

令和元年6月18日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05601

研究課題名(和文) カンラン石-メルト間のCaO分配の含水量依存性の解明と沈み込み帯のマグマへの応用

研究課題名(英文) Effect of H₂O content on the CaO partitioning between olivine and liquid: Its application to subduction zone magma

研究代表者

菅原 透 (Sugawara, Toru)

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40420492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：カンラン石-メルト間のCaO分配に基づく含水量計の信頼性の評価と沈み込み帯マグマへの適用を行なった。相平衡実験で析出した微小なカンラン石結晶をLA-ICP-MSとEPMAの両方で分析をして比較した。マトリクスガラスのCaO量が8wt%以下であればEPMA分析における二次蛍光効果の寄与は0.1wt%以下であり、EPMAによる分析値をそのままCaO分配の考察に採用できることがわかった。文献データに基づいてカンラン石-メルト間のCaO分配に基づく含水量計を構築し、岩手火山と秋田駒ヶ岳火山のソレイト玄武岩質マグマに適用して、それぞれの生成環境を考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグマに対する水の溶解度は圧力が低下するほど減少するため、噴火したマグマの含水量を知ることができれば噴火直前のマグマ溜まりの深さを予測することができ、活火山の状態を知ることに関与する。本研究は玄武岩に珪酸鉱物として含まれるカンラン石のCaO量を用いてマグマの含水量を予測する方法を提案した。また、このモデルを東北地方における玄武岩主体の代表的な火山である秋田駒ヶ岳火山と岩手火山に適用した。秋田駒ヶ岳のマグマ溜まりは岩手と比較して相対的に深度が浅く、温度が低温でやや還元的な環境であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study carried out the geothermometer using a CaO partitioning between olivine-melt and its application to the subduction zone magma. The CaO contents of olivine crystallized in phase equilibrium experiments measured by EPMA were compared with those by LA-ICP-MS in order to investigate overestimates of CaO by a secondary fluorescence effect in EPMA. It was found that the contribution of the secondary fluorescence effect is less than 0.1 wt%, if the CaO content of matrix glass is less than 8 wt%, suggesting that CaO content measured by EPMA can be used for consideration of element partitioning. Based on literature data, modified formulation of Olivine-melt geothermometer was developed. Environments of tholeiitic basaltic magma of Akita-Komagatake volcano and Iwate volcano, Northeast Japan, are estimated by combining Olivine-melt geothermometer, Plagioclase-melt thermometer and Olivine-liquidus thermometer.

研究分野：マグマ学，ガラス科学，物理化学

キーワード：カンラン石 玄武岩質マグマ 秋田駒ヶ岳 元素分配

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯のマグマではその発生から噴火に至る過程で水 (H₂O) が重要な役割を果たしていると考えられている。マグマが含んでいた H₂O 量を知ることはマグマの進化を考察する上で重要であるものの、その決定的な方法はなく、相平衡実験、メルト包有物の分析、液相濃集微量成分に対するマスバランス計算など、様々な手法による推定値が議論に用いられている (Grove et al., 2012; Kimura and Nakajima, 2014 など)。

申請者は 2005 年にカンラン石斑晶中の微量成分 (Ca, Mn, Ni, Co) のデータコンパイルを進める中で、沈み込み帯マグマのカンラン石中の CaO 濃度 (0.05-0.25wt%) はホットスポットや中央海嶺と比較して顕著に低いことを見出した (菅原, 2007)。また、既報の相平衡実験データをまとめて調べたところ、カンラン石とメルトの間の CaO の分配係数 (D(CaO)) はメルトの H₂O が増加すると顕著に低下することを初めて見出した。このことから、カンラン石斑晶の CaO 量の違いは島弧マグマが含む水に由来することを指摘するとともに、カンラン石中の CaO 量からマグマの含水量を見積もる方法を提案した (菅原, 2007)。

しかしながら、この含水量計と構築する元になった実験試料中の結晶は天然の斑晶とは違って 10-50 μm 程度の小さなサイズであり、そのような結晶を EPMA 分析すると周囲の Ca-rich 相の二次蛍光効果により濃度を過剰見積もりしている可能性があった。もしもそうであるならば、含水量計のモデルの定量性に問題が生じていることになる。

申請者がこの研究を開始して以来、2015 年までに火山岩のカンラン石に含まれる微量の CaO に関する 2 件の論文 (Kamenetsky et al., 2006; Feig et al., 2006) が報告されていたが、この Low-CaO カンラン石の成因とマグマの含水量の関係は世界的には認知されていないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究は含水系でカンラン石-メルト間の元素分配実験を行いとともに既報の文献データを組み合わせて解析し、カンラン石の CaO 量を用いたマグマの含水量計を構築することである。また、この含水量計と申請者がこれまでに発表してきた斜長石-メルト酸素分圧計 (Sugawara, 2001)、カンラン石のリキダス温度計 (Sugawara, 2000) を組み合わせて東北日本のソレアイト玄武岩マグマの生成環境を推定する。具体的には岩手火山と秋田駒ヶ岳火山の玄武岩質マグマの温度-圧力-含水量-酸化還元状態を明らかにし、相互に比較することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 内熱式ガス圧装置を用いて H₂O を添加した合成玄武岩組成で含水カンラン石-メルト間の相平衡実験を行う。
- (2) (1) の実験試料をレーザーアブレーション ICP 質量分析装置 (LA-ICP-MS) と電子線微小領域分析装置 (EPMA) を用いて分析し、カンラン石の CaO 含有量を比較するとともに、二次蛍光効果の補正式を考案する。この補正式を用いてカンラン石-メルトの CaO 分配に基づく含水量計を修正する。
- (3) 秋田駒ヶ岳火山のソレアイト玄武岩を採取して岩石記載と化学分析を行う。秋田駒ヶ岳ならびに申請者が過去に研究を行いデータを有している岩手火山のマグマに対して、(2) の含水量計、斜長石-メルト酸素分圧計 (Sugawara, 2001)、カンラン石のリキダス温度計 (Sugawara, 2000) を適用し、東北日本のソレアイト玄武岩マグマの生成環境を推定する。

4. 研究成果

(1) 内熱式ガス圧装置を用いた含水系におけるカンラン石-メルト間の CaO 分配実験

内熱式ガス圧装置を用いた含水系の相平衡実験と申請者が過去に行った実験試料を用いた EPMA 分析での二次蛍光効果の確認を行った。相平衡実験では玄武岩組成のガラスを酸化条件と還元条件で合成した試料、ならびにカンラン石を飽和させる目的でそれぞれに San Carlos カンラン石の粉末を添加した試料の合計 4 通りの出発組成に対して H₂O 飽和の条件下で行った。試料を Ag-Pd のシングルカプセルに封入した後、1500 気圧、1100°C で 24 時間保持し、急冷した。実験生成物を EPMA で観察、分析した。しかしながらカンラン石を添加しない試料には結晶析出せず、またカンラン石添加試料では組成が平衡に達していなかった。これらの理由により含水系での CaO の分配係数を求めることができなかった。

(2) 実験試料の微小カンラン石結晶に対する LA-ICP-MS 分析と EPMA 分析の比較

(1) の実験により試料を得ることができなかつたため、Sugawara (2001) で報告した 1 気圧の相平衡実験試料を用いてカンラン石結晶の CaO 分析における二次蛍光効果を検証した。EPMA と LA-ICP の測定と分析値の比較を行った (図 1)。カンラン石の結晶サイズは 10-30 μm であり、CaO 量は 0.2-0.9wt% の範囲にわたる。EPMA と LA-ICP の分析値の差はマトリックスの CaO 量が増加するとわずかに増加するものの、その大きさはマトリックスの CaO 量が 10wt% のときの二次蛍光効果に過剰量は 0.1wt% であった (図 2)。以上のことから、EPMA による微小カンラン石結晶中の CaO 分析で生ずる二次蛍光効果はカンラン石の組成変動幅と比較して小さなものであり、マトリックスの CaO 量が 8wt% 程度以下であれば EPMA により分析可能であることが示された。

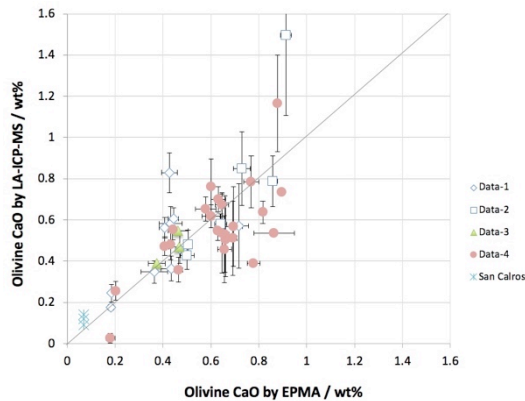


図 1. 相平衡実験で晶出した微小カンラン石結晶の CaO 含有量：LA-ICP-MS による分析値と EPMA による分析値の比較。

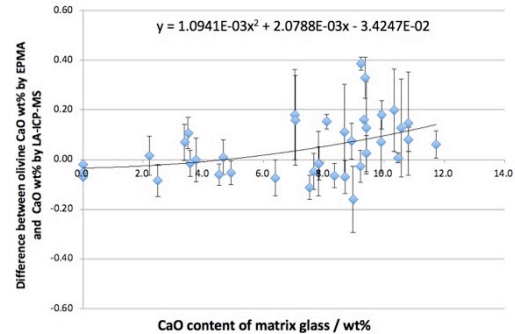


図 2. LA-ICP-MS によるカンラン石結晶の CaO 量の分析値と EPMA による分析値の差とマトリックスガラスの CaO 量の関係。

(3) カンラン石—メルト間の CaO 分配の定式

(2) の実験結果から、カンラン石—メルト間の CaO 分配係数を求める上で、メルトからの二次蛍光効果の影響は無視しても差し支えないことが判明した。そのため、EPMA 分析に基づき既報の相平衡実験の分析値に基づいて含水量計を構築した。本研究では計算を簡便に行うためにカンラン石の成分の活量係数を簡略化した次の計算式を提案した。平衡反応



に対して、平衡定数 K と温度 T (K)、圧力 P (GPa)、メルトにおける無水換算の Na_2O と K_2O のモル分率 ($X_{\text{Na}_2\text{O}}^L$, $X_{\text{K}_2\text{O}}^L$), 含水量 ($C_{\text{H}_2\text{O}}$) の関係を次式で近似した。

$$\ln K = -8.273 + 11444/T + 209.5 P/T + 15.43 (X_{\text{Na}_2\text{O}}^L + X_{\text{K}_2\text{O}}^L) - 0.2516 C_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

ここで、平衡定数 K はカンラン石の CaO と MgO のモル分率 ($X_{\text{Ol-CaO}}$, $X_{\text{Ol-MgO}}$) およびメルトの成分のモル分率 (X_{CaO} , X_{MgO} , X_{SiO_2}) を用いて次式から計算される。

$$K = (X_{\text{Ol-CaO}}/0.333 \cdot X_{\text{Ol-MgO}}/0.666) / (X_{\text{CaO}} \cdot X_{\text{MgO}} \cdot X_{\text{SiO}_2}) \quad (3)$$

(4) 秋田駒ヶ岳火山での玄武岩の試料採取とマグマの生成環境の推定

秋田駒ヶ岳火山の男女岳溶岩・火砕丘 (ON), 小岳大焼砂堆積物 (KO), 小岳火砕丘・溶岩流 (KDP), 女岳 1970 年溶岩 (MN) から合計 17 試料の玄武岩と安山岩を採取した。それらの試料について岩石薄片の作成と鉱物記載, 石基の重液分離, XRF による全岩と石基の化学組成の分析, EPMA による斑晶と石基鉱物の化学分析を行なった。分析結果を (3) のカンラン石—メルト間の CaO

分配モデル, および既報のリキダス温度計 (Sugawara, 2000), 斜長石-メルト間の Ca/Na 分配モデル (Ushioda et al. 2014) と酸素分圧計 (Sugawara, 2001) 等に適用し, マグマの温度-圧力-含水量-酸素分圧条件を明らかにするとともに, それらについて岩手火山と比較をした.

KDP, KO, ON は $T=1050-1100^{\circ}\text{C}$, $1-1.5\text{kbar}$, $\text{H}_2\text{O}=2.6-4.2\text{wt}\%$, $\Delta\text{QFM}=+0.9$ 程度と見積もられた. 全岩化学組成の観点では秋田駒ヶ岳火山は岩手火山と比較して分化が進んだ玄武岩が多いが, それに対応するように温度もやや低いことがわかった. また, 秋田駒ヶ岳火山の含水量は岩手火山と大きな違いはないが, 岩手火山と比較してやや低酸素分圧な状態にあることがわかった (図 3).

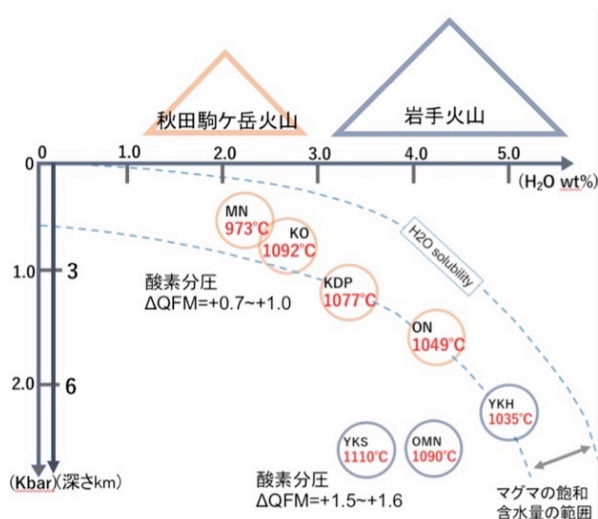


図 3. 秋田駒ヶ岳火山と岩手火山のマグマの温度-圧力-含水量の関係. (圧力は H_2O 飽和を仮定)

引用文献

- Feig et al. (2006) *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152, 611-638.
 Grove et al. (2012) *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 40, 413-439.
 Kamenetsky et al. (2006) *Chem. Geol.*, 233, 346-357.
 Kimura and Nakajima (2014) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 143, 165-188.
 菅原 透 (2007) *月刊地球*, 29, 27-32.
 Sugawara T. (2001) *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141, 659-686.
 Sugawara T. (2000) *J. Geophys. Res.*, 105, 8457-8472.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[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:
 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：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：大平俊明，清水千沙希

ローマ字氏名：Ohira Toshiaki, Shimizu Chisaki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。