

3次元地震探査と高密度電磁探査による 地下構造解明の試み —鳥海山北麓での実験例—

山口和雄¹⁾

1. はじめに

反射法地震探査は石油・天然ガス資源の探査において重要な位置を占め、平野部や沿海地域などの探査作業が比較的容易な地域や地下構造が層構造から成る地域を主な探査対象として発展してきた。一方、近年、必要な石油・天然ガス資源を確保するために、従来は探査の対象になりにくかった山地や極浅海地域のような探査が困難な地域や、過褶曲などの複雑な地質の地域において探査が行われるようになってきており、通常実施される反射法地震探査だけでは良好な探査結果を得られない場合が多くなってきた。このため、このような難探査地域においても有効に適用できるような新たな反射法地震探査技術の開発・改良を行うことが急務とされている。さらに、反射法地震探査だけでは十分な探査ができない場合や反射法地震探査が困難である場合のために、それを補完するための探査技術として、これまでは石油探査に用いられることは少なかったが、地下数 km までの探査深度があるといわれる電磁探査等の構造探査能力について検証することも必要になってきた。

このような探鉱環境の変化に対応するために、石油公団において1987年度より6年間の計画で大型研究「難地域物理探査技術の開発」が実施されている。ここでいう「難地域」とは、従来の反射法地震探査を主体とした物理探査技術では、経済性・作業能率・データの質の面で満足のゆく探査結果を得られない地域のことを指し、具体的には山地、極浅海地域、過褶曲地域、難地質などを想定している。

この研究では、

- (1) 特殊地震探査法の開発・適用、
 - (2) 高密度電磁探査法・高精度重力探査法の適用、
 - (3) 適用した各種物理探査結果の総合的解析法の開発・適用、
 - (4) 地震探査・電磁探査物理モデル実験装置の開発・運用によるシミュレーション解析、
- を行い、難地域において有効な物理探査技術を確立する

ことを目指している。このうち1989年度までに、(1)、(2)が実際に着手され、(4)は装置の設計段階にある。

筆者は石油公団へ出向中の1989年度に本大型研究の一部に関わったが、この研究はその内容が多岐に渡るために全体の総括は他所に譲り、本稿では、難地域で行われる地震探査の問題点に関して筆者なりにまとめ、本大型研究の実験地で1989年度に実施された3次元地震探査および高密度電磁探査(MT法、TDEM法)について概説したい。なお、ここで報告するこれら3つの探査の解析結果は1989年度のものであることをお断りしておく。

2. 地震探査における難地域の分類と問題点

地表条件・地質条件によって反射法地震探査における難地域を分類した(第1表)。

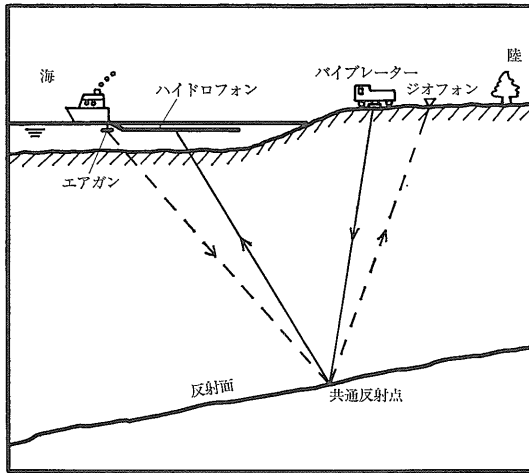
山地やジャングルでは調査地域へのアクセスが困難なために探鉱作業そのものが困難である。

測線の方向以外に反射面の傾斜が変化する地下構造(たとえば褶曲地帯)において、褶曲軸方向にしか測線を設定できない場合には、測線直下以外からの反射波が観測されることが考えられる。単一測線では、測線直下からの反射波と測線直下以外からの側面反射波を区別することができないので、得られる結果はノイズである側面

第1表 難地域の分類

地表条件	アクセス	山岳地, ジャングル, 漁網	
	測線配置	沼沢地帯	
	使用機器	都市域, 遷移地帯	
	ノイズ	荒波	
地質条件	表層地質	静補正	風化層, 凍結土
		エネルギー	溶岩, れき層, 盛土
	地質構造	急傾斜	
		小反射係数	
		断層帯	
	低速度層		

1) 地質調査所 地殻物理部



第1図 地震探査における難地域の模式図

反射波を含んだ断面となるであろう。このような問題は、地表条件等の制限により地下構造に対する最適な測線配置ができない場合に生じるものであり、地表条件からみた難地域といえよう。

第1図に示す浅海～陸域のような遷移地帯では、たとえば海側はエアガン（圧縮空気を用いる非爆薬震源）・ハイドロフォン（圧力型受振器）を用い、陸側はバイブレーター（周波数が連続変化する地震波の発生装置）・ジオフォン（速度型受振器）を用いるというように場所によって異なった震源・受振器の組合せを用いざるをえないことが多い。このような場合、同一ショット記録の中に異種観測機器によって収録されたデータが混在し、観測される反射波の波形・振幅等が使用する震源・受振器等の組合せの違いに対応して大きく変化してしまうためにCDP重合（同一の反射点に対応する受振点と発震点の対を集め地震波の経路の長さに対する走時のずれを補正して足し合わせる処理）の効果の低下を来す恐れがある。

表層の速度・構造等の異常によって震源エネルギーが表層付近で吸収・散乱されるために、表層を通り抜けて探査の対象とする反射面にまで達するエネルギーが非常に小さくなり、地表に戻る反射波が観測されないことがある。また震源エネルギーが深部まで達する場合においても、発震点・受振点の位置によっては急傾斜反射面からの反射波が観測できないことや、地層間の反射係数が小さくその境界で生ずる反射波のエネルギーが極めて小さいために受振点においてノイズレベル以下になり反射波として識別できないということも考えられる。急傾斜や小反射係数の場合、反射波が捉えられないということが地下に関する一つの情報であると考えられることもできるが、その原因が調査方法が不適切なためなのか、あるいは

は地下構造のためなのかを判断するのは現実的には困難な場合が多い。多数の断層の存在による地震波の散乱も考えられる。このほかに、地表や風化層下面の凹凸が激しい地域や風化層の速度が水平方向に大きく変化する地域での静補正（一種の時間補正で、補正值が時間軸上で変化しないもの）の問題も考えられる。これらは地質条件からみても難地域である。

3. 鳥海山北麓実験地

石油公団で実施されている大型研究「難地域物理探査技術の開発」では、難地域をそれぞれのタイプに分類し、各々の地域の特徴に適応した物理探査技術を開発して行く計画であるが、あらゆるタイプの難地域を対象にするのは困難である。そこで、まず最初に山地における反射法の技術開発が研究テーマとして取り上げられた。実験適地を検討した結果、以下の条件を満たす地域として鳥海山北麓（秋田県由利郡）が選ばれた。

- (1) 各種の物理探査測線の設定が可能、特に地表において平面的な地震探査測線の設置が可能。
- (2) 反射法によって反射面が捉えられることが分かっており、本大型研究で行うデータ収録技術・データ処理技術の開発・改良の効果が検証できる。

この実験地およびその周辺は、山地で凹凸の激しい地表地形をなし、後述の3次元地震探査測線内で最大50m以上の標高差がある。地表付近は層厚数10mの鳥海火山噴出物に覆われており（大沢ほか、1987）、この層での震源エネルギーの吸収・散乱が予想されると同時に、地表の凹凸も考え併せて静補正が重大な問題となる。既存データとして石油公団によって実施された基礎物理探査「仁賀保地域」の反射法結果（石油公団、1986）がある。それによれば、本実験地付近では反射面が北に傾いていると考えられる。この北落ちの傾斜を直線的な測線配置（東西方向の測線）による特殊地震探査（多線パラレル法、3成分受振器法）でどの程度まで把握できるかが、山地における反射法のデータの品質の向上とともに技術開発のテーマとして取り上げられた。

なお、本実験地は天然記念物秋田杉やブナの保護林がいたるところにあり、3次元地震探査測定範囲内の中央にある林道以外は、伐開を行なわないうがざり作業も困難な森林地帯であるため、作業能率・経済性等の面からみて、まさに難地域であった。

4. 鳥海山北麓で実施された物理探査

石油公団によって、鳥海山北麓実験地およびその周辺

においてこれまでに第2表に示す地震探査・電磁探査・重力探査が実施されている。第2図に1989年度に実施した3次元地震探査および高密度電磁探査(MT法, TDEM法)の測定範囲を示す(石油公団, 1990)。3次元地震探査の測線は多線パラレル法・3成分受振器法の結果と比較可能なデータが収録できる位置に設定した。両電磁探査の測線は、基礎物理探査「仁賀保地域」の地震探査測線1にほぼ沿う東西測線(本稿ではアレイ式測定域と呼称する)と、この東西測線中央部に位置する3次元地震探査測線域に重なる格子状測線(本稿ではネットワーク式測定域と呼称する)の2つの部分からなる。反射法地震探査を補完する探査法としての評価を行うために、通常電磁探査に較べて高密度で規則的な測定点配置がとられている。

4.1 多線パラレル法・3成分受振器法・MT法予備調査

従来の反射法(2次元法)では、一直線上に震源および受振点を設けるのに対して、多線パラレル法では、さらにこれに平行な複数の受振測線あるいは発震測線を追加する点に特徴がある。1987年度多線パラレル法は、東西方向に平行な受振測線を7本設けて実施された。その結果、ほぼ同じ位置で1985年度に行われた通常2次元法に較べてS/N比の改善・反射波群の連続性等の点

で高品質なデータが得られた。3成分受振器法は、多線パラレル法の中央の東西測線とはほぼ同じ測線で実施された。この方法は、通常垂直1成分だけでなく互いに直交する水平2成分のデータも受振する点に特徴がある。1988年度の実験では、垂直成分に較べて水平2成分の振幅が非常に小さいこととS/N比が悪いことのために多線パラレル法を超える品質のデータは得られなかった。MT法の予備実験は3次元地震探査実験地の北西約5kmの地点で行い、比抵抗構造が浅部から深部に向かって相対的に高一低一高と変化していることを把握した。またこの結果と電気検層の結果により整合性が見られ、MT法が地下の比抵抗分布をよく反映していることが確認された。

これら地震探査・電磁探査・重力探査の結果に関して詳しくは、石油開発技術センターの各年度の年報(石油公団, 1988, 1989)、石橋ほか(1988, 1989)および羽藤ほか(1989)を参照されたい。

4.2 3次元地震探査

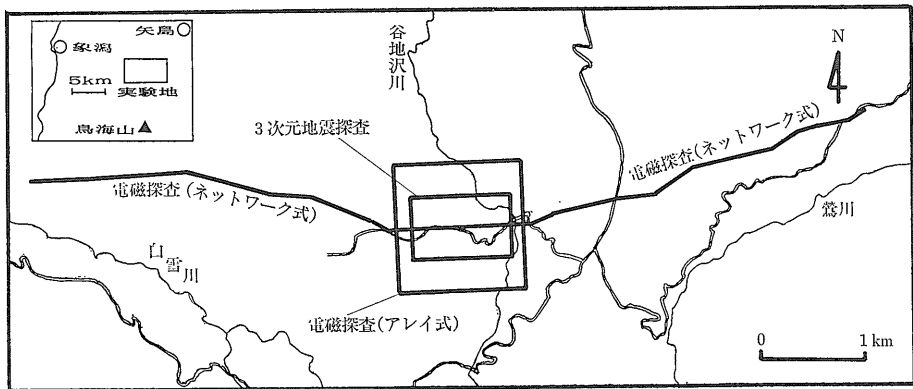
3次元地震探査は、地下構造を把握するための最も有効な方法の一つであり、石油探鉱においては地質構造精査・埋蔵量評価・貯留層把握等に用いられる。1989年度の3次元地震探査は、本実験地の反射面の3次元形状を把握することにより、前2年間に行われた特殊地震探査法の評価を行うことを目的として実施されたものである。

(1) データ収録および処理

特殊地震探査法との比較検討を容易にするために、3次元地震探査のデータ収録(震源・受振点間隔等)およびデータ処理の仕様は、基本的に特殊地震探査法の仕様に合わせてようにした。ただし、データ収録・処理のそれ

第2表 鳥海山北麓実験地およびその周辺でこれまでに実施された物理探査

	年度	反射法地震探査	電磁探査	重力探査
基礎地質調査	1985	通常(2次元法)		通常
大型研究 難地域物理探査 (前期3年間)	1987	多線パラレル法		高精度
	1988	3成分受振器法	MT法(予備)	坑井内
	1989	3次元法	MT法, TDEM法	



第2図 実験地位置および3次元地震探査・電磁探査測定範囲。
3次元地震探査は中央付近の小さい長方形内で実施した。MT法, TDEM法は東西に延びる測定点(アレイ式測定域)および中央付近の正方形(ネットワーク式測定域)で実施した。

ぞれの段階でパラメータテストを行っている。3 次元地震探査で採用した主なパラメータは以下の通りである。

震源 (ダイナマイト)	4.5~5.2kg
受振点間隔	20m
発震点間隔	40m
チャンネル数	672 (14測線×48受振点)
サンプル間隔	4ms
総ショット数	152
CDP ビンサイズ	10m×10m
CDP ビン数	5280 東西96×南北55

データ処理は、静補正、周波数フィルター、振幅回復、

速度解析、DMO (反射面の傾斜によって生ずる地震波の走時変化を補正する処理)、CDP 重合およびマイグレーション (傾斜している反射面を空間的に正しい位置に戻す処理) 等を実施した。

(2) 調査結果

最終的に、10m間隔で東西方向に55、南北方向に96の時間断面が得られた。

第3図に、3次元地震探査調査範囲のほぼ中央を通る直交する2つの重合測線の、DMO 処理を行ったマイグレーション前時間断面例を示す。

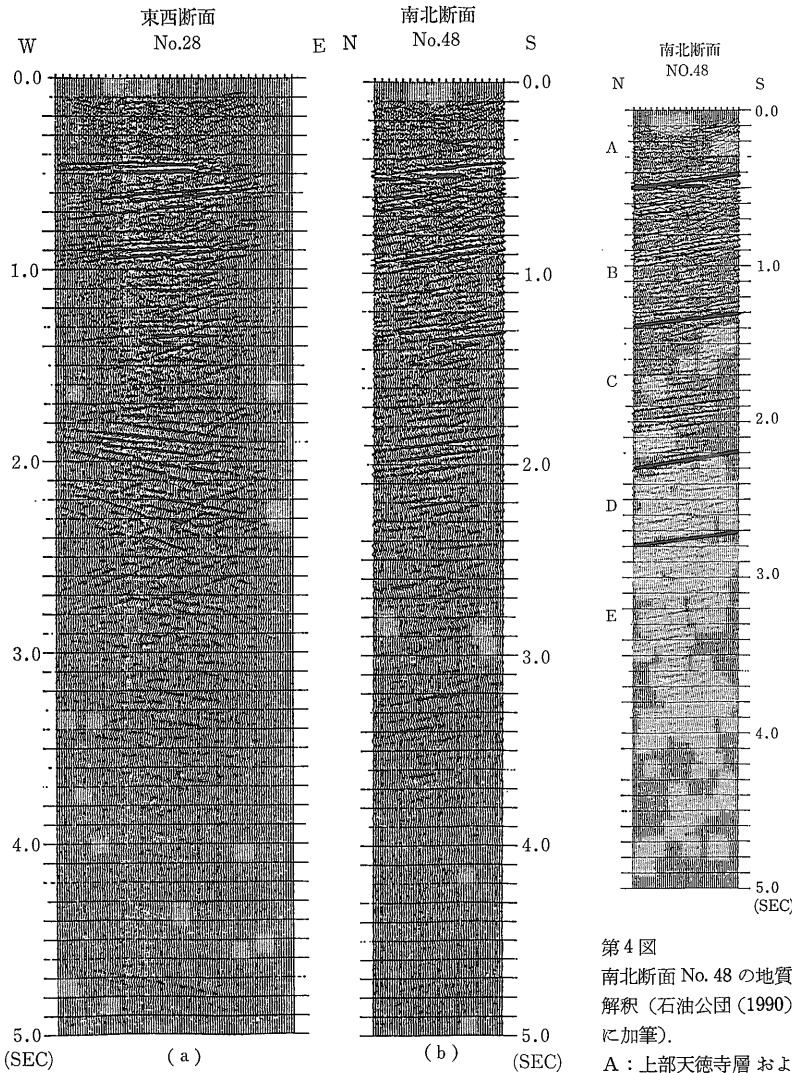
東西断面 No. 28は、多線パラレル法・3成分受振器法の CDP 重合測線とほぼ重なる位置にあり、その反射面の形状および傾斜は、多線パラレル法および3成分受振器法で得られた反射記録と同様な傾向を示している。また、南北断面 No. 48では反射面の形状は単純で、傾斜の違いはあるがいずれの反射面も北落ちとなっており、多線パラレル法によって推定された測線に直交する方向 (南北方向) への反射面の傾斜と調和的である。

次に、基礎物理探査「仁賀保地域」の地質解釈を参照して、南北断面 No. 48上で地質との対比を行った (第4図)。

近年実験地の北側の由利原台地において女川層よりも下位の西黒沢層の凝灰岩、玄武岩中に油・ガス層が発見され深部層である同層が新しい探鉱対象として注目されるようになってきた。本探査結果ではこの西黒沢層以下にも何枚かの反射面が現われた。ただし、実験地域に坑井データがなく、探査範囲が狭い範囲に限定されていることを考慮すると、今回のデータのみで深部層を解釈するのは困難である。

(3) 検討課題

今後、3次元地震探査データ処理フローおよびパラメータの見直し (静補正・速度解析・DMO



第3図 3次元地震探査重合断面 (石油公団 (1990) に加筆) DMO 処理を行った東西および南北方向の時間断面。いずれの断面も第2図の3次元地震探査測定範囲 (中央の長方形) のほぼ中央を通る。

第4図 南北断面 No. 48の地質解釈 (石油公団 (1990) に加筆)。A: 上部天徳寺層およびその上層, B: 下部天徳寺層, C: 船川層, D: 女川層, E: 西黒沢層およびその下層

・マイグレーション等)を行い、調査地域における最適な地下構造モデルを構築することが必要である。こうして得られた最適地下構造モデルをもとにして、多線パラレル法・3成分受振器法における最適データ収録・処理パラメータを定量的に検討し、山地における両探手法の有効性の検証を行うべきであろう。

4.3 MT法探査

MT法やTDEM法はいずれも地下の比抵抗構造を推定する有力な方法であり(Kaufman et. al., 1983, 小川, 1990), 比抵抗異常の検出に適しているため金属資源や地熱資源の探査に広く用いられている。

MT法(Magnetotelluric method, 地磁気地電流法)は地磁気の変動とそれによって誘導される電磁場を測定することによって地下深部の比抵抗分布を求める手法である。MT法の探査深度は、地下の比抵抗構造にもよるが、一般に電磁場の周波数が低いほど深くなるため、いろいろな周波数を観測することにより比抵抗垂直探査を行うことができる。

(1) データ収録

- 測定点数 アレイ式(東西測線) 41点
- ネットワーク式(格子状測線) 49点(7×7)
- このうち7点はアレイ式測定点と兼用
- 測定点間隔 200m
- 電位電極間隔 200m

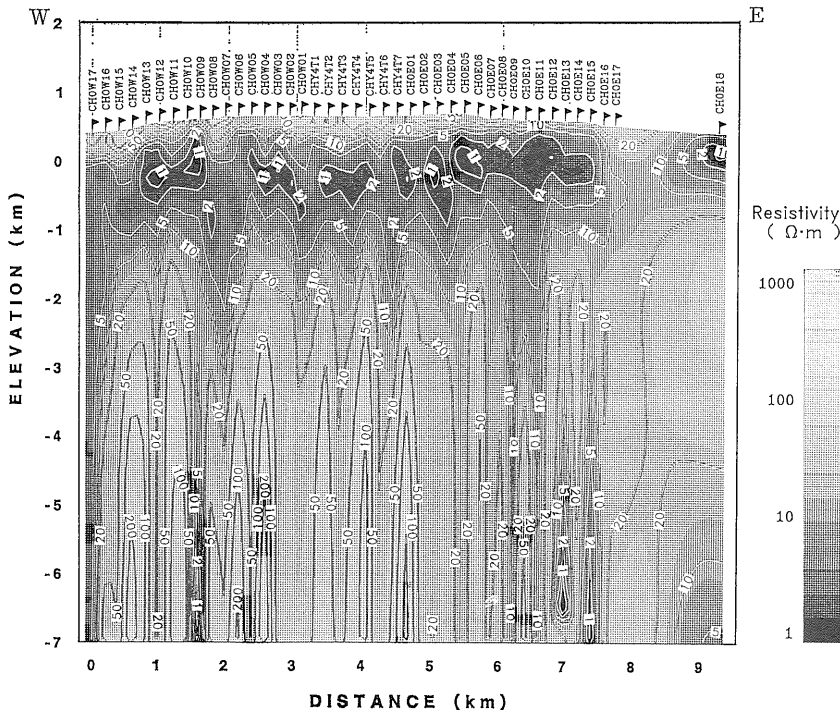
(2) データ解析

測定点毎に水平多層の比抵抗構造を仮定し、ポスティックインバージョン(観測データを深度一比抵抗に変換する方法)等によって1次元水平多層の深度一比抵抗のモデルを求め、逐次並べて地下構造を表現した(1次元解析)。このほかに、2次元解析として、アレイ式測定域(東西測線)の測定点の実測データの見かけ比抵抗・位相(観測値)と、2次的に組み立てられた地下比抵抗モデルから有限要素法により理論的に求められる見かけ比抵抗・位相(計算値)とを比較し、両者が良い整合性を示すまで比抵抗モデルを組直すという解析も行われた。

(3) 調査結果

第5図にアレイ式測定域(東西測線)の1次元解析比抵抗断面図を示す。

本調査地域の比抵抗構造は基本的に3層構造を呈し、比抵抗は深部に向かって相対的に高一低一高の変化を示す。石橋ほか(1989)を参照して比抵抗値と地質との対比を行った。第1層は比抵抗値20~100Ωmの高比抵抗域で第四紀火山岩類(鳥海火山噴出物)に対応し、層厚は0~200mで東へ向かうほど薄くなり測線東部の測定点CHOE11~CHOE15においてはほとんどなくなる。この領域は地表に露出している第三系(天徳寺層)に対応すると考えられる。第2層は20Ωm以下の低比抵抗を示し、浅部の高比抵抗層の下位から海拔約-2kmまで全



第5図
MT法アレイ式測定域(東西測線)の1次元解析比抵抗断面(石油公団(1990)).

域に分布し、海拔0 km付近が最も比抵抗が低く、約1 Ωm のところもある。第3層は20 Ωm 以上の深部の高比抵抗層であり、測線中央部から西部にかけて発達する。

4.4 TDEM 法探査

TDEM法 (Time Domain Electromagnetic method, 時間領域電磁探査法) は、人工の送信電流を遮断した後、生ずる渦電流が作る磁場を測定することによって地下の比抵抗構造を求める方法である。MT法では周波数領域でのデータ収録を行うのに対して、TDEM法では時系列のデータを取り扱う点に特徴がある。

(1) データ収録

測定点数 アレイ式 (東西測線) 72点
ネットワーク式 (格子状測線) 121点 (11×11) このうち11点はアレイ式測定点と兼用

測定点間隔 100m

(2) データ解析

各測定点は独立にデータ解析された。地下構造として1次元水平多層比抵抗構造 (初期モデル) を仮定し、このモデル上でTDEM測定を行った場合に得られる見かけ比抵抗値を理論的に計算し、見かけ比抵抗の実測値と比較する。順次モデルを修正し、両者の誤差が最小となるようなモデルをその測定点付近での地下構造モデル (解析比抵抗断面) とした。

(3) 調査結果

第6図にアレイ式測定域 (東西測線) の解析比抵抗断面図を示す。

調査地域の比抵抗構造は4層構造であり、比抵抗構造は深部に向かって相対的に中一高一低一高 (中) の変化を示す。浅部から順に第1層10~40 Ωm 、第2層40~100 Ωm 、第3層1~10 Ωm の比抵抗構造を成し、最下部は10 Ωm 以上の高比抵抗層が続いている。石橋 (1989) を参照すると、地質との対応は、第1層が鳥海火山噴出物・西目層・笹岡層、第2層が天徳寺層および船川層の一部、第3層が船川層・女川層、最下部が西黒沢層以下のグリーンタフ層に相当すると考えられる。

低比抵抗層 (第3層) の上面は全体として西に行くほど深くなる傾向が見られる。第4層の上面は測定点17付近で盛り上がりが見られ、それより西側で急に深くなっている。この盛り上がりは地質図 (大沢ほか, 1988) に示されている背斜軸と一致する。

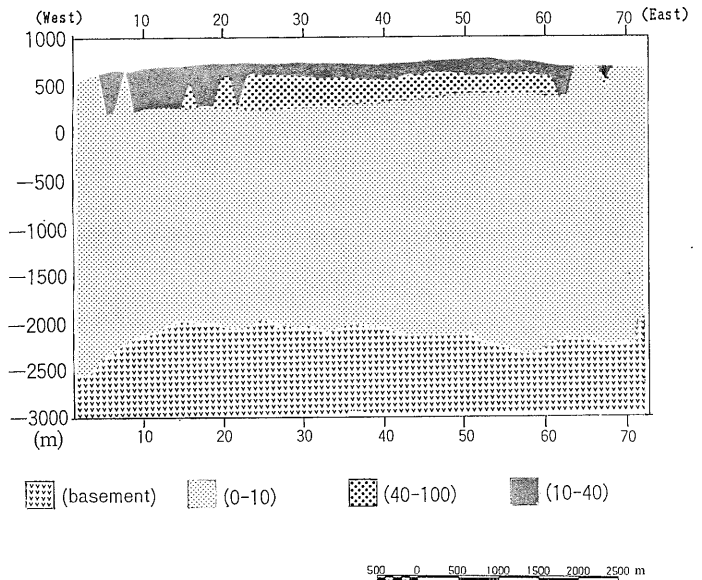
4.5 電磁探査の検討課題

1991年6月号

MT法の結果とTDEM法の結果は調和的であり、本調査地域の比抵抗構造は浅部から深部に向かって、相対的に高一低一高という分布であると推定される。また調査地域の基盤であるグリーンタフの西黒沢層は最深部の高比抵抗層 (MT法では20 Ωm 以上、TDEM法では10 Ωm 以上) としてとらえられ、その深度は解析の結果2~3 kmと推定された。TDEM法では東西測線の西側において基盤の急な落込みが検出された。このようにMT法、TDEM法は、深部比抵抗構造調査において有効であると考えられる。

電磁探査の解析では比抵抗値をいくつかの範囲に分けることがよく行われるが、この範囲分けは必ずしも実際の地層の境界と対応するものではないと考えられる。比抵抗構造と地質構造との対応関係も含めて、両電磁探査結果の詳細な比較・検討を行うことが必要である。

一方、電磁探査のデータ処理・解析は、各測定毎に独立に比抵抗構造を計算することが一般的である (1次元解析)。これは1次元解析がコンピュータによってほぼ自動的に解析されるので解析時間が短いということや、通常は2次元解析に適したデータ収録を行っていないこと等による。今回の電磁探査では、通常実施される電磁探査に較べて測定間隔を高密度で規則的にしているのので、2次元解析 (さらには3次元解析) の適用が可能な仕様であると考えられる。今後、反射法地震探査のデータ処理等と同様の考え方に基づいて、電磁マイグレーション



第6図 TDEM法アレイ式測定域 (東西測線) の解析比抵抗断面 (石油公団 (1990))

ン、イメージング等（これらは初期値設定等において、解析者の主観を排除した自然な方法による解析手法である）の新しい処理・解析手法の開発・適用が望まれる（例えば、坪田ほか（1989））。

7. まとめ

難地域における地震探査の問題点を指摘し、石油公団によって行われている大型研究の一部について概説した。

山地における有効な物理探査技術を確立するための基礎的な実験として、ほぼ同一の測線および測定域において、3次元地震探査、高密度電磁探査（MT法、TDEM法）が実施された。3次元地震探査は、特殊地震探査法である多線パラレル法および3成分受振器法を評価するために実施された。電磁探査では、地震探査データとの対比および将来の新しい電磁探査データ処理・解析手法の開発・適用を考慮して、アレイ式・ネットワーク式の高密度なデータ収録が行われた。

今後、多線パラレル法、3成分受振器法および両電磁探査法のそれぞれの評価を行ない、難地域の一つとして取り上げられた山地における有効な物理探査技術を確立することが必要である。

また、難地域における物理探査に限ったことではないが、地震探査によって得られた地層の物性（地震波速度）と電磁探査によって得られた物性（比抵抗）との関係を明確にし、その上で、地震探査および電磁探査の総合的な解析を、解析手法の開発とともに進めて行くこともこれからの物理探査にとっては重要な研究課題になるであろう。

謝辞：本稿をまとめるに当たり、石油公団石油開発技術センターの羽藤正実氏（現在（株）地球科学総合研究所）、石橋利久氏（現在（株）日鉱探開）の多大な協力を得ました。

同センターの岡野 正物理探査研究室長には本稿の発表を許可していただきました。また、原稿の修正に関して査読者および編集委員の方々から貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 羽藤正実・山口和雄・石橋利久（1989）：難地域における物理探査—鳥海山北麓—，物理探査学会第81回学術講演会論文集 349-352。
- 石橋利久・天野 博（1988）：Variable Density補正法の適用，物理探査学会第79回学術講演会論文集 299-304。
- 石橋利久・羽藤正実・山口和雄（1989）：秋田県仁賀保地区におけるMT法実験調査，物理探査学会第81回学術講演会論文集 325-330。
- Kaufman, A. A. and Keller, G. V.(1983): Frequency and transient sounding. Elsevier Amsterdam, 685p.
- 小川康雄（1990）：MT法による地下構造探査，地質ニュース，no. 428, 48-54。
- 大沢 稔・片平忠実・中野 俊・土谷信之・栗田泰夫（1988）：矢島地域の地質 地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，87p。
- 石油公団（1986）：昭和60年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「仁賀保地域」調査報告書，18p。
- 石油公団（1988）：石油開発技術センター年報 昭和62年度 104-116。
- 石油公団（1989）：石油開発技術センター年報 昭和63年度 91-109。
- 石油公団（1990）：石油開発技術センター年報 平成元年度 89-102。
- 坪田浩二・則竹和光・仙波 毅・清水和彦・斉藤 章・石川秀浩（1989）：時間領域電磁法のイメージング，物理探査学会第81回学術講演会論文集 268-273。

YAMAGUCHI Kazuo (1991): Substructure exploration by 3-dimensional seismic method and high density electromagnetic methods.

<受付：1990年10月2日>