

## 金属鉱床探査の現在地と日本の役割

石田美月\*

## 1. なぜ今、金属資源探査が重要か

史上初めて鉄器を製造し頭角を現したヒッタイト、青銅器の原料となる錫の取引を独占して栄えたアッシリア、金鉱山の採掘により富を生み出したローマ帝国などに象徴されるように、金属資源は人類社会の黎明期から文明の基盤となってきた。金属資源の重要性は今日の社会においても増すばかりで、その需要は今後数十年にわたり伸び続けるとみられている (UNEP, 2020)。現在、多種多様な金属資源のニーズを駆動しているのが、電気自動車、風力発電、太陽光パネルなど脱炭素技術の普及であり、今後、石油に代わる新たな国際経済の要として金属資源が台頭するとも言われている (IEA, 2022)。

金属資源の中には、近い将来に需要が数倍に伸びると予想されるものもあり、既に採掘・利用された資源のリサイクルの推進はもちろんのこと、新たな金属資源を発見し開発していくのための継続的な取り組みが、社会にとって不可欠である (Ali et al., 2017; Herrington, 2021)。金属資源の一次的な供給源は、地球上における特定の元素の濃集帯である金属鉱床であり、それは多くの場合、有用元素を数パーセントから数 ppm 程度含む、大陸地殻中の岩体である。天然資源である金属鉱床は、鉱種ごとに地球上の特定の地質体に偏在しているが、石油などの化石燃料資源と比べると、その分布や実態について明らかになっていない部分も多い。カーボンニュートラル社会の実現に向けて各国が資源確保に乗り出す中、有望な金属鉱床が「なぜ」「どこに」できるのか理解し、効率的に鉱床探査を進めていくことは、純粋な科学的興味や、各鉱山開発プロジェクトの成否のみならず、

地政学的、戦略的重要性を持つ時代になりつつある。

金属鉱床探査は、本質的には、ひとつの国や地域のような広域から徐々に対象を絞りこみ、最終的には試掘という「針」で、鉱化した岩体を貫く (掘り当てる) ことを目指す行為である。探査対象地域のスケールや探査の段階に応じて、文献調査や衛星データ解析、地質図作成、地質構造調査、地化学探査、地球物理探査など様々な技術を駆使し、有望エリアの洗い出しや、より精密な調査の要否を判断することを積み重ねていく。鉱床探査は、有望地についての何らかの仮説を持った小規模スタートアップ企業 (探鉱ジュニア) が、鉱山会社等から出資を募り、仮説を検証していくような形で探査を行なうことが多い。現在においても金属鉱床分布の支配要因についての科学的理解が途上である以上、探査プロジェクトやそのための仮説もまた、多種多様である。金属鉱床の探査は伝統的に高リスクなビジネスであり、探査を行っても鉱床が発見される確率は「1000 件に 1 件」、発見されるまでに 10 年以上を要することもあることが知られている (Schodde, 2019a)。それでも 2000 年代前半頃までは、探査に支出された金額と同程度、またはそれを上回る価値の金属資源が同じ期間内に発見されていたが、近年の状況は厳しい。最近 10 年で、鉱床探査への投資は増加したにも関わらず、発見された資源の価値は、未公表の発見について補正したとしても、探査に支出された金額を大幅に下回っている (Schodde, 2019b)。特に、銅や金など、硫化鉱物に伴われる資源探査については、最も多くの探査予算が投入されている (S&P Global, 2024) にも関わらず、

\*関西学院大学学部研究員

採掘される鉍石の品位（単位岩石量あたりの目的金属の濃度）の低下や、発見される鉍床の規模の縮小が顕著であり、探査手法の抜本的改善および探査の成功率向上が急務である。

## 2. 大規模・高品位鉍床を求めて

金属鉍床において資源量の規模や鉍石の品位は、開発の経済性、および、開発に伴う環境負荷を決定づける重要な要素である。大規模鉍床は、インフラ面でスケールメリット（例えば、大型ダンプトラックによる効率的な輸送）を享受することができる。また、長期間の採掘が可能となるため、鉍山につきものの金属価格変動による経営リスクを平準化し、地域に安定した雇用を生むことができる。高品位鉍床は、より小さなエネルギーで鉍床（有用元素濃度：数パーセントから数ppm）から金属（有用元素のみからなる工業製品）を取り出すことができ、エネルギー効率面で有利であるうえ、廃棄物も少なくすむ。現在、金属資源生産に係る温室効果ガス排出は、様々な工業製品のカーボンフットプリントの大きな割合を占めることを考慮すると、鉍石の品位低下減および新規発見資源の規模縮小は、採掘された資源を利用する下流産業、そして金属資源の最終的な受益者である我々にとっても、日々の生活の環境負荷を増大させる重要な課題であるといえる（Azadi et al., 2020; Cox et al., 2022）。したがって、脱炭素時代の鉍床探査のあり方として、「大規模・高品位鉍床の狙い撃ち」が今後求められていくことは想像に難くないが、鉍床の規模や品位の決定要因については、未解明の部分が多いのが現状である。

そもそも、金属鉍床は、ある供給源（リザーバー）から有用元素が運搬され、狭い範囲に鉍物として固定されるイベントが一定期間繰り返し発生することで形成される。したがって、鉍床の規模や品位もまた、これらの元素移動プロセスのどこかで決定づけられているはずである。これまでに、世界各地の大規模・高品位鉍床の個々の形成プロセスについては、多くの研究が行われてきた。

伝統的な鉍床学は、鉍石中の構成鉍物、鉍石の鉍床内の産状や鉍床周辺の変質鉍物の分布など、主に鉍石～鉍床周辺（数km四方）スケールの詳細な観察に重きを置いており、これらのスケールにおける元素運搬・沈殿メカニズムについては、ある程度体系的な知見が確立されている。鉍床の大まかな成因ごとにまとめられたこれらの知見は、数多くの新鉍床の発見に貢献してきた一方で、同じ種類の鉍床は、規模や品位に関わらず、よく似た鉍化作用や鉍石の産状を示すこともまた明らかにしてきた（McCuaig et al., 2014; McCuaig and Hronsky, 2017; 日本における例はセクション4参照）。すなわち、鉍床の規模や品位の違いを生んだ要因を、鉍床スケールで観察可能な地殻表層における元素の運搬・固定プロセスのみに求めるのは困難であることが明白になり、より広い視野に基づく、異なるアプローチで鉍床の成因を考える必要が生じてきたのである。

## 3. データ駆動科学時代の鉍床学：日本の立ち位置

上記を踏まえ、近年、過去に発見・採掘された鉍山のデータを様々なデータセットと組み合わせて解析し、大規模・高品位の優良鉍床の形成条件をデータ駆動・帰納的に明らかにする試みが行われるようになった。これまでにたとえば、鉍化作用の継続期間が銅鉍床の資源規模に重要な役割を果たしていること（Chiaradia, 2020）、大陸地殻の厚さや鉍化作用の深度が鉍床中の金属の比率の支配要因の一つであること（Murakami et al., 2009; Hao et al., 2022）などが明らかになっている。しかし、このような研究の障壁となっているのが、（あらゆるデータ駆動型の研究がそうであるように）データの入手およびデータセットの整備である。鉍床は小規模になればなるほど詳細な調査がされづらく、情報が不確実になりやすいほか、鉍床の発見に至らなかった探査プロジェクトについては、そもそも情報が公にならないことも多い。そこで、これまでは、十分なデータの確保のため、

対象範囲を全球的にまで広げる研究、または非常に限られた範囲に限定して行われる研究が多かった。しかし、今後綿密なデータさえ取得できれば、鉱床探査にとってより妥当な規模感で同様の議論を行っていく（例えば、都道府県レベルのエリアで比較を行っていく）ことができると考えられる。

この観点において、日本は非常にユニークな立ち位置を有している。鉱床探査は基本的に民間企業によって行われることが多い中、日本においては第二次世界大戦後40年近くの間、政府主導で全国の鉱床探査が行われてきた（金属鉱業事業団による広域地質構造調査、精密調査等）。54地域にわたる調査の成果は全て年度ごとに報告書としてまとめられ公表されている。これらの報告書は最近までは入手・閲覧が難しかったが、資料のデジタル化により、国立国会図書館ホームページからオンラインで閲覧することが可能になりつつある。これらの国内資源調査の多くは鉱床の発見には至らなかったものの、これほどの広域を、同一主体が、調査法や報告形式などに一貫した原則を持ち探査した記録は世界的にも珍しいものであると考えられる。

また、地球科学的観点からは、4枚のプレートの境界部に位置する日本列島は活発な火成活動が広域で継続してきた歴史を持ち、火成活動に伴われる鉱床形成のナチュラル・ラボラトリーと捉えることができる。火成活動に伴って形成される金属鉱床は、鉱床の数や分布の範囲および産出する鉱種の多様性から特に資源として重要であり、中でも、地殻中のマグマによって加熱された、またはマグマから放出された、高温の流体（=熱水）により形成される熱水性鉱床は経済価値にして世界の天然金属資源の半分近くを供給していることが知られている（Arndt et al., 2017）。日本には、海底面や海底下で形成される火山性塊状硫化物鉱床（海底熱水鉱床もこの一種である）、石灰岩とマグマの接触交代作用が鉱化作用の鍵を握るスケルン鉱床、地殻浅部の貫入岩体の近辺～周縁部で形成される鉱脈型の鉱床など様々な熱水性鉱床が

存在し、工業の発展を支えてきた歴史を持つ。日本でこれまでに開発されてきたこれらの鉱床についての記録は、小規模鉱山も含めて非常に細かくまとめられており、おもな鉱種ごとに、鉱床のタイプや規模がまとめられた地図やデータセットを、産総研地質総合研究所のウェブサイト（地質図naviなど）上で閲覧・ダウンロードすることができる。

このように日本は、熱水性鉱床資源について、世界的に見ても広範囲かつ高密度の基礎情報が整備されていながらも、言語の壁もあいまってその情報が世界にあまり知られていないエリアであるという特徴を持つ。これら失敗と栄光の過去の記録に、これまでの探査では考慮されてこなかった新たなデータを組み合わせることで、有望な鉱床の形成に必要な条件を明らかにする、日本独自の研究が展開できる可能性がある。

#### 4. 筆者の最近の研究の着眼点

上記、金属鉱業事業団による国内金属鉱床探査の最も顕著な成功例として知られるのが、鹿児島県の菱刈金鉱床である。世界的に金鉱山は金量が100 tを超えると大規模鉱床と言われる中、菱刈鉱床は250 t以上の金を胚胎する、第一級の大規模金鉱山である。また、現在、世界で採掘される金鉱石の品位は1.3 g/t（1 tの鉱石につき1.3 gの金が含まれる；S&P Global, 2023）であるのに対し、菱刈鉱床の平均金品位は20 g/tと非常に高く、そのうち数パーセントについては1000 g/tを超える超高品位鉱石であることも、菱刈を優良な鉱床たらしめる大きな理由である（Sekine et al., 2002）。1981年に発見された菱刈鉱床は、1985年の開山から既に40年近く採掘が続けられており、地域振興に大きく貢献しているほか、国内における鉱山専門人材育成の場としても重要な役割を果たしている。

菱刈鉱床の発見に大きく寄与したのが、周辺地域においてそれ以前に発見・採掘された鉱床に関するデータの取得や解析である。具体的には、菱

刈鉱床の発見に先立ち行われた調査によって、鹿児島県の北薩地域においては既知の複数の金鉱床が、マグマの貫入に伴う基盤岩の隆起構造、または過去のカルデラ形成に伴う基盤岩の陥没構造中に胚胎していたことが明らかになった。この事実は、基盤岩の隆起または陥没構造が、熱水の地殻浅部への上昇と、運搬されてきた有用元素（金）の効率的な沈殿・固定を促進したと解釈された。そこで、これらの構造を持つ地域を重力探査や電気探査により洗い出し、網羅的調査を行った結果、それまでに知られていた鉱床よりも大規模・高品位の鉱床である菱刈鉱床が発見された (Izawa et al., 1990)。北薩地域においては、その後も同様の地質構造を持つ地域において鉱床探査が続けられたが、それ以上の鉱床の発見には至らなかった。以上の鉱床探査プロジェクトの結果からは、元素の運搬・沈殿に適した構造を持つ地域すべてに鉱床が胚胎するわけではないこと、このような地質構造の存在と鉱床の規模には関係がないことが示唆される。すなわち、鉱床形成のラストステップである「元素の固定」が可能な領域は、大規模鉱床の希少さに対して圧倒的にありふれており、鉱床の規模は、元素移動のより初期のプロセスに支配されている可能性が考えられる。

菱刈鉱床は、鉱床学的には低硫化系の浅熱水性鉱床と呼ばれるタイプの、地殻浅部で形成される鉱床である。貫入岩に隣接するように形成される鉱床と異なり、火成活動の周縁部に形成されるこのタイプの鉱床において、マグマは主に熱水循環系の熱源でしかなく、鉱化作用に果たす役割は小さいと過去には考えられてきた。このことから、北薩地域を含め、これまでの浅熱水性鉱床の探査において、マグマの性質が考慮されることはほとんどなかった。しかし近年、浅熱水性鉱床であっても、鉱床中の有用元素の大部分はマグマから供給されていることが、鉱石や周辺岩石の同位体的検討から明らかになりつつある (Hosono and Nakano, 2004; Tassara et al., 2022; Ishida et al., 2023)。すなわち、浅熱水性鉱床中の有用元素の

初期のプロセスを担うのはマグマであり、菱刈鉱床を含め、有望な浅熱水性鉱床の形成は火成活動との関連においてこそ考察されるべきであることが示唆される。

現在、日本国内で外資系探鉱会社4社によって進行中の金属鉱床探査プロジェクトは全てが浅熱水性鉱床をターゲットとしたものであることからわかるように、浅熱水性鉱床は日本が大きなポテンシャルを持つ資源である。また浅熱水性鉱床は、世界的に見ても金、銀、鉛、亜鉛および付随するインジウム、ビスマス、テルルなどのレアメタルの重要な供給源となっている鉱床でもある (Goldfarb et al., 2016)。マグマ（貫入岩）との地質的關係性がより明瞭であるそのほかの鉱床と比較して、浅熱水性鉱床の形成に適したマグマの性質の理解は圧倒的に遅れており、そのようなマグマを判別する有効な手法についても現時点では知られていない。筆者が最近の研究で取り組んでいるのはこのような、大規模・高品位の浅熱水性鉱床を形成する火成活動の性質の解明であり、火成岩を用いた有望な浅熱水性金鉱床探査指針の構築を目指している。

## 引用文献

- Ali SH, Giurco D, Arndt N, Nickless E, Brown G, Demetriades A, Durrheim R, Enriquez MA, Kinnaird J, Littleboy A, Meinert LD, Oberhänsli R, Salem J, Schodde R, Schneider G, Vidal O, Yakovleva N (2017) Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature* 543: 367–372. doi: 10.1038/nature21359.
- Arndt NT, Fontboté L, Hedenquist JW, Kesler SE, Thompson JFH, Wood DG (2017) Future Global Mineral Resources. *Geochemical Perspectives*: 1–171. doi: 10.7185/geochempersp.6.1.
- Azadi M, Northey SA, Ali SH, Edraki M (2020) Transparency on greenhouse gas emissions

- from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience* 13: 100–104. doi: 10.1038/s41561-020-0531-3.
- Chiaradia M (2020) Gold endowments of porphyry deposits controlled by precipitation efficiency. *Nature Communications* 11: 248. doi: 10.1038/s41467-019-14113-1.
- Cox B, Innis S, Kunz NC, Steen J (2022) The mining industry as a net beneficiary of a global tax on carbon emissions. *Communications Earth & Environment* 3. doi: 10.1038/s43247-022-00346-4.
- Goldfarb RJ, Hofstra AH, Simmons SF (2016) Critical Elements in Carlin, Epithermal, and Orogenic Gold Deposits In: Verplanck PL, Hitzman MW (eds) *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*. pp 217–244.
- Hao H, Park J-W, Campbell IH (2022) Role of magma differentiation depth in controlling the Au grade of giant porphyry deposits. *Earth and Planetary Science Letters* 593: 117640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117640>.
- Herrington R (2021) Mining our green future. *Nature Reviews Materials* 6: 456–458. doi: 10.1038/s41578-021-00325-9.
- Hosono T, Nakano T (2004) Pb-Sr isotopic evidence for contribution of deep crustal fluid to the Hishikari epithermal gold deposit, southwestern Japan. *Earth and Planetary Science Letters* 222: 61–69. doi: 10.1016/j.epsl.2004.02.010.
- IEA (2022) *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. World Energy Outlook Special Report. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Ishida M, Fujinaga K, Tanimizu M, Ishikawa T, Nagaishi K, Kato Y (2023) New Pb isotopic data from Japanese hydrothermal deposits for tracing heavy metal sources. *Geochemistry*. doi: 10.1016/j.chemer.2023.126045.
- Izawa E, Urashima Y, Ibaraki K, Suzuki R, Yokoyama T, Kawasaki K, Koga A, Taguchi S (1990) The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan. *Journal of Geochemical Exploration* 36: 1–56. doi: 10.1016/0375-6742(90)90050-K.
- McCuaig TC, Hronsky JMA (2014) *The Mineral System Concept: The Key to Exploration Targeting*. Economic Geology Special Publication 18: 153–175. doi: <https://doi.org/10.5382/SP.18>.
- McCuaig TC, Hronsky J (2017) The mineral systems concept: the key to exploration targeting. *Applied Earth Science* 126: 77–78. doi: 10.1080/03717453.2017.1306274.
- Murakami H, Seo JH, Heinrich CA (2009) The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu-Au± Mo deposits. *Mineralium Deposita* 45: 11–21. doi: 10.1007/s00126-009-0255-1.
- Schodde R (2019) *Trends in Exploration*. International Mining and Resources Conference. Melbourne, Australia.
- Schodde R (2019) *Exploration and discovery of base and precious metal deposits in the Pacific Rim over the last 50 years*. Mineral Systems of the Pacific Rim Congress. Auckland, New Zealand.
- Sekine R, Izawa E, Watanabe K (2002) Timing of Fracture Formation and Duration of Mineralization at the Hishikari Deposit, Southern Kyushu, Japan. *Resource Geology* 52: 395–404. doi: 10.1111/j.1751-3928.2002.

tb00149.x.

S&P Global (2023) Gold mine stripping ratios rise on high prices, grades continue declining. <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/gold-mine-stripping-ratios-rise-on-high-prices-grades-continue-declining>

S&P Global (2024) World Exploration Trends 2024. <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/pages/world-exploration-trends-2024>

Tassara S, Rooney AD, Ague JJ, Guido D, Reich M, Barra F, Navarrete C (2022) Osmium isotopes fingerprint mantle controls on the genesis of an epithermal gold province. *Geology*. doi: 10.1130/g50045.1.

UNEP (2020) Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing extractive industries towards sustainable development. In: Elias T. Ayuk AMP, and Paul Ekins (ed). <https://www.resourcepanel.org/reports/mineral-resource-governance-21st-century>