

少人数で実施する反射法地震探査

伊藤 忍¹⁾

1. はじめに

反射法地震探査とは、弾性波を用いて地下の構造を知る物理探査手法であり、資源探査等に使われている。具体的には、多数のジオフォンを地表に展開し、多数の地点で発震することにより、多数の発震点と受振点の組み合わせで取得したデータを処理するものである。効率的にデータを取得するためには作業員を増やすことが手っ取り早く、一般的には多数の作業員を動員して探査を実施している。しかしながら、探査に割けるリソースは有限であるため、作業員を確保できない場合もある。我が国の人口減少も相まって、将来そのようなケースが増えることが予想される。

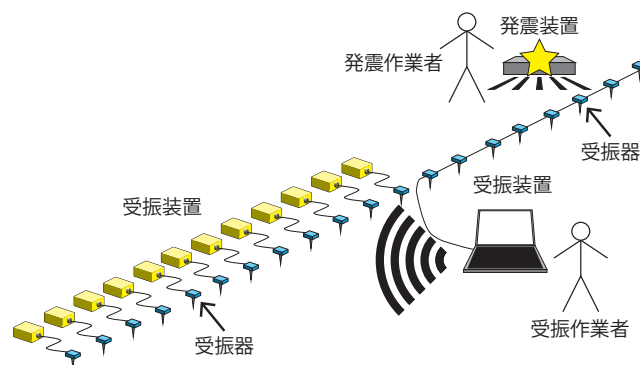
一般に、反射法地震探査の探査深度は測線の展開長の4分の1から2分の1程度と言われている。資源探査のような深さ数kmをターゲットとする探査では、数kmの長さを受振器を展開する必要がある、作業員数を減らすことはなかなか困難である。一方、地盤調査や活断層調査を目的とした深さ数十mから200m程度の浅部をターゲットとする探査ならば、ある程度は作業員数を減らすことは可能かもしれない。そこで筆者らは浅層探査において動員する作業員を減らしつつも効率的にデータを取得することに取り組むことにした。

2. 発震作業の効率化

反射法地震探査の作業は、発震に関わる作業と受振に関わる作業に大別される（第1図）。それぞれの作業を1人で実施できれば、計2人で探査を実施できる。筆者らは最初に発震作業の効率化に取り組んだ。

簡便な発震作業として、まず掛矢の使用が思い浮かぶ。一般に探査深度が浅い程、高分解能な結果が期待される。S波はP波よりも伝播速度が遅いため、高分解能な結果を得るのに適している。浅層探査ということでS波を発震させる場合、地面に板を置き、掛矢で板を横から叩く（写真1）。この際、板に与えた衝撃をより効率的に地面に伝えるために、板と地面とのカップリングが大変重要になる。板と地面とのカップリングを増加させるには、板の重量を

増やせば良い。しかしながら、発震点の移動の際には板を移動させる必要がある。取り扱いの容易さとカップリングのための重量の増加はトレードオフ関係にある。試しに高さ20cm、幅40cm、長さ100cmの松材を用いてみたところ、移動は特に大変ではなかった。欠点は、掛矢で叩く作業を繰り返すのは想像以上の重労働であったことである。同じ高さから掛矢を振り下ろす場合、掛矢の重量が大きいほどエネルギーは大きくなるが、取扱いは大変になる。2016年3月に石垣島で実施した探査では、これまでの経験から重量約5kgの掛矢を用いたのであるが、2



第1図 反射法地震探査の概念図。作業は発震に関わるものと受振に関わるものに大別される。後述するように発震装置・受振装置には様々なものがある。



写真1 掛矢を用いた板叩きによるS波発震作業の様子。この探査では2人が板にのって荷重を加えて発震したが、撮影のためにこの写真では1人しかのっていない。

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード：反射法地震探査、探鉱機、地震探査システム

人で20回/点×40点/日、すなわち800回/日くらいが限度であった。

発震作業を人力に頼るには限界があるため、筆者らは可搬型バイブレーター震源の使用も試みた。使用したのはGeosym社製のEIViS IIIというものである(伊藤ほか, 2014; 写真2)。震動ユニットを交換することでS波だけでなくP波を発震することも可能である。電源として鉛蓄電池を用いているが、ケースに入ったバッテリーユニットの重量は73.5kgであり、震動ユニットと地面とのカップリングを増加させる用途も兼ねている。また、さらにカップリングを増加させるために、発震時には作業員がバッテリーユニットの上ののようメーカーが指示している。2016年9月に福島県会津若松市で実施した調査で可搬型バイブレーター震源を用いた際に、比較のために掛矢でも



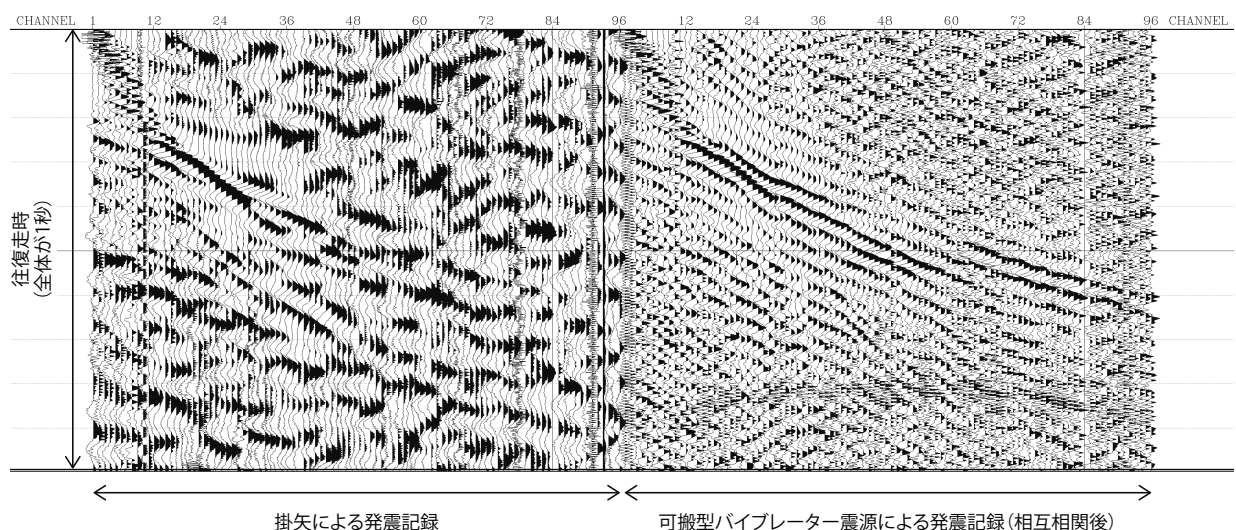
写真2 可搬型バイブレーター震源を用いたS波スイープ発震作業の様子。作業員はバッテリーユニットの上ののり荷重を加えている。

発震を行った。発震記録は掛矢と比較すると、短周期成分が良く生成されている(第2図)。欠点は、バッテリーユニットの重量が大きいので、坂道を上りながら発震点を移動するのはやや困難なことである。また、バッテリーユニットの脱着は筆者1人では無理であった。

3. 受振装置周辺作業の効率化

10年程前、CDPケーブルを接続しアナログ信号を1台の探鉱機に集約して記録していた頃は測線上の探鉱機の位置の制約が大きかった。筆者らが使用していたCDPケーブルは48チャンネル仕様であり、96チャンネルを超える探査では中継ケーブル等を使用する必要が生じる。展開を移動するには48チャンネル仕様の太いケーブルを大量に移動する必要があるため、作業員を減らすことは困難であった。

10年近く前に、筆者らのグループでは分散型の探査システムを導入した。筆者らが使用しているのはサンコーコンサルタント社製のDSS-12というものであり、1台の収録ユニットで12チャンネルを記録するものである(写真3)。従って、ケーブルは片側6チャンネル+LANという仕様であり、従来のCDPケーブルと比較して圧倒的に細く軽量である。また、探査のチャンネル数が増えても中継ケーブルは不要である。このため、展開移動に携わる作業員をかなり減らすことが可能となった。しかし当然ながら、作業が軽減されようとも作業員が多いほど展開移動は早く進捗するので、バランスを考えながら探査計画を立案するのに苦慮したものである。



第2図 掛矢による発震記録(左)と可搬型バイブレーター震源による発震記録(右)の比較。可搬型バイブレーター震源はスイープ型震源と呼ばれ、受振器の記録と震源の生成したスイープ波形記録の相互相関を取って発震記録を得る。掛矢等の衝撃型の震源と比較して雑振動に強いという優位性がある。



写真3 分散型地震探査システムの展開の様子。いくつか見える青いものが受振器であり、受振器12個分の波形記録をオレンジ色の収録ユニットでA/D変換し、デジタル化された信号をLANで送信する。

その後、筆者らのグループでは独立型の探査システムも導入した。独立型の探査システムは基本的にデータを連続記録するもので、発震記録は探査後に連続記録から切り出すものである。筆者らのグループでは、2014年1月から2月にかけて富士川河口断層帯で探査を実施したが、その際に使用していた分散型の探査システムでは富士川を越えることができなかった（伊藤・山口，2016）。測線レイアウトの自由度をさらに高める目的で独立型の探査システムである、Geospace社製のGSXというものを導入した（写真4）。このシステムは浅層探査を念頭において製作されたものではないため、2016年3月に石垣島で実施した浅層探査では2つの問題点が浮上した。1つ目は、個々のpod（収録ユニット）を設定する際の問題である。Line Viewerと呼ばれるハンドヘルドPC（写真5）を用いて個々のpodが測線上のどの測点に配置されているのかを設定するのであるが、通信にはBluetoothを使用している。それぞれのpodが相互に20m程度離れていれば、同時に通信できるpodは1台か、多くてもせいぜい3台程度である。しかし、浅層探査の場合、podは相互に1m程度しか離れていないため、数十台のpodを同時に認識してしまう。この中から目的のpodのシリアル番号を確認して測点を設定しなくてはならず、手間がかかることとなった。2つ目は、データの切り出しの際の問題である。個々のpodはGPS受信機を内蔵しており、あまり高精度ではないものの設置位置の情報を記録している。podが相互に20m程度離れていれば、その位置情報を手がかりに、処理ソフトウェアの機能で自動ソートすることが可能である。しかしながら、pod間の距離が1m程度の場合、こ

の機能はまったく動作せず、やはりシリアル番号を確認しつつ手でソートするしかなかった。これらの問題はあるものの、探査中はほぼ放置しておくことが可能であり、作業員を減らすことには大いに貢献するものであった。

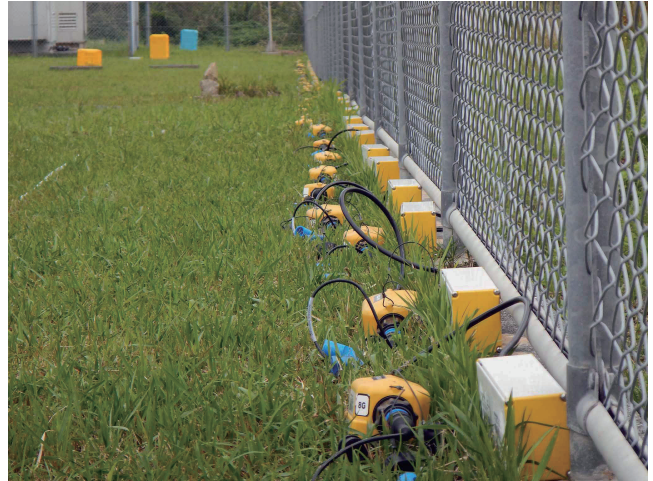


写真4 独立型地震探査システムの展開の様子。右側のフェンスに沿って配置されている上面の白いユニットはバッテリーであり、それぞれの左隣に配置されているのがpodと呼ばれる収録ユニットである。受振器はスパイクでしっかりと地面に固定しており、草の陰となつてほとんど見えていない。



写真5 Line Viewerと呼ばれるpodの動作確認装置。上に飛び出ている青いものは本体とUSB接続されており、動作確認用のアプリケーションソフトウェアのライセンスを確認するドングルとBluetoothのアンテナを兼ねている。

4. 発震・受振作業の統合

発震・受振作業自体の効率化については上述した。この他に、作業内容を記録するという作業がある。通常、発震作業は厳密に測点上で実施することは不可能で、受振器の設置位置からある程度のオフセットを設けて発震する。こ

のオフセット量を記録する必要がある、以下では発震ログと呼ぶことにする。一方、受振側では、トリガ時刻と発震点との対応付けを記録する必要がある、以下では観測ログと呼ぶことにする。反射法地震探査では発震失敗やトリガ失敗が一定程度発生することは避けられないため、これを確実に記録しなければならない。

上述した独立型の探査システムであるGSXでは、トリガ時刻を記録するのにSDR (Source Decoder Recorder) と呼ばれる装置を使用する (写真6)。このSDRを発震作業員が持つことにより、発震失敗とトリガ失敗を統一的に把握することが可能になる。SDRはpodと同様にGPS受信機を内蔵しているので、トリガ時刻と発震位置の対応付けの機能はあるものの、発震点間隔が小さい場合には機能しない。



写真6 SDRと呼ばれるトリガ時刻を記録する装置。AUX入力も備えており、バイブレーター震源を用いた場合にはスイープ信号を記録することが可能である。

そこで、観測ログと発震ログを同時にカメラで記録する方法を試みた (写真7)。ほとんどのデジタルカメラには時刻を映し込む機能がある。発震点がわかるような写真を撮れば観測ログとして必要な情報は記録される。筆者らは工事現場用の黒板を用いた。あとは発震ログとして必要な情報も写真に映し込むために、測量用の伸縮ポールを用いた。筆者らが使用した伸縮ポールは20cmごとに紅白に塗り分けられており、その程度の精度でオフセット量を認識できる。

5. おわりに

筆者はここ数年、本稿で述べた内容を「1人でできる反射法地震探査」というキーワードを使って人に説明してきた。本稿のタイトルも「1人でできる反射法地震探査」



写真7 カメラ撮影によるログの例。黒板は全天候型の既成品であるが、ログ用に記入項目をカスタマイズすることも可能である。

にしようかとも考えたのであるが、道半ばであり、現状では誇大広告となりそうなので自重した。

現状では、掛矢と独立型地震探査システムを用いれば1人でも反射法地震探査を実施できそうである。しかしながら本来、反射法地震探査とはイメージしたいものに合わせ震源や受振器の種類、発震・受振の間隔や受振器のチャンネル数を決定するのが筋である。今後は、より幅広い要求に応えられる工夫が必要であろう。手近なところでは、たとえば、可搬型バイブレーター震源を1人で扱えるような工夫をすることや、分散型探査システムの制御用PCを携行しながら発震作業を行えるような工夫をすることが考えられる。

本稿では触れなかったが、反射法地震探査では測点測量も不可欠である。1人で扱える光波測量とGPSのハイブリッドな装置も市販されているが、高価かつ過剰性能である。もう少し廉価で要求仕様を満たせるようなものが望まれるところである。

文 献

- 伊藤 忍・山口和雄 (2016) 富士川河口地域における反射法地震探査。海陸シームレス地質情報集, 「駿河湾北部沿岸域」, 海陸シームレス地質図 S-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 伊藤 忍・山口和雄・入谷良平 (2014) 可搬型バイブレーター震源を用いた浅層反射法地震探査, 日本地震学会講演予稿集 2015 年度秋季大会。

ITO Shinobu (2016) Seismic Reflection Survey with Very Few People.

(受付: 2016 年 4 月 1 日)