

物理探査 ニュース

2017 ハイライト

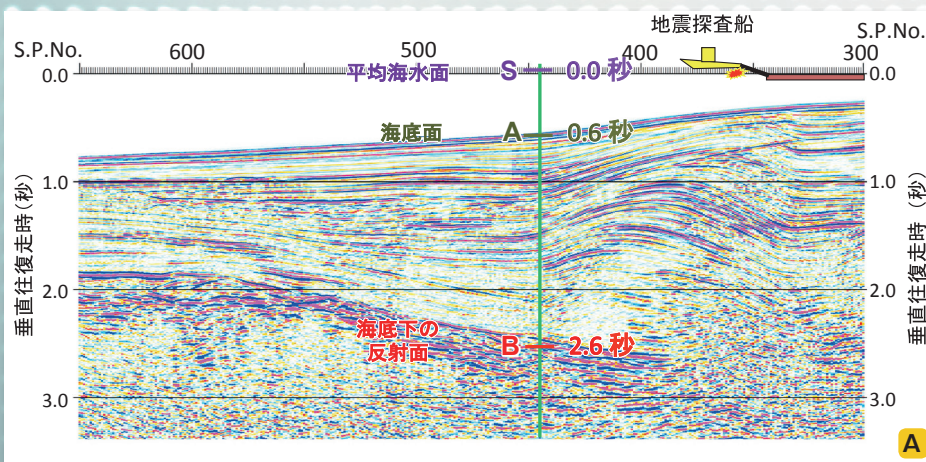


公益社団法人 物理探査学会
The Society of Exploration Geophysicists of Japan

目次

現場レポート 「2016年熊本地震直後の余震観測で経験したこと」	1
研究の最前線「重力異常・重力偏差テンソル」	5
SFの中の物理探査 13	7
会員の広場「Quest for Oilに挑戦」	8
現場レポート「英国での浅海底下CO2放出実験」	9
脱線英語 その14「ああ無情!」	13
物探よもやま話「重力波とジオフォン」	15

Geophysical Exploration News 2017 Highlights



「物理探査ニュース2017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2017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) わかりやすい物理探査 海上反射法地震探査断面図の見方(ニュース35号)
- (B) 地球惑星科学連合大会における地下レーダの展示(ニュース36号)
- (C) 山口大学における電気探査野外実習の観測機材(ニュース35号)
- (D) 熊本地震で崩壊した民家(ニュース34号)



2016年 熊本地震直後の余震観測で 経験したこと

東京工業大学 地元 孝輔・山中 浩明
鉄道総合技術研究所 津野 靖士・是永 将宏

余震観測とは

2016年熊本地震では、震度7という強烈な揺れを2度も観測し、甚大な被害をもたらしました。このような被害をもたらす強い揺れは地盤の影響も大きいので、私たちは物理探査を使って地盤を調べ、揺れとそれに伴う被害の原因を解明する研究を行っています。

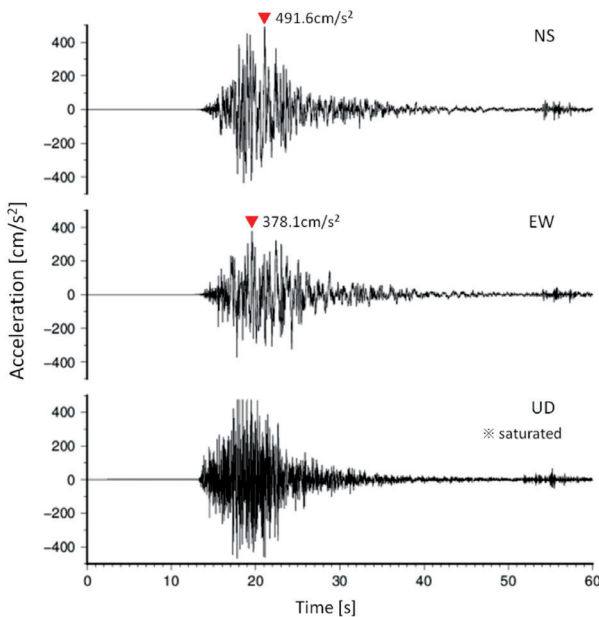


図1 熊本駅付近で観測した16日未明本震の記録

熊本地震で震度7を計測した機器は震度計や強震計と呼ばれており、日本では世界に類を見ない高密度な観測網が整備されていますが、それでも数十km間隔くらいです。では、震度計が設置されていない場所ではどうなのか。測ってみなければわからないので、一時的に高密度に震度計を設置します。しかし通常、地震はそう頻繁には起こりませんが、今回のような大地震の後には余震が多発し、効率的に地震記録が得られます。これが臨時余震観測です。

熊本地震では益城町の建物被害が帯状に分布していることが注目されました。今回の臨時余震観測の重要な目的は、被害状況の原因が地震の揺れの大きさの違いであるか、実際に観測して調べることです。

14日前震の発生から16日本震が起こるまで

4月14日の前震の翌朝、余震観測について検討が始まりました。山中はほかの研究者と連絡を取り合っており、私(地元)はとりあえず機器の準備を始めました。この日は4月15日です。鉄道総研チームは徹夜で準備して、すでに熊本に向かっているとの情報です。

私は昼過ぎには機器一式準備を終え、家に帰って着替えを鞆に詰めたあと、車で大学に戻って機器を積み込み、夕方に羽田から福岡空港に飛びました。鉄道総研は15日中に熊本駅付近の2か所に震度計をすでに設置したようです。すなわち、お察しのとおり、私たちは16日未明の本震

物理探査ハンドブック増補改訂増刷のお知らせ



1998年以来18年の長きにわたってご好評をいただいております物理探査ハンドブックですが、この度物理探査技術の発展がめざましい分野については手を加え、改訂版を出版しました。章立ては以下に示すとおり現行版と同様ですが、反射法地震探査やリモートセンシング、位置測量、あるいはこれまでなかった表面波探査を新たに追加するなど、手法によっては大幅な改定がなされています。第II編のケーススタディを割愛し、各章中に入れることといたしました。

- 第一分冊
 - 第1章 反射法地震探査
 - 第2章 屈折法地震探査
 - 第3章 微小地震・AE
 - 第4章 微動・振動・表面波探査
 - 第5章 電気探査
 - 第6章 電磁探査
- 第二分冊
 - 第7章 地中レーダ
 - 第8章 重力探査
 - 第9章 磁気探査
 - 第10章 リモートセンシング
 - 第11章 熱・温度探査
 - 第12章 放射能探査
- 第三分冊
 - 第13章 物理検層
 - 第14章 VSP
 - 第15章 ジオトモグラフィ
 - 第16章 シミュレーション
 - 第17章 モデル実験
 - 第18章 位置測量

冊子版にはCDはついておりません。電子版からCopy & Pasteはできません。

ご高評につき、増刷、再販しました
販売価格(税込)
冊子版¥32,400 電子版¥21,600

別途送料がかかります
事務局へお問い合わせください



に遭遇し、鉄道総研チームはなんと、本震を記録したのです(図1)。

さて、私と山中が15日に宿泊したのは、熊本県北部の山鹿市というところ。震源から離れているためか、特に変わった様子はみられませんでした。避難してきたと思われるご家族が宿泊していました。慌ただしかった一日の疲れもあって、たぶん熟睡していた瞬間だと思います。16日午前1時25分に本震が起こります。大きな揺れで目が覚め、グワングワン横に揺れると同時に緊急地震速報がけたたましく鳴っていました。寝ぼけていたし、死ぬかもなあと思ったことを覚えています。たしか、すぐにテレビをつけて、その後どうしたかという、また布団に入りました。「まさか昨日の地震より大きいはずが無いから大丈夫。とりあえず



東京工業大学 地元孝輔(上左) 山中浩明(上右)
鉄道総合技術研究所 津野靖士(下左) 是永将宏(下右)

明日に備えて眠ろう。」と、そんなことだったと思います。しかし、いざ眠ろうと決心しても、何回も余震で揺れるし緊急地震速報は鳴るしでほとんど寝付けませんでした。

結局夜が明けてテレビを見ると、相当大きな地震で、被害も広がっていることが分かりました。今夜も同じ宿なので、ひび割れがないかチェックしてから出発です。あんなに揺れたのに、宿泊していた山鹿市は震度5弱のようでした。震度7とは一体どれほど恐ろしいのでしょうか。

益城町へ向かう

さて、いよいよ震源地に向かうのですが、まさか本震が起こるなんて思ってもいませんし、発生から数時間でなかなか情報も集められません。とにかく現地の状況のみを手探りで観測点を決めるしかありません。結局、鉄道総研チームと合流することもできず、東工大チームは当初の予定通り益城町に設置することにしました。

高速道路はもはや通行止めですから、下道で熊本市に向かい、午前9時頃に益城町に入りました。益城町の中心に近づくにつれ、被害が徐々に大きくなっていき、道路もデコボコだらけです。信号は消えたまま。崩れた建物が道路にはみ出し、大渋滞で益城町の中心部へはなかなか近づけません。どこかに車を停めて歩いて行くしかありません。



そうと決めて車を降りた瞬間です。ドンッと揺れました。M5.4の余震だったようです。しかしこれにびっくりして怖気づいているひまなどなく、急いで機器一式をキャリーケースに詰め、足早に益城町役場を目指します。

余震観測点の設置

役場周辺は大渋滞。多くの住民も役場に集まってきます。そこには、配給、自衛隊、警察、救急、インフラの復旧隊でごったがえしています。さて、震度計を設置するのをお願いしたいのですが、一体、役場関係者はどこなのか探すだけで一苦労です。なんとか役場で設置を終え、次に防災科学技術研究所のKiK-net益城観測点で設置を終えたのはお昼すぎです。

お昼とはいっても休んでいる暇はありません。そもそも

お店はほとんど営業していないし、開いているコンビニもありましたが、弁当や総菜のコーナーは空っぽです。飲み物も水とお茶のコーナーだけすっからかん。断水しているのでトイレも使えません。

震度計の設置といってもあくまで臨時なので、センサーを置いて、収録装置は雨除けのためゴミ袋に入れる程度です。傍から見ればゴミです。現地でカーバッテリーを調達し



てつなげば電源もいりません。これらを次々に設置していきます。通行止めと渋滞でなかなか思うように動けないなか、被害を確認しながら設置場所を決めていきます。なんとか日没前に持ってきた機器7台すべてを設置することができました。

それぞれ設置している間にたいてい一回は余震が起きます。傾いた建物の横で設置していたときは、頼むからいま余震が起こらないでくれという思いも虚しく、容赦なく揺れが始まります。飛び跳ねて建物から逃げました。

余震のたびに携帯電話が不気味な緊急地震速報の音を発するのは、たいてい揺れが始まった後です。公園で子供を遊ばせていた母親は、滑り台で遊んでいる子供を必死に抱きかかえます。

実家の母が、おそらくテレビを見ていて心配したのでしょ



う。メールが届いて、「冬山か戦場にいるようなもの」と書かれていましたが、本当にその通りだと思いました。

1か所だけ益城町の中心から離れた山の中に設置しましたが、そこだけは何事もなかったかのように静かで、そこにいたひとときだけはほっとしたのを覚えています。そう思うくらい益城町の中心は普通ではなかったのです。

余震観測は、臨時とはいえ数週間から数か月に及ぶことがあるので、ご家庭に依頼して敷地内に設置させてもらうことが多くあります。今回もいくつかの一般のご家庭を訪ねましたが、家屋が傾いていて、軒先避難、車中泊されているようでした。回収したときも状況はほとんど変わっておらず、避難生活が長引いているようです。昼間は暑いくらいの青空が広がっていますが、夜はまだ冷え込みます。

再度、益城町へ

17日夕方には東京への帰路につきましたが、急きょ、明日また戻ってくることを決めたのです。あまりの被害の大



きさに、もっと観測点を増設の方がいいと判断したからです。18日夕方には福岡にとんぼ返りです。さらに5つの観測点を追加しました。

その帰り際に、断層調査をしていた研究者の案内で、地表に現れた断層を見ることができましたが、本当に目を疑いました。教科書を読んで理解していたつもりでしたが、地面のずれを目の当たりにすると頭が状況を理解できないようです。

西原村と南阿蘇村へ移設

4月末には、益城町に設置した臨時観測点で多数の余震を記録したので、そのまま機器を西原村と南阿蘇村に移設しました。そこでも熊本地震の被害が広範囲に及んでいることを目の当たりにしました。

学生村と呼ばれている南阿蘇村の東海大学周辺は、人や物でごったがえしていた益城町とは一転して、被災したそのままの状態、あたりには誰も見当たらず、ひっそりと

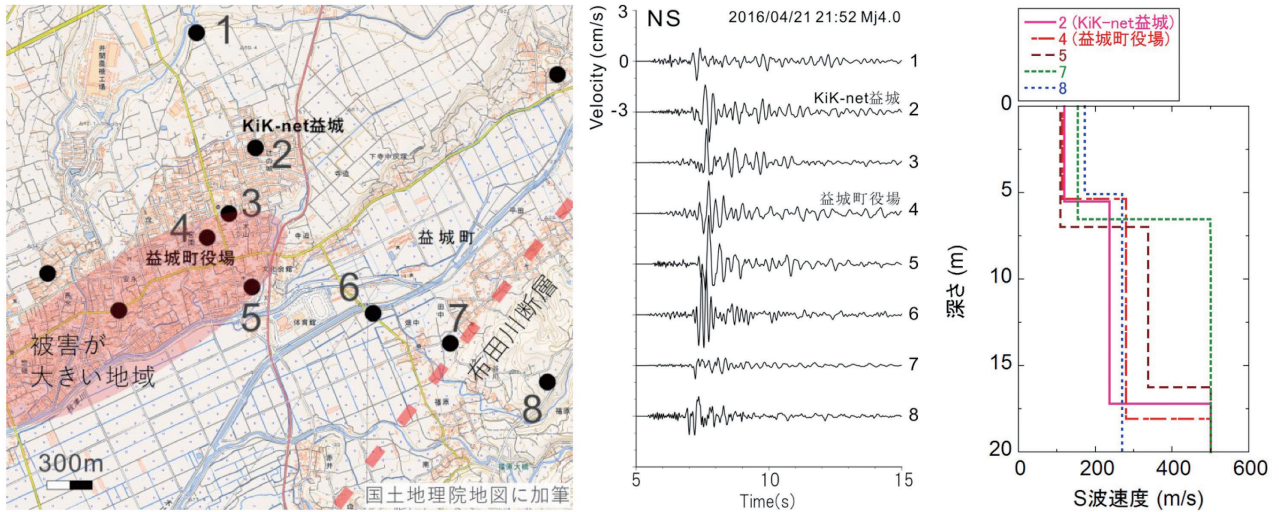


図2. 益城町に設置した余震観測点(左) 余震観測波形(中) 余震観測点のS波速度構造モデル(右)



していました。潰れたアパートの周りには家具や生活用品が散乱していて、洗濯物もそのまま。1階が潰れて目の高さにある2階の玄関はブルーシートで覆われていて、それを目前にすると本当に胸が痛みます。

臨時余震観測の記録からわかったこと

ほとんど体験記になってしまいましたが、少しでも、研究成果について紹介します。図2に示しているのは、益城町で



観測された余震記録の例です。地震直後から、益城町の被害は带状に分布していることに注目されていました。その



帯を横切るように設置した余震観測点の記録は、たしかに被害の帯に当たる部分で大きくなっています。本震でも同じであったかは不明ですが、もともと地震動が大きくなりやすいところに被害が集中しているということがわかりました。また、微動アレイ探査も行っており、S波速度100m/s程度の非常に低速度の層が確認されました。

このような調査を、私たちを含めて強震動を研究しているグループでは、合わせて60点以上で行いました。現在は熊本市にて継続しています。

地震から1年が経ちました。これほどの地震被害は、東日本大震災の津波被害を別にすれば、近年の地震でもまれです。なぜ、これほどの被害をもたらしたのか。警鐘を鳴らすことはできなかったのか。実際に本震を体験したこと、発生直後の被災地を目の当たりにして感じたことは忘れずになりたいと思っています。

(文:地元孝輔)

重力異常や重力偏差テンソルを用いた半自動解釈手法の最近の動向

富山大学大学院理工学研究部 楠本 成寿

重力探査は、堆積盆地形状の把握、断層調査、資源探査に欠くことができない探査手法であり、様々な地下構造調査に広く用いられてきた。近年は、重力偏差計を用いた重力偏差テンソルの計測が精力的に行われてきている。

重力偏差計は、3次元空間での重力の勾配を計測する装置で、元々はLoránd Eötvösによって考案された。Eötvösの実験装置はビームの両端に錘をセットし、このビームを吊るした針金の捻れから両端に作用する重力の差、すなわち重力偏差を検出するものであった。現在の重力偏差計は、計測が航空機を用いられることもあり、ぐるぐる回る回転盤の上に加速度計を据え付けるタイプ(図1)のものが主流であり、サイズも小さくなっている。図2はCGG Aviation社のヘリコプター搭載型重力偏差計(Heli FALCON[®])である。

ところで重力偏差テンソルとは、重力ポテンシャル W を空間

(x, y, z) で2階微分して得られる量のことであり、以下のように9成分からなる。

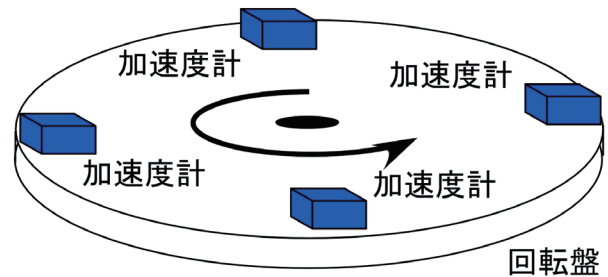


図1 重力偏差計の概念図。
一定速度で回転する回転盤上に加速度計を取り付け、重力偏差を計測する。



図2 ヘリコプターに搭載された重力偏差計(Heli FALCON[®])。(a) 全景。操縦士席の後ろに制御装置が、副操縦士席の後ろに重力偏差計がセットされている。(b) 制御装置。(c) 重力偏差計(中央の白い物体)。著者撮影。

物理探査ニュースは、会員以外の方にも
自由にアクセスいただけます。
下記URLへどうぞ



学会ホームページ 物理探査ニュース
<http://www.seg-j.org/letter/>

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{pmatrix}$$

重力ポテンシャルを空間で1階微分した量は重力(g_x, g_y, g_z)である。 Γ は、それらをさらに空間微分しているため、重力の空間勾配という意味から、 Γ を重力勾配テンソルとよぶこともある。一方で、 Γ を重力偏差テンソルとよぶこともある。これは、対角成分の和が0となるテンソルのことを偏差テンソルというためである。 Γ の対角成分の和はラプラス方程式($\partial^2 W / \partial x^2 + \partial^2 W / \partial y^2 + \partial^2 W / \partial z^2 = \nabla^2 W = 0$)を満たして0となるため、 Γ は偏差テンソルである。ここでは既出のように、 Γ を重力偏差テンソルとよぶことにする。重力偏差テンソルは、 $g_{ij} = g_{ji}$ となる対称テンソルでもある。そのため、 $g_{xx}, g_{xy}, g_{xz}, g_{yy}, g_{yz}, g_{zz}$ の6成分、あるいはラプラス方程式を考慮して、 g_{zz} を除く5成分が Γ の独立成分として扱われる。重力偏差テンソル各成分の単位は、重力偏差計の発案者であるLoránd EötvösにちなんでEと表記されており、 $1E = 0.1 \text{ mGal/km} = 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ である。

重力偏差テンソルは、重力の微分値であることから、構造変化に対する感度は重力異常より高い。特に、 g_{xy} や g_{zx} といった水平成分は浅部構造の影響を反映しやすいといわれており、これらの成分を用いた逆解析では、浅部構造がより詳細に推定される傾向がある。

さて、本記事のタイトルになっている半自動解釈手法とは、一般にデータ解析時に、解析者が地質学的あるいは地球物理学的な拘束条件を与えることなく構造境界の位置等を推定する手法のことをいう。最もポピュラーな解析は、構造境界に起因する重力異常の急変帯(エッジ)の検出である。

エッジの検出には、重力異常の鉛直一次微分 g_{zz} や水平一次微分($g_{zx}^2 + g_{zy}^2$)^{1/2}が採用されることが多い。いずれも重力偏差テンソルの成分やその組み合わせによるシンプルな手法である。これらは古典的な手法でありながら、現在もエッジ検出に多用され、大きな成果を挙げている。これらの他にも、解析信号を用いた手法や、ポテンシャルの曲率に注目した手法、より高次の微分値を用いた手法など、現在もエッジ検出手法についての研究が続けられている。

また、重力異常や重力偏差の原因位置や境界位置を、重力偏差テンソルの固有ベクトルや重力異常ベクトル(g_x, g_y, g_z)を用いて推定する手法も研究されている。代表的な手法は、オイラー・デコンボリューションである。この手法は密度構造を明示することはできないが、原因位置の当たりをつけることが出来るため、その適用例は多い。

近年では、地下構造物の走向や傾斜を推定する手法の研究が開始されている。重力偏差テンソルの最大固有ベクトルが周囲より高密度な物体の方向を向くという性質を利用し、Beiki and Pedersen (2010)は貫入ダイクの傾斜角の推定を試みている。この研究からヒントを得て、基盤岩をダイクのような高密度岩柱の集合体と見做してやれば、高密度の基盤岩と低密度の堆積層の境界や断層の傾斜角が重力偏差テンソルの最大固有ベクトルによって推定されるのではないかと楠本(2015)は考えた。この手法は中央構造線の傾斜角推定に応用され、これまでの探査結果とよい一致を得ている。また、Matsumoto et al.(2016)は、

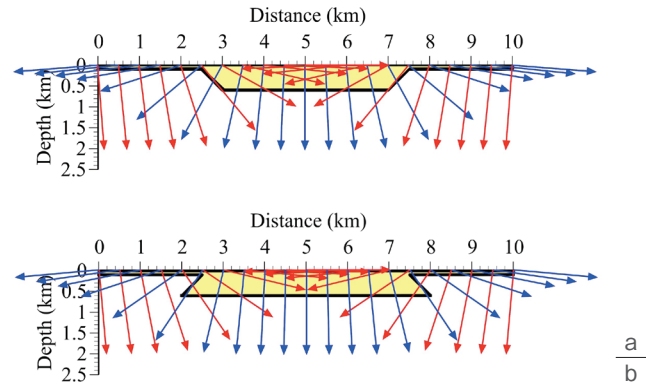


図3 単純化された堆積盆地モデルによる重力偏差テンソルの固有ベクトル。赤が最大固有ベクトルであり、青が最小固有ベクトルである。(a) 堆積層が正断層によって基盤と接している場合、最大固有ベクトルの傾斜は正断層の傾斜角と平行になる。(b) 堆積層が逆断層によって基盤と接している場合、最小固有ベクトルの傾斜は逆断層の傾斜角と平行になる。Kusumoto (2017)による。

布田川断層の断層傾斜角分布推定にこの手法を応用している。断層傾斜角は、断層の累積変位量と同じく重要なパラメータであるため、この手法の実用化に向けた研究も進められている。例えば、2次元断層調査では、多くの場合、断層の走向に直交する測線を設定し、その測線上で地震波探査や重力探査が実施される。Kusumoto (2017)は、このような測線上で得られた重力異常データを重力偏差テンソルに変換し、断層傾斜角の推定に応用する方法を提案している。この方法では、正断層の傾斜角推定には重力偏差テンソルの最大固有ベクトルが有効であるが、逆断層の傾斜角推定には最小固有ベクトルが有効であることが示されている(図3)。この特性は、Beiki and Pedersen (2010)や楠本(2015)の3次元解析では議論されていない。次元の違いが解析方法や結果に及ぼす影響を定量的に評価していくことが、今後、実用性を議論するうえで必要であると考えられる。

本記事で紹介した解析手法は、いわゆる逆解析ではなく、半自動解釈手法である。これらの手法は、比較的簡単な計算と短い計算時間により、データ解析の一助となる結果を与えてくれることが多い。一方で、異常源となる構造の密度差を推定することが出来ないという物足りなさもある。実際のデータ解析では、密度構造を推定する解析を採用するか、半自動解釈手法を採用するかは、解析の目的や状況によって異なる。

半自動解釈手法といえば、鉛直勾配や水平勾配と思われがちであるが、逆解析手法と同様、現在も活発な研究開発や議論が進められている。半自動解釈手法のフォローは、今後の思わぬ解析手法の発見や開発につながる可能性がまだまだ有りそうである。

本記事では紙面の関係上、参考文献を極力少なくした。詳しく知りたい読者の方は、楠本(2015)の参考文献等に当たられるか、著者までお問い合わせいただきたい。

参考文献

Beiki, M., and Pedersen, L. B. (2010): Geophysics, 75, 137-149.
 楠本成寿 (2015): 物理探査, 68, 277-287.
 Kusumoto, S. (2017): Prog. Earth Planet. Sci. 4: 15.
 Matsumoto, N., Hiramatsu Y., and Sawada, A. (2016): Earth, Plan. Space, 68: 167.

ホント?
SFの中の探査
-12-



ドラえもんで物理探査 ～宝さがし機で財宝さがし～

海洋研究開発機構 笠谷 貴史

ドラえもん、知らない人は居ないでしょう。どら焼きが大好きな設定のネコ型ロボットのアレです。自分が生まれる前から連載されているので、自分がアニメや漫画を見ていた時点で、すでに連載されてから10年が経っていたことに、改めて調べてみて気がきました。最近、娘がドラえもんを見たいと言うので、久々にテレビで見ってみました。アニメは声優さんが変わっているのでちょっと違和感ありますが、今もまだ自分の子供がアニメとコミックを見ているのに、ちょっとした感動を覚えます。

さて、本題。ドラえもんと言えば、のび太が困ると出てくる、物によってはちょっと微妙な「ひみつ道具」の数々ですね。皆さんも「こんなん、ホンマにあつたらよいのになあ。」と思った道具があったのでないでしょうか。自分もタケコプターや暗記パン、どこでもドアなんてあつたらよいのにと思っていたことを懐かしく思います。ネット時代の昨今、ひみつ道具をデータベース化したサイトを複数見つけることが出来ました。

何かネタになるひみつ道具は無いかと、データベースのサイトをちまちまと眺めていてふと目にとまったのは「宝さがし機」でした。「確かに見たことあるなあ」と懐かしく思いつつ、これは物探ネタでしょう、と言うことで今回は「宝さがし機」です。図1に宝さがし機を描き起こしてみました。どうでしょう、記憶に有りますでしょうか。この宝さがし機が掲載されているのはてんとう虫コミックス第15巻の「珍伽羅峠の宝物」です。このひみつ道具、100m以内にある宝物を見つけてくれますが、1000円以下のものには反応しないという代物。物質ではなく、金額で「仕様」が決まっているところは、物理探査屋さんとしては何とも微妙な道具です。ただ宝物を検出するやいなや、アナログメーターで知らせると共に、アンテナが宝物を指し、場所までナビゲートしてくれるのは素敵な仕様です(図1)。

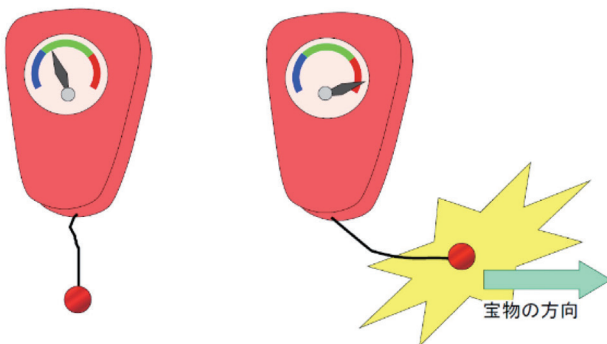


図1 宝さがし機のイメージ

このお話では、この宝さがし機を持って埋蔵金に関する本を読んだドラえもんとのび太が珍伽羅峠に2000万両と言われる財宝を探しに行きます。ただ、この道具、100m以内に近づかないと検出できません。水平も深さ方向にも100mが探知距離と思われるので、相当効率的な探査計画がないと見つけるのは難しそうです。ドラえもんとのび太は、珍伽羅峠という情報だけで財宝探しを始めていて、やみくもに探しているだけの2人にはなかなか見つけることが出来ません。探査計画としては大変残念なやり方と言わざるを得ませんね(笑)。



そのうち、とある農家の庭に反応があり、勝手に穴を掘って埋められていた壺を見つけます。地権者の許可を取らずに探査と掘削をしているので、セオリーとしては残念な限りです。壺の中には預金通帳が入っていて、農家のおじいさんの金庫代わりだったことが分かりますが、預金通帳に書かれた金額も探知できる道具だと言うことが分かります。これはすごい。

その後も探査を続ける2人。次に見つけたのは地上げ屋とおぼしき人の札束入りのリュックでした。この地上げ屋は先ほどの農家のおじいさんの山を買いに来た人のようですが、おじいさんに追い返されます。その後、雨が降ってきてけんかを始める2人ですが、また大きな反応があります。アンテナに従って行くと崖崩れの現場から反応があるようです。そこを掘ると1万円札の束が。実は地上げ屋が崖崩れに巻き込まれていて、土砂に埋まったそれを見つけたようです。結局人助けをするのですが、崖崩れが起きたばかりの現場に入っていくのは二次災害の観点からはアウトでしょうか。

ちなみに、宝さがし機の掲載されたコミックス第15巻を見るために、娘の遊びもかねてわざわざ藤子・F・不二雄ミュージアムまで行きました。しかし、灯台もと暗し。娘を通わせている学童にあるのを先日見つけて、ガッカリしたのは娘には秘密です。

<参考文献>

藤子・F・不二雄, ドラえもん第15巻(てんとう虫コミックス), 小学館.



Quest for Oil に挑戦!

石油資源開発(株) 河村 知徳

物理探査の発展は石油業界の発展と強く結びついてきました。これからも二人三脚的な発展を遂げていきたいと思います。地球を相手にする挑戦的なビジネスを理解するためのゲームアプリ「Quest for Oil」について、今回、紹介させていただきます。

アプリを提供しているMaersk(マースク)という会社名に心当たりはありませんでしょうか。そうです。港湾周辺でMaerskというコンテナをよく見かけるといいます。大体、どんな読み方をするのかもよくわからない会社ですが、ロゴは見たことあるという方はいらっしゃるのではないのでしょうか。



図1 Maerskのコンテナ (Wikipediaより)

ただ、我々が知っているMaerskは元々デンマークに本拠を置く海運会社ですが、実は、北海を中心に石油ビジネスの上流(探鉱・開発)にも参入しています。そこがこんなに面白いゲームを提供してくれているのです。懐の深い会社です。

ゲームのプロセスは実際の石油の探鉱(油田を探す)、開発・生産をかなり忠実に模していますが、やはりゲームなので難しい(ドロドロした?)ところは省略して、石油開発ビジネスの白か黒かで分けられるところだけを体験できるようになっています。

以下ではゲームの説明とともに虚実取り混ぜた石油業界の内情もご説明させていただきます。

① 鉱区権の取得

有望地域かどうかに関しては、その鉱区のポテンシャルが低い(埋蔵量が小さい)か高いかを教えてください。当然、有望地域は鉱区権(油田の有望地域の調査・掘削の権利)の入札価格は高く、そうでないところは安く設定されています。初期資金はそれほど多くないので、まずは Low や Medium のポテンシャル鉱区から始めます。

② 有望構造の抽出、埋蔵量推定

物理探査の結果として得られる様々な地下断面と、地層の孔隙率、浸透率の情報をもとに、石油が地下に溜まっているであろう部分を推定します(ここで物理探査が用いられる)。実は石油会社の仕事で難しいのはこの部分です。有望かどうかはきちんと調査してみないとわかりませんし、地下の情報をモデル化するのは非常に大変です。仮にこれらのプロセスが自動化できるのであれば我々の大半は失業です。ゲームと言いつつ、ここは難しいので、埋蔵量のある場所を見つけるまでヒントが与えられます。ただし、有料です(回数を重ねると資金がどんどん減少する)。このあたりは石油会社のコンサルタントへの依頼と似ています。ノウハウが蓄積されて来れば、コンサルタント費用の出費を抑えることができるのです。

③ 有望地点への掘削、可採埋蔵量の評価

掘削ドリルをうまく誘導して、目標となる油層へ掘り進めます。途中、緑色の掘削トラブル部分に遭遇してしまうと追加費用

が発生してしまいますので、ぐねっと曲げて避けましょう(実際はそんなに簡単に曲がりません)。またドリルの回転数(RPM)は回転させすぎるとドリルビット(先端の刃)が急激に摩耗して追加費用がかかってしまうこともありますので注意です(実際の作業ではドリルビットは回転数×時間で定期的に交換しています)。当然のことながら、目標の油層にきちんと当たらないと、埋蔵量も小さくなってしまいます。

④ 生産施設の建設、生産と販売

タンカーで断続的に生産・販売するか、初期投資がかかるもののパイプラインで連続的に生産・販売するかという2択を迫られます。どちらにするかで初期投資も異なりますし、資金が収入として戻ってくるタイミングも異なるので注意が必要です。その他、地下からの油の取り残しが少なくなるように、少量であっても長期間に渡って生産する方法と、反対に短期間で大量生産し資金の回収を早める方法など、選択肢はいくつかあります。

⑤ 保安

徐々に保安レベルが下がっていきますので、一定レベルを維持するために追加資金を投入する必要があります。複数の生産鉱区を抱えている場合のときに保安レベルの下がる、嵐が発生すると大変です。

⑥ 競合他社の状況把握

このゲームではコンピュータが競争相手になります。先に相手にゲームクリアされてしまうとその場でゲームオーバーです。ゲームが終了すると、スコアが表示されます。勝ち方によってスコアが異なるので、これまた工夫が必要です。

⑦ 世界を相手に研鑽可能

スコアは全世界へ向けて発信することもできます。しかし、上には上がいきますので、くれぐれもハマり過ぎないように注意が必要です。

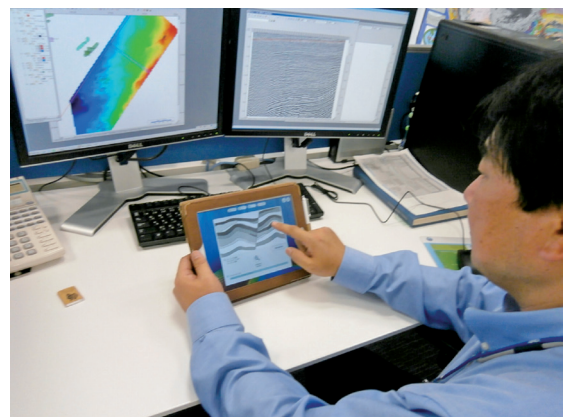


図2 実際のデータを前に、現実逃避中!?!の筆者

iPadやスマートフォンなどの携帯端末だけでなく、Windows、Mac といったPC版もございますので、興味のある方は是非とも挑戦して、この業界の奥の深さを体感していただければと思います。

Quest for OilのWebサイト

<http://www.maersk.com/en/hardware/quest-for-oil>



英国での浅海底下CO₂放出実験(QICS)における電気探査の裏話

一般財団法人 電力中央研究所 海江田 秀志

1. はじめに

地球温暖化対策として二酸化炭素(CO₂)の大気中への排出量削減が世界的に重要な課題となっています。この方策の一つとして、大規模な排出源でCO₂を回収して地中などへ貯留するCO₂回収・貯留(CCS, Carbon-dioxide Capture and Storage)が有効と考えられていますが、CCSの実施にはその費用を誰が負担するのか、貯留したCO₂が漏れ出すことは無いのか、万一漏れ出した場合周辺の環境にどのような影響があるのか、またその責任を誰が負うのかなど、解決しなければならない課題が多いのが現状です。

英国では、海底下の地中に貯留したCO₂が万一漏洩した場合の検出方法や、環境への影響について調べるため、QICSと名付けた小規模な現場実証実験を実施しました。この実験には日本の大学や研究機関なども参加し、電力中央研究所(以下、電中研)もCO₂が漏洩した場合の検出方法の一つとして、電気探査によるモニタリングを提案して参加しました。

この電気探査の計測結果については昨年(2016)の物理探査学会学術講演会で発表していますので、講演論文集をご参照下さい(海江田他、2016)。ここではQICS実験の概要をはじめ、実験実施のため英国でどのような調整がなされたのか、また電気探査における現場作業の苦労や失敗などについて紹介します。

2. 浅海底下CO₂放出実験(QICS)の概要

2.1 実験の背景

英国や日本では陸域の地下はCO₂を貯留する場所の確保が難しく、海域の地下に貯留する可能性が高いと考えられます。そこで、英国ではCCSIに関する研究者が集まり、安全で安心なCCSの実施のためには、海域の地下に貯留したCO₂が万一海中に漏れ出した場合、漏れ出したことをどのようにして検出するのか、また周辺の環境にどのような影響が生じるのか、について検討しました。CO₂による生物などへの影響については、これまでも実験室などで行われていますが、これらの実験では現象を単純化しているため、実際の影響については不明な部分が多いと考えられます。そこで、実際の海域で図1に示すようにCO₂を海底から放出する実験を実施することにしました。

この実験は、英国プリマス海洋研究所のBlackford博士がプロジェクトリーダーとなり、英国研究委員会(Research Councils UK)、英国自然環境調査局(Natural Environment Research Council)、スコットランド政府お

よび日本の複数の機関が資金を出し合って参加し、QICS(Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage)と名付けられました(QICS Web site: <http://www.bgs.ac.uk/qics/home.html>)を参照)。

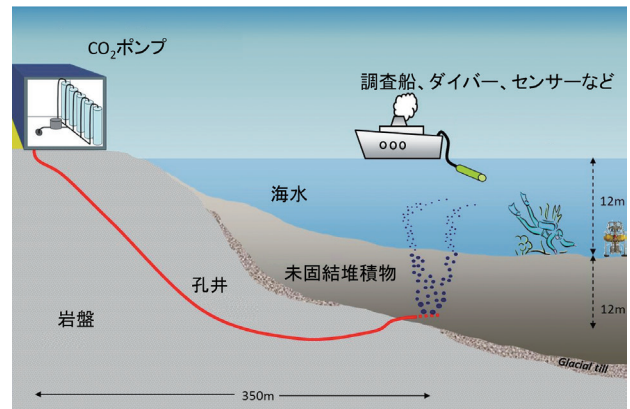


図1 QICS実験の概念

(<http://www.southampton.ac.uk/oes/research/projects/qics.page>に加筆)

2.2 実験実施のための地元調整

英国におけるCCSIは北海の海底下をCO₂の貯留場所として実施する可能性が高いことから、北海の海底に類似した地質であること、地元の理解が得られること、地元が協力してくれる研究機関あるいは企業があること、ダイバーなどによる現場作業や現象の確認を容易にするため、水深10m程度で浅であることなどの条件で、図2に示す英国スコットランド西岸の町Obanの北約6kmにあるArdmucknish湾が選ばれました。

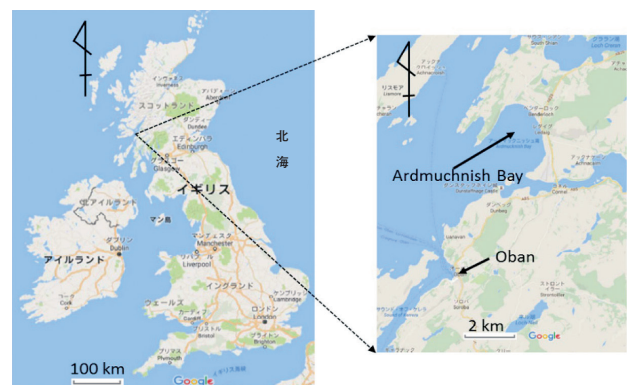


図2 QICS実験現場(Ardmucknish Bay)の位置

Obanは人口8千人程度の漁港で、周辺の島を結ぶ大型のフェリーが入り、春から夏季の旅行シーズンには多くの観光客が訪れます。ウイスキーの蒸留所(Oban distillery)

があり、1880年代に鉄道が開通して地域の産業も活性化され、観光業も発展して栄えたとされています。町の標識には英語とゲール語が併記されているのもあり、Obanはゲール語で「小さな湾」という意味だそうです。

CO₂放出実験実施のための許可などの手続きは、それまで海底からのCO₂放出に関する規制や基準がなかったため、規制当局の担当者との協議では苦労したようですが、協議を繰り返すことにより信頼関係が築けたとのこと。また、地元では産業界の代表者、法規制者、政府、プランナー、海洋使用者、一般市民、非政府組織などで構成される利害関係者諮問会を設立して、このメンバーと不定期開催のワークショップ、電話会議、個人的な連絡のやり取り、あるいはEメールを介してコミュニケーションが図られました。さらに、住民へは印刷物の配布、ラジオやテレビのインタビュー、学校での説明、実験サイトの見学なども実施しました。CO₂の放出実験中は24時間体制で人員を配置し、見学や問い合わせに対応すると共に、Facebookなどを通して毎日の活動(CO₂放出量など)と調査結果について情報を提供しました。特に、地元への説明はQICSの参加機関であるSAMS(Scottish Association for Marine Science)のスコットランド人の学生Tayler氏やスウェーデン人のStahl教授らが行いました。これをイングランドから来たBlackford博士らが行うと、まず地元の理解は貰えなかったらうとのこと。また、日本の研究者も参加しており、国際的にも関心の高い実験であるとの説明も効果的だったようです。地元の住民からの質問の多くは、「なぜこの場所で実験する必要があるのか」ということで、これについては「英国では大規模なCO₂の貯留場所として北海の海底を考えており、Ardmacknish湾は地質的に北海の海底に似ており、しかも浅い海底であることが実験には重要で、この場所が最適である」と説明して了解を得たようです。

2.3 現場実験状況

QICSの現場実験の実施においては英国と日本の研究者が専門分野毎に作業チーム(WP:Work Package)を作り、事前にEメールなどで研究内容や現場での計測方法などの調整を行いました。2011年10月24、25日に英国と日本の関係者がSAMSに集まり、現場を視察したり(写真1)、それぞれの研究の目的、現場作業計画、計測機器の配置などについて、WP内や全体で検討しました。

実験では図1に示すように海岸から約350m沖の水深10~12mの海底下11mの地点まで孔井を掘削して、孔井内に設置したケーシングパイプの先端に取り付けた長さ5mのディフューザーからCO₂を放出させました。2012年5月17日から6月22日までの37日間連続で、流量を1日に10kgから最大210kgに増加させてCO₂を放出し、総量は4.2tonでした。事前の数値シミュレーションでは、地下の物性に関するデータがほとんどなく、かなり大雑把な予測で、CO₂放出開始から2、3日で海底からCO₂が漏れ出る

だろうと見込んでいました。ところが、実際は1日も経たない内にCO₂の気泡が海底から出ていることがダイバーにより確認され、サンプリング作業の関係者は大慌てでした。CO₂の放出量の増加に伴い海底から湧出するCO₂気泡の量が多くなり(写真2)、湧出範囲も広がっていることが確認されました(Blackford et al., 2014)。



写真1 実験現場の海岸に集まったQICS関係者 (QICS Fact Sheet 12より)

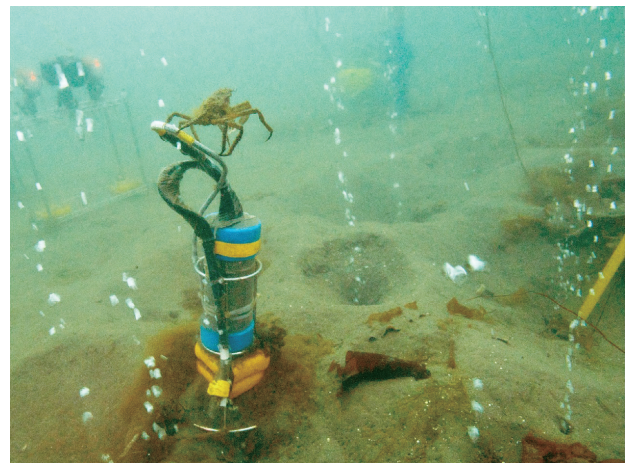


写真2 海底から放出したCO₂の海中への漏出状況 (QICS Fact Sheet 4より)

3. 電気探査の作業

3.1 電気探査の概要

海底下の地中に貯留されたCO₂が海中に漏出する場合、浅い海底下ではCO₂は気泡となって地中を上昇すると考えられます。CO₂の気泡は電気的には地層水に比べ高比抵抗であり、CO₂気泡の流動域や分布域は高比抵抗異常として捉えられる可能性があります。また、地下で流体が動くとその周辺で電位差が生じ、周辺の電位の変化(自然電位の変化)を調べると、流体の動きを推定できる可能性があります。そこで、電中研では、①CO₂放出前の海底の比抵抗構造とCO₂放出中および放出直後の比抵抗構造の変化を調べる、②CO₂放出前後および放出中のCO₂放出箇所周辺の自然電位の変化からCO₂の流動状況を調べる、の二つのテーマを提案しました。地下の地質や物性値が等方均

質ならば、CO₂は海底では放出箇所の直上を中心に同心円状に拡がると推定されます。そこで、電気探査用の電極は図3に示すように、CO₂放出箇所を中心としてそこを取り囲むように放射状に配置しました(海江田他, 2016)。

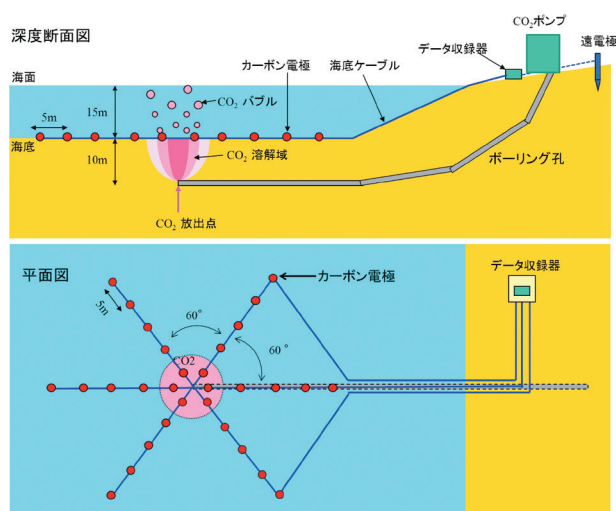


図3 電気探査の電極配置(上：深度断面図、下：平面図)

3.2 電気探査実施の苦労

電気探査により地下の比抵抗構造を評価するには、海底下に電気を流す必要があります。しかし、海底に電気を流すと、実験地点の環境や実験条件に影響があるのではないかと他の研究者から懸念され、CO₂の放出前や放出中も電気を流すことはできませんでした。実施できたのは生物や化学的調査のためのサンプリングや計測が終わり、海底に設置した機材もすべて撤去されてからとなり、CO₂の放出が終わって約3ヶ月も経ってからでした。CO₂放出中の海底からのCO₂気泡サンプリング結果などによれば、海底下から放出されたCO₂のほとんど(85%程度)は地中に留まっている可能性が高い(Blackford et al., 2014)とのことなので、放出されたCO₂の多くはしばらく地下に残っているものと考えられました。

なお、バックグラウンドの計測は後述するようにCO₂放出実験の後、約4年経過した2016年5月まで待つことになりました。

3.2.1 2012年の計測

電気探査計測用のケーブルは、先端から5mおきにカーボン製の電極が10個ずつ付いた10芯で長さ400mの防水ケーブルで、日本で製作して船便で現地まで輸送しました。現地では写真3に示すようにSAMSのダイバーにより海岸から沖合にケーブルを出して海底に這わせました。陸上ではとても重いと感じましたが、海底では軽くて浮き上がりそうだとダイバーからの指摘で、慌てて海底に固定するためのピンを用意し、適当な間隔でピンで海底に固定しながら設置して貰いました。ケーブルの長さは引き回しの余裕を50mとしましたが、3本のケーブルの内1本が海岸

までぎりぎり届いたという状況で、海岸の岩場に収録装置を設置せざるを得ませんでした。そこで、風雨対策のためのコンテナボックスや防水シートなどObanの町中を探し回り、何とか防水対策を施しました。ところが、ケーブルの設置が終わった翌日に、1本のケーブルの一部が断線していることが判りました。実験海域は観光地でもあるので、レジャーボートやヨットなどが遊覧しており、夜間に碇などで引っかけられたのではないかとのことでした。やむを得ず傷ついたケーブルを回収して断線箇所を修理し、再度設置し直そうとしたところ、ちょうどその日から天候が悪くなり嵐となりました。海も波が高くダイバーも作業ができないとのことで、修復したケーブルが設置できたのは4日後のCO₂放出開始予定日の前々日でした。



写真3 海底へのケーブル設置作業

自然電位計測のための基準電極は当初データ収録地点から30m程度沖に、長さ60cm程度の棒状のカーボン電極を砂の中に打ち込み、重石を載せるなどして海中に設けました。この基準電極と断線していないケーブルの電極20点で数日間自然電位を計測しましたが、前述の嵐で実験現場の海岸にも大波が打ち寄せたらしく、嵐が治まって現場に行くと、基準電極が付いたケーブルと海草(Kelp)が絡まり、無残にも基準点のカーボン電極が海岸近くの海中で波に揺られていました。そこで、また新たに基準電極の設置が必要となりましたが、計測は数ヶ月間続き、その間ほとんど無人でデータを収録しなければならないことや、海岸付近の海中に設置しても、また嵐が来た場合基準電極が同様のダメージを受ける可能性があることから、最終的には海底に設置した30点の内の最南端の電極を基準として、他の電極との電位差を計測することにしました。

CO₂の放出は孔井掘削やCO₂放出の流量調整の作業の遅れのため、筆者らが現地に滞在中には始まらず、データ収録器を自動にして現地を引き上げました(写真4)。CO₂の放出は筆者らが帰国した翌日から開始したとのことでした。

その後、6月に現地を訪問した時はCO₂の放出が続いており、自然電位のデータ収録システムのデータ量もそれなりに増えていました。ところが、収録器設置時のパソコンと回収用のパソコンが異なったためか、同じOSであるにもか

かわらず、収録器とパソコンの接続がうまく行かず、他の研究者のパソコンでもダメで、データが回収できませんでした。今回用いた収録器は計測を中断すると、新たなデータは古いデータに重ね書きになるため、断腸の思いでバッテリー交換のため収録を中断して収録を再開しました。これで収録開始からのデータが消えてしまいました。残念無念。その後、9月に訪れた時は、収録器を設置した時と同じパソコンで処理したため何の問題もなくデータが回収できました。データ解析の結果、6月17日に行われたCO₂の放出流量の増加に伴って、自然電位が大きく変化していることが確認されました(海江田他, 2016)。

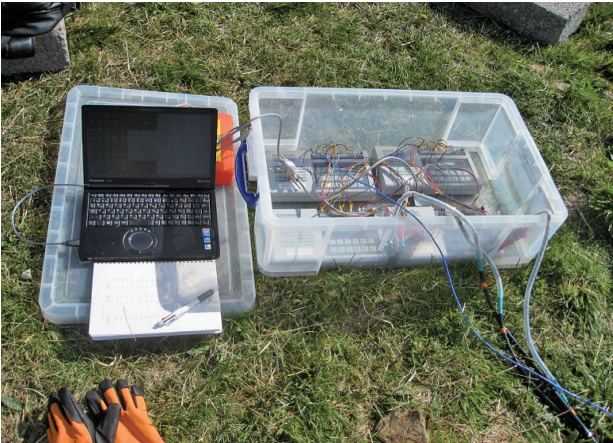


写真4 自然電位データ収録システム

CO₂の放出は6月22日に終了しましたが、その後生物や化学分析のためのサンプリングや計測が続けられました。9月20日にすべての作業が終わり、海底に設置した機材も撤去され、ようやく電気を流しても良いとの連絡があり、電気を流しての計測を9月21日に実施しました。計測は2極法により行い、データ収録地点から北西に約300m離れた地点の海底に設けた電流遠電極と各電極との間に、16秒周期の交替直流を約0.8A流しました(海江田他, 2016)。後日ケーブルの回収を行ったダイバーから、海底の電極付近では何の異常も見られなかったとのことで、海底での電気探査は1A程度の電流であれば環境上問題ないと思われます。

3.2.2 2016年の計測

2016年の計測は英国の関係者は予算が確保できなかったため、日本の関係者のみでの計測となりました。電中研では、2012年はバックグラウンドの計測ができなかったため、改めて計測することにしました。4年も経てば海底から放出されたCO₂のほとんどは地中から抜けているだろうと想定しました。2012年の計測と同様にカーボン電極が付いたケーブルを新たに製作して、SAMSに事前に送付し、2012年の計測と同じように設置してくれるように依頼しました。SAMSのダイバーによればGPSなどを用いて、2012年の計測とほぼ同じ位置(数十cmの精度)で電極を設置できたとのことでした。

筆者らは5月24日に現地に到着し、ケーブルの状態など

を確認して観測機器を設置しました。前回同様電気を流す計測は他の計測が終わってからとなり、とりあえず自然電位の計測を行いました。5月28日までに他の計測が終わり、ようやく電気を流すことができるようになりましたが、皮肉にもそれまで良かった天気その日に限って朝から雨になりました。翌日には帰国しなければならず、どうしてもその日の内に計測を終えなければなりませんでした。**写真5**に示すように雨合羽を着て、計測機器が濡れないようにブルーシートで簡易の屋根を掛けての計測となりました。さらに、計測データに高周波のノイズが混入しており、その原因究明と対策のため、冷たい雨の中ケーブルのチェックや計測機器の配線確認など慌ただしい作業となりました。試行錯誤の結果、流した電流とそれによる電位変化が計測でき、夕方暗くなり始める頃までに何とか計測を終えることができました。そして、この結果と2012年の計測結果との比較から、海底下のCO₂気泡の流動によると思われる比抵抗の変化が捉えられました(海江田他, 2016)。



写真5 雨中の比抵抗探査計測作業(左：(有)ネオサイエンスの城森 明氏、右：電中研の鈴木浩一氏)

4. おわりに

CCSの安全で安心な実施には、地下に貯留したCO₂が想定通り留まっているかの確認や、万一漏れたら環境にどのような影響があるかの把握が必要です。QICSの現場実験ではこのような現象の理解に重要なデータが得られました。

筆者にとってはQICSの現場実験において海底での電気探査が実施でき、CO₂気泡の流動によると思われる比抵抗や自然電位の変化が捉えられ、CO₂のモニタリングの可能性が示せたことは大きな成果で、今後さらに発展させたいと思っています。

参考文献

- 海江田他, 2016, 英国浅海底CO₂放出実験(QICS)サイトにおける電気探査, 物理探査学会第135回学術講演会論文集, pp.174-177.
Blackford et al., 2014, Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage. Nature Climate Change 4, pp.1011-1016, Doi: 10.1038/nclimate2381.

「ああ無情！」



Terra Australis Geophysics Pty Ltd
須藤公也

かなり前の話だが、日本の友人の高校生の娘さんを世話したことがあった。ある夜、映画に連れて行ったら、映画館の壁面に近日上映のポスターがいくつかあって、そのひとつにCount of Monte Christoがあった。「これをなんと訳す？」と訊いたら、彼女はちょっと首をひねって「キリスト山の計算？」と訊き返した。「なんだそれは。相撲取りの星勘定か。」このごろは大相撲も日本人ばかりではなくなったから、キリスト山関がいてもよさそうだが。「これは、『岩窟王』と訳すのだ」と教えてあげたら、彼女は「ガンクツオウ？」と怪訝そうにしていた。正確に言えば「岩窟王」はデュマの名作を黒岩涙香が翻訳したときの題だからそう訳すのはいけないかもしれない。そういう反省からかこのごろの翻訳書には「モンテ・クリスト伯」という題がついている。同様にLes Miserablesは「レ・ミゼラブル」となり、「ああ無情」という本は見当たらなくなった。これを訳して「気の毒な人びと」としてはいけないのだろうか。そういえばドストエフスキーには「貧しい人びと」という作品もあるのだが。

岡田先生の「微動探査法」(The Microtremor Survey Method・SEG刊)の翻訳をした時、「分散」という語を“Variance”と訳してしまったことがあった。その頃は統計処理を考えることが多かったので統計学でいう「分散」(これもVarianceという)に拘わってしまったのだ。Varianceは統計学では平均値からの差の2乗和だが、会計の方では偏差そのもののことを言うようだ。それならDifferenceとかDeviationと言ってくればよさそうなものだが、慣用はそうでない。表面波の「分散」はDispersionと訳さなければならなかった。この「分散」にしてもDispersion

にしても、もともと「周波数によって速度が異なる性質」なんていう意味がなかった語に、無理やりそういう定義を押しつけて使っているような気がする。

Stochastic processとなると「定常確率過程」という訳語があるが、この日本語を英語に訳せといわれた時にはStochasticという語を知っていなければとても訳せない。苦し紛れにStable probability processなどと訳して恥をかいたこともあった。そのころ私はStochasticという言葉も意味も知っていたのだが、それが日本語でいう「定常確率過程」のことだということを知らなかった。

「逆解析」もInversionと知っていなければ訳せない。この手の語彙はたくさんあって、翻訳家でも専門の知識がなければ難しいと思う。Inversionで困るのは、低速度層が高速度層の下にあるときVelocity inversionということがあって紛らわしいことだ。これはVelocity reversalといえれば混乱を避けられる。

前回まで3回にわたって「物理探査」という語の多義性について論じたが、われわれが現場でする「測定」を考えてみよう。「手引き」の翻訳でも日本から来た翻訳草稿はずいぶん手こずっていたように見えた。まず考え付くのはMeasurementだが、これは物差しをあてて直接「計る」ようなときにのみ有効だ。「巻き尺で距離を計る」、「ストップウォッチで時間を計る」、「Sonic logでInterval transit timeを測る」、「スピード違反を取り締まるレーダーで速度を測る」など。電流と電位を測るのはMeasureでも、そこから比抵抗を求める時には一つのプロセスを経ているからMeasure resistivityとはいえない。地震探査のデータを集めるのはMeasurementとはいわない。こういう時にはRecordingとかData acquisitionなどと訳すのがいい。

測線を設置するときには方向を定めるが、この「方向」も多義的である。Direction、Orientation、Bearingが「方向」にあたる語だが、運動の方向や何かの方向を指しているのがDirectionで、静止物の軸方向ならOrientation、Bearingは見回して方向を探るような語感がある。「測定は西から東に向かって行った」のならDirectionだが、「地震計を東西方向と南北方向に設置した」というならOrientationである。Bearingはどちらにも使えそうだが、やや口語的で論文には薦められない。さらに、絶対的な「方位」ならAzimuthという。「測線の方向は南北

に敷設した」The azimuth of the survey line was N-S. これらはそれほど厳密でなく、The survey line was laid in the N-S direction.といっても不自然でない。しかしThe survey line was laid in the N-S azimuth.と言われると違和感がある。これはおそらくlaidという動作が方向性をもっているのとBe動詞の静的性質との齟齬からくるようだ。

「広い地域」「広域」を日本人が訳すとWide areaとなることが多い。Wideを英和辞書で引くと「広い」とあり「広い」を和英辞書で引くとWideが出てくる。ところが、Wide areaには違和感がある。WideはWide road、Wide corridorやWide riverのように線型のものの幅が広いのであって面的に広いときには使えない。Large areaと言ったほうが適切である。

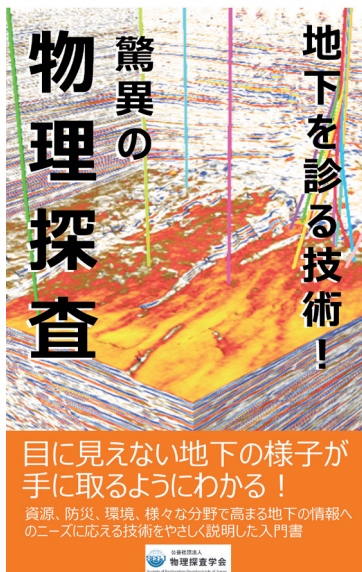
われわれは一生懸命英語を勉強して、なんとか英語で論文を書いたりするのだが、多義語の間の語感の違いというのまで勉強するのはとても難しい。そのことについてはいつかまた書く機会があると思う。こうして苦労しているのに、英語国民でそれを気の毒だと思ってくれる人

は多くない。違和感のある英語を書いて笑われたりする。ああ無情。われわれこそLes Miserablesではないかと思うこともある。



関 連 書 籍 紹 介

PCでも読める! 地下を診る技術! 『驚異の物理探査』



地下を診る技術! 「驚異の物理探査」 [Kindle版]

◎内容と特色

物理探査学会では創立60周年を機に、一般の方に物理探査を知っていただくと考え、上記の啓蒙書を2014年度に発刊いたしました。

当初はKindle版だけでしたが、Windows、Macintoshにおいてもアプリをインストールすれば読めるようになりました。Googleなどの検索サイトで、「Kindle for PC」または「Kindle for Mac」と打ち込んでいただければダウンロード可能です。電子書籍の購入は、「驚異の物理探査 Amazon」と入力すれば購入ページにたどり着くことができます。

物理探査がどのように社会に役立っているのかという視点を重視して、物理探査技術を紹介しています。一般の方だけでなく、物理探査学会会員の皆様や、社内研修などの教材としてもお使い頂けるものと思います。お求めやすい価格(250円)になっていますので、是非お買い求めくださるようお願いいたします。また、興味のある方にご紹介頂けると幸いです(事業委員会)。

「重力波とジオフォン」

石油資源開発株式会社 高橋 明久

物理探査ニュースNo.30では「重力波とバイブレータ」というタイトルで観測された重力波の波形とバイブレータ信号の意外な共通点について書いてみました。今回は重力波をとらえたセンサーのお話です。

2015年に重力波をとらえたセンサーは米国のWashingtonとLouisianaにある大型マイケルソン・モーリー型干渉計です。マイケルソン・モーリーの実験はご存知の方も多いかと思いますが、もともとは真空中を光が伝播するための媒質エーテルが存在するか否かというのがテーマでした。彼らの実験は当初は精度が不十分でしたが、工夫を重ねて観測が行われ、結果としてエーテルは存在せず、また光の速度が座標系に依らず一定というアインシュタインの特殊相対性理論を裏付けるものとなりました。

そして2002年には重力波の検知を目的に米国のLIGOプロジェクトで距離が4kmに及ぶ大型干渉計による観測が始まりました。図1は空中から見たルイジアナ州Livingstonの観測施設の様子です。

図2にはマイケルソン・モーリー型干渉計による重力波観測の原理を示します。重力波がない定常状態では距離Aと距離Bが等しいので2つの経路を通った光は同位相で干渉が起きません。そこに重力波による空間のゆがみが生じると距離Aと距離Bに差が生じて位相のずれが起こり、干渉縞ができます。

LIGOは当初の装置に対して改良に改良を重ねて精度を上げ、



図1 ルイジアナ州Livingstonの重力波観測施設 (Courtesy LIGO)

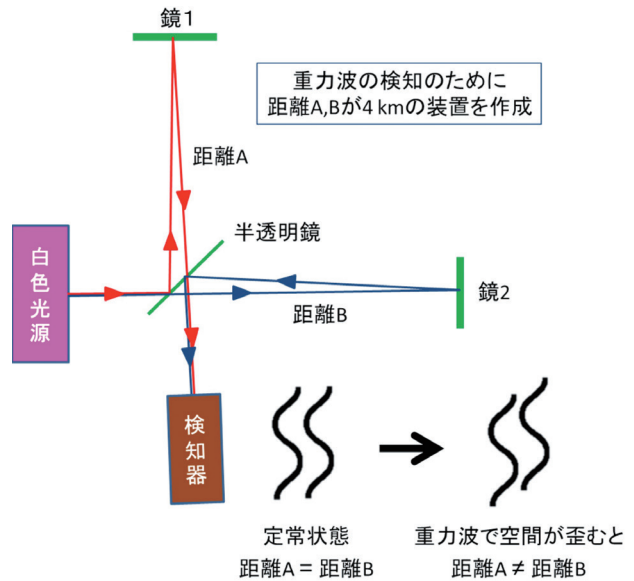


図2 マイケルソン・モーリー型干渉計による重力波観測の原理

ついに2015年に世界で初めての重力波観測に成功します。

さて、ここで観測されたひずみ量は 10^{-21} mです(30号参照)。重力波の周波数は35-250Hzでしたから、中心付近の周波数100Hzをとれば速度は 10^{-11} μkineとなります(kine=cm/s)。

地震探査において地上の観測点におけるノイズレベルは静かな場所でも10μkine程度ですから、このノイズレベルが最大入力となるようなA/D変換器を考えると重力波とのレベル差は 10^{12} になります。すなわち2進法のビット数に直せば $10^{12}=2^{39}$ となり39bitのA/D変換器があれば最小位ビット(LSB)で重力波が観測されることになります。

以上はジオフォンの感知できる速度が無限小まで可能な場合ですが、実際にはジオフォンの検知可能な速度は理論的に考えても 10^{-2} μkine程度とのことで(Hardee et al., 1987)、なかなか歯が立ちません。もっとも、重力観測施設は1,000億円規模で、数万円のジオフォンは価格が1千万分の1ということになりますから、費用対効果って全く想像がつかないですね。アポロ計画があつた時代に月に人類を送り込んだように、科学技術のあくなき追求は人類の本質的なものなのかもしれません。

さて、皆さん、それではジオフォンを改良して重力波の速度 10^{-11} μkineを観測できるようにするにはどうしたらよいでしょうか。ぱかぱかしいと思わないで、ちょっと考えてみてください。なにせ物探技術のあくなき追及も私たちの本質なのでから。

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。

物理探査ニュース 2017 総集編 2018年(平成30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