
《論 文》

岩石の多様性形成の要因とその弁証法的意義について

小 出 良 幸

要 旨

岩石の多様性を理解する上で、化学的多様性と形成年代、なかでも成因が重要である。岩石には、火成岩と変成岩、堆積岩の3つの成因がある。火成岩では固体が熔融し液体になり固化する、堆積岩では固体が離脱、移動し、再構成される、変成岩では固体が別の固体に再結晶する、というそれぞれの素過程がある。素過程ごとにいくつかの作用があり、作用ごとにいくつかの要因があり、それらにより多様性が形成されている。

素過程における要因だけでなく、地球の冷却過程や表層環境の変遷など、長い時間スケールでの変化を反映した多様性もある。岩石の多様性の変化は、地球の不可逆な変化を記録している。地球初期にできた固体にはいくつかの由来の火成岩があり、もっとも根源的な成因の岩石となっている。火成岩は、岩石の多様性に大きな改変を起こす、弁証法的な発展過程をしている。

キーワード：岩石多様性、成因、火成岩、堆積岩、変成岩、素過程、弁証法的発展

I はじめに

岩石は多様である。粒の粗いものから細かいものまで、重い物から軽いものまで、硬いものから柔らかいものまで、古いものから新しいものまで、色も多様だし、つくりも履歴も多様である。岩石がもつ属性ごとに、多様性が認められる（小出, 2011; 2013b）。多数の属性をもつ岩石は、属性の組み合わせの数が増大になり、岩石の区分や分類も多様になっていく。このような岩石の多様性が、どのような要因によるものか、要因の中でなにが本質的なのか。これらを整理していくことは、岩石の多様性形成を探る上において重要な視座となるであろう。

岩石とは、いく種類かの物質（鉱物や岩石片、結晶片、ガラスなど）が集まって構成されている。鉱物や鉱物片は、均質な組成をもった結晶のことである（湊, 1998）。岩石片も、鉱物の集合である。岩石は、突き詰めれば、鉱物あるいはその破片の集合体と見なすことができる。均質な鉱物が集合しているのに岩石が多様なのは、集合の様式や状態、組み合わせなどのばらつきに起因することになる。

鉱物集合におけるばらつきは、どのような原因によって生じるのか。ばらつきにはどのような作用が働いているのか。それらの原因は本質的なものなのか。体系化されうるものなのか。それらの疑問を探るために本論では、多数ある要因から、最も本質的なもの(素過程と呼ぶことにする)を探っていく。次に、素過程がどのような要因を内包しているかを考える。このような素過程と要因の関係の把握し、要因の体系化ができれば、多様性形成の解明につながる。本稿では、その最初のステップとしての素過程の抽出と要因の整理をしようとするものである。

Ⅱ 岩石の多様性の本質

地質学では、野外調査から室内実験という研究手法に基づき、岩石の多様性が探られる。以下では、それらの手順を概観して、多様性形成に関わっている過程や要因を検討していく。

1 多様性の把握に向けて

岩石の多様性の把握は、地質調査からはじまる。野外調査では、露頭で産状が調べられ、岩石の特徴が記録されていく。野外調査における岩石の産状記載の多くは、今後の研究における基礎情報となる。岩石の産状は、岩石の多様性を探るには不可欠であるが、多様性を定量的に把握するものではない。

岩石の組織や産状を手がかりに、岩石を見分け、区分していく。岩石組織の特徴の多くは、定性的なものであるため、多様性を厳密に示すものではない。ただし、モード組成（あるいはノルム組成）のように定量化できる特徴は、岩石の多様性の範囲を限定する情報となる。岩石の種類は、化学組成、モード組成、鉱物組み合わせなどによって定義されている（例えば、都城・久城, 1975; IUGS, 1973; 鳥海, 1998など）。ただし、どの定量データを用いるかは、岩石の成因によって異なってくる（岡田, 1968）。したがって、岩石の成因も、多様性の範囲を決めていく上で、重要な要因となる。

岩石の主成分化学組成は、岩石の多様性を探るために不可欠な情報である。岩石は、主成分化学組成によって多様性の範囲が限定されていく。微量元素や同位体組成を用いることにより、定性的であった岩石の特徴のいくつかを定量化できる。鉱物化学組成からは、過去の履歴や地下深部の条件、火成作用、変成作用、堆積作用の条件など、多様性形成の要因が読み取れる。露頭や岩石組織の定性的特徴が、化学組成で定量的に扱えるようになる。

野外調査の集大成として、地質図が作成される。地質図は、岩石の種類を前提に、その分布と地質学的関係を、広域的に把握しようとするものである。岩石の生い立ちや変遷などを知るために地質図は必要だが、岩石の多様性を把握した結果を表現したもので、多様性の要因を導き出すものとはならない。

岩石の形成年代は、時代ごとの多様性の有無を知る上で有用な情報である。岩石、鉱物、鉱物

内部の年代や年代差は、岩石の多様性だけでなく、岩石内の複雑な履歴を読み取ることができる（小出, 2014）。後述のように、もっと長い時間スケールでの多様性も記録されている（小出, 2010）。

岩石の成因、化学的多様性、形成年代に基づく時間変化が、岩石の多様性を考える上で重要な視点であることがわかる。次に、時間変化と多様性の関係を検討していく。

2 時間変化

地球は、約45億年前に形成された（Patterson et al., 1995; 小出, 1995）が、その時代の岩石は見つかっていない。しかし、44.04億年前の最古の鉱物（Wilde et al., 2001）や、各地で40億年前ころの古い岩石（Bowring and Williams, 1999）は見つかっている。40億年前以降に形成された岩石は、場所や環境を問わなければ、ほぼすべての時代のものが手に入る。

一方、新しい時代の岩石は、海底下の中央海嶺の火山、日本列島などの島弧の火山、ハワイなどの海洋島の火山、アフリカの大地溝帯の火山など、現在活動中のマグマから、新しい岩石が形成されている。海底には今も堆積物がたまっているし、地下深部では変成作用が進行中である。今もいろいろな場で、いろいろな岩石が形成されている。

40億年前以降ほぼすべての時代の岩石が、現在まで残されていることになる。地球は、約45億年前に形成されて以来、生産量はさまざまであるが、常に岩石の形成は継続している。地球は、物質量がほぼ一定の天体である。その天体で常に新しい岩石が形成されているということは、質量保存の原則から考えると、岩石の再生産が起こっていることになる。既存の岩石もしくは何らかの固体物質が、新しい岩石へと改変や変容、再構成されている。岩石は、古いものから新しいものへと、「新陳代謝」を続けていることになる。その結果として、岩石の多様性は、時間とともに増していることになる。

地球の時間変化の結果として、ある時代だけに限定して活動した岩石が知られている。それは時代固有の岩石といえ、地球の時間変化における重要な情報が残されている可能性がある。

例えば、太古代（40億～25億年前）にはコマチアイト（komatiite）が、太古代から原生代（25億～5.4億年前）にはアノーソサイト（anorthosite、斜長岩とも呼ばれる）が、太古代末から原生代初期にかけてはストロマトライト（stromatolite）や縞状鉄鉱層（banded iron formation）、堆積性ウラン鉱床（sedimentary uranium deposits）が、原生代以降では赤色砂岩（red sandstone）などが、時代固有の岩石として知られている（例えば、熊澤ほか, 2002など）。

アノーソサイトは、太古代から原生代に見つかる岩石である。花崗岩の仲間には属するもので、月との対比で、太古代の大陸はアノーソサイトでできていたとする考えもある（酒井ほか, 2010）。初期地球では、大規模な溶融によってマグマオーシャンができ、固化する時にアノーソサイトが形成されたとするものである。アノーソサイトの分布は少ない。水分量が多くなると、アノーソサイトの密度がマグマより大きくなり、マグマオーシャンでは沈むと考えられている。

アノーソサイトは、成因がまだ完全に解明されていないが、時代を特徴づける岩石となる。

コマチアイトも太古代に形成されたものである。コマチアイトは、珪酸成分が極端に少なく、超苦鉄質や超塩基性に分類される火山岩である。また、カンラン石がスピニフェックス構造をもち、枕状構造をもっていることから、超塩基性マグマが水中で急冷した火山岩である。現在の海洋域や大陸域の火山活動ではみられないものである。合成実験では、コマチアイト質マグマは1700℃に達する高温であったことがわかっている (Hirose and Kushiro, 1993)。現在のマンツルのマグマが形成される場では、達成できない温度条件である。マンツルの温度が、太古代では高かったが、地球の冷却によって、現在の温度まで下がってきたこと示している。

ストロマトライトは、シアノバクテリアがつくった生物起源の堆積岩である。シアノバクテリアが光合成で大量の酸素を形成したため、海洋域の酸化が進み、堆積性ウラン鉱床や大量の縞状鉄鉱層ができた。堆積性ウラン鉱床が消えるころに、赤色砂岩が産出するようになる。赤色砂岩は大気中の酸素による酸化でできる岩石である。20億年前ころに、それまで酸素のない地球表層で、酸素が一気に形成されるという大異変が起こったことが知られている (丸山・磯崎, 1992; 1998)。

ある時代固有の岩石は、マグマオーシャンや初期大陸の形成過程、冷却過程、地球の表層環境の変化など、地球の時間的変遷を記録している。岩石における時間変化による多様性形成は、地球史の大局的な変遷の把握に、重要な意味をもっていることになる。

3 化学的多様性

地球の主要部分である核、マンツル、そして地殻は、固体からできている。ただし、内核は金属鉄を主成分とした固体であるが、外核は溶けた金属鉄で固体ではないことが明らかにされている。固体金属も鉱物の一種であるから、内核も岩石の定義には組み入れられる。人類は地球の核の試料は未だに手にしていないが、地震学的データや類似の天体の核の破片として鉄隕石が入手できることから、その実体を探ることは、ある程度可能となっている (小出・山下, 1996)

核より外側のマンツルと地殻は、岩石からできている。マンツルと地殻の岩石は、珪酸を主成分とする珪酸塩鉱物 (主だった鉱物類) の集合体である。

地球の岩石は、金属鉄 (還元状態) から酸化物まで、化学的に大きく違った性質をもっている。さらに、珪酸塩鉱物を主とする岩石も、マンツルと地殻では明らかに違い、容易に区分可能である。

地殻の岩石は多様である。それに比べてマンツルの岩石の多様性は、比較的小さいことが知られている (例えば、Green and Ringwood, 1967など)。マンツルの岩石は、地球の営為によって、地表で手に入れることができるが、直接扱うことのできる岩石は、地殻を構成する岩石が圧倒的に多い。

岩石は鉱物の集合体だが、単一の鉱物種だけからできている岩石もある。例えば、石灰岩は多少の不純物は含まれているが、主たる構成物として炭酸カルシウム (CaCO_3) の結晶である方解

石からできている。鉱物の化学組成が、そのまま岩石組成になるため、他の岩石（珪酸を主とするもの）の多様性の範囲を、大きく逸脱したものとなる。単独鉱物でできる岩石の数だけ、多様性は広がり、そこに不純物（他の鉱物類）が加わって、より広い岩石の多様性となる。

不純物が通常の珪酸塩鉱物なら、通常の岩石の多様性へと漸移していく。つまり、単独の鉱物から平均的な岩石までの範囲で、岩石の化学組成の多様性が広がっていく。岩石は量を問わなければ、非常に広い化学的多様性をもっていることになる。

ひとつの鉱物による岩石は、その鉱物のでき方が理解できれば、成因が解明できる。ひとつの成因解明で、ひとつの多様性が理解できることになる。一方、一般の岩石は、鉱物や岩石片などの複数の構成物が組み合わせられたもので、複雑なつくりになっている。それぞれ形成条件が違う構成物を、ひとつの形成過程で説明することは、困難な課題である。今まで地質学は、その謎に取り組んできたことになる。

4 岩石の多様性形成の素過程

ここまで、岩石の成因を区別することなく述べてきた。成因は、化学的多様性を記述するためには、不可欠な情報である。以下では、火成岩、堆積岩、変成岩の3つの成因に区分して、それぞれの成因ごとに検討していくことにする。

岩石の成因は明瞭で分かりやすいものである。3つの成因を抽象化して述べると、次のように表現できるであろう。

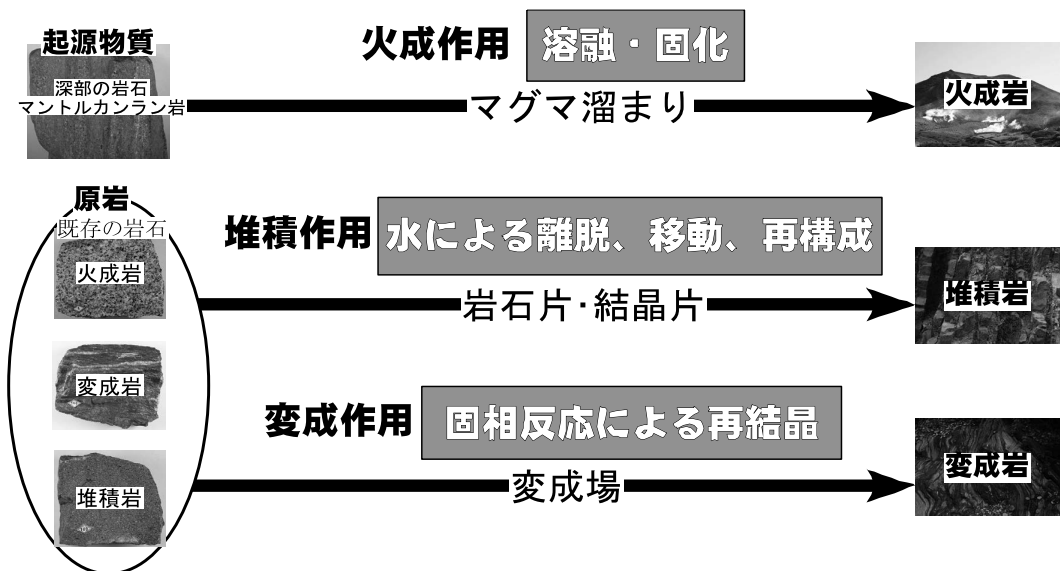


図1 岩石の成因ごとの素過程

火成岩（火成作用）、堆積岩（堆積作用）、変成岩（変成作用）の成因の違いを、素過程に基づいて示したもの。火成作用では溶融という過程、堆積作用では水の関与、変成作用では固相反応が、それぞれの素過程の特徴となっている。

火成岩は、固体が溶融し、液体になり、固化したものである。堆積岩は、固体が離脱、移動し、再構成されたものである。変成岩は、固体が別の固体に再結晶したものである。(図1)。岩石は、固体の素材から由来して、成因ごとに液体を経たのか(火成岩)、固体が離脱・解体・溶解、移動・運搬、堆積・沈殿・再構成されたのか(堆積岩)、固体のまま固相反応で再結晶して再構成されたのか(変成岩)、という違いがある。単純化したプロセスで見ると、岩石の多様性の形成のより本質的な過程、素過程があることがわかる。

堆積岩における化学的溶解や化学的沈殿は、火成岩の溶融と結晶化に対応している。堆積岩の化学的作用での素過程と、火成岩の素過程における違いは何か。堆積岩では、水が溶媒として、非常に重要な役割をもち、主たる成分でもあった。一方、火成岩でも溶融や固結で、水や流体(水蒸気)の関与はあるが、堆積岩における水の関与ほど大きな要因ではない。両素過程は、水の寄与の程度で区別できる。

次に、成因ごとの素過程にかかわっている要因について見ていく。それらの要因は、岩石や構成物の化学組成、形成年代などの情報を元に記載されたものである。

Ⅲ 火成岩にかかわる要因

火成岩は、固体が液体になり液体から再度固体になったものである。素材となる固体は、起源物質とよばれる。起源物質が溶けて液体になった溶融体を、マグマと呼ぶ。マグマが、再度固まり火成岩が形成される(久城, 1998)。

火成岩では、マグマという溶融状態を経由することが、重要な素過程となる。溶融という素過

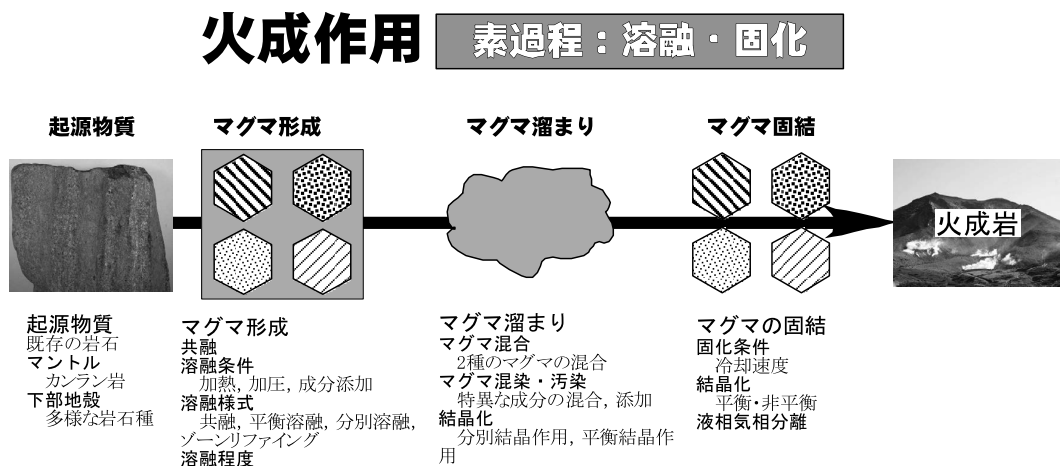


図2 火成作用における多様性形成の要因

火成作用における多様性形成の素過程は、溶融から固化となる。その素過程に働いている起源物質、マグマ形成、マグマ溜まり、マグマ固結という作用ごとに、関与していると考えられる要因をまとめたもの。

程では、マグマの素材となる起源物質、マグマ形成、マグマ溜まり、マグマ固結での作用が、多様性形成には重要な要因となる。それぞれの要因が、岩石の多様性形成とどのように関与しているのかを検討する（図2）。

1 起源物質

マグマの起源物質は、既存の岩石である。マグマの形成条件を考えると、地下深部の岩石（地殻下部物質）やマントルの岩石（カンラン岩）となる。起源物質の種類が、多様性を広げる要因となる。地殻下部の岩石は、実体は必ずしも明らかではないが、地殻を構成しているさまざまな岩石が存在するはずなので、多様性は大きいと考えられる。一方、マントルのカンラン岩は、比較的均質で、多様性は小さいことが知られている。

しかし、実際に形成されているマグマは、比較的多様性が限られており、いくつかのマグマ（本源マグマ）に集約されると考えられている（久城, 1998; 高橋, 1996）。マントルのカンラン岩のように、比較的均質な岩石を起源物質とするのであれば、本源マグマの多様性の少なさは理解できる。ところが、地殻下部のような多様な岩石を起源物質とするマグマも、限られた本源マグマであるとする、起源物質の多様性を消し去るような要因があることになる。それは以下のマグマ形成にかかわる要因によると考えられる。

2 マグマ形成

同じ起源物質でもあっても、マグマの形成の過程で、多様性がつくられている。

起源物質が溶融する条件を満たした時、岩石の一部が溶け出しマグマが形成される。マグマが形成される場合は、マントルであれ、地殻下部であれ、基本的に固相の岩石が存在する環境である。固相が存在する環境で、岩石が溶融するためには、なんらかの条件が加わらなければならない。

そのような条件として、起源物質の加熱、加圧、成分添加があることが判明している。

加熱とは、何らかの作用（熱い物質の接近、高温の場への移動など）によって、起源物質が融点まで温められることである。加圧とは、起源物質が高圧条件（マントル対流での深部への沈み込み、重力落下など）になり、起源物質の融点を越える場合である。成分添加とは、起源物質に微量の物質（水分や炭酸塩、アルカリなど）が加わり、融点が下がる場合である。

起源物質が、溶ける条件を満たせば、溶融が起こる。形成されるマグマは、限定された化学組成をもつことが、岩石の溶融実験から、かなり解明されている。起源物質の鉱物組み合わせが定まっていると、上記の条件を満たした時、一定成分のマグマができることが知られている。このような現象を共融（eutectic）と呼ぶ（都城・久城, 1977）。ある鉱物組み合わせでは、それぞれの鉱物の融点より低い温度で、定まった鉱物の比率で溶けていくことである（Osborn, 1942）。岩石だけでなく、冶金やセラミックなどの鉱工業では、よく知られている現象である。共融しているどれかの鉱物がなくなるまで、同じ組成のマグマが形成され続ける。

多様な起源物質であっても、一定の鉱物組み合わせがあれば、ある限られたマグマが形成されるという特徴は、共融という要因で説明できるであろう。碎屑性堆積岩が溶けるときにも、この効果が働き、大量の花崗岩マグマが形成されることが、岩石の溶融実験からわかっている (Tuttle and Bowen, 1958)。

生成されたマグマの挙動によっても、多様性が生まれる。溶けたマグマが、その場に留まり起源物質と平衡関係を保っている (平衡溶融) 場合と、平衡状態から速やかに分離される (分別溶融) 場合がある。

平衡溶融は、共融している鉱物が存在する限り、継続してマグマが形成される。花崗岩のように大きな岩体を形成するマグマも、共融作用があれば説明可能になるであろう。ただし、共融している鉱物のいずれかがなくなると、次の共融のマグマ組成が生成され、平衡にあるマグマの組成は少しずつ変化していく。

分別溶融は、マグマが溶融の場からとり去られるものである。分別溶融には、溶融場は変わらずマグマだけが取り出される場合と、溶融場が移動して起源物質が常に未溶融の場でマグマだけが分別されて増えていく場合がある。

後者は、ゾーンリファイニング (zone refining)、あるいはゾーンメルティング (zone melting) とよばれる。固体に収まりにくい元素 (incompatible elements) が起源物質に存在する場合、初期のマグマには、それらの元素が濃集したものとなる。

いずれの溶融様式も、理想的なものであるが、実際のマグマ形成では、これらの様式が複合していると考えられる。

起源物質の溶ける割合である溶融程度も、マグマ組成に大きな多様性を加える。起源物質が少量しか溶けなければ、共融している鉱物がなくなるまでは、一定の化学組成のマグマが形成される。溶融程度が大きくなると、いずれかの鉱物がなくなり、新たな鉱物組み合わせでの共融系となり、マグマの成分が一気に変化していく。平衡溶融では、すでにあったマグマに組成の違うものが付け加わるために、少しずつ変化していく。分別溶融では、新たな共融により、突然化学組成の違うマグマが形成されることになる。同じ起源物質から由来したとは思えないほどの変化が、起きることになる。

マグマの形成過程では、起源物質と溶融条件、溶融様式、溶融程度が、マグマの化学組成に大きな多様性を与える要因になる。

3 マグマ溜まり

マグマが形成されると、周辺の岩石より密度が小さいため、浮力によりマグマは上方に移動していく。マグマの浮力と、周辺の岩石の密度が釣り合ったところに、マグマ溜まりが形成されていく。マグマ溜まりは、物理的な密度均衡のとれた場なので、後続のマグマも集まってくることになる。

集まるマグマは、同一の条件で形成された同じ化学組成をもったマグマであることが多い。時に、他の溶融条件や溶融様式、溶融程度で組成の違うマグマが集まり、混合することもある。種類の違うマグマ同士の混合が島弧のような環境では常に起こっているという考えもある（柵山・小屋口, 1982）。また、極端に量の少ないマグマや、成分が著しく異なる少量のマグマが混入することを、マグマ混染、あるいは汚染と呼ぶこともある。

マグマ溜まりは、マグマの形成場より浅所になるので、温度も圧力が下がる。マグマ溜まりは、周辺と圧力が釣り合っているのだが、時間とともに温度低下が起こってくる。すると、マグマ中に結晶がではじめる。最初に晶出する結晶は、苦鉄質鉱物で密度が大きいものが多く、マグマ溜まりの中を沈降して、沈積岩を形成することがある。結晶が沈積すると、マグマから結晶成分が抜けていくことになる。このような作用を分別結晶作用という。マグマ内での対流があったり、マグマと密度の近い結晶であれば、マグマ内に結晶が漂った状態で、マグマと結晶が平衡関係を保ちながら、結晶化することもある。このような結晶化を平衡結晶作用と呼ぶ。

マグマ溜まりの作用としてマグマ混合、マグマ汚染、結晶化が、火成岩の多様性を広げる要因として働いている。

4 マグマの固結

マグマ溜まりで結晶化が進み、そのままゆっくり冷え固まったものが深成岩となる。大きく成長した結晶だけから構成され、結晶化の残りともいえるべき残渣マグマは、結晶化可能な成分は、周辺岩石中の脈に鉱物が形成される。残渣マグマからの結晶化は、特異な化学組成をもつ鉱物の組み合わせをもっている。それ以外の気相や流体相は、粒間や割れ目を通じて、周辺に拡散、移動していくことになる。

深成岩では、マグマの結晶化が平衡に近い状態でおこなわれていく。マグマの中で初期に結晶化した鉱物は、結晶固有の形態（自形という）を保っているが、マグマが少なくなり結晶が多くなると、自形結晶だけではなく、周囲の結晶に影響を受けたり、隙間に形成されたりして、他形結晶となる。隙間に形成される結晶は、固相成分が大量に抜けたマグマなので、結晶に入りにくい成分を含むことになる。そのような結晶は、付随鉱物となって、大きな結晶の隙間や脈として形成されることになる。

マグマ溜まりで、さらに温度が低下すると、流体相や気相が分離して、マグマの密度低下と膨張が起こり、上方に向かって亀裂が形成され、マグマの上方への移動が起こることがある。亀裂が、マグマの通り道（火道）になり、地表への噴出が起こる。亀裂形成が、火山噴火の重要な契機となる。噴出したマグマは、急速に固結して火山岩となる。

火山噴火では、急激な冷却によって、マグマ内で局所的な平衡、あるいは非平衡な条件での結晶化がおこなわれる。火山噴火による結晶は、急冷された組織として判別される。また、マグマが結晶化することなく、非晶質のガラスとして固まることもある。

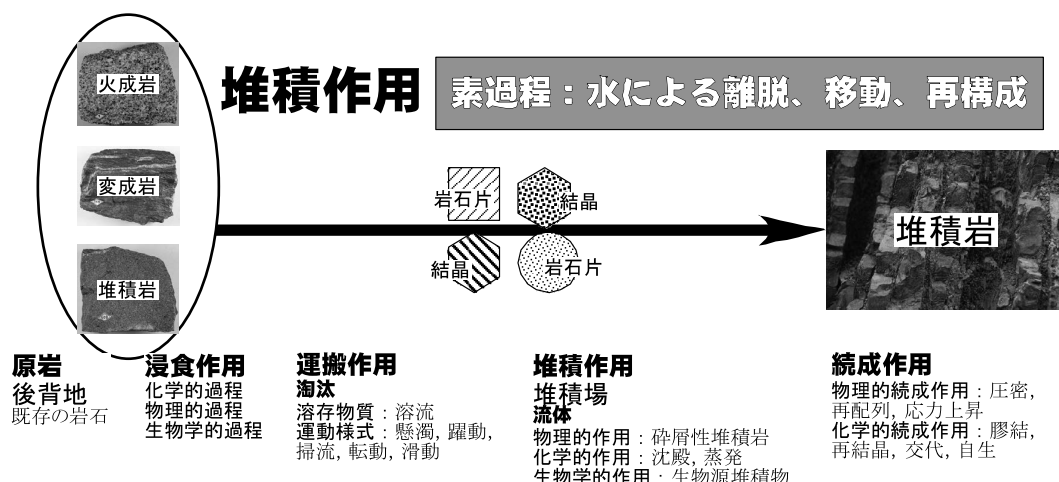


図3 堆積作用における多様性形成の要因

堆積作用における多様性形成の素過程は、離脱、移動、再構成となる。堆積岩の素過程では、水が関与することが大きな特徴となっている。素過程を構成している原岩、浸食作用、運搬作用、堆積作用、続成作用ごとに、働いていると考えられる要因をまとめたもの。

マグマの固化の条件によって、同じ化学組成のマグマであっても、岩石の組織の多様化が起こり、岩石種の多様化へとつながる。深成岩では、ゆっくり冷える条件で形成された結晶の組み合わせと岩石組織ができ、マグマの残りから形成される付随鉱物や脈が、多様性を広げることになる。火山岩では、結晶分作用の急冷結晶や非晶質ガラスの組織が、多様性を広げる。

Ⅳ 堆積岩にかかわる要因

堆積岩は、固体が物理的・化学的に分解、移動、堆積し、固化したものである。その素過程には、水が関与している。既存の岩石が、物理的破碎や化学的溶解、生物学的分解によって、小さな破片や粒子、化合物、イオン、溶液になる。それらが、河川を通じて下流から河口、そして海に運搬される。流れが弱まり停止すると、堆積や沈殿が起る。そして固化したのが堆積岩である(岡田, 1998)。上記の素過程は、後背地の原岩、浸食作用、運搬作用、堆積作用、そして続成作用に区分され、それぞれに働く要因が存在する(図3)。

1 原岩

堆積岩の素材となる固体は、原岩と呼ばれ、原岩が分布している地域を後背地と呼ぶ。堆積岩の素材は、後背地にある既存の岩石が原岩となる。

後背地の原岩の多様性が、堆積岩の多様性に反映される。単調な原岩構成の後背地から、多様性のある堆積岩は形成されない。多様な原岩からなる後背地であれば、堆積岩の多様性が増すこ

とになる。ただし、その後背地の多様性が、堆積岩の多様性に単純に反映されるわけではない。後背地の岩石が、そのまま堆積岩になるわけではないからである。原岩は、侵食、運搬、そして堆積、続成作用を受けた後に、堆積岩となるので、それらの作用の程度や組み合わせ、変動などによって、原岩の多様性が反映される割合は変化する。

原岩の多様性は、堆積岩の多様性の重要な要因であるが、反映される程度は様々である。

2 浸食作用

浸食作用は風化とも呼ばれる。熱、大気、水、氷、生物などの地表付近に存在するさまざまな営力によって、後背地の原岩は浸食を受けていく。浸食作用は、物理的過程と化学的過程、生物学的過程に区分できる。

物理的過程では、岩石が機械的に壊れたり、構成物の粒間に沿って分離したりするもので、岩石の構成物の化学的性質を変化させず細粒化させる働きのことをいう。風や砂塵、流水、氷河などによる機械的侵食、氷結による破碎、温度変化、乾湿変化による岩石自身による膨張と収縮、岩石にかかっている圧力変化などによって、亀裂が形成され、やがて破壊されていく。

化学的過程は、降雨や流水など水が関与した化学反応を起こしていくものである。太陽の光による化学反応も弱いが起こる。岩石の水に溶けやすい成分が、選択的に分解、溶出されていくことになる。もとの鉱物や物質が、酸化、還元、加水分解などの化学反応によって、他の鉱物や化合物に変わることも起こる。

生物学的過程は、生物が関与する反応である。植生のあるところでは、多かれ少なかれ起こっている作用である。植物の根の伸長、地中生物による擾乱などがある。地表の土壌形成は、生物学的過程による効果が大い。海底でも、底生生物による活動によって、堆積物の擾乱、移動、採食活動によって、有機物が分解されたり、腐敗による成分の再編がなされたりする。生物的過程は、化学的過程と物理的過程の複合した作用でもある。

化学的過程、物理的過程、生物学的過程は、それぞれ違った営力に由来し、営力に対する強弱も岩石によって違ってくる。3つの過程において、それぞれへの抵抗力の少ない鉱物や岩石が、選択的に侵食されていく。浸食作用が強く働けば、弱い岩石は大部分が侵食され、さらに働くと抵抗力や耐性の強い岩石にも侵食が及ぶことになる。

後背地の岩石の多様性と、営力の種類や強度が、堆積場で形成される堆積岩の多様性に大きな影響を与えることになる。後背地の浸食作用の程度、進行状態によって、供給される物質の成分は異なってくる。

3 運搬作用

後背地の原岩が浸食作用を受けると、形成された岩石片、結晶片、懸濁・溶融物などは、運搬される。水に溶存した物質は溶流となり、固体物質はそのまま粒子として、流水によって下流に

運搬されていく。流水による粒子の運搬は、懸濁、躍動、掃流、転動、滑動などの運動様式によって移動していく (Fritz and Moore, 1999)。

運搬作用によって、堆積物の淘汰が起こる。淘汰とは、流水の影響で粒径や比重、形態などによって、選別を受けることである。淘汰が強く働いた岩石を「淘汰のよい堆積岩」いい、粒径や形態、礫質などがそろった堆積物になる。「淘汰の悪い堆積石」は、不揃いな堆積物となる。運搬作用が長く、あるいは強く作用した堆積場では、淘汰のよい堆積物が供給されることになる。

運搬作用では、溶存や運動様式が淘汰の主な要因となっている。

4 堆積作用

堆積岩をつくる作用全体 (広義の堆積作用) も、ものがたまる時の作用も (狭義の堆積作用)、堆積作用と呼ぶが、ここでは狭義の堆積作用を扱う。堆積作用の物理的過程でできたものを碎屑性堆積岩と呼び、化学的過程でできたものを化学的堆積物、生物の遺骸が堆積してできた生物源堆積物という。浸食作用で生物学的作用という似た名称の過程があったが、内容は違ったものとなる。

堆積作用が主として起こるところを、堆積場あるいは堆積盆という。陸域では、湖沼や河川、砂漠などが堆積場となるが、碎屑性堆積物の堆積場は海域が多い (小出, 2012; 2013a)。後背地を構成している岩石のうち、侵食、運搬作用の過程で淘汰を受け、堆積場にもたらされたものだけが堆積岩となる。堆積場は、周辺の地質の変化に応じて、環境が変化していく。たとえば、水深が浅くなったり、深くなったり、あるいは河川の流路や海流の変化があれば、堆積場への堆積物の供給量や種類に変化が起こる。

堆積作用において働く水や空気などの流体は、粘性を持っているので、粘性流体として働く。粘性流体はレイノルズ数によってその特徴が示され、流体の運動はナビエーストックス方程式で記述される。物質が流体中を沈降するときは、同じ条件なら粒径の大きいものが速く沈降することになる。その結果、粒子は大きいものから小さいものへと堆積していく。このように粒度の違いで並ぶ堆積を級化という。多くの碎屑性堆積物でみられる特徴となっている (小出, 2014)。

乾燥環境の水域では、沈殿や蒸発などの化学的作用が起こる堆積場となる。蒸発や沈殿による岩塩やトラバーチンなどが、典型的な例となる。

生物源の物質は化石として堆積物の中に混在するが、運搬作用によって他地域から運ばれてきたもの (異地性) と、堆積場に住み死骸がそのまま堆積物として堆積するもの (現地性) もある。その違いは堆積物や化石の産状から認定可能である。

生物の活動により、堆積場の表面である海底で生物が這いまわったり、穴を掘ったりして、その痕跡が残ることがある。堆積物のすでにできている構造を、生物によって擾乱させることがある (小出, 2013a)。

深海底では、碎屑性の堆積物の供給が極端に少ないため、もともと微量しか堆積しないプランクトンの遺骸だけで、地層が形成される。層状チャートが典型的な例となる。また、熱帯地域の

海岸線、海山や海洋島の周囲には、サンゴなどの造礁性の生物が、大規模な岩体を形成していることがある。これらの生物遺骸は、石灰岩の起源となっている。層状チャートや造礁性石灰岩は、付加作用で陸域にもたらされることもあり、島弧の付加体の構成物としてよく見られるものとなっている（小出, 2012）。

堆積作用では、物理的作用や化学的作用、生物学的作用により、特徴のある堆積岩が形成され、それぞれの作用の程度、組み合わせにより岩石の多様性が生まれていく。

5 続成作用

堆積場で、堆積物が上に累重し続け、時間が経過していくと、未固結の堆積物から固結した堆積岩へと変化していく。このような変化を、続成作用と呼ぶ。

続成作用は、堆積物の自重の圧密によって粒子間の間隙が減少し、隙間に存在する流体（間隙水）が徐々に抜けていく。そのとき粒子の再配列も起こしながら、粒子の粒間が減っていく。このような作用を、物理的続成作用と呼ぶ。粒子が詰まった状態から結晶が固まると岩石となる。地層の累重によって埋没深度が深くなると、物理的続成作用により粒子相互の接触面積が増えたり、接触部の応力が上昇したりする。

間隙水や移動する流水に溶存している成分（炭酸カルシウムや二酸化ケイ素など）が、粒子間に結晶化していくことで、岩石が固結する。その結果、膠結、再結晶、交代、自生などの化学的続成作用が起こる。化学的続成作用は、何万年もの長い時間をかけて起こり、岩石の固化が進むことになる。長期間地下深部にあったものほど固い岩石になっていく傾向がある。

埋没深度が深くなり、地温が上がっていくと、再結晶が進むようになり、続成作用は、やがて変成作用に移行する。ただし、続成作用と変成作用の境界は明瞭ではない（小出, 2013b）。

続成作用は、初期に物理的作用が起こり、その後長期にわたって化学的作用が起こる。その結果、岩石としての固結に至る。この過程では、堆積物が固化する作用であり、物性の多少の変化はあるが、堆積岩の多様性を変化させることはない。

V 変成岩にかかわる要因

変成岩は、固体が新たな条件で、別の固体に変わったものである。変成岩の素材となる固体は、既存の岩石で、原岩と呼ばれる。変成作用とは、原岩が温度や圧力などの新たな物理化学的条件（変成条件）にもたらされて、既存の鉱物類が変成鉱物になり、既存の岩石組織の上に変成組織ができたものである。変成岩で重要な素過程は、固相反応による再結晶が起こることである。その素過程にかかわる要因として、原岩の多様性、累進変成作用、後退変成作用が挙げられる。以下で順にみていく（図4）。

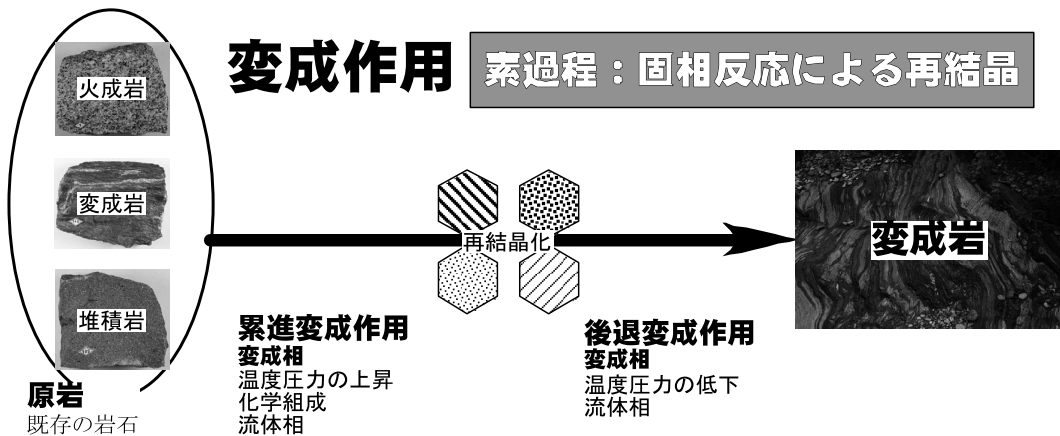


図4 変成作用における多様性形成の要因

変成作用における多様性形成の素過程は、固相反応による再結晶となる。その素過程に働いている原岩、累進変成作用、後退変成作用ごとに、関与していると考えられる要因をまとめたもの。

1 原岩

同じ変成条件でも、原岩の組成が違っていれば、鉱物組み合わせも異なってくる。ただし、変成作用の再結晶作用は、固相反応として局所的に起こるものなので、必ずしも全岩化学組成に敏感ではない。

原岩の岩質は、砂質、泥質、石灰質、塩基性、酸性などと、大雑把に区分されている。砂質とは石英や長石を多く含む砂岩（アルコース砂岩に分類される）のことで、泥質とは砂より細粒の粒子と粘土鉱物など泥質物質が多い泥岩（ワッケ砂岩も含まれる）、石灰質とは石灰岩のような炭酸カルシウムを主とする岩石、塩基性とは玄武岩質（斑レイ岩質）の火成岩（火山岩であることが多い）や火山砕屑岩、酸性とは花崗岩質（デイサイト質流紋岩質）の火成岩もしくは火山砕屑岩のことである。

マントルも、変成作用の対象となりうる。マントルの岩石は、長期間、高温高压条件にあったため、すべて再結晶しており、一種の変成岩と見なすこともできる。原岩は、地殻を構成していた岩石を対象として、それが変成場にもたらされることによって、再結晶したものとなる。したがって、マントルの岩石は、変成岩として扱わないことにされている。

変成岩の多様性における原岩は、敏感ではないが、固相反応の環境として重要な役割がある。

2 累進変成作用

変成作用が起こる条件は、加圧や加熱などの変成時の物理的条件、酸素分圧や流体相のpH、Ehなどの化学的条件のことで、変成鉱物の形成の要因となる。特に、温度と圧力が、重要となる。

変成作用においては、岩石が溶けることなく、鉱物間の固相反応によって、新しい平衡状態に移る。変成岩では、すべてが変成鉱物になっているとは限らず、原岩の鉱物が残存することもある。そのため、変成作用の程度によっては、原岩の組織や化学組成などの特徴を強く残すこともある。

累進変成作用とは、変成作用が進んでいく時に起こるもので、温度圧力が上昇していく。原岩は、変成岩になる前には低温低圧にあったが、変成作用の場に移り、徐々に温度や圧力が上がっていく。そのプロセスがゆっくり（固相反応が起こるほど）であれば、原岩はその時々の変成条件に平衡な変成岩になっていく。最終的に、最高の変成条件に達することになる。このような昇温昇圧の両方、あるいはどちらか一方が起こった変成作用を、累進変成作用と呼んでいる。

固相反応は、ある変成条件で生ずる鉱物が、一つまたは複数の鉱物の化学反応で表されることを意味する。代表的な化学反応、つまり普遍的にみられる変成鉱物を選んで区分することができる。固相反応は温度と圧力に依存したものであるので、熱力学的な計算によって、温度圧力を定量的に見積もることができ、変成条件を限定することが可能となる。変成鉱物に基づいた温度圧力条件の範囲を、変成相と呼んでいる。累進変成作用では、変成相の解析により、変成条件の変化を把握していくことになる。

泥質の全岩組成を持つ岩石では、アルミニウムと珪酸の成分が多いため珪酸アルミニウム（ Al_2SiO_5 ）の鉱物が形成される。その結晶は、温度と圧力によって、同じ組成であるが、結晶構造が変わるという特性をもっている。紅柱石、藍晶石と珪線石の3つの鉱物で、低压側では紅柱石、高压側では藍晶石、高温側では珪線石に変わる。このような鉱物の出現や消滅は、変成条件を考える上での目安にできる。

同じ原岩であっても、変成作用の条件によって、形成される変成相が変わってくる。広域的に見た時、最高変成度の違いが地表に現れることで、変成相の違いとして認識することができる。

変成作用では、含水鉱物を形成する反応が一般的である。変成条件が高温高压の条件になっていくと、含水鉱物がなくなり、脱水反応となっていく。再結晶作用には、流体（通常は H_2O ）が関与していることになる。変成岩の中で普遍的にみられる脈は、流体相の通り道に析出した結晶が残ったものである。変成岩となった後の化学組成の分析しか行えないため、流体相の成分や挙動の実態は正確には把握できていない。

変成岩の多様性において変成相が重要な概念となり、累進変成作用の温度圧力の上昇、化学組成、流体相、変成鉱物の形成が、変成相の構成の要因となっている。

3 後退変成作用

累進変成作用によって最高変成度に達した岩石は、その場にとどまれば、平衡に達するまで変成鉱物の形成が進む。地上で観察される変成岩は、常温常圧の条件になっている。地表の変成岩は、最高変成度から開放されて、温度や圧力が下がり、常温常圧の条件へと移行していく。このような変成条件の降下を、後退変成作用と呼ぶ。ただし、後退変成作用は判別しづらいことも多い。

後退変成作用と累進変成作用と似た経路をたどると、変成鉱物、あるいは変成相が同じものになり、見分けにくくなっていく。さらに、高温高压の条件で形成された変成鉱物が、安定な場合、後退変成作用を受けにくいこともある。後退変成作用において温度圧力が低下するとき、形成される鉱物は含水鉱物となり、流体が関与する条件がなければ起こりにくい反応となるからである。

温度圧力を考えると、変成岩が変成条件に向かう経路と、最高変成度からの降下経路は、同じではないことが多い。これは、原岩が変成場に移動するテクトニクスと、変成岩が地表に持ち上げられるテクトニクスが違っていることによる。その結果、形成される変成鉱物が異なってくる。

原岩から変成場、そして地表へと変成岩がたどった経路を、温度圧力のグラフで示したものを、変成経路という。そこには時間経過も含まれているため、変成履歴ということもできる。いくつもの岩体で、後退変成作用による変成鉱物が形成されていることが、明らかにされてくるようになった（例えば、Komatsu et al., 1989）。

後退変成作用は、最高変成度に達した変成岩が再度再結晶をおこなうことで、温度圧力の低下や流体相の関与が重要な要因となる。

VI 成因からみる多様性の発展過程

多様性と成因や要因との関係を整理し、多様性と時間変化のスケール、岩石の多様性の誕生、そして多様性の発展過程をみていく。

1 成因による多様性形成

火成岩、堆積岩、変成岩の3つの成因には、火成作用、堆積作用（広義）、変成作用での素過程がある。それぞれの素過程には、関係するいくつかの過程や作用があり、過程・作用はいくつかの要因や条件によって支配されていた。要因・条件ごとに、岩石の多様性形成にかかわる程度や働きには違いがある。その全容をまとめていく。

火成作用では、溶融状態を経由することが、素過程の特徴となる。火成作用の素過程では、起源物質、マグマの形成、マグマ溜まり、マグマの固結での作用が、多様性形成に関与している。

起源物質としての地殻下部の岩石は多様性が大きく、マンツルのカンラン岩は比較的一定で多様性は小さい。マグマが地殻下部で形成される場合は、起源物質の寄与は大きいと考えられる。マグマの形成過程では、溶融条件、溶融様式、溶融程度が、マグマの組成に大きな多様性を与える要因になる。マグマ溜まりの作用としては、マグマ混合、マグマ汚染、結晶化が、火成岩の多様性を広げる要因として働いている。マグマの固結では、固化条件、結晶化や気相液相分離が、岩石の多様化を大きく左右する。

堆積作用にかかわる素過程は、水の関与のもとで、離脱、移動、再構成の過程を経ることである。堆積作用の素過程では、後背地の原岩、浸食作用、運搬作用、堆積作用、続成作用が、重要

となる。

原岩の多様性は、堆積岩の多様性に反映されるが、後背地の浸食作用の程度によって大きく左右される。運搬作用では、淘汰が起こり、淘汰の程度は溶存や運動様式が主な要因として決定される。堆積作用では、物理的、化学的、および生物学的作用の程度、組み合わせにより、岩石の多様性が生まれる。続成作用は、堆積岩の多様性を変化させることはない。

変成作用の素過程は、固相反応による再結晶が起こることが特徴となる。変成作用の素過程にかかわる要因として、原岩の多様性、累進変成作用、後退変成作用が挙げられる。

変成岩は、原岩組成には敏感ではないが、固相反応の化学的環境規制としての役割がある。変成岩の多様性では、変成相が重要となる。変成相は、累進変成作用の温度圧力の上昇、化学組成、流体相の関与が、後退変成作用の温度圧力などの低下や流体相の関与が重要な要因となる。

各要因はほとんど定量化されてはいないが、多様性に関与する程度は把握されてきた。次に、岩石の多様性が、時間とともにどのような変化してきたかをみていく。

2 多様性と時間変化のスケール：斉一説の破れ

堆積岩は、地球表層で形成されるので、表層環境の変化が記録されやすい岩石である。堆積岩に形成年代が与えられると、環境の時間変遷の記録とすることが可能になる。

堆積岩の中の化石は、その典型的な例となる。ある時代に限定して産する示準化石と、限られた環境指標に利用できる示相化石を組み合わせ、年代区分に基づいて環境変化を読み取ることができる。さらに放射性核種による絶対年代や化学組成との組み合わせにより、定量的な環境変化を調べることが可能になってきた。

短い時間スケールでの変化は、要因における条件変化に還元できる。同じ条件（環境）が出現すれば、同じもの（生物）が形成される。示相化石は、まさにその応用といえる。火成作用、堆積作用、変成作用における多くの要因も同様である。

このような考えは、斉一的なものである。本来であれば、前提や条件が同じときある結果が生じるはずなのに、結果（岩石、化石）があるのでこのような条件（要因）であったと考えている。因果関係の論理が逆転している。本来であれば、慎重に検討すべきことであるが、その因果関係が成立していないことを示すのは、過去の事象では困難である。実際に、万年オーダーの短い時間変化では、斉一説への反証はみつかっていない。

一方、億年オーダーの長い時間スケールでは、時間変化が見つかっている。これは、斉一説の破れが見つかったことになる。前提や要因が、現在知られているものとは違っていたことを示すことになる。

限られた時代だけに産出するストロマトライト（化石の一種）や、縞状鉄鉱層、堆積性ウラン鉱床、赤色砂岩などの堆積岩である。これらの岩石は、地球表層の大きな環境変化を記録しているのだが、ある時代固有の不可逆的な環境変化が起こったことを意味している。地球史を考える

上で重要な視点となる。時間遷移による岩石の多様性が、不可逆的に変化したと見なすことができる。

碎屑性堆積岩は、大陸縁や島弧の既存の岩石から由来している。堆積岩からは、共融の効果により、大量の花崗岩質マグマが形成される。花崗岩は大陸地殻の主要岩石となっているので、大陸地殻形成のメカニズムでもある。これらの変遷は、島弧や大陸縁から大陸地殻の形成、あるいは再構成のプロセスとみなせる。もし花崗岩に時間的な変化があると、それは大陸の多様化において、斉一説を破る変化が起こったことになる。

太古代から原生代にかけてだけに産するアノーソサイトがある。アノーソサイトは特異な花崗岩で、大陸形成に大きな変化があったことになる。アノーソサイトのマグマ形成の条件として、高温のマントルから形成されたとされている。太古代から原生代にかけてのマントルは、今よりもかなり高温であったことになる。同様の結果は、太古代に特徴的に産するコマチアイトでも示されている。太古代が最も高温で、原生代には温度が少しさがり、顕生代には現在のマグマ形成がおこるようなマントル条件になったと考えられる。マントルは、あるいは地球内部は、かつては高温で、時間経過とともに冷却していることになる。マグマ形成の場としてマントルの環境が、時代によって変わってきていることを示している。

世界各地の沈み込み帯で形成される変成岩には、ある時代を境に、それまでなかった含水鉱物が出現することが知れている。沈み込み帯という変成場で、それまで存在できなかった含水鉱物が、ある時から存在できる条件に変化した（片山ほか, 2003）。沈み込み帯の変成作用の場が、温度低下してきたことを意味する。ここからも、地球の冷却過程が読み取れ、地球の不可逆な温度変化となる。

地球の環境変化や温度低下には、不可逆なものがあり、それらの変化の前後では、多様性にかかわるいくつかの要因が変化したことになる。特に古い岩石（太古代から原生代）については、斉一的な考えの適用には注意が必要になる。今後、それぞれの時代固有の岩石の研究から、変動の定量化、物理条件の限定などがなされていくであろう。

3 岩石の多様性の誕生

すべての岩石は、既存の岩石からスタートして、成因に応じた素過程を通じて形成される。既存の岩石とは、火成岩、堆積岩および変成岩である。では、それらの既存の岩石はどのような成因によってできたのか。これを繰り返し問い続けると、どの成因が最も根本的、初源的なのか、という疑問になる。

初期地球にまで遡れば、この疑問に答えを出すことができる（図5）。地球は、材料物質である隕石が、衝突、合体して形成された。形成直後の地球は、隕石の混合物であったはずである。その後、衝突時の重力エネルギーの開放により、地球表層は加熱され、表層部が溶けてマグマオーシャンが形成された（小出, 1999）。

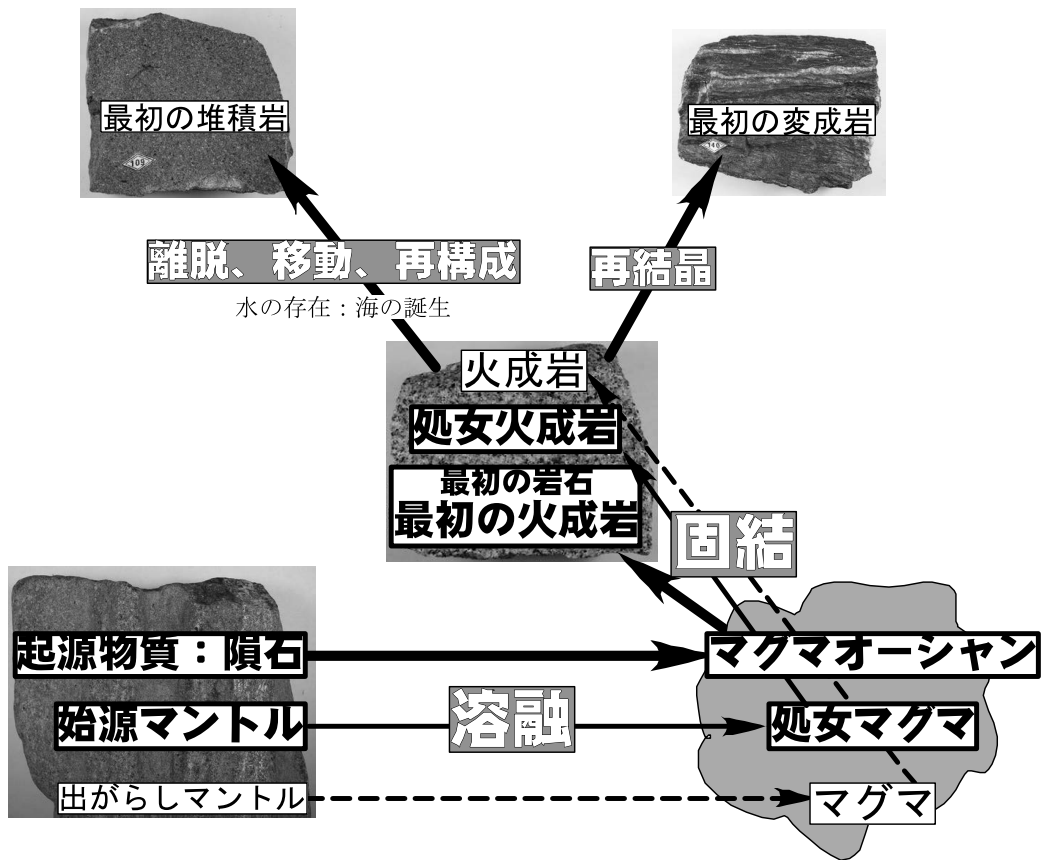


図5 最初の岩石と成因の関係

地球で最初に生成される岩石で、どのような作用が働き、どのような成因の岩石ができるかを模式的に示したものの。火成岩が地球の岩石では最初の岩石の成因と考えられる。その後、変成岩が、続いて水が形成されてから堆積岩が形成される。

その後隕石の衝突がおさまると、重力エネルギーの供給がなくなり、地表は冷却してくる。地球の最初の固相として地面ができる。この固相は、形成後、地球固有の素過程によってできた「最初の岩石」となる。

「最初の岩石」は、起源物質とマグマの形成過程において、通常の岩石とは違っている。マグマオーシャンの起源物質は、隕石で地球固有の既存の岩石ではない。だが、成因の素過程だけに注目するなら、マグマオーシャンから形成された「最初の岩石」は、高温の溶融過程を経ているので「最初の火成岩」と定義できる。

マグマオーシャン形成の熱源は、地球外からの隕石衝突で供給されたエネルギーや、その熱を逃がさない厚い大気の温室効果である。地球内部のエネルギーやプレートテクトニクスなどの作用によって、マグマオーシャンができたわけではない。マグマ形成過程においても、「最初の火成岩」は、通常の火成岩とは異なっていることになる。

現在の火成作用の熱源は、地球内部のエネルギーである。その源は、放射性元素の壊変エネルギーと地球初期に蓄えられた重力エネルギー、核での液体鉄から金属鉄が形成されるときに潜熱の放出になる。放射性元素の壊変エネルギーは地球の材料物質に由来しているものであるが、それ以外は、地球形成時の重力エネルギーとみなせる。地球初期に与えられたエネルギーが、今もマントル対流などを通じて地球表層に放出されている。プレートテクトニクスも、その現れである。したがって、現在のマグマ形成のエネルギー源も、遡れば地球形成時にもたらされたエネルギーに由来することになる。「最初の火成岩」も火成岩の一連の素過程と考えていいのかもしれない。

マグマオーシャンが固まった後、表層の地殻とその下にマントルができる。マントル内部には、マグマオーシャンに関与していない、隕石に似た成分である「始源マントル」が、固相として存在していたと考えられている。ここでいう始源マントルとは、隕石から変化していないものである。始源マントルは、現在でも地球のマントルには、残っていると考えられているが、その分布や産状、量などは、明らかではない。

始源マントルが地球内部の熱や作用によって溶けた時、地球固有の「処女マグマ」ができる。固化すれば「処女火成岩」となる。「処女火成岩」は、「最初の火成岩」とは違って、本論で論じた素過程にかかわる、すべての作用や要因によって由来したものとなる。

一度マグマを出したマントルは「出がらしマントル」となる。「出がらしマントル」であっても、一部の成分は抜けているが、溶けてない部分は始源マントルの名残となる。

ここで述べた初期の火成岩は、想定されるいくつかのプロセスからの理論上の岩石である。想定される地球最初の岩石は、素過程から考えると、火成岩の一種となる。したがって、既存の岩石のおおもとは、火成岩にたどり着くことになる。ただし、このような理論上の火成岩に対応するものは見つからない。

「最初の変成岩」は、冷えた原岩が高温高压になり固相反応で形成されるため、原岩は火成岩となる。堆積岩は既存の岩石が破碎され堆積したもので、「最初の堆積岩」ができるためには、水が存在しなければならない。堆積岩は、他の火成岩や変成岩よりは、後発となる。水が存在していた時期については諸説あるが、最古の碎屑性堆積岩は38億年前のものである。その時代には、既存の岩石として利用できる火成岩も変成岩も存在していた。

素過程でとらえると、変成岩も初源的な岩石となりうる。「始源マントル」は、隕石由来で溶けたことがないのもであっても、地球深部の温度圧力条件に長期間おかれている。その条件で固相反応をして、平衡な鉱物組み合わせに再結晶しているはずである。変成岩の素過程を満たしている。変成岩としてマントルの岩石をとらえることも可能である。現在のマントルは、隕石から組成変化していき、いまいが、地球固有の変成岩に再結晶しているとみなせる。となれば、変成岩が、地球の最初の既存の岩石に加えられることになる。このような観点については、今後の検討が必要である。

4 多様性形成の弁証法的発展

変成岩は、化学的には大きく改変されことなく、形成条件に見合った変成鉱物ができることによって多様性ができる。これは、変成岩の構成物の多様性は生じるが、既存の岩石として多様性を広げることにはならない。マンツルのカンラン岩が変成岩とみなせるとしたが、既存の岩石としての多様性を広げるわけではない。

堆積岩は、水による再構成があり、時に化学組成も大きく変える。素過程も複雑で多様性を生じる要因も多い。化学的過程は、溶解過程があり火成岩と同じように弁証法的発展を取りうるが、その量と多様性は火成岩に及ばない。水が存在できる地球表層だけで生じる素過程によるためである。

弁証法とは、ヘーゲルによって包括的に定式化されたものである。その概要は、ある命題（正、Thesis（英語）、These（独語））と、それと矛盾もしくは否定する命題（反、antithesis、Antithese）、そしてそれらを本質的に統合した命題（合、synthesis、Synthese）の3つによって構成されている。全てのものは、内部に矛盾を含んでいるため、必然的に対立が生じる。新旧の命題は対立し合う（優劣関係はない）が、その対立によって結びつくことになる。反から合へ止揚（揚棄、sublation、Aufheben）されるが、「否定の否定」になり二重否定の構造をもち、肯定となり正と同等に見えるが、発展した違った命題と考えられる。弁証法は、命題の発展過程を示している。ヘーゲルは、弁証法を世界全体をつらぬく一般法則として示した。

碎屑性堆積岩と変成岩は、弁証法的な発展過程ではなく、一部を変更する正から合、あるいは合が新たな正へという反を経ない移行だけで進んでいるようにみえる。つまり、堆積岩と変成岩

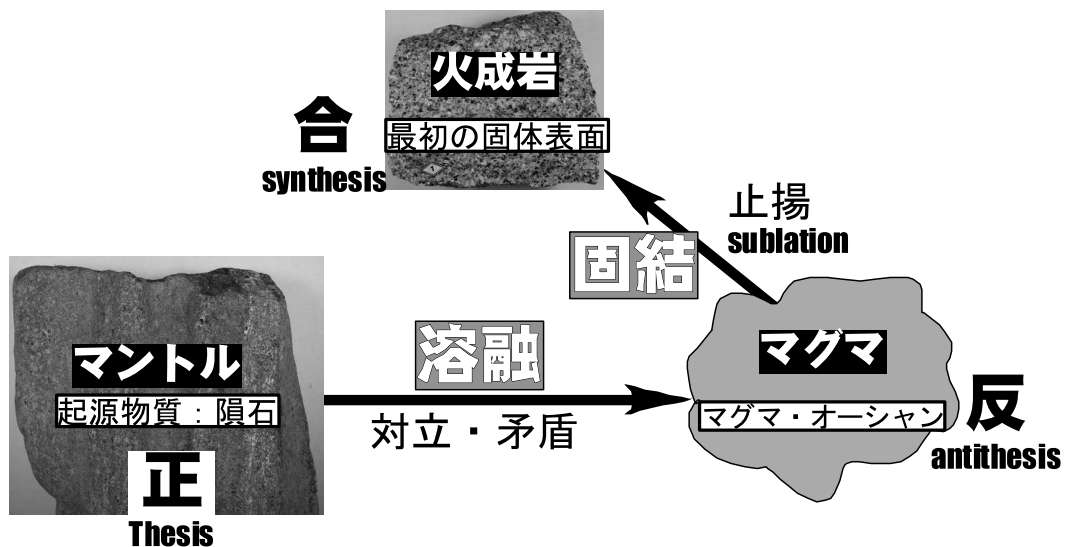


図6 火成岩の弁証法的視点

火成岩が地球においては、多様性を大きくする根源的要因である。火成岩の多様性形成のメカニズムは、弁証法的発展をしているとみなせる。

は、火成岩のように、大きな展開を生む過程が組み込まれていないことになる。

火成岩は、地球の多様性形成に重要な役割を果たしていると考えられる。火成岩は、既存の岩石からマグマという段階をへて形成される。地球のマントルも地殻も、固体が常態である。マグマは、地球においては特別な状態だといえる。岩石とマグマとは、まったく属性も相も違った物性を持つものである。ただし、マグマは、地球の営みにおける必然性に導かれて形成されたものである。

ある定常的な条件で存在する岩石があるとする。新たに発生した条件で岩石として存在できなくなると、マグマが形成され、上昇して固結する。その火成岩が起源物質として、別の時代、別の条件で、新たな火成作用が起こる。

このような火成作用の連鎖は、次のような抽象化ができる。今まで成立していた命題（既存の岩石）が、新たな条件では成立しなくなり、新たな条件に合うように相反する命題（マグマ）が形成される。その後、次なる常態的条件に移り、統合された新たな命題（火成岩）が形成される。これは一種の弁証法の形式とみなせる。弁証法的過程が、地球の岩石構成には組み込まれていると考えられる（図6）。

火成岩は、地球の弁証法的発展ととらえることができる。合が既存の岩石となり、条件変更が起こると合が正になり、冷却により反が生まれることになる。弁証法的過程が繰り返されれば、多様な火成岩が形成されていくことになる。繰り返しの過程には、時間的発展の仕組みも内在されていることになる。

VII さいごに

岩石の多様性の形成についてみてきた。岩石の多様性の範囲を理解するために、成因が重要となる。岩石の成因には、火成岩と変成岩、堆積岩の3つがあり、火成岩では固体が溶融し液体になり固化する、堆積岩では固体が離脱移動し再構成される、変成岩では固体が別の固体に再結晶するという素過程があった。素過程ごとにいくつかの作用があり、作用ごとに関与する要因により、多様性が形成されている。それぞれの要因では、条件によって多様性は変化してくる。このような要因は、定性的には理解されてきた。

長い時間スケールでの変化として、地球内部の冷却過程や地球の表層環境の変遷によるものなど、地球の歴史的な変化を反映した多様性もある。長い時間における多様性の変化は、地球の不可逆な進化を示している。これらは、地球を斉一的にとらえる危険性を示唆している。

初期地球では、地球マグマオーシャンから最初の火成岩の固化、始原マントルからの処女マグマ、処女火成岩の形成、出がらしマントルからのマグマなど、いろいろな火成岩がある。多様性の発生を考えると、もっとも初源的なものとして火成岩から始まったことになる。もっとも根源的な火成岩は、岩石の改変を起こす弁証法的な発展過程をしていることがわかる。

今後、岩石の多様性の形成メカニズムは、要因の定量化、そして長い時間経過に伴う条件の不可逆的变化の詳細を理解していく必要がある。

文 献

- Bowring, S. A. and Williams, I. S., 1999. Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogenesis from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134, 3-16.
- Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988. *Basic of Physical Stratigraphy and Sedimentology*. John Wiley & Sons, 原田憲一訳, 1999. 『層状学と堆積学の基礎』愛智出版 386 p.
- Green, D. H. and Ringwood, A. E., 1967. The genesis of basaltic magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 15, 2, 103-190.
- Hirose, K. and Kushiro, I., 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressures: determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. *Earth and Planetary Science Letters*, 114, 4, 477-489.
- IUGS, 1973. Plutonic rocks, classification and subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geotimes*, Oct., 1973, 26-30.
- 片山郁夫, 中嶋悟, 丸山茂徳, 2003. 「超高压変成岩から読み取る沈み込み帯深部での水の存在」『月刊地球』25, 262-265.
- 小出良幸, 1995. 「総説: 隕石－地球の材料物質としての隕石－」『神奈川県立博物館研究報告(自然科学)』24, 9-38.
- 小出良幸・山下浩之, 1996. 「地球初期への惑星物理的束縛条件」『神奈川県立博物館研究報告(自然科学)』25, 1-26.
- 小出良幸, 1999. 「冥王代の地質学的素描」『神奈川県立博物館研究報告(自然科学)』28, 1-22.
- 小出良幸, 2010. 「地層の多様性と地球環境」『札幌学院大学人文学会紀要』88, 1-22.
- 小出良幸, 2011. 「自然分類と人為分類について－生物種と鉱物種を例にして－」『札幌学院大学人文学会紀要』90, 23-45.
- 小出良幸, 2012. 「島弧－海溝系における付加体の地質学的位置づけと構成について」『札幌学院大学人文学会紀要』92, 1-23.
- 小出良幸, 2013a. 「島弧における付加体の形成と擾乱について」『札幌学院大学人文学会紀要』93, 37-58.
- 小出良幸, 2013b. 「岩石の自然分類の可能性について」『札幌学院大学人文学会紀要』94, 1-27.
- 小出良幸, 2014. 「地層に記録されている時間について－タービダイト層の場合－」『札幌学院大学人文学会紀要』95, 25-52.
- Komatsu, M., Osanai, Y., Toyoshima and T., Miyashita, S., 1989. Evolution of the Hidaka metamorphic belt, northern Japan. *Jour. Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 43, 487-493.
- 熊澤峰夫, 伊藤孝士, 吉田茂生編, 2002. 『全地球解説』東京大学出版 540p.
- 久城育夫, 1998. 「火成岩」『世界大百科事典CD-ROM版』平凡社.
- 久城育夫, 1998. 「マグマ」『世界大百科事典CD-ROM版』平凡社.
- 丸山茂徳・磯崎行雄, 1992. 「初期地球のテクトニクス－地球史研究の戦略と展望」『科学』62(3), 175-184.
- 丸山茂徳・磯崎行雄, 1998. 「生命と地球の歴史」岩波新書 543, 275 p.
- 湊秀雄, 1998. 「鉱物」『世界大百科事典CD-ROM版』平凡社.
- 都城秋徳・久城育夫, 1972. 「岩石学I 光顕微鏡と造岩鉱物」共立全書189. 共立出版 219 p.
- 都城秋徳・久城育夫, 1975. 「岩石学II 岩石の性質と分類」共立全書205. 共立出版 186 p.
- 都城秋徳・久城育夫, 1977. 「岩石学III 岩石の成因」共立全書214. 共立出版 245 p.
- 岡田博有, 1968. 「砂岩の分類と命名」『地質学雑誌』74, 371-384.
- 岡田博有, 1998. 「堆積作用」『世界大百科事典CD-ROM版』平凡社.
- Osborn, E. F., 1942. The system CaSiO_3 -diopside-anorthite. *American Journal of Science*, 240, 11, 751-788.
- Patterson, C. C., Tilton, G. R. and Inghram, M. G., 1955. Age of the Earth. *Science*, 12, 1, 69-75.

- 酒井理紗, 久城育夫, 永原裕子, 小澤一仁, 橘省吾, 2010. 「月地殻形成条件を用いたマグマオーシャン化学組成制約への試み」『日本惑星科学会誌』19, 2, 82-88.
- 柵山雅則, 小屋口剛博, 1982. 「一ノ目湯火山噴出物におけるマグマの混合」『日本火山学会 1982年春季大会講演要旨』27, 2
- 高橋栄一, 1996. 「地球惑星科学入門」『岩波講座 地球惑星科学』岩波書店, 111-157.
- 鳥海光弘, 1998. 「変成岩」『世界大百科事典CD-ROM版』平凡社.
- Tuttle, O. F. and Bowen, N. L., 1958. Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Geological Society of America Memoirs, 74, 1-146.
- Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H. and Graham, C. M., 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature, 409, 175-178.

The Factors in Formation of Rock Diversity and their Dialectical Significance

KOIDE Yoshiyuki

Abstract

The Factors of chemical variety, formation age, and the origin are important for making the rock diversity. There are the three origins of igneous, sedimentary, and metamorphic in rocks. In an elementary process of igneous rocks, solid (rock) turns into liquid (magma), and solidify (rock). In sedimentary rocks, solid (rock) breaks and moves as fragments, solute, reconstruct to rock. In metamorphic rocks, solid (rock) recrystallizes to rock. There are some functions for every elementary process, and some factors involving for every function. The functions and factors form the rock variety.

The rock diversity reflected the change with long time scales, such as a cooling process of the Earth and modification of the surface environment of the Earth. Mode change of the rock diversity is recording an irreversible change of the Earth. The first solids in the early Earth were made from igneous rocks which formed by the different processes from magmatism. An igneous process is the principle of origin. The igneous process developing dialectical causes the large diversity of rock.

Keywords: rock diversity, origin, igneous rock, sedimentary rock, metamorphic rock, elementary process, dialectical development

（こいで よしゆき 札幌学院大学人文学部教授 こども発達学科）