

## グリーンランドで発見された 最古の生物活動の痕跡

掛川 武  
Kakegawa Takeshi

### 1. はじめに

太陽系において地球のみに生命が存在する。「なぜ地球に生命が存在するのか?」「いつから生命は存在してきたのか?」という問いに対して明確な回答は得られていない。太古の地球で形成された岩石のほとんどは消失してしまっている。その一方で太古の石が部分的に残され露出している場所が世界中には数か所ある(図1)<sup>1)</sup>。特にグリーンランドのイスアと呼ばれる地域には今から38億年前に形成された岩石が大規模に露出している。イスア地域の岩石は38億年前の地球の姿を記録したタイムカプセルである。このイスア地域の岩石に38億年

前の地球の生命の痕跡が残されているかどうか、研究者の間での最大の関心事であった。

1999年にコペンハーゲン大学のM.T. ローゼン博士は、イスア地域の岩石に38億年前に活動していた生物の痕跡がグラファイトとして残されていると報告した<sup>2)</sup>。これが最古の生命の痕跡と考えられるようになってきた。ローゼン博士の報告後、同じイスア地域から38億年前の非生物的グラファイトが複数箇所に分布していることが分かった<sup>3)</sup>。その一方で“生物由来”グラファイト(黒鉛)は1か所だけの報告であった。また“生物由来”と“非生物由来”のグラファイトには共通点が多く、“生物



図1 太古の地層の分布  
グリーンランドのイスア地域には世界最古の38億年前の地層が分布している

由来”とする確固たる証拠が乏しい状況であった。そのために、38億年前の地球に本当に生物がいたのか懐疑的意見が生まれ、論争が展開されてきた。

“生物由来”の炭素を含んだ岩石が、もっとたくさん見付かれれば、38億年前の地球に生物が繁茂していた証拠になり得る。さらに“非生物由来”炭素との違いを明確化させれば、38億年前の地球に生物活動があったことが確信できる。そう考えて、東北大学の研究チームがグリーンランドのイスア地域の調査を行った。その結果、生物由来の炭素を含んだ岩石を新たに発見し、*Nature Geoscience* 誌で発表した<sup>4)</sup>。この場を借りて、その報告の背景と意義について解説する。

## 2. 炭素を含んだ地層の発見

イスア地域はグリーンランド西部、海岸から100 kmほど内陸に入った場所に位置し、東端は氷河で覆われている。イスアとは、グリーンランド語で“地が消え果る場所”という意味がある。そこから先は大地が大陸氷河に覆われ見えなくなる地域のことを指す。イスア地域を構成する主な岩石は38億年前の海底に噴出した溶岩である。この海底溶岩の上には泥も積もったとされる。生命の痕跡を探す場合は、この“海底の泥”がターゲットになる。海の中で生きていた生物の死骸が、泥に埋もれて残されるのが海底の泥だからである。

しかし、38億年前の溶岩や泥は、その後のプレートテクトニクスによって押し潰されたり、500℃を超える高温にさらされ、別の岩石に変わってしまっているケースがほとんどである<sup>5)</sup>。そのために広大なイスア地域の中で“海底の泥”の姿を保った岩石を探すのも一仕事である。そこで、東北大チームは38億年前の“海底の泥”探査を2002年からイスア地域で集中的に行った。その結果、溶岩に挟まれた“海底の泥”を2004年に発見した(図2)。これらは奇跡的に38億年前の海底に積もった組織を



図2 今回発見した炭素（グラファイト）に富む岩石

保存した岩石であった。現地で岩石の詳細な調査や観察を行い、その後、持ち帰った試料に対して化学組成分析も行った。その結果、今回発見した“海底の泥”は、現在の海底に堆積する泥と、同じ化学組成を有していることが分かった。これによって38億年前の“海底の泥”であることが証明された。これだけでも大発見であった。同時にこの泥が黒色であることに気が付いた。分析の結果、黒色の原因がグラファイトを含んでいるためであることが分かった。しかもグラファイトが、後から入り込んだのでなく海の底に積もった組織も有していた。

## 3. グラファイト結晶の形と内部組織

今回発見された岩石中のグラファイトの元になった炭素質物質が、38億年の“生物由来”炭素か“非生物由来”炭素なのか判定する必要があった。そこで本研究で注目したのがグラファイト結晶の炭素の並び方の組織や結晶形態である。グラファイトは岩石をフッ酸で溶かすことによって取り出すことができる。これを走査型及び透過型電子顕微鏡で観察することで、“生物”か“非生物”の違いが明確化できるのではと考えた。図3に非生物的にグラファイトが形成される例と生物由来の炭素質物質がグラファイト化する過程とを比較した。

イスア地域の岩石は、一旦海底で形成された

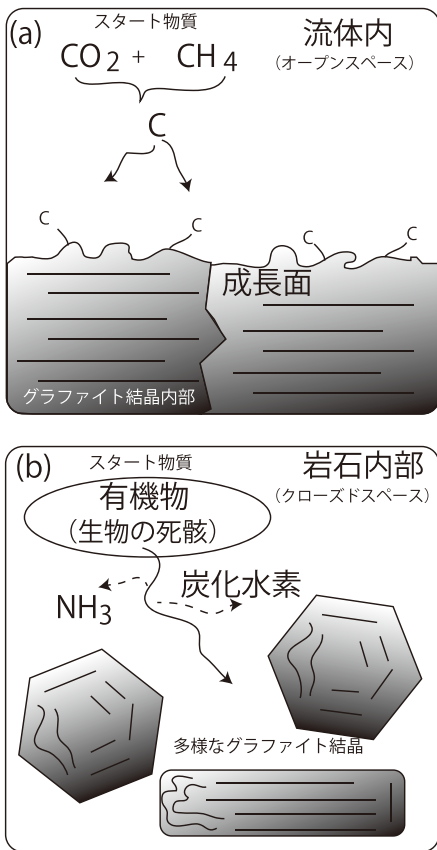


図3 異なったプロセスでのグラファイト結晶の成長メカニズム  
 (a) 無機的に温泉水から沈殿する場合、(b) 生物由来の有機分子が岩石中でグラファイト化する場合

後に、地球深くまで埋没した。38億年前の海底にあった泥が、1億年かけて地下20km近くまで埋没したと考えられている。地下20kmの地中深くでも温泉水(熱水)の活動がある。地球上には $CO_2$ や $CH_4$ のいずれかに富んだ温泉水があることが知られている。この2種類の温泉が混合することで、グラファイトが無機的に沈殿することが知られている。温泉水の通り道は“オープンスペース”で、道の側面から内側にかけてグラファイトが成長していく。成長面では、新たな炭素が順次加わり、グラフェンが不規則に並ぶことが予想されている。しかし成長が促進されると(図3(a))のグラファイト

結晶内部) グラフェンの配列は規則的になり、グラファイトの結晶度を増す。温泉からグラファイトが沈殿する条件が一樣なので、個々のグラファイト結晶の外形も一樣になる。

その一方で、生物由来の有機分子がグラファイト化する時は図3(a)とは異なった特徴を有するようになる。生物の体を作る有機分子は炭素以外にも水素、窒素などの様々な元素を含む。海水中で生きていた生物が死滅し、海底の泥に埋没した後、数万~数百万年という時間経過の中で、泥の温度、圧力が上昇する。すると、生物の死骸の分解が進みアンモニアや炭化水素が選択的に抜けていく。その過程で生物の死骸のグラファイト化が進行する。おおよそ海底からの深さ5kmで200℃を超えるような環境になるとグラファイト化が促進されると考えられている<sup>5)</sup>。もともと不純物がある有機分子のグラファイト化が起こると結晶形態に多様性が生まれる。さらに、グラファイト化する過程で、様々な不純物が残され、グラフェンの並びにも乱れを生じさせ、それが結晶内部に残される(図3(b))。すなわち、これらの特徴が見られれば、生物由来の炭素質物質と断定できるわけである。本研究では、グリーンランドから持ち帰った複数試料の電子顕微鏡観察を行った。同時に同じ地域に産する地下温泉由来グラファイト結晶の観察も行った。その結果、38億年前の“海底の泥”に含まれるグラファイトのみ図3(b)に示した特徴を有することが分かった。38億年前の地下温泉由来のグラファイトは図3(a)で予想された特徴を有し、生物由来のグラファイトとは明確な違いを有した。

#### 4. 炭素の安定同位体、生物、非生物の境

一般的にグラファイトの起源を調べる時に、炭素安定同位体組成比( $^{12}C$ と $^{13}C$ の比率)が用いられる。測定試料の炭素安定同位体組成比は、国際標準試料で規格化され $\delta^{13}C$ を用いて表現される。 $\delta^{13}C$ は $(\frac{^{13}C}{^{12}C})_{試料} / (\frac{^{13}C}{^{12}C})_{標準試料} - 1) \times 1000$ と定義される。単位は‰(パーミ

ル) が用いられる。この炭素同位体組成を測定するためには、岩石から取り出されたグラファイトを数 mg, 秤量する。これを電気オープンで燃焼させガス化し, 質量分析計で分析する。基本的に試料中の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ を測定するが, この比は PDB\* と呼ばれる標準試料の値で規格化され  $\delta^{13}\text{C}$  値になる。図 4 に, 今回分析したグラファイトの炭素安定同位体の測定結果の例を示す。岩石中グラファイトの  $\delta^{13}\text{C}$  値は  $-24 \sim -12\%$  の組成を有する。

天然試料の炭素同位体の特徴に関しては非常によく研究されてきている。特に生物由来の炭素と非生物由来の炭素では, 炭素同位体組成に大きな違いが生じることが知られている。特に生物由来の炭素は  $^{12}\text{C}$  がより多く濃集し  $\delta^{13}\text{C}$  値がよりマイナスの値になる<sup>5)</sup>。図 3 (a) で示した非生物プロセスでグラファイトが形成された場合, グラファイトと  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  の間に同位体平衡が成り立つ。そのときに  $\delta^{13}\text{C}$  値は  $-16\%$  以上の値となる (図 4)。よほど想定外のことが起こらない限り,  $-16\%$  以下の値は無機的なプロセスでは持てない。今回の研究での分析値の平均値は  $-18\%$  であり, さらに図 4 で示した最低値は  $-18\%$  よりも低い値を示している。これら  $-18\%$  よりも低い値は現世の植物性プランクトン由来の炭素と非常に似た組成である。逆に生物由来の炭素を起源としない限り, この同位体組成を説明することは難しい。

### 5. まとめ

38 億年前の“海底の泥”の発見, その炭素同位体組成の特徴, 電子顕微鏡下でのグラファイトの特徴を総合すると, 今回発見したグラファイトは, 38 億年前の生物由来の有機分子

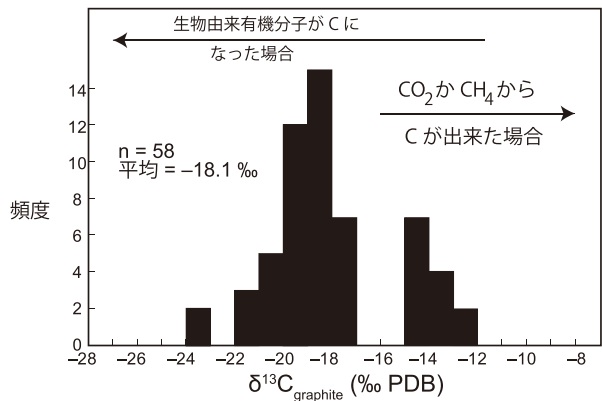


図 4 研究に用いたグラファイトの炭素安定同位体組成  
無機的にグラファイトが形成された場合,  $-16\%$  よりも大きな値を持つ。それよりも小さな値は生物が  $^{12}\text{C}$  を濃集させた値と解釈される

がグラファイト化したものと結論付けられる。すなわち 38 億年前まではこの地球に生物が繁茂していたということになる。最初の生命体は, 38 億年よりも前に生まれたことになる。さらに将来, 火星に生物の痕跡を探す時に, 今回用いたのと同じような研究手法が適用できると考える。

### 【謝辞】

本研究は東北大学大学院理学研究科博士学生 (当時) の大友陽子さんの博士論文の課題として行われた。JSPS の研究費を用いて行われた (科研費番号 24403013)。

### 参考文献

- 1) 大谷栄治, 掛川武, 地球・生命—その起源と進化, 共立出版 (2005)
- 2) Rosing, M.T., *Science*, **283**, 674-676 (1999)
- 3) Van Zuilen, M.A., *Nature*, **418**, 627-630 (2002)
- 4) Ohtomo Y., *Nature Geoscience*, **7**, 25-28 (2014)
- 5) 掛川武, 海保邦夫, 地球と生命, 共立出版 (2011)

(東北大学大学院理学研究科地学専攻)

\* PDB: Pee Dee Belemnite. 米国サウスカロライナ州 Pee Dee から産出するベレムナイト (白亜紀末に絶滅した軟体動物門・頭足綱の一分類)。