用語解説

4-C 地震探査

渡部 克哉*

(Received October 31, 2002; accepted November 7, 2003)

“4-C Seismic Exploration”

Katsuya Watanabe

Abstract: The purpose of this paper is to describe the fundamental concept of four-component (4-C) seismic exploration, and to exhibit its applications to the field surveys. “4-C seismic exploration” is a recently developed seismic method which utilizes 4-C receiver systems (orthogonally-oriented three-component geophones and a hydrophone) deployed on the seafloor in order to record S-waves and P-waves, in contrast with the conventional methods which acquire only P-waves. “4-C seismic exploration” has possibilities to provide more precise information on reservoir properties than conventional P-wave technologies.

Key words: 4-C, multicomponent, shear wave, converted wave.

1. はじめに

4-C地震探査 (four-component (4-C) seismic exploration) とは、通常の地震探査で用いられているP波（縦波・疎密波）に加えてS波（横波・せん断波）を取得するために、互いに直交する方向に振動する3つのジオフォンおよびハイドロフォン内蔵の受振器システムを海底に着底設置して、4つの成分（3ジオフォン+ハイドロフォン）の地震探査データを取得する海域での地震探査法である。なお、4-C seismic explorationの日本語名は確定していないが、ここでは4-C地震探査と呼ぶこととする。また、4-Cの代わりに multicomponent という用語が用いられることがある。これは海域、陸域を問わず多成分の地震探査データを取得する場合に用いられている。

地震探査で用いられる波には進行方向に振動するP波と進行方向に直交する平面上で振動するS波がある。P波は伝播速度が他の波より速いため記録上最初に現れる波として認識しやすく、また地層による吸収も比較的小さいことから、地震探査では通常P波が用いられてい

る。これに対しS波は伝播速度が遅い、孔隙内流体の種類（ガス、油、水）に影響されないなどのP波とは異なった特徴を持つ。そのため、P波情報にS波情報が加わることで岩相変化や孔隙内流体の種類などが推定できることが期待され、S波地震探査はこれまで盛んに研究されてきた。しかし記録の質の問題およびデータ取得・処理の困難さなどの理由で普及していなかった。

ところがここ数年海域でのS波地震探査が非常に脚光を浴びている。S波は水中では伝わらないため、海域でのS波地震探査はエアガンなどで生成されたP波の一部が地層境界面でS波に変換して反射する現象を利用する。P波からS波に変換して反射する波（converted waveあるいはP-SV変換波（後述）ともいうが、ここでは以後PS波と呼ぶ。これに対応させてP波のまま伝播する波をPP波と呼ぶ。）は、海底に着底設置した水平方向の振動を捉えるジオフォンで取得することができる。

4-C地震探査では1つの震源でP波情報とS波情報を同時に得ることができる。両者を用いた解釈により、浅部のガス層より下位の構造形態や、岩相変化、孔隙内流体の種類、飽和率などの情報が得られる可能性がある。陸上では良好なS波記録を取得することは困難であることが多く、有用性は理解されながらも一部でしか普及し

* 石油資源開発(株) Japan Petroleum Exploration Co., Ltd
現所属 アラビア石油(株) Arabian Oil Co., Ltd.

ていないS波地震探査であるが、北海などで実施された4-C地震探査では“高品質なS波記録”が以前より“手軽に”取得できることが示されている。今後コストの低減が図られ、かつ適用範囲が拡大することにより、さらに普及が加速することが予想される。

2. S波の性質

地下が二次元構造であると仮定した場合、図1に示すようにS波には伝播方向軸を含む鉛直面内で振動するSV波と、それに直交する水平面内で振動するSH波がある。図2に示すようにSV波はSV波のまま伝播するほか、地下の境界面において一部がP波に変換する。また逆にP波の一部がSV波に変換する（これがP-SV変換波である）。なお本解説で用いるPS波は、P波で下方伝播し、境界面でSV波に変換・反射して上方伝播する波動全体のことを表している。

P波が岩石中を伝播する際には、岩石の骨組みであるマトリックス部分と孔隙（油、ガス、水で満たされている）の両方の影響を受けるが、S波は流体中を伝播しないため孔隙内流体の種類（ガス、油、水）に影響されず岩石のマトリックス部分のみの影響を受ける。したがって例えばP波がガスを含んだ層を通過する際にはガスの影響でエネルギーが減衰し速度も急激に低下するが、S波は減衰せず速度変化も小さい。

S波の速度はP波の速度よりかなり遅い。そのため記録したP波およびS波の卓越周波数がもし同じであれば、S波の方が波長が短いため分解能が高くなるが、実際にはS波の高周波成分の減衰はP波の場合より大

図1 P波、SV波、SH波の伝わり方
(物理探査技術協会, 1979)

図2 P、SV波が地層境界面に入射した場合の反射・屈折現象

きいため記録したS波の卓越周波数はP波のそれより低い場合が多い。陸上では地表付近でS波の減衰が非常に大きいため、S波地震探査断面はP波断面と比較して分解能が劣る場合が多いが、海域では比較的S波の減衰が小さいためP波（PP波）断面とS波（PS波）断面で分解能は同じか後者が若干劣る程度である場合が多い。

3. 4-C地震探査技術の歴史と背景

3.1 S波地震探査技術の歴史

S波の情報を石油探査に利用する試みは、陸上においては1950年代のダイナマイト震源を用いたS波の生成および取得の実験から始まった。70年代にはP波地震探査データのブライトスポット処理、80年代にはAVO解析が脚光を浴び、地震探査技術が地下構造形態把握のみならず物性解析にも利用できることが認識された。80年代には陸上でS波震源によるS波地震探査や、P波震源によるPS波を用いたS波地震探査が盛んに研究されたが普及するまでには至らなかった。それは陸上では表層により特にS波の高周波成分の減衰が大きく、低分解能、低S/N比の記録になる場合が多いこと、表層の影響を補正する静補正などのデータ処理が困難な場合が多いこと、および受振器が高価かつ設置に手間がかかりコストがかかりすぎることによる。

一方海域ではS波は水中を伝わらないため、P波が海底面でS波に変換する波を利用する試みが行われた。エアガンなどのP波震源から生成されたP波が海底面でS波に変換して地層中を下方に伝播し、反射面で反射して上方に伝播後、海底面で再びP波に変換した地震波を通常の曳航方式のストリーマーで取得する、いわゆるPSSP波（P波からS波に変換し、再度P波に変換した波）を用いた地震探査が80年代にヒューストン大学などで研究されたが実用化しなかった。それはPSSP波が長大オフセット記録上でしか観測できず、また非常に微弱な波であり抽出が困難な場合が多いからである（例えばKim and Seriff, 1992）。

以上述べたようにS波の有用性は昔から認識されていたが、主にデータ取得上の問題と記録の質の問題から、S波地震探査は普及していなかった。

3.2 4-C地震探査技術の発展

4-C地震探査の受振器システムには大きく分けてOBC (Ocean Bottom Cable) タイプ（図3）とnodeタイプ（受振点ごとに設置する海底地震計タイプ。図4に一例を示す）がある。4-C地震探査技術の発展、普及化はOBC技術の発達によるところが大きい。

4-C地震探査は1990年代初頭に Statoil 社が北海

図3 4-C-OBCのタイプ (Caldwell, 1999)

図4 node タイプ4成分受振器
(A single node of the CGG Subseaco system, courtesy of CGG)

Tommeliten Field で実施した調査から始まった (Berg *et al.*, 1994)。この調査では node タイプの4成分受振器を海底にリモートコントロールで着底設置し、PS波およびPP波を取得した。データ処理を行って得られたPS波断面の質は、1970年代後半から80年代初頭の陸上S波探査や、80年代のPSSP波を用いた探査で得られたものとは対照的に、高分解能および高S/N比で良好なものであった。また、浅部ガスの影響でPP波ではイメージできなかった浅部ガスゾーン以深の構造形態がPS波によりイメージできた例が示され (図5)、本調査は海域でのS波探査が注目されるものとなった。その後1990年代半ばにS波を取得するための2つの水平成分ジオフォン、P波を取得するための垂直成分ジオフォンおよびハイドロフォンを内蔵した4-C OBCが開発され、OBCの利便性からより簡便に4-C地震探査ができるようになり、既存油・ガス田での適用を中心にここ数年で急速に普及しつつある。

OBCとは、もともと通常のスリーマーが使用でき

図5 北海 Tommeriten fieldでの4-C地震探査記録例 (Caldwell, 1999)
a) PP波断面図 b) PS波断面図。4-C地震探査の有効性を示した最初の例。

ない水深20~30 m以浅の海域で使用するために開発されたデジタル式の着底ケーブルである。ところで海中にハイドロフォンを設置した場合、地下から反射してきた上方進行の波と、それが海面に反射し下方進行した波(ゴースト反射波)が重なることによりデータ品質が低下する。水深15 m以上では品質の低下が顕著となってくるが、現在主流のOBCはこのゴースト波を抑制するため、ハイドロフォンとジオフォンを装着し、各受振点において両者のP波データが同時に取得される。両者のデータではゴースト波に関し極性が反転するため、適切な加算処理を行うことによりその抑制が可能である (Barr, 1997; 黒田・阿部, 1998)。

このようなゴースト反射波抑制技術の開発および現在では水深2,000 mでも使用可能となった耐水圧深度の著しい改善があり、OBCを用いる調査は生産プラットフォームなどの障害物や航行船舶が多い海域において最も有効な調査法として着実に普及していった。

OBCタイプはnodeタイプと比較して迅速な設置・撤収が可能でコストが安いという利点があるが、海底地形がラフな場合には海底とのカップリング(受振器システムと海底との接地効率)が悪くなり良好な記録が得られなくなる。そのような環境では探査コストは上昇するものの、海底とのカップリングが良好なnodeタイプの受振器システムを使用して高品質なデータを取得することも可能である。現在ではOBCの利便性から4-C地震探査のほとんどが4-C OBCを用いて行われている。

4. 4-C地震探査データ取得・処理技術

図6に4-C OBCを用いたデータ取得法の概念図を示す。4-C地震探査ではPP波とPS波を同時に取得する。

図 6 4-C 地震探査の概念図

エアガンなどで生成されたP波は地層境界面で、その一部がS波に変換して反射するが、それを海底に着底設置した互いに直交する2つの水平成分ジオフォンで取得する。なお水平成分ジオフォンで取得するのはPS波がほぼ真下から伝播してくるため、ほぼ水平方向に振動するからである。また通常のOBC調査と同様に垂直成分のジオフォンとハイドロフォンを用いてPP波を取得し、適切に加算することによりゴースト反射波を抑制する。

PS波のデータ処理は基本的にはP波（PP波）の処理と同じであるが、以下の点を考慮する必要がある。

- ① 水平成層構造であってもPS波の反射点の位置は発震点と受振点の midpoint とはならない。
- ② S波伝播速度の異方性の影響を強く受ける。
- ③ 海底付近でのS波のエネルギーの減衰が大きい。

PS波に対する標準的なデータ処理フローを図7に示す。図6で示されるようにP波の入射角とS波の反射角は、構造が水平成層であってもP波速度とS波速度の違いにより異なり、反射点は発震点と受振点の midpoint とはならない。このため通常のP波のデータ処理で用いられる common mid point (CMP) 重合法を適用することができない。PS波の処理ではP波からS波に変換する同一の反射点に対応する発震点と受振点の対を集める共通変換点 (common conversion point (CCP)) ビニングを行う必要がある。ただし共通変換点の位置はP波とS波の速度比 (V_p/V_s) によって異なるため CCP ビニングを正確に行うにはこの速度比を正しく見積もる必要がある。

データ処理ではまず、坑井データや地域の地質情報を参考に V_p/V_s の初期値を設定し、CCP ビニングから重合まで行った後、PP波断面とPS波断面において同じ反射面からの反射波の同定を行う。両断面では同じ反射面からの反射波でも往復走時 (two-way time) が異なるが、この往復走時の比から V_p/V_s が求まり、再び

図 7 PS 波の標準的データ処理フロー

CCP ビニング、速度解析、……を行う。両断面の反射波の相関が高くなるまで V_p/V_s の設定から重合までを繰り返すため、PS波のデータ処理はPP波のデータ処理と比較して多くの時間を必要とする。

5. 4-C 地震探査の適用分野

4-C 地震探査の主要な適用分野は2つある。1つはイメージングの分野で、浅部ガスゾーン以深のイメージングやS波インピーダンス変化が大きい場合のイメージングなど、P波（PP波）では良好な結果が得られない地質セッティングにおいてPS波を用いて地下構造形態の把握を行うものである。もう1つの適用分野は岩相および孔隙内流体の推定である。これはP波（PP波）データとPS波データの両方を用いて、P波（PP波）のみでは把握が困難な岩相や孔隙内流体に関する情報を与えるものである。

5.1 イメージング（構造形態把握）への適用例

5.1.1 浅部ガスゾーン以深のイメージング

P波がガスを含んだ地層を通過する際にはガスの影響でエネルギーが減衰し、深部の良好なイメージを得ることができないが、S波はガスの影響を受けないためP波を用いた場合よりもS/N比および連続性が良好なイメージを得ることができる。北海 Valhall 油田での適用例 (Zhu *et al.*, 1999) を図8に示す。PP波断面では Top Chalk の反射面が得られていないが、PS波断面では明瞭に得られている。またPP波断面では浅部のガスによる低速度層の影響で反射面の下方へのたわみ (pull down) が認められ、真の構造形態を得ることが困難であるが、PS波断面では低速度層による影響は小さい。

図8 北海 Valhall 油田での 4-C 地震探査記録例 (Zhu *et al.*, 1999, courtesy of BP, Valhall license partners and PGS)

a) PP 波断面図。b) PS 波断面図。PP 波断面図では中央付近がガス層の影響でイメージされていないが、PS 波断面図では Chalk 層上面が明瞭にイメージされている。

5.1.2 P 波のインピーダンス変化が小さい場合のイメージング

第三紀の未固結砂岩層と頁岩層からなる地層では、しばしば P 波のインピーダンス (P 波伝播速度と地層密度の積) の差が小さく、S 波のインピーダンス (S 波伝播速度と地層密度の積) の差が大きい場合が多い。このとき通常の P 波を用いる地震探査では砂岩貯留層上面や下面でのインピーダンスコントラストが小さく十分な強度の反射波が得られないが、PS 波ではより強振幅の反射波を得ることができる。

中部北海の Alba 油田への適用例 (Hanson *et al.*, 2000) を図 9 に示す。同油田は始新統の高孔隙率、未固結チャンネル砂岩を貯留岩とし、その上部を低浸透率の頁岩がシールしている。PP 波断面 (図 9 a) では貯留層上面の構造形態が得られていないが、PS 波断面 (図 9 b) ではウイング状の貯留層形状が明瞭に得られており、貯留層上面の構造把握がキーとなる追加水平坑井の掘削計画最適化に寄与している。

5.2 岩相および孔隙内流体の推定への適用例

P 波情報と S 波情報を用いて岩相や孔隙内流体の推定を行った例を紹介する。なお、これらは一義的に推定できるとは限らない。例えば V_p/V_s は岩相と強い相関があるが、孔隙内流体などによっても変化する。このため常に地質学的解釈とあわせて検討することが必要である。

中国 Yinggehai Basin の例：震探断面上で見られる局所的な強振幅異常をブライトスポットとすることがあるが、炭化水素 (ガスの集積を表している場合が多い)

によるものをいわゆる真のブライトスポット (true bright spot), 岩相変化などの炭化水素以外によるものをいわゆる偽のブライトスポット (false bright spot) ということがある。これらの偽のブライトスポットを見分ける方法として 4-C 地震探査を利用できる。

P 波の速度は孔隙内流体の変化の影響を受け、ガスの存在により強い反射波を生じるのに対し、S 波の速度は孔隙内流体の変化の影響をほとんど受けないので、ガスが存在しても P 波ほどの強い反射を生じない。一方岩相が急激に変化しているために PP 波断面上に偽のブライトスポットが生じている場合は、PS 波断面上でも偽のブライトスポットが生じる可能性が高い。

図10に中国 Yinggehai Basin での適用例 (Hanyi *et al.*, 2002) を示す。PP 波断面では True Bright Spot および False Bright Spot とも強振幅異常を示し、その区別が困難であるのに対し、PS 波断面では True Bright Spot の位置で強振幅異常が消え、False Bright Spot では強振幅となっている。True Bright Spot はガスによるもので、False Bright Spot は岩相によるものと考えられる。

北海 Callanish 油田の例：PS 波の振幅および P 波のインピーダンスを用いて炭化水素胚胎砂岩とそれ以外の識別を行った北海 Callanish 油田の例 (Alsos *et al.*, 2002) を紹介する。主要貯留層は第三系 Forties 砂岩層で構造および層位トラップを形成し、孔隙内流体はガス、油、水と変化する。Forties 層砂岩層上面の P 波インピーダンスマップ (図11 a) において、2 本の点線の

図9 北海 Alba 油田での適用例 (Hanson *et al.*, 2000, courtesy of ChevronTexaco)
a) PP 波断面図および解釈図。b) PS 波断面図および解釈図。

図10 中国 Yinggehai Basin での適用例 (Hanyi *et al.*, 2002)
a) PP 波断面。b) PS 波断面。

図11 北海 Callanish 油・ガス田での適用例 (Alsos *et al.*, 2002, courtesy of WesternGeco. Figure reprinted from Schlumberger *Oilfield Review*)
a) Forties 貯留層上面の P 波インピーダンスマップ。2本の点線の内側は砂岩分布域、外側は頁岩分布域を表す。b) Forties 貯留層上面の PS 波振幅マップ。暖色系は砂岩、寒色系は頁岩を表す。

図12 北海 Oseberg 油田での適用例 (Gaiser, 1999)
a) 貯留層上面の P 波インピーダンスマップ。b) S 波インピーダンスマップ。c) V_p/V_s マップ。

内側は砂岩の分布域を示すが、点線より内側の炭化水素を胚胎した砂岩と点線より外側の頁岩（どちらもグレー色）の区別が困難である。これに対し PS 波の振幅マップ（図11 b）では流体の種類に関係なく砂岩と頁岩が明瞭に区別されている。両者を組み合わせることにより、炭化水素を胚胎した砂岩とそれ以外のもの（炭化水素を胚胎していない砂岩および頁岩）を区別することに成功している。

北海 Oseberg 油田の例：地域と深度の範囲を限定すれば、P 波速度とS波速度の比（ V_p/V_s ）と岩相の間には強い相関関係がある。 V_p/V_s は例えば砂岩から泥岩、砂岩から石灰岩へと変わる際に増加するので、岩相の横方向の変化を調べるのに有効である。地震探査データから得られた V_p/V_s から岩相を推定した事例は、陸上での例は多く報告されているが（例えば稲盛ら, 2001）、4-C 地震探査を用いた事例で公表されているものは少ない。

PP 波断面および PS 波断面のインバージョン処理により得られるP波インピーダンス、S 波インピーダンスおよびそれらの比（ V_p/V_s に等しい）もまた岩相を推定するために活用できる。北海 Oseberg 油田では貯留層層準の P 波インピーダンスマップと S 波インピーダンスマップから V_p/V_s マップ（図12 c）を作成し、青色で示される低 V_p/V_s 値はターゲットとなる砂岩を表しているものとして開発井の坑跡が決定されている。

5.3 その他の分野への適用例

上記の適用分野と比較すると、実績例が少なく 4-C 地震探査の有効性が必ずしも確定していない適用分野であるが今後重要になる可能性が高いものを紹介する。

5.3.1 掘削障害の予知への適用例

孔隙圧が静水圧よりも高い状態にある地層を異常高圧層と呼ぶ。異常高圧層は主に、堆積速度が大きい場合に孔隙内の流体が排出されず、荷重が岩石の構成粒子だけでなく孔隙内流体によっても支えられることによって生じる。

近年、メキシコ湾などの大水深地域では、海底からの深度が比較的浅い未固結状態での海底扇状地成堆積物が異常高圧層として掘削障害となるケースが多くなっている。このような堆積物は流体の性質に近く、P 波速度は流体の速度に近いのに対し、S 波速度はほとんどゼロとなる。そのため V_p/V_s が非常に大きくなる。Huffman and Castagna (2001) は 4-C 地震探査により得られた高分解能の V_p/V_s 断面図から異常高圧層が検知できることを示している。

5.3.2 sub-salt, sub-basalt イメージング

P 波が岩塩層や玄武岩層などの高速度層にある入射角以上で入射した際には、P 波として高速度層を透過して

いくエネルギーよりも、高速度層上面で P 波から S 波に変換されて透過していくエネルギーの方が大きくなる。この変換波を用いて高速度層の下位の構造形態を得ようという研究が行われている（例えば Ogilvie and Purnell, 1996; Kendall *et al.*, 1998）。4-C 地震探査の他の適用例が PS 波（P 波から S 波への 1 回きりの変換）を用いているのに対し、高速度層下位のイメージングでは何度も変換を起こした複雑な変換波を対象としており、抽出の困難さやエネルギーの減衰が大きいためこれまでのところ顕著な成功例は報告されていない。

5.3.3 フラクチャーゾーンの空間分布や方向性の推定

S 波地震探査の利用法の 1 つとして期待されているものにフラクチャーゾーンの空間分布や方向性の推定がある。これはフラクチャーなどによって地震波伝播速度の異方性を有する地層に S 波が入射した場合、フラクチャーに平行な方向に振動する速度の速い波とそれに直交する方向に振動する速度の遅い波に分離・伝播する性質（これを S 波スプリットングという）を利用するものであり、陸上においては振動方向を制御できる S 波震源を用いての成功例がいくつか報告されている。海域では P 波から S 波への変換を S 波震源として用いるため振動方向を制御できず、陸上と比較して精度良くフラクチャー解析を行うには制限があるとの指摘がある（Tatham, 2002）。

5.3.4 4 C-4 D 地震探査技術

4 C-4 D 地震探査とは、生産に伴う残存油・ガスの分布や EOR における圧入流体の浸透状況などのモニタリングのために 4-C OBC を用いて三次元地震探査を繰返し実施するものである。繰返し実施するには OBC を半永久的に海底に設置しておく都合が良い。海底固定設置により、良好な repeatability、海底との良好なカップリングおよびロケーションに関する不確実性の減少が見込まれ、通常の方法と比較して生産や圧入に伴う圧力変化や貯留層内の流体変化などで生じる地震波応答のより微小な変化を捉えることができると期待される。また 1 回当たりの調査コストを低減することが可能となる。

海底固定設置による 4 C-4 D 地震探査の実施は未だ報告されていないが、ハイドロフォンのみの OBC の海底固定設置による 4 D 地震探査が北海 Foinaven 油田において実施されている（Kristiansen *et al.*, 2000）。本調査では水深 500m の海底にトレンチを切り OBC を固定設置し、油生産前の 1995 年と油生産開始 10 ヵ月後の 1998 年に、ストリーマーおよび OBC を用いて 3 D 地震探査を実施した。ストリーマーおよび OBC の、1998 年地震探査記録から 1995 年地震探査記録を差し引いたもの（残

図13 北海 Foinaven 油田における OBC 海底固定設置による 4-D 地震探査記録例 (Kristiansen et al., 2000, courtesy of BP, Shell and Foinaven asset partners)

a) ストリーマーによる 1995 年調査と 1998 年調査の残差。b) OBC による 1995 年調査。
c) OBC による 1995 年調査と 1998 年調査の残差。c) は a) と比較すると油を生産している矢印の範囲にのみ差異が見られ、かつ連続性のよい記録となっている。

差)をそれぞれ図13 a, 図13 c に示す。図の左側 1/4 は生産に寄与していない部分で、ストリーマーではその部分も含め全域的に残差が認められるが、海底固定設置 OBC では油を生産している範囲 (図13 c の矢印の範囲) のみ認められ、かつ S/N 比が高い。この振幅変化は油生産に伴う油層圧力の減少によって溶解ガスが分離・膨張したことによるものと考えられている。OBC の海底固定設置方式により、生産に伴う地震波応答の変化を認識でき、かつ機器の故障はほとんどなかったことから同方式による 4 D 地震探査の有効性が検証されている。今後、このような油層管理を目的とした 4 C-4 D 地震探査が実施されていくであろう。

6. おわりに

4-C 地震探査は多くの成功例が報告されつつあるが、現状では得られる情報量に対するコストがまだ高いとの認識や、適用範囲が限定的、PS 波のデータ処理が難しいとの理由で、広く普及しているとはいえない。今後はコストの削減および適用範囲の拡大が 4-C 地震探査がより普及するかどうかの鍵となる。

4-C 地震探査はこれまで、浅部ガスゾーン下のイメー

ジングや、P 波インピーダンスコントラストの小さい場合への適用など、構造形態把握での成功例が多く報告されてきた。S 波情報を得ることの最大の利点は、P 波情報と組み合わせる岩相変化や孔隙内流体の種類、動きを推定できることにあるが、この分野への適用はまだ始まったばかりである。今後このような油層キャラクターゼーション技術の発達による適用範囲の拡大が 4-C 地震探査のさらなる発展につながると考えられる。

謝 辞

本稿は石油/天然ガスレビュー誌に掲載された「新世代地震探査技術 4-C Seismic とは何か (渡部, 2000)」に加筆、改編したものである。石油公団には公表を許可していただいた。物理探査学会、Schlumberger 社、The Society of Exploration Geophysicists にはそれぞれ著作権を有する図の転載を許可していただいた。また査読者からは多数の有益なご意見を賜った。以上のかたがたに深くお礼申し上げる。

参 考 文 献

Alsos, T., Eide, A., Astratti, D., Pickering, S., Benaben-

- tos, M., Dutta, N., Mallick, S., Schultz, G., Boer, L., Livingstone, M., Nickel, M., Sneland, L., Schlaf, J., Schoepfer, P., Sigismondi, M., Soldo, J. and Stren, L., 2002: Seismic Applications Throughout the Life of the Reservoir, *Oilfield Review*, **14**(2), 48-65.
- 芦田 謙, 1997, S波による反射法地震探査, 物理探査, **50**, 321-331.
- Barr, F. J., 1997: Dual-sensor OBC technology, *The Leading Edge*, **16**, 45-51.
- Berg, E., Svenning, B. and Martin, J., 1994: SUMIC- a new strategic tool for exploration and reservoir mapping, *EAEG 56th Mtg. Abstracts*.
- 物理探査技術協会, 1979: 物理探査用語辞典, 210, 351, 352.
- Caldwell, J., 1999: Marine multicomponent seismology, *The Leading Edge*, **18**, 1274-1282.
- Gaiser, J. E., 1999: Application for vector coordinate systems of 3-D converted-wave data, *The Leading Edge*, **18**, 1290-1300.
- Hanson, R., MacLeod, M., Bell, C., Behrens, R. and Riel, P., 2000: 4C seismic data and reservoir modeling at Alba Field, North Sea, *SEG 70th Mtg. Expanded Abstracts*.
- Hanyi, H., Hongzhang, Z. and Dandan, F., 2002: Multicomponent seismic exploration in Yinggehai Basin, *The Leading Edge*, **21**, 914-920.
- Huffman, A. and Castagna, J., 2001: The petrophysical basis for shallow-water flow prediction using multicomponent seismic data, *The Leading Edge*, **20**, 1030-1035.
- 稲盛隆穂・萩原 洋・溝畑茂治・常山 太・岡村 仁, 2001: 炭酸塩岩を対象とした貯留層特性把握と繰り返し地震探査. 石技誌, **66**, 26-32.
- Kendall, R., Gray, S. and Murphy, G., 1998: Subsalt imaging using prestack depth migration of converted waves: Mahogany Field, Gulf of Mexico, *SEG 68th Mtg. Expanded Abstracts*.
- Kim, N. and Seriff, A., 1992: Marine PSSP reflections with a bottom velocity transition zone, *Geophysics*, **57**, 161-170.
- Kristiansen, P., Christie, P., Bouska, J., O'Donovan, A., Westwater, P. and Thorogood, E., 2000: Foinaven 4 D: Processing and analysis of two designer 4Ds., *SEG 70th Mtg. Expanded Abstracts*.
- 黒田 徹・阿部 進, 1998: データ取得技術. 物理探査ハンドブック第2巻反射法地震探査. 物理探査学会, 46-47.
- Ogilvie, J. and Purnell, G., 1996: Effects of salt-related mode conversions on subsalt prospecting, *Geophysics* **61**, 331-348.
- Tatham, R., 2002: Future directions of multicomponent seismic methods in the marine environment, *The Leading Edge*, **21**, 377-378.
- 渡部克哉, 2000: 新世代地震探査技術4-C Seismic とは何か—海域におけるS波探査の実用化—. 石油/天然ガスレビュー, **33**(3), 107-117.
- Zhu, X., Altan S. and Li J., 1999: Recent advances in multicomponent processing, *The Leading Edge*, **18**, 1283-1288.