

物理探査 ニュース

2021 ハイライト



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

Geophysical Exploration News 2021 Highlights

目次

研究の最前線
超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) 1

わかりやすい物理探査
屈折法その1:車でドライブ?..... 3

研究室紹介 兵庫県立大学
探査から解釈、マクロからミクロ 5

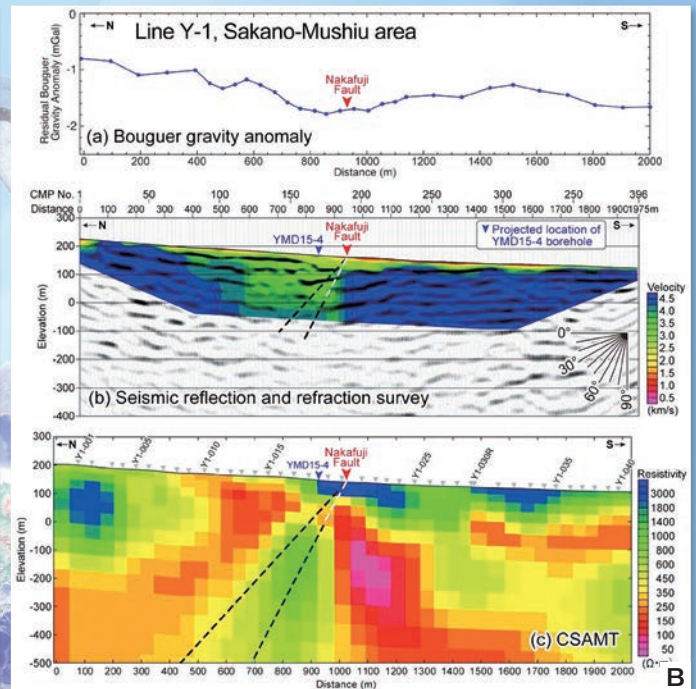
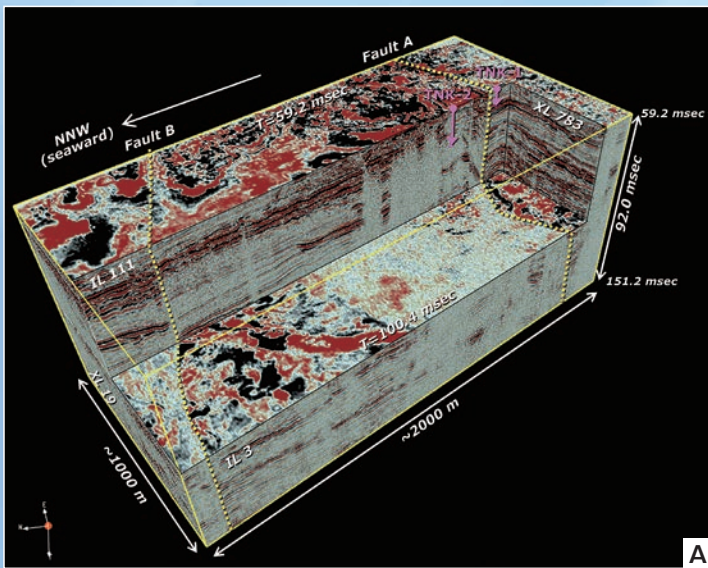
研究の最前線
横ずれ活断層に対する各種物理探査の適用 7

現場レポート 海洋底を探索する 9

研究の最前線
ドローンを用いた過渡応答空中電磁探査装置の開発 11

新技術紹介
機械学習を活用した地震探査データ解釈の紹介 13

本の紹介 反射法地震探査データ処理の数理 15



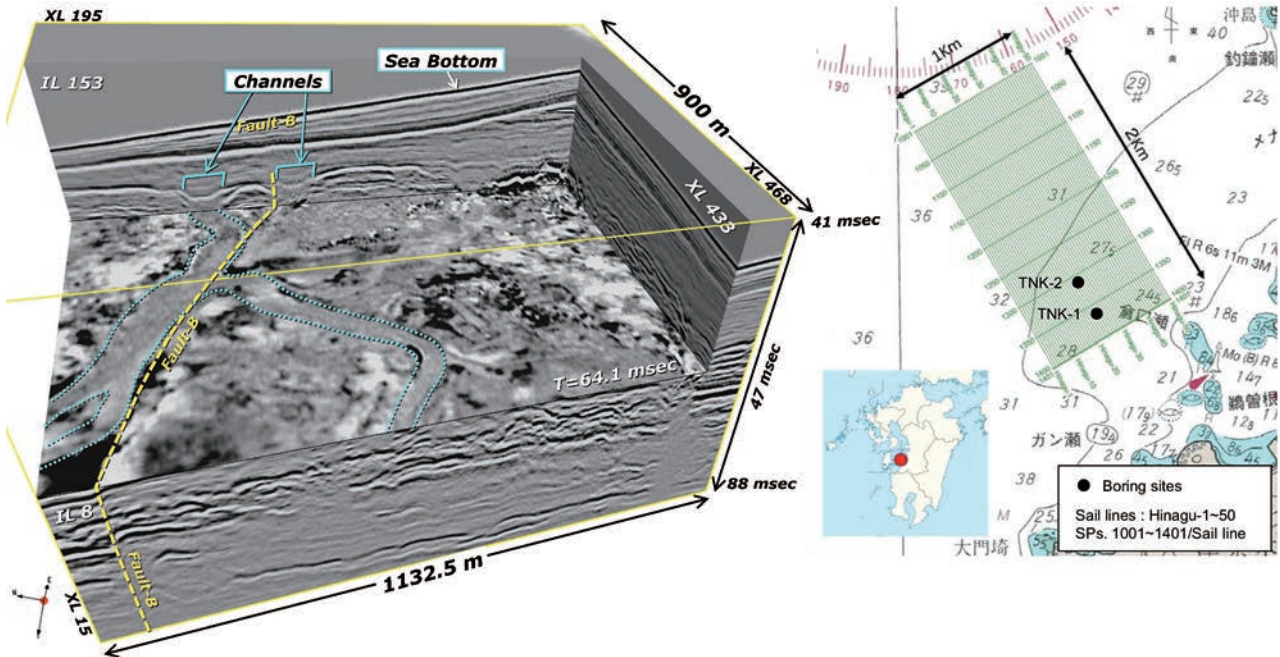
「物理探査ニュース2021ハイライト」は、物理探査学会が年4回発行する「物理探査ニュース」の2021年分から代表的な記事を抜粋したものです。物理探査ニュースはどなたでも学会ホームページ(<http://www.segj.org/letter/>)からご覧になれます。

表紙説明

- (A) 研究の最前線/超高分解能三次元地震探査(UHR3D)(49号)
- (B) 研究の最前線/横ずれ活断層に対する各種物理探査の適用(50号)
- (C) 研究の最前線/ドローンを用いた過渡応答空中電磁探査装置の開発(52号)
- (D) 現地レポート/海洋底を探索する—アコースティックマッピングにおける最高分解能データ取得の試み(51号)

超高分解能三次元地震探査(UHR3D) —日奈久断層帯海域部における実施例—

株式会社地球科学総合研究所 猪野 滋



巻頭図 (左)UHR3Dにより明らかになったチャネル構造

図1 調査エリア位置図

1. はじめに

従来の海底活断層調査では二次元測線を約1~2km間隔の格子状に設定して実施されてきたが、格子状の二次元測線だけでは測線間の断層の空間的なつながりは各測線での断層位置から推測するしかなく、横ずれ断層の変位量の推定も困難である。また、二次元地震探査の断面図では、側方への構造の傾斜が大きい場合、側方からの反射波があたかも測線直下の反射波であるかのごとく現れるので三次元構造の位置や形状を正確には表現できない問題もある。今回紹介する超高分解能三次元地震探査(Ultra-High Resolution 3D seismic survey : UHR3D)の手法は、この問題を解決するために、従来のブーマーを用いた二次元音波探査を三次元に拡張した手法である。三次元反射法地震探査は、石油・天然ガスを対象とした資源探査の分野で主に使用されているが、UHR3Dは資源探査に比較してより小型の調査船と短いケーブル、より高周波数の震源を用いた、簡便なシステムでかつ高分解能化を目指した手法である。この手法を用いて、2017年2月、熊本県八代海において日奈久断層帯海域延長部を対象とした活断層調査を実施した。

2. 調査方法

図1に示す熊本県津奈木町沖の八代海においてデータ取得作業を実施した。(株)地球科学総合研究所が開発した独立型ストリーマケーブル(Autonomous Cable System:ACS)を4本曳航し、ブーマーを震源とした三次元観測を実施した。使用した観測システム(図2)は、観測船後部両舷にクレーンを設置して4本のACSを10m間隔で曳航した。ACSでは、受振された信号をA/D変換しながら

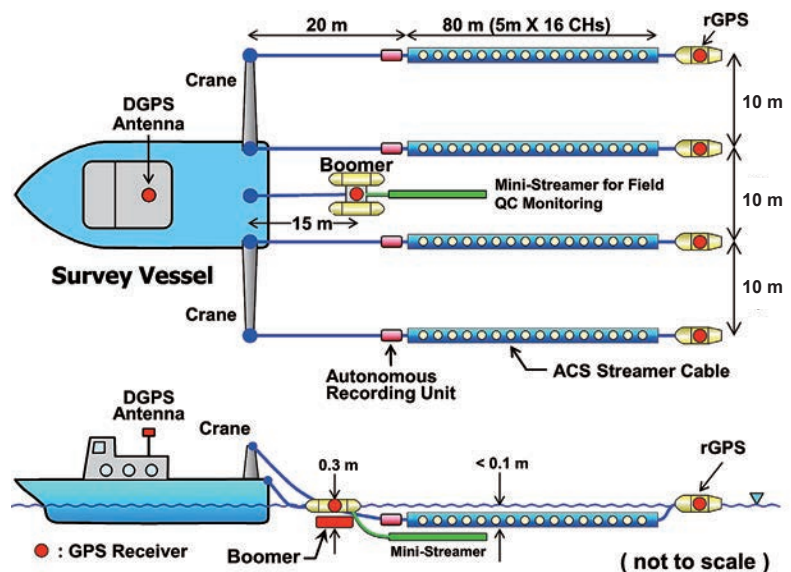


図2 UHR3Dの観測システム

常時連続的にFlash Memoryに記録しており、各ショット記録は測定終了後に発震時刻に基づいて切り出すことになる。ACSは観測船とは単にロープのみで繋がっており、従来のストリーマケーブルのように信号線を船上の観測室に引き込む必要がないのでケーブル投入・揚収のハンドリングは非常に容易である。

3. データ処理

UHR3Dで取得されるデータは、資源探査における三次元地震探査データと比べて水平分解能・垂直分解能ともに格段に高いため、その点に留意してデータ処理を行う必要がある。本処理では、複合型ノイズ抑制処理といった様々な手法を実施したが、特にフットプリント抑制処理の効果が大きかった。フットプリントとは、振幅や時間のばらつきによるインライン方向の縞模様のごとであり、潮汐の影響やWater Column Statics(データ取得日・時刻の違いに起因する各種の時間差)、波浪やうねりに起因するケーブルごとの深度の違いなど、様々な要因により生じる。このようなフットプリントは、データ取得を高分解能化するほど顕著に現れるため、UHR3Dのデータ処理においては重要な処理項目である。図3にフットプリント抑制処理適用前後のタイムスライスの例を示すが、フットプリントが効果的に抑制されたことが分かる。

図4はUHR3Dのマイグレーション結果の俯瞰図の一例であるが、北側と南側に断層の存在が認められる。

巻頭図は北側の断層に沿って見られるチャンネル構造を示したものであるが、過去の堆積環境が確認できる。正確な断層走向の解明や、過去の堆積環境を示すチャンネル構造のような地質現象の視覚化は、二次元地震探査では困難であり、三次元地震探査により可能となるものである。

4. おわりに

UHR3Dでは高精度な三次元データを取得でき、断層分布や地質構造、地層分布を空間的に把握することが可能となる。UHR3D探査は活断層調査に極めて有益な手法であり、詳細な断層分布や地質構造、構造発達史等の解明に役立つものと期待される。とりわけ、トレンチ調査が極め

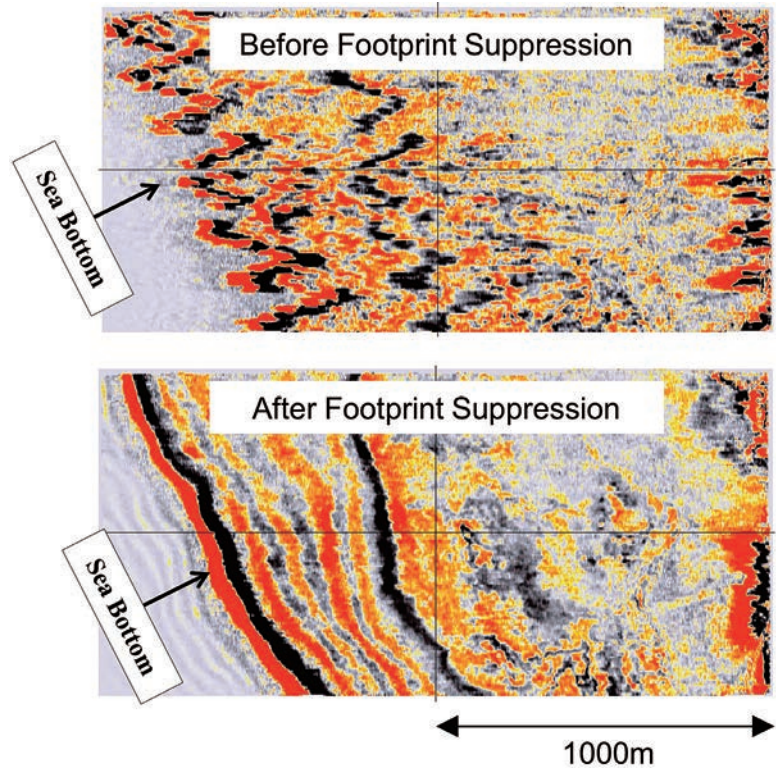


図3 フットプリント抑制処理適用前後のタイムスライスの例

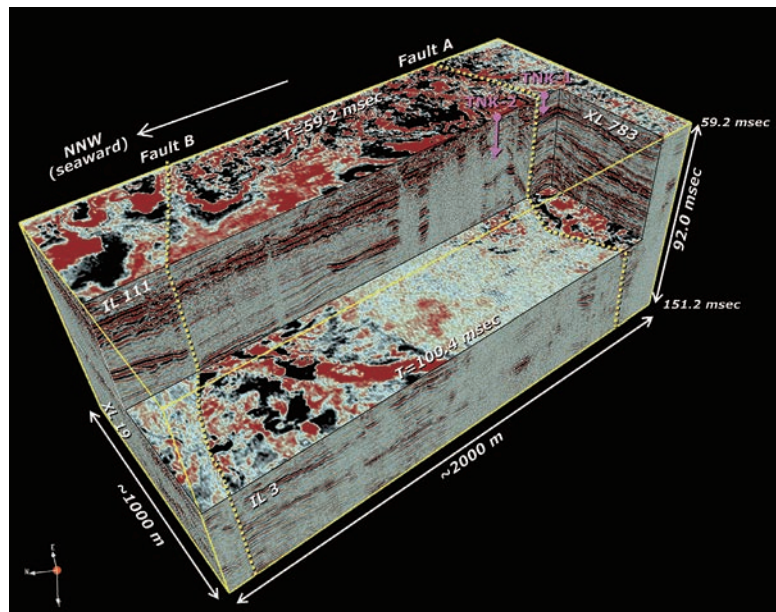


図4 UHR3Dマイグレーション結果の俯瞰図の一例

て困難である海域部での横ずれ断層の調査において、UHR3D探査が非常に有効な手段となるであろう。また、UHR3Dは土木工事等で海域での浅層部の構造調査が必要となる場合にも活用が期待される。

最後に、本データ取得及びデータ処理・解釈にご協力いただいた数多くの方々に、ここに記して感謝の意を表す。

物理探査 手法紹介

わかりやすい物理探査

屈折法 その1: 車でドライブ?

応用地質株式会社 齋藤 秀樹

1. はじめに

今回から4回の連載で、屈折法地震探査をわかりやすく説明していきます。屈折法探査は古くから利用されてきた探査手法の一つで、特に我が国の土木・建設分野においては、昭和30年代の高度成長期以降、非常に多く実施されてきました。私がこの業界に入ったころには(40年も前ですが)、土木地質調査の分野で物理探査と言えば、屈折法地震探査のことを指していたと言っても過言ではありません。そんな屈折法探査ですが、最近では他の物理探査手法も多用されるようになって、若い物探屋さんの中には屈折法探査の経験がない人もいます。そこでこのような連載が企画されたのではないかと思います。

屈折法地震探査の解説は、だいたい屈折波とは何かといったところから始まり、スネルの法則だとかホイヘンスの原理を説明して、走時曲線の理論に移っていく流れになるのですが、それは次回からにします。今回は、屈折法も地震探査も出てきません。

2. 一般道or高速道路優先?

地震探査とか屈折法とかは忘れて、車でドライブすることを考えてみましょう。図1に示すように、一般道と高速道路が平行に走っている場所を想定しています。目的地は20km先です。白い車は、一般道を時速40km/hの一定速度で20km走ります。途中の信号待ちなどは考えないことにします。一方、赤い車は、まず出発点から5km離れた高速道路のインターチェンジまで一般道を時速40km/hで走行します。次に高速道路を時速100km/hで20km先の目的地最寄りのインターチェンジまで走ります。最後に、5km離れた目的地まで、一般道を時速40km/hで走ります。こちらも、信号待ちや料金所での時間のロスなどは考えないことにします。

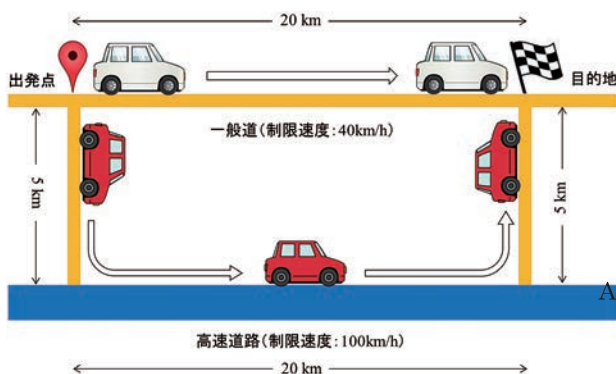


図1 同じ目的地まで一般道と高速道路を使うとどちらが早く着くか?
白い車: 一般道 赤い車: 高速道路利用

高速料金も考えないことにしましょう。走行距離は、白い車が20km、赤い車が30kmとなりますが、同時に出発した場合、目的地にはどちらが早く到着するでしょうか。最短距離を走った白い車でしょうか、少し遠回りしても速く走れる高速道路を通った赤い車でしょうか。それぞれの所要時間を計算してみましょう。白い車は、20kmを40km/hで走ったので、所要時間は $20 \div 40 = 0.5$ 時間(30分) です。赤い車は、5kmを40km/hで走り、その後20kmを100km/hで走り、再び5kmを40km/hで走りますので、所要時間は $(5 \div 40) + (20 \div 100) + (5 \div 40) = 0.45$ 時間(27分) です。赤い車のほうが3分早く目的地に着くことがわかりました。

3. 目的地までの距離が変わると?

では、どのような場合でも、遠回りして高速道路を走ったほうが早く到着するでしょうか。そうでないことは、直感的にわかりますね。上の例題では、目的地までの距離を20kmとしましたが、もっと短い場合や長い場合はどうでしょうか。

距離を10km、15km、20km、25kmと4通り想定して計算してみましょう。非現実的ですが、高速道路にはいたるところにインターチェンジがあって、どこからでも高速道路を降りて、一般道を5km走れば目的地に到着できると仮定します。計算結果をグラフにしたのが図2です。4通りの距離に対する所要時間のグラフは直線になり、白い車と赤い車ではその傾きが異なっていることがわかります。白い車のほうは、10km走るのに15分かかっていると読み取れます。つまり時速40km/hで走ったことが、このグラフの傾きから読み取れます。赤い車のほうは、傾きが小さくて図からは読み取りにくいですが、10km走るのに6分かかっていますので、時速100km/hであることがわかります。つまり、複数の異なる距離で所要時間を測定することができれば、

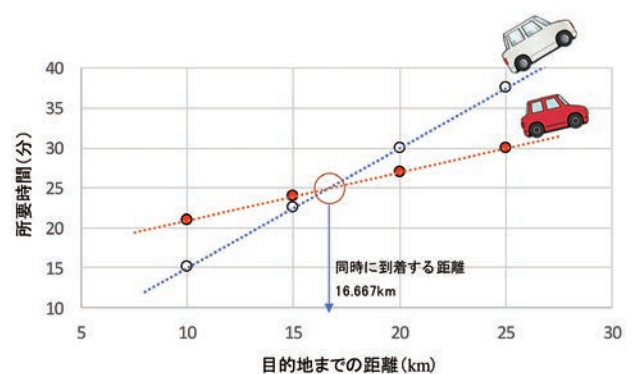


図2 目的地までの距離を色々変えた場合の所要時間

距離と所要時間のグラフの傾きから、走行速度を割り出すことができるのです(距離を所要時間で割った値を速度としているのですから当然ですが)。ここで、赤い車は一般道と高速道路のどちらも走行しているのに、このグラフの傾きは、高速道路の走行速度だけを示しているところが特徴です。

このグラフからわかるもう一つのことは、白い車と赤い車が同時に目的地に着くのは、2つの直線の交点、つまり所要時間が一致する距離(この例では図中に○で示したように16.667km)の場合であるということです。目的地がこの距離より近ければ、一般道を行ったほうが早し、これより遠ければ、高速を利用したほうが早いということがわかりました。

4. 一般道と高速道路の間の距離を色々変えると?

さてここまでの話では、一般道から高速道路のインターチェンジまでの距離を5kmとしましたが、この距離が変わるとどうなるでしょうか。距離を3km~7kmまで1km刻みに変えて計算した結果が図3です。白い車は、この距離が変わっても所要時間に影響を受けませんので、図2と同じグラフです。赤い車のグラフは、当然ながら距離が長くなると所要時間が増えることがわかりますが、5本の直線は一定間隔で平行であることもわかります。つまり直線の傾きは一定ですから、どのケースでも赤い車の高速道路での走行速度は100km/hであることがわかります。またグラフの間隔は一定ですから、グラフの時間軸の切片の値は、一般道から高速道路までの距離に比例することがわかります。図中に○で示したのは、それぞれのケースで、白い車と

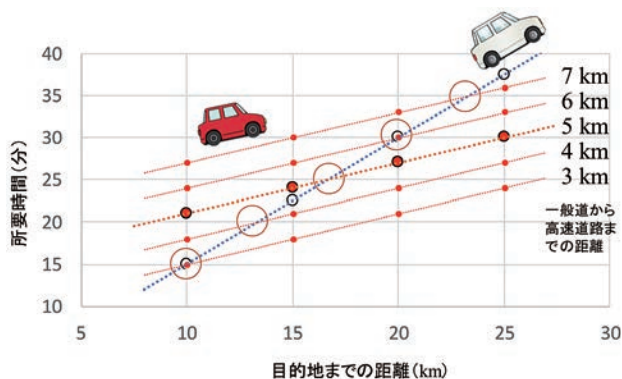


図3 一般道と高速道路の間の距離を色々変えた場合の所要時間

赤い車が同時に到着する距離です。一般道から高速道路までの距離が長くなるほど、同時に到着する距離は長くなるということがわかります。

以上の話を数式で表現してみましょう。

出発点から目的地に向かう距離を x (km)、一般道の走行速度を V_1 (km/h)、高速道路の走行速度を V_2 (km/h)、一般

道と高速道路(インターチェンジ)の間の距離を D (km) とします。

白い車の所要時間 T_1 (h) は、

$$T_1 = \frac{x}{V_1} \quad (1)$$

と表されます。これは原点を通る直線の式で、傾きは $1/V_1$ です。つまり、直線の傾きの逆数が走行速度を表していることがわかります。赤い車の所要時間 T_2 (h) は、一般道と高速道路の間を往復する時間を入れて、

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2D}{V_1} \quad (2)$$

となります。これは、所要時間軸の切片が $2D/V_1$ の直線の式で、傾きは $1/V_2$ であることがわかります。赤い車のグラフの傾きが高速道路での走行速度だけを示すことが、この直線の式からわかりましたね。

では、2台の車が同時に到着する距離を求めてみましょう。同時に到着するとき、つまり T_1 と T_2 が一致するときの距離を x_0 (km) とすれば、(1)、(2)式から、

$$\frac{x_0}{V_1} = \frac{x_0}{V_2} + \frac{2D}{V_1} \quad (3)$$

となり、これを x_0 について解けば、

$$x_0 = 2D \left(\frac{V_2}{V_2 - V_1} \right) \quad (4)$$

が得られます。つまり、それぞれの車の走行速度と、一般道から高速道路までの距離を与えれば、2台が同時に到着する目的地の距離がわかるということです。逆に、同時に到着する距離がわかれば、一般道から高速道路までの距離を次式によって求めることができます。

$$D = \frac{x_0}{2} \left(\frac{V_2 - V_1}{V_2} \right) \quad (5)$$

どうでしょうか、少しはあなたのドライブの参考になったでしょうか。いやいや、屈折法地震探査について知りたかったのに、いったい何を read されているのだろうと思われた方もいらっしゃるかと思います。しかし、実はこれが屈折法探査の解析そのものなのです。それは次回以降に説明していきたいと思ひます。今回は、「まずは基本から」ということで、スネルの法則から始まる、オーソドックスな解説をしたいと思ひます。

研究室紹介

探査から解釈、マクロからミクロ

兵庫県立大学大学院生命理学研究科地球科学講座* 後藤 忠徳

*注 同大学生命理学研究科は2021年4月に理学研究科に改組

「兵庫県立大学ってどこにあったっけ?」と思われる方は多いと思います。兵庫県立大学は、3つの大学(神戸商科大学、姫路工業大学、県立看護大学)が統合して2004年に誕生しました。現在は9つのキャンパスと16の研究拠点から構成されており、学生総数は6,500名を超えています。地球系の研究室も少なくない、兵庫県の各地で教育・研究活動を行っています(図1)。ここでは、理学部(生命理学研究科)の「地球科学講座」が行っている物理探査学の研究の様子について、簡単にご紹介致します。



図1 兵庫県立大学の研究拠点(赤)と地球系研究室(写真) 画像は各部署・機関のホームページより。大型放射光施設(SPring-8)は同大学の施設ではないが、関連は非常に深い。

兵庫県立大学地球科学講座では、地下でおきる短期・長期の地球変動現象の理解を目指して、地球物理学・岩石学・結晶学等の多様な手法による研究を実施しています。地球環境の変動は、私達を含む地球の生命に大きな影響を与えます。地震・火山噴火等の「諸現象」を地殻規模で可視化する、あるいは地層・岩石・鉱物といった様々な時空間スケールの「痕跡」を調査することで、地球表層や地球内部の変動過程を解明することができます。このうち前者、すなわち地下の可視化のためには、大きく分けて3つのStepがあります(図2)。当研究室では電気・電磁探査を軸として、これらの全段階に関する研究を行っています。Step1は野外でのデータ取得・解析です。その高度化のために、陸上や海底での電磁探査装置の新規開発を行っており、さらに新たな探査法の模索や情報科学を駆使したデータ解析法の研究、GUIツールの開発等を行っています。Step2の地下構造推定では、数値シミュレーションが欠かせません。物理探査データから3次元的な地下物性分布を求めるために、仮想的な地下構造上での観測データを予測するフォワード計算技術や、観測データを地下物性分布へ焼き付けるインバージョン技術の研究を行っています。特に、地表での複雑な地質分布や地形分布、地下物性の不連続境界等

をアルゴリズムに取り込むことで、より現実的な地下構造解析を試みています。Step3では、Step2で得られた地下構造から地質構造や地下水分布等を推定します。この「解釈技術」は、地下の科学的理解と社会利用において欠かせません。当研究室では、地表や海底から岩石を採取して、室内で物性・物質の測定を行うことで、地下比抵抗・地震波速度構造を地下水含有量や岩盤の透水性等に変換する技術を研究しています。以下では、具体的な調査・研究事例を紹介します。

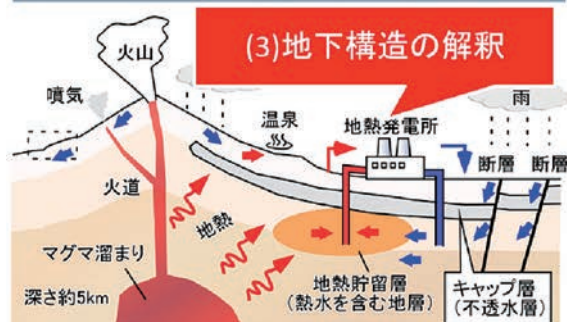
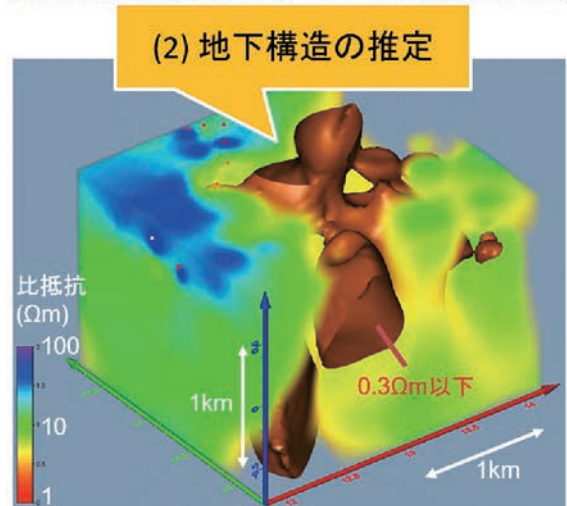


図2 上：九州の地熱地域での野外調査の様子。 中：得られた地下比抵抗構造。 下：地下の概念図(ペレ出版「地底の科学」より)



図3 左：深海調査研究船「かいれい」、2020年12月、南海トラフ巨大地震発生域において、同船を用いた人工電流源海底電磁探査を実施。
 中：2020年8月、学術研究船「白鳳丸」を用いて、東北沖に設置したOBEMを回収。
 右：同航海で得られた堆積物コアを船上で分析。（以上の撮影：後藤忠徳、「かいれい」 写真提供：海洋研究開発機構。）

活断層調査：活断層は、地震を引き起こす原因と考えられています。活断層周辺に発達する断層破碎帯は、周囲の母岩よりも地下水を含みやすいため、低い比抵抗を示す（電気を流しやすい）ことが知られています。当研究室では、調査船を用いた海底活断層調査を実施しています。海底電位差磁力計（OBEM）を海底に設置することで、自然の電磁場信号を用いた地下探査（MT探査）が可能となります（図3）。これによって地殻～マントル深度での海底下比抵抗分布を得られるため、地殻中の活断層分布や、プレートの沈み込みと水の移動に関する定量的な情報を得ることができます。陸域の活断層でも調査を行っています。熊本県布田川断層での電磁探査データに対して、地表の小スケール不均質体の影響を取り除きつつ地下構造解析を行い、さらに得られた比抵抗構造と近傍の掘削コアを対比しました。その結果、岩盤強度の低い地質体の中にだけ、断層沿いの低比抵抗帯が見られることが明らかになりました。これは、低比抵抗帯の規模と岩盤破碎度・強度の関係性を示唆するものです。これに加えて、断層近傍の物性・物質の測定や、比抵抗構造を単純化した断層モデルを用いた数値シミュレーション（地殻変動や地震発生の様子を再現）等の研究を進めており、防災・減災に資する知見を積み重ねています。

地下資源探査：火山の周辺には、高温の地熱地域が分布しています。この地熱は、地熱発電や暖房・農業・温泉等に利用されていて、再生可能エネルギーの一つとして注目されるだけでなく、エネルギーの地産地消や地域活性化の原動力としても期待されています。地熱の利用においては、地下深部のマグマによって温められた地下水（熱水）がどこにどれくらいあって、どのように循環しているかを解明せねばなりません。特に熱水循環においては、断層が大きな役割を担っていることが知られていますが、従来の地下探査法では断層の詳しい位置や循環パターンを明らかにすることは困難でした。そこで当研究室では、高周波帯域の電磁探査（AMT探査）を超高密度で実施する技術を開発・確立し、実際に地熱地域で適用を進めています（図2）。複数の地熱地域において、地下比抵抗構造を3次元的に可視化したところ、雨水起源の地下水と熱水が同一の活断層を

利用して循環している様子が分かってきました。陸域のみでなく、沖縄沖の海底熱水地域でも電気・電磁探査を実施しています。こちらでは、熱水が海水で急冷されて生じる「金属鉱床」がターゲットです。海底での探査に加えて、岩石の物性・成分分析や熱水対流シミュレーション等を行い、さらに地震探査や海底掘削データと比較しました。その結果、海底下の熱水対流の様子や、熱水金属鉱床の成長過程が明らかとなりました（京都大学・海洋研究開発機構等との共同研究）。

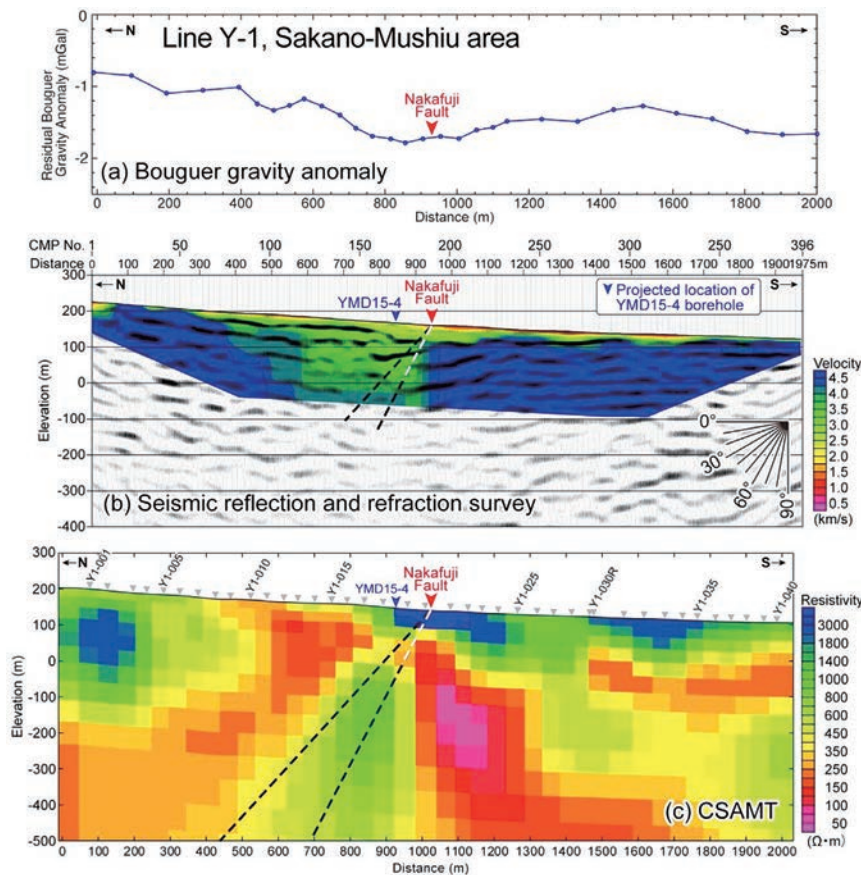
以上は当研究室での調査事例の一部です。その他にも、海底下の油ガス調査、陸域での地下環境調査や地すべり域での探査、人工ノイズの多い都市域での探査、そして露頭スケールや古墳内部、さらには人体内部のような小領域の探査を行っています。他方、日本列島スケールの地殻・マントル構造の解明や、月・火星で実施可能な探査技術の開発も行っています。これらの物理探査に加えて、マルチスケールの地下情報の融合、岩盤の変形破壊や地下水流動のシミュレーション等を通じて、地下の諸変動現象に定量的に迫ろうとしています。こういった多彩な研究活動に研究室の学生達は積極的に参加しています。大学間合同ゼミや学会等で研究成果を報告するだけでなく、多くの学生が陸上・洋上の野外調査に参加しています（図2、3は、いずれも兵庫県立大学の学生です）。当研究室のモットーは「よく学び、よく動き、よく食す」であり、今日もどこかで、広い地球をターゲットに駆け回っています（図4）。



図4 地球科学講座メンバー（2020年8月撮影）
 後列左から2番目が著者（教授・後藤忠徳）。
 研究室の詳細は <https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/life/earth/> を参照。

横ずれ活断層に対する 各種物理探査の適用

岩手大学理工学部システム創成工学科 岡田 真介



巻頭図 山田断層帯・中藤断層(兵庫県豊岡市但東町坂野付近)で実施した各種物理探査の結果

4つの物理探査はほぼ同一測線で実施されている。(a)ブーゲー重力異常、(b)反射法地震探査および屈折法地震探査、(c)CSAMT探査。赤の下向き矢印は地表の活断層位置、青の下向き矢印は、物理探査測線から東に約430m程度離れたボーリングの位置を投影させた。ボーリングの結果から明らかになった活断層の角度は白破線で示し、物理探査から推定される断層の角度は黒破線で示している(岡田ほか, 2018)。

1. はじめに

令和元年度物理探査学会奨励賞を拝受しました。本記事では、奨励賞をいただいた論文の内容(横ずれ断層に対して反射法地震探査、屈折法地震探査、CSAMT探査、重力探査の各種物理探査を適用した事例)について紹介させていただきます。(CSAMT探査: Controlled Source Audiofrequency Magneto-Telluric method)

1995年の兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)以降、活断層が注目を集め、地形・地質調査だけでなく、多くの物理探査が活断層の地下構造把握のために実施されるようになりました。逆断層が主体である東北日本や北海道では、反射法地震探査をはじめとした物理探査が多く実施されているのに対して、横ずれ断層(特に垂直変位量が少ない断層)に対して、物理探査が適用されている事例は少ないのが現状であると思います。筆者もこれまでは、東北日本の内陸活

断層(逆断層)を中心として主に反射法地震探査と重力探査から地下構造を明らかにしようと研究を行ってきましたが、横ずれ断層に対しても物理探査は非常に有効であることが、郷村断層帯・山田断層帯において実施した調査で分かってきました。

山田断層帯は、丹後半島の基部を北東-南西方向に約33km連続し、北西側隆起の成分を伴う右横ずれの活断層です。断層の南東側には、日本三景のひとつとして知られる天橋立があり、そこでは瀧湖を境する砂州を股からのぞくと、天に架かる橋に見えたり、天に昇る龍のように見えたりとされています(図1)。

2. 活断層を対象とした各種物理探査の特性

まずは各種物理探査(反射、屈折、CSAMT、重力)の特性について簡単に述べたいと思います。反射法地震探査は、反射面の連続や不連続として地下の地質構造が得られる点ですが、他の3つの探査と大きく異なります。活断層をターゲットとした陸域

の探査では、交通・生活ノイズも多く、さらに探査測線が道路の制約を大きく受けることから、地下の断層面そのものをイメージできることはまずありません。変位や変形を受けた地質構造(反射面)によって、活断層を判断することがほとんどです。また、横ずれ断層では、断層を境にして物性変化が少なく、さらに断層面が高角であることが多いため、地下構造のイメージングは一般的に難しいとされています。

屈折法地震探査は、探査深度が測線長に対してそれほど深くないため、断層面の角度などを捉えることは難しいですが、トモグラフィ解析を実施することで断層(断層破碎帯)による低速度領域を客観的に捉えることができます。また、探査計画を工夫することで、反射法地震探査と同時に屈折法解析用のデータも取得することが可能です。

CSAMT探査では、測定点を密にしてデータを取得することによって、高解像度で地下の比抵抗構造を推定することができます。しかし、浅部では低比抵抗を示し活断層とよ



図1 股のぞきにより天橋立を望む筆者。
股のぞきにより砂州が、天に架かる橋のように見えたり、天に昇る龍に見えたりすると言われています。

く一致する場合でも深部まで低比抵抗を示さない場合や、断層の片側に顕著な低比抵抗を示す場合、さらに活断層以外による低比抵抗を示すこともあるため、活断層をターゲットとした探査では、活断層の地表位置や他の物理探査の結果とも、よく比較する必要があります。

重力探査は、弾性波や電磁波を用いる探査とは異なる物理的性質を用いており、ブーゲー重力異常には、地下の密度構造に起因する重力異常のみが残っています。そのため、重力異常を用いることで、地下構造(密度構造)の推定に客観性が加わります。しかしながら、重力異常からのみでは唯一の地下構造の解を得られないため、反射法地震探査等の他の物理探査および地表活断層位置や地表地質等と合わせて検討する必要があります。

3. 山田断層帯における事例

天橋立より西へ約20kmの地点、山田断層帯の中藤断層を横切る測線で実施された反射法地震探査・屈折法地震探査・CSAMT探査・重力探査の結果(岡田ほか、2018)を例として巻頭図に示します。岡田ほか(2018)で実施された4測線における調査のなかでも、それぞれの探査の特性が最も良く表れている結果です。

反射法地震探査の結果は、測線南端(図右側)から反射面を追跡すると、ほぼ水平な反射面群が距離1200m付近から北(図左側)へ緩く傾斜するように変化し、活断層の深部延長付近で反射面群の連続が途切れています。また、測線北端から反射面群を追跡すると、距離800m程度の地表付近にも一部不連続はありますが、距離950mの地表から距離700mの標高-100m付近へ延びる直線上で反射面が不連続になっています。地表の活断層位置も考慮すると図中黒破線の位置に断層が推定されます。しかしながら、さらに細かく見ると反射面の小さな不連続は、測線中でいくつか見られます。

屈折法地震探査の結果(巻頭図bのカラー表示)では、地

表活断層位置の近傍である距離600~950mで標高-50mの深部まで連続する低速度領域が確認できます。低速度領域は、断層近傍以外でも浅部(地表から深さ50m程度)には分布しますが、深部まで連続していません。

CSAMT探査の結果では、3つの顕著な低比抵抗帯が確認できます。距離750mの標高100mから距離300mの標高-300mに向かう北傾斜の低比抵抗帯、距離1,000mの標高50mから距離1,250mの標高-400mに向かう南傾斜の低比抵抗帯、さらに距離1,500mの標高0m付近から測線南端部にかけて水平方向に連続する低比抵抗帯です。このうち、地表の活断層位置および他の物理探査の結果も考慮すると、北傾斜の低比抵抗帯が活断層の上盤側に断層面と平行に分布し、その南側の中比抵抗帯との境界付近に活断層が位置すると解釈できます。

ブーゲー重力異常は、地表の活断層位置近傍で周囲の重力値より-0.6mGal程度の低重力異常を示しています。また、その低重力異常の南側の重力変化の勾配が、北側の重力変化の勾配よりも緩いことは、断層面(破碎を受けた低密度帯)が北に傾斜していることを示唆しています。

これらの結果から、山田断層帯中藤断層の地下構造は、各種物理探査の結果と地表活断層の位置を合わせて考えると、北に50~60°程度の傾斜を持つ活断層であることが示唆されました。

各種物理探査による適用性を簡潔にまとめると、反射法地震探査では、反射面の連続・不連続で地下構造を把握することができ、地表の活断層位置と合わせて断層面の角度を限定できました。屈折法地震探査では、深部まで連続する低速度領域が活断層(破碎帯)の存在を示唆しており、他の探査で断層が疑われる構造に対しても、断層位置を限定することができました。また、CSAMT探査、重力探査は、断層上盤側に深部まで連続する低比抵抗帯によって断層の角度を深部まで限定することができました。重力探査からは低重力異常が活断層(破碎帯)のおおよその位置を示しており、重力変化の勾配が断層面の傾斜方向を示唆していました。

詳細な説明を省略した部分もありますが、反射法地震探査、屈折法地震探査、CSAMT探査、重力探査のそれぞれの探査だけでは解釈が難しい場合でも、探査の特性を活かして相互に比較する(補う)ことで、活断層の地下構造が特定できた非常に良い事例であると思います。天橋立の股のぞきは、地下構造に対しても異なる観点(探査手法)から対象を見ることの重要性を示唆してくれていたのでしょうか。

<引用文献>

岡田真介ほか(2018): 横ずれ断層における各種物理探査の適用可能性の検討(その1: 浅層反射法地震探査・屈折法地震探査・CSAMT探査・重力探査) — 郷村断層および山田断層帯における事例一, 物理探査, 71, pp.103-125.



海洋底を探查する —アコースティックマッピングにおける 最高分解能データ取得の試み

産業技術総合研究所 浅田 美穂

厚く海水に阻まれる海底面近傍を観察するには様々な困難が付きものです。いかにしてより正確かつ高い分解能をもつ音響データを取得するか、長年にわたってアコースティックマッピングに傾倒してきた立場から、洋上の試みをご紹介します。

アコースティックマッピングは、船底に装備された音響観測機器を用いて、比較的手軽に広域に、海洋底の地形や地質を表現する物理データを収集します。高精度アコースティックマッピングは海底地形を概観するだけでなく、海域における地殻変動、火山活動、断層の分布や活動頻度と前後関係、さらには海水の流れや生物分布に関する情報など、どこに、なぜ、どのような規模の地質学的特徴が存在し、どのように変化するのかなど更に踏み込んだ議論につながる情報を取得できます。海洋資源や海底付近の構造物の探査にも活用され、沿岸域から深海まで広く社会活動に資する、海底面近傍の状態に関するあらゆる事象の把握と理解に不可欠なデータを提供します。しかし海域において、揺れる船を用いて、母なる大洋底から可能な限り正確かつ分解能が高いデータを得ようとするときには、いくつかの困難があります。

【困難1】海況：いかにして船体姿勢を保持するか

船底から高い指向性をもって発振される音響信号の向きは、船体姿勢の変化にともない変化します(図1)。遠洋から押し寄せるうねりに、海面をわたる風がさざ波を起こし、船は船底に装備された音響観測機器ごと大きく揺れます。

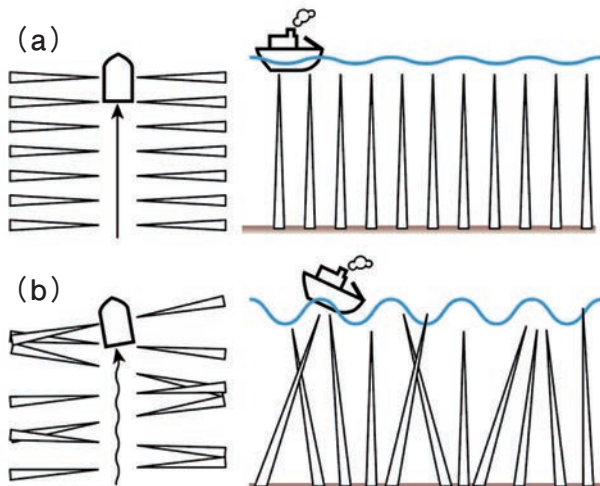


図1 安定した航行姿勢(a)と不安定な航行姿勢(b)がデータ品質に影響するイメージ

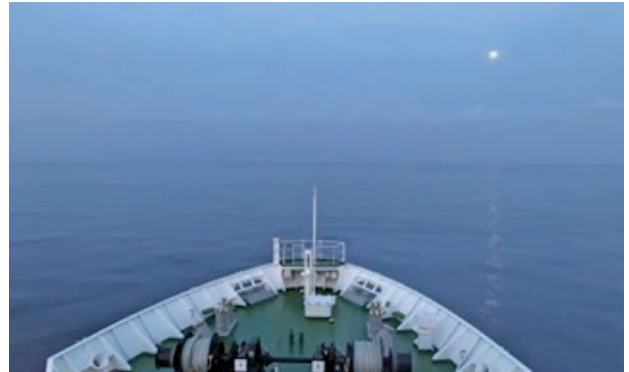


写真1 2018年熊野灘 夜間航走観測中(YK18-05)

さらに、荒れた海を進む船が海面を叩いて発生させる泡が、船底の観測機器を覆う事態となると、泡に阻まれて取得データ数そのものが減少し、データ品質が著しく低下してしまいます。より正しい位置から、正しいデータをより多く得ることが、品質の高いデータ取得につながります。理想的には、「揺れない船から」音響信号を送受信したいものです(写真1)。

音響信号を受け取る方法にはおおまかに2通りがあります：観測対象にあたって跳ね返ってきた信号を、決めた角度ごとに受け取るのか、あるいは受振器に届いた順に受け取るのか(図2)。前者は地形などを観測するマルチビーム測深器の考え方で、多くの測深機には船体動揺を補正して確からしいデータを導出する機能がありますが、処理が複雑な分取得できるデータの数に限りがあります。後者は音響的性質の差異を表現するサイドスキャンソナーの考え方で、音響シグナルを受振する順に並べるだけなので、機械的処理が少ない分、前者よりも桁違いに高密度のデータを取得しますが、動揺補正機能をもたず船体の揺れが全てノイズとなります。高密度データは条件が良ければ、観測対象の周辺に音響特性が大きく異なる物質の境界など、地形データでは表現されない微細な特徴(細粒堆積物に周辺を覆われる岩体や、水中に浮いているケーブルなど)を、

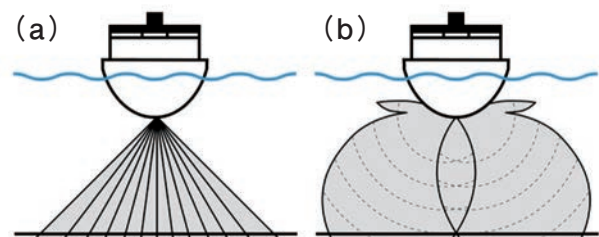


図2 音響シグナル送受信の概念図。
(a) マルチビーム測深器、(b) サイドスキャンソナー

実に高い分解能で描き出すことができます。船体姿勢の安定を最優先とするために、船速を対水一定とする航行をお願いすることがあります(海底面を観測対象とするアコースティックマッピングでは、データ取得間隔を一定するために、通常は対地速度を一定とします)。音響信号の出力を変化させないよう、観測モードを固定し、できるだけ等深線に沿う測線を計画します。工夫をもって取得する、最高分解能をもつ音響データによって描き出される、かつて目にしたことのない海底の様子が(写真2)、新しい科学を、新しい資源を、新しい概念を開く素材を提供します。



写真2 音響データ収集中(YK18-05、泥火山をあらわす地形と海水中に噴き出す水塊が映っています)

【困難2】位置精度：音響信号の性質に従い利用する

海域の観測は、位置精度との戦いでもあります。複数期間にわたって広い海域を網羅する場合にも、同じ場所で繰り返し観測をしたい場合にも、再現性の高さが重要です。再現性が高ければこそ、アコースティックマッピングで得られる時空間変化が初めて意味を持ち、地殻変動などさらなる議論へとつなげることが出来ます。

アコースティックマッピングを海上の船舶から実施する場合には、GNSS(Global Navigation Satellite System)測位によって求められる船舶の絶対位置が用いられます。絶対位置精度は時代によって変遷しますが、現在では様々な取り組みがなされており、繰り返し観測に十分に耐える位置精度があると言えます。問題は、AUV(自律型無人探査機)やROV(遠隔操作型無人探査機)など、海中に潜航してデータを取得する場合です。海中の位置決定には、現状では、音響測位技術が使われています。音響測位は、海面上にある船舶の絶対位置に、海中の対象の相対的位置を加えることで、海中にある対象の絶対位置を導く技術です。音響測位で用いる音波は海中を伝搬する間に、海水の温度や塩分等による音速の変化や屈折などの影響を受け、さらに海流や海底地形による反射、屈折、干渉等の影響も受けます。こうして得られる観測対象の位置情報には誤差が含まれます。さらにアコースティックマッピングの場合には、使用する音響信号の周波数等に依存する、感度

や減衰の相違により、同域同時帯に取得した複数のデータであっても、一見ただけでは相互比較さえ難しい場合もしばしばあります。これが位置誤差とあいまって、正しく高い分解能で取得する観測対象の絶対位置を、データ分解能に見合う精度で決めることが難しい場合があります。

このような場合には、複数回の観測を統計処理し、位置精度の限界と、音響信号の性質を勘案して、確からしい位置を導出します。また、使用する周波数により異なる観測対象の特徴をよく読み取ることで、実際には見渡すことが出来ない海洋底の情報を、可能な限り多く汲み取ることを目指します。

【困難3】不測の事態：想定して、備える

どれだけ周到に準備をして観測に臨んでも、海況の変化に抗うことは出来ないし、観測機器の故障、破損、亡失!?さらには乗員の怪我や発熱などという不測の事態も発生します。限られた観測時間内に理想とする観測を全うできないのは、悔しいけれどももはや当然のことと思うようになりました。取得できたデータセットからどのような情報を抽出するか、結論を導出するかが、腕の見せ所というところでしょうか。などとえらそうに…、私などは長いキャリアを積んでもなお半人前にも及びませんが、海域で情報を取得される全ての方々は、常に不測の事態に備え、相当の覚悟をもって観測を遂行されていることと確信いたします。

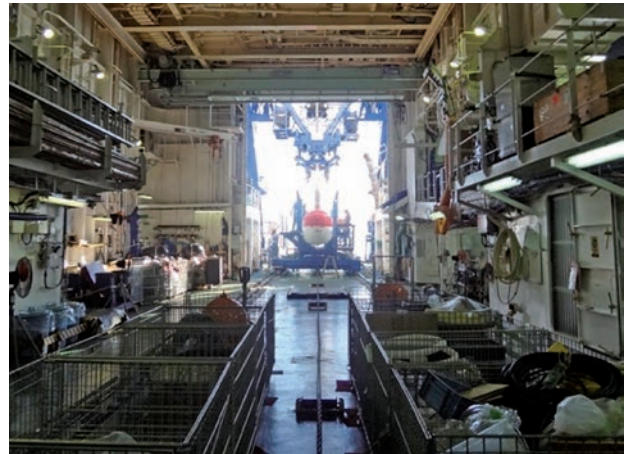


写真3 データを取得して調査船「よこすか」格納庫に揚収されるAUV「うらしま」(JAMSTEC)

海洋科学の分野で用いられる観測技術も、日々研究され、進化しています。これらを使い、海底面近傍の状態把握を必要とする科学と産業に資する情報が網羅されるまで、広く沿岸域から深海まで、最高分解能をもつ音響データセット取得の試みを続けたいと思います(写真3)。これまでに誰も知り得なかった海底面近傍の様子を明らかにすることで、あまりに大きな地球の活動のごく一端を理解することを目指します。

ドローンを用いた過渡応答 空中電磁探査装置の開発

有限会社ネオサイエンス 城森 明

1. はじめに

近年、大規模な自然災害が多く、地すべりや斜面崩壊のような急峻な地形での迅速な地下の3次元構造調査が求められてきています。一方、従来の空中電磁探査では機材の重量が重いため有人ヘリコプタを使用する必要があり、飛行許可やコスト面などを含めて簡便に利用することが困難な状況にあります。そこで、我々は3種類のドローンを使用した空中電磁探査装置の開発を行い、検証実験を行いました(城森ほか, 2020)。

装置の開発には、従来の空中電磁探査装置の小型軽量化が重要なポイントでした。ドローン探査では、有人ヘリコプタを用いた探査と比較して、その信号パワーが小さく探査深度も数10m~数100mまでと浅くなります。しかしながら、ドローンは小回りが利き、GPS飛行であるため測定位置の再現性も良く、大地に接近した測定も可能であり、小さな谷地形での測定も可能となります。また、ドローン探査は、自然災害の際に重要となる深度数100mまでの地下の可視化を、迅速に、かつ高密度に行うことが可能な探査です。

2. 3種のドローン空中電磁探査

従来の空中電磁探査には、空中送受信タイプ(HELITEM, P-THEM)と地上送信、空中受信タイプ(GREATEM)があります。後者の方法は受信機のみをドローンに搭載すれば良いため、現在の飛躍的な電子技術の発展により可能となりました。また、前者の方法は送受信の両方を1台のドローンに搭載するには重いため、2機のドローンの編隊飛行とデータ処理方法により可能になりました。

以下に開発した3種のドローン空中電磁探査の名称、略称、そして模式図を示します(図1)。

D-GREATEM(Drone-Grounded Electrical source Airborne Transient Electromagnetics), D-TEM [GL] (Drone-Transient Electromagnetics [Ground-surface Loop-source]), そしてD-TEM [AL] (Drone-Transient Electromagnetics [Aerial Loop-source])です。

D-GREATEMとD-TEM [GL]は、地上送信、空中受信タイプ、D-TEM [AL]は空中送受信タイプになり、それぞれの使用目的に応じた使い分けが必要であることが分かっています。

3. 検証実験

(1)概要

実験は中央構造線沿いの紀の川河川敷で実施しました

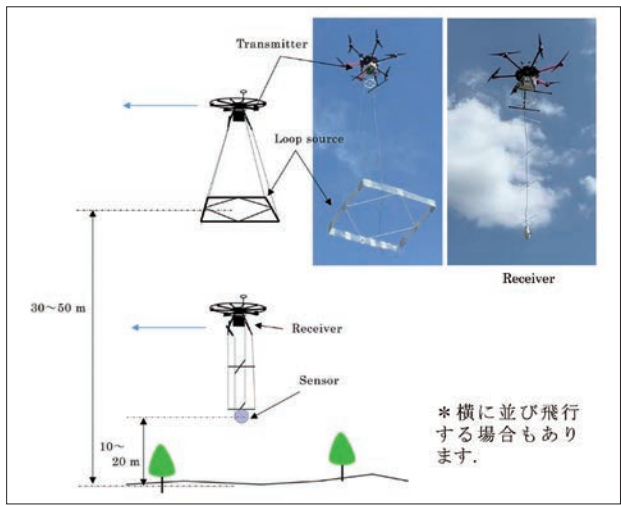
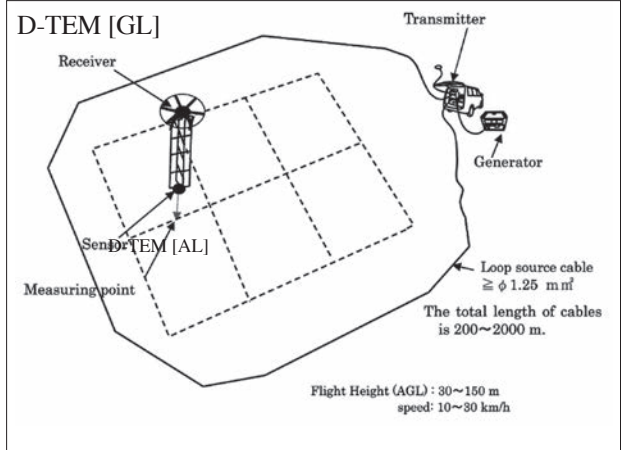
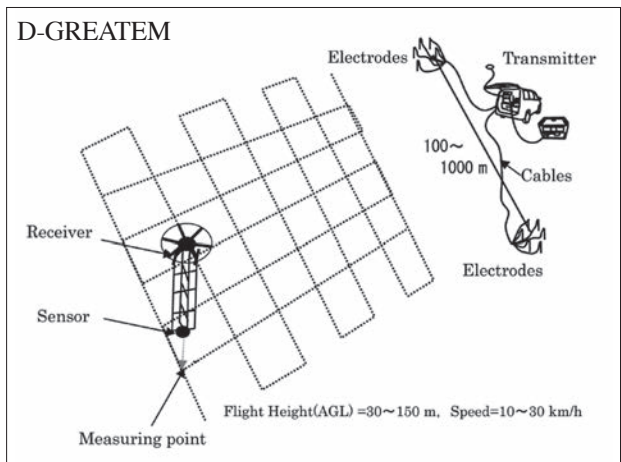


図1 ドローン空中電磁探査 (城森ほか, 2020より引用, 一部加筆)

(図2)。この地区は、既存の高密度電気探査の測定結果から、表層の5~10mは高比抵抗層、その下には層厚15~30mの低比抵抗層が、さらにその下には、主に中程度の比抵抗が分布することが分かっています(図3(a))。

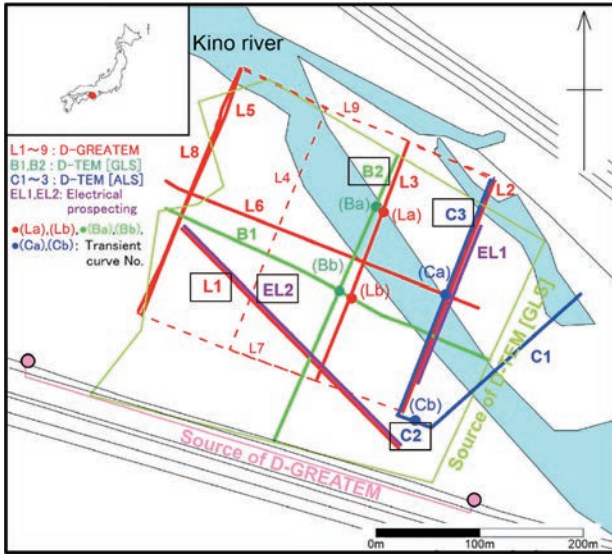


図2 測線位置図

(2) 結果

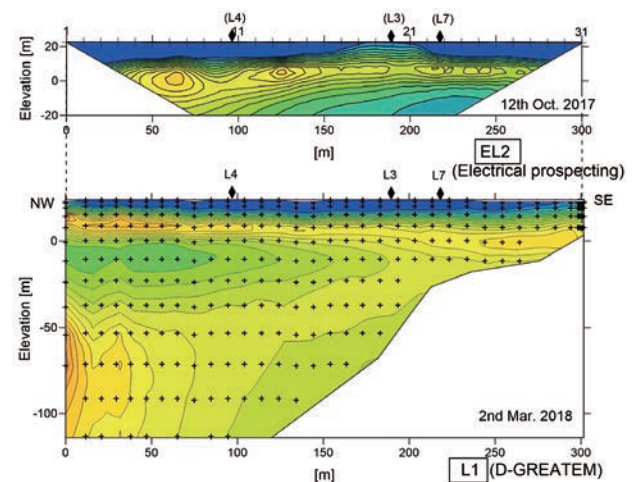
高密度電気探査は2次元インバージョン、ドローン探査は1次元インバージョンによって解析しました。高密度電気探査とD-GREATEMの比抵抗断面図は良い整合性を示しました(図3(a))。D-TEM [GL]の表層の層厚はD-GREATEMより南側(SSW)で厚くなっていましたが、これは測定年度が異なるために生じた可能性が高く、同年度に行ったD-TEM [GL]とD-TEM [AL]の比抵抗断面図は良い整合性を示しました(図3(b))。

4. 結論

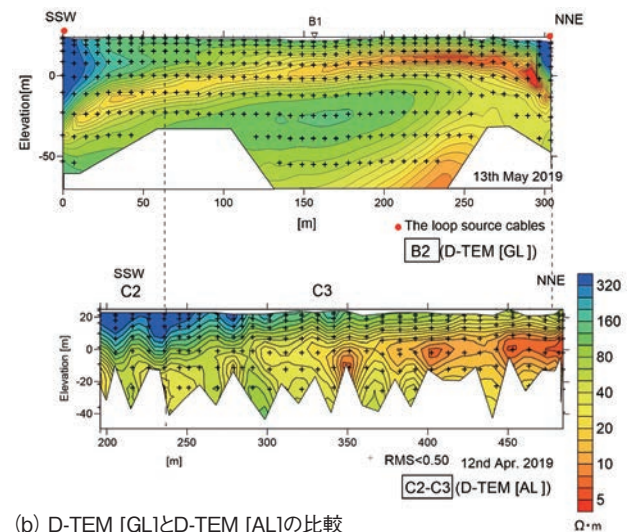
- ①D-GREATEMは、送信源と受信点の間に伸びる、例えば送電線のアースなどのような比抵抗異常が存在する時、その影響が影のように引きずるため、送信源の位置に注意しなければなりません、探査深度は比較的深く、数100mまで得られます。
- ②D-TEM[GL]は、送信源がループ状で調査地区を囲むため、D-GREATEMよりも信号強度が強く、安定した測定結果が得られます。
- ③D-TEM[AL]は、探査深度は50m程度までで、平坦な地形でのみの測定が可能です。ただし、この方法は地上送信源が不要であるため、様々な調査地区に適用しやすく、さらなる技術向上により有望な探査方法に成り得ると考えています。

謝辞

本研究の一部は、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)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」(管理法人:防災科研)によって実施され、解析ソフトに関しては、株式会社TANSA Geophysicalの佐々木 裕氏に、ご教示頂きました。本研究に、様々な形で携わっていただいた皆様に深く感謝の意を表します。



(a) 高密度電気探査とD-GREATEMの比較



(b) D-TEM [GL]とD-TEM [AL]の比較

図3 比抵抗断面図

(城森ほか(2020)で掲載されている断面の一部を抽出、加筆して掲載しました。)

<参考文献>

城森 明・城森信豪・城森敦善・近藤隆資・結城洋一・新清 晃(2020):ドローンをを用いた過渡応答空中電磁探査装置の開発—D-GREATEM, D-TEM [GLS], D-TEM [ALS]—, 物理探査, Vol.73,83-95.

(本誌編集委員より)

本誌では、会員はじめ一般の方にも技術的な内容をご理解頂けるよう、「わかりやすい物理探査」コーナーを設けております。本記事でも用いられている電磁法の技術的な解説については、物理探査ニュースNo.3, p.5~7の「わかりやすい物理探査(電磁法 1)」をご参照ください。

新技術 紹介

機械学習を活用した 地震探査データ解釈の紹介

シュルンベルジェ株式会社 岡田 実紗・大財 綾子

1. はじめに

前号の新技術紹介では、弊社で開発しているE&Pサイクルをクラウド上で統合するコグニティブE&P環境「DELFI」に関して取り上げ、クラウドサービスでは、地球物理関連業務において、データ連携の促進、作業の高速化、そして働き方に革新をもたらすような貢献が期待される事をご紹介いたしました。

今回は、クラウドサービスによって実現できる「機械学習を活用した地震探査データ解釈」を取り上げて紹介します。この新しい解釈手法では、一部の解釈データを機械学習させることで、数セクションの解釈を3次元データ全体に広げる事が可能です。このような半自動的な新しい解釈支援ツールを用いることで、解釈にかかる時間を、劇的に短縮する事が期待されます。今回は、主に機械学習を用いた断層解釈に関して、例を交えながら紹介させていただきます。

2. 手法の概要

この例で用いております断層解釈手法には、DCNN (Deep Convolutional Neural Network) という機械学習法を使用しています。DCNNでは、1960年から使用されていた画像判別用学習法CNN (Convolutional Neural Network: 畳み込みニューラルネットワーク) よりも、重みフィルタの畳み込みとプーリングを複数回繰り返し、多層にする事で、より複雑な形状の断層を安定して予測できるようになりました。

この手法では、まず断層解釈を行う地震探査データの断面を小さな画像セクションに変換し、DCNNによる画像認識を用いて断層の位置を認識する「prediction model」を構築します。このモデルにより解釈者は地震探査データの中で、断層の可能性を示す地震波属性 (0-1の値をとる) を得ることができます。(図1)

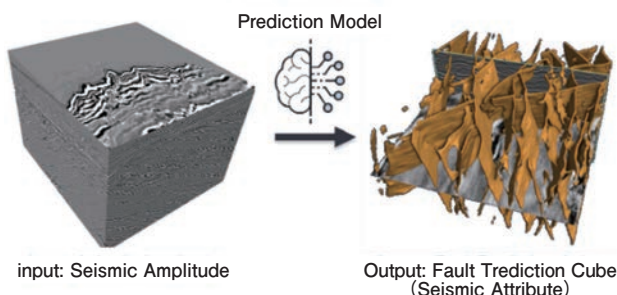
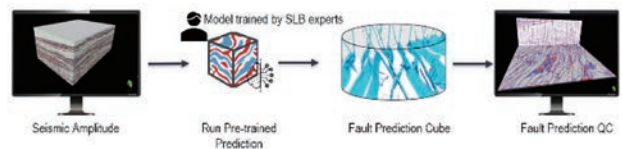


図1 断層予測の地震波属性の概略図

3. 断層予測手法

断層予測を行うには、2つの新しい手法を利用します。第一に事前学習済みモデルを使う手法(図2a)、第二に解釈者によって予測モデルを学習させる手法(図2b)です。それぞれの手法につきまして次にご説明します。

(a) Pre-trained prediction



(b) User-trained prediction

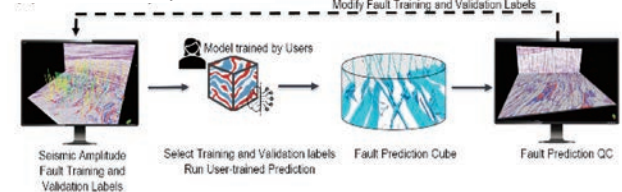


図2 断層予測手法の概要

3.1 Pre-trained Prediction (事前学習済みモデルを使う手法)

世界各国で公開されている地震探査データを使用して、経験豊富な専門家の解釈により訓練されたモデルを利用する機能です。事前学習済みモデルを使用するため、この機能を使って解釈を行う解釈者は設定のパラメータや手動による解釈を必要とせず、初めて見るデータ全体に対して、断層を予測できます(図2a)。もちろん解釈を行うデータの特性(ノイズや処理の有無)、地域特性によって、この手法のみでは期待する結果が十分に得られない場合がありますが、断層分布の傾向や数量などを把握するのに有用です。

3.2 User-trained Prediction (解釈者によって予測モデルを学習させる手法)

地域やデータ特性を予測モデルに反映するために、対象となるデータセットに解釈者が予測モデルの教師あり学習の教師データ(ラベル)としての解釈を与えます。(図2b)従来の解釈は、3次元地震探査データを全体的に解釈しますが、このラベルとしての解釈は選択した数セクション(Inline/Xline)のみに限定して解釈を行います(図3)。ただし、選択された断面内では予測モデルが正しく学習するために完全に過不足なく解釈する必要があります。このラ

ベルは学習だけでなく、予測結果を評価するための交差検証用としても使用されます。従ってこのラベルの品質は、最終的な予測の精度に大きな影響を与えます。断層と思われる変位が視認される場合は一貫してその位置を正確に解釈することが必要です。予測結果が不十分である場合は、解釈を修正してモデルを再学習させます。この手法の場合、予測モデル作成時にそのデータ専用のラベルを与えた上で学習させるので、結果はより最適化され、一般的に、事前学習済みモデルを使用するよりも予測精度の向上が期待されます。

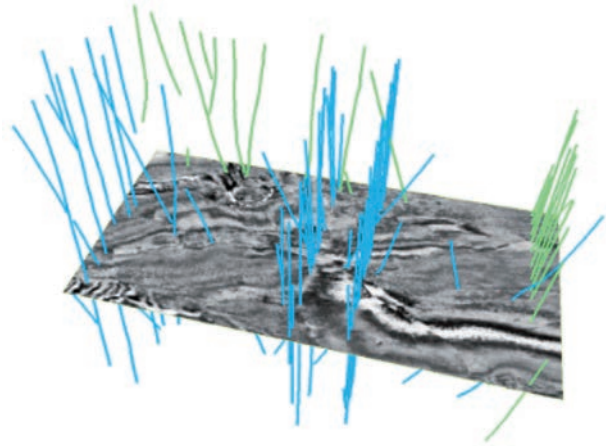


図3 機械学習のラベルとしての断層。数か所の断面を選択し、教師データ(青)と検証データ(緑)に分けている。

4. 実データでの実施事例

今回の適用例ではオーストラリア西部の海上地震探査データを使用しました。(図4)事前学習済みモデルを使用した予測結果を図4(a)に示します。黄色の線は予測された断層の位置を示します。この例からは主要な構造の傾向(北西―南東トレンド)が期待通りに得られましたが、深部では断層の十分な連続性が得られず、予測精度の低下が見られました。この主な理由は、データの地域特性を考慮できないことや、深くなるにしたがって地震探査データの品質が低下する影響と考えます。

次に、解釈者によって学習させたモデルを使用した予測結果を図4(b)に示します。この例では主要な断層について、学習用に4セクションと検証用に2セクション(全断面データの1%未満)にラベル付けを行いました。結果、事前学習済みモデルに比べて予測結果は連続性と正確性の点で大幅に向上しました。加えて、SN比が低い深部でもおおむね解釈者にとって違和感のない解釈が得られました。さらに従来の地震波属性解析と比較しても、比較的データのノイズに影響されることなく、予測結果は断層の形状を展開するのに適することが分かりました(大規模な断層構造等)。機械学習による解釈の精度をさらに向上させるには、

学習ラベルとして与えた数か所の解釈の修正のみで可能となります。

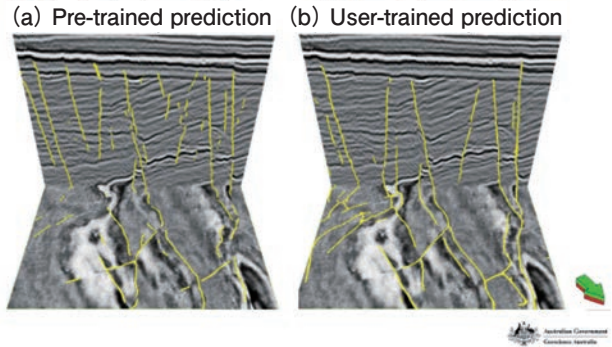


図4 適用例。事前学習済みモデルを使用した予測(a)と、解釈者によってモデルを学習させる手法を使用した予測(b)
(データ提供:Geoscience Australia)

5. 今後に向けて

これまで紹介した機能のさらなる開発は引き続き行われています。今後は、今回ご紹介した手法自体や管理手法の改善を行うとともに、断層だけではなく、層準解釈における機械学習機能も近日中に提供開始予定です。その他にも、岩塩ドーム等の複雑な構造に対しての解釈作業に対しても、様々な機械学習によるアプローチを組み合わせた手法を現在開発中です。このように、クラウドのような需要に合わせて急速に拡大あるいは縮小できるような柔軟な計算環境を利用した自動化技術を組み合わせることで、現在は数か月～年単位のプロジェクト期間が、数日～数か月の期間に短縮されることを目指しています。

6. まとめ

地震探査データの解釈は、地下構造の理解とモデリングにおいて必須なプロセスですが、最終的な結果を得るまでには数ヶ月の期間を要する長期間の作業が必要です。クラウドベースの新しいAIによる地震探査データ解釈支援ツールは、解釈者の専門知識に基づく予測モデルを利用して、手動の繰り返し作業を最小化し、最小限の労力で地下構造の予測をサポートします。これにより解釈者はより専門的な地質的・地球物理的な考察に集中し、従来よりも、詳細な構造解釈、ポテンシャル評価、リスク評価に時間を割くことが可能となることが期待されます。このように新技術と解釈者の経験とを統合することは、多大な時間と労力を必要とする従来の解釈作業を劇的に変える革新の第一歩かもしれません。

<参考>

<https://www.youtube.com/watch?v=jd8-Dj6BXJO>

本の紹介

芦田 讓 著

反射法地震探査データ処理の数理

名古屋大学 渡辺 俊樹

本学会名誉会員の芦田讓先生が、京都大学大学院工学研究科で在職時に使用されていた修士課程の講義テキストを元にした本書を上梓されました。タイトルにあるように、先生のご専門の反射法地震探査データ処理の数理、特にデジタル・データ処理について、基礎から当時の最新理論まで詳しく解説されています。

本書は以下の各章から構成されています。

1. 速度解析
2. フィルタ操作
3. スペクトル解析
4. デコンボリューションフィルタ
5. ウェーブレット変換
6. 速度フィルタ、F-Kフィルタ
7. 合成音響インピーダンスログ
8. マイグレーション処理
9. 地震モデリング
10. ジオトモグラフィ

また、追加資料として、会誌「物理探査」掲載のものを含め論文や資料5編が転載されています。

本書の特色は講義テキストであったことに尽きます。まず、反射法地震探査のデータ処理を学ぶにあたり必要な事項が揃っています。また、数式の導出が丁寧になされているので、初学者でも式を追って理解することができ、プログラミングも行うことができます。各章末には理論の基本的な参考文献が豊富に掲載されており、独習を進められます。

本書はデータ取得やハードウェアなどの内容を含まず、基礎的な数理に焦点が当てられています。ここ20~30年ほどの新しい解析技術は含まれませんが、基礎の数理は現在でも変わっておらず、本書の内容は教科書としての価値をまったく失っていません。改めて本書を見ると、デジタル・データ処理の理論と技術が発展した時代の熱がまだ感じられる気がします。また、後半に収録された論文や資料には、現在脚光を浴びているPSDMやAIにも通じるといえる論文もあり、先生の先駆的な業績がうかがえるものとなっています。

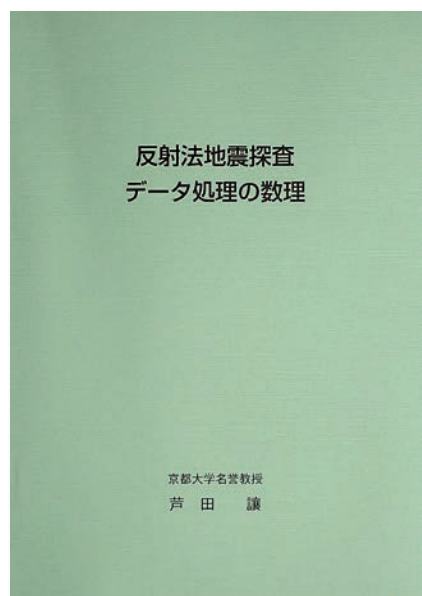
反射法地震探査のデジタル・データ処理については、Yilmazの大著があるもののごく少数で、特に日本語での類書がほとんどありません。本書は反射法地震探査のデジタル・データ処理の教科書、学習書として適切で、本手法を理解しようとする学部生、大学院生、研究者、技術者にお勧めします。なお、「本書は市販せず興味を持っていただいた

方にお申し込みにより、特別価格にて頒布させていただきます。」とのことです。

(芦田先生連絡先：ashida.eefa@cans.zaq.ne.jp)

私の手元にS62の日付のある手書きの講義テキストがあります。芦田先生が京大に着任された昭和62年当時、私は大学院修士課程の学生で、本書の元となる講義の最初の受講者の一人でした。この「物理探査特論」の講義は月曜日、先生によると毎週末に休日返上、自転車操業でテキストを執筆されたそうで、講義ではコピーしたての分厚いホチキス留めのテキストが配布されたことを覚えていません。本書の各章が1コマ1回分の講義の内容でしたので、猛スピードの講義に必死に食らい付き、反射法データ解析の真髄に触れられて楽しい講義だったことが思い出されます。できたての版にはミスや誤りもあり訂正の書き込みが随所にあります。我々学生も初版の校正に貢献できたと思っています。

テキストはその後、先生の御令室によりワープロで入力し直されて長く使われました。手書き版で修正したミスのいくつかはワープロ版で復活し、本書にも引き継がれたようですが、昔の思い出を見つけたような懐かしさを覚えます。なお、手書き版テキストには本書にはない11章「S波震源による探査」があり、物性解釈にも言及されています。



物理探査ニュース 2021 ハイライト 2022年(令和4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.org
ホームページ : http://www.segj.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頂ければ自由にご利用頂けます。