

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340166

研究課題名(和文)沈み込み帯のマグマの成因：最初は一つの玄武岩マグマか？

研究課題名(英文)Genesis of arc magmas: how many primary magmas exist in an arc volcano?

研究代表者

田村 芳彦 (TAMURA, Yoshihiko)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー

研究者番号：40293336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：マリアナ弧火山フロントのパガン火山において一つの火山に二つの初生マグマ(マントルが溶けた、できたてのマグマのこと)を見いだした。火山フロントで初生マグマを発見したのは世界でも珍しく、それらの初生マグマを用いて、沈み込み帯のマグマ成因論を大きく進展させた。火山の地下100キロに沈み込んでいる太平洋プレートから不混和な流体(炭酸塩メルトと珪酸塩メルト)が発生すること、そのためにマントルにおいて2種の初生マグマが生成すること、マントルが最大40%も部分融解していること、およびマントルの溶け残りには金雲母が存在することなど、誰も予測をしていなかった、新たな知見がいくつも得られた。

研究成果の概要(英文)：We recovered and studied primitive basalt lavas from Pagan Volcano, Mariana Oceanic arc, and our findings have been attributed to each of the three parts of the subduction factory, which we describe as Mission Immiscible, Mission Invisible and Mission Inevitable, respectively. Mission Immiscible involves the subduction components, derived from the subducting slab below the volcanic front at the depth of 100 km, which consist of hydrous carbonate melt (carbonatite) and silicate melt (sediment melt). Mission Invisible involves the highly depleted residual mantle wedge of the subduction zone, composed of phlogopite-bearing dunite and harzburgite, which depletes Nb, Ta, Zr and Hf, and fractionates Nb from Ta, and Zr from Hf in arc magmas. Mission Inevitable describes the assimilation of arc magmas when they evolve; inevitable even in an oceanic arc.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：primary magma arc volcano subduction zone basalt mantle wedge carbonatite sediment melt immiscible

1. 研究開始当初の背景

(1) アメリカの実験岩石学者 N.L. Bowen は、地球上のマグマはすべて玄武岩マグマから出発して、その結晶分化作用によってできるという説を展開した (Bowen, 1928)。反応原理に基づいたその理論の美しさは多くの研究者を魅了した。その後、テクトニックセッティングの違い (海洋中央海嶺、島弧、ホットスポット) により性質の違う玄武岩マグマが生じることが明らかになってきた。しかし、Bowen の没後 50 年以上を経ているにもかかわらず、多くの研究者は依然として Bowen の体系から抜け出せずにいる。その典型的な例が沈み込み帯 (島弧) マグマの成因である。①島弧火山は多様な岩石から構成されているが、一つの火山は一つの初生玄武岩マグマから出発した。②初生玄武岩マグマの結晶分化作用とマントルから地表に達するまでの地殻との反応によりマグマの著しい多様性、つまり多様な岩石、が生みだされた。多くの研究者はこの二つの前提の上に立って議論し、この前提が検討される例はきわめて稀である。

(2) 1960 年代後半から実験岩石学者久城育夫は、「含水鉱物を含む上部マントルに遊離した H₂O が存在すると、マントルの部分融解により安山岩質マグマが生じる」と主張した。しかし、この可能性は、沈み込みの初期に噴出するボニナイトという特殊なマグマに限られる。つまり、沈み込み帯で普遍的におこっているのではない、という考えが現在の主流である。久城の学生であった田村は伊豆弧の通常の火山において、マントル由来の安山岩マグマが存在することを主張してきた (Tamura, 1994; Tamura, 1995; Tamura, 1996; Tamura & Tatsumi, 2002 など)。しかし、一般に、マントルの融解で生じた最初のマグマ (初生マグマ) は地上まで上昇してくる途中で結晶作用をおこない、その組成を著しく変化 (分化) させる。よってそのような分化した火山岩を用いてマントルの融解を議論する方法はユニークであったが、説得力に欠けた。

2. 研究の目的

伊豆小笠原マリアナ弧 (IBM 弧) は典型的な海洋島弧である。その利点は地殻が薄いことである。つまり、マントルで生成されたマグマが地殻を通過して噴出するとき、地殻との反応は最小限と考えてよい。海底火山から採取された、未分化な溶岩に対して、薄片観察 (斑晶組み合わせ)、主要元素・微量元素全岩組成、鉱物化学組成、メルトインクルージョンの分析、Sr-Nd-Pb-Hf 同位体比組成の多角的な方向から検討し、マグマの結晶作用による組成変化をたどり、その源の初生マグマを導く。初生マグマの唯一性、多様性を検証する。また、なぜ異なる初生マグマが共存するのか、マントルでどのようにして両者を作り出すのかという成因モデル

を提示する。

3. 研究の方法

海底火山は成長するとその山頂部は火山島として海面上に現れる。伊豆小笠原マリアナ弧の火山島 (たとえば伊豆弧の伊豆大島、三宅島、青ヶ島、マリアナ弧のパガン、サリガン、アナタハンなど) においては従来多くの研究がなされている。しかし、火山島から採取される溶岩はすべて分化しており、その組成は、マントルが溶けたばかりのマグマ (初生マグマ) とは大きく異なっている。一方、これまでの JAMSTEC の海底火山の調査から、興味深い事実がわかっていた。それは、海底火山からは多様なマグマが噴出するということである。山頂部や山頂に近い、水深の浅い部分では、火山島に近い、分化したマグマが噴出する。ところが、水深が 2,000m を越える海底の山麓または山腹部からは、初生マグマに近い未分化なマグマが噴出する (図 1)。

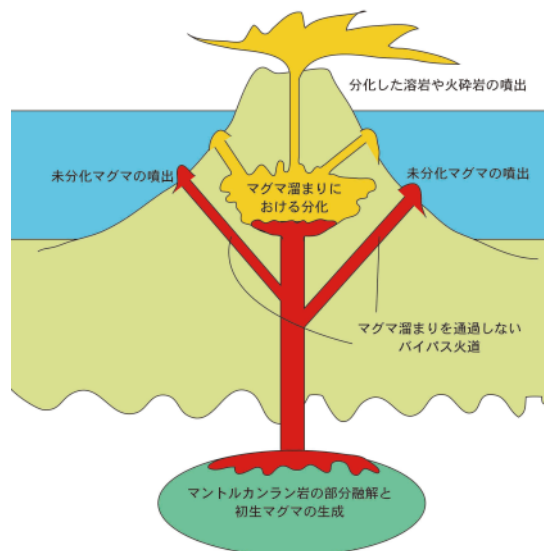


図 1 海底火山の断面想定図

海洋研究開発機構の無人潜水艇 (Remotely Operated Vehicle; ROV) ハイパードルフィンを用いて溶岩の産状と相互関係を確認してサンプリングをおこなう。マリアナ弧のできるだけ多くの火山からできるだけ未分化なサンプルを採取する。未分化な溶岩に対して、薄片観察 (斑晶組み合わせ)、鉱物化学組成、主要元素・微量元素全岩組成、メルトインクルージョンの分析、Sr-Nd-Pb-Hf 同位体比組成などの多角的な方向から検討する。

4. 研究成果

(1) マリアナ弧の NW Rota-1 海底火山において、一つの火山に 2 つの初生玄武岩マグマを見いだした (図 2)。これは、一つの火山のマグマが 1 つの玄武岩マグマの分化によって生じるという従来のパラダイムを塗り替えるものである。この成果は Journal of Petrology に掲載され (Tamura et al., 2011)、

プレス発表をおこなった（以下サイト）。
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20110518/
 また、2011年5月30日の朝日新聞の科学欄に掲載された（図3）。

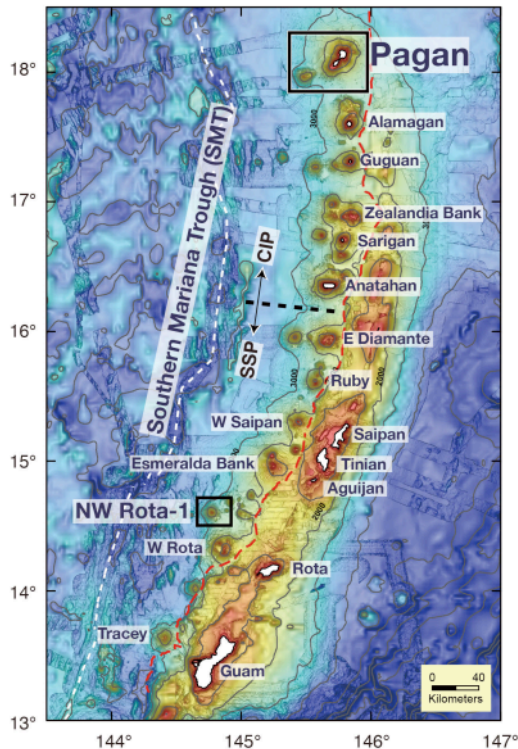


図2 マリアナ弧中南部の火山

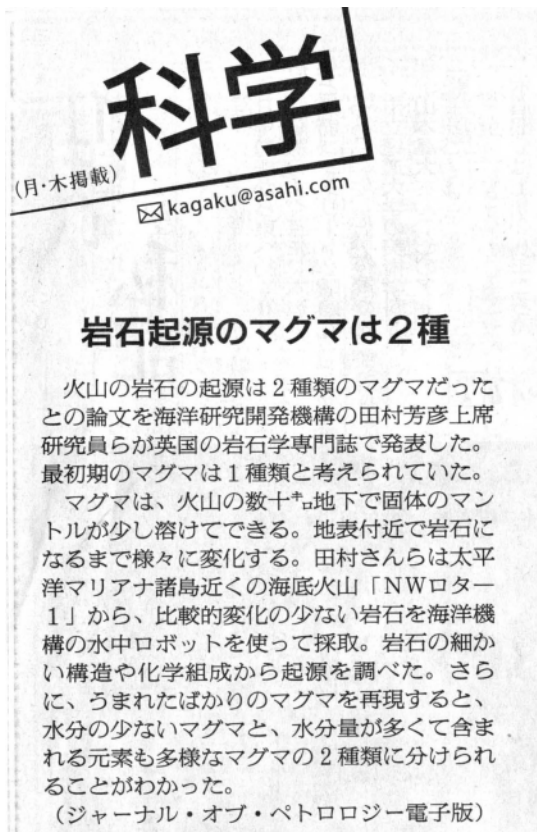


図3 朝日新聞 2011年5月30日科学欄

(2) NW Rota-1 の成果の普遍性を検証し、さらに発展させるために、マリアナ弧最大の火山、パガン火山の調査をおこなった（図2）。パガン火山の山頂部はパガン島を形成し、山腹斜面は水深3000mの海底まで続く。パガン火山の北東海底斜面（水深2000m前後）をハイパードルフィンで調査、試料採取をおこなった（図4）。



図4 パガン火山調査の模式図

パガン火山で採取された新鮮な枕状溶岩は10-11 wt% MgO を持ち、マリアナにおいて採取された最も未分化な玄武岩であった。これらの溶岩から、マントルでできたばかりの初生マグマは容易に求まる。その成果を Journal of Petrology (Tamura et al., 2014) に発表すると同時に、プレス発表を行った（以下サイト）。

http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20131107/
 初生マグマ発見はNHKニュースや西ノ島噴火に関する番組（ガリレオX）などに取り上げられた。またJSTのサイエンスニュース2013「地球の謎に挑む 初生マグマ採取に成功」としてYouTubeなどで公開されている（図5）。



図5 初生マグマ採取のサイエンスニュース
<https://www.youtube.com/watch?v=xnnYcNmOCBU>

(3) パガンにおいては、二つの異なる初生マグマがすぐ近傍に溶岩流として噴出していた。これらの二種の初生マグマを詳細に分析・解析することにより下記の4つの新しい仮説を提出した (Tamura et al., 2014)。

①火山の下 (およそ100キロ下) に沈み込んでいるプレートからの物質 (水と堆積物メルト) が予想外の液体不混和現象をおこしている。つまり、従来水と考えられていたものは、単純な水ではなく、大量の水を含んだ炭酸塩メルトである。炭酸塩メルトとケイ酸塩 (堆積物) メルトは混和しない。その結果、溶け合わない、水と堆積物メルトがそれぞれ別々にマンツルの部分融解をひきおこし、その結果として二種の初生マグマの生成がおこった。この考えを「Mission Immiscible (ミッション・イミッシブル)」と名付けている。

②沈み込み帯のマンツル (マンツルウエッジ) の部分融解度は最大40%にも達し、その解け残りはほぼ橄欖石のみからなるダナイトである。

③部分融解を起こしたマンツルウエッジ内に金雲母が残留している。この仮説を「Mission Invisible (ミッション・インビジブル)」と呼ぶ。

④マンツルで生じた初生マグマは、マグマ溜まりで分化すると必ず地殻物質を同化する。「Mission Inevitable (ミッション・イネビタブル)」。

沈み込み帯の初生マグマと大陸地殻の微量元素パターンにおける類似性はマンツルにおける金雲母の存在と両者の成因的近似性を示唆するものである。一方、初生マグマと大陸地殻の間には厳として大きな相違が存在する (図6)。

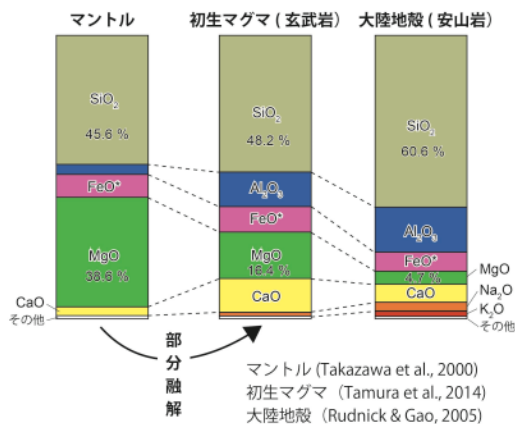


図6 マンツル、初生マグマ、大陸地殻の組成の比較

大陸地殻は、太陽系の惑星で、地球にだけ存在するユニークな物質である。大陸地殻の成因を明らかにするためには、マンツルで最初に行えるマグマ (初生マグマ) を明らかにする必要がある。その次に、初生マグマから、どのような過程で大陸地殻が生成するのかを明らかにする必要がある。本科学研究費ではマンツルで行える初生マグマについて大きな進展があった。今後は直接海洋島弧を掘削するプロジェクトを推進し、大深度掘削を実効

化し、海洋島弧において生まれたばかりの大陸地殻を採取し、大陸地殻の成因を明らかにしたいと考えている (下記プレス発表参照)。
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140324/

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- ① Robert W. Embley, Yoshihiko Tamura ほか Eruption of South Sarigan Seamount, Northern Mariana Islands: Insights into Hazards from Submarine Volcanic Eruptions, *Oceanography*, 査読有り, vol. 27, 18-25, 2014.
- ② Yoshihiko Tamura, Osamu Ishizuka ほか Mission Immiscible: Distinct subduction components generate two primary magmas at Pagan volcano, Mariana arc, *Journal of Petrology*, 査読有り, vol. 55, 63-101, 2014. doi:10.1093/petrology/egt061
- ③ Robert J. Stern, Yoshihiko Tamura ほか, Volcanoes of the Diamante cross-chain: evidence for a mid crustal felsic magma body beneath the southern Izu-Bonin-Mariana arc, *Geological Society of London Special Publication "Orogenic andesites and crustal growth"* 査読有り, in press, 2014.
- ④ 田村芳彦、巽好幸、プロジェクト IBM: 伊豆小笠原マリアナ (IBM) 掘削、号外地球、査読なし、64-65号合本、250-254、2014.
- ⑤ Yoshihiko Tamura, Cathy Busby and Peter Blum, Izu-Bonin-Mariana rear arc: the missing half of the subduction factory, *IODP Scientific Prospectus*, 査読なし, vol. 350, 1-64, 2013. Doi:10.2204/iodp.sp.350.2013
- ⑥ Robert J. Stern, Yoshihiko Tamura ほか. How the Mariana Volcanic Arc ends in the south. *Island Arc*, 査読有り, vol. 22, 133-148, 2013. Doi:10.1111/iar.12008
- ⑦ Nichols, A. R. L., Wysoczanski, R. J., Tani, K., Tamura, Y. ほか. Melt inclusions reveal geochemical cross-arc variations and diversity within magma chambers feeding the Higashi-Izu Monogenetic Volcano Field, Izu Peninsula, Japan. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 査読有り, vol. 13, 1-278, 2012. Doi:10.1029/2012GC004222
- ⑧ Zellmer, G. F., Iizuka, Y., Miyoshi, M., Tamura, Y., Tatsumi, Y. Lower crustal H₂O controls on the formation of

- adakitic melts. *Geology*, 査読有り, vol. 40, 487-490, 2012. Doi:10.1130/G32912
- ⑨ Tamura, Y., Ishizuka, O., Stern, R. J. ほか. Two primary basalt magma types from Northwest Rota-1 volcano, Mariana arc and its mantle diapir or mantle wedge plume. *Journal of Petrology* 査読有り, vol. 52, 1143-1183, 2011. Doi:10.1093/petrology/egr022
- ⑩ 田村芳彦, 伊豆弧衝突帯における大陸地殻形成, *地学雑誌*, 査読有り, vol. 120, 567-594, 2011.
- [学会発表] (計 17 件)
- ① Tamura, Y., ROV Hyper-Dolphin Survey at the May 2010 eruption site on South Sarigan Seamount, Mariana arc, AGU Fall Meeting 2013, 2013/12/11, Moscone Center San Francisco, USA.
- ② 田村芳彦, マリアナ弧調査 NT13-12 の概要とミッション・イミッシブル, 日本火山学会 2013 年秋季大会, 2013/09/30, 猪苗代町体験交流館「学びいな」福島県
- ③ Tamura, Y., (招待講演) Why we need ultra-deep drilling into IBM arc crust? Evolution of Oceanic Lithosphere and Formation of Marginal Seas- A Joint Symposium with the Chinese Geophysical Society/Marine Geophysics Special Section, 2013/09/13, 中国科学院南海海洋研究所, 広州、中国
- ④ Tamura, Y., (招待講演) Hot fingers and crustal evolution in the oceanic arc. Evolution of Oceanic Lithosphere and Formation of Marginal Seas- A Joint Symposium with the Chinese Geophysical Society/Marine Geophysics Special Section, 2013/09/11, 中国科学院南海海洋研究所, 広州、中国
- ⑤ 田村芳彦, (招待講演) IBM の岩石学と島弧進化と「安山岩問題」Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013/05/23, 幕張メッセ、千葉県
- ⑥ Tamura, Y. (招待講演) Mission Immiscible for two subduction components; evidence from Pagan Volcano, Mariana arc, VSMG annual meeting 2013, 2013/01/08, Bristol University, UK.
- ⑦ Tamura, Y. (招待講演) Ultra-deep drilling into arc crust, VSMG annual meeting 2013, 2013/01/08, Bristol University, UK.
- ⑧ Tamura, Y. (招待講演) Mission Immiscible: distinct subduction components generate two primary magmas of Pagan volcano, Mariana arc, AGU Fall Meeting 2012, 2012/12/07, Moscone

- center, San Francisco, USA.
- ⑨ Tamura, Y., Primitive submarine basalts and three primary magma types from Pagan, Mariana arc. 22nd V. M. Goldschmidt conference, 2012/06/28, Montreal, Canada.
- ⑩ Tamura, Y., Three primary magma types from Pagan volcano in the Mariana arc and implications for arc magma genesis. Uapan Geoscience Union Meeting 2012, 2012/05/21, Makuhari Messe, Chiba.
- ⑪ Tamura, Y., Primitive submarine basalts and magmatic variation of Pagan, Mariana arc, AGU 2011, 2011/12/06, San Francisco, USA.
- ⑫ 田村芳彦, マリアナ弧火山フロントに位置するパガン火山の未分化玄武岩マグマとその多様性, 日本火山学会 2011 年秋季大会, 2011/10/02, クリスタルホール、旭川市
- ⑬ Tamura, Y., Izu-Honshu collision, Penrose Conference, 2011/09/08, Urumqi, China.
- ⑭ Tamura, Y., Mantle diapir or mantle wedge plume of NW Rota-1 volcano, Mariana arc, Goldschmidt 2011, 2011/08/19, Prague, Czech Republic.
- ⑮ 田村芳彦, マントルの熱い指と島弧地殻の進化, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 2011/05/26, 幕張メッセ、千葉
- ⑯ 田村芳彦, 伊豆衝突帯における大陸地殻形成, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 2011/05/26, 幕張メッセ、千葉
- ⑰ 田村芳彦, マリアナ弧 NW Rota-1 火山のマグマと不均質なマントルダイアピル, Japan Geoscience Union Meeting 2011, 2011/05/25, 幕張メッセ、千葉

[その他]
ホームページ等

JST サイエンスニュース「地球の謎に挑む：初生マグマ採取に成功」
<https://www.youtube.com/watch?v=xnnYcNmOCBU>

地球情報館公開セミナー「初生マグマとはなんだ？」
http://www.jamstec.go.jp/j/pr/esm_sat_open/pdf/leaflet178.pdf

ジャムステックニュース・22号(子供ニュース)
https://www.jamstec.go.jp/j/kids/kabe/pdf/kabe_22.pdf

JAMSTEC ニュース
2014/06/12 西之島の不思議：大陸の出現か？
http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news

/20140612/

2013/11/25 西之島の新島出現について
http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20131125/

プレス発表

2011/05/18 一つの火山に二つの初生マグマの存在ー沈み込み帯のマグマ成因論に新たなモデルー
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20110518/

2013/11/07 海底火山から初生マグマを世界で初めて発見
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20131107/

2014/03/24 国際深海科学掘削計画 (IODP) 第 350、351、352 次研究航海の開始についてー島弧進化の総合的理解と大陸地殻成因の解明ー
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140324/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 芳彦 (TAMURA, Yoshihiko)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号：40293336

(2) 研究分担者

石塚 治 (ISHIZUKA, Osamu)
独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員
研究者番号：90356444

ニコルス アレキサンダー (NICHOLS, Alexander)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・研究員
研究者番号：00470120

木村 純一 (KIMURA, Jun-Ichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号：30241730