

## 物理探査研究グループ Exploration Geophysics Research Group

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

### 1. グループの研究目的

地熱・石油・金属等の資源探査、廃棄物処分場や人工構造物周辺の岩盤・地盤評価などでは、物理探査法を用いた物性の空間分布及び時間変化の高精度な把握が不可欠である。当研究グループでは、これらの分野における物理探査技術の高精度化を目指した測定・解析技術の研究開発、及び、関連する物性解釈手法の研究を行い、それらの成果普及に努める。地熱資源探査、メタンハイドレート探査、金属鉱床探査、放射性廃棄物地層処分場評価、土木・環境分野における地質環境評価などに関連する物理探査技術の研究開発を通じて、地震波データ及び電気・電磁気探査データの高精度解析手法の開発、NMR を用いた物理探査法、熱物性計測技術等の開発を行う。

### 2. グループの概要

#### 1) グループ員

内田利弘（リーダー）  
神宮司元治  
中島善人  
西澤 修  
松島 潤（石油公団出向中）  
光畑裕司  
横田俊之

#### 2) 平成 15 年度の研究テーマ

運営費交付金「高精度物理探査のためのデータ処理・解析技術の研究」  
運営費交付金・日本学術振興会日韓科学協力事業「深部地質環境評価のための電磁探査イメージング技術に関する共同研究（韓国）」  
原子力特研「地層処分場岩盤特性評価のための高分解能物理探査イメージング技術の研究」  
原子力特研「放射性廃棄物処分施設の長期安定型センシング技術に関する研究」  
文科省委託費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」  
RITE 委託費「キャップロックの長期安定性を評価するための岩盤の動的力学特性に関する実験的研究」  
ほか

### 3) 研究の概要

#### a) 地震探査データ解析

3次元散乱重合法における速度構造推定法の改良と微小地震探査データへの適用、全波形トモグラフィ解析手法の実測データへの適用、SWD 探査法の音響特性に関する基礎実験、不均質構造に起因する散乱波の除去法の検討を行う。また、CO<sub>2</sub> 地中貯留におけるキャップロック層の長期安定性評価に関わる実験的研究として、差応力状態にある頁岩において CO<sub>2</sub> の状態変化が力学物性変化に及ぼす影響を明らかにする。

#### b) 電磁探査データ解析

人工信号源電磁法 2.5次元インバージョン解析法の改良、MT法3次元モデリングにおける地形の考慮、MT法3次元インバージョン解析の精度向上を行う。また、人工信号源を用いる電磁探査法について、CSAMT法とLOTEM法を組み合わせた新しい測定・解析システムの開発に着手する。

#### c) NMR 物理探査法

拡散データを用いた NMR 物理探査による浸透率推定法の天然地質試料への適用と評価、可搬型 NMR 測定装置の開発等を行う。

#### d) 熱物性・液状化計測等

光ファイバを用いた熱物性量センサおよび高周波インピーダンスセンサの屋外実験、大型土槽における比抵抗を用いた相対密度分布計測法の検討、原位置における地盤液状化ポテンシャル評価手法の開発を行う。

### 3. 平成 15 年度の進捗状況

探査手法毎に研究の主な概要を以下に紹介する。

#### 1) 地震探査データ解析

##### a) 地震波全波形トモグラフィ

単一周波数成分を用いた周波数領域波形インバージョンで使用する周波数（波長）と再構成される構造スケールとの関係を、チェッカーボードレゾリューションを用いて視覚化した。チェッカーボードレゾリューションとは、背景モデルに対して格子状の微小な摂動を与え、インバージョンの感度を視覚的に表現する手法である。格子のサイズ  $\lambda_c$  と微小な摂動の量  $\epsilon$  が変数となる。格子サイズは地下の異常体のサイズを模していると考え

とができる。

まず、チェッカーボードの格子サイズを 8m、摂動量を 1%と固定し、インバージョンに使用する周波数(波長)を変化させることによって、使用した周波数と再構成された構造スケールの関係を確認した(図1)。波長がチェッカーボードの格子の4倍程度に長い場合には、チェッカーボードの格子とは無関係な模様再構成されることがわかる。波長が格子の2倍程度より短くなると、チェッカーボードのパターンを比較的正確に再構成することができるようになる。

次に、周波数を 300Hz(波長 10 m 相当)、摂動量を 1%と固定して、チェッカーボードの格子サイズを変化させた(図2)。この場合は、波長が格子の2倍程度となると再構成の信頼性が落ち始め、波長が格子の5倍となると急激に格子模様が再構成されなくなった。

以上の結果より、周波数領域波形インバージョンを用いた場合には、使用する波長の半分程度の異常体を識別する能力があることがわかる。これは、通常の走時トモグラフィに比較して優れている。その原因は、後続波形を有効に利用しているためであると結論することができる。

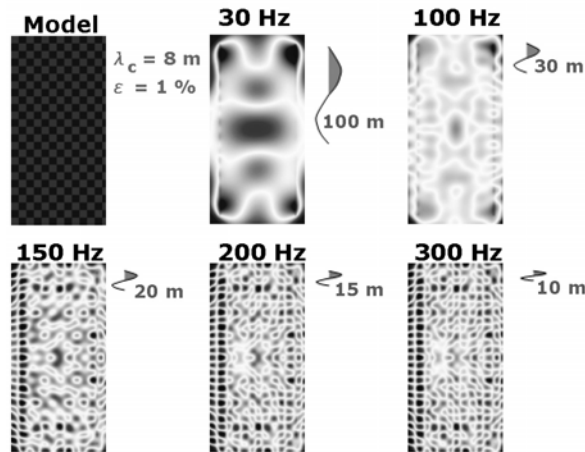


図1 全波形トモグラフィ解析の数値実験例。左上のパネルは数値実験に用いたチェッカーボード・モデル、その他のパネルは各々の周波数を用いた解析によって得られた速度構造モデル、右に信号の波長を示す。

## b) 不均質構造と弾性波速度異方性

CO<sub>2</sub> 地下貯留サイトの物理的モニタリング法として弾性波探査が有効と考えられているが、野外観測の結果を解釈するためには、岩石の割れ目に含まれる流体が弾性波に及ぼす影響を明らかにしなければならない。貯留層のキャップロックとしての頁岩は強い弾性波速度異方性を示すものが多く、割れ目中の流体の状態変化と地震波速度異方性変化との関係解明はモニタリング技術開発に役立つ。岩石自身が強い異方性を持つ場合に、割れ目の量と弾性波速度異方性の変化を実験で調べ、モデル計算と比較したものが図3である。左側が実験結果で封圧によって割れ目が閉鎖してゆくと

きの異方性変化が示されている。右側はモデル計算の結果を示しており、クラック量と弾性波速度との関係が示されている。実験で見られた異方性の特徴はモデル計算でも再現されている。弾性波速度異方性の計測により、地下の割れ目の変化や流体の状態変化を詳しく検出することができる。

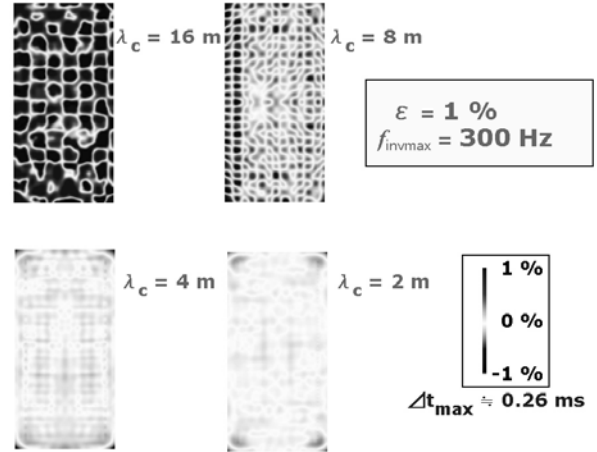


図2 全波形トモグラフィ解析における格子サイズの影響。周波数 300Hz の信号を用い、4通りの格子サイズについてインバージョン解析を行った。

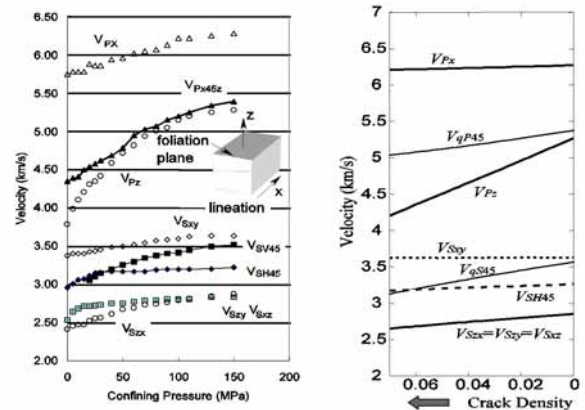


図3 強い異方性を有する岩石の弾性波速度と封圧の関係、(左) 実験結果、(右) モデル計算結果。封圧の上昇によって岩石中のクラックが閉鎖するので、弾性波速度が大きくなる(左図)。計算結果(右図)では左方向をクラック密度の増加方向とし、封圧の増加によるクラック閉鎖の方向と一致させている。モデル計算の結果は実験で見られた速度変化の傾向と一致する。

## 2) 電磁探査データ解析

### a) 地形を考慮した MT 法 3 次元モデリング

自然電磁場信号を利用する Magnetotelluric (MT) 法は地熱資源探査のみならず、火山・地震に関連した地殻構造調査、放射性廃棄物の地層処分に関連する広域地質構造調査等に利用されており、深さ数 10m から数 10km までの広い範囲を探査できる唯一の電磁探査手法である。MT 法のデータ解析

については、直方体要素を用いたスタガード差分法を用いたモデリング手法の開発を契機に、現在、3次元インバージョンが実用化されつつある。しかし、日本国内のような急峻な地形が存在する場合には、地形の影響を考慮したデータ解析が欠かせない。そのため今年度は、地形が滑らかに表現できるように、有限要素法(FEM)における変形ベクトル要素適用に関する理論的な研究を行った。そして、その結果に基づき、既に作成した FEM 3次元モデリング法プログラムについて変形ベクトル要素を基礎としたものに改良し、地形を組み込むことが可能な FEM 3次元モデリング法プログラムのプロトタイプを作成する予定である。

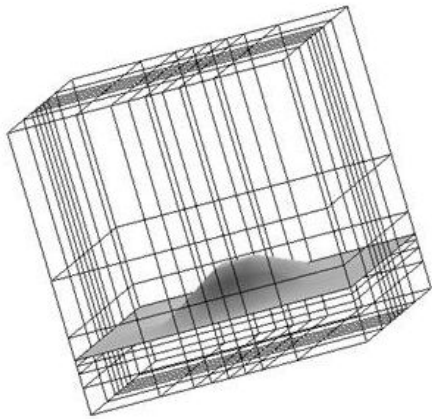


図4 変形ベクトル要素による地形表現の概念図。地形(青色部分)を6面体要素の面で近似する。

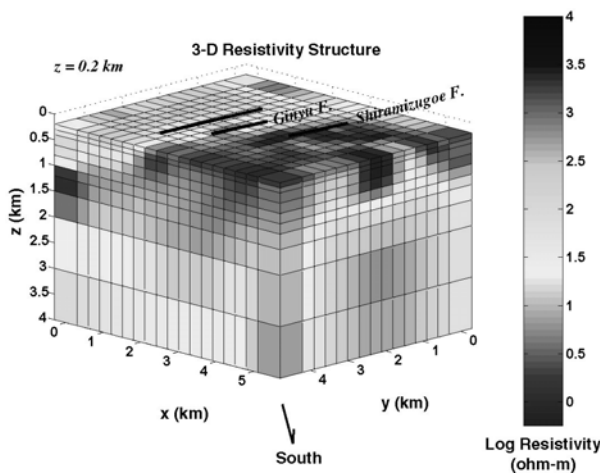


図5 大霧・白水越地熱における MT 法データの 3次元インバージョン結果。深度 200m までをばざ取った3次元比抵抗モデルを示す(南からの俯瞰)。当該地域の地熱貯留層を規制する銀湯断層と白水越断層に伴って、浅部には粘土変質帯に起因する低比抵抗異常が認められる。

な解析が行えるように改良を加え、日本および海外の地熱地域において取得された MT 法データに適用した。比抵抗モデルの最適な平滑化やスタティックシフト最小化の判定にはベイズ型情報量基準を用いている。いくつかの調査データに適用した結果、実用に十分供することのできるインバージョンを行えることを確認した。

大霧・白水越地熱地域で取得された約 160 測点の MT 法データの解析例を図5に示す。大量のデータに対するインバージョンであったが、安定な解析が行え、地質や検層データ等と比較しても妥当な比抵抗モデルが得られた。

### 3) NMR 物理探査法

NMR 物理探査による透水係数推定手法の地質試料への応用、粘土の NMR 物性の計算機シミュレーション、自主開発 NMR 物理探査装置のコイルユニットの改良を行った。そのうち、透水係数推定手法に関して以下に詳述する。ランダムウォークを計測対象にした NMR 物理探査による透水係数推定手法に関する特許を、平成 14 年に出願した。この手法が天然の地質試料にどの程度の精度で応用できるかを調べるために、多孔質天然地質試料に応用した(図6、図7)。図6のCT解析画像を用いてランダムウォークする間隙水の計算機シミュレーションを行い(図7)、屈曲度、比表面積および空隙率を推定し、それを特許出願中の理論式に代入して、透水係数を  $2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  と推定した。これは、実測値  $4.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  と 40%しか変わらない数値である。今回は CT データを用いたが、ランダムウォークデータは NMR 物理探査でも計測可能な量であり、したがって、今回のシミュレーションは本手法の天然地質試料への適用が有効であることを示唆している。

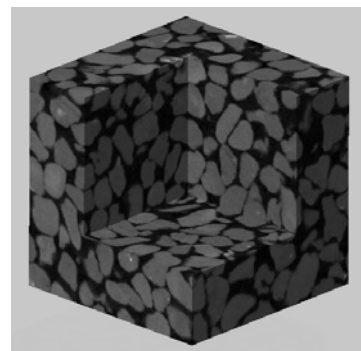


図6 鹿児島産の砂層堆積物(粒径約1mm)の3次元 X線 CT 画像。画像全体のサイズは、 $256^3$  画素 =  $7.3^3 \text{ mm}^3$ 。空隙部分は X線の吸収がほとんどないので、画素の輝度は暗くなっている。

### b) MT 法 3次元インバージョンの適用

フォワード計算に差分法を用いる MT 法 3次元インバージョンについて、大きなノイズや未知のスタティックシフトを含む実測データについても安定

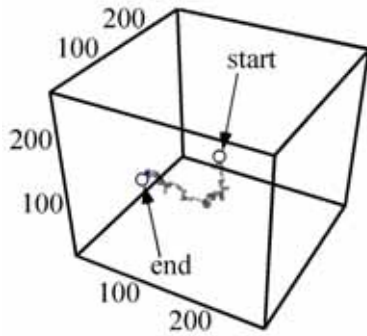


図7 5000ステップにわたるランダムウォークの3次元軌跡の例。図6の空隙が水で満たされていると仮定して、水分子のランダムウォークシミュレーションを行った。始点と終点の位置を矢印で表示している。

#### 4) 熱物性・液状化計測等

##### a) 原位置熱物性量分布計測法

地中熱利用施設の設計および環境影響評価を行うためには、対象地区の熱伝導率および熱拡散率等の熱物性量値の計測が重要である。これらの熱物性値は含水率などの地質環境に大きな影響を受けるため、原位置での計測が必要であり、本研究では、貫入試験装置を用いた計測手法についての検討を行っている（図8）。

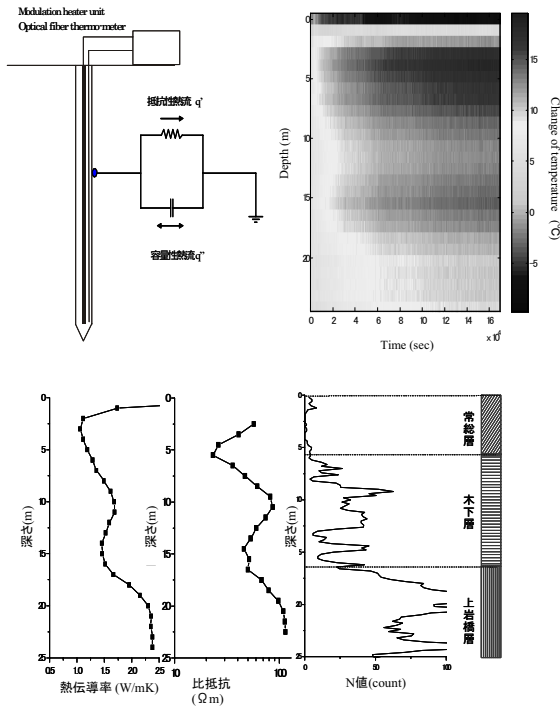


図8 原位置熱物性計測の計測例。本計測では、貫入プローブを地中に打ち込み、定常周期熱流をプローブに加え、その温度応答を光ファイバー温度センサで計測する。下の図は産総研敷地内で計測を行った地盤の熱伝導率、比抵抗、N値の計測結果である。それぞれの結果は調和的で地層の種類に応じて物性量の対比がよく現れている。

##### b) 比抵抗振動貫入試験による液状化ポテンシャルの評価

砂層の液状化ポテンシャル評価は、液状化発生の予測および被害評価を行う上で重要である。本研究では、簡易な振動貫入プローブを用い、砂層を加振した際の比抵抗および間隙水圧の挙動から砂層の液状化ポテンシャルを評価する計測手法の開発を行っている（図9）。

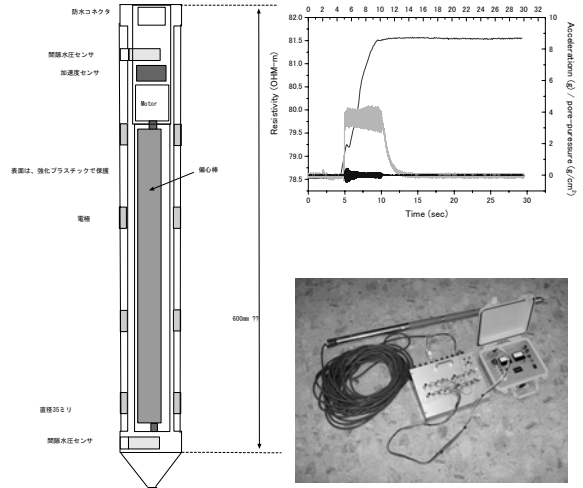


図9 比抵抗振動貫入プローブの模式図と計測システムの写真。右上の図は、室内実験で得られた加速度-間隙水圧-比抵抗の変化を示す。加振とともに間隙水圧および比抵抗が上昇し、プローブ周囲の砂層が液状化状態に至っているのが分かる。これらの挙動から砂層の液状化ポテンシャルの評価を行う。

#### 4. 期待される成果

物理探査データ解析法の高度化として、地震探査3次元重合前時間マイグレーションの実用化、地震トモグラフィ全波形解析法の高精度化、不均質構造による地震波形擾乱の解明、電磁気探査データの2.5次元、3次元解析法の開発、NMRの岩盤透水性評価への適用法の確立等を行う。また、地層処分場の岩盤評価・モニタリングや人工地中構造物周辺の地盤評価において重要な比抵抗、熱物性等のパラメタ分布の計測、液状化ポテンシャルの評価手法の開発を行う。さらに、これらの探査技術の産業界、学界への普及のほか、海外との技術交流・普及を進める。

(参考) 本研究グループの研究の詳細については、<http://unit.aist.go.jp/georesenv/explogeo/> をご覧下さい。