

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05615

研究課題名(和文) 新たな変成反応進行過程の提案と反応継続時間の推定

研究課題名(英文) Kinetics and duration of metamorphic mineral growth

研究代表者

宮崎 一博 (Miyazaki, Kazuhiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・副研究部門長

研究者番号：30358121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：変成岩に普遍的に含まれるジルコンを用いて、反応動力学を推定する新たな手法を開発した。また、成長速度の定式化を行いジルコンの年代測定値から成長時間を見積もった。以上の手法と見積りを沈み込み帯で形成された長崎変成岩に適応した。沈み込み帯深部では、物質の継続的な付加と低温高压型変成作用が、変成帯全体としては約3千万年の時間スケールで、個々の試料では1千万年から2千万年の時間スケールで進行することを明らかにした。沈み込み帯深部では、低温条件ため界面反応進行速度が遅く、物質の移動拡散が容易にする変成流体が比較的豊富にあるため、界面律速型反応動力学が卓越する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

碎屑性ジルコンは変成泥岩にほぼ普遍的に含まれることから、本研究で開発した変成反応進行過程の解明及び変成反応継続時間の推定には汎用性がある。本手法を沈み込み帯深部で形成された変成岩に適応することで、日本列島が位置する沈み込み帯深部での変成反応に伴う流体の生成機構の解明につながる。即ち、どのような律速過程で脱水反応が起こり、どれくらいの時間スケールで進行したかを明らかにすることができる。流体生成機構と継続時間の推定は、沈み込み帯深部での流体生成が、島弧における地震の発生、マグマの発生、大規模な地殻変動を伴う造山運動の進行に大きな影響を及ぼすので重要である。

研究成果の概要(英文)：We developed new method for determination of growth kinetics using zircon in metamorphic rocks. Formulation of growth kinetics was also developed for estimate of growth duration. We applied these methods to high-pressure Nagasaki metamorphic rocks formed in deeper part of subduction channel. The results show that duration of continuous accretion of materials and progress of high pressure and low temperature metamorphism in the whole Nagasaki metamorphic rocks is about 30 Myr, and that in each metamorphic rock sample ranges from 10 Myr to 20 Myr. Sluggish interface-kinetics at low temperature and abundant metamorphic fluids promoting rapid mass transport may result in predominance of interface-controlled reaction kinetics in subduction channel.

研究分野：岩石学

キーワード：変成反応 動力学 ジルコン 変成鉱物

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

変成岩は地殻深部において起こる変成反応によって形成される。変成反応は、拡散律速あるいは界面律速のいずれかで進行する。しかしながら、天然で見積もられた反応速度は、流体存在下での界面律速反応で進行する実験結果の外挿値に比べ 2-6 桁遅い。また、拡散律速の反応を仮定した場合、観測されるはずの成長鉱物の界面不安定性が天然ではほとんど存在しない。このような根本的な問題が存在し、天然での反応進行動力学について我々の理解は進んでいない。また、天然物質を用いた変成反応継続時間の研究例が少ないことも、反応動力学の理解が進まないことの一因である。

2. 研究の目的

上述のような研究背景のもと、提案者は変成泥岩中の碎屑性ジルコンとこれを被覆成長する変成ジルコンの計測と年代測定から、変成岩中のジルコン成長の反応動力学の決定と反応継続時間の推定を行う。

3. 研究の方法

本研究では、上記研究目的を達成するため、白亜紀低温高压型変成岩が分布する長崎県西彼杵半島を対象フィールドとして、以下の解析及び分析を行う。

- 1) 西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩の試料採集、全岩化学組成の分析、変成組織及び変形構造解析、温度圧力条件見積もり
- 2) 泥質片岩から碎屑性ジルコンからジルコンを分離し、カーソードルミネセンスと反射二次電子線像による組織の観察
- 3) 碎屑性ジルコンと被覆する変成リムと量比の測定とジルコンの U-Pb 年代測定
- 5) フェンジャイトの組成不均一の測定とフェンジャイトの K-Ar 年代測定
- 6) 以上の分析結果のとりまとめ

4. 研究成果

(1) 変成ジルコンの成長動力学を推定する手法の開発

泥質片岩中では碎屑性ジルコンが残存していることから、これを時間マーカーとして、成長によって増えた量の粒径依存性によって、成長度力学を判別する簡便な方法を開発した。対象とした試料は、西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩中のジルコンである。碎屑性ジルコンコアと変成反応で成長したジルコンリムは、カソードルミネセンス像で識別でき、かつ変成反応で成長したジルコンリムには微細な炭質物が包有されている(図 1)。光学顕微鏡においても碎屑性コアと変成リムの識別が容易である(図 1)。変成リムに含まれる炭質物の形態や粒径は、基質に含まれるものと同じである。また、炭質物温度計で求めた温度も 450 程度の低温であり、基質の炭質物で求めた温度と同じである。これらの観察事実は、変成リムが低温高压型の変成作用で成長したことを示している。

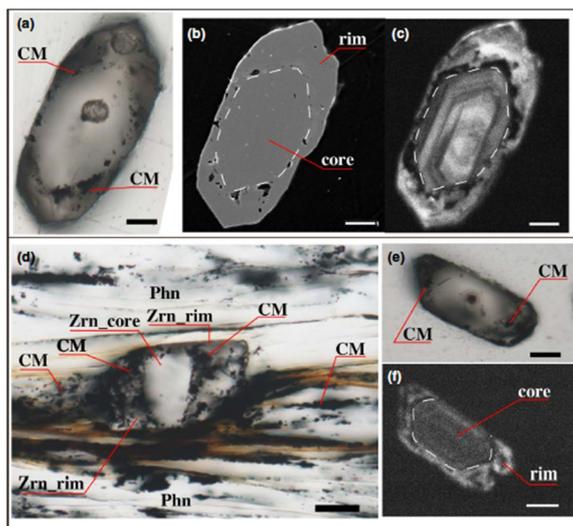


図 1 西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩中のジルコンの光学顕微鏡像(a,d,e),反射二次電子線像(b),カソードルミネセンス像(c,f)。Zrn:ジルコン; CM:炭質物; Phn: フェンジャイト。(Miyazaki et al., 2018)

変成ジルコンの成長動力学の推定には、碎屑性ジルコンの粒径 a_0 と変成リム成長後のジルコンの粒径 a を用いた。初期状態の粒径を a_0 、 t 時間後の最終状態の粒径を a とした場合、界面律速型の場合の成長量は粒径に依存しないが、拡散律速型では、粒径が小さいほど成長量は多くなる。粒子における成長速度の係数が試料で同一だと仮定できる理想的な場合は、初期粒径 a_0 を碎屑性ジルコンの粒径を横軸に、最終粒径 a を変成リム成長後の粒径として縦軸にプロットすることで、どちらの成長動力学が支配的であったかを識別できる(図 2)。界面律速型成長の場合は、傾き 1 の直線状に a_0 と a が配列するが、拡散律速の場合は a_0 が小さい領域で傾き 1 の直

線からのズレが大きくなる(図2). この関係は個々の粒子の成長速度に3倍程度のランダムなばらつきがある場合でも成り立つ. さらに, 粒径の測定に20%程度の誤差をランダムに与えた場合でも同様のプロットで, 拡散律速成長と界面律速成長が区別できることを確認している.

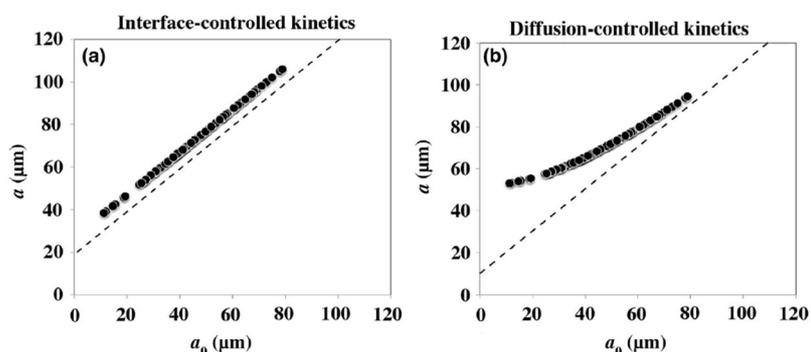


図2 初期粒径 a_0 と最終粒径 a の関係. (a) 界面律速型成長の場合. (b) 拡散律速成長の場合. どちらの場合も初期粒径として平均 $45 \mu\text{m}$, 標準偏差 $15 \mu\text{m}$ の正規分布を仮定した. (Miyazaki et al., 2018)

上記の手法を西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩中のジルコンに適用した結果, 測定したすべての試料で傾き1の直線に平行な配列を形成した(図3). 即ち, 長崎変成岩中のジルコンはすべて界面律速型成長で成長したことが明らかとなった. これまで, 鉱物の成長は漠然と, 拡散律速型成長で進行すると考えられていたが, 界面律速型成長で成長したことが確認できた. 長崎変成岩においてジルコンの成長が界面律速型成長になる要因は, 1) 沈み込み帯の低温高压型の変成温度圧力条件では, 温度が低いために界面での反応進行速度が遅い, 2) 低温高压型変成岩の形成場である沈み込みチャンネルには流体が豊富に存在し, 豊富な流体を介した元素の移流・拡散が素早く起こる. この2つの要因で界面律速型成長が起こるものと考えられる.

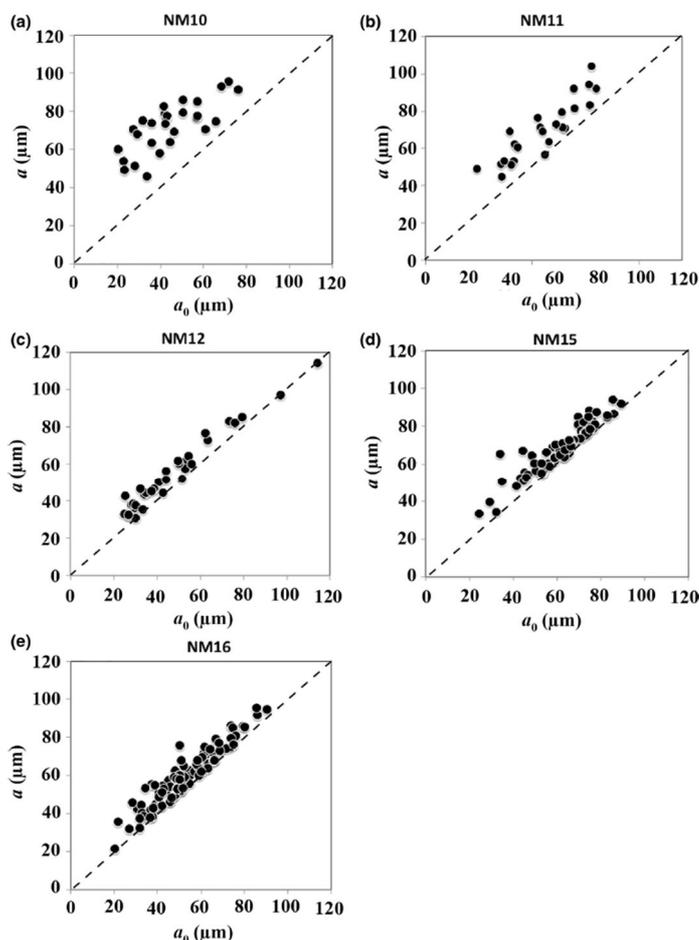


図3 西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩中のジルコンの初期粒径 a_0 と変成リム成長後の粒径 a の関係. (Miyazaki et al., 2018)

(2) 変成鉱物の成長動力学と成長時間の見積

成果(1)で開発した成長動力学判別法によって, 低温高压型変成岩である西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩中のジルコンは界面律速型成長で成長したことが示唆された. ジルコンはU-Pb年代測定によって, 成長した時間を知ることができる. そこで, 界面律速型成長を定式化することで, 成長時間を見積もった. 同時に拡散律速型成長の定式化も行い, 様々な変成鉱物に適用可能な形式にまとめた. 泥質片岩中にはジルコン以外にも年代測定が可能な鉱物としてフェンジャイトが含まれる. しかし, フェンジャイトに関しては, ジルコンと同様の方法で成長度力学の推定が

行えない．そこで、粒径と成長時間の関係から成長動力学の推定を行った．フェンジャイトの成長駆動力として、50 MPa の差応力がある場合の非静水圧下と静水圧下の化学ポテンシャルの違いを用いた．フェンジャイトの粒径を 100-1000 μm とした場合、界面律速型で成長することが予測できた (図 4)．フェンジャイトの成長を界面律速型と仮定すると、粒径 1 mm の粒子の成長溶解が数万年で起こる．従って、フェンジャイトから得られる K-Ar 年代は変成作用末期のものと仮定した．一方、ジルコンから得られる U-Pb 年代は、最大で数 10 Myr の差があり、短時間に一斉に成長したものでないことが示唆された．ジルコンに関しては、粒径が小さいために界面エネルギーの減少を駆動力とする界面律速型オストワルド成長で成長するとして成長則の定式化を行った．ジルコンの U-Pb 年代の測定データを界面律速型オストワルド成長の成長則でフィッティングすることで、成長開始時間を求めた (図 5)．なお、成長終了時間はフェンジャイト K-Ar 年代に等しいと仮定した．フィッティングの結果、成長時間は 10-20 Myr と見積もられた．この継続時間は、個々の試料の低温高压型変成作用の継続時間を表していると考えられる．西彼杵半島全体でみると、構造的上位ほどジルコン成長開始時間が早く、終了時間も早い (図 6)．また、原岩の堆積年代を表すと考えられる碎屑性ジルコンの最若年代成分も構造的上位ほど古い傾向がある．これらの結果から、沈み込み帯チャネル深部には低温高压型変成場が長時間存在し、そこに逐次、原岩である海溝充填堆積物と海洋底を構成していたチャート、玄武岩が付加して変成帯が成長していった様子がうかがえる．西彼杵半島長崎変成岩全体としては、変成反応の活動域が構造的下に移動しながら全体としては約 30 Myr の期間低温高压型変成場が存在したと推定される．

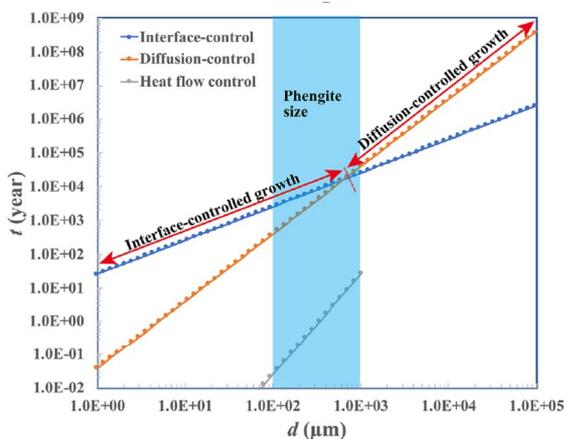


図 4 フェンジャイトの成長動力学．成長の駆動力として 50 MPa の差応力がある非静水圧場にある状態と静水圧場にある状態のフェンジャイトの化学ポテンシャルの差を想定．拡散律速，界面律速，熱流律速のそれぞれに粒径とその粒径に成長するのに必要な時間を算出．成長は最も遅い成長動力学で進行する．Miyazaki et al. (2019)

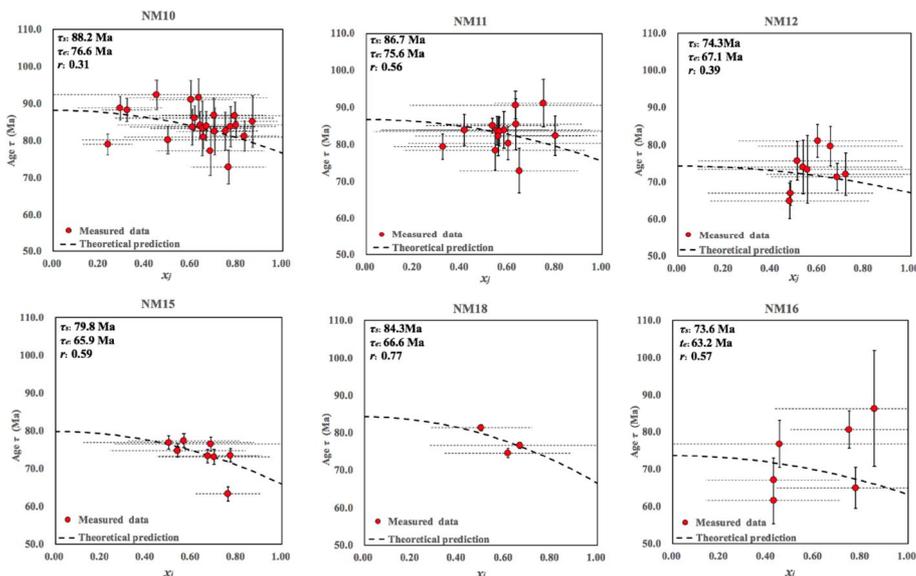


図 5 界面律速型オストワルド成長でジルコン U-Pb 年代をフィッティングした結果． X_j は各ジルコン結晶変成リムでの測定点の位置 (変成リムの厚さで規格化)． t_s は成長開始時間， t_e は成長終了時間， r は相関係数．(Miyazaki et al, 2019)

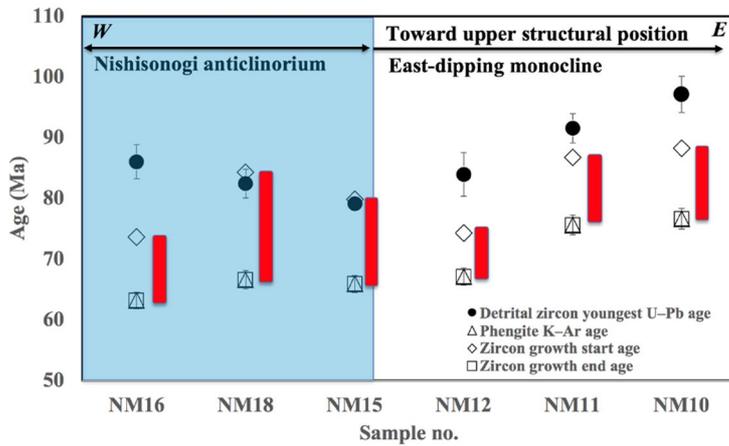


図 6 西彼杵半島長崎変成岩における変成作用の継続時間と地質構造の関係。(Miyazaki et al., 2019)

(3) 炭質物温度計による西彼杵半島長崎変成岩の広域温度構造

西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩中のジルコン及びフェンジャイトを用いた変成動力学と変成継続時間の推定と並行して、炭質物温度計を用いた同半島の広域温度構造の推定を行った。西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩の鉱物組合せは全域でざくろ石 + 緑泥石の鉱物組合せで特徴付けられ、鉱物組合せの変化がない(図 7a)。しかしながら、炭質物温度計でピーク時の温度を見積もると、構造的上位の地層が分布する半島東側ほどピーク温度が高い傾向が認められた(図 7b)。ジルコン及びフェンジャイトの成長動力学と成長継続時間から明らかになった変成帯の成長を考慮すると、変成帯の成長に伴い、徐々にピーク時の温度が低下している。全体として上位ほどピーク温度が高いことを考えると、変成帯へ熱を供給する熱源が構造的さらに上位に存在し、成長にともない熱源から離れるために、見かけ温度が低下した可能性がある。この場合、下位ほど海溝充填堆積物の年代が若いことを考えると、構造的の下位の方向が沈み込むスラブ側で、上位の方向がくさび形マントル側になり、くさび形マントル側から熱が供給されていた可能性が指摘できる。

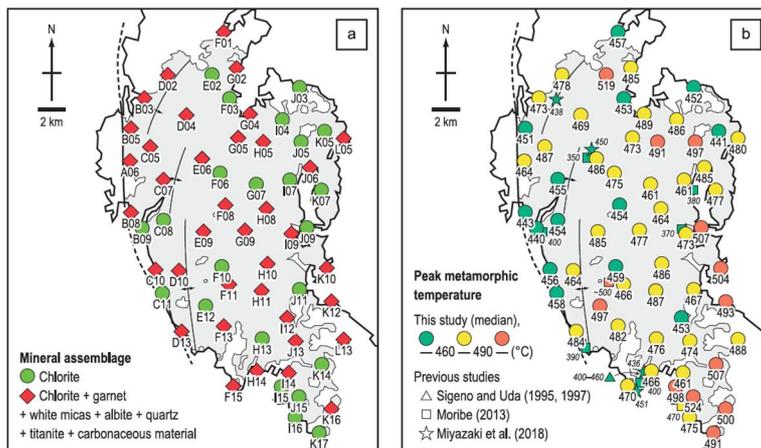


図 7 西彼杵半島長崎変成岩泥質片岩の鉱物組合せ(a)と炭質物温度計で求めたピーク温度(b)(Mori et al., 2019)

< 引用文献 >

1. Miyazaki, K., Mori, Y., Nishiyama, T., Suga, K. & Shigeno, M. (2018) Determination of reaction kinetics using grain size: An application for metamorphic zircon growth. Terra Nova, DOI: 10.1111/ter.12322.
2. Miyazaki, K., Suga, K., Mori, Y., Iwano, H., Yagi, K., Shigeno, M., Nishiyama, T., Danhara, T. & Hirata, T. (2019) Kinetics and duration of metamorphic mineral growth in a subduction complex: zircon and phengite in the Nagasaki metamorphic complex, western Kyushu, Japan. Contributions to Mineralogy and Petrology, 115, DOI: 10.1007/s00410-019-1629-8.
3. Mori, Y., Shigeno, M., Miyazaki, K. & Nishiyama, T. (2019) Peak metamorphic temperature of the Nishisonogi unit of the Nagasaki Metamorphic Rocks, western Kyushu, Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 114, 170-177

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Miyazaki, K., Suga, K., Mori, Y., Iwano, H., Yagi, K., Shigeno, M., Nishiyama, T., Danhara, T. & Hirata, T.	4. 巻 115
2. 論文標題 Kinetics and duration of metamorphic mineral growth in a subduction complex: zircon and phengite in the Nagasaki metamorphic complex, western Kyushu, Japan.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Contributions to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 MORI Yasushi, SHIGENO Miki, MIYAZAKI Kazuhiro, NISHIYAMA Tadao	4. 巻 114
2. 論文標題 Peak metamorphic temperature of the Nishisonogi unit of the Nagasaki Metamorphic Rocks, western Kyushu, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 170 ~ 177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2465/jmps.190423	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 Miyazaki Kazuhiro, Ikeda Takeshi, Matsuura Hirohisa, Danhara Toru, Iwano Hideki, Hirata Takafumi	4. 巻 61
2. 論文標題 Ascent of migmatites of a high-temperature metamorphic complex due to buoyancy beneath a volcanic arc: a mid-Cretaceous example from the eastern margin of Eurasia	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Geology Review	6. 最初と最後の頁 649 ~ 674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00206814.2018.1443403	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 Endo Shunsuke, Miyazaki Kazuhiro, Danhara Tohru, Iwano Hideki, Hirata Takafumi	4. 巻 27
2. 論文標題 Progressive changes in lithological association of the Sanbagawa metamorphic complex, Southwest Japan: Relict clinopyroxene and detrital zircon perspectives	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 e12261 ~ e12261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12261	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 Nagata Mitsuhiro, Miyazaki Kazuhiro, Iwano Hideki, Danhara Tohru, Obayashi Hideyuki, Hirata Takafumi, Yagi Koshi, Kouchi Yoshikazu, Yamamoto Koshi, Otoh Shigeru	4. 巻 -
2. 論文標題 Timescale of material circulation in subduction zone: U?Pb zircon and K?Ar phengite double dating of the Sanbagawa metamorphic complex in the Ikeda district, central Shikoku, southwest Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 e12306 ~ e12306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12306	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 SCHMITT Alison C., TOKUDA Makoto, YOSHIASA Akira, NISHIYAMA Tadao	4. 巻 -
2. 論文標題 Titanian andradite in the Nomo rodingite: Chemistry, crystallography, and reaction relations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.180731	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 今岡照喜・森康・楮原京子・永嶋真理子	4. 巻 68
2. 論文標題 中世の滑石石鍋分類の新たな指標：熱重量・示差熱分析とH2O含有量	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 山口大学教育学部研究論叢	6. 最初と最後の頁 39 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Miyazaki Kazuhiro, Mori Yasushi, Nishiyama Tadao, Suga Kenshi, Shigeno Miki	4. 巻 30
2. 論文標題 Determination of reaction kinetics using grain size: An application for metamorphic zircon growth	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Terra Nova	6. 最初と最後の頁 162 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ter.12322	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuhiro Miyazaki, Kenshi Suga, Yasushi Mori, Hideki Iwano, Koushi Yagi, Tadao Nishiyama, Miki Shigeno, Touru Danhara, and Takafumi Hirata
2. 発表標題 Metamorphic mineral growth in subduction complex: an example of zircon and phengite in Nagasaki metamorphic complex, western Kyushu, Japan
3. 学会等名 EGU (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎一博
2. 発表標題 Switching of metamorphic growth kinetics due to volume fraction of metamorphic fluid
3. 学会等名 JpGU 地球惑星連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 祐紀 池田剛 宮崎 一博
2. 発表標題 天草下島に分布する長崎変成岩類の片麻岩に見られる部分溶融の証拠
3. 学会等名 JpGU 地球惑星連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎 一博 池田剛 岩野英樹 檀原徹 平田岳史
2. 発表標題 領家泥質片麻岩中のジルコンの碎屑性年代, 変成年代, および成長動力学: 柳井地域と三河地域の例
3. 学会等名 日本地質学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎一博・菅賢志・森康・重野未来・岩野英樹・檀原徹・八木公史・大林秀行・西山忠男・平田岳史
2. 発表標題 高压型変成作用の継続時間と速度定数:長崎変成コンプレックス西彼杵ユニットの例
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会(つくば大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 重野未来・森康・宮崎一博・西山忠男
2. 発表標題 炭質物ラマン地質温度計で推定した西彼杵変成岩類の変成温度構造
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会(札幌大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mori, Y., Shigeno, M. & Nishiyama, T
2. 発表標題 Mixing and reaction of rocks facilitate fluid flow along the forearc slab-mantle interface
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Mori, Takeshi Ikeda, Kazuhiro Miyazaki
2. 発表標題 Metamorphic condition, age, and duration of the Takahama Metamorphic Rocks in Amakusa-Shimoshima, western Kyushu, Japan
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎一博・森康・重野未来・檀原徹・岩野英樹・八木公史・菅賢志・西山 忠男・平田岳史
2. 発表標題 西彼杵泥質片岩ジルコン変成リムの成長動力 学と成長時間
3. 学会等名 日本地質学会第123年学術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 森康・重野未来・西山忠男
2. 発表標題 蛇紋岩メランジュにおける流体岩石相互作用と反応促進型透水性：深部スロー地震との関連
3. 学会等名 日本地質学会第123年学術大会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 重野未来・森康・川本竜彦・西山忠男
2. 発表標題 ヒスイ輝石岩類と曹長岩類の流体包有物からのスラブ流体へのアプローチ
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2016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
研究 分担 者	森 康 (Yasushi Mori) (20359475)	北九州市立自然史・歴史博物館・自然史課・学芸員 (87101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	重野 未来 (Shigeno Miki) (90749558)	北九州市立自然史・歴史博物館・自然史課・受託研究生 (87101)	
研究分担者	西山 忠男 (Tadao Nishiyama) (10156127)	熊本大学・大学院先端科学研究部（理）・教授 (17401)	