論 文

ガボン沖合既存油田間鞍部における新油田の発見

—voxel 技法による貯留層分布予測—*

井上 正澄**・坂牧 和博**・町田 幸弘***

佐伯 龍男**・岡崎 隆臣**

(Received March 13, 2000; accepted September 8, 2000)

Discovery of a new oil field within existing fields, offshore Gabon - An application of voxel technology to the reservoir distribution prediction

Masazumi Inoue, Kazuhiro Sakamaki, Yukihiro Machida,
Tatsuo Saeki and Takaomi Okazaki

Abstract: There are many oil fields with the Upper Cretaceous Batanga reservoirs in the northern offshore Gabon, West Africa. Main structural closures, however, have already been drilled and the exploration of the area is considered to have been matured.

In 1994, Mitsubishi Petroleum Development Co., Ltd. (MPDC) together with Elf Gabon (operator) conducted a 3D seismic survey to evaluate the remaining potential. We have carried out a sedimentological study based on the 3D seismic data utilizing voxel technology. Through this study, the Batanga sandstone reservoirs are revealed to be a complex of many turbidite channels within mud-rich deepsea fan body. These channels are, whilst meandering and diverging, running basically from east to west, which indicates that the fluid flow within the reservoirs should have been restricted in the N-S direction.

Based on this study and other geological/engineering data, we have constructed a geological model, which implied considerable remaining oil reserves (equal to or even larger potential than each of the existing fields) over the saddle area between the two existing fields. MPDC proposed and Elf Gabon agreed to drill an exploration well to this area. This well was successful and proved that our geological model is correct.

Key words: West Africa, Gabon, Upper Cretaceous, Batanga, oil field, exploration, turbidite, channel, 3-D seismic, amplitude, voxel

1. はじめに

西アフリカ, ガボン沖北部には上部白亜系 Anguille 層 (Coniacian ~ Santonian) および Batanga 層

(Campanian ~ Maastrichtian) の砂岩層を貯留層とする多数の油田が発見されている (図1)。これらの油田は Aptian の岩塩層の運動により形成された構造に集油しているが, 主要構造はすべて試掘済みで, 1990年以降は新油田の発見はなく, 探鉱は熟成に達しているものと考えられていた。このため, 近年の探鉱は陸上および南部沖合のプレソルト層と深海域での第三系タービダイトを対象として行われている。特に後者は, 最近ナイジェリアおよびアンゴラの深海域で大発見が相次いでおり, 三次元地震探鉱の振幅異常などにより貯留層分布や炭化水素の存在を予測することが可能なことから注目を集め

* 平成12年5月25日, 平成12年度石油技術協会春季講演会で一部発表 A part of this paper was presented at the 2000 Technical Meeting of the JAPT, May 25, 2000.

** 三菱石油開発(株) Mitsubishi Petroleum Development Co., Ltd.

*** 石油公団 Japan National Oil Corporation

図1 ガボン北部沖油田群と Batanga 層の分布

ている (Da Costa *et al.*, 2000)。しかるに、白亜系のタービダイトは、第三系に比し圧密が進み貯留層と周囲の非貯留層との物性、すなわち音響インピーダンスのコントラストが小さいこと、および岩塩運動の影響が大きく地質構造が複雑でイベントの追跡が困難なことから、地震探鉱を利用した堆積学的研究はほとんど行われていない。

三菱石油開発株式会社 (三菱石開) は本地域で、1974年に Elf Gabon 社 (Elf) の保有する2鉱区に50%参加し、4油田を発見し (石井, 1983), 1980年以来20年間生産を続けている。1994年には残存ポテンシャルの評価のために、主力3油田の位置するボードロア (Baudrie) 鉱区で三次元地震探鉱を実施して構造再解釈を行った。三菱石開ではこれに引き続き、三次元地震探鉱データの voxel 技法を使った白亜系貯留層に対する堆積学的研究を行い、その他のデータと総合解釈することにより、既存2油田の中間鞍部に残存ポテンシャルを見いだした。この研究成果に基づきオペレーターの Elf に試掘井の掘削を提案し、これを実施して、予想通り新油田を発見した。本論では、これらの研究成果と試掘に至った経緯およびその結果を報告する。

2. 石油地質概要

西アフリカの堆積盆地は南アメリカとアフリカ大陸の分裂により形成されたもので、その層序はガボン、コン

ゴ、アンゴラでは Aptian の岩塩層により、その下位のリフト期の主として陸成〜湖成層からなるプレソルト (pre-salt) と、その上位のドリフト期の主として海成層からなるポストソルト (post-salt) に二分されている。ガボンの陸上や南部沖合ではプレソルトが主要探鉱対象であるが、北部沖合の探鉱対象はポストソルトである (図2)。ガボン北部沖合のポストソルトでは第三系タービダイトや下部白亜系 Albian の Madiela 層炭酸塩岩 (アンゴラの Pinda 層に相当) での集油も認められるが、この地域の主要油層は上部白亜系 Anguille 層 (Coniasian〜Santonian) および Batanga 層 (Campanian〜Maastrichtian) の砂岩層である。これらの砂岩層は古 Ogooue 川から供給された碎屑物が乱泥流により深海に堆積したタービダイトの一部を成しており (川上, 1987), 低海水準期に堆積したものと考えられる (図2)。Anguille 層は、北部沖合では比較的普遍的に分布しているが、より貯留層性状の良好な Batanga 層はその分布が限定されている (図1)。

根拠岩は、プレソルトの Melania 層 (アンゴラの Bucumazi 層に相当) の湖沼成黒色頁岩と考えられた時期もあったが (石井, 1983), その後の同位体分析などにより、ポストソルトの油のほとんどはポストソルトの Azile 層 (Cenomanian〜Turonian) の海成頁岩に由来すると考えられるに至っている (Tissot *et al.*, 1980; Teisserenc and Villemin, 1990)。この頁岩は Cenomanian〜Turonian の最大海進に伴うコンデンストセクションに相当しており (図2), 本地域では TOC は平均3〜5%であり、主として Type I-II のケロジェンを含む。本地域の Azile 層は現在オイルウインドウにあり、その熟成史から、油の移動集積は中新世以降にはじまったと解釈される (Teisserenc and Villemin, 1990)。

3. BDNM 油田, BDM 油田

ボードロア鉱区では、1969年に岩塩運動に起因したドーム状構造に BDM-1 が掘削され、Batanga 層で油徴を確認したが十分な油柱がなく、同井は油水界面の直上に掘削されたものと解釈され廃坑とされた。その後の震探解釈により北方の岩塩柱の周囲にクロージャーが予想されたため、1980年にここに BDNM-1 が掘削され、Batanga 層で油層を発見した。本油田はボードロアノール (BDNM) 油田と命名され、1982年から生産が開始された。一方、震探再解釈により BDM-1 の位置は構造頂部からはずれていたことが明らかになり、1981年にドーム状構造頂部付近に BDM-2 が掘削され、ここでも Batanga 層で油層を発見した (図3)。本油田はボードロア (BDM) 油田と命名され、1984年から生産が開

図2 ガボン北部沖ポストソルト層序（海水準曲線は Haq *et. al.*, 1987 による）

始された。当時の構造解釈では、両油田は図3に示すごとく別々の構造と解釈されていた。

1994年に、これら2油田を含むボードロア鉦区全域に三次元地震探鉦が実施され、地質構造の再解釈が行われた（図4, 5, 6）。この結果両油田は、図4に示すごとく

生産開始前には共通の油水界面を有し、構造的には連続していたことが判明した。しかし両油田とも10年を超す生産履歴により油水界面が上昇し、この三次元地震探鉦解釈時には別々の油水界面を有するに至っており（図4, 5）、既存井により今後回収される量を越える残存ポテンシャルはないと解釈された。

しかし、この解釈に対し、次の2点が矛盾点として問題提起された。

- (1) 両油田の現在の生産減退曲線を延長すると、両油田合計の原始埋蔵量に対する回収率は約35%となるが、この値は本地域の Batanga 層の平均的な回収率45~50%に比して有意に低い。
- (2) BDM 油田の北翼部に位置する BDM-3 の生産区間は、すでに完全に水没している BDM-4 のパーフォレーション区間より構造的に低い位置にあるが（図4, 5）、ごく少量（約100 bbl/日、water cut 約90%）ながら油を安定的に生産している。しかもプロダクション検層から判定される産油ゾーンは、現在の BDM 油田の油水界面よりはるかに低く、当初の油水界面のわずか2~6m上位に位置している。

従来は、図1に示した Batanga 層の分布域内では砂岩層はシート状に連続して分布し、異なる油田間でも対比されるものと解釈されていた。このため Batanga 層は図5に示すごとく、単一の貯留層として扱われてきた。しかし上記の矛盾点から Batanga 層内の砂岩層はより複雑な内部構造を有していることが予想され、場合によっては残存ポテンシャルが存在する可能性も示唆された。

4. voxel 技法によるタービダイトチャンネル解析

こうした問題を解明するために、砂岩層の連続性や導通性に特に注意を払いながら、三次元地震探鉦データの voxel 技法による Batanga 層の堆積学的解析を行った。

4.1 voxel 技法とは

二次元地震探鉦データを解釈する場合、トレース波形として表示された震探断面、あるいは、ピクセル (pixel) 表示（平面を微小な四角形の集合とし、それぞれの画素の色・濃淡の変化で波形の変化を表す手法）された断面を用いる方法が一般的である。また、従来の三次元地震探鉦データの解釈では、データ空間をインライン、クロスライン、タイム方向の各スライスに切り、それぞれの断面上で解釈を行った上で、三次元的な地質構造を推定することが一般的であった。この方法では、データは三次元であるものの、解釈アプローチ自体は二次元的であるため、作業効率および解釈精度の面で制約があり、複雑な地質構造の把握は困難であった。

図3 二次元震探による Batanga 層上面深度構造図 (星印は新試掘井 BDNM-8 の位置)

これに対し、voxel 技法とは、ピクセル表示を三次元に拡張したものであり、空間を微小な立方体 (voxel) の集合として表示する (Kidd, 1999)。この手法では、波形データの各ポイントが voxel として分割された後 (図 7a)、各 voxel に波形の振幅に対応した色が割り当てられる (図 7b)。基本的な原理はこうに極めて単純なものであるが、データ処理量が多く、高度な計算能力を必要とするため、近年の計算機技術の向上によって実用化が可能となった。本技法は、CT スキャンなどの医療技術分野などでも、三次元データの可視化技術として威力を発揮している (大澤ら, 1999)。

図 8 は、ボードロア鉦区における三次元地震探鉦データの一部区間 (第三系) に voxel 技法を適用した例であり、正の強振幅を有する voxel 以外を透過色にして、構造内部の振幅異常を強調したものである。図面手前に、蛇行パターンを呈する強振幅部が東西方向に高密度に連続して分布する。これらはチャンネル砂岩の基底の強反射を示していると考えられ、第三系タービダイトの分布エリアを示すマーカーとなる。なお、ボードロア鉦区内の第三系タービダイトでは、バリステ (BSM) 油田で Mandorove 層が油層となっているが、BDNM-BDM 油田地域ではクロージャーを形成していない。

図4 三次元震探による Batanga 層上面深度構造図 (星印は新試掘井 BDNM-8 の位置)

図5 BDM 油田-BDNM 油田断面図

voxel 技法によるアプローチでは、このように三次元構造を直接把握できるため、従来の二次元的な手法で要した作業時間が短縮されるだけでなく、複雑かつ微細な構造の解釈精度も向上する。

4.2 voxel 技法による振幅異常の抽出

前述した利点に基づいて、白亜系タービダイトの貯留層分布の解明に voxel 技法を用いた。

ただし、対象となる白亜系では、前述したように、岩塩運動の影響などを受け地質構造が複雑であること、圧密が進みインピーダンスコントラストが小さいことから、振幅異常の連続性は必ずしも高くない。また、薄層による波形のチューニング効果や周囲層の岩相変化によって、貯留層の物性とは無関係に、見かけの振幅異常

図6 BDNM, BDM, BSM 油田鳥瞰図 (Batanga 層上面)

図7 Voxel 概念図 (Kidd, 1999, Paradigm Geophysical 社の許諾を得て転載)

の発生、もしくは逆に振幅異常の消滅が起こっている可能性がある。さらに、同一の砂岩貯留層でも、頂部の反射面で負の振幅異常を示す場合、基底反射面で正の振幅異常を示す場合、両者がそれぞれ振幅異常を呈する場合など、さまざまなケースがありうる。

図8 第三系タービダイトチャンネル

voxel 技法で今回直接参照した波形情報が振幅値のみであることから、上記の理由によるミスリードを避けるため、既存の表示手法による解釈を併用しつつ、以下の手順を採用して、エリア別・深度別に特徴的な振幅異常を抽出した。

- (1) 既存の表示方法を用いて、Batanga 層の上面と下面の解釈を行い、上面を構造図作成に使用した。

voxel 技法による解析作業は、この両面にはさまれた Batanga 層に適用された。したがって voxel 解析では、この両面はデータ空間の境界という役割りにのみに使用した。

- (2) 今回用いた voxel 個々のサイズは水平方向が $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ 、垂直方向が 4msec 。(サンプル間隔)である。各 voxel には地震探鉱データから得られるいかなる属性値を与えることもできるが、既存坑井における Batanga 層の砂岩層は地震探鉱データの強振幅と対応しているの、今回は属性値として振幅値を採用した。各坑井で砂岩層の上面が負の振幅異常(トラフ)に、下面が正の振幅異常(ピーク)に相当する。この両方に対して voxel 解析を行った。
- (3) まず坑井において砂岩層に対応している強振幅の voxel を出発点とし、そこから振幅異常を抽出した。具体的には出発点の振幅値とデータ空間における振幅値の頻度分布(図 7b)を参考にして設定した敷居値を用いて、出発点から三次元方向に連続して敷居値を越える voxel を抽出した。抽出された voxel を着色し、抽出されなかった voxel を透明化することによって、抽出された振幅異常は線や面ではなくある体積を有する voxel の集合体として表示される。振幅値が高くても出発点から連続していなければ、その voxel は着色されない。また voxel への着色を微妙に調節することによって、抽出された集合体内での振幅異常の分布を明瞭にできる。なお敷居値を設定すると自動的に voxel が抽出されるため、一種のオートピッキングと言える。
- (4) 振幅の敷居値をいろいろ変化させ、また振幅値に割り当てる色および中間値の透明度を試行錯誤的に調節することにより、堆積形態を示唆する分布形状を呈する voxel 集合体を抽出した。なお、地震探鉱により得られる振幅は岩石物性そのものではなく、そのコントラストに対応しており、また振幅値自体も地震探鉱の取得・処理過程で各トレースやサンプル間の相対振幅が必ずしも保持されていないことから、すべての砂岩層に同じ敷居値を適用せず、砂岩層毎に適切と考えられる敷居値を採用し、この段階ではむしろ定性的な分布形状の認識を優先した。ただし、最終表示(図 9)では振幅値に割り当てる色はすべての振幅異常で共通として、異なる voxel 集合体間の振幅値の比較を可能にした。
- (5) 上記の坑井を出発点として抽出された振幅異常は、スタディ地域の北部(BDNM 油田を含む)と南部(BDM 油田を含む)に集中しており、両者の

間に連続性はない。しかし、両者の中間部にもこれらの坑井を出発点とする振幅異常とは異なる強振幅が認められることから、それらを出発点として、この地域でも強振幅の voxel の追跡を行った。ここでも振幅の敷居値は一定とはせず、堆積形態を示唆する形状の認識を優先させ、同様の解釈を行った。

- (6) 以上の手順を経て、実質的に Batanga 層中のすべての振幅異常を voxel の集合体として抽出した。これらを Batanga 層中で相対的に上位から下位に 6 グループにまとめ、平面図上に示したのが図 9(a, c, e はトラフ, b, d, f はピーク)である。図 10 は図 9 d の中央部を拡大したもの、図 11 は図 9 d の振幅異常を Batanga 層上面の深度構造図に重ね合わせたものである。

- (7) 本技法の特徴として次の諸点が挙げられる。

- ① 従来の方法では、振幅異常の抽出は、解釈した特定の層準上で、またはそれらを基準面とするウィンドウを設定して行っていた。voxel 技法では出発点と振幅の敷居値さえ与えれば、任意のデータ空間内で連続した振幅異常は三次元方向に自動的に追跡され、体積を有する voxel の集合体として抽出される。したがって、対象となる地層中に広域に追跡される反射面がない場合、および地層中の内部構造が解釈層準と平行でない場合に特に有効である。
- ② 敷居値の設定、中間値の半透明表示、微妙な着色の設定などが容易かつ迅速に行え、これらを試行錯誤的に繰り返すことにより、堆積形態を示唆する分布形状を持つ振幅異常が効率的に抽出できる。
- ③ 対象となる振幅異常以外は透明(または半透明)に表示できるので、データ空間を上方、下方、側方などから見通すことにより、振幅異常として抽出された voxel 集合体の形状や相互関係の検討が三次元空間で容易に行える。従来の方法では内部構造や連続性の判定が困難であったが、voxel 技法の採用によりこれらの問題が解決した。

4.3 タービダイトチャンネル解析

図 9 の振幅異常は明らかに蛇行するチャンネルの形態を示している。既存坑井との対比から、これらのチャンネルは砂岩層からなっていると解釈され、下記で検討するごとく、その振幅値と砂岩層の発達度に相関が認められる。こうした結果は、Batanga 層中の砂岩層は図 1 に示した Batanga 層の分布域内ではシート状で異なる油田間でも対比可能であるという従来のイメージと大き

図9 Batanga 層振幅異常 (a, c, e はトラフ, b, d, f はピーク, 星印は新試掘井 BDNM-8 の位置)

図10 ピーク d (チャンネル1 下部) 拡大図 (星印は新試掘井 BDNM-8 の位置)

く異なるものである。

図9a～fは、Batanga 層中での相対的な上下関係に基づき、いくつかの振幅異常を1つの図中にまとめたものであり、正確な層位的関係を考察して区分されたものではない。したがって同じ図中に示されていても、それらの振幅異常が同時期に形成されたチャンネルであることを必ずしも意味するものではない。そこで、振幅で示される蛇行パターンをチャンネル流路として読み取り、地震探鉱断面上で浸食する/されるの関係や各種のラッ

図11 ピーク d と Batanga 層上面深度構造図 (星印は新試掘井 BDNM-8 の位置)

ピングパターンに基づいてこれらの層位的上下関係を判定し (図12)、ほぼ同層準/同時期のチャンネルごとにまとめたものが図13である。本地域のタービダイトチャンネルは5つのグループにまとめられ、それぞれをチャンネル1～チャンネル5と呼ぶことにする。図9の振幅異常と図13のチャンネルの対応関係を表1にまとめて示す。

以下でこれらのチャンネルを下位から上位へ、やや詳しく吟味する。

4.3.1 チャンネル2, チャンネル4

Batanga 層中で振幅異常として識別できるチャンネルでは最下位にある。坑井では、これより下位の Lower Batanga 層中にも何枚かの砂岩層が認められるが、発達が悪いこともあり、それらは地震探鉱データでは識別が困難である。チャンネル2とチャンネル4は北と南に離れて分布しているため (図13d)、両者の正確な層位的関係は不明だが、共に Lower Batanga 層を浸

図12 地震探鉱断面図

図13 チャンネル分布図 (星印は新試掘井 BDNM-8 の位置)

表1 振幅異常 (図9) とチャンネル (図13) の対応

振幅異常 (図9)	チャンネル (図13)		
	南 部	中央部	北 部
a (トラフ)	チャンネル5	チャンネル1 (上)	チャンネル3
b (ピーク)		チャンネル1 (上)	チャンネル3
c (トラフ)		チャンネル1 (下)	
d (ピーク)	チャンネル5	チャンネル1 (下)	
e (トラフ)	チャンネル4		チャンネル2
f (ピーク)	チャンネル4		チャンネル2

食し、チャンネル1に浸食されていることから、ほぼ同時期に堆積したと考えられる。堆積時にはチャンネル2とチャンネル4はより広い範囲に分布していたと思われるが、両油田の中間部では現在はチャンネル1に浸食され残っていない。

チャンネル2の砂岩層はBDNM-6, 7で、チャンネル

4の砂岩層はBDM-2, 3, 4, 5, 6で認められるが、前者のほうが貯留層性状が良く、これは強振幅値 (図9e, f) ともよく相関している。振幅値からはチャンネル4の砂岩層は、坑井のないBDM油田南翼部で良好化していることが予想される。

4.3.2 チャンネル1

チャンネル1はBDNM油田とBDM油田の中間鞍部に分布している (図13b, c)。南方へ分岐する流路の一部がBDM-1, 3を通っているが、ここでは振幅値で示されるごとく砂岩層の発達には良くない (図10)。しかしチャンネル1の主軸部は顕著な強振幅を示し、ここでは良好な砂層の発達が期待される (図9c, d)。特にチャンネル1の基底部で流路が網目状に発達し (図13c)、チャンネル2、チャンネル4およびLower Batanga層を浸食している (図12)。この層準はMaastrichtian中期の海退に伴う低海水準期に対応していると考えられる

が(図2), シーケンス層序学的検討はまだ十分に行っていない。チャンネル1の上部でも蛇行流路は認められるが, 南北2つの分布域に分かれ, またその発達する地域も西方へと移っている(図9a, 9b, 13b)。

4.3.3 チャンネル3, チャンネル5

Batanga 層では最上位に位置するチャンネルである。チャンネル3およびチャンネル5は, 一部でチャンネル1を浸食して覆うという点では同じであるが, 分布範囲が北と南に分かれており(図13a), 両者の正確な層位的関係は不明である。チャンネル3の砂岩層はBDNM-3, 6, 7で発達しており, 震探の強振幅と呼応している(図9a, b)。チャンネル5の砂岩層はBDM-2, 4, 5, 6で認められるが, チャンネル4と同様, 振幅値からは坑井のないBDM油田南翼での発達が予想される(図9a, d)。これは堆積時にBDM構造の中央部が既に隆起を開始し, 海底上の高まりを形成していたため, タービダイトチャンネルの主部はこれをう回して堆積したものと解釈される。

4.4 チャンネル間の導通

既存坑井では, 地震探鉱の強振幅で示されるチャンネル流路の外側でも砂岩層が認められる。これらは流路からあふれ出したクレバススプレイ(crevasse splay)砂と解釈され, 一般に薄く, 貯留層性状や連続性も良くない。チャンネル内の導通は, その流路方向である長軸延長方向(ここでは東西)には良く, それと直交する方向(南北)では悪いと考えられる。垂直方向へは, 流路が位置を移動させながら重なり合っており, 一般に同一チャンネル内では上下方向への導通性は良好と考えられる。同一時代面で見ただけでは, 隣り合う流路どうしの導通は認められなくとも, こうした上下方向への導通により砂岩層のネットワークが形成され, 同一チャンネル内の砂岩層は基本的に, 相互に導通しているものと考えられる。すなわち, チャンネル1~5はそれぞれが一種の「タンク」を形成していると解釈される。

一方, 異なるチャンネル(「タンク」)間の導通は, 上位のチャンネルが下位のチャンネルを浸食している場合には, 浸食するチャンネルの基底部で砂の発達することが多く, これを通じて上位と下位のチャンネルの導通が考えられる。チャンネル1は下位のチャンネル2およびチャンネル4を浸食しているが, この基底部では流路が網目状に発達し, 震探での振幅も強いことから, 良好な砂岩層が広く分布していると考えられる(図13c)。この部分は, 下位のチャンネル2およびチャンネル4の流路の一部が重なり合って接していることから, それらのチャンネルが相互に導通する箇所であると解釈される。

他方, チャンネル3およびチャンネル5は下位のチャ

ンネル1を一部で浸食しているが, その面積は限られている。またチャンネル1の上部では流路の発達が悪いこともあり, 両者の砂岩層は接触しておらず, したがって導通はしていないと解釈される。

図14にこの貯留層モデルを模式的に示した(BDNM油田ではLower Batanga層中の油層からも生産しているが, ここではそれは示していない)。各チャンネル内部の砂岩層はネットワークを形成して相互に導通していて, チャンネル1~5はそれぞれが一種の「タンク」を形成している。チャンネル1, 3, 5は直接には相互に導通していないが, その下位のチャンネル2およびチャンネル4を通して導通していて, 水層部分も含めるとすべてのチャンネルが連続している。この油層モデルに基づいて断面図を描き直したものが図15である。

5. 総合解釈—掘削の提案

上記の研究成果と坑井の生産・圧力挙動, プロダクション検層, 埋蔵量の物質収支などのデータを総合的に検討した結果, 次のごとく解釈に至った。

- (1) Batanga 層は乱泥流により堆積したタービダイト

図14 貯留層モデル

図15 新解釈による Batanga 層断面図

トで、泥質岩が卓越する海底扇状地堆積体を形成しているが、この中に分岐し蛇行するチャンネルが認められ、そこでは砂質岩が卓越している。従来の解釈では Batanga 層の砂岩層はその分布域（図1）内ではシート状に分布しているとされ、このため異なった油田間でも個々の砂岩層の対比が行われていた。しかし今回の研究成果から、これらの砂層はチャンネルを形成しており、東西方向への連続性は良好だが、南北方向には連続していないことが明らかにになった。

- (2) これらのチャンネルは、その形態や層位的位置から、BDNM, BDM 油田を含むボードロア鉱区では5つのグループに分けられ、それぞれをチャンネル1, チャンネル2, チャンネル3, チャンネル4, チャンネル5と命名した。BDNM 油田はチャンネル2およびチャンネル3から、BDM 油田はチャンネル4およびチャンネル5から生産している（ただし、チャンネル2およびチャンネル4はすでに水没）。BDM-3がチャンネル1の最も南の分岐の末端部から生産している（図10）以外は、チャンネル1には坑井が掘削されていない。しかし震探記録ではチャンネル1の振幅が最も大きく、ここでは他のチャンネルに比べより良好な砂岩層の発達に期待できる。
- (3) BDNM 油田と BDM 油田は共に岩塩の運動に起因した明瞭な構造を形成しているが、その中間鞍部にも、Batanga 層上面では東西方向の軽微な背斜構造が認められる。この背斜は、①その下位で岩塩層の隆起が認められないこと、②Batanga 層より下位層では背斜構造が存在しないこと、③岩塩起源に特徴的なドーム状ではなく東西に延びる背斜であること、④チャンネル1の分布と良く一致していること（図11）から、チャンネル1の砂岩層の差別圧密に起因していると考えられる。こうした差別圧密が認められることは、逆にチャンネル1の砂岩層の良好な性状（高孔隙率の保存）を反映しているといえる。
- (4) BDNM 油田（チャンネル2, 3）と BDM 油田（チャンネル4, 5）は、生産開始前には同一の油水界面を有していた。したがって、その中間に位置するチャンネル1も同一の油水界面を有していることが予想される。しかし、これらのチャンネルは油層部分では直接に導通しておらず、チャンネル2, 3およびチャンネル4, 5では、BDNM 油田およびBDM 油田の生産に呼応してそれぞれで油水界面が上昇している。一方、チャンネル1は唯一その末端部に掘削された BDM-3 から生産が行われている

が（図10）、その累計生産量は同チャンネルの原始埋蔵量の2～3％程度に過ぎず、このため油水界面は当初の位置とほとんど変わらないと考えられる。これにより、BDM-3が、BDM 油田の他坑井（廃坑されている BDM-1 は除く）で現在確認されている油水界面より下位の、当初の油水界面のわずか数m 上位からいまだに油を生産していることが説明される（図15）。

- (5) 一方、油層圧力は両油田とも当初圧力より50～60 bar 低下して安定してきており、チャンネル1から生産している BDM-3 もほぼ同じ圧力を示している（図16）。また、BDM-2 では、掘削後、生産開始までの間（1982～1984）に BDNM 油田の生産により圧力が6 bar 低下した事実も考えあわせると、これらのチャンネルは、おそらく水層部分を通して導通していると考えられる。したがってチャンネル1の油層圧力も、当初の圧力より50～60 bar 低下していることが予想される。
- (6) 図14の貯留層モデルに基づけば、これらの現象はすべて整合的に説明される。チャンネル1～5は水層部分では導通していて、圧力的には同一のシステム内にある。水層は翼部にさらに大きな体積を有しており、両油田の圧力維持に寄与している。油層部分は、当初の状態でも各油田ごとに分離していて、導通は認められない。BDNM, BDM 両油田では生産実績に呼応して、それぞれで油水界面が上昇している。中央部のチャンネル1では、水層部分の導通により、油層圧力は BDNM, BDM 油田に近いレベルまで減退していると考えられるが、油の生産がないことから（ここでは BDM-3 からの少量の生産は無視している）油水界面は当初の位置のままと推定される。

図16 油層圧力の変遷

- (7) 新解釈 (図15) に基づき物質収支を計算すると、BDNM, BDM 各油田の生産減退曲線を将来に延長した究極累計生産量は、BDNM 油田ではチャンネル 2, 3 (+Lower Batanga 層) の原始埋蔵量の、BDM 油田ではチャンネル 4, 5 の原始埋蔵量の、それぞれ45~50%に相当する。この値は本地域のBatanga 層の標準的な回収率と一致する。
- (8) チャンネル1の油が実質的に未回収であると考え、その可採埋蔵量は BDNM 油田あるいは BDM 油田の累計生産量に匹敵する量となる。これはほかの坑井と同じ岩石物理学的パラメータを仮定した場合であり、上述のごとくチャンネル1では更に良好な砂層が予想されることから、より大きな埋蔵量と生産性が期待できる。

上記の解釈結果に基づき三菱石開はオペレーターの Elf にチャンネル1への試掘井を提案し、最終的に Elf もこれに同意した。この試掘井は既存プラットフォームからの傾斜井 BDNM-8 として、各図の星印の位置に掘削された。この位置ではチャンネル1の中で上部砂岩層の発達は見えないが (図13b)、下部砂岩層が特に発達していると考えられること (図9d, 13c)、および鞍部の中では構造的に最も高いことから選択された。

6. 掘削結果

この試掘井 (BDNM-8) は1999年末~2000年初めに掘削され、その結果、次の事実が明らかになった (層厚は垂直に換算してある)。

- (1) Batanga 層上面は、掘削前の予想深度よりわずかに5m 浅く出現した。これは、震探解釈における同層上面のピッキングと深度変換に用いた速度モデルの信頼性の高さを示しており、Batanga 層上面の構造図 (図4) の精度は高いと判断される。
- (2) Batanga 層の上部約55m は泥質で、1~2m の層厚の砂岩層が数枚認められるのみであった (図17)。この層準に相当する図9a, bで、本坑井位置には強振幅は認められず、この位置はチャンネル1上部の流路から外れており (図13b)、この薄い砂岩層は流路からあふれ出たクレバススプレイ (crevasse splay) 砂と解釈される。
- (3) Batanga 層の中部約40m は砂岩層が発達し、有効層厚比 (Net Gross Ratio : 孔隙率12%で cut off) は90%近くに達した。最上部を除くと砂岩層の平均孔隙率は約30%で、BDNM, BDM 両油田のどの坑井で確認された砂岩層をも上回る極めて良好な貯留層性状を示している (図17)。本砂岩層はチャンネル1下部の砂岩層と解釈されるが、図10で

図17 新試掘井 (BDNM-8) 結果

本坑井位置には極めて強い振幅が認められており、定性的には振幅と貯留層性状の相関が示唆される。本砂岩層は大局的には上方細粒化を示していると解釈されるが、コアが採取されておらず、高傾斜井でディップメーターの信頼性も落ちることから、詳細な岩石学的検討は行っていない。

- (4) Batanga 層の下部約50m は泥質で、1~2m の砂岩層が数枚認められるのみである。この部分は Lower Batanga 層と解釈され、チャンネル2とチャンネル4の間の泥質部に相当し (図13d)、地震探鉱記録での強振幅は認められない (図9e, f)。
- (5) 上部および中部の砂岩層は油を胚胎していた。本論では、この新たに発見された油田をボードロアセントラル (BDCM) 油田と仮称する。本坑井での油水界面は BDNM, BDM 両油田の当初の油水界面と完全に一致した。すなわち、BDCM 油田は、油の移動集積の過程では BDNM, BDM 両油田と同一システム内にあったと考えられるが、両油田の生産には BDM-3 を除くと全く寄与しておらず、チャンネル1の中の油が手つかずのまま残されていること

図18 現在の集油域（星印は新試掘井 BDNM-8 の位置）

になる（図14, 15, 18）。

- (6) 本坑井の油層圧力は BDNM, BDM 両油田の当初圧力に比して約45 bar 低下していた（図16）。これは BDCM 油田が、おそらく水層部分を通して、BDNM, BDM 両油田と導通していることを示しているが（図14）、圧力減退が両油田に比して5～10 bar 少ないことは、圧力的に完全には平衡に達していないものと思われる。

上記のごとく、本井の掘削結果は事前の予想とほぼ完全に一致しており、筆者らの研究手法の有効性とそれに基づく解釈の妥当性を裏づけるものであった。

7. おわりに

掘削結果に基づく BDCM 油田の埋蔵量評価は現在進行中であり、追加生産井の掘削も検討されている。高傾斜井や水平井の採用により、少数の坑井数により効率よく採油することが検討されているが、あと2～3坑の追加生産井が必要となろう。今回は、チャンネル1下部の強振幅かつ鞍部の中では構造的に最も高い位置に試掘が行われたが、振幅と砂岩層の発達の間関が確かめられ、構造図の信頼性と当初のままの油水界面が確認されたことから、今後の追加生産井ではチャンネル1上部に砂岩層の発達する位置や、複数のチャンネル流路を串刺しにする水平井の掘削が検討されている。

図19 生産実績と予測

図19に BDNM, BDM 両油田の生産実績と、これに BDCM 油田を加えた将来の生産予測を示した。ガボン沖北部浅海では1990年以降新油田の発見はなく、もはや探鉱ポテンシャルは残されていないと考えられていた。また三菱石開の保有する油田群も生産末期に入り、その余命は数年と見られていた。今回の筆者らの研究とそれに基づく試掘結果は、こうした探鉱熟成地域でも、新手法を適用し、これを地質学的・油層工学的知見と合わせて解釈することにより、新油田の発見に導くことが可能なことを示したものと言える。

謝 辞

本研究は、三菱石油開発株式会社技術一部（当時）において、小玉則雄、小倉 勇両氏の指導のもとに、工藤和男、松尾和明、加藤亮一、中川善之の各氏の協力を得て行われたものである。また、同社社長（当時）阪田清氏は、本研究に基づく試掘の実現に向けて Elf Gabon 社および Elf 本社を説得して下さい。本論の公表を許可して下さい三菱石油開発株式会社および Elf Gabon 社、ならびにこれらの諸氏に感謝する。

SI 単位換算係数

$$\begin{aligned} \text{bbl} \times 1.589874 & \quad \text{E-01} = \text{m}^3 \\ \text{bar} \times 1.0^* & \quad \text{E+05} = \text{Pa} \end{aligned}$$

* は正確な値

【追 記】

新試掘井 BDNM-8 は生産井に転換されたが、現在1坑のみで BDNM, BDM 両油田の全坑井の合計生産量を上回る日産量で生産を行っている。

引用文献

Da Costa, J. L., Schirmer, T. W. and Laws, B. R., 2000:

- Lower Congo Basin, deepwater exploration province, offshore West Africa. *Proceeding of the Second Wallace E. Pratt Memorial Conference "Petroleum Province of the 21st Century"*. AAPG.
- Haq, B. U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987: Chronology of fluctuating sea level since the Triassic. *Science*, **235**, 1156-1167.
- 石井基裕, 1983: 西アフリカガボン沖で発見した油田について. 石技誌, **48** (2), 160-170.
- 川上 亨, 1987: ガボン共和国ボードロアマリン鉱区における白亜系砂岩について. 石技誌, **52** (1), 70-77.
- Kidd, G., 1999: Fundamentals of 3-D seismic volume visualization. *The Leading Edge*, **18**, 702-712.
- 大澤 理・朝倉繁明・吉野昭浩・芦田 譲・松岡俊文・渡辺俊樹, 1999: 三次元可視化技術の地震探査データ解釈への応用. 物理探査, **52** (6), 499-504.
- Teisserenc, P. and Villemain, J., 1990: Sedimentary basin of Gabon - Geology and oil systems. In Edwards, J. D. and Santogrossi, P. A., ed.: *Divergent/Passive Margin basins*, AAPG Memoir **48**, 117-199.
- Tissot, B., Demaison, G., Masson, P., Delteil, J. R. and Combaz, A., 1980: Paleoenvironment and petroleum potential of Middle Cretaceous black shales in Atlantic basins. *AAPG Bull.*, **64** (11), 2051-2063.
- Vidal, J., 1980: Geology of Grondin Field. In Halbouty, M. T., ed.: *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1968-1978*, AAPG Memoir **30**, 577-590.