

ポーフリーカッパー鉱床探査ゲーム

澤口 隆*

Porphyry Copper Exploration Game.

Takashi SAWAGUCHI*

Abstract

Porphyry copper deposits are the largest source of copper ore that was formed from hydrothermal fluids associated with vertical dikes of porphyritic intrusive rocks. This paper shows "Porphyry Copper Exploration Game (Japanese translation version)", that was originally developed by Pete Loader of the Geological Society in 2018. The game comprises of several instruction and information cards (geography, geology, hydrothermal alteration, magnetic survey and stream sediment mineralogy). Separated groups of students are asked to discuss and decide to choose the most viable and easily exploitable porphyry deposits area using the information cards and thinking carefully about the legal, environmental, logistical and engineering issues associated with mining. This game also leads to an understanding of "(target 12.2) By 2030, achieve sustainable management and efficient use of natural resources" as stated in the UN agenda for sustainable development (SDGs).

Keywords : Porphyry Copper, Mine, Geoscience Education, Active Learning

1. はじめに

鉱床とは、資源として利用できる有用元素が濃集した岩石（鉱石）が集まった場所のことで、一般にその成因から、マグマ性、熱水性、堆積性、風化残留、変成鉱床など、様々

*) 東洋大学自然科学研究室 〒112-8606 東京都文京区白山 5-28-20
Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

に分類がなされている。ポーフイリーカップパー（斑岩銅）鉱床は、斑岩に伴う大規模・低品位な鉱染状銅鉱床で、花崗閃緑斑岩などの岩株状浅所貫入岩体に関係する熱水鉱床として産出する（地学辞典，1996）。ポーフイリー鉱床は、銅・モリブデン・錫・タングステン等の重要な供給源であり、特に銅については、世界で生産される全鉱石のうちの約60%がこの型の鉱床から採掘されている（渡辺，1998）。銅は銀に次いで高い導電性、熱伝導性を持ち、安価で加工性も良いため、電線、エアコンの熱交換器等に使用される重要な工業資源である。鉱床が形成されるメカニズムには様々な地質現象が関与しており、また資源問題は身近な実体経済や環境問題とも深く関連していることから、地質学を学ぶための教材として鉱床を題材とする意義は大きい。本論では、ロンドン地質学会（The Geological Society）のPete Loader氏が開発した「ポーフイリーカップパー鉱床探査ゲーム」を邦訳し、その教育活用方法について報告する。

2. ポーフイリーカップパー鉱床（斑岩銅鉱床）

ポーフイリーカップパー鉱床は、プレートの沈み込みに伴うカルクアルカリ質の火成活動に伴って形成されることが多い。太平洋を取り囲む環太平洋火山帯に広く分布をしているが、日本には存在しない（Fig. 1）。

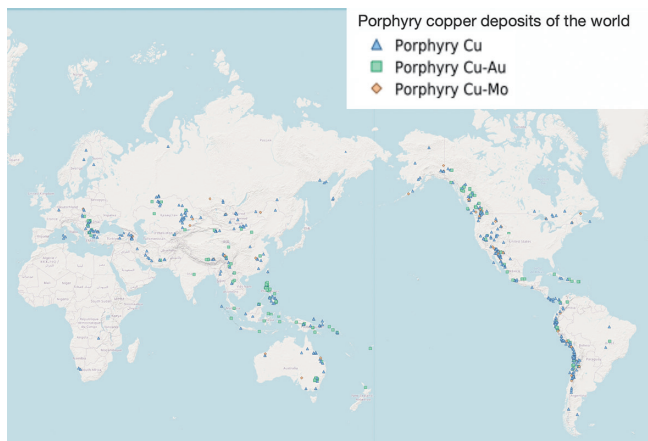


Fig. 1 世界のポーフイリーカップパー鉱床（USGS, online: map-us.html）

国別で見ると、銅の生産量はチリが5,600,000トン/年（全体の約28%）、ペルーが2,400,000トン/年（全体の約12%）と突出して高く、米国、中国、コンゴがそれに続く（Table 1）。世界最大の露天掘り銅鉱山であるチリ・チュキカマタ鉱山は、後期始新世から前期暁新世（42Ma-31Ma）に形成されたポーフイリーカップパー鉱床で、1915年から露天掘りでの採掘が行われている（渡辺，2001）。

Table 1 世界の国別銅生産量と埋蔵量 (USGS Mineral Commodity Summaries 2020, online: mcs2020.pdf)

	Mine production		Reserves ⁷
	2018	2019 ^e	
United States	1,220	1,300	51,000
Australia	920	960	87,000
Chile	5,830	5,600	200,000
China	1,590	1,600	26,000
Congo (Kinshasa)	1,230	1,300	19,000
Indonesia	651	340	28,000
Kazakhstan	603	700	20,000
Mexico	751	770	53,000
Peru	2,440	2,400	87,000
Russia	751	750	61,000
Zambia	854	790	19,000
Other countries	3,540	3,800	220,000
World total (rounded)	20,400	20,000	870,000

(単位：千トン)

最近、丸山・古野 (2018) は、南米大陸西縁に斑岩銅鉱床が集中する理由として、中央海嶺から供給された銅元素が、プレート沈み込み帯における構造侵食作用による銅元素の前弧域の濃集プロセスの重要性を指摘し、これを「銅バンク (Copper Bank)」と名付けた。

一般にポーフィリー銅鉱床から得られる銅の平均品位は低いが、巨大で比較的浅所に位置しているため、大規模な露天掘りで採掘されることが多い。マグマが地下浅所に貫入して冷却する際に、マグマが放出した熱水によって累帯状の銅化帯や変質帯を形成する。中心部から外側に向かって、黒雲母やアルカリ長石を含むカリウム変質帯、その周りのセリサイト変質帯 (フィリック変質帯)、さらにその周りに角閃石・黒雲母の緑泥石化や斜長石の曹長石化・緑簾石化で特徴付けられるプロピライト変質帯が見られる (Fig. 2)。カリウム変質帯とセリサイト変質帯の境界付近には黄銅鉱などが産出する高品位帯が存在する。これらの初生的斑岩銅鉱床の頂部は、浅成変質と呼ばれる地下水との反応によって酸化、溶脱、富化のサイクルが繰り返されて銅含有量が高められた二次富化帯が覆っている (渡辺, 2003)。

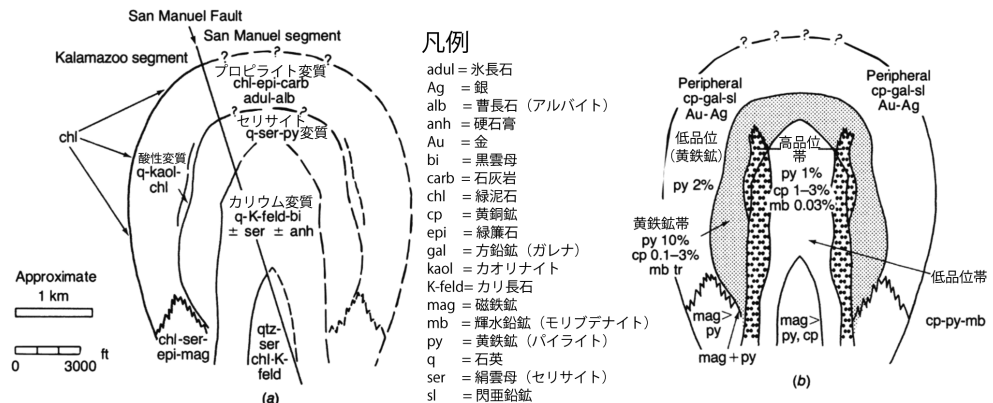


Fig. 2 斑岩銅鉱床における変質帯と銅化帯の模式図 (Guilbert and Park, 1986を改変)

3. ポーフィリー銅鉱床探査ゲーム

ロンドン地質学会 (The Geological Society) のPete Loader氏は、2018年に開催されたESTA (Earth Science Teachers Association) の年次大会において、ポーフィリー銅鉱床探査ゲームを発表した。このゲームは、ポーフィリー銅鉱床 (斑岩銅鉱床) の探査を題材とした、グループで行うゲーム形式の学習用教材で、岩石・鉱床・地球物理・環境・経済・国際問題などの教育目的で作られている。

3.1 準備するもの

ポーフィリー銅鉱床探査ゲームは、印刷された以下のセットから構成されている (Table 2, Figs. 3~9)。教材として使える拡大図をAppendixに添付する。

Table 2 ポーフィリー銅鉱床探査ゲームに含まれるセットの概要

内容物		説明
説明書		ゲームのルールが記載されている。
解説図		ポーフィリー銅鉱床の形成過程をまとめた図。
情報カード (全ての情報カードには調査地域A~Eの位置が示されている。)	地形	基盤岩の上に、完新世の河川堆積物が覆う様子が確認できる。鉄道の線路が調査地域の西部を南北に通っている。北東部には、国境線があり、隣国とは内戦状態である。
	地質	完新世の河川堆積物を取り除いた時の、基盤岩の地質図。先カンブリア時代の砂岩、石灰岩、火山岩に、ジュラ紀の花崗岩バソリスが貫入している。火山岩の上には古第三紀の堆積物が堆積している。被覆する河川堆積物の厚さ (深さ) が等深線で示され、北東から南西へ厚化している。
	熱水変質	先カンブリア時代の基盤岩とジュラ紀の花崗岩の中にみられる熱水変質帯の分布が示されている。
	磁気異常	磁気探査によって確認できる磁気異常の強さ
	河川堆積物に含まれる黄鉄鉱	河川堆積物に含まれる黄鉄鉱の割合

(それぞれ、Appendixに教材に使える拡大図を添付)

ポーフイリーカッパー鉱床探査ゲーム

ここは、以前に多くのポーフイリー鉱床が見つかった場所です。お金持ちの投資家がある会社にお金を貸し出し、あなたはこの地域の資源探査の権益を取得することができます。このゲームの最終目的は、ポーフイリー鉱床が見つかる可能性の高い場所を見つけ出し、大きな鉱山会社にその権益を売ることです。

この国の政府が探査を許可した地域は、A から E の 5 地域です。あなたが最終的にどの地域の権益を取得するかを決断したあと、他のチームと競い合います。それぞれの地域において、シークレット・オークションを実施します。入札結果は政府代表（役）が発表します。

あなたに許された探査費用予算は、2 億米ドルです。この予算をいくつかの地域に分散しても構いませんが、オークションの入札では不利になるかもしれません。

ゲームの勝者は、ポーフイリー鉱床探査候補としてもっとも実現可能性が高く、かつ開発が容易な地域を見つけたチームです。鉱山開発に関連して、法的要因、環境要因、ロジスティック、およびエンジニアリング技術などを注意深く考慮してください。

いくつかの専門的事項

- ・この地域でこれまでに見つかっているすべてのポーフイリー鉱床は、ジュラ紀に形成されており、その母岩は先カンブリア代の岩石であった。
- ・鉱化作用は“被覆層（完新世の河川堆積物を含む最も新しい堆積物）の下”から見つかっている。
- ・この地域の他の鉱床では、非常によく発達した変質帯ゾーニングが確認されている。



The
Geological
Society

serving science & profession



Fig. 3 ポーフイリーカッパー探査ゲーム・説明書

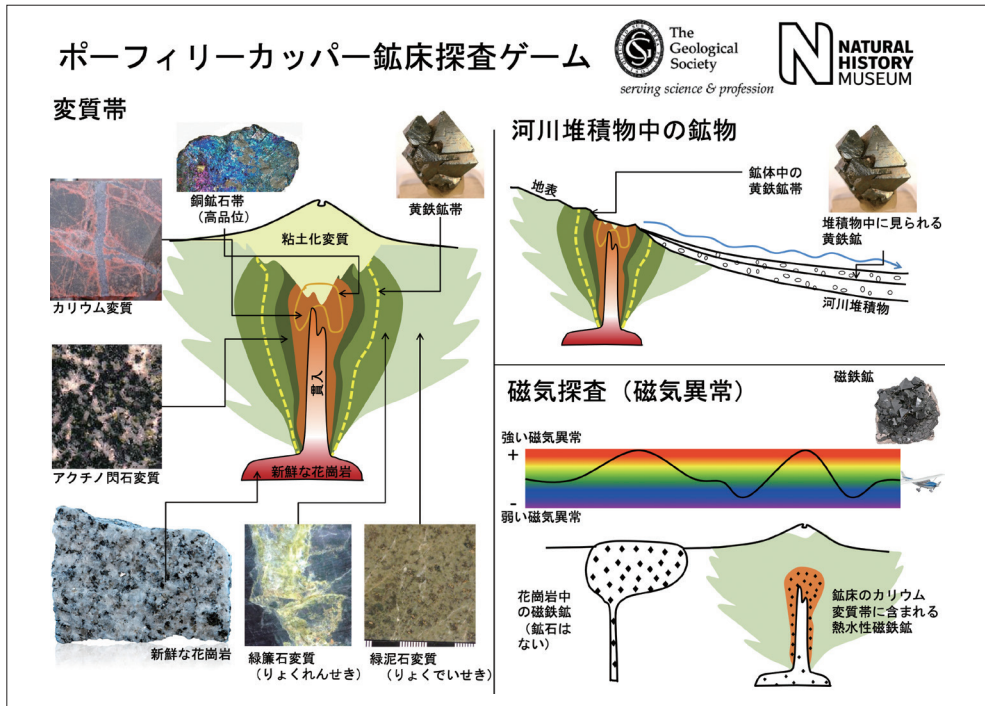


Fig. 4 ポーフリー銅床探査ゲーム 解説図

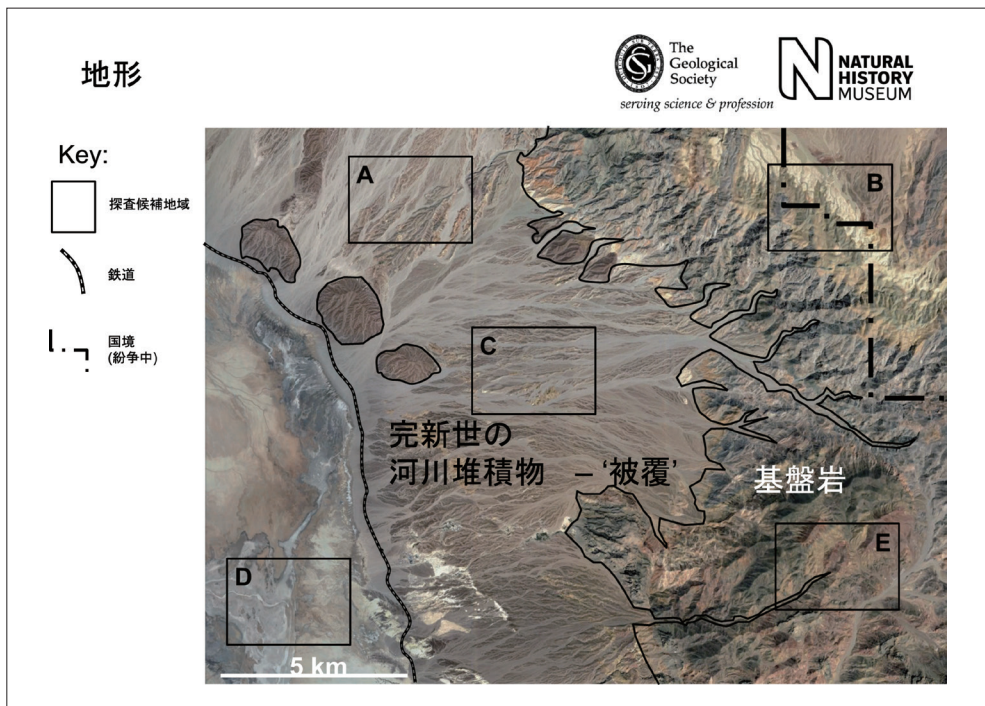


Fig. 5 ポーフリー銅床探査ゲーム 情報カード (地形)

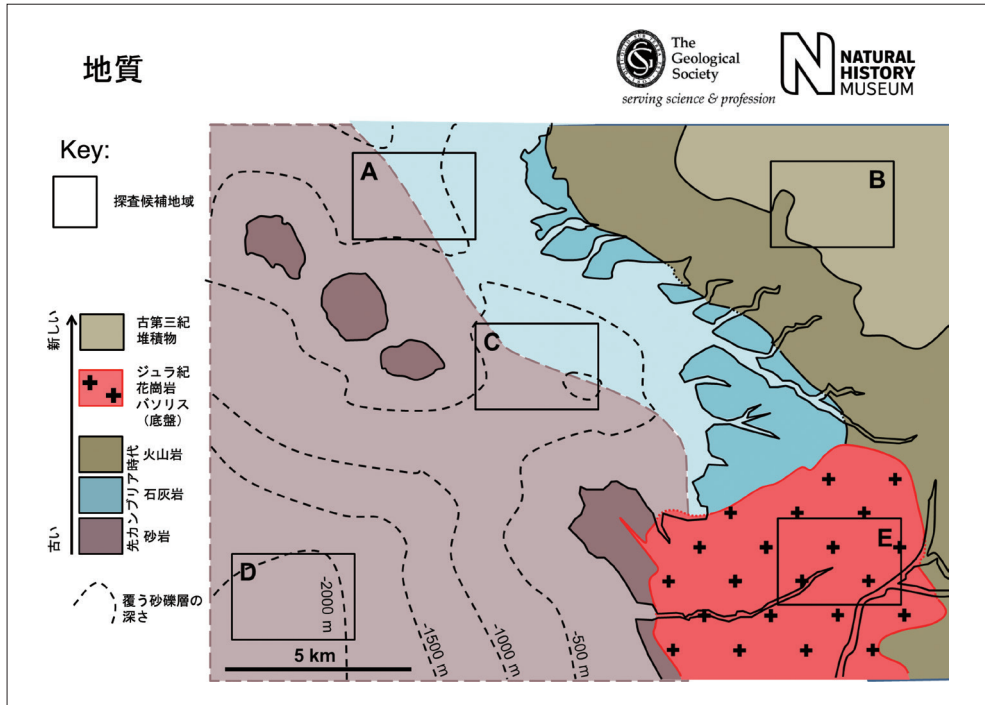


Fig. 6 ポーフイリーカップー鉱床探査ゲーム 情報カード (地質)

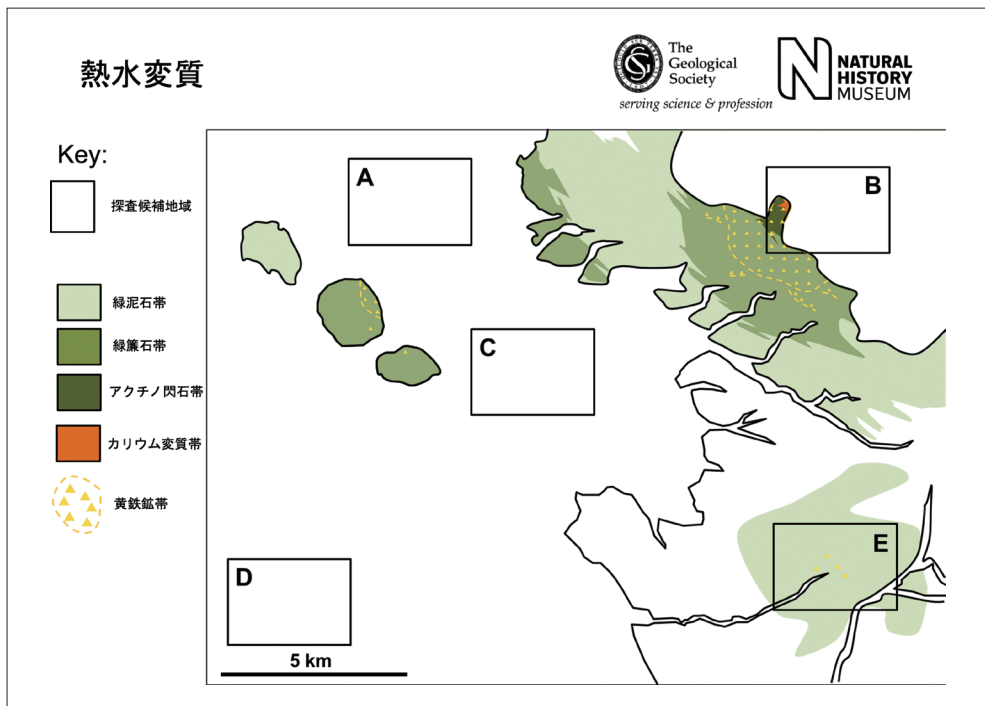


Fig. 7 ポーフイリーカップー鉱床探査ゲーム 情報カード (熱水変質)

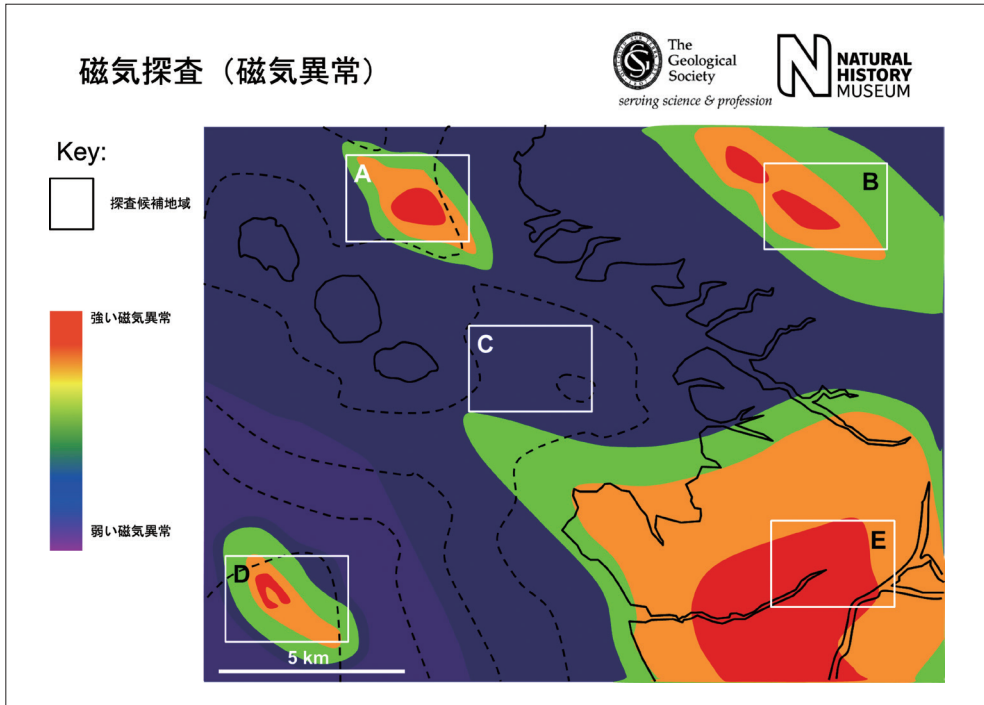


Fig. 8 ポーフイリー銅-鉛床探査ゲーム 情報カード (磁気探査)

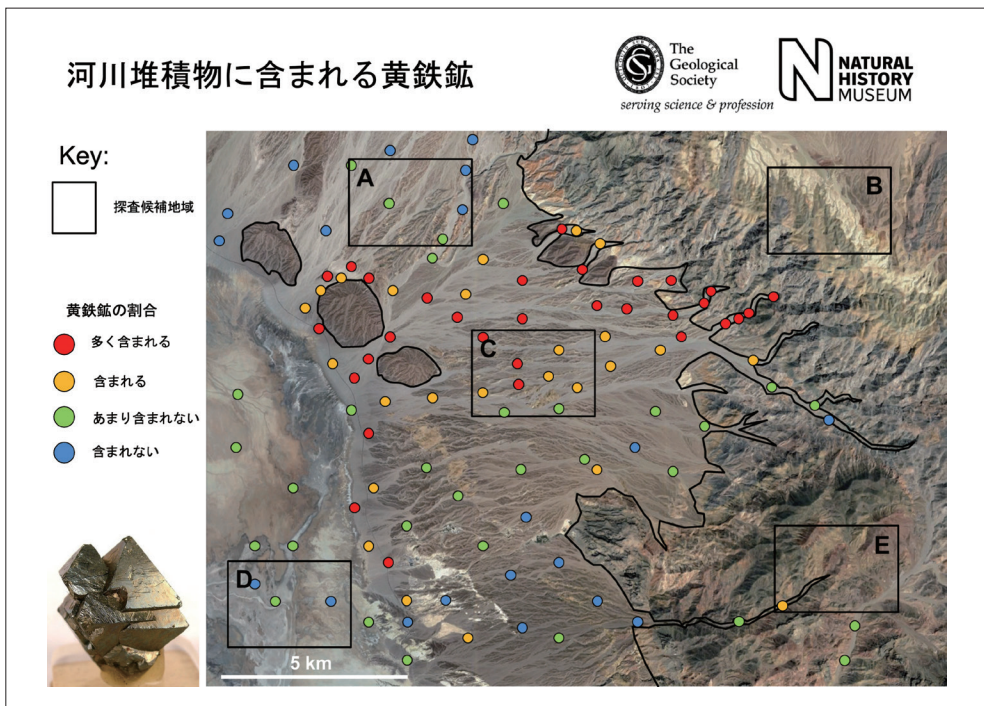


Fig. 9 ポーフイリー銅-鉛床探査ゲーム 情報カード (河川堆積物中に含まれる黄鉄鉱)

3.2 ゲームのルール

学習者は数名ずつのチームに分けられる。それぞれのチームには、1組ずつ説明書・解説図・情報カードが配布される。

教師はゲームの説明書および解説図を用いて、このゲームのルールとポーフイリー鉱床の解説を行う。ポイントとなる点は以下のような点である。

- ポーフイリー鉱床は、花崗岩マグマの地殻浅所への貫入によって形成される。
- マグマ起源の熱水と周囲の岩石が反応して、帯状の変質帯が形成される。
- 地下で形成されたポーフイリー鉱床は、削剥によって地表に露出する。
- 侵食された鉱物は、河川に運ばれて周囲に堆積する。
- 磁鉄鉱などの磁性鉱物を多く含む岩石は、地表付近に磁気異常を生じさせる。花崗岩体にも、ポーフイリー鉱床の周囲に形成される変質帯にも、共に磁鉄鉱は形成されるが、岩体の広がりによって、磁気異常の変化量に違いが見られる（前者は広い範囲で緩やかに変化するが、後者は狭い範囲で急に変化する）。

学習者は、これらの特徴を考慮しながら、与えられた5枚の情報カードを用いて、指定されたA～Eの5地域の中で、最も鉱床探査に適した場所を見つける。ゲームのルール上、それぞれのチーム毎に探査費用として2億ドルが与えられており、この予算をいくつかの地域に分散することも許されている。ゲームの勝者は、ポーフイリー鉱床探査候補としてもっとも実現可能性が高く、鉱山開発に適した地域を見つけたチームとなる。鉱山開発に関連して、法的要因、環境要因、ロジスティック、およびエンジニアリング技術などを注意深く考慮したうえで、合理的な判断をし、それぞれの地域に投資する金額を決定する。チームの代表者は、どの地域にいくらずつ投資するかを発表し、その根拠を説明する。

3.3 考え方（一例）

このゲームは、唯一の正解があるわけではないオープンエンドクエスションであるので、学習者の新しい発想や議論が期待されるが、参考までに考え方の一例を示す。

鉱床は多くの場合は地表に露出している領域は少なく、地下に存在をするので、最初に地下構造を推定する情報となる「磁気異常」を検討する。強い磁気異常が見られる地域は、A, B, D, Eの4地域である。Cは河川堆積物中に磁鉄鉱が多く含まれるが、これは地下の鉱床の存在を示しているわけではない。「地質」を見ると、地域Eはジュラ紀の花崗岩バソリスが分布しており、磁気異常の変化も緩やかで広範囲に渡るので、地域Eに鉱床が見つかる可能性は低い。可能性のある地域が、A, B, Dの3つに絞られたが、この3地域にはそれぞれ鉱床探査を考える上で有利な（可能性が高い）要素と不利な（可能性が低い）要素がある。「熱水変質」を見ると、Bの範囲内には強い変質帯の中心まで露出しているため、ポーフイリー鉱床が存在する可能性は極めて高いが、上位を第三紀（第三紀は現在では使われない時代区分であるが、ここでは元図に記載の通り第三紀と表現する）の地層が覆っており、鉱床はすでに削剥されて残っていない可能性もある。また、「地形」を見

ると、山岳地帯に存在し、鉄道からも遠く離れているため、開発にコストがかかるだけでなく、紛争中の隣国との国境を跨いでいるため、安全な開発を進められる保証がない。Aの近傍には磁鉄鉱帯を持つ変質帯の存在が確認できるので、鉱床がある可能性は高い。先カンブリア時代の砂岩および石灰岩が分布するので、ポーフィリー鉱床またはスカレン鉱床が発達している可能性がある。砂礫層の厚さも500m程度と比較的薄いため、掘削も比較的容易である。輸送のために使用する鉄道からも近い。Dは、「熱水変質」の分布が近くに見られないので判断が難しいが、「磁気異常」には尖ったピークが見られるので、地下に鉱床が存在する可能性は高い。ただし、砂礫層の厚さが2000m以上あり、掘削にはコストがかかる。これらの特徴をTable 3にまとめる。

Table 3 地域A～Eの特徴のまとめ

	地域A	地域B	地域C	地域D	地域E
地形 (Fig. 5)	鉄道から近い	鉄道から遠い 山岳地域 紛争のある国境をまたぐ	鉄道から近い 扇状地	鉄道から近い	鉄道から遠い 山岳地域
地質 (Fig. 6)	先カンブリア系 河川堆積物は薄い (500m)	第三紀堆積物	先カンブリア系 河川堆積物は薄い (500m)	先カンブリア系 河川堆積物が厚い (2000m)	ジュラ紀花崗岩パソリス
熱水変質 (Fig. 7)	地域内には見られないが、近くに緑泥石帯および磁鉄鉱帯が分布	強い変質帯（カリウム変質帯、アクチノ閃石、磁鉄鉱帯）がある	地域内には見られないが、近くに緑泥石帯および磁鉄鉱帯が分布	なし	緑泥石帯、磁鉄鉱帯
磁気異常 (Fig. 8)	強く集中した磁気異常	強く集中した磁気異常	弱い	強く集中した磁気異常	強く広範囲の磁気異常
河川堆積物に含まれる黄鉄鉱 (Fig. 9)	地域内は中程度だが、周囲は高い	河川堆積物が分布しない	高い	低い	中程度～低い

3.4 ゲームの勝者

ESTA学会で発表されたこのポーフィリー鉱床探査ゲームでは、最終的な勝利チームの決定方法までは決められていない。そこで本論文では、地域毎の投資金額に対するリターン割合を設定し、それぞれの地域に入札した金額にリターン割合を乗じた金額の合計を計算して、順位を決定する方法を提案する（Table 4）。

例）3チームがそれぞれ以下のような理由から、投資額を決定して発表した。

チーム1：地域内に唯一熱水変質帯が確認できる地域Eに\$20,000全てを投資。

チーム2：地域Aが鉄道からも近く、磁気異常の結果からも地下に鉱床が存在する可能性が高いと考え、地域Aに\$10,000を投資。残りの\$10,000は、可能性のある地域Bおよび地域Dに\$5,000ずつ投資。

チーム3：可能性のありそうな地域A, B, Dに満遍なく\$5,000ずつ投資し、残りを地域CおよびDにそれぞれ\$2,000、\$3,000ずつ分散投資。

Table 4 順位決定の例（各チームの投資金額配分とそのリターン合計）

		地域A	地域B	地域C	地域D	地域E	合計	順位
投資金額に対する リターン割合		200%	150%	30%	125%	50%		
チーム1	投資金額	\$0.00	\$20,000.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$20,000.00	2位
	リターン金額	\$0.00	\$30,000.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$30,000.00	
チーム2	投資金額	\$10,000.00	\$5,000.00	\$0.00	\$5,000.00	\$0.00	\$20,000.00	1位
	リターン金額	\$20,000.00	\$7,500.00	\$0.00	\$6,250.00	\$0.00	\$33,750.00	
チーム3	投資金額	\$5,000.00	\$5,000.00	\$2,000.00	\$5,000.00	\$3,000.00	\$20,000.00	3位
	リターン金額	\$10,000.00	\$7,500.00	\$600.00	\$6,250.00	\$1,500.00	\$25,850.00	

それぞれのチームの投資金額に、地域毎のリターン割合をかけて合計した結果、Table 4のような順位付けを行うことができる。

4. ポーフイリー鉱床ゲームの拡張

このゲームを活用することで、以下のような地球科学的理解の学習を深めることができる。

- ポーフイリーカップー鉱床とその成因
- 物理探査（磁気異常）を利用した地下構造の推定
- 火成岩の貫入と熱水変質帯の形成
- 鉱物（黄鉄鉱、黄銅鉱、磁鉄鉱、緑泥石、緑簾石）
- 地質現象（隆起・浸食・運搬・堆積・沖積層）
- 鉱山開発と環境問題

アクセスの困難な地域や広範囲の鉱床探査においては、古くからリモートセンシング技術が活用されている。矢島ほか(2007)は、ASTERデータを利用したポーフイリーカップー鉱床探査のための熱水変質帯識別技術を整理している。さらに、ASTER画像解析データとDEMデータ地形モデルを組み見合わせることで、空間的変質累帯関係が認められる有望地区の判断を行った例も知られている（山本ほか, 2012）。こうしたDEMやリモートセンシングのデータをポーフイリーカップー鉱床探査ゲームに追加することで、地形と地質の関連なども考慮した考察が可能となる。

5. まとめ

2015年にニューヨーク国連本部で開催された「国連持続可能な開発サミット」で採択された「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」では、17の目標と169のターゲットからなる「持続可能な開発目標（通称：SDGs）」が掲げられている。

その中の目標12「持続可能な生産消費形態を確保する」として、ターゲット12.2「2030年までに天然資源の持続可能な管理および効率的な利用を達成する」がある。現在社会において金属資源を含む鉱物資源は欠かせない天然資源であるが、地球史を通じてのこうした金属資源の濃集プロセスや鉱床の特性を知ることが、有限な資源に対する理解を深め、持続可能な資源管理の意識を高めることにつながるであろう。

謝辞

The Geological SocietyのPete Loader氏には、ポーフイリー銅鉱床探査ゲームの日本語版の作成と頒布に関して許可を頂いた。記して感謝の意を表す。

引用文献

- Guilbert, J. M. and Park C. F. (1986) The geology of ore deposits. Freeman, New York, 985 pp.
- 地学団体研究会 (1996) 『新版地学辞典』. 平凡社: 1-1443.
- 丸山茂徳・古野正憲 (2018) 斑岩銅鉱床の起源: 銅の濃集メカニズムとは. 日本地球惑星科学連合2018年大会講演要旨. SRD33-02.
- 矢島太郎・山本邦仁・山本和広・林 歳彦 (2007) ポーフイリー銅鉱床探査のためのASTER データによる熱水変質帯識別. 日本リモートセンシング学会誌, 7: 117-128.
- 山本邦仁・林 歳彦・縫部保徳 (2012) チリ共和国フロンテラ地域ロスエラードス地区における斑岩型銅・金鉱床探査について. 資源地質, 62 (2): 117-124.
- 渡辺寧 (2003) 斑岩銅鉱床. 資源地質学会 (編) 『資源環境地質学: 地球史と環境汚染を読む: 資源地質学会創立50周年記念』, 資源地質学会: 35-44.
- 渡辺寧 (1998) 鉱床探査家のためのポーフイリー銅鉱床学 (1) ポーフイリー銅鉱床とは. ほなんざ (金属鉱業事業団), 271: 18-24.
- 渡辺寧 (2001) チリの新生代テクトニクスと斑岩銅鉱化作用-チリはなぜ世界最大の銅産出国なのか? 地質ニュース, 566: 6-21.

オンライン文献 (全て、2020年11月10日アクセス)

- USGS Porphyry copper deposits of the world database, <https://mrdata.usgs.gov/porcu/map-us.html>
- USGS Mineral Commodity Summaries 2020, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>

Appendix I ポーフイリーカッパー鉱床探査ゲーム 説明書

ポーフイリーカッパー鉱床探査ゲーム

ここは、以前に多くのポーフイリー鉱床が見つかった場所です。お金持ちの投資家があるあなたの会社にお金を貸し出し、あなたはこの地域の資源探査の権益を取得することができます。このゲームの最終目的は、ポーフイリー鉱床が見つかる可能性の高い場所を見つけ出し、大きな鉱山会社にその権益を売ることです。

この国の政府が探査を許可した地域は、AからEの5地域です。あなたが最終的にどの地域の権益を取得するかを決断したあと、他のチームと競い合います。それぞれの地域において、シークレット・オークションを実施します。入札結果は政府代表（役）が発表します。

あなたに許された探査費用予算は、2億米ドルです。この予算をいくつかの地域に分散しても構いませんが、オークションの入札では不利になるかもしれません。

ゲームの勝者は、ポーフイリー鉱床探査候補としてもっとも実現可能性が高く、かつ開発が容易な地域を見つけたチームです。鉱山開発に関連して、法的要因、環境要因、ロジスティック、およびエンジニアリング技術などを注意深く考慮してください。

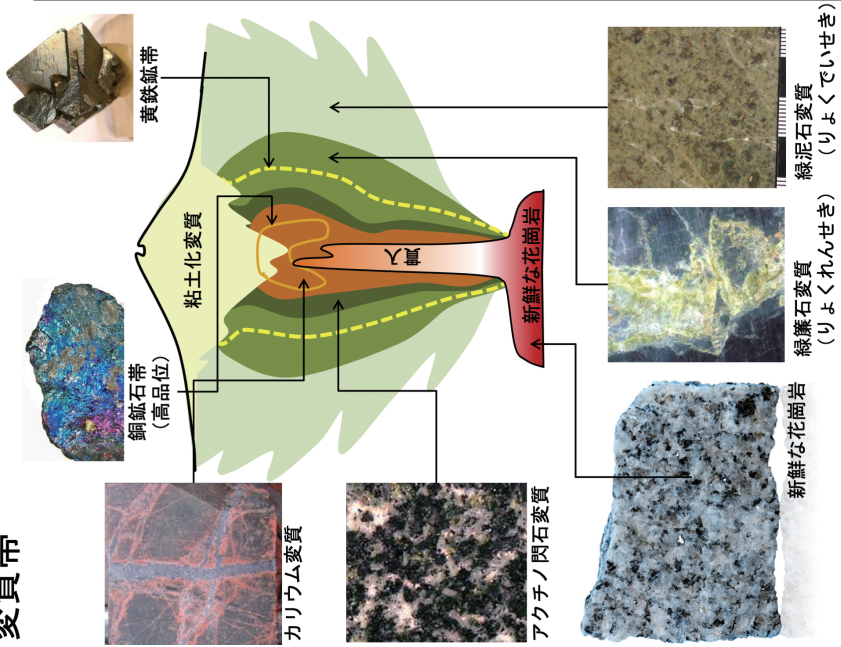
いくつかの専門的事項

- ・この地域でこれまでに見つかっているすべてのポーフイリー鉱床は、ジュラ紀に形成されており、その母岩は先カンブリア代の岩石であった。
- ・鉱化作用は“被覆層（完新世の河川堆積物を含む最も新しい堆積物）の下”から見つかっている。
- ・この地域の他の鉱床では、非常によく発達した変質帯ゾーニングが確認されている。

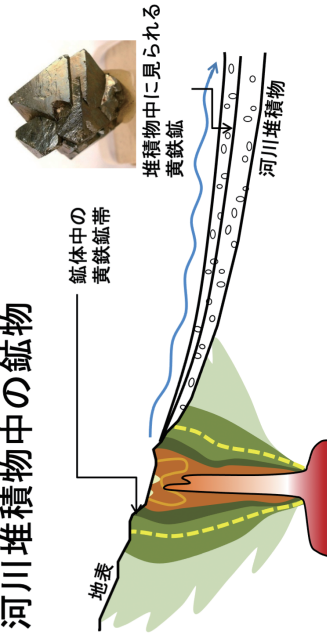


ポーフイリーカッパー鉱床探査ゲーム

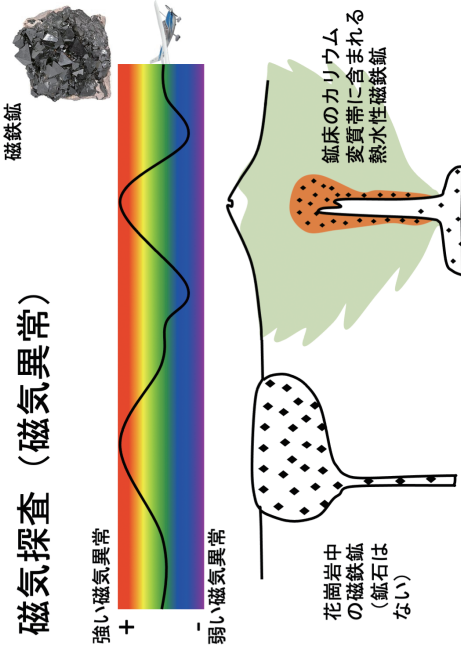
変質帯



河川堆積物中の鉱物



磁気探査 (磁気異常)



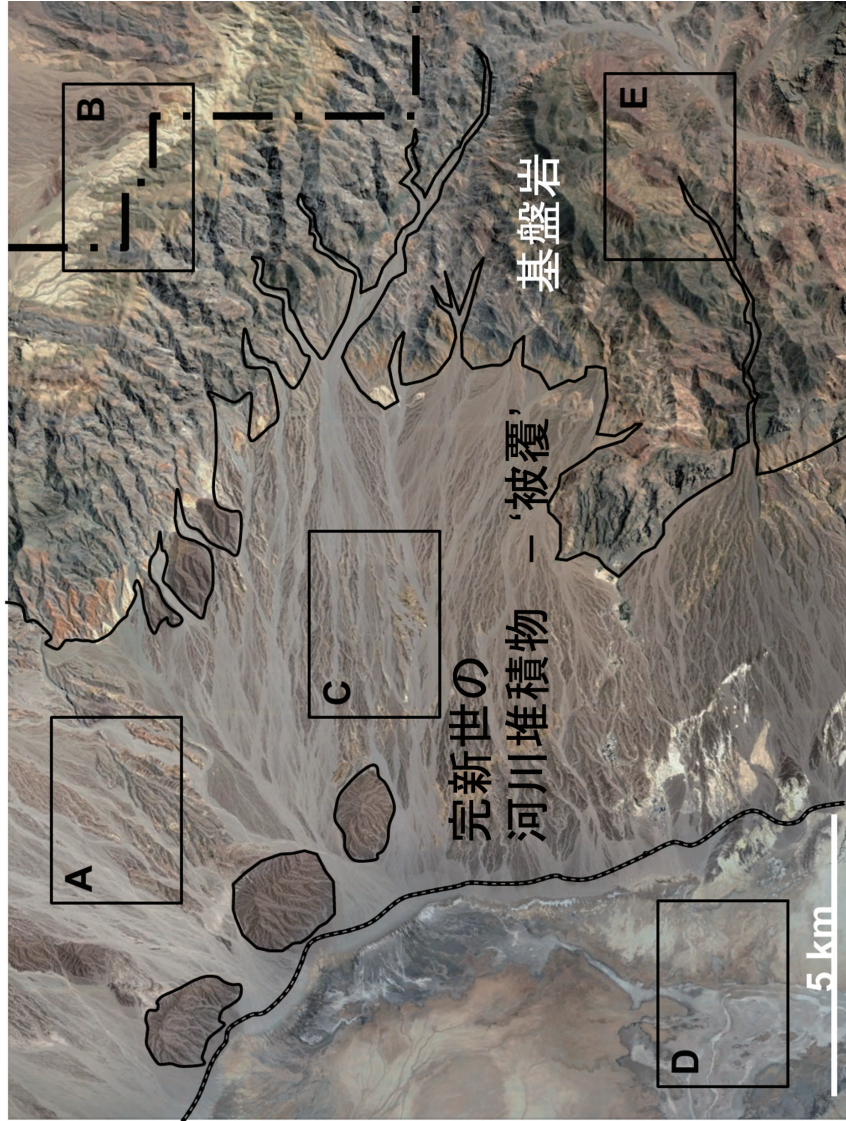
Appendix III ポーフイリー銅床探査ゲーム 情報カード：地形



地形

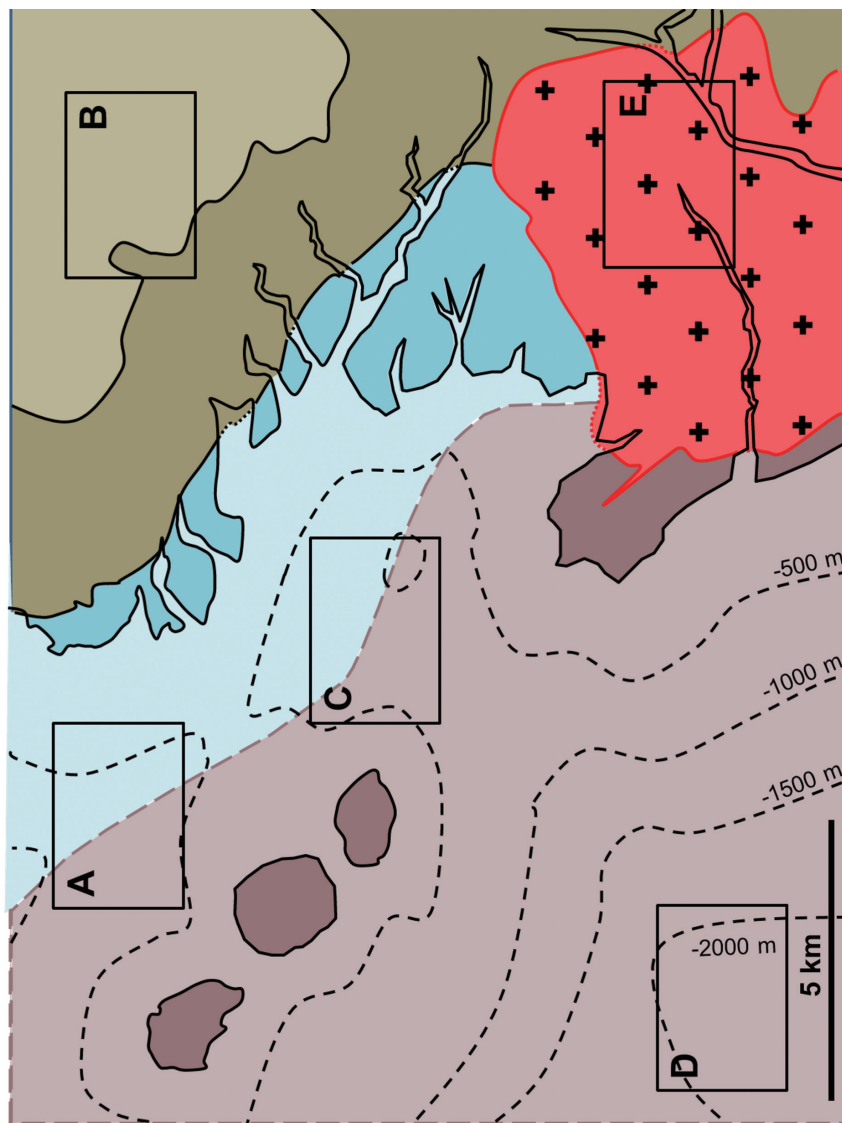
Key:

- 探査候補地域
- 鉄道
- 国境 (紛争中)

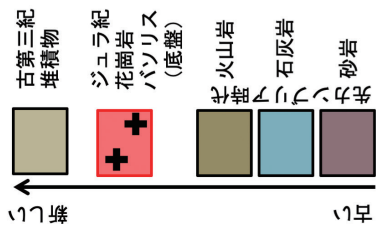




地質



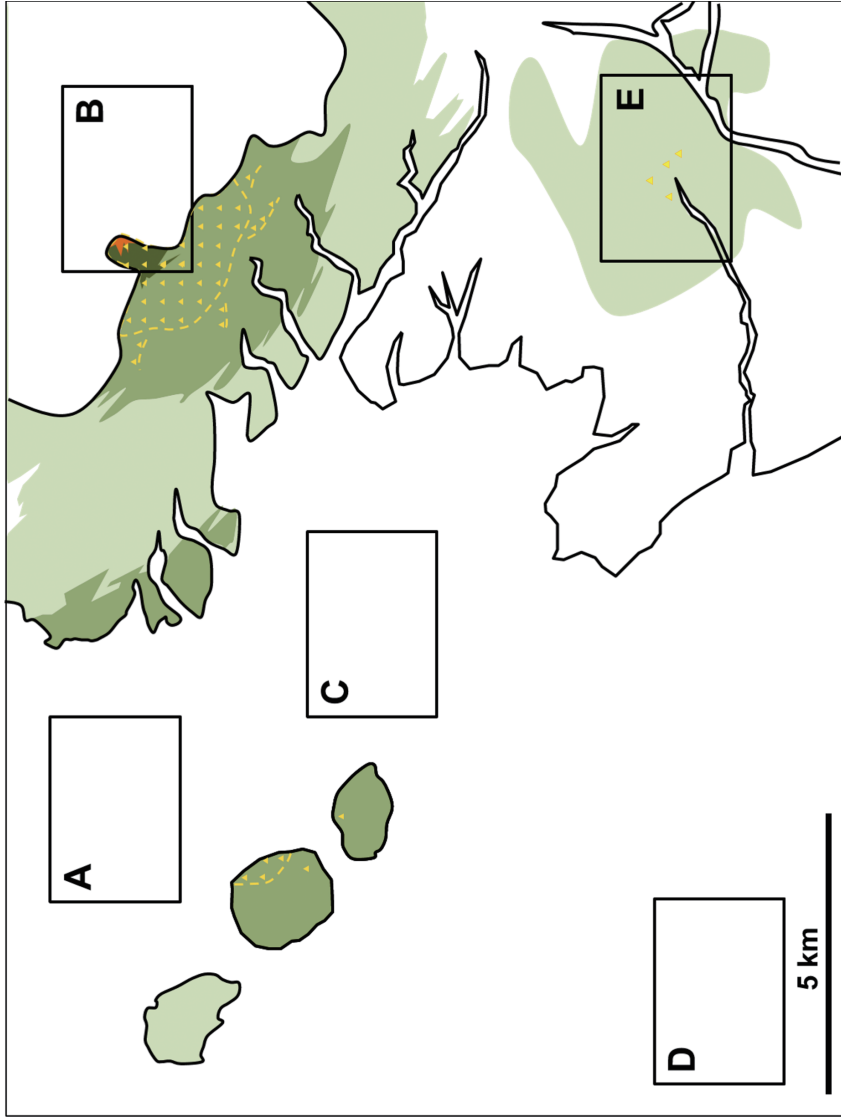
Key:



覆う砂礫層の深さ



熱水変質



Key:



探査候補地域



緑泥石帯



緑簾石帯



アクトキノ閃石帯

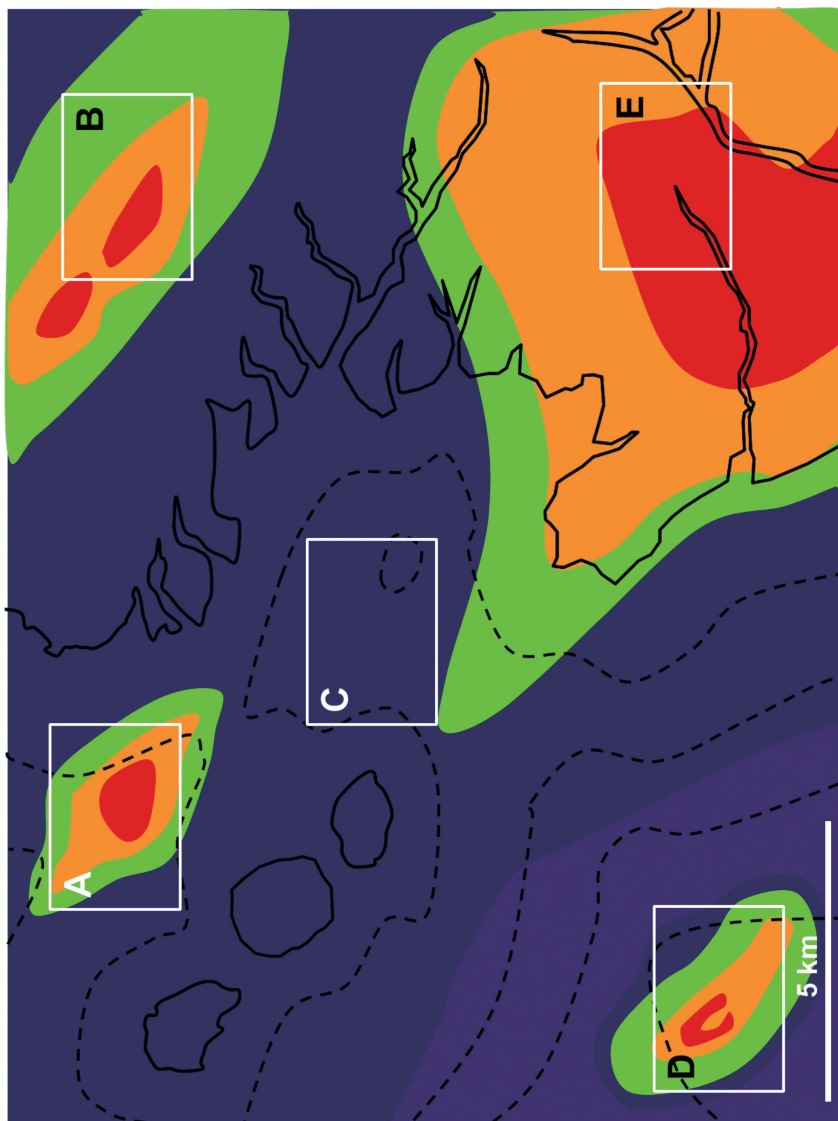


カリウム変質帯



黄鉄鉱帯

磁気探査（磁気異常）



Key:

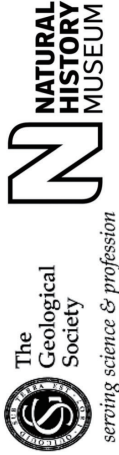


探査候補地域

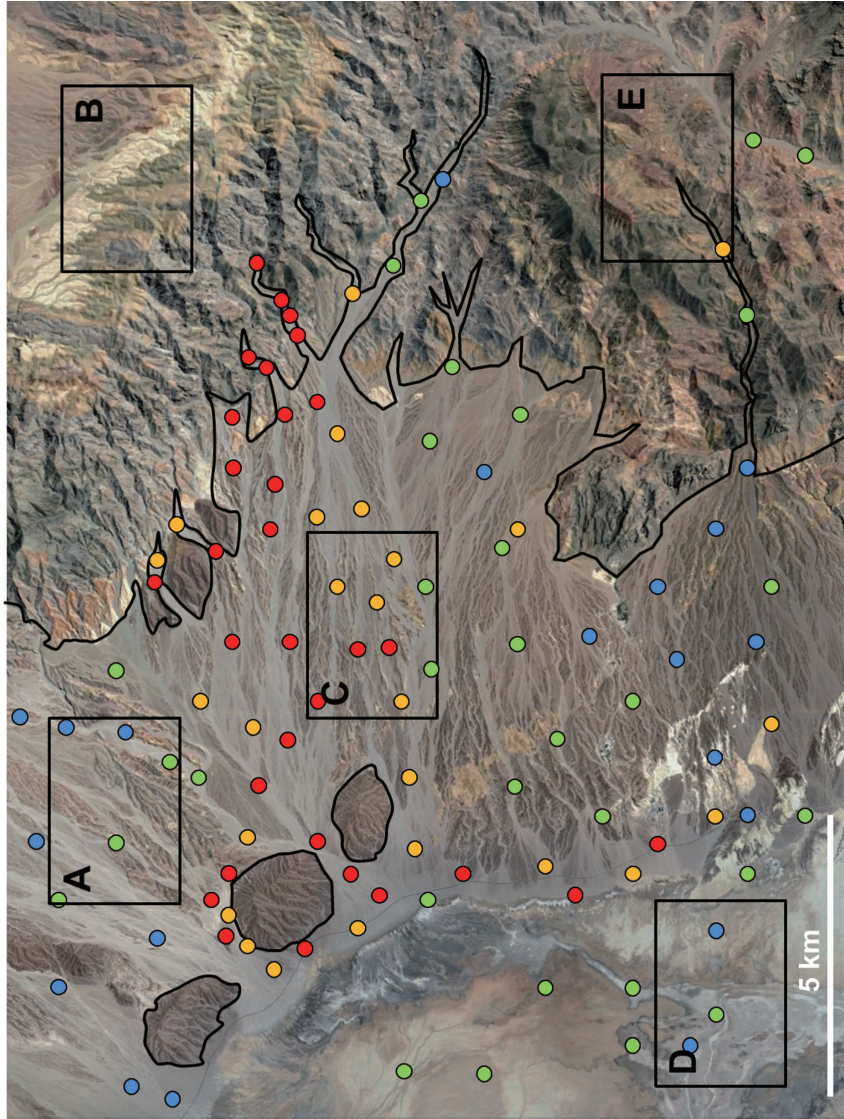
強い磁気異常



弱い磁気異常



河川堆積物に含まれる黄鉄鉱



Key:



探査候補地域

黄鉄鉱の割合



多く含まれる



含まれる



あまり含まれない



含まれない

