論文・報告

炭酸塩岩貯留岩の特性評価

—地震探査データと坑井データによるケーススタディー—*

榎 本 美津郎**

(Received September 4, 1992; accepted November 24, 1992)

Evaluation of a carbonate reservoir

—A case study by using seismic data and well data—

By

Mitsuro Enomoto

Abstract: A detailed delineation of structural configuration for the 3DA structure, which is located in the Gulf of Moattama, offshore Myanmar, was required for the current evaluation work. For this study, 650 kilometers of 2-D seismic data covering the structure were reprocessed and acoustic velocity measurements of the well core samples were made.

The reprocessing and reinterpretation provided more reliable structural map and porosity distribution map of the reservoir of the 3DA structure. The structure composed of a carbonate build up exhibits a four-way closure. AVO analysis was applied to define a productive area from non-productive area of the structure. Also, seismic interval velocities were used to produce an average porosity map of the gas-bearing carbonate reservoir of the structure. The results made it possible to obtain more reliable estimation of the rock volume and the porosity distribution for the 3DA structure.

1. はじめに

ミャンマーのモアッタマ湾 (旧名称はマルタバン) には、炭酸塩岩をガス貯留岩とする構造が存在している。

ここではその中の 1 つである 3DA 構造^{注1)}を取り上げ、地震探査データと坑井データを利用した貯留岩評価の事例を紹介する。

3DA 構造は、イラワジ河口の沖合い約 90km に位置している。この海域は、陸域南部のイラワジ・デルタ盆地の南延長部にあたり、モアッタマ盆地と呼ばれる盆地

注 1) 3DA は構造の名称であり、地震探査の 3-D とは関係がない。

* 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

** 出光石油開発(株) 技術室

内にある (図 1)。モアッタマ盆地は、第三紀とそれ以後の堆積物から成り、本盆地は central volcanic arc を介して西の fore arc 側と東の back arc 側に区分される。3DA 構造のような中新世の炭酸塩岩ビルド・アップは、この fore arc 側にのみ認められる。

3DA 構造は、1982 年に測定された 2-D 地震探査データを基に評価された。また、同年掘削された坑井 3DA-XA によりガス層が発見されている。このガス層は Upper Burman Limestone と呼ばれる中新世初期の炭酸塩岩が貯留岩であり、層厚は厚く、性状もかなり良好であった。その後、3DA-XA の東側 3km にステップアウト井 3DA-XC が掘削され、ここでも良好なガス層を発見している。3DA-XC のガス層トップは、3DA-XA より約 44m レベルダウンしていた。このガス層の発見後、再度本構造に対して 2-D 地震探査が精査として実施された。

図1 Study area の位置図

2. データと評価方法

ガス田の評価に使用した地震探査データと坑井データは次のとおりである。3DA 構造には、総測線長 650km 以上の 2-D 地震探査が 1km×1km のグリッド間隔で実施されている (図2)。この地震探査データは、1984年に測定された 48 重合のエアガン・データであり、旧処理データの品質を改善するため、1990年に再処理を実施した。本再処理では、Dip Move Out (DMO) 処理と Kirchhoff タイプのマイグレーション処理の適用が従来と特に異なっており、データの品質改善に大きく貢献した。解釈にはマイグレーション処理後のデータを使用した。通常、2-D データの場合、マイグレーション処理後のデータはタイ・ラインの位置での反射波対応が難しく、解釈時にホライズンや断層の位置対応に困難をきたすことがしばしばある。しかし、今回の解釈では構造上の傾斜があまり大きくなく、断層がそれほど多く発達していない地質状況から、前述のような問題には遭遇しなかった。データ解釈は、我が社が保有する地震探査解釈用ワークステーションを利用して実施した。

坑井 3DA-XA の速度検層と密度検層のデータを使っ

図2 坑井位置および測線図

図3 坑井3DA-XAの検層ログと合成地震記録データ

て作成した合成地震記録を図3に示した。坑井内速度測定データ（VSP等）がないため、時間変換はsurface seismic velocityから求めた走時と深度の関係を利用した。しかし、図3から明らかなように、ガス層内の速度ログデータが欠測しているため、合成地震記録からガス層のトップとベースを認めることはできなかった。この地震記録は、いくつかのマーカー（例えばlimestoneのトップやベース）を解釈する際に役立てた。

ガス層の水平的な分布域を確認するため、AVO解析を実施した。この解析には、坑井で取得したコア・サンプルを使った弾性波速度測定から求められたP波速度、S波速度、密度を参考にした。

また、ガス層の孔隙率の水平分布を推定するために、前述の弾性波速度測定の結果を利用した。この場合、検層データは速度ログデータが欠測していたため、ほとんど利用できなかった。坑井からの唯一の速度データは、コア分析から得られたものだった。

3. 3DA 構造

3DA 構造のガス層のトップは炭酸塩岩のトップに対応しており、この対応関係は地震探査データの反射面に明瞭に同定できた（図4）。この同定から反射面を解釈してガス層トップの構造図を作成した。2坑の坑井データから得られたガス層トップの深度値により補正した深度構造図を図5に示した。構造は、全体にドーム型の背斜構造を呈しているものの、西側に南北トレンドの構造

上の高まりがある。坑井3DA-XAはほとんど構造頂部に位置しており、また坑井3DA-XCは東翼にある。2坑の坑井データから端水面を1,320mと解釈し、この深度までを深度構造図に示した。

次に、ガス層の等層厚線図を作成するには端水面を地震探査データ上で確認しなければならない。図4に示した測線3DA-10上に2坑井から得られた端水面の位置を矢印で示してある。これを見ると、対応する反射波は両者とも速度増加の極性をもっているが一枚の連続した反射面として解釈するのは難しい。しかしながら、図6の測線3DA-25で認められるように、端水面に対応する位置にはほぼ水平なpositiveな反射面が存在していること、およびこの反射面がほぼ構造全域の測線に認められることから、この反射面が端水面を代表すると判断して解釈を実施した。検層データを詳細に検討した結果、この反射面は端水面直下にある炭酸塩岩内のやや硬質部分を示している可能性が高い。いずれにせよ、ガス層のトップとこの擬似端水面の反射波間を解釈して図7に示す等層厚線図を作成した。この等層厚線図のゼロ(0)mラインと深度構造図の1,320mラインを比較してみると、概して両者は良く一致しているとみなせる。すなわち、こうして得られた等層厚線図はrock volumeの計算には適さなくとも、後述する孔隙率の水平分布計算に使用しても大きな問題にはならないと考えた。

3DA 構造の地震探査データに見られる反射波パターン

図4 測線3DA-10と解釈ホライズン

図6 測線3DA-25と解釈ホライズン

図5 ガス層トップの深度構造図

図7 ガス層の等厚線図

ンについて、ここで簡単に述べる。ガス層を含む炭酸塩岩中の反射面は、おおむね平らな「パラレルパターン」を示している（図4と図6）。このことは地質検討の結果から、3DA 構造の堆積環境はリーフが育つ環境よりもやや深い海であろうと推定されていることと関連があるのかもしれない（Brown, *et al.*, 1990）。

4. AVO 解析と結果

3DA 構造のガス貯留岩の水平的な分布を把握するため、AVO 解析を実施した。初めに、コアデータを用いて AVO モデル計算を行い、いろいろな状況下でのレスポンスを計算した。次に、地震探査データにより解析を行いモデル計算の結果と比較検討することによって、貯留岩の分布域を推定した。

4.1 AVO モデル計算

ガス層上部からの反射波にみられる AVO レスポンスを、コアサンプルからの測定結果を使って計算した。コアデータからは P 波速度、S 波速度、密度の測定値を利用した。モデル計算の中から、次の2つのケースの結果を図8に示した。

ケース A：上部層、粘土岩

下部層、含ガスで孔隙率の高い石灰岩

ケース B：上部層、粘土岩

下部層、タイトな石灰岩

ケース A はガス層からの AVO レスポンスを想定し、ケース B はガス層を含まないもの（水飽和率 100% のデータを使用）を想定した。その結果、ガス層があるケース A では、負符号の反射波振幅が入射角の増加とともに増加していく傾向が認められた。一方、ガス層のないケース B では、入射角が 0° ~ 20° の範囲で振幅変化のない傾向が現れた。この他のケース、例えば同じガス層でも孔隙率やガス飽和率が変化すれば、当然 P 波速度、S 波速度、密度はそれぞれ変化するため、AVO レスポンスも変化する。従って、上記のケース A とケース B の結果が、3DA 構造のガス層に関するレスポンスをすべて網羅していると考えるのは非常に危険である。しかしながら、今回の場合はガス層が非常に厚く、また広く分布していること、さらに異なったコアデータの測定値を用いても比較的類似した AVO の変化パターンが得られたことを考慮して、大局的にはケース A とケース B の結果がガス層の有無を反映しているとみなせるであろう（Chacko, 1989; 藤井, 1992）。

4.2 地震探査データによる AVO 解析

3DA 構造にかかる測線に対して、AVO 処理を実施

図8 AVO モデリング計算

した。各データの入射角範囲は測定上 3° ~ 25° まで取得できたが、far traceのムーブアウトに問題のある部分を削除して、 4° ~ 17° の範囲を実際の解釈には用いている。測線3DA-10のSP 357における処理結果を図9に示した。ガス層からの反射波振幅(図9のNo. 2)は、明らかに入射角とともに増加する変化パターンを示しており、モデル計算のケースAの結果とよく一致しているのがわかる。

一方、測線3DA-7の処理結果を19個のCMPギャザーについて示した図10からは、振幅増加の傾向をもつものが認められない。むしろ、ガス相当層の反射波振幅は変化のないパターンが認められる。この結果は、ケースBのモデル計算と一致している。こうしたパターンをもつデータはある程度平面的な拡がりをもって存在しており、その位置は図5の破線エリアに示したとおり、構造の北西と南東に2箇所ある。AVOモデル計算の結果からは、こうしたエリアにはタイトな炭酸塩岩の存在が考えられる。そこで今回の評価では、このエリアは貯留岩の発達が悪いと判断した。

5. 孔隙率の分布

3DA構造のガス層における平面的な孔隙率分布を地震探査データとコアデータを用いて推定した。この種

図9 測線3DA-10, SP 357のAVO処理

の手法では、坑井の検層データを併用するのが一般的であるが(May and Eyles, 1985)、すでに述べたように当ガス層の検層データが欠測していたため、コアデー

図10 測線3DA-7のAVO処理

図11 P波速度と孔隙率のクロスプロット

タを代用せざるを得なかった。

まず第一に、ガス層内全体の区間速度分布を求めた。この分布は、図7に示したガス層の等層厚線図に基づいて作成した。次に、コアデータから速度と孔隙率のクロスプロットを作成した(図11)。このコアデータは、ガス層のサンプルを含む Burman Limestone と呼ばれる

炭酸塩岩 10 個について、それぞれ水飽和率 100% と 0% に対する P 波速度と孔隙率を求めたものである。図 11 で、●印が水飽和率 100%、○印が 0% に対応している。いずれのケースをとっても P 波速度と孔隙率には直線関係が認められる。従って、この直線関係を使って、区間速度分布図から孔隙率分布図への変換は可能で

図12 ガス層の平均孔隙率分布図

あると考えた。ただし、ここで得られているP波速度はコアデータの速度であるため、地震探査データから得られた区間速度と直接対応づけることはできない。ガス層の平均垂直孔隙率が区間速度と直線関係にあると仮定することによって、速度から孔隙率の変換が可能となる。そこで、ガス層の平均孔隙率は2坑の検層データからそれぞれ、29%と25%と求まっているので、これを区間速度に対応させることによってガス層の平均孔隙率分布を求めた(図12)。

この手法で得られる孔隙率の分布図にはいくつかの問題点がある(Wang, et al., 1990)。例えば、コアデータの速度と孔隙率が直線関係にあるからといって、垂直方向のガス層全体の速度平均と孔隙率平均が直線関係とは必ずしもいいきれない。しかも、水飽和率が100%と0%のケースで、速度と孔隙率が直線関係にあるとはいえ、実際のガス貯留層の水飽和率は数10%であり、この条件でも直線関係が成立するとは断言できない。また、ガス層厚が大きいところでは区間速度は精度よく求まるけれども、層厚が薄くなるにつれて速度の値はバラツキが大きくなる。こうした結果は、孔隙率の値に大きく影響を及ぼす。従って、ガス層の評価を行う際には、こうした問題点を念頭において、この分布図を利用しなければ

ばならなかった。しかし、このようにして地震探査データとコアデータを用いて得た平均孔隙率分布図は、単に坑井データと地質状況から得られる分布図と比べて、はるかに正確で有益な情報を与えているといえよう。

6. まとめ

3DA構造のガス貯留岩評価の事例として、特に地震探査データと坑井データを組み合わせて実施した評価結果を簡単に紹介した。

最近の物理探査技術の進歩には目ざましいものがあり、石油の探鉱・開発事業にも大いに利用されているとはいえ、すべての石油開発のプロジェクトがその恩恵を受けているわけではない。特に、使用できるデータ量が限られていると、最新技術を応用することは難しい。

今回のスタディでは、3-D地震探査のデータがなく、また速度検層データが欠測しているといった問題点があったけれども、対象としたガス層が比較的広くかつ厚く分布していたため、使用したデータの品質は概してどれもみな高かった。その結果、評価内容が構造図の作成のみに止まらずに、AVO解析や孔隙率計算といった貯留岩特性の検討にまで進めることができたといえる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、出光石油開発株式会社 林雅雄技術室長、渡辺雅治主任技師には粗稿を読んでいただき、ご助言を賜った。また、石油公団藤井康友氏には有益な議論をいただいた。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- Brown, R.J., Anderson, N.L. and Hills, L.V., 1990: Seismic interpretation of Upper Elk Point (Givetian) carbonate reservoirs of western Canada. *Geophysical Prospecting*, 38, 719-736.
- Chacko, S., 1989: Porosity identification using amplitude variations with offset: Examples from South Sumatra, *Geophysics*, 54, 942-951.
- 藤井康友, 1992: AVO解析, 物理探査, 45, 318-327.
- May, J.A. and Eyles, D.R., 1985: Well log and seismic character of Terumbu Carbonate, South China Sea, Indonesia. *AAPG Bull.*, 69, 1339-1358.
- Wang, Z., Hirsche, W.K. and Sedgwich, G., 1990: Seismic velocities in carbonate rocks. *Petroleum Society of CIM/Society of Petroleum Engineers*, 90, 1-21.