

平成 21 年 6 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2005 ～ 2008

課題番号：17340165

研究課題名 (和文) 伊豆小笠原マリアナ弧の海底カルデラと島弧地殻の進化・安山岩の成因

研究課題名 (英文) Submarine calderas of the Izu-Bonin-Mariana arc, crustal evolution and the genesis of andesites

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・地球内部変動研究センター・グループリーダー

研究者番号：40293336

研究成果の概要：海洋性島弧である伊豆小笠原マリアナ弧において大量の流紋岩マグマが噴出し、海底カルデラを形成する。大陸ではなく海洋でなぜこのようなことがおこるのか。この疑問に端を発した研究である。最終的に、海洋性島弧における流紋岩マグマが地殻の年代・地殻構造と密接な関わりを持っていることを示し、流紋岩マグマの成因と島弧地殻の進化に関する新しい仮説を提出して出版した。物質 (岩石学・地球化学) とイメージ (地球物理学) を組み合わせた当研究および関連研究はこの分野 (沈み込み帯の研究) における最先端のものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	8,600,000	0	8,600,000
2006 年度	2,900,000	0	2,900,000
2007 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	15,700,000	1,260,000	16,960,000

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：流紋岩、島弧地殻、火山、マントルウエッジ、マグマ、玄武岩、安山岩、中部地殻

1. 研究開始当初の背景

伊豆小笠原マリアナ弧は全長 2800 km に及ぶ典型的な海洋性島弧である。その海洋性島弧で第四紀に大量の流紋岩マグマが噴出していることが明らかになった (Tamura & Tatsumi (2002), *Journal of Petrology*: この論文は雑誌 (インパクトファクター 3.806) の web site で紹介されている 50 Most Frequently Cited Articles 中で 12 位には入っている)。大陸であれば流紋岩マグマの原料となる溶けやすい地殻 (花崗岩) が広く分布しているが、地殻がより未分化で溶けにくいと考えられる海洋性島弧でなぜ流紋岩マグ

マがそれほど噴出し、海底カルデラを生成するのか。なぜ流紋岩マグマが生じるのか。流紋岩マグマの原料はなにか。多様な手法を用いて、この問題の解決をめざした。また近年、地震波を用いた島弧地殻のイメージングやマントルトモグラフィーは著しく進歩し、地質、岩石、火山などの研究者に大きなインパクトを与えている。これらの地球物理学的観測の成果を取り入れ、岩石学と地震学の分野間の垣根を取り払ってマグマの成因、島弧地殻の進化を解明したいと強く感じていた。

2. 研究の目的

伊豆小笠原マリアナ弧は 5000 万年の歴史を持つ沈み込み帯である。全長は 2800km におよび、広大な背弧海盆（四国海盆、パレスベラ海盆、マリアナトラフ、西フィリピン海盆）をもち、九州パラオリッジはこれらの海盆によって分断された古島弧である。

(1)伊豆小笠原マリアナ弧の全域にわたって、かつ始新世から第四紀までの玄武岩から流紋岩にわたる多様な火山岩を採取し、分析する。それによってマグマの地域的変化、時系列による変化、発生時における多様性をとらえ、伊豆小笠原マリアナ弧の島弧地殻の進化とマグマの成因との関係を明らかにする。

(2)地震波を用いた島弧地殻・マンツルのイメージングは近年著しく進歩している。これらの地球物理学的観測と地質学、岩石学、地球化学的調査分析をカップリングさせ、分野にまたがる研究を行い、そこに新たなサイエンスのブレイクスルーを見いだしたい。

3. 研究の方法

(1)伊豆小笠原マリアナ弧において研究航海をおこない、海底地形の調査、ドレッジによる岩石の採取、および無人探査機による海底の探査、岩石の採取をおこなう。

(2)伊豆小笠原マリアナ弧形成初期(始新世)から中新世までの火山岩が分布するグアム、サイパン、ロタ、パラオ島の地質調査および岩石採取をおこなう。

(3)採取された岩石を XRF により全岩化学分析(主要元素、微量元素)、ICP-MS により微量元素分析、質量分析計により Sr, Nd, Pb, Hf の同位体分析をおこなう。

(4)偏光顕微鏡および画像解析システムにより火山岩中の斑晶鉱物を記載、観察し、EPMA による鉱物科学組成分析をおこなう。

(5)海洋研究開発機構がこれまでに採取して保管していた伊豆小笠原マリアナ弧の岩石を新たに分析して JAMSTEC の持つ GANSEKI データベースに登録する。

(6)新たに採取し分析した岩石、GANSEKI データベースで分析した岩石、および既に出版されている岩石データをすべてあわせて総合的なデータをつくる。これらのデータを岩石学的、地球化学的手法によって解析し、マグマの分化過程を解明する。さらに地球化学的データと地球物理学的観測で得られたデータ(地殻の厚さ、マンツルウエッジの速度異常など)を対比検討し、島弧地殻の進化を議論する。

4. 研究成果

代表的な成果 4 つを新しいものから述べる。

(1)伊豆小笠原マリアナ弧に噴出する流紋岩について広域的、かつ詳細な研究を行った(Tamura *et al.*, 2009)。その結果、「海洋性島

弧における大量の流紋岩マグマの生成」という、地球科学におけるミステリーのひとつの解明に大きな一歩を記したと考える。この成果は背景でも述べた Tamura & Tatsumi (2002) 論文の問題提起に対する解答であり、前論文が広く引用されていることをみても、本成果の国内外におけるインパクトは大きい。結論を簡潔に述べると、

①海底カルデラ(流紋岩主体の海底火山)は大島、三宅島、八丈島、青ヶ島、スミス、鳥島など火山島をもつ大きい火山に挟まれて出現する(図 1)が、海底カルデラから噴出する第四紀流紋岩マグマ(R1)と、火山島から噴出する第四紀流紋岩マグマ(R2)は系統的に組成が異なる。

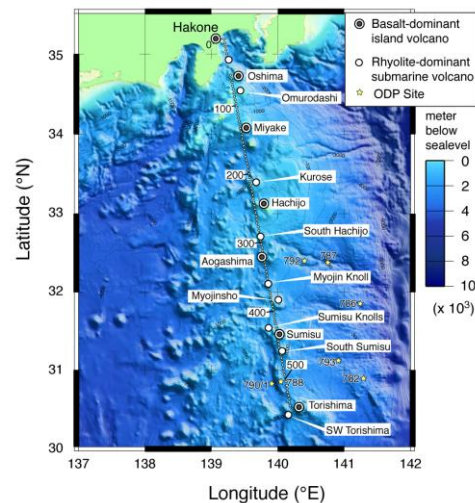


図 1 伊豆弧における第四紀火山の分布 (Tamura *et al.*, 2009)

②さらに地殻構造でも火山島は厚い中部地殻を持つものに対して海底カルデラの地下では中部地殻が異常に薄い(図 2)。

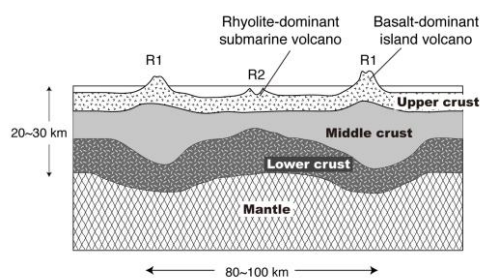


図 2 伊豆弧の火山フロントに沿った地殻構造の模式図。このような波状構造が連続する (Tamura *et al.*, 2009)

③火山島の流紋岩は共存する第四紀玄武岩・安山岩マグマと共通性を持つが、カルデラから噴出するマグマは第四紀玄武岩・安山岩とも共通性を持たない。

④一方、伊豆小笠原弧の古い火山岩(漸新世)とカルデラの流紋岩は主要元素、希土類元素のパターン、微量元素の比、Sr, Nd, Pb 同位体比がよく一致する。

⑤ によって火山島の流紋岩は第四紀の新しい地殻を溶かして噴出しているのに対し、海底カルデラの流紋岩は古い漸新世の地殻を溶かしたものである(図3)。
 ⑥ さらに海底カルデラの地下では古い地殻を消費しているため中部地殻が異常に薄くなっており、新しい地殻が形成されていない。また古い地殻を溶かす熱源は20-30km離れた火山島のマグマから供給されている(図3)。

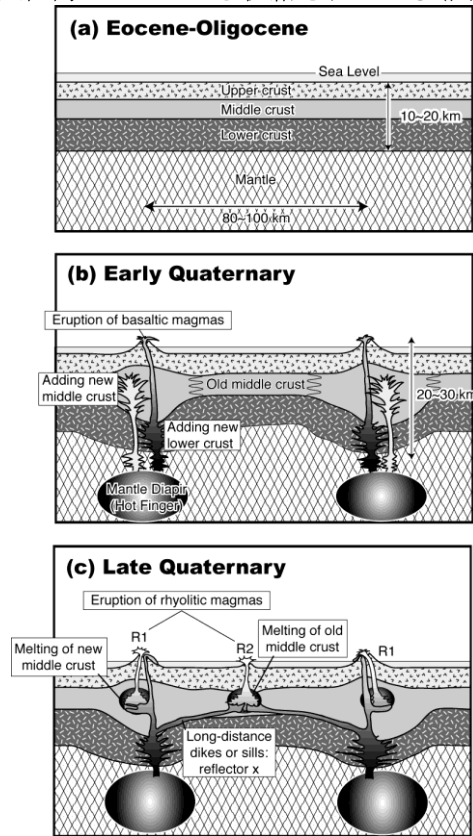


図3 伊豆弧における二種の流紋岩生成のモデル (Tamura *et al.*, 2009)。この構造が火山フロントに沿って南北に連続、繰り返される。

(2) 伊豆小笠原マリアナ弧は全長2800kmに及ぶ長大な沈み込み帯である。太平洋プレートがフィリピン海プレートに沈み込むことによりマントルウエッジ内に対流が生じ、高温のマントルが上昇することによって島弧マグマが生じると考えられている。しかし、マグマを生じる源であるマントル物質がどのように対流し、どのように移動しているのだろうか。Isse *et al.* (2009)はフィリピン海全域において新たに得られた地震波(S波)速度異常とこれまで得られていた島弧に沿った膨大な量の化学組成・同位体組成を対比、検討することによって全く新しい仮説を導いた。このような広域の地震波速度異常を示した前例はなく、また速度異常と化学組成の対応を検討した例もない。よって本研究は専門領域を越えたオリジナルで先駆的なものであり、国内外で高い評価を得るものである。

① 伊豆小笠原マリアナ弧のマントルウエッジには鳥島、硫黄島、アグリガン島のマントルに中心を持つ三つの大きな速度異常の固まり(目玉)が存在することがはじめて確認された(図4d)。

② その地震波速度異常の目玉と火山岩の同位体比(図4a, b, c)が良い相関を示す。よってそれぞれの速度異常の境界は同時にマントルの物質境界であり、伊豆小笠原マリアナ弧のマントルウエッジには大きく三つの高温のマントル物質が入り込み、島弧マグマを生成している。

③ 本研究は島弧マグマ生成と火山の分布にマントルの“熱い指”が関係しているという hot fingers 仮説 (Tamura *et al.*, 2002, *Earth and Planetary Science Letters*) の続編ともいえるべきものである。この解像度では hot fingers は分離して識別できないが、hot fingers を出す“熱い手のひら”がこの三つの目玉に対応していると考えられる。その手のひらが三つに分かれてマントルウエッジに入り込んでおり、さらに“手のひら”は物質的に異なるマントルであるという結果は斬新である。

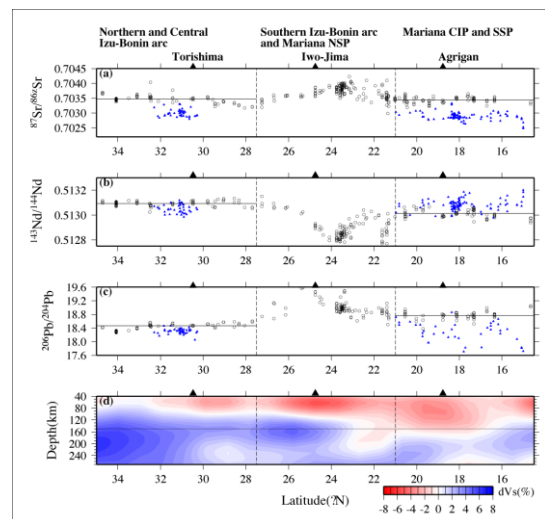


図4 伊豆小笠原マリアナ弧における島弧方向のSr, Nd, Pb 同位体比組成変化とS波速度プロファイル (Isse *et al.*, 2009)

(3) 沈み込み帯のマグマ、特に玄武岩マグマの成因に関する新しい知見を海洋研究開発機構の調査船によるドレッジ、有人潜水艇・無人潜水艇による地質調査とサンプル採取、火山島の地質調査、および採取された岩石を用いた詳細に岩石学的・地球化学的研究により見いだした (Tamura *et al.*, 2005; Tamura *et al.*, 2007)。伊豆小笠原弧の火山フロント上の100km離れた二つの火山、スミスと鳥島に関しておこなわれた調査である。スミスはカルデラを持ち、玄武岩および流紋岩のバイモーダルな火成活動を特徴とする。

一方鳥島はほとんど玄武岩からできた島であるが、海底においては流紋岩質の溶岩および軽石が採取された。両火山は研究成果の(1)で述べた玄武岩主体の火山に分類される。両火山においてこれまで島弧火山の玄武岩マグマにおいて知られていなかった新しい事実が判明した。

①一つの火山に微量元素や微量元素の比、斑晶組み合わせが異なる二種の玄武岩マグマが存在する。両者の同位体比には大きな差がないことからマンツルのマグマ源は同じであると考えられる。しかし、斑晶組み合わせと微量元素比が相関を示すことから二種のマグマの水の量が異なっており、水の多いマグマはマンツルの部分熔融度が高く、水の少ないマグマは部分熔融度が低いことが結論として提示された (Tamura *et al.*, 2005;2007)。
 ②さらに二種のマグマの元素を調べたところ、カリウムは二種の間で Zr や希土類元素と同じ挙動を示すが、K の挙動と Cs, Sr, Ba, Pb の挙動は異なることが判明した。後者の元素は沈み込むプレートから流体と共にマンツルウェッジに付加されると考られている。従来 K もこれらの元素と共にスラブ流体に入っていると考えられていた。しかし、本研究により K は火山フロントよりもより深部ではじめてマンツルに付加されること、そのためには沈み込むスラブにフェンジャイトという含水鉱物が安定に存在する必要があることを示した (Tamura *et al.*, 2007)。一つの火山の地表のマグマを詳細に研究することにより、地下 100km に存在するプレートの中の含水鉱物の有無にまで言及できるという研究は他に例がない。

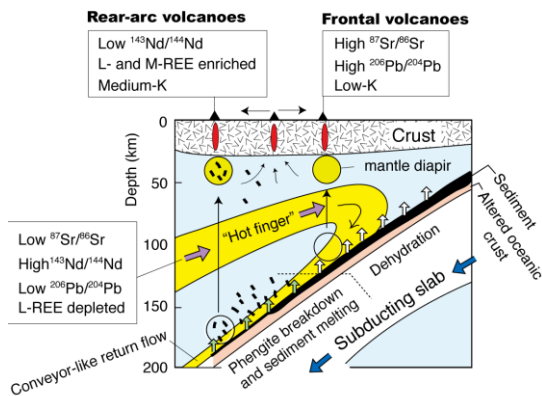


図5 伊豆小笠原島弧のマンツルウェッジの断面。マグマ源のマンツルダイアピルとホットフィンガーの関係 (Tamura *et al.*, 2007)

(4) スミスカルデラにおける流紋岩マグマとパイモダル火成活動の成因 (Shukuno *et al.*, 2006)。
 本論文は Tatsumi & Tamura (2002) で提示された海洋性島弧における流紋岩の成因モデルを実際の火山 (スミスカルデラ) を徹底的

に調査することによって検証しようとしたものである。さらに伊豆弧の中部地殻と見なされている丹沢岩体の高温高压における融解実験をおこない、スミスカルデラにおける流紋岩の生成を探った。この論文は中部地殻におけるプロトリス (固結/半固結した安山岩体) の再溶融が流紋岩の生成に重要であることを強調し、西南日本の大山火山のマグマと伊豆弧における流紋岩マグマの共通性を見いだしている。前述した Tamura *et al.* (2009) はこのプロトリスが伊豆弧において二種類あるというのが結論である。よって本論文は Tamura *et al.* (2009) のベースの一つとなった。

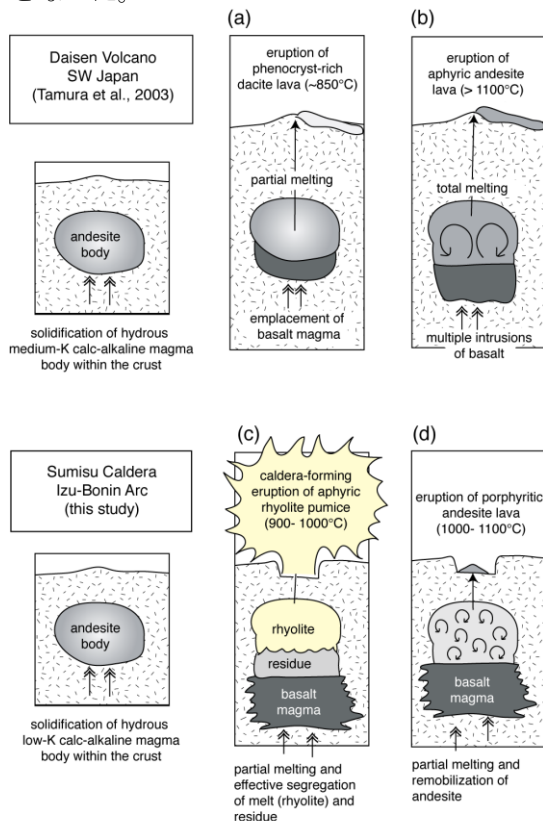


図6 西南日本弧大山火山と伊豆小笠原弧スミスカルデラにおける珪長質マグマの成因の比較 (Shukuno *et al.*, 2006)

(5) マリアナ弧における海底噴火の直接観察 (Embley *et al.*, 2006)。
 本論文はプレス発表もされ、テレビなどでもいくつか紹介された。われわれの 2005 年のマリアナ調査において無人探査機が水深 500m において海底噴火を観察し、映像におさめた。水圧のおかげで爆発的な噴火を至近距離で詳細に観察することに成功した。日本の陸上の地質 (たとえば伊豆半島) をみると海底噴火による堆積物と考えられる地層が多数みられる。しかし、実際にどのような場においてそのような地層が形成されたかを知る術はなかった。海底噴火の実際の場合は映像的

にも非常に興味深いものであり、今後さらに教育・研究の面で活用していきたいと思っている。本科研費による岩石学的、地球化学的研究は現在論文執筆中である。



図7 マリアナ弧 NW Rota-1 火山の海底噴火

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 12 件)

- ① Tamura, Y., Gill, J. B., Tollstrup, D., Kawabata, H., Shukuno, H., Chang, Q., Miyazaki, T., Takahashi, T., Hirahara, Y., Kodaira, S., Ishizuka, O., Suzuki, T., Kido, Y., Fiske, R. S. & Tatsumi, Y. (2009). Silicic magmas in the Izu-Bonin oceanic arc and implications for crustal evolution. *Journal of Petrology* **50**, 685-723. (査読有)
- ② Isse, T., Shiobara, H., Tamura, Y., Suetsugu, D., Yoshizawa, K., Sugioka, H., Ito, A., Kanazawa, T., Shinohara, M., Mochizuki, K., Araki, E., Nakahigashi, K., Kawakatsu, H., Shito, A., Fukao, Y., Ishizuka, O. & Gill, J. B. (2009). Seismic structure of the upper mantle beneath the Philippine Sea from seafloor and land observation: Implications for mantle convection and magma genesis in the Izu-Bonin-Mariana subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters* **278**, 107-119. (査読有)
- ③ Fujiwara, T., Kido, Y., Tamura, Y. & Ishizuka, O. (2009). Gravity and magnetic constraints on the crustal structure and evolution of the Horeki seamount in the Izu-Ogasawara (Bonin) arc. *Earth Planets Space* **61**, 333-343. (査読有)
- ④ Tani, K., Fiske, R. S., Tamura, Y., Kido, Y., Naka, J., Shukuno, H. & Takeuchi, R. (2008). Sumisu volcano, Izu-Bonin arc, Japan: site of a silicic caldera-forming eruption from a small open-ocean island. *Bulletin of Volcanology* **70**, 547-562. (査読有)
- ⑤ Stern, R. J., Tamura, Y., Embley, R. W., Ishizuka, O., Merle, S. G., Basu, N. K., Kawabata, H. & Bloomer, S. H. (2008). Evolution of West Rota volcano, an extinct submarine volcano in the southern Mariana arc: Evidence from sea floor morphology, remotely operated vehicle observations and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological studies. *Island Arc* **17**, 70-89. (査読有)
- ⑥ Tamura, Y., Tani, K., Chang, Q., Shukuno, H., Kawabata, H., Ishizuka, O. & Fiske, R. S. (2007). Wet and Dry Basalt Magma Evolution at Torishima Volcano, Izu-Bonin Arc, Japan: the Possible Role of Phengite in the Downgoing Slab. *Journal of Petrology* **48**, 1999-2031. (査読有)
- ⑦ Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Miura, S., Tamura, Y., Tatsumi, Y., Kaneda, Y. (2007). New seismological constraints on growth of continental crust in the Izu-Bonin intra-oceanic arc. *Geology* **35**, 1021-1034. (査読有)
- ⑧ Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Ito, A., Tamura, Y., Tatsumi, Y. & Kaneda, Y. (2007). Seismological evidence for variable growth of crust along the Izu intraoceanic arc. *Journal of Geophysical Research* **112**, doi:10.1029/2006JB004593. (査読有)
- ⑨ Tamura, Y. & Wysoczanski, R. (2006). Silicic volcanism and crustal evolution in oceanic arcs: introduction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **156**, v-vii. (査読有)
- ⑩ Shukuno, H., Tamura, Y., Tani, K., Chang, Q., Suzuki, T. & Fiske, R. S. (2006). Origin of silicic magmas and the compositional gap at Sumisu submarine caldera, Izu-Bonin arc, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **156**, 187-216. (査読有)
- ⑪ Embley, R. W., Chadwick, Jr., W. W., Baker, E. T., Butterfield, D. A., Resing, J. A., de Ronde, C. E. J., Tunnicliffe, V., Lupton, J. E., Juniper, S. K., Rubin, K. H., Stern, R. J., Lebon, G. T., Nakamura, K., Merle, S. G., Hein, J. R., Wiens, D. A., & Tamura, Y. (2006). Long-term eruptive activity at a submarine arc volcano. *Nature* **441**, 494-497. (査読有)
- ⑫ Tamura, Y., Tani, K., Ishizuka, O., Chang, Q., Shukuno, H. & Fiske, R. S. (2005). Are arc basalts dry, wet, or both? Evidence from the Sumisu caldera volcano, Izu-Bonin arc, Japan. *Journal*

of Petrology **46**, 1769-1803. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Yoshihiko Tamura, Oligocene IBM, Japan Geoscience Union Meeting, 2009 年 5 月 18 日、幕張メッセ国際会議場 (international session、英語で発表)
- ② Yoshihiko Tamura, Silicic magmas in the Izu-Bonin oceanic arc and implications for crustal evolution, AGU Fall Meeting, 2008 年 12 月 17 日, San Francisco Moscone Center.
- ③ 田村 芳彦、マリアナ弧 NW Rota-1 火山の安山岩マグマ、日本鉱物科学会、2008 年 9 月 20 日、秋田大学
- ④ Yoshihiko Tamura, Primary andesite melts; new insight from NW Rota-1 volcano, Goldschmidt 2008, 2008 年 7 月 15 日、バンクーバー・ブリティッシュコロンビア大学
- ⑤ Yoshihiko Tamura, Silicic magmas in the Izu-Bonin oceanic arc and implications for crustal evolution, Goldschmidt 2007, 2007 年 8 月 22 日、ドイツ・ケルン大学
- ⑥ Yoshihiko Tamura, Along-arc chemical variations in rhyolitic magmas in the Izu-Bonin oceanic arc, Subduction Zones Geodynamics Conference, 2007 年 6 月 5 日、フランス・モンペリエ
- ⑦ 田村 芳彦、島弧マグマの起源とバリエーション、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、2007 年 5 月 24 日、幕張メッセ国際会議場
- ⑧ Yoshihiko Tamura, Co-existing wet and dry basaltic magmas at Torishima volcano, 100 km south of Sumisu caldera, Izu-Bonin arc; Implications for arc magma genesis and crustal evolution, AGU Fall Meeting, 2005 年 12 月 6 日, San Francisco Moscone Center.

[図書] (計 2 件)

- ① Connor, C (eds), Cambridge University Press, Volcanic and Tectonic hazard Assessment for Nuclear Facilities, 2009, in press.
- ② 阪口 秀(編)、東京大学出版会、階層構造の科学、2008 年、227 ページ (132-166)

[その他]

ホームページ等

http://www.jamstec.go.jp/ifree/jp/04member/2-1-001_tamura.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 芳彦 (TAMURA YOSHIHIKO)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・グループリーダー
研究者番号：40293336

(2) 研究分担者

石塚 治 (ISHIZUKA OSAMU)
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員
研究者番号：90356444
宿野 浩司 (SHUKUNO HIROSHI)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究主任
研究者番号：50359204
常 青 (Chang Qing)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究主任
研究者番号：30359195
川畑 博 (KAWABATA HIROSHI)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任
研究者番号：90392943
谷 健一郎 (TANI KENICHIRO)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任
研究者番号：70359206

(3) 連携研究者

宿野 浩司 (SHUKUNO HIROSHI) (2008 年度)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究主任
研究者番号：50359204
常 青 (CHANG QING) (2008 年度)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究主任
研究者番号：30359195
川畑 博 (KAWABATA HIROSHI) (2008 年度)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任
研究者番号：90392943
谷 健一郎 (TANI KENICHIRO) (2008 年度)
海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任
研究者番号：70359206