

特 集

資源探査の現状と将来

物理探査の概要

General Remarks of Geophysical Prospecting

吉住 永三郎\*

Eizaburo Yoshizumi

1 ま え が き

今回、「資源探査の現状と将来」の特集に際し、「物理探査の概要」を執筆することになったが、今回の特集には、石油・天然ガス、金属・非金属、核燃料、地下水、地熱、海底硬鉱物資源、地下構造の7項目の探査対象について、各分野の専門家による執筆が予定されているので、この概要では、まず、おもな探査方法を説明し、次で、物理探査の課題を列記し、2つの課題についての対策を提案することにする。

2および3における用語の説明は、物理探査学会出版の物理探査用語辞典（編集委員長 吉住永三郎、昭和54年5月）から、また、図-1~5は同学会編集の「物理探査創立20周年」（昭和43年4月）から抜粋したものである。

2 物 理 探 査

地下に存在する物質の物理的、化学的性質と直接あるいは間接的に関連して、人為的または自然的に生じた現象を遠隔的に観測し、その資料を解析することにより、地質構造の様相、鉱床の存在などのような地下の状態を解明すること。利用される物理現象により、地震、電気、磁気、重力、放射能、地温探査等、方法別に分類される。坑井、試錐孔内の特殊な応用変形として物理検層がある。また、使用するセンサーの場所により、地表、空中、海上、海底、坑道内、坑井内物理探査などの呼び名がある。探査対象も多岐にわたり、石油、金属および非金属鉱床、石炭、地熱、地下水、温泉、土木・建築、防災の各分野で物理探査が実施されており、最近では地球科学のような純学術分野にもこの技術が利用されている。

2.1 物理探査法一覧

表1は物理探査法の内容を一覧にしたものである。表1に示すように、物理探査には多くの方法があり、それぞれの探査には固有な現象および物理定数があり、探査結果から得られる情報は異なった物理的性質のものである。

3 各種物理探査法

3.1 弾性波探査法(地震探査法) (図-1)

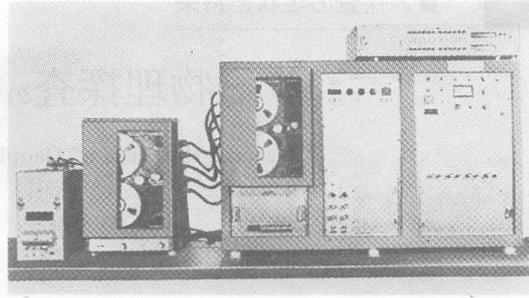
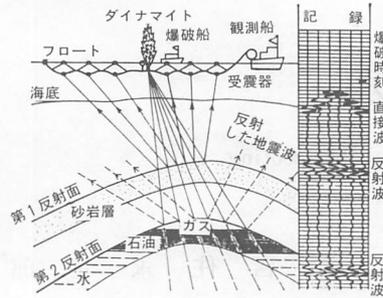
人工的に起こした弾性波動を利用して、地質構造や、地下の物質を推定する方法。対象の深さにより土木工学のための浅層探査、および主として石油ガスの鉱床

表1 物理探査法一覧

方 法	現 象	物理的性質 または状態	おもな 応用分野
弾性波探査 (地震探査)	弾性波動(人工)	伝播速度 反 射 屈 折	石油・石炭 一般地質構造 特殊鉱床 基礎地盤
重力探査	重 力(自然)	密 度	石油・石炭 一般地質構造 特殊鉱床
電気探査	分極現象 定常定流(自然) 電磁現象(人工)	分 比 抵 抗 透 磁 電 率	金属鉱床 一般地質 地下水盤 基礎地盤
磁気探査	地磁気(自然)	透磁率 磁化率 残留磁気	磁性鉱床 特殊地質構造
放射能探査	放射能(自然) (人工)	放 射 能	放射性鉱床 特殊地質構造 放射能追跡子の利用
地温探査	熱 (自然)	熱伝導度 発 熱 熱 流 量	地 熱 源 温 泉 特殊鉱床
物理検層(試錐孔・坑井内の物理探査) 自然電位(SP), 比抵抗, 放射能検層, 密度検層, 速度検層, PS 検層など			石油層 石炭層・鉱脈 一般地質構造 基礎地盤

\* 京大工学部資源工学科教授

## 海上地震探査



デジタル地震探査器

図-1 弾性波探査

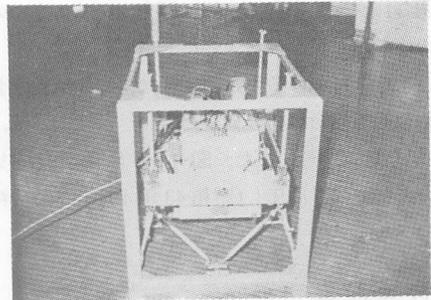
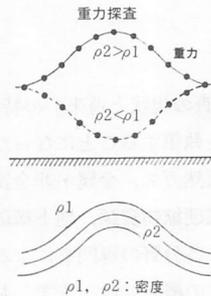
探査を目的とした深層探査に大別される。また利用する波の性質により、地層境界からの反射波を解析する反射法、地下の高弾性波速度層による屈折波を利用する屈折法に分類することもできる。反射法、屈折法以外に、直接波を利用する方法も特殊な目的の際には用いられることがある。いずれの方法も弾性波としてはP波を使用するのが一般的であるが、S波を使用して探査を行なう場合もある。

一般的には、震源、受振器をともに地上、あるいは海面付近に設置し、反射波もしくは屈折波を検出・記録するが、その他目的に応じて、震源もしくは受振器を、孔中やトンネル内に設置する方法も使用される。震源としては、爆薬震源の他、各種の非爆薬震源が用いられ、受振器としては、ジオフォンやハイドロフォンが利用される。またS波を発生させる場合は特殊な震源を用いることが多い。

マルチチャンネルあるいはシングルチャンネルの繰り返しによって得られた地震記録は、直接ペーパー記録として出力されることもあるが、今日ではほとんどすべて磁気録音されるようになっている。録音された記録については、解析に先立ち、各種の処理を行なうのが普通で、特にデジタル式のマルチチャンネルによる反射法の場合には、大型電子計算機による複雑なデータ処理を行なうようになっている。

## 3.2 重力探査法 (図-2)

地球の表面で観測される重力値は、場所により変化するが、その原因としては、(1)地球は完全な球体でない、(2)緯度により、地球の自転による遠心力の影響が異なる、(3)観測した場所の標高の違い、(4)観測した場所の周辺の地形の起伏による影響、(5)地下の密度分布が均一でない、等がある。これらのうち(1)~(4)に起因する重力変化に対し必要な補正を加え、(5)の地下の密度分布を反映する重力異常を求め、重力図・重力断面



船上重力計 (本体)

図-2 重力探査

等を作成する。この重力異常に適切な解析・解釈を加え地下構造を推定することを重力探査という。

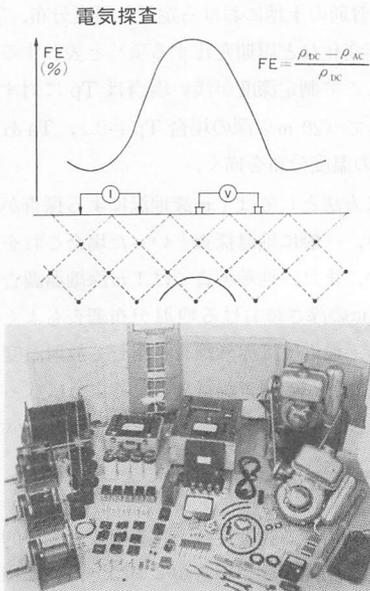
重力異常からある岩体モデルを想定し、曲線照合法や異常の特別な部分を利用する方法等により、直接的に地下の構造を推定する事ができるが、1つの重力異常に対応する地下構造は無限に存在し、重力データのみから一義的に地下構造を求める事は一般的には困難である。したがって、他の物理探査のデータや地質情報を加えて総合的に解釈する事により、より効果的な地下構造の推定ができるし、さらに地層の物理的性質を知る重要な手掛りが得られる場合もある。重力異常と直接結び付く岩石密度は、地域により異なった特性をもつので、坑井を利用した密度検層や地表岩石より得られた密度情報は解釈上特に重要である。

陸上の測定には、陸上用重力計の他、立ち入りの容易でない場所では、ヘリコプターから降下する遠隔操作型の重力計が使用されている。海上では海底型重力計や船上重力計が使用される。その他特殊なものとして、坑井重力計による密度の垂直変化の測定や、航空機による広域調査も実施されている。

3.3 電気探査法 (図-3)

岩石や鉱物などの比抵抗、誘電率あるいは電気化学的分極等、電気的属性の差異に着目して、人工的または自然的要因によって発生した電界ないし電磁界の諸量を地表や空中などで測定し、そのデータから地下の構造や状態を推定し、あるいは鉱床等を検出する探査方法の総称。他の物理探査法が単一の力の場を利用しているのに対して(例えば、重力、磁気、弾性等)、電気探査法は電磁界の型式やその観測方法がきわめて多岐にわたっている点が特徴的であり、利用する周波数範囲も直流から放送周波数帯域以上に及ぶ。それ故、電気探査法に属する探査法の種類もきわめて多い。

電気探査法の分類の仕方は種々あるが、自然のエネルギーを利用する方法(自然電位法、地磁気地電流法、Afmag法等)と人工的なエネルギーを利用する方法(比抵抗法、IP法、電磁法等)とに大別される。利用しようとする電気的属性に基づいて分類されることもある。初期の段階では、静的または定常電界の観測に基づく方法(自然電位法、比抵抗法等)が実用化され、最近の電子技術の進歩に伴って、微小の過渡的電磁界や交



電気探査器 (強制分極法)

図-3 電気探査

流電磁界等の観測が精度よく実施されるようになって、IP法、電磁法、地磁気地電流法等が急速に発展した。

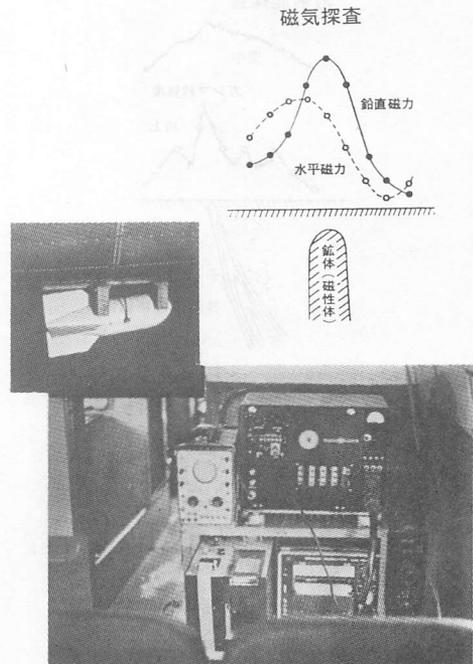
電気探査法はまた電気的属性の平面的分布や測線沿いの変化を求める水平探査として広い応用範囲をもつが、垂直的分布を求める垂直探査にも用いられる。電極間隔などの幾何学的パラメーターを変える垂直探査法の他、電流透入深度の周波数依存性を利用する垂直探査法も相次いで開発されている。前者の例として比抵抗垂直探査法(シュランベルジャー法、ウェンナー法、双極子法等)があり、後者には地磁気電流法や電磁垂直探査(AFMT法等)に例がみられる。

電気探査法は試錐孔内の測定にも利用されており、代表的な応用として電気検層、鉱体流電法、試錐孔IP法などがある。

電気探査法は金属鉱床、地下水、地熱等においては最も重要な探査法となっており、また、地質構造調査法としても適用分野が広い。

3.4 磁気探査法 (図-4)

陸上、海上あるいは空中で地球磁場を測定し、これに基づいて地下の磁性体の分布を求めることにより地下の構造、岩質、資源などの様子を調べる物理探査の1方法。地殻を構成する岩石はそれに含まれる磁鉄鉱のような強磁性物質の量に応じて磁性をもっており、



空中磁力計 左上は検出部

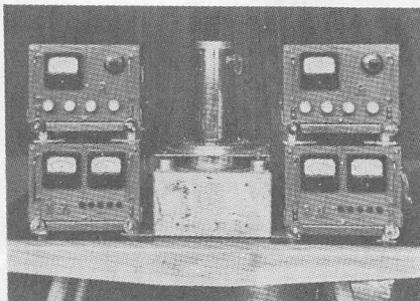
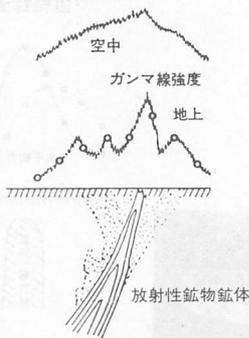
図-4 磁気探査

地球磁場によって誘発される誘導磁化や岩石固有の残留磁化を発生させている。こうした磁化が作る磁場は標準地球磁場に較べて非常に小さいが、測定された地球磁場から標準地球磁場を差し引くことにより磁気異常として検出される。磁気探査の歴史は鉄鉱床をはじめとする金属鉱床の探査に始まったが、磁力計の進歩により微弱な磁気異常の検出が可能になるとともに次第に対象を広げてきた。1950年代に空中磁気探査が普及するにつれ、非鉄金属鉱床や石油鉱床の探査他に国土の基礎調査にも用いられるようになり、さらに近年は地熱探査でも地下深部の温度分布を調べるためにも使われている（キュリー等温面深度探査）。この他に、トンネルやダムの調査、埋没爆弾調査等多くの分野で使われている。

### 3.5 放射能探査法（図-5）

放射能の検出に基づく探査法。広義的には人工放射線源を使用する検層法（ガンマーガンマ検層、各種の中性子検層など）もこの範ちゅうに入るが、通常はウラン、トリウムなどの天然放射性鉱物から放出される放射線（主としてガンマ線）を対象とする探査法を指す。測定器としてシンチレーションカウンターあるいはGMカウンターが用いられる。探査の形態は携帯型測定器による踏査以外に、車載型測定器を使つての探

放射能探査



カーボン用放射能探査器

図-5 放射能探査

査（カーボン）、飛行機による空中探査（エアボーン）、あるいは試錐坑井内の検層などがある。また湖水の多い地域（例えばカナダ北部）では特殊のプロープをボートで曳航して湖底の放射能を連続的に測定する方法も行なわれている。広い地域を対象とする場合、まずエアボーン（あるいはカーボン）による広域探査を行ない、検出された放射能異常地点の踏査（グラウンドチェック）、グリッドサーベイなどで探査範囲を限定し次段階の試錐（検層）へと進むのが基本的な探査のパターンである。

### 3.6 地温探査法

地温の分布状態を調べることによって温泉等の地下熱源の賦存状態（位置・深さ・形状・温度・規模等）を推定する方法。温泉脈や温泉帯水層等の探査に用いられることが多いが、それにとどまらず地熱開発を目的とした探査でも行なわれている。

地中において気温等の影響による温度変化の振幅は深さと共に指数関数的に減衰し、日変化は深さ約50 cm、年変化は深さ10~20 mに達するとほとんどなくなるので調査深度は深いほどいい。調査する深さにも規則はなく何でもいいが、深くになると労力や費用の面で問題があり、また、浅すぎるとその土地における気温や風速・太陽の日射等の気象要素の日変化・年変化等の影響を受けやすく補正が難しくなる。

Tを測定値とした場合、 $T = T_a + T_n + T_p$ （ $T_a$ : 特殊熱源による地温の異常分布、 $T_n$ : 地熱の影響を受けていない普通土地における定常な温度分布、 $T_p$ : 日変化・年変化など周期変化する項）と表わすことができる。ここで測定深度が浅い場合は $T_p$ に対する補正を行なって（20 m以深の場合 $T_p \div 0$ ）、 $T_a$ あるいは $T_a + T_n$ の温度分布を描く。

手軽な方法としては1 m深地温による探査が行なわれており、一般に地温探査といった場合これをさすことが多い。また、地熱調査では1 m深地温調査の他に10~100 mの深さにおける地温分布調査もよく行なわれている。最近では赤外線を利用して放射温度計等で地表面温度分布の調査が行なわれるようになってきたが、これも広義な意味で地温探査といえることができる。

## 4 物理探査の課題

探査に利用する物理定数と探査対象の物理的性質とは直接的な相関がない場合が多いので、物理探査には色々な課題がある。例えば、探査理論の確立、測定方式の開発、境界値問題と逆境界値問題、測定結果の解

析と解釈, 適用性の検討, 研究と教育, 学会体制の確立などである. 誌面の都合で, 測定方式の開発, 測定結果の解析と解釈, について述べる.

4.1 測定方式の開発

地下レーダーについて説明する. 図-6は地下レーダー装置で, 電磁波を地下に放射し, 地中の地層や埋設物の境界面からの反射波あるいは透過波を利用して地下構造の断面図をうる測定方式である. 図-7は地下構造断面図の例で, ①は地表面による反射, ②は第1層による反射, ③は第2層による反射である. 色々検討すべき問題も多く, 浅い地下構造ではあるが, 図-7のような電磁波による断面図がえられたことは甚だ興味あることで, 今後の研究が期待される測定方式である.

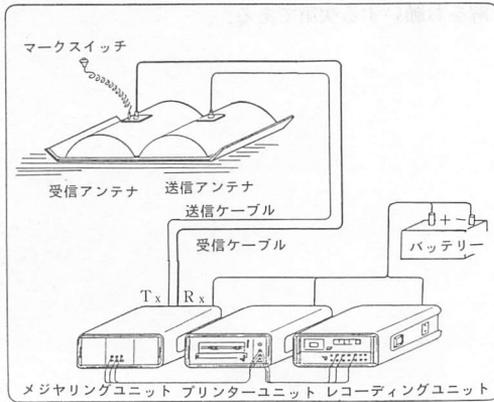


図-6 地下レーダー装置

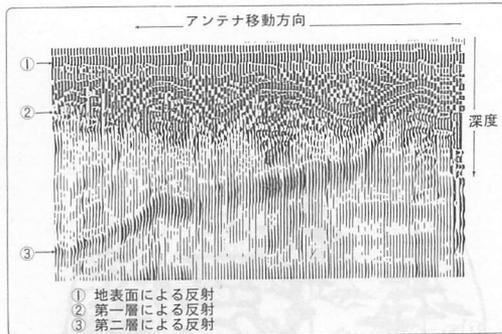


図-7 地下構造断面図

4.2 測定結果と解析と解釈

使用する物理定数による測定結果の解析と解析結果の探査対象への解釈とを明確に区別して考察することが重要である. 比抵抗電気探査法を例にとり説明する. 解析法は測定結果の見掛比抵抗 ( $\rho_a$ ) から, 単位体積の集合体とする地下構造の当該単位体積比抵抗 ( $\rho_u$ ) を解析する  $\rho_a - \rho_u$  解析法である.

図-8と図-11は表土層と地形のみが, 図-9と図-12は

表土層と地形とともに探査対象の地下構造が併存する場合の Wenner 電極配置による見掛比抵抗断面図である. 図-10と図-13は  $\rho_a - \rho_u$  解析法による解析結果で, 表土層と地形のノイズが除去された単位体積比抵抗断面図である. 探査対象の地下構造が図-9と図-12に比べて図-10と図-13の方が精度高く解析されている. 解釈は自ら容易になる. 表土層や地形のノイズの除去や解析精度の向上は重要な課題である.

Apparent Resistivity Contour ( Wenner ), PIRM21 1 (ashizumi Laboratory, Kyoto University)

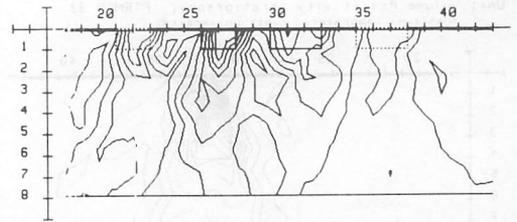


図-8 見掛比抵抗断面図

Apparent Resistivity Contour ( Wenner ), PIRM19 1 (ashizumi Laboratory, Kyoto University)

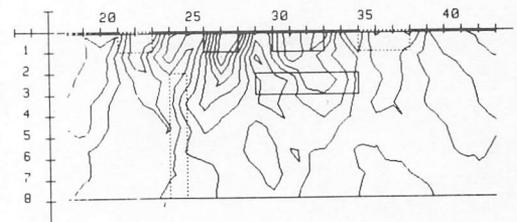


図-9 見掛比抵抗断面図

Unit Volume Resistivity Stratigraphy, PTRM19 33 (ashizumi Laboratory, Kyoto University)

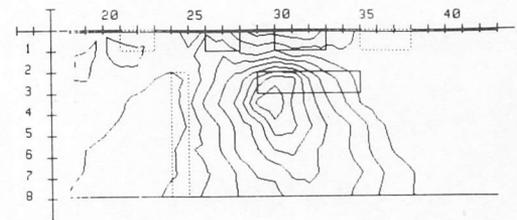


図-10 単位体積比抵抗断面図

Apparent Resistivity Contour ( Wenner ), PIRM23 1 (ashizumi Laboratory, Kyoto University)

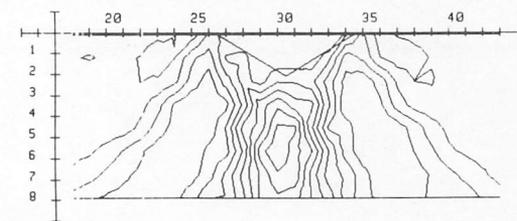


図-11 見掛比抵抗断面図

Apparent Resistivity Contour (Wenner), PIRM25 1  
Yuzuzumi Laboratory, Kyoto University

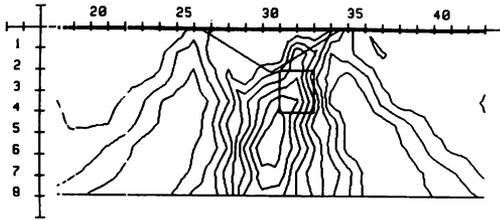


図-12 見掛比抵抗断面図

Unit Volume Resistivity Stratigraphy, PTRM25 33  
Yuzuzumi Laboratory, Kyoto University

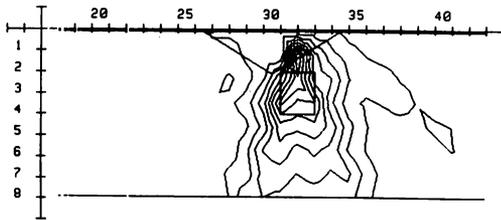


図-13 単位体積比抵抗断面図

### 5 あとがき

地下レーダーによる探査例と  $\rho_a - \rho_u$  解析法による解析例は昭和56年度の特許装置設備「電磁誘導式地下探査装置」による研究でえられたもので、特許装置設備の設置には、西島安則前工学部長に、また、地下レーダーの製作には、(株)応用地質調査事務所(陶山国男社長)に謝意を表わす次第である。なお、これらの一部は第51回米国際物理探査学会(昭和56年10月)および第44回ヨーロッパ物理探査学会(昭和57年6月)で発表されたものである。

物理探査法のうち、検層、電磁探査法、IP法、リモートセンシングなどの説明は誌面の都合で割愛した。ご了解をお願いする次第である。

