総 説

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*

岡 野 正**

(Received August 28, 1992; accepted November 24, 1992)

The progress and current activity of geophysical method
in petroleum exploration

By

Tadashi Okano

1. はじめに

物理探査技術は、石油・ガスの探鉱・開発、鉱物資源の探鉱、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、1990 年における物理探査の分野別作業費の割合を示す。表 1 によれば、費用的に全体の 96.1% (約 21 億ドル) が石油・ガスの探鉱・開発にかかるものである (Goodfellow, 1991)。また、石油・ガスの探鉱には、物理探査技術のうちの地震探査反射法の占める割合が大きい、探鉱段階によって重力探査など種々の物理探査手法が適用されてきている。

SEG (the Society of Exploration Geophysicists) の物理探査活動調査委員会 (the Geophysical Activity Committee) の調査による、1980 年から 1990 年までの旧ソ連邦および中国を除く世界の物理探査活動の推移および石油・ガスの探鉱に占める割合は、表 2 に示すとおりである (Senti, 1981, 1982, 1983, 1984, 1988, 1989; Montgomery, 1985, 1986, 1987; Goodfellow, 1990)。探鉱作業が活発に実施された年とそうでなかった年では費用として 2 倍以上の開きがあり、油価の動向などによって探鉱活動が大きく影響を受けてきているの

が読み取れる。また、費用全体のうち石油・ガスの探鉱・開発に占める割合はほぼ 96~98% となっており、費用的には石油・ガスの探鉱・開発がそのほとんどすべてを占めていると言える。

表 1 には表れていないが石油・ガスの探鉱・開発以外の適用分野について注目すると、年毎に出入りはあるものの、作業費は土木分野および研究分野で増える傾向が認められる。

表 1 1990 年における物理探査の分野別作業費割合 (Goodfellow, 1991)

Petroleum	Minerals	Engineering	Research	Others
96.1%	1.7%	1%	0.8%	0.4%
合 計 2,195 百万ドル				

表 2 物理探査活動の推移および石油・ガスの探鉱の占める割合

Year	Total (MM \$)	Petroleum (%)
1980	3002	96.8
1981	4040	97.2
1982	4168	97.6
1983	3597	97.2
1984	3506	97.6
1985	3028	97.6
1986	1902	96.8
1987	1459	96.3
1988	1547	95.5
1989	1915	95.5
1990	2195	96.1

* 平成 4 年 6 月 2 日第 57 回石油技術協会定時総会地質・探鉱部門シンポジウム「物理探査が探鉱作業に果たす役割」- 構造形態把握から内部構造/岩相把握へ- にて講演

** 石油公団・石油開発技術センター (現 石油開発情報センター)

2. 石油・ガスの探鉱作業における物理探査の位置づけ

表3は、石油・ガスの探鉱における物理探査の位置づけを示している。対象とする地域でのこれまで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、対象とする鉱区において探鉱作業を行うこととなる。

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、さらには電磁探査などが実施される。引き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、粗いグリッドの概査、より細かなグリッドの精査としての地震探査反射法が実施される。

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になる。さらに、試掘作業で運良く油・ガスの発見に結びつけば、貯留層の分布範囲を確認するための探掘井の掘削を行うことになる。探掘井の掘削に平行して、1970年代後半になって3次元地震探査が適用されるようになった。3次元地震探査は、当

初、油・ガスが発見された構造において、2次元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。その後の技術革新ならびに経済効率により、後述するように、試掘段階から3次元地震探査が実施されるケースもでてきている。

前記のSEGの物理探査活動調査委員会の調査では、1985年の作業量調査から3次元地震探査に関する項目が独立して設定されており、探鉱作業の中で一般的に使用されるようになってきたことを物語っている。表4は、旧ソ連邦および中国を除く地域での3次元地震探査作業量の推移を示している。測線長と適用対象面積での表示が併用されており、単純に比較することは難しいが、ここでも油価の動向などに影響されて探鉱活動そのものが低下することによる影響は認められるものの、3次元地震探査が適用されるケースが多くなってきていると言える。

表5は、測線長で集計された統計に基づいて全体の作業量に占める海域における3次元地震探査の割合をそれぞれの年毎に示したものである。3次元地震探査の作業量は、1985年の統計以降1989年までかなりの割合で増加してきたが、1990年には地震探査の実施測線長は前年より増加しているものの、3次元地震探査の作業量の占める割合は、1985年のレベルまで落ちてきている。これは

表3 探鉱・開発における物理探査の位置づけ

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他
重力探査・磁気探査
地震探査（概査・精査）
試掘井掘削（坑井内調査）
成功 不成功
探掘井掘削（成功）
3次元地震探査
探掘井掘削
油・ガス田の採算性の検討

表5 3次元地震探査の割合

	Marine Survey		
	Total Line-km	3-D Line-km	%
1985年	1,712,040	55,992	3.3
1986年	1,157,600	115,652	10.0
1987年	1,065,922	139,262	13.1
1988年	1,026,812	231,350	22.5
1989年	1,250,640	442,744	35.4
1990年	1,509,160	100,709	6.7

The Leading Edge of Exploration 1986-1991

表4 3次元地震探査作業量の推移

	Land		Marine	
	Line-km	Square-km	Line-km	Square-km
1985年	2,230	2,765	55,992	...
1986年	16,743	502	115,652	...
1987年	15,969	1,209	139,262	30,031
1988年	4,576	3,019	231,350	...
1989年	3,654	4,132	442,744	11,244
1990年	777	5,416	100,709	10,097

The Leading Edge of Exploration 1986-1991

表6 アメリカにおける3次元地震探査の単価

	US\$/Km	
	Land	Marine
1985年	3,484	673
1986年	2,934	220
1987年	1,911	161
1988年	12,542	164
1989年	9,426	137
1990年	5,249	404

The Leading Edge of Exploration
1986-1991

リスクの高い未探鉱地域での探鉱作業が増加し、油・ガスの発見につながる探鉱作業の割合が減少したことによるのか、あるいは油価の影響などによるのか、今後ともこの傾向が続くのかどうかを含めて関心の持たれるところである。

表6には、3次元地震探査の単価の推移をアメリカでの陸上および海上での単価について示している。測定仕様は、年を経るに従って良くなってきており、重合数などによる記録の質を抜きにしては比較の意味合いが薄れるが、海上での3次元地震探査は1989年までかなりの割合で安価になってきたと言える。1990年には、3次元地震探査の実施測線長が減ると同時に、単価もかなり高くなってきている。

3. 地震探査技術の進歩

ここで、地震探査反射法についてその生い立ちを振り返ってみると、表7に示したように概説することができる。すなわち、地震探査反射法の発達の原点は、1917年の Fessenden による地震探査法に関する特許取得にあるといえる。

一方で、Allen (1980) が記述しているように、多くの先人が地震探査法の先駆け的な適用・発展に寄与しており、厳密な意味での歴史的な出発点を見つけだすのは困難なようである。地震探査屈折法の発明者は、1845年のアイルランドにおける作業から、Malletto と考えられており、地震探査反射法の偉大な貢献者として、1930年の GSI (Geophysical Service Inc.) の設立者の一人である Karcher の名前を落とすわけにはいかないであろう。GSI の設立に先立って、地震探査反射法を営利目的で実施していた会社は、GRC (Geophysical Research Corporation) のみであり、Karcher はこの会社で地震探査反射法を実施していたが、独立して既述の GSI を設立したものである。Karcher の地震探査反射法との関わりは、Green (1979) の追悼文に詳しい。

表7 地震探査技術(反射法)の進歩

1917年………地震探査法に関する特許 (Fessenden)
1950年代………共通反射点重合法提案 (Mayne)
1960年代………ディジタル・レコーディング開始
1970年代………3次元地震探査法の登場
1970年代………波動方程式マイグレーション (Claerbout)
1970年代………サイスマックストラティグラフィー
1980年代………会話形式ワークステーション

1930年代は、地震探査反射法の請負業者の出現とともに次第に屈折法が使われなくなり、反射法の使用が益々広まっていく時代であった。作業の実施者としては、いくつかの石油会社であり、これらは Amerada, Marland (後の Conoco), Gulf, Humble (Exxon), Shell などである。

その後1950年代に入り、1952年には、磁気テープへのアナログデータの録音が始まり、1955年には、反射法地震探査技術の中で最も重要な技術の1つである共通反射点重合法の概念が、Mayne によって提案された。また、データ処理の分野では、MIT の GAG (Geophysical Analysis Group) がノイズを含むデータからいかに反射信号を抽出するかについての処理方法を開発した。

ディジタル・レコーディングも1960年代に始まり、1970年代に入って前述の3次元地震探査法の登場となる。

ディジタル・レコーディングの導入により、記録の質も良くなり、構造形態把握から内部性状把握への端緒が現れてきたと言える。これらは、1970年代のブライトスポットやエクソンによるサイスマックストラティグラフィーへと受け継がれて行く。

ブライトスポットは、メキシコ湾やナイジェリア沖合など砂泥互層の堆積環境下で、かなりの確立でハイドロカーボン、特にガスの存在を地震探査データから直接検出できるとして、大いに注目された技術である。

砂泥互層の堆積環境下であっても、砂岩と泥岩の地震波速度の関係は一義的に決まるものではなく、深度によって地震波速度は逆転することなどが明らかとなった。さらに、単なる岩相変化でも地震波速度にかなりの差を生じ、ブライトスポット的反射波が現れることが指摘されるようになって急速に人気はしぼんでしまい、ブライトスポットはダメだなどの結論づけまでされてしまった。物理探査技術者としては、このように結論づけられることは非常に不本意なことと考えており、ブライトスポットは万能ではないことを認識した上で、適用すべき条件を明確にして解釈作業を実施すべきと反省している。

最近同様の技術として AVO (Amplitude Varia-

tion with Offset) がかなり適用されてきているが、ブライトスポットと同様の結末とならぬように心して適用していく必要があると考えている。

1975年に開催されたシンポジウムで脚光を浴びるようになったサイスミックストラティグラフィーは、電子技術ならびに地震探査データの質の向上が相まって初めて可能となった技術である。

地震探査データの解釈に関しては、1980年代に会話形式のワークステーションが現れるまで、処理結果をフィルムに焼き付け、これからコピーを作成して手作業で解釈作業を行ってきた。現時点でも処理結果の磁気テープが入手できない場合もあり、必ずしもすべての解釈作業がコンピューター化されているわけではない。しかしながら、3次元地震探査データの解釈を行う場合には、今や会話形式のワークステーション無しでは、ほとんど不可能となってきていると言っても言い過ぎではないであろう。

4. 検討課題

物理探査技術、特に地震探査反射法は、石油・ガスの探鉱作業においてどのように使われているか、さらには地震探査技術の進歩について見てきたが、現時点で抱えている技術的検討課題をとおして、どのような分野でこれらの物理探査技術が適用・応用されているか例を示すこととする。詳細は、それぞれの個別の議論に任せるとして、ここではその概要を記すにとどめる。

4.1 難地域での探鉱

地震探査データの質の向上とともに、構造形態把握のみでなく内部性状把握のために地震探査データを活用し

ようと言う動きがでてきた。1つの構造に数本の試探掘井が掘削されている場合でも、坑井データを使用する限りにおいては、点の情報が与えられるのみである。坑井データとの対比／検討に基づいて地震探査データが活用できれば、貯留岩特性等の面的な検討が可能となると考えられる。しかしながら、内部性状把握以前の問題として、地震探査法によっても地下構造を十分には把握できない地域が依然として残っている。これらは、極浅海域（水深30m以浅）や、表層付近に速度異常を伴う地域や、地形の急峻な所であり、石油開発技術センター物理探査研究室ではこれらを難地域と称している（図1）。

極浅海域における探鉱作業では、従来のフローティング・ケーブルやボトムドラッグ・ケーブルに代わり、1970年代後半よりテレメトリー・システムが採用されるようになった。コンピューターの進歩と相まって、波動方程式マイグレーション法がClaerboutにより提唱され、複雑な地下構造や断層の発達した所でのデータ処理はかなりの改善が認められるようになった（表7）。しかしながら、地震探査法のみでは地下構造の把握ができないあるいは難しい地域があり、そのような場所では、重力探査・磁気探査・電磁探査など他の物理探査法より得られたデータを含め総合的に解析作業を進める必要があると考えている。

石油開発技術センター物理探査研究室では、秋田県の鳥海山北麓を実験場所に選定し、昭和62年度より種々の物理探査手法（地震探査法、電磁探査法など）を適用し、それぞれの探査手法の持つ特性を把握するとともに異なる探査手法の比較検討を行ってきた。平成3年度は地震探査データと電磁探査データを用いて、いかに異なる物

図1 難地域の概念図

性量を扱う探査手法を総合的に扱うことができるかを検討するために、総合解析技術の開発に取り組んできている。詳細は、今回のシンポジウムで発表された志賀らの論文を参照されたい。

4.2 EOR モニタリング

EOE は Enhanced Oil Recovery の略であり、石油生産用語集によれば、通常の圧力維持法や水攻法より高い油回収率を達成する目的で、油層に適用される様々

図2 サウスキャスパークリーク油田の位置図

図3 坑井位置図

図4 水蒸気圧入前後の坑井間地震探査結果 発震井 #10-6-3 (右端) と受振井 #40 (左端) 間の P 波速度分布図 (松原・倉沢, 1991)

な回収法の総称であり、熱回収法、ミシブル回収法とケミカル攻法の3つをさすとする。現在までに我々が検討を行ってきたのは、熱回収法の一つである水蒸気攻法において、圧入された水蒸気の広がりをモニタリングする物理探査手法の開発/検討である。具体的な手法としては、3次元地震探査法と坑井間物理探査法を使用している。すなわち、水蒸気圧入前に3次元地震探査および坑井間地震探査を実施し、水蒸気圧入後(約半年後)3次元地震探査および坑井間地震探査を実施、さらに水蒸気圧入約1年後に3次元地震探査を実施して、水蒸気圧入前後の記録を比較検討し、水蒸気圧入の効果を求めようとするものである。

この圧入された水蒸気の広がりをモニタリングする物理探査手法の開発/検討は、米国ユノカル社との共同研究として米国ワイオミング州サウスキャスパークリーク油田を使用して平成元年3月より平成3年3月まで実施された。

図2, 3に対象油田の位置図および坑井配置図を示す。また、図4に水蒸気圧入前後の坑井間地震探査結果の例を示す。

受振井#40の深度773~795m付近において、圧入後は水蒸気の油層内浸透による温度上昇に起因する地震波伝播速度の減少が現れている。

本共同研究を通じて、水蒸気の広がりをモニタリングする物理探査手法として3次元地震探査および坑井間地震探査が有効であることが検証されている。

今後、さらに他の回収法の効果をモニタリングする方法について検討を行う必要があると判断している。しかしながら、基本となるのは油価などの条件を考慮にいて、経済的に成り立つ回収法が実際に油・ガス田で適用されることが前提であり、この意味で発見済みの油・ガス田をいかに効率的に開発するか、生産・開発関係の技術者に期待するところが大きい。

4.3 孔隙率分布予測

山形県の余目油田を実験フィールドとして、石油開発技術センター物理探査研究室は、3次元地震探査データを使用して、油・ガス貯留層の形態・分布および性状を把握する技術の開発を行ってきた。図5に、余目油田の対象層である下部北俣層上限付近の深度構造図および3次元地震探査調査地域を示す。

余目油田は、昭和30年代に発見された油田であり、3次元地震探査データと対比検証できる坑井データは多くはないものの、岩相解析処理などを施すことにより孔隙率分布をかなりの正確さで推測することができたと判断している。詳細は、今回のシンポジウムで発表された仙石らの論文を参照されたい。

図5 下部北俣層上限付近の深度構造図および3次元地震探査調査地域(仙石ら, 1992)

4.4 3次元地震探査

前述の適用例のうちでEOR モニタリングおよび孔隙率予測については、3次元地震探査データの果たす役割が大きい。構造形態把握の点で注目を集めることになった3次元地震探査法は、内部性状把握の点でも有用であるとの認識が固まりつつある。Shell は長年にわたる探鉱経緯を見直した結果、3次元地震探査の構造形態把握並びに内部性状把握の優れた点に着目し、今後探鉱・開発作業の中で3次元地震探査を重要視していくとしている(Nestvold and Nelson, 1991)。Shell は、10年以上におよぶ探鉱作業の経緯を発見油・ガス田を中心に見直しを行っている。すなわち、探掘井の位置選定、開発井の位置選定など重要な探鉱・開発の節目において、それぞれの根拠となった構造図について、その後実施された3次元地震探査データに基づく構造図と比較・検討を行うとともに、その後の掘削結果について言及している。これらの結果を踏まえて、2次元地震探査に基づく構造図でその後の方針を決めるよりも、3次元地震探査を実施してその後の探鉱・開発戦略を決めた方が経済的

であったと評価/反省を行っている。

さらに、シュルンベルジェの Baird (1991) は、1991年の世界石油会議における講演の中で、90年代の石油・ガスの探鉱開発における重要な技術の1つとして、生産分野の水平坑井と並び3次元地震探査を探鉱分野の技術として挙げている。3次元地震探査は、構造形態把握のみでなく内部性状把握にも使用することが可能であり、探鉱・開発・生産のすべてのフェイズで使われてきているとしている。

5. ま と め

石油・ガスの探鉱作業における物理探査技術の果たす役割について、構造形態把握から内部性状把握へと進んできているとの認識を持っている。しかしながら、個々の技術についていえば、構造形態把握の点でも例えば、地震探査反射法の深部における分解能の向上および坑井データとの対比など今後さらに検討すべき問題点は多く残されており、一層の技術革新が期待される。

引用文献

- Allen, S. J., 1980: Seismic method. *Geophysics*, **45** (11), 1619-1633.
- Baird, E., 1991: The outlook for the petroleum service industries in the 1990s. *Schlumberger*.
- Goodfellow, K., 1990: Special report geophysical activity in 1989. *The Leading Edge of Exploration*, **9** (11), 49-72.
- Goodfellow, K., 1991: Special report geophysical activity in 1990. *The Leading Edge of Exploration*, **10** (11), 45-72.
- Green, C. H., 1979: Memorial to Dr. Karcher. *Geophysics*, **44** (6), 1018-1021.
- 松原由和・倉沢由和, 1991: 油層構造物理探査技術坑井間物理探査法の開発. 2) サウスキャスパークリーク油田におけるケーススタディ. 石油開発技術センター年報, 平成2年度, 142-146.
- Montgomery, G. E., 1985: Special report geophysical activity in 1984. *The Leading Edge of Exploration*, **4** (10), 33-54.
- Montgomery, G. E., 1986: Special report geophysical activity in 1985. *The Leading Edge of Exploration*, **5** (8), 25-48.
- Montgomery G. E., 1987: Special report geophysical activity in 1986. *The Leading Edge of Exploration*, **6** (8), 25-49.
- Nestvold, E. O. and Nelson, P. H. H., 1991: Technology for the 90s. *Shell International*.
- 仙石雄三・江坂照也・須田茂幸, 1992: 余目油田におけるレザバークライゼーション. 石技誌, **57**(3), 223-234.
- Senti, R. L., 1981: Special report geophysical activity in 1980. *Geophysics*, **46** (9), 1316-1333.
- Senti, R. J., 1982: Special report geophysical activity in 1981. *The Leading Edge of Exploration*, **1** (9), 30-55.
- Senti, R. J., 1983: Special report geophysical activity in 1982. *The Leading Edge of Exploration*, **2** (8), 41-64.
- Senti, R. J., 1984: Special report geophysical activity in 1983. *The Leading Edge of Exploration*, **3** (7), 49-69.
- Senti, R. J., 1988: Special report geophysical activity in 1987. *The Leading Edge of Exploration*, **7** (8), 33-56.
- Senti, R. J., 1989: Special report geophysical activity in 1988. *The Leading Edge of Exploration*, **8** (8), 33-56.