

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03783

研究課題名(和文)海溝近傍火成活動が付加体・前弧海盆堆積物に与える熱的影響の理解

研究課題名(英文)Near-trench magmatism and its thermal effects on accretionary sediments

研究代表者

川畑 博(KAWABATA, Hiroshi)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・准教授

研究者番号：90392943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：海溝近傍火成活動の産物である室戸岬ハンレイ岩体に注目し、マグマ貫入境界を調査対象とした。野外の産状をもとに、堆積物・マグマ貫入境界で起こる多様な地質現象を時系列で読み解き、その現象をもたらした物理条件を相平衡とレオロジーにもとづいて制約した。また、マグマ貫入によって引き起こされる堆積物の相変化、組織変化、化学的变化を明らかにした。これにより、マグマ貫入がもたらす未固結堆積物への熱的・化学的影響を理解することを目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

室戸岬ハンレイ岩体では、ハンレイ岩内部に発達する層状構造の形成過程に関心がもたれマグマの分別結晶作用や、メルト-結晶間の分離・移動機構が詳しく研究されてきた。一方、本研究では貫入境界に見られる多様な産状を用いて、マグマ-未固結堆積物の接触境界部で起こる現象と、その物理条件を明らかにすることを試みた。未固結堆積物へのマグマ貫入は、リフト帯や背弧海盆でも起こる現象であり、堆積物中の有機物熟成や熱水環境の地下生物圏にも関わる地質現象である。本研究で得られた知見は、マグマ貫入現象をマグマ側と堆積物側の両方から統合的に理解していく上で役立つものと期待される。

研究成果の概要(英文)：This research investigated the thermochemical interactions between seafloor sediments and intrusive mafic magmas. The study area is the Murotomisaki Gabbroic complex in Kochi prefecture, SW Japan. This gabbroic complex was formed by igneous activity near the trench about 15 million years ago. Field observations and petrological studies have revealed the geological phenomenon associated with magma intrusion and subsequent interactions among magmas, sediments, and hydrothermal fluids. This study also constrained the pressure-temperature conditions of magma intrusion and the thermal effects on sediment using phase diagrams and rheology of solid-liquid mixtures.

研究分野：Petrology

キーワード：マグマ貫入 未固結堆積物

## 1. 研究開始当初の背景

火山フロントから海溝までの間は、島弧火成活動の空白域となることが知られている。しかしながら、活動中の海底拡大軸が沈み込むなどの、特異なテクトニックセッティングでは、海溝付近であっても火成活動が起こりうる。それが海溝近傍火成活動または前弧域火成活動と呼ばれるものである (Marshak and Karig, 1977; Hibbard and Karig, 1990; Sisson et al. 2003)。

海溝近傍火成活動の特徴は、海溝充填堆積物、付加体、付加体を覆う前弧海盆や斜面海盆堆積物(いわゆる被覆層)にマグマが貫入する点にある。その一例として挙げられるのが紀伊半島、室戸半島、足摺岬において四万十帯に貫入する中新世火成岩体である(高橋, 1980; 溝口ほか, 2009 など)。これらの貫入岩体はバックストップの役目を担うため、付加プリズム内の断層系や前弧海盆の発達過程を変化させることが明らかとなってきた (Tsuji et al., 2015)。

しかし、海溝近傍火成活動が付加体・前弧海盆に与える影響は、上記に挙げた力学的な側面にとどまらない。リフト堆積盆や島弧火山性堆積盆内の貫入岩体を対象とした研究では、マグマ貫入に伴う温度変化が引き金となって多様な現象が起こることが明らかにされている。たとえば、間隙流体の相変化・物性変化 (Wohletz et al, 2012)、堆積物の脱水分解・部分熔融反応 (Martin and White, 2002)、堆積物の発泡や流動化 (Kokellar, 1982; Krynauw et al., 1994)、ペペライト(未固結堆積物へのマグマ貫入を示す産状、Skilling et al., 2002)や碎屑岩脈 (Svensen et al, 2009)の形成、有機物の熱熟成 (Stewart et al., 2005; Wang 2008)、熱対流域の形成 (Wang and Manga, 2005)、熱水噴出孔の形成 (Planke et al., 2005)である。これらに類似した現象は、海溝近傍火成活動時にも起こると予想され、局所的ではあるものの、堆積物の温度構造、物性、間隙水や元素の移動パターンに変化をもたらすと考えられる。

近年、マグマ貫入に伴う堆積盆内の熱・物質移動、相変化を予測する上で、熱・流体移動モデルを用いた数値計算が重要なツールとなってきている (Aarnes et al., 2010; Iyer et al., 2013; Wang et al., 2015 など)。その一方で数値計算は初期値やモデルの仮定事項に大きく依存する側面をもつ。そこで、現実に即した意味のあるモデル計算によって、火成活動をもたらす付加体・前弧海盆の熱的影響を評価するためには、マグマ貫入境界に記録された現象を把握し、最高被熱温度構造と貫入条件、岩石-熱水反応などを野外の産状と天然試料の解析から明らかにする必要がある。つまり、地質学的な束縛条件を与える必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、海溝近傍火成活動の産物である室戸岬ハンレイ岩体に注目し、マグマ貫入境界を調査対象とした。堆積物-マグマ貫入境界で起こる多様な地質現象を時系列で読み解くこと、その現象をもたらした物理条件を制約すること、マグマ貫入によって引き起こされる堆積物の相変化、組織変化、化学的变化を明らかにすることを主な目的とした。これにより、マグマ貫入がもたらす未固結堆積物への熱的・化学的影響を理解することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では地質調査、岩石・鉱物組織の観察と解析、岩石・鉱物の化学組成分析、ジルコンの U-Pb 年代測定、流体含有物のマイクロサーモメトリーなどを行い、データを収集した。さらに、得られたデータを用いて、相平衡とレオロジーの観点から考察を進めた。以下にデータの収集方法と活用法について記す。

マグマ貫入機構・堆積物流動化現象の把握：マグマ貫入境界部において野外調査を行った。貫入境界部にみられる多様な産状を記載するとともに、貫入マグマに取り込まれたと解釈できる堆積物や、マグマ固結後にハンレイ岩に注入した碎屑岩脈の厚さ、長さ、走向・傾斜を測定した。これらのデータは、貫入時のマグマ-堆積物間、マグマ固結後のハンレイ岩-堆積物間でおこる熱・化学的な相互作用をもたらす現象を把握する基礎データとして用いた。

堆積年代、貫入年代の測定：先行研究では、微化石を用いた堆積年代の推定と、Rb-Sr アイソクロン年代を用いた貫入年代の推定が行われている。後者では、ハンレイ岩体内に分布する文象斑岩(本研究の石英長石質脈に相当)を用い、全岩と黒雲母から得られた2点のみを結び直線を内部アイソクロンとみなしている。本研究では、先行研究とは異なる方法で堆積年代とマグマ貫入年代を制約するため、堆積岩およびハンレイ岩体内に分布する石英長石質脈、ハンレイ岩からジルコンを分離し、二次イオン質量分析装置を用いて U-Pb 年代測定を行った(国立極地研究所との共同研究)。

岩石記載、鉱物化学組成分析：試料採取許可を得て収集した岩石試料、およびアーカイブ試料を用いて岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて、岩石の観察・記載を行った。また、エネルギー分散型 X 線分析装置を用いて鉱物の化学組成を分析した。石英に関しては、累帯構造やオーバーグロースなどを判別するために、補助的にルミノスコープやカソードルミ

ネッセンズを用いた観察を行った。記載岩石学的特徴と化学組成データをもとに相平衡状態図や地質温度計を活用することで、熱変成条件や鉱物形成条件を推定した。

流体包有物形成条件の決定：鉱物形成温度を制約するため、鉱物内に捕獲された流体包有物を用いて均質化温度を測定した。測定対象は、石英（ハンレイ岩体内に分布する石英長石質脈）と方解石（石英長石質脈の形成後に作られたプレーナイト脈）に含まれる包有物とした。均質化温度測定にあたっては、包有物の産状や形態を観察し、包有物がホスト鉱物にとりこまれた時期の把握に努めた。氷点を測定して塩濃度を求めることも試みたが、流体包有物が小さすぎて温度変化に伴う相変化を観察できなかった。

全岩化学組成分析：堆積岩およびハンレイ岩体内部に分布する石英長石質脈、ハンレイ岩体を構成する火成岩を分析対象とし、全岩化学組成分析を行った。全岩化学組成分析には、蛍光 X 線分析装置（主成分・微量元素組成）誘導結合プラズマ質量分析装置（微量元素組成）、表面電離型質量分析装置（Nd 同位体比）を用いた。なお、難溶性鉱物を含む石英長石質脈と堆積岩については、アルカリ融解法を適用した。得られたデータを用いて、貫入境界からの距離に応じた岩石の化学組成変化や、堆積物の同化によるマグマ組成変化を調べた。また、ハンレイ岩体急冷部の全岩化学組成は貫入マグマの温度推定に活用した。

#### 4. 研究成果

室戸岬ハンレイ岩体は、約 1400~1500 万年前に起こった瀬戸内—外帯地域火成活動の最南端に位置し、四国海盆拡大軸やマイクロプレート境界の沈み込みに伴う海溝近傍火成活動の産物と考えられている。本研究の結果、室戸岬東方の御厨人窟周辺には、苦鉄質マグマが未固結堆積物に貫入することで生じた、様々な地質現象が記録されていることが明らかになった。たとえば、マグマの貫入に伴うペペライト（火成岩ブロックと堆積物との混在部）の形成、指状に貫入するマグマによる堆積物の挟み込み、貫入マグマの冷却・結晶化と堆積物の加熱に伴う相変化、堆積物のハンレイ岩への注入（碎屑岩脈の形成）、ハンレイ岩による碎屑岩脈の加熱、碎屑岩脈を切るプレーナイト脈の形成などである。特に、貫入境界周辺は複数のシート状マグマの貫入で特徴付けられ、貫入マグマの先端が指状に枝分かれする産状も認められる。この指状形態はマグマ貫入時の堆積物が未固結状態であり、堆積物の実効粘度がマグマのそれよりも低かったことを示唆する。また、この指状形態を貫入面上の線構造と見なすことで、マグマの流動方向を制約した。なお、ジルコンを用いた U-Pb 年代測定の結果、粒子数が少なくやや信頼性に欠けるものの、約 22 Ma の堆積年代（堆積岩中の碎屑性ジルコンが示す最も若い年代）と、約 15 Ma のマグマ貫入年代が得られた。

堆積物—マグマ間、堆積物—ハンレイ岩間の相互作用を理解するためには、上記に挙げた各現象が起こった温度帯を特定することが不可欠である。温度が特定できれば、サンプルの位置情報（貫入境界からの距離）と、堆積物—マグマ間の熱移動を再現したモデル計算から、マグマ貫入後どのくらいの時間スケールで各現象が生じたのか制約できるようになる。しかしながら、岩石試料から注目する現象をもたらした温度を特定することは容易ではない。その理由として、熱水変質により初生的な化学組成情報がかなり失われていることが挙げられる。また、低圧条件では変成反応曲線やソリダスの傾きが大きく変化するため、鉱物の安定領域が温度と圧力の両方に大きく依存してしまうことも一因である。

そこで本研究では、岩石の相平衡関係を利用するのではなく、碎屑岩脈の形成条件に注目してマグマ貫入深度を見積もる方法を考案した。この方法では、水と碎屑粒子からなる混合物が混相流として振る舞える最大粒子分率（堆積物の最低間隙率に相当）をジャミング転移の観点から制約し、さらに地層の厚さと間隙率との相関関係を利用して、碎屑岩脈を形成できる最大深度を求めた。なお、海底面の水深は現在の南海トラフを参考として、1000 m から 6000 m を仮定した。その結果、碎屑岩脈の形成深度（= マグマ貫入深度）は、大きめに見積もっても約 100 MPa に相当する圧力を超えないと見積もった。この値は、Yajima et al. (1977) が求めた室戸岬ハンレイ岩体の貫入深度よりも浅い。Yajima et al. (1977) はマグマ貫入深度を、海底面から約 8 km の深さ（およそ 200 MPa に相当）とした。これは室戸半島に分布する地層の層序を地向斜論的な立場で復元し、そこで推定した層厚から導かれた深度である。

シュードセクションを用いた解析の結果、貫入境界部のホルンフェルスは約 400°C から 500°C 以上を経験したと推定した。この岩石は石英、長石に加えて堇青石（仮像もしくは、石英中の未変質包有物）と黒雲母を含み granoblastic texture を示す。部分熔融の痕跡がないことから最高被熱温度は 700°C をこえないと考えられる。一方、貫入境界から 15 m 以内のハンレイ岩体露出地域には、少なくとも 125 本の石英長石質の細脈が存在している。石英長石質脈には形成過程の異なる 2 種類が確認できた。ひとつめは、となりあうシート状貫入岩に挟み込まれた堆積物や、指状に枝分かれしたマグマに挟在された堆積物である。そのため、本来は脈ではなくレンズ状の挟在層という表現がふさわしい。ふたつめは、マグマ固結後、ハンレイ岩に注入した碎屑岩脈である。本研究では、両者の区別が必要な場合をのぞき、上記の 2 種類をまとめて石英長石質脈と呼んだ。なお、碎屑岩脈はプレーナイト脈によって切られる場合がある。プレーナイトの安定条件を考慮すると、碎屑岩脈の形成は、ハンレイ岩がソリダス温度以下となって以降、400°C まで冷

却される間におこったと解釈できる。

石英長石質脈の大きな特徴は、石英と長石の共晶組織（微文象組織）をもつことである。本研究では、岩石組織の特徴から微文象組織を 2 タイプに大別した。ひとつめのタイプは miarolitic cavity に伴う微文象組織である。Miarolitic cavity は流体が存在したことを示すことから、このタイプの微文象組織は岩石—熱水反応で生じたと解釈した。2 つめのタイプは、正稜帯構造をした自形斑晶状の斜長石を覆うように成長する微文象組織である。このタイプはメルトの結晶化によって作られたと解釈した。メルト起源の微文象組織をもつ石英長石質脈は、文象斑岩に類似した岩石組織を示し、組織から結晶化順序が追える。微文象組織を構成するアルカリ長石は、まれに変質を免れ離溶組織が残っている場合がある。離溶したアルカリ長石の化学組成を用いると、ソルバス温度計から 570°C 前後の温度（100 MPa 以下を仮定）が得られた。よって、この温度以上でメルト起源の微文象組織が形成したと判断できる。

相平衡状態図に基づくと、黒雲母の分解反応曲線は、 $H_2O$  に飽和した珪長質岩のソリダスと 100 MPa、700°C 付近で交わる。このことは約 100 MPa を境として、昇温に伴う堆積物の相変化に大きな違いがあることを意味する。例えば約 100 MPa 以下では、 $H_2O$  に飽和した堆積物が部分溶融を開始する前に黒雲母は消失してしまい、輝石が生じる。一方、約 100 MPa 以上の場合は、黒雲母の安定領域が高温まで広がるため、部分溶融度が小さい間はメルトと黒雲母が共存できる。石英長石質脈は石英、斜長石、アルカリ長石、黒雲母から主に構成される。よって、鉱物組み合わせとともに、先に述べた碎屑岩脈の形成深度も満たす条件として 100 MPa 程度の圧力が適していると言える。メルト起源の微文象組織をもつ石英長石質脈は、700°C を超えるまで加熱されたと解釈した。

単純な 1 次元の熱伝導モデルを用いて温度構造を計算すると、マグマ貫入境界から 15 m 以内に分布する碎屑岩脈が部分溶融を引き起こすためにはマグマ貫入後、およそ 100 年以内に碎屑岩脈が形成される必要があると言える。ただし今回のモデル計算は単純なものであり、今後、物性の温度依存性や対流の影響を考慮して計算する必要がある。

ハンレイ岩体中に分布する石英長石質脈は、貫入境界よりも陸側に分布する堆積岩とは岩石学的特徴が異なっている。石英長石質脈は、貫入境界より陸側の堆積岩に比べて、ノルム石英/（石英+長石）比が小さく、ノルムアルバイト/（アルバイト+オルソクレース）比が大きい。また、LIL 元素の濃度に明瞭な違いも認められた。一方で、両者はともに堆積岩に特徴的な低い  $^{143}Nd/^{144}Nd$  同位体比をもつ。よって、熱履歴と岩石—熱水反応の違いによって元素濃度の差が生まれた可能性がある。岩石—熱水反応の実態に関しては十分な検討ができず今後の課題として残った。

これまで、室戸岬ハンレイ岩体では、ハンレイ岩内部に発達する層状構造の形成過程に関心がもたれ、マグマの分別結晶作用や、メルト—結晶間の分離・移動機構について詳しく研究されてきた（Yajima, 1976; 赤塚ほか, 1999; Hoshida et al., 2006; Floess et al., 2019 など）。しかし、マグマの貫入は堆積物にも大きな変化をもたらす。これはよく知られるように、貫入岩体周囲でおこる接触変成作用に相当する。だが、本研究が対象とした未固結堆積物—マグマ間の相互作用は、地殻内でおこる貫入岩体周辺の熱変成作用とは異なる特徴を持つ。たとえば、堆積物の加熱に伴って間隙水（海水）が 2 相分離（塩水と蒸気の 2 相共存など）すること、堆積物が高い間隙率をもち流体移動が容易なため、開放系で熱変成作用が進むことなどである。よって熱水の役割を重視して堆積物—マグマ、堆積物—貫入岩の相互作用を明らかにすることが今後不可欠となると考えられる。本研究では、貫入境界に見られる多様な産状を用いて、マグマ—未固結堆積物の接触境界部で起こる現象と、貫入時の物理条件を明らかにすることを試みた。未固結堆積物へのマグマ貫入は、リフト帯や背弧海盆でも起こる現象であり、堆積物中の有機物熟成や熱水環境の地下生物圏にも関わる地質現象である。本研究で得られた知見は、マグマ貫入現象をマグマ側と堆積物側の両方から統一的に理解していく上で役立つものと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Samadi Ramin, Torabi Ghodrat, Kawabata Hiroshi, Miller Nathaniel R.	4. 巻 386-387
2. 論文標題 Biotite as a petrogenetic discriminator: Chemical insights from igneous, meta-igneous and meta-sedimentary rocks in Iran	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 106016 ~ 106016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2021.106016	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 H. Kawabata and T. Shimura	4. 巻 114
2. 論文標題 Three-dimensional visualization of ternary prisms (T-prism): Development of a spreadsheet-based tool for Earth and material sciences	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 142-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.181214	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0件

〔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
---------	---------