

## 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

# (3-1) 地下水流れが非常に遅い領域を 調査・評価する技術の高度化

令和5年8月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
核燃料・バックエンド研究開発部門  
幌延深地層研究センター 深地層研究部  
早野 明

# 説明概要

## 課題

- 処分場の閉鎖後長期の安全確保において、水理場の観点では、「地下水流動が緩慢であること」が好ましい地質環境特性
- 堆積岩が分布する地域の地下深部には、隆起・侵食を経ても天水の涵養の影響を受けておらず、埋没続成過程により変質した堆積時の海水(化石海水)が残されていることがあり、これは地下水の流れが非常に遅く、拡散による物質輸送が支配的な領域(低流動域)であることを示す証左  
⇒ 化石海水を指標として、物理探査とボーリング調査により、低流動域の空間分布(深度や広がり)を推定する調査技術を整備することが課題

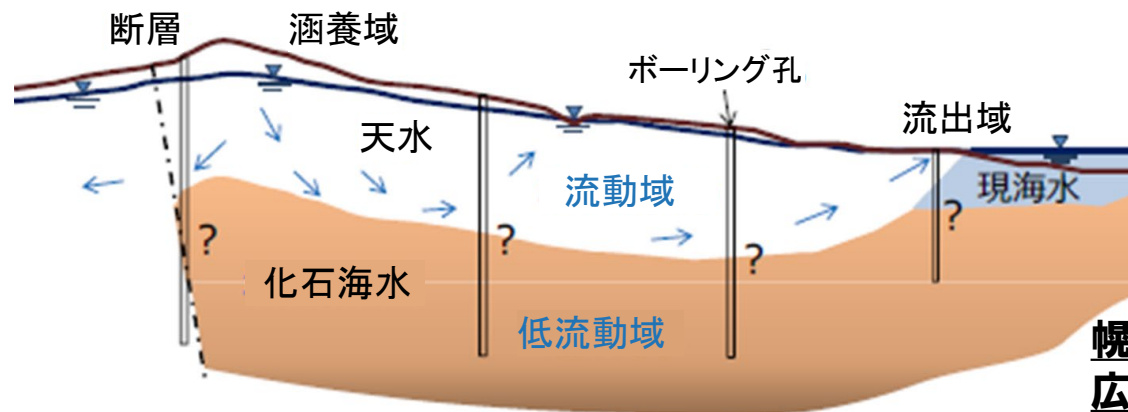
## 目的・内容

- 化石海水を指標として物理探査とボーリング調査を組み合わせた低流動域の空間分布の推定手順を検証するために、以下を実施
- 幌延深地層研究センター周辺における三次元電磁探査とボーリング調査
  - ボーリング調査データと電磁探査データを組み合わせた地球統計学的手法による水質分布の推定

## 成果

- 化石海水を指標として低流動域の空間分布を推定する際の調査手順を提案し、幌延深地層研究センター周辺において実施した三次元電磁探査とボーリング調査により、その調査手順が有効であることを確認
- ボーリング調査データと電磁探査データを組み合わせた地球統計学的手法を適用する際、三次元比抵抗分布に基づきボーリング調査地点を選定することで、より少ないボーリング調査により化石海水が存在する領域の三次元分布を推定できることを例示

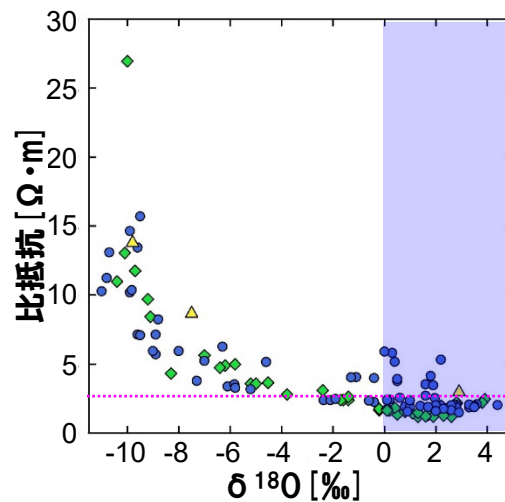
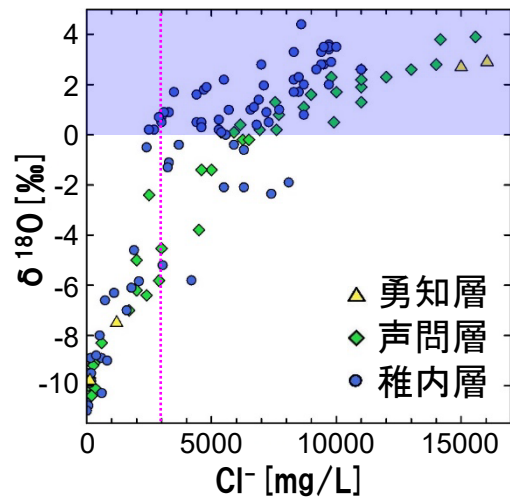
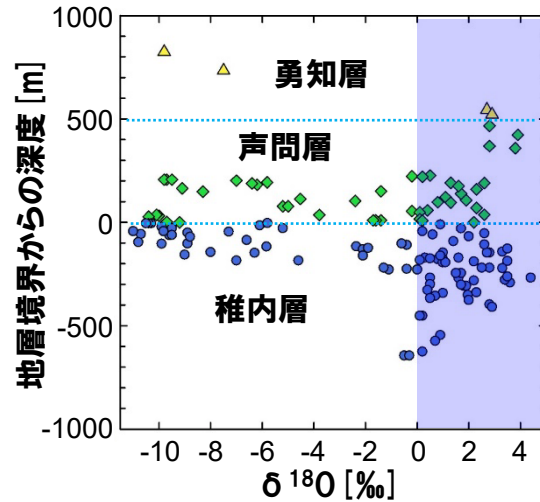
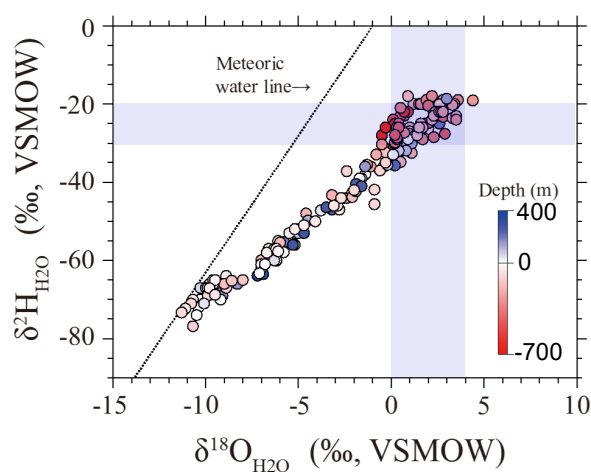
# 幌延地域の広域地下水流動概念



幌延地域の  
広域地下水流動概念

- 浅部：天水が隆起・侵食に伴い涵養し、地下を經由し流出域まで流動する流動域
  - 深部：隆起・侵食を経ても天水の涵養の影響を受けておらず、埋没続成過程により変質した堆積時の海水が残されており、拡散が支配的な低流動域
- ※「化石海水」と呼ぶ場合、堆積時の海水が埋没続成過程で変化し、その後、天水浸透の影響を受けていない地下水のことを指す

# 幌延地域における化石海水の特徴



- 化石海水はどの地層にも存在し、声問層/稚内層境界から深度約200 m以深の地下水はほとんどが化石海水
- 化石海水の塩化物イオン濃度は約3,000～16,000 mg/Lと幅がある
- 化石海水が存在する地点の地下の比抵抗は、ほとんどが約3 Ω・m以下であり、比抵抗と酸素同位体比の間に相関性が認められることから、化石海水の分布の推定には電磁探査が有効

既存のボーリング調査(HDB-1～11)により得られた地下水の酸素・水素同位体比、塩化物イオン濃度、地下の比抵抗の関係

# 提案した調査手順

## 【手順①：広域スケールの調査範囲の選定】

- 既存情報(文献調査)に基づき、数10km四方スケールの調査範囲を設定
- 地下水流動解析や地形解析などの結果から同一の流動系である範囲を抽出

## 【手順②：広域スケールの概略的な低流動域の分布を推定】

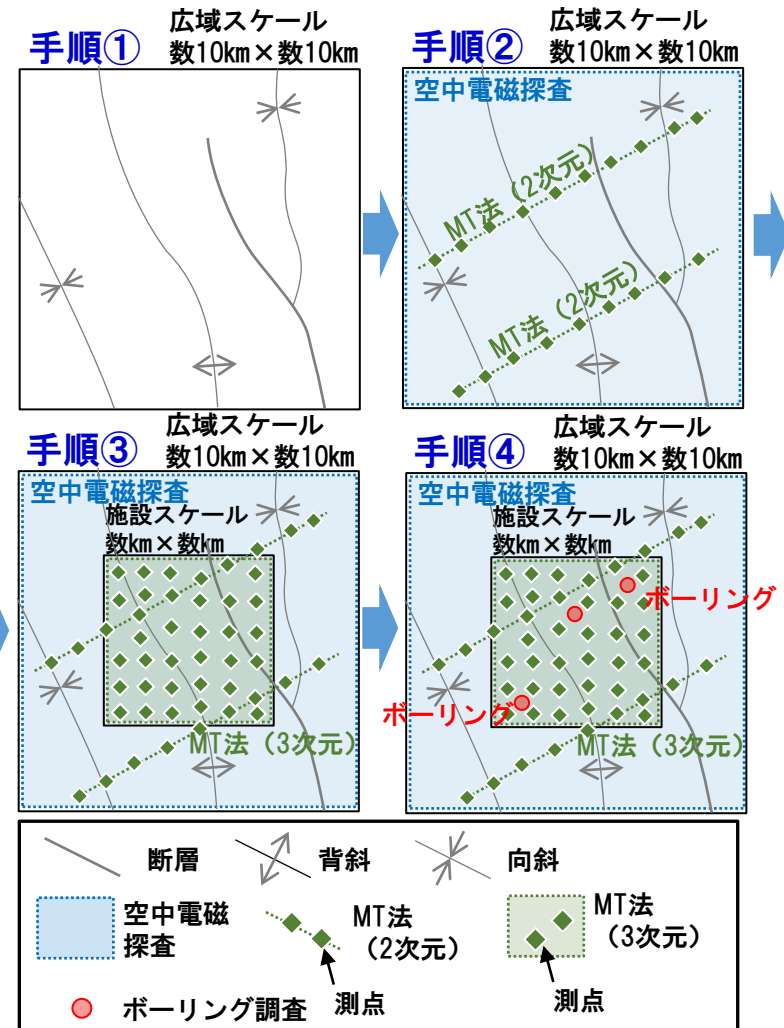
- 電気・電磁探査により塩濃度に相関する比抵抗分布を概略的に推定
- 探査深度の浅い空中電磁探査で調査範囲全体を把握し、探査深度の深い2次元測線のMT法により、深部の比抵抗を補完

## 【手順③：施設スケールの調査範囲の設定】

- 手順②で推定した比抵抗分布に基づき、地下施設が建設可能な深度に低比抵抗の地層がより広く存在する領域を候補として、数km四方スケールの調査範囲を設定
- 高密度電磁探査により、具体的な三次元分布を推定

## 【手順④：施設スケールの具体的な低流動域分布の推定】

- 複数のボーリング調査により、低流動の指標となるデータを取得
- 地球統計学的手法に基づく三次元分布の推定



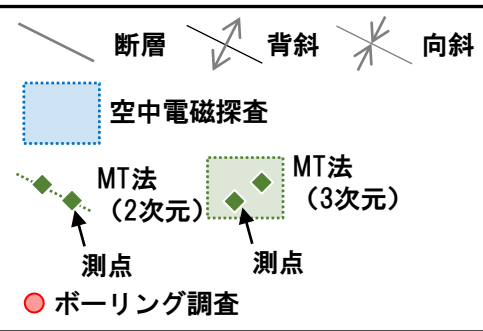
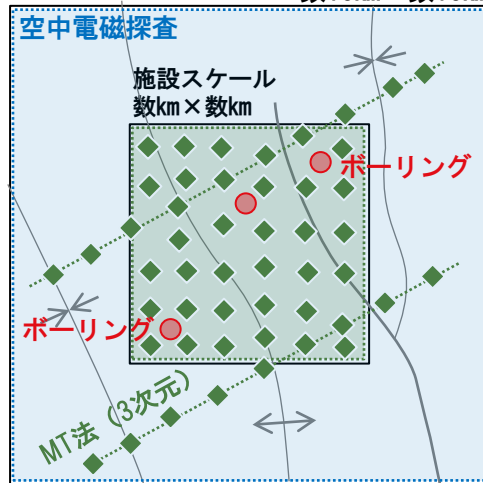
本研究では、施設スケールを対象に以下を実施

- 令和2年度：地上からの物理探査
- 令和3～4年度：ボーリング調査

# 施設スケール(数km)を対象とした調査フロー

手順③→④

広域スケール  
数10km×数10km



**手順③I：施設スケール(数km四方)における三次元電磁探査(現地調査)の実施**

- 数kmスケールの範囲においての高圧電線などのノイズ源、土地利用や作業性などの制約を考慮しながら、可能な限り200 mから500 m程度の間隔になるように測点を配置
- 浅部から深部まで対象とするため、MT法・AMT法を併用した幅広い観測周波数で取得

**手順③II：電磁探査データの解析による三次元比抵抗分布の推定**

- 三次元インバージョン解析の実施により三次元比抵抗分布を推定(本研究では、NMCC2000シリーズを用いた三次元インバージョン解析(例えば、Negi et al. (2011)など)を実施)

**手順④I：ボーリング調査 1本目**

- 調査範囲に化石海水が存在することを確認するために、電磁探査により取得した三次元比抵抗分布に基づき、化石海水が存在する可能性の高い低比抵抗領域がより浅部に出現する箇所を調査地点として選定
- 化石海水の存在を確認するために、塩化物イオン濃度、酸素水素同位体比の深度プロファイルを取得

**手順④II：地球統計学的解析による低流動域の三次元分布の推定**

- より具体的に化石海水の三次元分布を推定するために、ボーリング調査データを一次データ、電磁探査の三次元比抵抗分布を二次データとしたコロケートド・コクリギングにより、地下水の塩化物イオン濃度や酸素水素同位体比の三次元分布を推定

**手順④III：ボーリング調査 2本目**

- 1本目のボーリング調査で確認した化石海水が存在する領域の広がり把握するために、三次元比抵抗分布に基づき、低比抵抗領域と高比抵抗領域の境界付近を調査地点として選定
- 化石海水の存在を確認するために、塩化物イオン濃度、酸素水素同位体比の深度プロファイルを取得

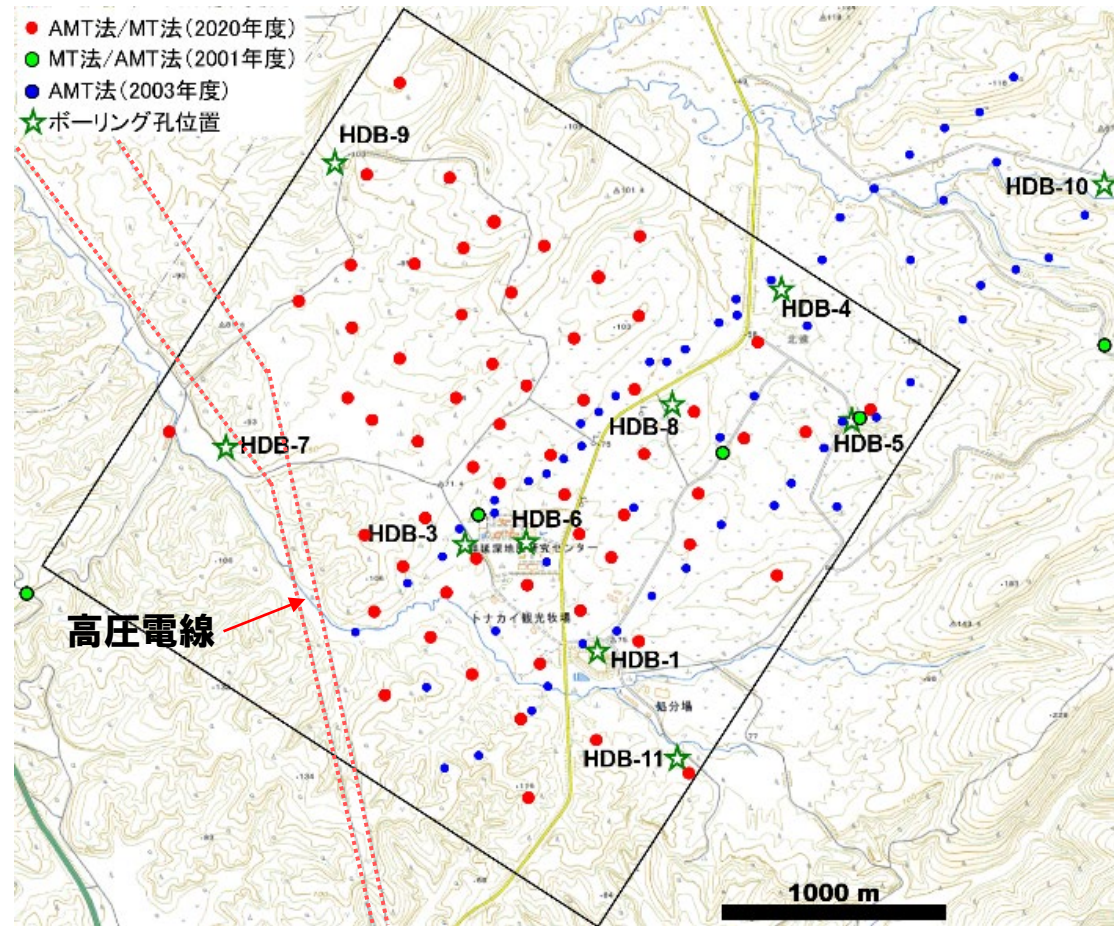
**手順④IV：地球統計学的解析による低流動域の三次元分布の推定(更新)**

- 一次データであるボーリング調査データを追加し、コロケートド・コクリギングによる塩化物イオン濃度と酸素水素同位体比の三次元分布を推定を更新



# 手順③I: 三次元電磁探査(現地調査)仕様概要

- 幌延深地層研究センターを中心とする約3 km四方が調査範囲
- 解析上の解像度は調査範囲の中心部で100 m程度、周辺部で200 m程度とし、それに対し測点の配置は、地形や土地利用状況、ノイズ源になる高圧電線を考慮した上で、100~300 m程度の間隔で配置
- 探査深度は地下施設が建設される深度より、十分に深い探査深度 ⇒ 幅広い周波数帯



磁気センサーを埋設している様子

## 【測定仕様】

測定方法: リモートリファレンス方式による AMT/MT 法

測点数: 60点 (令和2年度実施分)

測定成分: 全測点で電場 2成分、  
磁場 3成分の計 5成分を測定

ダイポール長: 原則 30 m

測定周波数: 8,000~0.001Hz の 30 周波数 以上

測定時間: AMT 周波数帯 1 晩 以上、  
MT 周波数帯 2 晩 以上

測定機器: カナダ Phoenix 社 AMT/MT 法測定システム

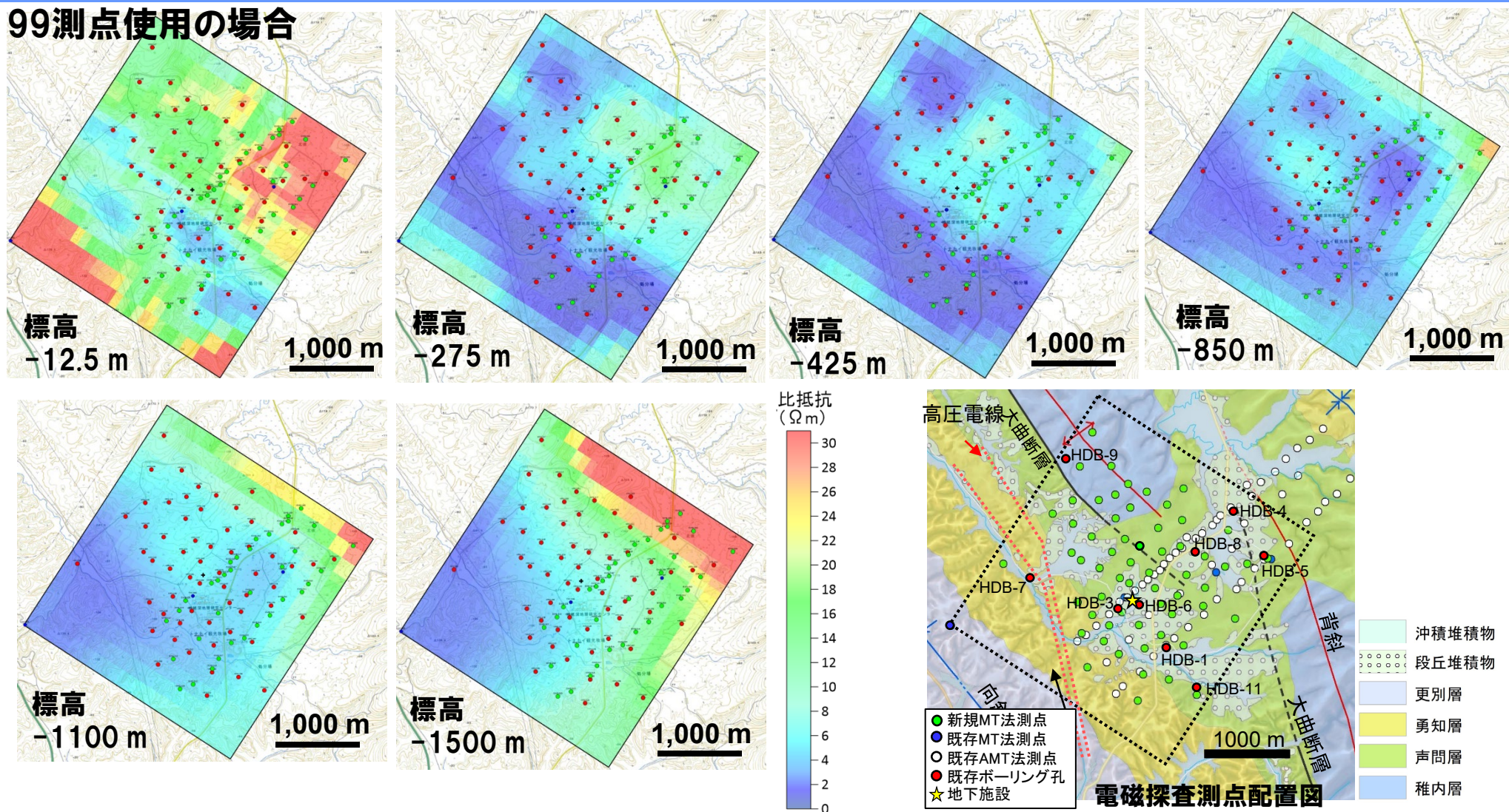
電磁探査の測点配置(既存の測点を含む)



# 手順③II: 電磁探査データの解析による三次元比抵抗分布の推定

## 電磁探査の結果\_各深度の水平断面

### 99測点使用の場合



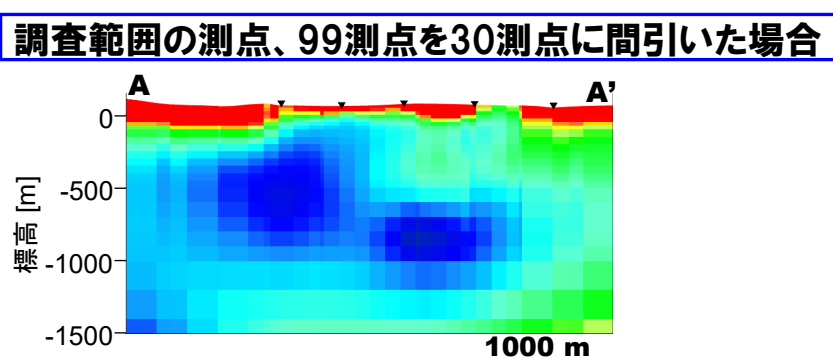
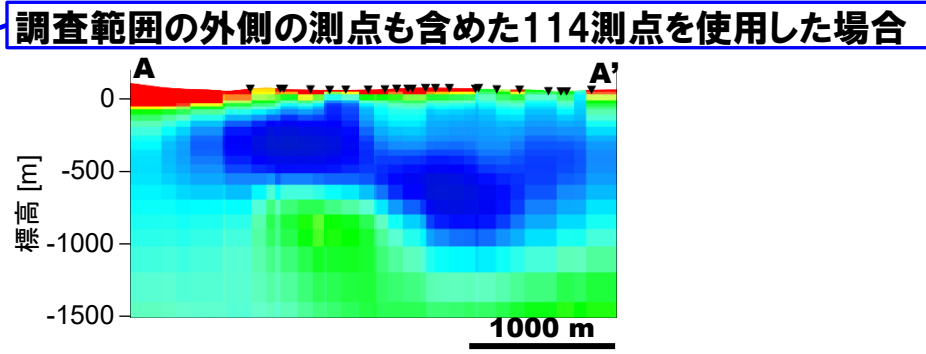
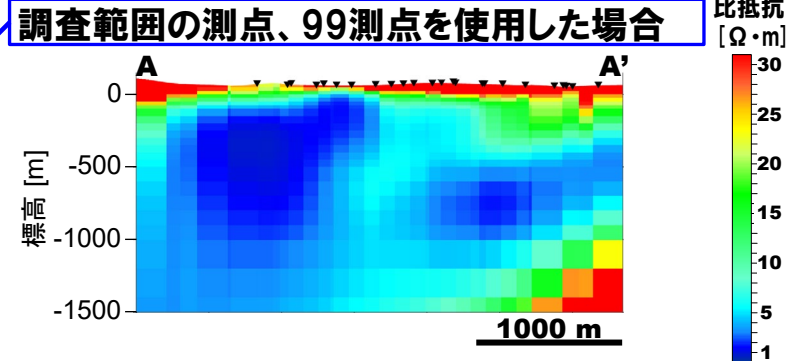
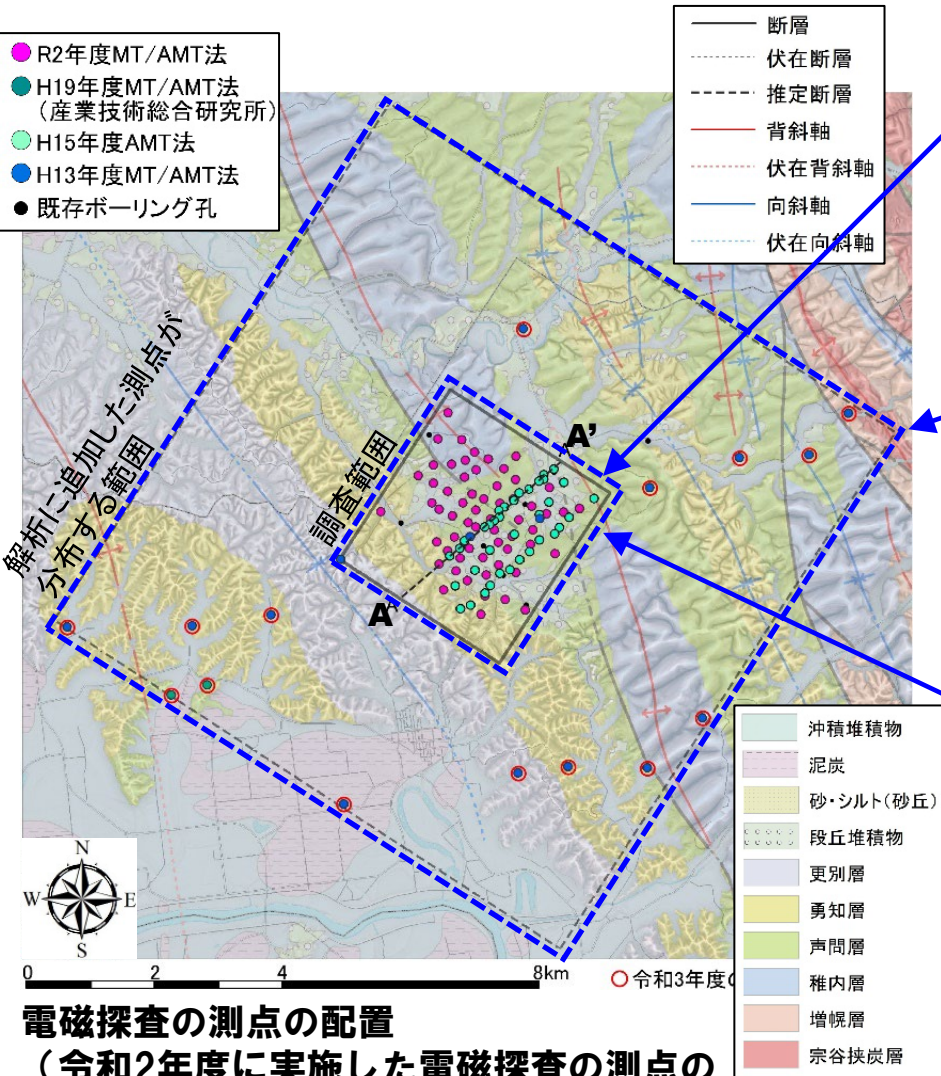
- 地表付近(標高-12.5 m)では、特に南西側と東側で高比抵抗、一方、標高-1500 mでは北東側で高い比抵抗
- 標高-275~-425 mの範囲では、北東側と南西側で比抵抗のコントラストがあり、南西が低い比抵抗
- 標高-850 m以深では、比抵抗が高くなる傾向 ⇒ 解析上の特徴



# 手順③II: 電磁探査データの解析による三次元比抵抗分布の推定

## 電磁探査の結果\_測点数の違いの影響

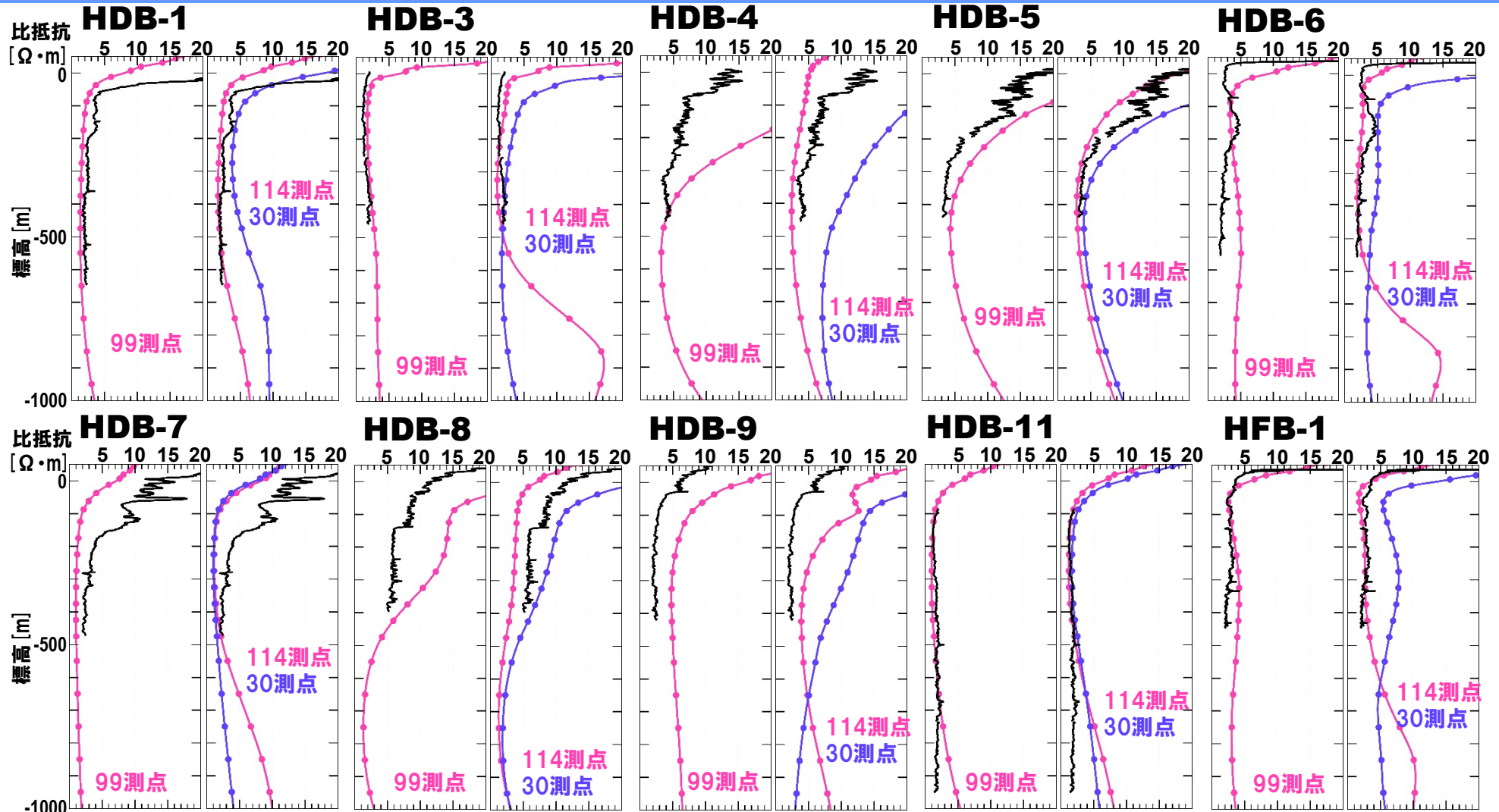
➤ 調査範囲の99測点を使用した場合のほか、調査範囲外の測点を使用した(114測点)と調査範囲内の測点を間引いた場合(30測点)の三つのケースを検討



電磁探査の解析結果 (A-A' 断面)

電磁探査の測点の配置  
(令和2年度に実施した電磁探査の測点のほか、既存の測点も含む)

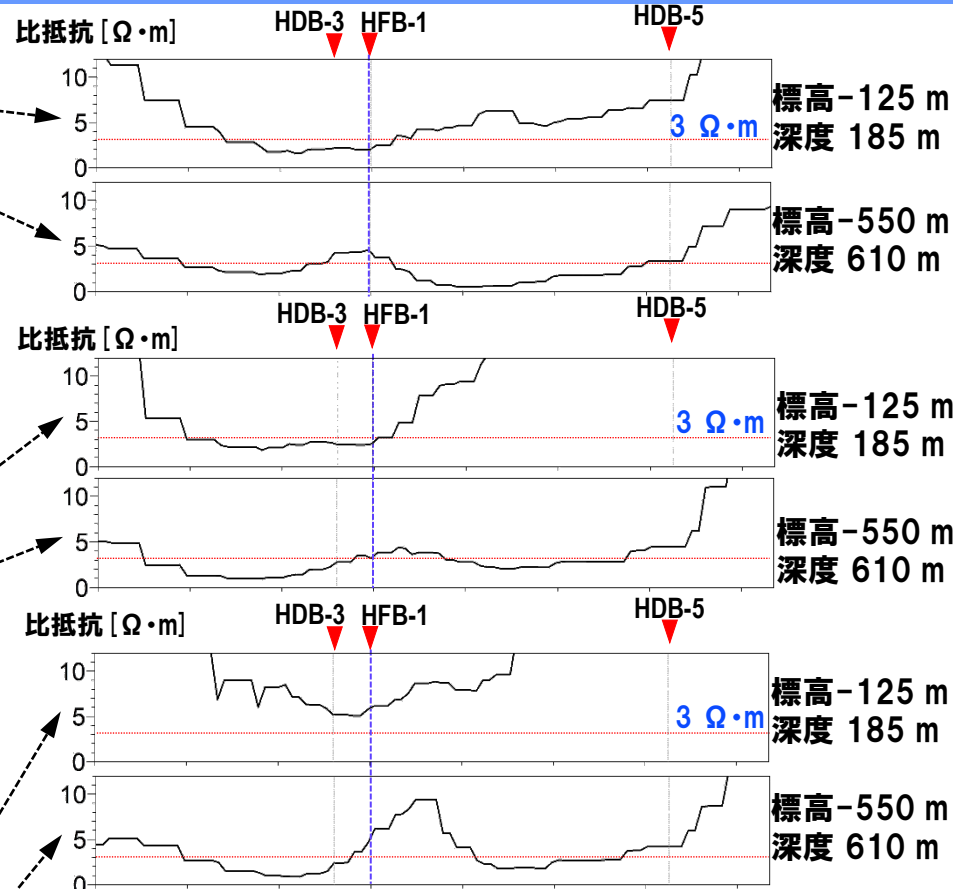
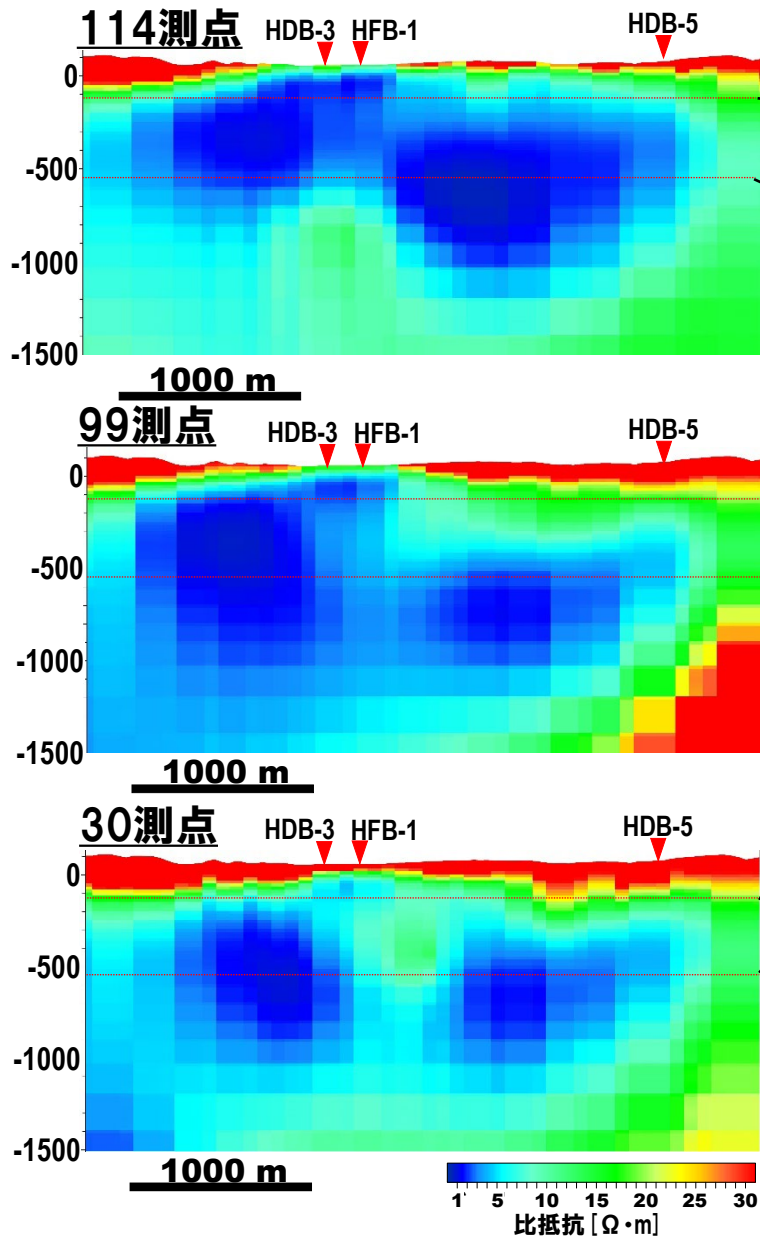
# 手順③II: 電磁探査データの解析による三次元比抵抗分布の推定 電磁探査と各ボーリング孔の比抵抗検層の比較



- 99測点: 比抵抗検層の値と概ね整合的
- 114測点: 一部ボーリング孔では標高-500mまでの範囲では整合性がさらに向上
- 30測点: 全体的に高比抵抗になる傾向

# 手順③II: 電磁探査データの解析による三次元比抵抗分布の推定

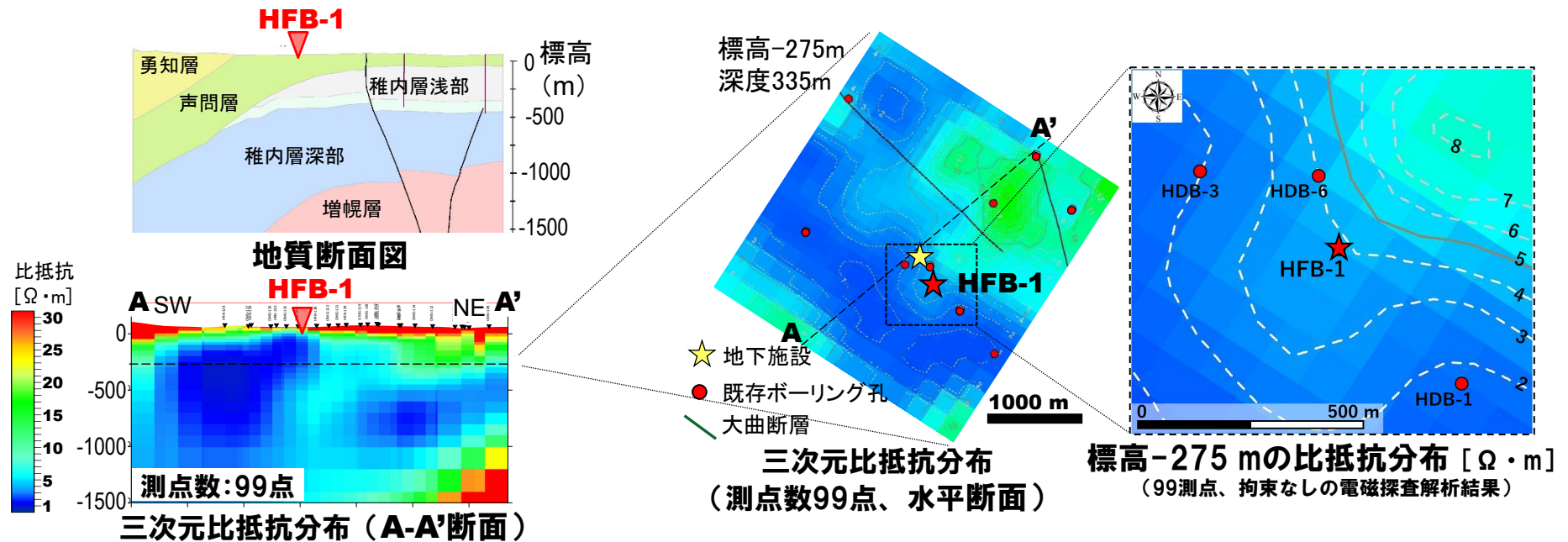
## 電磁探査の結果\_水平比抵抗プロファイルの比較



- 深度185 mの比抵抗の水平プロファイル: 114測点、99測点では、HFB-1を境に南西側と北東側とで比抵抗の傾向が異なることが読み取れるが、30測点では不明瞭
- 深度610 mの比抵抗の水平プロファイル: 114測点、99測点では、全体的に低比抵抗であるが、30測点では一部高比抵抗の領域あり  
⇒少なくとも99測点(100~300m程度の測点間隔)でボーリング調査地点を適切に判断できる推定を得ることが可能



# 手順④I、III: ボーリング調査 1本目、2本目(HFB-1)の調査地点の選定の考え方



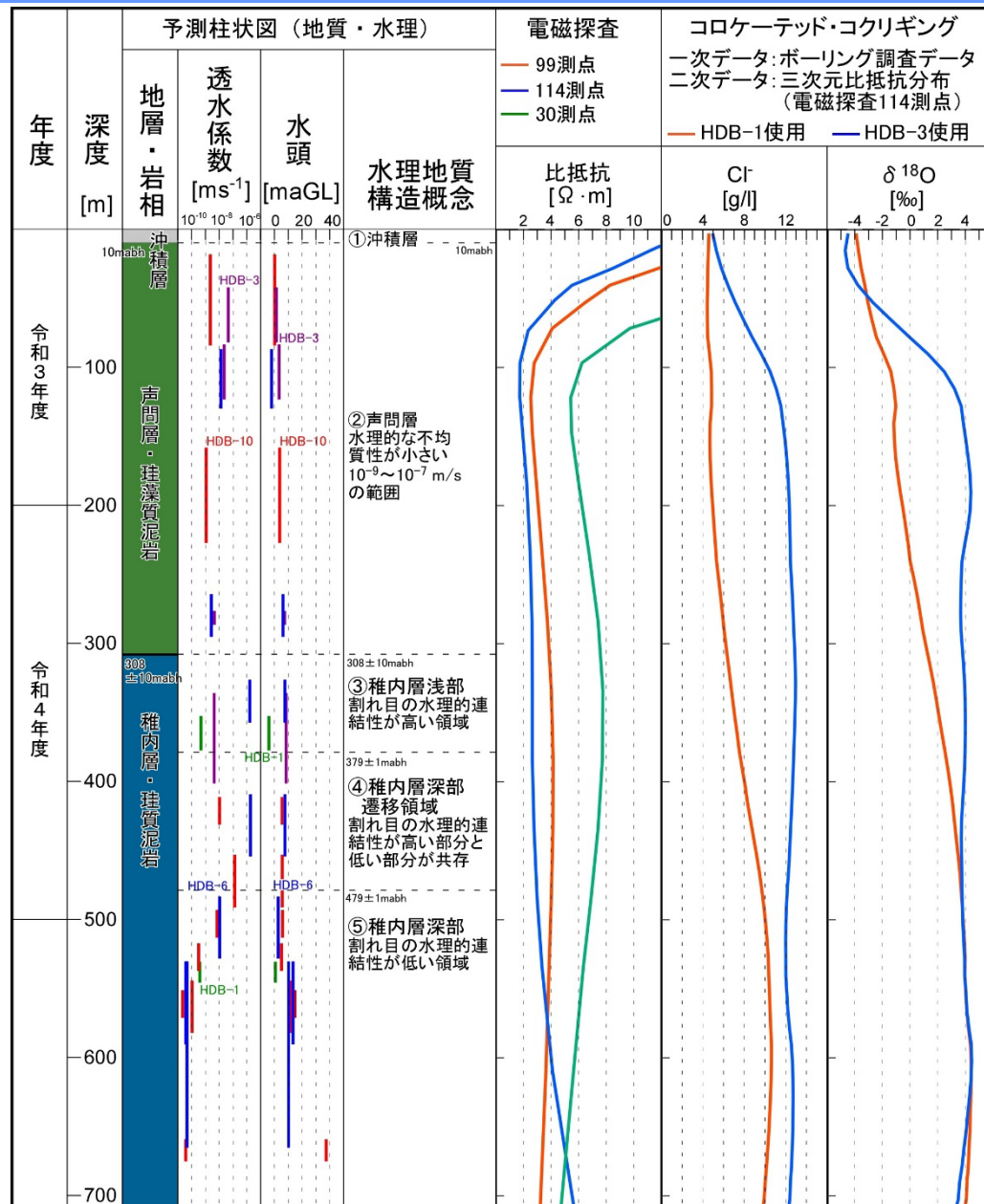
## ボーリング調査地点の選定に使用した三次元比抵抗分布

- 令和2年度の電磁探査実施時に得た調査範囲に含まれる99測点のデータを用いた解析ケース
- 南西側では深度100m程度から低比抵抗、北東側では深度500m程度から低比抵抗

## これまでに提案した調査手順：施設スケール内のボーリング調査地点

- 1本目：低流動域と推定できる領域（低比抵抗領域）がより浅部から分布する地点  
⇒ 例えば、既存孔HDB-1とHDB-3が相当
- 2本目：低流動域の広がり端を把握するために、低比抵抗領域の端と読み取れる地点  
⇒ **電磁探査の結果からHFB-1が浅部から広がる低流動域の端にあると判断**

# 手順④III: ボーリング調査\_HFB-1の予測



- 声間層/稚内層境界: 既存地質構造モデルに基づき、深度約308 m
- 水理地質構造: 既存孔の結果に基づき、稚内層浅部あるいは深部遷移領域 (深度300~480 m)において水みちの出現可能性が高い
- 電磁探査の比抵抗分布に基づく、深度約100 m以深が低流動域
- 化石海水の出現深度: コロケートッド・コクリギングによる推定に基づく、
  - HDB-1の場合、深度約300 m以深
  - HDB-3の場合、深度約100 m以深

# 手順④III: ボーリング調査\_ HFB-1の調査プログラム

年度	深度 [m]	ボーリング孔掘削					調査・試験												
		地層・岩相	掘削フェーズ	トリコンビット掘削 [inch]	ワイヤライン掘削 三重管オールコア	ケーシング [inch]	掘削水	トレーサー	岩芯記載	孔径検層	比抵抗・自然電位検層	温度検層	孔壁画像 (超音波型) 検層	電磁式 フローメータ検層	粉末X線回折 (XRD) 分析	岩芯試料酸素・ 水素同位体比測定	間隙水抽出用岩芯採取	ガス抽出用岩芯採取	地下水・ガス採取
令和3年度	0-10	沖積層	I	10-5/8"	PQ 139.8 mm	清水													
	10-200	戸内層・珪藻質泥岩	I	20mabh	PQ 139.8 mm	ベントナイト泥水	アミノ6酸 10ppm												
令和4年度	200-300	戸内層・珪藻質泥岩	II	200 mabh	PQ 139.8 mm	ベントナイト泥水	アミノ6酸 10ppm 蛍光ビーズ (シンロイヒ社SW-113RED)												
	300-400																		
	400-500			400 mabh															

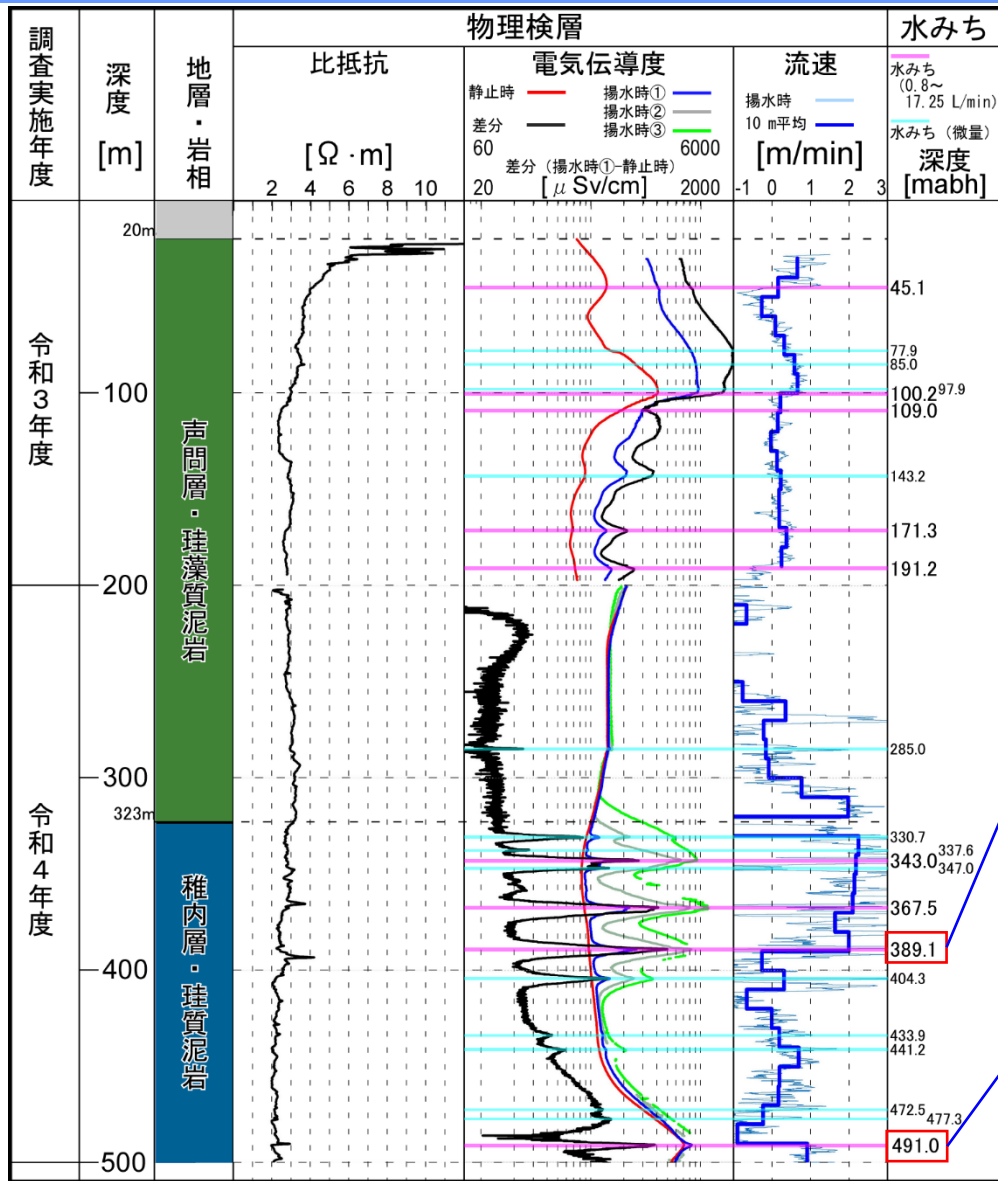
- PQ三重管ワイヤーライン工法によりコア掘削
- 令和3年度に深度200 mまで掘削し、令和4年度に深度500 mまで掘削
- **低流動域の存在を確認**するために、**比抵抗、水質・同位体データの取得**が主要な調査※

※地層処分事業の概要調査では、すべての地質環境特性(地質・地質構造、水理、地球化学、力学)を対象とした調査プログラムが適用されることを想定

変更の可能性あり



# 手順④II: ボーリング調査\_HFB-1の結果



- 実際に確認した地層境界深度は323.0 m
- 比抵抗は、地表から深度約100 mにかけて  $3 \Omega \cdot m$ 程度に減少し、深度約400m以深では最も低い  $2 \Omega \cdot m$ 程度
- 電気伝導度の変化点から複数の水みちを抽出し、その箇所では水みちと関連する地質学的な特徴を観察
- 深度約400m以深では、割れ目の頻度が低く、顕著な水みちも少ない



- 傾斜50度以上の中～高角のせん断と引張の特徴を併せ持つ割れ目
- 一部、粘土質

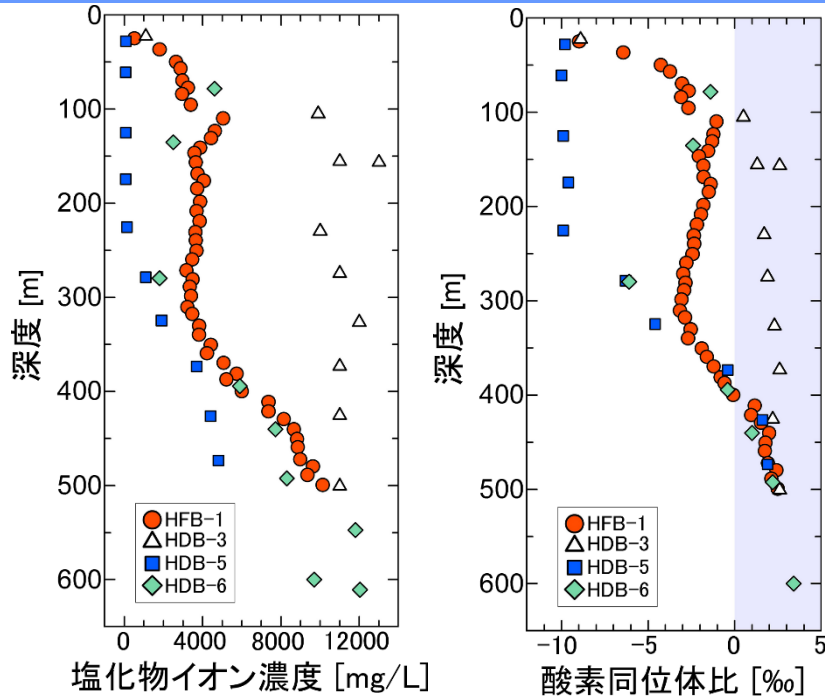


- 厚い断層角礫(粘土質な角礫)を介在する割れ目
- 破碎帯中央部には白色鉱物脈を含んだ珪質細粒砂岩～泥岩が包有され、その上下位に粘土で構成される軟質な脆弱部

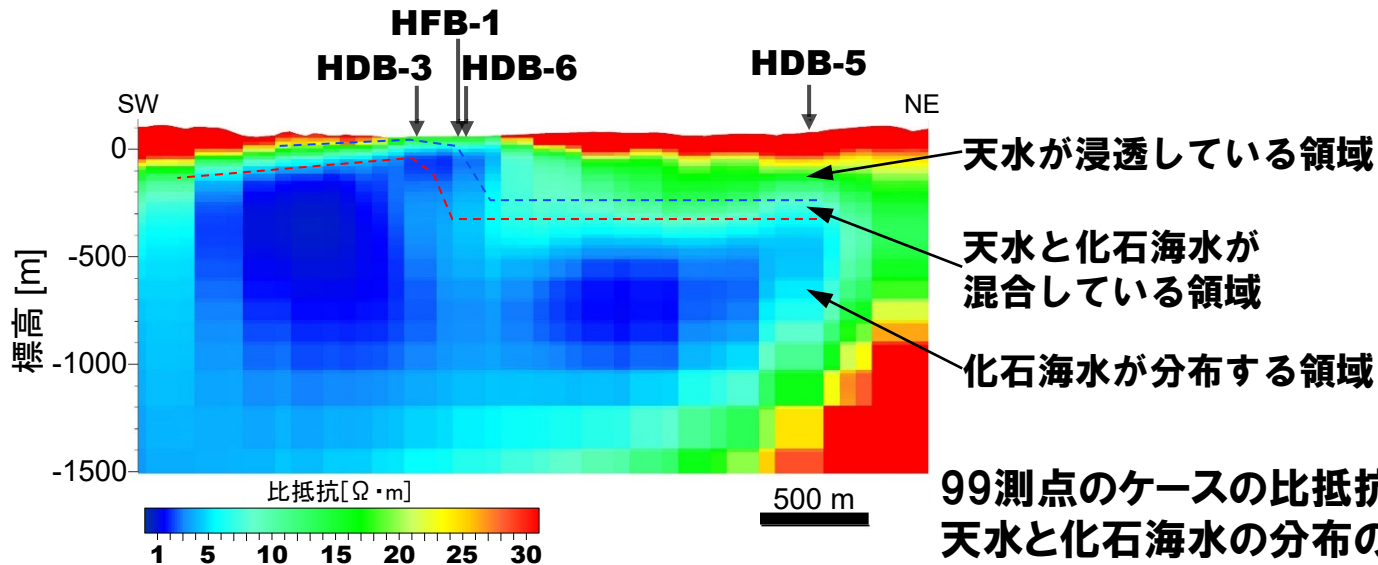
注)物理検層の実施年度が深度200 mを境に異なる。特に、電磁式フローメータ検層の測定時の条件が異なっているため、電気伝導度と流速が連続していない。

# 手順④Ⅲ: ボーリング調査

## HFB-1孔における化石海水の分布と電磁探査の有用性について



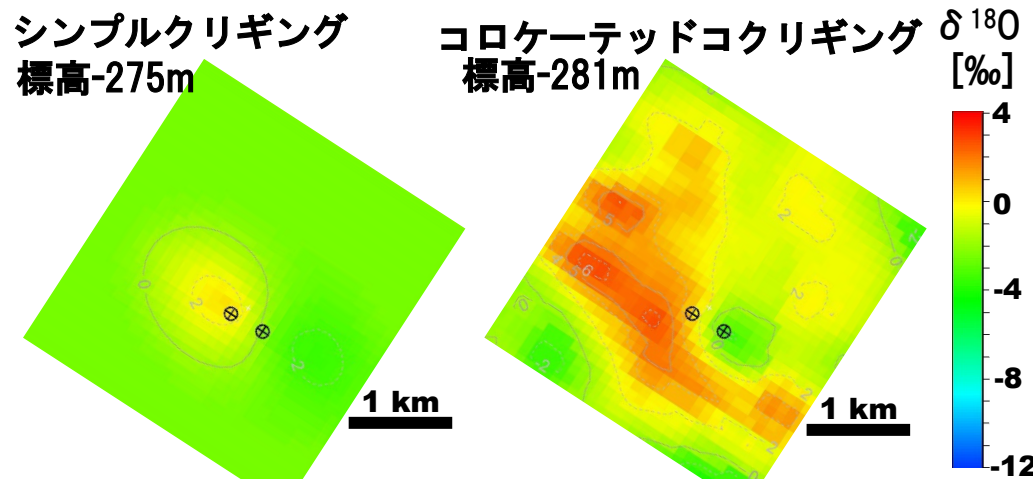
- HFB-1は深度約20 mからCl<sup>-</sup>濃度およびδ<sup>18</sup>Oともに上昇するが、深度400 mまでは化石海水と判断できない地下水
- HFB-1のほか既存孔HDB-3、6、5のδ<sup>18</sup>Oの深度プロファイルに基づき、天水と化石海水の分布について解釈  
⇒ 比抵抗の分布(高低)は、天水と化石海水の分布の状況と整合的
- HFB-1孔のCl<sup>-</sup>濃度とδ<sup>18</sup>Oの深度プロファイルは、「天水と化石海水が混合している領域」が鉛直に長く分布する地点を掘削したことを示しており、提案した調査手順の通り、化石海水が浅部から分布する領域の端を掘削できたことを示す。



99測点のケースの比抵抗断面と天水と化石海水の分布の解釈

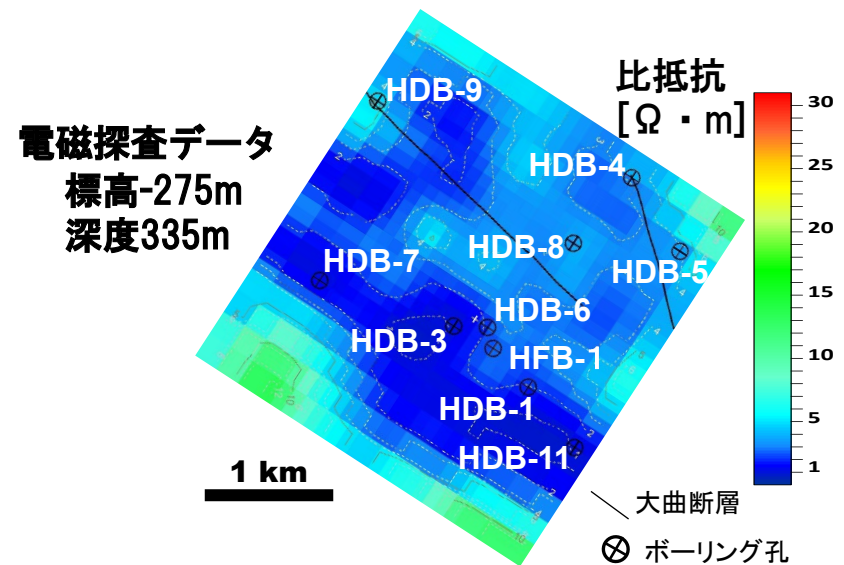
# 手順④II、IV:地球統計学的解析による低流動域の三次元分布の推定 手法の概要と検討内容

- 電磁探査には、三次元分布の把握できる大きな利点があるが、本質的には比抵抗だけから化石海水の有無を判断できない。一方、ボーリング調査では、化石海水の有無を判断するための指標である酸素同位体比を取得できるが、それはボーリング孔に沿ったデータである。
  - ⇒ ボーリング調査の水質データを一次データ、電磁探査の三次元比抵抗分布を二次データとした地球統計学的手法(ここでは、コロケートッド・コクリギング)により、酸素同位体比の三次元分布を推定可能
- 酸素同位体比の三次元分布を推定する場合における最適なボーリング調査地点の場所と数について、HFB-1孔と既存孔10孔の全11孔を使用した地球統計学的解析を通じて検討



ボーリング孔から離れた領域は、**平均値**が与えられる  
 ボーリング孔から離れた領域は、**電磁探査データ**が反映される

シンプルクリギングとコロケートッドコクリギングにより  
 推定した  $\delta^{18}O$  の三次元分布  
 (2本のボーリング孔データを使用した場合)

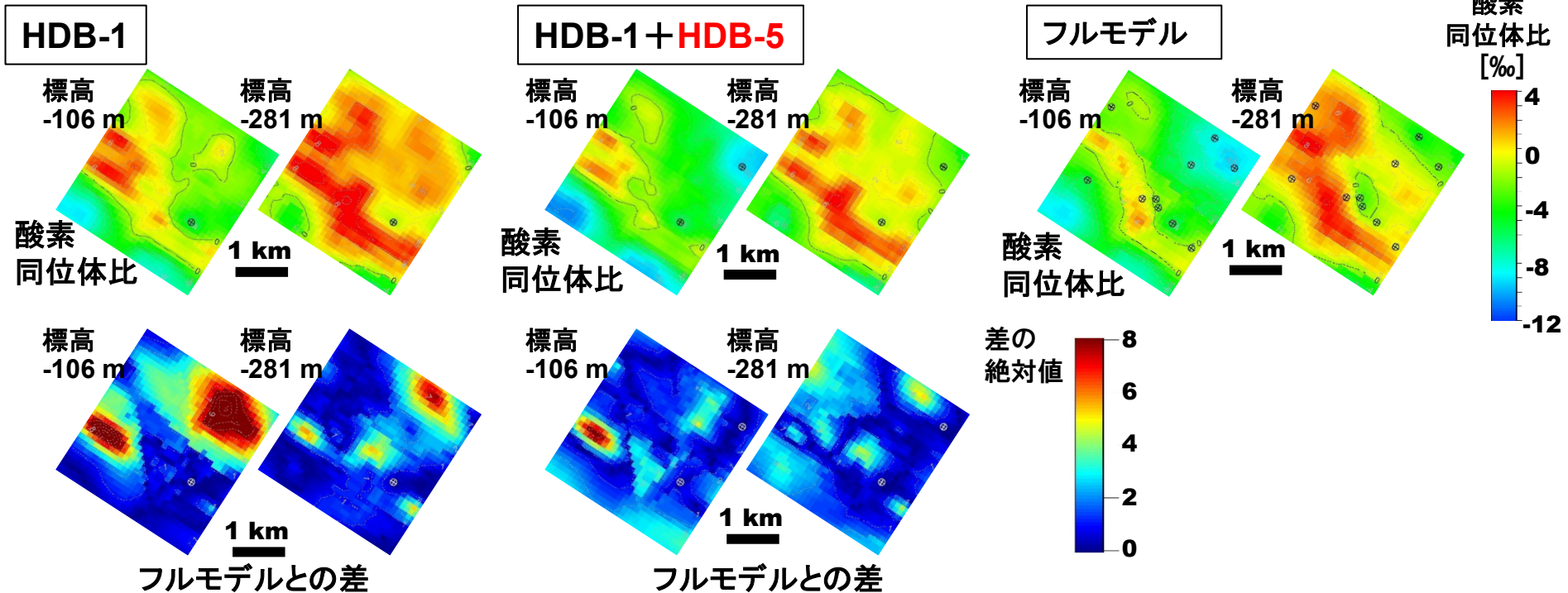


ボーリング孔地点と電磁探査の比抵抗分布  
 (114測点のデータを使用した場合の三次元比抵抗分布)



# 手順④II、IV:地球統計学的解析による低流動域の三次元分布の推定 結果(1/2)

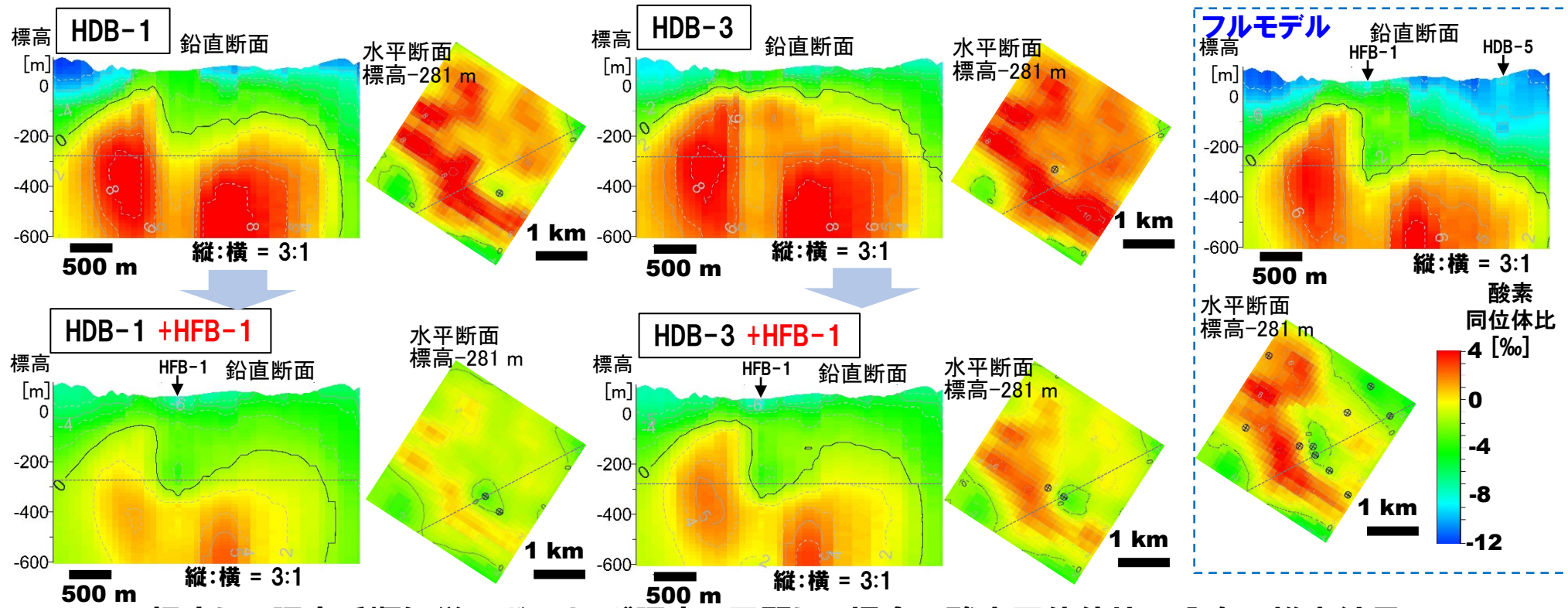
- 全11孔を使用した推定結果(フルモデル)と、比抵抗分布、地質、位置関係に基づいて任意の1~3孔を選んだ推定結果との差により評価
  - 例えば、フルモデルとHDB-1孔とHDB-5孔を選んだケースとの差では、HDB-1孔のみでは標高-106 mの解析領域の北東部に誤差が非常に高い領域があるが、北東部に位置するHDB-5孔(高比抵抗領域)を加えることで誤差を低減可能
- ⇒ 化石海水が存在する可能性が高い低比抵抗領域だけでなく、高比抵抗領域のボーリングデータを得ることで、2孔だけでもフルモデルと類似した推定結果を得ることが可能



HDB-1(低比抵抗領域)とHDB-5(高比抵抗領域)を使用した場合における酸素同位体比分布(水平断面)とフルモデルとの差の分布

# 手順④II、IV:地球統計学的解析による低流動域の三次元分布の推定結果(2/2)

- 提案した調査手順に従い、1孔目をHDB-1あるいはHDB-3孔、2孔目をHFB-1孔とした場合、HFB-1孔付近だけでなく、それから離れた領域の推定値もフルモデルに近づく
- HFB-1孔周辺は、電磁探査の結果から化石海水分布の境界付近にあると推定された領域であり、比抵抗と水質の変化が大きい領域のデータを取得可能
- 電磁探査の結果に基づきホーリング調査地点の適切な設定が可能であり、1孔目を浅部から低比抵抗領域が広がる領域に設定し、化石海水の存在を確認し、2孔目を化石海水の有無の境界付近に設定することで、化石海水が存在する範囲をより正確に把握可能



提案した調査手順に従いボーリング調査を展開した場合の酸素同位体比の分布の推定結果

# 本日の発表内容に係る文献リストおよび謝辞

- Negi T., Mizunaga H., Asamori, K., Umeda K., Three-dimensional magnetotelluric inversion using a heterogeneous smoothness-constrained least-squares method, *Exploration Geophysics* 44 (3) 145–155, <https://doi.org/10.1071/EG13026>, 2011.

**本資料には、平成30年度から令和4年度に経済産業省資源エネルギー庁から受託した「高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業(JPJ007597)(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)」の成果の一部を利用した。**