

無人ヘリによる口永良部島火口周辺域における地震観測点の再構築

Reconstruction of the Seismic Observation Network at the Summit Area of Kuchinoerabu-jima by Using an Unmanned Helicopter

大湊隆雄⁽¹⁾・金子隆之⁽¹⁾・小山崇夫⁽¹⁾・渡邊篤志⁽¹⁾・神田径⁽²⁾・為栗健

Takao OHMINATO⁽¹⁾, Takayuki KANEKO⁽¹⁾, Takao KOYAMA⁽¹⁾, Atsushi WATANABE⁽¹⁾,
Wataru KANDA⁽²⁾ and Takeshi TAMEGURI

(1) 東京大学地震研究所

(2) 東京工業大学火山流体研究センター

(1) Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(2) Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

Synopsis

On August 3, 2014, a moderate eruption occurred at Kuchinoerabu-jima and all the observation stations at the summit area were destroyed. A summit eruption on May 29, 2015 caused entire evacuation of the island. In order to reconstruct the seismic observation network at the summit area, we newly developed seismometers suitable for the observation and conducted seismometer installations at the summit area by using an unmanned helicopter. Helicopter operations were conducted twice. 4 and 5 stations were installed in April and September 2015, respectively. The reconstructed seismic network could successfully detect the sudden increase and decrease in shallow earthquakes few days before the eruption in May 2015. Comparison of the April and September observations clearly shows the declined trend of volcanic activity.

キーワード: 口永良部島, 地震観測, 無人ヘリコプター

Keywords: Kuchinoerabu-jima, seismic observation, unmanned autonomous helicopter

1. はじめに

口永良部島は屋久島西方約 14 km に位置する火山島である。山体は活発な活動を繰り返す新岳と近年は噴気活動のみが認められる古岳から構成されており、目撃記録の残る 19 世紀後半以降の噴火は全て新岳山頂火口およびその周辺で発生している。1841 年噴火が歴史に残る最古の噴火である。1933 年の噴火では新岳の南東 2 km の七釜集落が全滅し、1966 年の爆発的噴火では新岳北方 3.5 km の距離まで噴石が飛

んだ。その後小規模な噴火が繰り返されたが、1980 年に新岳山頂東側の割れ目からの噴火を最後に静穏な状態が続いていた（下司・小林, 2007）。

京都大学防災研究所は 1991 年から火山性地震の連続観測を開始し、山腹及び山頂付近で地震観測を行っていた。気象庁は山腹および山頂付近において地震観測を行っており、防災科学技術研究所は山腹での地震観測を行っていた。

1999 年以降、地震活動が活発化し、GNSS や水準測量により山体の隆起・膨張が継続していることが観

測され、また、熱異常や火山ガス放出量の増加も観測されていた(井口・中道, 2015)。火山活動の活発化が進む中、2014年8月3日に34年ぶりの噴火が発生した。この噴火は火砕流を伴い、島民は島内西方の高台である番屋ヶ峰あるいは島外に避難した。気象庁は噴火警報レベル3を発表し、火口から2kmを立ち入り禁止区域とした。各機関が展開していた観測網のうち山頂に近い観測点は全て被災し、山頂付近の地震活動を十分な精度で観測することができなくなった。

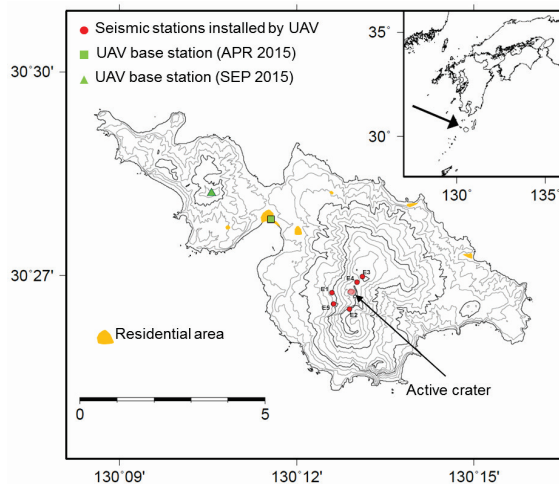


Fig.1 Location of Kuchinoerabu-jima (inset). Red circles are seismic stations. Green square and triangle are the position of base stations in the April 2015 and September 2015 operations, respectively. Residential areas are shown by yellow.

火山観測において山頂付近の活動を把握することは極めて重要であるが、観測点復旧のために山頂付近に観測者が直接接近することは極めて危険である。東京大学地震研究所は自律型の無人ヘリコプターを用い、危険を冒すことなく火口近傍を観測する手法の開発を進めており、桜島、霧島、伊豆大島、三宅島などにおいて地震計やGPSの設置、空中磁気測量、画像撮影、火山ガス採取などの実施経験があった(Ohminato et al., 2012; Kaneko et al., 2011; Koyama et al., 2013)。無人ヘリコプターによる火口近傍観測の経験を活かし、京都大学防災研究所と共同で山頂観測網を再構築することを計画した。

口永良部島観測用に地震観測モジュールを改造し、まず、2015年4月に4観測点の設置を行った。しかし、2015年5月29日に2014年8月噴火を上回る規模の山頂噴火が発生し4観測点はすべて被災した。この噴火は居住地域に達する火砕流も伴ったため、全島民が島外へ避難せざるを得なかった。2015年9月に再度、無人ヘリコプターによる設置を実施

し、5観測点による観測を開始した。

2015年4月と9月の観測結果を比較することにより、山頂付近の活動状態に関する重要な知見が得られた。その後、原稿執筆時点の2016年5月において5観測点での観測が継続中である。Fig.1に口永良部島の位置、2015年4月と9月の地震計の設置地点、および無人ヘリコプターの離発着地点を示す。

本報告書では、口永良部島における無人ヘリコプターによる山頂地震観測網の再構築の状況および得られたデータの概要について報告する。

2. 自律型無人ヘリコプター

使用した無人ヘリコプターは、ヤマハ発動機製のRMAX-G1である(Photo 1)。

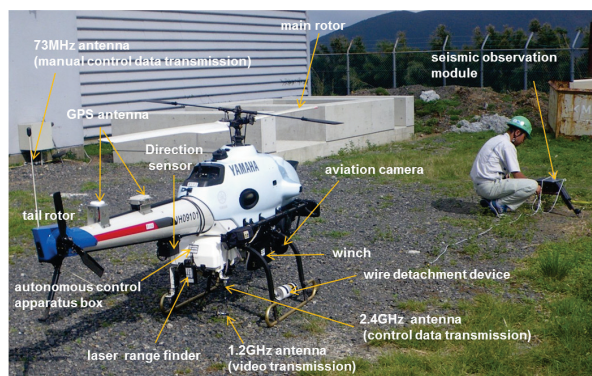


Photo 1 Main body of the unmanned autonomous helicopter RMAX-G1 and the seismic observation module.

3軸ジャイロを用いた姿勢制御とGPSを用いた速度・位置制御により、自律的に目標位置へ飛行することができる(鈴木, 2005)。機体の全長は3.6m、重量84kgであり、基地局に置かれたラップトップPCから機体を操作する。ペイロードは燃料の量に依存するが10kgである。Differential GPSを用い、事前にプログラムされた飛行経路を相対精度1m程度で自律的に飛行することができる。飛行範囲は基地局から5km程度であるが、見通しが効く場合は更に遠距離まで飛行することも可能である。飛行中に機体取り付けカメラからの画像、機体の位置、速度や傾き、残燃料などの飛行情報をリアルタイムで基地局から確認することができる。また、機体カメラは基地局からの操作で向きの変更やズームが可能である。

地震観測モジュール設置時にはウインチおよび切り離し装置を取り付け、ワイヤーで観測モジュールを吊り下げる。基地局では無人ヘリコプターから送られる情報を用いて機体、搭載カメラ、ウインチ、切り離し装置を操作し、設置作業を行うことができ

る。Table 1 に機体のスペックをまとめる。

Table 1 Capability and specification of RMAX-G1

Helicopter capability	
Maximum payload	10 kg (1atm, 20°C)
Maximum flight time	90 minutes
Radius of action from the base-station	5 km
Maximum speed	20 m/s
Operating temperature	-10 ~+45°C
Maximum permissible wind speed	10 m/s (average), 15m/s (instantaneous)

Helicopter specification	
Total length	3.63 m
Maximum width	0.72 m
Total height	1.22 m
Weight	84 kg (including fuel and camera system)
Fuel tank capacity	11 liters
Engine max power/torque	15.4kW / 2.6kgm
Engine type	water-cooling, two strokes, two cylinder horizontally opposed
Radio frequency	2.4 GHz

3. 地震観測モジュール

3.1 低消費電力化と通信速度の改善

無人ヘリコプターによる火山山頂付近への地震観測モジュール設置は桜島などですでに実績があるが、以下の理由でこれまでの観測モジュールをそのまま口永良部島で使用することはできなかった。1) これまでに火山で設置された観測モジュールはセンサーとして加速度計を使用しており 12V 電源での消費電流が 100mA と大きい。そのため、必要とするソーラーパネル数が多く、風を受ける面積が広がることから強風で飛ばされる危険性が高かった。台風の通り道となりやすい口永良部島ではこの点は致命的な欠点となる。2) 旧型では USB 接続のデータ通信デバイスを使用していたが、消費電力が大きくかつ機器の電源コントロールをきめ細やかに行うことができなかった。また、AD 部、記録部、通信部間の内部通信に 9.6kbps のシリアル通信を用いていたため、通信デバイスの帯域を十分に生かすことができなかった。電力の不足と低い通信効率により、連続データを送信することが困難であったため、「火山活動モニタリング」という目的には不十分であった。

電力不足を解消しソーラーパネル数を減らすことと通信効率を上げることで連続データの送信を可能にするため、口永良部島に設置する地震観測モジュ

ールにおいては以下の改良を施した。1) 電力を必要としないムービングコイル型の速度計(L-28B, 4.5Hz)をセンサーとして採用した。これにより、全体の消費電流が 100mA から加速度計消費分を除いた 20mA に激減し、それまでは 6W のソーラーパネル 6 枚を要していたが、6W のパネル 1 枚と 1.5W のパネル 5 枚で十分となり、風で飛ばされる危険性が大幅に減少した。2) 通信デバイスとして FOMA の無線パケット通信用に開発されたユビキタスモジュールを採用するとともに、ボトルネックとなっていた内部の低速度通信を解消した。

Photo 2 に改良前後の地震観測モジュールを示す。観測モジュールはアルミニウム棒 3 本を互いに直交するように組み合わせた三脚型のフレームに、ソーラーパネル、ニッケル水素電池(12V, 10Ah)、センサーが取り付けられている。防水ケースに入った通信モジュールと記録装置は三脚の腹の位置に収められている。

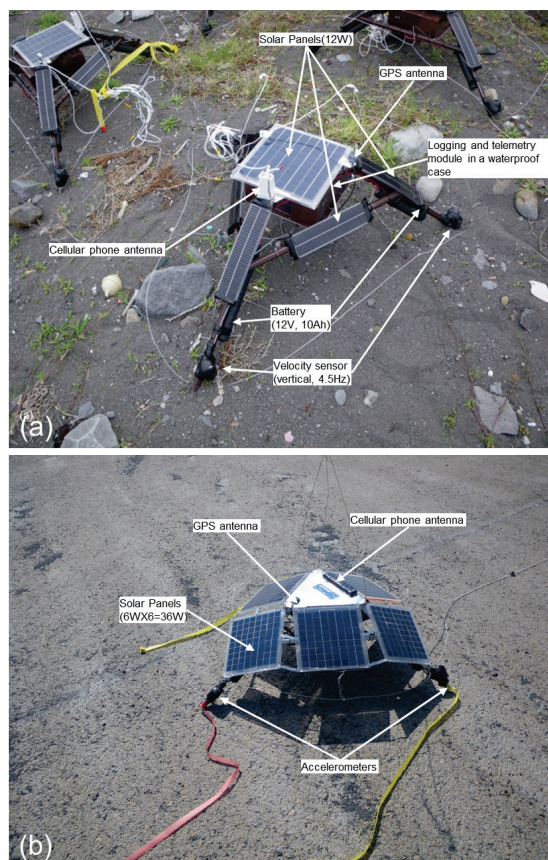


Photo 2 Seismic observation modules used at Kuchinoerabu-jima (a), and at Sakurajima (b).

口永良部島で使用した観測モジュールは 6W のパネル 1 枚と、1.5W のパネル 5 枚からなる(Photo 2(a)). パネル数が少ないため隙間が多く風の影響は受けにくい。これに対し桜島で使用している改良前の観測

モジュールは 6W パネルを 6 枚使用しており、風の影響を受けやすい形となっている(Photo 2(b)).

改良版ロガーは観測時間の大半は通信モジュールの電源を落としており、間欠的に通信接続する際に連続データをまとめて送信している。通信間隔は 10 分間に設定しており、各回の通信時間は 1-2 分程度である。従って波形データは 2-10 分程度遅れて到着する。間欠通信を採用したことにより、電源電圧 12V におけるロガーの消費電流を従来とほぼ同じ 20mA 程度に抑えたまま、連続データを送信することが可能となった。

3.2 設置時の傾斜の影響

Fig.2 に示すように、地震観測モジュールの設置はヘリコプターから吊り下げた状態からウインチでゆっくり地面に降ろすことにより行うため、センサーの傾きを完全にコントロールすることは難しい。機体カメラの映像を確認しながら傾きが小さくなるまで設置をやり直すことで傾きを改善する。

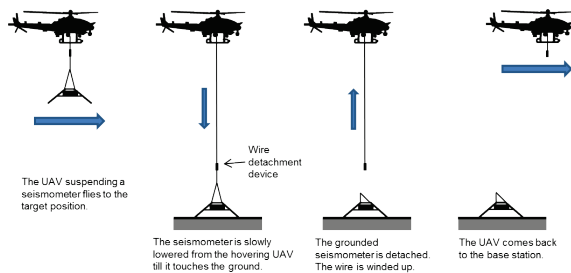


Fig.2 How to install seismic observation module by using the helicopter.

桜島で使用している観測モジュールは 3 軸の加速度計を使用しているため、観測モジュールが傾いても DC 成分から傾斜を決められるため、上下成分と水平 2 成分に分離することは容易である。一方、口永良部島で使用した観測モジュールのようにセンサーが速度計の場合、水平成分を使用するためにはモジュールを完全に水平に設置することが条件となる。口永良部島観測においては、完全な水平設置は技術的に困難であるため水平成分の使用は見送った。

一方、上下動センサーはある程度の傾きまでは使用できることが分かっていた。使用する速度センサーの上下動成分が正常に動作する傾斜の範囲を事前にテストした。その結果、鉛直から 25°以内の傾きであれば、鉛直に置かれたセンサーとの差は十分小さいことが分かった (Fig.3)。桜島や霧島での設置経験から、地震計モジュールの傾きは最大でも 25°程度に制御できることが分かっていたため、この実験結果により上下動を使用できる目途がついた。

上下動センサーの鉛直からの傾きを更に小さくす

るため、最終的には次のように取付けた。地震計モジュールの 3 本の脚それぞれに上下動センサーを 1 つずつ鉛直から 5 度傾けて取り付け、かつ、各センサーの軸が鉛直軸周りに互いに 120° ずつ回転した軸対称の位置関係になるように配置する。センサーをこのように配置することにより、地震計モジュールが 5° 以上傾いて設置されても 3 つのセンサーのうち少なくとも 1 つは鉛直軸からの傾きがモジュール全体の鉛直軸からの傾きよりも小さくなる。

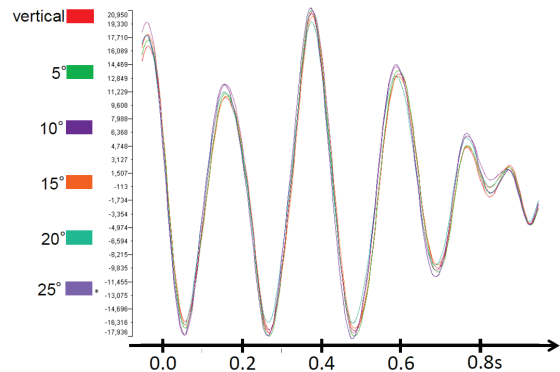


Fig.3 Comparison of inclined vertical component sensors. Colors indicate sensor inclination. The sensor outputs are almost identical regardless of the sensor inclination.

3.3 使用チャネルの選択とノイズ除去

上述したとおり、地震観測モジュールは傾いた状態で設置されるためモジュールの各脚に取り付けた 3 つの上下動センサーの中には傾きが許容範囲内に収まるものと、傾きが大きく使用できないものが出

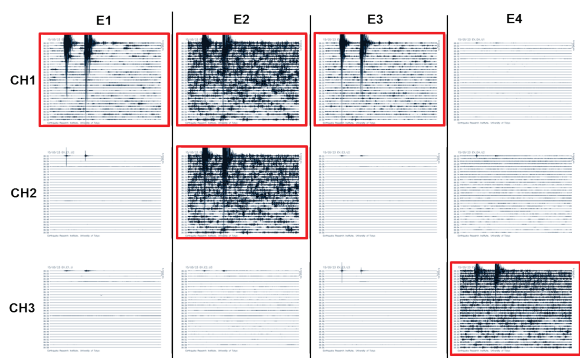


Fig.4 4 columns and 3 rows correspond to stations and channels, respectively. Each panel indicates one hour trace from 8:00 to 9:00 May 23, 2015. Each panel is composed of 30 2-minute long traces. Panels surrounded by the red frame are good channels in which two seismic signals are clearly seen.

てくる。

Fig.4に、2015年4月に設置した4つの観測点E1, E2, E3, E4の3成分記録を示す。それぞれのパネルは1時間の記録であり、1トレースが2分間にあたる。使用できるチャンネルを赤枠で囲んだ。有効チャンネルには2つのイベントがはっきりと記録されているが、その他のチャンネルの記録は振幅が極めて小さいことがわかる。観測点E1, E3, E4では3つのセンサー中、有効なセンサーは1つしかないが、観測点E2ではch1, ch2の2つのセンサーが有効である。

観測モジュールは地面に置かれるだけであるから、地面とのカップリングは不十分であり、様々なノイズの影響を受けやすい。最も顕著なノイズは風による観測モジュールそのものの振動と考えられる。例として、観測点E1とE2における2015年5月28日23:00から23:59までの1時間の記録をFig.5に示す。

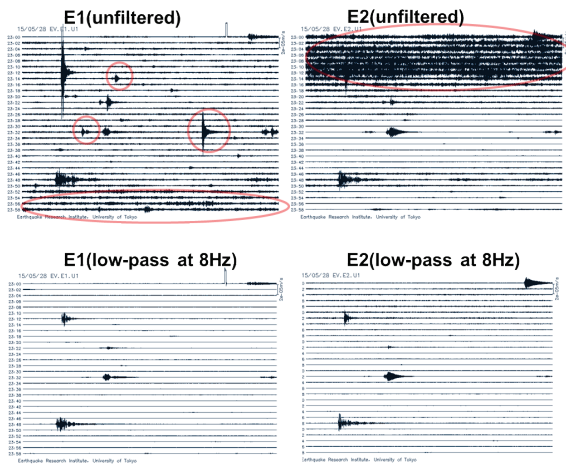


Fig.5 Comparison of raw and low-pass filtered traces. Top: unfiltered one hour traces of two stations E1 and E2 from 23:00 to 24:00 May 28, 2015. Bottom: same as the top traces but low-pass filtered at 8Hz. Signals shown by red lines are noise

Fig.4同様、1トレースの長さは2分である。上段はフィルターを掛けていない記録、下段は8Hzのローパスフィルターを掛けた記録である。フィルター無しの記録(Fig.4 上段)において赤で囲った部分同士を比較すると、同じ時間帯にも関わらず一方の観測点にしか現れていない振動が記録されており、ノイズだということがわかる。ローパスフィルターを掛けた波形(Fig.4 下段)を比較すると、両者に共通に現れる振動が記録されており、地動だと判断できる。この図が示すように、フィルターを掛けない記録ではノイズと信号を区別することは困難だが、適切なフィルターを掛けることで信号を取り出すことができる。口永良部島での設置状態で得られたデータに対しては8Hzのローパスフィルターが最適であった。

以降の解析は全て8Hzのローパスフィルターを掛けたデータを用いて行った。

4. 山頂部の地震活動

4.1 2015年4月の設置データ

2015年4月14日から18日の期間に無人ヘリによる地震観測モジュールの設置を行った。ヘリコプターの離発着点は本村付近であり、Fig.1には緑四角で示されている。地震計設置位置は京都大学防災研究所の定常観測点近傍4か所である。Fig.6に4観測点の位置と4月から5月の震源分布を示す。

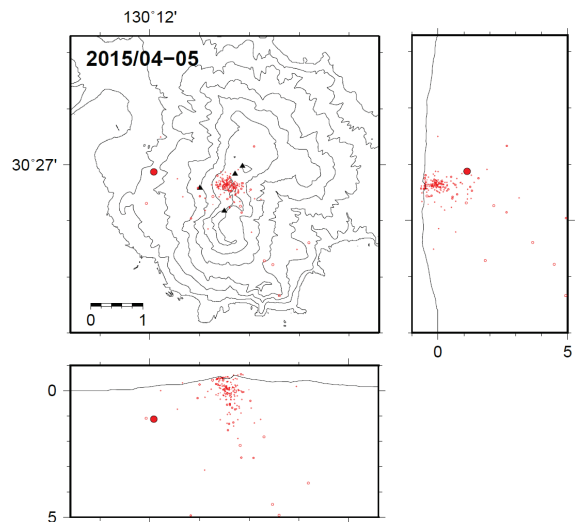


Fig.6 Hypocenter distribution from April 17 to May 29, 2015. Closed triangles show station locations. Red circles show the location of M2.7 earthquake on May 23, 2015.

これらの観測点は2015年5月29日9:59の山頂噴火後にデータが途絶えた。本観測で使用した観測モジュールは10分おきに間欠的にデータを送る方式のため、5月29日の噴火発生時刻9:59分の9分前9:50に送信されたデータが最後である。

震源決定においては、8Hzのローパスフィルターを掛けたデータに対してSTA/LTAによりイベントの自動検検を行い、検出されたイベントについてフィルターを掛ける前の元データに戻って目視によりノイズや遠地地震等の除去、再読取を行った。震源決定用の速度構造として井口ら(2005)を参考にP波速度2.5km/sを仮定した。自動検検、再読取、震源決定にはト部・東田(1992)のwinシステムを用いた。

ほとんどの震源が山頂付近浅部に決まっている。例外は5月23日に山頂西方約2kmで発生した有感地震である。気象庁マグニチュードはM2.3であるが、本解析ではM2.7の値が得られている。その震源付近でVT地震数が一時的に急増したことが報告されて

いる(福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2015). 無人ヘリコプターで設置した山頂観測網ではそれらの中で比較的大粒の地震は捉えられたが, 小さなものは捉えられていない. そのかわり, 山麓の観測網ではほとんど決められていない山頂付近で発生する M -1~1 の微小な地震活動は山頂観測網によって明瞭に捉えられている.

4.2 噴火前の地震発生数の変化と震源分布

Fig.7 に 2015 年 5 月の 1 日当たりの地震発生数を示す. 前節で述べた通り, 山頂観測網では山麓の小さな地震は捉えられないため, 5 月 23 日の有感地震の余震とみられる山麓の地震活動はこの図ではカウントされていない. 山頂付近の地震活動に着目した地震数の変化である. 5 月 23 日の有感地震発生直後には山頂付近の地震活動の急増は見られない. しかし, 噴火 3 日前の 5 月 26 日から地震数が急増し, 5 月 27 日に地震数のピークを迎えた. 噴火前日の 5 月 28 日には地震活動が低下し, 噴火当日には更に活動が低下した状態で噴火に至った.

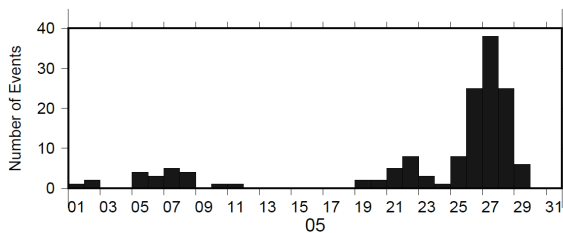


Fig.7 Daily number of earthquakes in May 2015.

5 月 29 日は 9 : 59 に噴火が発生したため, それ以降のデータは無い. 本観測で使用した観測モジュールは 10 分おきに間欠的にデータを送る方式のため, 5 月 29 日の噴火発生時刻 9:59 分の 9 分前 9:50 に送信されたデータが最後である. しかし, 5 月 29 日 9:50 までのデータから地震数を数えると, 地震活動は前日に比べて低下しており, Fig.7 に見られる 5 月 29 日のイベント数の低下は, 観測時間が 10 時間弱しかないことを考慮しても顕著である.

火山においては噴火前に地震活動が変化することがしばしば報告されている. 活動活発化の初期には VT 地震と呼ばれる P 波初動の明瞭な地震の増加がみられ, マグマ陥入による応力変化を反映しと考えられている. VT 地震の活動が低下した後は LF 地震と呼ばれる低周波成分が卓越する地震が増加する. これはマグマが地表に接近し, 地下浅部の熱水系がマグマの熱で加熱されたことを反映すると考えられる. 特定の周波数成分が卓越するものは Monochromatic 地震と呼ばれる. さらにマグマが地表に接近すると火山性微動と呼ばれる連続的な地震動

が発生し噴火に至る. 以上がマグマが直接関与する噴火でしばしばみられる地震活動変化である (McNutt, 1996). これに対して, 地表に出る前のマグマやマグマから分離した高温ガスなどによって加熱された熱水系で発生する水蒸気爆発については地震発生数の変化に規則性は見られるという報告はなく, 前兆的な地震活動変化を見せずに噴火に至ることもある.

5 月 29 日の噴火はマグマの直接的な関与は少なかったことが分かっている(東京大学地震研究所・早稲田大学教育総合科学, 2015). 噴火前の地震数変化がマグマが直接関与する噴火の典型例とは大きく異なっていたことは, 5 月 29 日噴火におけるマグマの関与が少なかったことに対応していると考えられる.

次に, 噴火に至るまでの震源位置の変化を検討する. Fig.8 に 2015 年 5 月 1 日から噴火直前までの震源分布の変化を示す. これによると, 噴火直前の震源位置が浅部に移動したり, 火口に集中するような傾向は見られない. 25 日以降に水平方向・鉛直方向ともに震源分布の広がりが拡大しているように見え

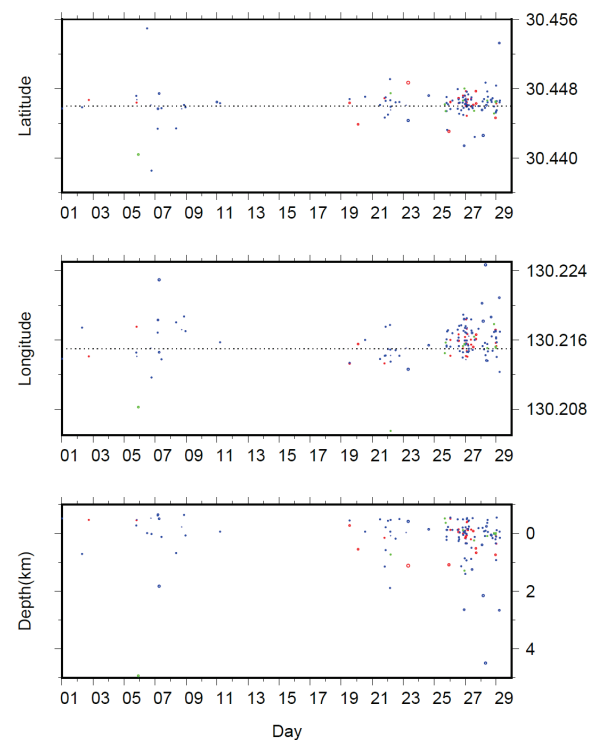


Fig.8 Change in the hypocenter location from May 1 to May 29, 2015. Dotted lines show the location of the center of the summit crater. Symbol color of red, blue and green correspond to VT, LF, and Monochromatic events, respectively. (top) north-south position, (middle) east-west position. (bottom) vertical position.

るが、これは震源決定精度の低い LF 地震が増えたためであり、VT 地震や Monochromatic 地震に着目すると明瞭な震源の移動は見られない。両者とも、一貫して火口近傍の狭い領域の浅部に集中している。

4.3 2015 年 9 月の設置

4 月に設置した観測点は 5 月 29 日噴火で被災したため、2015 年 9 月 8-12 日に再び無人ヘリコプターによる地震観測モジュールの設置を実施した。ヘリコプターの離発着点は、噴火の危険を避けるために山頂から 4 km ほど離れた番屋ヶ峰とした。Fig.1 では緑丸で示されている。観測点数は 4 月と同じ 4 か所に加え、山頂南西側に 1 ヶ所増やした計 5 ヶ所である。Fig.9 に観測点位置と 2015 年 9 月から 2016 年 4 月までの震源分布を示す。2015 年 4 月から 5 月の震源分布 (Fig.6) と比較して大きな違いは見られない。空中に決まっているものは震源決定精度の低い LF 地震である。

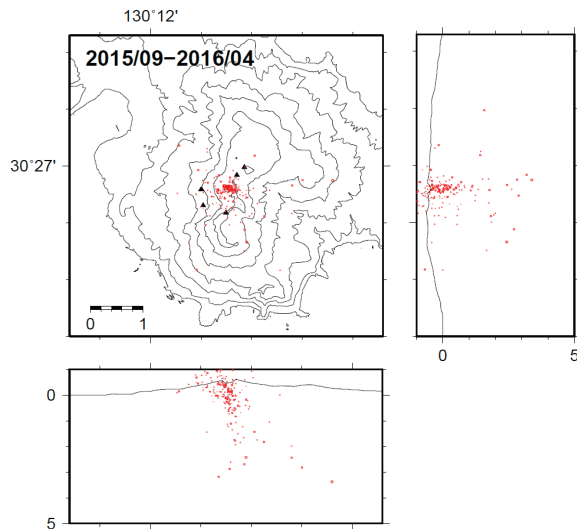


Fig.9 Hypocenter distribution from April 2015 to April 2016. Closed triangles show station locations.

2015 年 4 月と 9 月の 2 回の設置による観測期間は 2015 年 5 月 30 日から 9 月 10 日までの欠測期間があるものの、1 年を超えた。Fig.10 に 2015 年 4 月から 2016 年 4 月までの地震発生数の推移を示す。Fig. 7 で示したように、2015 年 5 月噴火の直前に地震活動が活発化しているが、2015 年 9 月には噴火前の水準以下に低下した。その後も低調な活動が続いている。地震の種類毎に噴火前後を比較すると、VT 地震は 9 月の時点で 4 月より多かったが、その後は 4 月の水準に戻っている。LF 地震は 9 月以降、4 月の発生数より少ない状態が続いている。Monochromatic 地震は 2015 年 5 月の噴火直前にいくつか見られたが、11

月以降は発生していない。

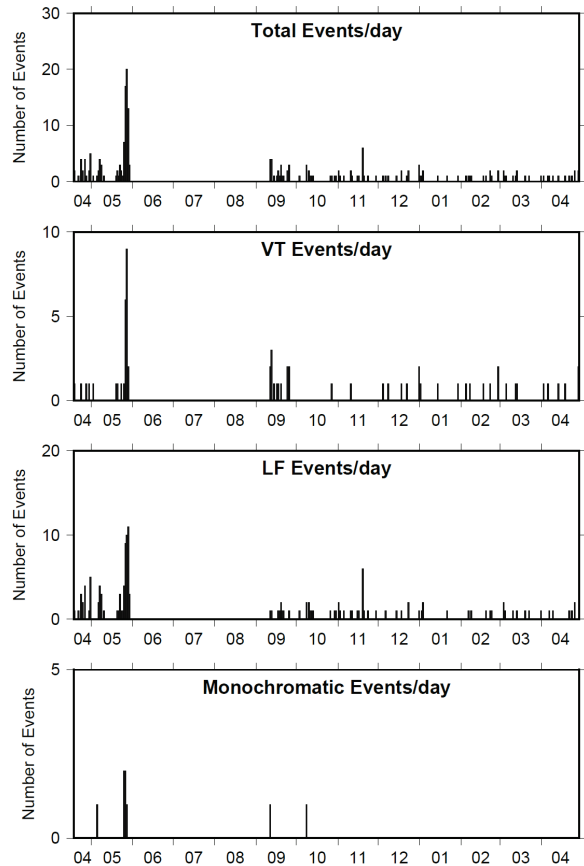


Fig.10 Daily number of earthquakes from April 2015 to April 2016. From top to the bottom, (a)all events, (b)VT events, (c)LF events, and (d)Monochromatic events.

5. おわりに

無人ヘリコプターを利用して、噴火で被災した口永良部島の山頂地震観測網を回復旧した。2015 年 4 月に無人ヘリコプターによる最初の設置を行い 5 月 29 日噴火の被災後、9 月に再設置を行った。

地震計モジュールを地面に直接置くという設置方法のため地面とのカップリングは良好とは言えないが、適切なフィルターを掛けることによりノイズが除かれ、解析に耐えるデータが得られる。

得られたデータを用いて震源決定を行ったところ、山頂付近に集中した地震活動を捉えることができた。特に、山頂観測網により噴火直前の地震発生数の変化が明瞭に捉えられた点は特筆すべき点である。山頂付近の地震数は噴火の 3 日前から急増し、噴火前日に減少した後、噴火に至った。この変化は噴火に至る準備過程の一端を示すと考えられる (Fig. 7)。

4 月から 5 月までの観測では、噴火に至る山頂付近の地震活動の推移が捉えられた。これに対して 9 月の再設置後に得られた地震データは、地震数が噴

火前の4月の水準以下にまで低下したことを示している。2015年9月以降の地震活動は横ばいかやや低下傾向を示す。設置地震計は設置後7カ月を経た2016年4月の時点でも順調に動作している。

噴火で火口近傍の観測網が被災することはしばしば起きるが、復旧するためには活動の低下を待たなければならない。一方、山頂付近の観測網が失われたことにより火山活動の評価ができず、復旧作業になかなか取り掛かることができないというジレンマが生じる。無人ヘリコプターによる地震計設置は、人的危険を冒すことなく山頂付近の地震観測網を復旧を速やかに行うための火山活動情報を得る手段として今後の活用が期待される。

謝辞

本観測経費の一部として京都大学防災研究所共同研究費(課題番号 27G-6), JSPS 科研費(15H05794, 26287103)を使用しました。記して感謝致します。

参考文献

- 井口正人 他 40名 (2005): 口永良部島火山における人工地震探査—探査の概要と初動の走時について—, 京都大学防災研究所年報, 第 48号 B, pp.297-322.
- 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, 第 58号 A, pp. 1-7.
- 卜部卓・束田進也 (1992): win—微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, No.2, P41
- 下司信夫・小林哲夫 (2007): 口永良部島火山地質図, 産総研地質調査総合センター
- 鈴木弘人 (2005): 監視用 UAV RMAX-G0-1, Technical Review, ヤマハ発動機, 2005-3, 39.
- 東京大学地震研究所・早稲田大学教育総合科学 (2015): 口永良部島 2014年8月3日噴火および 2015年5月29日噴火の火山灰について, 第132回火山噴火予知連絡会資料, 口永良部島
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2015): 口永良部島の火山活動開設資料(平成27年5月)
- Kaneko, T., Koyama, T., Yasuda, A., Takeo, M., Yanagisawa, T., Kajiwara, K., and Honda, Y. (2011): Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *Int. Jour. Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 1491-1504.

Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., Yanagisawa, T., Watanabe, A., Takeo, M. (2013): An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter, *Earth Planets Space*, Vol. 65, pp. 657-666.

McNutt, S. (1996): Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the state-of-the-art and case histories, in *Monitoring and mitigation of volcano hazards* (Scarpa and Tilling eds), pp. 99-146.

Ohminato, T., Takayuki, K., Koyama, T., Yasuda, A., Watanabe, A., Takeo, M., Honda, Y. (2012): Volcano observations using an unmanned autonomous helicopter: seismic and GPS observations near the active summit area of Sakurajima and Kirishima volcano, Japan, *EGU General Assembly 2012*, EGU2012-8575.

(論文受理日: 2016年5月19日)