

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04116

研究課題名(和文) 変成鉱物を用いた地殻岩石反応動力学の推定

研究課題名(英文) Estimation of reaction kinetics of metamorphic minerals in crustal rocks

研究代表者

宮崎 一博 (Miyazaki, kazuhiko)

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・招聘研究員

研究者番号：30358121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ガーネットとジルコンを用いて、変成反応の動力学を推定した。ガーネットは温度圧力推定に有利であり、ジルコンは年代測定が行える。沈み込み帯で形成されるガーネットとジルコンは、いずれも界面律速型の動力学に支配されている。ガーネットに関しては、粒径が大きくなるほど大きくなる成長則が認められた。一方、火山弧深部で形成されるガーネットとジルコンに関しては、いずれも部分熔融が起こる変成度以上で形成されたもので、拡散律速型の成長則を示した。ジルコンに関しては、動力学が決定できたことにより、成長時間を制約することができた。これにより、ジルコンのパルス的成長を検出することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

反応動力学は、反応が時間と共にどのように進行するかを予測する。変成鉱物を用いた反応動力学識別に関する研究は、世界的にみても殆ど行われていないのが現状である。本研究では、沈み込み帯での地震の原因となり岩石の強度低下を引き起こす脱水反応の動力学、火山弧深部でマグマの発生を引き起こす岩石の部分熔融反応の動力学を、そのような場で形成され、現在地表に露出する岩石から推定する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The kinetics of metamorphic reactions were estimated using garnet and zircon. Garnet is advantageous for temperature and pressure estimation, and zircon can be used for age dating. Both garnet and zircon formed in subduction zones are governed by interface-controlled growth kinetics. For garnet, a growth law that increases with grain size is observed. On the other hand, garnet and zircon formed in the deeper part of the volcanic arc and above solidus temperature, showed a diffusion-controlled growth kinetics. The determination of the growth kinetics of zircon allowed us to constrain the growth duration. Using the constrain, we detected the pulsed growth of zircon.

研究分野：地球科学，岩石学，地質学

キーワード：変成反応 成長動力学 ガーネット ジルコン 沈み込み帯 火山弧

1. 研究開始当初の背景

地殻内部における変成反応の進行速度には、相反する以下の2つの考え方がある。1)造山運動の時間スケールに匹敵する数千万年～1億年の長い時間ゆっくり進行する、あるいは2)地震活動や火山活動のように短時間に急激に起こる。しかし、この一見相反する変成反応の起こり方は、連続進行する変成反応の起こり方の2つの局面を見ている可能性がある。すなわち、岩石内の流体もしくはメルト量の変化により、反応動力学や反応進行速度の大きな変化をもたらされる可能性がある。反応動力学としては、反応進行に必要な物質の供給レートが律速する拡散律速、鉱物表面の成長・溶解反応が律速する界面律速型が代表的な例である。例えば、流体量が極端に減少した場合、岩石内で連結した流体通路が確保できず、実質、拡散がほとんど行われない状態に陥り、実質的な反応の進行は流体の流入時に短時間に進行する可能性がある。地殻内部での変成反応の実像を把握するためには、変成反応の動力学の解明とこれにもとづく反応継続時間の見積もりが必要である。

2. 研究の目的

地殻内部で起きる変成反応が、実質的に流体あるいはメルトが豊富にある状態での界面律速型動力学もしくは拡散律速型動力学で進行しているのかを明らかにする。低温下での脱水反応で形成される変成鉱物や高温下での脱水溶融反応で形成される変成鉱物が、どのような成長動力学であるかは特に重要である。脱水反応で形成された変成鉱物が拡散律速型でゆっくりとした連続的成長という古典的な変成反応の進行の描像がこれまで一般に受け入れられてきた。しかし、以下のような特異な反応進行も起こり得る。すなわち、脱水反応の進行に伴い流体が放出されるが、流体の放出は周囲への流体の流入を意味し、十分非平衡度の高い状態におかれた周囲の岩石の界面律速型反応の進行を一気に加速する可能性がある。このように、流体あるいはメルト存在下の変成鉱物形成の反応動力学とその進行が、変成反応の進行を決定する場合がある。しかしながら、これまでそのような観点から反応動力学を決定した例はほとんどないことから、本研究でこれを決定する手法を提示し、沈み込み帯及び火山弧深部で形成された変成岩にその手法を適応する。

3. 研究の方法

本研究では、内部に最低限1つの時間マーカーをもつ変成鉱物を用いて成長動力学を決定する。時間マーカーには、成長時に生じた組成累帯構造などが使える。具体的には、同時にできたと仮定できる任意の2点の中心からの距離を計測する(図1)。中心部からの内側の時間マーカーまでの距離を初期粒径 a_0 とし、その鉱物の粒径を最終粒径 a とする。界面律速成長では、粒径に依存しない成長則なので a_0 vs a の図上では傾き1の直線上にプロットされる(図1a)。一方、拡散律速型では、拡散流が中心部に向かって流れ込むので、粒径が小さいほど単位面積当たりの拡散流は大きくなり、結果として、小さい粒子ほど大きく成長する(図1b)。岩石内の多数の粒子で上記のプロットを行うことで動力学を判別できる(Miyazaki et al., 2018)。

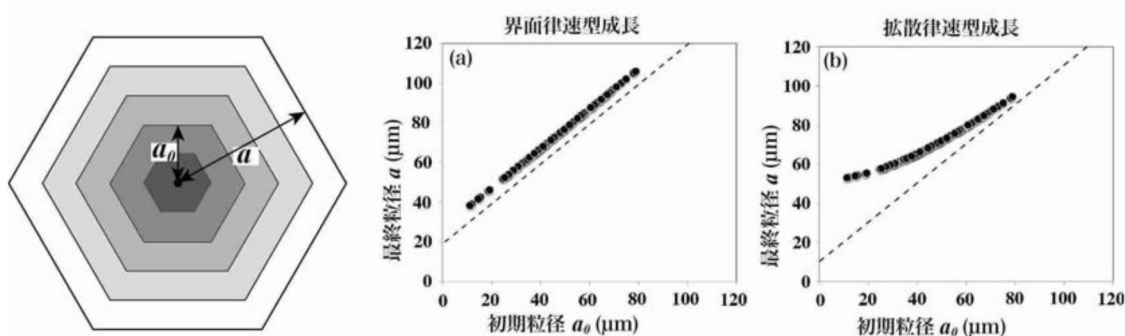


図1 反応動力学識別法の模式図。(左図)累帯構造を有する鉱物と初期粒径 a_0 と最終粒径 a の関係、(a)界面律速型成長と(b)拡散律速型成長の場合の初期粒径と最終粒径プロット。

本研究では、上記反応動力学識別法を沈み込み帯で形成された三波川帯と火山弧深部で形成された領家帯の変成岩中のガーネット及びジルコンに適応する。両変成岩からガーネット及びジルコンを分離・抽出する。抽出分離したガーネット及びジルコンを樹脂ないしテフロンシートにマウントし、それぞれの鉱物の形態の中心を通る研磨面を作成する。先に述べた動力学判別法を用いて反応進行時の動力学を推定した。ガーネットに関しては、EPMAにより組成を分析し、形成温度圧力を推定した。ジルコンでは、U-Pb法で形成年代を推定した。

4. 研究成果

(1)ガーネットの成長動力学の推定

ガーネットは、地殻内の脱水反応で生じる典型的鉱物である。三波川変成岩は沈み込み帯で形成されたガーネットを含む。三波川変成岩のアルバイト黒雲母帯(エクロジャイト相ユニット)の泥質片岩試料から、自形性の良いガーネットを多く含み、空間分が均一な試料を選び出し、ガーネットを分離し、粒径ごとにガーネット粒子を樹脂にマウントし、研磨面が形態中心を通るように研磨した。研磨したガーネット粒子の化学組成分析を EPMA で行った。その結果をもとに、ガーネットの成長動力学を推定した。ガーネットの成長量は、粒界が大きくなるほど、大きくなる傾向を示し、成長速度の粒径依存性が示唆された。成長動力学としては、界面律速型成長を指示する。成長速度の粒径依存性を説明するために、界面エネルギーの効果と弾性相互作用の効果を検討した。検討の結果、弾性相互作用の効果が大きい可能性が指摘できた。さらに、X線CTを用いた、岩石内のガーネットの粒径分布も、弾性相互作用が進行するときの粒径分布と定性的に一致した。天然の鉱物の成長で、弾性相互作用の効果が報告されたことはこれまでなく、さらなる検討が必要である。

領家変成岩は火山弧深部で形成されたガーネットを含む。領家変成岩のざくろ石堇青石帯の泥質ミグマタイト試料から、ガーネットを多く含む試料を選び出し、ガーネットを分離した。分離したガーネットは、表面が凸凹した不定形をしたものが多い。X線CTを用いた非破壊的分析でも、3次元的に凸凹した表面形態が確認できた。このような形態は、ガーネットが拡散律速型で成長したことを示唆する。後述するように、領家変成岩中のジルコンの成長動力学も拡散律速型であった。

(2)高圧型及び高温型変成帯のジルコンの成長動力学

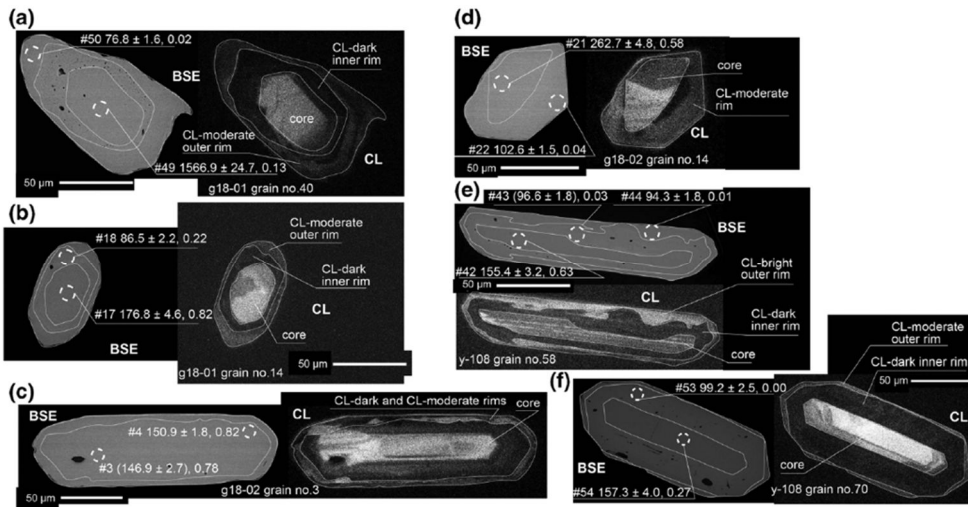


図 2 領家変成岩泥質ミグマタイトから分離したジルコンの反射二次電子線像とカソードルミネッセンス像。白い破線の丸は、ジルコン U-Pb 年代測定の分析点。数字は、分析点の番号と、U-Pb 年代、Th/U 比。(Miyazaki et al., 2023).

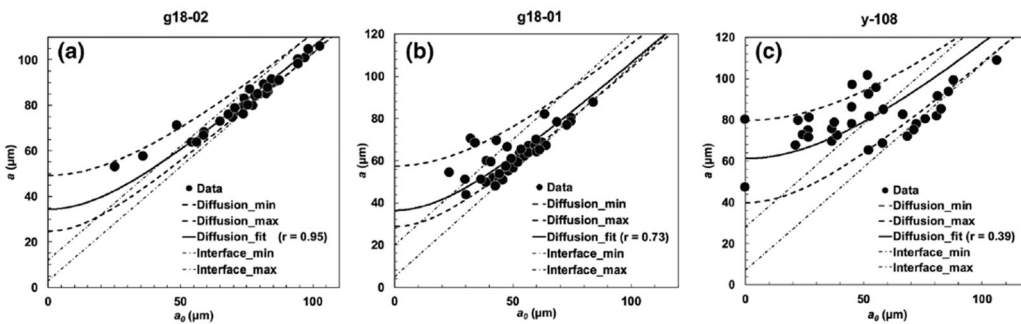


図 3 領家変成岩泥質ミグマタイト中のジルコンの初期粒径 a_0 と変成リム成長後の粒径 a の関係。実線は、拡散律速型成長動力学のベストフィット。破線は、拡散律速成長の動力学係数の値をベストフィットの値を中心に最大最小で 4 倍変えた場合の曲線。細破線は、界面律速型成長の曲線。界面律速型成長の動力学係数を最大最小で 4 倍変えている (Miyazaki et al., 2023)

領家変成岩のざくろ石堇青石帯の泥質ミグマタイト中には、碎屑性ジルコンが残存している。碎屑性ジルコンを時間マーカーとして、変成時に成長によって増えた量の粒径依存性から成長動力学を判別した。ジルコン変成リムは、カソードルミネッセンス像で、不定形の輝度の異なる部分かなる累帯構造を示し、微細な包有物を含むことが多く、碎屑性ジルコンコアが輝度の異なる

るドメインが繰り返す振動累帯構造を示すのと対照的である(図2)。碎屑性ジルコンコアは、丸みを帯びた形態もしくは外形が凸凹した形態を示すことが多い(図2)。

変成ジルコンの厚さは、碎屑性ジルコンコアの粒径が小さいほど厚くなる関係が存在する。泥質ミグマタイト中のジルコンの成長動力学は、拡散律速型であると推定される(Miyazaki et al., 2023)(図3)。この結果は、高圧型泥質片岩中のジルコンの成長動力学が界面律速型であること(Miyazaki et al., 2019)と対照的である。先に述べたように、本研究で、ガーネットの成長動力学も、高圧型泥質片岩中では界面律速型であり、高温型泥質ミグマタイト中では拡散律速型である。高圧型変成帯では、水を主成分とする流体が供給されて、変成反応の進行に必要な元素の供給が素早くなされるのに対し、低温であるため流体と鉱物界面での反応の進行が遅く、界面律速型の動力学が卓越すると考えられる。一方、高温型変成帯では、部分熔融が進行に生じた高温のメルトと鉱物界面の反応が素早く起こるのに対し、反応進行に必要な元素のメルト中の拡散が相対的に遅いために拡散律速型の動力学が卓越すると考えられる。

(3) 領家変成岩のミグマタイトに記録されたパルスの成長

領家変成岩泥質ミグマタイト中の成長動力学を推定できたことから、ジルコンの成長時間を最大成長時間を推定した。ジルコンの成長時間の推定には、成長動力学の決定と非平衡の度合いである過飽和度の推定が必要である。しかしながら、過飽和度は時間と共に変化することからその推定は難しい。そこで、ジルコン成長時の過飽和度は、臨界半径から推定されるオストワルド成長の過飽和度を下回ることはないという原理を用いて、最大成長時間を見積もった。臨界半径は、泥質ミグマタイト中で観測されるジルコンの最小粒径程度と仮定した。過飽和度がオストワルド成長の過飽和度を下回らないとの仮定と、実験で求められている珪長質メルト中のZrの拡散係数から泥質ミグマタイト中のジルコンの最大成長時間を求めたところ、数千間年から数十万年という値を得ることができた(Miyazaki et al., 2023)(図4)。実際のジルコンの成長時間は、これよりも短いと推定される。求められた最大成長時間は、測定した変成ジルコンU-Pb年代の測定誤差と同程度か1桁程短い。測定した試料中の変成ジルコンのU-Pb年代は、分析誤差に起

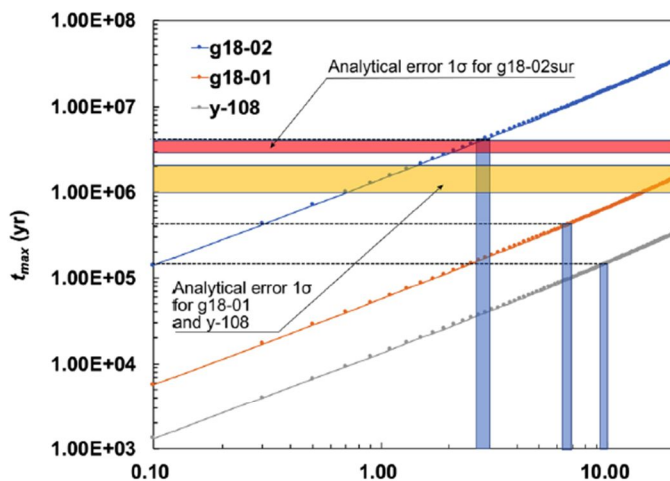


図4 変成ジルコンの最大成長時間 t_{max} の推定。横軸は初期半径 r_0 を固定した時の変成ジルコン成長後の半径の増分 r 。初期半径は各試料中の碎屑性ジルコンの平均的な粒径を使用した。右上がりの直線は、変成ジルコン成長後の半径増分とその最大成長時間の関係を示す。水平な帯は、サンプルごとのU-Pb年代測定誤差。(Miyazaki et al., 2023)

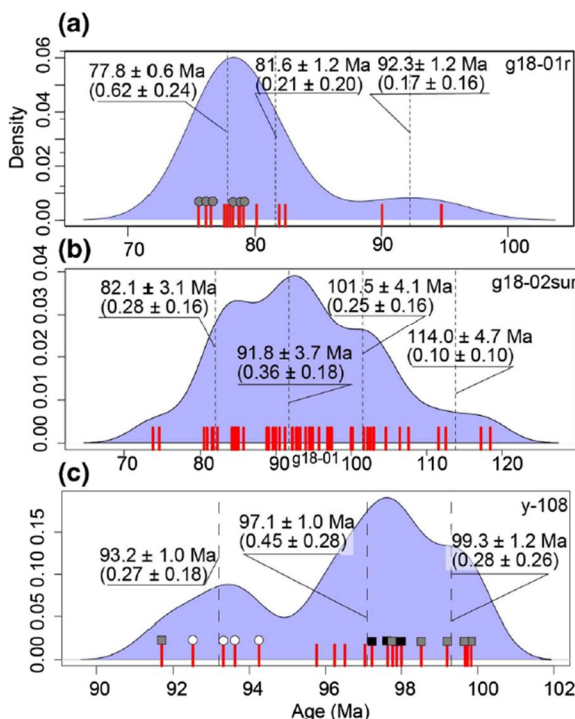


図5 変成ジルコンU-Pb年代の混合正規分布による年代成分分離。数字は、分離した年代成分。括弧内数字は年代成分の比率。青色の分布は、年代値のカーネル密度分布。赤いバーは、実測されたジルコンのU-Pb年代。赤いバーの上の白丸、灰色丸、灰色四角、黒四角は、カソードルミネッセンスの輝度の違いを示す。(Miyazaki et al., 2023)

因する年代幅より大きなばらつきを示す。成長時間が分析誤差より短い場合、年代値のばらつきは、複数回の成長イベントを表している可能性があり、混合正規分布を用いて年代分離が可能となる。混合正規分布を用いて年代分離を行った結果、3 つから 4 つの成長パルスが識別された (Miyazaki et al., 2023)。それぞれのパルスは、付近に存在する深成岩中のジルコンから得られたジルコン年代と近く、マグマ貫入による熱パルスとほぼ同期することが判明した。従って、領家変成岩は花崗岩マグマの貫入による接触変成作用によって引き起こされると解釈できる。すなわち、領家変成帯は花崗岩マグマの貫入により形成された広域接触変成帯とすることができ

る。領家変成岩の泥質ミグマタイトで検出されたパルスの間隔は数千万年から数百万年であり、同時代のカルデラクラスター内の個々のカルデラ形成の時間間隔とほぼ同程度の間隔である。領家変成岩は、白亜紀の火山弧深部で形成されたと考えられる。地殻の深部～地表にかけて、マグマ供給のパルスが存在することが示唆される。

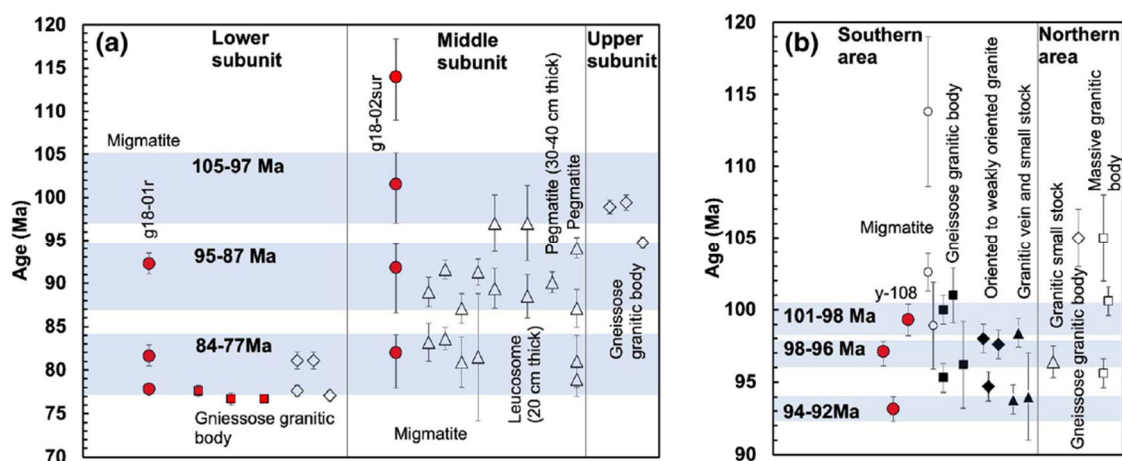


図6 泥質ミグマタイト中の年代成分分離を行った変成ジルコン U-Pb 年代 (赤丸及び白丸) と深成岩中の火成ジルコン U-Pb 年代 (文献値を含む) (白ひし形, 白三角, 白四角, 黒四角, 黒ひし形, 黒三角) (Miyazaki et al. 2023; reference therein)

< 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. Miyazaki, K., Ikeda, T., Iwano, H., Hirata, T., Danhara, T. (2023) Kinetics and pulses of zircon growth in migmatites beneath a volcanic arc: An example from the high-T Ryoike Complex, southwest Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, DOI: 10.1111/jmg.12711.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miyazaki Kazuhiro, Ikeda Takeshi, Iwano Hideki, Hirata Takafumi, Danhara Tohru	4. 巻 41
2. 論文標題 Kinetics and pulses of zircon growth in migmatites beneath a volcanic arc: An example from the high T Ryoke Complex, southwest Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Metamorphic Geology	6. 最初と最後の頁 639 ~ 664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jmg.12711	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 Yoshihiro Nakamura, Kazuhiro Miyazaki, Yutaka Takahashi, Hideki Iwano, Tohru Danhara, Takafumi Hirata	4. 巻 40
2. 論文標題 Amalgamation of the Ryoke and Sanbagawa metamorphic belts at the subduction interface: New insights from the Kashio mylonite along the Median Tectonic Line, Nagano, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JOURNAL OF METAMORPHIC GEOLOGY	6. 最初と最後の頁 389-422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jmg.12633	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 Yuki Mori, Kazuhiro Miyazaki, Takeshi Ikeda, Tomoharu Miyamoto, Hideki Iwano, Tohru Danhara, and Takafumi Hirata	4. 巻 -
2. 論文標題 Early Cretaceous partial melting recorded by pelitic gneiss from the Nagasaki Metamorphic Complex, western Kyushu, Japan: initiation of Cretaceous high-T metamorphism at eastern margin of Eurasia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 INTERNATIONAL GEOLOGY REVIEW	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00206814.2021.1961104	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9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮崎一博・村岡やよい
2. 発表標題 巨大珪長質深成岩体周囲に形成される高温型変成帯 脊振山系雷山～糸島半島の例
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村岡やよい・宮崎一博
2. 発表標題 福岡県西部，糸島半島周辺の花崗岩類の年代値
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 佳博・宮崎 一博・高橋 浩
2. 発表標題 伊豆弧衝突で赤石山地基盤岩はめくれ上がったのか？砕屑性ジルコン年代と炭質物温度計からの考察
3. 学会等名 大気海洋研究所共同利用研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮崎一博・池田 剛・佐藤大介
2. 発表標題 構造化地質図とマグマ移流モデルによる領家コンプレックスの熱物質収支評価
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム 研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮崎一博・中村佳博・牧本 博
2. 発表標題 三波川コンプレックスの長期間にわたる沈み込み変成作用と前弧域深部での累積，南アルプス大河原地域の例
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎一博
2. 発表標題 高压型変成岩中のざくろ石の反応動力学と粒径依存成長
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 宮崎 一博・中村 佳博・高橋 浩
2. 発表標題 長野県南部赤石山地の白亜紀 古第三紀テクトニクス
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 宮崎 一博・中村 佳博
2. 発表標題 四国西部, 唐崎マイロナイトの変形温度条件の制約
3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎一博・池田剛・岩野英樹・平田岳史・檀原徹
2. 発表標題 Detection of zircon growth pulses and thermal evolution of Ryoke complex
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
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
研究 分担者	池田 剛 (IKEDA Takeshi) (40243852)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	
研究 分担者	遠藤 俊祐 (ENDO Shunsuke) (60738326)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・准教授 (15201)	

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