

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654180

研究課題名（和文）鉱物・流体包有物形成における分別作用：岩石形成過程への新アプローチ

研究課題名（英文）Fractionation during formation of mineral/fluid inclusions: A new approach for understanding of rock-forming processes

研究代表者

岡本 敦 (OKAMOTO ATSUSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号：40422092

研究成果の概要（和文）：

岩石中の班晶中の鉱物包有物や流体包有物の形成メカニズムを明らかにするために、水熱反応実験と変成岩の解析を行った。石英中に包有物を取り込ませる実験では、水熱下で結晶成長する自形面を出す前のラフな成長面により包有物を取り込みやすいことを明らかにした。また、三波川変成帯のざくろ石を解析し、反応に関与しない鉱物を取り込んでいること、また周囲の粒界を割りながら包有物として取り込むダイナミックなプロセスを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

I have revealed what controls the formation of fluid/mineral inclusions in porphyroblasts, based on hydrothermal experiments on quartz crystal growth and the analyses of garnets in the metamorphic rocks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：変成岩，鉱物包有物，流体包有物，水熱実験，石英，変成岩，ざくろ石

1. 研究開始当初の背景

変成岩や火成岩は、様々な形成ステージの温度・圧力を経験し、その情報を鉱物組み合わせ・化学組成として記録している。地表に露出したこれらの岩石の経験した温度・圧力・時間経路を定量的に評価することは、地球内部の温度圧力構造とダイナミクスを理解するために不可欠である。鉱物の「組成累帯構造（結晶成長時の組成変化を示す組織）」と「包有物（母結晶に取り込まれた鉱物や流体）」は、岩石形成における「特定の時期の

情報」を抽出するための重要な組織として広く解析に用いられている。

例えば、泥質変成岩中の組成累帯構造を持つざくろ石が黒雲母+斜長石+石英を包有する場合、温度圧力経路を定量的に推定することができる (Spear 1993)。また、ジルコンに温度圧力の指標鉱物が含まれる場合、放射年代と温度圧力履歴を対応づけることが可能となる (Katayama et al. 2001, Earth and Planetary Science Letters)。しかし、不思議なことに、全岩化学組成やマトリックス鉱

物から期待されるすべての鉱物が、包有物として見つかることは非常に稀である。同様な現象は鉱物脈中の流体包有物や火成岩中のメルト包有物についてもいえる。鉱物脈内部の石英中の流体包有物の量やサイズには非常に大きなバリエーションがあり、単一結晶内においても成長時期によって包有物の量が変化する。このことは、包有物の取り込みには、成長過程や周囲の環境に支配されたある種の「分別作用」が働くことを示唆する。

私はこれまでに三波川変成帯の温度圧力履歴の解析 (Okamoto & Toriumi 2001, 2004, Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, Journal of Metamorphic Geology)、モンゴルのティール変成帯の泥質変成岩の解析、三波川変成帯の鉱物脈の解析 (Okamoto et al. 2008, Contributions to Mineralogy and Petrology, Okamoto & Tsuchiya, Geology) を行う際に、この包有物不在、選択性の問題に常に直面してきた。この問題に対する従来の対処法は、多くの岩石試料の薄片を作成し、解析可能な包有物を含む結晶を探すというものであった。しかし、このようなアプローチは多大な労力を必要とする上に、ある特定の条件下の偏った情報を取得し全体の解釈に用いるという危険性がある。鉱物・メルト・流体包有物の解析は確立した手法として広く用いられているにもかかわらず、その形成メカニズムについての研究は、これまで皆無であった。

2. 研究の目的

本研究では、地殻の代表的な構成鉱物である石英について水熱環境下の成長実験を行い、成長の過程で周囲の流体や異種鉱物を取り込むための条件（過飽和度、温度、鉱物種、サイズ、形状、界面エネルギーなど）検討す

る。本研究では、包有物形成の物理メカニズムを明らかにし、包有物のサイズ分布・数密度分布などが、岩石形成環境に対してもつ意味を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 変成岩中のざくろ石包有物の解析
変成岩中のざくろ石はもっともよく変成温度圧力の手法として用いられる。本研究では、三波川変成帯の汗見川ルートのざくろ石帯の泥質片岩とメタチャートのざくろ石中の包有物について、SEM による同定、また石英包有物に関しては、複屈折イメージングシステム、電子プローブ顕微鏡、EBSD を用いてキャラクターゼーションを行い、包有物の形成過程について考察した。

(2) 石英結晶成長に伴う包有物形成についての水熱実験

流通式水熱反応装置を開発して、超臨界状態における石英の成長実験を行った。本実験室テムは研究代表者が独自に開発したものである。この実験装置を用いて、石英結晶を析出させ、流体包有物の形成条件を解析した。また、基盤となる石英粒子の周囲に、細粒の鉱物粉末を設置し、鉱物包有物を実際に形成させる実験を行った。

4. 研究成果

(1) 変成岩中のざくろ石包有物の解析
典型的なざくろ石帯の泥質片岩に含まれる鉱物組み合わせは、ざくろ石+緑泥石+白雲母+曹長石+石英+緑簾石+方解石+スフェーンである。ざくろ石はこの母岩の鉱物組み合わせとは全く異なり、スフェーン>黄鉄鉱>ジルコンがざくろ石のコアの部分に多いという結果が得られた (図1)。

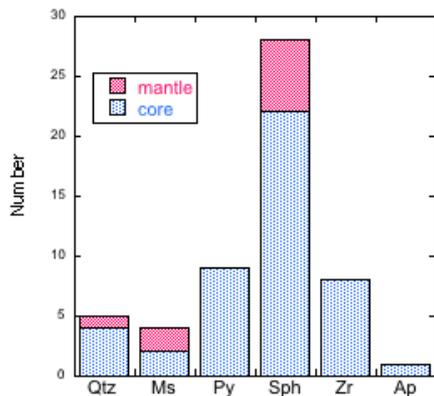


図1 泥質片岩中の鉱物包有物の頻度

このことは、ざくろ石結晶の成長時に包有物を取り込みやすいこと、また、周囲に多く存在する鉱物ではなく、ざくろ石の成長に関与しない鉱物を取り込んでいることを明らかにした。

また、メタチャート中に存在するざくろ石を骨格だけ残して多くの石英とヘマタイトを含むざくろ石斑状変晶の産状と結晶方位を解析した(図2)。

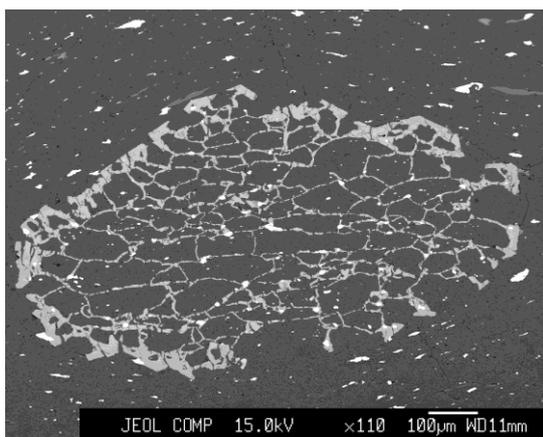


図2 メタチャート中のスケルタルざくろ石

その結果、包有物中の石英粒子の結晶方位はランダムであること、また、ざくろ石に仕切

られた各部屋の石英は単一の粒子であることが明らかになった。このことは、ざくろ石が成長する際に、チャート中の石英結晶の粒界を割りながら成長したことを示唆している。一方で、ざくろ石の化学組成は泥質片岩のものとは大きく異なり、スペサルティン成分が90%近くなるようなものであった。緑泥石からざくろ石を生成する反応曲線の位置を考えると、通常の泥質片岩中のざくろ石生成反応よりも100°Cほど低温で起こったか、非常に非平衡な状態でざくろ石の成長が起こったことを示唆する。すなわち、変成岩の包有物形成過程とは、マトリックス中の鉱物を切り取って、成長中の母結晶に取り込むプロセスであり、マトリックスの局所的な脆性破壊を伴うことを示唆している。

(2) 石英結晶成長に伴う包有物形成についての水熱実験

石英の結晶成長させる実験は、430°C、31MPaの超臨界状態のH₂O溶液の中で行った。これは、石英の水に対する溶解度が臨界点近傍の360°C付近で極大をとり、超臨界状態で劇的に下がるとを利用して、この装置を用いて、岩石基盤を入れて成長実験をすることによって、石英脈を人工的に作成することに世界で初めて成功した。この成果は、Okamoto and Sekine (2011)で報告している。

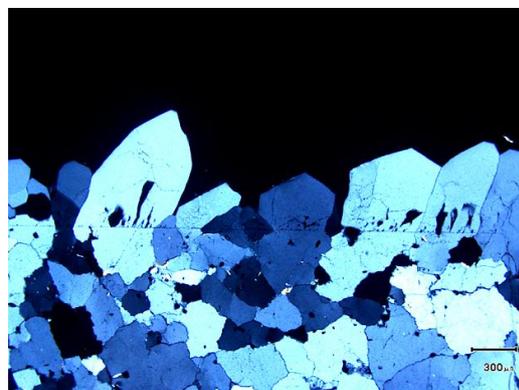


図3 チャート基盤から成長した石英結晶

と流体包有物の薄片写真

結晶成長の最初の段階に流体包有物を取り込んで、流体包有物は結晶のc軸方向に伸長していることを明らかにした。また、周囲に鉍物粉末を配置した実験でも、石英結晶中に鉍物を取り込ませることに成功した。その詳細な観察からも(図4)、包有物は石英結晶の自形面がでる前の、かつ高過飽和な状態において取り込まれやすいことを明らかにした。

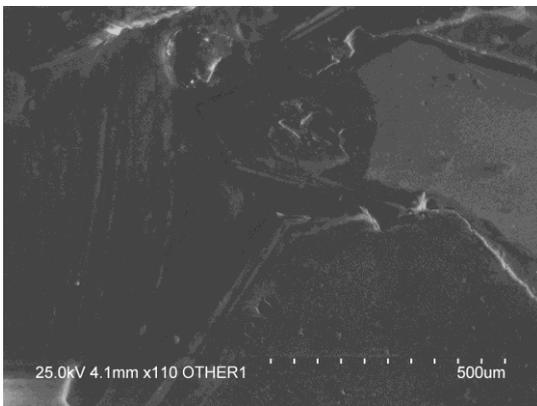


図4 人工的に成長させた石英のCL累帯構造と包有物

このことは、鉍物・流体包有物の頻度、サイズ、種類の系統的な解析は、岩石の形成環境(非平衡度、流体、変形)などの状態に対する重要な情報を含んでいる可能性があることを示唆している。

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5件)

1. Saishu H. *, Okamoto A., Tsuchiya N. (2012) Mineralogical variation of silica induced by Al and Na in hydrothermal

solutions. *American Mineralogist*, 97, 2060-2063. DOI: 10.2138/am.2012.4258

(査読有)

2. Burenjargal U., Okamoto A.*, Meguro Y., Tsuchiya N. (2012) An exhumation pressure-temperature path and fluid activities during metamorphism in the Tseel terrane, SW Mongolia: Constraints from aluminosilicate-bearing quartz veins and garnet zonings in metapelites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54-55, 214-229. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.04.017

(査読有)

3. Okamoto, A., Sekine, K. (2011) Textures of syntaxial quartz veins synthesized by hydrothermal experiments. *Journal of Structural Geology*, 33, 1764-1775. DOI: 10.1016/j.jsg.2011.10.004 (査読有)

4. Sekine, K. *, Okamoto, A., Hayashi, K. (2011) In situ observation of the crystallization pressure induced by halite crystal growth in a microfluidic channel. *American Mineralogist*, 96, 1012-1019. DOI: 10.2138/am.2011.3765 (査読有)

5. Kuwatani, T. *, Okamoto, A., Toriumi, M. (2011) Thermodynamic forward modeling of progressive dehydration reactions during subduction of oceanic crust under greenschist facies conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 307, 9-18. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.01.027 (査読有)

[学会発表] (計15件)

1. Okamoto A., Saishu H., Yamada R., Hirano N., Tsuchiya N.. Silica precipitation in sub to supercritical water:

- implications to hydrological system in the Kakkonda Geothermal field. 10th International Workshop on Water dynamics. 2013, March 13, Tohoku University.
2. Saishu H., Okamoto A., Tsuchiya N. The formation of the hydrothermal-convection zone and the heat-conduction zone in Kakkonda geothermal field by quartz precipitation. 10th International Workshop on Water dynamics. 2013, March 13, Tohoku University.
 3. Sekiguchi C., Hirano N. Okamoto A., Tsuchiya N. Experimental study on observation of critical behaviors of multicomponent geofluids by spectroscopic measurement. 10th International Workshop on Water dynamics. 2013, March 13, Tohoku University.
 4. Musha M., Okamoto A., Tsuchiya N. Distribution of C-H-O fluids in the accretionary prism deduced from fluid inclusions from the Shimanto belt in the Muroto area, SW Japan. 10th International Workshop on Water dynamics. 2013, March 13, Tohoku University.
 5. 最首 花恵・岡本 敦・土屋 範芳 石英核形成に対する Al・Na の影響:地熱帯の石英脈とシリカスケール形成における重要性, 日本地熱学会平成 24 年湯沢大会, 湯沢, 2012.10-24-26
 6. 岡本 敦・福田惇一・武藤 潤 鉱物包有物の形成過程:ざくろ石斑状変晶中の石英の例. 日本地質学会 2012 年, 9 月 17 日、大阪府立大学.
 7. Burenjargal Ulziiburen, Atsushi Okamoto and Noriyoshi Tsuchiya Variation of garnet zoning pattern in the pelitic gneisses and its implications to thermal history of Tseel terrane, SW Mongolia. 34th International Geological Congress, 2013, August 7th, Brisbane, Australia.
 8. H. Saishu, A. Okamoto, N. Tsuchiya, "The effect of Aluminum and Sodium to precipitation of silica minerals", 34th International Geological Congress, Brisbane, Australia, 2012.8.5-10.
 9. 最首花恵, 岡本敦, 土屋範芳, 「熱水に含まれる Al と Na の シリカ鉱物析出に及ぼす影響」, 日本地球科学連合 2012 年大会, 千葉, 2012.5.20-27.
 10. Okamoto A., H. Saishu and N. Tsuchiya. Precipitation of silica minerals from hydrothermal solutions: effect of trace amount of Al. International symposium on Geofluids, 2012, March 19, Okayama.
 11. Okamoto A., H. Saishu and N. Tsuchiya. Hydrothermal experiments on formation of quartz/calcite veins at crustal conditions. International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction zones. Feb. 28. Kochi. 2012.
 12. H. Saishu, A. Okamoto, N. Tsuchiya, "Effects of Al on mineralogy and kinetics of precipitation of silica minerals under crustal conditions", American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2011.12.5-9
 13. 最首 花恵・岡本 敦・土屋 範芳 核形成を伴うシリカ鉱物析出速度式の提案と鉱物脈形成に関する考察 日本鉱物科

学会、2011年9月9日 茨城大学

14. 武者 倫正・岡本 敦・土屋 範芳 水
熱環境下における方解石析出の実験的検
討 日本鉱物科学会、2011年9月9日
茨城大学

15. 岡本 敦、関根 孝太郎 微細流路内の
NaCl 析出に伴う結晶成長力のその場観察
日本鉱物科学会、2011年9月10日
茨城大学

〔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

・准教授

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：