AI 的画像解析手法による鉱物資源探査

Mineral Resources Exploration Using AI

古宇田亮一*

Ryoichi KOUDA

1. はじめに

資源探査にリモートセンシング画像を利用する場合、現在でも一般的な方法は、引き伸ばされた写真を空中写真判読の要領で、地質専門家が専門知識に照らし合わせて目で見て解析する方法である。これを写真の目視判読という。このことは、ディジタル処理手法がまだ一般に普及していないことの反映でもある。目視判読は、様々な専門知識が容易に解析結果に反映され易い半面、時間がかかり、大量処理には向かない上、結果の主観性（非再現性）が強く、計測データとしてのリモートセンシング画像を扱いにくい。これに対して、計算機によるディジタル処理手法は、データの入手と操作にまだ難点がある。ディジタル処理そのものも、各種統計処理や、放送用映像処理の転用、あるいは文字処理技術等の、概して単純な、あるいは組合わせに自由度の少ない処理が多い。そのため、複雑で変化に富む地表解析に応用できるほどの厳密さには程遠いのが現状である。

衛星リモートセンシング画像の応用開発に当たっては、地形抽出や線状特徴抽出等の限定された目的を実現する補助手段としてディジタル解析が使われているに過ぎない。この目的は、地質学的な資源探査応用への、補助的で間接的な初歩的一段階に過ぎないことが多い。構造や、分光特徴の処理結果が得られても、さらに専門家による次の段階の判読が不可欠であるため、限定されたものとなっている。従って、実用に供する立場で言えば、ディジタル処理手法が補助的である上に、処理結果も補助的に利用されることにしかない。この結果、リモートセンシング技術の有効性に対する疑義は数多い。これらの疑義に答え、問題解

決を図るには、次のような方法がある。

第一に、リモートセンシングデータを物理的、又は、化学的計測データとして、その精度を向上させることが重要である。これには、空間・分光分解能におけるセンサ性能の向上が効果的である。現状のリモートセンシングデータに対しても精密科学的処理技術としての画像処理のアプローチを図ることもできよう。これには、室内と野外の計測実験値による比較も重要である。しかし、現状の空間・分光分解能では限界がある。

第二に、リモートセンシング・データの画像処理では、従来のような、柔軟性に乏しい補助的処理手法だけでなく、専門家の知識による複雑な判断過程を画像処理に組み込むアプローチが考えられよう。知識処理による画像解析へのアプローチをここでは、AI 的画像解析手法と呼ぶことにする。AI 的画像解析手法では、必ずしも新しい要素技術だけが技術開発上の目的ではない。従来からある要素技術の自由な組合わせで専門知識による解析に比較できるシステム化も重要な開発目的である。むしろ、要素技術の目新しさと共に、実用上効果的な解析結果を実現する自由度の高さが、AI 的画像解析手法に本質的であると言える。しかし、ここで定義した AI 的画像解析手法の事例は少ない。

AI 的画像解析手法はまだ新しい分野であるが、将来に期待できる発展性を持つと思われるので、鉱物資源探査におけるいくつかの適用事例を紹介し、問題点と今後の課題を展望することにしよう。

2. 鉱物資源探査における画像解析の諸問題

リモートセンシング画像の鉱物資源探査における応用は、まず写真地質学的手法、即ち画像判読として発展してきた。画像判読では、画像中に表れる個々の地質学的、あるいは地形学的要素に注目し、これまでに蓄積された知識を基に、各要素の特徴を画像中に見いだして画像を区分したり、特定の要素を画像から抽出

* 通産省工業技術院地質調査所

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 30, No. 4, 1991

する。例えば、地表の色の微妙な差異、河川系の形態（網状・樹状・平行状・環状・菱形状等）、山稜・溪谷の断面形態（緩急の度合等）、岩石の硬さ、地表のテクスチャ（滑らかさ・粗さ等）、層理面・溶岩流等の地表と交差する線の構造、断層等の断裂系の示す線的構造、植生の発達状況等を全て勘案して画像上の地表を区分し、岩相推定や構造（応力場）解析を進める。岩相は、岩石のまとまった特徴のことで、化学成分が似ているとか、表面構造が似ている、同じ堆積構造を持つ等の似た性質により、対比できる（代表的名称と呼べる）岩石単位のことである。同じような岩相には、同じような種類の鉱物資源が期待できることがある。応力場は、地層が受ける力学的場のことで、断裂系の理論的解析と整合性、応力の方向や大きさ、原因等を推定するために解析される。断裂系と断裂を充填する鉱脈とは密接な関係がある。

画像判読における個々の情報要素は必ずしも独立したものではなく、最終的には、物理化学的物性を示す分光情報と力学的物性を示す構造情報に分解できる。しかし、単純な分光情報と構造情報さえ得られるならば、判読可能というわけではない。判読するためには、適当な広がりをもつ画素群の領域的特性を地質学的・地形学的事象に結び付けようとする分光情報と構造情報の自由な組合わせが必要である。これは、十分、知識工学の対象とすることができ、例えば、現象論的に結果を得るには、ニューラル・ネットによる分類・抽出処理が有効である。

分光情報は対象の物理化学的特徴を示唆してくれるので、例えば、岩石区と植生区の区分のような単純な区分には有効である。現状のリモートセンシング情報は分光範囲と分光分解能が共に限定的であるので、同一岩石区が似たような植生分布を持つとか、特に強い粘土化変質があるとか、鉄酸化帯が地表に表れている等の場合に限定的に使われるだけである。これは、ディジタル処理の対象となり得る。高精度の空間分解能で分光範囲と分光分解能が増せば、更に、どのような種類の粘土鉱物をどのくらいの割合で含むとか、石灰岩か珪酸塩岩か、珪酸分がどの程度か等のことが判明する。これによって、岩石種が推定でき、資源に関係する粘土変質帯や珪化帯の分布が特定できる。しかし、これらは岩石が露出していることが必須の条件である。この情報は資源予測上不可欠で有用な情報となる。しかし、現状のせいぜい10m程度の空間分解能

では、分光分解能を上げてでも地質物性の分離が難しいので、依然、将来の課題として残る。

一方、構造情報は、地表付近の地形的構造特徴を示すだけでなく、リモートセンシング画像の特徴である広域観察を生かして、広域的に現れた地下の地質学的情報ももたらしてくれる。構造情報は、広域的応力場の解析に欠かせない重要な情報であり、地下構造の推定は地下資源の探査に大きく貢献できる。しかし、地表から断裂系を特定するにあたり、単純にエッジや線構造を抽出するだけでは、本当に断裂系なのか、断裂系以外かが自明ではない。線状の特徴から地質学的意味を明らかにするには、写真地質学的判定を必要とする。線状特徴の内容の判断基準の一つとして、画素群の領域的性質、例えばテクスチャを比較することが有効である。

テクスチャはまた、岩相情報を与えてくれるので、侵食の度合や線状特徴の分布等により、分光情報による岩相分類とは異なる手段を与える。地球表面で岩石そのものが直接観察できることは必ずしも多くない。地表は植生や細粒の砂・土壌に被われ、又は、風化表面で岩石内部の物理化学的性質が隠れることが多い。テクスチャはリモートセンシング画像から岩相を推定するための主要な方法である。しかし、どのようなテクスチャ量がどのような岩相に対応するかという、詳しく多面的な地質学的解析が少ない。リモートセンシング画像の一シーン内におけるテクスチャの示す岩相のパラメータは、そのシーン内だけに限定される例が多い。他のシーンで使われたパラメータがそのままでは使いにくいので、単純に画像処理のみに委ねることができない。更に、一シーン内のテクスチャ特徴は多数あり、変化に富む。従来の目視判読では単純化した限定的な判読しかできず、定量的で全面的なテクスチャ解析には至らないことが多かった。これは、既存のリモートセンシング画像情報すら十分には利用されていないことも意味している。

以上の問題点を解決するためAI的画像解析手法が使われ始めることは、画像処理に知識を組み合せなければ実用的結果が得られないという実際の要請によるものであり、必然的な流れといえるであろう。

3. 資源探査のためのAI的画像解析手法による解析例

Masuda et al.(1990)¹⁾は、DSDA線抽出オペレータ

knowledge of photogeologists	included or not	how to incorporate into expert system
1.knowledge about understanding the outline of surveyed region. .position on map .rocks distributed .geological structure	○	user inputs to the system the information related to the surveyed region, as a label image
2.knowledge about grasping the geographical features .geographical features of fault displacement .classification of drainages generated .relation between drainage pattern & geological properties .relation between rock categories & amounts of protrusion .relation between rocks & their surfaces	×	these are all high grade data, which are considered essential for proper evaluation, however, it is very difficult to establish their direct relationship with the image
3.knowledge about extraction of straight lineal structure .defining the straight lineal structure using the features on image (such as, straight linearity, difference of gradation, elongation, degree of clarity, etc.	○	can be considered to be mostly realized by DSDA, but, since some winding and noise are extracted by DSDA, it is necessary to prepare rules to eliminate them
4.knowledge about elimination of linear features .linear features originating from artificial objects .linear features which do not reflect subterranean structures .linear features which do reflect subterranean structures, but not the destruction of rocks	△	linear features other than those which do reflect the subterranean structures but not the rock destruction can be found out by referring to the information about the surveyed region, and therefore can be directly incorporated as they are. linear features which cannot be incorporated are those which cannot be easily evaluated by image processing
5.knowledge about extraction of lineament .knowledge about distributing positions .relation with geographical features .relation with drainage .relation with geological properties .relation as a geological structure .relation between geological properties & geological structure (as general knowledge)	△	knowledge about the given surveyed region, which can be easily referred to, may be directly incorporated as it is. however, data which are ambiguously defined on the basis of surrounding conditions or data which cannot be easily evaluated from the image cannot be incorporated at the present stage. the knowledge about unification of unit lineament concerns unit lineament; and it shall be incorporated on the premise that the same can be established for the linear objects extracted by DSDA. but the method of judging straight lineal arrays shall be newly studied.

表 1 写真地質学的知識の分類¹⁾

図 1 の線構造分類選択に用いる知識表現を分類表示した。×はシステムでは使われない方法である。

図1 リニアメント抽出の流れ作業図¹⁾

対象領域の画像と画像から線構造をDSDAオペレータによって抽出した線構造の画像を用い、予め対象領域を区分したラベル画像によって線構造を分類選択したリニアメント図を作成する。この時、分類選択に表1の方法を用いる。

を用いて画像上の線的な構造を多量に引き出した後、その分類による取捨選択（表1）にエキスパート・システムの手法（図1）を用いて地質学的なリニアメントを推定、地質専門家による目視判読結果と比較した。取捨選択の元になる線的な構造の抽出の容易さは、DSDA オペレータの線抽出範囲の画素の規模によって決定される。この容易さは、必ずしも目視判読の広域的で大局的な線抽出の容易さに等しいものではないが、画素と画素の関係を検討して線的な構造の位置を検出する点で、微細な目視判読による線抽出（古宇田ほか、1984）²⁾に類似した方法である。古宇田ほか（1984）²⁾では、画像中のあらゆる線的な構造を無差別にリニアパターンと称し、そのうち、水域、雲、噴煙、雪、人工構造物等の明らかに地質学的でない線構造を目視判読で除き、残りの多くを地質的に意味のある構造として、南部九州現地で調査を重ねて実証した。Masuda et al. (1990)¹⁾も、画像から抽出された線構造の含まれる領域の性質から各線を評価し、水域、砂丘、雲、雪、氷河、人工構造物の領域に含まれた線構造を自動的に除去するという方法を用いている。線構造の地質学的確かさに対しては次の操作を行う。軟堆積物

や新しい溶岩流領域の線構造の地質学的リニアメントの確かさを0.5以下に落し、複数のまとまった線構造全体がリニアパターンを示すならば確かさを0.7以上に上げ、線構造の長さが30画素を超える場合は確かさを0.3以上に上げ、30画素以下では逆に0.3以下に落す。この新しい方法で、中国の含油堆積盆地の地質学的リニアメントを126抽出し（図2）、88のリニアメントを抽出した専門家による判読結果（図3）と比較した。両方とも一致するリニアメントは図2に示す自動抽出結果の53%であった。DSDA オペレータのみによる線的な構造との一致率は、20%にすぎない（これは、選択する前では分母が大きくなるから当然である）。このエキスパート・システムの選択方法では、予め対象地域の詳しい地質・地理情報を領域データとして入力しておく必要があり、画像だけから選択抽出したり、画像の一部の知識から画像全体の領域分割を行って選択抽出することはできない。画像のみからでも目視判断のつきやすい水域、雲、氷河、砂漠等は容易にマニュアルで領域分割できるが、軟堆積物地域か、溶岩流が新しいのか古いのかなどはすぐには目視判読できかねる。従って、予め対象領域の詳しい情報が必要とされ

図2 中国四川盆地における、選択抽出によるリニアメント自動判別結果¹⁾

る。又、領域分割そのものは、自動的には行えない。

Kouda・Suwijanto (1991)³⁾は、リモートセンシングが特に必要とされている既存情報の少ない遠隔の熱帯地域に於て、画像から資源探査に必要な構造情報を自動抽出する方法を開発した。対象地域の情報が少ない場合、画像から自動的に判断できるのは、植生に被われた地域か、水域か、雲等の画素単位のスpekトル特

徴で明らかな情報である。又、線構造は、VanderBrug (1976)⁴⁾の16方向非線形線抽出オペレータの対象画素を拡大して64方向以上に拡張したものを用いた。非線形線抽出オペレータの抽出する線構造数は、オリジナルの VanderBrug (1976)⁴⁾の場合極めて多数に上り(図4)、これだけでは、どこまでが地質学的に意味のある画像か自動的には判断できない。しかし、線構造の密集する領域は、比較的鉱脈等の断裂系も多いという仮定をおけば、線密度の高い領域でのリニアパターンを地質学的に意味のある構造と考えることができる。更に、鉱脈が露出し、地形的にも複雑になっていると仮定して、空間分解能の高い SPOT 画像で小領域の輝度変化の標準偏差値を求め、以上と重ね合わせた(図5)。現地調査により、以上の結果が鉱脈の分布に関係する線構造ことを検証した。更に、この情報と、スペクトルから期待される遷移金属酸化物分布と重ね合わせることで、鉱脈の地表露出分布域を推定し、現地調査で含金鉱脈であることを実証した。これらの処理は、全てデジタル処理手法で自動的に行うことが可能であるが、予め個々の処理で何が得られるかわからないため、処理の組合わせを対話型で自在に変える

図3 中国四川盆地における、地質専門家によるリニアメント目視判読結果¹⁾

図4 Vander Brugオペレータ³⁾による線抽出結果
(インドネシア・ロンブレン島)³⁾

図5 線構造，線密度，標準偏差画像の重ね合わせ³⁾
各平均値以上の二値化画像

必要が生じた。Tominaga・Kouda (1990)⁵⁾は、言語Cによる処理プログラムをライブラリに組み込める市販のエキスパート・システム (GURU) と言語Cにより独自開発した画像処理システムを組み合わせ、上述の画像解析による探査手法のエキスパート・システム化を試みている。

画像処理に地球物理学や地質学の知識を重ね合わせて意味のある解析結果を得ようとする方法は、基礎的に研究されていた (Wang, et al. (1983)⁶⁾, Lee, et al. (1987)⁷⁾, Bonham-Carter, et al. (1988)⁸⁾等)。Moon, et al. (1990)⁹⁾は、画像データと地質、地球物理データを重ね合わせて表示するために使われるエキスパート・システムのための推論機構を考察した。画像データの範囲で得られる地質、地球物理データは、不完全で、精度も分散していることが多い。そこで、あいまいさを持つデータに対してベイズ統計による確率手法、Dempster-Shafer法の確信関数による方法、およびFuzzy集合による方法を比較検討した。空間的に不完全な情報集合に対しては、ベイズ統計による方法は困難で、Dempster-Shafer法が処理可能であったが、その結果は、誤差の多いものであった。Shimoda et al. (1990)¹⁰⁾は同様の方法をネバダ州のウォーカーレン地域に適用して熱水変質帯と酸化帯を抽出している。Moon, et al. (1990)⁹⁾のFuzzy集合による方法では、空間的に不完全な情報集合でも適切に扱えるものの誤差と不確実性の拡大を防ぐことはできなかった。この課題に対して、Chung・Moon (1990)¹⁰⁾によるJackknife型擬似変数推定法が事後情報の処理を適正化して解決の糸口を与えるとしている。

4. 今後の展望

知識工学の手法を画像解析や画像理解に応用する試みは多岐にわたるものの、対象の知識が不完全で膨大な資源探査への応用は、その困難さと相俟って、必ずしも進んだものとなっていない。これまでに用いられた手法も、実際問題の解決のためには、写真地質学的な目視判読が大変効果的であった。目視判読のアルゴリズムをどこまで自動化できるかが、今後の重要な課題であろう。この問題の解明には、解析的なアプローチも有効であるが、ニューラルネットにより画像理解への学習効果を高めていく方法も有効であろう。エキスパート・システムは、AI的方法としては初歩的なものとしても、これまでに蓄積された様々な知識処理を組み込むために、現在のところ、GISと組み合わせることで効果的になるであろうと期待されている。このような手法が蓄積され、先進的資源探査手法と肩を並べられるようになれば、リモートセンシングによる鉱物資源探査も“普通の”方法として一般に受け入れられるようになるであろう。

謝 辞

小論は、リモートセンシング技術センター竹内章司主任研究員の御薦めにより執筆した。日立情報システムズ大谷健二部長には小論のため原画を御提供頂いた。資源観測解析センター榊田彰一調査役と原田敏夫調査役、および、三洋テクノマリン植木俊明室長には、小論を御閲読頂き貴重な御示唆を頂いた。以上の方々

参 考 文 献

- 1) Masuda, S., Tokuo, T., Ichinose, T., Otani, K., and Uchi, T.: Expert system for lineament extraction from optical sensor data. *In* Proceedings of ISME-AI '90, Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol. 1, 79, 1990.
- 2) 古字田亮一, 小川克郎, 嶋崎吉彦, 佐藤壮郎, 小野雅敏: ランドサット MSS 画像のディジタル処理による九州南部の地形・地質構造解析, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 4, pp. 321~340, 1990.
- 3) Kouda, R. and Suwijanto: Development of the method of pattern recognition for the search of nonrenewable resources in the tropical region of Indonesia. *In* Technical Report of Joint Research on the Enhancement and Application of the Remote Sensing Technology with ASEAN Countries, Science and Technology Agency, pp. 187~204, 1991.
- 4) VanderBrug, G.J.: Line detection in satellite imagery. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* GE-14, pp. 37~43, 1976.
- 5) Tominaga, Y. and Kouda, R.: An application of expert systems for resource exploration. *In* Proceedings of ISME-AI '90, Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol. 1, pp. 199~201, 1990.
- 6) Wang, S., Elliot, D. B., Campbell, J. B., Erich, R. W., and Haralick, R. W.: Spatial reasoning in remotely sensed data. *IEEE Transact. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-21, pp. 94~101, 1987.
- 7) Lee, T., Richards, J. A., and Swain, P. H.: Probabilistic and evidential approach to multi-source data analysis, *IEEE Transact. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-25 pp. 283~293, 1987.
- 8) Bonham-Carter, F. G., Agterberg, F. P.: Integration of Geological data sets for gold exploration in Nova Scotia, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, 54, pp. 1585~1592, 1988.
- 9) Moon, W. M. and Chung, C. F.: Representation and Integration of Geological, Geophysical, and remote sensing data. *In* Proceedings of ISME-AI '90, Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol. 1, pp. 162~166, 1990.
- 10) Shimoda, H., Fukue, K., Tokunaga, M., and Osada, T.: Extraction of the hydrothermally altered and oxidation zones using the Dempster-Shafer rule. *In* Proceedings of ISME-AI '90, Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol. 1, pp 207~210, 1990.
- 11) Chung, C. F. and Moon, W. M.: Combination rules of spatial geoscience data for mineral exploration. *In* Proceedings of ISME-AI '90, Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol. 1, pp. 131~141, 1990.