

論文紹介

キルナ型鉄床としての中小坂鉄山・下仁田ジオパーク

The Nakaosaka Mine as the Kiruna type of iron ore deposit, Shimonita Geopark

宮下 敦・村上浩康・力田正一・市川 孝 (2024)
日本における酸化鉄-燐灰石型 (IOA, Kiruna 型) 鉄床の発見
-群馬県下仁田ジオパーク・中小坂鉄山の磁鉄鉄床-
資源地質, 74, 25-26

宮 下 敦*
Atsushi Miyashita

はじめに

下仁田ジオパークのジオサイトである中小坂鉄山は、江戸時代に発見、明治初期から本格的に開発され、日本の近代製鉄の魁となった産業遺産としても重要な存在である。中小坂鉄山は、製鉄施設の北側の山で産する磁鉄鉄 (Fe₃O₄) からなる鉄鉄石を利用して鉄生産を行っていた。

古くから使われてきた日本国内産の鉄鉄石としては、マグマが冷えて固まった火成岩に含まれる磁鉄鉄やチタン鉄鉄 (FeTiO₃) が、火成岩の風化部や、風化部が崩れて川や海の流れの作用で集まった砂鉄として採取されるものであった。このような鉄原料の鉄床を漂砂鉄床と呼んでいる。

もう一つの国産の鉄鉄石のでき方が、スカルン鉄床に伴って形成された鉄鉄石である。スカルン鉄床は、地下にある鉄を含む鉄液 (鉄床を作る熱水) が、カルシウム (Ca) やマグネシウム (Mg) に富んだ岩石と反応してできるスカルン鉄物を伴うことが特徴である。カルシウムに富んだ岩石の代表が石灰岩、マグネシウムに富んだ岩石の代表が苦灰岩

で、これ以外の岩石でも、カルシウムやマグネシウムに富んでいればスカルン鉄床ができる場合がある。スカルン鉄物自体、ざくろ石、輝石、緑れん石といったカルシウムやマグネシウムに富んだケイ酸塩鉄物 (ケイ素と酸素を骨組みとした結晶) で、これらの鉄物ができるときに、鉄液の性質が大きく変化し、含まれていた金属成分が酸化物や硫化物 (金属と硫黄の化合物) として結晶化して鉄床を形成するというしくみで形成される。そこでスカルン鉄床では、ふつう大量のスカルン鉄物を伴っている。

中小坂鉄山の磁鉄鉄は、もちろん前者の砂鉄ではなく、スカルン鉄物を大量に伴うこともないので、国内でみられる代表的な鉄鉄石とは異なる性質を持っている。そこで、下仁田町のご出身で、日本を代表する鉄床学者でもある佐藤興平博士は、「このユニークな鉄床の成因は未解明のままとなっている」とされていた (佐藤 2020)。

なお、現在の製鉄で用いられる鉄鉄石は、主に縞状鉄鉄層鉄床産の赤鉄鉄 (Fe₂O₃) であり、日本では全量をオーストラリアやブラジルなどの海外から輸入している。

2025年1月24日受付。2025年1月11日受理。

*成蹊学園サステナビリティ教育研究センター／成蹊大学理工学部／放送大

中小坂鉄山の特徴

1960年ころに中小坂鉄山を調査した地質調査所の竹田英夫氏は、スカルン鉱床とは別のしくみの熱水鉱脈鉱床説を提案した(竹田 1961)。鉱脈とは、鉱石を含む板状の鉱体をいう、ただ、一般的に鉱脈鉱床は、鉱石の他に、石英(二酸化ケイ素)や粘土鉱物など脈石と呼ばれる鉱物を多量に伴っている。中小坂鉄山の磁鉄鉱石は、わずかに方解石(カルシウムの炭酸塩)などの炭酸塩鉱物や緑泥石(粘土鉱物の一種)を伴うだけで、ほぼ磁鉄鉱だけからなるという特徴を持っている。このため、熱水鉱床であるとしても、鉱液の中から鉄の酸化物だけを沈殿させる仕組みを考える必要があった。

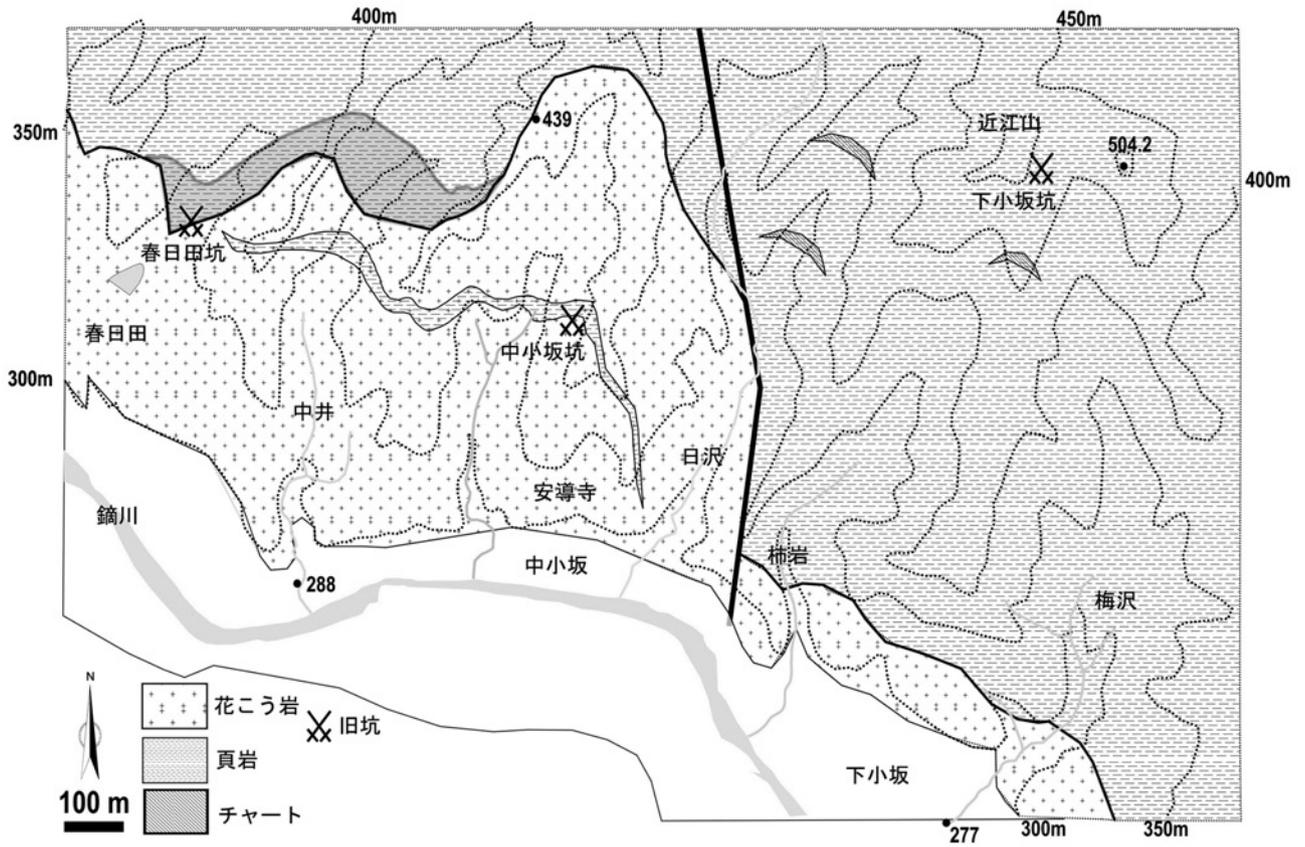
筆者らも、中小坂鉄山の磁鉄鉱の露頭を最初に観察したときは、鉱液の中から鉄の酸化物だけが結晶化して集まるしくみについて全く想像ができなかった。そこで、下仁田町研究助成を頂き、また、ごく小さな標本を採取して調べる許可をえて、鉄山周辺の地質を調査しなおすところから研究を始めた(第1図)。その結果、これまで白亜紀の火成活動でできた滑花こう岩の中だけに鉄鉱石が含まれているとされていたが春日田の^{かすがた}鉱体や下小坂の^{なんじやい}鉱体では、ジュラ紀付加体である南蛇井層の頁岩やチャートにも鉄鉱石が伴うことが明らかになった(第2図)。また、中小坂の^{なんじやい}鉱体も含めて、春日田や下小坂の^{なんじやい}鉱体も緑泥石変質帯(鉱体のまわりの岩石が鉱液との反応で変化した部分)を伴い、スカルン鉱物は全く見られないという共通点を持っていることも分かった。下小坂の^{なんじやい}鉱体にはアクチノ閃石というカルシウムを含む角閃石を伴うところがあるが、この角閃石は滑花こう岩(約7000万年前、佐藤ほか 2018)よりも古い時代(約1億年前、宮下ほか 2024)にできているので、^{なんじやい}鉱床ができる前からあった南蛇井層中の緑色岩であることも明らかになった。昔のレポート(沢田石・カネヤス^{なんじやい}産 1960)がスカルン^{なんじやい}鉱床としたのは、アクチノ閃石をスカルン^{なんじやい}鉱物と考えたためのものであるが、^{なんじやい}鉱物ができた年代からも、これは否定された。これらのデータは、竹田英夫氏の熱水^{なんじやい}脈^{なんじやい}鉱床を支持する結果だった。

さらに、中小坂^{なんじやい}鉱体・三連坑付近の磁鉄^{なんじやい}鉱石周辺の標本を電子顕微鏡で調べていて、ごくわずかで顕微鏡でしか見えない微細なものだが砒鉄^{なんじやい}鉱(ローリンジャイト、ヒ素と鉄からなる^{なんじやい}鉱物)と呼ばれる日本国内では比較的珍しい^{なんじやい}鉱物が含まれていることに気づいた。この砒鉄^{なんじやい}鉱は、硫砒鉄^{なんじやい}鉱(アルセノパイライト、鉄・ヒ素・硫黄からなる^{なんじやい}鉱物)と接合しており、両者の化学組成から二つの^{なんじやい}鉱物ができたときの温度が分かる。化学組成分析の結果、熱水^{なんじやい}脈^{なんじやい}鉱床としては高温の、500℃以上の温度でできたことが示された。また、精度は悪いものの、磁鉄^{なんじやい}鉱に含まれるマグネシウムの量から磁鉄^{なんじやい}鉱が結晶化したときの温度を推定する方法でも、これを裏付けるデータが得られた。原理が異なる二つの温度推定方法で一致した結果が得られたので、^{なんじやい}鉱床ができた温度が、熱水^{なんじやい}脈^{なんじやい}鉱床としては高いのは間違いと考えられる。

また、磁鉄^{なんじやい}鉱石を電子顕微鏡で詳しく調べると、大きさが数十ミクロンという非常に小さいものだが、塩素を含む^{なんじやい}磷灰石(カルシウムのリン酸塩)が、^{なんじやい}磷灰石本来の結晶の形(自形)を保ったままで、磁鉄^{なんじやい}鉱に包有されていることも見つけることができた。これは^{なんじやい}磷灰石が磁鉄^{なんじやい}鉱と同時に結晶化した証拠となる。この微小な^{なんじやい}磷灰石は、中小坂^{なんじやい}鉱体だけでなく、下小坂^{なんじやい}鉱体や春日田^{なんじやい}鉱体の磁鉄^{なんじやい}鉱にも含まれ、中小坂鉄山の鉄^{なんじやい}鉱石に共通の性質といえる(第3図)。

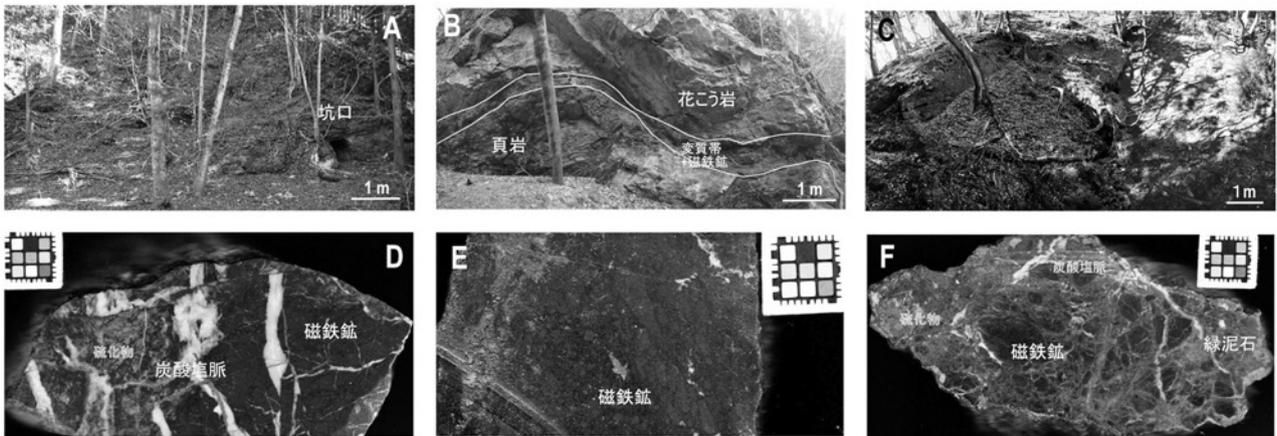
酸化鉄-磷灰石型^{なんじやい}鉱床

世界の磁鉄^{なんじやい}脈^{なんじやい}鉱床のでき方のうち、500℃以上の高温の^{なんじやい}鉱液から、^{なんじやい}磷灰石を伴って鉄の酸化物だけが沈殿する仕組みのものとして、酸化鉄-^{なんじやい}磷灰石(Iron Oxide -Apatite, IOA)型^{なんじやい}鉱床と呼ばれているものがある。代表的なものは、スウェーデンで古くから鉄^{なんじやい}鉱石を採掘しているキールナ^{なんじやい}鉱床(日本語の地理教科書などではキルナと表記)と、南米チリにあるエルラコ^{なんじやい}鉱床である。前者のキールナ^{なんじやい}鉱床は、約19億年前に形成された大規模な^{なんじやい}鉄^{なんじやい}鉱床で、数世紀にわたる採掘によって^{なんじやい}鉄^{なんじやい}山町全体が崩落する



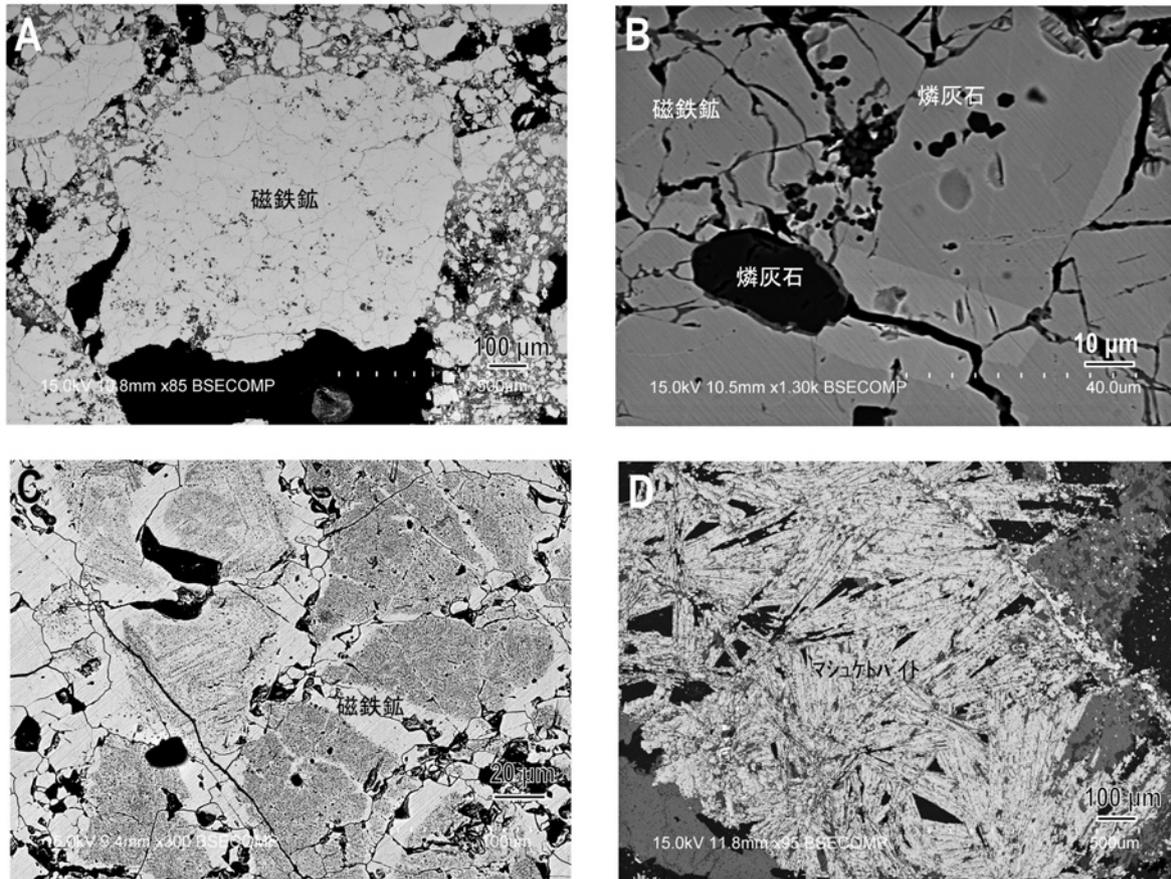
第1図 中小坂鉄山周辺地質図

地域の北半部にジュラ紀付加体堆積物の南蛇井層が、南半部に白亜紀滑花こう岩が分布する。中小坂鉄山の鉄鉱床は、西から春日田、中小坂、下小坂の3カ所で稼行された。春日田鉱体はチャート中に、中小坂鉱体は花こう岩中に、下小坂鉱体は頁岩中に胚胎される。鉱体の形成は周辺の岩石（側岩）の種類とは関係がないことが分かる。



第2図 各鉱体の採掘場所と磁鉄鉱鉱石

A：チャート中に開口している春日田鉱体坑；B：花こう岩と頁岩の境界にある中小坂鉱体；C：下小坂鉱体の露天掘り跡；D：炭酸塩脈が発達する春日田鉱体磁鉄鉱鉱石；E：破碎された模様が見える中小坂鉱体磁鉄鉱鉱石；F：緑泥石に密接に伴う下小坂鉱体磁鉄鉱鉱石

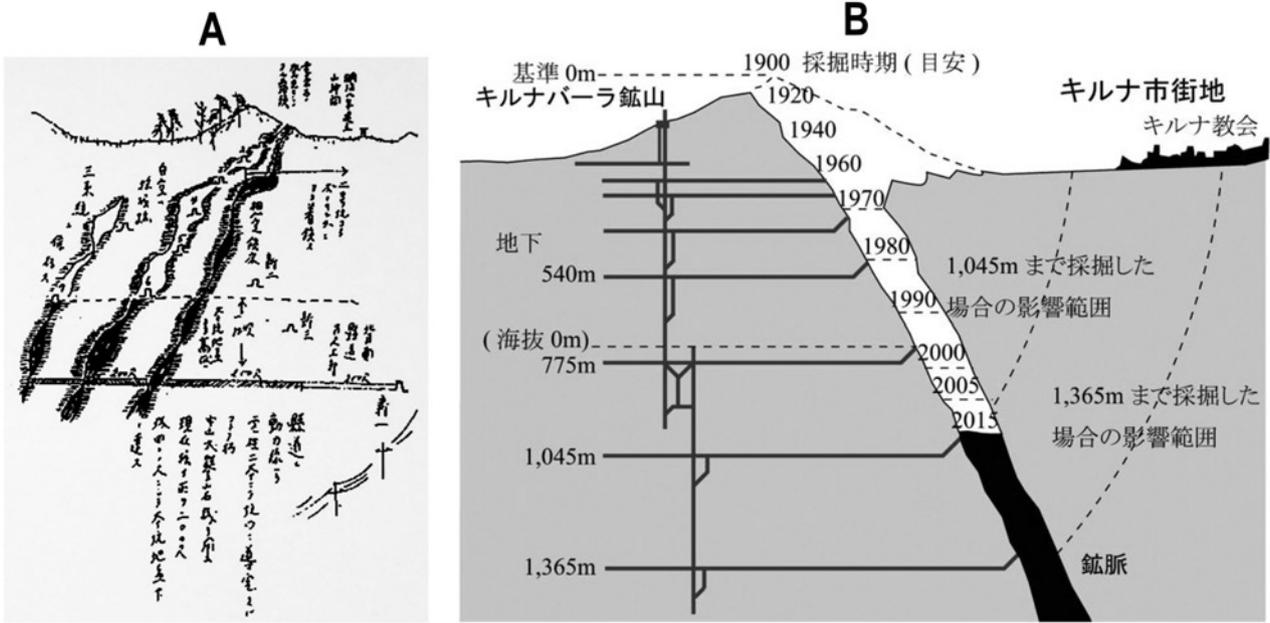


第3図 磁鉄鉱の組成像

走査型電子顕微鏡で撮影した磁鉄鉱の組成像（後方散乱電子像）。明るいところほど原子番号の大きな元素を多く含むことを示している。；A：中小坂鉱体の磁鉄鉱。磁鉄鉱に含まれる小さい黒い鉱物は燐灰石。中央の磁鉄鉱の周縁は破碎されて、小さいかげらになっている。；B：中小坂鉱体の磁鉄鉱中の燐灰石の産状。右上の小さい結晶は燐灰石本来の六角形の形をしており、磁鉄鉱と同時にしくは、その前に結晶になっていることが分かる。同じ磁鉄鉱でも暗い部分はケイ素を多く含む。；C：下小坂鉱体の磁鉄鉱結晶。1つの結晶の中の暗い部分はケイ素を多く含む。左上の磁鉄鉱は、ケイ素を多く含む部分と少ない部分が縞になっており、結晶成長のときにオシラトリ一累帯をしていることを示す。；D：春日田鉱体で見られる磁鉄鉱のマッシュケトバイトと呼ばれる組織。元々は赤鉄鉱で、板状の赤鉄鉱の結晶形を残したまま磁鉄鉱に置き換わっている。鉱液中の酸素量が減少したことを示している。IOCG型鉄鉱床でしばしば見られる現象。

危険が指摘され、町ごと移転を行っている（外村保 2018）ことでも知られている（第4図）。第4図でわかるように、中小坂鉄山とキールナ鉱床の坑道模式断面図は、規模は全く違うが、とてもよく似ている。また、後者のエルラコ鉱床は、鉄鉱石自体が200万年ほど前の火山噴火でできた溶岩の特徴を持っており、半世紀ほど前から磁鉄鉱マグマの証拠として有名だった（石原 2004）。ふつうの溶岩はケイ酸塩が主成分だが、エルラコ鉱床の溶岩は、酸化鉄がドロドロにとけたマグマとなり、これが噴火して磁鉄鉱でできた火山をつくたと考えられた。地球

の歴史の上では非常に古いキールナ鉱床と、ごく最近といってよい時代にできたエルラコ鉱床だが、磁鉄鉱などの酸化鉄を主要鉱種とし燐灰石も産するというもののほかに、鉱床ができた温度が500℃以上と高温で、伴う鉱物が塩素に富み、炭酸塩鉱物やアクチノ閃石、緑泥石をつくる中性からアルカリ性の鉱液による変質帯が発達するといった特徴が共通している。他にも、磁鉄鉱のまわりの岩盤が熱水によってくだかれ（熱水破碎）されていること（第3図A）や、赤鉄鉱（ Fe_2O_3 ）が磁鉄鉱に変化したマッシュケトバイトと呼ばれる組織（第3図D）なども



第4図 坑道断面図での中小坂鉄山とキルナ鉄山の比較

A：中小坂鉄山鉱体模式断面図（帝国鉱業株式会社加藤技師踏査立案に基づく小坂鉄山近江山着鉱予算書による）；B：キルナパール鉱山（キルナ）鉱体模式断面図，外戸保（2018）の第4図を一部改変。

規模は全く異なるが，両者の断面図での鉱体の形状はよく似ている。キルナパール鉱山では 1365 m まで開発が進むと，キルナ市街に崩落がおよぶ危険があり，都市移転が実施された。

酸化鉄型鉱床によくみられる現象である。

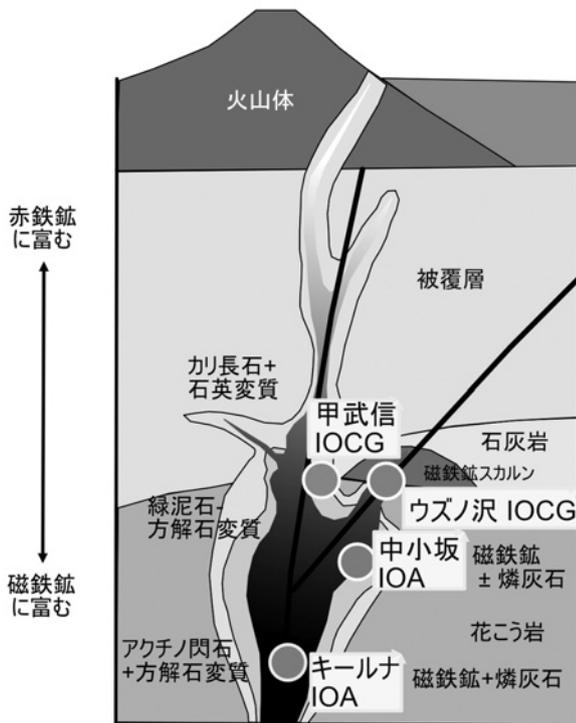
実は，これらの特徴が中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床で全て観察をすることができる。そこで，筆者らは中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床は，キルナ鉱床やエルラコ鉱床と同様に，酸化鉄－燐灰石型鉱床に分類されるものであるという結論に至った（宮下ほか 2024）。キルナ鉱床は約19億年前という古い時代（原生代）の大規模な鉄鉱床であり，エルラコ鉱床は新生代の磁鉄鉱マグマの活動によるかもしれないという特殊な性質を持っているので，そのようなものが日本列島に存在する可能性は，おそらくこれまで誰も検討したことがなかったのではないかとと思われる。中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床は，日本列島で初めて発見された酸化鉄－燐灰石型鉄鉱床ということになる。酸化鉄－燐灰石型鉄鉱床は，スウェーデンやチリだけでなく，世界中のいろいろな時代に形成されていることが分かっているが，これまで日本は分布の空白域だった。今回の発見は，その空白域を埋めるもと言える。

酸化鉄－燐灰石型鉱床の成因論と重要性

酸化鉄－燐灰石型鉄鉱床は，前述のように共通の特徴を持っているが，どうしてそのような特徴の鉱床ができるのか，ということについてはよく分かっていない。エルラコ鉱床の産状を根拠に，磁鉄鉱などの酸化鉄が溶融体（マグマ）として噴出した溶岩だという説，鉄と塩素が化合したゲル（水溶性片栗粉でつけたとろみみみたいなもの）が溶岩のように流れて溶岩のみかけを持つ酸化鉄のかたまりができたとする説，マグマの中で結晶化した磁鉄鉱が泡によって浮上して集まり，それがさらにマグマや地下の塩水が起源となった塩化物に富む鉱液によって安山岩溶岩を置き換えてしまったとする交代作用説，など百家争鳴の状態である。磁鉄鉱マグマ説だけとっても，マグマだまりの底でケイ酸塩マグマから分離して沈んでいた磁鉄鉱マグマが，火山の形成時に陥没によって上から押されることで，地下から割れ目を通して絞り出されてきたのがエルラコ鉱床だ，というようなモデルも考えられている。つま

り、鉱床学で未解決のホットなテーマになっている。また、同じ磁鉄鉱-燐灰石型鉱床でも、鉱床それぞれに個性があり、マグマ起源のものから、高温熱水性の成因が卓越するものまで、様々であるらしい。中小坂鉄山の場合は、マグマ性ではなく、高温熱水性の成因が卓越するものかもしれない(第5図)。中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床は、こうした成因論を検証する研究対象としても重要である。

さらに、中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床が、いつ頃できたのか、というのも未解決の問題である。筆者らも、いろいろな方法で鉱床ができた年代を分析しようとしたが、残念ながらうまくいっていない。少なくとも、滑花こう岩ができた時代(約7000万年、佐藤ほか 2018)よりも後ということは確かである。



第5図 酸化鉄-燐灰石 (IOA) 型鉱床のモデル図

深部ではキールナ鉱床に見られるように、磁鉄鉱+燐灰石の鉱石とアクチノ閃石+炭酸塩鉱物を伴う変質帯を伴う。より浅い部分では、中小坂鉄山のように磁鉄鉱の割合が増え、緑泥石+炭酸塩鉱物の変質帯を伴う。酸化鉄-金-銅 (IOCG) 型鉱床が IOA 型鉱床よりも浅所で形成されることは、南米の斑岩銅鉱床でも報告がある。関東山地では、秩父鉱山ウズノ沢鉱体や甲武信鉱山梓山鉱体が、IOCG 型鉱床の可能性があると考えられる。

一番可能性が高いのは、下仁田町の北西にある約600~200万年前の本宿^{もとじゆく}陥没構造にともなう火成活動(佐藤 2005)である。磁鉄鉱-燐灰石型鉄鉱床の中には、前述のエルラコ鉱床形成モデルのように火山活動やそれに伴う陥没に関連してできたと考えられているものがあるからである。これが正しいとすると、中小坂鉄山は、エルラコ鉱床とならんで世界でも最も若い磁鉄鉱-燐灰石型ということが出来るかもしれない。

本宿陥没構造をつくる火山活動の時代、下仁田町を含む関東地方の南側は、フィリピン海プレートの北上によって、伊豆弧の衝突が起こり、南側から強く圧縮されていたことが知られている。このような地球科学的な特徴は、チリの鉄ベルト地帯とよばれる南米の酸化鉄型のそれとよく似ている。このため、この時代の関東地方の南側で、南部フォッサマグナと呼ばれている地帯には、日本列島では知られていなかった、酸化鉄型鉱床や斑岩銅鉱床といった、南米にたくさん見られるような地下資源が、中小坂鉄山と同様に形成されている可能性がある。その検証はこれからの課題である。

磁鉄鉱-燐灰石型鉱床の成因が注目されているのは、もうひとつ理由がある。それは、磁鉄鉱に伴っている燐灰石に、レアアースに富んだものが見つかるからである(星野 2020)。レアアース(希土類元素)とは、電池、半導体、磁石などの原料になるネオジウム、サマリウム、セリウムなどの17種の元素を指す。世界で使われているレアアースの最大の生産地は、中国のバヤンオボー(白云鄂博)鉱床だが、この鉱床自体が酸化鉄型であるとする意見もある。バヤンオボー鉱床以外では、2024年の時点では、酸化鉄-燐灰石型鉱床からレアアースを製錬して生産しているところはないが、将来的には採掘ができる可能性があり、世界各地で探査が始まっていると予想される。現在、レアアースの採掘や生産は主に中国が担っており、資源安全保障上も日本独自のレアアース資源を確保する必要にせまられている。中小坂鉄山は、こうした地下資源をさぐる手がかりとなる可能性を秘めている。

下仁田町とスウェーデンのかかわり

最後に、以前、この研究報告（宮下・カールソン 2021）で紹介した、明治初期に下仁田町で鉄生産を行ったスウェーデン技術者についてふれておきたい。スウェーデン人のアドルフ・レイノルド・ベルーギレン（Adolf Reinhold Berggren, 1839-1893）は、1874年～1875年にかけて中小坂鉄山で高炉を運転して製鉄を行った。文献ではベルギレンと書かれることがあるが、これはオランダ語の読み方である。江戸時代末から明治初期にかけては、蘭学の伝統で、外国人の名前はオランダ語の発音で書かれたため、「ベルギレン」はスウェーデン人の名前をオランダ語にもとづいてカタカナ表記したものである。スウェーデンの人に「ベルギレンさん」といっても通じないので、現在使うのであれば、ベルーギレンというカタカナの方がよい。同じく中小坂鉄山にいたイギリス人のウォートルス（ジョン・アルバート・ウォートルス, John Albert Robinson Waters, 1846-1902）もオランダ語読みで、英語の読みではウォーターズというカタカナにするのがよいが、建築史分野で広くウォートルスが普及してしまったので修正が難しい。

ベルーギレンの製鉄技術は、日本の近代製鉄の魁となったものである。中小坂鉄山で最初に製鉄を試みたのは、ガワー（エラスムス・ガワー：Erasmus Henry Mauritius Gower, 1830-1903）やウォートルスら、イギリス人技術者たちだったが、中小坂鉄山のような小規模な高炉を、磁鉄鉱を原料として操業することは、彼らだけではできなかった。磁鉄鉱を製鉄原料とするためには、焙焼という工程で磁鉄鉱を焼いて赤鉄鉱に変化させてから高炉に入れる必要があり、この工程のノウハウが必要であったためと考えられる。イギリス人技術者たちは、中小坂鉄山の磁鉄鉱の性質と高炉の性能がスウェーデンのものに似ていることに気づき、製鉄を成功させるためにスウェーデンから技術者を呼び寄せたものと想像される。ベルーギレンの出身地であるカルマーレ地方スモーランドに近いスウェーデン中部でも、酸化鉄－燐灰石型の磁鉄鉱鉱床が採掘さ

れており、彼にとっては扱いなれた鉱石だったかもしれない。筆者は、ベルーギレンの来日と鉱床の成因に関係があるということは想像すらしていなかったが、中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床がキルナ鉱床と同じだとすると、スウェーデンと下仁田町の奇縁を感じざるをえない。

謝 辞

宮下ほか（2024）の共著者のお一人で、中小坂鉄山の調査を共にした市川 孝さんが、論文の出版を目前にしてご逝去されました。本稿を市川さんに捧げ、ご冥福を祈ります。

備 考

中小坂鉄山のご見学の際、落盤や酸欠などの危険がありますから、坑内には絶対に入らないでください。十分な装備がないと滑落などの危険がありますので、見学路の歩行も注意をしてください。ジオサイトであるとともに文化財でもありますから、許可なく試料採取は行わないでください。また、2025年時点では、暖かい時期のご見学はヤマビルやマダニなどの対策が必要です。安全な見学にご協力をお願いします。

引用文献

- 星野美保子（2020）重希土類資源としてのアパタイトの可能性。地球化学, 54, 29-59.
- 石原舜三（2004）エル ラコ磁鉄鉱溶岩をめぐる最近の話題。地質ニュース, 596, 66-69.
- 宮下 敦・テレース・カールソン（2021）明治初期の中小坂鉄山にいた外国人技術者たち。下仁田町自然史館研究報告, 6, 27-35.
- 宮下 敦・村上浩康・カ田正一・市川 孝（2024）日本における酸化鉄－燐灰石型（IOA, Kiruna 型）鉱床の発見－群馬県下仁田ジオパーク・中小坂鉄山の磁鉄鉱鉱床－。資源地質, 74, 25-26.
- 佐藤興平（2005）荒船山の火山岩の K-Ar 年代と本宿カルデラの火山活動史における意義。群馬県立自然史博物館研究報告, 9, 11-27.
- 佐藤興平（2020）群馬の地質と中小坂鉄山の鉄鉱床。鉄と

- 技術と歴史研究フォーラム第39回フォーラム講演会論文集, 幕末・明治期の鉄研究会キックオフ講演会, 63-68.
- 佐藤興平・竹内 誠・鈴木和博・南 雅代・柴田 賢 (2018) 関東山地北西縁下仁田地域に産する珪長質火成岩体の U-Pb ジルコン年代. 群馬県立自然史博物館研究報告, 22. 79-94.
- 沢田石雅弘・カネヤス鉱産(株)小坂鉱業所 (1960) 未利用鉄資源—小坂鉱山. 通商産業省地下資源開発審議会鉱山部会, 8, 159-161.
- 外柵保大介 (2018) 鉱山都市キルナ・イエリヴァレにおける産業動態と都市移転. E-journal GEO, 13, 452-462.
- 竹田英夫 (1960) 未利用鉄資源—小坂地区. 通商産業省, 地下資源開発審議会鉱山部会, 9, 149-155.