

鬼界海底カルデラ内に巨大溶岩ドームが存在 破局的災害を引き起こす巨大カルデラ噴火予測への挑戦

神戸大学海洋底探査センター教授 巽 好幸

1. はじめに

日本は、地球上の約7%、111もの活火山（過去1万年以内に活動した火山）が密集する世界一の「火山大国」である。だから私たちは、火山から温泉や食べ物などの恩恵を得る⁽¹⁾と同時に、火山災害という試練も与えられる運命にある。

ところで、日本列島の周辺で現在のプレートの配置や運動が定まったのは約300万年前のことである。したがって、過去300万年間にプレート運動が引き起こしてきた地震や火山の活動は、これからも必ず起きる。一方でこの時間スケールと比べると日本の歴史は圧倒的に短い。つまり、日本人が歴史上経験したことのない巨大災害も、将来必ず起きると考えるべきである。

その典型的な例が「巨大カルデラ噴火」だ。日本史上最大規模の噴火の1つは1707年の富士山宝永噴火である。当時の江戸市中にも火山灰を降らせたほどの大噴火であった。しかし巨大カルデラ噴火の規模はその数百倍以上である。実は、この途轍もない大噴火を我々の祖先は一度だけ経験しているのだ。今から約7300年前、九州南方海域で起きた巨大カルデラ噴火は、進んだ縄文文化を育てていた人々を南九州から一掃してしまった。そして人々が再び南九州に暮らし始めるには、数百年以上の時が必要であった。またこの噴火に伴う火山灰は、関西でも10cm以上降り積もり、はるか東北地方にまで達した（図1）。

2. 巨大カルデラ噴火を「災害」と認識すべき

噴火記録が地層に比較的よく残されている過去12万年間に、日本列島では10回の巨大カルデラ噴火（マグマ噴出量 $>40\text{ km}^3$ ）が7つの火山で起きている（図1）。いずれの火山も、風光明媚なカルデラ地形が有名である。一方で、巨大カルデラ噴火は、いわゆる自然災害の中でも極めて「低頻度」である。なにせ、最も直近でも7300年前なのだ。最近よく使われるようになった地震などの「発生確率」と同じように表現すると、今後100年間に日本列島で巨大カルデラ噴火が起きる確率は約1%である⁽²⁾。

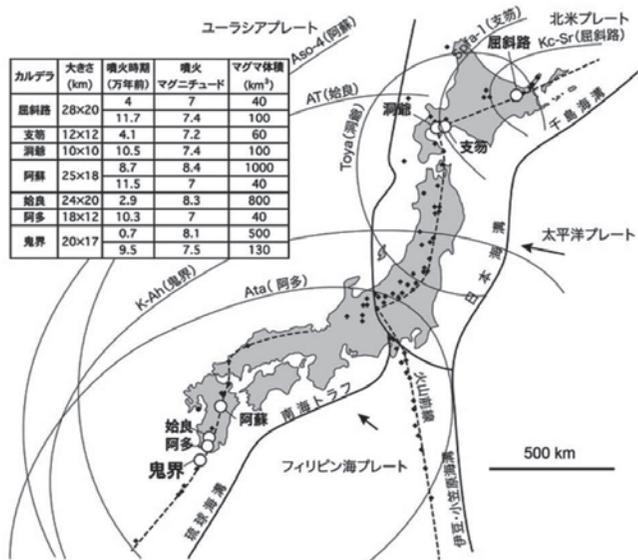


図1 日本列島の活火山（●）と巨大カルデラ火山（○）。過去12万年の活動と広域火山灰の分布も示す。

この確率を聞いた人たちの多くは、その低さに安心するようだ。中には、99%大丈夫などと思いつつも、しかしこの受け止め方が正しくないことは、私たちはすでに知っているはずなのだ。例えば、1995年1月17日の阪神淡路大震災（兵庫県南部地震）については、その後地震断層の詳細な調査が行われた結果、地震発生前日における「今後100年間に震度6以上の地震が発生する確率」を求めることができる。その確率は約1%である。こんなにも低い確率であったにもかかわらず、その翌日にあの悲劇が起きたのだ。したがって私たち火山大国の民は、巨大カルデラ噴火はいつ起きても不思議でないと認識すべきである。

もう1点、巨大カルデラ噴火について私たちが知っておかねばならないことがある。それは被害の甚大さである。ひとたびこの噴火が起きると、高温の火砕流は半径100kmの地域を覆い尽くす。さらに、数十kmの高さまで立ち上がった噴煙柱からは火山灰が広範囲に広がる（図1）。現代の社会インフラは降灰に極めて脆弱で、10cm以上の降灰域では全てのライフラインがストップする。過去の巨大カルデラ噴火に伴う降灰データに基づいて最悪の事態を想定すると、現代日本で巨大カルデラ噴火が起きると、1億人以上の人々が生活不能に陥る⁽²⁾。そして現状では、復旧活動は絶望的である。

事故や自然災害に対する備えの「緊急性」を表す指標として「危険値」がある（図2）。これは想定死者数に発生確率を乗じた値で、高い危険値を示す事象には緊急の対策が必要と考えてよい。図2のデータを見て認識していただきたいことは、

	想定死者数 (人)	年間発生確率 (%)	危険値 (人/年)
台風・豪雨被害	80	100	80
水難事故	800	100	800
交通事故	4,000	100	4,000
首都直下地震	23,000	4	920
南海トラフ巨大地震	330,000	4	13,200
富士山大噴火	14,000	0.1	14
富士山山体崩壊	350,000	0.02	70
巨大カルデラ噴火	120,000,000	0.003	3,600

図2 自然災害や事故に対する危険値の比較⁽²⁾。巨大カルデラ噴火の発生確率は低い、被害が破局的であるためにその危険値は交通事故と同程度となる。

巨大カルデラ噴火の発生頻度は低いにもかかわらず、被害が桁外れに大きいために、その危険値は交通事故と同程度に高いことだ。火山大国日本は、この破局的な火山現象を災害としてしっかりと認識すべきであろう。

3. 火山噴火予測の現状と課題

2014年の御嶽山に続き2018年1月の草津白根山の噴火でも、噴火警戒レベルが引き上げられることなく突然水蒸気噴火が起こり、噴石の直撃などで犠牲者が出た。まだまだ火山大国の噴火予測には課題が多いことが明らかになった。第一に指摘すべき点は、火山は個性が強く、噴火に至る過程や前兆現象に関して多様であるにもかかわらず、現状ではこの個性を十分に把握できていないことだ。噴火の時期と場所を的確に予測する噴火予知の成功例として語り継がれる有珠山2000年の噴火では、前兆現象の検知に基づき適切な避難が行われ、被害は最小限に抑えられた。この成功の最大の要因は、有珠山という火山の個性を知り尽くしたホームドクターチームが火山に寄り添っていたことである。しかし最近では、全国各地の火山観測所では人員の削減が続いている。なぜなら近年の大学教員の評価は、有名英語雑誌に公表した論文の数ばかりが重要視される。しかし息の長い火山観測研究ではなかなか論文を「稼げない」のだ。その結果、火山に寄り添わなければいけない大学の教員が本来の目的を忘れてしまい、火山大

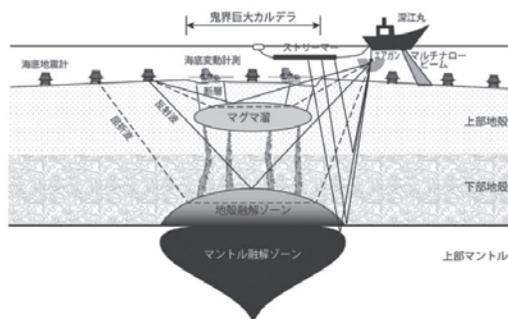


図3 マグマ溜りイメージング計画の概要。マルチナロービームで海底地形を正確に把握し、エアガンで発した地震の反射波や屈折波を受信し、また海底に設置した地震計や磁力計を用いて地下構造を探索する、このほかにも、海中ロボットを用いた観察や試料採取を行う。

国の大学があるべき姿を見失いつつあるのだ。

もう一つの噴火予測が抱える問題点は、現状では噴火を引き起こす「マグマ溜り」の状態を観測できないことだ。マグマ溜りの正確な位置、形、大きさがわかり、その時間変化を把握することができれば、噴火予測の精度は格段に上がるに違いない。特に、膨大な量のマグマを噴出する巨大カルデラ噴火に対しては、この情報は必要不可欠である。しかし世界的に見ても、マグマ溜りの高精度イメージングに成功した例はない。その原理は病院のCT検査と同じで、X線やX線検出器の代わりに地震と地震計を使えばよい。ただ自然地震は頻度が少ないために、正確なイメージングには人工地震を用いる必要がある。このような観測で数km以上の深さにあるマグマ溜りを検知しようとすると、数十～100km四方に及ぶ大規模な観測を行わねばならない。しかし人口が密集する陸域では、これほど大規模な観測は極めて困難なのが実情だ。

そこで神戸大学では、2016年から大学付属の練習船「深江丸」に最新の観測装置を搭載して(図3)、「鬼界海底カルデラ」(図1)の探査を開始した。海域では漁業関係者の理解を得れば、縦横無尽に火山直下のCTスキャンをかけることが可能なのだ。また鬼界海底カルデラは、日本列島で最も直近、7300年前に巨大カルデラ噴火を起こした火山であり、現在でも巨大なマグマ溜りが存在する可能性がある。

4. カルデラ内に成長した巨大溶岩ドーム

鬼界海底カルデラについては海上保安庁などの調査で、カルデラ壁と思われる地形や、カルデラ内部にドーム状の隆起域が存在することはわかってきた。しかし地下構造も合わせた検討や海底の

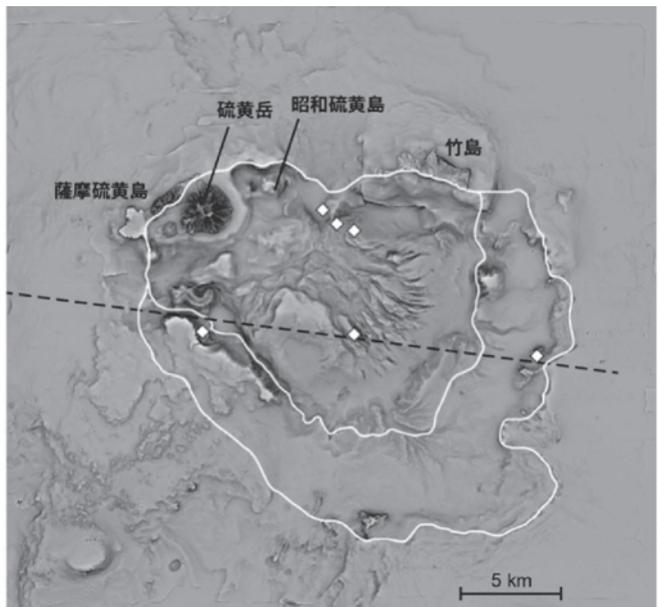


図4 鬼界海底カルデラの立体地形図。白線はカルデラ縁、破線は反射法地震探査側線、白四角は柱状音響異常の位置を示す。鬼界海底カルデラが2重構造を有し、その内側には巨大な隆起域が存在することがわかる。

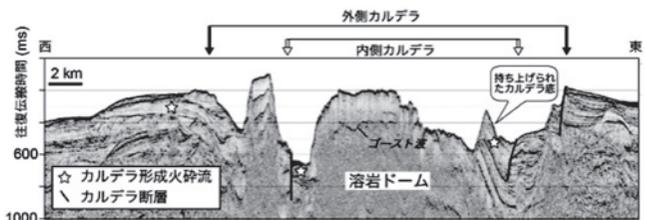


図5 反射法地震探査で得られた鬼界海底カルデラの地下構造。カルデラ縁には陥没断層が存在する。ドーム以外の所にはカルデラ形成時の火砕流などの層状の構造が認められるが、ドーム内にはゴースト波と呼ばれる干渉ノイズを除くと層状構造は認められない。

地層や岩石の調査が行われていなかったために、詳細は不明であった。そこでまず私たちが行ったことは、精密な海底地形図を作成し、反射法地震探査や海底観察、それに試料採取で得られたデータを合わせて、カルデラの構造を明らかにすることだった。その結果は論文に公開されている⁽³⁾ので、カラーの図や詳細な議論はこれを参考にしていただきたい。

これまで3回の探査航海で明らかになった海底地形を図4に、地下構造断面を図5に示す。薩摩硫黄島と竹島に露出する急崖がカルデラの北縁をなし、これらと海底地形・地下構造を考慮してカルデラの位置を決定した。一般的にカルデラ縁は

地形に基づいて、いわゆる「外輪山」の内側に設定されるが、陸上では侵食などの影響で正確に描くことは難しい。今回の調査では地形に加えて、地下構造探査で見出されたカルデラ陥没に伴う「正断層」の位置も勘案した(図5)。鬼界海底カルデラは、24×19 km(長径と短径)と17×15 kmの2重の構造を有し、その陥没量は、内側のカルデラで約600 m、外側は約300 m、カルデラの容積は約140 km³である。日本を代表する阿蘇カルデラとほぼ同規模のカルデラだ。ただし、現時点では2重カルデラが一連の活動で、つまり7300年前に形成されたものなのか、それとも外側のカルデラはより古い活動の結果誕生したものかは判断できない。

このカルデラの最大の特徴は、カルデラ内に巨大なドーム状の地形が存在することである。他のカルデラ火山でも、カルデラ内に大規模に盛り上がった地形が認められる場合がある。例えば、インドネシア・トバ火山のカルデラ湖に浮かぶ60×20 kmにもおよぶ隆起域であるサモシール島があり、その隆起量は1000 mにも達する。この巨大ドームの表面は、カルデラ形成時の火砕流やその後の堆積物で覆われている。すなわち、この隆起はカルデラ形成後に、マグマが地表に噴出することなく地下から地面を持ち上げたことで形成されたもので、「再生ドーム」と呼ばれている。鬼界海底カルデラのドームもこのようなものであろうか？

鬼界海底カルデラでも、カルデラの内側や外側の広い範囲に、火砕流や海底堆積物からなる層状の構造が見える(図5)。一方で、ドームの表面や内部はまったく無構造である。ドーム内に一筋、表面地形と相似形の線が見えるが、これは「ゴースト」と呼ばれる干渉ノイズであり、地層などの境界ではない。つまり、このドーム状地形は「再生ドーム」ではない。

さらに、深江丸から海中ロボットを下ろして搭載したカメラで観察すると、このドームの表面は特徴的な亀甲状の割れ目(図6)や「枕状溶岩」と呼ばれる岩石からなることがわかった。これらは高温のマグマが水と接してできる特徴的な構造



図6 溶岩ドームの表面の岩石に見られる水冷構造。海底に噴出したマグマが急冷したことがわかる。

である。さらにこの岩石を採取すると、流紋岩つまり噴出したマグマが冷え固まったものであることがわかった。

以上のことから、鬼界海底カルデラ内のドーム状地形は、溶岩が海底に溢れ出してできた溶岩ドームであることが明らかとなった。国内にも昭和山や雲仙・普賢岳など、溶岩ドームの成長は珍しくはないが、鬼界溶岩ドームの規模はそれらをはるかに凌駕する。その体積は少なく見積もっても32 km³。地球上最大規模の溶岩ドームが海底に潜んでいたのだ。さらに、図5に示すように、溶岩ドームの成長によって、もともとカルデラ底に平坦に溜まっていた地層が大きく持ち上げられた構造も見出された。

さらにこの溶岩ドームは現在でも活動的であると考えられる。音響探査の結果、ドームや周辺のいくつかの地点で柱状の音響異常が見つかったのだ(図2)。このような音響異常は海底熱水活動(熱水プルーム)との関連が知られている。実際にいくつかの地点では活発に火山ガスが噴出していることも確認された。今後、レアメタルなどを含む熱水鉱床の評価も行う予定である。

5. 鬼界海底カルデラ火山は準備期に入ったのか？

巨大カルデラ火山では、カルデラ形成を伴う超巨大噴火の後に、しばしばまだ地下に残されたマグマが絞り出されて火山活動が起きることが報告されている。この場合には、全体的には火山の活動は弱まる傾向、すなわち「静穏期」にあると見做すことができる(図7a)。従って次

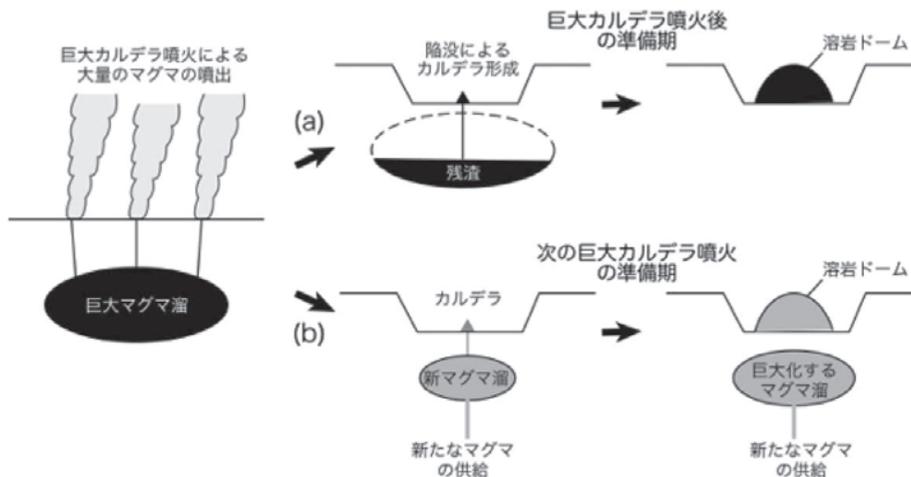


図7 巨大カルデラ噴火後の溶岩ドーム形成に関する2つのシナリオ。
 (a) 巨大カルデラ噴火の残渣（残りかす）が溶岩ドームを形成する。
 (b) 巨大カルデラ噴火後に、新たにしかも大量のマグマの生産が続く。

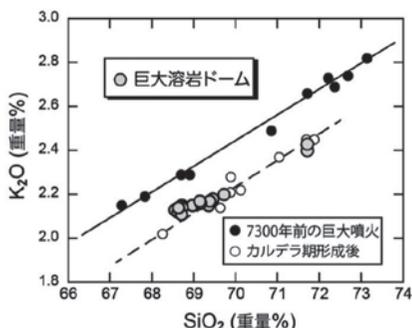


図8 溶岩ドームの科学的特徴。7300年前の巨大カルデラ噴火とは異なる、新たなマグマが大量に生産されていることがわかる。

の巨大噴火に対する切迫度はそれほど高くはないと考えることができる。果たして鬼界海底カルデラの溶岩ドームは、このような7300年前の巨大噴火の残りかすのマグマなのであろうか？

この点を明らかにするために私たちは、採取した溶岩ドームの岩石の化学組成を、7300年前の超巨大噴火で放出された火砕流に含まれる軽石と、7300年前のカルデラ形成以降に活動した薩摩硫黄島や昭和硫黄島の岩石と比較した（図8）。

超巨大噴火と小規模な後カルデラ期活動のマグマは、明らかに異なる特性を示す。つまりそれぞれ別のマグマに由来する。そして巨大溶岩ドームの流紋岩は超巨大噴火のマグマとは異なり、カルデラ形成後の硫黄岳など同様の性質を示す。つまり巨大溶岩ドームを形成した大量のマグマは、超巨大噴火の残渣ではなく、カルデラ形成後に新

たに造られたマグマシステムに由来することになる（図7b）。言い換えると、現在の鬼界海底カルデラは、7300年前の超巨大噴火の後の静穏期にあるというよりは、次の巨大噴火の準備を着々と行っており、そのマグマの一部が巨大溶岩ドームを形成したと考えた方が良い。

6. 今後の展望

これまでの調査で、現在も鬼界海底カルデラの地下では、活発にマグマが上昇し、マグマ溜りが巨大化している可能性があることがわかってきた。今後は一刻も早く、世界で初めてマグマ溜りを可視化して、その正確な位置、形、大きさを決めて、さらにその状態をモニタリングする必要がある。このような挑戦こそ、世界一の火山大国である我が国が、世界に先駆けて実施すべきであろう。

参考文献

- (1) 巽好幸(2014)『和食はなぜ美味しい』岩波書店, 190pp.
- (2) 巽好幸(2016)『富士山大噴火と阿蘇山大爆発』幻冬舎新書, 227pp.
- (3) Yoshiyuki Tatsumi, Keiko Suzuki-Kamata, Tetsuo Matsuno, Hiroshi Ichihara, Nobukazu Seama, Koji Kiyosugi, Reina Nakaoka, Kazuo Nakahigashi, Hideaki Takizawa, Kazuki Hayashi, Tatsuro Chiba, Satoshi Shimizu, Mamoru Sano, Hikaru Iwamaru, Haruhisa Morozumi, Hiroko Sugioka & Yojiro Yamamoto (2018) Giant rhyolite lava dome formation after 7.3 ka supereruption at Kikai caldera, SW Japan, *Scientific Reports*, **8**, Article number: 2753.