

## 特集記事・4

鉄～宇宙・地球・生命・文化・未来～

## 鉄が生み、鉄と共に育った地球生命

Life on the Earth was Made by Fe and Grown with Fe

掛川 武

Takeshi Kakegawa

東北大学大学院  
理学研究科 地学専攻  
教授

## 1 要旨

地球は水の惑星と呼ばれるが、初期地球は「鉄」の惑星でもあった。宇宙からもたらされた多量の鉄が生命を生むきっかけを作った。さらに地球内部の岩石から抽出された鉄が最初の生物の代謝を助け、さらにその後の進化にまで影響した。鉄とともに進化した初期生物は縞状鉄鉱層を残し、現在の我々の生活を助けることになった。

## 2 生命の「材料」の準備に鉄が果たした役割

地球は今から46億年前に誕生した。誕生後しばらく、隕石が頻繁に落下する時代が続いた<sup>1)</sup>。しかし44億年前からあま

り隕石が落下しない時代が訪れた。そのために地球表面は冷えて、最初の海も誕生したと考えられている。しかし42億年から39億年前頃の期間に再び多量の隕石が落下する時代が到来した。この頃の地球が広く海に覆われていたことを考えると、隕石のほとんどは海に衝突したことが予想される。ここでは隕石衝突のエネルギーによって海水の一部も蒸発し、衝突蒸気雲が出現したと考えられる(図1)。

隕石にはしばしば、金属鉄などが含まれている(図2)。すなわち隕石が多量に降り注ぐということは、宇宙から「鉄」を地球にばらまくのと同じことである。これら「鉄」が衝突蒸気雲の中で還元剤として作用すれば、普段、起こりにくい化学反応が起こる可能性があるが、誰もその詳細を検証してこなかった。さらに隕石がもたらした「鉄」が生命起源につ

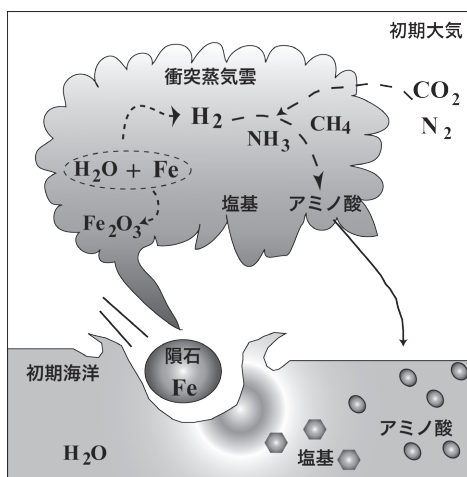


図1 初期海洋に隕石が衝突し衝突蒸気雲を生じさせたモデル図

図2 鉄を含んだ隕石の例(石鉄隕石)  
東北大学自然誌標本館所蔵

ながる重要な化学反応を起こした可能性もある。この新しい仮説は、物質・材料研究機構の中沢弘基名誉フェローによって提唱され「有機ビックバン説」とも称される<sup>2)</sup>。この仮説を実証するために、著者の研究グループは実験用の大砲を用いて火薬を爆発させて弾を飛ばし、加速された弾を水に撃ち当てることで、隕石が海に落下することを再現した。

現在の大气は窒素 ( $N_2$ ) と酸素 ( $O_2$ ) を主成分としている。しかし生命が誕生した頃の大气組成はこれとは異なり、二酸化炭素 ( $CO_2$ ) と窒素 ( $N_2$ ) が主成分だった。生命を誕生させるためには、これらを炭素源、窒素源としてアミノ酸などを作る必要がある。しかし世界中の研究者が二酸化炭素と窒素を使ってアミノ酸の生成を試みてきたが失敗してきている。東北大では鉄が水を分解し、そこから発生する水素 ( $H_2$ ) に注目した (図1)。大砲を用いた実験を展開する中でこの水素が二酸化炭素と窒素と反応し、多量のメタン ( $CH_4$ ) やアンモニア ( $NH_3$ ) が生成されることが分かった。メタンとアンモニアが揃えば、生命起源に必要なアミノ酸などを作ることも難しくない。そこで条件を変えながら大砲を用いた実験を更に展開した。その結果、グリシン、アラニンなど我々の体を作っている主要なアミノ酸が複数生成された<sup>3)</sup>。さらにDNAの構成成分である塩基も生成された。太古の海に落下した隕石の量、すなわち鉄の量は膨大である。この鉄と大気や海水が絡み合っアミノ酸などの生命の種が多量にできたことを東北大での実験成果は示している。そうした生命の種は、太古の海に蓄えられ生命へと進化していくことになる。

### 3 「鉄」が決めた初期生物の「代謝」

初期地球の海は、地底からも多量の鉄が供給される世界だった。地底から鉄を供給するのには海底温泉が重要な役割

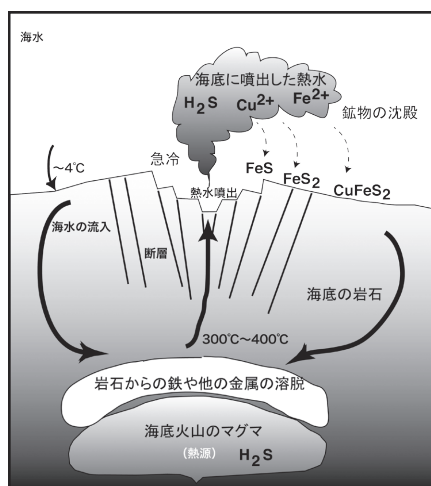


図3 海底熱水循環モデル

を果たしてきている。海底火山周辺に発達した海底温泉は海底熱水活動とも呼ばれ、地球に海が誕生してから現在まで絶え間無く続いていた。海底の岩石の中を海底熱水が通り抜けることで、岩石から鉄などの金属元素を抽出する (図3)。海水や火山ガスの中には硫黄もあり、これらも海底熱水の中に含まれることになる。この海底熱水の温度は300度を超える。岩石の中を通り抜けて海底に湧き出すと、海水で冷やされるので熱水に溶けていた成分が海底に一斉に沈殿する。沈殿物の中には鉄と硫黄の化合物 (磁硫鉄鉱:  $FeS$ ; 黄鉄鉱:  $FeS_2$ ) や銅、鉄、硫黄の化合物 (黄銅鉱:  $CuFeS_2$ ) も含まれる。太古の海底熱水から沈殿した鉱物は、世界各地に見出され、金属資源として採掘されている。ここで注目したいのが、鉄と硫黄の化合物である。

我々生物の体の中では酵素によって様々な化学反応が起きている。その化学反応によって「代謝」が促進され、生命活動を維持している。酵素の多くは金属元素を含んでおり、金属元素がないと酵素として働かない。フェレドキシンと呼ばれる酵素がその代表例で、鉄と硫黄の化合物 ( $Fe-S$ ) にアミノ酸が結合しクラスターを形成し、タンパク質で囲まれた構造を持つ (図4)。フェレドキシンは動物からバクテリアまでほとんどの生物が有する酵素である。最初の生命も持っていたと考えられ、最古級の酵素といっても過言でない。

鉄・硫黄クラスターはまさに海底熱水で形成される磁硫鉄鉱 ( $FeS$ ) と似た物質である。カナダ・オンタリオ州には27億年前の海底熱水が作った金属鉱床が多く存在する。その一つにポッター鉱山がある。図5にポッター鉱山 (現在は閉山) で採掘された鉱石の例を示す。この鉱山では銅や亜鉛を中心に採掘していたが、鉱石には  $FeS$  も多く含まれる。海底熱水が  $Fe^{2+}$  と  $H_2S$  を海水に放出し  $FeS$  となり、海底に泥のように積もるのである。27億年前には既に生物も活動しており、その死骸が有機物として  $FeS$  と一緒に積もった様子が図5に見られる。34億年前の地層からもポッター鉱山で見られる  $FeS$

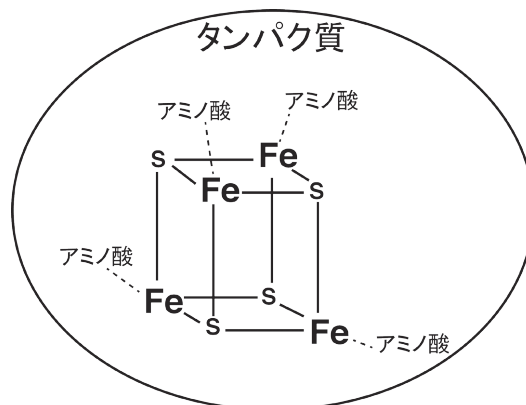


図4 酵素に含まれる鉄・硫黄クラスターの模式図

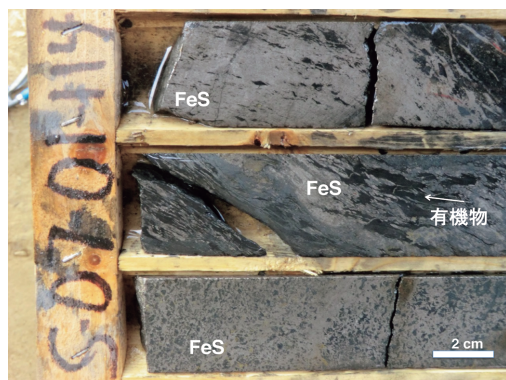


図5 カナダ・オンタリオ州ポッター鉱山に産する磁硫鉄鉱海底に堆積したために縞状の堆積構造を示す。有機物も伴う。

に富んだ鉄鉱が見つかっている。このことは初期地球の海底熱水は当時の海底に多量のFeSをばらまいていたことを意味している。

生命発生前の原始海洋にはアミノ酸が多く溶け込んでいた(図1)。このアミノ酸に富んだ海の中に海底熱水が噴出すれば鉄・硫黄・アミノ酸複合体でできた酵素の原型ができてもおかしくないことになる。この原始酵素が最初の生物の体に取り込まれて、最初の生物の代謝を支えることができたに違いない。その時に鍵になるのがやはり「鉄」である。太古の地球で、鉄を岩石から取り出し、海に供給するシステムがなかったなら、酵素はできないし、アミノ酸はあっても生命へと進化できなかったかもしれない。

## 4 鉄が初期生物の「進化」に与えた影響

現在の地球においても海底熱水は岩石から鉄を抽出し、多量の鉄を海水に放出している。現在の海は酸素に満ちた海である。海底熱水が湧き出している深海にも酸素がある。海底熱水で放出された鉄と酸素を含んだ海水が混じると、鉄は即座に赤鉄鉱( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )として沈殿してしまう。海底は広いので赤鉄鉱は拡散し、同じ場所に厚く積ることはない。

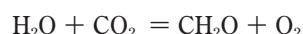
初期地球の海水の大部分は現在と異なり無酸素であった。酸素のない海水は鉄を多量に溶け込ませる。太古の海底熱水から放出された鉄が、無酸素海水の中に溶け続け、結果として海水中に多量の鉄が蓄えられた。太古の海は鉄の貯金箱みたいなものであった。太古の海に溶けていた鉄はやがて縞状鉄鉱層として堆積する。縞状鉄鉱層は、主に鉄とシリカ( $\text{SiO}_2$ )からなる地層である。鉄は赤鉄鉱( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )や磁鉄鉱( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )や菱鉄鉱( $\text{FeCO}_3$ )として存在する。図6はグリーンランドのイスア地域で見つかった世界最古の38億年前の縞状鉄鉱層である。この縞状鉄鉱層は19億年前まで形成され



図6 グリーンランドイスア地域に産する世界最古の縞状鉄鉱層(38億年前)  
黒い層は鉄の酸化物、白い部分はシリカ。黒い層と白い層が交互に現れている。

続けた。

それでは、この縞状鉄鉱層はどのようにして形成されたのであろうか？縞状鉄鉱層を作るためには、鉄と酸素を結びつける必要であり、その役割を微生物が果たしていたとするのが一般的な考えである。その中でもシアノバクテリアと呼ばれる微生物が関与したとするのが古典的な見方である。シアノバクテリアは太陽光をエネルギー源とし、水と二酸化炭素を化合させる。その過程で有機物( $\text{CH}_2\text{O}$ )を作り出すが、化学反応の残物として酸素が吐き出される。



光合成で生じた酸素は大気に放出されることなく、まず海水の中に溶け込んだ。シアノバクテリアは光が届く浅い海でしか生息できない。そのために酸素が溶けたのは、表層水に限られていたとされている(図7)。それより深い海は無酸素状態を保ったままで、そこには多量の鉄が蓄えられていた。この鉄は湧昇流に乗って浅瀬にもたらされる。浅瀬では酸素に富んだ水があるので、鉄の酸化が起こる。



湧昇流は次から次へ鉄を供給するので、同じ浅瀬に数百メートルの厚さで酸化鉄が積もることになる。シアノバクテリアの活動や鉄の供給は断続的で季節変化もあったとされる。鉄が沈殿しにくい時期にはシリカが沈殿し、結果的に鉄とシリカが互層をなした縞状鉄鉱層が形成された(図6)。

シアノバクテリアが発生し始めた頃は、光合成で作られた酸素は鉄の酸化に使われてしまう。そのために酸素が地球環境に広がることもなく、大気中にも深層水にも酸素はなかったと考えられている。時代とともにシアノバクテリアの活動

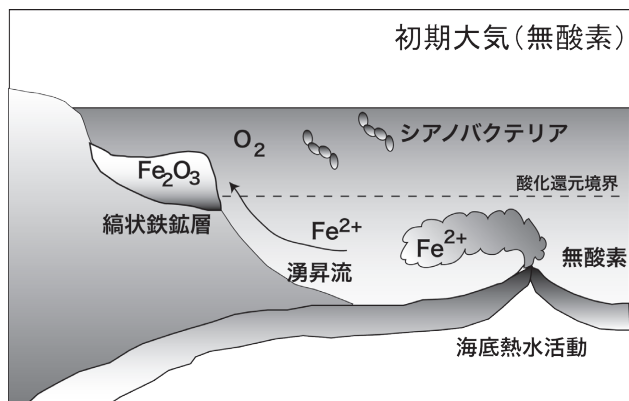


図7 縞状鉄鉱層形成モデル



図8 南アフリカ・シッシェン鉱山の鉄鉱石

が高まり、生産された酸素量が多くなると、酸素が表層水に飽和し、海水で抱えきれなくなり、23億年前頃にやっと大気に放出され始めた。この初期大気への酸素放出を大酸化事変と呼んでいる。19億年前になると浅い海にも深い海にも大気にも酸素が満ちていく。19億年前では、現在の海と同じ姿になり、海底熱水が鉄を供給しても即座に酸化されてしまった。海底火山の活動も弱まり、鉄が供給できなくなった。そのために19億年よりも後の時代には縞状鉄鉱層は形成されなくなった。同時に酸素が大気に溜まることでオゾン層を形成し紫外線を遮断してくれる。それによって多細胞生物や真核生物といった、より複雑で酸素を必要とする生物が繁茂できるようになった。すなわち太古の海中の鉄量の減少が、初期地球の生物の進化を決めたといっても過言でない。

## 5 資源としての縞状鉄鉱層：初期地球と初期生物からの恩恵

縞状鉄鉱層は鉄の資源としても重要である。オーストラリア、南アフリカ、カナダなどでは32億年から24億年前に形成された縞状鉄鉱層が多く存在し、そこから鉄を採掘する鉱山が複数ある。しかし縞状鉄鉱層は鉄以外にもシリカ（ $\text{SiO}_2$ ）を多量に含む。シリカを含んだままの縞状鉄鉱層は鉄の品位が低く、鉱石としての価値は少ない。

図8は南アフリカ・シッシェン鉱山で採掘されている鉄鉱石である。この鉱石は赤鉄鉱（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）でできており、シリカをほとんど含んでいない。縞状鉄鉱層から鉄を採掘する鉱山は、こうした赤鉄鉱（もしくは磁鉄鉱 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ や菱鉄鉱 $\text{FeCO}_3$ ）に濃集した岩石を採掘している。それでは、なぜこれら鉱石

はシリカを含まないのであろうか？

32億年から24億年前の海底に積もった縞状鉄鉱層は、やがて海底下に埋没する。その後、プレートテクトニクスによって数億年かけて移動し大陸の一部となる。大陸内部では地下水が多量にある。大陸の内部に閉じ込められた縞状鉄鉱層は、こうした地下水と何万年～何千万年と接することになる。南アフリカのシッシェン鉱山では24億年前に海の底にあった縞状鉄鉱層が2億年かけて大陸の一部になり、当時の大陸の地下水と反応した痕跡がある。シリカは地下水に溶けやすく、縞状鉄鉱層からシリカを取り除いてくれる。その結果、地層中には赤鉄鉱だけが残り、鉄の品位が著しく高まることになる。すなわち地球自身の持つ様々な作用が複合し、何億年もかけて鉄の鉱石を残してくれたのである。こうした太古の地球や初期生命が作ってくれた鉄鉱物の恩恵を受け、現在の我々人類の生活が成り立っているわけである。鉄と生命は誕生時から現在まで深い関わりを持っており、鉄なしでは生命も誕生できなかったし、進化もできなかった。現在の人類の生活もない。

### 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), 196.
- 2) 中沢弘基：生命誕生, 地球史から読み解く新しい生命像, 講談社現代新書, (2014), 318.
- 3) Y.Furukawa, H.Nakazawa, T.Sekine, T.Kobayashi and T.Kakegawa：Erath Planet. Sci. Lett., 429 (2015), 216.

(2017年9月1日受付)