



岩石-水反応が駆動する地殻現象とその有効利用

東北大学大学院環境科学研究科
先進社会環境学専攻
教授 岡本 敦

1. はじめに

私たちの人間社会は、固体地球の上に存在しています。地球のプレートの動きは年間で数センチ数十センチメートルとゆっくりとしたものですので、普段の生活では「地球」を意識することはほとんどないかもしれません。しかし、東日本大震災以降、各地で地震や火山活動が頻発するようになり、地殻現象が私たち人間社会に与える大きな影響を感じるようになりました。現在の日本は、人類史上で最も活動的な地球に直面していると言えるかもしれません。地震や火山のような災害だけではなく、鉱物資源や化石燃料、温泉、地熱エネルギーなど、私たちは地球内部から多くの恩恵を受けています（図1）。私は、地球を「動的なシステム」として捉えて、それと調和した形で人間社会を考えていくことが大切であると考えています。



図1 地圏環境と私たちの人間社会

人類は月に行くことはできても、いまだに10km地下には行くことができません。したがって、地殻内部の状態を精度よく評価することは、科学技術の発達した現代の社会においても非常に困難な課題のままです。例えば、地下資源は、どこを掘っても出てくるわけではなく、非常に局在化しているために、開発が困難になっています。このような地殻の複雑さを理解する1つの鍵は、岩石の隙間などに存在する地殻流体（ H_2O 、 CO_2 、それに溶け込んでいる電解質など）にあります。岩石そのものの反応は非常にゆっくりとしたものですが、岩石に少量の流体が加わると、物質やエネルギーの移動、そして化学反応が劇的に加速します。その結果、流体は、鉱床や地熱資源が形成する中心的な役割を果たし、地震や火山活動を引き起こします。また、 H_2O や CO_2 の地球内部を含めた大循環は、海水量、気候、エコシステムに大きな影響を与えます。私たちの研究室では、水熱実験、フィールド調査、モデリングなどを通じて、地殻やマントルで起こっている特徴的な岩石-流体相互作用

用のメカニズムを理解し、資源やエネルギーの有効利用へとつなげていく研究を進めています。

2. 超臨界地熱システムにおけるシリカの影響

日本の東北地方のような火山地域において、「地熱」は季節や天候に左右されず安定に供給できる再生可能エネルギーとして期待されています。地下は深くになればなるほど高温になり、地熱地帯では深さ1kmごとに $100^\circ C$ を超える温度勾配を持っています。地熱エネルギーを利用するためには、熱を効率よく回収するための流体の存在が不可欠です。現在の地熱発電は、温度にして $200-300^\circ C$ 、深さにして $1000-2000m$ くらいの貯留層をターゲットにしています。一方、近年、水の臨界点（ $374^\circ C$ 、 $22 MPa$ ）よりも高温の超臨界地熱資源が新たな可能性として注目されています（図2）。しかし、その開発は決して簡単ではありません。高温地殻の掘削が技術的にハードルが高だけでなく、流体が存在する場所を地表探査のみで決定するのは困難で、かつ岩石の力学的特性、流体の化学的性状を含めて、超臨界地熱貯留層の特性はよくわかっていないためです。現在、アイスランド、イタリア、日本などで、超臨界地熱の開発に向けた掘削プロジェクトが進められています。

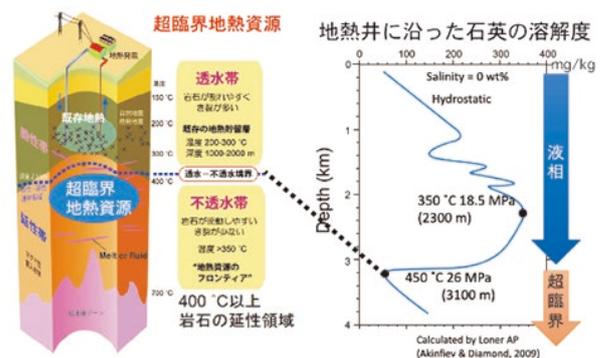


図2 超臨界地熱システムと石英の溶解度の変化

地殻は、浅部では脆性的で割れやすく、流体が流れやすい透水系であるに対して、深部では岩石が延性的に変形する不透水系であると考えられており、超臨界貯留層はこの透水-不透水境界よりも深部に位置します。しかし、この透水-不透水の境界が何にコントロールされているかは、よくわかっていません。私たちは、この問題の岩石-流体

相互作用の側面に着目し、葛根田地熱地域の深部掘削井WD-1aに沿って、地殻の代表的なシリカ(SiO_2)鉱物である石英の溶解度を求めました (Saishu et al., 2014)。その結果、石英の溶解度は深くなるにつれて大きくなるが、350°C付近に来ると急激に減少して、380°Cくらいで極小値をとることがわかりました (図2)。驚くべきことに、この極小値の深度は、透水-不透水境界の深度とピタリと一致します。この溶解度の急激な変化は、水の超臨界から超臨界への状態変化に対応すること、また、このような環境を水熱実験で再現してやると、石英やアモルファスなどさまざまな形態でシリカ鉱物が析出することがわかりました (Okamoto et al., 2010; Okamoto and Sekine, 2011)。このようなことから、超臨界地熱システムは、実は岩石の力学的性質だけではなく、流体の状態に強く依存して形成・維持されており、シリカの析出が水理学的な境界を形作っていると考えています。

3. 超臨界流体のフラッシングによるシリカ粒子の形成

アイスランドのクラフラ火山の近傍で行われた超臨界地熱の掘削プロジェクトIDDP-1では、深度2.1kmでマグマに遭遇し、450°Cを超える過熱蒸気が噴気しました。この蒸気は地熱資源としては非常に高品質ですが、問題となったのは、蒸気中に大量のシリカが含まれていることでした。このような蒸気中でのシリカの状態を調べるために、私たちは、高濃度のシリカを溶かし込んだ水溶液を、超臨界状態から一気に大気開放するフラッシング実験を行いました (Amagai et al., 2019)。その結果、数秒のうち減圧し、蒸気となるに伴って、0.1から5ミクロンメートル程度の球形のアモルファスシリカの粒子が瞬間的に生成されることがわかりました (図3)。さらに、このようなナノマイクロサイズの粒子を超臨界流体中に保持すると数日で、最も安定な石英へと変わることも明らかにしました。超臨界地熱を開発する際には、このシリカの析出は避けられない問題であり、タービンや配管などへの付着を避けるために、その粒子の生成・輸送に関する物理・化学過程を詳しく調べています。

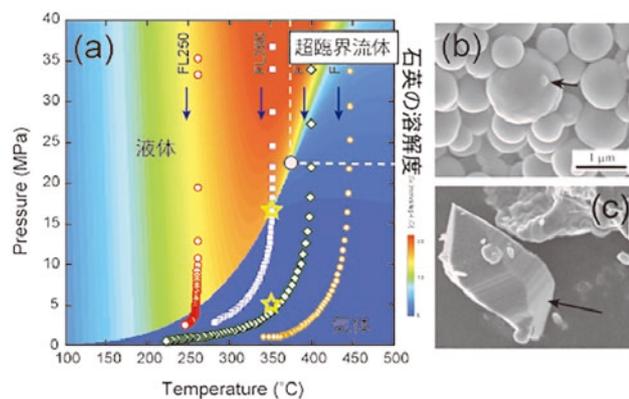


図3 (a)超臨界フラッシング実験の条件と(b)生成したアモルファスシリカ粒子、(c)石英への変化(Amagai et al., 2019)

実は、地熱開発と同様のフラッシング現象は、天然の地下の中でも起こっていると考えられます。2013年に「地震が起こると瞬間的に金鉱床ができる」という興味深い仮説が提案されました (Weatherley and Hanely, 2013)。地震時に断層の隙間が広がるために真空に近い状態となり、地下の流体がflash vaporizationを起こし、シリカとともに金を析出するというものです。この論文では仮説として述べられているだけですが、私たちのフラッシング実験は、同じような状況を再現しているといえます。実際に、天然の断層や熱水性の金鉱脈には球状のアモルファスシリカ粒子や、痕跡を残した石英粒子がしばしば観察されており、地震に伴う瞬間的な流体流動と鉱床形成の関係を示唆しています。ただ、実験室では、シリカを析出させることはできますが、金を析出させることには成功していません。金はシリカと比べて圧倒的に溶解度が低いので、金鉱床で見られるような濃集構造がどのようにできるのか、実際にそれを再現するような人工鉱床を作ることができるのかは、大きなチャレンジとして残されています。このような最近の研究は、これまで地質学的時間スケールでゆっくり形成すると考えられてきた鉱床が、実は、地震のような突発的イベントによって短期間にできたことを示唆しています。現在、各地で群発地震が観測されていますが、今まさに高温地殻を地殻流体が移動しながら、現在進行形で金属鉱床が作られているのかもしれない。

4. マントル流体相互作用と水素の発生

地球表面の7割を占める海洋には、大陸地殻とは全く異なる海洋地殻が広がっています。大陸地殻(厚さ30-70 km)に比べて、海洋地殻の厚さは5-10kmと薄いために、海水は直接的にマントルのかんらん岩と反応しやすいという特徴があります。海洋底は固体地球(岩石圏)と表層環境(気圏・水圏・生物圏)との最大の境界面だということもできます。現在、マントル岩石と流体との反応は、地球内部の水循環、地震発生、海底エコシステム、二酸化炭素固定、生命の起源などの様々な分野で大きな注目を集めています。まず、マントルの岩石が水と反応すると、かんらん石が「蛇紋石」と呼ばれる13質量%の水を含む鉱物へと変化します(これを蛇紋岩化作用と呼びます)。蛇紋岩は地球内部に水を持ち込む最大のキャリアーであるとともに、沈み込み帯の深部で分解して水を放出し、地震を引き起こしたりマグマを作る原因になると考えられています。また、蛇紋岩化作用の大きな特徴の1つは、反応の際に、2価の鉄を酸化して、同時に水を還元して水素を発生することです。その場に二酸化炭素が存在すれば、メタンや高次の炭化水素をも作り出します。2000年以降、大西洋中央海嶺などの深海底において、熱水噴出孔の周辺に特殊なエコシステムが発達していることが発見されて、蛇紋岩化作用によって生成される水素エネルギーが、海底や地下の生物圏を生み出してことが示されつつあります (Kelley et al., 2001)。さらに、近年では、原始地球や他の天体において、

この反応が生命発生の鍵を握っているのではないかと多くの研究者が考えています。しかし、現在の海洋底においても、海水が海洋プレートの中をどの深さまで侵入して、どれほどの量を水素を発生しているのかはいまだによくわかっていません。

私たちの研究室では、日本では秩父や愛媛県、海外ではオマーン、モンゴルなどの様々な地域で、地表に露出したマントル岩石を調査しています。さらに、潜水艇「しんかい6500」による海洋底の調査などを行うことで、蛇紋岩化作用の研究を行なっています(図4)。最近では、海洋プレートが地表にのし上がった地質体が露出しているオマーン国において行われた陸上掘削プロジェクトに参加し、地殻とマントルの境界を貫く掘削コアを解析し、下部地殻をどのように流体が浸透しているのか、またそこでどのように水素が発生しているかを明らかにする研究を進めています(Yoshida et al. accepted)。



図4 「しんかい6500」によるトンガ海溝調査(左)と「ちきゅう」によるオマーンオフィオライトのコア記載(右)

また、蛇紋岩化作用の反応プロセスを理解するために、実験室での水熱反応実験を行なってきました。マントルの岩石は地殻よりもシリカ(SiO_2)に乏しい特徴を持っています。そのため、マントルと地殻の境界では、海水が循環するとマントルにシリカを供給される特殊な状況になります。この熱水循環系を理解するために、反応容器の中に模擬的に地殻-マントル境界を設定して、最長8000時間にも及ぶ反応実験を行いました。実験としては長いものですが、地球の100万年を単位とするようなプロセスとしてはかなり短期間なものです。実験の結果、地殻-マントル境界で特徴的な反応が起こり、境界から離れるに従って、反応経路やその進行度合いが系統的に変化するということがわかりました。さらに、生成物が作り出す空間パターンを反応-輸送モデリングと機械学習の手法を用いることより、反応カインेटクスや元素拡散の解析を行なっています(Ogasawara et al., 2013; Oyanagi et al., 2020)。

マントルの岩石は、水とともに、二酸化炭素を炭酸塩として固定化する高い反応性を持っています。このため、地球の歴史において、表層の気候変動に影響を与えてきたと考えられており、また、現在の人為的な二酸化炭素地中固定の方法としても期待されています。このようなマントルと流体の研究を通じて、海底が実効的にどれほど浸水して

いて、それが環境や地下生物圏にどのような影響を与えているかを理解し、自然の仕組みを利用して環境問題への解決につなげていきたいと思っています。

5. 岩石の組織形成と情報抽出

これまで述べてきたように地殻やマントルの内部で起こっている化学反応や物質移動は、表層の環境、生態系やそして私たちの人間社会にも大きな影響を与えます。しかし、通常、その「地球の動き」や「岩石の形成プロセス」をその場で観察することはできません。このような岩石が経験してきた履歴は、過去の地殻変動を経て地表に現れた、岩石の空間パターン、岩石組織に残されています。私たちは、この岩石の組織を数値モデルにより再現しながら、理解しようとしています(Okamoto and Shimizu, 2015; Okamoto et al., 2015; Shimizu and Okamoto, 2016; 岡本・桑谷, 2017; Yoshida et al., accepted)。

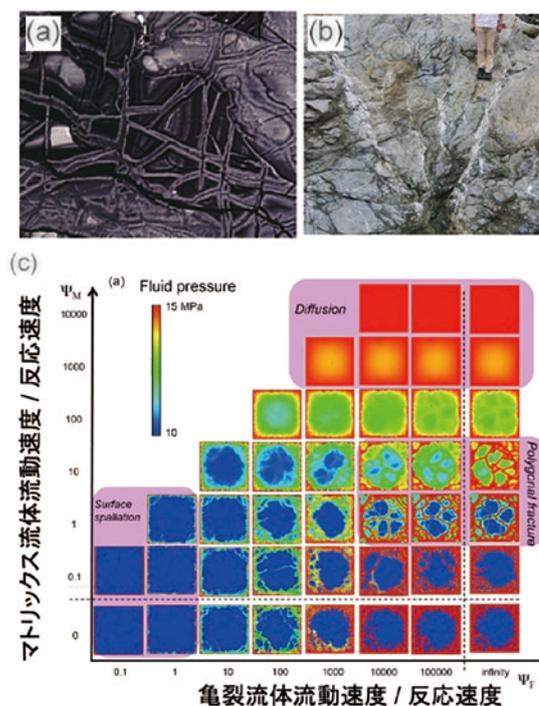


図5 (a)海洋底の蛇紋岩組織と(b)マントルの炭酸塩化の亀裂、(c) 離散要素法による反応による亀裂パターンの変化(Shimizu and Okamoto, 2016修正)。

例えば、マントル岩石の蛇紋岩化(水を吸収する反応)や炭酸塩化(二酸化炭素を吸収する反応)が進行すると、最大50%もの体積膨張が起こります。私たちが室内で反応実験を行う際には、通常、岩石や鉱物の粉末を用いますが、実際の地下環境では、岩石が流体との反応により膨張すると H_2O や CO_2 流体の通り道である空隙が閉塞してしまうというパラドックスが存在します。したがって、本質的な問題の1つは、化学反応そのものよりも、地下でどのように流体浸透を維持しながら反応が進行するか、ということです。この問題を解く鍵は、天然の蛇紋岩などで観察される、特徴的なパターンで発達するき裂ネットワークにあります

(図5)。私たちは、離散要素法を用いたモデリングを行って、岩石の反応に関連するき裂形成メカニズムを明らかにする研究を進めています。離散要素法では、粉体の挙動をシミュレーションするために発達した手法ですが、要素をバネで結びつけて岩石を表現することができます。私たちはこの岩石モデルに、地下で起こる化学反応と流体流動を組み込む新しいモデルを開発しました。これにより、マントルに流体が浸透すると、岩石が反応によって膨張し、その結果の不均質な応力場で岩石が割れて、流体がさらに浸透することができるということを示しました (Okamoto and Shimizu, 2015; Shimizu and Okamoto, 2016)。このようなき裂パターンは、反応の種類や、反応速度と流体移動速度の兼ね合いによって系統的に変化することを示しました。このような数値シミュレーションによって得られたパターンと天然の岩石組織を比較するとき、現時点では、直感的に「似ている」ものを選んで解釈することが多いのが現状です。今後は、機械学習のアプローチなどを用いて、生成モデルやパターン特徴量自体を選択することで、岩石に記録された情報から、地殻やマントルの反応現象を逆問題として解いて、そのダイナミクスを明らかにしていきたいと考えています。

6. おわりに

この30年の間に固体地球の物質科学は飛躍的に進歩して、相平衡の熱力学によって、地球のコアまでどんな物質が安定に存在できるかを予測できるようになってきました。しかし、今後、増大していく地球規模の環境問題や資源・エネルギー問題、大規模な自然災害に対応していくためには、地球の静的な物質分布ではなく、ダイナミックな地殻現象を理解し、予測する必要があると考えています。私たちは、水熱実験や数値シミュレーションをうまく使いながら、情報がスパースな地圏環境を理解し、持続可能な社会のためにその仕組みを有効利用するための研究を展開していきたいと思っています。

参考文献

- [1] Saishu, H., Okamoto, A., Tsuchiya, N., (2014) The significance of silica precipitation on the formation of permeable-impermeable boundary within Earth's crust. *Terra Nova*, 26, 253-259.
- [2] Okamoto, A., Saishu, H., Hirano, N. & Tsuchiya, N. (2010) Mineralogical and Textural variation of silica minerals in hydrothermal flow-through experiments: Implications for quartz vein formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 3692-3706.
- [3] Okamoto, A., Sekine, K. (2011) Textures of syntaxial quartz veins synthesized by hydrothermal experiments. *Journal of Structural Geology*, 33, 1764-1775.
- [4] Amagai, T., Okamoto, A., Niibe, T., Hirano, N., Motomiya, K., Tsuchiya, N. (2019) Silica nanoparticles produced by explosive flash vaporization during earthquakes. *Scientific Reports*, 9, 9738.
- [5] Weatherley, D.K., Henley, R.W. (2013) Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NNGEO1759.
- [6] Kelly D.S., Karson, J.A., Blackman, D.K., Fruth-Gree, G.L., Butterfield, D.A., Lilley, M.D., Olson, E.J., Schrenk, M.O., Boe, K.K., Lebon, G.T., Rivizzigno, P., the AT3-60 Shipboard Party (2001) An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N. *Nature*, 412, 145-149.
- [7] Yoshida, K., Okamoto, A., Shimizu, H., Oyanagi, R., Tsuchiya, N., Oman Drilling Project Phase 2 Science Party, Fluid infiltration through Oceanic lower crust in response to reaction-induced fracturing: Insights from serpentinized troctolite and numerical models. *Journal of Geophysical Research*, accepted.
- [8] Oyanagi, R., Okamoto, A., Tsuchiya, N. (2020) Silica controls on hydration kinetics during serpentinization of olivine: Insights from hydrothermal experiments and a reactive transport model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 270, 21-42. doi.org/10.1016/j.gca.2019.11.017
- [9] Ogasawara Y., Okamoto A., Hirano N., Tsuchiya N. (2013) Coupled reaction and silica diffusion during serpentinization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 119, 212-230.
- [10] Okamoto, A., Kuwatani, T., Omori, T., Hukushima, K. (2015) Free-energy landscape and nucleation pathway of polymorphic minerals from solution in a Potts lattice-gas model. *Physical Review E*, 92, 042130.
- [11] 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.
- [12] Shimizu, H., Okamoto, A. (2016) The roles of fluid transport and surface reaction in reaction-induced fracturing, with implications for the development of mesh textures in serpentinites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171, 73.
- [13] 岡本 敦, 桑谷 立 (2017) 変成岩組織と鉱物組成累帯構造からの情報抽出. *日本地質学雑誌*, 123, 733-745

著者略歴

おかもと あつし
岡本 敦

1976年1月生まれ

1998年3月 東京大学理学部地学科卒業

2000年3月 東京大学大学院理学系研究科博士前期課程修了 (地質学専攻)

2003年3月 東京大学大学院理学系研究科博士後期課程修了 (地球惑星科学専攻)

2003年4月 静岡大学理工学研究科 日本学術振興会特別研究員 (PD)

2005年9月 東北大学大学院環境科学研究科 助手

2007年4月 東北大学大学院環境科学研究科 助教

2011年10月 東北大学大学院環境科学研究科先進社会環境学専攻 准教授

2020年4月 東北大学大学院環境科学研究科先進社会環境学専攻 教授