

桜島火山におけるマグマ供給系の変化 —始良カルデラ形成噴火以降のテフラ噴出物からの解析—

Change of magmatic systems of Sakurajima volcano -analysis of tephra samples since Aira caldera-forming eruption-

宮坂瑞穂⁽¹⁾・中川光弘⁽¹⁾・吉本充宏⁽¹⁾・小林哲夫⁽²⁾・奥野充⁽³⁾

Mizuho AMMA-MIYASAKA⁽¹⁾, Mitsuhiro NAKAGAWA⁽¹⁾, Mitsuhiro YOSHIMOTO⁽¹⁾,
Tetsuo KOBAYASHI⁽²⁾, Mitsuru OKUNO⁽³⁾

(1) 北海道大学大学院理学研究院

(2) 鹿児島大学大学院理工学研究科

(3) 福岡大学理学部

(1) Graduate School of Science, Hokkaido University

(2) Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

(3) Faculty of Science, Fukuoka University

Synopsis

Sakurajima volcano repeated plinian eruptions since 26,000 yBP and at least 17 tephra layers (P1~P17) are recognized after Aira caldera-forming eruption of ca.29,000 yBP. We took tephra samples from two boring cores at 5km southeast and 10km east of the volcano, and analyzed petrography, mineral chemistry, matrix glass and melt inclusion chemistry. The main conclusions are as follows. (1) Tephra samples of each eruption stage of Sakurajima volcano (Older Kitadake stage of P17-15, Younger Kitadake stage of P14-P5 and Minamidake stage of P4-P1) should be produced by magma mixing, and assemblages of end-member magmas are different in each stage. (2) Dacitic and andesitic magmas related to the eruptions of all stages. (3) Dacitic and andesitic magmas changed to new ones in each stage. (4) Effect of rhyolitic magma of Aira caldera-forming eruption can be found in Older Kitadake stage.

キーワード: 桜島火山, マグマ供給系, テフラ噴出物, マグマ混合, 端成分マグマ

Keywords: Sakurajima volcano, magmatic systems, tephra samples, magma mixing, end-member magmas

1. はじめに

桜島火山は、九州南部に位置する始良カルデラの後カルデラ火山で、日本で最も活動的な火山でもある。桜島火山は歴史時代だけでも4回の大規模なプリニー式噴火を繰り返しており、地球物理学的手法、地質学的手法、岩石学的手法など多岐にわたる研究

が進められている。特に、西暦1471年以降の噴出物については、古記録に基づく噴火履歴を基礎として詳細な岩石学的解析が行われており（例えば, Yanagi et al., 1991; 中川ら, 2011), その結果, 最近500年間ではデイサイト質マグマと安山岩質マグマからなる2端成分マグマ供給系から、20世紀以降は玄武岩質マグマを加えた3端成分マグマ供給系へ変化したこと

が明らかにされた (中川ら, 2011). また, 地質学的研究によって桜島火山の噴火履歴がほぼ解明されたことに伴って (例えば, Kobayashi, 1988; 奥野, 2002) 始良カルデラ地域の噴出物の時間変化に関する研究も行われるようになり, 噴火ステージごとに異なる組成のマグマが噴出したことが示唆されている (例えば, 宇都ら, 2005; Takahashi et al., 2013). しかしながら, これらの研究では全岩化学組成の分析結果のみを解析しており, さらに全岩化学組成の測定が困難な桜島火山初期噴出物に関するデータはほとんど得られていないという問題点があった.

そこで本研究では, 始良カルデラ形成噴火以降のテフラ噴出物を対象として, 岩石記載, 斑晶鉱物組成分析, 石基ガラス・メルトインクルージョンの組成分析を行い, マグマ供給系の変化を明らかにすることを目的とする.

2. 桜島火山の噴火史

桜島火山は, 南岳と北岳が連なる成層火山であり, 山頂火口のほかに山腹には多くの側火山が認められる. 桜島火山周辺ではプリニー式噴火による降下軽石層が17層識別されており, 小林 (1986) らはこれらを新しい時代のものからP1-P17と命名した. 桜島火山の噴火史は, これらのテフラ層序とその年代測定から, 古期北岳・新期北岳・古期南岳・新期南岳の4つのステージに分類されている (例えば, 小林ら, 2013).

約29,000年前に始良カルデラが形成された後, 桜島火山は26,000年前から北岳で噴火を開始した. 古期北岳ステージでは, P17-P15の3枚のテフラが認められ, およそ24,000年前まで活動していたと考えられる. 古期北岳ステージの噴出物は桜島島内の地表には分布していないが, ボーリングコア中には約30,000年前の年代を示す溶岩が認められている (宇都ら, 1999). その後, 北岳の活動は約10,000年間の休止期をはさんで13,000年前頃に再開した. この新期北岳ステージでは, 約5,000年前までの8,000年間にP14-P5の少なくとも10回のプリニー式噴火を繰り返したと考えられる. この時期に噴出した溶岩や火砕流は北岳山体に広く分布している. 一方, 南岳は約4,500年前から活動を始め, 1,600年前頃までにブルカノ式噴火の降下火山灰が堆積したほか, 山麓には溶岩流が流下した (古期南岳ステージ). その後, 新期南岳ステージの活動は西暦764年のプリニー式噴火 (P4) で始まった. 1471年, 1779年, 1914年に同様の噴火を繰り返し, 1946年には溶岩流を流出して, これらの噴出物は南岳山体の大部分を覆った. 西暦1955年以降はブルカノ式噴火を繰り返しており, 現在に至っている.

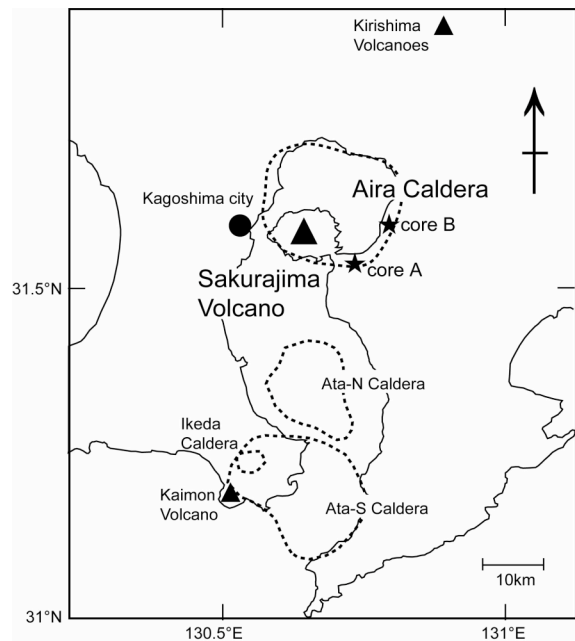


Fig. 1. Index map of Sakurajima volcano and locations of boring sites.

3. 分析試料および分析手法

本研究では, Fig. 1 のボーリングコアから採取した試料のうち, 新期北岳ステージ・古期北岳ステージの降下軽石または降下火山灰を主な対象として, 岩石記載と斑晶鉱物・石基ガラス・メルトインクルージョンの組成分析を行った. また比較のために, 始良カルデラ噴出物についても同様の解析を行い, 新期南岳ステージの噴出物については中川ら (2011) で用いた降下軽石の薄片を利用して石基ガラス・メルトインクルージョンの組成分析を追加した.

サンプルの処理および分析は, すべて北海道大学大学院理学研究院で行った. 新期北岳ステージ・古期北岳ステージ・始良カルデラの噴出物については, 代表的な軽石について薄片を作成して鏡下観察を行った. さらに, 本質物質 (P16に関しては個々の軽石の判別が困難であったため火山灰全量) を洗浄・乾燥させた後, 水篩により斑晶鉱物を分離した. その際斑晶量を重量%で測定した. 分離した斑晶鉱物は粒径ごとに篩い分けし, 40-60メッシュの斑晶鉱物について鉱物粒薄片を作成した. 斑晶鉱物組成, 石基ガラス・メルトインクルージョン組成は, 軽石の薄片と鉱物粒薄片を用いて, 波長分散型EPMA (日本電子社製JXA-8800) でZAF補正法を適用して測定した. 測定条件は, 加速電圧が15kV, 電流値は斜長石で10nA, 苦鉄質鉱物で20nA, 石基ガラス・メルトインクルージョンで10nAである. また, 石基ガラス・メ

ルトインクルージョンの組成分析の際には、ビーム径を10 μ mに広げて測定を行った。

4. ボーリングコアのテフラ層序

本研究で用いたボーリングコアは、桜島の南東約5kmの高峠 (A) および東約10kmの高野 (B) において掘削した (Fig. 1)。それぞれ深さ35m, 70mまで試料を採取した結果、およそ8mの深さまでに桜島火山の南岳ステージ (本ボーリングコアでは古期南岳噴出物を識別できなかつたため、以後南岳ステージと総称する)、新期北岳ステージ、古期北岳ステージの噴出物が認められ、それより深い部分は始良カルデラの噴出物であった。各ボーリングコアの柱状図を Fig. 2に示す。

コアAでは、上位からブルカノ式噴火の噴出物, P1, P2, P4, P7, 池田カルデラ由来のテフラ, P8, 鬼界-アカホヤテフラ, P13, P14, P15, P16, P17, 始良カルデラ噴出物が認められる。一方、コアBでは、P5, 鬼界-アカホヤテフラ, P11, P12, P13, P14, 谷テフラ, 高野ベースサージ噴出物, P15, P16, P17, 始良カルデラ噴出物が堆積しており、両者をあわせると桜島火山由来のP1-P17のテフラのうち、P3, P6, P9, P10を除く13枚のテフラを識別できた (Table 1)。

南岳ステージのP1, P2, P4テフラはコアAにのみ認められ、最大粒径約2-12mmで新鮮な白色軽石を含むが、P4の軽石は黄褐色でやや風化が進んでいる。P1-P4テフラの体積は、小林ら (2013) により0.1-0.8km³と見積もられている。新期北岳ステージのうちP5-P12のテフラ体積は1km³以下であるが、P13は1.3km³, P14は桜島火山の噴火の中で最も規模の大きな噴火で11km³ものテフラを噴出している (小林ら, 2013)。P13, P14はコアA, コアBの両方で認められ、P14は複数のフォールユニットからなる。ボーリングコア中の試料は、P5-P11が最大粒径3-20mmであるのに対して、P12-P14は30-50mmとやや粗粒である。大部分の軽石が黄褐色で、P11やP14の細粒な軽石にはオレンジ色を呈するものもある。古期北岳ステージのP15-P17テフラは、いずれのコア中にも認められる。噴出体積はP15とP16で0.2km³, 0.3km³とごく小規模であるが、P17では1.1km³と見積もられている (小林ら, 2013)。いずれの軽石もオレンジ色を呈し、最大粒径はP15で7mm, P16で3mmと細粒で、これらは個々の軽石の判別が難しいほど変質が進んでいる。P17の軽石は最大粒径15mm程度であり、コアAでは複数のフォールユニットが認められた。始良カルデラ噴出物は、コアAでは5つの噴火ユニット (上位より始良-丹沢テフラまたは入戸火砕流, 亀割坂爆発角礫岩, 妻屋火砕流, 垂水火砕流, 大隅降下軽石),

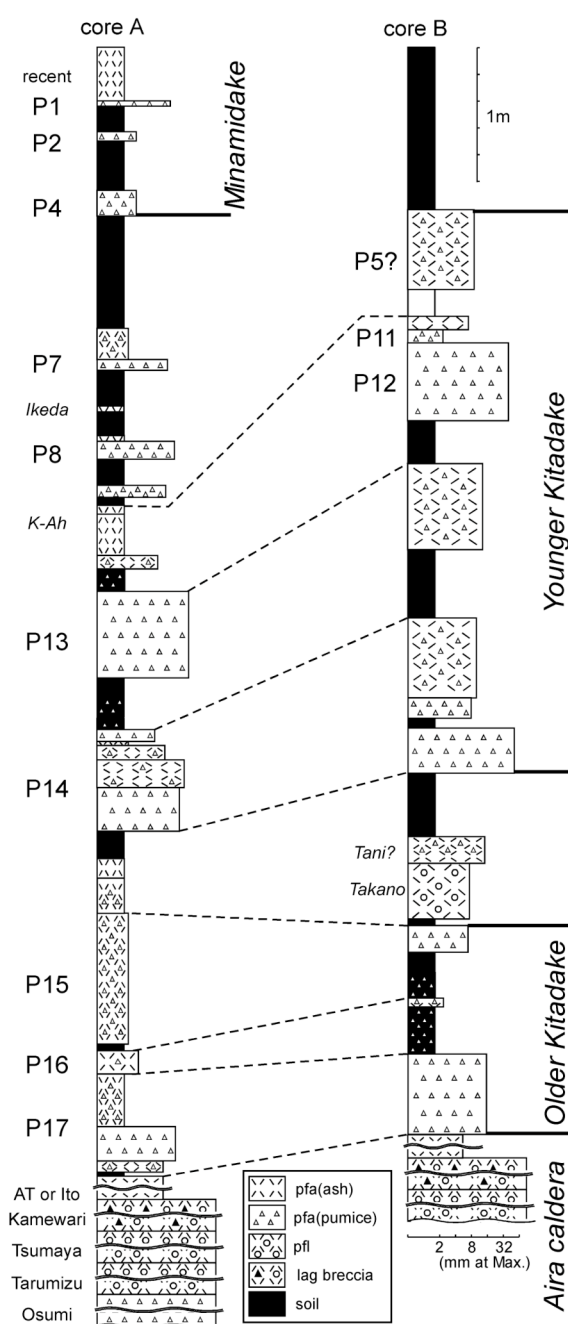


Fig. 2. Columnar sections of boring cores. Locations of boring sites are in Fig. 1.

コアBでは上位3つの噴火ユニットが認められる。総体積は500km³程度と見積もられ (小林ら, 2013), 粒径30-100mm以上の新鮮な白色軽石が大部分を占めている。

このように、本研究のボーリングコアから得られた試料は、P12-14と始良カルデラ噴出物を除けば粒径数cm以下の軽石のみであり、さらに古期北岳ステージのP15-P17に関してはかなり変質しているため全岩化学組成の分析を行うことが不可能である。よって、すべての噴出物に共通して分析可能な斑晶鉱物に注目して解析を行った。

Table 1. Characteristics of juvenile materials from Sakurajima volcano and Aira caldera-forming eruption.

stage	unit	age	core	Max. size (mm)	colour of juveniles	phenocryst mode (wt%)	phenocryst assemblage
Minamidake	P1	1914 AD	A	12	white	15-30*	pl>opx, cpx>mt (ol)*
	P2	1779 AD	A	2	white	15-25*	pl>opx>cpx>mt*
	P3	1471 AD		not collected		5-15*	pl>opx>cpx>mt*
	P4	764 AD	A	6	yellow	10-25*	pl>opx, cpx>mt (ol)*
Younger Kitadake	P5	5.6 cal ka	B	10	yellow	32	pl>opx>cpx>mt>il
	P6	3.8 cal ka		not collected			
	P7	5.0 cal ka	A	10	yellow	26	pl>opx>cpx>mt>il
	P8	6.5 cal ka	A	20	white-yellow	30	pl>opx>cpx>mt>il
	P9	7.5 cal ka		not collected			
	P10	7.7 cal ka		not collected			
	P11	8.0 cal ka	B	3	yellow-orange	30	pl>opx, cpx>mt, il
	P12	9.0 cal ka	B	40	yellow	24	pl>opx>cpx>mt>il
	P13	10.6 cal ka	A,B	30	yellow	18	pl>opx>cpx>mt>il
	P14	12.8 cal ka	A,B	50	yellow-orange	26	pl>opx>cpx>mt>il
Older Kitadake	P15	24 cal ka	A,B	7	orange	6	cpx>opx>pl>qz, ol, mt
	P16	25 cal ka	A,B	3	orange	n.d.	cpx>opx>pl>qz, ol, mt
	P17	26 cal ka	A,B	15	orange	6	cpx>opx>pl>qz, ol, mt
Aira Caldera	AT / A-Ito		A,B	>30	white	10-20**	pl>qz>opx>mt>il**
	A-Km		A,B	>100	white	17	pl>qz>opx>mt>il
	A-Tm	29 cal ka	A,B	>80	white	10-15**	pl>qz>opx>mt>il**
	A-Tr		A	>80	white	10-15**	pl>qz>opx>mt>il**
	A-Os		A	n.d.	white	10-20**	pl>qz>opx>mt>il**

*recalculated from Togashi et al. (2007)

**Bando and Nakagawa (2008)

n.d.: not determined

5. 岩石記載

桜島火山の噴出物は、いずれも両輝石を含む安山岩ヘダイサイトであるが、噴火ステージごとに斑晶量や斑晶鉱物組み合わせが異なり、またいずれの噴出物も始良カルデラ噴出物とは明瞭に区別できる (Table 1)。

南岳ステージの噴出物は、斑晶鉱物組み合わせによって、単斜輝石斜方輝石安山岩ヘダイサイト (主に1779年噴出と1471年噴出物) と、かんらん石単斜輝石斜方輝石安山岩 (1914年以降の噴出物と764年噴出物の一部) の2つに大別できる。かんらん石斑晶が認められないP2, P3では斑晶量は5-25wt%程度であるが、かんらん石斑晶を含む噴出物があるP1, P4では10-30wt%程度とやや斑晶に富む (富樫ら, 2007)。斜長石・斜方輝石・単斜輝石・磁鉄鉱は、数種類以上で集合斑晶を形成することが多いが、かんらん石斑晶は単独で存在するか斜長石斑晶とのみ共存する。一方、新期北岳ステージのテフラ噴出物は、P13が斑晶量18wt%とやや少ないのを除けば、25-30wt%と全体的に斑晶に富む。また、すべての噴出物にイルメナイト斑晶が含まれるが、かんらん石斑晶は存在しない。輝石と不透明鉱物の集合斑晶が普遍的に認められ、それらが斜長石斑晶と集合斑晶を形成することもある。古期北岳ステージのテフラ噴出物は、斑

晶量が非常に少なく5wt%程度である。斑晶鉱物組み合わせは、斜長石、両輝石に加えて、かんらん石と石英がわずかに認められる。全体として単斜輝石・斜方輝石斑晶に富み、無色鉱物に乏しい。不透明鉱物は磁鉄鉱のみで、輝石斑晶と集合斑晶を形成することが多い。ちなみに、始良カルデラ噴出物は斑晶量10-20wt%程度で、斜長石、石英、斜方輝石、磁鉄鉱、イルメナイト斑晶が認められる。単斜輝石斑晶が存在しないこと、石英を多く含むことで桜島火山の噴出物と明瞭に区別することができる。

6. 斑晶鉱物化学組成

Fig. 3に新期北岳ステージおよび古期北岳ステージ噴出物の斑晶中心部組成のヒストグラムを示す。古期北岳ステージと新期北岳ステージでは斜長石、輝石、磁鉄鉱斑晶が共通して認められるが、それらの組成幅および組成分布はステージごとに異なる。

斜長石斑晶は、新期北岳ステージでは大部分がAn=40-90の組成を持つ。ほぼユニモーダルな組成分布を示すが噴火ごとにピークの位置が異なる。P14やP11ではAn=50付近に、P13ではAn=70付近に集中するが、その周囲に第2のピークも存在している。一方で、古期北岳ステージの斜長石斑晶は、An=30-90の範囲でいずれもポリモーダルな組成分布を示す。ピ

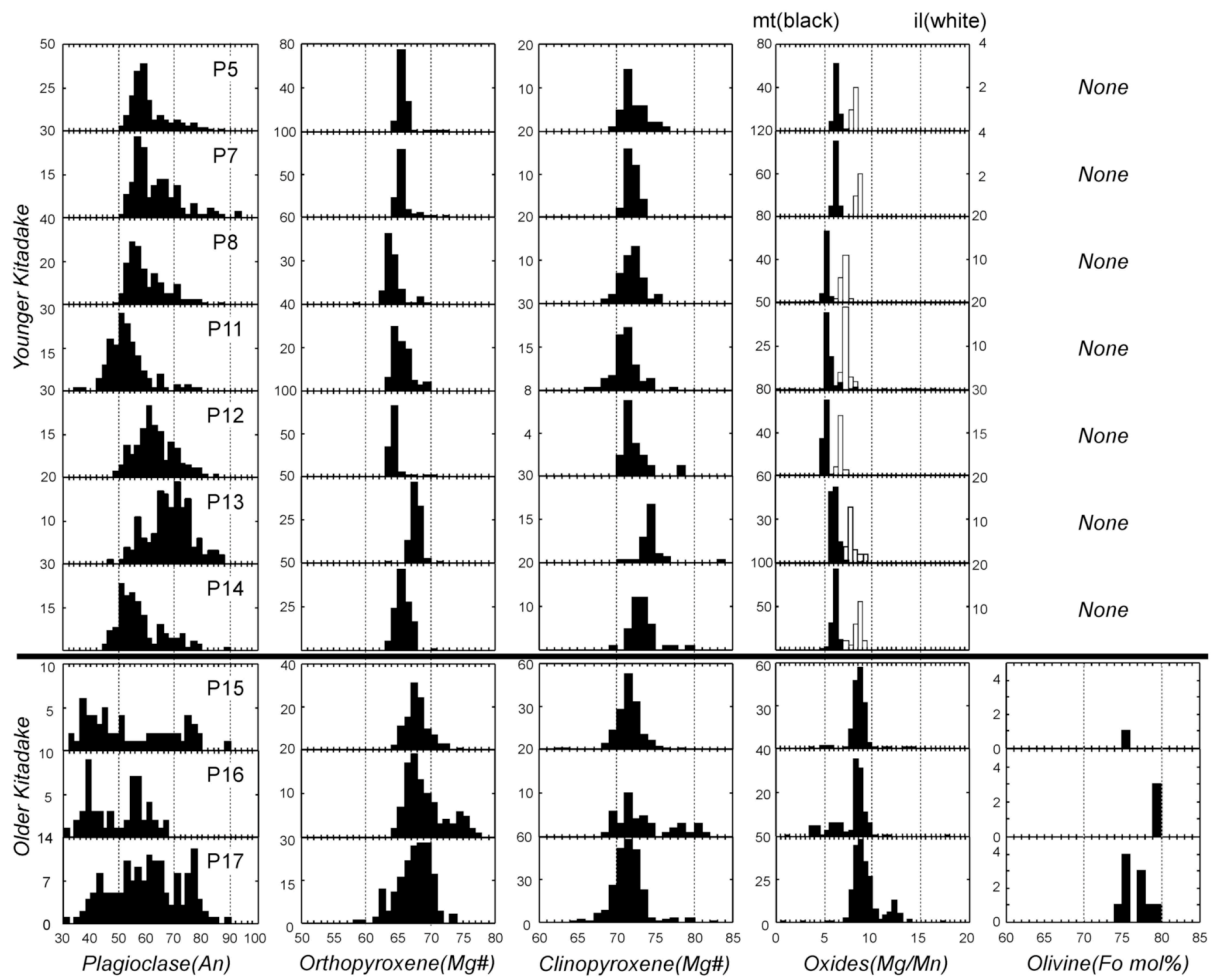


Fig. 3. Histograms of core compositions of phenocrysts in juvenile materials of Younger Kitadake and Older Kitadake stages.

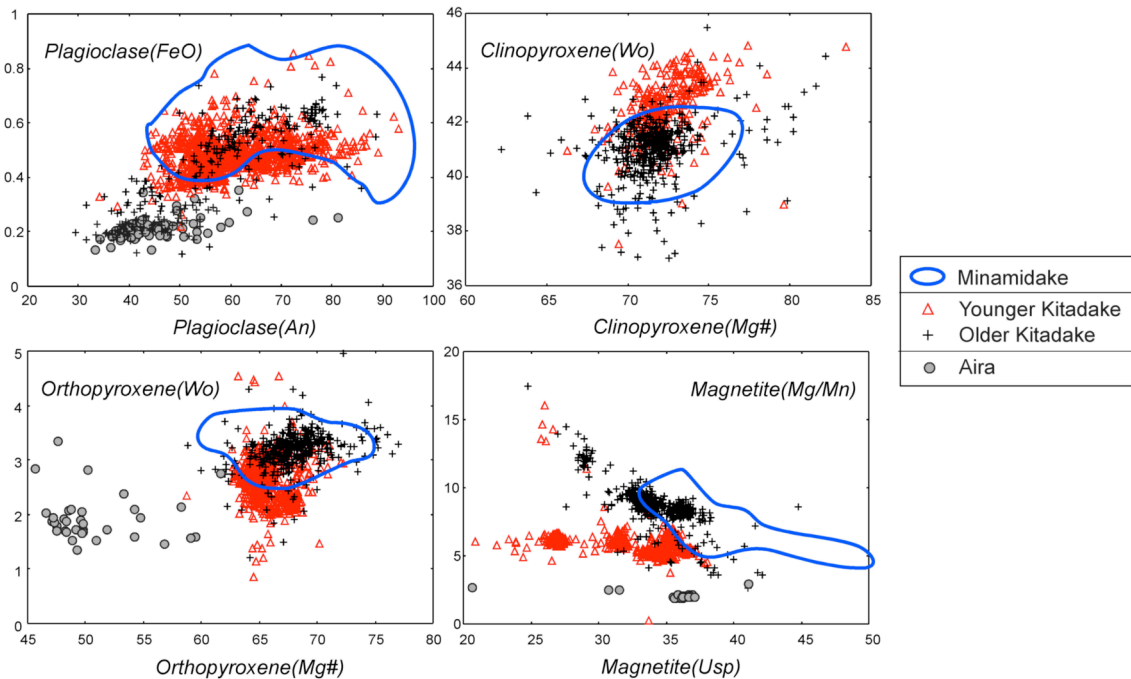


Fig. 4. Core compositions of phenocrysts in juvenile materials of Minamidake, Younger Kitadake, Older Kitadake and Aira caldera-forming eruption.

ークの大きさは噴火ごとに異なるが、P15-P17を通じてAn=35-45の斑晶が認められ、その他にAn=55-65, An=70-80の斑晶も存在する。輝石斑晶は、新期北岳ステージ、古期北岳ステージとも組成幅は広く(斜方輝石でMg#=58-78, 単斜輝石でMg#=64-84), 斜方輝石でMg#=65-70付近, 単斜輝石でMg#=70-75付近に組成分布のピークが認められる。新期北岳ステージではこれらよりMgに富む斑晶はわずかであるが、古期北岳ステージではMg#=70-78の斜方輝石, Mg#=75-82の単斜輝石からなる第2のピークが存在する。不透明鉱物は新期北岳ステージでは磁鉄鉱とイルメナイトが共存するが、いずれも組成幅は狭くユニモーダルな組成分布(磁鉄鉱でMg/Mn=5-6, イルメナイトでMg/Mn=7-9)を示す。一方、古期北岳ステージでは磁鉄鉱斑晶しか認められず、Mg/Mn=2-18と組成幅は広いが、大部分はMg/Mn=7-10で新期北岳ステージよりも明らかにMgに富む。また、古期北岳ステージではFo=74-80のかんらん石もわずかに認められる。

新期北岳ステージと古期北岳ステージの斑晶鉱物組成の違いは他の元素図でも明瞭であり(Fig. 4), 古期北岳ステージではAn, FeOともに低い斜長石が認められるほか、斜方輝石は全体的にWoが高く、単斜輝石はWoが低く、磁鉄鉱は同じUspでもMg/Mnが高い。これら北岳ステージの斑晶鉱物を南岳ステージ、始良カルデラ噴出物のものと比較すると、南岳ステージの斑晶鉱物はいずれも古期北岳ステージの主要

な斑晶と類似した組成を示す。一方、始良カルデラ噴出物は、斜方輝石はMg#=45-63, 磁鉄鉱はMg/Mn=2-3で桜島火山のものより明らかにMgに乏しいが、斜長石斑晶は古期北岳ステージのAn, FeOの低い斜長石の組成範囲内にはほぼプロットされる。

7. 石基ガラスおよびメルトインクルージョン組成

石基ガラスと輝石斑晶中のメルトインクルージョンの組成をFig.5に示す。すると、新期北岳ステージと古期北岳ステージのSiO₂組成範囲はほとんど重複しない。新期北岳は大部分がSiO₂=70-75wt%に集中しているが、古期北岳はSiO₂=58-72wt%と組成幅が広くSiO₂=60wt%とSiO₂=65-70wt%付近のものに分かれる。これらを南岳ステージ、始良カルデラ噴出物のものと比較すると、南岳ステージはSiO₂=64-73wt%で古期北岳ステージのうちSiO₂に富むグループとほぼ同じ組成を示すが、始良カルデラ噴出物は桜島火山のものとは異なり、SiO₂=75wt%以上のものが大部分を占める。始良カルデラ噴出物を除けば、全体としてはTiO₂, MgO, K₂Oのハーカー図において1つの直線状トレンドを形成しているように見えるが、P₂O₅のハーカー図ではSiO₂に乏しい部分で組成トレンドが折れ曲がっている。

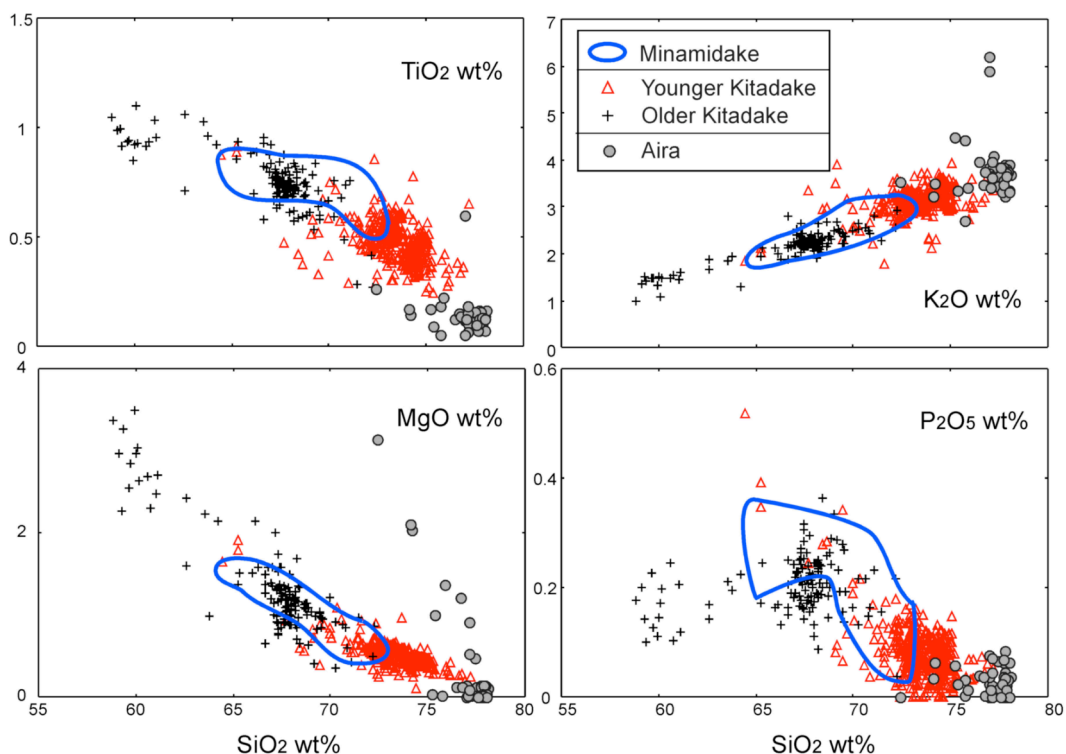


Fig. 5. Compositions of matrix glass and melt inclusions in pyroxene phenocrysts of Minamidake, Younger Kitadake, Older Kitadake and Aira caldera-forming eruption.

8. 議論

8. 1 マグマ混合の証拠

桜島火山西暦1469年以降の噴火に関する岩石学的研究はこれまでに詳細に行われており(例えば, Yanagi et al., 1991; 中川ら, 2011), 全岩化学組成が直線的な組成トレンドを示すこと, 斑晶鉱物の中心部組成がバイモーダルな組成分布を示すこと, 正累帯構造・逆累帯構造を示す斑晶鉱物が共存することなどから, マグマ混合が主要なマグマプロセスであることが指摘されている. またTakahashi et al. (2013) は始良カルデラ地域の噴出物について全岩化学組成を分析し, 新期南岳噴出物と新期北岳噴出物がそれぞれ異なる直線トレンドを示すことから, やはりマグマ混合が起こっていたと結論づけている.

本研究では, 主に新期北岳ステージおよび古期北岳ステージの斑晶鉱物中心部組成を分析した結果, 古期北岳ステージではかんらん石と石英が共存すること, すべての斑晶でバイモーダルまたはポリモーダルな組成分布を示すことから, 複数のマグマが混合していたと考えられる. 一方で新期北岳ステージの斑晶はほぼユニモーダルな組成分布を示すものの, 斜長石や輝石では組成幅が広く, 斜長石では小さいながらも第2のピークが認められること, 大部分の輝石とは組成的に非平衡なMgに富む斑晶が存

在するなどの特徴が認められる. これらの証拠は, 新期北岳ステージでもマグマ混合が起こっていたことを示唆している.

8. 2 各噴火ステージの混合端成分マグマ

26,000年前以降の桜島火山噴出物は, いずれもマグマ混合作用の影響を受けていると考えられるが, その岩石学的特徴は噴火ステージごとに大きく異なる (Table 1, Fig. 3-5). 西暦1469年以降の噴火では, 1471年・1779年噴火で両輝石デイサイト質マグマと両輝石安山岩質マグマが混合していたのに対して, 1914年以降の噴火では, これらに加えてかんらん石を含む玄武岩質マグマが混合に関与するようになったことが明らかにされている (中川ら, 2011). またTakahashi et al. (2013) によると, 新期南岳噴出物と新期北岳噴出物はそれぞれ high-Ti,Pタイプと low-Ti,Pタイプのデイサイト質マグマおよび安山岩質マグマからなり, 安山岩質マグマは玄武岩一玄武岩質安山岩マグマと high-Ti,Pタイプ, low-Ti,Pタイプのデイサイト質マグマとのマグマ混合によって形成されたと考えられている. しかしながら, Takahashi et al. (2013) では斑晶鉱物組成分析が行われていないため, 中川ら (2011) の研究結果との比較検討が不可能であり, さらに古期南岳ステージの噴出物との関係が不明であった.

stage	type	Plagioclase	Orthopyroxene	Clinopyroxene	Olivine	Quartz	Magnetite	ilmenite
		An mol%	Mg#	Mg#	Fo mol%			
Minamidake*	D	40-60	55-68	61-72	-	-	+	-
	A	58-90	65-75	68-80	-	-	+	-
	B	80-95	-	-	75-82	-	-	-
Younger Kitadake	D	40-70	60-70	64-72	-	-	+	+
	A	60-90	65-72	70-83	-	-	+	?
Older Kitadake	R	30-60	58-60?	?	-	+	+	-
	D	40-70	62-72	65-77	-	-	+	-
	A	70-90	67-78	71-82	-	-	+	-
	B	85-90?	-	-	75-80	-	-	-
Aira caldera**	R	30-60	45-60?	-	-	+	+	+
	A	70-90	60-70	-	-	-	+	+

*Togashi et al. (2007)

**Bando and Nakagawa. (2008)

Fig. 6. Characteristics of mixing component magmas of each eruption stage (Minamidake, Younger Kitadake, Older Kitadake and Aira caldera-forming eruption).

そこで本研究では、斑晶鉱物の組成分布と集合斑晶の組み合わせ、斑晶鉱物中のメルトインクルージョンの組成を利用して、各噴火ステージの混合端成分マグマについて考察した。その結果、新期北岳ステージでは単斜輝石・斜方輝石斑晶を含む2種類の斑晶組み合わせが認められるのに対して、古期北岳ステージでは両輝石を含む2種類に加えて、かんらん石斑晶を含むものと石英斑晶を含むものの計4種類の組み合わせが認められることが明らかになった (Fig. 6)。各斑晶組み合わせを構成する輝石のMg[#]やかんらん石のFoから、本研究では便宜的に、かんらん石を含む斑晶組み合わせをBタイプ、両輝石を含む組み合わせをAnに富む斜長石とMgに富む輝石からなるものをAタイプ、Anに乏しい斜長石とMgに乏しい輝石からなるものをDタイプ、石英を含む組み合わせをRタイプと命名した。中川ら (2011) の結果を考慮すると、これらはそれぞれ玄武岩質マグマ (B)、安山岩質マグマ (A)、デイサイト質マグマ (D)、流紋岩質マグマ (R) から晶出した斑晶であると推定することができる。すると、新期北岳ステージでは安山岩質マグマとデイサイト質マグマの混合が起こっていたのに対して、古期北岳ステージでは4種類全てのマグマが混合に関与していた可能性がある。同様に始良カルデラ噴出物は流紋岩質マグマと安山岩質マグマ (ただし単斜輝石斑晶は含まない) の混合作用によって形成されたと考えられる。つまり、29,000年前の始良カルデラ形成噴火以降、噴出中心の違いや休止期によって区分された噴火ステージごとに、混合端成分マグマの組み合わせが異なると言える。また、26,000年前以降の桜島火山の噴火では、いずれのステージでも安山岩質マグマとデイサイト質マグマが混合に関与していたことが明らかになった。

8. 3 各噴火ステージの安山岩質マグマおよびデイサイト質マグマの関係

桜島火山においては、単斜輝石・斜方輝石を含む安山岩質マグマとデイサイト質マグマが普遍的に存在することが明らかになったため、単斜輝石・斜方輝石斑晶とそれらに含まれるメルトインクルージョンの組成から、各噴火ステージのこれらのマグマの特徴について考察した。Fig. 7は、横軸に輝石のMg[#]、縦軸にメルトインクルージョンのSiO₂量を示した図で、輝石のMg[#]が高いものほどインクルージョンのSiO₂が低い傾向が認められる。また、同じMg[#]で比較すると、新期北岳ステージは、古期北岳ステージに比べて明らかにインクルージョンのSiO₂が高く、南岳ステージの組成はその中間にプロットされる。このことは、各噴火ステージ (特に新期北岳ステージと古期北岳ステージ) の安山岩質マグマ同士、ある

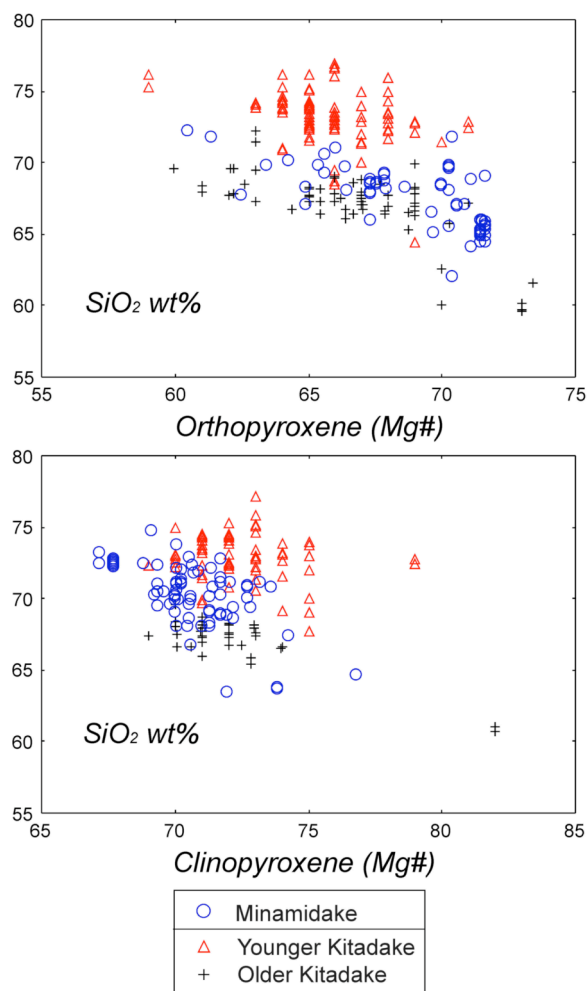


Fig. 7. Mg[#] of pyroxene vs SiO₂ of melt inclusions in Minamidake, Younger Kitadake and Older Kitadake.

いはデイサイト質マグマ同士はそれぞれ異なり、かつ同一のマグマからの結晶分化では生じえないことを示唆している。同様のことは、安山岩質マグマ、デイサイト質マグマ由来と考えられる斑晶鉱物の晶出温度からも支持される (Fig. 8)。共通して存在する輝石斑晶の温度計によると、南岳ステージは約1030-1070度で晶出したと考えられるのに対して、新期北岳ステージでは900-1030度程度と低く、古期北岳ステージでは980-1100度で南岳ステージと同程度である。つまり、安山岩質マグマ、デイサイト質マグマはいずれも、噴火ステージごとに、親子関係のない温度の異なるマグマに入れ替わっていた可能性が高い。

8. 4 始良カルデラ形成噴火に関与した流紋岩質マグマの影響

約29,000年前の始良カルデラ形成噴火は、少なくとも5つの噴火ユニットからなり (Table 1)、その総体積は500km³にも及ぶ (例えば、小林ら, 2013)。本噴火

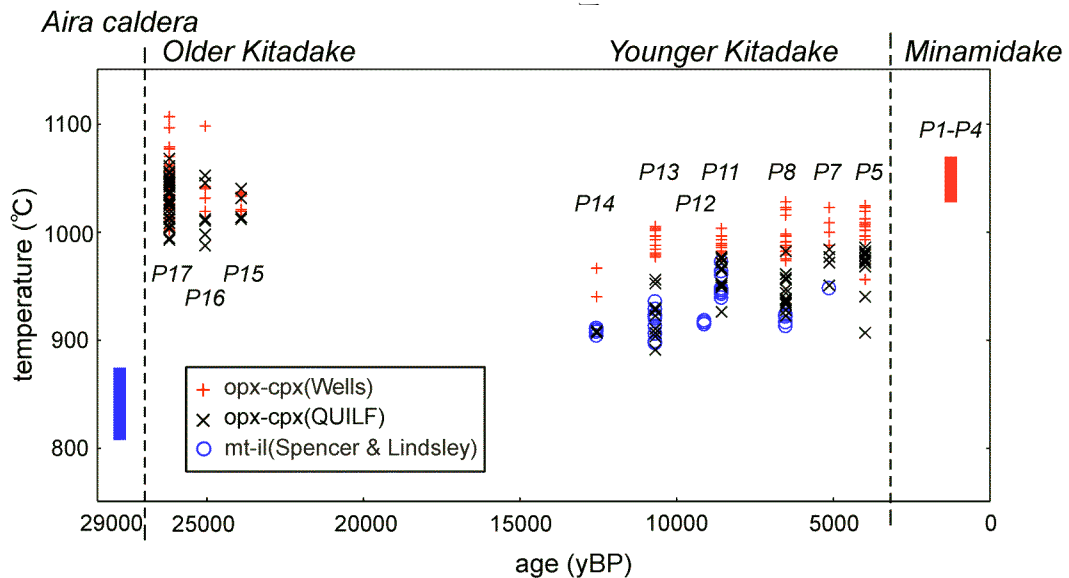


Fig. 8. Crystallizing temperature of pyroxenes and oxides in each eruption of Minamidake, Younger Kitadake, Older Kitadake and Aira caldera-forming eruption.

に關与したマグマに關しては津久井・荒牧 (1990), Arakawa et al. (1998) などにより検討されており, 地殼が大規模に部分熔融して生じた流紋岩質マグマに加えて, それとは起源の異なる苦鉄質マグマが噴火に關与したと考えられている。

今回, 始良カルデラ噴出物の一部についても同様の解析を行ったところ, 石英斑晶とAn₃₀₋₆₀の斜長石斑晶によって特徴づけられる流紋岩質マグマ (R) とよりAnに富む斜長石を含む安山岩質マグマ (A) とが混合していることが明らかになった (Fig. 6)。さらに非常に興味深い点として, このうちRタイプの斜長石斑晶が, 古期北岳ステージに認められるRタイプの斜長石と類似した組成を示すことがあげられる (Fig. 4)。古期北岳ステージのRタイプでは石英と斜長石以外の鉱物組み合わせが不明確ではあるが, Rタイプの斑晶鉱物とその後の桜島火山の活動では認められなくなることを考慮すると, 先行するカルデラ形成噴火の流紋岩質マグマの一部が約3,000年間の休止期において始まった古期北岳ステージの噴火にも關与していた可能性が示唆される。

9. まとめ

桜島周辺のボーリングから得られた始良カルデラ形成噴火以降のテフラ噴出物について岩石学的検討を行った結果, 以下のことが明らかになった。

- 1) 26,000年前以降の桜島火山のテフラ噴出物はいずれもマグマ混合によって形成されたと考えられ, 古期北岳ステージ (P17-P15), 新期北岳ス

テージ (P14-P5), 南岳ステージ (P4-P1) でそれぞれ混合端成分マグマの組み合わせが異なる。

- 2) いずれの噴火ステージでもデイサイト質および安山岩質マグマが關与していた。
- 3) デイサイト質および安山岩質マグマは, 噴火ステージごとに新しいマグマに入れ替わった。
- 4) 古期北岳ステージでは始良カルデラ形成噴火の流紋岩質マグマが關与していた可能性がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり, 火山活動研究センターのスタッフの方々には, 大変お世話になっている。北海道大学理学部の野村秀彦氏・中村晃輔氏には薄片作成において, 松本亜希子氏には波長分散型EPMAの使用に際して大変お世話になった。以上の方々に深く感謝いたします。なお, 本研究は, 文部科学省による「地震および火山噴火予知のための観測研究計画」の研究費の一部を使用した。

参考文献

- 宇都浩三・味喜大介・内海茂・石原和弘 (1999): 桜島火山ボーリングコアの K-Ar 年代と古地磁気測定 —火山活動史解明への複合的取り組み—, 京都大学防災研究所年報, 第42号 B-1, pp. 27-34.
- 宇都浩三・味喜大介・Hoang NGUYEN・周藤正史・福島大輔・石原和弘 (2005): 桜島火山マグマ化学組成の時間変化, 京都大学防災研究所年報, 第48号

- B, pp. 341-347.
- 奥野充 (2002): 南九州に分布する最近約3万年間のテフラの年代学的研究, 第四紀研究, 第41巻, pp. 225-236.
- 小林哲夫 (1986): 桜島火山の形成史と火砕流, 「火山噴火に伴う乾燥粉体流 (火砕流等) の特質と災害」研究成果報告書, pp.137-163.
- 小林哲夫・味喜大介・佐々木寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三 (2013): 桜島火山地質図 (第2版), 地質調査総合センター.
- 津久井雅志・荒牧重雄(1990): 始良火災噴火のマグマ溜り, 火山, 第35巻, pp. 231-248.
- 富樫泰子・中川光弘・宮坂瑞穂・福島大輔・小林哲夫 (2007): 桜島火山, 8世紀からの歴史時代活動期のマグマ供給系の構造と変遷, 日本地球惑星科学連合大会予稿集 (CD-ROM), V156-038.
- 中川光弘・松本亜希子・宮坂瑞穂・富樫泰子・井口正人(2011): 桜島火山の噴火活動様式とマグマ供給系の20世紀からの変化とその意義, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」2010年度報告書, pp. 85-94.
- 坂東道子・中川光弘 (2008): 始良カルデラ形成時のマグマ供給系の構造と噴火プロセス, 日本地球惑星科学連合大会予稿集 (CD-ROM), V231-003.
- Anderson, D.J., Lindsley, D.H., Davidson, P.M. (1993): QUILF: a Pascal program to assess equilibria among Fe-Mg-Mn-Ti oxides, pyroxenes, olivine, and quartz, Computers & Geosciences, 19, pp. 1333-1350.
- Arakawa, Y., Kurosawa, M., Takahashi, K., Kobayashi, Y., Tsukui, M., Amakawa, H. (1998): Sr-Nd isotopic Arakawa, Y., Kurosawa, M., Takahashi, K., Kobayashi, Y., Tsukui, M., Amakawa, H. (1998): Sr-Nd isotopic and chemical characteristics of the silicic magma reservoir of the Aira pyroclastic eruption, southern Kyushu, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 80, pp. 179-194.
- Kobayashi T. (1988): Geological map of Sakurajima volcano, A guide book for Sakurajima volcano, Kagoshima International Conference on Volcanoes.
- Spencer, K.J., Lindsley, D.H., (1981): A solution model for coexisting iron-titanium oxides. American Mineralogist, 66, pp. 1189-1201.
- Takahashi, M., Otsuka, T., Sano, H., Kawamata, H., Yasui, M., Kanamaru, T., Otsuki, M., Kobayashi, T., Ishihara, K., Miki, D. (2013): Temporal Variation for Magmatic Chemistry of the Sakurajima Volcano and Aira Caldera Region, Southern Kyushu, Southwest Japan since 61 ka and Its Implications for the Evolution of Magma Chamber System, Bulletin of the Volcanological Society of Japan, 58, 1, pp. 19-42.
- Wells, P.R.A. (1977): Pyroxene thermometry in simple and complex systems, Contributions to Mineralogy and Petrology, 62, pp. 129-139.
- Yanagi, T., Ichimaru, Y., and Hirahara, S. (1991): Petrochemical evidence for coupled magma chambers beneath the Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, Geochemical Journal, Vol. 25, pp. 17-30.