

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

活動的火山の噴火履歴と噴出物の物質科学的解析による噴火準備過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

ア. マグマ上昇・蓄積過程

(5) 本課題の5か年の到達目標：

噴火予測に関する研究は活動中の火山に地球物理学・地球化学的観測網を整備して、マグマとその移動の検出に主眼がおかれてきた。これらの研究は直前噴火予測においては大きな成果をあげてきたが、近代的な観測が始められてからまだ 100 年余りしか経過しておらず、過去に起こった大規模噴火、多様な噴火様式に対する経験が絶対的に不足している。また国内の活火山の全てに観測網を整備することは現実的ではないが、個々の活火山の将来の噴火ポテンシャルを何らかの方法で評価しておくことは不可欠である。社会的要請の大きい中長期噴火予測及び噴火推移予測のためには、地質学的手法による噴火履歴の解明や過去の噴火推移の理解が不可欠であり、それに加えて噴出物の物質科学的解析によるマグマ発達過程を明らかにすることも必要である。

本課題ではまず活動が特に活発で近い将来に噴火すると考えられ、また噴火シナリオ作成予定であり長期集中観測実施予定の他の研究課題でも対象とする、伊豆大島、桜島及び有珠山を集中的な研究対象とする。これらの火山では、まず地質学的手法により噴火履歴の高精度の解明を目指す。桜島では噴火履歴解明の精度を上げるために、特にトレンチ調査もあわせて実施する予定である。またこれらをもとに噴火履歴及び噴火推移に沿った組織的な試料採取を行い、物質科学的手法によって、地球物理学の観測では追跡不可能な長期にわたる、マグマ系の発達過程及び個々の噴火プロセスの変化を明らかにして、マグマ系の現状を推定する。そして、これらのマグマ系の発達に関するデータを、地球物理学の観測データと融合することによって、噴火準備過程の高精度なモデルを構築し、解明することを目指す。このために他の計画との連携を重視し、特に噴火シナリオ作成に貢献することを目指す。

それ以外の活火山についても、できるだけ多くの火山での基礎的データの蓄積に努める。噴火様式や噴火間隔が様々な活火山で、低い噴出率の火山として蔵王山と十勝岳、歴史時代において噴火頻度は高いが最近の噴火頻度が低下している火山として樽前山、そして表面現象はなく長い休止期にある火山の摩周において、主として研究を実施する。これらの火山について噴火履歴を高精度に求め、噴

出物の岩石学的解析を行うことによってマグマ発達過程も長期にわたり明らかにする。一方、日本と比べて噴火頻度の高い海外の火山、特にカムチャッカの火山についてもロシアとの共同研究でマグマ発達過程を検討し、国内の火山との比較を行う。それらを用いてそれぞれの火山の噴火ポテンシャルを評価し、中長期の噴火予測を行うことを目的とする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

5か年の計画は以下のとおりである。

平成 21 年度においては、桜島ではこれまでの研究を総括するとともに、地表踏査を実施し、トレンチ地点の選定を行うことを主目的とする。有珠山においては、長期のマグマ進化を解明するための試料採取に重点を置く。伊豆大島では文献による噴火記録と地表踏査による噴火推移の対比に試みる。それ以外の火山でもこれまでの研究の総括を行い、それを踏まえた地表踏査を行うことに重点がおかれる。

平成 22 年度においては、桜島でトレンチ調査を実施する。さらに、その結果を踏まえて、次年度のトレンチ地点の選定を行う。有珠山では試料の岩石学的検討を行う。伊豆大島では地表踏査を継続する。それ以外の火山でも地表踏査を継続する。またカムチャッカのクリチェフスコヤ火山において試料採取を行う。

平成 23 年度においては、桜島でトレンチ調査を実施するとともに試料の岩石学的検討を行う。さらに採取試料の岩石学的検討を行う。有珠山においては岩石学的検討を継続するとともに、関連するボーリング探査にも参画する。伊豆大島では岩石学的検討に重点をおく。それ以外の火山でも岩石学的検討を行う。カムチャッカのクリチェフスコヤ火山において試料採取を行うとともに、物質科学的解析をおこなう。

平成 24 年度においては、桜島では試料の岩石学的検討を行うとともに地表踏査も行う。有珠山ではボーリング探査の資料も加え岩石学的検討を行う。伊豆大島及びその他の火山では岩石学的検討を行うとともに、追加の地表踏査を行う。カムチャッカのクリチェフスコヤ火山において物質科学的解析を行い、マグマ系の検討と日本の活火山との比較を行う。

平成 25 年度においては、研究の取りまとめを行い、投稿論文作成を重視する。特に桜島、有珠山及び伊豆大島では噴火シナリオ作成にも協力する。また、複数の火山で中長期噴火予測を試みる。

(7) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要：

以下の 1～3 の項目に分けて計画期間中の成果についてまとめる。

1. 桜島火山研究成果

○歴史時代噴火マグマ供給系の変遷に関する研究

15 世紀から 18 世紀の安永の陸上噴火までは、デイサイト質マグマ(S マグマ)に安山岩質マグマ(A マグマ)が混合した 2 端成分マグマ混合の産物が活動していたことが明らかになった。そして 25 年度には安永水中噴火では噴火直前に玄武岩質マグマ(B1)が少量混合していたこと、大正噴火では安永とは別の玄武岩質マグマ(B2)が大量に混合したことがわかった(図 1)。それ以降、現在まで B2 マグマが S+A の混合マグマに混合する 3 端成分マグマ混合物が活動している。このように安永噴火の後半から玄武岩質マグマの関与がはじまり、特に大正噴火からその関与が顕著になり、噴火様式が変化したと考えられる。さらに 1955 年から中～小噴火が頻発した時期の噴出物を検討したところ、B2 タイプの玄武岩質マグマが多く混合した場合に活動が活発になっていたことが明らかになった。つまり桜島火山の 20 世紀以降の噴火の頻度と規模は、D+A の混合マグマ系への B2 マグマ混合の規模と頻度によって支配されている可能性がある。この結果は地球物理学の観測結果の解釈に重要な制約を与えられとされる。

○2006 年以降の噴火現象の物質科学的モニタリング

2006 年以降の噴火で放出された火山灰および噴石の物質科学的解析を行っている。その結果、2009 年 9 月以降に新鮮なガラス物質が含まれるようになり、その時期から本格的なマグマ噴火に移行したこ

と、またそのマグマは大正噴火以降の噴火と同様に D+A マグマに玄武岩質マグマが混合していることが明らかになった。そのマグマ物質の時間変化を追跡したところ、噴出マグマ中の玄武岩質マグマの影響が大きいほど活動が活発化していること、2009 年 9 月～2010 年 4 月が活動のピークであり、その時期の噴出物が最も玄武岩質マグマの影響を受けていることが明らかになった（図 2）。噴出物への玄武岩質マグマの影響は 2010 年 4 月以降から時間とともに減少し、それに対応して噴火活動度が低下していることが明らかになった。この結果から噴出物の物質科学的解析が活動的火山の噴火活動評価あるいは噴火推移予測に重要であることを示せた。

○噴火履歴に関する研究

地表踏査に加え、トレンチ掘削、ボーリングおよび潜水調査を実施した（図 3）。歴史時代の噴出物については、特に大正噴火と安永噴火の火砕流堆積物の分布の概略が判明した。文明噴火では溶岩の新たな分布域を確認できた。天平宝字噴火では、海中に溶岩が広く分布することを確認し、マグマの噴出量がそれ以降の大噴火とくらべ遜色ないことを明らかにした。これらの成果は火山地質図として出版された。また安永噴火については島への上陸調査および海底試料採取を行った。過去 2.5 万年間の噴火履歴についても再検討を行い、始良カルデラ以降の大規模噴火および南岳成長期のテフラ層序を検討した。これらの調査では同時にサンプルを系統的に採取し物質科学的解析を行った。

○桜島火山の長期マグマ系進化に関する研究

始良カルデラ形成直後から現在までの約 2.5 万年間の桜島火山のマグマ系の変遷を検討した。地表踏査およびボーリングによる試料のうち、数千年前以前のサンプル（軽石）は風化変質が著しく、全岩組成分析ができない。そこで斑晶鉱物組成、メルト包有物および LA-ICP 分析による単斜輝石の希土類元素組成を検討した。その結果、過去 2.6 万年間で 3 種類のマグマ供給系が存在していたことがわかった。これらのマグマ供給系はいずれもデイサイト質な珪長質マグマに、安山岩質マグマが混合している。その中で 26-24ka および歴史時代では、安山岩質マグマに加え玄武岩質マグマも関与した 3 端成分マグマ混合であることがわかった。さらにこのマグマ供給系の変化は、桜島の中で長い休止期が想定される時期を挟んで起こっていたことも明らかになった（図 4）。

2. その他の活火山の噴火履歴・物質科学的解析に関する研究成果

1) 樽前山

火山地質および噴火史の再検討を行い火山地質図として刊行した。さらに 17 世紀以降の歴史時代噴火について物質科学的解析を行い、結晶に富んだ珪長質マグマ（デイサイト～安山岩境界付近の組成）に玄武岩質マグマ注入して噴火活動が開始したこと、その後に成層マグマ溜りが形成され、そこに玄武岩質マグマが繰り返し貫入して噴火活動が続いていることが明らかになった。そして 250 年間の活動で、成層マグマ溜り中の主要なマグマタイプであった珪長質マグマが枯渇して、現在は少量の安山岩質混合マグマのみが存在している可能性を指摘した。

2) 十勝岳

十勝岳について火山地質および噴火史の再検討を行い火山地質図として刊行した。

3) 有珠山

17 世紀以降の歴史時代噴火について物質科学的解析を行った。その結果、珪長質マグマに玄武岩質マグマ注入して噴火活動が開始したこと、その後に成層マグマ溜りが形成されていたことが明らかになった。しかしながら珪長質マグマは 3 の異なるマグマ溜りを形成しており、1667 年、17 世紀後半～1853 年、そして 1910 年～2000 年でそれぞれのマグマ系が活動していることを明らかにした。また 25 年度にはそれぞれの噴火年代の噴出物が物質科学的に識別できることを用いて、溶岩ドームの形成年代の再検討を行い、最初期の 1663 年噴火では溶岩ドームが形成されていない可能性があること、それ以降の全ての噴火では溶岩ドームが形成されたことを新たに明らかにした。

4) 北海道駒ヶ岳

25 年度に 17 世紀以降の歴史時代噴火について、最初期の 1640 年噴火とその次の 1694 年の物質科学的解析を行い、結晶に富んだ珪長質マグマ（デイサイト～安山岩境界付近の組成）に玄武岩質マグマ注入して噴火活動が開始したこと、その後に成層マグマ溜りが形成されたことが明らかになった。し

かしそれぞれのマグマの密度を検討した結果、下部に結晶に富んだ珪長質マグマ、その上位に無斑晶質の玄武岩質マグマという、組成的に逆に累帯していたことが明らかになった。そして 1694 年では玄武岩質マグマの新たな注入なしに、この逆成層マグマ溜りから噴火したことを指摘した。これは噴火の引き金を考えるうえで重要な指摘である。

5) 蔵王

蔵王山の最新活動期について、層序を確立し、試料の岩石学的解析を基にマグマ供給系の発達過程を検討した。噴出物は 5 つのユニットに分けられる。何れの場合も浅部マグマ溜りに深部からの高温マグマが注入することによって噴火が引き起こされた。熊野岳火砕岩、五色岳火砕岩では、噴火が進行するにつれて深部マグマの寄与率が増加した。他の 3 つのユニットでは、ユニット内の活動期間によって供給系、特に浅部マグマ溜りの発達様式が異なる。また、25 年度には得られた結果を基に、想定される噴火推移を検討した(図 5)。

6) 伊豆大島

本研究では伊豆大島火山下のマグマプロセスを明らかにするため、1777-78 年、1950-51 年、1986 年噴出物を対象に、岩石学的・地球化学的解析を行った。特に 25 年度では 1777-78 年噴出物、1950-51 年噴出物、1986 年噴出物の代表的な試料を対象に、高精度の微量元素濃度測定を行った。その結果、1986 年の B・C 火口の噴出物は SiO₂ 量の増加とともに Eu 異常 ($= 2 \times \text{Eu}^*/(\text{Sm}^* + \text{Gd}^*)$) が 0.965 から 0.909 まで系統的に減少していることが明らかとなり(図 6)、それらの噴出物の全岩組成トレンドは、斜長石を主とする結晶の分別、もしくは Eu の負の異常が小さい低 SiO₂ 量のマグマと Eu の負の異常が大きい高 SiO₂ 量のマグマとの混合によって説明できることが分かった。また、斜長石斑晶に富む 1777-78 年の高 Al₂O₃ 量の噴出物には、有意な Eu 異常が認められないことが分かった。このことは、その結果、従来の研究によって指摘されてきたような、マグマ溜り内における斜長石斑晶の浮上・集積作用が起きていなかった可能性を明らかにした。これは、(1) 伊豆大島の玄武岩質マグマの含水量が 5 wt.% 以上であることから、マグマの上昇に伴って減圧されても(=メルト中の水の飽和溶解度が低下しても)メルトの密度が斜長石の密度を上回ることができない点、そして(2) 斜長石斑晶に顕著に富む 1777-78 年の噴出物が Eu の正の異常をもたない点から示唆される。

3. 歴史史料の解説による噴火推移の検討

伊豆大島 1777 年安永噴火、桜島 1779 年安永噴火、浅間山 1783 年天明噴火(図 7)、および青ヶ島火山、有珠山、そして 25 年度には北海道駒ヶ岳の噴火履歴の高精度化をめざして、主に古文書の収集、その成立過程と信頼度の吟味、記録内容の整理を行ない、噴火推移と噴出物の見直しを行なった。また、噴火シナリオ作成の基礎データとして活用した。その成果を学会で発表するとともに日本火山学会誌「火山」論説、と噴火史料集として公表した。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Ban, M., Ohba, T., Fujinawa, A. (2013) B01: Active Volcanoes in Northeast Japan, 2013 IAVCEI Field Trip Guide. Bull. Volcanol. Soc. Jpn. 58, B1-1-34. CD BOOK.

伴雅雄 (2013) 蔵王火山. 日本地質学会巡検案内書. 地質雑, 119, 補遺, 120-133.

Ban, M., Matsui, R., Yamamoto, T., Iwata, N., Fujinawa, A., Nakashima, K. (in press) Petrologic characteristics of the newest stage in Azuma volcano group, Northeast Japan. International Journal of Eruptive History and Informatics

Hasegawa, T., Nakagawa, M. and Kishimoto, H. (2013) Calderas and active volcanoes in central to eastern Hokkaido, 2013 IAVCEI Field Trip Guide. Bull. Volcanol. Soc. Jpn., 58, A1-1-34, CD BOOK.

林信太郎・伴雅雄・大場司 (2013) 鳥海山 1800-1804 年噴火におけるマグマ性の爆発的噴火活動. 歴史地震, 28, 85-90.

Kobayashi, T., Okuno, M. and Tameguri, K. (2013) Kirishima, Sakurajima volcanoes and their source calderas in southern Kyushu. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58 (2), CD-BOOK, B5-1-16.

- 小林哲夫・味喜大介・佐々木寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三(編)(2013) 桜島火山地質図 1:25,000. 地質調査総合センター, 1-8.
- 小杉安由美・中川光弘・清野寛子(2013) 西南北海道, 更新世渡島小島火山の地質と岩石学的特徴. 地質学雑誌, 119, 743-758.
- Kuritani, T., Kimura, J.-I., Ohtani, E., Miyamoto, H. and Furuyama, K. (2013) Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, northeast China. *Lithos* 156-159, 1-12.
- Kuritani, T., Yoshida, T., Kimura, J.-I., Hirahara, Y., and Takahashi, T. (2014) Water content of primitive low-K tholeiitic basalt magma from Iwate Volcano, NE Japan Arc: implications for differentiation mechanism of frontal-arc basalt magmas. *Mineralogy and Petrology* 108, 1-11.
- Kuritani, T., Yoshida, T., Kimura, J.-I., Takahashi, T., Hirahara, Y., Miyazaki, T., Senda, R., Chang, Q., Ito, Y. (2014) Primary melt from Sannome-gata volcano, NE Japan arc: constraints on generation conditions of rear-arc magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, in press.
- Matsumoto, A., Nakagawa, M., Miyasaka, M., Iguchi, M. (2013) Temporal variations of the petrological features of the juvenile materials since 2006 from Showa crater, Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 191-212.
- Miyabuchi, Y., Hanada, D., Niimi, H., and Kobayashi, T. (2013) Stratigraphy, grain-size and component characteristics of the 2011 Shimodeake eruption deposits, Kirishima Volcano, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 258 (1), 31-46.
- Miyamachi, H., Tomaru, C., Yakiwara, H., Iguchi, M., Tameguri, T., Yamamoto, K., Ohkura, T., Ando, T., Onishi, K., Shimizu, H., Yamashita, Y., Nakamichi, H., Yamawaki, T., Oikawa, J., Ueki, S., Tsutsui, T., Mori, H., Nishida, M., Hiramatsu, H., Koeda, T., Masuda, Y., Katou, K., Hatakeyama, K., and Kobayashi, T. (2013) Shallow velocity structure beneath the Aira caldera and Sakurajima volcano as inferred from refraction analysis of the seismic experiment in 2008. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58 (1), 227-237.
- Okuno, M., Nakamura, T., Geshi, N., Kimura, K., Kokubu, Y., and Kobayashi, T. (2013) AMS radiocarbon dating of wood trunks in the pumiceous deposits of the Kikai-Akahoya eruption in Yakushima Island, SW Japan. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, B, 294, 602-605.
- Shibata, T., Suzuki, J., Yoshikawa, M., Kobayashi, T., Miki, D., and Takemura, K. (2013) Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on the origin and magmatic evolution of Quaternary lavas of Sakurajima volcano, southern Kyushu island, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58 (1), 43-58.
- 嶋野岳人・下司信夫・小林哲夫(編)(2013) 諏訪之瀬島火山地質図 1:25,000. 地質調査総合センター, 1-8.
- Takahashi, M., Otsuka, T., Sako, H., Kawamata, H., Yasui, M., Kanamura, T., Otsuki, M., Kobayashi, T., Ishihara, K., and 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. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58 (1), 19-42.
- Takahashi, R. and Nakagawa, M. (2013) Formation of a compositionally reverse zoned magma chamber; Petrology of the AD 1640 and 1694 eruptions of Hokkaido-Komagatake Volcano, Japan. *Jour. Petrol.*, 54, 815-838.
- Kobayashi, T., Imura, R., and Okuno, M. (2013) A Guidebook for Mid-Conference Field Trip, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 1-19.2
- 味喜大介・小林哲夫(印刷中) 古地磁気測定による溶岩の年代推定—桜島および南九州の火山—. 月刊地球, 号外 62.
- 宮坂瑞穂・中川光弘・吉本充宏・小林哲夫・奥野充(2013) 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—「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」2013 年度報告書, pp. 95-104.

中川光弘・長谷川健・松本亜希子（2014）北海道東部，阿寒～屈斜路火山群の成り立ち：小型カルデラが複合した大型カルデラの形成．岩波科学，84，97-102.
奥野 充，高島 勲，長岡信治，鮎沢 潤，稲永康平，今里 博，大淵真吾，葺本信太朗，兼田大道，小林 哲夫（2013）九重火山中西部の熱ルミネッセンス年代．月刊地球，号外 62，32-36.
津久井雅志（2013）有珠火山噴火史料集．140p.

（9）実施機関の参加者氏名または部署等名：

北海道大学大学院理学研究院 中川光弘・吉本充宏・松本亜希子・長谷川 健・宮坂瑞穂

他機関との共同研究の有無：有

山形大学理学部 伴雅雄（ 代表者 ）

東北大学大学院理学研究科 栗谷豪（ " ）

千葉大学大学院理学研究科 津久井雅志（ " ）

九州大学大学院理学研究院 寅丸敦志（ " ）

鹿児島大学理学部 小林哲夫（ " ）

北海道教育大旭川校地学 和田恵治（ " ）

研究協力機関

産業技術総合研究所 古川竜太（ " ）

（10）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：北海道大学大学院理学研究院地球惑星システム科学分野

電話：011-716-2111(代表)

e-mail：

URL：<http://www.sci.hokudai.ac.jp/faculty/section/nature/index.html>

（11）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中川光弘

所属：北海道大学大学院理学研究院地球惑星システム科学分野

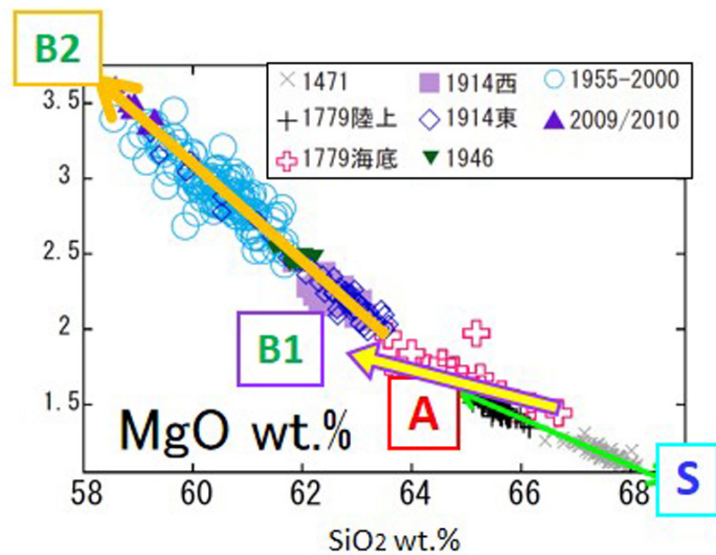


図1．桜島歴史時代噴火噴出物の SiO₂-MgO 図.

1779 陸上噴火までは珪長質マグマ (S) と安山岩質マグマ (A) の混合マグマ。1779 年海底噴火からはそれに B1 玄武岩質マグマ、大正噴火からは B2 玄武岩質マグマが混合している。

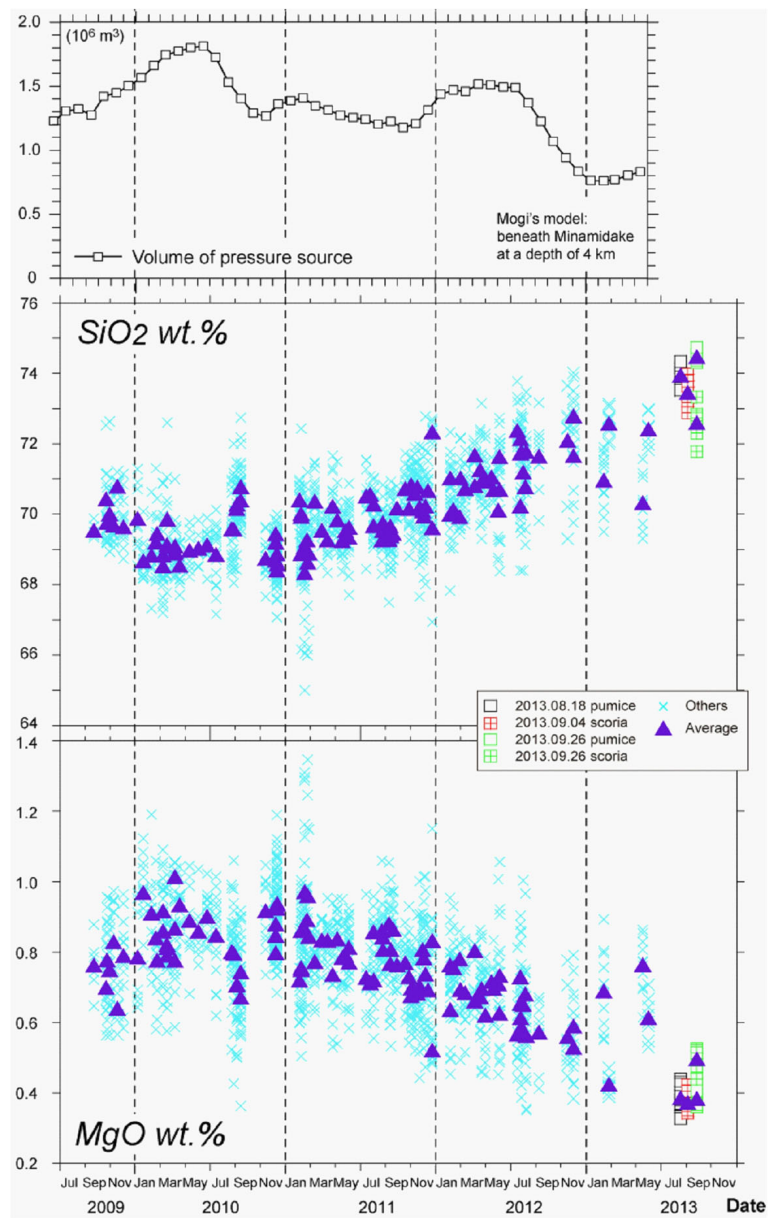


図 2. 桜島火山の 2006 年以降の噴出物中のマグマ物質の基質ガラス組成の時間変化と南岳深部の膨張源の推定堆積の時間変化（最上部の図）。

SiO₂ が低く、MgO が高いと玄武岩質マグマの関与が大きい。

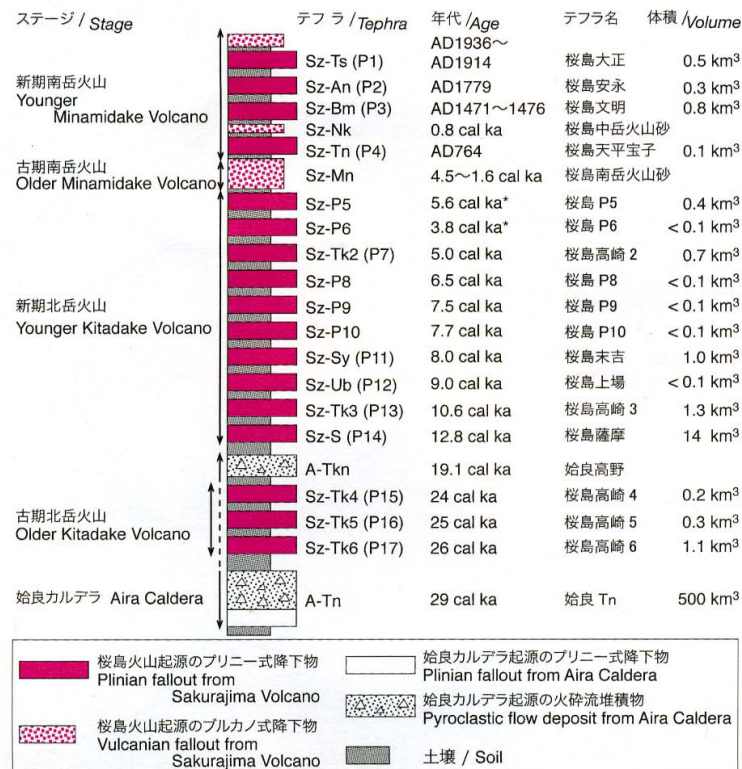


図3. 桜島火山のテフラ層序と年代・噴出量.

テフラ年代は奥野（2002）および小林（2010）による．単位の cal ka は暦年構成した年代で 1000 年前の意味．

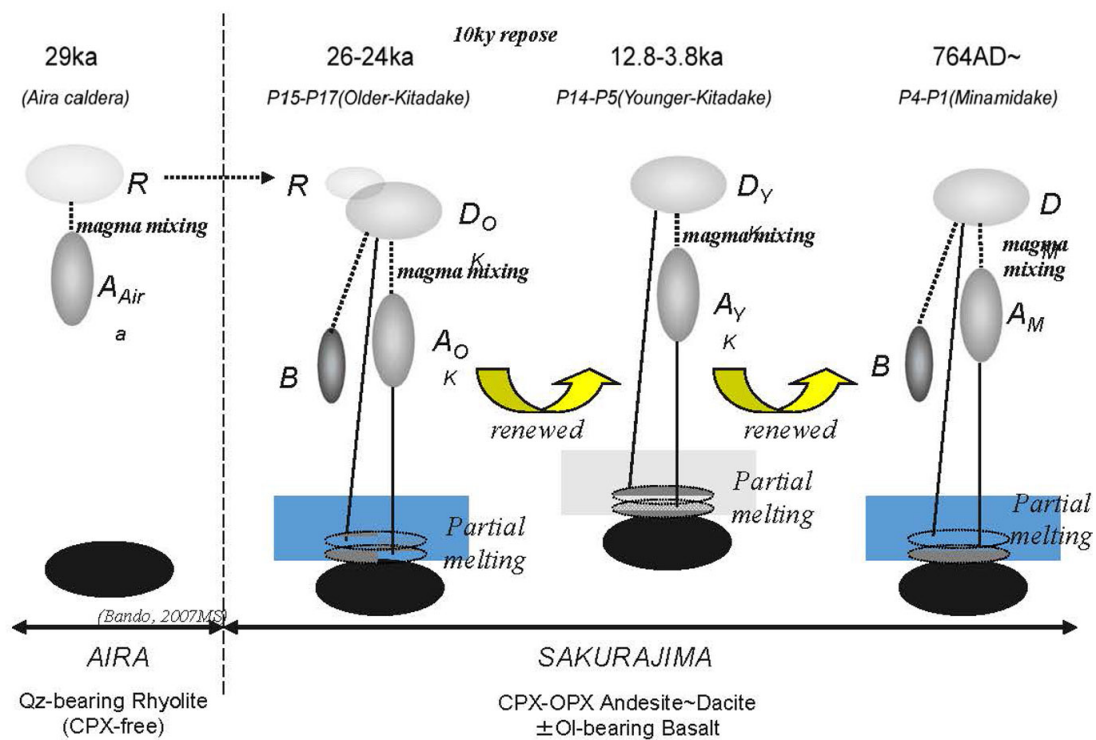


図4. 桜島火山のマグマ供給系の長期進化モデル.

R：流紋岩質マグマ，D：デイサイト質マグマ，A：安山岩質マグマ，B：玄武岩質マグマ．2.6 万年間にマグマ供給系は 2 回更新された．

蔵王山の過去の活動から想定される噴火推移

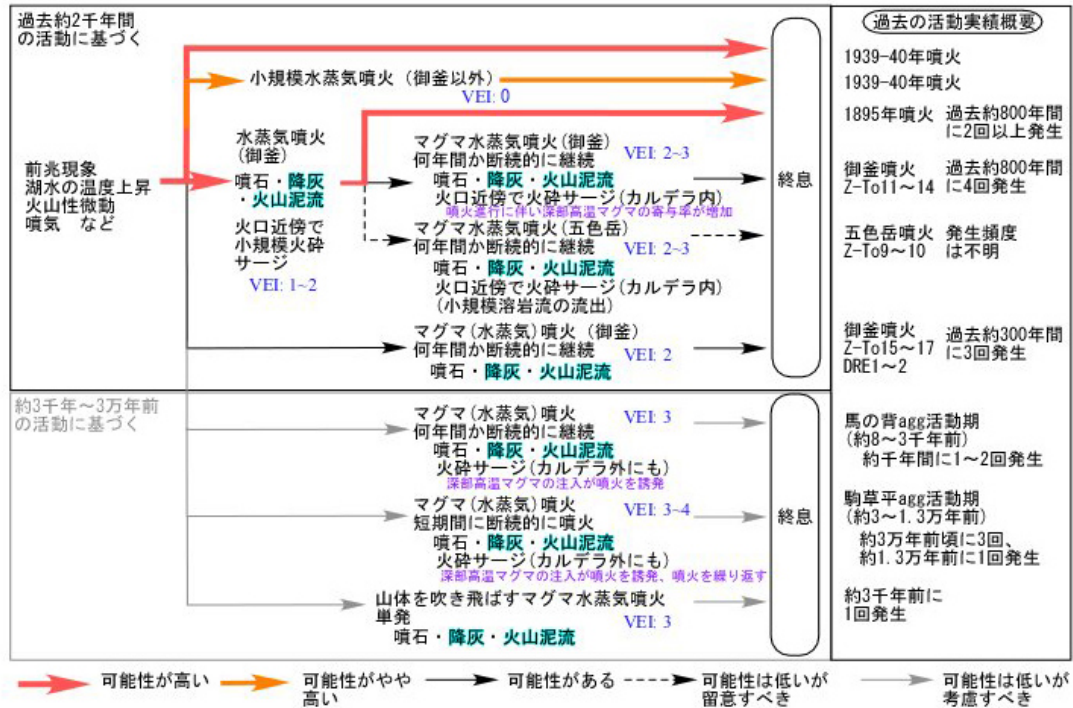


図 5. 蔵王火山の噴火履歴および物質科学的解析結果から見た噴火シナリオ

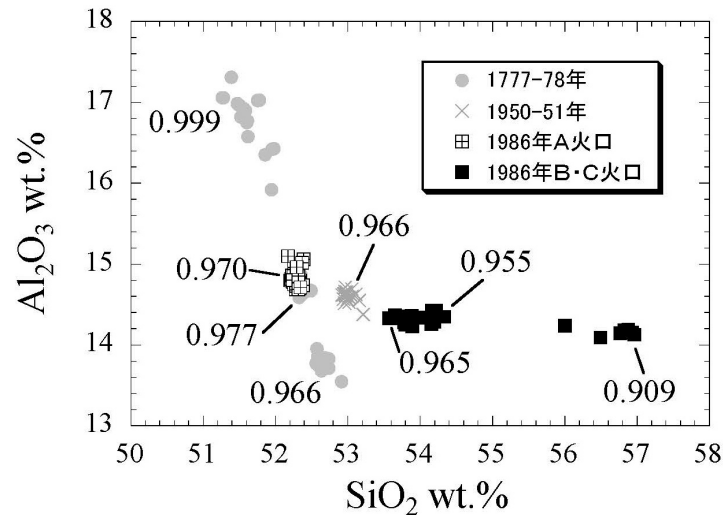


図 6. 伊豆大島の最近の噴出物の全岩化学組成, および代表的な試料の Eu 異常の値.

Eu 異常は, $Eu^* \times 2 / (Sm^* + Gd^*)$ で定義される (アスタリスクは Sun and MacDonough (1989) のコンドライトの値で規格化した濃度を表す)

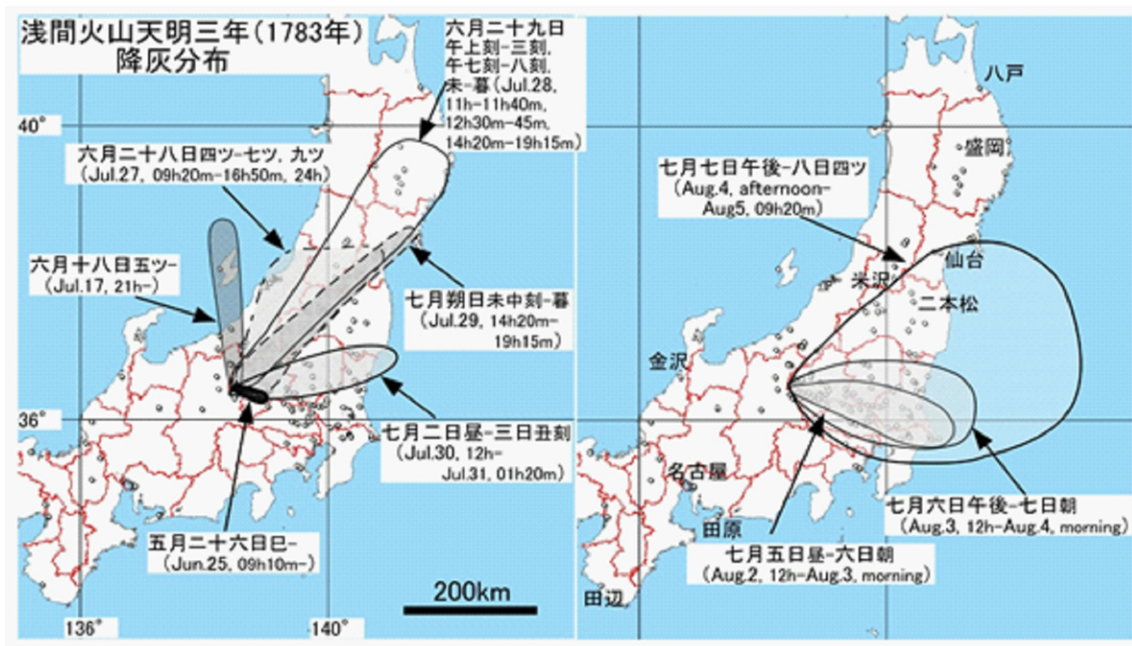


図 7. 浅間山天明三年（1783）の降灰分布