

天然ガス資源の探査技術の現状と その地球物理学アクティビティ

The Current Status of Geophysical Exploration Method and Geophysical Activity for Natural Gas Exploration

岡野 正*・菅野 強**

Tadashi Okano Tuyoshi Sugano

1. はじめに

天然ガスはその地質学的産状によっておよそ次のように大別される¹⁾。

- (1) 油田において原油と共に産出するガス
- (2) 油田地帯の油を含む地質系統中に遊離形鉱床を形成して存在する油田系ガス
- (3) 原油または石炭の鉱床を有しない地質系統中で主として地層水中に溶解状態をなして存在する水溶性天然ガス
- (4) 炭田地帯で炭層または炭層付近の地層から産出する炭田ガスである。

平成2年度(1991年度)における国内の天然ガスの生産量は、上記(1)に起因するもの55百万m³、(2)に起因するもの1,450百万m³、(3)に起因するもの534百万m³および(4)に起因するもの26百万m³であり、合計2,065百万m³である(天然ガス鉱業会ほか、1992)²⁾。ところで集計の仕方は異なるが、1992年の世界の天然ガスの生産量は21,590億m³と報告されており(OGJ, 1993)³⁾、日本国内の天然ガス生産量は全世界の生産量の約0.001%にすぎない。

国内的には(1)及び(2)に起因する天然ガスは、秋田県、新潟県及び北海道で生産されている。(3)の水溶性ガスは、千葉県東部の茂原周辺がその生産地である。(4)の炭田ガスの例としては、常磐炭田における天然ガスの生産が挙げられる。

今回探査対象として議論する天然ガスは、上記(1)及び(2)に属する天然ガスであり、適用される探査手法としては油田に対する探査手法と同じとみなすことが出来る。本稿では、今後探査対象として石油・天

然ガスと表記する。

2. 物理探査が適用される分野および 分野別作業費

岩石は、さまざまな物理的特性を持っている。したがって、岩石の集合体である岩体や地層も固有の物理的特性を持つことになる。もし、岩体や地層相互の間の物理的特性が明らかに異なる場合には、この差異を利用して岩体や地層の境界を識別することが出来る。このような考え方に基づいて地球内部の様子を調べる学問分野を地球物理学(Geophysics)とよんでいる。とりわけ、石油・天然ガスや金属鉱床のような地下資源の発見を目的としたり、また、トンネルやダム建設を目的とするような人間の生活のために地球の比較的浅い部分の様子(構造)を調べる場合には、これを特に地球物理学的探査、略して物理探査(Geophysical Exploration, Geophysical Prospecting)と呼んでいる。

物理探査法には、地震探査や電気探査比抵抗法のように、人工的に地球内部へエネルギー(波動や電流)を投入してその応答を見て物理的特性を調べる方法(人工場の方法)と、重力探査や磁気探査のように、地球自体が本来的に持っている物理量を測定して物理的特性を調べる方法(自然場の方法)とがある。

物理探査技術は、石油・天然ガスの探査・開発、鉱物資源の探査、土木分野、地熱探査、地下水探査および海洋調査など多くの分野で使用されている。表1には、世界の1991年における分野別作業費の割合を示している。表1によれば、費用的にみて全体の96.3%(約2,167百万ドル)が石油・天然ガスの探査・開発にかかるものである(Riley, 1993)⁴⁾。油価の動向などによって探査作業が影響を受け、探査活動が活発であった年と低調であった年で全体の費用で2倍程度の開きはあるが、1980年代を通じて石油・天然ガスの探

* 勘石油開発情報センター 研究部次長

〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル17階

** 京都大学工学部資源工学教室講師

〒606 京都市左京区吉田本町

表1 1991年における物理探査の分野別作業費割合 (Riley, 1993)

石油・天然ガス	鉱物	土木	環境	地下水	その他
96.3%	1.2%	1.5%	0.15%	0.1%	0.75%
合計			2,250 百万ドル		

鉱開発には費用的に全体の95ないし98%が使用されてきている。

3. 石油・天然ガスの探鉱作業における物理探査の位置づけ

表2は、石油・天然ガスの探鉱における物理探査の位置づけを示している。最終的に石油・天然ガスの経済的に成り立つ開発・生産を目的として鉱区の取得に乗り出すに際して、対象とする地域での過去の探鉱作業結果に基づく鉱区評価などの事前調査に始まり、鉱業権の取得に結びつけば、対象となる鉱区において探鉱作業を行なうこととなる。

堆積盆の形態把握などの場を見る手段としてのリモートセンシング、重力探査、磁気探査さらには電磁探査

表2 探鉱・開発における物理探査の位置づけ
探鉱の経緯と共に下の作業に移る。物理探査作業に下線を引いて示す。

対象地域の事前調査
鉱業権取得・利権交渉・入札
鉱業権の取得
地質調査・リモートセンシング
<u>重力探査・磁気探査</u>
<u>地震探査(概査・精査)</u>
試掘井掘削(坑井内調査)
成功 または 不成功
探掘井掘削(成功)
<u>三次元地震探査</u>
探掘井掘削
油・ガス田の採算性の検討

などが実施される。引続き実施される探鉱作業として、構造形態把握のために現在最も有効な手法は、地震探査反射法であり、粗いグリッド(対象とする地域の予想される構造規模等を勘案して、例えば、5km×10kmグリッド)で実施する概査、概査結果に基づきその後の探鉱対象地域を絞り込み、この地域の更に詳細な評価に際して実施される精査(例えば、500m×500mグリッド)としての地震探査反射法が実施される。表3に地震探査反射法、地震探査屈折法、重力探査および磁気探査法について適用対象等について示す。

この段階で試掘の対象となる有望な構造が抽出されれば、試掘作業に移ることとなる。さらに、試掘作業で連良く石油・天然ガスの発見に結びつけば、石油・天然ガス層の分布範囲を確認するための探掘井の掘削を行なうことになる。探掘井の掘削に平行して、1970年代後半になって地震探査反射法を100m程度の間隔で、石油・天然ガスの発見された構造を対象として地震探査反射法を行なう三次元地震探査が適用されるようになった。三次元地震探査は、当初、石油・天然ガスが発見された構造において、精査としての地震探査では把握できない構造の細部を把握し、探掘井の成功率を高めるとの観点から実施されてきており、費用的にも掘削費用に匹敵するものであった。その後、測定/データ処理技術の進歩および低廉化さらに処理結果の解釈に使用するワークステーションの一般化に伴い、有望な構造が抽出された段階で試掘および探掘作業等の掘削作業にかかる費用を削減するために、試掘段階から三次元地震探査を実施するケースが出てきている。

表3 物理探査法の適用対象及び特徴

	地震探査 反射法	地震探査 屈折法	重力探査	磁気探査
コスト	高	高	中	安
調査速度	遅	遅	遅	迅
概査・精査	精査	概査	概査	概査
堆積盆形態	○	△	○	○
堆積層内構造(トラップ)	◎	×	△	△
基盤内構造	×	△	×	○

4. それぞれの物理探査手法の概要

4.1 リモートセンシング⁵⁾

リモートセンシングは、人工衛星や飛行機に搭載されたセンサーによる遠く離れたところから探査する技術と訳することが出来、対象物から反射・放射される電磁波（可視・近赤外域・赤外域・マイクロ波域）を用いて探査する技術である。

代表的な地球観測衛星であるランドサットによる画像は、太陽光の反射波を利用したものであり、受動型リモートセンシングと呼ばれている。一方、電磁波を人工的に発信してその反射波を観測する方法があり、これは能動型リモートセンシングと呼ばれている。

受動型リモートセンシングではエネルギーが強く、かつ大気中の水蒸気などによる吸収の影響を受けない波長 0.4 μ m から 2.5 μ m の可視・近赤外域/短波長赤外域、波長 8~14 μ m の熱赤外域を主に使用する。この波長帯の受動型センサーを一般に光学センサと称

している。

一方、能動型リモートセンシングでは大気中の雲などを透過する波長数 cm~数十cm のマイクロ波域が用いられ、この波長域を利用する能動型センサをマイクロ波センサと称している。

(1) 光学センサ

一般に地表をおおう物質の違いによって太陽光の反射スペクトルは変わる。このため、観測される反射光のスペクトル特性から逆に地表の物質が何であるかを知る事が可能となる。図-1の上図は代表的な物質のスペクトル特性を示し、下図は岩石の種類の違いによるスペクトル特性を示したものである。

(2) マイクロ波センサ

マイクロ波センサはマイクロ波を地表に向けて発射し、地表からの後方散乱を受信する。受信波の強弱から主として地形の起伏を把握する。

マイクロ波は光学センサが利用する電磁波に比べて波長が長く、雲を透過する能力がある。マイクロ波センサは熱帯雨林域のように常に雲におおわれている地域であっても雲をすかした画像を得ることが出来る。これは光学センサにない大きな長所である。さらに、太陽光を必要としないため、夜間でも地上の画像を得ることが出来る。また、マイクロ波が衛生から斜め方向に発射されるため、地形の微妙な起伏をもよくとることが出来、断列構造やゆるやかな背斜・向斜構造などの把握に適している。

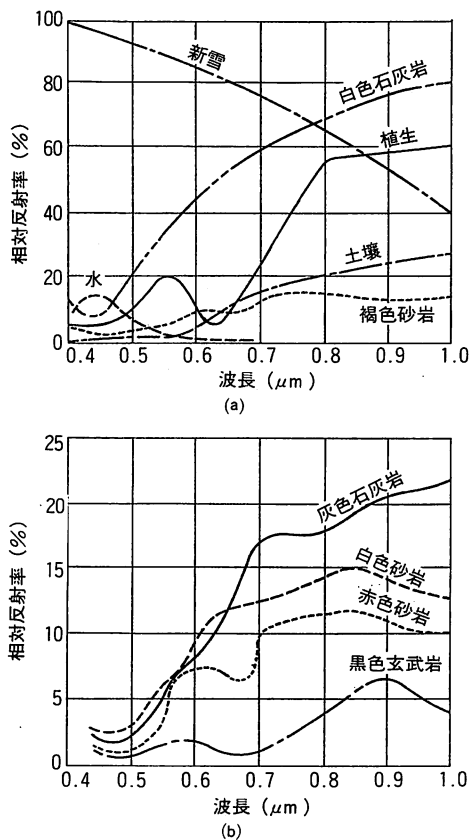
(3) 石油・天然ガス探査との関わり

リモートセンシングは、既述のように雲の影響や夜間でも地上の画像を得ることが出来る等の特徴があるが、その探査深度は大きくはない。したがって、主として地表面の地質構造、地表地質の分類等に使用される。地表面の地質構造と地下数kmの地質構造が同じである地域であれば、地表の地質構造を明らかにすることにより石油・天然ガスが溜り得る構造である背斜構造の存在をランドサット画像等から把握することが出来ることとなる。

4.2 重力探査

(1) 重力探査の概要⁵⁾

地球上では、物体が質量に比例して鉛直下方に力を受け空中に解放されると、一定の増加率で加速しながら自由落下する。この速度の増加率である重力加速度を重力と呼び、平均値は 980cm/s² である。重力の単位は、発見者ガリレオにちなんでガル (gal = cm/s²) が一般的に用いられる。物理探査の分野では、



(図解 物理探査より)

図-1 地表覆物の反射スペクトル特性

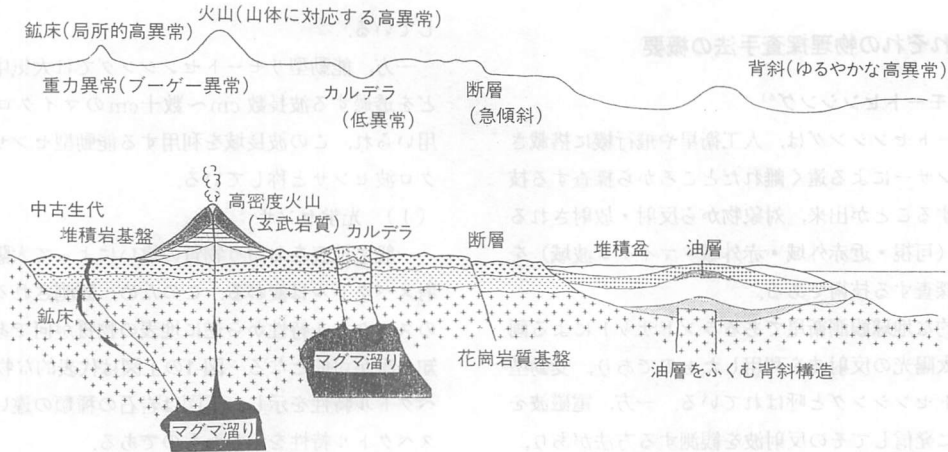


図-2 地下構造と重力異常の概念図(図解 物理探査より)

ガルの千分の一の mgal がよく用いられる。

また、ニュートンは物体間にはそれらの質量の積に比例し、距離の二乗に逆比例する万有引力を導入して惑星の運動を法則化した。

地表で観測される重力は基本的にはこの万有引力と同じである。地球上の引力は近似的に地球の質量に比例し、地球の中心から地表までの距離の二乗に逆比例する。

地球上の物体は、万有引力の法則に従い地球の全質量による引力を受けるとともに、地球の自転にともなう遠心力を受ける。それゆえ、重力は引力と遠心力の合力となる。

(2) 石油・天然ガス探査との関わり

地球が密度的に均質で回転しない球であれば、地球上の物体に働く力はどこでも同じで重力加速度は同一となる。実際は、地球は内部が不均質な楕円体であり回転による遠心力も伴うので、場所によって重力加速度は変化する。重力探査では、この地球内部の不均質に伴う重力異常を利用する。図-2は地下構造と重力異常の概念図を示している。金属鉱床の多くは周辺物質に比較して高密度物質を含むので局所的な高重力異常を示し、石油・天然ガスを含む背斜構造は緩やかな高重力異常を示す。

4.3 磁気探査

(1) 磁気探査の概要⁵⁾

地球は、北極及び南極に極を持つ巨大な一つの磁石に相当すると考えられている。地磁気は、波長の非常に長い地球深部に原因を持つものと、ごく短波長の局所的なもので構成されている。この短波長の成分は、地球の浅い部分(地殻)の岩体や地層の磁気的特性を

反映しており、これに基づいて地下構造の解析が行なわれる。

(2) 岩石の磁性

磁石に近づけた鉄片がそれ自体磁石と化すのと全く同じ原理で、地球というとても大きく大きい磁石の内にある磁鉄鉱のような強磁性の物質も強く磁化(磁石化)している。

さて、磁気異常は地下の岩体や地層の磁化の強弱を反映することを述べたが、どのような鉱物や岩石が強い磁化を持っているのかについて次に示す。

天然の強磁性鉱物の代表的なものは、磁鉄鉱(Magnetite)であり、岩石の磁化率は磁鉄鉱の含有量によって決まるといっても一般には差しつかえない。岩石の磁化率について、最も強いものは塩基性火成岩、次に酸性火成岩、深成岩類と続き最も弱いのが堆積岩である。火成岩類が堆積岩に比べて強い磁化率を持つということが堆積盆地の磁気探査の有効性の最大の根拠になっているのである。

(3) 磁力計と調査法

磁気探査は、航空機や船舶を用いて行なわれることが多いが、地上探査もしばしば実施される。石油・天然ガスの探査の場合、概査段階では迅速安価な航空機による調査が実施され、精査段階では地震探査と平行して船舶による調査が行なわれることが多い。

重力異常に比べて磁気異常と地下構造の関係は難解であると言われている。堆積盆地では、重力の負異常の中心が堆積物の最大層厚と一致し、縁辺部に至るに連れて重力値は増加するのが普通である。一方、磁気異常の場合は、こうした明瞭な関係はなく、異常の正負を問わず堆積盆地の中心部では長波長小振幅の異常

(1) 機器及びデータ収録・処理技術の発達

(Allen, 1980)⁷⁾に述べられているように、地震探査の機器と技術の発達の主要な変節点はいくつかあるが、その中から下記の技術について説明を加える。

1) 共通反射点水平重合法

共通反射点水平重合 (Common Depth Point Stack: CDP—図-5) 法は、地震探査技術の発達の過程に於ける最も重要な技術のうちの一つであり、これによりS/N比の向上、その後のデジタル探鉱機/処理技術の発達と相まって速度解析技術の発達とつながっており、近代地震探査技術の根幹を成すといえる。

重合数の増加 (海上地震探査では96重合、120重合は普通である) により、処理記録の内容が漸次改善され、従来は難しかった深部構造や微細構造をも地震探査データで解釈する事が可能となってきた。

2) ブライトスポット処理

地震探査データ上に現れる部分的な強い振幅を表す言葉として70年代初めに使用されるようになった。

地層に炭化水素 (主に天然ガス) が存在すると、音響インピーダンス (地震波伝搬速度と媒質の密度の積) が小さくなる。この結果、炭化水素を含む部分に付いてのみ、反射波の位相の逆転、大振幅反射、下方湾曲、水平指標 (フラットスポットと呼称) が地震探査断面上に現れるケースがあり、これらの現象をブライトスポット現象と称している。

当初、強い振幅が地震探査断面上に現れば、ガスの存在を示唆すると単純化されすぎた傾向があるが、強い振幅が必ずしもガスの存在を意味しないことが実際の探鉱現場で検証されてきた。大量のガスが存在すれば、ブライトスポット現象は現れ、また地質条件にも関係する事から、ブライトスポットのみに着目することなく地質データを含む総合的な判断が必要である。

3) 三次元地震探査

一つの測線に沿って震源と受振器を展開する二次元地震探査では、受振器を通して収録された反射波は測線直下よりの反射波であるとみなしている。しかしながら、実際の構造が三次元的な広がりを持ち複雑になればなるほど前記の仮定から外れ、側方からの反射波が多く含まれる事になる。本来側方からの反射波も地下の重要な情報を提供しているはずであるが、処理に際してはノイズとして除去されてきたのが現状である。

探鉱の現場に於いて、石油・天然ガスが発見されその広がりを把握するために探掘井が掘削されるようになると、二次元的な調査をかなり細かいグリッド (例

えば、500 m × 1 km) で実施して構造図を作成しても、掘削結果との対比が難しいあるいは出来ないというケースが多く見受けられるようになってきた。

これらの問題を解決するために導入されたのが、三次元地震探査法である。反射点が対象とするエリア内に面的に分布するように、震源及び受振器の配列を設計し、あらゆる方向からの反射波を取り扱う事が出来るようになった。

このようにして得られたデータを、初期の頃は解釈作業を手作業で実施していた。しかしながら、データの量は膨大となり、手作業で解釈しているのでは時間的に無駄が多くしかも三次元地震探査の有利な点を引き出しにくいという問題があった。

その後のワークステーションの発達により、現在では解釈作業はほとんどすべてが対話型のワークステーション上で実施されている。ワークステーションを用いる事により、データボリューム内の任意の方向の地下断面図を作成する事も可能であり、グラフィック画面の上で断層の対比、層準の水平化等が可能である (図-6)。

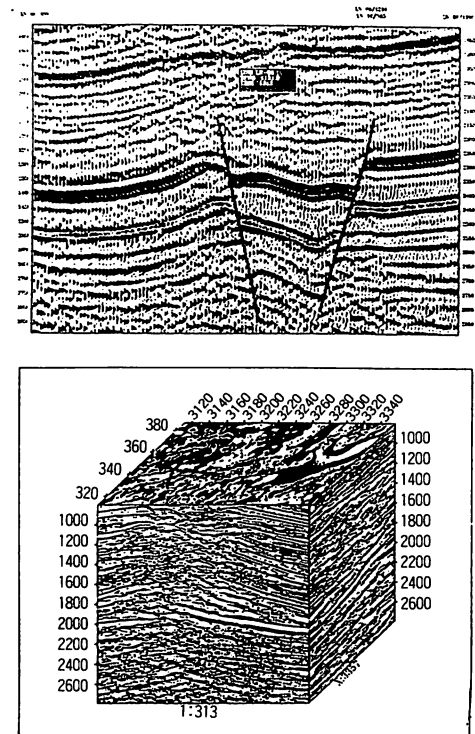
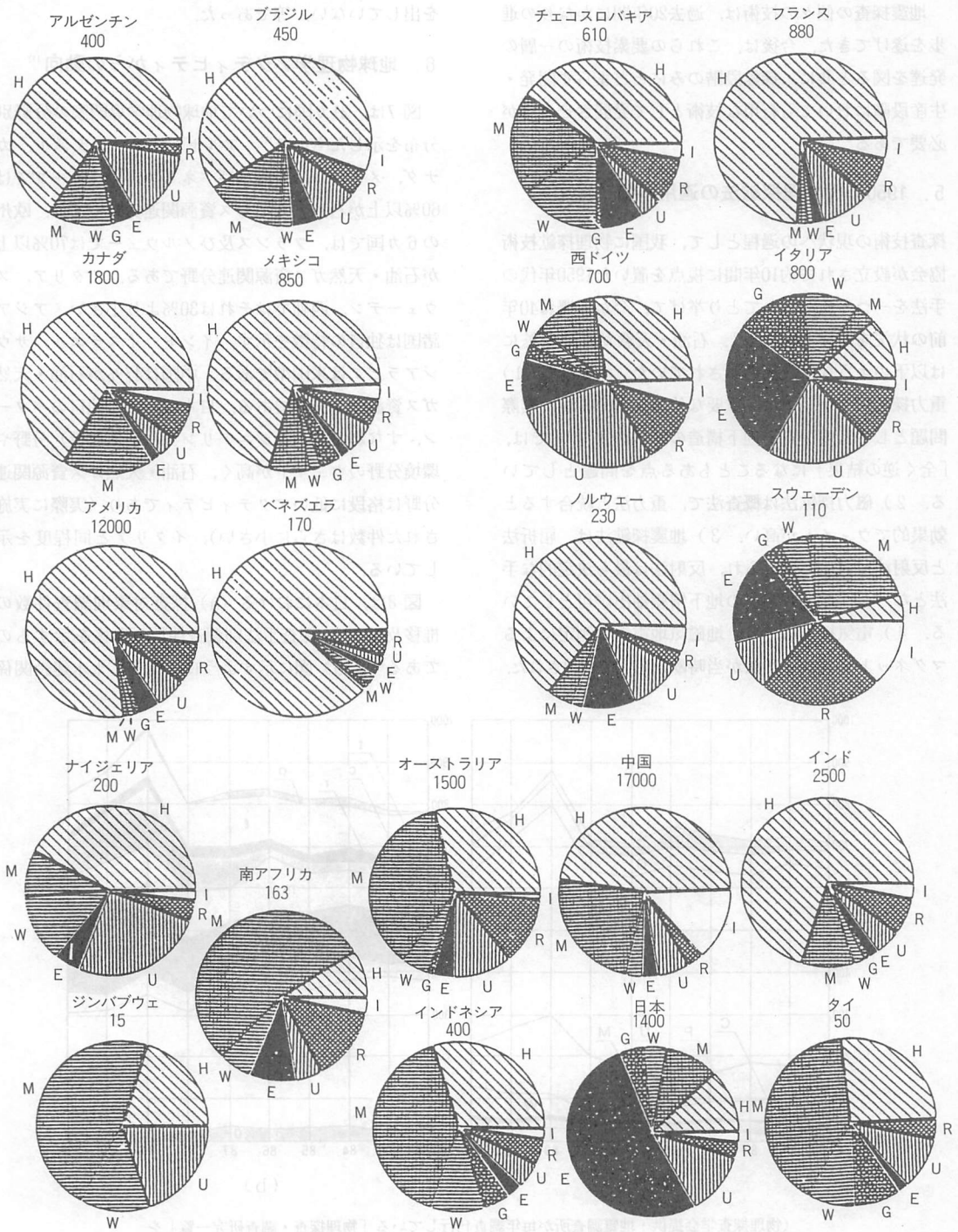


図-6 三次元表示および解釈断面



(国際物理探査学会提供, Palacky, 1989)^{6) 7)}

H (石油・天然ガス等) M (鉱物資源) W (地下水) G (地熱) E (エンジニアリング, 土木建設)
 U (大学教育研究) R (国家機関研究調査) I (機器開発生産)

図-7 21カ国における地球物理学専門家数の対象別分布

(2) 今後の動向

地震探査の個々の技術は、過去20年間にかなりの進歩を遂げてきた。今後は、これらの要素技術の一層の発達を図ると共に、探鉱段階のみにとどまらず開発・生産段階においても有用な技術として発展させる事が必要である^{8), 9)}。

5. 1950年代物理探鉱法の適用事情

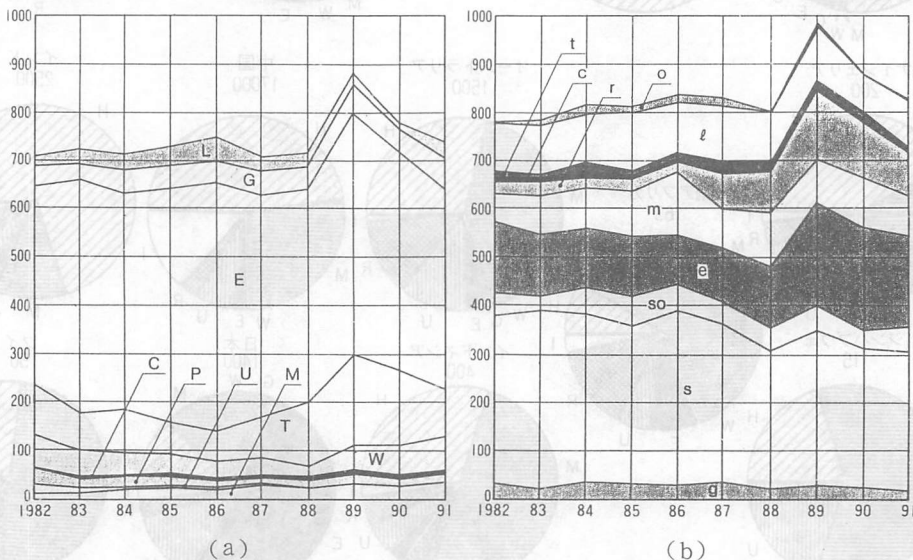
探査技術の現状への過程として、我国に物理探鉱技術協会が設立されて約10年間に視点を置いた1950年代の手法の一つの資料としてとり挙げて、今から概ね40年前の状況を概観しておく¹⁰⁾。石油・天然ガスの探鉱には以下のような手法評価がされていた。すなわち、1) 重力探鉱法については、重要な位置を占めるが、実際問題として密度分布と地下構造の関係のあり方では、「全く逆の結果」になることもある点を問題としている。2) 磁力探鉱法は概査法で、重力法と統合すると効果的でウェイトが高い。3) 地震探鉱法は、屈折法と反射法が有効に用いられ、反射法は最も決定的な手法となった。地下数kmの地下情報抽出が可としている。4) 電気探鉱法では、地磁気地電流の測定によるマグネットテルリック法が当時欧州方面で利用された。

5) 放射能探鉱法は、とくに油田の探査では十分効果を出していない。等であった。

6. 地球物理学アクティビティからの動向¹¹⁾

図-7は、21カ国について地球物理学専門家の分野別分布を示したもので¹²⁾、アルゼンチン、ブラジル、カナダ、メキシコ、米国及びベネズエラのグループでは60%以上が石油・天然ガス資源関連分野である。欧州の6カ国では、フランス及びノルウェーでは70%以上が石油・天然ガス資源関連分野である。イタリア、スウェーデン、西独ではそれは30%より小さい。アジア諸国は独自の特徴を示す。インド、イスラエル、サウジアラビアは米国型である。中国は47%が石油・天然ガス資源関連分野である。日本は極めて独自のパターン、すなわち、エンジニアリング(土木建設)分野や環境分野のウェイトが高く、石油・天然ガス資源関連分野は格段に低いアクティビティであり(実際に実施された件数はさらに小さい)、イタリアと同程度を示している。

図-8は、日本における(a) 探査対象別調査件数の推移及び(b) 探査手法別調査件数の推移を示すものである¹³⁾。(a) 図に示すように圧倒的に土木建設関係



(物理探査学会提供；地質調査所が毎年調査刊行している「物理探査・調査研究一覽」をもとに物理探査学会が作製した推移のグラフ、物理探査学会要覧、1993)¹³⁾
 (a) 対象別 M (金属及び非金属) U (ウラン) P (石油及び天然ガス) C (石炭)
 W (地下水) T (地熱及び温泉) E (土木建築関係) G (地質構造) L (研究・その他)
 (b) 方法別 g (重力) s (地震) so (海上地震) e (電気) m (磁気) r (放射能)
 c (化学) t (測温) l (検層) o (その他)

図-8 我が国における物理探査対象別及び方法別調査件数の推移

が高く、石油・天然ガス分野は我国では僅かのアクティビティ（例えば、1986年をサンプリングすると、総計746件中僅か1.9%）¹⁰⁾である。(b)図は、探査技術の手法別であるが、石油・天然ガス資源探査に適用性の良い重力探査は件数が当然のことながら小さいことを示している。地震手法も適用性が良いが、(b)図に見るこのアクティビティの高さは、エンジニアリング関係の件数が多いことによっている。

7. むすび

天然ガス資源の探査技術の現状に関し、新しい動向も含め、全体と歴史的変遷の一例を概観した。さらに、資源・環境における地球物理学的アクティビティの立場から世界の石油・天然ガス資源探査と我国における物理探査活動におけるその位置づけも補足した。

社会工学的観点からも、このような分野における新展開を中長期的に展望することは大変意義深い。

なお、本解説をまとめるにあたり、Society of Exploration Geophysicists (SEG, Tulsa) 及び物理探査学会には、図の提供をいただいた。ここに、明記して厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 石油公団；石油用語辞典（増補改訂版）（1989）
- 2) 天然ガス鉱業会他；日本の石油・天然ガス資源（1993）
- 3) OGIJ；Worldwide Crude Oil and Gas Production, Oil Gas Journal (1993), Vol. 91, No. 10
- 4) Riley, D. C. ; Special Report Geophysical Activity, The leading Edge of Exploration (1993) Vol. 12, No. 11
- 5) 物理探査学会；図解 物理探査（1989）
- 6) 岡野 正；物理探査技術の探鉱作業における位置づけおよび最近の動向, 石油技術協会誌, 第58巻, 第1号（1993）, 3~10.
- 7) Allen, S. J. ; Seismic Method, Geophysics, Vol. 45, No. 11 (1980), 1619~1633.
- 8) 仙石雄三, 江坂照也, 須田茂幸；余目油田におけるレーザーキャラクタライゼーション, 石油技術協会誌, 第57巻, 第3号（1992）, 223~234.
- 9) 仙石雄三, 倉沢由和, 中川 洋；余目油田におけるレーザーキャラクタライゼーション（その2）, 石油技術協会誌, 第58巻, 第1号（1993）, 78~91.
- 10) 物理探鉱技術協会；十周年記念特別号, 応用編（1958）, 325~333.
- 11) 菅野 強；資源および環境の探査評価における新しい地球物理学アクティビティ（I）, エネルギー・資源（1990）, Vol. 11, No. 6, 487~495.
- 12) Palacky, G. J. ; Human Resources in Geophysics : Specialization, Geophysics : The Leading Edge of Exploration (1989), Vol. 8, No. 8, 58~63.
- 13) 物理探査学会；物理探査学会要覧, 45周年記念出版（1993）
- 14) 通産省工業技術院地質調査所編；物理探査・調査研究一覧

協賛行事ごあんない

「第13回光がかかわる触媒化学シンポジウム」

<主 催> 理化学研究所, 触媒学会
 <協 賛> 日本化学会, 高分子学会 他
 <日 時> 平成6年6月10日(金)
 <会 場> 東京工業大学 百年記念館
 (目黒区大岡山2-12-1)

<講演内容> 依頼講演 2件, 一般講演 10件
 <参加費> 一般 3,000円, 学生 1,000円
 <連絡先> 〒227 横浜市緑区長津田町4259
 東京工業大学生物工学科 大倉一郎
 TEL 045-922-1111 (内線2476)