

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610149

研究課題名(和文)アパタイト含水率計の開発：原始地球における水とマグマへの新アプローチ

研究課題名(英文)Development of a new method to decipher water contents in ancient magmas using apatite

研究代表者

飯塚 毅 (Iizuka, Tsuyoshi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：70614569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：水は、表層環境と生命の進化、マントルダイナミクス・マグマ活動に重大な役割を果たしている。本研究では、原始地球において水がマグマ活動に果たした役割を理解することを長期的な目的とし、副成分鉱物アパタイトを用いたメルトの含水率定量法の有用性の評価を行った。具体的には、北海道納沙布岬の貫入岩体の試料を用いて、マグマの分化に伴う水などの揮発性成分の挙動が、アパタイトにどのように記録されているかを調べ、アパタイト中の希土類元素、水素、塩素、フッ素の濃度変化とメルト中の揮発性元素の濃度変化の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Water plays a fundamental role in environmental change, the evolution of life, mantle dynamics and magmatism on the present Earth. With a long-range goal of understanding the role of water in ancient magmatism, we have developed a method to estimate water contents in magmas using an accessory mineral, apatite. Specifically, using intrusive rocks in Nosappumisaki of Hokkaido, we have investigated how abundances of hydrogen, fluorine, chlorine and rare earth elements in apatite can be linked to a change in water content with the differentiation of magma.

研究分野：地球化学

キーワード：アパタイト 水 マグマ 太古代

1. 研究開始当初の背景

水は液体や気体として地球表層部に存在するだけでなく、鉱物中の水酸基として地球内部にも含まれている。マントル中の水は、マントルの粘性や融点を著しく低下させることでマントルダイナミクスやマグマ活動を活発化させる。そのような地球内部の水は、地球形成時に大気からマグマオーシャンに溶解してそのままマントルに保持されたか、その後の含水化した海洋プレートの沈み込みによってもたらされたものと考えられる。一方で、地球内部の水は、自身が促進したマグマ活動(脱ガス)によって、地球表層部へ輸送される。近年、地震波・電気伝導度を用いて、現地球の水の内部分布が調べられており(Karato 2011)、また、水の循環フラックスについても、火山岩ガラスや斑晶のメルト包有物からマグマ及び起源マントルの含水量を推定すること、沈み込み帯における含水鉱物の相関係を調べることから、明らかになりつつある(Iwamori 2007)。しかし、原始地球・惑星におけるマグマやマントルの含水量については、未だに良く分かっていない。これらを知ることは、その時代のマグマ活動とマントルダイナミクスを議論する上で必要不可欠である。また、マントルの含水量が時代と共にどのように変遷してきたのかを解明することで、長いタイムスケールでの水の大規模循環に制約を与えることが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、水が原始地球・惑星におけるマグマ活動に果たした役割(マグマの含水量)とその性質を理解し、さらには、そのマグマの起源マントルの含水量を推定することを長期的目標とする。原始地球・惑星のマグマの含水量を調べることが困難であった主な理由は、古い岩石試料の多くは変成作用を経験しているため、変質しやすい火山ガラスやメルト包有物を用いた従来の含水量定量法を適用できない点にある。そこで本研究ではマグマの含水量推定に、ガラスや斑晶鉱物に比べて変質しづらいアパタイトを利用する。アパタイトは、幅広い組成の火山岩・深成岩に含まれ、その結晶には水酸基が固溶しうる $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})]$ 。したがって、メルトに水が含まれていた場合、そのメルトと共存していたアパタイトには、水酸基が含まれると考えられる。古い岩石試料に含まれるアパタイトの水素濃度を調べることにより、その親マグマ、引いては起源マントルの含水量を調べられることが期待される。さらに、アパタイトに水素が含まれていた場合、その水素同位体組成から、水の性質・由来に制約を与えられる。

この研究の第一歩としてアパタイトを用いたメルト含水率計の開発を行う。アパタイト中の水素濃度が、その親マグマ(共存メルト)の含水率を定性的に反映することは明らか

だが、その定量性についてはこれまでに評価されてこなかった。そこでまずは、アパタイト-メルト間の水素の分配係数を決定し、さらに、その分配係数を左右しうるパラメータを理解することにより、アパタイト含水率定量計を確立する。その後、様々な年代のアパタイトについてこのメルト含水率計を適用し、且つ、年代学・微量元素・同位体地球化学と組み合わせることにより、マントルの含水量経時変化を明らかにしていく。

3. 研究の方法

原始地球において水がマグマ活動に果たした役割を理解するためには、変成作用の影響を受けづらい新しいメルト含水率計の開発が必要となる。そこで本研究では、アパタイトを用いたメルト含水率定量計を確立していく。アパタイトを用いたメルト含水率定量法を確立するために重要となるのは、アパタイトは比較的分化したメルトから結晶化する鉱物のため、アパタイトがどの程度分化したメルトから結晶化したのかを調べ、さらに、そのメルトの分化過程において揮発性元素がどのように振る舞ったのかを調べる必要がある。そこで、本研究では北海道・根室半島・納沙布岬に産出している白亜紀根室層群中の貫入岩体に着目した。納沙布岬貫入岩体は、堆積層に貫入した厚さ120 m - 長さ1.5 kmの層状分化岩体であり、岩体の縁には急冷された玄武岩が見られ、その内側では下部から上部にかけて岩相がガプロからモンゾナイトへと変化している(Yagi *GSA Bulletin*, 1969)。また先行研究(Simura & Ozawa *J. Pet.* 2006, 2011)で、壁岩堆積岩の組織と急冷縁玄武岩の石基・斑晶鉱物の組成から、この岩体の貫入圧力・温度と初生マグマの含水率は、0.15 GPa, 1125 °C, H_2O 1.0 wt%と見積もられている。したがって、この貫入岩体に含まれる様々な程度に分化した岩石中のアパタイトについて、微量元素や含水量の分析を行うことで、アパタイト含水率計の有用性評価が可能となる。

4. 研究成果

本研究では、結晶分化・固結過程が良く分かっている納沙布岬貫入岩体を研究対象として、マグマの分化・固化過程をアパタイトの微細構造と化学組成・水素同位体組成に基づいて検討することで、アパタイトの揮発性元素挙動の指標としての有用性を検証した。納沙布岬貫入岩体は、根室半島の東端にある板状貫入岩体で、貫入前から存在していた結晶の急速な沈積と組成対流による閉鎖系での分化により、岩体の基本構造である優黒質の下部集積層と優白質の上部モンゾナイト層が形成されたとされている(Simura & Ozawa, 2006; 2011)。

納沙布岬貫入岩体では、急冷部を除き、短柱状~針状の自形アパタイトが普遍的に出現する。上部のモンゾナイト層と下部の集積

層の2層準のアパタイトのOH含有量と水素同位体比(δD , SMOWを基準)をNanoSIMS分析により測定した(各層準3-6個の結晶につき, 1-3点分析)。その結果, アパタイトの水素同位体比とOH含有量の平均値は, 上部ではそれぞれ-110‰, 1.2wt%, 下部では18‰, 1.2wt%であり, 下部のアパタイトの水素同位体比は上部のアパタイトより重い値をもつ一方, OH含有量には有意な変化は認められなかった。また, アパタイトのClとFの含有量をEPMAにより測定したところ, そのF含有量は, 上部が下部より高い値であるのに対し, Cl含有量は, Fと逆相関を示す(各層準10~20個の結晶につき, 1-3点分析)(Fig.1)。固液間の分配係数を考慮すると, D/HやF/Clの大きな変化は, アパタイトや黒雲母による結晶分別では説明できない。また, 貫入岩の上部でアパタイトのCl含有量が少なくなっているため, 海水起源の熱水の混入では説明できない。ClはFよりメルトに比してガスに分配されやすいこと(Signorelli & Carroll, 2000; Webster, 1990), CH_4 や H_2 分子と異なり, H_2O 分子での発泡・脱ガスはメルト中の水素同位体比を軽くすること(Kyser & O'Neil, 1983)から, D/HとF/Clの変化は, メルト層上部での H_2O による発泡・脱ガスにより説明することができる。また, 上部と下部でのF/Cl値が重なっていないことから, 下部の沈積層では, メルトは発泡の影響をほとんど受けずに, 結晶分別によって, メルト中のFが減少し, Clが増大する方向にF/Clが変化したことになる。脱ガスを伴った分別結晶化モデルを適用し, メルト層上部と沈積層それぞれについてF/Clのトレンドを生み出した脱ガスと結晶分別量を見積もることができる。

本研究により, アパタイトのF/ClとD/Hを用いることにより, 発泡・脱ガスの量やガス分子種に関する情報を得ることができ, アパタイトはマグマ固化過程における揮発性成分挙動の指標として有用であると言える。

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 7件)

Iizuka T., Yamaguchi A., Haba M.K., Amelin Y., Holden P., Zink S., Huyskens M.H. & Ireland T.R. (2015) Timing of global crustal metamorphism on Vesta as revealed by high-precision U-Pb dating and trace element chemistry of eucrite zircon. *Earth and Planetary Science Letters* v. 409, 182-192 査読有り。

Kimura J.-I., Qing C., Itano K., Iizuka T., Vaglarov B.S. & Tani K. (2015) An improved U-Pb age dating method for zircon and monazite using 200/266 nm femtosecond laser ablation and enhanced sensitivity multiple-Faraday collector

inductively coupled-plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* v. 30, 494-505 査読有り。

Iizuka T., Amelin Y., Kaltenbach A., Koefoed P., Stirling C.H. (2014) U-Pb systematics of the unique achondrite Ibitira: Precise age determination and petrogenetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* v. 132, 259-273 査読有り。

Koike M., Ota Y., Sano Y., Takahara N., Sugiura N. (2014) High-spatial resolution U-Pb dating of phosphate minerals in Martian meteorite Allan Hills 84001. *Geochemical Journal* v. 48, 423-431 査読有り。

Rumble D., Bowring S., Iizuka T., Komiya T., Lepland A., Rosing M.T. & Ueno Y. (2013) The oxygen isotope composition of Earth's oldest rocks and evidence of a terrestrial magma ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* v. 14, 1929-1939 査読有り。

Iizuka T., Campbell I.H., Allen C.M., Gill J.B., Maruyama S. & Makoka F. (2013) Evolution of the African continental crust as recorded by U-Pb, Lu-Hf and O isotopes in detrital zircons from modern rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* v. 107, 96-120 査読有り。

[学会発表](計 10件)

Iizuka T., Yamaguchi T., Hibiya Y. & Amelin Y. The solar initial abundance of hafnium-176 revealed by eucrite zircon. *46th Lunar and Planetary Science Conference*. 2015年3月17日 ヒューストン(アメリカ)。

Iizuka T., Yamaguchi A., Haba M.K., Amelin Y., Holden P., Zink S., Huyskens M.H. & Ireland T.R. Thermal history of Vesta's crust constrained by U-Pb dating and trace element chemistry of zircon in the Agoutl eucrite. *The 37th Symposium on Antarctic Meteorites*. 2014年12月3日 国立国語研究所(東京都, 立川市)。

久岡 由実, 飯塚 毅, 高畑 直人, 小澤 一仁, 永原 裕子, 佐野 有司. マグマ固化過程の揮発性成分挙動の指標としてのアパタイト: 納沙布岬貫入岩体への適用とその有用性. *日本地質学会*. 2013年9月14日 東北大学(宮城県, 仙台市)。

飯塚 毅. 初期太陽系年代学の統一的理解に向けて. *日本地球化学会年会* 2013年9月13日 茨城大学(茨城県, 水戸市)。

久岡 由実, 飯塚 毅, 高畑 直人, 小澤 一仁, 永原 裕子, 佐野 有司. マグマ固結過程の指標としてのapatiteの有用性: 納沙布岬貫入岩体を例にして. *地球惑星科学連合大会*. 2013年5月20日 幕張メッセ(千葉県, 千葉市)。

飯塚 毅, アメリン ユーリー, 山口 亮,
高木 康成, 野口 高明, 木村 眞. Northwest
Africa 6704 のウラン-鉛年代学. 地球惑星
科学連合大会. 2013 年 5 月 20 日 幕張メッ
セ (千葉県, 千葉市).

Iizuka T. Evolution of the continental crust as
recorded in accessory minerals. European
Geophysical Union Annual Meeting. 2013 年
4 月 12 日 ウィーン (オーストリア).

〔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：
出願年月日：
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

飯塚 毅 (IIZUKA, Tsuyoshi)
東京大学・大学院理学系研究科・講師
研究者番号：70614569

(2) 研究分担者

小澤 一仁 (OZAWA, Kazuhito)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：90160853

(3) 連携研究者

佐野 有司 (SANO, Yuji)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：50162524

折橋 祐二 (ORIHASHI, Yuji)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：70313046