

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：16401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20937

研究課題名（和文）太陽系最古の生命の痕跡を探す

研究課題名（英文）Trace of early life in solar system

研究代表者

佐野 有司（Sano, Yuji）

高知大学・海洋コア総合研究センター・特任教授

研究者番号：50162524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、太陽系最古の生命の痕跡を探すことである。化石が残らないような古い地質記録から生命の痕跡を探すには、安定炭素同位体が用いられてきた。しかし古い時代の生命の痕跡はとも小さく従来の方法で分析することは困難であった。そこで、顕微ラマン分光分析法と二次元高分解能二次イオン質量分析計を駆使することにより、約40億年前の地球の岩石から生命の痕跡を見つけることに成功し、約40億年前の火星の岩石でも同様の分析結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生命がいつ、どこで誕生したのかという疑問は自然科学のみならず、人が持つもっとも本質的な問題である。本研究では、火星隕石から生命の痕跡として想定される同位体比と矛盾しない測定結果を得た。このことは、一般社会に大きなインパクトを与えるだけでなく、生命が誕生した環境を調べる上で、重要な情報を提供してくれる。さらにここで開発した分析手法は地球科学だけでなく生命科学の分野にも応用の可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we succeeded in detecting ancient life in Earth's and Mars old rocks using a micro-Raman spectroscopy and a high lateral resolution secondary ion mass spectrometer (NanoSIMS). Carbon isotopic ratios in graphite grains suggest a signature of the early life.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：初期生命 炭素同位体 ラブラドル堆積岩 火星隕石

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

「生命がいつ、どこで誕生したのか」という疑問は自然科学のみならず、人が持つもっとも本質的な問題である。この根源的な問題に実証的解答を与えるには、地質記録から生命の痕跡を探ることが最も直接的な手段となる。特に、太古代 (25 億年前以前) の堆積岩中に生命活動を認定する指標として、安定炭素同位体比が用いられてきた。そして我々を含む研究グループは「いつ」に挑戦し、最近、地球上で最古の生命記録がカナダ・ラブラドル地域に産する約 40 億年前の堆積岩に残されていることを明らかにした (Tashiro et al., 2017)。

一方、「どこで」には、原始の地球だけでなく誕生間もない温暖で広い海洋が存在したと考えられる誕生初期の火星も候補になる。火星隕石 ALH84001 は細菌細胞のような構造が確認されたことから地球外生命の痕跡として注目を浴びたが (McKay et al., 1996)、その真偽は未解明のままである。本研究ではこの解析手法を地球の岩石だけでなく約 40 億年前に形成された火星隕石 ALH84001 に応用し、太陽系最古の生命が生まれた環境を調べることを目標とした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、安定炭素同位体を用いて太古代の岩石および火星隕石から生命の痕跡を探ることである。しかし生命の痕跡と考えられる還元的炭素 (グラファイト) の塊は非常に小さく、その炭素同位体を測定するのは簡単ではない。そこで顕微ラマン分光分析法と高空間分解能の二次イオン質量分析計 (ナノシムス) を駆使することで、検出が可能になる分析法を確立し、地球および火星の岩石試料に応用することで、太陽系最古の生命の痕跡を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

まず顕微ラマン分光分析法を用いて微小領域 (1 μm 以下) の炭素の状態分析を行った。そのために試料は薄片あるいは厚片とし表面を研磨して準備した。まず光学顕微鏡を用いて、ナノシムス分析に十分な大きさのグラファイトを探した。その後、顕微ラマン分光分析法により、試料中の還元的炭素 (グラファイト) と酸化的炭素 (炭酸カルシウム鉱物) を識別し、炭素同位体比を測定する領域を選定した。見つかったグラファイトの大きさや形が様々なため、まず標準試料を用いてナノシムスによる分析法を確立した。その後、炭酸塩に含まれる酸化的炭素とグラファイトに含まれる還元的炭素の同位体分別から、炭酸固定に基づき生命の痕跡を調べた。

4. 研究成果

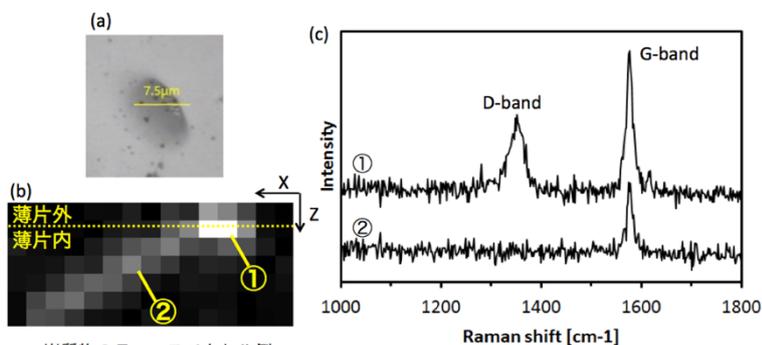
(1) ナノシムス測定用の試料の準備

太古代の地球試料は、Tashiro et al. (2017) と同じカナダ・ラブラドル地域に産する約 40 億年前の堆積岩を使用した。まず岩石の種類ごとに薄片を作成し、光学顕微鏡で観察してナノシムス分析に十分な大きさの還元的炭素を探した。火星隕石は約 40 億年前に形成された ALH84001 を使用し、樹脂に埋め込まれ表面を研磨されたものをそのまま分析に用いた。火星隕石では微細な炭酸塩粒 (10~50 μm) が散在することを確認した。

ナノシムス分析に向けて炭酸塩中の微量な還元的炭素を定量するため、多環芳香族炭化水素 (フェナントレンまたはペリレン) の濃度を段階的に変えて主成分の炭酸カルシウムと混合した標準試料を作成し、顕微ラマン分光分析を用いて検量線を作成した。その結果、多環芳香族炭化水素の濃度と炭素質物質に特有のバンドの高さは直線関係を示すことを確認した。さらに、合成した標準試料の一部はナノシムスで分析し、炭酸塩中に微量に含まれる有機物の炭素同位体比を分析する方法を検討した。

(3) 顕微ラマン分光分析法によるグラファイトの特定

顕微ラマン分光分析法とは光学顕微鏡とラマン分光分析法を組み合わせた装置であり、光学顕微鏡を用いて薄片試料内のグラファイトと思われる場所を特定し、ラマン分光分析法により炭素質の同定とその構造を特定した。薄片表面に露出したグラファイトのラマンスペクトルは、図 1 に示すように D バンドと G バンドのピーク強度比が本来のそれと異なることが知られている。



炭素質のラマンスペクトル例
 (a) 炭素質の反射顕微鏡写真 (黄線はマッピング測定の X 方向を示す)
 (b) G-band の XZ 分布図 (c) 炭素質のラマンスペクトル (① 薄片表面, ② 薄片内)

図 1. ラマンスペクトル

そのため、通常グラファイトのラマン分光分析では薄片内のものを分析するが、ナノシムスでは表面に出ているものしか分析できない。この問題を解決するため、マッピング分析を行い、グラファイトが薄片表面に出ているか評価した。

火星隕石も同様に1 μm 以下のスポット径で炭酸塩粒子の炭素の状態分析および平面方向の空間分布分析を行った。その結果、炭酸塩由来の酸化的炭素のバンドに加えて、炭素質物質に特有のDバンドとGバンドも検出されたため、炭酸塩粒子内に還元的な炭素も含まれることが分かった。また、還元的炭素が検出されない炭酸塩粒子も存在し、単一の炭酸塩粒子でも還元的炭素の分布には偏りがあったことから、還元的炭素は隕石中および炭酸塩粒子中で不均質に分布することがわかった。ナノシムス分析に十分なサイズの還元的な炭素を複数発見した。

(4) ナノシムスを用いた炭素同位体分析法の確立

顕微ラマン分光分析法により、図2に示すようないくつかのタイプの違うグラファイトが見つかった。大きさや形が異なり従来の方法では分析が難しいものがあり、まず分析法の確立から取りかかった。大きなものはスタンダードと同じやり方で、その内部の5 μm ×5 μm の領域を測ることで形が異なっても問題ないが、それより小さなものは分析領域を小さくするか、イオン像をとって数値解析する必要がある。まずスタンダードを用いて、分析領域を変えた時に炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 値)が変わらないかを確認した。その結果、領域が2 μm ×2 μm より小さくなると $\delta^{13}\text{C}$ 値が高い方にシフトすることがわかった。そのため、イオン像を取ってからグラファイトの部分のみのカウントを抜き出し $\delta^{13}\text{C}$ 値を計算する方法に変更した。スタンダードでイオン像を取り、いくつかの領域で $\delta^{13}\text{C}$ 値を計算したところ、従来の分析法と同じ値が得られることがわかり、イオン像を使って微小領域の $\delta^{13}\text{C}$ 値を求める方法を確立した。これにより数 μm サイズのグラファイトでも炭素同位体比が精度よく分析できるようになった。

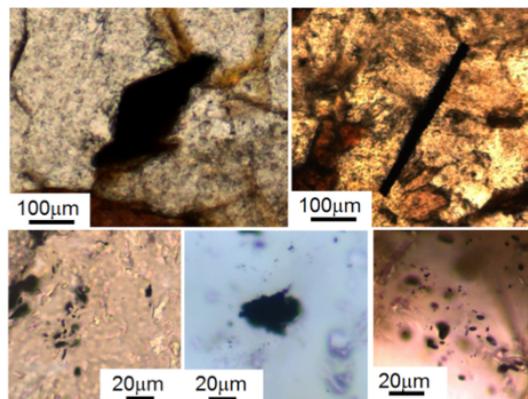


図 2. 見つかった還元的炭素

(5) ラブラドール堆積岩中のグラファイトの炭素同位体測定

分析した結果のうち、炭酸塩岩を分析した結果の一つを図3に示す。従来の安定同位体質量分析装置を用いて測定した全岩の還元的炭素の炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ 値は、Tashiro et al. (2017)で-9.9‰と報告されており、ナノシムスで分析した個々のグラファイトの $\delta^{13}\text{C}$ 値は全岩の値とほぼ一致した。このように炭酸塩岩の中にあるグラファイトであってもナノシムスで分析できることを確認した。炭酸塩岩ではない岩石中のグラファイトはさらに低い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示し、全体として見ると分析した炭素同位体比の値から個々のグラファイトは生物の痕跡と考えられる。このことから地球上では39.5億年より前に炭酸固定を行う生物活動があったとする我々の既往研究を支持する結果が得られた。

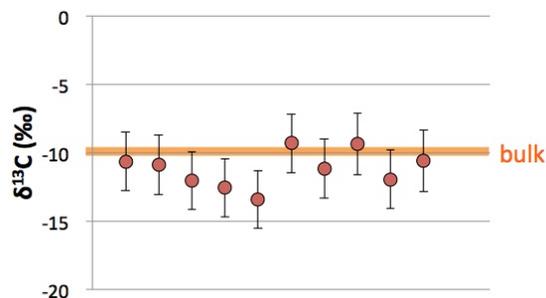


図 3. 個々の還元的炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値

(6) 火星隕石中のグラファイトの炭素同位体測定

分析した結果の一つを図4に示す。顕微ラマン分光分析で炭酸塩中のグラファイトを特定した後、ナノシムスにおいて炭素と窒素、それに二次電子のイメージを見ながら分析領域を決定した。周りが炭酸塩のため、グラファイトの領域を正確に決定する必要があり、さらに粒間のコンタミの影響を避ける必要があるため、CN像も併用した。分析の結果得られたグラファイトの $\delta^{13}\text{C}$ 値は+10~20‰となり、Romanek et al. (1994)により報告されている炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 値+41‰に比べると

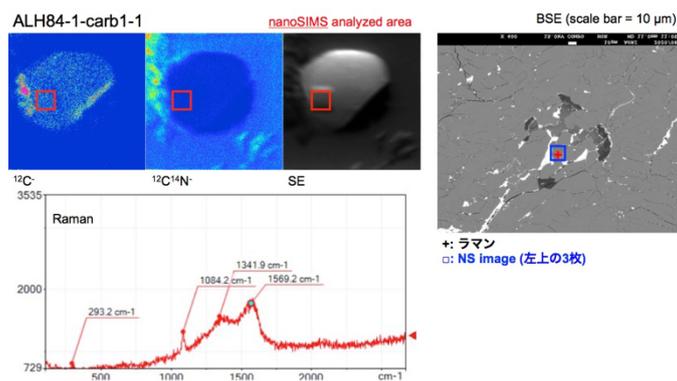


図 4. 火星隕石の分析例

20～30%低い値であることがわかった。このことから、火星隕石 ALH84001 に含まれるグラファイトも生物の痕跡である可能性がある。

本研究では顕微ラマン分光分析法とナノシムスを用いることで、地球最古の生命痕跡を再確認するとともに、約 40 億年前に形成された火星隕石 ALH84001 でも生命の痕跡を世界で初めて確認した。この手法は、ほとんど痕跡が残っていない初期生命の痕跡を探す上で強力なツールとなることが期待される。さらに、微小領域の炭素同位体分析を必要とする生命科学の分野でも応用が可能となるだろう。

<引用文献>

- ① Tashiro et al. (2017), *Nature*, 549, 516-518.
- ② McKay et al. (1996), *Science*, 273, 924-930.
- ③ Romanek et al. (1994), *Nature*, 372, 655-657.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Chung Chuan-Hsing, You Chen-Feng, Schopf James William, Takahata Naoto, Sano Yuji | 4. 巻 349 |
| 2. 論文標題 NanoSIMS U-Pb dating of fossil-associated apatite crystals from Ediacaran (~570 Ma) Doushantuo Formation | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Precambrian Research | 6. 最初と最後の頁 105564-105564 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2019.105564 | 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 Koike Mizuho, Sano Yuji, Takahata Naoto, Iizuka Tsuyoshi, Ono Haruka, Mikouchi Takashi | 4. 巻 549 |
| 2. 論文標題 Evidence for early asteroidal collisions prior to 4.15 Ga from basaltic eucrite phosphate U-Pb chronology | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters | 6. 最初と最後の頁 116497-116497 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116497 | 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 Zhongwu Lan, Sandra L. Kamo, Nick M.W. Roberts, Yuji Sano, Xian-Hua Li | 4. 巻 377 |
| 2. 論文標題 A Neoproterozoic (ca. 2500 Ma) age for jaspilite-carbonate BIF hosting purported micro-fossils from the Eoproterozoic (>3750 Ma) Nuvvuagittuq supracrustal belt (Quebec, Canada) | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Precambrian Research | 6. 最初と最後の頁 106728-1067 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2022.106728 | 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 Kento Motomura, Shoichi Kiyohara, Minoru Ikehara, Takashi Sano, Wouter Bleeker, Kentaro Tanaka, Tsubasa Miki, Yuji Sano | 4. 巻 359 |
| 2. 論文標題 Redox fluctuation and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ - $\delta^{34}\text{S}$ 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 106191-204 |
| 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 Kohei Fukuda, Hajime Hiyagon, Wataru Fujiya, Takanori Kagoshima, Keita Itano, Tsuyoshi Iizuka, Noriko T. Kita, Yuji Sano | 4. 巻 293 |
| 2. 論文標題 Irradiation origin of ¹⁰ Be in the solar nebula: Evidence from Li-Be-B and Al-Mg isotope systematics, and REE abundances of CAIs from Yamato-81020 C03.05 chondrite | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta | 6. 最初と最後の頁 187-204 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2020.10.011 | 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 Jian-Wei Lin, Chi-Yu Lee, Cheng-Hong Chen, Takenori Kato, Yuji Sano, Naoto Takahata | 4. 巻 218 |
| 2. 論文標題 Buchan type metamorphism in the Pingtan-Dongshan metamorphic belt, SE China: Evidence from combined EMP monazite and U-Pb zircon ages of mica schists | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences | 6. 最初と最後の頁 104891-908 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2021.104891 | 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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Sasaki K., Ishida A., Takahata N., Sano Y. and Kakegawa T. |
| 2. 発表標題 New morphotypes, cell-wall structures, and elemental distribution of the Gunflint microfossils |
| 3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 笹木晃平, 石田章純, 高畑直人, 佐野有司, 掛川武 |
| 2. 発表標題 New morphotypes, cell-wall structures, and elemental distribution of the Gunflint microfossils |
| 3. 学会等名 JpGU 2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 須藤克誉, 鹿児島涉悟, 高畑直人, 佐野有司, 澤木佑介, 小宮剛, David Bekaert, Michael Broadley, Bernard Marty |
| 2. 発表標題 カナダ・ラブラドル地方の堆積岩の年代測定 |
| 3. 学会等名 JpGU 2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊規須素子、田中健太郎、高畑直人、小宮剛、佐野有司、高井研 |
| 2. 発表標題 カナダ・ラブラドル地域から産出した初期太古代堆積岩中のグラファイトの安定炭素同位体比分析の予察的結果 |
| 3. 学会等名 地質学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Sumiya, M. Koike, K. Onishi, A. Kurokawa, N. Takahata, H. Asamura, and Y. Sano |
| 2. 発表標題 U-Pb DATING OF ZIRCON AND PHOSPHATE MINERALS IN A HIGHLY-SHOCKED EUCRITE NORTHWEST AFRICA 13166 |
| 3. 学会等名 LPSC (国際学会) |
| 4. 発表年 2022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 | 伊規須 素子 (Igisu Motoko) (00518285) | 国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(超先鋭研究プログラム)・特別研究員 (RPD) (82706) | |

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 | 鹿見島 涉悟 (Kagoshima Takanori) (70772284) | 富山大学・学術研究部理学系・特命助教 (13201) | |
| 研究分担者 | 高畑 直人 (Takahata Naoto) (90345059) | 東京大学・大気海洋研究所・助教 (12601) | |

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0件

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 | | |
|----------|----------|-------------|--|
| | | | |
| 中国 | 中国科学院 | 地質学地球物理学研究所 | |
| その他の国・地域 | 台湾・中央研究院 | 地球科学研究所 | |