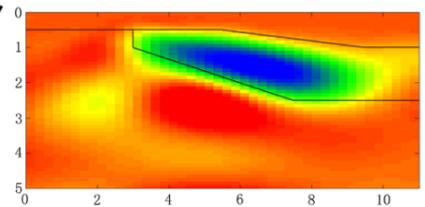
Utsugi, 2021 より

### 非線形インバージョン・シンセティック例（2次元比抵抗）

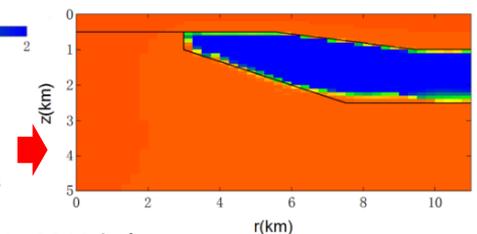
真の比抵抗モデル



従来のインバージョン手法  
(平滑化) による解析結果



スパースインバージョン  
(体積最小化) による解析結果



Xiang et al., 2018より

# 研究成果

## 比抵抗構造の空間分解能向上：スパースインバージョンの開発

目的関数 $\Phi(m)$ の最小化

$$\Phi(m) = \frac{1}{2} \|W_d(F(m) - d)\|^2 + \lambda |m|$$

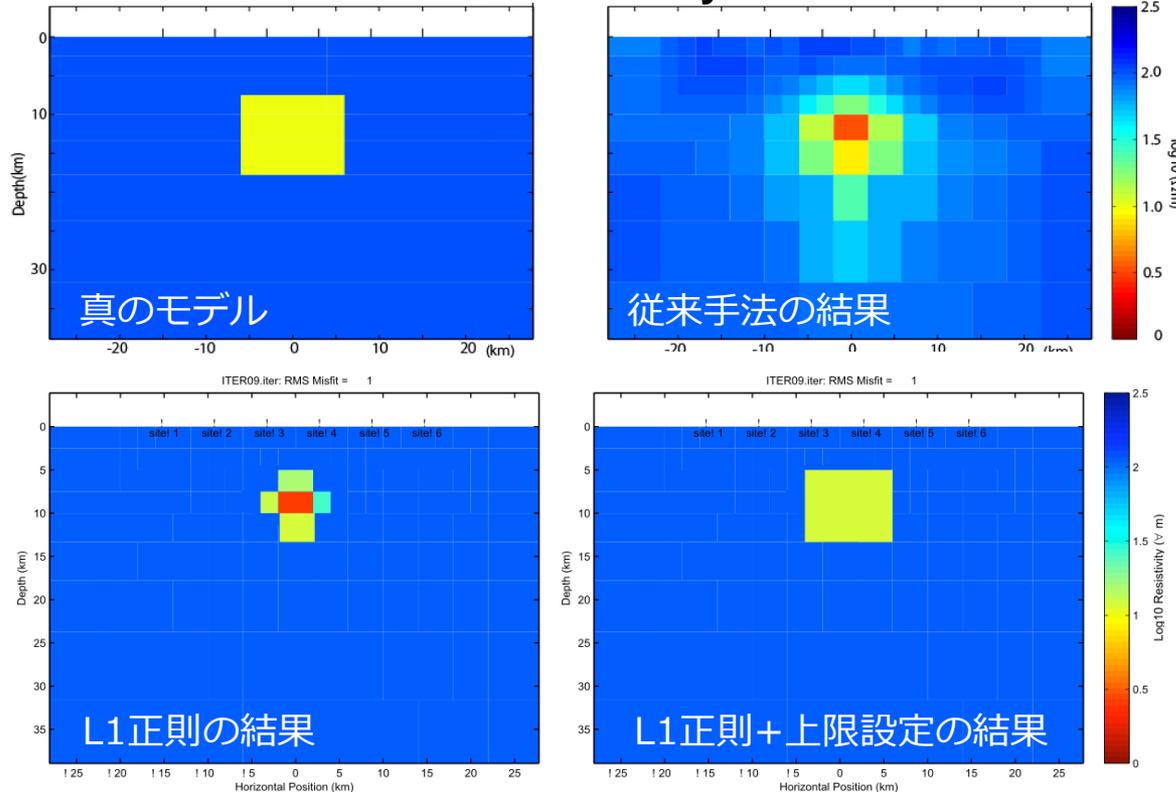
L1ペナルティ項

$d$  : データベクトル

$m$  : モデルベクトル

$F(m)$ : データの理論計算値

### 現在の2 DMTコードを用いたsynthetic testの例



### 現時点での成果

- L1正則による1D及び2DのMTスパースインバージョンを実装したコードを作成
- 作成したコードを用い synthetic testを実行し得られるモデルの特性を検討した
- 正則化の適用方法を工夫（比抵抗値の上限を設定）する事で高解像度のモデル導出が可能であることを示した

### 今後の計画

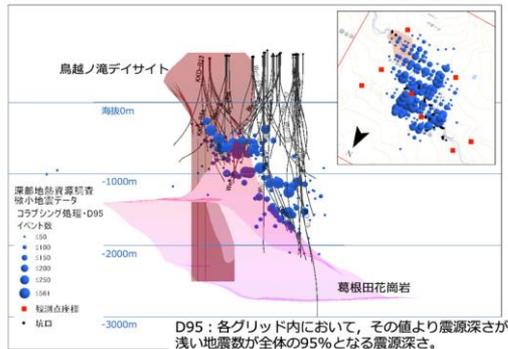
- 最適化方法の評価
- 3次元構造への適用

# 研究成果 データ収集

## 実フィールドデータの収集・整理

- AIの評価に使用可能な各種パラメータの実フィールドデータを収集、整備する。
- 葛根田地域のデータを収集し、モデル化ソフトに入力、整理し、統一フォーマットで画像、ファイル出力を可能にする。
- 各種データから、有望領域（透水性）推定に必要な「意味画像」を作成する。

収集データの例



(AIによる超臨界地熱資源評価技術,  
2018-2020年度成果報告書)

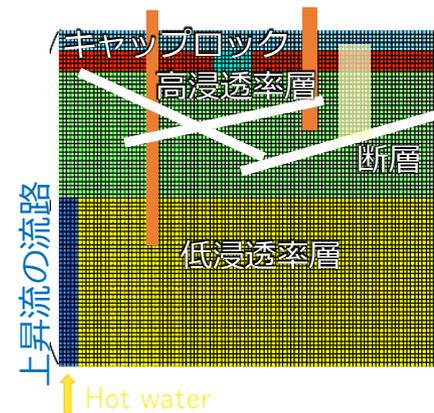
意味画像作成の例



## 人工データセットの生成

- AIの評価に使用可能な各種パラメータを含む人工のデータセットを作成する。
- 国内の典型的な地熱貯留層を模擬する。
- 熱水流動シミュレーションや物理モデルを使用し、**浸透率、温度、比抵抗、密度、地表重力値等**のパラメータを利用可能にする。
- 物理モデルの導出に必要な実験値を得るため、新たに室内実験を実施する。

人工モデル概念の例  
(主断層支配型の例)



# 今後の取組

## 「温度推定AI」

- \* Physics-informed Neural Network手法の導入による推定精度向上。
- \* 人工データセットおよび実フィールドデータでの性能評価、機能改良。

## 「有望領域（透水性）推定AI」

- \* 物理探査データの入力方法の決定。
- \* 多種データを用いた推定方法の確立。性能評価。
- \* 学習データ数の増加による精度向上方法の検討。

## 「比抵抗構造の空間分解能向上」

- \* 正則化手法の選択方法、正則化パラメータの評価方法の確立。
- \* 3次元スパース逆解析コードの作成。人工データセットおよび実フィールドデータによる性能評価。ユーザーインターフェースを含むパッケージ化。

## 「データ収集」

- \* 有望領域（透水性）推定AIに使用する「意味画像」の作成方法の確立。
- \* 人工データセットにおける比抵抗値等算出方法の検討。そのための実験データ取得。

# まとめ

## ①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発

- \* 「温度推定AI」では、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による推定機能に可視化機能等を統合し、Windows上で実行可能なアプリケーションソフトとして整備した。推定精度向上のため、Physics-informed NNを導入した手法を開発中。
- \* 「有望領域（透水性）推定AI」は画像処理用U-netを学習に利用することにより実装した。地熱地域の変質帯分布やリニアメント分布等の平面図画像と経験的解釈に基づいて有望領域をプロットした意味画像を使用したテストを実施中。今後、物理探査データ等のデータも入力可能とする予定。
- \* AI評価用人工データセットの基礎モデル（岩相、浸透率、空隙率等）を作成し、熱水流動シミュレーションを利用して温度分布を追加した。今後、比抵抗および重力値の追加を行う。

## ②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上

- \* 1次元、2次元構造に対するスパース逆解析コードの作成を完了した。正則化手法および正則化パラメータの評価を実施中。3次元逆解析コードの作成に着手した。

※各種ツールについて、ユーザーインターフェース等の整備を進めている。