

令和 5 年 4 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01996

研究課題名(和文)地球史上最大”中太古代環境変動”の解明：初期大陸出現による海洋・生物圏環境変化

研究課題名(英文) Mesoarchean largest environmental change in earth history: the relationship between continental growth and oceanic condition

研究代表者

清川 昌一 (Kiyokawa, Shoichi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：50335999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：中太古代環境変動の記録を解くために、今まで取得した試料31億年前のCleaverville層の掘削コアCL3の観察により、層序の立て直し、顕微鏡観察、電顕観察、化学分析を行ってきた。陸上で赤く見えていた地層は緑泥石からなる粘土層であり、それとチャートと酸化鉄のラミナからなる縞状鉄鉱層が互層することが明らかになった。初期の鉄の沈殿はシデライトが沈殿しており、沈殿後により結晶化することを見いだした。鉄濃集層もシリカ分がすくない粘土層中に鉄分が増加してくるようであり、その部分のみマグネタイト結晶ができ、粘土層中の鉄分の増加過程とシデライト形成の要因が太古代BIFの形成に関与することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、酸素濃度がほとんどないとされる太古代において、どのようにして鉄が酸化されて地表に堆積/固定されるかを示す重要な証拠を明らかにしたものである。当時の嫌氣的海底では、2価鉄は炭酸塩化して3価のシデライトとして化学的に沈殿する。このとき海底表層に微生物がいた方が効率よく酸化されることが提唱されているが、今のところその痕跡は見つかっていない。熱水によって供給された2価鉄は、冷えていく課程で化学的な沈殿を起こしていると考えられる。社会的には、酸素がない状態で、鉄鉱石の沈殿作用を考える上で重要な指針を示したと思われる。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the record of environmental changes in the Mesoarchean environment, we have carried out stratigraphic reconstruction, microscopic observation, electron microscopic observation, and chemical analysis by observing the drilling core CL3 of the Cleaverville Formation deposited at 3.1 billion years ago. It was clarified that the strata that appeared red on land were clay layers composed of chlorite, and banded iron layers composed of chert and iron oxide lamina alternated. It was found that the initial iron precipitates consisted of siderite precipitates, which crystallized after precipitation. In the iron-concentrated layer, the iron content seems to increase in the clay layer with little silica content, and magnetite crystals are formed only in that part. It will be involved in formation of BIF sequence.

研究分野：地質学

キーワード：太古代 縞状鉄鉱層 シデライト マグネタイト 黒色頁岩 大陸成長

## 1. 研究開始当初の背景

地球の歴史において海水成分が大きく変わる要因のうち、地球史上初めての大陸地殻物質の海洋への流入は、海水組成を変える一大転機である。一般的に太古代-原生代境界(25億年前)ごろに、大陸地殻の大規模な形成があり、大気の大酸化事変(GOE)もこの頃起こったと考えられていた (eg. Windley, 1983, Holland, 1983; 図1)。最近の岩石同位体研究により中太古代(32~30億年前)において、急激な大陸成長が指摘された (Dhuime et al., 2015; 図1)。

しかし、この時代の海洋変化の有無は明らかでない。これは、32-30億年前の未変質・未変成な遠洋性海洋底を示す地層がまれにしか残っておらず、研究不足が原因である。特に、BIFに残される、海水組成や海洋環境や生物の進化速度におよび、初期地球における生命と環境の共進化を考える上で極めて重要な要因となる。中太古代における表層環境変化と生命進化のリンケージの理解は、他の惑星・衛星における生命進化の可能性を議論する上でも重要な制約条件を与える。

## 2. 研究の目的

31億年前の連続層序中に残される太古代 BIF の形成メカニズムの解明と中太古代環境復元。この時期、初期大陸形成が始まり海洋上に陸地が現れ始める。陸地形成と花崗岩大陸の形成、およびその周辺部に堆積する鉄鉱層とのリンケージを明らかにする。

## 3. 研究の方法

中太古代の環境記録が残るクリバービル層の掘削コア CL3 について、特に縞状鉄鉱層の形成部分を約 200m の変化について、詳細な観察、顕微鏡・SEM による観察/分析を行い縞状鉄鉱層が形成する岩相や粘土層の変化を約 20-50cm おき、500 枚の薄片観察を行ってきた。コロナにより海外調査ができなかったが、今まで取得していた試料についての詳細な観察および分析が行えた。

岩石試料の化学分析、特に、①地層観察による堆積場の高解像度層序復元、②高精度年代測定(Zircon U-Pb 法)による堆積速度の見積もり、③陸源物質の寄与(Al, K, Fe, Sc/Th, Ni/Co, Cr/Zn, REE)、④海底の酸化還元状態(V, Mo)、⑤生物生産量(炭素、硫黄同位体)を求め、高時間分解能での有機物量の変化・BIF 形成メカニズムを明らかにする。

## 4. 研究成果

陸上で赤く見えていた地層は緑泥石からなる粘土層であり、それとチャートと酸化鉄のラミナからなる縞状鉄鉱層が互層することが明らかになった。初期の鉄の沈殿はシデライトが沈殿しており、沈殿後により結晶化することを見いだした。鉄濃集層もシリカ分がすくない粘土層中に鉄分が増加してくるようであり、その部分のみマグネタイト結晶ができ、粘土層中の鉄分の増加過程とシデライト形成の要因が太古代 BIF の形成に関与することがわかった。

縞状鉄鉱層を主とするクリバービル層であるが、大陸起源の石英砂岩などの混入はなく、波による堆積構造もないために、波浪限界よりも深い場所での沈殿であり、鉄鉱層の形成は粘土層の鉄の量の増加が鍵と考えられ、徐々に増加し、比較的急激に終わることが明らかになった。また、鉄濃集ラミナは初期にマグネタイトを形成していくことが明らかになった。クローライトからなる緑色粘土層は、堆積構造や地層内部の不均質性もない塊状組織をもつ。この地層とチャート/鉄鉱層ベッドとの互層により縞状鉄鉱層をつくるが、今のところ熱水沈殿物と単発的に起こる火山灰層の互層の可能性が示唆される。当初予測されていたバクテリアの痕跡（バイオマツト）などは見つかっていない。

また、TEM 分析により新たにグリーンライト（鉄酸化物粘土鉱物）についての存在の確認を行っている。短冊状のサブ $\mu$ の鉱物を TEM で発見しているが、今のところクローライトであり初期沈殿物質のグリーンライトは発見されていない。これが発見されると BIF の初期沈殿は化学的な酸化作用由来によるものと考えられることになる。熱水系のチャートに含まれていることが多いために、クリバービル層の下位のデクソンアイランド層や南アフリカバーバートン帯の BIF、カナダ、ラブラドルトラフの BIF などと比較検討している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Motomura Kento, Kiyokawa Shoichi, Ikehara Minoru, Sano Takashi, Bleeker Wouter, Tanaka Kentaro, Miki Tsubasa, Sano Yuji	4. 巻 359
2. 論文標題 Redox fluctuation and $^{13}\text{C}$ org- $^{34}\text{S}$ perturbations recorded in the 1.9?Ga Nuvilik Formation of the Cape Smith belt, Canada	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precambrian Research	6. 最初と最後の頁 106191 ~ 106191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2021.106191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 2. Shoichi Kiyokawa, Takashi Kuratomi, Tatsuhiko Hoshino, Shusaku Goto, Minoru Ikehara	4. 巻 133
2. 論文標題 2. Shoichi Kiyokawa, Takashi Kuratomi, Tatsuhiko Hoshino, Shusaku Goto, Minoru Ikehara., 2021, Hydrothermal formation of iron-oxyhydroxide chimney mounds in a shallow semi-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geological Society of America Bulletin	6. 最初と最後の頁 1890-1908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1130/B35782.1.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Goto Kosuke T., Sekine Yasuhito, Ito Takashi, Suzuki Katsuhiko, Anbar Ariel D., Gordon Gwyneth W., Harigane Yumiko, Maruoka Teruyuki, Shimoda Gen, Kashiwabara Teruhiko, Takaya Yutaro, Nozaki Tatsuo, Hein James R., Tetteh George M., Nyame Frank K., Kiyokawa Shoichi	4. 巻 567
2. 論文標題 Progressive ocean oxygenation at?~2.2?Ga inferred from geochemistry and molybdenum isotopes of the Nsuta Mn deposit, Ghana	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 120116 ~ 120116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kiyokawa Shoichi, Ito Takashi, Ikehara Minoru, Yamaguchi Kosei E.	4. 巻 29
2. 論文標題 Thematic section: Special topics in 4th IGS 'Precambrian World 2'	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Maekawa Takumi, Kiyokawa Shoichi, Maeda Haruyoshi, Tanaka Gengo, Costa Jovita E. F., Freitas Aquiles T.	4. 巻 25
2. 論文標題 First Report of Early Permian Albaillellarian Radiolarians from East Timor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 32-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2517/2020PR009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kiyokawa Shoichi, Suzuki Taishi, Horie Kenji, Takehara Mami, El-Dokouny Hanna A., Dawoud Maher, Abuelhasan Mohamed M.	4. 巻 165
2. 論文標題 Tectonic and sedimentary history of the neoproterozoic metavolcanic volcanoclastic rocks of the El-Dabbah Group, Central Eastern Desert, Egypt	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of African Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 103807 ~ 103807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jafrearsci.2020.103807	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kiyokawa Shoichi, Suzuki Taishi, El-Dokouny Hanaa Abdenaby, Dawoud Maher, Abuelhasan Mohamed Mahmoud	4. 巻 168
2. 論文標題 Stratigraphy, petrology, and geochemistry of a neoproterozoic banded iron sequence in the El-Dabbah Group, central Eastern Desert, Egypt	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of African Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 103805 ~ 103805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jafrearsci.2020.103805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Motomura Kento, Kiyokawa Shoichi, Ikehara Minoru, Tanaka Kentaro, Sano Yuji	4. 巻 29
2. 論文標題 Geochemical constraints on the depositional environment of the 1.84Ga Embury Lake Formation, Flin Flon Belt, Canada	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 1. Shoichi Kiyokawa, Masaru Yasunaga, Ayako Yamamoto, Daisaku Kaneko, Yuta Ikebata, Noriko Hasebe, Yukiyasu Tsutsumi, Mami Takehara, Kenji Horie.	4. 巻 1
2. 論文標題 Stratigraphic reconstruction of the lower-middle Miocene Goto Group, Nagasaki Prefecture, Japan.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Island arc	6. 最初と最後の頁 1 - 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 2. Kento Motomura, Shoichi Kiyokawa, Minoru Ikehara, Takashi Sano, Wouter Bleeker, Kentaro Tanaka, Tsubasa Miki, Yuji Sano.	4. 巻 359
2. 論文標題 Redox fluctuation and 13Corg- 34S perturbations recorded in the 1.9 Ga Nuvilik Formation of the Cape Smith belt, Canada.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precambrian Research	6. 最初と最後の頁 1 - 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2021.106191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 池端 雄太、清川 昌一、堤 之恭、堀江 憲路、竹原 真美
2. 発表標題 長崎県五島列島の層序と堆積年代
3. 学会等名 地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清川 昌一、堀 航喜、酒本 直弥、倉富 隆、後藤 秀作、池原 実
2. 発表標題 現世の鉄鉱層形成：水酸化鉄チムニーマウンドと水酸化鉄沈殿層について -鹿児島県薩摩硫黄島-
3. 学会等名 地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 元村 健人、清川 昌一、堀江 憲路、佐野 貴司、竹原 真美
2. 発表標題 カナダ・フリンフロン帯中に分布するターピダイトの堆積年代制約と堆積環境推定：後期古原生代の地球表層環境復元
3. 学会等名 地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitasari Awalina, Kiyokawa Shoichi
2. 発表標題 Formation of modern iron-oooidal sands in a shallow-marine hydrothermal environment at Nagahama Bay, Satsuma Iwo-Jima Island, Japan
3. 学会等名 地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 浩平, 清川 昌一
2. 発表標題 西オーストラリア, ピルバラクラトン, クリバービル層の CL3 コアを用いた 31 億年前の海洋堆積環境の復元
3. 学会等名 高知コアセンター共同利用成果報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井口 祐輔, 清川 昌一
2. 発表標題 西オーストラリア, ピルバラ海岸グリーンストーン帯における 32 億年前, デキソンアイランド層の詳細観察による海底熱水系堆積場の解明
3. 学会等名 高知コアセンター共同利用成果報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 元村 健人, 清川 昌一, 池原 実, 佐野 貴司
2. 発表標題 後期古原生代海洋における窒素循環
3. 学会等名 高知コアセンター共同利用成果報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoichi Kiyokawa
2. 発表標題 Modern Iron formation at Satsuma Iwo-Jima Island, Kagoshima, Japan- Hydrothermal chimney mound, iron sediments and iron oolite.
3. 学会等名 5th IGS “Precambrian World 2023” (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	伊藤 孝  (Ito Takashi)  (10272098)	茨城大学・教育学部・教授   (12101)	
研究 分担者	後藤 孝介  (Goto Kosuke)  (30612171)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員   (82626)	
研究 分担者	竹原 真美  (Mami Takehara)  (70792448)	国立極地研究所・先端研究推進系・特任研究員   (62611)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	池原 実  (Minoru Takehara)  (90335919)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授    (16401)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 5th IGS “Precambrian World 2023”	開催年 2022年～2023年
--	--------------------

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
カナダ	地質調査所 GSC			
南アフリカ	ヨハネスブルグ大学			
ガーナ	ガーナ大学			
エジプト	メノフィーユ大学			