

# 物理探査 ニュース

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

## 目次

研究の最前線  
海底重力計の開発と海底熱水鉱床探査への適用 ..... 1

日本応用地質学会北海道支部  
令和3年度技術講習会 開催報告 ..... 3

わかりやすい物理探査  
屈折法 その4：速度構造の解析方法 ..... 4

会員企業紹介  
住鉱資源開発株式会社 ..... 8

現場レポート 台湾微動観測記 その1 ..... 10

現場レポート 新潟県陸上震探収録作業について① ..... 12

現場レポート 新潟県陸上震探収録作業について② ..... 14

お知らせ、編集後記 ..... 16

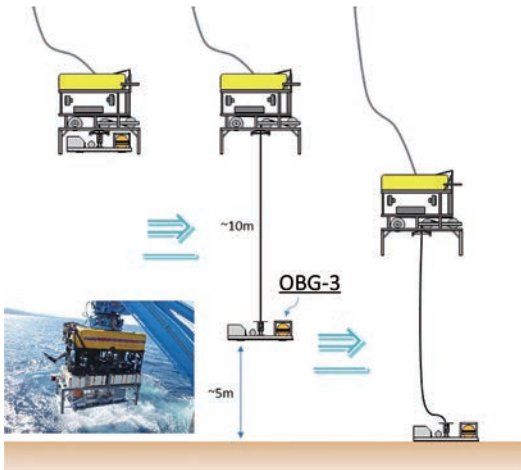
Geophysical Exploration News Spring 2022 No.54



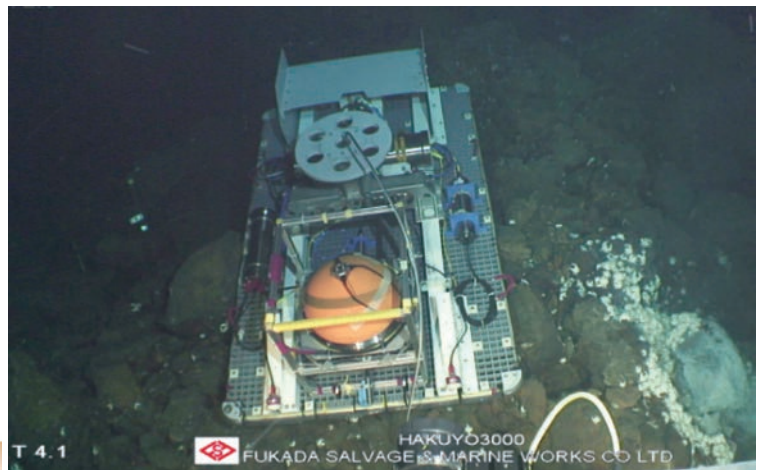
## 海底重力計の開発と 海底熱水鉱床探査への適用



川崎地質株式会社 押田 淳



巻頭図-1 ROV曳航型探査システム



巻頭図-2 海底重力測定状況

### 1. はじめに

海底重力計を使うと海域で陸上と同等精度の重力測定が可能です。また、探査対象に近い海底で測定を行うので、船上重力計では検知することすら難しい小規模な重力異常も捉えることが可能です(図1)。具体的には海域活断層や海底熱水鉱床などが主な探査対象となります。今回、これらのニーズに対応するために、浅海から深海まで使用可能な海底重力計を開発しました。また、SIP「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)」の一環として、中部沖縄トラフの「Hakureiサイト」で、今回開発した海底重力計を用いた海底熱水鉱床探査を実施しましたので、その結果も併せてご紹介いたします。

### 2. 海底重力計の開発

当社では20年以上前から研究機関向けに海底重力計の開発と現場計測を行ってきましたが、今回、海域活断層調査や海底熱水鉱床・表層型メタンハイドレートなどの海底資源探査への関心が高まりつつある中で、自社で自由に使用できる海底重力計(OBG-3と命名)を開発しました(図2,3)。

OBG-3ではシステムの核となる重力センサには特別にカス

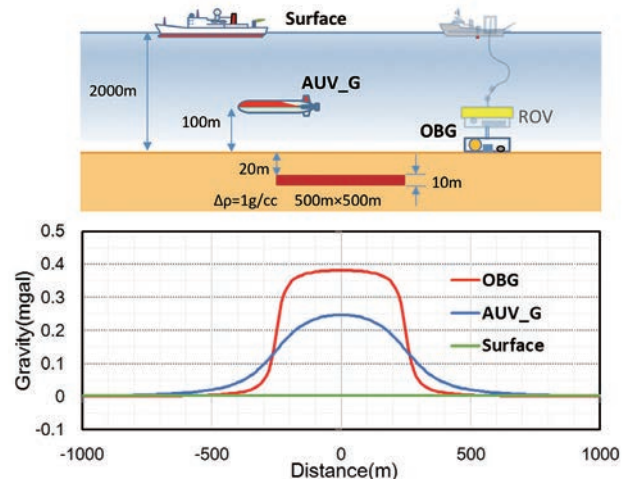


図1 調査方法による重力異常の違い

タマイズしたScintrex CG-5重力計(測定精度0.01 mgal、測定分解能0.001 mgal)を採用しています。また、観測位置

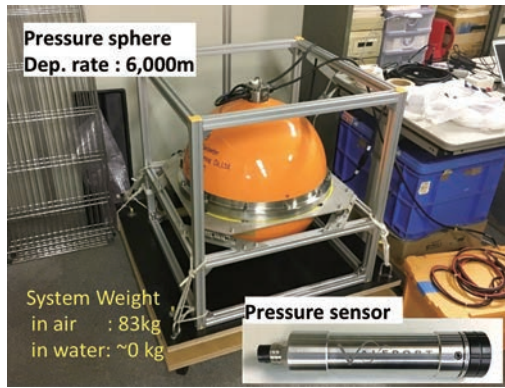


図2 OBG-3外観

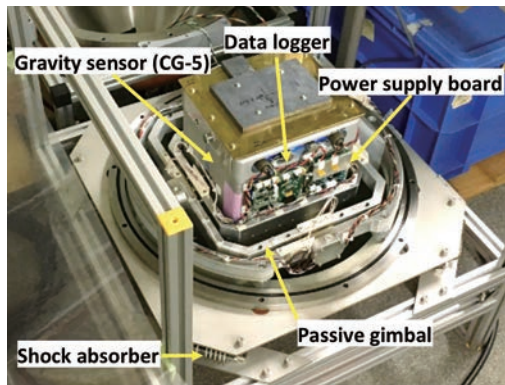


図3 OBG-3耐圧容器内部

(深さ)測定用の圧力計としてValeport miniiPS(測定レンジ3,000m、精度0.01%FS、分解能0.001%FS(=3cm))を使用しています。

重力・圧力データは6Hzでサンプリングを行い、計測時刻データと共にデータロガーのSDカードに記録されます。電源はリチウムイオン電池を使用しており、1回の充電で24時間以上の連続観測が可能です。

圧力計以外のすべての電子機器はチタン合金製の耐圧容器(外径φ500mm、最大使用可能水深6,000m)の中に設けられたジンバル機構の内側に取り付けられています。ジンバルは水平保持にモーターを使用しないパッシブ方式です。各ジンバル軸に回転型のオイルダンパが取り付けられており、着底後10秒程度で重力センサは自然に鉛直方向を向き静止します。

### 3. 海底熱水鉱床探査への適用

海底重力探査はSIP参加民間2グループである海洋調査協会(JAMSA)と次世代海洋資源調査技術研究組合(J-MARES)により、2016年3月に実施されました。調査海域である「Hakureiサイト」は中部沖縄トラフ東縁に位置し、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)により海底熱水鉱床の分布が確認されている場所です(図4)。

探査はROV曳航型探査システムのパレットに海底重力計を取り付け、ROVは着底せずにパレットだけを着底させることで、1点当たりの作業時間の短縮を図ることができました(巻頭図1、2)。結果的に、「Hakureiサイト」での潜航回数は2回で合計21点(含む再測)の測定を実施しましたが、この間、海底での作業時間は合計11時間であり、移動を含む1点当たりの作業時間は平均で30分程度に収めることができました。また、処理済み1分データのばらつき程度から、各測点での重力データは陸上と同程度(0.010mgalオーダー)の精度で測定できていることがわかりました。重力調査に必須の器械ドリフト補正のための閉塞測定は、時間的な制約により、航海の前後で那覇新港の絶対重力値が既知の基準点で実施しました。

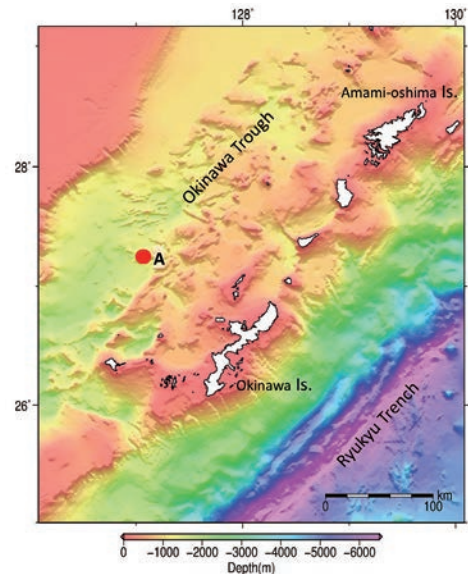


図4 「Hakureiサイト」位置図(A点)

図5に探査結果を示します。測定点は全長約1,200mの東西測線上に100m(一部50m)間隔で設定されました(同図下段の▲)。水深は測線西側の1,640mから比高40m程のマウンドを通り東端では1,580mまで浅くなります。同図上段の●(黒丸)は観測されたブーグ重力異常(ブーグ板密度: 1,950kg/m<sup>3</sup>)、●(赤丸)は2次元モデル計算結果をそれぞれ示しています。黄色の縦線はJAMSTECの掘削船「ちきゅう」による海底掘削データにより海底熱水鉱床が確認されている区間、赤色の領域が海底熱水鉱床をシミュレートした2次元モデル(周囲より密度が1,000kg/m<sup>3</sup>大きい)、茶色の領域はより深部の密度構造に起因すると考えられる長波長成分をシミュレートするために便宜的に設けた2次元モデルの領域です。

この解析結果は掘削データにより海底熱水鉱床が確認されている区間を取り囲むように設定された高密度域(赤色)によって観測値が説明可能であることを示しており、潜頭性も含めた海底熱水鉱床を重力異常探査により初めて捉えたものと言えます。

### 4. おわりに

今回の「Hakureiサイト」での結果は、既知の海底熱水鉱床による重力異常の検証であり、残念ながら未知の海底熱水鉱床を探し当てたとは言えません。しかしながら、潜頭性の海底熱水鉱床に起因する重力異常を初めて捉えたことは重要です。今後、初期の探査に加えて、鉱床の範囲と品位を調べるための高価な海底グリッドボーリングに対する相補的な探査手法として、探査コスト削減に向けた活用を期待するところです。

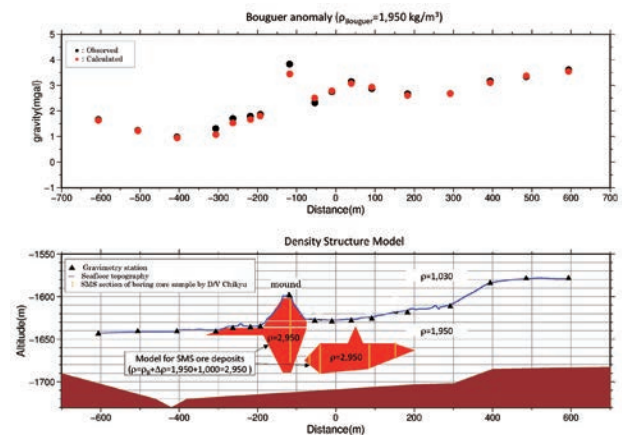
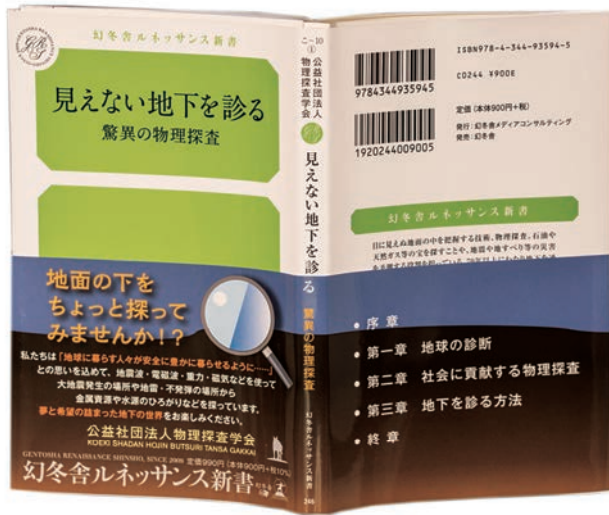


図5 中部沖縄トラフ「Hakureiサイト」における海底重力探査結果

# 日本応用地質学会北海道支部 令和3年度技術講習会 開催報告

川崎地質株式会社 鈴木 敬一



テキストとして用いた「見えない地下を診る～驚異の物理探査～」

令和4年1月28日に日本応用地質学会北海道支部令和3年度技術講習会が、開催された。一般社団法人北海道地質調査業協会、公益社団法人物理探査学会との共催である。新型コロナウイルス感染症拡大防止の観点からZoomによるWeb開催であった。事務局を含め49名の参加者があった。本講習会は令和4年1月に発刊された書籍「見えない地下を診る～驚異の物理探査」をテキストに用いた。講習内容は以下の通りである。

- 第1章：地球の診断  
(北海道大学名誉教授 茂木 透)
- 第2章：社会に貢献する物理探査  
(川崎地質 鈴木 敬一)
- 第3章：地下を診る方法  
(三井金属資源開発 志賀 信彦)

講師は上記テキストの執筆者であり、主に執筆した内容をそれぞれの講師が担当し、講義内容はテキストに沿っている。ただし、文章だけの説明については、図を用いて適宜補足説明した。

第1章は「地下はなぜ見えないのか」「地下を診るにはどうしたらよいか」ということについて解説している。ここでは「見る」と「診る」を意識的に使い分けた。第1章では地震波、電気、磁気、電磁波、重力、放射能など様々な物理現象とそれによって得られる物理的性質、すなわち物性について解説した。

第2章は一転して物理探査がどのように使われているのかについて様々な事例を紹介している。これまでの物理探査の書籍では原理的なところから入るものが多く、物理探査の初心者や利用者には敷居が高い印象があったようである。そのため本テキストでは事例から入り、それがどのようにして得られたのかを後から説明する方式とした。この章では、社会に貢献するというキーワードを前面に押し出し「地下は宝の山でもあり危険の巣でもある」ということを示した。宝の山という点では、資源の宝庫、土木構造物や社会インフラの基盤であること、危険の巣という点では地震や火山あるいは洪水などの災害の危険性である。これらの両方の分野に物理探査技術が使われている。他にも環境問題や遺跡等の文化財、あるいは地雷や不発弾の検知技術など様々な分野で物理探査は利用されている。

第3章は物理探査の原理的なところを解説している。まず初めに近年の物理探査には欠かせない逆問題(インバージョン)を説明し、その後、物理探査の各手法の説明を行った。初めに地震探査関係として屈折法地震探査、反射法地震探査、表面波探査、微動探査、自然地震探査について解説され、重力探査・磁気探査・電気探査と続く。電気探査には比抵抗法、強制分極法、自然電位法がある。続いて電磁探査が解説された。電磁探査は手法が多岐にわたり、MT法、ループ・ループ法、過渡応答電磁法(TEM法)、空中電磁法、海底電磁法などがある。この次に地中レーダー、リモートセンシング、放射能探査が紹介された。

物理探査は多方面に利用され、手法も多岐にわたっていることを紹介した。そこで強調したのは何を「診る」のかということである。これは本セミナーの講演でも強調した。単に「診る」といっても地盤の硬さを診るのか、地下水を診るのかによっても手法が異なる。さらにどの程度の深さや解像度(分解能という)で診るのか、それによっても適用する手法が異なる。このことに十分注意して調査計画の立案をすることで、物理探査のより良い結果が得られる。

講演後の質疑の時間もあったが、オンラインのためか質問やコメントはなかった。異なる学会でも重なる部分があり、互いに連携することが重要であることを再確認した。今後もこのような機会を積極的に設けて行きたいと考えている。

## 1. はじめに

この連載も今回で最後となりました。初回は屈折法探査を身近な問題に置き換えて説明しました。2回目は数式ばかりになりましたが、屈折波の伝わり方や走時曲線と地下構造の関係について学びました。そして3回目は、屈折法探査にとって重要な走時曲線について、詳しく説明しました。とくに屈折波の走時曲線が満たすべき幾何学的特徴について、実データを使って解説しました。データの良否を判断できる重要な証拠です。参考になりましたでしょうか。今回はいよいよ解析方法について説明します。

しかし、実は解析作業の中で最も重要なのは、前回説明した走時曲線の作成なのです。最近の傾向として、屈折法探査も他の多くの探査手法と同様、PCでの解析が主流になってきています。乱暴な話ですが、走時曲線さえ入力すれば、コンピュータがあつという間に自動解析してくれるのです。便利になったものですが、もし間違った走時曲線を入力しても、間違った解析結果が出てくるだけなのです。それに気づいて正しい答えを導き出せるのは、正しい知識を持つ物探屋だけなのです。自動解析については、後であらためて述べることにします。

一方、連載初回の記事の中で、屈折法探査が古くから使われてきたと述べました。コンピュータが普及する前から屈折法探査は実務で使われてきたのです。その理由の一つは、「萩原の方法」という解析法が普及し、手解析で地下構造を描くことができたからです。まず「萩原の方法」による解析方法を説明しましょう。

## 2. 萩原の方法

前回、走時曲線から地下構造を求める説明をしたときには、地表が水平で速度境界の傾斜が一律のモデルを想定しました。しかし実際の調査地は、地形や速度境界に傾斜や凹凸があるのが普通です。そんな場合にも解析できるのが「萩原の方法」です。ここでは図式解法と呼ばれる方法で解析手順を説明します。

図1に測線長50m、受振点間隔5mの場合の、起振点A、Bからの走時曲線を示します。2層構造の走時曲線ですが、凹凸があって走時曲線の傾きから速度を決めることはできませんね。では解析を始めましょう。理論は端折って、手順だけ説明していきます。

まず往復走時 $T_{AB}(=T_{BA})$ の1/2の時間に線を引きましょう。と、何気なく書きましたが、前回説明した「往復走時

の一致]を思い出してください。往復走時が一致していないと、この線をどこに引けばよいのかわかりません。最初から解析につまずいてしまいますね。次に、一つの受振点Pに着目して、起振点Aからの走時 $T_{AP}$ と起振点Bからの走時 $T_{BP}$ の差を取ります。さらにその差の1/2の時間を先ほどの $T_{AB}/2$ の線を基準にしてプロットします(図中●)。この点(時間)を $T'_{AP}$ とします。整理すると、 $T'_{AP}=T_{AB}/2+(T_{AP}-T_{BP})/2$ ということになります。

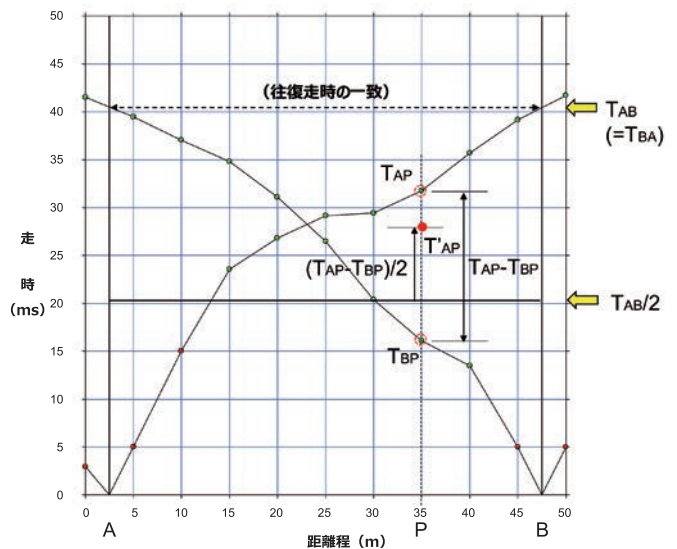


図1 萩原の方法(1) 速度走時( $T'$ )の説明

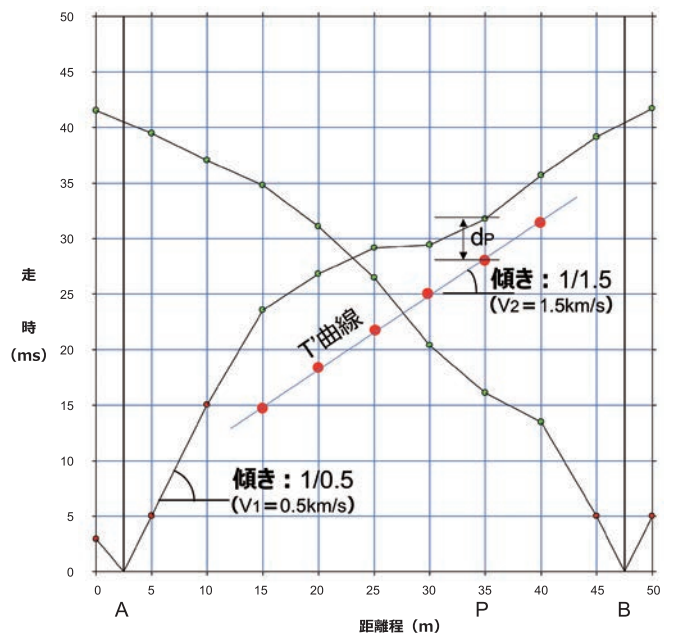


図2 萩原の方法(2)  $T'$ 曲線と速度の決定

T' (ティー・ダッシュと読みます)を各受振点で同様にプロットすると、**図2**のようになります。T'の並びはT'曲線とか速度走時曲線と呼ばれます。曲線と呼ばれますが、ほぼ直線状に並んでいることがわかるかと思います。走時曲線に凹凸があっても、T'曲線はほぼ直線になり、その傾きの逆数が2層目の速度V<sub>2</sub>を示すのです。1層目の速度は、起振点近傍の直接波の走時曲線の傾きの逆数ですから、これも**図2**から求められます。これで1層目と2層目の速度を求めることができました。最後に、各受振点での1層目の層厚を求めれば、速度構造を描くことができます。そのために深度走時d<sub>P</sub>という値を定義します。

$$d_P = T_{AP} - T'_{AP}$$

です。1層目の層厚h<sub>P</sub>は、次式で求められます。

$$h_P = d_P \cdot V_1 / \cos i_c$$

ここに、i<sub>c</sub>は臨界屈折角です(本連載その2参照)。

ところで層厚というのは、受振点から速度境界に降ろした垂線の長さです。しかし速度境界が決まっていない段階では、「速度境界に垂線を降ろす」ことは困難です。そこで、**図3**に示すように受振点を中心として、h<sub>P</sub>を半径とする円弧を描いて、その包絡線を2層目の速度上面境界とします。このように速度構造を求めるのが萩原の方法です。

細かいことをずいぶん端折って、手順の説明だけになってしまいました。グラフ用紙と鉛筆、定規、コンパス程度があれば、コンピュータがなくても解析できることがお分かりいただけたでしょうか。

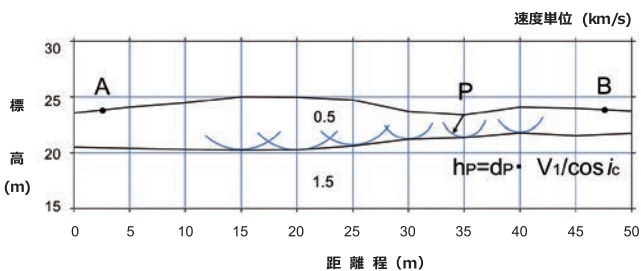


図3 萩原の方法(3) 速度層境界の求め方

### 3. 実データを解析してみよう

では、前回、走時曲線の説明に使った実データを解析してみましょう。

#### (1) 層構造解析

萩原の方法のように、地下を速度がほぼ均一の複数の層から構成されると仮定して解析することを、層構造解析と呼びます。

**図4**に解析する走時曲線を示します。層構造解析の場合、まず走時曲線のどの部分がどの層からの屈折波の走

時かを定める必要があります。これには「走時曲線の平行性」などの特徴を使います。図中の走時曲線には走時を示す○印に色を付けています。赤が第1層を伝わる直接波、緑が第2層からの屈折波、青が第3層からの屈折波が、それぞれ初動となっていることを示しています。色の変わり目が折れ点ということになります。

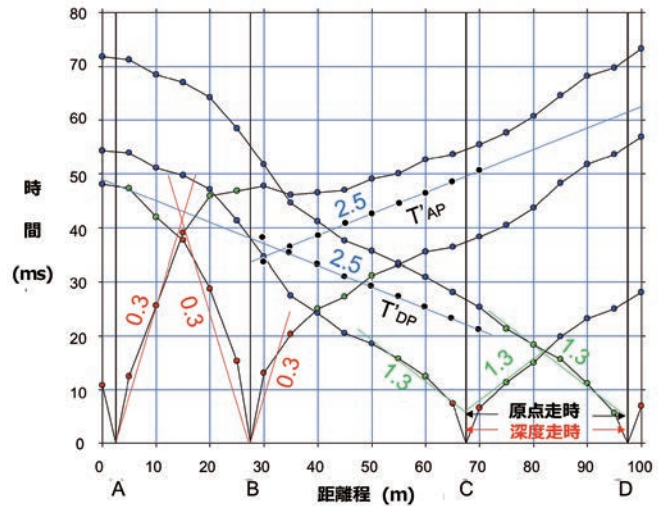


図4 走時曲線の解析(利用できる速度情報など)

起振点AとDの走時曲線を使って、前述のT'曲線を作成します。図中、黒丸を青の直線で近似して2.5という数字を付したのが、T'曲線です。第3層の速度は2.5km/sです。T'曲線はその受振点の左右両方向からの走時がともに同一層からの屈折波である範囲でのみ定義されますので、距離程30~70mの範囲だけで計算されます。実際にはこの範囲の速度しかわからないわけですが、他に情報がないので、測線の端までこの速度が続くと考えておきます。また、起振点AからのT'\_{AP}と同様、起振点DからのT'\_{DP}も計算できますので、図中にあわせて示しました。測線全体にわたって、第3層までの深度走時は得られました。

起振点AとB近傍の走時曲線は、起振点から0.3km/sの傾きを持つ直線(赤実線)で近似できるので、第1層の速度は0.3km/sと考えられます。第2層の折れ点距離は15m程度と読み取れます。起振点CとD付近では、左右両方向の第2層の走時曲線で共通して1.3km/sの直線(緑実線)で近似できる部分があります。起振点Cでは、左右の走時曲線の原点走時も一致します。そこで、この1.3km/sを第2層の速度と考えることは妥当かと思えます。起振点CとDでは、原点走時の1/2としてタイムターム(=深度走時)が求められます。走時曲線から得られる情報はこの程度です。

速度の情報はそれぞれ測線の一部でしか求められませんが、測線全体にわたってこの3層が連続していると仮定し、深度走時や折れ点距離を手掛かりにして層構造を描いたのが**図5**です。わからない部分も、滑らかな線で結んでしまいました。この構造が、走時曲線を説明し得るものになっているか

確認してみます。つまり解析した速度構造を使って、逆に走時曲線を計算してみるのです。一般にはレイトレーシングなどと呼ばれますが、屈折法探査の世界では「パス計算」と呼ばれ、これも昔は手計算で行われていました。さすがに今ではコンピュータを使って計算することができます。

図6は解析結果の速度構造に対する理論走時曲線です。元の観測走時曲線も合わせて示してあります。概ね合っていますが、乖離が大きいところもありますね。さらに、コンピュータ解析では、層境界形状を微修正して、観測走時と理論走時ができるだけ一致するように、自動修正することができます。その結果が図7で理論走時曲線が図8です。両者はかなり一致してきました。この解析結果は、走時曲線を十分説明し得るものと言えそうです。走時曲線から各層の速度が正しく求められさえすれば、層境界形状の微修正はコンピュータに任せてもよさそうですね。

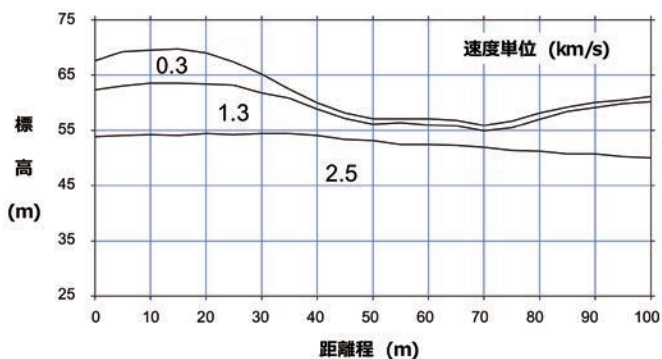


図5 層構造解析結果(手解析)

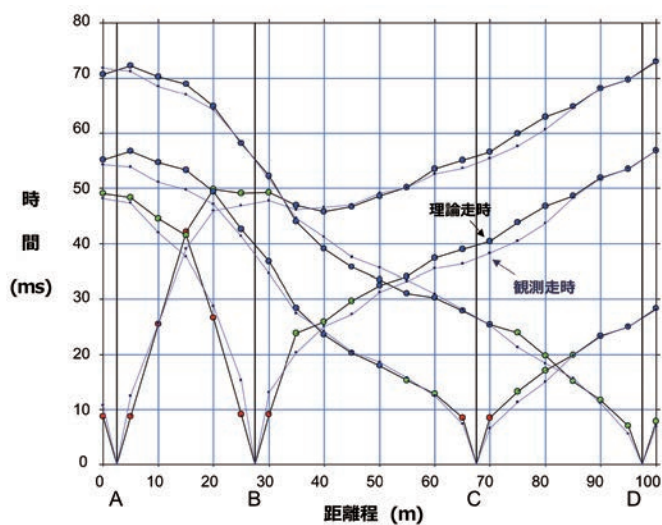


図6 層構造解析結果に対する理論走時と観測走時

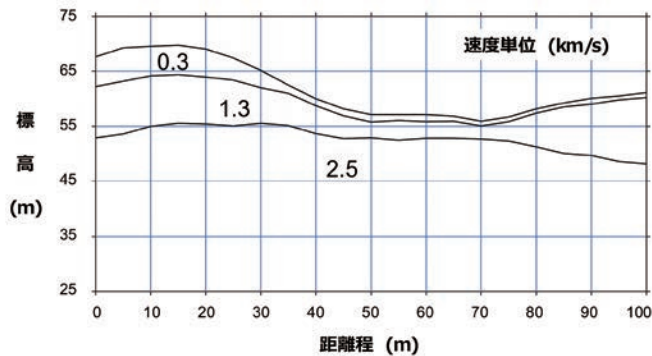


図7 層構造解析(コンピュータによる自動修正結果)

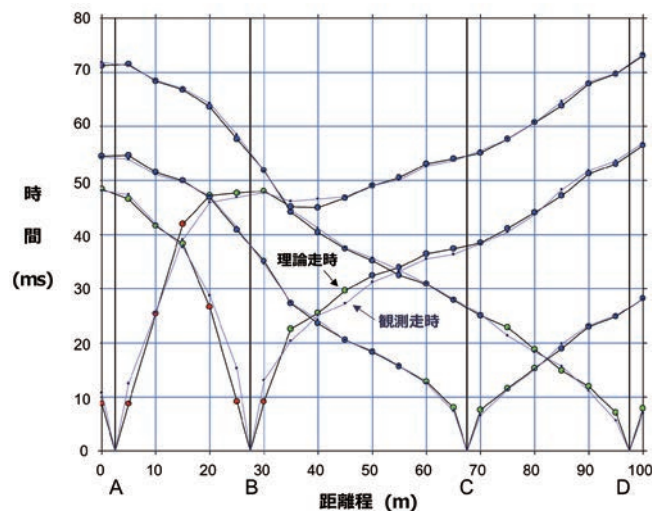


図8 自動修正結果に対する理論走時と観測走時

## (2) トモグラフィ解析

最近の傾向として、初めから層構造を仮定しないトモグラフィ解析が主流になっていることと思います。これは屈折法というよりは、初動走時を使った弾性波トモグラフィと言っても良いと思いますが、屈折法と同じ測定をして、解析も走時曲線を作成するところまではまったく同じですので、屈折法の解析方法の一つと考えて良いと思います。トモグラフィの詳しい説明は割愛しますが、地下を多数のセルに分割して、各セルに速度値を与えることによって、観測走時と理論走時ができるだけ一致するような速度分布を自動的に求めるものです。

図9がトモグラフィ解析による速度分布断面図、図10が観測走時と理論走時の比較図です。トモグラフィ解析では、層構造では表しきれないような複雑な速度分布も解析できるメリットがあり、有効な解析方法だと思います。ただし、トモグラフィ結果は速度コンター図で表されているもので、コンター線が速度層境界を示すものではないことに注意しておく必要があります。また、この場合でも、前回説明した走時曲線の幾何学的特徴を満足していなければ、正しい解析はできませんので、そこは十分注意してください。

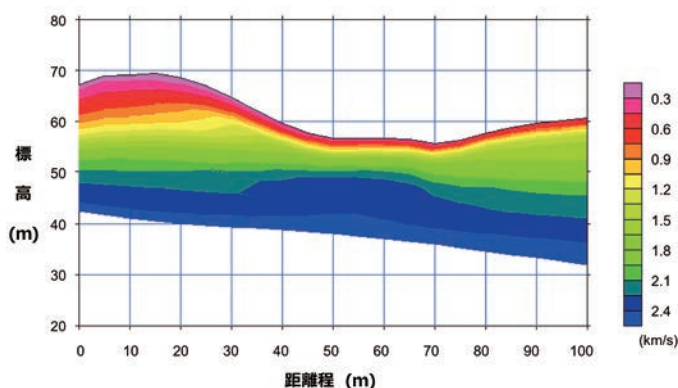


図9 トモグラフィ解析結果

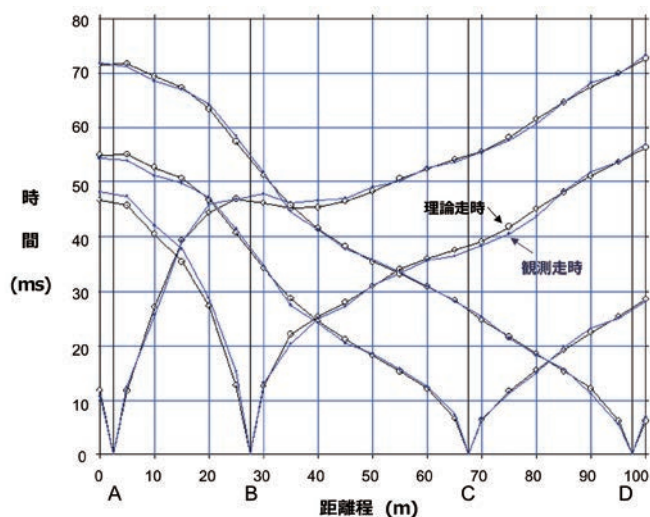


図10 トモグラフィ解析結果に対する理論走時と観測走時

## 4. おわりに

これで屈折法探査の連載を終えます。必ずしも「分かりやすい」とは言えなかったかもしれませんが、大事なことは丁寧に説明したつもりです。すなわち、コンピュータを使っても使わなくても、「屈折法探査は走時曲線が命」です。屈折法探査を実施する方にも、探査結果を利用する方にも、役に立つ記事になっていれば幸いです。

## わかりやすい物理探査シリーズ バックナンバー

### ▶ 電磁法

早稲田大学教授 斎藤 章

その1 物理探査ニュースNo.3(2009年)

その2 物理探査ニュースNo.4(2009年)

### ▶ インバージョン解析の基礎

東工大学名誉教授、物理探査学会名誉会員 斎藤 正徳

その1 物理探査ニュースNo.9(2011年)

その2 物理探査ニュースNo.10(2011年)

その3 物理探査ニュースNo.12(2011年)

その4 物理探査ニュースNo.13(2012年)

### ▶ 磁気探査入門講座

日本物理探査(株)技術顧問、

産業技術総合研究所客員研究員 中塚 正

その1 物理探査ニュースNo.15(2012年)

その2 物理探査ニュースNo.16(2012年)

その3 物理探査ニュースNo.17(2013年)

その4 物理探査ニュースNo.18(2013年)

### ▶ 微動探査講座

電力中央研究所 地球工学研究所 佐藤 浩章

その1 物理探査ニュースNo.19(2013年)

その2 物理探査ニュースNo.21(2014年)

その3 物理探査ニュースNo.24(2014年)

その4 物理探査ニュースNo.26(2015年)

### ▶ 反射法地震探査

石油資源開発株式会社 高橋 明久

その1 物理探査ニュースNo.32(2016年)

その2 物理探査ニュースNo.35(2017年)

その3 物理探査ニュースNo.38(2018年)

その4 物理探査ニュースNo.40(2018年)

その5 物理探査ニュースNo.43(2019年)

### ▶ 電気探査

応用地質株式会社 島 裕雅、櫻井 健

その1 物理探査ニュースNo.44(2019年)

その2 物理探査ニュースNo.45(2020年)

その3 物理探査ニュースNo.47(2020年)

その4 物理探査ニュースNo.48(2020年)

### ▶ 屈折法

応用地質株式会社 齋藤 秀樹

その1 物理探査ニュースNo.49(2021年)

その2 物理探査ニュースNo.50(2021年)

その3 物理探査ニュースNo.51(2021年)

※著者の所属は当時のものです。



### 会社概要

住鉱資源開発株式会社(Sumiko Resources Exploration & Development Co., Ltd., 略称:SRED)の前身である住鉱コンサルタント株式会社は、1963年に鉱山探査部門と土木部門の技術を土台とした総合コンサルタントとして、住友金属鉱山株式会社により設立されました。2010年には、主たる業務を資源開発調査とするため、建設コンサルタント部門を切り離し、社名を「住鉱資源開発株式会社」に変更しました。

弊社は、設立以来58年間にわたり、住友金属鉱山株式会社の探鉱・開発プロジェクトや菱刈鉱山の探鉱・採鉱・開発において実績を重ね、これまで国内外の鉱物資源探査、地熱資源探査、海洋資源探査、地質構造探査、地震・火山観測や活断層調査などに携わってきています。

### SREDの物理探査

物理探査は、地質調査、ボーリング技術、鉱山開発と並ぶ弊社保有技術として重要な役割を担っています。

菱刈鉱山では、1970年代後半から広域重力探査、電気探査(シュランベルジャー法)、空中電磁法、その他に当時の新技術として試験的にSIP法、CSAMT法が実施されました。結果として鉱化帯と高重力異常、低比抵抗異常との関連が認められ、1981年の鉱床発見の糸口となり、鉱床探査に対する物理探査の重要性が認識されました。

現在、弊社の主力となっている物理探査手法は、重力探査、MT法探査、微動アレイ探査です。保有する測定機器は以下の通りです。

- 重力計：ラコステG型、D型(写真1)
- 電磁測定器：Phoenix Geophysics社製MTU-5Aシステム、MTU-5Cシステム(写真2)
- 微動アレイ用微動計(写真3)

弊社の物理探査は、これまで鉱物・地熱資源探査、地質構造調査などの分野で多くの実績を有しています。微動アレイ探査は土木地質分野や地震工学分野でよく用いられていますが、弊社では非鉄金属の鉱床探査への適用実績もあります(例えば、岡田、2017)。

弊社の物理探査には、データの地質解釈を重視しているという特徴があります。物理探査結果と地質・地質構造データ(広域のおよび地域的な既往地質データ、現地地質調査結果)、掘削データ、地化学データなどを総合的に解釈した地質構造モデルを提供致します。



写真1 LaCoste & Romberg社製D型重力計(左)、測定の様子(右)



測定機器  
MTU-5C



電位電極  
PE5



磁気センサー  
MTC-50, MTC-150L, MTC-80H

写真2 電磁探査測定機器  
(Phoenix Geophysics社製、MTU-5Cセット)



ハイエンドクラス1台に搭載可能



L=20cm, W=10cm, H=21cm



測定風景

写真3 微動アレイ探査機器・測定風景

### 物理探査データの解析・解釈業務

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が実施している「地熱資源ポテンシャル調査のための広域空中物理探査」では、調査が開始された2012年度から空中重力偏差法探査(AGG)、時間領域空中電磁探査(HeliTEM)、



空中磁気探査のデータ解析および解釈もおこなわれています。本調査で用いられている探査は、空中物理探査の有効性に加え、高分解能(62.5mメッシュ)であることが特徴です。弊社では直線状の重力偏差の急変部を断層・断裂帯、低比抵抗域をキャップロック上面と解釈し、空中物理探査結果に基づく着目地区を抽出しています(例えば、JOGMEC, 2017)。

最近では地熱資源探査のため、AGGで得られた重力偏差テンソルを用いた密度構造の3次元解析をご依頼頂くことが増えています。これは観測値を説明し得る3次元密度分布を逆解析によって求めるものです。ポテンシャル力である重力・重力偏差は深さ方向の情報に乏しい傾向があり

ますが、3次元解析は地熱貯留層となりうる高角の地質構造を抽出するのに有効な解析です。得られた密度モデルは、カルデラや断層に伴う大規模な重力基盤の形状だけでなく、溶岩ドームや貫入岩など比較的小規模な密度異常体も可視化することができます。それによって地熱有望地における断裂帯の角度や深度方向への連続性など、詳細な地質構造を解釈することができ、地熱構造モデルの構築に大変有効なものとなっています(図1、野上, 2018)。また、3次元解析した密度モデルから低密度部を剥ぎ取ることで、貫入岩を示唆する高密度部の盛り上がりが見えなくなった例もあります(図2)。

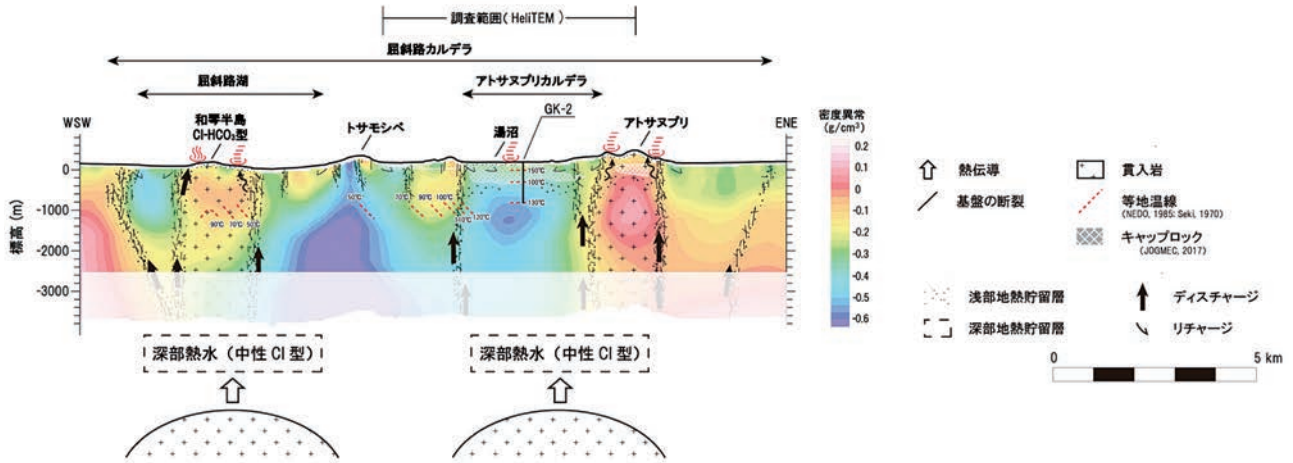


図1 屈斜路湖周辺地熱構造モデル(背景は3次元解析した密度モデルの断面、野上, 2018)

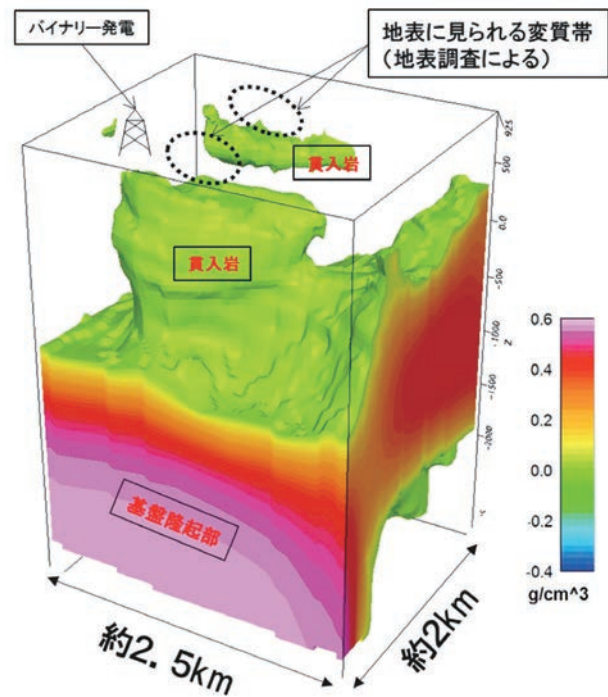


図2 低密度部を剥ぎ取った密度モデルの鳥瞰図  
バイナリー発電は貫入岩縁辺部に発達した断裂帯を上昇してきた熱水を利用していると解釈される

## おわりに

弊社は、今後も鉱物・地熱・海洋資源の探査と開発、火山や活断層調査などの分野で、最新技術を積極的に開発・導入しながら、物理探査手法やこれに基づく地質構造モデルの適用分野を拡大し、社会に貢献してゆく所存です。

**【引用文献】**  
 岡田和也(2017)GSJ地質ニュース, Vol.6, No.2, 53-61.  
 JOGMEC(2017)平成28年度「地熱資源ポテンシャル調査のための広域空中物理探査」報告書.  
 野上俊介(2018)JOGMEC平成29年度地熱部事業成果報告会.



# 台湾微動観測記 その1(小アレイ)

産業技術総合研究所 長 郁夫

## 2018年花蓮地震

2018年2月に台湾で発生した花蓮(かれん)地震(Mw 6.4)の調査のため、京都大学防災研究所の山田真澄氏がとりまとめた花蓮市内の微動観測に同行しました。この地震は死者17名、ビル4棟の倒壊など多くの被害をもたらしましたが、ビルの倒壊理由(地盤、地表断層、震源過程等)が判然としませんでした。そこで山田氏は地盤調査のため日本から6名、台湾から6名の研究者を募り微動観測を行いました(図1)。



図1 微動観測隊員(2列目左端が山田氏)

花蓮(図2)は台湾東部最大の都市です。港があって魚が美味しく、背後には富士山より高い中央山脈が迫ります。大理石の断崖絶壁で有名な太魯閣(たろこ)峡谷まで30kmで、ナイトマーケット「東大門夜市」の近くには繁華街を東西に区切るように米崙(みるん)断層が走ります。大地のダイナミクスを感じます。地盤はさぞ複雑なことでしょう。倒壊したビルの周辺は特に軟弱だったのでしょうか?

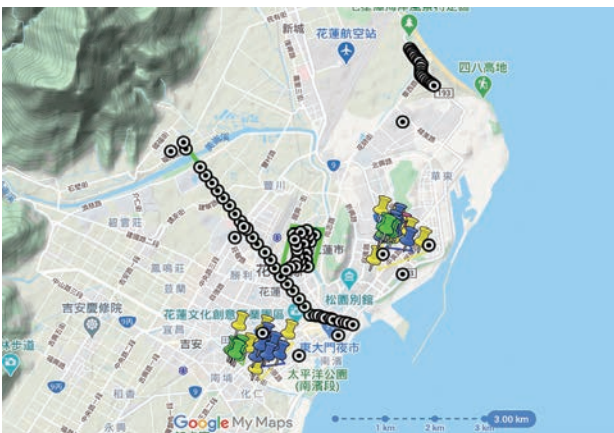


図2 花蓮市の微動観測地点(ピン、マーカー等)

## 観測計画

観測には産総研の3成分サーボ加速度計6台と鳥取大学からお借りした4台で合わせて10台を手分けして持参

しました。これをどう使うか皆で話し合いました。「浅部構造(小アレイ)を面的(3D)に」、「断層を挟む測線沿い(2D)に」、「地震基盤(大アレイ)も」、などいろいろな希望が出ました。その結果、欲張りにも全部やろう(図2)ということに。もちろん実現性は現地の状況によるので、まずは初日にテストをしてから内容を確定する流れとなりました。

## 現地テスト

旅程は2018年10月の1週間でした。移動を除くと観測は4日間、うち初日は朝から機材チェック、午後は「小アレイ」の現場テストとなりました。

私はこれまで国内で半径0.6mの極小アレイと半径7-8mの三角アレイをセットで観測してきましたので「ぜひ花蓮でも」と思っていたのですが、現場判断で中止となりました。三角アレイは通常、道路の両側にそれぞれ1台と2台の地震計を設置しています。しかし、花蓮郊外は車両通行が多くて、赤コーンを置いても猛スピードで突っ込んでくるので、道路の横断すままならず、「地震計が轢かれるのも時間の問題!危険過ぎる」と断念しました。

急遽、「半径7.8mの三角アレイ」を「地震計2台で構成される2点(直線)アレイ」で代用しては? という大胆な案が浮上りました。それなら道路の片側だけ使って設置できるのでだいぶ安全になります。

しかし、2点アレイは微動の波動場の影響でバイアスが生じる可能性があるため、常識的には推奨されません。しかし、私は「何とかできるのでは?」と思っていました。少なくとも国内では、2点アレイによるたった15分間のデータであっても「そこそこの(程度問題にて、ここが重要)」結果が得られていたからです。これは単なる直観ではなく、数百個のアレイの統計でした。具体的には、「20%程度の誤差を許容できるならば2点アレイの結果の3/4は適切」という結果が得られていました(Cho 2020, doi: 10.1093/gji/ggz454; Cho et al., 2021, doi: 10.1093/gji/ggab149)。

しかし、そうは言っても、「台湾でも大丈夫?」と聞かれるとやはり不安です。そこで、全地震計を5m間隔で直線的に並べて長時間の記録を取りました(図3)。2点アレイで問題のない地震計間隔や記録時間を改めて確認しておきたかったからです。夜にホテルに戻ってデータを解析すると、国内と同様に15分程度のデータでも十分安定した分散曲線が得られました。もしも1/4の結果が怪しくても、3/4が適切ならば、大量に観測すれば2D/3D地盤構造の概観程度ならば把握できると期待できます。

## ヒゲ付き極小アレイによる稠密観測

もちろん、2点アレイのバイアスのリスクを完全に除外することはできません。そこで、リスクヘッジのために「ヒゲ付き極小アレイ」(小アレイ)の利用を思い立ちました(図4)。

「ヒゲ」は長波長側(低周波数側)を担当する長さ5mと10mの2つの2点アレイ(15mの2点アレイも自動的に追加される)から成ります。ヒゲの「毛根」にあたる部分に



図3 リニアアレイによるテスト。夕方だったため、多くの参加者が蚊に苦しんだ。



図4 ヒゲ付き極小アレイ

極小(三角)アレイを置いて、短波長側(高周波数側)を担当させることにしました。こうすれば少なくとも高周波数側は3点アレイなので波動場によるバイアスがありません。よって、それぞれの結果がスムーズにつながれば、間接的ですがヒゲの結果にバイアスがないことが担保されます(図5)。

加えて、いくつかの地点では大きな三角アレイを実施してヒゲの結果を直接検証しました。さらに、多数の定常的な強震観測地点でも同様に観測しました。これらの地点ではPS検層がなされているので解析精度の検証が可能となります。

というわけで、6名ずつの2グループに分かれ、それぞれ1地点ごとにヒゲ付き極小アレイで15分間の観測を行っては少し移動するという作業を繰り返しました。このアレイは道路の片側に設置できるのでとてもラクです(図4)。本観測3日間のうち2日間をこれに費やしました。その結果、全部で60地点以上の記録が得られました(図2の2重丸印)。

このように「2点アレイ」の利用には慎重さが必要です。しかし、上述の通ように、結果を担保する手段がある限り、とても使える道具となります。ここでは約5kmの測線に沿う2D断面の評価や被害甚大地域でのAVS30のマッピングが可能となりました。それらの結果については山田氏の報告(Yamada et al. 2020, doi: 10.1785/0120200063)をご一読下さい。

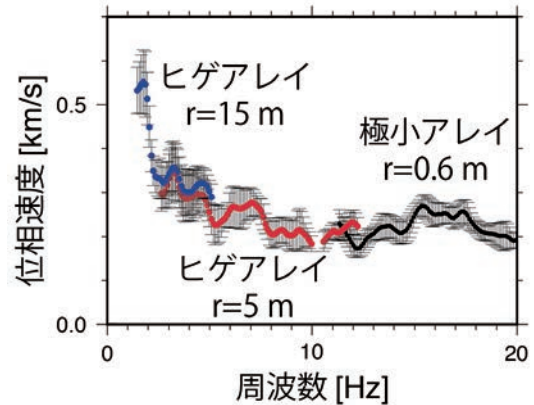


図5 位相速度分散曲線例。誤差棒は標準偏差

### 余談

こういう市街地の観測にはいくつか特典があります。まず、商店街の人が話しかけてきてくれます。最初は、慣れない台湾語のせいか「怒られてるの?」と感じましたが、実はどれも楽しいおしゃべりだったようです(図6)。また、コンビニがあってトイレに行けることや蚊がいないことも市街地ならではの特典です。でも最も嬉しいのは、ランチやおやつを選択肢が増えることかもしれません(図7)。

今回は、本観測3日間のうちの1日分をまるまる使って行なった大アレイ観測について報告します。



図6 観測中に商店街の店主と記念撮影。左の二人は観測手伝いの高雄大学学生。



図7 人気店「周家蒸餃」の餃子と小籠包



# 新潟県陸上震探収録作業について

## ～その①：夜間・深夜収録と稠密発震による高品質記録の確保

株式会社INPEX 技術本部 技術推進ユニット 堂垂 達也

### 1. はじめに

当社は2019年9月～12月の約3か月半、新潟県中越地域の陸上において新規二次元震探収録作業(以下、本作業)を実施した(図1)。当社内におけるこれまでの震探収録の経験から、当地域は深部のイメージングが困難な地域と認識されていたが、社内の技術検討の結果、ノイズレベルに応じた発震プログラムの最適化や稠密収録の導入によって品質の改善が見込めることが示唆され、およそ10年ぶりに当地域で震探収録を実施することとなった。

本記事では、本作業にて新たに取り入れた震探収録における工夫について紹介したい。



図1 収録作業の様子(夜間収録)

### 2. 事前ノイズ観測に基づく発震プログラムの最適化

#### 【事前ノイズ観測】

収録対象地域におけるノイズレベルの把握を目的として、本収録前の2019年4月に事前ノイズ観測を実施した。事前ノイズ観測においては計画測線上の代表15地点で昼夜休日を含む連続54時間のノイズ観測を実施した。

ノイズ観測の結果、夜間(19時～翌6時)におけるノイズレベルが日中に比べ10dB以上低下するとともに、朝夕の通勤時間帯(9～10時、16～18時)にノイズレベルがピークとなるといった時間的な傾向を把握出来た(図2)。

また、市街地や幹線道路周辺の観測点において定期的にはノイズレベルが上がるといった空間的傾向も把握出来た。

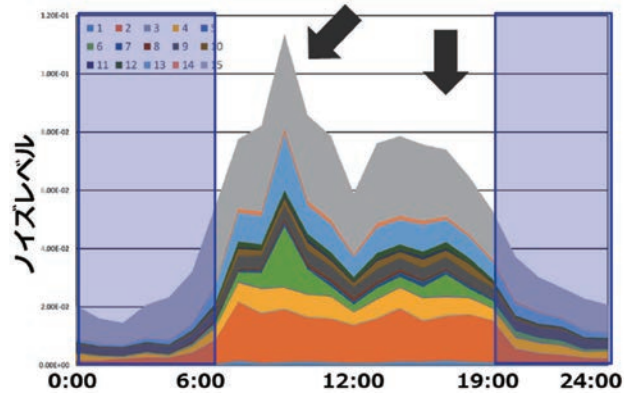


図2 事前ノイズ観測結果

#### 【発震プログラムの最適化】

ノイズ観測の結果、深夜帯では大きくノイズレベルが低下することが確認できたため、可能な限り深夜に発震を実施する方針となった。一方で、収録地域には市街地や工場などの施設が点在していることから、近隣住民への影響を考慮する必要があった。そこで本作業においては、民家や施設などの構造物から発震点までの距離を基に発震時間帯を表1に示す3つの時間帯に区分することで近隣住民への影響を低減させる発震プログラムを設定した。

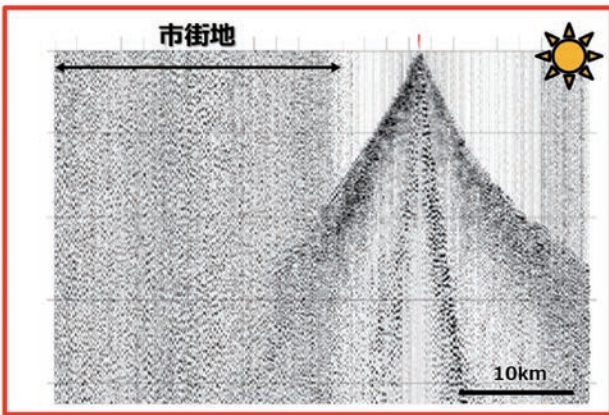
表1 本収録における作業時間帯

作業区分	時間帯	構造物からの距離
日中作業	10時～16時	150m以下
夜間作業	19時～22時	150～300m
深夜作業	22時～翌4時	300m以上

また、ノイズレベルの高い区間の前後においてはバイブレータの発震回数を標準パラメータから増加させることで記録品質の向上を図った。

事前ノイズ観測結果と机上作業及び度重なる現地踏査を組み合わせることで発震プログラムを最適化したことにより、過半数の発震点で夜間及び深夜作業を実施することが出来、高品質な記録の取得に成功した。(図3)

### 日中発震記録 (11:00 AM)



### 深夜発震記録 (3:00 AM)

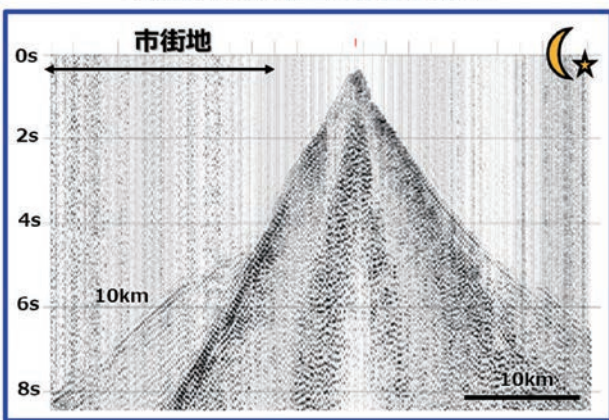


図3 日中発震記録と深夜発震記録の比較

### 3. 稠密受発震の実施

本作業においては、従来の収録仕様では受発震間隔が概ね20~40m程度だったのに対し、発震間隔10m、受振間隔5mといった、稠密受発震の収録仕様を採用した。稠

密受発震を採用することによってCMPあたりの重合数が飛躍的に増加しS/Nの改善やデータ処理品質の精度向上が期待できるためである。

本稿では稠密受発震の成果の一例として表面波ノイズ抑制の精度向上を紹介する。本作業において5m間隔で受振した記録と20m間隔の受振仕様となるように間引いた記録に対するF-Kフィルタを用いた表面波抑制処理の精度を比較した結果を図4に示す。従来の収録仕様(20m間隔)ではF-Kフィルタを適用しても低速度の表面波ノイズがエイリアシングを起こしてしまい十分にノイズを抑制できていないのに対し、本作業の収録仕様(5m)では、表面波ノイズのエイリアシングが抑えられ、効果的にノイズが抑制されていることが確認できる。

この様に、本作業では稠密受発震によって重合数の増加によるノイズ低減効果に加え、ノイズ抑制処理の精度向上を達成することで従来の収録結果と比べ、高品質の震探断面を得ることが出来た。

### 4. おわりに

本作業は、当社にとっておよそ10年ぶりの国内陸上での震探収録であったが、従来難地域とされていた中越地域において、夜間作業や稠密受発震といった技術的な工夫を行うことによって、従来の収録結果を上回る品質の震探データを収録することに成功した。当社では2020年にも新潟県の下越地域において震探収録を実施し、本作業で効果を確認した技術的な工夫に継続して取り組むとともに、収録地域に応じた新たな工夫を加えて高品質な記録の収録をめざした。(その②へ続く)

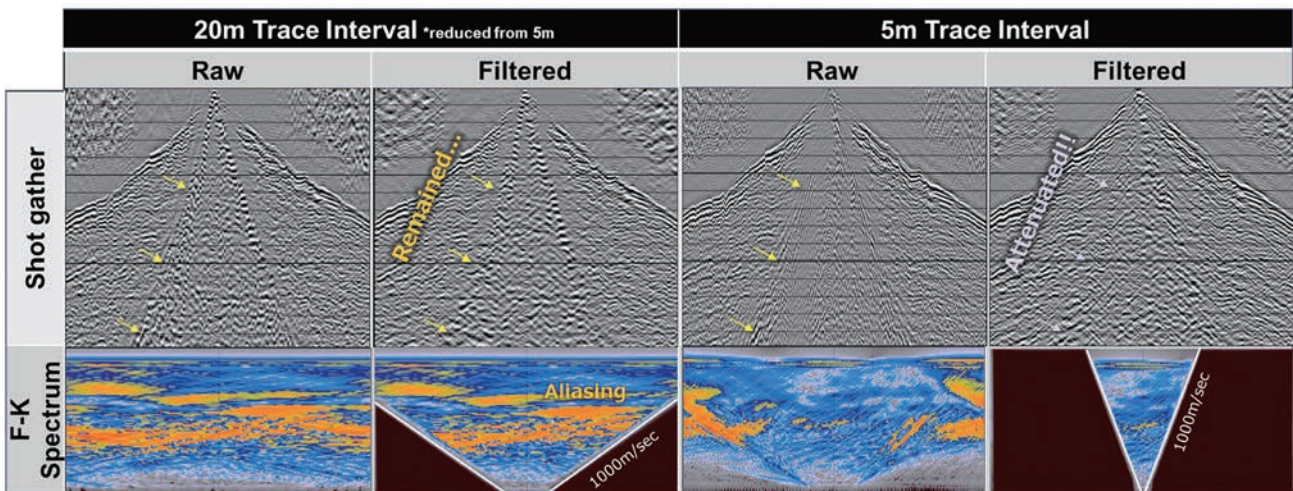


図4 稠密収録による表面波ノイズの抑制効果 (Seino et.al., 2020)



# 新潟県陸上震探収録作業について ～その②：高品質記録確保に向けた工夫と コロナ禍における震探作業

株式会社INPEX 国内E&P 事業本部 探鉱・開発ユニット 清野 雄太郎

## 1. はじめに

当社は2020年11月～12月中旬の約1か月半、新潟県下越地域の陸上において新規二次元震探収録作業（以下、本作業）を実施した。本作業では、その①（2019年当社実施の中越地域における震探）に記述した①事前ノイズ観測に基づく発震プログラムの最適化および②稠密受発震の実施を採用し、高品質なデータ取得を試みた。それに加え、市街地エリアにおけるノイズレベルを把握するための事前ノイズ観測、および机上調査により課題として上げられていた砂丘や潟などの旧地形が発震記録の品質に与える影響の把握を目的とした事前発震テストを実施し、記録の品質確保に向けて発震プログラムを最適化した。

また、本震探収録は新型コロナウイルス感染拡大の渦中に行われ、感染者・体調不良者を出すことなく完遂することができた。

本記事では、市街地における高いノイズレベル、砂丘・潟などの旧地形による発震への影響、および新型コロナウイルスが蔓延する状況に打ち勝ち、高品質な震探データを取得するに至った当社の震探収録における工夫について紹介したい（図1）。



図1 震探収録作業風景（写真中央は著者）

## 2. 現地テスト

### 【事前ノイズ観測】

本作業は市街地周辺で実施され、車両や工場などから発せられる音・振動が記録の品質に大きく影響することが、事前踏査によって予想された。そこで、2019年当社震探での実績のあった事前ノイズ観測を本作業前に実施した。

2019年実施時は、代表点にのみ受振器を配置したが、一般的な作業では、より詳細にノイズの地域特性が把握できるよう収録予定測線上に100m間隔で受振器を設置した。また、観測は平日～休日をまたぐように継続して行われた。その結果、図2に示すとおり、対象地域における空間的・時間的なノイズレベルを詳細に把握することができた。

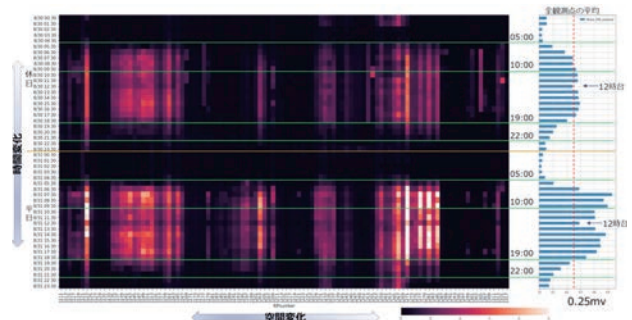


図2 事前ノイズ観測結果（暖色が高ノイズレベルを示す）

### 【発震テスト】

対象地域では、地表地質図や古地形図により、砂丘や潟などが発達していた（る）ことが、確認されている。それら旧地形による軟弱な地盤による発震記録への影響が懸念された。そこで、事前情報をもとに予定測線上に3点の発震点を設け、パイプロサイスのパラメータテストを実施した。

図3に砂丘頂部と、砂丘縁辺部における発震記録の差を示す。ご覧の通り、砂丘頂部において急激な振幅の減衰が生じていることがわかる。発震テストの結果、砂丘頂部の発震点では品質確保が困難であることが確認された。

以上の現地テスト結果を踏まえ、高ノイズレベル地域や砂丘頂部からの測線位置の変更、および発震回数の増強区間の設定などを実施し、結果的に高品質な震探データを取得することに成功した。

## 3. コロナ禍における収録作業

本作業は2020年11月～12月中旬に実施され、いわゆるコロナ禍の最中での現場作業となった。作業中に体調不良者・感染者が出た際には即座に中断しなければならず、そのため徹底した感染予防対策を実施した。作業員は現場入りの2週間前から現場終了まで健康観察、体温測定を継続し、県外からの作業員はPCR検査で陰性を確認してから入場するなど、水際対策を徹底した。

また、これまでの震探収録の現場品質管理（QC）体制

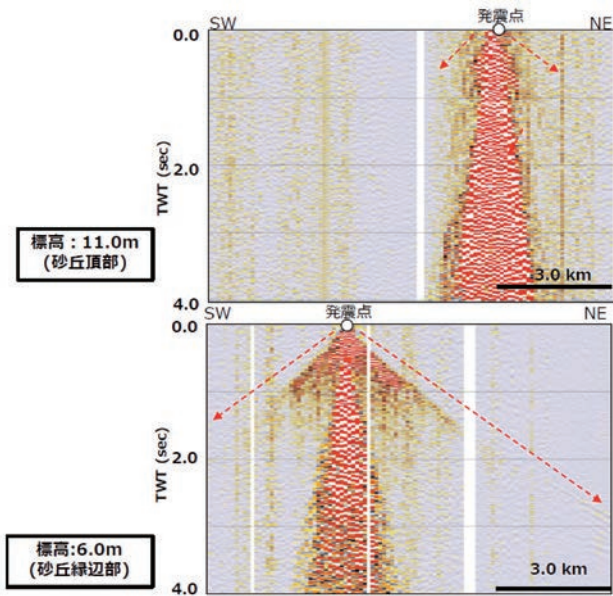


図3 砂丘頂部における振幅減衰の例(堂垂ほか, 2021)

は、発震制御と記録の品質確認ができる観測車内に、作業業者と当社の人員が入り、ともに記録の品質を確認しながら

ら発震プログラムの指示を実施した。迅速なコミュニケーションが取れる一方で、観測車内はいわゆる3密状態であった。そこで、当社人員と作業業者との距離を十分とれるよう観測車の隣に簡易的なハウスを設置し、観測車のモニターをハウスに投影させてQCを実施する体制を取り、密な状態を避けたQC体制を確立した(図4)。上記の取り組みの結果、1か月半の作業期間において一人の感染者・体調不良者を出すことなく、作業を完遂することができた。

#### 4. おわりに

本作業は、コロナ禍という難しい状況の中ではあったが、必要十分な感染対策を講じることで、無事に作業を遂行することができた。加えて、地域特性による震探品質への影響を事前テストにより把握することで、発震プログラムを最適化し、高品質な記録を取得することができた。

当社は今後、状況が変化し、これまで通りの作業の実施が出来なくなる可能性がある中で、本作業で取り入れた工夫やそれをさらに発展させ、安全に高品質な記録取得ができるよう、継続して取り組んでいく所存である。

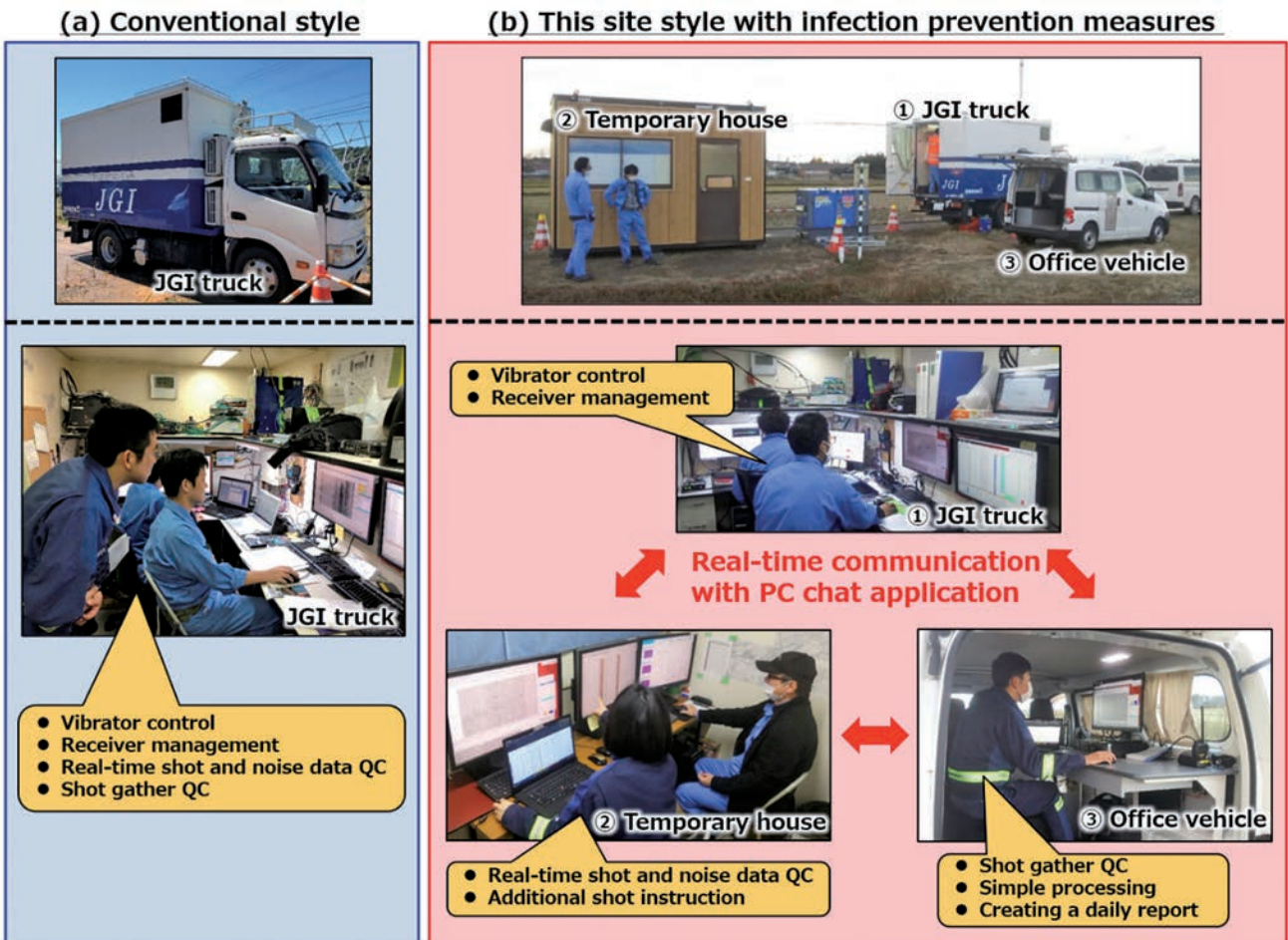


図4 震探収録現場QC体制, (a) 2019年収録時 (b) 2020年収録時 (Suzuki et al., 2021)



## お知らせ

### 第145回(2021年度秋季)学術講演会 表彰

学術講演会最優秀発表賞と優秀発表賞の受賞者が決定しました。おめでとうございます。受賞者には第146回学術講演会(2022年度春季)の会場において賞状の授与を行います。

#### 最優秀発表賞

岡本 京祐さん(産総研)

対象:

岡本 京祐、田中 勇希、浅沼 宏、青木 直史、大里 和己、小野寺 真也：  
微小地震探査による地熱井近傍の構造推定 その2

#### 優秀発表賞

##### 【口頭発表】

西野 玉城さん(早稲田大学)

対象:

西野玉城、上田 匠：深層ニューラルネットワークを用いた周波数領域空中電磁探査データ逆解析の改良と実装

國政 光さん(東京都立大)

対象:

國政 光、鳥取 稜平、東 宏幸、小田義也：Transformerを用いた深層学習による地震波自動検出—八丈島臨時地震観測データへの適用—

##### 【ポスター発表】

荒巻 健さん(九州大学)

対象:

荒巻 健・池田達紀・辻 健・山浦悠貴：雑微動を用いた表面波トモグラフィによる地熱地域の3次元S波速度構造

### 第146回(2022年度春季)学術講演会

現地とオンラインによるハイブリッド開催

開催日：2022年6月7日(火)~6月9日(木)

開催場所：早稲田大学 国際会議場

6月7日(火)：一般講演

6月8日(水)：一般講演、総会、特別講演

6月9日(木)：一般講演

#### 特別講演

(1)地質層序研究をベースにした首都圏の3次元地質地盤情報の整備

中澤 努氏

((国研)産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

(2)物理探査技術者の為の最新DX

高市 和義氏

(伊藤忠テクノソリューションズ(株))

詳しくはこちら

<http://www.segi.org/event/lecture/2021/12/146.html>

### 編集後記

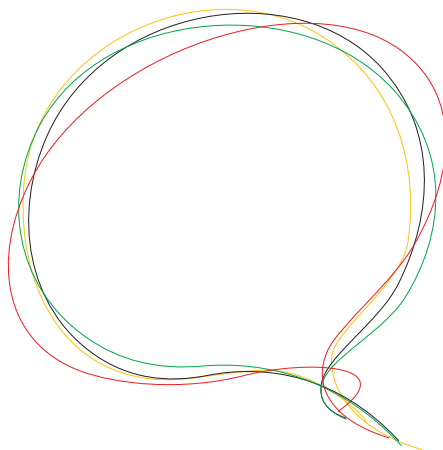
世界的な新型コロナウイルスの感染拡大から約2年が経過し、感染防止対策の徹底およびワクチン接種の普及に伴い、コロナ禍からの回復の兆しが見えた矢先、2022年2月に始まったロシアのウクライナ軍事侵攻は長期化、深刻化が懸念され、歴史の分岐点を迎えている感があります。

そのような中で2022年度が始まりましたが皆様いかがお過ごしでしょうか？4月から新しい仕事を担当することになった方、職場が変わり、ようやく仕事に慣れてきた方など、様々であると思います。中には新入社員(職員)を迎えた職場もあるのではないのでしょうか？次号以降、「フレッシュマン紹介」で若手技術者を紹介して参りますのでご期待下さい。

今号は、多数の記事をご投稿頂いたため、2015年10月(第28号)以来の16ページの構成となっております。過去の物理探査ニュースを振り返りますと、創刊号(2009年)~2015年10月の間は16ページ構成で、表紙は主として記事に関連する写真が掲載されていました。2016年に構成が変更となり、12ページ構成が続いておりました。今回多数の記事をご投稿頂いた方々に深く感謝申し上げます。

今号では、「わかりやすい物理探査」シリーズの屈折法探査の最終回を迎えました。また、現場レポートが3編も掲載され、他の記事にも計測技術および計測機器といったデータ取得に関する内容が多い点が特徴です。「台湾微動観測記」は2018年のコロナ禍前の現場であり、写真からは、人が密の状態での会食を行い、マスクの着用は皆無である当時の様子がよく分かります。一方、「新潟県陸上震探収録作業について~その②」は、2020年のコロナ禍における現場であり、徹底した感染予防対策を講じながら高品質のデータ取得を行うという大変困難な現場であったことが分かります。このような困難な現場での創意工夫を記事にして是非お寄せ下さい。

(ニュース委員 林 努)



### 物理探査ニュース 第54号 2022年(令和4年)春号

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@segi.org

ホームページ：http://www.segi.org

### 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。



