

2023年度成果報告会

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

2024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

山谷祐介（産業技術総合研究所）

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

1. 背景・目的

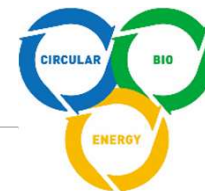
地熱開発においては、地下の高温かつ高透水性ゾーンの位置を特定し、掘削目標を如何に絞り込むかが開発リスク低減のために重要である。本事業では、坑井、地質学的情報、物理探査等の地表で得られる多項目データを人工知能（AI）的手法によって総合的に解釈し、地下の温度分布および高透水性領域の分布を高精度で推定可能な技術を確立にすることを目的とする。また、それらの時間変化を検出する手法の可能性についても検討する。

2. 実施期間

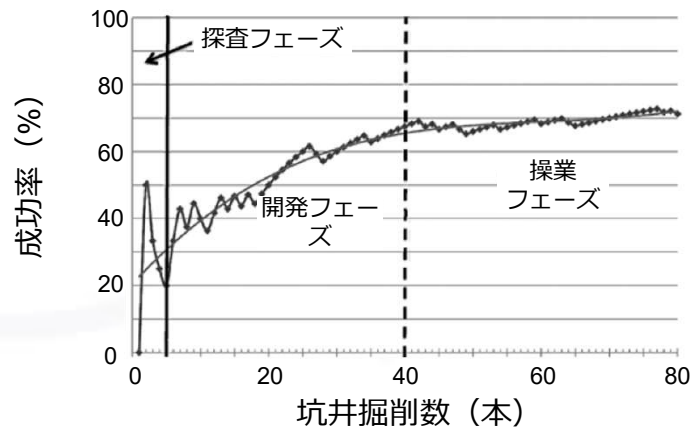
開始 : 2021年6月
終了（予定） : 2024年3月

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。



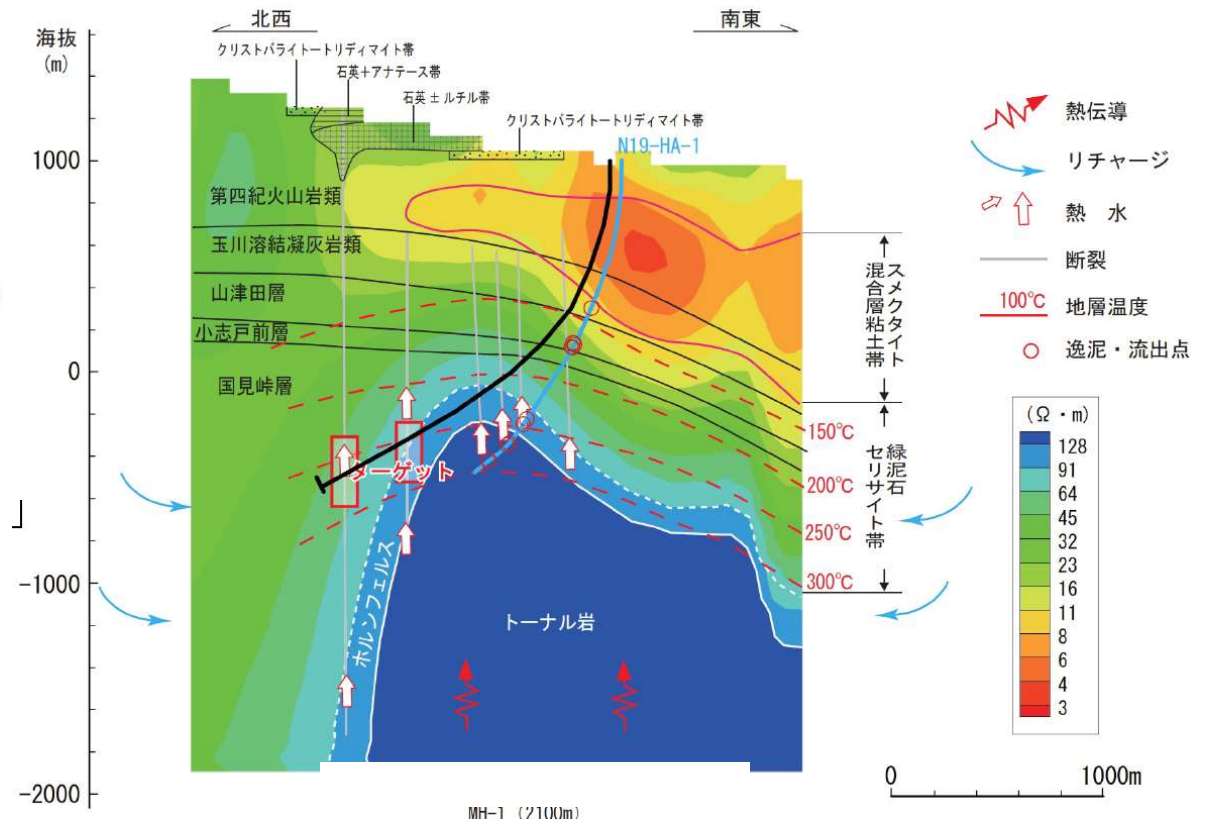
研究の背景



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

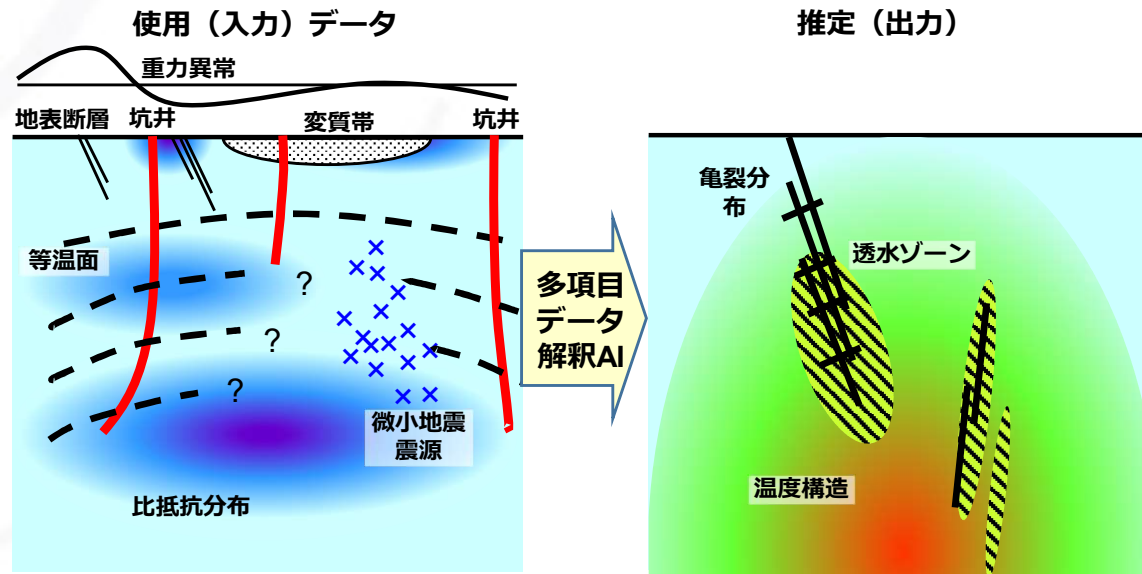


目的

地表調査データ、坑井データからAIによって地下の高温・高透水ゾーンの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。

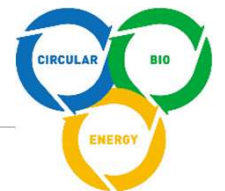


本研究開発の成果

- * 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

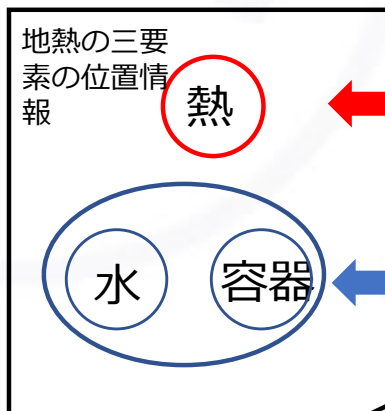
課題

- 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。

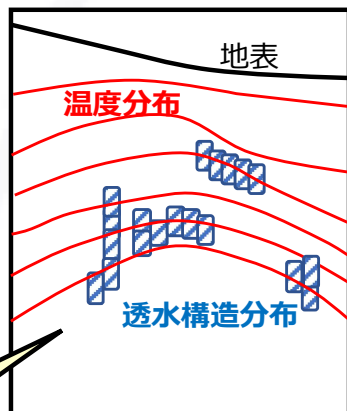


研究開発内容

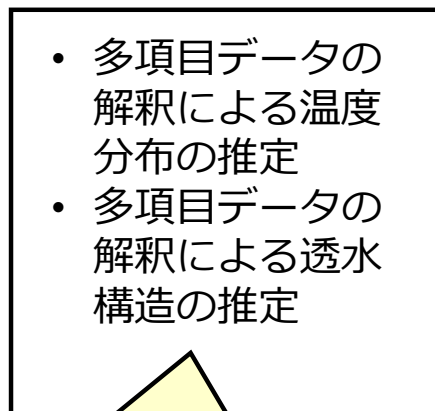
掘削のために欲しい情報



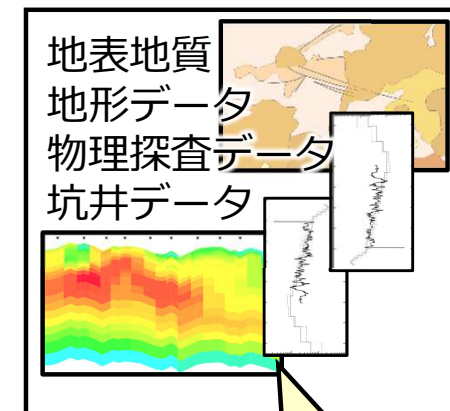
推定可能な情報



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

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
- PIMLによる物理モデル制約つき推定

①-(d) 実フィールド・人工データ収集

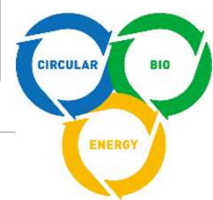
- AI検証用データの収集、整備

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

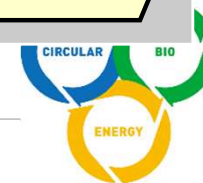
- スパース逆解析コードの開発



開発スケジュール

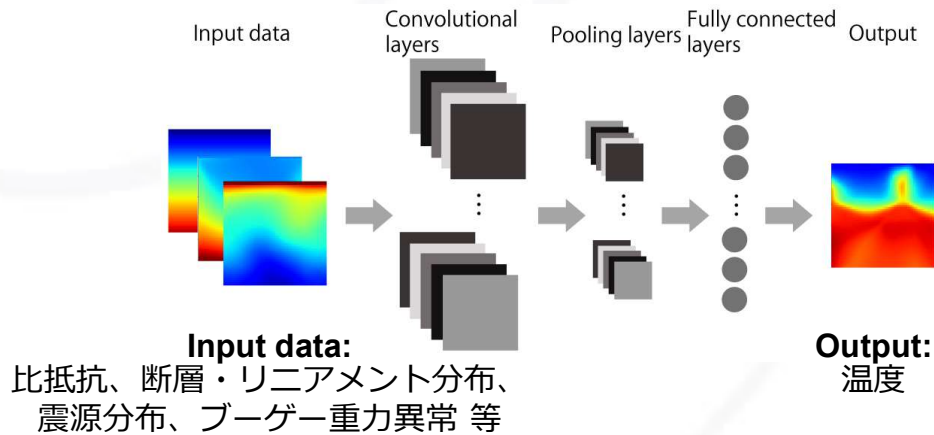


研究開発項目	担当	2021年度	2022年度	2023年度
① AIによる坑井、地表、物理探査データの解釈技術 (a)AIによる貯留層構造・状態の推定	○産総研、室工大、兵県大、名大、京大、Geo-E、東北大、九大	機能・データ仕様策定	AI機能開発 <ul style="list-style-type: none"> 温度推定 有望領域推定 	性能評価・実証試験
(b)AIによる貯留層状態の時間変化の推定	○産総研、室工大、兵県大、京大、Geo-E、名大	機能・データ仕様策定	AI機能開発	性能評価
(c)物性データの収集	○Geo-E、九大、産総研、兵県大、名大	物性データ収集 <ul style="list-style-type: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



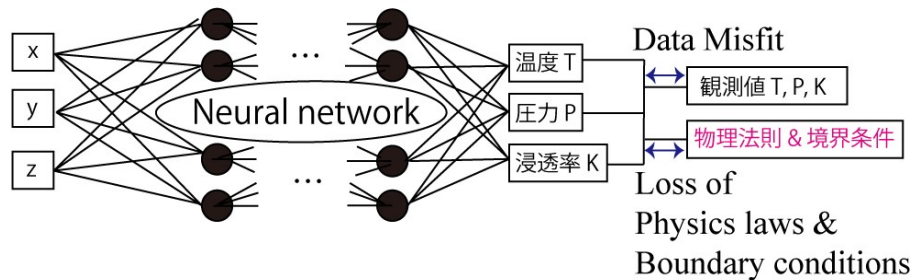
温度推定AIの開発 2種類のアプローチにより温度構造を推定するAIを開発している。

畳み込みニューラルネットワーク (CNN)



- ✓ 入力データの空間的に隣接する情報も考慮
- ✓ FY2021成果をベースにアプリケーション化を完了
- ✓ 入力データの種類や組合せを検討し、多種データを用いる等により、性能評価を実施予定

物理法則に基づくニューラルネットワーク (PIML)



- ✓ 損失関数に物理法則・境界条件を考慮することで、物理法則に従った予測値を得ることが可能

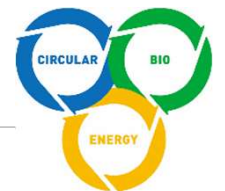
損失関数 = 観測値と予測値の誤差 + 物理法則の誤差 + 境界条件の誤差

(学習時に最小化する関数)

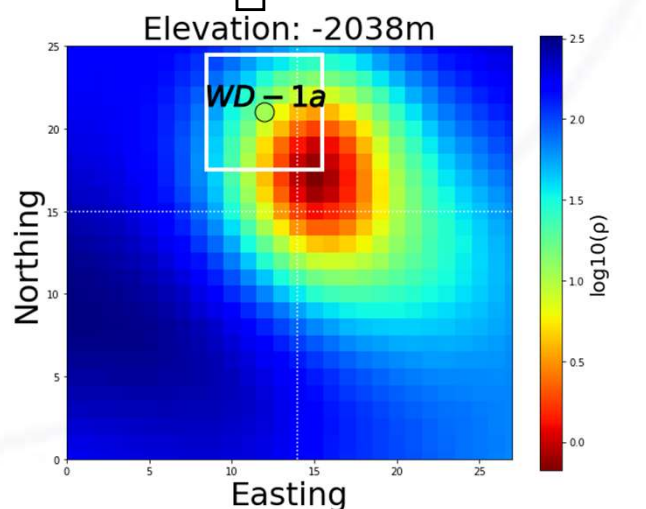
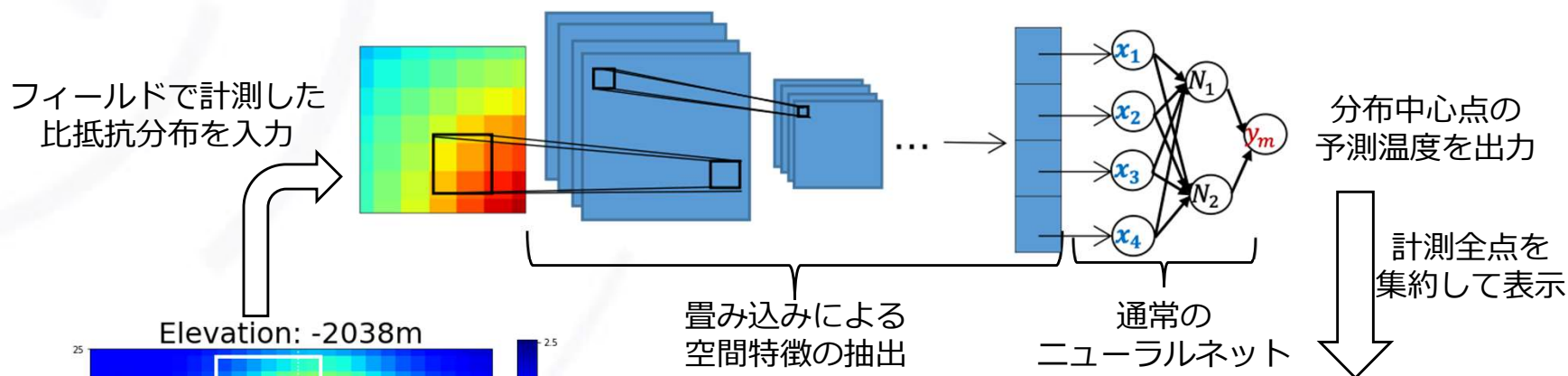


損失関数 = 観測値と予測値の誤差

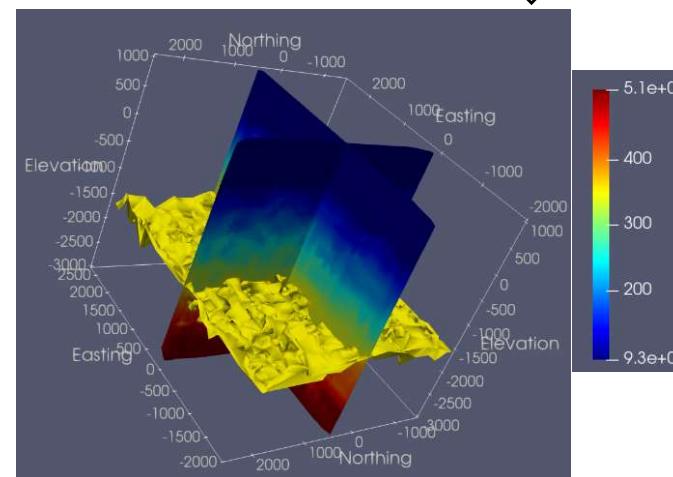
(参考：一般的なNNの損失関数)



温度推定AI：CNNによる推定アプリの開発



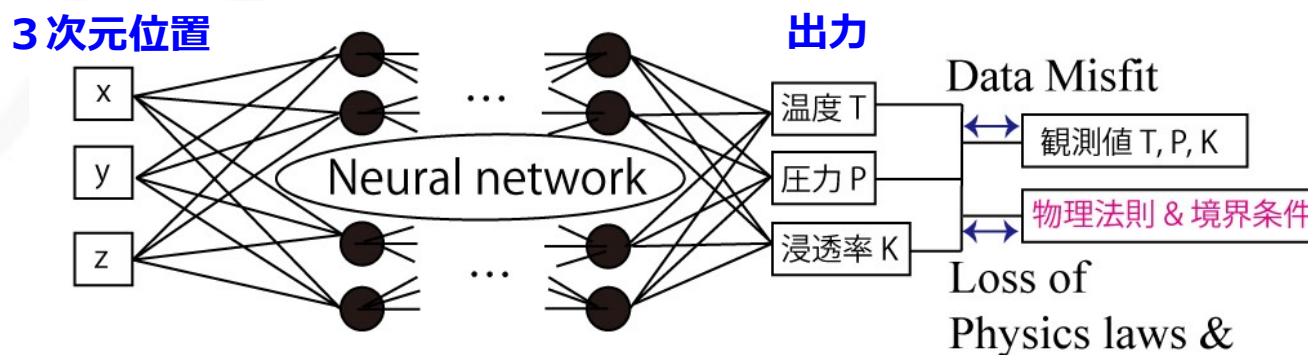
葛根田地域における
海拔-2038 mにおける比抵抗分布



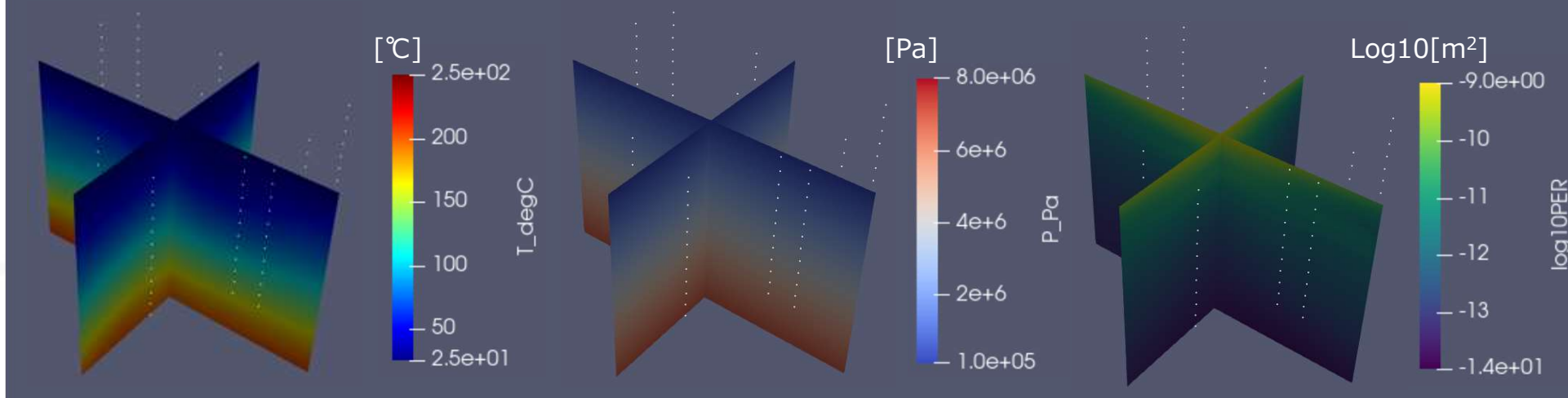
CNNによる葛根田地域の温度分布
(2022年NEDO成果報告会資料, 2023)

- 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) により、物理探査データと坑井データから3次元温度分布を出力するアプリケーションソフトを開発した。

温度推定AI：物理法則を考慮した深層学習による推定手法の高度化



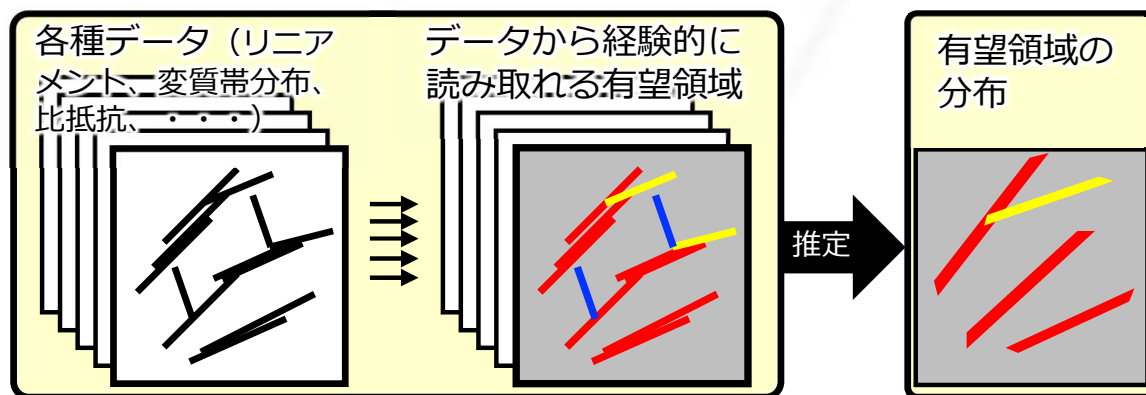
仮想データを使用した温度、圧力、浸透率の予測例



- 物理法則を考慮した深層学習を基に学習効率を高め、坑井データから温度・圧力・浸透率の3次元分布を推定することを可能とした。

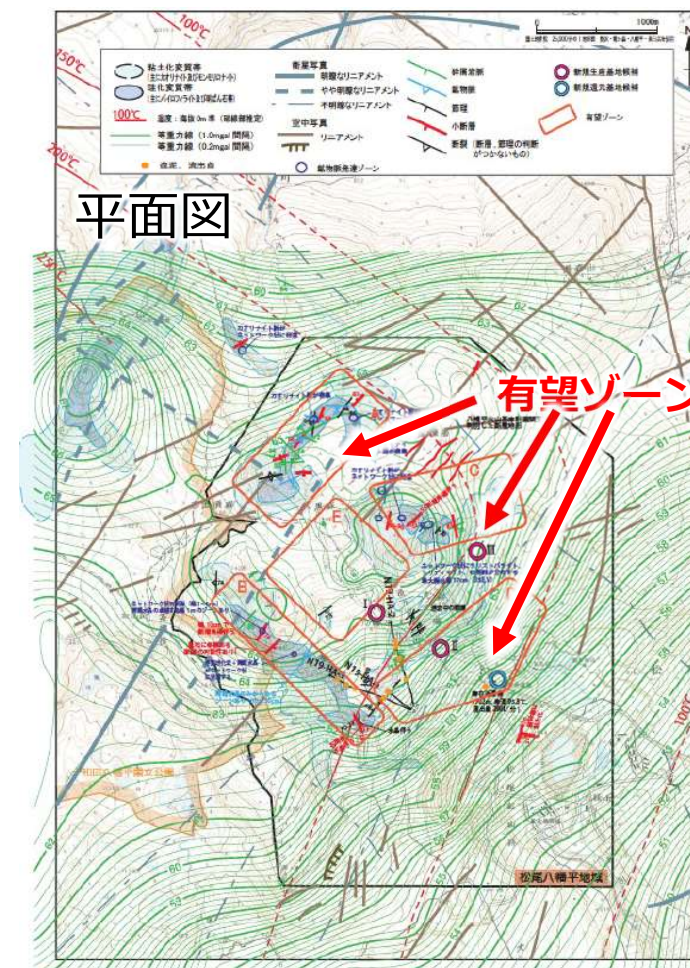
有望領域（透水性）推定AIの開発

- 各種データと人間による経験的な解釈データを学習し、有望領域の存在可能性分布を推定する機能を開発する。
 - 人間と同等の解釈を自動的に出力可能にする



開発により期待される成果

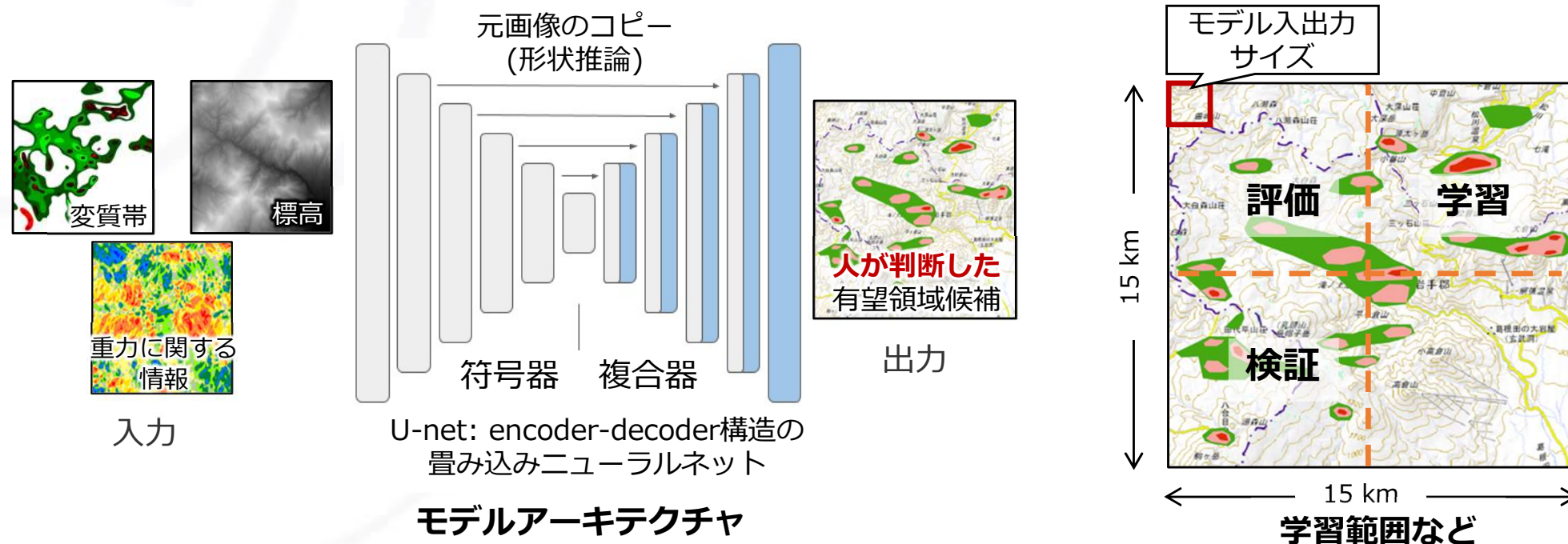
- 平面図を使用した有望ゾーン自動推定の実現。
- 新規開発地条件でのAIの適応性と利用価値を向上。
 - 多数の解釈データの利用により推定精度の向上が期待される。



一般的な有望ゾーンの解釈
(NEDO, 2011)



有望領域（透水性）推定AIの概要



入力： 2次元地質データ等3種. **出力：** 透水性の高い有望領域（経験者の判断）

学習の設定：

- 画像処理用U-net++を転移学習で利用
- 各領域から1000枚ランダム切り出しで利用
- 学習領域と検証・評価の3領域を分割・定量化(領域和集合: IoU)

● 各種データの平面図から人間の解釈によって判断される透水性の高い領域（有望領域）を、U-netモデルを利用して自動的に推定するAIを開発した。

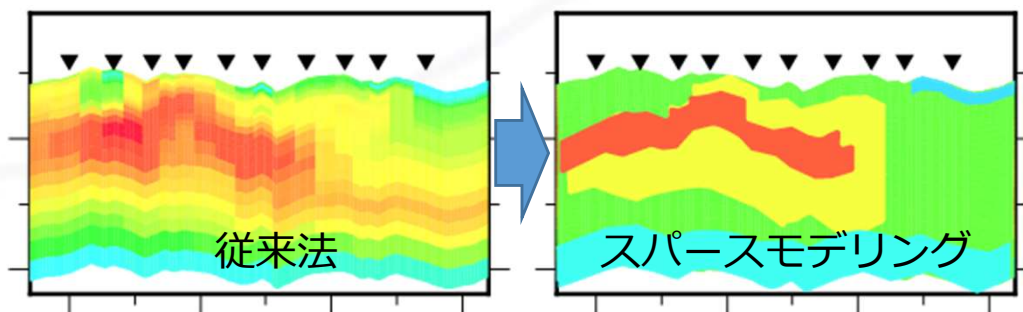
比抵抗構造の空間分解能向上：概要

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。

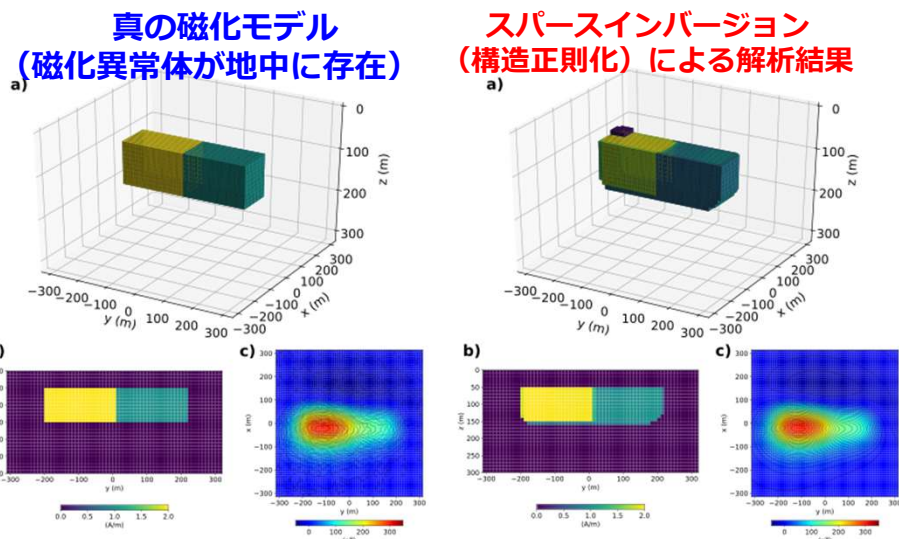
従来方法と
何が違う？

- 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



MT法による比抵抗構造の解像度向上イメージ

線形インバージョン・シンセティック計算例 (3次元磁化)



Utsugi, 2021 より

比抵抗構造の空間分解能向上：MT法逆解析における正則化方法の検討

安定的かつ信頼性の高い解を得るために、適切な正則化方法の比較、検討が必要。

MT法逆解析の目的関数 $\Phi(m)$

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

d :	データベクトル (見かけ比抵抗、位相差)
m :	モデルベクトル (地下比抵抗値のログ)
$F(m)$:	m に基づくforward計算の非線形関数
W_d :	データの重み行列

正則化パラメータ
damping factor

正則化項
ペナルティ項

実装済みの正則化方法

<従来のスムーズインバージョン>

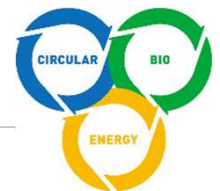
- L2正則
- minimum roughness

<スパースインバージョン>

- L1正則 (Tibshirani, 1995)
- L1-L2正則 (Zou and Hastie, 2005, Utsugi, 2019)
- L1-TV1正則 (Utsugi, 2021)

- ユーザが対象とするフィールドにおける先見情報等に基づいて適切な正則化方法を複数の方法から選択可能とした。また、それらの方法の評価を行った。
- 特性の異なる正則化方法を複数用いて構造を求め、その結果を比較・検討することで地下構造の決定、解釈をする事が可能。

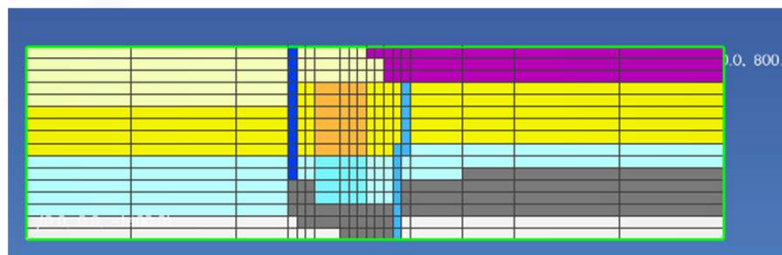
- スパース正則化を導入したMTインバージョン手法を開発し、1次元、2次元コードを作成した。また、スパース正則に加え従来のスムーズインバージョンの正則化方法も含め、いくつかの正則化方法を選択可能とし、それらの評価を行った。



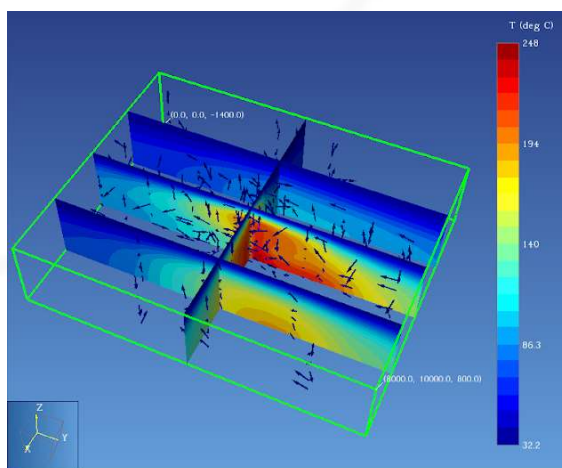
人工データセットの整備

目的：開発したAIの性能評価に使用するための人工データセットを整備する。データ項目は、温度、浸透率、空隙率、比抵抗、密度（および重力）等とする。

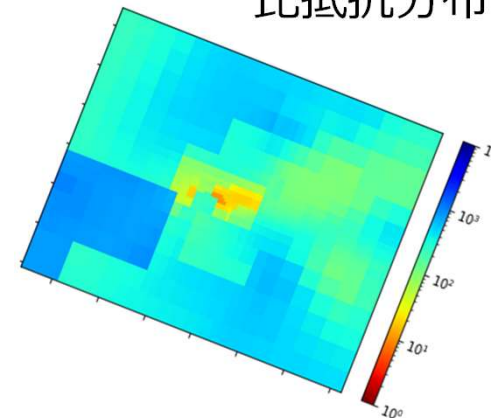
岩相分布
(鉛直断面)



温度分布



比抵抗分布



浸透率、温度、
間隙水濃度、岩
種等から変換

- 実際の地熱地域のデータを参考に、2種類の架空の地熱貯留層モデル（浸透率等）を構築し、貯留層シミュレータにより温度分布等を与えた。さらに、対応する比抵抗値を追加した。

FY2023以降の課題

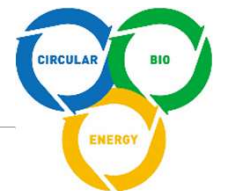


①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発

- * 「温度推定AI」：物理法則を考慮したニューラルネットワークによる手法における推定精度の向上、性能評価、ソフトウェア整備。時間変化抽出の手法検討。
- * 「有望領域（透水性）推定AI」：多数地域の学習データを使用した検証、評価、推定精度の向上。地形、地質データ以外（物理探査データ等）の活用。深度情報推定手法の検討。
- * 人工データセットの整備：密度分布、重力値の追加。フォーマット整理。
- * 観測可能な地質、物理探査データと物性値との関係解明による、データ解釈技術向上。

②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上

- * 3次元MT法スパース逆解析コードの完成。人工データによる性能評価。実データへの適用試験。ユーティリティソフトウェア、マニュアルの整備。



まとめ（FY2022まで）



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）による推定機能をもつアプリケーションソフトを整備した。推定精度向上のため、物理法則を考慮したニューラルネットワークによる手法を開発し、人工データによる検証でその有効性を確認した。
- * 「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、経験的解釈に基づく有望領域を示す意味画像を使用し、1地域での評価を実施した。今後、多数地域での評価を実施するとともに、物理探査データを活用する予定。
- * 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。また、比抵抗値を追加した。今後、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した。3次元逆解析コードの開発を進めている。

