報 告

ブラジルカンポス堆積盆地の石油システム評価*

佐々木 哲**・岩崎 哲治***・井口 義朗****・大野 尚樹*****

(Received November 9, 2006 ; accepted January 12, 2007)

Petroleum system of Campos Basin, Brazil

Satoshi Sasaki, Tetsuharu Iwasaki, Yoshiro Iguchi and Naoki Ohno

Abstract : The Campos Basin, offshore Brazil, is a typical passive margin basin in the western South Atlantic, and the most prolific basin with about forty producing fields including deep-water giant fields. The Campos Basin is currently responsible for more than 80% of Brazilian oil production.

The hydrocarbon accumulations are distributed throughout the stratigraphic column of the basin from Neocomian to Miocene. The most important oil accumulations in the basin are associated with deep-water fans distributed in the stratigraphic column from Cenomanian to Miocene. Almost all the hydrocarbon accumulations discovered to date are sourced mainly from Barremian to early Aptian lacustrine shales of the Lagoa Feia Formation in the pre-salt sequence. The oil pooled in the post-salt sequence migrated through a system associated with pre-salt normal faults, "salt windows" in the Aptian evaporite, listric faults and regional unconformities.

The play fairway map was made based on considering the basement and the salt development, the fault distributions and the kitchen area. This map presented that the Campos Basin was divided into five structural zones. These zones could be closely related to the hydrocarbon potential. It was evaluated that the eastern part of Zone I and Zone IIa along the present day shelf edge provided more favorable condition for the hydrocarbon accumulation than other zones. The oil of Marlim Sul field is trapped in the blanket turbidites that pinch out toward the northwest landward. The thick mud deposits derived from the muddy turbidites was considered to be the important factor for establishing the stratigraphic trap.

Key words : Brazil, Campos Basin, petroleum system, passive margin basin, turbidite, listric fault

1. はじめに

ブラジルのカンポス堆積盆地は、大西洋沿岸に発達す

* 平成 18 年 5 月 31 日, 平成 18 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「大水深 (deep water) の探鉱と開発」で講演 This paper was presented at the 2006 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Exploration and exploitation in deep water" held in Sendai, Japan, on May 31, 2006.

** (財) 石油開発情報センター Information Center for Petroleum Exploration and Production

*** (財) 石油開発情報センター, 現在 ベネズエラ石油㈱ Teikoku Oil (Venezuela) Co., LTD

**** (財) 石油開発情報センター, 現在 (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

***** (財) 石油開発情報センター, 現在 石油資源開発㈱ Japan Petroleum Exploration Co., LTD

る典型的な安定縁辺堆積盆地 (passive margin basin) であり, 水深 200 m 以深において多数の大規模油・ガス田が発見されているブラジルの代表的な堆積盆地である (図 1)。

同堆積盆地は, ブラジル南東部のリオデジャネイロ州の主として大西洋沖合に位置し, 南にはサントス堆積盆地, 北にはエスピートサント堆積盆地が存在し, 約 10 万 km² の面積を有する。

ブラジルの 2005 年の原油生産量は 168 万 bbl/d であり, そのうち 83% はカンポス堆積盆地から生産されている。

本報告は, 財団法人石油開発情報センターが石油公団 (現独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構) から受託した調査事業, 平成 13 年度「ブラジル大水深域などの炭化水素ポテンシャル評価フェーズ 2」および平成 14 年度「ブラジルカンポス堆積盆地の石油システム

評価」を基に取りまとめたものである。

本報告においては、前半部（第2章から第4章）では既存文献などに基づきカンボス堆積盆地の石油システムについて概説し、後半部（第5章と第6章）ではオリジナルデータに基づいた石油システム評価について論じる。

特に後半部の石油システム評価では、カンボス堆積盆地内の基盤形態、海底地形、岩塩層の構造形態やリトリック正断層の分布から構造区分帯を行い、それを基に作成したフェアウェイマップから石油地質学的特徴や石油システムの成立条件について言及する。また、三次元地震探査データを加えて解析した、同堆積盆地の主要な貯留岩となっているタービダイト砂岩の堆積モデルおよび分布についても考察する。

2. カンポス堆積盆地の油・ガス田概況

2.1 探鉱活動

カンボス堆積盆地の海域での探鉱活動は、1970年代に開始された。1974年に同盆地海域において、最初の

商業油田であるガロウバ油田 (Garoupa) が発見されて以降、次々に油・ガス田が発見されてきている (図 2)。1980 年代半ばからは、より水深の深い方へ探鉱活動が移行し、それにつれて巨大油田が発見されることになる。1984 年には、水深 290 m においてアルバコラ油田 (Albacora) の発見があり、翌 85 年にはブラジルで最大規模の埋蔵量を誇るマリム油・ガス田 (Marlim) の発見があり、同油田は水深 400–1,100 m に広がる。その後も水深 200–1,200 m の大水深域で活発な探鉱が実施され、1996 年にはマリム油・ガス田とならび巨大油田であるホンカドル油・ガス田 (Roncador) の発見につながる。

同堆積盆地におけるこれまでの発見可採埋蔵量は、原油換算で約 230 億バーレルと考えられている。

2.2 油・ガス田概況

カンボス堆積盆地において、これまでに発見されたフィールドは約100あり、このうち現在約40フィールドで原油・ガスの生産活動が実施されている。

カンボス堆積盆地において、原油可採埋蔵量が5億

パーレルを超える油田は、これまでに9フィールド発見されている。特に、このなかでもビッグスリーといわれている油田が、マリム油・ガス田、南マリム油・ガス田 (Marlim Sul) およびホンカドル油・ガス田であり、いずれもこれまでの原油発見可採埋蔵量は20億パーレル以上である。主要油・ガス田は、水深200m以深かつ離岸距離100km以上の大陸棚斜面に位置しており、水深2,000m以深まで広がっている油・ガス田も存在する。生産原油の比重は、比較的重質であり、現在最大の生産量を誇るマリム油・ガス田 (2005年平均生産量約46万bbl/d) の原油比重は20° API前後である。

3. カンボス堆積盆地の地質概説

3.1 地質層序

カンボス堆積盆地の地質層序は、堆積盆地の形成段階を反映して、先カンブリア系と推定される花崗岩類などからなる基盤の上に、下位よりシンリフト期 (syn-rift)、ポストリフト期 (post-rift)、ドリフト期 (drift) の堆積物が累重する (図3)。

(1) シンリフト期堆積物

シンリフト期の堆積物は、白亜紀前期 Neocomian から Aptian にかけての南アメリカとアフリカの分裂によって形成されたリフト帯の堆積物を主体とし、下位より Cabiunas 層、下部-上部 Lagoa Feia 層から構成される。

最下部層の Cabiunas 層は、Neocomian 前期のリフト活動の初期に噴出した玄武岩類である。

Cabiunas 層の上位には不整合で重なる Lagoa Feia 層が分布する。Lagoa Feia 層は、リフト活動の活発な時期に堆積した下部層と、不整合を挟みリフト活動が穏やかとなり広域的な盆状沈降の場となったサグ (sag) の時期に堆積した上部層から構成される。特にリフト活動の活発期に堆積した Lagoa Feia 層の下部層は、湖沼成環境で堆積した有機物に富んだ頁岩や珪質岩類を含んでおり、これらは本堆積盆地における優秀な根源岩となっている。

(2) ポストリフト期堆積物

ポストリフト期は、リフト帯が形成された後、大西洋拡大に伴うドリフト期へ移行するまでの Aptian 後期から Albian までの期間に相当する。ポストリフト期の堆

図3 カンボス堆積盆地の地質層序表 (IHS Energy, 2006 を修正)

積物は下位より、限定的な海の侵入により形成された岩塩を主体とした蒸発岩類から成る Aptian の Lagoa Feia 層の最上部層である Petiro 部層、その上位に海進による浅海環境下で堆積した粗粒碎屑岩類や炭酸塩岩を主体とする Albian の Macae 層の下部・中部層より成る。

(3) ドリフト期堆積物

ドリフト期は、Cenomanian 以降の大西洋拡大に伴い地殻の熱収縮や堆積物の自荷重圧による沈降を受けた安定縁辺堆積盆地が形成された時期であり、海成堆積物が広く発達した。ドリフト期の堆積物は下位より Albian 後期 - Turonian の上部 Macae 層、白亜紀後期 Senonian 以降の Campos 層群 Carapebus 層などから成る。

白亜紀後期 Cenomanian から暁新世前期にかけて堆積環境は、半深海 (bathyal) から深海 (abyssal) となり、主として遠洋性堆積物から成る頁岩やタービダイト成堆積物などが発達した。

暁新世後期以降は、堆積物の北西から南東へ向かってのプログラデーションにより深海から半深海、浅海へと移行し、おおむね遠洋性から浅海性の堆積様式に変化した。始新世後期から漸新世前期にかけては相対的に海水準が上昇し、タービダイトの堆積は大陸斜面に限られるようになり、層厚 30-100 m の薄板状のタービダイトが堆積した。漸新世後期には後背地の隆起と相対的な海水準の低下が起こり海底谷を形成し、漸新世以降はチャンネル充填型のタービダイトやロウブ (lobe) 型のタービダイトが発達した。始新世以降の堆積盆地西縁部では次第にデルタ成碎屑岩が卓越するようになり、局所的な浅海部分では炭酸塩岩が発達した。

3.2 地質構造

カンボス堆積盆地の構造運動は、白亜紀前期 Neocomian の南アメリカとアフリカの分裂に伴うリフトの形成に始まり、その後 Aptian の盆状沈降活動を経て、Cenomanian 以降は大西洋の拡大に伴う安定縁辺堆積盆地の形成へとつながる。安定縁辺堆積盆地形成期には、岩塩テクトニクスも構造形成に加わってくる。

引張応力により形成されたリフト帯は、堆積盆地内で海岸線と平行に伸びるカンボス断層 (Campos Fault) の東に認められる。リフト帯は、北北東-南南西方向の軸を持つ地溝・地塁から構成されている。

現在の大陸棚外縁部から大陸斜面にかけて岩塩ドーム (salt dome) や岩塩ダイアピル (salt diapir) による褶曲が発達する (Mohriak *et al.*, 1995)。これらの岩塩テクトニクスは、Albian-Cenomanian に始まり、海進によって上位層の Macae 層の堆積が進むにつれて、また堆積盆地全体が東へ傾動したことにより、岩塩の流動が起きたと推定される。

また、岩塩の流動や更なる堆積盆地の傾動により岩塩層をデタッチメントとしたリストリック正断層が発達し、上位の Macae 層炭酸塩岩では正断層の発達やラフト (raft; 正断層により完全に分断されたブロック) が形成され、同炭酸塩岩はローテーションやスライドを引き起こしている。さらに、Macae 層より上位の層準ではリストリック正断層に伴ったロールオーバー構造による背斜構造が形成されトラップへと発展している (Guardado *et al.*, 1990)。Macae 層炭酸塩岩の正断層は、おおむね現在の大陸棚縁辺地域で発達し、ラフトおよび大規模なリストリック正断層は、現在の大陸棚斜面で発達している。

4. カンボス堆積盆地の石油システム

カンボス堆積盆地においては、大陸地殻が沖合まで広がり、シンリフト期の良好な根源岩の発達、白亜系・第三系のタービダイト砂岩の発達、岩塩運動による構造の形成、マイグレーションパスとしての断層の発達など、巨大油・ガス田の成立条件を備えている。

4.1 根源岩

カンボス堆積盆地の主要根源岩は、プレソルト (pre-salt) の Neocomian-Aptian の Lagoa Feia 層湖沼成石灰質黒色頁岩である。特に Lagoa Feia 層の下部層が堆積した Neocomian 前・中期には、活発なリフト活動による水深の深い湖沼が形成され、これらの湖沼の貧酸素環境下で有機物に富んだ頁岩や珪質岩類が堆積し、質・量ともに優れた性状を有する根源岩が発達した。根源岩性状等については、ケロジェンタイプ I, TOC 2-9%, HI 300-900 mg/gTOC, 炭化水素生成能力 7-50 kgHC/tRock, 根源岩層厚 50-1,000 m (平均 200 m) と優れた根源岩能力を有している。

炭化水素の生成・移動は、中新世に開始され、現在まで継続していると考えられている (Mohriak *et al.*, 1990; Mello *et al.*, 1994)。

Lagoa Feia 層以外にもポストソルト (post-salt) の Macae 層や Campos 層群の泥質岩において、根源岩ポテンシャルが認められている。しかしながら、これらの層準は盆地の大部分の地域で未熟成であることおよびこれらの層準を根源岩起源とする油の発見がないことから、本堆積盆地の根源岩は、プレソルトの Lagoa Feia 層と考えられている。

4.2 貯留岩

カンボス堆積盆地の主要貯留岩は、上部白亜系から中新統にかけて堆積した Campos 層群タービダイト成砂岩である。このほかにもプレソルトの Cabunas 層玄武岩のフラクチャーおよび Lagoa Feia 層のコキナ、またボス

トソルトの Macae 層のプラットフォーム炭酸塩岩も貯留層として確認されている。

同盆地における原油・ガス埋蔵量の9割以上がタービダイト成砂岩において発見されており、タービダイト成砂岩貯留層を時代別に見ると、6割強が第三系、4割弱が白亜系貯留層に胚胎している。Campos 層群タービダイト成砂岩について、孔隙率は20–30%、浸透率は1,000 md 以上を示すものが多く、層厚も100 mに達するものもある。

Macae 層プラットフォーム炭酸塩岩は、基底部ではバックストーンからなり、上方に向かってグレインストーンへと漸移し良好な貯留岩性状を有する。グレインストーンで孔隙率33%、浸透率1,000–4,000 mdを示す。沖合いに向かうにつれ細粒化・泥質化し貯留岩性状は低下する。

4.3 帽岩

プレソルトの貯留岩に対してはLagoa Feia 層の泥質岩やPetiro 部層の蒸発岩が帽岩となっている。ポストソルトでは、上部Macae 層の泥質岩が下位の炭酸塩岩貯留岩に対する帽岩となり、Campos 層群のタービダイト成砂岩貯留岩は同層中の頁岩が帽岩となっている。

4.4 炭化水素の移動・集積 (図4)

下部Lagoa Feia 層の根源岩からプレソルトの貯留岩への炭化水素の移動は、主としてリフト帯を形成している正断層が移動経路と考えられる。また、ポストソルトの貯留岩へは、炭化水素がPetiro 部層の蒸発岩類を通過する必要がある。炭化水素が蒸発岩類を移動通過するためには、蒸発岩類をデタッチメントとしたリストリック正断層の発達、上位層で形成された海底谷による蒸発岩類の削剥または蒸発岩類の流動などによって蒸発岩類そのものが薄くなった部分や欠如した部分のいわゆる「ソ

トウィンドウ (salt window)」の存在が重要である。このソルトウィンドウにおいて、Lagoa Feia 層のリフト帯の正断層と、主としてポストソルトの貯留層へとつながるリストリック正断層の両者の断層がキャリアベッドないしは不整合などを通じて接することで下部Lagoa Feia 層に分布する根源岩から上方への炭化水素の移動がより促進されたものと考えられている (Guardado *et al.*, 1990; Mello *et al.*, 1994)。

4.5 プレイタイプ

カンボス堆積盆地における油・ガス田のプレイタイプとしては、プレソルトおよびポストソルトのいずれの層準でも確認されているが、プレソルトの油・ガス田は現在の大陸棚上に位置し限定的かつ小規模であり、主要なプレイタイプはポストソルトのタービダイト成砂岩を貯留層とするものである。

(1) Cabiunas 層玄武岩フラクチャープレイ (プレソルト・プレイ)

バデジョ油田 (Badejo) のみで玄武岩の構造的高まり (Badejo High) におけるオープンフラクチャーに炭化水素が集積している。

(2) Lagoa Feia 層コキナプレイ (プレソルト・プレイ)

これまで確認されているコキナは、現在の大陸棚の地域でバデジョ、リンガド (Linguado)、パンボ油田 (Pampo) 周辺やその北東方などの堆積盆地内に散見的に分布している。コキナは南北方向の正断層で区切れ東へ向かって単斜構造を呈し、南北方向へは岩相変化しピンチアウトしていく。

(3) Macae 層プラットフォーム炭酸塩岩プレイ (ポストソルト・プレイ)

白亜紀前期末における、主として岩塩テクトニクスによる構造的高まりの上に発達した炭酸塩岩を貯留岩

図4 カンボス堆積盆地の地質断面図概略図と炭化水素移動経路 (Guardado *et al.*, 1990 と Mello *et al.*, 1994 を基に作成)

とするもので、炭酸塩岩は現在の大陸斜面を中心に北東－南西方向に30–50 kmの幅で分布する。トラップ形態は、南北方向のロールオーバー構造を主体とするもので4-way クロージャーを呈するものもあるが、炭酸塩岩の岩相変化や続成作用による性状変化によって層位封鎖トラップの要素もある。本プレイタイプの例としては、ガロウパ、パンボなどの油・ガス田がある。

(4) 上部白亜系から新第三系中新統にかけてのタービダイト成砂岩プレイ（ポストソルト・プレイ）

上部白亜系より上位の堆積物は、東方ないしは南東方へのプログラデーションにより堆積し、現在の大陸棚から大陸棚斜面、さらには半深海に至る地域でタービダイト砂岩が分布する。トラップタイプとしては、タービダイト成砂岩のせん滅による層位封鎖トラップが主体であるが、断層トラップやロールオーバー背斜構造、さらに岩塩ドームによるドレープ構造もトラップとなる。カンボス堆積盆地において発見されているほとんどの大規模油・ガス田は、このプレイタイプに属する。

5. フェアウェイと石油地質学的考察

石油システムのポテンシャル評価（第5章と第6章）においては、上述の石油システムの概念にオリジナルデータ、すなわち二次元地震探鉱データ約17,885 km、坑井データ31坑および三次元地震探鉱データ約3,631 km²などを加えて解析した。

まず初めに、二次元地震探鉱データによる地質構造解釈を行い、時間構造図、アイソクロン図を作成し、キッチンエリアを検討し、さらに堆積盆地の構造区分帯を重ね合わせることでフェアウェイマップを作成した（図5、図6）。

5.1 キッチンエリア

Lagoa Feia 層の根源岩は、リフト帯における地溝部に分布していると考えられる。特に、シンリフト期堆積物が厚く分布する地溝域において、優秀な根源岩を夾在する Lagoa Feia 層の下部層が発達する可能性がある。また、根源岩の熟成度の検討結果（Mohriak *et al.*, 1990；Mello *et al.*, 1994）を参考にして、現在の油の熟成域およびガスの熟成域を推定し、これらを考慮してキッチンエリアと考えた。

5.2 南北の構造系列区分帯

基盤の構造形態や海底地形の特徴、重磁力データなどから南北の構造系列区分がなされ、北より北部地域（North Area）、中央地域（Central Area）、南部地域（South Area）と区分された。

中央地域は、海底地形の特徴から大陸棚が大きく南東方へ張り出すとともに、大陸地殻や海洋地殻の境界線や、後述の岩塩ダイアピルの異なる構造形態から系列区分される区分線も同様に南東方へ張り出す地域である。特に中央地域の大陸棚では、北部地域、南部地域と比べて基盤の地溝に伴ったキッチンエリアが大きく広がり、多くの油・ガス田が成立している。地塁などの伸びの終息するポイントなどを考慮して中央地域と北部地域、南部地域の境界とした。

5.3 東西の構造系列区分帯

東西の構造系列区分については、リストリック正断層の規模、岩塩層の分布形態、Macae 層炭酸塩岩の構造形態および古第三系層準の構造形態などを考慮して設定された。構造系列区分帯について西側から説明する。

(1) I 帯

東落ちの落差の大きい大規模なリストリック正断層が、現在の大陸棚縁辺～大陸棚斜面の地域を中心に発

図5 カンボス堆積盆地のフェアウェイ系列区分模式断面図

は 800 ms 以上にも成る。古第三系層準では、岩塩ダイアピル構造に関連する構造を形成している。

(5) III 帯

岩塩壁 (salt wall) 地域であり、岩塩の層厚が 1,500 ms 以上の岩塩壁が顕著に発達する地域。特に北部地域で広く分布する。

5.4 フェアウェイマップの石油地質学的考察

I 帯東部および IIa 帯において、Outer High などの基盤が高まりを形成しているところでは伸張場を生み、特に IIa 帯では東方への地殻の傾動も重なって岩塩層をデタッチメントとした大規模なリストリック正断層が発達する。この結果、上位の Macae 層炭酸塩岩で大規模なラフトが形成され、さらに上位層準のタービダイト成砂岩貯留岩が発達する Campos 層群では、このリストリック正断層の西側で地塁構造や傾動地塊によるトラップが形成され、東側ではロールオーバー背斜構造が発達し、大規模なトラップが形成されている。

また、このリストリック正断層は岩塩層にソルトウィンドウを形成する場合もあり、Lagoa Feia 層根源岩から大規模埋蔵量を有する Campos 層群のタービダイト成砂岩貯留岩まで炭化水素のマイグレーションパスとして重要な役割を果たしている。

タービダイト成砂岩の堆積環境を考えると、I 帯は海底谷を埋めるタイプ、IIa 帯では海底扇状地が卓越し、より沖合いの他の区分帯と比較しても大規模な貯留層を形成しやすいと考えられる。

以上から、I 帯東部および IIa 帯においては多くの油・

ガス田が成立しており、これは炭化水素がキッチンエリアからソルトウィンドウおよびリストリック正断層をパスとしてタービダイト成砂岩貯留岩が発達する上位層準の地塁構造や傾動地塊およびロールオーバー背斜構造のトラップへと移動・集積する石油システムが形成されており、油・ガス田の成立条件が満たされている区分帯と考えられる。

一方、IIb 帯、IIc 帯は、I 帯東部および IIa 帯と比べて岩塩ダイアピルの発達が著しく、岩塩層が厚層化し、またリストリック正断層の発達も減少することから、ソルトウィンドウの存在がさらに重要となる。また、タービダイト成砂岩の分布についても、タービディティカレントが岩塩枕や岩塩ダイアピルによって形成された構造間のトラフ部を流れてくる必要があり、砂岩の分布は複雑となる。また、厚い岩塩層の影響により地震探鉱データからは岩塩層以深の Lagoa Feia 層の分布が明確に把握できないことから、根源岩の分布のリスクも高くなる。

III 帯に関しては、さらに岩塩層が岩塩壁を形成することから、炭化水素の移動や貯留岩の分布、根源岩の分布リスクがさらに高いものと考えられる。

6. タービダイトの堆積モデルと貯留岩分布予測

6.1 タービダイトの堆積モデル (第三系漸新統一下部中新統中部)

カンポス堆積盆地の漸新統タービダイト (下部中新統の一部を含む) の広域的な堆積モデル (図 7) としては、

図 7 漸新統一下部中新統中部タービダイトの堆積モデル

大陸棚外縁部から大陸斜面にかけて厚い泥質岩が堆積し、その前面部にマリム油・ガス田などの貯留岩となる砂岩が堆積している。Line A は図 9 の断面位置を示す。

古河川（古カンボス川）により形成されたデルタを後背地とし、第3オーダーのシーケンスサイクルごとに低海水準期初期から中期にかけて古海底谷などの形成とそこを流れるタービディティカレントによって、陸棚から陸棚縁辺や陸棚斜面上に再運搬された粗粒物質を含むタービダイト成砕屑物が堆積したものと考えられる。その後の低海水準期中期から海進期にかけては陸棚斜面から陸棚縁辺にかけて比較的厚い泥質タービダイトの広範囲にわたる堆積がなされ、さらに一部の地域ではその後の高海水準期にも泥質堆積物の運搬がなされていたと推定される。このように、カンボス堆積盆地の漸新統から下部中新統にかけてのタービダイトの特徴としては、タービダイト成砂岩が分布する地域の陸側地域で泥質タービダイトの厚い堆積物が分布していることであり（図8、図

9）、この厚い泥質岩の存在が層位封鎖トラップの形成の大きな要因となったと考えられる。

マリム、東マリム（Marlim Leste）、南マリムの油・ガス田群地域のタービダイト成砂岩の分布位置は、後背地から約90～100 km、陸棚の幅は比較的狭く約30 km、陸棚縁辺からは約40～60 kmにあたる。

6.2 漸新統タービダイト砂岩の分布

カンボス堆積盆地の代表的貯留層である漸新統の砂岩体について、坑井データに基づくシーケンス層序学的解析を行った結果、多くの砂岩体は、シーケンスサイクルの低海水準期堆積体もしくは海進期堆積体に属し、砂岩体の堆積は第3オーダーのシーケンスサイクルの海水準変動に連動して堆積したものと解釈された。

南マリム油・ガス田は、低海水準期堆積体に属する最

図8 上部漸新統一下部中新統中部のアイソクロンと古環境図

二次元地震探査データに基づき、古河川、古海底谷の位置を推定し、またアイソクロンを作成した。さらに、微化石データから古環境を推定した。Line Aは図9の断面位置を示す。

図9 漸新統一下部中新統中部の堆積モデル模式断面図

断面位置は図7と図8に示す。坑井データからシーケンス層序学に基づいた地層区分、時代区分、古環境解析、坑井間対比を実施した。南マリム油・ガス田の砂岩貯留層は、厚い泥質岩体の前面（沖合い側）に堆積した。

図10 マリム油田群における漸新統層準の振幅異常分布

三次元地震探鉱データに基づき構造解釈と振幅異常解析を実施した。振幅異常解析により各油・ガス田には砂岩優勢の複数のチャンネルとファン・ロウプから構成された砂岩層の存在が推定された。

下部漸新統に分布する上部半深海 (upper bathyal) の砂岩体と上部漸新統の上部－中部半深海の砂岩体を主要油層としており、南マリム油・ガス田の油層となっている砂岩層は漸新世の長い期間にわたってサイクル的に形成されたタービダイト成砂岩の複合体から構成されていると考えられる。

また、マリム、東マリム、南マリムの大規模な油・ガス田が存在する地域に対して、三次元地震探査データを用いた VoxelGeo 解析を実施し、漸新統の砂岩層に対応すると考えられる振幅異常（ここでは正の振幅値）の広がりをも面的に抽出した（図 10）。その結果、漸新統の振幅異常は 3 箇所認められ、これらが上記 3 油・ガス田に相当し、振幅異常の広がりが油・ガス田の輪郭形態を表現していることが確認された。

7. ま と め

カンボス堆積盆地の石油システムについて次のようにまとめられる。

- (1) カンボス堆積盆地の主要根源岩としては、プレソルトの Lagoa Feia 層湖沼成石灰質頁岩であり、これまでポストソルトの根源岩から生成されたと考えられる原油の発見は認められていない。
- (2) 主要貯留層は上部白亜系から第三系にかけてのタービダイト成砂岩であり、これまでの発見可採埋蔵量の 90% 以上を占める。
- (3) プレソルトの根源岩で生成された原油が、ポストソルトの貯留層へ移動・集積するためには、その間に存在する岩塩層を通過する必要があるが、その際にリストリック正断層あるいはソルトウィンドウの存在が重要である。
- (4) 上記の要素を踏まえた石油システムを考えた場合、カンボス堆積盆地のプレイ・フェアウェイの I 帯東部から IIa 帯にかけての地域が油・ガス田成立条件上優位にあり、それより東の IIb 帯、IIc 帯、III 帯においては、根源岩の分布、炭化水素の移動および貯留岩の分布においてリスクが高くなる。
- (5) カンボス堆積盆地における代表的油・ガス田である南マリム油・ガス田の貯留層である漸新統のタービダイト成砂岩は、漸新世の海水準変動に影響されてサイクル的に上部－中部半深海の環境下に堆積した砂岩の複合体を形成している。また、タービダイト成砂岩の分布地域より陸側の陸棚斜面から陸棚縁辺にかけては、比較的厚い泥質層が堆

積しており、この泥質岩の存在が層位封鎖トラップの形成の大きな要因となったと考えられる。

謝 辞

本稿は、(財)石油開発情報センターが石油公団から受託した平成 13 年度および平成 14 年度の調査事業を基に取りまとめたものであり、その公表を許可していただいた独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（旧石油公団）に感謝の意を表します。

さらに、石油技術協会地質・探鉱部門シンポジウムにおいて発表の機会を与えていただいたシンポジウム世話人の方々には、この場を借りて深くお礼申しあげたい。

SI 単位換算係数

$$\text{bbl} \times 1.589874 \quad \text{E} - 01 = \text{m}^3$$

$$\text{darcy} \times 9.86923 \quad \text{E} - 13 = \text{m}^2$$

引 用 文 献

- Guardado, L.R., Gamboa, L.P.A. and Lucchesi, C.F., 1990 : Petroleum geology of the Campos Basin, Brazil, a model for a producing Atlantic type basin. In Edwards, J.D. and Santogrossi, P.A. eds. : *Divergent/passive margin basins*. AAPG Memoir 48, 3–80.
- IHS Energy, 2006 : Basin Monitor, Campos Basin, Brazil, South Atlantic Ocean Region.
- Mello, M.R., Koutsoukos, A.M., Mohriak, W.U. and Bacocoli, G., 1994 : Selected petroleum systems in Brazil. In Magoon, L.B. and Dow, G. eds. : *The petroleum system – from source to trap*. AAPG Memoir 60, 499–512.
- Mohriak, W.U., Mello, M.R., Dewey, J.F. and Maxwell, J.R., 1990 : Petroleum Geology of the Campos Basin, offshore Brazil. In Brooks, J. ed. : *Classic petroleum provinces*. Geological Society of London, Special Publication, 50, 119–141.
- Mohriak, W.U., Macedo, J.M., Castellani, R.T., Rangel, H.D., Barros, A.Z.N., Latege, M.A.L., Ricci, J.A., Mizusaki, A.M.P., Szatmari, P., Demercian, L.S., Rizzo, J.G. and Aires, J.R., 1995 : Salt tectonics and structural styles in the deep-water province of the Cabo Frio Region, Rio de Janeiro, Brazil. In Jackson, M.P.A., Roberts, D.G. and Snelson, S. eds. : *Salt tectonics : A global perspective*, AAPG Memoir 65, 274–304.