

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400526

研究課題名(和文) 軽元素局所同位体比分析による地球初期大陸地殻進化の探求

研究課題名(英文) In-situ isotope analysis of light elements for better understanding of early Earth's continental crustal evolution

研究代表者

牛久保 孝行 (USHIKUBO, Takayuki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・技術研究員

研究者番号：10722837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 二次イオン質量分析計(SIMS)を用いて約10ミクロンの分析領域の高精度酸素同位体比分析法を確立した。同手法を用いて、カナダ・アカスタ地域の約40～36億年前の片麻岩試料と、約5千万年前以降に伊豆・小笠原・マリアナ(IBM)島弧で形成した花崗岩類試料のジルコン結晶の研究を行い、大陸地殻形成に伴いマグマの酸素同位体比が上昇する様子を明らかにした。

(2) 同じくSIMSを用いてガラス中の揮発性元素(H, C, F, P, S, Cl)濃度分析と水素同位体比分析法を確立した。IBM島弧の急冷ガラスや海洋島玄武岩の結晶中のメルト包有物を分析し、マグマ起源の違いや進化に伴う変動を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：(1) We developed an in situ, high precision oxygen isotope analysis technique with 10 micrometer in diameter primary beam by SIMS. We measured oxygen isotope ratios of zircons recovered from ca. 4.0 to 3.6 Ga Felsic Gneisses of Acasta Gneiss Complex in Canada, and felsic rocks of the Izu-Bonin-Mariana (IBM) Arc of the western Pacific. We found occurrence of moderately elevated oxygen isotope ratios of zircons from both sites, indicating increase of oxygen isotope ratios of parent magmas in association with continental crustal felsic rocks.

(2) We developed in situ analysis techniques of volatile elemental abundances and hydrogen isotope ratios of glass. With these analytical techniques, we recognized that fresh volcanic glasses and melt inclusions in olivine phenocrysts from IBM arc and ocean island basalts preserved pristine signatures of igneous fractionation and change of supplied fluid from subducted materials.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：ジルコン 太古代 大陸地殻 酸素同位体 SIMS 揮発性元素

1. 研究開始当初の背景

月や火星など、岩石質の表層(地殻)を持つ惑星・衛星の表層は主に玄武岩で覆われている。地球の海洋地殻も主に玄武岩に覆われているが、大陸地殻には花崗岩という玄武岩よりも SiO_2 成分に富む岩石が卓越する。花崗岩は表層に大量の水(海洋)が存在する地球で大量に形成できると考えられている。ジルコン(ZrSiO_4)は、U-Pb 法で年代決定が出来る事と、その同位体比・微量元素組成が母岩を形成したマグマの特徴を反映する事から、地質史とマグマ形成プロセス、特に初期地球の地殻の進化・発達過程を研究する上で有用な鉱物である。西オーストラリア Jack Hills から見つかる古いジルコン試料の研究から、40 億年よりも古い試料でも結晶化当時の情報を保持していて、約 43 億年前には地球上で大陸地殻が形成された事が明らかになってきた。しかし、Jack Hills のジルコン試料は母岩が完全に失われており、形成過程を正確に知ることが出来ない。そこで、地球最古の岩石(約 40 億年前)が保存されていて、地域の地質区分も詳細に調べられているカナダ・アカスタ片麻岩体のジルコンに着目し、約 40 億年前以降の数億年間に渡る大陸地殻形成・変成過程を明らかにする事を目指した。

2. 研究の目的

カナダ・アカスタ片麻岩体から産出する太古代のジルコン粒子(主に約 40 億年前から 33 億年前)の軽元素(例えば酸素・リチウム)同位体比と微量元素濃度を、二次イオン質量分析計(SIMS)を用いた微小領域局所分析法で分析し、地球の初期大陸地殻の形成と再変動作用による地殻の進化史を解明する事を目指した。軽元素の同位体比は岩石と流体(水)の反応や風化物の混入で大きく変動する。ジルコンの同位体比や微量元素濃度は母岩を形成したマグマの特徴を反映する事から、アカスタ片麻岩のジルコンの軽元素同位体比・微量元素濃度分析を行う事で、地球初期の大陸地殻の形成と進化に対して流体(水)が果たした役割の解明を目的とした。

3. 研究の方法

(1) ジルコン結晶の大きさは 0.3mm 程度で、かつ結晶内部に微細な成層構造を持ち複数のマグマ活動や変成作用の情報を記録している場合が多い。これら微細構造の情報を正確に調べるために、SIMS を用いて 10 μm スケールの局所分析法を開発した。

(2) 局所分析に適したミクロンスケールで均一性が保障された国際的な標準試料は無い。そこで、他の分析法を得意とする国内外の研究グループと協力して標準試料を準備した。

(3) 共焦点レーザー顕微鏡や走査型電子顕

微鏡(SEM)を利用した詳細な観察とSIMSの同位体比分析を組み合わせる事で、微細構造に保持されたマグマ活動の記録を正確に計測し解釈を行った。

4. 研究成果

(1) 局所高精度酸素同位体比分析の達成

海洋研究開発機構高知コア研究所に新規に導入されたSIMS(CAMECA IMS 1280-HR)を用いて、約 10 μm の領域の酸素同位体比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)を $\pm 0.3\text{‰}$ の精度で分析する測定プロトコルを確立した。同分析法は、ジルコンだけでなくオリビンなど他の珪酸塩鉱物や、炭酸塩鉱物、非晶質のガラスにも適用出来る事を確認した。達成した分析精度は流体や風化生成物の混入に伴うマグマの酸素同位体比変動を調べるには十分である。また、同手法を炭酸塩試料の古環境解析に適用した場合、10 μm スケールで ± 1 の気温推定が可能になる。本研究では、さらに小さな領域を分析するテストを行い、3 μm の領域で $\pm 1\text{‰}$ 程度の分析が可能なる事が確認された(図1)。これらの成果は「ぶんせき」誌で論文発表したほか、平成 26 年質量分析学会同位体比部会、平成 27 年日本地球惑星科学連合大会、Precambrian World 2017 等の学会で発表し、同手法を用いた共同研究の実施を積極的に呼びかけている。

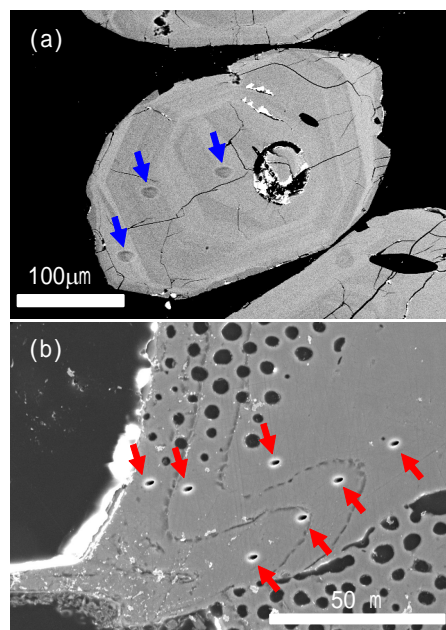


図 1 (a)ジルコン結晶の累帯構造と酸素同位体比分析点(約 10 μm) (b) 微小ビーム(約 3 μm)を用いた有孔虫炭酸塩殻の酸素同位体比のテスト分析点(雑誌論文 から一部引用)

(2) 揮発性元素分析法開発

水やフッ素等の揮発性元素は主要な無水鉱物中の含有量が少ない事から、流体成分のマグマへの供給や脱ガス作用によって濃度が顕著に変動する。酸素同位体比データと組み合わせることでマグマ形成と流体の関係

を詳細に議論が出来ることが期待されるので、結晶中のメルト包有物や急冷ガラスの揮発性元素濃度分析の手法開発を実施した。揮発性元素濃度の異なるガラス標準試料を作成し、濃度の異なる多様な天然試料が分析出来る測定条件の検討を行った。その結果、直線性の良い較正線と、半年間の5分析セッションの較正線の傾きの差が5%以内という、過去に例の無い高い再現性を得た(図2)。

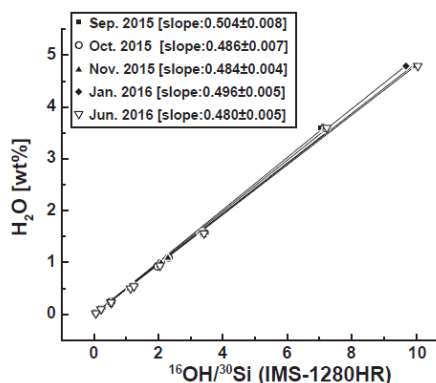


図2 標準ガラス試料のOHシグナル量と含水量の較正線(雑誌論文から引用)

確立した分析法を用いて伊豆-小笠原-マリアナ(IBM)島弧や海洋島玄武岩(OIB)のメルト包有物や急冷ガラス試料の分析を行い、マグマ起源の違いや進化に伴う揮発性元素量の変動を明らかにした。また、含水量の多い(>0.5wt%)ガラス試料については水素同位体比分析にも取り組んでいる。これらの成果はGeochemical Journal誌で論文発表したほか、Goldschmidt Conference 2016や平成28年日本地球惑星科学連合大会等の学会で発表した。

(3) 太古代ジルコンの酸素同位体比変動

カナダ・アカスタ片麻岩体のジルコン試料のうち、U-Pb年代分析の結果から結晶化年代が古く、かつ変成作用の影響の少ない粒子を選んで酸素同位体比分析を行った。約40億年前から36億年前のジルコン結晶の酸素同位体比を網羅的に調べた結果、アカスタ地域の最も古い岩石試料(約40~39.5億年前)のジルコンの酸素同位体比は変動が大きく、それ以降は一貫して高い酸素同位体比を持つ事が判った(図3)。

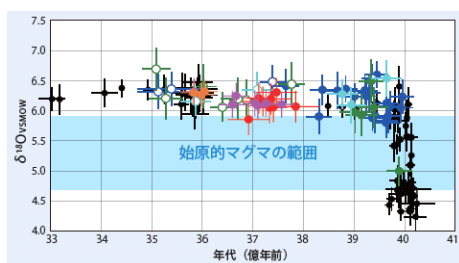


図3 アカスタ片麻岩ジルコンの酸素同位体比変動(雑誌論文から引用)

これは、初期の地殻を形成したマグマは多様な温度で水質変成を受けた物質を取り込む活動的な環境で形成したのに対して、後の地殻を形成したマグマは低温変成物質の取り込みと、先に形成された地殻物質の再熔融で形成したと解釈出来る。

これらの成果はGoldschmidt Conference 2015や平成28年日本地球惑星科学連合大会等の学会で発表した。また概要をBlue Earth誌で発表した。

(4) IBMジルコンの酸素同位体比変動

アカスタ片麻岩のジルコン試料で見つかった地球初期の大陸地殻の酸素同位体比変動の原因を理解するため、初期大陸地殻形成モデルの一つ(海洋地殻同士の沈み込み)に近い環境と考えられているIBM島弧と伊豆衝突帯で見つかる花崗岩類のジルコン試料の酸素同位体比分析を行った。その結果、IBM島弧のジルコン試料の酸素同位体比($\delta^{18}O_{VSMOW}$ 値)は4.5~5.3‰が卓越する一方で、伊豆衝突帯のジルコン試料では高い酸素同位体比($\delta^{18}O_{VSMOW}$ 値で6.0~7.0‰)が見られることが判った。この変動範囲はアカスタ花崗岩の最も古いジルコン試料の変動範囲と一致する(図3)。この事は、海洋地殻同士の沈み込みに伴う島弧と花崗岩類の形成、それに続く島弧同士の衝突(集積)と酸素同位体比の高いマグマの形成という一連の過程が、地球の初期大陸地殻形成の有力なモデルであることを示していると解釈している。

この成果は2016年日本地球惑星科学連合大会で発表した他、Blue Earth誌で概要を発表した。

(5) その他の手法開発と標準試料作製の取り組み

酸素同位体比の測定プロトコルが確立後、直ちにSIMSの酸素同位体比分析用のジルコン標準試料の候補となる結晶の均質性評価を実施し、二つのジルコン標準試料($\delta^{18}O_{VSMOW}=5.43\pm 0.14\text{‰}$, $19.14\pm 0.14\text{‰}$)を確立した。アカスタ片麻岩とIBM花崗岩類のジルコン試料の分析にはこれらのジルコン標準試料を用いている。

次に、酸素同位体比分析の分析条件を修正することで、約10 μm の分析領域の珪素同位体比($^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$)測定プロトコルを確立した。Quartz(SiO_2)なら $\pm 0.2\text{‰}$ 、珪素量がやや少ないジルコン(ZrSiO_4)では $\pm 0.3\text{‰}$ の精度の分析を達成している。また、ジルコン結晶中の微量元素(LiからUまで希土類元素を含む29元素)の濃度分析法を確立した。これらの測定プロトコルを用いて標準試料候補物質の均質性の評価し、均質性が確認された物質をICP-MSで定量分析する事でSIMS用の標準試料の確立を行った。現在までにジルコンの微量元素濃度標準試料、ジルコンとオリピンの酸素と珪素同位体比標準試料が確立出来ている。

さらに、これら標準試料を使って、アカスタ片麻岩と IBM 花崗岩類のジルコン試料の一部について分析を行った。今後は酸素同位体比の変動との比較検討出来る Si と微量元素の網羅的な分析の実施を目指している。これらの成果の一部は Goldschmidt Conference 2015 と Precambrian World 2017 で学会発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Shimizu K., Ushikubo T., Hamada M., Itoh S., Higashi Y., Takahashi E., Ito M., H₂O, CO₂, F, S, Cl, and P₂O₅ analyses of silicate glasses using SIMS: Report of volatile standard glasses、Geochemical Journal、査読有、51、2017、印刷中 DOI:10.2343/geochemj.2.0470

生久保 孝行、Marine Science Seminar 微なるかな微なるかな、地球初期に至る - 微小領域分析で挑む大陸形成の始まり -、Blue Earth、査読無、148、2017、28-31

生久保 孝行、二次イオン質量分析計を用いた高精度局所同位体比分析手法の開発と応用、ぶんせき、査読有、2016-10、2016、390-396

〔学会発表〕(計 17 件)

(主な発表 5 件を記載)

Ushikubo T.、Development of ins situ oxygen, silicon and sulfur isotope analysis techniques by SIMS at Kochi Institute, JAMSTEC、Precambrian World 2017、平成 29 年 3 月 3 日、九州大学(福岡県・福岡市)

Ushikubo T.、Shimizu K.、Ueno Y.、Hydrogen isotope analyses of forearc volcanic glasses from IODP Exp. 352 using IMS 1280-HR、Goldschmidt Conference 2016、平成 28 年 6 月 28 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Shimizu K.、Ushikubo T.、Significant uplift of the forearc at the subduction initiation inferred from volcanic glasses in the Bonin fore-arc (IODP Expedition 352)、Goldschmidt Conference 2016、平成 28 年 6 月 28 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Tani K.、Ushikubo T.、Oxygen isotopic compositions of zircons from modern intra-oceanic arc and arc collision zone granites、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、平成 28 年 5 月 24 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

Ushikubo T.、Iizuka T.、Spicuzza M. J.、Valley J. W.、Consistent occurrence of moderately elevated $\delta^{18}\text{O}$ magmas in Acasta gneiss complex from 4.0 to 3.5 Ga、Goldschmidt Conference 2015、平成 27 年 8 月 18 日、Prague (Czech Republic)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

生久保 孝行 (USHIKUBO, Takayuki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・技術研究員
研究者番号: 10722837

(2) 連携研究者

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

伊藤 元雄 (ITO, Motoo)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・主任技術研究員
研究者番号: 40606109

(3) 研究協力者

清水 健二 (SHIMIZU, Kenji)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・技術研究員

谷 健一郎 (TANI, Kenichiro)
国立科学博物館・地学研究部・研究員

ジョン W. バレー (John W. VALLEY)
University of Wisconsin-Madison ·
Department of Geoscience · Professor

マイケル J. スピキューザ (Michael J. SPICUZZA)
University of Wisconsin-Madison ·
Department of Geoscience · Senior Scientist

R. バスチアン ゲオルグ (R. Bastian GEORG)
Trent University · Water Quality Center ·
Senior Research Scientist