

物理探査研究グループの紹介 -2011 年度- Exploration Geophysics Research Group, FY2011 Update

研究グループ長：内田利弘

Leader, Exploration Geophysics Research Group: Toshihiro Uchida

Phone: 029-861-3840, e-mail: uchida-toshihiro@aist.go.jp

<http://unit.aist.go.jp/georesenv/explogeo/>

1. グループの研究目的

本研究グループでは、放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO₂ 地中貯留、土木分野等の地圏環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング、及び、地熱・地中熱、鉱物資源等の資源分野における地質構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う。平成 23 年度においては、主に、放射性廃棄物地層処分場選定における地質構造評価、土壌汚染・地下水環境・土木分野等における浅部地質環境評価、CO₂ 地中貯留における岩石物性評価と物理探査モニタリング、地中熱利用における地下物性モニタリングおよび地熱貯留層探査・評価手法の研究を進めるとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2. グループの概要

1) グループ員

内田利弘（リーダー）
上田 匠
神宮司元治
中島善人
光畑裕司
横田俊之

2) 平成 23 年度の主な研究予算

資エネ庁委託費「沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発」
文科省科研費「富栄養化内湾堆積物における異種微生物間長距離細胞外電子伝達の実証」
環境省委託費「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」
請負研究費「インドネシア国地熱開発技術力向上プロジェクトに係る技術移転に関する協力」
運営費交付金「沿岸域地質・活断層調査」
など

3) 平成 23 年度の研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

沿岸域の断層や塩淡水境界を把握するための物理探査技術として、浅海域を対象とする電磁探査法の機器開発と 3 次元データ解析手法の研究、北海道幌延地域における適用調査および既存データの再解

析等を行う。

b) 土壌汚染評価

油汚染サイトにおいて取得した物理探査データ（地中レーダ等）の解析を継続し、汚染評価のための基礎情報を整理する。X 線 CT 法による非破壊イメージング手法の重金属汚染土壌コアへの適用可能性を検討する。

c) 浅部地質環境評価

核磁気共鳴 (NMR) 表面スキャナー装置について、農業や工業製品への適用を行う。物理探査及び CPT 技術を用いた液状化調査評価手法について検討する。

d) CO₂ 地中貯留のモニタリング技術

物理探査（電磁探査等）による CO₂ 貯留モニタリングについて、海底電磁探査の測定手法の検討、数値実験による最適なモニタリング計測配置等の検討を行う。また、CO₂ 貯留岩の電気物性評価のため、繰り込み理論をよる解析法を開発する。

e) 地熱資源・地中熱利用における物理探査

地中熱利用における最適生産設計と環境影響予測のため、地下水を汲み上げて熱交換を行うオープンサイクル地中熱利用に対するモニタリング技術の開発を行う。人工ノイズの強い地域における時間領域電磁探査法のデータ処理法に関する研究を行う。温泉との共生を目指した地熱資源開発について、電磁探査法による貯留層評価手法の検討を行う。

f) 沿岸海域における地質・活断層調査

沿岸域の物理探査データ空白域を補い、海陸にわたる地質・断層構造を把握する探査法について検討する。今年度は、北海道苫小牧周辺陸域で取得された反射法地震探査データを解析する。

g) 震源断層評価にかかる物理探査調査

震源断層評価技術開発のためのモデルフィールドにおいて昨年度に取得した浅層反射法および地中レーダの測定データについて 3 次元処理等を実施する。また、東日本大震災に関係する地震断層において電磁探査法調査を実施し、断層周辺の比抵抗構造を求めると。

3. 平成 23 年度の主な進捗状況

1) 地層処分場の地質構造評価

a) 沿岸域を対象とする物理探査技術開発

放射性廃棄物地層処分において、沿岸域の地質構造と地下水環境（塩分濃度等）を把握するための物理探査手法の整備が必要とされている。そのため、本研究では、浅海域を対象とする電磁探査測定技術開発および2次元・3次元データ解析手法の研究を進めるとともに、北海道幌延町のモデルフィールドにおいて、地震探査・電磁探査等の探査手法の適用研究を実施している。

平成 22 年度には、開発中の浅海用海底電磁探査装置を用いた調査を実施し、これまでに取得した陸域のデータと合わせて解析を行った。平成 23 年度には海底電磁探査の補足調査を実施中である。

幌延沿岸域における調査位置を図 1 に示す。平成 22 年度には海域の 2 測線（16 測点）で測定を行った。測点間隔は約 1km であり、最も海岸線に近い測点は海岸から約 400m に位置し、水深は約 4m である。基本的に連続 3 日間の自然電磁場の観測を行い、MT 法のデータ処理を行った。最終的な測定データの品質は 0.1Hz 周辺の自然信号の弱い帯域を除き比較的良好であった（図 2）。ただし、水深が 10m より浅い測点では、波浪によって装置が揺動することによるノイズが大きく、1Hz より低い周波数ではデータ品質は良くない。

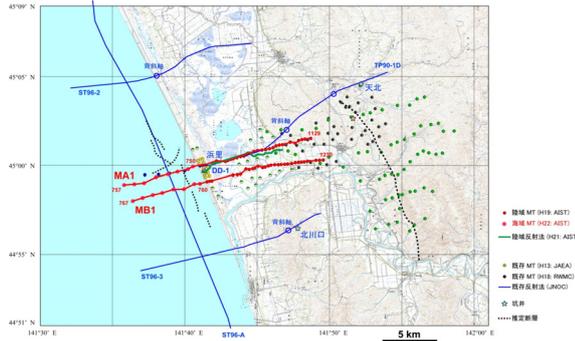
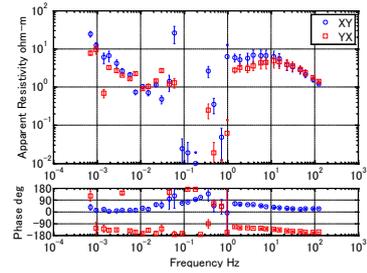


図 1：北海道幌延町の沿岸域モデルフィールドにおける平成 22 年度までの物理探査調査位置。平成 23 年度には、海域における電磁探査の補足調査を実施している。

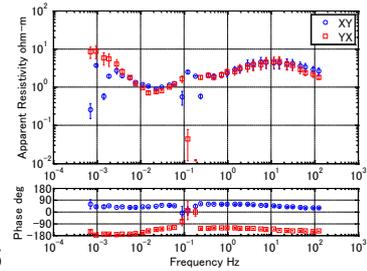
2つの測線について陸域の MT 法測定データを含めて海陸接合の 2 次元解析を行った。MA1 測線の比抵抗モデルを図 3 に示す。また、平成 21 年度に行った陸域の反射法地震探査について、沿岸部の深部調査井の検層データを用いて再解釈を行った結果を図 4 に示す。比抵抗構造の主な特徴として、以下が挙げられる。

- ・沖積層中に低比抵抗層（シルト層）が挟在する。
- ・陸側の更別層は概ね高比抵抗である。
- ・勇知層の層厚は水平方向に大きく変化し、大部分が低比抵抗であるが、上部に高比抵抗部が存在する。
- ・声間層はサロベツ背斜で地表近くに達し、全体的に低比抵抗である。これは地層中の化石海水によると推測され、サロベツ背斜の浅部にも保持されている。
- ・海底下の更別層の上部は海岸から数 km の範囲で高比抵抗で淡水的であると推定される。これは、沿岸部において塩水と淡水が静的に平衡状態にある

場合には考えにくい現象であり、過去の海進・海退の繰り返しにより形成され現在も維持されているものと考えられる。



(a) 測点 MA1



(b) 測点 MA5

図 2：海域 MA 測線のデータ例。測点 MA1 の水深は約 8m、MA5 は約 33m。

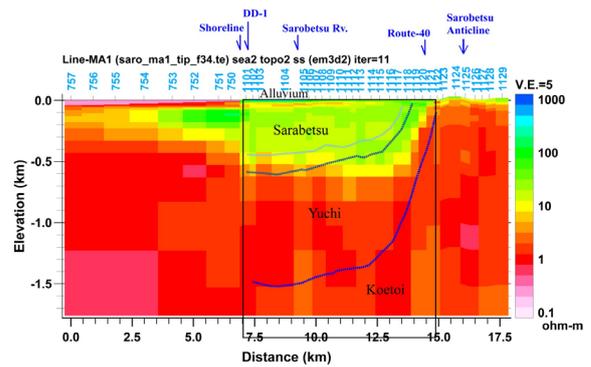


図 3：海陸接合測線 MA1 の 2 次元解析結果。縦横比 5。図 4 の反射法による地層境界を重ねて示した。DD-1 は深部調査井（掘削深度 1000m）の位置。

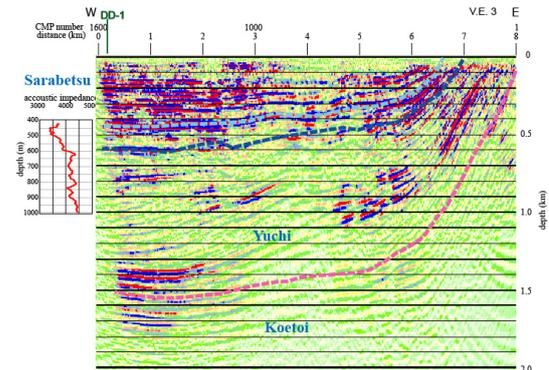


図 4：陸域反射法（平成 21 年度実施）の再解釈結果。

2) 浅部地質環境評価

液状化対策の一つであるマイクロバブル地盤不飽和化工法の物理探査技術を用いた評価に関する研究を実施した（外部機関との共同研究）。江戸川河川敷で実施された地盤へのマイクロバブル水注入による原位置実験において、地盤飽和度の直接的

な計測のため、ボーリング孔を掘削し、アクセスチューブを設置する検層型 TDR を用いて体積含水率のモニタリング計測を行った。また、地盤中のマイクロバブルの拡散状況の把握するため、繰り返し電気探査を行った。その結果、図 5 に示すように、注入地点において飽和度の明確な変化を検出した。

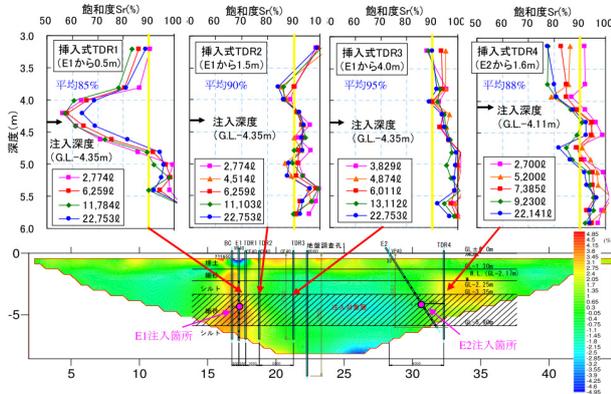


図 5：検層型 TDR による飽和度計測結果（上）と繰り返し電気探査による比抵抗変化分布（下）

3) CO₂ 地中貯留の岩石物性

フォーメーションファクター（間隙流体の比抵抗値で規格化された多孔質岩石や堆積物の比抵抗、以下、FF と記す）は、CO₂ 地中貯留のモニタリングなどで用いられる電気・電磁探査法における基本的な岩石物性である。物理探査や検層データと比較するため、コア試料の空隙スケールの X 線 CT 画像から FF を求めることがしばしば行われる。通常は、デジタル CT 画像データに対して、電位に関する 3 次元大規模ラプラス方程式を数値的に解く手段がとられる。本研究では、繰り込み (renormalization) という近似手法を適用し、桁違いに高速に計算が行える方法を開発し、その適用性を検討した。

まず、大規模画像をたとえば $2 \times 2 \times 2 = 8$ 個の画素からなるサブシステムに分割し、各サブシステムについてラプラス方程式を数値的に解いて FF 値を求める。この 8 個 \rightarrow 1 個の縮小画像をシステムが単一の値になるまで次々と繰り返す。 256^3 画素の画像に関する 8 回の繰り込みスキームを図 6 に示す。小規模なサブシステムのラプラス方程式を多数回解くことになるが、それでも大規模画像を直接解くよりも桁違いの時間短縮が期待できる。一例として、X 線 CT によって求めた砂岩の画像 (図 7) に繰り込みを適用した結果を図 8 に示す。この画像では、FF の大規模ラプラス方程式解 17 に対して、繰り込みによる計算値は 58 であった。パソコンによる計算時間は前者が 7 時間、後者が 6 分であった。この例では両者の値の差はやや大きい、最初のサブシステムのサイズとしてたとえば $32 \times 32 \times 32$ 画素のように大きめを採用すると、両者はより一致することを確認済みである (ただし、計算時間の増加は避けられない)。繰り込みは、多孔質岩石に限らず複合材料などの複雑な境界条件のもとでの大規模なラプラス

方程式の高速解法として広く応用できる。また、電気伝導のみならず熱伝導、物質拡散、ダルシー流れの 3 次元大規模シミュレーションにも広く適用できる。

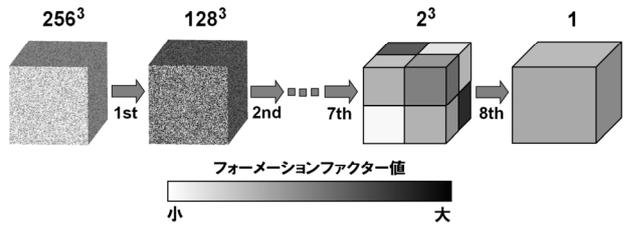


図 6：繰り込み操作の概念図

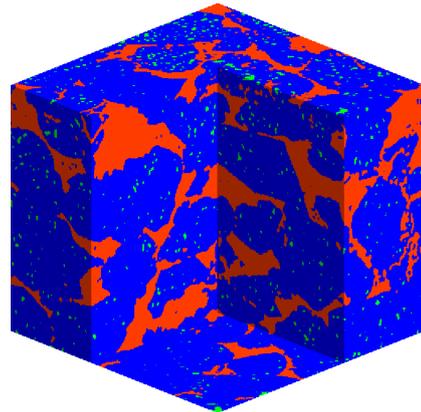


図 7：空隙率 20% のペリア砂岩画像。画像サイズは 256^3 画素 (0.54^3 mm^3)。赤はパーコレートした空隙でこの画素に電流が流れる。緑は孤立した空隙、青は固体 (絶縁体)。

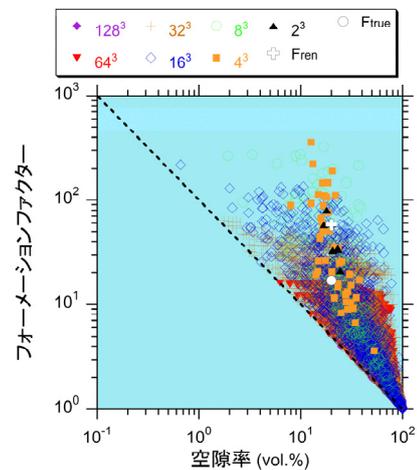


図 8：図 7 の画像の繰り込み結果。Ftrue (白丸) は、大規模ラプラス方程式を直接解いた値。Fren (白十字) は、図 6 の繰り込み操作を 8 ステップ繰りかえして得た値。

4) 地中熱利用における地下物性モニタリング

地中熱ヒートポンプシステムを使った冷暖房システムは、わが国においても急速に普及しつつある。しかし、地中熱システムが地盤の熱環境に与える影響については、これまで十分に検討されているとは言えない。特に、地下水水面の変動などによって体積含水率が変化する不飽和地盤については、含水率に応じて熱伝導率が変化することを考慮する必要がある。本研究では、不飽和地盤の熱伝導率について

検討を行った。

体積含水率の計測には検層型 TDR 体積含水率計を用いた。実験地の地盤は関東ローム層であり、ボーリング孔壁と TDR を挿入するアクセスチューブとの間に隙間が空いてしまうため、その隙間に珪砂を投入し埋め戻すことにした。珪砂が存在することによる TDR 計測値の変化を補正する変換式を作成し、地盤自体（ローム）の体積含水率の深度分布を求めた。その結果は、ロームを直接サンプリングして計測した体積含水率とほぼ同一であった。また、このボーリング孔を用いて体積含水率の長期的な変動を計測したところ、その変化は最大で6%程度であった。これから予測される熱伝導率の変化は極めて小さく、関東ローム層のような地盤では体積含水率の変動は小さいことが明らかになった。

次に、地下の熱伝導率構造を調べるため、ボーリング孔を用いた TCP (thermal conductivity profiling) 法による試験を行った。用いた地下水観測井の深度が160mと深いため、50mおきに加熱する分割加熱法を試みた。その結果、分割加熱でも測定が可能であり、大深度のボーリング孔においても全体を一度に加熱する必要はなく、部分的な加熱を行うことで熱伝導率を測定できることを確認した(図9)。

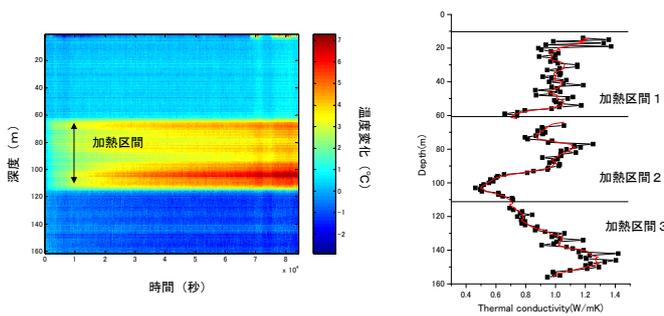


図9：地下水観測井の部分加熱によるTCP測定結果。左は加熱区間2における温度の時間変化、右は温度変化より求めた熱伝導率の深度分布。

5) 震源断層評価への物理探査の適用

断層構造評価に対する物理探査の適用性検討を目的として、埼玉県北部の櫛挽断層をモデルフィールドとし、様々な物理探査手法の複合的な適用による野外調査を実施した。

a) 反射法地震探査とCSAMT法の比較

P波反射法とCSAMT法によって得られた解析断面図に同じ解釈線を入れたものを図10に示す。P波反射法で解釈された反射面のうち、A、C、D、E、Fを黒色破線で示し、また、CSAMT測点CS4の北東側での低比抵抗層の落ち込みを青色破線で示した。反射面Aは砂礫層とその下の低比抵抗層との境界、反射面Dは低比抵抗層とそれ以深の高比抵抗層との境界に相当する。反射面DとEは、過去に行われた深部を対象とする反射法の結果では一連のイベントとして解釈されたが、今回新たに取得した浅層反射法の高分解能な記録においては、2つに分断されたイベントとして識別された。低比抵抗層の位置および

反射面が途切れる位置は地表の断層推定位置に近く、断層の存在が何らかの影響を与えていると推定される。CSAMT法の結果に見られる低比抵抗帯は、新第三系の活褶曲による背斜構造である可能性が示唆されているが、断層に伴う粘土化や断層にシールされた地下水の存在などと解釈することも可能である。一方、反射法の結果は断層に伴う地層境界面の乱れが捉えられていると解釈するのが最も自然であり、低比抵抗の翼部に急傾斜の断層を想定することが可能である。

b) 地中レーダによる極浅層探査

極浅部を対象とする地中レーダ結果を図11に示す。深度約2mの南西傾斜のイベント(反射面)が三箇所不連続になっている様子が見える(その部分に黒の破線で断層解釈線を入れた)。不連続になった端部は持ち上がっているように見える。これは、横方向の力により生じた変形と解釈することが可能である。これらの不連続が見られる位置は、トレンチ調査や群列ボーリングなどにより解釈された断層位置より約15m北東にあたり、極浅部における断層の分岐の一部を捉えた可能性が考えられる。

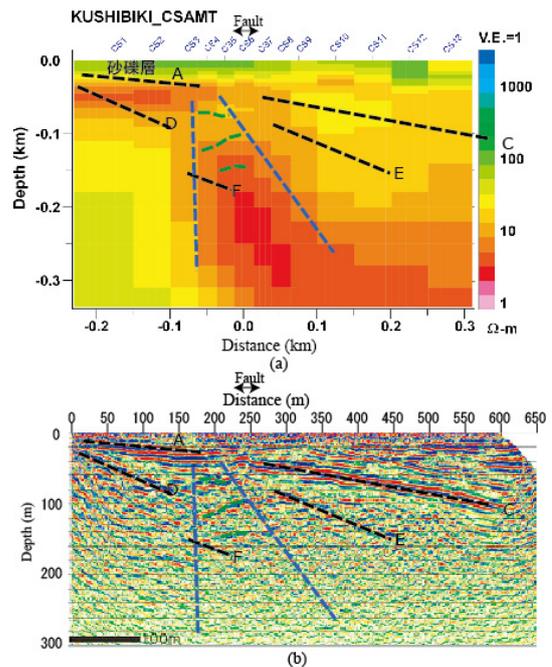


図10：櫛挽断層におけるCSAMT法2次元比抵抗モデル(上)と浅層反射法の深度解析断面図(下)。右が北東方向。

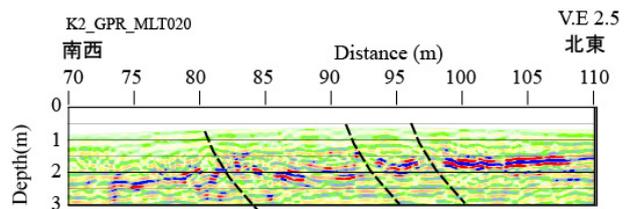


図11：地中レーダによる探査結果。縦横比2.5:1。