

南部九州に分布する玄武岩の 島弧横断方向の化学組成変化

永尾隆志*・長谷義隆**

Across-arc chemical variations in the basalts distributed in Southern Kyushu

Takashi Nagao* and Yoshitaka Hase**

In Southern Kyushu, the basalts which erupted at about 1Ma are distributed in across arc direction. From the volcanic front to the back-arc, these basalts vary from island-arc basalt through within-plate alkali basalt and within-plate tholeiite to island-arc basalt. This is not common in many island arcs and means that magma generation processes across in Southern Kyushu cannot be explained by the partial melting of the metasomatized mantle wedge source.

1. はじめに

火山弧の伸長方向に直交する向きに、火山岩の化学組成が系統的に変化することは、よく知られている^{1), 2)}。この事実、沈み込み帯のマグマの成因モデルの重要な束縛条件とされ、島弧横断方向の化学組成の系統的変化は、マグマの分離深度の違い、それぞれの火山弧下で脱水分解する鉱物の違いによって引き起こされると考えられている³⁾など。

南部九州の後期新生代の火山岩類分布地域は、

四万十層群に隔てられて、肥薩、北薩、南薩火山区として区分されている⁴⁾。これらの火山区は主に安山岩から構成されているが、玄武岩類も分布している。肥薩火山区では、ステージ1(7.6 – 2.5Ma)とステージ3(2.0 – 0.4Ma)に島弧的特徴をもつ玄武岩が活動し⁵⁾、特にステージ1では玄武岩およびその分化岩が大量に存在する。北薩火山区には、いわゆる川内玄武岩類^{6), 7)}と火山フロントを構成する玄武岩が分布している。南薩火山区では、火山フロントを構成する玄武岩のみが分布

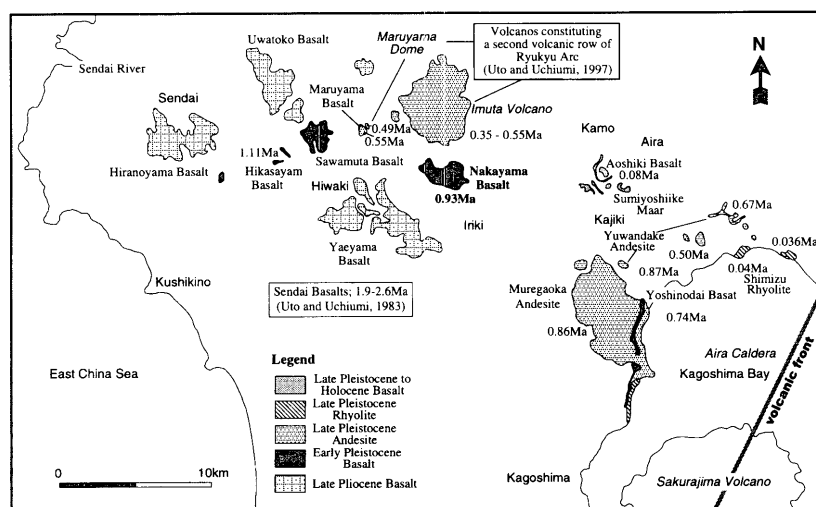


図1. 北薩火山区の玄武岩の分布。年代は松本・藤井²⁷⁾、周藤ほか^{28), 29)}、宇都・内海^{11), 19)}、内海・宇都¹⁰⁾、永尾ほか⁹⁾による。

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

** 熊本大学理学部地球科学教室 Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kumamoto University

している。

さて、北薩火山区の川内地域には、小規模な台地を形成する玄武岩質溶岩類が散在しており川内玄武岩類と呼ばれている⁶⁾。宇都⁷⁾、宇都ほか⁸⁾や永尾ほか⁹⁾によれば、川内玄武岩類は、活動時期によって2 Ma前後と1 Ma前後の2つのグループに区分されることが明らかになった。またそれぞれのグループの玄武岩は、現在の火山フロントにほぼ直交して列状に分布している(図1)。さらに、現在の火山フロント近くにも0.74Maの玄武岩¹⁰⁾が分布しており1 Ma前後の南部九州の島弧横断方向の玄武岩の化学組成変化を検討することができる。このことは、南部九州の新生代マグマティズムやマグマプロセスを考える際、重要な情報となる。

2. 1 Ma 前後の玄武岩の分布と化学組成の特徴

1 Ma 前後の玄武岩は、火山フロントから背弧側にむかって、吉野台玄武岩、中山玄武岩、丸山玄武岩、沢牟田玄武岩、日笠山玄武岩が分布している^{10), 11), 8), 9)}。

これらの玄武岩を、山口大学機器分析センターの蛍光X線分析装置で分析した。分析法は、角縁ほか¹²⁾、永尾ほか¹³⁾に詳しい。中山玄武岩(NK01)、丸山玄武岩(HOKU8)の化学組成は、Shinjo et al.¹⁴⁾によっても報告されている。また、吉野台玄武岩はShinjo et al.¹⁴⁾によった。その結果をSiO₂-

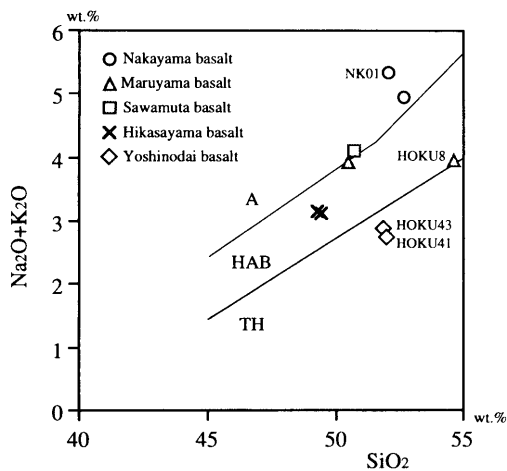


図2. SiO₂-Na₂O+K₂O図。TH; ソレライト系列, HAB; 高アルミナ玄武岩系列, A; アルカリ系列。境界はKuno^{11), 15)}による。NK01, HOKU8, HOKU41, HOKU43はShinjo et al.¹⁴⁾の分析値。

Na₂O+K₂O図^{11), 15)}(図2)に示した。吉野台玄武岩は、ソレライト系列、日笠山玄武岩と丸山玄武岩は、高アルミナ玄武岩系列、沢牟田玄武岩と中山玄武岩はアルカリ系列に属する。また、マグマのテクトニックな場を推定するMeschede¹⁶⁾の2Nb-Zr/4-Y区分図(図3)では、吉野台玄武岩はN-MORB(中央海嶺玄武岩)+VAB(火山弧玄武岩)、中山玄武岩はWPA(プレート内アルカリ玄武岩)、丸山玄武岩は、筆者らが分析したサン

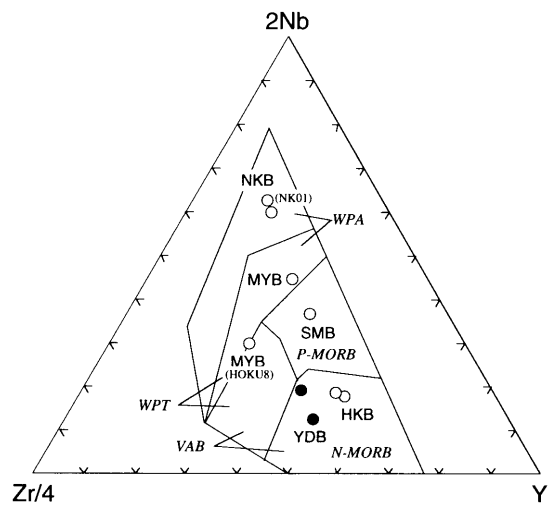


図3. Nb-Zr-Y区分図¹⁶⁾。NKB, 中山玄武岩; MYB, 丸山玄武岩; SMB, 沢牟田玄武岩; HKB, 日笠山玄武岩; YDB, 吉野台玄武岩。NK01(中山玄武岩), HOKU8(丸山玄武岩), YDB(吉野台玄武岩)は、Shinjo et al.¹⁴⁾による。

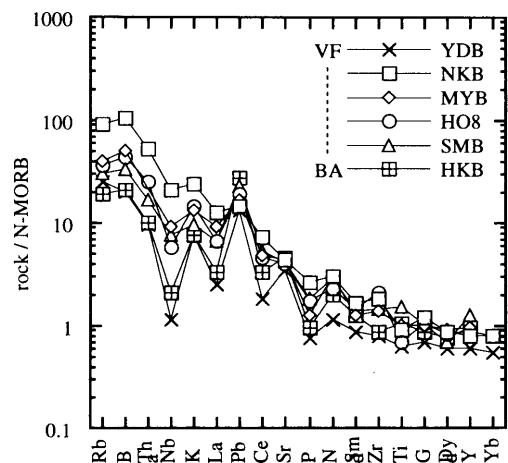


図4. N-MORBで規格化¹⁷⁾した微量元素のパターン。ラベルは図3と同じ。ただしHO8はHOKU8。VFは火山フロント, BAは背弧を意味する。Nbの負の異常は、火山フロントのYDBが最も大きく、次に背弧のHKBが大きい。NKBから灰弧側に向かってNbの負の異常はだんだん大きくなっていく。

プルはWPT（プレート内ソレイト）+WPA, Shinjo et al.¹⁴⁾のHOKU8は、WPT+VAB, 沢牟田玄武はP-MORB（ブルーム型MORB）, 日笠山玄武岩はVAB+N-MORBの領域にプロットされる。つまり海溝側から背弧側に向かって島弧玄武岩, プレート内アルカリ玄武岩, さらに背弧側にむかって次第に島弧的な特徴が強くなるという, 特異な組成変化が明らかになった。ちなみに, 火山フロントの吉野台玄武岩は, 最も背弧側の日笠山玄武岩と同じN-MORB+VABの領域にプロットされる。また, Shinjo et al.¹⁴⁾の丸山玄武岩(HOKU41)を除き, ほぼ一直線上にプロットされる。

N-MORB規格化パターン¹⁷⁾（図4）では, Nbの負の異常は, 火山フロントの吉野台玄武岩が最も大きい。中山玄武岩はNbの負の異常の程度は小さく, 背弧側に向かってNbの負の異常はだんだん大きくなっていく。つまり, 火山フロント側と背弧側に島弧的な特徴を強く示す玄武岩が存在し, その中間に, アルカリ玄武岩や中間型玄武岩が存在することになる。なお, Pearce¹⁸⁾のN-MORB規格化値を用いると日笠山玄武岩以外はNbの負の異常は認められない。

3. 島弧横断方向の特異な化学組成変化の原因

宇都・内海¹⁹⁾は, 中山玄武岩の北～北西部に位置する藪牟田火山や丸山溶岩円頂丘が, 0.35 – 0.5Ma頃に第四紀火山フロントから約30kmの地点で活動し, この地点の和達–ベニオフ帯の深さが150 – 160km²⁰⁾であり, 巽²¹⁾が指摘する沈み込み帯第2列目（背弧側）火山列直下のスラブ深度は, 173 ± 12kmであるという条件を満たしていると考えている。丸山玄武岩と丸山溶岩円頂丘は, 同じ地域に分布しているが, 宇都・内海¹⁹⁾は, 溶岩円頂丘と玄武岩の上下関係は不明としている。丸山玄武岩は, 前期更新世山之口層を覆っている¹⁹⁾ので, その活動時期は少なくとも前期更新世以降であると考えられる。また, 丸山玄武岩の化学組成の特徴から考えると, これらの玄武岩のマグマソースは, 沈み込み成分の影響を受けていないか, 小さいと考えられ, 丸山溶岩円頂丘との上下関係は重要である。また, 清水ら²²⁾は, 震源分布

から, 九州南部では, フィリピン海プレートの沈み込みは50km以深でかなり高角であるが, 断面形状はゆるやかなS字を描いているように見え九州西部まで達していないと述べている。彼らの断面図から読みとると平均的な沈み込みの角度は約60°であり, 藪牟田火山や丸山溶岩円頂丘の下には, 沈み込むスラブは存在しないようにも見える。0.93Maの中山玄武岩や1.11Maの日笠山玄武岩が活動した時期の, 火山フロントの位置やフィリピン海プレートの沈み込み角度についてはわからないが, 0.86Maの牟礼ヶ岡安山岩や0.74Maの吉野台玄武岩¹⁰⁾が火山フロントを形成していたと考えたとすると, 当時の火山フロントは, 現在の火山フロントから約12km背弧側に存在していたことになる。

さて, すでにのべたように, 中山玄武岩はプレート内アルカリ玄武岩であり, 沈み込み帯のマグマ活動とは考えられない。さらに, ほぼ同じ時期に活動した1 Ma前後の玄武岩は, 中山玄武岩から背弧側に向かって, 島弧火山岩の特徴が強まる。また, 最も背弧側の日笠山玄武岩と当時の火山フロントを形成していた吉野台玄武岩の化学的特徴は類似している。これらのことは, 一般的な島弧横断方向の玄武岩の化学組成変化の特徴と異なっており^{2), 21)}など, 少なくとも中山玄武岩とそれより背弧側の玄武岩は, 沈み込み帯のマグマティズムの枠組みとは異なったマグマプロセスを考えなければならない。

Nakada and Yokose²³⁾は, 2 – 1Maの川内玄武岩と0.5 – 0Maの鹿児島グラーベンの東側の米丸, 住吉玄武岩の時空分布は, マントル対流によって束縛されており, 玄武岩の組成変化は部分融解度の増加やエンリッチソースに対するディプリートソースの交代によると解釈している。マントルウエッジの交代は西側の深部からはじまり, 東側の浅部に拡がっていった。すなわち, 南西九州の火山活動は, 沈み込むスラブの脱水によって支配されているのではなく, 背弧側からマントルウエッジへのマントル流によって支配されていると考えている。同様に, Shinjo et al.¹⁴⁾は, 背弧側にプレート内アルカリ玄武岩である中山玄武岩が存在するので, そこにはスラブの先端は存在しなかったと考え, このアルカリ玄武岩の存在や火山

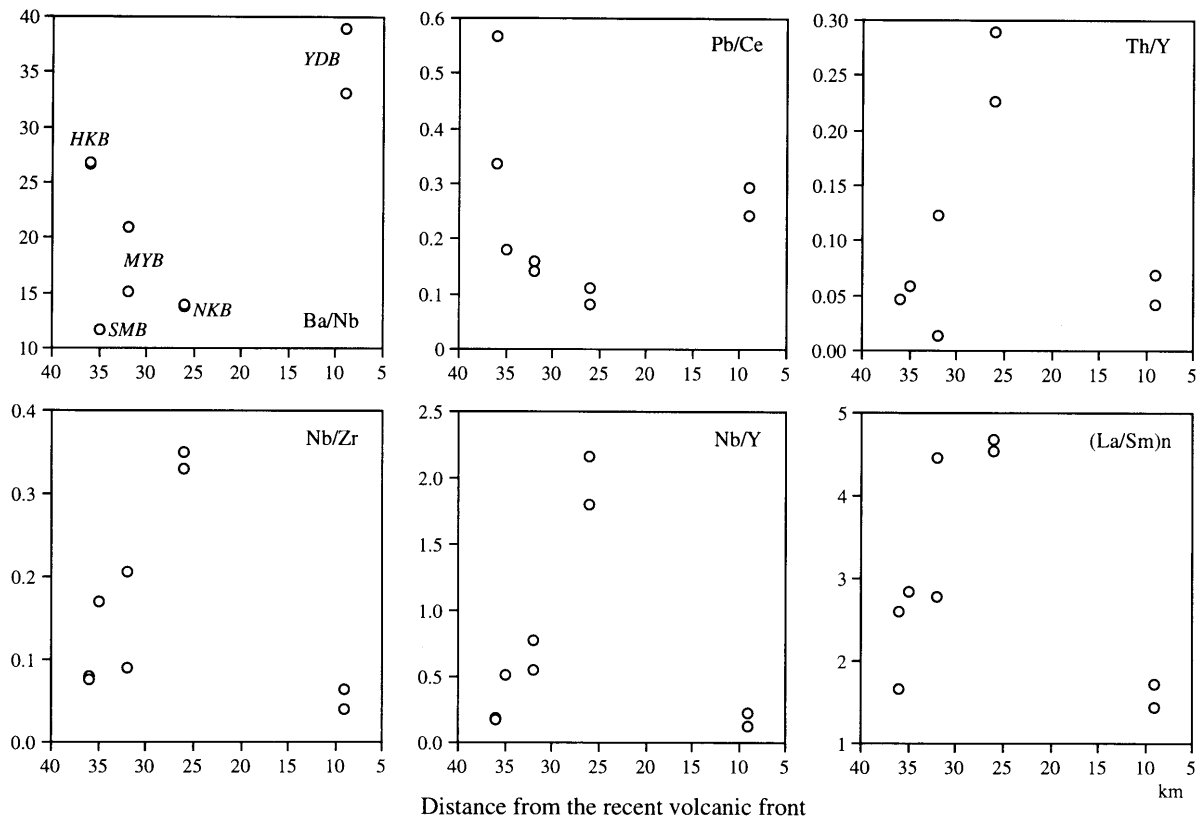


図5. 現在の火山フロントからの距離と玄武岩の化学組成（元素比）の関係。ラベルは図3と同じ。

フロント下のスラブの屈曲は、南部九州のマントルウエッジの中に、Indian-MORBに似たアセノスフェアの流入と関係があると考えた。また、北西九州の上昇帯からのアセノスフェアの流れが、沈み込むスラブを押し、上位のリソスフェアの底で引きずり力を生み出し、それがスラブの屈曲と引張的な地殻の回転を引き起こしたと考えた。Shinjo et al.¹⁴⁾は、中山玄武岩(NK-01)は、LILEとPbのわずかなエンリッチメントを除いて、微量元素とSr-Nd-Pb同位体組成は、北西九州のプレート内玄武岩と似ていると述べている。

1Ma前後に活動した玄武岩の、現在の火山フロントからの距離と化学組成（元素比）の関係を検討した（図5）。火山フロントに分布する吉野台玄武岩は、島弧玄武岩の特徴を示しているがそれより背弧側の中山玄武岩は、プレート内アルカリ玄武岩でさらに背弧側に向かってより島弧的な特徴が強まっていく。Ba/Nb比は沈み込むスラブからマントルウエッジに供給されるフルイドの程度を、またPb/Ce、Th/Y比は、沈み込む堆積物の

寄与の程度を示すと考えられているが、Ba/Nb、Pb/Ce比は、火山フロントの吉野台玄武岩で高く、中山玄武岩で最も低く背弧側に向かって高くなっていく。また、Th/Y比は、吉野台玄武岩で低く、中山玄武岩が最も高く背弧側に向かって低くなる。なお、Pbは沈み込む堆積物よりもフルイドによって運ばれるという議論もある²⁴⁾。また、マントルのエンリッチメントの程度を示すと考えられているNb/Zr、Nb/Y、(La/Sm)_n比は、フロントの吉野台玄武岩で低く、中山玄武岩から背弧側に向かって低くなる。このような北薩火山区の1Ma前後の玄武岩の島弧横断方向の化学組成の変化は、一般的な沈み込み帯の玄武岩の示す特徴とは異なっている²¹⁾。

Shinjo et al.¹⁴⁾は、背弧側にプレート内アルカリ玄武岩である中山玄武岩が存在するので、そこにはスラブの先端は存在しなかったと考えた。つまり、中山玄武岩よりも背弧側に分布する島弧的な特徴をもつ玄武岩は、沈み込み帯玄武岩とは異なったプロセスで生成されたと考えなければなら

を意味している。したがって、(1)の島弧的な特徴をもつ日笠山玄武岩以外を同じマグマソース（アセノスフェア）の部分融解の程度の違いによって説明するのは簡単ではない。より複雑なマグマプロセスを考える必要がある。(2)については、マグマソースの不均質の原因を検討しなければならない。中山玄武岩はアセノスフェアの部分融解で生成されたと考えられるので、ここでの検討には加えない。簡単のために、ほかの玄武岩のマグマソースはふたつの端成分どうしの混合によって作られたと考える。そうするとDMMとPhの混合しかない。しかも、その混合の程度はPhが10%以下でよい。それぞれの玄武岩は、DMMとPhの異なった程度の混合によってできたマグマソースの部分融解で説明することが可能である。(3)のモデルは次のように考えることができる。中山玄武岩マグマと、どの端成分を混合させても、ほかの玄武岩の化学組成を説明することはできない。そこで、マグマソースの組成を変化させ、それと中山玄武岩マグマを反応させることによって、多様な組成の玄武岩をつくることを考えた。説明可能なソースはDMMとRyの混合、あるいは、DMMとSssの混合で作ったソースである。さらに、DMMとRyあるいはSssの混合比、また作られたソースと中山玄武岩の反応の程度を考えると、DMMとRyの混合が現実的である。つまり、中山玄武岩マグマとRy₁₀(DMM:Ry=90:10), Ry₁(DMM:Ry=99:1)の混合線の間、ほかの玄武岩の組成が収まってしまう(3)のモデルが説明可能である。

どのモデルが、最も観察事実を説明できるかさらに検討が必要である。

謝辞 山口大学の沢井長雄氏、佐賀大学の角縁進氏には、岩石薄片を作成していただいた。厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) Kuno, H. (1966); Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. Bull. Vol., 29, 195-222.
- 2) Gill, J.B.(1981); Orogenic Andesites and Plate Tectonics. pp 390. Springer-Verlag, New York.
- 3) Tatsumi, Y. (1989); Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. Jour. Geophys. Res., 94, 4697-4707.
- 4) 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. pp90, 九工大地質研究室.
- 5) 永尾隆志, 長谷義隆, 長峰 智, 阪口和之, 角縁 進(1999); 不均質なマグマソースから生成された後期中新世~中期更新世の肥薩火山岩類—火山岩の分布と化学組成の時空変からの証拠—. 岩鉱, 94, 461-481.
- 6) 太田良平(1971); 川内地域の地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, pp28.
- 7) 宇都浩三(1980); 南九州川内玄武岩類の岩石学. 火山, 25, 289-290.
- 8) 宇都浩三, 阪口圭一, 寺岡易司, 奥村公男, 駒澤正夫(1997); 20万分の1地質図「鹿児島」, 地質調査所.
- 9) 永尾隆志, 長谷義隆, 梅田浩司, 投稿中, 岩石鉱物科学.
- 10) 内海 茂, 宇都浩三(1997); 20万分の1地質図幅「鹿児島」北西部の年代未詳火山岩のK-Ar年代. 地調月報, 48, 107-112.
- 11) 宇都浩三, 内海 茂(1983); 南部九州川内玄武岩類のK-Ar年代. 火山, 28, 204.
- 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) 永尾隆志, 長谷義隆, 長峰 智, 角縁 進, 阪口和之(1998); 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率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.
- 14) Shinjo, R., Woodhead, J.D. and Hergt, J.M. (2000); Geochemical variation within the northern Ryukyu Arc: magma source

- compositions and geodynamic implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 140, 263-282.
- 15) Kuno, H. (1968); Differentiation of basalt magmas, *Basalts* (H.H.Hess and A. Poldervaart eds.), New York, 623-688.
- 16) 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.
- 17) Sun, S-S. and McDonough, W.F. (1989); Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes. *In Magmatism in the Ocean Basins* (Saunders, A.D. and Norry, M.J. eds.). Blackwell Scientific Publ., London, UK. 313-345.
- 18) Pearce, J.A. (1983); Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. 230-249. *In* (Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. Eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva, Nantwich.
- 19) 宇都浩三, 内海 茂 (1997); 鹿児島県樋脇町丸山溶岩円頂丘のK-Ar年代: 琉球弧第2列目の第四紀火山. *火山*, 42, 299-302.
- 20) 石原和彦, 吉田明夫 (1992); 九州下フィリピン海スラブの形状と地震活動. *地震* 2, 45, 45-51.
- 21) 巽 好幸 (1995); 沈み込み帯のマグマ学—全マントルダイナミクスに向けて. pp159. 東京大学出版会, 東京.
- 22) 清水 洋, 馬越孝道, 松尾紉道 (1996); 九州西部の微小地震活動とS波偏光異方性. *月刊地球*, 17, 402-405.
- 23) Nakada, S. and Yokose, H. (1998); Pliocene-Pleistocene Volcanism in Sendai Area, southern Kyushu, Japan: Implication for the Opening of Okinawa Trough. *AGI*.
- 24) Kogiso, T., Tatsumi, Y. and Nakano, S. (1997); Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148, 193-205.
- 25) Borg, L.E., Clyne, M.A. and Bullen, T.D. (1997); The variable role of slab-derived fluids in the generation of a suite of primitive calc-alkaline lavas from the southernmost Cascades, California. *Can. Mineral.*, 35, 425-452.
- 26) Plank, T. and Langmuir, C.H. (1998); The chemical composition of subducting sediment and its consequence for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, 145, 325-394.
- 27) 松本哲一, 藤井紀之 (1989); 鹿児島県蘭牟田火山のK-Ar年代—入来カオリン鉱床の生成時期と関連して—. *岩鉱*, 84, 398-402.
- 28) 周藤正史, 石原和弘, 巽 好幸 (2000); 始良カルデラ地域の先カルデラ火山活動史—カルデラ北縁部加治木, 国分地域及び南縁部牛根地域の溶岩流試料のK-Ar年代測定—. *火山*, 45, 1-12.
- 29) 周藤正史, 宇都浩三, 味喜大介, 石原和弘 (2001); 始良カルデラ周辺部の火山活動の時間空間変遷. *日本火山学会講演予稿集 2001年度秋季大会*, 3.