

火山性陥没と金銀鉍床の探査—発見

古宇田 亮 一 (鉱物資源部) ・スイヤント (インドネシア国立地質工学研究開発センター)
Ryoichi KouDA Suwijanto

1. はじめに

科学技術振興調整費による「アセアン諸国とのリモートセンシング技術の高度化とその応用に関する共同研究」では、地質調査所とインドネシア国立科学院地質工学研究開発センターが協力して熱帯地域の非再生資源調査を行った。共同研究の3年度目に、インドネシア共和国ロンブレン島北部において、高品位部で10~20ppm, 最高687ppmの含金量を部分的に持つ有望な石英脈を現地調査で発見した。この発見に大きく貢献した、情報処理技術による探査手法の一端を、ここに御紹介しよう。

2. インドネシア共和国の鉱物資源

インドネシア共和国は、わが国にとって重要な資源供給元である。又、インドネシア共和国にとっても、わが国は重要な資源供給先であり、特に石油類の取引は大変多い。インドネシア共和国における主要な資源生産量を第1表に示す。非鉄金属鉱物の点では、露天堀りによるアルミニウム(ボーキサイト)と錫、ニッケル以外は、あまり大きくないことがわかる。主要産品は、銅、金、銀、マンガン、ニッケル、鉄、錫、アルミニウム等と、アスベスト、石灰石、カオリン、ダイヤモンド、それに、石油、天然ガス、石炭、アスファルトである。

インドネシア共和国は赤道をはさんで、弧状に並んだ13,000以上の島からなり、大陸地殻と海洋地殻が複雑に入り組んでいる。赤道付近に広大な領域を占めるため、その熱帯林の重要さと共に、地球気候上重要なため、数多くの生物学・地学的研究対象となってきた。資源的にも重要で、スマトラ島のパレンバン油田やバンカ島・ビリトン島の錫鉱床等で、わが国にもなじみが深い。

しかし、一般の非鉄金属鉱床や非金属鉱床の開発は、同様の地質を有する他の弧状列島地域等に比較して、必ずしも進んでいるわけではない。これらの鉱床は、開発に要する面積が少なく、抗廃水対策等に留意すれば、環境への影響もそれほど大きいものではない。しかも、近代的産業を成立させる上で不可欠な基礎素材を提供する。

第1表 インドネシア共和国の鉱物生産量 (U. S. B. M. : Minerals Year Book, 1985, III, 428-435)

鉱種	1985年の生産量(トン)
アルミニウム (ボーキサイト)	216,820 (830,000)
銅	88,724
金	83,533 (トロイ・オンス)
鉄(鉄鋼として)	1,200,000
マンガン	942
ニッケル	48,836
銀	1,175,000 (トロイ・オンス)
錫	22,413
アスベスト	25,000
セメント	9,817,000
粘土(カオリン等)	90,160
ダイヤモンド(工業用)	22,000 (カラット)
ヨウ素	25
窒素(アンモニア中)	1,230,000
リン鉱	3,000
塩	600,000
硫黄	5,000
アスファルト	450,633
石炭	1,958,000
天然ガス	1,580,012 (百万立方フィート)
液化天然ガス	16,000 (42ガロンバレル)
石油	483,659,000 (同上)

わが国のように、資源の乏しい国であっても、弧状列島に特有な銅・鉛・亜鉛鉱床は昔から知られて、開発が進んでいた。江戸-明治期のわが国の銅輸出量は世界屈指でもあった。わが国の例から考えて、相似した地質を有するインドネシア共和国においても同様の開発が可能であろうと考えられる。本節では、以下、Djumhani (1981)に基づいて略述する。

インドネシア共和国における古生代以前の地質と鉱化作用については、ほとんど知られていない。わずかにイリアン・ジャヤのボーゲルコップや南スマトラのランパン等に、著しく変成を受けた古生代からそれ以前の花崗岩質片麻岩にモリブデン・金・銀・銅・鉛・亜鉛等を少量含む気成又は熱水成と呼ばれる鉱脈が存在する。これらについては、ほとんど研究が進んでいない。

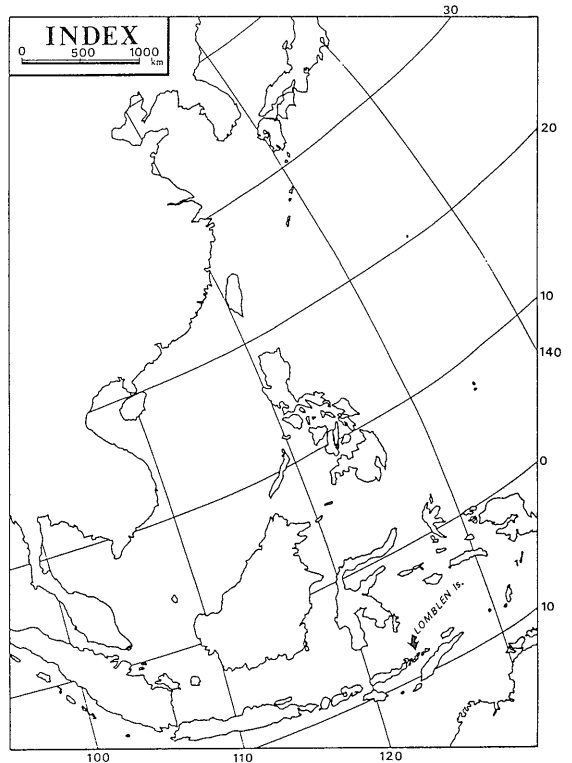
インドネシア共和国の大規模な鉱床は、三疊紀中期以後白亜紀に至る花崗岩活動に伴う錫鉱床が代表的である。この鉱床はバンカ島・ピリトン島で大規模に採掘されている。特徴から分類すれば、ベグマタイト脈、花崗岩質岩の鉱染、スカルン帯の鉱脈、グライゼンや破碎帯の鉱脈、熱水鉱脈やパイプ状鉱脈、貫入岩の鉱染、被貫入岩の熱水鉱脈に分けることができる。この時代に属する鉱床には、他に銅・鉛・亜鉛等の塊状スカルン鉱床がある。

白亜紀から第三紀の中新世にかけて、多くのスカルン型・熱水性・鉱染鉱床が知られており、金・銀・銅・鉛・亜鉛・水銀・モリブデン・マンガン等が産出する。これらの鉱床は、スマトラ・カリマンタン・スラベシの白亜紀後期から暁新世にかけての褶曲帯と北・東部スラベシの始新世から漸新世にかけての褶曲帯に見られる。母岩は火成岩のほか堆積岩が多く、そこに苦鉄質から珩長質の深成・及び火山成岩石が分布している。鉱石の産状は多く知られているが、鉱床として開発された大規模なものは少ない。超塩基性岩体中のクロム・ニッケル鉱床は、かなりよく開発されている。

第三紀中新世から鮮新世にかけて、多種類の金属鉱物が、熱水鉱脈・スカルン型・斑岩銅・黒鉱鉱床等で産出し、イリアン・ジャヤのエルツバーグ銅鉱床やスラベシ島のサンカロビ黒鉱鉱床（現在は閉山）が知られている。この時期に属する火成岩は広範囲の分布が知られており、多数の鉱石産状と一部の規模のやや大きな鉱床が存在することから、探査対象としても大きな期待が持たれている。

第四紀以後の鉱床には、熱水鉱脈鉱床が知られており、活動的な火山に伴う金銀鉱床が今後の重要な探査対象となるだろう。（以上、Djumhani, 1981による）。

インドネシア共和国では、広大な国土を行政区が軍管区に対応付け可能な地域割りによって、国土資源探査計画をたてている。例えばジャワ島とその周辺を一区画、スマトラ島を北と南の二区画、小スンダ列島を一区画等に分けている。これは行政的効率性の理由の他に、弧状列島を、いくつかのブロック構造帯に分割する見解の為であろう。開発・生産に移行した時には行政的分割も効率的なこともあるが、探査ではいかなるものであろうか。又、大変複雑な弧状列島特有の構造を単純化しすぎている大構造区の見方が、どれほど探査に有効だろうか。実際のところ、精密な資源評価に基づく探査計画がまだ明らかになっていない。探査にかかる費用が限られているので、成果の不明な試錐を続々と増加するより、精密な資源評価による探査の効率化を促進すべきであろう。それに必要な方法は、まだ提案されていないのが現



第1図 ロンブレ島の位置（図中の右下）

状である。

3. ロンブレ島の衛星画像

ロンブレ島（第1図）が含まれる小スンダ列島には、第三紀の火山岩が広く分布し、現在の活火山も多い。塊状硫化鉱石の産状も知られており、現在までに稼働中の金属鉱山がほとんど無いものの、資源的に調査する価値の高い地域であることは間違いない。問題は、調査の前提にすべき既存資料である。概略的な地質図が部分的に得られることや、いくつかの鉱石産状がある事を除いて、この地域の資源的評価に必要な事前資料は全く入手できなかった。外国における資源調査は、一般に諸資料が入手し難いことが多い。“国家機密”に祭り上げられてしまうこともあって、ある程度の障害は仕方がない。しかし、稼働中の鉱山も、専門的に詳しく研究した例もほとんど無いため、この地域では評価の前提になる公開資料は全く入手できなかった。非公開資料については共同研究機関である地質工学研究開発センターで収集することになっていたが、現在に至るも殆んど出てこないのが現状である。普通はここであきらめて撤退する。

しかし、分解能が低くてどうにもならないと思われる

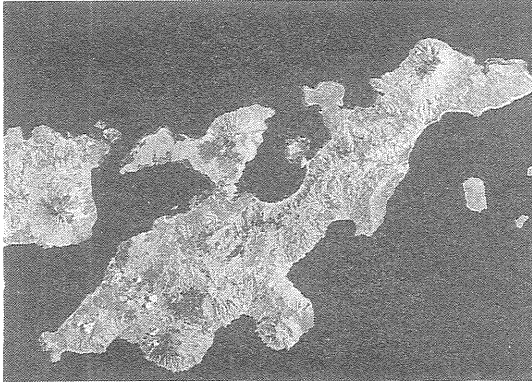


写真1 ロンブレン島のMSS画像

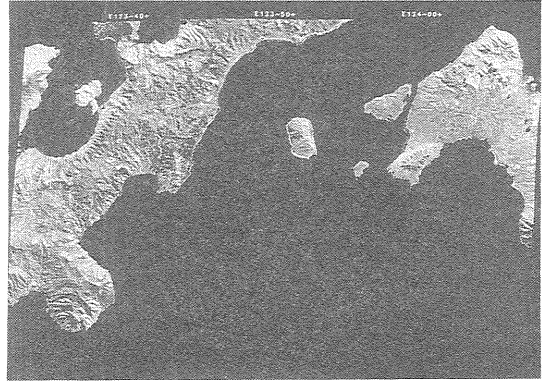


写真2 ロンブレン島のSPOT画像(マルチバンド)

ものの、わずかに衛星画像だけが入手できた。又、質が良いとは言えぬものの、航空機レーダー画像も観察する機会があった。そこで、発想を転換して、これらの画像データを事前評価の代わりにできないか検討することになった。これが、そのまま本共同研究の経過であり、成果となっていた。

最初に入手できた画像はランドサット MSS 画像である(写真1)。地上分解能79mのため、資源調査に必要な情報は得難いものの、幸い雲の無い乾燥期末の画像のため、大構造がよく見える。写真1のロンブレン島北東部(右上)に、明らかな円環状構造が見える。また、ロンブレン島のあちこちに、円錐体の火山を思わせる地形が観察でき、その頂部は火口状の様が見られる。共同研究者から、これらは火山である旨の示唆を得たことと、判読上堆積岩地域や変成岩地域に特有の縞模様や深成岩体を推測させるブロック状構造も見られず、熔岩流様の構造等が観察されたことからこの島がほとんど火山岩からなることが容易に推定できる。しかも、深く削られた侵食谷や構造的断裂を予想させる線状構造が見られることから、第三紀火山岩の広い分布が推定できよう。ただし、それが陸成火山か海底火山によるものかは画像だけではわからない。

写真1に見られる円環状構造が火山活動源のものとするればその大きさから単なる火口ではあり得ず、偶然にしては整いすぎていることから、火山性陥没構造、即ち、コールドロンであることが推定できる。コールドロンであれば、環状陥没構造を構成する大規模な断裂系が存在し、この火山活動を生んだマグマの熱により移動する熱水が鉱脈を生んだと期待できる。実際に採取された場所が明らかでないもの、ロンブレン島に、2箇所の硫化鉱物鉱石のマークが、インドネシア全体の鉱物資源分布図に載っている(Djumhani, 1981)。内容については全く不明であるため確認の仕様がないうもの、少しは期待を持

たせられる情報である。しかし、共同研究者によると、これは黒鉱鉱床の可能性があるというものであり、なおかつ、この島が陸成火山岩に被覆されているということである。わが国の経験によれば、陸成火山地域の黒鉱鉱床の可能性は低い。情報の元になる試料が存在しないと言われる以上、不確かではあるものの、何らかの鉱化作用があることが期待できよう。

従来の地質学的・地球化学的手法ではこれまで、である。この程度の不確かな情報なら無数にあって、対象をロンブレン島に限る必然性は何もない。隣接のフローレス島やアロール島など、小スンダ列島には、いくつも鉱化作用らしきものがあり、いずれも探鉱には成功していない。むしろ、確実な既知鉱山の周囲を調査する方が、成果はなくても、安心感があるだろう。スラベン島南部のサンカロピ黒鉱鉱床は、昔、稼行していただけに、そのような対象としてふさわしい。実際、従来の「衛星資源探査」の多くも、このような既知鉱床の囲りを対象にすることが普通である(批判する意図はないので、念の為)。

今回、ロンブレン島北部に、MSS画像で明らかな環状構造を見出したので、火山性陥没構造と熱水鉱脈との関係が立証できるのではないかと考えられた。このためには、より精密な画像で環状構造を詳しく研究することと、とりあえず、現地の火山岩分布状況を調べることが必要である。検討に必要な地質図・地形図がなく研究報告もなく、鉱徴地の場所も明らかでなく、果たして本当に鉱徴があったのかどうかすら不明という環境では、他にすすべがなかった。

ロンブレン島の現地調査は研究の2年度目から着手された。又、精密なSPOT衛星画像も撮像リクエストを出した。結果的には両者共、成果を得ることができた。SPOT画像は1987年8月9日(320, 367)のシーン(マルチスペクトルとパンクロマティック両モード)が入手できた。この画像はほとんど雲の無い、地形もある程度見える良

好なものだった。環状構造が明らかで、更に、その中の複合した火山性構造と判断し得るパターンも認められた。現地調査では、環状構造に焦点をあてた結果安山岩熔岩・火砕岩からなり、一部に熱水変質・石英脈等の見られることがわかった。また、事前情報が無かったものの、この地域で石油掘削用の潤滑泥水に使う重晶石を採掘していることもわかった。これらの新たな情報は、環状構造地域に金属鉱物の鉱脈が存在する可能性を強めるものであった。

我々の共同研究チームと独立に、その少し前、某国の鉱山会社が、ひっそりとロンブレン島を調査し、環状構造域から少し離れた地域でボーリング調査も行っていたことが知られた。この独立のグループは小スンダ列島全域を調査しており、ロンブレン島では、“大したものは何も無いので” 87年頃撤退したという話であった。89年になって、日・イ共同研究の成果が知られるようになって後、実は、ある程度の鉱徴をつかんでいたが、違法性を訴追されかねないため秘かに中断したらしいという話を受けた。これらは、伝聞の為、本当の所は不明であるが、適法な調査でなかったとすれば、よいことではない。わが国がこのような事をアセアンの国で起こした場合、大問題に発展しかねないであろう。但し、この会社が画像を主対象に解析したことは無いようであった。日・イ共同研究では、画像の解析が中心的作業であったところがユニークな点であろう。

4. パターン解析による衛星地質図

衛星画像の地質応用のためのパターン解析には、いくつかの特徴がある。第一は、当然ながらパターン解析そのものの研究ではないため、全く新しい解析法を創出する必要が必ずしも基本的要件ではない。従来法のままではうまくいかないことが多いが、従来法の組合わせて新しい手法が創出できればそれでもよい。従来法の組合わせて成功した例は、電子技術総合研究所が地質調査所の協力で開発した SIS 法（選択的画像鮮鋭化法；非線形線抽出オペレータと二次微分エッジ強調オペレータの複合）や EPS 法（エッジ保存領域分割法；二次微分エッジ強調オペレータと濃度同時生起行列による領域分割—結合の複合）であろう。

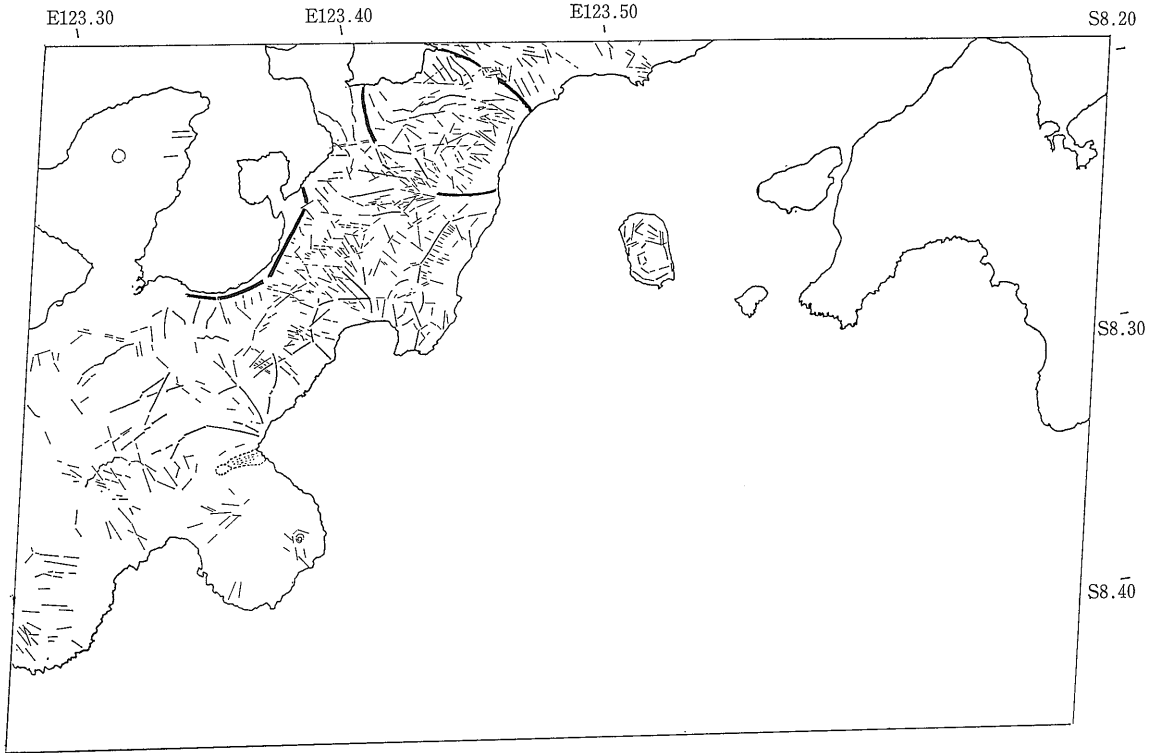
第二の特徴は、構造的特徴や境界として線状のパターンが重視される点にある。微分型のエッジ強調やマスク・オペレータ型の線状模様抽出等が頻繁に応用されるのもこのためである。ところで、従来の方法では、せっかく抽出した特徴を更に詳しく究明する前に、原画像と重ね合わせる等により、再び画像化してしまうことが多い。これは、他分野の画像処理に従ったものであって、

必ずしも効果のある方法とは言えない。従来は、画像を写真判読することが多かったため、画像らしいものに戻す必要があったことも一因らしい。計算機技術の急発展した現在では、判読者が画像処理も手がけられるようになってきている。このため、画像処理のプロセスを地質学的観点で検討することができ、より精密な検討が行なえるようになった。

第三の特徴は、地質学的に有意な処理領域の設定にある。地質学においては、対象とする自然現象の尺度が大変重要で、議論の範囲に有効な尺度を誤らないようにしなければならない。尺度は、何を明らかにしたいかという目的と、その手段によって、同一対象（地域）でも異なることが多い。極端な例で言えば、メランジェ帯やサブダクション帯が地球上どのように分布しているのか調べるためには、数 10m から数 100km のオーダーの尺度が、それぞれの目的によって選択されるだろう。もし顕微鏡の尺度だけで、このような大構造を論じようとすれば、とんでもない誤りを犯すだろう。逆に、顕微鏡以下の尺度の、例えば鉱物粒子境界における原子拡散を明らかにしたいのに、プレートテクトニクスの尺度はまったく当てはまらない。時間についても、同様のことが言える。衛星画像を解析する場合でも、画像の持つ地上分解能の尺度と、明らかにすべき目的とが適合していなければならない。又、画像処理に用いるマスク等の処理単位の地質学的意味を明らかにすることが不可欠である。不適当な尺度単位で処理した結果は、大きな誤りを含む可能性が高い。

第三の特徴に関する詳細な研究は、まだ行われていない。これはケース・バイ・ケースによるので、事例を積み上げる必要がある。

第 2 図は、SPOT 衛星画像に 6×6 のマスクによる非線形線状特徴抽出オペレータをかけて、その結果を見易くした解析図である。ロンブレン島北部の環状構造が明らかである。このオペレータでは屈曲部の線抽出ができないので、屈曲部ではややボケた感じになる。ここは、人間が画像を判読して補っている。又、線として判断される最小単位が 2 画素ごとの輝度差によっている。このため、1 画素しかない線の特徴は、かなりのコントラストがないと拾われぬ。1 画素の地上分解能が 10m であるため、20m 幅以上の構造が主としてみえることになる。更に 6 画素を超える幅の構造では、その輪郭が明瞭でない限り、このオペレータでは出力されない。幅の広い構造は重要なため、オペレータの領域を大きくとるか、原画像をリサンプリングないしは（移動）平均をとる等で抽出する方法が考えられよう。あるいは、より分解能の低い MSS 画像や MOS-1 衛星画像を使ってもよい。



第2図 SPOT 衛星のリニアメント解析結果

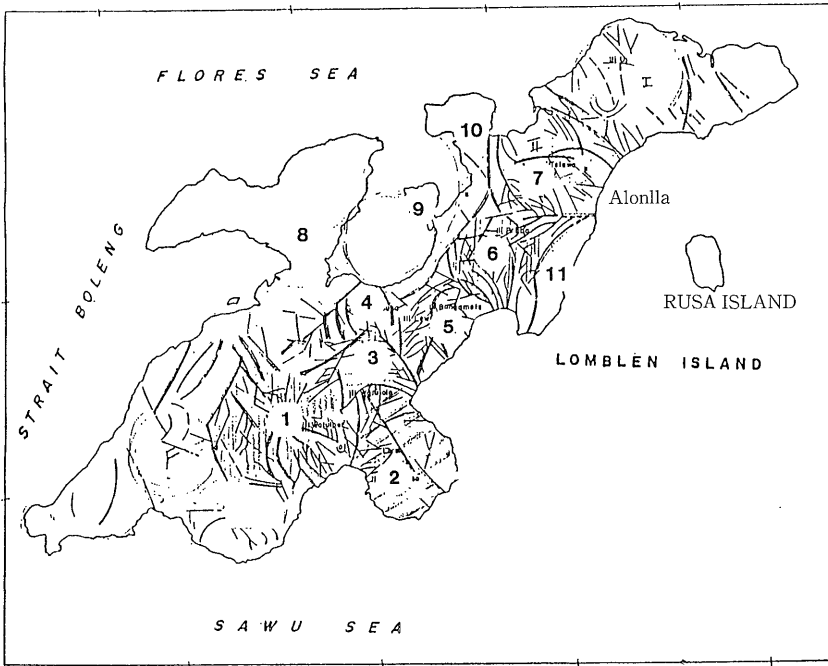
一般に金属鉱床に関する線状の構造は、例えば数 mm 幅の縞状脈や、せいぜい数 cm 幅の鉱層が、これまでは重要であった。これらの構造は、調査者が肉眼又はルーペで識別できる規模である。従来の資源調査は、この範囲の尺度の事象を基に、精密に組立てられてきた。従って、地上分解能がせいぜい10mしかない衛星画像にこれと同じことを求めることは無理である。空中写真判読なら、1m程度でも見分けられるので、1m以上の幅を持つ鉱脈や断裂系解析等に写真を応用する判読技術が発達してきた。この判読術は、直接的な鉱床探査に応用できるほど安定した方法ではないため、補助的に使われることが多い。衛星画像では、この尺度すら無理である。従って、衛星画像の解析では、資源調査に有効な尺度について、根本的に考え直さなければいけない。

衛星画像から引き出すべき、資源調査に有効な目的とその尺度を決定する必要がある。これは目的志向であると同時に、手法束縛になる。画像の地上分解能や、分光分解能、その範囲等の所与の手段が、応用の限界を決定する。10m分解能の画像では10m尺度を表現する画素を処理するが、マスクオペレータ等複数画素を処理する場合には、正確に10mと考えるわけにはいかない場合もある。又、テクスチャ解析のように、ある領域の輝度分布

を調べる場合には、その領域分だけ分解能を犠牲にしなければならない。

入手した SPOT 画像は大変精密なため、写真判読手法で、ある程度の地質区分ができる。これを画像のデジタル処理で再確認するため、代表的な領域で、テクスチャ解析を実施した。第3図では選択した領域を、概略的な MSS 画像判読によるリニアメント図上に示した。第2表は、領域における輝度分布の標準偏差を32×32画素領域と64×64画素領域で比較計算したものである。この値(σ)の大なるほど輝度分布に差があり複雑な構造とと考えてよい。ロンブレン島の大部分が第三紀以降の火山岩で被覆されていることから、これは、侵食による削剝程度の差を示すだろうと考えられた。第2表のうち、2を除いた他の10地域は、判読と現地調査の結果に、よく整合する。2のみ、現世の活火山域で、もっとも値が小さく出るはずが、逆に最大になっている。これは課題として将来に残したいが、恐らく、火山活動による被覆がまだ薄く、古い侵食地形が出ているためではなかろうかと考えられる。この地域の現地調査は、道路の崩壊と峻険な地形に阻まれて果たせていない。画素領域は32×32の方が64×64より明瞭な結果をもたらしている。

以上のパターン解析と判読によって、第4図の衛星地



第3図 MSS 画像のリニアメント解析結果と SPOT・パノクロマティック画像のテクスチャ解析領域 (第2表参照)

質図を作成し、現地調査で検証してその有効性を確認した。

5. 陥没構造の検証と金銀鉱脈の発見

なぜ、環状構造に注目するのであろうか。環状構造が熱水鉱脈に関係する火山性陥没構造をあらわすと考えられるからである。浅熱水性金属鉱床は、マグマの熱・地下の割れ目・循環する水という、三つの環境要素が基本的に必要であると考えられる。三つの環境要素は、貫入マ

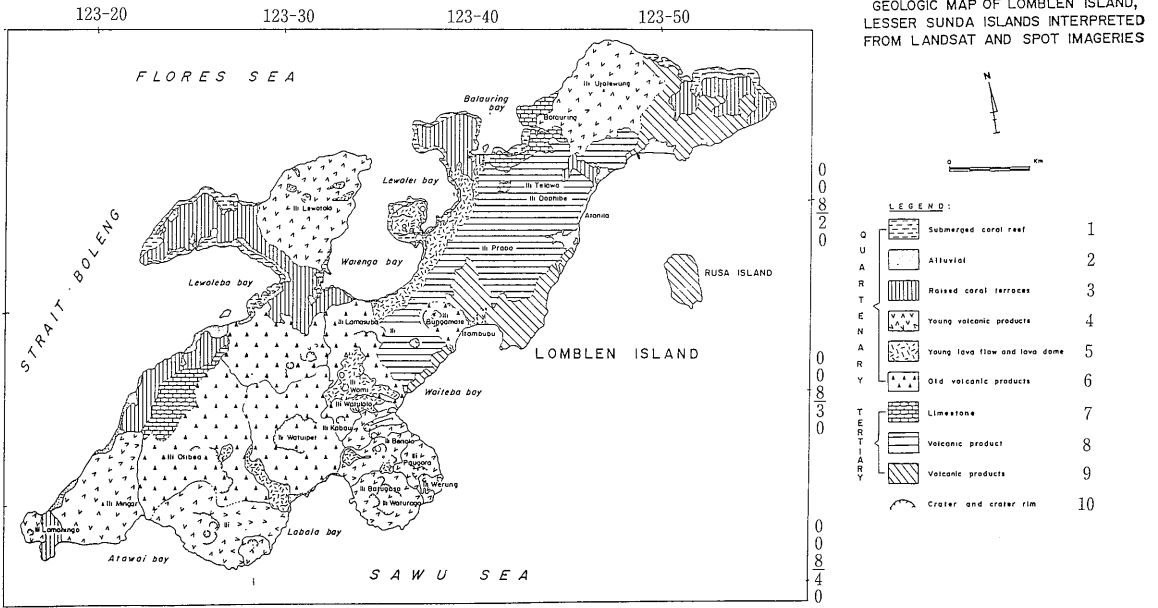
グマに伴う集中的断裂帯に発生し易い。貫入マグマに伴う構造のうち、衛星画像に適するほど規模が大きく、特異な構造として見えるであろう構造は、火山性陥没構造である。この構造は、円環的、又は、多角形的な環状構造として、地表で観察できる。資源調査に本質的に寄与できるのは、地質構造なので、それを示唆する構造は特に重要である。

通常、地下の直接計測はボーリングで孔を穿つ必要があり、精度の高い確実な情報が得られるものの、コストが大変高価である。ボーリングを打つ前に、ある程度地下の様子が事前評価できなければ、無駄な投資を増やさない。衛星画像による評価は、コスト的に最も安く、大量の広域データを、手軽にパーソナルコンピュータ等で処理できる利点を持つ。この利点を生かすには、地表にあらわれたパターン情報を、地下の予測に発展できる方法が必要になる。浅熱水性鉱床が三つの環境要素を必要とするという例のような、適正な資源モデルで資源調査を精密に組織することは、その一つであろう。

環状構造が、本当に陥没構造かどうかは、断裂帯を現地調査して、ズレの程度を推定するか、重力・磁力・比抵抗等で推定するか、ボーリングで確認することで検証できる。現地調査の結果、あまり明瞭な断層崖は観察できなかった。しかし、携帯型重力計とその解析結果 (第5~8図) によれば、環状構造域は、環状部分に数百m以上の規模の陥没構造を含むことが明らかになった。この陥没構造は、中央部分が盛り上がった形を持つ再生カル

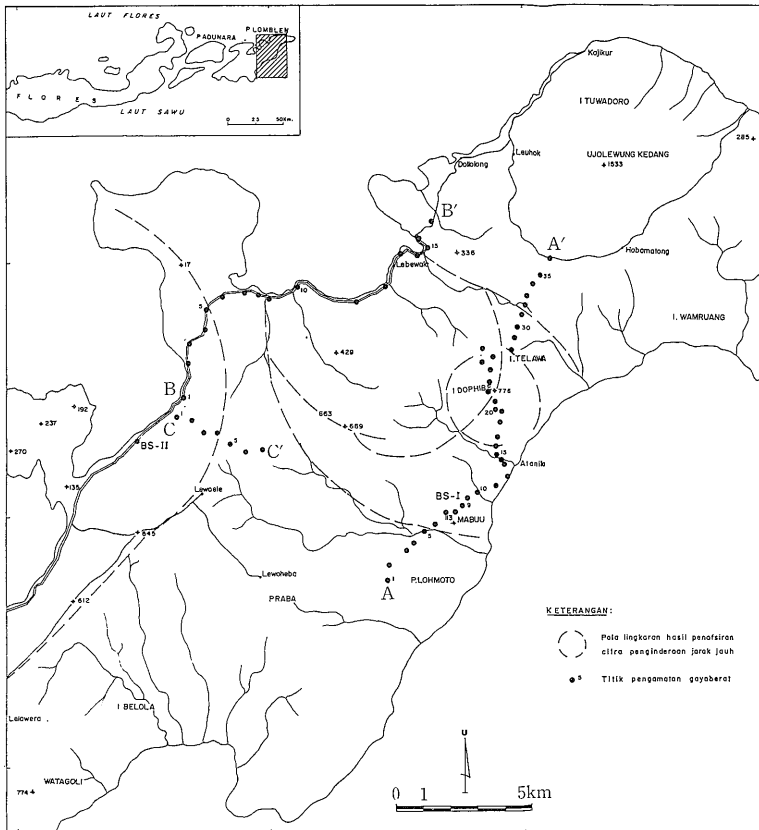
第2表 ロンブレ島 SPOT 画像のテクスチャ量 (パノクロマティック・データからサンプリング, 第3図参照)

領域	32×32画素		64×64画素	
	平均	分散	平均	分散
1	37.50	4.61	39.55	6.11
2	43.94	8.07	44.72	9.56
3	51.30	3.44	48.61	4.12
4	61.35	5.30	61.81	5.60
5	36.56	3.17	38.71	4.96
6	46.03	6.21	46.36	6.68
7	43.52	7.42	40.41	6.41
8	51.81	2.34	50.71	2.55
9	55.06	2.94	55.59	5.56
10	56.70	2.57	56.43	3.73
11	43.84	5.39	47.11	7.30



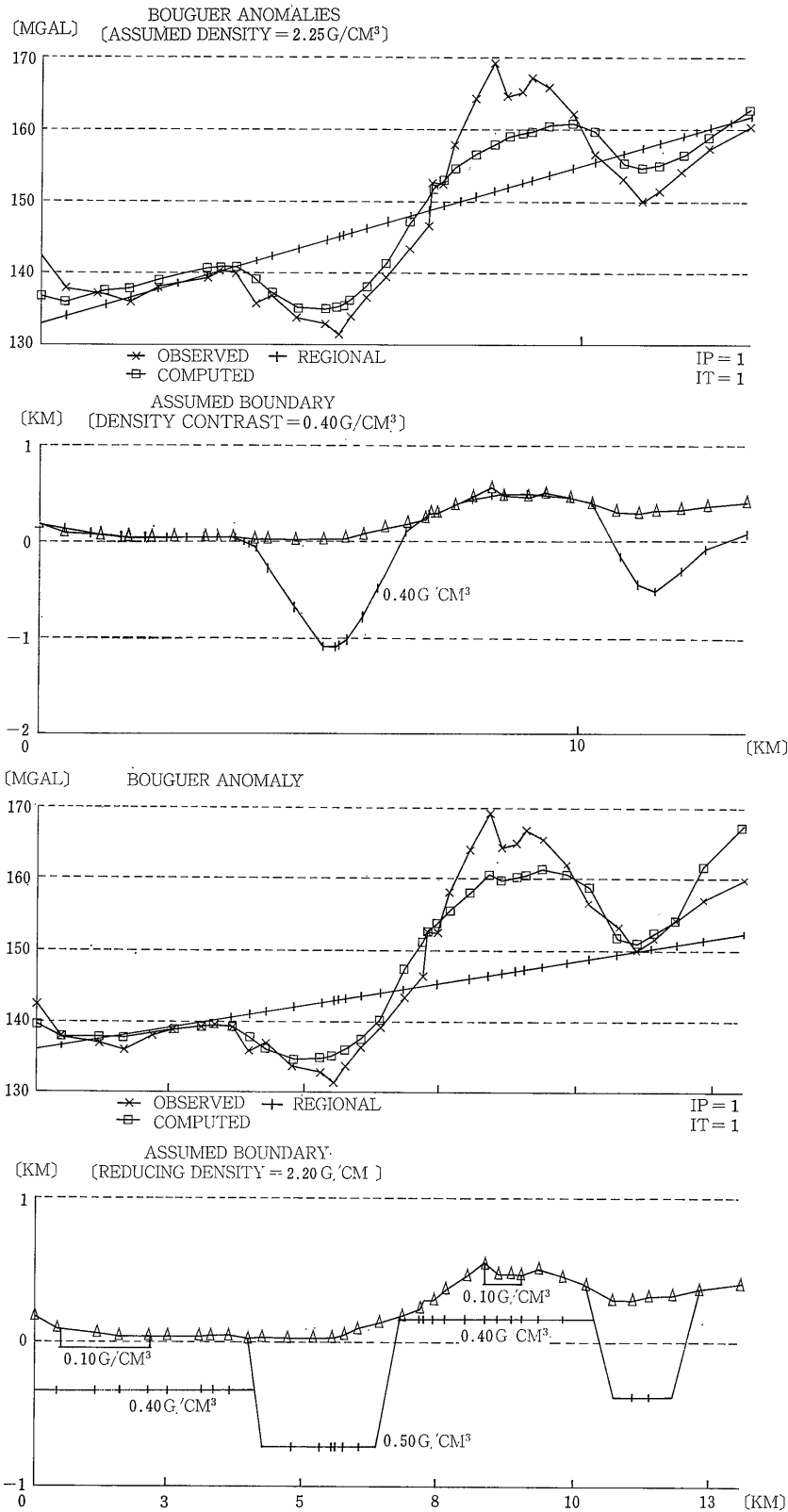
第4図 ロンブレ島の衛星地質図

- 1: 石灰礁 2: 沖積層 3: 礁性石灰岩 4: 新期火山岩 5: 新期熔岩 6: 古期火山岩 7: 石灰岩 8: 第三紀新期火山岩
9: 第三紀古期火山岩 10: 火口縁 (1~6は第四紀)

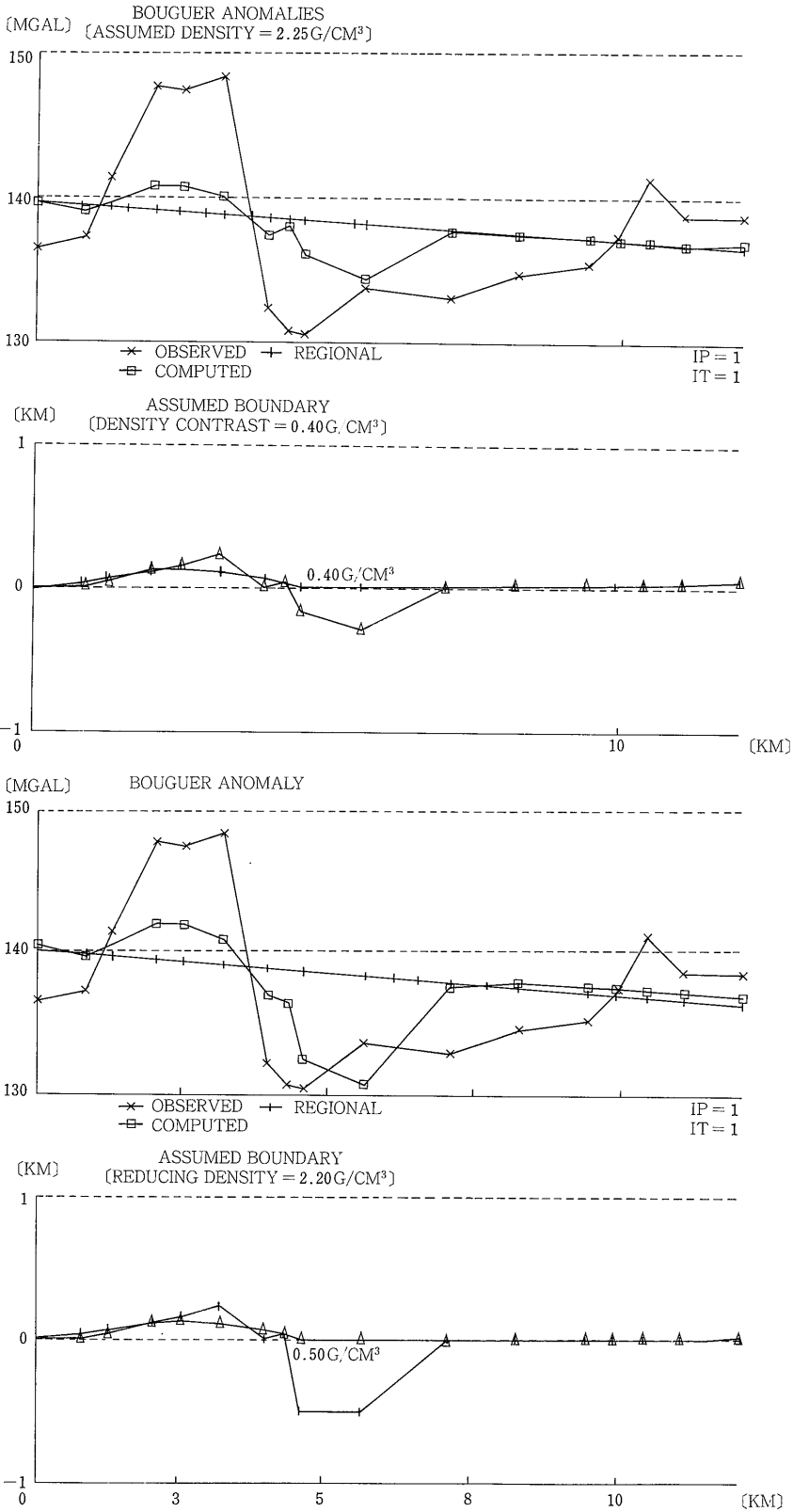


第5図 重力測定の測点分布 (第6~8図)。

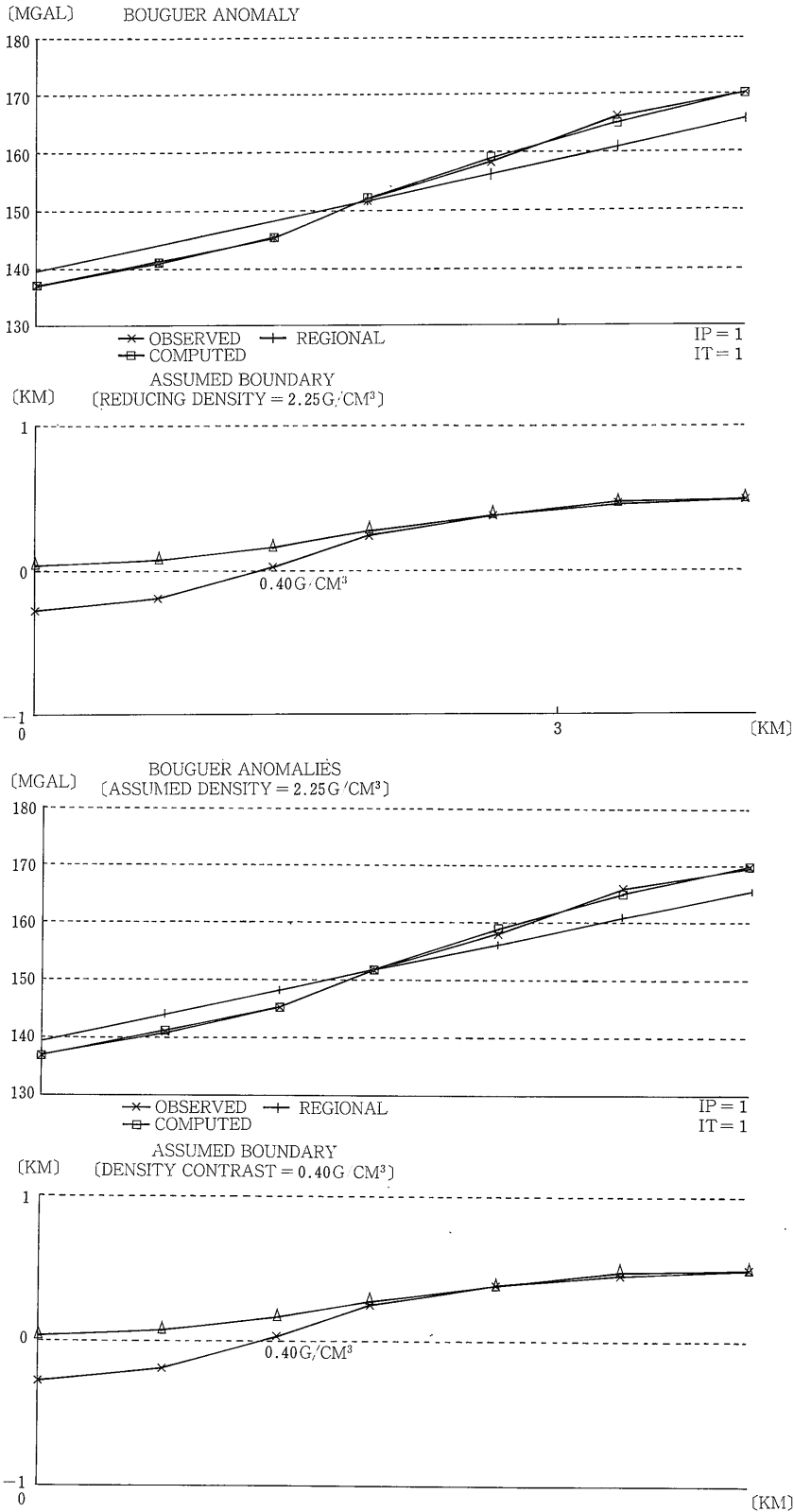
東側: A-A' 西北側: B-B' 西側: C-C'



第6図 A-A'断面解析図
上：二層モデルによる基礎分布解析。環状構造の部分の大きな陥没が顕著である。下：多層モデルによる解析結果。再生カルデラとするモデルが調和的である。
×：観測値，+：広域値，□：計算値，△：地表高。



第7図 B-B'断面解析図
上：二層モデルによる基盤分布解析。下：多層モデルによる解析。



第8図 C-C'断面解析図
 上：二層モデルによる基盤分布解析。下：多層モデルによる解析。

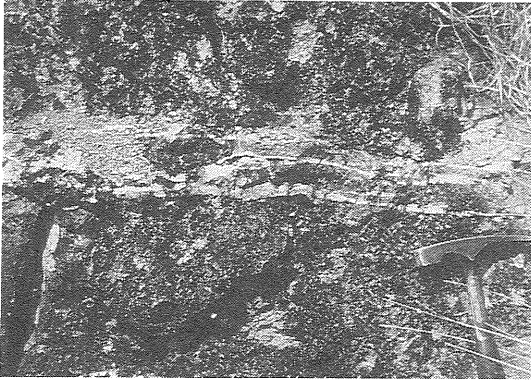


写真 3 北西部の銀の多い石英脈

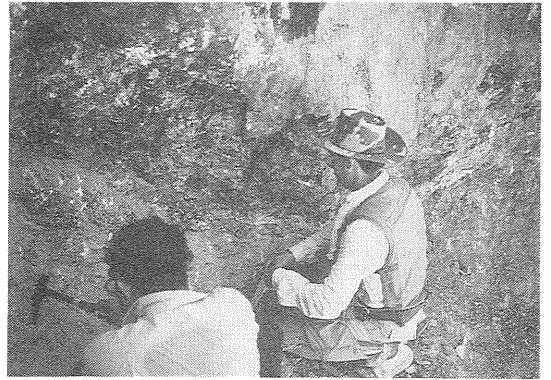


写真 4 東部の含金量 687ppm の石英脈

左がスイヤント、右がバンバン氏。なお、この石英脈は、最初にバンバン氏が発見したので、バンバン・サイトと呼んでいる。

デラ様の構造を持っている。

再生カルデラは、金銀鉱脈との関係が大変深い。単なる陥没カルデラと異なって、カルデラを構成する断層系が形成されたあとも、何度もマグマ貫入活動が引き続いたため、熱水活動の生成が頻繁に行われたと推定されている。これも火山性陥没構造の一種である。

陥没域は、相対的に低地であり、ここにロンブレン島の幹線道路が通じている。現地調査では、この幹線道路(陥没域)に沿った地質事象を調査できた。その結果、いくつかの熱水脈を発見できた(写真3, 4)。これらの試料を後で化学分析したところ、環状構造の西部域で銀が5~260 ppm, 金が0.02~0.26 ppm。東部域で銀が2.5~9.7 ppm, 金が0.9~687 ppmの品位を得た。鉱脈の幅も小さなもので数10cmから大きなもので数mに達するものもある。更に、X線粉末回折により、第9図のような変質鉱物分布が得られた。この作業は、まだ継続中であり、更にデータ量が増えた段階で正式に報告したいが、カリ長石を伴う、比較的中性に近い熱水溶液であったらしいことが推定できる。酸性溶液を示すアルーナイトも観察されたが、電子顕微鏡とそれに付属した原子・分子分析装置により、二次生成分と思われる水酸化鉄の表面を被覆しているところから、熱水液の性質を知る決め手にはなりにくいようだ。

この熱水鉱脈は金や銀の他に、銅・鉛・亜鉛・砒素等を含んでいる。銀の多い西部の鉱脈は、マンガン酸化物が多い。ロンブレン島で硫化物鉱石が見つかったのは、場所が確認できないものの、これと似た鉱脈であった可能性が高い。地表部分では硫化鉄等の水酸化が著しく進んでおり、針鉄鉱等による赤茶色の、いわゆる“赤焼け”が点々と分布する。現地調査では、これらが鉱徴の決め手となった。

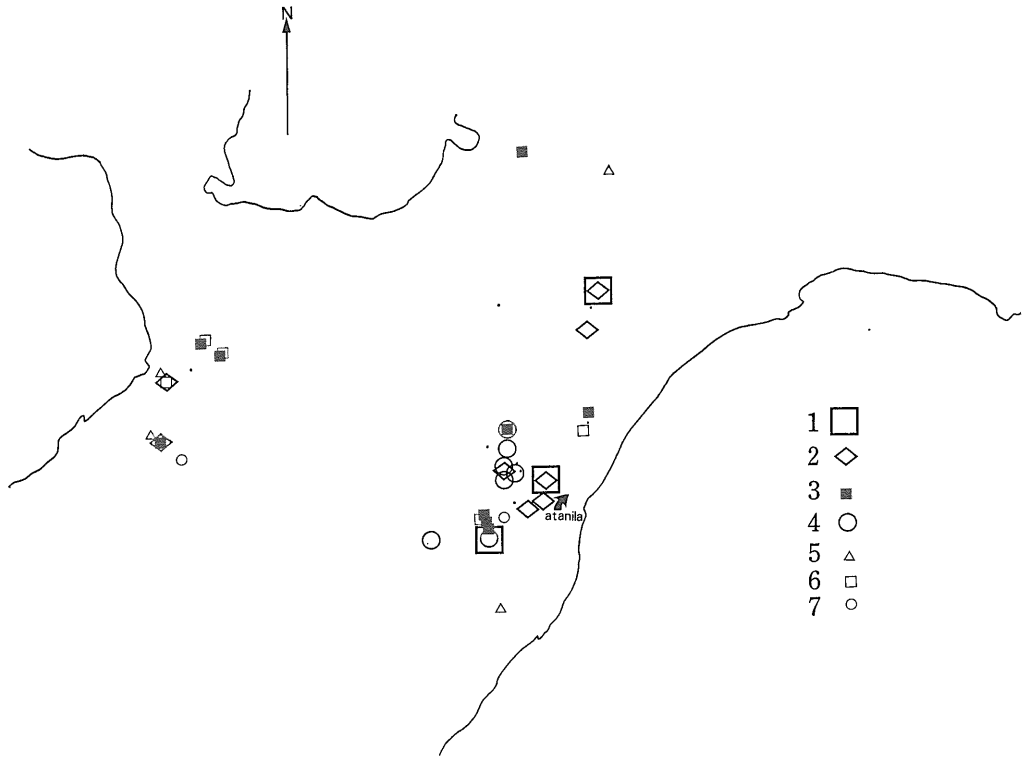
1989年11月号

衛星画像のうちランドサットTM画像は短波長赤外域に2つのスペクトル帯を有する。このうち2μm帯と称するTM7帯は粘土鉱物等の水酸基による吸収が著しく粘土変質帯があり、かつそれが地表に露出していて、植生等の影響が少なく、石灰岩等も無い場合に、粘土変質帯を示唆できるとされている。しかし、今回はランドサットTM画像の受信範囲になく、この方法は不可能である。ただし、ランドサットMSS画像や、SPOT画像の紫外寄り可視域帯は、遷移金属イオンによるブロードな吸収があり、水酸化鉄やマンガン鉱物等の検出には有効な場合もある。

そこで、試しにSPOT画像の第1スペクトル帯他のスペクトル帯に対する相対強度の分布に、適当な閾値を設けてみた。この結果は、単に点が散らばるだけであるが、驚くべきことに、現地調査で確認した水酸化鉄による“赤焼け”帯がごとごとく含まれていた。この方法は、緑の植生は除去してくれるが、枯草の影響を除去し難く、まだ開発途上である。TM画像のように、短波長赤外域にスペクトル帯を拡大した画像が入手できれば、より良い結果が得られるだろう。

6. 衛星資源探査の課題

この日本—インドネシア共同研究では、幸運にも、予測した所に、予想した通りの金銀鉱脈を発見することができた。鉱脈そのものについては、なぜ重晶石脈が付近に多量に分布するのか等の地球化学的問題もある。今後、鉱山開発が始まり、調査が進めば、解決されると考えられる。ここでは、共同研究チームを、ここまで導いてくれた、地球観測衛星による鉱物資源探査の今後の課題を考察する。



第9図 鉱化作用に関係する鉱物の分布

1:絹雲母 2:カリ長石 3:重晶石 4:明ばん石 5:石灰石 6:モンモリロナイト 7:石英のみ

以下の7点を問題として提起しておこう。

- ① 雲量の多い地域等，解析できる画像の入手が困難な場合が多い。
- ② 植生の多い地域では，地質用途のスペクトル情報が使いにくい。
- ③ 従来は，既存鉱山かその周辺の鉱化帯探査が主で，資源的に未知な地域で主導的に試みられた例が少ない。
- ④ 変質帯抽出の成功例はあるが，それが新しい鉱床発見につながった例はない。
- ⑤ 企業探鉱・鉱業権獲得等のために，積極的に使われている例が少ない。
- ⑥ 衛星画像の分解能がせいぜい10m～30mしかないため，航空機搭載センサによるリモートセンシングほど使われてはいない。
- ⑦ 自省をこめて敢えて触れれば，資源探査の明確な目的を持つ組織的研究体制がまだ少数で，実用化より，研究自身に目的があると疑われても仕方のない基礎研究的傾向がないとはいえない。

①について，地球観測衛星が太陽同期軌道をとるため

常に現地時間で午前10時前後の観測（夜間を除く）に集中することも原因の一つであろう。この時間帯に雲の多い地域では良好なデータが得にくい。恐らく，初期に地球観測衛星を設計・打上げた欧米諸国では，午前の方が有利な理由があったのだろう。今後，太陽同期軌道をとらなかつたり，夕方の画像をとるような，地球観測の様々なヴァリエーションが考えられてもよいだろう。当面の方策として，レーダー画像を組み合わせる必要がある。航空機 SAR 画像では，山頂がレーダー発生源寄りに近付いてしまう歪んだ画像が得られ，解析上難点が多い。これに対して，地球観測衛星の SAR（合成開口レーダー）では，超高空から撮像するため，歪みの少ない画像が得られる。資源調査には，衛星画像のパターン解析が大変有効と考えられるので，歪みの少ない画像であれば効果も大きい。雲と無関係であることは，大いに魅力的である。

②について，植生の少ない乾燥地域なら，衛星による探査が容易である。しかし，このような地域では，それ以上に各種の探査が進んでいることが多い。今更，粗い情報しか得られない間接探査法のリモートセンシングが活躍する余地は制限されている。広域観測の利点を生かすには，この点の打開が望まれる。植生の多い地域で

は、更に、短波長赤外スペクトル帯の利用効果も減少する。短波長赤外スペクトル帯では、植生の反射率が近紫外可視域ほど低くならない上、水分等の吸収が重なるからである。植生に厚く被覆された地域では、地表が観察できないので、植生に関すること以外で分光応用が有効になることは少ない。

③について、既存鉱山周辺は採鉱権等が安定して、情報の得易いこと等が原因であろう。既存鉱山の鉱量拡大のための要請も高い。採鉱投資の主対象になることは当然と言える。ところが、既存鉱山周辺となると、要求されるデータも精密なものであり、広域を同時に鳥瞰視するリモートセンシングのような間接的手法より、狭域を精密に解析する直接的手法の方が、はるかに強力で現実的である。問題が、もしあるとすれば、既存情報の有効な解析が進まないまま、無用データが継続して積重ねられたり、有望な鉱徴をつかんでいるのに見過ごしてしまう点にある。探査に真に役立つ情報は、限られた少数であることが多いので、それを効率良く選択し無駄なコストを避けることが課題となっている。リモートセンシングは、むしろ積極的に未知鉱化域の探査に用いられるべきである。未知鉱化域に適用する中での問題解決こそ、リモートセンシングの応用研究を前進させ、新しい手法の創造等にもつながることが期待できる。対象を既存鉱山周辺にのみ限定してしまえば、精度の点で必ずしも十分でなく、間接的な手法であるリモートセンシング手法を、精度の良い直接的な探査手法の成果で解釈することに終始しかねない恐れもある。

④について、鉱床の周囲に、鉱床より広い範囲で変質帯が分布することがあるため、変質帯抽出を探査の一手法として試みる人が多いことが動機であろう。変質帯は、熱水が岩石を変質させて生成する、普遍的地質現象である。鉱床そのものが発見困難でも、変質帯は見つけ易いので、探鉱の指針として重要視されている。しかし、容易に見つかるということは、逆に、有望な鉱床を伴わない変質帯がそれだけ数多いということでもある。更に、変質帯をほとんど伴わない鉱床や、変質帯があっても鉱床の大きさにほぼ等しいものも多い。偏在する鉱物資源の生成と、普遍的な変質帯の生成は、別の理由によるとする考え方もある。変質帯の生成と鉱床生成とが密接に関係するのは、非常に限定された条件においてであり、変質帯と鉱床に対する正しい認識なしに変質帯抽出技術のみ発達しても、資源探査に有益とはなりにくい。そうではなくて、逆に、もし鉱床があるとすれば、どのような特徴を示すモデルで考えるべきかに注目すべきである。リモートセンシングによる未知資源域の鉱床風化帯・二次富化帯等の探査が、この観点では有効にな

るだろう。分光特性を調べるのであっても、パターン解析を必要とすることになると考えられる。

⑤について、買鉱や鉱業権獲得の為に資源評価が必要ということがある。直接的方法是、狭域に捉われ易く既存情報の制約も強いので、考え方の幅も狭くなり易い可能性がある。又、現地で試料を直接採集しなければ信頼性のあるデータが得られない。これは、どの地域に興味を持っているか、その意図が曝れてしまうことにつながる。しかし、地球観測衛星による鳥瞰視の観察は、相手に悟られることなく、鉱区設定等を企画するのに有利である。この目的でリモートセンシングによる情報を活用している例は、あまり聞かない。このような試みは、諸外国でもあまり聞かないし、それに類する研究例も少ない。調査の実態を曝してしまう直接法より、私匿性のあるリモートセンシングが、鉱業権設定のような場合や、外国法人と交渉する際有利になることもある。但し、リモートセンシングの信頼性は、現地調査を欠く時、著しく低下する。必要な信頼性をどのレベルに設定すべきか合理的に決定する必要がある。

⑥について、地球観測衛星の地表分解能が、対象の資源地域の最適分解能に達していないことが原因となっている。このため、衛星画像による推定は、精密化するほど不安定となる。従って、分解能は低いが広域観察のできる間接的な衛星画像による方法と、現地調査等による直接的方法を、有効に組み合わせる必要がある。有効にするためには、画像利用の仕方を資源応用と関係づけるべく、地質・資源モデルに基づく画像処理方法を積極的に研究開発する必要がある。このためには画像範囲における深い地質学的理解と洞察が不可欠である。従来の画像処理アルゴリズムの単純延長では、この問題に論理的接点を持ち得ない。これは、現地調査の有効な運用と共に、深刻な課題として残されている。

⑦について、基礎研究とは言え、文献的方法の追試の域を脱していないものもある。文献の方法は、それなりの目的があって研究開発された成果と言える。その目的を設定した思考や風土まで模倣することは困難であろう。本来の目的には強力であっても、応用分野の目的には必ずしも適合できないものもある。方法の有効性は状況によって変化する。そこで、現在得られている多数の鉱物資源モデルに対応した、精密な応用研究開発を創造的に発展させるというのは如何であろうか。現在、研究開発予算の大部分が基礎研究に向かう傾向があり、応用分野の創造的研究が入り込む余地は大変少ないが、この分野においても、世界中のどこにも無い独自の研究を成立させても良いのではなからうか。それが現実に役に立つなら「応用」という名で捨てる必要もない。この分野

は、既に学際的分野に移行していると考えられるからである。

7. おわりに

日本—インドネシア共同の、衛星画像による資源調査の当面の成果と課題について略述した。この共同研究は現在も継続中であり、ここに述べていない未整理の多くの情報に囲まれている。共同研究者の協力を得て、できるだけ早く、その成果を国際的に公表していきたいと考えている次第である。

本稿中、テクスチャ解析は地殻熱部宮崎芳徳氏が算出したものであり、重力解析システムは地殻物理部駒沢正

夫氏のシステムを地質工学研究開発センターの Edy M. Arsadi 氏と共に使用させていただいた。写真の一部は、地殻熱部村岡洋文氏の撮影したものを借らせていただいた。X線粉末回折は地質工学研究開発センターの Bambang S. Kartadiredja 氏と共に解析した。MSS 画像のリニアメント判読は同センター Kardi Suhariono 氏との共同作業である。記して厚く感謝の意を申し上げます。

文献

Djumhani (1981) Metallic Mineral Deposits of Indonesia: A Mettalogenic Approach. Report of Geological Survey of Japan, No. 261, p.107~124.

地学と切手

ジオロジ—諸島の切手



ジオロジ—諸島と銘うたれた切手が、仏領南極から発行されている。通常の相当大きなアトラスにも記載されていない。切手を良く見るとジオロジ—諸島とは、南極大陸のすぐ北にある一群の島の総称でフランスの南極観測基地ジュモン・デュアビル基地のある所と判った。

フランスが領有を主張している南極は東経 136°12' から 142°02' にわたる扇形の地域である。これをアデリー地域と呼んでいる。アデリーとはアデリー・ペンギンのアデリーであり 1840 年にここを発見したジュール・ジュモン・デュアビル大尉の妻の名前である。フランスは 1934 年にこの領有を宣言した。1950 年に観測基地を一度設置したが、1952年に焼失してしまった。4年後に建設されたのがジュモン・デュアビル基地であり現在に

P. Q.

至っている。磁極もこの近くにあり地球物理学上重要な地域である。

ジオロジ—諸島の島は科学者の名前がつけられているのが多い。基地の置かれている最大の島は Ile des petrels (ウミツバメ島) であるが、名前をつけられた科学者には以下の者がある。

クラウデ・ベルナル (Claude Bernard 1813-1878) 生理学者で脂肪消化における胆汁の機能、肝臓の糖生産などの業績がある。

ビュホン (Buffon 1707-1788) 18 世紀最大の博物学者 自然のほとんどのもの人類から鉱物に至るまで考察した。生物の自然発生説や惑星の太陽起源説として知られている。

ラマルク (Lamarck 1744-1829) 博物学者進化論の用不用説を唱え、進化学説についての最も重要な導火線となった。

キュビエ (Cuvier 1769-1832) 古生物学者 動物の比較解剖学の創始者進化論では天変地異説で知られる。他にジャン・ロスタン (Jean Rostand) 島などがあ

る。切手は1971年に発行された。ついであるがジオロジ—に関する地名としてジオロジ—スキューと言う町がシベリアのオホーツク海に近い内陸部にあることをつづけておきたい。