

2 (3) (3-3) 火山噴火過程

「火山噴火過程」計画推進部会長 西村太志
(東北大学大学院理学研究科)

噴火規模や様式、噴火推移を支配する要因を理解するためには、火道浅部におけるマグマの挙動や火山体構造の状態を把握し、それらと噴火規模や様式との関係を明らかにすることが必要である。本火山噴火過程研究計画では、「ア. 噴火機構の解明とモデル化」と「イ. 噴火の推移と多様性の把握」の研究を2つの柱とし、両者をあわせて考察することにより噴火シナリオの作成に資することを目的として研究を進めてきた。このため、計画では、発泡・脱ガス過程などの火道内マグマの挙動を調べるために、繰り返し発生する噴火を対象として集中的な地球物理学・物質化学的観測を行い、多量のデータをもとに噴火機構のモデル化を図った。また、火山体浅部の熱水系や火道周辺構造との相互作用を調べ、多様な噴火形態やその推移を支配する要因を理解するために、過去の履歴を地質学的情報に基づき記載し、その特徴を調べた。

ア. 噴火機構の解明とモデル化

火山噴火機構を調べるために、インドネシア国ロコン山の臨時地震観測点等の波形データ解析を進めた。その結果、爆発地震の初動から約1秒間は、火口底からの火山物質の噴出に先行し、火道の収縮現象が起きていることが明らかとなった。この特徴は、前年度に実施した諏訪之瀬島の爆発地震の解析結果や桜島での先行研究により明らかにされた特徴と類似しており、ブルカノ式噴火発生直前の火道プロセスに共通性があることを示すことがわかった。また、爆発地震の規模別の発生頻度数は、よく使われているべき分布よりも、指数分布により説明できる可能性が高いことがわかった。このことは、爆発地震を引き起こす火道内の圧力解放過程には、それぞれ特徴的なスケールがあることを意味し、火道等の大きさが繰り返し噴火の規模を支配していることを示唆する(東北大学理学研究科 [課題番号: 1213])。

浅間山の山頂部において2012年度に実施した稠密MT/AMT観測のデータ解析を進めた。その結果、深さ数十メートルでは、CO₂フラックスが卓越している火口東側のごく浅部に低比抵抗の領域が広がっていること、深さ数100~1km程度では火道が西下方方向から火口に到達していること反映した低比抵抗領域があること、などが明らかとなった。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1425])。

火山ガスの放出率の測定方法の改良を進めた。噴煙およびその周りに存在する大気中の火山灰による紫外線の散乱効果を補正する手法を開発し、二酸化硫黄放出率を高精度で算出できる手法を開発した。さらに、頻繁に火山灰を噴出している桜島火山のデータに適用し、二酸化硫黄の放出率が減少あるいは増加して爆発に至る過程を定量的に示すことに成功した。そのほか、スキヤニング装置の小型化、通信・制御系の低消費電力化を進め、諏訪之瀬島において、太陽電池を用いた自動連続観測をすることに成功した(東京大学地震研究所 [課題番号: 1425])。

伊豆大島で平成18年度より継続している自然電位の連続記録について、火山活動とは関係のない年周変化を地表面からの蒸発を考慮した雨水浸透過程で説明した。また、山

麓での自動観測の効率化を図るため、火山ガス濃度が上昇した際に観測する「火山ガス感応起動型自動観測装置」を開発し、桜島において観測を開始した。脱ガス活動によって形成された変質帯が発達している雌阿寒岳火山において、自然電位およびAMT法による電磁探査を実施するとともに、数値シミュレーションによって低比抵抗の変質帯分布と自然電位の発現様式を明らかにした。(産業技術総合研究所 [課題番号：5009])。

個別要素法による3次元応力場におけるマグマ移動シミュレーションを行い、噴火/噴火未遂の支配条件について物性パラメータ、マグマ圧、応力場の依存性を調べた(防災科学技術研究所 [課題番号：3014])。磐梯山で発生した山体崩壊を伴った1888年水蒸気爆発機構について、噴火に先行して発現した地震活動、古文書に残る噴火活動についての検討を重ね、水蒸気爆発の高温熱水源について考察した。(公募研究[課題番号：2911])

イ. 噴火の推移と多様性の把握

水蒸気爆発の発生や熱水系に関係する浅部水環境を理解するために、有珠2000年新山域を対象に試錐および構造探査データをもとに浅部構造の検討を進めた。試錐は、2000年新山北麓で、地震探査およびMT探査から推定された貫入マグマを示唆する背斜状を呈する構造の北翼において行った。その結果、深さ500mまでに2000年噴火時の貫入マグマは確認されなかった。また、深さ90m前後で65度を示す孔底温度や地温勾配は、有珠山周辺の温泉井と変わらないことから、浅部にマグマ貫入した可能性は低いことが明らかとなった。貫入マグマを表すと想定した背斜状の構造は、電気検層結果と比抵抗構造に基づく、地層境界と解釈され、また、山体変形を及ぼした火山性圧力源により変形したと推察された。また、深さ約50mから500mの浅部構造を形成する新規安山岩層と荘珠内川層は、変質作用を受けたカオリンを部分的に含むスクメタイトであったこと、空隙率と透水係数から推定される高空隙率難透水性の粘土層であることがわかった。(北海道大学理学研究科 [課題番号：1007])。

噴火規模と頻度の関係について、平成22年度に引き続き、検討を進めた。日本列島やインドネシア、チリなどの地域の個別火山のVEI(火山爆発指数)を調べた結果、全地球の火山にたいするVEIの頻度分布と同じく、べき乗則が成り立っていることが明らかとなった。また、カルデラ噴火のようなVEI6以上の低頻度大規模噴火について、この規則性が保持されている。このことから、規模の大きな噴火に対して、小さな規模の噴火とは別の、特別の過程があるわけではないことが示唆された。(東京大学地震研究所 [課題番号：1426])。

これまでの課題と今後の展望

平成21年度から25年度の5年間にかけて、噴火機構の解明とモデル化および噴火の推移と多様性の把握を目的にして進められた研究に対して、主な成果と今後の課題についてまとめる。

国内の浅間山、諏訪之瀬島、霧島、桜島に加えて、インドネシア国のスメル山、ロコン山も観測対象として、繰り返し噴火について観測研究を進めてきた。その結果、ブルカノ式噴火に関して、前兆現象などの特徴を明らかとすることができた。まず、火口から数百メートルから1 km以内に高感度の傾斜計や広帯域地震計を設置し、山体変形データを記録することにより、火道内マグマ上昇や火山性ガス集積等による噴火直前の山体

膨張を検知することが可能であることがわかった。地震波の最大値をもとにした爆発規模は、多数の事象を平均的に見ると、噴火直前の山体膨張量の増加とともに大きくなること、噴火の様式によって山体膨張の時間変化に違いがあることがわかった。これらの関係は、ブルカノ式噴火という規模の小さな爆発現象に限られるものの、規模・様式を観測データに基づき予測できる可能性を強く示唆している。また、山体膨張の大きさや時間変化は、火道流モデル等を通してマグマ揮発性成分の挙動を考えたモデルで説明することができた。ただし、山体変形の大きさや時間変化は個々の噴火に着目してみると必ずしも平均的な特徴と常に同じではないため、そのような多様性の評価と予測への応用は今後の課題である。モデルの高度化をすすめて、観測量との比較を実施することにより、現象の支配要因をより定量的に明らかにすることができるだろう。

プリニー式などの大噴火について、噴火規模に関する重要な知見が得られた。全世界で発生する火山噴火を、噴出物量の常用対数に比例する爆発指数（VEI）で評価すると、VEIの発生頻度はべき分布で説明できることが知られていた。これは地震のマグニチュードと発生頻度の関係式（グーテンベルグ・リヒターの式）と同じである。このような統計的性質を、噴出物量記録の多い桜島や富士山、伊豆大島等の個別火山について調べた結果、同様の関係式が成り立つことが明らかになった。また、日本やチリの地域に存在する火山全体でみると、VEI 2の小噴火からカルデラ噴火級の巨大噴火、VEI 6クラスまでこのべき分布で説明できることがわかった。べき分布は火山噴火現象が自己相似的であることと解釈できるので、小さな噴火を調べることによって、大噴火や巨大の発生過程の理解や予測に役立つ可能性があると言える。しかしながら、前述したブルカノ式噴火については、爆発地震の最大振幅という指標で見た噴火規模で評価すると、必ずしもべき分布ではないこともわかった。世界各地で多項目観測で精力的に調べられているこのような繰り返し噴火に関する知見を、甚大な火山災害を及ぼす大規模噴火にどのように応用できるか注意を払いながら、研究を進めていくこと重要であろう。

噴火シナリオの高度化に関する研究も5年間の研究実施により、その役割や問題点が具体的になってきた。噴火履歴や現在の火山学的な知見をもとにして作成された、桜島や伊豆東部火山群等、インドネシア国シナブン山などの確率を付した高度な噴火事象系統樹は、それぞれの火山における噴火活動を俯瞰的に理解することに大きく役立てられた。また、行政担当者の火山防災施策の立案するためにも効果的であった。火山ハザードマップはすでに多くの火山で導入されているが、今後、火山活動の推移を記載した噴火事象系統樹の普及を図ることにより、行政機関や地域住民が噴火発生後の対応を考える上でも役立てられるであろう。しかしながら、これまでに作成した系統樹の中の事象分岐の確率は、過去の噴火履歴に基づき付与されている。噴火推移の予測は大きな課題であると言われてきたが、地球物理学的データや噴出物の解析／分析結果、あるいは理論的な知見の中には、事象分岐予測に役立てられる可能性のあるものも少なからずある。これらの最新の科学的知見を最大限利用した噴火事象系統樹を作成し、より効果的な防災・減災・避難対策の立案／実施に役立てるための研究が必要である。

5年間の観測研究により、マグマ供給系・熱水システムの時空間分布の推定精度が向上し、噴火活動や火山活動、その発生場である火山体構造との関連性が明らかとなってきた。浅間山では、火山性地震の震源分布、地殻変動観測に基づく火山性圧力分布、人工地震探査および地震波干渉法による地震波速度構造、MT/AMT探査とミュオンによる火

口浅部の密度分布構造の調査が行われ、地殻下部付近から火口に至るマグマ供給系のモデル化が行われた。有珠山では、稠密な地震・電磁気学的構造探査が実施されるとともに、過去のデータの再利用により、中期的な熱活動変化の定量的な評価もできるようになった。これらの結果に加えて、試錐探査や周辺温泉環境の調査結果をもとに、2000年新山における水蒸気発生場の理解が進められた。試錐は貫入マグマを捕らえられなかったものの、水蒸気爆発や潜在溶岩ドーム形成の発生環境の複雑性が明らかとなってきた。また、伊豆大島や薩摩硫黄島などにおいて、自然電位やMT探査および熱流体シミュレーションにより浅部熱水系活動のモニタリングおよびその理解が進んだ。また、この5年間の研究実施により、火山ガス観測は、自動観測システムの開発が進んだ。実地観測とデータ解析が進み、爆発や微噴火の発生直前の火山ガス量の低下などの現象が検知されるなど、噴火直前の火道内プロセスの理解が進んだ。噴火発生前後に限らず、安定的な観測体制を整えることにより、定常的な噴気活動の定量化が進み、中長期的な火山活動のあたらしい理解の進展が期待される。今後もこのような、観測の稠密化、解析技術の向上を進め、火山発生場の時空間的な揺らぎを定量的に評価することにより、多様な火山活動を系統的に理解し、噴火推移を予測する上での土台となる情報を高度化することができよう。

成果リスト

- Nishiyama R., Y. Tanaka, S. Okubo, H. Oshima, H. K. M. Tanaka, T. Maekawa, Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3-D density structural analysis of volcanoes: Case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan, *J. G. R.*, DOI:10.1002/2013JB010234, 2014.
- Nishimura, T., Iguchi, M., Yakiwara, H., Oikawa, J., Kawaguchi, R., Aoyama, H., Nakamichi, H., Ohta, Y. and Tameguri, T., 2013, Mechanism of small vulcanian eruptions at Suwanosejima volcano, Japan, as inferred from precursor inflations and tremor signals, *Bull Volcanol.*, 75: 779, DOI 10.1007/s00445-013-0779-1.
- Shimano, T., Nishimura, T., Chiga, N., Shibasaki, Y., Iguchi, M., Miki, D., Yokoo, A., 2013, Development of an automatic volcanic ash sampling apparatus for active volcanoes, *Bull Volcanol.*, 75: 773, DOI10.1007/s00445-013-0773-7.
- Nakamichi, H., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Horikawa, S., Okuda, T., Yamazaki, F., 2013, Continuous long-term array analysis of seismic records observed during the 2011 Shinmoedake eruption activity of Kirishima volcano, southwest Japan, *Earth Planets Space*, 65, 551-562.
- 中道治久・青山裕・西村太志・八木原寛・太田雄策・横尾亮彦・井口正人, 2013, 諏訪之瀬島火山における火口に近接した地震計アレイ観測－2010年10月～11月実施－, 京都大学防災研究所年報, 56B, 227-235.
- Shimano, T., Geshi, N., and Yakiwara, H., 2013, Suwanosejima-Lighthouse of East China Sea: Ongoing Strombolian activity and proximal facies of the 1813 eruption. Guidebook of Pre/Post-conference field trips IAVCEI 2013, Kagoshima, Japan, A3. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, 58, 2, CD book.
- 嶋野岳人・下司信夫・小林哲夫, 2013, 諏訪之瀬島火山地質図. 火山地質図17, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 8pp.

- Takeo, M., Y. Maehara, M. Ichihara, T. Ohminato, R. Kamata, and J. Oikawa, Ground Deformation Cycles in a Magma-effusive Stage, and Sub-Plinian and Vulcanian Eruptions at Kirishima Volcanoes, Japan, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/jgrb.50278, 2013.
- Aoki, Y., M. Takeo, T. Ohminato, Y. Nagaoka, and K. Nishida, Structural controls on magma pathways beneath Asama Volcano, Japan, *Geological Society London Special Publications*, 380, 2013.
- Nagaoka, Y., K. Nishida, Y. Aoki, M. Takeo, and T. Ohminato, Seismic imaging of magma chamber beneath an active volcano, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 333-334, 1-8, doi:10.1016/j.epsl.2012.034, 2012, 2012.
- Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato, Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L04304, doi:10.1029/2011GL050542, 2012.
- 中田節也 (2014) 大噴火の溶岩流・火砕流はどれほど広がるか。岩波科学, 84, 49-52.
- Kazahaya R., Mori, T. and Yamamoto K., Separate quantification of volcanic gas fluxes from Showa and Minamidake craters at Sakurajima volcano, Japan. *J. Volcanol. Soc. Of Japan*, 58, 183-189, 2013.
- Mori T. and Kato K., Sulfur dioxide emissions during the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Japan. *Earth Planets Space*, 65, 573-580, 2013.
- 浜口博之・植木貞人, 2012a, 1888 年磐梯山水蒸気爆発に関するノートー (1) 爆発源の位置と噴出方向に関する再検討ー, *火山*, 57 巻, 3 号, 111-123.
- 浜口博之・植木貞人, 2012b, 1888 年磐梯山水蒸気爆発に関するノートー (2) 「東国旅行談」に描かれた火山活動の含意ー, *火山*, 57 巻, 3 号, 125-129.
- Bani, P., A. J. L. Harris, H. Shinohara, F. Donnadieu, 2013, Magma dynamics feeding Yasur's explosive activity observed using thermal infrared remote sensing. *Geophys. Res., Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50722.
- Miwa, T., N. Geshi and H. Shinohara, H 2013, Temporal variation in volcanic ash texture during a vulcanian eruption at the Sakurajima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 260, 80-89.
- Mori, T., H. Shinohara, K. Kazahaya, J. Hirabayashi, T. Matsushima, T. Mori, M. Ohwada, M. Odai, H. Iino, and M. Miyashita, 2013, Time-averaged SO₂ fluxes of subduction-zone volcanoes: Example of a 32-year exhaustive survey for Japanese volcanoes. *J. Geophys. Res. Atm.*, 118, 1-13, doi:10.1002/jgrd.50591.
- Shinohara, H., 2013, Volatile flux from subduction zone volcanoes: Insights from a detailed evaluation of the fluxes from volcanoes in Japan. *J. Volcanol. Geothermal. Res.*, 268, 46-63, 10.1016/j.jvolgeores.2013.10.007.
- Shinohara, H., 2013, Composition of volcanic gases emitted during repeating Vulcanian eruption stage of Shinmoedake, Kirishima volcano, Japan. *Earth Planets Space*, 65, 667-675.