報 告

地震探鉱のない石油探鉱—PNG, SE Gobe 油田と構造解釈—*

小鷹 長**・金子 光好***

(Received September 13, 1995 ; accepted November 29, 1995)

Petroleum exploration without seismic method :
SE Gobe oil field and structure interpretation in Papua New Guinea

Takeru Kotaka and Mitsuyoshi Kaneko

Abstract: The SE Gobe oil field was discovered in 1991 on the Papuan Foldbelt, onshore Papua New Guinea. Structure of the field is a large, elongated anticline, interpreted as a thin skinned fault propagation fold, limited by the Wa'a Thrust in the SW flank and by the Soro Thrust in the NE. Because the field is located on a hill, and is covered with thick and heavily karstified limestone, seismic method is futile for delineating the subsurface structure. Various techniques, therefore, have been applied in the area, such as, digital terrain modelling (DTM), synthetic aperture radar (SAR), image processing, strontium isotope analysis, magnetotellurics (MT), high resolution aeromagnetics and balanced cross section method. Because these techniques contain a large amount of ambiguity in themselves, integration of them is the key to minimize error in the structure interpretation.

An outline of the SE Gobe field and some new techniques are summarized in this paper along with two examples of structure modelling.

Key words: Papuan Foldbelt, structure interpretation, digital terrain modelling, synthetic aperture radar, strontium isotope, magnetotellurics, high resolution aeromagnetics, balanced cross section

要 旨

SE Gobe 油田は 1991 年にパプアニューギニア (Papuan Foldbelt) で発見された。構造はいわゆる “thin-skinned fault propagation fold” で、南西を Wa'a Thrust, 北東を Soro Thrust に限られた北西-南

東にのびる細長い形態を示す。本油田は山岳地帯にあり、さらに厚いカルスト化した石灰岩が地表にあるため地震探鉱は有効ではない。そのため当地域では地下構造を把握するために様々な技術が取り入れられ応用されている：数値地形モデル (Digital Terrain Modelling), 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, SAR), イメージ処理 (Image Processing), ストロンチウム同位体比分析 (Strontium Analysis), 電磁波探査 (MT), 高精度空中磁気探査 (Aeromagnetics), バランス断面図 (Balanced Cross Section) などである。これらの技術は単独では多くのあいまいさを含むが、総合的に解釈することにより全体的な誤差を僅少化し精度の高い構造が求められている。

1. はじめに

サザンハイランド石油開発(株)は、パプアニューギニア

* 平成 7 年 6 月 7 日, 平成 7 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「最近の探鉱技術—新規油・ガス田の発見をめざして—」で講演 This paper was presented at the 1995 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Advanced technology of exploration for discovering new oil or gas fields”, held in Makuhari, Chiba, Japan, June 7, 1995.

** ジャパンエナジー石油開発(株) Japan Energy Development Co., Ltd.

*** サザンハイランド石油開発(株) Southern Highlands Petroleum Co., Ltd.

陸上の PPL56 鉱区（図 1）において、ジョイントベンチャー（joint venture, 以下 JV と略す）の一員として 1991 年より石油の探鉱を始め、同年、最初の試掘井で Southeast Gobe 油田（以下 SE Gobe 油田）を発見した。

当該地域は標高 1,000 m を超す山岳地帯にあり、また厚さ約 1,000 m のカルスト化した石灰岩に覆われているため、地下構造を把握するうえで地震探鉱は有効な手段とはなっていない。そのため、従来から構造解釈は地表地質調査に頼ってきたが、最近では新しい探鉱技術が開発され本地域でも応用され始めている。

本論では、SE Gobe 油田の概要を紹介するとともに、本鉱区周辺で近年用いられている構造探鉱手法について報告する。

2. 一般地質

パプア堆積盆地（Papuan Basin）は、オーストラリアプレートの北縁に位置するサグベースン（sag basin）で、中生界の碎屑性堆積岩および新生界の石灰岩より構成されている。

この堆積盆地では、三畳紀に陸成堆積物・火山碎屑岩が局地的に堆積し始め、ジュラ紀には泥岩を主体とする海成の碎屑岩が全域に堆積した。ジュラ紀末から白亜紀初めには、海退に伴う数枚の砂岩層が堆積し、本地域の主要な貯留岩となっている。泥岩を主体とする海成層の堆積は白亜紀末まで続いたが、始新世には Coral Sea でリフティングが起こり、その後に堆積盆地の東南部が隆

起し削刺された。その後、本地域では、暁新世～中新世のプラットフォーム性の石灰岩が厚く堆積し、ところにより 3,000 m を超える層厚となっている。

この堆積盆地がこうむった主な構造運動は、前述の Coral Sea リフティング、および中新世のメラネシア弧の衝突による Papuan Foldbelt の形成、の 2 つがある。特に後者は、堆積盆地を構造的に前陸盆地（foreland）、褶曲帯（foldbelt）、覆瓦構造帯（imbricated zone）の 3 地域に分けるとともに（図 2）、本地域の炭化水素鉱床の主要構造を作り上げた重要なものである。

炭化水素鉱床は、Papuan Foldbelt に油ガス田、Papuan Foreland およびパプア湾にガス田が見つまっている。Foldbelt の油ガス田の多くは、広く分布する下部白亜系の Toro Sandstone を主要な油層にしており、その下位にある上部ジュラ系の Digimu Sandstone、Hedinia Sandstone、Iagifu Sandstone などが副次的油層になっている。根源岩は上部ジュラ系 Imburu 層の泥岩とされている（図 3）。

本地域の油ガス田の大部分は、Papuan Foldbelt に伴って形成された背斜構造に成立しているが、パプア湾の中新統石灰岩を貯留層とするガス田は礁（reef）構造をなしている。

3. SE Gobe 油田

SE Gobe 油田は Papuan Foldbelt の最先端部、第 1 列に位置する。この系列上の北西延長部には複数の油ガス田が見つかり、PNG で最初の生産油田 Iagifu/

図 1 PPL56/SE Gobe 油田位置図

図2 パプアニューギニア地帯構造図 (Smith, 1990)
reprinted with permission from PNG Chamber of Mines and Petroleum.

図3 地質層序表 (小鷹, 1994より改)

Hedinia 油田群 (2.34億バレル) もこの系列上にある。

SE Gobe 油田は、1991年に PPL56 JV の SE Gobe-1 号井により発見され、さらに探掘井として SE Gobe-2 (1991) と SE Gobe-3 (1992) が東 1.3 km と北西 0.9 km の地点に連続して掘削され油層の延長を確認した (図4)。隣接する PPL100 (現 PPL161) JV は、引き続き SE Gobe-3 の北西 4.7 km に Gobe-2x/2x ST (1992) を掘削し油を発見したが、SE Gobe プールとは別の圧力系に属するものであった (Gobe-2x プール)。同 JV はさらに SE Gobe-2 の東 1.5 km に Gobe-3x を掘削し、SE Gobe プールの延長部が同鉱区内にも延びていることを確認し、また OWC も確定した。SE Gobe 構造は、2つの衝上断層にはさまれた1枚のスラストシート上にあり、北西-南東に延びる細長い背斜構造をなしている。このシートは、南西で Wa'a Thrust にのり上げ、北東で Soro Thrust の下に位置している (図5)。この構造は、いわゆる“thin-skinned fault propagation fold”と解釈され、前期白亜系の Toro Sandstone および後期ジュラ系の Iagifu Sandstone が上盤側で背斜構造をなしている。本油田の油層範囲は、およそ 8 km×1.5 km ある (Surka, 1993)。

貯留岩はジュラ系 Imburu 層 Iagifu Sandstone で、上方粗粒化を示す浅海成の中〜細粒砂岩よりなる。砂岩は岩質から上下2つに分けられ、下部が中〜上部外浜相 (middle〜upper shoreface) およびデルタ相、上部が河川相 (fluvial) の卓越する河口相 (estuarine) の環境を示す。両者は 135 Ma のシーケンス境界で境されている (Powis, 1993)。砂岩堆積時の海岸線は、現在の衝上断層帯の方向とほぼ平行で、北西-南東の方向だったと考えられている。貯留岩の性状は、PPL56 内の平均で厚さグロス 48 m、孔隙率 18%、浸透率 150 md の性状を示す (図6)。

約 120 m ある油柱の上には少量のガスキャップが、下には端水面が確認されており、これは RFT による圧力-深度グラフ上でも明らかである (図7)。平均油層深度は海水準下約 1,200 m で、原油は軽質で硫黄分はほとんどなく、API 45度、GOR 1,000 scf/stb である。

4. 構造解釈のための新技術

PNG 陸上の当地域周辺では地震探鉱が有効ではない。これは地表に激しくカルスト化した石灰岩が露出し、地震波エネルギーが十分に地下に伝わらないためである。

図4 SE Gobe 油田構造図

図5 SE Gobe 油田断面図

図6 Iagifu Sandstone 貯留岩

急峻な地形自体もデータ収録作業を困難にしている。このため地下構造解釈には、地表地質調査をはじめ様々な技術が用いられているが、特に最近用いられ始めた技術として数値地形モデル (DTM)、合成開口レーダ (SAR)、電磁波探査 (MT)、高精度空中磁気探査、バ

図7 RFT 圧力-深度プロット

ランス断面図、ストロンチウム同位体比分析、イメージ処理がある。以下にそれぞれの技術についてのべる。

4.1 数値地形モデル (DTM)

地形標高データ (図8, Royal Australian Survey Corps, 1979) をデジタルでモデル化し, 他の解析データのベースマップとして使用するものである。後述のイメージ処理ソフトウェアなどと併用することにより, 俯瞰図などの3次元表示をすることも可能になる。

Papuan Foldbelt を形成した構造運動は比較的新しい時代のものであるため, 地表地形は地質構造をかなり反映している。このため地形データからだけでも地質構造についてかなりの情報を抽出することができるが, これを他の解析結果とあわせることにより, さらに多くの地質情報を取り出すことが可能となる。

4.2 合成開口レーダ (SAR)

航空機, 人工衛星などから電波を送り, その反射を捕えることで, 地表地形などの起伏の詳細を映像化するものである (図9)。雲などに影響されずに簡便にデータ取得できるため, アクセスが難しい地域などでも広く使われている。図9は図8の地形図と同じ SE Gobe 構造周辺のイメージであるが, 地形図だけでは表現されないような微妙な地形のレリーフが視覚化されているのがわかる。最近では, 立体視の可能なイメージから DTM データを直接作ることも可能になってきている。

4.3 電磁波探査 (MT, CSAMT)

MT 法は自然界に存在する電磁場変動をエネルギー源として利用する物理探査の1つである (内田・斎藤, 1994, その他)。地表で磁場・電場データを時系列で測定して周波数解析し, それらの相互関係から地下の岩石の比抵抗分布を求める。対象とする周波数の範囲は 0.001 Hz~数百 Hz である。MT 法は一般に数 10 km の探査深度があるといわれているが, 記録の質が悪いと (S/N 比が低いと) 1.5~2 km 程度にしかならないことがある。これはエネルギー源を自然の電磁場変動に頼っており, 太陽の黒点活動や, 雷などが大きなノイズ源となるためである。PNG の場合, 雨雲, 雷が多いので, 良い記録がとれるかどうかは天候に大きく左右される。

PPL56 周辺地域では, 高比抵抗の基盤の上に低比抵抗の砕屑岩, さらに地表部は高比抵抗の Darai Limestone と重なっており, 地下構造の比抵抗コントラストが強いので MT 法は有効である (Ross, 1993; Bennet and Parish, 1993)。

自然エネルギーを用いる MT 法に対して, 人工的電磁波源を用いる CSAMT 法 (Controlled Source Audio Magnetotellurics) も PPL56 では試みられているが, エネルギーが小さく, 2 km 以浅と浅い探査深度しかないため, その適用は限られている。

4.4 高精度空中磁気探査

従来の空中磁気探査は, 磁気基盤構造を求めるだけだったのに対し, より高密度にデータを取得することにより, 磁気分布を微細なオーダーで捉えることができるようになる。これから, 従来の磁気基盤より浅い部分, すなわち堆積物中の磁気分布を検知することができ, この部分の地下構造図を描くことが可能になる。

実際のデータ取得密度は, ライン間隔が 250 m 以下 (従来は 0.5~2 km), 飛行高度が 60~80 m (従来は 100~300 m) と 2 倍以上の高密度になっている。

図10, 11に PPL56 を含む地域の全残留磁気図を, 従来の方法のものと高密度のものを比較して示した。従来のもの (図10) では, 長い波長の異常しか示さず, きわめて曖昧な図となっているのに対し, 高精度調査によるもの (図11) では, スラストシートが 1 枚 1 枚認められ, また表面の微細な模様から地質構造区を認定することも可能になっている。

4.5 ストロンチウム同位体比分析

従来大型有孔虫化石に頼っていた中新統 Darai Limestone の時代区分を, ストロンチウムの同位体比を調べることにより, 絶対年代として求めることができるようになった。

Sr は Ca と同様の挙動を示し, 地球循環水に普遍的に含まれている。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比は地質時代を通じて変化しているが, 36 Ma 以降は一方向的に上昇しており, その値から絶対年代を一義的に求めることができる (Hoddell et al., 1991, など)。PNG では, 坑井における石灰岩シートの重なり (重複) 状況を特定できるほか, 地表サンプルの測定値から削剥量, 石灰岩の基底位置, ひいては地下構造の推定などに用いられている (Hornafius and Denison, 1993)。

図13は Iehi-1 号井のコアを分析したものである。求めた年代と深度がよく調和し, 精度の高い堆積カーブが描かれる。地表部分では削れを受けていることを念頭におき, このカーブを本地域の代表的石灰岩の堆積カーブとすることができる。

図14はこのカーブを異常に厚い石灰岩が認められた Anesi-1 号井に適用したものである。この図からおおよそ 1,100 mKB で重なる 2 枚の石灰岩シートが認定できる。両者の境界は, 従来は大型有孔虫化石から 1,400 mKB 近辺と推定されていたが, この分析でこれが間違っていたことが明らかになった。また本井では, 石灰岩を掘り切ることができずに 1,700 mKB で掘り止めたが, 重複した石灰岩の基底部はおおよそ 2,100 mKB であることがこの図から推測できる。

4.6 バランス断面図

バランス断面図法は “thrust and foldbelt” 地域の構

図 8 SE Gobe 構造周辺地形図

図 9 SE Gobe 構造周辺 SAR イメージ

図10 PPL56 付近残留磁気図 (従来のもの)

図11 PPL56 付近残留磁気図 (高精度空磁による)

図12 合成地形イメージ (DTM+SAR)

図13 Iehi-1号井 Sr 年代

図14 Anesi-1号井 Sr 年代

造解析に広く用いられている構造モデリング法である (Boyer and Elliott, 1982; 村田, 1990, その他)。これは変形の前後で地層の質量 (断面図上では line length) が保存されることを原則とし, 変形後の地質構造解釈を変形前に戻したとき, 地層が合理的な堆積時の形に戻るかどうかで, 解釈の妥当性を検証するものである。本手法は PNG などの圧縮場だけでなく, ソルトベーズンなどの伸張場でも震探断面図と併用して解釈に用いられている。最近では専用のコンピュータソフトウェア (GeoSec など) を使用することにより, いくつかの構造モデルを素早く検証することができるようになった。

当地域では, バランス断面図法は地域全体の構造解釈と同時に, プロスペクトオーダーのポテンシャル評価にも用いられている。

4.7 イメージ処理

DTM, SAR, dip-strike, 高精度空中磁気探査, 地質図などの map image をコンピュータ上で重ね合わせるにより, 相互の関連をはっきりさせると同時に, 構造単位, 断層, スラストシート, 岩質分布などを認定できるようにする。

図12に, SAR イメージを DTM の標高データで色付

けたものを示す。本来は地表面の微細な起伏を示す白黒 SAR イメージに絶対的標高データが重なることで, 対象地域の地形がより具体的にはっきりと捕えることができるようになっている。

このような画像情報はデータ量がきわめて多いため, 処理には高速コンピュータが不可欠である。実際にはワークステーションを用いることにより, 巨大なイメージデータの取扱い, 素早い処理, 視覚化による解釈作業, 作図作業の質的向上, 効率アップに大きく寄与している。

5. プロスペクトの構造モデリングの実例

当地域では以上のような手法を総合して各プロスペクトのトラップ形成の可能性が調べられているが, ここではこれに成功したものと, 不成功のものをそれぞれ1例ずつ示す。なお, いずれの場合も1991年にテストされたもので, 試掘前の構造モデルは地質調査, SAR, バランス断面図法により作られ, MT と高精度空中磁気探査は当時はまだ用いられていなかった。

図15は SE Gobe-1 号井の掘削前後の構造断面図であ

図15 構造解釈成功例 (SE Gobe-1)

る。本構造は、Papuan Foldbelt 第1列の褶曲構造で“fold bend model”として解釈された。試掘前に1,770 mKBと予想されたToro層の出現深度は、実際には1,878 mKBで108 mしかずれておらず、その誤差は6%であった。これはこの時の構造解釈モデルが正しく、正確だったことを示している。

一方、図16に示すAnesi-1号井では、前述したよう

に異常に厚いDarai Limestoneが出現し、深度1,712 mKBでも掘り抜けず、ターゲットのToro Sandstoneの深度がきわめて深くなることが予想されたためここで掘り止められた。これは、衝上断層の角度が当初の想定よりも緩く、上盤側でToro Sandstoneなどの貯留岩が地表でみられる背斜に巻き込まれていなかったためであるが、これを事前に予測することは当時ではできなかつ

図16 構造解釈不成功例 (Anesi-1)

た。しかし、MTなどの新しい技術を適用することにより、石灰岩の繰り返しをあらかじめ検知しモデルの妥当性を事前に検討することは、現在ではある程度可能となってきた。

6. おわりに

PNGでは、地震探鉱のように構造を確定できる技術

が使用できないため、様々な既存技術・新技術が取り入れられ応用されている。最近の技術的傾向としては、金属探査に用いられていたものを石油に応用する(MT, 高密度空中磁気)、データを高密度に取得し微細なアナマリーを検知する(高密度空中磁気)などがある。これらの技術は、地下構造を把握する上で地震探鉱ほどの確実さは無く、あいまいさが残るので、それらを総合する

ことにより、全体的な誤差を最小化し精度の高い構造を求めるように努力されている。

謝 辞

本編をまとめるに当たり PPL56 Joint Venture の Barracuda Pty Limited, サザンハイランド石油開発株式会社, Oil Search Limited, Nomeco PNG Oil Co., Mountains West Exploration Inc. の各社には内部資料の公表を認めていただきました。また, サザンハイランド石油開発株式会社の田中義久常務取締役には, 本論文公表の機会を与えていただきました。ここに深く感謝いたします。

引用文献

- Bennett, J. K. and M. Parish, 1993 : The use of magneto-telluric surveying as a risk reduction tool for hydrocarbon exploration in the Papuan Foldbelt. *In* Carman, G. J. and Z. Carman, (Eds), *Petroleum Exploration and Development in Papua New Guinea* ; Proceedings of the 2nd PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 31st May-2nd June, 1993 : 335-349.
- Boyer, S. E. and D. Elliott, 1982 : Thrust systems. *Bull. AAPG*, **66**, 1196-1230.
- Hoddell, D. A., P. A. Muller and J. R. Garrido, 1991 : Variations in the strontium isotopic composition of seawater during the Neogene, *Geology*, **19**, 24-27.
- Hornafius, J. S. and R. E. Denison, 1993 : Structural interpretations based on strontium isotope dating of the Darai Limestone, Papuan Fold Belt, New Guinea. *In* Carman, G. J. and Z. Carman, (Eds), *Petroleum Exploration and Development in Papua New Guinea* ; Proceedings of the 2nd PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 31st May-2nd June, 1993 : 313-324.
- 小鷹 長, 1994 : 流体包有物分析の石油探鉱への応用. 石枝誌, **59**(4), 304-308.
- 村田明弘, 1990 : 造山帯前縁部の地質構造. 大原隆・西田孝一 (編), 地球環境の変容. 96-103, 朝倉書店.
- Powis, G., 1993 : The sequence stratigraphy of the Mesozoic reservoirs of the Gobe Anticline, Papuan Thrust Belt. *In* Carman, G. J. and Z. Carman, (Eds), *Petroleum Exploration and Development in Papua New Guinea* ; Proceedings of the 2nd PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 31st May-2nd June, 1993 : 155-167.
- Ross, L., 1993 : Evolution of structure models of two anticlines in the Papuan Thrust Belt by application of Magnetotellurics. *In* Carman, G. J. and Z. Carman, (Eds), *Petroleum Exploration and Development in Papua New Guinea* ; Proceedings of the 2nd PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 31st May-2nd June, 1993 : 351-370.
- Royal Australian Survey Corps, 1979 : "Erave Sheet" 1 : 100,000 Geographic Map.
- Smith, R. L., 1990 : Tertiary plate tectonic setting and evolution of Papua New Guinea. *In* Carman, G. J. and Z. Carman, (Eds), *Petroleum Exploration in Papua New Guinea* ; Proceedings of the First PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 12-14 Feb., 1990 : 229-244.
- Surka, E., 1993 : The South East Gobe Oilfield : Technical aspects of a significant discovery in Papua New Guinea. *In* Carman, G. J. and Z. Carman, (Eds), *Petroleum Exploration and Development in Papua New Guinea* ; Proceedings of the 2nd PNG Petroleum Convention, Port Moresby, 31st May-2nd June, 1993 : 431-444.
- 内田利弘・斎藤 章, 1994 : 電磁法探査システムの開発動向. 物理探査, **47**(6), 472-500.