

深海堆積物中の Toarcian 海洋事変

堀 利栄*

HORI S. Rie (1993) Toarcian Oceanic Event in deep-sea sediments. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 44(9), p.555-570, 11 fig., 1 table, 1 plate.

Abstract: Toarcian Oceanic Event, characterized by a global change of oceanic environment including OAE (oceanic anoxic event) defined in this paper, is regarded as an oceanic event occurring stepwise at Pliensbachian and early Toarcian ages during Early Jurassic based on radiolarian biostratigraphic data, lithologic and geochemical analyses of Lower Jurassic deep-sea sediments and a comparison with documented data from calcareous sediments in Europe as follows, 1) The radiolarian biostratigraphy has exhibited drastic faunal turnover from latest Triassic and earliest Jurassic affinity to late Jurassic and early Cretaceous one at Pliensbachian and early Toarcian. These faunal turnover have been investigated among other marine invertebrates from shallow- and deep-sea sediments in a global scale. 2) Distinct lithologic changes, black cherts with FeS₂ indicating OAE, shale ticking or a stratigraphic gap over 20m.y., have been recognized in deep-sea bedded chert sequences at immediately before the end of the early Toarcian faunal change and occasional presence of reworked fossils after that, as the same manner of those in shallow-sea sediments such as limestone sequences.

These synchronistic faunal and lithologic change suggests that a global environmental change took place drastically both in deep- and shallow-seas at the same time, which probably generated by the current migration change due to opening of Tethyan seaways.

A model for the cause and consequences of the Toarcian Oceanic Event are discussed herein.

要 旨

下部ジュラ系層状チャート中の放射虫化石群集・岩相変化及び地球化学的分析をもとに, Toarcian期における海洋事変を詳細に検討した。その結果, 本事変は, Pliensbachian期と Toarcian期前期の2度にわたって世界的な規模での海洋環境変動として進行したことが以下の事実により明らかになった。

1) 放射虫化石群集は, 上記2時期をへてジュラ紀中・新世および白亜紀に多産する種に近縁なものが優勢になる変化を示し, 特に multicyrtids において顕著に観察される。このような中生代後期型への変化は, 世界各地の深海・浅海堆積物中に産出する放射虫化石を含む海生無脊椎動物化石において広く識別され, その変化時期は一致

している。

2) 岩相は, Toarcian期前期の動物相変化層準直前において顕著に変化しており, 厚い頁岩や貧酸素状態(OAE)を示す FeS₂を含む黒色堆積物が深海・浅海相とも卓越する。また, まれにトリアス紀新世におよぶ堆積間隙がみられ, コノドントなどの再堆積も観察されることから, 深海・浅海における底層流の変化が示唆される。

3) 動物相の2つの変化相準と一致して, 顕著な堆積物中の酸素・炭素同位体比の変化が報告されており, なんらかの海洋環境変化(海水温や生物生産量の変動)が動物相変化の要因となったことが推察される。

ジュラ紀古世後期(Pliensbachian期・Toarcian期を含む)は, バンゲア大陸の分裂に伴いテチス水路の形成された時期とされている。堆積物中に記録された上記の変

*愛媛大学教養部地学教室

Keywords: Toarcian, Pliensbachian, Deep-sea sediments, Radiolaria, Oceanic environment, OAE, Tethyan seaway

化は、水路の開通による海流循環の表層から深層に及ぶ変化とそれに起因する環境変動モデルで説明可能である。

1. はじめに

顕生代にはいくつかの海洋環境の急激な変化が知られている (以後、海洋事変と呼ぶ、第 1 図)。そしてこのような海洋事変は、その年代の化石相、岩相及び堆積物の同位体比の変化として間接的に記録されている (e.g., Fischer, 1984a; Holser, 1984)。海洋事変の原因としては、大陸の離合集散、大規模な火成活動、海水準変動、気候変動などがあげられているが (e.g., Fischer, 1984a; Worsley *et al.*, 1984; 海保, 1992)、事変の規模に応じて主因が異なるとされている。第 1 図に示した Oceanic Anoxic Event (低酸素海洋事変) を伴う海洋事変のうち、中でも古生代/中生代 (Permian/Triassic) 境界とジュラ紀古世後期 (Toarcian) の事変 (第 1 図中星印) は、大陸の配置変換 (前者はパンゲア大陸の形成と後者はパンゲア大陸の分裂に関係する) に起因するとされている (e.g., Fischer, 1984a; Summerhayes, 1986)。

日本には、世界的にもまれな古生代/中生代 (Permian/Triassic) 境界とジュラ紀古世後期 (Toarcian) の年代を示す深海堆積物が広く分布している。深海堆積物は地球規模での平均的な情報を記録しており (堀・丸山, 1991)、しかも連続層序で時間軸に沿った観察を行なうこと

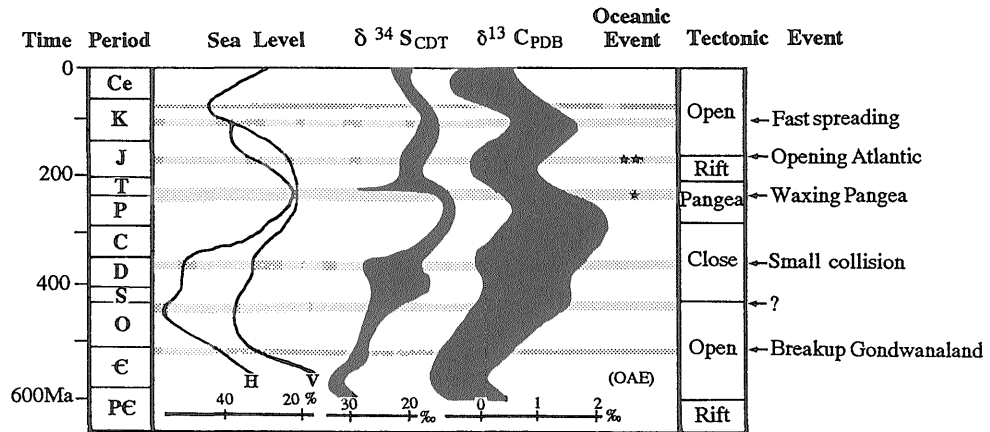
ができるので、海洋環境の変化がどのように起こり、どのように回復していったかを追跡する材料として最適である。本論では、ジュラ紀古世後期の Toarcian 期に着目し、深海堆積物から得られる放散虫化石群集の変化と岩相変化の情報をもとに、Toarcian 期の環境変動 (第 1 図中 2 つ星印) が地球規模での現象であることを証明し、当時の海洋環境変化の過程を推論する。

2. 海生無脊椎動物相の変遷

Toarcian 期における海生無脊椎動物相の激変*¹は、主に浅海相に産出する底生や半浮遊性の化石動物群において報告されてきた。このため、Toarcian 期の激変は地域的な環境変化の影響の結果起きたもので、Sepkoski & Raup (1986) が示唆したような凡世界的な変化ではないという意見が主張されていた (Hallam, 1986)。しかしながら以下に述べるように、浮遊性生物の代表である放散虫の化石群集は、この年代において著しく変化しており (Hori, 1988)、しかもその変化が層状チャートなどの大洋底での深海堆積物中で識別されることから、凡世界的規模での動物群の変化であることは明らかである。放散虫化石群集の変化

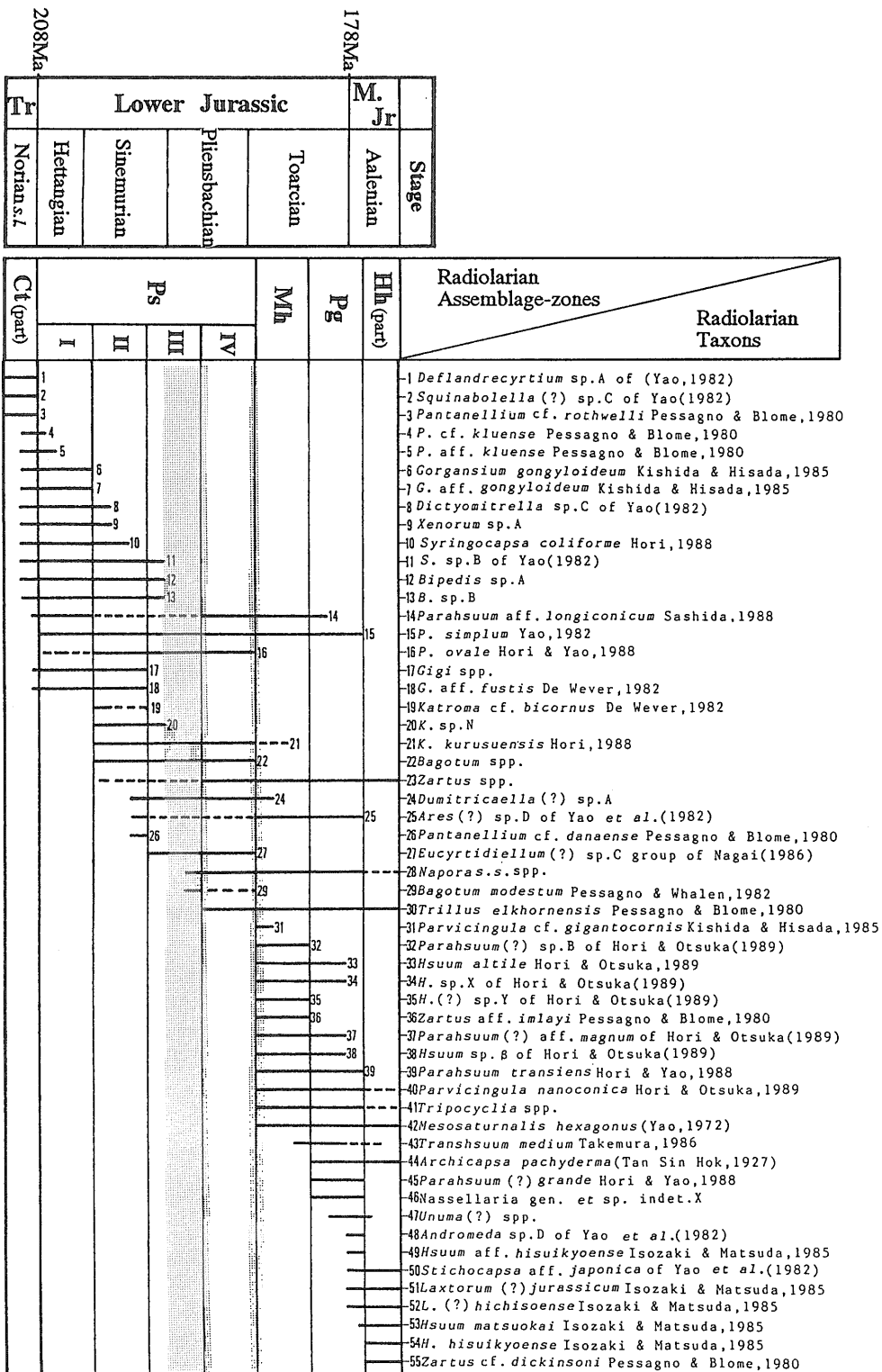
第 2 図に日本各地の深海堆積物に産出する放散虫化石

*¹本論では新しい種の出現を重視するため、特に大量絶滅という言葉を使用していない。



第 1 図：顕生代における主要な海洋事変と大陸の分離・合体。

Sea level, $\delta^{34}\text{S}$ と $\delta^{13}\text{C}$ は、Fischer (1984b) を引用。H: Hallam curve; V: Vail curve。 $\delta^{34}\text{S}$ に関しては、Holser (1984) の Fig. 2 に示されたデータも考慮し加筆してある。海洋事変 (Oceanic Event) は、Holser (1984) の Fig. 1 にまとめられた低酸素事件 (Oceanic Anoxic Event = OAE) の主なものを網かけ線で示してある。Tectonic Event は、Worsley *et al.* (1984) のパンゲア大陸の分離・合体の時代区分を引用。Sheridan (1983) と Veever (1989) をもとに、OAE に対応する大陸配置に関する Tectonic Event を記入してある。星印は日本のジュラ紀付加体中の層状チャートに観察される海洋事変。



第2図：日本における下部ジュラ系層状チャート層に産出する主要な放射虫化石とその産出範囲。帯状に示してあるのが、今回議論する Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における変化。Hori (1989) に引用加筆。

群集の変化をまとめたものを示す。

Toarcian 期における海生無脊椎動物の変化は、Pliensbachian 期から Toarcian 期前期にかけて起こる 1 つの変化として語られることが多かった (e.g., Sepkoski & Raup, 1986)。しかし、連続層序での放散虫化石群集の詳細な検討は、従来ひとつにまとめられていた変化が、実際には Pliensbachian 期と Toarcian 期前期の 2 回に分けて段階的に起こっていることを明らかにした (第 2 図及び第 I 図版)。この間に起こった放散虫化石群集の変化は、系統進化の点から見れば、中生代の前期型から中生代の後期型への変化である。

さまざまな放散虫の系統進化のなかでも、変化が明瞭なのは、Toarcian 期前期に起きた Nassellaria 目の変化である。多節 Nassellaria (multicyrtids) の系統分化がジュラ紀古世後期からジュラ紀中世前期の期間に起こったことは、Pessagno & Whalen (1982) や松岡 (1986) などによって指摘されていたが、変化層準が Toarcian 期の前期から中期の短期間に限定されて凡世界的に起こっていることが明確になったのは最近である (Hori, 1989 など)。以下に 2 つの時期において観察される放散虫化石の変化を簡単に紹介する。

Pliensbachian 期の変化

特長: *Trillus* 属 (*Trillus elkhornensis*) と *Napora* 属 (狭義) の出現で特長づけられる。

変化: トリアス紀最末期からジュラ紀最前期に多産する *Gigi* 属や *Bipedis* 属が Pliensbachian 期前期 (もしくは Sinemurian 期後期? に入る) に急激に絶滅した後、Pliensbachian 期後期に *Trillus* 属と *Napora* 属 (狭義) など、multicyrtids 以外の中生代後期型のグループが徐々に出現する。この変化は、後でべる Toarcian 期の変化と比べ長時間 (約 5 m.y.) かけて起こっている。

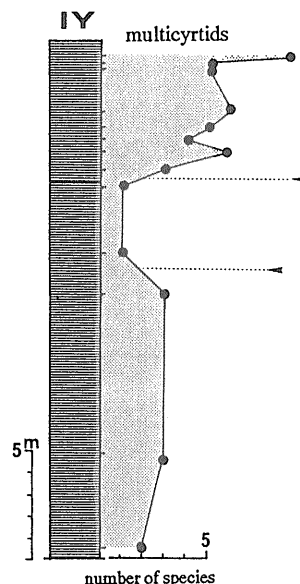
Toarcian 期の変化

特長: *Parvicingula* 属 (広義) の出現で特長づけられる。

変化: 多節塔状 Nassellaria に顕著に現われ、ジュラ紀後期から白亜紀に多産する *Parvicingula* 属が出現する。出現初期の種は、小型である。また *Hsuum* 属や *Parahsuum* 属においては層準が上位になるに従って、大型化が観察されると共に、多様性が増す変化がみられる。多様性増加の例を第 3 図に示す。第 3 図は、層準毎に保存良好な 100 個体の標本をランダムに取り出し、電子顕微鏡観察したときに何種の multicyrtids が同定できるかを示したものである。2 つめの破線の示す層準 (Toarcian 期前期) 以降、明らかに multicyrtids において種数が増加しているのが認められる。

Saturnaliidae においても中生代の前期型から中生代の後期型への変化が観察される。*Mesosaturnalis* 属は、トリアス紀から白亜紀にかけて優勢な放散虫である。中でもリング状の殻に刃状の突起を持つグループは、ジュラ紀中世から白亜紀にかけて特徴的に多産する。層状チャートの連続層序断面の検討に基づくと、このようなグループの出現は Toarcian 期前期である。後期型への変化は、特に *Mesosaturnalis hexagonus* (第 I 図版の 5) に顕著に観察される。*M. hexagonus* は、ジュラ紀中世の *Unuma echinatus* 群集に特長的な放散虫化石であり、突起の発達した六角形のリングと 6 本の刺針を持つのが特長である。この種は、出現当初小型で刃状の突起が未発達であったのに、年代を経るに従って大型化し、刃状の突起が発達した、よりジュラ紀中世型に近い個体が出現する。

上記のような放散虫化石群集の変化は、日本だけでなくアメリカ西海岸のフランシスカン層群に含まれる層状チャート層においても、またオレゴンやクイーンシャーロット島に分布する泥岩などの浅海堆積物中においても認められる (e.g., Pessagno & Whalen, 1982; Murchey, 1984)。Murchey (1984) の論文に示されたフランシスカン層群中の放散虫化石群集の変化は、断片的であるが日本の層状チャートの変化と同じ傾向を示す。つま

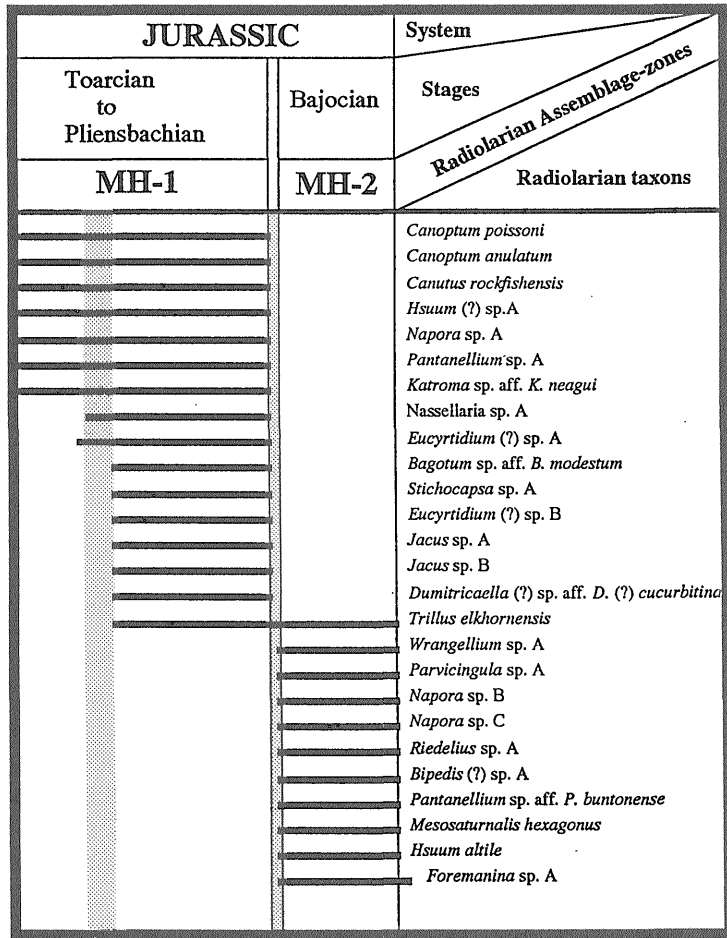


第 3 図: 下部ジュラ系に産する多節 Nassellaria (ここでは multicyrtids) の種数の変化。Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における変化 (点線の層準) では、Toarcian 期前期以降、明かに種数が増加する。

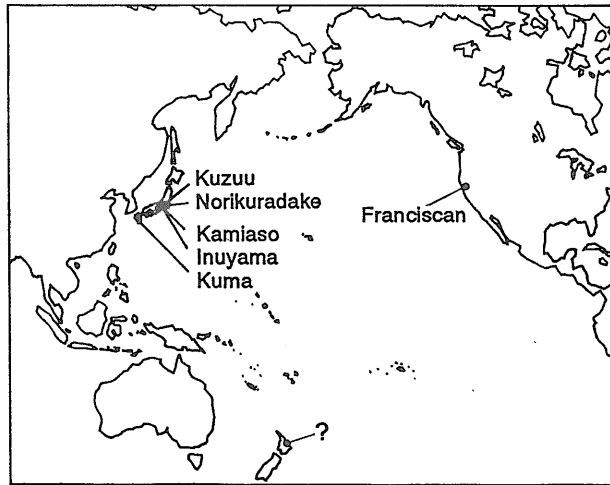
り、フランシスカン層群中の層状チャートにおいても *Trillus* 属の出現層準と *Parvicingula* 属の2つの出現層準において著しい変化が観察される (第4図)。第4図に示した放散虫群集帯のMH-1中とMH-1からMH-2の変化が上記2層準に対応する。第5図には同様な放散虫化石群集の変化を連続層序断面で確認した地域を示す。

放散虫化石群集で見られた Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における変化は、アンモナイトなどの

ジュラ紀の代表的な示準化石である海生無脊椎動物群においても明確に認められる (第1表)。ただし、石灰質ナンノプランクトンは Pliensbachian 期においては、著しく変化するが、Toarcian 期前期においては顕著な変化がいまのところ認められていない。しかし、Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における変化は、多くの海生無脊椎動物群において認められ、しかも後者の変化は放散虫の変化と同じく、中生代の前期型から中生代の後期型への変化であることが指摘されている (e.g., Hal-



第4図：北米フランシスカン層群中のジュラ系下部層状チャートに見られる放散虫化石の群集変化。Murcley (1984) 引用・加筆。網線で帯状に示してある層準が第2図における層準と対応する。示されている化石群集の年代は、現在の放散虫生層序から判断するとやや若めになっている。



第5図：Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における放射虫化石群集の急変が深海堆積物中に識別された地域。

第1表：Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における海生生物の変化。

Taxons	Pliensbachian	early Toarcian
Ammonoid	+	+
Brachiopod	+	+
Cephalopod	+	+
Bivalvia	+	+
Ostracod	+	+
*Radiolaria	+	+
Nannoplankton	+	-

著しい変化が認められるものは+，認められないものは-。

lam, 1961).

3. 堆積相の変化

海生無脊椎動物の変化要因を探るために、化石動物群が含まれる母岩に記録されている変化をそれぞれの層準ごとに検討した（一部 IGC1992で発表）。

3.1 深海堆積物中の Toarcian セクション

Toarcian 期の層状チャート層は、日本各地に分布しているが、ここでは美濃帯犬山地域と上麻生地域の例をあげる。以下にあげたような岩相変化は、詳細に検討すれば、他の地域においても認められる可能性がある。

3.1.1 岩相変化

Pliensbachian 期の変化層準については、露頭レベルで確認される岩相変化が見られない一方で、Toarcian 期においては明瞭な岩相変化が観察される。Toarcian

期の岩相変化にはいくつかのパターンが観察され、第5図に代表的な例をあげる。この論文では層状チャートの色調変化について、有機物に富む黒色チャート以外にはとくに言及していない。なぜなら、層状チャートの色調変化が直接初生的な堆積環境変化を反映している可能性は低いからである。例えば、赤色チャートが漸層などにそつてうぐいす色から緑色に変化しているのは、よく見られる事実であるし、また隣り合った露頭でかつ同じ年代の層状チャートであっても、違うパイルナップであれば、まったく相違した色調をしめすのが普通である（例 IY と UF など）。

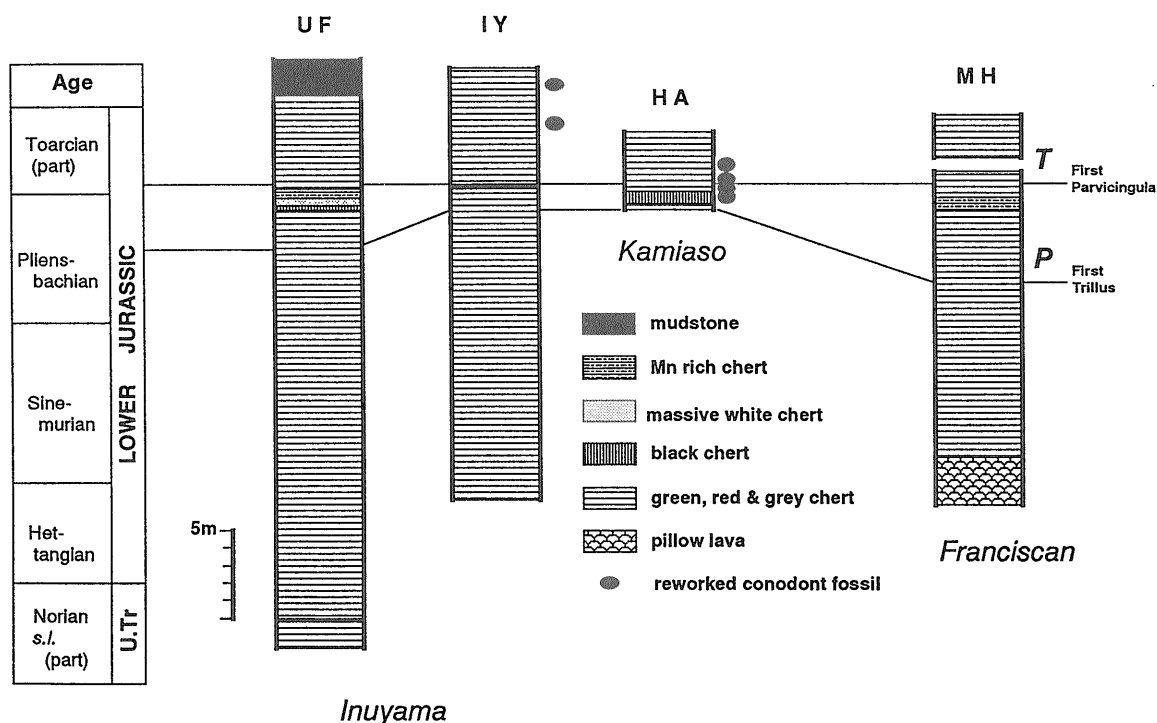
識別された岩相変化の軽微な例としては、層状チャート中の泥質部の厚さが部分的に増す変化があげられる（例 IY Section）。層状チャートは、数 cm の珪質部と数 mm の泥質部の互層で構成されているのが普通であるが、Toarcian 期の *Parvicingula* 属出現層準直下におい

て、数 cm から20cm にもわたる泥質部が発達する場合がある。同様な層準における最も顕著な岩相変化例は、犬山地域の勝山セクション (UF Section, 詳しくは Hori, 1992) である (第6図)。ここでは、Pliensbachian 期の *Trillus* 属の出現層準上位数mの層準において、黒色を呈し黄鉄鉱のノジュールを含むチャート層が分布し、50cm から1mの厚さの再結晶の著しい白色チャートとマンガンに富む層状チャートがその上位に発達するのが認められる (第7図)。一般に、Toarcian 期の *Parvicingula* 属出現層準直下の層状チャートは、黒色を呈し有機物に富み、層準によっては黄鉄鉱のノジュールを含むことが多い。その直上のチャートにはまれに、単層中に数 mm の厚さで層状に菱マンガン鉱を含むマンガン鉱床が発達することがある (Hori, 1992)。必ずしも日本のジュラ系の層状マンガン鉱床が Toarcian 期に限って発達するわけではないが (例えば、上麻生地域では Aalenian/Bajocian? の層準)、黄鉄鉱を含むような黒色チャート層を伴うものは、Toarcian 期のものである場合が多い。*Parvicingula* 属出現直下にマンガンに富むチャート層が発

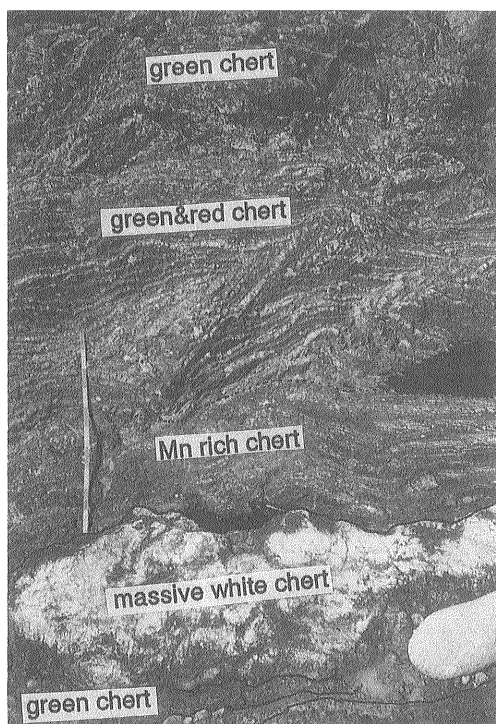
達する現象は、北米のフランシスカン層群中の層状チャートにも観察される (第5図の MH)。

Carter *et al.* (1988) によれば、*Parvicingula* 属の出現はすくなくとも Pliensbachian 期後期より遅く Toarcian 期中期以前 (アンモナイト化石帯でいえば Bifrons 帯) であるので、このようなマンガンに富み黒色チャートを伴うような層準の年代は、Toarcian 期前期 (アンモナイト化石帯でいえば *Tenuicostatum-Falciferum* 帯) に限定される可能性が高い。

上麻生地域においては、Toarcian 期の *Parvicingula* 属出現層準直下において、数十 m.y. (トリアス紀新世後期からジュラ紀古世後期) に及ぶ欠如がみられる。松田・磯崎 (1982) は、上麻生地域の上部トリアス系から下部ジュラ系に相当する層状チャートから産出する放散虫化石とコノドント化石を詳細に報告したが、彼らのセクションの岩相変化を現在の放散虫化石層序の情報に基づいて再検討すると次のようになる。上麻生セクションではトリアス紀新世後期を示す放散虫化石 (*Squinabollera* spp. など) とコノドント (*Axiothea posthernsteini* など)



第6図：Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における深海堆積物の岩相変化。日本とアメリカの例。岩相変化と放散虫化石の産出に関しては、UF (勝山) & IY (岩屋観音): Hori (1988, 1989), HA: 松田・磯崎 (1982) MH: Murchey (1984) に詳しい。



black chert includ. pyrite nodules

第7図：第6図中のUFセクションのToarcian期前期の岩相変化の露頭写真。スケールは1m.

が共産する層準の直上に黄鉄鉱を含有する黒色層状チャートが層理面に整合的にのり、そのすぐ上位の層準から Toarcian 期の放散虫化石群集が産出するのが観察される。このトリアス紀新世後期からジュラ紀 Toarcian 期前期までは少なくとも20m.y.以上の時間間隙が存在する。

3.1.2 再堆積

層状チャートの著しい岩相変化層準の上位には、再堆積したコノドント化石が産出する場合がある。コノドント化石の産出上限は、放散虫化石群集帯でいえば、一般にトリアス系最上部の *Canoptum triassicum* 群集帯までで、ジュラ系最下部 *Parashuum simplicum* 群集帯にはいるのはまれである。コノドントの絶滅はトリアス紀新世の Norian 期 (広義、=Norian s.s. + Rhaetian) といわれており (e.g., Isozaki & Matsuda, 1982), それ以降においては、いまのところ詳細な報告がない。しかしながら、唯一の例外は、Toarcian 期の変化層準付近である。犬山地域においても上麻生地域においても Toarcian 期の岩相化層準の直上にコノドント化石が産出する (第5

図の黒丸の層準)。共産する放散虫化石は明らかに若い年代を示す化石群集であることから、これらのコノドント化石は再堆積したものと判断できる (Hori, 1989; 1992)。

3.1.3 地球化学的検討

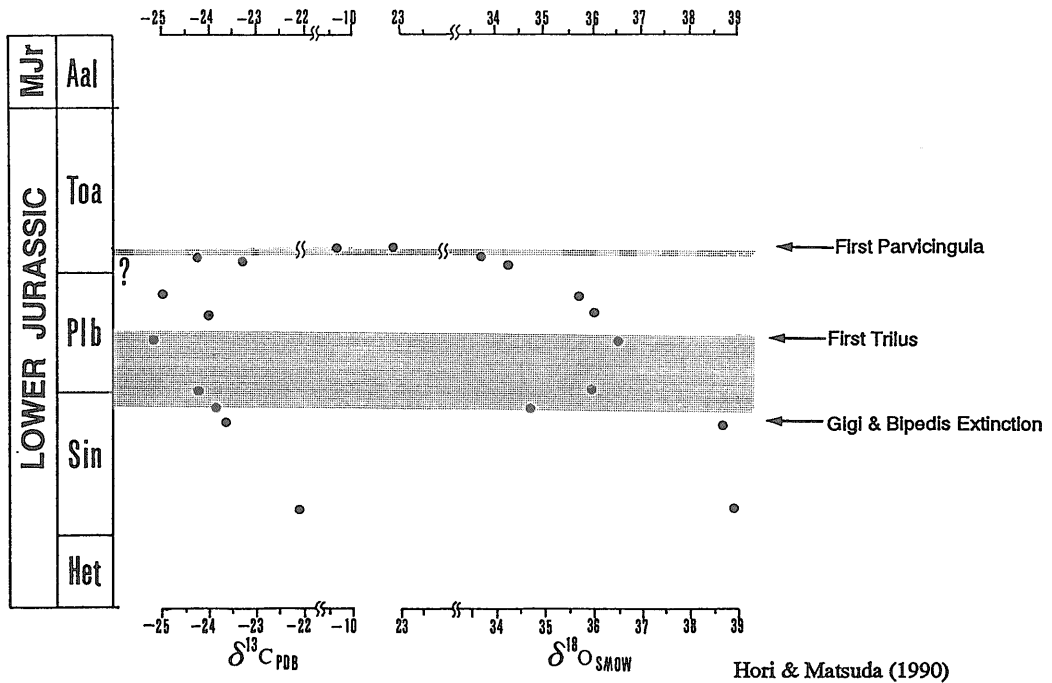
放散虫化石群集の変化層準における酸素・炭素同位体比の変化を検討した(堀・益田, 1990)。分析は、層状チャート中に含まれる炭酸塩鉱物を分離・粉碎し、酸素・炭素同位体比を測定する方法で行なった。第7図に層準による酸素・炭素同位体比の変化 (堀・益田, 1990引用・簡略化) を示す。注意しなければならないのは、チャート中に含まれる炭酸塩鉱物は2次的に形成された可能性があり、必ずしも得られた同位体比が堆積当時の環境を反映している確証がない点である。しかしながら、得られた同位体比の急激な変化層準は、放散虫化石群集の変化層準とよく一致する (第8図)。例えば、Sinemurian 期最後期—Pliensbachian 期前期の *Gigi* 属、*Bipedis* 属の絶滅層準は、酸素同位体比が著しく負にシフトしている層準と一致している。また、Pliensbachian 期の *Trillus* 属、*Napora* 属の出現層準では、酸素同位体比がなだらかに正へ変化し極大となるのが観察される。逆に炭素同位体比はそれまで漸次減少傾向だった値が突然正へシフトする。

Toarcian 期の層状チャート中における岩相変化層準においては、酸素・炭素同位体比の変化は Pliensbachian 期と比べ著しい。放散虫化石群集の著しい変化に伴って、酸素同位体比は負に炭素同位体比は正にシフトする。岩相変化が起こる直前の層準では、酸素同位体比は漸次減少している。このような同位体比の変化は、鉱物組成の変化を考慮しても十分に有為な変化と考えられる。

3.2 浅海堆積物中の Toarcian セクション (ヨーロッパ)

深海堆積物である層状チャート層中に識別された変化は、石灰岩などの比較的浅い堆積物で構成されているヨーロッパテチスの Toarcian セクションにおいても報告されている。海生無脊椎動物の激変に伴う浅海相の岩相変化は、Jenkyns (1988) らが詳しい研究を行なっている。

彼らは、南アルプスの Belluno トラフの石灰岩層の Toarcian 期前期の層準 (アンモナイト帯の *Falciferum*-Zone 前後) に、しばしば黒色泥岩と共にマンガンに富む石灰岩層が発達することを報告している (Jenkyns *et al.*, 1985)。石灰岩とチャートという岩相の違いはあるが、この産状は、日本の層状チャート層にみられる Toar-



第 8 図：Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における深海堆積物（層状チャート）の炭素・酸素同位体比の変動。堀・益田（1990）を引用・簡略化。帯状に示してあるのが、放散虫の急変層準。矢印は代表的な放散虫化石の変化。

cian 期の岩相変化（本論文の UF）と同じでありかつ同様な年代である。また、上記のような Toarcian 期の岩相変化を起こしている層準に再堆積した化石がよく産出することは、古くから報告されており（e.g., Hallam, 1961）、深海底堆積物中にみられるコノドントの再堆積の産状と同じである。

石灰岩相における同位体比の変化も、層状チャートから得られた変化パターンと良く一致する。第 9 図に、Jenkins & Clayton (1986) と Küspert (1982) らによる炭素同位体比の変化と酸素同位体比の変化を示す。炭素同位体比は、Pliensbachian 期後期で減少し、Toarcian 期前期（アンモナイト化石帯でいえば、Tenuicostatum 帯から Falciferum 帯）で急激に正へシフトしている。このような変化は、日本の層状チャートにおける炭素同位体比の変化パターンと同じである。酸素同位体比に関しては、いまのところ有意な変化が識別され難いので、データが十分でないので詳細な比較がいまのところできない。しかし、どちらも Toarcian 期前期にかけて、酸素同位体比が減少傾向にあるのが認められる。

4. Toarcian 期の海洋事変一何が起こったのか？

今まで述べてきた、Toarcian 期前後の海底堆積物中に記録されている変化をまとめると次のようになる。

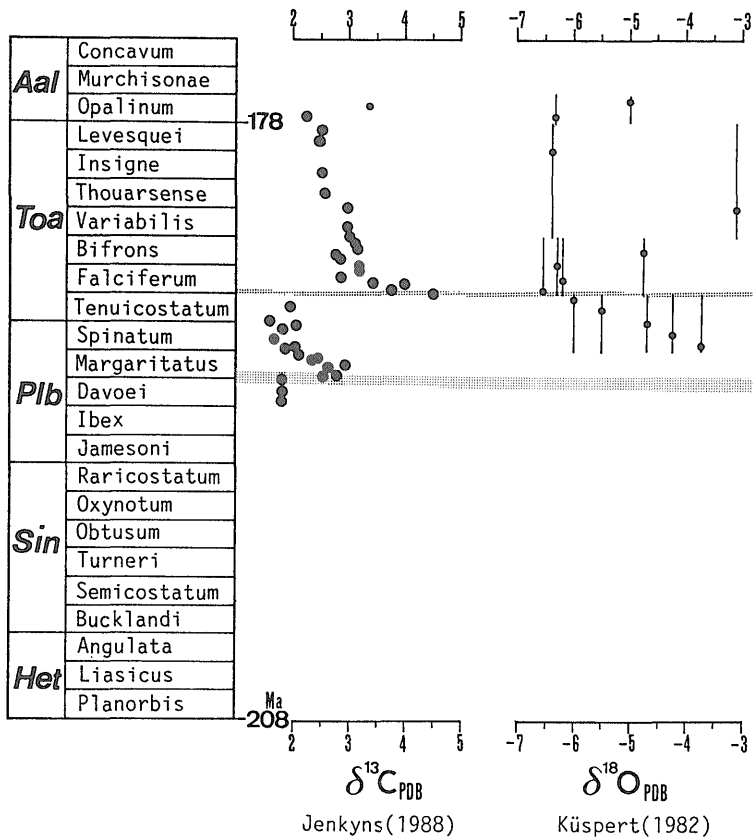
(1) 海生無脊椎動物相の著しい変化

Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における凡世界規模での変化は浮遊性（例えば、放散虫）、半浮遊性、底性に限らず広く認められる。プランクトンの一種である放散虫の化石群集が Pliensbachian 期と Toarcian 期前期に凡世界的に変化し、かつ他の海生無脊椎動物群も同時に急変していることは、この 2 つの時期に地球規模での海洋環境の変動が起こったことを示唆する。

Toarcian 期前期における変化は、短期間に起こり、一方 Pliensbachian 期のものは、ゆっくり起こっている。しかし、両者とも化石群集の変化は中生代前期型から後期型への変化として特長づけられる。

(2) 岩相変化

Pliensbachian 期において深海堆積物中に顕著な岩相変化が認められない一方で、Toarcian 期前期には、浅海・深海堆積物共に明瞭な岩相変化が識別される。変化は、



第9図：Pliensbachian 期と Toarcian 期前期における石灰岩中の炭素・酸素同位体比の変動、ヨーロッパの例。横に示してあるのは、ジュラ系の階名とアンモナイト化石帯。

Toarcian 期の化石動物群の急変層準(中生代後期型の動物群が出現する層準)の直下に必ず観察される。そこでは、Oceanic Anoxic Event (低酸素海洋事変)を示唆する有機物に富み黄鉄鉱を含む黒色堆積物が卓越する場合が多い。OAE とは、海底に溶存酸素量の非常に少ない還元的な環境が広く分布するようになる海洋環境の変化である。一般に酸化的な海底環境が還元的になると、有機物に富む黒色堆積物が広く形成され、またそのような堆積物には海生動物の遺骸が分解されず保存され易い。OAE が着目され始めたのは、白亜紀の堆積物の研究からである。Schlanger & Jenkyns (1976) は、Aptian-Albian と Cenomanian-Turonian 期の堆積物を調べ、有機物に富む堆積物が広く発達することを指摘し、凡世界的な OAE を提唱した。彼らは、OAE の原因を急激な海水準の上昇と気候変動によって海洋中の溶存酸素量極小の分布域が増大したためと考えた。Jenkyns *et al.*

(1985) はさらに、ジュラ紀 Toarcian 期においても同様な OAE が存在したと報告した。しかしながら、Hallam (1986) が指摘したように、Jenkyns らが識別した OAE はテチス海などの比較的浅い海での堆積物中で、今の太平洋底のような深海の堆積物からの報告例がなく凡世界的な事変としての説得性に欠けていた。そのために Raup & Sepkoski (1982) らが報告した海生無脊椎動物の大量絶滅を伴うジュラ紀の OAE が世界的な環境変動の結果か? それとも地域的な変化を反映したものであるか? という議論には決着がついていなかった。本論でのべた、深海堆積物中にも OAE が識別されるという事実は、前者の説を強く裏付け、Toarcian 期における OAE が地球規模で起こったことを示唆する。

(3)再堆積のプロセス

深海堆積物中の岩相変化層準直上に再堆積化石が認められる事実は、Toarcian 期前期における海洋事変が、深

海底の環境まで著しい影響を及ぼすほど大規模であったことを示す。層状チャートにみられるコノドント化石の再堆積は、テチス海とパンサラッサ海が赤道付近でつながったことにより、深海底層流の流れが変わったため引き起こされたと考えられる。つまり、以下のようなプロセスが考えられる。北極海起源のシリカに不飽和な若い底層流が、チャートの堆積場であったパンサラッサの深海底にテチス水路を通して流れこみ、未固結なチャートを局所的に溶かす。コノドント化石はアパタイトでできているので、Opal-Aで構成されている放散虫化石より、同じ海洋底環境下でははるかに溶けにくい。そこで、まだ未固結なため溶け易いトリアス紀後世からジュラ紀 Toarcian 期前期までの層状チャートが溶け、コノドント化石だけが洗い出される。そしてコノドント化石のみが再堆積した。このような考えは、以下の事実と調和的である。1)再堆積したコノドント化石は主にトリアス紀後世のものである。2)層状チャートの主要構成物質であるシリカ (Opal-A) が海底環境下で固結に要する時間は、一般に約10-20m.y.とされている。これは、トリアス紀後世からジュラ紀 Toarcian 期前期約 (約20 m.y.)までの期間と一致する。3)層状チャートにおいて、まれにトリアス紀後世からジュラ紀 Toarcian 期前期約 (約20m.y.)までの欠如がみられる (上麻生の例)。

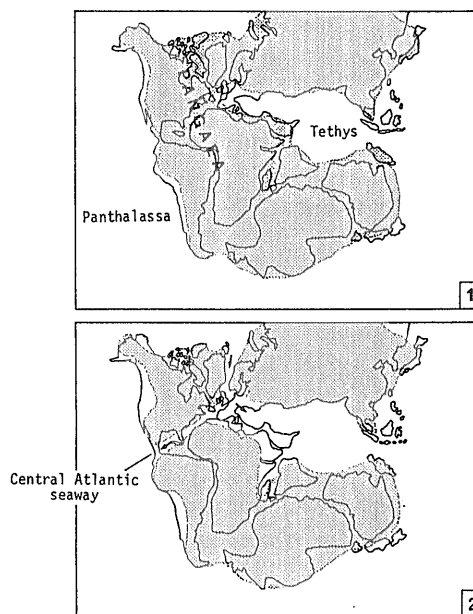
(4)堆積物の同位体比

動物相の変化層準と一致して、浅海・深海堆積物の炭素同位体比の顕著な変化が認められる。このような変化は、Toarcian 期前期、Pliensbachian 期ともに認められ、前者の方がより著しい。深海堆積物の同位体比に関しては、まだまだ検討しなければならないが、同位体比の変化の同時性とパターンの類似は浅海・深海とも同様な環境変動を被った可能性を示している。

一般に炭素同位体比は、生物生産量の変動を酸素同位体比の変動は、堆積物の温度条件の変化を反映しているとされている。Jenkyns (1988)は、2度にわたる炭素同位体比の正へのシフトを生物生産量の急激な増加とそれに続く減少と結び付けている。炭素同位体比の Pliensbachian 期と Toarcian 期前期の正へのシフトは、海洋での生物生産量が2度にわたり急激に変化したことを示唆している。放散虫では炭素同位体比が正にシフトした後、必ず新しい群集が出現するパターンが認められる。一方、OAEを示す岩相変化は炭素同位体比のシフトの直前に見られる。Pliensbachian 期後期から Toarcian 期前期にかけての石灰岩の酸素同位体比の負への変化は、この時期に浅海域での海水温が上昇した可能性を示唆している。

以上議論してきた事を総合すると、ジュラ紀前期の海洋事変は、放散虫化石群集解析と地球化学的検討から、Pliensbachian 期と Toarcian 期前期の2回のステージに分けられることが明らかになった。ただし、Pliensbachian 期の海洋事変は、岩相上の変化が見られないのに対し、Toarcian 期前期には顕著な岩相変化が認められる。化石群集の変化の程度は、後者は前者に比べて著しいがどちらも中生代前期型から中生代後期型への変化である。このようなジュラ紀前期の海洋事変が引き起こされた主要因は、海洋環境が地球規模で変わったためであると考えられる。

ジュラ紀前期は地球史の中で、超大陸パンゲアが海洋の形成を伴って割れ始めた時期として特徴づけられている (第1図参照)。この時期、中部大西洋または北部大西洋が開き始めることにより、パンサラッサ (古太平洋)とテチス海または北極海をつなぐ水路が形成されたといわれている (e.g., Ziegler, 1988, 第10図)。いままで述べてきた Toarcian 期の海洋事変の原因は、多くの研究者が指摘してきたように、パンゲア大陸の分裂によるテチス水路の形成と解釈すると最も無理がなく説明できる。テチス水路の出現は、地球規模での海流循環の変化をもたらし、環赤道海流の形成によって地球の温暖化に促進したであろう。また、大西洋の形成に伴う若い海洋底の急

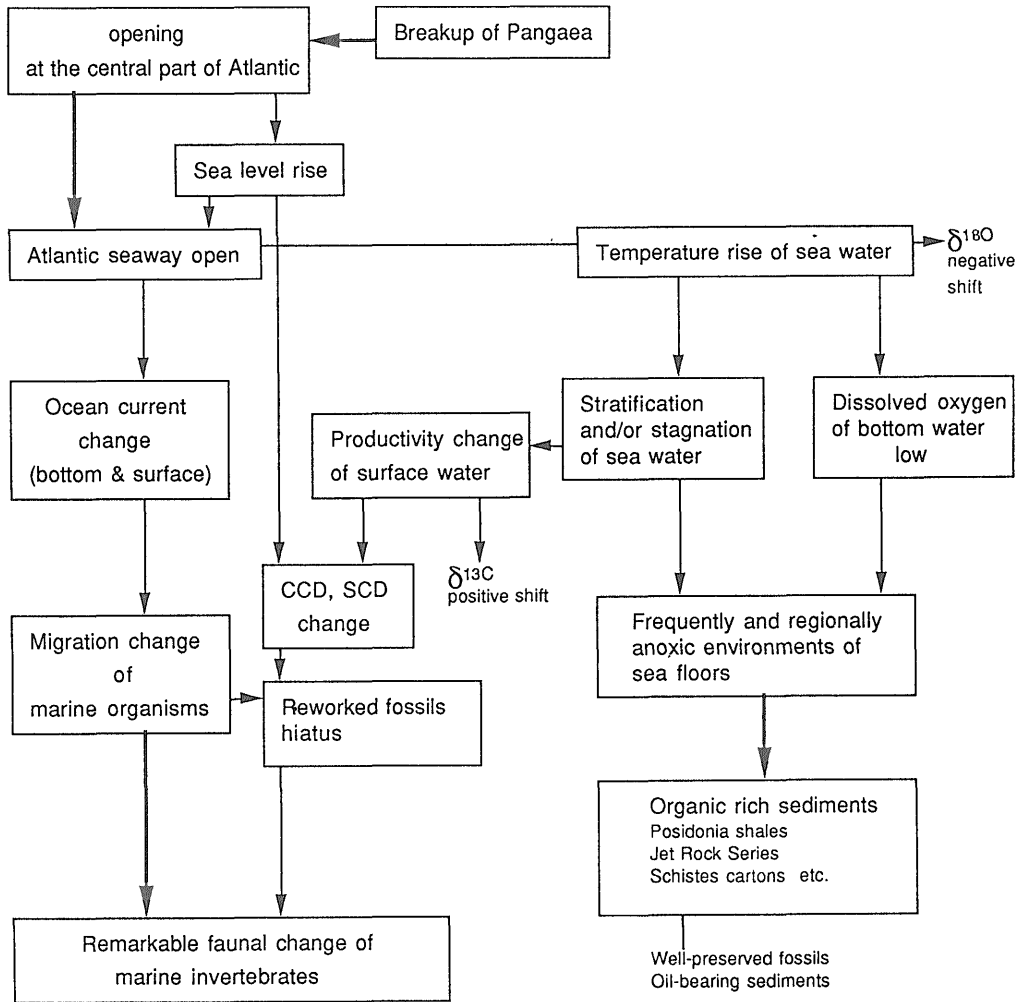


第10図：ジュラ紀古世の大陸配置。Hallam(1983)を引用・加筆。
1：ジュラ紀最前期，2：Toarcian 期。

激な増加は海水準の急速な上昇を伴ったと推察される (Worsley *et al.*, 1984)。実際この時期に急激な海水準の上昇が起こった事は、堆積相の解析から多くの研究者が指摘している (e.g., Hallam, 1975)。海水温の上昇と急激な海進は、白亜紀の場合と同じメカニズムで、OAE をもたらしたに違いない。OAE を伴う Toarcian 期前期の海洋事変は、これに相当する。以上の Toarcian 期の海洋事変を第11図にまとめた。

一方, Pliensbachian 期の海洋事変は、岩相変化がないと言う点で Toarcian 期前期のそれと大きく異なる。その理由としては、環境変動の規模の違いや変動の種類の違いなどが考えられるが、植物プランクトンである石灰質ナノプランクトンが Pliensbachian 期にのみ変化していることを考慮すれば、後者の理由の方が受け入れ易い。その要因については、なんらかの気候変動が最も考え易いが、今後の十分な検討が必要である。

TOARCIAN OCEANIC EVENT



第11図：Toarcian 海洋事変のモデル。

5. 最後

今まで述べてきたように、深海堆積物中の放射虫化石群集の検討、岩相及び地球化学的検討は、海洋事変の時期及びその実体に関する重要な限定条件を与えてくれる。本論で最後に議論した内容は多分に想像の域をでないが、変わらない事実として強調したいのは、地球規模での海洋環境の変動が Pliensbachian 期と Toarcian 期前期に 2 回、段階的に起こったことである。そして、この 2 つの海洋事変は、浅海堆積物にも深海堆積物にも記録されており、変動層準の識別に放射虫化石が有効であるということである。これと同様なことがおそらくペルム紀/トリアス紀 (P/T) 境界にもあてはまる。日本では世界的にもまれな P/T 境界を深海堆積物中に連続層序断面で観察することができる。P/T 境界もジュラ紀 Toarcian 期もどちらも OAE を伴う海洋事変だといわれている (e.g., Holser, 1984; Jenkyns *et al.*, 1985; 海保, 1992; 磯崎・丸山, 1992) 層準であるが、決定的な違いが存在している。それは、前者は海退に伴う OAE であり、後者は海進に伴うものであることである。よって、両者は現象として堆積物に記録されている変化は同じかも知れないが、根本原因は全く相対するものである。本論では、ジュラ紀 Toarcian 期前後の海洋環境を論じたが、その点を考慮して P/T 境界の理解に役立てていただきたいと望んでいる。

なお、本論文投稿中に石賀 (1993) など Toarcian 期の OAE に関する多くの研究が公表された。深海堆積物による海洋環境の解釈は、ますます面白くなりつつある。

謝辞：本論の層状チャートにおける Toarcian 期の海洋事変の研究は、著者が大阪市立大学の博士課程 (Hori, 1990MS) においてまとめたものの一部である。博士課程においては、市川浩一郎元大阪市立大学教授に重要な指摘をしていただき、八尾昭大阪市立大学教授には放射虫化石の問題についてご指導いただいた。大阪市立大学益田晴恵博士には同位体のご指導をいただいた。また、当時の大阪市立大学大学院在籍中の先輩方には、いろいろご助言をいただいた。

以上の方々に紙面をかりて、心からお礼申し上げます。最後に本紙に拙論を公表する機会をくださった世話人の方々に心から感謝いたします。

文 献

Carter, E.S., Cameron, B.E.B. and Smith, P.L.
(1988) Lower and Middle Jurassic

radiolarian biostratigraphy and systematic paleontology, Queen Charlotte islands, British Columbia. *Geol. Surv. Canada*, no.386, 109p.

Fischer, A.G.(1984a) The two Phanerozoic Supercycles. In Berggren, W.A. and Couvring, J.A.van eds., *Catastrophes and Earth History*, Princeton University Press. p.129-150.

———— (1984b) Biological Innovations and the Sedimentary Record. In Holland, H. D. & Trenndall, A.F. eds., *Patterns of Change in Earth Evolution*, Springer-Verlag, p.145-157.

Hallam, A.(1961) Cyclothems, Transgressions and Faunal Change in the Lias of North-West Europe. *Trans. Edinb. Geol. Soc.* vol.18, p.132-174.

———— (1975) Jurassic Environments. Cambridge University Press, 269p.

———— (1983) Early and Mid-Jurassic Molluscan biogeography and the establishment of the central Atlantic seaway. *Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeoeco.*, vol. 43, p.181-193.

———— (1986) The Pliensbachian and Tithonian extinction events. *Nature*, vol. 319, p.765-768.

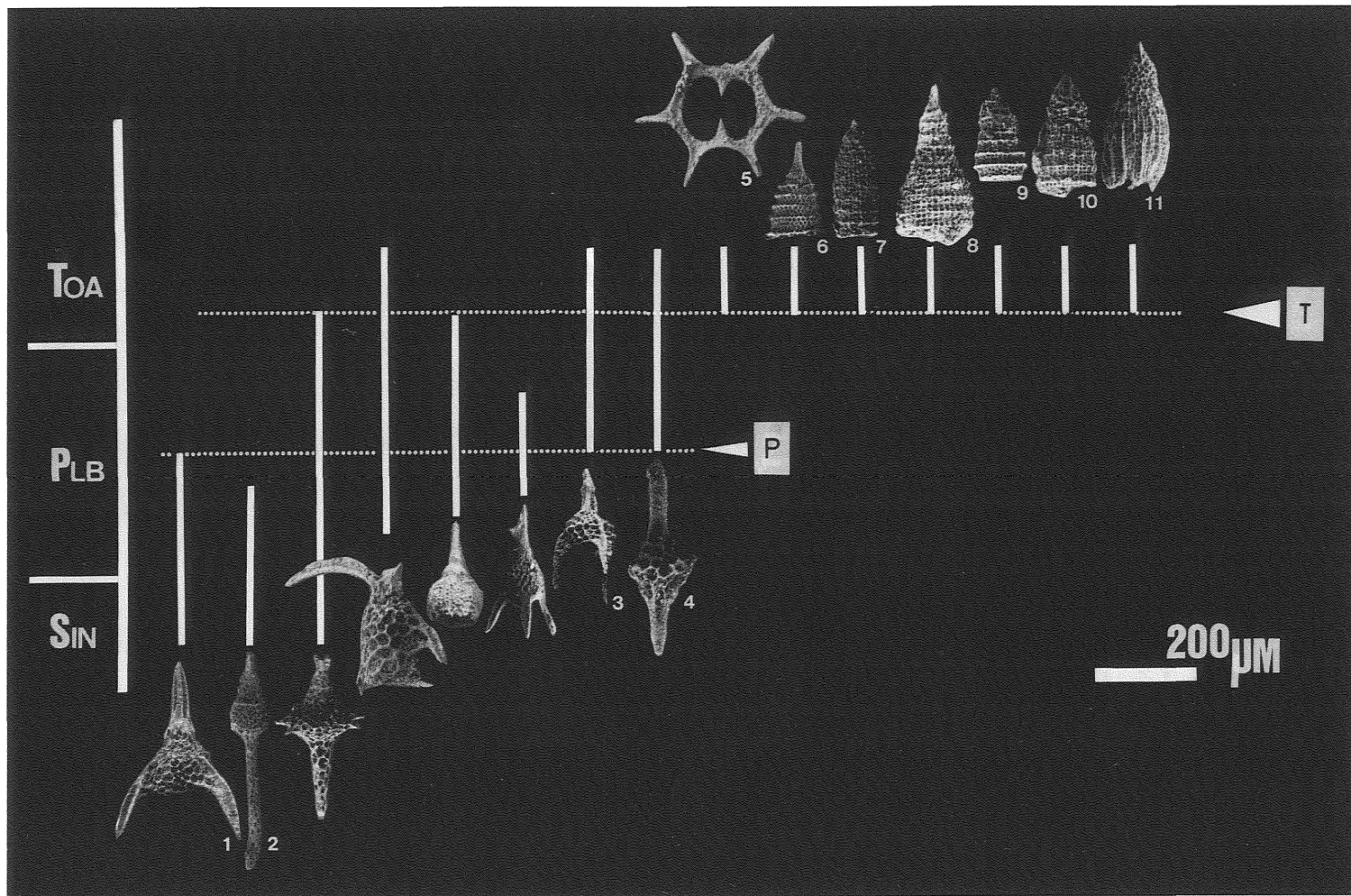
Holser, W.T.(1984) Gradual and Abrupt Shift in Ocean Chemistry During Phanerozoic Time. In Holland, H.D. & Trenndall, A.F. eds., *Patterns of Change in Earth Evolution*, Springer-Verlag. p. 123-143.

————, Schönlaub, H.-P., Attrep, M. Jr., Boeckelmann, K., Klein, P., Magaritz, M., Orth, C.J., Fenninger, A., Jenny, C., Kralik, M., Mauritsch, H., Pak, E., Schramm, J.-M., Statterger, K. and Schmöller, R. (1989) A unique geochemical record at the Permian/Triassic boundary. *Nature*, vol.337, p.39-44.

Hori, R.(1988) Some characteristic radiolarians from Lower Jurassic bedded cherts of the Inuyama area, Southwest

- Japan. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N.S.*, no.151, p.543-563.
- (1989) Lower Jurassic radiolarian zones of SW Japan. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N.S.*, no.159, p. 562-586.
- (1990MS) Early Jurassic radiolarian faunal change and faunal provinces in "Tethyan region". *Osaka City Univ.*, 131 p. *Doctor Thesis*.
- (1992) Radiolarian biostratigraphy at the Triassic/Jurassic Period boundary in bedded cherts from the Inuyama Area, central Japan. *Jour. Osaka City Univ.* vol.35, p.53-65.
- 堀 利栄・益田晴恵(1990) Toarcian期における海洋変化. 日本地質学会第97年学術大会講演要旨集, p.152.
- ・丸山茂徳(1991) 地球史を通じた大陸の平均化学組成の変化と超大陸の形成・分裂. 月刊地球 vol.13, p.428-440.
- 石賀裕明(1993) 西南日本の中古生界層状チャートの研究—とくに層状チャートに記録された海洋無酸素素変—. 地球科学, vol.47, p. 63-73.
- Isozaki, Y and Matsuda, T.(1982) Middle and Late triassic conodonts from bedded chert sequences in the Mino-Tamba belt, Southwest Japan. Part 1: Epigondolella. *Jour. Geosci., Osaka City Univ.*, vol.25, p.103-136.
- 磯崎行雄・丸山茂徳(1992) 付加帯中の遠洋性堆積物に保存された古生代中生代境界事件の記録とその地球史上の意義. 日本地質学会第99年学術大会講演要旨集, p.160.
- Jenkyns, H.C.(1988) The Early Toarcian (Jurassic) Anoxic Event: Stratigraphic, Sedimentary, and Geochemical Evidence. *American Jour. Sci.*, vol.288, p. 101-151.
- and Clayton, C.J.(1986) Black shales and carbon isotopes in pelagic sediments from the Tethyan Lower Jurassic. *Sedimentology*, vol.33, p.87-106.
- , Sarti, M., Masetti, D. and Howarth, M. K.(1985) Ammonites and stratigraphy of Lower Jurassic black shales and pelagic limestones from the Belluno Trough, Southern Alps, Italy. *Eclogae Geol. Helv.*, vol.78, p.299-311.
- Küspert, W.(1982) Environmental Changes During Oil shale Deposition as Deduced from Stable Isotope Ratios. In Einsele, G. and Seilacher, A. eds., *Cycle and Event Stratification*. Springer-Verlag. p.482-501.
- 海保邦夫(1992) 地球環境変動と大量絶滅. 科学, vol.62, p.654-660.
- 松田哲夫・磯崎行雄(1982) 美濃帯上麻生地域飛水峽チャート層からのトリアス紀・ジュラ紀境界付近の放散虫化石 付”アニシアン”の放散虫化石. 第一回放散虫研究集会論文集, 大阪微化石研究会誌特別号, no.5, p. 93-101.
- 松岡 篤(1986) ジュラ紀・白亜紀境界付近における放散虫化石群の変化(予察)—とくに多節 Nassellaria について—. 化石, no.40, p. 1-5.
- Murchey, B.(1984) Biostratigraphy and Lithostratigraphy of chert in the Franciscan Complex, Marin Headlands, California. In Blake, M.C. ed., *Franciscan Geology of northern California*. S.E.P. M., no.5, p.51-70.
- Pessagno, E.A., Jr. and Whalen, P.A.(1982) Lower and Middle Jurassic Radiolaria (multicyrtids Nassellariina) from California, east-central Oregon and the Queen Charlotte Islands, B.C. *Micropaleont.* vol.28, p.111-169.
- Raup, D.M. and Sepkoski, J.J.Jr.(1982) Mass Extinctions in the marine fossil record. *Science*, vol.215, p.1501-1503.
- Schlanger, S.O. and Jenkyns, H.C.(1976) Cretaceous Oceanic Anoxic Events: Causes and Consequences. *Geologie en Mijnbouw*, vol.55, p.179-184.
- Sepkoski, J.J.Jr. and Raup, D.M.(1986) Periodicity in marine extinction events. In Elliott, D.K. ed., *Dynamics of extinction*,

- Wiley-Interscience, p.3-36.
- Sheridan, R.E.(1983) Phenomena of Pulsation Tectonics related to the Breakup of the eastern North American Continental margin. *Tectonophysics*, vol.94, p.169-185.
- Summerhayes, C.P.(1986) Sea level curves based on seismic stratigraphy: Their chronostratigraphic significance. *Palaeogeo. Palaeoclim. Palaeoeco.*, vol. 57, p.27-42.
- Veevers, J.J.(1989) Middle/Late Triassic (230.5Ma) singularity in the stratigraphic and magmatic history of the Pagan heat anomaly. *Geology*, vol.17, p.784-787.
- Worsley, T.R., Nance, D. and Moody, J.B. (1984) Global Tectonic and Eustasy for the past 2 Billion years. *Marine Geology*, vol.58, p.373-400.
- Ziegler, P.A.(1988) Post-Hercynian plate reorganization in the Tethys and Arctic-North Atlantic domains. In Manspeizer, W., ed. *Triassic-Jurassic Rifting Part B*, Elsevier. p.711-755.



第1図版：Pliensbachian期とToarcian期前期における放散虫化石の変化（点線の層準）。白線はその産出範囲。
1: Bipedis属, 2: Gigi属, 3: Napora属, 4: Trillus属 (Trillus elkhornensis), 5: Mesosaturmalis hexagonus,
6: Parvicingula属, 6-11: multicyrtids