EGJ
Engineering Geology of Japan

火山岩中の斑晶鉱物を用いてマグマの発生から噴火に至る過程を知る

岡田 郁生 [1)]

キーワード：マグマ，火山，斑晶鉱物，角閃石，温度・圧力条件，化学組成，由布岳

1．はじめに

日本は世界でも有数の火山大国です．火山は，噴火すれば社会的・経済的に甚大な被害をもたらしうる一方で，温泉や地熱資源，雄大な景観など私たちの生活に恩恵も与えてくれます．それゆえ，火山活動に関する知見は，火山防災・減災，地熱資源の確保，地域振興など，私たちが火山と共生し持続可能な社会を築いていくうえで重要な情報となります．火山活動の源は，地下のマグマです．従って，どのように発生したマグマが，どの深さにどのような温度条件と化学組成で存在していたのか，また，噴火に至るまでにどのようなプロセスが起きてマグマの組成を変化させたのか（これを分化過程といいます），をより詳細に明らかにすることは，火山活動の理解において根源的な課題です．

マグマの発生から噴火に至る過程を明らかにするうえで，マグマの物理化学的条件（温度，圧力，化学組成など）は極めて重要な制約条件を与えます．例えば，圧力からマグマが存在していた深さを知ることができます．また，温度はマグマの粘性と関係があるので，噴火メカニズム等に影響します．さらに，化学組成は，マグマの起源や分化過程を議論するうえで欠かせません．これまで，マグマの発生から噴火に至る過程を，マグマが地表に噴出してできた火山岩全体（以下，火山岩全岩；図1a）の化学組成や組織などから解明しようとする研究が多数行われてきました．しかし，マグマの発生から噴火に至る過程は十分な理解には未だ達していません．この大きな原因は，マグマの発生から噴火に至る過程のある時点でのマグマの物理化学的情報を，火山岩全岩の化学組成や組織から手に入れることが極めて困難である場合が多いということが挙げられます．マグマは，噴火に至るまでに様々なプロセスを経ています．マグマの発生から噴火に至る過程のある時点でのマグマの物理化学的特徴は，その後に起きたプロセスによって上書きされ失われてしまいます．例を挙げると，日本で噴出するマグマの多くは，複数のマグマ同士の混合（マグマ混合）を経て噴出していると考えられています．マグマ混合の影響を受けている火山岩全岩の化学組成からマグマが混ざる前のマグマの情報を手に入れることが難しいことは，「お湯と水が混ざったものから元々の温度を知ることが難しい」とイメージすると分かりやすいでしょう．

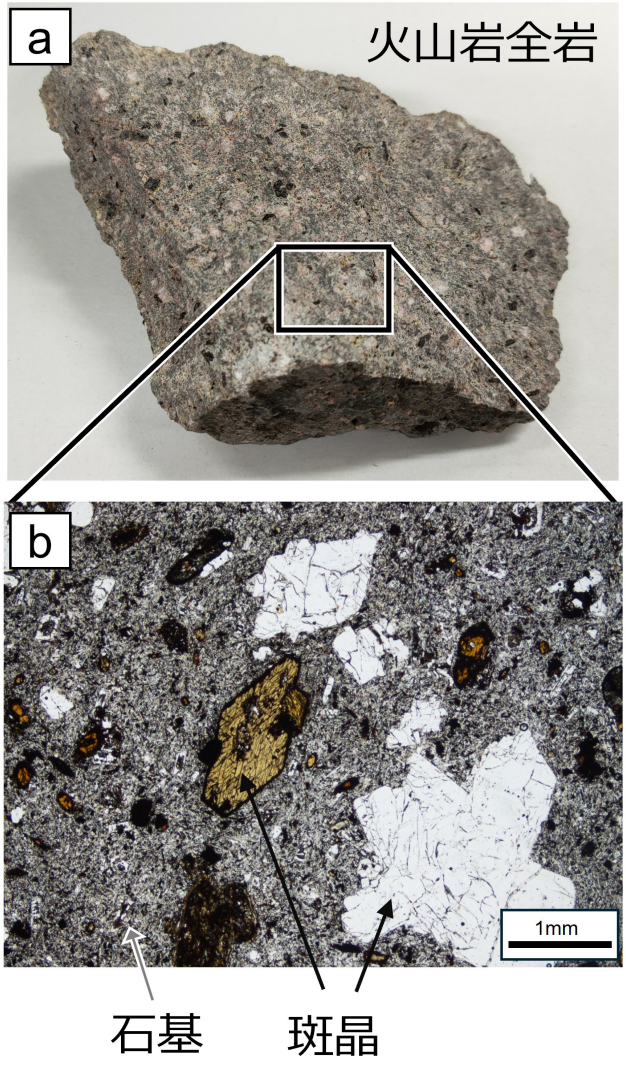

図 1　火山岩全岩（a）と火山岩内部を拡大した（b）写真．地表に噴出したマグマが固化してできた火山岩を拡大すると，大きな結晶である斑晶（黄土色，茶色や白の結晶），細かい結晶やガラスの石基（斑晶の間を満たす緻密な生地に見える部分）が見られる．

2．失われたマグマの情報をどのようにして手に入れるか？

では，マグマの発生から噴火に至る過程のある時点でのマグマの物理化学的特徴をどのようにして手に入れればよいのでしょうか．火山岩は結晶である斑晶と細かい結晶やガラス質の石基で構成されています（図1b）．これら構成要素の中に，上書きされ失われたマグマの情報を保持しているタイムカプセルみたいな役割を果たしているものがあれば，それを解析することで失われたマグマの情報を手に入れることができるでしょう．このようなタイムカプセル

[1)] 株式会社蒜山地質年代学研究所　〒703-8252 岡山市中区中島2番地5　（okada.ikuo@geohiruzen.co.jp）

として，私は，火山岩中の斑晶鉱物（図1b）に着目しました．なぜならば，火山岩中の斑晶は，地下でマグマがゆっくり冷えて晶出・成長した結晶だからです．地下に存在するマグマは，液体部分のメルトと，結晶の斑晶が共存しています（図2）．火山岩中の石基は，噴火時のメルトが急激に冷えてできたものなので，その化学組成は噴火時のものを反映します．一方で，斑晶の化学組成は，晶出・成長した時のマグマの物理化学的条件を反映します．さらに，斑晶が結晶成長中にマグマの物理化学的条件が変化しても，それらの化学組成は上書きされず，木の年輪のような形で異なる化学組成を持った成長層を形成することがあります．そのため，斑晶鉱物が上書きされる前のマグマ中で晶出・結晶成長していれば，それらの化学組成を解析することで，そのマグマの情報を抽出できるはずです．私は，火山岩中の斑晶鉱物の化学組成を解析し，上書きされ失われたマグマの情報を抽出する研究に取り組んできました．その成果の一つとして，本稿では，火山岩中に普遍的に含まれる斑晶鉱物の一つである角閃石を用いたOkada *et al.*（2024）について紹介します．なお，Okada *et al.*（2024）は，柴田知之教授（広島大学），芳川雅子特任教授（広島大学），石橋秀巳准教授（静岡大学），杉本健博士（地熱エンジニアリング株式会社），早坂康隆館長（天草市立御所浦恐竜の島博物館，当時，広島大学）との共著です．

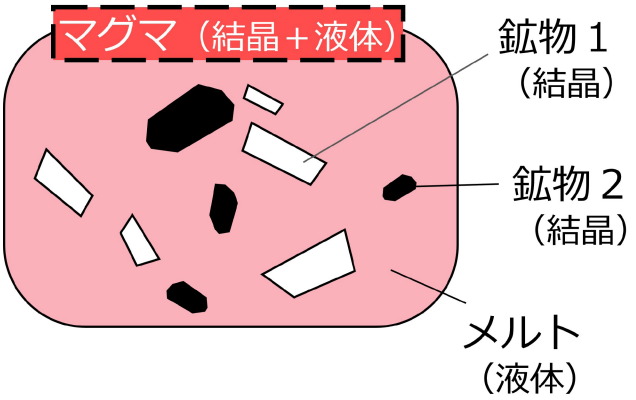

図 2　マグマと，斑晶およびメルトの関係．マグマ中に，鉱物 1，鉱物 2，メルトが存在していると仮定した．

3．なぜ，角閃石なのか？

角閃石（図3）は幅広い温度，圧力，メルトの化学組成の条件下で晶出する鉱物です（Putirka 2016; Zhang *et al.*, 2017）．近年，角閃石の晶出条件に関する研究が飛躍的に進展しました．この研究成果に着目したことも角閃石を用いた大きな理由です．マグマと斑晶鉱物の関係を再現する高温高圧実験のデータを多変量解析したり，機械学習したりすることで，角閃石ひと粒ひと粒の主要元素濃度（wt.%（百分率）レベル）から，それらの晶出時の温度，圧力，メルトの主要元素濃度を推定することができるようになりました（Ridolfi and Renzulli, 2012; Putirka, 2016; Zhang *et al.*, 2017; Ridolfi, 2021;Higgins *et al.*, 2022）．また，メルト中にppm（百万分率；1ppm = 0.0001 wt.%）レベルで含まれる微量元素の濃度は，鉱物–メルト間の分配係数（*Kd*s; 鉱物の濃度とメルトの濃度の比）を使って計算することで推定することができます．鉱物–メルト間の *Kd*s は，高温高圧実験的研究などにより決定されてきました．しかし，鉱物–メルト間の *Kd*s は，温度や圧力，メルトの化学組成によって変動する（e.g., Blundy and Wood, 1994; Tiepolo *et al.*, 2007）ため，どの *Kd*s を使えばいいのか，決定することが困難でした．これに対して，高温高圧実験データの多変量解析により，角閃石の主要元素濃度を使って，角閃石の晶出条件に応じた角閃石–メルト間の *Kd*s を決定することが可能となりました（Shimizu *et al.*, 2017; Humphreys *et al.*, 2019）．角閃石の主要元素に加え，微量元素組成も分析したうえで，これら高温高圧実験データの多変量解析で得られた成果を組み合わせて応用すれば，角閃石晶出時の温度，圧力，メルトの主要元素・微量元素組成を系統的に決定できるはずです．しかし，このような応用を試みた例はありませんでした．

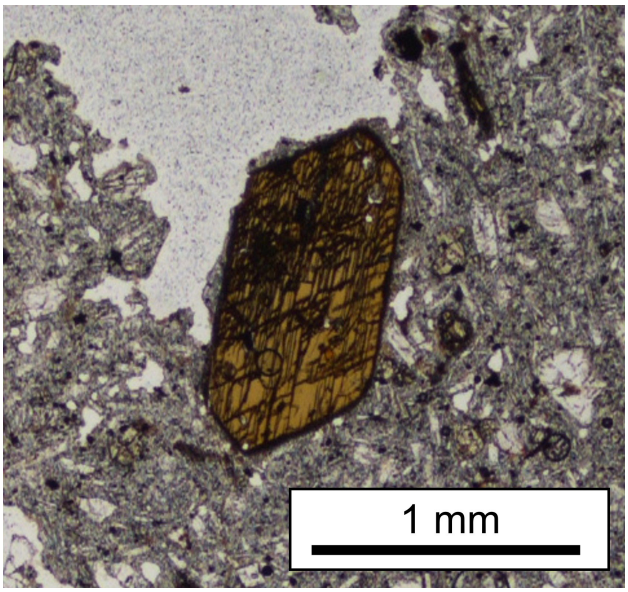

図 3　角閃石の例（由布岳火山岩中の角閃石）

4．由布岳の火山岩中の角閃石への適用

私たちは，由布岳の火山岩に含まれる角閃石を分析しました．由布岳は，九州北東部，大分県に位置する活火山で，付近には別府温泉や湯布院温泉といった有名観光地があります．由布岳の火山活動は約6,000年前よりも以前に活動を開始し，2,200年前の噴火が最新の活動です（小林，1984; 星住ほか，1988; 太田ほか，1990）．由布岳の火山岩は，角閃石のほかに斜長石や輝石を主な斑晶として含みます（例えば，太田ほか，1990）．由布岳のマグマについては，火山岩全岩の岩石学・地球化学的検討（太田ほか，1990; 太田・青木，1991; Sugimoto *et al.*, 2006）から，マグマ混合を経て噴火したことが指摘されてきましたが，混ざる前のマグマの物理化学的特徴に関しては十分な理解が得られていませんでした．

4. 1. 角閃石晶出時の温度，圧力，メルトの主要元素・微量元素組成の系統的な推定

角閃石晶出時のメルトの温度，圧力，主要元素・微量元素組成を系統的に推定するためには，同一角閃石斑晶について，主要元素と微量元素の濃度を系統的に分析することが必要不可欠です．そこで，私たちは，まず，角閃石斑晶の主要元素濃度を電子線マイクロアナライザー（EPMA）で測定しました．その測定結果を高温高圧実験データの多変量解析の成果（温度：Putirka, 2016; 圧力：Ridolfi and Renzulli, 2012; Ridolfi, 2021; 主要元素組成：Zhang *et al.*, 2017; *Kd*s：Shimizu *et al.*, 2017; Humphreys *et al.*, 2019）に応用することで，角閃石晶出時の温度，圧力，メルトの主要元素組成，角閃石–メルト間の *Kd*s を計算しました．その後，EPMA測定の終えた角閃石斑晶について，微量元素濃度を，レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計で測定し，角閃石の主要元素濃度から計算した *Kd*s と組み合わせることで，メルトの微量元素の濃度を推定しました．このようにして，角閃石晶出時の温度，圧力，メルトの主要元素・微量元素組成の系統的な推定を実現しました．

EPMA の分析結果から，由布岳の角閃石はパーガサイト（Prg）とマグネシオホルンブレンド（Mhb）という2種類に分けられました．温度・圧力条件の推定結果から，Prg は約930–1020℃，約360–600 MPa（深さ約13–23 km）で，Mhb が約770–850℃，75–220 MPa（深さ約3–8 km）で晶出したことが明らかになりました．また，メルトの主要元素・微量元素組成も異なる推定結果が得られました．これらのことは，由布岳下に異なる温度・化学組成を持つ二つのマグマがそれぞれ異なる深度に存在し，これらのマグマが混合したことで同一マグマ中に2種類の角閃石が共存するに至ったことを示します．また，推定したメルトの化学組成から，Prg は苦鉄質（SiO_2濃度に乏しい）マグマ，Mhb は珪長質（SiO_2濃度に富む）マグマから晶出したと考えられます．

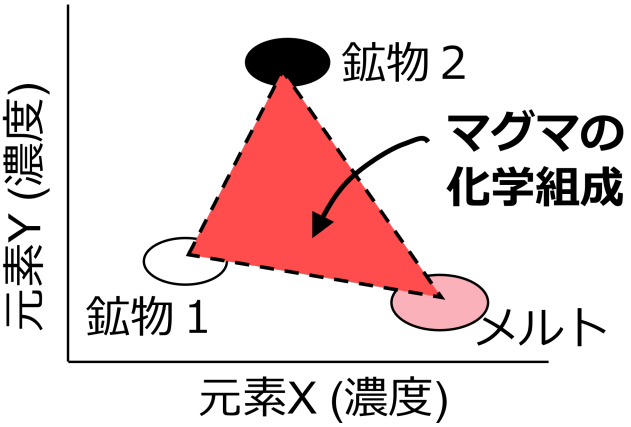

図 4　マグマの化学組成を推定するモデル計算の簡略図．図 2 で示したマグマの化学組成を考えた時のモデル計算を例として挙げた．元素 X– 元素 Y の関係において，鉱物 1，鉱物 2，メルトがこのような組成を持つとすると，鉱物 1，鉱物 2，メルトの混合関係は，それらの組成を頂点とする点線で囲んだ三角形で表される．この三角形内部が図 2 で示したマグマの取り得る組成範囲であると考えることができる．

4. 2. マグマの化学組成の推定

4.1. で紹介したように，私たちは，角閃石晶出時のメルトの主要元素・微量元素組成を推定しました．しかし，これでマグマ混合前のマグマの化学組成を特定することができたとは言えません．なぜならば，「マグマは斑晶鉱物とメルトの混合物」だからです（図2）．一方で，この視点に基づけば，マグマの化学組成は斑晶鉱物とメルトの化学組成の混合関係から推定できるはずです．そう考えた私たちは，斑晶鉱物（角閃石，斜長石，輝石）とメルトを混合させたモデル計算を行いました．このモデル計算方法について説明するために，図2のマグマの化学組成を推定したときの例を図4に示しました．図2で示したように，マグマ中に鉱物1，鉱物2，メルトが共存しているとします．これらの鉱物とメルトの化学組成が，元素X–元素Y の関係において，図4のような関係にあるとします．このときの鉱物1，鉱物2，メルトの混合関係を考えると，これらの鉱物とメルトを頂点とした三角形が形成されます．この三角形の内部が，図2のマグマの取り得る組成範囲であると推定することができます．このようなモデル計算に基づいて，Prg が晶出した苦鉄質マグマと Mhb が晶出した珪長質マグマの取り得る組成範囲を推定しました．そして，これらの推定した組成範囲を由布岳の火山岩全岩の化学組成と関連付けることで，混ざる前のマグマの化学組成を特定しました．その結果，苦鉄質マグマは SiO_2 = 約45 wt.% の玄武岩質マグマ，珪長質マグマは SiO_2 = 約68 wt.% のデイサイト質マグマであったことが明らかになりました．これまで，混ざる前のマグマの化学組成は，火山岩全岩の解析に基づいて，対象とする火山の噴出物そのものや周辺に分布する火山の噴出物で代表させることで推定されてきました．これに対し，私たちは，世界で初めて，混ざる前のマグマの化学組成を斑晶鉱物の化学組成から直接的に特定することに成功したのです．

推定した玄武岩質マグマとデイサイト質マグマの化学組成を解析すると，これらのマグマは，それぞれ，由布岳下の地殻を構成すると考えられる斑レイ岩（Takagi *et al.*, 2010）と花崗岩（Kamei *et al.*, 2009）とそれぞれ似た組成を持っていることが明らかになりました．このことは，玄武岩質マグマとデイサイト質マグマはそれぞれ，斑レイ岩質の下部地殻と，花崗岩質の上部地殻を起源とする可能性があることを示唆します．さらなる検討が必要ですが，このようにして，私たちは混ざる前のマグマの起源について議論することもできました．

4. 3. 由布岳のマグマ供給系

ここまでの話をまとめると，以下のようなマグマの発生から噴火に至る過程が考えられます（図5）．

由布岳下には，玄武岩質マグマとデイサイト質マグマが異なる深度と温度で存在していました．これらのマグマは，それぞれ，斑レイ岩質の下部地殻と花崗岩質の上部地殻を起源とするのかもしれません．玄武岩質マグマとデイサイ

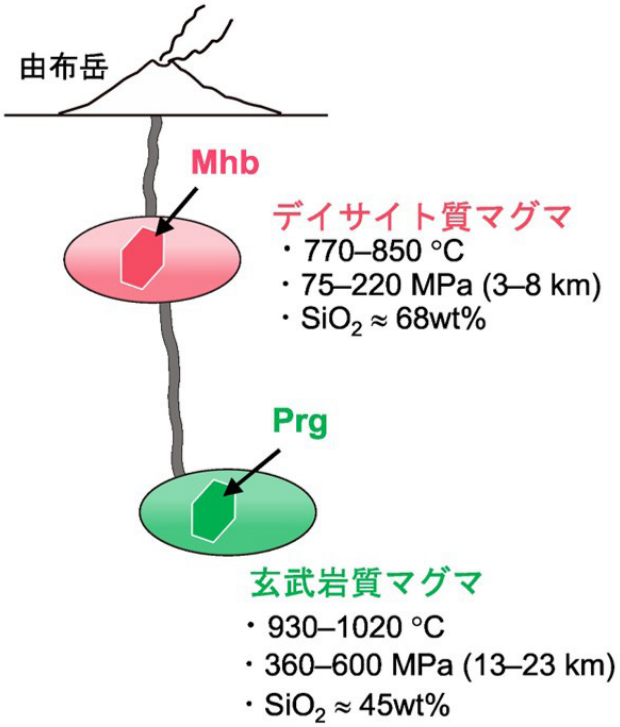

図 5　角閃石の主要元素・微量元素組成から明らかになった由布岳のマグマの発生から噴火に至る過程．Okada *et al.*（2024）を改変．

ト質マグマからそれぞれPrgとMhbが晶出しました．そして，これらのマグマが混合したことでPrgとMhbは同一マグマ中に共存することになり，最終的に噴火に至ったと結論付けることができます．

5．おわりに

本稿で紹介したOkada *et al.*（2024）では，由布岳の角閃石の主要元素・微量元素組成から，マグマ混合に関与した二つのマグマの温度，圧力，主要元素・微量元素組成を特定することに成功しました．このことは，角閃石の化学組成がマグマの発生から噴火に至る過程をより詳細に理解するうえで強力な地球化学的トレーサーとなることを示しています．角閃石は，世界中の様々な火山で見られる鉱物です．本稿で紹介したような手法を他火山にも応用すれば，これまで火山岩全岩からは得ることができなかった，マグマの発生から噴火に至る過程に関する新たな知見が得られるかもしれません．今後も，私はマグマの発生から噴火に至る過程で上書きされ失われた情報をより多く手に入れる研究を進めることで，火山活動の根源的な理解につなげていきたいと考えています．

謝辞

上述したように，本稿で紹介したOkada *et al.*（2024）は，広島大学大学院先進理工系科学研究科の柴田知之教授，芳川雅子特任教授，静岡大学理学部の石橋秀巳准教授，地熱エンジニアリング株式会社の杉本健博士，天草市立御所浦恐竜の島博物館の早坂康隆館長（当時，広島大学大学院理学研究科・准教授）との共著です．共著の皆さまには，多大なご指導やご助力をいただきました．特に，柴田知之教授には指導教官として終始熱心なご指導をいただきました．さらに，粗稿も読んでいただきました．共著の方々に加えて，産業技術総合研究所地質調査総合センターの宮城磯治主任研究員，広島大学大学院先進理工系科学研究科のDas Kaushik 教授，宮原正明准教授，Dey Bidisha選抜助教（現金沢大学理工学域・助教），平山剛大選抜助教，広島大学自然科学研究支援開発センターの柴田恭宏氏，私が広島大学在籍時に所属していた研究室の後輩の皆さまには，私が研究を進めるにあたって大変お世話になりました．また，上記の方々のみならず，多くの方々にもご指導・ご声援をいただきました．本稿は，里和玲伊氏に丁寧な校閲をしていただきました．ここに記して厚くお礼を申し上げます．

引用文献

Blundy, J.D. and Wood, B.J.（1994）Prediction of crystal–melt partition coefficients from elastic moduli. *Nature*, **372**, 452–454.

Higgins, O., Sheldrake, T. and Caricchi, L.（2022）Machine learning thermobarometry and chemometry using amphibole and clinopyroxene: a window into the roots of an arc volcano（Mount Liamuiga, Saint Kitts）. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **177**, 10.

星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎（1988）別府地域の地質．地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅），地質調査所 , 131p.

Humphreys, M.C.S., Cooper, G.F., Zhang, J., Loewen, M., Kent, A.J.R., Macpherson,C.G. and Davidson, J.P.（2019）Unravelling the complexity of magma plumbing at Mount St.Helens: a new trace element partitioning scheme for amphibole. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **174**, 9.

Kamei, A., Miyake, Y., Owada, M. and Kimura, J.I.（2009）A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan arc. *Lithos*, **112**, 615–625.

小林哲夫（1984）由布・鶴見火山の地質と最新の噴火活動．地質学論集 , **24**, 93–108.

太田岳洋・青木謙一郎（1991）由布・鶴見火山群における安山岩マグマの成因—二端成分マグマ混合モデル—．岩鉱，**86**, 1–15.

太田岳洋・長谷中利昭・藤巻宏和（1990）大分県中部，由布・鶴見火山群の地質と岩石．岩鉱，**85**, 113–129.

Okada, I., Shibata, T., Yoshikawa, M., Ishibashi, H., Sugimoto, T. and Hayasaka, Y.（2024）Genesis of Andesitic Magma Erupted at Yufu Volcano, Kyushu Island, Southwest Japan Arc: Evidence from the Chemical Compositions of Amphibole Phenocrysts. *Journal of Petrology*, **65**, egae018.

Putirka, K.（2016）Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist*, **101**, 841–858.

Ridolfi, F.（2021）Amp-TB2: An Updated Model for Calcic Amphibole Thermobarometry. *Minerals*, **11**, 324.

Ridolfi, F. and Renzulli, A. (2012) Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130 °C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **163**, 877–895.

Shimizu, K., Liang, Y., Sun, C., Jackson, C.R.M. and Saal, A.E. (2017) Parameterized lattice strain models for REE partitioning between amphibole and silicate melt. *American Mineralogist*, **102**, 2254–2267.

Sugimoto, T., Shibata, T., Yoshikawa, M. and Takemura, K. (2006) Sr-Nd-Pb isotopic and major and trace element compositions of the Yufu-Tsurumi volcanic rocks: implications for the magma genesis of the Yufu-Tsurumi volcanoes, northeast Kyushu, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **101**, 270–275.

Takagi, T., Naito, K. and Kamei, A. (2010) Petrographic contrast between ilmenite-and magnetite-series gabbroids in the Ryoke and San-in belts, southwestern Japan arc. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **105**, 194–214.

Tiepolo, M., Oberti, R., Zanetti, A., Vannucci, R. and Foley, S.F. (2007) Trace-Element Partitioning Between Amphibole and Silicate Melt. In: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry AMPHIBOLES: Crystal Chemistry, Occurrence, and Health Issues* (eds. Hawthorne, F.C., Oberti, R., Della, V.G. and Mottana, A.), **67**, 417–452. Mineralogical Society of America.

Zhang, J., Humphreys, M.C.S., Cooper, G.F., Davidson, J.P. and Macpherson, C.G. (2017) Magma mush chemistry at subduction zones, revealed by new melt major element in version from calcic amphiboles. *American Mineralogist*, **102**, 1353–1367.

2025 年 7 月 22 日受付，2025 年 8 月 29 日受理 .

Engineering Geology of Japan, No. 15, 'The special issue of 30th anniversary of Hiruzen Institute for Geology and Chronology', 143–147 (2025)

Understanding the processes from generation to eruption of magma inferred from phenocrysts in the volcanic rocks

Ikuo Okada [1)]

[1)] Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co., Ltd., 2-5 Nakashima, Naka-ku, Okayama 703-8252, Japan

© 2025 Hiruzen Institute for Geology and Chronology. All rights reserved.