

物理探査学会 60 周年 —過去・現在・そして未来—

創立 60 周年記念事業実行委員会
委員長 松岡俊文*



要 旨

物理探査工学は、地下を非破壊で探査する工学的な学問体系として広く知られている。この技術は、地下に対する物理的な応答を計測し、取得されたデータに対して有用な情報を引き出すためにデータ処理や解析が行われ、さらに利用者が必要とする地下に関する情報を地質工学的な表現方法で提供する。この技術体系は、まずデータ計測技術に大きな技術革命が起き、それに付随してデータの処理解析技術が革新され、さらにこれに対応して解釈技術も新しく提案され、その結果として地球科学において新しい学問分野が出現すると言う歴史的な発展を繰り返してきた。2008 年に創立 60 年を迎えるに当たり、物理探査工学が歩んできた歴史を振り返り、技術発展の原動力を考え、これから物理探査工学が進む方向について考える。

キーワード：物理探査・データ取得・データ処理・データ解釈・技術革命史

1. はじめに

社団法人物理探査学会は 2008 年に創立 60 周年を迎え、盛大に記念式典が開催されました。設立当時は、物理探査技術協会と称されており、第二次世界大戦後の日本の復興に必要であった各種地下資源の探査を目的に地下の探査に関わる人々が参集しました。この様な学会が作られた一つの理由として、戦争中に日本軍が占領していたインドネシアなどで、海外の石油会社 (Shell) が行っていた物理探査技術の高さに驚いた日本の技術者が、海外に負けてはいけないとの熱い思いもあったと聞いています。また戦後の復興期における大規模な土木事業などにも活躍の場が多くありました。その後、地下の探査に関わる技術は着実に進歩を続け、当学会の活動も順調に成

長してきました。学会設立 60 年という節目に当たり、私なりに物理探査技術に関して考えてみたいと思っています。以下の内容は個人的な見解ですが、広く学会諸兄にご意見を頂ければ幸いです。

2. 物理探査技術

物理探査手法は地下を可視化する手段であり、古来多くの人たちが一度は見てみたいと考えている地下の世界を開いてくれる手段です。フランスの科学冒険小説家であるジュール・ヴェルヌは、19 世紀末に未来の世界を想像して幾つかの SF 小説を著したが、いまだに地球の中心への旅 (地底旅行) は実現されていません。我々が暮らしている大地の下地盤がどうなっているのか、地球

* 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-109

の内部がどうなっているかを知りたい、見てみたいという興味と要求は昔からあった訳です。

一般的に物理探査法は、入力信号に対する地球からの応答を地表で観測して、地球の内部の状態を調べる技術です。そしてこの技術体系は作業の進行にともなって、大きく次の3つの技術に分類されます。

- ① 地下からの応答を観測する（データ取得技術）
- ② 取得データに対して処理や解析を施し、物性値分布を示す各種図面を作成する（データ処理・解析技術）
- ③ 処理・解析結果に対して、地質学的な情報も付加して総合解釈を行い、地下の地質モデルを構築する（解釈技術）

これは地震探査法であれ、電気探査法であれ、重力や磁力探査法であれ、これらの3つのステージを経て、初めて利用者に提供できる有用な情報となります。

しばしば物理探査技術は、非破壊技術と比較されますが、「検査」と「探査」は大きく違います。物理探査は非破壊「探査」であり、地球内部「検査」ではありません。即ち上記の③の作業があって初めて探査という作業が完結するわけです。非破壊検査では異常が見られる場所の特定が最終的な目的ですが、物理探査は、資源の探鉱や、土木分野で地下地盤の力学的な性質、水理学的な性質を知ることが最終目的になるためです。速度異常や、比抵抗異常を見つけても、ユーザが欲している情報になっているかを常に考える必要があります。

物理探査データは、上記の作業手順に従い一方に流れて、調査報告書が作成されがちです。しかしながら、本来これらの作業は互いに緊密に関連しあうものであり、各ステージでの品質管理の観点から、③の段階から再度②の段階に戻ることも珍しいことではありません。②の作業と③の作業はしばしば混同され、同一なような感じもありますが、やはりこの違いをハッキリと認識し、物理探査技術者が③の作業も積極的に行うことが、物理探査の将来に取っても重要と思っています。

上記作業の中で最もコストがかさむのは、多くの場合、現場作業がともなう①です。一方、最もコスト的に安いと思われるのは③です。しかしながら作業の重要性和、ユーザの満足感を大きく左右するのは、実は③の作業であることは明かです。①のデータ取得作業では一定のマニュアルに従って作業を進めると、一定の品質のデータが保証される場合が多いですが、②や③の作業では、どのような場合にでも通じる万能な手順が整備されているとは言い難いのが現状です。データの総合解釈とは、最終的には地下モデルの構築であり、その結果は担当技術者の個人的な力量に依存していると考えられています。即ち最も重要ではありながら、現状では工学として標準化が最も遅れている部分であり、今後は工学的な観点で技術開発にもっと力を注ぐべき分野です。

3. 技術革新の歴史

さて物理探査法の歴史を振り返ってみると、大きな技術革新はフィールドにおけるデータの取得技術の革命が引き金となっています。これを反射法地震探査で見ましょう。反射法地震探査のアイデアは1914年のFessendenの特許からと言われています。その後、アナログの時代が続くわけです。

物理探査学会が創立された1948年当時は、計測機器はアナログ機器であり、取得データの処理は人間コンピューターが計算図表を利用したり、また特殊な計算機器も考案され、一連の作業が行われていました。その後、アナログ探鉱器がデジタル化された時（1960年代後半）の革命が、おそらく反射法地震探査での最大の技術革新（いわゆるパラダイムシフト）であったと思われます。この革命の結果、石油の探鉱では、通常取得されるデータは一回のショットに対して、5秒長、4ミリ秒サンプリング、48チャンネルと言う仕様が標準的となって来ました。この時のデータ総量は1ショットに対して、6万サンプルで、これを海上などでは物理探査船が24時間稼働するわけで、約26メガサンプルが、1日で取得されるわけです。

それに付随して、大量データ処理が可能となるディジタルコンピュータの利用によって処理技術の革新が行われ、それらの処理結果の品質が格段に向上しました（1970年代）。さらに高品質の地下構造のイメージは、解釈作業にも革新をもたらし、堆積学において、地震層序学と言う学問分野を生み出しました（1980年代）。

処理技術に関しては、ディジタルデータに対して、1970年代から始まるデコンボリューション処理や、フィルター処理を中心とする時系列データに対するディジタル処理の確立と、最終的には重合前深度マイグレーション処理法までの確立（1990年代）が大きな技術革新だったと思われます。特にマイグレーション処理（非常に多くのアルゴリズムが提案され処理の品質が飛躍的に向上）は、処理技術の中では最大の革新だったでしょう。

次に起こった反射法地震探査の大きな革命は、3次元データの取得技術の革命でした。これは物理探査船などで10本以上のストリーマを曳航し、3次元的なデータ取得技術の確立です。データ量は10倍ではなく、ストリーマも長く、チャンネル数も100を超えるようになり、データ量は数10倍以上になり、同時に3次元的な処理が必要になって来て、計算機能力の限界に近づいてきました。無論陸上においても同様なデータ取得技術が適用されています。

これが1980年代から1990年代にかけてのデータ取

得技術における革命です。同時に、大量の3次元データを処理するために、大型並列計算機の利用、さらに特別な3次元可視化技術の開発でした。これらは2000年代に入り、一段落と言った状況だと思います。その結果、堆積学においては地震地形学(Seismic Geomorphology)が現在学問分野として確立されつつあります。

こうしてみると、反射法地震探査の歴史は、まずデータ取得技術に革命が起き、それに応じてデータの処理解析技術が革新され、その結果解釈技術も変化し、その結果として地球科学において新しい学問分野が出現する、と言った歴史の流れです。特に反射法地震探査の結果は石油の探鉱に利用されてきたため、学問的には堆積学における寄与が大変大きかった訳です。

4. これからの物理探査

さて、上記の様な技術の歴史を考えると、これからはおそらく以下の様な歴史をたどると予測されます。

まずデータの取得は地震探査、電気・電磁探査の区別無く、3次元的な取得が今後土木分野や他の分野においても一般的になることが望ましいと思います。言われないと気がつきませんが、断層に対して、2次元反射法地震探査の測線が直交していれば、断層は反射法の断面図上において、浅い(上)所から深い(下)所にかけて地層を切っており、データ上で明確に認識可能です。所が、調査測線が断層に平行だった場合には、断層は地層と平行になるため(上下に地層を切るというイメージではない)、反射断面図上で認識が非常に困難になります。また2次元調査では、測線間で断層を結ぶ作業(技術者の技量に依存)が必要になりますが、3次元データにおいてはこの作業は不必要になります。これを実現するためには、どの様にして経済的に現場計測を行うかが、一番の鍵でしょう。現在そのために、ランドストリーマや牽引型電気探査など色々な試みが行われていることは周知の事実です。2次元に比較して3次元調査に経費がかかるという事実に対して、アウトプットである解釈結果の品質向上が、経費とバランスしていれば、顧客は利用してくれる可能性が十分あります。それには、物理探査が「調査法」と言う枠を超えて、反射法地震探査が堆積学に新しい学問領域を作った様に、例えば「地震活断層学」や「電気地下水学」や「地震土木工学」と言った学問分野の確立(これは目的に沿った新たなデータ取得・処理・解析手法の確立)を目指して行く必要があります。

所で、反射法のデータ取得の要素は、震源と受振器と探鉱器(データ記録器)です。再度歴史を振り返ると、最初の革命は、探鉱器のデジタル化でした。その後現在に至るまで、探鉱器に対して色々な技術開発が進められて来ましたが、それらは受振点(受振器)の数を増や

すことに対応した技術開発であったと思っています。

反射法地震探査における受振点の数の増加は、ムーアの法則に従っていると言われており、2020年には100万チャンネルのデータが一度に取得されると予測されています。以下にHeath氏によってなされた受振点数の増加予測図を示します。これによると100万チャンネルが実現されるのは2020年となっています(First Break, Vol.26, Feb. 2008, pp53-58)。昨年(2008年)1ショットに対して、7万チャンネルのデータが取得されました。2010年が約10万チャンネルであれば、100万チャンネルが実現されるのが、2020年と言っても不思議では無いと思います。

今後受振点数の増加が続くだろうと予測されます。しかしながら、100万点の受振点はある意味で質の変化が必要であり、おそらく何らかの技術の革命が必要と思われる。例えば、100年以上利用されて来たコイルと磁石からなるジオホーンのままで、100万チャンネルは可能かと言った問いかけです。つまり、100万個の受振器を人間がハンドリングするのは可能かどうかから考える必要があると思われます。100万チャンネルの測定を可能にするには、ナノテクノロジーの様な非常に革新的な技術の応用が必要と思われます。現在ジオホーンに変わって、MEMS(低電力と低コスト化)を使った受振器(加速度センサー)の研究が進められて、実用化されつつありますが、まだまだ研究開発の余地はあるでしょう。またデータの転送に関しても(陸上のデータ取得の場合)、ZigBee等を利用したワイヤレスネットワークが必要と思っています。

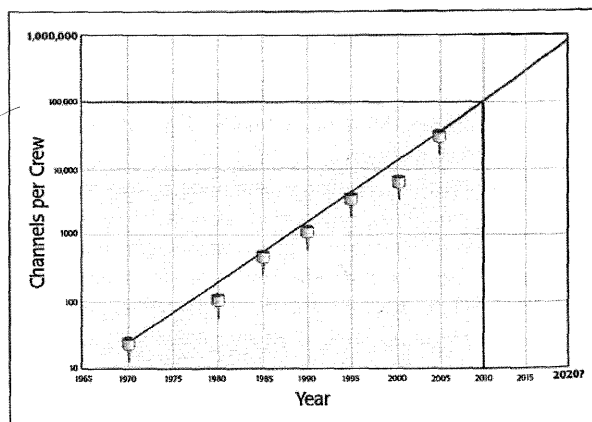


Figure 1 Moore's law of doubling applied to land crew channel count. Will the appropriate technology make possible the first million channel crew in 20 years?

図1 受振点数の増加予測

一方、震源ですが、この分野に関しての革新も、パイプロサイスの実現以来、大きな革新は未だに有りません。昔ながらに震源としてダイナマイトを利用するのが一番と考えられています。それでは人工的な震源を用いない

地震探査の可能性が有るか、と言った質問も必要と考えられます。現在多くの研究者が興味を持っている地震波干渉法も一つの解決策を提示するかも知れません。

あるいは今までは思いもつかなかった着想での計測は可能かと言うような問いかけです。現在石油の探鉱のために、今までとは全く異なった考えで、地下の情報を取得しようとする試みが提案されています。これは大変興味深いので、あえて紹介します。

通常石油の探査では坑井を掘削して、石油の存在の有無を調べますが、同時に検層作業を行い、地下情報を取得します。この作業において、坑井を掘削するために莫大な費用が必要になります。石油が有るかどうかの試験と、検層に必要な経費は、坑井の掘削経費に比べれば、ほとんどただ同然です。ここで本質的な疑問ですが、石油の生産の為に坑井は必要ですが、石油の存在を確認する為に、一体坑井は必要なのかと言う事です。

地下数千メートルまで、モグラの様に自分で穴を掘って、あとは塞いでしまうような機械の製作が、Shell とノルウェーのスタットオイルの研究費によって進められており、もうすぐ試験掘削が行われる予定です。地表からの電力によって掘削し、地層に対する各種計測データを地表に送ってくるシステムで、坑井の掘削経費に比べて 10 分の 1 程度と考えられています。掘り終わると、掘削機械は地下数千メートルに止まり、地表まではケーブルが延びていると言う状況です。この地表からのケーブルに MEMS 型の非常に小型の受振器を設置すると、VSP の観測が、安価に手軽に出来る可能性が有ります。

5. おわりに

物理探査の技術は多くの変遷を遂げてきました。そしてこれからも時代と共に、技術はますます発展していく

と考えられます。1948 年に物理探鉱技術協会が学会設立 10 周年を記念して発刊した「十周年特別号」は、当時の技術の最高峰を集大成したもので、技術者の熱意がひしひしと伝わってくる、大変素晴らしい出版です。その序文に「物理探鉱を方法別に基礎事項・探鉱装置・現場調査法・測定結果の取り扱い、ならびに結果解釈（解析）を主体とした基礎技術編と、石油・石炭・鉱山・土木・地下水・地熱・温泉等の多方面にわたり・・・」と書かれています。当時の技術者が夢見ていた世界は実現されたのでしょうか。

現在物理探査学会を取り巻く環境は、当時と比較して決して楽観できるものではありません。国内において、石炭山はすでに無く、金属鉱山も無きに等しい状況です。しかしながら全く新しい適用の分野が広がっていることも一方にあります。防災分野、遺跡・文化財の調査、農業、核廃棄物処分、CO₂ の地中貯留などなど、現在では、月での物理探査まで考えられています。これらは 1948 年には考えられなかった適応分野です。創立 60 周年という時点に立って未来を考え、そして明日に備えるという姿勢こそが、物理探査技術を支えていくことであると思っています。この姿勢があつてこそ、次の 60 年に希望が持てると思っています。

Butsuri-Tansa the 60th Birthday – Past, Present, and Future –

Toshifumi Matsuoka*

ABSTRACT

Geophysical engineering is widely known as an engineering system which prospects underground structures by non-destructive way. At the first stage of the geophysical work, the physical response from underground is observed. Then data processing and analysis are conducted. Furthermore, the meaningful information about the underground for the users is offered with interpretation works. As for these systematized engineering, a big technological revolution occurs in data acquisition technology first, then, the data processing technology is reformed along with it. Furthermore, corresponding to this, interpretation technology is also proposed newly. Using these interpreted results, a new science branch has been developed. This step was repeated in geophysical engineering history many times. Since Society of Exploration Geophysics Japan becomes 60th birthday at 2008, it looks back upon the history which geophysical engineering has followed. We try to consider the driving force of technical development and the future direction of geophysical engineering also.

Keywords: geophysical exploration, data acquisition, data analysis, data interpretation, technology evolution history

* Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

C1-109, Kyotodaigaku-Katura, Nishigyō-ku, Kyoto, 615-8540, Japan