鉱物脈組織から読み解く地殻流体流動

Vein texture: a window for fluid dynamics in the crust

岡本 敦 (Atsushi OKAMOTO)*

Fluids in the Earth's crust play crucial roles in various geological phenomena including earthquakes, volcanism and formation of ore deposits. Mineral-filling veins are fossils of fluid-filled fractures, but it is not easy to extract information on nature of fluid flow during vein formation. Mineral veins in the metamorphic rocks show systematic variation in internal textures (grain shape, mineral distribution, crystallographic orientation, relation to the host rock) as a function of aperture size and host rock. Hydrothermal experiments for silica precipitation have revealed that the occurrences and mineralogy of silica minerals are strongly controlled by solution chemistry (supersaturation, minor elements), rock substrates (quartz distribution, grain size), fracture geometry (aperture distribution, surface roughness) as well as temperature, which results in a variation in vein texture. Combining modeling and analyses of natural and synthetic veins, vein texture is a potentially useful indicator of hydrological properties (flow velocity, flow direction, degree of supersaturation, duration of sealing etc.) in the crust.

Keywords: Mineral vein, Texture, Fluid flow, Permeability, Geothermal area, Crust, Hydrothermal experiments

I. はじめに

地球内部に存在する流体は、岩石のレオロジーや物質・エネルギー移動の性質を大きく変化させ、結果として、地震発生、火山形成、鉱床の発達などに大きな影響を与える。とくに、地殻において亀裂は流体の主要な通り道であり、亀裂システムの時間的・空間的バリエーションを知ること、地殻の水理学的システムを理解する上で非常に重要である。現在、地球内部の流体の分布は様々な観測により明らかにされつつあるが、流体流動の実態は未だによく分かっていない。

変成帯、付加体、熱水性鉱床など地殻深度で形成した地質体には普遍的に鉱物脈が観察される。鉱物脈形成は、非常に短期間の地質現象であること、母岩形成との前後関係が分かりやすいことから、変形や流体活動の指標として広く用いられてきた。鉱物脈の産状、流体包有物、充填鉱物の化学組成や内部組織についてこれまでに膨大な研究があり、形成時の応力方向、温度圧力条件、流体の起源などが推定されている。その一方で、流体流動の基本情報(流体

の移動方向・移動速度、亀裂間隙幅、亀裂閉塞時間、流体組成など)についてはあまり分かっていない。その大きな理由は、ごく一部の流体包有物以外は、関与した流体がほとんど残っていないためである。

鉱物脈は石英や方解石など比較的シンプルな鉱物組み合わせである。その一方で、多様な微細組織を示すことが知られている(Oliver and Bons, 2001; Okamoto *et al.*, 2008; Bons, 2012;)。ここでいう微細組織とは、薄片スケールの鉱物の空間分布、サイズ、結晶方位、形状などである。形成後の塑性変形の影響を受ける場合もあるが、基本的には鉱物脈組織は、亀裂中で結晶が析出したときのプロセスと環境の情報を保持していると期待される。本研究では「地殻流体の動的挙動を鉱物脈から読み解く」ために、鉱物脈の組織に着目し、2つのアプローチをとる。1つは、天然の鉱物脈組織から系統性を抽出し、モデル化するものであり、もう1つは、水熱実験によって実際に鉱物脈を作成し、組織のバリエーションを生み出す要因を明らかにするものである。

doi: 10.2465/gkk.131129

(平成 25 年 11 月 29 日受付, 平成 25 年 12 月 12 日受理, 担当編集委員: 赤坂正秀)

* 東北大学大学院環境科学研究科, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20

* Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-20 Aoba Aramaki, Sendai 980-8579, Japan E-mail: okamoto@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

II. 天然の鉱物脈組織

亀裂充填鉱物の材料の輸送過程は大きく以下の2つが考えられる：亀裂に沿った流体流入と、母岩から元素拡散である。前者は多量の流体流入を必要とし、後者は流体が流れる必要がない。一般的に、地殻浅部の熱水性鉱物脈では前者、高変成度の変成岩中の鉱物脈は後者で解釈されることが多い。元素拡散はしばしば脈周囲の反応帯から読み取られてきた(Fisher *et al.*, 1995)。

三波川変成帯の上昇期に形成した鉱物脈は、結晶成長組織をよく保存し、特徴的な組織を示す(Okamoto *et al.*, 2008; Morohashi *et al.*, 2008)。泥質変岩中の石英—緑泥石—曹長石—カリ長石の鉱物脈は、ファイバー状結晶が亀裂を橋渡ししており(伸長結晶組織; Fig. 1a), 石英—曹長石—方解石の鉱物脈は、自形で粒状の石英によって充填されている(塊状組織)(Fig. 1b)。前者は母岩の組成に対応して脈内の鉱物分布が変化するのに対して、後者の鉱物分布は母岩組成とは無関係に石英と曹長石によって充填される。この2種類の鉱物脈は、同じ露頭ではほぼ同時期に形成されたものであるが、みかけの亀裂間隙幅(脈内の包有物トレイルなどから推定)を比べると、前者が非常に小さく、後者は1桁以上大きい。このような組織の特徴から、間隙の狭い亀裂では流体は流れず元素拡散が支配的で、広い間隙の亀裂では過飽和な流体が流入し、流体中で核形成+成長が起こったと考えられる。亀裂間隙に対する同様の傾向は、方解石の炭素同位体組成からも示唆される(Morohashi *et al.*, 2008)。このような観察は、流体移動が亀裂ネットワーク中で間隙の大きい亀裂に集中することを示唆している。

これまでの研究において、シリカ濃度や同位体組成などを用いて「鉱物脈をつくるのに必要な流体の総量」というものがしばしば計算されてきた(Bons, 2001)。しかし、この見積もりでは、鉱物脈の形成時間と流体移動速度を独立

には決定できない。一方、前述の三波川変成帯の塊状組織の鉱物脈の石英粒子(Figs. 1b and 1d)は、マグマだまりの結晶成長と同様に、核形成した結晶が浮遊しながら成長したと推論できる(Okamoto and Tsuchiya, 2009)。そのとき流体の上昇速度は、結晶の沈降速度とほぼバランスしていたであろう。結晶成長と結晶沈降を組み合わせたモデルを考え、最大1 mm程度の石英粒子をもつ上記の鉱物脈から流体の上昇速度は0.01–0.1 m/sと見積もられた(Okamoto and Tsuchiya, 2009)。同様に、熱水性鉱物脈中の岩石破砕片の産状から、流速を20 m/sと見積もられた例がある(Oliver *et al.*, 2006)。上記の0.1 m/sという速度は、通常、地殻岩石の透水係数とダルシー則から予想されるよりもオーダーで大きく(Bons, 2001)、深部低周波微動が動く速度と同じくらいである。このような脈は、ゆっくりとクラックが伝搬することで流体が流れた証拠なのかもしれない。

III. 水熱実験による人工石英脈

シリカ溶解度は、通常、温度と圧力が高いほど大きくなるが(Manning, 1994)、<100 MPaの条件では、水の臨界点(374 °C, 22.1 MPa)近傍で極大値を持つ。著者らは、石英脈組織のバリエーションを理解するために、流通式水熱実験装置を開発し、シリカ析出実験を進めてきた(Okamoto *et al.*, 2010; Okamoto and Sekine, 2011; Saishu *et al.*, 2012)。臨界点近傍(360 °C, 31 MPa)で石英を溶かし、より高温の超臨界状態(430 °C, 31 MPa)にもちこむと、一週間の実験で多量のシリカ析出物が得られる。

実験による成果の1つは、析出シリカ鉱物の種類や産状が、溶液組成と基板岩石によって変化することを示したことである(Okamoto *et al.*, 2010)。平衡に近いSi濃度の場合($C_{Si}/C_{Si,eq} < \sim 1.2$)は、花崗岩基盤の石英の成長のみが起こり、高過飽和条件($C_{Si}/C_{Si,eq} > \sim 1.2$)では、基盤とは無関係なシリカ析出が起こる。また、純粋なSi溶液では

Fig. 1. Thin section photos of the mineral veins hosted by the pelitic schists in the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. (a) quartz-albite-chlorite-K-feldspar veins with stretched crystal texture, and (b) quartz-albite-calcite vein with blocky texture.

石英の他に準安定なシリカ鉱物(アモルファスシリカ、クリストバライト)も析出するのに対して、花崗岩を溶解して作成した溶液からは、石英の析出が支配的であった(Okamoto *et al.*, 2010)。この原因は溶液中の微量元素(Al, Na)であり、微量元素濃度が増加すると支配的な析出物がアモルファスシリカ、クリストバライト、石英へと系統的に変化することがわかった(Fig. 2; Saishu *et al.*, 2012)。天然の地殻流体には長石などの溶解により流体にAlやNaが多量に含まれており、そのことが石英脈には準安定なシリカ鉱物が観察されない理由なのかもしれない。

鉱物脈の幅は、必ずしも亀裂開口幅を表すわけではない。亀裂形成-鉱物析出を繰り返せば、一回の開口幅が小さくとも太い脈をつくるのが可能だからである(Ramsey, 1980)。亀裂開口幅を推定する有効な組織として、隣り合う粒子の間の“成長競争”の有無がある。成長競争が起これば、結晶が成長するにつれて幅が広がる(Fig. 3)

Fig. 2. X-ray diffraction (XRD) patterns of silica precipitates of hydrothermal experiments at 430°C and 31 MPa with variable Al concentrations in the solution, C_{Al} (Saishu *et al.*, 2012). In the case of $C_{Al}=0$ mg/kg, the product was amorphous silica.

Fig. 3. Thin section photo of polycrystal quartz growth synthesized by flow-through hydrothermal experiments (Okamoto and Sekine, 2011). Quartz crystals show the texture of competitive growth.

のに対して、起こらない場合はファイバー状の結晶が成長する。この成長競争は自由空間で成長したこと(鉱物脈の開口速度>>結晶成長速度)を示唆しており、基盤の結晶方位、亀裂間隙幅、亀裂面の凹凸などでコントロールされる(Bons, 2012)。スリットを入れたチャート基盤から多結晶石英の成長実験(Okamoto and Sekine, 2011)では、成長初期(成長する結晶が自形面をだすまで)に亀裂の両側からの結晶がぶつかるまで成長すると成長競争はおこらず、すなわち、壁岩の石英粒径と亀裂間隙幅の相対的な大きさが重要であることを示された。基盤石英の結晶成長様式、石英の核形成、準安定シリカ鉱物析出は鉱物脈組織として反映されるはずであり、より詳細な実験を行うことにより、シリカ濃度、微量元素濃度、間隙幅、母岩の種類などのパラメータ空間の中で鉱物脈組織が分類し、明確な意味を与えられると期待できる。

亀裂に過飽和溶液が流れ込むと、結晶成長により亀裂がジャッキアップされる可能性がある(Wiltschko and Morse, 2001)。Sekine *et al.* (2011)では、樹脂製の微細流路のなかで溶液からNaCl結晶を成長させ、複屈折をその場観察し、成長時に周囲の壁を押す圧力(2 MPa)が発生していることを実際に評価した。一般的に、亀裂(断層)のシーリングは、強度の回復と流体圧の上昇を引き起こし、地震サイクルに重要な役割を果たすと考えられている(Sibson, 1988)。一方、亀裂がジャッキアップされるならば、鉱物析出は逆に強度低下に働くはずである。今後、実際に亀裂がシールする際の力学的・水理学的応答について詳細な実験を行っていきたい。

IV. 地殻の水理学的システムにおけるシリカの溶解-析出の重要性

大陸地殻では、浅部では透水率が大きく、深さに伴って劇的に減少する一方、深部ではあまり変化しない(Ingebristen and Manning, 2010)。その透水域-不透水域の境界(典型的な地殻では深さ10-15 km)は、脆性-延性遷移領域に対応すると考えられている。では、シリカの溶解・析出は地殻の透水率にどのような影響を与えるのであろうか?

葛根田は日本有数の熱水卓越型の地熱地帯であり、NEDOにより掘削された深部坑井WD-1aは、浅部の熱水対流域と深部の熱伝導域の境界(深度3100 m, 380 °C, 24 MPa)を突き抜けて、最深部(3779 m)において500 °C以上に到達している(Doi *et al.*, 1998; Fig. 4)。WD-1aの温度プロファイル(Ikeuchi *et al.*, 1998)に沿って石英の溶解度を計算すると、2300 mまでは溶解度が深さとともに増加するが、その後は減少し、3100 m近傍で極小値をとってふたたび増加する(Saishu *et al.*, in press; Fig. 4)。この溶解度の極小値は葛根田の水理学的境界とほぼ一致し、水が超臨界流体になる領域と対応する。170-430 °Cの温度条件でシリカの析出実験を行うと、低温では全く析出が起こら

Fig. 4. (a) Temperature profile of the well WD-1a in the Kakkonda geothermal field, Japan (Ikeuchi *et al.*, 1998) and (b) quartz solubility in water, Si (mg/kg) along the P - T condition of WD-1a under hydrostatic condition, calculated by Manning (1994) (Saishu *et al.*, in press).

ず、400 °C以上において核形成を伴う顕著なシリカの析出が起こる (Saishu *et al.*, in press)。すなわち、葛根田の水理学的境界は、平衡論的にも速度論的にも非常にシリカが析出しやすい場所といえる。葛根田では、350 °Cの等温線 (WD-1a では深度 2300 m) に沿って強い反射面が観察され、ほとんどの地震はそれよりも浅部で起こっている。この深度はシリカ溶解度の極大点にあたり、亀裂はシールされることなく維持される。一方、380 °C (シリカ溶解度の極小点) においては、亀裂ができてシリカの析出によってすぐに閉塞し、不透水なシリカレイヤーを形成し、熱水対流領域の範囲を規定しているのかもしれない。このようにシリカの溶解析出は地熱地帯の水理学的システムや脆性-延性遷移領域の深度に多大な影響を与えられ、その普遍性についての検討は今後の課題である。

V. おわりに

地殻や沈み込み帯における流体流動の痕跡は、鉱物脈をはじめ岩石の中に多く残されている。しかし、岩石は「時間積分した結果」であるため、流体のダイナミクスという「時間発展」を理解するには多くの困難を伴う。1つの有効な方法は、「組織」という空間パターンの形成過程を理解し、最大限に情報を抽出することである。その際、水熱実験やシミュレーションの結果と天然組織のパターンを比較、マッチングする基準・手法の開発が重要であろう。観測技術の進歩により、地殻流体の静的な分布のみならず、地震前後の流体の動きが読み取れるようになりつつある (Nakajima *et al.*, 2013)。広域的な観測情報と、鉱物脈からの亀裂流体流動の情報を組み合わせることにより、地殻における流体のダイナミクスをより詳細に理解できるので

はないかと期待している。

謝 辞 この研究は、東北大学で職を得てからこれまでの成果の一部をまとめたものである。常日頃から多大なご支援をいただき、本研究奨励賞に推薦していただいた東北大学環境科学研究科の土屋範芳教授に深く御礼申し上げます。東京大学の学生時代にご指導いただいた鳥海光弘教授、静岡大学の研究員時代にお世話になった増田俊明教授には、研究の取り組み方、自然に対する見方において多大なる影響を受けた。また、学生時代から今日まで、多くの先生方、先輩方、学生諸君にめぐまれて、ここまで研究を進めてこられたものと実感している。この場を借りて、厚く感謝申し上げます。

引用文献

- Bons, P.D. (2001): The formation of large quartz veins by rapid ascent of fluids in mobile hydrofractures. *Tectonophys.*, **336**, 1–17.
- Bons, P.D., Elburg, M.A. and Gomez-Rivas, E. (2012): A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *J. Structural Geol.*, **43**, 33–62.
- Doi, N., Kato, O., Ikeuchi, K., Komatsu, R., Miyazaki, S., Akaku, K. and Uchida, T. (1998): Genesis of the plutonic-hydrothermal system around quaternary granite in the Kakkonda geothermal system, Japan. *Geothermics*, **27**, 663–690.
- Fisher, D.M., Brantley, S.L., Everett, M. and Dzvonik, J. (1995): Cyclic fluid flow through a regionally extensive fracture network within the Kodiak accretionary prism. *J. Geophys. Res.*, **100**, 12881–12894.
- Ingebristen, S.E. and Manning, C.E. (2010): Permeability of the continental crust: dynamic variations inferred from seismicity and metamorphism. *Geofluids*, **10**, 193–205.
- Manning, C.E. (1994): The Solubility of Quartz in H_2O in the Lower Crust and Upper Mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 4831–4839.
- Ikeuchi, K., Doi, N., Sakagawa, Y., Kamenosono, H. and Uchida, T. (1998): High temperature measurements in well WD-1a and the thermal structure of the Kakkonda geothermal system, Japan. *Geothermics*, **27**, 591–607.
- Morohashi, K., Okamoto, A., Satish-Kumar, M. and Tsuchiya, N. (2008): Variations in stable isotope compositions ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) of calcite within exhumation-related veins from the Sanbagawa metamorphic belt. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **103**, 361–364.
- Nakajima, J., Yoshida, K. and Hasegawa, A. (2013): An intraslab seismic sequence activated by the 2011 Tohoku-oki earthquake: Evidence for fluid-related embrittlement. *J. Geophys. Res.*, *Solid Earth*, **118**, 3492–3504.
- Okamoto, A., Kikuchi, T. and Tsuchiya, N. (2008): Mineral distribution within polymineralic veins in the Sanbagawa belt, Japan: implications for mass transfer during vein formation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **156**, 323–336.
- Okamoto, A. and Sekine, K. (2011): Texture of syntaxial quartz veins synthesized by hydrothermal experiments. *Journal of Structural Geology*. *J. Structural Geol.*, **33**, 1764–775.
- Okamoto, A., Saishu, H., Hirano, N. and Tsuchiya, N. (2010): Mineralogical and textural variation of silica minerals in hydrothermal flow-through experiments: Implications for

- quartz vein formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 3692–3706.
- Okamoto, A. and Tsuchiya N. (2009): Velocity of vertical fluid ascent within vein-forming fractures. *Geology*, **37**, 563–566.
- Oliver, N. and Bons, P. (2001): Mechanisms of fluid flow and fluid-rock interaction in fossil metamorphic hydrothermal systems inferred from vein-wall rock patterns, geometry and microstructure. *Geofluids*, **1**, 137–162.
- Oliver, N.H.S., Rubenach, M.J., Fu, B., Baker, T., Blenkinsop, T.G., Cleverley, J.S., Marshall, L.J. and Ridd, P.J. (2006): Granite-related overpressure and volatile release in the mid crust: Fluidized breccias from the Cloncurry District, Australia: *Geofluids*, **6**, 346–358.
- Ramsey, J.G. (1980): Crack-seal mechanism of rock deformation. *Nature*, **284**, 135–139.
- Rimstidt, J.D. and Barnes H.L. (1980) The kinetics of silica-water reactions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 1683–1699.
- Saishu, H., Okamoto, A. and Tsuchiya, N. (2012): Mineralogical variation of silica induced by Al and Na in hydrothermal solutions. *Amer. Mineral.*, **97**, 2060–2063.
- Saishu, H., Okamoto, A. and Tsuchiya, N. (in press): The significance of silica precipitation on the formation of the permeable-impermeable boundary within Earth's crust. *Terra Nova*, doi:10.1111/ter.12093.
- Sekine, K., Okamoto, A. and Hayashi, K., (2011): In situ observation of the crystallization pressure induced by halite crystal growth in a microfluidic channel. *Amer. Mineral.*, **96**, 1012–1019.
- Sibson, R.H., Robert, F. and Poulsen, K.H., (1988): High-angle reverse faults, fluid pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, **16**, 551–555.
- Wiltchko, D.V. and Morse, J.W. (2001): Crystallization pressure versus “crack seal” as the mechanism for banded veins. *Geology*, **29**, 79–82.