

チョークと黒色頁岩

東京大学大気海洋研究所 准教授, 海洋研究開発機構 生物地球化学研究分野 主任研究員 黒田潤一郎

白亜紀（1億4500万年～6600万年前）は、恐竜など大型爬虫類の繁栄で特徴づけられる時代である。この時代、地球は今よりもずっと温暖で、極域に氷床はなく、このため海水準が高かった。広大な大陸棚に浅い海が広がり、そこで植物プランクトンが繁茂した。温かく浅い海では石灰質の殻を持つ円石藻や有孔虫の遺骸が海底に降り積もり、石灰質の微化石からなる白い堆積物がたまった。これがやがて岩石になったものが「チョーク」である。この白く美しい岩石は別名「白亜」とよばれ、白亜紀の名前の由来になっている。イギリス南部のドーバー海峡やワイト島の白い崖は、白亜紀のチョークでできている。

この厚いチョークの中に、しばしば真っ黒の地層が認められる。「黒色頁岩」とよばれるこの岩石は、有機炭素や硫化鉄に富み、数mm～数cmの明暗色ラミナが発達する。有機炭素や硫化鉄といった物質は、通常の酸化的海洋では分解してしまい保存されにくい。また、酸化的海洋では底生動物の活動によって地層が擾乱を受け、ラミナが保存されにくい。これらのことから、黒色頁岩は海底が貧酸素～無酸素条件となった時に堆積した物質であることが示唆される。

黒色頁岩は、地球史を通して様々な時代から報告されている。その中でも白亜紀の黒色頁岩は最も若い部類に入る。そのため黒色頁岩の堆積場の分布は比較的よく復元されており、海底下の掘削でも保存の良い黒色頁岩が回収されている。白いチョークの時代に突如訪れるこの黒色頁岩は、色のコントラストが強く印象的であるが、それと同時に白亜紀という温暖な時代の海洋環境を特徴づけるものでもある。黒色頁岩が世界各地で堆積するイベントは「海洋無酸素事変 Oceanic Anoxic Event; OAE」とよばれ、白亜紀の中頃に計五回のOAE (OAE1a, OAE1b, 1c, 1d, 2)が報告されている。

近年の分析技術の目覚ましい発展に伴い、黒色頁岩の地球化学的特性や古環境指標についての検討も進展している。たとえば、黒色頁岩に保存される多様な有機化合物のうち、光合成生物色素に由来する化合物（ポルフィリン）を抽出・純化してその構造と同位体組成を測定した研究では、窒素固定を行う原核生物であるシアノバクテリアに由来する化合物の寄与が大きいことが解明された¹⁻³。これは、黒色頁岩に含まれる有機物の生産者として、真核藻類よりもシアノバクテリアが重要であったことを示している。さらに、真核藻類に由来するポルフィリンにも窒素固定を示唆する窒素同位体比が認められたことから、シアノバクテリアと真核藻類（珪藻など）が共生していたという新たな説が提唱されている³。海洋無酸素事変は、特異な海洋生態と生物地球化学プロセスが機能したイベントであった。

一方、重元素であるオスミウムや鉛の同位体比を測定した研究では、黒色頁岩の堆積時期とほぼ同時にマントル由来のオスミウムや鉛が広く大気・海洋中に放出された証拠が得られた。これは、大規模な火山活動が起こったことを強く示唆するものであり、世界各地の黒色頁岩層（主にOAE1a, OAE2）から同様の記録が報告されている⁴⁻⁹。白亜紀の中頃には、太平洋を中心に数多くの巨大火成岩岩石区（Large Igneous Provinces; LIPs）が形成された。最大のLIPは南太平洋のオントンジャワ海台で、約200万平方キロメートルという途方もない大きさの火成岩岩体が、100万年前後の短期間で形成されたようだ¹⁰。アプチアン前期のOAE1a堆積物に、オスミウムや鉛同位体比の明瞭な変化が認められたが、いずれもオントンジャワ海台の噴火を示唆するものであった⁴⁻⁶。また、セノマニアン末期のOAE2でも、堆積物にオスミウムや鉛同位体比の明瞭な変化が認められたが、これらは東太平洋で形成されたカリブ海台の噴火を示唆する⁷⁻⁹。いずれの海洋無酸素事変でも、その始まりと巨大噴火はほぼ同時に起きているようだ。筆者らは、この同時性は単なる偶然の一致とは考えていない。何らかの原因で、巨大火山噴火が海洋環境を変化させ、海洋無酸素事変となったと考えている。それでは、どのようなメカニズムで巨大噴火が海洋無酸素事変を引き起こしたのか？いくつかのシナリオが提唱されている。一つは、

火山噴火による温室効果ガスの供給で温暖化が進み、表層水温が上がって海水中の溶存酸素濃度が低下したり、海水の鉛直混合が停滞して海洋深層が無酸素化するシナリオ、もう一つは温暖化による大陸風化の促進で栄養塩が海洋表層に供給され、海洋表層の基礎生産が増加するシナリオである。後者はいくつかの数値モデルで再現されている¹¹。しかし、いずれのシナリオもシアノバクテリアが繁茂する環境を再現できていない。エネルギー効率が悪い窒素固定を必要とする条件（つまり窒素だけに異常に枯渇する栄養塩バランス）を巨大火山噴火がどのようにもたらしたのか、窒素固定の酵素が必要とする元素（鉄やモリブデン）が十分に供給される条件がどのように整ったのか、ほとんど検討されていない。今後は両者の関連を解く鍵が必要になるだろう。

ところで、現在の海洋でも貧酸素化が問題視されている。これは、地球温暖化によって表層海水温が上昇し、溶存酸素が低下することが原因である。ただ、白亜紀の無酸素事変は海水温の上昇だけではなく、さまざまな複合的要因が考えられており、現在の地球温暖化の将来像として見ることはできない。とはいえ、海洋の貧酸素化は温暖化した地球が経験する宿命なのかもしれない。



図 イタリア中部、ウンブリア州コンテッサ採石場のチョーク。写真右下と左上に黒色頁岩が認められ、それぞれOAE1aを代表するLivello Selli（前期アプチアン）とOAE2を代表するLivello Bonarelli（セノマニアン末期）である。

引用文献

- 1 Ohkouchi, N. *et al.* (1997) *Ancient Biomolecules* 1, 183–192.
- 2 Kashiya, Y. *et al.* (2008) *Org. Geochem.* 39, 532–549.
- 3 Ohkouchi, N. *et al.* (2015) *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* 91, 273–291.
- 4 Tejada M.L.G. *et al.* (2009) *Geology* 37, 855–858.
- 5 Kuroda, J. *et al.* (2011) *Earth Planet. Sci. Lett.* 307, 126–134.
- 6 Bottini, C. *et al.* (2012) *Geology* 40, 583–586.
- 7 Kuroda, J. *et al.* (2007) *Earth Planet. Sci. Lett.* 256, 211–223.
- 8 Turgeon, S.C. and Creaser, R.A. (2008) *Nature* 454, 323–326.
- 9 Du Vivier, A.D.C. *et al.* (2014) *Earth Planet. Sci. Lett.* 389, 23–33.
- 10 Coffin, M.F. and Eldholm, O. (1994) *Rev. Geophys.* 32, 1–36.
- 11 Misumi, K. *et al.* (2009) *Earth Planet. Sci. Lett.* 286, 316–323.