

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610169

研究課題名(和文) 脱水・加水反応に起因するフラクチャー形成のモデリング

研究課題名(英文) Modeling of fracturing induced by hydration and dehydration reactions

研究代表者

岡本 敦 (Atsushi, Okamoto)

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：40422092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球内部の水の循環には、岩石の加水反応と脱水反応が大きな役割を果たしている。これらの反応は、しばしば岩石の破壊を伴いながら進行するが、そのメカニズムはよく分かっていない。本研究では、離散要素法を用いて、岩石の表面反応・流体流動・破壊の複合的なプロセスについてのモデルをつくることに成功した。これを用いて、典型的な累進変成作用(体積減少する脱水反応)と後退変成作用(体積膨張する加水反応)では対称的な亀裂パターンを作り出すこと、その主要因が固体体積変化による応力の擾乱であることを明らかにした。また、これらのプロセスが、海洋底における蛇紋岩化作用の進行速度を支配することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Hydration and dehydration of rocks play crucial roles on global circulation of H<sub>2</sub>O in the Earth's interior. It is known that these reactions commonly proceed with fracturing, but the detailed mechanism is still poorly understood. In this study, based on a distinct element method, we succeeded in making a novel model for the coupled processes of surface reaction-fluid flow-fracturing. We revealed that typical prograde metamorphism (volume-decreasing dehydration) and retrograde metamorphism (volume-increasing hydration) produce contrasting fracture patterns mainly induced by stress fields due to the solid volume change. Such a feedback also controls the effective reaction rate of serpentinization within the oceanic lithosphere.

研究分野：岩石学

キーワード：離散要素法 破壊-反応 流体流動 加水反応・脱水反応 フラクチャーパターン フィードバック  
蛇紋岩化作用 変成作用 地球内部の水循環

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 岩石の脱水反応と加水反応は、地球内部の水の循環に大きな役割を担っている。特に、沈み込み帯において、岩石の脱水反応・加水反応は間隙水圧と岩石物性に劇的な変化を引き起こし、地震発生にも多大な影響を与える(Hacker et al., 2003)。一方、変成岩や蛇紋岩には反応と鉱物の破壊が同時に進行する組織がしばしば観察され(Iyer et al., 2008)、地球内部のダイナミックな物性変化の重要な情報を持っていると考えられる。

(2) 離散要素法は破壊現象を表現するのに優れたシミュレーション法であるが、地球科学への応用は非常に限られてきた。これまで、オスロ大学のグループが岩石の反応-破壊カップリングについて先駆的な研究を行っているが(Jamtveit et al., 2000; 2008)、非常に限られた条件であること、結果が天然の組織と大きく異なっていることから、モデルの妥当性、有効性が十分に示されていない。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、岩石中の加水・脱水反応における表面反応-破壊-流体流動についての各プロセスについて簡略化したモデルを構築し、離散要素法によるシミュレーションを行い、天然や実験生成物の反応-破壊組織との比較を行う。

(2) 本研究の目的は、地球内部の岩石の脱水・加水反応に伴う亀裂パターンを分類し、現象の支配パラメータを抽出すること、脱水反応と加水反応の進行様式の違いを明らかにすること、また、天然岩石中の反応-破壊組織に明確な物理的な意味付けを与えることである。

### 3. 研究の方法

(1) 研究分担者の清水が開発した2次元離散要素法のコードをもとに、変成岩の加水・脱水反応と流体移動プロセスを組み込んだ岩石破壊のモデルを構築する。 $A = B + H_2O$  という反応(右向きは脱水反応, 左向きは加水反応)を考え、固体体積膨張と、反応による放出(吸収)される水の量によって反応を定義する。

(2) 反応速度, 流体移動速度, 岩石強度などのパラメータを変化させる数値実験を行い、フラクチャーパターンと反応の空間分布を分類する。その上で、支配的なパラメータを軸としたフラクチャーパターンの“相図”を作成する。

(3) バッチ式水熱反応容器による蛇紋岩化作用の反応実験と大気圧下での脱水反応実験を行い、シミュレーションから得られる組織と比較検討し、モデルの改良を行う。

(4) 天然の蛇紋岩体と変成帯でのフラクチャーパターンの解析を行って、比較することにより、累進変成作用と後退変成作用の脱水反応と加水反応の進行メカニズムと実効的な反応速度について考察する。

### 4. 研究成果

(1) モデルの構築: 本研究のモデルの特徴は、亀裂を流れる流体流動を取り入れている点であり(図1左)、無限に大きい亀裂流動を仮定したオスロのグループのモデルとは大きく異なる。また、加水・脱水反応の表面反応を速度論的に取り入れるために、反応速度を流体圧の関数として定義した(図1右)。簡易的なモデル岩石を使って、試行錯誤をすることにより、プロセスのエッセンスを失わないままに、できるだけ簡略化した汎用性の高いモデルを作ること成功した。

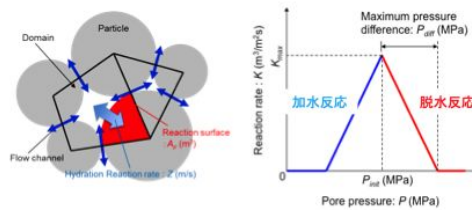


図1 離散要素法の基本モデル(左)と反応速度の流体圧依存性(右)

(2) 脱水収縮反応と加水膨張反応: 累進変成作用(温度上昇に伴う変成作用)は通常、固体体積が収縮する脱水反応であり、後退変成作用(温度低下に伴う変成作用)は固体体積が膨張する加水反応である。これらの違いを明らかにするために、反応の方向のみを逆にし、他の条件を一定にした2つの典型的な条件でのシミュレーションを行い、その時間発展と形成されるパターンの比較を行った。

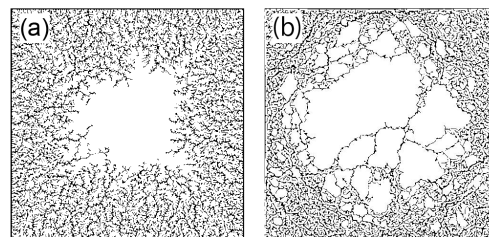


図2 (a) 脱水収縮反応と (b) 加水膨張反応によって形成される亀裂パターン

(3) 図2は、(a)脱水収縮反応と(b)加水膨張反応によって形成された亀裂パターンである。どちらの反応もモデルの外側から内側に向かって進行するが、前者では、流体圧の低いところで反応が良く進行し、後者では、流体圧の高いところで反応が進行する。また、形成される亀裂パターンも対照的であることが明らかになった。脱水収縮反応では、亀裂が外側から連結した、フラクタルツリーのような形状をしている(図2a)。これは、反応が起こると要素粒子が収縮するためにランダムな方向に亀裂が形成し、新たな亀裂に流体が進行するという正のフィードバックが起こるためである。一方、加水膨張反応では、反応領域を階層的に分割するポリゴンの

ような亀裂パターンを形成し、孤立した亀裂が数多く存在する(図2b)。このような亀裂パターンは、亀裂表面で粒子が反応によって膨張するために内側には直交するような新たな引張亀裂が発生し、それが外部と繋がったときのみ新たな反応場として機能するということを意味する。しかし、脱水収縮反応の場合とは異なり、反応が進行すると強い圧縮場となり、亀裂が進展しにくくなり反応は止まってしまうという負のフィードバックが働く。ツリータイプの亀裂パターンは、石膏の脱水実験で得られる亀裂パターンと、ポリゴンタイプの蛇紋岩に見られるメッシュ組織などのよく似ており、それぞれ天然でも同様のプロセスが進行していると考えられる。また、両反応のフィードバックの仕方の違いが、累進変成作用は全体として均質に進行するのに対して、後退変成作用は不均質で未反応部分が残っていることを説明できる。この成果については、国際誌 Earth and Planetary Science Letters に置いて掲載済みである。

(4) 蛇紋岩化作用におけるメッシュ組織の発達：流体移動速度 vs 反応速度：前述のシミュレーションでは、それぞれの反応についてある特定の条件でのみ計算を行っているが、様々なパラメータによってパターンがどう変化するかを検討されていない。また、離散要素法の計算の効率と安定性を確保するために、非常に小さな時間刻みと大きな反応速度を用いており、その妥当性は検証されていない。そこで、ここでは、加水膨張反応の典型である蛇紋岩化反応に着目し、「流体移動速度と反応速度の比」に着目した評価をおこなった。この課題を進めるにあたって、流体移動はき裂内だけではなく、マトリックス流動も考慮できるようにモデルを改良した。このモデルのマトリックス流動は定性的には流体の拡散のような移動を表現することができる。また、反応と流体流動の速度を評価するために、2つの無次元パラメータ( $\Psi_F$  = き裂流体流動速度/反応速度;  $\Psi_D$  = マトリックス流体流動速度/反応速度)を導入した。

(5) まず、この $\Psi_D$ と $\Psi_F$ を一定にして、反応速度を変化させたシミュレーションを行い、その影響を検証した。その結果、反応速度がある閾値よりも大きくなると、反応粒子が慣性力によって破裂するような不自然なき裂が発生するが、閾値よりも小さければき裂パターンとその反応進行度に対する時間発展は変化しないことを見いだした。このことは、適切に反応速度を設定してシミュレーションを行えば、シミュレーション結果を、地質学的な時間スケールの現象にまで外挿することが可能であるということを示唆している。

(6) 次に、 $\Psi_D$ と $\Psi_F$ を大きく変化させて、パターンの変化を観察した。その結果、 $\Psi_D$ と $\Psi_F$ を軸とするパラメータ空間において、反

率-流体圧-亀裂パターンが系統的に変化することを見いだした(図3)。大きく3つの典型的なパターンを端成分と考えることができる。 $\Psi_D$ と $\Psi_F$ がともに1よりも小さい(反応速度の方が流体移動よりも大きい)場合の、表面から剥がれ流のように亀裂が形成する剥離タイプ、マトリックスの流動(拡散)大きい場合の、き裂が発生せずに均質に反応が進行する拡散タイプ、そして、マトリックス流動が小さく、き裂流動速度が大きい場合の、ポリゴンタイプである。

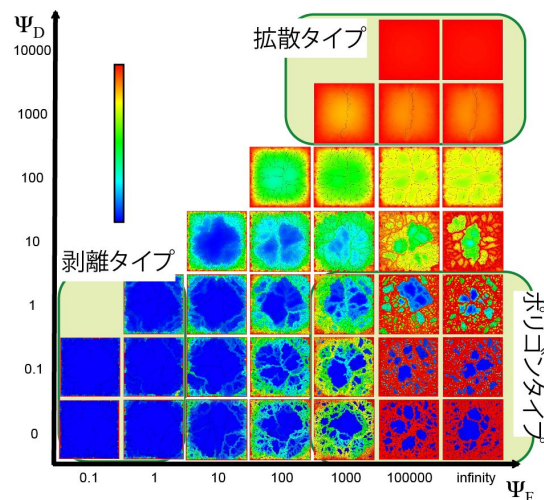


図3 き裂とマトリックスにおける流体流動速度/反応速度の違いによる加水膨張反応の流体圧分布パターンの変化。

(7) 海洋底の蛇紋岩のメッシュ組織は、前述のようにポリゴンタイプである。このことは、海底の蛇紋岩化作用は単純に一番遅い過程が律速するわけではなく、亀裂内の大きな流動速度が必要不可欠であるという事を意味している。すなわち、反応して、その結果で亀裂ができるというフィードバックが全体としての反応速度を支配しているということが明らかになった。また、天然のメッシュ組織は粒界を起点になって階層的な亀裂が生成しており、粒界を導入したシミュレーションと比較しても、蛇紋岩化作用の初期の段階で粒界がなんらかの要因(熱応力やテクトニックな応力)で割れて、流体の高速通路として機能していたことがわかった。

(8) 本研究を通じて、反応のタイプ、流体移動速度と反応速度との兼ね合いによって、様々な亀裂-反応パターンが現れることが明らかになった。このことは、天然の亀裂パターンを定量的に評価し、シミュレーションのパターンと比較することにより、地球内部の反応-物質移動の鍵となるパラメータを推定するという全く新しいアプローチの可能性を示唆している。

< 引用文献 >



Hacker, B.R., Peacock, S.M., Abers, G.A., Holloway, S.D., 2003. Subduction factory – 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. Geophys. Res.*, 2030. doi: 10.1029/2001JB001129.

Iyer, K., Jamtveit, B., Mathiesen, J., Malthe-Sørenssen, A., Feder, J., 2008. Reaction-assisted hierarchical fracturing during serpentinization. *Earth Planet. Sci. Lett.* 267, 503–516.

Jamtveit, B., Austrheim, H., Malthe-Sørenssen, A., 2000. Accelerated hydration of the Earth's deep crust induced by stress perturbations. *Nature* 408, 75–78.

Jamtveit, B., Malthe-Sørenssen, A., Kostenko, O., 2008. Reaction enhanced permeability during retrograde reactions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 267, 620–627.

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Okamoto, A., Shimizu, H., 2015. Contrasting fracture patterns induced by volume-increasing and -decreasing reactions: implications for the progress of metamorphic reactions. *Earth and Planetary Science Letters*, 415, 9-18. Doi: 10.1016/j.epsl.2015.02.015 査読有

Oyanagi, R., Okamoto, A., Hirano, N., Tsuchiya, N., 2015. Competitive hydration and dehydration at olivine-quartz boundary revealed by hydrothermal experiments: implications for silica metasomatism at the crust-mantle boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 425, 44-54. Doi: 10.1016/j.epsl.2015.05.046 査読有

[学会発表](計 9 件)

Atsushi Okamoto, Ryosuke Oyanagi, Noriyoshi Tsuchiya, Significance of silica transport on serpentinization: insights from hydrothermal experiments. Goldschmidt Conference, 2016 年 06 月 28 日. パシフィコ横浜 (横浜)

岡本 敦, 清水 浩之 変成作用における反応-物質移動-フィードバックとパターン形成. 2016 年 05 月 24 日. 幕張メッセ(幕張)

Ryosuke Oyanagi, Atsushi Okamoto,

Noriyoshi Tsuchiya, Bidirectional replacement zoning as a consequence from metasomatic reaction in olivine-plagioclase system. 13th International Workshop on Water Dynamics. 2016 年 03 月 15 日-3 月 17 日. 東北大学(仙台)

大柳良介, 岡本敦, 土屋範芳 水熱実験によるかんらん石-斜長石系における熱水変質過程. 日本鉱物科学会, 2015 年 09 月 25 日. 東京大学(本郷)

岡本 敦・清水 浩之 加水反応において形成するフラクチャーパターン: 表面反応速度 vs. 流体移動速度. 日本地質学会, 2015 年 9 月 11 日. 信州大学(長野).

大柳良介, 岡本敦, 土屋範芳 水熱実験による地殻-マントル境界における交代作用. 2015 年 05 月 24 日-5 月 28 日. 幕張メッセ(幕張)

Ryosuke Oyanagi, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya, Metasomatic processes on crust-mantle boundary deduced from hydrothermal experiments. 12th International Workshop on Water Dynamics. 2015 年 3 月 9 日-3 月 10 日. 東北大学(仙台)

大柳良介, 岡本敦, 土屋範芳 かんらん石-斜長石-水系における蛇紋岩化作用の進行と物質移動. 日本地質学会, 2014 年 09 月 15 日. 鹿児島大学(鹿児島)

岡本 敦, 清水 浩之 加水・脱水反応に起因するフラクチャー形成: 反応による固体系積変化の影響. 日本地質学会, 2014 年 09 月 13 日. 鹿児島大学(鹿児島)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

岡本 敦 (OKAMOTO, Atsushi)  
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授  
研究者番号：4 0 4 2 2 0 9 2

(2)研究分担者

清水 浩之 (SHIMIZU Hiroyuki)  
東北大学・流体科学研究所・助教  
研究者番号：6 0 6 1 0 1 7 8

(3)連携研究者

( )

研究者番号：