



入門講座

鉄を知る-3

鉄の物性 金属の王にして異端者である鉄

I 原子のレベルからみた鉄

松尾宗次

(株)日鉄技術情報センター 主席研究員

Munetsugu Matsuo

Mysteries of the King of Metals

I Wonders of Iron Atoms

1 「鉄は價廉にして、その用廣し」

江戸時代の自然哲学者三浦梅園(1723-1789)は、著作『價原』の中で次のように記しています。「金とは、五金の總名なり。分っていへば、金銀銅鉛鐵、合わせていへば皆金なり。五金の内にては、鐵を至寶とす。銅これにつぐ。鉛これにつぐ。如何となれば、鐵は其價廉にして、其の用廣し。民生一日も無くんば有るべからず。銅は器物の用あり。鉛は軍中の用あり。金銀は有らば有る處の用あれども、無くても先ずすむ者なり」¹⁾。つまり鉄は金属の中で最も重要であり、人々の日常生活に欠かせないことを述べています。「鐵」という字は「鐵は金の王なる哉」と分解されます。この三浦梅園の文章は、鉄が金属の王であり、その理由は廉価であり用途の広いことであると説明しています。

鉄は身近にあって最もありふれた典型的な金属と思われるがちです。ところが本当は金属一般の常識からはずれた異端の金属といえます。以前『鉄と銅』誌に増子昇東京大学教授(当時)が「鉄の七不思議」を挙げられました²⁾。鉄を学ぶと多くの不思議に出会います。その不思議な異端性が人間に恵みをもたらしています。実は鉄と同じように身近にあって人間に不可欠でありながら、常識はずれの物質があります。それは水です。この二つの物質の非常識さには多くの共通点が認められます。後で説明するように鉄と水は、地上に大量に存在する、他の物質に対して大きな親和力と包容力をもつ、奇妙な変態挙動を示す、生命を支える働きをする、などの共通した特徴が認められます。鉄と水は言葉の上でも関連があると思われる。グリム童話で知られるグリム兄弟の編纂した『ドイツ語大辞典』によれば、ドイツ語の鉄(Eisen)は水(Eis)を語源としています。鉄の金属光沢が水を連想させるためと解釈されています³⁾。

何故「鐵は價廉にして、その用廣し」なのだろうか。本記事ではその理由を考えてみましょう。そのために鉄の原

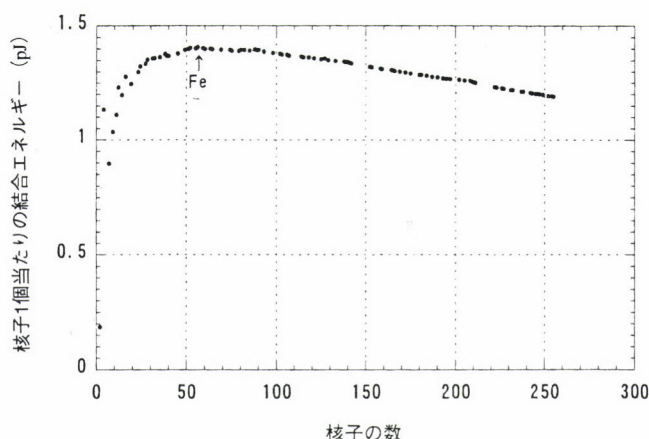
子の特徴そして鉄原子が配列して組み立てる結晶の特異性に注目します。そして人工物を象徴する鉄と自然を象徴する水とに共通する不思議さと異端性を対比しながら、鉄が人間社会を豊かにする働きの根源を探ってみましょう。最初に鉄原子の特徴を知り、それをもとに鉄が廉価である理由を考えます。

2 宇宙の中の鉄

2.1 不滅の原子核をもつ鉄

原子核内では核子の陽子と中性子がパイ中間子を介した交換力で凝集しており、原子番号26の鉄元素では原子量56つまり30個の中性子を含む同位体が最も多く存在します。核種によって原子核の安定度が異なります。原子核の安定度は水滴の安定性との類推で説明されます。きれいなガラス板上に水を落とすと水滴ができます。水滴を近づけると、合体して大きくなります。水分子が凝集して体積が大きくなるほど安定になるからです。しかしある程度以上に大きくなると、水滴は割れてしまいます。分裂して表面張力を減らした方が安定なのです。つまり水滴には合体も分裂もしない安定な大きさがあります。原子核でも核子の凝集力と表面張力とに依存した安定な大きさがあります。

すべての実在核種の原子核の質量を測定すると、それをつくる陽子と中性子それぞれの質量の総和よりも小さい値を示します。この質量欠損量は、アインシュタインの相対性理論による質量とエネルギーの等価性から、原子核の結合エネルギーに相当します。このようにして評価した核子1個当たりの結合エネルギーを表したのがFig.1です。この図から原子番号26で原子量56の鉄原子核は結合エネルギーが最高であり、こじんまりと引き締まった適度の大きさの強固な原子核であることがわかります。結合エネルギーの大きな核種への転移が核融合や核分裂です。安定な

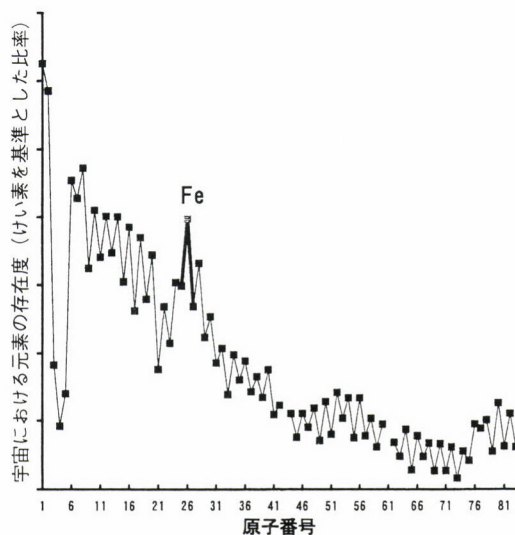
Fig. 1 原子核の核子1個当たりの結合エネルギー⁴⁾

鉄原子核は核融合も核分裂もおこさず、核融合と核分裂のいずれの終着点になります。

2.2 星の錬金術師の究極の作品である鉄

元素の宇宙における存在度を原子番号順で表すとFig. 2のようになります。原子番号が大きくなると存在量が少なくなる一般的傾向が認められます。この傾向は大ざっぱに言えば、ビッグバンによって宇宙が創成された歴史つまり軽い元素の水素から始まって、段々と重い元素が生まれてきたことを表しています。この図で周囲から突出した異常に多量に存在する元素に注目されます。この原子番号26の特異な点が鉄に相当します。この理由は上で説明した鉄原子核の安定性にあります。ビッグバンから鉄の誕生に至る経過をたどってみましょう。

初めに光があり、宇宙はビッグバンの大閃光で始まったと考えられています。その残光は今も宇宙空間に満ちあふ

Fig. 2 宇宙の中の元素の存在度⁵⁾

れており、ビッグバンの証拠とされています。大爆発の極めて高い温度の中で陽子1個の水素原子核ができました。水素原子核は融合してヘリウム原子核をつくりました。しかし爆発後3分も経つと温度は急激に低下して以後の核融合は進みませんでした。ヘリウムから次の核融合に進む反応がおこりにくい事情もありました。これはFig. 2でヘリウムから炭素の間の谷間にも表れています。

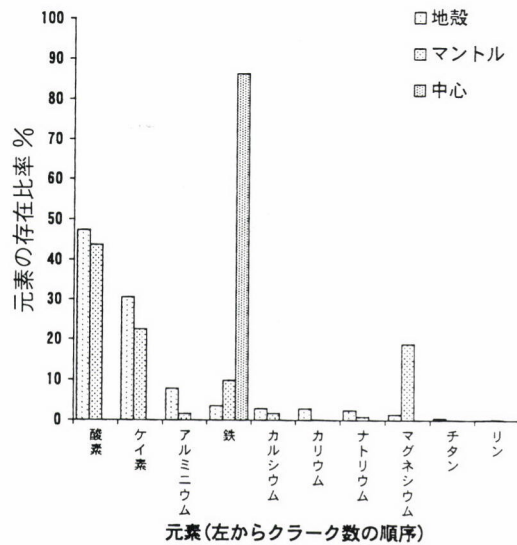
水素とヘリウムの原子核は電子を捕らえて原子となり、宇宙空間をさまよいました。やがてこれらの原子の濃度分布に不均一が生じ、どこかで密度の濃いところが生れます。周囲の原子は重力でそこに引きつけられ、どんどんと寄り集まってガス状の雲をつくり、星が誕生しました。星に集まった原子はどんどん重力で押しつけられ、星の温度と圧力が高まり、中心部ではヘリウムの核融合が起こり始めて炭素がつくられます。さらに温度は上がり、酸素、けい素へと次々に原子番号の大きな元素が生まれていきます。

大型の星の内部では著しく高い温度と圧力の下で、けい素から鉄までの核融合が進み、星の芯の部分には鉄が蓄積されます。鉄の原子核は安定なのでそれ以上に重い元素に変換する反応は進みません、しかしさらに温度と圧力が上昇すると安定な鉄の原子核も不安定になり、中性子と陽子と電子に分解し、陽子と電子は結合して中性子となり、中性子星となります。星の中心部に圧縮された中性子はやがて耐えられずに反発して、猛烈な爆発を起こします。これが超新星爆発と呼ばれる現象であり、昼間でも目視できる明るい輝きを放ちます。その時に、芯の周りを取り囲む鉄殻と鉄以下の原子番号の元素は宇宙空間に吹き飛ばされます。同時にそれらの元素は猛烈な中性子の嵐を浴びて中性子を吸収し、鉄より重い元素が合成されます。超新星は新しい星ではなく、鉄を大量に生産した大型の星の最期の輝きです。まき散らされた原子や分子は星塵となって銀河系をただよい、やがて太陽系をつくり、地球に集まってきました。太陽は初代の星ではなく、二代目以後の星です。

3 地球の鉄

3.1 高炉の断面は地球の内部

地球に集まった星屑には水惑星をつくり生命を生み出す元素が含まれていました。地球は芯部の合金層コア、それを囲む重い岩石層マントル、表面部の軽い岩石層の地殻そしてこれらの地圏を覆う気圏という層状構造をもちます。地圏の層別に主要構成元素の存在度をFig. 3に示します。この図で横軸の元素は、地表部の元素の存在比を示すクラーク数の順序で並べています。中心から表面にかけて重い元素から軽い元素に移り変わっていることがわかりま

Fig. 3 地球の中の元素の存在比率⁵⁾

す。重い鉄がコアの大部分を占め、通算すると地球全体の重さの30%になると推定されています。また鉄がコアだけでなくマントルと地殻部でも四番目に多い存在であることは重要です。

地球の生い立ちについてはいくつかの考え方がありますが、ここでは前提として回転する高温の塊を出発点とします。この熱塊に対して重力が作用し、密度の大きな物質が中心部に集まり、外側に軽い物質が重なっていきます。しかし単純に元素の存在量や密度だけではなく、他の様々な要因により物質分布ができました。諸元素の原子の容積、他の元素との結びつきの傾向を示すイオンの価数と半径、電子を引きつける強さを示す電気陰性度など、元素の個性

にもとづく要因が作用します。Table 1 はそれらの要因を記した周期表です。

表では上から、原子容積、電気陰性度、イオン半径、地球化学的な分類が記入されています。原子容積は、1モルの単体原子が占める体積であり、原子量を密度で割った値に相当します。原子量の順に原子容積が周期的に変化する事実が当初周期律の証明となりました。周期表から鉄族元素は小さな原子容積をもち、密度の大きなグループであることがわかります。最下段の記号は地球化学的な分類を示します。この分類は地球化学の創始者であるゴールドシュミットが与えたものです。

ゴールドシュミットは地球における元素の分化挙動を考え、地球内部の元素分布は高炉内の状況、つまり底に沈降する鉄、その上に浮遊するけい酸塩、炉頂から揮発するガスの分化の様子に似ていることに気づきました。この観点で元素を親鉄元素、親銅元素、親石元素、親気元素の四種類に分類しました。親鉄元素は溶融鉄に溶け込める元素、親石元素は酸素との親和力が大きくけい酸塩をつくり易い元素、親銅元素は酸素とは親しみにくく硫化物をつくり易い元素、親気元素は揮発性の元素です。Table 1 から鉄元素が例外的に地球内部の各部をつくる親鉄、親銅、親石の総ての元素分類に属していることが注目されます。

3.2 造岩鉱物の中の鉄

地球を構成する元素で量的に優勢なのは、鉄、酸素、けい素、マグネシウム、硫黄で、地球の成り立ちの大勢を把握するには、これらの5元素の挙動をもとに考えれば充分です。陰性元素の酸素と硫黄の総量は、陽性元素をすべて

Table 1 鉄を知るための周期表⁶⁾

I		II		原子番号 元素記号 鉄との原子容積比率(Fe=1.00) 鉄との電気陰性度差(Fe=0.00) イオン価数 対鉄半径比(6配位数: Fe ²⁺ =1.00) 地球化学的分類 ●親鉄元素 ◆親銅元素 □親石元素 △親気元素												III	IV	V	VI
3 Li 1.83 0.91 □	4 Be 0.69 0.34 □													5 B 0.66 -0.15 □	6 C 0.70 -0.68 ●△	7 N 1.92 -1.16 △	8 O 1.47 -1.59 □△		
11 Na 3.35 0.92 1+ 1.02 □	12 Mg 1.97 0.64 2+ 0.72 □	13 Al 1.41 0.35 3+ 0.68 □	14 Si 1.70 0.04 4+ 0.51 (IV 0.33) [*] □	15 P 1.61 -0.23 5+ 0.45 ●□	16 S 2.18 -0.64 2- 2.37 ◆														
19 K 6.39 1.03 1+ 1.76 □	20 Ca 3.70 0.85 2+ 1.28 □	21 Sc 2.12 0.59 3+ 0.96 □	22 Ti 1.50 0.38 4+ 0.78 □	23 V 1.17 0.23 3+ 0.82 □	24 Cr 1.02 -0.28 3+ 0.79 □	25 Mn 1.03 -0.05 2+ 1.06 □	26 Fe 1.00 0.00 2+ 1.00 3+ 0.83 ●◆□	27 Co 0.94 -0.05 2+ 0.96 ●◆	28 Ni 0.93 -0.06 2+ 0.88 ●◆	29 Cu 1.00 0.05 1+ 1.23 ◆	30 Zn 1.29 0.21 2+ 0.96 ◆	31 Ga 1.66 0.07 3+ 0.79 ◆	32 Ge 1.92 -0.03 4+ 0.69 ◆	33 As 1.83 -0.21 3+ 0.79 ◆	34 Se 2.31 -0.59 2- 2.54 ◆				
37 Rb 7.90 1+ 1.95 1.03 □	38 Sr 4.78 2+ 1.45 0.89 □	39 Y 2.68 3+ 1.15 0.69 □	40 Zr 1.98 4+ 0.92 0.53 □	41 Nb 1.53 5+ 0.82 0.37 □	42 Mo 1.32 6+ 0.76 -0.23 ●	43 Tc 1.22 4+ 0.82 -0.24 ●	44 Ru 1.15 3+ 0.87 -0.25 ●◆	45 Rh 1.17 3+ 0.86 -0.33 ●◆	46 Pd 1.25 2+ 1.10 -0.34 ●◆	47 Ag 1.45 1+ 1.47 0.19 ◆	48 Cd 1.83 2+ 1.22 0.29 ◆	49 In 2.22 3+ 1.03 0.05 ◆	50 Sn 2.31 4+ 0.88 0.042 ●◆	51 Sb 2.57 3+ 1.31 -0.11 ◆	52 Te 2.88 4+ 1.21 -0.05 ◆				
55 Cs 9.76 1+ 2.18 1.08 □	56 Ba 5.37 2+ 1.74 0.94 □	57 La 3.18 3+ 1.35 0.75 □	72 Hf 1.90 4+ 0.91 0.51 □	73 Ta 1.52 5+ 0.82 0.32 □	74 W 1.35 6+ 0.77 -0.20 ●	75 Re 1.25 4+ 0.81 -0.21 ●	76 Os 1.19 4+ 0.81 -0.23 ●◆	77 Ir 1.20 4+ 0.81 -0.28 ●◆	78 Pt 1.28 4+ 0.81 -0.31 ●◆	79 Au 1.44 1+ 1.76 -0.03 ◆	80 Hg 1.99 2+ 1.31 0.09 ◆	81 Tl 2.43 1+ 1.92 0.01 ◆	82 Pb 2.58 2+ 1.51 -0.06 ◆	83 Bi 3.00 3+ 1.31 0.01 ◆	84 Po 3.18 4+ 1.21 0.12 ◆				

化合物に変えてしまうには足りず、余った最も量の多い鉄は遊離しました。その結果大別して鉄、硫化物、鉄とマグネシウムのけい酸化合物の三つの相が形成され、残りの元素は鉄との親和度にしたがってそれぞれの相に分配されます。遊離した鉄は親鉄元素をともなって芯部に集まりました。そこでたとえばニッケルは量的に上回る鉄に吸収されて大部分が中心核に集まり、したがって地殻にはほとんど残らず、高価な稀少金属となりました。

マントルと地殻を構成するのは岩石です。ほとんどの岩石は安定な酸化物鉱物の集合体でできていて、大きな酸素の陰イオンの立体的配列の空隙に金属元素の陽イオンが入り込んだ構造をつくっています。そのような酸素の代表的な隙間はFig. 4に示すような形態であり、空隙の大きさと取り囲む原子の数(配位数)に違いがあります。そこで空隙に入り込める金属イオンの種類が限られてきます。

最も多い酸化物は4個の大きな酸素の2価陰イオンを1個の小さなけい素の4価陽イオンを取り囲む SiO_4^{4-} 正四面体構造(Fig. 4a)が骨格となっています。この構造単位は4個の負の荷電をもち、それらの骨格のつくる空間にはFig. 4bやcのような形の空隙ができています。その空隙に金属イオンが入り込み中性の塩となります。こうして侵入するイオンの価数と大きさに応じて四面体の配列形式も多様に変化して、様々な結晶構造をもつ金属けい酸塩鉱物が存在します。Table 1には八面体の6個の角にある最近接イオンで囲まれて存在する6配位の状態にある2価イオンの半径を示しました。

さらに空隙を占める元素の種類にはTable 1に示した電気陰性度が関連します。金属けい酸塩と遊離鉄との平衡関係にしたがい、鉄よりも陰的な金属元素は鉄に置換されて金属鉄相に移ります。そのような元素が親鉄元素です。代わりに鉄がけい酸塩相に収まります。こうして鉄は親石元素でもあります。鉄イオンは適度な大きさで、けい酸分の少ない塩基性岩石を構成するほとんどの有色造岩鉱物に含まれています。代表的な鉄けい酸塩鉱物はカンラン石 $[(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4]$ や輝石 $[(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_3]$ です。カンラン石

にはマグネシウム分の多いフォスフェイトと鉄分の多いファイアライトがあります。 SiO_4^{4-} 正四面体のつくる立体の6配位の空隙を占める際に、鉄とマグネシウムの2価イオンの大きさが近いことから、互いに置換し合うことができます。この相互置換反応は鉄鋼生産でも利用されています。こうして鉄は地殻部にも大量にとどまりました。

3.3 水と酸素と生命が生んだ鉄の大鉱床

鉄が地球に沢山存在しても地上に多く存在することにはつながりません。鉄と同じように地球のコアを構成するニッケルが、地上ではむしろ稀少金属です。地表近くにも多量に存在することも鉄の特徴です。そればかりでなく、容易に採集でき安価に精錬可能な鉱石として大量に集積していることが、非常に人間にとって幸いなことです。鉄鉱石が地表で濃縮され還元されやすい状態に変えられたことには、水とそこに生まれた生命が大きく関わっています。

地球は太陽系の水惑星とよばれるように、地表には水が豊富にある特異な惑星です。宇宙に水素が多量にあっても、必ずしも地球上に多量の水があり海があることにはなりません。軽い水素は簡単に宇宙空間に逃げ去りますが、適度の大きさの地球の引力が水素を引き留めて海をつくりました。優れた溶媒である水は様々な物質を運び蓄えました。雨水は岩石を浸食溶解し、鉄をはじめとする金属イオンが水中に抽出され、川はそれらを溶かし込んで海に流しました。こうして莫大な量の鉄が陽イオンあるいは鉄炭酸塩などの状態で海水中に蓄積されました。当時の海水の酸素濃度が低く、2価鉄イオン(Fe^{2+})を多量に蓄えることができました。

原始地球の生命は酸素の無い環境のもとで、豊富に手近に存在する鉄と硫黄を使って、硫化水素などをエネルギー源として生きていたと思われます。この際に鉄は電子の伝達役として働き、そのような形での鉄のエネルギー発生の役割は、その後の多様化する生物に受け継がれていきました。やがて生物は太陽光を用いて豊富にある二酸化炭素と水からエネルギー源をつくりだす方法を会得しました。光合成生物は大量の遊離酸素を発生しました。

遊離した酸素は海中に溶けていた Fe^{2+} イオンを酸化して溶けにくい Fe^{3+} イオンに変えました。このようにして大量の酸化鉄が先カンブリア紀の海底に沈殿し、縞状鉄鉱層と呼ばれる巨大な鉄床が地球上の多くの場所で作られました。これらの大鉄床は、大陸移動によって分割された原始大陸の姿を再現できるほどに広範囲に分布しており、今後も長く世界の鉄の需要をまかなうに足る埋蔵量を持ちます。精錬困難で低濃度の火成岩起源の鉄けい酸塩鉱物が、高濃度に濃縮された赤鉄鉱や磁鉄鉱などの酸化鉄鉱物に変

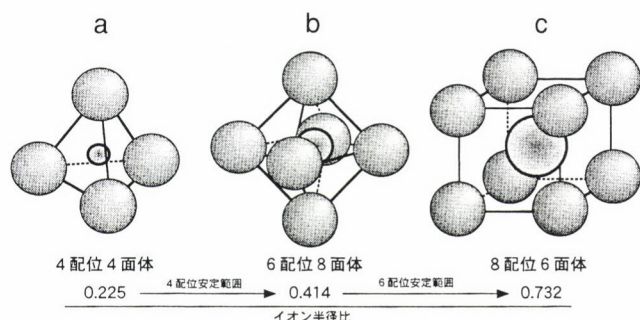


Fig. 4 酸化物の中の金属イオンの配置

身されました。鉄は錆びやすいことが欠点とされています。これは金属鉄を得にくいことを意味します。しかし同じ地上に豊富にある酸化物でも、アルミニウムを精錬するために莫大な電力を消費する事実に比べて、鉄鉱石ははるかに安価に精錬できます。鉄の酸化と還元は、様々な場面で重要な働きをしています。その一端を眺めてみましょう。

4 鉄イオンの多彩な働き

4.1 情報化を支える酸化鉄

鉄は数百度の高温で酸素に触れると第一酸化鉄(FeO)が生じます。これはウスタイトと呼ばれますが、室温では不安定であり天然鉱物としては産出しません。ウスタイトでは酸素原子のつくる八面体の隙間(Fig. 4b)に鉄原子が入りこみます。そこでは鉄は Fe^{2+} イオンとして存在しますが、一部は Fe^{3+} に酸化されています。このため電荷の過不足が生じ、それを補うように鉄原子の席が空になった欠損構造が生じてます。ウスタイトが酸化されるとマグネタイト(磁鉄鉱)になります。マグネタイトの化学式は $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ で、酸化状態の異なる2種類の鉄イオンが構成する複酸化物です。酸素の間のもう一種類の四面体の隙間を小さな3価の鉄イオンが占有した構造となります。さらに酸化が進むと γ ヘマタイト($\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$)になります。この酸化鉄も強磁性を示し、マグヘマタイトとも呼ばれます。これを空気中で熱すると最も安定な α ヘマタイト(赤鉄鉱)に変わります。

マグネタイトは最も古い時代から知られていた磁石であり、フェライトの基本形となっています。Table 1 からわかるように、2価と3価の鉄イオンは適度の大きさを持ち、他の元素イオンとの相互置換が可能です。こうしてマグネタイト中の鉄イオンを他の元素で置き換えることで多彩な特徴ある磁氣的性質が現れます。最初のフェライトは加藤与五郎と武井武によって見出されました。この発見を契機にフェライトは永久磁石などの硬質そして磁心などの軟質の両面で磁性材料として大きな展開を遂げました。フェライトの磁性はフェリ磁性と呼ばれます。鉄の磁性については次回に説明しますが、基本的には同符合のスピンの持つ電子が秩序をもって並ぶことで磁性が発現します。フェライトの場合には、酸素を通じて結び合った異なる金属イオンの電子が、酸素の電子を介して、互いにスピンを逆向きに揃えて安定になろうとします。その結果、たとえばマグネタイトでは Fe^{2+} と Fe^{3+} のスピンを相互に逆向きに揃える作用が働き、両イオンの磁気の大きさの差の総和が強磁性となって現れます。

4.2 美しい彩色

赤鉄鉱は弁柄として顔料に使われます。鉄イオンは自然に豊かな色彩を添えています。青インクで書いた字が黒色に変わって消えなくなるのは、大気中の酸素によって Fe^{2+} が Fe^{3+} イオンに変化するからです。このように Fe^{2+} と Fe^{3+} との間の移り変わりが比較的容易に起こることは重要です。色は可視光を電子が吸収することによって発色するのでイオンの状態によって色が変化します。 Fe^{2+} と Fe^{3+} イオンのバランスは、柿右衛門の赤、青磁の青など陶磁器やガラス中で美しい色彩と微妙な色合いをもたらします。大ざっぱに言えば鉄の含まれた釉を酸化性雰囲気で焼成すれば3価の鉄イオンが赤系統の発色を、還元性の雰囲気で焼けば2価の鉄イオンが青系統の色を発します。鉄は焼成雰囲気や他の構成元素の影響のもとで、イオンの状態つまり電子状態が変化して、多彩な色を生み出す最も重要な彩色元素です。

4.3 生命を保つ電子の伝達

前に述べた大鉱床の形成後、莫大な鉄を酸化しつくした遊離酸素はさらに増えつづけ、大気中の酸素濃度は上昇しました。増大する酸素は生物にとって猛毒物質であり、著しく有害な環境汚染でした。生物はこの毒を克服し、逆に酸素を有効に活用してより大きな活動エネルギーを生み出す生き方を獲得しました。その時に生物は身近に豊富に入手できた鉄の働きを巧妙に利用しました。酸素を使ってエネルギーを得た生物は爆発的に増大し、多様化が進みました。

鉄は1個の電子を出し入れによって、 Fe^{2+} と Fe^{3+} イオンの間を比較的容易に移り変わります。電子を失うことは酸化、電子を獲得することは還元を意味します。したがって Fe^{2+} から Fe^{3+} イオンの移行にともなって電子が伝達され、燃焼が起こっていることを示します。生体の中で酸素によって炭水化物のような栄養素がゆっくりと燃やされてエネルギーを得る過程は、このような鉄を介した電子の移動によって進みます。ヘモグロビンが酸素の運搬役を果たせる秘密は、鉄の電子のスピン状態の変化による微妙な働きにあります。生命活動のために鉄は巧妙に用いられ、生命に不可欠の元素となっています。太古の状態と異なる現在のような地球上の酸化性雰囲気のもとでは、生物が鉄を摂取することは困難になりました。人間の鉄不足による貧血は良く知られています。海の中の鉄の含有量は著しく減少しました。そこで魚などの海の生物にも鉄を求める性向が強く、鉄製漁礁に魚が集まってきます。

地球上の生物が酸素に依存している事実は、鉄に依存して生きていることに他なりません。生命の誕生と多様化の

過程で、鉄の働きは大きいのですが、未だ不明なことが沢山残っています。鉄という視点からのアプローチで生命の歴史を解説する研究は、多くの興味深い事実を探し出してくるであろうと期待されます。

引用資料

- 1) 三浦梅園：價原，岩波文庫，(1773)〔三浦梅園集，三枝博音編註，42 (1953)に収録]
- 2) 増子 昇：鉄と銅，73 (1987)，398.
- 3) Jacob Grimm and Wilhelm Grimm : Deutsches Wörterbuch, Dritter Band, S. 364, Verlag von S. Hirzel, Leipzig, (1862)
- 4) 理化学辞典，岩波書店，第5版，(1998) 付録9 核種の存在比と質量(p. 1532)所載データより算定
- 5) 松井義人，坂野昇平：岩石・鉱物の地球化学，岩波書店，(1992)，付表1 所載データにもとづき作成
- 6) 下記資料を参照して編纂作成
- (a) V. M. Goldschmidt : Geochemistry, Oxford University Press, A. Muir, ed., Oxford, (1954)
- (b) V. M. Goldschmidt : Geochimische Verteilungsgesetze der Elemente, VII Gesetze der Krystallochemie, Skrifter Norsk. Vid. Akad. Oslo, Oslo, (1926)
- (c) 前記文献(5)
- (d) E. T. Teatman et al : Compilation of Calculated Data Useful in Predicting Metallurgical Behavior of the Elements in Binary Alloy Systems, Report LA-4003, UC-25, Metals and Ceramics and Materials, TID-4500, Los Alamos Scientific Laboratory.
- (e) A Physicist's Desk Reference - The Second Edition of Physics Vade Mecum, eds. H. L. Anderson et al., American Institute of Physics, New York, (1989)
- (f) CRC Handbook of Chemistry and Physics (79th ed.), ed. D. R. Lide, CRC Press, (1998)
- (g) Elements Explorer - A Multimedia Guide to the Periodic Table (CD-ROM edition), McGraw Hill, (1998)
- (h) John Emsley, The Elements, Oxford University Press, Oxford, (1998)
- (i) 井口洋夫：元素と周期律，裳華房，(1987)
- (j) 近角聡信他：改訂 最新元素知識，東京書籍，(1985)
- (k) WebElements : periodical table of the elements : www.shef.ac.uk/~chem/web-elements/
- (l) An Online Interactive Periodic Table of the Elements : <http://www.chemicalelements.com/>

(1999年7月7日受付)

次号、Ⅱ 結晶レベルからみた鉄