

2 (2) (2-2) 火山噴火準備過程

「火山噴火準備過程」計画推進部会長 井口正人
(京都大学防災研究所)

火山噴火予知研究の目標は、噴火の時期、場所、規模、様式及び推移を予測することであるが、活動的で数多くの噴火履歴があり、多項目観測や各種調査が実施されている幾つかの火山であっても、観測と経験則により異常の原因が推定できる段階にとどまっている。これを、「現象を支配する物理法則を明らかにし、観測結果を当てはめて、将来の予測ができる段階」に引き上げるために、火山噴火準備過程研究計画では、「ア．マグマ上昇・蓄積過程」と「イ．噴火履歴とマグマの発達過程」の解明を2つの柱としている。前者では、マグマ供給系を含む地下の構造や状態とそれらの時間変化を把握することに重点を置き、後者では様々な時間スケールでの火山活動過程を解明するための地質学的調査・研究を行う。両者をあわせて考察することにより噴火現象をモデル化し、噴火シナリオの作成に役立てることを目指している。

研究成果のまとめ

ア． マグマ上昇・蓄積過程

(1) マグマ上昇・蓄積過程の多様性の把握

これまでの研究により、マグマ上昇・蓄積過程に対応する地盤変動の様式には多様性があることが明確に認識され、次のように大別される。①地震活動や地殻変動以外の噴火の兆候を示す現象が観測されていない静穏期にある火山で、山体の膨張と収縮を繰り返す活動（例：伊豆大島）。②山体直下へのマグマの貫入と噴火によるマグマの放出が同時に起こり、マグマ蓄積はその収支バランスの上に現れる活動（例：現在の桜島）、③山体膨張の開始がそのまま主噴火に直結する活動（例：2011年霧島山新燃岳噴火）。

今年度の研究では、同じ火山でも地盤変動の様式が時間とともに変化することが分かった。例えば、伊豆大島では、1990年代からカルデラ内と周辺海域の地震活動に連動する膨張とそれに続く収縮が、1～2年周期で繰り返され、膨張が収縮よりも優勢であるので、長期的には膨張のトレンドにあるとされてきた。ところが、2010年以降、膨張量が収縮量とバランスした結果、長期的な膨張のトレンドも停止した状態にあり、マグマの蓄積量が増加していないことがわかった（気象庁〔課題番号：7019〕、国土地理院〔課題番号：6016〕）。また、最近の1～2年周期で繰り返される膨張・収縮は体積ひずみ計でも観測されるが、1986年噴火以前の体積ひずみ計の記録に遡ったところ、最近繰り返される膨張・収縮の振幅の2倍の大きさで、噴火の3年ほど前から膨張・収縮が繰り返されていたことが判明した（図1：気象庁〔課題番号：7019〕）。伊豆大島は次の噴火に向けての準備過程にあると考えられるが、噴火に近づいていることの判断基準として重要な情報が得られたことになる。また、岩手山では1998年のマグマ貫入と思われる火山体の膨張イベントに先行して、岩手山山腹・山麓地域が収縮する地盤変動が検出された（東北大学〔課題番号：1209〕）。その前の変動についてはわからないが、マグマ貫入に先行するプロセスとして注目できる。

伊豆大島と同様に長期的なマグマ貫入と蓄積が進行している桜島においては、地盤変

動の空間的なパターンが変化していることが分かった。桜島の地盤変動を励起する圧力源は始良カルデラ下と桜島の中央火口丘下にあるが、桜島下にある圧力源は、2009年10月～2010年3月の変動では球状圧力源で近似できたが、2011年11月～2012年3月の変動は開口割れ目でモデル化する方が妥当であることが示された（図2）。2012年7月24日には南岳で噴煙高度5000m以上、30万トンの火山灰が放出される爆発が発生した。これに前駆して21時間前から隆起・膨張が捉えられた。圧力源における体積増加量は $1 \times 10^5 \text{m}^3$ であり、昭和火口爆発に前駆する地盤変動の体積変化量の $10^3 \sim 10^4 \text{m}^3$ よりも1桁以上大きい。このことは、前駆する地盤変動を励起する圧力源の体積変化量とその速度がその後に発生する噴火の規模を判断するための指標となることを意味する（京都大学防災研究所〔課題番号：1809〕）。

(2) 地下構造と火山活動

桜島においては様々な火山体構造調査が行われた（京都大学防災研究所〔課題番号：1809〕）。広帯域MT観測から得られる3次元比抵抗構造では北岳の下3～5kmの深さに顕著な低比抵抗部分が認められ（図3）、地盤変動観測により求められた圧力源の位置と一致しており、北岳の下のマグマ溜りを見ている可能性が高い。毎年繰り返してきた反射法地震探査では反射面の不明瞭化が、また、4年ぶりに実施した空中磁気測量では火口周辺への噴出物の堆積に伴う磁化の獲得を除去した場合の磁化強度の減少が検出された。それぞれ、マグマの北岳下への貫入の繰り返しおよび昭和火口下での蓄熱の結果と解釈される。

一方、深部構造については、大陸内火山を対象とした高精度地震波トモグラフィーにより得られた深部構造と火山の位置関係からマグマ上昇機構が検討された（東北大学〔課題番号：1209〕）

イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

クリチェフスコイ火山、北海道駒ヶ岳、那須岳、蔵王山、伊豆大島、桜島において噴火史および噴火推移と物質科学解析によるマグマ系変遷の解明が進んだ。珪長質マグマの上位にまで苦鉄質マグマが貫入したマグマ系をもつ北海道駒ヶ岳においては、苦鉄質マグマがほぼ消費され、主要なマグマとなった珪長質マグマの温度低下が進行していることが明らかとなった（北海道大学〔課題番号：1004〕）。また、桜島の先歴史時代の降下火砕物について、物質科学的解析を行った結果、約21000年前から約11000年前までの長い休止期間中にマグマ混合の一方の端成分マグマである珪長質マグマの性質が大きく変化したことが明らかになった（図4）（北海道大学〔課題番号：1004〕）。さらに、那須岳においては最新のマグマ噴火である1408～1410年噴火について詳細な噴火履歴が明らかになるとともに、ブルカノ式噴火活動中にマグマの組成が変化したことなど、詳細なマグマ系変遷の推移が明らかとなった（公募研究〔課題番号：2914〕）。これらの結果は、次のマグマ活動の様式の推定の可能性を示すとともに、長期の休止期を経た場合の予測の難しさを意味する。

地球物理学的データと物質科学的データのリンクと時間変化の同期

桜島において地盤変動観測から見積もられるマグマ供給率の推移は噴出物分析による

物質科学的データとも整合的である。マグマ供給率が大きい貫入期に、火山灰付着成分の水溶性成分のCl/Sモル比、火口からのSO₂放出率、温泉ガス中のCO₂濃度は増加し（京都大学防災研究所 [課題番号：1809]）、噴出物の火山ガラス中のSiO₂量が減少する（北海道大学 [課題番号：1004]）。

桜島の噴火活動は2009年から激化し、それと同時にマグマの供給率が桜島の100年間の活動の平均的なレベルまで増加した。それに前駆して観測されたた温泉ガス中のH₂、CO₂の急激な増加は、その後は減少傾向が続き（京都大学防災研究所 [課題番号：1809]）、噴出物の分析により認められる玄武岩質マグマの関与は、その程度を2010年以降弱めている（北海道大学 [課題番号：1004]）。一方、火山灰付着成分水溶性成分のCl/Sモル比およびSO₂放出量は長期的に増加傾向にある。これは、高温のマグマが浅部まで上昇し、しかもその量が増加していることを意味するので、噴火活動が継続したことによる火道の拡大を反映している。

これまでの課題と今後の展望

これまでの観測と研究により、マグマの蓄積はほぼ検知できているとあってよい。多くの火山でマグマ蓄積あるいは貫入イベントは繰り返し発生しており、現状の予知研究の課題は、現在発生しているマグマ貫入イベントが火山噴火発生に結びつくものなのかどうか、火山噴火に結びつくイベントだとすれば、いつ噴火発生の直前過程に移行し、そして噴火するかである。伊豆大島では1-2年周期の膨張と収縮が繰り返され、長期的に膨張のトレンドにあり、マグマの蓄積が進行していると考えられる。2009年以降、昭和火口の小規模爆発が頻発し、長期的な噴火活動期にある桜島においてもマグマの蓄積過程の推移と主噴火に至っていない状況からみると同様である。そこで、考えなければならないのが2011年に発生した霧島新燃岳噴火である。GPS観測により、1年前から山体の膨張が検知されたが、地盤変動率がほぼ一定の割合で膨張が進行し、直前の地震活動の顕著な活発化もなかったため事前発生予測に至っていない。長期的なマグマの蓄積を検知しているにもかかわらず、実戦で利用可能な技術としてはいまだに直前の地震活動の活発化に依存しているのが、実情である。2011年の霧島新燃岳噴火では、噴火直前の地震活動が見られなかったように、地震活動の活発化は噴火直前に常に期待できるわけではなく、その規模や発生様式、地震の種類は多様であり、しかも直前過程である地震活動期間が短く、その活発化を捉えた段階では、避難完了のための予知はすでに手遅れである場合もありうる。マグマ蓄積とその多様性は認識できる段階であり、個々のマグマ蓄積の特性がどのような現象に対応し、噴火に至るまでの準備過程の中でどの段階にあるのかを判断できる研究が必要である。

観測坑道におけるひずみ計は、桜島の昭和火口の爆発に先行する圧力源の膨張を捉え、1つの膨張イベントは確実に噴火活動に結びつくが、膨張開始から噴火発生までに時間を要する場合は、途中のプロセスは単純ではない。図5に発生までに29時間を要した噴火に先行する傾斜とひずみ変化を示すが、膨張と停滞、一時的な収縮を繰り返し、直前では膨張率が加速して爆発に至った。時間と規模のスケールは数十年以上の時間間隔で発生する噴火とは大きく異なるが、数年以上の間隔で発生する火山噴火に至る準備過程の縮図がここにある可能性もあり、小規模であっても発生頻度の高い現象から原理、原則

を導き出し、スケーリング則を確立させていくことにより低頻度大規模現象の予測に結び付けていく努力が必要である。

成果リスト

- Alanis, P., H. Miyamachi, H. Yakiwara, K. Goto, R. Kobayashi, T. Tameguri, and M. Iguchi, 2012, Seismic velocity structure of the crust beneath the Aira caldera in southern Kyushu by tomography of travel times of local earthquake data, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 57, 227-234.
- Ban, M., Hirotoni, S., Ishizuka, O. and Iwata, N., 2012, Petrologic study of explosive pyroclastic eruption stage in Shirataka volcano, NE Japan: Synchronized eruption of multiple magma chambers. In: Al-Juboury A. I. (ed.) *Petrology - New Perspectives and Applications: In Tech - Open Access Publisher*, 57-72.
- Hasegawa, T., Nakagawa, M., Kishimoto, H., 2012, The eruption history and silicic magma systems of caldera-forming eruptions in eastern Hokkaido, Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, 107, 39-43.
- 井口正人, 2012, 桜島における火山灰放出量予測に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 55B, 169-175.
- 井口正人, 2012, 桜島火山の噴火活動—2011年7月～2012年6月—, 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, 平成23年度分報告書, 1-6.
- 井口正人・平林順一, 2012, 桜島・黒神における温泉ガス濃度(2011年・2012年), 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, 平成23年度分報告書, 87-90.
- 井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫, 2012, 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測(2010年～2011年), 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, 平成23年度分報告書, 47-53.
- Iguchi, M., 2013, Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 1-18.
- Iguchi, M., T. Tameguri, Y. Ohta, S. Ueki, and S. Nakao, 2013, Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011 *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 115-135.
- 神田径・小川康雄・高倉伸一・小山崇夫・橋本武志・小森省吾・園田忠臣・佐藤泉・井上直人・宇津木充・Nurnaning Aisyah・Aditya Sebastian Andreas, 2012, AMT法による桜島火山の浅部比抵抗構造調査2011, 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, 平成23年度分報告書, 71-78.
- Kanda, W., et al., 2013, Shallow resistivity structure of Sakurajima volcano revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 251-267.
- 国土地理院, 2012, 伊豆大島の地殻変動, 第113回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院, 2012, 伊豆大島の地殻変動, 第114回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院, 2012, 桜島の地殻変動, 第113回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院, 2012, 桜島の地殻変動, 第114回噴火予知連絡会資料.
- 小林哲夫, 2012, 水蒸気マグマ噴火のデータベース作成上の問題点. 月刊地球, 第34号,

299-304.

- 小林哲夫, 2012, 南九州における最近の火山活動. 鹿児島県地学会誌, No. 100, 55-64.
- 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., 2013, 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*, in press.
- 松本亜希子・中川光弘・宮坂瑞穂・井口正人, 2012, 岩石学的特徴からみる, 桜島火山の活動とその評価-2006年6月~2012年4月の昭和火口の活動について-, 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, 平成23年度分報告書, 109-118.
- Matsumoto, A., M. Nakagawa, M. Miyasaka and M. Iguchi, 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.
- Miura, K., Ban, M., Ohba, T., Fujinawa, A., 2012, Sequence of the 1895 eruption of the Zao volcano, Tohoku Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 247-248, 139-157.
- Miyamachi, H. et al., 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, 227-237.
- 森 俊哉, 2012, 昭和火口と南岳火口の火山ガスHCl/SO₂比の推移(2), 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, 平成23年度分報告書, 91-99.
- 野上健治・井口正人・味喜大介・為栗健・山本圭吾・園田忠臣・佐藤泉, 2012, 桜島昭和火口における噴火活動と地球化学的観測研究-火山灰水溶性成分及びガス放出量による噴火活動評価2009~2012-, 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, 平成23年度分報告書, 105-107.
- 大場司・林信太郎・伴雅雄・近藤梓・葛巻貴大・鈴木真悟・古木久美子, 2012, 最近4500年間の鳥海火山の噴火活動—湿原堆積物に保存された火山灰層の解析—. *火山*, 57, 65-76.
- 大久保修平・田中愛幸・山本圭吾・井口正人・今西祐一・渡邊篤志・坂守, 2012, 桜島火山における絶対重力観測(3), 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」平成23年度分報告書, 65-70.
- Okubo, S. et al., 2013, Absolute gravity variation at Sakurajima volcano from April 2009 through January 2011 and its relevance to the eruptive activity of Showa crater, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 153-162.
- 奥野 充・鳥井真之・西園幸久・稲倉寛仁・小林哲夫, 2012, 九州の活火山データベースで何を指すか? 月刊地球, 第34号, 273-276.
- 奥野 充・鳥井真之・成尾英仁・小林哲夫, 2012, 種子島・屋久島のテフクロロジーの最近の進展. 鹿児島県地学会誌, No. 100, 79-86.
- 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.

- Okuno, M., Torii, M., Naruo, H., Saito-Kokubu, Y., Kobayashi, T., 2012, AMS radiocarbon dates and major element composition of glass shards for Late Pleistocene tephras on Tanegashima Island, Southern Japan. *Radiocarbon*, 42 (2), 825-832.
- 寺田暁彦, 2012, 阿蘇火山中岳の火口湖「湯だまり」の火山学的理解. *月刊地球*, 34, 12, 712-721.
- 嶋野岳人・井口正人・味喜大介, 2012, 桜島で連続採取した火山灰の分光測色による活動評価指標の検討, 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, 平成23年度分報告書, 101-104.
- 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, (in press)
- 為栗 健・井口正人・園田忠臣・市川信夫, 2012, 桜島火山における火山性地震の震源分布(2011-2012年), 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, 平成23年度分報告書, 7-11.
- Terada, A., T. Hashimoto and T. Kagiya, 2012, A water flow model of the active crater lake at Aso volcano, Japan: fluctuations of magmatic gas and groundwater fluxes from the underlying hydrothermal system, *Bulletin of Volcanology*, April 2012, Volume 74, Issue 3, pp 641-655.
- Terada, A. and Y. Sudo, 2012, Thermal activity within the western-slope geothermal zone of Aso volcano, Japan: Development of a new thermal area, *Geothermics*, Volume 42, April 2012, Pages 56-64.
- Tian, Y. and D. Zhao, 2012, P-wave tomography of the Western United States: Insight into the Yellowstone hotspot and the Juan de Fuca slab, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200, 72-84.
- 津久井雅志, 2013, 青ヶ島噴火史料集. 114p.
- 筒井智樹・他, 2012, 桜島火山における反復地震探査(2011年観測), 「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」平成23年度分報告書, 25-38.
- Tsutsui, T. et al., 2013, Structure of northeastern Sakurajima, south Kyushu, Japan, revealed by seismic reflection survey, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 239-250.
- 上木賢太・寺田暁彦, 2012, 草津白根火山の巡検案内書. *火山*, 57, 235-251
- 山脇 輝夫, 野上 健治, 青山 裕, 草津白根山南部の地震活動, 地球惑星科学連合大会予稿集, SCG64-P15
- 植木貞人・太田雄策・出町知嗣・井口正人・園田忠臣・市川信夫, 2012, 桜島火山山腹におけるGPS連続観測用電源の降灰対策, 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, 平成23年度分報告書, 55-58.
- Umeda, K. and Ban, M., 2012, Quaternary Volcanism Along the Volcanic Front in Northeast Japan. In: Stoppa, F. (ed.) *Updates in Volcanology - A Comprehensive Approach to Volcanological Problems: InTech - Open Access Publisher*, 53-70.
- 宇津木充・井上寛之・神田 径・橋本武志・井上直人・小森省吾・井口正人・味喜大介, 2012, 桜島火山におけるくり返し空中磁気観測(2007-2011年), 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, 平成23年度分報告書, 79-86.
- 八木原寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗健・井口正人, 2012, 鹿児島湾奥

部海域における繰り返し海底地震観測，および陸上地震観測網による桜島火山周辺の広域地震活動，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，平成23年度分報告書，13-23.

山本圭吾・他，2012，水準測量による桜島火山の地盤上下変動(2010年11月～2011年11月)，京都大学防災研究所年報，55B，155-161.

山本圭吾・他，2012，水準測量による桜島火山の地盤上下変動(2010年11月～2011年11月)，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，平成23年度分報告書，39-45.

山本圭吾・他，2012，桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定(2011年10月)，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，平成23年度分報告書，59-64.

Yamamoto, K. et al., 2013, Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 137-151.

山下貴範・奥野 充・小林哲夫，2012，霧島火山，牛のすね火山灰－野外調査と室内分析結果のデータベース化－. 月刊地球，第34号，287-292.

Wei, W., J. Xu, D. Zhao, and Y. Shi, 2012, East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism, J. Asian Earth Sci., 60, 88-103.

Zhao, D., 2012, Tomography and dynamics of Western-Pacific subduction zones, Monogr. Environ. Earth Planets, 1, 1-70.

Zhao, D., T. Yanada, A. Hasegawa, N. Umino, and W. Wei, 2012, Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands, Geophys. J. Int., 190, 816-828.