

地球最古の海洋堆積物から生命の痕跡を発見！ 約 40 億年前の微生物による炭酸固定の証拠

1. 発表者

- 田代 貴志 (研究時：東京大学大学院理学系研究科 修士課程学生)
石田 章純 (研究時：東京大学大気海洋研究所 特任研究員
／現：東北大学高度教養教育・学生支援機構 助教)
堀 真子 (研究時：東京大学大気海洋研究所 特任研究員
／現：大阪教育大学自然教育専攻 准教授)
伊規須 素子 (日本学術振興会特別研究員 RPD 海洋研究開発機構深海・地殻内生物圏
研究分野)
小池 みずほ (東京大学大学院理学系研究科 博士課程学生)
Pauline Méjean (研究当時：東京大学大気海洋研究所 特任研究員／現：フランス原子力機構)
高畑 直人 (東京大学大気海洋研究所 助教)
佐野 有司 (東京大学大気海洋研究所 教授)
小宮 剛 (東京大学大学院総合文化研究科 准教授)

2. 発表のポイント

- ◆カナダ・ラブラドル・サグレック岩体に産する約 40 億年前の堆積岩中にグラファイトを発見した。
- ◆グラファイトの炭素同位体比は変成度と正の相関や有機炭素量とは負の相関をもち、より低い値ほど初生的であることを示す。
- ◆グラファイトの炭素同位体比の最小値は-28.2 パーミルに達し、炭酸塩との同位体差は 25.6 パーミル以上となり、それが生物起源であることを強く示唆する。

3. 発表概要

地球上に生命が存在した証拠をどこまで古い年代に遡ることができるかという試みは、生命の起源を推定する上で最も直接的かつ重要な手法である。東京大学の総合文化研究科小宮准教授らは、39.5 億年前の年代を持つサグレック岩体のヌリアック表成岩類を調査し、複数の堆積岩中に微小なグラファイト(注 1)の粒子が存在することを発見した。これらのグラファイトは堆積構造と整合的に産出しており、当時の海底面に降り積もったものである。大気海洋研究所佐野教授らは、グラファイトと炭酸塩鉱物の炭素同位体比(以下、 $\delta^{13}\text{C}$ 値、(注 2))を気体用質量分析計および二次元高分解能二次イオン質量分析計(ナノ・シムス(注 3))を用いて測定し、発見されたグラファイトが、還元的アセチル-CoA 経路やカルビンサイクルといった炭素固定経路を経て、生命によって形成されたことを明らかにした。さらに、堆積岩に伴う玄武岩質変成岩の鉱物組み合わせやグラファイトを含む堆積岩中の変成鉱物の化学組成から変成温度を推定し、これがグラファイトのラマン分光分析(注 4)による結晶化度と矛盾しないことを検証した。これら詳細な地質学、変成岩岩石学や鉱物学的研究結果と、炭酸塩やグラファイトの同位体地球化学的分析結果を統合し、約 40 億年前の海洋で生命活動が行われていたと結論づけた。この結果は世界最古の生命の痕跡を従来の推定より 1.5 億年以上遡らせるものである。

4. 発表内容

[背景]

生命がいつ、どこで誕生したのかを解明することは自然科学のみならず、人が持つもともと本質的な問題であるが、その解明は未だ道半ばである。特に、冥王代(注5)のみならず、原太古代(注6)の岩石や地質体は極めて稀であるため、直接過去の生命の痕跡を探索するのは極めて難しいとされてきた。現在知られている最古の生命の痕跡は、西グリーンランド南部・イスア地域の堆積岩中から発見された低い $\delta^{13}\text{C}$ 値を持つグラファイトで、37~38 億年前のものとされる。それより古い 37.5 億年前のカナダ・ヌブアギツック地域や 38.3 億年のグリーンランド・アキリア島などからもグラファイトが報告されているが、生物起源であることが疑われており、地球初期の岩石から生命の痕跡を探ることの難しさを物語っている(図1)。

近年、小宮らによって、カナダ・ラブラドル地域に産出するヌリアック表成岩帯の詳細な地質調査およびジルコンのウラン鉛年代測定(注7)が行われ、この地域に少なくとも 39.5 億年前の堆積層が存在することが報告された。本研究ではこの堆積層を対象に、岩石に残存するグラファイトの同位体地球化学的分析を行うことで、地球最古の生命活動の痕跡を探索した。

[研究内容]

東京大学の総合文化研究科小宮准教授らは 2011 年以来、カナダ・ラブラドル地域のサグレック岩体に産出する 39 億 5 千万年前のヌリアック表成岩帯で詳細な地質調査を行ってきた。本研究ではサグレック岩体内の 4 ヶ所の Nulliak 表成岩帯で採取した合計 156 の泥質岩、礫岩、炭酸塩岩と炭酸塩岩中のチャートノジュールとチャート中のグラファイトの産状の記載とその同位体組成分析を行った。(図2)。グラファイトはチャート以外の 54 試料から発見された。また、変成度が高いサグレック岩体西部の岩石には、岩相によらず全ての試料でグラファイトの存在を確認することができなかった。一部の泥質岩は堆積構造を保存しており、グラファイトは数十~数百マイクロメートル(注8)の大きさで、その構造に沿うように鉱物の粒界あるいは鉱物中に存在する(図3)。図4は岩石が受けた変成温度とグラファイトの結晶化度の関係を示す。各岩石試料が経験した変成温度は、変成鉱物の鉱物組み合わせやザクロ石-黒雲母地質温度計(注9)によって見積もられた。その結果、分析試料は 580~800°C の変成作用を受けたことがわかった(図4)。一方で、グラファイトの顕微ラマン分光分析法による結晶化温度の推定でも、536°C 以上の温度を受けたことが示され、岩石の変成温度と整合的であることがわかった。その結果は、グラファイトが変成作用以前に存在していたことを示す。さらに、調査地域の複数の花崗岩質貫入岩の年代分布や地質学的証拠から、グラファイトが 39.5 億年前の堆積以降に混入したとは考えられないことが示唆された。

大気海洋研究所佐野教授らの分析によると、これらの岩石の有機炭素(TOC, 注9)の含有量は 0.02~0.62%、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は -28.2~-11‰であった。一方、炭酸塩岩の無機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -3.8~-2.6‰であった(図5B)。炭酸塩岩の無機炭素同位体値は一般に後の変質によって低くなることから、当時の海洋中の炭酸イオンの $\delta^{13}\text{C}$ 値は最低でも -2.6‰であったと考えられる。また、泥質岩中の炭素同位体値は TOC 量と負の相関、変成度とは正の相関が見られた(図5B, C)。そのことは変成作用に伴う脱ガスによって、有機炭素同位体値が高くなったことを示し、堆積時の初生炭素同位体値は -28.2‰以下であったこと示唆する。結果として、海洋の無機炭酸イオンと有機炭素の炭素同位体値の差(炭素同位体分別係数)は 25.6‰以上となることから、その有機炭素は還元的アセチル-CoA 経路やカルビン回路等の生命による代謝分別経路を経て生じたと考えられる(図5D)。

本研究により、約 40 億年前の海洋で生命活動が行われていた地球化学的な証拠が世界で初めて示された。

[今後の課題]

本研究では世界最古の堆積岩から、生命活動の痕跡を見出すことに成功した。当時の海洋に生息していた微生物種については今後、窒素や鉄等の生元素同位体組成や金属結合生体分子に由来する生元素の分布など、さらなる分析評価を重ねることで、その特定につながることを期待される。本研究の手法は他の太古代試料や火星起源の隕石にも適用可能であり、初期生命の進化史、ひいては生命起源の解明に貢献する極めて重要な成果である。

5. 発表雑誌

雑誌名：Nature (2017年9月28日掲載)

論文タイトル：Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada

著者：T. Tashiro, A. Ishida, M. Hori, M. Igisu, M. Koike, P. Méjean, N. Takahata, Y. Sano, T. Komiya

DOI 番号：10.1038/nature24019

6. 問い合わせ先

東京大学大学院総合文化研究科

准教授 小宮 剛 (こみや つよし)

E-mail：komiya@ea.c.u-tokyo.ac.jp

TEL：03-5454-660

東京大学大気海洋研究所

教授 佐野 有司 (さの ゆうじ)

E-mail：ysano@aori.u-tokyo.ac.jp

TEL：04-7136-6100

7. 用語解説

注1) グラファイト：

ここでは堆積岩中に見られる炭素質の微粒子を指す。元々は有機物で水素や酸素など他の軽元素も含んでいたと考えられるが、変成作用に伴う脱ガスによって炭素だけが岩石中に残存した。

注2) 炭素同位体比：

^{12}C に対する ^{13}C の比率 (ともに安定同位体)。生物の代謝による同位体分別によって質量の小さい ^{12}C 同位体が優先的に同化されることが知られている。したがって、炭素同位体比を測定することで生物起源と非生物起源の判定ができる。この安定同位体元素の比率を測定することができるのが質量同位体比分析計。

注3) 二次元高分解能二次イオン質量分析計 (ナノ・シムス)：

試料表面に細く絞ったイオン (一次イオン) のビームを照射し、その衝撃で試料から飛び出してくるイオン (二次イオン) を分析することで試料の微量な元素組成や同位体組成を測定する装置。「ナノ・シムス」はその名の通り、一次イオンを細く絞り、ナノメートル (1000分の1ミリメートルよりも小さいサイズ) レベルの極めて微小な領域を分析することができる。

注4) ラマン分光分析：

入射光の波長と異なる波長の散乱光 (ラマン散乱光) を検出することで物質の分子構造や結晶構造を特定する分析。グラファイトの場合、グラファイトの結晶構造に起因する G バンドと、結晶の欠陥や不規則配列に起因する D バンドが見られ、これらの比を計算することで結晶化度やグラファイトが経験した変成温度を推定することができる。

注5) 冥王代 (Hadean)：

地球誕生から 40.3 億年前までの地質時代の名称。現存する最古の地質体・岩石であるアカスタ片麻岩の形成年代（40.3 億年前）以前の時代をさす。

注 6) 原太古代 (Eoarchean) :

太古代 (25 億年から 40.3 億年前) のうち、初期 (40.3-36 億年前) を示す地質時代の名称。

注 7) ウラン-鉛年代測定 :

ウランの原子核放射壊変による鉛同位体比の変化を利用した年代測定法。同じ親元素 (ウラン) から 2 つの壊変経路をたどり同じ娘元素 (鉛) に壊変するという特徴から、2 つの年代が求まり、精度良く年代を決定できる。ジルコンはウランが濃集しやすく初生的な鉛の存在度が低い上に、物理化学的に安定であるためこの年代測定法に適した鉱物である。

注 8) マイクロメートル :

1 マイクロメートルは 1 ミリメートルの 1000 分の 1。

注 9) ザクロ石-黒雲母地質温度計 :

ザクロ石と黒雲母間の鉄とマグネシウムの分配係数が変成温度と関連することを利用して、岩石試料が経験した変成温度を推定する方法。

注 10) TOC :

全有機炭素含有量 (Total Organic Carbon) の略語。岩石試料全量に対する有機炭素 (この研究ではグラファイト) の質量パーセントで表される。

8. 添付資料 :

図 1. 太古代における生命の痕跡に関する研究概要

直接、生命の形状を残す化石は約 35 億年前以降の地質体に限られ、それ以前の生命の証拠は生痕化石または有機炭素の炭素同位体値に基づく。現在知られている最古の生命の証拠は 38 億年前のイスア表成岩帯のグラファイトとされる。

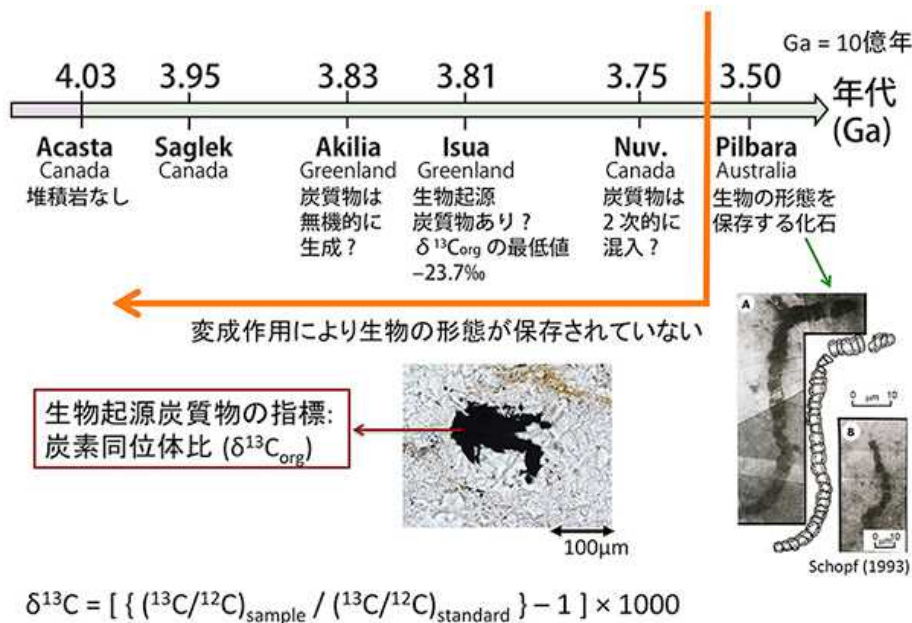


図2. サグレック岩体の位置と本研究の調査地域

(a) カナダ・ラブラドル・サグレック岩体の位置、(b) St. John's Harbour 南側地域の地質図と試料採取地、(c) Big Island 地域の地質図と試料採取地点、(d) Shuldham Island の西海岸地域の地質図と試料採取地点、(e) St. John's Harbour 東側地域の地質図と試料採取地点。

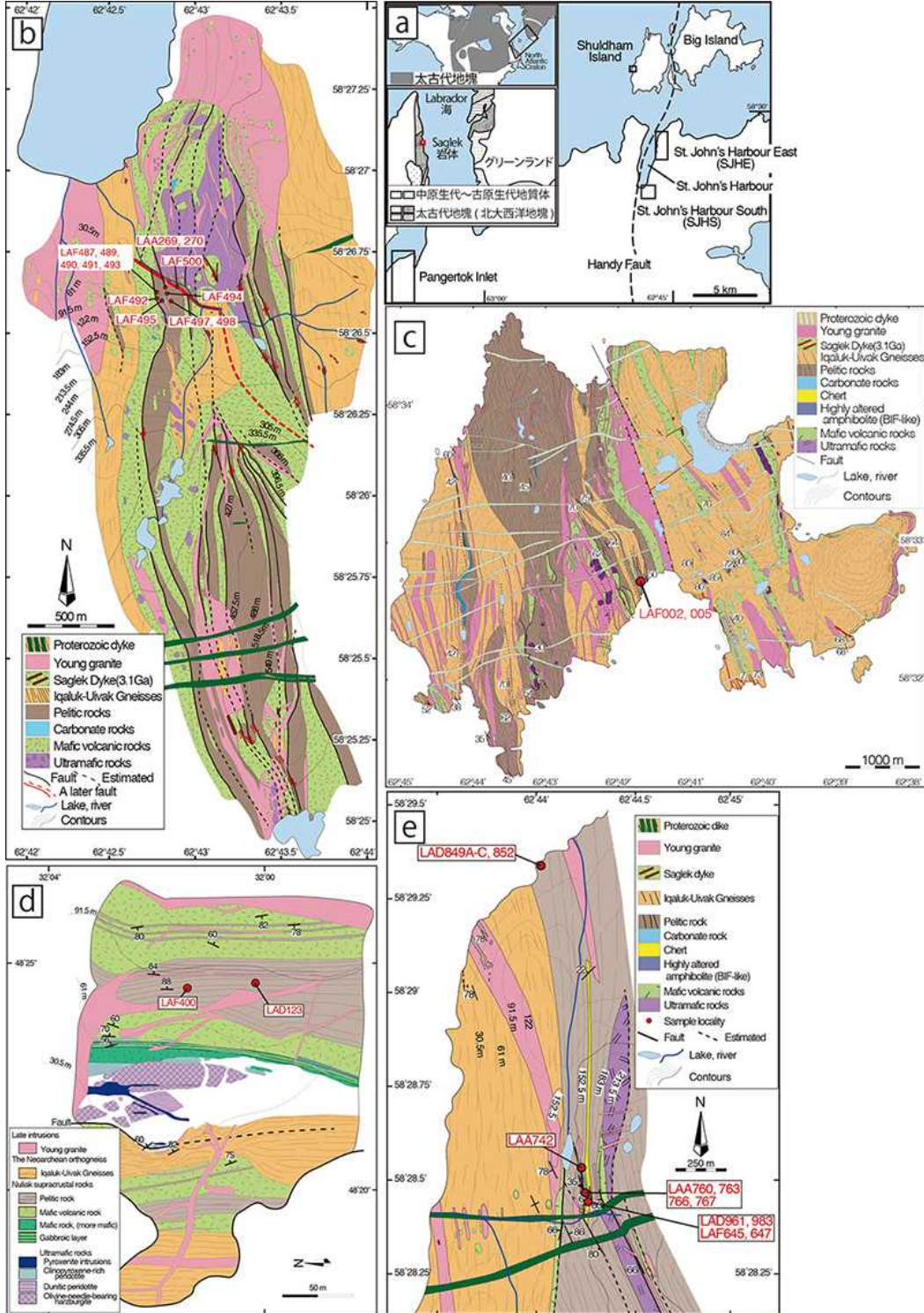


図3. ヌリアック表成岩帯に見られる変成した堆積岩。a: 泥質岩の露頭、b: 礫岩の露頭、c: 炭酸塩岩の露頭。チャートノジュールが見られる、d: チャートの露頭、e と f: 泥質岩の薄片写真。黒い粒がグラファイト、g: 炭酸塩岩の薄片写真、h: 炭酸塩岩中のグラファイト。

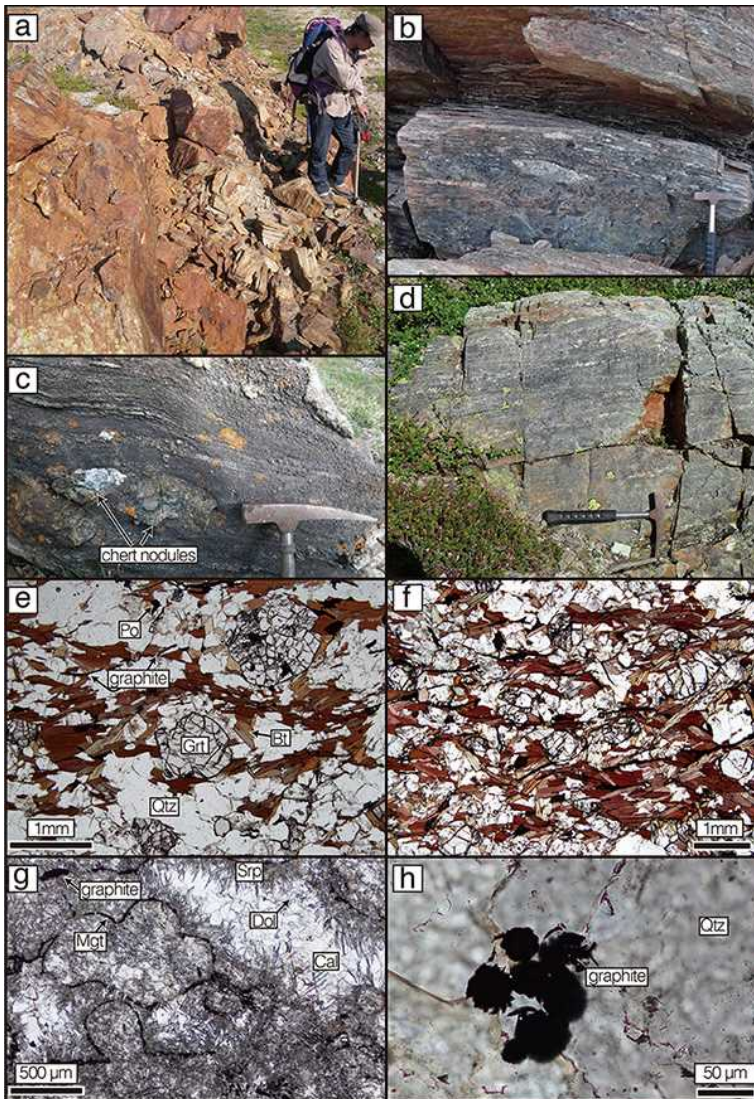


図4. ラマン分光分析から推定されたグラファイトの結晶化度と泥質岩中のガーネットと黒雲母の化学組成から推定された変成温度の関係。

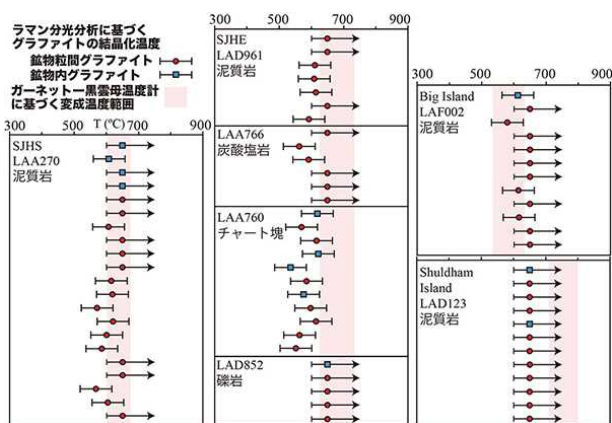


図5. (A) ヌリアック表成岩類中のグラファイトの産状。(B) ヌリアック表成岩類の泥質岩、礫岩、炭酸塩岩、チャート塊中の有機炭素の含有量と炭素同位体値、炭酸塩岩の炭酸塩の炭素同位体値の関係。有機炭素の炭素同位体値の最低値は-28.2‰で、炭素同位体値は TOC 量と負の相関が見られる。炭酸塩岩の炭素同位体値の最大値は-2.6‰。(C) 泥質岩中の有機炭素の含有量、炭素同位体値と変成度の関係。炭素同位体値は変成度とは正の相関、含有量とは負の相関が見られる。(D) 無機炭素の同位体値の範囲（黒や青の棒線）と現生生命の炭素固定回路と炭素同位体値の関係（赤の棒線）。

