

南部九州，肥薩火山岩類の親マグマと分化トレンド

永尾隆志*・長谷義隆**・長峰 智***・角縁 進****・阪口和之*****

Parental magmas and fractional crystallization trends of the Hisatsu volcanic rocks, southern Kyushu

Takashi Nagao*, Yoshitaka Hase**, Satoru Nagamine***, Susumu Kakubuchi**** and Kazuyuki Sakaguchi*****

1. はじめに

フィリピン海プレートの沈み込みに伴う島弧火山である霧島-桜島-開聞岳が活動する以前の後期中新世から前期更新世にかけて，南部九州全域で膨大な火山岩類が活動した。これらの火山岩類の分布域は，主に四万十層群からなる基盤岩を境に，北から肥薩，北薩，南薩の各地域（あるいは火山区）に“便宜的”に分けられており，筆者らや宇都ら¹⁾，阪口ら²⁾，宇佐見ら³⁾，横瀬ら⁴⁾によって精力的に研究が行われている。

筆者らは，南部九州の後期中新世から前期更新世の火山活動の典型例である熊本・鹿児島・宮崎の三県にまたがる肥薩火山区⁵⁾の火山岩類（肥薩火山岩類）について火山岩の分布，活動様式，マグマの成因を明らかにするために研究を続けてきた。

肥薩火山岩類の活動は，層序，岩相，年代値，活動様式（産状）などをもとに3つのステージに区分されている^{6), 7), 8)}。各ステージの活動時期は，ステージ1は7.6～2.5Ma，ステージ2は2.5～2.0Ma，ステージ3は2.0～0.4Maである。ここで問題にしている安山岩は，両輝石安山岩で，産状，肉眼的特徴の違いが，SiO₂-K₂O図に反映さ

れており，K₂Oに富むものを便宜的に“高K安山岩”，K₂Oに乏しいものを“低K安山岩”と呼んでいる^{9), 10)}。ステージ1では，西側で低K安山岩，東側で高K安山岩，ステージ2では，全域で高K安山岩，ステージ3では，西側で低K安山岩，東側で，高K安山岩が主体で，東端部で低K安山岩が活動した。つまり，低K安山岩は西側に，高K安山岩は東側に活動中心があった。

2. 肥薩火山岩類の化学組成

肥薩火山岩類の化学組成は，永尾ら¹¹⁾，角縁ら¹²⁾の方法で，山口大学機器分析センターに設置された理学電機工業株式会社製RIX3000（Rh/WデュアルX線管球）で管電圧50kV，管電流50mAでおこなった。なお，主成分元素，微量元素，希土類元素を，同じ低希釈率ガラスビードで測定する場合，測定時間は，1試料あたり36元素を約4時間で測定している。また，希土類元素の測定精度を上げるために，3回の測定値の平均値を採用している。補正は，ファンダメンタルパラメータ法を用いた理論マトリックス補正である。

すでに述べたように，肥薩火山岩類は，分布や産状，肉眼的な特徴をもとに“高K安山岩”と“低K安山岩”に区分されている。図1に，ステージ1の高K安山岩と低K安山岩，ステージ2の高K安山岩，ステージ3の低K安山岩と高K安山岩のSiO₂-K₂Oの関係を示した。図から明らかなように，ステージにかかわらず高K安山岩と低K安山岩は，異なった領域を占めている。Gill¹³⁾によるSiO₂とK₂Oに基づいた造山帯の安山岩の区

*機器分析センター Center of Instrumental Analysis

**熊本大学理学部 Faculty of Science, Kumamoto University

***県立水俣高等学校 Minamata High School

****佐賀大学文化教育学部 Faculty of Culture and Education, Saga University

*****アジア航測株式会社大阪支店 Osaka branch, Asia Air Survey Co., Ltd.

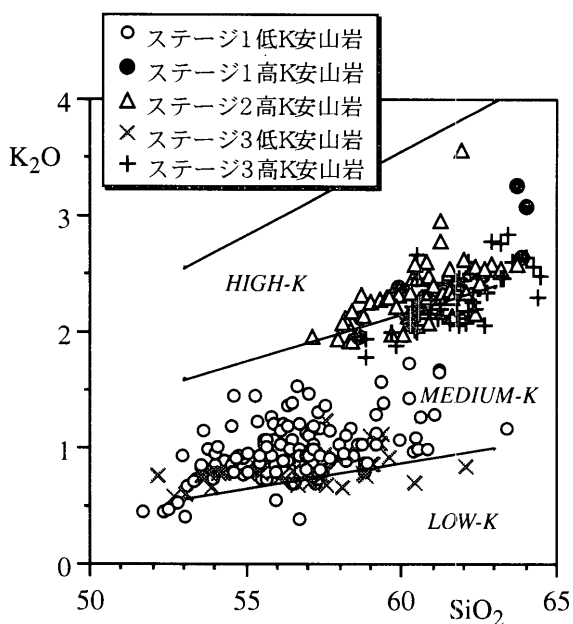


図1. 肥薩火山岩類の K_2O - SiO_2 図
区分の境界はGill¹³⁾による.

分によると、低K安山岩は、低Kと中Kの領域に、高K安山岩は、中Kと高Kの領域にオーバーラップしてプロットされる。

また、図2に、 FeO^*/MgO 比とコンパチブル元素であるNiとCrの含有量の関係をステージ毎に低K安山岩と高K安山岩に区別して示した。 FeO^*/MgO 比は分化の尺度として採用した。 SiO_2 を採用しなかったのは、一部の岩石（ソレライト質玄武岩）で、分化が進んでも SiO_2 が増加しない場合があったからである。図から明らかなように、

これらの元素は、典型的な分別結晶作用による組成変化経路をたどる。このことは、低K安山岩、高K安山岩にかかわらず肥薩火山岩類の組成変化をもたらした主要なプロセスは、分別結晶作用であることを示している。

3. 肥薩火山岩類の親マグマと分化トレンド

次に、 SiO_2 - FeO^*/MgO 図で、肥薩火山岩類の親マグマと分化トレンドについて検討した。図3に、肥薩火山岩類で認められる4つの分化トレンドを模式的に示した。従来、高K安山岩としていたものは、佐藤¹⁴⁾の高マグネシア安山岩（以下高Mg安山岩）系列とカルクアルカリ系列の境界線に沿って分化トレンドを形成する（分化トレンド1）。また、低K安山岩に一括して区分していたものには、3つの分化トレンドが認められた。すなわち、 FeO^*/MgO が1前後で SiO_2 が55wt.%から、 FeO^*/MgO の増加に伴って SiO_2 も増加するトレンド（分化トレンド2）、同じく FeO^*/MgO が1前後で SiO_2 50wt.%から、Miyashiro¹⁵⁾のカルクアルカリ系列とソレイト系列の境界に沿って分化するトレンド（分化トレンド3）、およびソレイト系列の領域の中で FeO^*/MgO が増加しても、 SiO_2 があまり増加しないトレンド（分化トレンド4）である。

分化トレンド1の最も未分化なものは、ステー

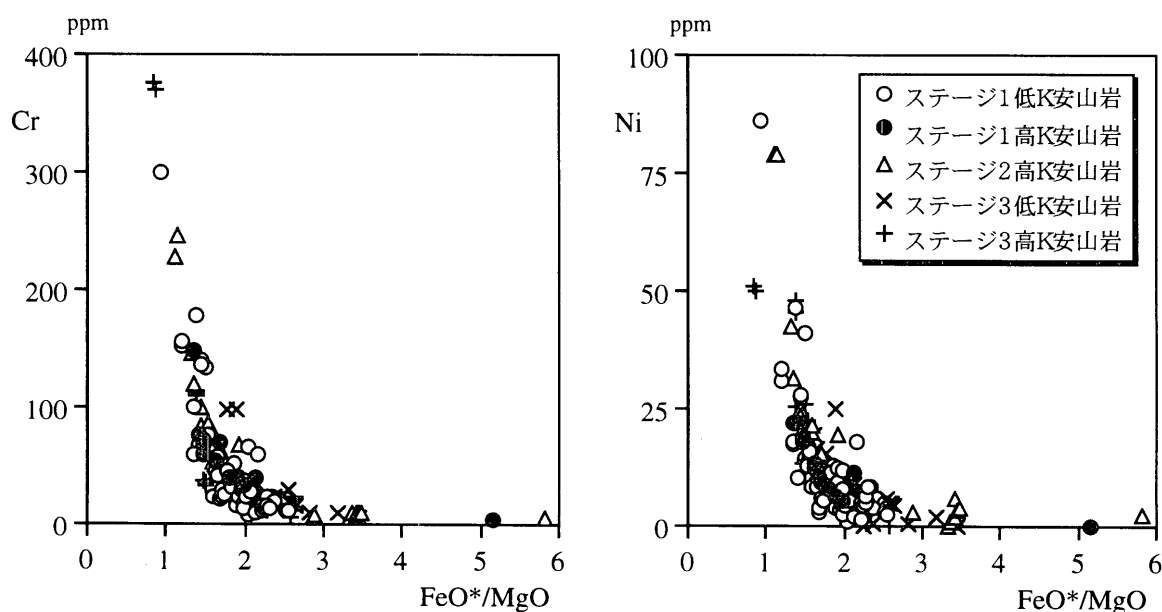


図2. 肥薩火山岩類のCr, Ni- FeO^*/MgO 図

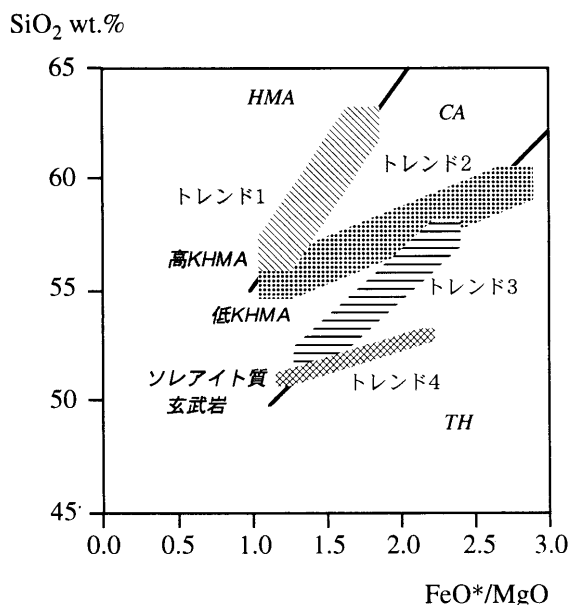


図3. 肥薩火山岩類の $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ 図
それぞれの分化トレンドの親マグマは、トレンド1, 高K高Mg安山岩；トレンド2, 低K高Mg安山岩；トレンド3と4, ソレイト質玄武岩。TH (ソレイト系列)とCA (カルクアルカリ系列)の境界はMiyashiro¹⁵⁾, CAとHMA (高Mg安山岩系列)の境界は、佐藤¹⁴⁾による。網の部分には白木ら²⁶⁾の瀬戸内高Mg安山岩とその分化物の範囲。

ジ2の鬼岳岩脈¹⁶⁾で、高Mg安山岩系列に属するやや分化した岩石である。鬼岳岩脈は、 SiO_2 57.22wt.%, MgO 6.15wt.%, K_2O 2.10wt.%, Ni 79ppm, FeO^*/MgO 1.12である。分化トレンド2に属する岩石は、ステージ1の大関山地域を構成する凝灰角礫岩に典型的に認められ、比較的未分化なものは久木野安山岩で、 SiO_2 55.80wt.%, MgO 6.33wt.%, K_2O 0.90wt.%, Ni 33ppm, FeO^*/MgO 1.21でマントルと共存できる初生マグマではないが、おそらく高Mg安山岩由来のものであろう。また、分化トレンド2に属するステージ1の馬出野安山岩岩脈も、 SiO_2 57.43wt.%, MgO 6.74wt.%, K_2O 1.01wt.%, Ni 86ppm, FeO^*/MgO 0.92で、久木野安山岩より未分化で、Shiraki¹⁷⁾の区分 ($\text{SiO}_2 > 53\text{wt.}\%$, $\text{MgO} > 6\text{wt.}\%$)によれば高Mg安山岩である。ここで分化トレンド2は分化トレンド1の親マグマである高Mg安山岩に比べて K_2O や他のインコンパチブル元素に乏しいことを考慮して、分化トレンド1の親マグマを高K高Mg安山岩、分化トレンド2

のそれを低K高Mg安山岩として区別する。

分化トレンド3を形成する岩石は、ステージ3の矢筈岩脈¹⁶⁾, 矢筈岳複合岩脈⁵⁾が代表的である。最も未分化な岩石は矢筈岩脈で、 SiO_2 52.18wt.%, MgO 6.44wt.%, K_2O 0.60wt.%, Ni 45ppm, FeO^*/MgO 1.38でやや分化している。この岩石は、Meschede¹⁸⁾の2Nb-Zr/4-Y区分図では、N-MORB (normal MORB)あるいはVAB (volcanic arc basalt)の領域に、Mullen¹⁹⁾の $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{P}_2\text{O}_5$ 区分図では、IAT (island arc tholeiite)の領域にプロットされ、島弧型のソレイト質玄武岩の特徴を有している。分化トレンド4は、ステージ1の大関山地域の凝灰角礫岩中の溶岩流に認められる。最も未分化なものは、大鋸ノ俣の玄武岩で、 SiO_2 50.96wt.%, MgO 6.22wt.%, K_2O 0.46wt.%, Ni 11ppm, FeO^*/MgO 1.42で初生マグマとしての要件はそなえていない。この岩石も、Meschede¹⁸⁾の区分図では、VAB, Mullen¹⁹⁾のそれでは、IATに属する。したがって、分化トレンド4は分化トレンド3の場合と同じように、ソレイト質玄武岩マグマからの分化によって導かれたものであろう。分化トレンド3と4の親マグマは、化学組成の特徴から判断すると同じソレイト質玄武岩マグマで、分化トレンドの違いは分別された結晶の種類と量の違い、おそらくマグマ溜りの物理的条件の違いに起因しているであろう。したがって、分化トレンド3と4の初生マグマは、ソレイト質玄武岩として一括する。

4. 肥薩火山岩類の親マグマの化学組成の特徴

上述のように、肥薩火山岩類には、3つの親マグマと4つの分化トレンド認められる。3つの親マグマの特徴を明らかにするために、各ステージの4つの分化トレンドの比較的未分化な岩石について、インコンパチブル元素のN-MORB規格化パターンと希土類元素のC1コンドライト規格化パターンを検討した(図4)。N-MORBの規格化には、Sun and McDonough²⁰⁾の値を、C1コンドライトの規格化にはAnders and Grevesse²¹⁾のC1コンドライトの平均値を用いた。なお、トレンド3と4については、親マグマが同じソレイト質玄武岩と考えられることから一括して扱っ

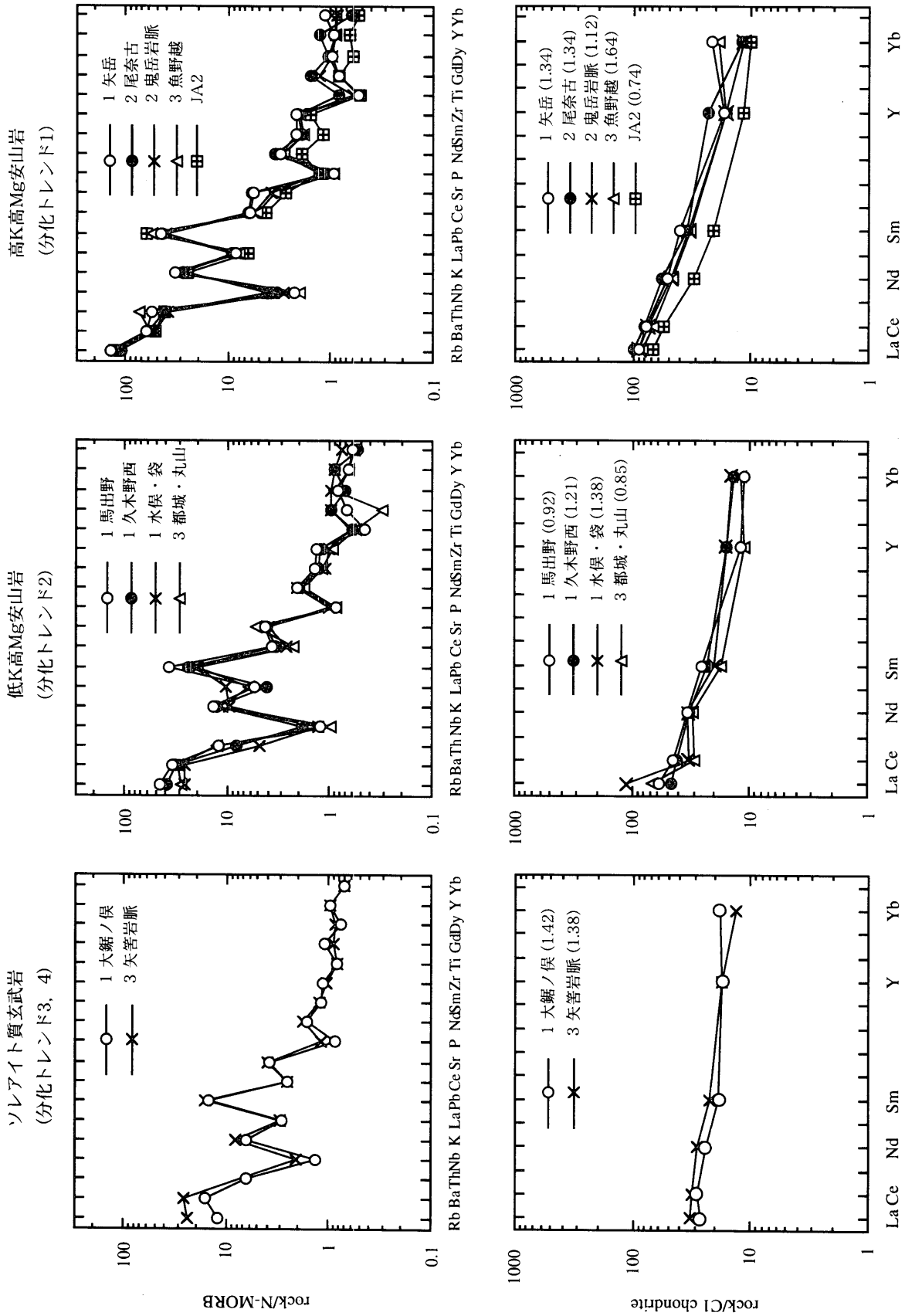


図4. 肥薩火山岩類のインコンパチブル元素のN-MORB規格化図と希土類元素のC1コンドライト規格化図
 サンプル名の前の数字はステージ区分, () 内の数字は FeO^*/MgO .

た。

N-MORB規格化パターンについて比較すると、規格化パターンは類似しているが、インコンパチビリティーの高い元素の濃度が、ソレイト質玄武岩、低K高Mg安山岩、高K高Mg安山岩の順に高くなる。ソレイト質玄武岩には、Tiの負の異常は認められないが、低K高Mg安山岩、高K高Mg安山岩には、負の異常が認められる。さらに、ソレイト質玄武岩、低K高Mg安山岩には、Ceの負の異常が認められるが、高K高Mg安山岩には認められない。島弧火山に特徴的に認められるNbの負の異常¹³⁾は、すべてのマグマタイプに認められる。また、Pよりもインコンパチビリティーの低い元素は、ソレイト質玄武岩では規格値がほぼ1で一定であるが、低K高Mg安山岩、高K高Mg安山岩では、規格値が1前後で変動している。また、従来、低K安山岩と一括して区分してきたソレイト質玄武岩（分化トレンド3、4）と低K高Mg安山岩（分化トレンド2）を比較すると、後者がK₂O, Ba, Ce, La, Pb, Rb, Thに富んでいる。また、分化トレンド3と4のソレイト質玄武岩を比較するとトレンド3のものがRb, Baに富んでいるが他の元素はほぼ同じ濃集度である。このことは、前述のように分化トレンド3と4の親マグマはほぼ同じ組成をもつソレイト質玄武岩であることを支持している。

次に、希土類元素のC1コンドライト規格化パターンについて見てみよう。ここでは、精度良く分析できるLa, Ce, Nd, Sm, Ybと広義の希土類元素に含まれるY^{22), 23)}を規格化図のHoの位置に置いて重希土類元素としての役割を担わせた。というのは、Hoのイオン半径は3価6配位で90.1pmで、Yのイオン半径は3価6配位で90.0pmであり極めて近い値を示している²⁴⁾。マグマ中での元素の挙動は、電荷とイオン半径によって決定されるので、HoとYはほぼ同じ挙動をするものと思われる。また、Hoよりもイオン半径の大きいDyは91.2pm、小さいErは89.0pmであるので、YをDyとErの間のHo代わりに置いて差し支えないと考えた。

ソレイト質玄武岩では、分化トレンドの異なるステージ1の大関山とステージ3の矢筈岳の玄

武岩は類似したフラットなパターンを示している。また、低K高Mg安山岩は、地域によってLaとCeの濃度は異なっているもののパターンそのものは類似しており、ソレイト質玄武岩に比べて、軽希土類元素に濃集しているため、やや急な傾斜を示している。また、図には示していないが、JA-2の規格化パターンは、低K高Mg安山岩、特に馬出野高Mg安山岩とよい一致を示している。高K高Mg安山岩は、低K高Mg安山岩よりもさらに軽希土類元素に富んでおり、より急な傾斜になっている。

これらの図で見る限り、それぞれの親マグマの化学的特徴は、ソレイト質玄武岩では、ステージ1と3、低K高Mg安山岩では、ステージ2と3、高K高Mg安山岩ではステージ2と3のように、活動したステージによって化学的特徴が大きく異なることはない。このことは、肥薩火山岩類は、活動継続時間が7.6Ma～0.4Maと長いにもかかわらず、同じ様なマグマ供給システム（マグマの起源物質やマグマの組成など）に支配されていたことを意味する。

ちなみに、肥薩火山岩類にみられる3タイプの希土類元素規格化パターンに類似したものは、現在の沈み込み帯の火山列であるインドネシアのスダ弧Flores-Lembataセクターで、低Kソレイト、中Kカルクアルカリ、高Kカルクアルカリタイプとしての認められており、最も背弧側にはベイサナイトも活動している。この地域は、火山列間の幅が非常に狭く、Stolz et al.²⁵⁾によれば、スダ弧下のマントルは、極めて不均質で、低Kソレイトは、沈み込み帯に由来する気相によって汚染された枯渇したMORBソースマントルの比較的大きな程度の部分融解によって、中Kと高Kカルクアルカリタイプは、MORBソースあるいはOIBソース、そして沈み込んだ海洋性堆積物に由来する液/気相の混合物に由来したと考えている。

引用文献

- 1) 宇都浩三, 阪口圭一, 内海 茂 (1997), 鹿児島県北薩地域の新第三紀-第四紀火山活動と火山構造成地溝の形成. 地球惑星科学関連学会講演要旨, 671.

- 2) 阪口圭一, 宇都浩三, 内海 茂 (1997), 北薩・霧島・始良地域の第三紀-第四紀火山活動. 日本地質学会第104年学術大会講演要旨, 362.
- 3) 宇佐美 賢, 新城竜一, 加藤祐三 (1998), 北薩地域の火成活動とマグマ組成の時空変化: slab bendingとの関係. 岩鉱学会講演会講演要旨, 10.
- 4) 横瀬久芳, 菊池 航, 長尾敬介, 小玉一人 (1998), 九州南西部矢筈岳火山岩類のK-Ar年代. 岩鉱, 93, 151-161.
- 5) 山本 敬 (1960), 肥薩火山区の火山地質学的並びに岩石学的研究. 九工大地質学研究室, 90p.
- 6) 長峰 智, 長谷義隆, 永尾隆志, 阪口和之 (1995), 南部九州肥薩火山区西部鬼岳およびその南西方地域の火山層序. 熊本大学教養部紀要, 30, 143-154.
- 7) 永尾隆志, 長谷義隆, 長峰 智, 角縁 進, 阪口和之 (1998a), 南部九州の鮮新世~更新世肥薩火山岩類の微量元素の特徴-マグマの成因に寄与する“堆積物成分”について-. 山口大学機器分析センター報告, 第6号, 25-39.
- 8) 永尾隆志, 長谷義隆, 長峰 智, 角縁 進, 阪口和之 (1998b), 南部九州肥薩火山岩類のマグマの成因に寄与した“堆積物成分”について-Rh/WデュアルX線管球を用いた低希釈ガラスビード法による岩石の主成分, 微量成分および希土類元素分析の例-. 理学電機ジャーナル, 29, 34-46.
- 9) 永尾隆志, 長谷義隆, 長峰 智, 山元正継, 阪口和之 (1992), 南部九州, 肥薩火山岩類の活動史と成因. 日本地質学会第99年学術大会講演要旨, 407.
- 10) 永尾隆志, 長谷義隆, 井川寿之, 長峰 智, 阪口和之, 山元正継, 周藤賢治, 林田賢一 (1995), 九州の平坦面を形成する安山岩の地質学的・岩石学的研究: “洪水安山岩”の提唱. 地質学論集, 44, 155-164.
- 11) 永尾隆志, 角縁 進, 白木敬一 (1997), 全自動蛍光X線分析装置(理学/RIX3000)による岩石中の主成分および微量元素組成の定量. 山口大学機器分析センター報告, 第5号, 10-15.
- 12) 角縁 進, 永尾隆志, 山田康治郎, 河野久征, 白木敬一 (1997), 低希釈率ガラス円板を用いた岩石中の希土類元素の定量. 山口大学機器分析センター報告, 第5号, 16-25.
- 13) Gill, J.(1981), Orogrnic andesites and plate tectonics, 390p, Springer-Verlag.
- 14) 佐藤博明 (1989), 高マグネシア安山岩類の生成環境に関する研究. 昭和63年度科学研究費補助金一般C研究成果報告書, 99p.
- 15) Miyashiro, A.(1974), Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. Am. Jour. Sci., 274, 321-55.
- 16) 永尾隆志, 阪口和之 (1989), 南部九州, 肥薩火山岩類の未分化マグマ. 白木敬一編 日本の高マグネシア安山岩, 67-73.
- 17) Shiraki, K.(1981), Boninite and sanukite. Recent Prog. Nat. Sci. Japan, 6, 84-88.
- 18) Meschede, M.(1986), A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chem. Geol., 56, 207-218.
- 19) Mullen, E.D.(1983), MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. Earth Planet. Sci. Lett., 62, 53-62.
- 20) Sun, S.S. and McDonough, W.F., (1989), Magmatism in the Ocean Basins, Saunders, A.D. and Norry, M.J. eds., Geol. Soc. Amer. Spec. Publ., 42, 313-345.
- 21) Anders, E. and Grevesse, N., (1989), Abundances of the elements: Meteoritic and solar. Geochim. Cosmochim. Acta, 53, 197-214.
- 22) 増田彰正 (1979), 希土類元素からみた火成岩の多様性. 241-264. 岩波講座 地球科学4 地球の物質科学-岩石鉱物の地球化学-(松井義人, 坂野昇平編), 294p, 岩波書店.
- 23) Mason, D. and Moore, C.B.(1982),

Principles of geochemistry. 4th edition.
John Wiley & Sons, 344p.

- 24) Shannon, R.D. (1976), Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Cryst.*, A32, 751-767.
- 25) Stolz, A.J., Varne, R., Vavies, G.R., Wheller, G.E. and Foden, J.D. (1990),

Magma source components in an arc-continent collision zone: the Flores-Lembata sector, Sunda arc, Indonesia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105, 585-601.

- 26) 白木敬一, 長尾憲治, 永尾隆志, 角縁進, 松本征夫 (1991), 瀬戸内海西部産瀬戸内火山岩の微量元素の特徴. *岩鉱*, 86, 459-472.