

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する。このような観点から、本計画では、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る。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る。さらに、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、その特徴を明らかにする。

ア. 噴火機構の解明とモデル化

爆発的噴火の直前現象と噴火過程との関係及びそのメカニズムを明らかにするために、繰り返し噴火を行う諏訪之瀬島及びスメル山で観測研究を進めた。諏訪之瀬島火山において、火山灰放出に伴う連続微動の停止と山体膨張の発現開始時刻の同期から、火道上部の「ふた」形成により火道最上部に圧力が蓄積され山体膨張が生じ、地震波解析からその圧力は噴火時に解放されることが明らかとなった。地震計アレーデータの解析から、爆発地震の地震波は微弱な初動に続くS波、その約1~2秒後に続く表面波からなることが明らかとなった(図1)。理論走時及び山体地形等を考慮した理論波形と比較すると、S波と表面波は、それぞれ、深さ200~800 mの震源と「ふた」による火口直下の圧力源から主に励起されたと推察された。傾斜計では検知できないこのような「ふた」の形成は、噴火直前の微小な火山ガス量の低下としてもとらえられた。スメル火山(インドネシア)において、1観測点の重合した傾斜データから求められた「山体膨張量が大きいほど噴火規模が大きくなる」という特徴(昨年度報告)も、個々の噴火について解析した場合も認められるものの、1桁程度の誤差を伴うことから、個々の噴火規模を予測するにはノイズ軽減化や多点観測による信頼性向上などの対策が必要であることがわかった(東北大学理学研究科[課題番号:1213])

爆発的噴火を引き起こす火道浅部構造を解明するために進めてきた浅間山の観測研究では、雑微動を用いた地震波干渉法により、火山体西部の深さ5~10 kmに、局所的なS波の低速度領域が存在することを明らかとした。さらに、これまでに実施された比抵抗探査、地震波構造探査及び2004年噴火で明らかになった浅間山直下のマグマ供給経路、ミュオングラフィによる密度分布、傾斜変動などの各種観測データ解析結果を統合することにより、上部地殻から浅間山山頂火口に至るマグマの供給経路が明らかとなった(東京大学地震研究所[課題番号:1425])。

火山ガスの連続及び繰り返し観測研究により火山噴火メカニズムの理解が進み、また火山活動のモニター手法の開発が進められた。霧島山のブルカノ式噴火前の二酸化硫黄放出率の減少は、噴火30分前から膨張を示す傾斜変化や火口中央部噴出孔からの噴煙活動停止の他データとの比較から、噴火直前の噴出孔閉塞により生じていると推察された(東京大学理学研究科[課題番号:1504])。口永良部島においては、山頂部の膨張や地震活動の活発化、消磁と同期した火山ガス組成の変動現象を説明するモデルを構築した。霧島火山では、Multi-GASシステムを用いた火山ガス組成変動の連続観測を行うと

ともに、無人飛行機による噴火直後の火山ガス組成の推定を行った。薩摩硫黄島火山を対象としたマグマ-熱水系のシミュレーションの結果（図2）と、地表温度分布測定結果との比較から、火山ガスの供給が地下300m程度の浅所で生じていること、火山ガスが凝縮した酸性熱水の流動が自然電位異常の発生要因として重要であることが明らかになった（産業技術総合研究所[課題番号:5009]）。また、噴煙の時空間分布のパターンマッチングから推定される噴煙速度の時空間分布に基づきガス放出率を決定する新しい方法を考案するとともに、ガス放出率自動測定用のパニング装置の長期稼働を行った（東京大学理学研究科[課題番号:1504]）。

そのほか、空振計と地震計データの相互相関解析を利用した、風のノイズに影響されずに火口からの微弱な空振波の励起を検知する手法を開発し、浅間山や霧島新燃岳の観測データに適用してその有効性を示した（東京大学地震研究所[課題番号:1425]）。個別要素法による3次元マグマ移動シミュレーションを実施し、噴火/噴火未遂の支配条件について、物性パラメータ、マグマの過剰圧、応力場等の依存性を評価した。また、三宅島の噴火履歴に対し、Brownian passage-time modelを適用し、噴火確率を求める手法を示した（防災科学技術研究所[課題番号:3014]）。

イ. 噴火の推移と多様性の把握

有珠山における浅部噴火発生場の検証研究として、昨年度までに得られた人工地震探査、低高度稠密空中磁気測量や熱観測データの解析を進めた。2001年と同様に2000年新山を概ね南北に横断する人工地震探査の測線を設置し、屈折法や反射法を行った。解析の結果、噴火活動終息直後から始まる沈降の中心にあたる新山頂部付近は、2001年に比べてP波速度が増加しており、浅部火山体構造で圧密が深部に及んでいることなどが示唆された。低高度稠密空中磁気測量のデータに、拡張交点コントロール法を適用し直流成分まで含めた10年間の地磁気異常時間変化を求めた結果、2000年新山域、山頂火口原及び昭和新山の3地域に、冷却帯磁傾向が認められることがわかった。一方、1910年噴火で生じた明治新山付近には有意な変化は認められず、地下に貫入したマグマの大きさや冷却過程の違いを反映していることが示唆された。さらに、昨年度に実施した空中赤外熱映像観測や氷熱流計による定点観測データなどをもとに、2000年新山地域及び山頂部における熱放出率の経年変化を調べた結果、新山付近の噴気地からの放熱率は、噴気地の拡大とともに増大し噴火3~5年後をピークに減少に転じていることがわかった。一方、1977-82年噴火で生じた噴気地は噴火30年後も約40MWの放出量を保っていることから、両者には、表面熱活動を支える貫入マグマの量や熱水循環システムの発達の違いがあると推察された（北海道大学理学研究科[課題番号:1007]）。

噴火推移の発生予測をする上で重要な、噴火活動度の評価を行った。世界全体の火山の噴火事象をまとめて得られている経験則「噴火規模（VEI）が大きくなるにつれて発生頻度の対数は線形に小さくなる」について、個別の火山でも成立するか検討した。大規模噴火は長期間データを対象とし、比較的小さな噴火は最近のデータをもとにして、1000年で規格化した発生数を求め、噴火の規模の発生頻度を調べた。その結果、個々の火山について求められたVEIに対する発生頻度の減少度は、火山によって微妙に異なるものの、全世界の火山から求められた現象度とあまり大きく変わらないことがわかった（図3）。ただし、巨大噴火を発生する火山についてみると、この発生頻度の減少度が小さくなる。このことは、カルデラ噴火のような巨大噴火とそれ以外の”一般的な”噴火は、噴火システムにおいて違いがあることを示唆している。そのほか、年~数百年の期間を対象とする噴火の長期的予測を数値的に考えるデータや噴火事象の時系列の特徴について考察を進めた（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年度より進めてきた観測研究により、ブルカノ式噴火の発生直前に、山体膨張や微動停止、火山ガス停止が発現する事例が数多くあることが明らかとなった。今後も地震・地殻変動などの地球物理学的観測及び火山ガス観測などを継続・拡張して実施し、噴火規模や様式、発生時期とこれらの現象との関係について、幅広いデータに基づく噴火予知に関連する経験則を得ていくことが必要不可欠である。また、複数の火山で類似の現象が観測されていることから、これらの直前現象を引き起こす火道内プロセスの解明及び噴火メカニズムとの定量的な関係の理解を深めることが必要である。稠密な観測から火道内圧力の時空間分布を推定するとともに、火山ガス放出量やマグマ物性などの時間変化を説明するモデルの構築を行い、異なる火山の爆発的噴火に関する比較研究を積極的に推進することにより、より客観的な噴火予知方法の構築が可能となると考えられる。

多項目の観測データにもとづいた火山噴火現象の解明とともに、地下浅部のマグマ・熱水活動を定量的に記述することも求められる。薩摩硫黄島で進められた非噴火時の浅部活動についてのマグマ-熱水系シミュレーションを用いた定量的な理解などは、今後起こりうる新たなマグマ貫入や火山活動変化を評価する上での、背景となる火山活動の定量データである。このような観測に基づく定常な非噴火時の火山活動の評価は、噴火発生の前兆現象の理解に役立ち、噴火様式、推移に関する基礎的な知見となることから、今後も積極的に進める必要がある。次年度から本格的に始まる有珠で実施される試錘探査によるその場測定は、水蒸気爆発や溶岩ドーム、あるいはプリニー式噴火という異なる噴火様式と発生場の関係を調べる第一歩であり、成果が期待される。

噴火シナリオは、系統樹という形で火山ごとに作成されてきた。伊豆東方沖火山群では、分岐とその確率を過去のマグマ貫入事象や噴火事象などの経験データをもとにして系統樹にまとめられている。これは、火山周辺自治体や住民にとって、また、火山学者にとっても火山活動全体を俯瞰的に理解する上で非常に役立った。火山活動の系統的な理解は、防災対策や避難行動を考える上で重要であり、今後も、同様のシナリオを作成していくことが重要であることは言うまでもない。一方、系統樹だけでなく、噴火規模に対する発生頻度を、過去の履歴を元に個別火山で明らかにしたことは重要である。大噴火と小噴火の発生する割合は、巨大噴火を除いて、いずれの火山でも大きく違わない、という統計的事実は、中長期的な噴火活動の予測に役立つ。火山噴火現象の理解には、今後も、このような統計的なアプローチも積極的に加えることが必要である。

成果リスト

- Aiuppa A., Shinohara H., Tamburello G., Giudice G., Liuzzo M., Moretti R., 2011, Hydrogen in the gas plume of an open-vent volcano, Mount Etna, Italy. *J. Geophys. Res.*, 116 doi: 10.1029/2011JB008461.
- Bani P., Oppenheimer C., Allard P., Shinohara H., Tsanev V., Carn S., Lardy M., Garaebiti E., 2011, First estimated of volcanic SO₂ budget for Vanuatu island arc. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 211-212, 36-46.
- Me'trich N., Allard P., Aiuppa A., Bani P., Bertagnini A., Shinohara H., Parello F., Di Muro A., Garaebiti E., Belhadj O., Massare D., 2011, Magma and volatile supply to post-collapse volcanism and block resurgence in Siwi caldera (Tanna island, Vanuatu arc). *J. Petrol.*, 52, 1077-1105.
- Bagnato E., Aiuppa A., Parello F., Allard P., Shinohara H., Liuzzo M., Giudice G., 2011, New clues on the contribution of Earth's volcanism to the global mercury cycle. *Bull. Volcanol.*, 73, 497-510.
- Garcia-Aristizabal, A., Marzocchi, W. and Fujita, E., 2011, A Brownian model for recurrent volcanic eruptions: an application to Miyakejima volcano (Japan), *Bull. Volcanol.*, 1-14, 2011.

- Hashimoto, T., M. Utsugi, T. Nakatsuka, S. Okuma, T. Koyama, W. Kanda, 2011, Temporal magnetic changes possibly due to cooling magmas as revealed by repeat helicopter-borne magnetic surveys over an active volcano, *Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, Kyoto*, 276-279.
- Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato, 2012, Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi:10.1029/2011GL050542.
- Iguchi, M., Surono, Nishimura, T., Hendrasto, M., Rosadi, U., Ohkura, T., Triastuty, H., Basuki, A., Loeqman, A., Maryanto, S., Ishihara, K., Yoshimoto, M., Nakada, S. and Hokanishi, N., 2012, Methods for eruption prediction and hazard evaluation at Indonesian volcanoes, *J. Disas. Res.*, 26-36.
- Kazahaya R., Mori T., Takeo M., Ohminato T., Urabe T. and Maeda Y., 2011, Relation between single very-long-period pulses and volcanic gas emissions at Mt. Asama, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11307, doi:10.1029/2011GL047555.
- Maeda, Y, M. Takeo, and T. Ohminato, 2011, A waveform inversion including tilt: method and simple tests, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04892.x.
- Maeda, Y., and M. Takeo, 2011, Very-Long-Period pulses at Asama volcano, central Japan, inferred from dense seismic observation, *Geophys. J. Int.*, 185, 265-282.
- 松島喜雄・大島弘光・森 濟・前川徳光・鈴木敦生・寺田暁彦・鍵山恒臣, 2012, 携帯型赤外カメラを用いた航空機による地表面温度測定 (2006) —有珠火山・登別火山・樽前火山—, *北海道大学地球物理学研究報告*, 75, 43-58.
- 長井雅史・中田節也・高橋正樹・安井真也・鶴川元雄・小園誠史・金丸龍夫・金子隆之・武尾 実, 2011, 浅間山鬼押出火山観測井コア試料の岩相と層序. *防災科学技術研究所研究所資料*, No.375, 1-32.
- Nagaoka, Y., K. Nishida, Y. Aoki, M. Takeo and T. Ohminato, 2012, Seismic imaging of magma chamber beneath an active volcano, *Earth Planet. Sci. Lett.*, accepted.
- Nishimura T, Iguchi M, Kawaguchi R, Surono, Hendrasto M, and Rosadi U, 2012, Inflations prior to vulcanian eruptions and gas bursts detected by tilt observations at Semeru Volcano, Indonesia, *Bull. Volcanol*, doi: 10.1007/s00445-012-0579-z.
- Shinohara H., Matsushima N., Kazahaya K., Ohwada M., 2011, Magma-hydrothermal system interaction inferred from volcanic gas measurements obtained during 2003–2008 at Meakandake volcano, Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol*. DOI 10.1007/s00445-011-0463-2, 73, 409-421.
- Shinohara, H., Hirabayashi, J., Nogami, K., Iguchi, M., 2011, Evolution of volcanic gas composition during repeated culmination of volcanic activity at Kuchinoerabujima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 202, 107-116.
- 寺田暁彦・吉川 慎・大島弘光・前川徳光・松島喜雄, 2012, 空中赤外観測に基づく噴気地及び火口湖面からの放熱量推定—有珠火山・登別火山・北海道駒ヶ岳火山—, *北海道大学地球物理学研究報告*, 75, 25-41.

W0.5sBP2-4Hz U 101004 05:42 31s

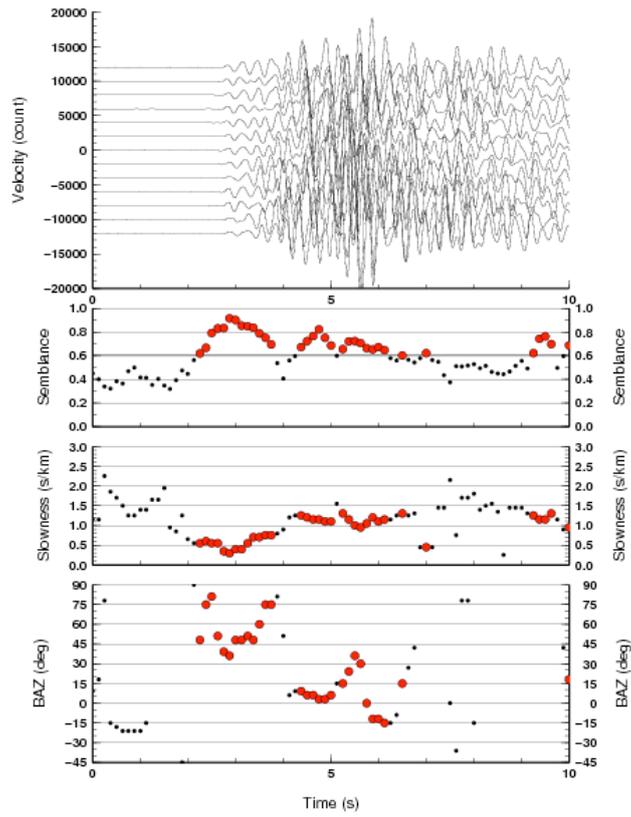


図1. 諏訪之瀬島爆発地震波形のアレー解析の例（東北大学理学研究科 [課題番号：1213]）。

- 1 段目：アレーで記録された上下動速度波形.
- 2 段目：センブランス値.
- 3 段目：スローネス（見かけ速度の逆数）値.
- 4 段目：到来方向.

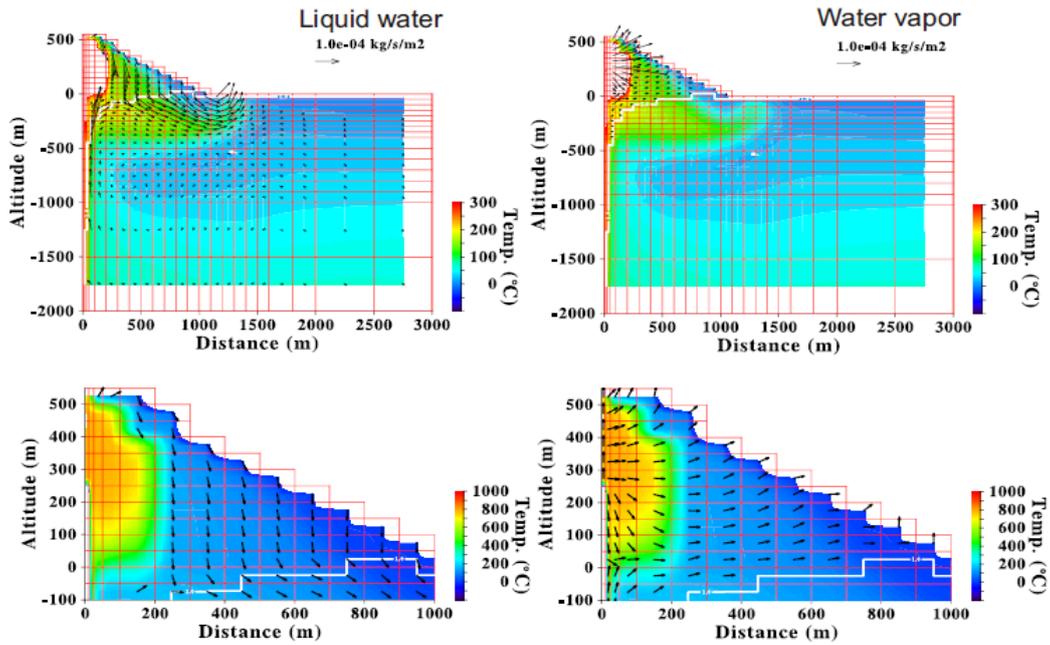


図2. 薩摩硫黄島火山における脱ガスに伴う熱水系の数値モデリング（産業技術総合研究所 [課題番号：5009]）。

上段：熱水（左）と水蒸気（右）の流動と温度分布（スケールは0-300°C）。

下段：上段の中心部を拡大し、温度スケールを0-1000°Cにしたもの。

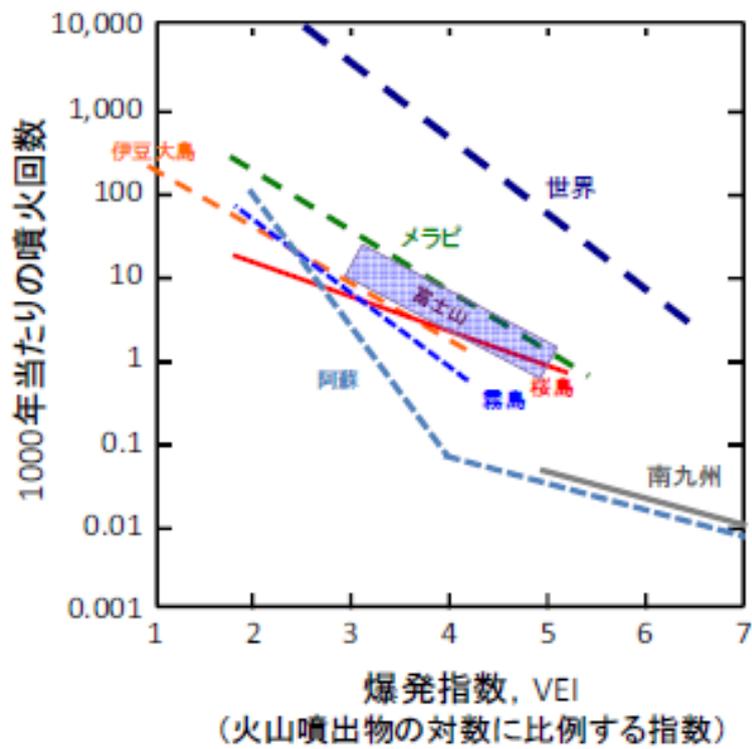


図3. 日本の火山の噴火規模と頻度（東京大学地震研究所 [課題番号：1426]）。