

講演要旨(第142回)*

特集 「新しい資源探査技術とその将来」

最近の鉱山と探鉱

岡野 武雄

西側世界の金属鉱山、非金属鉱山(除石油、石炭、天然ガス)の稼行鉱山数、品位の変遷、アメリカ合衆国・カナダにおける鉱山の発見頻度、発見手法について述べる。

1979年の西側世界の稼行鉱山数は6,000強で1968年(約6,000)に比べて著しい変化はない。これらのうち年産15万トン以上の鉱山数は1,078で1968年の984に比べて9.6%の増加である。採掘手法別にみると、露天掘は14.0%、坑内掘は6.3%の増である。露天掘、坑内掘ともに15万トンから100万トン迄の鉱山数は減少しているが、100万トン以上の鉱山数は増加している。特に年産300万トン以上の鉱山は1968年に比べて1979年は、露天掘で54%、坑内掘で89%と著しい増加を示している。以上のことは、この10余年間に鉱山の採掘規模が大きくなったことを示す。

鉱山の稼行品位の変遷を銅鉱山の例によってみると次のことがいえる。自由世界の銅鉱山の平均品位は、ポーフリー銅型鉱山では1955年0.82%、1975年0.53%、非ポーフリー銅型鉱山で1955年1.8%、1971年1.00%と段階的に減少してきている。すなわち稼行鉱山の稼行品位は低下してきている。

鉱山の発見数は1971年に生産に入っている鉱山として、1946-1970年間に223鉱山数が発見されている(年平均9鉱山)、アメリカ合衆国では、同期間に58鉱山(年平均2.3鉱山)となっている。

鉱山発見の手法を主に使用された手法として伝統的手法、地質的手法、物理探査法、化学探査法に分けてみると地質的手法による発見は、アメリカ合衆国73%、カナダ27%、伝統的手法0.5%、40%となり、今日迄のところこの2法が大きな役割をはたしている。

1鉱山発見のために要した投資金額と発見金額は1946年、50年の平均に対し1971年のそれは10倍になっている(価格変動は調整してある)。1971年発見の鉱山(1971年

の発見鉱山数4の平均)の投資金額は1鉱山当たり 21.5×10^6 ドル、発見金額は $2,225 \times 10^6$ ドルである。しかし1946-50年の平均から1971年迄の5年ごとの平均(1971年は1年間)投資金額に対する発見金額は80-150倍で、平均して100倍となっている。以上のことは発見1鉱山当りの価値が大きくなり、すなわち大規模鉱山となりその発見に要する探鉱費、開発費も比例して大きくなってきたことを示している。

今後の鉱山発見に貢献する主たる探鉱法として物理探鉱、化学探鉱の比率が増加するが、その後発対象となる鉱床が地下深く(潜頭鉱床)になると、物理探鉱、化学探鉱では発見し難くなり、再び地質的手法による探査が重要になって来るであろう。これに加えて、VLF法、リモートセンシングなどの手法が併用されよう。(鉱床部)

花崗岩及び花崗岩系鉱床と硫黄同位体

佐々木 昭

花崗岩質岩石には通常0.00 n~0.0 n%の硫黄が含まれているが、その地球化学的意義についてはこれまでほとんど議論されたことがない。われわれは、さきに開発した岩石の微量硫黄の同位体比測定法(SASAKI *et al.*, 1979)を用いてこの問題を検討した。

これまでに測定した本邦の花崗岩類中の硫黄は $\delta^{34}\text{S}$ (CDT)値で-11~+9%の範囲に入るが、これらはISHIHARA(1977)による磁鉄鉱系花崗岩、チタン鉄鉱系花崗岩で明瞭に2分され、前者は+1~+9%で常に正值を、後者は-11~+1%でほとんど常に負値をとる。この中、地殻物質の関与が本質的とされているチタン鉄鉱系マグマでは、硫黄の主たる供給源が、軽い硫黄に富むことを特徴とする堆積起源硫化物にあったと考えることにより、観測値が明快に説明される。

一方、地殻下部又は上部マントル起源と考えられている磁鉄鉱系花崗岩では、多くの場合、その同位体値がマントル硫黄の値(≒+1%)よりも明らかに重いことから、沈み込む海洋プレートと共に何らかの形で運び込まれる海水硫酸起源の重い硫黄の関与が考えられる。この解釈は、プレート型のマグマ発生機構が想定されるグリ

* 昭和55年6月11日本所において開催の研究発表会

ーントフ帯や山陰帯の磁鉄鉱系花崗岩が平均して $\delta^{34}\text{S} \approx +5\%$ であるのに対し、非プレート型と考えられる北上・阿武隈帯では $+1 \sim +2\%$ とみられ、よりマントル的であることと調和している。

もちろん、これらの解釈(SASAKI and ISHIHARA, 1979)は今後さらに多くの試料が検討され、また地球上の他の花崗岩地域での結果が得られるようになれば、修正を迫られるかも知れない。しかし、いずれにせよ、岩石の微量硫黄の同位体的研究は、硫黄の起源のみならず岩石そのものの成因を考察する上にもきわめて有力な手段である。

花崗岩活動に関連してさまざまな鉱床が形成されるが、これら鉱床の硫黄同位体値は親花崗岩における値と並行に変化している(SASAKI and ISHIHARA, 1980)。ただしこの場合、鉱床硫黄は岩石硫黄にくらべ多少とも軽い同位体値を示すのが一般で、日本の花崗岩系鉱床の場合、両者の関係は、ほぼ $\delta^{34}\text{S}_{\text{岩石}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{鉱床}} + 3 (\pm 1)$ であらわされる。これは硫黄が鉱化熱水系内で酸化種と還元種に分配され、この中、鉱床に固定されなかった酸化硫黄種に、交換反応の結果重い同位体がより多く含まれていたためと解釈される。ポーフィリー型銅鉱床のように、その鉱化条件がより酸化的であったとみられる鉱床では、鉱床(硫化物)硫黄は岩石硫黄にくらべ、さらに軽くなっており、この解釈を支持している。

岩石硫黄と鉱床硫黄の同位体的並行性は、鉱床の硫黄が花崗岩マグマからもたらされたものであることを強く示唆している。このことは、近年、鉱化作用にとって火成岩体の活動は、単なる熱機関としての役割を果しているに過ぎないとみる立場がしばしば強調される中で、鉱化物質の起源論上とくに重要な意義を持っている。

広域的に検討された鉱床硫黄の同位体的情報は、これからの metallogeny の議論に、また、広域的な鉱床探査の面でもさまざまに活用されるであろう。

ISHIHARA, S. (1977) The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.*, vol. 27, p. 293-305.

SASAKI, A., ARIKAWA, Y. and FOLINSBEE, R. E. (1979) Kiba reagent method of sulfur extraction applied to isotopic work. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 30, p. 241-245.

———, ISHIHARA, S. (1979) Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 68, p. 107-115.

——— and ——— (1980) Sulfur isotope

characteristics of granitoids and related mineral deposits in Japan. *Proc. 5th IAGOD Symp.*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller) Germany, Stuttgart, p. 325-335.

(鉱床部)

花崗岩系列と鉱床生成量

石原舜三

不透明鉱物、とくに磁鉄鉱の有無により提案された2系列、磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系の火成岩類は、一般の熱水性鉱化作用の種類に密接に関係している。例えばポーフィリー型鉱床や黒鉄鉱床はすべて磁鉄鉱系の花崗岩や火山岩に関連してのみ生成している。総括的に金属鉱床を概観すると、硫黄あるいは塩素と結合して溶存する鉱種は磁鉄鉱系のマグマ活動に伴われて生成する。その原因は、この種のマグマが(1)本来 S, Cl に富み、かつ(4)それら化合物がマグマ固結時に珪酸塩メルトから水溶液相に、ほとんどすべて分配されるからであろう。

磁鉄鉱系マグマがチタン鉄鉱系マグマと比較して、硫化物鉱床の生成能力にたけている点には疑い余地はないが、磁鉄鉱系火成岩帯でも、地域によって著しい相違が鉱床生成量に認められる。若干の例を $\text{Cu} + \text{Pb} + \text{Zn}$ について次に示す。

フィリピン	$n \times 10^4 \text{ t/km}$ (マグマ前線)
アンデス	同上
グリーンタフ(東北日本)	同上
北上山地	$n \times 10^3 \text{ t/km}$
山陰帯	$n \times 10^2 \text{ t/km}$
アジア大陸東縁部	同上

以上のうち鉱床生成能力が大きい地帯はポーフィリー型銅鉱床が産出する所である。東北日本のグリーンタフ帯では、ポーフィリー型は産出しないが、カルデラに伴う海盆がもたらす特殊な環状環境が黒鉄鉱床を生ぜしめたために、鉱床生成能力が高まったのであろう。

ポーフィリー型鉱床の多くは、成層火山直下のような一点に集中して貫入する火山岩プラグの周辺で、同心円的なマグマ水-地下水熱水対流が生じて形成される。その様な環境は火成活動時に構造的に安定した所で得られ、たとえばカルデラが形成されるような割目が多面的に生じる環境では得られないものと考えられる。

アジア大陸東縁部の火山深成岩帯では(沿海州、慶尚盆地、中国東海岸)、磁鉄鉱系火成岩類がカルデラ陥没構

造を伴って産出している可能性が地元の地質家によって示唆されている。また日本の山陰帯の古第三紀磁鉄鉱系火成岩帯でも、多くのカルデラ構造が知られている。このような地域では、火山活動に伴う構造的なじょう乱によって鉱化物質の濃集が得られず、同じ磁鉄鉱系火成活動でも鉱床生成能力が低下した可能性が考えられる。日本の地帯区分で以上に適合しない所は北上山地である。

磁鉄鉱系火成鉱床の生成には以上のテクトニクスの側面の他、鉱化成分の原濃度、すなわち化学的側面が重要である。これについては研究の進展を待って、別の機会にのべてみたい。(鉱床部)

石炭資源探査の新技術と今後の 問題点について

曾我部正敏・佐々木 実

石炭資源有効利用に関する炭質評価技術の研究という題目で、石炭課の特研グループが、昭和52-54年の3カ年にわたって、釧路炭田太平洋炭鉱と石狩炭田芦別・砂川・夕張・大夕張の各炭鉱の地域を対象に調査研究を行った。この研究の成果は、藤井ほか(1977-1980)らによって発表されているが、ここでは、その中の炭層予測技術の研究の成果について述べる。

炭層の厚さと炭質の変化は、石炭組織成分のうちのデグラディニットならびに揮発分量比と密接な関係のあることが判明したので、デグラディニットの物理・化学的特性について説明する。

デグラディニットは、植物の木質部が微細に崩壊したものに由来するとされているが、岩石におけるグラントマスに相当し、一般に、粘土鉱物、エクジニット及びイナーチニットと混在しているので、従来、その化学的性質は、殆んど研究されていなかった。しかし、多量のデグラディニットからなる試料(デグラディニット約81%、テリニットとコリニットからなるビトリニット約11%、エクジニット約6%、イナーチニット約2%)の採取が可能となった結果、デグラディニットは、ビトリニットと比較して発熱量が150-400 kcal/kg高く、揮発分が4-8%及び水素が多く、むしろエクジニットの化学成分に近いことが確認され、また流動度も極めて高いことが判明した。

一方、炭層中におけるマセラルの含有割合は、太平洋炭鉱地域では、ビトリニットが約95%、エクジニットが約3%、イナーチニットが約2%、夕張地区においては、ビトリニットが約91%、エクジニットが約7%、イナーチニットが約2%で、炭層の90-95%がビトリニットで

占められている。従ってデグラディニットの含有量が増加すれば、テリニットとコリニットからなるビトリニットの含有量が反対に減少することになる。

太平洋炭鉱地域の春採本層、夕張地区の夕張10尺上層及び常磐炭田石城夾炭層下層の各炭層の等層厚、等デグラディニット(等ビトリニット)及び等揮発分線図から、太平洋炭鉱地域においては、炭層堆積盆の周辺部では、炭丈約2m、デグラディニット約34%、揮発分約52%であるが、中心部に向かってこれらの数値はしだいに増加し、中心部では炭丈約2.9m、デグラディニット約43%、揮発分約54%となっている。夕張地区においては、炭層堆積盆は、北北西と東北東の2つの方向性に支配された5個の堆積盆に分割されており、各堆積盆の周辺部では炭丈1-2m、デグラディニット約10%、揮発分約41%で、中心部では炭丈4-5m、デグラディニット20-30%、揮発分45-50%と次第に増加している。常磐炭田においては、西方の基盤よりでは、炭丈約1.2m、テリニットとコリニットからなるビトリニットが50-60%であるが東方の炭層深部に進むにつれて、炭丈は1.5-2.5mと厚くなり、ビトリニットは反対に減少して20-45%となっており、換言すればデグラディニットは増加することになる。

上述のように、デグラディニットならびに揮発分は、炭層の厚さ及び炭質と正の相関関係にあることが認められ、未開発地域や炭鉱における深部未開発地域の炭層発達状況と炭質を予知するための有力なパラメーターであり、かつ、このパラメーターは他の炭田にも適用されうると考えられる。

また、デグラディニットとテリニット・コリニットからなるビトリニットの物理・化学的特性が非常に異なっており、かつ、炭層堆積盆の周辺部では、ビトリニットの含有量が多く、中心部ではデグラディニットの含有量が多くなる。このような関係は、炭層堆積盆内の植生の差異に原因しているものと推定される。すなわち、堆積盆の周辺部では主に樹木類が生育し、堆積盆の内部では草本類が生育していたものと思われる。

今後石炭組織別の液化実験を実施する予定であるが、デグラディニットはビトリニットよりも液化反応速度が早く、かつ良質の液体が多量に生産されるものと予想される。この研究の成果は、石炭液化、ガス化に必要な原料炭の探査及び利用に際しての基礎的指針となるものと考えられる。

(燃料部・同)

第2世代を迎える地質・資源探査 リモートセンシング

長谷 紘 和

資源観測衛星 Landsat が打ち上げられて8年が経過し、現在同3号衛星が地球データを記録しつつ周回している。この間1978年1月末からはわが国の地上受信局も受信を開始し、日本列島及びアジア大陸東縁部のリアルタイムデータ取得が可能となった。

この Landsat データの果たした最大の寄与は地球規模での資源(広義)の観測・管理の可能性を実証したことにあると考えられるが、地質・地下資源分野についていえば、データの評価が進むにつれて、多くの新事実が明らかにされつつある反面、実用的観点からのデータの利用限界についても問題点が具体化されてきた。こうした問題点はセンサテクノロジーを主体とするハード技術上から見ると克服の可能なものであり、かつ今日のエネルギー資源に代表される資源需給問題の深刻さと相まって、先進諸国では1980年代の中ばを目標に地質・地下資源への実用性を重視した人工衛星打上げ計画が軒なみ打出され、わが国においても例外ではない。このような動きは、従来の国内のみを対象とする認識とは明らかに異なる視点のもとでの発想であり、この点を表題に表わした。

本発表では地質・地下資源分野における技術背景の分析をまず試みる。1839年に Daguerre の写真術が確立されて以来、技術進展のうちで画期的な一般事項としては、1909年に実現した航空機並びに1957年から実現化した衛星による搭載技術があげられる。地質・地下資源分野では1940年代初期に実現した立体視技術の寄与がもっとも大きく、この効果を主体に写真地質が体系化され、また関連する写真測量技術分野の進展も著しい。リモートセンシングデータの面からは、技術概念が通常写真技術時代におけるパンクロマティック技術に代表される一様性の追求から、多波長帯域化にみられる多様化に移行し、今後は多様なデータの統合がテーマになるものと思われる。

リモートセンシングデータの利用は、地形形態に注目して対象場の理解をはかる、構造地質・層位学的アプローチと、岩石の波長特性に注目して岩石区分を行おうとする鉱物学的アプローチに区分される。

構造地質・層位学的アプローチの側面に立てば、Landsat に代表される衛星データは、地質構造の枠組を理解するための間接概査手段の一つとみなされる。わが国ではデ

ータの大観効果によって識別される大型の環状地形形態が注目される。村岡らはそれらを侵食による削はくレベルごとに検討し、陥没カルデラに起因するテクトニックモデル化の研究を進めつつある。それらのうち若い地質年代のものについては地熱資源賦存の観点から評価できる。

また、リモートセンシングデータのもたらした、資源探査上の寄与に関しては表層被覆を透して下位の構造、とくに断裂に関する情報が地表面においてとらえられる事実があげられる。それらは断裂の地表トレースの位置に、1)被覆層の物性変化が生じ、それが可視域・マイクロ波領域での画像データ上に反映されるものと、2)被覆層の力学的変化により、侵食パターンに反映されるものとに分けることができる。被覆層の厚さは大陸では1kmをこえる場合でも、下位基盤構造の地表への反映が報告され、また、未固結表層への反映例も報告されている。わが国の場合には、第四紀火山灰質層・湖成堆積物に下位層の反映がみられるものと推定される例がある。

鉱物学的アプローチの側面からみると、岩種の区分・識別にリモートセンシングデータ処理技術の適用が期待されるものの、現在のところ使用波長域と岩石・鉱物の分光特性からくる限界や地表分解能の制限から、処理技術が高度に活用されるには至っていない。造岩鉱物の分光特性からみると、熱赤外波長域の利用に効果が期待されるが、これまでこの波長域の多波長帯域データ化はセンサ技術の面から困難があった。しかしその技術的困難がどうやら克服され、熱赤外波長域を3つの波長域(8.27-8.7 μm , 8.8-9.3 μm , 10.1-11.0 μm)に分帯してデータをとるテストが大きな成果を収めたという報告が本年4月に行われた第6回 W. T. Pecora シンポジウムでなされている。

Landsat の有効波長域(0.5-1.1 μm)では、これまで変質帯の広域識別に有効であるという実験結果が示されているが、わが国の場合にも、山岳地域に発達する地熱変質帯は、周囲が分光コントラストの強い植生帯で囲まれることもあって、画像データからのコンピュータ利用による変質帯の広域抽出は、相対的に容易なテーマといえることができる。(地殻熱部)

物理探査における最近のトピックス

駒井 二郎

近年、物理探査技術の進歩は非常にめざましいものがあり、特に探査対象がさらに地下深部に移行しつつある

状勢下において、その比重は一段と高まりつつある。資源探査のすべての領域にわたって言及するのは時間的に困難なので、金属・非金属鉱床分野における最近の話題を二、三とり上げ、その現状と将来を展望する。

現在、物理探査部においては、重点的な研究課題として鉱床探査への応用を必ずしも強力に推進している訳ではない。しかし鉱床物理探査における諸手法は、たとえば複雑構造、急峻地形、あるいは要求される高度の構造分解能といった技術的観点から、地熱・活断層探査等の他分野と共通の基盤を有しており、われわれとしてはその動向に対し、常に間断なき注意と関心を怠っていない。

まず鉱床物理探査における技術体系中の代表的存在である電気探査法について、今後もっとも中核的な役割を果たすものと期待される「複素比抵抗(スペクトル IP)法」の概要を紹介する。概念的には従来の周波数領域 IP法がせいぜい2周波数の測定にとどまっていたのに反し、その大幅な多重化を図るとともに位相情報を付加することにより、比抵抗を複素スペクトルとして取扱う方式と理解してよい。従って革新的な着想というよりは一応、在来技術の拡大・延長線上にあるものとみなされるが、これまで可探深度の増大を進める上において致命的な障害となっていた電磁カップリングの除去を効果的ならしめると同時に、Cole-Cole 図上に表現されたスペクトルパタンの形状から比抵抗、FE,あるいはMCF等を越えた高次の二次物性量(各種鉱物・岩石の差異または変質作用の強弱)推定への道をひらくものである。

実例として、磁鉄鉱と磁硫鉄鉱、石墨と硫化鉱体、黄鉄鉱と黄銅鉱等の特徴的な複素比抵抗特性を示し、上記の可能性を示唆する。

ハードウェアとしては多重周波数に対応した送受信機能が組み込まれているほか、マイコンを内蔵して大量データの現地処理をある程度行っているが、測定作業自体に比較的長時間を要するため、目標がかなりしぼられてきた段階での精査用として位置づけされるべき性質のものであろう。見通しとしては、可探深度の方は相当程度の改善が現在でも期待できるが、スペクトル特性による二次的諸量の分離・予測が可能となるまでには、なお若

干の時日を要するものと考えられる。いずれにせよ、この方向からのアプローチが、少なくとも電気探査法としての最終目標のひとつである点については、衆目のほぼ一致するところである。

地震探査法については、これまで金属鉱床に対する利用はあまり活発ではないが、ウラン・ボーキサイトに対する屈折法の適用、あるいは石灰石・粘土等の非金属鉱床に対する表層被覆の厚さや空洞等の推定、さらに石炭の見直し調査等、需要としては決して小さくはない。大規模な基盤構造調査のような場合をのぞくと、当面いわゆる“浅層反射法”がおもしろい応用面を開拓してゆくものと予想される。特に最近開発された“MINI-SOSIE”なる方式は、道路工事等に使用されるランマーを振源として発生させたランダムパルス列を受信側において相関をとり、通常の孤立波形に変換するもので、原理的には深部探査用に用いられているかの“パイプソイス”にやや近い。簡便性—コスト面において抜群にすぐれ、ことさらに高い経済性が望まれる金属・非金属鉱床探査にはよい適応性が認められる。

このほか、地表面10数m程度の範囲の極浅部探査用として、VHF帯のマイクロ波レーダーをあげたい。コンパクトにまとめ上げられた装置一式は機動性に富み、音波探査の記録と類似した高い解像力の地下構造断面がえられる。当面、潜在活断層探査への応用を計画しているが、鉱床に対しても“浅層反射”とほぼ共通の用途に利用されよう。

以上、いずれも断片的な説明に終始したが、これらはすべて独立した手法として今日、急速な発展途上にあるものばかりであるが、特定の探査対象に対しては在来技術と組み合わせ、それぞれの持味を活かしつつ、相乗効果が得られるような最適システムが構成されるべきであることはいうまでもない。

(物理探査部)

写真でみる中部ヨーロッパの地質

—北海から地中海まで—

寺岡易司(地質部)