



令和4年1月18日

報道機関 各位

東北大学大学院環境科学研究科

化学反応によって岩石が破壊され、 水や二酸化炭素が持続的に固定されるメカニズムを解明

【発表のポイント】

- 岩石が水や二酸化炭素を消費する際の体積膨張反応を、MgO 焼結体をもちいた室内実験で再現。
- 反応により岩石に破壊が生じ、流体の流れが加速されること、水や二酸化炭素が持続的に固定されることを世界で初めて実験的に明らかにした。
- 反応により岩石が破壊されるためには、流速に対して反応速度が十分に大きい必要があることを明らかにした。
- 地球のグローバルな物質循環の解明につながるほか、大気中の二酸化炭素除去技術への応用が期待される。

【概要】

岩石が水や二酸化炭素を消費する吸水反応や炭酸塩化反応は、地球の環境や物質循環を支配する主な反応です。これらの反応は数%から数十%もの大きな固体の体積膨張を伴いますが、地下深部の高い圧力下でどのように岩石が膨張しながら反応が進むのかはわかっていませんでした。

東北大学大学院環境科学研究科の宇野正起助教らの研究グループは、体積膨張を伴う岩石-流体反応によって地殻・マントルに破壊が生じ、それによって流体の流れを加速させることを世界で初めて実験的に示しました。さらに、破壊や流体流れの加速が生じるためには、反応の速度が流体流れの速度に比べて十分に大きい必要があることを突きとめました。これらの知見は、固体地球内部への水や二酸化炭素の固定メカニズムの解明につながるほか、地下開発における流体流れの制御、二酸化炭素鉱物固定技術への応用が期待されます。

本成果は、2022年1月14日、米国科学アカデミーが発行する科学誌 *Proceedings of the National Academy of Sciences* に掲載されました。

【詳細な説明】

地球表層の水や二酸化炭素などの揮発性物質は、岩石に固定され、プレートとともに地球内部に持ち込まれます。このグローバルな物質循環は、表層環境および地震や火山活動に大きな影響を与えています。地球表層から地球内部へと持ち込まれる水や二酸化炭素の量は、岩石と流体が反応して含水鉱物や炭酸塩鉱物を作る吸水反応、炭酸塩化反応の進行度合いで決まります。そのため、これらの反応の進行メカニズムを明らかにすることは、地球上の水・二酸化炭素循環の理解と予測のために重要です。

一般に、岩石の吸水反応や炭酸塩化反応は数%から数十%もの体積膨張を伴います。この体積膨張によって応力が発生し、岩石を破壊する場合があると考えられています。反応によって岩石が破壊されると、反応表面積を増やすとともに、流体の新たな流路が形成され、反応を加速させると予測されます。一方、体積が膨張すると、岩石中の空隙が閉じ、流体の流れが阻害されるため、反応は減速するとも考えられます。このように、地下の高い圧力下で岩石がどのように膨張しながら反応するのかは自明ではなく、その予測は難しいのが現状です。

天然岩石の観察からは、吸水反応や炭酸塩化反応が亀裂沿いに進行しており、反応とともに破壊が生じ、反応が加速していることが示唆されます（図 1）。しかしながら、従来の室内実験では、実際に流体を流しながら岩石を反応させると、体積膨張で目詰まりして流体の流れは減速し、反応や流体流れの加速を再現することはできませんでした。したがって、吸水反応や炭酸塩化反応を自己加速・減速させる支配メカニズムは明らかになっていませんでした。

東北大学大学院環境科学研究科の宇野正起助教、岡本敦教授、土屋範芳教授らのグループは、水を吸収すると体積が約 119%増加する MgO 焼結体をもちいて流通式水熱反応実験をおこない、岩石の体積膨張反応における流体流れを加速・減速させる支配要因を探索しました。その結果、初期空隙率が高く、流体が流れやすい高透水試料 (P-MgO) では、反応が均質に進行して試料は破壊せず、浸透率（岩石中の流体の流れやすさの指標）が約 2 桁減少しました（図 2A, 図 3A, 図 4A-C）。一方、初期空隙率が低く、流体がほぼ流れない不透水試料 (IP-MgO) では、試料が不均質に反応しながら階層的に割れ、浸透率が 3 桁以上も増加しました（図 2B, 図 3C, 図 4G-I）。空隙率が中程度の中透水試料 (MP-MgO) では、一旦浸透率が約 2 桁減少したのち、2 桁増加しました（図 2A, 図 3B, 図 4D-F）。これらの結果は、世界で初めて、体積膨張反応により岩石が破壊し、流体流れが加速することを実験的に示したものです。

本研究の実験結果と、従来の天然岩石の観察、数値計算、室内実験の結果を、「反応速度」と「流体の流れ速度」を示す無次元数で比較してみます（図 5）。すると、反応速度が流体流れ速度より十分に大きい ($\Psi \ll 1$) の場合にのみ、破壊が生じたり、流体流れが加速したりしていることがわかります。すなわち、岩石の体積膨張反応では、「反応速度 \gg 流体流れ速度」であることが、破壊を生じ

流体流れを自己加速化させる必要条件であることが明らかになりました(図 5D)。

水や二酸化炭素が岩石に固定されるためには、目詰まりすることなく、流体が継続的に未反応の岩石に供給される必要があります。本研究で明らかにした岩石-流体反応による岩石の破壊は、地殻やマントルに流体を固定するカギとなるプロセスであり、地球内部の水循環を駆動する海洋リソスフェアの吸水反応や、岩石へ二酸化炭素を固定する鉱物炭酸塩化が、どのような条件で加速するのか、その理解と予測に繋がると期待されます。また、体積膨張反応は様々な条件で起こり得るために、トンネル掘削や地熱開発による崩落の防止、流体流れの制御、二酸化炭素鉱物固定化の加速など、地下開発における力学-水理学-化学応答の予測や制御への応用が期待されます。

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業 新学術領域研究 (研究領域提案型) 公募研究 (JP15H01136; JP17H05310), 基盤研究 (B) (JP17H02981), 基盤研究 (S) (JP16H06347), 国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化 (A)) (JP18KK0376), および、科学技術振興機構 (JST) / 国際協力機構 (JICA) 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) (JPMJSA1703) の支援を受けて実施されました。

【掲載論文】

タイトル : Volatile-consuming reactions fracture rocks and self-accelerate fluid flow in the lithosphere

著者名 : Masaaki Uno^{1*}, Kodai Koyanagawa¹, Hisamu Kasahara¹, Atsushi Okamoto¹, and Noriyoshi Tsuchiya¹

著者所属 : 1 国立大学法人 東北大学大学院環境科学研究科

掲載雑誌 : Proceedings of the National Academy of Sciences (2022) 119 (3) e2110776118.

(米国科学アカデミー紀要 (2021) 119 巻, 3 号, e2110776118)

DOI 番号 : 10.1073/pnas.2110776118

U R L : <https://doi.org/10.1073/pnas.2110776118>



図1 天然岩石にみられる化学反応による岩石破壊。(A) かんらん岩の吸水反応（蛇紋岩化）により生じた蛇紋岩ブロック（サン・アンドレアス湖，カルフォルニア）。蛇紋石（リザダイト）の脈（淡緑色）に切られ，多面体状になっている。(B) 部分的に蛇紋岩化したカンラン岩の偏光顕微鏡写真（クロスニコル）（レッドウッド蛇紋岩体，カルフォルニア）。網目状に発達したブルース石の脈に沿って反応が進行している。(C) かんらん岩や蛇紋岩が炭酸塩化して生じた，シリカ-炭酸塩岩（サン・ノゼ，カルフォルニア）。白い石英脈が網目状の亀裂を充填している。

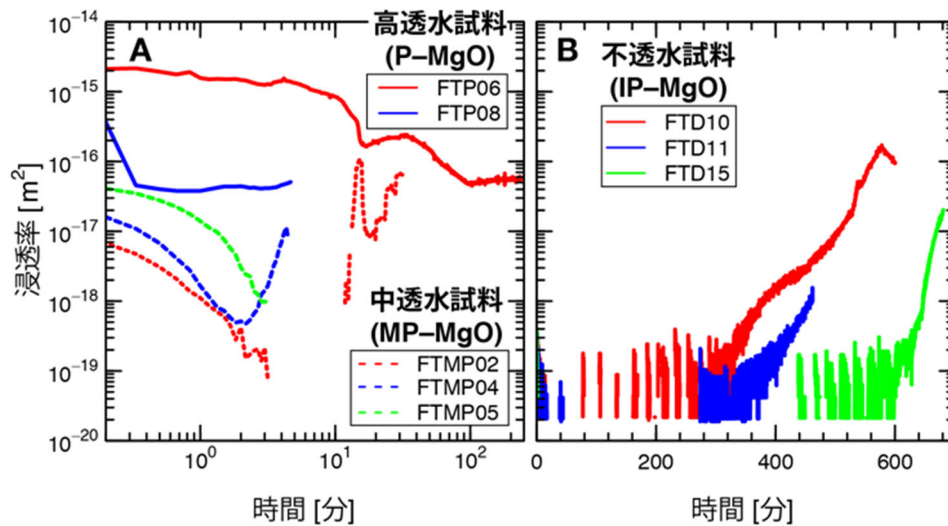


図2 流通式水熱反応実験による浸透率（岩石中の水の通りやすさの指標）の時間変化。(A) 初期空隙率の高い高透水試料（P-MgO）および中程度の中透水試料（MP-MgO），(B) 初期空隙率の低い不透水試料（IP-MgO）。FTで始まる番号は，実験番号を示す。不透水試料で3桁もの浸透率上昇が観測され，時間とともに流体流れが加速している様子が分かる。

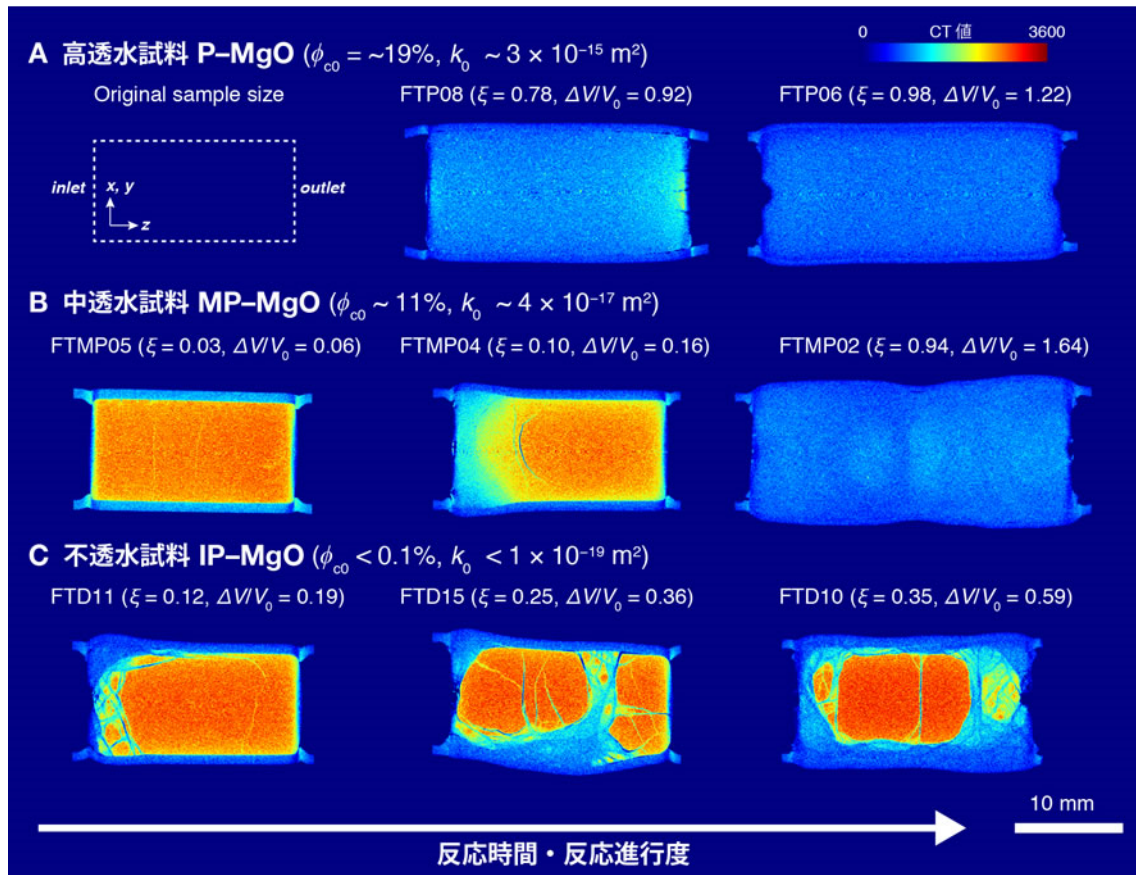


図3 実験生成物の X 線 CT イメージ。 ϕ_{c0} , k_0 , ξ , $\Delta V/V_0$ はそれぞれ初期空隙率, 初期浸透率, 反応率, 体積増加率。FT で始まる番号は実験番号。図2 と見比べると, 高透水・中透水試料では均質に反応が進んで浸透率が低下している一方, 不透水試料では不均一に反応が進行して亀裂が発達し, 浸透率が上昇していることが分かる。

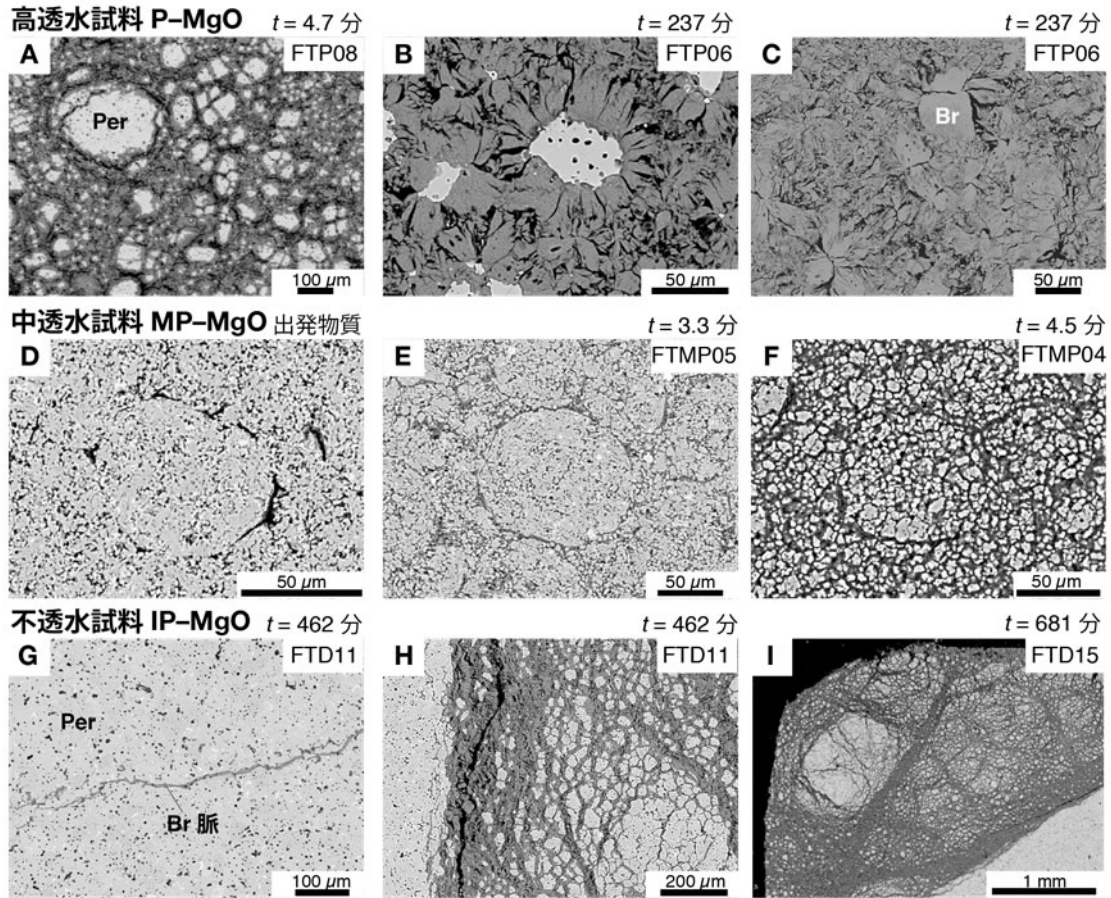


図4 実験生成物の電子顕微鏡写真（反射電子像）。（A-C）高透水試料（P-MgO）の生成物。（D-F）中透水試料（MP-MgO）の生成物。（G-I）不透水試料（IP-MgO）の生成物。Per：ペリクレーヌ（MgO），Br：ブルース石（Mg(OH)₂），FTで始まる番号は実験番号。高透水試料では粒界沿いに反応が進行していること，中透水試料では粒内割れがおきていること，不透水試料では階層的に割れが発達していることが分かる。

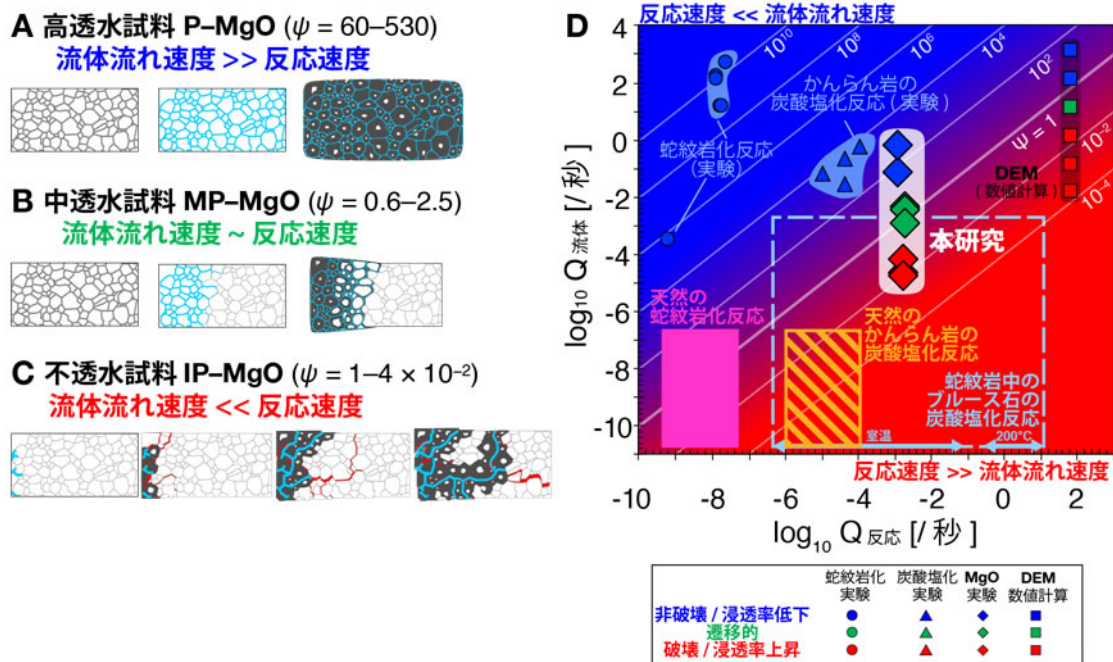


図5 流体流れ速度／反応速度比 ($\Psi = Q_{\text{流体}}/Q_{\text{反応}}$) が体積膨張反応の力学・水理学挙動に与える影響。(A-C) 実験試料における流体浸透と反応の概念モデル。(D) さまざまな体積膨張反応における流体流れ速度 ($Q_{\text{流体}}$) と反応速度 ($Q_{\text{反応}}$)。

本実験で試料が破壊された実験は $\Psi \ll 1$ 、破壊しなかった実験は $\Psi \gg 1$ にプロットされる。従来の数値計算の結果 (DEM) も同様に説明できる。破壊が観察されなかった従来の流通式反応実験は、 $\Psi \gg 1$ に位置しており、上記の説明と一致する。一方、天然の蛇紋岩化反応やかんらん岩の炭酸塩化反応は、殆どが $\Psi \ll 1$ の領域にプロットされ、これらの天然岩石が多くの場合破壊されているという観察事実 (図1) を説明できる。これらの比較より、「反応速度 \gg 流体流れ速度」であることが、破壊を生じ流体流れを自己加速化させる必要条件であることが明らかになった。

ブルース石 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) の炭酸塩化も殆どが $\Psi \ll 1$ にプロットされており、加速度的に炭酸塩化することが予測される。

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学大学院環境科学研究科
助教 宇野 正起 (うの まさおき)

電話： 022-795-7401

E-mail： uno@geo.kankyotohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学大学院環境科学研究科 情報広報室
助手 物部 朋子 (ものべ ともこ)

電話： 022-752-2241

FAX： 022-752-2236

E-mail： tomoko.monobe.d4@tohoku.ac.jp