

白亜紀中期・セノマニアン/チューロニアン境界の 絶滅事変時における有孔虫化石群組成の 超高解像度解析

守 屋 和 佳** 長 谷 川 卓** 成 瀬 貴 洋**
瀬 尾 草 平* 根 本 俊 文** 鈴 木 崇 章**
森 本 こ の み*

Ultra-high Resolution Analyses of Foraminiferal Fossil Assemblages of the Cenomanian/Turonian Boundary (Mid-Cretaceous) Extinction Interval

Kazuyoshi MORIYA**, Takashi HASEGAWA**, Takahiro NARUSE**
Sohei SEO*, Toshifumi NEMOTO**, Takaaki SUZUKI**
and Konomi MORIMOTO*

Abstract

Bulk organic carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) analyses across the Cenomanian/Turonian boundary in Hokkaido, Japan, and high-resolution planktic foraminiferal biostratigraphy indicate that the timing of the planktic foraminiferal disappearance in the northwestern Pacific was significantly earlier than that in the Atlantic region. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ shows a prominent $\sim 2\%$ positive excursion, clear trough interval, steady plateau interval, and recovery interval, which can be used as very precise chemo-stratigraphic markers. Planktic foraminiferal biostratigraphy demonstrates a pair of diversity crisis at a horizon below the initial $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ excursion and at the beginning of the plateau interval. This isolated double diversity crisis of planktic foraminifers has also been identified in the Western Interior region and northern Europe. The timings of this double diversity crisis in the Western Interior and Europe show quite good consistency on the basis of the $\delta^{13}\text{C}$ chemo-stratigraphy. On the other hand, the double crisis in the northwestern Pacific is significantly earlier than those in the Western Interior and Europe. This offset indicates that expansion of the oxygen-depleted water mass in the northwestern Pacific preceded that in the Atlantic region.

* 金沢大学理学部地球学科

** 金沢大学大学院自然科学研究科

+ 現所属：愛媛大学沿岸環境科学研究センター環境動態解析分野

* Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kanazawa University

** Division of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

+ Division of Coastal Oceanography, Center for Marine Environmental Studies, Ehime University

Key words : Oceanic Anoxic Event, Cenomanian/Turonian boundary, carbon isotope stratigraphy, planktic foraminiferal biostratigraphy, extinction, Hokkaido

キーワード : 海洋無酸素事変, セノマニアン/チューロニン境界, 炭素同位体比層序, 浮遊性有孔虫化石層序, 絶滅, 北海道

I. はじめに

今からおよそ1億3千～8千5百万年前までの白亜紀中期は, きわめて温暖であったことが知られており (Clarke and Jenkyns, 1999; Wilson and Norris, 2001; Huber *et al.*, 2002; Jenkyns *et al.*, 2004; Forster *et al.*, 2007; Moriya *et al.*, 2007; Bornemann *et al.*, 2008; Friedrich *et al.*, 2008 など), 赤道大西洋地域の海洋表層水温はおよそ34℃に達し, 太平洋の中緯度地域での表層水温もおよそ26℃に達していたことが明らかになっている (Moriya *et al.*, 2003)。このような極度な温室地球時代であった白亜紀中期には, 有機物に富む堆積物が, 海洋の広範囲において, 短期間に, かつ大量に埋没した事象が複数回知られており, 海洋無酸素事変 (Oceanic Anoxic Events: OAEs; Schlanger and Jenkyns, 1976) と呼ばれ, 古くから研究が行われてきた。OAE時には海洋中で貧/無酸素水塊が拡大したと考えられており, 多くの軟体動物や原生生物などの絶滅現象が報告されてきた (Jarvis *et al.*, 1988; Elder, 1989; Hart, 1996; Erbacher and Thürow, 1997; Leckie *et al.*, 2002 など)。なかでも, セノマニアン/チューロニン境界 (C/T 境界) 付近で発生した OAE2 時には, 海洋生物の 33～55% の種が絶滅したと考えられており (Sepkoski, 1989), 白亜紀の中では最大級の絶滅事変であったことが知られている。特に海洋表層付近に生息する浮遊性有孔虫の絶滅は, 無酸素水塊が海洋表層にまで達していたことを示す証拠として, 注目されてきた (Jarvis *et al.*, 1988; Leckie *et al.*, 2002 など)。

一方, 生物源炭酸塩の全岩の炭素同位体比分析から, OAE の期間は炭素同位体比の顕著な正の偏位により特徴づけられることが明らかになり, この正への偏位は大気-海洋の炭素循環系から有

機炭素 (相対的に ^{12}C に富む炭素) が大量に, かつ短期間に除去された結果であると考えられるようになった (Sholle and Arthur, 1980; Arthur *et al.*, 1988)。地質学的時間幅では, 汎世界的炭素循環系の炭素同位体比と海洋表層の溶存無機炭素の炭素同位体比は平衡関係にあることから, 浮遊性有孔虫や石灰質ナノ化石に記録される炭素同位体比変動は, 汎世界的な炭素循環系の炭素同位体比変動を記録していると考えられる。従って, 石灰質ナノ化石などからなる炭酸塩岩の炭素同位体比の正の偏位は, 世界的な良好な鍵層として利用することができ, これまでも多くの研究が行われてきた (たとえば, Heyes *et al.*, 1989; Corfield *et al.*, 1991; Jenkyns *et al.*, 1994; Jarvis *et al.*, 2006 など)。

また, 炭素循環系の炭素同位体比変動は, 海洋の溶存無機炭素の炭素同位体比だけでなく, 陸上および海洋の植物の有機炭素同位体比にも記録されることが期待され, Pratt and Threlkeld (1984) や Pratt (1985) などにより, その同位体比変動が明らかにされてきた。本邦においても Hasegawa and Saito (1993) などにより, C/T 境界の陸源有機物の有機炭素同位体比に顕著な正の偏位が認められることが明らかになり, 汎世界的に C/T 境界の対比が可能となった (Hasegawa and Saito, 1993; Hasegawa, 1997; Moriya and Hasegawa, 2007 など)。

しかし, これまで本邦で行われてきた炭素同位体比層序の時間解像度は, アフリカ, アメリカ, およびヨーロッパなどで行われている分析の時間解像度に比べ低かったことから, 本邦を含めた太平洋地域と大西洋地域との間で詳細な絶滅イベントの時間的前後関係を議論するには至っていなかった。そこで, 本研究では, 本邦と大西洋地域に認められる, OAE2 時における生物-海洋現象

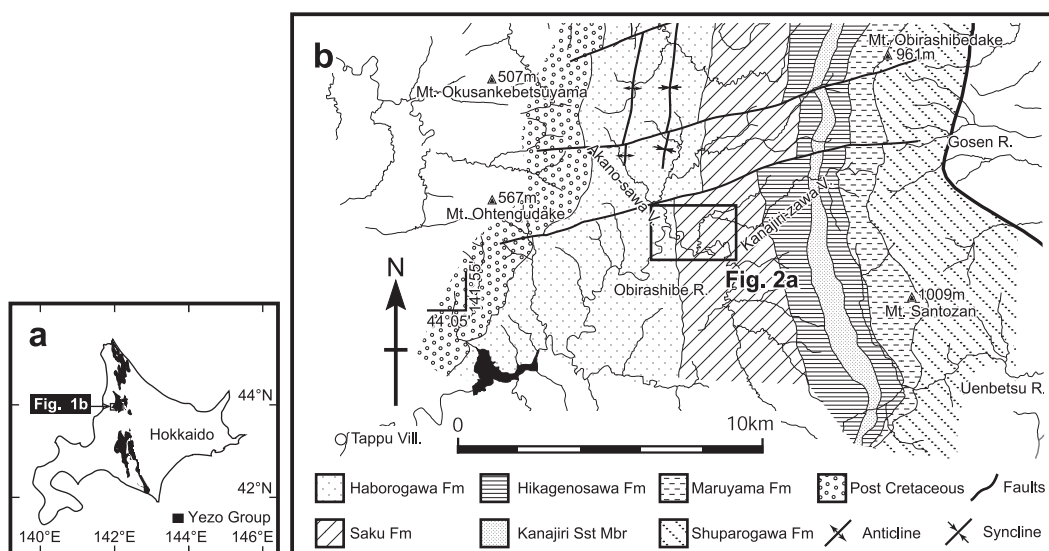


図 1 蝦夷層群分布域 (a) と小平地域の地質図 (b: Takashima *et al.*, 2004 を改変). b 中の四角は図 2a の範囲を示す.

Fig. 1 Distributions of the Yezo Group (a), and a geological map of the Tappu area (b: modified after Takashima *et al.*, 2004). A rectangle in panel b indicates an area in Fig. 2a.
Fm: Formation, Mbr: Member.

の時間的前後関係を詳細に議論するために、堆積物中に含まれる全岩の有機炭素同位体比を、大西洋地域との詳細な対比が可能になる時間解像度で分析し、さらに、1 万年以下の時間解像度での浮遊性有孔虫化石の多様性変動史の解析を行った。

II. 地質および層序の概説

北海道中軸部に位置する宗谷、手塩、苫前、留萌、夕張、日高、および穂別などの地域には、およそ 1 億 2 千万年前から 6 千 5 百万年前に堆積した白亜系蝦夷層群が広く分布する (図 1a; Takashima *et al.*, 2004)。蝦夷層群はその地質構造発達史や (Okada, 1983; Takashima *et al.*, 2002), 古流向などの研究から (Tanaka, 1963; 田中・角, 1981), ユーラシアプレート東縁の前弧海盆堆積物であると考えられている。なかでも苫前地域の南部に分布する蝦夷層群は、主に厚く堆積した陸源碎屑物からなり、ほぼ南北の走向を持ち、西に傾斜し、西側に上位の地層が重なる比較的単純な同斜構造を示す (図 1b)。苫前地域に

は下位より、シューパロ川層、丸山層、日陰ノ沢層、佐久層、および羽幌川層が分布し、北部地域では数本の胴切断層や複褶曲構造が認められるものの、調査地域である小平薬川支流の金尻沢では、構造的に連続した一連の層序が確認される (図 1b)。

本地域では、保存良好な軟体動物化石や微化石が多産することから、多くの化石層序学的研究が行われ、地層の年代決定が試みられてきた (たとえば, Tanaka, 1963; Takayanagi and Okamura, 1977; 棚部ほか, 1977; Taketani, 1982; 関根ほか, 1985; 利光ほか, 1995 など)。なかでも関根ほか (1985) は、アンモナイト類やイノセラムス類の化石層序から、小平薬川や金尻沢における C/T 境界のほぼ正確な位置を示した。また, Hasegawa and Saito (1993) では、蝦夷層群の堆積物に含まれる陸源有機物の炭素同位体組成の層位学的変化から、本邦においては初めて約 2‰ の正の偏位を見だし、浮遊性有孔虫の化石層序とあわせることで、蝦夷層群中における C/T 境界の位

置を特定することに成功した。金尻沢においては、この有機炭素同位体比の正の偏位は、その下流域の佐久層中部において確認された（図 2a；Hasegawa and Saito, 1993）

III. 試料と手法

本研究では、まず、Hasegawa and Saito (1993) において有機炭素同位体比に正の偏位が認められた金尻沢で、より詳細な有機炭素同位体層序を確立するために、堆積物中に含まれる全岩の有機炭素同位体比を測定した。続いて、C/T 境界における絶滅イベント、特に海洋表層に生息する生物の絶滅イベントを検討するために、浮遊性有孔虫化石の化石群組成の層位的変化の解析を行った。

1) 調査範囲

調査範囲は金尻沢下流域のおよそ 400 m の範囲である（図 2）。この区間において、1000 分の 1 の詳細なルートマップを作成し、全岩の有機炭素同位体比測定用、および浮遊性有孔虫の化石群組成解析用の試料を採取した。

2) 有機炭素同位体比

全岩の有機炭素同位体比分析には、露頭において平均約 13 m おきに、合計 30 試料の泥岩ないし砂質泥岩を採取した。堆積物試料は、河床の露頭から新鮮な部位を約 1 kg 採取した。採取された試料は、実験室において加熱処理後の有機物をまったく含まない砥石を切断することによって洗浄した岩石カッターを用いて切断し、その中心部を分析に用いた。

切断された試料から、デンタルドリルを用いて約 1 g の副試料を切削した。その際、明らかに砂質な部分は避けて切削を行った。切削した副試料は、5 mol/l および 1 mol/l の塩酸を用いて試料中の炭酸カルシウムを 2 段階除去した後に、そこから約 3 mg を抽出し、高知大学海洋コア総合研究センター現有の元素分析計直結型同位体質量分析計（Thermo Scientific, Finnigan DELTA plus Advantage）を用いて、全岩の有機炭素同位体比分析を行った。すべての副試料について 2、ないし 3 回の測定を行い、その平均値を分析結果として採用した。

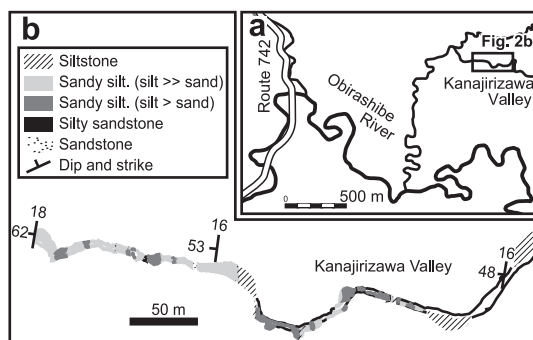


図 2 調査地域の河川図 (a) とルートマップ (b)。

Fig. 2 Distributions of rivers in the study area (a), and a route map of an analyzed section (b).
Silt.: Siltstone.

3) 浮遊性有孔虫化石群

浮遊性有孔虫層序には、Hasegawa and Saito (1993) によって、全岩の炭素同位体比に急激な約 2% の偏位が認められる地点を中心に、約 140 m の区間で解析を行った。この区間において、1.5 ~ 3 m ごとに約 1 kg の堆積物試料を 73 試料採取した。採取された試料を乾燥した後に、試料から 350 ~ 500 g の副試料を採取し、硫酸ナトリウム法およびナフサ法を用いて分解した。分解後の堆積物は 63 μm のふるいで洗浄、および乾燥後、直径 180 μm 以上の大きさのすべての浮遊性有孔虫化石について、産出個体数の計測を行い、各試料に含まれている種を同定した。それぞれの種が算出するか、しないかの確認は行ったが、試料ごとの各種の産出個体数は計測していない。

IV. 結 果

1) 岩相層序

調査範囲のルートマップおよび岩相柱状図を図 2b, および図 3 に示す。調査範囲には、ほぼ全域にわたって、連続して露頭が分布し、きわめて小規模の断層は認められるものの、ほぼ連続した一連の層序が確認された。これらの地層はおおよそ N16°E50°W の走行・傾斜を持つ同斜構造で、主にシルト岩と砂質シルト岩が露出する。砂質シル

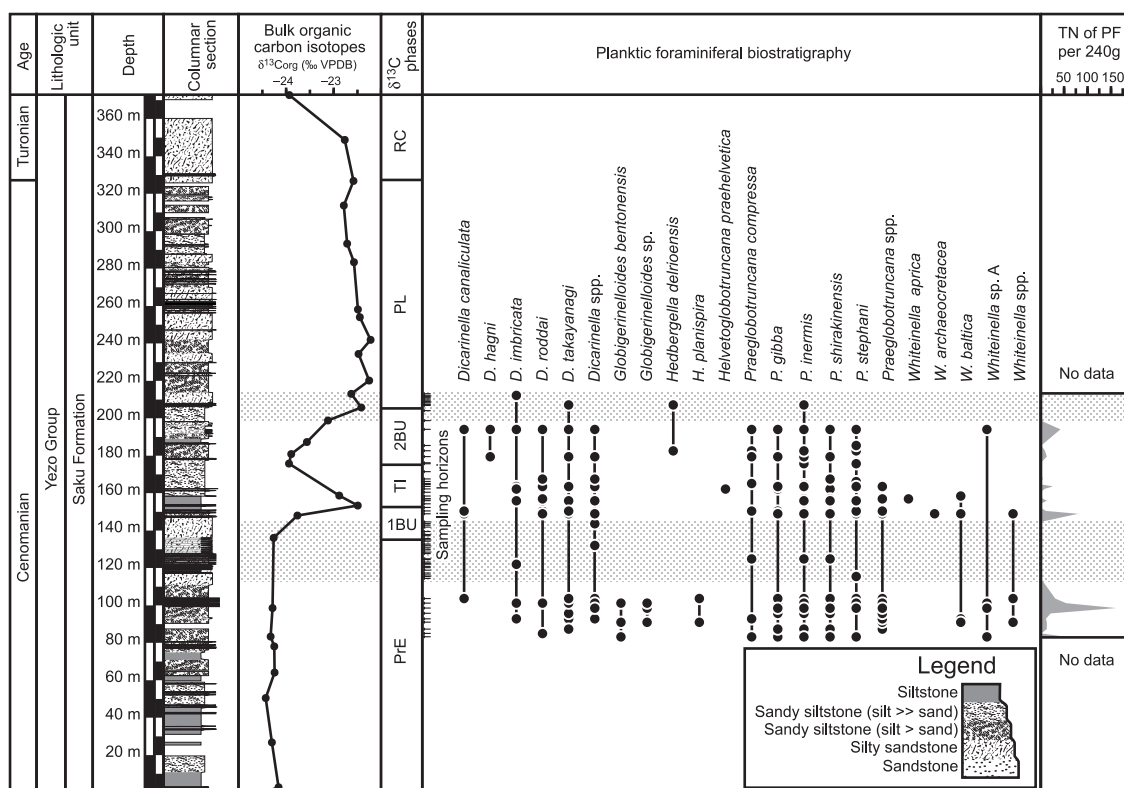


図 3 調査範囲の岩相柱状図、全岩の炭素同位体比組成の層位的変化 ($\delta^{13}C_{org}$)、炭素同位体比の変動パターン (Paul *et al.*, 1999)、浮遊性有孔虫の化石層序、および浮遊性有孔虫の産出個体数変動。網掛けは浮遊性有孔虫の貧産出帯を示す。

Fig. 3 Lithostratigraphy, bulk organic carbon isotope stratigraphy ($\delta^{13}C_{org}$), $\delta^{13}C$ phases (Paul *et al.*, 1999), planktic foraminiferal biostratigraphy, and total number of planktic foraminifers per 240 g sediment. Shadings indicate zones of rare planktic foraminiferal occurrence.
PrE: pre-excursion, 1BU: first build-up, TI: trough interval, 2BU: 2nd build-up, PL: plateau, RC: recovery, TN: total number, PF: planktic foraminifers.

ト岩は、層厚 3 cm 以下程度の砂岩薄層を挟在するシルト岩が、生物擾乱を受け砂粒とシルト粒とが混在した産状を呈する。生物擾乱の程度は層準により変化し、しばしば葉理の連続性が完全に失われ、ほぼ塊状を呈することもあるが、一部にはほぼ完全に葉理が保存されている層準も認められる。葉理の保存された層準では、泥岩勝ち砂岩泥岩互層となり、砂岩層には斜交葉理が認められることがある。これらの斜交葉理の古流向は西から東への流れを示すこと、葉理の保存された層準ではほぼ規則的な砂岩泥岩互層からなることから、

これらの堆積物は半遠洋性泥岩とタービタイトの互層からなるタービタイト相であると考えられる。

岩相は下位より、シルト岩、砂質シルト岩、シルト質砂岩と上方に粗粒化し、調査範囲の下位より約 140 m 地点で粒度が極大となる。その後、約 150 m 地点には再びシルト岩が分布し、砂質シルト岩、シルト質砂岩と再び上方へ粗粒化する層序からなる。従って、本調査地域に分布する地層は全体として 2 回上方へ粗粒化を繰り返すタービタイト相から構成される。

2) 全岩の有機炭素同位体層序

本研究では、Hasegawa and Saito (1993)でも認められた、顕著な約2%の正の偏位が認められた(図3)。調査地域の下部、層厚0~約140 m地点までは、炭素同位体比は一貫して約-24.5%で推移するのに対し、層厚約150~155 m地点にかけて、炭素同位体比は急激に正に偏位し、約155 m地点でおよそ-22.5%の極大値に達する。その後、約155~175 mの間で急激に負に偏位し、およそ-24.0%となる。さらに約175~205 mの区間で再び正に偏位し、およそ-22.5%となり、約330 m地点までほぼ一定の値を示す。炭素同位体比はその上位で再び減少し、調査範囲の最上位地点では、およそ-24.0%へ回復する。

3) 浮遊性有孔虫化石層序

調査範囲からは、*Dicarinella*, *Globigerinelloides*, *Hedbergella*, *Helvetoglobotruncana*, *Praeglobotruncana*, および *Whiteinella* の5属の有孔虫化石が産出した。そのうち種小名の同定に至ったものは18種である(図3)。*Hel. prae-helvetica*, *W. aprica*, および *W. archaeocretacea* はそれぞれ1試料のみから産出したが、他の種は複数試料から産出した。特に層厚80~100 m付近、および150~200 m付近では多種の有孔虫化石が産出し、前者では14種、後者では16種の産出が認められた(図3)。これらの区間では、産出個体数も多く、下位層では240 gの堆積物試料あたりに最大150個体以上、上位層でも最大約100個体の有孔虫化石が産出した(図3)。一方、層厚約110~150 mと200~215 mの区間では、それぞれ5種、および4種と産出する種数が著しく減少する。産出する個体数も、堆積物試料240 gあたり最大で8個体ときわめて少ない(図3)。

V. 考 察

1) 全岩の有機炭素同位体比変動曲線と国際対比

Schlanger and Jenkyns (1976)により、白亜紀の広範囲に及ぶ海洋底に有機炭素に富む泥岩

(いわゆる黒色泥岩)が、同時期に堆積したことが明らかにされ、この事象がOceanic Anoxic Eventsと名付けられて以来、OAEのメカニズムの解明、あるいはOAEと海洋生物の絶滅・放散現象との関連が盛んに議論されてきた。

近年、C/T境界におけるより高時間解像度、かつ多地域での炭素同位体比分析から、C/T境界における炭素同位体比の正への偏位は1回の事象ではなく、少なくとも2回の正への偏位があることが明らかになった(図4; Paul *et al.*, 1999; Tsikos *et al.*, 2004; Sageman *et al.*, 2006; Forster *et al.*, 2007 など)。その特徴から、Paul *et al.* (1999)では、C/T境界における炭素同位体比の変動パターンを下位より、Pre-excursion, First build-up, Trough interval, 2nd build-up, Plateau, Recovery, および Post excursion の7段階に区分した(図3, 4, 5)。すなわち、OAE以前の安定期(Pre-excursion: PrE)からOAEの開始に伴い炭素同位体比が大きく正に偏位し極大に達し(First build-up: 1BU), その後やや負に偏位し(Trough interval: TI), 再び正へ偏位する期間を経て(2nd build-up: 2BU)低い値で安定化し(Plateau: PL), PrEに近い値へと回復し(Recovery: RC), 再び安定期に移行する(Post excursion: PoE)というパターンである(図5)。

本研究による金沢での調査では、C/T境界でのOAE発生前から(PrE), 第一極大期(1BU), 谷区間(TI), 第二極大期(2BU), 平坦期(PL), および回復期(RC)の6段階が明瞭に確認された(図3)。OAE後の安定期(PoE)は確認されなかったが、C/T境界の模式地であるアメリカ合衆国コロラド州プエブロ地域では、PLとRCとの境界がC/T境界に相当することから(Sageman *et al.*, 2006), 本調査地域には、後期セノマニアン期~チューロニアン期最前期の地層が、層位学的な欠如なく露出することが明らかになった。

2) C/T境界における浮遊性有孔虫化石の多産/貧産出イベント

金沢では、OAEの開始に前後して、2回の浮遊性有孔虫化石の貧産出帯が確認され、そ

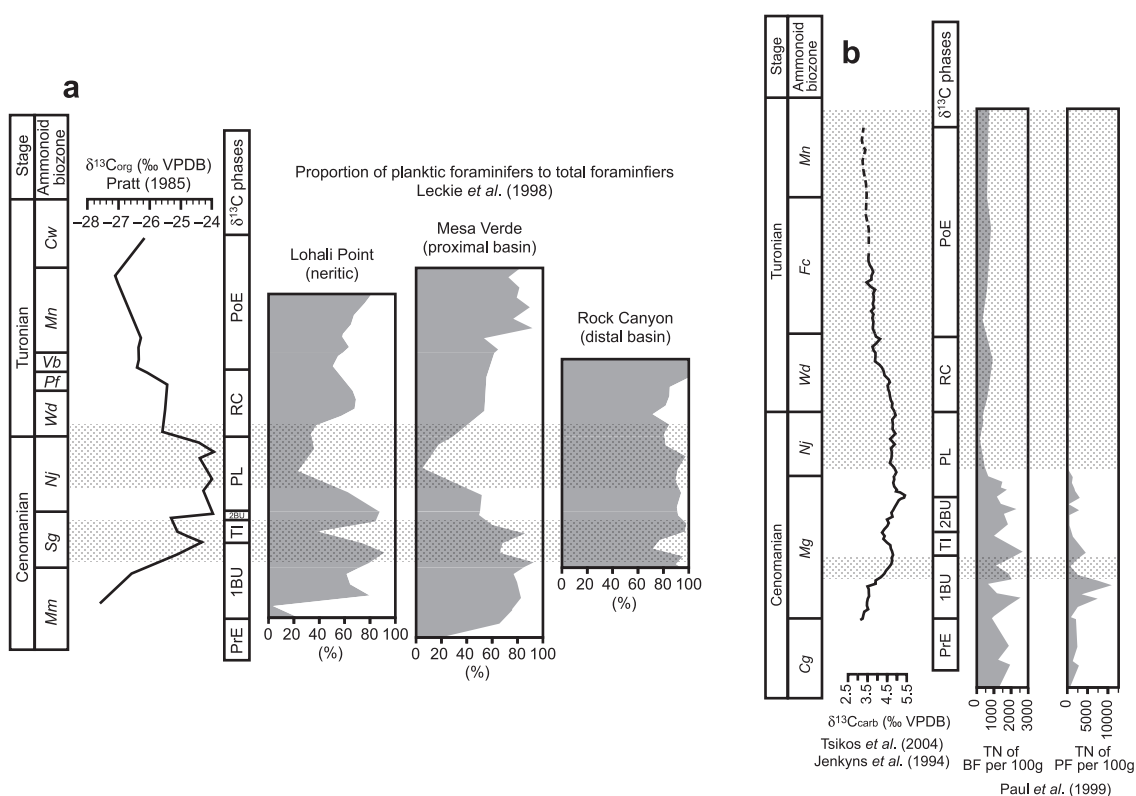


図 4 アメリカ Western Interior における有機炭素同位体層序 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) と浮遊性有孔虫化石の産出数 (a) とイギリス Eastbourne における無機炭素同位体層序 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) と浮遊性および底性有孔虫化石の産出個体数 (b). 網掛けは浮遊性有孔虫の貧産出帯を示す.

Fig. 4 Bulk organic carbon isotope stratigraphy ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) and planktic foraminiferal abundance in the Western Interior (a), and bulk carbonate carbon isotope stratigraphy ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) and benthic and planktic foraminiferal abundance in Eastbourne (b). Shadings indicate zones of rare planktic foraminiferal occurrence.

Mm: *Metoiceras mosbyense* Zone, Sg: *Sciponoceras gracile* Zone, Nj: *Neocardioceras juddii* Zone, Wd: *Watinoceras devonense* Zone, Pf: *Pseudaspidoceras flexuosum* Zone, Vb: *Vascoceras birchbyi* Zone, Mn: *Mammites nodosoides* Zone, Cw: *Collignoniceras woollgari* Zone, Cg: *Calycoceras guerangeri* Zone, Mg: *Metoiceras geslinianum* Zone, Fc: *Fagasia catinus* Zone, PrE: pre-excursion, 1BU: first build-up, TI: trough interval, 2BU: 2nd build-up, PL: plateau, RC: recovery, PoE: post-excursion, TN: total number, BF: benthic foraminifers, PF: planktic foraminifers.

れぞれ PrE ~ 1BU にかけて、および 2BU ~ PL にかけての区間に相当する (図 3)。本研究では、PL 中部以降のデータは得られていないが、Hasegawa (1999) では、大夕張地域の C/T 境界付近の PrE から PoE にかけての広い範囲において、浮遊性有孔虫化石の貧産出帯が存在することが報告されている。Hasegawa (1999) では、PrE から PoE ままで一括して貧産出帯としているが、その広い貧産出帯の中でも 1BU に相当す

る層準からは、浮遊性有孔虫化石が得られており (Fig. 4 of Hasegawa, 1999), 詳細に区分すると、この広い貧産出帯は PrE ~ 1BU にかけてと、2BU ~ PoE にかけての 2 層準とみなすことができる。この特徴は本地域で得られた結果とほぼ同一の特徴であり、この 2 回の貧産出イベントは蝦夷層群において普遍的に存在するものと考えることができる。

一方、これまで OAE2 の高時間分解能での研

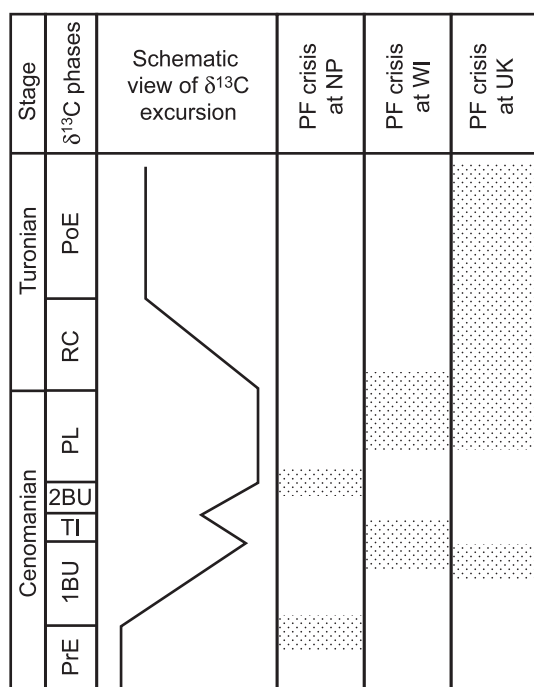


図 5 セノマニアン/チューロニアン境界における典型的な炭素同位体比の変動曲線と北西太平洋, Western Interior, および Eastbourne における浮遊性有孔虫貧産出帯（網掛け）の分布。

Fig. 5 Schematic view of carbon isotope stratigraphy across the Cenomanian/Turonian boundary, and zones of rare planktic foraminiferal occurrence (shadings) in the northwestern Pacific, Western Interior, and Eastbourne.
PrE: pre-excursion, 1BU: first build-up, TI: trough interval, 2BU: 2nd build-up, PL: plateau, RC: recovery, PoE: post-excursion, NP: northwestern Pacific, WI: Western Interior, UK: United Kingdom.

究が盛んに行われてきたアメリカ合衆国コロラド州プエブロ地域や、イギリス南部のイーストボーン周辺地域においても、このような2回の浮遊性有孔虫化石の貧産出帯が確認されてきた（図4）。プエブロ地域では、遠洋の海盆底に相当する Rock Canyon では明瞭な貧産出帯は認められないものの、特に大陸棚相において 1BU ~ TI にかけてと、PL 中期から RC にかけての顕著な貧産出帯が報告されている（図 4a: Leckie *et al.*, 1998）。同様に、イーストボーン地域におい

ても、1BU 後期と PL 中期以降の2回の貧産出帯が報告されている（図 4b: Paul *et al.*, 1999）。両地域ともに、1BU 前期では浮遊性有孔虫の産出数が多く、1BU ~ TI で貧産出となった後に、2BU ~ PL 前期で再び産出数が増加し、PL 後期で2回目の貧産出帯を迎えることとなり、ほぼ同一の時期にそれぞれの貧産出帯が存在する。

大西洋地域においては、浮遊性有孔虫の多様性が一旦回復する TI ~ 2BU の範囲において、底性有孔虫化石の多産や、ベレムナイトの *Preactinocamax plenus* の多産、あるいは biserial の浮遊性有孔虫 *Heterohelix* 属の多産などの生物学的イベントが報告されている（Jefferies, 1962; Gale and Christensen, 1996; Leckie *et al.*, 1998; Keller *et al.*, 2001; Keller and Pardo, 2004 など）。さらに、赤道太平洋における TEX₈₆ や浮遊性有孔虫の酸素同位体比の結果から、OAE の開始に伴い約 3℃ 上昇した表層水温が、この期間に急激に約 3 ~ 4℃ 減少したことが明らかになっている（Forster *et al.*, 2007）。この寒冷化は大量の有機物埋没に伴う大気中の二酸化炭素濃度の減少によるものと考えられ、堆積物中の炭酸カルシウム含有量の変化などから、海底が一旦酸化的になったことが示唆され、TI ~ 2BU の区間は海洋の貧/無酸素状態の一時的な緩和時期に相当すると考えられている。従って、大西洋地域の浮遊性有孔虫の2回の貧産出帯は、OAE の開始に伴い一旦多様性が大きく減少した浮遊性有孔虫が、TI ~ 2BU にかけての貧/無酸素状態の緩和に伴い多様性が回復し、再び貧/無酸素状態の強度が増す PL 期に多様性が減少したものと解釈することができる。

炭素同位体比曲線に対する、これらの2つの貧産出帯の分布を示したものが図5である。上述のように、プエブロ地域とイーストボーン地域ではほぼ同時期に貧産出帯が存在するのに対し、本調査地域である北西太平洋では、これらの2回の貧産出帯の位置する時期が大西洋のそれとは明らかに異なり、大西洋地域より先行して存在することが示された。大夕張地域での有孔虫化石層序の結果を考慮すると（Hasegawa, 1999）、本研究

で明らかになった 2BU ~ PL にかけての貧産出帯は、より上位の PoE 帯まで存続するものと考えることができる。従って、有孔虫の産出/貧産出パターンは、PrE の上部で減少した多様性が、1BU ~ TI で回復し、再び 2BU 以降で減少するというパターンであり、発生時期は異なるものの、大西洋地域でのパターンと同様のパターンであると考えられる。

大西洋地域と同様に 1BU ~ TI までの一旦多様性が回復する期間が貧/無酸素状態の一時的な緩和を示しているとする、北西太平洋地域では、貧/無酸素状態の拡大、一時的な緩和、および再強化のタイミングが大西洋地域より先行していたものと考えることができる。

VI. 結論と今後の展開

大西洋地域では貧/無酸素状態の発達と、様々な生物種の多産イベントや、海水温変動の詳細な記録が復元され、OAE2 時における海洋-生物間の相互作用の詳細な前後関係が明らかにされつつある。一方、本邦においては、詳細な時間分解能を持つ結果としては、本研究で明らかになった炭素同位体比層序と有孔虫化石の多産/貧産出イベントの結果が初の報告であり、OAE2 時における北西太平洋での海洋-生物イベントの独自性を示すことに成功した。その結果、これまで漠然と汎世界的な海洋イベントとしてとらえられてきた OAE2 が、大西洋地域と太平洋地域とはその様相を異にし、貧/無酸素状態の発達が異時性があることを示すに至り、太平洋地域では大西洋地域に先行して貧/無酸素状態に突入した可能性が示唆された。大西洋と太平洋で確認されたこの貧/無酸素状態の発達が、全球的に単一の要因に基づく同一のメカニズムによるものであるのか、あるいは、C/T 境界付近で大西洋と太平洋で独立に同様の事象が起きたのかについては、今後のさらなる詳細な海洋-生物イベントの解析が不可欠である。

近年、栗原・川辺 (2003) により、C/T 境界付近での軟体動物化石相の概要が示されたものの、詳細な炭素同位体比曲線との対比に基づく生

痕種ごとの生痕化石相解析や、多様な分類群にわたる化石相や、それぞれの事象の前後関係などについては、いまだに不明点が多い。そこで、今後は本研究で得られた詳細な炭素同位体比変動曲線に基づき、多様な生物群の化石相解析や、地球化学分析に基づく海洋環境の復元など、生物および海洋イベントの前後関係を明らかにすることで、太平洋地域における貧/無酸素状態の発達状態の詳細なメカニズムを解明することが求められる。

謝 辞

本研究は、東京地学協会の研究助成金、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 18340164 : 長谷川 卓)、文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 19740318 : 守屋和佳) の費用を使って行われた。関係諸機関に心から感謝致します。調査地域への入林に関しては、林野庁北海道森林管理局留萌南部森林管理署達布森林事務所、および北海道留萌郡小平町教育委員会の方々にお世話になった。また、現地での滞在には、羽幌遊歩ユースホステルの高梨雅弘・恵理夫妻には多大なるご援助をいただいた。ここに記して心より感謝の意を表します。

文 献

- Arthur, M.A., Dean, W.E. and Pratt, L.M. (1988): Geological and climatic effects of increased marine organic carbon burial at the Cenomanian/Turonian boundary. *Nature*, **335**, 714-717.
- Bornemann, A., Norris, R.D., Friedrich, O., Bechmann, B., Schouten, S., Sinninghe Damsté, J.S., Vogel, J., Hofmann, P. and Wagner, T. (2008): Isotopic evidence for glaciation during the Cretaceous supergreenhouse. *Science*, **319**, 189-192.
- Clarke, L. and Jenkyns, H.C. (1999): New oxygen isotope evidence for long-term Cretaceous climatic change in the Southern Hemisphere. *Geology*, **27**, 699-702.
- Corfield, R.M., Cartlidge, J.E., Premoli-Silva, I. and Housley, R.A. (1991): Oxygen and carbon isotope stratigraphy of the Paleogene and Cretaceous limestones in the Bottaccione Gorge and the Contessa Highway sections, Umbria, Italy. *Terra Nova*, **3**, 414-422.
- Elder, W.P. (1989): Molluscan extinction patterns across the Cenomanian-Turonian stage boundary in the Western Interior of the United States. *Paleobiology*, **15**, 299-320.
- Erbacher, J. and Thürow, J. (1997): Influence of oce-

- anic anoxic events on the evolution of mid-Cretaceous radiolaria in the North Atlantic and western Tethys. *Marine Micropaleontology*, **30**, 139–158.
- Forster, A., Schouten, S., Moriya, K., Wilson, P.A. and Sinninghe Damsté, J.S. (2007): Tropical warming and intermittent cooling during the Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event 2: Sea surface temperature records from the equatorial Atlantic. *Paleoceanography*, **22**, PA1219.
- Friedrich, O., Erbacher, J., Moriya, K., Wilson, P.A. and Kuhnert, H. (2008): Evidence for warm saline intermediate waters in the Cretaceous tropical Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, **1**, 453–457.
- Gale, A.S. and Christensen, W.K. (1996): Occurrence of the belemnite *Actinocamax plenus* in the Cenomanian of SE France and its significance. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, **43**, 68–77.
- Hart, M.B. (1996): Recovery of the food chain after the Late Cenomanian extinction event. in *Biotic Recovery from Mass Extinction Events* edited by Hart, M.B., The Geological Society, 265–277.
- Hasegawa, T. (1997): Cenomanian-Turonian carbon isotope events recorded terrestrial organic matter from northern Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **130**, 251–273.
- Hasegawa, T. (1999): Planktonic foraminifera and biochronology of the Cenomanian-Turonian (Cretaceous) sequence in the Oyubari area, Hokkaido, Japan. *Paleontological Research*, **3**, 173–192.
- Hasegawa, T. and Saito, T. (1993): Global synchronicity of a positive carbon isotope excursion at the Cenomanian/Turonian boundary: Validation by calcareous microfossil biostratigraphy of the Yezo Group, Hokkaido, Japan. *Island Arc*, **2**, 181–191.
- Heyes, J.M., Popp, B.N., Takigiku, R. and Johnson, M.W. (1989): An isotopic study of biogeochemical relationships between carbonates and organic carbon in the Greenhorn Formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**, 2961–2972.
- Huber, B.T., Norris, R.D. and MacLeod, K.G. (2002): Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous. *Geology*, **30**, 123–126.
- Jarvis, I., Carson, G.A., Cooper, M.K.E., Hart, M.B., Leary, P.N., Tocher, B.A., Horne, D. and Rosenfeld, A. (1988): Microfossil assemblages and the Cenomanian-Turonian (late Cretaceous) Oceanic Anoxic Event. *Cretaceous Research*, **9**, 3–103.
- Jarvis, I., Gale, A.S., Jenkyns, H.C. and Pearce, M.A. (2006): Secular variation in Late Cretaceous carbon isotopes: A new $\delta^{13}\text{C}$ carbonate reference curve for the Cenomanian–Campanian (99.6–70.6 Ma). *Geological Magazine*, **143**, 561–608.
- Jefferies, R.P.S. (1962): The palaeoecology of the *Actinocamax plenus* subzone (lowest Turonian) in the Anglo-Paris Basin. *Palaeontology*, **4**, 609–647.
- Jenkyns, H.C., Gale, A.S. and Corfield, R.M. (1994): Carbon- and oxygen -isotope stratigraphy of the English Chalk and Italian Scaglia and its palaeoclimatic significance. *Geological Magazine*, **131**, 1–34.
- Jenkyns, H.C., Forster, A., Schouten, S. and Sinninghe Damsté, J.S. (2004): High temperatures in the Late Cretaceous Arctic Ocean. *Nature*, **432**, 888–892.
- Keller, G. and Pardo, A. (2004): Age and paleoenvironment of the Cenomanian/Turonian global stratotype section and point at Pueblo, Colorado. *Marine Micropaleontology*, **51**, 95–128.
- Keller, G., Han, Q., Adatte, T. and Burns, S.J. (2001): Palaeoenvironment of the Cenomanian-Turonian transition at Eastbourne, England. *Cretaceous Research*, **22**, 391–422.
- 栗原憲一・川辺文久 (2003): セノマニアン/チューロニン期境界前後の軟体動物相: 北海道大夕張地域と米国西部内陸地域の比較. 化石, **74**, 36–47.
- Leckie, R.M., Yuretic, R.F., West, O.L.O., Finkelstein, D. and Schmidt, M. (1998): Paleoceanography of the southwestern Western Interior sea during the time of the Cenomanian-Turonian boundary (Late Cretaceous). in *Stratigraphy and Paleoenvironments of the Cretaceous Western Interior Seaway, USA* edited by Dean, W.E. and Arthur, M.A., *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology No. 6*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 101–126.
- Leckie, R.M., Bralower, T.J. and Chashman, R. (2002): Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. *Paleoceanography*, **17**, doi:10.1029/2001PA000623.
- Moriya, K. and Hasegawa, T. (2007): Cretaceous oceanic anoxic events in the Japanese islands. in *Paleoclimates in Asia during the Cretaceous: Their Variations, Causes, and Biotic and Environmental Responses* edited by Lee, Y.I., Paik, I.S., Cheong, D.K., Huh, M. and Lee, Y.U., International Geoscience Programme Project 507, 49–63.
- Moriya, K., Nishi, H., Kawahata, H., Tanabe, K. and Takayanagi, Y. (2003): Demersal habitat of Late Cretaceous ammonoids: Evidence from oxygen isotopes for the Campanian (Late Cretaceous) northwestern Pacific thermal structure. *Geology*, **31**, 167–170.
- Moriya, K., Wilson, P.A., Friedrich, O. and Erbacher, J. (2007): Testing for ice sheets during the mid-Cretaceous greenhouse using glassy foraminiferal calcite from the mid-Cenomanian tropics on Demerara Rise. *Geology*, **35**, 615–618.
- Okada, H. (1983): Collision orogenesis and sedimentation in Hokkaido, Japan. in *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions* edited by Hashimoto, M. and Uyeda, S., Terra Scientific Publishing, Tokyo, 91–105.

- Paul, C.R.C., Lamolda, M.A., Mitchell, S.F., Vaziri, M.R., Gorostidi, A. and Marshall, J.D. (1999): The Cenomanian-Turonian boundary at Eastbourne (Sussex, UK): A proposed European reference section. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **150**, 83–121.
- Pratt, L.M. (1985): Isotopic studies of organic matter and carbonate in rocks of the Greenhorn marine cycles. in *Fine grained Deposits and Biofacies of the Cretaceous Western Interior Seaway: Evidence of cyclic Sedimentary Processes* edited by Pratt, L.A., Kauffman, E.G. and Zelt, F.B., *Field Trip Guidebook No. 4*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 38–48.
- Pratt, L.M. and Threlkeld (1984): Stratigraphic significance of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in mid-Cretaceous rocks of the Western Interior, U.S.A. in *The Mesozoic of Middle North America*. edited by Stott, D.F. and Glass, D.J., *Canadian Society of Petroleum Geologists Memoire 9*, Canadian Society of Petroleum Geologists, 305–312.
- Sageman, B.B., Meyers, S.R. and Arthur, M.A. (2006): Orbital time scale and new C-isotope record for Cenomanian-Turonian boundary stratotype. *Geology*, **34**, 125–128.
- Schlanger, S.O. and Jenkyns, H.C. (1976): Cretaceous oceanic anoxic events-causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, **55**, 179–184.
- 関根秀人・高木 淳・平野弘道 (1985): 北海道小平地域北東部上部白亜系の化石層序学的研究. 化石, **38**, 1–15.
- Sepkoski, J.J. (1989): Periodicity in extinction and the problem of catastrophism in the history of life. *Journal of Geological Society of London*, **146**, 7–19.
- Sholle, P.A. and Arthur, M.A. (1980): Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: Potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, **64**, 67–87.
- Takashima, R., Nishi, H. and Yoshida, T. (2002): Geology, petrology and tectonic setting of the Late Jurassic ophiolite in Hokkaido, Japan. *Journal of Asian Earth Science*, **21**, 197–215.
- Takashima, R., Kawabe, F., Nishi, H., Moriya, K., Wani, R. and Ando, H. (2004): Geology and stratigraphy of forearc basin sediments in Hokkaido, Japan: Cretaceous environmental events on the north-west Pacific margin. *Cretaceous Research*, **25**, 365–390.
- Takayanagi, Y. and Okamura, M. (1977): Mid-Cretaceous planktonic microfossils from the Obira area, Rumoi, Hokkaido. *Palaeontological Society of Japan, Special Papers*, **21**, 31–39.
- Taketani, Y. (1982): Cretaceous radiolarian biostratigraphy of the Urakawa and Obira areas, Hokkaido. *The Science Reports of the Tohoku University, Second Series, Geology*, **52**, 1–76.
- 棚部一成・平野弘道・松本達郎・宮田雄一郎 (1977): 北海道小平地域の上部白亜軽装所. 九州大学理学部研究報告, **12**, 181–202.
- Tanaka, K. (1963): A study of the Cretaceous sedimentation in Hokkaido, Japan. *Report of the Geological Survey of Japan*, **197**, 1–122.
- 田中啓策・角 靖夫 (1981): 北海道中軸部白亜系の古流系. 地質調査所月報, **32**, 65–127.
- 利光誠一・松本達郎・野田雅之・西田民雄・米谷盛壽郎 (1995): 本邦上部白亜系の大型化石—微化石層序および古地磁気層序の統合に向けて. 地質学雑誌, **101**, 19–29.
- Tsikos, H., Jenkyns, H.C., Walsworth-Bell, B., Petrizzo, M.R., Forster, A., Kolonic, S., Erba, E., Premoli Silva, I., Baas, M., Wagner, T. and Sinninghe Damsté, J.S. (2004): Carbon-isotope stratigraphy recorded by the Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event: Correlation and implications based on three key localities. *Journal of the Geological Society of London*, **161**, 711–719.
- Wilson, P.A. and Norris, R.D. (2001): Warm tropical ocean surface and global anoxia during the mid-Cretaceous period. *Nature*, **412**, 425–428.

(2008年7月1日受付, 2008年7月15日受理)