

白亜紀海洋無酸素事変の解明

Investigation of the Cretaceous oceanic anoxic events

地球の温暖化が進行するとどのような環境になるのか、この疑問に対する答えは過去にある。地球が究極の温室となった時期の一つは、白亜紀の中期である。白亜紀の温室世界は、両極に氷床はなく (Frakes, 1979)，現在は26度もある低緯度と高緯度の水温の格差が14度程度まで小さくなり (Huber *et al.*, 2002)，二酸化炭素濃度は現在の2～10倍 (Berner, 1994) に達し、海水準も現在より200m近く高かった (Haq *et al.*, 1988; Hardenbol *et al.*, 1998)。この温室期を特徴づける事件として、大量の黒色頁岩を堆積させた海洋無酸素事変 (Oceanic Anoxic Event, OAE; Schlanger and Jenkins, 1976) がある (図1)。テーチス海のあったヨーロッパでは、白亜紀の堆積物の多くは白色の石灰岩や灰色の泥灰岩からなるが、無酸素事変の時期には葉理の発達した黒色の頁岩へと変わり、その時期に環境変動が生じたことが容易に識別される (表紙および裏表紙を参照)。この事変は、白亜紀を通じて陸棚から深海底までの広い範囲にわたり、総計5回 (テーチス海では7回) も生じ、OAE1aからOAE2まで名前がつけられている (図2)。海洋無酸素事変は、地球内部におけるスーパープリュームの活動が激化することで大気中の二酸化炭素濃度が増大し、温室効果が強化されて引き起こされたとの説 (スーパープリューム説) が有力であるが、その発生機構に関しては未だに解決されていない。

そこで、2003年1月24日（金）に古生物学会第152回例会（横浜国立大学）で、平野弘道、川辺文久、北里 洋、西 弘嗣の4人が世話人となって、「白亜紀海洋無酸素事変の解明」のシンポジウムを行った。このシンポジウムの目的は、海洋無酸素事変をキーワードとして異なる研究者間の情報を交換し、この環境変動に関する理解を深めることであった。さらに、その発生過程に関して議論を行い、将来起こるべき温暖地球の姿を予測することを最終的な目的とした。なお、このシンポジウムは、古生物学会、IGCP434、およびJAMSTEC (IFREE) が共催して実施された。

このシンポジウムでは以下の11の講演が行われた。1) 南フランスにおける白亜紀後期の無酸素事変 (坂本竜彦ほか12名), 2) 有機・同位体地球科学からみた白亜紀の無酸素事変 (大河内直彦), 3) 浅海性炭酸塩岩からみた無酸素事変 (佐野晋一), 4) 海生脊椎動物化石記録と海洋無酸素事変 (平山 廉), 5) 大型化石からみた白亜紀海洋無酸素事変 (平野弘道ほか4名), 6) 日本の白亜系 (蝦夷累層群) に記録された海洋無酸素事変: OAE1相当層の $\delta^{13}\text{C}$ 変動とバイオマーカー (高橋一晴ほか2名), 7) 日本の上部白亜系における炭素同位体比変動と放散虫化石の産出特性 (阿部善浩ほか3名), 8) 白亜紀OAE黒色頁岩の堆積学的特徴に関する考察 (黒田潤一郎ほか5名), 9) 白亜紀の地球システム変動モデリング (田近英一・中山康裕), 10) Cretaceous Large Igneous Provinces: Causes of Environmental Change? (M. F. Coffin), 11) 海洋無酸素環境の創成と生物の反応 (北里 洋)。本論文集にはその中の6編を収録した。

白亜紀の海洋無酸素事変の成因として、基本的には「海洋循環の停滞」と「有機物の過剰供給」という2つの見解がある。両者の説は、ともに底層水の酸素消費量が増大する、あるいは底層で全く酸素がなくなり黒色頁岩が堆積したとする点では一致しているが、その原因を表層と深層の循環に求めるのか、海洋表層のプランクトンの生産や陸上植物の破片など有機物の供給に求めるかに違いがある。前者の代表的な例がErbacher *et al.* (2001) が提唱したsupersapropel仮説である。これは地中海の黒色軟泥 (腐泥, sapropel) がそのモデルとなっており、テーチス海や大西洋に流入した淡水が海水をキャップし、表層と底層の循環が停滞したことが直接の原因となっている。そのため、新たに酸素が表層から底層へと供給されず消費されてしまい、通常では酸化・分解される有機炭素が堆積物中に保存され黒色を呈する。これに対して、後者は、主として太平洋の海山や炭酸塩プラットフォームの研究から支持されている説で、表層の一次生産性が急速に上昇したことで大洋の1000～2000mの深度にある酸素極小帯が拡大し、黒色頁岩を堆積させたと考えている (Arthur *et al.* 1987; Bralower *et al.*, 2002; 佐野, 本特集号参照)。

近年、地球温暖化問題が社会的に注目されるにつれ、温室期の代表である白亜紀中期の研究が活発に行われ、以前とは比較にならないほど多くの論文が出版されるようになった。また、その研究分野も地質学や古生物学だけではなく、無機・有機地球化学、バクテリア生物学、シミュレーションの分野まで多岐にわたっている (本特集号, 高

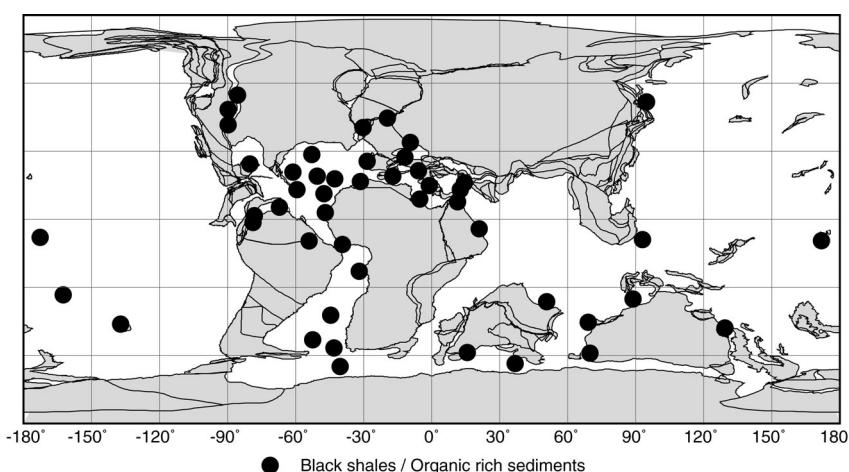


図1. 白亜紀中期 (121～90Ma) で黒色頁岩もしくはそれに相当する堆積物がみられる地域。但し、古地理図は約90Maの復元図を使用した。

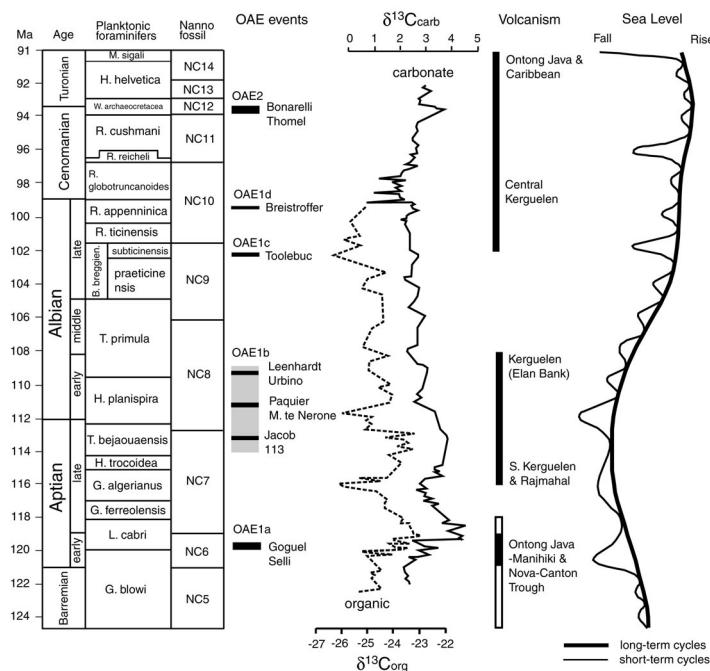


図2. 白亜紀中期における海洋無酸素事件 (Oceanic Anoxic Events : OAEs) の地質時代と主要な地質学的イベント (Leckie et al., 2002を改変). 一般にOAEは、白亜紀中期ではOAE1からOAE3まで認識される. しかし、OAE3の存在が汎世界的であるかどうかは、現在議論されているところである. OAE1は、OAE1aからOAE1dまでの4つに細分することができ、それらはヨーロッパの各地域でGoguel(フランス), Selli(イタリア)など独自の名前が付けられている. また、これらの黒色頁岩の堆積時には炭素同位対比の正のシフト(高い値になることが多い)がみられることが多い. OAE1a, OAE1b, OAE2はいずれも海底火山活動が活発となった時期とも一致するが、海水準はOAE1bの時期に最も低くOAE2に最も高くOAEの各時期によって異なる.

ない. 我々の最終的な目標は、過去の温室地球の研究結果を基にして温暖化した地球の環境を予測し、その対策を地球科学の分野から提言することである. 本論文集がそのきっかけとなれば幸いである.

文献

- Arthur, M. A., Schlanger, S. O. and Jenkyns, H. C., 1987. The Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event, II. Paleoceanographic controls on organic-matter production and preservation. In Brooks, J. and Fleet, A. J. eds., *Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication, (26), 401-420.
- Berner, R. A., 1994. Geocard II: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, **294**, 56-91.
- Bralower, T. J., Premoli Silva, I., Malone, M. J., et al., 2002. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, **198**. [CD-ROM]. Available from: Ocean Drilling Program, Texas A&M University, College Station TX 77845-9547, USA.
- Erbacher, R. D., Huber, B. T., Norris, R. D., Markey, M., 2001. Increased thermohaline stratification as a possible cause for a Cretaceous oceanic anoxic event. *Nature*, **409**, 325-327.
- Fenchel, T. and Finlay, B. J., 1995. *Ecology and Evolution in Anoxic Worlds*. 276p., Oxford Series in Ecology and Evolution, Oxford Univ. Press, Oxford.
- Frakes, L. A., 1979. *Climates throughout geologic times*. Elsevier, Amsterdam, 310 p.
- Haq, B. U., Hardenbol, J. and Vail, P. R., 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Special Publication, (42), 71-108.
- Hardenbol, J., Thierry, J., Farley, M. B., Jacquin, T., De Graciansky, P.-C. and Vail, P. R., 1998. Cretaceous chronostratigraphy. In De Graciansky, P.-C., Hardenbol, J., Jacquin, T. and Vail, P. R. eds., *Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basins*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Special Publication, (60), Charts.
- 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.
- 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**, 13-1-13-29.
- Schlanger, S. O. and Jenkyns, H. C., 1976. Cretaceous anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, **55**, 179-184.
- Sepkoski, Jr., J. J., 1989. Periodicity in extinction and the problem of catastrophism in the history of life. *Journal of the Geological Society, London*, **146**, 7-19.
- Sepkoski, Jr., J. J., 1996. Patterns of Phanerozoic extinction: A Perspective from Global Data Bases. In Walliser, O. H. ed., *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*, 35-51. Springer, Berlin.

橋・平野、大河内、田近・山中を参照).

さらに、この無酸素事変は生物の進化にも大きな影響を与えている。実際、Cenomanian/Turonian境界では、海洋生物が科のレベルで8%，属のレベルで26%，種のレベルで33~35%の絶滅が起こり (Sepkoski, 1989;1996)，海洋無酸素事変が深刻な影響を与えたことが示唆される。米国西部の内陸地域では種レベルの絶滅が、アンモナイト類では70%，イノセラムスでは90%を超える（栗原・川辺、本特集号参照）。また、無酸素事変のように嫌気性水塊が拡大した環境では、真核生物がメタン生成菌、硫黄酸化細菌などの嫌気性バクテリアを細胞内に共生させることができると報告されている(Fenchel and Finley, 1995)。この共生関係自体がそのホストとなった生物の進化にも影響を与えたとする考え方も提出されている。したがって、現在の海洋でどのように無酸素水塊が発達するか、またその場所における物質循環や生態系はどのようにになっているかなど現世の無酸素環境における研究も並行して行なわなければ、白亜紀の無酸素事変の実態の解明はできないであろう（北里、本特集号参照）。

このように、白亜紀の海洋無酸素事変の原因については、幾つかの仮説が提出されているものの、未だに決着はついていない。白亜紀の海洋無酸素事変の解明は、2003年10月より開始されるIODP (Integrated Ocean Drilling Program) の科学計画 (ISP: Initial Science Plan) の柱となる研究「極限気候の解明」でも主要なテーマとなっており、日本の地球科学においても重要なことは疑いが