

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23740398

研究課題名(和文) 背弧域上部マントルの熱物質循環過程の解明

研究課題名(英文) Thermal and material recycling process in the upper mantle beneath off-arc region

研究代表者

柵山 徹也 (Sakuyama, Tetsuya)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80553081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込んだ海洋プレートがどの程度背弧側の上部マントルまで熱・物質的影響を及ぼしているのかを明らかにするために、ユーラシア大陸東縁部超背弧域に位置する中国・韓国に噴出した約40火山からサンプリングを行い、新生代プレート内火山の岩石学的・地球化学的検討を行った。その結果、沈み込み時に脱水した海洋地殻の融解と沈み込んだ堆積物に由来する流体の寄与による上部マントルかんらん岩の融解がそれぞれ2つの端成分的マグマの成因に寄与していることを示すことに初めて成功した。このことは沈み込むスラブの影響はマントル遷移層付近にまで及んでいる可能性を強く示唆する。

研究成果の概要(英文)：Stagnation of the subducted Pacific slab in the mantle transition zone beneath eastern China has been imaged by seismic tomography. Late Cenozoic basaltic volcanoes lying above the stagnant slab, are distributed throughout eastern China. These basalts are rich in alkaline and incompatible trace elements that are typically associated with oceanic island basalts (OIBs). Such geochemical similarities between the basalts in eastern Asia and typical OIBs have led some researchers to conclude that the Chinese basalts originated from the upwelling of mantle, independent of a stagnant slab. According to the results of high-pressure experiments, melting of the stagnant slab could occur if the slab contains adequate amounts of H₂O or CO₂. In this study, we presented geochemical and petrological evidence that melts from the igneous layers in the stagnant Pacific plate slab have contributed to the source composition of basalts erupted in eastern China.

研究分野：マグマ学

キーワード：アルカリ玄武岩 プレート内火山 スタグナントスラブ ユーラシア大陸東縁部 海洋地殻 堆積物
マントル遷移層 超背弧域

1. 研究開始当初の背景

1. 研究の学術的背景

全地球的にみてリソスフェア底部の熱流量の内 30% は未だに起源が不明である (Malamud & Turcotte, 1999)。彼らはその起源を、現在の地震学的手法では検出できない多数の小規模なマントル上昇流によるモデルを提案した。海洋プレート上に多数存在する小規模海山や大陸上単成 (もしくは複成) 火山活動はそのような小規模上昇流による可能性がある。そして特に大陸上小規模プレート内火山の多くは背弧域に分布する。しかし、小規模であることに加え、これまでの火山学の研究の中心は中央海嶺玄武岩、ホットスポット火山および沈み込み帯火山にあったことから、プレート内小規模火山の成因は未解明な点が多い。

背弧域は一般的に以下のような特徴を有する (e.g., Currie & Hyndman, 2006)。1) 高い地殻熱流量 (70mW/m²)、2) 上部マントル帯に広がる地震波低速度領域、3) クラトンに較べて明瞭に高い地温勾配 (かんらん岩ゼノリスによる制約)、4) 散発的・長期的かつ広域的な玄武岩火山活動。

これらのことは背弧域上部マントルに特有の熱物質輸送プロセスが存在する可能性を示唆している。しかし背弧域マントルにおいてどのような時間・空間スケールで何がどうやって輸送されているのかはほとんど明らかにされていなかった。

ユーラシア東縁部背弧域は上記の特徴を有する典型的な背弧域と言える。申請者はこれまでユーラシア東縁部背弧域玄武岩活動として九州北西部及び韓国の新生代玄武岩活動の研究を進めてきた。そこでは詳細な溶岩層序の確立と K-Ar 年代測定に基づき、岩石学的・地球化学的検討を行った。その結果、九州北西部や韓国の玄武岩活動が比較的高温の小規模マントル上昇流モデルによって最もうまく説明できることを示した。

しかし、このモデルが広範囲に大陸側火山にも適用可能かどうかは更なる検討が必要である。そのためには大陸側火山にも地球化学的データのみならず、斑晶組み合わせ、全岩・鉱物主要元素データおよびその試料に対応した年代値が必要である。しかし当該地域においてそのようなデータセットは殆ど無いのが現状であり、背弧域上部マントルの温度・組成 (揮発性成分含む) 構造およびその広域的時空変化すらいまだに未解明である。

沈み込んだ海洋プレートは、脱水・融解により島弧火山の生成に寄与した後、さらに沈み込み、やがてマントル遷移層に停滞する。一方、停滞スラブ上の上部マントルには地震波低速度・高電気伝導度領域が広がり、マントル捕獲岩によりリソスフェアは高温である。そこで、海溝から 2000km 以上の内陸部においても、停滞スラブからの何らかの影響が及んでいると一部では考えられているが、地球化学的にスラブからの寄与を火山岩か

ら抽出した研究例はなかった。

2. 研究の目的

新生代火山活動の時間・空間変化に基づき、背弧域上部マントルにおける熱・物質循環プロセスを明らかにする。火山岩から岩石学的に推定したマントルの温度と地球化学的情報から特定した起源物質の時間・空間的推移を本研究では明らかにし、表層テクトニクスやマントルの地震学的・地球物理学的 (熱伝導率や重力異常) 情報と対比することで、包括的な背弧域上部マントルダイナミクスの理解を目指す。具体的には、海溝から約 2000km 西部に位置する中国東部・山東半島の新生代玄武岩の主要元素、微量元素、同位体元素組成とコンパイルデータに基づいて、内陸部のプレート内火山の成因と、それに対する沈み込んだプレート物質 (海洋地殻や堆積物等) の寄与の有無を明らかにする。

3. 研究の方法

現地調査・サンプリング

2010年3月11日 2010年3月20日
2010年12月1日 2010年12月14日
2012年6月26日 2012年7月8日
の合計3回、現地調査・サンプリングのために中国へ渡航した。事前に文献で調べておいた合計40の火山を北京大学 Wei Tian 教授、その他の共同研究者らとともに自動車で廻り、ハンマーを用いて新鮮な溶岩岩石を採取してきた。また本研究計画が開始する以前に採取してあった、朝鮮半島・Chugaryeong 火山溶岩および北西九州・北松浦玄武岩も中国の火山と比較するために研究対象とした。

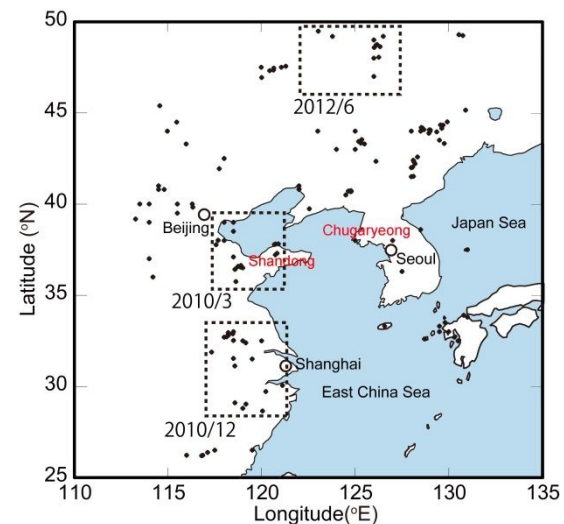


図1 サンプリング地域と新生代火山の分布 (黒丸)

偏光顕微鏡・電子顕微鏡による岩石薄片観察

3回のサンプリングで採取した合計156試料全てに対して、岩石薄片の作成を行い、偏光顕微鏡・電子顕微鏡を用いて溶岩組織の観察、斑晶組み合わせの特定、斑晶モード組成の推定等を行った。

岩石粉末に対する各種分析
 3回のサンプリングで採取した合計 156 試料全てに対して、タングステン乳鉢及びアルミナバイブレーションミルを用いて岩石粉末の作成を行った。岩石粉末に対して、蛍光 X線分析装置(XRF: RIGAKU® Simaltics 3550 & Rix 3000)を用いて全岩主要・微量元素組成、電子線マイクロプローブ分析装置(EPMA: JEOL JXA-8800 and -8900)を用いて鉱物主要元素、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS, VG Element® PQ3 system)を用いて全岩微量元素、表面電離型質量分析装置(TIMs: Thermo-Finnigan® Triton TI)を用いて全岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位体比の測定を行った。

4. 研究成果

中国・山東半島玄武岩

山東半島では新第三紀後期から第四紀にかけて、アルカリ玄武岩を主体とする火山が散発的に噴出した。その中でも、特徴的に Pb の含有量が少なく、始源的マントルで規格化した微量元素パターンが、Rb, Ba, Pb, Zr, Hf に負の異常(例えば Ce/Pb > 30)を有する玄武岩を新たに見出した(図2)。このようなパターンは、HIMU 同位体端成分的特徴を有する海洋島玄武岩(HIMU 玄武岩)の示すパターンに類似しており、沈み込んでから脱水を経験した中央海嶺玄武岩(MORB)が融解に寄与したこと、少量のカーボナタイト質マグマが関与したことを反映していると考えられる。

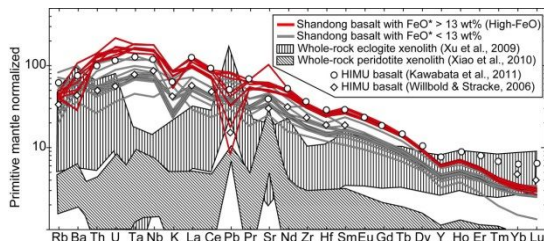


図2 山東玄武岩、地殻物質の微量元素パターン

一方、そのような山東半島の玄武岩岩石の放射性同位体(Sr-Nd-Pb)組成は HIMU 玄武岩のそれとは大きく異なり、DMM 的である。また Nd-Hf 同位体空間では Ce/Pb 比が大きくなるほど太平洋プレート MORB 組成へ近づくトレンドを示す(図3)。さらに、そのような大きな Ce/Pb 比を有する岩石は、SiO₂ (~41wt%) や Al₂O₃ (~10wt%) に乏しく、FeO* (~13.5wt%) や TiO₂ (~3wt%) に富むことから、苦鉄質岩石が融解に寄与したことが強く示唆される(図4)。

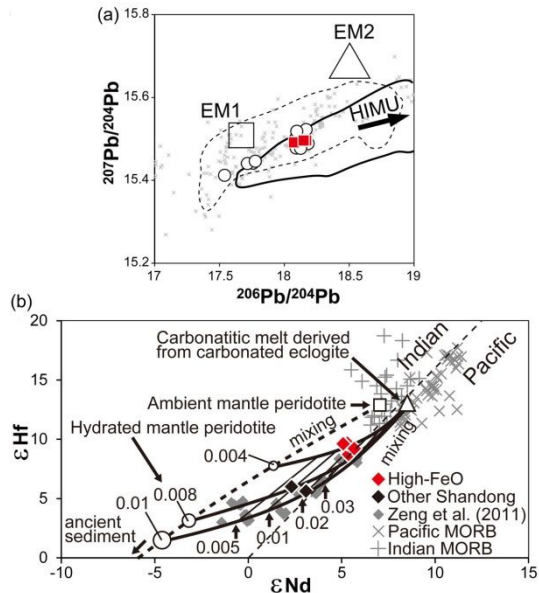


図3 山東玄武岩の(a) Pb 同位体比, (b) Nd-Hf 同位体

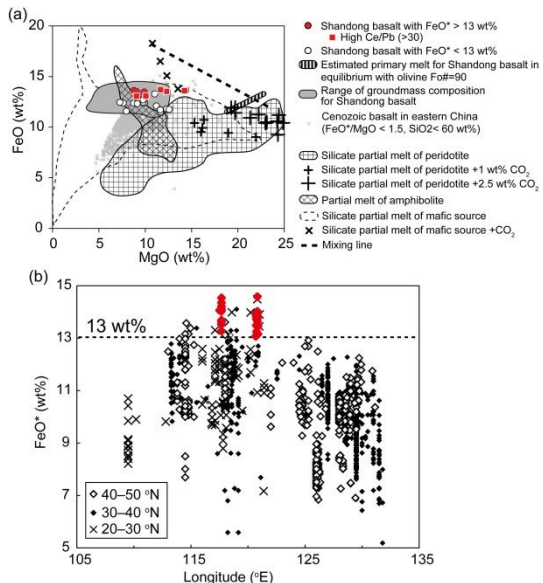


図4 (a) 山東玄武岩の MgO vs FeO 図, (b) ユーラシア大陸東縁部に産する玄武岩 FeO 含有量とその空間分布

上記のような岩石学的・地球化学的特徴を有する玄武岩は、山東半島のみならず、東経 119 ± 1 度、北緯 30 ± 5 度の南北に伸長して分布している。これは現在マントル遷移層に停滞している太平洋スラブの西端とよく一致する(図5)。

停滞スラブ上面の海洋地殻層は、沈み込み開始から時間とともに周囲のマントルにより温められる。よってその西端部分は最も周囲のマントルの温度に近いと考えられる。CO₂ 存在下でのエクログャイトソリダスは、平均的なマントル地温勾配とマントル遷移層付近で一致することが知られている。つまり、中国東部にみられる上記のような極端な化学組成の玄武岩とその空間分布は、スラブ上面の脱水した海洋地殻に少量の CO₂ が存在し、

それが融解したことに起因するというモデルでうまく説明できることを初めて示した(図6)

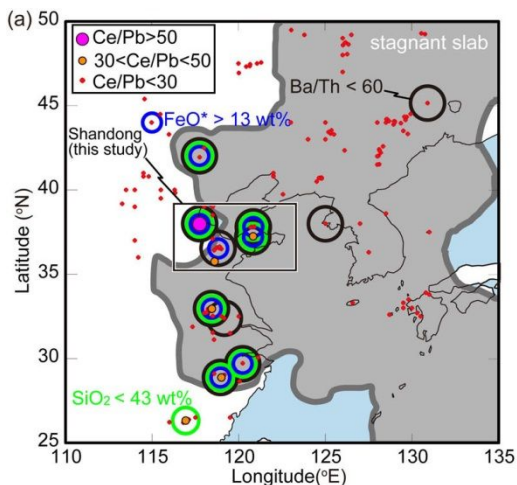


図5 ユーラシア大陸東縁部に産する玄武岩のCe/Pbとスタグナントスラブの分布

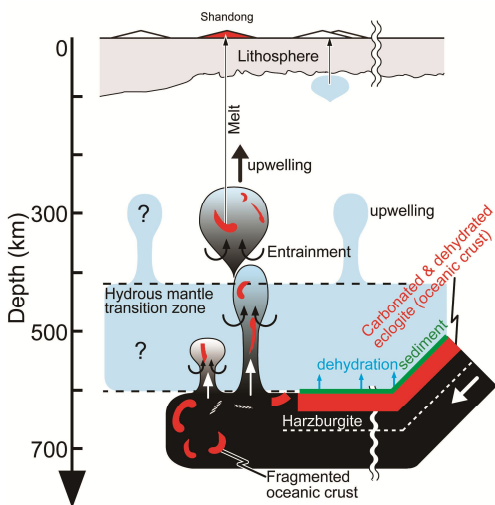


図6 ユーラシア大陸東縁部に産する玄武岩火山の成因モデル

朝鮮半島・Chugaryeong 火山玄武岩

Chugaryeong 火山は韓半島中心部、北朝鮮と韓国の国境付近に噴出源を有する第四紀アルカリ玄武岩火山である。火山活動は少なくとも2つのステージに分かれることが明らかにされており(長岡ほか 2008)、Chongok 溶岩は0.5Ma、Chatan 溶岩は0.15MaのK-Ar年代を示す(Ryu et al., 2011)。

両溶岩とも斑晶量は少なく(<~5 vol%)、ほぼかんらん石のみを斑晶として有する。Chongok 溶岩の斑晶かんらん石中スピネル包有物のCr#は系統的にChatan 溶岩のそれより低く、両溶岩ともFo# = ~90でかんらん石スピネルマントルアレイと交差する(図7)。

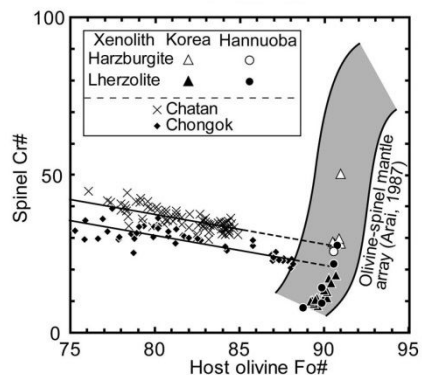


図7 かんらん石Mg#とスピネルCr#の関係

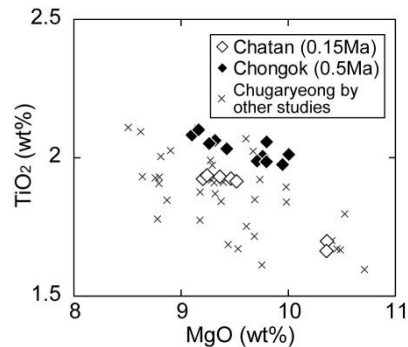


図8 Chongok 溶岩とChatan 溶岩のMgO量に対するTiO2量の関係。

全体の全岩化学組成幅は非常に小さく、共に未分化に近い全岩化学組成を有するが、両溶岩の間には系統的な違いがある。Chongok 溶岩はSiO₂ = 47.9-48.4 wt%, MgO = 9.0-10.0 wt%, K₂O = 1.9-2.1 wt%, Zr = 228-249 ppm、Chatan 溶岩はSiO₂ = 48.4-48.8 wt%, MgO = 9.2-10.4 wt%, K₂O = 1.5-1.9 wt%, Zr = 192-230 ppmでそれぞれ明瞭に異なる全岩化学トレンドを示す。Chongok 溶岩はかんらん石と少量の単斜輝石、Chatan 溶岩はかんらん石のみの結晶分別で再現可能であるが、互いの組成を結晶分別や地殻物質の混入で導くことは困難である。両トレンドの違いは親マグマの違いに加え、Chatan 溶岩が相対的に水に富み、単斜輝石の晶出が相対的に遅れることでこととうまく説明できる。

かんらん石最大分別を仮定して見積もった初生メルト組成は、含水条件下~2.9GPa、1420 °Cでかんらん岩と平衡になると見積もられる(図9)。

Chugaryeong 火山全体としては液相濃集微量元素に濃集したOIB的な微量元素パターンを示し、Chongok 溶岩は相対的にアルカリ元素、液相濃集微量元素含有量が高く、LILE/HREE, LREE/HREE, MREE/HREE比が高い。初生メルト組成は互いにほぼ平行な微量元素パターンを有するが、Chatan 溶岩はBaやPbといった流体に入りやすい元素に若干富み、Chatan 玄武岩の起源マントルが相対的に流体に富んでいたことを示唆する。

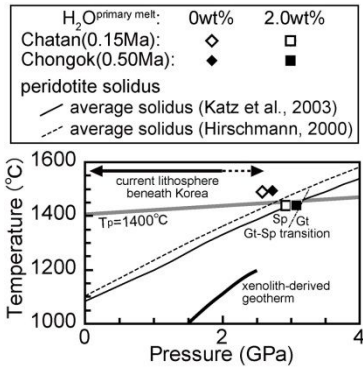


図9 推定した Chongok 溶岩と Chatan 溶岩の生成条件

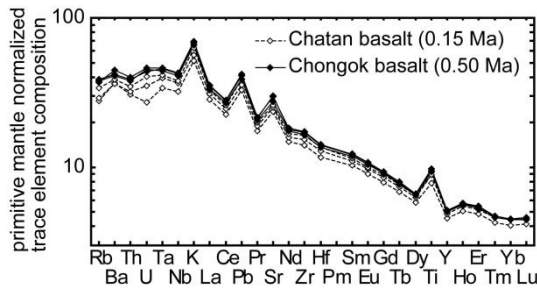


図10 Chugaryeong 火山玄武岩の微量元素パターン

Chugaryeong 火山全体では東北アジア・プレート内第四紀玄武岩火山の中で最も $\Delta 7/4$ 、 $\Delta 8/4$ が高く、EM1 端成分に近い同位体組成を有する。また Chatan 溶岩は相対的に $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ と $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ が低く、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ が高く、EM1 端成分に近い。東北アジアにおけるマンテル EM1 的端成分が古い (~1.5 Gyr) 沈み込んだ堆積物由来の流体に起因すると仮定すると (Kuritani et al., 2011) Chugaryeong 火山で見られる同位体組成変化は、沈み込んだスラブ上の堆積物から放出されてマンテル遷移層に滞留している流体の寄与が若い Chatan 溶岩ほど大きかったと解釈できる。

全岩主要・微量元素及び同位体組成、鉱物組成分析の結果、Chugaryeong 火山に噴出した2種類の玄武岩溶岩は、若い溶岩ほどスラブ堆積物由来の流体の寄与を強く受け、その結果マンテルの部分融解度が上昇することで生成されたマグマが、結晶分別を経て噴出したものと考えられる。さらに、Chugaryeong 火山の Ba/Th、Pb/U は、マンテル遷移層からの流体を含むマンテル上昇の中心と考えられる中国東北部 Changbaishan 火山に較べて小さいことから、Changbaishan 火山を中心とする同心円状の火山岩化学組成構造は韓半島中心部まで延長することができる。

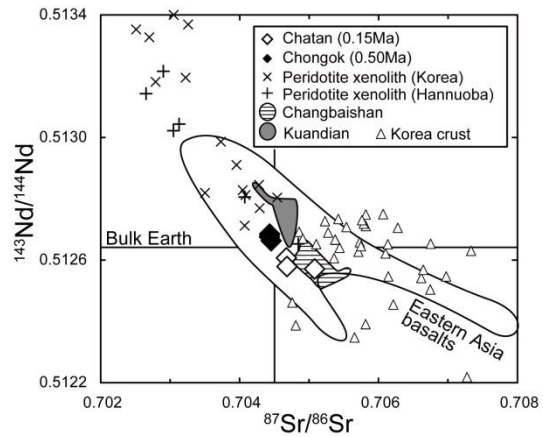


図11 Chugaryeong 火山玄武岩の Sr-Nd 同位体組成

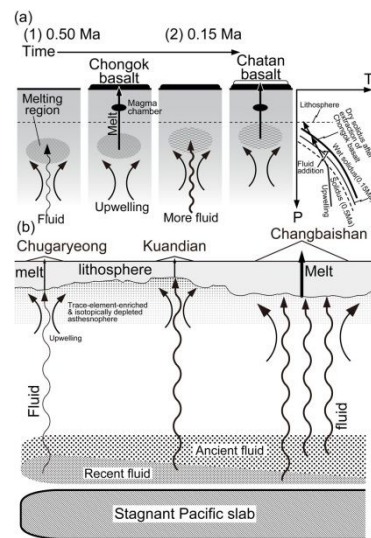


図12 Chugaryeong 火山マグマの生成モデル

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5件)

1. "Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China", Tetsuya Sakuyama, Wei Tian, Jun-Ichi Kimura, Yoshio Fukao, Yuka Hirahara, Toshiro Takahashi, Ryoko Senda, Qing Chang, Takashi Miyazaki, Masayuki Obayashi, Hiroshi Kawabata, and Yoshiyuki Tatsumi, *Chemical Geology*, 359, pp. 32-48, 2013 [査読有]

2. "Melting of the Uppermost Metasomatized Asthenosphere Triggered by Fluid Fluxing from Ancient Subducted Sediment: Constraints from the Quaternary Basalt Lavas at Chugaryeong Volcano, Korea", Tetsuya Sakuyama, Shinji

Nagaoka, Takashi Miyazaki, Qing Chang, Toshiro Takahashi, Yuka Hirahara, Ryoko Senda, Tetsumaru Itaya, Jun-Ichi Kimura, and Kazuhito Ozawa, *Journal of Petrology*, 55, pp.499-528, 2014 [査読有]

3. "Progressive interaction between dry and wet mantle during high temperature diapiric upwelling: constraints from Cenozoic Kita-Matsuura intraplate basalt province, northwestern Kyushu, Japan" Tetsuya Sakuyama, Shun'ichi Nakai, Masako Yoshikawa, Tomoyuki Shibata, and Kazuhito Ozawa, *Journal of Petrology*, 55, pp.1083-1128, 2014 [査読有]

4. 「ユーラシア大陸東縁部の新生代背弧域火山活動」柵山徹也, *岩石鉱物科学* (2013), vol 42, pp.68-82, 2013 [査読有]

5. "K-Ar ages of the Quaternary basalts in the Jeongok area, the central part of Korean Peninsula", Sunyoung Ryu, Miho Oka, Koshi Yagi, Tetsuya Sakuyama, Tetsumaru Itaya, *Geoscience Journal*, vol. 15, 1-8, 2011 [査読有]

[学会発表](計8件)

1. 「新生代東北アジア背弧域火山岩からみる上部マントル」柵山徹也、宮崎隆、常青、高橋俊郎、平原由香、仙田量子、田偉、木村純一、日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SVC051-02, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2011.5.22

2. 「停滞スラブのマントル遷移層における融解: 中国東部、山東半島玄武岩からの制約」柵山徹也、Wei Tian、木村純一、深尾良夫、平原由香、高橋俊郎、仙田量子、常青、宮崎隆、巽好幸、日本火山学会 2011 年度秋季大会, 旭川市大雪クリスタルホール(北海道旭川市), 2011.10.3

3. 「Melting of a stagnant slab in the mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China」Tetsuya Sakuyama, Wei Tian, Jun-Ichi Kimura, Yoshio Fukao, Yuka Hirahara, Toshiro Takahashi, Ryoko Senda, Qing Chang, Takashi Miyazaki, Masayuki Obayashi, Hiroshi Kawabata, and Yoshiyuki Tatsumi, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SGC055-09, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2012.5.23

4. 「スラブからの流体と背弧域におけるマントル融解: 韓国第四紀 Chugaryeong 火山からの地球化学的制約」柵山徹也、長岡信治、木村純一、平原由香、高橋俊郎、仙田量子、常青、宮崎隆、板谷徹丸、小澤一仁、日本火山学会 2012 年度秋季大会, エコールみよた(長野県北佐久郡御代田町), 2012.10.15

5. 「Cenozoic off-arc volcanisms and mantle dynamics in eastern margin of Eurasian continent」, Tetsuya Sakuyama, Jun-Ichi Kimura, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2013. 5.23(招待講演)

6. "Melting of the oceanic crust in the stagnant slab at the mantle transition zone: constraints from alkaline basalts in eastern China", Tetsuya Sakuyama, Wei Tian, Jun-Ichi Kimura, Yoshio Fukao, Yuka Hirahara, Toshiro Takahashi, Ryoko Senda, Qing Chang, Takashi Miyazaki, and Yoshiyuki Tatsumi, AGU Fall Meeting, 2011.12.9

7. "Melting of a stagnant slab in the mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China", Tetsuya Sakuyama, Wei Tian, Jun-Ichi Kimura, Yoshio Fukao, Yuka Hirahara, Toshiro Takahashi, Ryoko Senda, Qing Chang, Takashi Miyazaki, Masayuki Obayashi, Hiroshi Kawabata, and Yoshiyuki Tatsumi, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県), 2013. 7.21

8. "Volcanism above a stagnant slab: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China and Korea", Tetsuya Sakuyama, Jun-Ichi Kimura, Goldschmidt conference 2016, パシフィコ横浜(神奈川県), 2016.6.28

[その他]

Melting of the oceanic crust in stagnant slabs
<http://www.mantleplumes.org/StagnantSlabs.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柵山 徹也(大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授)

研究者番号: 80553081