

# 物理探査 ニュース



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

## 目次

物理探査学会創立75周年記念行事のお知らせ	1
現場レポート 能登沖OBEM観測 その2	3
わかりやすい物理探査 GPRその5 地中レーダにかかわる物性	4
現場レポート 微動の会の活動	7
EAGE Annual Meeting 2023 in Vienna参加報告	9
地震防災研究会 特別講演会 開催報告	11
第39回地盤探査研究会開催報告	12
よもやま話 オーディオと物理探査その2	13
研究の最前線 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	14
お知らせ	16

Geophysical Exploration News Summer 2023 No.59



## 物理探査学会創立75周年 記念行事のお知らせ

The Society of Exploration Geophysicists of Japan



Anniversary  
1948 – 2023

Since its inauguration in 1948, SEGJ has been promoting research, exchange of knowledge and technologies, cooperation among members, and collaboration with the associated academic societies in Japan and beyond. The Society will celebrate its 75th anniversary in 2023.

詳細は  
2ページに  
掲載

# 「持続可能な社会と物理探査」

## 公益社団法人 物理探査学会

# 創立75周年記念事業

### シンポジウム・記念式典 (会場+オンライン同時開催)

■日程：2023年10月11日(水)～13日(金)

10月12日(木)の講演は一般の方も無料でご参加いただけます

■場所：早稲田大学国際会議場井深大記念ホール

#### ■シンポジウム「持続可能な社会と物理探査」

- ・資源 (石油・ガス・金属・地熱)
- ・環境 (土壌・地下水・CCS・地層処分)
- ・宇宙や空中からの物理探査 (リモートセンシングとドローン)
- ・防災 (斜面・地震防災・河川堤防)
- ・土木 (維持管理・農業)
- ・学術 (地球科学・遺跡文化財)

#### ■祝賀会 (会場：リーガロイヤルホテル東京)

#### ■その他イベント

- ・基調講演
- ・パネルディスカッション「物理探査の過去と未来(仮)」
- ・アウトリーチ
- ・秋に開催している学術講演会もポスター講演として同時開催

### 記念出版物の刊行

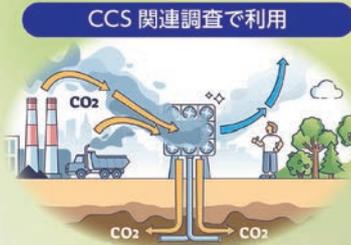
■物理探査ハンドブック第三版の出版

■学会要覧の改訂

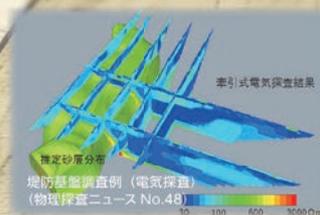
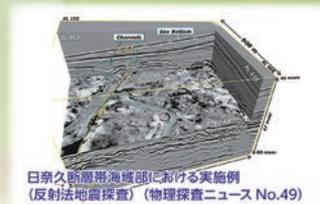
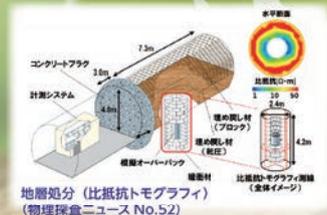
■75周年記念シンポジウム及び

2023年度秋季学術講演論文集の出版

スケジュールや内容は変更になる場合がございます。ご了承ください。



物理探査は、持続可能な社会の実現に貢献しています



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

〒101-0031 東京都千代田区東神田1-5-6 MK 第5ビル 2F  
電話・FAX：(03)6804-7500 E-mail：office@segj.or.jp  
https://segj.or.jp/ (左記新 HP に移行中、2023年5月)



創立75周年記念行事 HP  
<https://segj.or.jp/event/75/75.html>

お願い

これらの記念事業は学会員を中心として多くの方々の寄付金を基に遂行されます。75年の節目となる歴史的な行事を成功させるために、皆様の一層のご協力をよろしくお願いいたします。(寄付金に関するお問い合わせは、事務局までお願いいたします。また、創立75周年記念行事 HP もご参照ください。)

## 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、どうに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す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でした。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

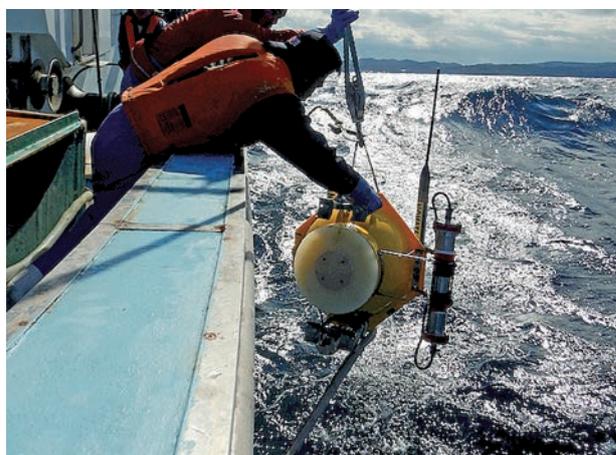


図3 OBEMの回収作業の一コマ

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？

## 1. はじめに

地中レーダで測定される電波伝搬速度は、媒質の水分量が多いほど小さい値を示すことが知られています。電波伝搬速度は、高い周波数では近似的に比誘電率の関数であらわされます。電波伝搬速度が小さいことは、比誘電率が大きいことを意味します。なぜ、水分量が多いと比誘電率の値は大きくなるのでしょうか。それは水の比誘電率が、空気や土粒子に比べて圧倒的に大きく、少しでも水分を含むとその影響を受けるためです。それにしても水の比誘電率はなぜ大きいのでしょうか。そのことについては物理探査の世界ではあまり議論されてないように思われます。ここで少しまとめておきたいと考えます。

## 2. 水の比誘電率はなぜ大きいのか

比誘電率は、真空の誘電率に対する媒質の誘電率との比を指し、次元はありません。誘電率は外部から電場を与えたときに物質中の原子や分子がどのように応答するかによって決まります。

図1は水分子を模式的にあらわしたものです。酸素原子Oの両脇に水素原子Hが少し斜めの位置の両側に結合しています。このとき原子のなかの電子は、酸素原子の側に偏って分布します。図1の右側のように水分子全体でみると電気的に偏っているのです。これを電気双極子といいます。

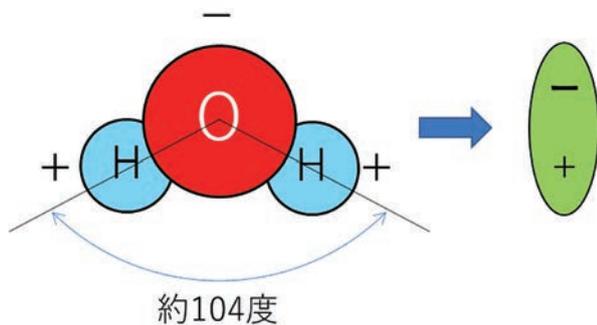


図1 水分子の構造

地中レーダでは高い周波数の電波を用います。外部から交流電場を与えるので、電荷の正負が入れ替わります。その様子を模式的に示したのが図2です。+側から-側へ電気力線により電場を与えると、双極子の方向が揃います。これを誘電分極(単に分極とも)といいます。地中レーダでは交流電場(インパルスでも同じ)を使うため、+と-が入れ替わると双極子の向き、すなわち分子の向きも入れ

替わります。この電場の変化がゆっくり、すなわち周波数が低いうちは双極子の向きが電場の向きの変化に追従していきます。しかし、周波数が高くなると、徐々についていけなくなる双極子が出てきて、さらに周波数が高くなると全く追従できなくなります。

双極子が電場の変化について行けるうちは、双極子の方向が揃うので、誘電率の値は大きくなります。逆に周波数が高くなると、誘電率は小さくなります。途中には誘電率の値が遷移する周波数帯ができます。これを定式化したのがデバイのモデル(Debye, 1945)で、これを図3に図画しました。値は比誘電率の方がわかりやすいので、ここでは比誘電率で表記しています。

地中レーダの周波数帯では、比誘電率の値は、よく知られているように80より少し大きい値(普通は計算しやすいように81にすることが多い)ですが、途中で徐々に比誘電率値が小さくなり、高い周波数では比誘電率の値は小さくなります。誘電率は正確には実数ではなく複素数であらわれます。虚数部の値も図3に破線で併記しました。誘電率の実数部は電磁波の伝搬速度に関わっていて、虚数部は減衰に関わっています。

本稿の最初の方では電波と書きましたが、ここでは電磁波と書きました。電磁波はガンマ線やX線や可視光も含む広い周波数帯域を指します。ちなみに電波法第2条によれば『「電波」とは、300万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう』と定義されていますので、我々の使う地中レーダの周波数帯では「電波」と呼ぶのが適切だと思います。

可視光のような高い周波数では比誘電率の値は1.15となります。ちなみに可視光に対しては比誘電率の2乗が屈折率になり、その値は1.33です。もし可視光においても誘電率の値が大きければ、伝搬速度も小さいので、水を入れたコップの中の箸が、水面を境に相当曲がって見えるはずですが。

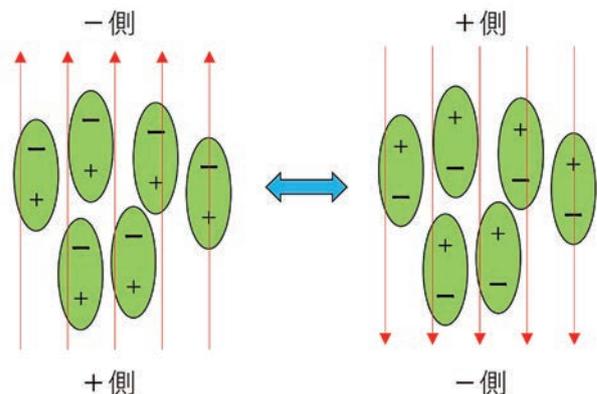


図2 外部電場による水分子の挙動

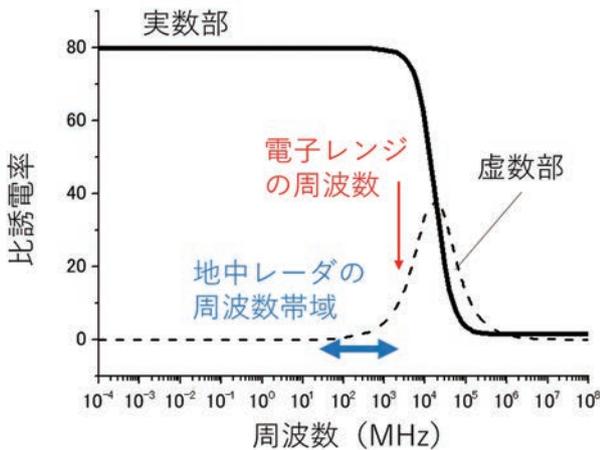


図3 デバイのモデルによる水の誘電率実数部と虚数部

以上のことを考えてみると、水分子が双極子であることが、電波の周波数帯で誘電率が大きいことの大きな要因になっていることがお分かりいただけると思います。また、水分子は分子量のわりに密度が高いですが、これは分子同士が電気的に結合しているからです。水( $\text{H}_2\text{O}=2+16$ )と二酸化炭素( $\text{CO}_2=12+16\times 2$ )の分子量を比較すると、前者は18、後者は44で、 $\text{CO}_2$ の方が分子量は2倍以上です。しかし、前者は液体、後者は気体と圧倒的に水の密度が大きいのです。

液体の比誘電率として、メタノール $\text{CH}_3\text{OH}$ は33、エタノール $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ は24、プロパノール $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ は20です。OH基の割合が相対的に低くなる(CH基の割合が増える)と比誘電率の値も低下します。CH基は分極していないためです。アルコール類は分子量が大きい割に水より密度は低くなっています。すぐに蒸発するので電気的な結合も水よりは弱いことがわかります。ちなみにOH基を持たない電気的結合の弱い気体のメタン $\text{CH}_4$ やエタン $\text{C}_2\text{H}_6$ などの比誘電率は1.8前後、 $\text{CO}_2$ は約1です(竹内(2006)などを参考に記述)。

### 3. 電子レンジで水が温まる理由

図3に戻ります。虚数部は何を意味しているのでしょうか。これは電磁波の減衰に関わっています。外部磁場の変化に対して、追従できる双極子とできない双極子が混在する周波数帯域です。ここでは双極子同士がぶつかり合って、摩擦が生じます。この分子の摩擦が熱に代わって、水の温度を上げます。これが電子レンジの原理です。水が双極子であるがゆえ、水だけを加熱することができます。水の特性をよく考えた、とても賢い方法だと思えます。

電子レンジの周波数は2.4GHzで、図3に矢印で示したあたりです。虚数部のピークはもっと高い周波数にあり、その周波数の電波を照射した方が効率はよさそうですが、そうはなっていません。この周波数で電波を照射してしまう

と、一気に沸騰して危険です。そのため少し効率を落としたところの周波数を使用しているのです。

図3の虚数部をよく見ると、地中レーダの周波数帯でも虚数部はゼロではありません。ということはこの周波数帯の電波を人体に照射すると、血液をはじめ体内の水がゆすられることになります。それがどのように人体に影響を与えるかわかりませんが、なんとなく気持ち悪い感じがします。

### 4. 土の比誘電率は何で決まるのか

本シリーズの第1回でも含水率と速度(または比誘電率)に触れられていました。土は、土粒子、水、空気の混合体です。したがってこれらの比誘電率とその割合がわかれば、比誘電率が推定できそうです。

土壌水分計という土の体積含水率を電波伝搬速度から推定する方法があります。これはTime Domain Reflectometry、略してTDR法と呼ばれていて、製品化もされています。この方法はプローブと呼ばれる10cmくらいの電極を土に刺して、そこへ階段状の信号を入射させます。インパルスを与えたときはインパルス応答といいます。階段関数と呼ばれる信号を与えたときはインディシャル応答といいます。このインディシャル応答の遅延時間は、周囲の媒質の伝搬速度によって決まります。プローブの長さを、その先端で反射した往復時間の半分で割れば、電波伝搬速度が求まり、それを体積含水率に換算します。電波伝搬速度から体積含水率への換算式はTopp et al.(1980)に提案されています。主に石英の粒と、水と空気だけで構成されている土の場合は、この方法で体積含水率を求めることができます。

測線上で数多くのCMP測定を行って、電波伝搬速度の垂直方向の分布を体積含水率の分布に直します。CMP測定は、送信と受信のアンテナの距離を変えて、地下の伝搬速度を算出する方法です。これをプロファイル断面に重ねて表示すると地質構造だけでなく、各層の体積含水率を2次元断面として得ることができます(Greaves et al.(1996))。単純な反射断面だけでなく、体積含水率という工学的に有用な物性も得ることができます。

### 5. 誘電率にかかわる諸問題と将来展望

TDR法のところで、土の誘電率は、周波数に関わらず一定であるかのように説明してきました。水の比誘電率は地中レーダの周波数帯においては一定値、空気や土粒子の比誘電率も一定値なので、それでよいと思われるかもしれませんが、実際には混合体としての土は周波数により違うことが確認されています。物理探査ハンドブック増補改訂版の地中レーダの章の中で、比誘電率と導電率の数値例が示されていますが、キャプションのところに「100

MHz]と書かれています。このことは周波数が違えば、これらの値が異なることを暗に意味しています。

土粒子と水の接する境界面では、電場がかけられたときに、双極子である水分子の電荷の偏り(分極)が生じ、見かけの誘電率が大きくなります。電気探査では電気二重層という現象がありますが、それと似たようなことです。境界面では、表面張力なども生じていて、水分子の分極が単体の水の場合とは異なり、周波数によってあられ方も違います。それが周波数依存性としてあらわれます。これを誘電分散と呼びます。この誘電分散を利用すると、単純な伝搬速度だけを使うより、定量的な物性の議論ができそうです。岩石や土の試料を用いて測定すると顕著な分散性が見られます。地中レーダのCMP測定波形から、表面波探査と同様に分散曲線を描くこともできます(Suzuki et al., 2021; 図4)。周波数が低いほど速度が低いので、表面波とは違ってきます。この分散曲線を利用するとTDR法では適用が難しい土に対しても、うまく地中レーダのデータから物性の議論ができそうな気がします。

たとえば材料工学などの分野では誘電分散を利用して、内部構造を推定することが行われています(花井, 2000)。このあたりの分野に今後の地中レーダの新たな方向性が

見出せそうです。参考文献に示したように、書名のサブタイトルが「物質をこわさずに内部構造を探る」とはまさに物理探査の目指す方向性と同じだからです。

本稿では主に比誘電率について議論してきましたが、厳密には導電率や透磁率も関わってくる場合もあり、これらの取り扱いをどうするのか議論が待たれるところです。

## 6. おわりに

これまで地中レーダは空洞や埋設管、遺跡などを探査検知器としての役割が多かったように感じます。しかし、単純に地下にあるものを探すというだけでなく、地中レーダには物理探査としてのポテンシャルがあるのに、現状ではそれがまだまだ引き出されていないように思えます。

本シリーズの第1回では「GRPは宝探しの道具ではない」、第3回では「GPRデータ処理は画像処理とは本質的に異なる」という指摘がありました。地中レーダにおいては、同じ反射波を利用する反射法地震探査と比べると、物性の議論が立ち遅れているのではないのでしょうか。波形データ処理に関しても反射法地震探査から大いに学ぶ余地がありそうです。

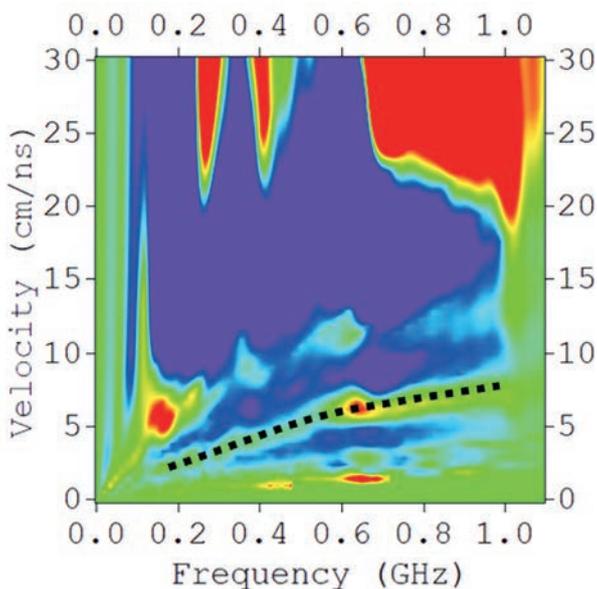


図4 地中レーダの分散曲線の例

### 【参考文献】

- 1) Debye (1945): Polar Molecules, Dover Publ. Inc.
- 2) Topp et al. (1980): Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16, 574-582.
- 3) 竹内 学 (2006): 電磁気学・静電気入門(II)―電磁気学・電磁物性定数―, 日本画像学会誌, 45, 2, 194-203.
- 4) Graves et al. (1996): Velocity variations and water content estimated from multi-offset ground penetrating radar, Geophysics, 61, 3, 683-695.
- 5) Suzuki et al. (2021): Dielectric dispersion measurement of silica sand in frequency domain, Proc. 14th SEGJ Int. Symp., GP-09.
- 6) 花井哲也 (2000): 不均質構造と誘電率―物質をこわさずに内部構造を探る, 吉岡書店, 304p.



## 微動の会の活動

微動の会第12回幹事長、愛媛大学 森 伸一郎

### 1. はじめに

微動は、ご存知のように、どこでも常にある地盤の微小な振動のことである。気圧変動・海洋波浪・風などの自然現象や交通・工場・建設現場などの人間活動に起因していると考えられ、地盤の振動特性評価や物理探査に利用されている。

微動の会は、微動に興味があるという入会資格を持つ全国の研究者、技術者、学生、同好者による研究会(任意団体)である。2008年に6人による準備会、2009年に第1回微動の会(会合)が島根県松江市で開催され、2019年に石川県能登半島で第11回の会を開催するまで11年間、毎年開催された<sup>1)</sup>。ちなみに、物理探査学会会員も少なからず会員にいる。

この会への参加費用としては、入会金、会費などなく、年1回開催される会合としての微動の会への参加実費のみである。この会合は、会員を幹事長と祭り上げて幹事長の地元で開催することで順繰りに全国各地を回る。数泊の合宿形式を取り、昼夜の研究発表、合同微動観測会、見学会、懇親会という充実した研究・学習・懇親の機会として、登録会員100人余りから、毎回20~40人の参加者がある。なぜか毎回、温泉がある地で開催され<sup>1)</sup>、美味しい日本酒と海山の幸を楽しめ、心身ともに晴れやかとなる。

合同微動観測は各自が持ち寄った微動計を使い、持ってこない者も観測に参加できる。大勢で多チームに分かれて観測するので、広いエリアをカバーした観測ができる。また、測り方に各自の癖や技術が見られ、大いに参考になるが、年々統一感が出てきた。そのような経験を重ね、観測会の成果は、第8回るときに宿舎において合同で深夜まで分析を行う(一部、お酒を飲みながら)ということが試みられ、幹事長のリーダーシップでまとめられ、ジャーナル論文に掲載された<sup>2)</sup>。

2017年は活動度が高く、微動の会の英名を Microtremor Research Camp(MRC)と名付けて、Facebookも開設された。第9回の会合より活動が発信されている(「微動の会」と検索すると筆頭に現れる)。

2020年から2年間は新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のパンデミックのために、合宿スタイルのこの会合は困難であるとして見送られた。それでも何とか活動したいとの思いで、微動の会の会員全員に呼びかけ、集まった有志でオンライン研究会を行った。新型コロナのパンデミック対策の結果としての人間の活動抑制に起因する微動レベルの低下をテーマに「コロナ微動」と名付けて研

究を行った。成果はジャーナル論文となった<sup>3)</sup>。

### 2. 第12回微動の会 in 愛媛県大洲市

2022年は、新型コロナにも慣れ、感染症対策を十分にし、特に全員検査陰性で開催するという条件で、愛媛県での開催を決めた。10月14日(金)から10月17日(月)までとし、3泊4日を大洲市が運営する鹿野川荘(温泉付き)を貸切る形で開催した。現地参加者18名全員が新型コロナ検査陰性を確認した。

海に近い山の中の温泉ということで、山海の美味しい料理(写真1)と愛媛の純米吟醸酒(写真2)を取り寄せて懇親会が始まったが、全員マスクをして集まり、乾杯の際に小声で「かんぱーい」というのが新型コロナならではのであった。微動の会に参加する者は、本当にまじめなのだと認識できた。それでも食と杯が進むにつれ、笑顔が溢れてきて、3年ぶりの再会と歓談を楽しみ英気を十分に養った。

2日間の研究発表会は、現地の17名に加えてオンラインで7名が参加した。全員で24名のよく知った顔がなつかしかった。例年の教室式の座席配列ではなく、大広間に長



写真1 大きな栗いっぱい栗ご飯



写真2 取り寄せ愛媛の純米吟醸酒

机をコの字配列にして、前後に人が来ないようにして、窓も廊下も全開にして万全の自然換気とするコロナ対策とした(写真3)。誰もマスクを外さなかったのが印象的であった。

研究発表の内容は、全て微動が対象であるが、それぞれキーワードは、横断歩道橋、携帯通信回線利用、橋梁、地震動増幅、大規模盛土、Python、斜面・盛土、DAS計測、Complex Coherence Function、硬質地盤、新型コロナ、地震波干渉法、相馬市地震被害分布、高密度リニアアレイ、高密度微動、杭の損傷実験などであった。物理探査にとどまらず工学分野を含む広範囲な話題である。どれもユニークで興味深い研究発表ばかりであった。夜の部の研究発表会では、お酒も入り、気楽に話す人もおり、学会では聞けないような本音の話も聞けて、いつものようにとても有意義であった。

毎回、微動経験豊富な研究者の発表も多いが、学生さんや若い人の発表もあり、「学会ほどに緊張もなく、有名な人からコメントしてもらえたのが良かった」などの声も聞こえて、フランクでフレンドリーな微動の会ならではの(写真4)。今回は宿泊施設の管理者である西谷 忠さんから2018年西日本豪雨における大洲の被災状況のプレゼンがあり、その出来に感心した。

3日目は大洲市内での微動観測会であった。最初はハドルテストであり、毎回、壮観である。今回は、3種36台が持ち込まれ、一列に並べてのハドルテストであった(写真5)。大洲城を含む東西1.5km、南北1.0kmの地域を52メッ

シュに分け、5チームに分かれて分担して1チームが4~5台を用いた極小アレイ観測を実施した。分析は、進行中である。それを終えて翌日に備えて八幡浜市に移動して宿泊した。

4日目は四国電力伊方原子力発電所の見学であった。厳重に管理された施設内のほか、深層地震計の装置を見学するなど(写真6)、四国電力様のおかげで、珍しく興味深いものを見学できた。

以上のように、4日間をのべ30名(見学会のみの追加参加を含む)の参加者が堪能した。

### 3. 第13回微動の会へのお誘い

今年は、第13回微動の会 in 八丈島が計画されている。入会は、会員への連絡または<https://forms.gle/DTMTeyEyhzbvJKep>まで。Facebookを参照され、微動の会へのご新規の参加者を期待する。「山あり、海あり、そして、微動ありの八丈島でお会いしましょう!」。

(次期幹事長、東京都立大学 小田義也談)

#### 【参考文献】

- 1) 山田雅行, 地域安全学会ニュースレター No. 112, 2020.
- 2) 大堀道広 ほか, 日本地震工学会論文集, 第17巻, 第4号, 2017.
- 3) 林田拓己 ほか, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 78巻, 第4号, I\_624-I\_635, 2022.



写真3 研究会(現地)の様子



写真4 集合写真(現地参加者)



写真5 36台のハドルテスト



写真6 伊方発電所深部地震計の前で

# EAGE Annual Meeting 2023 in Vienna

## 参加報告

川崎地質株式会社 鈴木 敬一

2023年6月6日から8日にかけてEAGEのAnnual Meetingが行われました。当学会もブースを出し、筆者が代表で参加してきたので報告します。

会場はウィーン・メッセというところですが、写真1は会場の入り口です。あらかじめメールで送られてきたバーコードを入口右の装置にかざすと、参加証が印刷されます。これを受付に持って行くと、プログラムなどが入ったバッグを渡され、参加証を首からかけて入場します。セッションは純粋な地質学からエネルギー転換まで多岐にわたり、さらに各分野のジョイントセッションもあり、数多くて探すのも一苦労です。



写真1 会場入り口

写真2はSEGJのブースです。ポスターがありません。実は、ウィーンに来る時の航空機が機材トラブルで飛ばなかったのです。私はETIHAD航空に乗せられ、アブダビ経由でウィーンに入りました。日本からEAGEに参加される方が同じ便にかなり乗る予定だったようで、ワルシャワ経由やチューリッヒ経由など、様々な経路に振り分けられていたようです。

トラブルはそこで終わらずに、預けた手荷物は行方不明となりました。その中に展示物が入っていたのです。結局、手荷物は2日目の6月7日午後になって手元に帰り、午後4時くらいに会場に展示することができました。

写真3はオープニングセレモニーでのEAGE会長の挨拶の様子です。今回のAnnual MeetingのテーマはSecuring a Sustainable Future Together(持続可能な未来を共に確保する)です。キーワードとしてはMitigation, Adaptation, Resilience(緩和、適応、回復力)です。SEGJの75周年記念行事のテーマにも通じると思います。

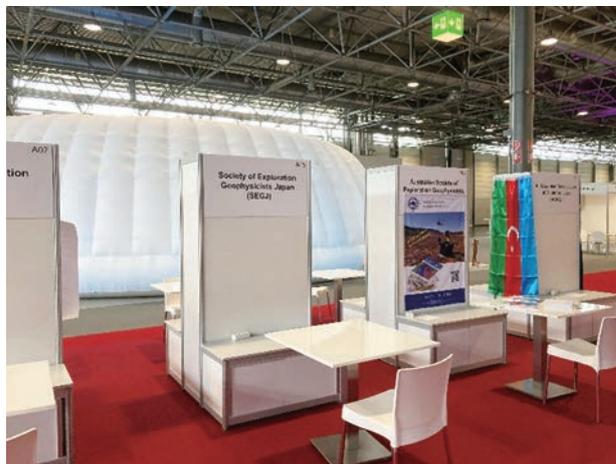


写真2 ポスターが届かないSEGJブース



写真3 オープニングセレモニーでのEAGE会長の挨拶

オープニングセレモニーでは、表彰式とパネルディスカッション、スポンサー企業のCEOのインタビューが行われました。表彰式はあらかじめ書面で受賞者や授賞理由が配布され、表彰式自体は名前を呼んで、賞状と盾を渡すだけという非常にシンプルなものでした。最後に受賞者代表1名が短いスピーチを行うだけです。

パネルディスカッションは、企業のCEOといわれる人が4名と司会の5名でしたが、CEOのうちの2名は女性で、さすがにジェンダー平等が進んでいると感じました。スポンサー企業としては最も貢献していると思われる地元のOMVというエネルギー関連企業のCEOに話を聞くというものです。あまり英語が得意でない筆者は、これらの議論はSustainable Futureについて話をしているのだなということがわかる程度でした。

写真4は口頭発表会場の様子です。セッション中は写真撮影が禁止されていますので、まだ休憩時間中の様子になります。座長とタイムキーパーが一段高いところにお

そらく会場全体が良く見渡せるのだらうと想像します。

筆者はAI関連やNon-Seismicなどのセッションに参加しました。Non-Seismicのほとんどは電磁探査、それも3D-EMでした。他にはフルウェーブフォームインバージョン(FWI)やCCS、洋上風力発電なども目立ちました。

反射法地震探査で培った技術を石油や天然ガスの生産だけでなく、再生可能エネルギーやCCSへ応用しようという意気込みが感じられます。



写真4 口頭発表会場の様子

写真5は展示会場に設営されたドーム状のセミナー会場です。ここでは展示企業のセミナーなどが行われ、このような会場が4箇所と、EAGEの主催するミニセミナー会場が1箇所ありました。

展示会場は非常に広く、各企業の展示も目を引くような工夫されていて、歩いているだけでワクワクします。なかでも写真6に示すように北海油田のボーリングコアをスライスしたものを展示しているのが目につきました。日本の地質とは違い、化粧石に使える美しい岩石です。ところどころ丸くサンプルを抜かれているところがあり、美しさを損ねているのが残念です。

展示会場を見渡してもFWIが目立ちます、ヨーロッパではFWIがかなり普及している感じがします。他にはGPRやEM探査装置などのブースを見せられました。パンフレットなどもきれいに作られていて、参考になります。ノベルティグッズも充実しています。特に印象に残ったのはKIGAMの海洋調査船のペーパークラフトです。本格的なもので、組み立てるのがもったいないくらいのものでした。

ブースに立ち寄って話を聞く



写真5 小セミナー会場の様子



写真6 北海油田のボーリングコア

と必ずといっていいほど、紹介した技術は今日の午後のセッションで発表するので聞きに来てほしいなどといわれます。展示と発表がうまくリンクしていて、このあたりのやり方はSEGJとしても見習わなければならないと感じました。



写真7 やっと届いたポスター



写真8 来年のNear Surface in Tsukuba 2024のスポンサー契約調印式後の記念撮影

写真7はやっと届いたポスターを展示した状態です。これでやっとご近所さんに挨拶ができます。左側は空き家状態で、となりはオーストラリア物理探査学会(ASEG)でした。空きブースは、勝手に会議室として使われています。SEGJのブースもポスターが来る前はそのような状態でした。ASEGのブースには50周年と書かれたポスターが展示されていました。「SEGJはお宅より25歳年上だぞ」と言っておきました。実際には2021年が50周年で、そのときのポスターを使用していたそうです。その隣はウクライナの情報地質学会(Geoinformation)です。国旗が掲揚されているのが印象的です。

2024年5月13日から15日まで、つくばにて第6回のAsia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience

and Engineeringが行われる予定です。このイベントのメインスポンサーに応用地質株式会社様がなっただけということで、EAGEとの間で、スポンサー契約の調印式が行われました。それにも立ち会いました(写真8)。大変ありがたいことです。来年のつくばでのイベントの成功に向けて、今後準備を進めたいと思います。

## 謝辞

国際委員の皆様にはポスター、会員広報委員の皆様には会場での配布資料(英語版)の作成等ご尽力いただきました。ウィーンに行くまでの様々な手配や、現地でのトラブルの相談など大変お世話になった応用地質株式会社の垂澤氏に感謝を申し上げます。

# Seminar

## 地震防災研究会 特別講演会 開催報告

公益財団法人鉄道総合技術研究所 津野 靖士(地震防災研究会幹事)

地震防災研究会では、平成8年より物理探査技術を通して地震災害の軽減に必要な情報を共有することを目的とした活動を実施しております。この度、公益社団法人日本地震工学会の協力(後援)を得て、フランスより日本に滞在中のPierre-Yves Bard氏(Institute of Earth Sciences, University Grenoble-Alpes, Grenoble, France)を招聘し、令和5年5月1日に、特別講演会「フランスの応用地震学の最先端とその応用」を企画しました。Bard氏のご講演“State-of-art applied seismology in France and its applications — From non-invasive surveys to site response and seismic hazard assessment: a (subjective) French-European experience”では、当研究会から要請した、ヨーロッパの応用地震学のプロジェクトであるSESAME(ヨーロッパにおける微動H/Vおよび微動アレイ探査技術の信頼性やその導入に向けたプロジェクト)、InterPacific(表面波探査や微動アレイ探査の信頼性評価のための国際ベンチマークプロジェクト)、Prenolin(非線形サイト応答評価の不確実性を評価する国際ベンチマークプロジェクト)で実施された物理探査に関連する研究背景やその成果、またフランスの原子力施設における地震動評価等に関する最先端の研究事例についてご紹介いただきました。ヨーロッパの応用地震学の成果を工学の方々に受け入れていただくまでの苦労についても触れていただき、ヨーロッパで行われてきた一連のプロジェクトの研究背景をよ



講演会の様子(京都大学・東京オフィス)

く理解することができました。

当研究会は「学会の場よりもフランクに意見交換すること」を目指しており、講師の先生方には科学的なお話のみならず、研究を通じて上手くいったことや上手くいかなかったこともお話していただきたいとお願いしております。今回の参加人数は26名(出席者数 24名)といった当研究会は小規模である利点を生かし、フランクに講師の方と接することができる場であると思います。今回の講演会はコロナ禍が社会的にも落ち着いてきた時期での開催となり、講演会後はBard氏を囲んで交流会(出席者数 19名)も開催いたしました。当研究会は、被害地震に対する研究報告等、定期的で開催されていますので今後の講演会にお越しいただき、議論にご参加いただければと思います。

## 第39回地盤探査研究会開催報告

大和探査技術株式会社 児島 悠司

第39回(令和4年度第1回)地盤探査研究会が令和5年3月23日に早稲田大学西早稲田キャンパスとオンラインのハイブリッド形式で開催されました。新型コロナウイルス感染症の影響で当研究会もしばらくオンラインに限定しての活動が続いていましたが、久しぶりに対面形式での実施が実現し、雨の中ではありませんでしたが会場には23名の方が来場され、オンライン参加の方(32名)を合わせ、参加者は55名となりました。

今回の研究会では「物性を探る」というテーマを設けました。物理探査の適正な普及のために物性と地盤探査の関係を改めて整理して考える機会にしたいというねらいがありました。会場に5名のパネリストをお迎えし、前半は各パネリストの方々から弾性波・電気・電波の各地盤探査で取り扱う主要な物性に関する話題提供をいただきました。後半はパネルディスカッションを行い、約1時間に渡る活発な議論が展開されました。ご出席いただいたパネリストは下記の通りです。

- ・ 東 宏幸氏 (東京都立大学)
- ・ 杉本芳博氏 (ダイヤコンサルタント)
- ・ 鈴木敬一氏 (川崎地質)
- ・ 高倉伸一氏 (産業技術総合研究所)
- ・ 土家輝光氏 (大成建設)

前半の話題提供は理論・データ取得・解析など多岐にわたる内容となり、地盤探査に従事するの方々にとって大いに参考になるものでした。

東京都立大学の東氏からは弾性波速度を探査から求める際に注意すべき物性について詳しく解説していただきました。ダイヤコンサルタントの杉本氏からは長年にわ

たり取り組まれてきたジョイント・インバージョンについて、具体例を示しながらその有効性について説明していただきました。川崎地質の鈴木氏は地中レーダで取り扱う物性について解説する中で、用語を正しく使うこと、基本に立ち返ることの重要性について言及されました。電気探査のシステム開発に携われた産業技術総合研究所の高倉氏からはデータ取得の際の心得についてのお話があり、「データ取得は一期一会」というフレーズが印象的でした。大成建設の土家氏は反射法の解釈可能性の向上のためにデータの背景となる物理的要素の追求が大切であることを述べられました。

後半のパネルディスカッションでは話題に対する質疑応答のほか、実務を行う上での重視すべき事項についての議論が展開されました。一つの質問に対して各パネリストから手法を横断する形で意見が示され、多様な考え方に触れられる良い機会となりました。オンラインでの質問が少なく、会場中心の意見交換となりましたが、今後は会場参加の方が増えることでより充実した議論となることを期待したいと思います。

地盤探査研究会では今後も基本的な技術や実務における課題等を題材にしながら、物理探査に実際に携わる方々にとって有用になるような情報共有・議論の場を提供できればと考えています。興味を持たれた方の次回以降のご参加をお待ちしております(特に若手の皆様大歓迎です)。



写真1 パネリストによる話題提供の様子



写真2 パネルディスカッションの様子

## 1. 蓄音器と音響インピーダンス

蓄音器というと読者の皆さんはどんな音を想像されるだろうか。筆者もかつてはざーざーと、雑音の中がかすかに声や音楽が聴こえるように考えていた。しかし、実際に蓄音器の音を聴いてみると、電気を一切使わないアコースティック楽器のような、なんとも言えない音がすることに感動した。金沢市に金沢蓄音器館がある。ここには名器と呼ばれる蓄音器が展示され、実際にSPレコードを演奏し、その音を楽しむことができる。2015年に秋季学術講演会の際に立ち寄って、名器といわれるクレデンザという蓄音器の音を聴かせてもらった。このクレデンザという蓄音器は販売当時には家が一軒買えるくらいの金額だったそうである。見た目も高級木製家具のような感じで、出てくる音もなんとも暖かく気品があり、意外に良い音がするのである。

前置きが長くなったが、その蓄音器の仕組みを探ってみよう。

### (1)蓄音機の原理

蓄音器は発明王エジソンにより1877年に考案された。直径8cmの円筒にスズ箔を貼って、回転させながら箔の上に傷をつけることで、音を波形として記録した。録音の始まりであり、この装置はフォノグラフと呼ばれている。その後、スズはロウに変更され、これにより安価で何度も録音できるように改良された。この当時は音を記録することが目的で、音楽を聴くという目的ではなかったようである。円筒形のロウ管は保管の効率が良くないため、円盤形の記録方式に改良された。録音における最初のパラダイムシフトといってよいだろう。円盤型の記録方式を発明したのは、ドイツのベルリナーで、この方式はグラモフォンと呼ばれた。現在でもレコードレーベルのドイツ・グラモフォンとしてその名を今に伝えている。円盤にしたことで、元となる原盤を製作すれば、あとはそれをプレスして複製することができるため、同じ音源を量産が可能となった。これにより録音された音楽を、再生するという発想が生まれた。

その音を再生する方法を次に見ておきたい。SP盤は毎分78回の速さで回転し、針先から記録された音を振動として拾うが、このままでは大きな音として聴くことができない。そのため図1に示すようなサウンドボックスと呼ばれる

装置が開発された。てこの原理を応用して、針先の微小な振動を、スタイラスバーと呼ばれる棒を介して、振動板に伝えることで音を増幅している。

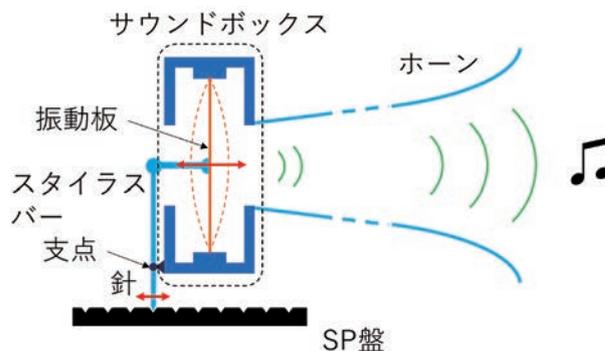


図1 サウンドボックスの構造

てこの原理を利用して、微小な振動を機械的に増幅するという発想は、煤書き地震計によって地面の微小な振動を、可視記録として増幅するのと同様に似ている(煤書き地震計の方が構造的にはかなり複雑)。

サウンドボックス内部に張られた振動板は、空気を押す、あるいは引くことで、粗密波を放射する。これを耳で聴こえるようにするために付けられている装置がホーンである。これがあることによって、人間が聴こえる音圧レベルになる。

なお、音を電氣的に記録できるようになったのは、1928年にテープレコーダーの原型が開発されるのを待つ必要があった。再生側のSP盤は、増幅方式が1930年代に電気式に改良され、スピーカー駆動となった。この装置は電気蓄音器、略して「電蓄」と呼ばれた。1950年代になりLPレコードが開発されると、SP盤は姿を消していった。

次回はもうひとつの蓄音器の原理であるホーンについて詳しく見ていくこととする。

次号【(2)音響インピーダンスとホーン】へ続く

### 【参考文献】

- 米村俊一(2021):「音」を理解するための教科書,コロナ社,240p.
- 金沢蓄音器館HP:  
<https://www.kanazawa-museum.jp/chikuonki/>
- 那須科学歴史館HP:  
<https://tzwrdr.co.jp/nsh/news/20210125/66/>

# 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査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

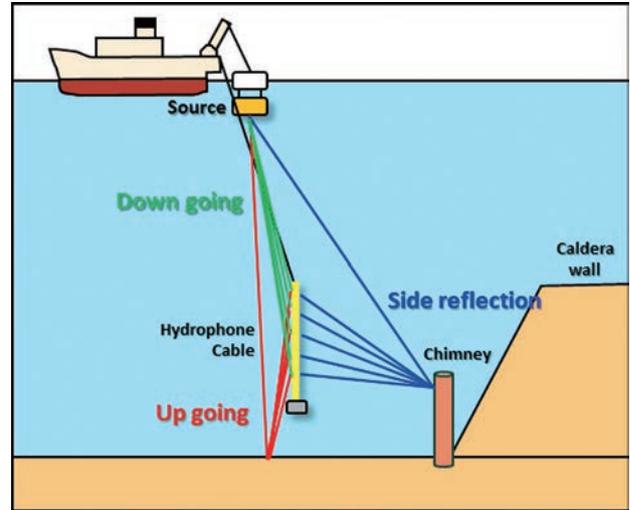


図1 ZVCS概念図

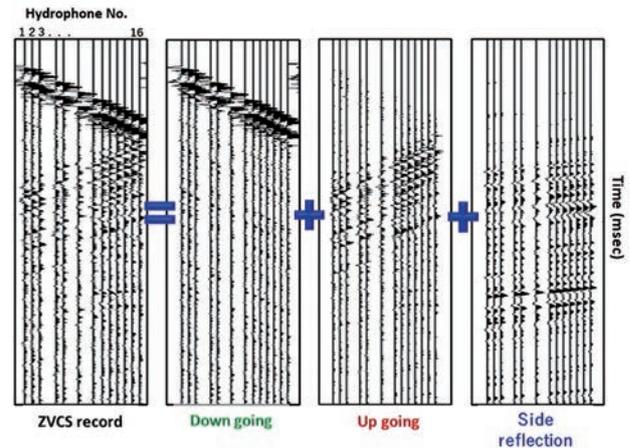


図2 ZVCS記録の波動場分離例

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ガンを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

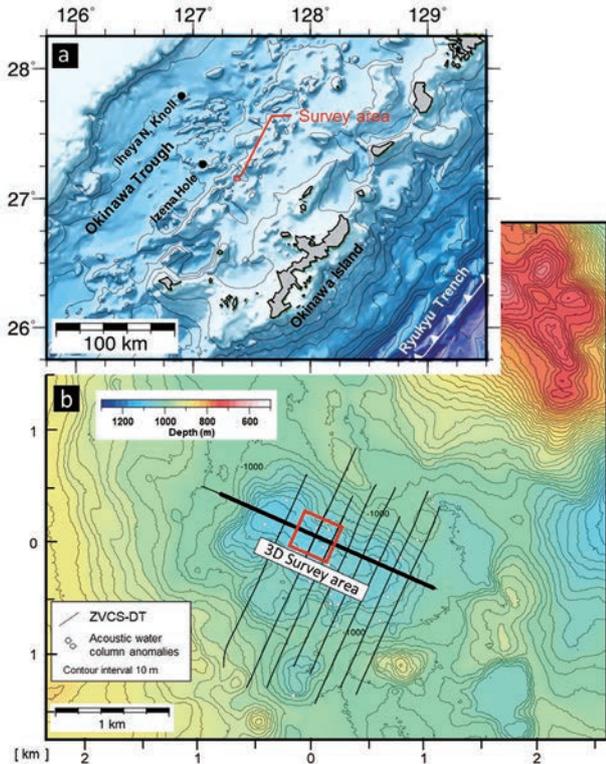


図3 探査事例  
 a 調査エリア位置図  
 b 二次元探査測線および三次元探査位置図

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、熱水活動による鈹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、角の取れた硫化鈹石が得られました。このことから凹地形形成時の熱水活動によって硫化鈹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。

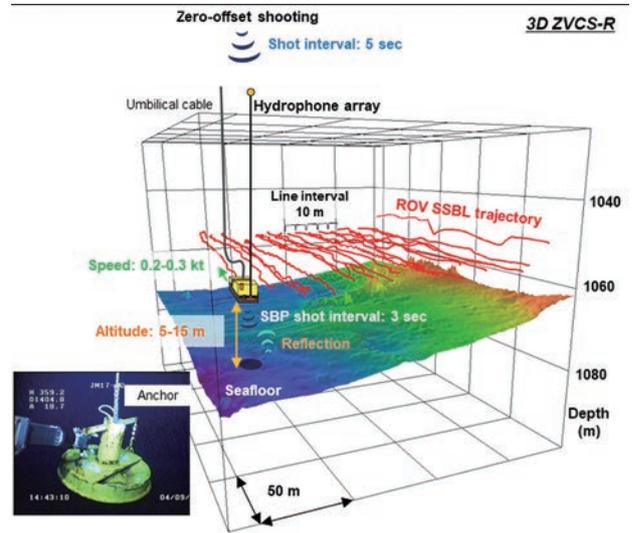


図5 3D ZVCS-Rの調査イメージと測線配置  
 ハイドロフォンケーブル下端のアンカーをROVでつかみ曳航する

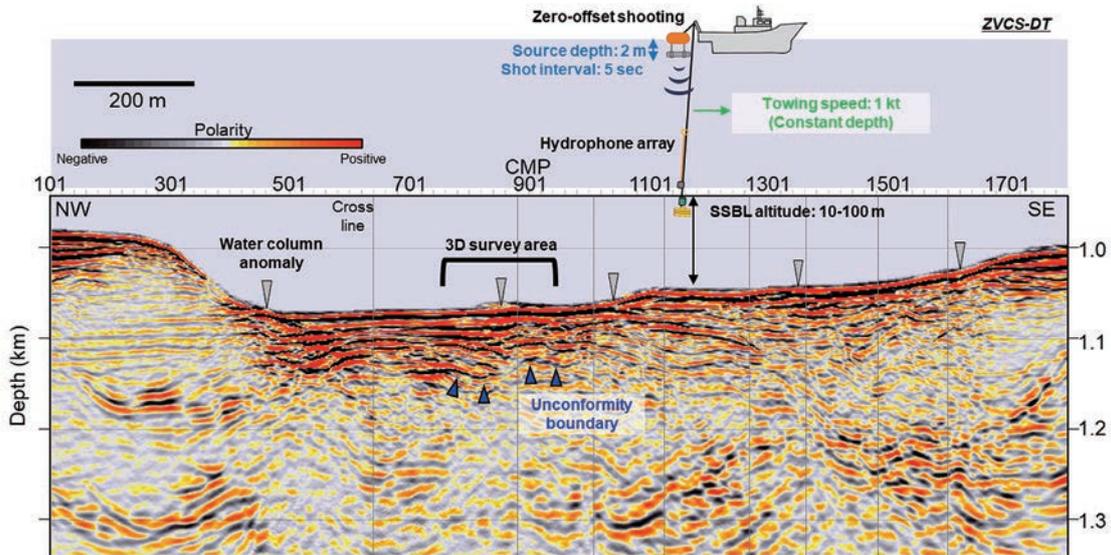


図4 ZVCS-DTによる調査イメージと探査結果例。熱水噴出を示唆する水中音響異常が報告された箇所をグレーの三角で示した。

## 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ご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。

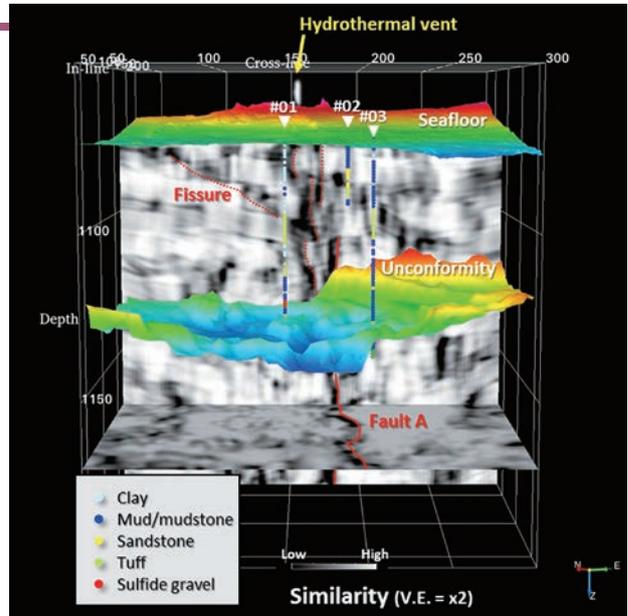


図6 3Dボリュームに対し隣り合う記録の類似性(Similarity)についてのアトリビュート解析を適用した結果  
海底面と3Dボリュームから抽出した不整合面およびボーリング調査で得られた3本のコア(#01、#02、#03)の記載を三次元空間に示した。断層および亀裂による構造境界を赤線で示した。

### 【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.



## お知らせ

本物理探査ニュースは、会員に限らず一般の方へも物理探査技術を理解してもらうために2009年より年4回発刊しています。物理探査技術を分かりやすく紹介すると共に、最新の技術や学会の活動についてタイムリーにお知らせします。記事の掲載を希望される方は、物探学会事務局もしくはニュース委員会委員長の吉川(yoshikawa.takeshi@kiso.co.jp)までご連絡ください。



## 編集後記

全国津々浦々で祭りが復活しているようです。編者の地元では過去最大規模のクラフトビールフェアが催されました。仕事なので、陽光眩しい中ビール片手に…とはいきませんが、ニュース原稿に目を通して思わず口元が緩みました。まず本号は「現場レポート」が2つ。時化る能登沖の船上作業はたいへんだろうなあ、でもホテルイカはおいしいだろうなあ、愛媛の微動の会、美酒いいなあ等々。EAGE、地震防災研究会、地盤探査研究会も盛況のようでした。「物理探査手法紹介」では誤植チェックを忘れて電子レンジの原理に引き込まれて納得。「物探よもやま話」を読んで「アコースティック楽器のような」古き良き蓄音機を聴きたくなるも、「研究最前線」で音響波を分解するための工夫を読むと、シンセ音の合成・分解(YMOのテクノポップ。これも古い。今で言えばボカロP?)が彷彿されました。まさに物探お祭り屋台ですが、今回は表紙からして記念祭典の告知です。みなさんぜひご来場ください!

(ニュース委員会委員・長 郁夫)

## 物理探査ニュース 第59号 2023年(令和5年)夏号

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 : http://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。