

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.3-1

新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発
事業/フェーズC（再生可能エネルギー熱利用促進分野）

SQUID磁気センサを用いた地熱熱水貯留層の 高分解能電磁探査実用技術の開発

発表：2025年7月17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 田邊圭一

*団体名 超電導センサテクノロジー（株）、早稲田大学

問い合わせ先 超電導センサテクノロジー（株） E-mail: contact1@sustec.jp TEL: 045-560-1350

1. 目的

雑音の大きい地熱発電所近傍にも適用可能なSQUID磁気センサを用いた過渡
応答電磁（TEM）法による高分解能地熱探査技術・解析技術の開発
現場での優位性実証による本技術利用の拡大、掘削成功率向上/地熱発電量の拡大

2. 期間

2023/10/1 ～ 2025/6/30

3. 目標（最終）

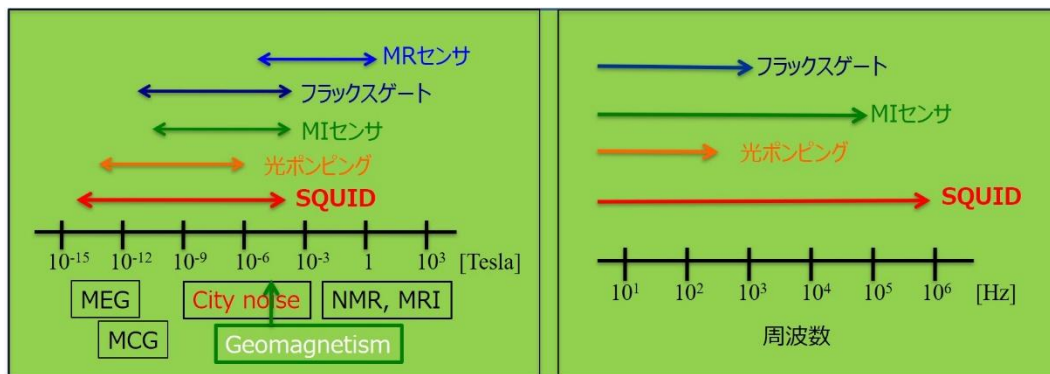
周波数微調整タイマーの開発による商用電源雑音除去率90%以上
高信頼低雑音センサの室内選別方法の確立、製造歩留まり30%以上
磁場水平成分を用いた逆解析技術開発、非直線接地電線に対する応答特性評価
既開発地域での高品質TEMデータ取得、高分解能比抵抗構造取得実証

4. 成果・進捗概要

周波数微調整タイマーの現場での効果実証、高信頼センサの室内評価技術確立
磁場水平成分を用いた逆解析、現場試験での高分解能比抵抗構造取得実証

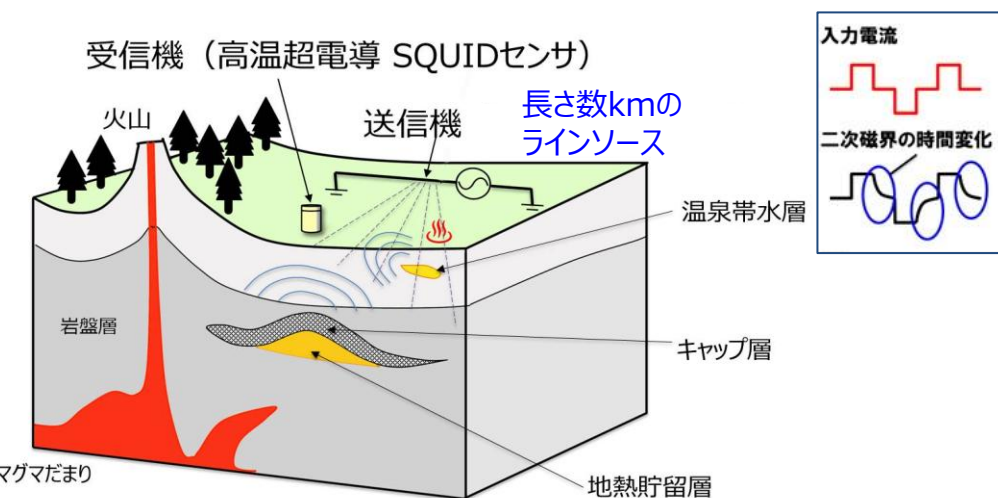
SQUID磁気センサとSQUID-TEM法の特徴

(Superconducting Quantum Interference Device : SQUID)



- 超電導の量子効果を利用した磁気センサ
- 他の磁気センサに比べ高感度かつ広帯域
- 高温超電導材料を使ったSQUIDセンサは液体窒素冷却で探査現場で容易に扱える

SQUID-TEM法とMT（地磁気地電流）法の特徴比較



測定法	MT法 (Magnetotelluric)	TEM法 (Transient electromagnetic)	
		TEM	SQUID-TEM
送信磁場	地磁気の変動 (強い)	人工のパルス磁場 (弱い)	
受信信号	磁場 + 電場	磁場 (減衰が早い $dB(t)/dt$)	磁場 (減衰が遅い $B(t)$)
検出器	誘導コイル	誘導コイル	磁気センサ
信号周波数	$< 1\text{Hz}$	$1\text{Hz} \sim \text{数十kHz}$	$0.05\text{Hz} \sim \text{数十kHz}$
繰り返し測定 (環境ノイズ低減)	不可	適用 (高いS/Nのデータ)	
送信源の影響	受ける (地磁気)	受けない (送信磁場OFF時に測定)	
信号変化量	S に比例	S^3 に比例 (抵抗変化に最も敏感)	
探査深度	数100m ~ 数十km	地表 ~ 数100m	地表 ~ $> 3\text{km}$

*1 100回の繰り返し測定で、環境ノイズを1/10 ~ 1/100に低減できる

*2 S : 地層コンダクタンス ($S = h/\rho$ (h : 層の厚さ, ρ : 比抵抗))

長さ数kmのラインソース（設置電線）にパルス状の
交番電流を流し、地下に誘起される電流による二次磁場の
時間変化を計測 → 逆解析で地下の比抵抗分布取得

高いS/Nでの計測が可能で比抵抗変化に最も敏感
→ MT法（従来法）に比べ高分解能の比抵抗分布

発電所近傍での地熱探査

【目的、ニーズ】

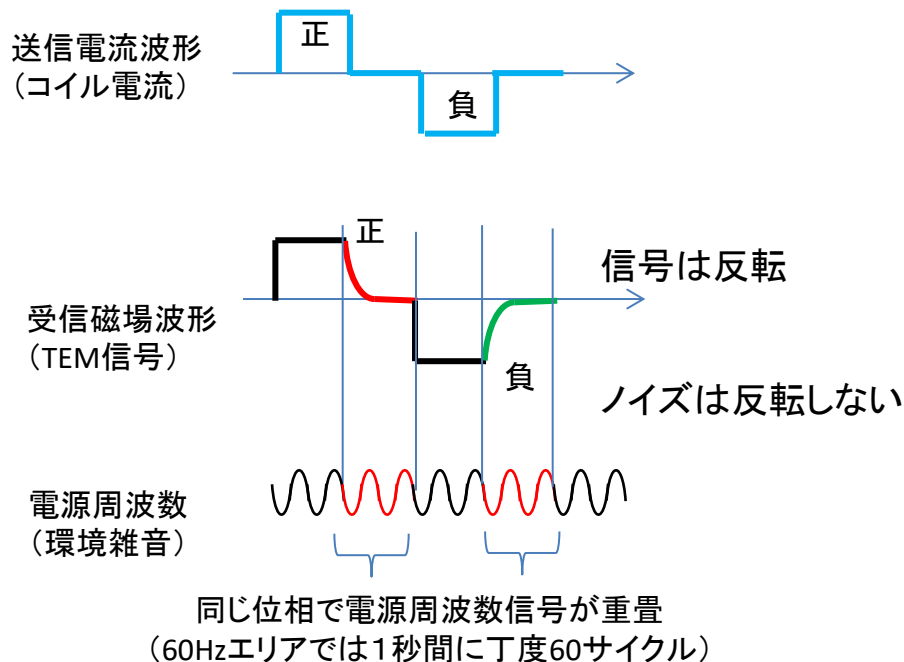
- ・発電量の維持・拡大のための追加性掘削位置の決定（掘削成功率向上）

【技術的課題】

- ①送電線からの商用電源周波数の磁気雑音の存在
信号の後処理で除去することもできるが、信号のひずみが発生する可能性
平均化処理である程度除去できるのが望ましい
- ②磁場雑音の多い環境でも安定して動作するセンサが必要
安定動作するセンサの評価・選別方法の確立や製造歩留まり向上が課題
- ③井戸ケーシングやパイプラインなど金属人工物の存在
誘導電流の影響を抑制する計測配置把握や影響を考慮した解析技術が必要
- ④ラインソース（人工磁場送信源）の敷設位置や形状（非直線）の制限
非直線ラインソースに対する解析技術の確立

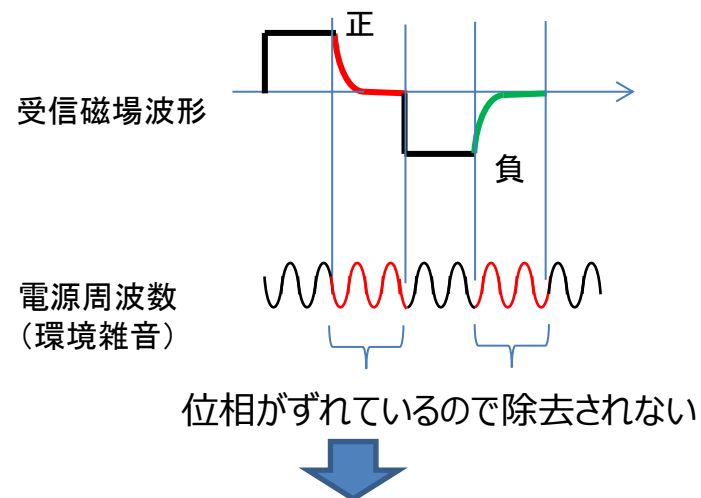
① 商用電源周波数雑音の除去

信号反転による商用電源ノイズの除去

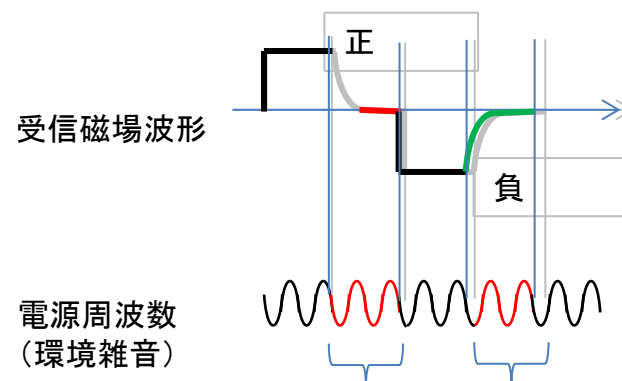


正の信号から負の信号を引くことで
TEM信号は加算されるが、
電源周波数信号は除去される
(電源周波数が50 Hzあるいは60 Hzぴったりの場合)

電源周波数が50 Hzあるいは60 Hzからずれていると



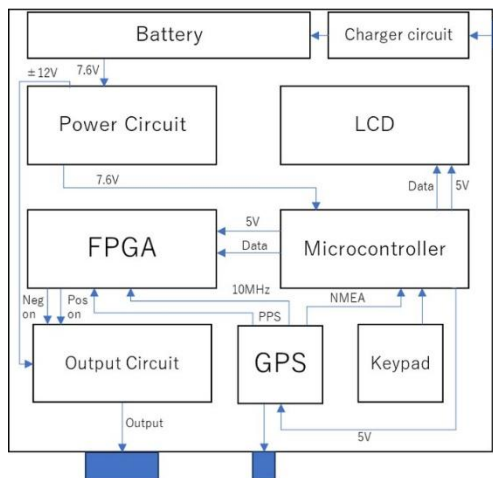
計測のタイミングを電源周波数に合わせてやると



位相が一致しているので除去できる

① 商用電源周波数雑音の除去

周波数微調整可能なGPS基準タイマーの開発



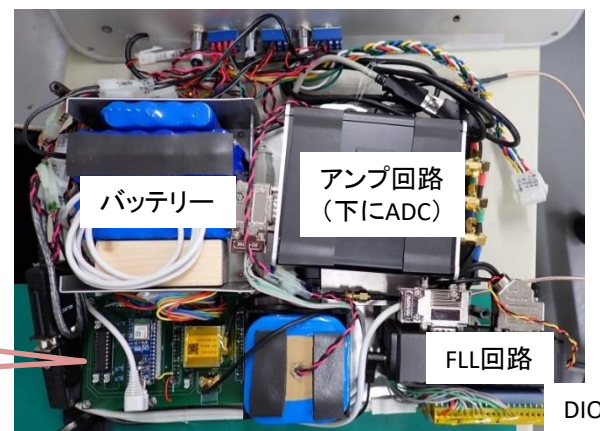
GPS基準タイマー回路のブロック図



試作したタイマー回路
(周波数を0.01Hzの精度で設定可能)



試作したフィールド実証試験用探査装置

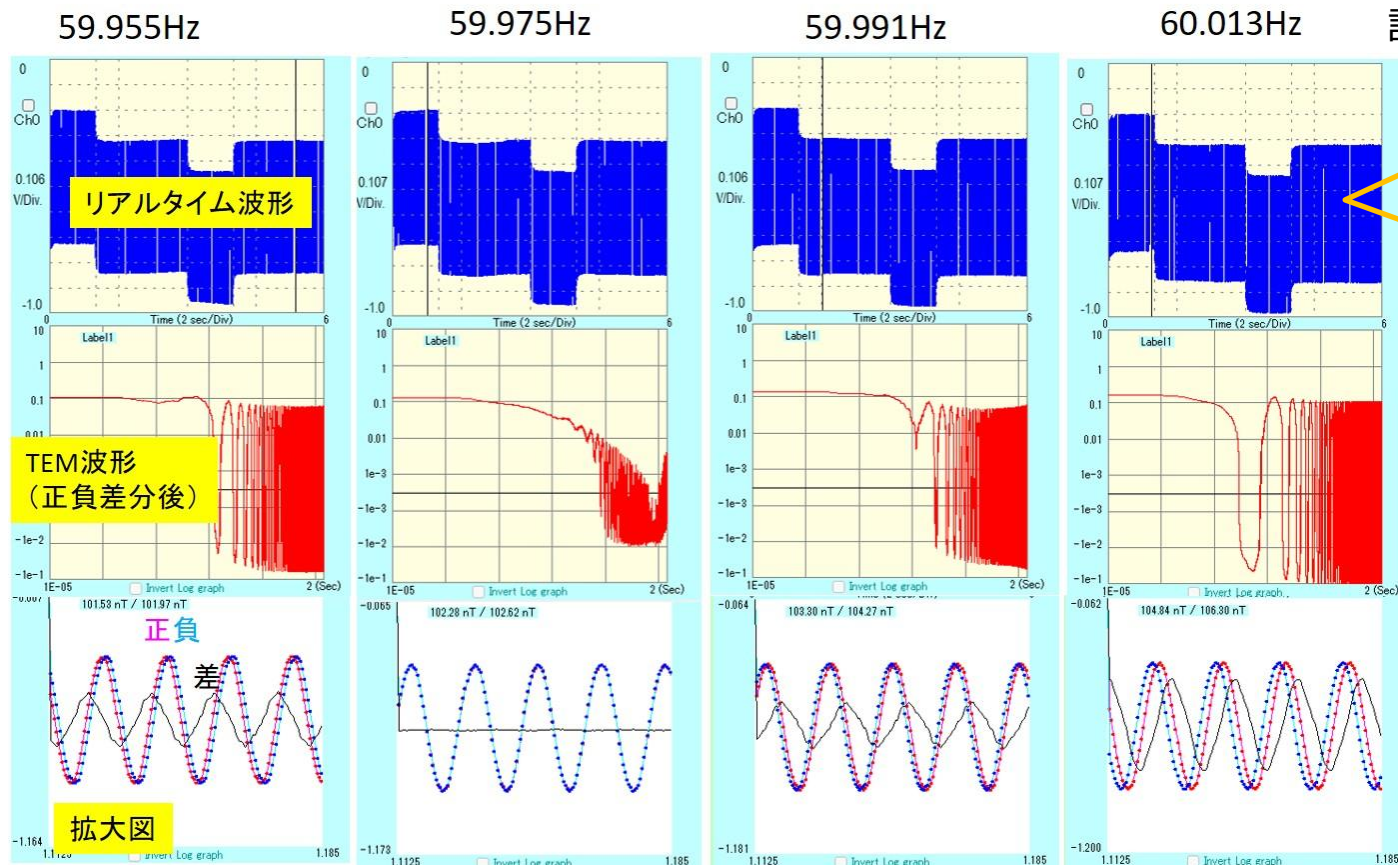


タイマー回路を組み込んだ
受信機の内部写真

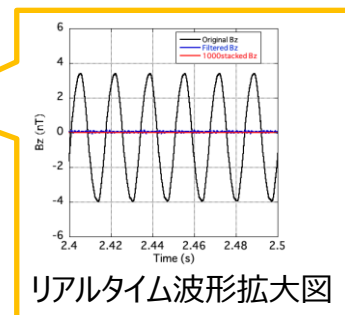
① 商用電源周波数雑音の除去

周波数微調整の効果

送信（受信）周波数を59.98 Hzに固定



計測時の商用電源周波数
時間でわずかに変動している



正負差分後の信号波形
(時間変化の対数表示)

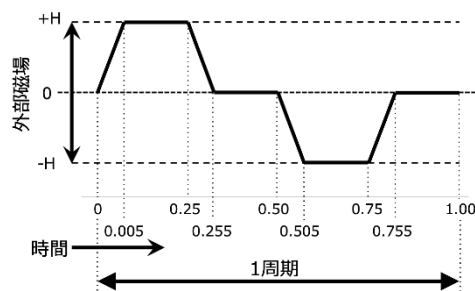
正負差分後の信号波形
の拡大図 (リニア表示)

送信（計測）周波数が商用電源周波数にほぼ一致した場合、正負差分により商用電源周波数信号はほぼ消す（<10%）ことができる（下図の黒線）

② 変動磁場中安定動作センサの評価

安定動作センサ選別方法の考案

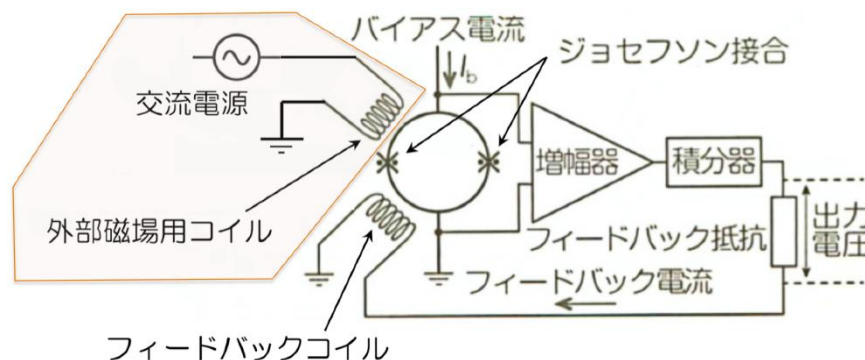
簡易スルーレート評価：磁場印加シーケンス



外部から
振動磁場を印加

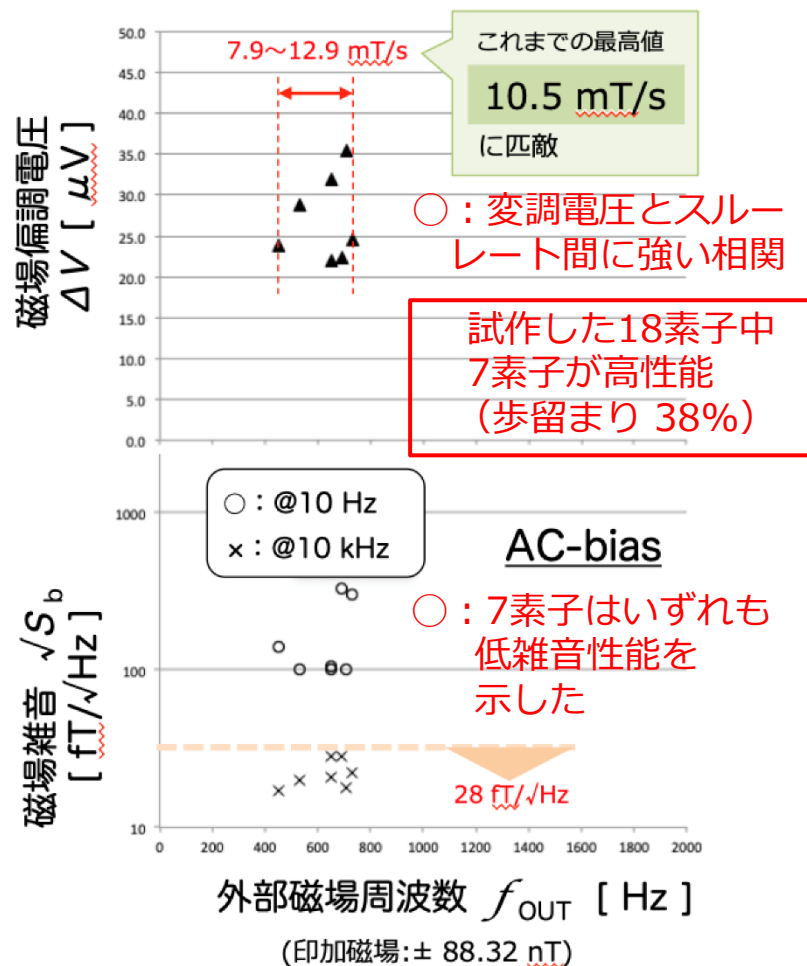
高速変化（高い外部磁場
周波数）に耐えるほど
高スルーレート
（野外で安定動作）

簡易スルーレート評価



SQUID磁気センサはフィードバック制御（ロック状態）で動作させる。スルーレートとは、フィードバック制御が追従できなくなる（=ロック状態が崩れる）、すなわち測定が不能になる磁場時間変化の限界値を指す。

良質センサのスルーレートと雑音性能



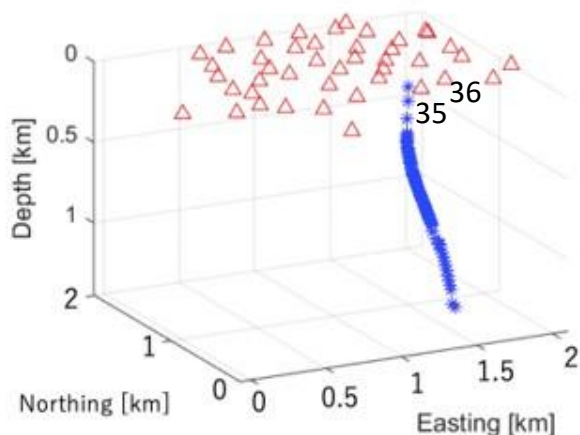
③人工物の影響評価（実証試験現場において）



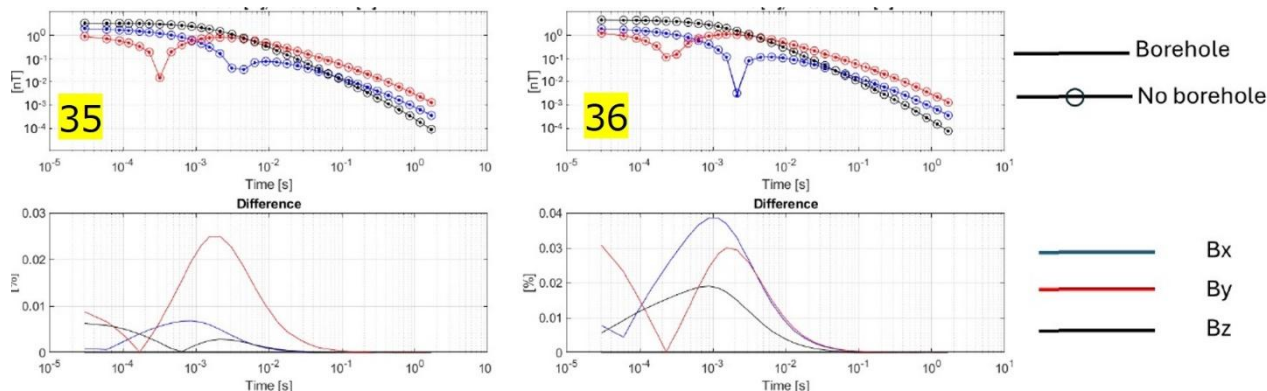
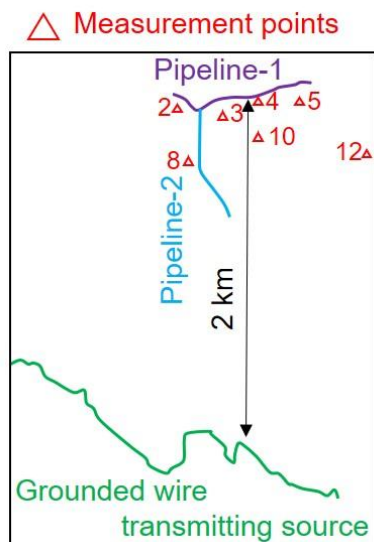
実証試験現場（出光興産殿、出光大分地熱殿の協力を得た）
番号は2024年2-3月試験時の計測点

③人工物の影響評価（実証試験現場において）

人工物の影響に関する数値シミュレーション



NE-11鋼管と計測点の関係

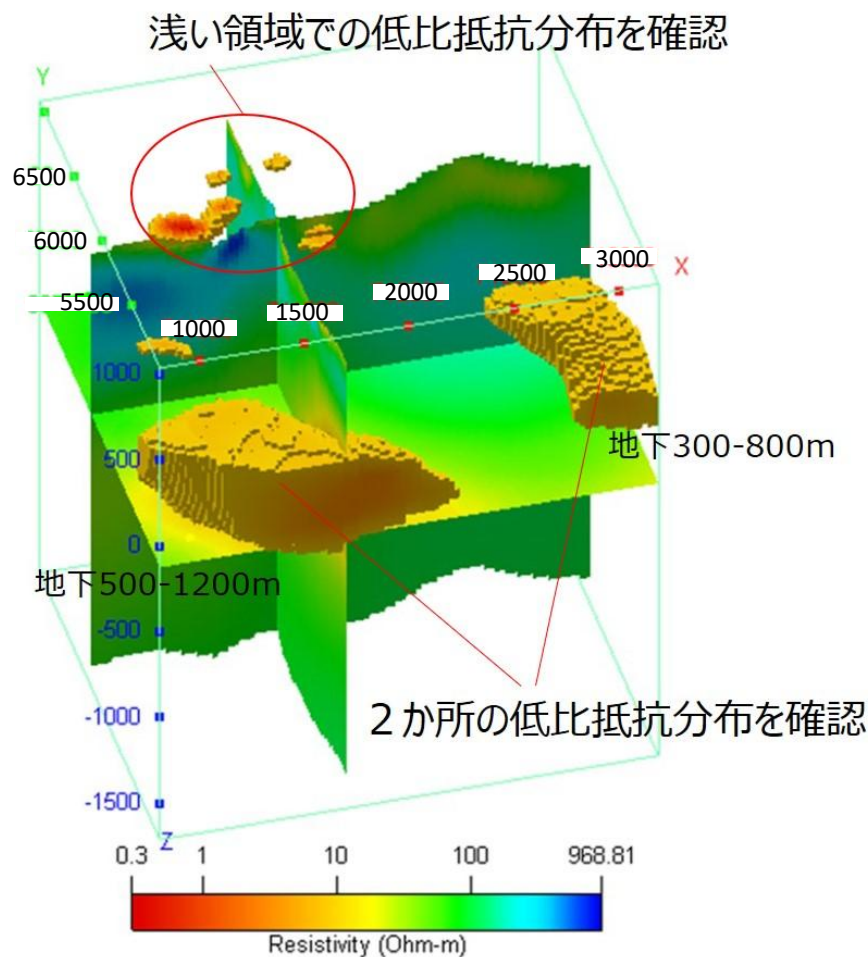


- 井戸鋼管がある場合、ない場合の減衰曲線（上）と変化率（下）
変化率は1%未満で影響は無視できる

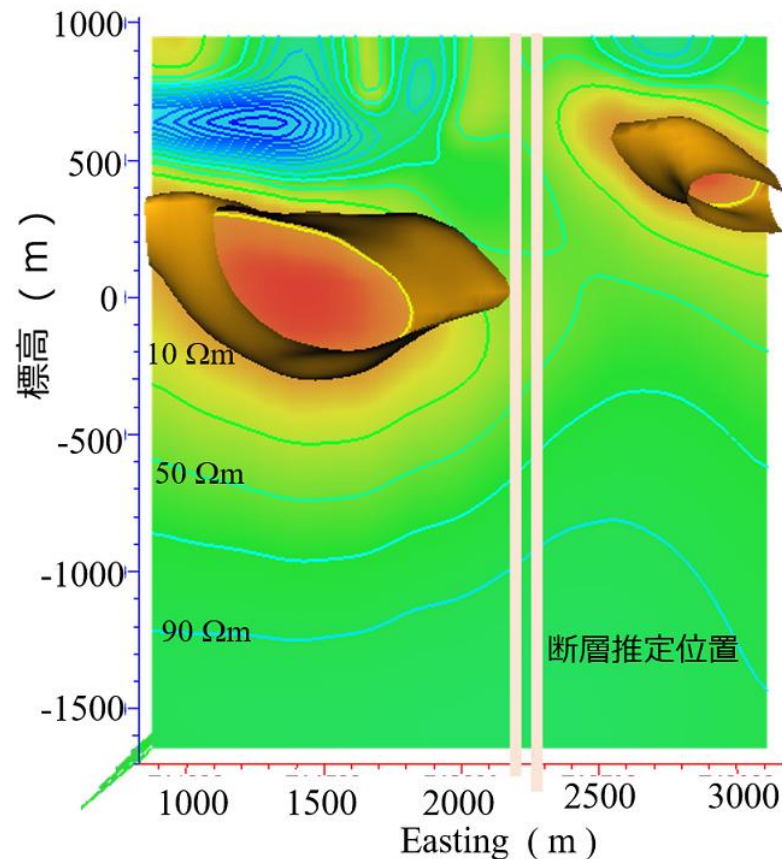
- 井戸鋼管の場合と同様の数値シミュレーションにより
ラインソースに平行なパイプライン-1に近い測点（2,3,4,5）では
変化率が3%以上（逆解析には使用できず）
- ラインソースに垂直なパイプライン-2付近の測点では
変化率は1%未満（逆解析に使用可能）

パイプラインの配置

④ 逆解析の結果（2024年実証試験）



逆解析により得られた 3 次元比抵抗モデル



3 次元比抵抗モデルの東西方向断面図

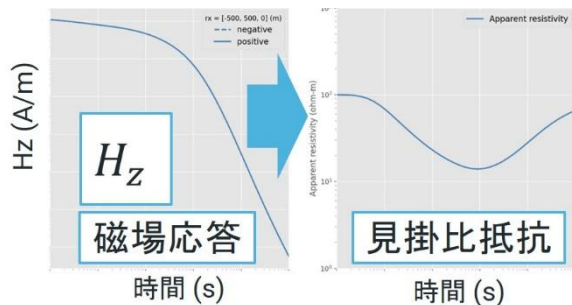
- ・断層構造との整合性はよい（従来法より高分解能）
- ・茶色の低比抵抗領域は貯留層上のキャップ層と推定

⑤解析技術の開発

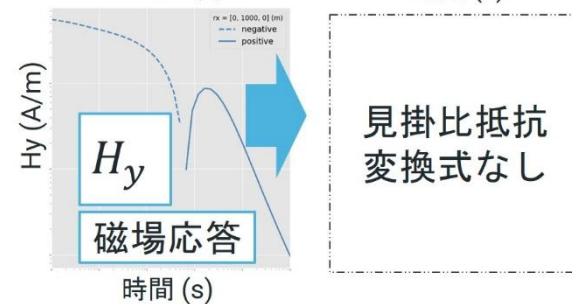
(早稲田大学担当)

磁場水平成分を用いた逆解析

垂直成分

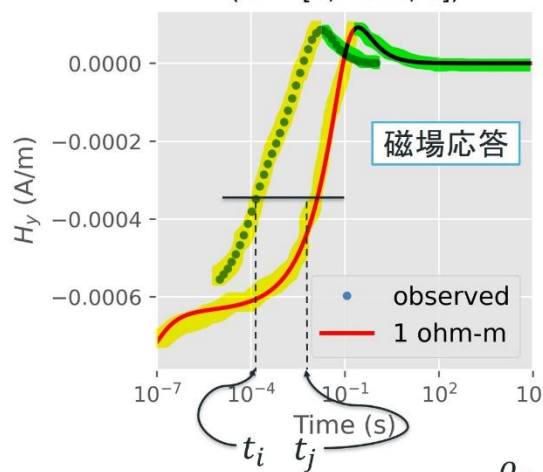


水平成分

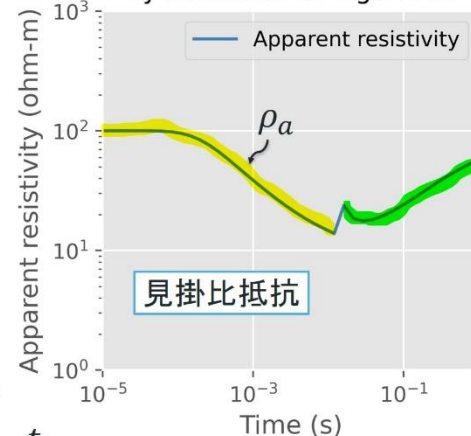


- 逆解析には磁場応答そのもの、あるいは見掛け比抵抗が用いられる（垂直成分の場合）
- 水平成分については磁場応答の符号反転があるので逆解析に使うのは難しい
- 水平成分についての見掛け比抵抗変換式が従来なかった

(a) Magnetic field response ($\rho_0 = [0, 1000, 0]$)



(b) Apparent resistivity calculated by translational algorithm



$$\rho_a = \frac{t_j}{t_i} \cdot \rho_0$$

- **平行移動演算法**（均質比抵抗の場合の磁場応答との時間比から水平成分の見掛け比抵抗を推定）を用いることで、正負両方の領域の見掛け比抵抗を求めることができ**磁場水平成分の逆解析が可能になった**

まとめと事業化の見通し

- ・各開発実施項目の目標値はほぼ100%達成
既開発地域においても高精度の地熱探査データ取得と解析が可能になった
- ・国内、海外の地熱事業者より商用探査案件の打診あり（2026年には実施見込み）
今後、国内外の学会・展示会（IMAGE25、IIGCE、日本地熱学会等）での
成果発表により受注拡大を図る
- ・JOGMEC委託事業による東北地区地熱探査（2024年秋実施）
他社の所有する高出力送信源と併用することで探査深度5000mを達成
→ 従来地熱だけでなく次世代地熱への展開も模索する