報 告

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*

稲盛 隆穂**・萩原 洋***・溝畑 茂治****・
常山 太****・岡村 仁****

(Received August 31, 2000; accepted January 12, 2001)

**A case study of geophysical survey for reservoir characterization
and miscible flood enhanced oil recovery in carbonate reservoirs**

Takao Inamori, Hiroshi Hagiwara, Shigeharu Mizohata,
Futoshi Tsuneyama and Hitoshi Okamura

Abstract: We are now executing a cooperative research project with UNOCAL in order to develop and apply geophysical technology for reservoir characterization and optimizing miscible flood enhanced oil recovery in carbonate reservoirs. This project aims to monitor the fluid behavior in carbonate reservoirs by time-lapse geophysical surveys such as 3-D seismic survey, VSP, cross-well technology and well logging. JNOC and UNOCAL decided to conduct this study at the Reinecke oil field in Texas, U.S.A., operated by UNOCAL, whose reservoir is Paleozoic dolomitic limestones.

First, we interpreted the geometrical framework of the reservoir and described the reservoir in terms of P-P reflected wave volume and P-SV converted wave volume, both of which were generated from the data acquired in December, 1997. Based on these methods, we drew a detailed time structure map and found some new structural/sedimentological features of the reservoir.

Second, for reservoir characterization, we calculated the Vp/Vs ratio from the isochron P-P and P-SV 3D volumes and created a distribution map of the Vp/Vs ratio. We evaluated the distribution map as a predictive tool of carbonate lithology by using the relationship between the Vp/Vs ratio and the dolomite content established through well log analysis. Our initial interpretation suggests the correlation between the the seismically deduced Vp/Vs ratio and the dolomite content. There has been, however, difficulties in the evaluation at its advanced stage. Believing that such 3D seismic volume information should include some useful attributes of reservoir, we are continuing to evaluate the data for further reservoir characterization.

Third, we conducted a new 3D survey over the field in December, 1999, after Unocal started to inject CO₂ to the reservoir in January, 1998. This is to monitor the effect of the CO₂ injection using the seismic attributes in those time-lapse data series. We successfully found some differences in and around the reservoir between the previous baseline sections and the rush sections of the monitoring survey. This evaluation will be completed with cross-equalizing the volume data sets calculated from the two, time-lapse surveys.

Key words: reservoir characterization, time-lapse, 3D-3C seismic survey, 4D, Vp/Vs ratio, dolomite, limestone

* 平成12年 5 月24日, 平成12年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱シンポジウム「石油探鉱・開発における貯留岩性状の予測技術」で講演 This paper was presented at the 2000 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Technology for prediction of reservoir distribution and property in petroleum exploration and development", held in Niigata, Japan, May 24, 2000.

** 石油公団石油開発技術センター物理探査研究室 Japan National Oil Corporation, Technology Research Center, Geophysics Laboratory (現, 石油資源開発(株)探鉱本部探鉱技術部)

*** 石油公団石油開発技術センター物理探査研究室 Japan National Oil Corporation, Technology Research Center, Geophysics Laboratory (現, Petroleum Development Division, Abu Dhabi Marine Operating Company)

**** 石油公団石油開発技術センター物理探査研究室 Japan National Oil Corporation, Technology Research Center, Geophysics Laboratory (現, 石油公団石油開発技術センター低浸透性炭酸塩岩油層研究プロジェクトチーム)

1. 緒 言

石油公団石油開発技術センターでは、三次元地震探査データを利用した炭酸塩岩貯留層における孔隙率・浸透率の分布予測のための貯留岩解析技術の開発を実施し、いくつかの成果を上げてきた。

近年の貯留層解析技術においては、より効率的な油・ガスの回収を目指すために、生産中の油・ガス田で、時間間隔をおいて実施した物理探査データを用い、貯留層内の流体の挙動を把握する技術が脚光を浴びつつある。この技術は繰り返し物理探査と呼ばれ、その物理探査としては三次元地震探査、坑井間トモグラフィ、VSPなどが利用される。特に繰り返し三次元地震探査は、時間と言う次元が増えることから、四次元地震探査と呼ばれることもある。

そこで、石油公団石油開発技術センターは長年共同研究を実施してきた米国ユノカル社と共同研究「炭酸塩岩における貯留層特性把握とミシブル攻法に伴う EOR モニタリングに関する技術の開発研究」を1996年4月に開始した。

本共同研究の全体計画では、まず繰り返し物理探査のフィジビリティスタディを実施し、その結果を吟味した上で、炭酸塩岩貯留層に炭酸ガス圧入攻法を適用する油田において、三次元地震探査などの物理探査を複数回実施する。次いでこの物理探査データと坑井データに基づく地質解析および三次元地質モデルを作成する。さらに、その地質モデルを用いた油層シミュレーションなどの手法を用いて、総合解析を行い、炭酸ガス圧入に伴う動的な貯留層特性把握と EOR モニタリングに関する技術開発を行うことが、本共同研究の目的である。

今回は、この研究において、貯留層特性把握として Vp/Vs 値を使用した岩相比率推定の試みを実施したので報告する。また、繰り返し地震探査の予備的な結果も紹介する。

2. 研究対象油田概要

2.1 ライネキ油田

本研究は、テキサス州北西部に位置する米国ユノカル社がオペレータであるライネキ油田(図1)の上部ペンスルバニア系から最下部二畳系(図2)で構成される尖礁に存在する油層を対象としている。本油田は2つの炭酸塩岩ドームからなり、このうち、油田南側のドームの炭酸ガス圧入実施に合わせて、繰り返し地震探査を行うこととした。

本油田の発見は1950年で、ミッドランド堆積盆地のホースシューアトールの南側に位置する。主要な貯留層

図1 ライネキ油田インデックスマップ

SYSTEM	SERIES	STRATIGRAPHIC UNIT
PERMIAN	Ochoon	Dewey Lake
		Rustler
		Salado
	Guadalupe	Capitan
		Tansill
		Yates
		Seven Rivers
		Goat Seep
		Queen
PENNSYLVANIAN	Leonardian	Grayburg
		San Andres
		Clear Fork
		Spraberry
		Dean
		Wolfcamp
		Cisco
		Canyon
		Strawn
		Bend
MISSISSIPPIAN		Mississippian
DEVONIAN		Devonian
SILURIAN		Fuselman
ORDOVICIAN	upper	Montoya
	middle	Simpson
	lower	Ellenburger
CAMBRIAN		

Relative production ● → ●

図2 ライネキ油田周辺地質層序模式図

は上部ペンスルバニア系キャニオン/シスコ層～最下部二畳系ウルフキャンプ層の尖礁・マウンド性石灰岩層で、構造形態としては炭酸塩岩ドームである。本構造はその南東域に極隆部を有し、直径約6,000ftで、比高約230ftである。貯留層の孔隙率は平均11% (10.8～13%), 平均浸透率は水平方向300md, 垂直方向は100mdである。これらの値は地域によるばらつきが大きく、垂直浸透率が数ダルシーに達するところも見られる。初期油飽和率は81%で、残存油飽和率は32～40%である。

生産初期の本油田の生産面積は2,721エーカー(約11平方キロ)で、油層高は470ftで主要な排油機構は底水タイプ水押し型、初期油水境界面は-4,660ft(平均海水面下)であった。炭酸ガス圧入前の油水境界面は

-4,420~-4,480ftである。

本油田の原始埋蔵量は178百万 bbl、累積生産量は83百万 bblである。一日当たりの生産量は1997年5月現在で、油：965 bbl/day、水：56,403 bbl/day、ガス：1,891百万 ft³/dayであり、水圧入量は56,403 bbl/dayである。

坑井の間隔は20エーカー/坑で、炭酸ガス圧入前では、生産井が46坑、水圧入井が30坑、休止井が55坑であった。

このように、ライネキ油田全体には多数の坑井が掘削されており、多くの検層データ、テストデータ、生産データなどが利用可能である。

研究対象となる油田南側の坑井配置図を図3に示す。

2.2 ライネキ油田生産状況

本油田では、1950年の発見後、1969年までは自然の水押しおよび溶解ガス押しにより、油が排出されていたが、油層圧が減退したため、水圧入による圧力維持が実施されてきた。1990年代に入り、本油田では、垂直方向の高浸透性が原因となって激しい水のコーニングが生じていて、ウォーターカットが大きい。そこで、米国ユノカル社では、重力効果を用いた炭酸ガス圧入を適用し、コーニングを解消して生産性をあげようと計画した。

1993年、米国ユノカル社はライネキ油田の周辺および深部未探鉱構造発掘のために三次元地震探査を実施している。このデータを用いて、油層シミュレーションのための貯留層モデルを構築し、炭酸ガス圧入の油層シミュレーションを実施した結果、この圧入攻法の有効性が示唆された(図4)。この結果を受けて、炭酸ガスの貯留層内の圧入は1998年1月より開始された。

図3 ライネキ油田南側坑井配置および三次元地震探査領域図

図4 重力効果による炭酸ガス圧入攻法の概念図

2.3 繰り返し地震探査のためのフィジビリティスタディ

実際の繰り返し物理探査データの取得を実施する前に、岩石物性の測定を実施し、繰り返し地震探査によるモニタリングの可能性を検討した。コアを用いた弾性波速度測定からは、石灰岩において、水から炭酸ガスの置換によりP波速度が2~5%低下するという結果が得られた。また、ドロマイトでは1~2%の速度低下が観測された。密度の変化も考慮すると、水から炭酸ガスの置換により、インピーダンスは石灰岩で4%、ドロマイトでは1~3%の減少が予測された。

3. 三成分三次元地震探査データを用いた構造解釈

3.1. 概要

ライネキ油田の南側をカバーする13.3平方 km (3.6 km×3.6 km)で、三成分三次元地震探査が実施された。三次元地震探査領域は図3に合わせて示した。

対象地域の地表は収穫後の綿花畑および土漠状の平坦地であるが、データ取得の障害物として、所々に生えている灌木、油田内の生産井、生産施設および埋設パイプラインがある。

発振はP波バイブレータを使用し、発振周波数は8~110Hz、発振長は6sec、リスニングタイムは4sec、発振回数は8回である。受振器には三成分受振器を用い、水平成分のデータも取得した。

第1回目の三成分三次元地震探査のデータ取得期間は1997年12月12日から17日であり、第2回目は1999年12月5日から12日であった。季節的にはほぼ同じである。

どちらの調査時期も、地表はかなり乾燥していた。受振器の設置においては、埋設して撒水することにより、受振器と地面とのカップリングの向上を図った。

第1回目と第2回目の同一発震点での記録を図5(a), (b)に示す。図からはデータの品質はさほど変わらないことが見てとれ、データの再現性は確保されていると考えられる。

しかしながら、厳密な繰り返し地震探査の検討においては、今後詳細なリピータビリティの検討が必要である。その基本データとなる埋設受振点を調査域内に全32点設置し、コンクリートで固め、2回の地震探査データの比較を行うためのデータを取得し、解析に備えた。

データ処理は通常のP-P反射波の処理だけでなく、水平二成分のデータを用いて、P-SV変換波の処理を実施した。第2回目の地震探査データは現在処理解析中である。

3.2 貯留層内ホライゾン解釈

音波検層(P波, S波)および密度検層データから、P-P反射波とP-SV変換波の合成地震記録を作成した(Larsen *et al.*, 1997)。この合成地震記録をP-P反射波とP-SV変換波三次元ボリュームと坑井データとの比

図5(a) 1997年12月実施の三次元地震探査発振記録例 (AGC 600ms 適用)

図5(b) 1999年12月実施の三次元地震探査発振記録例 (AGC 600ms 適用)

較に用いた。

合成地震記録の解析から、貯留層上面がピークに一致することが分かる。またP-P反射波では200, 300, 400の貯留層内の3シーケンス境界(以下SB-200, SB-300, SB-400とする)について油田内においてその反射波は顕著で反射イベントとして同定ができたが、P-SV変換波においては、SB-200, SB-400の変換波の同定は困難であった。一方、SB-300は同定が可能であった。この結果から、P-SV変換波三次元ボリュームでは貯留層上面とSB-300を追跡することとした。これらのシーケンス境界はコアと検層データ、P-P三次元地震探査データに基づいて認定され、4境界とも地表への露出が認められる不整合面である。

調査域中央のIL測線250のP-P反射波断面を図6(a), P-SV変換波断面を図6(b)に示す。

P-SV変換波のS/N比は必ずしも良くなかったが、P-P反射波との関係を考えつつ、解釈を実施した。

貯留層上面とSB-300のP-P反射波時間構造図(図7(a), (b))を作成した。合わせて、P-SV変換波時間構造図(図8(a), (b))を示す。

速度構造を坑井データから推定し、P-P反射波時間構造図から深度構造図を作成した。

4. 貯留層特性把握

P-P反射波三次元ボリュームとP-SV変換波三次元ボリュームの解釈ホライゾンデータからホライゾン間のVp/Vs値を算出し、貯留層内のドロマイトと石灰岩の比率の推定を試みた。岩質とVp/Vsの関係については多くの報告がある。例えば、Tatham and McCormack (1991)では、石灰岩ではVp/Vsが約1.9、ドロマイトでは約1.8という結果が得られている。

Vp/Vsを三次元地震探査データから求め、岩質を推定することができれば、検層ログから求められる孔隙率や浸透率の推定の精度向上に役立つ。

4.1 坑井検層データから求めたVp/Vs

S波音波検層を実施した7坑井の検層データを用いて、Vp/Vsを求めた。Vp/Vsは貯留層上面とSB-300の間で平均した。同様にドロマイト含有率を求め、クロスプロットを行った(図9)。図からは、Vp/Vsとドロマイト含有率に逆相関が見られる。

4.2 三成分三次元地震探査データから求めたVp/Vs

P-SV変換波ボリュームでの往復走時Tpsは、P-P反射波での往復走時をTp、P波速度、S波速度をそれぞれVp、Vsとすると、

$$Tps = \frac{Tp}{2} + \left(\frac{Tp}{2} * \frac{Vp}{Vs} \right)$$

図 6(a) P-P 反射波処理マイグレーション時間断面図 IL-250

図 6(b) P-SV 変換波処理マイグレーション時間断面図 IL-250

図 7(a) 貯留層上面の P-P 反射波時間構造図

図 7(b) SB-300 の P-P 反射波時間構造図

図 8(a) 貯留層上面の P-SV 変換波時間構造図

図 8(b) SB-300 の P-SV 変換波時間構造図

図9 7坑井で求められた Vp/Vs 値とドロマイト含有率のクロスプロット

図10 貯留層上面と SB-300 のアイソクロンから求めた Vp/Vs 値分布図

これを $\frac{Vp}{Vs}$ で解くと、

$$\frac{Vp}{Vs} = 2 * \frac{Tp_s}{Tp} - 1$$

この関係を用いて求めた貯留層上面と SB-300 で挟まれた部分の Vp/Vs を図10に示す。

4.3 検層ログデータと三成分三次元地震探査データから求めた Vp/Vs との比較

対象地域26坑井の貯留層上面と SB-300 のドロマイト含有率の平均から分布図を作成した (図11)。

図10と図11を比較すると、図10では短周期変化が大きく、両者の単純な比較は困難である。今回使用した Vp/Vs の計算方法はホライゾン間の往復走時を基にしているため、解釈時の任意性が高い。また、層が薄くなれば、つまり往復走時が小さくなれば、反射波・変換波の波形の揺らぎが Vp/Vs 値を大きく変化させる。貯留層付近の P-P 反射波の卓越周波数は 40 Hz 程度とすると、半波長分は 12.5ms である。一方、貯留層付近の

図11 26坑井データに基づくドロマイト含有率分布図

図12 左：1997年12月実施の P-P 反射波処理マイグレーション時間断面図 IL-250
右：1999年12月実施の P-P 反射波処理マイグレーション時間断面図 IL-250

P-SV 変換波の卓越周波数は 25 Hz 程度とすると、半波長分は 20ms である。一方、貯留層上面と SB-300 の往復走時差は P-P 反射波断面で、約 15ms、P-SV 変換波断面で約 30ms となるため、少しの解釈のずれが大きな Vp/Vs 値のエラーとなる。

4.4 貯留層特性把握まとめ

以下のように、3つのことが判明した。

- (1) P-P 反射波と P-SV 変換波それぞれの時間構造図を比較すると若干その形状が異なり、Vp/Vs が変化している。
- (2) 坑井検層データによる Vp/Vs を検討した結果、炭酸塩岩の構成物であるドロマイト含有率との間に逆相関がある。
- (3) P-P 反射波と P-SV 変換波ボリュームから求めた Vp/Vs 値は短周期変化が大きく、坑井データに基づくドロマイト含有率分布とは必ずしも合致しない

い。したがって、地震探査から求めた V_p/V_s からドロマイト含有率を推定するためにはさらに検討を要する。

5. 繰り返し地震探査

2000年6月現在、1999年12月に取得された第2回目のデータの処理を実施中である。図12に図6と同じIL 測線 No. 250 の予備的な結果を示す。

図12によると、第1回目と第2回目の地震探査で貯留層上面からの反射波と思われるイベントの卓越周波数に変化が見られることと、その下のトラフの振幅が変化していることが分かる。これは炭酸ガス圧入による影響の可能性を示唆する。

しかしながら、他の反射イベントも変化しているところが見受けられる。厳密な繰り返し地震探査の解析には炭酸ガス圧入の影響の及ばない領域で対応するトレースデータを用い、第1回目と第2回目の地震探査データをクロスイコライゼーションなどの手法を適用した平準化処理が必要であろう。

6. まとめと考察

1997年12月に収録された三成分三次元地震探査データから得られたP-P 反射波とP-SV 変換波データに基づいて構造解釈を行い、貯留層上面とSB-300の時間構造図を作成した。貯留層の特性を把握するために、 V_p/V_s 値に注目したところ、坑井検層データから V_p/V_s とドロマイト含有率に相関があることが示された。この結果、地震探査データの V_p/V_s 値に基づく貯留層内のドロマイト含有率の推定の可能性が示唆された。三成分三次元地震探査データから求めた2つの解釈ホライゾンの往復走時を用いて、これらのホライゾン間の V_p/V_s 値を求めた。

対象地域内の坑井データに基づくドロマイト含有率分布と、ホライゾンの区間走時から求めた V_p/V_s 値を比較したが、データの質にかなりの開きがあり、その検討がさらに必要である。解釈ホライゾンから求めた V_p/V_s 値の信頼性をいかに高めるのが今後の課題となる。

7. 結 言

P-P 反射波とP-SV 変換波データは岩質・岩相の

データを何らかの形で含んでおり、今回求めた V_p/V_s 値はそのひとつにすぎない。地震探査データから岩質・岩相を推定する物性値をいかに抽出し、坑井検層データと比較し、岩質・岩相の推定に結びつけていくのか、さらなる検討を続ける必要があると考える。

今回、4.4節の(2)で述べたように坑井検層データでは V_p/V_s 値を岩質の推定に用いることが可能であると考えられる。したがって、三成分三次元地震探査データから精度よく V_p/V_s を求めることができれば、貯留層内のドロマイトと石灰岩の分布を得ることができ、さらには孔隙率・浸透率分布を求めて、より詳細なフローシミュレーションモデルの構築に役立てることができであろう。

謝 辞

石油公団石油開発技術センターと米国ユノカル社には本報告の公表を許可していただき、感謝しております。また、シンポジウムでの講演と本報告発表の機会を与えてくださったシンポジウム世話人の皆様に感謝致します。ならびに本報告の作成に当たり、アラビア石油株式会社日下 肇様、石油資源開発株式会社高橋明久様には適切かつ有益なご助言をいただいたことを記して感謝を表します。

SI 単位換算係数

md $\times$ 9.86923	E-04= μ m ²
bbl $\times$ 1.589873	E-01=m ³
ft $\times$ 3.048	E-01=m
ft ³ $\times$ 2.831685	E-02=m ³
エーカー $\times$ 4.0969	E-03=m ²

引 用 文 献

- Danbom, S. H. and S. N. Domenico, 1987 : *Shear-wave exploration*. SEG., 282p.
- Larsen, J. A., Margrave, G. F. and Foltinek, D. S., 1997 : New developments in the SYNTH algorithm. *CREWES Annual Research Report*, 9, ch. 17.
- Tathan, R. H. and McCormack, M. D., 1991 : *Multicomponent seismology in petroleum exploration*. SEG., 256p.