論 説
 Original Article

陸上三次元地震探査データを用いたアジマス異方性解析*

高梨 将**・高橋 功***・赤間 健一****

An application of seismic azimuthal anisotropy using a land 3D seismic data

(Received October 2, 2008 ; accepted January 9, 2009)

Mamoru Takanashi, Isao Takahashi and Kenichi Akama

Abstract : We analyzed azimuthal anisotropy of seismic velocity using 3D land seismic data in a Middle Eastern oil field, for predicting anisotropic horizontal stress and/or possible fractures. By applying sufficient correction, we extracted trustworthy distribution of azimuthal velocity variation from the 3D seismic data, which would represent distribution of the in-situ horizontal stress.

The 3D data was acquired with a rectangular geometry, in which the inline maximum offset was 3.6km and the crossline maximum offset varied from 1.8 km to 2.2 km periodically. The nominal fold was 36 for a 25×25 meter bin. For using sufficient volume of data for individual azimuthal angles, we first generated super-gathers with 400m x 400m super-bins. To minimize the influence of structural dip on the super-bin that presupposes flat reflectors, we applied a dip correction, which do not harm the seismic anisotropy information of the data.

Subsequently, we extracted azimuth dependence of seismic velocity at each super-bin. This analysis delivered 1) intensity of velocity anisotropy (the ratio of highest and lowest velocities) and 2) orientation of high velocity. These outputs were visualized by vectors at each super-bin, whose directions and lengths corresponded to the orientation and strength of velocity anisotropy. The result of velocity anisotropy presented that the highest velocity orientation was predominantly along NE-SW, which turned out to be consistent with the in-situ maximum horizontal stress orientation interpreted from borehole breakout of the resistivity image log data. Besides, the magnitude of seismic velocity anisotropy increased towards NE, i.e., to the proximity of active mountain range, which may indicate lateral variation of in-situ stress magnitude.

Keywords : Azimuthal anisotropy, Supergather, in-situ stress,

1. はじめに

中東陸上油田における地下の水平応力異方性分布、フラクチャー分布の推定に資するために、三次元地震探査重合前データを用いた P 波速度のアジマス異方性分布を解析した。対象データの特性を踏まえた適切な前処理を実施することで、地下の水平応力異方性を示す速度異方性分布を得た。

2. 背景

1990 年代以降の 360°アジマスのカバーするマルチアジ

マス三次元地震探査の実用化に伴い、フラクチャー分布把握、ならびに浸透率異方性モデル構築に資する P 波地震探査異方性解析への期待が高まっている。例えば、中国黄河デルタにおける泥岩フラクチャー油層では、異方性の強いエリアがフラクチャー集中帯を示すものと解釈して探鉱に活用されている (Li *et al.*, 2003)。また、北海、中東、欧州、北アフリカにて P 波異方性の解析事例が公表されており、坑井データとの整合性からフラクチャー分布、あるいは水平応力の異方性分布を推定している (Hall and Kendall, 2003 ; Fernando *et al.*, 2003 ; Vetri *et al.*, 2003 ; Tod *et al.*, 2007)。

これらの解析に使用する入力情報は、P 波の走時あるいは振幅のアジマス変化である。前者は NMO 速度のアジマス依存性を楕円フィッティングすることで、最大速度の方向と速度異方性の強度 (最大速度と最小速度の差) を得る (Grechka and Tsvankin, 1998, 図 1)。後者は入射角に対する振幅変化 (AVO Gradient) のアジマス異方性を楕円フィッティングすることで、最大 AVO Gradient の方向と異方性強度 (最大 Gradient と最小 Gradient の差) を解析する (Rüger

* 平成 20 年 6 月 11 日、平成 20 年度石油技術協会春季講演会、地質・探鉱部門シンポジウム「現在、気になる探鉱技術とその適用事例ーイメージングとマッピング」で講演 This paper was presented at the 2008 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Imaging and Mapping : Attractive Technologies on Geology and Geophysics for Recent Oil and Gas Exploration and Development" held in Niigata, Japan, on June 11, 2008.

** (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

*** 国際石油開発株 Inpex Corporation

**** 地球科学総合研究所 JGI, Inc.

図1 楕円フィッティングによる速度異方性解析

and Tsvankin, 1997)。

アジマス異方性の原因として最も考えやすいのは、オープンフラクチャーの指向性である。P波速度は一般にオープンフラクチャーに平行な方向に最も大きく、垂直方向に小さい。また、オープンフラクチャーの方向は現在の最大水平応力方向に規定され、浸透率の特性を支配するとの考え方があり (Coney *et al.*, 1993)。したがって、P波速度異方性解析により有意なフラクチャー分布を直接的に推定することが可能と期待される。一方、P波振幅異方性解析は地層境界における相対的な異方性変化に応答するため、より高い垂直・水平分解能が期待されるが、その最大方向は必ずしもフラクチャー方向に平行とは限らない解析の難しさがある (Hall and Kendall, 2003)。また、振幅異方性解析は、被覆層における振幅減衰の変化に留意する必要がある (Luo *et al.*, 2007)。

本スタディの対象油層では坑井にて顕著なフラクチャー帯は確認されていないが、震探解釈による断層、リニアメントの存在ならび近傍に活動中の造山帯により、浸透率に影響を与える弾性特性のアジマス変化が分布しうると推定された。そこで、アジマス異方性解析を実施し対象油層における同手法の有効性を評価した。

3. 陸上三次元データを対象としたアジマス異方性解析

対象中東陸上油田において、既存5坑井位置を含む震探データ 300 km² を用い、アジマス速度、振幅異方性解析を実施した。

3.1 対象油層

スタディ対象は中東陸上の炭酸塩岩を主とする巨大油層である。坑井数は5本と油層分布域約 1,000 km² に比して少ないため、油層評価には油層をカバーする三次元震探データが活用されている。特に、重合後ならびにオフセットギャザーを用いたアトリビュート解析、AVO インバージョン手法は対象油層の油層モデル品質向上に貢献している。油層構造は平均斜度 2°以下、最大傾斜 5°程度と緩やかである (図2)。震探解釈にて明瞭に識別できる断層は北西部にのみ分布するが、南部にもリニアメントが抽出されており、その一部は油層コンパートメント化の要因となる断層と解釈されている。被覆層の構造も全体に緩やかであるが、第四系が北東に向かって厚くなっており、北東に位置する造山帯の活動と関連している。

3.2 データ

本スタディでは、360°アジマスをカバーするマルチアジマス三次元地震探査と比してデータ密度の小さいデータを使用した。同データは 400 m 間隔の発震ライン、受振ラインが直交する orthogonal ジオメトリの基で取得された (図3)。また、ピンサイズ 25 m × 25 m における重合数は 36、最大オフセット距離はインライン方向が 3.6 km に対してクロスライン方向は 1.8 km–2.2 km (周期的に変わる) と非対称データである。

3.3 前処理

アジマス速度・振幅異方性解析は、通常の震探速度解析・AVO 解析以上に入力となる重合前走時・振幅誤差による影響を受ける。まず、表面波等ノイズを除去し、局所的な走時、振幅変化の影響を抑制するため、静補正、Surface Consistent Amplitude Correction (SCAC)、ならびに、low cut cone フィルタ、trace editing を実施した (図4)。

また、アジマスオフセットデータを十分に確保するため、周囲のピンからトレースを集めることでスーパーギャザーを作成した。これに先立つフォワードモデリングの結

図2 対象油田の地震探査断面

図3 データ取得ジオメトリ

果から、ビンサイズ 400 m × 400 m、最大オフセットを 3 km とすることで安定した異方性解が求まることが示唆された。そこで、スーパーギャザー作成にはこれらのパラメータを採用した (図 5)。

一方、スーパーギャザーの適用により、油層構造傾斜に起因する走時残差値の偽像 (ギャップ) を生じさせることが判明した (図 6)。この補正には、①各位置における構造傾斜ならびにビンセンターからの反射点位置に基づき構造傾斜による残差走時を求め、②スーパーギャザー走時残差値から構造傾斜による残差値を差し引いた。その結果、発震、受振位置が入れ替わっても同様の値 (点対称パターン) を示す地下のアジマス異方性を示す走時残差値が得られた (図 7)。

図5 スーパーギャザーの採用によるアジマスオフセットデータの確保。ただし、使用データの最大オフセットは 3,000 m。

3.4 速度異方性解析結果

これらの前処理を施したスーパーギャザーを用い、アジマス速度異方性解析を行った。各ギャザーの地表から油層上面 (深度約 3,000 m) の走時に対して楕円フィッティングを行い、長軸の方向並びにアスペクト比を求め、各位置における最大速度の方向ならびに速度異方性の強度を求めた。また、これをベクトル表示し、速度異方性の分布を表わした (図 8)。

その結果、最大速度方向はおおむね NNE-SSW から NE-SW を示した。また、異方性の大きさは最大で 5% であり、北東に向かって大きくなる傾向を示した。南部の坑井にて実施した FMI の Borehole Breakout 解析では、油層区間を含む深度 2,000 ~ 4,000 m の区間で最大水平応力方向は NE-SW と解析されており、この異方性解析結果とおおむね一致した。さらに、現在も圧縮応力場にある北東の造山帯に近づくにつれて速度異方性が大きくなっていることから、速度異方性の大きさは in-situ 差応力の空間分布を示すものと解釈された。この結果は対象油層における浸透率異方性の生産性に対する影響度評価に使用された。

一方、異方性結果には一部に被覆層の速度不均質による偽像が認められた。偽像の位置が Pull-up を伴う被覆層のチャンネル状高速度異常の位置と一致したことから、チャンネル状高速度異常がアジマス速度分布に偽像を与えたことが示唆された (図 9)。

図4 アジマス異方性解析処理フロー

図6 構造傾斜による反射点深度のずれ。

西（発震ライン方向）へ傾斜し隣り合う受振ライン R_1 , R_2 が反射点の東側に位置する例では、受振ライン R_1 と発震点 S_1 – S_7 の組み合わせによる各トレースはオフセットの増加に伴い反射点位置が西へ、反射点深度が深部へ移動する（左図）。 R_1 によるオフセットが最大となるトレースはスーパービンの西端に位置するが、それ以上のオフセットデータをカバーする S_3 – S_7 と R_2 による最少オフセットトレースはスーパービンの東端に位置する。東西端の反射点深度の差により NMO 補正後のギャザーに受振ラインに依存したギャップが生じる（右図）。

図7 傾斜補正前後のスーパーギャザーの残差ムーブアウトの比較。

3.5 振幅異方性解析結果

次に、主力油層上面を対象とした振幅異方性解析を行った結果、スーパーギャザー上の振幅分布が点対称パターンを示さず、明瞭な異方性は認められなかった（図10）。この要因として、三次元地震探査データの前処理、ならびにジオメトリに関連する問題が挙げられた。前処理において表面波除去に FK 領域で低速度部分を取り除くコンフィルタを適用したため、700 m 以下のニアオフセット振幅値

が小さく、振幅 gradient 値がオフセット方向に大きく変化した。加えて、非対称ジオメトリによりアジマス方向に均一オフセットの使用可能な範囲が狭い。こうした要因により、gradient 値のアジマス分布が不安定になることが原因と推察された。

4. ま と め

本スタディでは、地表から油層までの平均速度の異方性

図8 速度異方性解析結果のベクトル表示（左図）とFMI解析による最大水平応力（右図）。異方性結果におけるベクトルの長さ、色は異方性強度を示し（ $V_{max}-V_{min}/V_{min}$ ）、ベクトルの方向は最大速度の方向を示す。またFMI解析結果は深度2000-4000mにおけるBorehole Breakoutの方向に基づく最大水平応力方向の平均（矢印）を示す。異方性解析における最大速度方向はFMI解析による最大水平応力と一致した。また、異方性の強度は造山帯に近づく北東に向かって強くなっている。

図9 速度異方性結果に表れた被覆層速度不均質による偽像（左図）。偽像の位置は浅部Pull-Upアノーマリの位置と一致する（右図、Dip スライスと時間断面）

解析の結果、地下の水平応力分布を示す異方性分布が得られ、その信頼性は残差走時分布、ならびに坑井、広域地質との比較より支持された。異方性解析結果と浸透率などの油層パラメータとの関連付けは困難であるが、当該油層では本スタディ結果を参考に最大速度方向が最も浸透率が大いとは仮定したときの生産性感度調査が行われた。もって、地震探査データ取得パラメータが必ずしも十分でない対象データを用いて異方性解析結果が油層評価に活用された。

非対称ジオメトリデータを用いた本異方性解析では、アジマス方向のオフセット分布をなるべく均一にするためスーパーギャザーの適用とオフセット範囲の選択が重要であった。また、スーパーギャザーの採用に伴い数度の傾斜でも位置の違いによる反射点深度変化の補正が必要となった。異方性解析結果の信頼性を評価するためには、各スーパーギャザー上の残差走時、振幅分布の点対称性の確認が有効であった。

図 10 振幅異方性解析結果（左図）とスーパーギャザー上の振幅分布（右図）。ニアオフセットにおける振幅が小さく、アジマス分布が非対称であるため振幅異方性解析結果が不安定になった。

引用文献

- Coney D., Fyfe T. B., Smith P. J., 1993 : Clair appraisal : the benefits of a co-operative approach. In Parker, J. R. (ed) : *Petroleum Geology of Northwest Europe : Proceedings of the 4th Conference. Geological Society, London.*, P1409–1420.
- Fernando A. N., Ahmed A. M., Jung J. K. and Ed L. N., 2003 : Fracture characterization of deep tight gas sands using azimuthal velocity and AVO seismic data in Saudi Arabia, *The Leading Edge*, **22**.
- Grechka V. and Tsvankin I., 1998 : 3-D description of normal moveout in anisotropic inhomogeneous media. *Geophysics*, **63**, 1079–1092.
- Hall, S. A. and Kendall, J. K., 2003 : Fracture characterization at Valhall : Application of P-wave amplitude variation with offset and azimuth (AVOA) analysis to a 3D ocean-bottom data set. *Geophysics*, **68**, 1150–1160.
- Li, X. Y., Liu, Y. J., Liu, E., Shen, F., Qi, L. and Shouli, Q., 2003 : Fracture detection using land 3D seismic data from the Yellow River Delta, China. *The Leading Edge*, **22**, 680–683.
- Luo M., Takanashi M., Nakayama K. and Ezaka T., 2007 : Physical modeling of overburden effects. *Geophysics*, **72**, T37–T45.
- Rüger, A. and Tsvankin, I., 1997 : Using AVO for fracture detection : Analytic basis and practical solutions. *The Leading Edge*, **10**, 1429–1434.
- Tod, S., Taylor, B., Messaoud, H., Johnston, R., and Allen T., 2007 : Fracture prediction from wide-azimuth land seismic data in SE Algeria. *The Leading Edge*, **26**, 1154–1160.
- Vetri, L., Loinger, E., Gaiser, J., Grandi, A. and Lynn, H., 2003 : 3D/4C Emilio : Azimuth processing and anisotropy analysis in a fractured carbonate reservoir. *The Leading Edge*, **22**, 675–679.