

反射法の震源

—特にミニソシーの原理について—

横倉隆伸・加野直巳 (物理探査部)
Takanobu YOKOKURA Naomi KANO

はじめに

多くの地球物理的手法の中で 反射法地震探査は最も高い分解能で地質情報を提供してくれるものである。しかも処理結果は あたかも地質断面をそのまま見るかのような 視覚的な情報となっている。その原理はきわめて簡単であるにもかかわらず 与えてくれるものは非常に大きい。特に石油探査への需要とあいまって 反射法は近年急速に発展してきている。

物理探査部でも最近陸上の浅部地質を対象とした反射法探査システムを導入し 石油探査に使用されている従来の反射法と比較して格段に分解能の高い記録を得ることができるようになってきた。このシステムは 通常のものとはかなり異なった震源ならびに探査原理を利用しており きわめておもしろいものである。本稿ではその原理を簡単に説明してみようと思う。また従来のものとどう異なっているかを示すため 従来の方法の簡単な紹介もあわせて行うことにする。

本稿では震源関連の説明に限ることにし 反射法の探査システム・処理システムについてはふれないことにする。その優れた解説が朝倉(1982 1983)になされているので 興味のある読者は参照されたい。また標題では「反射法の震源」としたが ここで述べるものは反射法に限らず地震探査一般に使用することができる。

通常の探査原理と震源

反射法の原理はきわめて簡単である。例えば図1aのように 地下に二つの地層境界(反射面)が存在し 各地層の物性が境界Aではそれほど大きく異なっておらず(弱い反射面) 境界Bでは大きく異なっている(強い反射面)とする。ここで何らかの手段で地表から発生させたパルスの弾性波(図1b)がAおよびBで反射されて地表にもどってきたとすると 図1cのような記録が得られる。反射法の原理は これらの反射波が地表にもどってくるまでの時間の半分に対応する深さにそれぞれの反射面がある というだけである。また反射波の振幅の大小から地層の物性のコントラストを推定することもできる。

実際には 反射面の深度を求めるには弾性波速度が必要である。また震源から発振された波は図1のようなインパルスではなく ある拡がりをもった波形をしているため 得られた記録のどこが本当の反射波に相当するかを決めるための処理が必要である。こういった処理をすべて含んだかたちで 現在の反射法処理システムができあがっているが その詳しいことは省略する。

あとの説明の都合上現場で得られる記録が どういうものであるかを ここで数学的に表現しておこう。図1では震源の波形をインパルスとしたが 実際の波形は時間の関数として表されるある振動をする。その関数

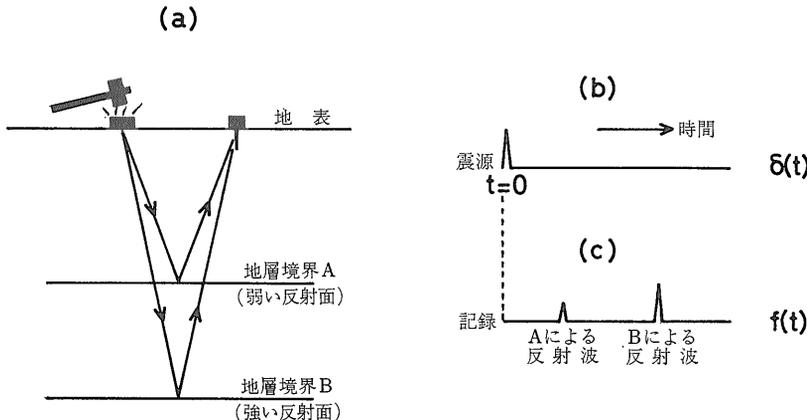


図1 反射法の原理

表1 代表的な陸上震源

タイプ	エネルギー源と名称	震源波形	
爆薬	ダイナマイト TNT	通常のパルスのな波形	
	人 力		カケヤ 重錘落下
電 気 的	DYNA-PULSE ⁽¹⁾		
高压空気	TERRAPAK ⁽²⁾		
	AIR GUN ⁽³⁾		
熱力学的	DINOSEIS ⁽⁴⁾		
	GAS GUN ⁽⁵⁾		
機 械 的	THUMPER ⁽⁶⁾		
	VIBROSEIS ⁽⁷⁾		周波数変調された連続振動
	ランマー(MINI-SOSIE) ⁽⁸⁾		ランダム間隔のパルス列

(註) 表中の番号は以下の各社の登録商標である
 (1) Globe Exploration Company
 (2) Marine Geophysical International Inc.
 (3) Bolt Associates, Inc.
 (4) Sinclair Oil Company
 (5) Maccollum Laboratories, Inc.
 (6) Ray Geophysical Div., Mandrel Industries, Inc.
 (7) Continental Oil Company
 (8) Société Nationale Elf-Aquitaine Production

形を $S(t)$ とする。またインパルスに対する地下の応答を表す関数(非常に大雑把な言い方をすれば時間軸上でどこに反射面が存在するかを示す関数)を $f(t)$ とする。この時現場で得られる記録は $S(t)$ と $f(t)$ のコンボリューションになっている。記号的には $S(t) * f(t)$ と表現される。コンボリューションとは少し複雑化されたある種の掛け算である。図2に $S(t)$ と $f(t)$ (図1c)のコンボリューションを模式的に示す。

原理的に言えば震源としては振動を起こすことのできるものならば何でも良いことになる。しかし $S(t)$ がインパルスに近いほど得られた記録は $f(t)$ に近いものとなる。すなわち地下の反射面そのものに近い結果を得ることができる(図1のような場合)ためあとの処理がたやすくなる。従って通常使用されている震源としてはエネルギーを非常に短い時間内に集中させたパルスのな波形を出すものが選ばれる。

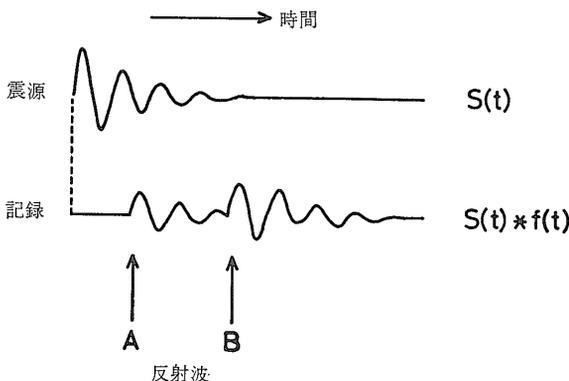


図2 震源波形と記録の模式図

表1に震源の代表的なものをあげた。ただし海上用震源の説明は筆者らの手に余るのでここでは陸上で使用されているものに限った。表の作製にあたっては黒岩(1968) Dobrin (1976) 物理探鉱技術協会(1978)を参照した。この節では表中の通常のパルスの震源について説明する。昔から使用されているのはダイナマイト・TNTなどの爆薬震源である。爆薬震源は出力エネルギーを大きくすることができるため信号対雑音比(S/N比)の良い明瞭な記録を得ることができ非常に有効な震源である。しかし爆薬は安全性に欠ける面があり騒音源ともなるため最近では使用できる場所が非常に限られてきている。

そのためこれに代るものとして非爆薬震源が使われるようになってきた。非爆薬震源は動力源となるものの違いによっていくつかのタイプにわけることができる。簡単なものとしては人力によってカケヤで地面を叩く方法重錘を落下させて震源とする方法などがある。機械力を利用して重錘落下を大規模にしたものがTHUMPERである。電氣的なものとしてDYNA-PULSEがある。これは流体で満たされた容器の中でプラズマ放電を起こさせ、金属底板に衝撃を加えることにより発振する。空気の放出を利用したものではTERRAPAKとAIR GUNがある。TERRAPAKはコンプレッサーからの空気をピストン内に急速に開放することによってピストンを動かしその衝撃で地面を叩くものである。AIR GUNはコンプレッサーからエアガン内に送り込まれた高压空気を急速に水中に放出することによって発振させるものであり一般に海で使用されている。陸上で使用するには地面に穴を掘り水を

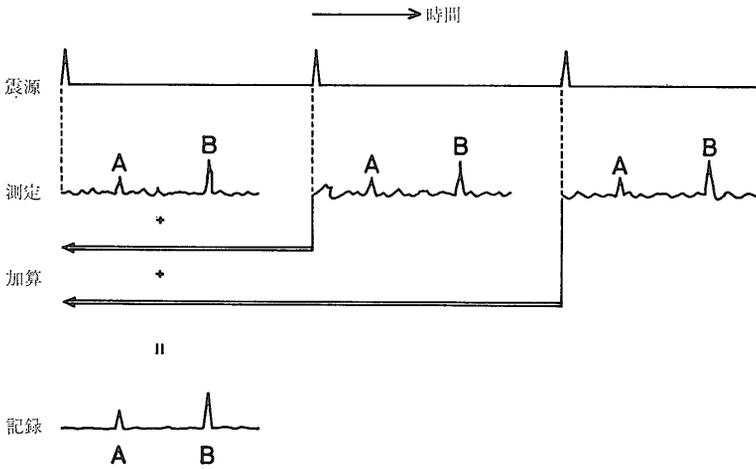


図3 スタックの原理

ためて その中で発振させるか あるいは水の入った容器を地面におき その中で発振させる。写真1に陸上用エアガンを使用した探査風景を示す。熱力学的なものとしては DINOSEIS と GAS GUN がある。DINOSEIS はプロパンと酸素の混合気体をガン内で爆発させ それによるガス膨張で瞬間的にガンの底板を押し下げ 地面を叩く。GAS GUN はプタンと酸素を用い 原理的には DINOSEIS とほとんど同じである。DINOSEIS は車輛搭載型であるが GAS GUN はそうではない。

非爆薬震源は爆薬震源に比較して出力エネルギーが小さいが 機動性があり短時間で繰り返し発振できる。



写真1 陸上用エアガンによる探査風景

従って S/N 比を向上させるために一測定点で何回も発振させ 得られた記録の加算(一般にスタックあるいは重合という)を行うことが多い。図1のような二つの反射面が存在する場合の例を図3に示す。エネルギーが弱いため一つ一つの発振に対する記録は雑音の目立つものであるが スタック数を多くすれば 反射波の存在するところは位相が揃っているため大きくなり 雑音のところは位相が揃わず互いに打ち消し合ったりしてあまり大きくなる。その結果 S/N 比の良い記録を得ることができる。

しかし記録長Tのものをスタックしようとするとき T よりも長い時間間隔をあけて発振しなければならない。つまり一つの発振による波が充分おさまってからでないと 雑音が大きくて次の発振が行えないのである。従って S/N 比の良い記録を得るのにはきわめて多くの時間がかかる。実際の作業にとって これは大きな欠点となる。

パイブロサイスの原理

パイブロサイス(VIBROSEIS)は前述した震源とは全く異なった原理をもっている。前述の震源(後述のミニシーの震源も)は 非常に短い時間内にエネルギーを集中させた 広い周波数帯域をもつパルス的な波形を出す。これに対しパイブロサイスは 数秒から数十秒かけて周波数を数Hzから数十Hzまで連続的に変化させた(FM変調された)連続振動を出すのである。この連続振動を出すことをスイープという。普通の震源とパイブロサイスの1スイープの震源波形およびスペクトルを模式的に示したのが図4である。このように両者の波形のタイムスケールは非常に異なっている。またパイブロサイスはある限定された帯域の周波数成分しか含んで

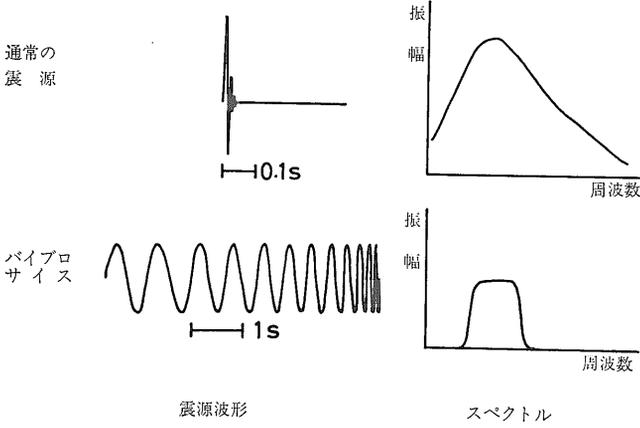


図4 通常の震源とバイプロサイスの比較

いない。

バイプロサイスはあらかじめ設定された電氣的なスイープ信号に従って 振動装置(油圧式 電磁式等がある)を忠実に動かし 地面をゆすることによって地中にエネルギーを送り出す。

連続信号を出すため 受信される記録は複雑な様相を呈し 見掛け上わけのわからないものとなっている。その記録からどうやって地下情報を得るのかを次に説明しよう。 図5に模式図を示す。 図1と同じく二つの反射面があるとしよう。 その時得られる 従来の震源による記録を(a)とする。 (b)をスイープ波形とする。 反射面AおよびBでの反射波をそれぞれ(c)と(d)とすると現場で得られる記録は両者を合わせた(e)のようなものと

なる。 この現場記録(e)とスイープ波形(b)との相関関数を計算すると 各反射面に対応した時刻のところで大きなピークが出て それ以外のところでは相関が小さくなり 最終的に(f)が得られる。 これは従来の記録とほとんど同じようなものとなる。

数学的に説明すると次のようになる。 (a)は前に述べた $S(t) * f(t)$ である。 (b)の波形を $x(t)$ とすると 現場記録(e)は $x(t) * f(t)$ となる。 すなわちスイープ波形と地下の応答を表す関数とのコンボリューションである。 これとスイープ波形 $x(t)$ との相互相関関数を計算すると $ACF(x(t)) * f(t)$ となる。 ここで $ACF(x(t))$ は $x(t)$ の自己相関関数を表す。 一般に $ACF(x(t))$ はパルスの波形をしたものとなっており クラウダー・ウェーブレット (Klauder wavelet) と呼ばれる。 図5の(a)と(f)の式を比較すると (f)は $ACF(x(t))$ というパル的な波形を出す仮想的な震源を使用して得られた記録とすることができる。 すなわち(f)は普通の探査記録と同等のものと言える。

バイプロサイスは大型の機械であるが車載されている(写真2)ため 道路のある所ならばどこでも発振するこ

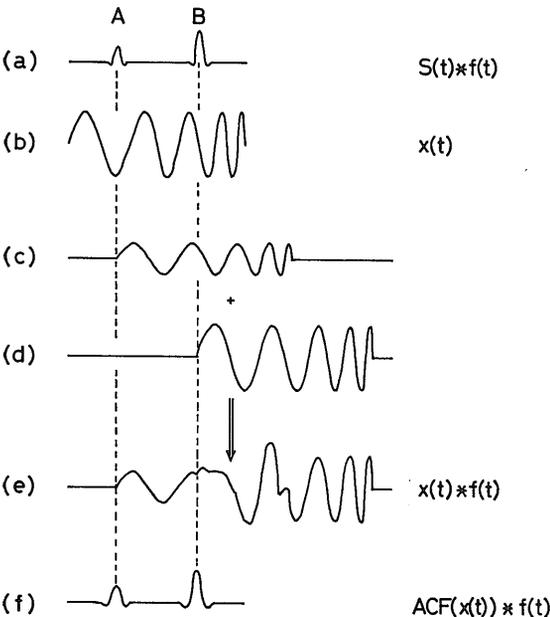


図5 バイプロサイスの原理



写真2 石油資源開発(株)のバイプロサイス

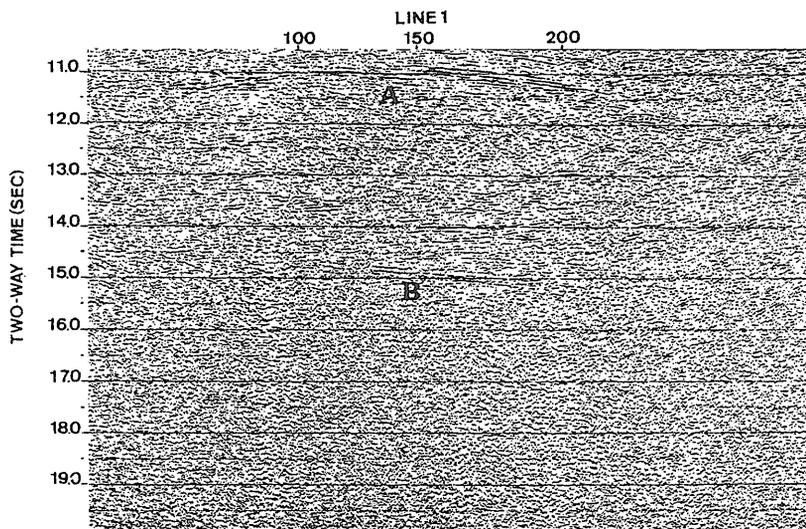


図6 COCORP による例 Bがモホ面からの反射波といわれている (Smithon ほか 1979 より)

とができ 機動性がある。しかし爆薬に比べてエネルギーが小さいので 良い記録を得るためにスタックを行うことが普通となっている。

エネルギーが小さいとはいっても パイプロサイスの威力は大きく 最近では COCORP プロジェクトのように 大陸地殻深部および上部マントルの探査にも利用されるようになってきている (Brewer and Oliver 1980 に詳しい解説がある)。モホからの反射波と思われるものの得られている例を図6に示す。

ミニソシーの原理

前述の非爆薬震源は安全性・機動性等の長所を有しているが それでも大型のコンプレッサー・容器・パイプレーター等を必要としているため どこでも手軽に探

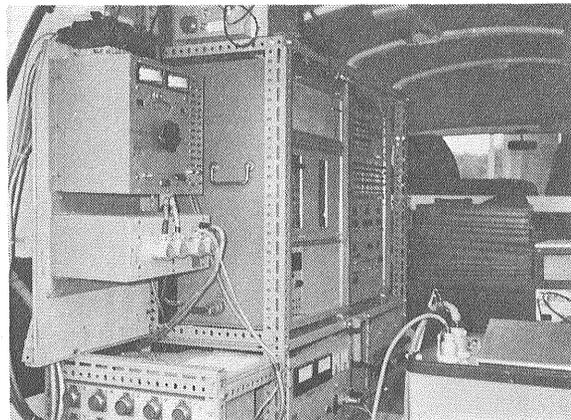


写真3 ミニソシー・システム(Input/Output Inc.のDHR-2400)の概観(車載状態)

査することができるというわけではない。またスタックを行うには多大の時間がかかる。手軽に探査することができ スタックを効率的に行えるように考え出されたのがミニソシー(MINI-SOSIE)である。

現在我々が使用しているこのミニソシーというシステムは フランスの Société Nationale Elf-Aquitaine Production が開発した 海上用のソシー(SOSIE)という原理にもとづいている(Barbier and Viallix 1973 1974)。このソシーを陸上用に改良し アメリカのInput/Output, Inc. が製作した小型探査システムがミニソシーである (Barbier ほか 1976, Serres and Wiles 1978)。その概観を写真3に示す。

前述したように 普通 地震探査の記録をとる際には 発振間隔 t は記録時間 T よりも大きくしなければならない。つまり一つの発振による波が充分おさまらず 雑音として次の記録中に現れないようになってはじめて 次の発振が行えるのである。ところがソシーでは T よりもはるかに短い間隔でパルス列を次々と発振することができる。このため 短い時間でスタック回数を大幅に増やすことができる。

図7にソシーと通常の場合とのスタック法の比較を示す。通常は記録長 T の記録をとる場合 T よりも長い間隔 t で発振し 各発振後 T だけの間とぎれとぎれに記録して スタックをしていく。ところがソシーでは 発振中は連続して記録をとり(図7の T') 発振されるたびに T だけの長さの部分の部分を次々と切り取ってきて スタックしていくことができる。そのため図7のように同一時間内に何倍・何十倍ものスタックを行うことができる。

ソシーの1発振に対応する長さ T の記録中には その

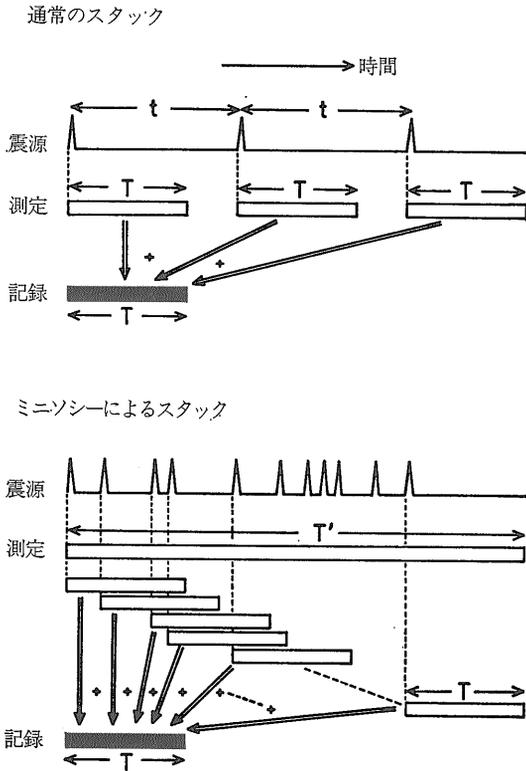


図7 通常のスタックとミニソーのスタックの比較

前後の発振による影響が雑音として入っている。その影響を取り除くために発振間隔をうまく調節する必要がある。そのためには発振間隔がランダムであればよい。それを図8に具体的に示す。簡単のため4発振のみで示す。また受振記録中の反射波は単純なスパイクであるとする。(a)は発振の時系列である。これまでの例と同様二つの反射面AおよびBがあるとする。この時受振される記録は(b)のようになる。ここで A_i および B_i はそれぞれ*i*番目の発振による反射面AおよびBからの反射波を表す。(a)の各発振ごとに時間Tずつ(b)の記録から切り取り(c)の操作)移動して並べると(d)のようになる。図中の黒いスパイクがそれぞれの発振に対する本当の反射波である。これらをスタックすると反射面AおよびBに対応した反射波のところは位相が揃い振幅は4倍となる。それ以外の別の発振に対する反射波は(a)がランダム系列であれば位相が合わず振幅がもとのままに残る。従って(e)のように本当の反射面に対応したところだけ強調されそれ以外は目立たなくなる。また突発的な雑音がどこかに入っても同様の理由で目立たなくなる。発振数を更に多くすればAおよびBに対応したところだけ反射波がありその他はノイズレベルかそれ以下になってしまい

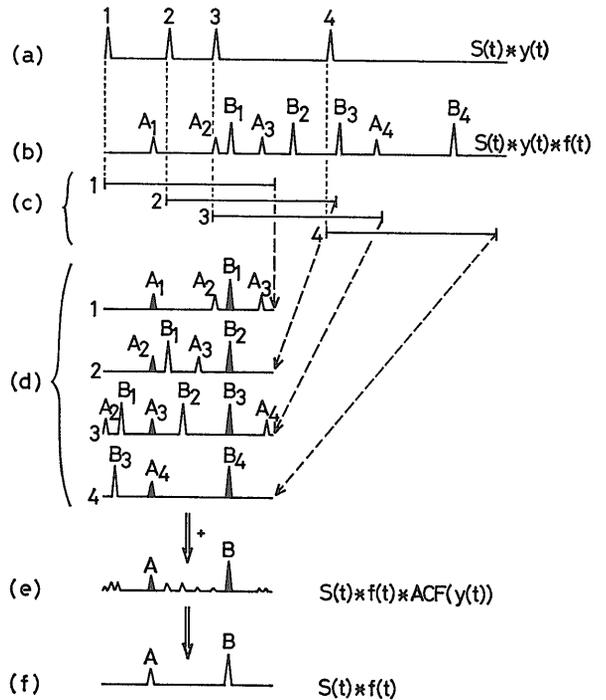


図8 ミニソーの原理

実際には(f)のように従来の記録と同じものが得られることになる。

以上のことを数学的に表すと次のようになる。実際の震源波形を $S(t)$ とし発振の時系列を $y(t)$ と書くことにする。この時全発振を合わせた波形は $S(t) * y(t)$ と表される。これが見掛け上の震源波形であるから得られる記録は全体としては $(S(t) * y(t)) * f(t)$ となる。図8の(c)切り取り (d)移動 (e)加算という操作はこの記録 $(S(t) * y(t)) * f(t)$ と発振時系列 $y(t)$ との相互相関を計算することに相当する。そうすると得られるものは $S(t) * f(t) * ACF(y(t))$ である。ここで $ACF(y(t))$ は前と同じく $y(t)$ の自己相関関数である。もし $y(t)$ がランダム時系列であるとすると $ACF(y(t))$ はデルタ関数となる。従って $S(t) * f(t) * ACF(y(t))$ は $S(t) * f(t)$ となって通常の記録と同じものが得られる。

ソーの利点は連続発振ができるため通常のスタックに比較して格段にはやく探査を行うことができるということである。従ってエネルギーの非常に小さい震源を使用してもスタック数を多くすればS/N比の良い記録が短時間でとれることになる。またエネルギーは弱い機動性のある軽便な震源を利用してどこでも簡単に探査することも可能となる。

普通ミニソーでは震源として道路工事に使用されているタンピング・ランマー(土固め機)を使用している

(写真4). そのため非常に狭い所でも安全に能率良く探査ができる. ただランマーは出力エネルギーがきわめて小さいため 浅部(せいぜい深さ1,000mくらいまで通常は500mくらいまで)の探査しかできないという欠点がある.

ミニソシーで一番問題となるのは 発振のパルス列をいかにしてランダムに近づけるかということである. ランダムさが不十分であると 本来ノイズとなるべきところでも位相が揃い 大振幅となりうるので気を付けなければならない. 図9にその典型的な例を示す. (a)はなるべくランダムになるように探査した例であり (b)はランダムさが不十分であった例である. (b)ではおよそ0.1秒間隔で同じような波形をしたものが繰返し現れている. ここで使用したランマーは安定状態での振動周期がおよそ0.1秒であるため このようなことが起こりやすくなる.

ミニソシーによる探査の例を図10に示す. これは深度およそ300mくらいまでを対象として探査を行った例である. 縦軸は深度に変換してある.

まとめ

以上いろいろな震源について述べてきたが その長所短所を簡単にまとめておこう. 簡単に言えば 爆薬はエネルギーが大きく きれいな記録をとることができるが 安全性に欠ける面があり また数mのボーリングを必要とするため機動性がない. 爆薬の使用には公的規制があり どこでも使用できるわけではない. 非爆薬震源の場合 一般に安全で応用範囲が広いがエネルギーが小さい. 爆薬に比較すれば機動性があるが 多くの場合大がかりな機械となっているため しっかりとし

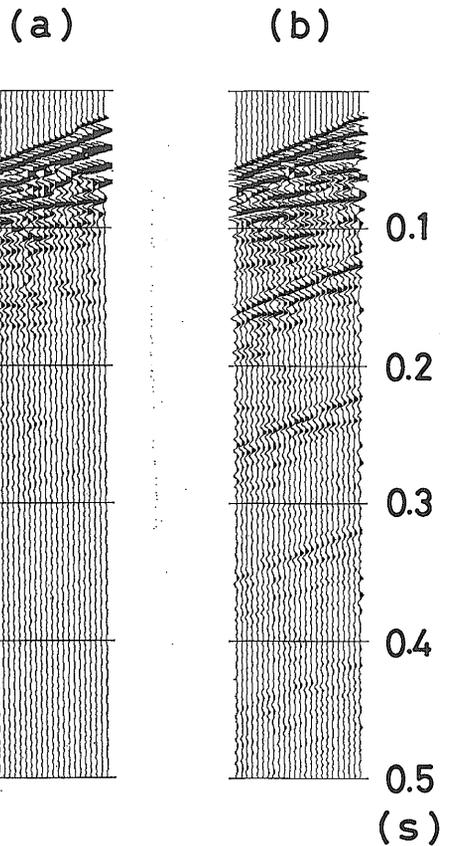


図9 ランダムさの違いによる記録の差 (a)良い例 (b)悪い例

た地表条件のところでなければ使用しづらい. ミニソシーでのランマーはエネルギーが非常に小さいので浅部にしか適用できないが 安全性 機動性 軽便性にすぐ

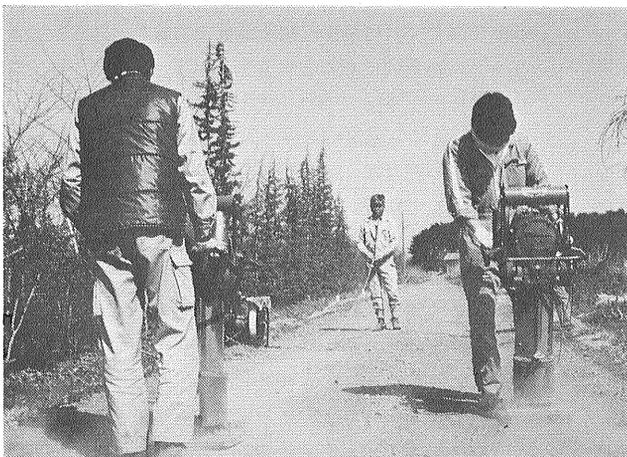


写真4 ランマーによる探査風景

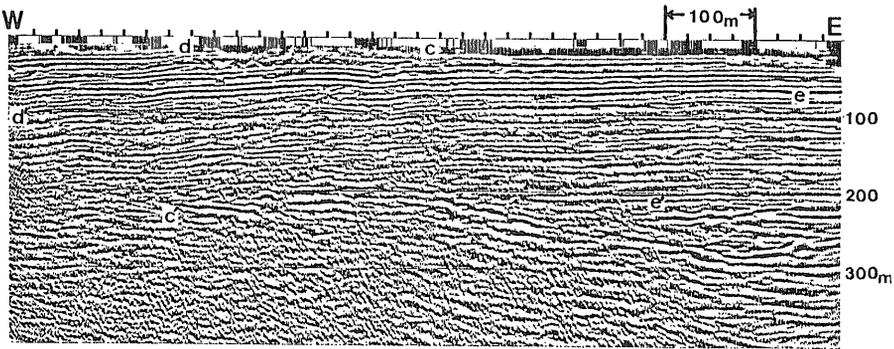


図10 ミニソシーによる
探査例

Recorded by Geological Survey of Japan
Instrument : I/O DHR-2400
0.5 ms Sample Rate
Source : Mikasa MTR-80H
12 Geophones/Channel
2.5m Channel Interval
2.5m Ramming Segment

れ かなり広い条件範囲で使用できる。震源を使用するにあたっては 各長所短所を知った上で 目的に応じて選ぶことが大事である。

最後に付け加えておきたいのは ここで述べたパイプロサイス ソシーの原理は他の観測分野でも利用できる可能性があるということである。一般に観測には受身的なものと同動的なものがある。例えば物理探査で言えば 重力 磁気等の観測が受身的なものであり 地震探査 電気探査等が能動的なものである。観測者が何らかの形でエネルギーを対象に送り込み その応答を観測して対象の性質を知ろうという能動的な観測の場合には S/N比を上げるためにパイプロサイスやソシーのような原理を利用できる。特にノイズが大きいのを送り込むエネルギーをそれほど増やせないような場合 あらかじめコード化された信号を送り ノイズに埋っている対象からの応答をそのコードに従って取り出せば きれいな信号をとらえることができる。最近通信の方で実用化され出した スペクトラム拡散通信方式(簡単な説明は例えば滑川(1978) 横島(1979)に述べられている)はまさにこれと同じことを行っている。

長々と書いてきたが 読者諸氏の何らかの参考になれば幸いである。

参考文献

朝倉夏雄 (1982) 初心者のための反射法データ処理 物理探査 35巻 6号 p. 351-374

朝倉夏雄 (1983) 反射法データ処理におけるフィルタリングの基礎概念 物理探査 36巻 2号 p. 87-99.
Barbier, M. G. and Viallix, J. R. (1973) A new tool for marine seismology, Geophysics, 38, p. 673-683.
Barbier, M. G. and Viallix, J. R. (1974) Pulse coding in seismic prospecting—Sosie and Seiscode, Geophysical Prospecting, 22, p. 153-157.
Barbier, M. G., Bondon, P., Mellinger, R. and Viallix, J. R. (1976) Mini-Sosie for land seismology, Geophysical Prospecting, 24, p. 518-527.
Brewer, J. A. and Oliver, J. E. (1980) Seismic reflection studies of deep crustal structure, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 8, p. 205-230.
物理探査技術協会(1978)物理探査用語辞典 ラテイス 419. p.
Dobrin, M. B. (1976) Introduction to Geophysical Prospecting, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 630. p.
黒岩敦 (1968) 非爆薬地震探査震源 物理探査技術協会20周年記念「最近における物理探査の進歩」内 p. 88-94.
滑川敏彦 (1978) スペクトラム拡散通信方式とは エレクトロニクス 昭和53年11月号 p. 1165-1169.
Serres, Y. and Wiles, C. (1978) Mini-Sosie —New high-resolution seismic reflection system, Canad. Inst. Min. Metall. Bull., 71, p. 96-102.
Smithon, S. B., Brewer, J. A., Kaufman, S., Oliver, J. E. and Hurich, C. A. (1979) Structure of the Laramide Wind River uplift, Wyoming, from COCORP deep reflection data and from gravity data, Jour. Geophys. Res., 84, p. 5955-5972.
横島一郎 (1979) スペクトラム拡散通信方式—その原理と応用—エレクトロニクス 昭和54年5月号 p. 481-492.