

人工地震の役割

早川 正巳*

Review on Seismic Prospecting

By

Masami HAYAKAWA

Résumé

A review on seismic prospecting is tried. In the first half of this paper, the history of seismic prospecting is introduced, in connection with the development of related techniques.

In the latter half, some examples of seismic surveys are shown, in sequence of the frequency of generated waves from the source.

人工地震・地震探査あるいは地震探鉱という言葉はすでに我々には耳なれたものであるが、案外、その利用や現状については知られていないこともある。編集委員会からの要望に応じて、ここに筆をとつた。利用などかなり広範囲なので不十分な点があると思う。おゆるしいだきたい。

上にしるした三つの言葉の意味は、大体同じようなものであるが、はじめの方ほど広い意味ぐらゐにとつてもらえばよかろう。本文でははじめの人工地震を用いることにする。人工地震はどのようにして発展してきたのであろうか、最初は石油、石炭などの地下資源をしらべることから始まったのであるが、次第にその応用も広まり、更には地殻の構造解明にまで発展してきた。そのためには陸地のみならず、海洋における人工地震の技術が大いにあづかつて力となつたのである。

ここではまず、前半ではこれらの人工地震の歴史をひもとき、またその歴史と関連して、その技術の進歩が如何にその時々に関連学問、技術の発展や社会情勢の影響をうけたかをふり返つてみる。後半では人工地震でしらべられる構造をその規模の大小に応じて、小さな方から順次大きな方に実

例を用いて説明してゆくことにする。

I. 人工地震の技術の歴史

人工地震は今から60年ばかり前、第一次世界大戦中、ドイツのミントロップ博士によつて始められた。それは敵の大砲の位置を知るのが最初の目的であつた。すなわち、弾丸発射の反動で地面に衝撃を与え、それが振動となつて地下を伝わり、それを方々で受振してそれによつて大砲の発射位置を知ろうと云うのであつた。このため、ミントロップは光学的な拡大装置を使った野外測定用の地震計をつくつた。それは精巧なものであつたが、地下構造の複雑さのために、その時には直接成功はしなかつた。

しかし、この地震計を用いて、それから数年たつて、第一次世界大戦直後、人工地震による屈折法の基礎を確立し、1919年には屈折法の特許をとつたのである。それから2年後1921年、人工地震では世界ではじめての会社 SEISMOS をハノバーに設立した。今から50年前のことである。この会社こそ、今を時めく PRAKLA-SEISMOS 社の前身である。その後、ミントロップはアメリカにわたり、

* 東海大学海洋学部教授 Tokai University

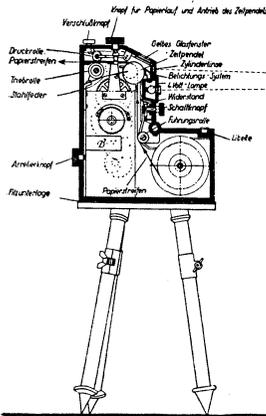
テキサスで人工地震により岩塩ドームを発見した。これが人工地震の石油探査のはじまりであった。

筆者は今を去る10年前、SEISMOSを訪れた折に、ミントロップの後継者のシュロイゼーネル教授から直接、そのミントロップがはじめて作った地震計をみせてもらったが(第1図)、わずかのショックによつてそのミラーのふれるのを見て、感激し襟を正したものである。

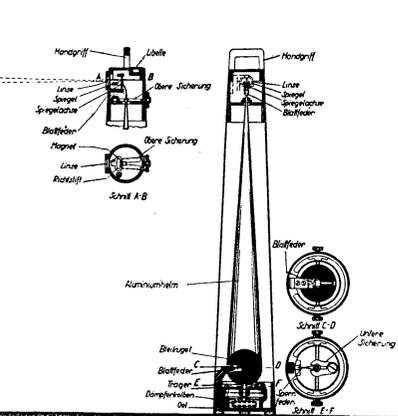
屈折法というのは、地下が弾性および密度の異なる層から成る場合、その境界面において光の波と同じように波動が屈折する。その臨界屈折波を

記録して、それから地下構造を計算する方法である。仮に地下に、地表に平行なこのような不連続面があり、上層より下層中の弾性波のつたわる速度が大きい時を考えてみよう。このような場合には第2図に示すように、横軸に爆発点から受振点への距離 x をとり、縦軸に人工地震波が各受振点までとどくに要する時間をとつてみると、(このような図を走時曲線という) ある爆発—受振点間距離(ここでは x_0)より遠くでは、直接波の初動Aよりも、下層をもぐつて伝播し到着した地震波の初動Bの方が先に受振器にとどくことになる。丁度、リレーをしている時、円形のトラックの外側

Lichtschreiber
(Photogr. Registrierapparat)

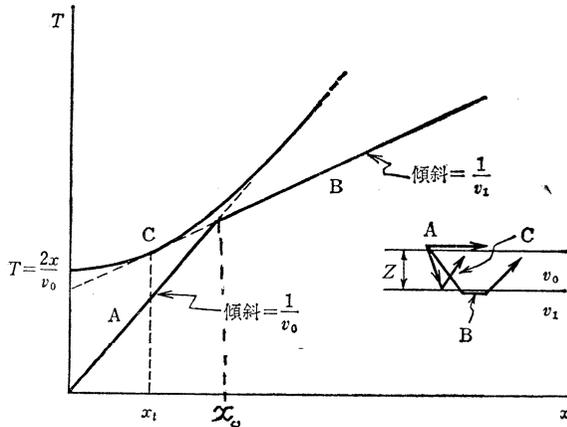


Feldseismograph
(Vertikalschreiber)



First refraction seismic equipment

第1図 ミントロップのつくつた最初の地震計



第2図 屈折、反射の定時曲線

を走つても、速い選手なら先にゴールに達するようなものである。この x_0 の位置は、上下の層の速度や、層の厚さに関係する量であるが、たとえば層が厚いほど、 x_0 は遠い距離になるし、また速度が大きいほど走時の傾きが大きくなっていく。このような関係から層の境界面の深さを屈折で計算することができる。また水平層ばかりでなく、境界面が傾斜していても、いくつかの層があつても、あるいは断層等があつても地下構造を屈折法で推算することはできるのである。

ところで話を元へ戻そう。時間がすこし前にさかのぼるが、ミントロップがこのような人工地震計をつくっていた頃、すこしはちがうが類似の自然地震計を用いて、1909年、ユーゴスラビアのザグレブ気象観測所のモホロビッチは、当時はまだ不完全であつた地震観測によつて、地下の地震波の伝わり方から、地下数10キロメートルのところに、一つの境界面があるはずだと予測したのであつた。これはまた大へんな卓見で、これこそ今日の地殻（陸地では地表面から33キロ、海では海底から6キロメートルの厚さをもつ）の存在を云いあてていたのである。そして後にこの境界面はモホロビッチ境界面、またはモホ面とよばれるようになった。このように地震計は当時すでに、自然地震観測にも人工地震のスタートと時を同じくして地下の構造解明への火ぶたを切つたのである。

さて、その後の人工地震技術の発展は次第にめざましいものとなつてきた。1930年代になると真空管増幅器があらわれ、それを用いた人工地震の観測装置がつくられた。それによつて屈折法の他に新たに反射法が開発されることになつたのである。弱電技術の進歩が如何に関係のある分野での技術の発展に寄与したかを如実に物語っている。

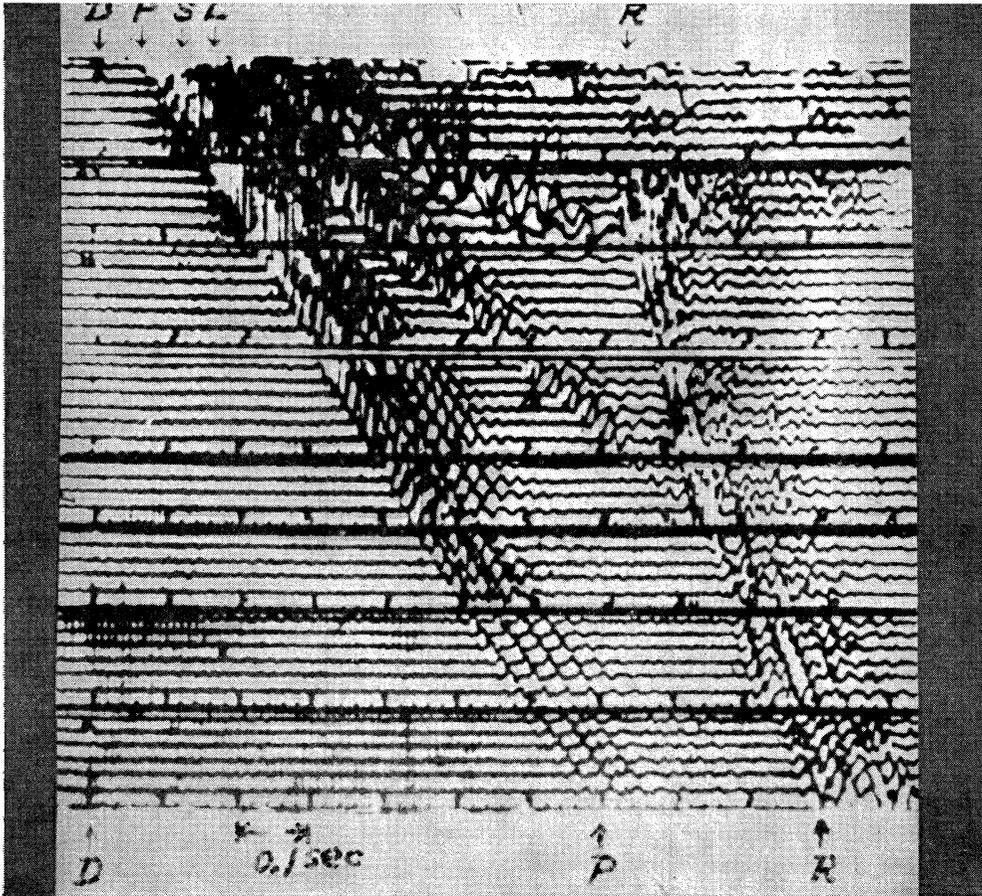
地下に地層の境界がある場合に、反射波は記録の上には第2図のCのようにあらわれる。すなわち反射波は、屈折法の場合とことなり、初動につづいておこるいろいろの振動の中で、地下の地層からの反射波を見付け出さなくてはならない。そのためにいろいろの弱電回路を使う。たとえば、大きな振幅をもつた波がくれば、すぐさま動作がはじまり、相続く振動を急激に減衰させる、いわ

ゆる A.V.C. とか、とり出したい周波数をもつた波を大きくあらわすフィルターなどの回路を組みこむ。

こうすることによつて反射波をとり出すことが一応できるようになつたが、ここで人工地震の一般的な器械についてひとことふれておこう。それは受振器→増幅器→記録器からできている。火薬爆発によつて生じた波動は、地下を伝播して受振器に到達する。陸上の場合、受振器はふつう可動コイル型で、地下からの機械的な振動を電気的な振動に変換する。この機械的振動の振幅は数マイクロン程度のものであるから、これを増幅器の中で大きくする。そこには上記の A.V.C. やフィルターなどの回路が組みこまれている。ここから出てくる電氣的振動が、オシログラフの装置してある記録器で、ふたたび機械的振動に変換されて、プロマイドやフィルムに記録されるのである。

このようにして得られた記録の一例を第3図に示した。これは埋くつの上では全く第2図に対応するものである。爆源から左、右のちがいはあるが、これは対称的なものであるからさしつかえはない。両図を比較してみると、その間の事情がよく分るであろう。なお第3図の記録はふつうの波形であるが、後出のものには波形をよくみると、ふつうの波形とすこしちがつているものがでてくる。これは記録を見やすくするために、最後にオシログラフの振れをプロマイドに記録させる段階で、光電管を使うとか、いろいろの方法で波形を強調することをやるのである。なお第3図の横軸の一本一本が、いくつも地面にならべたそれぞれの受振点に相当する。各受振点では反射波等を強く浮び出させるために、一カ所にふつう数個から10個以上も受振器をグループにして設置する。また爆発点でも反射に利きのよい爆発の仕方をする。

ところで、このようなやり方でよい記録をとるためには現地でいろいろの苦勞がいつたのである。たとえば、新しい場所について人工地震をやる場合、そこではどの程度の A.V.C. を使えばよいか、また反射波はどんな卓越周期をもっているか、それらを知るには1回や2回の実験では分らない。そのため爆発をくり返す。そうすると、数回の爆発で、爆発井戸もいたんできて、爆発条件



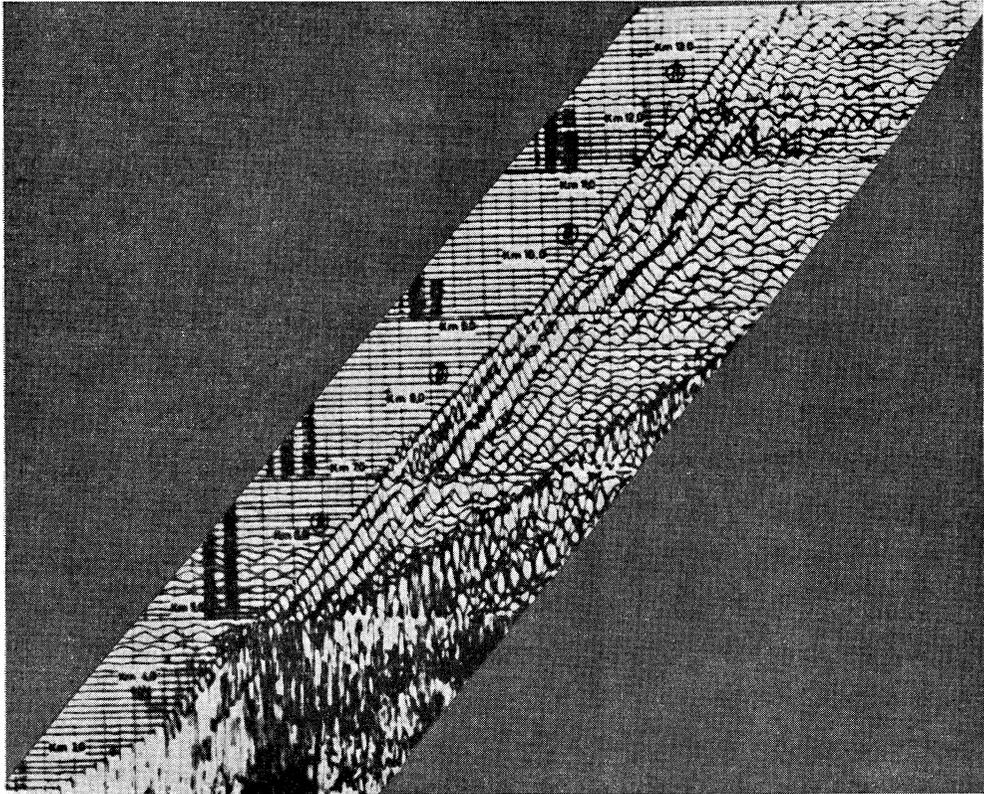
第3図(1) 直接波, 反射波の記録
 D……爆破時刻
 P……直接(P波)波初動
 S……同 (S波)波初動
 R……反射波初動

が変り, 同じ地震波動を発生することが困難となる。またこれら作業のため, 人件費, 爆薬代もかさんでくる。

第二次世界大戦が終つて数年たった1950年ごろから, 人工地震の記録技術に基本的な変革がアメリカによつてなされた。それは磁気録音テープの方式を導入したことである。これは, 1950年代中頃には実用化に発展し, 世界中の人工地震記録の半数はこの方式にきりかえられた。そして, その後, トランジスタの発展と共に, 人工地震の器械はトランジスタライズされ, 小型となり, 性能も

よくなつてきた。そして, これらを使用することで, 種々の総合解析器およびその技術も発展してきた。さらに, 今日では人工地震のみならず, 自然地震の観測の地震計にもひろく, この磁気録音方式が採用されている。

磁気録音方式では, 地下からくるあらゆる高周波, 低周波の振動を幅の広いフィルターで一旦テープに記録し, それを再生する際にシャープフィルター, A.V.C. 倍率等をかえて, 何回かくり返し, 希望する記録が得られるのである。実際の例を第4図(1), (2)に示した。(1)は Jakosky の



第3図(2) 爆源より上方へ直接波、屈折波、波中に直接波の延長も見える

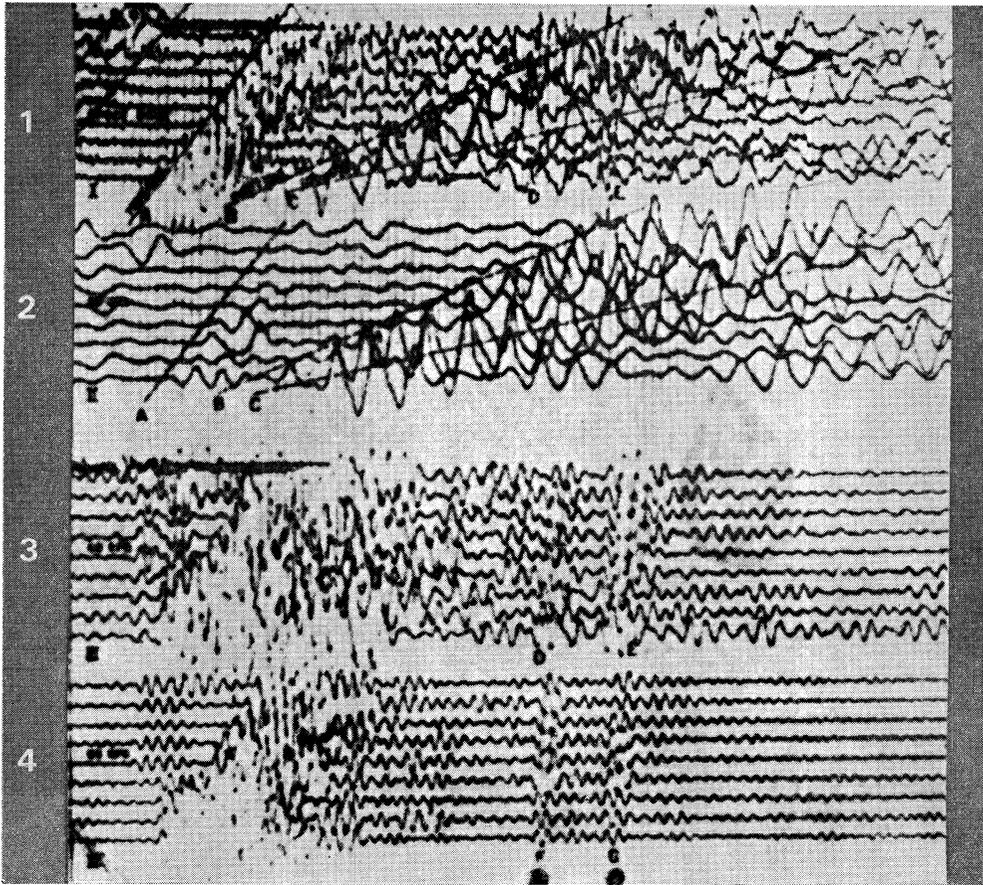
(2) は PRAKLA-SEISMOS による。

(1) の一番上の記録は、周波数幅の広いフィルターを使った自然のままの録音を、そのままの幅の広いフィルターで再生記録させたものである。9個の受振点で受け、横軸は時間に相当している。一本一本のたて線の間隔は1/100秒に当る。初動はこれからでも見分けはつくが、その他、いろいろの波動が重なり合わさっていて、これからは判別できない。そこで、次にまず低い周波数の波だけを透すようなフィルターをかけてみると、上から二番目のような記録が得られる。これは音波や表面波などである。これをみれば分るように、初動のような高周波は姿を消している。それでは次に今の反対に高い周波数だけを透すようなフィルターをかけてみたのが第三番目の記録である。このままでは見にくい、それに適当な A.V.C. をかけてみると、一番下の記録が得られる。ここ

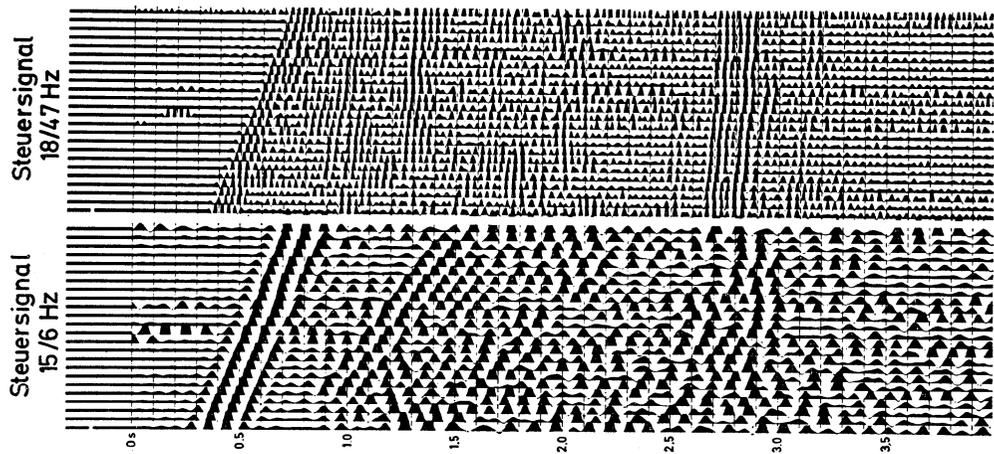
で●印をした二つの相が反射波をあらわしているが、実にこの方式のみごとさを物語っている。

(2) の記録は低周波と高周波により、如何に別の情報が得られるかを示している。最近ではデジタル方式で、記録紙からはみ出すような大きな波でも忠実に記録される。

陸上の人工地震の技術が発展してくると、次には海の上でもそれが実施されるようになってきた。はじめの中はやはり屈折法からはじまった。それは今から30年ばかり前、第二次世界大戦のはじまった頃であった。当時はまだエネルギー源として、日本では石油以外に石炭が大きな幅を利かしていた。九州の有明海や山口県の宇部沖で盛んに海(湾)底下の炭田地質解明のための人工地震が行なわれ、これは戦後も数年の間つづいた。それと共に、金属、非金属の鉄山や、関門トンネル工事のための基礎調査として、またダム、橋梁等



第4図(1) テープレコーダーの役割を示す記録 (ジャコスキーによる)



第4図(2) フィルターの作用 (PRAKLA-SEIRMOS による)

一般の土木工事等のためにも人工地震の屈折法は利用された。

その当時の日本の人工地震の揺籃期のことを少しふり返ってみよう。地震学では世界でも一流の活動をつづけてきたわが国でも、人工地震の方は初期にはあまり派手ではなかった。地下構造が複雑なこともあつたろうし、業界面の後押しもすくなかつたこと、さらには今日とちがって技術面が軽くみられていたこともあつたであろう。とも角、昭和10年頃までは、もつぱら東京大学、京都大学、地質調査所の人々によつて人工地震の研究や実験がほそぼそと、しかし今日考えてみれば、今日の繁栄の基礎が一步一步なされていた。

詳細は略するが、今はすでに故人となられた今村明恒、青山秀三郎、石本巳四雄、波江野清蔵等の諸先生、それに現存では那須信治、松沢武雄、佐々憲三、萩原尊礼、表俊一郎、林一、岩津潤等の諸先生によつて初期の頃の基盤がきづかれたのであつた。中でもラジオ地震計をつくられた地質調査所の波江野先生は、第二次世界大戦の最中、昭和17年(1942年)の暮れにシンガポールにおいて戦死された。それがキッカケで私ごとで恐縮であるが、その三カ月後筆者は、宮部直巳先生と故淵田隆門先生の御推薦で地質調査所に招かれた。そしてそれから今日までの30年におよぶ人工地震の研究生活が始まつたのである。この意味からも筆者には故波江野先生への敬慕措くあたわざるものがある。

この頃、研究と平行して実際面の方も着々と進行をはじめていた。昭和14年(1939年)、日本鉱業株式会社は、ハイランド反射地震探鉱器を輸入し、油田の反射法探鉱に先べんをつけたが、その後、その油業部は1942年分離して、帝国石油株式会社に吸収され、さらに1955年、物理探鉱部門は石油資源開発株式会社に移り、その後、数年前、石油開発公団の発足と共に新たに石油資源開発株式会社において石油のための地震探査が大きくすすめられている。わが国では石油公団、石油資源のほか、三菱石油、日本鉱業、帝国石油、出光興産、アラビア石油、西日本石油各株式会社において人工地震が、国内のみならず国外においてもすすめられている。

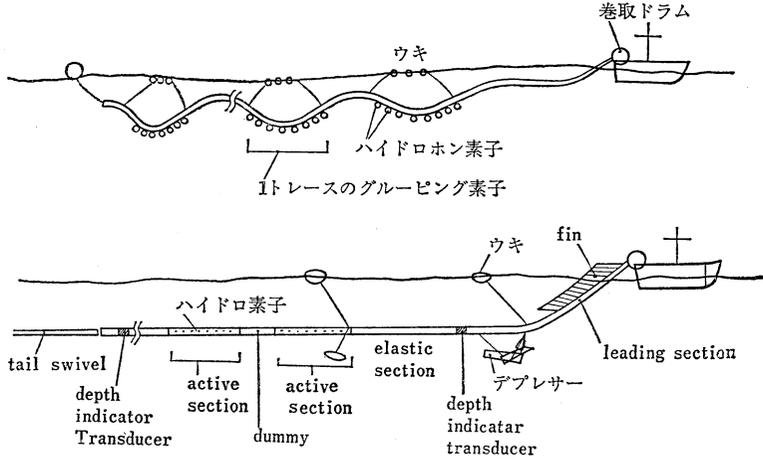
ところで、その初期の頃、相前後して、1942年、渡辺貫博士によつて日本ではじめての日本物理探鉱株式会社が設立され、主として土木関係の人工地震がはじめられ、その後種々の方法を取り入れ、同社は今日も盛んに活躍している。その後、日本国土開発株式会社、応用地質調査事務所、さらに最近では多くのコンサルタント会社等が誕生し、人工地震が盛んに実施されている。

土木方面の人工地震の利用については、上記の各物理探鉱会社の他に、中央電力技術研究所においてダム調査が、また鉄道技術研究所においては、青函連絡トンネルしらべのための海の人工地震など、鉄道工事に関係のある調査が進められてきた。

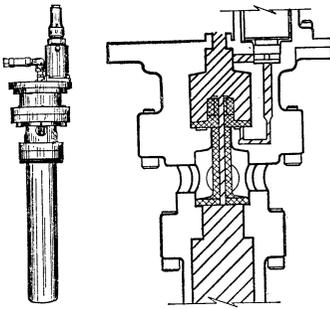
石炭については、先程も一寸ふれたが、宇部興産、三井鉱山、三菱鉱山、日鉄鉱業等の株式会社がそれぞれ海底炭田の調査を目的とする地震探鉱班が設けられ、活躍している。金属、非金属鉱山でもそれぞれ地震探鉱器をもち、活発に調査が行なわれている。

ここで話を海の反射法にもどそう。上にものべたように、はじめは海でも屈折法であつたものが、今から25年ばかり前、終戦直後から、反射法がはじまつた。そして受振器をいくつもある間隔をおいてパイプに入れ、それを船に曳航させながら記録をとるフローティングケーブルやストリーマーカーケーブルの方法などが進んだ(第5図)。その後、今から12、3年前から爆源として火薬を使用しない。いわゆる非爆源の方法によつて、連続した記録断面(音響測深機と類似の)をつくる人工地震の新しいやり方が行なわれるようになった。これらのエネルギー源としては放電(スパーク)、プロパンと酸素などの混合物に着火させるガスの爆発、振幅一定の周波数変調によるFM発震のバイプロサイス、圧縮空気を用いる空気放出(エアガン)などであるが、これらの方法では、ふつうの火薬爆発とちがいで、いずれも漁類に被害を及ぼさない。最後のエアガンによる方法が実施されたのは、今からやつと7、8年前のことである。

エアガンの理くつを示す図を第6図に掲げておいた。その原理は高圧力で圧縮した空気を水の中



第5図 フローティングケーブルとストリーマーカーケーブル



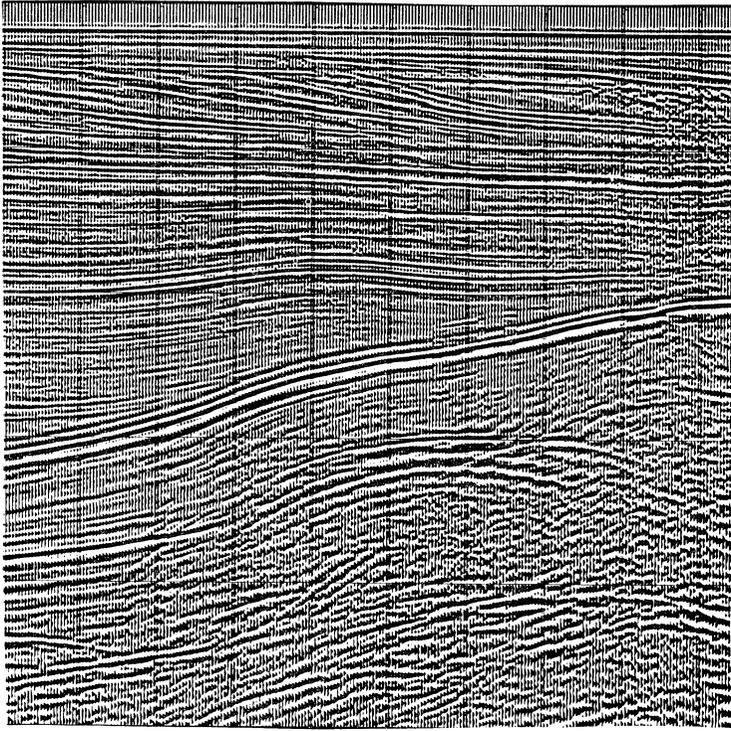
第6図

エアガンの外観図 (GILES による) (左)
 ガンの頂部の断面図 (GILES による) (右)

で曳航するチャンパーの中に満たし、トリガー信号にしたがい、これを急激に放出して音波を発生する。これが原理である。機器は高压空気をつくるコンプレッサー(船上のデッキに設置する)と、水中曳航のエアガンの本体(第6図)(エアホースとトリガー信号付き)等からなっている。エアコンプレッサーでは150気圧/cm²程度の圧力の空気をつくる。

第6図左はエアガンの外観で、同図右はその中味である。船上のコンプレッサーからの高压空気をエアホースを通じてエアガン本体に運搬するが、同図一番上には、エアホースにつなぐ部分と電磁弁が出ている。この弁を通った高压空気はチャンパー(同図下部)を満たしてゆく。そしてチ

エンパーばいになってからトリガー信号がくると、電磁弁が開いて、チャンパー内の高压空気は一きよに海水中に放出されて音波を発生する。同図中央部分にはこの空気を放出する穴があいている。一方、高压の空気の一部を弁によつてわずか5気圧/cm²程度の低圧力にしておく。これはガンの発振直後、ピストンを復元し、またトリガーしたりするため使われている。エアガンのチャンパーは交換でき、その大きさは、1立方インチ(16ml)から2000立方インチ(30l)までいろいろある。大きな出力を要する発振には、容量を大きくするだけでなく、いろいろの容量のものを並列に使い、周波数特性が全体として広くなるようにする。つまり、爆薬使用と用じような波形も出せる。エアガンによる記録の一例を第7図に示した。今日では海底の石油探査には広く使われている。一方、非爆薬源でなく、ごく少量の火薬を最も効果的に使用する方法がフランスで開発された。それは第8図のように、ごくわずかの火薬を、次々とほとんど連続的に船尾から水中に引っぱった沢山の孔のあいた鉄製のカゴ(水中での爆破によるくり返し振動、つまり気泡影響を防ぎ、地下の反射有効エネルギーを増すため)の中で爆発させるやり方である。これによつて漁類への被害はなく、深い構造が得られるもので、ケージシューティング(Cageshooting)とよばれ、製品名はFlexotirといわれている。記録の一例を第9



第7図 エア、ガン記録の一例 (Western Geophys. Co による)

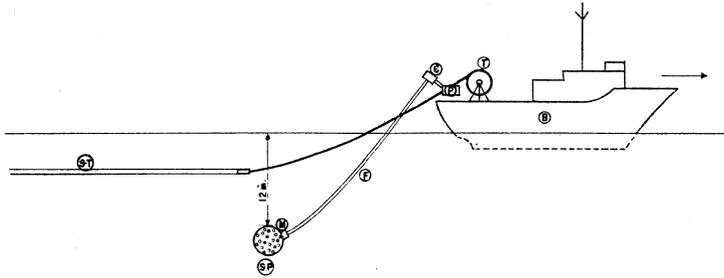
図に示した。なお、最近、アメリカでは、この場合、火薬の代りにエアガンを装置したものもあらわれた。今日では、電子計算機の急激な発展にともない、記録をアナログからデジタル化し、計算機によるデータ処理の際に、特殊なソフトウェアを用いて、フィルタリングによつて質的には邪魔ものとなる雑音や、重複反射(海面と海底、あるいは地層間同士の)を除き、また量的には大量の記録処理ができるようになった。また現地で記録をとる際にも、受振器のおき方で、地下の反射記録をある部分ずつを重ねてとれるようにする重合の方法など、いろいろと反射法については高度の技術が行なわれるようになった。

以上のべてきた海の反射法はもつぱら石油探査など海底下3~4キロメートル程度の構造を出すに適した方法である。これに対して、地殻構造解明のための人工地震には遠距離屈折法というべきものが行なわれている。これをのべる前にそれに対応する陸上における人工地震についてしるして

おこう。

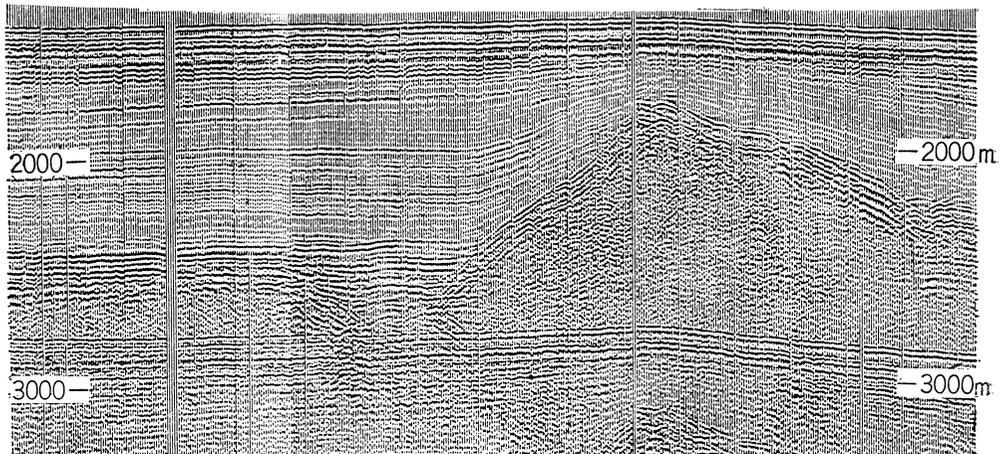
今次世界大戦において、ドイツは終戦直後、1947年ぼう大な量の火薬の処理に困つた。そこで北海のヘリゴランド島において4,000トンもの大量の火薬を爆発させた。この時には、方々の国々にあらかじめこのことを知らせておき、ドイツからスイス、さらにイタリアの南方まで受振器を配置しておき、この実験を行なつたのである。この結果、アルプスの地下40キロメートル近くの地殻、マンツルのいわゆるモホ境界面の追跡ができたほか、低速度層の存在(これはマグマなどとも密接な関係のある)も確められたのである。この大きな成功が元となつて、爆薬量はこれよりずつとすくないが、数トン程度の火薬爆発によつて、地殻内部やモホ面までの地下構造をしらべることが盛んになつてきた。アメリカ、ソ連、ドイツ、イギリス、アイスランド、ニュージランド等と共に、わが国でもはじめてからすでに20余年になる。

"CAGE SHOOTING"



- B - Recording boat
- T - Cable winch
- ST - Streamer (1 to 24 traces)
- SP - Sphere
- F - Rubber hose
- M - Firing device
- C - Loading head
- P - Pump

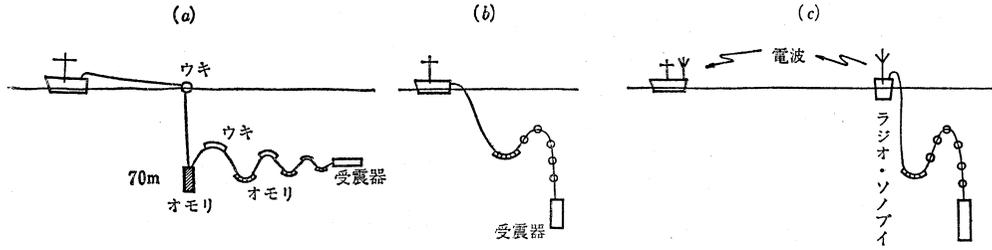
第8図 Flexotir の原理 (CGG による)



第9図 Flexotir の記録例 (CGG) (ビスケー湾における) 僅か 50 gr. の火薬で海底下 2~3 km まで記録できる

わが国では、この陸上の遠距離屈折法がはじめて行なわれたのは1950年で、岩手県の石淵においてダム工事の採石爆破を利用して実施された。ヘリゴランドの2年後である。それ以来、わが国の

爆破地震動研究グループによつて共同研究の形で、北海道、東北、関東、中部、近畿、中国各地方において行なわれた。とくに近年には、国際地球内部開発 (UMP) の機会を利用して、すでに現在ま



第10図 遠距離屈折法の受震器の支持

で30数回にわたって実施されている。

ところで、一般に海においては火薬の利きがよく200キログラムから場合によっては1トンぐらいまでの火薬を使つて、この種の研究が行なわれるようになった。話はもどるが、これが遠距離屈折法である。この方法では側線の長さも数10キロから300キロメートルぐらいになる。海上の遠距離屈折法では受振点で弱い屈折波をうけるので、海の雑音をさけるため、受振の時には船をとめて観測する。(先程のべたように探鉱目的の反射法の場合は、船を曳航しながら連続的に観測してゆくが)また海水と受振器の摩擦による雑音をすくなくするため、第10図のような方法が使われている。

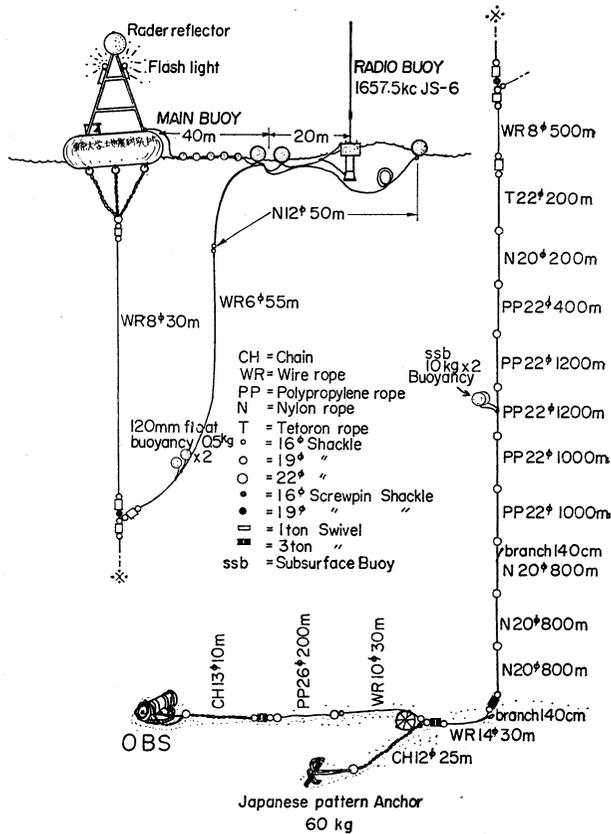
以上が地殻構造、モホ面等の研究のための海の遠距離屈折法であるが、この目的のための反射法としてはサイスマック・プラフィーラがある。これは最初 J. I. EWING 博士(1961年)(M. EWINGの弟)がつくつたが、現在世界中にゆきわたっている。はじめは TNT 火薬の1/4ポンドずつを約3分ごとに水中で爆破するやり方であったが、後(1964年)、火薬の代りにエアガンを用い、くり返しは数秒ごととなり、大へんな進歩を示した。

海洋における遠距離屈折法は、わが国では永年要望されていたが、種々の理由でアメリカ、ソ連、イギリスより出足がおくれた。しかし、1963年、アメリカの M. EWING 教授と日本の坪井忠二教授により、日米科学協力の一環としてはじめてられて以来、アメリカ側では J. I. EWING, W. J. LUDWIG, 日本側では村内、田、堀田、浅野博士らによつて研究が行なわれてきた。近年には、陸上同様、UMP 利用により活発に実施されている。また日ソの共同観測も機がみのり、最近では

北海道の東南、北西沿岸で実施されるようになってきた。これらの結果、日本海、日本海溝、天皇海山、シャッキライズ等を含む北西太平洋、また沖縄からフィリピン海に至る海域、さらにマリアナからカロリン海盆などの海底下の地殻、上部マントルの様子が次第に明瞭になってきた。また、両極観測の機会に、ラモント型のサイスマック・プラフィーラの装置が堀田、村内博士らによつて開発され、南極への往復航海中の他、日本近海でも遠距離屈折法とともに盛んに行なわれるようになった。なお、最近では海底に地震計を設置して自然地震を、あるいは人工地震を観測する方法が南雲昭三郎教授(東大)や小平平八郎講師(東海大)らによつて確立された(第11図)。

さて、ここで目を転じて室内実験について考えてみよう。野外において人工地震を実施する場合、屈折法では走時曲線の傾きから一応、地下をつたわってくる地震波速度を知ることができるが、地下構造が複雑で、たとえば、地層の境界が傾斜している場合には、見掛けの速度しか得られない。また反射法においては、あらかじめ速度の見当をつけてかからなければならない。このためには小規模な屈折や、直接井戸の中の地震波速度を測定して深さに対する速度の増しを知っておかなければならない。このことはすでに実施されているが、それにしても、これらのことを考えると、あらかじめ露頭、あるいは井戸の中の岩石のコーサンプルを使つて、その中を伝わる地震波(弾性波)速度を知っておくことが必要である。

これには、サンプルを振動させて与える振動とその共振とにより調べる方法(名大の飯田教授のもの)もあり、またサンプルの一端に超音波の振動を与え、他端に受振器をくつつけてサンプル両端間を



第11図 海底地震計の略図(南雲, 長谷川, 是沢, 小林により) えりも崎付近の600mの海底で設置した時の状態

左上部分は海上に浮かせたブイ(地震計の場所を知らせる)で左中部から右上部分につながる。そして最後に左下部に見えるOBSが海底地震計本体である。下の中央部の海底のアンカーは地震計に途中のワイヤーの振動をつたえないためのものである。

走る超音波の時間を測る方法(南雲教授や東北大の高木教授らの)がよく用いられている。この原理を用いて、モデル的な地下構造をプラスチックなどで作って、実験することもできる。

以上、海の人工地震についてのべたが、前半のおしまいに補足的なことを二つ加えておこう。一つは人工地震のくり返しの話であり、今一つは地熱に関するものである。

大きな自然の地震のおこるところをはさんで、両側に爆発点、受振点をおき、その場所をかえな

いで、永い年月にわたって人工地震を時間的にくり返し、何度も実施するやり方である。もし地下に弾性的な変化がおこれば、歪みがたくわえられ地震波の速度などにも変化が考えられるので、それを通じて、地殻またはマントル上部の岩石、地層中に歪みエネルギーの蓄積および発散、解除がしらべられる可能性がある。この考えは筆者が20年余り前、当時の自然地震の観測データでしらべたことがあるが、精度の問題でその後中止していた。しかし、人工地震を用いれば、与える振動の大きさ、場所、時間等に精度の上で非常に信用がおけるので、ここ数年前から、地震予知計画の一環として取りあげられ、地質調査所(飯塚進技官らによる)が中心となり、東大震研、防災センター等協力して目下、毎年、大島で爆破を行ない、相模湾や東京湾、駿河湾をまたいで多くの受振点をつくり、継続実施中である。息の永い仕事であるが、ぜひ成功させたいものである。

以上の利用方法のほかに、最近は地熱地帯での地下構造をしらべるのにも、人工地震は一役買っている。地下の熱源(マグマ溜りに関係する)をしらべることは今迄、大へんむずかしいことであつたが、筆者は東大

の竹内均教授や石井吉徳助教授の協力を得て、特殊なソフトウェアの開発利用により、地下4~5キロメートルの熱源の情報を反射法により得ることができた(図面は後出)。

II 人工地震の実例

爆源から地震波が発生して、それが地下を伝わってゆく時、爆源からの距離(r)が大きくなるにしたがい、振幅(I)は減少してゆく。それは波があらゆる方向にひろがってゆくため、幾何学的に

エネルギーが r^2 に逆比例してへつてゆくことと、伝播進行途中で、内部摩擦により弾性エネルギーが熱エネルギーに変換して指数函数的にへつてゆくことによるのである。したがって結果として、

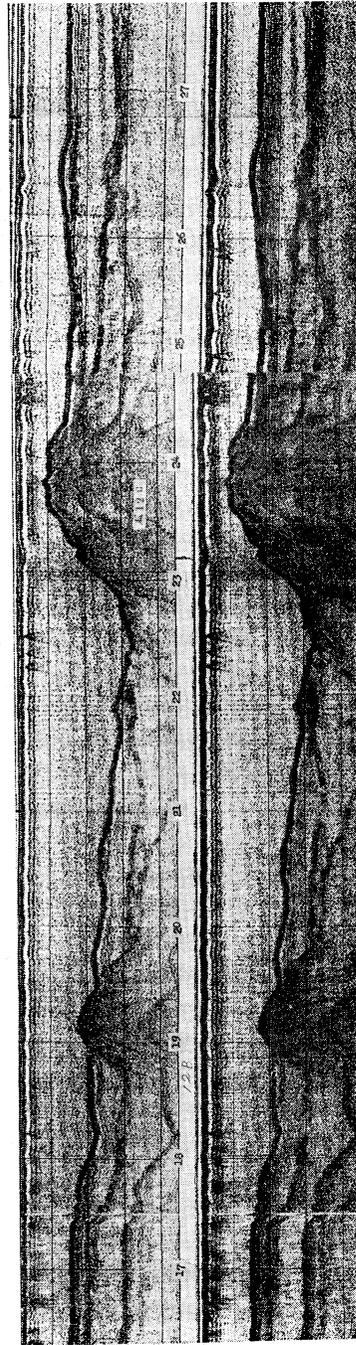
$$I = I_0 \frac{e^{-kr}}{r}$$

となる。ここに I_0 は爆源における波の振幅、 k は物質による常数で、周波数に比例する。一方、一般に地震波速度 v 、波長 λ と振動周波数の間には

$$v = f\lambda$$

という関係がある。自然地震や人工地震の周波数や音圧の範囲では、速度はある地層については一定と考えてよいので、低周波であれば波長が長くなり、高周波であれば波長が短くなる。したがってはじめの振幅—距離関係の式と組み合わせると、次のようなことがいえる。

はじめの振幅 I_0 が同じなら、自然地震のように周波数の低い地震波については、はじめの振幅の式から、地震波は震源から遠くまで、地殻からマントル、外核、内核、さらには地球の裏側までも、そして、ある波はそれら境界面から反射して、ふたたび地表の表面までも地震波は衰えることなく伝わる。しかし、皮肉なもので、波長と分解能は反比例するので、自然地震の場合は波長が長く、分解能はあまりよくない。ところが、人工地震やエアガン、スパーカーのように、周波数が次第に高くなるにつれて、波長の方は段々と短くなり、したがってきめ細かい地下の構造がしらべられるようになる代りに。はじめの振幅の式から分るように、ここにのべたような人工地震波をあまり深くまで浸透させることはできない。さらに波長が短くなった超音波を用いた音響測深儀の場合はどうであろうか。かりにその発振周波数が 15 kc ならば、水中音波の速度は 1.5 km/s であるから、その波長は 10 cm となり、楽に小さな魚の群れでもとらえることができる。漁探器が生まれたのもこのような原理にもとづく。さらに波長が短くなったものには探傷器などがある。しかし、波動の浸透という点からいえば、あきらかに音響測深儀や漁探器では、海底面



第12図 スパーカー記録例(大阪湾) フィルターをかえて記録したものと泉砂岩の構造があらわられている。海面から200メートル程度の深さ

以下に地震波は送りこめない。

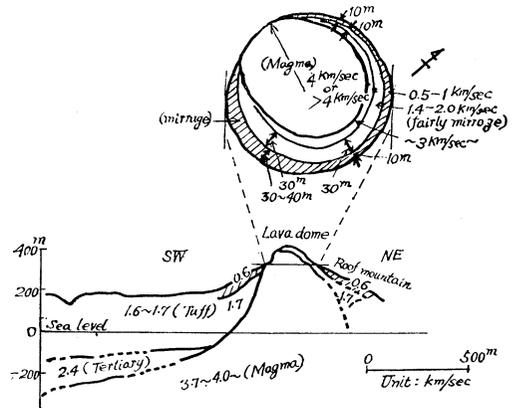
このようにしてしらべた地下構造の例を、波長の短い方から、つまり浅いところのきめの細かい構造から、次第に深いところのきめのあらい、モホ面よりすこし深いところぐらいの構造までのものを以下に示そう。

ここでは日本の例のほか、50周年を迎えたドイツの PRAKLA-SEISMOS の記念号の中からのを主にし、それにフランスの COMPAGNE GENERAL DE GEOPHYSIQUE で開発した Flexotir の記録などを紹介してゆこう。

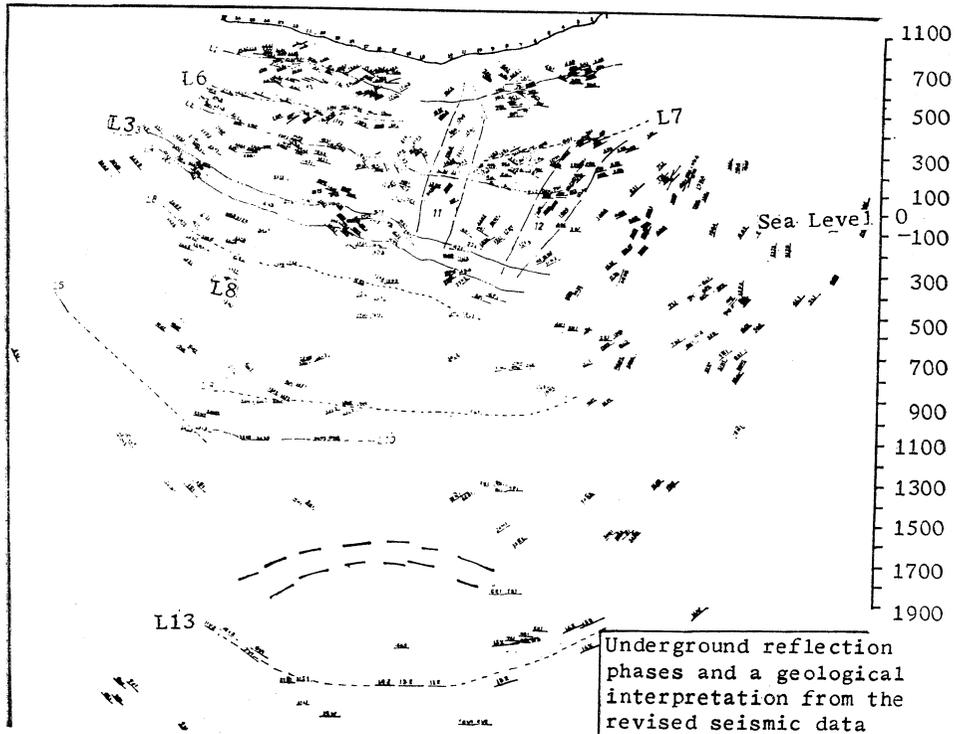
まず浅いところの例からはじめる。大阪湾で筆者らの行なつた音波探査断面の一つを第12図に示す。これは数100サイクルの周波数のもので、ふつうの出力では海面下数100メートルの調査に適している。(もつとも出力を大きくすれば、地下の弾性の状態によつては2キロメートル以上にも及ぼすことも可能である)したがって、ふつうは大都市沿岸あるいは臨海工業地帯の港湾、地盤、

橋梁等の基盤調査や湾、浅海底の浅い油田構造等を含めた地質探査等に適している。

ここで、火葉爆発による火山や地熱地帯の結果の例を示す。一つは、昭和新山における屈折と反射法(第13図)、今一つは、反射法による岩手県



第13図 昭和新山における人工地震断面

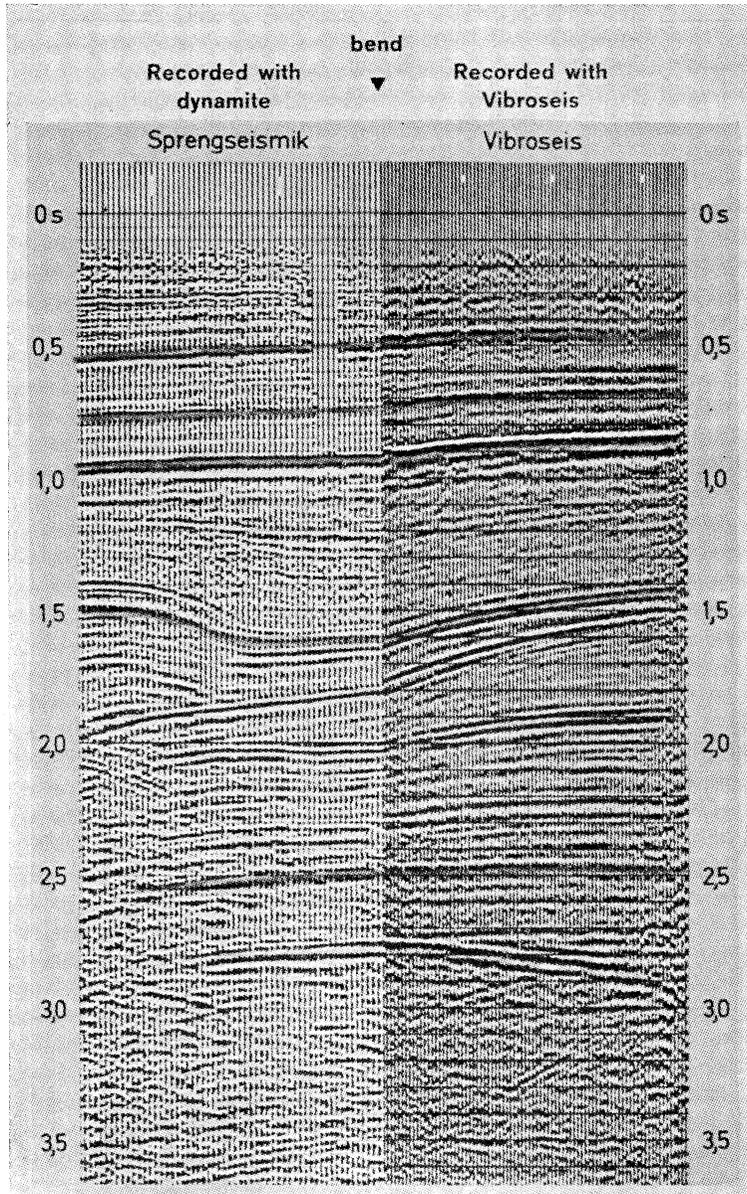


第14図 松川地熱地帯の地震断面図

の松川地熱地帯の構造である(第14図)。第13図からは、昭和新山の屋根山から地表面に突き出したドームの地下へのつながりの状態がこれによくみられる。一方、第14図には、現在2万キロワットの地熱発電の行なわれている松川地熱地帯の地表の帽岩から地下の熱水、蒸気の貯溜層、また第2

の帽岩、貯溜層と、地下深部から熱をもたらす断層などがみられる他、下部に点線のドーム状の部分があらわれているが、これは新しく開発されたソフトウェアを用いてあらわれたもので、地下数キロメートルのところの熱源と考えられる。

次にふつうの陸上の火薬爆発による方法と、バ

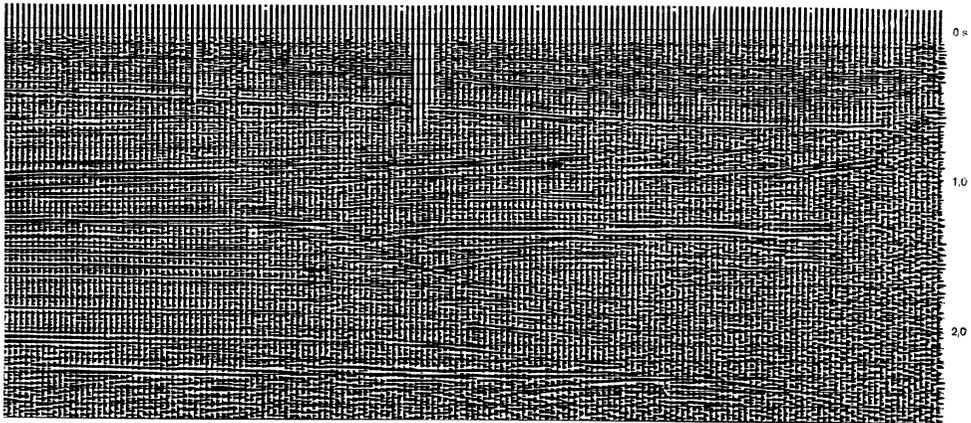


第15図 ダイナマイト(左)とバイブロサイス(右)との記録比較 (PRAKLA-SEISMOS による)

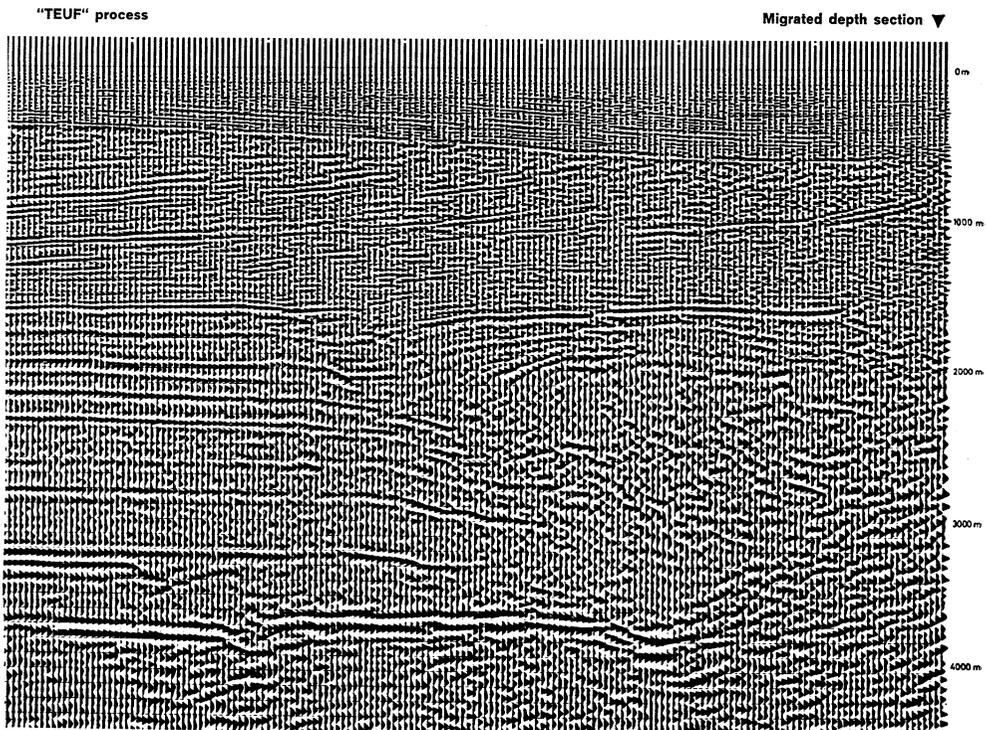
イブロサイスによる反射の記録の比較例 (PRAKLA-SEISMOS による) を第15図に示す。これを見ると、3秒、つまり3~4キロメートルの深度まで、後者の方法によつて、前者つまり火薬爆発に比して遜色のない記録がとれることがわかるであろう。

さて、ふつう人工地震で出てくる記録は時間断面であるが、これを地下の地震波速度を計算機に入れて、深さ断面にすることができる。これの一例を第16図 (PRAKLA-SEISMOS による) に示す。

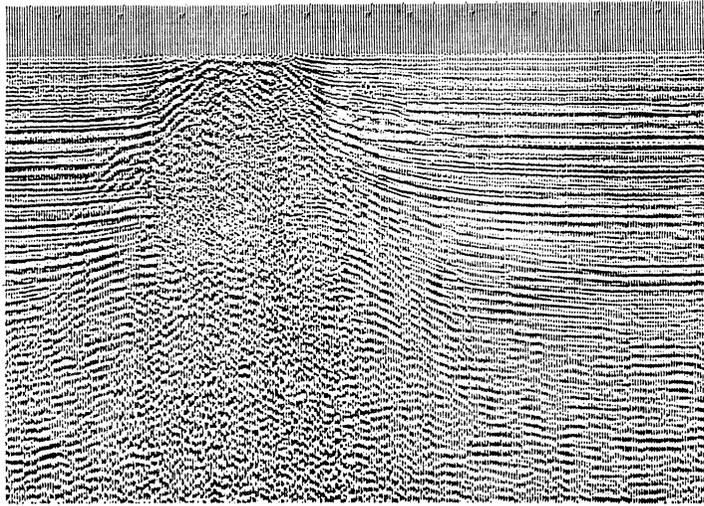
さて、次にはエアガン記録の一つを示しておこ



▲ Time section



第16図 時間断面 (上) と深さ断面 (下) との比較 (PRAKLA-SEISMOS による)



第17図 エアガン記録の一例 (Independent Exploration Co., Teledyne Co.)ルイジアナ沖海底下4 km 迄の記録。たてよこ同じスケールで水面より4キロメートルぐらいの深さになる

う(第17図)。これはアメリカのルイジアナ沖の海底下の断面記録である。岩塩ドームの海底下4キロメートル程度までの様子を知ることができる。

ここで、フランスの Flexotir による記録の例を第18図に示した。これは北海において行なわれた実験で、左側たて線は秒数で深さを示している。わずかに50ポンドの火薬で、海底下4キロメートルぐらいまでの構造が得られているのは注目値する。6重合と24重合の場合の比較がみられる。

最後に、モホ面よりすこし深いところまでの地下構造をみよう。ここにははじめの章にのべたように、日米で実施したもの(第19図)で、フィリピン海の海底下の構造をみるができる。これは屈折法によるものである。海の底ではモホ面が浅いといわれていたが、この結果は如実にそれを示している。最近、プレートテクトニクスの研究などにもこれら人工地震の結果が利用されている。

最近では、水素地下爆発等による地震波の観測からも、モホ面以深の構造がしらべられているがここには省略する。

以上で、簡単ではあるが、人工地震の話を終るが、最後に、上記のものとは性質はちがうが同じく人工地震という名でよばれるものにふれておこう。これは関係方面ではすでによく知られている

が、アメリカのデンバー東北のロッキー山のふもとで1962年に起こったことであるが、地上で使った水のやり場に困り、これを地下にするため、3700メートルの井戸を掘った。そして同年3月、地下への圧入を開始した。同月中に注入した水量は1万6000トンになる。ところが、4月になって井戸周辺で地震がおこりはじめた。その後も月2万トンずつの水を入れたが、その量に応じて地震が続発した。翌1963年9月末で水の注入を一応打ち切ったところ、翌月から地震の量は目立って減った。その後、再び同じような試みが翌1964年9月から1965年9月末まで行なわれたが、同じような地震現象があり、地震は翌月の11月からびつたり止った。この間に注入した水の量は60万トン近くにもなるが、地震の総数も700回にもなり、マグニチュードは最大4.3であつた。震央のひろがり半径10キロにもなり、震源深さも10乃至20キロメートルにもなつた。これは水を入れたため地下の断層面の圧力が解放されたためとされている。

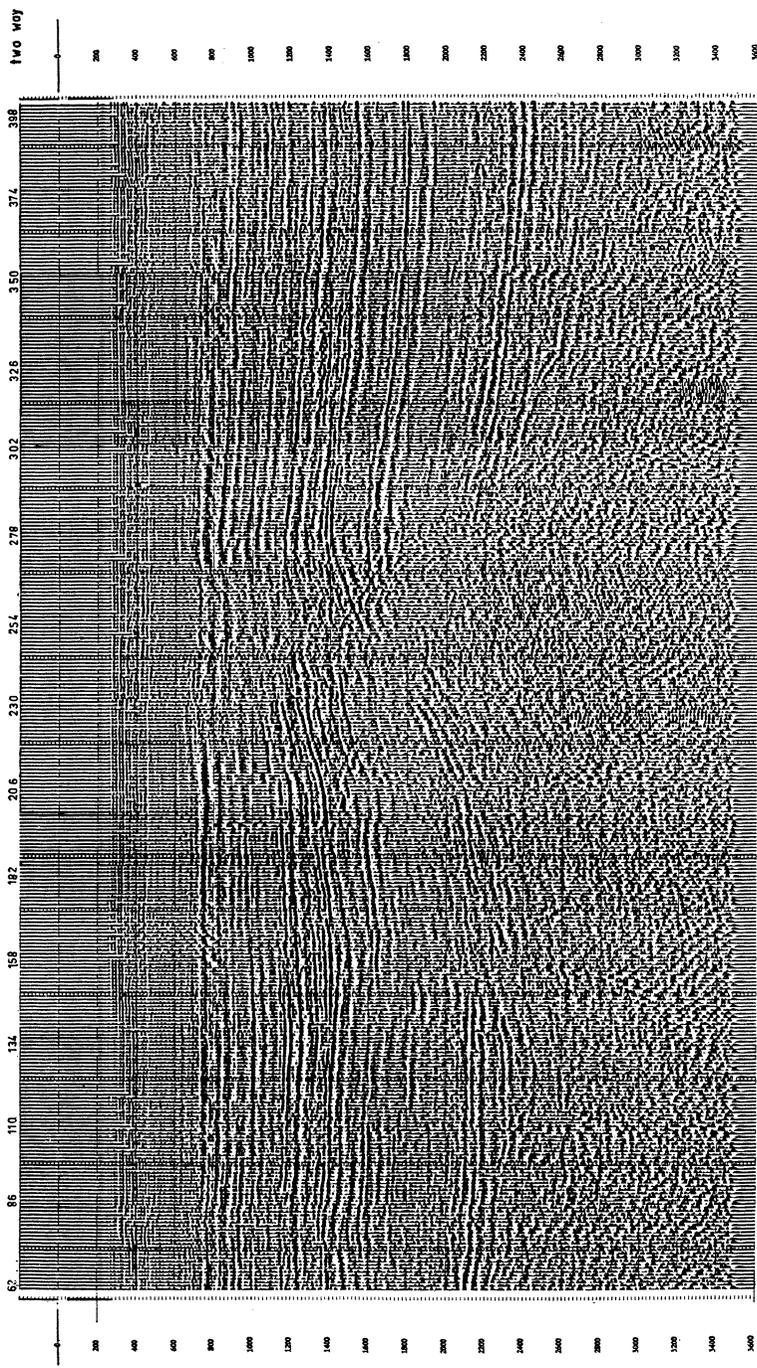
以上人工地震の役割についてのべたが短日時に稿をおこしたため、書き足りない点もあるが、何れそれらについては後日書いてみたい。最後にこの機会を与えられた編集委員会に感謝したい。

FLEXOTIR TEST NORTH SEA

6 traces (92 between traces)

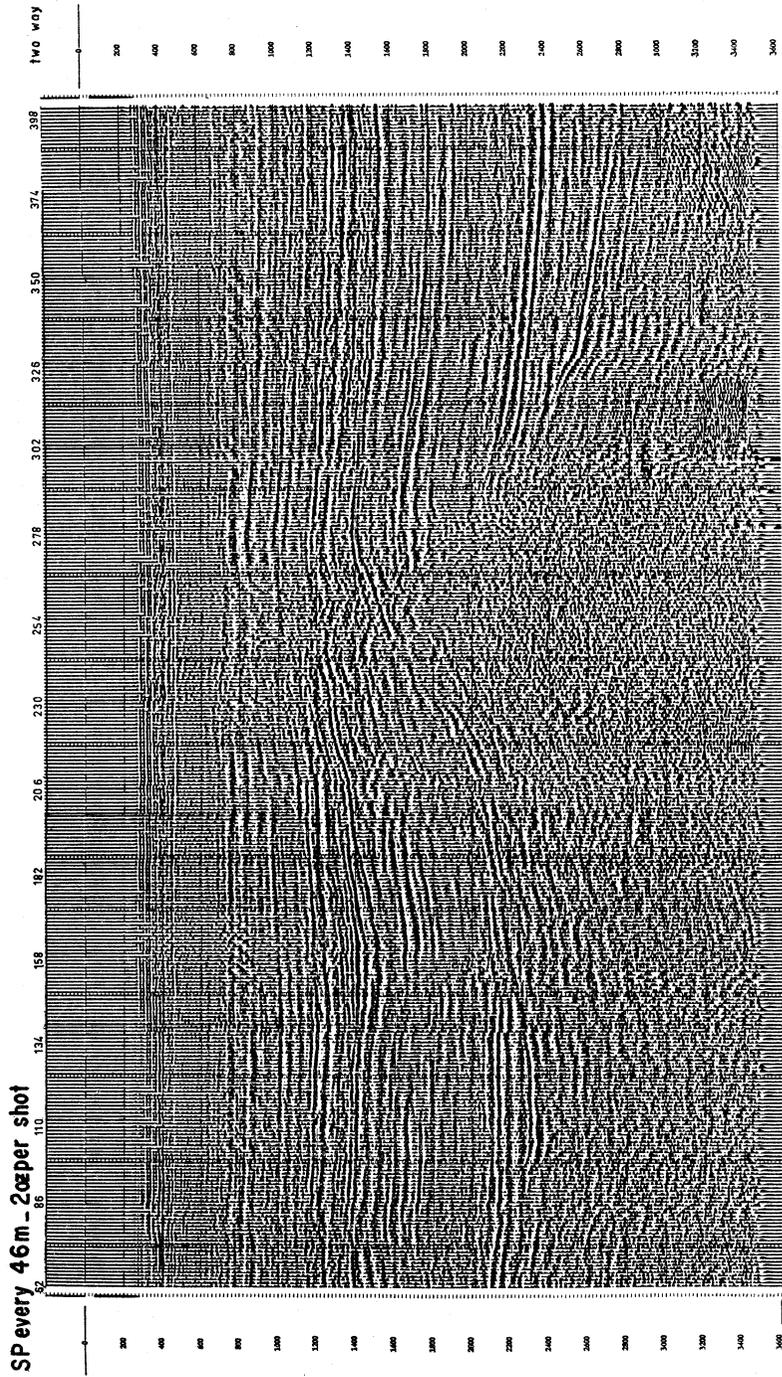
SP every 46m - 2oz per shot

6 fold stack, deconvolution after stack

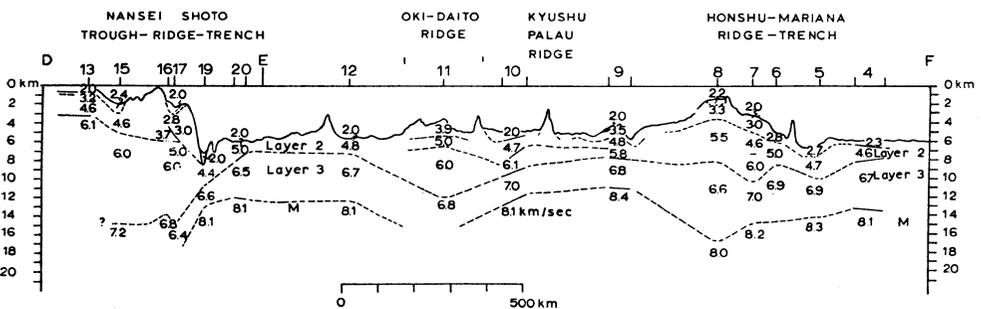
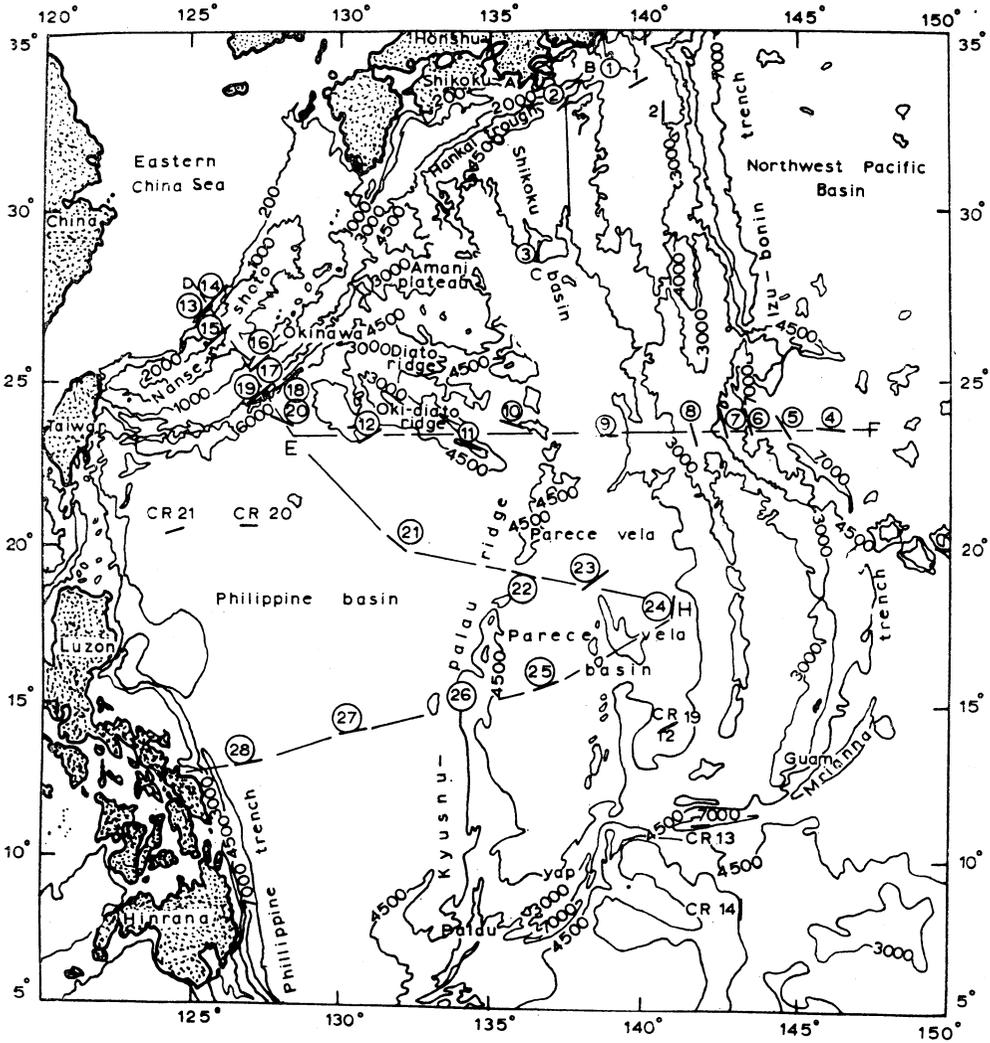


第18図 (1) Flexotir 記録例, 6 重分によるもの (CGG による)

FLEXOTIR TEST NORTH SEA
sireamer 2 200 m
24 traces
24 fold stack deconvolution after stack



第18図 (2) Flexotir 記録例, 24 重合によるもの (CGG による)



第19図 フィリピン海の地下構造 (村内らによる)

文 献

- 1) 早川正巳(1972) : 「物理探鉱」(改訂版).
ラティス刊
- 2) 中条純輔, 早川正巳 (1971) : 「海洋の物理探査技術」(海洋開発第三巻) 海洋開発センター.
- 3) 「物理探鉱10周年記念号」(1958) : (物理探鉱 (Vol. 11, No. 4) 物理探鉱技術協会.
- 4) 「最近における物理探鉱の進歩」(1968) : (物理探鉱20周年記念号) 物理探鉱技術協会.
- 5) 「PRAKLA-SEISMOS REPORT」(1971) : ハノーバー, PRAKLA-SEISMOS.
- 6) 「FLEXOTIR」(1970) : Compagne Générale de Géophysique
- 7) NAGUMO, S. (1970) : Ocean-bottom seismographic observation at the offside of Japan Trench near the Erimo Seamount—seismic activity of the oceanic lithosphere and velocity structure around the geophysical “Ocean-continent Boundary”, *Bull. Earthq. Res. Inst.* Vol. 48, 769-762.