論 文

静岡県掛川－相良油田地域における古～新第三系前弧堆積盆地の 根源岩と石油システム*

上田 広和**・三瓶 良和**・日浦 祐樹***・石橋 正敏****

(Received February 6, 2007 : accepted May 17, 2007)

**Source rock and petroleum system of the Paleogene – Neogene forearc basin
in the Kakegawa-Sagara oil field, Shizuoka Prefecture, central Japan**

Hirokazu Ueda, Yoshikazu Sampei, Yuki Hiura and Masatoshi Ishibashi

Abstract : Oil fields occur in the Sagara district of Shizuoka Prefecture, despite the disadvantageous geological conditions of a fore-arc setting. We investigated the petroleum system of this fore-arc basin in southern Shizuoka Prefecture based on hydrocarbon compositions of oils, source rock potential, organic matter type, and burial history of the Paleogene to Neogene sediments. Argillaceous rock samples from the MITI-Omaezakioki well and from outcrops in the Kakegawa and Sagara districts were analyzed for geochemical properties by CHNS elemental analyzer, Rock-Eval pyrolysis, and GC/MS.

Various maturity parameters in the Sagara oils indicate differing maturity levels, ranging up to the condensate zone. The range in maturity parameters is wider in the northwest flank of the Megami anticlinorium than in the southwest flank. The upper layers of the Lower Miocene Towata Formation and the lower layers of the Lower Miocene Matsuba Formation have relatively high potential for hydrocarbon generation (up to TOC=0.9 wt%, S_2 =2.8mg/g and HI=350mg/gC). The highest-potential layer of the Matsuba Formation was probably deposited in a highly productive marine environment during deposition of siliceous clastic sediments. No equivalent high-potential layers were identified in the MITI-Omaezakioki well, suggesting that the organic-rich layer formed only in the northern part of the basin. In the Eocene-Oligocene Mikura Group, layers relatively rich in TOC (up to 0.7 wt% in over-matured black shale) were observed in the Kakegawa area and also in the MITI-Omaezakioki well. According to epimerization of sterane and hopane isomers, thermal gradient was higher in the northern part of the basin than in the south. In both areas the Kurami Group only reached medium-light oil zone, whereas the Mikura Group reached the condensate zone. The thermal structure of the basin thus changed significantly between the Paleogene and Neogene.

On the basis of basin modeling simulation of the MITI-Sagara well, medium-light oils (R_o =0.7-1.0%) were generated in the Mikura Group at ca. 29 Ma and 15 Ma, and condensates (R_o =1.2%) at ca. 2 Ma. The Kurami Group generated medium-light oils (R_o =0.7-1.0%) at ca. 15 Ma and 2 Ma. Therefore, the ca. 2 Ma condensates from the Mikura Group migrated and were contaminated by oils from the Kurami Group and bitumens from the upper reservoir layers (e.g. Sagara Group).

Key words : fore-arc basin, Sagara oil, Kurami Group, Mikura Group, source rock, petroleum system

* 平成 18 年 8 月 4 日, 第 24 回日本有機地球化学会シンポジウム「2006 年 松本シンポジウム」で一部講演 This paper was partly presented at the 24th symposium of Japanese Association of Organic Geochemists in Matsumoto, August. 4, 2006.

** 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学専攻 Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University

*** 株式会社アイピーシー TIBC Corporation

**** ジャパンエナジー石油開発株式会社 Japan Energy Development Co.,Ltd

1. はじめに

前弧域では、海洋底が酸化的になりやすいため有機物が分解されやすく、また、地殻熱流量の低いプレート沈み込み帯上に位置するため、一般に石油鉱床の成立は難しいと考えられてきた (例えば、林, 1992; 鈴木・角井, 1995)。我が国においては、静岡県御前崎地域前弧海盆系に相良油田が胚胎しているが (猪間, 1982; 杉山ら, 1988), その石油システム (奥井, 2005b) は必ずし

も明らかになっていない。

相良油田は明治初期から開発され軽質油を生産してきたが、総産油量は約4,600klと少なく(猪間, 1982), 新潟・秋田地域と比較して鉱床規模が小さいことで特徴付けられる。相良油田近辺では、昭和46年度の基礎物理探査「東海」をはじめとして陸域・遠州灘海域を対象とした物理探査が実施され(猪間・佐々木, 1979), 昭和58年に基礎試錐「御前崎沖」および昭和63年に「相良」が掘削されたが、新たな鉱床は確認されていない。根源岩層については、猪間(1982)が漸新統から鮮新統までの地表露頭を対象に検討を行い、上部中新統相良層群、下部中新統倉真層群松葉層および漸新統大井川層群蓬萊層で炭化水素ポテンシャルが高いとした。また、加藤(1992)は、基礎試錐「御前崎沖」および「相良」の結果から、根源岩層として下部中新統倉真層群と古第三系三倉層群の可能性が高いことを示唆したが、ステランに基づく原油の熟成度が軽質油にしては低すぎるという矛盾も指摘した。

近年、南海トラフに胚胎するメタンハイドレートとその起源に対象が広がり、平成12年に基礎試錐「南海トラフ」が掘削されたが、ハイドレート中のメタンは主にメタン生成菌起源であり、下部からの熱分解ガスの寄与は解明されなかった(石油公団, 2000)。さらに、平成14年には前弧域での炭素循環と地下微生物による有機物の分解・合成を明らかにするため、「相良掘削計画(Sagara Drilling Program: SDP)」によって旧相良町菅ヶ谷で200.6mの掘削が行われた(Kitazato *et al.*, 2006)。その結果から、Yessalina *et al.* (2006)は、メチルナフタレン指標に基づく原油の熟成度はビトリナイト反射率換算で0.9～1.2%と高く、この高熟成原油が移動した際に低熟成のステラン・トリテルパンおよびオレアネンを取り込んだことを指摘した。また、Kato *et al.* (2006)は、原油の安定炭素同位体比が $-24.3 \sim -25.2\%$ と軽い値を取りステラン組成が C_{28} に乏しいことなどから、根源岩は古第三系である可能性を示した。

本論文では、以上の既報成果を踏まえて、相良原油および静岡県掛川地域に分布する始新統～中部中新統前弧海盆堆積物の泥質岩と、基礎試錐のコア・カッティングス試料を用いて有機地化学的分析を行い、堆積盆一次元シミュレーションを加えて、相良油田前弧海盆地域の石油システムについて議論した。

2. 地質概要

2.1 相良油田の概要

相良油田は、相良地域を南西-北東方向に伸びる女神背斜翼部の上部中新統相良層群時ヶ谷層の砂岩・泥岩互層を貯留層としており、油層深度は150～250mと浅

い(猪間, 1982, 図1, 2)。また、油層が女神背斜軸部ではないことから断層トラップと考えられている(猪間, 1982; 加藤, 1992)。

相良油田以外での油ガス徴は、女神背斜周辺の下部中新統女神層および相良層群内で数箇所認められ、旧相良町以外にも掛川市北部の下部中新統新在家凝灰岩や島田市南部の湯日・坂部の相良層群中でも油ガス徴が報告されている(猪間, 1982)。また、基礎試錐「相良」によって女神背斜と平行した浜松背斜の存在が確認されたほか、その南西延長上の御前崎沖においても複数の独立した背斜構造が確認されており、規模は小さいながらも複数の油・ガス鉱床の可能性が指摘されている(加藤, 1992)。

2.2 静岡県南部古第三系～下部中新統前弧堆積盆地の岩層層序

掛川-相良地域には古第三系～新第三系前弧堆積盆地が分布している(Ibaraki, 1986; 杉山ら, 1988; 杉山・下川, 1990, 図1, 4)。新第三系は累算して7,000mにおよび多くの地質学的、古生物学的な研究が進められてきた(Ibaraki, 1986; 土, 1988)。また石油公団(1984, 1989, 2000)によれば、地表で確認される古～新第三系

図1 静岡県南部の地質と調査地域

杉山ら(1988)をもとに作成。

凡例: 1. 四十万帯 2. 三倉層群 3. 瀬戸川層群 4. 大井川層群 5. 高草山層群 6. 倉真・西郷層群 7. 相良層群 8. 掛川層群 9. 小笠層群 10. 段丘堆積層 11. 完新統

A: 調査対象地域(掛川地域) B: 原油試料採取地域(相良地域)

図2 掛川地域の地質

古第三系～下部中新統付加体堆積物：1. 滝沢層，2. 天徳寺層； 古第三系前弧海盆堆積物：3. 伊久美層，4. 神尾層，5. 童子沢層；下部～中部中新統前弧海盆堆積物：6. 天方層，7. 戸綿層，8. 松葉層，9. 新在家凝灰岩層，10. 西郷層；鮮新統前弧海盆堆積物：11. 掛川層群。

三倉層群は加藤ら（1991）をもとに作成。瀬戸川層群，倉真・西郷層群および掛川層群は Ibaraki *et al.*（1983）および Osozawa（1988）をもとに作成。

調査ルート：1. 県道原里・森線 2. 林道折立線 3. 林道真砂奥山線 4. 林道西山線 5. 県道赤石・金谷線 6. 県道金谷線 7. 大代川沿い林道

図3 相良油田周辺の地質と原油採取場所

地質図は国土地理院2万5千分の1地形図「相良」の一部を使用し，本研究における地質調査を基に作成。

地質図凡例：1. 異地性石灰岩 2. 女神層 3. 時ヶ谷砂岩シルト岩互層 4. 相良砂岩シルト岩互層（地層名は Ibaraki（1986）に基づく）

原油試料採取地点：A. 大知ヶ谷油田の里公園油井 B. 新田（富田松蔵氏所有坑井） C. 県道バイパス西山寺（1991年トンネル工事中の油徴） D. 寺川原（油溜），SDP（Sagara Drilling Program）：Kitazato *et al.*（2006）

前弧海盆堆積物が南方海域に連続していることが明らかになっている（図5）。

2.2.1 三倉層群

中期始新世～漸新世の前弧海盆堆積物と考えられている（加藤ら，1991）。主に黒色頁岩，緑色凝灰質頁岩および砂岩優勢の砂岩・泥岩互層からなり，層厚は4,000 mに達する（杉山・下川，1990）。化石の産出が稀であるため

図4 掛川－相良地域における前弧海盆堆積層の層序

Ibaraki（1986）をもとに作成し本調査結果（特に三倉層群）を加筆した。

図5 始新統～中新統前弧堆積盆地における御前崎海域と掛川地域調査ルートとの層序対比

各基礎試錐の層序は石油公団（1984，1989，2000）による。図右の番号は図2の調査ルート名と層準を表す。

層序関係は不明な点が多く，地層名は必ずしも統一されていないが，黒色頁岩層は伊久美層，砂岩優勢砂泥互層は神尾層とされている（Matsumoto，1966；加藤ら，1991）。

2.2.2 倉真層群

下部中新統倉真層群は，下位から天方層，戸綿層，松葉層に分けられる（Ibaraki *et al.*，1983）。天方層は，淘汰

の悪い円礫層を基底として三倉層群を傾斜不整合で覆い、上位では塊状無層理の細〜中粒砂岩・砂質シルト岩に変化する。戸綿層は主に塊状無層理シルト岩からなるが、上松葉〜真砂地域において細粒砂岩・シルト岩の互層が観察され、Ibaraki *et al.* (1983) によって東道砂岩シルト岩互層と命名されている。その上位 50 ~ 100 m では漸移的に珪質化して堅硬な珪質シルト岩の松葉層となる。下部では数 cm ~ 20 cm 程度のガラス質凝灰岩が複数挟まれているほか、炭酸塩ノジュールが認められる。Ibaraki *et al.* (1983) による浮遊性有孔虫を用いた検討から、戸綿層下部は Blow の N.6、松葉層は N.7 ~ 8 に相当し、一連の堆積物は約 16 ~ 19Ma に堆積したとされている。

2.2.3 西郷層群

下部〜中部中新統西郷層群は、主にやや軟質の塊状暗灰色泥岩からなる。東部では新在家緑色凝灰岩（斉藤, 1960）が分布しており、泥岩層とは指交関係となっている。浮遊性有孔虫から Blow の N.8 帯に属するとされる（Ibaraki *et al.*, 1983）、約 16Ma の堆積物とされている。

3. 試料と分析方法

3.1 泥質岩試料

地表試料は、始〜漸新統三倉層群、下部中新統倉真・西郷層群がほぼ連続して分布している静岡県掛川地域（掛川市北部）において、露頭の連続性が良い県道原里・森線、林道折立線、林道真砂奥山線、林道西山線、県道赤石・金谷線、大代川沿い林道の 7 ルート（図 2）について地質調査と泥質岩試料採取を行い、三倉層群 8 試料、倉真層群 68 試料および西郷層群 16 試料の計 92 試料を用いた。基礎試錐「御前崎沖」では、泥質岩のコア・カッティングス試料を用い、A 層（三倉層群）11 試料（うちコア 3 試料）、B₁ 層（倉真層群）22 試料（うちコア 3 試料）、B₂ 層（西郷層群）11 試料（うちコア 1 試料）の計 44 試料を用いた。基礎試錐「南海トラフ」では、A 層（三倉層群）4 試料、C・B 層（倉真層群）3 試料の計 7 試料（コア試料）を用いた。

3.2 原油試料

原油試料は、旧相良町の 4 地点から採取した（図 3）。原油 A は油田の里公園の油井から（2004 年 11 月 25 日採取）、原油 B はその北東約 300 m の富田松夫氏所有の畑にある坑井から（2001 年 5 月 6 日採取）、C は旧相良町沢木バイパス西山寺のトンネル工事時の油染み出し現場から（1991 年 6 月 6 日に採取され保管されていたもの）、D は旧相良町寺川原の雑木林沢沿い地表の油溜（「石油の発見地、深谷の油田」の看板の前）から（2004 年 11 月 26 日採取）、それぞれ採取した。

油井試料の原油 A・B はいずれも透明性の高い橙〜褐色を呈し、原油 C はやや濃い褐色、原油 D は暗緑色を帯びた濃い褐色を呈する。

3.3 分析方法

泥質岩試料は乾燥後、ジョークラッシャー・自動メノウ乳鉢を用いて 200 メッシュサイズ以下に粉末化し、CHNS 元素分析（FISONS E.A.1108）・Rock-Eval 分析（Rock-Eval2）に供した。また、粉末試料約 30g をジクロロメタン/メタノール混合溶媒（9/1, v/v）を用いてソックスレー管により 3 日間ビチューメンの抽出を行った。抽出液は薄層クロマトグラフィー（TLC）によって飽和脂肪族炭化水素、多環芳香族炭化水素、レジン・アスファルテンに分離した。GC/MS 分析には島津製作所製 QP-2010 を使用した。GC カラムには Agilent Technologies 製 DB-5MS（内径 0.25 mm、膜厚 0.25 μ m、長さ 30 m）を使用し、気化室温度は 250°C、GC オーブンの昇温条件として 50°C 5 分間保持、8°C/min で 300°C まで昇温後 30 分間定温とした。キャリアガスには高純度ヘリウムを用い、気化室ガス圧力 100.1Kpa、全流量 41.6ml/min、カラム流量 1.69ml/min、パージ流量 6.0ml/min、圧力一定の条件下で分析を行った。MS 部では EI 法でイオン化電圧を 70eV とし、イオン源温度を 250°C、全イオンスキャンモード（m/z=50-850）と SIM モードを同時平行して測定を行った。

原油試料は分離せず、ヘキサンで 1,000 倍に希釈してそのまま GC/MS 分析に用いた。

4. 相良原油の特徴

n-アルカンは *n*-C₁₅ 以下の低分子に富んでいるが、*n*-C₂₅ 以上の陸上高等植物ワックス分も検出されている（図 6）。ただし、原油 D では iso-アルカンが卓越して *n*-アルカンがほとんど検出されず、微生物分解が進んでいることを示す。Pr/Ph 比は 3.3 ~ 4.7 と高く、オレアナン/ホバン比（Oleanane/C₃₀ hopane）も 0.7 ~ 1.2 と高い（図 6, 7, 表 1）。また、原油 A・B と原油 C・D には明らかな違いが見られ、Pr/Ph 比とオレアナン/ホバン比はいずれも前者の方が高い。CPI は原油 A・B では約 1.3、原油 C では 1.17 であり、同様に前者がやや高い。

熟成度指標についても、C₂₉ ステラン 20S/(20S+20R) 比と MPI3（Methylphenanthrene index 3 : Radke, 1987）において原油 A・B と原油 C・D で異なる値を示し、前者は未熟成〜石油生成帯初期の値を示すが、後者は石油生成帯中期の熟成度値を示す（MPI3 をビトリナイト反射率（Ro）に換算すれば、原油 A・B と原油 C・D はそれぞれ約 0.4% と 0.7-0.8% となる：表 2）。一方、TNR-2（Trimethylnaphthalene ratio 2 : Radke *et al.*, 1994）は、Ro

図6 相良原油の TIC マスクロマトグラム

換算値で約 0.8-0.9% と高く 4 つの原油で同程度の値を示し、さらに MNR (Methylnaphthalene ratio; Radke *et al.*, 1984) では Ro 換算値で約 1.2% となり、4 つの原油で一致している (表 2)。すなわち、これらの原油中には、異なる熟成度を示す有機分子指標が複数存在し、かつ低熟成度を示す指標では地域差が大きいことになる。

熟成度指標として用いたこれらの C_{29} ステラン, MP, TN および MN の分子量はそれぞれ $M=400, 192, 170, 142$ であり、分子量が大きくなるにつれて低い熟成度を示している。原油 A・B・C・D がいずれも軽質であること (図 6) を併せて考えれば、この分子量との関係は、

表 1 相良原油のバイオマーカー等分析結果

※・は検出されず。

相良原油							
Sample	CPI ¹⁾	Pr/Ph ²⁾	Pr/n- C_{17}	Ph/n- C_{18}	Ts/(Ts+Tm) ³⁾	Oleanane/ C_{30} hopane ⁴⁾	Homohopane Index ⁵⁾
oil A	1.30	4.31	1.02	0.48	0.56	1.10	-
oil B	1.26	4.77	1.20	0.45	0.54	1.09	-
oil C	1.17	3.34	0.78	0.35	0.67	0.77	0.083
oil D	-	3.51	6.18	5.27	0.64	0.74	0.066

1) CPI (carbon preference index) = $\{(\sum n-C_{25} \sim C_{33} \text{ (奇数)}) / (\sum n-C_{24} \sim C_{32} \text{ (偶数)}) + (\sum n-C_{25} \sim C_{33} \text{ (奇数)}) / (\sum n-C_{26} \sim C_{34} \text{ (偶数)})\} / 2$
 熟成とともに 1 に近づくが、陸源有機物の影響が大きい場合高くなる (Tegelaar *et al.*, 1989)。

2) Pr/Ph: 1 > 還元的环境, 3 < 陸源有機物の供給がある酸化的環境 (Peters *et al.*, 2005)。

3) Ts/(Ts + Tm): Ts が Tm より安定なため熟成とともに増加するが、堆積環境・起源有機物にも影響を受ける (Moldowan *et al.*, 1986; Peters *et al.*, 2005)。

4) Ole/ C_{30} Hop: オレアナンは被子植物相対量を表すが、熟成とともに増加する (Ekweozor and Telnaes, 1990)。

5) Homohopane Index: $C_{35}/(C_{31} \sim C_{35})$ homohopanes; 還元的环境で高くなる (Peters and Moldowan, 1991; Peters *et al.*, 2005)。

※ Pr: Pristane Ph: Phytane Ts: 18 α (H)-22, 29, 30-trisnorhopane Tm: 17 α (H)-22, 29, 30-trisnorhopane

Oleanane: 18 α (H)-oleanane C_{30} hopane: 17 α (H), 21 β (H)- C_{30} hopane

図 7 相良原油の $m/z = 191$ マスクロマトグラム

高分子炭化水素ほど原油移動途中の取り込みなどの影響が強いことを示しているものと考えられる。熟成度の高い原油ではステラン・ホパンなどの分子量の大きいものはもとの存在量が少ないため、取り込みなどによるコンタミネーションの影響が大きく表れるものと考えられる。さらに、原油 A・B においては、オレアナンの前駆体であるオレアネなどの未熟成有機分子が確認されたこと (図 7) から、原油 A・B 地点においては、貯留層相良層群等の未熟成層におけるコンタミネーションの影響が原油 C・D 地点よりも大きかったことを示唆する。

相良原油の移動および貯留層におけるオレアネや熟成度の低いステランなどのコンタミネーションについては、すでに Yessalina *et al.* (2006) が指摘しており、分子量の大きな C_{29} ステランはコンタミネーションの影響を

表 2 相良原油の熟成度パラメーターとその Ro (ビトリナイト反射率) 換算値

※・はデータの記載なし (Yessalina *et al.*, 2006)。

This study

Sample	C ₂₀ Sterane 20S/(20S+20R)	MPI3 ¹⁾	TNR-2 ²⁾	MNR ³⁾	Ro (MPI3)	Ro (TNR-2)	Ro (MNR)
oil A	0.24	0.82	0.73	2.11	0.35	0.84	1.18
oil B	0.26	0.86	0.70	2.12	0.38	0.82	1.18
oil C	0.44	1.35	0.79	1.94	0.77	0.88	1.15
oil D	0.53	1.30	0.67	1.95	0.72	0.80	1.15

Yessalina *et al.* 2006

Seep oil from SDP	C ₂₀ Sterane 20S/(20S+20R)	MPI3	TNR-2	MNR	Ro (MPI3)	Ro (TNR-2)	Ro (MNR)
SDP20208	0.28	-	0.76	2.26	-	0.86	1.20
SDP20207	0.27	-	-	1.79	-	-	1.12
SDP202071	0.27	-	0.75	1.95	-	0.85	1.15
SDP20204	0.22	-	0.82	2.28	-	0.89	1.21

1) MPI3 = (2MP+3MP)/(1MP+4MP+9MP) Ro=0.79MPI3-0.3 (Sampei *et al.*, 1994)2) TNR-2 = (1,3,7-TMN+2,3,6-TMN)/(1,3,5-TMN+1,3,6-TMN+1,4,6-TMN) Ro=0.6TNR-2+0.4 (Radke *et al.*, 1994)3) MNR=2MN/1MN Ro=0.18MNR+0.8 (Radke *et al.*, 1984)

※ MN: methylnaphthalene TMN: trimethylnaphthalene MP: methylphenanthrene

受けやすく、分子量の小さなナフタレン異性体の熟成度がこの原油の本来の熟成度を示すとしている。Yessalina *et al.* (2006) の原油 4 試料の採取地は本研究の原油 B の採取地点と同一地点であり、C₂₀ ステラン 20S/(20S+20R) 比、TNR-2、MNR のいずれの熟成度も本研究とほぼ一致している (表 2)。また、Yessalina *et al.* (2006) は、相良原油の本来の熟成度は Ro にして 1.2% のコンデンセートに近い高熟成であったことを示唆しているが、本分析結果はこれを支持する。このことは、API 比重から見ても相良原油が 39～50° のコンデンセート性状を示すとする Kato *et al.* (2006) の見解と一致している。本研究では、さらに異なる複数地点の原油を追加検討したことにより、女神背斜の北西翼部に産する原油 A・B は、同背斜の南東翼部に産する原油 C・D よりも、コンタミ

ネーションの影響が大きかったことが示された。コンタミネーションの起源については、泥質岩試料との比較により以下に議論する。

5. 始新統～中部中新統前弧堆積盆地 質岩の有機地化学的特徴

5.1 根源岩ポテンシャル

掛川地域および基礎試錐「御前崎沖」の古～新第三系全層準を通して、全有機炭素 (TOC) 濃度は、1.0% を超える泥質岩がなく 0.3～0.6% が大部分を占めている (表 3、図 8)。また、S₂ は 1.0mgHC/gRock を下回るものが多く全般に根源岩能力は低い (表 3)、良好な根源岩の目安である 2.0mgHC/gRock (Peters and Moldowan, 1993) を上回る層準が一層準存在することが明らかに

表 3 泥質岩の TOC およびロックエバル分析結果

※上段は分析値の平均値、下段は値の範囲、() 内は分析試料数。

掛川地域

層準	Tmax (°C)	S ₁ (mgHC/gRock)	S ₂ (mgHC/gRock)	TOC (%)	HI (mgHC/gTOC)	PI (S ₁ /(S ₁ +S ₂))	S ₁ +S ₂ (mgHC/gRock)
西郷層群	435 428-438 (6)	0.05 0.04-0.06 (6)	0.21 0.12-0.42 (6)	0.32 0.18-0.40 (15)	63 39-110 (6)	0.20 0.11-0.31 (6)	0.26 0.16-0.47 (6)
倉真層群松葉層	436 427-442 (27)	0.10 0.04-0.47 (27)	0.59 0.04-2.83 (27)	0.42 0.10-0.91 (49)	119 36-350 (27)	0.18 0.09-0.48 (27)	0.69 0.17-3.30 (27)
倉真層群戸綿層	440 430-466 (17)	0.09 0.06-0.14 (17)	0.64 0.19-1.61 (17)	0.52 0.37-0.70 (25)	120 41-230 (17)	0.14 0.07-0.24 (17)	0.73 0.25-1.73 (17)
三倉層群	484 473-500 (6)	0.09 0.05-0.14 (9)	0.15 0.02-0.30 (9)	0.38 0.09-0.71 (9)	34 18-49 (9)	0.45 0.24-0.68 (9)	0.23 0.07-0.39 (9)

基礎試錐「御前崎沖」

層準	Tmax (°C)	S ₁ (mgHC/gRock)	S ₂ (mgHC/gRock)	TOC (%)	HI (mgHC/gTOC)	PI (S ₁ /(S ₁ +S ₂))	S ₁ +S ₂ (mgHC/gRock)
B ₂ (西郷層群)	425 422-429 (11)	0.12 0.09-0.18 (11)	0.82 0.54-0.98 (11)	0.61 0.53-0.69 (11)	137 78-163 (11)	0.13 0.11-0.18 (11)	0.94 0.65-1.12 (11)
B ₁ (倉真層群)	421 396-431 (22)	0.12 0.08-0.16 (22)	0.59 0.30-0.94 (22)	0.52 0.31-0.64 (22)	112 80-146 (22)	0.17 0.11-0.31 (22)	0.71 0.42-1.06 (22)
A (三倉層群)	456 443-468 (5)	0.07 0.05-0.10 (11)	0.14 0.02-0.38 (11)	0.24 0.11-0.50 (11)	53 14-88 (11)	0.42 0.21-0.72 (11)	0.21 0.08-0.48 (11)

図8 TOC, S_2 および T_{max} の層位変化
データはすべて本研究の分析による。

なった。掛川地域の倉真層群松葉層下部から戸綿層上部にかけて、 S_2 が最大で 2.83mgHC/gRock を示している (図8)。ここでは、TOC は $0.5 \sim 0.9\%$ とやや高く、また、HI が $200 \sim 350\text{ mgHC/gC}$ のピークを示す (図8, 10)。ただし対比される基礎試錐「御前崎沖」の B_1 層 (倉真層群) $2,500\text{m}$ 付近においては、 S_2 および HI がそれぞれ 0.95 mgHC/gRock および 150 mgHC/gC 程度までのわずかな増加として確認できるのみで、明瞭なピークは認められない (図8, 10)。このことは、倉真層群松葉層下部から戸綿層上部の根源岩ポテンシャルが、この前弧堆積盆地の北部において地域的に増加していたことを示している。

始～漸新統三倉層群では、掛川地域の伊久美層下部で TOC が 0.7% から 0.1% まで減少する傾向があり、基礎試錐「御前崎沖」の A 層 (三倉層群) でも 0.5% から 0.1% まで減少する同様の傾向が認められる (図8)。したがって、この変化はこの古第三系前弧堆積盆地の広域的な傾向を示すものと考えられる。三倉層群の HI 値は、掛川地域で $20 \sim 50\text{mgHC/gC}$ 、基礎試錐「御前崎沖」で $10 \sim 90\text{mgHC/gC}$ を示し、新第三系と比べて明らかに低い (図10)。しかし、 T_{max} および PI 値が高いことから (表3, 図8)、熟成によって HI 値が減少していると判断され、三倉層群の初期根源岩ポテンシャルを具体的に推定することは困難であった。ただし、三倉層群の下部で過熟成後の TOC が約 0.8% と高い値を示すことは、初生的にはやや高い根源岩ポテンシャルを有していたことを示唆する。

5.2 堆積環境

被子植物の寄与を示すオレアナン/ホバン比は、掛川地域では、倉真層群戸綿層中部で 1.5 と最も高く、上位の松葉層下部に向かって 0.2 程度まで減少する (表4, 図9, 10)。同区間では、HI 値は約 100mgHC/gC から 350mgHC/gC まで増加し、Pr/Ph 比は 1.2 から 4.0 程度まで増加している。酸化還元指標である Homohopane

Index (Peters and Moldowan, 1991) は 0.07 前後の相対的にやや高い値を示している。したがって、堆積環境は貧酸素的であり、被子植物の割合は減少するものの陸上高等植物の供給は増加し、それに伴って植物プランクトン生産も増加して、結果的に HI 値を増加させたものと考えられる。この HI 値の増加は、戸綿層から松葉層にかけて泥質岩が珪質岩化する層準とよく一致しているが、この珪質化は珪藻によるものではなく、火山性シリカの増大によるものと解釈されている (横山, 1963)。また、この時期 ($17 \sim 18\text{Ma}$) には気候が温暖化したことが知られている (棚井, 1991)。したがって、火山性砕屑物の供給が栄養塩を伴って起こり、温暖な気候下での日射量増加等の要因が加わり、前弧海盆陸側において基礎生産性が高まったものと考えられる。

しかしながら、HI 値の増大は松葉層下部に限られている。松葉層上部では Pr/Ph 比がさらに増加し Homohopane Index が減少していることから、陸上高等植物の供給が増加すると同時に海底が酸化的となって、海成有機物が分解されやすい環境に変化したものと考えられる。

この新第三系前弧堆積盆地の南部に位置する基礎試錐「御前崎沖」では、掛川地域と比較してオレアナン/ホバン比が $0.1 \sim 0.4$ と全般に低くなっており (表4, 図10)、被子植物の供給が総じて低かったことを示している。ただし、基礎試錐「御前崎沖」において掛川地域倉真層群と対比される深度 ($2,200 \sim 3,100\text{m}$) では、オレアナン/ホバン比が 0.4 までのブロードな高まりが掛川地域と同様に表れている。また、同深度の Pr/Ph 比は $0.2 \sim 0.6$ と低く、陸上高等植物の寄与は掛川地域と比べてわずかであって、HI 値の高まりも認められない。これらのことから、倉真層群の堆積環境は、前弧堆積盆地の陸側と太平洋側で地域差が大きかったものと考えられ、掛川地域の炭化水素高ポテンシャル層を形成させた地域は、栄養塩の供給が多い陸側海域に限られていたと推察され

表4 泥質岩のバイオマーカー等分析結果

※上段は分析値の平均値, 下段は値の範囲, () 内は分析試料数. - は検出されず。

掛川地域

Sample	CPI ¹⁾	Pr/Ph ²⁾	Pr/n-C ₁₇	Ph/n-C ₁₈	Ts/(Ts+Tm) ³⁾	Oleanane/ C ₃₀ hopane ⁴⁾	Homohopane index ⁵⁾
西郷層群	1.88 1.69-2.09 (5)	3.31 2.27-4.43 (5)	7.55 6.91-8.85 (5)	1.56 1.05-2.33 (5)	0.23 0.21-0.26 (5)	0.27 0.20-0.33 (5)	0.056 0.043-0.072 (5)
松葉層	1.57 1.19-2.07 (11)	3.91 0.86-9.25 (11)	8.28 3.21-15.20 (11)	1.74 1.00-2.95 (11)	0.23 0.07-0.35 (11)	0.46 0.18-0.97 (11)	0.064 0.038-0.098 (11)
戸綿層	1.47 1.18-1.79 (14)	3.03 0.80-6.22 (14)	6.94 3.32-17.68 (14)	1.70 0.65-4.00 (14)	0.39 0.27-0.51 (14)	0.82 0.30-1.59 (14)	0.072 0.044-0.101 (14)
三倉層群	1.13 1.08-1.19 (6)	3.22 0.80-5.58 (7)	0.64 0.39-0.83 (7)	0.18 0.14-0.21 (7)	0.69 0.59-0.80 (7)	0.33 0.00-0.72 (7)	-

基礎試錐「御前崎沖」

Sample	CPI	Pr/Ph	Pr/n-C ₁₇	Ph/n-C ₁₈	Ts/(Ts+Tm)	Oleanane/ C ₃₀ hopane	Homohopane index
B ₂ (西郷層群)	2.48 1.74-2.82 (7)	0.27 0.05-0.48 (6)	0.27 0.01-0.36 (6)	0.40 0.18-0.54 (6)	0.34 0.19-0.62 (7)	0.18 0.06-0.23 (7)	0.061 0.040-0.080 (7)
B ₁ (倉真層群)	1.75 1.25-2.57 (11)	0.50 0.07-1.63 (6)	0.45 0.27-0.65 (6)	0.41 0.21-0.58 (6)	0.37 0.29-0.46 (11)	0.25 0.10-0.44 (11)	0.079 0.062-0.107 (10)
A (三倉層群)	1.31 1.10-1.66 (6)	1.54 0.37-2.19 (3)	0.49 0.43-0.55 (3)	0.27 0.18-0.34 (3)	0.62 0.31-0.92 (6)	0.35 0.05-0.97 (6)	0.096 0.067-0.115 (5)

1)〜5) は表1を参照。

図9 掛川地域および基礎試錐「御前崎沖」の m/z=191 マスクロマトグラム

る。なお、石油公団 (1989) によれば、掛川地域と基礎試錐「御前崎沖」の中間に位置する基礎試錐「相良」では、倉真層群相当の B 層 (約 2,200 m) において S₂ が約 2.0 mgHC/gRock を示しており、他の層準と比較して根源岩ポテンシャルが高く、ケロジェンタイプ II-III とされている。この B 層は、掛川地域の松葉層下部に対比される可能性が高く、したがって掛川地域の高ポテンシャル層は、少なくとも掛川地域から基礎試錐「相良」周辺までの 30 km 程度は連続していたものと考えられる。

オレオナン/ホパン比と Pr/Ph 比の両指標で、相良原

油とはほぼ同じ値を示すのは、オレオナン/ホパン比が 1.0 前後、Pr/Ph 比が 4.0 前後を示す松葉層下部〜戸綿層上部であり、相良原油はこれらの層準において生成したか、または原油移動の際にこれらのバイオマーカーを取り込んだかのいずれかであることを意味する。

ステラン組成を示す三角ダイアグラム (図 11) によると、掛川地域の倉真層群では、下部中新統戸綿層で相対的に C₂₉ 成分に富む傾向があり陸源有機物の供給が多かったことを示唆している。これは同層でオレオナン/ホパン比が高いこと (図 10) と整合する。一方、基礎

図10 バイオマーカー古環境指標の層位変化
データはすべて本研究の分析による。

図11 相良原油と始新統～中新統前孤堆積盆地の
 C_{27} - C_{28} - C_{29} ステラン三角ダイアグラム
データは全て本研究の分析による。

試錐「御前崎沖」のB₁層（倉真層群）において、陸源有機物の影響の強いC₂₉ステランに富んだ領域にプロットされたものは下部層であり、戸綿層に対比されと考えられるが、それより上位についてはB₁層ではC₂₈とC₂₉がほぼ等量、B₂層（西郷層群）ではC₂₇とC₂₉がほぼ

等量となり、プランクトン起源の割合が高くなる。三倉層群では、掛川地域および基礎試錐「御前崎沖」ともに、C₂₉よりもC₂₇、もしくはC₂₈が優勢となっており、陸源有機物の影響は低い傾向となっている。また、相良原油は、C₂₉にやや富みC₂₈に乏しい域にプロットされるが（図11）、すでに述べたように特に原油A・Bのステランはコンタミネーションの影響を強く受けているものと考えられる。

5.3 熟成度

有機物起源指標であり熟成度指標でもあるTs/(Ts+Tm)比（Moldowan *et al.*, 1986; Peters *et al.*, 2005）と、熟成度指標であるC₂₉ステラン20S/(20S+20R)比との関係（図12）は全般に相関がよく、Ts/(Ts+Tm)比の変化が主に熟成度に拠っていることを示す。最も値が高い領域にプロットされたのは基礎試錐「御前崎沖」の三倉層群A層（3,160～3,500 m）であった。原油C・Dは三倉層群とほぼ同一の値の高い領域を占めるが（図12）、原油A・Bは倉真層群側の中間領域にプロットされる。図9, 10に示したオレオナン/ホパン比を併せて考えると、原油A・Bの図12上のプロット域は、三倉層群と戸綿層・松葉層の混合で説明できる。

掛川地域では、C₂₉ステラン20S/(20S+20R)比はばらつきがあるものの、倉真層群松葉層～戸綿層以深では0.2（Ro=0.5%に相当：坂田ら，1987；鈴木ら，1987）を超え熟成帯に入っており、MPI3値から換算したRo値でも同様な傾向を示している（図13）。倉真層群における最も高い熟成度は、MPI3によるRo換算値で0.75%である。三倉層群になるとC₂₉ステラン20S/(20S+20R)比は平衡値の0.54（Mackenzie and Mckenzie, 1983）付近でばらついており、MPI3によるRo換算値では1.3%以上を示している。

一方、基礎試錐「御前崎沖」では下部中新統のC₂₉ス

図 14 前弧堆積盆地のステラン-ホパン two kinetic parameters plots

Suzuki (1984), 鈴木 (1987) が新潟油田帯の高増温率を示した図に、本研究結果をプロット。
基礎試錐「南海トラフ」試料：A 層；3,000 m, 3,048 m, 3,050 m, 3,100 m。B 層；2,800 m, 2,900 m。C 層；2,200 m。

果を図 14 に示す。新第三系では、基礎試錐「御前崎沖」の下部～中部中新統 (B₁, B₂ 層) は低い増温率域にプロットされるが、基礎試錐「南海トラフ」の下部中新統 (B, C 層) の増温率はやや高く、また、掛川地域の下部～中部中新統 (西郷層群, 倉真層群) は東北地方日本海側新第三系と同程度の高い増温率を示す。古第三系では、三倉層群は、基礎試錐「御前崎沖」、基礎試錐「南海トラフ」および掛川地域のいずれにおいても高増温率のものが存在する。これらのことから、古第三紀にはこの堆積盆地全域において増温率が高かったが、新第三紀になると陸側で増温率が高く太平洋側で低い構造に変化したものと考えられる。

7. 石油生成・排出シミュレーション結果と石油システム

静岡南部前弧堆積盆地の石油生成・排出について、堆積盆地一次元シミュレータを用いた検討を行った (島根大学所有の Platte River 社 Basin MOD-1D を使用)。シミュレーションの対象は、基礎試錐「相良」近傍とした。

基礎試錐「相良」および基礎試錐「御前崎沖」では、現在の地温勾配が約 2.0°C/100 m と低く (石油公団, 1984, 1989), この値から算出される基礎試錐「相良」近傍の現在の地殻熱流量は約 0.83HFU (Heat Flow Unit) となる。また、前述した熱履歴に基づけば、基礎試錐「相良」近傍では古第三紀に増温率が高かったものと考えら

れる。したがって、この地域の最も単純な地殻熱流量モデルとして「古第三紀から現在にかけて、一定の割合で地殻熱流量が減少してきた」とし、基礎試錐「相良」の Ro 値を再現できる古第三紀の地殻熱流量を算出したところ、38Ma で 2.5HFU となった。

また、構造地質学的には、基礎試錐「相良」付近では逆断層によって古第三系 A 層以深に新第三系西郷層群相当層 (C 層) が出現しており (図 5), これは西郷層群堆積後の約 15Ma 頃に衝上したものと考えられている (石油公団, 1989)。C 層以深の情報は得られていないが、本シミュレーションではその下に下部中新統倉真層群および古第三系三倉層群が連続していることを仮定した。これらの条件によるシミュレーション結果を図 15 に示す。

図 15 では、C 層堆積直後の 15Ma に層厚 1,000 m 程度

図 15 基礎試錐「相良」近傍における堆積盆地一次元シミュレーション結果

シミュレーション条件

- Heat Flow : 38Ma の 2.5HFU から現在の 0.83HFU まで一定割合で減少。
- C 層 (西郷層群) 以深に倉真層群 (B₁'・B₂') と古第三系 (三倉層群相当) が連続していることを仮定。
- 衝上断層活動時期は C 層堆積直後 (15Ma : 石油公団, 1989)。
- 根源岩 : 古第三系三倉層群, TOC=0.8%, HI=200 (TypeIII) ; B₁'層 (倉真層群戸綿層), TOC=0.8%, HI=180 (TypeIII) ; B₂'層 (倉真層群松葉層), TOC=1.0%, HI=300 (TypeII)

図 16 基礎試錐「相良」近傍における炭化水素生成シミュレーション結果

a: 古第三系三倉層群, 約 28 Ma に $R_o = 0.7 \sim 1.0\%$ に達し最初の生成量ピーク (約 25 mg/gTOC)。約 15 Ma に衝上断層によって $R_o = 1.0\%$ 以上に上昇し 2 度目の生成量ピーク (約 22 mg/gTOC)。約 2 Ma に $R_o = 1.2\%$ となり 3 度目の小さな生成 (約 0.3 mg/gTOC)。
 b: B_2' 層 (戸綿層), 約 15 Ma に $R_o = 0.7\%$ となり生成量ピーク (約 42 mg/gTOC)。
 c: B_2' 層 (松葉層), 約 15 Ma に $R_o = 0.7\%$ となり生成量ピーク (約 35 mg/gTOC)。約 2 Ma に $R_o = 0.78\%$ となり 2 度目の生成 (約 10 mg/gTOC)。

の衝上体が急速に重なるために、衝上以前に $R_o = 0.7\%$ 程度であった古第三系三倉層群は $R_o = 1.0\%$ 以上に達する (図 15)。一方、新第三系倉真層群については B_2' 層下部以深でも $R_o = 0.7\%$ 程度である。炭化水素の生成・排出については、古第三系では、29Ma と 15Ma でピークとなり、新第三系 (倉真層群戸綿層および松葉層) では、15Ma と 2Ma でピークとなる (図 15, 16)。約 2Ma は、女神背斜および浜岡背斜の形成時期 (石油公団, 1989; 中森ら, 1991) とほぼ一致する。

これらのことと前述した原油・根源岩の熟成度実測値およびバイオマーカー分析結果を併せて考えれば、この地域の石油システムは次のように推察される (図 17)。すなわち、倉真層群と西郷層群が 18 ~ 16Ma の短期間に最大で 2,000 m 近く堆積し、約 15Ma には倉真層群松葉層よりも下部で石油の生成が生じた。しかし、相良層群がまだ堆積しておらず適当な貯留層・トラップ構造がなかったために鉱床は形成されなかった。その後、相良層群と掛川層群が厚く堆積したため、衝上断層以深の堆積物では熟成がさらに進行し、約 2Ma には、古第三系三倉層群で排出せずに残っていた原油が熱分解して、コンデンセートに近い軽質油が少量生成され (図 16 の a: 0.3mgHC/gTOC)、断層によって排出・移動した。この原油は、倉真層群松葉層で生成された原油を取り込んで断層中を移動し、現在の女神背斜の相良層群砂泥互層中にトラップされたために、倉真層群の特徴を反映し、その上位の堆積物からの未熟成有機物の影響も受けた原油になったと考えられる。移動途中のコンタミネーションの割合は女神背斜軸の北西翼部で大きかった。

現在、東アジアの始新統・中新統石油システムにおける主要な根源岩は石炭と考えられている (例えば、奥井,

図 17 静岡県南部前弧堆積盆地の石油システム概念図
 地質断面図は、杉山ら (1988)、杉山 (1995)、石油公団 (1989) をもとに作成。
 a: 約 15Ma, 衝上断層の形成。b: 現在 (~2Ma), 古第三系三倉層群でコンデンセートが排出され、下部中新統倉真層群から生成した原油および上位の未熟成有機物を取り込み移動。

2005a; 鈴木, 2005 など)。日本においても、北海道では石炭起源の石油鉱床が形成されているが、中部日本太平洋側に位置する相良地域では石炭は発達せず、以上の本研究結果から、陸源有機物を伴った海成有機物起源の石油システムが形成されたものと考えられる。

8. まとめ

相良原油の特徴、静岡県南部前弧堆積盆地の根源岩ポテンシャル・熟成度および石油システムに関して、以下のような知見が得られた。

- (1) 相良原油のうち女神背斜の北西翼部に産するものは、高熟成 (R_o 換算値で最大 1.2%) を示す芳香

族熟成度指標炭化水素に加え、新第三系倉真層群松葉層・戸綿層からの取り込みと考えられる低熟成度のステラン・ホパンおよびオレアナン等を含む。一方、同背斜の南東翼部に産するものは、ステラン・ホパンの熟成度は高く、芳香族炭化水素との熟成度差が小さい。原油中の各熟成度指標については、 C_{29} ステランのコンタミネーションの影響が大きく、さらにメチルフェナントレン、トリメチルナフタレンおよびメチルナフタレンの順に影響が小さくなる。

- (2) 倉真層群松葉層下部から戸綿層上部において根源岩ポテンシャルが相対的に高くなり、海成有機物の多い珪質シルト岩（最大 $TOC=0.9\%$ 、 $S_2=$ 約 $2.8mgHC/gRock$ 、 $HI=$ 約 $350mgHC/gC$ ）が掛川地域で確認されたが、基礎試錐「御前崎沖」では明瞭ではなかった。このことは、陸に近い北部地域ほど、基礎生産性の高い前期中新世の沿岸海洋環境を反映していたものと考えられる。古第三系三倉層群では、いずれも $S_2=$ 約 $0.4mgHC/gRock$ 、 $HI=$ 約 $100mgHC/gC$ 以下の低ポテンシャルを示すが、これは高熟成度を経験しているためである。
- (3) 下部中新統以浅の熟成度および増温率は、掛川地域で高く海域側で低い。掛川地域においては倉真層群・三倉層群ともに熟成しているが、海域側において熟成しているのは三倉層群以深である。さらに、コンデンセートを生成できるほどの高い熟成度（ $Ro>1.2\%$ 以上）をもつ倉真層群は両地域ともに確認されず、三倉層群のみであった。ただし、衝上断層で倉真層群の深度がさらに増加した地域があるとすれば、倉真層群（松葉層下部～戸綿層上部）が軽質油－コンデンセートを生成した可能性は残される。
- (4) 堆積盆地一次元シミュレーションに基づけば、始新世以降で顕著な石油生成・排出が起こったのは、29Ma および 15Ma（三倉層群を根源岩として原油生成）と 2Ma（三倉層群を根源岩として軽質油－コンデンセート生成、かつ倉真層群を根源岩として原油生成）である。
- (5) バイオマーカー等とシミュレーション結果を併せれば、相良原油の生成移動過程は次のように考えられる。すなわち、約 2Ma に三倉層群から生成排出された軽質油－コンデンセートが、断層等を移動する途中で倉真層群起源炭化水素を取り込んで相良層群中にトラップされた。

謝 辞

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構には、基礎試錐「御前崎沖」・「南海トラフ」のコア・カッティング試料を使用させていただき、また、基礎試錐「御前崎沖」・「相良」・「南海トラフ」の分析データの公表を許可していただいた。旧相良町石油の里、旧相良町菅ヶ谷の森田輝夫氏および旧相良町寺川原の大石英夫氏には原油の採取にご協力いただいた。掛川市教育委員会松浦成夫氏には地質調査の便宜を図っていただいた。帝国石油株式会社平井明夫氏には Basin MOD-1D の条件設定に関し有益な助言をいただいた。島根大学バリーローザ博士には英文要旨を読んでいただいた。2名の査読者からは有益なコメントをいただき、本論文は改善された。以上の方々に、心よりお礼申し上げます。なお、本研究には、平成 16-18 年度文部科学省科学研究費補助金「基盤研究 B：古～新第三紀における前縁海盆・付加帯系の有機物堆積濃集システムの解明（代表者：三瓶良和）」を使用した。

SI 単位換算係数

$$HFU \times 4.18605E-03 = mW/cm^2$$

引 用 文 献

- Ekweozor, C. M. and Telnaes, N., 1990: Oleanane parameter: Verification by quantitative study of the biomarker occurrence in sediments of the Niger delta. *Org. Geochem.*, **17**, 401-413.
- 林 雅雄, 1992: 石油鉱床. 佐々木昭・石原舜三・関陽太郎編: 岩波地球科学選書, 地球の資源 / 地表の開発, 143-151, 岩波書店.
- Ibaraki, M., Tsuchi, N. and Takayanagi, T., 1983: Early Neogene Planktonic Foraminiferal Biostratigraphy in the Kakegawa Area, the Pacific Coast of Central Japan. *Rep. Fac. Sci., Shizuoka Univ.*, **17**, 101-116.
- Ibaraki, M., 1986: Neogene Planktonic foraminiferal biostratigraphy in the Kakegawa Area on the Pacific Coast of Central Japan. *Rep. Fac. Sci., Shizuoka Univ.*, **20**, 39-173.
- 猪間明俊・佐々木栄一, 1979: 東海沖の堆積盆地の分布と性格. 石技誌, **44** (5), 40-46.
- 猪間明俊, 1982: 相良・掛川地域, 日本の石油・天然ガス資源. 246-276, 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会.
- 金子信行・坂田 将, 1992: 未熟成帯におけるバイオマーカーの組成変化-Reversal Maturation Trend の地質学的, 地球化学的解釈-. 石技誌, **57** (3), 243-252.
- 加藤 進・柴田 博・井上洋子, 1991: 大井川下流域の三倉層群の化石. 瑞浪市化石博物館研究報告, **17**, 53-65.
- 加藤 進, 1992: 御前崎地域の石油地質－フォアアークベースンでの炭化水素ポテンシャル-. 石技誌, **57**

- (1), 46–52.
- Kato, S., Waseda, A. and Nishita, H., 2006 : Geochemical characteristics of crude oils from the Sagara oil field, Shizuoka Prefecture, Japan., *Island Arc*, **15**, 304–312.
- Kitazato, H., Wada, H., Pickering, K. T. and Taira, A., 2006 : Thematic Section : Dynamic sedimentation in forearc basins : Results from the Choshi and Sagara drilling projects., *Island Arc*, **15**, 283–284.
- Mackenzie, A. S. and Mckenzie, D., 1983 : Isomerization and aromatization of hydrocarbons in sedimentary basins formed by extension., *Geol. Magazine*, **120**, 417–470.
- Matsumoto, E., 1966 : Geology of the Paleogene and Lower Neogene formations in the lower course of River Ooigawa, Shizuoka Prefecture, central Japan., *Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ., Ser. B*, **33**, 115–133.
- Moldowan, J.M., Sundararaman, P. and Schoell, M., 1986 : Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of SW-Germany., *Org. Geochem.*, **10**, 915–925.
- 横山次郎, 1963 : 掛川地方地質図説明書 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 29p.
- 中森 亨・井龍康文・笠沢教一・森 啓, 1991 : 静岡県掛川地域の中新統女神層に含まれる異地性石灰岩岩体の起源. 地質雑, **97** (12), 987–1000.
- 奥井明彦, 2005a : 東南アジア非海成 “Daul Petroleum Systems” の特徴. 石技誌, **70** (1), 91–100.
- 奥井明彦, 2005b : 石油システム. 石技誌, **70** (3), 265–274.
- Osozawa, S., 1988 : Accretionary process of the tertiary Setogawa and Mikasa groups, southwest Japan., *Journal of Geology*, **96**, 199–208.
- Peters, K. E. and Moldowan, J. M., 1991 : Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum., *Org. Geochem.*, **17**, 47–61.
- Peters, K. E. and Moldowan, J. M., 1993 : *The Biomarker Guide*., 363p, Prentice Hall, New Jersey.
- Peters, K. E., Walters, C. C. and Moldowan, J. M., 2005 : *The Biomarker Guide vol.2 - Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*., 1155p, Cambridge UNIV Press.
- Radke, M., Leythaeuser D. and Teichmuller M., 1984 : Relationship between rank and composition of aromatic hydrocarbons for coals of different origins., *Org. Geochem.*, **6**, 423–430.
- Radke, M., 1987 : Organic geochemistry of aromatic hydrocarbons., *In* Brooks, J. and Welte, D. H., eds. : *Advance in Petroleum Geochemistry 2*, 141–207. Academic Press, London.
- Radke, M., Rullkotter, J. and Vriend, S. P., 1994 : Distribution of naphthalenes in crude oils from the Java Sea : Source and maturation effects., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 3675–3689.
- 斉藤常正, 1960 : 静岡県島田・掛川市付近の第三系とその浮遊性有効虫化石群. 東北大地質古生物邦文報告, **51**, 1–45.
- 坂田 将・鈴木祐一郎・金子信行, 1987 : 長岡周辺新第三系ガス田の生物指標化合物. 石技誌, **52** (3), 221–230.
- Sampei, Y., Suzuki, N., Mori, K., Nakai, T. and Sekiguchi, K., 1994 : Methylphenanthrenes from the MITI Takada-heiya well and thermally altered Kusanagi shales by dolerite intrusion in Northeast Japan. *Geochemical Journal*, **28**, 317–331.
- 三瓶良和・鈴木徳行, 2005 : 有機分子の構造変化からみた堆積岩の熱履歴–速度論に基づく異性化の数値シミュレーション–. 地球科学, **59**, 175–183.
- 石油公団, 1984 : 昭和 58 年度基礎試錐「御前崎沖」地質検討会資料, 50p.
- 石油公団, 1989 : 昭和 63 年度基礎試錐「相良」地質検討会資料, 36p.
- 石油公団, 2000 : 平成 11 年度基礎試錐「南海トラフ」地質検討会資料, 111p.
- 杉山雄一・寒川 旭・下川浩一・水野清秀, 1988 : 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)「御前崎地域の地質」. 地質調査所, 153p.
- 杉山雄一・下川浩一, 1990 : 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)「清水地域の地質」. 地質調査所, 103p.
- 杉山雄一, 1995 : 赤石山地の瀬戸川帯北部の地質と瀬戸川付加体の形成過程. 地質調査月報, **46**, 177–214.
- Suzuki, N., 1984 : Estimation of maximum temperature of mud stone by two kinetic parameters; epimerization of sterane and hopane., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 2273–2282.
- 鈴木徳行, 1987 : バイオマーカー地質温度計による堆積岩の古地温評価. 堆積学研究会報, **27**, 241–253.
- 鈴木徳行・坂田 将・金子信行, 1987 : バイオマーカー組成からみた新潟堆積盆地新第三系原油, コンデンセート油の熟成度と一次移動の時期. 石技誌, **52** (6), 499–510.
- 鈴木徳行, 2005 : 「東アジアの新生代非海成層起源の石油・天然ガス」まとめ–石油システムと地球システムの接点–. 石技誌, **70** (1), 101–103.
- 鈴木祐一郎・角井朝昭, 1995 : グローバルテクトニクスに基づく堆積盆タイプ区分と東アジアの堆積盆. 地質ニュース, **487**, 17–25.
- 棚井敏雄, 1991 : 北半球における第三紀の気候変動と植生の変化. 地学雑誌, **100**, 951–966.
- Tegelaar, E.W., Mattenizing, R.M., Jensen, J.B.H., Horsfield, B. and de Leeuw, J.W., 1989 : Possible origin of n-alkanes in high-wax crude oils., *Nature*, **342**, 529–531.
- 土 隆一, 1988 : 掛川地域. 日本の地質「中部地方特」編集委員会編 : 日本の地質 4 中部地方 I, 108–113, 共立出版.
- Yessalina, S., Suzuki, N. and Saito, H., 2006 : Geochemical characteristics of Tertiary Sagara oil from an active forearc basin, Shizuoka, Japan., *Island Arc*, **15**, 292–303.