

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 4 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01991

研究課題名(和文) 碎屑性ジルコン用母岩推定図の作成

研究課題名(英文) Discrimination diagram for detrital zircons

研究代表者

澤木 佑介 (Sawaki, Yusuke)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：00635063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では碎屑性ジルコンへの応用を念頭に置き、堆積岩混入量が増えるにつれてジルコン中で濃度変化がみられる微量元素を特定する事を目指した。研究対象は丹沢山地、甲府盆地周縁、大峯地域、紫尾山地域及び大隅半島に産する中新世花崗岩である。それぞれの岩体から堆積岩混入量の異なる複数の花崗岩を採取した。花崗岩からジルコンを分離し、学習院大学に既設のLA-ICP-MS/MSを用いて微量元素濃度測定を行った。その結果、ジルコン中のNb/P値(Ta/P値)、Ce/P値によって、各型から分離されたジルコンが上手く特徴づけられる事が明らかになり、これらが堆積岩混入量の指標として有用であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

花崗岩質な大陸は惑星地球を特徴づけるものである。大陸は堆積岩を作り出し、その中に有機物が取り込まれる事によって大気海洋の酸化に寄与するため、大陸成長の歴史は地球史解読において重要なテーマである。その大陸成長史の研究において碎屑性ジルコンのU-Pb年代は重要な役割を果たしてきたが、年代だけでは大陸がどのような花崗岩で構成されていたのかが分からない。これからの碎屑性ジルコンの測定の際には年代と共にNb、Ce、P濃度を同時にモニターし、本研究で作成したジルコン判別図上で母岩を推定する事により、いつの時代にどのような花崗岩が大陸を構成していたのかを明らかにすることができる。

研究成果の概要(英文)：To make the discrimination diagrams for detrital zircons, we examined trace-element compositions of zircons extracted from Miocene granitoids in the Tanzawa tonalitic plutons, Kofu granitic rocks, Ohmine granitic rocks, and granitoids exposed in Shibisan area and Ohsumi peninsula in southwestern Japan. After zircon separation, trace-element compositions of zircons were determined with LA-ICP-MS/MS at Gakushuin University. The zircons showed systematic differences in Nb/P, Ta/P, and Ce/P values, and we recommend the combined use of Nb/P-Ce/P or Ta/P-Ce/P crossplots for evaluating sediment involvement during magma ascent. Although the crossplots were created using data from Miocene granitoids in Japan, the discrimination diagrams are based on the general features of each type of granite.

研究分野：地球史

キーワード：ジルコン 中新世花崗岩 LA-ICP-MS/MS 微量元素組成

1. 研究開始当初の背景

ジルコン ($ZrSiO_4$) は物理的及び化学的風化に強固であり、岩石が風化してジルコン単結晶になっても U-Pb 年代系を保持する。そのため、砕屑岩中の砕屑性ジルコンは砕屑岩堆積当時に後背地に存在した火成岩体の年代情報を提供可能である。2000 年代以降、レーザー照射 (LA) と誘導性結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を組み合わせた、迅速なジルコンの U-Pb 年代分析法が普及し、大量の年代分析が可能となった。これにより、削剥・消失してしまった地質体の年代情報が読み取れるようになったため、各地域、特に日本列島構造発達史の解読に大きな貢献がなされた。これに加えて、砕屑性ジルコンから年代以外の情報を得る事ができれば、過去の後背地の理解、ひいては構造発達史の議論が大幅に進展すると期待される。ジルコン中の微量元素成分や酸素 (O) 及びハフニウム (Hf) 同位体比測定に基づいて、ジルコン単結晶から年代以外の情報を得ようと試みる研究は複数存在し、それらは主に造工場推定 (大陸・島弧 or 海洋島 or 中央海嶺等) を目指すものと、母岩推定を目指すもの (図 1) に大別される。

ジルコンの母岩推定指標として一番引用度の高い研究は Belousova et al. (2002) であり、超塩基性岩～酸性岩に至る多様な火成岩中のジルコン分岐図を提唱した (図 1)。しかし、先行研究全般に言えることでもあるが、多様な地域から得られた多量の分析データをコンピューターに読み込ませて機械的 (自動的) に分岐図が作成されるため、() 分岐に選択される元素に理論的背景が希薄な場合も多く、() 元データすら上手く分類されない場合もある。例えば図 1 下部で花崗岩とドレイイトの分岐に ” 何故 $Hf=1.015wt\%$ が選択されたのか ” に明確な岩石学的背景は無く、花崗岩の約 2 割のデータはドレイイトに分類され、半分以下のデータしか正しい分類がなされない。またこの分岐図には () 花崗岩の中を SiO_2 濃度

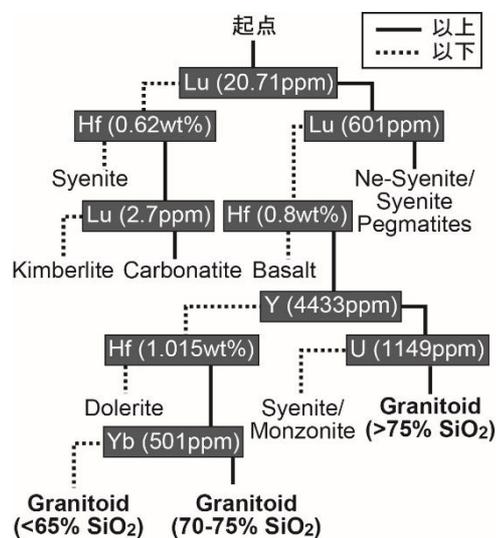


図 1. Belousova et al. (2002) によるジルコン判別図。

で分けているが、果たしてそういった分類が妥当かつ可能なのか、といった問題も内在する。多くの研究者が上述の () ~ () の問題点を感じつつも、他に良い指標が無いという実情もあってこの判別図 (図 1) が広く使用され続けている。

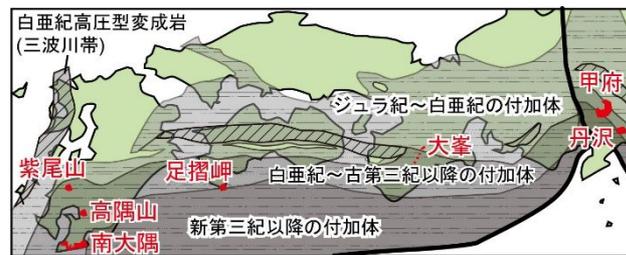
一方で、花崗岩内の細分を目的として、花崗岩形成時に捕獲された堆積岩量の見積もりを目指す研究も存在する。一般に Sedimentary 型 (S 型) の花崗岩は Mantle 型 (M 型) や Igneous 型 (I 型) の花崗岩に比べて堆積岩混入量が多く、O 及び Hf 同位体比が堆積岩混入量の指標として広く受け入れられている。しかし、O 同位体比測定は二次イオン質量分析計 (SIMS) が必要であり、Hf 同位体比測定は大きな分析径が必要であるために小さなジルコン粒子には適用できないといった不便さがある。一方で、ジルコンの微量元素濃度測定は U-Pb 年代分析とほぼ同じ分析装置を用い、分析径も $30\mu m$ 程度で良いため、より簡便に測定可能である。ジルコンの微量元素濃度から堆積岩混入量の見積もりを試みた研究も存在するが、500km 以上離れた、親マグマの組成も貫入先の地質体も異なる花崗岩を使用しており、堆積岩自体の微量元素濃度情報も伴っていないといった問題がある。

2. 研究の目的

本研究の目論見は碎屑性ジルコンによる後背地解析を促進する事にある。河口堆積物の碎屑性ジルコンの年代頻度分布は後背地の”花崗岩質”地殻の形成年代を良く反映し、実質的には碎屑性ジルコンの大半が大陸・島弧の花崗岩から供給されると見込まれるため、ジルコンがどのような花崗岩に由来するのかを示す事で目論見に直結できると考えている。この考えのもと、本研究の目的を花崗岩形成時の堆積岩混入量をモニターする指標を作る事とする。具体的には、上述した問題に対応可能な日本の中新世花崗岩中からジルコンを分離し、微量元素濃度測定を通じて、堆積岩混入量の指標となるべく元素の選定を行う。

3. 研究の方法

甲府盆地、紀伊半島、鹿児島県に産する中新世(2300~500 万年前)花崗岩を研究対象とした(図2)。特に、甲府花崗岩体と大峯花崗岩類では各々が同源の親マグマを持ち、貫入先の堆積岩種や混入量の違いによって異なる花崗岩種が形成されており、本研究に最適である。鹿児島県の紫尾山 - 高隅山 - 南大隅岩体は類似する親マグマからの形成が自明ではないが、形成年代は似通っており、中新世花崗岩の東西方向の多様性を調べるために使用した。一般に M 型磁鉄鉱系列が最も堆積岩混入量が



型	系列	九州南部	紀伊半島 (大峯花崗岩類)	甲府盆地周辺
M型	磁鉄鉱			畦ヶ丸、芦川等
I型	磁鉄鉱			三宝、広瀬等
I型	チタン鉄鉱	紫尾山	洞川	昇仙峡、瑞牆
S型	チタン鉄鉱	高隅山 南大隅	川迫、天狗山 白谷	

図2. 研究に用いた花崗岩の情報。

少なく、I型を経て、S型チタン鉄鉱系列が最も多くの堆積岩混入が見込まれる(図2)。

花崗岩及び周囲の堆積岩から粉末試料を作成し、ガラスビードを作成後、XRF分析によって全岩主要元素濃度を決定した。一方で花崗岩からジルコンを分離し、EDS検出器を備えた電子顕微鏡(SEM)にて副次成分鉱物の同定を行った。学習院大学に既設のLA-ICP-MS/MSを用いて、ガラスビード(全岩組成用)、樹脂埋めしたジルコンについて、それぞれ微量元素濃度を測定した。

4. 研究成果

(1) 副次成分鉱物の記載

SEM-EDSによる観察の結果、ジルコンよりもマグマ中で先出して微量元素組成に影響を与えそうな副次成分鉱物として、燐灰石、ゼノタイム、モナザイト、イルメナイト、褐簾石等が含まれている事を確認した。主要鉱物としては斜長石はジルコンよりも早くから晶出している様子が確認された。一方で角閃石はジルコンを包み込むように結晶成長しているため、ジルコンよりも後に晶出している様子が確認された。

(2) 堆積岩を特徴づける微量元素

花崗岩に貫入されている堆積岩の微量元素組成も測定した。その中でジルコン組成にも反映されそうな元素について、周辺に露出している島弧玄武岩と比較すると、Th, U, Nb, Ta, Ce, Ndが高い事が明らかになった。言い換えると、花崗岩マグマが堆積岩を取り込むと、全岩組成

としてこれら元素の濃度が上昇すると見込まれる。

(3) ジルコンの微量元素組成

ジルコン中の微量元素濃度そのもの、及びそれらを比にとって幾重にも及ぶトライアルを繰り返した結果、Nb/P, Ta/P, Ce/Pを組み合わせる事でM型 I型 S型花崗岩中ジルコンを特徴づけられることが明らかになった(図3)。M型花崗岩中ジルコンに比べてI型花崗岩中ジルコンは高いNb/P, Ta/P比を持っている。M型に比べてI型は堆積岩を相対的に多く取り込んでいる。そのため全岩組成で見た時にM型花崗岩に比べてI型花崗岩が高いNb, Ta濃度を持っており、この全岩組成の違いがジルコンにもそのまま反映されたものと考えられる。

一方で、S型花崗岩は全岩としては高いNb, Ta, Ce濃度を持つものの、その中のジルコンはこれら元素に枯渇している、という事が新たに明らかになった(図3中左下)。マグマが上昇過程で堆積岩を取り込むと、堆積岩が低温であるが故にマグマの温度が下がる。すると、既存のジルコンを溶かしきる事ができないため、過飽和度が低下して、新規に形成されるジルコンは比較の後期に晶出する。それ故、先出鉱物の影響が大きくなる。一般に堆積岩は島弧玄武岩に比べて、有機物を含むために還元的环境中であり、化学組成の面ではCaが相対的に少ない。堆積岩を多量に取り込んだマグマではこの化学的特徴が引き継がれ、イルメナイトやモナザイトといった鉱物が晶出しやすくなる。これらの鉱物はNb, TaやCeに高い分配係数を示すため、これら鉱物が晶出することにより残存マグマ中の上記元素濃度が著しく減少する(図4a)。そのため、残存マグマから晶出するジルコンにはこれら元素が枯渇してしまうものと考えられる。堆積岩の化学的特徴がそのままジルコンに引き継がれているわけではないが、堆積岩を取り込んだことによって形作られた性質(Nb, Ta及びCeの枯渇)ではあるため、これも堆積岩混入量の指標として有用と考えている。

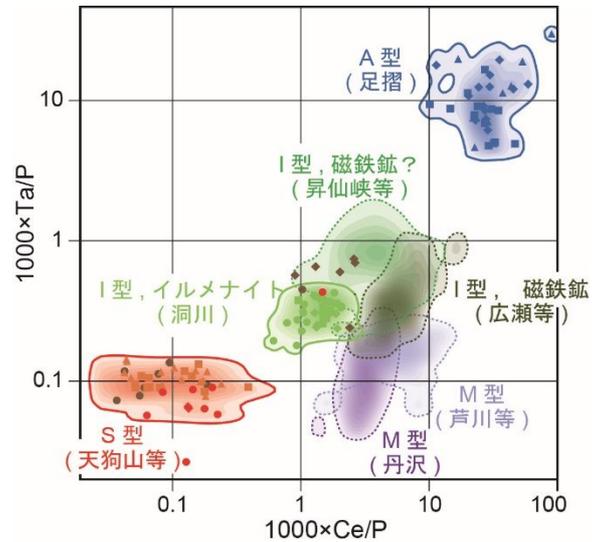
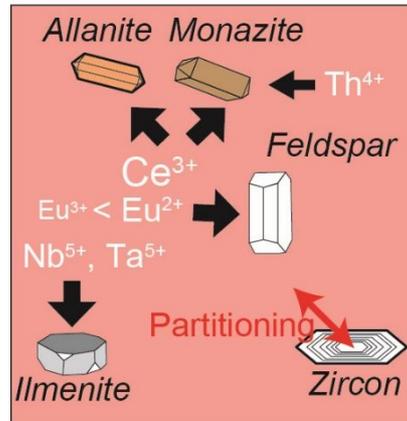


図3. 碎屑性ジルコン用母岩推定図。
縦軸は Nb/P でもほぼ同じ推定図となる。

(a) S型花崗岩マグマ



(b) A型花崗岩マグマ

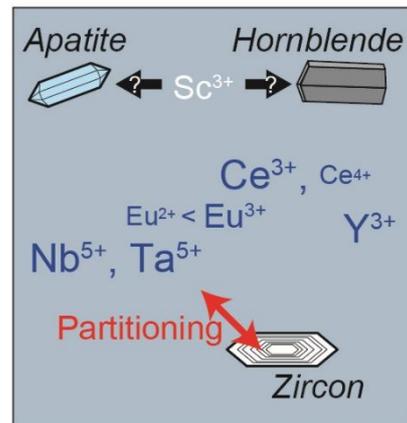


図4. マグマ中の元素挙動。

(4) 碎屑性ジルコンへの応用

本研究が採用した、花崗岩をM, I, S型に分ける方法はalphabetical classificationと呼ばれ、もう一つalkaline型(A型)と呼ばれる分類を含む。日本の中新世花崗岩のうち、足摺岬

に露出する花崗岩のみがこの A 型に属する(図 2)。この花崗岩からジルコンを分離し、上記同様にジルコンの微量元素濃度を測定した。その結果を図 3 上にプロットすると、M, I, S 型とは一線を画し、Nb, Ta, Ce の全てに富んだ化学組成を持っている事が明らかになった。A 型花崗岩は全岩組成としてこれら元素に富むため、全岩組成の特徴がそのままジルコンにも引き継がれているものと考えられる(図 4b)。

本研究が目指した碎屑性ジルコン用母岩推定図の作成は図 3 の提唱をもって完遂された。この図自体は日本の中新世花崗岩という、ローカルな岩石を用いて作った判別図であるが、判別の基となる化学的特徴を生み出している要因(S 型花崗岩中でのモナザイト晶出等；図 4a)は一般的事象であり、特に日本の中新世花崗岩に限った事象ではない。同じデータセットが公開されている論文のデータを未知試料として図 3 上にプロットしても、ほとんどが想定通りの領域にプロットされる(Sawaki et al., 2022)。よって、図 3 に示した判別図は汎用性が高いと見込んでおり、今後碎屑性ジルコンのデータと組み合わせられることによって、後背地研究の進展に寄与できれば幸いである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13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 Sawada Hikaru, Sawaki Yusuke, Sakata Shuhei, Ishikawa Akira, Muteta Brian, Isozaki Yukio, Maruyama Shigenori	4. 巻 173
2. 論文標題 New geochronological constraints on the middle Archean Shurugwi greenstone belt toward an understanding of the crustal evolution of the Zimbabwe Craton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of African Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104021 ~ 104021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jafrearsci.2020.104021	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 Sawaki, Y., Asanuma, H., Abe, M., Hirata, T.	4. 巻 29(1)
2. 論文標題 U-Pb ages of granitoids around the Kofu basin: Implications for the Neogene geotectonic evolution of the South Fossa Magna region, central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 e12361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12361	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 Suzuki, K., Sawaki, Y., Iizuka, T., Kitajima, K., Hattori, K., Hirata, T., Anma, R.	4. 巻 372-373
2. 論文標題 Hf-O isotope systematics of zircons from the Taitao Granitoids: Implications for slab-melting material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 105665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2020.105665	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 Sawaki Yusuke, Asanuma Hisashi, Sakata Shuhei, Abe Mariko, Ohno Takeshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Trace element composition of zircon in granitoids, <sc>Kofu and Tanzawa</sc> <sc>Japan</sc> incorporated in parent magma : Quantitative indicator of sediment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 e12455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12455	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 Sawaki Yusuke, Asanuma Hisashi, Sakata Shuhei, Abe Mariko, Ohno Takeshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Zircon trace element compositions in ^{<scp>Miocene</scp>} granitoids in ^{<scp>M , I , S</scp>} Japan : Discrimination diagrams for zircons in ^{<scp>A</scp>} type granites , and	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 e12466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12466	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20件(うち招待講演 3件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 澤木佑介、坂田周平、大野剛
2. 発表標題 甲府花崗岩中のジルコン微量元素組成：堆積物混入指標の確立
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yokoyama, S., Sakata, S., Niki, S., Hirata, T., Sawaki, Y., Yamamoto, S., Fukami, Y., Ohno, T.
2. 発表標題 Trace elements in Hadean zircons indicate the evolution of the early crustal formation process
3. 学会等名 2021年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山晶 , 坂田周平, 澤木佑介, 山本伸次, 深海雄介, 大野剛
2. 発表標題 LA-ICP-MS/MSを用いたジルコン中の微量元素測定 における高確度化の検討
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田聡, 澤木佑介, 小宮剛
2. 発表標題 カナダ・ヌブアギツック表成岩帯の炭酸塩岩の地質学的産状と化学組成を用いた初期太古代の熱水組成の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤木佑介
2. 発表標題 ジルコンの母岩判別図作成時の境界問題
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋真里花, 横山晶, 坂田周平, 澤木佑介, 山本伸次, 深海雄介, 大野剛, 小宮剛
2. 発表標題 冥王代ジルコロン中の Sc/Yb の評価法の検討
3. 学会等名 2022年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤木佑介, 吉田聡, 浅沼尚, 佐藤友彦, 平田岳史
2. 発表標題 希土類元素地球化学の原生代前期炭酸塩岩への応用
3. 学会等名 2022年度日本地球化学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

澤木佑介のホームページ
<https://y-sawaki.jimdofree.com/>

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
研究分担者	大野 剛 (Ohno Takeshi) (40452007)	学習院大学・理学部・教授 (32606)	

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
---------	---------