

私たちの地球 「鉄の惑星」物語 138億年の宇宙誌

◎ 東京大学総合研究博物館 准教授 **宮本 英昭氏**

レバーやほうれん草には、鉄が多く含まれているからよく食べましょう。こう言われて不思議な気分になったことはありませんか。車や橋、ビル、家電製品などをつくるのに使われる鉄が、体の中で一体何をしているのかというと、血液中のヘモグロビンの中に存在し、呼吸で得た酸素を全身に運びエネルギーに変換する重要な役割を担っています。私たちは鉄がなければ生きていけないのです。さらに鉄は、地球の真ん中に存在しています。巨大な磁場をつくり出し、生命にとって危険な宇宙放射線が地表に届かない安全な環境へと変えてくれています。地球は「鉄の惑星」なのです。では、なぜ鉄なのか。物語はここから始まります。



みやもと・ひであき

1970年千葉県生まれ。理学博士。専門は惑星科学。95年東京大学理学部卒業、99年同大学院助手、2002年アリゾナ大学で月・惑星研究所客員研究員、06年東京大学総合研究博物館助教授を経て、07年より現職。09年東京大学総合研究博物館の特別展示『鉄—137億年の宇宙誌』展で学術企画を担当し中心的な役割を果たす。

※ 本稿は宮本准教授の共著『鉄学—137億年の宇宙誌』（岩波書店）などの内容を再構成したものです。

なお宇宙の始まりはこれまで考えられていたよりも1億年ほど早く、138億年であることが2013年に判明しました。

宇宙・生命・文明を結ぶ 新たな試み「鉄学」

地球は「水の惑星」と一般的に言われます。

「地球は青かった」という世界初の有人宇宙飛行を成功させたユージン・ガガーリンの有名な言葉にも象徴されていますが、これは地球表面の70%を水が覆っていることを重視した言い方に過ぎません。

では、そもそも地球は何でできているのでしょうか。ある日、私は地球惑星科学の専門家たちと雑談をしていたときに、「地球で一番多い元素は何でしょうか」と問いかけてみました。すると「酸素とケイ素」という答えが返ってきました。地球表面の地殻では確かにそうなります。「地球全体で、重量で見たらどうでしょう」とさらに尋ねると、しばらく考えて「ああそうか、鉄になるね」という結論に達します。地球内部にはマンタルがあり、それは溶けた鉄でできています。重さで見ると、鉄は地球の3分の1を占め、最も多く存在しています。実は、地球は「鉄の惑星」なのです。

地球科学、環境科学、考古学、物理学、化学、天文学、生物学など多くの研究分野において、鉄が重要な元素であることは当然とされてきました。しかし各分野を横断的に鉄で見渡していくと、新しい宇宙誌や地球誌、生命誌、人類誌の物語が見えてきます。

Powers of Ten Years

鉄学年表

10¹年後 近未来の姿

鉄系の超伝導物質、超高純度鉄、新触媒、鉄の海洋散布など、鉄に関する最先端の研究から、将来の鉄利用が見えてくる。

10⁰年前 転換期の現在

鉄は構造物・機能材として現代文明の根幹を成す。現在は持続社会の構築へ向けた準備段階。

10¹年前 鉄は国家なり

鉄を制するものが国家を制すると言われたが、同時に成長の限界という概念に気付く。

10²年前 鉄と産業革命

コークス製鉄法による安価な鉄鋼の供給と、鉄の磁性と電気の発見は、産業革命の起爆剤となった。

10³年前 鉄器時代

鉄は農耕器具に利用され、効率的な農耕を促して文明を安定させるとともに、武器に使用され他の文明を淘汰する役割も持った。

10⁴年前 赤い鉄

鉄隕石で人類は初めて金属鉄を利用した。それ以前の旧石器時代は顔料として赤い酸化鉄が広く利用されていた。

10⁵年前 鉄と気候変動

植物プランクトンの活動度には、鉄が大きな役割を果たしており、これと気候変動との関連が指摘されている。

10⁶年前 地球磁場逆転

過去500万年に20回も地球磁場が逆転している。その際、結果的に気候が変化するという説もある。

10⁷年前 生命維持と鉄

この時代の大量絶滅期を哺乳類が生き延びたのは、生命維持に鉄が重要な役割を果たしていたから。

10⁸年前 生命の多様化

鉄はヘモグロビンの中に存在し、酸素を体内の隅々まで運ぶという重要な役割を果たす。

10⁹年前 地球の形成 生命の誕生

地球の中心に鉄が濃集し、地球磁場が形成された。この磁場が有害な宇宙放射線をブロックし、生命が誕生。原始生命であるシアノバクテリアは海の酸化還元状態の大変化を引き起こし、現在の鉄鋼原料である縞状鉄鉱床を形成した。

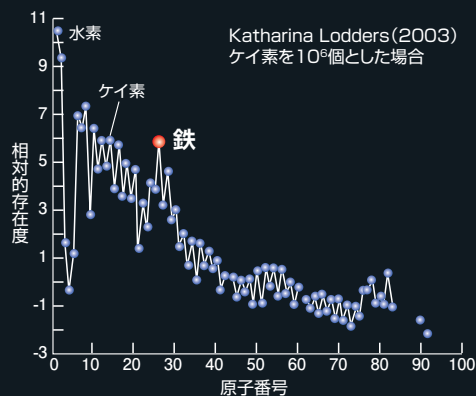
10¹⁰年前 鉄元素の形成

核融合により鉄が形成された。安定的な元素である鉄の存在度は、宇宙において、他の元素より相対的に高くなった。

『鉄学』では時間尺度を10のべき乗で表わして各時代の現象を分析し、それを一つずつ繰り上げていくことで、138億年を概観している。

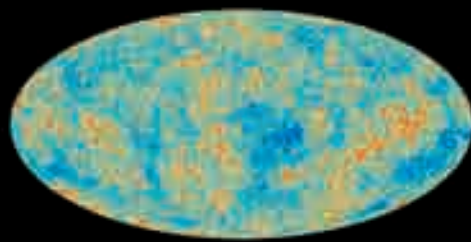
西オーストラリアで採掘された縞状鉄鉱床のボーリング・コア。世界規模の環境変動を記録した貴重な標本。 撮影／瀧川 晶氏

その鉄という元素がいかんして誕生したのかという根本的な疑問に始まって、太陽系や地球の形成、生命の誕生や進化において、鉄がどのような役割を果たしてきたのか。なぜそれが現代文明にまでつながり、鉄が私たちに必須であるという結論にどのようにしてたどり着くのか。そして人類と鉄との関わりは今後どのように変わっていくのか。「鉄学」とは、こうした問いに迫る試みなのです。

10^9 

太陽系の元素存在度

原子番号の大きな元素ほど、存在度が小さくなる傾向にあるが、鉄はその傾向から著しく外れ特異性が現れている。

 10^{10} 

© ESA AND THE PLANCK COLLABORATION

誕生間もない宇宙の姿を描いた地図

欧州宇宙機関(ESA)と米航空宇宙局(NASA)が、ビッグバンから38万年後の宇宙の温度分布を色で示した地図を作成し、2013年3月に発表した。その結果、現在の宇宙の年齢は、これまで考えられていたよりも1億年ほど多く、「138億歳」であることがわかった。

 $10^9 \sim 10$ 

© NAOJ

元素をばらまく超新星爆発

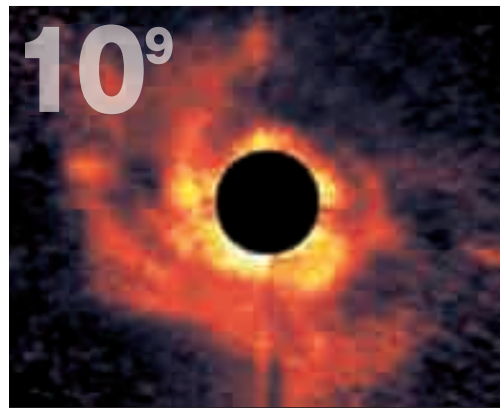
かに星雲(画像)は冬の夜空を彩る代表的な天体。1054年に起こった超新星爆発の残骸で、藤原定家の日記『明月記』にもその現象が記されている。

鉄は星の中で生まれた

138億年前、宇宙空間には水素とヘリウムの原子核と電子しか存在していませんでした。では宇宙の中で、どうやって鉄という元素が生まれたのでしょうか。

約130億年前、最初の星が宇宙に光り輝き出しました。太陽の10倍以上あったこの巨大な原始星の内部で核融合が起こり、さまざまな種類の元素がつくり出されました。鉄はこうした星の中の核融合反応によって生まれました。

元素は原子核と電子で形成され、原子核は陽子と中性子でできています。ここで興味深いのは、原子核と電子の結びつきが元素によって異なっていることです。普通に存在する元素の中で、陽子と中性子の結びつき

 10^9 

© NAOJ

太陽系と地球の誕生

画像はうすまき状の惑星誕生の現場。中心の星の周りに惑星の材料となるガスやダストが大量に回っている。太陽系も同じような経緯をたどり誕生した。

宇宙

鉄を生み出すまでの宇宙の営みの歯車の一つが変わってしまうと、私たちのような生命体は存在せず、鉄の文明も生まれない可能性があった。鉄はかけがえのない存在だ。

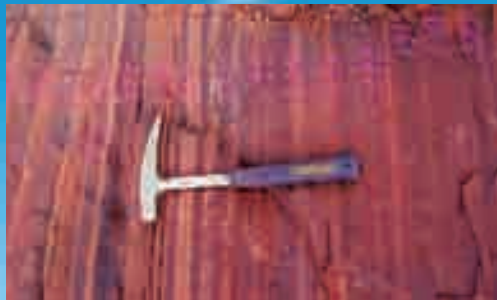
が最も安定した原子核を持つのが鉄であることがわかっています。

この結びつきは、星の中の核融合反応に影響します。というのも、鉄より小さい原子核は核融合して大きくなった方が安定し、鉄より大きな原子核は核分裂したほうがより安定するということになるからです。つまり星の中の核融合反応にとって、その最終到達地は鉄であるということになるのです。星の中で元素がつくられると言いましたが、こうした理由から鉄が増えていったのです。

このようにして鉄は宇宙空間で増え続けていきました（なお、鉄より重い元素は、超新星爆発などによって一気につくられたと考えられています）。こうしてつくられた元素が集まって、約45億6000年前に太陽系が生まれ、地球が形成されたのです。

太陽系の惑星や衛星には、内部や表層にさまざまな形で鉄が存在します。太陽系の全質量の約99・9%を占める太陽の化学組成を調べたところ、太陽にはなんと地球400個分の重量の鉄が含まれていることがわかっています。また最近の研究から、太陽のような恒星であっても、その周囲に惑星が常に形成されるわけではなく、地球のような惑星が形成されるためには、鉄の存在が重要な役割を果たすとみられています。私たちが地球で鉄を使う文明を築いたのは、太陽系が誕生したときすでに決まっていたと言っても過言ではありません。

10^{8~9}



縞状鉄鉱層

提供：東京大学大学院教授 加藤 泰浩氏

25億年前の縞状鉄鉱層(西オーストラリア・ハマスレー)。鉄鉱物を主体とする黒い層と、石英を主体とする白い層が交互に堆積している。一つ一つの層の厚さは数cm程度だが、その1つの層の中にさらに細かい薄い層の堆積が繰り返されている。

10⁹



ストロマトライトの海

太古の海で酸素を排出する光合成を行ったシアノバクテリア。その集合体であるストロマトライトを今もオーストラリアの海で見ることができる。



地球磁場

出典：NASA

鉄が生み出す地球磁場は危険な宇宙放射線を遮り、地表面を生命にとって安全環境へと変えた。



生命体と鉄の深いつながり

私たちは地球以外で生命体をまだ発見していません。地球が特殊な天体である重要な理由の一つに、地球が十分に大きな鉄の核を内部に持ち、強大な磁場をつくり出していることがあげられます。地球磁場がバリアとなり、宇宙空間から降り注ぐ生命体に有害な高エネルギーの宇宙放射線や、太陽からの高エネルギー粒子の流れ(太陽風)を遮っています。鉄が生み出す強大な磁場が、多様な生物に満ち溢れた惑星を生み出しているという見方があるのです。

初期の地球は酸素のない、嫌気的な環境でした。これが一変したのが地球磁場が非常に強くなった20〜30億年前のことです。この時期に地球で初めて繁栄した生命がシアノバクテリアです。シアノバクテリアは光のエネルギーを使って水と二酸化炭素から有機物をつくり出し、酸素を排出する光合成を行います。シアノバクテリアのおかげで、地球の海水や大気中に酸素が増え、地球表面は一気に酸化的な環境に変わりました。その結果、二価の鉄イオンとして海水中に溶けていた鉄が、三価となり、三価の鉄イオンは水に溶けないため海底に沈殿し、縞状鉄鉱層を形成しました。私たちが現在使っている鉄は、この地球規模の環境変動の痕跡である縞状鉄鉱層から採掘された鉄鉱石(酸化鉄)でつくられています。

さて地球上に酸素が蓄積されると生物の大進化が始まりました。生物は生存戦略として、外敵のいない新天地を求めて陸上へと進

生命

10⁸



生命の多様化

原図：東京大学大学院教授 九郎丸 正道氏

赤血球中のヘモグロビンに含まれている鉄は、生命が発達するために重要な役割を果たした。ヒトやイヌの赤血球は中央がくぼんだ円盤のような形状であるのに対し、ラクダの赤血球(画像)は小判の形態を示す。

10⁷



提供：東京大学大学院特任教授 西澤 直子氏

生命維持と鉄

鉄不足の石灰質アルカリ土壌で通常のイネ(画像右)を栽培すると育成が抑制された。これに対して、植物の鉄獲得機構を強化したイネ(左)は良好に育成した。不良土壌における植物生産性の向上は食糧問題だけでなく、環境・エネルギー問題にも貢献することが期待される。

植物が土壌から巧みな方法で鉄を取り込んでいるおかげで、動物は植物を通じて必須元素である鉄を摂取し、生命を維持している。

出し、やがて私たち人類が誕生しました。鉄は呼吸や光合成、DNA合成、窒素固定など、生命体に必須ないくつもの機能において、中心的かつ不可欠な役割を果たしているとみられています。

例えば私たちは酸素を吸って生きています。また栄養物を酸素と反応させることによって、生存に必要なエネルギーを得ています。生きていくにはこの酸素呼吸を維持していかなくてはなりません。この重要な目的に、鉄は二つの中心的な役割を果たしています。

一つ目は酸素の体内への運搬です。人体の鉄の多くはヘモグロビンの中に存在しています。ヘモグロビンは鉄を中心とした構造を持っており、肺から酸素を得て体中に運んでいます。二つ目はエネルギーをつくり出す上で電子を効率的に伝達することです。鉄イオンを介して電子を受け取りゆつくりと酸化還元反応を進めることで、私たち人類は活動するためのエネルギーを得ているのです。

鉄がエネルギー生産に重要な役割を果たしているのは、哺乳動物だけではなく、ほとんどの生物において体内のさまざまな部分へ電子を伝達しエネルギーを得るという意味で同一の仕組みが必要であり、この電子の伝達に鉄が重要な役割を果たしています。

地球上のほとんどの生命体は、鉄がなければ生きていくことができません。鉄はそれほど重要な元素なのです。

10⁰



転炉

19世紀に転炉法による精錬が発明されると、一度に大量の鋼をつくり出すことが可能になった。その後も絶え間ない技術革新によって鋼は進化し続け、現代社会を支えている。

10²



ファラデーの円盤

提供：国立科学博物館

蒸気や水の力を電気へと変換する発電機の発明は人類史において重要な転機となった。画像は発電機の動作原理を発見したマイケル・ファラデーが1831年に考案した最初の電動機。



世界最古の鉄橋 アイアンブリッジ(イギリス)

1709年にコークスを用いた高炉法による製鉄が初めて成功した場所につくられた。石炭を蒸し焼きにしてつくるコークスは火力が非常に強いという利点があり、鉄の生産は飛躍的に増大し産業革命を支えた。



10³



© アナトリア文明博物館

文明を支える鉄

人類は地表に大量に存在する鉄を最大限に活かし、高度な文明を築きました。

人類が最初に鉄を利用したのは隕石だと言われています。鉄という単語は古代シュメール語で「天から来た金属」を意味します。本格的な鉄器時代の幕開けは、紀元前1500、2000年ごろ西アジアのヒッタイト人による鉄の製造にさかのぼります。鉄を自由に加工するためには、鉄を含む岩石を溶かして金属鉄を取り出さなければなりません。当時の製鉄方法では温度を十分に上げることができず、生成された鉄は加熱したり叩いたりして不純物を取り除く必要がありました。それゆえに社会全体の生産性は限られ、鉄を使った武器をいち早く利用できた文明は、他の文明に対して優位を保つことが可能となりました。さらに鉄器が農耕の効率を格段に向上させ、生産性を大幅に高めたことが、社会を安定させ科学技術を発達させました。

ヒッタイト戦士を描いたレリーフ

アナトリア半島(トルコ)に帝国を築いたヒッタイト人が、人類初の鉄器文化を築いたとされる。その製鉄技術は紀元前1200年ごろにはヨーロッパやインド、アジアなどに広がっていった。

文明



産業革命以降、鉄道、橋、ビルなどの建設に大量の鋼を必要となり、鉄は近代文明に欠かせない存在となった。鉄の技術開発は将来も人類の暮らしを豊かにするものと期待される。

鉄を確保することは、近代においても重要な国家戦略になりました。中でも社会を大きく変化したのが、18世紀イギリスにおける産業革命でした。このころ製鉄技術が発展し、大量に鋼を生産できるようになりました。製鉄燃料となる石炭を採掘する際、炭坑に地下水が溜まるため、排水に蒸気機関を用いた新型機械が生まれました。さらに炭鉱から石炭を効率よく輸送する手段として鉄道が発展するなど、鉄の大量生産は後に重要な産業の出発点となるさまざまな発明を促しました。

19世紀になると、鉄の人気はさらに上昇しました。電気エネルギーの登場です。鉄の磁性という特殊な性質を利用して発電機で電気がつくられ、その電気を使いモーターで機械を動かすことにより工場で大量生産が可能となり、産業は爆発的に発達しました。鉄は産業革命の起爆剤となり、貴重品から必需品へと変わっていったのです。

鉄は安価でありながら高い強度を持つため、現代社会において、車やビル、橋など構造物として広く使われています。また鉄の磁性をうまく利用することで、パソコンやキャッシュカードなど情報記憶媒体の機能材としても使われています。さらに鉄の錯体(※)は、超伝導性や代替元素としての役割も期待されています。

鉄は人類の文明社会を根幹から支えており、恐らく将来においてもその地位は揺らがないでしょう。宇宙、地球、生命、文明のすべてにおいて、鉄はなくてはならない存在なのです。

※ 鉄の錯体：鉄イオンに配位子と呼ばれる分子やイオンが結合したものの。