

海水準変動と炭化水素根源岩ポテンシャル：序論

徳橋 秀 一¹⁾

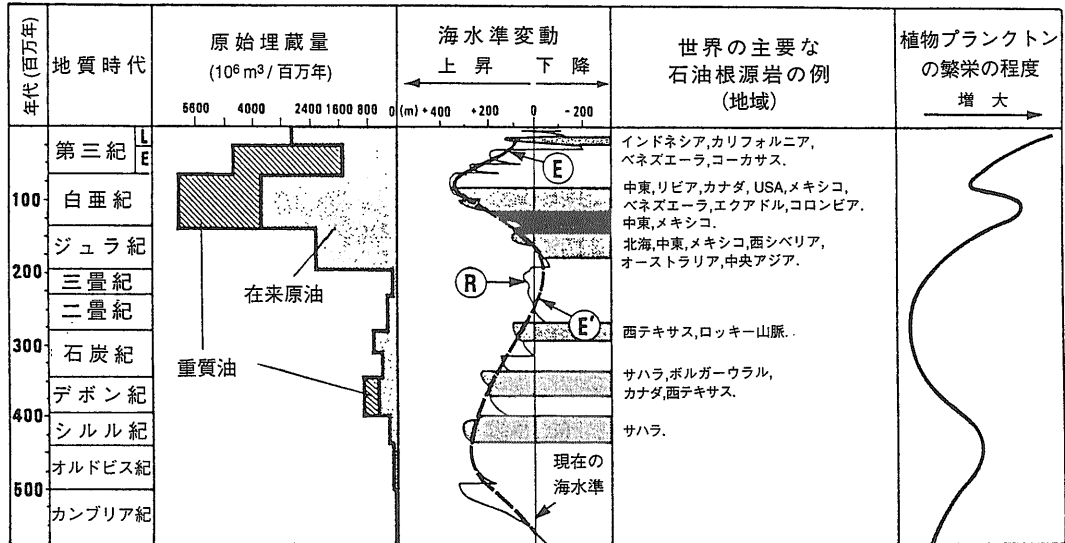
1. はじめに

地球上の炭化水素根源岩ポテンシャルには、時代的・地域的偏りがあり、それが地球表層における環境変動(古海洋環境, テクトニクス, 生物の進化など)と密接に関連していることを, 炭化水素鉱床特集の Part I (地質ニュース, 1995年3月号)では, グローバルな視点から紹介した(渡部・山本, 1995; 鈴木・角井, 1995). 一方著者は, エクソン・カーブに代表されるような海水準変動が地質時代を通してみられ, それが堆積作用に重大な影響を与えてきたこと, また, そういった観点からシーケンス層序学というような新しい層序学が生まれてきたことを同じく Part I で指摘したが(徳橋, 1995), ここでは, 海水準変動と炭化水素根源岩ポテンシャルとの関係について, これまでに指摘されていることを,

代表的な研究例を中心に, 簡単に概観してみることにする.

2. 根源岩ポテンシャルの時代的偏り

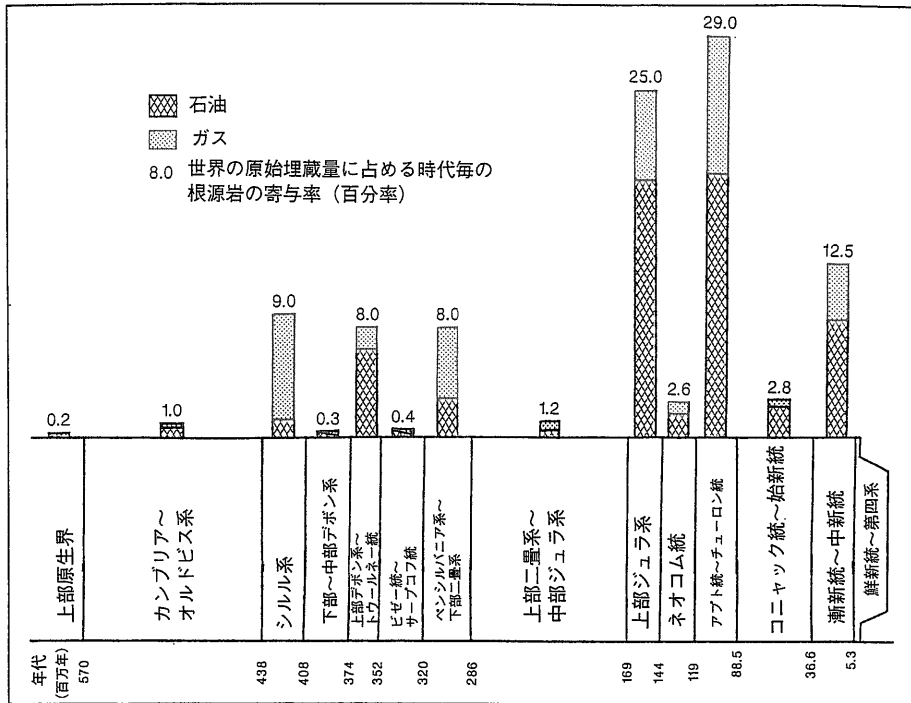
地質時代において, 石油を生成した優秀な根源岩(主に黒色頁岩)の時代的分布には, 極めて偏りがあることが知られている(例えば, North, 1979, 1980; Bois et al., 1982; Tissot & Welte, 1984; Klemme & Ulmishek, 1991). 一方, 中央海嶺の拡大速度と深度との関係をもとに, 計算によって白亜期後期以降の海水準の変化量を求めた Pitman(1978)の絶対的海水準変動曲線や既に紹介したエクソン・グループによる相対的海水準変動曲線(Vail et al, 1977)が提出されると, このような炭化水素ポテンシャルの時代的偏在を, 海水準変動との関係で論じられること



第1図 頭生代における炭化水素根源岩ポテンシャルと海水準変動との関係. Tissot & Welte(1984)をもとに改変. Eは, Pitman(1978)による絶対海水準変動カーブで, E'は, それをさらに古生代まで延長したものの.

1) 地質調査所 燃料資源部

キーワード: 海水準変動, 炭化水素ポテンシャル, 根源岩ポテンシャル, シーケンス層序学



第2図 世界の根源岩ポテンシャルの地質年代毎の分布状況。Klemme & Ulmishek(1992)をもとに改変。世界の90%以上の油・ガスを生成した根源岩は、6つの時代に集中的に形成されたとすることを示している。

も多くなった。

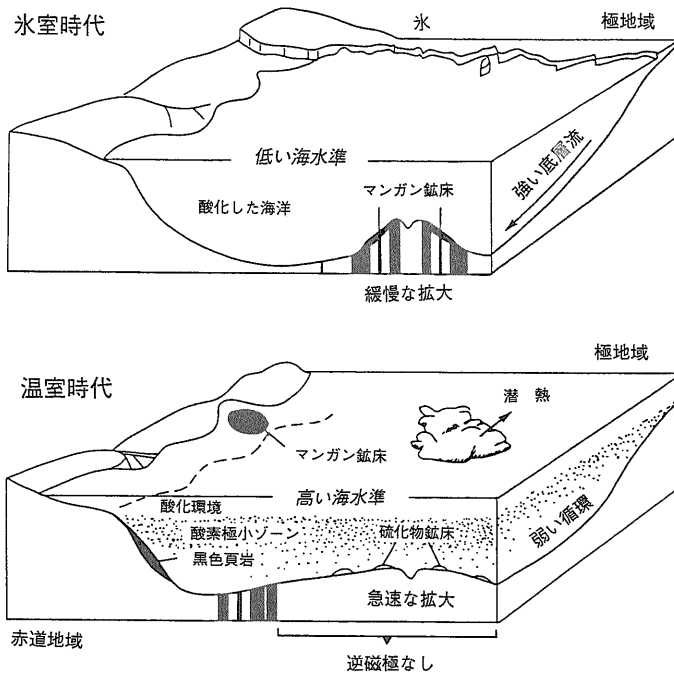
例えば、Tissot(1979)やTissot & Welte (1984)によると、世界の原油を生成した根源岩は、古生代の中期及び中生代中・後期から新生代にかけて多く、これは、古生代以降の第1次のオーダーの海水準変動サイクルにみられる2つのサイクルの高海面期と対応しているということである(第1図)。特に、第2のサイクルの時期、すなわちジュラ紀から第三紀の時期に多く、全体の85%がこの時期に集中しているという。更に、第2次のオーダーの海水準変動サイクルのステージとの関係でより詳しく検討すると、世界の古生代以降の著名な根源岩の多くは、世界的な海進期に形成されたと指摘している(第1図)。

そしてその理由としては、海進によって大陸のプラットフォームや緩やかな凹地に海水が侵入し、広い浅海域(Epicontinental Sea)が形成される。このような浅海域では、光合成プランクトンの第1次生産性が高いうえに、特に藻類の異常発生が起りやすく、その結果、バクテリアによる酸素の消費が盛んになるために還元的な環境となり、石油指向型で

あるタイプII型の有機物に富んだ根源岩が形成されるためであるとしている。

Bois et al. (1982)は、中東地域を初めとして、特別に高い根源岩ポテンシャルを有する白亜期については、世界的な海進による浅海域の拡大と第1次生産者の増加のほかに、特に、 Gondwana大陸とローレシア大陸の間に挟まれ外洋から隔離された、したがって、大規模な大洋循環の影響をうけないテチス海(Mesogean Seas)の存在の重要性を強調している。

一方、Klemme & Ulmishek (1991)は、世界の油の90%以上をもたらしした根源岩は、比較的短い6つの地質学的時代に形成されたが(第2図)、そのうちの4つは世界的な海進の時期に形成され、残りの2つは海退の時期に形成されたものであるとして、世界的な海水準変動サイクルの特定のステージとの対応については否定的である。そして、高い根源岩ポテンシャルを有する黑色頁岩の形成要因としては、堆積盆の地形的な隔離の程度、海水の循環パターン、表層における第1次生物生産量と底質における有機物の消費量との間の収支が最も重要で



第3図 氷室時代と温室時代における地球表層環境の比較. Force(1984)をもとに改変.

あるとしている。そして、そのような条件を満たしたところとして、テーチス海(proto-Tethys, paleo-Tethys, neo-Tethys)の存在の重要性を指摘している。

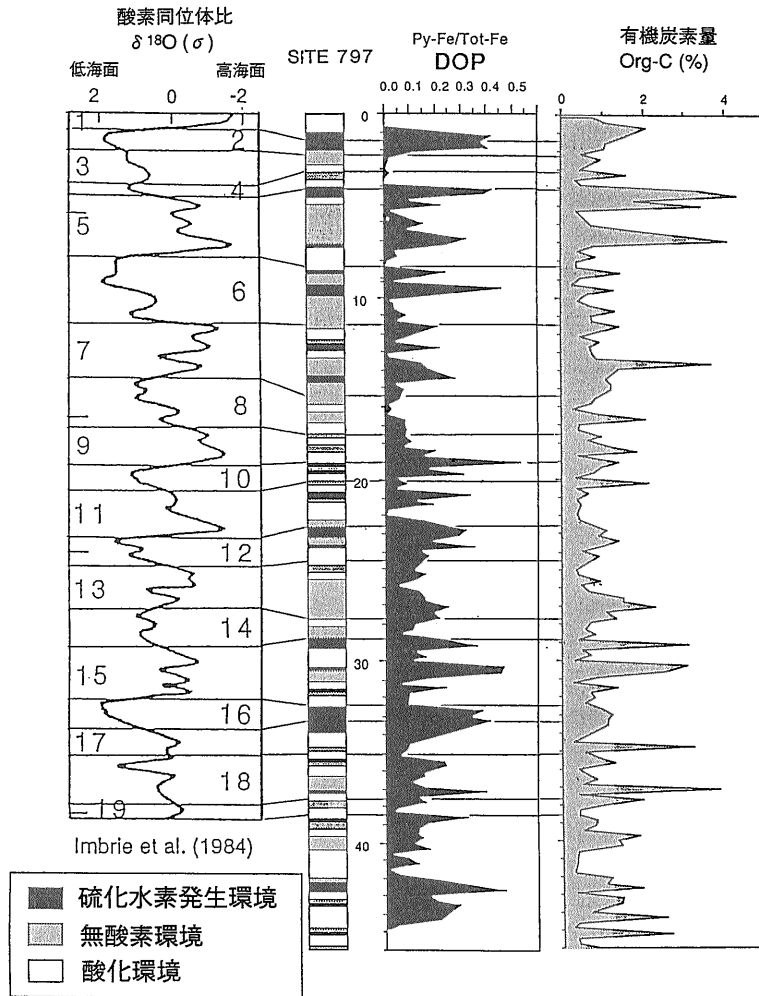
この他、根源岩ポテンシャルは極地域を中心とする氷床の発達とも密接に関連しているとされている(第3図)。すなわち、極地域周辺において大規模な氷床が存在・発達する時代(氷室時代)には、低緯度と高緯度地域の海水の温度差の増大が大規模な海水の循環をうながすために、還元的環境は形成されにくく、根源岩ポテンシャルは低くなるが、逆に、極地域における氷河の発達が無視できるような時代(温室時代)には、温度差による南北方向の海水の循環も弱く、また、海水の温度も高いために酸素溶存量が低くなり、海水はより還元状態になりやすく、根源岩ポテンシャルが高くなると考えられている(Fisher & Arthur, 1977; Berry & Wilde, 1978; Bios et al., 1982; Force, 1984; Tissot & Welte, 1984; 増田, 1990; など)。

3. 古日本海堆積物にみられる関係

第三紀以降に形成された古日本海などの縁海の堆

積盆地における海水準変動と堆積物や有機物量との関係については、1989年夏、日本海で行われた国際深海掘削計画(ODP)第127次、第128次航海のコア試料(計6地点)の分析結果から、多くの新しい情報が得られつつある。それによると、中期中新世以降の堆積物に見られる大きな特徴の一つは、いくつかの層準に明瞭な白黒(明暗)バンドないし縞模様が観察されることである(多田・玉木, 1992; Tada et al, 1992)。

このうち第四紀中・後期の縞模様については、日本海の広い範囲で対比することができるとともに、その周期を検討すると、ミランコビッチ・サイクルに対応していることが明らかにされた(多田, 1991a, b; Tada et al., 1992)。特に、酸素同位体曲線によって、約10万年周期で100 m前後の氷河性海水準の変動(昇降運動)があったことが知られているブリュンヌー松山古地磁気境界(約80万年前)以降の堆積物については、各種の詳しい分析がなされている。それによると、珪藻の固体数の変動パターンが、酸素同位体曲線の変動パターンと非常によく調和していることから、珪藻の固体数の変動パターンは、酸素同位体曲線の代わりに日本海域における年代層序として使えることが判明した(小泉, 1992;



第4図 ODP797地点における第四紀後半の酸化・還元環境，DOP，有機炭素量と酸素同位体比曲線との関係。多田(1994)をもとに改変。

Tada et al., 1992). そのことを利用して海水準変動と底層環境及び有機炭素量との関係を検討すると，間氷期の高海水準期には，有機炭素量の値が低くて(全有機炭素量が1%以下)比較的厚い(1 m 以上)明色層が形成されている．一方，氷期の低海水準期には，相対的には中くらいの有機炭素量(全有機炭素量が1~1.5%)を有する比較的厚い(1 m 以上)暗色層が形成されている．そして中間の中程度の海水準期に，無酸素環境で(non-euxinic anoxic)，最も有機炭素量が大きくて(全有機炭素量が2%以上)，比較的薄い(30 cm 未満)暗色層が形成されている(第4図)。

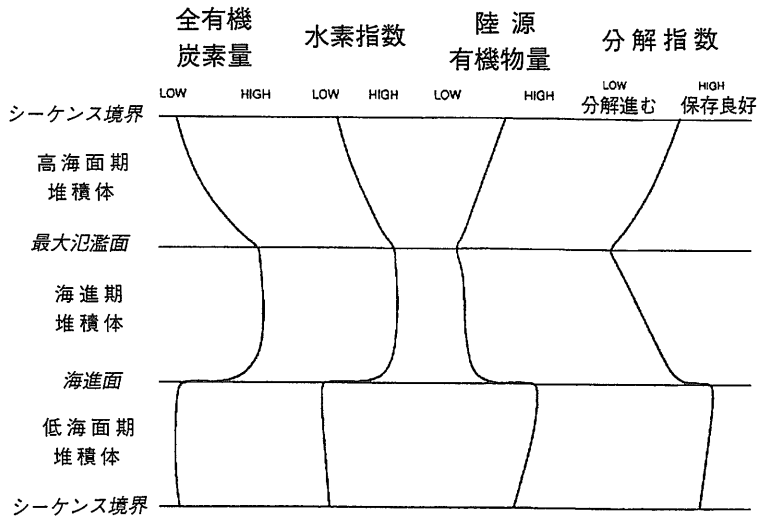
このような現象は，高海水準期における南からの暖流の流入とこれらの深層水(日本海固有水)への転

換による酸素の継続的な供給，また低海水準期における日本海の閉鎖化と沿岸水や陸水の流入による表層水の塩分低下やそれによって引き起こされる密度成層の形成と垂直混合の低下による底層水の強還元環境への変化，及び底層水中の栄養塩類の量や湧昇流との関係を考慮することによって説明可能であるとしている。

縁海における半遠洋性堆積物には，海水準変動に伴う環境変化が極めてセンシティブに保存されているという今回の日本海での ODP の成果により，多田(1991c, 1994)は，ミランコビッチ・サイクルにみられるようなサイクル特性(堆積リズム)の解析を層序学の武器にしようとする，高精度サイクル層序学の重要性を指摘している。

第1表 堆積シーケンスを構成する各堆積体・境界面における特徴のまとめ。Pasley et al.(1993)をもとに編集。

堆積体と境界面	電気検層特性	有機物特性
高海面期堆積体	前進性	最大氾濫面より上方へ全有機炭素量 (TOC) 及び水素指数 (HI) の減少。陸源有機物量 (TOM) とその保存率の増大 [分解指数 (DI) の減少]
最大氾濫面	最大ガンマー線値	この面付近の試料が最大の全有機炭素量や水素指数を示すとはかぎらず、一般的には、陸源有機物量が最小となる。植物片の分解が高度に進んでいる (分解指数は最小値を示す)。
海進期堆積体	後退性	最大の全有機炭素量や水素指数を示し、十分な厚さを有していれば、最も高い根源岩ポテンシャルを有している可能性が大きい。陸源有機物量は、上方の最大氾濫面に向かって減少する。植物片は高度に分解している。
海進面	下位の累積性から上位の後退性への変換	この面より上の試料の陸源有機物量は、その直下のそれよりも相当量少ない。この面より上では、植物片の分解がより進むことから、この面を境に、分解指数の急激な減少がみられる。
低海面期堆積体	累積性～前進性	この堆積体からは、最低の全有機炭素量と水素指数が得られている。陸源有機物は豊富でよく保存されている (高い分解指数)。
シーケンス境界	下位の前進性から上位の累積性への変換	有機物質の特性からは、最も識別しにくい面。この面より上位の低海面期堆積体では、下位の高海面期よりも植物片がより保存されやすいことから、一般的には、分解指数の増大が見込まれる。



第5図 堆積シーケンス内部における各種有機地球化学的指標の垂直変化パターン。Pasley et al.(1993)をもとに改変。

4. シーケンス層序学と根源岩ポテンシャル

シーケンス層序学と根源岩ポテンシャルとの関連については、最近 Katz & Pratt 編による“Source

Rocks in a Sequence Stratigraphic Framework”という特集号が AAPG Studies in Geology の no. 37 (1993)として発刊され、そのなかでこの問題が取り上げられている。特に Pasley et al. (1993)は、米

国のニューメキシコ州サン・ホアン堆積盆に分布する上部白亜系の陸棚堆積物であるマンコス頁岩 (Mancos Shale) を対象に有機地球化学的解析を行って、炭化水素ポテンシャルとシーケンス層序学的に区分された堆積体や境界面との関連を検討するなど、この問題を正面から取り上げている。そして、両者の間により対応関係があることを明らかにし、それを表と図にまとめている (第1表・第5図)。

それによると、前進的な (forestepping) パラシーケンス・セットがみられる低海面期堆積体や高海面期堆積体の場合には、陸源性有機物の量は上方に増大するとともに、分解指数 (Degradational Index; DI) も高くなってその保存の度合いが増加する。ここで分解指数とは、高度に分解されて不定形化した陸源植物片 (phytoclast) に対するよく保存された陸源植物片の比のことである。一方、全有機物量 (Total Organic Matter; TOC) や水素指数 (Hydrogen Index; HI) は、陸源物質による希釈の影響を受けて、低いか上方に減少する。それに対して、後退的な (backstepping) パラシーケンス・セットがみられる海進期堆積体の場合には、陸源性有機物の量は急激に少なくなり、陸源物質による希釈の影響が小さいことから、全有機炭素量や水素指数は最も高い値を示す。分解指数は上方に急速に低くなり陸源植物片の分解が著しい。

これらの結果から、陸棚の泥質堆積物の場合、根源岩ポテンシャルが最も高いのは海進期堆積体であり、このような例は最近他のところでも知られているとしている (Leckie et al., 1990; Posamentier & Chamberlin, 1993; Wignall, 1991)。そして、ダウンラップ面と一致するコンデンスト・セクションが根源岩ポテンシャルが最も高いとするこれまでの考え方 (Loutit et al., 1988 など) に、否定的な見解を示した。

また、下位の低海面期堆積体と上位の海進期堆積体を区切る海進面 (Transgressive Surface) を境に、全有機物量、水素指数、陸源性有機物の量、分解指数などの値に急変が認められることから、これらの値は、陸棚泥質堆積物における海進面の認定にも大変有用であるとしている。すなわち、こうした有機物のタイプや量を扱う有機物相 (Organic Facies) も、統合的な層序学であるシーケンス層序学の構築のための有用なツールとして含めるべきであると

もに、シーケンス層序学は、根源岩の炭化水素ポテンシャルを予測する上でも、大変重要な役割をはたすことができると結論づけている。

5. あとがき

本論の主題である海水準変動と炭化水素根源岩ポテンシャルとの関連は、極めて大きなテーマであり、本論ではそのさわりを紹介したに過ぎない。海水準変動は、地球表層部の環境の変遷と密接に関連しているとともに、それらに最も大きな影響をもたらすとみなされることから、炭化水素の根源岩ポテンシャルの変遷は、地球環境の変遷を反映したものにはかならないともいえる。また、最後に取り上げた根源岩ポテンシャルとシーケンス層序学的な枠組みとの関連についての検討や研究は、最近始まったばかりであり、今後ますます盛んになることが予想される。

最後に、本原稿の粗稿に目を通して有益なご意見をいただいた燃料資源部の渡部芳夫氏にお礼申し上げます。次第です。

参考文献

- Arthur, M. A. & Schlanger, S. O. (1979): Cretaceous "oceanic anoxic events" as causal factors in development of reef-reservoired giant oil fields. AAPG, Bull., vol. 63, 870-885.
- Berry, W. B. N. & Wilde, P. (1978): Progressive ventilation of the oceans-an explanation for the distribution of the lower Paleozoic black shales. Amer. Jour. Sci., 278, 257-275.
- Bois, C., Bouche, P. & Pelet, R. (1982): Global geologic history and distribution of hydrocarbon reserves. AAPG Bull., 66, 1248-1270.
- Fisher, A. G. & Arthur, M. A. (1977): Secular variations in the pelagic realm. SEPM, Spec. Pub., no. 25, 19-50.
- Force, E. R. (1984): A relation among geomagnetic reversals, sea floor spreading rate, paleoclimate, and black shales. EOS, 65, 18-19.
- Klemme, H. D. & Ulmishek, G. F. (1991): Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors. AAPG Bull., 75, 1809-1851.
- 小泉 格 (1992): 日本海の後期第四紀珪藻群集に見られるミランコビッチ周期。安成哲三・柏谷健二編: 地球環境変動とミランコビッチサイクル, 146-158, 古今書院。
- Leckie, D. A., Singh, C., Goodarzi, F. and Wall, J. H. (1990): Organic-rich, radioactive marine shale: a case study of a shallow-water condensed section, Cretaceous Shaftsby Formation, Alberta, Canada. Jour. Sediment. Petrol., 60, 101-117.
- Loutit, T. S., Hardenbol, J., Vail, P. R. & Baum, G. R. (1988): Condensed sections: the key to age determination and correlation

- of continental margin sequences. SEPM, Spec. Pub. no. 42, 183-213.
- 増田富士雄(1990): 氷河時代と無氷河時代—酸素同位体からみた地質時代の気候—。ハイドロロジー, **20**, 5-16.
- North, F. K. (1979): Episodes of source-sediment deposition (1). Jour. Petrol. Geol., **2**, 199-218.
- North, F. K. (1980): Episodes of source-sediment deposition (2). Jour. Petrol. Geol., **2**, 323-338.
- Pasley, M. A., Riley, G. W. and Nummedal, D. (1993): Sequence stratigraphic significance of organic matter variations: example from the Upper Cretaceous Mancos Shale of the San Juan Basin, New Mexico. J. Katz and M. Pratt (eds.): Source rocks in a sequence stratigraphic framework, AAPG Studies in Geology, no. 37, 221-241.
- Parrish, J.T. (1982): Upwelling and petroleum source beds, with reference to Paleozoic. AAPG Bull., **66**, 750-774.
- Pitman, W. C. (1978): Relationship between eustacy and stratigraphic sequences of passive margins. Geol. Soc. Amer. Bull., **89**, 1389-1403.
- Posamentier, H. W. and Chamberlin, C. J. (1993): Sequence stratigraphic analysis of Viking Formation lowstand beach at Joarcam Field, Alberta, Canada. In H. W. Posamentier, C. P. Summerhayes, B. U. Haq, and G. P. Allen (eds.): Stratigraphy and facies associations in a sequence stratigraphic framework, IAS Special. Publ., no. 18, p. 469-485.
- 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, no. 487, 17-25.
- 多田隆治(1991a): 日本海堆積物に見られる堆積リズムと海洋変動。地球, **13**, 606-612.
- 多田隆治(1991b): ミランコビッチサイクルと日本海海洋変動。科学, **61**, 640-644.
- 多田隆治(1991c): 高精度サイクル層序学のすすめ。地球, **13**, 478-480.
- 多田隆治(1994): 石油探鉱における堆積リズム解析の可能性—第四紀日本海海洋循環ダイナミックスの復元を例として。石技協, **59**, 54-62.
- Tada, R., Koizumi, I., Cramp, A. and Rahman, A. (1992): Correlation of dark and light layers, and the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea. In K. A. Pisicotto et al. (eds.) Proc. ODP, Sci. Results, 127/128, Part 1, 577-601, College Station, TX (ODP).
- 多田隆治・玉木賢策(1992): 日本海深海掘削の成果とその層序学的意義。石技協会誌, **57**, 103-111.
- Tissot, B. (1979): Effects on prolific petroleum source rocks and major coal deposits caused by sea-level changes. Nature, no. 277, 463-465.
- Tissot, B. & Welte, D. H. (1984): Petroleum formation and occurrence. Springer-Verlag, 699p.
- 徳橋秀一(1995): 海水準変動と堆積作用: シーケンス層序学序論。地質ニュース, no. 487, 26-35.
- Vail, P. R., Mitchum, Jr., R. M., Todd, R. G., Widmie, J. M., Thompson, S., Sangree, J. B. and Bubb, J. N. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level. AAPG, Mem., no. 26, 49-212.
- 渡部芳夫・山本正伸(1995): 地球環境の変遷と石油天然ガス根源岩の形成。地質ニュース, no. 487, 7-16.
- Wignall, P. B. (1991): Model for transgressive black shales? Geology, **19**, 167-170.

TOKUHASHI Shuichi (1995): An Introduction to the Relationship between Eustatic Change and Hydrocarbon Source Rock Potential.

〈受付: 1994年11月29日〉