

論文内容の要旨

Geochemistry of Archean surface environment

[太古代表層環境の地球化学的研究]

西澤 学

太古代(25億年以前)の表層環境がどのようなものであったかを解読することは地球科学の第一級のテーマであり大気海洋や生命の共進化を考察する上できわめて重要である。太古代表層での生物地球化学物質循環は当時の大気の化学組成や同位体組成に反映されたと予想され、大気の情報在地質試料から読み取ることが重要となる。また地球に生命が誕生した時期を特定することは表層での諸元素の循環過程の進化を考察する上できわめて重要である。上の2つの目的を達成するため本研究では太古代海底熱水系の痕跡と考えられる試料(35億年前:西オーストラリア・ピルバラ地塊・ノースポール地方)と太古代初期の堆積岩試料(38億年前:西グリーンランド・イスア地方)を東京工業大学丸山教授から提供していただき、流体包有物や岩石の地球化学分析を行った。35億年より古い堆積岩のなかで比較的変成度が低い岩石は上述の地域にあり初期地球環境の解読のうえで最適である。また本研究では流体包有物や岩石に微量にしか存在しないためこれまで報告例が限られていた生物必須元素の窒素に着目し、静作動型質量分析計を用いた極微量(サブナノモル)窒素の同位体測定法を用いることで、地球初期の窒素循環過程に制約を与え、また原始生命の痕跡と考えられる物質を検出した。以下、それぞれについての研究成果を報告する。

I. 西グリーンランド・イスア地方の38億年前の堆積岩を使った初期生命痕跡の探査

西グリーンランドには38億年前の堆積岩が存在し、地球最古の生命痕跡の発見を目的とする研究が多くの研究者によって行われてきた。すなわち全岩試料の酸処理で取り出した炭質物の炭素同位比を測定し、炭質物の起源が初期生命の合成した有機炭素であるか否かが検討されてきた。しかし、この地域の岩石は複数回の変成、変質を経験しているため岩石の識別が難しく従来堆積岩だと考えられていた岩

石の多くが変質を受けた火成岩である可能性が近年指摘された。さらに 2 次的に混入した有機物が岩石中の結晶粒界に相当量あることが徹底的な電子顕微鏡観察により近年指摘された。その結果、分析した岩石の起源や 2 次的な有機物の影響が十分考慮されていなかった従来の研究の結論はその信頼性が低下した。以上を踏まえ本研究ではイスア地域の中で最も変成度が低い地域から採取された石英と磁鉄からなる鉍縞状鉄鉍岩 (BIF; 堆積岩) を試料とした。そして段階加熱法を用いて、試料の中から一次的な炭素・窒素同位体比を二次的な炭素・窒素同位体比と分離して測定した。そして一次的な炭素・窒素同位体比が有機物の炭素・窒素同位体比と調和的であるかを初めて判定した。その結果、高い温度段階 (1000 - 1200 度) で太古代初期のケロジェンと調和的な炭素・窒素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}=-30\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}=-3\text{‰}$) が初めて検出された。そして BIF を構成する各種鉍物のクラッキング温度を比較することで、この高温炭素・高温窒素は磁鉄鉍の結晶内に存在したと推定された。また BIF の磁鉄鉍は結成時に晶出したと考えられるため、高温炭素・高温窒素は一次的であると推定された。窒素は炭素と同様に生物必須元素であるので岩石中での窒素の存在を示すことは初期生命探査において重要であることは以前から指摘されていた。しかしケロジェンの窒素は炭素に比べ変成によって損失しやすいため、熱耐性の低いサイト (粒界や石英結晶内など) に存在する炭質物を主に分析していた従来の研究は窒素の存在を示すことができなかった。一方段階過熱法を用いた本研究によって、熱耐性は高いが不透明鉍物であるため (内包されたケロジェンが認識されず) 従来見過ごされてきた磁鉄鉍の中に窒素をよく保存したケロジェンが存在することが初めて示唆された。上述したように窒素も炭素と同様に生物必須元素であるので、本研究で発見された一次的な高温炭素・高温窒素は初期生物起源である可能性がある。また同じ BIF に含まれるアパタイトの REE パターンを測定したところ、BIF は海底熱水系付近で堆積した可能性が示唆された。以上をまとめると、初期生命が海底熱水系で誕生したという従来の仮説と調和的な化学的情報を 38 億年前の BIF から発見した点で本研究は独創的である。

II. 西オーストラリア・ノースポール地方の太古代熱水系試料の地球化学

地球大気中の窒素の同位体比がどのように変化してきたかを知ることは各時代のケロジェン中の窒素同位体比を解釈する基盤となり、生物地球化学的窒素循環の変遷を解明するうえで重要である。特に太古代のケロジェン中の窒素同位体比は現在とは大きく異なる値を持つものがあり、当時の窒素循環を解読する上で太古代の大気窒素の同位体比の情報は欠かせない。しかしその値についてはいまだ定説がない。西オーストラリア・ノースポール地方には 35 億年前の海底熱水脈の痕跡と考えられる石英脈が玄武岩質緑色岩に多数貫入している (Isozaki et al., 1997)。この石英脈と同時期に形成されたと推定されるメノウ脈には流体包有物が大量に保存されている。この流体包有物は当時の海水を保存していると予想され、流体包有物に溶存した窒素の同位体比から当時の大気中に存在した窒素の同位体比を推定できる可能性がある。しかし石英脈の形成年代はこれまで放射年代測定法で決定されてこなかった。そこで本研究では 1、石英脈の中に存在するアパタイトの U-Pb 年代を測定し、石英脈と流体包有物の年代を推定した。その結果をもとに流体包有物の起源を推定し、2、真空破砕法を用いて流体包有物中の窒素やアルゴンの同位体比や元素比を測定して、端成分として含まれる海水溶解大気窒素の同位体比を推定した。

II-1 アパタイトの年代測定

石英脈中のアパタイトには硫化物と連晶をなすものや硫化物を包有するものが観察され、これらが脈中で晶出したことが示唆された。これはアパタイトの年代から石英脈の年代が推定可能であることを示す。アパタイトは直径約 10 μm と微小で鉱物分離による回収は困難であったので、本研究では薄片試料の中のアパタイト 1 粒 1 粒に対して 2 次イオン質量分析計 (SIMS) による局所 U-Pb 測定を行った。また同様の手法でアパタイトの希土類元素 (REE) 存在度のパターンを測定し、アパタイトの起源について化学的に考察した。アパタイトの REE パターンは火成岩起源のアパタイトのそれと明らかに異なり、アパタイトが石英脈中で晶出したことが産状とは独立に推定された。アパタイトの Pb-Pb、U-Pb 年代は誤差範囲内で一致し $3.20 \pm 0.15 \text{ Ga}$ ($\text{Ga} = 10$ 億年前) であった。石英脈を産するこの地域は 32 億年前に変成を被ったことがこの地域の岩石記録から示唆されており、アパタイトの年代と調和的である。ここで緑色岩の鉱物組み合わせから見積もられた石英脈の変成温度は 300~400 °C であり、その上限値はアパタイトの U-Pb 閉鎖温度 (380~410 °C) と同程度であった。したがって 3.2 Ga はアパタイトが晶出した年代であるのか、アパタイトの U-Pb 系がリセットした年代であるのかを特定することはできなかった。つまり石英脈と流体包有物は 35 億年前もしくは 32 億年前のいずれかで形成したと結論された。

II-2. 流体包有物の窒素同位体比

アパタイト年代測定の結果から流体包有物は 35 億年前の海水または 32 億年前の変成流体であると推定された。前者の場合は 35 億年前の海水に溶解した大気由来の窒素が流体包有物に保存されていると考えられる。一方、変成流体の窒素の起源は緑色岩の間隙に存在する海水、石英脈に存在する有機物及びマントル物質であると考えられる。したがって後者の場合でも流体包有物には 32 - 35 億年前の海水が端成分として保存されていると予想される。真空破砕法により得られた流体包有物の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比から流体包有物にはマントル起源物質が存在しないことが示された。一方、窒素同位体比と $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$ 比の関係から包有物中の窒素には 2 つの端成分が存在することが示唆された。一つは石英脈の有機物を起源とする窒素であり、もう一方は古海水に溶解した大気起源の窒素であると推定された。そして後者の $\text{N}/^{36}\text{Ar}$ 比は現在の海水に溶存した大気の $\text{N}/^{36}\text{Ar}$ 比に比べ 3 倍高い値を持つことが示された。この高い $\text{N}/^{36}\text{Ar}$ 比は当時の大気・海洋に (N_2 に比べて) 溶解度が高いアンモニアが N_2 と一緒に存在しそれが流体包有物に補綴されたことに起因すると示唆された。また流体包有物の端成分の窒素同位体比から 32-35 億もしくは 35 億年前の大気の窒素同位体比が 4‰以下であることが推定された。本研究で推定された太古代の窒素同位体比と従来の研究で推定された太古代のマントルの窒素同位体比を考慮すると、大気の窒素同位体比は 32-35 億年前から現在にかけて最大でも 4‰しか変動しなかったと結論された。