

□蔵王山の火山観測と防災

東北大学大学院理学研究科 附属地震・噴火予知研究観測センター

教授 三浦 哲

1. 蔵王山の概要

蔵王山は宮城県と山形県の県境に位置し、日本百名山に数えられる山頂周辺や山麓のスキー場・温泉には毎年多くの観光客が訪れている。令和元年の宮城県観光統計概要¹⁾によると、その数は年間約420万人であり、仙台市内(約1,650万人)や日本三景の一つである松島(約600万人)に次ぐ多さとなっている。

その一方で、蔵王山は我が国に111ある活火山の一つであり、その中でも火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要があるとされる50火山の一つにもなっている。エメラルドグリーンの湖水を湛える火口湖御釜から僅か約800mの距離には一般車両用の駐車場が整備され、訪れた観光客は軽装のまま数分間歩くだけで最短で約400mの距離まで近づくことができる。2014年の御嶽山噴火のように、万が一晴天の日中に顕著な兆候もなく噴火が発生すれば、噴火規模が大きくなくとも甚大な人的被害を被ることになる。したがって、高精度の観測に基づく蔵王山の火山活動のモニタリングと噴火発生時の切迫性の評価、そして山頂周辺域への立ち入り規制等の適切な対策を行うことが極めて重要である。

2. 蔵王山の噴火履歴

以下では、蔵王山の詳細な火山地質学的な研究

²⁾に基づいて得られた過去約1万年間の噴火履歴について簡単に述べる。約9～4千年前には、ストロンボリ～ブルカノ式のマグマ噴火あるいはそれらに水が関与したマグマ水蒸気噴火が繰り返されていたと考えられる。また、マグマ噴火の前または後に水蒸気噴火が発生した可能性も指摘されている。約4～2千年前の噴出物には水蒸気噴火が発生した痕跡が認められる。規模は、約2千年前以降のものよりは大きかったと推定されている。約2千年前以降の噴火は、水蒸気噴火からマグマ噴火に移行するような噴火が繰り返し起こり、御釜東側の五色岳を形成したとされている。

1894～1897年の噴火は、近年では最も大規模なものであった。1894年7月、1895年2月、3月、8月には小規模の水蒸気噴火が繰り返し発生し、9月27日にはクライマックスの噴火に至った。これらの噴火に伴って御釜から湖水が溢水することで発生したラハール(火山泥流)が東側の河川を流れ下ったと考えられる。クライマックス噴火のスケッチ(図1)³⁾によれば、噴煙柱が350mほど上空に達し、大型の火山弾が落下している様子が描かれている。御釜周辺で見られる火山弾には長径約2.5mのものも発見されている。総噴出量はおよそ60万トンで、噴出物と共に多量の熱水が噴出したと考えられる。また、噴出物に火山弾が含まれることから、マグマそのものが一部噴出した可能性が指摘されている。

その後、1918年には御釜が沸騰、1923年8月

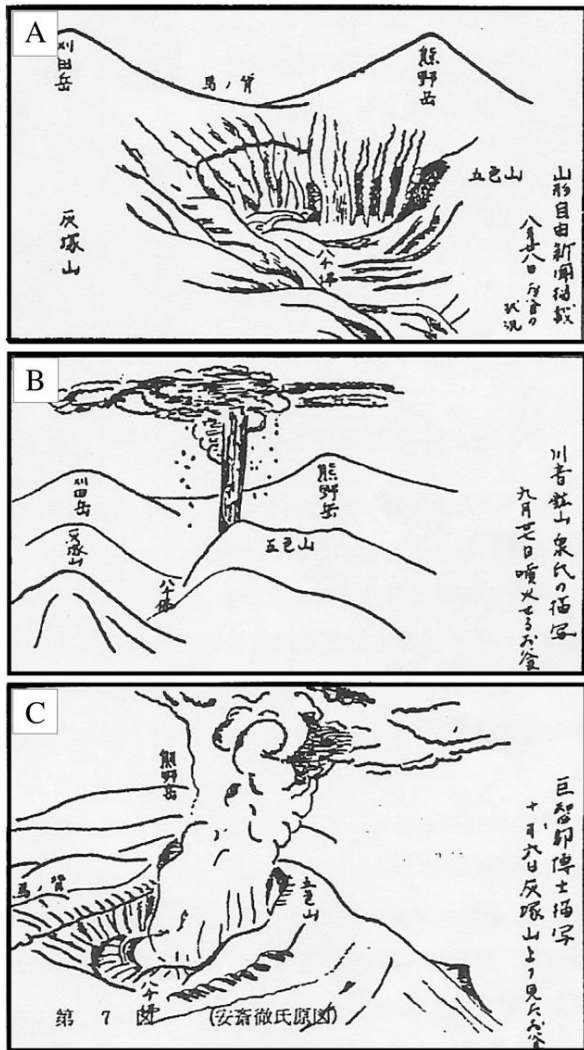


図1 巨智部(1896)⁵⁾による蔵王山噴火時の山頂周辺のスケッチ³⁾。(A) 1895年8月28日、(B) 同年9月27日、(C) 同年10月6日。

には湖心から H_2S 、 SO_2 の噴出、ゴム状硫黄浮遊、湖水の白濁等の報告⁴⁾があるが、噴火には至っていない。1939年7月頃から御釜湖水の白濁、ガス噴出、硫黄球浮遊が認められ、11月にガス噴出は減衰したが、湖底水温が $100^{\circ}C$ 以上になった。1940年2月には凍結していた湖面が部分的に氷解し、湖底付近の水温 $100^{\circ}C$ 以上となった。3月には大型の硫黄球が確認され、5月の調査によって、新噴気孔付近(御釜北東約2.1km、現在の丸山沢噴気地熱地帯)で70~80 mにわたって雪面に砂礫が飛散しているのが確認され噴火に該当する現象と考えられている。その後は、1941年8月頃よ

り白濁が弱くなり、活動も低下した。1962年8月には、丸山沢噴気地熱地帯付近を震源とする地震が発生したが、その約4年後から、山腹の複数の噴気帯帯において、噴気の増加、新温泉の湧出、強い硫黄ガスの発生、硫黄臭などが認められた。この間、御釜での異常は報告されていない。1971年頃にこれらの現象は終息した。

その後は、1984年の熊野岳南東約5 km 付近や、1990年の御釜~刈田岳付近での群発的地震活動、1992年及び1995年の不忘山付近、1995年の熊野岳北西約10km での地震等の報告がある。

3. 蔵王山の観測研究

蔵王山では、2011年東北地方太平洋沖地震以後、マグマ活動を示唆する深さ20~35km で発生する深部低周波地震の活動が活発化し、2013年1月22日には、2010年9月1日に気象庁により常時観測が開始されて以来初めて火山性微動が観測された。当時、蔵王山周辺の火山観測点は、気象庁の1点と東北大学の2点のみであったため、気象庁と東北大学は、さらなる火山活動の活発化に備えて、観測網の強化を進めた。その結果、現在気象庁の常時監視観測に利用されている地震観測点は8点、GNSS 観測点は4点、傾斜観測点は2点増加した。東北大学では、これらの拡充された観測点で得られるデータを用いて、蔵王山の地下で起きている諸現象について解明を進め、火山災害軽減に資するための研究を行っている。以下では、それらのうちのいくつかについて紹介する。

国内で発生する深部低周波地震の多くは、第4紀火山近傍に集中して発生していることから、上部マントルから下部地殻にかけてのマグマの移動に関連した現象であると考えられている。蔵王山直下で2012年以降に発生した深部低周波地震に関する詳細な研究⁶⁾では、まずマッチドフィルター法という波形相関を用いた地震検出法を用いて気象庁では震源決定できていなかった小さな地震を

検出することにより、研究対象となる地震数を286個から1,178個に増加させた。そして、機械学習の一種である階層クラスタリング法により波形の特徴に基づいて7グループに分類した。図2に示したグループ毎に色分けした震源分布図を見ると、Aグループの地震は深さ25km以深でのみ発生し、Aグループ以外の地震の多くはそれより浅部で発生していることがわかる。また、図3には、グループ毎の積算個数の時系列を示した。これを見ると、Aグループでは2012年に地震回数は増加し始め、2015年に一時的に発生率が増加している。一方で、A以外のグループでは2013年に地震回数が増加し始め、B、C、F、Gの各グループでは2016年に一時的に発生率が増加している。同図には、(a) 2 km以浅で発生した火山性地震の日別回数と積算個数及び(b) 長周期地震のエネルギー指数（逆三角形）と積算個数も示されており、前者は2015年に、後者は2014年に（いずれもAグループ

の地震活動が活発化した後）個数が増加している。以上のように、深部マグマだまりの下部から活動が開始し、その後マグマや揮発性物質が次第に地表付近へと移動することによって浅部熱水系の活動活発化が引き起こされたと理解することができる。

図3中の灰色で示されている期間（2015年1月から6月までの半年間）には、蔵王山周辺のGNSS連続観測網によって僅かな地殻変動が観測されている⁷⁾。図4に示したように水平変動では山頂周辺を中心とした放射状の変位を、上下変動では山頂周辺で隆起傾向を示していることから、この期間に山体膨張現象が起きていたと考えられる。変動源として点圧力源を仮定して逆解析した結果、位置は御釜の中心から東側に約1.0km、海拔下約4 km、体積増加量は $4 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された。推定された位置は、深部低周波地震震源域のほぼ直上に相当している。

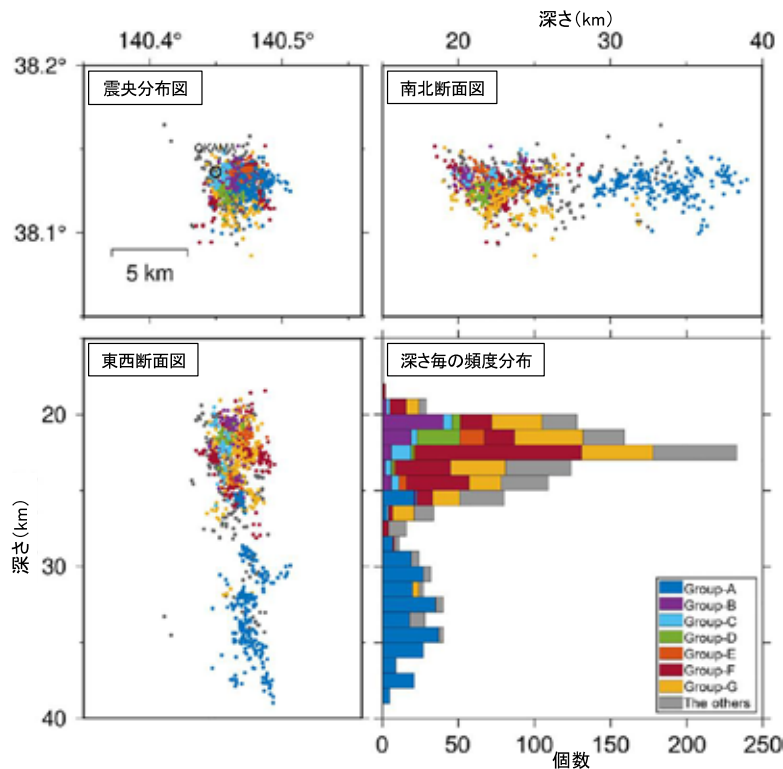


図2 蔵王山直下で発生した深部低周波地震の震源分布図及び深さ毎の頻度分布図⁶⁾（右下）。階層クラスタリング法により分類されたグループ毎に色づけされている。

平成26年9月に発生した御嶽山の噴火等を踏まえ、文部科学省は我が国の火山研究を向上させ、火山噴火に対する減災・防災対策に貢献するため平成28年に次世代火山研究・人材育成総合

プロジェクト（火山PJ）を開始した。このプロジェクトは、「観測・予測・対策の一体的な火山研究及び火山観測データの一元的流通の推進」と「広く社会で活躍する火山研究人材の裾野を拡大するとともに、火山に関する広範な知識と高度な技能を有する火山研究者となる素養のある人材の育成」を目指すものである。このプロジェクトの一課題「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、通常行っている火山活動監視・異常検知のための観測に加えて、これらを補う高精度の観測や調査を機動的に行うことにより、火山活動の変化や噴火の切迫性を総合的に判断する手法の開発を行っている。蔵王山は、この課題において、機動観測を実施する全国の10火山の一つに選定され、山頂周辺での比抵抗構造探査や地震観測が実施された。

水蒸気噴火を繰り返す火山における比抵抗構造探査によって、深さ約1 km以浅に電流を流しやすい低比抵抗層が存在し、その層の下にやや比抵抗の高い領域が存在していることが複数の火山に共通して明らかになっている。草津白根山や霧島硫黄山などでは、その低比抵抗層下限のやや比抵抗の高い領域側に、熱水や水蒸気の関与を示唆する火山性地震の震源域の上限、熱水膨張を示唆する増圧源、熱消磁源が位置することから、その領

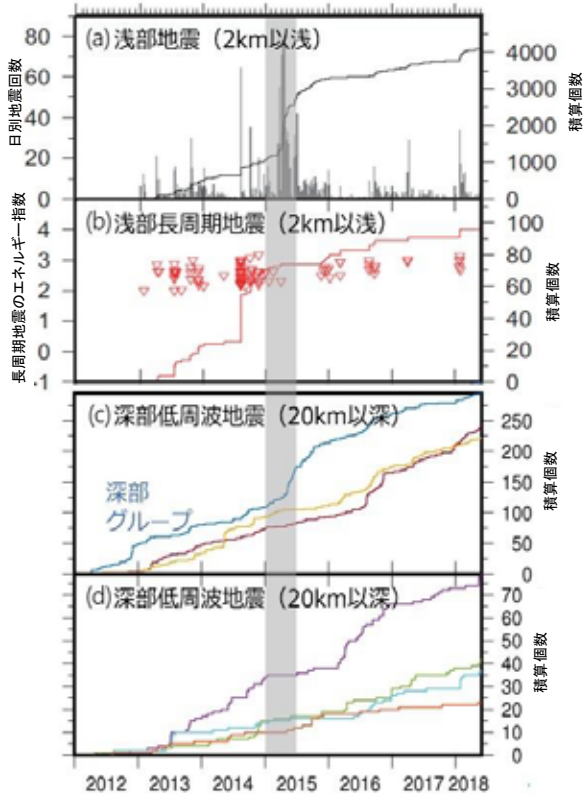


図3 蔵王山直下で発生した深部低周波地震の活動と浅部における火山性地震の活動推移⁶⁾。

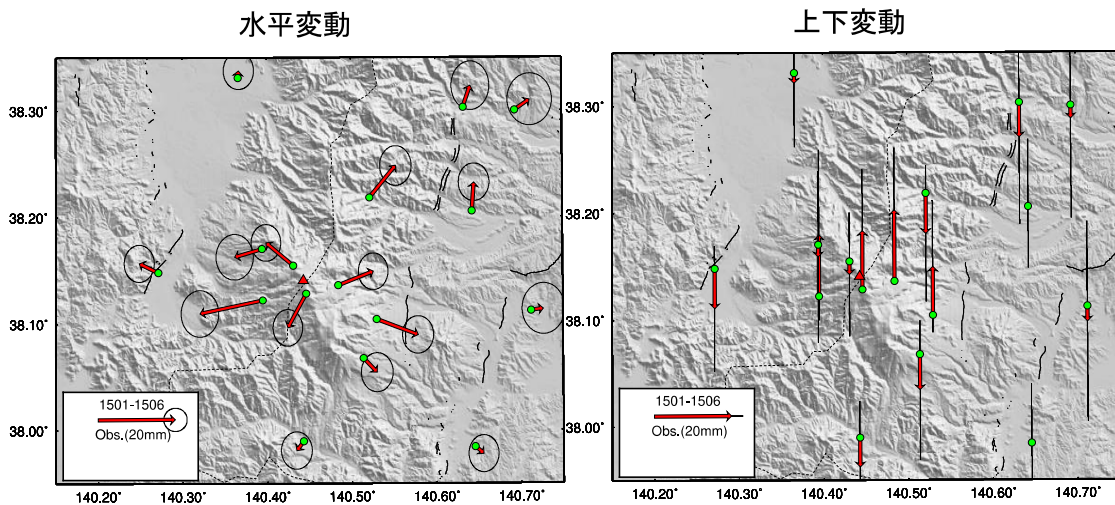


図4 2015年1月から同年6月までの期間に蔵王山周辺で観測された地盤変動。赤の三角形は最高峰の熊野岳山頂の位置を示す。

域が熱水や水蒸気の通り道となっていること、その上側に存在する低比抵抗層は、それらの上昇を阻止する難透水性の熱水変質層であると解釈されている。蔵王山で行われた比抵抗構造探査においても同様の構造的特徴が明らかになりつつある。

また、既設の観測網が手薄な火山性地震発生領域の南側及び西側に3点の機動地震観測点を設置し、令和2年秋から連続観測を開始した。その結果、蔵王山で発生する火山性地震のうち、P波・S波の初動が不明瞭なBH型及びBL型の震源は、主として火口湖御釜の東側から南東側にかけての海拔下1kmから標高0.6kmの範囲に分布すること、BH型・BL型の震源領域とはやや離れた御釜東側約1.5kmの海拔下約1.5kmの領域（噴気・地熱地帯直下）にP波・S波の初動が明瞭なA型地震の震源が分布することが判明した。特にA型地震については、従来の観測網では精度よく震源決定を行うことが困難であったが、震源域直上付近に機動地震観測点を設置したことにより、特に深さの震源決定精度が向上した。

噴火災害軽減のためには、監視観測体制を整備するとともに、ハザードマップの作成及び噴火推移の予測が基礎的事項として重要である²⁾。地震や火山現象の解明と予測に関する理学的研究に基礎を置き、災害の軽減に貢献することを意識した

研究を推進している「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」⁸⁾では、火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測を、重点的に取り組む三つの研究の一つに位置付けている。しかし、蔵王山では近代的な観測技術によって噴火活動の推移を捉えた事例がないため、現時点では詳細な地質学的研究に基づいた推移予測が行われている²⁾。図5は、最新活動期の活動履歴に基づいて作成された噴火推移予測図である。それによると、前兆現象のみで収束する場合、それが水蒸気噴火に移行する場合、さらにマグマ噴火に移行する場合、その上規模の大きいマグマ噴火に移行する場合が想定される一方で、各段階で収束する可能性も考えられる。1894年以降の事例は、前兆現象発生、あるいは水蒸気噴火の段階までで終息した場合のみであり、今後の活動としてはこれらと同様の推移をたどる可能性が最も高いと考えられる。なお、約4～2千年前の事例のように規模の大きい水蒸気噴火はそれ以降発生しておらず、可能性としては低いと考えられる。次に、水蒸気噴火からマグマ噴火に至る推移は、五色岳形成時に8回起こっており、今後もこの推移をたどる可能性は考慮しておく必要がある。一方、それが準プリニー式噴火の段階まで推移したのは最新期の初めの時期のみであり、今後の活動でこの段

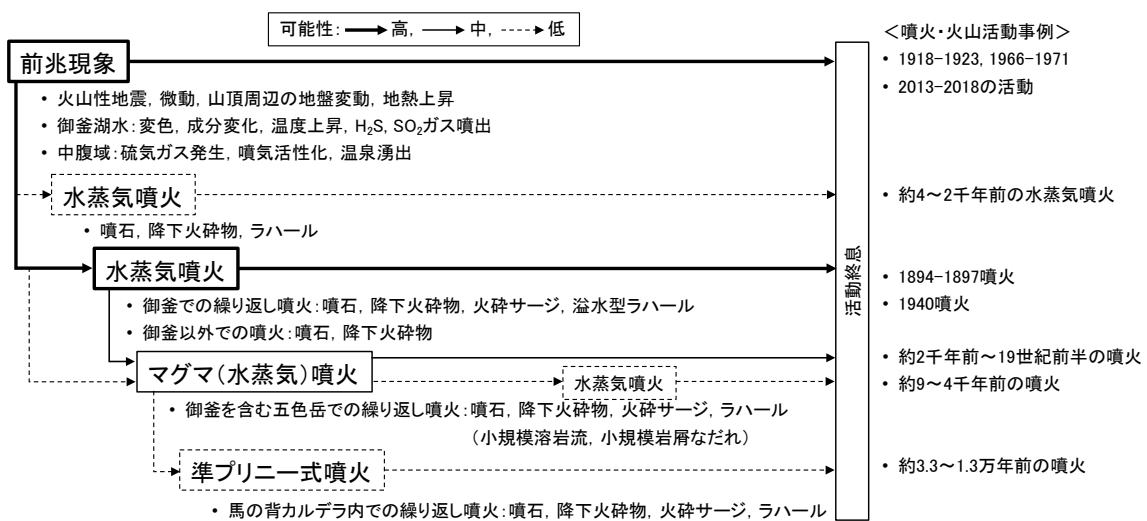


図5 蔵王山で将来発生する火山噴火の推移予測図。参考文献²⁾の図を和訳して示した。

階まで達する可能性は低いと考えられる。

4. まとめ

蔵王山では、2015年に火山活動の極大期を迎え、火山性地震や微動が頻発するとともに僅かな山体膨張が観測された。それに先駆けて2012年からは、深さ28km以深で深部低周波地震の活動が始まり、翌2013年には深さ20~28kmの下部地殻浅部の深部低周波地震、2014年には深さ2km以浅の長周期地震が増加したことから、マグマや揮発性物質が深部から次第に地表付近へと移動したと考えられる。

幸い噴火には至らなかったものの、蔵王山は軽装の観光客が火口の数百mまで近づくことのできる観光地であることから、過去の噴火履歴のさらなる調査や現状の監視観測、さらに機動的観測等に基づく詳細な研究により噴火の切迫性評価の精緻化が必要不可欠である。

【参考文献】

- 1) 宮城県経済商工観光部観光課, 「観光統計概要」, <https://www.pref.miyagi.jp/documents/12827/818398.pdf>
- 2) 伴・他 (2019) 近代的噴火観測事例のない火山での噴火推移予測: 蔵王火山の例, 火山, **64**, 131-138.
- 3) Miura et al. (2012) Sequence of the 1895 eruption of the Zao volcano, Tohoku Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **247-248**, 139-157.
- 4) 安斎 徹 (1941) 其の後の蔵王山活動に就いて (上), 齋藤報恩会時報, **170**, 19-29.
- 5) 巨智部忠承 (1896) 蔵王山爆裂調査概報, 地学雑誌, **8**, 183-189, 239-244, 285-288.
- 6) Ikegaya, T., Yamamoto, M. (2021) Spatio-temporal characteristics and focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath the Zao volcano, northeastern Japan, *JVGR*, **417**, 107321, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107321.
- 7) 三浦・他 (2020) 2015年蔵王山膨張イベントの変動源, 地殻活動研究委員会報告書, **44**, 7-13.
- 8) 文科省 (2019) 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 (第2次), https://www.mext.go.jp/content/20210202-mxt_jishin01-000012539_23.pdf