



統合国際深海掘削計画 (IODP)  
— 2003 年から 10 年の成果 —

# 白亜紀の科学掘削に 関して

大河内 直彦  
黒田 潤一郎

## On the Cretaceous scientific drilling

Naohiko Ohkouchi • Junichiro Kuroda

おおこうち なおひこ : 海洋研究開発機構  
くろだ じゅんいちろう : 海洋研究開発機構

白亜紀に起きた海洋無酸素事変を掘削することは、地球内部から表層まで貫くダイナミックかつ普遍的なこの星の営みにアプローチすることに等しい。科学掘削船ちきゅうの高い掘削能力による太平洋深海底の掘削に期待したい。

### 1. はじめに

広範囲の海底下から白亜紀に形成された黒色頁岩を見出したことは、DSDP に始まる一連の海洋科学掘削における大きな成果の一つであろう。IODP が開始されて 10 年が経ったが、残念ながらこの間、白亜紀の地層を回収できた航海は数えるほどしかなかった。しかしその一方で、黒色頁岩の成因に関する研究には大きな進展が見られた。黒色頁岩は石油の根源岩であり、私たちの文明を影で支える天然資源である。近年は黒色頁岩層が胚胎するシェールオイルやシェールガスの採掘が採算ラインにのり、世界のエネルギー供給マップを大きく変化させつつある。エネルギー資源という観点からは、黒色頁岩の重要性は今後も変わりはない。ただし、黒色頁岩を地球科学的に研究する意義は、エネルギーの起源やそれを生み出した環境イベントやについて知ることだけではない。むしろ、黒色頁岩を生み出すイベントが地球内部活動と表層環境の間をつなぐきわめてダイナミックな地球の営みを映し出しているところに最大の魅力がある。つまり、このイベントを研究すれば、地球という星が内部から表層まで一つの系として機能する姿が見える点にこそある。

本稿では、こういった黒色頁岩のもつ魅力に関する最近の成果をまとめるとともに、筆者らが提唱している太平洋深海底の掘削についても簡単に紹介したい。

### 2. 最近の新しい知見

筆者らは、白亜紀海洋無酸素事変時 (Oceanic Anoxic Events, OAEs) に形成された黒色頁岩中に含まれるポルフィリン化合物の構造決定を行うとともに、その窒素同位体比測定を行った<sup>[1,2]</sup>。ポルフィリンとはクロロフィルの分解生成物であ

り、一次生産者のバイオマーカーとみることができ、詳細は他の総説論文<sup>[3]</sup>に譲るが、その結果によると、当時の海洋表層ではクロロフィル *a* が最も多く合成されると同時に、そのクロロフィルを構成する窒素原子が窒素固定プロセスを経由して生体内に同化されたものであることが明らかになった。クロロフィル *a* を合成し、窒素固定を行う光合成独立栄養生物はシアノバクテリアに限られることから、この証拠は当時の海洋の一次生産は主として窒素固定能をもつシアノバクテリアによって担われていたことを示唆している。この結果は、バルクの窒素同位体比や2-メチルホパンの分析結果の解釈を支持するとともに<sup>[4,5,6]</sup>、より明確な証拠を提示することとなった。さらに、黒色頁岩中に含まれるケイ酸塩の起源を考慮すれば、珪藻とシアノバクテリアの共生体が主たる生産者であった可能性もあると筆者らは考えている<sup>[7]</sup>。

また、この黒色頁岩の究極的原因についても最近になって明らかになってきた。筆者らは、OAE-2の黒色頁岩中に含まれる微量の鉛の同位体組成を分析し、黒色頁岩が形成されると全く同時に鉛同位体比が大きくマンツルの組成側へ大きくシフトすることを初めて明らかにした<sup>[8]</sup>。この結果をもとに、黒色頁岩の形成時に大規模な火山活動が起きていたこと、そしてそれがマダガスカルあるいはカリブ海の巨大火成岩区の形成の可能性が高いことを示唆した。その後、堆積物中に含まれるオスミウム同位体比が詳細に分析され、白亜紀 OAE の黒色頁岩形成が始まると同時にオスミウム同位体比がマンツル由来の同位体比にまで急激に低下することが明らかにされた<sup>[9,10]</sup>。

もっとも、巨大火成岩区 (Large Igneous Province, LIP) の形成が白亜紀の海洋無酸素事変のような環境イベントの究極的な原因であるという考え方のルーツは、筆者らが知る限り1970年代の論文にまで遡る<sup>[11]</sup>。その後 LIP の概念が登場して、こういった考えがブルーム・テクトニクスへとつながっていく<sup>[12,13]</sup>。しかし白亜紀の LIP の形成年代を放射性核種を用いて推定しようとすると、ふつう 1 Ma 程度の誤差をとまない、かたや生層序

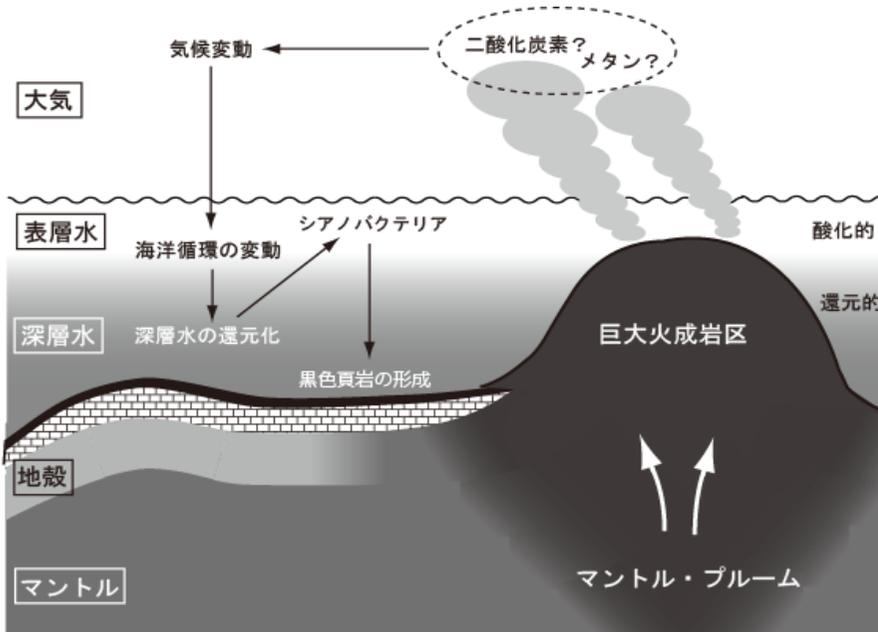
などによって推定される黒色頁岩の形成年代も同様に 1 Ma 程度の誤差をとまなう。したがって、これらの独立した地質イベントを厳密な意味で対比することは事実上不可能である。そこで、生層序情報を含む堆積岩そのものの詳細な化学分析を通して、両者の時間的關係が厳密に明らかにされたという経緯がある。堆積岩中に極微量にしか含まれない鉛やオスミウムといった金属の同位体比を正確に分析するには、ごく最近まで実質上不可能であった。しかし、マルチコレクター ICP/MS など分析技術のハード面の進展が、こういった研究を後押ししたのである。

このように最近の 10 年で黒色頁岩の成因論に関して大きな進展が見られた (図 1)。この問題について私たちは、今後解明すべき主要な問題は以下の二点と考えている。つまり、巨大火成岩区の形成がいかにして黒色頁岩の形成に結びついたかという点と、太平洋の深海底における黒色頁岩の分布の解明である。前者については、LIP の形成が大気中に大量の二酸化炭素を放出し、それが気候変動を引き起こして海洋循環を変化させた可能性が指摘され<sup>[8]</sup>、精緻な気候シミュレーションによっても両イベントは結びつけることができる<sup>[14,15]</sup>。ただし現時点では、マグマ中に含まれる炭素量が不明のため、今後、流体包有物の分析などからその点について明らかにする研究が必要である。

### 3. 北西太平洋深海底の掘削について

2 つ目の問題については、太平洋の深海底の科学掘削によって初めて解明できる問題である。白亜紀の黒色頁岩の研究は、そのほとんどが大西洋やテチス海で採取された試料について行われたもので、太平洋で採取された試料について行われた例はきわめて少ない<sup>[16]</sup>。一般に、太平洋における黒色頁岩は、酸素極小層が形成される中層水に覆われた堆積物にのみ見出されると信じられてきたが、十分な根拠に基づく考えというわけでは決していない<sup>[17]</sup>。それどころか、私たちは太平洋深海底における黒色頁岩の分布についてほとんど何

図1 白亜紀の黒色頁岩の成因を模式的に示した図(大河内・黒田, 2011).



も知らないに等しい。これは白亜紀のプレートの多くがすでに沈み込んで失われてしまったからでもあるが、それと同時に太平洋の深海底堆積物を特徴づける珪質堆積物の掘削回収率がきわめて悪いことも大きな原因となっている(図2)。

これまでの海底掘削で得られた数少ない堆積物試料からも、いくつかのヒントをえることができる。例えばマリアナでの掘削(site 585)から、厚さ数cmほどのラミナ構造をもつ黒色頁岩が見出されている。これは掘削された当時、浅い水深の堆積物が「流れてきた」という解釈もあるが、その写真を見るにつけて不自然な解釈である(H. Jenkyns, pers. comm.)。また伊豆ボニン海溝外側斜面(site 1149)において、黒くはないがラミナ構造をもった堆積物が、ちょうどOAE期に当たる時代に形成されている<sup>[18]</sup>。堆積物がラミナ構造をもつこと自体、水深5830mのこの海域の底層水が還元的になっていたことを示唆するものであり、上で解説した酸素極小層の拡大ではとうてい説明できない。当時の海洋において圧倒的な面積を占めていた太平洋で、還元的な水塊がどこま

で広がっていたかを正確に知ることは、OAE期の地球環境を知るうえできわめて重要である。

そこで筆者らは、日本の東方海域に広がる深海盆において掘削し、OAE-1aおよびOAE-2時の堆積物を採取する提案を考えている。これは単に知識のギャップを埋めるためのものだけではないし、石油の根源岩の分布を知るといってもない。そこに黒色頁岩が形成されるメカニズムの鍵が隠されている。

#### 4. 今後に向けて

石油の根源岩として知られるようになった19世紀以来、黒色頁岩の成因を解明することは長年にわたって地質学の重要なテーマであり続けた。その成因に関する知見は、21世紀にはいって大きく前進した。この新たな知見の重要性は、研究の視点の転換が可能であることを示唆するところにある。つまり黒色頁岩の成因を知ることとは、冒頭にも述べたとおり、特定の時代の特定の場所の古環境を明らかにするだけでなく、下部マントル(あるいはコア?)から地球表層環境まで一本

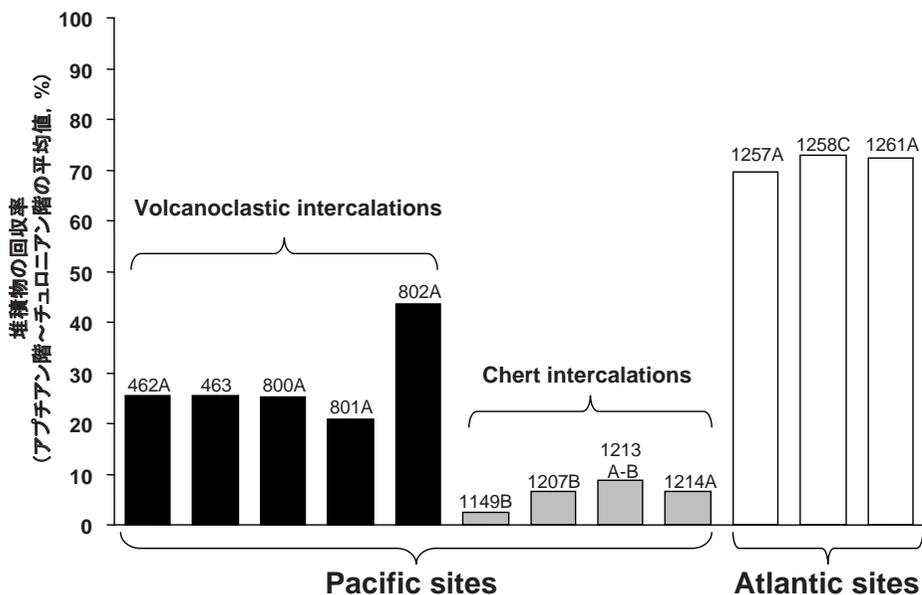


図2 太平洋および大西洋の深海底において掘削された白亜紀アプチアン階からチュロニアン階の堆積物の回収率. 太平洋域においてチャートが互層をなす堆積物(灰色)の回収率が極めて低いことがわかる. グラフ上の数字はODPのサイト番号.

の線をつなぐ、ダイナミックかつ普遍的な地球の営みにアプローチする唯一の手段となりえることだ。現在の地球上で見られない地球の活動を理解するためには、過去の地球を「観測」する以外にないのである。

そしてこの科学掘削にはもう一つ重要な長所がある。たくさんの掘削時間や資金をつぎ込む必要がないという点だ。重厚長大な科学掘削計画を実施するだけでなく、数日間の掘削で確かな成果を挙げられる可能性の高い科学計画も実施できるような柔軟性のある科学計画に変えていかねばならない。

### 参考文献

[ 1 ] Ohkouchi, N. *et al.* (2006) : Biogeosciences, 3, 467-478.  
 [ 2 ] Kashiyama, Y. *et al.* (2008a) : Org. Geochem., 39, 532-549.  
 [ 3 ] 大河内直彦, 黒田潤一郎 (2010) : 科学, 80, 1117-1123.  
 [ 4 ] Rau, G. H. *et al.* (1987) : Earth Planet. Sci. Lett., 82, 269-279.  
 [ 5 ] Ohkouchi, N. *et al.* (1997) : Ancient Biomol., 1, 183-192.  
 [ 6 ] Kuypers, M. M. M. *et al.* (2004) : Geology, 32, 853-

856.  
 [ 7 ] Kashiyama, Y. *et al.* (2008b) : Biogeosciences, 5, 797-816.  
 [ 8 ] Kuroda, J. *et al.* (2007) : Earth. Planet. Sci. Lett., 256, 211-223.  
 [ 9 ] Turgeon, S. C. and Creaser, R. A. (2008) : Nature, 454, 323-326.  
 [10] Tejada, M. L. G. *et al.* (2009) : Geology, 37, 855-858.  
 [11] Vogt, P. R. (1972) : Nature, 240, 338-342.  
 [12] Larson, R. L. (1991) : Geology, 19, 963-966.  
 [13] Coffin, M. F. and Eldholm, O. (1994) : Rev. Geophys., 32, 1-36.  
 [14] Misumi, K., Yamanaka, Y., and Tajika, E. (2009) Earth Planet. Sci. Lett., 286, 316-323.  
 [15] 黒田潤一郎, 鈴木勝彦, 大河内直彦 (2010) : 地学雑誌, 119, 534-555.  
 [16] Dumitrescu, M. and Brassell, S. C. (2006) : Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol., 235, 168-191.  
 [17] Thiede, J., Dean, W. E. and Claypool, G. E. (1982) : In, Schlanger, S. O. and Cita, M. B. (eds.), Nature and Origin of Cretaceous Carbon-rich Facies, pp. 79-100. Academic Press, London.  
 [18] Plank, T. Ludden, J. N., Escutia, C. *et al.* (2000) : Proc. ODP, Initial Rep., vol. 185.

