

東北日本新第三系石油根源岩の堆積と古海洋環境変動

山本正伸* 渡部芳夫* 渡辺真人*

Masanobu YAMAMOTO, Yoshio WATANABE and Mahito WATANABE (1999) Paleoclimatological controls on the deposition of Neogene petroleum source rocks, NE Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 50 (5/6), p. 361-376, 10 figs.

Abstract: Paleoclimatological reconstruction was conducted on the Middle Miocene-Pliocene Tohoku Trough where the petroleum source beds were deposited.

The decrease of dinosterane/sterane ratio at 10.5 Ma indicates that both diatoms and dinoflagellates were abundant during 12-10.5 Ma, and that diatoms became dominant after 10.5 Ma. This suggests that the supply of dissolved silica to surface water became to be constant after 10.5 Ma. High C_{27}/C_{29} sterane ratio during 9-5 Ma suggests the enhanced productivity. This presumably resulted from intensified local upwelling induced by increased wind stress. The bioturbation degree shows the gradual bottom water oxygenation during 10-6 Ma. This likely resulted from (1) the decreased inflow of Pacific OMZ water by the shallowing of sill depth or (2) the sinking of oxygen-rich water to the deeper part of basin. These suggest a drastic paleoenvironmental change at 9 Ma from the anoxic basin with highly stratified water column to the suboxic basin with ventilated water column and regional upwelling.

Fair to good potential for petroleum source rocks occurs through middle and upper parts of the Onnagawa Formation in Yashima area. The environment where the middle Onnagawa Formation was deposited was a stratified anoxic basin, which favored the preservation of marine organic matter. The upper Onnagawa Formation was deposited in the ventilated basin that was characterized by high primary production due to a local upwelling and relatively reducing benthic water, which accelerated the accumulation of marine organic matter.

要 旨

秋田県矢島地域における中期中新世から鮮新世 (およそ12 Ma から3 Ma) にかけての古海洋環境の変化を復元した。

10.5 Ma におけるジノステラン/ステラン比の減少から, 12 Ma-10.5 Ma までの間, 渦鞭毛藻と珪藻の両者が一次生産者として重要であり, 10.5 Ma 以降は珪藻が重要になったことが示唆される。この一次生産者の変化は10.5 Ma 以降にシリカが表層水に継続的に供給されるようになったことを反映していると考えられる。

9-5 Ma の高い C_{27}/C_{29} ステラン比は局所的な生産性の増大をもたらす局所的湧昇流の強化を反映していると解釈される。10-6 Ma において底層水の酸化が進行したことが, 生物擾乱の発達様式の変化から示される。この原因として, 後期中新世の海水準低下に起因する太平洋酸素極小帯水 (OMZ 水) の流入の減少が, 古日本海全体の生物生産の総量を抑制し, 還元的底層水が相対的に減少したとする可能性と, 溶存酸素に富む表層水の深層へ

の沈み込みが底層水の酸化に寄与した可能性が考えられる。

女川層の堆積した環境は, およそ9 Ma を境に, 貧酸素底層水と成層化した半閉鎖型海盆により特徴づけられる環境から, 酸化的な底層水と活発な表層水-底層水循環, 局所的に高い生物生産性により特徴づけられる環境へと大きく変化したことが推測される。

矢島地域では, 女川層の中部 (10.5-9 Ma) から上部 (9-7 Ma) が石油根源岩として能力が高い。女川層中部堆積時には, 水柱構造は成層化しており, 海盆の深層では還元的水塊が停滞し, 有機物の保存に適した環境であったと考えられる。これに対して, 女川層上部では, 水柱構造は成層状態から活発な攪拌状態へと移行し, 海盆の深層水は次第に酸化的になり, 有機物の保存には不利な環境へと移行したが, 高い光合成一次生産による有機物の供給の増加と比較的還元的な底層水環境の組み合わせにより, 石油の生成に適した海起源有機物の濃集が可能になったと考えられる。

* 資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department GSJ)

Keywords: organic geochemistry, biomarkers, petroleum source rocks, diatomaceous sediments, Onnagawa Formation, Neogene, upwelling, Tohoku Trough, NE Japan

1. はじめに

新第三紀北太平洋縁辺において膨大な量の珪藻質岩が堆積した(Garrison, 1975)。これらの珪藻質岩類は環太平洋地域北部における油ガス田の主要な石油根源岩として重要であり、石油地質学者及び地球化学者の関心を引いてきた。またこれらの堆積物は中新世以降の地球の気候変動の記録を保存しているものとして古気候学の観点からも注目されつつある。

これらの珪藻質岩類において、しばしば有機物に富む層準が発達する。この富有機物堆積岩の形成を説明するモデルとしては、底質での有機物の保存に好都合な底層水の還元性が表層水での高い生物生産性によって維持されたとする生物生産性モデル(湧昇流モデル)と表層水と底層水との循環が抑制されることにより維持されたとする停滞モデル(閉鎖型海盆モデル)が提案されている(Stein, 1991)。カリフォルニアのモンテレー層に関しては、現在のペルー沖の湧昇流海域の類推から湧昇流モデルの典型として説明されることが多い(Kolodny and Garrison, 1994)。しかし他の北太平洋縁辺の岩相や地質学的条件は多様であり、ペルー沖の例に必ずしも対応していないようにみえる。

富有機物堆積岩の形成がどのようなものであったのかを明らかにするためには、表層水での生物生産と底層水の環境に関する情報を独立に取得し、総合することにより、有機物の保存に適した条件について考察を進める必要がある。古海洋の各環境要素を独立に解析するためには、一次生産者、分解者、系外からの物質の流入等の量や種類などに関する多面的な情報を取得する必要がある。この目的のために、古生物学、堆積学、地球化学など様々な観点から手法の開発が進められている。この中で、近年、バイオマーカーを用いた古環境解析手法が急速な発展を遂げつつある。

工業技術院特別研究「島弧型炭化水素ポテンシャルの形成機構と予測手法に関する研究」では、上記珪藻質岩層の北西太平洋セクションのひとつとして我が国の中新統女川層をとりあげ、その有機物と珪藻殻に富んだ堆積岩の形成環境の復元をバイオマーカーをおもに用いて試みた。その成果の一部は既に、Yamamoto and Watanabe (1994), Watanabe *et al.* (1994), 渡部ほか(1994), 山本ほか(1994), 渡部ほか(1995), Yamamoto and Watanabe (1995), 山本(1998本特集号)に公表されている。本報では、これらの公表された知見と山本の博士論文(1995MS)の未公表部分を総括し、紹介する。

2. 女川層

わが国の東北地方とその周辺では、中新統珪藻質岩の北西太平洋側の典型的層序(女川層とその相当層)が認

められる。女川層とその相当層は中期-後期中新世(15-12 Ma から10-6 Ma 頃まで)の珪藻岩、ポーセラナイト、チャートを主体とする地層であり、わが国の東北地方と北海道の各地(天北堆積盆の稚内層、鯨ヶ沢堆積盆の大童子層、秋田堆積盆の女川層、新庄堆積盆の草薙層、新潟堆積盆の寺泊層、佐渡島の中山層、能登半島の姿層)と日本海(ODP Legs 127, 128のユニット3とユニット4)に広く分布する。

女川層とその相当層は比較的静穏な火山活動により特徴づけられる冷却沈降期(13-8 Ma; Sato and Amano, 1991)に本州弧北部の西側に位置する閉鎖型海盆(東北トラフ, Iijima *et al.*, 1988)において堆積した(第1図)。この海盆は東縁を北上・阿武隈両地塊に、西縁を小島を伴う沖合いバンクにより限られる北北東-南南西方向に伸びた形態を持っていた(Iijima *et al.*, 1988)。東北トラフは中新世前期末から中新世中期末まで続いた日本海の拡大に伴い形成された。拡大終了後に日本海南西口は地峡で閉鎖され、日本海への黒潮暖流の流入が止まり、親潮寒流が優勢になった(Iijima *et al.*, 1988)。女川層珪質岩の堆積はおよそ13 Maに開始し、10-6 Ma頃まで継続した。その珪藻質の岩相(主として珪藻岩、ポーセラナイト、チャート)は上位に向かい次第に泥質になり、船川層やその上位の天徳寺層へと移化する。

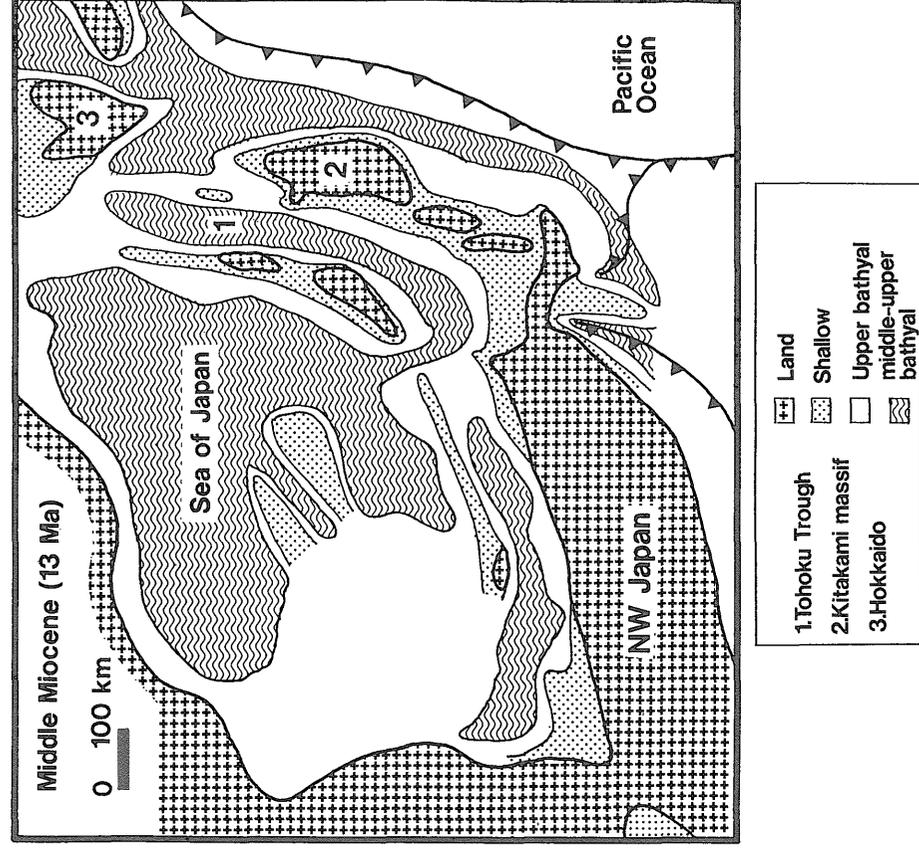
3. 女川層の堆積モデル

本特別研究が始まる以前、女川層及びその相当層に関して、2つの古海洋モデルが提案されていた。Tada (1991)は女川層にみられる天体周期に対応した生物源シリカと碎屑物の堆積速度の周期的変化に基づいて、海水準上昇に起因する太平洋OMZ水(酸素極小帯の水)のシルを通じての閉鎖型海盆への侵入によって還元的な底層水が形成されるというモデルを提案した。他方、福沢(1992)は、新第三紀天北海盆内における堆積相、珪藻化石群集の多様性、有機炭素量の空間的分布に基づいて、現在のカリフォルニア湾でみられるような季節風による局所的湧昇流モデル(van Andel, 1966)を示唆している。

これらの研究は堆積学的検討を主体としている。本特別研究では、古海洋環境の生物学的側面を復元することを重視し、バイオマーカーなどの有機化合物を用いた分子地球化学的アプローチを主体に、無機地球化学的、古生物学的、堆積学的な観点からのアプローチを総合して、女川層の古海洋環境の復元を試みた。

4. 矢島地域の新第三紀海洋環境

本特別研究では、秋田堆積盆地の矢島地域の女川層、船川層、天徳寺層を研究の対象にした。その理由は(1)女川層のほぼ全層準が川岸に露出し、系統的な試料採取が



第1図 中期中新世後期 (13 Ma) の古水深図 (Iijima, 1994).

Fig. 1 Middle Miocene paleoceanographic and paleobathymetric map (13 Ma) of Japan and the Sea of Japan (Iijima, 1994).

可能であること, (2)有機化合物の保存の良い未熟成試料が採取可能であること, (3)調査ルートに関して多くの地質学的データが既に取得されていることによる。中期中新世の東北トラフの古水深と矢島地域の位置を第2図に, 試料採取柱状図を第3図に示す。

石油根源岩能力

有機炭素量を第4図に示す。有機炭素量は女川層で相対的に高く, 船川層で低い。矢島地域の女川層の有機炭素量の平均値は1.28%であり, 秋田堆積盆地の中軸部における平均的な値 (山本, 1990) に一致している。有機炭素量からみると, 女川層試料のすべてがGood (1~2%; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992) の範疇にはいる。

ロックエヴァルS₂値 (Yamamoto and Yamamoto, in prep) を第5図に示す。女川層中部-上部で高いS₂値が認められ, この層準が最も石油根源岩能力が高いことが示された。S₂値からみると, 女川層試料のほとんどがFair (2-6 mgHC/g rock; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992) の範疇にはいる。

早稲田・重川 (1990) は矢島地域露頭の約15km北西の

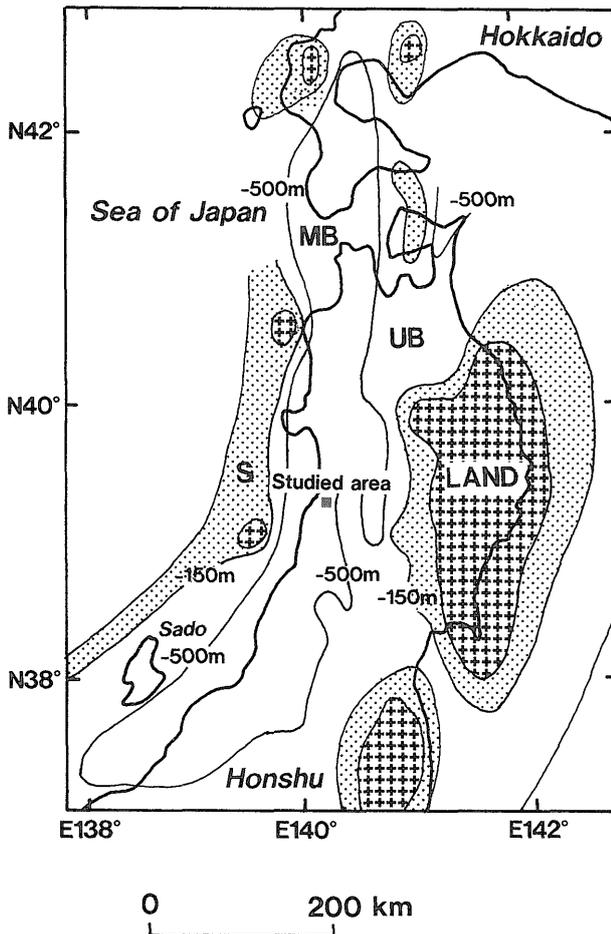
由利原油ガス田の石油・根源岩対比を行い, 炭素同位体組成から由利原油ガス田の油・コンデンセートは女川層上部の珪質泥岩に由来した可能性が高いとした。

矢島地域の女川層中部-上部は未熟成領域にあるが (Yamamoto and Watanabe, 1994), 熟成度を十分に被れば, 石油を生成・排出した可能性が高い。

陸源物質の寄与

富有機物珪藻質岩が形成される主要な条件としては, (1)碎屑物の流入が制限され, それによる有機物や珪藻殻の希釈が少ないことと, (2)底層水が溶存酸素に乏しく好気性バクテリアによる有機物の酸化分解が制限されることとが挙げられる。碎屑物の流入量に関しては, 本研究の対象としているような細粒堆積物の場合, 碎屑物に起源を持つ無機元素の含有量を用いて議論されることが多い。Tada *et al.* (1986) は津軽堆積盆の鱈ヶ沢地域の女川層について, 仮想的な平均碎屑物組成を求め, 碎屑性と生物源のシリカ含有量を算出し, その時代的な変動を追跡している。

第5図に示されるように, アルミニウムに代表される碎屑物起源元素は女川層のほうに船川層及び天徳寺層よ



第2図 東北日本の中期中新世の古水深図と本研究地域。古水深図は Iijima *et al.* (1988) より。S=浅海(0 から-150m), UB=上部半深海(-150 から-500m), MB=中部半深海(-500から-2000m)。

Fig. 2 Middle Miocene paleobathymetric map of the Tohoku Trough and the location of studied area. Bathymetric map refers to Iijima *et al.*, (1988). S=shallow (0 to -150meters), UB=upper bathyal (-150 to -500 meters) and MB=middle bathyal (-500 to -2000meters).

りも総じて少ないことが指摘される。生物源シリカ量と碎屑性シリカ量を、Tada (1991) の式： $\text{生物源 SiO}_2 (\%) = \text{SiO}_2 (\%) - \text{Al}_2\text{O}_3 (\%) \times 4.2$, 碎屑性 $\text{SiO}_2 (\%) = \text{Al}_2\text{O}_3 (\%) \times 4.2$ により算出した(第5図)。生物源シリカ量と碎屑性シリカ量の割合においては、女川層と船川層・天徳寺層の間に顕著な違いが認められる。すなわち女川層の生物源シリカ量は相対的に高く、船川層・天徳寺層では碎屑性シリカ量が高い。

バイオマーカーのうち、高等植物起源に起源を持つものの割合を検討すると、 C_{27}/C_{21} ノルマルアルカン比、 C_{28}/C_{16} ノルマル脂肪酸比、および ω -ヒドロキシ C_{22} ノルマル脂肪酸/ C_{16} ノルマル脂肪酸比は船川層において上位方向に増加する(第5図)。これらの増加は、アルミ

ナ含有量の増加と調和的であることから、船川層堆積時の碎屑物の割合の増加に伴う高等植物起源有機物の寄与の増加を反映しているものと考えられる。

この矢島地域の船川層(およそ6-4 Ma)中におけるアルミナ量や碎屑性シリカ量の上位層準への増加傾向は碎屑物の割合の増加を意味する。このような碎屑物の割合の増加の要因としては、碎屑物供給速度の増加と生物源物質供給速度の減少のふたつが考えられる。Tada *et al.* (1986) による鱒ヶ沢での研究では、そこでも同様に認められる碎屑物の割合の増加は、生物源物質の減少によるものではなく碎屑物の供給量の増加によるものと結論づけている。本地域でも、女川層に比べて船川層・天徳寺層の堆積速度の方が大きいことから(鈴木, 1989)、碎屑物の供給量の増加が主に反映されているものと考えられる。辻ほか(1991)の放射虫化石年代によれば、矢島地域での女川層と船川層の境界はおよそ6 Maに相当する。Sato and Amano (1991)によれば、東北日本弧はおよそ8 Maを境に冷却沈降サブステージ(Thermal Subsidence Substage, 13-8 Ma)から弱圧縮サブステージ(Incipient Compressional Substage, 8-2.4 Ma)へと構造場の性格が変わり、カルデラ火山活動が活発になると共に、脊梁地域の隆起が開始し、徐々に陸域が拡大したとされる。辻ほか(1991)は、矢島地域の女川層上部(約9 Ma以降)の碎屑物が火山性であることを指摘している。これらのことから、女川層上部以降の碎屑物と陸源有機物の増加は、東方の脊梁火山弧の形成とそこからの火山性碎屑物の流入に帰せられる。

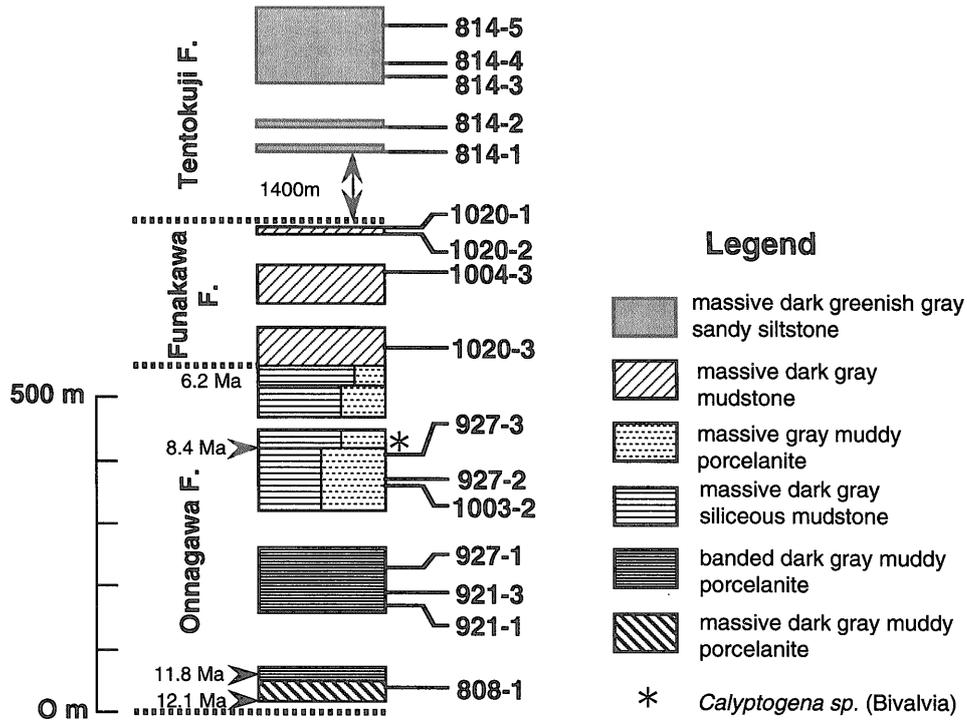
生物擾乱の発達様式

底層水の溶存酸素濃度に関して、近年、生物擾乱の発達様式を用いた解析が盛んになりつつある(Wignall and Meyers, 1988; Sageman, 1989; Savrda and Bottjer, 1991; Bottjer and Savrda, 1993)。特に、細粒堆積物の生物擾乱の様式を決定する要因として、底層水だけでなく堆積物の表層直下の溶存酸素濃度が重要であること、また季節的変動も重要であることが指摘されるようになった(Savrda and Bottjer, 1991)。

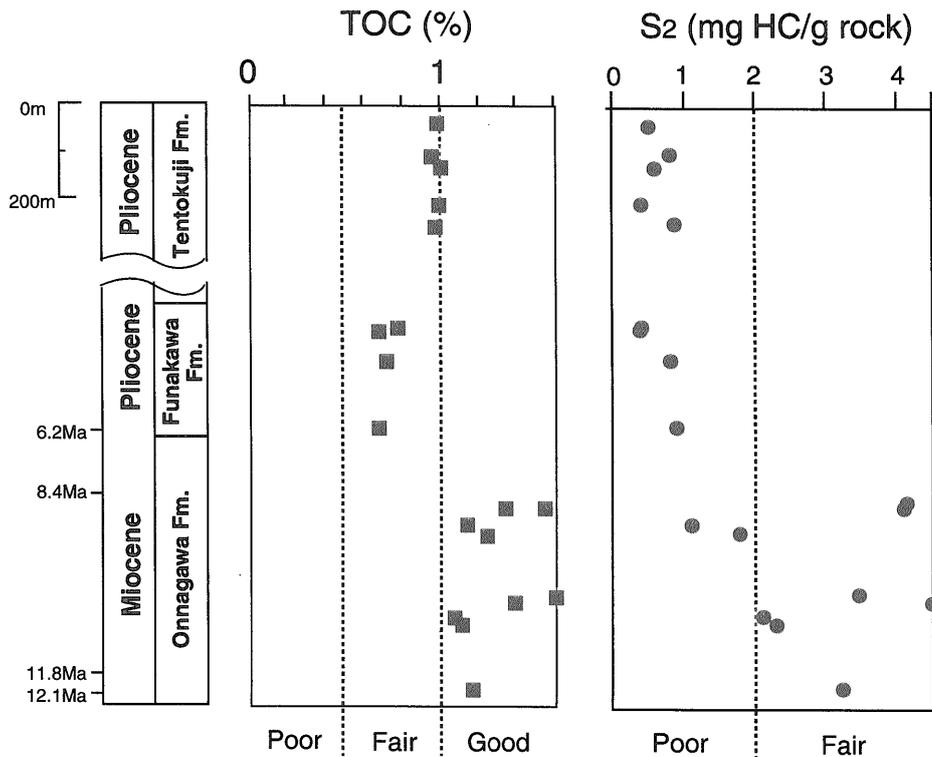
生物擾乱の発達様式は、Tada (1991) の分類を参考にし、試料の切断面を観察することにより決定した。生物擾乱の発達様式は次の4段階に区分した。

B (bioturbated; Tada (1991) の Class E に相当); 葉理構造は完全に破壊され、堆積物は均質化されている。底棲動物の這跡が頻繁に観察される。SL (slightly laminated; Class D); 葉理構造は部分的に保存されているが、生物擾乱は顕著である。現地性の二枚貝化石を産する。L (laminated; Classes B, C); 葉理構造は保存されているが、一部で生物擾乱が認められる。WL (well laminated; Class A); 葉理構造は完全に保存され、生物擾乱は認められない。

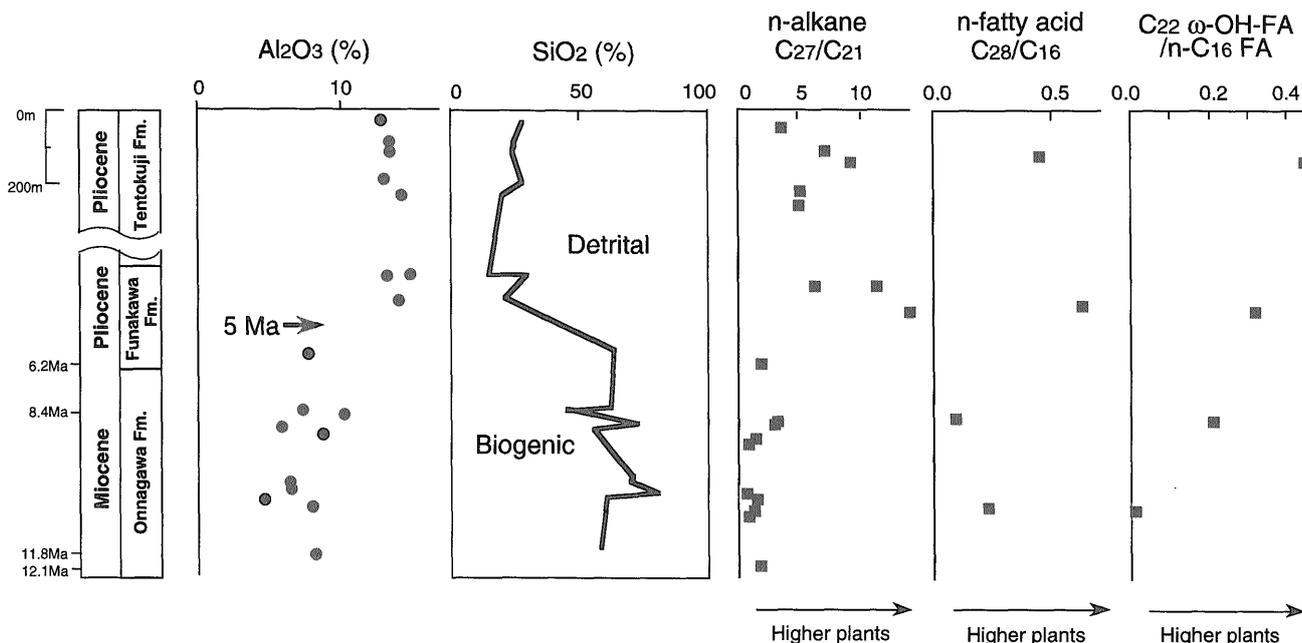
これらの区分は Savrda and Bottjer (1991) の生物相



第3図 矢島地域の女川層、船川層、天徳寺層の模式的柱状図と試料位置 (Yamamoto and Watanabe, 1994). 年代データは辻ほか (1991) より。
 Fig. 3 Schematic stratigraphic and lithologic sections of Yashima area. Numbers in the column indicate sampling points (Yamamoto and Watanabe, 1994). Age data refer to Tsuji *et al.* (1991).



第4図 矢島地域における、有機炭素量 (Yamamoto and Watanabe, 1994) とロックエヴァル S₂ 値 (Yamamoto and Yamamoto, in prep.) の層位的変化。
 Fig. 4 Stratigraphic variations of total organic carbon contents (Yamamoto and Watanabe, 1994) and Rock Eval S₂ (Yamamoto and Yamamoto, in prep.) of the Onnagawa, Funakawa and Tentokuji Formations in Yashima area.



第5図 矢島地域における、アルミナ含有量、生物源/碎屑性シリカ、陸起源バイオマーカー(C₂₇/C₂₁ n-アルカン比、C₂₈/C₁₆ n-脂肪酸比、ω-ヒドロキシ C₂₂ n-脂肪酸/C₁₆ n-脂肪酸比)の層位学的変化(Yamamoto and Watanabe, 1994 ; 1995)。

Fig. 5 Stratigraphic variations in the contents of alumina and biogenic/detrital silica and the ratios of C₂₇/C₂₁ n-alkanes, C₂₈/C₁₆ n-fatty acids and ω-hydroxy-C₂₂/C₁₆ n-fatty acids in Yashima area (Yamamoto and Watanabe, 1994 ; 1995).

との比較により、Bは Aerobic biofacies (底層水中と表層堆積物中共に、溶存酸素濃度 O_{2(dis)} > 1.0 ml/l) と Dysaerobic biofacies (底層水と表層堆積物共に、O_{2(dis)} = 0.1-1.0 ml/l), SLは Exaerobic biofacies (底層水中では O_{2(dis)} = 0.1-1.0 ml/l, 表層堆積物中では O_{2(dis)} = 0 ml/l), Lは Quasi-Anaerobic biofacies (底層水中では O_{2(dis)} < 0.1 ml/l, 表層堆積物中では O_{2(dis)} = 0 ml/l), WLは Anaerobic biofacies (底層水中と表層堆積物中共に、O_{2(dis)} = 0 ml/l) に相当すると考えられる。

第6図に示したように、矢島地域の女川層下部は Quasi-Anaerobic biofacies に、女川層上部は Exaerobic biofacies に、船川層・天徳寺層は Dysaerobic-Aerobic biofacies に相当する。この女川層下部から上位層準へ向けての生物擾乱の発達様式の変化は、女川層上部沈積時 (10-6 Ma) の底層水が、還元的なものから酸化的なものへと変化したことを意味する。

矢島地域において、ホパン/ステラン比は船川層中において上位方向に急増する(第6図)。この変化は生物擾乱の発達様式からみた底層水の酸化に対応しているように見える。ホパン類は主として原核生物(主としてバクテリア)の細胞膜に由来し(Ourisson *et al.*, 1979), ステラン類は真核生物(主として藻類)に由来する(Burlingame *et al.*, 1965) ことから、ホパン/ステラン比は堆積物へのバクテリアと藻類の寄与の大きさの割合を反映しているとされている。それ故、船川層におけるホパン/ス

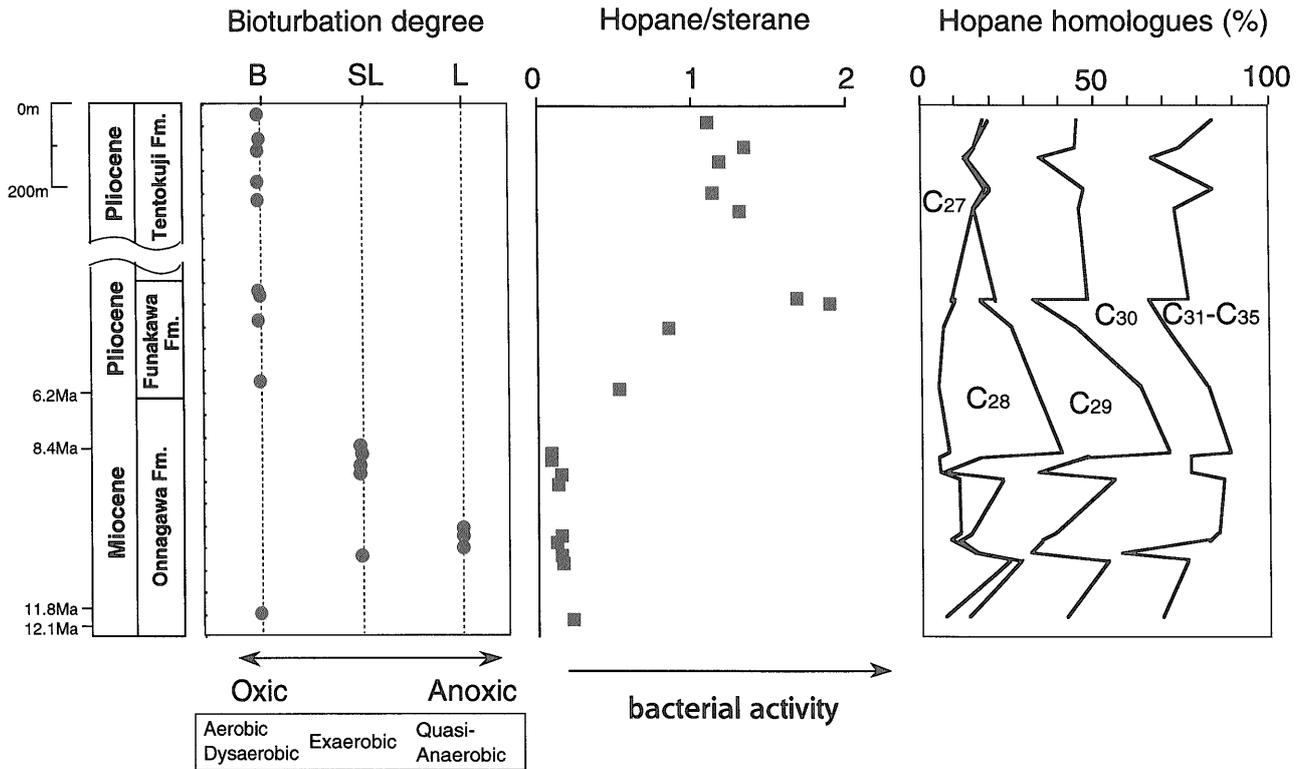
テラン比の増加は初期続成作用期における好気性バクテリアの増加を反映しているものと考えられる。

一次生産者の種類と表層水栄養塩環境の変化

女川層と船川層の下部は、相対的に高い C₂₇/C₂₉ ステラン比により特徴づけられる(第7図)。藻類の多くは C₂₇ ステロイドに富み、陸上高等植物は C₂₉ ステロイドに著しく富む(Huang and Meinschein, 1979) ので、高い C₂₇/C₂₉ ステラン比は有機物の根源物質として藻類の寄与の高かったことを意味する。矢島地域では女川層の上部と船川層の下部において特に高い C₂₇/C₂₉ ステラン比が認められる。女川層におけるこの上位層準に向う C₂₇/C₂₉ ステラン比の増加は、アルミナ量の増加から予想される C₂₉ ステランの増加とは相反しており、生物生産性の増加に起因する藻類由来有機物の寄与の増加を反映していると考えられる。

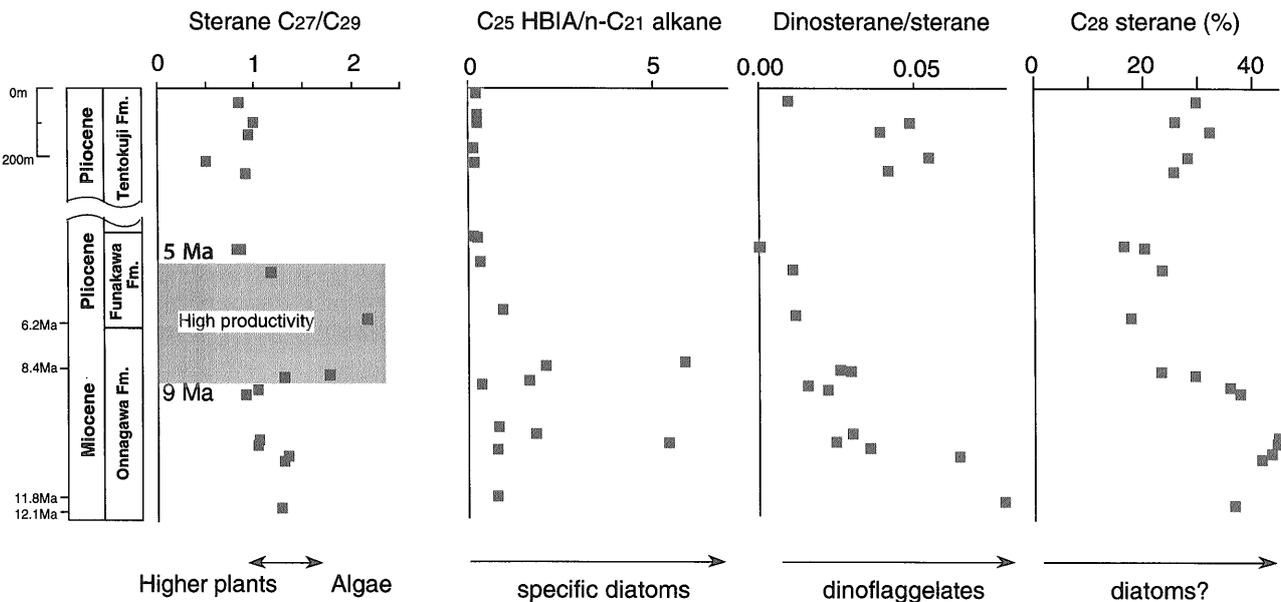
渦鞭毛藻起源のジノステラン(Shimizu *et al.*, 1976) の藻類一般に起源を持つステランに対する比は、女川層中部上部と船川層に比較して女川層下部と天徳寺層で高い(第7図)。このことは渦鞭毛藻の寄与がおおよそ10.5 Maで減少し、およそ4 Maで再び増加したことを意味する。

矢島地域の花粉学的データによれば、当地域の女川層は全層準にわたり渦鞭毛藻のシストを多産する(辻ほか, 1991)。また当地域の船川層は渦鞭毛藻シストに乏しく、天徳寺層は河川水の影響下で繁殖する沿岸棲の渦鞭毛藻



第 6 図 矢島地域における、生物擾乱の発達様式、ホパン/ステラン比、ホパン同族体の層位学的変化 (Yamamoto and Watanabe, 1994 ; 1995).

Fig. 6 Stratigraphic variations of bioturbation degree, hopane/sterane ratio and hopane distribution in Yashima area (Yamamoto and Watanabe, 1994 ; 1995).



第 7 図 矢島地域における、ステランの C_{27}/C_{29} 比、 C_{25} 高分岐イソプレノイドアルカン (C_{25} HBI) / C_{21} n-アルカン、ジノステラン/ステラン比、全ステラン中の C_{28} ステランの割合の層位学的変化 (Yamamoto and Watanabe, 1994 ; 1995).

Fig. 7 Stratigraphic variations of C_{27}/C_{29} sterane ratio, C_{25} HBI alkane/ C_{21} n-alkane ratio, dinosterane/sterane ratio and % of C_{28} sterane to total steranes in Yashima area (Yamamoto and Watanabe, 1994 ; 1995).

のシストを多産することが明らかになっている(秋葉, 私信)。天徳寺層における高いジノステラン/ステラン比はこのパリエロジカルな結果と対応しているように見える。他方, 女川層中のジノステラン/ステラン比の変化とパリエロジカルな結果との対応は明瞭ではない。

珪藻起源の C_{25} 高分岐イソプレノイドアルカン(Volkman *et al.*, 1994) の C_{21} n-アルカンに対する比は女川層で高く, 船川層・天徳寺層で低い(第7図)。この比は同一試料の2つの形態別フラクション, 遊離態と硫黄結合態でしばしば異なる(山本, 1999本特集号)ことを考えると, この比が直接, ある種の珪藻の寄与を反映しているとはみなせない。しかしながら, この比の遊離態と硫黄結合態の間にみられる違いは, 女川層と船川層・天徳寺層の間にみられる違いに比べて一般に小さい(山本, 1999本特集号)。それ故, 女川層にみられる相対的に高い C_{25} 高分岐イソプレノイドアルカン/ C_{21} n-アルカン比は女川層において一次生産者として珪藻の寄与が相対的に高かったとことを反映しているとみなせる。

女川層下部試料において, ステラン全体に占める C_{28} ステランの割合が高い(第7図)。微細藻類起源の C_{28} ステロールとしては, 24-メチルコレステ-5-エン-3 β -オール, 24-メチルコレステ-5, 22E-ジエン-3 β -オール, 24-メチルコレステ-5, 24(28)-ジエン-3 β -オールが挙げられる。このうち24-メチルコレステ-5, 22E-ジエン-3 β -オールはある種の珪藻(Nitzschiaなど)の最も主要なステロールである(Volkman, 1986)。女川層が珪藻殻に由来する高い生物源シリカ含有量を示すこと(第5図)を考えると, 女川層にみられる相対的に高い C_{28} ステランの割合は珪藻由来の24-メチルコレステ-5, 22E-ジエン-3 β -オールの寄与を反映している可能性が指摘される。

以上のジノステラン/ステラン比, 生物源シリカ量, C_{25} 高分岐イソプレノイドアルカン/ C_{21} n-アルカン比, C_{28} ステラン量の変化を総括すると, 女川層を通じて, 珪藻が一次生産者として重要であったことと, 12 Ma から 10.5 Ma にかけては, 珪藻の他に渦鞭毛藻の寄与も大きかったことが示唆される。

化学合成バクテリアの寄与

矢島地域では, ホパンの同族体組成に大きな層位学的変化が認められる(第6図)。これはおそらく堆積時のバクテリア群集の複雑な変化を反映している。特に, C_{28} 同族体の28, 30-ビスノルホパンは女川層上部と船川層下部において卓越する。Schoell *et al.* (1992) はモンテレー油中の28, 30-ビスノルホパン炭素同位体組成が, 他のホパン類に比較して9パーミル程度軽いことから, 28, 30-ビスノルホパンの起源として, 化学合成バクテリア(特に硫黄酸化バクテリア)を考えた。最近, 古生痕学的なアプローチによって, これらの地層が, exaerobic biofacies (Savrda and Bottjer, 1991; Bottjer and Savrda, 1993), もしくは episodically dysaerobic biofacies

(Wignall and Meyers, 1988) あるいは benthic boundary biofacies (Sageman, 1989) で特徴づけられることが指摘されるようになった。この生物相(biofacies)は, colorless filamentous な硫黄酸化バクテリアのマットと現地性の底棲動物化石を特徴とする。本研究においては, 28, 30-ビスノルホパンが多くみられる層準は矢島地域の女川層上部と船川層下部に限られている。これらの層準は, 前述のように高い生物生産性と比較的酸化的な沈積環境(exaerobic-dysaerobic biofacies)が推定される層準である。このような沈積環境においては, 表層水からの堆積物への有機物の供給が大きく, 底層水からの酸素と硫酸イオンの供給が保証されるために, 堆積物表層中における硫黄還元酸化サイクルが促進されることが予測される。この活発な硫黄還元酸化サイクルにより硫黄酸化バクテリア等の化学合成バクテリア活動が卓越し, 特殊な微生物群集が維持されたのかもしれない。

矢島地域の古海洋環境

矢島地域の古海洋学的要素を取りまとめると, その古海洋学的条件がおおよそ12 Ma, 10.5 Ma, 9 Ma, 5 Ma を境に変化したことが示される(第8図)。

ステージ A (12-10.5 Ma; 女川層最下部): 渦鞭毛藻と珪藻の両者が一次生産者として重要であった。このことは表層水の溶存シリカ濃度が珪藻の繁茂に適した高濃度と渦鞭毛藻の繁茂に適した低濃度の間を頻繁に揺れ動いたことを示唆する。シリカが表層水に供給されていたが, しばしばシリカが欠乏することもある条件にあったことが示唆される。底層水は次第に還元になった。

ステージ B (10.5-9 Ma; 女川中下部-中部): 一次生産者として珪藻が卓越していた。このことはシリカが継続的に表層水に供給されていたことを示唆する。底層水は還元であった。

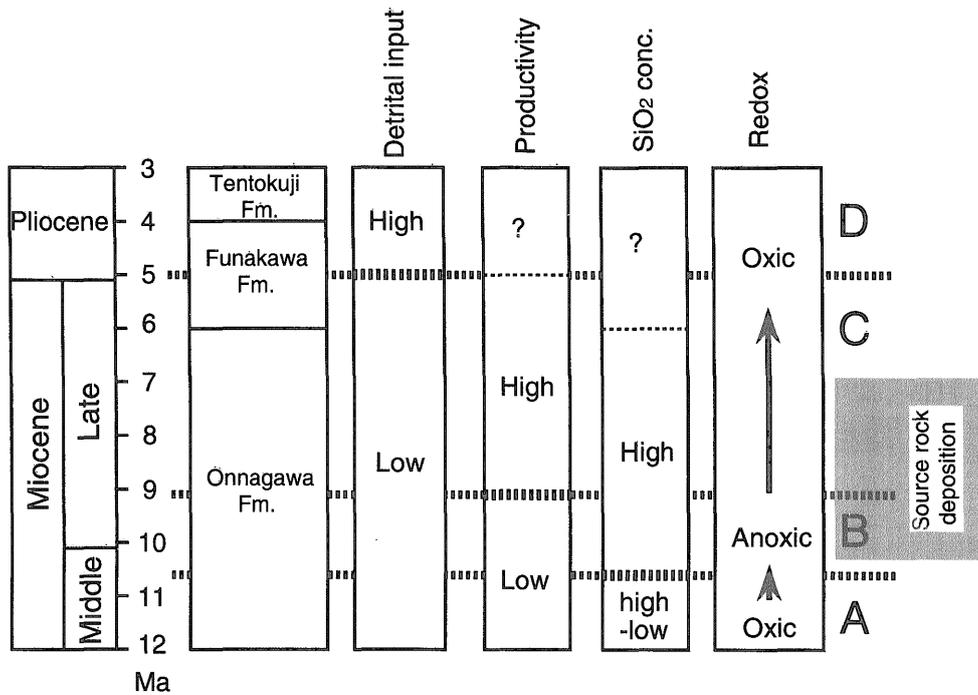
ステージ C (9-5 Ma; 女川層中上部-上部および船川層下部): 一次生産者として珪藻が卓越し, 高生物生産性が維持されていた。このことは前ステージに引き続いてシリカが継続的に表層水に供給されていたことを示唆する。底層水は次第に酸化的となり, 堆積物表層付近には28, 30-ビスノルホパンを生合成する底棲化学合成バクテリア群集が存在していた。

ステージ D (5 Ma-3 Ma 頃; 船川層上部および天徳寺層): 陸源物質の寄与の急増と好気性バクテリアの活動の活発化により特徴づけられる。4 Ma 以降は沿岸棲渦鞭毛藻が卓越する。底棲動物活動は活発であった。

5. 生物生産性と海洋循環形態の変化

推定された東北トラフの古海洋環境の変遷を模式的に第9図に示す。

矢島地域におけるジノステラン/ステラン比, 生物源シリカ量, C_{25} 高分岐イソプレノイドアルカン/ C_{21} n-アル



第8図 矢島地域における古海洋学的要素の変化。
Fig. 8 Changes in paleoceanographic factors in Yashima area.

カン比の層位学的変化から、女川層を通じて、珪藻が一次生産者として重要であったことと、12 Ma から10.5 Ma にかけては、珪藻の他に渦鞭毛藻の寄与も大きかったことが示唆される。先に述べたように、現在の北太平洋海域では、表層水の溶存シリカ濃度の高い条件では珪藻が一次生産者として主体であり、溶存シリカ濃度の低い条件では渦鞭毛藻が一次生産者として主体である (角皆・乗木, 1983)。このことから、およそ10.5 Ma におけるジノステラン/ステラン比の減少は、表層水中の溶存シリカ濃度の増加により、一次生産者として渦鞭毛藻の比重が低下し、珪藻がより重要になったことを反映していると解釈される。

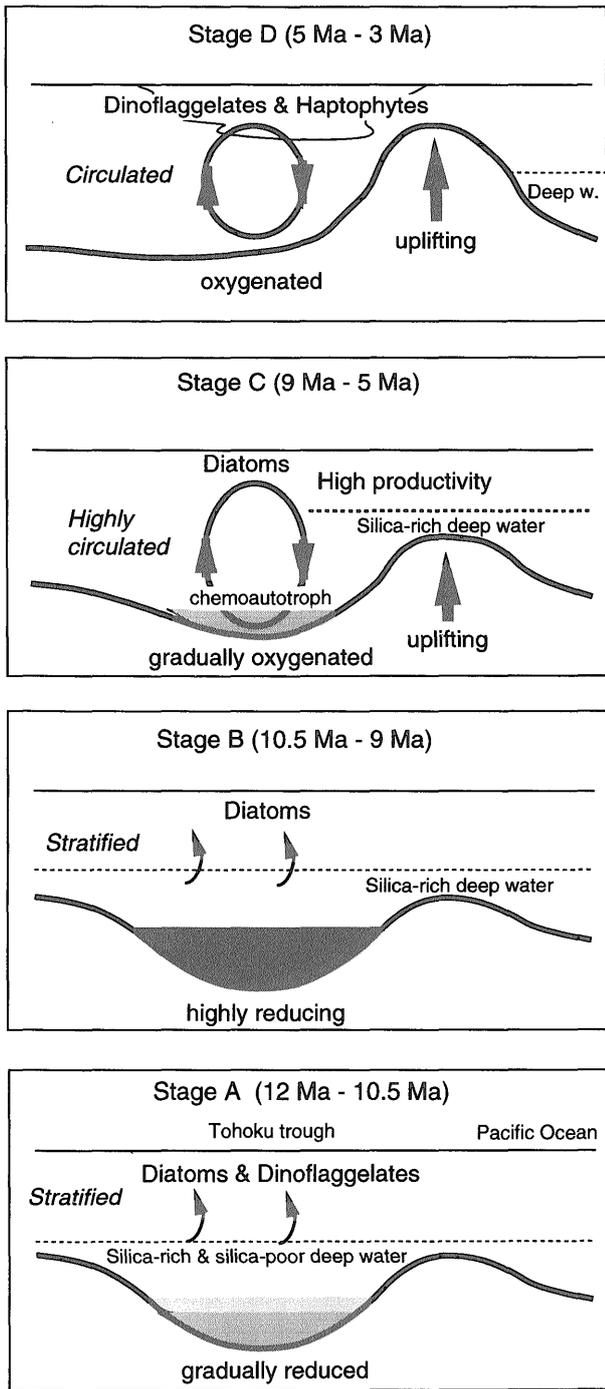
珪藻が繁茂するためには溶存シリカが表層水に供給される必要がある。現在の北太平洋では、水深1000m 以深において世界の海洋中で最も高い溶存シリカ濃度が認められている (Sverdrup *et al.*, 1941)。この深層水は、北大西洋で沈み込んだ表層水がおおよそ2000年をかけて海底を移動し、北太平洋に達したものである。この移動の過程で、深層水は硝酸イオン、燐酸イオン、溶存シリカに富む組成となる。このような現在の汎地球的深層水循環様式は、およそ14 Ma から10 Ma にかけて徐々に形成されたものと考えられている (Woodruff *et al.*, 1981; Miller *et al.*, 1987)。しかし、最近、深海掘削計画によりこれまで得られた炭酸塩のデータを整理した結果、太平洋の炭酸塩補償深度が17 Ma を境に4900m から3800m に上昇したことが明らかになった (Carter and Raymo, 1998)。これは、17 Ma に深層水循環様式が現在型に移行

したことを示唆しており、太平洋深層水の循環様式の移行時期については、さらに検討が必要である。

東北トラフの珪質堆積岩の堆積は、概ね12 Ma に開始しており (Iijima *et al.*, 1988)、東北トラフへの太平洋深層水の海盆内への流入がこの時期に開始したことが示唆される。本研究で示されたように、12 Ma から10.5 Ma までの間、渦鞭毛藻と珪藻の両者が一次生産者として重要であったことは、表層水の溶存シリカ濃度が珪藻の繁茂に適した高濃度と渦鞭毛藻の繁茂に適した低濃度の間を頻りに揺れ動いたことを示唆する。この12-10.5 Ma に表層水へシリカが断続的に供給された原因として、(1)現在の汎地球的深層水循環様式が徐々に形成された可能性と、(2)太平洋と古日本海を結ぶ海峡のシル水深が変化し、栄養塩に富む太平洋深層水が断続的に流入した可能性が考えられる。

およそ9 Ma を境界に、 C_{27}/C_{29} ステラン比、24-ノルコレスタンや28、30-ビスノルホパンの相対量、全窒素/有機炭素比やペリレン含有量が顕著に変化している (Yamamoto and Watanabe, 1994; Taguchi, 1969)。このことから、この時期に表層水と底層水の海洋学的条件が共に大きく変化したことが示唆される。

矢島地域での C_{27}/C_{29} ステラン比の層位的学変化 (第7図) は、女川層上部と船川層下部 (およそ9-5 Ma) 沈積時において藻類の生産性が高かったことを示す。この時期の古日本海の各地において沈積した珪藻質堆積物のいくつかは、特異な性質を示すことが報告されている。例えば、秋田堆積盆の由利原油田にみられる異常に重い



第9図 東北トラフにおける古海洋環境の変化。
Fig. 9 Neogene paleoceanographic changes in Tohoku Trough.

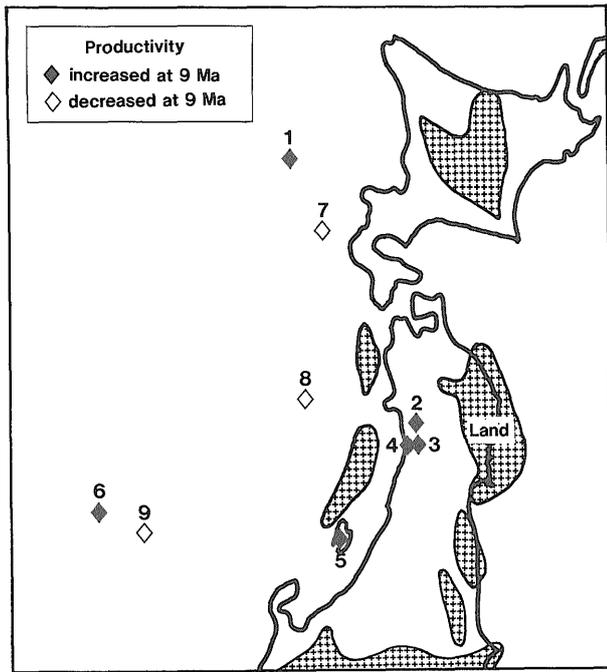
炭素同位体比(早稲田・重川, 1990), 秋田堆積盆の南外地域にみられる磷酸塩ノジュール(荻原・田口, 1986), 佐渡島にみられる珪藻岩の堆積速度の増加(渡辺ほか, 1977; 福沢ほか, 1991), 北大和トラフ(ODP Leg 127 Site 799のユニット3)にみられるマグネサイト(Matsumoto, 1992), 北日本海盆(ODP Leg 127 Site 795のユニット3)にみられる相対的に高いシリカ含有量

(Tada and Iijima, 1992)などが挙げられる。著者らは、これらの現象は9-5 Maのこれらの地域における同時的な生物生産性の増加を反映しているものと考えている(第10図)。しかしながら、ODP Leg 127(日本海)では、大和海盆(Sites 794, 797)と日本海盆(Site 796)では、10-6 Maの間は生物生産性が相対的に低く、6-2.5 Maの間は生物生産性が高かったことが示されている(Tada and Iijima, 1992)。したがって、9-5 Maの同時的な生物生産性の増加は地域的に限られていたと考えられ、この時期の古日本海各地における湧昇流が局地的であったことが示唆される。Haq *et al.* (1987)によれば、後期中新世は全世界的に低海水準であった。この時期には大和海盆(Akiba, 1986)と能登半島(渡辺, 1992)において8.5-6.6 Maの期間にわたる海底ハイエイクスが報告されており、この時期の古日本海における底層流の強化が示唆される(渡辺, 1994)。また一方で、この時期に海水準が低下したことによって、女川層が沈積した起伏に富む海底地形(Iijima *et al.*, 1988)が海洋循環に与える影響がより大きくなったことが推測される。したがってこれらの底層流の強化と起伏に富む海底地形というふたつの要因が結び付くことによって、局所的な高生産性をもたらす局所的湧昇流が強化されたと想像される。

6. 底層水の酸化還元環境と海洋循環形態の変化

矢島地域での生物擾乱の発達様式の層位学的変化(第6図)から、底層水の酸化還元環境は、女川層上部(およそ10-6 Ma)堆積時において還元的なものから酸化的なものへと変化したことが示される。最近になって、本州北部と日本海の各地からこの時期における底層水の酸化が報告されるようになってきており(鱒ヶ沢: Tada *et al.*, 1986; 佐々木・山本, 1986; 五城目: Tada, 1991; 南外: 荻原・田口, 1986; 佐渡: 坂本, 1992; 日本海盆及び大和海盆: Tada and Iijima, 1992; Masuzawa *et al.*, 1992; 北大和トラフ: Matsumoto, 1992), 日本海の広い範囲にわたって同時に酸化が進行したことが示唆される。

現在の北太平洋では、水深500-1000mの範囲に溶存酸素に乏しい深度帯(酸素極小帯, Oxygen minimum zone, OMZ)が存在する。この酸素極小帯では、溶存酸素濃度は0.5-1.0ml/lまで減少し、堆積物表層では、Dysaerobicな生物相が発達している。Tada (1991)は、海水準上昇に伴い、このような太平洋OMZ水(酸素極小帯の水)がシルを通じて閉鎖型海盆へ侵入することによって還元的な底層水が形成されるというモデルを提案した。しかし女川層準の一部にみられるAnaerobic ($O_{2(dis)} = 0$ ml/l)やQuasi-Anaerobic ($O_{2(dis)} = 0 - 1$ ml/l)な生物相に示される強度な還元性は、OMZ水そのものの溶存酸素濃度では説明できない。Tada (1991)は



第10図 およそ9 Ma を境に生物生産性の増加したと推定される海域と減少したと推定される海域。
 1 : ODP Leg 127 Site 745 のユニット 3, 高いシリカ含有量より (Tada and Iijima, 1992),
 2 : 南外地域の船川層, 燐酸塩ノジュールの存在より (荻原・田口, 1986), 3 : 矢島地域の女川層上部・船川層下部, 高い C_{27}/C_{29} ステラン比より (Yamamoto and Watanabe, 1994), 4 : 由利原油田, 重い炭素同位体比より (早稲田・重川, 1990), 5 : 佐渡島, 珪藻岩の堆積速度の増加より (渡辺ほか, 1977), 6 : ODP Leg 127 Site 799 のユニット 3, マグネサイトの存在より (Matsumoto, 1992), 7 : ODP Leg 127 Site 796 のユニット 3, 低いシリカ含有量より (Tada and Iijima, 1992), 8 : ODP Leg 127 Site 794 のユニット 3, 低いシリカ含有量より (Tada and Iijima, 1992), 9 : ODP Leg 127 Site 797 のユニット 3, 低いシリカ含有量より (Tada and Iijima, 1992).

Fig. 10 Map showing the productivity changes at approx. 9 Ma. 1: high silica contents in Unit 3 of ODP Leg 127 Site 795 (Tada and Iijima, 1992), 2: phosphate nodules in the Funakawa Formation, Nangai area (Ogihara and Taguchi, 1986), 3: high C_{27}/C_{29} sterane ratio in the Upper Onnagawa and Funakawa Formations, Yashima area (Yamamoto and Watanabe, 1994), 4: heavy carbon isotopic composition of organic matter in the Upper Onnagawa Formation, Yurihara Oil Field, 5: high sedimentation rate of diatomites, Sado Island, 6: magnesite in Unit 3 of ODP Leg 127 Site 799 (Matsumoto, 1992), 7: low silica contents in Unit 3 of ODP Leg 127 Site 796 (Tada and Iijima, 1992), 8: low silica contents in Unit 3 of ODP Leg 127 Site 794 (Tada and Iijima, 1992), 9: low silica contents in Unit 3 of ODP Leg 127 Site 797 (Tada and Iijima, 1992).

この OMZ 水そのものの低い溶存酸素濃度に加えて, 栄養塩に富んだ OMZ 水の適度な湧昇に支えられた藻類の繁茂と生産された有機物の底層水と堆積物表層での分解により強度な還元性が維持された可能性を示唆している。

10-9 Ma 以降の底層水の酸化の原因としては, 海盆内の生物生産性の総量が低下したことによるとする考えと海盆内における溶存酸素濃度に富む表層水の深層への沈み込みに求めるふたつの可能性が挙げられる。第一の考えは, 後期中新世の海水準低下によって太平洋深層水や中層水の流入が制限され, その結果, 表層水への栄養塩の供給が減少し, 東北トラフ全体の生物生産の総量を減少させ, 底層水の還元性を維持できなくなったとするものである。第二の考えは, この時期には大和海盆 (Akiba and Yanagisawa, 1986) と能登半島 (渡辺, 1992) において 8.5-6.6 Ma の間にわたる海底ハイエイトスが報告されており, この時期の古日本海における底層流の強化が示唆されるが (渡辺, 1994), この底層流の強化に伴う底層水の攪拌作用が底層水の酸化に寄与したとするものである。

7. 石油根源岩能力と古海洋環境の関係

有機炭素量とロックエバル S_2 値からみる限り, 矢島地域では, 女川層の中上部が石油根源岩として能力が高い (第 4 図)。矢島地域西方の由利原油ガス田では根源岩は女川層上部の珪質泥岩であると考えられており (早稲田・重川, 1990), 本研究の結果と調和的である。この能力の高い石油根源岩の堆積期間はステージ B の全範囲 (10.5-9 Ma) とステージ C の前半 (9-7 Ma) に相当する。

ステージ B では水柱構造は成層化しており, 海盆の深層では還元的水塊が停滞し, 有機物の保存に適した環境であったと考えられる (第 9 図)。このような環境は現在の黒海でみられ (Demaison and Moore, 1980), Stein (1991) の区分の停滞モデル (閉鎖型海盆モデル) や Tada (1991) の閉鎖型海盆への太平洋 OMZ 水侵入モデルに相当する。Tada (1991) の対象とした秋田県五城目での女川層が矢島地域の女川層下部-中部に相当することを考えると, 本研究のステージ B の環境は, Tada (1991) の示す女川層の環境と同一のものをみている可能性が高い。

ステージ C では水柱構造は成層状態から活発な攪拌状態へと移行し, 海盆の深層水は次第に酸化的になり, 有機物の保存には不利な環境へと移行したと考えられる (第 9 図)。しかし, 活発な局所的湧昇流により栄養塩に富んだ深層の水が有光層にもたらされ高い光合成一次生産が維持されていた。また, 堆積物表層では, 底棲化学合成バクテリア群集が存在しており, 化学合成による一

次生産も活発に行われていた。ステージC前半では、このような高い一次生産による有機物の供給の増加と比較的還元的な底層水環境の組み合わせにより、石油の生成に適した海起源有機物の濃集が可能になったと考えられる。このような環境は現在のカリフォルニア湾でみられる(van Andel, 1966), Stein (1991)の区分の生物生産性モデル(湧昇流モデル)や福沢(1992)の局所的湧昇流モデルを示唆している。福沢(1992)の対象とした天北堆積盆の稚内層は矢島地域の女川層上部から船川層に相当し、本研究のステージC前半の環境は、福沢(1992)の示す稚内層の環境と同一のものをみている可能性が高い。ステージCの後半では、底層水の酸化が進行し有機物の分解が促進されたことと砕屑物の流入により有機物が希釈されたことにより、石油根源岩の能力が低下したと考えられる。

第5項で議論したように、矢島地域でのステージC前半における高い石油根源岩能力は局所的な湧昇流に起因すると考えられる。したがって、この時期の石油根源岩の分布は東北トラフの中でも限定されたものであることが予想される。これに対して、ステージBの高い石油根源岩能力は、海盆深層の還元的水塊の存在に起因すると考えられる。したがって、この時期の石油根源岩の分布は東北トラフのほぼ全域にわたるものであることが予想される。事実、秋田-新潟にかけて、この時期の珩質泥岩を根源岩とする油ガス田が多く存在しており(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992), この作業仮説と矛盾しない。

以上のように、東北トラフにおける石油根源岩の堆積には古海洋学的要因が第一義的に重要である。東北トラフが砕屑物の流入が基本的に少ない堆積環境にあったために、海盆の水理学因子が有機物の生産や保存に直接的に影響を及ぼしたものと解釈される。

8. 女川層とモンテレー層の比較

北太平洋縁辺の珩質岩が新第三紀のほぼ同時期に形成された原因として、(1)南極氷冠の形成(16-15 Ma)に対応した全地球的な大気海洋循環の強化とそれに伴う中高緯度における珩質岩の繁茂と、(2)25-22 Maの東太平洋海嶺の拡大率の増加を引きがねとする漸新世から中期中新世にかけての広範囲なテクトニズムの変化とそれに起因する環太平洋地域における同時的な縁辺堆積盆の形成の組み合わせが考えられている(Ingle, 1981)。しかしながら、環太平洋の各地域のものを比較すると珩質岩の沈積開始時期や岩型の組み合わせや有機炭素量などに違いが認められる(Iijima, 1994)。例えば、西太平洋側の東北日本では、珩質岩に海緑石層準を伴うのに対して、東太平洋側のカリフォルニアでは代わりに、燐酸塩岩を伴う(Iijima, 1994)。このことは各地域における珩質

岩の形成を考えるうえで地域的な条件を明らかにすることが重要であることを暗示する。

女川層とモンテレー層の共通点として、高硫黄ケロジェン(II-S型)の存在、異常に高い安定炭素同位体比、高い C_{27}/C_{29} ステラン比、24-ノルコレスタン、28, 30-ビスノルホパン、およびガンマセランの高い存在量が挙げられる(Yamamoto and Watanabe, 1994)。これらの類似性はおそらく共通の藻類種の繁茂と共通のバクテリア群集の存在を反映している。

これとは対照的に、有機炭素量にみられる大きな違いも指摘される。女川層の有機炭素量は概ね2%以下である(佐藤ほか, 1972; 林田・田口, 1978; 早稲田・重川, 1990)のに対して、モンテレー層では6%を超えるものも多い(Curiale and Odermatt, 1989)。鹿野(1986)は女川層の相対的に低い有機炭素量の原因として、タービダイトや火山噴出物の流入による酸素極少帯の擾乱を想定している。Iijima *et al.* (1988)は湧昇流の強度がモンテレー層に比べて弱かった可能性と砕屑物や生物源シリカによる希釈効果の可能性を指摘している。本研究の結果からは、女川層の層準のうち、高い C_{27}/C_{29} ステラン比がみられる高い生物生産性が推測される層準(ステージC)に限られていること; またその生物生産性の高い層準(ステージC)の堆積環境は比較的酸素に富む環境であったことが示される。これらのことは、高い生物生産性と還元的な底層水の存在という有機物の濃集に最適な組み合わせがモンテレー層では存在したのに対して、女川層には欠如していたことが女川層の相対的に低い有機炭素量の原因であることを示唆する。

9. まとめ

およそ10.5 Maにおけるジノステラン/ステラン比の減少は表層水へシリカが継続的に供給されるようになったことを反映しているものと解釈される。12 Maから10.5 Maまでの間、渦鞭毛藻と珩質岩の両者が一次生産者として重要であったことは、表層水の溶存シリカ濃度が珩質岩の繁茂に適した高濃度と渦鞭毛藻の繁茂に適した低濃度の間を頻りに揺れ動いたことを示唆する。この12-10.5 Maに表層水へシリカが断続的に供給された原因として、(1)現在の汎地球的深層水循環様式が徐々に形成された可能性と、(2)太平洋と古日本海を結ぶ海峡のシル水深が変化し、栄養塩に富む太平洋深層水が断続的に流入した可能性が考えられる。

およそ9 Maを境界に、表層水と底層水の両者の海洋学的条件が大きく変化したことが示唆される。矢島地域では女川層上部と船川層下部(およそ9-5 Ma)堆積時において藻類の生産性が高かったことが示された。この時期に、表層水-底層水循環の強化と起伏に富む海底地形というふたつの要因が結びつくことによって、局所的な高

生産性をもたらす局所的湧昇流が強化されたと想像される。

矢島地域では、底層水の酸化還元環境が女川層上部(およそ10-6 Ma) 堆積時において還元的なものから酸化的なものへと変化したことが示された。この原因に関しては、後期中新世の海水準低下による太平洋 OMZ 水の流入の制限が、古日本海全体の生物生産の総量を減少させ、底層水の還元性を維持できなくなったとする可能性と、海盆内の海洋循環の強化に伴う底層水の攪拌作用が底層水の酸化に寄与した可能性が考えられる。

以上のことを総合すると、およそ9 Ma を境に、女川層の堆積した環境は、貧酸素底層水と成層化した半閉鎖型海盆により特徴づけられる環境から、酸化的な底層水と活発な表層水-底層水循環、高い生物生産性により特徴づけられる環境へと大きく変化したことが推測される。

矢島地域では、女川層の中部 (10.5-9 Ma) から上部 (9-7 Ma) が石油根源岩として能力が高い。女川層中部堆積時には、水柱構造は成層化しており、海盆の深層では還元的な水塊が停滞し、有機物の保存に適した環境であったと考えられる。これに対して、女川層上部では、水柱構造は成層状態から活発な攪拌状態へと移行し、海盆の深層水は次第に酸化的になり、有機物の保存には不利な環境へと移行したが、高い光合成一次生産による有機物の供給の増加と比較的還元的な底層水環境の組み合わせにより、石油の生成に適した海起源有機物の濃集が可能になったと考えられる。

本報で用いた年代値は、同一ルートでの放射虫化石データから求められたものである(辻ほか, 1991)。その後、古地磁気・微化石年代尺度に大きな改訂が加えられた(Cande and Kent, 1995; Berggren *et al.*, 1995)、放射虫化石帯と年代値との対応も最近改訂された(Motoyama, 1996; 本山・丸山, 1998)。この新しい対比に従えば、本報で用いられている年代値12.1, 11.8, 8.4, 6.2 Ma はそれぞれ12.6, 11.7, 9.1, 8.2 Ma となる。しかし、本報では、他地域の微化石層序の再検討を行う時間的余裕が無かったため、旧対比に従った。新対比による微化石層序の再検討と海洋環境の変遷の復元は、平成10年度より開始された工技院特別研究「天然ガス資源ポテンシャルの総合的研究」において進められており、その成果は別報で報告する予定である。

謝辞 本報は山本の博士論文の一部を含む。博士論文作成の際には、主査の半田暢彦名古屋大学教授(現愛知県立大学教授)には多くをご教授いただいた。琉球大学の本山功講師には放射虫年代層序に関しご教示いただいた。査読者の坂田 将博士には建設的な意見をいただいた。本研究を進めるにあたっては、グループ長の徳橋秀一博士をはじめ、グループ員の方々にお世話になった。ここに記して感謝する。

文 献

- Akiba, F. (1986) Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified Lower Miocene through Quaternary diatom zones for middle-to-high latitudes of the North Pacific. *In Initial Report, Deep Sea Drilling Project, 87*, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., 393-481.
- van Andel, T.H. (1966) Gulf of California. *In Fairbridge, R.W., ed., The Encyclopedia of Oceanography*, Dowden Hutchinson & Ross Inc, Strousburg, Pennsylvania, 312-315.
- Berggren, W.A., Kent, D.V., Swisher, C.C. III and Aubry, M.-P. (1995) A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. *In Berggren, W.A., Kent, D.V., Aubry, M.-P., and Hardenbol, J., eds., Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation, SEPM Spec. Pub.*, 54, 129-212.
- Bottjer, D.J. and Savrda, C.E. (1993) Oxygen-related mudrock biofacies. *In Wright, V.P., ed., Sedimentology Review/1*, Blackwell, Oxford, 92-102.
- Burlingame, A.L., Haug, P.A., Belsky, T., Calvin, M. (1965) Occurrence of biogenic steranes and pentacyclic triterpanes in an Eocene shale (52 million years) and in an Early Precambrian shale (2.7 billion years): a preliminary report. *Proc. Nat. Acad. Sci. US*, 54, 1406-1412.
- Cande, S.C. and Kent, D.V. (1995) Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Jour. Geophys. Res.*, 100, 6093-6095.
- Carter, S.J. and Raymo, M.E. (1998) Cenozoic history of global marine sedimentation and the calcite compensation depth. *In Abstract of 1998 Spring Meeting of American Geophysical Union*, S180.
- Curial, J.A. and Odermatt, J.R. (1989) Short-term biomarker variability in the Monterey Formation, Santa Maria Basin. *Org. Geochem.*, 14, 1, 1-13.
- Demaison, G.J. and Moore, G.T. (1980) Anoxic environments and oil source bed genesis. *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 64, 1179-1209.
- 福沢仁之・坂本竜彦・小泉 格 (1991) 佐渡新第

- 三系中山層の縞状珪藻質岩に記録された海洋変動のリズム。月刊地球, **13**, 7, 467-469.
- 福沢仁之(1992) 新第三紀生物源珪質頁岩の堆積作用と古海洋環境の関係について(予報)。地質学論集, no. 37, 219-226.
- Garrison, R.E. (1975) Neogene Diatomaceous Sedimentation in East Asia: A review with Recommendations for Further Study. In *United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Committee for Co-ordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas, Technical Bulletin 9*, 57-69.
- Haq, H.B., Hardenbol, J. and Vail, P.R. (1987) Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, **235**, 1156-1167.
- 林田進男・田口一雄(1978) 石油先駆物質としての抽出性非炭化水素有機物の続成変化。地質学論集, no. 15, 191-204.
- Huang, W.-Y. and Meinschein, W.G. (1979) Sterols as ecological indicators. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **43**, 739-745.
- Iijima, A., Tada, R. and Watanabe, Y. (1988) Developments of Neogene sedimentary basins in the northeastern Honshu Arc with emphasis on Miocene siliceous deposits. *Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. II*, **21**, 417-446.
- Iijima, A. (1994) Neogene siliceous, phosphatic and glauconitic sediments of the northwestern Pacific Rim: A comparison with the eastern Pacific Rim. In Iijima, A., Abed, A. M. and Garrison, R.E., eds., *Proc. 29th Int'l. Geol. Congr. Part C: Siliceous, Phosphatic and Glauconitic Sediments of the Tertiary and Mesozoic*, VSP, Utrecht, 5-16.
- Ingle, Jr., J.C. (1981) Origin of Neogene diatomites around the North Pacific Rim. In Garrison, R.E. et al., eds., *The Monterey Formation and Related Siliceous Rocks of California, SEPM special publication*, 159-179.
- 鹿野和彦(1986) 石油根源岩の堆積環境—女川層の場合—。石油鉱床学の諸問題, 田口一雄教授退官記念論文集, 161-169.
- Kolodny, Y. and Garrison, R.E. (1994) Sedimentation and diagenesis in paleo-upwelling zones of epimeric sea and basinal setting: A comparison of the Cretaceous Mishash Formation of Israel and the Miocene Monterey Formation of California. In Iijima, A., Abed, A.M. and Garrison, R.E., eds., *Proc. 29th Int'l. Geol. Congr. Part C: Siliceous, Phosphatic and Glauconitic Sediments of the Tertiary and Mesozoic*, VSP, Utrecht, 133-158.
- Masuzawa, T., Takada, T. and Matsushita, R. (1992) Trace-element geochemistry of sediments and sulfur isotope geochemistry of framboidal pyrite from Site 795, Leg 127, Japan Sea. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 705-717.
- Matsumoto, R. (1992) Diagenetic dolomite, calcite, rhodochrosite, magnesite, and lansfordite from Site 799, Japan Sea—implications for depositional environments and the diagenesis of organic-rich sediments. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 75-98.
- Miller, K.G., Fairbanks, R.G. and Mountain, G.S. (1987) Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion. *Paleoceanography*, **2**, 1-19.
- Motoyama, I. (1996) Late Neogene radiolarian biostratigraphy in subarctic Northwest Pacific. *Micropaleontology*, **42**, 3, 221-262.
- 本山 功・丸山俊明(1998) 中・高緯度北西太平洋地域における新第三紀珪藻・放散虫化石年代尺度: 地磁気極性年代尺度 CK92および CK95 への適合。地質雑, **104**, 3, 171-183.
- 荻原成騎・田口一雄(1986) 本邦産磷酸塩ノジュールについて—東北日本新第三系からの磷酸塩ノジュールの発見(要旨)。岩鉱, **81**, 4, 155-156.
- Ourisson, G., Albrecht, P. and Rohmer, M. (1979) The hopanoids: Paleochemistry and biochemistry of a group of natural products. *Pure & Appl. Chem.* **51**, 709-729.
- Sageman, B.B. (1989) The benthic boundary biofacies model: Hartland Shale Member, Greenhorn Formation (Cenomanian), Western Interior, North America. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, **74**, 87-110.
- 坂本竜彦(1992) 佐渡島中山層(中期中新世~初期鮮新世)の堆積リズム。地質雑, **98**, 7, 611-633.
- 佐々木清隆・山本正伸(1986) 青森県鱈ヶ沢町中村川地域の地質と大童子層泥質岩中の有機物—特に, C₂₅ にピークを持つノルマルアルカン分布パターンについて—。石油鉱床学の諸問題, 田口一雄教授退官記念論文集, 223-229.

- Sato, H. and Amano, K. (1991) Relationship between tectonics, volcanism, sedimentation and basin development, Late Cenozoic, central part of Northern Honshu, Japan. *Sed. Geol.*, **74**, 323-343.
- 佐藤俊二・佐々木清隆・田口一雄 (1972) 秋田。新潟地域油田新第三系の有機炭素量と抽出性有機物量—燃焼法による有機炭素分析の検討に言及して—。地質雑, **78**, 12, 643-651.
- Savrda, C. and Bottjer, D.J. (1991) Oxygen-related biofacies in marine strata: an overview and update. In Tyson R.V. and Pearson, T.H., eds., *Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia*, Geological Society Special Publication, London, 201-219.
- Schoell, M., McCafferey, M.A., Fago, F.J., Moldowan, J.M. (1992) Carbon isotopic composition of 28, 30-bisnorhopanes and other biological markers in a Monterey crude oil. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 1391-1399.
- Shimizu, Y., Alam, M. and Kobayashi, A. (1976) Dinosterol, the major sterol with a unique side chain in the toxic dinoflagellates, *Gonyaulax tamarensis*. *Jour. Amer. Chem. Soc.* **98**, 1059-1060.
- Stein, R. (1991) *Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments, Results from the Deep Sea Drilling Project/Ocean Drilling Program (DSDP/ODP)*, Springer-Verlag, Berlin, 217p.
- 鈴木宇耕 (1989) 日本海東部新第三系堆積盆地の地質。地質学論集, no. 32, 143-183.
- Sverdrup, H.U., Johnson, M.W. and Fleming, R.H. (1941) *The Oceans*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 242p.
- Tada, R., Watanabe, Y. and Iijima, A. (1986) Accumulation of laminated and bioturbated Neogene siliceous deposits in Ajigasawa and Goshogawara areas, Aomori Prefecture, Northeast Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, II, **21**, 3, 139-167.
- Tada, R. (1991) Origin of rhythmical bedding in middle Miocene siliceous rocks of the Onnagawa Formation, northern Japan. *Jour. Sedim. Petrol.*, **61**, 1123-1145.
- Tada, R. and Iijima, A. (1992) Lithostratigraphy and compositional variation of Neogene hemipelagic sediments in the Japan Sea. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **127/128**, 1229-1260.
- Taguchi, K., Sasaki, K. and Ushijima, N. (1969) Geochemical significance of porphyrin pigments in the stratigraphic correlation of the Neogene Tertiary rocks 1. Yashima Oil Field, Akita Prefecture, Japan. *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, Sec. III, **3**, 333-348.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会 (1992) 改訂版日本の石油・天然ガス資源。天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 東京, 520p.
- 辻 隆司・増井泰裕・早稲田周・井上洋子・栗田裕司・甲斐邦男 (1991) 秋田県矢島町周辺の女川層の岩相区分と堆積環境, およびその根源岩特性。石油資源開発研究報告 **7**, 45-99.
- 角皆静男・乗木新一郎 (1993) 海洋化学。西村雅吉編, 産業図書, 286p.
- Volkman, J.K. (1986) A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. *Org. Geochem.*, **9**, 83-99.
- Volkman, J.K., Barrett, S.M. and Dunstan, G.A. (1994) C25 and C30 highly branched isoprenoid alkenes in laboratory cultures of two marine diatoms. *Org. Geochem.*, **21**, 407-413.
- 早稲田周・重川 守 (1990) 由利原油・ガス田における炭化水素の生成・移動・集積。石技誌, **55**, 233-244.
- 渡辺剛忠・加藤園江・小坂秀王・小林巖雄 (1977) 新潟県佐渡, 相川-沢根に露出する中新統の泥質岩—とくに, 岩相, 有機炭素量, 窒素量, 珪藻化石について—。佐渡博物館研究報告, **7**, 103-111.
- 渡辺真人 (1992) 富山県氷見・灘浦地域の新第三系の層序—とくに姿累層とその上位層との間の時間間隙について—。地質雑, **96**, 915-936.
- 渡辺真人 (1994) 日本海周辺域にみられる後期中新世の submarine hiatus の形成過程に関する一考察。地調月報, **45**, 471-475.
- Watanabe, Y., Yamamoto, M. and Imai, N. (1994) Sedimentary environment of the Onnagawa Sea: Middle Miocene Japanese backarc trough. In Iijima, A., Abed, A.M. and Garrison, R.E., eds., *Proc. 29th Int'l. Geol. Congr. Part C: Siliceous, Phosphatic and Glauconitic Sediments of the Tertiary and Mesozoic*, VSP, Utrecht, 31-51.
- 渡部芳夫・山本正伸・今井 登 (1994) 堆積盆モデル評価による炭化水素資源ポテンシャル—新第三系女川根源岩相の堆積環境—。地調月報, **45**, 509-525.
- 渡部芳夫・山本正伸・渡辺真人 (1995) 無機地球

- 化学組成から見た女川珪藻質石油根源岩相の堆積物組成と古海洋環境. 石油技術協会誌, **60**, 15-26.
- Wignall, P.B. and Meyers, K.J. (1988) Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach. *Geology*, **16**, 452-455.
- Woodruff, F., Savin, S.M. and Douglas, R.G. (1981) Miocene stable isotope record: A detailed deep Pacific Ocean study and its paleoclimatic implications. *Science*, **212**, 665-668.
- 山本正伸 (1990) 秋田県能代・鷹巣地域の女川層(岩谷層)珪質岩類のバイオマーカー組成. 「資源評価のための三次元モデリング手法に関する研究」第一次中間報告書, 地質調査所, 42-54.
- Yamamoto, M. and Watanabe, Y. (1994) Biomarker geochemistry and paleoceanography of Miocene Onnagawa diatomaceous sediments, northern Honshu, Japan. *In* Iijima, A., Abed, A.M. and Garrison, R.E., eds., *Proc. 29th Int'l. Geol. Congr. Part C: Siliceous, Phosphatic and Glauconitic Sediments of the Tertiary and Mesozoic*, VSP, Utrecht, 53-74.
- 山本正伸・渡部芳夫・渡辺真人 (1994) 中新統女川層珪藻質岩中のジノステランと表層水栄養塩環境. 地調月報, **45**, 527-530.
- Yamamoto, M. and Watanabe, Y. (1995) Molecular geochemical approach to the paleoceanographic assessment of Neogene sediments of Yashima area, Akita Basin, Japan. *J. Jap. Assoc. Petrol. Technol.*, **60**, 27-38.
- 山本正伸 (1995MS) 分子地球化学的手法を用いた東北日本新第三系珪藻質一珪質堆積岩による古海洋環境の復元. 名古屋大学博士論文, 130p.
- 山本正伸 (1998) 秋田県矢島地域新第三系堆積岩の各種結合態バイオマーカーの組成とその起源. 地調月報 (本特集号).

(受付: 1998年7月17日; 受理: 1999年2月18日)