

白亜紀の火成活動と温暖化・環境変動

高嶋礼詩・西 弘嗣

東北大学学術資源研究公開センター・総合学術博物館

Cretaceous warming and environmental changes linked to volcanism

Reishi Takashima and Hiroshi Nishi

The Center for Academic Resources and Archives, Tohoku University Museum, Tohoku University, Aramaki Aza Aoba 6-3, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan

Abstract. The mid-Cretaceous period is one of the warmest climate periods in the history of Earth. Although the long-term (>1 my) warming trend during mid-Cretaceous is considered to have caused by activated volcanism in mid-Ocean ridges, increased volcanic activities in subduction zones also may have contributed to global warming during 100–80 Ma. On the other hand, emplacements of Large Igneous Provinces (LIPs) during mid-Cretaceous induced transient rapid warming (<1 my) through outgassing of volcanic CO₂. Such rapid warming may have resulted in elevation of primary productivity and expansion of anoxia in the global oceans (Oceanic Anoxic Events: OAEs) through the enhancement of weathering and continental run-off. Recent ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os isotope stratigraphies and U-Pb ages in the Oceanic Anoxic Event 2 (OAE2) interval revealed that the activity of LIPs preceded the OAE2 by 300 kilo years.

Key words: volcanism, LIPs, Cretaceous, greenhouse climate, OAEs

はじめに

白亜紀は地球史においても最も温暖化した時代の一つとして知られている。この時期には、海水準の大幅な上昇、極域における氷床の不在、巨大低気圧の頻発、海洋表層の酸性化、海洋中～深層における無酸素水塊の拡大、海洋生態系の変化など、現在の地球温暖化で危惧される環境変化がすべて起こっていたと考えられている（例えば、Ito *et al.*, 2001; Leckie *et al.* 2002; Takashima *et al.*, 2006）。近年の地球温暖化は主に産業革命以降の化石燃料の消費による温室効果ガス（主に二酸化炭素）の放出が原因とされているが、白亜紀では、スーパーブルーム活動による大規模な火成活動が大量の二酸化炭素を放出した結果、温暖化が進行したと考えられている（Larson, 1991a, b）。白亜紀全体の長期的な温暖化傾向は、海嶺における海洋地殻生産量の増加に起因すると考えられているが、他方、短期間（100万年未満）の急激な温暖化も起こっており、その多くは大規模火成岩岩石区（Large Igneous Provinces: LIPs）の形成に伴って起こった可能性が高い。この急激な温暖化は海洋無酸素事変などの地球規模の環境変化を起こしたと考えられ、近年、急速に進行している温暖化が地球環境にどのように影響を及ぼすかを理解する上で重要である。このような背景から本論では、白亜紀の火成活動と温暖化・環境変動に関する研究の進展について簡単にレビューする。

長期トレンドの温暖化と火成活動

白亜紀中期の温暖化は、海嶺の火成活動の活発化と一致していることから、古くより火成活動との関連性が指摘されてきた（例えばArthur *et al.*, 1985）。図1はジュラ紀末期から現在にかけての海洋地殻生産量、ストロンチウム同位体比、底生有孔虫及びベレムナイトの酸素同位体比曲線、海洋無酸素事変の発生時期をまとめたものである。ベレムナイトと底生有孔虫の生息深度の違いから単純比較はできないが、基本的に白亜紀の海水温はAlbian～Santonian（112～84 Ma）の区間で高く、とりわけCenomanian後期～Turonian前期（95～90 Ma）で最大となる（Bodin *et al.*, 2015）。一方、マントル由来の火成活動の指標となる海洋地殻生産量およびストロンチウム同位体比では、Aptian～Albian前期（125～110 Ma）とCenomanian後期～Turonian前期（95～85 Ma）付近の2つの期間にピークがみられる。Cenomanian後期～Turonian前期は白亜紀の海水温の極大期とよく一致するが、Aptian～Albian前期に関しては、海底火成活動が活発だったにもかかわらず、Cenomanian後期～Turonian前期のような顕著な温暖化傾向がみられない。この相違に関して明確に議論された例は無いが、ここでは2つの可能性を挙げておく。

1. 沈み込み帯火成活動の活発化

日本やカリフォルニアにおける花崗岩類の放射年代と

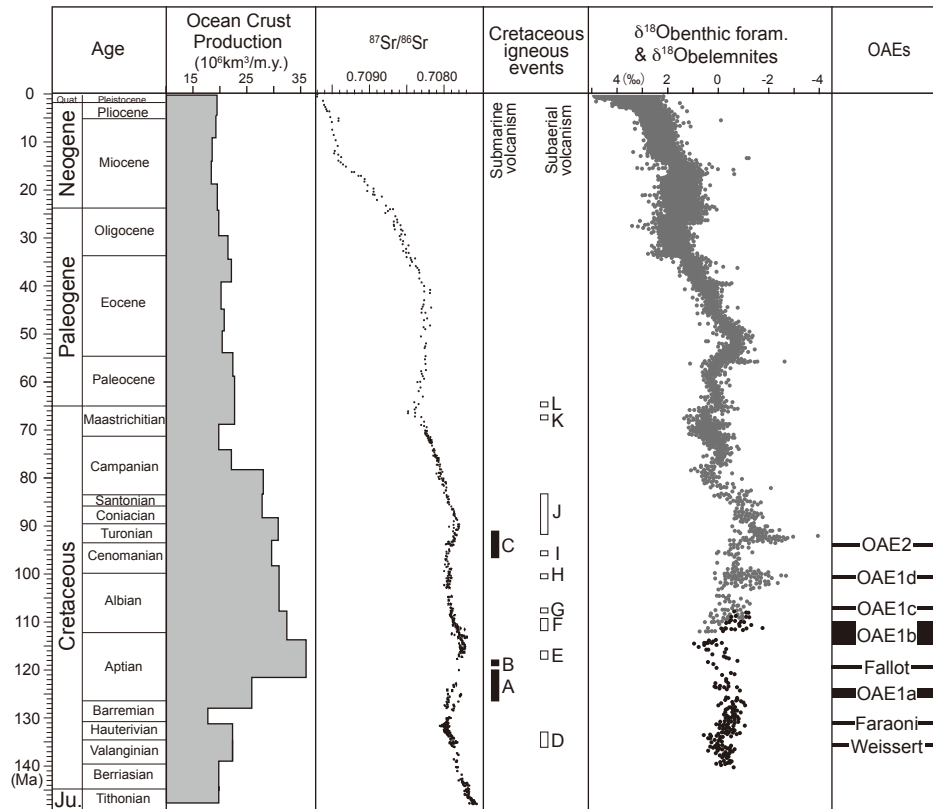


図1：ジュラ紀末期から現在までの海洋地殻生産量，ストロンチウム同位体比，底生有孔虫（灰点）・ベレムナイト（黒点）の酸素同位体比の変遷と白亜紀の大規模火成岩岩石区（LIPs）および海洋無酸素事変層準（OAEs）。A：Ontong Java and Manihiki Plateaus, B：Kerguelen Plateau, C：Caribbean Plateau and NE Ontong Java, D：Panana-Etendeka, E：Rajmahal Traps, F：northern Kerguelen Plateau, G：Elan Bank, H：central Kerguelen Plateau, I：Broken Ridge, J：Madagascar flood basalt, K：Skiff Bank. L：Deccan Trap各データはLarson (1991a), Mahoney *et al.* (1993), Storey *et al.* (1995), Torsvik *et al.* (1998), Price and Gröcke (2002), Niebuhr and Joachimski (2002), Mahoney *et al.* (2008), Friedrich *et al.* (2012), Bodin *et al.* (2015) に基づく。

Fig. 1. Latest Jurassic to present day long-term variations of oceanic crust production, marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio, benthic sea-water $\delta^{18}\text{O}$ signal, and LIPs emplacement and OAE horizons.

露出面積等に基づいて、火成活動を見積もると、これらの地域の沈み込み帯火成活動は後期白亜紀の100～80 Maにピークがみられる（Ducea, 2001; Takagi, 2004）。沈み込み帯の火成活動は海嶺の火成活動よりもより多くの二酸化炭素を放出するため（Sano and Williams, 1996）、沈み込み帯における火成活動の活発化も Cenomanian 後期～Turonian 前期（95～90 Ma）における温暖化の極大を引き起こした一つの要因として挙げることができる。しかし、沈み込み帯は隆起・侵食などによって当時の火山噴出物の露出が限られているため、現時点では沈み込み帯における白亜紀火成活動の規模を正確に見積もることは困難である。

2. 大西洋～テチス海における有機物に富む堆積物の形成

テチス海～大西洋にかけての海域で堆積した白亜系は石灰岩が卓越するが、下部白亜系上部の Aptian から Albian にかけての区間のみ、海洋無酸素事変以外の層準であっても有機物に富む泥灰岩～黒色頁岩が卓越する（例

えば, Bréhéret, 1997; Takashima *et al.* 2007）。このことは、火成活動によって大量の二酸化炭素が放出されても、大量の有機炭素が大西洋～テチス海において埋没したために、堆積物中に二酸化炭素が固定されることになり、温暖化の進行が顕著にならなかったのかもしれない。一方、Cenomanian–Turonian 期には Aptian–Albian 期よりも海水準が高く、陸地面積が少なかったために風化が抑制され、二酸化炭素が除去されないために、その結果として温暖化が顕著に進行した可能性も考えられる。

LIPsの活動と温暖化・海洋無酸素事変

白亜紀中期にはスーパープルーム活動に起因して形成された大規模火成岩岩石区（LIPs）が数多く存在した（図1）。中でも最大規模のLIPsであるオントンジャワ海台では、総噴出量が $60,000,000 \text{ km}^3$ に達し（Coffin and Eldholm, 1994）、日本の後期第四紀最大の破局的噴火として知られる阿蘇4噴火の噴出物総量 600 km^3 と比べても桁違いである。白亜紀のLIPs形成時期には海洋無酸素事

変がほぼ同時期に発生していることから、その関係については1980年代以降、盛んに議論がなされてきた。しかし、LIPsの放射年代値は誤差が大きく、生層序学的年代尺度に基づくOAEの年代値と比べてその因果関係を議論することは困難だった。その後、Bralower *et al.* (1997)は、白亜紀中期の海洋堆積物において $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の顕著な低下区間とOAE1a, OAE1b, OAE2の各層準がほぼ一致することを示し、火成活動の活発化と海洋無酸素事変の発生との関係が層序学的に調和的であることを解明した。ストロンチウムの海洋における滞留時間は200～400万年間（例えば、Veizer, 1989; Ravizza and Zachos, 2003）であり、OAEの発達期間（数万～100万年間）に比べて極めて長いために、LIPsの活動とOAEの開始との厳密な因果関係を議論するほどの精度には至っていなかったが、この研究以降、LIPsが急激な温暖化やOAEを引き起こす要因とする見解はほぼ共通の認識となった。この結果、LIPsと海洋無酸素事変との因果関係については大まかに2つのシナリオが提唱された（図2）。一つは、LIPsが熱水プルームの放出を介して、生物必須元素を海洋表層にもたらし、一次生産を刺激し、酸素極小層の拡大をもたらしたとする仮説で、LIPsが直接、海洋無酸素事変を引き起こしたとする考えである（例えば、Sinton and Duncan, 1997; Kerr, 1998; Larson and Erba, 1999; Snow *et al.*, 2005）。もう一つは、LIPsの活動によって温暖化や海水準の上昇が起こり、結果として降雨の増加や陸棚域の水没等による陸からの栄養塩の増加が、海洋一次生産を上昇させ、無酸素水塊の拡大を引き起こしたとする、LIPsが間接的に海洋無酸素事変をもたらしたとする考えである（Larson and Erba, 1999; Leckie *et al.*, 2002; Misumi *et al.*, 2009; Adams *et al.*, 2010; Barclay *et al.*, 2010; Monteiro *et al.*, 2012; Ozaki and Tajika, 2013）。LIPsが直接、海洋無酸素事変を引き起こしたとするシナリオでは、火成活動と一次生産の増加がほぼ同時でなければならない、実際に、アリューシャン弧のカサトチ火山

では、2008年8月9日に起こった火山噴火とほぼ同時に大幅な一次生産の増加が起こっている（例えば、Lindenthal *et al.*, 2013）。一方、後者のLIPsが間接的に海洋無酸素事変を引き起こしたとするシナリオでは、LIPsの活動による大気中の二酸化炭素濃度の増加やLIPsの形成に伴う海水準の増加などにある程度のタイムラグが生じる可能性がある。

2000年代に入り、海洋無酸素事変層準の鉛同位体比やオスミウム同位体比などの検討が行われるようになり、海洋無酸素事変とLIPsの活動との時間関係が層序学的に詳細に明らかにされるようになった（例えば、Kuroda *et al.*, 2007; Turgeon and Creaser, 2008; Tejada *et al.*, 2009; Kuroda *et al.*, 2011; Bottini *et al.*, 2011）。鉛同位体比（ ^{208}Pb , ^{206}Pb , ^{204}Pb ）については、Kuroda *et al.* (2007)により、OAE2の黒色頁岩の鉛同位体比がマダガスカル洪水玄武岩やカリブ海台、MORBの組成範囲と類似することが示され、大規模火成活動と海洋無酸素事変との関連が明らかにされた。海洋のオスミウム同位体比（ $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ）は、ストロンチウムと同様、大陸地殻由来の放射起源の ^{187}Os （ ^{187}Re が β^- 壊変して生じる）と安定同位体である ^{188}Os との量比であり、風化が促進すると $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初生値は高くなり、マントル由来の熱水活動が卓越すると $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初生値は低くなる（Peucker-Ehrenbrink and Ravizza, 2000）。このような点から、隕石の影響を除けば、基本的にストロンチウム同位体比と類似している。前述したように、海洋のストロンチウムの滞留時間は200万～400万年と長いのに対して、オスミウムでは8千年～1万年とかなり短く（Oxburgh, 2001）、短期間で海洋のオスミウムは入れ替わることが知られている。このことは、オスミウム同位体比のほうが高精度で風化作用とマントル由来の熱水活動の供給量のバランスの変化を検出することが可能であることを示す。Turgeon and Creaser (2008)は、Cenomanian/Turonian境界で発生したOAE2を挟む地層においてオスミウム同位体比を検討した結果、オスミウム同位体比は海洋無酸素事変の発生よりも数万年先行して大幅に減少することを明らかにするとともに、OAE2の終了に向かって徐々に風化が再び卓越してくることを明らかにした。さらに、Du Vivier *et al.* (2015)は、北海道や北米Western InteriorのOAE2区間において、凝灰岩のジルコンU-Pb年代とオスミウム同位体比の測定を行い、オスミウム同位体比曲線の高精度な年代モデルを構築し、LIPsの活動と海洋無酸素事変との時間関係を詳細に解明した。彼女らの結果によると、LIPsの活動はOAE2の開始よりも35万年前に開始し、OAE2開始の約3万年前に極大に達し、OAE2の開始から30万年後に終息したことが明らかになった。つまり、LIPsの活動開始や活動のピークとOAE2の発生の間に30万～30万のタイムラグが生じている（図3）。図3によると、LIPsの活動開始層準（OAE2の30万

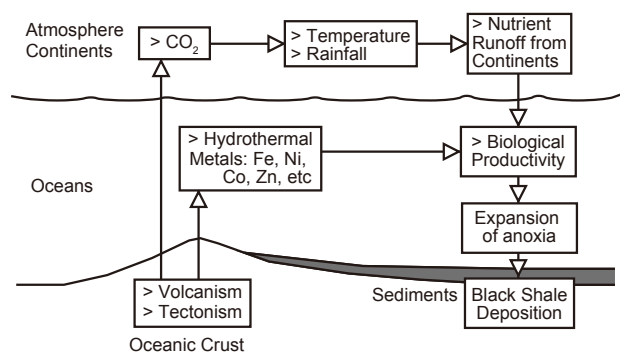


図2：LIPsの活動と海洋無酸素事変の関係を示した2つのモデル（Larson and Erba, 1999を改編）。

Fig. 2. Models showing the relationship between LIPs formation and oceanic anoxic event (Modified from Larson and Erba, 1999).

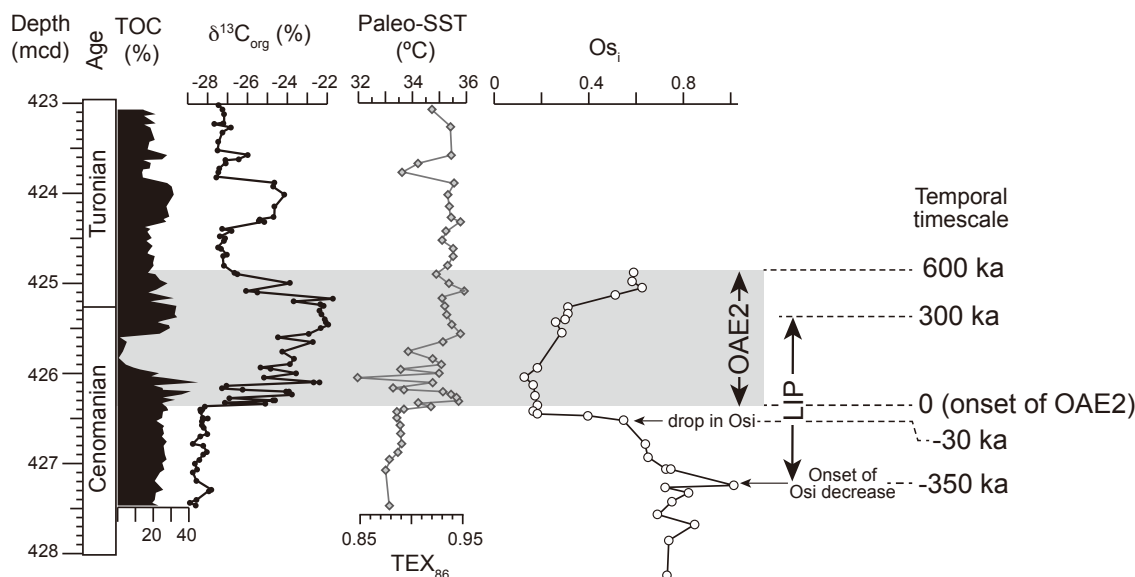


図3：Demerara Rise（Ocean Drilling Program Leg207 Site1260）のOAE2層準における全有機炭素量（TOC）、炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ）、海洋表層水温（ TEX_{86} ）、オスミウム同位体比（ Os_i ）（Forster *et al.*, 2007; Turgeon and Creaser, 2008; Du Vivier *et al.*, 2014）。オスミウム同位体比曲線の年代モデルはDu Vivier *et al.*（2015）に基づく。

Fig. 3. Stratigraphy, total organic carbon contents (TOC), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, paleo-sea surface temperature (TEX_{86}) and Os_i across the OAE2 interval in Demerara Rise (Ocean Drilling Program Leg207 Site 1260). Geochemical data are from Forster *et al.* (2007), Turgeon and Creaser (2008) and Du Vivier *et al.* (2014). Temporal time scale for Os isotope stratigraphy is from Du Vivier *et al.* (2015).

年前)には大西洋の低緯度地域でも海水温は上昇し始め、OAE2開始直前に大幅に上昇している。植物の気孔密度から産出された二酸化炭素濃度も、OAE2の開始前から増加しており、この事実と矛盾しない(Barclay *et al.*, 2010)。以上のことから、LIPsが直接、海洋表層の生産性を刺激し、無酸素水塊の拡大を引き起こしたとする仮説より、LIPsの活動による二酸化炭素の放出が、温暖化や風化の促進、大陸から海洋への栄養塩の流入の増加を引き起こし、海洋無酸素事変を間接的に引き起こしたとする仮説を支持する。現時点では、OAE2を引き起こした噴火として、マダガスカル洪水玄武岩、カリブ海台、オントンジャワ海台北東部、ブローケン海膨、北極など、OAE2の放射年代と近い年代値を示すLIPsが挙げられているが(図1)、これらの放射年代値はいずれも誤差が大きく、OAE2との関連を示すには十分でない。しかし近年、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の精度が大幅に向上しつつあり(Jicha *et al.*, 2016)、将来的にはOAE2を引き起こしたLIPsの特定も可能となるかもしれない。

おわりに

本論は、白亜紀の火成活動が長期スケール（100万年以上）と短期スケール（100万年未満）の温暖化とどのような関係にあるかを紹介したレビューである。近年の放射年代測定の飛躍的な精度向上とオスミウム同位体比の研究により、海底火成活動、温暖化、環境変動のリンケージの理解が飛躍的に進展した。しかしながら、沈み

込み帯での火成活動の影響の見積もりや、陸上と海底のLIPsの形成による環境変動の違いについてはまだ明らかになっていない部分が多く、今後の課題と考えられる。

本論は2016年1月に京都大学で開催された日本古生物学会第165回例会のシンポジウム（1）「白亜紀の層序学・古生物学の進展と環境変動」において講演した内容を、関連する情報を補填してまとめたものである。本論はIGCP608「白亜紀のアジア-西太平洋地域の生態系システムと環境変動」の活動の一貫として行われた。東アジアのIGCPを長年牽引されてこられた早稲田大学の故平野弘道教授、本論の執筆機会をいただいた茨城大学の安藤寿男教授に感謝いたします。

文献

- Adams, D. D., Hurtgen, M. T. and Sageman, B. B., 2010. Volcanic triggering of a biogeochemical cascade during Oceanic Anoxic Event 2. *Nature Geoscience*, **3**, 201–204.
- Arthur, M. A., Dean, W. E. and Schlanger, S. O., 1985. Variations in the global carbon cycle during the Cretaceous related to climate, volcanism, and changes in atmospheric CO_2 . In Sundquist, E. T. and Broecker, W. S., eds., *The Carbon Cycle and Atmospheric CO_2 : Natural Variations Archean to Present*. AGU Geophysical Monograph 32, 504–529, AGU, Washington, D.C.
- Barclay, R. S., McElwain, J. C. and Sageman, B. B., 2010. Carbon sequestration activated by a volcanic CO_2 pulse during Ocean Anoxic Event 2. *Nature Geoscience*, **3**, 205–208.
- Bodin, S., Meissner, P., Janssen, N. M. M., Steuber, T. and Mutterlose, J., 2015. Large igneous provinces and organic carbon burial: Controls on global temperature and continental weathering during

- the Early Cretaceous. *Global and Planetary Change*, **133**, 238–253.
- Bottini, C., Cohen, A. S., Erba, E., Jenkyns, H. C. and Coe, A. L., 2012. Osmium isotope evidence for volcanism, weathering, and ocean mixing during the early Aptian OAE 1a. *Geology*, **40**, 583–586, doi:10.1130/G33140.1.
- Bralower, T. J., Fullagar, P. D., Paull, C. K., Dwyer, G. S. and Leckie, R. M., 1997. Mid-Cretaceous strontium-isotope stratigraphy of deep-sea sections. *Geological Society of America Bulletin*, **109**, 1421–1442.
- Bréhéret, J.-G., 1997. L'Aptien et l'Albien de la Fosse vocontienne (des bordures au bassin) évolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques. Société Géologique du Nord, 25. SGN, Villeneuve d'Ascq, 614pp.
- Coffin, M. F. and Eldholm, O., 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions and external consequences. *Reviews of Geophysics*, **32**, 1–36.
- Cramer, B. S., Toggweiler, J. R., Wright, J. D., Katz, M. E. and Miller, K. G., 2009. Ocean overturning since the Late Cretaceous: inferences from a new benthic foraminiferal isotope compilation. *Paleoceanography*, **24**, PA4216.
- Ducea, M., 2001. The California Arc: Thick granitic batholiths, eclogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups. *Geological Society of America Today*, **11**, 4–10.
- Erba, E. 2004. Calcareous nannofossils and Mesozoic oceanic anoxic events. *Marine Micropaleontology*, **52**, 85–106.
- Forster, A., Schouten, S., Moriya, K., Wilson, P. A. and Damsté, S. 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, doi:10.1029/2006PA001349.
- Friedrich, O., Norris, R. D. and Erbacher, J., 2012. Evolution of middle to Late Cretaceous oceans—a 55 m.y. record of Earth's temperature and carbon cycle. *Geology*, **40**, 107–110.
- Du Vivier, A. D. C., Selby, D., Sageman, B. B., Jarvis, I., Gröcke, D. R. and Voigt, S., 2014. Marine $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ isotope stratigraphy reveals the interaction of volcanism and ocean circulation during Oceanic Anoxic Event 2. *Earth and Planetary Science Letters*, **389**, 23–33.
- Du Vivier, A. D. C., Selby, D., Condon, D. J., Takashima, R. and Nishi, H., 2015. Pacific $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ isotope chemistry and U-Pb geochronology: synchronicity of global Os isotope change across OAE 2. *Earth and Planetary Science Letters*, **428**, 204–216.
- Ito, M., Ishigaki, A., Nishikawa, T. and Saito, T., 2001. Temporal variation in the wavelength of hummocky cross-stratification: implications for storm intensity through the Mesozoic and Cenozoic. *Geology*, **29**, 87–89.
- Jicha, B. R., Singer, B. S. and Sobol, P., 2016. Re-evaluation of the ages of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sanidine standards and supereruptions in the western U.S. using a Noblesse multi-collector mass spectrometer. *Chemical Geology*, **431**, 54–66, doi:10.1016/j.chemgeo.2016.03.024.
- Kerr, A. C., 1998. Oceanic plateau formation: a cause of mass extinction and black shale deposition around the Cenomanian-Turonian boundary? *Journal of the Geological Society*, **155**, 619–626.
- Kuroda, J., Ogawa, N. O., Tanimizu, M., Coffin, M. F., Tokuyama, H., Kitazato, H. and Ohkouchi, N., 2007. Contemporaneous massive subaerial volcanism and late Cretaceous Oceanic Anoxic Event 2. *Earth and Planetary Science Letters*, **256**, 211–223.
- Kuroda, J., Tanimizu, M., Hori, R. S., Suzuki, K., Ogawa, N. O., Tejada, M. L. G., Coffin, M. F., Coccioni, R., Erba, E. and Ohkouchi, N., 2011. Lead isotopic record of Barremian-Aptian marine sediments: Implications for large igneous provinces and the Aptian climatic crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, **307**, 126–134, doi:10.1016/j.epsl.2011.04.021.
- Larson, R., 1991a. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, **19**, 547–550.
- Larson, R., 1991b. Geological consequences of superplume. *Geology*, **19**, 963–966.
- Larson, R. and Erba, E., 1999. Onset of the mid-Cretaceous greenhouse in the Barremian-Aptian: Igneous events and the biological, sedimentary, and geochemical responses. *Paleoceanography*, **14**, 663–678.
- Leckie, R. M., Bralower, T. J. and Cashman, R., 2002. Oceanic anoxic events and plankton evolution: biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. *Paleoceanography*, **17**, doi: 10.1029/2001PA000623.
- Lindenthal, A., Langmann, B., Pätsch, J., Lorkowski, I. and Hort, M., 2013. The ocean responses to volcanic iron fertilization after the eruption of Kasatochi volcano: a regional-scale biogeochemical ocean model study. *Biogeosciences*, **10**, 3715–3729. Doi: 10.5194/bg-10-3715-2013.
- Mahoney, J. J., Storey, M., Duncan, R. A., Spencer, K. J. and Pringle, M., 1993. Geochemistry and geochronology of the Ontong Java Plateau. In Pringle, M. S., Sager, W. W., Sliter, W. and Stein S., eds., *The Mesozoic Pacific. Geology, Tectonics, and Volcanism*, AGU Geophysical Monograph 77, 233–261, AGU, Washington, DC.
- Mahoney, J. J., Saunders, A. D., Storey, M. and Randriamanantenasa, A., 2008. Geochemistry of the Volcan de l'Androy Basalt-Rhyolite Complex, Madagascar Cretaceous Igneous Province. *Journal of Petrology*, **49**, 1069–1096.
- Misumi, K., Yamanaka, Y. and Tajika, J., 2009. Numerical simulation of atmospheric and oceanic biochemical cycles to an episodic CO_2 release 1 event: Implications for the cause of mid-Cretaceous Oceanic Anoxic Event-1a. *Earth and Planetary Science Letters*, **286**, 316–323.
- Monteiro, F. M., Pancost, R. D., Ridgwell, A. and Donnadieu, Y., 2012. Nutrients as the dominant control on the spread of anoxia and euxinia across the Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event (OAE2): Model-data comparison. *Paleoceanography*, **27**, PA4209, doi:10.1029/2012PA002351.
- Niebuhr, B. and Joachimski, M. M., 2002. Stable isotope and trace element geochemistry of Upper Cretaceous carbonates and belemnite rostra (Middle Campanian, north Germany). *Geobios*, **35**, 51–64.
- Ozaki, K. and Tajika, E., 2013. Biogeochemical effects of atmospheric oxygen concentration, phosphorus weathering, and sea-level stand on oceanic redox chemistry: Implications for greenhouse climates. *Earth and Planetary Science Letters*, **373**, 19–139.
- Oxburgh, R., 2001. Residence time of osmium in the oceans. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **2**, 2000GC000104.
- Peucker-Ehrenbrink, B. and Ravizza, G., 2000. The marine osmium isotope record. *Terra Nova*, **12**, 205–219.
- Price, G. D. and Gröcke, D. R., 2002. Strontium-isotope stratigraphy and oxygen- and carbon-isotope variation during the Middle Jurassic-Early Cretaceous of the Falkland Plateau, South Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **183**, 209–222.
- Ravizza, G. E. and Zachos, J. C., 2003. Records of Cenozoic Ocean Chemistry. In Holland, H. D. and Turekian K. K., eds., *Treatise on Geochemistry: The Oceans and Marine Geochemistry*, **6**, Elsevier, 551–582.
- Sano, Y. and Williams, S. N., 1996. Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries. *Geophysical Research Letters*, **23**, 2749–2752.
- Sinton, C. W. and Duncan, R. A., 1997. Potential links between ocean plateau volcanism and global ocean anoxia at the Cenomanian-Turonian boundary. *Economic Geology*, **92**, 836–842.
- Snow, L. J., Duncan, R. A. and Bralower, T. J., 2005. Trace element abundances in the Rock Canyon Anticline, Pueblo, Colorado, marine sedimentary section and their relationship to Caribbean plateau construction and oxygen anoxic events 2. *Paleoceanography*, **20**, doi: 10.1029/2004PA001093.

- Storey, M., Mahoney, J. J., Saunders, A. D., Duncan, R. A., Kelly, S. P. and Coffin, M. F., 1995. Timing of hot-spot related volcanism and the breakup of Madagascar and India. *Science*, **267**, 852–855.
- Torsvik, T. H., Tucker, R. D., Ashwal, L. D., Eide, E. A., Rakotosolof, N. A. and de Wit, M. J., 1998. Late Cretaceous magmatism in Madagascar: palaeomagnetic evidence for a stationary Marion hotspot. *Earth and Planetary Science Letters*, **164**, 221–232.
- Takagi, T., 2004. Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in the Japan arc. *American Journal of Science*, **304**, 169–202.
- Takashima, R., Nishi, H., Huber, B. and Leckie, M., 2006. Greenhouse world and the Mesozoic ocean. *Oceanography*, **19**, 82–92.
- Takashima, R., Coccioni, R., Nishi, H. and Hayashi, K., 2007. Mid-Cretaceous Oceanic Anoxic Events recorded in SE France and central Italy. *Journal of the Geological Society of Japan*, **113**, iii–iv.
- Tejada, M. L. G., Suzuki, K., Kuroda, J., Coccioni, R., Mahoney, J. J., Ohkouchi, N., Sakamoto, T. and Tatsumi, Y., 2009. Ontong Java Plateau eruption as a trigger for early Aptian oceanic anoxic event. *Geology*, **37**, 855–858, doi:10.1130/G25763A.1.
- Turgeon, S. C. and Creaser, R. A., 2008. Cretaceous Anoxic Event 2 triggered by a massive magmatic episode. *Nature*, **454**, 323–326.
- Veizer, J., 1989. Strontium isotopes in seawater through time. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **17**, 141–167.

（2016年9月27日受付，2017年1月8日受理）

