

平成 22年 4月 1日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20740304

研究課題名（和文） 地殻岩石き裂内における流体移動と鉱物析出メカニズム

研究課題名（英文） Fluid flow and mineral precipitation within fractures under crustal environments

研究代表者

岡本 敦 (OKAMOTO ATSUSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・助教

研究者番号：40422092

研究成果の概要（和文）：

岩石中の亀裂は地殻における流体の主要な通り道である。亀裂は流体から析出した鉱物（主に石英、方解石）によって充填され、鉱物脈として観察される。この鉱物脈は、非常に多様な成長組織を示す。本研究では、水熱反応装置を用いて、岩石基板上にシリカ鉱物の析出実験を行った。結果として、Si濃度、微量元素濃度、基盤岩石によって、シリカ鉱物の析出様式、形成される組織が系統的に変化することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Fractures play as dominant fluid pathways in the Earth's crust. Mineral veins, that are fractures sealed by minerals (i.e. quartz and calcite) show a variety of microtextures. In this study, we conducted hydrothermal experiments to precipitation of silica minerals under crustal conditions. We clarified that mechanisms and textural developments in precipitation of silica minerals systematically vary depending on Si concentration, minor elements in solutions and rock substrates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：岩石・鉱物・鉱床学、 変成岩

キーワード：地殻流体、鉱物脈、水熱反応実験、石英

1. 研究開始当初の背景

地球内部は主に岩石により構成されている。しかし、その中に少量の流体（主に H₂O）が含まれることにより、地球内部の変形、反応性、物質・エネルギーの移動が促進される。

とくに上部地殻には岩石の脆性破壊によって形成するき裂（割れ目）が多く存在し、流体の主要な通路になっていると考えられる。近年では、地震発生のメカニズムにもこの地殻流体が大きく関与していると考えられて

いる。例えば、震源の近傍には流体としての水が存在しているということが、近年の地震学的、または電磁気学的観測によって示唆されている。しかし、私達は地下を直接見ることは不可能であり、流体がどのように移動しているのか、また、周囲の岩石とどのような化学反応を起こしているのかは不明なままである。一方、過去に地殻深度に存在していた地質体（付加体や変成帯）の中には、鉱物によって充填されたき裂（鉱物脈）が普遍的に存在している。このような鉱物脈は、①亀裂の発生、②流体移動、③流体からの鉱物析出という3つのプロセスによって出来たと考えられ、地下の流体移動や岩石-水相互作用を記録した「物理的な化石」であると考えられる。鉱物脈は、石英や方解石といった非常にシンプルな鉱物組み合わせによってしめられている。一方、亀裂の中の結晶成長のパターンは非常にバリエーションにとんでおり、多くの情報を含んでいると考えられる。しかし、その形成メカニズムは不明であるために、鉱物脈の解釈はあいまいなのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、地殻内部の亀裂を模擬した環境を再現して、鉱物脈の主要鉱物であるシリカ (SiO_2) 鉱物（石英とその多形）を水溶液から析出させる実験を行う。すなわち、石英脈（石英で充填されたき裂）を人工的に作成する。本研究の目的は、シリカ鉱物の析出様式と組織発達を支配する要因を明らかにすること、また、天然の鉱物脈の微細組織に対して明確な物理化学的な意味づけを与えることである。

3. 研究の方法

実験装置は、ステンレス製の2つの反応管からなり、水平な流路を構成する。反応管0ではSiの過飽和溶液を作成し、反応管1で析出を起こす。温度圧力条件は、反応管0において360°C、31MPa、反応管1において430°C、31MPaである。石英の溶解度は通常、温度、圧力の上昇に伴って増加するが、圧力が100MPaよりも低い領域では、臨界点付近（374°C、22Mpa）で極大を取る。したがって、31MPaでは360°Cにおいて、石英を溶解させた溶液は、430°Cにおいて過飽和となって析出を起こす。本実験では、2種類の溶液を用いて実験を行った。1つは、石英砂を溶解させて作成したSi単成分溶液、もう1つは花崗岩砂を溶解させた多成分溶液である。どちらの溶液もSiの濃度は300-350 ppmであるが、多成分溶液には花崗岩中の長石から溶脱したAl, Na, Kが数 ppm含まれている。析出を起こす反応管1には、18本の花崗岩のブロックを基盤として設置した。実験中は、析出

前後の溶液を定期的にサンプリングし、ICP-AESによって溶液の分析を行った。また、実験後、反応管1を18個に切断し、析出物と花崗岩ブロックの重量を測定し、反応管1内部の流路に沿っての析出量と析出物を明らかにする。また、析出物は、走査型電子顕微鏡、光学顕微鏡によって観察を行い、X線回折装置と顕微ラマン分光分析装置によってシリカ鉱物の同定を行った。

4. 研究成果

実験によって、溶液からのシリカ鉱物の析出メカニズム、組織はSi濃度、微量元素の有無、岩石基盤表面の鉱物種によって系統的に変化することが明らかとなった。具体的な特徴は以下のとおりである。

(1) 過飽和度が低い条件下（平衡に近い条件）では、シリカ鉱物の析出は、岩石基盤に存在する石英のエピタキシャル成長のみが起り、他の鉱物の表面における析出は起こらない。

(2) 高過飽和度のSi単成分溶液からは、溶液のSi濃度の減少に伴って支配的なシリカ鉱物種がオパールA（アモルファスシリカ）→オパールC→石英の順に変化する。この析出は、岩石基盤に関係なく、前面を覆うように析出が起こる。実験条件（または地殻環境において）、もっとも安定なシリカ鉱物は石英であるが、準安定なオパールは、その界面エネルギーが小さいために、核形成が起こり析出が進行する。

(3) 高過飽和度のSi多成分溶液からはオパールはほとんど析出せず、石英と少量の玉髄が直接核形成して析出が起こる。このことは、溶液中に含まれる微量な元素（Alなど）が、オパールの核形成を阻害し、また、界面エネルギーの大きい石英の核形成を促進したと考えられる。

以上のように、シリカ鉱物の析出様式、鉱物種、発達する組織は溶液の組成によって変化する。このような組織は、天然で観察される鉱物脈と対応することが出来る。例えば、鉱物脈の特徴としては、亀裂の壁に存在する石英から成長しているものと、壁岩とは不連続な微粒子によって充填されているものが存在する。上記の実験結果は、壁から成長している組織は、Si濃度が低く、石英粒子が溶液中で核形成しているような後者の組織は、高いSi濃度であったことを示唆する。地殻環境下においては、温度が高い深部の方がより溶解度が高いために、石英脈を形成するためのSiに富む溶液は、可能性として深部から運ばれた流体であると考えられる。本研究によって明らかにされた析出メカニズム、組織の変化がおこる過飽和度（ $= C_{\text{Si}}/C_{\text{Si, eq}}$ ）は1.2程度であり、深部からの流体が地温勾配にそって上昇すると考えると、微粒子によ

って埋められるような組織を形成するためには、0.1–0.01m/s という非常に速い速度で流体が上昇してきた可能性を示唆する。

以上のように、流体からのシリカ鉱物の析出様式はSi濃度によって大きく変化するために、鉱物脈の組織はSi濃度、き裂閉塞の時間スケール、流体移動などの重要な情報として用いることが出来る。

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9件)

1. Okamoto A, Saishu H, Hirano N, Tsuchiya N, Mineralogical and Textural variation of silica minerals in hydrothermal flow-through experiments: Implications for quartz vein formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, 2010, 印刷中
2. Kameda J, Okamoto A, Mikouchi T, Kitagawa R and Kogure T, The occurrence and structure of vermiform chlorite. *Clay Science*, 査読有, 2010, 印刷中.
3. 中島康隆・平野伸夫・須藤孝一・岡本敦・井上千弘・土屋範芳 岩石内に隔離された流体中の有機物および微生物の非汚染検出に関する実験的検討. *地熱学会誌*, 32, 査読有, 2010, 41–48.
4. Kimura, N., Nakayama S., Tsukishima, K., Miwa, S., Okamoto, A. & Masuda, T. Determination of amphibole fracture strength for quantitative paleostress analysis using microboudinage structures. *Journal of Structural Geology*, 32, 査読有, 2010 136–150.
5. Okamoto A & Tsuchiya N Velocity of vertical fluid ascent within vein-forming fractures. *Geology*, 37, 2009, 査読有, 563–566.
6. Okamoto, A., Kikuchi, T., Tsuchiya, N. Mineral distribution within polymineralic veins in the Sanbagawa belt, Japan:

implications for mass transfer during vein formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156, 2008, 査読有, 323–336.

7. Morohashi, K., Okamoto, A., Satish-Kumar, M., Tsuchiya, N. Variations in stable isotope compositions ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) of calcite within exhumation-related veins from the Sanbagawa metamorphic belt. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 103, 2008, 査読有, 361–364.
8. Masuda, T., Nakayama, S., Kimura, N., Okamoto A. Magnitude of σ_1 , σ_2 , and σ_3 at mid-crustal levels in an orogenic belt: microboudin method applied to an impure metachert from Turkey. *Tectonophysics*, 460, 2008, 査読有, 230–236.
9. Okamoto, A., Saishu, H., Hirano, N., Watanabe, N., Tsuchiya, N. Precipitation of silica minerals by hydrothermal flow-through experiments at 200–430 °C and 30 MPa. *Transactions of Geothermal Resource Council*, 32, 2008, 査読有, 389–392.

[学会発表] (計13件)

1. 岡本敦、最首花恵、平野伸夫、土屋範芳 水熱反応によるシリカ析出様式と組織発達、日本地質学会、2009年9月5日、岡山理科大学
2. 大森康智、木村希生、岡本敦、増田俊明 西アルプスの紅簾石片岩のマイクロブーディン構造を用いた応力一歪解析、日本地質学会、2009年9月5日、岡山理科大学
3. 最首花恵、岡本敦、平野伸夫、土屋範芳 地殻流体からのシリカ鉱物析出速度、日本地質学会、2009年9月5日、岡山理科大学
4. 増田俊明、櫻井涼子、三宅智也、山之内未来、大森康智、針金由美子、岡本敦 圧痕形成に於け

る平行四辺形の法則の提唱、日本地質学会、2009年9月5日、岡山理科大学

5. Burenjargal U, Okamoto A, Tsuchiya N
Preliminary studies of the Tseel metamorphic rocks in southwestern Mongolia 日本地球惑星科学連合大会、2009年5月16日、幕張メッセ

6. 岡本敦、諸橋啓介、サティシュ クマール、土屋範芳 三波川帯上昇期に形成した鉍物脈の空間分布。日本地球惑星科学連合大会、2009年5月16日、幕張メッセ

7. Okamoto A, Shaishu, H., Hirano, N., Watanabe, N., Tsuchiya, N. Precipitation of silica minerals by hydrothermal flow-through experiments at 200-430 °C and 30 MPa. Geothermal Resource Council 2008年10月7日Reno, Nevada.

8. 岡本敦、平野伸夫、土屋範芳 流通式反応実験によるシリカ析出様式と組織発達。日本鉍物科学会、2008年9月22日、秋田

9. 諸橋啓介, 岡本敦, Madhusoodhan Satish-Kumar, 土屋範芳 三波川変成帯の方解石を含む鉍物脈の同位体組成からみた流体移動, 日本地質学会, 2008年9月22日, 秋田

10. 亀田純、岡本敦、北川隆司、小暮敏博 バーミキュラー状緑泥石の産状と構造。粘土科学討論会、2008年9月4日、沖縄。

11. Okamoto A, Tsuchiya N. Kinetics and textural development of quartz vein. Goldschmidt Conference, 2008年7月15日, Vancouver

12. 諸橋啓介, 岡本敦, Madhusoodhan Satish-Kumar, 土屋範芳 Effect of lithology on calcite-vein formation in the Sanbagawa metamorphic rocks. 日本地球惑星科学連合, 2008年5月25日, 幕張。

13. 岡本敦、平野伸夫、渡邊則昭、土屋範芳石英ベイン形成のカイネティクスと組織発達。日本地球惑星科学連合, 2008年5月25日, 幕張。

〔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・助教
研究者番号：40422092

(2)研究分担者 ()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：