報 告

米国カリフォルニア州ロストヒルズ油田で実施した、坑井間電磁および
弾性波トモグラフィーによる貯留層モニタリングの試み*

常山 太**・溝畑 茂治***・大里 和己****・渡邊 英彦*****・
斉藤 章*****・荘司 泰敬*****・Wilt Michael*****

(received July 31, 2002 ; accepted January10, 2003)

Reservoir monitoring by cross-hole electromagnetic and seismic tomography
—Field experiments in the Lost Hills Oil Field, California—

Futoshi Tsuneyama, Shigeharu Mizohata, Kazumi Osato, Hidehiko Watanabe,
Akira Saito, Yasunori Shoji and Michael Wilt

Abstract: Reservoir monitoring is the key issue to design the optimum plan for recovery enhancements of hydrocarbon production. The Technology Research Center of Japan National Oil Corporation has conducted extensive field measurements to validate the current cross-hole technologies at the Lost Hills Oil Field, California in the first quarter of 2000. The experiments were composed of cross-hole electromagnetic surveys between fiberglass cased boreholes in both frequency domain and time domain methods together with seismic tomography. The time domain electromagnetic survey was designed to test the newly developed time domain down-hole transducer. However, the tool was broken down during the measurement. For the frequency domain electromagnetic method, we conducted three kinds of experiments, which are time lapse analysis with previously measured data, multi-frequency survey for higher resolution analysis, and measurement with setting up transducer in a steel cased hole. Multi-stage multi-disk borehole seismic source, which has been developed in collaboration between JNOC and OYO corporation was employed for seismic tomography.

The subsurface velocity profile from seismic tomography was utilized to calculate the formation porosity. Since the standard calculation procedure of sonic porosity is not adequate to apply for the diatomite reservoir because of its nature of high porosity despite very low permeability, a correction function was developed and employed. Then the resistivity profile was incorporated into estimation of fluid saturation in the reservoir by Archie's equation. The resultant values of porosity and water saturation are quite reasonable in comparison with reported ranges for this field.

Assuming that the regional compaction being related to reduction of reservoir porosity has not been significant from 1997 to 2000 based on the ground subsidence in the area, we calculated a fluid saturation profile since the beginning of water flooding. We revealed the manners of fluid saturation change in the reservoir during water flooding through the time lapse analysis.

Key words: cross-hole survey, electromagnetic method, seismic tomography, reservoir monitoring

* 平成13年1月25日、物理探査学会第5回国際シンポジウム—イメージングテクノロジー—にて一部講演、平成14年5月29日、平成14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「物理探査の探鉱開発への貢献—過去・現在・未来—」にて講演 Portions of this paper were presented at the 5th SEGJ International Symposium entitled "Imaging Technology" held in Tokyo, Japan, May 25, 2001 followed by thorough presentation at the 2002 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Contribution of geophysical prospecting to exploration and development—past, present, and future—" held in Akita, Japan, May 29, 2002.

** 石油公団石油開発技術センター、現 出光オイルアンドガス開発(株) Japan National Oil Corporation Technology Research Center, currently Idemitsu Oil & Gas Co., Ltd.

*** 石油資源開発(株) Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

**** 地熱技術開発(株) Geothermal Energy Research & Development Co., Ltd.

***** 三井金属資源開発(株) Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd.

***** 応用地質(株) Oyo Corporation.

***** Electromagnetic Instruments, Inc. Schlumberger.

1. はじめに

生産油ガス田における回収率増進を考える場合に、地下における貯留層内流体分布の把握技術は極めて重要な課題となる。石油公団石油開発技術センターでは、2000年1月に米国カリフォルニア州ロストヒルズ油田において、貯留層内流体分布把握技術の検証および開発を目的として現状で利用可能な坑井間物理探査技術の基礎実験を実施した。実験種目は、ファイバークラスケーシング坑井間での時間領域および周波数領域電磁トモグラフィーおよび弾性波トモグラフィーである。時間領域電磁トモグラフィーは全周波数帯域を網羅し、高分解能の比抵抗解析結果が期待できるものの、高出力の送信源を必要とするため実用機が製作されていなかった。そこで、本実験のために新規に機器を開発したのであるが、坑井内送信器が測定初期に破損したため解析に十分なデータ取得はできなかった。周波数領域電磁トモグラフィーでは、経年変化解析用データ取得、高分解能解析用多周波数測定、金属ケーシング内送信源設置での測定を行い良好な品質のデータを取得している。対象貯留層はダイアトマイトであり、弾性波速度に特異な性質を持った

め、坑井間弾性波トモグラフィーによる速度データから通常の評価手法で孔隙率を求めることができなかった。そこで、筆者らは、データの検討から経験的補正式を求めて適用し、坑井間の孔隙率断面図を作成し、さらに比抵抗断面図との統合解析により水飽和率断面図を計算した。また、地盤沈下に関する情報に基づいて水圧入開始年以降の圧密は微小であり、貯留層の孔隙率はほぼ一定に保持されていると判断し、過去に同地域で測定された坑井間電磁トモグラフィー結果を利用して、貯留層への水圧入に伴う層内流体の分布について経年変化を検討したのでその結果を報告する。

2. 対象油田の概要

2.1 油田概況

今回の実験では、以下の2点の理由により米国のロストヒルズ油田を実験サイトに選定した。

- (1) 塩水（地層水）圧入が実施されており、貯留層内の流体分布把握が課題となっていることから比抵抗検層のためのファイバークラスケーシング観測井が利用可能である
- (2) これらの坑井を利用して、すでに坑井間電磁トモグラフィーの測定実績がある

同油田は、カリフォルニア州ケンカウンティ、ベーカーズフィールドの北西約80kmに位置し、N35°Wに伸張り南東に急激に消滅するノーズ状構造を呈する（図1）。油田の歴史は、1913年のStandard Oilによる南部地域での発見にさかのぼる。生産初期の日産量は一坑井あたり60バレル程度で、深度400mの中新統頁岩のフラクチャー型貯留岩から生産していた。水圧破碎による増産は1962年に開始されたものの、依然小規模な生産が続いていた。1980年にChevronがポーセラナイト〜オパール化したダイアトマイトの水圧破碎により大幅な増

図1 油田位置図

図2 実験サイト南方における地表地震探査イメージ

図3 対象油層内のマーカー層準における深度構造図

図4 実験サイト周辺の坑井位置図

産に成功し、それ以降には一坑井あたり1,000バレル以上の生産が記録されるようになった。今回の実験サイトは、1998年に Seneca Resources 社が買収したエリスリース内に位置する。

2.2 貯留層地質概況

実験サイト付近における貯留層は、漸新統 Etche-goin 層ないし中新統 Reef Ridge 層のオパール化したダイアトマイトに発達するフラクチャーである。単層の厚さは10~15mで下位に位置する根源岩層準の Monterey 層から連続して堆積している頁岩層中に挟み込まれる。堆積環境は、海洋成頁岩が卓越する中にタービダイトが流入するような水深数100~1,000mあまりの環境と考えられており、古地形の高所と低所に顕著にダイアトマイトが観察され、斜面上ではその分布が乏しいとされる (Graham *et al.*, 1985; McGuire *et al.*, 1983; Schwartz *et al.* 1981)。

貯留層深度は700~800m程度で層位トラップの要素を持つ。貯留層部分の孔隙率は、45~60%に達するが、平均的な浸透率は100~200mdである。原油比重は30~40°で、しばしばガスを伴う。油水比は32~54%。検層による貯留層付近でのP波速度は1,700m/sで比抵抗値は2~5Ωm程度である。実験サイト近傍で測定さ

れた地表地震探査の結果(図2)では、フラクチャーや胚胎される油・ガスの影響といった複合的な要因によって貯留層付近での反射波が不明瞭になっており、それを貯留層の特性把握や流体の分布把握に活用するのは難しい。

3. 基礎実験の概要

3.1 基礎実験デザイン

基礎実験サイトはノーズ状構造の東翼に位置し(図3)、周辺には数多くの生産井および水圧入井が掘削されている(図4)。このサイト周辺でのフラクチャー発達トレンドは北東方向とされ、これに応じた坑井配置がなされている。主要な実験は、87.5mの坑井間距離を持つファイバースケージングの設置された観測井OB1-9とOB2-10を利用して実施し、坑井間弾性波測定および金属ケーシング内送信の電磁トモグラフィーは、観測井OB1-9の替わりに金属ケーシングの設置された生産井223-9を用いて実施した(図5)。統合解析にあたっては、いずれの坑井組み合わせも同一測線上のデータとして扱っている。実験実施種目は3つに分類され、おのおのについての目的は以下のとおりである。

3.1.1 時間領域電磁トモグラフィー

時間領域電磁トモグラフィーは、専用の測定機器がまだ実用化されていない技術である。原理的には、パルス状あるいは矩形の強い電流を送信源側の坑井で送信し、これに伴って形成される一次磁界が地層の比抵抗に応じて形成する誘導電流の大きさを、その誘導電流によって形成される二次磁界中に設置する受信器側のコイルに流れる電流で測定しようとするものである(図6左)。解析においては、一定の間隔で設定された送信-受信波線のデータセット(図6右)を繰り返して計算して、連立的に解くことによって最適な比抵抗分布を求めていく。時間領域電磁トモグラフィーでは、大容量の送信電流を必要とすることから送信器の小型化が困難であり、これま

図5 基礎実験坑井配置断面図

図6 坑井間電磁探査の測定原理と解析波線

で坑井内送信器は開発されていなかった。今回、石油公団では三井金属資源開発(株)と協力して坑井内送信器を開発し、その稼動実験を主目的に本項目の測定を計画した。

3.1.2 周波数領域電磁トモグラフィー

周波数領域電磁トモグラフィーは、測定原理は時間領域と同様であるが、送信源として特定周波数の電流を利用する。送信波形がパルス状でなく周期波形であるため瞬時に大容量の出力を行う必要が無く、すでに坑井間での測定装置が実用化されている。そのサービス会社である Electromagnetic Instruments 社および地熱技術開発(株)により、(1)同サイトで1997年の水圧入前から実施している坑井間電磁探査で得られた比抵抗分布の経年変化を解析するためのデータ取得、(2)通常の単一周波数での解析より高精度での解析が可能と予測される多周波数解析のための周波数帯域を変化させての測定、(3)金属ケー

シングの影響およびその補正手法を検討するために金属ケーシング坑井に送信器を設置しての基礎データ測定、の3つを目的に実験を実施した。(3)に用いる金属ケーシング坑井としては観測井 OB1-9 の至近に位置する生産井223-9を利用した。観測井 OB2-10 と生産井223-9の坑井間距離は69.2mである。

3.1.3 弾性波トモグラフィー

上記、電磁トモグラフィーにより貯留層中の比抵抗分布を求めることができるが、地層の比抵抗は孔隙率とその内部流体組成の2つの要因に支配されるため、比抵抗値のみから流体分布を決定することはできない。そこで、変数の1つである孔隙率を独立に確定するために、速度データを提供する坑井間弾性波トモグラフィーを基礎実験に含むこととした。坑井内震源によるファイバースケースケーシングへのダメージ回避および坑径とツール径の差異を考慮した結果、生産井223-9を発震坑井として利用することとした。

3.2 測定および解析結果

3.2.1 時間領域電磁トモグラフィー

時間領域電磁トモグラフィーでは、製作された坑井内送信器により十分な容量のパルス波信号および矩形波信号が発信できることが確認された。しかし、測定の初期段階で送信側ユニットのケースに亀裂が発生し、内部回路が破損したため、解析に足る十分なデータセットを得ることができなかった。第7図にツール外観と送信波形例を示す。図中央上がパルス波、下が矩形波である。縦軸は電圧を示し横軸が時間で、比較のため矩形波グラフの右隅に軸スケールを合わせたパルス波を示している。

3.2.2 周波数領域電磁トモグラフィー

周波数領域電磁トモグラフィーは、Electromagnetic

図7 時間領域電磁探査坑井内送信源および発信波形

図8 多周波数解析結果(左)と単一周波数解析結果(右)の比較

図9 金属ケーシング内送信の解析結果(左)とファイバークラスケーシング坑井間の解析結果の比較

Instruments社のXBH-2,000システムを利用して実施した。同システムは、1~2000 Hzの周波数帯域による測定が可能で、坑内温度175℃まで耐用できる。実験では、間隔5mで4連の受信器ストリングを観測井OB2-10にセットし、送信器を観測井OB1-9に挿入して坑底から信号を送信しつつ上方ヘスキャンし、送受信の測定計画深度の組み合わせにしたがい、測定値を記録するという方法を繰り返して測定を行った。経年変化の検討用には過去になされた測定周波数と同じ1,000 Hzで、多周波数解析用には1,000 Hzに加えて370 Hz, 90 Hz, 24 Hzの周波数でのデータセットを測定した。解析にはAlumbaugh *et al.* (1996)による差分法コードを適用した。

1,000 Hz 測定の解析結果を過去の測定のものと比較すると、水圧入開始前である1997年4月には断面の両端に存在していた高比抵抗部が1998年8月の測定では断面中央付近へ移動し、さらに、今回の測定では3層に分離しているようすが観察できる。ただし、この段階では貯留層内の孔隙率の変化による比抵抗値への影響が除去されていないため、直接的に貯留層内流体の分布の時間的

変化を論ずることはできない。この点については次章で議論する。なお、断面中に構造落差が認められるが、これは解析グリッドが傾斜層を充分表現できていないことにより生じたもので、断層を表すものではない。

多周波数測定の解析結果では、測定周波数のうち最も高い1,000 Hzのデータセットを単独で解析したものと、多周波数データを同時解析した結果の比較を行った。その結果、両者の間に大きな差は見られなかった(図8)。その原因は、低周波数の測定では減衰が小さく、受信信号レベルは大きい分解能に劣ったためと考えられる。

金属ケーシング内での送信では90 Hzで測定を行い、記録データ上でケーシングカップリング部がスパイク状に低受信レベルとなるノイズが観測された。しかし、その他の部分では解析に十分な記録が得られており、前述ノイズ部についても補正フィルタを設計して適用することが可能である。ファイバークラスケーシング間測定で得られた比抵抗分布断面との比較では、分解能の低下が見られるものの、油層内部の比抵抗構造の把握に十分な解析結果が得られている(図9)。ただし、今回の測定は送信側のみ金属ケーシングでの実験であり、金属ケーシング坑井間での測定についてはさらに機器および解析手法の改良が必要であると推察される。

3.2.3 弾性波トモグラフィー

坑井間弾性波トモグラフィーでは、震源として石油公団と応用地質(株)が共同で開発し後者がサービス提供を行っているMulti-stage multi-disk Borehole Seismic Source (Wappa Source)を使用した。受振器としては、測定時間短縮のため、5連の3成分ジオフォンを採用した。震源深度2,100~2,700 ft (640~823 m)、受振深度2,210 ft (674 m)での記録例を図10に示す。図の左が垂直成分、中央と右が水平成分の記録である。

解析では、初動走時によるトモグラフィー解析のみを実施し、速度断面を得ている。

4. 統合解析

基礎実験により得られた速度断面および比抵抗断面を図11に示す。これらの物性値を用いて、検層解析と同様の手順にしたがい、貯留層の孔隙率および水飽和率を求めることとした。ただし、本地域では、孔隙率の推定に音波検層を用いることは適切でなく密度検層による計算が最適であるとの検討結果が報告されており(Stosur and David, 1976)、速度断面から孔隙率断面を求める際に何らかの補正が必要となる。しかし、残念ながら、サイト近傍では音波検層と密度検層の両者が測定されている坑井は無く、両者の比較から直接補正量を求めることはできなかった。そこで、実際の検層データからその補

図10 坑井間地震探査の記録例

図13 音波検層による孔隙率の補正効果

図11 速度断面図および比抵抗断面図

図14 2観測井における検層データのカロスプロット

図12 密度検層と音波検層による孔隙率の比較

正方法について検討した。その結果、孔隙率と導電率のカロスプロット上において音波検層データのシフトおよびローテーションを行うことにより密度検層で求められた孔隙率レンジに変換できることが分かった。すなわちデータのシフトにあたっては、Wyllie's time average の式

$$\phi_{\text{sonic}} = (t_{\text{LOG}} - t_{\text{matrix}}) / (t_{\text{fluid}} - t_{\text{matrix}})$$

において、 $t_{\text{matrix}} = 70 \mu\text{sec/ft}$ 、 $t_{\text{fluid}} = 300 \mu\text{sec/ft}$ においてデータ全体を適正な範囲に移動する。その後、

$$\phi_{\text{true}} = \{\phi_{\text{sonic}} / (0.0006 \times \text{導電率} + 0.25) \times 0.65\}$$

を適用してデータ群を回転する。本式中の定数については、音波検層による孔隙率を回転しシフトさせたときにできるだけ密度検層による孔隙率に重なるように、最小自乗法で求めた。図12は、この補正を行う前の近傍2坑井での密度検層（図中凡例 D1～D7）と音波検層（図中凡例 S1～S7）による孔隙率を孔隙率と導電率のカロスプロット上で比較したものである。図中の1～7のユニット分けは、音波検層データを導電率ごとに分類し、同じ層準に対比される密度検層データを同様の番号で表したものである。このデータセットに前述の補正を行った結果を図13に示した。同様のマーカーで表されるデータ群がクロスプロット上でオーバーラップしていることが分かる。したがって、データ全体として適正な補正が行われているものと考えられる。なお、図13の中央下部に破線で囲まれた高孔隙率-低導電率の一群が見られるが、これらは、貯留層最上部のガスゾーンに対応するもので、適性には補正できないものである。図中の直線状の破線は、観測井 OB1-9 と OB2-10 で同様のプロットを作成した際にデータが分布する範囲およびペイゾーンとノンペイゾーンを区分する境界である（図14）。また、導電率の低いデータで補正量が小さいという傾向が見ら

れるが、それは油層部分の岩石マトリックスがポーセラナイトへオパール化され、より強固であるためと考えられる。検層データにより求められたこの補正式を測定速度断面図に適用して求められた孔隙率断面図を図15左に示す。

求められた孔隙率に基づいて Archie の式により断面図の水飽和率を算定する。計算にあたってのパラメーターについては、すでに Stosur and David (1976) により詳細に検討されているので、これを引用して $a=1$, $m=1.46$, $n=2$ とした。求められた水飽和率断面図を図15右に示す。比抵抗断面図では、孔隙率の低下による高比抵抗の可能性を排除できていなかったが、水飽和率断面図では、低い水飽和率が直接炭化水素の分布を示す。また、検層データの検討で認められたガスゾーンに対応する領域を図15に併せて表示した。この結果から2000年1月の実験時における貯留層内では、3層に分離して油が胚胎されており、最上部にガスキャップが形成されていることが推察できる。なお、求められた水飽和率のレン

ジは、California Department of Conservation Division of Oil and Gas によってまとめられている対象油田周辺のデータとも調和的である。

同一の坑井間では、1997年4月および1998年8月にも周波数領域電磁トモグラフィーが実施されている。一方、Xu and Nur (2001) に基づけば、実験サイト付近でのこの間の地盤沈下量は最大 10 cm/100 日である。この沈下が対象層およびその下位の2層の貯留層の圧密によって生じていると仮定すると1年間あたりの孔隙率減少量は0.8%と計算される。対象貯留層は最大60%に近い大きな孔隙率を持つことから、計算された孔隙率変化が解析に与える影響は無視できる範囲と判断し、過去に測定された電磁トモグラフィー結果についても今回の解析と同手法にて水飽和率断面図を計算した。図16は、その結果であり、水圧入開始前の1997年から今回測定の2000年までの経年変化を表すものである。1997年4月の水圧入開始前の水飽和率断面図では、図中右半分に偏って低飽和率領域が分布しており、その分布形態から図15に示した高孔隙率部分に集中的に原油が胚胎していたものと判断できる。その直後に開始された水圧入により（掃攻方向は断面図に対して手前から奥へ向かう方向）、1998年8月には油層間に水が入り込み胚胎層が3層に分離するが、依然として下部にも低い水飽和率の値が見られる。さらに、2000年1月では、3層の分離がより明瞭となり、断面図右下には圧入水の経路と考えられる高い水飽和率を示す部分が顕在化している。また、最上部には極めて低い水飽和率として計算されるガスゾーンが出現しており、その上部のシール層準部分においてもガスの影響と思われる水飽和率の低下が認められる。この結

図15 孔隙率断面図と水飽和率断面図

図16 水飽和率断面図の経年変化

果は、最近になって貯留層上部にフリーガスゾーンが形成されてきているとされる現場での観測と整合している。

5. ま と め

貯留層内の流体分布把握技術の検証および開発を目的として、カリフォルニア州ロストヒルズ油田において坑井間電磁および弾性波トモグラフィーの実験を実施した。そのデータを用いて、約 70 m の坑井間における孔隙率断面図および水飽和率分布を計算した。また、坑井検層データによる孔隙率と導電率のクロスプロットから速度断面図を適切な孔隙率断面図へ補正する手法を確立したほか、ガスの領域を特定して同断面に適用した。さらに、地盤沈下データから孔隙率の変化が無視できると考えられることから、過去に測定されている電磁トモグラフィー結果を含め水飽和率の経年変化について考察した。その結果、水攻法により油層が 3 層に分離していく過程とともに、ガスゾーン形成過程の概要が明らかになった。

謝 辞

本研究にあたり、Seneca Resources 社にはロストヒルズ油田エリスリースを実験サイトとして利用することを許可していただいた。また、Welaco 社および Lawrence Berkeley National Laboratory には、検層サービスおよび資機材を提供していただいた。地熱技術開発株式会社の山根一修博士には、準備および実験期間の長期にわたり現場に滞在し各種のアレンジを行っていただいた。栗田真由子さんには、図面作成をお願いした。これらの方々に深く感謝いたします。

引 用 文 献

Alumbaugh, D.L. and Newman, G., 1996: 3D massively parallel electromagnetic inversion Part B: Analysis of a cross well EM experiment, *Radio Science*, **31**, 24-35.

Graham, S.A. and Williams, L.A., 1985: Tectonic, depositional, and diagenetic history of Monterey Formation (Miocene), Central San Joaquin Basin, California, *AAPG Bulletin*, **69**, 385-411.

McGuire, M.D., Bowersox, J.R. and Earnest, L.J., 1983: Diagenetically enhanced entrapment of hydrocarbons—southeastern Lost Hills fractured shale pool, Kern County, California, in Isaacs, C.M. and Garrison, R.E. eds., *Petroleum generation and occurrence in the Miocene Monterey Formation, California, Pacific Section SEPM Symposium Volume*, 171-183.

Schwartz, D.E., Hottman W.E. and Sears, S.O., 1981: Geology and diagenesis of Belridge diatomite and brown shale, San Joaquin Valley, California (abs.), *AAPG Bulletin*, **65**, 988-989.

Stosur, J.J. and David, A., 1976: Petrophysical evaluation of the Diatomite Formation of the Lost Hills Field, California, *Journal of Petroleum Technology*, October Issue, 1138-1144.

The California Department of Conservation Division of Oil and Gas (Sacramento), 1985: *California Oil and Gas Fields (Central California), Third Edition*.

Tsuneyama F., Mizohata, S., Watanabe, H., Osato, K., Saito, A., Shoji, Y. and Wilt, M., 2001: Crosswell imaging of resistivity and velocity for water flood monitoring: oil field experiments in Lost Hills, California, *Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium—Imaging Technology—*, 237-242.

Watanabe H., Saito, A., Ishikawa, H., Okuzumi, K., Tsuneyama, F. and Mizohata, S., 2001: Development of time-domain electromagnetic tomography system for EOR monitoring, *Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium—Imaging Technology—*, 257-261.

Wilt, M., Zhang, P., Osato, K. and Tsuneyama, F., 2001: Crosswell EM studies at the Ellis Lease, Lost Hills California, *Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium—Imaging Technology—*, 243-250.

Xu, H. and Nur, A., 2001: Integrating reservoir engineering and satellite remote sensing for (true) continuous time-lapse reservoir monitoring, *The Leading Edge*, No. 10, 1176-1179.