Review

金属鉱物資源探査技術の開発と適用 *

菱 田 元¹ 大 岡 保 隆^{2,3}

Development and Application of Mineral Exploration Technique

by Hajime HISHIDA^{a*}, Takashi OOKA^a and Yasunori NUIBE^b

- a. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)
(*Corresponding author: E-mail hishida-hajime@jogmec.go.jp)
- b. JOGMEC (Nittetsu Mining Co.Ltd., at Present)

This paper reviews the development of remote sensing, geophysical and geochemical techniques, and their application to mineral exploration over the last decade in addition to introducing the related research and development works by the Metal Mining Agency of Japan (presently Japan Oil, Gas and Metals National Corporation). In the field of geologic remote sensing, ASTER data with high spatial and spectral resolutions is widely used as well as conventional satellite data such as LANDSAT and SPOT data. Airborne data acquisition with either optical or radar sensor is commonly used. Hyper spectral data acquisition has also been developed both in satellite and airborne systems. Geophysical techniques are versatile using airborne, ground and drill-hole methods. In gravity, magnetic, electric and electromagnetic methods, several techniques have been developed in data acquisition and analysis. Airborne gravity method has been recently developed and started to be used in exploration. Though the geochemical techniques are still based on conventional methods employing rocks, soils and stream sediments, better understanding to the geochemical phenomenon has greatly improved interpretation of the results. Regolith mapping method, which was resulted from research work for the deeply weathered tropical terrain, is one of the good examples. Exploration manager is required to follow the more advanced mineral exploration techniques and apply the most suitable combination of the methods to the project in response to the exploration stage.

KEYWORDS: Mineral Exploration, Remote Sensing, Geophysical Exploration, Geochemical Exploration

1. はじめに

鉱床は奥地化・潜頭化し、新鉱床を発見することはますます困難になってきている。鉱床は多様な型を持ち、それを胚胎する地質構造もさまざまであるため、鉱床探査の新しい技術が開発されても、それが適用可能か否かは適切なケーススタディを積まないと判断できない。鉱床探査の柱となるのは地質調査とその解釈であるが、ここではそれを補足する探査技術であるリモートセンシング、物理探査、地化学探査について、技術開発状況とその適用を金属鉱業事業団（2004年2月29日付けで独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構に組織変更）の取り組みも交え紹介する。なお、探査技術の重要な要素であるボーリング技術については、筆者らの専門外であり省略した。

2. リモートセンシング

鉱床探査の初期段階にとって衛星リモートセンシング・データは欠かせないものであり、新しい地域の調査を始める場合は、まず有効と思われる衛星画像を入手するのが常である。一方、航空機リモートセンシングの需要も近年増えてきており、センサー技術開発の一環として衛星搭載前に航空機に搭載して試験する場合も多い。リモートセンシング技術の開発はセンサー開発から適用技術まで非常に幅広いが、ここでは鉱床探査という視点から全体を概観する。

2・1 衛星リモートセンシング

2・1・1 光学センサー 資源探査分野における衛星リモートセンシングの利用は、1970年代から稼働の始まった米国の地球観測衛星 LANDSAT により実質的に幕を開けた。初期の LANDSAT-1 ～ 3 には可視・近赤外域に 3 ～ 4 バンドを持つ光学センサー (MSS) が搭載され、これを利用して写真地質学的な解析を行った。その後打ち上げられた LANDSAT-4、-5 (1982年、1984年) には、空間分解能を高め、短波長赤外域にもバンドを増強したより高性能の TM センサーが搭載された。これにより多くの鉱物・岩石特有のスペクトル特徴を捕捉できるようになり、地質解析に大きな進展をもたらした。現在では TM センサーをさらに向上させた ETM+ センサーが稼働している (LANDSAT-7: 2003年5月にセンサーの不具合が発生し、正常な運用が中断されている)。米国以外ではフランスが 1986 年から高分解能の

*2004年7月30日受付 2004年11月10日受理

1. 普通会员 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 業務評価・審査グループ調査役

2. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 業務評価・審査グループチームリーダー

3. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (現 日鉄鉱業㈱ 資源開発部)
[著者連絡先] FAX: 044-520-8710 (菱田)

E-mail: hishida-hajime@jogmec.go.jp

キーワード: 鉱床探査, リモートセンシング, 物理探査, 地化学探査

SPOT 衛星シリーズを稼働させており、LANDSAT と SPOT が国際標準として認知されている¹⁾。

我が国独自の地球観測衛星としては、資源探査を主目的とした JERS-1 (ふよう 1 号) が 1992 年に打ち上げられ、可視近赤外域と短波長赤外域で全 7 バンドを持つ光学センサー (OPS) と合成開口レーダー (SAR) のデータの利用が開始された。1999 年には我が国が開発した ASTER センサーを搭載した米国の地球観測衛星 TERRA が打ち上げられた。ASTER センサーは可視光から熱赤外波長域 (0.52 ~ 11.65 μm) において全 14 バンドを有する高性能光学センサーで、熱赤外多バンドセンサーを搭載していること、立体視が可能なバンドも備えており高精度の DEM が作成できること、などの特長を有する。

一方、光学センサーの多バンド化は、200 バンドを超える光学超多バンド (ハイパースペクトル) センサーへと開発が進んでおり、より高精度なスペクトルの解析技術が求められている。金属鉱業事業団でも 2001 年度より「超多バンド光学センサー技術の開発」を開始している。また、米国 Space Imaging 社の IKONOS に代表される商用ベースで 1m の高空間分解能を持つ衛星データの利用も始まっている。

2・1・2 マイクロ波センサー マイクロ波を利用した (合成開口レーダー等) の開発は 1970 年代後半から進んできており、特に欧州宇宙機構の ERS シリーズ (1991 年 ~) や我が国の JERS-1 (1992 年)、カナダの RADARSAT シリーズ (1995 年 ~) 等の合成開口レーダー (SAR) 等によりデータが利用できるようになった。波長数 cm から 30cm 程度のマイクロ波 (C ~ L バンド) により、雲、雨等の影響を受けないで高精度の地形情報が取得することが可能になる。我が国でも JERS-1 等の合成開口レーダーを利用して地形情報から鉱物資源の胚胎可能性を追跡する研究が政府関係機関、大学、資源関連会社等を中心に行われている。その他近年では、レーダーから複数の偏波情報を送受信することで地表物質識別や含水状態などの物性の違いを明らかにしようとする研究²⁾や、レーダー干渉計を利用して極めて高精度の 3 次元情報あるいは地表変位情報等を取得する研究も進展してきている³⁾。金属鉱業事業団でも 2001 年度より多偏波情報を利用した「高精度合成開口レーダー解析技術の開発」を開始している。

2・2 航空機リモートセンシング

2・2・1 光学センサー 初期の航空機リモートセンシングは白黒の空中写真を利用した地質判読にすぎなかったが、その後、各種衛星センサーに先行する形でより高度な航空機センサーの開発と利用が進められてきた。ハイパースペクトルについては 1970 年代後半から開発が進み、1990 年代以降商用システムが運用されている。特に米国 NASA/JPL の AVIRIS (224 バンド: 0.38 ~ 2.5 μm) は改良が重ねられ、信頼性が高く多くの研究で利用されている。また、豪州でもハイパースペクトルの研究が盛んであり、HyMap (128 バンド: 0.45 ~ 2.48 μm) 等が開発・利用されている。金属鉱業事業団も 2001 ~ 2002 年度に VMS 鉱床に関係するゴッザン抽出に HyMap データを試用した⁴⁾。

熱赤外センサーでは NASA の TIMS、Aerospace 社の SEBASS、豪州 CSIRO 等で開発した ARGUS (TIPS モジュール) 等が代表的で、これらを利用して珪酸塩岩の識別等の研究が行われている。

2・2・2 マイクロ波センサー 航空機搭載型のマイクロ波センサーは 1960 年代後半の Side-Looking Airborne Radar (SLAR) から主に利用が開始され、1970 年代に入ってから合成開口レーダーの開発が進んだ。現在では、干渉情報や偏波情報が同時に利用できる NASA/JPL の AIRSAR や我が国の通信技術総合研究所等が開発している PI-SAR 等があり、高精度な地形情報や地表の

物性の違いを明らかにする研究等が行われている⁵⁾。

2・3 探査への適用

変質鉱物は金属鉱床の成因に密接に関連していることが多く、その分布や鉱物の種類を把握することは鉱床探査上の重要な指針となる。たとえば、斑岩型鉱床などでは鉱床の近傍から外側に向かって特有の変質鉱物の組み合わせを持つ累帯構造を示すことが多く、セリサイト、カオリナイト、モンモリロナイト、明礬石、緑泥石、緑簾石などのような変質鉱物の識別が可能であれば変質の累帯構造を推定することができる。一般的に変質鉱物は短波長赤外域 (1.0 ~ 3.0 μm 付近) においてその化学的組成の違いにより特徴的なスペクトルパターンを示す。このため、特に ASTER の短波長赤外域にある 6 つのバンドを中心に利用することで従来では不可能であった変質鉱物の種類の識別が可能になる。

金属鉱業事業団は 1996 年度から ASTER の実利用に備えるための研究開発を開始し、2000 年度には ASTER 実画像が取得されたためこれを利用したケーススタディを行うとともに「金属鉱物資源探査のための ASTER データ利用マニュアル」を作成した⁶⁾。特に金属鉱床の探査に重要な変質帯の識別の利用技術開発においては、ASTER の高波長分解能を有効に活用するため、フォーカスカラー画像、比演算画像、岩石・鉱物指標による画像、等粒子モデル⁷⁾と呼ばれる鉱物粒子間の反射・吸収を考慮した半定量的鉱物同定画像等を用いた岩石・鉱物識別の検討を行った。この結果、鉱床の周辺部を取り巻く微弱な変質帯のマッピングや、変質鉱物の組み合わせによる変質帯分類が可能であることがわかった。

金属鉱業事業団が国際協力事業団から委託を受け実施した資源開発協力基礎調査では、2002 年度に実施した 13 地域での調査のうち 10 地域で衛星画像解析を行なった。その内訳は光学センサーデータの解析 6 件、マイクロ波センサー (レーダー) データの解析 5 件である。2001 ~ 2002 年度のアルゼンティン共和国における調査では、ASTER 画像を用いて広域レベルから鉱床有望地を選定するための変質帯抽出作業を実施した。調査地域はアルゼンティン北西部の面積約 100,000 km^2 の範囲で、地形的には標高 3,500 ~ 5,000m 前後の山岳地帯である。本地域は原生代末期から第四紀までの地質で構成され、オルドビス系に伴う SEDEX 型鉛・亜鉛鉱床および新第三紀火山岩類に伴う斑岩型銅・金鉱床が胚胎する。ASTER 画像から変質帯を抽出した結果に基づき現地検証を行ったところ、既知鉱床・鉱徴地に伴う変質帯のほとんどが網羅されていること、また、断層等に伴う微弱な粘土化帯等も抽出されることがわかった。さらに、地表が植生で 30% 程度覆われていても、土壌 (変質鉱物) の情報が取り出せることがわかった。また、立体視画像を利用して作成した DEM (Digital Elevation Model) による高精度な地形図は、良質な地形図のない遠隔地での調査に極めて有益であった⁸⁾。

金属鉱業事業団は上記とは別に 1999 年度より海外衛星画像解析調査を開始した。ユーラシア変動帯地域、インドシナ・マレー地域、テチス海収束地域において、衛星画像解析、グラントルース、有望地抽出の作業を行い、探査プロジェクト形成の準備を進めている。Fig.1 にイラン・イスラム共和国 北西部地域における衛星画像解析結果の例を示す。

今後、ハイパースペクトルや高分解能センサーなどの高性能センサーの適用を考えると、探査の初期段階だけではなく、よりステージの進んだ状況での利用、たとえば精密な調査ルートの選定、ボーリングサイトの決定、鉱山開発あるいは鉱山の環境モニタリング等の環境分野での利用が拡大していくものと思われる。一方、データ処理が容易でかつ信頼性の高い LANDSAT TM・ETM+ や

(a) FCC image (BGR=346)

(a) フォールスカラー画像 (BGR=346) : 変質帯 (特に酸性変質帯) は BGR=346 のフォールスカラー画像では淡緑色～青緑色に呈して見える (破線で囲んだ付近)。

(b) Ratio image

(b) 比演算画像 (BGR=5/8, 5/6, 4/6) : この画像は ASTER バンド 5/8 を Propylitic 変質帯にバンド 5/6 を Phyllic 帯に, またバンド 4/6 を Advanced argillic 帯として代表させるもので, 酸性変質帯を伴うような斑岩型鉱化帯に認められる変質帯が中心から外周に向けて赤色 (R) → 黄色 (Y) → 青色 (B) で示される (図中の R, B, Y で示す付近)。

(c) SiO₂ content index image

(c) SiO₂ 含有量指標画像 : 二宮・傳⁹⁾ は, 酸性岩ではバンド 13・14 において放射率が高くなり, 超塩基性岩ではバンド 10～12 に相当する短波長域において黒体に近い放射特性になることに着目し, SiO₂ 含有量指標 SI を提唱した (SI= バンド 13 / バンド 12)。本画像上では矢印に示すような地域が珪化を受けている部分であり濃い色調として示されている。

(d) DEM shade image

(d) 陰影画像 (太陽方向 315, 太陽高度 35°) : 陰影画像は光源を用いて地形の陰影をつけることで立体的に地形を表現する手法であり, DEM を利用することでその光源の方向・角度を自由に設定することができる。本地域は珪化が強い地域はピークを形成していることが多く (矢印等), 陰影画像でその地形的特徴が把握できる。

(e) DEM slope image

(e) 傾斜量画像 : 傾斜量画像は, 特定の距離における (ここではピクセルサイズ) 標高の変化を計算し画像にしたものである。傾斜量画像では傾斜の同じ領域が同じ濃度の画像として示され, 地形の変化を画像の濃淡で示すことができるため地形の不連続面の推定に利用できる。陰影画像, SiO₂ 含有量指標画像, フォールスカラー画像, 既存地質図等と併せて傾斜量画像を判読することでより明瞭に断裂系の推定が可能になる。

Fig.1 イラン・イスラム共和国西北部地域 (Takestan 北東) における ASTER 画像解析例。スケールは東西約 28km × 南北約 24km。

ASTER のような従来型の多バンドセンサーも、広域的な検討を行うには重要であり、引き続き多くの需要が見込まれると考えられる。

3. 物理探査

物理探査の適用は、鉱床胚胎と関係する地質構造把握を目的とする場合（概査）と潜頭性鉱床の捕捉や鉱床の深部への連続の確認を目的とする場合（精査）に分かれる。鉱山坑内の坑道やボーリング孔を利用して鉱量評価に役立てようという試みも続けられている。物理探査の特長は、鉱床探査の概査から精査の流れに即して空中探査・地上探査・ボーリング孔利用探査とバリエーションが変えられること、また、対象となる地質構造や鉱床タイプに応じて種々の手法から適切な方法を選択できること、が挙げられる。

物理探査の技術開発は大手鉱山会社、物理探査コントラクター、大学、国立研究所などで行なわれている。北米では政府関係機関、大学コンソーシアム、物理探査コントラクターがその主体を担い¹⁰⁾、豪州では AMIRA (Australian Mineral Industries Research Association Limited) や CRC (Cooperative Research Center) のような組織が CSIRO、大学、鉱山会社などの研究開発を統括している¹¹⁾。以下に、手法別に最近の技術開発状況を概観する。

3・1 重力探査

重力探査は、抽出された重力異常が鉱床そのものに起因し発見に結びついた例もあるが（ポルトガル Neves Corvo 鉱床 - VMS 型鉛・亜鉛鉱床¹²⁾）、通常は基盤構造などの地質構造把握を目的として広域に行われる。これまでは地上探査のみであったが、鉱床探査への適用を目的とした空中重力探査の技術開発が 1990 年代初頭より複数の組織で行われ、近年実用化の段階に入った。Falcon System は 1970～80 年代に Bell Aerospace 社が開発した重力偏差測定器を基に BHP 社が Lockheed Martin 社と共同で開発したもので、1990 年代後半からケーススタディを積んできた¹³⁾。豪州 Cannington 鉱床 (SEDEX 型 銀・鉛・亜鉛鉱床) でのケーススタディでは、対地高度 120m のデータから鉱床と関係する重力異常を抽出している。ここでの地形補正は、レーザー・スキャナーで取得した高分解能 DEM データから重力傾度をフォワード計算することにより求めている¹⁴⁾。コストは地上重力探査の 25～100 % とのことから、遠隔地等で地上探査にとって替えられる場合も増えると思われる。

3・2 磁気探査

磁気探査はそのかなりの割合が空中磁気探査である。鉱床そのものに起因する磁気異常を直接抽出する場合もあるが（豪州 Cannington 鉱床¹⁵⁾）、広域的な地質構造の把握に今や欠かせない手法となっている。空中磁気探査は 1980 年代に大きく技術発展したが、技術開発要素として、磁気センサーの感度向上・GPS による位置精度の向上・密な飛行測線間隔と低飛行高度によるデータの質の向上・画像処理技術の進歩による表示の改良、等が挙げられる。K-vapor 磁力計の開発、GPS による位置決め精度の向上、microleveling、低緯度地域における極磁気変換、gridding 手法の進歩、3 次元逆解析など、この 10 年間にもハードからソフトまで地道な技術開発が継続している¹⁰⁾。地形が平坦なところでは飛行測線間隔が数十 m の密な測定も行われ、地上磁気探査よりも優れているとの考えもある¹⁶⁾。現在は、データ取得・処理・解析技術の進歩に解釈技術が追いつかない状態にあり、今後の課題である。

金属鉱業事業団の資源開発協力基礎調査では、1997～2001 年度の 5 年間でフィリピン、チリ、マリ、モンゴル、ウルグアイの

各プロジェクトで空中磁気・放射能探査を行った。Fig.2 にモンゴル国・西部エルデネット地域における空中磁気・放射能探査結果を示す¹⁷⁾。

3・3 電磁探査

3・3・1 空中電磁探査 豪州では、それまで困難であった導電性表層（レゴリス）下に潜頭する鉱床を抽出するための研究開発が行なわれ、固定翼航空機を用いた時間領域の新システムが開発された。解析では時間領域、周波数領域ともにデータを CDI (Conductivity-depth images) に変換する方法が実用化した。金属鉱業事業団は 2002 年度モロッコ王国での資源開発協力基礎調査で GEOTEM システム（時間領域）を使った空中電磁探査を実施した。

3・3・2 地上電磁探査 地上電磁探査は導電性鉱床の抽出に威力を発揮し、特に時間領域電磁探査 (TEM (Transient Electromagnetic) 法) は VMS 型鉱床の探査にルーティン的に用いられる。TEM 法では、full-waveform のデータ記録と複数受信機による多点測定の方法へ展開している¹⁰⁾。解析技術は 2 次元・3 次元逆解析の研究が盛んであるが、まだ実用化レベルには至っていない。

高感度の超伝導磁力計 (SQUID 磁力計) を電磁探査に応用する試みが国内外でなされてきている。従来の時間領域電磁探査は、誘導コイルを受信センサーとして用い磁場の時間微分 (dB/dt) を測定しているが、磁場そのもの (B field) を測定した方が探査深度の点では優れている。SQUID 磁力計は B field を高精度で測定でき、可探深度の増大が期待される。BHP 社 - CSIRO のグループは、SQUID 磁力計の空中電磁探査への適用を目指した研究を実施した¹⁸⁾。一方、金属鉱業事業団は地上電磁探査 (TEM 法) のシステム開発を行っている¹⁹⁾。

電磁探査のもう一つの手法である CSAMT (Controlled Source Audio-Magnetotelluric) 法は、MT (Magnetotelluric) 法では扱わない高周波域 (4Hz～8kHz) を人工送信源でカバーした方法で 1980 年代以降広く普及した。最近カナダで、人工送信源なしで数百 Hz 以上の自然電磁場も利用する AMT (Audio-Magnetotelluric) 法が CSAMT 法に代わって用いられるようになってきた²⁰⁾。

3・4 比抵抗/IP 法電気探査

電気探査のデータ取得は dipole-dipole 法が依然として主流であるが、解析では 2 次元逆解析がルーティン的に用いられるようになった²¹⁾。鉱床に起因する IP 異常の位置（水平・垂直方向）の精度を格段に上げ、斑岩型鉱床や VMS 型鉱床の探査でボーリングの位置・掘進深度の決定に貢献している。

3・5 地震探査

これまで地震探査反射法は鉱床探査にあまり用いられていなかったが、石油探査で発達した 3 次元のデータ取得・処理技術が、地質構造が複雑な所の鉱床にうまく適用されているという報告がある¹⁰⁾（カナダ Thomson nickel belt、南アフリカ共和国 Witwatersrand 鉱床地帯）。

3・6 放射能探査

放射能探査は、空中磁気探査と併用されることが多い。0～3000 keV のエネルギー範囲で 256 channel のスペクトルデータ取得が一般的となり、スペクトル解析における多チャンネル・スペクトルのノイズ除去に進歩が見られた¹⁰⁾。

3・7 ボーリング孔利用物理探査

ボーリング孔を利用する物理探査技術は、検層、Down-hole EM、トモグラフィ、と多岐にわたるが、ボーリング孔周辺の物性測定からはじまり経済的価値のある鉱体と周囲のズリとの境界把握まで、高分解能が要求される。鉱床探査や鉱山開発にルーティ

Fig.2 モンゴル国・西部エルデネット地域における空中磁気・放射能探査結果。
固定翼航空機により対地高度 120 m、飛行測線間隔 200 m で取得された測定値をグリッドデータに変換して表示している。
スケールは東西約 70km × 南北約 70km。

的に組み込むための地道な試みがなされている²²⁾。

金属鉱業事業団では1990年代にボーリング孔利用物理探査の技術開発を行い比抵抗トモグラフィ、IPトモグラフィ、電磁トモグラフィに取り組んだが²³⁾、実用化のためには更に多くのケーススタディを積む必要がある。

4. 地化学探査

地化学探査は、鉱床生成に伴う地化学異常1次ハローが鉱床周囲に分布し、また鉱床の風化過程に伴う地化学異常の2次分散がしばしば起こる、という事実を利用したものである。手法は分析対象別に分けられ、岩石・土壌・氷河砕屑物・沢砂(河床堆積物)・湖沼堆積物・表層水・地下水・雪・蒸気(ガス)・植物・海水・海底堆積物、等多岐に亘る²⁴⁾。これらのうち陸上の鉱床探査としてルーティンとして用いられているのは、岩石・土壌・沢砂地化学探査である。

4・1 岩石地化学探査

岩石地化学探査は、その異常を直接のターゲットとする場合もあるが、鉱床生成のメカニズムを考察する上で不可欠であり、結果としてそれが鉱床探査に結びついている。カナダでは岩石の生成～鉱化変質過程解明に多元素解析を適用する研究がカナダ・ブリティッシュコロンビア大学のMDRU (Mineral Deposit Research Unit)を中心に1980年代後半より活発になった。これは、熱水変質や広域変成作用によって影響を受けない元素と影響を受ける元素を識別し、両者の挙動を解析することにより鉱床生成に伴う物質移動過程を解明しようとするもので(Lithogeochemical technique)、熱水変質などを受けて複雑化した火山性塊状硫化物鉱床の胚胎火山層序の復元などに利用されている²⁵⁾。そのほか、類似した手法として岩石系のある2つの元素量の比を利用して物質移動過程を解明しようとするPER (Pearce Element Ratio) Approach²⁶⁾などもあり、これらの手法は現在もカナダを中心に研究や実探査での利用²⁷⁾が進められている。

4・2 土壌地化学探査

露頭の乏しいところでは、必然的に土壌地化学探査に頼らざるを得ない。従来の土壌地化学探査が鉱床発見に繋がった例として、豪州Queensland州Century鉱床(SEDEX型亜鉛・鉛)が挙げられる。土壌試料は地表下10～30 cmのB層から採取され、混合酸で処理した後ICP-OESで分析された。その結果得られたZn異常(>1000 ppm)の直下に鉱床が胚胎していた²⁸⁾。

1990年代になると、土壌表面に吸着している元素、あるいは土壌中の有機物に含まれている元素を選択的に抽出し分析する方法が、豪州やカナダで研究された。これは旧ソ連邦で開発された技術から出発しており、MMI法あるいはEnzyme reach法などと呼ばれている²⁹⁾。金属鉱業事業団ではMMI法を菱刈鉱山の本鉱床と山田鉱床の上で試験し、従来の土壌のバルク分析結果と比較した。その結果、複数の元素を解析すれば、従来法よりも地化学異常を明瞭に抽出できるとの結論を得ている³⁰⁾。

カナダCAMIRO (Canadian Mining Industry Research Organization)が26社のコンソーシアムをスポンサーとして実施したプロジェクト³¹⁾は、選択的抽出法の発展形として興味深い。チリ第II州のSpence鉱床及びGaby Sur鉱床(斑岩銅・金鉱床)を対象とした試験調査では、鉱床上位の崖錐堆積物を5種類の選択的抽出法により処理・分析した結果、鉱床直上及び付近の断裂帯の上でCu, NaCl, Asといった関係元素の濃度が高くなった。この地化学異常形成の成因を、“関係元素を溶かし込んだ鉱床付近の地下水が地震により地表付近まで上昇し、そこで元素を土壌中に沈殿させた。複数回の地震が元素の一層の濃集をもたらした。”と結

論している³¹⁾。その後の降雨などにより元素の垂直的再移動が起こっており、試料採取レベルも重要である。

4・3 レゴリス・マッピング

レゴリスとは風化を受けていない新鮮な岩石より上位に分布するすべての岩石を指す用語で、土壌もその構成メンバーの一つとなる。豪州では研究開発コンソーシアムCRC LEME (Cooperative Research Center for Landscape Environments and Mineral Exploration)が1990年代初頭に組織され、レゴリスの成因・分類・地化学異常形成等の研究に取り組んでおり、その下位の鉱床探査に役立てようとしている^{32,33)}。

金属鉱業事業団は2000～2003年度にマリ共和国において資源開発協力基礎調査を実施したが、調査地域(パオレ・パニフィング地域)には原生代の火山岩類・堆積岩類起源のグリーンストーン(ピリミア累層群)が分布し、これに胚胎する金鉱床が探査対象である。既に発見・開発されている金鉱床としてSyama, Sadiola, Morila等がある。地表はラテライト質風化帯が卓越し、多様なレゴリス物質が分布する。これまで起源や風化程度の異なるレゴリス物質を規格化することなく評価し、高濃度で大規模な地化学異常帯をボーリングの対象としていたため、地化学異常の下位に鉱化作用が続かないことが多かった。そこで2002年度よりレゴリス地質学の考えを導入し、レゴリス図の作成を開始した。その結果、本地域のレゴリス種と分布及びラテライト質風化に起因する元素の挙動が明らかとなり、精査地区抽出手順として①Au異常域の抽出→②As/V元素濃度比異常域の抽出(Asの挙動はラテライト性風化の過程でFe及びVと密接な関係を示すため、AsとVの元素濃度比により鉱化作用起源のAs濃集の程度を評価する)→③レゴリス図との重ね合わせによる原地性異常域の把握、が妥当であるとの結論を得ている³⁴⁾(Fig.3)。

4・4 沢砂地化学探査

河川流域が発達する地域では沢砂地化学探査が用いられるが、この手法が鉱床発見に繋がった例としてインドネシア共和国スバワ島のBatu Hijau鉱床(斑岩銅・金鉱床)が挙げられる³⁵⁾。1986年の初期の調査では40メッシュ試料、80メッシュ試料及び水篩重鉱物と転石が同時に採取され、BLEG法でのAu 10 ppb及び15.3 ppb、80メッシュ試料でのCu 135 ppmの各異常が目撃された。1989年のフォローアップ調査では、発見露頭の1 km北の沢においてBLEG法でAu 169 ppb、80メッシュ試料でCu 580 ppmの異常が抽出された。

Fletcher³⁶⁾は沢砂地化学探査を行う場合の留意点として(1)堆積物は集水域を代表しているか、そうでなければ別の媒体を分析対象とする必要がある、(2)調査フィールドのどこで(あるいはいつ)堆積物を採取すべきか、(3)堆積物のどの粒度を分析すべきか、(4)金のような非常に希な重鉱物粒子を代表させるためには、調査フィールドをどの程度大きく設定し、試料をどの程度多く採取するか、を挙げている。

金属鉱業事業団は2001～2003年度にインドネシア共和国東ジャワで資源開発協力基礎調査を実施した。探査対象は斑岩銅・金鉱床及び浅熱水性金鉱床である。その一環として2002年度に800 km²の範囲において沢砂地化学探査を実施した³⁷⁾。合計519個の試料を採取し、採取密度は0.6個/km²である。80メッシュ試料と166メッシュ試料をCuとAuの分析値と比較した結果、166メッシュ試料の方が再現性が高く、より高精度の地化学異常を抽出可能である。また、後背地の地質に応じて地化学高異常の閾値を設定する必要性も指摘された。

Fig.3 マリ共和国 パオレ・パニフィング地域 レゴリス地形図と土壤地化学異常図（縫部ほか³⁴⁾を一部改変）
 (a)～(d)の図面を重ね合わせ、原地性レゴリス上の Au, As/V 地化学異常域をターゲットとして精査地域を抽出した。
 メモリは UTM 座標 (WGS84)。

5. ま と め

リモートセンシング、物理探査、地化学探査の技術は、ここ10年で様々なものが開発され、あるものは実用化されている。GIS解析もルーティン化し、多種類かつ多量のデータを統合し、探査結果を効率的に評価するのに大きく貢献している。

探査マネージャーは、自身の専門に拘らず、これら多様な技術の適用性を理解し、探査ステージ・対象地域・鉱床タイプに応じた適切な手法を取り入れなければならない。それまでの探査結果を正しく評価し、次の探査にフィードバックすることも重要である。

謝辞 本総説について適切なコメントをいただいた匿名の査読者に感謝いたします。

References

- 1) 資源・環境観測解析センター：宇宙からの地球観測，資源・環境リモートセンシング実用シリーズ1(2001)，p.275.
- 2) 資源・環境観測解析センター：ScanSAR-インターフェロメトリー処理技術の研究開発，平成9年度石油資源遠隔探知技術の研究開発報告書(1997a)，3/5，pp.65-101.
- 3) 資源・環境観測解析センター：レーダーポラリメトリの応用に関する研究，平成9年度石油資源遠隔探知技術の研究開発報告書(1997b)，3/5，pp.35-64.
- 4) T. Cudahy, M. Wells, R. Hewson, A. Cornelius and T. Yajima: Spectral-physicochemical characterization and remote mapping of gossans from the Cu-Zn-Pb Panorama VMS-magmatic system, Pilbara, Western Australia. CSIRO Exploration and Mining Report 915R(2002), pp.1-43.
- 5) 梅原俊彦・前野英生・佐竹誠・浦塚清峰：航空機搭載 SAR(Pi-SAR) 再生画像の位置精度評価，日本リモートセンシング学会 第31回学術講演論文集 P-56(2001)，pp.267-268.
- 6) 大岡隆・小島和浩・増田信行・広瀬知世：ASTER データ利用技術の開発，資源地質，52(2002)，45-49.
- 7) T. Hiroi and H. Takeda: A Method to determine silicate abundances from reflectance spectra with applications to asteroid 29 Amphitrite associating it with primitive achondrite meteorites, Icarus, 88(1990), 205-227.
- 8) 国際協力事業団・金属鉱業事業団：平成13・14 資源開発協力基礎調査報告書 アルゼンティン共和国 北西部地域(2002, 2003) p.346, p.333.
- 9) 二宮芳樹・傳碧 宏：ASTER 熱赤外データのバンド間演算による石英指標，炭酸塩鉱物指標，および SiO₂ 含有量指標，日本リモートセンシング学会誌，22(2002)，50-61.
- 10) M. Nabighian, and M. Asten: Metalliferous mining geophysics -State of the art in the last decade of the 20th century and the beginning of the new millennium, Geophysics, 67(2002), 964-978.
- 11) 岡田和也：オーストラリアにおける金属資源開発と物理探査技術を取り巻く状況，物理探査，54(2001)，315-327.
- 12) J. Relvas et al.: The Neves-Corvo deposit, Iberian pyrite belt, Portugal: Impacts and future, 25 years after the discovery. In Integrated methods for discovery: Global exploration in the twenty-first century. Econ. Geol. Special Publication 9(2002), 155-176.
- 13) E. Van Leeuwe: BHP develops airborne gravity gradiometer for mineral exploration, The Leading Edge, 19(2000), 1296-1297.
- 14) A. Christensen, A. Mahanta, D. Bboggis and M. Dransfield: Falcon airborne gravity gradiometer survey results over the Cannington Ag-Pb-Zn deposit, ASEG 15th Geophysical Conference and Exhibition(2001), Brisbane.
- 15) S. Walters et al.: Discovery and geology of the Cannington Ag-Pb-Zn deposit, Mount Isa eastern succession, Australia: Development and application of an exploration model for Broken Hill-type deposits. In Integrated methods for discovery: Global exploration in the twenty-first century. Econ. Geol. Special Publication 9(2002), 95-118.
- 16) P. Basford and N. Hughes: A comparison of high density ground magnetic surveys and low-level aerial magnetic surveys in a near-surface noise environment -A Cobar case history, ASEG Preview, 76(1998), 101.
- 17) 国際協力事業団・金属鉱業事業団：平成13 資源開発協力基礎調査報告書モンゴル国 西部エルデネット地域(2001) p.304.
- 18) J. Lee et al.: Airborne TEM surveying with a SQUID magnetometer sensor, Geophysics, 67(2002), 468-477.
- 19) 荒井英一・片山弘行・小島和浩・増田信行：SQUID 磁力計を利用した高精度電磁探査技術の開発，資源地質，52(2002)，1-9.
- 20) X. Garcia and A. Jones: Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding, Geophysics, 67(2002), 448-458.
- 21) Y. Sasaki: Automatic interpretation of induced polarization data over two-dimensional structures, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 42(1986), 59-74.
- 22) P. Basford: Development of a short-term model using petrophysical logging at Century mine, North Queensland, ASEG Preview, 92(2001), 19-24.
- 23) E. Arai et al.: Application of IP and EM tomography systems for mineral exploration, Proceedings of the 4th international workshop on the application of geophysics to rock engineering, organized by the ISRM Commission on application of geophysics to rock engineering(2001), Beijing, pp. 1-7.
- 24) W. Peters: Exploration geochemistry and geobotany, In Exploration and mining geology. 2nd ed., John Wiley & Sons, 1987, pp.397-432.
- 25) W. MacLean and T. Barrett: Lithochemical techniques using immobile elements, J. Geochem. Explor., 48(1993), 109-133.
- 26) C. Stanley and H. Madeisky: Applications in lithochemical exploration. Mineral Deposit Research Unit, Dept. of Geological Science, Univ. of British Columbia, Short course no.13 notes(1993), Vancouver, British Columbia
- 27) T. Barrett, W. Maclean and S. Tennant: Volcanic sequence and alteration at the Parys Mountain volcanic-hosted massive sulfide deposit, Wales, United Kingdom: Applications of Immobile element lithochemical geochemistry, Econ. Geol., 96(2001), 1279-1305.
- 28) G. Broadbent, S. Andrews and I. Kelso: A decade of new ideas: Geology and exploration history of the Century Zn-Pb-Ag deposit, Northwestern Queensland, Australia. In Integrated methods for discovery: Global exploration in the twenty-first century. Econ. Geol. Special Publication 9(2002), 119-140.
- 29) G. Hall: Analytical perspective on trace element species of interest in exploration. J. Geochem. Explor., 61(1998), 1-19.
- 30) 通商産業省・資源エネルギー庁：Mobile Metal Ion (MMI) soil geochemistry in the Hokusatsu-Kyushikino region Honko and Yamada deposits, Hishikari mine. 平成9年度広域地質構造調査報告書 北薩・串木野地域(1998), pp.49-95.
- 31) E. Cameron, M. Leybourne and D. Kelley: Exploring for deeply covered mineral deposits: Formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface of mineralized groundwaters, Geology, 30(2002), 1007-1010.
- 32) G. Taylor and C. Butt: The Australian regolith and mineral exploration. In AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics.17(1998), 55-67.
- 33) 縫部保徳：レゴリス地質学と地化学探査，資源地質，54(2004)，91-99.
- 34) 縫部保徳・甲斐道照・鈴木満・長尾尚顕・武山眞：マリ共和国パオレ・パニフィング地域の金鉱床探査とその成果-レゴリス地質に基づく地化学探査データの評価-，資源地質，54(2004)，37-46.
- 35) R. Sillitoe: Exploration and discovery of base- and precious-metal deposits in the circum-Pacific region during the last 25 years, Metal Mining Agency of Japan(1995) p.127.
- 36) W. Fletcher: Stream sediment geochemistry in today's exploration world. In Gubins, A.G. (ed), Geophysics and geochemistry at the millennium. Proceedings of Exploration 97: 4th Decennial Int. Conf. Mineral Exploration. Prospectors and Developers Association of Canada, Toronto, 1997, pp. 249-259.
- 37) 山本耕次・鈴木哲夫・三宅一弘：熱帯地域における沢砂地化学探査の手法と解析-インドネシア共和国東ジャワ地域の例-，資源地質，53(2003)，19-28.