

岩石の「模様」から地下の流体反応プロセスを解読する

東北大学大学院環境科学研究科 岡本 敦

マントルかんらん岩が流体（水や二酸化炭素）を吸収する蛇紋岩化作用や炭酸塩化作用は、グローバルな物質循環に影響をあたえる重要なプロセスである。しかし、これらの反応は体積膨張を伴うために、地下での反応進行メカニズムはよくわかっていない。その謎を解く鍵は、岩石にみられる不思議な網目状の模様（亀裂ネットワーク）にある。最新の組織形成の数値シミュレーションは、岩石の反応そのものが新たな「みずみち」となる亀裂を作り出し、さらなる反応を促進するというフィードバックを明らかにした。岩石の組織を再現することで地球のダイナミックな反応プロセスを理解する、という新しい方向性に期待したい。

岩石—流体の反応が作り出す奇妙な亀裂パターン

相平衡熱力学に基づいた固体地球物質科学の発展により、私たちは地球のコアまでどんな物質が存在しているのかを予測できるようになってきた。一方で、プレートの沈み込み境界や海洋底に存在した岩石を露頭や顕微鏡下で観察すると、多くの岩石は完全平衡には達しておらず、反応は破壊や変形を伴いながら不均質に進行していることに気づかされる。変成岩や変質岩の組織は複数のプロセスやステージを経験した複雑なものであり、研究者の間で延々と議論しても解釈が一致しない場合もしばしばある。しかし、岩石の反応プロセスが作り出す「模様」は、興味深い幾何学特徴を備えたものがあり、地球内部のダイナミックな現象の情報をもっている。本稿では、流体が関与する岩石の反応—破壊組織に注目し、その地球科学的な意味と、数値シミュレーションを使ってパターンからプロセスを読み解くおもしろさと可能性を考えてみたい。

マントルかんらん岩が水を吸収するプロセスを「蛇紋岩化作用」、二酸化炭素を吸収するプロセスを「炭酸塩化作用」という。これらの反応により揮発性物質である水や二酸化炭素がマントル岩石に固定され、ときには固体地球内部に沈み込む。このため、反応の実効的な速度は、固体地球と表層環境をつなぐグローバルな物質循環を考えるうえで非常に重要である。水や二酸化炭素を吸収する反応が継続的に進行するには、流体が岩石の未反応部分にまで供給される必要がある。しかし、流体を吸収すると、典型的には岩石は膨張する（密度が小さくなる）ために、反応が進むと「みずみち」が塞がって、結果として反応が止まってしまうことが予想される。しかし驚くべきことに、天然では蛇紋岩化作用や炭酸塩化作用が著しく進行したかんらん岩体がしばしば存在する。では、地下でどのように反応が進行するのだろうか？ この謎

を解く1つの鍵が、蛇紋岩化したかんらん岩（図1(a))や、炭酸塩化したかんらん岩や蛇紋岩（図1(b))に観察される奇妙な亀裂パターンにある。この亀裂ネットワークは、ポリゴンを作るように網目状に発達している。同じような亀裂は、顕微鏡下でも観察され、「メッシュ組織」と呼ばれる（図1(c))。もし、膨張反応によって破壊が起こって亀裂が生じ、新たな「みずみち」が形成されるのであれば、反応は止まらずに進行できそうである。

岩石の反応—破壊—流体流動のフィードバックとパターン形成

このような反応—破壊—流体流動が関与する複合現象を理解するために、離散要素法による数値モデルの開発が進められている。これはもともと粉体工学などで発展してきた計算法であるが、各要素をパネでつなぐことによって岩石を表現できる。2000年に初めて、反応による要素の体積変化を組み込んだモデルが提案され（Jamtveit *et al.*, 2000）、その後、脱水・吸水反応のカイネティクスや、流体流動や拡散による元素移動を組み込むなど改良が続けられている（Okamoto and Shimizu, 2015）。興味深いことに、反応の種類や条件によって、様々な亀裂パターンが形成されることがわかってきた。

例えば、プレートの沈み込みにより、海洋底で含水化した地殻やマントル岩石が脱水すると、固体体積の収縮が起こる。このような

反応を離散要素法によりモデル化すると、境界から水を放出しながら反応が進行し、反応フロントでは固体収縮によって細かい引張亀裂が生成し、流体が抜けることでさらに反応が進行することがわかる（図2(a); Okamoto and Shimizu, 2015）。このような正のフィードバックにより、反応は岩石内部に向かって均質に進行し、結果として、フラクタルツリーのような亀裂パターンが形成される。天然の変成岩には、プレートの沈み込み時の反応組織は残りにくいが、石膏や蛇紋岩の脱水実験によると、生成物に同様の細かい亀裂構造を形成することが報告されている。

これに対し、海洋底での蛇紋岩化作用などの、加水して膨張する反応では、流体と接した亀裂面が局所的に膨張することで、内部に亀裂面と直交する引張場が生じて、比較的大きな亀裂が生じる。そこに流体が浸透することで、次の亀裂がその直交方向にできる（図2(b))。この階層的な亀裂形成プロセスにより生じるパターンは、蛇紋岩や炭酸塩岩で見られる網目状模様と類似しており、体積膨張による破壊現象が、流体を岩体の内部にまで浸透させる本質的な役割を持っていることを示唆している。ただし、反応する岩体の周囲も体積膨張を許すように変形する必要があるために、メッシュ組織は、海洋底など地表近傍でよく観察されるが、沈み込み帯由来の蛇紋岩体ではあまり観察されない。さらに、同じ体積膨張反応であっても、反応速度と流体移動速度の「兼ね合い」によって反応—破壊様式は変化することがわかってきた。メッシュ組織を作り出すには、表面反応速度が粒界などを通るマトリックスの流体移動速度よりも非常に大きい必要があり、逆に流体移動速度が相対的に大きい場合は、反応は均質に進み、亀裂が形成しない（図3(a))。このようなモデルによる予測は、最近、室内実験でも

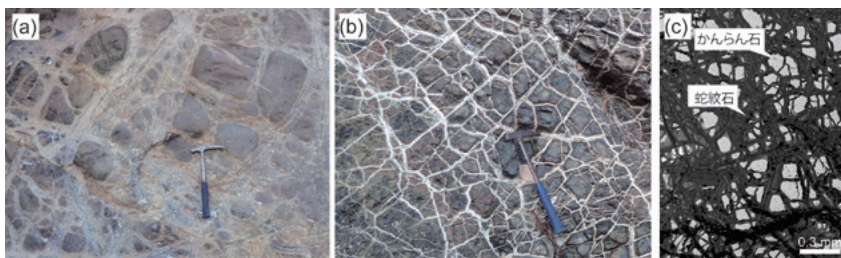
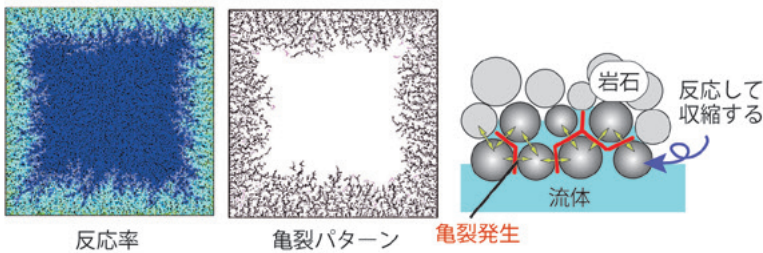


図1 流体反応に伴って形成される亀裂パターン。(a) 蛇紋岩化したマントルかんらん岩、(b) 炭酸塩脈の発達した蛇紋岩の露頭写真（オマーンオフィオライト、森下知晃氏提供、ハンマーの長さはおおよそ40 cm）。(c) 蛇紋岩のメッシュ組織の電子顕微鏡写真（嶺岡オフィオライト）。

(a) 脱水収縮反応



(b) 加水膨張反応

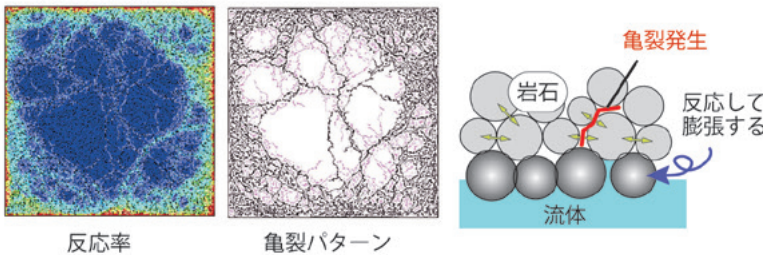


図2 離散要素法による(a)脱水収縮反応、(b)加水膨張反応によるパターン形成 (Okamoto and Shimizu, 2015 修正)。反応率(左)、亀裂パターン(中央)、亀裂形成の概念図(右)。モデルの1辺の長さは100 mm。

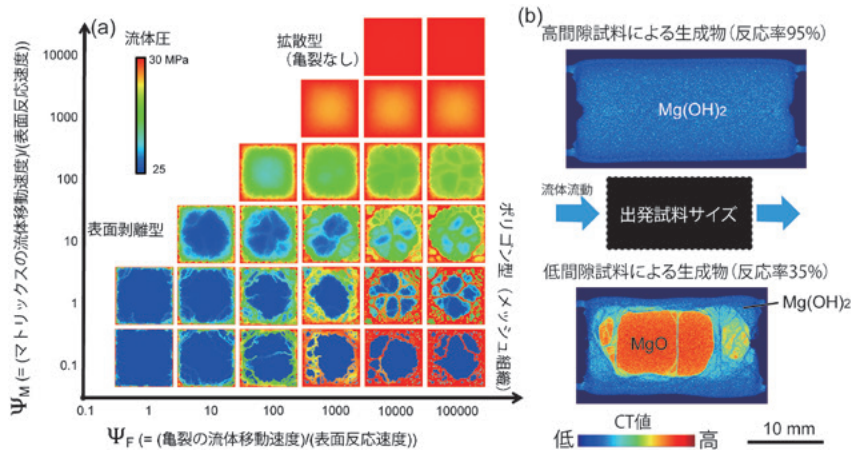


図3 流体移動速度と反応速度の兼ね合いによる亀裂パターンの変化。(a) 離散要素法による加水膨張反応のシミュレーション (Shimizu and Okamoto, 2016, *Contrib. Mineral. Petrol.*)。モデルの1辺の長さは5 mm であり、流体圧の高い部分ほど反応が進んでいる。(b) MgOの加水膨張反応—透水実験 (Uno et al. 2022, 一部修正)。初期の浸透率が低い場合では、反応中に亀裂が生成して、浸透率が上昇する。CT値が低い部分が反応生成物。

実証されている。かんらん石のアナログ物質として MgO 焼結体を用いた吸水反応 (120% の体積膨張) — 透水実験により、初期の浸透率が大きい試料を出発物質にすると、破壊が起こらず間隙が均質に閉塞されてしまうのに対し、浸透率が小さい試料による実験では、膨張反応が局所的に起こることによって、破壊と浸透率上昇が引き起こされることが示された (Uno et al., 2022; 図 3 (b))。このような天然、実験、数値シミュレーションの研究は、岩石の浸透率や反応速度は決して物質固有な物性値ではなく、反応しながらダイナミックに変動することを示唆している。流体の浸透・固定化速度は、反応しない条件で測定

された浸透率から予測される値よりも、天然ではずっと大きい可能性がある。人為的な二酸化炭素の地中固定を考えるうえでも、炭酸塩化の化学反応そのものより、反応に伴うフィードバック機構の方が実効的な速度にとって本質的であろう。



著者紹介 岡本 敦 Atsushi Okamoto

東北大学 大学院環境科学研究科 教授

専門分野: 変成岩岩石学, 地殻流体科学。岩石学的解析, 水熱反応実験, 組織形成シミュレーションに基づき, 海洋リソスフェア, 沈み込み帯, 地熱システム等における岩石-流体相互作用を解明する研究を行っている。

略歴: 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員等を経て、現職。著書に「地球大百科事典」(朝倉書店, 共訳)がある。

岩石が示すパターンを解読するには何が重要か

上述した離散要素法のモデルのみならず、近年、様々な組織形成シミュレーションが発展している。数多くの反応組織を計算機上で作り出し、天然と「よく似た」パターンを見つけることで、その背後にある支配パラメータや時間発展の抽出が期待できる。ただし、いくつか重要な問題が残っている。まず、組織によっては「何を測定すれば良いのか」自体がわからないことがある。岩石の研究者は、おそらく無意識に、粗視化したり、注目する部分を変えたりして「面白い」パターンを抽出して解釈している。一方、網目状の亀裂ネットワークでも、通常測定するのは走向傾斜、長さや間隔であり、その特徴を記述できたとは言えない。岩石組織解析の性能を飛躍的に向上させるには、これまでにない新しい特徴量の探索が不可欠であろう。そのような気が付かなかった特徴量の抽出には、深層学習などの機械学習のアプローチを活用することが効果的かもしれない。一方、組織形成の数値シミュレーションそのものもまだ計算コストが大きいため、膨大な数のシミュレーションにより教師データを作成するのは現実的ではない。その意味で、岩石反応の本質的な部分を残してうまく簡略化した有効モデルをつくる試行錯誤を続けることも、岩石の模様からプロセスを抽出する逆問題を解くために重要であろう。

—参考文献—

Jamtveit, B. et al. (2000) *Nature*, 408, 75-78.

Okamoto, A. and H. Shimizu (2015) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 417, 9-18.

Uno, M. et al. (2022) *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 119, e2110776118.

■一般向けの関連書籍

エイドリアン・ベジャン, J. ペダー・ゼイン (2013) *流れとかたち—万物のデザインを決める新たな物理法則*, 紀伊国屋書店。