

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

橋本 武志*

Utilizing Thermal Demagnetization Events to Evaluate Volcanic Unrest and the Prospects for Eruption Forecasting

Takeshi HASHIMOTO*

[Received 30 December, 2020; Accepted 14 April, 2021]

Abstract

Volcanoes with shallow hydrothermal systems are often accompanied by background volcanic activity such as fumarolic activity, microseismicity, and ground deformation even in the non-eruptive phase. When elevated, they are said to be in a state of “unrest.” It is not difficult to imagine that such events of unrest reflect changes in the state of the shallow hydrothermal system beneath a volcano. However, there is currently no method by which these events can be used to quantitatively evaluate eruption imminency or predict eruption intensity based on physical and/or chemical models. A potentially useful application of such unrest events for probabilistically forecasting eruptions is discussed. First, the method proposed by Hashimoto *et al.* (2019) for compiling and evaluating the sources of unrest events, such as thermal demagnetization, is described. Then, the volcanic unrest index (VUI) of Potter *et al.* (2015a) is proposed as another key tool. Finally, a concept is proposed for integrating the VUI and the unrest data to make probabilistically forecasting eruptions feasible. Also described is a recent attempt to introduce the VUI for evaluating a volcano in Japan. Information on sources of unrest in the form of the scatter plot of Hashimoto *et al.* (2019) can be used as one of the rating criteria on the VUI worksheet. The key idea is to divide the source diagram into regions based on the probability of posterior eruptions given unrest events and to assign VUI scores to these regions. Such a procedure may augment the VUI’s function, partially enabling probability-based eruption forecasting. Irrespective of whether the VUI is applied or not, it is essential to obtain temporally homogeneous monitoring data during both eruptive and non-eruptive periods for a quantitative evaluation of unrest events. Surveys and analyses carried out regularly over long time periods also play an equally important role. Therefore, to realize of probabilistic eruption forecasting, it is fundamentally important that monitoring networks are run properly and the data are shared appropriately.

Key words : volcanic eruptions, unrest, VUI, probabilistic evaluation, thermal demagnetization

キーワード : 火山噴火, 活動不安定, 火山活発化指数, 確率的評価, 熱消磁

* 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

* Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, 060-0810, Japan

I. はじめに

火山噴火に先立って、群発地震、地盤変動、地熱異常、噴気ガス組成の変化など、さまざまな異変が発現する場合がある。一方で、こうした異常現象が観測された場合であっても、その後噴火に至らず静穏状態に戻るケースもある。活火山の場合、噴火していない時期であっても、微小地震活動、地熱・温泉活動、噴気活動などが準定常的にみられることは珍しくなく、これらも広い意味での火山活動である。丁寧に追跡すると、こうした平時の火山活動にも揺らぎがあることが普通で、その揺らぎの範囲を逸脱した状態は英語で *unrest* と呼ばれる。この言葉は最近の火山学分野ではよく使われるようになってきているが、日本語としていまだ適当な訳語がないので、本稿では「活動不安定」と呼ぶことにする。平時の火山活動（バックグラウンド・レベル）は、概念的にはいわば気象における「平年並み」と同じようなものであり、火山ごとに差異がある。したがって、何をもって活動不安定と考えるべきかについても個々の火山で異なる。換言すれば、ある状態が活動不安定に該当するか否かを認知することは、その火山のバックグラウンドの活動を知ることの裏返しでもある（図1）。

噴火前にマグマそのものが急激に上昇し地表に向かおうとする場合、顕著な地盤変動を伴う有感地震が多発するなど、平時とは明らかに異なる強い活動不安定が起こることがある。このような場合は、現象の発現から数日の間に噴火に至ることもあるため、活動不安定は噴火の切迫性評価に直結する指標となり得る。一方で、マグマの移動を伴わない場合や、マグマが少し上昇してそのまま定置しただけの場合にも、微小地震の多発、火口付近に局在した地盤膨張や熱消磁（岩石の加熱に伴って磁性鉱物の残留磁化が部分的に消失すること）といった、相対的に小規模な活動不安定が起こり得る。こうした活動不安定は、熱水系が発達した火山ではしばしばみられる現象である（ここで熱水系は、地下浅部に水を貯留する構造があり、深部からマグマ起源の熱供給を受けているもの

を指す）。これらが、マグマ溜まりからの脱ガスの活発化や、それに刺激された浅部熱水系の状態変化を反映していることは想像に難くないが、物理・化学モデルに基づいて、これらの事象を噴火の切迫性評価や規模予測に結びつける道筋は、現状では確立していない。その理由のひとつは、こうした活動不安定事象は、非噴火期にさまざまな時間スケールで繰り返し起こることが多く、しばしば噴火に至らずに終息してしまうことにある。こうした現象は、Rouwet *et al.* (2014) が指摘したように「噴火の予知」の陰となり、とくに学術論文には記載されにくい (Moran *et al.*, 2011) ため、研究者の興味の対象となりにくかったのである。

熱水系が発達した火山では、変質鉱物等の沈積によって、浅部熱水系のなかに難透水性のシール層ができたり、火道の一部が閉塞したりすると、その直下で圧力が高まり、水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火の起こりやすい環境になるとする研究がある（例えば、Christenson *et al.*, 2010; Tanaka *et al.*, 2017, 2018; Stix and de Moor, 2018）。こうした考えが正しいとすれば、火口域の地下で起こる熱消磁や地盤膨張などの現象は、Kanda *et al.* (2010) が口永良部島の観測結果に基づいて考察したように、噴火の準備過程を反映している可能性があるだろう。さらに、最近では、Stix and de Moor (2018) のように、火山の熱水系として想定される概念モデルを念頭に置きつつ、活動不安定事象の特徴から噴火を予測する手法を模索しようとする動きもある。本稿も基本的にこの考え方の延長上にあり、各種のモニタリング観測データを、噴火予測にどのように活用できるかについて論考するものである。

本稿ではまず、橋本ほか (2019) が提示した、熱消磁等の活動不安定事象の整理・評価の方法について述べる。次に、Potter *et al.* (2015a) の考案した火山活発化指数 (Volcanic Unrest Index, 以下 VUI と呼ぶ) についてその基本的考え方を紹介し、筆者らが最近取り組んでいる、わが国の火山への VUI 導入の試みについても触れる。さらに、両者を融合させることで、モニタリング観

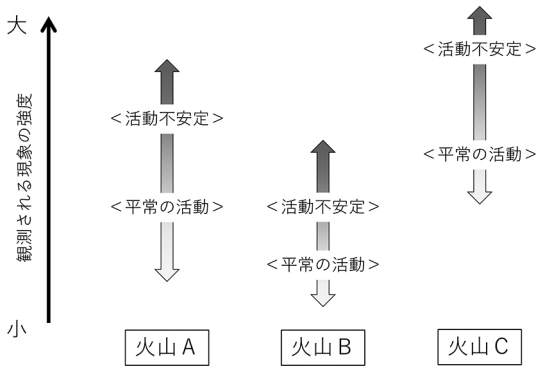


図1 「平常の火山活動」の範囲に応じて「活動不安定」と判断される目安は火山ごとに異なる。例えば、火山Aでは平常の活動とされるものが、火山Bでは活動不安定に該当し、火山Aで活動不安定とされる状態は、火山Cでは平常の範囲である場合がある。

Fig. 1 Background volcanic activity and state of “unrest” of a specific volcano with respect to a specific monitoring index differs from other volcanoes. For example, normal activity level at Volcano A can be unrest at Volcano B, while an unrest state at Volcano A can be in the background range at Volcano C.

測で蓄積される活動不安定の事例を、将来の噴火確率予測にどのように活用できるかについて考える。

II. モニタリングデータによる活動不安定事象の評価

活動不安定事象が観測された後にどのようなことが起こるかを、物理・化学モデルに基づいて決定論的に予測しようとするならば、事象の発生源に関する情報やその周辺媒質の物性を、その事象が起こった火山ごとに知るか仮定する必要があるが、一般にはそれらすべてが詳しくわかるわけではない。一方、特定の火山ではなく、タイプの類似した火山グループを対象を広げて事例を多数収集し、活動不安定事象の特徴を数値として抽出した上で、何らかの統計的な手法によって、噴火に至る可能性を評価するというアプローチが考えられる。後者では、個々の火山の特性の違いを無視することになるが、特徴抽出の項目や方法が適切

であれば、事例を蓄積していくことにより、予測の精度を逐次高めていける可能性がある。

一般に、火山性の地盤膨張や熱消磁は、火山の地下での増圧や蓄熱を示唆するので、水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火の準備過程として想定される熱水系の圧力や温度の変化を間接的に反映する指標になり得るであろう。橋本ほか(2019)は、試みとして、過去にわが国で報告された活動不安定事象を中心に事例を収集し、変動源深度と強度(およびその時間変化率)の情報を抽出・整理した。彼らは、活動不安定の事例をできるだけ多く集めるため、地盤膨張については茂木モデル、熱消磁については単一磁気双極子モデルに基づいて、変動源が推定されたもの(もしくは利用可能なデータに基づいて変動源情報を二次的に推定可能なもの)を対象とした。収集したデータを、両対数グラフの横軸に変動源深度、縦軸に地盤変動または熱消磁の指標をとりプロットしたところ、いずれのグラフにも明瞭な正の相関が認められた。図2は、11火山について収集した熱消磁イベントについて、横軸に変動源深度、縦軸に磁気モーメント変化率をとった散布図である。活動不安定発現後に噴火したイベントは円で囲ってある。また、図2のイベントについて、火山名と時期、噴火との対応を表1にまとめている。事例数は決して多いとはいえないが、興味深い傾向が指摘できる(橋本ほか, 2019)。まず、活動不安定の時期に観測された変動源の深度と、噴火の有無の関係については明瞭な関係は認められない。一方、300 mより浅い消磁イベントには、このグラフ上で右上がりの直線で近似されるトレンドから外れているものが多く、そのいくつかは活動不安定の発現後に噴火している。彼らはこのことから、全体の直線トレンドからみて、個々の変動源がどの程度浅く強い方向にずれているか(すなわち、グラフ上での左上方向への偏差)によって、その活動不安定事象が噴火に至る可能性を評価できるのではないかと指摘している。現状では収集できたイベント数が少なく上記は仮説に過ぎない。また、以下の段落で述べるように「噴火」の判定に関する問題点も孕んでいる。それでもなお、この

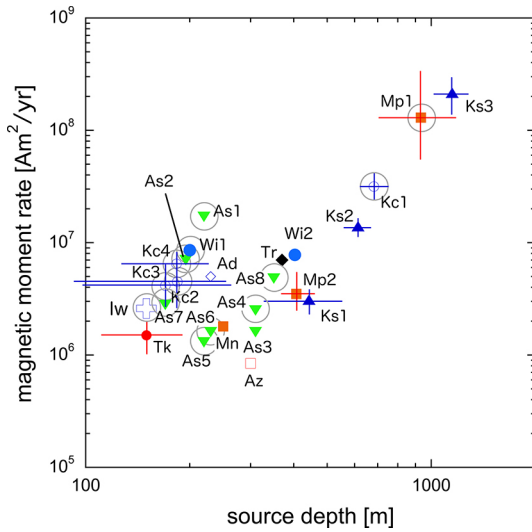


図 2 地磁気全磁力変化(熱消磁イベント)から単一磁気双極子モデルで推定された消磁源の磁気モーメント変化率。横軸は地表面からの深度。霧島硫黄山で2017年2月から2018年2月に観測された消磁源(Iwと表示)(鹿児島地方気象台・福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, 2019)を橋本ほか(2019)のFig. 2に追加し改変。その他のイベント名については表1および橋本ほか(2019)を参照。円で囲われた記号は、活動不安定後に噴火したイベントを示す。

Fig. 2 Magnetic moment rates assuming a single dipole model, based on reported geomagnetic total field records (unrest events associated with the thermal demagnetization). Horizontal axis indicates source depth from ground surface. Event names indicated with symbols are the same as in Fig. 2 of Hashimoto *et al.* (2019), except for the newly added demagnetization event at Iwoyama, Kirishima Volcanic Group (Iw), which was observed from February 2017 to February 2018 by Kagoshima Local Meteorological Office, JMA and Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters, JMA (2019). Symbols of erupted events posterior to the unrest are circled. Refer to Table 1 for other events.

ように整理した変動源の情報は、III章で紹介する火山活発化指数(VUI)を算出するための評価項目のひとつとして効果的に使えるのではないかと、筆者は考えている。

図2は橋本ほか(2019)のFig. 2に基づいているが、本稿で改変を加えたので、ここで付記し

ておく。まず、霧島硫黄山で2018年4月に発生した小規模な水蒸気噴火に先行する消磁の1イベント(Iw)を本稿で追加した。次に、阿蘇山のイベント群(As1~8)については、橋本ほか(2019)ではAs1, As2, As8を、それぞれ1989年, 1990年, 2014年噴火と紐付けていた。マグマの関与が明らかなこれらの噴火期と比べると低調ではあるものの、2000年から2013年にかけては、第1火口底で土砂噴出が活発な時期があった。この時期に火口外に火山灰を降らせる規模に達した噴出イベントには、気象庁が「噴火」としているものもある。橋本ほか(2019)では、こうした現象は、土砂噴出活動の規模が大きくなったものとして、噴火とはみなしていなかったが、本稿では、上述の霧島硫黄山の2018年水蒸気噴火など、同じくごく小規模な現象も取り扱っていることから、改めて阿蘇山の当時の火山活動について資料を参照し再検討した。その結果、消磁イベントAs4~7については、それぞれの活動不安定に紐付けられる、噴出現象の高まりとしての「噴火」があると判断した。もっとも、阿蘇山では、湯だまり(高温の火口湖)内の噴騰や土砂噴出などの小規模な噴出現象は頻繁に起こっており、消磁イベントの数も多いことから、それらの対応付けにはなお任意性が残ることは否めない。一方、口永良部島については、2001年以降の4回の消磁イベントは、橋本ほか(2019)と同様に本稿でも、すべて2014年噴火に紐付けている。これは、イベント間に突発的な噴出現象がなかったことに加えて、地盤変動や地震活動がこの消磁と連動し、表面活動の長期的な経過が、2014年噴火に向かって徐々に高まっていった(井口・中道, 2015)という事実に基づいている。すなわち、4つの消磁イベントを、2014年噴火に向かって積み上げられたものと考えたわけである。しかし、全体をひとつの事象とみなす、あるいは最後のイベントのみを噴火に対応付けるという取り扱いもあり得るだろう。

火山性の熱消帯磁現象は、ある深さにおける温度変化を反映していると考えられるが、それは熱の供給と散逸の収支に変化があったことを示唆す

表 1 図 2 の消磁イベントのリスト.

Table 1 List of demagnetization unrest events shown in Fig. 2.

Volcano/Crater name	Event name	Period of analysis (Year.Month)	Eruptions and eruptive activities with potential relevance
Meakandake/ Pon-machineshiri cr.	Mp1 ↑	2008.09–2009.09	2008.11 phreatic eruption
	Mp2	2013.06–2014.06	
Meakandake/ Naka-machineshiri cr.	Mn	2014.08–2015.09	N/A
Tokachidake/62-2 cr.	Tk	2008.09–2009.09	N/A
Tarumae/Summit cr.	Tr	1999.07–2000.10	N/A
Azuma/Oana cr.	Az	2004–2009	N/A
Adataru/Numano-Taira cr.	Ad	1997.07–1998.06	N/A
Kusatsu-Shirane around Mizugama cr.	Ks1	1982.11–1985.10	N/A
	Ks2	1988.09–1991.09	
	Ks3	2014.05.08–2014.05.31	
Aso/Nakadake 1st cr.	As1 ↑ *1	1989.09–1989.11	1989.10: Strombolian eruption at new vent *1, 1989.11: two explosive events *1, 1990.04: mud explosion *2 1990.09–12: three new vents opened, 1991.01–02: Strombolian eruption, 1992.04–09: mud explosions w/ash 1992.12: two new vents opened, 1993.01–03: Strombolian eruption to intermittent mud explosions 1994–1995: frequent mud explosions, 1996–2000: sporadic mud explosions from water pool 2003.07: mud explosion w/ash *3, 2004.01: mud explosion w/ash, 2004.02–09: small mud explosions 2005.04: mud explosions w/ash, 2006.03–06: small mud explosions , 2009.02: small explosion w/ash *4 2011.05–06: small explosions w/ash *5, 2013.07, 10–12: small mud explosions *6 2014.01–02, 08: small eruptions w/ash, 2014.11–2015.05: magmatic eruption *7
	As2 ↑ *2	1990.02–1990.04	
	As3	2001.01–2001.12	
	As4 ↑ *3	2003.01–2003.09	
	As5 ↑ *4	2007.01–2008.12	
	As6 ↑ *5	2009.10–2011.04	
	As7 ↑ *6	2013.01–2013.12	
	As8 ↑ *7	2014.10.02–2014.11.25	
Kuchinoerabujima/ Shindake cr.	Kc1 ↑	2001.05–2002.07	2014.08 phreatomagmatic(?) eruption
	Kc2 ↑	2003.06–2004.06	
	Kc3 ↑	2004.12–2006.01	
	Kc4 ↑	2006.09–2007.10	
White Island (NZ)/1933 cr.	Wi1 ↑	1970.11–1971.07	1971.07 eruption at south of Rudolf vent
	Wi2	2005.02–2006.02	
Kirishima Iwoyama/ South and West crs.	Iw ↑	2017.02–2018.02	2018.04 small phreatic eruption

最右列には、活動不安定事象に関連する可能性のある噴火および突発的な噴出現象を記載した。イベント記号右の上向き矢印は、その後の噴火に紐付けられたものであることを示す。阿蘇山については、気象庁の火山活動解説資料および活火山総覧第4版（気象庁、2013）を参照し、気象庁の分類で「噴火」とされていない現象はボールド体で示した。阿蘇山についてはイベント数が多いため、本稿で与えた活動不安定事象と噴火の対応関係を注釈数字で示している。

Eruptions and smaller eruptive episodes that are potentially relevant to unrest events are listed in the rightmost column. Upward arrows indicate events related to posterior eruptions. Regarding Aso, this part is mainly based on volcanic activity reports of the Japan Meteorological Agency and the 4th edition of the national catalogue of active volcanoes in Japan (JMA, 2013). Note: activity that is not termed “eruption” by the JMA is indicated by boldface. Numbers with an asterisk are attached to clarify the correspondence between an unrest event and an eruption.

る。一定期間継続していた消磁が、停滞や着磁の傾向に転じる際には、この収支を変える何らかの現象が起こっている可能性が高く、それは熱供給率に対して放熱率が相対的に増える過程であるだろう。熱輸送の担い手がマグマや熱水である場合、その過程は、「噴火」のような突然の噴出現象による熱放出である場合もあれば、噴気量や熱異常域の増大など「ゆっくり噴火」ともいべき熱放出現象であるかもしれない。とりわけ、現象の規模が小さい場合には、両者は連続的なスペクトラムの端成分としてみるべきだと筆者は考える。本稿では、図2で記号を円で囲ったイベントは、気象庁が「噴火」としているものであるが、活動不安定事象と「噴火」との時間間隔や、何をもって「噴火」とするかの基準によって、この判定はある程度変わり得る。しかし、この点について深く議論することは本稿の目的ではないので、別の機会に検討したい。その際、阿蘇山については、図2に収録した以外にも1990年代に複数の消磁イベントがあることが橋本ほか(2001)で報告されているので、これらについても精査し、検討に加えることができるだろう。

III. 火山活発化指数 (VUI) への応用

1) VUI とは何か

序論で触れた、火山の「活動不安定」という言葉は、バックグラウンドの火山活動との境界を明確に定義することなく使われることも少なくない。ある火山で活動不安定事象が起こったとして、その現象の強さをそこで過去に起こった活動不安定事象やバックグラウンド活動と比較することは、一見簡単なことのように思われるかもしれないが、実際にはそうとは限らない。例えば、観測網の配置や観測項目が時代とともに変化している場合には、その違いを考慮するために何らかの調整が必要である。多項目のデータから抽出される多様な情報を、どのように評価の土俵に乗せるのかといった問題もある。他の火山の活動不安定事象との比較はさらに複雑さを伴う。しかしながら、過去に起こった活動不安定事象の強度や頻度を、定量的な定義に基づいて正確に記録できていれば、

眼前で進行中の活動不安定がどの程度深刻なものかを判断する助けとなることは疑いない。この点は、地質学における噴火履歴の研究と同様であろう。

こうした問題・要求に対処することを目的として、ニュージーランドのGNS Scienceの研究者が中心となり、火山活発化指数 (VUI) というものを提案している (Potter *et al.*, 2015a)。この論文の筆頭著者である S. Potter 氏は火山学も理解した社会科学の専門家であり、この VUI は、多項目データを含む複雑な活動不安定事象の情報を、いかに定量性を保ちつつ単純な形に整理して、火山観測の専門家でない人々にもわかりやすく伝えることができるかという、コミュニケーション・ツールとしての側面にも力点が置かれている。既存の類似物として、噴火警戒レベル (Volcanic Alert Level; VAL) があるが、VALにはしばしば火山活動以外の情報も考慮されること、VALが噴火中の状態も対象としていること、VALはそれ自体に予測の要素を含む場合があること、などの点において、観測事実に基づく評価に特化している VUI と異なる。

噴火に至らなかった活動不安定事象は、研究論文等の形では報告されにくいという傾向がある (Moran *et al.*, 2011) ため、VUI の算出には、基本的には定常観測もしくは定期的に行われる臨時観測のデータが用いられる。ただし、信頼性の高い文献情報に基づいて、定常的な観測網が敷かれる以前の履歴を遡ることも可能であり、上記に随伴する論文 (Potter *et al.*, 2015b) では、ニュージーランドのタウポ火山地域について、観測網が整備される1940年より前のVUIも、新聞記事等を利用して算出している。

2) VUI 算出の手順

前出のVUIは、あらかじめ用意したワークシートを用いて、0から4までの整数値として算出されるものである。VUI値の0, 1, 2, 3, 4には、それぞれ no unrest, negligible unrest, minor unrest, moderate unrest, heightened unrest という直観的な評定ワードが付与されている。本節では、Potter *et al.* (2015a, b) で示されてい

火山名 対象地域 時間範囲		Volcanic Unrest Index (VUI) Worksheet					VUI=
(1)		0 No unrest	1 Negligible unrest	2 Minor unrest	3 Moderate unrest	4 Heightened unrest	(6)
カテゴリ1	項目1						(5)
	項目2						
	項目3						
	項目4						
カテゴリ2	項目1						
	項目2						
	項目3						
カテゴリ3	項目1						
	項目2						
	項目3						

図3 火山活発化指数 (VUI) ワークシートのイメージ. Potter *et al.* (2015a) に示されたオリジナルのワークシートを簡略化.

Fig. 3 Image of the VUI worksheet. Simplified version of original worksheet from Potter *et al.* (2015a).

るこのワークシートについて、図3を用いて簡単に解説する。

Potter *et al.* (2015a) によるオリジナルのVUIワークシートではまず、対象とする火山、データの空間範囲と時間範囲 (time window) を決める (図3の(1))。ここでいう空間範囲とは、例えば火山性地震の場合であれば、どのエリアを震源とする地震イベントを評価対象とするかということの意味している。時間範囲とは、評価の対象とするデータの始期と終期である。評価に使われる部分はマトリクス状の一覧表になっている。評価対象とするデータのカテゴリが左端に書かれており (同(2))、オリジナルでは「地震」「地盤変動」「熱・ガス」の3つが用意されている。各カテゴリにはさらに評価項目がいくつかある (同(3))。例えば、地震であれば「群発地震の継続期間」「震源の深さ」「VT地震の発生状況」「微動・低周波地震・ハイブリッド地震の発生状況」といった具合である。それぞれの項目ごとに、0から4の評価スコアを与えるために、マトリクス内の対応する要素には、現象の数値や特徴などの評価基準をあらかじめ定めておく (同(4))。右端の列には、項目ごとのスコアを評価者が書き込む欄が用意されている (同(5))。該当のない項目にはスコアを

記入せずに空欄のまま残す。次に、このスコア列の平均値を求め、さらに四捨五入で整数化する。これがワークシート全体のVUIとなる (同(6))。シートの作成にあたっては、観測されている項目すべてを盛り込むのではなく、活動不安定を評価する観点で重要なものを絞り込み、特定のカテゴリに重みが係りすぎないように配慮することを、Potter *et al.* (2015a) は推奨している。また、スコアの0から4の段階分けに係るレンジの設定については、個々の火山の特性にあわせて、あらかじめよく検討しておくことが求められる。加えて、Potter *et al.* (2015a) は、モデル依存性の強い評価項目を設定することは避けた方がよいことや、前の状態との比較は個々の評価項目のレンジ設定に持ち込まず、時間変化を議論したい場合には、静的基準に基づいて評価したVUIそのものの時間変化として行うべきであることも指摘している。後者の注意点は、例えば、現在進行中の活動不安定事象をリアルタイムで逐次評価する場合に、前の状態との比較が判定基準に入っていると、VUIが長期間同じ値に留まることが難しくなるためとされている。

3) 日本でのVUIの試行的導入

わが国では、活動期にある少数の火山を除き、

ほとんどの火山において、噴火中よりも、噴火間の静穏状態の時間の方が圧倒的に長い。このため、火山の周辺は生活の場や観光資源となることが多い。噴火は、生命や財産を脅かす災害となり得るが、非噴火時の活動不安定事象もまた、それが長引いた場合にはとくに、住民の日常生活や地域経済に大きな影響を与える可能性がある。したがって、過去の活動不安定事象の履歴をVUIなどのツールを用いて定量的に把握・整理しておくことは、研究上の有用性にとどまらず、社会的な観点からも、行動決定のための判断根拠として重要と考えられる。

近年、想定される火山現象を網羅し、それらの時間的連関を樹形図として整理した、いわゆる噴火事象系統樹が作られる火山が増えている。地質学的知見から得られる噴火履歴に基づいて系統樹が作成されることが多いが、最近では、観測データに基づいて事象分岐に確率を付与することで、系統樹を高度化しようとする取組もはじまっている（西村ほか、2019）。多くの場合、活動不安定は系統樹の最初のノードに現れる事象である。しかし、活動不安定事象は地質記録には残らないため、この事象からの分岐に確率を付与するには、観測記録に頼る以外には方法がない。その際、過去の活動不安定事象の強度、頻度、継続期間をできるだけ正確に知ることが重要であるが、ここにVUIを導入すれば、多項目の観測記録を統合して評価できるため便利であろう。さらに、VUIは、活動不安定の強度に応じて0から4の指標として表現されるため、収集事例の母数が大きければ、各指標値に紐付けられる噴火確率を求めることも原理的には可能なはずである。Potter *et al.* (2015a) は、「VUIは予測ツールではない」と強調しているが、上記の手順に従えば、いわば「観測記録の統計に基づく噴火切迫度の確率評価を指向したVUIの機能拡張」を実現できるのではないだろうか。とりわけ、地質情報として痕跡が残りにくい水蒸気噴火については、こうした手法を追究する価値があると筆者は考えている。もっとも、実用的なレベルに達するまでには、多くの活動不安定事象の蓄積が必要であり、それに

は相当な年月がかかるであろう。

筆者は、VUIにはこのようにいくつかの応用・拡張可能性が見込まれることから、わが国でも試行してみる価値があると考えた。そこで筆者らは、研究分担者とともに、文部科学省による「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）」（文部科学省、2019）の一環として、いくつかの国内火山に対して、VUIワークシートの試作に取り組んでいる。2019年には、研究分担者による意見交換を経て、VUI導入のための検討ワーキング・グループを組織し、十勝岳のワークシートを試作した（橋本ほか、2020）。このワークシートでは、カテゴリとして「地震」「地盤変動」「熱」「化学」の4つを設けることとした。1960年代から長期間安定した記録が残されている気象庁の観測データをベースとし、観測項目が増えている近年については、それ以外の機関による多様なデータも評価項目に取り入れることを検討した。その結果、地震カテゴリでは、A型・B型地震の発生回数、地盤変動カテゴリでは火口付近のGNSS連続観測の変位速度、熱カテゴリでは噴気高・温度・熱消磁、化学カテゴリではSO₂放出率・ガス組成・温泉水組成を、それぞれ評価項目として設定することとした。各スコアのレンジ設定等の具体に関する説明は別の機会に譲る。

IV. VUI評価における熱消磁現象の活用可能性

本章では、VUIの試行的導入にあたり、熱のカテゴリに加えた熱消磁（地磁気変化）の取り扱いについて、将来的な噴火予測への活用可能性の視点も含めて述べる。

火山における地磁気観測の有用性は、海外ではあまり広く認知されていないが、日本ではそれなりの歴史があり、気象庁の観測にも一部取り入れられているため、記録の存在する火山は多い。このため、II章に述べたような整理が可能であったわけである。橋本ほか（2019）は、熱消磁の活動不安定事例を収集して図2に追加していけば、やがては図4のような分布が得られると予想した。バツとマルは、それぞれ活動不安定発現後の噴火の有無に対応している。この予想に基づ

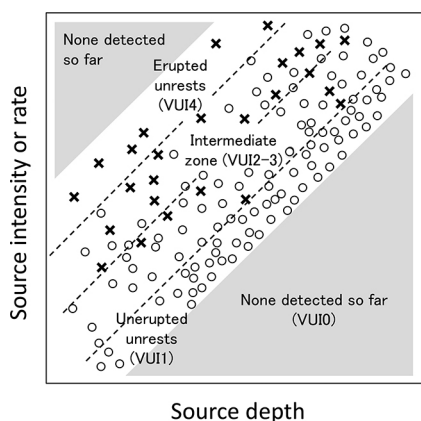


図 4 活動不安定事象の変動源深度—強度の散布図に基づく統計的噴火予測の概念図。橋本ほか(2019)のFig. 5を改変。

Fig. 4 Conceptual scatter plot of source intensity versus source depth, demonstrating a statistical evaluation of unrest events (modified after Fig. 5 from Hashimoto *et al.*, 2019).

いて、散布図上で領域を分割し、それらに対して、例えば以下のようにVUIスコアを割り当てることが可能である。図中の右下隅のハッチは、それ以前に事象の検出例がない領域である。検出できないほど消磁源が深い(または弱い)ことを意味しているが、もしこの領域にプロットされる事象が観測された場合、もしくは連続観測データが消磁センスにない場合にはスコア0 (no unrest)とする。その左上の、マルのみが分布する領域は、活動不安定の発現後に過去一度も噴火していない。ここにはスコア1 (negligible unrest)を割り当てる。もうひとつ左上の、マルとバツが混在する領域はスコア2 (minor unrest) および3 (major unrest)とする。さらに左上の、バツの事例のみが分布する領域は、活動不安定の発現後に必ず噴火しているので、スコア4 (heightened unrest)を割り当てる。この図4を用いる方法は、もともとが複数の火山の事例を集めた結果に基づいているため、基本的にどの火山に対してもそのまま適用できるという簡便さがある。ただし、消磁源の推定にはモデルを介していることには留意する必要がある。なお、消磁源の位置を先験的

に仮定できる場合には、散布図上で横軸の位置を固定して、連続観測記録の時間変化率(時系列グラフの傾き)とVUIスコアを対応付けるといったやり方も可能である。十勝岳のワークシートではその方式を採用している。

以上、橋本ほか(2019)の方法で整理した熱消磁の活動不安定を、Potter *et al.* (2015a)が考案したVUIの評価項目として組み込む手順についてやや詳しく述べた。ポイントは、活動不安定発現後の噴火の有無(つまり、活動不安定発現と噴火の同時確率)に基づいて散布図を領域に分け、それに対してVUIスコアを割り当てるといった考え方である。この仕組みを取り入れることにより、VUIに噴火確率予測に近い機能を持たせることが可能になるはずである。地盤膨張についても、同じ手順で組み込むことは原理的に可能であろうが、今のところ、図4に相当する散布図でVUIスコアに対応させるための領域分けがうまくできておらず、文献調査を含めさらなる事例収集と特徴抽出方法の検討が必要である。

先に説明したように、VUIは多項目のデータの評価を平均して算出するものであるが、すべての評価項目について、活動不安定と噴火の同時確率を反映させた基準を入れることは実際には難しい。例えば、火山性地震の発生回数は、個々の火山にとって重要な活動不安定評価項目のひとつであるが、バックグラウンドの活動度は火山ごとに大きく異なるし、計数値は観測点の位置にも強く依存する。このため、熱消磁イベントについて行ったような複数の火山のデータをまとめて比較する方法には向かないであろう。したがって、対象とする火山のデータのみに基づいて評価基準を作成することになる。しかし、同時確率を計算できる程度に十分な回数の活動不安定と噴火の事例が観測データとして存在するケースは希であろう。このような場合には、いったん利用可能な全期間のデータを調べて、VUIスコアの出現頻度を他の評価項目と大きく食い違わないように調整するなど、ある意味で相対的な基準設定をせざるを得ないだろう。それでもなお、VUIによる表現は、個々の活動不安定事象の深刻性を直観的に理解できる

という点で、個人や自治体の意思決定にも役立つと筆者は考えている。

V. ま と め

本稿では、火山における各種のモニタリング観測で検知される活動不安定事象を、定量的な噴火予測にどのように活用できるかについて考えた。具体的には、橋本ほか(2019)が試行した、熱消磁等の活動不安定事象の整理・評価の手法を、Potter *et al.* (2015a) の考案した火山活発化指数(VUI)に取り入れることで、噴火確率予測の機能をVUIに組み込める可能性を述べた。また、筆者らが最近取り組んでいる、わが国の火山へのVUI導入の試みについても紹介した。もっとも、現状では試行錯誤の段階であり、確率予測を可能にするには、今後、活動不安定事象の事例を数多く蓄積しなければならない。

VUIを用いるか否かによらず、活動不安定事象の定量評価を進める上で、噴火時/非噴火時を通じて均質なモニタリング観測のデータがあることが本質的に重要である。連続観測ではなくても、長期にわたって定期的に行われている調査や分析もまた、同様に大きな役割を果たす。したがって、観測網や観測データが適切な形で継承・共有されることが、将来の噴火確率予測の実用化には欠かせない。

謝 辞

十勝岳のVUIワークシートの試作にあたっては、気象庁札幌管区气象台から過去の地震回数・噴気高度・火口温度・GNSSの観測データをご提供いただいた(GNSSデータの一部は北海道立総合研究機構・地質研究所の観測による)。本研究は、文部科学省による「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)」の支援を受けた。本稿の内容の一部は、研究分担者との意見交換や、ワーキング・グループでの議論や作業を通じて得たところが大きい。関係諸氏に深謝申し上げる。なお、本稿は、2020年1月に箱根で開かれた水蒸気噴火のメカニズムに関する国際WSで筆者が講演した内容に若干の見直しを行い、IV章のVUIを交えた論考を加えたものである。WSでは、VUIの考案者であるPotter氏と議論する機会を得て大変有意

義であった。WSを企画して下さった神奈川県温泉地学研究所に感謝申し上げる。

注

- 1) English translation of this article is available at <https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/78402?locale=en&lang=en> [Cited 2020/12/30].

文 献

- Christenson, B.W., Reyes, A.G., Young, R., Moebis, A., Sherburn, S., Cole-Baker, J. and Britten, K. (2010): Cyclic processes and factors leading to phreatic eruption events: Insights from the 25 September 2007 eruption through Ruapehu Crater Lake, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **191**, 15-32.
- 橋本武志・田中良和・宇津木 充 (2001): 阿蘇火山における地磁気変化について (1991~2000年). 京都大学防災研究所年報, **44B**(1), 333-343. [Hashimoto, T., Tanaka, T. and Utsugi, M. (2001): Geomagnetic variation observed at Aso Volcano during the past ten years (1991-2000). *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, **44B**(1), 333-343. (in Japanese with English abstract)]
- 橋本武志・宇津木 充・大倉敬宏・神田 径・寺田暁彦・三浦 哲・井口正人 (2019): 非マグマ性の火山活動に伴う消磁及び地盤変動のソースの特徴. 火山, **64**, 103-119. [Hashimoto, T., Utsugi, M., Ohkura, T., Kanda, K., Terada, A., Miura, S. and Iguchi, M. (2019): On the source characteristics of demagnetization and ground deformation associated with non-magmatic activity. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **64**, 103-119. (in Japanese with English abstract)¹⁾
- 橋本武志・青山 裕・田中 良・大倉敬宏・森 俊哉 (2020): 十勝岳の火山活発化指数(VUI)基準の試作. 日本火山学会講演予稿集2020年度秋季大会, O2-20. [Hashimoto, T. Aoyama, H., Tanaka, R., Ohkura, T. and Mori, T. (2020): A trial application of the Volcanic Unrest Index (VUI) to Mt. Tokachidake. *The Volcanological Society of Japan 2020 Fall Meeting*, O2-20. (in Japanese)]
- 井口正人・中道治久 (2015): 続発する日本の水蒸気噴火. 京都大学防災研究所年報, **58A**, 1-7. [Iguchi, M. and Nakamichi, H. (2015): Successive occurrence of phreatic eruptions in Japan. *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, **58A**, 1-7. (in Japanese with English abstract)]
- 鹿児島地方气象台・福岡管区气象台地域火山監視・警報センター (2019): 霧島硫黄山の全磁力変化—2017年9月~2019年1月31日—. 火山噴火予知連絡会会報, **132**, 240-311. [Kagoshima Local Meteorological Office, JMA and Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters, JMA (2019): Volcanic activity of Kirishima-

- yama Volcano—September 1, 2017–January 31, 2019—. *Report of the Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruption*, **132**, 240–311. (in Japanese)]
- Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T. and Shigeno, N. (2010): A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **189**, 158–171.
- 気象庁編 (2013): 日本活火山総覧 (第4版). [Japan Meteorological Agency ed. (2013): *National Catalogue of the Active Volcanoes in Japan (The Fourth Edition)*.]
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/84_Asosan.pdf [Cited 2020/12/30].
- 文部科学省 (2019): 災害の軽減に貢献するための地震火山研究観測計画 (第2次) の推進について (建議). [Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (2019): *Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program*. (in Japanese)]
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1413118.htm [Cited 2020/12/30].
- Moran, S.C., Newhall, C. and Roman, D.C. (2011): Failed magmatic eruptions: Late-stage cessation of magma ascent. *Bulletin of Volcanology*, **73**, 115–122.
- 西村太志・中川光弘・藤田英輔 (2019): 特集「噴火事象系統樹の高度化と火山活動の分岐条件」. 火山, **64**, 31–32. [Nishimura, T., Nakagawa, M. and Fujita, E. (2019): Introduction of the special issue on “Improvement of Volcanic Event Tree and Understanding of Branching Conditions of Volcanic Activity”. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **64**, 31–32. (in Japanese)]
- Potter, S., Scott, B.J., Jolly, G.E., Neall, V.E. and Johnston, D.M. (2015a): Introducing the Volcanic Unrest Index (VUI): A tool to quantify and communicate the intensity of volcanic unrest. *Bulletin of Volcanology*, **77**, 77.
- Potter, S., Scott, B.J., Jolly, G.E., Johnston, D.M. and Neall, V.E. (2015b): A catalogue of caldera unrest at Taupo Volcanic Centre, New Zealand, using the Volcanic Unrest Index (VUI). *Bulletin of Volcanology*, **77**, 78.
- Rouwet, D., Sandri, L., Marzocchi, W., Gottsmann, J., Selva, J., Tonini, R. and Papale, P. (2014): Recognizing and tracking volcanic hazards related to non-magmatic unrest: A review. *Journal of Applied Volcanology*, **3**, 17.
- Stix, J. and de Moor, J.M. (2018): Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing. *Earth, Planets and Space*, **70**, 83.
- Tanaka, R., Hashimoto, T., Matsushima, N., Ishido, T. (2017): Permeability-control on volcanic hydrothermal system: Case study for Mt. Tokachidake, Japan, based on numerical simulation and field observation. *Earth, Planets and Space*, **69**, 39.
- Tanaka, R., Hashimoto, T., Matsushima, N. and Ishido, T. (2018): Contention between supply of hydrothermal fluid and conduit obstruction: Inferences from numerical simulations. *Earth, Planets and Space*, **70**, 72.