

山口県における領家変成帯の新知見:マグマ過程と 高温型変成作用の関係

New aspect of Ryoke metamorphic belt: An example of magmatic and high-
temperature metamorphic relations from Iwakuni–Yanai
district, Yamaguchi

大和田正明（山口大学大学院創成科学研究科）

1. はじめに

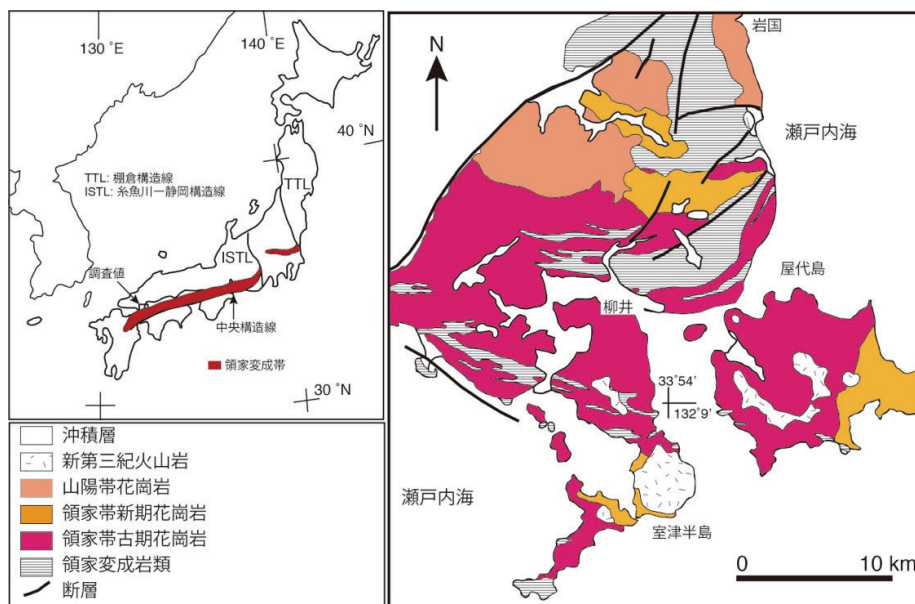
領家変成帯は、白亜紀の高温型変成岩と花崗岩を主体とする深成岩から構成される複合岩体で、中央構造線の北側に位置し東西約 800km にわたり追跡できる。中央構造線の南側に分布する三波川変成帯と対の変成帯を形成し、火山弧の地殻深部で起こる典型的な変成帯として認識された (Miyashiro, 1961)。

近年、機器分析技術の進歩によってジルコン U–Pb 年代測定が多くの変成岩や深成岩体から報告されるようになり、高温型変成岩の熱源が議論されるようになってきた (Skrzypek et al., 2016; Kawakami et al., 2022)。山口県東部の岩国–柳井地域には、南北約 40km の範囲に変成岩と花崗岩が広く露出している (第 1 図, Kojima and Okamura, 1968; 東元ほか, 1983 など)。これまでの研究成果によって、変成岩の原岩構成、変成温度圧力条件そして構造運動の詳細が明らかになっている (岡村, 1957; 東元ほか, 1983; Okudaira et al., 1993; Ikeda, 1998, 2004)。また、花崗岩については、岩体区分や Sr–Nd, Hf 同位体組成を含む岩石化学的特徴が明らかになってきた (Akasaki et al., 2015; 池田ほか, 2019; Mateen et al., 2019; 児玉ほか, 2021 など)。一方で、詳細な地質調査に基づいた岩体相互の貫入関係が編まれてきたが、より正確な火成活動史を編むために各岩体の貫入・定置時期を直接示す誤差の少ない年代値の蓄積が課題であった。

小論では、岩国–柳井地域に分布する変成岩と深成岩について、地質学的に特徴とそれらのジルコン U–Pb 年代をレビューし、領家変成帯を構成する変成岩と深成岩との関係について述べる。その上で高温型変成作用の形成過程を議論する。尚、本論は山口地学会誌 84 号 (2022 年) に掲載された内容を含み、その後得られたデータを加えた内容となっている。

2. 岩国–柳井地域の地質概要

第 1 図に山口県東部、岩国–柳井地域の地質概略図を示す。ここには白亜紀の変成岩と深成岩以外、柳井地域南部の屋代島西部と室津半島に新第三紀中新世に活動した瀬戸内火山岩が分布する (西村ほか, 2012)。変成岩は砂泥質変成岩と層状チャートを原岩とし、少量の石灰珪質岩や苦鉄質岩を小規模なレンズとして伴う。深成岩は花崗岩を主体とし、小規模な閃緑岩をしばしば伴う。比較的規模の大きな閃緑岩体は柳井市北部の氷室岳南麓に分布する氷室岳



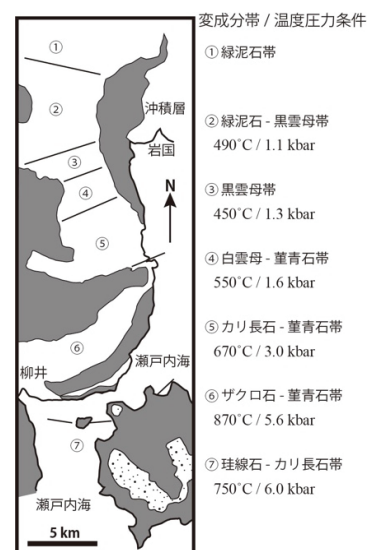
第 1 図 岩国—柳井地域の地質概略図（池田ほか，2019）。

石英閃緑岩（赤崎ほか，2013；Akasaki et al., 2015）である．一般に標題地域に産する苦鉄質深成岩（はんれい岩～閃緑岩）は花崗岩マグマと苦鉄質マグマが共存してできた「苦鉄質包有物（mafic magmatic enclave; MME）」として産することが多い．特に南部の大島から屋代島北西部にかけて，MME を伴う花崗岩体が普遍的に分布する（池田ほか，2019）。

3. 領家帯を構成する変成岩類と深成岩類

既往研究

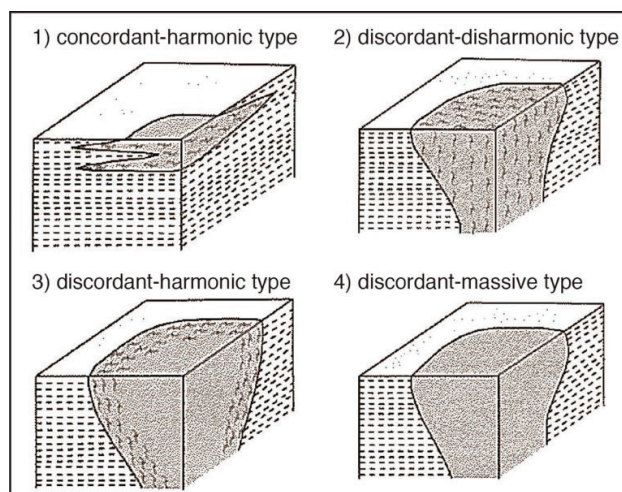
岩国—柳井地域に分布する変成岩は，泥質岩の鉱物組み合わせによって分帯され，基本的に北から南へ変成度（温度）が上昇する累進変成作用（変成度の空間変化）を示す（Okudaira et al., 1993; 1995, Ikeda, 1998; 2004）．第 2 図に Ikeda (2004) による変成分帯図と各鉱物帯の温度圧力条件を示す．北部の緑泥石帯と緑泥石—黒雲母帯の岩石は弱変成岩で，肉眼的には原岩となったジュラ紀付加体の玖珂層群と見分けがつかない．黒雲母帯よりも南方に分布する変成岩類は片理面が発達した結晶片岩ないし片麻岩である．この図でもわかるように，南部に分布するザクロ石—堇青石帯は最も変成度が高く，870℃の変成温度が見積もられて



第 2 図 変成分帯図と温度圧力（Ikeda, 2004）。

いる (Ikeda, 2004). 一方, ザクロ石-堇青石帯の構造的低位に位置する珪線石-カリ長石帯の変成温度は 750°C で, 温度構造が逆転している (Ikeda, 2004). その原因として, 広域的な温度構造が確立された後, 軸面が南へ傾斜した背斜構造が形成され, 軸の部分が削剥されて露出したためと考えられた (Okudaira et al., 1993). また, 岩国-柳井地域の累進変成作用の空間的な温度構造 (地温勾配) は $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ に達し, こうした高い地温勾配はマグマ活動による熱の移送によるとされた (Okudaira et al., 1995; Okudaira, 1996).

岩国-柳井地域に産する花崗岩は, 伝統的に片状構造が顕著な領家帯古期花崗岩と弱い片状構造の領家帯新期花崗岩, そして塊状の山陽帯花崗岩に区分されてきた (東元ほか, 1983). 横山 (2009) は, 面構造 (片理, 片麻状構造) を伴うことが領家帯花崗岩の特徴で, そのことが山陽帯花崗岩と区別する基準になるとした. そして, 花崗岩と母岩との構造的関係に基づいて, 領家帯花崗岩を 4 タイプに区分した (第 3 図). 1) 花崗岩体が変成岩の構造と調和的に貫入し, なおかつ花崗岩の面構造が岩体の貫入方向と調和的; concordant-harmonic type, 2) 変成岩の構造と非調和に貫入し, 花崗岩の面構造は岩体の貫入方向と非調和 (変成岩の片理面と調和的な場合もある); discordant-disharmonic type, 3) 2) と同様に母岩の構造に対して非調和に貫入するが, 岩体内の面構造は岩体の貫入方向と調和的; discordant-harmonic type, そして 4) 母岩の構造と非調和に貫入し, 岩体内部の岩相は塊状; discordant-massive type, である. 1) は領家帯の古期花崗岩に, 2) と 3) は新期花崗岩にそれぞれ対応する. そして, 4) は山陽帯花崗岩である. これら以外にも小規模な岩脈状花崗岩は普遍的に産する.



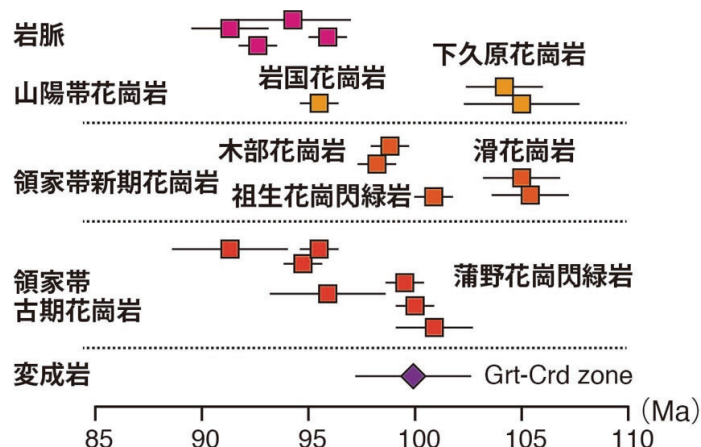
第 3 図 構造的要素に基づく花崗岩の区分 (横山, 2009).

一般に非変成から弱変成作用を受けた地域には, 塊状で均質な岩相の山陽帯花崗岩が分布する. それに対して結晶片岩から片麻岩地域の中程度の変成作用を受けた地域には領家帯新期花崗岩, そして南部の高変成度地域には領家帯古

期花崗岩が分布する．また，野外での貫入関係や変形時期との相対的な関係から，岩国－柳井地域に分布する花崗岩は領家帯古期花崗岩，領家帯新期花崗岩そして山陽帯花崗岩の順で貫入したとされた（東元ほか，1983）．

年代データ

21 世紀になってから岩石学の分野では，径数 10 μm レーザーを照射することによって鉍物を瞬時に気化させ，鉍物に含まれる微量元素組成を測定できる装置（レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置：LA-ICP MS）を使って，ジルコン U-Pb 同位体年代を測定する技術が普及した．放射起源同位体によって得られた年代の意味を理解するには，「閉鎖温度」の概念が重要である．これは鉍物に含まれる放射起源同位体の逸散が止まり，閉鎖系になった時の温度を指す．例えば黒雲母 K-Ar 法では，冷却速度を $5^{\circ}\text{C}/100$ 万年とした場合，閉鎖温度は $360-340^{\circ}\text{C}$ とされている（Harrison et al., 1985; Grove and Harrison, 1996）．したがって，花崗岩中の黒雲母 K-Ar 年代は測定した岩体が約 350°C 以下に冷却されてから以降の年代を示す．そのため角閃岩相高温部からグラニュライト相に達する変成岩の最高変成時の年代や冷却速度の遅い貫入岩体の形成年代を求める時は，閉鎖温度の高い測定法が必要となる．ジルコンを用いた U-Pb 年代測定法は閉鎖温度が高く，上述した冷却速度での閉鎖温度は 940°C である（Cherniak and Watson, 2001）．また，ジルコンは変質作用や風化作用に強い鉍物で，中間質から珢長質火成岩や砂泥質岩中には普通に含まれている．このため，特に高変成度岩の変成年代やマグマの形成年代を検討するのに有効である．そうした理由から，LA-ICP-MS によって得られた年代データが最近 10 年間で日本各地から多数報告されるようになってきた．岩国－柳井地域では，Skrzypek et al. (2018) がザクロ石－堇青石帯の泥質片麻岩中のジルコンから U-Pb 年代を測定し， 100 ± 3 Ma の変成年代を報告した．また，第 4 図で示すように花崗岩の年代値も多数報告されてきた．引用文献は大和田（2022）に記されているが，年代値の多くは 2016 年以降の報告である．



第 4 図 ジルコン U-Pb 年代値（大和田，2022）．

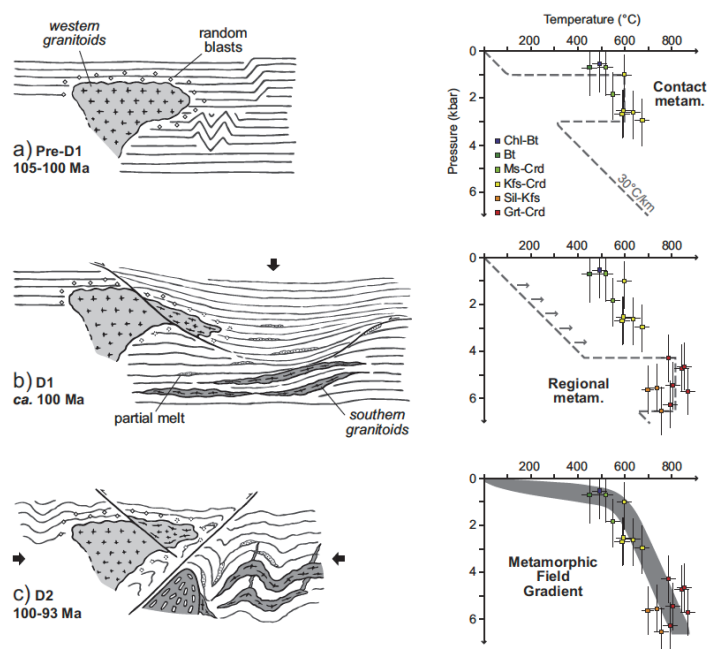
第 4 図によると、岩国－柳井地域の花崗岩は 107–92 Ma の年代値を示し、岩脈を除くと、多くは 100 ± 5 Ma の年代範囲に収まる。また、岩相によって区分された領家帯古期花崗岩、領家帯新期花崗岩および山陽帯花崗岩と年代値の間に明瞭な相関関係は認められない（第 4 図）。そして、この地域で最も初期に活動した岩体は、これまで考えられていた領家帯古期花崗岩（蒲野花崗閃緑岩）ではなく、山陽帯花崗岩（下久原花崗岩）と領家帯新期花崗岩（滑花崗岩）である（第 4 図）。

Mateen et al. (2019) は、領家帯古期花崗岩に属する蒲野花崗閃緑岩の活動時期が 100–96 Ma と 94–92 Ma に別れるとして、それぞれを蒲野花崗閃緑岩 I と蒲野花崗閃緑岩 II と呼んだ。その上で、領家帯花崗岩に対して形成時期を示唆する「古期・新期」の名称や山陽帯花崗岩が領家帯花崗岩よりも後に活動したとする考えは適切でないとした。特に片麻状構造を持つ蒲野花崗閃緑岩が 94–92 Ma を示すことは、岩相と年代の関係性が弱いことを示している。また、屋代島に分布する蒲野花崗閃緑岩は、変成岩類との境界部で不均質な産状を示し、場所によって顕著な片麻状構造を示す。一方、変成岩との境界部から離れると面構造は弱くなり、新期花崗岩とされている東側の東和花崗閃緑岩へ移り変わる（池田ほか，2019；児玉ほか，2021）。以上から、花崗岩の岩相を基準とした領家帯花崗岩の「古期」と「新期」の関係は、用語に関する整合性を考慮し、総合的な見地から再検討する必要がある。

従来の野外地質調査や顕微鏡観察に加え、ジルコン U–Pb 年代を加えた解析によって、領家帯変成帯の高温型変成作用と火成作用の関連性が徐々に明らかになってきた。次章では、特に岩国－柳井地域に産する領家帯変成帯に関する最近の考えを紹介する。

4. マグマ過程と高温型変成作用の関係

岩国－柳井地域に分布する高温型変成作用と火成作用の関係について、Skrzypek et al. (2016) は、主に花崗岩のジルコン U–Pb 年代と変成岩の変成・変形作用の観察に基づいて新たな考えを示した（第 5 図）。それによると、**Pre-D1 ステージ**：下久原花崗岩と滑花崗岩、祖生花崗閃緑岩の地下浅所への貫入と北部地域における低変成度岩（緑色片岩相～角閃岩相低温部）の形成、**D1 ステージ**：広域的な水平引張（垂直圧縮）場での片理面形成、この時期にシート状に貫入した蒲野花崗閃緑岩による南部地域の高変成度岩（角閃岩相高温部～グラニュライト相）の形成、引き続いて貫入した木部花崗岩の貫入・定置、そして **D2 ステージ**：南北圧縮による東西に軸を持つ褶曲の形成と剪断作用を伴うスラストの形成、褶曲構造形成直後の岩国花崗岩や小規模岩脈の貫入である。



第 5 図 Skrzypek et al. (2016)による岩国—柳井地域の花崗岩活動と温度構造の形成過程。

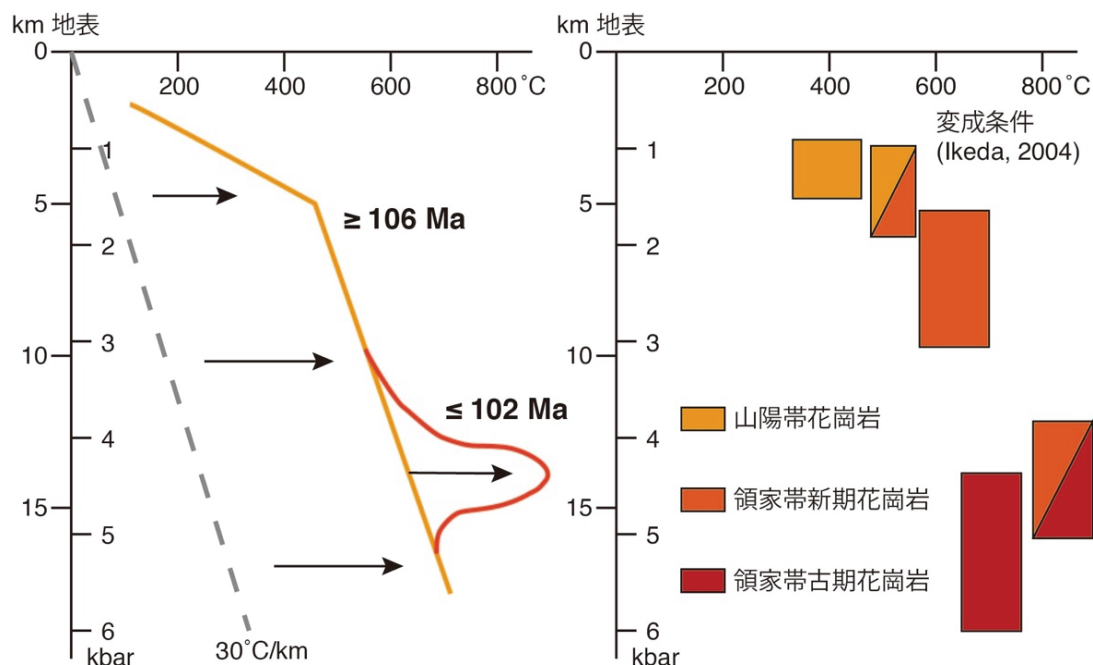
各ステージの年代は、それぞれ **Pre-D1** ステージ：105–100 Ma, **D1** ステージ：約 100 Ma, そして **D2** ステージ：100–93 Ma である。水平引張場で形成した変成作用は 106–103 Ma の滑花崗岩中に弱い片理面を形成しているが、98–97 Ma の本部花崗岩は変形作用を受けていない (Skrzypek et al., 2016)。従って、片理面の形成時期は 103–99 Ma と推定される。また、蒲野花崗閃緑岩の活動は 101 Ma から 92 Ma まで年代幅が広い (第 4 図)。一方、南北圧縮による変形作用は北部の岩国花崗岩や小規模岩脈には及んでいないが、南部の小規模岩脈や 95–92 Ma を示す蒲野花崗閃緑岩には認められる。従って、北部では、岩国花崗岩の活動前 (95 Ma) に変形作用は終了したが、南部ではそれ以降も継続した。こうした変形作用の継続時間の違いについて、地殻の深部に相当する南部では、浅部よりも高温状態が長期にわたり維持されるためと解釈された (Skrzypek et al., 2016)。

Skrzypek et al. (2016) のモデル (第 5 図) によると、Pre-D1 ステージで、北部の地殻浅所に下久原花崗岩、滑花崗岩そして祖生花崗閃緑岩が貫入し、母岩に接触変成作用を与えた。D1 ステージでは地殻深部で変形作用を伴いながら蒲野花崗閃緑岩の貫入によって下部地殻の温度が上昇した。その結果として、地殻の上部から下部まで連続した温度構造を形成した。このように高温型変成作用の熱源は貫入してきたマグマの熱が重要な意味を持つ。しかしながら、現在岩国—柳井地域で観察できる変成岩の温度構造から求められる累進変成作用は、あくまで見かけ上の結果に過ぎない。一方、大和田ほか (2022) は、最

初期に活動した滑花崗岩からミリメートルサイズの捕獲岩（マイクロゼノリス）を見出し、その鉱物組み合わせから、捕獲岩が変成帯の構造的な最下部に位置する Sil-Kfs 帯に由来するとした。従って、岩国－柳井地域の温度構造は、すでに滑花崗岩（106 Ma）が活動する以前に形成したと考えた。そうであるなら、100 Ma の年代を示すざくろ石－堇青石帯の変成年代や温度構造の逆転は何を意味するのかといった課題が残る。そこで、現在得られているデータから、この地域の地温勾配の形成過程を検討する。

岩国－柳井地域に分布する花崗岩の岩相は定置深度や貫入時の変形運動に対応すると考えるのが妥当である。第 6 図の右図に花崗岩（領家帯古期花崗岩、新期花崗岩および山陽帯花崗岩）とそれらの貫入母岩（変成岩）の温度圧力条件を示す。既述のように、領家帯古期花崗岩が地殻深部に定置し、山陽帯花崗岩が最も浅部（上部）に分布している。そして、領家帯新期花崗岩は両花崗岩の間の深度に貫入している。また、ザクロ石－堇青石帯の変成年代と Mateen et al. (2019) による蒲野花崗閃緑岩 I の形成年代は 100 Ma で一致する（第 4 図）。このことは、地下深部から上昇してきた花崗岩マグマが白亜紀高温型変成作用の熱源とする考えを支持する。

Skrzypek et al. (2016) や Mateen et al. (2019) の年代結果（第 4 図）は、花崗岩の主な活動期間（105–95 Ma）として 1000 万年の幅を持つ。こうした年代幅の中で花崗岩マグマが上～下部地殻に次々に貫入し、継続的に母岩へ熱を供給することで、現在地表に露出している変成岩を形成した。すなわち、領家帯の変成岩は広域的な接触変成作用によって形成したと考えられる。



第 6 図 温度構造の形成と花崗岩の区分と各花崗岩の定置位置の関係。

火成岩類の貫入が主な熱源とすると、温度構造が逆転するザクロ石－堇青石帯と珪線石－カリ長石帯については、以下のように推論できる（第 6 図，左図）。ザクロ石－堇青石帯が分布する地域には、蒲野花崗閃緑岩が分布している。第 4 図によれば、蒲野花崗閃緑岩の年代は、101–96 Ma と 94–92 Ma で、800 万年間にわたり断続的に貫入していた。こうした長期間にわたる高温状態が継続したことに加えて、この岩体は大小さまざまな閃緑岩を伴う（池田ほか，2019）。野外の産状から、閃緑岩 MME は花崗岩との接触部に急冷周縁相を形成しているので、閃緑岩の方が花崗岩よりもマグマの状態では高温であったと考えられる。すなわち、106Ma 以前に基本的な地温勾配が確立した後、102Ma 以降のマグマの貫入によって、閃緑岩を高頻度で伴う蒲野花崗閃緑岩が貫入した場所は、高温の状態に長期間置かれることになった。そのため、ザクロ石－堇青石帯の変成岩は、構造的低位に位置する珪線石－カリ長石帯の変成岩よりも高温の変成作用を受け、温度構造の逆転が生じたと考えられる。そうであれば、ザクロ石－堇青石帯の変成岩は、蒲野花崗閃緑岩と同様に幅広い年代値を持つと推察される。岩国－柳井地域に分布する領家変成帯の温度構造を理解するには、様々な変成度を示す変成岩から複数の正確な変成年代を明らかにすることが必要である。

5. おわりに

本報告では、領家変成帯の研究成果をレビューし、低圧高温型変成帯の形成過程と花崗岩の形成年代をまとめた。領家帯古期花崗岩、領家帯新期花崗岩そして山陽帯花崗岩は、横山（2009）が示したように岩相の違いは明確である。一方、活動年代はほぼ同じで、約 1 億年前のマグマ活動によって、大量の花崗岩が大陸地殻を形成した。花崗岩を構成する鉱物は、温度変化で生じる膨張や収縮の度合いが岩体内で異なるため、岩石に歪みが生じ、やがて風化してマサになる。岩体内の歪みは、地表部での温度変化の他にもマグマの固結や固結後の上昇過程でも生じる。詳細な地質調査に基づく構造解析や年代学的研究を進めることで、マグマの形成から固結、そしてその後の構造運動が明らかにできる。そうした基礎データが花崗岩分布地域の調査、例えば岩体のどこに弱線や緩みがあるかの推定等に利活用できれば、今後の防災や減災対策の一助になると思われる。

謝辞

本稿は公表論文を中心に岩国－柳井地域に分布する変成岩と花崗岩の関係を整理した。今岡照喜氏（山口大学名誉教授）と亀井淳志氏（島根大学教授）には、白亜紀火成活動に関して日常的に議論していただいた。特に、山口大学の卒業生の成果が本稿の基本となっている。一人一人の氏名はあげないが、これまで研究を支えてくれた多くの方々に感謝の意を表する。

引用文献

- 赤崎英里・亀井淳志・大和田正明, 2013, 領家帯柳井地域新期花崗岩(本部花崗岩)のマグマ過程. 岩石鉱物科学, 42, 159–173.
- Akasaki, E., Owada, M. and Kamei, A., 2015, Crustal differentiation due to partial melting of granitic rocks in an active continental margin, the Ryoke Belt, Southwest Japan. *Lithos*, 230, 82–91.
- Cherniak, D.J. and Watson, E.B., 2001, Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172, 5–24.
- Grove, M. and Harrison, T.M., 1996, $^{40}\text{Ar}^*$ diffusion in Fe-rich biotite. *American Mineralogist*, 81, 40–951.
- Harrison, T.M., Duncan, I. and McDougall, I., 1985, Diffusion of ^{40}Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2461–2468.
- 東元定雄・濡木輝一・原 郁生・佃 栄吉・中島 隆, 1983, 岩国地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 79p.
- Ikeda, T., 1998, Progressive sequence of reactions of the Ryoke metamorphism in the Yanai district, southwest Japan: the formation of cordierite. *Journal of Metamorphic. Geology*, 16, 39–52.
- Ikeda, T., 2004, Pressure-temperature conditions of the Ryoke metamorphic rocks in Yanai district, SW Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146, 577–589.
- 池田雄輝・大和田正明・西塚 大・亀井淳志, 2019, 山口県東部, 柳井地域に産する領家帯蒲野花崗閃緑岩のマグマ過程. 地質学雑誌, 125, 167–182.
- Kawakami, T., Ichino, T., Kazuratachi, K., Sakata, S. and Takatsuka, K., 2022, Multistage zircon growth recording polyphase metamorphic evolution caused by pulsed granitoid intrusions into a low-P/T type metamorphic belt: P–T–D–t evolution of migmatites in the Ryoke belt, southwest Japan. *Island Arc*, 2022;31:e12454.
- 児玉省吾・大和田正明・亀井淳志・池田雄輝・井無田譲嗣, 2021, 山口県南東部, 屋代島に産する領家花崗岩類のマグマ過程. 岩石鉱物科学, 49, 133–147.
- Kojima, G. and Okamura, Y., 1968, On the Kitaoshima gneiss complex. *Journal of the Science of Hiroshima University, Series C*, 5, 295–306.
- Mateen, T., Okamoto, K., Chung, S.-L., Wang, L.-L., Lee, H.-Y., Abe, S., Mita, Y., Rehman, H.U., Terabayashi, M. and Yamamoto, H., 2019, LA-ICP-MS zircon U–Pb age and Hf isotope data from the granitic rocks in the Iwakuni area, Southwest Japan: re-evaluation of emplacement order and the source magma. *Geoscience Journal*, 23, 917–931.

- Miyashiro, A., Evolution of metamorphic belts *Journal of Petrology*, 2, 277–377.
- 西村祐二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷 敦, 2012, 山口県地質図第3版(15万分の1)および同説明書. 山口地学会, 167p.
- 岡村義彦, 1957, 山口県柳井地方領家変成岩類および花崗閃緑岩類の構造. 地質学雑誌, 63, 684–697.
- Okudaira, T., 1996, Thermal evolution of the Ryoke metamorphic belt, southwestern Japan: Tectonic and numerical modeling. *Island Arc*, 5, 373–385.
- Okudaira, T., Hara, I., Sakurai, Y. and Hayasaka, Y., 1993, Tectono-metamorphic processes of the Ryoke belt in the Iwakuni–Yanai district, southwest Japan. *Memory of the Geological Society of Japan*, no. 42, 91–120.
- Okudaira, T., Hara, I. and Takeshita, T., 1995, Emplacement mechanism of the older Ryoke granites in the Yanai district, Southwest Japan, with special reference to extensional deformation in the Ryoke metamorphic belt. *Journal of Science, Hiroshima University, Series C*, 10, 357–366.
- 大和田正明, 2022, 山口県における領家変成帯の新知見：マグマ過程と高温型変成作用の関係. 山口地学会誌, 84号, 11–24.
- 大和田正明, 青木克磨, 赤崎英里, 亀井淳志, 2022, 領家帯柳井地域, 滑花崗岩の定置過程とミグマタイトの形成. 日本地質学会第129年学術大会講演要旨.
- Skrzypek, E., Kato, T., Kawakami, T., Sakata, S., Hattori, K., Hirata, T. and Ikeda, T., 2018, Monazite behavior and time-scale of metamorphic processes along a low-pressure/high-temperature field gradient (Ryoke Belt, SW Japan). *Journal of Petrology*, 59, 1109–1144.
- Skrzypek, E., Kawakami, T., Hirajima, T., Sakata, S., Hirata, T. and Ikeda, T., 2016, Revisiting the high temperature metamorphic field gradient of the Ryoke Belt (SW Japan): New constraints from the Iwakuni–Yanai area. *Lithos*, 260, 9–27.
- 横山俊治, 2009, 5. 白亜紀–古第三紀の火成活動, 5.2 領家帯. 日本地方地質誌, 中国地方(日本地質学会編), 250–258.