

地球化学プロセスと地震発生周期の関係性を考える

最首花恵¹⁾・大坪 誠²⁾

1. はじめに

地球内部の物理的特性や物質移動の時間空間変化は、わたしたちの足元で起こっているが、直接観察することができません。そのため、それらの理解は地球科学の大きな課題のひとつとなっています。特に日本の防災・減災政策やエネルギー環境分野の発展に、地球内部の知見は必要不可欠といえます。これまでも、沈み込み帯のプレート境界そのものや、プレート境界から派生する巨大分岐断層の活動により生じる巨大地震とそれに関連するといわれるスロー地震の研究が多くなされてきました。特に近年、南海トラフにおける将来の巨大地震と津波による大規模被害が予想されており、地震発生周期の再検討の必要性が強く指摘されています。また、火山国である日本は地熱のポテンシャルが高いため、天候などに左右されない安定的な国産エネルギーである地熱エネルギーの利用に期待が高まっています。

従来、地球内部の状態は物理情報と化学情報によって描かれます。特に地震発生メカニズムの検討や地熱ポテンシャル評価の多くは、地質調査や物理探査などから得られる物理情報を主要データとして議論されてきました。それらは空間的理解には大いに役立ちますが、一方で時間変化の理解については、反応速度を扱う化学情報の重要性も示唆されています。最近、筆者らが取り組んだ Saishu *et al.* (2017) の研究成果により、地震発生周期に関する議論に新しい地球化学反応モデルが提案されました。今回はその研究成果について紹介します。

2. 地震発生周期と鉱物脈の関係

沈み込み帯のプレート境界や巨大分岐断層では、マグニチュード 8 を超える巨大地震が 100 ~ 1,000 年オーダーの周期で繰り返し発生していることが示唆されています。しかし地球内部の状態の時間変化を直接測定することは難しいため、地震発生周期を定量的に評価した研究はほとんどありませんでした。

多くの地球物理探査により、地震が発生する断層付近では岩石中の流体圧が高いことが知られています。このことから、断層周辺の流体圧が上昇すると、断層の強度が低下して断層が滑りやすくなり、地震が発生する、というメカニズムが考えられています。これは、高速道路で自動車が水たまりの上を走るとスリップしやすくなる現象に例えることができます。流体圧が変化する理由はいくつか考えられますが、鉱物の溶解析出反応による鉱物脈の形成もそのひとつです。地球の内部には水(地殻流体)が存在し、地殻岩石の隙間や亀裂を移動しています。地殻流体は温度圧力条件等により、周りの岩石鉱物を溶かしこんだり、溶かしこんだ成分を析出沈殿させたりします。析出した鉱物で岩石亀裂が埋まったものは「鉱物脈」と呼ばれ、地球内部で流体が流れ、化学反応が起こった証拠として、普遍的に存在しています。さらに、岩石亀裂(流体の通り道)が鉱物で埋まった状態は、岩石の孔隙率や透水率が鉱物析出反応の前後で変化したことも示唆します。もし地殻流体が鉱物脈形成後も供給されるならば、このような岩石の孔隙率や透水率の変化により、流体圧が上昇するかもしれません。つまり、鉱物脈の形成が、流体圧の上昇、そして地震発生に寄与する可能性を示していると考えられるわけです。

地震が発生すると、断層周辺への力のかかり方が変化して、岩石に引っ張り亀裂が生じることが知られています。この時の温度圧力変化は、鉱物の溶解析出反応と鉱物脈形成に寄与します。特にシリカは大陸地殻に豊富に存在しており、地震が発生する環境では石英が安定して存在するため、断層沿いには岩石亀裂を石英が埋めた石英脈が数多く形成されます(第 1 図; Otsubo *et al.*, 2016)。

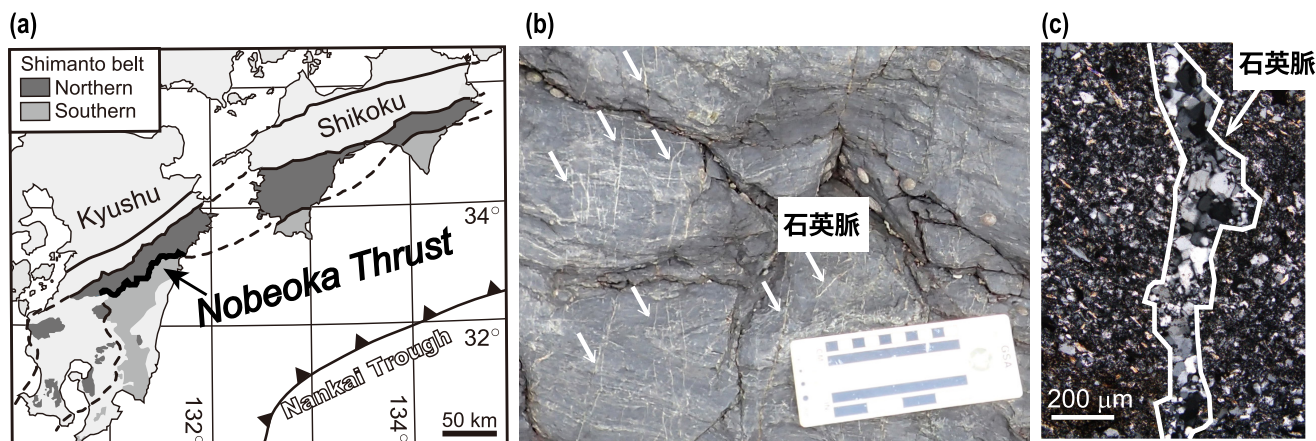
3. 石英脈形成時間スケールの計算モデル

地震発生と流体圧、流体圧と岩石特性(孔隙率・透水率)、そして岩石特性と石英脈形成の関係から、Saishu *et al.* (2017) は石英脈形成時間と地震発生周期との比較に取り組みました。この研究では宮崎県北部の延岡衝上断層周辺で認められる石英脈を扱いました。延岡衝上断層は、

1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター
(兼) 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

2) 産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

キーワード: 石英脈, 断層, 地震発生周期



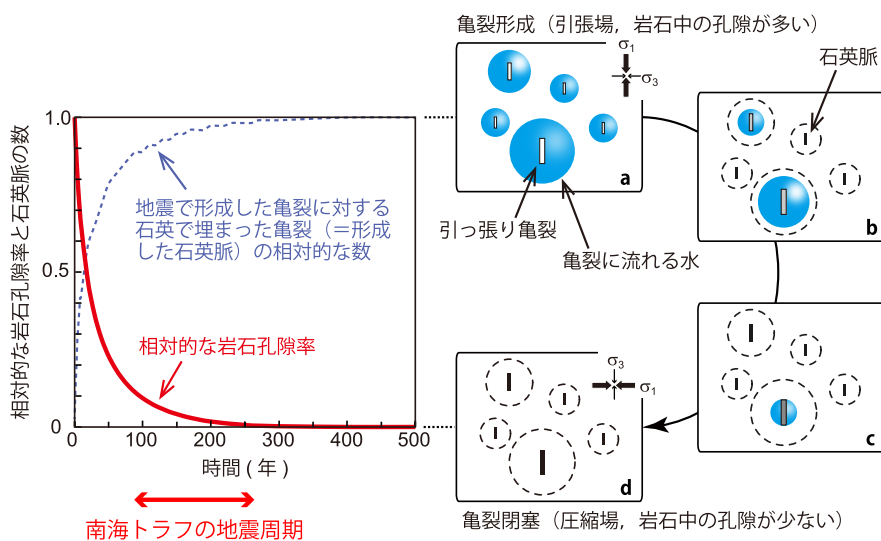
第1図 宮崎県延岡衝上断層の石英脈。(a) 調査対象の延岡衝上断層の位置。(b) 露頭で見られる石英脈(矢印は石英脈を示す)。スケールのプレートは16 cm。(c) 石英脈の偏光顕微鏡観察(modified after Saishu *et al.*, 2017)。

四万十帯北部(白亜系)と四万十帯南部(新第三系)を境とする衝上断層(低角逆断層)であり、九州から紀伊半島まで追跡が可能な巨大な地質境界です。南海トラフの巨大分岐断層の陸上アナログとして考えられています。ここでは、岩石の引張亀裂を石英が埋めた石英脈が多く分布しています(第1図; Otsubo *et al.*, 2016)。

今回の研究では、新しい石英脈形成時間の計算モデルが提案されました。従来は平衡論や拡散モデルが主流でしたが、Saishu *et al.* (2017)では移流モデルと石英の結晶成長速度論を組み合わせたモデルを構築しました。このモデルを用いることにより、岩石の引張亀裂内部の水と母岩中の水との圧力の違いによる石英溶解度の変化から、シリカが亀裂内部に石英として析出して亀裂を埋め、その結果として石英脈となる時間を見積もることができました。

4. 南海トラフ巨大地震周期と石英脈形成モデル

陸上の延岡衝上断層周辺の岩石が変形を経験した当時の環境に相当する深さ10 km、温度250°Cの条件下で、延岡衝上断層周辺で観察される平均サイズの石英脈(長さ約7 cm、開口幅約50 μm)の形成時間を計算したところ、延岡衝上断層周辺において推定される引張り裂内部の流体圧変化(10-25 MPa)によって、石英脈は6年から60年程度で形成するという結果が得られました。また、平均サイズより大きな亀裂でも、延岡衝上断層周辺に存在する石英脈のほとんどが、300年以下で形成するという結果となり、南海トラフなど巨大分岐断層で発生する巨大地震の繰り返し周期(100年オーダーから1,000年オーダー)の時間スケールと相関性がありました(第2図)。



第2図 延岡衝上断層における石英脈形成による相対的な岩石孔隙率と石英脈の数の時間変化と石英脈形成過程モデル(modified after Saishu *et al.*, 2017)。

本研究成果により、地震が発生しやすい流体圧まで上がる過程と石英脈形成過程とが密接に関係している可能性が、世界で初めて定量的に示されました。また、これまで物理情報に重きをおいていた地震の研究分野に、鉱物脈形成という地球化学情報の重要性が提示されました。この成果が地震発生メカニズムや周期のさらなる理解のための新機軸の第一歩になることを期待します。

5. 今後の研究展開

Saishu *et al.* (2017) では、地球化学だけではなく、地震学、地質学、岩石力学、などの多様な情報を統合し検討を行いました。今後、分野を超えた連携研究に取り組み、本研究の新しい計算モデルを様々なフィールドに応用することにより、地球物理学と地球化学の両方の観点から、地震発生メカニズム・条件・周期の定量的な評価方法を確立していく必要があると考えます。

また、本研究成果は地熱ポテンシャル評価への応用も期待されます。地熱エネルギーは地下から熱水や蒸気を取り出して利用しますが、これもまた地下の熱水(流体)と地熱貯留層や周辺の熱水流動の状況を支配する環境条件(透水性など)に依存します。特に、温度が高いほど鉱物溶解析出反応速度は速くなるため、地熱地域では化学反応が地下の特性により大きな影響を及ぼす可能性があります。これまでの地熱ポテンシャル評価は、主に地質調査や物理探査による物理情報に基づいており、化学反応に依存するエネルギー量の時間変化は評価されていませんでした。今後、多様な分野の専門家と議論し、本研究の新しい計算モ

デルをポテンシャル評価に応用できれば、地熱貯留層の透水性の時間変化を見積もり、時間軸が加わった新しい地熱ポテンシャル評価手法の構築、そして地熱エネルギーの持続可能性を定量的に評価できるかもしれません。

文 献

- Otsubo, M., Miyakawa, A., Kawasaki, R., Sato, K., Yamaguchi, A. and Kimura, G. (2016) Variations in stress and driving pore fluid pressure ratio using vein orientations along megasplay faults : Example from the Nobeoka Thrust, Southwest Japan. *Island Arc*, 25, 421-432.
- Saishu, H., Okamoto, A. and Otsubo, M. (2017) Silica precipitation potentially controls earthquake recurrence in seismogenic zones. *Scientific Reports*, 7, 13337.

SAISHU Hanae and OTSUBO Makoto (2019) Considering the relationship between geochemical process and the recurrence interval of earthquakes.

(受付:2018年12月28日)