

物理探査 ニュース

2023 ハイライト



公益社団法人 物理探査学会
The Society of Exploration Geophysicists of Japan

目次

現場レポート(58号)	
ウクライナ地雷除去への国産センサ供与	1
わかりやすい物理探査(60号)	
重力探査 その1:重力、重力異常、重力測定	4
現場レポート(60号)	
家を建てています。	7
現場レポート(57号)	
能登沖でのOBEMによる電磁場観測(その1)	9
現場レポート(59号)	
能登沖OBEM観測(その2)	10
高校生のための物理探査入門&実践:(58号)	
出前講義@早稲田大学高等学院	11
研究の最前線(59号)	
独立型ハイドロフォンケーブルを用いた 音波探査手法による海底熱水鉱床探査置	13

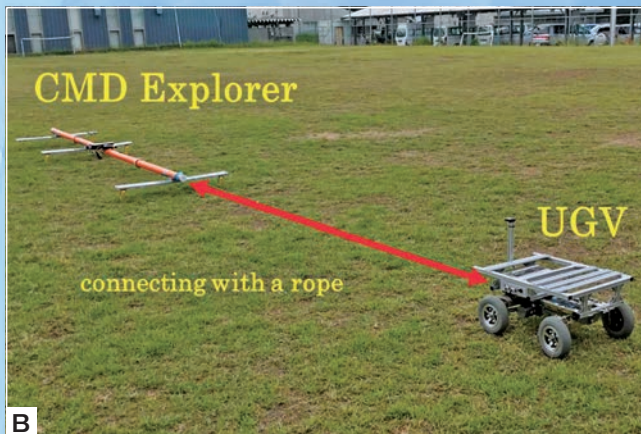
Geophysical Exploration News 2023 Highlights



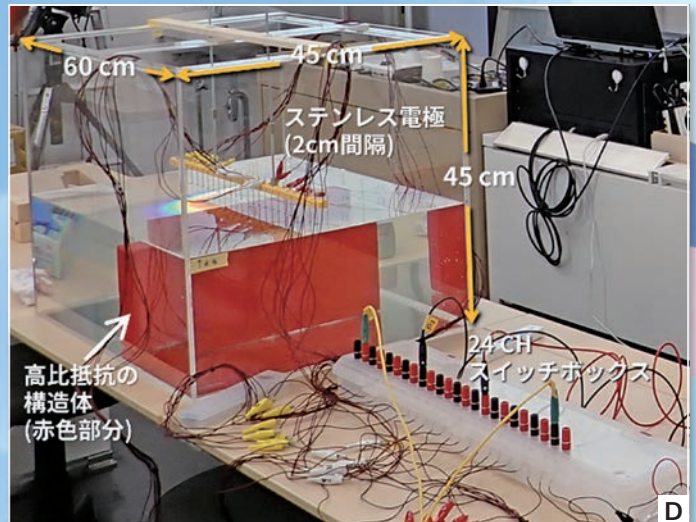
A



C



B



D

「物理探査ニュースハイライト」は、物理探査学会が年4回発行する「物理探査ニュース」の2023年分から代表的な記事を抜粋したものです。物理探査ニュースはどなたでも学会ホームページ(<https://www.segj.or.jp/>)からご覧になれます。

表紙写真説明

- (A) 創立75周年記念祝賀会 鈴木会長の挨拶
- (B) UGVEMシステム全体図(58号)
- (C) 地震計36台のハドルテスト(59号)
- (D) 電気探査実験の様子(58号)

ウクライナ地雷除去への国産センサ供与

東北大学 東北アジア研究センター 佐藤 源之



テストレーンで訓練を受けるウクライナ隊員 (JICA提供)



ALIS動作原理の説明 (JICA提供)



ALISのセンサ校正法の実技 (JICA提供)

1. はじめに

ウクライナ戦争勃発から1年経過したが、ロシア軍が撤退した後に残された地雷による被害が報告されている¹⁾。戦闘と無関係な一般市民に被害を及ぼす地雷に対する人道的地雷除去活動は1990年代からカンボジア、旧ユーゴスラビア諸国など紛争終結後の地雷被災国において、世界的に行われてきた。地雷除去には磁気探査、電磁探査、地中レーダなどの物理探査手法が活用されている。我々は人道的地雷除去用地雷検知センサ「ALIS: Advanced Landmine Imaging System」を開発し、実際の地雷除去活動に利用している。ALISの技術的な概要は物理探査ニュース(2023年3月)で紹介した²⁾。

我が国のウクライナ支援の一つとして、ALISを地雷除去に導入するプロジェクトがJICAによって開始された³⁾。2023年3月21日には岸田首相がキーウを訪問し、地雷除去分野での日本の支援を改めて強調したが、本報告では日本政府がウクライナに導入を計画しているALISの技術的な説明と、地雷被災国での展開について紹介する。

2. 人道的地雷除去

地雷除去は軍事目的と人道的の2つに分類され、その目的は大きく異なる。軍事的な地雷検知では地雷原を特定し、車両などの通過に障害となる地雷を除去することが目的であり地雷の検知確率は100%である必要が無く、作業の迅速性が追求される。一方人道的地雷除去は紛争終

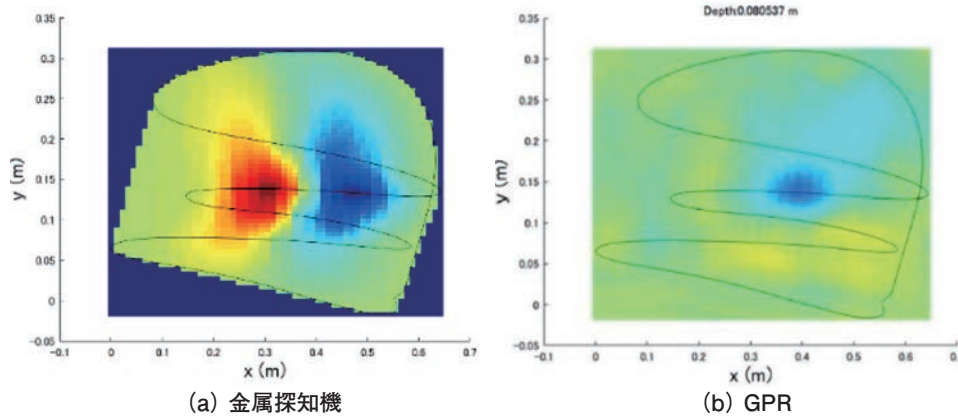


図1 ALISで取得したデータ画像
(Data ALIS #1 1544、PMN-2 depth=10cm Lane #4 acquired on 26 October 2018)

結後、戦闘が行われたことにより埋設されたまま残留した地雷を取り除くことで、その土地に住む一般市民の安全を保障することにある。地雷被災国では農地や牧草地、山林などでの地雷除去活動が多く、農民に農地、耕作地を返還することで農業活動を復活させ、経済活動を活性化することが最終的な目的である。従って人道的地雷除去は100%の検知・除去が行われなければ本質的な意味が無く、そのための作業時間は軍事的地雷除去に比べて圧倒的に長い。

人道的地雷除去の国連規則では地表面から13cmまでの金属物体はすべて取り除く事が基本となっている。しかし戦闘後の地域では葉莖や爆弾の破片など多くの金属片が土中に埋もれているため金属片と地雷をすべて検知、除去する作業は困難であり効率的な検知による作業時間の短縮が望まれている。

3. 地雷検知に用いられる物理探査技術

いわゆる地雷除去では不発弾、クラスター弾、対戦車地雷、対人地雷を検知対象とするが対人地雷以外は鉄製容器に爆薬が詰められているため磁気探査あるいは電磁探査での検知が適している。

対戦車地雷は直径50cmほどの鉄製で0.5~1m程度に埋設されるのに対し、対人地雷(プラスチック地雷)は直径10cm以下のプラスチック容器に爆薬が詰められ、数十グラム程度の金属製雷管で起爆する。対戦車地雷は磁気探査あるいは電磁探査で検知できるのに対し、対人地雷は雷管が非鉄金属であるため磁気探査は使えず、電磁探査も極めて高精度のセンサでしか検知できない。これに対して地中レーダはプラスチック容器からの電波反射を利用するので対人地雷検知に適している。

4. 地雷検知用デュアルセンサ

対人地雷の検知には主として電磁誘導センサ(金属探知

機)が利用されてきた。金属探知機は信頼性が高い反面、地雷に含まれる金属以外にも反応するため、掘削除去作業に膨大な時間がかかる。この問題を解決する手段として金属探知機に地中レーダ(GPR)を組み合わせた「デュアルセンサ」の開発が2000年頃より世界的に進められた。我々は2002年から、デュアルセンサALISの開発を開始した²⁾。ALISの最大の特長はGPR信号を合成開口レーダ処理(SAR、マイグレーション)により埋設物の画像化を行うことでクラッタの軽減を図る点にある。

ALISのGPRは800MHz-2.6GHzステップ周波数-連続波(SF-CW)レーダ方式を採用し、キャビティバックスパイラルアンテナを送受信アンテナとして円偏波を利用する。また3軸加速度計でアンテナ位置を追跡しながらGPRデータを取得し、3次元マイグレーションで地下埋設物を画像化するのが特徴である。ALISによる地雷検知ではまず金属探知機を利用して金属反応の有無を確認する。金属反応があった場合、GPRデータを取得する。1回のデータ取得はおおよそ50cm×50cmの範囲で行うが1分以内で終了する。データ取得が終わるとほぼ瞬時にデータは信号処理され、**図1**に示す2つの画像がタブレット端末画面に表示される。

5. 地雷被災国での実用化

東北大学ではALISをカンボジア地雷除去センター(CMAC)に貸与して2018年から試験を開始、2019年1月よりカンボジア国内の地雷原での利用が認められ、本格的な運用が始まった。

ALISの現場運用試験の成果に基づき、2023年2月に日本政府ODAとして12台のALISがCMACに供与された。今後更に本格的な運用が開始される。

一方、ボスニア・ヘルツェゴビナにおいてはボスニア連邦地雷除去組織、東北大学、オランダ応用科学研究所(TNO)が共同で組織するNATO SPSプロジェクト[4]においてALISの有効活用法を検討しており、4台のALISによる実



図2 SESU隊員に対するALISの運用訓練
(2023年1月 カンボジア CMAC施設)

地雷原における除去活動が開始されている。更に南米コロンビアでは2022年より科研費によるALISの試験運用を実施中である。

6. ウクライナのための活動と展望

ウクライナでは2014年3月のロシアによるクリミア半島併合、また東部ドンバス地方でのロシア軍との紛争が10年以上前から発生し、ロシア軍による地雷問題は既に顕在化していた⁵⁾。2022年2月のロシア軍ウクライナ侵攻後、新たにロシア軍が仕掛けた地雷による問題が明らかになり、ウクライナから我国に対しても地雷対策における支援要請が行われてきた。戦争中であるウクライナの地雷問題はこれまでの地雷被災国と様相が異なる。都市部に侵入したロシア軍が撤退の際に建物内部や、破壊したがれきの中に地雷を埋設するような復興を妨げる行為が報告されている。ALISは土だけ

で無く鉄筋を含むコンクリートの背後にある物体を可視化する能力をもつ。従来の金属探知機は鉄筋に反応するため役に立たない状況でもALISの活用が期待できる。ウクライナに対する軍事的支援が難しい日本にとって、非軍事活動である人道的地雷除去での貢献は極めて重要である。こうした背景からJICAは外務省と協力しながら2023年1月からウクライナへALISを導入するためのパイロットプロジェクトを開始した³⁾。ウクライナ現地での活動が難しいためウクライナ緊急事態省(SESU)地雷除去隊員(Deminer)8名をカンボジアに招聘し、2023年1月にALISの運用訓練を行った。

カンボジアでは2018年以来CMACがALISを実地雷原で稼働してきた実績があり、CMAC自体にALISの操作員を訓練するシステムができあがっていた。そこで、佐藤がカンボジアにおいて、ALIS導入の意義や技術的な特長をウクライナ隊員に説明した上で、CMACの教官と共にウクライナ隊員に対してALISの操作訓練を実施した。

2023年4月現在、ウクライナへの日本人の入国は厳しく制限されているため、佐藤は現地に赴くことは今のところ計画できない。そこでウクライナで地雷検知用GPRの研究を行ってきたウクライナ科学アカデミー-G. Pochanin博士をカンボジアに招聘し、土壌水分のTDRIによる計測とALISのマイグレーション処理でのパラメータ設定などについて技術情報を提供し、ウクライナ国内でのALIS運用の技術的な指導を委託した。またALISを用いた有効な地雷除去の運用方法を策定するため、オランダ応用科学研究機構(TNO)のA. Schoolderman博士にも参画いただいている。

現在4台のALISをウクライナで運用しているが、その結果を踏まえて2023年夏から台数を増強して本格運用を開始予定である。

【参考文献】

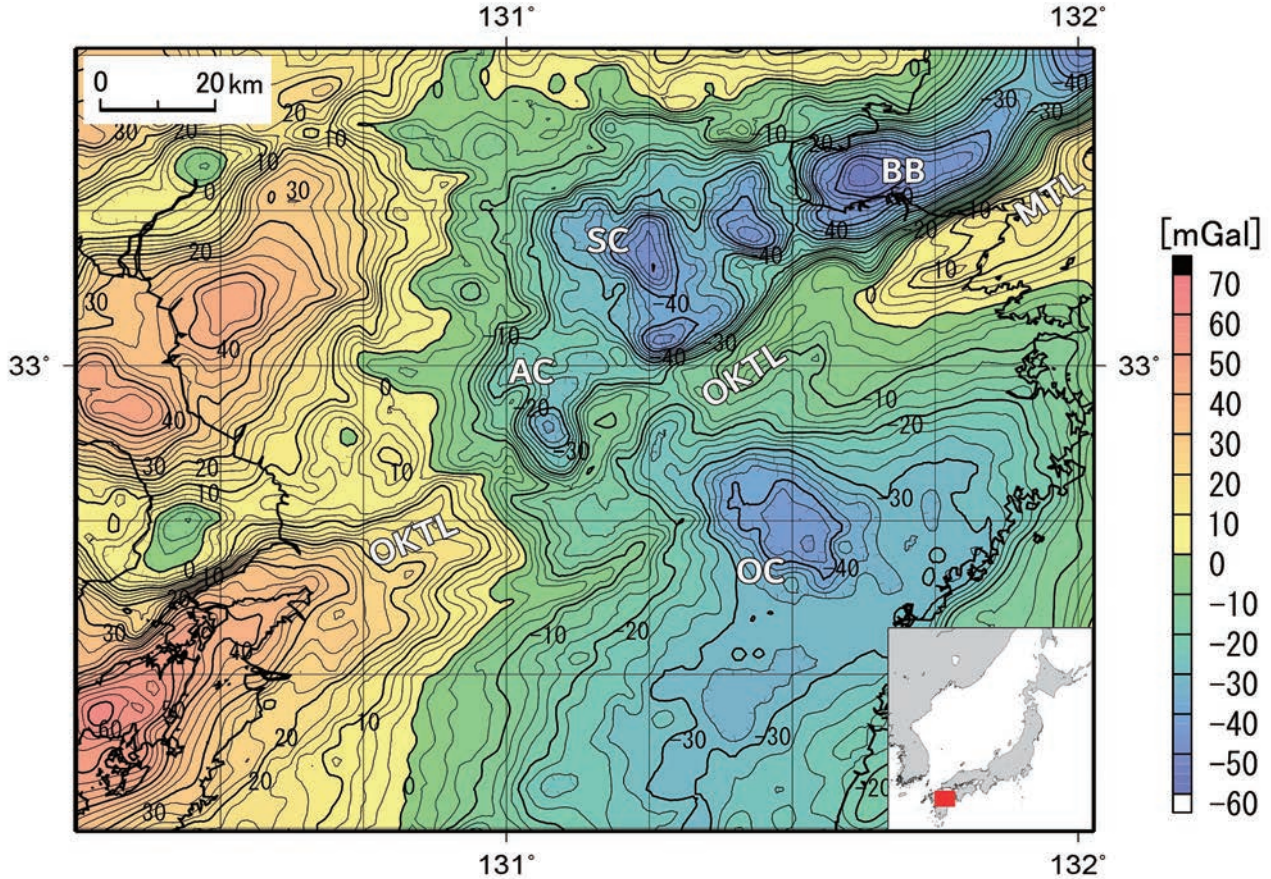
- 1) ロイター通信 / <https://jp.reuters.com/article/ukraine-crisis-mines-idJPKBN2UAOD2>
- 2) 佐藤 源之 わかりやすい物理探査 GPRその3: 地中レーダ信号の表示 物理探査ニュース No.57, 物理探査学会2023.
- 3) JICA / 日本の技術でウクライナ地雷除去へ! カンボジアで日本製の地雷探知機の研修を実施 https://www.jica.go.jp/topics/2022/20230303_01.html
- 4) NATO / Science for Peace and Security (SPS) <https://www.nato.int/cps/en/natohq/78209.htm>
- 5) T. Bechtel, et al., "A Survey of Electromagnetic Characteristics of Soils in the Donbass Region (Ukraine) for Evaluation of the Applicability of GPR and MD for Landmine Detection," Int. Conf. on GPR 2016, Hong Kong, July 2016.

物理探査 手法紹介

わかりやすい物理探査

重力探査 その1：重力、重力異常、重力測定

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 楠本 成寿



巻頭図 中部九州地域の一次傾向残差ブーゲー異常。地質調査総合センター(2013)のデータベースを利用して作成。
 AC：阿蘇カルデラ、SC：猪牟田カルデラ、BB：別府湾、MTL：中央構造線、OKTL：大分～熊本構造線、
 OC：大崩山コールドロン

1. はじめに

重力探査とは、重力異常を用いて地下の密度構造を推定する地下構造探査手法のことです。重力異常とは、大まかに言うと、重力測定値と理論重力値のずれのことです。理論重力値は、手芸用の発泡スチロール球のように核やマントルも無い均一な地球を仮定して求められています。したがって両者のずれは、均一な地球からのずれになります。重力異常にはフリーエア異常やブーゲー異常等、いくつか種類があります。物理探査では主にブーゲー異常が用いられています。

ブーゲー異常の解釈では、注目する異常が周囲に比べて大きいかわ小さいか、それらがどのような空間変化をしているかが重要になります。図1に示されるように、周囲よりも高密度物質が分布する場所ではブーゲー異常値は周囲より大きくなり(高重力異常)、周囲より低密度物質が分布する場所では周囲より小さくなります(低重力異常)。断層のように地下の密度構造が急変するところでは、ブーゲー異常値も大きく変化します。ブーゲー異常図には、それぞれの異常に対応した密度構造を直感的に頭に思い描くことができるという特性があります。

今回から4回にわたる重力探査の講座では、重力、重力異常、

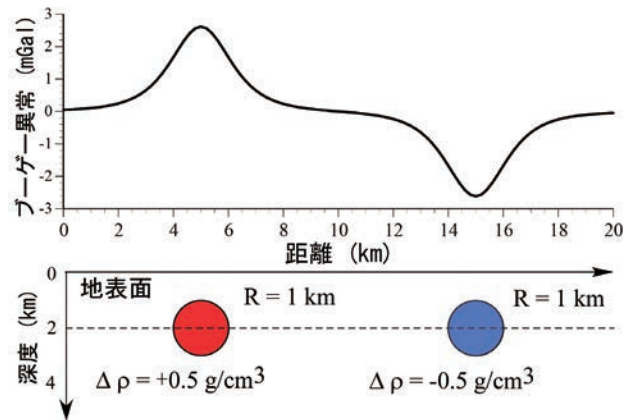


図1 地下構造とブーゲー異常の関係。地下2kmに半径1km、周囲との密度差±0.5g/cm³の横倒し円筒があるときのブーゲー異常。

重力測定手法、重力偏差、重力異常と重力偏差の関係、重力異常と重力偏差の定性解析と定量解析を話題にしていく予定です。

2. 重力

地球上で重力と言ったとき、それは地球上に静止した物体と地球の間に働く引力と地球の自転による遠心力の合力として定義されています。重力の測定は、最も精密な域に達した測定の一つで、19世紀末にはその計測精度は1mGal(ミリガル)に達していました。

ここに出てきたmGalのmは 10^{-3} を意味する接頭詞であり、Galが重力の単位になります。重力の単位は国際単位系(SI: *Système International d'unités*)では m/s^2 ですが、物理探査ではGal(ガル)が用いられています。Galはガリレオ・ガリレイ(Galileo Galilei)にちなんでおり、 $1Gal=1cm/s^2$ です。したがって地球上の大局的な重力値 $9.8m/s^2(=980cm/s^2)$ は、980Galとなります。上述のように、接頭詞mは 10^{-3} を意味しますので、 $1Gal=1000mGal$ であり、 $9.8m/s^2$ は980000mGalになります。重力探査では、 μ という接頭詞もよく出てきます。 μ は 10^{-6} であり、 $1mGal=1000\mu Gal$ です。

さて、地下構造探査のために重力が利用され始めたのは、20世紀に入ってからです。それ以前は地球の形状決定を目指した測地学分野で研究が進められました。実際、17世紀末から18世紀前半に起こった地球は縦長か横長かという国際的な議論では、赤道付近の重力は高緯度地域より小さいことが観測で判明し、ニュートン(I. Newton)が地球は扁平楕円体であると提唱したことが発端でした。

赤道付近の重力が小さいことは、重力測定を実施して判明したわけではありません。1672年にパリ天文台のリシェー(J. Richer)が、火星の視差の観測のためにパリから南米エクアドルの赤道に近いカイエンヌに向かいました。そのときパリから運んだ振り時計が一日に148秒遅れたようです。観測に支障が出るため正しい時刻を刻むよう、振子の長さを約3mm短くしました。観測を終えてカイエンヌからパリに戻ったところ、今度は一日に148秒進んだということです。気温差で振子の長さが3mmも変化するとは考えにくいので、時計の遅れと進みは重力の違いによるとの結論に至ったようです。

当時フランスでは、子午線1度あたりの弧長測量が行われており、地球は自転軸方向に長い扁平楕円体であると考えられていました。そこでこの地球の形状についての論争に終止符を打つために測量隊を組織し、測量を実施しました。その測量隊にはブーゲー異常で名を残すブーゲー(P. Bouguer)や、地球の扁平率 $(a-b)/a$ と重力扁平率 $(\gamma_P - \gamma_E)/\gamma_E$ (図2)の和は、赤道での遠心力と重力の比の5/2倍に等しいというクレローの定理の発見者として知られるクレロー(A. Clairaut)が参加していました。

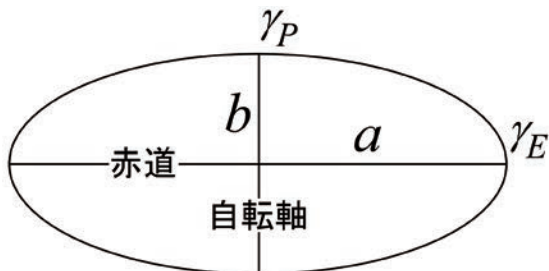


図2 楕円体の形状と重力。
a: 赤道半径、b: 極半径、 γ_E : 赤道での重力、 γ_P : 極での重力。

クレローの定理は、重力分布が分かれば地球の形状(扁平率)分かるという重要な定理で、世界中で重力測定が実施されるよ

うになりました。その後、地球の重力場の定義となる正規重力値を緯度の関数で与える国際重力式が1930年に与えられ、1967年には新しい測地基準系に対応した正規重力式が発表されました。これにより、精度の高い重力場研究の基礎がつけられました。現在は1980年の測地基準系に基づく正規重力式が用いられています。なお正規重力値とは、地球の質量と自転角速度、形状から数学的に導出される理論重力値のことです。正規重力値を与える正規重力式の導出には核やマントルといった地球の内部構造についての情報や仮定は入っていません。

このように、重力と地球の形には深いつながりがあり、20世紀後半に正規重力式が与えられました。

3. 重力異常

最初にも書きましたが、重力異常は大まかに言うと、重力測定値と理論重力値のずれのことです。重力探査では、重力異常としてブーゲー異常がよく用いられます。ブーゲー異常は、地表の点Pで得られた重力測定値 g (図3)に対し、正規重力の他に、重力測定点の高さの効果や地形の引力効果などを補正して得られるものです。なおここで重力測定値とは、重力計で測定した重力値に潮汐補正、ドリフト補正、機械高補正などを施したものとします。

正規重力の補正は、高さの効果の補正と一緒に行われます。地球の形状に最も近い回転楕円体を地球楕円体(以降、楕円体)といいます。正規重力は、楕円体面上で与えられます。測地学では楕円体面と海水準面(ジオイド)は区別され、両者のずれ量はジオイド高とよばれます。物理探査や地球物理学では測地学ほど厳密さを求めないため、海水準面と楕円体面は一致していると考えます。しかしながら、海水準面Q(図3(a))で与えられる正規重力を、標高 h に位置する点Pでの重力値 g と直接比較することはできません。そこで、標高が1m高くなると重力値は0.3086mGal小さくなることを利用して、点Qでの正規重力値を点Pでの値に換算し、観測値から引き去ります。これは

$$\Delta g_F = g - (g - \beta h) = g - g + \beta h$$

と表記されます。ここで β は正規重力の鉛直勾配であり、上述の0.3086mGal/mになります。この計算で得られる Δg_F のことをフリーエア異常といいます。フリーエア異常はアイソスタシーの研究などでよく用いられます。

次に、海水準面と点Pの間に存在する地殻物質による影響を除去する補正を行います(図3(b))。これはブーゲー補正と呼ばれ、 h に対して十分な広がりをもつ円筒の引力の鉛直成分 $2\pi G\rho h$ をもって、

$$\Delta g_{SB} = \Delta g_F - 2\pi G\rho h = g - g + \beta h - 2\pi G\rho h$$

という補正計算で行われます。ここで G は万有引力定数であり、 ρ は地殻物質の平均的な密度になります。密度 ρ は、「仮定密度」や「ブーゲー密度」とよばれます。ここまでの補正計算で得られる重力異常 Δg_{SB} のことを、単純ブーゲー異常といいます。

図3(b)をみると、ブーゲー補正では補正できていないところや、過剰に補正されているところがあります(図3(c))。これらの過不足を補う補正が、地形補正といわれるものです。補正量は地形の起伏に依存するため、補正に用いた密度 ρ と共に ρT と表記することが多く、以下のように表記されます。

$$\Delta g_B = \Delta g_{SB} + \rho h = g - g + \beta h - 2\pi G\rho h + \rho T$$

このようにして得られた重力異常 Δg_B のことをブーゲー異常と

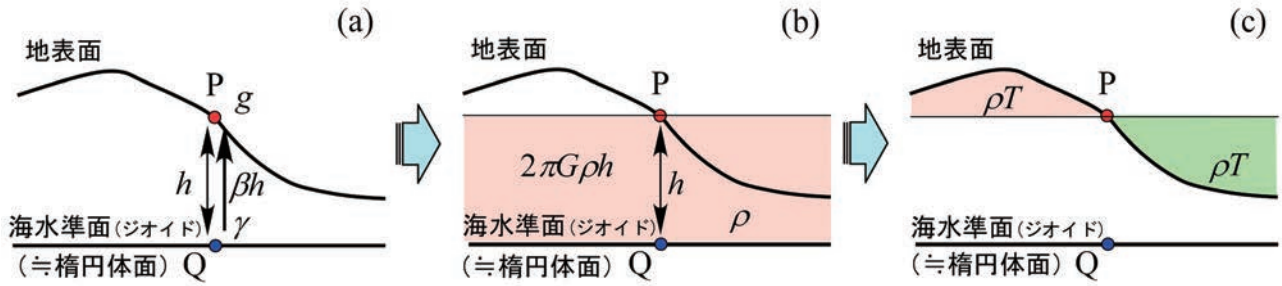


図3 重力補正。(a) フリーエア補正(フリーエア・リダクション)、(b) ブーゲー補正、(c) 地形補正

います。図3から分かるように、ブーゲー異常は、重力測定点Pで与えられます。

巻頭図は、ブーゲー密度を 2.67g/cm^3 として得られた中部九州周辺の一次傾向残差ブーゲー異常です。この図から、阿蘇カルデラ、猪牟田カルデラ、別府湾、中央構造線、大分-熊本構造線といった中部九州の火山活動やテクトニクスを考察する上で重要な構造を反映した低重力異常や重力異常の急勾配帯を見つけることができます。また大崩山コールドロン等に起因する低重力異常も認められます。

4. 重力測定

重力測定には絶対測定と相対測定の2種類があります。絶対測定とは、振子の周期や落体の運動から、重力値を直接測定することです。図4(a)は、Micro-g LaCoste社製のFG-5絶対重力計です。真空引きされた円筒内部で、自由落下方式による絶対測定が行われます。計測精度は $2\mu\text{Gal}$ に達しています。

一方、相対測定とは、ある地点Aの重力値に対し、別の地点Bの重力値はどれだけ異なるかを測定する方法のことです。今日の重力探査では、基本的に相対測定による重力測定が採用されています。図4(b)は、Scintrex社製CG-6重力計(オレンジ色)とLaCoste & Romberg社製G型重力計です。これらはスプリング式重力計であり、重錘を吊したスプリングの伸びを計測することで、フックの法則により重力の相対値を計測します。計測精度は双方の重力計とも、概ね $10\mu\text{Gal}$ です。相対測定は重力測定を精度良く能率的に実施できますが、絶対重力値の既知点を基準にしなければ、測定した重力値の絶対値を知ることができないという特徴があります。

図4に示した重力計は、主に陸域で重力測定を行う際に用いられる機器になりますが、重力測定は陸上だけでなく、海上や海中、海底、さらに空中でも実施されています。海底での重力測定は、陸上で使用する重力計を耐圧容器に入れて海底に着底させ、測定を実施します。海上や海中、空中での重力測定では、大

きな加速度が作用している移動体に専用の重力計を搭載して重力を測ります。そのため、移動体の運動に係わる補正(例えば、エトベス補正)などが必要になり、移動体の正確な位置情報も必要になります。

重力探査では、重力測定を実施する範囲や重力測定点間隔が重要です。ある深度の質点が地表につくる重力異常の範囲はその深度の3~4倍程度といわれており、重力測定の実施範囲を設定する際のひとつの目安となります。また重力測定間隔を狭くするほど浅部地下構造の情報を取得できるという特性があります。

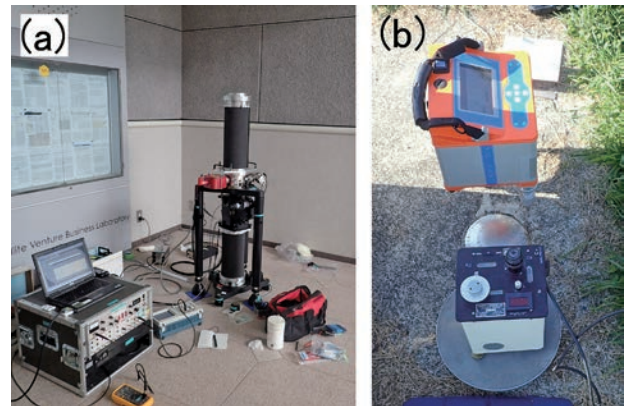


図4 絶対重力計と相対重力計。

(a) Micro-g LaCoste社製FG-5絶対重力計。

(b) Scintrex社製CG-6重力計(上: オレンジ色)とLaCoste & Romberg社製G型重力計(下: 黒)。

【引用文献】

地質調査総合センター(2013): 日本重力データベースDVD版, DVD-ROM P- 2.



家を建てています。

応用地質株式会社 櫻井 健

1. そろそろ家を建て替えますか？

今の家もそろそろ自分と同じくらいの年になるし、最近地震も多いので、建て替えですかね？ ということで、家を建て替えることになりました。いくつかの住宅メーカーを回り、ある工務店にお願いすることにしました。

契約の際に、地質調査の会社に勤めている旨を話したところ、「釈迦に説法かもしれませんが一応決まりですので」ということで、地盤調査について詳しく説明していただきました。なお、工務店の営業の方は、表面波探査の技術は知っていました。

2. 地盤調査

地盤調査はスウェーデン式サウンディング試験を行い、敷地内の5か所で実施しました。試験結果を見たことがない人もいるかもしれませんが、**図1**のようなものです。ユックリ、スルスルです。

地盤調査の結果、地盤改良工事が必要と判定されました。隣の新築工事でも柱状改良をしていたので、必要だとは思っていましたが、工法は、RES-P工法が採用されました。

込んでいくのですが、貫入だけなので施工が早いこと。一日で施工は終了しました。



図2 RES-P工法

7-1. スウェーデン式サウンディング試験											
調査名		櫻井		調査番号		5		備考			
調査場所		KBM +0.12 m		調査年月日		2022年02月26日					
孔口標高		KBM +0.12 m		最終貫入深さ		9.25 m					
孔内水位		孔内GL-2.00 m		天候		晴れ		試験者			
層名	層厚 (m)	貫入深さ (m)	1m 当りの平均貫入速度 (mm/s)	注記	判定	標準 S _w 200 (kN)	貫入 1m 当りの平均貫入速度 (mm/s)	標準 S _w (kN)	標準 S _w (kN)	標準 S _w (kN)	標準 S _w (kN)
1.00	16.0	0.25	25	04 芳り芳り	硬土	6.2	70.0	6.2	70.0		
1.00	10.0	0.50	25	40 芳り芳り	硬土	5.0	55.6	5.0	55.6		
1.00	5.0	0.75	25	20	粘性土	4.0	42.8	4.0	42.8		
1.00	4.0	1.00	25	16	粘性土	3.8	40.2	3.8	40.2		
1.00	0.0	1.25	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	1.50	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
0.75	0.0	1.75	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
0.75	0.0	2.00	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
0.75	0.0	2.25	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
0.75	0.0	2.50	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
1.00	0.0	2.75	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	3.00	25	0	ユックリ	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	3.25	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	3.50	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	3.75	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	4.00	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
0.75	0.0	4.25	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
0.75	0.0	4.50	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
0.75	0.0	4.75	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
0.75	0.0	5.00	25	0	ユックリ	2.2	22.5	2.2	22.5		
1.00	0.0	5.25	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	5.50	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	5.75	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	6.00	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	6.25	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	6.50	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	6.75	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	7.00	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	7.25	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	7.50	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	7.75	25	0	スルスル	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	8.00	25	0	ユックリ	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	8.25	25	0	ユックリ	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	0.0	8.50	25	0	ユックリ	3.0	30.0	3.0	30.0		
1.00	8.0	8.75	25	32	粘性土	4.6	50.4	4.6	50.4		
1.00	50.0	9.00	25	200	硬質土	15.4	>120	15.4	>120		
1.00	117.0	9.25	25	468	砂質土	33.3	>120	33.3	>120		

図1 スウェーデン式サウンディング試験結果

3. 地盤改良工事 RES-P工法

RES-P工法は、地盤に数多くの単管パイプを貫入して地盤を強くする工法です。**図2**のような多数の単管を打ち

4. 常時微動測定

地盤改良前後に、常時微動測定を実施して、地盤改良の効果を確認してみました。改良効果が表れなかったら、施工やり直しもありえますね。(笑)

測定では3成分のMcSEIS-ATを使用し、H/Vスペクトル比を計算してみました。地盤改良前の測定状況を**図3**に示します。敷地の中央の他、何点かで測定してみました。測定時間は1地点あたり10~15分程度です。



図3 3成分McSEIS-AT 測定状況

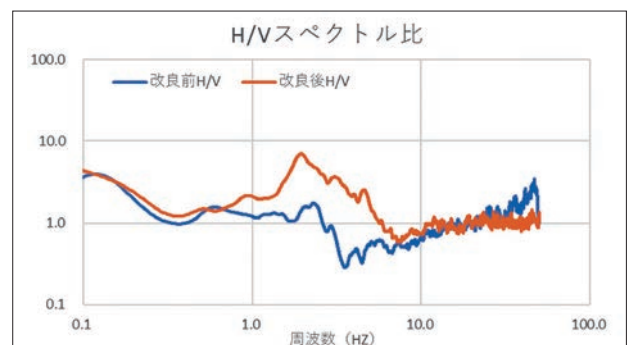


図4 地盤改良前後 H/Vスペクトル比の比較

地盤改良後の測定後、データをダウンロードして早速H/Vスペクトル比で比較してみました。(図4)

あれっ? 地盤改良後(オレンジ色)が、地盤改良前(青色)よりなんか大きくなって? つまり揺れやすくなっている? 前後のデータを間違えたわけではないですよね?

我が家は大丈夫なのか?

5. 地盤改良前後のH/Vスペクトル比

何度見直しをしたことでしょうか? 測定時間がデータに入っているの、間違えるわけはありません。やはり地盤改良工事により、改良前よりも揺れやすくなってしまったのか?

こうなったら地盤改良の施工業者を呼びつけ、地盤改良のやり直しをしてもらえないとモンモンとしていた時でした。

さてよ? 微動には上下動と水平動2成分がありますよね?

6. 上下動・水平動成分の比較

なにが何でも地盤増幅特性=H/Vスペクトル比として考えてしまうのはよくありません。

基本的に立ち返り、上下動、水平動成分のスペクトルを地盤改良前後で比較してみました。図5、6に地盤改良前後の上下動、水平動のスペクトルをそれぞれ示します。

図5の上下動スペクトルの結果では、すべての周波数で、スペクトルが小さくなっていることがわかります。一方、図6の水平動スペクトルの結果では、1Hzから10Hzの間でほとんど変化がなく、10Hz以上でスペクトルが小さくなっていることがわかりました。

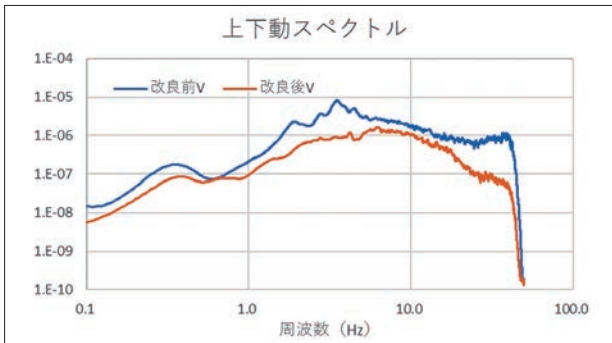


図5 地盤改良前後の上下動スペクトルの比較

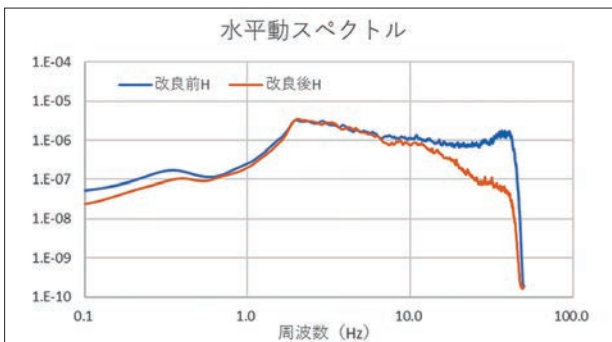


図6 地盤改良前後の水平動スペクトルの比較

このことより、地盤改良後にH/Vスペクトル比が大きくなった原因は、分母の上下動成分が小さくなったことであると確認できました。

地盤改良後に上下動成分が小さくなった原因がRES-P工法によるものなのか、詳しい議論はここでは避けませんが、無数の単管パイプの貫入により上下動方向の振動が制限された可能性があります。

H/Vスペクトル比ではなく、基本に立ち返って上下動成分・水平動成分の記録に戻って確認できたことで、必要のない地盤改良業者へのクレームを防ぐことができました。

7. 基礎完成後の比較

念のため、基礎ができあがったところで、もう一度微動を計測してみました。(図7参照)

H/Vスペクトル比の比較結果を図8に示します。基礎完成後のH/Vスペクトル比は、地盤改良後とほぼ同じ結果でした。基礎の荷重によりもう少し変化すると想像していましたが、なお、数10Hz以上で少し大きくなっていますが、おそらく水平動のノイズと考えています。



図7 基礎上での微動計測

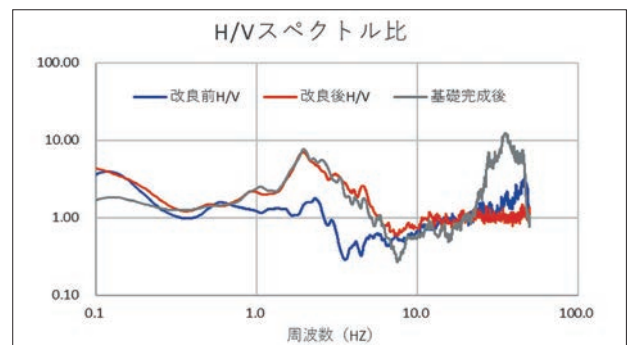


図8 基礎完成後のH/Vスペクトル比の比較

家を新築することは一生に一度あるかないかのことで、機会があればぜひ地盤改良前後に微動測定を実施してみてください。私のようにH/Vスペクトル比が大きくなる家もあるかもしれませんが、地盤振動を正しく理解していれば安心できると思います。結果次第では、業者に対してクレームを言うこともできますよ。

※2022年6月に無事完成し、今のところ地震が起きても被災していません。



能登沖でのOBEMによる電磁場観測 (その1)

海洋研究開発機構 笠谷 貴史

1. 調査に至る経緯

能登半島北東部(石川県珠洲市周辺)では、2020年12月頃から地震活動が活発化し、2022年6月19日にマグニチュード5.4(深さ13km、珠洲市で震度6弱)の地震が発生し、負傷者5名、建造物の被害や水道管の破裂などの被害がありました。地殻変動連続観測によって、2020年11月から現在までに珠洲市の観測点は4cm程度隆起したことも明らかとなっています。活火山のない能登半島においてこのような地殻の隆起を引き起こす要因は、地下深部からの流体の上昇であると推測されています。この地震に関する調査を行うために、「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査(代表者:金沢大学 平松良浩教授)」に対して文科省から科学研究費助成事業(特別研究促進費)による助成を受けることになりました(2022年7月22日にプレスリリース)。この総合調査では、陸域の地震観測をはじめとして様々な観測が行われますが、地震活動と関連するとされる地下の流体の分布を明らかにする観測の一つとして、これまでに実施されてきた陸上のMT調査に加え、海域での調査も実施されることになりました。観測点は、これまでの地震活動や既存の陸域データを参考に、能登半島北東部を囲うように設置する計画となりました(図1)。



図1 海底での電磁場観測点

2. まずはロジ

科研費として調査を行うため、2022年度内で観測を終えることが必要となります。海域での調査は兵庫県立大学の後藤先生とJAMSTECの私が担当することになりました。能登半島は日本海側、そう、冬の時化が問題となります。夏は非常に穏やか

な日本海も、冬は一般的に「日本海と言えば」でイメージされる荒れ狂う海となります。また、冬の日本海の別のステレオタイプなイメージとして「カニ」があると思いますが、カニ漁が解禁となると漁船のチャーターも難しくなることが予想されました。科学的な知見から設置点を決めることはもちろん重要ですが、たった3点とは言え、機材の設置・回収作業を行うためには様々なロジが必要となります。海象やカニ漁の解禁を考えると、遅くとも11月初旬には回収まで終える必要があると予想しました。

科研費の代表者である金沢大学の平松先生は、これまでも能登半島での地震観測や地元への啓蒙活動などで珠洲市と太いパイプがあり、様々な便宜をはかっていただくことが出来たのは幸いでした。平松先生は後藤先生と同級生、私にとっても先輩にあたるのも功を奏したように思います。とは言え、色々な面で綱渡りになるのは明らかで、スケジュール的に極めて厳しい状況なのは変わりません。

とにもかくにも、作業には船が必要です。石川県漁業共済組合すず支所の担当者をご紹介いただき、作業船として使える船を探していただきました。冬になる前に回収となると、十分な電磁場データを得るためにも少なくとも1ヶ月以上は観測が必要です。そのため、9月の可能な限り早い時期に投入する必要があります。8月末に、後藤先生と共に現地を訪れ、紹介された船長さんに作業内容をお話し、休漁日である火曜日に作業を行うことで作業の実施を承諾いただけました。

それと並行して観測機器となる自己浮上型の海底電位磁力計(OBEM)の準備も必要となります。問題となるのは錘。海域によっては錘の回収を求められる事もあります。私は、過去の観測で井形に組んだ木枠に砂を詰めた土嚢袋をくりつける錘で漁協から設置許可を得たことがあったので、今回も同じ方法で説明したところ、石川県漁業共済組合から許可をいただくことが出来ました。今回は、過去に実施した写真を見ながら組み上げ方をアレコレと試行錯誤し、土嚢袋を麻紐でくりつけるなど可能な限りプラスチック製品を廃して製作しました。この錘のミノは、もし網に掛かったとしても、土嚢袋に穴を開ければ砂が落ちて水中重量が軽くなって、魚網に損害を与える可能性が低いことです。

と、ここまで書いて紙面が尽きてしまいました。次回は設置作業と最後の最後まで綱渡りだった過酷な回収作業についてレポートします。



図2 船上で木枠に土嚢袋を取り付け作業中のOBEM



能登沖での電磁場観測(その2)

海洋研究開発機構 笠谷 貴史

1. ピンチの連続だった投入作業

現地入り初日、地元の報道機関も多く取材に訪れて注目度の高さを感じました。金沢大の平松先生と兵庫県立大学の後藤先生が取材対応をされる中、「作業員A」な私は組み上げ作業を黙々とこなし、作業手順の確認を船長と行うところまで来ました。が、あれこれと試行錯誤するものの、どうしても船のブームだけではOBEMの投入作業は困難と判断せざるを得ない事態に。どうしたものかと過去の写真を見せながら船長と対応を協議したところ、船長のお仲間のクレーン付きの船にサポートをお願いできることになりました。急遽、作業手順の確認も兼ねて、現地入り初日に蛸島漁港から一番近い設置点での作業を行うことに。図1の写真はその日の投入前のOBEMです。翌日の2台の投入作業も比較的スムーズに進みました。ちなみに、試行錯誤中の作業風景が翌々日の地元新聞にデカデカと載っていましたが、投入できるのかと不安しかなかった心境を思い出し、冷や汗が出てきます。

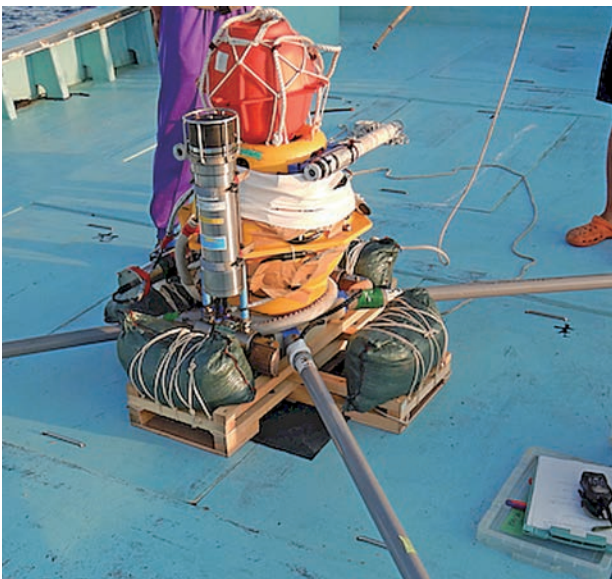


図1 投入前の海底電位磁力計(OBEM)

2. ものすごく過酷だった回収作業

カニ漁が始まる10月末までに回収を終えることがマストでしたが、冬型になる日も出てくる時期。複数の予報や気象モデルで検討した結果、回収予定日は絶望的な天候となる確度が高まり、急遽予定を早めて作業を実施することになりました。悪くなる一方の天候のため、現地に到着後すぐに船上音響装置の準備もままならないまま出航。空はまだ晴れ間が見えるものの、10m/sを超える風が吹き、波高も1mを超えるなかなかの時化模様。それっぽい写真を撮るのは難しいのですが、図2の様な感じでうねりを超える度に大量の水しぶきが甲板にも。キャビンがないので、暴露甲板でひたすら耐えるのみ。合羽着てますが、水しぶきがスゴすぎて首筋とかから中に水が入りずぶ濡れ状態ですが、酔

わない体質なのだけは親に感謝しました。学生さん2人は出航直後から船酔いで身動きが取れませんが、最後まで弱音を吐かずに頑張りました。回収作業は概ね順調。OBEMはニュース3号の記事のように、長い電極アームを折りたたんで浮上してくるので、漁船でも容易に回収出来ます。図3は2台目の回収風景ですが、うねりが大きいことが分かります。そんなこんなで3台とも無事回収。その日のお風呂は何物にも代えがたいものでした。



図2 現場に向かうときの波しぶき

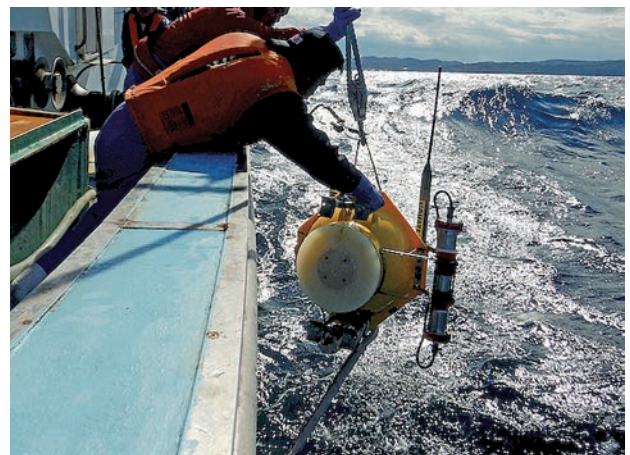


図3 OBEMの回収作業の一コマ

なんとか無事に終わることができた今回の作業ですが、今回の強力な助けになったのは、機材の一時保管や整備時にご協力いただいた金沢大学里山マイスター能登学舎 (<https://www.crc.kanazawa-u.ac.jp/meister/>) の存在でした。ここでは「能登の里山里海」をキーワードに地域と多様な人を結びつけ、新たな価値を作り出すための様々な活動を廃校になった小学校を利用した施設で行っています。小さい頃、親戚のいた七尾市によく来ていて、美しく遠浅な能登島近くの海で遊んでいました。今回、地震という災害を通してではありますが、能登地域と再び深く関わることができて感慨深いものがありました。昨年は、ふるさと納税で珠洲市の「原木しいたけ」を取り寄せて美味しくいただきました。観光資源と美味しいものがたくさんある能登半島に皆さん足を運んでみませんか？

高校生のための物理探査入門&実践：出前講義@早稲田大学高等学院

(国研) 産業技術総合研究所 小森 省吾

1. はじめに

今回のご報告は、当学会でもあまり開催例のない、高校3年生を対象とした物理探査の出前講義です。この講義は、2022年7月に早稲田大学高等学院 地学教員の井上貞行先生から頂いたご相談からスタートしました。

井上先生は、「高校教育と社会が接点を持つことに気づかせ、自身の職業選択・将来設計といったキャリアとの繋がりを生徒に実感させることで、学習意欲を向上させたい」とのお考えのもと、地学と社会を繋ぐキーワードとして「物理探査による地下の可視化」を着想されました。地下の可視化は、探鉱、インフラ建設・維持・管理、防災といった産業の基盤や社会の安全のために必要不可欠なものであり、地下可視化のための物理探査技術には、物理・数学・地学を軸とする中等～高等教育が密接にリンクします。

他方、物理探査そのものが高校教育で触られることは殆どなく、地震探査が地学の資料集にほんの少し出てくる(地球内部の地震波速度構造)程度の取り扱いです。そのため、高校教育で物理探査を詳しく学ぶことは大変難しいのが現状です。このような背景から、物理探査を専門に取り扱う当学会が、出前講義をお引き受けすることといたしました。

2. 高校生のための物理探査入門&実践

井上先生からは、物理探査装置を自作しそれを使った実験を行いたいとのご要望がありました。高校生にも比較的簡単・短時間に組める物理探査装置として、後藤ほか(2022)による、DC-ACコンバータ、デジタルマルチメータからなる交流電気探査装置が最適と考えました。また、社会とのリンクを実感してもらうには、得られたデータの有用性が視覚的に伝わる必要があると考えました。そのため、単にデータを取り特徴を抽出するだけでなくインバージョンも行い、実際の構造解析を体験してもらうこととしました。

さらに、職業選択・将来設計の観点では、高校3年生の皆さんにとって、今は大学進学を間近に控えると同時に就職の事も考え始める重要な時期です。講義中に進路の参考になる情報が盛り込めればと考え、同学院の卒業生である篠原純弥さん(早稲田大学理工学術院 物理探査工学研究室 修士1年)にもご協力頂き、物理探査の道に進んだ背景や今後の事、生徒の皆さんに伝えたい事をお話し頂くこととしました。

3. 出前講義(全3回)

今回はかなり内容が多いため、1日2コマ、全3回の講義

形式としました。また、出前講義は、井上先生の担当講義「自由選択科目 応用地球科学」内にて行いました(図1)。同講義は、文系・理系志望を問わず地球科学を幅広く学ぶ場となっています。



図1 出前講義の一風景

3.1. 第1回(10月28日)

初回は、物理探査とは何かについてお話ししました。今の生活で使用する様々な製品の源である資源を探し当てる方法の1つとして物理探査があること、資源の探査に、今高校で学んでいる物理を応用していることを認識してもらいました。その上で、オームの法則を利用した電気探査について教科書で学ぶ回路図と比較しながら概説した後、簡易電気探査装置を自作して頂きました。計測テストを通し、装置開発にもノウハウが必要であることを実感して頂きました。

3.2. 第2回(11月4日)

第2回目では、自作装置を使い電気探査を実施しました。水道水の入った水槽に直方体の構造体(アクリル製・高比抵抗体を模擬)を沈め、電極間隔2cm、24極のステンレス電極を水面上に設置し、ウェンナー法による計測を行いました(図2)。電極は電線により手元のスイッチボックスと繋がっており、スイッチボックス上で効率的に電極組み合わせを変えることができる本格仕様。33通りの電極組み合わせで、浅部から深部までの見掛比抵抗データを満遍なく取得しました。生徒の皆さんは、最初こそ電極切り替えや電流・電圧値の読み取り・記録に手間取っていましたが、すぐに慣れて手際よく作業をこなしていききました。

3.3. 第3回(11月11日)

第3回目では、前回得られたデータを用い、地理で習った

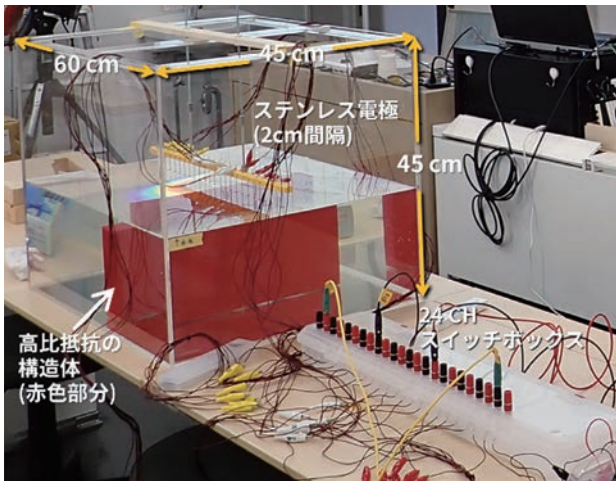


図2 電気探査実験の様子

等高線の引き方の要領で見掛比抵抗分布(コーナー)を描いてもらいました。直方体の構造があった部分に見掛比抵抗の高い領域がぼつと現れますが、これだけでは直方体を想起させるような形状にはなりません。インバージョンによって見掛比抵抗を真の比抵抗に「戻す」作業を行うこと、反復計算により徐々に直方体の形状が浮かび上がってくることを、講師側のPCで事前に行った解析内容を見せて追体験してもらいました(図3)。

その後、電気探査が探鉱現場で利用されている実例を解説した他、電気探査以外の物理探査手法としてMT法を含む電磁探査を紹介しました。電磁探査では、オームの法則に加えファラデーの電磁誘導の法則を応用していること、手法によっては数10km、100kmといった大深度の構造を推定し、例えば火山噴火メカニズムの解明に利用されている等、産業及び社会の役に立つ情報を提供し続けていることを解説しました。

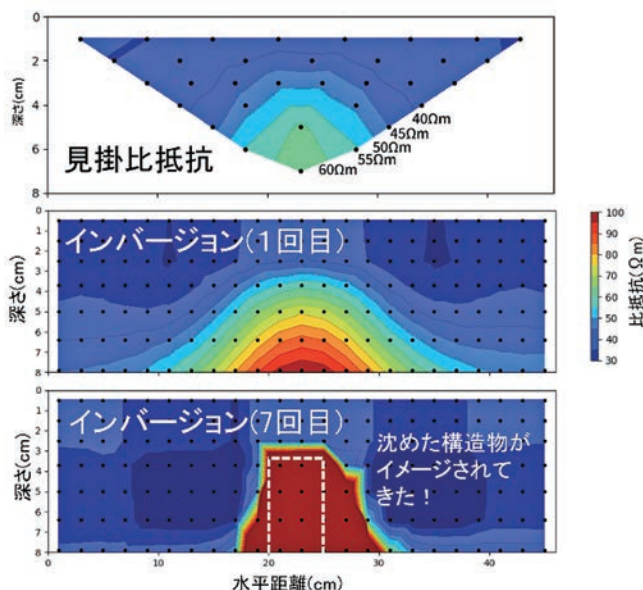


図3. インバージョン追体験

最後に、卒業生の声として篠原さんより、地球科学には高校在学時に興味を持ったこと、徐々に資源確保の重要性を意識し始める中で物理探査を知り、大学で物理探査を専門とする研究室を選んだこと、大学で理系の研究室に配属するには今から微分積分をしっかりと勉強しておくこと等、篠原さんの実体験に基づきお話し頂きました。生徒の皆さんも、篠原さんのお話にしっかり耳を傾けているようでした。

4. 出前講義の感想

出前講義後、生徒の皆さんにアンケートにご回答頂きました(図4)。「物理が苦手だったが、今回の授業を面白く感じた」「これまでの勉強が現実の社会でどう活かされるか、プロセスも含め理解できた」「研究の進め方を体系的に学

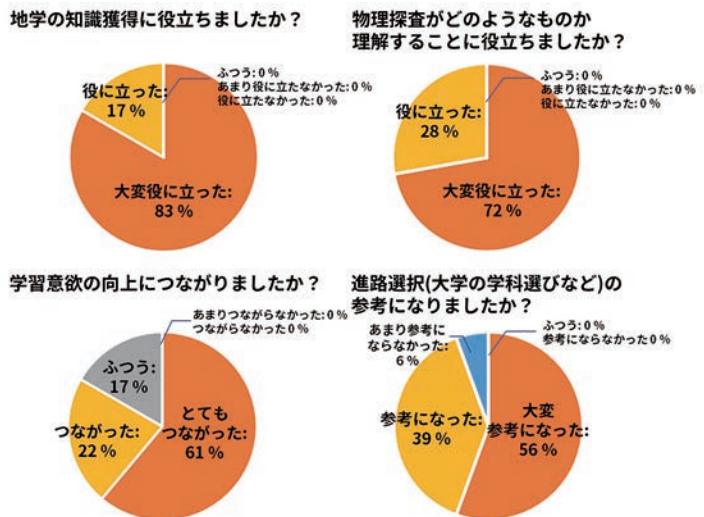


図4 出前講義のアンケート結果

べた]等のご意見も頂きました。また、9割の方に今後の進路選択の参考になったとご回答頂き、この出前講義が、少なからず生徒の皆さんのためになっていれればと願うばかりです。講義担当者としては、今回の出前講義で得た経験を糧に、物理探査を志す若者が1人でも増えてくれるような情報を今後もお伝えできればと思います。

5. 謝辞

辻本崇史氏(元JOGMEC)、内田利弘氏(元産総研)には井上貞行先生からの当初の相談に対応して頂きました。梅澤良介氏・横田俊之氏・長郁夫氏・高倉伸一氏(産総研)からは、講義に際し貴重なコメントを頂きました。感謝申し上げます。

【参考文献】

後藤忠徳、黒田真奈加、山本壮馬、天野玲、藤本静菜、大島由有希、山下風、山本睦徳 (2022): 簡易型電気探査装置の開発と活断層調査への適用, 物理探査学会第146回学術講演会論文集, 90-93.

独立型ハイドロフォンケーブルを用いた音波探査手法による海底熱水鉱床探査

川崎地質株式会社 多良 賢二(受賞時 株式会社地球科学総合研究所在籍)

1. はじめに

海底熱水鉱床は銅・鉛・亜鉛や金・銀といった金属を含んだ海洋鉱物資源のひとつであり、海底火山地帯で形成されることが知られています。戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)」では、日本周辺に分布する海洋鉱物資源を探索するための技術開発が進められました。我々の研究グループでは海底熱水鉱床探査に特化した音波探査データの取得方法の開発、および実海域での探査を行いました。本記事では、受賞対象となった論文(多良ほか、2020)について簡単に研究内容をご紹介します。

2. 海底熱水鉱床を対象とした音波探査の工夫

まず、海底熱水鉱床はどのような場所に分布しているのでしょうか? 探査対象の地質背景を知ることは、サーベイデザインを行う上でとても重要です。海底熱水鉱床は、海底火山のなかでも、カルデラのような凹地を形成する断層上に多く見つかっています。これは、断層が地下深部で鉱物を溶かし込んだ熱水の流路となるためです。従って、海底熱水鉱床探査では熱水の流路となる断層や亀裂を手掛かりに詳細な地下構造のイメージングを行っていきます。同時に、熱水鉱床の近傍にはカルデラ壁やチムニーと呼ばれる熱水噴出物の堆積によって形成された巨大な煙突状の構造物の存在を想定しなければなりません。このような地形の起伏は音波探査において側方反射ノイズとして現れます。これら側方反射ノイズは従来の音波探査手法では識別が難しく、特に堆積構造が明らかでない熱水活動域ではデータ解釈の妨げとなっていました。

多良ほか(2020)では、熱水活動域で想定される側方反射ノイズを簡単に識別する手段として、深海で運用可能な独立型のハイドロフォンケーブルを海底近傍で鉛直方向に配列し、その直上で音源を発振することでデータ取得を行うZVCS(Zero-offset Vertical Cable Seismic)を考案しました(図1)。この手法は、下方からの反射波、音源から直接あるいは海面で反射して上方から伝わる波、カルデラ壁やチムニーのような構造物など側方から伝わる波を各受振器への走時差から容易に識別することができます(図2)。また、本手法は深海でのケーブル姿勢保持を気にした浮力調整が必要ないこと、側方反射を識別するための補助測線が必要ないことから、調査に必要な時間を短縮することができます。これは、外洋の調査に必要な大型船舶の備船コストを抑えることができる画期的な調査技術と言えます。

3. 探査事例

本手法による音波探査は、次世代海洋資源調査技術研究組合(J-MARES)によって2018年に中部沖縄トラフにて実施されました。調査海域は事前調査によって火山活動による地形や熱水ブルーム等による水中音響異常が認められた凹地です(図3)。音波探査データはまず始めに凹地全体の堆積構造把握、熱水の流路となりうる断層や亀裂の分布把握を行うための二次元探査を行いました。次に、断層や亀裂が最も認められた場所の空間

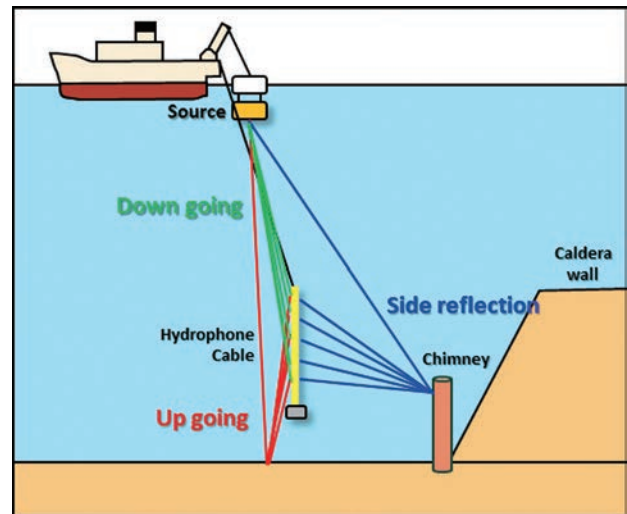


図1 ZVCS概念図

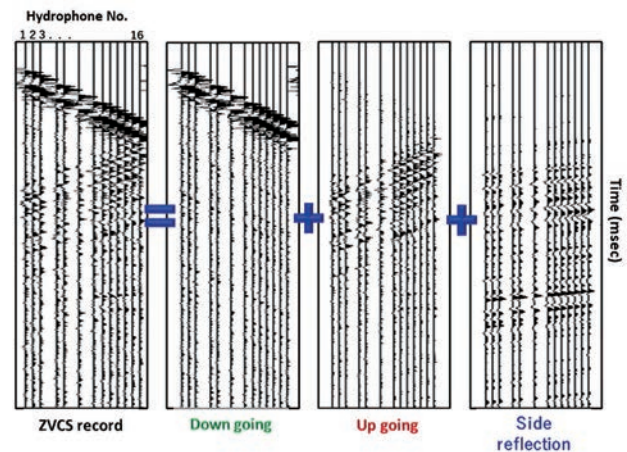


図2 ZVCS記録の波動場分離例

的な構造把握を行うために三次元探査を行いました。探査記録は、同プロジェクトで実施されたボーリング調査結果と照らし合わせ、地質構造解釈を行いました。

3.1. 二次元探査

二次元探査は、GIガン音源として独立型ハイドロフォンケーブルを母船から曳航するディープトウ方式(ZVCS-DT)により実施しました。図4に図3bの太線で示した北西-南東方向の断面を示します。凹地最深部には堆積盆が発達しており、熱水噴出が確認されていた凹地中央部では不整合面の変異が認められました(図4 青三角)。また凹地中央部の不整合面上位は周辺の反射イベントと比較して断続的な反射面で示される断裂構造が認められました。これら二次元探査の結果から、空間的な構造把握を行う三次元探査を断裂構造が最も認められた凹地中央部で実施しました。

3.2. 三次元探査

三次元探査は、独立型ハイドロフォンケーブルを海中ロボット(ROV)によって曳航し三次元的にデータ取得を行う手法(3D ZVCS-R)によって実施しました(図5)。音源は二次元探査と同

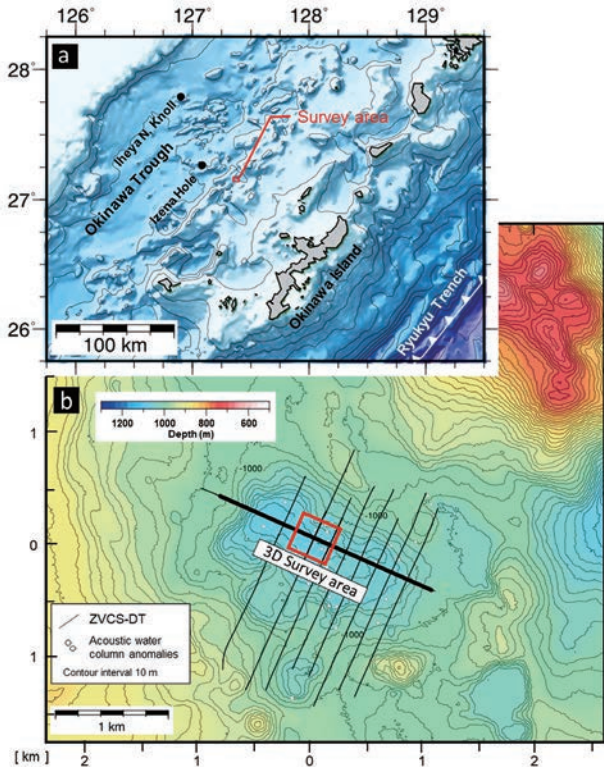


図3 探査事例
 a 調査エリア位置図
 b 二次元探査測線および三次元探査位置図

様にGIガンを用いています。取得データは、1辺1mグリッドサイズで重合前深度マイグレーションを適用し3Dボリュームとしました。図6は3Dボリューム対し隣り合うデータの類似性 (Similarity) についてアトリビュート解析を適用し、インライン方向の断面とタイムスライス面を表示したものです。解析結果からは、データの深部から深度約1,100mまでに北東-南西方向の正断層 (図6 Fault A) による構造境界が認められました。また、断層の上盤側では海底面に向かって脈状に構造境界が広がっており、その海底面には熱水噴出孔が分布していました。こ

れらの結果から、3Dボリュームが示す脈状の構造境界は熱水の流路となる堆積物の亀裂であることが示唆されました。

本調査海域で実施されたボーリング調査は、熱水の流路となりうる断層や亀裂が発達した箇所を手掛かりに、凹地形形成時の海底面である不整合面を目標深度として、熱水活動による鉱体の有無を明らかにするために行われました。ボーリング調査の結果、堆積盆に発達した堆積層は主に泥岩と凝灰岩層で構成されていることが明らかとなりました。また、不整合面付近まで掘削を行ったボーリングコア (図6 #01) の最深部からは、角の取れた硫化鉱物が得られました。このことから凹地形形成時の熱水活動によって硫化鉱物の堆積があったことが明らかとなりました。また、断層直上の掘削点 (図6 #02) では掘削中に250℃を超える熱水が噴き始め掘削を中断しました。さらに、断層の上盤側で脈状の構造境界が広がる場所では熱水変質を受けた粘土が得られたことから、3D ZVCS-Rによって熱水活動に関する断層や亀裂のイメージングが可能であることが示されました。

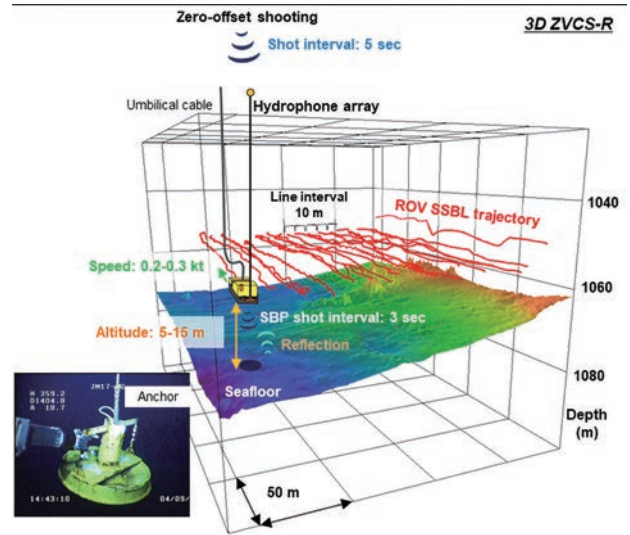


図5 3D ZVCS-Rの調査イメージと測線配置
 ハイドロフォンケーブル下端のアンカーをROVでつかみ曳航する

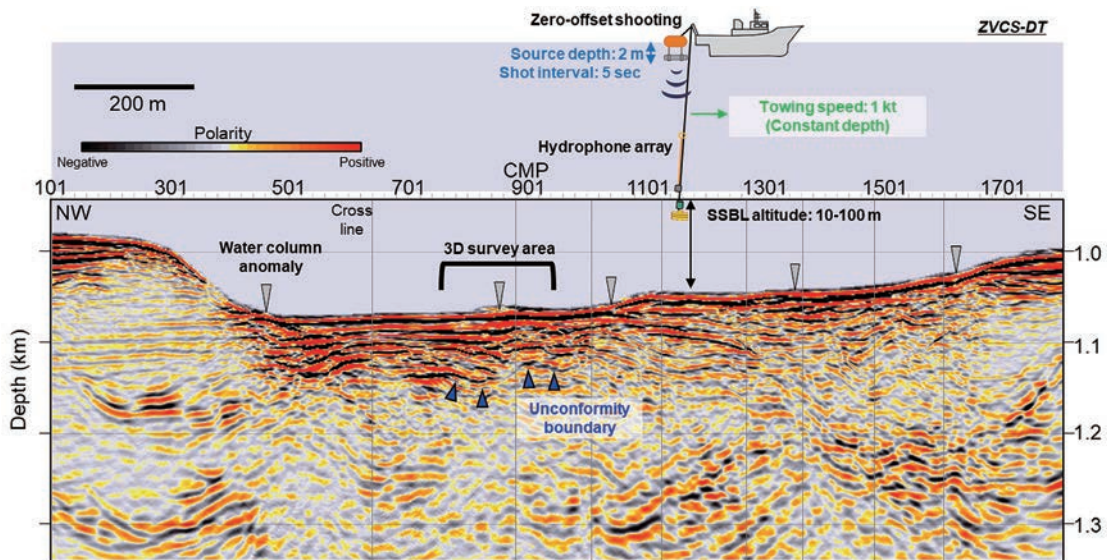


図4 ZVCS-DTによる調査イメージと探査結果例。熱水噴出を示唆する水中音響異常が報告された箇所をグレーの三角で示した。

4. おわりに

本研究で実施したZVCSは複雑な地形を有する熱水活動域において高精度の海底下イメージングができる手法と言えます。一方で音波探査の記録だけでは、熱水鉱床の堆積を示すような構造があったとしても、それが有用な鉱物かどうかまでは判断できません。より効率的に探査を行うには、例えば独立型ハイドロフォンケーブルに独立型の化学分析機を取り付けて曳航する方法などが考えられます。また、独立型ハイドロフォンケーブルは、AUVを用いた深海での音波探査においても容易に搭載可能です。海洋鉱物資源の探査を目的として開発された技術が今後幅広く応用されることを期待するところです。

謝辞

多良ほか(2020)につきましては、第146回物理探査学会におきまして、奨励賞を賜り大変光栄に存じます。選考委員ならびに関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

本調査は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「海のジパング計画」(管理法人：国立研究開発法人 海洋研究開発機構)によって実施されました。

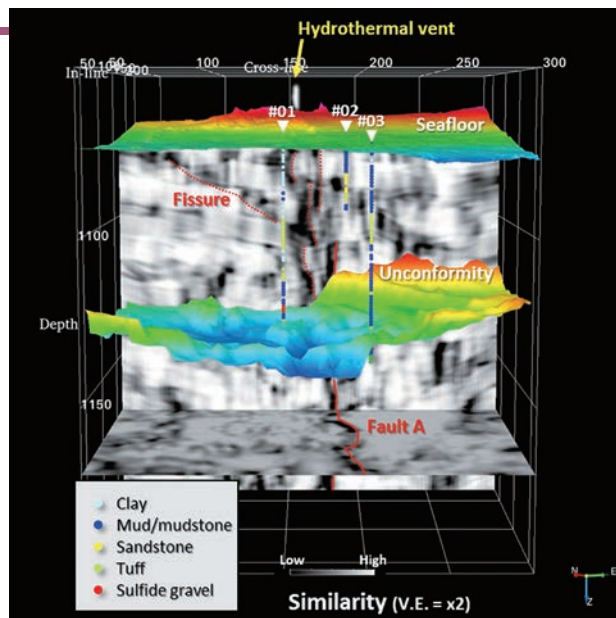
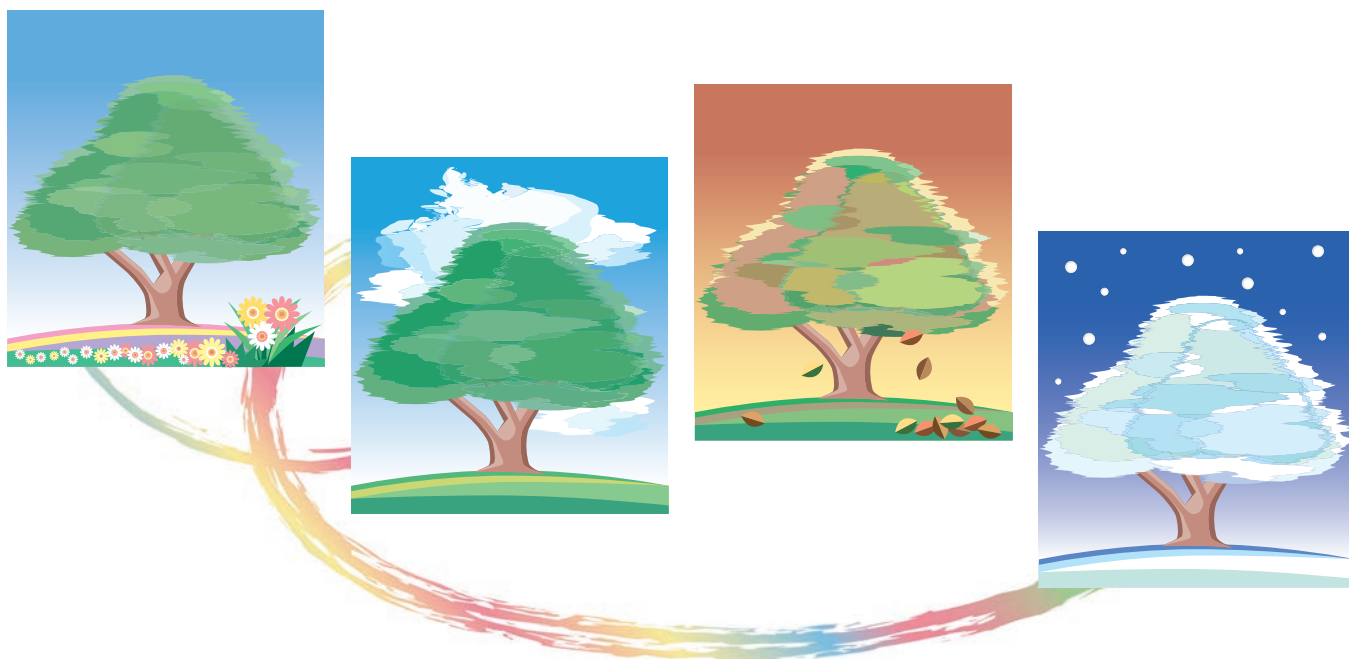


図6 3Dボリュームに対し隣り合う記録の類似性(Similarity)についてのアトリビュート解析を適用した結果
海底面と3Dボリュームから抽出した不整合面およびボーリング調査で得られた3本のコア(#01、#02、#03)の記載を三次元空間に示した。断層および亀裂による構造境界を赤線で示した。

【引用文献】

多良賢二ほか(2020)：深海曳航型ハイドロフォンケーブルを用いた高分解能音波探査による海底熱水鉱床探査, 物理探査, Vol. 73, 14-22.



物理探査ニュース 2023 ハイライト 2024年(令和6年)1月発行

編集・発行 公益社団法人物理探査学会
〒101-0031 東京都千代田区東神田1-5-6 東神田MK第5ビル2F
TEL : 03-6804-7500 FAX : 03-5829-8050
E-mail : office@segj.or.jp
ホームページ : <https://www.segj.or.jp/>

著作権について

本ニュースの著作権は、原則として公益社団法人物理探査学会にあります。本ニュースに掲載された記事を複製したい方は、学会事務局にお問い合わせ下さい。なお、記事の著者が転載する場合は、事前に学会事務局に通知いただければ自由にご利用いただけます。