

解 説

UDC 553.31.06

鉄 鉱 石 の 起 源*

武 内 寿 久 禰**

Origin of Iron Ores

Sukune TAKENOUCI

1. は じ め に

地殻を構成する岩石の大部分は珪酸塩鉱物からなる。この珪酸塩鉱物は酸素と珪素とで作られた種々のフレームの間に各種の元素がとりこまれたもので、岩石の化学組成(表1)をみればわかるように、主として酸素、珪素、アルミニウム、鉄、マグネシウム、カルシウム、ナトリウム、カリウムなどからなる。火成岩は、一般に SiO_2 45~70% (重量), Al_2O_3 14~17% のほか何種類もの元素を含んでいるが、堆積岩には石灰岩(CaCO_3)やチャート(SiO_2)のように単純な組成のものもある。地球の一番外側の地殻はこれら多様な岩石からなりたつたが、それは半径 6371 km の地球の表面のわずか 30 km の厚さを占めているにすぎない。しかも、われわれが利用している地下資源のほとんどは、地表近くに存在するものに限られ、たとえば石油井で 10 km まで、金属鉱山では 4 km までである。

鉄は地殻を構成する主要元素のなかで、アルミニウムに次いで多い金属であり(表2)、一部の岩石を除いて比較的普遍的に各種岩石中に分布している。鉄は火成岩・変成岩の中では主として珪酸塩鉱物・酸化鉱物として、堆積岩の中では主に酸化鉱物・水酸化鉱物として含まれていることが多いが、炭酸塩鉱物や硫化鉱物として産することもある。

地球内部や表面においておこなわれる種々の地質営力、すなわちマグマ活動における晶出分化作用、熱水作用、風化分解作用、堆積作用などによつて、鉄鉱物がとくに濃集した部分が鉄鉱床であり、鉄資源として利用されている。したがつて、鉄鉱石の起源を考えるにはどうしても鉄鉱床の分類とその生成条件などについて理解しておく必要がある。一口に鉄鉱石と称しても、マグマの結晶化の過程で晶出した磁鉄鉱が濃集してできた鉱床から採掘されたものもあれば、約 20 億年前の海底に沈殿した堆積岩の一部と考えられるもの、あるいは激しい広

域変成作用を受けて再結晶化した変成岩に相当するものなどさまざまである。このように、世界各地から生産される鉄鉱石にはそれぞれ異なつた生いたちがあり、それによつて鉱石の性質にも相違が認められる。したがつて、鉱床の分類、成因の研究は鉄資源の探査ばかりでなく、その利用・処理にも重要な基礎資料を提供することになる。

2. 鉄鉱床の分類

鉄鉱床はマグマ活動に関連して生成したもの、地表における風化分解や淘汰作用により生成したもの、化学的あるいは生物的沈殿作用により生成したものなどに大別される。以下にそれぞれの鉱床型について成因と特徴を簡単に述べる。

表 1 地殻と岩石の平均組成 (wt%) (理科年表)

	全 地 殻	平均火成岩	平均堆積岩
SiO_2	55.2	59.12	57.95
Al_2O_3	15.3	15.34	13.39
Fe_2O_3	2.79	3.08	3.47
FeO	5.84	3.80	2.08
MgO	5.22	3.49	2.65
CaO	8.80	5.08	5.89
Na_2O	2.88	3.84	1.13
K_2O	1.91	3.13	2.86

表 2 各種岩石の平均組成 (wt%) (理科年表)

	花崗岩	閃緑岩	はんれい岩	かんらん岩	安山岩	玄武岩
SiO_2	72.08	51.86	48.36	43.54	54.20	50.23
Al_2O_3	13.86	16.40	16.84	3.99	17.17	14.07
Fe_2O_3	0.86	2.73	2.55	2.51	3.48	2.88
FeO	1.67	6.97	7.92	9.84	5.49	9.00
MgO	0.52	6.12	8.06	34.02	4.36	6.34
CaO	1.33	8.40	11.07	3.46	7.92	10.42
Na_2O	3.08	3.36	2.26	0.56	3.67	2.23
K_2O	5.46	1.33	0.56	0.25	1.11	0.82

* 昭和 54 年 11 月 5 日受付 (Received Nov. 5, 1979) (依頼解説)

** 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

2.1 マグマ活動に関連して生成した鉱床

2.1.1 マグマ成鉱床

スウェーデンの有名なキルナバーラ鉱床はこの鉱床型に属し、キルナ (Kiruna) 型鉱床ともよばれている。マグマが結晶化する過程において、晶出した磁鉄鉱がその比重が大きいために沈降して濃集し、あるいはそれが貫入してきたもので、細粒の磁鉄鉱の他に燐灰石、輝石、角閃石が鉱石中に含まれている。燐灰石を含むため鉄鉱石の燐含有量は1~10%に達する。

珪酸分がやや少なく鉄・マグネシウムに富むマグマに伴ってチタンを含む磁鉄鉱の鉱床が生成していることもある。スウェーデンのターベルク鉱床にちなんでターベルク型鉱床とよばれることもあり、 TiO_2 含有量が20%に達しチタン資源となることもある。この型の鉱床には大規模なものが多く、鉱量が10億tに達するものもある。鉱石は一般にFe 10~35%, TiO_2 2~20%, V 0.1~0.5%を含有する。

2.1.2 カーボナタイト鉱床

カーボナタイトとよぶ岩石は、大陸に分布するアルカリ岩系のマグマ活動に伴って貫入してきた炭酸塩マグマから生成した岩石で、方解石、ドロマイト、アンケライト、菱鉄鉱などよりなり、ほかに金雲母、りん灰石、パイロクロア (含 Nb 鉱物)、含チタン磁鉄鉱、チタン鉱物、希土類元素を含む鉱物など多種類の鉱物を伴っている。カーボナタイトは堆積岩の石灰岩やドロマイトとは含有する微量成分や安定同位体組成に関して著しく異なっている。

カーボナタイト鉱床としてはカナダのオカ (Oka) やブラジルのアラシャ (Araxa) 鉱床のようにパイロクロアを含むニオブ鉱床がよく知られているが、南ア連邦のパラボラ (Palabora) のようにカーボナタイト中の銅鉄鉱石を採掘し、さらに副産物として磁鉄鉱、りん灰石、ヒル石などを回収している鉱山もある。カーボナタイトに伴う磁鉄鉱にはチタンが含まれ、燐灰石が伴うことが多いので、鉄鉱石としては必ずしも歓迎されていない。パラボラ鉱山では銅鉄採掘に伴う年間約300万tの低チタン磁鉄鉱は輸出しているが、約1000万tに達する高チタン磁鉄鉱は販売先がなくストックされている。

2.1.3 スカルン鉱床

日本の釜石鉱床や中国湖北省の大冶鉱床などはこの型に属する。石灰岩やドロマイトなどの炭酸塩岩に花崗岩質や閃緑岩質のマグマが貫入すると、マグマから放出される熱や熱水により炭酸塩鉱物は分解され、さらに熱水による運搬や拡散により珪酸や鉄が添加されて、鉄・カルシウムを含む珪酸塩鉱物が生成する。こうしてできた塊状の岩石はスカルンとよばれているが、主として鉄・カルシウムを含むざくろ石と単斜輝石からなり、ほかに緑れん石なども含まれている。

一般に、スカルン鉱床では磁鉄鉱はおもにざくろ石ス

カルン中に、黄鉄鉱や黄銅鉱などの硫化鉱物は単斜輝石スカルン中に生成している。しかし、スカルン鉱床産鉄鉱石には少量の硫化鉱物が含まれていることが多いので、硫黄、銅、亜鉛の含有量の高いものがある。また、少量の錫石を伴うこともあるので、錫の含有量にも注意を払う必要がある。

岩手県の和賀仙人鉱床は赤鉄鉱を伴うスカルン鉱床であるが、赤鉄鉱はスカルン生成後の熱水作用により形成されたものであろうと考えられている。

2.1.4 熱水成鉱床

非鉄金属鉱床の場合には、地殻中の熱水活動により形成された鉱床で重要なものが少なくないが、鉄鉱床の場合には埋蔵量の規模、鉱石の構成鉱物の性質などの理由により重要な鉱床は少ない。この型に属する鉱床としては、スペインのビルバオ (Bilbao) に菱鉄鉱・黄鉄鉱の塊状交代鉱床、西ドイツのジーガーラント (Siegerland) に菱鉄鉱の鉄脈鉱床、英国のヨークシャー (Yorkshire) に赤鉄鉱の鉄染交代鉱床などが知られている。

2.1.5 沈殿褐鉄鉱鉱床

わが国の第四紀火山地域には、含鉄泉の沈殿物として褐鉄鉱鉱床が生成しており、とくに北海道南西部、東北地方や群馬・長野県に多く存在する。この鉱床は、第四紀の火山活動に伴い鉄を含む硫酸泉、炭酸泉が地表に流出して酸化され、非晶質水酸化鉄が沈殿し、後に結晶化して針鉄鉱と粘土鉱物の集合体である褐鉄鉱に変化したもので、沼鉄鉱とよぶこともある。鉄鉱石の輸入が思うようにできなかった時代には、スカルン鉱床に次いでわが国の重要な鉄資源としてさかんに採掘された。鉱石中に鉄明ばん石、葱臭石、りん酸塩鉱物などを含んでいるため、硫黄、砒素、りんなど鉄の有害成分の含有量が多く、これらの除去に関する研究も行われたことがある。

鉱床は含鉄泉が流下した旧地形に支配されるため、形態が不規則で連続性を欠き1鉱体の鉱量はせいぜい数百万tまでであり、鉱石は低品位で水分が多いなどの理由から現在はあまり利用されていない。

2.2 風化分解や淘汰作用により生成した鉱床

2.2.1 風化残留鉱床

地表に露出する玄武岩のような鉄分の多い塩基性火成岩が高温多湿の熱帯性気候の風化作用を受けると、岩石は分解して珪酸分が溶出し、鉄分はおもに水酸化物となつて濃集し赤褐色のラテライトが生成する。このような土壌は紅土ともよばれている。同じような作用で水酸化アルミニウムが濃集したボーキサイトはアルミニウム資源として利用されている。ボーキサイトは一般にアルミナ分の多い閃長岩などを源岩としているが、風化分解をおこす気候条件もラテライトの生成条件とは幾分相異しており、ボーキサイトは年間降雨量の多い地域によく発達し、ラテライトは熱帯性ではあるが降雨量の少ない地域に多い。

ラテライトはおもに非晶質水酸化鉄、針鉄鉱、粘土鉱物よりなり、鉄含有量が 40% くらいのものもあるが、チタン、クローム、ニッケルなどを数% 含んでいることがある。とくに、蛇紋岩などの超塩基性岩が源岩のラテライトには珪ニッケル鉱が含まれニッケル含有量の高いものがあり、鉄資源としてよりもニッケル資源として重要視されている。ラテライトには鉄以外の金属元素や有害元素が含まれていることが多く、これらの除去が難しいため、現時点ではほとんど利用されていないが潜在的鉄資源として注目に値する鉱床である。

2.2.2 漂砂鉱床

岩石や鉱床が風化作用により分解されると、石英や磁鉄鉱のような安定な鉱物は流水により搬出され、河川や海浜に堆積する。このような過程で磁鉄鉱やチタン鉄鉱のような重い鉱物は、水の淘汰作用により条件の適当な箇所に濃集して砂鉱床を形成する。漂砂鉱床には現世のものやや古い洪積世のものがあり、また海浜や河床に集積したものと鉱物供給地に近い山腹に堆積したものなどがある。北海道噴火湾沿岸、下北半島沿岸、有明海などにみられる海砂鉄は、後背地の安山岩の風化分解により供給された磁鉄鉱、チタン鉄鉱の集積したもので、鉱石中にはチタンのほかにヴァナジウムも含まれている。これに対し、鳥取・島根県の中腹にある山砂鉄は中国地方の花崗岩が風化分解する過程で、その中に含まれていた磁鉄鉱が濃集したもので、不純物の少ない砂鉄である。昔の日本刀の原料にはもっぱらこの地方の砂鉄が用いられていたとのことであるが、それは当時の幼稚な製鉄技術にとつては他に得難い優れた原料であつたためであろう。

2.3 化学的沈殿作用により生成した鉱床

現在、世界的にみても最も重要な鉄資源は古い大陸地塊を構成する先カンブリア時代の岩石中の縞状鉄鉱層である。これらの鉱床から生産される鉄鉱石はタコナイト (taconite, アメリカ合衆国), メタタコナイト (metataconite, カナダ), イタビライト (itabirite, ブラジ

ル), セブラ鉱 (zebra ore, アフリカ), B. H. Q (banded hematite quartz, インド), などと呼ばれている。

先カンブリア時代の鉄鉱層は、今より約 27 億年前の時期に生成したアルゴマ型 (Algoman type) 鉱床と、22~19 億年前の時期に生成したスペリオール型 (Superior type) 鉱床とに大別することができる。とくに、スペリオール型鉄鉱層は先カンブリア時代の同じ時期に沈殿した堆積岩地域に全世界にわたって分布しており、その沈殿環境の考察は鉄資源の探査に必要なばかりでなく、先カンブリア時代における地球表面の環境の変化、つまり大気中の遊離酸素の増加といったような地球科学的問題についても重要な情報を提供している。

先カンブリア時代の縞状鉄鉱層に次いで経済的に重要な鉱床は、古生代以降に生成した炭酸塩鉱物を伴う魚卵状構造の赤鉄鉱・菱鉄鉱層であり、ヨーロッパのローヌ・ルクセンブルク地方に存在するミネット型 (Minette type) 鉱層がその典型とされている。

2.3.1 縞状鉄鉱層の構造・組織

縞状鉄鉱層は一般に厚さ数十mから数百mの厚い累層をなして広い地域に分布しているが、各層は厚さ数 cm のメソバンドとよばれる縞からなり、メソバンドはさらに厚さ数 mm のマイクロバンドとよばれる微小な縞からなっている。メソバンドは堆積物の沈殿過程における堆積条件の周期的変化を示す構造であり、マイクロバンドは構成鉱物の相異による構造である。

縞状鉄鉱層は先カンブリア時代の沈殿がさかんにおこなわれていた堆積盆の中に形成された鉱床であるが、鉱層を水平方向に追ってみると、海深の浅い堆積盆の周縁部には鉄の酸化鉱物を主体にした酸化物相が発達し、堆積盆の中心に向かつて鉄その他の炭酸塩鉱物を主体にした炭酸塩相、さらに鉄を含む含水珪酸塩鉱物を主体にした珪酸塩相と変化し、海深の最も深い堆積盆の中央部では鉄の硫化物を主体にした硫化物相が発達している。このような堆積相の変化は、堆積環境の化学的性質、すなわち酸化-還元条件や水素イオン濃度、温度などの相違に

表 3 縞状鉄鉱層にみられるおもな鉱物

酸化鉱物	赤鉄鉱	鉄鉱	鉄鉱	hematite	Fe_2O_3
	磁鉄	鉄	鉄	magnetite	Fe_3O_4
炭酸塩鉱物	方解石	方解石	方解石	calcite	CaCO_3
	菱鉄	菱鉄	菱鉄	siderite	FeCO_3
	ドロマイト	ドロマイト	ドロマイト	dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	アンケライト	アンケライト	アンケライト	ankerite	$\text{CaFe}^{2+}(\text{CO}_3)_2$
珪酸塩鉱物	グリーンナライト	グリーンナライト	グリーンナライト	greenalite	$\text{Fe}_6^{2+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	シャモサイト	シャモサイト	シャモサイト	chamosite	$(\text{Fe}_4^{2+}, \text{Al}_2)(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	鉄かんらん石	鉄かんらん石	鉄かんらん石	fayalite	Fe_2SiO_4
	グRUNERITE	グRUNERITE	グRUNERITE	grunerite	$\text{Fe}_7^{2+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	ミネソタアイト	ミネソタアイト	ミネソタアイト	minnesotaite	$\text{Fe}_3^{2+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	曹閃石	曹閃石	曹閃石	riebeckite	$\text{Na}_2\text{Fe}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	スティルプノメレン	スティルプノメレン	スティルプノメレン	stilpnomelane	$(\text{K}, \text{Ca})_{0-1}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_{7-8}\text{Si}_8\text{O}_{23-24}(\text{OH})_4 \cdot 2 \sim 4\text{H}_2\text{O}$
硫化鉱物	黄鉄鉱	黄鉄鉱	黄鉄鉱	pyrite	FeS_2
	磁硫鉄	磁硫鉄	磁硫鉄	pyrrhotite	Fe_{1-x}S

よつて生じたものであろう。

2.3.2 アルゴマ型 (Algonian type) 鉄鉱層

鉄鉱床のなかではもつとも古いもので、30 億～26 億年前の始生代に活動した火山帯と推定される地域に分布している。レンズ状または層状の鉄鉱層は鉱石中に火山噴出物と推定される物質を含み、火山岩や火山砕屑岩の間にはさまれているが、これら火山岩類は広域変成作用を受けて現在は緑色岩 (Greenstone) とよばれる岩石に変化している。

始生代の緑色岩帯はその岩石の性質から推定して現在の島弧、すなわち伊豆マリアナ列島や千島列島のような島弧地帯の火山活動帯に似ているといわれ、カナダ楕状地における研究によれば北米大陸の内側から外側の緑色岩帯に向かつて地質年代が系統的に若くなっていることが明らかにされている。これは古い大陸地殻の外側に造山帯ができ、それらが地塊化した後にさらにその外側に新しい造山帯ができて大陸地塊が発達してゆく過程を示している。

アルゴマ型鉄鉱層は次に述べるスペリオール型鉄鉱層に比べて鉄鉱層の生成した堆積盆の規模がやや小さく、炭酸塩相、硫化物相の発達著しく、かつ同一堆積盆内での水平方向の鉱石相の変化が著しい。鉄鉱層を形成した鉄は堆積盆に噴出した火山岩と関係のあるマグマから供給されたものであろう。

アルゴマ型鉄鉱層は大陸各地の先カンブリア時代の緑色岩中に存在する。なかでも、アメリカ合衆国ミネソタ州の Vermilion やカナダのオンタリオ州 Michipicoten などには 27 億年前にできた鉄鉱層が知られている。南アメリカ大陸ではギアナ楕状地やベネズエラの Imataca 地方に 34 億～30 億年前のもの、ブラジル Nova Lima には 28 億年前のものが発見されている。また、オーストラリア大陸では西オーストラリア州の Yilgarn 地区や Pilbara に 30 億～26 億年、アフリカ大陸では Rhodesia-Kaapvaal 地塊の中に 34 億～30 億年のアルゴマ型鉄鉱層が知られている。

2.3.3 スペリオール型 (Superior type) 鉄鉱層

アルゴマ型よりも生成時代が若く、ほぼ 26 億～18 億年のものが多いが、特に 22 億～19 億年の間に著しく集中している。

泥質・砂質堆積岩類 (砂岩・粘板岩) と化学的沈殿堆積岩類 (チャート・珪岩) の互層にはさまれて磁鉄鉱・赤鉄鉱を含む典型的な縞状鉄鉱層が存在する。アルゴマ型鉄鉱層と異なり、鉱石中に岩石片などの砕屑性物質を含まず、チャート中に鉄鉱物によるきれいな縞状構造が発達している鉱石で、酸化物相が卓越している。この型の鉄鉱層は世界各地の大陸に分布し、規模は大きい鉄品位は一般に 25～35% と低い。世界の大規模な鉄鉱床の大部分はこの型に属する。

北米大陸のスペリオール湖西側やカナダ南部に分布する

ヒューロン系 (Huronian, 約 20 億年の堆積岩) の中にはミネソタ州のメサビ (Mesabi Range) など有名な鉄鉱床が多数分布している。メサビ地区だけで数十億 t の埋蔵鉱量があると報ぜられている。オーストラリアのハマーズレイ (Hamersley) 南ア連邦のトランスバール (Transvaal)、ウクライナのグリボイログ (Krivoy Rog) などの鉄鉱層もこの型に属するとされている。これら著名な鉄鉱層地域のほかにも大陸各地にスペリオール型鉄鉱層の分布が知られており、アフリカ大陸西海岸地域の縞状鉄鉱層は南アメリカ大陸東海岸地域のものと地質環境や岩相がよく似ていると報ぜられている。中国大陸にもこの型の鉄鉱層の分布が知られている。

縞状鉄鉱層が地表に露出すると風化作用を受け地下水によつて珪酸分が溶出され、鉄分が赤鉄鉱、針鉄鉱 (褐鉄鉱) として濃集し 50～60% の鉄鉱石を形成することがある。ミネソタ州メサビ地域の鉄鉱山はこのような赤鉄鉱鉱床 (現地ではタコナイトに対して natural iron ore とよんでいる) を対象に開発されたものがある。その後、採掘量の増加に伴い赤鉄鉱鉱床の鉱量が減少し、低品位のタコナイトが開発されるようになった。タコナイトの開発には、鉱石の性質に由来する種々の技術改良がおこなわれている。タコナイトは珪酸分の多い硬い鉱石であるため、発破孔のさく孔はビットによる掘さくでは能率が上がらないので、ジェットピアシング (jet piercing) とよばれる強力な火焰によるさく孔法が用いられている。また、鉱石は低品位でかつ組織が極めて微細であるため、選鉱に際しては 43 μ 以下の粒径のものが 95% 以上を占めるように微粉碎し、磁鉄鉱を磁気選鉱により、あるいは赤鉄鉱を浮遊選鉱により回収し、60～67% の鉄精鉱を生産している。この鉄精鉱は微粉であるためベレットにして製鉄所に送らなければならないなど、鉱石処理上の費用がかかる欠点があるが、高炉原料としての性質が優れている点でその経費増を十分に補っている。

イタビライトはブラジルのミナスジェライス (Minas Gerais) 地方に産する結晶質の赤鉄鉱 (鏡鉄鉱ともよばれる) がほぼ一定方向に配列した結晶片岩状の鉱石の名称である。この鉱石はスペリオール型鉄鉱層が広域変成作用を受け、片理面を持つ珪質岩の間に再結晶した赤鉄鉱が濃集した層状鉄床から生産されている。

縞状鉄鉱層の上下の堆積岩の中にはアルゲル (algal) とよばれる藻類により形成された石灰物質のかたまりがある。このことは縞状鉄鉱層の堆積環境は比較的浅い暖かい海であつたことを示している。このほかの地質データもスペリオール型鉄鉱層は火山活動のない比較的安定した大陸棚的環境の浅海で沈殿堆積により形成されたものと推定されている。

2.3.4 ミネット型 (Minette type) 鉄鉱層

古生代以降の堆積岩中に存在する炭酸塩鉱物に富み魚

表 4 表 3 に掲げた鉱物以外で本文中に記載されている鉱物

針 鉄 鉱	goethite	$\alpha\text{-FeO}\cdot\text{OH}$
鱗 鉄 鉱	lepidochrosite	$\gamma\text{-FeO}\cdot\text{OH}$
チタン鉄鉱	ilmenite	FeTiO_3
錫 石	cassiterite	SnO_2
単斜輝石	clinopyroxene	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_6$
ざくろ石(アンドラダイト)	garnet(androdate)	$\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
角閃石(陽起石)	amphibole(actinolite)	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
緑 れ ん 石	epidote	$(\text{Ca}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\cdot\text{OH}$
緑 泥 石	chlorite	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al})_{12}(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$
金 雲 母	phlogopite	$\text{K}_2\text{Mg}_6(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{20}(\text{OH}, \text{F})_4$
ひる石(バーミキュライト)	vermiculite	$(\text{Mg}, \text{Ca})_{0.7}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al})_6[(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
パイロクロア	pyrochlore	$(\text{Na}, \text{Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F})$
りん灰石	apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$
鉄明ばん石	jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
葱臭石(スコロド石)	scorodite	$\text{Fe}^{3+}(\text{AsO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

卵状構造を呈する赤鉄鉱・菱鉄鉱の層状鉄床をミネット型鉄鉱層とよんでいる。ヨーロッパのロレーヌ-ルクセンブルク (Lorraine-Luxemburg) 地方にはジュラ紀の頁岩、砂岩、石灰岩の互層にはさまれて、魚卵状の赤鉄鉱、針鉄鉱、菱鉄鉱、緑泥石からなるミネット鉄鉱床がある。鉱石の品位は $\text{Fe}: 30\%$ 前後、 $\text{P}: 0.5\sim 1.8\%$ 、 $\text{CaO}: 5\sim 12\%$ であり一般に低品位ではあるが、ヨーロッパにおける重要な鉄資源として利用されている。この型の鉄鉱層は浅海に堆積した菱鉄鉱や海緑石がその後酸化・交代作用を受けて変化したものと推定されている。北米大陸や中国大陸など各地にも同様な鉄床が発見されており、世界的にみてもスベリオー型鉄鉱層に次いで重要な鉄資源である。

米国のニューヨーク、ペンシルベニア、バージニア、ケンタッキー、テネシー、ジョージア、アラバマの諸州には、上部シルル紀の砂岩、頁岩、石灰岩にはさまれて、方解石を伴う魚卵状赤鉄鉱や礫岩・砂岩の岩石粒を赤鉄鉱と方解石が充填してできた鉄層があり、クリントン型 (Clinton type) とよばれている。

カナダのニューファウンドランドにはオルドビス紀の砂岩・頁岩の中に、大量の菱鉄鉱と緑泥石を伴う魚卵状の赤鉄鉱の鉄層があり、ワバナ型 (Wabana type) とよばれている。鉄鉱石の沈殿堆積環境は似ているが、緑泥石と菱鉄鉱を伴う点でクリントン型とやや異なる。

2.3.5 クリーブランド型鉄鉱層

英国ヨークシャー (Yorkshire) 地方には下部ジュラ紀の砂岩・頁岩の中に魚卵状の菱鉄鉱・緑泥石からなる鉄鉱層がある。時に魚卵状黄鉄鉱や鉛・亜鉛の硫化物を伴うことがあり、鉱石品位は $\text{Fe}: 25\sim 35\%$ 、 $\text{P}: 0.6\sim 1.5\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3: 3\sim 6\%$ 、 $\text{SiO}_2: 6\sim 15\%$ 、 $\text{CaO}+\text{MgO}: 7\sim 8\%$ で低品位であるが、約 5 億 t の埋蔵量を持っている。この鉄床はクリーブランド型鉄鉱層とよばれている。

3. 縞状鉄鉱層の生成と地球表面の環境

鉄床の分類にみられるように、鉄鉱石は種々の鉄床型から供給されているが、資源的な面からみても純科学的な面からみても、スベリオー型縞状鉄鉱層の生成がもつとも重要でかつ興味深い。

スベリオー型鉄鉱層の生成時期は世界を通じて、22 億～19 億年前の先カンブリア時代に集中している。このことは、この時期に海水から大量の鉄が酸化鉄として沈殿するような著しい環境の変化が、地球表面全面にわたって生じたことを示している。

一般に、酸化的条件を示す $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比の高い赤褐色の陸成の碎屑性堆積岩は 16 億年以降の岩石にみられ

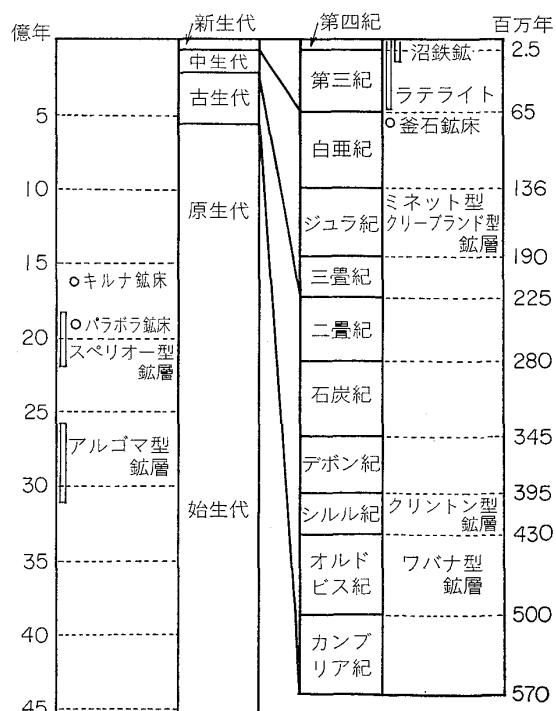


図 1 地質時代と鉄鉱床

るが、これより古い陸成堆積岩は $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比が低く、暗黒色を呈し閃ウラン鉱 (uraninite UO_2) や黄鉄鉱などが含まれていて酸素分圧の低い非酸化的环境を示している。また、酸素呼吸をおこなう微生物の出現は約 20 億年以降といわれている。これらの事実から、地球の大気中の酸素分圧が高くなりだしたのは 20 億～16 億年以降であろうと推定されている。この時期は縞状鉄鉱層の堆積の盛んな時期の直後にあたり、縞状鉄鉱層の生成と大気中の酸素分圧との間に何らかの関連があることを示している。

鉄の水への溶解度は 2 価の時には大きい、3 価になると減少する。始生代においては酸素はほとんど炭酸塩、珪酸塩、水として固定されており、大気中に自由酸素は少なく、鉄は 2 価でカルシウム、マグネシウムと同様な挙動をしていたと推定されている。

始生代後期から原生代前期にかけて地球上各地にわたり、浅海で活躍するある種の光合成有機物の作用により海水中の 2 価の鉄は酸化されて大量の酸化鉄が沈殿した。当時の海水は SiO_2 にも飽和していたと考えられ、沈殿した大量のシリカと酸化鉄が縞状鉄鉱層を形成した。

海水中の大量の鉄が沈殿した後、原生代になつて光合成有機物の活動により遊離酸素が大気中に蓄積されて酸素分圧の上昇をもたらした。地表の岩石中の鉄を酸化する圧力にまで達して赤色砂岩の出現 (16 億年以降) をみるにいたつたのであろう。

縞状鉄鉱層の生成時期には世界的規模の氷河活動があったようで、鉄床生成地域では氷河の浸蝕による碎屑物の供給と浅海性の安定な堆積環境とが交互におとずれ、層状の構造が形成されたものと推定されている。

これら堆積現象は人類の時間的尺度からみれば極めて長いゆつくりしたものであり、何回も環境の変化がくり返されながらその時々々の環境の条件を構成鉱物に反映して堆積が進んでいつたものであるから、一枚一枚の薄い層を詳細に調べることにより堆積の歴史を明らかにしてゆくことができる。

いずれにしても、約 20 億年よりも以前の地球の大気

は比較的還元的であり、鉄は Fe^{2+} の形で海に大量に溶解していたが、20 億年以降では大気中の遊離酸素がしだいに増加し、鉄は Fe^{3+} に酸化されて溶解度の減少をきたし沈殿したものと推定される。このような地球をおおう大気の還元状態から酸化状態への移行が、海水中の大量の鉄の沈殿を生じ、汎世界的な縞状鉄鉱層の生成をもたらしたのであろう。大気の組成が現在のものに近くなつた古生代以降においては、地域的な海において還元的な条件が生ずることはあつても、全世界にわたつて生ずることはなく、従つて堆積成の鉄鉱層の分布も地域的に限られたものとなつたのであろう。

4. お わ り に

鉄は他の金属に較べれば資源的には恵まれている。これまでに鉄鉱石の埋蔵量についていろいろな数字が発表されている。1 例として、世界全体では約 7800 億 t の鉄鉱埋蔵量があり、このうち 4700 億 t は縞状鉄鉱層であるとの報告がある。鉄鉱の品位や性質に厳しい注文をつけなければ、まだ当分は鉄鉱石が枯渇することはないであろう。しかし、近年の 50 年間の鉄消費量の伸びは著しい。縞状鉄鉱層が堆積した先カンブリア時代から今日までの 20 億年を、人間の寿命の 70 年に相当するとして、近年の 50 年間を単純に縮めてみるとそれはわずかに 1 分程度にしかない。

鉄鉱石ばかりでなく製鉄に必要な石炭・石油にしても石灰にしても、現在のわれわれは実に急速に長年の間温存されてきた地下資源を食いつぶしていることになる。近年、地球の地質現象の説明によく使われるプレートテクトニクス説によれば、大洋底に沈積した鉄はこれから何百万年か何千万年たてばどこかの火成活動のマグマに含まれて地表近くに上昇してきて鉄床を形成するかもしれない。しかし、この年数は人類にとつてはあまりにも長いものであり、人類はそれを待つことはできない。「子孫に美田を残さず」などと言わずに、できるかぎり資源のリサイクルに努力し、子孫も天の恵みを享受できるように努めるべきであろう。