

物理探査研究グループの紹介 -2009 年度- Exploration Geophysics Research Group, FY2009 Update

物理探査研究グループ長： 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

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、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 21 年度においては、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、および、海底資源探査や CO₂ 地中貯留等の海域における物理探査の適用を中心に研究を行うとともに、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
西澤 修
安藤 誠（産学官制度）

2) 平成 21 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」
JNES 委託費「震源断層評価に係る地質構造調査の高度化に関する研究」
文部科学省委託費「海底下比抵抗構造の高精度推定のための海底接地型電磁探査法の開発」
運営費交付金「沿岸域地質・活断層調査」
民間委託費「コスタリカ国地熱地域電磁探査データの 3 次元比抵抗構造解析」

3) 研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

放射性廃棄物地層処分場の岩盤評価のため、沿岸域の断層構造や塩淡水境界把握の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 2 次元・3 次元データ解析手法の研究、北海道

幌延地域における物理探査の適用調査、地層の物性を求めるデータ解析法の研究等を行う。

b) 土壌汚染評価

油汚染の顕著なサイトにおいて昨年度までに取得したデータの解析、試料の分析を継続し、得られた比抵抗構造、電磁波反射面分布、土壌サンプル物性計測値、ダイレクトプッシュ原位置計測値等を総合的に解釈し、地盤構造、油汚染分布等との相関を調べ、汚染評価のための基礎情報とする。

c) 浅部地質環境評価

地下水環境、土木建設等における浅部地質環境評価のため、河川堤防における物理探査データの解析、マイクロバブル注入による地盤改良実験および発破液状化実験における比抵抗モニタリングの適用実験、熱伝導率を用いた地盤の探査・モニタリング手法の検討等を行う。

d) 海域における物理探査適用

海底熱水鉱床開発に向けた探査技術開発、CO₂ 地中貯留等における地質構造把握やモニタリング等、海域における物理探査について基礎的な検討を行う。また、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し、新潟地域の沿岸域における海陸接合の物理探査法調査を実施する。

e) 物理探査技術の基盤的研究

地圏における資源開発及び地質環境評価のため、物理探査による地下構造の高精度イメージングのための技術開発を行う。今年度は、震源断層評価のための物理探査適用法の基礎研究、豪州における地殻構造調査のデータ解析を実施する。

3. 平成 21 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法の機器開発および 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

研究を行う。調査位置を図 1 に示す。平成 19 年度に陸域における MT 法・TEM 法調査を行い、広域の 2 次元比抵抗構造や海岸部掘削調査地点（図の星印）周辺の 3 次元比抵抗構造を求めた。今年度は、海底電磁探査予備実験、陸域における反射法調査、MT 法補足調査を実施する。開発中の浅海用海底電磁探査測定装置の外観を図 2 に示す。

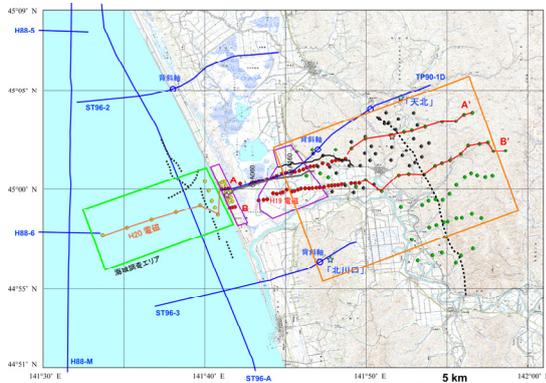


図 1：幌延沿岸域における物理探査調査位置。平成 21 年度には、海域における電磁探査予備実験（緑四角の領域で数箇所）、陸域における反射法調査（灰色線）、MT 法調査（紫多角形）を実施する。



図 2：海底電磁探査装置の動作試験の様子

b) 物理探査データ解釈法の研究

物理探査や物理検層データから、地層の地質環境特性（間隙率、塩分濃度、力学的物性等）を定量的に推定する手法を開発する。岩石を大小二種類の球状粒子（砂・粘土粒子）で表現する二粒子モデル理論を適用し、弾性波速度と電気伝導度の解釈を行った。幌延地域において掘削された坑井の検層データを用い、二粒子モデルにより粘土含有率と間隙率の関係を考慮した上で、間隙率と粘土含有率および弾性定数の関係、および、間隙率と粘土含有率および電気伝導度の関係を求めた（図 3）。

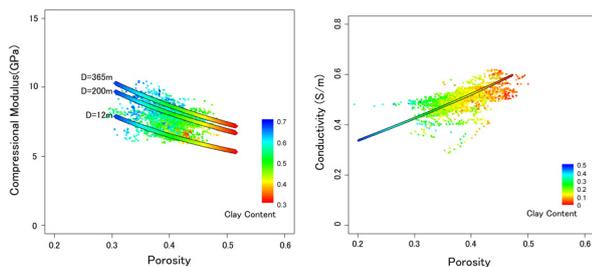


図 3：二粒子モデルによる理論曲線（線）と検層結果（点）の比較。粘土含有率で色付けた。（左）圧縮弾性率と間隙率、（右）電気伝導度と間隙率の関係。

2) 土壌汚染評価

地表からの物理探査や原位置計測によって、電気物性等の分布から油分汚染土壌を評価する手法について検討するため、油分汚染モデルフィールドにおいて、3次元電気探査、電磁マッピング法、地中レーダ等による調査を実施した。また、ダイレクトプッシュ型貫入プローブを用いた深さ数 m までの比抵抗計測、土壌・地下水サンプリング等を実施した。取得したサンプルについては、電気物性計測、X線 CT 計測、化学成分分析等を行った。それらの結果を総合して、モデルフィールドの 3次元比抵抗構造、レーダ反射断面、原位置比抵抗計測値等と、地盤構造（砂、粘土等）、油分汚染分布とを比較し、油分汚染の効果的な調査手法を検討した。

a) ダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測

各種センサーの附属したプローブを地盤に静的貫入あるいは打撃貫入しながら、地盤の物性を計測する。本研究では、地盤の電気伝導度（EC）を計測するプローブ、および、油分の蛍光反応を利用し、直接油汚染を検知可能な蛍光反応型検出（FFD）プローブを用いた。計測例を図 4 に示す。A3 地点および A5 地点では、EC と FFD の変化が良く対応している。一方で、A12 地点では、FFD と EC との相関は明瞭ではない。油汚染土壌では、油系炭化水素の経年的な微生物的分解によって土壌間隙水中の TDS（総溶解固形物）が増加し、EC も増加すると言われている。A3、A5 地点の EC と FFD の相関はそのような過程が進行した結果と思われる。

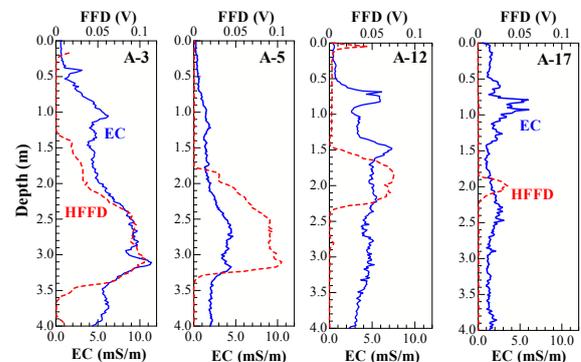


図 4：4 地点における電気伝導度と FFD 値の深度分布（場所は図 5 参照）。

b) 電磁マッピング

電磁マッピングデータの例として、周波数 29kHz の離相成分データを平面図で示す（図 5）。概略的にはタンク跡地周辺の地盤はその周りよりも比抵抗が高く、土壌サンプルの TPH 濃度が高い地点（赤△）は、その中にあってもやや比抵抗が低い領域に分布しているように見える。

c) 地中レーダ探査

3次元地中レーダ探査によって得られたレーダ反射強度の深度スライスを図 6 に、断面図を図 7 に示す。深度 1.07m では、貯槽タンク跡に対応する円

形の反射強度異常が見える。深度 1.92m では、タンク跡の内部に強い反射面が見える。断面図には、地下水面に相当すると考えられる深さ約 1m と、深さ約 2m に連続的な反射面が見える。後者については、簡易ボーリングで油分汚染の上面が確認された深度に対応している。

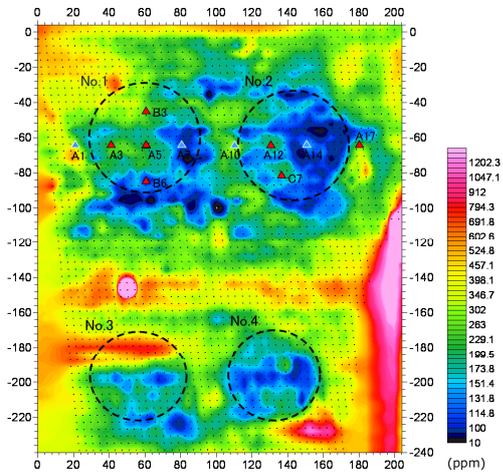


図 5: 電磁マッピング取得データ (29kHz の離相成分) 平面図。値が小さい (青色系) ほど高比抵抗である。丸い破線は貯槽タンク跡、三角はダイレクトプッシュ計測位置で、赤三角の地点は TPH 濃度が 1000mg/kg 以上。

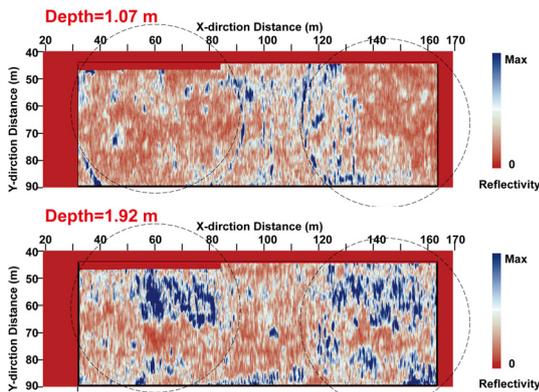


図 6: 3次元処理による地中レーダ反射強度深度図。探查範囲は、図 5 の上側のタンク跡地 2 基付近に相当。

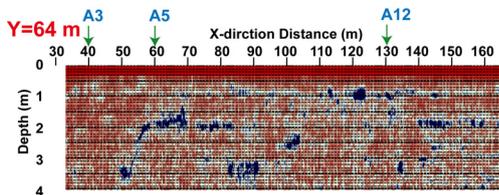


図 7: 3次元処理による地中レーダ反射強度断面図

d) X線 CT 計測

採取した土壌コアサンプルを用い X 線 CT 計測を実施した。使用した X 線 CT 装置は、医療用 CT とマイクロフォーカス CT である。前者は X 線量が大きく、コアを開封せずにそのまま 3 次元イメージングが行える。後者は空間分解能が約 2 桁優るが、X 線量が小さいので、コアを整形し 1cm³ 程度の小さい容器に収めてから計測を行う必要がある。図 8 は、名

目深度 0~1m (実長 72cm) のコアをそのまま医療用 CT で計測し、3 次元データを長手方向に断面をとった画像である。カメラ画像と比較すると、名目深度 0~50cm にはレキ (赤い画素) が分布することがわかる。また、地表付近の不飽和帯から深度 1m 付近の飽和帯にむけての体積含水率の上昇を、土壌のマトリックス部分の CT 数の増加 (図では緑から黄色の変化) として検出できた。なお、この深度には油分汚染は見られない。

マイクロフォーカス CT 画像の例を図 9 に示す。空気の画素 (青) と間隙水の画素 (緑) は明瞭に識別でき、CT 画像から空隙率を求めることができる。モデルフィールドは全般に砂質層で構成されるが、このサンプルは不飽和帯からのものであり、深部の飽和帯のサンプルの CT 画像と比較すると、飽和帯の体積含水率は、不飽和帯のそれより約 30% 高いことがわかった。

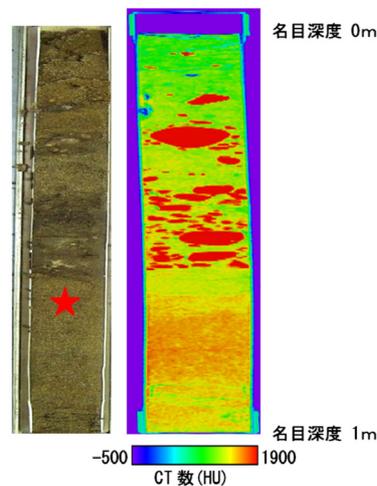


図 8: 地表から名目深度 1m までの区間の土壌コア (円筒形のプラスチック製コアケースの内径は 42mm) のデジタルカメラ写真 (左) と X 線 CT 画像 (画素値は Hounsfield Unit, HU)。

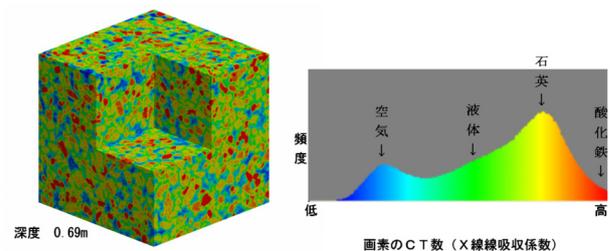


図 9: 図 8 の星印の場所から整形した試料のマイクロフォーカス X 線 CT 画像。一辺 5.1mm の立方体で、画素の大きさは約 10 ミクロン。色は CT 数の大小を表し、右図は CT 数のヒストグラム。

3) 浅部地質環境評価

a) 地盤液状化の比抵抗モニタリング

地盤の液状化リスク評価に資するため、液状化現象を物理的にモニタリングする技術について研究開発を行っている。液状化は数分から数十分と比較的短時間に生じる現象であり、連続かつ高速なモニタリングが行える手法が不可欠である。近年、受信チャンネルを複数有する電気探査装置や複数の電流電極から同時に送信するマルチ送信型探査装置などが開発され、高速なデータ取得が可能となっている。

本研究では、北海道の石狩湾新港で実施された大規模な発破液状化実験において、その一部のエリアを対象に2次元電気探査による繰り返し比抵抗モニタリングを実施した。実験場は港湾の埋立地であり、砂質土で構成される。深度 4m 以上は飽和ゾーンであり、低比抵抗を示す。発破後、6分から16時間の間に8回の計測を行った。発破前の比抵抗からの変化量の分布を図10に示す。発破直後から、深度4mを中心とする領域で比抵抗が減少し、発破後16分までその傾向が続いた。これは、液状化によって下部から水が上昇し、水飽和度が大きくなったことによると思われる。その後、深度4m以深では比抵抗が増加し、3時間後には、比抵抗はほとんど変化しなくなった。この比抵抗増加は、地盤が間隙水を排出して圧縮され、間隙率が小さくなったことによると考えられる。

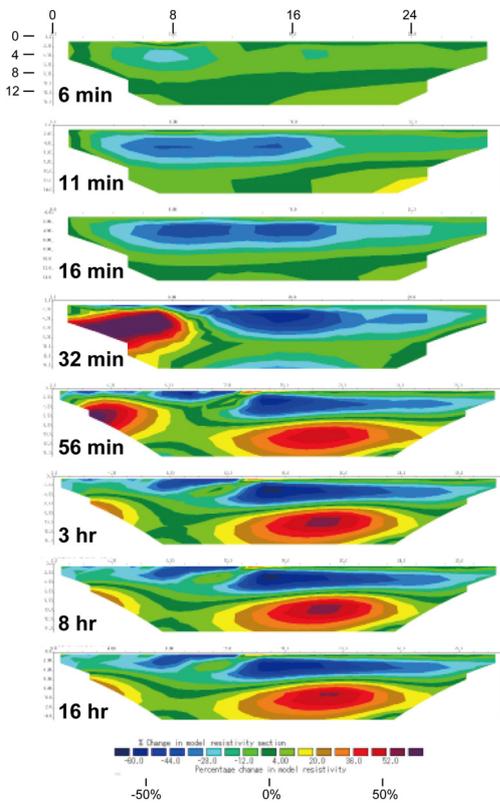


図10：発破後の比抵抗断面。発破前の比抵抗断面からの変化量(%)で表示。左の数字は発破後の経過時間。

4) 海域における物理探査適用

a) 海底地形を考慮した汎用3次元電気探査順解析
 海底熱水鉱床等の探査を念頭に、海底下浅部の比抵抗探査を目的とした海底電気探査法について、3次元解析手法の研究を実施した。特に、浅海と深海の両方に対応する汎用性と、地下構造だけでなく海底地形についても3次元性を考慮できるように、有限要素法を用いた順解析計算プログラムを作成し、精度検証を行った。海底地形を含むモデリングによる電位分布計算例を図11に示す。これらを用い、効率的な海底電気探査法の適用方法について検討を進めている。

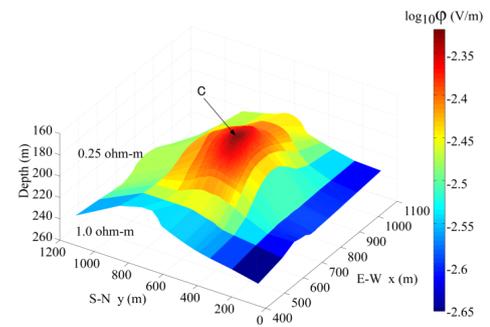


図11：海底電流電極Cによる電位分布計算例

5) 物理探査技術の基盤的研究

a) 電気・電磁探査 3次元数値解析における連立方程式求解の高速・効率化

電磁探査法の3次元数値解析手法は、その計算精度、コストの問題から依然として研究途上にあり、実用的なデータ解析のためには、さらに計算の高精度化、高速化が求められている。本研究では、計算コストに大きな影響を与える線形連立方程式の求解について、計算工学分野の成果である汎用連立方程式求解ライブラリ Lis の電気・電磁探査法数値解析分野へ適用とその効果を検討した。MT法3次元モデリングに用いた差分法構造モデルを図12に、また、各種ソルバを用いた場合の収束状況の比較を図13に示す。

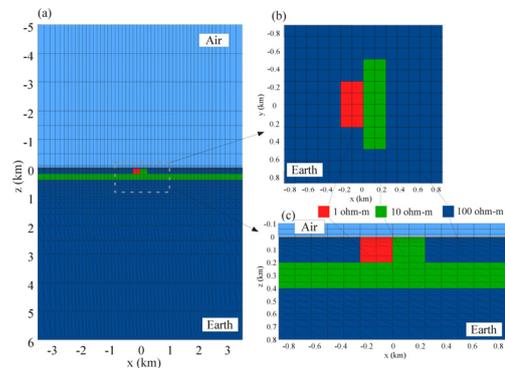


図12：差分法によるMT法モデリングの離散化メッシュと比抵抗構造モデル

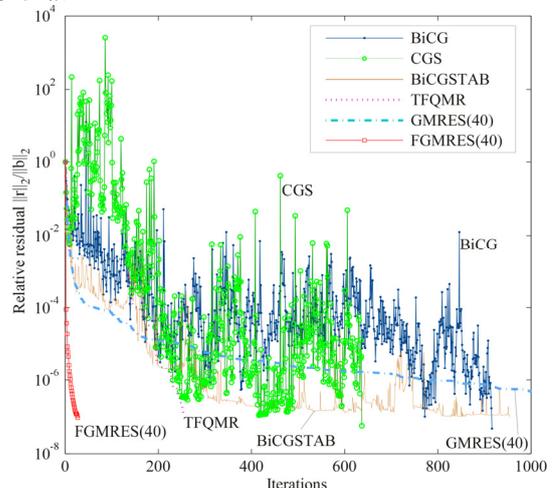


図13：ILU(0)前処理を用いた場合の各ソルバの求解反復状況