

論文内容の要旨

論文題目: **Anatomy of Cretaceous black shales: paleoceanography of Oceanic Anoxic Event-2 based on lamina-scale geochemical analyses**

(白亜紀黒色頁岩のアナトミー: 超高解像度地球化学分析による
海洋無酸素イベント-2 の古環境に関する考察)

氏名: 黒田 潤一郎

1. はじめに

白亜紀の海洋無酸素イベント(OAE)は、有機質黒色頁岩が短期間(~100 万年規模)で汎世界的に堆積するイベントであり、地球史における特異な環境イベントとして注目されている。筆者は Cenomanian/Turonian 境界の OAE (以下 OAE-2 と略記)にテチス海西部の遠洋域で堆積した Bonarelli 層に注目して高解像度サンプリングおよびさまざまな化学分析をおこない、古環境の変遷やその原因となるメカニズムについて多くの新しい知見を得た。Bonarelli 層は明暗色互層の発達した厚さ約 1 m の地層で、平均堆積速度は約 1.3 m/my とされ、OAE-2 の期間は約 80 万年と見積もられている^[1]。

2. Bonarelli 層における堆積物の分布パターン (第二章)

本研究では、Bonarelli 層に含まれる主要な堆積物である生物源シリカ、炭酸カルシウム、黄鉄鉱の分布パターンを 0.01 mm 解像度の元素マップをもとに復元し、1.5 mm 間隔で測定した全有機炭素量(TOC)の変動と比較した^[2]。その結果、明暗色互層に対応した堆積物組成の変動を知り得た。暗色層は有機物や黄鉄鉱に富み、TOCが26%に達する。一方、明色層は生物源シリカに富み、一部で炭酸カルシウムが豊富になる。明暗色互層に対応したTOCと生物源シリカの変動は数mm ~3 cm 程度、時間にして千年~数万年規模で繰り返す特徴を持ち、異なる二つの海洋環境セッティングがこの時間スケールで繰り返し出現したことを示唆している。また、Bonarelli 層には明暗色を通して0.1~数mmのラミナが保存されており、OAE-2を通して底層、少なくとも堆積物-水境界より下位は恒常的に還元状態であったことを示す。

3. OAE-2 における海洋環境の復元 (第三章)

次に、脂質化合物や窒素・有機炭素同位体比から有機物の起源生物について考察をおこなった。暗色層の脂質化合物は、原核生物の分子化石である炭素数 30 以上のホパノイドを豊富に含む。特にホパン酸(C₃₁、C₃₂)は全脂質量に匹敵する濃度(〜120 ug g⁻¹ C)で含まれていた。また、暗色層の全窒素同位体比は -1 ~-3‰ と非常に低い値を示した。暗色層の窒素は TOC と明瞭な相関を示すことから有機窒素とみなすことができるので、軽い $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は窒素固定生物の寄与が大きいことを示している。色素化合物の誘導体であるジオポルフィリンの分析結果(Kashiyama et al, in prep.)を踏まえると、Bonarelli 層の暗色層にはシアノバクテリアに由来する有機物が豊富に含まれており、彼らが主要な基礎生産者であったと結論づけることができる。また、一部の暗色層では絶対嫌気性の光合成細菌である緑色硫黄細菌の色素(イソレニエラテン)の誘導体と考えられるトリメチルアールイソプレノイドが認められ、暗色層の堆積時には酸化還元境界が透光帯下部にまで達する photic zone anoxia となっていたことが示唆される。この化合物は Bonarelli 層の基底部の暗色層で豊富に認められ、OAE-2 開始時にはすでに海洋が photic zone anoxia になっていたことを示す。一方、明色層はホパノイドに枯渇し、高い全窒素同位体比(〜3‰)を持ち、生物源シリカや炭酸カルシウムに富む。これらのことから、明色層堆積期には珪藻や円石藻などの真核藻類が主要な基礎生産者であったと解釈される。全有機炭素同位体比を 1.5 mm 間隔で連続的に測定した結果、Bonarelli 層の中〜上部では暗色層の全有機炭素同位体比が明色層よりも約 3‰ 高い値を持つことが明らかになった。これは明色層と暗色層とで異なるタイプの光合成生物が寄与している、つまり基礎生産者が違っていたことを反映している。

以上の結果から、OAE-2 における海洋環境の詳細な復元が可能となった。まず、暗色層の堆積期には、水柱の大部分が還元的になった。最下部の層準の堆積時には、還元水塊が透光帯下部にまで達し、緑色硫黄細菌が出現した。このような環境では真核生物の活動が規制され、シアノバクテリアが主要な基礎生産者になる。水柱での有機物の分解速度が低下し、有機物に富む堆積物が形成された。一方、明色層の堆積時には酸化還元境界は海洋の深部に降下し、水柱の大部分が酸化的になった。表層では真核藻類が主要な基礎生産者となり、水柱での有機物の分解が促進され、その結果生物源シリカや炭酸カルシウムに富む明色層が堆積した。この二つの環境セッティングが数千年〜数万年規模で繰り返すことで、Bonarelli 層の明暗色互層が形成された。暗色層は Bonarelli 層中部で優勢になることから、OAE-2 の中期には還元的海洋環境が比較的長期間出現したことを示している。

4. OAE-2 の成因に関する考察 (第四章・第五章)

最後に OAE-2 の発生メカニズムについて考察をおこなった。1.5 mm 間隔で測定した $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 記録には、OAE-2 の開始時に約 3‰の負のシフトが認められる。全有機炭素同位体比は下位の石灰岩中で約-24‰であったのが、OAE-2 の開始と同時に-27‰にシフトし、その後徐々に増加する。基底から 35 cm の層準で-23‰に達し、その上位ではほぼ一定になる。平均堆積速度 1.3 m/my を仮定すると、負のシフトの後、-23‰ に達するまでに約 30〜35 万年要したことになる。現在の海洋における炭素の滞留時間が 10 万年規模であることから、この大局的な全有機炭素同位体比の変動は、海洋の炭素同位体比の変動を反映している可能性がある。Bonarelli 層の脂質化合物の炭素同位体比を測定したところ、多くの化合物は全有機炭素同位体比とほぼ平行な変動を示し、さまざまな生物に同様の炭素同位体比の変動が記録されていることが判明した。以上のことから、筆者は全有機炭

素同位体比の大局的変動は海洋の炭素リザーバーの同位体比の変動(OAEの開始と同時に急激に負にシフトし、その後約30~35万年かけて回復して、定常状態に戻る)を示していると解釈した。海洋炭素リザーバーの同位体比が負にシフトする原因として、二つのシナリオが考えられる。一つは大規模な火山活動にともなう脱ガスにより大気海洋系への炭素流入が急増し、炭素循環の収支バランスが崩壊したというシナリオで、もう一つは低い同位体比をもつメタンが大量に放出されたというシナリオである。前者は、OAEの時期が巨大火成岩区(LIPs)の活動時期に近いこと(OAE-2の場合、カリビアンプラトーとマダガスカル洪水玄武岩)^[3]、マントル起源物質の供給が増加したことを示すストロンチウム同位体比の負のシフトがOAEの時期に認められること^[4]などから、OAEの成因として注目されてきた。しかし、OAEの開始と火山活動の直接的関連を示す証拠は得られておらず、仮説の域を脱していない。本研究では、アルミノ珪酸塩中に含まれる鉛の同位体比を測定し、OAE-2開始時において堆積物の供給源に変動があったかどうかについて検討した。OAE-2開始時に大量のCO₂を供給するような大規模な火山活動が起きたとすれば、その信号が鉛同位体比に現れることが予想される。鉛は4種の同位体を持ち、マグマの性質ごとに特徴的な同位体比をもつことから、物質の供給源の変動をより詳細に知ることができる。鉛同位体比を測定し、鉛、トリウム、ウランの定量をおこなって年代効果を補正した結果、OAE-2開始時において有意な鉛同位体比のシフトが認められた。このシフトは²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb比で特に顕著で、いずれの同位体比も前記のLIPsの岩石に特有な同位体比の方向にシフトしている。この結果は、OAE-2の開始時にLIPsの岩石に特徴的な鉛同位体比をもつ物質の供給が増加したことを示し、大規模な火山活動がOAEの開始時に起きたことを示す興味深い記録である。現段階ではカリビアンプラトーとマダガスカル洪水玄武岩のいずれの活動によるものかを特定するには至っていないが、LIPsの活動がOAEの引き金になっていることを示す有力な証拠を得た。おそらく大規模な火山活動によって大量の揮発性物質(CO₂、SO₂、H₂Sなど)が地球内部から供給され、大気海洋の化学組成が大きく変化したことが予想される。これにより、地球表層環境が大きく変化してOAEが出現したのであろう。

参考文献

- [1] Ohkouchi N., Kawamura K., Kajiwara Y., Wada E., Okada M., Kanamatsu T. and Taira A. (1999) *Geology* **27**, 535-538.
- [2] Kuroda J., Ohkouchi N., Ishii T., Tokuyama H. and Taira A. (2004) *Geochim. Cosmochim. Acta*, in press.
- [3] Eldholm O. and Coffin M.F. (2000) *Geophysical Monograph* **121**, 309-326.
- [4] Bralower T.J., Fullager P.D., Paull C.K., Dwyer G.S. and Leckie R.M. (1997) *Geol. Soc. Am. Bull.* **109**, 1421-1442.