

Reconstruction of the Mesoproterozoic sea floor
sedimentary environment: Studies on
stratigraphy and carbon and sulfur isotope of
the DXCL drill cores in the coastal Pilbara
terrane, Western Australia

三木, 翼

<https://doi.org/10.15017/1931697>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 三木 翼

論 文 名 : Reconstruction of the Mesoarchean sea floor sedimentary environment:
Studies on stratigraphy and carbon and sulfur isotope of the DXCL drill cores in
the coastal Pilbara terrane, Western Australia
(中太古代の海洋堆積環境復元: 西オーストラリア・海岸ピルバラ帯の
DXCL コアの層序および炭素・硫黄同位体に関する研究)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

西オーストラリア・ピルバラ地域は太古代の低変成度のグリーンストーン帯が最も良く保存され、特に北西部のクリーバビル地域には海岸に沿って約 32-31 億年前のデキソンアイランド層及びクリーバビル層が露出している(Kiyokawa and Taira, 1998; Kiyokawa et al., 2006). しかし本地域の陸上露頭は様々な度合いの風化作用を被っており、地球化学的な物質変化を正確に追跡する事は困難であった. 2007 年, 未風化の新鮮な岩石試料を採取し, 当時の海洋底環境を詳細に復元する事を目的とした Dixon Island-Cleaverville 陸上掘削(DXCL-Drilling Project; Kiyokawa et al., 2012)が行われた. 本研究では DXCL 掘削によって得られた計 4 本, 合計コア長約 420 m の未風化岩石試料(DX, CL1, CL2, CL3 コア)を用いて, これらの地層の詳細な岩相記載・層序確立および炭素・硫黄同位体分析を行い, 約 32 から 31 億年前の海洋底環境の復元を試みた.

デキソンアイランド層はクリーバビル海岸とデキソンアイランドの北西に位置し, 下位からコマチャイト・流紋岩質凝灰岩部層(約 250 m), 黒色チャート部層(7~20 m), 多色チャート部層(約 150 m)からなり, 約 400 m の層厚を持つ. 多色チャート部層上部には黒色頁岩があり, 非常に細かなラミネーションを持つ黄鉄鉱を含む. デキソンアイランド層の南側には層序的上位のデキソン枕状溶岩が整合的に接し, さらにその南側にはクリーバビル層が整合している. クリーバビル層は下部の黒色頁岩部層(約 130 m)及び上部の縞状鉄鉱層(BIF)部層(約 300 m)からなり, 約 430 m の層厚を持つ.

DX コアはデキソンアイランド層最上部の多色チャート部層に当たり, 黒色頁岩と灰色珪質頁岩, 黄鉄鉱層の互層からなる. 鏡下観察により, 数 mm 幅の黄鉄鉱層の中には数十から数百 μm の自形黄鉄鉱や直径約 10 μm の微小球殻状黄鉄鉱があること, また地層の切断関係や形態から微小球殻状黄鉄鉱が最初期に形成したことが分かった. CL1 コアおよび CL2 コアはクリーバビル層黒色頁岩部層に当たり, シルト~細粒砂を含む黒色頁岩ないし無層理黒色泥岩である. 碎屑物は DX コアよりも粗粒になり, 浅海化したことを示している. CL3 コアはクリーバビル層 BIF 部層に当たり, 菱鉄鉱とチャートからなる炭酸鉄 BIF と赤鉄鉱, 磁鉄鉱, チャートからなる酸化鉄 BIF を黒色頁岩が挟む層序をなしている.

炭素質物質および菱鉄鉱の起源を推定するため, 高知大学海洋コア研究センター所有の EA-IRMS にて有機・無機炭素同位体($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ・ $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)分析を行なった. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ は CL3 コアの BIF 部層以外では岩相に関わらず -30 ‰ で安定した. Schidlowski (1987) による種々の一次生産者の炭素固定反応において取りうる $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 値との比較および層序的上位に BIF を含むことから, 酸素発生型の光合成細菌であるシアノバクテリアの存在が示唆される. シアノバクテリアは海洋表層に酸素を放出するも, 熱水起源の 2 価鉄イオンとの結合により水酸化鉄イオンを生じていた可能性がある. 一方 BIF 部層中

の $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ は主に菱鉄鉱の値を反映しており、一般的な海洋無機炭酸塩(-2 ~ +2 ‰; Becker and Clayton, 1972)より低い約-10 ‰の値で安定した。これは世界各地の BIF 中の菱鉄鉱の値(約-10 ‰; Fischer et al. 2009)に近く、同位体比の低い炭素源についての議論(Becker and Clayton, 1972)や BIF 中の菱鉄鉱の鉄同位体組成に関する研究(Konhauser et al., 2005)から、鉄還元菌による水酸化鉄イオンを用いた呼吸反応による菱鉄鉱であると考えられている。

硫黄同位体比($\delta^{34}\text{S}$)全岩分析では粉碎試料を九州大学有機宇宙地球化学研究室所有の EA-IRMS にて測定を行なった。DX コアから CL3 コアを通して $\delta^{34}\text{S}$ 値は-10 ~ +25 ‰の範囲でばらついたが、特に CL1 コア、CL2 コアおよび CL3 コアでは全てが正の値を示した。この値はデキソンアイランド層黒色チャート部層に産する微小重晶石結晶の $\delta^{34}\text{S}$ 値(-8 ~ +12‰)と比較しても重い値である。硫酸イオンよりも硫化物の方が同位体的に重くなる現象は一般に Rayleigh 分別(Seal, 2006)で説明されるが、DXCL 掘削試料では Rayleigh 分別の初期段階で必然的に生成される同位体的に軽い黄鉄鉱が欠如している。このことから、デキソンアイランド層およびクリーバビル層の黄鉄鉱生成過程においては従来の説明に従わないプロセスが働いている可能性がある。

このような $\delta^{34}\text{S}$ 変動プロセスについて詳細に調べるため、非常に発達した黄鉄鉱ラミナを含む DX コアに重点的に着目し、黄鉄鉱ラミナを構成する直径約 10 μm の微小球殻状黄鉄鉱について $\delta^{34}\text{S}$ 局所分析を行なった。球殻状黄鉄鉱は、その形態から R(rounded)-I 型(球殻の中にシリカのみが充填したもの)、R-II 型(球殻の中にシリカが充填し、中心部に黄鉄鉱球を含むもの)、R-III 型(球殻の中を全て黄鉄鉱が充填したもの)の 3 つに分類した。また共存する R-IV 型(数百 μm 程度までの塊状をなし、微小な穴を含むもの)および自形の黄鉄鉱についても分析を行った。これらを含む薄片を標準試料と共に樹脂に包埋し、東京大学大気海洋研究所所有の NanoSIMS50(二次元高分解能二次イオン質量分析装置)を用いて 10 x 10 μm^2 ほどの領域を対象に $\delta^{34}\text{S}$ のマッピングを行なった。

結果は以下のような特徴を示した。R-I 型: 1 つの球殻内で同心円状の分布を示した。R-II 型: 外殻は同心円状の分布を示し、内部の黄鉄鉱球がさらに 5 ~ 10 ‰高い値を示した。R-III 型: 外縁部と中心部が軽く、その間にリング状に約 7 ‰高い領域が見られた。R-IV 型: 直径 10 μm の円状の領域が見られ、周囲は 20 ~ 30 ‰低くほぼ均質であった。自形: 均質な値の分布が見られた。以下に球殻成長過程を示す。R-I 型は最も初期に形成し、その球殻内部にて硫酸還元が続いて黄鉄鉱が沈殿する際に同位体的に重い組成をとることで R-II 型となる。球殻が全て黄鉄鉱で埋まる時点で黄鉄鉱は同位体的に最も重くなっており、R-III 型になる。一方 R-IV 型は、球殻が外側に成長して他の球殻と接する際に同位体的に均質で軽い黄鉄鉱が形成したことを示している。また球殻外部では同位体比が均質な自形の黄鉄鉱が成長していることから、続成作用により二次的に形成したものであると考えられる。このような球殻状黄鉄鉱の成長について、粒径(10 μm)から硫酸還元菌(体長~1 μm)の活動が想起されるが、硫酸還元菌が生成する硫化物の $\delta^{34}\text{S}$ を上昇させる働きは閉鎖系以外では知られていない。しかし球殻内部は結晶成長のために硫酸を取り込む開放系である必要がある。そのため、内部の黄鉄鉱の $\delta^{34}\text{S}$ を上昇させるプロセスは硫酸還元菌による作用(特に Rayleigh 分別)とは異なる可能性が高い。

以上一連の結果から、本研究試料の堆積場では 1)全体に深海の嫌気的環境から浅海化しながら BIF 生成場へと変化したこと、2) 表層のシアノバクテリアの発する酸素により水酸化鉄が形成し、鉄還元菌による菱鉄鉱形成が行われていたこと、3) 黄鉄鉱の $\delta^{34}\text{S}$ が高く重晶石の $\delta^{34}\text{S}$ が低い特異な環境であり、Rayleigh 分別以外の同位体分別プロセスが働いていた可能性があること、4) 球殻状黄鉄鉱内部にも同位体不均質があり、 μm スケールでも黄鉄鉱の $\delta^{34}\text{S}$ を高くするプロセスが働いていたことが明らかになった。本研究は対象地域の詳細な堆積機構を解明することに成功し、また $\delta^{34}\text{S}$ の変動プロセスについて新たな視点の必要性を明らかにした。