

鉱物 流体系のパターン形成

Pattern formation in a mineral - fluid system

西山 忠男[1]

Tadao Nishiyama[1]

[1] 熊本・理・地球科学

[1] Earth Sci., Kumamoto Univ.

本講演では、岩石に見られる様々な構造のうち、とくに周期構造を有する非平衡組織に注目し、鉱物 流体系のパターン形成の問題として捉える。

1. なぜ非平衡組織か？

岩石にはマグマからの結晶作用によって形成されるもの（火成岩）既存の岩石が高温高压の条件下で化学反応を起こして形成されるもの（変成岩）水の作用で砂などの粒子が堆積したり鉱物が化学的に沈殿して形成されるもの（堆積岩）などがある。この他熱水が岩石の割れ目を流動したり岩石中に浸透することで鉱物の溶解沈殿を引き起こす作用（熱水変質作用）もある。このようなプロセスは本質的に不可逆過程であり、その過程が凍結された非平衡組織は岩石中で起こる結晶作用、化学反応そして熱輸送・物質移動に関する豊富な情報を含んでいる。

2. 鉱物 流体系とは何か

岩石の形成過程は多くの場合鉱物と流体との相互作用と見ることができる。たとえば火成作用ではマグマからの鉱物の結晶作用、マグマと鉱物の間の熱輸送・物質移動、マグマの移流や結晶の沈降などによるマグマと鉱物の物理的分離などの相互作用が重要な役割を演ずる。そしてこれらのマグマと鉱物の相互作用が連結（coupling）することで多様な構造を生み出す。変成作用においても岩石中の化学反応によって放出された水やCO₂などの流体が粒間に存在し化学反応や物質移動を媒介すると考えられている。またそれらの流体の移動（浸透流や割れ目を通しての流動）は熱輸送・物質移動に重要な貢献をなす。そこで形成されつつある岩石を鉱物 流体系として定義し、鉱物と流体の相互作用を議論する。

3. なぜ周期構造か？

岩石には様々な構造が認められるが、その中で周期構造は、普遍的に認められる構造でありながら理解困難な現象として長年岩石学者を悩ませてきた。変成岩の縞状構造と火成岩の層状構造がその代表格である。この他、変成岩の反応帯や熱水変質岩などに見られるリーゼガングリング構造、熱水脈に発達する周期的沈殿構造、斜長石などに発達する波動累帯構造、そして火成岩に局所的に見られる櫛状層構造（comb layering）や球状花崗岩など周期構造の例は多い。近年、散逸構造や反応拡散系の理論の展開によって、これらの周期構造が非平衡条件下でのパターン形成の問題として注目を浴び始めている。

4. 既存の理論と鉱物 流体系固有の問題

鉱物 流体系のパターン形成は既存の理論の単なる応用問題ではない。たとえばBZ反応は反応拡散系におけるパターン形成の代表的なモデルであるが、この反応系における核となるメカニズムである自己触媒反応は無機系では稀である。さらにBZ反応は溶液中の反応であるが、岩石の場合、流体中の濃度パターンが溶解沈殿反応を媒介として鉱物として固定されるプロセスが必要となる。またマグマ系の周期構造の形成には熱輸送も重要な役割を担っていることが推測され、反応拡散系の理論の単純な応用で説明できるわけではない。

鉱物 流体系の周期構造を形成するには、何かしら物質が集まるメカニズム（自己触媒反応に代わるもの）が必要である。以下の議論では、鉱物に対して静止した流体系に限定して、いくつかの周期構造形成の具体的なモデルを述べる。

5. アップヒル拡散の重要性

多成分系の珪酸塩メルト中ではアップヒル拡散が普通に生じることが知られており、物質が集まるメカニズムとして注目される(Nishiyama, 1998)。一般の鉱物 流体系でもアップヒル拡散はいくつかの異なるメカニズムによって生じることが期待される。

(1) 局所平衡（ギブス デューエムの関係）によるアップヒル拡散

鉱物と流体が局所平衡にある場合は、流体中の成分の拡散に対して鉱物が安定であるためには、拡散流が鉱物に対するギブス デューエムの関係を満足する必要がある、この要請のためにアップヒル拡散が生じうる。変成岩の縞状構造はこのメカニズムによって説明され得る（Nishiyama, 1994）。

(2) 電気的中性条件によるアップヒル拡散

電解質溶液系では拡散流は電気的中性の条件を満足する必要がある。リーゼガングリング構造の形成は過飽和理論で説明されるのが一般的であるが、本講演では電気的中性の条件によるアップヒル拡散がリーゼガングリング構造の形成に重要な役割を果たしている可能性を指摘したい。

6. 火成層状構造の形成モデル

火成岩における層状構造の一例として、リーゼガングリング構造類似のスペース則を満たす事例（インドネ

シア・ピリピリ層状貫入岩体)を紹介する。この層状構造における個々の層はマグマの冷却過程において形成される mushy layer (結晶を多量に含むマグマの層) が固化したものと考えられる。mushy layer 中の組成分化は拡散律速型核形成成長によるものと考えられ、熱輸送よりも化学成分の拡散の方がより効率的に起こったことを示す。