

反射法地震探査による深部地殻探査

横倉 隆伸・宮崎 光旗 (地殻物理部)
Takanobu YOKOKURA・Teruki MIYAZAKI

1. はじめに

最近の宇宙科学の進歩に伴い、遠い宇宙空間の姿を高解像度で捉えることは、さほど困難でなくなってきた。例えば惑星探査機ボイジャーの伝送してきた外惑星およびその衛星の鮮明な写真は記憶に新しいところである。しかし、我々にとって最も身近にある地球の内部の姿を鮮明に捉えることは思いのほか難しい。我々にとって最も情報伝達量の多い媒体は光(電磁波)である。宇宙の姿を鮮明に捉えることが可能になった背景には、宇宙空間の場合まさにその光を利用することができたという事実がある。また伝送されたデータの質を高めるコンピュータ処理技術の向上も重要な要素となっている。

それにひきかえ地球の内部は、ごく一部を除いて光によってその姿を捉えることはできない。地球の中であっても海洋底の場合にはまだ比較的その姿を捉えやすい。第二次大戦中からの音響機器の発達により、その姿は段々と明らかになってきた。これは海洋という空間がほぼ均質な塩水からなり、音波を比較的減衰なしに透過させることができるためである。また光源を用意することによって未知の深海底でさえ写真やビデオで観測することもできる。しかし、不透明の岩石によって満たされた空間である大地の内部は、かたくなにその姿を見せようとはしなかった。このような観測の難易は、これら空間を構成している物質とその疎密の度合によっている。

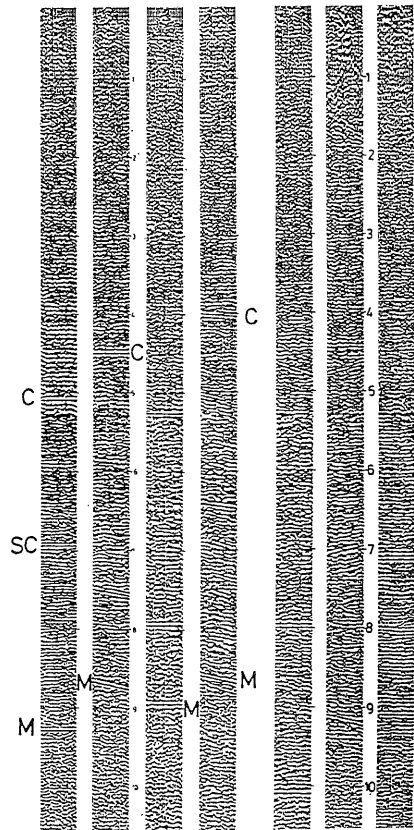
だからといって人間が手をこまねいていたわけではない。それどころか、月の裏側を見る以前に、また深海底の深さを知る以前に、既に地球の内部の構造を調べていた。その情報を運んだものは地震波である。もとより地震波は光に比して波長が長く、伝達する情報量が少ないため、大まかな地球内部の姿が得られるだけであった。しかし、最近の反射法地震探査技術およびデータ処理技術の進歩により、およそ100kmまでの深度の地殻構造がそれまでとは格段に異なる高分解能で得られるようになった。

そこで小論では、世界において行われている反射法による深部地殻探査のいくつかの例に基づき、どのような

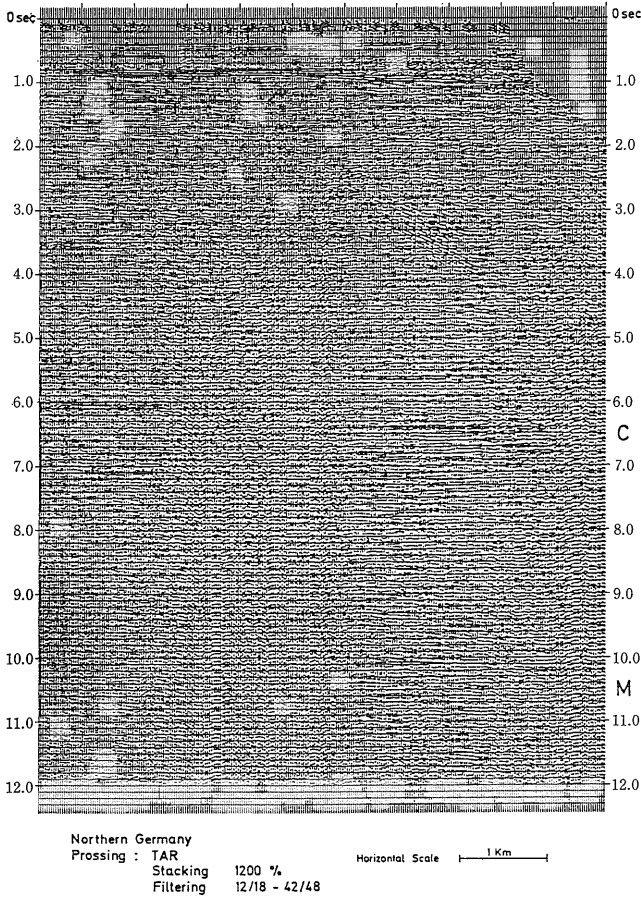
ことがどこまで分かって来たのかを概観したい。また日本におけるその可能性についても若干触れたい。なお深部地殻探査の中核である反射法地震探査の概要および詳細は解説書や教科書、例えば物理探査学会(編)(1989)やSheriff and Geldart (1983)等に譲り、小論では割愛する。

2. 深部地殻探査の歴史と各国の探査計画

反射法地震探査により地殻構造を探索する試みは1960



第1図 深部からの反射波の例。C・SC・Mを付された明瞭な反射波はそれぞれ、コンラッド・サブコンラッド・モホに対比されている。縦軸の数字は往復走時(s)。Dohr and Meissner (1975)による。



第2図 12重畳の反射記録断面の例。C・Mはコンラッド・モホに相当。縦軸は往復走時(s)。水平スケールは約6km. Dorh and Meissner (1975) による。

年代からヨーロッパを中心として北米・オーストラリアなどで盛んに行われて来た。その初期はダイナマイトを震源に用いた反射法でありかつチャンネル数も不十分なものであった。また特に東欧・ソ連では主に広角反射法と呼ばれる。ここでの主題とは少し異なる方法が行われていた。

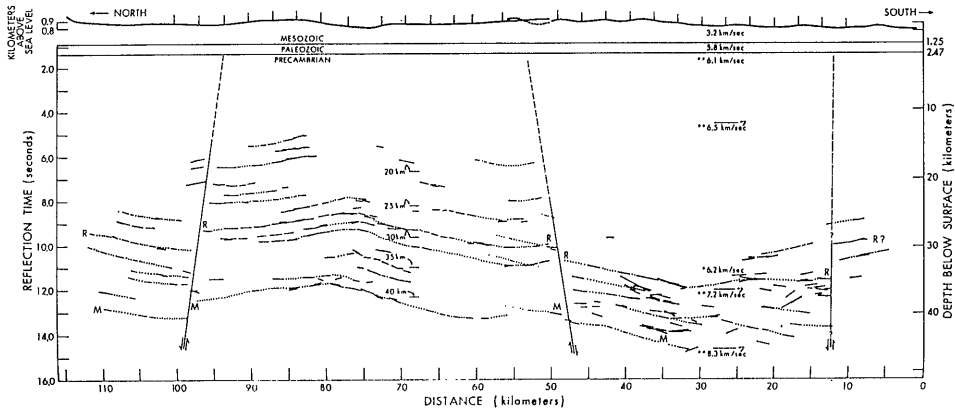
これらの中では西ドイツの Dohr Fucks Meissner らのグループの研究が興味深い。その結果は Dohr and Meissner (1975) にまとめられている。彼らは多年にわたりヨーロッパ各地の50以上もの地点で探査を行いそのうちのほとんどの地点で深部からの反射波を捉えることができた。その例を第1図に示す。これは重畳記録ではないがそれでもモホ面(M)・コンラッド面(C)・サブコンラッド面(SC)と思われる明瞭な反射波を捉えることができた。更に6kmの長さにおよぶ12重畳の反射記録断面も報告している(第2図)。図の5~7秒 8~10秒にいくつかの反射面群が見られる。これらはそれぞれコンラッド面・モホ面におそらく対応

するものと考えられる。

また北米では Robertson Kanasewich Clowes Cumming らのグループが研究を行っている(Robertson, 1963; Kanasewich et al., 1969; Cumming and Chandra, 1975)。これらの中で注目すべきことは明瞭とは言えないが Kanasewich et al. (1969) により地殻深部からマントル上部に到る断層の存在が浮かび上がってきたことである。彼らは反射記録を並べその反射波の並びの食い違いから第3図に示されたような大きな断層を想定した。

これらの研究によりコンラッド面・モホ面とも従来考えられていたような単純な一つの面ではなく面群からなることまた場合によってはそれらが断層により切断されていることも有ることなどが示された。地殻内部は従来考えられていたよりもかなり複雑であることが示されたのである。

その後1970年代に入って石油探査に用いられていた非爆薬震源であるバイプロサイス(注1)が深部地殻探



第3図 地殻深部から上部マントルに到る断層を示唆する例。横軸は距離 (km) 縦軸は往復走時 (s)。Kanasevich et al. (1969) による。

査に用いられるようになった。またチャンネル数も大幅に増大して大々的に重合記録がとられるようになってきた。その中心となったのがアメリカのCornell大学を中心に各大学・政府・石油企業によって1974年に組織されたCOCORPである。第1回の実験はTexasのHardeman Countyで1975年に行われた(Oliver et al., 1976)。その後現在までに全米各地で地点数にして20以上反射記録断面にして50以上もの探査が引き続き行われ数々の興味ある結果を得ている。COCORPでバイプロサイスが使用された理由として

- (1)環境への影響が小さい。
- (2)送り出す震源信号の形を容易に制御できる。
- (3)同一地点での繰り返し発震が容易で垂直重合数を増やすのが簡単。
- (4)石油探査・COCORPの探査を通じて様々な環境下でその有効性が示されている。

といったバイプロサイスの持つ利点があげられよう。

COCORPに触発され1980年代に入るとイギリスフランス西ドイツカナダオーストラリアベルギースイスイタリアなどが類似の探査計画を組織し探査を開始した。またオーストラリア東ドイツトルコなどでも探査が計画されているという。深部地殻探査計画を実施している主な国とその計画の略称を第1表にまとめてある。

また反射法地震探査による深部地殻探査に関するその時々総集編ともいべき報告はアメリカ地球物理学連合(AGU)のGeodynamic seriesの第13巻・第14巻(Barazangi and Brown, eds., 1986a, b)やGeophysical Journal of Royal Astronomical Societyの第89巻特別号(Matthews and Smith, eds., 1987)にまとめられてい

る。その他青木(1982)やKüppers・鈴木(1987)によるCOCORPやDEKORPの概要紹介もある。

以下では上述の報告等に基づきこれら探査計画のうちCOCORP LITHOPROBEおよびヨーロッパのいくつかの探査例についてその概要を述べたい。

3. 北米大陸

COCORP

先ず始めにデータ収集・処理に関することを述べておこう。現場でのデータ収集は契約によりある専門のコントラクターが請け負い年間スケジュールにより順次行われる。1978年からは一つの探査クルーが一年中フルタイムで探査を行うようになった。探査に先立ち数日間をかけて厳密なノイズテスト・品質管理のためのテスト等が行われ実際の探査パラメタが決定され

第1表 各国の深部地殻探査計画

国名	計 画
オーストラリア	ACORP (Australian Continental Reflection Profiling)
イギリス	BIRPS (British Institutions Reflection Profiling Syndicate)
アメリカ	COCORP (Consortium for Continental Reflection Profiling)
イタリア	CROP(ITALIA) (Crosta Profonda Italia)
西ドイツ	DEKORP (Deutsches Kontinentales Reflexionsseismisches Program)
フランス	ECORS (Etude de la croûte Continentale et Océanique par Réflexion et Réfraction Sismiques)
カナダ	LITHOPROBE (Canadian programme for the study of the continental lithosphere)
スイス	NFP20 (Nationales Forschungsprogramm 20)

第2表 COCORP の代表的探査パラメータ [Brown (1986) による]

項目	パラメータ
チャンネル数	96チャンネル
水平重合数	48重合
サンプルレート	8ミリ秒
ハイカット周波数	31.25ヘルツ
記録時間	52秒
有効記録長	20秒
震源構成	
パイプレータ数	5台
間隔	15.2メートル
移動間隔	12.6メートル
総展開	149メートル
スweep周波数	8-32ヘルツ
スweep数	8回
スweep長	32秒
受振点構成	
ジオフォン数	24個
ジオフォン間隔	4.3メートル
総展開長	98.1メートル
展開形式	
最小オフセット	503メートル
受振点間隔	100.6メートル
震源間隔	100.6メートル

る。第2表に COCORP で用いられている代表的探査パラメータ (Brown, 1986) を掲げた。

処理に関しても最初は専門のコントラクターが行っていた。しかしデータの正しい解釈のためにはデータ処理者とデータ解釈者との間の密接な協力・協議・検討等が是非とも必要であるということが当然のことながら明らかになってきた。そこで1979年にデータ処理システムが Cornell 大学に導入され COCORP 自身が処理を担当するようになった。現在支援スタッフ6名のもとで年間を通じてフル稼働している。処理は学生と研究者また地球物理屋と地質屋からなる混成チームによって行われている。計画のための基金は全米国立科学財団 (NSF) からのほか、石油企業・探鉱企業・その他多数の援助によっている。

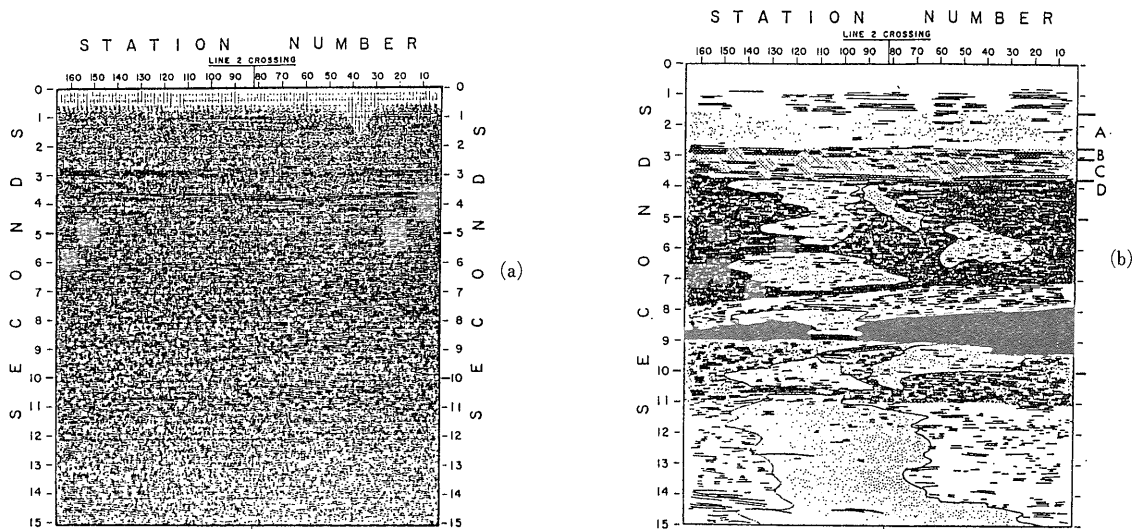
探査測線の持つべき理想的な条件としては

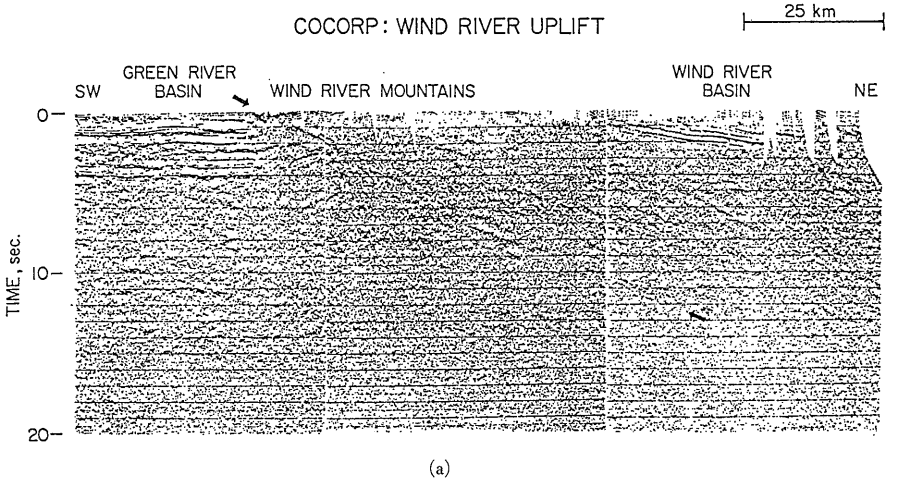
- (1)平坦であること
- (2)真直ぐであること
- (3)交通や騒音から離れていること
- (4)舗装されていないこと
- (5)風や降雨がなく 気温も適当であること

が挙げられている (Brown, 1986)。最初はなるべくこの条件を満たすような測線が選ばれていたが そのうちに騒音の多い都市近郊・交通の多いハイウェイ沿い・著しく屈曲した山岳道路などの条件の悪いところでも行われるようになった。しかし後の処理・解釈などを考えると 上の条件はなるべく満たすようにしたほうが良いようである。

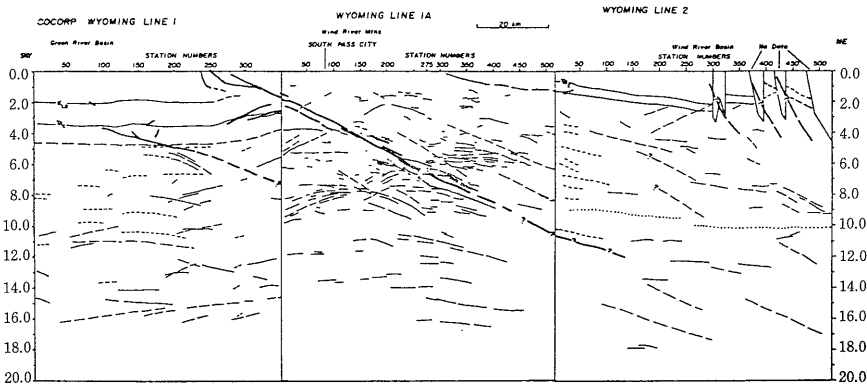
次にいくつかの探査例を見てみよう。先に地殻内部はかなり複雑そうであると述べたが そのことを更に端

第4図 Hardeman County での探査結果。(a)Line-1 の時間断面 (b)Line-1 の反射特性の分類。水平スケールは約 8km。縦軸は往復走時(s)。(b)は単に反射波の特性により分類したものであり 地質に基づく分類ではない。非常に複雑であることが分かる。Oliver et al. (1976) による。





(a)



(b)

第5図 Wind River Mountains 周辺での探査結果。(a)時間断面 (Brown et al. (1986) による)。矢印部分が断層。
(b)反射面の線描図 (Smithson et al. (1979) による)。縦軸は往復走時 (s)。

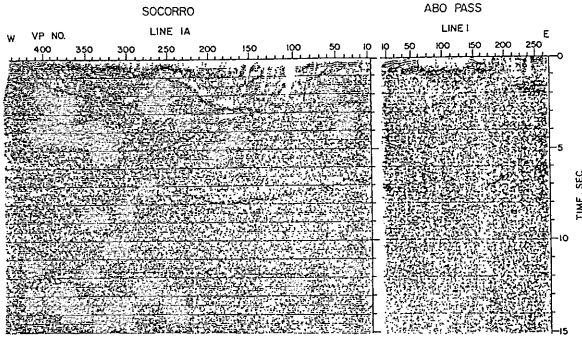
的に示したのが第1回の Hardeman County の探査結果である。第4図(a)に Line 1 の時間断面を (b)に速度解析・反射面の形状等に基づいた時間断面の分類を示す (Oliver et al., 1976)。地殻深部には実に多くの反射面が存在し、かつそれらが断続的であり、かなり複雑であることが分かる。また図には示されていないが、往復走時15秒以下にも反射面が存在するという。こういったことから、彼らはコンラッド面・モホ面を強いて特定することを避けている。論文の中で彼らは

This project should not be thought of as solely an attempt to detect and map the Moho and Conrad. It was designed to detect structure and heterogeneity in the crust and upper mantle with resolution far

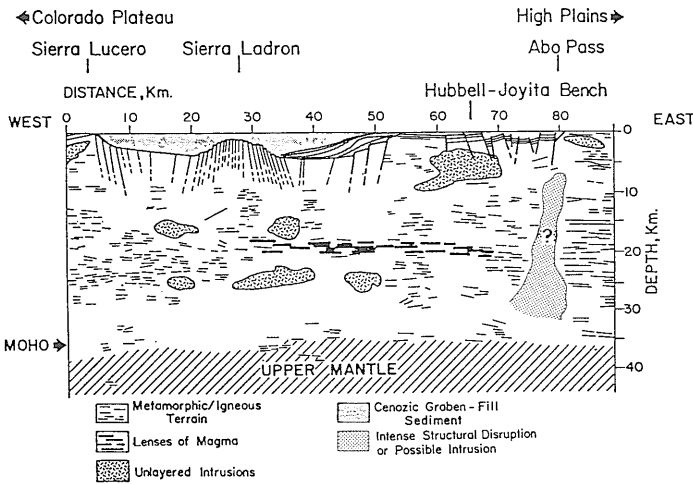
greater than that which one imagines when discussing the Moho and Conrad.

と述べている。探査結果がこのように複雑であったため、仕方なくこのように述べたのか、あるいは最初から本当にそう考えていたのか定かではない。しかし、このように強調せざるを得なかったところをみると、予期以上に探査結果が複雑であったとは言えるであろう。

次に、ある地域のテクトニックな運動の原因を明らかにした例として、Wyoming の Wind River Mountains 周辺での探査結果を第5図に掲げた (Smithson et al., 1978, 1979)。図に示したように、この地域では Wind River Mountains の下に、延々と深さ30数kmまで続く大スラストが見事に捉えられた。これにより、当地域の隆



(a)



(b)

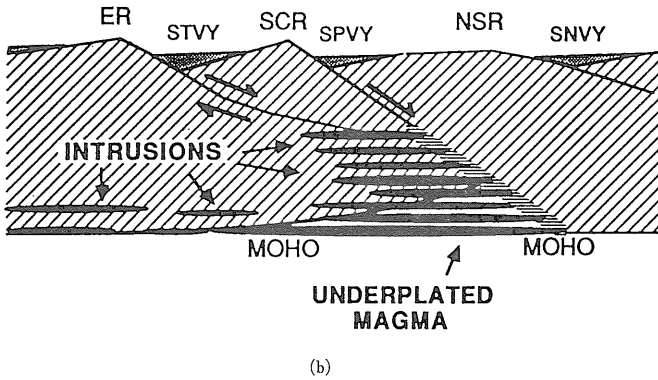
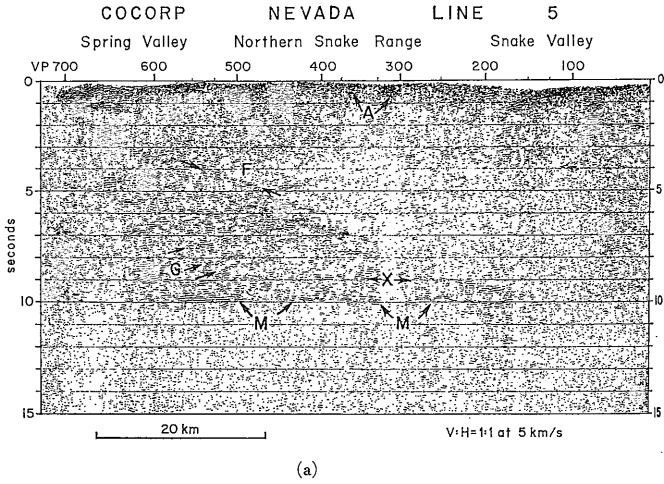
第6図 Rio Grande Rift での探査結果. (a)時間断面. 縦軸は往復走時 (s). (b)模式断面. Brown et al. (1980) による. 縦軸は深度 (km). 図中央の往復走時約 7s 深度約 20kmの反射面がマグマ溜まりと言われている.

起が主にブロック・フォールティングによる垂直方向の運動に起因するものではなく 水平方向の短縮によるスラストリングに起因するものであることが明らかとなった.

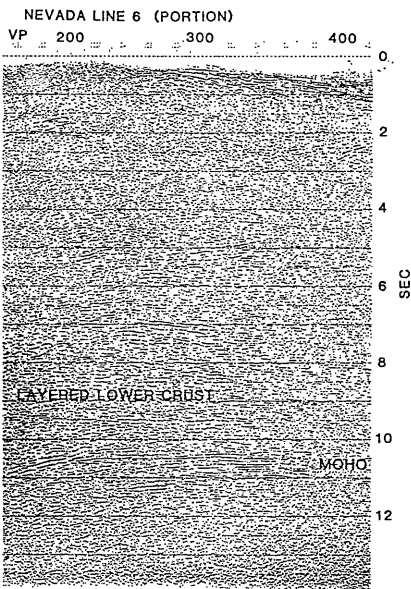
またこれと反対に地殻の伸張を示す例も Rio Grande Rift・Death Valleyなどを始めとして数多く見られる (Brown et al., 1980; Serpa and de Voogd, 1987; Houser et al., 1987). これらは数多くの正断層で特徴づけられる. 第6図に Rio Grande Riftでの探査結果を示す. また時にはモホにまで達すると思われる巨大な正断層も見られる (Hauser et al., 1987). 第7図に Nevadaの Snake Rangeでの探査結果を示す. また同時にこれらには地殻中部および下部にマグマ溜まりとみられる顕著な反射面が伴っているのも大きな特徴である. 第6

図(a)の断面中央部の顕著な反射面 また第7図(a)の断層(F)の下に見られる多くの反射面がマグマ溜まりであると考られている. これら図(a)に基づいた模式的な断面をそれぞれの図(b)に示す.

また探査を通じて 一般的に言えば上部地殻は比較的透明で反射面が少なく 下部地殻には反射面が多く認められるということも分かってきた (第8図). 上部が比較的透明であるのは おそらくそこが花崗岩体・非常に変形を受けた岩石等のもともと反射面となる大きな構造を持たないものから成っていることに起因するのであろう. 一方下部に反射面の多い理由はあまり明らかではないが 昔の堆積岩のなごり・マントルから貫入した火成岩・地殻の伸長によって作られた組織構造等が理由としてあげられている (Brown et al, 1986).



第7図
Nevada line-5 (Snake Range) での探査結果.
(a)時間断面. 縦軸は往復走時(s). 図中のMはモホ. (b)模式断面 (SCR より右側が時間断面に対応する). 断層Fの下の反射面がマグマ溜まりと言われている. Hauser et al. (1987) による.



第8図
Nevada line-6 での探査結果. 上部地殻は比較的透明で反射面が少なく 下部地殻には反射面が多い. Brown et al. (1980) による.

この他数限り無い多くの成果をあげ 大陸地殻の生成・進化・変形・衝突等の議論に与えたインパクトははかり知れない. 現在も探査は続けられており 今後北米大陸を横断・縦断するような探査断面が得られたあかつきには 大陸地殻および上部マントルに関する知識はドラスティックに変化する事になるかもしれない.

LITHOPROBE

カナダでは1960年代の始めから 下部地殻とモホ面を対象とした地震探査の実験がアルバータの南部地域を中心に いくつかの大学・研究所で行われてきた. その後1975年にそれらを集成するかたちで COCRUST (Consortium for Crustal Reconnaissance Using Seismic Techniques) が形成された. COCRUST は最初の調査を1977・1979年カナダ中部のウィリントン堆積盆で行ったのを

第3表 バンクーバー島での代表的探査パラメタ
 [Clowes(1987) による]

項 目	パ ラ メ タ
チャンネル数	120チャンネル
重合数	30重合
サンプルレート	4 ミリ秒
ハイカット周波数	64ヘルツ
記録時間	32秒
有効記録長	16秒
震源構成	
パイプレータ数	4 台
間隔	40メートル
スイープ周波数	8-40ヘルツ
スイープ数	16回
スイープ長	16秒
受振点構成	
固有周波数	8ヘルツ
ジオフォン数	18個
ジオフォン間隔	5.3メートル
展開形式	
展開方法	振り分け展開
受振点間隔	90メートル
震源間隔	180メートル
最小オフセット	280メートル
最大オフセット	8280メートル

始めとして 1980年太平洋側のバンクーバー島などで屈折法・小規模反射法等が行われた (Green et al., 1980; Hajnal et al., 1984; Ellis et al., 1983; Spence et al., 1985).

この他1978年東部のアブラチア造山帯でも アメリカ・カナダの共同研究として往復走時4-6秒の反射法が行われ (St-Julien et al., 1983) メイン州沖へ続く USGS の反射法測線との接続がはかられた。この段階までの反射法による研究に関しては Green and Clowes (1983) によってまとめられている。

こういった情勢の中で 1980年代の地球科学の共同プロジェクトとして LITHOPROBE が立案された (Canadian Committee on the Dynamics and Evolution of the Lithosphere (CANDEL), 1981)。LITHOPROBE は地質学・地球物理学・地球化学等の方法を応用して キーとなる構造・地質的な問題・対象域等に対し リソスフェアの三次元的構造・組成・発達史などの総合的把握を目的としている。その第2期には 1-5km 深のボーリングも考えられている。財政的援助は国立科学・工学研究評議会 (NSERC・National Sciences and Engineering Research Council) と連邦エネルギー・鉱業・資源省 (Department of Energy, Mines and Resources) に負っている。その他資源関連の企業の貢献がある。

最初の探査は1984年に太平洋岸のバンクーバー島で行

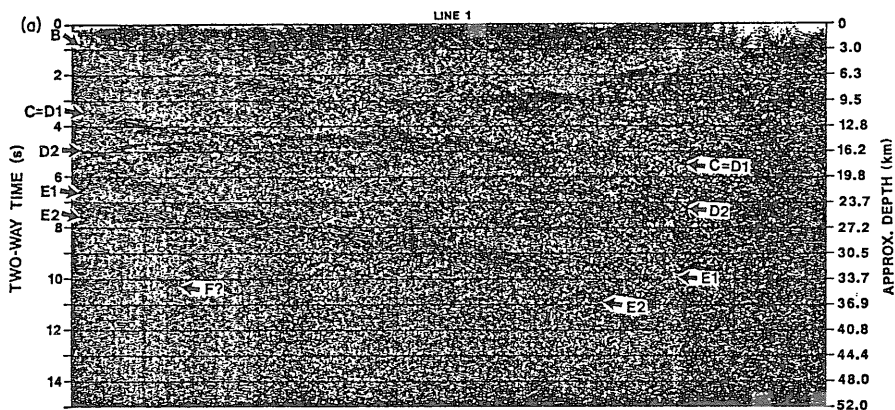
われた (Yorath et al., 1985a, b; Green et al., 1986a, b, 1987; Clowes, 1987; Clowes et al., 1987a)。1985年には南部カナディアン・コーディレラ (Cook et al., 1987, 1988) で また海上ではあるが東部の Grand Banks (ニューファウンドランド島沖合) (Keen et al., 1986; de Voogd and Keen, 1987) でも行われた。反射法探査の方法は COCORP のものをほとんどそのまま踏襲している。例としてバンクーバー島で用いられた代表的探査パラメタを第3表に示しておこう (Clowes, 1987)。探査および処理は共に専門のコントラクターによって行われた。

次に探査結果を見ていこう。バンクーバー島はファンデフーカ・プレートが北アメリカ・プレートの下に沈み込んでいるその直上に位置する。探査の目的はその沈み込みに伴う付加体の形状・沈み込んだスラブの形状を明らかにすることである。この探査は 深部地殻探査の測線としては唯一の沈み込み帯を対象としたものとして興味深い。第9図(a)にバンクーバー島を横断する Line 1 での探査結果を (b)にその線描を示す。第9図(a)の矢印部分に顕著な反射面が見られる。C~Eは COCRUST によって見出された 地殻としては異常に高速度 (7.7km/s)・高密度 (3.28g/cm³) な領域 (Spence et al., 1985) と正に一致している (第9図(b)の1の領域がそれである)。ここは 以前に沈み込んでいたプレートがアンダープレートしたものと解釈されている (Green et al., 1986b; Clowes et al., 1987a)。第10図がそれを模式的に示したものである。屈折法・重力の解析から Spence et al. (1985) によって既にそのことは示唆されていた。しかしこの反射法の探査結果はアンダープレートしたものを直接的に“見た”最初の例といっただろう。また1985年にバンクーバー島沖でも反射法がおこなわれ 上の測線の西方延長の地殻構造が得られている (Clowes et al., 1987b)。

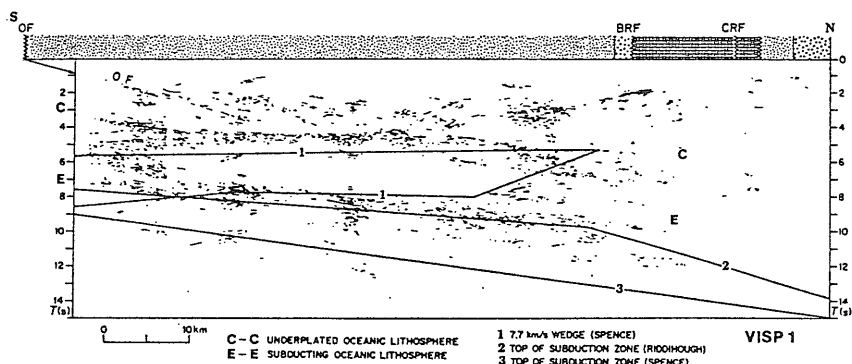
次に南部カナディアン・コーディレラで行われた探査結果を見てみよう。探査結果に基づく線描とその解釈を第11図に示す。Rocky Mountain Trench (RMT) から西へ数多くの西下がりのスラストが深さ10数 km まで続いていること また北アメリカ大陸を作る 基盤が RMT の西方の Kootenay Arc まで続いておりそこで東下がりのスラストによって切られているらしいこと などが分かってきた。なおここではモホからの反射波は一部を除きあまり明瞭ではない。

上述のバンクーバー島と南部カナディアン・コーディレラの探査は将来接続され ファンデフーカ・プレートからロッキーを越えて続く 壮大なトランセクトとされることが計画されているという。

ニューファウンドランド沖の探査については 小論で

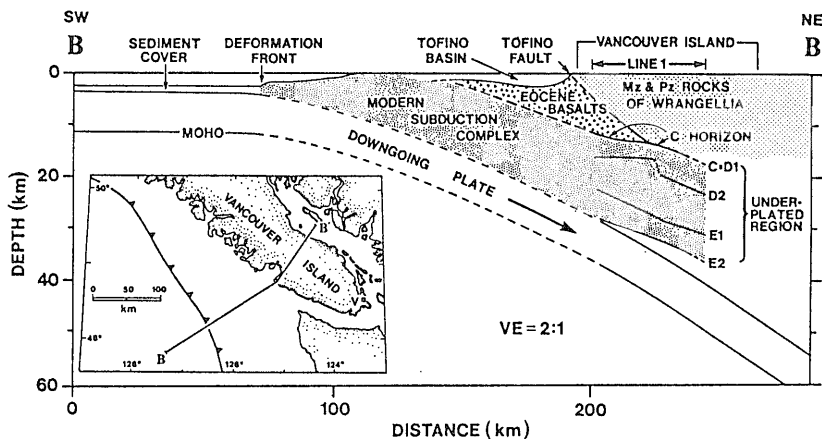


(a)

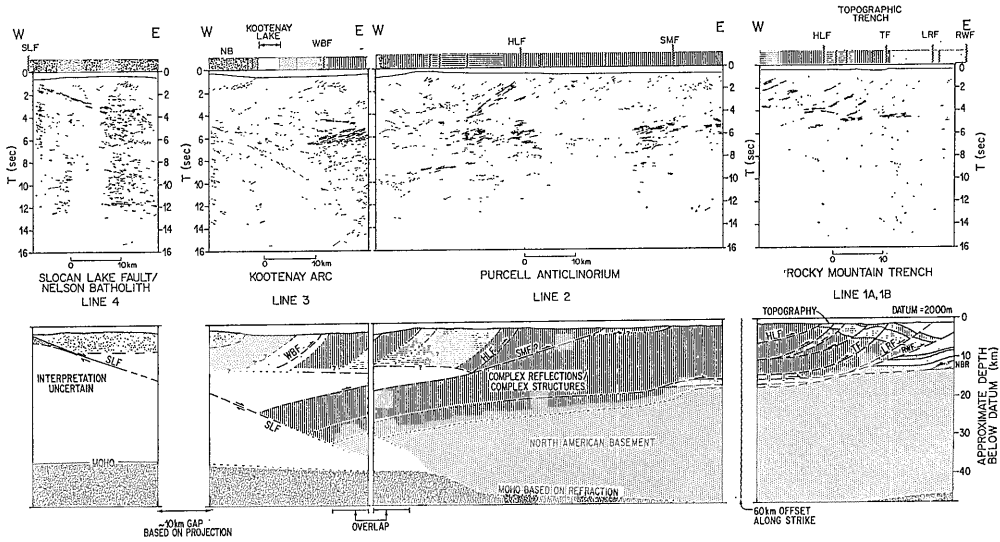


(b)

第9図 バンクーバー島の line-1 での探査結果。(a)時間断面 (Clowes et al. (1987a) による)。E がファンデフーカ・プレートの上面に相当。F はファンデフーカ・プレートのモホではないかと言われている。(b)線描図 (Green et al. (1986b) による)。1: Spence et al. (1985) の高速度領域。2: 主に重力異常をもとに Riddihough (1979) が決めたスラブの上面。3: 屈折法により Spence et al. (1985) が決めたスラブの上面。



第10図 バンクーバー島を横断する模式的な地質構造断面。C～Eがアンダープレートした領域と言われている。Clowes et al. (1987 a) による。



第11図 南部カナディアン・コーディレラでの探査結果に基づく線描図と解釈図。 Cook et al. (1987) による。

は割愛する。

4. ヨーロッパの例

BIRPS

イギリスでは1981年に深部地殻を探査する組織として BIRPS が Bullard Laboratory に設立された。財政援助は自然環境調査評議会(Natural Environment Research Council)と石油企業により行われている。またデータ収録およびデータ処理は専門のコントラクターが請け負っている(Matthews and Cheadle, 1986)。COCORPとは異なり BIRPS はイギリス周辺の海域を探査対象としている。海上で探査を行う利点として

- (1)陸上のパイプソイスによる反射法に比べて単位距離当たりのコストが20分の1である
- (2)陸上に比してS/N比が大きく 質の良いデータが得られる
- (3)測線をとる上での制約がなく 長大な真っ直ぐの測線上で探査を行える
- (4)陸上と異なり複雑な形をした低速度の風化層がないといったことがあげられている(Warner, 1986)。(2)に関しては 下部地殻からの反射波がスタック前ですらノイズ・レベルより有為に大きいという事実が有る。陸上のパイプソイスではそのようなことはほとんど期待できない。また(4)に関して言えば陸上の探査では風化層の存在により反射面の見掛け上の歪み・断続・振幅変化・周波数変化等がつねに起こる。しかし 海上では

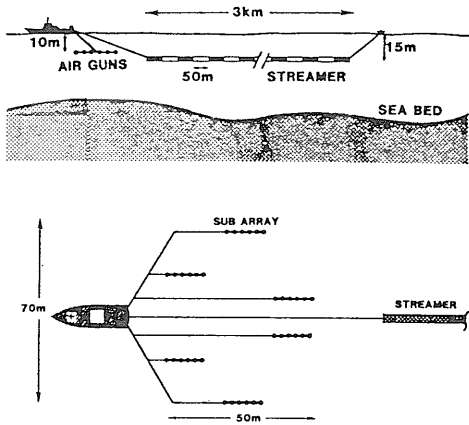
そういった低速度層は非常に稀である。

不利な点としては

- (1)地表(海底)地質が良く分からない
 - (2)地質的に面白いところは海岸から遠く離れた陸上に多い
 - (3)データ上に強い多重反射が現れ 真の反射を隠したり真の反射との区別がつけにくくなる
- といったことがあげられているが 今のところあまり問題ではないようである。

探査のパラメタは データの記録時間が長いこと(往復走時15秒) 特別に工夫された発震系を使用していることを除けば通常の海上探査と変わらない。発震系は28-46個のエア・ガンからなり それを4-8列のレイに分け 下向きのエネルギーが選択的に大きくなるように並べている。総容量は74-140リットルという大きなものとなっている。受振系としては1チャンネル当たり50mのストリーマーを計60チャンネル連ねたものを使用している。典型的な探査形態を第12図に示す(Warner, 1986)。

最初の探査は1981年にスコットランド北方の MOIST (the Moine and Outer Isles Seismic Traverse) 測線で行われた。驚くべきことにこの探査によって 下部地殻あるいはモホ付近から始まり 上部マントルに向かって伸びる東下りの顕著な反射面が見出され Flannan Fault と名付られた(Smythe et al, 1982; Brewer and Smythe, 1984)。始めはマルチプル・側方反射等が見掛け上反射面として見えているのではないかと考えられた



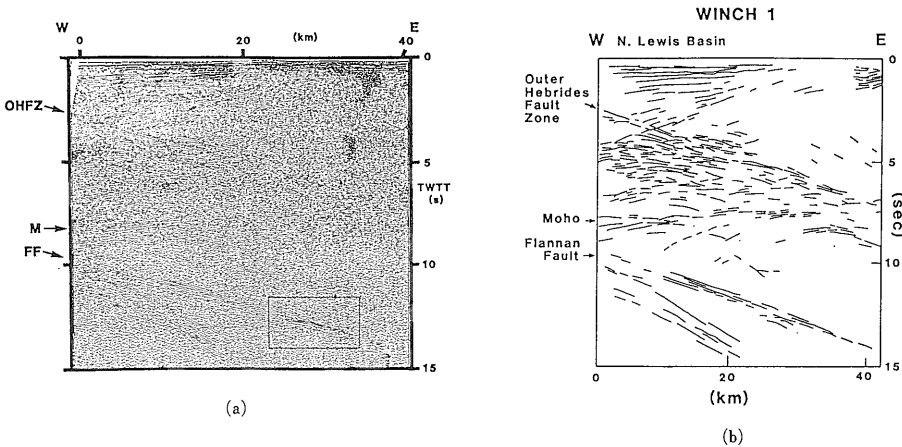
第12図 BIRPSにおける典型的な探査のジオメトリ。 Warner (1986) による。

が見掛け上の反射面として説明することは一切できなかった。その後WINCH (the Western Isles and North Channel Traverse) 測線・その他でも見出されその実在が確認された。第13図に WINCH 1 の探査結果とその線描を示す。特に図(a)の四角で囲まれた部分の振幅は大きく 堆積盆内の最大の反射面に匹敵するという (Matthews and Cheadle, 1986)。また上部地殻からモホ直上まで続くやはり東下がりの反射面が存在する。これは古生代(400Ma)に形成されたスラストが中生代に大西洋の拡大に伴い正断層として再活動したものと解釈されている。

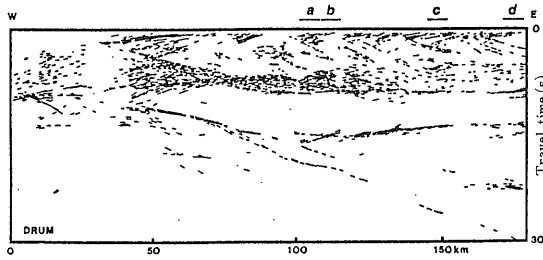
この驚くべき探査結果を受けて 1984年には更に深部を目指した探査が試みられた (McGeary and Warner, 1985)。MOIST・WINCH 測線とほぼ平行にとられた DRUM (Deep Reflections from the Upper Mantle) 測線がそれである。ここでは往復走時が2倍の30秒まで記録がとられた。第14図にマイグレーション前の時間断面の線描を示す。マイグレーションした結果 Flannan Fault は深度 85km まで続いていることが分かった。またそれ以外にモホの下の深度40-50kmにほぼ水平な反射面も得られた。これらは共にある種の shear zone を表すものと解釈されているがその実体はほとんど分かっていない (McGeary and Warner, 1985; Warner and McGeary, 1987)。例えば Flannan Fault はリソスフェア下部の脆性的な断層あるいはカレドニア造山以前のサブダクション・ゾーンの名残りなどと言われている。また深度40-50kmの水平反射面はデコルマンではないかと言われている (McGeary and Warner, 1985; Warner and McGeary, 1987)。

その他

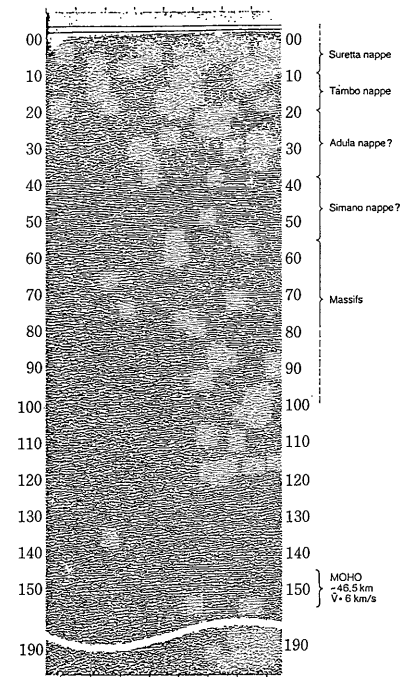
ヨーロッパでは BIRPS の他に第1表に掲げたように多くの国々が探査を行っているがさすがに“ヨーロッパ共同体”だけあって 一国にとどまらず国境を越えた共同探査が行われているのが特徴である。例えば Celtic Sea では BIRPS と ECORS が Rhine Graben では DEKORP と ECORS が Pyrenees ではスペインと ECORS が また Alps では ECORS と CROP (ITALIA) が それぞれ共同研究を行うという具合である。それらについてはまた別の機会に譲ることとする。 DE



第13図 WINCH 1 での探査結果。(a)時間断面。(b)線描図。横軸は距離 (km) 縦軸は往復走時 (s) である。モホは往復走時約 8 s 付近にある。モホ下に見える明瞭な反射面が Flannan Fault。(a)の四角で囲まれた部分は異常に大きい反射率を示すところである。 Matthews and Cheadle (1986) による。



第14図 DRUM 測線でのマイグレーション前の時間断面に基づく線描形。横軸は距離 (km) 縦軸は往復走時 (s)。8~9 s 付近がモホである。モホ下の斜めの反射面が Flannan Fault。14~15 s 付近の水平な反射面は上部マントル内のデコルマンと言われている。McGeary and Warner (1985) による。



第15図 アルプスの NFP20-EAST 測線での探査結果の一部。水平距離は約 6.4km。縦軸は往復走時 (s)。各ナップの間には中生代の堆積物が挟まれそれが顕著な反射面となっている。Keppner and Lehner (1988) による。

KORP については前掲の Küppers・鈴木 (1987) に述べられている。

ここでは最後の例として現在活動的な圧縮場にあるアルプスで最近行われた探査結果の一部を示すことにしよう。アルプスでは先に述べた ECORS-CROP (ITALIA) 測線の他にスイスの NFP20 による 3 測線で探査が行われたりあるいは計画されている (Werner, 1987; Keppner

and Lehner, 1988)。ドイツの新聞はこのアルプス越えの反射法探査を カルタゴの勇将ハンニバルの象によるアルプス越えに例えたという。パイプロサイスの形が象を連想させたのかもしれない。それはともかくとして 第15図に NFP20 の EAST 測線の南端部の断面とその予備的な解釈を示す。ここではモホの深度はおおよそ 50km となっている。また各ナップの間には中生代の堆積物がはさまれそれが顕著な反射面となっていることが分かる。

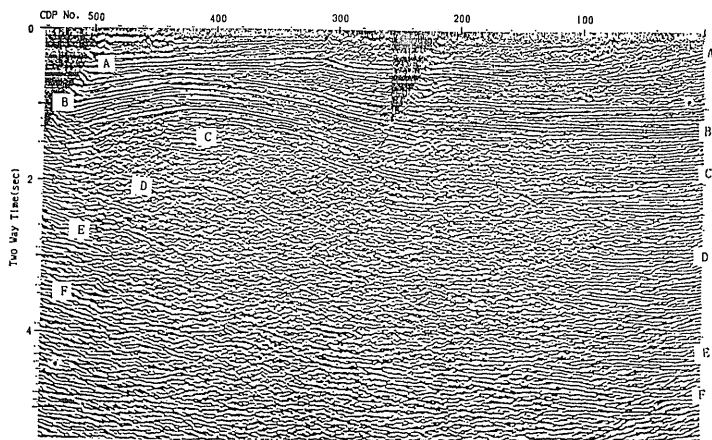
この他 挙げればきりがなくなるが 最近では各地の探査結果を対比する試みもなされている。例えばアラチア・ヘルシニア造山帯が互いに良く似た断層構造を示すこと 異なる震源で得られたイギリス周辺 (エア・ガン)・北西フランス (パイプロサイス)・Black Forest (パイプロサイス)・Urach (ダイナマイト) の下部地殻の層構造が良く対比できること 上部地殻でも非常に発達した層構造が見られるところがあること 現在活動している造山帯の下ではモホが周辺に比べて深くになっているが古い造山帯の下ではモホが周辺と同じく平らであることなどが示されている (Brown and Meissner, 1988)。

5. 日本における深部地殻探査と展望

日本は世界有数の“地震国”であり 地震による被害も多発している。そのため国家プロジェクトとしての地震予知計画により 他に例を見ないほどの自然地震観測網が全土にはりめぐらされている。また臨時観測網 (自然地震および爆破観測を含む) もすぐに起動することのできる体制が整っている。その結果日本ではこれらを駆使した地殻構造の研究が盛んである。

一方 深部地殻を対象とした反射法による探査はほとんど行われていないといってよい。わずかに浅野・他 (1986, 1987) により 深部地殻をも念頭においたパイプロサイス探査が行われているだけである。これは文部省自然災害特別研究「地震動予測精密化のための地下深部構造の研究」として 北海道の長沼・苫小牧周辺において行われた。苫小牧測線での探査結果を第16図に示す。また探査パラメタを第4表に掲げる。これらの探査では残念ながら意味のある反射面は往復走時約 5 秒までしか得られなかった。更に高度な処理が行われているようであるが 現在までに得られている最深の反射面 F の深度は左端で約 5 km 右端で約 9 km である。これら各層のうち表層を除き大部分が新第三系で F が古第三系であるという。

探査パラメタで比較する限り 北米・ヨーロッパのものとの本質的な差はない。それなのに何故日本では地



第16図 北海道苫小牧における探査結果。 水平スケールは約14km. 縦軸は往復走時 (s). 最深の反射面Fの深度(往復走時)は左端で約5km (3.5s) 右端で約9km (4.8s)である。 表層を除き大部分が新第三系で F以深が古第三系である。 浅野・他(1987)による。

第4表 北海道における探査パラメタ

[浅野・他(1986 1987)による]

項 目	パ ラ メ タ	
測線名	長沼測線	苫小牧測線
チャンネル数	96チャンネル	96チャンネル
重合数	24重合	48重合
サンプルレート	4 ミリ秒	4 ミリ秒
フィルタ周波数	5-80ヘルツ	5-80ヘルツ
記録時間	32秒	32秒
有効記録長	12秒	12秒
震源構成		
バイブレータ数	4台	4台
間隔	17メートル	17メートル
スウィープ周波数	8-43ヘルツ	8-43ヘルツ
スウィープ数	30回	15回
スウィープ長	20秒	20秒
受振点構成		
固有周波数	8ヘルツ	8ヘルツ
ジオフォン数	24個	24個
ジオフォン間隔	2メートル	2メートル
展開形式		
展開方法	終端展開(一部振分)	?
受振点間隔	50メートル	50メートル
震源間隔	100メートル	50メートル
最小オフセット	275メートル	?
最大オフセット	5025メートル	?

殻深部からの反射波が捉えられないのだろうか? 一般に日本では大爆破グループの観測記録に反射波が捉えられることは極めて稀であるという。それにひきかえアメリカ・ヨーロッパでは広角反射法がよく行われているという事実からも分かるように容易に反射波を捉えることができる。その違いは何に起因するのだろうか?

青木(1982)は日本での深部地殻探査の可能性について論じている。そこで問題としているのは日本固有の環境・複雑な地質である。良く知られているように日本列島は古生層から現世の堆積物に到るまでの大小様々なスケールのもが寄せ木細工のように組み合わせられてできている。その上活動的な島弧であるため多くの断層によりそれらが切られている。従って北米・ヨーロッパ等に比べて地質の単位の大きさが圧倒的に小さいという難点がある。つまり日本にはそもそも延々と続く反射面など存在しないかもしれないのである。更に日本では人口密度が高いため生活上・産業上・交通上の騒音のないところはないといってよい。このように陸上で深部反射法探査を行うのには不利な条件が揃い過ぎているといえるだろう。先にCOCORPの項で述べた探査測線の持つべきいくつかの理想的条件を日本ではどれも満たすのは難しいかもしれない。

一般に深部反射面が見られない原因として

- (1)そもそも地殻深部に反射面となるものが存在しない
あるいは反射面が高角度で立っている
- (2)反射波は存在しているが充分なS/N比がない
- (3)表層あるいは地殻内での減衰が大きく波動エネルギー

—が十分に地上に戻って来ない

(4)表層部と基盤岩との固さのコントラストが大き過ぎて
て充分なエネルギーが深部地殻に伝わらない

(5)表層あるいは地殻内の構造が複雑で深部地殻の反射
面が時間断面上で面として識別できない

といったようないくつかのことが考えられる。

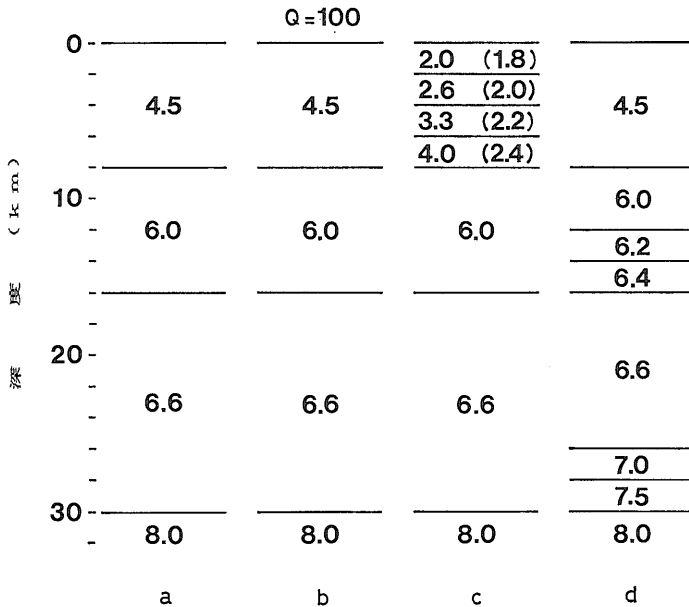
(1)の場合にはそもそも反射法探査で捉えることは無理
であり 他の探査方法を考えるしかない。(2)の場合に
は対策は比較的に簡単である。震源の出力を大きくす
る バイブレータのスイープ数を増やす 重合数を増
やす 騒音の少ない夜間に観測する 等々の方法が考え
られる。またバイブロサイスの場合には 悪地表条件
下でのバイブレータと地面とのカップリングの不良のため
バイブレータの出力信号と実際の地中への入力信号
が異なってしまう ノイズが生ずることがある。従っ
てしっかりした地表条件の下で探査を行うことがS/N
を良くするために必要である。

(3)~(5)はかなりやっかいであり 本質的な解決策は無
いと言っても過言ではないかもしれない。こういった
状況を直観的に把握するために 地殻内の諸条件によ
って深部反射面がどのように見えるかをモデル計算によ
り考えてみよう。COCORP 等で良く見られる 第17図
(a)のような構造を“標準モデル”として仮定しよう。
簡単のため密度は一定 減衰は無いとした。上に述べ

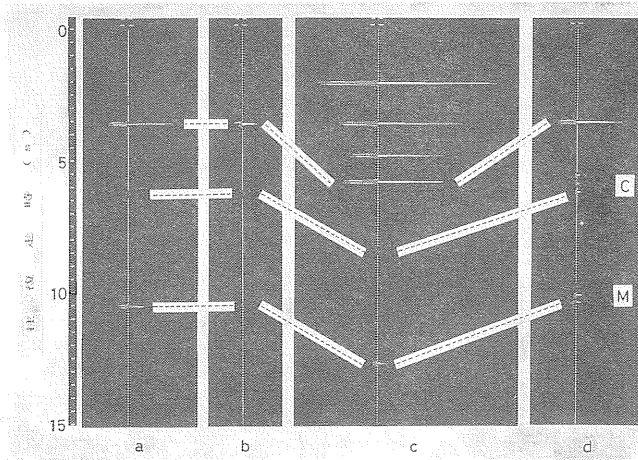
た原因(3), (4)に相当するモデルを第17図(b), (c)に示す。
(b)では速度構造は(a)と同じであるが 減衰を表すパラメ
タであるQ値を100とした。これは地殻熱流量の高い
島孤地殻でよくある値である。また(c)では上部地殻を
速度・密度の小さい層で置き換えた。これらに対する
垂直入射の反射記録が第18図である。CおよびMがそ
れぞれ6.0km/s 層と6.6km/s 層の境界(コンラッド)お
よび6.6km/s 層と8.0km/s 層の境界(モホ)からの反
射波に相当する。(b)では減衰のため反射波がほとんど
見えなくなっている。(c)ではわずかに見えるもの
上部地殻での反射波が大きすぎるため 現実の探査で捉
えられるかどうかは微妙なところである。

原因(5)の一例として第19図(a)のような複雑な構造を考
えてみよう。これに対する垂直入射の反射記録が(b)で
ある。複雑な構造が存在するときにはその構造に対す
る反射波が複雑になるだけではなく その下の反射面
にも大きな影響を与える。図(b)に見られるように 本来
水平で連続しているはずの反射面があたかも切れて無
くなったり 複雑な様相を呈したりということが起こっ
てしまうのである。この例に限らず 複雑な構造の下は
本来反射面があっても 反射面がないかのように見える
ことは 往々にしてあるのである。

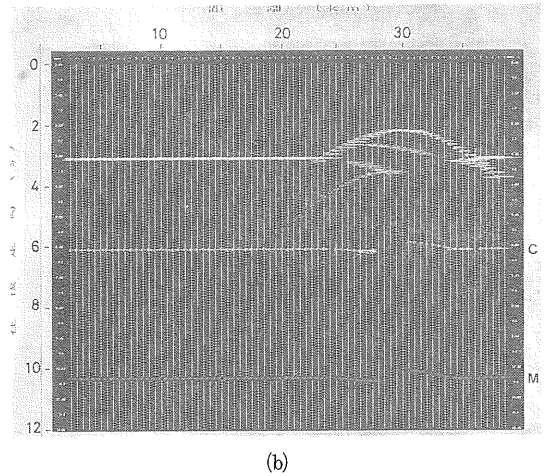
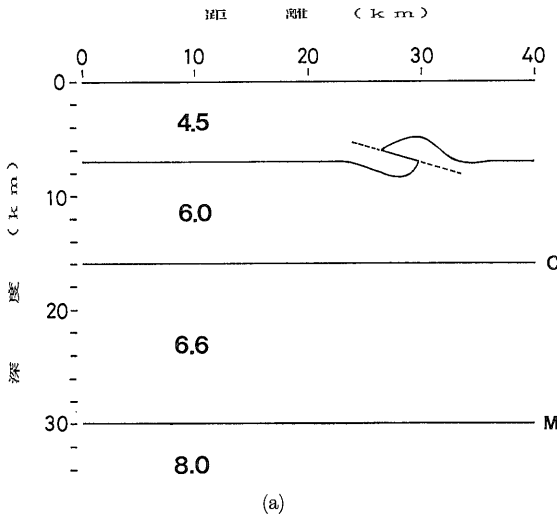
以上の例ではコンラッド・モホをとともに急激な速度変
化の境界としてモデル化した。しかし現実のコンラッ



第17図 反射波形計算用の構造モデル。(a)標準モデル。(b)減衰地殻モデル(Q=100とした)。(c)低速度上部地殻モデル。(d)コ
ンラッド・モホが単一面でないモデル。括弧のない数字は速度(km/s)括弧のついた数字は密度(g/cm³)。密度の表示の
ない部分はすべて3g/cm³を仮定。



第18図 計算された垂直入射の反射波記録。(a)標準モデル。(b)減衰地殻モデル。(c)低速度上部地殻モデル。(d)コンラッド・モホが単一面でないモデル。C・Mはそれぞれコンラッド・モホに対応する。

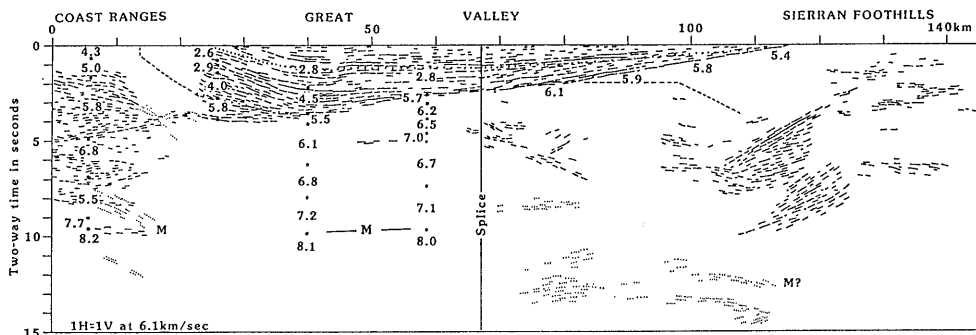


第19図 上部地殻に複雑な構造が存在するモデルとその計算された反射記録。(a)構造モデル。点線は断層。C・Mはそれぞれコンラッド・モホ。各層内の数字は速度 (km/s)。横軸は距離 (km) 縦軸は深度 (km)。(b)計算された反射記録。横軸は距離 (km) 縦軸は往復走時 (s)。C・Mが見掛け上切れて見える。

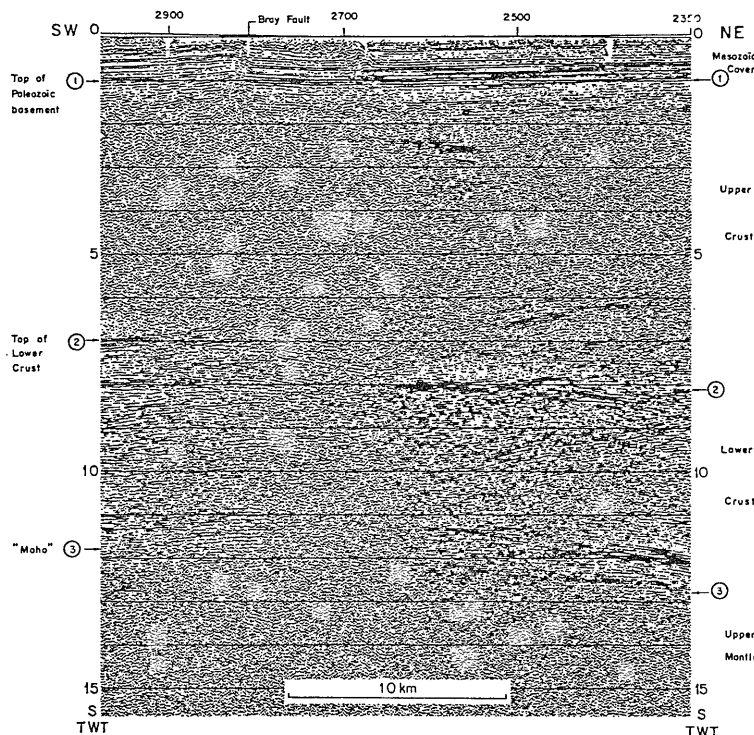
ド・モホははっきりした一つの面ではなく いくつかの反射面からなっているらしい。もしもこれらが数枚の層からなり 徐々に速度が変化しているとすると 事態は更に悪くなる。第17図(d)にその場合のモデルをまた第18図(d)に計算結果を示す。このモデルは基本的には第17図(a)と同じであるが コンラッド・モホに対応する反射面をそれぞれ3枚にしており 徐々に速度を変化させてある。この場合標準モデルに比べて反射波群の振幅はずっと小さくなっている。現実の日本島弧下ではここでモデル化した要因のすべてが多かれ少なかれ関係してくるため 深部地殻探査を行うのはかなり難しいと言えるかもしれない。

かの原因によって 深部反射が捉えられなかったり 乱されたりしたと思われる例が多く見受けられる。例えば第20図に示したカリフォルニアの Great Valley における探査 (Wentworth et al., 1987) では 速度の遅い厚い堆積物に覆われた地域の下に深部からの反射波はほとんど見られない。これは原因(4)に起因するものと考えられる。断定はできないが 先に述べた北海道での探査で深部反射を捉えることができなかったのはこれと同じ原因によるのかもしれない。

また原因(5)に起因するものとしては 第21図に示した例 (Bois et al., 1986) があげられる。深部反射が幅約10kmにわたって見えなくなったのは 直上にある Bray Fault に伴う構造の乱れと 断層北側の地表近傍の悪条



第20図 カリフォルニアの Great Valley における探査結果の線描図。 図中の数字は屈折法によって求められた速度 (km/s)。 速度の遅い 厚い堆積物の下にはほとんど反射波が認められない。 横軸は距離 (km) 縦軸は往復走時 (s)。 Wentworth et al. (1987) による。



第21図 ECORS の北フランス測線における探査結果の一部。 Bray Fault 周辺の幅約10km にわたって反射波が見えなくなっている。 水平スケールは約30kmである。 縦軸は往復走時 (s)。 ②がコンラッド ③がモホに相当。 Bois et al. (1986) による。

件によるものである。 また同様のことが第5図(a)の大スラスト上端の下方にも見られる。

このように 比較的に条件の良い大陸地殻においても悪条件下では反射波が得られない というのが真実のようである。 こうしてみると 更に条件の悪い日本における深部地殻探査は絶望的であるとすら言えるかもしれない。 しかし 上に述べた諸原因を逆に考えると次の

条件

- (1)熱流量が低く減衰の小さそうな場所
- (2)第三紀以降の堆積物のないあるいは薄い場所
- (3)断層などの構造を乱す要因の少ない場所

のすべてといわないまでも ある程度を満たす場所を実験地として選ぶならば必ずしも不可能ではないと言えるであろう。 従って日本において深部地殻探査を始めよ

うとするとき まず最良の探査地点を慎重に選定するということが何にも増して重要になるであろう。そしてその実験地においてデータ取得上の様々な技術をマスターした上で 他の地質条件下での探査技術を開発していくべきであろう。なぜなら活動的島弧下における深部地殻探査は行われたことがなく 技術・経験ともに何の蓄積もないからである。

また反射法と合わせて 大爆破による地殻構造探査も行われることがデータの解釈上必要である。反射法と屈折法が相補うことによって真実の姿により近付くことができるからである。その典型的な例をLITHOPROBEのバンターバー島での探査に見ることができる。また深部地殻の諸物性を反映する重力・磁気・電気探査を併せ行えば深部地殻の構造・組成をより良く理解することができるであろう。

6. おわりに

以上 諸外国の探査例・日本の探査例・日本における展望などについて見てきた。いささか中途半端な展開となってしまったことは否めないが 強調しておきたいことは 諸外国の探査により大陸地殻に対する認識が大幅に変更され 増大したという事実である。それでも現在のところ探査は北米・ヨーロッパ・オーストラリア等の世界のほんの一部に限られている。もしもその他の地域 特に大陸とは異なる若い地域である島弧下の地殻について更に多くのことを知ることができれば 地殻の生成・進化等の議論に大きく貢献することができるであろう。

最後に述べておきたいことは 深部地殻探査は一研究機関でできることではないということである。日本における深部地殻探査で最も問題となるのは COCORPのような探査主体となるべき組織が現在のところ存在しないということである。真に有効な深部地殻探査を行うためには複数の省庁にまたがる多くの研究機関の参加が望まれる。現在の縦割り行政の中で 複数の省庁にまたがる研究機関が参加する研究組織を作り上げていくことは大変に難しいであろう。しかし 何とんでも省庁横断的な組織を早急に作り上げ 日本島弧の地殻構造の詳細を明らかにしたいというのが我々の夢である。

(注1) Conoco Inc. の登録商標

参 考 文 献

青木 豊 (1982) 日本におけるパイロサイス反射法による大陸地殻調査の可能性—COCORPを例として—。物理探査 35, 22-33.

- 浅野周三・嶋 悦三・松田時彦・吉井敏尅・岡田 広・斎藤正徳・小林啓美・入倉孝次郎・鳥羽武文・朝倉夏雄 (1986) パイロサイス反射法による地殻構造調査。物理探査学会昭和61年度秋季講演会講演予稿集 73-74.
- 浅野周三・嶋 悦三・松田時彦・吉井敏尅・岡田 広・斎藤正徳・入倉孝次郎・瀬尾和夫・梅戸在明・田村八洲夫 (1987) パイロサイス反射法による地殻構造調査(2)。物理探査学会第77回 (昭和62年度秋季) 学術講演会講演論文集 24-26.
- Barazangi, M. and Brown, L., eds. (1986a) Reflection Seismology: A Global Perspective. Geodynamic Ser., Vol. 13, Am. Geophys. Union, Washington, D. C., pp. 311.
- Barazangi, M. and Brown, L., eds. (1986b) Reflection Seismology: The Continental Crust. Geodynamic Ser., Vol. 14, Am. Geophys. Union, Washington, D. C., pp. 339.
- Bois, C., Cazes, M., Damotte B., Galdéano, A., Hirn, A., Mascle, A., Matte, P., Raoult, J. F. and Torrelles, G. (1986) Deep seismic profiling of the crust in northern France: the ECORS project. In: Barazangi and Brown (1986a), 21-29.
- Bois, C., Damotte, B. and Mascle, A. (1987) Operations and main results of the ECORS project in France. Geophys. J. R. astr. Soc., 89, 279-286.
- Brewer, J. A. and Smythe, D. K. (1984) MOIST and the continuity of crustal reflector geometry along the Caledonian-Appalachian orogeny. J. Geol. Soc. London., 141, 105-120.
- Brown, L. D. (1986) Aspects of COCORP deep seismic profiling. In: Barazangi and Brown (1986a), 209-222.
- Brown, L., Barazangi, M., Kaufman, S. and Oliver, J. (1986) The first decade of COCORP: 1974-1984. In: Barazangi and Brown (1986a), 107-120.
- Brown, L. D., Chapin, C. E., Sanford, A. R., Kaufman, S. and Oliver, J. (1980) Deep structure of the Rio Grande Rift from seismic reflection profiling. J. Geophys. Res., 85, 4773-4800.
- Brown, L. and Meissner, R. (1988) Deep seismic profiling the world over: a status report. Trans. Am. Geophys. Union (Eos), 69, 496.
- 物理探査学会 (編) (1989) 図解物理探査. pp. 224.
- Canadian Committee on the Dynamics and Evolution of the Lithosphere (CANDEL) (1981) Lithoprobe: geoscience studies of the third dimension—a coordinated national geoscience project for the 1980s. Geoscience Canada, 8, 117-125.
- Clowes, R. (1987) LITHOPROBE: Exploring the subduction zone of the western Canada. Leading Edge, vol. 6, no. 6, 12-19.
- Clowes, R. M., Brandon, M. T., Green, A. G., Yorath, C. J., Sutherland Brown, A., Kanasewich, E. R. and Spencer, C. (1987a) LITHOPROBE—southern Vancouver Island: cenozoic subduction complex imaged by deep seismic reflection. Can. J. Earth Sci., 24, 31-51.

- Clowes, R. M., Yorath, C. J. and Hyndman, R. D. (1987b) Reflection mapping across the convergent margin of western Canada. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 89, 79-84.
- Cook, F. A., Simony, P. S., Coflin, K. C., Green, A. G., Milkereit, B., Price, R. A., Parrish, R., Patenaude C., Gordy, P. L. and Brown, R. L. (1987) Lithoprobe southern Canadian Cordilleran transect: Rocky Mountain thrust belt to Valhalla gneiss complex. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 89, 91-98.
- Cook, F. A., Green, A. G., Simony, P. S., Price, R. A., Parrish, R. R., Milkereit, B., Gordy, P. L., Brown, R. L., Coflin, K. C. and Patenaude, C. (1988) Lithoprobe seismic reflection structure of the southeastern Canadian Cordillera: initial results. *Tectonics*, 7, 157-180.
- Cumming, G. L. and Chandra, N. N. (1975) Further studies of reflections from the deep crust in southern Alberta. *Canad. J. Earth Sci.*, 12, 539-557.
- de Voogd, B. and Keen, C. E. (1987) Lithoprobe east: results from reflection profiling of the continental margin: Grand Banks region. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 89, 195-200.
- Dohr, G. P. and Meissner, R. (1975) Deep crustal reflection in Europe. *Geophysics*, 40, 25-39.
- Ellis, R. M., Spence, G. D., Clowes, R. M., Waldron, D. A., Jones, I. F., Green, A. G., Forsyth, D. A., Mair, J. A., Berry, M. J., Mereu, R. F., Kanasewich, E. R., Cumming, G. L., Hajnal, Z., Hyndman, R. D., McMechan, A. and Loncarevic, B. D. (1983) The Vancouver Island seismic project: a CO-CRUST onshore-offshore study of a convergent margin. *Can. J. Earth Sci.*, 20, 719-741.
- Green, A. G., Berry, M. J., Spencer, C. P., Kanasewich, E. R., Chiu, S., Clowes, R. M., Yorath, C. J., Stewart, D. B., Unger, J. D. and Poole, W. H. (1986a) Recent seismic reflection studies in Canada. In: Barazangi and Brown (1986a), 85-97.
- Green, A. G. and Clowes, R. M. (1983) Deep geology from seismic reflection studies in Canada. *First Break*, vol. 1, no. 7, 24-33.
- Green, A. G., Clowes, R. M., Yorath, C. J., Spencer, C., Kanasewich, E. R., Brandon, M. T. and Sutherland Brown, A. (1986b) Seismic reflection imaging of the subducting Juan de Fuca. *Nature*, 319, 210-213.
- Green, A. G., Milkereit, B., Mayand, L., Spencer, C., Kurtz, R. and Clowes, R. M. (1987) Lithoprobe seismic reflection profiling across Vancouver Island: results from reprocessing. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 89, 85-90.
- Green, A. G., Stephenson, O. G., Mann, G. D., Kanasewich, E. R., Cumming, G. L., Hajnal, Z., Mair, J. A. and West, G. F. (1980) Cooperative seismic surveys across the Superior-Churchill boundary zone in southern Canada. *Canad. J. Earth Sci.*, 17, 617-637.
- Hajnal, Z., Fowler, C. M. R., Mereu, R. F., Kanasewich, E. R., Cumming, G. L., Green, A. G. and Mair, A. (1984) An initial analysis of the earth's crust under the Williston Basin: 1979 COCRUST experiment. *J. Geophys. Res.*, 89, 9381-9400.
- Hauser, E. C., Potter, C., Hauge, T., Burgess, S., Burtch, S., Mutschler, J., Allmendinger, R., Brown, L., Kaufman, S. and Oliver, J. (1987) Crustal structure of eastern Nevada from COCORP deep seismic reflection data. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 99, 833-844.
- Kanasewich, E. R., Clowes, R. M. and McCloughan, C. H. (1969) A buried precambrian rift in western Canada. *Tectonophysics*, 8, 513-527.
- Keen, C. E., Keen, M. J., Nichols, B., Colman-Sadd, S. P., O'Brien, S. J., Miller, H., Quinlan, G., Reid, I., Stockmal G. S., Williams, H. and Wright, J. (1986) A deep seismic reflection profile across the northern Appalachians. *Geology*, 14, 141-145.
- Keppner, and Lehner, P. (1988) Geotraversing the Swiss Alps. *First Break*, vol. 6, no. 4, 106-108.
- Küppers, A. N.・鈴木尉元 (1987) ドイツ連邦共和国の大型プロジェクト "DEKORP" と "KTB". *地質ニュース*, no. 396, 9-13.
- Matthews, D. H. and Cheadle, M. J. (1986) Deep reflections from the Caledonides and Variscides west of Britain and comparison with the Himalayas. In: Barazangi and Brown (1986a), 5-19.
- Matthews, D. and Smith, C., eds. (1987) Deep Seismic Reflection Profiling of the Continental Lithosphere, Special Issue of *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 89, pp. 447.
- McGeary, S. and Warner, M. R. (1985) Seismic profiling the continental lithosphere. *Nature*, 317, 795-797.
- Mooney, W. D. and Brocher, T. M. (1987) Coincident seismic reflection/refraction studies of the continental lithosphere: a global review. *Rev. Geophys.*, 25, 732-742.
- Oliver, J., Dobrin, M., Kaufman, S., Meyer, R. and Phinney, R. (1976) Continuous seismic reflection profiling of the deep basement, Hardeman County, Texas. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, 1537-1546.
- Robertson, G. (1963) Intrabasement reflections in southwestern Alberta. *Geophysics*, 28, 910-915.
- Serpa, L. and de Voogd, B. (1987) Deep seismic reflection evidence for the role of extension in the evolution of the continental crust. *Geophys. J. R. astr. Soc. Vol.* 89, 55-60.
- Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. (1983) *Exploration Seismology*, Vol. 1, pp. 253 and Vol. 2, pp. 221, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Smithson, S. B., Brewer, J., Kaufman, S., Oliver, J. and Hurich, C. (1978) Nature of the Wind River thrust, Wyoming, from COCORP deep-reflection data and from gravity data. *Geology*, 6, 648-652.

- Smithson, 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. *J. Geophys. Res.*, 84, 5955-5972.
- Smythe, D. K., Dobinson, A., McQuillin, R., Brewer, J. A., Matthews, D. H., Blundell, D. J. and Kelk, B. (1982) Deep structure of the Scottish Caledonides revealed by the MOIST reflection profile. *Nature*, 299, 338-340.
- Spence, G. D., Clowes, R. M. and Ellis, R. M. (1985) Seismic structure across the active subduction zone of western Canada. *J. Geophys. Res.*, 90, 6574-6772.
- St-Jullien, P., Slivitsky, A. and Feininger, T. (1983) A deep structural profile across the Appalachians of southern Quebec. In: *Contributions to the Tectonics and Geophysics of Mountain Chains*. ed. by R. D. Hatcher, Jr., H. Williams, and I. Zietz, *Geol. Am. Memoir*, 158, 103-111.
- Warner, M. R. (1986) Deep seismic reflection profiling the continental crust at sea. In: *Barazangi and Brown (1986a)*, 281-286.
- Warner M. and McGeary, S. (1987) Seismic reflection coefficients from mantle fault zones. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 89, 223-230.
- Wentworth, C. M., Zoback, M. D., Griscom, A., Jachens, R. C. and Mooney, W. D., (1987) A transect across the Mesozoic accretionary margin of central California. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 89, 105-110.
- Werner, H. (1987) Seismische Geotraversen querend die Alpen. *Prakla-Seismos Report*, 1+2/87, 46-61.
- Yorath, C. J., Clowes, R. M., Green, A. G., Sutherland-Brown, A., Brandon, M. T., Massey, N. W. D., Spencer, C., Kanasewich, E. R. and Hyndman, R. D. (1985) Lithoprobe-phase 1: southern Vancouver Island: preliminary analyses of reflection seismic profiles and surface geological studies. In: *Current Research, Part A, Geol. Surv. Canada, Paper 85-1A*, 543-554.
- Yorath, C. J., Green, A. G., Clowes, R. M., Sutherland-Brown, A., Brandon, M. T., Kanasewich, E. R., Hyndman, R. D. and Spencer, C. (1985) Lithoprobe, southern Vancouver Island: Seismic reflection sees through Wrangellia to the Juan de Fuca plate, *Geology*, 13, 759-762.

最近中国で発見された新鉱床

岸本文男 (地質相談所)

Fumio KISHIMOTO

貴陽市でボーキサイト鉱床を確認

貴州省有色地質勘探公司第5総隊は5年の探査を経て貴陽郊外の斗蓬山で鉱量1,100万トンのボーキサイト鉱床を探査・確認した。この鉱床は貴州モリブデン廠から7.5kmほどのところであって面積本5万km²東西2鉱体区に分れ合せて9鉱体からなり鉱体の平均厚度は2.7m Al₂O₃/Si₂O₃値が6以上である。なお鉱体の賦存深度は50—100mの範囲にある。

吳龍根 (中国地質報, 1987. 9. 18)

華北卓状地でのウラン鉱床の探査

核工業部東北地質勘探局の第247地質大隊は大型・高品位・高収益性の鉱体の探査に積極的に取組み5年間の努力のすえ1987年末に一つのウランモリブデン構成などの大型多金属鉱床を発見した。

この鉱床の稼行価値を評価した結果はウランモリブデンなどの金属鉱の潜在経済価値が25億元を越え鉱体の賦存深度が浅く規模が大きく鉱体が集中し総合利用率が高く水溶精練に好適であるなどの特徴を備え総合開発・综合利用に適している。しかも投入すべき

資本は国家が規定している100m・1万元・ウラン1tという標準値よりもはるかに少なくて済み鉱量計算値からすると平均ウラン1t当りわずか19.2mの作業量であり0.24万元の資金となる。

この一鉱床の発見は華北卓状地でのウラン鉱床の探査の展望を開きその鉱床生成法則の研究に根拠を与え951鉱床の稼行に対する初歩的な評価を可能にし543鉱床の深部における地質的ウラン鉱量に一定の見通しを与えてくれた。またこの鉱床の発見は華北地方での大型ウラン鉱床の探査が有望なことを教えてくれたのである。顔凱旋 (中国地質報, 1988. 2. 5)

湖北省南西部で大型セレン鉱床の発見

最近湖北省地質鉱床産局第2地質大隊は同省南西部の中央部において二疊紀下部統最上部の孤峰層の薄い含炭珪質岩中で堆積型の大型単独セレン鉱床を探査・確認しその探査によってセレン胚胎層が厚さ10—14m前後セレン含有品位が一般に10—数100ppm中部主含セレン層が厚さ2—4mでセレン含有品位450—5,000ppmに達し含セレン層の分布面積は50km²を越えている。宋成祖 (中国地質報, 1988. 3. 11)