

地球史から見た海底鉱物資源 Seafloor mineral deposits during the Earth's history

加藤 泰浩^{1*}

KATO, Yasuhiro^{1*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹University of Tokyo

There are several types of mineral deposits on modern seafloor. The deposits include manganese nodules, manganese crusts, and volcanogenic massive sulfide deposits. In addition, very recently, the author and his co-workers have discovered rare-earth elements and yttrium (REY)-rich mud-type deposits on Pacific deep-sea floor^[1]. In the Japanese accretionary complexes, on the other hand, there are strata-bound mineral deposits that were originally precipitated on ancient seafloor. Deciphering a genetic linkage between modern and ancient seafloor mineral deposits gives us an important hint for exploring mineral deposits on modern seafloor.

[1] Kato, Y. *et al.* Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience* **4**, 535-539 (2011).

太古代 BIF の化学組成構造とその成因 Origins of chemical structures in Archean BIFs

勝田 長貴^{1*}, 清水 以知子², 高野 雅夫⁴, 川上 紳一¹, H. Helmstaedt³, 熊澤 峰夫⁴

KATSUTA, Nagayoshi^{1*}, SHIMIZU, Ichiko², TAKANO, Masao⁴, Shin-ichi Kawakami¹, H. Helmstaedt³, Mineo Kumazawa⁴

¹ 岐阜大学教育学部, ² 東京大学理学系研究科, ³ Queen's Univ. Canada, ⁴ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Faculty of Education, Gifu University, ² Graduate School of Science, University of Tokyo, ³ Queen's Univ. Canada, ⁴ Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Uni

本発表では、現在我々が解析を進めている太古代縞状鉄鉱層 (banded iron-formations) の縞構造の成因 (Katsuta et al. in press) を、他地域の BIF の化学組成構造と比較し考察する。解析試料は、北西カナダ・イエローナイフ・グリーンストーン帯の Bell Lake 地域に露出する 29 ~ 28 億年前の BIF であり、研究方法は、顕微鏡による岩石学的解析と、SXAM、EPMA ならびに SEM-EDS を用いた蛍光 X 線分析である。

Bell Lake BIF は、センチメートルスケールの Fe-rich メソバンドと Si-rich メソバンドの繰り返しからなる縞構造に特徴づけられる。顕微鏡下において、構成鉱物は完全に再結晶し、変成鉱物に置き換わっている。Fe-rich メソバンドは、普通角閃石、磁鉄鉱とグリユネ閃石から構成され、一方、Si-rich メソバンドは、石英、磁鉄鉱と微量のアクチノ閃石から成る。この他に、黄鉄鉱、燐灰石とスチブノメレンがごく微量に含まれる。角閃石の配向で定義される片理面はほとんどのところで組成縞と平行であるが、ごく稀に見られる層間褶曲の軸部などで局所的に片理面がバンド境界面を切っている。このことから、Fe-rich メソバンドと Si-rich メソバンドは変成作用より以前から存在した構造と見なすことができる。

EPMA 分析の結果から、Fe-rich メソバンドと Si-rich メソバンドの Ca 角閃石において、Al₂O₃ 含有量に大きな差が認められた (普通角閃石は 7.50 wt%、アクチノ閃石は 0.54 wt%)。アルミニウムは不移動元素であることから、Ca 角閃石の Al₂O₃ の差は、先駆物質のバルク組成の差に起因すると見なすことができる。このことは、西オーストラリア・Hamersley 地域の低変成 BIF で提唱されているシリカの圧力溶脱作用 (Trendall, 1983) では Fe メソバンドの形成過程を説明することが困難である (Morris, 1993) ことを意味する。Fe-rich メソバンド中の Al や Ca の起源としては、その構成鉱物とともに、Bell Lake BIF は大陸縁辺が分裂したときに出現したリフト帯で形成したことから (Muller et al., 2005) 海底火山活動で生じた苦鉄質な火山砕屑物であると見なすことができる。また、Fe-rich バンドの繰り返しは、湧昇流 (Ohmoto et al., 2006) による火山砕屑物の周期的な供給 (Morris, 1993) を反映するものと判断される。

Bell Lake BIF の Si-rich メソバンドには、磁鉄鉱に富むミリメートルスケールのバンドが少なくとも数枚含まれている。この微細なバンドは一般にマイクロバンドに区分され、Hamersley 地域や Kuruman 地域 (南アフリカ) の低変成 BIF を含め世界中の BIF で確認されている (Klein, 2005)。マイクロバンドは、海底での形成時の初生構造と見なされている。その形成過程は、鉄酸化細菌による化学沈殿作用と関連付けて議論されており、マイクロバンド 1 枚が年層であると考えられている (Trendall, 1983)。また、近年、この考えを支持する実証実験が行われている (Posth et al., 2008)。一方、Bell Lake BIF のマイクロバンドについては、先に述べた構成鉱物が完全に再結晶していること、石英が細粒の磁鉄鉱を結晶粒界移動していること、から、バンドの厚さや間隔は、初生構造から変化していると思なすことができる。

SXAM マッピングの解析から、Fe-rich メソバンドの中央部には Ca が濃集し、その両側に Mn の濃集層が存在することが明らかとなった。Ca は普通角閃石、Mn はグリユネ閃石のモード組成に対応する。この Fe-rich メソバンド内に見られる化学組成の対称性は、今回太古代 BIF で初めて見つかった化学組成構造である。これまで、BIF のメソバンドの化学組成構造は、原生代の低変成 BIF で観察されており、極性 (グレーディング) を持つ化学ゾーニングは、突発的な嵐で生じた潮流 (Paufahl and Fralick, 2004) や続成過程で生じた Fe の分離作用 (Lescellias, 2006) と関連付けて議論されている。Hamersley 地域の BIF では、Mn と Ti が Si-rich の赤色メソバンドと接する Fe-rich の黒色メソバンドの上下の境界に濃集することが micro-XRF 分析により明らかとなっている (Matsunaga et al., 2000)。Ti は熱水変質作用に対して不移動元素であることから、バンド境界に見られる化学組成構造は、海流の変化を示す初生構造として解釈されている。Bell Lake BIF にも、Fe-rich メソバンドに Mn の濃集が見られるが、Ti は数ミクロンの微粒子として Fe-rich メソバンド中にほぼ均質に分布している。この微粒子は、SEM-EDS 分析からウルボスピネルからなる。したがって、Fe-rich メソバンドに見られる Ca や Mn の分布は、変成分離作用で生じた二次的な化学組成構造であると考えられる。

Reference

Katsuta, N., Shimizu, I., Helmstaedt, H., Takano, M., Kawakami, S., and Kumazawa M. (in press), Major element distribution in Archean banded iron-formation (BIF): Influence of metamorphic differentiation. *Journal of Metamorphic Geology*.

キーワード: 縞状鉄鉱層, 化学組成構造, 元素マッピング, メソバンド, ミクロバンド

Keywords: banded iron formation, chemical structure, elemental mapping, mesoband, microband

太古代中期のクリバービル縞状鉄鉱層: DXCL2 掘削報告 1

Mesoarchean Cleaverivlle Iron Formation: DXCL2 drilling preliminary report

清川 昌一^{1*}, 山口 耕生², 尾上 哲治³, 坂本 亮¹, 寺司 周平¹, 相原 悠平¹, 菅沼 悠介⁴, 堀江 憲路⁴, 池原 実⁵, 伊藤 孝⁶
KIYOKAWA, Shoichi^{1*}, YAMAGUCHI, Kosei E.², ONOUE, Tetsuji³, SAKAMOTO, Ryo¹, TERAJI, Shuhei¹, AIHARA, Yuhei¹, SUGANUMA, Yusuke⁴, HORIE, Kenji⁴, IKEHARA, Minoru⁵, ITO, Takashi⁶

¹九州大学 地球惑星科学部門, ²東邦大学 理学部, ³鹿児島大学 理学部, ⁴国立極地研究所, ⁵高知大学 海洋コアセンター, ⁶茨城大学 教育学部

¹Kyushu Univ. Earth and Planetary Sci., ²Toho Univ., ³Kagoshima Univ., ⁴NIPR, ⁵Kochi Univ., ⁶Ibaraki Univ.

縞状鉄鉱層は2価鉄が酸化することで3価鉄になり沈殿し形成したものであり, 23億年前の大酸化作用以降はラピュタン型以外の縞状鉄鉱層は報告されておらず, 大気酸化作用を示す重要な証拠となる。縞状鉄鉱層は26?24億年前の地層が有名であるが, 太古代中期にも各地で報告されている。クリバービル縞状鉄鉱層はビルバラクラトンにおいて有名な太古代中期の縞状鉄鉱層であり, その成因は太古代中期の海底や表層環境復元の鍵をもつ地層である。我々は2011年11月にこの縞状鉄鉱層およびその前後の地層について掘削をおこない, 太古代中期の縞状鉄鉱層堆積環境の復元を目指している。今回は, 掘削により新しく明らかになった地層層序について述べる。

層序 クリバービル縞状鉄鉱層は, クリバービル層上部に分布する。クリバービル層は層厚約400mであり, 下位部層は黒色頁岩を主とし, 上位にマグネタイト層が顕著な縞状鉄鉱層からなる。クリバービル層は下位のデキソン枕状玄武岩に整合的にかさなり, 最上部は褶曲軸により地層が欠落するが, リザードヒル層(66ヒル部層)の砂岩・黒色・白色チャート, チャート角礫層が不整合で重なる。デキソン枕状玄武岩の下位には熱水活動を記録するデキソンアイランド層がある。2007年のDXCL掘削では, 上部デキソンアイランド層のチャート層と下部クリバービル層の黒色頁岩層にて新鮮で連続性の良いコアが取得している。

今回の掘削では前回取得したCL1コアの層序的上位にあたる黒色頁岩層の上部から縞状鉄鉱層にかけて, 210mの連続コアを取得した。地層は大きく4つの部分に区分され, 下位から1)黒色頁岩層(CL1コアサンプルと類似), 2)淡緑色?白色層状チャート層, 3)縞状マグネタイト・チャート互層, 4)黒色頁岩・チャート互層からなる。陸上調査では, 黒色頁岩・チャート互層の上位にマグネタイト層はもう一層ある。掘削時に鉄鉱層の有無を調べる為に簡易帯磁率計を使い, その分布を調べた。

コア観察によると黒色頁岩層には斜交葉理を含む火山岩砂岩を挟み, その上位は淡緑色?白色チャート層はデキソンアイランド層下位に見られる淡緑色チャートと類似し, コマチアイト質の火山岩凝灰岩層の可能性もある。マグネタイト層は淡緑色?白色チャート層上位において, 徐々に量比を増して重なり, 厚いマグネタイト層になる。上位の黒色頁岩・チャート互層は間にマグネタイト層を所々挟む。石英を多く含む砂岩層は掘削コア中には全く含まれていなかった。

予察的な考察であるが, 中期太古代の縞状鉄鉱層の形成には, 1)大量の有機物層(有機物はシアノバクテリアの沈殿物), 2)熱水起源のチャート層が関連しており, 熱水活動によって比較的酸化されつつある海底に熱水活動にともなって鉄が供給されることにより沈殿していった可能性が示唆される。この層序はハマスレー層群やデキソンアイランド層にもみられ, 縞状鉄鉱層の形成過程を示す重要な条件を示していると考えられる。

キーワード: 太古代, 黒色頁岩, 層状チャート, 縞状鉄鉱層, 熱水活動, ビルバラ

Keywords: Archean, Black shale, Bedded chert, BIF, hydrothermal activity, preliminary report

非生物的な黄鉄鉱形成の際の鉄同位体分別のみで、地球史初期の堆積岩の鉄同位体記録を説明できるか？

Could 'Iron Isotope Biosignatures' be falsified ?

山口 耕生^{1*}

YAMAGUCHI, Kosei E.^{1*}

¹ 東邦大学理学部 & NASA Astrobiology Inst

¹Toho University & NASA Astrobiology Inst

"Iron Isotope Biosignatures" have been a target of considerable debates between two schools (e.g., Beard *et al.*, 1999; Bullen *et al.*, 2001; Rouxel *et al.*, 2005; Yamaguchi and Ohmoto, 2006). One school argues that Fe isotope compositions of certain minerals can be used to distinguish whether they were formed biologically or abiologically. The other school, however, argues that some abiological processes that fractionate Fe isotopes can be solely used to fully explain Fe isotope fractionation in the geologic record. Recently, Guilbaud *et al.* (2011) presented a kinetic Fe isotope fractionation factor for abiological pyrite formation from dissolved and solid FeS, and suggested that low $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratio for pyrite from the geologic record could have been produced by this inorganic process. This further implies that Fe isotopes cannot be used to trace ancient biologically mediated redox processes. However, such an interpretation could be wrong because of many reasons (e.g., Czaja *et al.*, 2012; see also Guilbaud *et al.*, 2012). The Fe isotope compositions of early Precambrian marine sedimentary rocks were produced by numerous processes, including abiological and biological Fe processes involving redox reactions. Interpreting the origin of isotopic variations preserved in the rock record is not an easy task, because it requires systematic consideration of geologic, petrographic, and geochemical contexts. A thorough understanding of the depositional setting, mineralogy, and geologic history of Precambrian sedimentary rocks indicates that the Fe isotope record is likely to reflect biological fractionations and Fe redox processes. In my talk, background information related to Fe isotope geochemistry is introduced first and then some important points of discussion are presented for lively discussion.

References:

Beard *et al.* (1999) *Science* **285**, 1889; Bullen *et al.* (2001) *Geology* **29**, 699; Czaja *et al.* (2012) *Science* **335**, 538c; Guilbaud *et al.* (2011) *Science* **332**, 1548; Guilbaud *et al.* (2012) *Science* **335**, 538d; Rouxel *et al.* (2005) *Science* **307**, 1088; Yamaguchi and Ohmoto (2006) *Science* **311**, 177.

キーワード: 鉄同位体, 黄鉄鉱, 太古代

Keywords: iron isotope, pyrite, Archean

段階燃焼法で明らかにされた初期原生代有機物窒素同位体比の不均質性 Stepwise combustion analyses of distinct nitrogen isotopic compositions on Paleoproterozoic organic matter

石田 章純^{1*}, 橋爪 光², 掛川 武¹

ISHIDA, Akizumi^{1*}, HASHIZUME, Ko², KAKEGAWA, Takeshi¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹Graduate School of Science, Tohoku Univ., ²Graduate School of Science, Osaka Univ.

堆積物中の有機物の窒素安定同位体比は、堆積当時の海洋環境、微生物活動を規定する上で重要なツールである。特に近年、太古代から先カンブリア代にかけての地球表層環境を理解するために精力的な分析が行われている [e.g. Beaumont and Robert, 1999, Shen et al., 2006]。その一方で、多くの研究で目的有機物に由来しない窒素 (粘土鉱物中のアンモニウムイオンや有機物表面への吸着窒素など) の影響が正しく評価されていない可能性があるという問題点があげられる。

段階燃焼法 [Yamamoto et al., 1998] はこうした吸着窒素の影響を排除して目的有機物のみ窒素安定同位体比を評価することのできる有効な手法の一つである。これは分析試料を酸素雰囲気下で段階的に昇温・燃焼させ、各温度フラクションで解放される窒素量と同位体比を測定する手法である。比較的低温側で吸着窒素が解放されるなど、分析試料の温度によるプロファイルの評価をすることができる。一方で、分析に伴う同位体分別効果を考慮する必要がある。Pinti et al. (2007) は、段階燃焼法による太古代チャート中の窒素の評価を行っており、全岩分析においては Rayleigh Distillation による窒素同位体分別効果 (以下 Rayleigh 効果) を考慮すべきとしている。しかし、先カンブリア時代の有機物のみ段階燃焼分析で同様の効果を検証している研究例はない。

本研究では、19億年前カナダ・ガンフリント層の炭酸塩質砂岩中の有機物を段階燃焼によって分析した。分析は、燃焼温度幅を 25 °C として、450 °C から 1100 °C の範囲で行った。その結果、450-500 °C (=低温部)、525-600 °C (=中温部)、625-1100 °C (=高温部) のそれぞれの温度画分でほぼ一定の窒素安定同位体比をとることがわかった。このうち低温部では吸着窒素が解放されており、中温部では平均 5.0 ‰、高温部では平均+7.3 ‰というプロファイルをとることが分かった。各温度幅で解放された窒素量から Rayleigh 効果を見積り、実測値との比較を行った結果、この傾向は Rayleigh 効果では説明されないことが分かった。さらに、温度ごとに解放された炭素の量に基づいたアレニウスプロットを行ったところ、中温部と高温部でそれぞれ異なる傾きを持つ直線となることが分かった。これは、中温部と高温部で炭素の反応の活性化エネルギーが異なる、つまり中温部と高温部で異なる炭素の構造を持つ可能性を示唆している。炭素の構造の変化に対応して窒素の解放量が変化し、かつ窒素安定同位体比に Rayleigh 効果がみられないことから、構造の異なる炭素に、窒素安定同位体比の異なる窒素がそれぞれ組み込まれていたと考えることができる。

本研究によって、初期原生代の有機物中に 2 つの異なる窒素同位体比が見られることが初めて確認された。この解釈として、初生的な有機物の違いを反映している、変成度の異なる有機物が混在している、などの可能性が考えられるが、いずれにしても先カンブリア時代の有機物中窒素同位体比の解釈に大きな影響を与えることができると考えられる。

キーワード: 段階燃焼法, 窒素安定同位体比, ケロジェン, 初期原生代, ガンフリント層

Keywords: stepwise combustion method, nitrogen isotopic composition, kerogen, Paleoproterozoic, Gunflint formation

堆積場の異なる南中国エディアカラ紀の炭素同位体比負異常 Ediacaran carbon isotope anomaly of different setting in South China

田畑 美幸^{1*}, 澤木 佑介², 岡田 吉弘¹, 上野 雄一郎¹, 吉田 尚弘¹, 小宮 剛³, 丸山 茂徳¹

TAHATA, Miyuki^{1*}, SAWAKI, Yusuke², OKADA, yoshihiro¹, UENO, Yuichiro¹, YOSHIDA, Naohiro¹, KOMIYA, Tsuyoshi³, MARUYAMA, Shigenori¹

¹ 東京工業大学, ² 海洋研究開発機構, ³ 東京大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²JAMSTEC, ³The University of Tokyo

The Ediacaran is one of the most important periods in the history of life when multicellular animals first appeared on the earth. However, we still poorly understand the relationship between the abrupt biological evolution and environmental change. Many of the Ediacaran sections record the largest $\delta^{13}\text{C}$ anomaly through the Earth's history, named as Shuram excursion (Calver et al., 2000; Fike et al., 2006). The observed excursion may reflect extensive remineralization of large amounts of organic matters in the Ediacaran ocean (Fike et al., 2006; Rothman et al., 2003) or extensive, global diagenetic alteration (Knauth & Kennedy, 2009). However, it is difficult that the negative excursion of similar magnitude around the world is caused by local alteration (Grotzinger et al., 1995). We analyzed carbon and nitrogen isotopes by using drill core samples from four different depositional settings in South China: Three Gorges and Weng'an sections for shallow marine setting, and Tianping and Shiduping sections for relatively pelagic, deeper slope setting, respectively.

We comprehensively analyzed the drill core samples through the sections, but the deeper, relatively pelagic, sections show high carbon isotope ratios through the sections, and apparently no negative excursion. The result is contrast to presence of continuous negative $\delta^{13}\text{C}$ values through the Ediacaran in deeper facies, proposed by Jiang et al., (2007) The Weng'an section, characterized by the oldest extensive phosphorite deposit, in shallow shelf setting also displays smaller negative excursion (>-4 per mil), compared with Three Gorges section in another shallow marine setting.

Our results show the $\delta^{13}\text{C}$ values are highly variable depending on the depositional environment. The restriction of appearance of the negative $\delta^{13}\text{C}$ excursions to shallow marine settings suggests that extensive remineralization took place only in shallow marine environments, enriched in organic carbon and sulfate, due to extensive supply of sulfate from continents. On the other hand, extensive phosphorus supply promotes prosperity of photosynthetic activity, namely primary production, thus increases $\delta^{13}\text{C}$ of the area of the sea, as well as inhibits remineralization due to sulfate reduction. Alternatively, the shallow sections preferentially suffered from diagenetic alteration possibly in response to eustatic sea-level fall, analogous to $\delta^{13}\text{C}$ negative anomalies before the Snowball Earth events, as recently proposed by Swart & Kennedy (2012). But, as far there is no evidence for a glacial event, associated with the Shuram excursion.

Keywords: Ediacaran, carbon isotope ratio, Shuram excursion, deeper sediment

X線を用いた micro-CT 分析によるカンブリア紀初期の微化石の三次元構造解析 Synchrotron X-ray micro-CT analyses of The Early Cambrian microfossils

中尾 泰斗^{1*}, 韓 健², 岡田 吉弘³, 佐藤 友彦¹, 上杉 健太郎⁴, 星野 真人⁴, 小宮 剛¹

NAKAO, Taito^{1*}, Jian Han², OKADA, Yoshihiro³, SATO, Tomohiko¹, Kentaro Uesugi⁴, Masato Hoshino⁴, KOMIYA, Tsuyoshi¹

¹ 東京大学総合文化研究科広域科学専攻, ² 西北大学地質学系, ³ 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, ⁴ (財) 高輝度光科学研究センター

¹Department of Earth Science & Astronomy, The University of Tokyo, ²Department of Geology, Northwest University, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ⁴Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Cambrian Explosion, the most drastic event in history of life on Earth, which is characterized by the rapid appearance of almost all of modern phyla, happened in early Cambrian (around 530 Ma). Therefore, paleontological and geochemical studies around the event are very important to reveal features and origin of the Cambrian explosion in the biological history.

Many microfossils are found mainly in phosphorites around Precambrian-Cambrian boundary. Especially in South China, we can find many well-preserved phosphatic microfossils. Globular-shaped microfossils are generally interpreted as embryos or larvae because of their forms (e.g. Bengtson & Yue, 1997; Steiner et al., 2004). Skeletal microfossils, named as SSF (Small Shelly Fossils), are also reported and have various shapes, interpreted as Cnidaria, Chaetognatha, Gastropoda, Mollusca and others (e.g. Chen & Huang, 2001; Bengtson et al., 1990; Steiner et al., 2007). Because the SSF are distributed over the world, the biostratigraphy is often used for comparison among the sections in the world (literatures listed in Steiner et al., 2007). In addition, taxonomy of SSF is a key to investigate origin of biomineralization, diversification of hard structure-forming life and linkage to modern Metazoa, (e.g. Porter, 2007), thus the SSF highly attracts paleontological and biological interests. However, because most of SSF has simple and extraordinary shapes, the taxonomy is still unclear. On the other hand, globular microfossils have simple external forms so that it is often difficult to identify their affinity in detail. In addition, because some embryo- and larvae-stage fossils with complex forms are relatively large, the internal structures cannot be observed with SEM. We need new criteria for classification as well as their external morphology.

Recent X-ray micro-CT analyses of the microfossils yielded new methods to observe the internal structures (e.g. Donoghue et al., 2006). Compared with microscopic and SEM observations of cutting planes of the microfossils, this technique has two advantages of nondestructive analyses on any cross-sections of internal structures. This work presents preliminary observations of three-dimensional structures of the Early Cambrian microfossils including embryo and larvae stage fossils and SSF, South China with the Synchrotron X-ray micro-CT at SPring-8 (beam line: BL47XU). The spatial resolution is about 1 micrometer, and it takes only 10 minutes to take a CT image of a sample.

We classified the specimen into some groups based on the SEM images. One is composed of animal embryo fossils, which are partly covered with envelopes and contain, often shriveled, globules, or which are divided into two or more cells. Second consists of larvae of cnidarian. The fossils, which comprise an umbrella-like top and relatively small column at bottom, often with pentaradial symmetry, resemble forms of larvae of cnidarian and of small jellyfish. Some fossils are similar to a polyp or a sea anemone in form. Some horn-shaped fossils, so-called Anabarites are also found.

We analyzed these samples with the Synchrotron X-ray micro-CT and reconstructed their three-dimensional structures. The preliminary data allows us to observe the internal structures as well as the morphologies, and to identify their affinities.

Keywords: Synchrotron X-ray micro-CT, Spring-8, Early Cambrian, Small Shelly Fossils(SSFs), Embryo fossils

生物地球化学モデルを用いた原生代初期スノーボールアース・イベントと大気酸素濃度増大の因果関係の検証

Modeling a rise of atmospheric oxygen after the Paleoproterozoic snowball Earth event

原田 真理子^{1*}, 田近 英一², 関根 康人²

HARADA, Mariko^{1*}, TAJIKA, Eiichi², SEKINE, Yasuhito²

¹ 東京大学大学院地球惑星科学専攻, ² 東京大学大学院複雑理工学専攻

¹Dept. of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Dept. of Complexity Science & Engineering, University of Tokyo

Understanding the evolution of atmospheric oxygen is one of the fundamental issues in the history of life on earth, as the evolution of higher life, such as eukaryotes and metazoans, is dependent on the oxidation state of the atmosphere-ocean system. Atmospheric oxygen levels are considered to have increased largely (from $<10^{-5}$ of present atmospheric level (PAL) to ~ 0.01 PAL) in early Paleoproterozoic, although the cause of this rise has been controversial.

Previous studies have suggested a hypothetical causal linkage between the Paleoproterozoic snowball glaciation at 2.22 Ga and a rise in atmospheric oxygen based on evidence of depositions of manganese and iron oxides immediately after the glaciation found widespread in South Africa and North America [1,2]. These records imply that a global warming in the glacial aftermath enhanced chemical weathering on land and provided nutrients to the ocean, which lead to a cyanobacterial bloom [1]. In order to assess the hypothesis quantitatively, we developed a simple atmosphere-ocean biogeochemical cycle model. In the model, we simulate biogeochemical perturbations in the atmosphere-ocean system in response to a climate jump to an extreme greenhouse condition immediately after the Paleoproterozoic snowball glaciation. We calculate a consequent rise in oxygen due to the perturbations and evaluate timescale from the glacial termination to the initiation of cap carbonate depositions with the aim of comparing with the geological records [1].

The model consists of two boxes; atmosphere-surface ocean box, and deep ocean box. In each box, we calculate chemical and biological reactions relate to the global CO₂ methane, and oxygen cycles. We consider the inputs of phosphorous and Ca²⁺ from land into surface ocean via chemical weathering, and also calculate the diffusion of dissolved components (e.g. DIC, Alk and H₃PO₄) between the ocean boxes. Considering the Paleoproterozoic snowball deglaciation, high atmospheric pCO₂ (~ 0.7 atm) is assumed as an initial condition. Chemical weathering rate is given as a function of temperature and atmospheric pCO₂, multiplied by weathering efficiency f ($f = 1$ at present). We change f given the uncertainty in soil biological activity and continental area at that time. Nutrient supply is represented by riverine phosphorous input via chemical weathering, which is fully consumed by photoautotrophs (cyanobacteria) via photosynthesis. To calculate oxygen and methane levels in the atmosphere for given production fluxes, we adopt a redox balance model given by Goldblatt et al. [3].

The results indicate that, immediately after the glaciation, global temperature rises as high as 330 K, resulting in extremely high levels of riverine phosphorous input to the oceans due to the enhanced chemical weathering (~ 10 - 20 times higher than that of today). Assuming all the phosphorous are consumed by cyanobacteria via oxygen-producing photosynthesis, the total amount of oxygen generation reaches $\sim 10^{23}$ mol during the first 10^5 years after the glaciation. The atmospheric oxygen level increases from $< 10^{-5}$ PAL to ~ 1 PAL during the first 5×10^6 years, and then gradually decreases to ~ 0.01 PAL. These results are consistent with the oxygen levels reconstructed by the depositions of manganese and iron oxides [1,2].

We also found that the ocean becomes highly undersaturated with respect to carbonates after the glaciation due to high atmospheric CO₂ concentrations. Such a situation prevents carbonates from precipitating during the first 10^5 years after the glaciation, which is also consistent with the geologic records of the depositions of iron and manganese oxides followed by cap carbonate in the oceans [1].

[1] Kirschvink et al. (2000) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **97**, 1400-1405. [2] Sekine et al. (2011) *Earth Planet. Sci. Lett.* **307**, 201-210. [3] Goldblatt et al. (2006) *Nature* **443**, 683-686.

ペルム紀末大量絶滅のトリガーとプロセス Trigger and process of the end-Permian mass extinction

海保 邦夫^{1*}, 古賀 聖治², 伊藤 幸佑¹, 大庭 雅寛¹, ポール・ゴージャン³, 高橋 聡¹, チェン・ツォン チアン⁴, 童金南⁴, 山北 聡⁵

KAIHO, Kunio^{1*}, KOGA Seizi², ITO Kosuke¹, OBA Masahiro¹, GORJAN Paul³, TAKAHASHI Satoshi¹, CHEN Zhong-Qiang⁴, TONG Jinnan⁴, YAMAKITA Satoshi⁵

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 産総研, ³ ワシントン大学, ⁴ 中国地質大学, ⁵ 宮崎大学

¹Tohoku University, ²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ³Washington University, ⁴China University of Geosciences, ⁵Miyazaki University

The largest mass extinction of animals and plants in both the ocean and on land occurred at the end of the Permian, largely coinciding with the largest flood basalt volcanism event in Siberia. Our depth-transect data show that euxinia frequently developed below 100-m water depth in the Changhsingian, followed by anoxia or dysoxia at 200- to 40-m water depths during the extinction. These organic and isotopic geochemical results imply that there was an accumulation of hydrogen sulphide in intermediate and deep waters followed by oxidation of hydrogen sulphide that led to dissolved oxygen consumption, surface-water anoxia, and acidification, resulting in the end-Permian mass extinction in the seas. The possibility of atmospheric ozone collapse due to coincident massive release of CH₄ from the Siberian igneous province and H₂S from the euxinic ocean to the atmosphere is not likely. Our calculations indicate that a massive release of CH₄ and H₂S to the atmosphere would cause an approximately 10% decrease in atmospheric O₂ levels but not significantly alter ozone levels. The slight decrease in atmospheric O₂ levels may also have contributed to the extinction event. However, the end-Permian mass extinction of terrestrial animals was most likely significant global warming and an increase in CO₂ levels probably induced by the Siberian volcanism, not an increase in UV radiation levels and a decrease in atmospheric O₂ levels.

キーワード: ペルム紀, 大量絶滅, メタン, 硫化水素, オゾン, 酸素

Keywords: Permian, mass extinction, CH₄, H₂S, ozone, O₂

HIMU の Pb 同位体比からみた U と Th のマントル循環

Pb isotope evolution of the HIMU reservoir; implications to recycling of U and Th in the mantle

羽生 毅^{1*}, 川畑 博¹, 巽 好幸¹, 木村 純一¹, 宮崎 隆¹, 常 青¹, 平原 由香¹, 高橋 俊郎¹, 仙田 量子¹, 中井 俊一²

HANYU, Takeshi^{1*}, KAWABATA, Hiroshi¹, TATSUMI, Yoshiyuki¹, KIMURA, Jun-Ichi¹, MIYAZAKI, Takashi¹, CHANG, Qing¹, HIRAHARA, Yuka¹, TAKAHASHI, Toshiro¹, SENDA, Ryoko¹, NAKAI, Shun'ichi²

¹ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, ² 東京大学地震研究所

¹IFREE, JAMSTEC, ²ERI, University of Tokyo

Geochemical heterogeneity in ocean island basalts and mid-ocean ridge basalts documents the presence of several mantle reservoirs. HIMU is one such mantle reservoir that has been considered to be formed by subduction and accumulation of ancient oceanic crust in the deep mantle. Consequently, basalts with the HIMU signature may record the processes that act on the oceanic crust some billion years ago, such as formation of oceanic crust, subsequent hydrothermal alteration and subduction modification.

The 'extreme' HIMU basalts occur in limited localities at St. Helena in the Atlantic and Cook-Austral Islands in the south Pacific. These lavas exhibit remarkably similar isotopic compositions with very high $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, depleted Sr isotope, and enriched Nd and Hf isotopes, suggesting uniform geochemical compositions of the HIMU reservoir that exist at different places in the mantle. However, significant difference in $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is confirmed by isotope analyses with both whole-rock and clinopyroxene; the St. Helena lavas show systematically higher $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for a given $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ than the Cook-Austral lavas. This is explained by various formation age of the reservoir. The Pb isotope evolution model demonstrates that portions of the HIMU reservoir for St. Helena and Australs were formed at approximately 2.2 Ga and 1.8 Ga, respectively.

The relationship between $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ reflects time-integrated Th/U (or $\kappa = ^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$) of the source. Both St. Helena and Austral lavas demonstrate that time-integrated Th/U of the HIMU reservoir is approximately 3.7, which is close to the chondritic Th/U (4.0) and is much higher than Th/U of the present-day MORB and depleted mantle (2.6). This indicates that the ancient oceanic crust, that is the precursor of the HIMU reservoir, had different Th/U from the modern MORB. Indeed, sub-seafloor alteration and subduction dehydration would decrease and increase Th/U in oceanic crust, respectively, but the net effect would be reduction of Th/U (< 2) in the subducted oceanic crust (Becker et al., 2000). Consequently, the depleted upper mantle at the time when the HIMU reservoir was formed (1.8-2.2 Ga) must have had higher Th/U than at present. This is consistent with the model in which the Archean and early Proterozoic depleted mantle had chondritic Th/U and then the value decreased to the present due to selective recycling of U, relative to Th, from continent back into the mantle (Elliott et al., 1999). Slightly lower Th/U in the HIMU reservoir (3.7) than the chondritic (or Archean depleted mantle) value (4.0) suggests either that the HIMU reservoir was formed by subduction of both fresh and altered parts of oceanic crust, that it was formed by hybridization of subducted oceanic crust with primitive mantle, or that the hydrothermal alteration did not lower Th/U so drastically under less-oxidized condition in the Archean (and possibly early Proterozoic) hydrosphere.

Becker et al., Chem. Geol. 163, 65-99 (2000)

Elliott et al., Earth Planet. Sci. Lett. 169, 129-145 (1999)

キーワード: HIMU, マントル循環, ウラン、トリウム, 太古代マントル

Keywords: HIMU, mantle recycling, U and Th, ancient mantle