

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

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

1. グループの研究目的

石油・メタンハイドレート・地熱等の資源探査、廃棄物地層処分場や CO₂ 地中隔離等における岩盤・地盤評価、地下水・土壌環境評価などにおいては、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。放射性廃棄物地層処分場の岩盤評価、土木・環境分野における地質環境評価、メタンハイドレート探査、地熱資源探査などに関連する物理探査技術の研究を通じて、地震波・電磁気探査データの高精度解析手法の開発、熱物性等の原位置計測技術の開発、および、NMR を用いた物理探査法の開発を行う。

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

光畑裕司

横田俊之

齊藤竜彦(JSPS 客員研究員)

Hyoung Seok Kwon(JSPS 国際客員研究員)

2) 平成 16 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」

産総研内部グラント「加振に対する地盤の電氣的応答を利用した動力学的強度計測手法の開発」

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」

ほか

3) 研究の概要

a) 地震探査データ解析

地震波 3 次元散乱重合法の速度構造推定法の改良と高精度化、全波形トモグラフィ解析の実データへ

の適用、掘削音を震源とする SWD 探査法について震源周波数特性の把握、地中レーダのデータ処理に関する基礎的研究を行う。また、弾性波速度変化モデリング、岩石試料を用いた波動伝播実験を行い、地下構造イメージング精度向上のための波形ゆらぎの解析と、統計的手法による既存解析技術の改良を行う。

b) 電磁探査データ解析

人工信号源電磁法の探査測定システム試作装置による実験とデータ処理ソフト開発、人工信号源電磁法 2.5 次元解析法の改良、MT 法 3 次元モデリングにおける地形の考慮とマルチグリッド法適用による高速化、MT 法 3 次元インバージョン解析の精度向上を行う。また、浅部電磁プロファイリング法の適用実験とデータ解析法を開発する。

c) NMR 物理探査法

原位置計測用 NMR ペネトレータの試作、自主開発の可搬型 NMR 測定装置の動作実験、掘削泥の NMR 物性データ解析に基づく NMR 検層の適用性評価、液状化砂層の CT 画像を用いた地層係数の解析プログラムの開発を行う。

d) 熱物性・液状化原位置計測等

これまでに開発した光ファイバー熱物性量センサの計測値の精度検証、含水量計測のための誘電率探査装置の試作を行う。また、液状化地盤評価のための貫入型振動プローブの試作と適用実験を行う。

3. 平成 16 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) パーカッションドリル SWD

土木分野で一般的に用いられるパーカッションドリルを用いた Seismic while drilling (SWD) に関する研究を行った。掘削時にパーカッションドリルから発生する弾性波は非常に単一周波数に偏っている(時間領域で見るとおおよそ連続サイン波形)。震源波形がそのような特徴を持つ場合には、反射法の基本となる相互相関法による震源波形の抽出がうまく行えず、相関後の波形にも強い周期性が残る。したがって、震源周波数を広帯域化することがパーカッションドリル SWD 開発の大きな課題である。本年度は基礎実験を行い、通常のパーカッションドリルから放出される弾性波の性状を把握するとともに、広帯域化のため、掘削オペレータが手動で

制御可能な掘削パラメータを検討した。

図 1 に実験に用いた掘削パラメータを示す。通常のパーカッション掘削では、掘削が安定した後は、ほぼ一定の周波数出力が得られる。今回の実験では 2 種類の広帯域化を試みた。まず、定常的掘削のオン・オフを繰り返す手法を試した。この手法は、全体のメカニズムが単純であるため、将来坑底駆動型のパーカッションドリルを設計する際に設計が容易であるというメリットがある。次の手法は、パイプロサイスのスイープ信号を模した掘削方法であり、最も出力周波数の広帯域化が可能である。

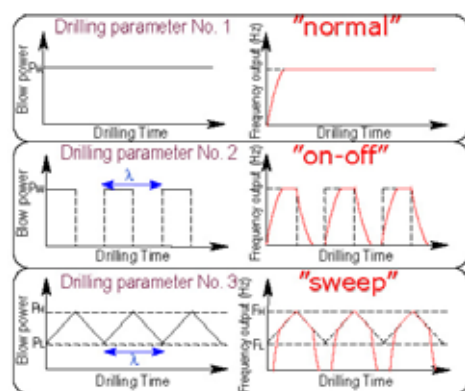


図 1: 実験に用いた 3 種類の掘削パラメータ。左側に掘削経過時間とパーカッションドリルの打撃力の関係を、右側に掘削経過時間と、予想される周波数出力(実線)をプロットした。掘削パラメータ 1 が通常のパーカッションドリリングに相当する。掘削パラメータ 2 は、掘削オペレータが掘削スイッチのオン・オフを繰り返した掘削方法である。掘削パラメータ 3 はパイプロサイスのスイープ信号を模した掘削方法であり、掘削オペレータが打撃圧を制御するハンドルを手動で制御することにより行った。

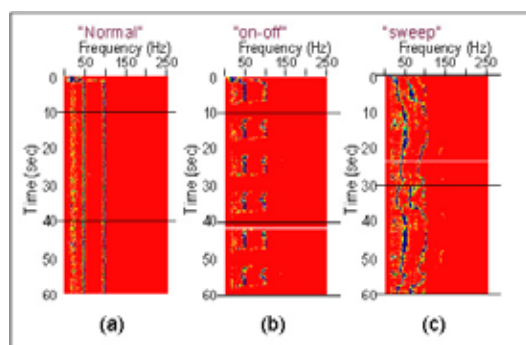


図 2: 出力振動の周波数成分の時間変化を 3 種類の掘削パラメータ毎に表示したもの。(a)通常のパーカッション掘削、(b)掘削スイッチのオン・オフを繰り返したもの、(c)パイプロサイスのスイープ信号を模したもの。

以上の 3 つのパラメータで掘削された際に発生する掘削振動の上下動成分を 5 メートル離れた地点で観測し、その周波数成分の時間変化をプロットしたものが図 2 である。この実験におけるパーカッション掘削による定格打撃数は 1 秒間に 49 回であった。通常掘削では打撃間隔に相当する 49Hz と倍振動である 98Hz の信号が卓越し、その他の周波数成分のエネルギーがほとんどないことがわかる (図 2a)。掘削パラメ

ータ 2 では、震源が安定するまでの時間と、震源が完全に停止するまでの時間に周波数変化が見られるものの、全体としては 49Hz と 98Hz が卓越し、効果的に周波数を広げるためには、もっと頻繁に掘削スイッチのオン・オフを繰り返す必要があることがわかる (図 2b)。それに比較すると、図 2c に示したスイープ掘削では、周波数成分が広がっていることが明らかであり、全体として 20-100Hz の周波数帯で十分なエネルギーを有することがわかる。

b) 散乱重合法

繰り返し反射法地震探査法を用いて地下の物性変動を検出するためのデータ処理技術を開発することを目的とし、散乱重合法(重合前時間マイグレーション処理)の改変ならびにその適用性を評価した。

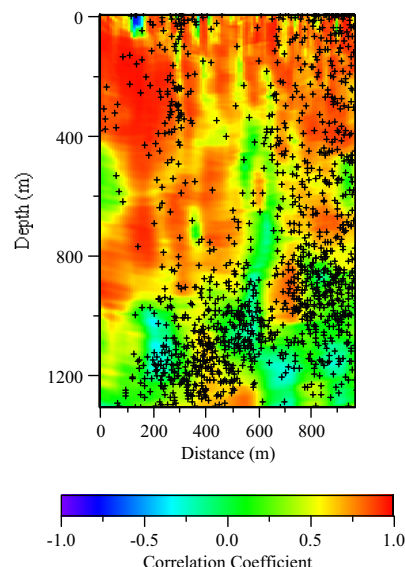


図 3: 葛根田地熱地帯において地熱井シャットイン前後に取得された繰り返し反射法地震探査データに対する散乱重合断面同士の相関係数マップ(カラーコンター)と微小地震分布。相関係数の小さい領域が熱水の相変化領域を示し、この領域が亀裂帯を示唆する微小地震の高密度域と一致している。

繰り返し反射法地震探査データに対する散乱重合法処理として、以下に述べる手法の改変を実施した。一般的に繰り返し反射法地震探査により取得される複数回データから、各回における地震探査断面を作成するためには、各回においてイメージングを最適化する速度(重合速度)を決定する必要がある。しかし、データ品質が良好でないデータにおいてはこの作業は容易ではない。そこで、複数の均質速度を用いて得られる散乱重合断面を重ね合わせることで最終断面を得る方法を採用し、速度決定誤差の影響を受けない散乱重合法を提案した。この手法の有効性を数値実験により検証し、さらに葛根田地熱地帯における繰り返し反射法地震探査データに適用した結果、散乱重合断面で抽出された変動領域が地下の亀裂帯と密接に関係のある微小地震分布と一致していることを見だし、変動領域が熱水の層変化であることを指摘した(図 3)。以上の一連の研究については

国際誌に掲載された。

c) CO₂ 地中貯留と弾性波速度異方性

CO₂ の地層貯留には、上部に浸透率の小さいキャップロック層を有する帯水層が適している。キャップロックの CO₂ シール能力が長期にわたり安定であるか否かは、CO₂ 地層貯留の重要な問題である。頁岩のように細かい鉱物粒子が密に詰まった岩石は、理想的なキャップロックになると考えられている。頁岩の微細構造は異方性を有し、弾性波速度も異方性を示すので、岩石中の割れ目などの微細構造に変化が生じれば、これが弾性波速度異方性に影響を及ぼし、弾性波速度異方性の変化からキャップロックの変化を予測することができる。

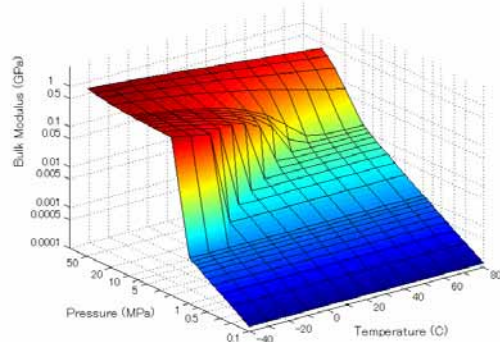


図 4: CO₂ の体積弾性率の温度、圧力依存性

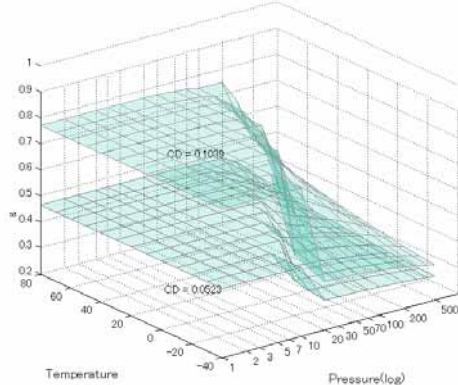


図 5: 頁岩の縦波速度異方性の温度、圧力依存性

CO₂ は地下の温度・圧力条件下で、液体、気体、超臨界状態の三つの異なった相を形成する。また、条件によっては水の中でハイドレートを形成することもあり、空隙の物性を極端に変化させる。こうした状態変化は地震波の速度や減衰に影響を与えるが、とりわけ岩石の異方性への影響は顕著であると考えられる。そこで、異方性クラックモデルによって CO₂ の状態変化と頁岩の異方性変化との関係を予測した。図 4 は CO₂ の体積弾性率の温度・圧力への依存性を示す。高压・低温では液体で値が大きく、低压・高温では気体で値が小さくなる。図 5 は水平方向と鉛直方向の縦波速度の比を温度・圧力に対して示したものである。2 枚の面はクラックの量に対応しており、値が小さいほどクラックの量が多い。この図から、異方性の変化が岩石の割れ目内部の CO₂ の状態変化に対応していることが読み

取れる。以上の結果から、弾性波速度異方性変化は、CO₂ 地下貯留層上部のキャップロックの状態をモニタリングするのに有望であることがわかる。

2) 電磁探査データ解析

a) 地質環境評価のための電磁探査法開発

放射性廃棄物地層処分場の適地選定に必要となる地質構造調査・岩盤評価を目的に従来の電磁探査法の CSAMT 法と LOTEM 法を組み合わせたハイブリッド人工信号源電磁探査法システムプロトタイプの開発を実施した(図 6)。また沿岸地域帯水層への塩水浸入域調査を目的に、千葉県蓮沼地域と茨城県東海地域において電磁探査法適用実験を実施し、浸入領域を示唆する低比抵抗領域の存在を検出することができた。また、土壌・地下水汚染調査を目的とした電磁プロファイリング探査システムを導入し、システムの特性評価実験を実施し、問題点の把握を行った。

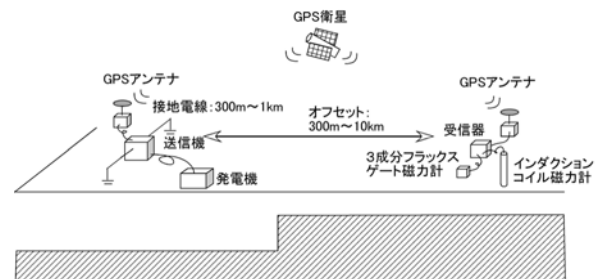


図 6: ハイブリッド人工信号源電磁探査測定システムの概念図。送信機より接地電線に正弦波形や休止波形の電流を送信すると、大地中の誘導電流が発生する。その電流が作る磁場を、GPS により時間同期された受信器により測定し、その観測値から地下の比抵抗構造を推定する。

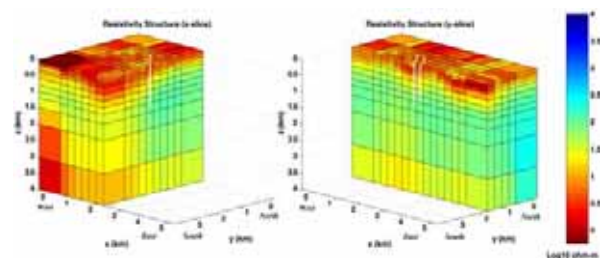


図 7: 韓国ポハン地域における MT 法データの 3 次元比抵抗モデル。x=2.25km(左)および y=1.65km(右)の面で切って表示した。浅部の低比抵抗層は新第三紀の泥岩に相当し、その下の高比抵抗層は主に白亜紀の砂岩・泥岩および新第三紀の貫入岩に相当する。白い線は KIGAM の掘削した坑井を表す。

b) MT 法 3 次元インバージョン

韓国南東部に位置するポハン地域(低エンタルピー地熱地域)において、韓国地質資源研究院(KIGAM)との共同研究として MT 法調査を実施した。韓国は地層が一般的に高比抵抗であり、人工的な電磁ノイズが国全域で非常に強い。そのため、九州南部に参照測点を設け、リモートリファレンス処理を行うことによって十分な品質を有するデータの取得に初めて成功した。そのデータに対し、昨年度までに改良を加えた MT 法 3 次元インバージョン

ン解析プログラムを適用し解析を行った(図 7)。調査地が海に近いところに位置するため、3 次元モデルに海水に相当する領域を組み入れ、その影響を解析に含めた。

3) NMR 物理探査法

オリジナルの可搬型 NMR 物理探査装置の開発と、NMR データ解釈のための地質試料の NMR 物性計測実験を行った。NMR 物理探査装置の開発に関しては、コイルユニットを NMR 分光器本体に装着して、硫酸銅水溶液サンプル(模擬地質試料)から NMR シグナルを計測することに成功した(図 8)。今後は、この装置のトンネル亀裂検出への応用を意識して、亀裂検出能力の向上を行う予定である(図 9)。NMR 物性計測実験については、掘削泥に使用する粘土ゲルのプロトン緩和時間・水拡散係数データ(NMR 検層データ解釈に必須の物性)の計測実験を行った。その結果、粘土鉱物表面の結合水の厚さの簡便な推定方法を開発したので国内特許出願した。



図 8: 現在開発中の NMR 物理探査装置。ワゴンに載った分光器本体(トランスミッターと制御用 PC を含む)と、永久磁石と rf コイルからなるセンサーユニットで構成されている。



図 9: NMR 物理探査装置によるトンネル壁の検査の概念図。磁石とコイルからなるセンサーユニットで壁をスキャンすると、壁の内部の含水亀裂中のプロトンから NMR シグナルを検出できる。

4) 熱物性・液状化原位置計測等

a) 比抵抗貫入振動試験 (ER-VPT) による砂層の動的評価手法の開発

地盤の液状化抵抗力の評価は、液状化対策や土木構造物の設計において重要であると考えられる。これまで、原位置における地盤の液状化抵抗を評価するためには、SPT(標準貫入試験)や CPT(コーン貫入試験)が用いられてきた。これらの手

法は、貫入抵抗により地盤の強度を評価する方法であるが、測定が比較的簡易であるため、幅広く利用されている。しかしながら、SPT や CPT は加振に対する直接的な地盤の応答を評価するものではない。そのため、原位置において直接地盤の動的応答を計測できれば、より高度な評価が可能になると考えられる。本研究では、振動機構を有する貫入プローブを地中に貫入させ、その加振に対する比抵抗などの動的な応答から地盤の動力学的な特性を評価する原位置計測技術の開発を行っている。昨年度末、試作したプローブを用いた原位置試験を実施し、砂層における比抵抗変化を計測することができた(図 10)。現在、より強力な振動プローブの開発を行っており、再度の原位置試験を実施する。

b) マルチウェーブトモグラフィ装置を用いた 3 次元電気探査に関する研究

地盤汚染をはじめとする様々な環境問題に対応するために、高分解能で高精度な物理探査手法が求められている。3 次元電気探査手法は、高分解能で地中の 3 次元比抵抗マッピングを行うことが可能であるが、3 次元探査における測定数および測定時間は膨大であり、現実的には高分解能な計測は困難である。この問題を解決するためには、より高速な測定が必要となるが、送信電極および受信電極を切り替える現状のスキューン方式では限界がある。本研究では、複数の送信電極から微小周波数差を持つ電気信号の同時発信を行い、同期検波によって個別の波形を分離するマルチウェーブトモグラフィ装置の開発を進めている。これまでに試作機の開発を終了し、実験室内でのテストによって実効性を確認した。今後、屋外での実験を行い、3 次元比抵抗探査の実証試験を行う。

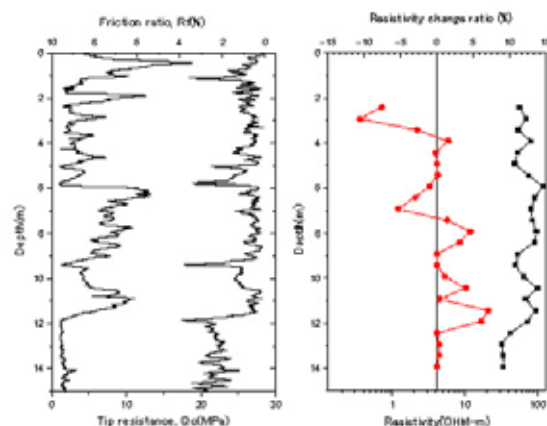


図 10: トルコのサファンジャ湖畔で行った CPT および ER-VPT 実験の結果。右図の黒■は比抵抗、赤●は比抵抗変化率の深度分布を示す。CPT により砂層と推定される深度では比抵抗値の変化が認められた。比抵抗値が変化していない深度の地層は、フリクション比が高く、CPT の分析の結果でも本地層が砂質シルト層および粘土質シルト層であると推定されている。

(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。