

資 料

549.903.12 : 552.513

重 鉍 物 研 究 の 現 状 と 問 題 点

佐藤 良昭*

1. 序

堆積岩、とくに砂岩中に含まれている重鉍物の種数や組成から堆積物の原岩、後背地における地形の起伏侵食の程度（火成岩体の中では、その温度・圧力条件に応じて、表面から深部へ向かうにつれ、構成鉍物が変わるので、鉍物組成から、どの程度まで侵食が進んだのかわかる場合がある）、堆積条件、続成作用などが推定され、さらにこれが対比にも有効に利用できることが認められている。これまでに、ヨーロッパやアメリカなどでは、非常に多数の論文が発表されている。

重鉍物研究の歴史は古く、BOSSWELL (1933) は、1718年にまでさかのぼって記載している。わが国においてもこの10年間に多数の研究結果が発表された。

重鉍物と簡単にいってしまうが、重鉍物と軽鉍物の境界をどこにおくかについては、あいまいなものがある。PETTJOHN (1957) やその他の人々は重液としてプロモフォルム（比重2.85）を用い、これより比重の大きな鉍物を重鉍物と呼んでいる。しかしプロモフォルムと同様ひろく使われているテトラブromエタンは比重が2.96あり、これを用いた場合の重鉍物は比重2.96以上のものになってしまう。しかし、いずれの重液を使っても砂岩の大部分を占めるいわゆる軽鉍物（石英・長石）は簡単に分離できる。問題なのは、両重液の中間の比重を持つ鉍物の取扱いである。比重2.85~2.96の値を持つ主な鉍物は、黒雲母・白雲母などの雲母類、ドロマイトなどの炭酸塩鉍物、緑泥石類などに限られる。重液分離の時にこれら鉍物は中間に浮遊し、ごく一部がいわゆる重鉍物とともに回収される。したがって、重鉍物を算える時に、これら鉍物の持つ意味（少量であっても、実際の岩石中にはかなり含まれているという点）を念頭におけば、重鉍物とは“比重がほぼ3以上の鉍物”と簡単に定義することができる。

砂岩に含まれる重鉍物の量は非常に少なく、一般に0.1~0.05重量%位が普通である。このようにわずかしが存在しないので、普通の岩石薄片の中では、数粒の重鉍物しかみだせないが（自生鉍物は除く）、岩石試料を粉碎して重液分離を行えば、10gの試料から数百ないし数千粒の重鉍物を取り出すことができるのである。10gの試料というと、岩石薄片の100枚分以上に相当するから、このことは当然であろう。

2. 研究史^{注1)}

BOSSWELL (1933) によると、重鉍物に関するもっとも古い研究は、DE R'EAUMUR (1718) のRhone河およびRhein河の砂の研究である。彼は砂の中にジルコン・ルチル・ざくろ石・鉄鉍物・寶石をみだした。その後1870年頃までに各種の論文が発表されているが、その分析・同定方法は、化学的なもの、磁石によるもの、結晶形によるものであった。1860~1870年にかけては、河砂や海砂の性質を調べた研究が多く、それもすべてが記載的なものであった。この頃から岩石顕微鏡が用いられるようになり、薄片による研究も始まってきた。

1870~1890年代には、記載岩石学が一つの最盛期に入った。1870年以後になると重液が導入

* 燃料部

注1) 1930年までの歴史は、主としてBOSSWELL (1933) によった。

され、それらの液には発見者の名前が冠せられている (Sonstadt 液など)。THÜRACH (1884) はいろいろな地質時代の岩石中に出現する鉱物を記載し、形態の重要性を強調し、堆積物の起源との関係を論じた。THOULET のサハラ砂漠の研究 (1881) は粒度分析、鉱物組成、長石の同定方法を内容とするもので、重鉱物の研究としては傑出したものである。

1890~1900年代に入ると分析方法はさらに洗練され、記載も詳しくなってきた。RETGERS (1895) は、オランダの砂丘砂につき、各種の方法を用いて鉱物分析を行ない、石英の特徴から原岩を推定し、鉱物による堆積環境決定の可能性について述べている。従来、定性的であった重鉱物組成の表現を、量で示す試みも行なわれた (ARTINI, 1898)。

1900~1920年代になると、堆積岩岩石学の研究はふたたび盛上ってきた。本手法は、一般的な研究方法として取入れられ、大学においても、学生に教えるようになってきた。研究対象も拡がり、その地質時代は先カンブリア紀から現世堆積物にまでおよんでいる。ILLING (1916) は鉱物組成から、Trinidad の第三系の対比を行なった。1910年代の後半からは火成岩中の副成分鉱物が注目されだし、BRAMELL (1928) は Dartmoor 花崗岩を多量に粉碎して、その中の重鉱物を取り出した。

1920年を過ぎると本研究はさらに発展し、応用地質学の分野でも標準的な研究手段として利用されるようになってきた。各鉱物の産出頻度もかぞえられ、サンプリング方法、鉱物分離方法、粒度分析の面にも注意が向けられるようになった。RUBBY (1933) は鉱物の selective sorting に注目した最初の人である。この頃、市村毅 (1933, 1938) は台湾の重鉱物について多数の研究成果を発表し、その起源を追求するなど、我が国における重鉱物研究の先鞭をつけた。

1940年初期までにいろいろの研究は続けられてきたが、はじめの頃のような熱狂的取組み方はもはやみられず、またその効果に対しても疑問がもたれはじめた。また、堆積物中の鉱物組成と母岩のそれとを比較し、鉱物の安定性や続成作用による変化を問題とするようになってきた。そして1940年以降の研究では、いろいろな条件を考慮した上での、原岩・運搬・堆積作用の研究 (KRYNINE, 1946; RITTENHOUSE, 1943; VAN ANDEL, 1950, 1960) や、試料の統計的処理に関するもの (ALLEN, 1944; GRIFFITHS, 1960)、特定鉱物の同定法 (RAMAN, 1965) など、より突込んだ研究がみられるようになる。

我が国においては、戦前における市村 (前出) の研究以後、戦後にふたたび市村が、ジルコン・モナズ石鉱床 (1949)、秩父古生層の重鉱物の研究 (1953) を発表するまでには、大きな間隙がある。1950年代の初期、河井は重鉱物組成による凝灰岩層の対比 (1951, 1953)、重鉱物百分率の信頼度について (1952) 述べるなど、我が国に多い凝灰岩を対象に取上げている。その後、佐藤 (1954, 1955)、飯島 (1957)、藤井 (1956) らの中生層や第三紀層砂岩中の重鉱物組成の研究がはじまり、九州の炭田地帯については小原 (1958)、加藤 (1957) らが、山形県地方のグリーンタフについて市村・青木 (1957)、裏日本油田第三系について田口 (1954, 1957) の研究が開始されるようになり、その後それらの結果の集大成が発表されている。さらに第四紀、現世堆積物の研究が盛んになるにつれ、凝灰岩やローム層中の重鉱物もしばしば取上げられ、関東ローム研究グループ (1965) は、その成果をまとめて発表している。

3. 重鉱物の分離法

重鉱物分離の標準的な方法については、KRUMBEIN & PETTJOHN (1938) や MILNER (1952) などの教科書にのっており、筆者 (佐藤, 1966) はそれを初心者向きに解説している。本方法は小さな改良がしばしばなされているが、大綱は変化していない。分離方法につき、順を追って検討してみる。

3.1 試料の粉碎

試料が柔らかい時には鉄乳鉢で簡単につぶすことができるが、固い岩石の時には、クラッシャーを使った方が能率的である。クラッシャーの中でもジョウクラッシャーかスタンプミルの

ように、岩石を叩いたり押しつぶす型のもので試料を処理すると、中に含まれている重鉱物のこわれることも少なく、ほとんど原形のままで回収することができる。ディスク型のものでは、ディスクの間隔を適当に調節するのがむずかしく、回転速度も早いために鉱物がすりつぶされるような力を受け、原形をこわされてしまうことがある。

粉碎した後、篩を使って試料の粒度を揃える。筆者はこの段階で65メッシュ (0.25 mm) 前後のものを使っている。重鉱物は一般的にいて 0.15 mm 以下の大きさの物が多いから、重鉱物を能率よく濃集させるには 120 メッシュ程度の篩を使う方が望ましい。しかし使用する篩の目が細かいと、試料が篩の目につまってしまう掃除がむずかしくなる。しかもその篩を繰返し使用すると、試料の汚染も心配されてくる。65メッシュ前後の篩では、目につまった試料をほとんど完全に除くことができるので、この心配がない。このことが、筆者が65メッシュの篩を使っている理由である。

3.2 重液分離

堆積岩中の重鉱物を分離するために使用されているもっとも普通の重液は、プロモフォルム (CHBr_3 , 比重2.85) とテトラブromエタン (CH_2Br_2 , CHBr_2 , 比重2.96) である。どちらもアルコールやアセトンに溶けるし、重液の回収も比較的簡単である。筆者は比重のやや高いテトラブromエタンの方が、軽鉱物を完全に分離しやすいという理由で、これを使っている。揮発性もプロモフォルムほどは高くないようである。試料中に黒雲母、白雲母、緑泥石などが含まれていると、重液分離を行なった時、ごく一部が重鉱物のグループに入るが、大部分は重液の中間に浮遊するか、軽鉱物の方に残される。

筆者は以前、Thoulet's solution (赤色第2水銀とヨードカリとの水溶液) を使用していた。これは水の増減によって比重を変えることができ、洗じよう、回収も簡単であるが毒性が強く、その使用は望ましくない。

重鉱物を比重の差によってさらに細かく分類するためには、Clerici's solution ($\{\text{TlCO}_2\text{H}$ および $\text{CH}_2(\text{COOTl})_2$, 最高比重4.25) を使うとよい。しかしこの重液は非常に高価である (100 g 3万円位)。MODARRESI (1968) はわずかの重液を使い、少量の重鉱物試料を、さらに比重の差によって分類するための装置を考案している。

試料の粒度がシルトの時には、遠心分離機を使わないと、重鉱物の完全な分離は行なわれない。この時問題となるのは、1) 普通のガラス管では、重液が入るために強度がもたない、2) 分離されて下に沈んだ重鉱物を取り出す時、軽鉱物とふたたび混じってしまうおそれがある、の2点である。1) は硬質ガラス管を使うことにより防ぐことができる。2) の難点を防ぐには、遠心分離管の下部をドライアイスや液体窒素につけて重液と重鉱物を凍らせ、軽鉱物を流しきった後に、重鉱物を溶かし出す方法、あるいは分離管の底の形を変えて、傾けても軽鉱物と重鉱物の混合が起らないように工夫をこらしたのものもある (FESSENDEN, 1959; SCULL, 1960)。

分離した重鉱物を受けるために、普通ろ紙が使われている。しかし、ろ紙中の重鉱物を取り出す場合、ろ紙のせん維が混じってきたり、わずかしかない重鉱物の一部が、ろ紙のせん維の中に入り込んでしまって、中々取出し難いことをしばしば経験する。したがって筆者はこの段階では、磁製の蒸発皿を使用している。蒸発皿 (径6 cm 位) であると重液も洗い落としやすいし、鉱物の秤量も簡単であるし、その後で筆によって全量を容易に回収することができ、非常に有効である。しかし多量に存在する軽鉱物に対しては、このように神経を使う必要はなく、ろ紙を使用しても差支えない。

3.3 その他の分離法

磁鉄鉱を重鉱物から分離するためには、磁石が有効である。とくに最近市場でみられる角型あるいは丸型の磁石 (ない時は馬蹄型) を、薄紙あるいはビニールでおおってから磁鉄鉱をこれに吸いつけ、他の容器に移してから磁石を除けば、磁鉄鉱は磁石に付着することなく回収さ

れる。

磁氣的性質の差によって重鉱物をさらに細かく分けるには、アイソダイナミックセパレーターの使用が考えられる。しかしこの装置は、特定の鉱物を多量に集めたり、重鉱物が多量にあつてそれをさらに特別の目的を持って細分することが必要な場合以外には、一般的堆積岩の研究には、それほど必要なものでない。

4. 重鉱物の同定

重鉱物を同定するためには、双眼顕微鏡よりも偏光顕微鏡の方が有効である。分離して得られた重鉱物は粒のままスライドグラスに封じこみ、顕微鏡下で観察する。

このために普通はカナダバルサムや合成樹脂(佐藤, 1968)が用いられる。これら medium の難点は屈折率が低いことである (1.54位)。すなわち重鉱物は比重が大であると共に屈折率も高いのが普通であり、したがって低い屈折率を持つ medium 中では、鉱物の relief から重鉱物相互間の屈折率の大小を比較することは、その差が大きい場合を除いてはむずかしい。屈折率の高い medium としては Piperine ($n = 1.68$) (KRUMBEIN & PETTJOHN, 1938) や Hyrax ($n = 1.80$) (TICKEL, 1965) などがあるが、筆者はまだ試みたことがない。このような高屈折率を持つ medium が簡単に使用できるならば、重鉱物の同定には、非常に有効であろう。鉱物同定のため一時的に使用するだけでよいならば、屈折率測定浸液の高い値を持つものが利用できる。しかしこの場合は、試料をそのまま永久保存することはできない。

重鉱物を粒のまま偏光顕微鏡下で観察することは、薄片の場合と大分様子が違うので、最初はとまどうかもしれない。薄片では結晶がいろいろの方向で切られており、薄く平板であるが、粒の場合は特徴的な結晶形態が観察されたり、同種鉱物はスライドグラス上でもっとも安定な方向を向いて配列されたりして、同定はむしろ容易である。また厚さが大となるため色や多色性は一層顕著となり、はっきりした干渉像が得られることもしばしばある。ただし干渉色が高次のものを示すため、検板による X, Z の決定はむずかしいことが多い。

堆積岩中にみられる鉱物の種類は、軽鉱物も含めて 160種 (BOSSWELL, 1933) と 300種以上 (GRIFFITHS) ともいわれるが、我が国でごく普通に存在する重鉱物は約20種といえよう。産出のまれなものも含めて研究文献中にあるものを列記すると (炭酸塩鉱物を除く)、次のようになる (佐藤, 1961, 1962, 1964; 飯島, 1959; 小原, 1962等)。

Actinolite	Allanite	Anatase
Andalusite	Apatite	Augite
Barite	Biotite	Brookite
Cassiterite	Chlorite	Chromite
Clinozoisite	Corundum	
Diallage	Diopside	
Epidote		
Garnet	Glaucophane	
Hematite	Hornblende (common, oxy)	
Hypersthene		
Ilmenite		
Kyanite		
Magnetite	Monazite	Muscovite
Olivine		
Piedmontite	Pyrite	
Rutile		

Sillimanite	Spinel	Staurolite
Titanite	Topaz	Tourmaline
Zircon	Zoisite	

(ゴシックとしたものはもっとも普通にみられる鉱物)

以上の鉱物はそれぞれ特徴的な結晶形態や光学的性質を持っているので、熟練すれば容易に顕微鏡下で識別することができる。しかし、初めて重鉱物の同定を行なおうとする場合には、上記鉱物の標本をごく一部わけて貰い、標準スライドを作って、試料と比較検討してみるのが望ましい。

鉱物を同定しようとする際に直面するむずかしさの一つとして、無色透明鉱物の不規則な結晶の存在があげられる。特徴的な光学性が観察されれば問題ないが、そうでない場合には、なかなか、決め手をつかみにくい。このような不明鉱物が多数ある時には、双眼顕微鏡下でかなりの量を集めた後、X線回折装置にかけて、そのパターンから決定できる。しかし、不明鉱物が数10粒程度しかない時には、この方法は使えない。このような時、あるいはある鉱物の同定をもっと確実にやりたい時には、Spindle Stage 法 (WILCOX, 1959) という有効な方法がある。Spindle Stage の原理はユニバーサルステージを非常に簡単にしたものである。まず試料中の目的とする鉱物を双眼顕微鏡下に見出し、長さ 5 cm 程度のピアノ線の先に水溶性のかわをわずかにつけ、ここに必要とする鉱物を 1 粒付着させる。この針金 (Spindle) を簡単な載物台 (stage) にのせ、鉱物のついた針金の先端を屈折率測定浸液に浸し、顕微鏡で干渉像を観察する。Spindle の回転と顕微鏡ステージの回転による干渉像の変化から、ステレオネットを使って、鉱物の X・Y・Z 軸の方向を求める。これがわかれば、浸液を次々に交換して各方向における屈折率を測定し、結局 α , β , γ の値を知ることができる (1 軸性結晶では ϵ , ω)。すなわち 1 粒の鉱物についてその屈折率を全部知ることが可能であり、光軸角も計算され、正確にその鉱物の種類を決めることができるのである。

現在はまだほとんど行なわれていないが、同種とした鉱物でも屈折率の差に基づいて分類したり、不透明鉱物については研磨片を作って反射顕微鏡によって同定を行なうなどして、各試料の組成上の特徴を一層詳しく知る道が残されているが、非常に時間と労力を要する仕事である。

5. 重鉱物同定結果の統計的処理

顕微鏡下で重鉱物の個数を種類別にかぞえあげ、その組成百分率を求めるのが次の段階である。この時、総計何コ位をかぞえたらその組成百分率は信頼できる値となるであろうか。

これにはいろいろな要素がからみあっていて、たとえば野外におけるサンプリング誤差と、実験室において処理中に生じる誤差 (試料の細分・篩分け・分離などすべての段階) は、それぞれ 10% という値が示されている (KRUMBEIN & RASMUSSEN, 1941)。この点についての議論は将来に残し、今はスライドグラス中に封じ込まれている試料についてのみ、問題を限るならば、スライド中の鉱物粒を無作為にある一定数だけかぞえあげて全体の鉱物組成分布を推定した時、そのサンプリング誤差は統計的に求めることができる。

すなわち、スライドグラスに封じ込まれている重鉱物の数 (N) が十分に大きく、しかも各鉱物種はその中で均質に分布している時、その中から n コを無作為にかぞえて、その結果より各鉱物種の百分率 (p) を推定した場合、

$$N - n \cong N - 1 \quad \text{で}$$

$np \geq 500$ の条件が満たされるならばその誤差がどの程度のものであるかを、統計表によって知ることができる (西平, 1957)。

例えば鉱物粒 250 コをかぞえて、その中でジルコンの割合が 75% という値が得られたならば、そのサンプリング誤差は 5.5% (信頼度 95%) である。いいかえれば、スライド中で全ジルコンが占める割合は、69.5~80.5% の間にあるといっても、9 分 5 厘 (9 分 9 厘ではない)

まで間違いない。またざくろ石50%であれば、その誤差は6.3%、電気石12%ならば、誤差は4.1%である。もし鉱物粒を150コだけかぞえたとすると、誤差はそれぞれ7.1%、8.2%、5.3%となる。

河井(1952)は重鉱物百分率の信頼度について小標本論の立場から検討し、従来いわれていた鉱物粒を100~300コかぞえあげて百分組成を求める方法に対して、その正当性の理論的裏づけをあたえた。

また、A・B2試料がある時、それらの重鉱物百分率の間に有意の差があるかどうか(2組のサンプルの間のパーセントの差の検定)を調べることも、いろいろの条件はあるが統計学的に可能である。しかしこの計算を行なうには、フィールドで選んだ岩石試料が統計学的に意味のあるものでなければならない。意味のある試料を得るためには、地層中における鉱物分布に関する知識、あるいは地層のでき方についての明らかな知識がないとサンプリング計画がたてられない。いいかえれば、データを統計学的に処理するためには、非常に多くの事実が地質学的に解決されていなければならない。しかし我々は、地層中における鉱物の分布、挙動に関して、ほとんど何も知らないといつて良い状態にある。したがって、個々の試料については数学的に処理することも可能であるが、その結果から地層(母集団)を云々することは非常に危険であり、さらにデータの集積が望まれる理由がある。

6. 重鉱物組成の側方変化について

いろいろの大きさや形、比重を持っている重鉱物は、それが運搬されて行く途中において撰択的な淘汰を受け、初めの組成がだんだんと複雑なものに変わって行くであろうことは常識的に考えられるし、砂鉄鉱床の生成もこの作用の結果の一つである。

この観点から、現世の海底堆積物や河川堆積物について、野外のデータあるいは室内実験により論じた研究はかなりある(BRIGGSら, 1962; CHERRY, 1966; FLORES, 1967; McCULLOUGHら, 1960; PETTIJOHNら, 1933; POMERANCEBLUM, 1966; RUBBY, 1933; VAN ANDEL, 1950, 1960)。

PETTIJOHNらは海岸線において鉱物組成と沿岸流との関係を調べた結果、堆積物の運搬方向に向かっては、輝石の量は変化しない、角閃石は漸増し、ざくろ石は30%台から10%台へと減少するという傾向をみいだした。彼等は、重鉱物の量の変化に影響を及ぼすのは、粒径よりも形や比重の方が大きな役割を果たしていると述べている。一方RUSSELL(1939)はミシシッピー河での例から、粒径の減少が重鉱物量の増加をまねくといひ、FLORES(前出)も、石英・長石(軽鉱物である)や雲母の量の変化は粒径のみに関係しているという結論を出している。VAN ANDEL(前出)もいろいろなタイプの現世堆積物の重鉱物組成を調べている。彼の結論(1959)では、撰択的淘汰や層内水の影響によって失われる鉱物量の変化はごくわずかなものである。したがって、軽鉱物・重鉱物の研究は、とくに堆積物の起源、堆積物供給源地の地形的・気象的・岩石学的特徴、堆積盆地における鉱物の分布パターンに関して、いろいろの資料が得られるというものである。

我が国では重鉱物の撰択的淘汰についての定量的な研究は、あまり行なわれていない。佐世保層群の砂岩中のざくろ石量について述べたものでは、その変化が淘汰によるものか、堆積物の起源の差によるものか議論がわかれている(小原, 1962; 飯島, 1965)。崎戸—松島炭田の西彼杵層群最下部砂岩中の、電気石やざくろ石量の地域的变化についても同様である(小原, 1961; 佐藤, 1969)。また小原(1959)は、砂岩単層中の重鉱物が、走向方向約700mにわたって、ほぼ一定の性質を持っていることを認めた。

以上みられるように、鉱物組成の側方変化に関する資料はしばしばあるが、その変化を完全に説明することのできる説というものがない。この分野には未解決の問題が多数残されている。この問題をとくには、水槽による実験も一つの手段であるが、あまりに多くの要素が複雑にからみあっていて、容易ではないと思われる。しかし、問題を非常に単純化して、簡単な形

の1鉱物の動きを示すことができる法則をみつけ出すかあるいは仮定すれば、コンピューターによるシミュレーションを繰返すことによって、実際の動きに近い各種条件をみつけることが可能となるかもしれない。

7. 重鉱物の起源について

堆積岩中の重鉱物は、堆積岩の原岩(起源)をもっとも良く示すものとして、古くからその組成の研究が続けられてきた。最近では VAN ANDEL (1960) がメキシコ湾北部の現世堆積物と陸域の河川流域地質との関係から、くわしい鉱物分布図を作成し、5つの province を認めている。

重鉱物に関する参考書には、鉱物組合せと原岩の関係を示す表が、たいていのっている (TICKELL, 1965; PETTIJOHN, 1957; KRUMBEIN & SLOSS, 1963; KRUMBEIN & PETTIJOHN, 1938; MILNER, 1952)。分類に使われている岩石のタイプは、酸性火成岩・塩基性火成岩・ペグマタイト・変成岩(高変成度, 低変成度)・堆積岩(reworked sediments)となっている。TICKELL (前出)の表がもっともくわしいが繁雑すぎるので、以下に PETTIJOHN (前出)の表をあげ、次いで、我が国でみられる重鉱物(第4章)と外国のそれとの組成上の差をみることにする。

() をつけた鉱物は、二義的なものである。

堆積岩

Barite. (Leucoxene) Rutile Tourmaline (丸いもの) Zircon (丸いもの)

変成岩—低変成度

(Biotite および Muscovite) (Leucoxene) Tourmaline (小さな淡褐色自形, 炭質包有物)

変成岩—高変成度

Andalusite Epidote Garnet Hornblende (青緑色の種類) Kyanite (Magnetite) (Muscovite および Biotite) Sillimanite Staurolite Zoisite

酸性火成岩

Apatite (Biotite) Hornblende Magnetite Monazite Muscovite Sphene Tourmaline (小さく桃色自形) Zircon

塩基性火成岩

Anatase Augite Brookite Chromite Hypersthene Ilmenite(および Magnetite) (Leucoxene)

Olivine Rutile

ペグマタイト

Fluorite Garnet Monazite (Muscovite) Topaz Tourmaline (典型的な青)

この表にあがっている鉱物の大部分は、わが国でもみることができる。しかし産出頻度をみると、外国とはいちじるしい差のあるものがある。その第1は、kyanite, sillimanite, staurolite, andalusite などの変成岩に特徴的に産する鉱物で、アメリカやヨーロッパでは、しばしば堆積岩中の主要構成重鉱物となっている。筆者(SATO & DENSON, 1967)もコロラド州からワイオミング州にかけて分布する含ウラン第三系の砂岩中に普通に存在するのをみいだした。そしてこれら鉱物の起源を、ロッキー山脈を構成している先カンブリア紀の変成岩に求めた。一方我が国では、重鉱物中にこれらの鉱物を見ることは非常にまれである(沖縄の新第三系では、量は少ないが, staurolite, kyanite が普遍的に存在する例がある)。このことは、重鉱物研究の例が少なく、資料が不足していることもあるが、また地質時代において、このような高変成度の変成岩の分布や露出が限られていて、堆積物の主たる供給源となり得なかったことも考えられる。飛驒変成岩や阿武隈山地周辺で、これら変成岩をおおう、あるいはそれより若い堆積岩中の重鉱物が、どのような組成を示すか興味もたれる。

我が国の重鉱物組成(主として古第三系)の特徴は、zircon, garnet, tourmaline, epidote が

大半を占め、しかも地域的にもあまり差がなく、北海道から九州にまでわたってみられることである。この組成は主として酸性火成岩起源を示すものであり、堆積物の供給源として花崗岩類が、当時広く分布していたことが考えられる。

各鉱物と原岩との関係について、もう少し詳しく触れてみる。

epidote は、一般的に変成岩起源を示すものとされているし、実際結晶片岩中に多量に含まれていることは、しばしば経験するところである。しかし花崗岩中の長石が熱水変質を受けたときにもできる。したがって我が国の白堊紀、第三紀の堆積岩中に、ときに多量に存在するこの鉱物が、どんな原岩からもたらされたかを判断することは、むずかしい場合が多い。

zircon は酸性火成岩の特徴的な鉱物である。これは花崗岩中に普通に存在するが、酸性火成岩や凝灰岩にも多量に含まれることがある。山本ら (1964) や POLDERVAART (1955, 1956) は晶相や伸長率の測定などから、原岩の細分を試みている。火成岩から直接もたらされた zircon は、一般に新鮮でほとんど磨耗されていないが、円磨された zircon については、これがより古い堆積岩から洗い出されて再堆積したものか、一次的のものが長距離を運搬されたり、あるいは長期間波に洗われてきたものかを区別することは困難である。ほとんど楕円または球に近い紫色 zircon が時々みられるが、これは再堆積の繰返しの結果できたものであろう。

有色鉱物は新第三紀以降の地層に多量に存在するという顕著な事実がある。このことは、新第三紀以降に火山活動が盛んとなり、多量の火山砕屑物が堆積物として供給されたことを示している。しかし古第三紀以前の地層に有色鉱物が少ないのは、火山活動の影響がなかったというわけではなく、一度堆積した有色鉱物が、地層中で消失してしまったものと考えられる。有色鉱物は重鉱物の中でも風化作用に対しては不安定であり、時代の古い地層中では層内水などの影響で化学的風化を受け消滅することが知られている。中新世の凝灰質砂岩中にある augite, hypersthene, hornblende のあるものでも、この事実を裏づけるように、鋸歯状構造 (hack-saw structure) がしばしばみられる。

したがって、ここで注意しなければならないのは、古第三紀以前の堆積岩中の重鉱物をみた時には火山活動の影響を過少評価し勝ちになるとともに、新第三紀以降の堆積岩中の重鉱物を取扱う時には、多量の有色鉱物によってかくされてしまった、その他の重鉱物の存在を見落すおそれがあることである。

かんらん石は塩基性ないし超塩基性岩起源の鉱物である。この鉱物は、非常に新しい地層 (関東地方では関東ローム層、関東ローム研究グループ、1965) で知られているが、鮮新世以前の地層には非常にまれにしか存在しない。これも本鉱物が非常に不安定であることによって、もし地層中にこの鉱物がかなりの量みられるならば、地層対比の上からも、原岩推定の上からも、非常に有効な鍵鉱物となるであろう。

飯島 (1964) は、重鉱物中の chromite 量の分布に注目し、北海道において、2つの超塩基性岩のベルトを推定した。KRYNINE (1946) は、tourmaline の光学性、形態から、大きく5つの起源を区別している。このように特定の鉱物あるいは鉱物中の包有物などの特徴に注目して、原岩の種類、位置などを推定する試みももっとなされてもよいだろう。

天草炭田、高島炭田、崎戸—松島炭田の夾炭層には、10%前後 (全透明重鉱物を100%とした時) の rutile が普遍的に含まれている (佐藤, 1969)。筆者はその他の重鉱物組成からこの堆積物の主な供給源は花崗岩類であり、九州西方海上には、当時花崗岩体が広く分布していたものと推定した。しかし rutile の起源を考える時、これは結晶片岩、塩基性火成岩、あるいは堆積岩の再堆積したものにも含まれ得るので、この場合、その持つ意味を解釈することができなかった。鉱物組成から原岩を推定する時には、しばしばこのような困難な問題に直面することが多い。

我が国の地質・構造は現在地表でみられるように、非常に複雑であり、大きな岩体が1つの水系全域を占めて広く分布するという例はまれである。地質時代においても造山帯に位置する

ために大陸のような簡単な構造は存在しなかったのであろうし、したがって堆積物中の重鉱物もいろいろな原岩からもたらされ、複雑な組成を示すに至ったと考えられる。このために、外国では重鉱物は原岩を推定する上に有効であるとされながらも、日本では、なかなか明解な結論を出すことができないでいる。

8. 重鉱物組成による地層対比について

重鉱物の研究は、地層を対比する上に大いに役立ち、とくに無化石の地層の分帯・対比に非常に有効であると考えられてきた。とくに第2次大戦までは、石油探査のために主として米国においてこの研究が盛んに行なわれ、多量の資料が集まった。しかし最近になり、この分野に対する研究の興味は急速に失われつつあるように思われる。この理由としては、微生物学や物理検層の発達があげられよう。たしかに重鉱物による分帯結果は、大変レンジが長く、細分はむずかしいことが多い。またある組成が側方に変化したり、重鉱物帯が地層や古生物帯と斜交することもある(佐藤, 1954; COGEN, 1940)。最近の研究例をみても、ほぼ統単位で組成上の特徴の示されているものが多い。例えばドイツ中央部のチェコとの国境付近では、三疊紀の上部と中部が zircon-garnet の組合せで区別されている(LOTHAR, 1965)。アペニンの漸新統は、staurolite と glaucophane のないことで、中新統と区別できる(GANDOLFI & GAZZI, 1962)。コイパー砂岩層は全層序断面を通じて zircon-tourmaline-rutile が優勢である(SCHRÖDER, 1965)。

我が国でも古第三紀以前の地層中の重鉱物はその種類が割合簡単で(zircon, tourmaline, garnet, epidote など)、地層の細分を行なえるような組成変化はなかなか見あたらない。重鉱物もほとんどないといってよく、筆者は鉱物種の組合せや量比によって特徴をつかみ、地層の分帯を行なっている。この分帯の単位も一般的にいて累層単位であり、層群単位でしか組成変化の見られないこともある(SATO 1969)。しかし時には層(メンバー)単位の区別が、重鉱物の量比の細かい変化から識別できることもある(SATO, 1969)。これらの結果は多数の試料を分析し、三角図表などにその成分をプロットした上で分類されたものである。同一地層中でも重鉱物の量比にはばらつきがあるので、未知の層準の1試料の組成から、その層準を決定するのは、組成がよほど特徴的なものでない限りむずかしい。しかし数試料の分析を行なって、その量比の変化範囲がつかめれば、既知のデータと比較して、対比をすることができる。

これに反して新第三紀以降になると、地層中に多量の有色鉱物がみだされる。これは当時盛んであった火山活動を反映すると共に、風化に対して不安定な有色鉱物も、時代が若いために、あまり失われてしまっていないためであろう。これら堆積岩中の有色鉱物はその分布がかなり広く、また火山活動の時期の違いによって鉱物組成にも変化があり、したがって地層の分帯・対比に非常に役に立つ。河井(1951, 1953)は重鉱物によって凝灰岩層の対比を行なった。筆者は砂岩中の有色鉱物の組合せ、量比から北海道奈井江付近の滝川層は2分できる可能性を示し(佐藤, 1959)、宮城県大内亜炭田でも各層を2分した(佐藤, 1962)。さらに岐阜県美濃亜炭田では、試錐コアおよび露頭試料の重鉱物分析結果から、中村層群・瑞浪層群の組成上の特徴を明らかにし、重鉱物による対比を行なった(佐藤, 1970)。

このような堆積岩中の有色鉱物の研究は、その他関東ロームに関するもの(関東ローム研究グループ, 1965)、山形県下の新第三系の研究(青木, 1965)、東北日本油田地帯の研究(佐々木・牛島, 1968; 田口, 1954, 1957)などがある。しかし外国文献では、このような例はほとんど見られない。

関東ローム層の研究(前出)をみると、同一層準であっても、火山砕屑物の供給源が地域によって違うために組成に変化があり、他の重鉱物の例と同様に、対比が可能な範囲にはある限界があることを示している。

火山砕屑物の研究では、さらに火山ガラス(重鉱物ではないが)の屈折率を各層準の試料について測定し、その差から分帯、対比、起源の追跡も可能であるとされている(WILCOX, 私信)。

重鉱物研究の目的の1つとして、不整合をみいだすことがあげられる。一般的に考えれば、地層の堆積の間に大きな時間間隙があれば、後背地や堆積盆地の形状に大きな変化があり、当然重鉱物組成にもいちじるしい変化が生じるはずである。これまでに不整合をはさんで、上下の地層にはっきりした鉱物組成上の変化が認められた例としては熊本県天草下島における白垩紀層と福連木層(始新世)、崎戸—松島炭田の松島層群と西彼杵層群(いずれも漸新世)、北海道奈井江の石狩層群(古第三紀)と滝川層(洪積世)との間などがあげられる。しかし整合関係にある上下の地層でも重鉱物組成に顕著な差がある場合も多く、重鉱物の面からだけで、2地層の関係が不整合であるか整合であるかを判定することはむずかしいといえる。

9. むすび

地層中における重鉱物の分布状態は、いろいろな条件、要素が複雑にからみあった結果生じたものであり、したがってその解釈についても、常に困難がともなう。

地層の分帯・対比のためには、中新世以降の堆積物にあっては重鉱物(とくに有色鉱物)は有効な武器となり得る。しかし従来の経験からいうと、古第三紀あるいはそれより古い地層に対しては、重鉱物組成が単純なこともあり、何らかの新しい方法を加えなければ、この目的のためにはあまり期待が持てそうにもない。

VAN ANDEL (1959) は、堆積物の起源を知る上に、重鉱物は非常に重要なデータを与えてくれると述べている。しかし本研究においても重鉱物だけの観点から論議することなく、岩石薄片の観察によって軽鉱物や基質の組成・量比を調べて砂岩の成因的分類を行ない、岩片からも供給物質の推定を行なうと共に、古流系の方向の研究なども加えて堆積物の運搬方向を求めるなど、堆積物に対して総合的な研究を行なって、その結果から判断を下す必要がある。これはいう事は簡単だが、実際には、大変な努力を必要とする仕事である。

自生鉱物については、これまであまり取りあつかわれていないが、その生成条件を詳しく調べることにより、堆積環境についてのいろいろな情報を得ることができよう。また不透明鉱物についても、研磨片を作って反射顕微鏡下で同定・分類して行くならば、今まで見のがされていた資料が集積され、とくに堆積物の供給源に関する研究に役立つであろう。

火成岩体・変成岩体では、その周縁部から中心部へと特徴的鉱物が異なっていくことが知られている。したがってこのような岩体が侵食されていき、その碎屑物が運搬・堆積されるならば、地層中の重鉱物組成から、逆に上記岩体がどの程度まで削はくされてきたかを推定できるわけである(GROVES, 1931)。我が国では、この問題に触れた論文はほとんどないが、火成岩体・変成岩体の出現(unroofing)、削はく、堆積の過程を知ることは、古地理を考える上に重要な事項である。

その他、未解決の問題として重鉱物組成の側方変化に関する法則、epidote など普遍的に存在する重鉱物の、火成岩起源か変成岩起源かの判別、円磨されている重鉱物が存在する時、その原因が運搬距離によるものか、波浪の影響か、古い堆積岩から再侵食を受けてもたらされたものかの判定法、重鉱物組成の変化と地層の整合・不整合との関係などがあげられる。これらの問題をどのように取りあつかって解決していくかは、今後に残された課題である。

参考文献

- ALLEN, P. (1944): Statistics in Sedimentary Petrology. *Nature*, vol. 153, pp. 71-78.
- AOKI, K. (1965): Some Sedimentary Petrographical Investigations on the Neogene Sediments Exposed in the District West of the Yamagata Basin, with Special Reference to Heavy Mineral Components. *Bull. Yamagata Univ.*, vol. 6, no. 3.
- BOSSWELL, P.G.H. (1933): *On the Mineralogy of Sedimentary Rocks*. 393p., Thomas Murby & Co., London.

- BRIGGS, L. I., McCULLOCH, D. S. & MOSER, F. (1962): The Hydraulic Shape of Sand Particles. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 32, no. 4.
- CHERRY, J. A. (1966): Sand Movement along Equilibrium Beaches North of San Francisco. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 36, no. 2.
- COGEN, W. M. (1940): Heavy-mineral Zones of Louisiana and Texas Gulf Coast Sediments. *A.A.P.G.*, vol. 24, no. 12.
- FESSENDEN, F. W. (1959): Removal of Heavy Liquid Separates from Glass Centrifuge Tubes. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 29, no. 4.
- FLORES, R. M. (1967): Variations in Mineral Composition During Transport. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 37, no. 1.
- 藤井浩二 (1956) : 九州八代地方中生界の砂岩, 地質雑, vol 62, no. 727
- GANDOLFI, G. & GAZZI, P. (1962): Significato della distribuzione dei minerali pesanti nella arenarie fra il Passo della Porretta e Castiglione dei Pepoli (Appennino Tosco-Emiliano). *Acta Geol. Alpina*, no. 8, p. 423-432.
- Gazzi, P. (1962): Ricerche sulla distribuzione dei minerali pesanti nei sedimenti arenacei dell' Appennino Tosco-Romagnolo. *Acta Geol. Alpine*, no. 8, p. 379-422.
- GRIFFITHS, J. C. (1960): Frequency Distribution in Accessory Mineral Analysis. *Jour. Geol.*, vol. 68, p. 353-365.
- GRIFFITHS, J. C. (1967): *Scientific Method in Analysis of Sediments*. 508p. McGraw-Hill Book Co.
- GROVES, A. W. (1931): The Unroofing of the Dartmoor Granite and the Distribution of Its Detritus in the Sediments of Southern England. *Q.J.G.S.*, LXXXVII, p. 62-96.
- 市村 毅 (1933) : 台湾苗栗油田及其の附近に産する所謂白色砂岩の地質学的考察, 地質学雑, vol. 40, no. 483
- 市村 毅 (1938) : 四稜砂岩層の砂岩と白冷層の砂岩, 台湾地学記事, vol. 9
- 市村 毅 (1949) : 台湾におけるジルコンとモナズ石の鉱床, 地質雑, vol. 54, no. 631
- ICHIMURA, T. & MATSUBAYASHI, H. (1953): Igneous Activities prior to the Deposition of the Chichibu System. *Earthq. Res. Inst. Bull.*, XXXI, part 2.
- ICHIMURA, T. & AOKI, K. (1957): Some Geological Considerations of the Neogene Sediments Exposed at the Western Margin of the Yamagata Basin. *Earthq. Res. Inst. Bull.*, XXXV, part 1.
- IJIMA, A. (1957): Preliminary Note on the Heavymineral Association of the Ishikari Series (Eocene-Oligocene) in the Ishikari, Kabato and Rumoi Cool Fields in Hokkaido, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, vol. 63, no. 737.
- IJIMA, A. (1959): On Relationship between the Provenances and the Depositional Basins, Considered from the Heavy Mineral Associations of the Upper Cretaceous and Tertiary Formations in Central and Southeastern Hokkaido, Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. II*, vol. XI, part IV.
- IJIMA, A. (1964): The Chromium Distribution in the Paleogene Deposits of Hokkaido and Its Bearing on Ultrabasic Rock Belts. *Jap. Jour. Geol. Geogr.*, vol. XXXV, no. 1
- IJIMA, A. (1965): The Petrographic Study of the Later Tertiary Sandstones and Basement Rocks in Northwest Kyushu, Japan. *Jap. Jour. Geol. Geogr.*, vol. XXXVI, nos. 2-4.
- 関東ローム研究グループ (1965) : 関東ローム, その起源と性状, 378 p., 築地書館
- 加藤和幸 (1957) : 大之浦地区第三紀層の含有鉱物, 九州鉱山誌, vol. 25, no. 3
- 河井興三 (1951) : 重鉱物組成による凝灰岩層の対比 (第2報), 地質雑, vol. 57, no. 670
- 河井興三 (1952) : 重鉱物百分率の信頼度に就いて, 石油技協, vol. 17, no. 4

- 河井興三 (1953) : 重鉱物組成による凝灰岩層の対比 (第3報), 地質雑, vol. 59, no. 694
- KRUMBEIN, W. C. & PETTIJOHN, F. J. (1938): *Manual of Sedimentary Petrography*. 549p., Appleton-Century Co. Inc.
- KRUMBEIN, W. C. & RASMUSSEN, W. C. (1941): The Probable Error of Sampling Beach Sand for Heavy Mineral Analysis. *Jour. Sed. Petrol.* vol. 11, p. 10-20.
- KRUMBEIN, W. C. & SLOSS, L. L. (1963): *Stratigraphy and Sedimentation*. 2nd Ed. 660p., W. H. Freeman and Co.
- KRYNINE, P. D. (1946): The Tourmaline Group in Sediments. *Jour. Geol.*, vol. 54, p. 65-87.
- McCULLOCH, D., MOSER, F. & BRIGGS, L. (1960): Hydraulic Shape of Mineral Grains. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 71, p. 1925.
- MILNER, H. B. (1952): *Sedimentary Petrography*, 660p., Thomas Murby and Co.
- MADARRESI, H. G. (1968): Simple and Effective Device for Gravity Separation of Heavy Mineral Grains. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 38, no. 1.
- 西平重喜 (1957) : 統計調査法, 196 p., 培風館
- 小原浄之介 (1958) : 佐賀県三間坂南方の地質及砂岩 (九州第三紀層砂岩の研究, その1), 地質雑, vol. 64, no. 749
- 小原浄之介 (1959) : 高島炭田二子島層中の砂岩単層の重鉱物分布, 地質雑, vol. 65, no. 770
- 小原浄之介 (1961) : 崎戸炭田の重鉱物, 九大理研報 (地質), vol. 5, no. 3
- 小原浄之介 (1962) : 重鉱物による北九州諸炭田の地質学的研究, 九大理研報 (地質), vol. 6, no. 1
- PETTIJOHN, F. J. & RIDGE, J. D. (1933): A Mineral Variation Series of Beach Sands From Ceder Point, Ohio. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 3, no. 2.
- PETTIJOHN, F. J. (1957): *Sedimentary Rocks*. 2nd Ed., 718p., Harper and Brothers.
- POLDERVAART, A. (1955): Zircons in Rocks. I. Sedimentary Rocks. *Am. Jour. Sci.*, vol. 253, p. 433-461.
- POLDERVAART, A. (1956): Zircon in Rocks. II. Igneous Rocks. *Am. Jour. Sci.*, vol. 254, p. 521-554.
- POMERANBLUM, M. (1966): The Distribution of Heavy Minerals and Their Hydraulic Equivalents in Sediments of the Mediterranean Continental Shelf of Israel. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 36, no. 1.
- RAMAN, K. V. & JACKSON, M. L. (1965): Rutile and Anatase Determination in Soils and Sediments. *Amer. Min.* vol. 50, no. 7 & 8.
- RITTENHOUSE, G. (1943): The Transportation and Deposition of Heavy Minerals. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 54, p. 1725-1780.
- RUBEY, W. W. (1933): The Size-Distribution of Heavy Minerals within a Water-Laid Sandstone. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 3, no. 1.
- RUSSELL, R. D. (1939): Effects of Transportation on Sedimentary Particles. *Recent Marine Sediments*, p. 32-47.
- 佐藤良昭 (1954) : 岡山県山奥層 (ジュラ系) の重鉱物, 地質雑, vol. 60, no. 707
- 佐藤良昭 (1955) : 秩父盆地赤平層 (第三系) の重鉱物組成, 地質雑, vo. 61, no. 723
- 佐藤良昭 (1959) : 北海道奈井江試錐コーアの重鉱物組成, 地調月報, vol. 10, no. 10
- 佐藤良昭 (1961) : 長崎県東長崎町付近および熊本県天草下島に分布する古第三系の重鉱物組成, 地調月報, vol. 12, no. 9
- 佐藤良昭・宮下美智夫 (1962) : 宮城県伊具含炭地大内付近の重鉱物組成, 地調月報, vol. 13, no. 1

- 佐藤良昭 (1964) : 唐津炭田および西彼杵半島古第三系の重鉱物組成, 地調月報, vol. 15, no. 1
- 佐藤良昭 (1966) : 砂岩の中の重鉱物, 地質ニュース, no. 141
- SATO, Y. & DENSON, N. M. (1967): Volcanism and Tectonism as Reflected by the Distribution of Nonopaque Heavy Minerals in Some Tertiary Rocks of Wyoming and Adjacent States. *U.S.G.S. Prof. paper*, 575-C, p. C42-C54.
- SATO, Y. (1969): Geological Significance of Zircon-Garnet-Tourmaline Ratio of the Paleogene Sandstones of the Northwestern Kyushu, Japan. *Geol. Survey of Japan, Report* no. 235.
- 佐藤良昭 (1970) : 東濃, 日吉地域に分布する中村・瑞浪層群 (新第三系) の重鉱物組成による分帯, 地調月報, vol. 21, no. 7
- 佐々木清隆・牛島信義 (1968) : 新潟県東山油帯の椎谷層および西山層の砂岩の重鉱物組成, 岩鉱, vol. 59, no. 2
- SCHRÖDER, B. (1965): Die Schwermineralführung des Keupers in den nördlichen Hassberger in regionalem Vergleich. *Geol. Bl. Nordost-Bayern*, vol. 15, no. 4.
- SCULL, B. J. (1960): Removal of Heavy Liquid Separates from Glass Centrifuge Tube-Alternative Method. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 30, no. 4.
- 田口一雄 (1954) : 新庄盆地南縁部の堆積学的考察 (予報) ——重鉱物分析の適用結果について——, 岩鉱, vol. 38, no. 4
- 田口一雄 (1957) : 裏日本油田第三系への重鉱物分析の適用, 堆積学研究, 16, p. 3-4
- TICKELL, F. G. (1965): *The Techniques of Sedimentary Mineralogy*. 220p. Elsevier Pub. Co.
- VAN ANDEL, Tj. H. (1950): *Provenance, Transport and Deposition of Rhein Sediments*. 129p. Geol. Lab. Agricultural Univ. at Wageningen.
- VAN ANDEL, Tj. H. (1959): Reflections on the Interpretation of Heavy Mineral Analyses. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 29, no. 2.
- VAN ANDEL, Tj. H. & POOLE, D. M. (1960): Sources of Recent Sediments in the Northern Gulf of Mexico. *Jour. Sed. Petrol.*, vol. 30, no. 1.
- WILCOX, R. E. (1959): Use of the Spindle Stage for Determination of Principal Indices of Refraction of Crystal Fragments. *Amer. Min.*, vol. 44, p. 1272-1293.
- 山本 敬・松熊和子 (1964) : 堆積岩中のジルコンに関する研究, 岩鉱, vol. 52, no. 5