

周辺に分布するNbに富む安山岩（以下、杵築高Nb安山岩）は、両子火山の基盤岩の一部を構成する中新世の宇佐層²⁾中の溶岩である。杵築市周辺の宇佐層の放射年代は報告されていないが、沢井ほか³⁾によって杵築市北西の山香地域に分布する宇佐層相当層である山香火山岩類から6.45-5.17MaというK-Ar年代が報告されている。

Nbに富む安山岩は、黒色の斑状岩で、斜長石、輝石、角閃石の斑晶が散点している。鏡下では、斑状組織を示し、斑晶として自形～半自形の斜長石、自形の角閃石、自形～半自形の斜方輝石、やや小型の自形単斜輝石、自形のカンラン石からなる。斜長石は累帯構造が著しいのが特徴である。リム（最外殻ではない）が汚濁帯になっている結晶も稀に存在する。角閃石はほとんどオパサイト化しているが、小型結晶のコアが新鮮な場合があり、淡褐色～褐色の多色性を示す。長柱状の微斑晶も存在する。斜方輝石は淡緑色～淡赤褐色の多色性を示し、不透明鉱物を包有している。単斜輝石には、ラメラ双晶が発達するものもある。カンラン石は粘土化しているがスピネルを包有している。

石基はインターサータル組織を示し、短冊状の斜長石、単斜輝石、斜方輝石、不透明鉱物と少量のガラスから構成される。

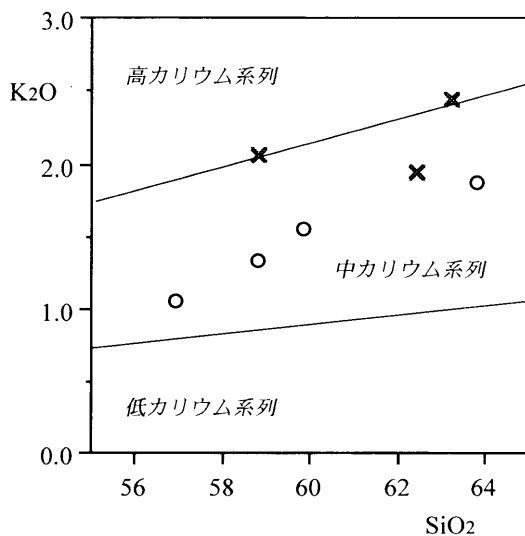


図2. SiO₂-K₂O図。
×は杵築高Nb安山岩で、○は周辺に分布するNbに乏しい安山岩である。各系列の境界線は巽⁵⁾による。

3. 化学組成の特徴

岩石の化学組成分析は機器分析センターの蛍光X線分析装置（理学電機株式会社製 RIX3000）を用いて角縁ほか⁴⁾の方法で行った。今回、分析したNbに富む3試料の安山岩は、SiO₂-K₂O図（図2）では、巽⁵⁾の中カリウム系列から中カリウム系列と高カリウム系列の境界付近にプロットされる。さらに、非アルカリ系列の中性～酸性火山岩については、Miyashiro⁶⁾のSiO₂-FeO*/MgO図で、カルクアルカリ系列とソレライト系列に区分されている。これに加えて、佐藤⁷⁾は、Miyashiro⁶⁾のSiO₂-FeO*/MgO図上で、第四紀の成層火山に産するカルクアルカリ安山岩の組成分布限界を高マグネシア安山岩とカルクアルカリ岩の境界であると考え区分線を引いた。この線を、巽⁵⁾の小笠原諸島の高Mg安山岩系列のSiO₂-FeO*/MgO図に描くと、小笠原諸島の高Mg安山岩系列の組成分布限界（特にSiO₂ 55-65wt.%の範囲）と一致した（図3）。このことは、佐藤⁷⁾の高マグネシア安山岩/カルクアルカリ安山岩境界に合理性があることを意味している。佐藤⁷⁾の高マグネシア安山岩/カルクアルカリ安山岩境界を引いたSiO₂-FeO*/MgO図（図4）に杵築高Nb安山岩をプロットすると高マグネシア安山岩の境界線あるいは高マグネシア安山岩の領域にプロットされる。また、最も未分化な岩石は、SiO₂ 58.06wt.%でFeO*/MgO

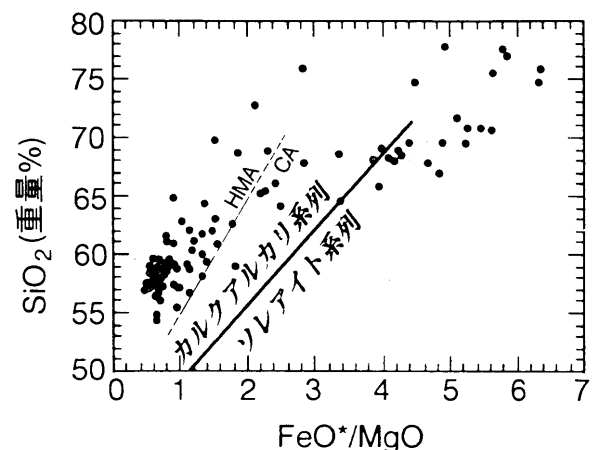


図3. SiO₂-FeO*/MgO図での高マグネシア安山岩の領域の検討。
巽⁴⁾の「図2.3 小笠原諸島の高マグネシア安山岩系列の化学組成」に佐藤⁷⁾の高マグネシア安山岩系列(HMA)/カルクアルカリ系列(CA)の境界を書き入れた。

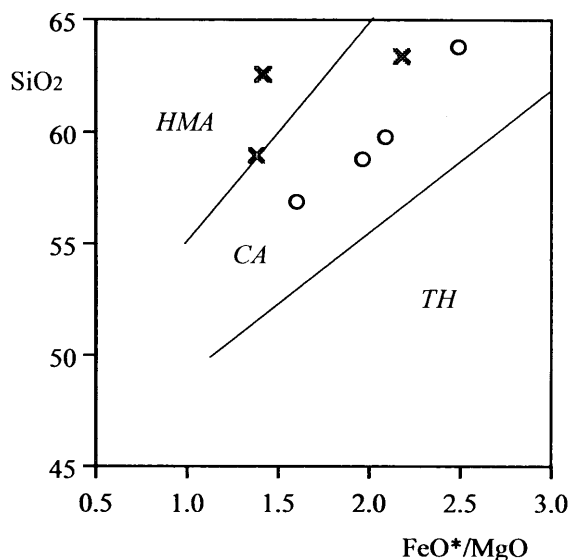


図4. SiO_2 - FeO^*/MgO 図。
 ×は杵築高Nb安山岩で、○は周辺に分布するNbに乏しい安山岩である。THはソレイト系列、CAはカルクアルカリ系列、HMAは高マグネシア安山岩系列を示す。ソレイト系列とカルクアルカリ系列の境界はMiyashiro⁶⁾、高マグネシア安山岩系列とカルクアルカリ系列の境界は佐藤⁷⁾による。

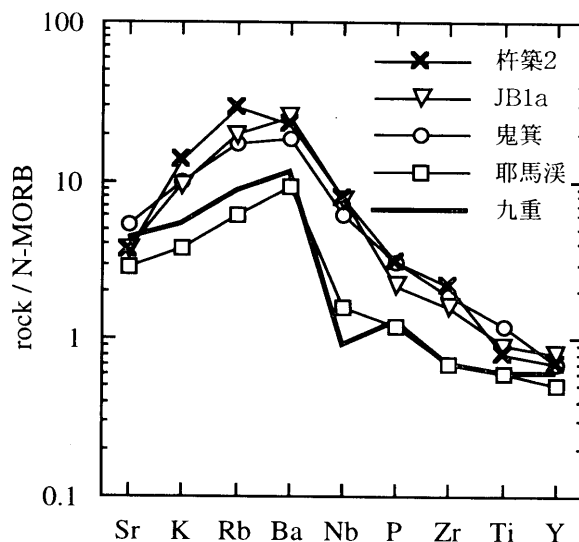


図5. Pearce¹⁾のN-MORB規格化図。
 杵築2は杵築高Nb安山岩、JB1aは北西九州のアルカリ玄武岩(海洋島型)¹⁷⁾、鬼箕は由布・鶴見火山群の鬼箕アルカリ玄武岩(海洋島型)、耶馬溪は、4.7Maの耶馬溪型玄武岩(海洋島型と島弧型の中間)⁸⁾、九重は2.2Maの九重型玄武岩(島弧型玄武岩)⁸⁾。杵築高Nb安山岩はJB-1aや鬼箕アルカリ玄武岩と類似したパターンを示すが、島弧型玄武岩である九重玄武岩とは異なったパターンを示す。

1.39, Ni 34.6ppm, Cr 100ppmであり、親マグマは高マグネシア安山岩である可能性が高い。また、Nbは27ppmで、Pearce¹⁾のN-MORB規格化図(図5)では、沈み込み帯の火山岩(島弧型)に特徴的なNbの負の異常は認められず、比較のために示した島弧型玄武岩である九重型玄武岩(2.2Ma)や島弧型と海洋島型玄武岩(あるいはプレート内玄武岩)の中間である耶馬溪型玄武岩(4.7Ma)⁸⁾とも異なったパターンを示している。ちなみに、耶馬溪型玄武岩は、九重型玄武岩に比べNbの負の異常の程度が小さい。

4. 議論

九州に産するNbに富み、Pearce¹⁾のN-MORB規格化図でNbの負の異常を示さない代表的な火山岩は、プレート内玄武岩(プレート内ソレイト、プレート内アルカリ玄武岩)である(図5)。杵築高Nb安山岩は、 TiO_2 、 K_2O 、Ba、Nb、Rb、Pb、Th、Zrや軽希土類元素などに富みプレート内アルカリ玄武岩と類似した化学的特徴を持っている。そこで、杵築高Nb安山岩とアルカリ玄武岩の類似点、相違点を明らかにするためSun and McDonough

⁹⁾のN-MORBの組成で規格化した図(図6)で両者を比較した。なお、規格化に使われるN-MORBの分析値は、Pearce¹⁾とSun and McDonough⁹⁾では少し異なり、Sun and McDonough⁹⁾の値で規格化すると日本の多くのアルカリ玄武岩はNbの負の異常を示すが、荒戸山ベイサナイトはNbの負の異常を示さない。図6から明らかのように、杵築高Nb安山岩は、北西九州のアルカリ玄武岩(JB-1a)、由布・鶴見火山と同じ時期に活動した¹⁰⁾鬼箕アルカリ玄武岩や中国山地の荒戸山ベイサナイトと類似したパターンを示している。このことは、杵築高Nb安山岩の成因にアルカリ玄武岩～ベイサナイトマグマあるいはマグマソースが何らかの役割を果たしていることを示唆している。ただし、杵築高Nb安山岩は、荒戸山ベイサナイトに比べNbやTiに乏しく、KやPbに富んでおり、JB-1aや鬼箕アルカリ玄武岩に比べるとThに乏しく、KやPbに富んでいる。杵築高Nb安山岩が、荒戸山ベイサナイトと異なる特徴を持つ元素は“沈み込み成分(subduction component)”と呼ばれるものである。以上のことから、杵築高Nb安山岩は、アルカリ玄武岩～ベイサナイトマ

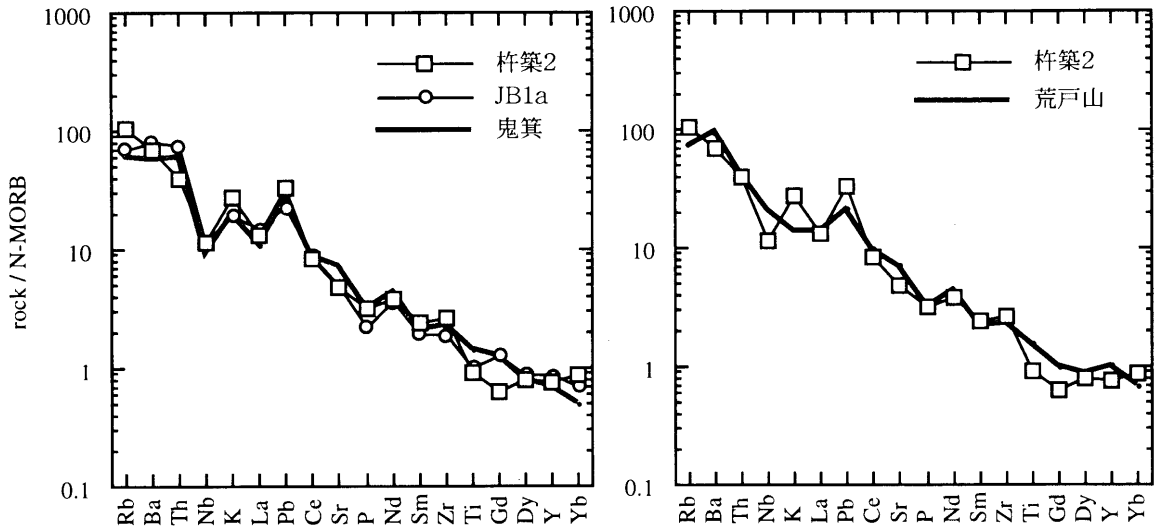


図6. Sun and McDonough⁹⁾のN-MORB規格化図。杵築2は杵築高Nb安山岩、JB1aは北西九州のアルカリ玄武岩¹⁷⁾、鬼箕は由布・鶴見火山群の鬼箕アルカリ玄武岩、荒戸山は中国山地の荒戸山ベイサナイトを示す。

グマあるいはそれらのマグマソースに“沈み込み成分”が付加されたものと考えられることができる。また、C1コンドライト組成¹¹⁾で規格化した希土類元素図でも、杵築高Nb安山岩とアルカリ玄武岩～ベイサナイトはパターンも濃度もほぼ同じであり、上記の考えを支持している。

さて、Nbに富む安山岩が分布する杵築市周辺は、Kamata¹²⁾の豊肥火山地域に含まれている。そこで、豊肥火山地域の火山活動とマグマの成因に関するこれまでの研究を簡単にレビューし、杵築高Nb安山岩と豊肥火山活動の関連を議論する。鎌田¹³⁾やKamata¹²⁾は、豊肥火山地域は、火山構造性陥没地であり、火山活動は6Maにはじまり、初期から現在に至るまで活動規模を単調に減少させ、その結果火山岩分布地域が中心部にに向けて縮小したことを指摘した。さらに、これらの火山活動はフィリピン海プレートの斜め沈み込み開始に起因すると考えている。また、Nakada and Kamata⁸⁾は、沈み込むスラブから由来する液体で上部マントルが時間とともに汚染され、それにとまってマントルが海洋島型マントルから島弧型マントルに変わったことを主張した。つまり、豊肥火山地域で活動する玄武岩の組成が海洋型玄武岩（北西九州型玄武岩）（豊肥火山地域には分布していない）から海洋島型と島弧型の間中型（耶馬溪型玄武岩）、さらには島弧型玄武岩（久重型玄

武岩）に変化したと考えている。また中田¹⁴⁾は、豊肥火山地域の主な構成要素である安山岩・デイサイトは、玄武岩マグマが熱源となり下部地殻物質が溶融してできたと考えた。すなわち、特に火山活動の初期には、マントルウエッジでのマグマの生産量が多く、地殻物質を大量に溶かすに十分な熱があったと考えている。この結果、地殻内で大量のマグマが蓄積されたため、深部からのより苦鉄質マグマは地殻内でトラップされて地表までもたらされることが少なかったと考えた。

沢井ほか³⁾は、杵築市の北西に分布する山香火山岩類は、その活動時期から考えて豊肥火山地域の初期の火山活動の産物と考えている。沢井・河村（未公表）によると山香地域の火山岩の特徴は、杵築市周辺のNbに富む安山岩と類似しておりほぼ同じ時期に活動した可能性がある。ただし、鎌田¹³⁾によると杵築市周辺は、3-2Maのゾーンに含まれている。

さて、杵築高Nb安山岩は、Pearce¹⁾のN-MORB規格化パターンでNbの負の異常を示さないことはすでに述べた。このような特徴を持つ安山岩はどのようにして形成されたのであろうか。中田¹⁴⁾が考えたように豊肥火山活動の初期に活動した安山岩が、下部地殻の溶融によって形成されたとすると、安山岩の化学組成の特徴は下部地殻のそれに依存すると考えられる。中田・鎌田¹⁵⁾は、

北西九州の下部地殻物質（輝石ガブロ～角閃石ガブロ）は、N-MORB規格化パターンではNbとZrに著しく乏しく、このような物質の部分溶融ではNbに著しく乏しい珪長質マグマが生じると考えている。国東半島下の下部地殻もこの様な物質であれば、部分溶融によってNbに富み、Pearce¹⁾のN-MORB規格化図でNbの負の異常を示さない安山岩は生成されない。

そこで、中田や鎌田の豊肥火山活動のシナリオを採用してNbに富む安山岩の成因を考えると以下のようなモデルが考えられる。豊肥火山地域下の海洋島型マンツルの部分溶融によってNbに富むアルカリ玄武岩マグマが発生し、その熱によって下部地殻が溶かされ珪長質マグマが生成され、さらにそのマグマとアルカリ玄武岩の混合によってNbに富む安山岩が形成される。ただし、珪長質マグマはN-MORB規格化パターンではNbの負の異常を示すと考えられるので、Nbの負の異常がない安山岩を形成するためには、アルカリ玄武岩はNbの負の異常があってはならない。しかし、このモデルは、沈み込み帯という環境を考えなくても良いか、あるいはスラブの沈み込みがあってもアルカリ玄武岩マグマが生成されなければならない。

永尾ほか¹⁶⁾は、九州の後期新生代火山岩類（現在の火山フロント上の火山を除く）の初生マグマは、フィリピン海プレートの沈み込みと直接的な関係を持たず、深部から上昇してきたアセノスフェアに由来するメルト（プレート内アルカリ玄武岩～ソレアイト）と、かつての沈み込みプロセスで形成された不均質な島弧性マンツルの様々な程度の反応（この過程で“沈み込み成分”を獲得しSiO₂のエンリッチメントが行われなければならない）によって形成された可能性を示唆している。杵築高Nb安山岩にはPearce¹⁾のN-MORB規格化パターンでNbの負の異常が認められないので、アセノスフェアに由来するメルトのNbの量はかなり高かったのであろう。

また、Kamata¹²⁾によれば豊肥火山岩類の化学組成はK₂Oを除いて5Maの間、大きな変化はなかったが、1.6Maより若い岩石はそれ以前よりもK₂Oに富むとされている。Nakada and Kamata⁸⁾

は、豊肥火山岩のK₂Oは時間とともに増加していると指摘した。しかし、豊肥火山活動の初期の活動と考えられる杵築高Nb安山岩は、Kamata¹²⁾の1.6Maより若い火山岩の領域にはいり、この点でも豊肥火山活動の一般的な特徴と異なっている。

今後、豊肥火山活動についてマグマ成因論を含めた再検討が必要であろう。

謝辞：1999年に当時理工学研究科の院生であった河村博之氏と著者のひとり沢井によって、大分県山香地域でN-MORB規格化パターンでNbの負の異常を示さない安山岩が見いだされている。河村博之氏には種々ご教示をいただいた。また、熊本大学 長谷義隆氏、佐賀大学 角縁 進氏にも、貴重なご意見をいただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Pearce, J.A.(1983); Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J.(eds) Continental basalts and mantle xenoliths, Shiva, 230-250.
- 2) 松本幡郎, 成重欽也 (1985) ; 大分県国東半島の火山地質, 熊本大学教養部紀要 (自然科学編), 20, 61-76.
- 3) 沢井長雄, 河村博之, 板谷徹丸 (2000) ; 大分県北東部山香地域の新生代火山岩類のK-Ar年代, 日本地質学会第107年学術大会講演要旨, 172.
- 4) 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.
- 5) 巽 好幸 (1995) ; 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版会, pp186.
- 6) Miyashiro, A. (1974); Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J.Sci.*, **274**, 521-535.
- 7) 佐藤博明 (1989) ; 高マグネシア安山岩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, pp99.
- 8) Nakada, S. and Kamata, H.(1991);

- Temporal change in chemistry of magma source under Central Kyushu, Southwest Japan: progressive contamination of mantle wedge. *Bull. Vol.*, **53**, 182-194.
- 9) Sun, S.S. and McDonough, W.F.(1989); Chemical and isotopic systematics of ocean island basalts: implications for mantle compositions and processes. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **42**, 313-345.
- 10) 太田岳洋, 長谷中利昭, 伴 雅雄, 佐々木 実 (1992) ; 由布-鶴見地溝内, 鬼箕単成火山の非島弧的な地質学的岩石学的研究. *火山*, **37**, 119-131.
- 11) Anders, E. and Grevesse, N., (1989); Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 197-214.
- 12) Kamata, H(1989); Volcanic and structural history of the Hohi volcanic zone, central Kyushu, Japan. *Bull. Vol.*, **51**, 315-332.
- 13) 鎌田浩毅 (1985) ; 熊本県宮原西方の火山岩類の層序と噴出年代－九州中北部の火山活動の時代と分布－. *地質雑*, **91**, 289-303.
- 14) 中田節也 (1993) ; 九州中部における鮮新世以降の火山活動：豊肥火山地域と島原火山地域の比較. *地質学論集*, **41**, 83-91.
- 15) 中田節也, 鎌田浩毅 (1988) ; 島原半島南部に分布する玄武岩・安山岩類の成因関係. *火山*, **33**, 273-289.
- 16) 永尾隆志, 長谷義隆, 田島俊彦, 長峰 智 (2000) ; 九州の後期新生代火山岩の不均質なマグマソース－不均質の程度と化学的特徴－. *日本地質学会第107年学術大会 講演要旨*, 328.
- 17) Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A., (1995); 1994 compilation values for GSJ reference samples, "Igneous rock series". *Geochem. J.*, **29**, 91-95.