

続発する日本の水蒸気噴火

— そして桜島噴火を考える —

井 口 正 人

1. はじめに

我が国には110の活火山が存在する。活火山とは過去1万年以内に噴火が発生した証拠が見つかった火山であり、将来も噴火の発生の懸念がある火山である。このうち47の活火山において気象庁は常時観測を基本とする監視を行っている。気象庁は2007年12月に噴火警戒レベルの運用を開始し、レベルの変更時には噴火警報を発表している。2014年2月時点では、噴火警戒レベルが3（入山規制）の火山は2009年以降爆発が頻発している桜島だけであり、レベル2（火口周辺警報）の火山も三宅島、阿蘇山、新燃岳、諏訪之瀬島の4火山にとどまっていた（表1）。その1年後の2015年2月時点では、噴火警戒レベル3の火山に口永良部島と御嶽山が加わり、草津白根山、吾妻山、十勝岳において警戒レベルが2に引き

表1 気象庁によって発表された噴火警戒レベルの推移

火山名	2014年2月時点	2015年2月時点	2015年6月時点	変更した日
十勝岳	1	2↑	1↓	2014年12月16日 レベル 2; 2015年2月26日 レベル 1
吾妻山	1	2↑	2→	2014年12月12日 レベル 2
草津白根山	1	2↑	2→	2014年6月3日 レベル 2
浅間山	1	1→	2↑	2015年6月11日 レベル 2
箱根山	1	1→	2↑	2015年5月6日 レベル 2
三宅島	2	2→	1↓	2014年6月5日 レベル 1
御嶽山	1	3↑	3→	2014年9月27日 レベル 3
阿蘇山	2	2→	2→	
霧島新燃岳	2	2→	2→	
桜島	3	3→	3→	
口永良部島	1	3↑	5↑	2014年8月3日 レベル 3 2015年5月29日 レベル 5
諏訪之瀬島	2	2→	2→	運用開始後変更なし

上げられていた。これは、2014年8月3日に口永良部島、9月27日には御嶽山において噴火が発生し、草津白根山、吾妻山、十勝岳においては火山性地震の発生回数の増加をはじめとする地盤変動、地熱、火山ガスなどが平常値以上に達し、水蒸気噴火の発生が懸念されたからである。さらに2015年5月には箱根山、6月には浅間山の警戒レベルが2に引き上げられ、5月29日には口永良部島において再噴火が発生し、初めての噴火警戒レベル5が発表された。このように我が国では水蒸気噴火発生の可能性が多く火山において高まっているが、水蒸気噴火といえども、その駆動力は地下のマグマの熱活動にあるので、水蒸気噴火の発生はマグマ性噴火の前兆過程といえる。すなわち、水蒸気噴火の続発はマグマ性噴火の続発の可能性を意味する。本稿では、最近発生した口永良部島及び御岳山噴火について解説し、将来的にマグマ性大規模噴火発生の可能性が高い桜島の火山活動の推移と災害の軽減策について考えてみる。

2. 続発する日本の水蒸気噴火

まず、2014年に発生した口永良部島と御嶽山噴火について述べる。

2.1. 口永良部島噴火

口永良部島は屋久島の西14kmにある火山島である。離島であるがゆえに古い噴火の記録はないが、記録に残る最も古い1841年の噴火以降、1年から30年程度の間隔で、新岳山頂火口あるいはその東の割れ目火口において噴火が発生している。1931年から1934年の期間は活動的であり、1933年12月24日の噴火では新岳山頂から2kmの距離にあった七釜集落が死者・負傷者34名の被害を出して全滅した（田中館、1938）。また、1966年11月22日の爆発では巨大岩塊が新岳から3.5km北の海岸付近まで到達している（鹿児島地方気象台・屋久島測候所、1967）。20世紀最後の噴火は1980年9月26日であり、2014年8月3日に発生した噴火は、34年ぶりの噴火となる。

2014年8月3日の噴火は12時24分ごろに発生した。爆発による噴石は約1kmの距離まで到達し、新岳火口周辺には多数の岩塊が飛散した。噴火と同時に火砕サージが発生し、新岳火口から南西側及び北西側の向江浜方向に流下した。火砕サージによる倒木も多数確認できた。火砕サー

続発する日本の水蒸気噴火

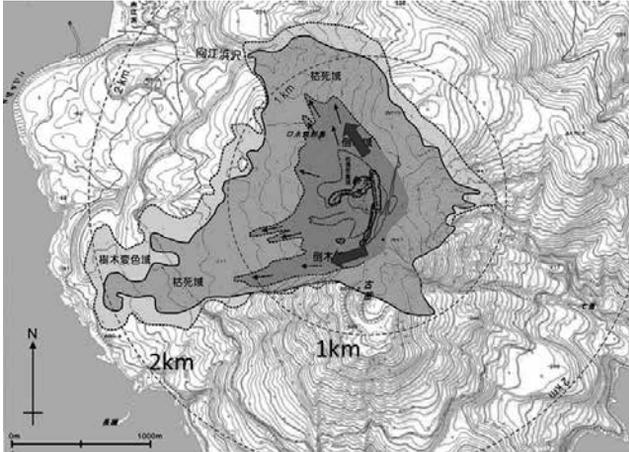


図1 口永良部島の2014年8月3日噴火による火砕流と熱風の到達範囲（京都大学防災研究所・産業技術総合研究所、2014）

ジによる熱風は新岳火口から約2kmまで到達した（図1）。噴火により新岳火口周辺は大きく変化した。新岳火口内の東側には南北方向の割れ目が形成され、火口の北西部が陥没、火口が拡大し、西側の火口縁は大きくえぐられた（産業技術総合研究所・京都大学防災研究所、2014）。

噴煙は台風による強風のために高くはないが、火口上800mまで達した（気象庁、2014）。火山灰は強い南風により北の方向に飛散し、多くは海域に落下したため、放出火山灰量は不明である。火山灰の解析から多少のマグマの関与をうかがわせる水蒸気噴火とされる（産業技術総合研究所、2014）。

2.2. 御嶽山噴火

御嶽山は1979年10月に有史後、初めて噴火が発生した。その後、1991年、2007年にも小規模な水蒸気噴火が発生しており、2014年の噴火は7年ぶりの噴火である。噴火は9月27日の11時52分に発生した（気象庁、2014）。噴火口の位置及び火砕流の流下範囲を図2に示す。火砕流は北西及び南西方向に発生し、南西側の火砕流は南の谷筋に沿って、3km以上流下した（気象庁、2014）が、火砕流が流下した方向に倒木はないことが確認されている（東京大学地震研究所、2014）。また、噴石は火口

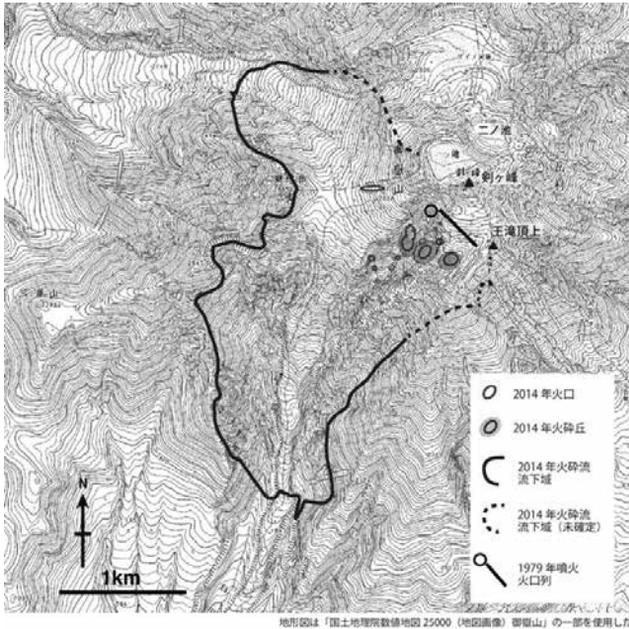


図2 御岳山の2014年9月27日噴火により、形成された火口および火砕流の到達範囲（産業技術総合研究所、2014）

から約1kmの距離まで到達した（東京大学地震研究所、2014）。多数の噴石の落下により山頂付近にいた登山者が被災し、死者・行方不明者63名、負傷者69名の災害が発生した。死者は御嶽山山頂の剣ヶ峰から南の八丁ダルミの火口からの距離約500mの範囲に集中している。

噴火による噴煙は火口上7000mまで達し（気象研究所、2014）、火山灰は北北東から北東にかけて飛散した。放出された火山灰量は38万トン～90万トン（東京大学地震研究所、2014）、62万トン～99万トン（産業技術総合研究所、2014）と推定されており、噴火の規模は1979年と同等の規模と評価されている（東京大学地震研究所、2014）。火山灰には新鮮なマグマ物質は含まれておらず水蒸気噴火と考えられている（東京大学地震研究所、2014；産業技術総合研究所、2014）。

3. 口永良部島及び御岳山噴火の前駆現象

口永良部島及び御嶽山噴火発生時の噴火警戒レベルはどちらも1であ

続発する日本の水蒸気噴火

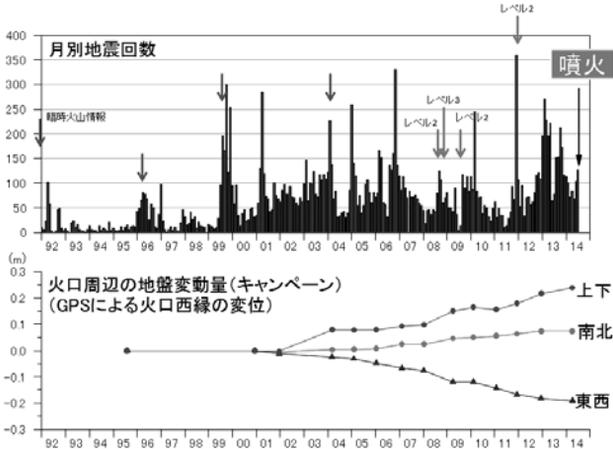


図3 口永良部島における火山性地震の月別発生回数（上段）とGPSキャンペーン観測による新岳火口西縁の地盤変動

り、警報が発表されない段階で噴火が発生し、噴火発生直後に警戒レベルが3に引き上げられた。しかし、噴火警戒レベルは1のままであってもどちらの火山においても噴火発生前に地震活動の活発化や地盤の膨張が観測されているので、噴火に前駆する現象について記述する。

3.1. 口永良部島噴火の前駆過程

京都大学防災研究所は1991年12月に火山性地震の連続観測を開始した。図3に口永良部島における火山性地震の月別発生回数を示す。口永良部島において発生する火山性地震の多くは新岳火口直下の深さ0.5km以浅を震源とする「極浅部火山構造成地震」であり、東西伸長の正断層型のメカニズムをもつ (Triastuty et al., 2009)。1999年6月までは火山性地震の発生回数は一か月に100回以下であったが、1999年7月以降、火山性地震の発生回数が増加した。1999年7月以降では、およそ1~2年おきに火山性地震が群発的に発生しており、1999年7月以前とそれ以降では活動が大きく異なる。

1995年に初回の観測を行い、1999年以降はほぼ毎年冬期に行ってきたGNSS観測による地盤の水平変位ベクトルを図4に示す。新岳火口を膨張の中心とする変位ベクトルが得られた。新岳火口周辺において、変動

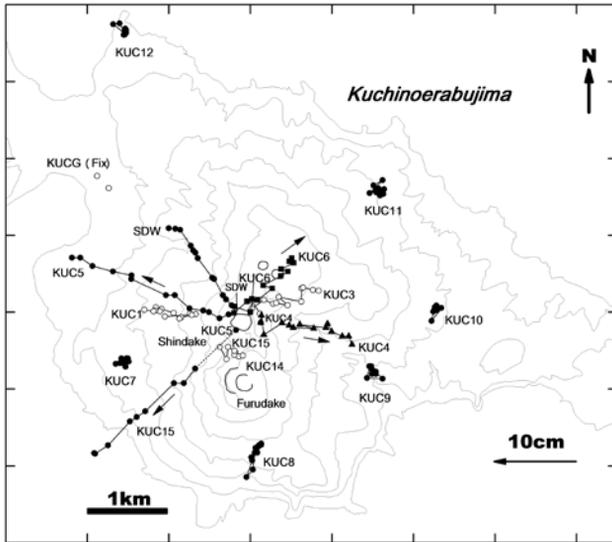


図4 口永良部島におけるGPSキャンペーン観測によって得られた水平変動。1995年～2014年。

が大きく、山麓における水平変動は2cm以下と小さいので、圧力源の深さは300m程度と極めて浅い（井口・他、2007）。GNSS繰り返し観測によって得られた新岳火口西縁の地盤変動の時間変化を図3に合わせて示した。変位が明瞭となったのは2001年ごろであり、新岳西縁の観測点KUC5では、2014年までに西方に22cm、北方に11cm変位し、上方には25cm隆起した。

火山性地震活動の活発化と火口周辺の地盤の隆起・膨張に加え、地下および地表面の熱的状態も活発化した。新岳周辺において全磁力観測を2000年に開始したが、2003年から火口の北側で全磁力の増加、南側で減少が始まった。全磁力変化は地震活動が活発化し、火口周辺の地盤が膨張する時期に変化速度が大きくなった。この変化は新岳火口直下の深さ500mにおける蓄熱を反映していると考えられている（Kanda et al., 2010）。火口内および周辺の地熱活動も活発化した。熱赤外映像装置によって2005年2月と2006年10月に空中から測定した地表面の地熱分布を比較すると、地熱異常域が拡大し、異常がない部分との温度差が大きく

続発する日本の水蒸気噴火

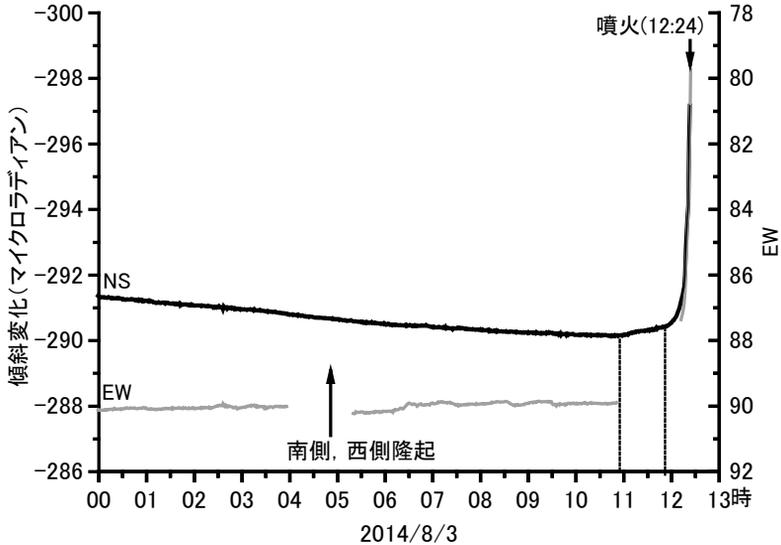


図5 口永良部島の2014年8月3日噴火直前の新岳火口側隆起の傾斜変化。新岳北東200mの距離設置した観測点。

なった（井口、2007）。2003年ごろから火口底に噴気がみられるようになったが、2008年10月には火口南壁に噴気活動が現れ、噴気量が増大し、白色噴煙が最大500mの高さに達した。二酸化硫黄ガスの放出量も増加し、2008年12月には200トン/日に達した（森・他、2009）。

2014年8月3日の噴火直前の現象としては、新岳火口方向の地盤が隆起する傾斜変化があげられる。噴火発生1時間前の11時ごろから観測され始め、12時以降、急激に加速した（図5）。傾斜変化量は約 $10\mu\text{rad}$ に達した。

3.2. 御嶽山噴火の前駆過程

御嶽山において2006年12月ごろから山頂をまたぐ基線が伸びる変動がGNSS連続観測により検知されている（気象庁、2014）。2007年噴火は微小噴火であったので、噴火後に収縮は観測されておらず（気象庁、2014）、2014年噴火まで山体が膨張した状態を保っていたといえる。2002年から水準測量が繰り返されているが（木股・他、2005）、測量さ

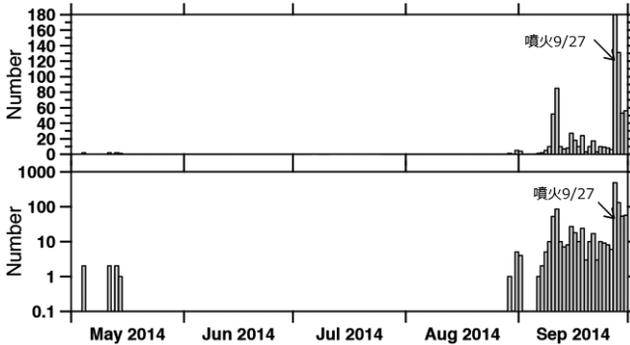


図6 御岳山の2014年9月27日噴火に先行する火山性地震の日別回数。上段：リニアスケール、下段：対数スケール。

れていない一部期間と測線があるものの、2006年から2009年の期間では山頂側が約1cm 隆起する上下変動が得られており（日本大学文学部・他、2014）、長期的に山体が隆起・膨張していた状態であったと考えられる。

一方、火山性地震の活動は2007年噴火以降著しく低下した状態であったが、2014年8月31日から火山構造性地震が発生し始め、9月10日には52回、11日には85回の発生頻度を数えた（図6）、さらに18日～24日にかけて低周波地震が発生した（気象庁、2014）。火山構造性地震の多発から低周波地震への移行は火山噴火の教科書的な前兆過程（例えば、Minakami, 1974；McNutt, 1996など多数）であり、わが国でも桜島、浅間山、有珠山など多くの火山で知られている。

気象庁（2014）によれば、噴火は9月27日の11時52分頃に始まったが、それに先行して11時42分から火山性微動が発生した（図7）。44分には山頂側が隆起する傾斜変動が剣ヶ峰山頂から約3km 離れた田の原に設置された傾斜計で検出され始め、変動速度を加速させながら52分の噴火開始に至った。傾斜変化量は約1.4 μ rad に達した。

3.3. 前駆過程の比較

2014年に発生した口永良部島と御嶽山の噴火に至る前駆過程は、どちらも長い準備過程と極めて短時間の直前過程からなることがわかる。口永良部島では1999年7月から火山性地震の発生回数が増加しており、15

続発する日本の水蒸気噴火

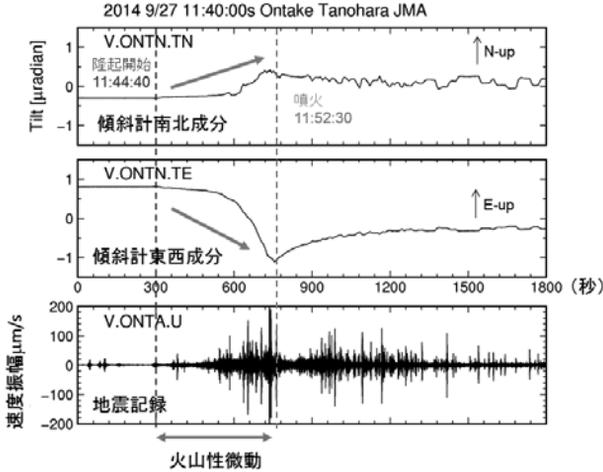


図7 御岳山の2014年9月27日の噴火直前の山頂側隆起の傾斜変動（上段及び中段）と火山性微動の振幅。山頂から3km南東の田の原観測点（気象庁）の記録。

年の準備過程を経て噴火が発生した。御嶽山では2007年には山体の膨張が観測されているので少なくとも7年間の準備過程があったと考えられる。一方、加速する傾斜変動が観測される直前過程は、極めて短く、口永良部島噴火で約1時間、御嶽山噴火ではわずか10分程度である。

準備過程は、噴火に向かって火山活動が進行していることを忘れさせるほど長く、直前過程は警報等の有効な対策ができないほど短い。このこと考えると準備過程から直前過程に遷移する時期の認識が最も重要であるといえる。御嶽山においては噴火に先行する約2週間前に、火山構造成地震の発生頻度の急激な増加があり（図6）、その後、低周波地震の発生という過程を取った。この地震活動は準備過程から直前過程に遷移する過程の現象と位置づけられる。一方、口永良部島においては1999年から火山性地震の活動が高まり、1年から2年程度の間隔で多発し、2004年、2006年、2008年の地震多発現象は火口周辺の地盤の周辺の地盤の膨張を伴ったが、2014年8月噴火に先行する数か月の火山性地震活動は比較的高いものの、10回以下で安定している。御嶽山のような劇的な増加はみられない。

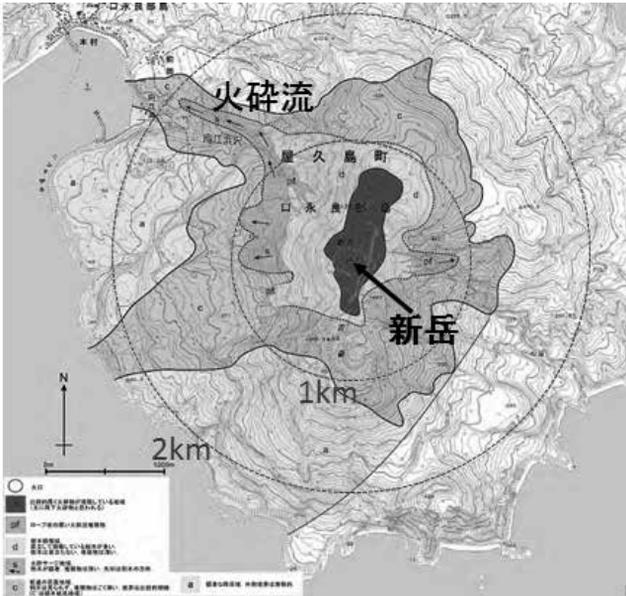


図8 口永良部島の2015年5月29日の噴火により発生した火砕流の到達範囲（産業技術総合研究所、2015）。

4. 2015年口永良部島噴火の前駆過程

口永良部島では2014年8月3日の噴火に続き、2015年5月29日にも噴火が発生した。噴火は9時59分に始まり、火山灰の噴出とともに火砕流が発生し、新岳の2km北西の向江浜の海岸付近まで達した（図8、産業技術総合研究所、2015）。また、噴煙は、10km超の上空まで達し、火山灰は屋久島の南部を通過して南東方向に流れた（気象庁、2015）。気象庁は10時8分に噴火警戒レベル5を発表し、住民の避難が始まった。2014年の噴火の経験から、噴火発生時には口永良部島西部の番屋ヶ峰にある旧NTT無線中継局舎に集合することがすでに決まっており、住民の避難は整然と行われた。その後、町営船フェリー太陽で137名（島外者を含む）が屋久島に避難した。避難行動そのものがうまくいったのは、2014年噴火で「訓練のための訓練」ではない実戦を積んだ経験から、住民自らが考え始めたことが大きい。

15年に及ぶ長期の前駆過程をもつ2014年噴火では、その直前に大きな

続発する日本の水蒸気噴火

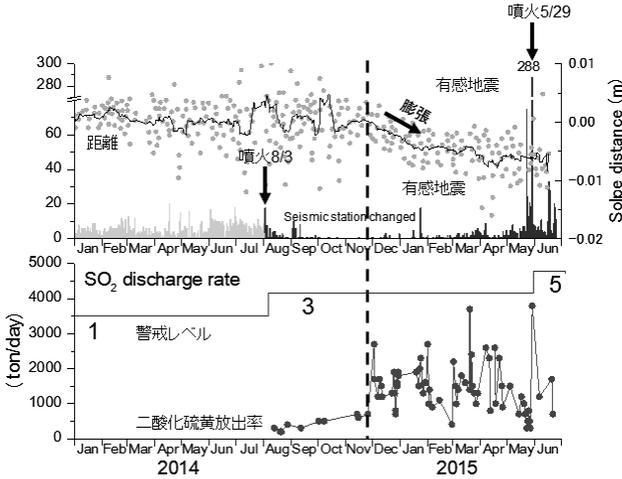


図9 口永良部島の2015年5月29日噴火に先行する地盤変動（上段）、地震活動（中段）及び二酸化硫黄放出率。（下段）。地盤変動はGNSSによって測定された国土地理院の永田（屋久島）と気象庁の七釜観測点の間の斜距離の日々の値。地震活動は、日別地震回数。

変化がなかったが、2015年噴火では異常現象が、10か月足らずの間に段階的に活発化し、噴火の再発を予想させるに十分なものであった。図9に2014年噴火以降の地震活動、地盤変動及び二酸化硫黄ガス放出量の推移を示した。2014年噴火直後の二酸化硫黄放出量は300トン/日であり、この時点でも少なくないと判断できるが、その後、徐々に増加し、11月末には一挙に3000トン/日まで急増した。このころからGNSSで火山体の膨張を示す地盤変動が観測されるようになり、火山性地震回数も緩やかに増加した。地盤の膨張が進行した翌年1月24日には有感となる火山性地震（M2.2）が発生した。さらに、3月24日には気象庁の監視カメラで新岳火口上空が夜間赤く見える火映現象が観測されるようになった。これらの現象は段階的に前駆過程が進行してきたことを示すものである。特に、3000トン/日レベルの二酸化硫黄放出率と火映現象は、桜島のように噴火を繰り返している火山でないと観測できないような現象であり、極めて異常な値である。

5月23日に新岳西山麓において発生した有感地震（M2.3）は、噴火発生前の最後通告であり、私は気象庁に対して噴火警戒レベルを5に上げ

るよう助言したが、噴火発生前に噴火警戒レベルの変更はなかった。その後、有感地震の発生はないものの火口近傍での火山性地震の活動度は高まった状態で、5月29日の噴火を迎えたのである。有感地震が発生した段階で噴火警戒レベルを5に上げる理由は以下の通りである。

- ① 2014年8月3日の噴火により発生した火砕サージの到達距離に基づき、規制区域は新岳から2kmとされていた（噴火警戒レベル3）。この規制区域は2～2.5kmの距離にある前田集落に隣接しており、2014年噴火を上回る規模の噴火の発生はレベル5を意味していた。
- ② 5月23日の有感地震は単なる1回の地震発生で片づけられない地震発生までの前駆過程がある。先に述べたように、二酸化硫黄放出量の増加、山体の膨張、地震数の増加、高温化を示す火映現象が段階的に進行していった。しかもいずれの現象も2014年噴火に前駆する現象よりも強い。二酸化硫黄放出量は2014年噴火以前では最大300トン/日であるが、2015年噴火の前では3000トン/日を超えている。2014年噴火の前に火映が観測されたことはなく、2015年3月24日以降の火映現象は熱活動の活発化を示す。地盤変動は2014年噴火の前は新岳火口周辺に集中していた。一方、2015年噴火の前の地盤変動は山麓でもGNSSおよび水準測量により検出されており、圧力源の体積増加量は大きい。火山性地震の発生数は2014年噴火の前は多い時期があるが、有感地震は発生しておらず、地震規模は小さい。2015年1月24日及び5月23日に有感地震が発生したことはマグニチュード2程度とはいえ、火山性地震としては無視できない規模であり、地震エネルギーは著しく増加したことを示す。
- ③ 口永良部島の過去に災害を伴った噴火では有感地震が直前に発生している。1931年4月2日の19時半頃に発生した噴火では、午前7時、12時、午後3時等山上で、さらに午後4時40分と6時40分には、山麓にても有感となる地震が発生した（田中館、1938）。1966年11月22日11時の噴火では、噴煙高度は5000m、噴石は北東海岸付近の3km超まで達したが、その直前の地震は、爆発約10分前に前田で、さらに、2～3分前には新岳8合目西斜面でも有感であった（鹿児島地方気象台・屋久島測候所、1967）。いずれも複数回

続発する日本の水蒸気噴火

表2 桜島における歴史時代の大規模噴火

	文明噴火	安永噴火	大正噴火	(昭和噴火)
年代	1471-1476	1779-1780	1914	1946
火口の位置	北東-南西	北-南	東-西	東(片山腹)
溶岩流の体積	5億 m ³	17億 m ³	13.4億 m ³	1.8億 m ³
火山灰・軽石の体積	7億 m ³	4億 m ³	5.2億 m ³	0.2億 m ³
噴煙高度	不明	12,000m	8,000m	2,000m
主な災害	集落・田畑埋没	集落・田畑埋没 土石流、津波	集落・田畑埋没 土石流、地震	埋没
死者数	多数	153	58	1

注) 昭和噴火は大規模噴火とは言えないが比較のために記載した。

の有感地震が発生しているが、1931年及び1966年噴火とも20年程度の休止期後に発生した噴火であり、わずか10か月前の2014年8月に先行噴火のあった2015年噴火に比べて地震は発生しやすい状態にあったと考えられる。

5. 桜島の火山活動の特性

次に、桜島について述べる。桜島は始良カルデラの南縁に位置する後カルデラ火山であり、その活動は26000年前に始まったとされる。始良カルデラでは29000年前に巨大噴火が発生し、南九州は火砕流に覆われた。桜島の活動はその巨大噴火後のことである。まず、桜島の主山体である北岳を形成し、5000年前からは南岳に活動の中心が移行し、その山頂及び山腹において噴火活動が繰り返されている。有史以降も大規模噴火が繰り返されており、特に最近500年余の間に文明(1471~1476年)、安永(1779・1780年)、大正(1914年)と呼ばれる3度の大規模が発生している。これらの大規模噴火はいずれも桜島の両山腹において発生し、文明噴火では北東と南西、安永噴火では北と南、大正噴火では東西の山腹に火口を形成し、多量の火山灰・軽石と溶岩を噴出した(表2)。

大正噴火後は25年ほど静穏であったが、1935年ごろから噴火活動が再開し、1939年に始まった昭和火口の噴火活動は1946年の溶岩流出により終息した(昭和噴火)。

昭和の溶岩流出後はしばらく静穏化したのが、1955年には桜島の南岳では爆発的噴火活動が始まった。南岳の噴火活動は1972年9月以降激化し、1974年と1985年にはそれぞれ、489回と452回の爆発が発生した(図10)。

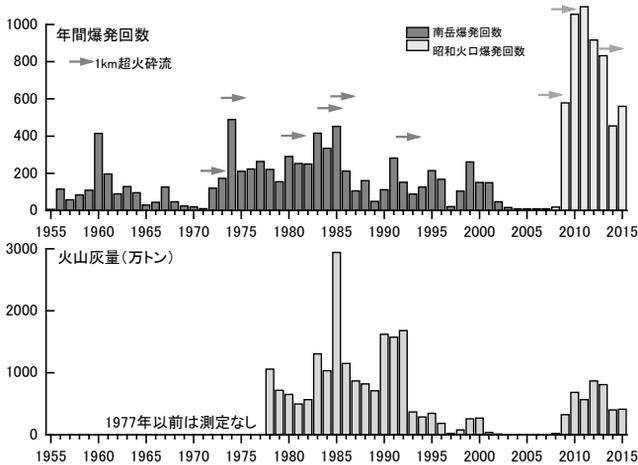


図10 桜島の噴火活動。上段：年間爆発回数、下段：年間火山灰放出重量。

また、1985年には2940万トンの火山灰が放出された。南岳における噴火活動は1993年以降、低下し、2004年以降は爆発回数が10回以下まで減少し、火山灰放出量も年間1万トン以下まで低下した。ところが、2006年6月4日に昭和火口における噴火活動が58年ぶりに再開した。2006年と2007年はマグマ水蒸気爆発で噴火の規模も小さかったが、2008年2月3日の噴火以降、火砕流を伴う爆発的な噴火活動に移行してきた。2009年以降は、爆発的な噴火の発生回数が急増し、火山灰放出量も1970年代から1980年代の南岳活動期ほどではないが、年間数百万トンまで増加した。

6. 桜島のマグマ供給系

火山噴火はマグマ物質の地表への噴出現象であり、マグマがどこにあり、どのような経路を通過して地表に達するかは火山学において極めて重要な課題である。桜島では、明治以降、繰り返されてきた水準測量や、近年の総合的な地球物理学的観測によりマグマ供給系が明らかになってきた。

南九州では、1890年ごろから水準測量が行われていたので、大正噴火後の測量により、噴火に伴う地盤変動が量的に明瞭にとらえられている。南九州一円において地盤が5cm以上沈下しており、特に、鹿児島

湾沿岸での沈降量は50cm程度に達した (Omori, 1916)。一方、桜島はむしろ隆起しており、地盤沈降の中心は桜島北部の始良カルデラにあることがわかった。Mogi (1958) は、半無限均質媒質中の微小圧力源モデルを用いて地盤沈降の中心が始良カルデラの中央部の深さ10km付近にあることを示した。桜島の主マグマ溜まりは始良カルデラの中央部にあるのである。

1955年以降の南岳の噴火活動期においては、桜島島内の水準測量が繰り返されることにより、始良カルデラ中央部のマグマ溜まりに加え、桜島中央火口丘下にも副次的な溜まりがあることがわかった (Yoshikawa, 1961など)。さらに、近年の稠密 GNSS 観測により、マグマ溜まりに相当する圧力源は古い山体である北岳の直下5~6kmにあることが明らかとなった (Iguchi et al., 2013)。

桜島において繰り返される爆発的噴火では、噴火に先行する地盤の膨張と同期する地盤収縮が多くの場合観測される。これは、南岳の爆発であれば、南岳直下深さ4km付近の圧力源の変化 (立尾・井口, 2009)、昭和火口の爆発では、深さ1km付近の変化と推定されている (Iguchi et al., 2013)。

図11に桜島へのマグマ供給系を模式的に示す。始良カルデラの地下10km付近に主マグマ溜まりがあり、そこから桜島に向かって移動したマグマが北岳の下5~6km付近にマグマ溜まりを形成している。北岳の噴火活動期には、そこから北岳山頂火口に向かう火道が存在したはずであるが、現在は長期間閉塞したままの状態になっている。マグマはさらに南岳の地下に移動し、マグマ溜まりを形成する。南岳下のマグマ溜まりから火道が南岳山頂火口へ繋がり、1955年以降の南岳山頂爆発期にはマグマは火道内を上昇していた。現在は、南岳山頂への火道は閉塞しており、途中から枝分かれした細い火道を通ったマグマが昭和火口において噴出している (Iguchi et al., 2013)。

7. 桜島の火山活動予測

桜島では2009年の秋以降噴火活動が活発化しており、年間1000回前後の爆発が発生している。2009年以降の桜島の火山活動を概観する。図12に月別の爆発回数、火山灰放出量、A型地震 (いわゆる地震と同じメ

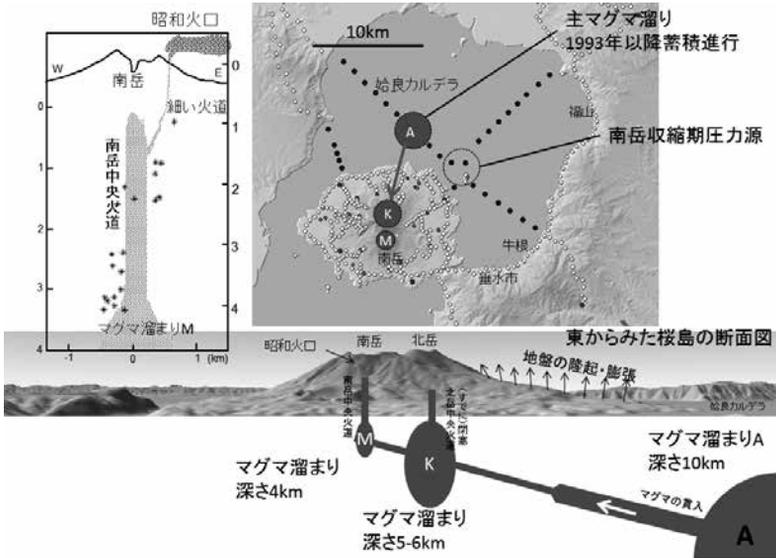


図11 桜島のマグマ供給系の概念図。

カニズムをもつ火山構造的な地震) 回数、地盤変動を示す。2009年12月～2010年3月、2011年12月～2012年3月が特に爆発の発生頻度が高く、1ヶ月に90～180回の爆発的噴火が発生し、火山灰放出量は100万トン前後に達した。2015年1月～6月の噴火活動もそれらと同等の噴火活動度であり、2015年3月には172回の爆発が発生し、4月の火山灰放出量は156万トンに達した。2009年12月～2010年3月、2011年12月～2012年3月および2015年1月～6月の活動の特徴として、噴火活動の活発化と同期して火山体が膨張していることがあげられる。ハルタ山観測坑道の伸縮計では約1 μ ストレインのひずみ変化が、または、GNSSにより桜島東西の基線長変化として1～2cmの伸長が捉えられている。桜島直下にマグマが貫入すると同時に、噴火により一部が放出され、残りが火山体内部に残留していると考えられる。

このような噴火活動の活発化に加え、3月31日には桜島の南西部の深さ8km付近でA型地震が発生した。マグニチュードは2.8であり、火山性地震としては注意を要する規模であった。桜島においてはA型地震の発生回数は少なく(図12)、ほぼ定常的なマグマの上昇により、マグ

続発する日本の水蒸気噴火

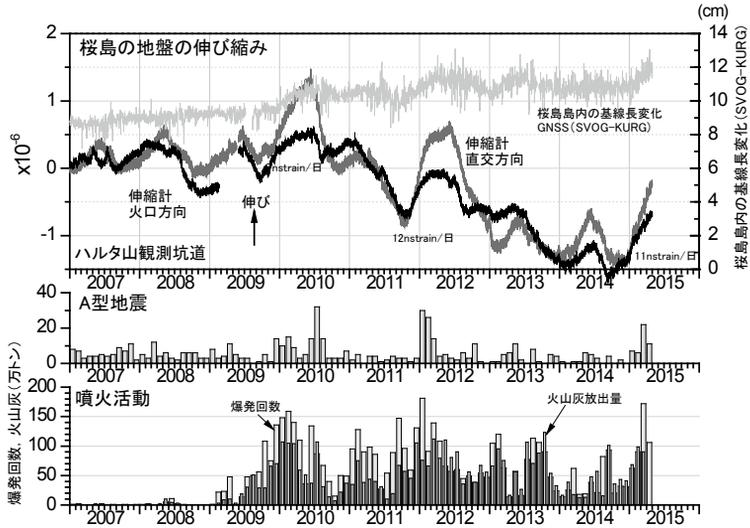


図12 昭和火口噴火活動期における桜島の地盤変動（上段）、地震活動（中段）、噴火活動（下段）。地盤変動はハルタ山観測坑道におけるひずみ変化とGNSSにより測定された桜島を東西に横切るSVOG-KURGの基線長の変化で表した。地震活動はA型地震の月別の発生回数。噴火活動は月別の爆発回数及び火山灰放出重量。

マの通り道である火道が出来上がっており、最近のマグマの貫入は火山体にひずみをあまり蓄積させないからである。南西部において顕著な地震活動が検出されたのは2004年以後のことであった。南西部の深さ10km前後の地震活動は1976年～1978年南岳火口における爆発活動活発化の先行現象としてよく知られており（加茂、1978）、2006年6月に昭和火口における噴火活動再開に前駆する2003年11月～2004年にも活発化しており（Hidayati et al., 2007）、桜島の火山活動を予測するうえで重要な地震活動である。

図11に示したように、桜島の噴火は始良カルデラ下の溜まりから移動するマグマにより発生するので、今後の活動を予測するうえで、始良カルデラ下のマグマ溜まりにおける蓄積量の変化は極めて重要な情報となる。図13は始良カルデラの西縁、大崎鼻の最近125年間の上下変動である。破線は佐々（1956）により推定された変動である。1914年大正噴火では約80cm、1946年昭和噴火では約7cm、1980年以降の南岳爆発の激

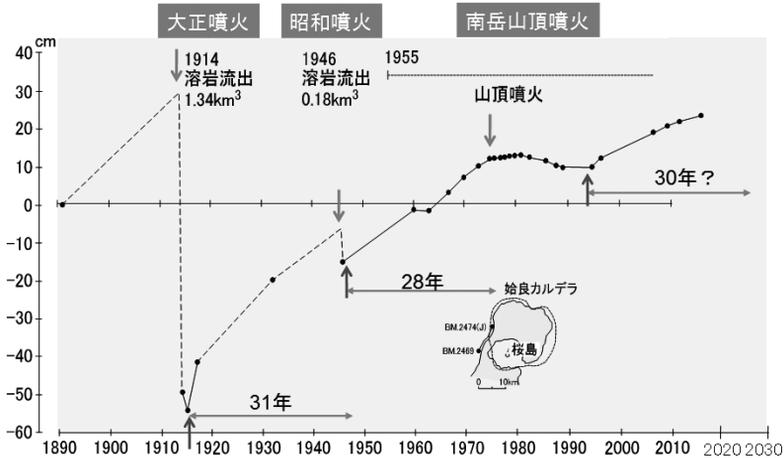


図13 始良カルデラ西縁のBM2474(J)における上下変動。旧鹿児島県庁のBM2469を基準とした相対標高の時間変化。

しかった時期には2~3cmの地盤沈下が見られるが、顕著な噴火活動期を除けば、地盤の隆起が続いており、大正噴火直後の地盤沈下を基準にすると2015年には約70cm高くなっている。大正噴火による地盤沈下は約80cmと推定されているので、ほぼ90%が回復したことになる。1993年以降の隆起率が続くとするれば、2020年代から2030年代には100%に到達する見込みである。100%に到達する段階で大規模噴火が発生するとは限らないが、大正噴火により放出されたマグマに相当する量が蓄積されることは大規模噴火に対する明快な警戒基準であろう。

8. 火山災害の特性

大規模噴火が発生すれば、様々な種類の火山災害が発生する。次に、火山災害の特性について述べる。火山噴火災害は他の自然災害に比べて、複合性の極めて高い災害である(図14)。噴火とは地下にあるマグマ物質が地表に噴出される現象であり、地表に可動性の高い物質が突然増加する。噴出物は固体である火山岩塊、レキ、火山灰や、溶融した溶岩流、多成分複合気体である火山ガスに分類され、火山ガスとレキ・火山灰が混じった粉体流は火砕流と呼ばれる。降下した火山岩塊、レキ、火山灰に水が混じれば、再移動が容易となり、土石流、泥流の形態を

火山災害の複合性

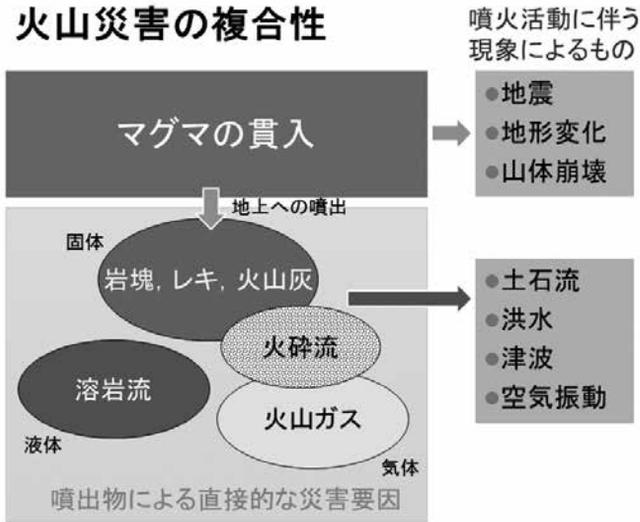


図14 火山災害の発生要因

とって洪水を引き起こす。さらに、火山噴火は地盤変動・地形変化を引き起こし、火山体そのものを破壊してしまう場合すらある。海底噴火や海域への多量の土砂の突入が起これば、津波を引き起こす。

8.1. 固体噴出物

固体の噴出物は粒形により火山岩塊（64mm 以上）、レキ（2～64mm）、火山灰（2mm 未満）に分類される。火山岩塊の到達距離は、爆発の瞬間に与えられた運動エネルギーにより大気中を空気の抵抗と重力の影響を受けながら運動する移動体を考えればよい。桜島の南岳活動期においては火山岩塊落下による災害が多く、岩塊は最大で3kmの距離に達しているの、初速度は240m/sと推定される（井口・他、1983）。火山岩塊が大きい場合には、慣性力が空気抵抗より大きいので、落下時の速度は初速に近く、直径1mの球形の岩塊は 3×10^7 Jのエネルギーをもって落下するのでコンクリートの建築物をも破壊する。当たれば、人を死に至らしめる。

レキの運動は岩塊より複雑である。火山岩塊は高速であるために噴煙

から爆発直後に離脱するので大気中の弾道運動のみを考えればよいが、遠方に到達するレキは上昇する噴煙により、上空に運ばれ、噴煙の上昇速度がレキが落下するときの終端速度を下回れば落下を始める。水平方向には風によって運ばれ、移動速度はレキの大きさと風速によって決まる。南岳噴火活動期においてはレキの落下により、国道通行中の車のフロントガラスが割れる事故が頻繁に起きた。昭和火口の噴火活動期においても2013年以降、噴煙高度が高くなってくると、ガラス破損事故が時々発生するようになってきている。規制区域外であっても、火山の風下にいるときは注意が必要である。

火山灰の場合もレキと同様と考えればよい。レキに比べると粒形が小さいので、噴煙上昇による到達高度も高く、水平方向には風速とほぼ同じ速度で移流する。火山灰は落下したときの破壊力はないが、厚く堆積することにより道路や鉄道などの交通機関を停止させる場合もある(2011年霧島新燃岳噴火の例)。また、火山灰に対して最も脆弱な交通機関は航空機である。1982年のインドネシア・ガルングン火山および1989年アラスカ・リダウト火山の噴火では、噴煙に突入したB747型機のジェットエンジンが4基とも飛行中に停止した。現在では、火山灰が拡散する空域での運航はきわめて慎重に行われ、2010年4月に発生したアイスランドのエイヤフィヤトル・ヨークトル火山の噴火により放出された火山灰の影響を受けて、ヨーロッパの航空路は停止された。火山灰には二酸化硫黄、硫化水素、塩素などがイオンとして付着している。これらにより、構造物の腐食や、植物の枯れ死が引き起こされ、農業被害が引き起こされる。最近では火山灰のうち、直径2.5ミクロン程度の微粒子(PM2.5)も健康への影響として注目されている。

8.2. 火砕流

火砕流とは、火山灰・レキと火山ガスの混合体である粉体流が、山麓を流下する現象である。溶岩ドームの崩壊や、上昇しきれない重い噴煙の突然の崩壊によって引き起こされる。海外ではモン・ペレー火山噴火(1902年：死者数28000人)や我が国では浅間の天明噴火(1783年：死者数1441人)に見られるように、火砕流による死者数は多く、最も危険な火山災害の要因とされる。火砕流の危険性が高い理由は、①火砕流がレ

キ・火山灰が混じった重い噴煙であり、破壊力が大きい。②時速100キロ以上の高速で流下する。③高温（マグマ性噴火の場合、600～800℃）であることによる。桜島でも火砕流はよく発生する。大正噴火で火砕流が発生しているし、2009年以降の昭和火口における噴火活動では、火砕流が1km超の距離に達している。

8.3. 溶岩流

粘性流体である溶岩が流下する現象である溶岩流の流下速度は、溶岩の粘性や降伏応力、密度などの物性に依存するが、安山岩質溶岩を噴出することの多い我が国の火山では、流速が小さいために、溶岩に巻き込まれて死に至ることは考えにくい。一方、溶岩流では掃下域を完全に埋め尽くし、10m～100m近くの地形変化を引き起こすので、復旧は現実的ではない。1914年桜島大正噴火では、1.34km³の溶岩が流出し（石原・他、1981）、桜島は大隅半島と陸続きとなったが、同時に多くの家屋が溶岩流に呑み込まれた。

8.4. 火山ガス

火山地域では、常時、硫化水素、二酸化硫黄、二酸化炭素などの火山ガスが放出されていることが多い。これらのガスは空気より重く、無風時に谷あいなどの低いところに流れ込むと高濃度になり、その場に人がいれば、死に至ることもある。死者を伴う災害事例で最も多いのが硫化水素ガスによる事故である。硫化水素は低温ガスであり、水蒸気噴火が発生することの多い草津白根山、安達太良山、霧島山などにおいて事故が発生している。二酸化硫黄は高温ガスであり、活動的な火山において多量に噴出されている。桜島では噴火活動期において1000～5000トン/日の二酸化硫黄が放出されている。阿蘇山では二酸化硫黄山ガスによる死者が出た。2000年の三宅島噴火では山頂カルデラから多量の二酸化硫黄ガスが放出され、島民は3年間にわたり、避難を余儀なくされた。一方、二酸化炭素ガスは無色・無臭であり、人間は異臭などによって検知できないので最も危険といえる。カメルーンのニオス湖から噴出した二酸化炭素により、周辺の住民のうち1700人が犠牲となった。また、これらの火山ガスは植物、農作物などに被害を与え、金属を著しく腐食させる。

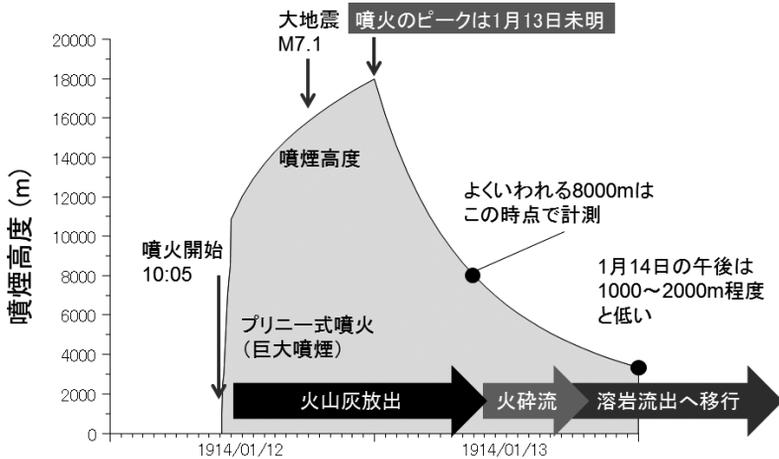


図15 桜島の大正噴火の推移。噴煙高度の測定値及び推定値で表した。

9. 桜島大正級大規模噴火において想定される災害

まず、1914年大正噴火で発生した現象と災害についてまとめてみる(図15)。噴火は1月12日10時5分ごろ引之平の横の西山腹から、10分後には東山腹でも噴火が始まった。開始直後の噴煙高度は低い、30分後には「プリニー式」と呼ばれる巨大な噴煙柱を形成する噴火となっている。このステージでは多量の軽石、火山灰が放出される。噴火口に近い桜島では多量の軽石が堆積する。さらに風下となった大隅半島側でも多量の火山灰、軽石が堆積し、多いところでは1mを超えた。12日の夕方18時29分に発生した鹿児島湾を震源とするマグニチュード7.1の地震は噴火による被害に追い打ちをかけた。鹿児島市では多くの家屋が倒壊し、29名が犠牲となった。噴火活動のピークは13日の未明とされているが、活動が低下し始めた13日の夜には火砕流が発生したものと思われる(小林、1982)。翌14日には溶岩が流下し始めているが確認できる。溶岩の流出は西側の火口で1週間程度、東側の火口では翌年まで続いたとされるが、流出が始まった直後の噴出率が大きいと推定される。溶岩の流下は掃下域となる6集落を埋没させた。ただし、溶岩流出時では噴煙高度は1000m以下と低く、噴火活動に見通しがついてきた段階ともいえる。

大正噴火時の火山災害を踏まえ、21世紀に同様の噴火が発生した場合

続発する日本の水蒸気噴火

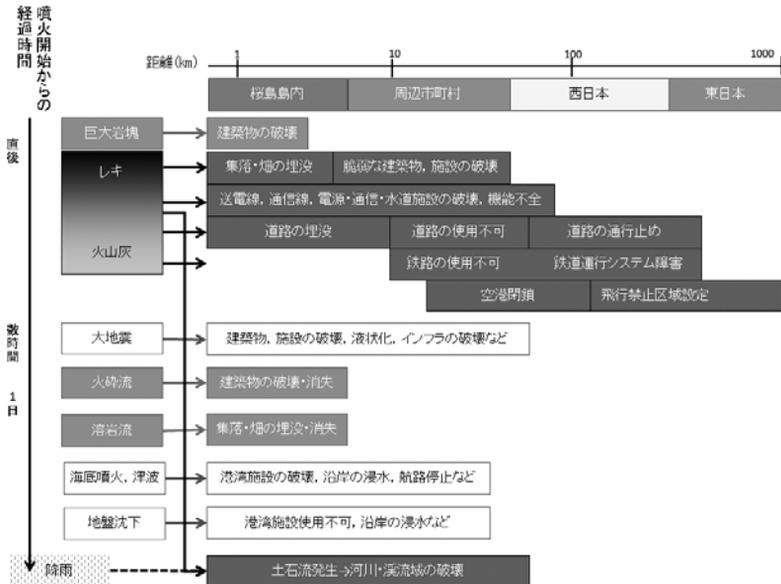


図16 大正級大規模噴火が発生した時の予想される災害。要因の時間の推移と桜島火山からの距離によって表した。

の災害について考えてみる。図16に噴火開始からの経過時間と桜島からの距離によって想定される災害をまとめた。桜島島内における軽石、火山灰の堆積、火砕流や溶岩流による破壊、埋没は現代においても変わらない。噴火開始後の大地震については耐震化が鍵となる。安永噴火では海底噴火も発生しているので、津波の到達を想定しておく必要がある。最も大きく違うのは、火山灰・軽石の降下による都市域におけるインフラの破壊、機能停止・低下である。すでに国土交通省によって大規模噴火時の降灰分布予測がハザードマップとして提示されている (http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/sabo/jigyuu/img/bousai_map.pdf)。これによれば、桜島南岳の風下の距離20~30kmまで、降灰堆積厚50cm以上が予測されている。注意しなければならないのは、ここでいう灰とは南岳や昭和火口の噴火で降下してくる微細な火山灰ではなく、軽石だということである。8.1節で述べたレキに分類されるべき大きさのものであり、破壊力が大きい。木造家屋の屋根が被弾し、破壊される。実際、

2014年2月に発生したインドネシアのケルト火山の噴火では10km以内にある多くの家屋の屋根が破壊された。コンクリートの建築物であれば、支障はないが、窓ガラス等の保護が必要となる。最も大きな影響を受けるのは道路網であり、通行不可能となる。厚さ1cm程度の降灰は道路を通行止めにするのに十分すぎると考えてよい。鉄道も同様であり、すでに2012年7月24日の南岳噴火による降灰によってJRは運休している。これは、降灰によって運行システムの上で、列車の位置情報が捕捉できなくなったことによる。航空網の場合は、空港に噴出物が堆積した場合は当然であるが、大気中を移流・拡散する火山灰により広域に影響が及ぶ。大正噴火では東北地方南部まで降灰が目視で認められており、九州から東北地方南部までの広い範囲で火山灰微粒子が浮遊したと推定される。同様の大規模噴火が発生すれば、日本の主要な航空路は閉鎖される。

長期的には、降り積もった火山灰や軽石はその後の強い雨によって、土石流として流出することを考えておく必要がある。大正噴火では、大隅半島側に多量の火山灰と軽石が堆積したが、桜島に近い垂水、牛根、百引では土石流が発生し、距離が比較的遠い肝属川でも洪水となり、死傷者だけでなく、多くの家屋が被災した（下川・地頭園、1991）。また、多量のマグマの噴出により、マグマ溜まりの直上に当たる鹿児島湾北部沿岸では地盤沈下が起こるため、港湾施設が使用できない可能性がある。

大正級大規模噴火に備える対策は2つの柱からなると考えられる。大規模噴火では先に述べたように噴出物の堆積によって徹底的に破壊されるので、事前の避難が必要であり、火山噴火予知研究の成果を活用しつつ早期警戒を実現しなければならない。これは「命を守る」戦略である。もう1つは「生活を守る」ための戦略であり、生命に危険が及ばないまでも、大規模噴火による多量の噴出物の堆積は都市域におけるインフラの破壊、機能停止・低下を引き起こす。このことは経済活動を深刻な状態に低下させるので、火急的なインフラの復旧が必要である。ここまでは他の自然災害と同じである。火山災害対策の難しさは、復旧・復興へのプロセスが簡単に見通せないことにある。大正噴火であれば、プリニー式噴火の活動は1日程度しか続いていないが、文明、安永

噴火ではもっと長い時間続いている可能性がある。噴火が長期化する、あるいは、噴火規模が拡大すれば、復旧・復興のプロセスに入れないだけでなく、避難区域の拡大も必要となってくる。火山活動については初期発生だけでなく、活動の推移の予測が重要であると言われるのはここに理由がある。火山噴火は他の自然災害に比べ、長期化する可能性が高く、その先行きを見通しにくいことを復旧において考慮すべきである。

引用文献

- 井口正人 (2007)：空中赤外熱測定による口永良部島新岳周辺の地熱異常域変化の検出、京都大学防災研究所 平成18年度防災研究推進特別事業、口永良部島の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究、pp.53-58.
- 井口正人・石原和弘・加茂幸介 (1983)：火山弾の飛跡の解析、京都大学防災研究所年報、Vol.26B-1、pp.9-21.
- 井口正人・斎藤英二・鈴木敦生 (2007)：口永良部島火山における GPS 繰返し観測—1995年～2006年—、京都大学防災研究所平成18年度特別事業報告書「口永良部島の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究」、pp.25-32.
- 石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一 (1981)：桜島火山の溶岩流 (1) —有史時代の溶岩流の容積—、京都大学防災研究所年報、第24号 B-1、pp.1-10.
- 鹿児島地方气象台・屋久島測候所 (1967)：昭和41年11月22日の口永良部島新岳の爆発、福岡管区气象台要報、第22号、pp.79-98.
- 気象研究所 (2014)：第130回火山噴火予知連絡会資料、御嶽山.
- 気象庁 (2014)：第130回火山噴火予知連絡会資料、口永良部島.
- 気象庁 (2014)：第130回火山噴火予知連絡会資料、御嶽山.
- 気象庁 (2015)：第132回火山噴火予知連絡会資料、口永良部島.
- 京都大学防災研究所・産業技術総合研究所 (2014)：第130回火山噴火予知連絡会資料、口永良部島.
- 木股文明・宮島力雄・村瀬雅之・太田雄策・柏木雅生・大園真子・仮屋新一・山室友生 (2005)：御嶽山群発地震域において精密水準測量より検出された地盤の隆起変動2002年4月-2005年4月、東濃地震科学研究

- 所報告、第16号、pp.71-75.
- 小林哲夫 (1982): 桜島火山の地質: これまでの研究の成果と今後の課題、火山、第27巻、pp.272-292.
- 佐々憲三 (1956): 地震予知に関する 2、3 の問題 (II)、地殻変動について、京都大学防災研究所設立5周年記念論文集、pp.3-7.
- 下川悦郎・地頭園隆 (1991): 大正3年桜島大噴火が火山周辺域の侵食災害に及ぼした影響、自然災害研究西部地区部会報、第12号、pp.73-80.
- 産業技術総合研究所 (2014): 第130回火山噴火予知連絡会資料、口永良部島.
- 産業技術総合研究所 (2014): 第130回火山噴火予知連絡会資料、御嶽山.
- 産業技術総合研究所 (2015): 第132回火山噴火予知連絡会資料、口永良部島.
- 立尾有騎・井口正人 (2009): 桜島における BL 型地震群発活動に伴う地盤変動、火山、第54巻、pp.175-186.
- 田中館秀三 (1938): 口永良部島新岳噴火と火口の形態及び向江浜の山津波、火山、第2巻、pp.339-354.
- 東京大学地震研究所: 第130回火山噴火予知連絡会資料、御嶽山.
- 日本大学文理学部・名古屋大学・京都大学・九州大学・北海道大学・東濃地震科学研究所 (2014): 精密水準測量による御嶽山における上下変動 (2006年4月-2014年10月)、第130回火山噴火予知連絡会資料、御嶽山.
- 森健彦・風早康平・大和田道子・下司信夫・平林順一・横尾亮彦・多田光宏・神田径・為栗健・井口正人・篠原宏志 (2009): 口永良部島における二酸化硫黄放出量の計測、日本火山学会秋季大会予稿集.
- Hidayati, S., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2007): Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira caldera, southern Kyushu, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol.52, pp.289-309.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013): Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011 Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol.58, pp.115-135.

- 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, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 189, pp.158-171.
- McNutt, S. R. (1996): Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the state-of-the-art and case histories, *Monitoring and mitigation of volcanic hazards* (edited by Scarpa and Tilling), Springer-Verlag, p.99-146.
- Minakami, T. (1974): Prediction of volcanic eruption, *Physical volcanology*, Elsevier, pp.313-333.
- Mogi, K. (1958): Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, Vol.36, pp.99-134.
- Omori, F. (1916): The Sakura-Jima eruptions and earthquakes, II. *Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm.*, 8(6), 179p.
- Triastuty, H., Iguchi M. and Tameguri, T. (2009): Temporal change of characteristics of shallow volcano-tectonic earthquakes associated with increase in volcanic activity at Kuchinoerabujima Volcano, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 187, pp.1-12.
- Yoshikawa, K. (1961): On the crustal movement accompanying with the recent activity of the volcano Sakurajima (Part 1), *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No.48, pp.1-15.

(京都大学防災研究所教授・火山活動研究センター長)

