

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01301

研究課題名(和文) モナザイトから読み解く大陸地殻の進化機構

研究課題名(英文) Deciphering the evolution of continental crust using monazite

研究代表者

飯塚 毅 (Iizuka, Tsuyoshi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：70614569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,570,000円

研究成果の概要(和文)：花崗岩質大陸地殻の進化を理解することは、固体地球・表層環境の進化を議論する上で不可欠である。本研究では、モナザイトを用いて大陸地殻進化を明らかにすることを試みた。モナザイトは幅広い変成条件下、及び低Ca花崗岩質マグマ活動で結晶化するリン酸塩鉱物であり、堆積作用を経ても成長時の化学情報を保持する。この特徴を活かし、世界主要河川の碎屑性モナザイトについてウラン-鉛年代を測定し、流域大陸地域の造山運動の時期を高精度で決定した。さらに、これらのモナザイトについて微量元素及びネオジウム同位体組成を決定し、この造山運動の性質を制約した。その結果、大陸地殻が大規模に変成作用を被った時期を正確に決定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

花崗岩質な大陸地殻の存在は地球の主要な特徴の一つであり、大陸地殻がどのように今の姿に至ったのかを知ることは、固体地球の熱史・化学進化や表層環境の変遷を理解する上で重要となる。本研究では、大陸地殻の進化過程を明らかにすることを目的として、世界の巨大河川川砂に含まれるモナザイト鉱物のウラン-鉛年代測定および微量元素・ネオジウム同位体分析を実施した。これにより、プレートテクトニクスの稼働に伴って進む大陸衝突が、いつ・どのような温度圧力条件下で進んだのかについて、制約を与えることができた。

研究成果の概要(英文)：Understanding the evolution of granitic continental crust is central to deciphering the evolution of the solid Earth and surface environments. In this study, we have studied crustal evolution by using monazite. Monazite is a phosphate that can crystallize under a wide range of metamorphic conditions and from low-Ca granitic magma. Considering that monazite can retain its primary chemical and isotopic signatures during sedimentary processes, we measured U-Pb ages of detrital monazite grains from major world rivers. Furthermore, we determined trace element and Nd isotope compositions of the dated monazite grains. The data allow us to determine the precise timing and nature of orogenic events in the drainage areas. These results provide new constraints on the timing of major metamorphic events in the continental crust.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：大陸地殻 モナザイト 超大陸 ウラン-鉛年代 ネオジウム同位体 微量元素

1. 研究開始当初の背景

地球特有の花崗岩を主体とする大陸地殻は、熱源元素のウラン・トリウムや生体必須元素リンの主要な貯蔵庫となっている。また、大陸地殻は風化・浸食・堆積作用をとおして大気・海洋組成を制御する。このため、大陸地殻がどのように今の姿に至ったのかを知ることは、固体地球の熱史・化学進化や表層環境の変遷を理解する上で重要となる。大陸地殻の進化は主にプレート収束域における火成・変成・堆積作用をとおして進む。例えば、沈み込み帯におけるマントル部分融解や地殻再溶融に伴う火成作用は、初生的及び二次的大陸地殻の形成を担う。一方、大陸衝突帯における地殻厚化や山脈形成に伴う変成・堆積作用は、大陸地殻の改変を引き起こす。大陸地殻の進化を解明するには、大陸地殻の形成と改変過程のそれぞれが、いつ、どのように起きたのかを理解することが必要となる。

地球史における大陸地殻の形成過程を調べるため、砕屑性ジルコンを用いた研究が広く行われてきた(Iizuka et al., 2017 *Lithos*; Spencer et al., 2017 *Earth-Sci. Rev.*; 及びその引用文献参照)。ジルコンは花崗岩に普遍的に含まれるケイ酸塩鉱物であり、その化学組成は変成・堆積作用を経ても改変しない。また、ジルコンは単一粒子について高精度でウラン-鉛(U-Pb)年代とハフニウム(Hf)同位体比を測定できる。ジルコンの U-Pb 年代は花崗岩の形成年代を、Hf 同位体比は花崗岩の起源物質(初生的大陸地殻)の形成年代を反映する。一方、巨大河川の川砂などに含まれる砕屑性鉱物は、広範囲の大陸地殻の情報を得るのに有用である。近年、砕屑性ジルコンの U-Pb 年代と Hf 同位体データが大量に蓄積され、二次的及び初生的な大陸地殻の形成史が明らかになってきた。しかし、ジルコンは変成・続成作用時に殆ど成長しないため、砕屑性ジルコンから大陸地殻の変成・堆積作用を読み解くことは難しく、大陸地殻の改変過程についての理解はあまり進んでいない。

2. 研究の目的

本研究では、地球史における大陸地殻の改変過程、特に変成活動史を、砕屑性モナザイトから解読することを目指す。モナザイトは軽希土類元素(Light-Rare Earth Elements: L-REE)のリン酸塩鉱物で、ジルコンと同様に単一粒子について高精度で U-Pb 年代を測定でき、その化学組成は堆積作用では改変しない。一方、モナザイトはジルコンと違い、変成鉱物として幅広い変成度で成長し、火成鉱物としては主に堆積岩の再溶融によって形成される低カルシウム(Ca)花崗岩に見られる。したがって、砕屑性モナザイトには、大陸地殻の様々な変成活動と一部の花崗岩(二次的大陸地殻)形成の情報が記録されると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では大陸地殻の進化機構の解明に向け、2つの具体的な研究課題を設けた。

[研究課題①：モナザイト形成条件の指標確立]

鉱物の微量元素組成は共存鉱物種に依存し、延いては形成温度圧力条件を反映する。しかし、具体的にモナザイトの微量元素組成が、形成過程によってどう変動するのか系統的に調べた研究はない。そこで本研究では、形成過程の分かっている様々な変成岩・花崗岩に含まれるモナザイトについて微量元素データを取得・コンパイルし、形成条件の指標となる微量元素濃度パターンを特定する。

[研究課題②：砕屑性モナザイトの年代・微量元素分析]

大陸の川砂に含まれる砕屑性モナザイトについて年代・微量元素・Nd 同位体分析を行う。これまでに既にアフリカ大陸の5河川(ナイル, ニジェール, コンゴ, ザンベジ, オレンジ川)については年代・微量元素データを報告済みであり(Itano et al., 2016), 本研究期間中には北米・南米大陸4河川(アマゾン, ラブラタ, ミシシッピ, マッケンジー)を、それぞれの試料について約100粒子ほど U-Pb, 微量元素, Nd 同位体を LA-ICPMS により分析する。その結果から、大陸地殻の変成(±火成)活動の時期と性質を探る。さらに、砕屑性ジルコンから推定された火成活動史と併せ、新たな大陸地殻進化モデルを構築する。

4. 研究成果

研究課題①の達成に向け、先行研究でデータの不足している火成起源モナザイトの微量元素分析を実施した。特に、日本島弧の磁鉄鉱, チタン鉄鉱系花崗岩に含まれるモナザイトの微量元

素組成 Nd 同位体組成を系統的に分析することで、モナザイト微量元素組成と花崗岩マグマ進化の関係性を結びつけることを目指した。両系列の花崗岩質ペグマタイトと花崗岩中のモナザイト希土類元素組成はそれぞれ、Eu 負異常・軽/中希土類元素比・中/重希土類元素比において特徴づけられた。チタン鉄鉱系では、ペグマタイト中モナザイトは花崗岩のそれよりも、多様な希土類元素組成を持ち、はるかに大きな Eu 負異常を示す。また、中希土類元素に対して、軽・重希土類元素の含有量は減少する傾向を見せ、希土類元素間の分別も顕著である。これらの特徴は、長石類に加えて、軽希土類元素のホスト相のモナザイトや重希土類元素のホスト相のゼノタイムや石榴石が還元的な花崗岩マグマ中で結晶分別した結果を示唆する。一方、磁鉄鉱系では希土類元素組成の変化は比較的小さい。特筆すべきは、Eu 負異常がチタン鉄鉱系のものに比べて小さいことである。磁鉄鉱系において Eu 負異常が小さく、比較的軽・重希土類元素の分別が小さいことは、磁鉄鉱系列花崗岩マグマ中のより低い $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ を反映し、metaluminous/peralkaline なマグマで希土類元素を主成分とする鉱物の晶出が抑制されたためと考えられる。

これらの花崗岩起源モナザイトのデータを、先行研究で報告されている変成・火成起源モナザイトのコンパイルデータとあわせ、モナザイトの起源推定に有効な化学指標を検討した。その結果、モナザイトの希土類元素パターンと U-Th 濃度が有用な指標となることが明らかになった。具体的には、火成起源のモナザイトは顕著な Eu の負異常で、また高変成度条件下で成長した変成起源モナザイトは顕著な重希土類元素の枯渇によって特徴づけられることが明らかになった。これらの元素がモナザイト起源の有用な指標となることは、機会学習を用いたデータ解析からも裏付けられた。ここで確立されたモナザイト起源の微量元素指標は、砕屑性モナザイトの起源を制約する上で重要な指標となる。これらの研究成果は、国内・国際学会で発表され、さらに国際学術雑誌に報告された (Itano et al., 2018 *Chemical Geology*; Itano et al., 2019 *Geosciences*)。

研究課題②では、レーザーアブレーションシステムを四重極誘導結合プラズマ質量分析計および多重検出器誘導結合プラズマ質量分析計の2台に接続し、U-Pb 年代、微量元素組成、Nd 同位体組成を同時に測定した。北米および南米について砕屑性モナザイトを 265 及び 180 粒子測定した。U-Pb 年代及び微量元素データから、それぞれの大陸における low-Ca マグマ活動および変成作用の年代が明らかになった (図 1)。具体的には、ミシシッピー川流域では主に 17.5 及び 14 億年前に、マッケンジー川では主に 26 及び 2 億年前に、アマゾン川では 22, 13, 10, 6 億年前に、パラナ川では 6 億年前に大規模な造山運動があったことが明らかになった。さらに、それぞれのモナザイト粒子の Nd 同位体組成から、火成・変成作用の起源岩の性質を制約した (図 2)。その結果、太古代や原生代初期に、比較的初生的なマグマ活動が進んだのに対して、原生代中期以降は、古い地殻のリサイクルが卓越したことが明らかになった。さらに、同河川の砕屑性ジルコンの U-Pb 年代頻度分布と比較することにより、変成作用と火成作用の卓越した時期に明瞭な違いがあることが示唆された。これらの研究成果は既に国内・国際学会で発表され、現在国際学術雑誌に投稿すべく、論文執筆中である。

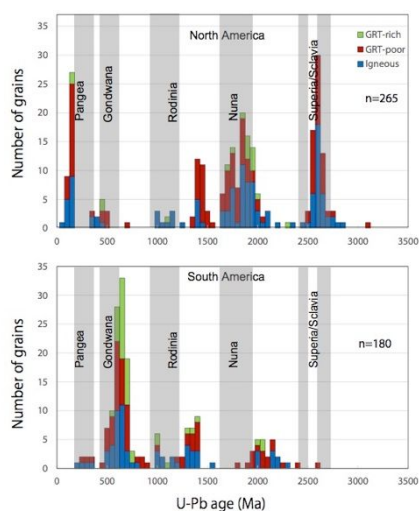


図 1：北米・南米大陸の川砂モナザイトの U-Pb 年代頻度分布

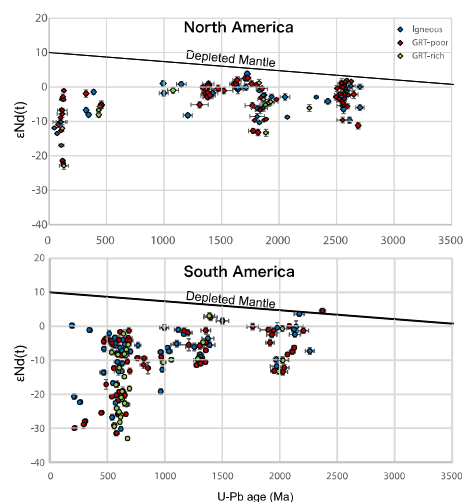


図 2：北米・南米大陸の川砂モナザイトの U-Pb 年代と Nd 同位体組成。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Itano K., Ueki K., Iizuka T., Kuwatani T.	4. 巻 10
2. 論文標題 Geochemical Discrimination of Monazite Source Rock Based on Machine Learning Techniques and Multinomial Logistic Regression Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 63
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences10020063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Izumi K., Suzuki K., Kemp D.B., Iizuka T.	4. 巻 55
2. 論文標題 Detrital zircon geochronology of Palaeogeographic and tectonic setting of the Lower Jurassic (Pliensbachian-Toarcian) Nishinakayama Formation, Toyora Group, SW Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geological Journal	6. 最初と最後の頁 862-874
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/gj.3466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sawada H., Iizuka T., Tsutsumi Y., Isozaki Y.	4. 巻 53
2. 論文標題 Detrital zircon evidence for Archean crustal development and plate subduction from the Murmac Bay group in the Rae Craton	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 171-179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2343/geochemj.2.0554	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Itano K., Iizuka T. & Hoshino M.	4. 巻 484
2. 論文標題 REE-Th-U and Nd isotope systematics of monazites from magnetite- and ilmenite-series granitic rocks of the Japan arc: Implications for its use as a tracer of magma evolution and detrital provenance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 69-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.chemgeo.2017.11.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Iizuka T.
2. 発表標題 The Sedimentary Record of Progressive Continental Growth
3. 学会等名 Goldschmidt (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Itano and T. Iizuka
2. 発表標題 Evolution of continental crust elucidated by an integration of detrital zircon and monazite records
3. 学会等名 JSPS-DST Japan-India Forum for Advanced Study
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Iizuka and K. Itano
2. 発表標題 Role of monazite in tracing crustal evolution
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Workshop on Laser-Ablation and Micro-Analysis (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Itano and T. Iizuka.
2. 発表標題 Tracing Magma Homogenization in Granite Genesis by Sr and Nd Isotope Microanalyses: A Case from the Busetsu Granite, Japan
3. 学会等名 Goldschmidt Conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯塚毅
2. 発表標題 同位体地球化学から制約する大陸地殻成長モデル
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板野敬太、飯塚毅、星野美保子
2. 発表標題 Isotopic change and its homogenization for petrogenesis of the Busetsu granites in Japan: evidence from multiple isotope micro-analyses
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板野敬太、飯塚毅
2. 発表標題 Transition from arc accretionary-type to collision-type orogenic events during the assembly of the Gondwana supercontinent from the integrated detrital zircon and monazite age spectra
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板野 敬太, 吉屋 一美, 飯塚 毅
2. 発表標題 モナザイトのU-Pb年代・Nd同位体・微量元素同時分析法の開発と今後の展望
3. 学会等名 日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉屋 一美, 板野 敬太, 飯塚 毅
2. 発表標題 北アメリカ大陸主要河川の川砂モナザイトのU-Pb年代・Nd同位体・微量元素組成
3. 学会等名 日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumi Yoshiya, Keita Itano, Tsuyoshi Iizuka, Shigenori Maruyama
2. 発表標題 U-Pb chronology and geochemistry of detrital monazites from major North American rivers
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 U-Pb chronology and geochemistry of detrital monazites from major North American rivers
2. 発表標題 Kazumi Yoshiya, Keita Itano, Tsuyoshi Iizuka, Shigenori Maruyama
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------