

試料中における特定の鉱物の含有量測定—試料が持つ情報の数値化の一例として—

郷津 知太郎¹⁾

キーワード：地質学的試料, 数値化, 定量分析,
鉱物含有量, モード組成, EPMA, XRD

1. はじめに

「この石の岩石名が知りたいんだけど」

筆者が蒜山地質年代学研究所で分析一般を担当する様になってから11年が経過した。担当している分析は一般に理学的な分析に分類されるもので、対象となる試料は岩石、堆積物、水など、地質学分野のものがほとんどである。これらの試料を分析の対象として見てきて、いつも考えることがある。それは「なんとか結果をより定量化できないか」ということである。特に工学的な業務の一環として行われる分析では、定量性の必要性を強く感じるし、発注元からの要請、期待もある。しかし、自分が担当している分析については、結果の定量化は現実的には難しいことが多い。何より地質学的な試料は、様々な情報を記録していて、しかもそれらが多かれ少なかれ混在していて分別が困難なためである。

例えば業務では冒頭に挙げた様な問い合わせを受けることがしばしばある。これは単純な問いに見えて、その実、難しい問いである。試料が変質した火山礫凝灰岩質の岩石であった場合には、対策会議を招集したくなるくらいである。この場合の分析手順は薄片を作製して、後に偏光顕微鏡観察を行うことが常道である。しかし火山礫凝灰岩質の岩石は、巨視的には火成岩の側面と堆積岩の側面とがあり、どちらも言いがたい場合もしばしばである。より詳細に見ていけば、含まれる岩片は火成岩（火山岩と基盤の深成岩）だけでなく、堆積岩、変成岩が含まれることがあり、それらの別、およびその細別、火山岩については本質、類質、異質の区分が必要であり、鉱物片もおおよそ同様である。さらに火山礫凝灰岩質の岩石には変質岩としての側面もある。依頼の理由が「フィールドネームがつけにくい、なぜなら試料が変質しているから」ということも多く、試料のほとんどが変質鉱物に置換されている状態のものも珍しくない。遠目には真っ赤な斑状変晶と、片理を持った緑色の基質からなるクリスマスカラーのエクロジャイトの様な試料が、実際には変質した火山礫凝灰岩であっ

たという例にも、少なくとも2度はお目にかかっている。

業務として実施する上では、どの様な情報が必要かは把握できていることが多いので、それに従って観察結果をまとめていくことになるが、岩石鑑定はどうしても観察者の主観に依存した定性的な報告にならざるを得ないのが現状である。あるいは観察者の判断に依拠せず常に一定の報告書を書くとするれば、無理を承知で厳密な鑑定基準を決め、常にこれに従えば良いのかも知れない。間違いなく複雑怪奇な基準になるが、少なくとも観察者は知識と経験をもとにした、ある基準で鏡下の観察をして岩石名を導いているので、不可能とは言えない。各構成要素の含有量と相関性、色、円磨度、粒径、定向性などを数値化して、閾値で判定すれば、機械的に岩石名を決めることもできるはずである。

岩石名を決めるために、この鑑定基準を作成する気合いを残念ながら筆者は持ち合わせていないが、試料を構成する各要素について、それらが持つ情報を個々に数値化することは実際には普通に行われており（例えば画像解析的な分析等）、弊社も業務として請けることがある。数値化された情報は結果がシンプルであり、従って使いやすさがある。何より地質学的試料の分析結果の定量化を目指したい筆者にとっては、やりがいを強く感じる業務とも言える。

以下にそうした分析の一例として、試料中における特定の鉱物の含有量測定について、弊社での実施例を紹介する。これは地質学的試料について定量的分析を行う試みの紹介でもある。なお、実施例においてしばしば対象を限定し、また手法を替えるなどを行っている理由については、先に述べることにする。

2. 数値化の難しさ

試料中における各構成要素の情報を数値化する上で最も重要なことは、情報をいかに抽出するかということである。そしてこの重要な点こそが情報の数値化において最大の障壁とも言える。なぜなら知りたい情報は、試料中に常に理想的な形で存在するとは限らないからである。

例えば手もとに火山礫凝灰岩があって、構成粒子の分類をする場合を考える。まずどこからどこまでが1つの構成粒子かを決定する必要がある。再結晶した試料で亜粒界が発達した鉱物の場合、そもそもどこまでを1つの粒子とするか決めることすら難しいが、火山礫凝灰岩では、ひとまず周囲の組織と不連続で、比較的一様な内部構造を持ち、円礫状～角礫状の形状を持つ部分を指定すれば良いことにする。では、そうした構成粒子が例えば岩片か鉱物片かを決めるにはどうしたら良いか。直感的には1種類の鉱物からなり、粒界を持たない粒子を鉱物片とし、複数の鉱物種あるいは単一鉱物であっても複数個からなる場合に岩片とすれば良い様に思われる。しかし岩石が破碎を受け、たまたま粗粒な鉱物が1つできたときに、これを鉱物片とするか、岩片とするかは現実には悩ましい問題である。例えば

1種1個の鉱物からなると思われる粒子の周囲に、わずかに他の鉱物が付着している様に見える場合など、実際には判断に困る状況が少なからず発生する。

情報の抽出は何らかの基準を与えて解決したとする。今度情報はデータのデータ化をどの様に行うかという問題に直面する。研究目的であれば、例えば鉛筆やコンピューターの描画ソフトでひたすら粒界や長軸方向を書き入れていき、画像解析をすることも可能であるかも知れない。しかし例えば業務などで数をこなす必要がある場合には主に時間的な制約（多くは金銭的な制約ともなりうる）により、そうした手段をとれないことが多い。形状を自動で認識するコンピューターソフトも存在するが、岩石学的な意図を汲んでくれるものは寡聞にして聞いたことがなく、汎用的なものが適用できる範囲は限定的であると思われる。

以上の通り試料中における各要素の情報の数値化は一筋縄ではいかない。そこで、正攻法とは異なるアプローチを併せることでその困難性を回避することが考えられる。以下の、試料中の特定の鉱物についてその含有量を測定する例では、代替的な手法の例も挙げる。

3. 試料中の特定の鉱物の含有量を求める

試料中の鉱物の含有量測定はそもそも記載岩石学の基本であり、モード組成分析として行われてきた。これは薄片全体あるいは一部について、一定の間隔で鉱物（目的に応じて岩片、微化石などの場合もある）を同定していき、メッシュ状に同定箇所を網羅するものである。点数はおおよそ1,000~2,000点程度とされることが多い。筆者も鉱物の含有量を求める際には、モード組成分析が基本であると考えている。鏡下で鉱物等を同定していくので、不明な鉱物が多産しない限りは、統計的には各鉱物の含有量を一義的に決定できる手法であるためである。

しかし全ての手法がそうであるように、モード組成分析も万全ではない。例えば1) 泥岩等で微細な鉱物種を一つ一つ同定することは一般に困難である。2) 大型薄片を用いる場合には、通常メカニカルステージを用いることができず、操作性が悪い（薄片が大型のため、薄片の重心とステージの回転軸が大きくずれている時には、ステージを回すと遠心力で薄片が動くという問題も地味に大きい）。3) 含有量が少ない鉱物の含有量を、ある程度精度良く知りたい場合には測点数を多く取らざるを得ず、非常に時間がかかる。4) 測定者が鏡下で鉱物を誤認する危険性が常にある、などの問題がある。

また業務としては、火山灰分析を除いて、一般的なモード組成分析が求められることはそれほど多くなく、むしろ特定の鉱物の含有量を求められる方が多い。それもモード組成分析を用いることが困難な事案がしばしばあり、その場合は一般的なモード組成分析以外の手法での対応が必要とされてきた。それらの方法について、以下に紹介する。

3.1. 含有量の測定を求められやすい鉱物は何か

業務として試料中における特定の鉱物の含有量が求めら

れる場合、その特定の鉱物はなんらかのデメリットになっていることが多い様である（資源分野を除く）。以下に代表的な3つの鉱物を挙げる。

3.1.1. スメクタイト

スメクタイトは結晶の層間に水分子が入ることで膨潤する特性を持つ粘土鉱物である。土木工事の中でのこの特性は困りもので、地山が盤膨れを起こし、崩落の原因となる。スメクタイトの含有量が多いほど変形の程度も大きくなるため、変質岩中に含まれるスメクタイトの量と変位の量との相関性を調べる目的等で、試料中に含まれるスメクタイトの量が検討される。粒径が小さい場合には鏡下での同定は困難である。

3.1.2. 黄鉄鉱

黄鉄鉱は熱水変質時に晶出するとともに、還元的な環境下では堆積岩中에서도形成される硫化物である。地表付近で酸化されると硫酸酸性の水を生じ、地下水が重金属を含む原因となる。試料中に含まれる量が少量である場合に、モード組成分析ではうまく含有量を定められない場合がある。

3.1.3. 石英

さまざまな岩石に含まれる代表的な造岩鉱物の一つであるが、特徴の一つに摩滅に対する耐久度が比較的高いというものがある。例えば岩石粉末作成時に用いる乳鉢や、薄片作製時に岩石とすりあわせる板としてメノウ（石英の微晶結晶の集合体）が用いられる。この特徴のため、岩盤中の石英の含有量が高いほど、ボーリングやトンネルの掘削に用いられるビットの摩耗量が大きくなることが知られている。主要造岩鉱物であるが、細粒粒子として含まれる場合、色や屈折率が同等の斜長石や沸石などと判別が困難となることがあり、正確な含有量を定めることが難しくなる。

3.2. 特定の鉱物の含有量を決定する具体的な手順

弊社で実施している、試料中の特定の鉱物について、その含有量を決定する具体的な手順は以下の通りである。

3.2.1. モード組成分析の応用 (1): 標準チャートとの対比

岩石鑑定などにおいて、含有量の正確性をそれほど必要とせず、かつ大量、迅速に決定する必要がある場合には、標準チャートとの対比で含有量を決定する。標準チャートとは、一定の白色の領域の中で黒色の部分が規定の面積比を占める様に散在して分布する図のことである。含有量毎に複数のチャートが準備され、この図と見比べることで特定の鉱物の含有量をおおよそ知ることができる。良い点としては、簡易で迅速なことであり、別途粒界を抽出した図を作らなくても、鏡下での状況とチャートとの比較で結果を求めることができる。慣れれば肉眼観察時等にも応用が利く。また、含有鉱物の粒径がある程度揃っていれば、粒径の大小にはあまり依存しない。適宜観察する倍率を変えることで視野中の「みかけ」をチャートに対応させること

ができるため、汎用性がある。弱点は、手法の特性上定量性が良くないことである。また、特定の鉱物の粒径に極端なバラツキがあったり、分布に偏りがある場合にはチャートとの対比が難しく、使いにくいことがある。また、特定の鉱物が周囲の部分と区別しにくい場合にはやはり使いづらい。

3.2.2. モード組成分析の応用(2)：反射顕微鏡写真による画像解析

薄片中の黄鉄鉱の含有量を求めるには、一般には薄片の表面に鏡面研磨を施し、反射顕微鏡を用いてモード組成分析を行う。偏光顕微鏡と反射顕微鏡とを用いて黄鉄鉱の含有量を求めるため、かなりの時間を要する。

ただし、試料中の黄鉄鉱の含有量のみが必要となる場合はこの限りではない。すなわち、反射顕微鏡の写真撮影し、写真画像中の黄鉄鉱の面積を算出することで、短時間に黄鉄鉱の含有量を知ることができる。これは、主に珪酸塩からなる鉱物の低い反射能と、黄鉄鉱の高い反射能との比較的明瞭な差異を利用するもので、顕微鏡写真を撮影できる範囲(例えば3mm*4mm)における解析を行うことができる。写真の解像度にも依存するが、モード組成分析と比較して、含有量の低い黄鉄鉱の含有量を迅速に精度良く決めることが可能である。

この手法の問題点としては、黄鉄鉱以外で反射能の高い鉱物が含まれる場合、黄鉄鉱のみの面積を求めることが難しいことが挙げられる。反射顕微鏡写真において色調で鉱物を区別することは不可能ではないが、例えば白鉄鉱の様に、黄鉄鉱と共存しやすく、比較的反射能が高く、かつ色調のみで言えば黄鉄鉱に比較的似た鉱物が存在する場合、画像中における黄鉄鉱部分のみの面積比を求めることは難しい。また、反射顕微鏡写真を撮影することが前提であるので、センチメートルオーダーの広い範囲の検討を行う際には、複数の反射顕微鏡写真について解析を行い、値を平均するなどの工夫が必要である。

3.2.3. モード組成分析の応用(3)：EPMAの面分析を用いた画像解析

対象となる鉱物を特徴付ける元素がある場合、EPMAの面分析による面積比の検討が有効である。面分析の結果は選択した元素の濃度分布として得られるため、鉱物を特徴付ける元素の分布(各測点について複数の元素を加減乗除した分布も含む)の面積を求めることで、当該鉱物の含有量を算出することができる。機器を用いた分析であることから、測定条件に問題がなければ鉱物の同定について信頼性は高い。原理的にはモード組成分析と同様であるが、モード組成分析では測点数が2,000点程度であるのに対して、EPMA分析では5万点~50万点の結果を用いることが多いため、特に含有量が少ない鉱物の数え落としが少ないという利点がある。また、黄鉄鉱の分析においては、例えば土壤汚染対策法で問題となる重金属の分布を同時に調べることもできる。弱点はEPMAという高価な機器を使用する必要があることや、測定を希望する鉱物に組成上の特徴がない場合には無効であることが挙げられる。例えば

方解石は起源が異なっても化学組成的には大きな違いがない場合があり、その場合起源毎の方解石の含有量を知るとは難しい。

3.3. XRDを用いた鉱物の含有量測定

XRD(X線回折)分析は、鉱物が持つ結晶構造の特徴を反映した回折スペクトルを得るものである。全岩の粉末を作製し分析した場合、回折スペクトルは試料中に含まれる各鉱物のスペクトルを足し合わせたものになる。各鉱物のピーク強度は試料中の含有量が増えるに従って相対的に強くなるため、標準鉱物の粉末を一定量添加した標準試料を作成して、ピーク強度の変化から検量線を作成し、未知試料から得られるピーク強度と対比することで、未知試料中の特定の鉱物の含有量を調べることができる。

上記のモード組成分析、またはそれを応用した手法は、対象となる鉱物の量を面積比として数値化するのに対し、XRDを用いた鉱物の含有量の測定では鉱物の分布状況は分析には関係しない。従って、対象となる鉱物について、粒径の大小やバラツキ、分布の偏在等、分布状況の影響を受けることなく測定を行うことが可能である。例えば断層ガウジ中のスメクタイトや泥岩中の石英の含有量を検討する際、鏡下で個々の粒子を認定し、その面積比を求めることは一般に難しいが、XRDを用いることでそうした難しさを回避することができる。この意味で、XRDを用いた手法は先に述べた「代替的手法」の1つと言える。

XRDを用いた鉱物の含有量測定の問題点には、分析の煩雑さ(検量線を引くために、特定鉱物の濃度が既知の標準試料を通常8~10試料分析しなければならないこと、分析試料は常に一定量を秤量して用いなければならないこと、鉱物毎にそれぞれ別の検量線が必要であることなど)や、標準試料の選定の難しさなどがある。特に測定対象鉱物と同じ様なスペクトルを持つ標準鉱物を選定することは難しく、精度を追求することは一般に難しい。また、鉱物によっては他の鉱物とピーク位置が重畳することがあり、計算上重畳した分を差し引くことも不可能ではないが、人為的な操作を行った分、定量性を減じる。

3.4. 全岩化学組成分析による鉱物の含有量測定

鉱物によっては、特徴的な元素を選択的に濃集する場合がある。例えば、ジルコン、ルチル、アパタイトなどは、それぞれジルコニウム、チタン、リンを特徴的に含み、かつこれらの元素はしばしばそれらの鉱物に選択的に濃集する。このような場合には、全岩化学組成を分析することで、特定の鉱物の含有量を検討することができる。

一般的な造岩鉱物は複数の元素を含む固溶体であることがほとんどであり、特定の元素のみを選択的に濃集することが少ないため、全岩化学組成を測定するだけで鉱物の含有量を定めることは実際には難しい。しかし一義的に決まらなくても、例えば黄鉄鉱は硫化物として硫黄を含み、かつ硫化物としては頻出する部類であるので、硫黄の含有量を測定することで、黄鉄鉱の多寡を窺い知ることができる。ただし、試料中に黄鉄鉱が含まれることや、他の硫化物、硫酸塩が卓越しないことは別途鏡下観察やXRD分析

などで確認しておく必要はある。本特集号の後藤が紹介している CNS 分析の様に、短期間で大量の試料について、硫黄の分析が可能な手法を用いることで、多数の試料中における黄鉄鉱の分布状況を概査することが可能である。

この全岩化学組成分析を用いた手法も、構成要素の試料中での分布状況には関係なく、構成要素の含有量を検討できる手法である。

4. おわりに

筆者が担当している分析には岩石鑑定などの定性的なものと、化学分析などの定量的なものがある。その中で岩石中の鉱物の含有量を決定する分析は、一般には定量分析の範疇にみなされると考えられる。しかし元素の含有量や結晶構造、岩石組織などに一定の幅をもつ鉱物については、鉱物そのものを特徴付ける単純なパラメーターは容易に設定できず、従って常に高精度高確度の分析ができると

は限らない。ただし、であるからこそ、この種の分析に当たっては分析担当者の持てる地質学的知識、分析手法を総合的に動員する必要がある、得られる結果は単純であるが、やりがいの大きな作業である。

総合的な動員といえば、いつの間にか弊社の年代学グループ構成員も5人まで増え、分析一般についても分担、あるいは共同作業が可能となってきた。それぞれに異なった得意分野の見地があり、今後は様々な視点からの検討によって、同じ分析項目であっても、より内容の充実した報告書の作成が期待できる。発注者からの要請を満たすことは前提として、さらに一歩進んだ分析を目指すべく、仲間とともに努力をしていく所存であるので、関係各位にはますますのご指導、ご鞭撻を乞い願う次第である。

謝辞

編集委員の八木公史博士および曾根原崇文博士のご助言により本稿は改善されました。ここに記して感謝の意を表します。

2015年7月8日受付, 2015年7月15日受理.

Engineering Geology of Japan, No. 5, 'The special issue of 20th anniversary of Hiruzen Institute for Geology and Chronology', 183-186 (2015)

The analysis of modal abundance for a specific mineral – An example of quantification of the petrographical information –

Chitaro Gouzu¹⁾

¹⁾ Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co., Ltd., 2-5 Nakashima, Naka-ku, Okayama 703-8252, Japan

© 2015 Hiruzen Institute for Geology and Chronology. All rights reserved.