特集号「水蒸気噴火のメカニズムと噴火予知への課題 —最新の知見と火山防災—」巻頭言

萬 年 一 剛* 行 竹 洋 平**
道 家 涼 介* 平 田 大 二***

Preface for the Special Issue

“Mechanism of Phreatic Eruptions and Challenges for Eruption Forecasting: Latest Advances and Volcanic Disaster Prevention”

Kazutaka MANNEN*, Yohei YUKUTAKE**,
Ryosuke DOKE* and Daiji HIRATA***

箱根火山 2015 年噴火の噴出中心となった大涌谷は、年間 300 万人の観光客が訪れるとされる国内有数の観光地であるが、この噴火で新たに生じた火口は、観光客が散策する領域からわずか 200 m ほどしか離れていない（例えば, Mannen *et al.*, 2018）。また、大涌谷の近傍には、2015 年噴火よりもはるかに大規模な水蒸気噴火の給源となったと考えられる火口地形が複数認められる（例えば, 山口ほか, 2021）。こうしたことから、噴火前に立入規制などの防災行動をとることは人命保護の観点からきわめて重要である。一方、箱根火山では山体のわずかな膨張や地震活動の活発化は必ずしも珍しい現象ではなく、2001 年以降は数年に 1 度の頻度で発生している。したがって、活発化のたびに経済的な損失の大きい規制を行うのは難しい。観光客や住民の生命を守りつつ、経済的な損失を最小化する火山防災対応をとるためには、噴火にいたる過程を理解して、噴火の切迫度を評価することは重要である。箱根火山の研究に長年従事している神奈川県温泉地学研究

所では 2015 年噴火の解析を行うことと並行して、上のような問題意識に基づいて、英文誌 *Earth, Planets and Space* での特集号編集や (Mannen *et al.*, 2019)、研究集会の実施を通じて、今後の研究や火山監視の方向性を検討するために必要な知見の集約に努めている（安部, 2019; 萬年・加藤, 2020）。本特集号は、地元企業・団体、箱根町および東京地学協会の助成を受けて、2020 年 1 月に神奈川県立生命の星・地球博物館と共催で実施した「水蒸気噴火のメカニズムに関する国際ワークショップ」で行われた講演や、その後の研究を基にした論文を収録する。

行竹・萬年 (2021) が、水蒸気噴火の発生に大きく関わる熱水系に関する知見を整理した総説では、熱水系に発達する難透水層に着目し、浅部では変質粘土鉱物の発達による、深部ではシリカの晶出による難透水層が形成されるとし、それぞれの難透水層に関する観測事例を列举している。浅部の難透水層は熱水変質で生じる粘土鉱物により形成され、低比抵抗体として電磁探査で検知で

* 神奈川県温泉地学研究所

** 東京大学地震研究所

*** 神奈川県立生命の星・地球博物館

* Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, Odawara, 250-0031, Japan

** Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan

*** Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, Odawara, 250-0031, Japan

きる。深部の難透水層はシリカの析出で形成され、と考えられ、直接の観測はないが、地球化学的な観測から存在が示唆される。加えて本総説では、地震や地殻変動の観測から、熱水の発するシグナルがとらえられて噴火までの動きが少しずつ明らかになっており、そうしたシグナルが熱水系のどこで発生しているのかも徐々に解明されつつあることが紹介されている。将来は、熱水の発するシグナルから、熱水系の圧力や空隙率、浸透率などの物理量やそれらの空間分布が明らかとなり、深部のマグマ性流体供給から水蒸気噴火にいたるプロセスやその間の難透水層の役割がより詳しく解明されることが期待される。この総説では、このほか、噴火前の数十年から数か月にかけて生じる準備過程の地球物理学的観測、噴火予測に関わるモニタリングや切迫性評価の手法についても最近の論文を多数収録しているが、最近の水蒸気噴火や熱水系に関する研究の長足の進歩には驚くべきものがある。

井口 (2021) は、噴火警戒レベル導入後はじめてレベル 5 が発表された口永良部島の 2015 年噴火について、噴火前後の経過をまとめるとともに、火山学者の視点から、行政の意志決定を中心に課題を抽出して、解決の方向性を論じている。噴火警戒レベルとは火山活動の状況を 5 段階にわけて、警戒が必要な範囲や自治体等がとるべき対応をあらかじめ定めたもので、気象庁が 2007 年から全国の火山を対象に導入を順次進めている、しかし、火山活動が静穏であることを示すレベル 1 のままで、死傷者を伴うような噴火さえ発生しているなど、適切なレベル発表には課題も大きい。この論文によれば、口永良部島 2015 年噴火の場合、7 か月前から顕著な二酸化硫黄ガスの放出量増加や山体膨張などが観測されていたが、レベル 5 が発表されたのは噴火後であった。この論文では、この点について、噴火 6 日前の有感の火山性地震を根拠にしたレベル 5 発表が可能であったと指摘している。また、今後の火山防災に必要なものとして、想定噴出量とシミュレーションに基づく警戒範囲設定、噴火警戒レベルだけに頼らない火山災害対策、地元首長の意志決定を気象庁

が積極的にサポートすること、地元自治体や住民の自衛への覚悟、など多岐にわたる項目があげられている。これらのなかには直ちに実施することが困難なものも含まれているかも知れないが、体験に基づく貴重な指摘で、今後の火山防災の方向性を示すものといえる。

橋本 (2021) は、火山体内部の温度変化を反映していると考えられる熱消帯磁現象に着目し、これまでの観測事例をまとめるとともに、Potter *et al.* (2015) が提案した Volcano Unrest Index (VUI) に取り入れる試み、および、わが国の火山へ VUI を導入する取り組みについて紹介した。火山活動には、噴火には至らない活発化ないし活動不安定と呼ばれる現象があり、英語ではこれを *unrest* と呼ぶ。VUI は *unrest* がどの程度噴火に近いものなのかを指標化するものといえる。*unrest* の時に普段と異なる観測を示す項目や内容はさまざまだが、橋本 (2021) で着目された熱消帯磁現象は、マグマや熱水の動きにより地下の温度が変化するために、岩石の磁化が失われたりもとに戻ったりすることで現れる磁場の変化を指す。海外ではそれほど行われておらず、Potter *et al.* (2015) では考慮されていなかったが、わが国では観測の蓄積が大きいので、これを VUI に組み込むことは大きな意義がある。これまでは火山学者の間でも、噴火現象そのものに注目が集まるあまり、*unrest* はあまり注目されてこなかった。しかし、多数の火山を抱えているわが国において、*unrest* 時の噴火切迫性評価は重要な課題であり、うまく行っているとはいえない噴火警戒レベルの改善にも研究は必要である。また、本論文で指摘されているように、*unrest* 時に何が発生しているのかを理解することは、その火山の平時の活動を知ることに通じ、純粋に火山学的な課題として非常に重要な課題であるといえよう。

代田ほか (2021) は箱根火山で 2013 年以降実施されている、ガス検知管による火山ガス比の繰り返し測定について報告をしている。精密な火山ガスの測定には、特殊なサンプリングと分析の技術が必要で、実施可能な研究機関の数は限られていた。代田ほか (2021) で紹介される手法は、

噴気中の水を凝結させる手間が必要なものの、測定そのものは特殊な技術を必要としない簡単なもので、ひとつのガス種につき数分で実施できる。この手軽さにより火山ガス観測としては頻繁な測定が実施可能となった。この手法は、今後の気象庁や大学等での火山監視にも応用できるだろう。この研究では噴気中の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比 (C/S 比) が、箱根火山活発化時に GNSS で観測される箱根火山の膨張開始とともに上昇をはじめ、膨張の停滞とともに低下に転じることを報告している。箱根火山では膨張の停滞後も地震数は多い状況が続く。また、GNSS による観測は日々の変化が大きいため傾向が判明するまで時間がかかる。代田ほか (2021) では C/S 比の方が明瞭な変化をすることから、この観測が火山活動の評価に重要であるとしている。簡便なことによって可能となった頻度の高い火山ガスモニタリングは、地殻変動や地震活動などの地球物理学的観測と組合せ、火山活動の評価に利用できることが、この論文で示されている。他の火山でも適用することでさまざまな火山における熱水系や、その活発時の反応が解明されることが期待される。

大場ほか (2021) は水蒸気噴火の定義と放出される粒子の起源について検討を加えた。現在の日本において、水蒸気噴火という用語は報道などでも一般的にもちいられているが、その発生メカニズムは必ずしも単純一様でない。大場ほか (2021) は、(1) 地熱流体の突沸、(2) マグマからの新たな熱による地下水の加熱、(3) マグマからのガスの蓄積 (ブルカノ式噴火が頻発する火山で多い)、に分類し、放出される火山灰粒子にも以下の特徴が現れるとした。すなわち、(1) は変質物に富むことが特徴で、地下浅部の変質帯だけでなく、山体内部に発達する複数の変質帯に由来する場合もあり、鉱物組み合わせが金属鉱床などに類似する場合もある。(2) は強変質を示す噴出物からなるのが特徴だが、変質の進んでいない新鮮な溶岩片を含む場合もある。(3) は変質していない粒子が多く含まれるとともに、火山性流体から直接沈殿する硫黄化合物が認められる場合がある。これまで、水蒸気噴火噴出物中の本質物質

(=マグマ性) の有無は注目を浴びることが多かったが、大多数を占める異質～類質岩片 (=非マグマ性) について、このような見通しのよい整理がなされたことは意義深い。今まで火山学とは別に積み重ねられてきた、鉱床学や地熱開発で得られた知見を取り入れて、水蒸気噴火のメカニズムについての研究がさらに進展することを期待したい。

道家ほか (2021) は、地表面変位を捉えることができる InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar; 干渉合成開口レーダー) の火山への適用について、箱根火山におけるこれまでの研究を中心にレビューを行った。InSAR はアンテナから発射された電波が地表にあたって反射した電波を観測するが、時間をおいて行われた2回の観測で得られた電波の位相差から、その間の地殻変動を明らかにできる。衛星搭載型 InSAR では数十 km にわたる広範囲の衛星視線方向の変位を一度に捉えることができるため、測線上やその近傍の変動しか検知できないこれまでの方法とはまさに次元の異なる強力な地殻変動観測ツールである。道家ほか (2021) の総説では、衛星 InSAR の観測により、噴火準備過程で蓄積する流体によるもの、噴火時の熱水貫入によるもの、熱水系の収縮によるものなど、さまざまな原因による地表面変位が捉えられたことが紹介されている。注目すべきことは、こうした地表面変位が、過去の割れ目噴火地形や、最近行われた電磁探査によって明らかになった地下の蒸気だまりや熱水系、地質・地形調査や GNSS 観測で知られていた剪断変形帯などと空間的に調和的な場所で検出されていることである。すなわち、これまで別々に行われてきた地球物理学的観測と地質学、地形学的知見が、InSAR というツールを通じて見事に結びつけられたことが示された。InSAR はさまざまな火山観測の重要な結節点をなす貴重な観測手法といえる。

萬年 (2021) は近年の箱根火山に関する地球物理学的、地質学的研究をレビューした。箱根火山のマグマシステムは、高減衰領域の分布から富士火山深部のマグマだまりと繋がっている可能性が示唆されている。箱根の深部低周波地震は富士

直下から派生する高減衰領域上で発生しているようにみえ、この地震がマグマに関連する流体の移動で励起されている可能性を示唆する。箱根火山の unrest では、深部低周波地震の発生と深さ 6 ~ 10 km 付近での膨張が認められるが、膨脹源はマグマだまりとみられる低 V_p ・低 V_s ・高 V_p/V_s 領域よりも浅く、膨張の原因はマグマでない可能性を示唆する。加えてガス観測から箱根火山の unrest 時に熱水系へのマグマ供給が行われたと考えられる積極的な根拠は今のところ見つからない。箱根火山の unrest で認められる火山ガスの成分比変化は、マグマの浅部供給ではなく、マグマ性流体が熱水系に供給されることと、それによる熱水系中の気液比の変化によるスクラビング能力の変化で説明できる可能性が高い。比抵抗探査や地震の下限、噴気温度などから、箱根火山の熱水系は地表近くからある程度の深さまで気相卓越の気液共存系である可能性が高いことが示唆されるが、気相卓越の熱水系であることが、水蒸気噴火時の爆発が深部に進展することを阻止し、2015 年噴火が小規模なものに終わった原因となった可能性を指摘している。

一昔前まで、水蒸気噴火の前兆的な現象は微弱で、検知が困難な場合が多いとされてきた（例えば, Barberi *et al.*, 1992）。現時点でも、前兆的な現象が観測されないか、観測されてもその切迫性評価が困難な例は多いが、本特集号では、水蒸気噴火のもととなる熱水の上昇や、そのトリガーとなるマグマないしマグマ性流体の供給による地球物理学的、地球化学的シグナルが認められる火山も多く、とくに強いシグナルが観測される箱根火山では、トリガーから噴火にいたるプロセスがかなりよく観測され、モデル化が進んでいることを紹介した。一方、本特集号が指摘するとおり、水蒸気噴火のメカニズムは多様であることも明らかで、箱根火山はもちろん、どこの火山でも、過去と同様のパターンで水蒸気噴火にいたるプロセスが進行するとは限らない。今後の研究により、さまざまな火山のさまざまな熱水系と、水蒸気噴火に至るプロセスが明らかになることで、マグマ噴火時以外の火山の営みが明らかになるとともに、

噴気地帯や火口周辺で行われている、観光をはじめとするさまざまな人間活動がより安全になることを期待したい。

文 献

- 安部祐希 (2019): 水蒸気噴火のメカニズムと予知に関する研究集会参加報告. 火山, **64**, 139–145. [Abe, Y. (2019): Report of the workshop on mechanism and prediction of phreatic eruption. *Bulletin of Volcanological Society of Japan*, **64**, 139–145. (in Japanese)]
- Barberi, F., Bertagnini, A., Landi, P. and Principe, C. (1992): A review on phreatic eruptions and their precursors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **52**, 231–246, doi:10.1016/0377-0273(92)90046-G.
- 代田 寧・大場 武・谷口無我・十河孝夫・原田昌武 (2021): 箱根山火山ガス組成による火山活動予測—火山防災への活用—. 地学雑誌, **130**, 783–796. [Daita, Y., Ohba, T., Yaguchi, M., Sogo, T. and Harada, M. (2021): Volcanic activity forecast based on volcanic gas composition of Hakone volcano, Japan: Utilization for volcanic disaster prevention. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 783–796. (in Japanese with English abstract)]
- 道家涼介・萬年一剛・板寺一洋 (2021): 地表面変位から推定される箱根山浅部熱水系の構造. 地学雑誌, **130**, 811–830. [Doke, R., Mannen, K. and Itadera, K. (2021): Structure of shallow hydrothermal system in Hakone volcano, Japan, inferred from surface displacement. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 811–830. (in Japanese with English abstract)]
- 橋本武志 (2021): 火山の活動不安定評価における熱消磁現象の活用と噴火予測の可能性. 地学雑誌, **130**, 771–781. [Hashimoto, T. (2021): Utilizing thermal demagnetization events to evaluate volcanic unrest and the prospects for eruption forecasting. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 771–781. (in Japanese with English abstract)]
- 井口正人 (2021): 2015 年口永良部島噴火の火山活動推移と避難の意志決定. 地学雑誌, **130**, 755–770. [Iguchi, M. (2021): Precursors to the 2015 eruption of Kuchinoerabujima volcano and decision making on evacuation. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 755–770. (in Japanese with English abstract)]
- 萬年一剛 (2021): 箱根火山のマグマ・熱水系モデル. 地学雑誌, **130**, 831–855. [Mannen, K. (2021): Magma-hydrothermal system of Hakone volcano. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 831–855. (in Japanese with English abstract)]
- 萬年一剛・加藤照之 (2020): 地学ニュース (令和元年度助成金報告—国際研究集会) 水蒸気噴火のメカニズムに関する国際ワークショップ. 地学雑誌, **129**, N72. [Mannen, K. and Kato, T. (2020): Chigaku

- News (FY2019 Grant Report: International Research Meeting) International Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **129**, N72. (in Japanese)*]
- Mannen, K., Yukutake, Y., Kikugawa, G., Harada, M., Itadera, K. and Takenaka, J. (2018): Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan—Geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis. *Earth, Planets and Space*, **70**, 68, doi:10.1186/s40623-018-0844-2.
- Mannen, K., Roman, D., Leonard, G., Prejean, S. and Nakagawa, M. (2019): Special issue “Towards forecasting phreatic eruptions: examples from Hakone volcano and some global equivalents.” *Earth, Planets and Space*, **71**, 1–6, doi:10.1186/s40623-019-1068-9.
- 大場 司・井村 匠・南 裕介・シヤレザ サイディナ アンカサ (2021): 火山灰中の鉱物からみた水蒸気噴火のメカニズム. 地学雑誌, **130**, 797–809. [Ohba T., Imura, T., Minami, Y. and Angkasa, S.S. (2021): Mechanisms of steam-blast eruptions inferred from the mineralogy of volcanic ash. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 797–809. (in Japanese with English abstract)]
- Potter, S.H., Scott, B.J., Jolly, G.E., Neall, V.E. and Johnston, D.M. (2015): Introducing the Volcanic Unrest Index (VUI): A tool to quantify and communicate the intensity of volcanic unrest. *Bulletin of Volcanology*, **77** (9), doi:10.1007/s00445-015-0957-4.
- 山口珠美・山下浩之・萬年一剛・小林 淳 (2021): 箱根火山の地質と形成史：最近の研究レビュー. 神奈川県立博物館調査研究報告 (自然), **16**, 137–160. [Yamaguchi, T., Yamashita, H., Mannen, K. and Kobayashi, M. (2021): Geology and eruptive history of Hakone volcano, central Japan: Reviewing two decades of progress. *Research Report of Kanagawa Prefectural Museum, Natural History*, **16**, 137–160. (in Japanese with English abstract)]
- 行竹洋平・萬年一剛 (2021): 水蒸気噴火の発生場と噴火過程の観測—最近の進展と今後の展望—. 地学雑誌, **130**, 731–753. [Yukutake, Y. and Mannen, K. (2021): Observations of hydrothermal system and preparatory process of phreatic eruption: Recent developments and future prospects. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 731–753. (in Japanese with English abstract)]
- * Title etc. translated by K.M.