

はじめに

京都大学防災研究所は拠点研究(特別推進)として「開口型火道システムにおける火山噴火予知を考える」(代表者:本研究所火山活動研究センター井口正人)を実施いたします。本研究において上記の公開研究集会を、防災研究所一般研究集会 23K-04「桜島火山活動と能動的火山活動モニタリングの可能性」(代表者:鹿児島大学・宮町宏樹),「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の火山噴火準備過程部会(部会長:井口正人)および火山噴火過程部会(部会長:東北大学・西村太志)と連携して開催いたします。

休止期を経て噴火活動が再開した場合、北海道の有珠山によく見られるように噴火の前兆現象として有感地震を含む地震活動や GPS 観測でも捕捉できるような顕著な地盤変動が現れることが知られています。これは、閉塞した火山体にマグマが貫入・上昇することによる火山体の破壊と膨張の結果であると考えられます。一方、すでに開口している火道系に徐々にマグマが供給された場合、顕著な地震活動と地盤変動は現れにくいと考えられます。

桜島の火山活動については、1955 年から始まった南岳の爆発噴火活動は今世紀に入り低下しましたが、かわって2006年6月からは昭和火口の噴火活動が再開しています。昭和火口の噴火活動は2008年から爆発的となり、2009年には578回、2010年には1055回の爆発(京都大学防災研究所の計測)が発生するなど徐々に活動的となっています。すでに火道は開口状態であるために火山性地震の活動や地盤変動は顕著ではなく、爆発回数のみが増加し続けており、今後の活動予測が非常に難しくなっています。

このような状況は、桜島と同様に長期にわたり噴火活動を続けているトカラ列島の諏訪之瀬島も同様な状況です。また、2011年1月に噴火した霧島の新燃岳噴火もその直前に顕著な地震活動や地盤変動がなく、2008年から水蒸気噴火を繰り返していたことから同様の状態にあると考えられます。最も顕著に火道の閉塞状態と開口状態のちがいが表れたのは、2010年のインドネシア・メラピ火山の噴火です。10月26日の最初の爆発の前には火山性地震の急激な増加と山体の膨張を捉えることにより噴火開始の前日に警報レベルを最高に上げ、住民を避難させることに成功しました。しかし、その後、11月3日から5日にかけて流下距離最大で17kmにおよぶ火砕流が連続的に発生する活動の前には、すでに火道は開口していたために前駆する明確な異常を捉えることはできず、警戒区域の拡大と前後して300名以上の犠牲者が出ました。

火山噴火予知においては噴火の開始よりもその後の推移予測の方が難しいことはすでに言われ続けていることですが、これは噴火開始前の閉塞型火道系に対して噴火開始後の開口型火道系におけるマグマの動態は異なることの認識とその戦略が不足しているためです。このような開口型火道系への火山噴火予知に対処するための研究戦略を本研究集会で議論します。

本研究集会では以下の構成で、開口型火道システムにおける火山噴火予知を議論します。

第1部 最近の噴火活動の事例

桜島，霧島新燃岳，諏訪之瀬島，インドネシアの火山など開口型火道をもつ火山において発生した前駆現象と噴火活動について紹介します。

第2部 地盤変動観測などの高精度化によるアプローチ

顕著な地震活動や地盤変動が捕捉されていなくても噴火発生の前にはマグマが貫入・上昇してきているはずであり，地盤変動観測や地震観測の精度を従来より向上させることにより前兆現象を捕捉できるはずです．その方法について議論します．

第3部 地下の構造の変化を知る

マグマが貫入してきていれば火山体地下の構造は必ず変化するはずであり，構造の時間変化を抑えていくことが重要であると考えます．桜島では人工地震探査を繰り返しており，また，今年度からはあらたにアクロスにより構造変化を追っていく予定です．また，電磁気学的手法，重力，宇宙線を使った構造観測についても紹介します．

第4部 先行物質の変化を追う

火道が既に開放している、あるいは完全に閉じた状態でなければ、先行物質としてのマグマ物質のその量と組成の変化を捉える好機です。従来物質科学では、噴火イベントごとの限られた資料の分析に力がそそがれてきましたが、高頻度サンプリングが可能な状況では、多量の資料の物質科学的解析によってその時間変化を追うことが可能となってきています。

研究代表者

国立大学法人京都大学防災研究所

井口 正人

シンポジウム「開口型火道システムにおける火山噴火予知を考える」
Symposium on Prediction of Eruption at Volcanoes under Open-conduit

日時 平成 23 年 7 月 14 日
場所 桜島公民館(鹿児島市桜島町横山)

9:00 はじめに……井口正人(京大防災研)

第 1 部 最近の噴火活動の事例

- 9:05 諏訪之瀬島の火山活動ー1989 年以降の火山性地震と噴火活動についてー
……為栗健・井口正人(京大防災研)
- 9:30 霧島新燃岳の火山活動……山里 平(気象庁)
- 9:55 Eruptive activity at volcanoes in Indonesia -Merapi, Semeru, Bromo-
……Hetty Triastuty, Surono and Muhamad Hendrasto (PVMBG, Indonesia)

第 2 部 地盤変動観測などの高精度化によるアプローチ

- 10:30 桜島の火山活動と観測坑道データを用いた火山噴火予測……井口正人(京大防災研)
- 10:55 諏訪之瀬島・スメル山の山体膨脹……西村太志(東北大理)
- 11:20 浅間山の浅部構造と最近の火山ガス放出活動……大湊隆雄(東大地震研)
- 11:45 2000 年三宅島噴火に伴う地殻変動……藤田英輔・上田英樹(防災科研)

第 3 部 地下の構造の変化を知る

- 13:15 地震波干渉法の浅間山への適応……西田究・長岡優・青木陽介・武尾実・大湊隆雄(東大地震研)
- 13:40 桜島火山における反復地震探査とその経過……筒井智樹(秋田大)・桜島火山反復地震探査グループ
- 14:05 MT 連続観測による比抵抗変動観測……相澤広記(東大地震研)
- 14:30 アクロスによる地下構造の時間変化の抽出の可能性……渡辺俊樹・山岡耕春(名大環境)
- 15:05 噴火推移予測のためのハイパーハイブリッド重力観測の現状と展望
……大久保修平・田中宏幸・風間卓仁・田中愛幸・今西祐一(東大地震研)

第 4 部 先行物質の変化を追う

- 15:40 活動期の火山における火山ガスモニタリング……森 俊哉(東大理)
- 16:05 火山灰付着性成分の時間変化……野上健治(東工大火山流体)
- 16:30 桜島火山の噴火活動様式とマグマ供給系の 20 世紀からの変化とその意義
……松本亜希子・中川光弘・宮坂瑞穂(北大理)
- 16:55 降下火山灰の自動採取によるモニタリング手法の開発……嶋野岳人(富士常葉大)

諏訪之瀬島の火山活動－1989年以降の火山性地震と噴火活動について－

Volcanic activity of Suwanosejima volcano

－Relation of seismicity of volcanic earthquakes and eruptive activity－

為栗 健・井口正人(京都大学・防災研究所)

Takeshi Tameguri and Masato Iguchi (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

諏訪之瀬島は鹿児島市の南南西 240km に位置し、トカラ列島に属する安山岩質の火山である。1813～1814年と1884～1885年には、それぞれ島の西部と東部に達する溶岩流を流出する大規模な噴火が発生した。1957年ごろからは、頻繁に御岳山頂の新火口においてストロンボリ式～ブルカノ式の噴火活動を繰り返してきた。京都大学防災研究所火山活動研究センターでは、諏訪之瀬島火山の活動を常時、把握するため、1989年5月からパソコンと一般加入電話回線を用いた収録・伝送システムにより火山性地震・空気振動の観測を御岳山頂から3.3km離れた集落において継続してきた。2003年からは御岳山頂域に4点の地震観測点を新設し、テレメータ観測を行っている。本稿では、火山性地震と噴火の発生頻度をもとに1989年か

ら2011年までの諏訪之瀬島の火山活動をまとめた。

1989年以降の活動はおおよそ3つの期間に分けられる。1989年からは1994年まではブルカノ式噴火が多数発生した噴火活動期である。1995年から2000年までは爆発がほとんど発生しない静穏期であったが、2000年12月19日に、十島村役場より「漁船から通常の火口とは違う場所から噴煙を上げているとの連絡があった」との通報が鹿児島県庁に入り、翌日防災ヘリにより調査を行ったところ、御岳の中央火砕丘の北および東200～300mの地点に新たに2箇所の噴気口が確認された。これ以降、諏訪之瀬島は新たな活動段階に入った。その後、この噴気口は拡大し、2003年ごろにはこれまでの火口と繋がった火口を形成した。

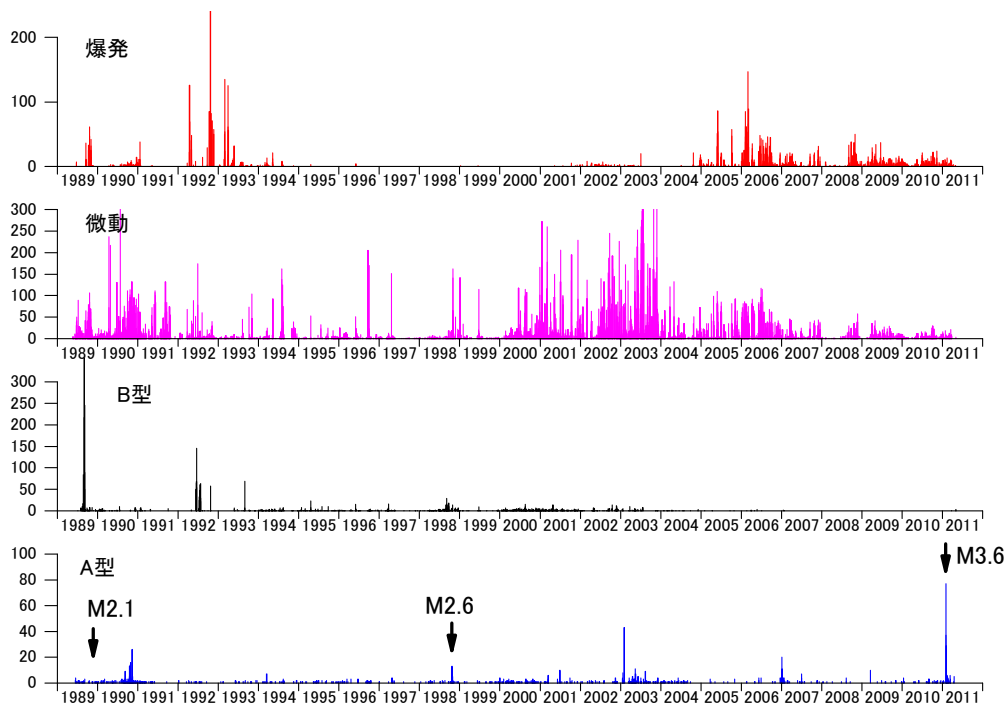


図1 諏訪之瀬島の日別火山性地震発生回数

噴火活動の活発化に先行して A 型地震や B 型地震の発生回数が増加することはよく知られているが、1994 年以前の活動期においては、1989 年 9 月 1～6 日にかけて B 型地震が群発し、9 月 16 日～爆発的な噴火活動が始まったこと、10 月 16 日に有感の A 型地震が発生し、その後、21 日から爆発が激化したことが知られている。また、1990 年 11 月 11 日には 26 回の A 型地震が発生し、1991 年 1 月に爆発活動が活発化した。その後は、爆発活動活発化と A 型地震発生との関係は見られない。

1998 年 10 月 24 日に 2 回の有感の A 型地震が発生した。この地震活動の直後に噴火活動が再開したわけではないが、その後火山性微動が発生するようになり、2000 年 12 月の噴火活動再開につながった可能性がある。

1989 年以降において最大の A 型地震の活動は 2011 年 2 月である。A 型地震は諏訪之瀬島北東の海域において発生した。1989 年の A 型地震の震源は西方、1998 年の A 型地震の震源は山頂域であり、2011 年 2 月の地震活動は震源域が異なる。

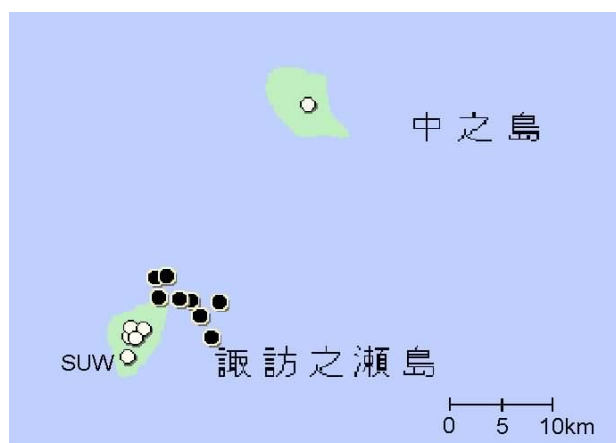


図 2 2011 年 2 月の A 型地震の震源分布 (黒丸)

2011年霧島山（新燃岳）の噴火活動

○山里 平

(気象庁火山課)

Eruption at Shinmoedake volcano in 2011

○Hitoshi Yamasato (Japan Meteorological Agency)

1 はじめに

2011年1月、霧島山新燃岳は噴火を再開し、準プリニー式噴火を経て、火口底に溶岩が蓄積し、爆発的な噴火を繰り返した。新燃岳の本格的なマグマ噴火は1717～18年の享保噴火以来であり、今後の活動推移が注目される。

2 2011年噴火前の火山活動

新燃岳は、1990～91年の微噴火以来、静穏な状態が続いていたが、2006年頃から、火山性地震の多発や微動が発生するようになり、気象庁のGPS繰り返し観測で、火口の近傍だけが膨張する微小な地殻変動が観測され始めた(福井ほか, 2008)。2008年8月22日には、1991年以来の小規模な噴火が発生し、麓の小林市などに降灰があった。この噴火の際には、3日前から顕著な火山性地震の多発が見られた。2010年3～7月にも7回の小規模な噴火が発生した。2010年の噴火に際しては地震活動の活発化はほとんどみられなかった。これらの小規模な噴火はいずれも水蒸気爆発と考えられており、それぞれの噴火に伴って地下の熱水の動きと関連していると推定される微小な傾斜変化が観測された(加藤ほか, 2010)。また、噴火が散発した2010年4月以降、新燃岳直下を震源とする火山性地震が多い状態が継続した。

一方、霧島山周辺のGPS観測では、韓国岳の西方、新燃岳の北西数kmの地下6～10km付近でゆっくりとした膨張が2009年12月から認められるようになった(国土地理院, 2010)。

3 2011年1月19日噴火

2011年1月19日01時27分、空振を伴う火山性微動が観測され、噴火が再開した。この噴火微動や空振の規模は2008年、2010年の水蒸気爆発時と同程度であったが、この微動は振幅が小さくなりながらもその後23日頃まで継続した。この噴火に伴い、宮崎県側の太平洋まで火山灰が降ったことが確認された。火山灰の中に新鮮なマグマ物質が認められ、この噴火はマグマ水蒸気爆発であったことが確認されている(中田・霧島山(新燃岳)総合観測班, 2011)。

4 1月26～27日の噴火(準プリニー式噴火)

1月26日朝から火山性微動が再び頻発するようになり、火山灰を含む噴煙が観測されるようになった。噴煙高は、当初、火口縁上200m程度で推移した。14時49分に振幅の大きい微動が発生、15時30分頃から噴火規模が急激に拡大、噴火微動や空振振幅も大きくなった。この頃から、準プリニー式噴火に移行したと推定される。

準プリニー式噴火が始まってから、2009年12月から膨張していた新燃岳北西の深部マグマだまりが急激に収縮する地殻

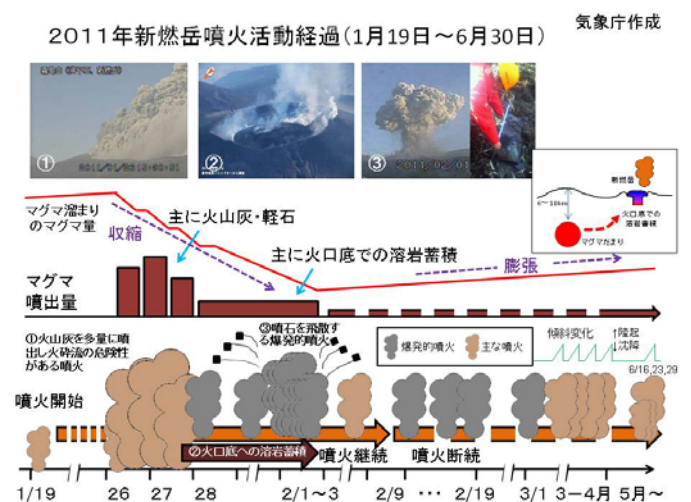
変動が、周辺の傾斜計やGPSで捉えられた。これは、深部マグマだまりから新燃岳へ向かってマグマが上昇してきたことを示すと推定され、傾斜計のデータからは、準プリニー式噴火は、26日夕方まで、26日深夜～27日早朝、27日15時41分の爆発的噴火後～同日夕方の、計3回のピークがあったことがわかる。火山灰等の総噴出量は1千～3千万トンと推定されている(東大震研, 産総研による)。

5 溶岩成長と爆発的噴火

1月28日以降、B型地震が多発するようになり、火口底に溶岩が出現しているのが28日に確認された。溶岩の蓄積量は次第に大きくなり、一時は頂部が火口縁を超え大浪池から望見できるまでに成長した。この間にも、新燃岳北西の深部マグマだまりの急激な収縮が観測された。以降、爆発的噴火を繰り返し、2月1日07時54分の爆発では、火口から3.2kmまで弾道岩塊が飛散、空振による被害も発生した。

溶岩成長がほぼ停止した2月以降も、噴火が間欠的に発生したが、徐々に頻度や規模が低下していった。そして、噴火の数時間～数日前から新燃岳直下が膨張する傾斜変化とB型地震の多発がみられるようになった。

4月中旬～6月中旬にかけては噴火は発生せず、小康状態となっていたが、6月16日以降小規模な噴火が散発的に発生している。また、新燃岳北西の深部マグマだまりの膨張は噴火前とほぼ同じ速度で継続しており、マグマが再び上昇して噴火活動が再活発する可能性が残されている。



新燃岳の活動経過(2011年1月～6月現在)

ERUPTIVE ACTIVITY AT VOLCANOES IN INDONESIA – MERAPI AND SEMERU

Hetty Triatuty¹, Surono¹, Muhammad Hendrasto¹, Masato Iguchi²

¹Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Geological Agency, Indonesia

²Sakurajima Volcano Research Center, DPRI, Kyoto University, Japan

Abstract

After the last eruption in 2006, Merapi was going into dormant period for 4 years. Initiated by occurrences of significant number of VT earthquakes in October 31 and December 9, 2009, June 10 and September 9, 2010, activity of Merapi started to increase intensively. On September 20, alert level was increased to level II and one month later the level upgraded into level III. After issuing the alert level III on October 21, CVGHM declared the highest alert level IV on 25 October and recommended people living in around the volcano to evacuate. Seismic energy and ground deformation showed acceleration pattern toward first eruption on October 26 and the seismic energy was three times larger than previous ones. The style of eruption was different from the previous eruptions which generated pyroclastic flow due to collapse of lava dome at the summit such as in 1997, 1998, 2001, and 2006. After the first explosive eruption, no drastic change of seismicity and ground deformation measurement were detected. Seismicity was dominated by tremor starting on November 3 which the trend of energy reached the peak on November 5. Significant increased in SO₂ emission was detected on November 4-5 before the climax of eruptions which continuously generated pyroclastic flow up to 17 km distance.

In 2009, eruption style changed at Semeru volcano. Semeru volcano continued eruptive activity of intermittent explosion with time interval of 10-60 minutes for long time. The eruptive activity suddenly stopped in March 2009 after a big explosion. In August 2009 eruptive activity recommenced with white-gas emitting from the crater, and then lava was came out at the crater in November. Lava dome extended forming lava tongue and generating avalanche since then. Volcanic tremor increased intensively since August 2009. Gas continuously emitted from the summit crater with the earthquake event having a similar time interval to previous explosions. Lava flowed on south-eastern flank of Semeru since January 2010. In early May – early July 2011 explosions occurred and some of them were accompanied with the rumbling sound and ejected incandescent material from the crater.

桜島の火山活動と観測坑道データを用いた火山噴火予測

Volcanic activity and prediction of volcanic eruption by using ground deformation data in underground tunnels at Sakurajima volcano, Japan

井口正人(京都大学・防災研究所)

Masato Iguchi (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1. 桜島の火山活動

1955年に始まった桜島の南岳における噴火活動は1972年から1992年に最も活動的であり、1974年と1985年には400回を超えるブルカノ式噴火が発生した。南岳の噴火活動は今世紀に入り急激に低下したが、代わって2006年6月からは南岳の東斜面の昭和火口において噴火活動が58年ぶりに再開した。2006年と2007年の噴火活動は2~3週間と短期間で穏やかであったが、2008年2月3日の火砕流を伴う噴火を契機に爆発的となった。2009年には578回、2010年には1033回、2011年には500回(5月現在)の爆発(有村:距離2.4kmにおいて最大振幅10Pa以上の空振)が発生しており、徐々に噴火活動は活発化している。2008年2月~7月、2009年2月~2010年9月、2010年11月以降に分けられる。2009年2月からの噴火活動期は2009年7月、10月と段階的に活動的となり、2010年1月から3月にピークに達している。2010年7月~10月は衰退期である。

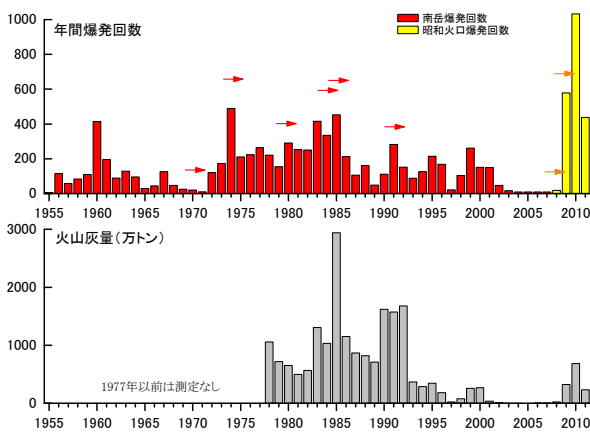


図1 桜島における爆発回数と火山灰放出量

桜島の南岳の活動期においてはB型地震が多発した後、爆発発生回数が増加した。また、B型地震の

多発に先行してA型地震の深部から浅部への移などがみられた時期もあった。一方、昭和火口における活動期では先行する顕著な地震活動の変化はみられず、2010年6月・7月を除いて地震発生回数は少ない状態が続いている。これは、南岳活動期に比べて桜島直下に供給されるマグマがまだまだに少ないことによる。南岳の活動期では600万トン/月に達したが、昭和火口の活動期では100万トン/月である。また、1回の爆発による火山灰放出量は南岳が平均5万トン(最大40万トン)であるのに対し、昭和火口では平均6千トン(最大10万トン)と小さい。

一方、1995年から開始したGPS観測によると始良カルデラの下に蓄積されたマグマの量は1.2億立方m³になり、始良カルデラの再隆起は1993年に再開したとされているので、それ以降の蓄積量は1.4億立方m³と推定される。1.8億立方m³の溶岩を流出した1946年昭和火口噴火に匹敵するマグマを1993年以降だけでも蓄積しつつある状況にあり、今後、1946年噴火に匹敵する規模の噴火の発生が予想される。

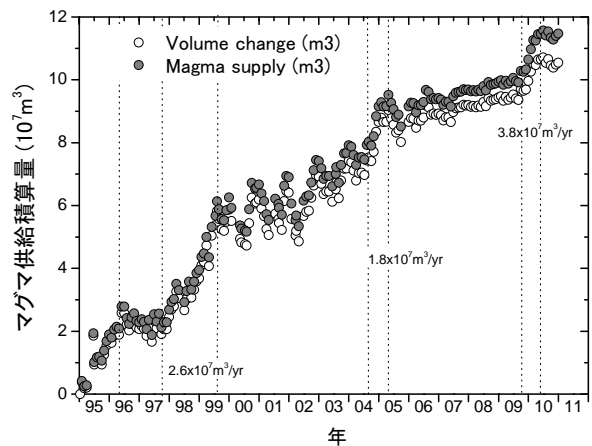


図2 始良カルデラ下のマグマ溜まりへの供給量

2. 地盤変動観測の高精度化によるアプローチ

噴火活動の活発化にもかかわらず地震活動レベルは低い状況にあり、地震活動により現状を評価、将来を予測することは難しい状況にある。しかし、小規模とはいえ、昭和火口の爆発に伴う地盤変動は観測坑道に設置された伸縮計や傾斜計により検出されているので、これらの観測機器により得られる変動は有用である。

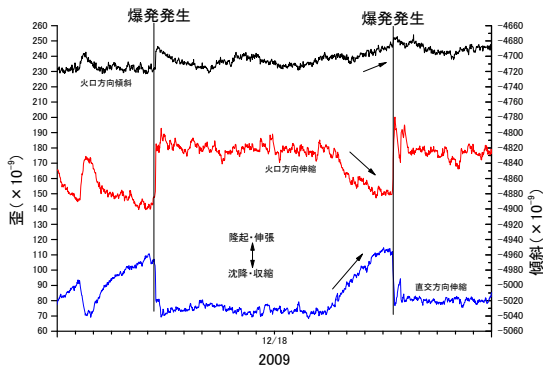


図3 昭和火口の爆発に伴う有村観測坑道における傾斜計および伸縮計の記録

有村観測坑道における伸縮計の記録を図3に示す。爆発に先行して火口方向において5~110ナノストレインの収縮ひずみと火口と直交方向において5~60ナノストレインの膨張ひずみが観測される。2つの方向で極性が異なるのは、圧力源が浅いことによる。南岳活動期の爆発のように圧力源が深ければ、どちらも伸張ひずみとなる。この特性を用いて火口方向と直交方向のひずみ比から圧力源の深さを求めることができる。茂木モデルを仮定すると深さは1km前後に求められる。傾斜変化が最も大きくなるのは、有村観測坑道では力源が深さ4km付近にあるときであり、規模の大きい噴火を除いて、傾斜計では変動が認めにくい。一方、歪変化は力源が浅いほど大きくなり、地表にあるときに最大となる。昭和火口の爆発的噴火の95%以上において爆発の直前に火口方向において収縮、直交方向において伸張の歪が観測される。

この変動が始まるとほぼ一定の割合でひずみが進行するが、爆発の直前には、停滞から収縮を示すことが多い。諏訪之瀬島、スメル火山、南岳爆発期の桜

島において、爆発に先行して地盤は隆起・膨張し、爆発の直前に小規模な収縮から小規模な膨張が現れた後、地表面における爆発現象が発生し、地盤変動が沈降・収縮に反転することが知られている(Iguchi et al., 2008)。これは火道内の過剰圧に起因する火道最上部からのガスが逸脱による火道内の減圧が、マグマを発泡させることにより一時的な体積増加を示すものと解釈されている。昭和火口爆発では、爆発直前における膨張の停滞とそれに続く小規模の収縮がより明瞭にあらわれる場合が多い。さらに明瞭にあらわれる場合が、南岳爆発期におけるBL型群発地震を伴うストロンボリ式噴火活動である。B型地震の群発は爆発活動(ブルカノ式)の発生・活発化を予測する重要なパラメータに位置づけられているが、後期南岳爆発期においてはBL型地震の群発現象が噴火活動を伴っているので、噴火を予測するのであれば、BL型地震群発そのものを予測すべきである。BL型地震群発に先行して火山体の隆起・膨張が観測される。南岳のブルカノ式噴火に伴う地盤変動と比べると、隆起・膨張速度が小さいこと、その期間が長いこと(最大22時間)、隆起・膨張のあと1~4時間の停滞期をへて噴火活動が始まることがあげられる(立尾・井口, 2009)。停滞した後は緩やかに沈降・収縮が始まり、変動速度が加速するとストロンボリ式噴火が顕著となる。

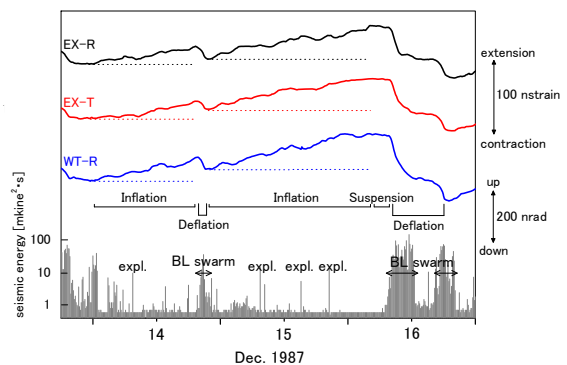


図4 BL型群発に伴う傾斜・伸縮変化

これらの噴火活動に伴う地盤変動に共通することは、隆起・膨張の継続から噴火が発生することにより突然沈降・収縮に反転するのではないということである。継続的な隆起・膨張が破綻する時期あるいは、沈降・収縮への反転時期は噴火発生の前にあり、この時期か

ら噴火発生までの時間が直前予測にとって重要である。最近の諏訪之瀬島の爆発ではわずか0.2-0.3秒しかないが、桜島の南岳の爆発では1-2分あり、噴火の規模が大きくなるにつれこの時間が長くなる傾向がみられる。さらに大規模な噴火では、この先行収縮時間が重要となることが予想される。

諏訪之瀬島・スメル山の山体膨脹

西村太志 (東北大・理・地球物理)

Volcano Inflations observed at Suwanosejima and Semeru volcanoes

Takeshi Nishimura (Geophysics, Science, Tohoku Univ.)

1. はじめに

諏訪之瀬島火山およびインドネシアのスメル山は、山頂火口からブルカノ式噴火を頻発することがよく知られ、長年、開口型火道を形成している。小規模な噴火が繰り返し発生し、比較的短期間に多量のデータを収録できることから、火口近傍に地震計および傾斜計を設置し、噴火機構の研究および噴火予知技術開発を進めてきた。本報告では、両火山で観測された山体膨脹現象と噴火との関係について、これまでに得られたデータをもとに議論する。

2. スメル山の山体膨脹

スメル山の火口から約500mの地点に設置した傾斜計を解析した。繰り返し噴火が発生することを利用し、数百以上のデータを重合することによりS/N比をあげ、平均的な特徴を調べた。小規模なブルカノ式噴火のデータ(2007年)は、噴火開始200~300秒ほど前から火口上がりを示し、60秒ほど前からさらに加速する。これは、メルト中の気泡上昇や水分子の気泡への流入が火道内マグマで起きていることを示唆する。一方、2010年に頻発したガス噴出に先行して記録された傾斜は、噴出20~30秒ほど前から山上がりを示すものの、特に加速する様子は認められない。

噴火に伴う地震の最大振幅と傾斜を比べた結果、ブルカノ式噴火およびガス噴出ともに、山体膨脹量が大きいほど、地震の最大振幅が大きい。この事実は、噴火規模を直前の山体膨脹量から予測できることを示している。

3. 諏訪之瀬島火山の山体膨脹

諏訪之瀬島の火口から約350mの地点に設置した傾斜計の記録は、ブルカノ式爆発的噴火の60~100秒ほど前から火口上がりの傾斜を示す。噴火が頻発している活動期には火山灰やガスの連続噴出によると考えられる常時微動が発生しているが、この火口上がりの傾斜が始まるときとほぼ同じときに微動が停止する。この因果関係から、諏訪之瀬島の山体膨脹は、火口出口に蓋が形成され、ガスや火山灰の噴出が停止することにより火道内の圧力が高まったと

推察される。2009年および2010年のデータを、S/N比をあげるため雑微動の小さい時期に観測されている数十イベントを重合した。その結果、山体の膨脹率に地震の規模による顕著な違いは認められなかった。ただ、膨脹の継続時間は規模が大きいとき長くなるようにも見える。深部からほぼ一定レートで供給されていた火山ガスが噴火直前の蓋の形成によって火口直下に蓄えられると考えられることを示唆するが、重合したデータがまだ少なく、今後データの蓄積を進めることが必要である。

4. 考察とまとめ

開口型火山における小規模な噴火においても、火口数百メートル程度に高精度の傾斜計などを設置することにより、数百秒から数十秒前に顕著な山体膨脹が検出され、噴火規模や様式の違いを予測できる可能性があることが明らかとなった。

諏訪之瀬島で観測されたブルカノ式噴火の直前の山体膨脹、微動停止やガス放出の減少の同時発現は、桜島火山でも観測されており、共通のメカニズムが示唆される。その一方で、マグマ噴火であっても、スメル山のブルカノ式噴火先行して加速する山体膨脹には、微動の停止は必ずしも起きておらず、ブルカノ式噴火のプロセスにも違いがあることを示唆している。ただし、いずれの火山も深部からマグマが長期にわたり供給されていることを考えると、火道浅部でのガスとメルトの上昇の違いが、膨脹現象の違いや微動停止活動と関係していると推察される。

※諏訪之瀬島観測は、火山噴火予知研究の全国連携の課題として進め、青山裕(北大)、太田雄策(東北大)、及川純(東大)、中道治久(名大)、八木原寛(鹿大)、井口正人・為栗健(京大)、嶋野岳人(富士常葉大)の各氏らとの共同研究として進めているものである。スメル山観測は、井口正人(京大)、川口亮平(東北大)、Surono, Muhamad Hendrasto, Umar Rosadi (CVGMH, インドネシア)の各氏とともに、おもにJST-JICAの地球規模課題対応国際科学技術協力事業の一環として実施された。

浅間山の浅部構造と最近の火山ガス放出活動(レビュー)

○大湊隆雄(東大・地震研)

Shallow structure and recent degassing activity of at Mt. Asama

○T. Ohminato(ERI)

最近の浅間山の活動 浅間山は2004年の山頂噴火以降、小規模な噴火を挟みながら、山頂火口から火山ガスの放出を継続している。2004年9月1日から12月にかけて発生した一連の中規模噴火は、閉塞された火道が噴火とともに解放されるブルカノ式噴火であった。その後、山頂クレーターは溶岩に満たされ、火道は再び閉塞した。2008年8月には小規模噴火が発生したが、火口底に大きな変化は見られなかった。2009年2月2日の噴火の際には火口底中央部に直径 約50mの噴気孔が新たに生じた。

浅間山浅部構造 2004年噴火以降、浅間山では人工地震構造探査や地震波干渉法により山体のP波、S波速度構造が推定され、MT法による比抵抗構造も得られた。また、最近開発されたミュオンラジオグラフィー手法により、山頂極浅部の密度構造が明らかになり、地震データから推定される力源モデルと合わせて浅部の状態が少しずつ明らかになってきた。

2004年9月から11月の噴火 噴火前に山体西部でダイク貫入が起きていた。山頂付近にはGPSも傾斜計もなかったため、噴火に先行する山体極浅部の膨張があったかどうかはわからない。しかし、噴火のメカニズムを見ると、下向きシングルフォースが卓越しており、金森モデルと調和的である(Ohminato et al., 2006)。このことは、山体が徐々に膨張した後、噴火に伴い山体が収縮する閉鎖型システムであったことを示唆する。

2009年2月噴火 噴火前の2008年7月頃からは、山体西側の西北西-東南東走向を持つ鉛直ダイクと山頂直下極浅部の膨張源で説明される山体膨張が進行していた。山体西の鉛直ダイクの存在は地震波速度構造や比抵抗構造とも調和的である。噴火に伴う傾斜変動は浅間山周辺に展開された広帯域地震計でも観測された。噴火の数10分前から山側の膨らみに対応する傾斜変化が始まり、噴火とともに急激な収縮に転じた。この収縮は、噴火前に膨張していた山体西側ダイクと山頂直下の膨張源の収縮でほぼ説明できる。この噴火も閉鎖

型システムの特徴を示した

山体浅部構造と火山ガス放出 2008年9月から2009年4月にかけて山頂付近に展開された稠密地震観測網の地震データを用い、傾斜を考慮した波形解析を行ったところ、火口中央付近に達する火道の先端付近から火口北側浅部に向かって円筒と亀裂の連なる構造が延びており、その構造の膨張収縮で観測地震波形を説明できることがわかった(Maeda and Takeo, 2011)。この構造の位置はミュオンラジオグラフィーによる低密度域に対応している(Tanaka et al., 2011)。

可視カメラ画像と地震記録の比較によると、この噴火で生じた火口底噴気口からのガス放出と長周期地震発生が対応していることが明瞭になった。2009年6月のS02の放出量観測によると、噴気口からのガス放出とともにS02放出量も増加し、その増加量は長周期地震波の震源モーメントと比例関係にあることが明らかにされた(Kazahaya et al., 2011)。ガスが火道周辺の狭い通路を通じ間欠的に放出されると考えれば、稠密地震観測から推定された地震メカニズムとも調和的である。

浅間山の現在の状態 火口底中央に噴気孔が開いている現在の浅間山は開放型システムに変わったのだろうか?。2009年2月の噴火前に見られた地殻変動と、浅部構造モデルを考慮すると、次のような状態であると推察できる。噴火前には火口壁に点在する噴気口から火山ガスは漏れていたものの、火道は閉塞された状態に近く、明瞭な噴火直前の山体膨張と噴火直後の収縮が観測された。噴火後は火道から火口底へのガスの経路は広くなったものの、完全な開放型とは言えない程度に閉塞されたままである。そのため、火山ガス放出や地震発生は連続的ではなく間欠的に起きる。実際、長周期地震の発生状況は2009年2月噴火の前と後でほとんど変わっていない。従って、浅間山は開放型システムに変わったとは言えず、次のマグマ上昇と噴火が起きる際には、噴火前の山体膨張と噴火直後の収縮が観測されることが予想される。

2000年三宅島噴火に伴う地殻変動

藤田英輔・上田英樹（防災科研）

Crustal deformation during the 2000 Miyakejima volcano eruption

Eisuke FUJITA and Hideki UEDA(NIED)

○はじめに

三宅島では1983年噴火からおよそ20年が経過する2000年過ぎに次の噴火が予想されていた。このため、防災科研は島内に5ヶ所のボアホール型地震・傾斜計を主とした観測施設を整備していた。2000年6月26日に始まった三宅島噴火は、地下のマグマの移動をこれらの地殻変動観測で追うことができた好例である。活動は大まかに4つ、すなわち、第1ステージ（岩脈貫入）・第2ステージ（山体収縮期1）・第3ステージ（山体収縮期2：カルデラ形成）および第4ステージ（ガス放出期）に分けられ、それぞれ特有の現象が観測されている。このうち第1・2ステージは地表での噴火活動を伴わないものであった（一部の海底噴火を除く）。第3・4ステージでは、時折山頂噴火が発生しており、開口型火道システムでの現象である。

○第1ステージ：岩脈貫入（閉口系～開口型火道系）

第1ステージは2000年6月26日18時過ぎから27日にかけての群発地震発生と傾斜変動が観測された期間である。傾斜・GPSデータの解析によりマグマの移動の様子が明らかになった。マグマはまず島南西部から山頂方向へ貫入した。21時ごろより上昇がとまり、大量に西方へ移動する。最初の山頂方向への貫入は、岩脈として周囲を破壊しながら上昇したもの（閉口系）か、既存の火道を上昇したもの（開口系）か定かではない。西方へのマグマの移動は1983年噴火の際の山腹割れ目噴火の走向とほぼ直行方向に進展した岩脈によるものである。さらに、地震活動は島の北西方向へ延伸し、神津島・新島近海での群発地震活動へと発展する。

○第2ステージ：山体収縮期1（開口型火道系）

一連の岩脈貫入期の後、三宅島内ではゆっくりとした山体の収縮が続いていた（6/28～7/7）。収縮源は島南部深さ7kmの球状マグマ溜まりとその上部に位置する岩脈状の部分である。この収縮期には山頂直下を震源とする低周波地震が観測され始めてい

た。また、絶対重力計による観測から、この期間に山頂直下に空洞が形成されていたことが示唆されており（Furuya et al., 2003）、この間にほぼ開口型火道系が形成されていたと考えられる。

○第3ステージ：山体収縮期2（カルデラ形成）

7/8 18:41に最初の山頂噴火が発生し、山頂の陥没が始まった。この噴火に先立ち、山頂方向が加速的に沈降する傾斜変動がおよそ8時間前から観測されている。7/8以降は、基本的には山体収縮を示す地殻変動がゆっくり継続し、それに重畳する形で8月18日までに46回の傾斜ステップおよび超長周期地震が観測されている。これらは三宅島南部から北西方向に延びるシルの瞬間的な開口および山頂直下のクラック状の開口によるものと解釈されている。この間、徐々に山頂が陥没し、カルデラが形成された。

○第4ステージ：ガス放出期

8月18日の大規模噴火以降、活動の主体は継続的な火山ガスの放出となった。顕著な山頂噴火や地震活動は低下し、ゆっくりとした山体収縮が継続することとなる。この収縮源は、第2ステージより収縮を続ける球状マグマ溜まりと岩脈状領域に加え、山頂直下数kmのところの一つ収縮源があるものと推定され、火口からのガスの放出に伴う火道内ガス溜まりの収縮が考えられている。

○まとめ

2000年三宅島噴火では、傾斜計・GPSによる地殻変動データの解析により、地下でのマグマの移動を把握や、カルデラ形成等の表面現象との関係の理解が可能であった。しかし、これらは事後に行ったものであり、時々刻々変化するデータをリアルタイムで解析し、噴火活動の推移予測を実現するまでには至らなかった。これらを実現する手段の一つである地殻変動データの解釈のため、平常時のマグマ蓄積過程、噴火発生時のマグマ移動などが地殻変動データとしてどのように表れるか、あらかじめ理解し、蓄積しておくことが重要である。

地震波干渉法の浅間山への適応

西田究(1), 長岡優(1, 2), 青木陽介(1), 武尾実(1), 大湊隆雄(1)

(1) 東京大学地震研究所, (2) 現気象庁

Application of seismic interferometry for Mt. Asama

Kiwamu Nishida (1), Yutaka Nagaoka (1,2), Yosuke Aoki (1), Minoru Takeo (1) and Takao Ominato (1)

(1) Earthquake Research Institute, University of Tokyo (2) Now JMA

地球内部で起こる現象のダイナミクスを考える上で、速度構造の時間変化を捉える事は非常に重要である。実際に地下構造の時間変化を求めようとする場合、コントロールソースを用いて繰り返し地震波トモグラフィを繰り返す事が想的である。しかし多くの場合現実的ではない。一方自然地震を使う場合、震源の不確実性や震源分布の偏りなどに起因する不確実性が速度構造の不確実性を引き起こす。そのため、たとえ時間変化が見かけ上見えたとしても、それはただのノイズなのか本当の速度変化なのか判然としがたい。

一方近年、イベントを使わず地震のノイズ記録やコーダ波を用いて地下構造及びその時間変化を求める研究が流行の兆しを見せている(地震波干渉法: e.g. Shapiro et al., 2005). これら地震計のノイズ記録から地下構造の情報を抽出する研究は 1950 年代の安芸による先駆的な研究にまでさかのぼる。

地震波干渉法には、解析する波動場の種類から、多く分けて二つの種類の解析手法が存在する:(1) 脈動による構造推定(主に表面波に対応)、(2) コーダ波を用いた構造推定。これらの手法は、既に全マントルスケール(Nishida et al., 2009)、から日本列島スケール(Nishida et al. 2008)、そして浅間の山体スケール(図 1)という、幅広いスケールの現象に適応されている。浅間山の結果は、実体波トモグラフィや構造探査がともに感度を持たない、地殻に存在する低速度異常(マグマだまり)の検出可能性を示唆している。

地震波干渉法は、地下構造の時間変化を検出するのに非常に有効な方法である。なぜなら、最も単純な例を考えると、2 点で地震観測をして、その記録の相互相関関数の変化を見続ければその 2 点間の局在化された構造変化を時々刻々モニターすることができるからである。脈動をモニタリング用いる場合、励起の時間変化を構造の時間変化に押しつける危険性を秘めている(e.g. Nakahara 2006). そこで本研究では S コーダを用い、位相速度変化のモニタリングを試みた(図 2)。コーダ波を用いる場合、短周期計のイベント記録さえ存在すれば良いので過去の記録へとさかのぼりやすい利

点もある。時間変化を検出する上で、過去の記録を使えることは大きなアドバンテージである。

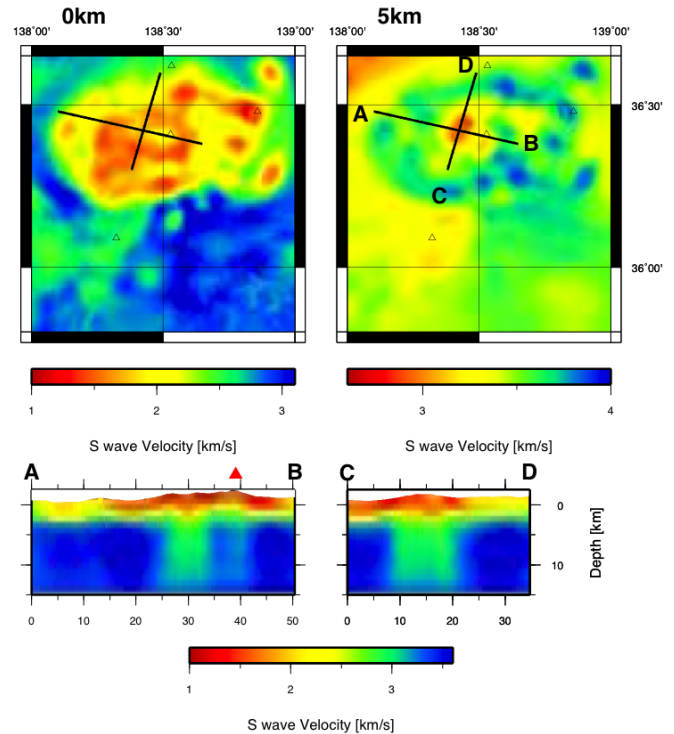


図 1: 地震波干渉法によって求められた浅間山付近の 3 次元 S 波速度構造 [Nagaoka et al., 2011].

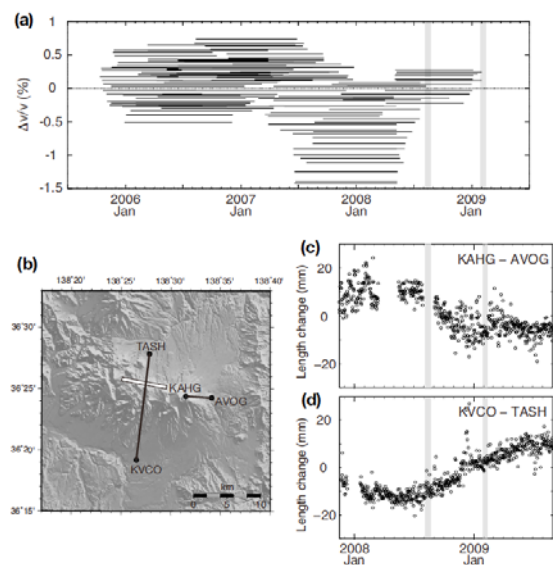


図 2: Coda 波を用いた地震波干渉法を用いて推定された浅間山山体の速度構造変化 [Nagaoka et al., 2010].

桜島火山における反復地震探査とその経過

筒井智樹 (秋田大工資)・桜島火山反復地震探査グループ

A progress report of seismic survey rounds in Sakurajima

Tomoki TSUTSUI (Akita University) and Research Group of Seismic Survey Rounds in Sakurajima

本講演では 2008～2010 年にかけて実施された人工地震実験にもとづいて、桜島火山における地震反射応答の変化について中間報告する。

我々は火山活動に伴う地震学的構造の変化の検出を目的に桜島火山北東部に 2 本の測線を展開し、同一測線上で 2008 年 11 月, 2009 年 12 月, 2010 年 12 月と 1 年おきに人工地震実験を繰り返し行った (井口・他, 2009; 筒井・他, 2010)。以降ではそれぞれ順に 2008 年観測, 2009 年観測, 2010 年観測と称することにする。

桜島では 1990 年代後半から始まった始良カルデラ一帯の膨張が継続中であり (山本・他, 2010), いずれの探査時期にも昭和火口からの噴出活動が卓越していた (井口・他, 2009; 井口, 2010)。このように活発な動きが見られることから、桜島火山では地下におけるマグマの移動および蓄積に伴う地震学的特性 (たとえば反射係数等) の変化が期待される。

2008 年探査は昭和火口からの爆発頻度が増大し始めた時期に実施され, 2009 年探査は昭和火口からの爆発回数がピークを迎えるとともに桜島北東部の急激な伸張が始まった時期に実施された (井口・他, 2010)。さらに 2010 年探査は昭和火口における爆発活動が依

然として活発であるが、桜島北東部の伸張変動が小康状態を迎えた時期に実施された。

桜島北東部に展開された 2 本の測線 (測線 NS および測線 EW) は 14 ケ所の発破点と約 248 点の臨時観測点から構成されている (Fig. 1)。2 本の測線はともに Hidayati et al. (2007) が提唱した始良カルデラから桜島に至る開口割れ目モデル位置 (Fig. 1 太線) を横切るように設定された。各観測点ではデータロガー LS8200SD と 4.5Hz 上下動成分のセンサーを組み合わせた 1 成分観測をサンプリング周波数 500Hz で行った。

人工震源にはダイナマイトを用いた。2008 年に実施された観測では薬量 20kg (分割発破) が 7 ケ所で、300kg (単孔発破) で 1 ケ所の発破が実施された。2009 年以降に実施された観測では 14 ケ所のすべての発破点は薬量 20kg の単孔発破であった。Table 1 に発破点の対応を示す。

毎年、各観測点はおおむね良好に再現された。2008 年探査では前年に対してそれぞれ南北方向に平均 0.3m、東西方向に平均 0.2m の差であった。2010 年探査では 2009 年探査に対してそれぞれ南北方向に平均 0.1m、東西方向に平均 0.2m の差であった。

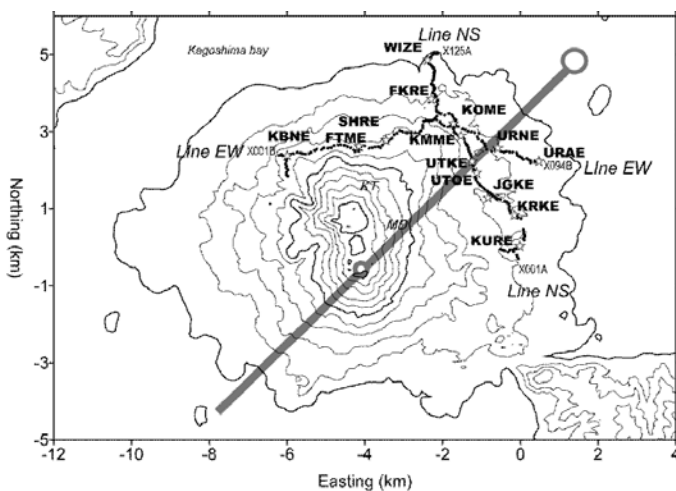


Fig. 1 反復地震探査測線。黒い点は測線を構成する臨時観測点を、星印は発破点を示す。太線は Hidayati et al. (2007) の開口割れ目モデルを示し、白丸は地盤変動圧力源位置を示す。

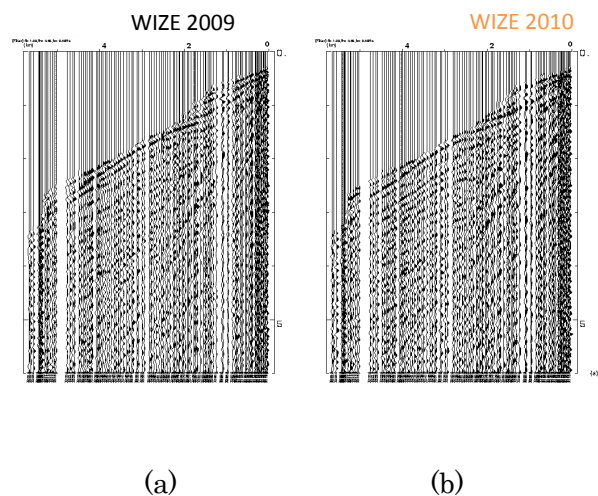


Fig. 2 発破点 WIZE に対する南北測線観測波形例 (a) 2009 年観測, (b) 2010 年観測

2009 年観測の 2008 年観測に対する最大振幅比は同葉量発破で 0.6~2.9 倍，2010 年観測の 2009 年観測記録に対する最大振幅比は 0.8~1.5 倍であった。

2008 年観測はそれ以降の研究を行うための先行調査として位置づけられる。2008 年観測では桜島北東部の深さ 6km までの地震反射構造が明らかにされ，桜島北東部に向かって深くなる基盤構造や 2.5km 以深に複数の負のインピーダンスコントラストの存在が指摘された(Tsutsui et al. 投稿中；筒井・他 投稿中)。これらの情報は 2009 年以降の観測データを解釈する上で重要な基礎情報である。

2009 年観測は発破が 14 ヶ所に増設され，その分布が改善されたこととその形態が単孔発破に統一されたことから，それ以降の観測に対する標準的観測として位置づけられる。

これまでに検出された波形変化は桜島北東部に多く現れる傾向がある。その典型的な例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 には測線最北端の発破点 WISE に対する測線 NS 上の観測波形(2009 年観測・2010 年観測)を示す。震源距離 3~4km の走時 2.5 秒付近の後続相に若干の変化が見受けられる。これらの観測データについては現在

精査中である。

桜島火山反復地震探査グループは以下のメンバーで構成されている。敬称略で記す。；筒井智樹，井口正人，為栗 健，大島弘光，青山 裕，植木貞人，大湊隆雄，及川 純，市原美恵，野上健治，中道治久，大倉敬宏，清水 洋，松島 健，宮町宏樹，八木原 寛，上田義浩，斎藤公一滝，前川徳光，平原 聡，辻 浩，奥田 隆，堀川信一郎，吉川 慎，園田忠臣，平野舟一郎，末峯宏一，林 幹太，加藤幸司，長尾 潤，池亀孝光，松末伸一，五藤大仁，河野太亮，後藤 進，宇都宮真吾，築田高広，田中窓香，渡辺竜一，長岡優，前原祐樹，吉田沙由美，小林由実，栢橋志郎，佐藤 泉，大藪竜童，清水英彦，山下裕亮。

謝辞

本観測の遂行にあたり，測線に関連する地区の区長諸兄をはじめ地元住民の皆様のご協力をいただきました。また，国土交通省大隅河川国道事務所には格別のご配慮をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

Shot point	2008	2009	2010	Site name
KURE	08S09	09S02	10S01	黒神
KRKE	-	09S03	10S02	黒神川
JGKE	08S10	09S04	10S03	地獄河原
UTOE	-	09S05	10S04	宇土
UTKE	-	09S06	10S05	宇土北
KMME	-	09S07	10S06	高免南
KOME	08S11	09S12	10S07	高免
FKRE	08S12	09S08	10S08	ふくら川
WIZE	-	09S09	10S09	割石崎
URAE	08S06	09S10	10S10	浦之前
URNE	-	09S11	10S11	浦之前西
SHRE	08S13	09S13	10S12	白浜
FTME	-	09S14	10S13	二俣
KBNE	08S15	09S15	10S14	かばの
NBYE	-	09S01	-	鍋山
08S14	08S14	-	-	-

Table 1 発破点

MT 連続観測による比抵抗変動観測

相澤広記 (東京大学地震研究所)

Temporal changes in electrical resistivity at Sakurajima and Kirishima volcano from continuous magnetotelluric observations
Koki Aizawa (ERI)

はじめに

比抵抗は流体に敏感な物理量であり、火山活動によってその構造が変化する可能性がある。実際、伊豆大島火山や三宅島火山等では噴火前後に比抵抗変動が検出され、マグマ上昇や熱水系の変化によるものと解釈されている (Yukutake et al., 1990; Zlotnicki et al., 2003)。現在、比抵抗構造を推定するのに最も用いられるのは自然の電磁場変動をソースとする MT 法である。人工的に電流を流す手法に対し、大掛かりな装置が必要なく広域的に比抵抗変動を推定できるという利点がある。ところが、これまで MT 法を火山のモニタリングとして適用した例は報告されておらずその有効性は未知数であった。著者等は 2008 年から、途中中断を挟みつつ桜島で MT 連続観測を行ってきた。2011 年からは霧島、富士山でも同様の観測を進めている。

活動的火山における比抵抗変化シナリオ

上昇してくるマグマは低比抵抗と考えられるが、その体積は山体に対し著しく小さいため、MT 観測で直接的に捕らえることは火口に接近しない限り容易ではない。ところが地下のマグマは上昇中に揮発性成分を周辺に散逸(脱ガス)するという性質があり、さらにガス成分は軽く移動しやすいためマグマ上昇に先行し浅部に到達する (e.g., Hernandez et al., 2001)。このガス成分の移動を比抵抗変動として捉えることにより、より深部のマグマ上昇を間接的に推定できる可能性がある。

桜島における MT 連続観測

2008 年 5 月から 2009 年 7 月にかけて行った MT 連続観測では数週間から数ヵ月続くインピーダンス変化がたびたび検出された。変化の開始は有村観測坑道の水管傾斜計が山上がりを示す時期に一致しており、変化の大きさは見掛け比抵抗で ± 20 パーセント、位相で ± 2 度程度であった。観測が行われたのは黒神地域とハルタ山であるが、両者の変動は逆相関を示し、また変動開始時期には 1 週間程度のタイムラグが存在した。2 次元インバージョンにより変動は海水準付近で起こっていると推定された (Aizawa et al., 2011)。

2010 年 2 月~7 月の期間には昭和火口を取り囲むように 6 観測点を設置し、見掛け比抵抗で ± 20 パーセント、位相で ± 3 度程度の時間変化が捉えられた。前年までの観測と同様に比抵抗変動の極性は必ずしも全観測点で一致しなかった。変動の極性とバックグラウンドの比抵抗構造(神田他, 2008)を比較したところ、もともと海水の侵入等で比抵抗が低い領域と、天水を主成分とする地下水で比抵抗が高い領域では、変動の極性が異なることが示唆された。以上の性質はガスの効果により定性的に説明できる。

MT 連続観測とは別に、桜島温泉水の同位体比分析(ヘリウム、水素-酸素)を行ったところ、マグマ起源のガスが多く含まれるのに対し、マグマ水(安山岩水: Giggerbach et al., 1992) はほとんど含まれていないことが明らかになった。以上の事実と MT 連続観測の結果は桜島地下においてマグマと浅部地下水を結ぶガスの通路が存在することを示唆している。

アクロスによる地下構造の時間変化の抽出の可能性

渡辺俊樹*, 山岡耕春 (名古屋大学)

Possibility of detecting temporal variation in subsurface structure using ACROSS

Toshiki Watanabe*, Koshun Yamaoka (Nagoya Univ.)

1. アクロスとは

アクロス (ACROSS) とは精密制御定常信号システム (Accurately-Controlled Routinely-Operated Signal System) の通称であり、対象物の物理的性質の時間的な変動を長期間にわたり能動的に監視することを目的としたシステムである。

2. アクロスの基礎

アクロスの原理は弾性波・電磁波などの信号の種類によらず共通で、その特徴は、精密に周波数を制御した信号を正確に繰り返し発信することにある。信号処理は離散フーリエ変換の特性を利用して主に周波数領域で行われる。これにより、

- スタッキングにより S/N 比を飛躍的に向上させる
- S/N 比を定量的に評価する
- 複数の信号源を同時に連続稼働させる

といったアクロスの特長が可能となる。

周波数領域では、震源関数 $S(\omega)$ 、地下の応答 (伝達関数) $H(\omega)$ 、観測データ $O(\omega)$ の関係は $O(\omega) = H(\omega)S(\omega)$ で与えられる。震源関数 $S(\omega)$ は既知であるので、デコンボリューションにより伝達関数 $T(\omega)$ を得る。

弾性波アクロス震源には偏心錘を回転させる方式が採用されている。この方式の利点は、正回転/逆回転の信号を合成し、任意の方向の直線加振記録を合成できることであり、テンソル伝達関数を得ることができる。震源装置が 1 台の場合でも、定期的に正回転/逆回転を切り替えて信号を観測することにより直線加振が実現できる。

3. 断層近傍の構造の長期モニタリング (淡路)

兵庫県淡路島の野島断層近傍に設置されたアクロス震源と断層解剖計画によって設置されたボアホール地震計を用いて、地震発生後の断層近傍の構造の時間変化を捉える観測が行われた。

2000 年から 15ヶ月連続運転を実施し、季節変化や降水量に対応した走時の変化を検出した。また、2000 年鳥取県西部地震の地震波の通過に伴う走時変動 (ステップ状の走時遅れとその後のゆっくりとした回復) が観測された (Fig. ??)。走時の変動は S 波で大きいこと、異方性が見られることから、この変動は地震波の通過に伴う圧力変動により、クラック内への地下水の流入

と排出に起因していると解釈された (Ikuta et al., 2002, Ikuta and Yamaoka, 2004)。

その後、2010 年までに短期間の観測を繰り返し実施した。P 波、S 波の走時、振幅、S 波スプリッティング解析による S 波速度異方性には、2000 年以降顕著な変動は観測されず、断層近傍の地下の状態に変化がないと考えられることから、断層活動による断層および周辺の破壊の回復は 2000 年頃までにはほぼ終息したことが示唆された (Kobayashi et al., 2010)。

4. プレート境界反射波の検出とモニタリング (東海)

東海地域において、プレート境界のモニタリングを目指し、土岐 (JAEA)、森町 (気象研)、豊橋 (名大) の弾性波アクロス震源が連続稼働している。各震源の信号は周波数帯域を共有しているが、それぞれの信号分離が可能であることがアレイ観測の結果から確認されている (山崎ほか, 2009)。

4.1 土岐-鳳来の伝達関数のモニタリング

構造モデルを用いた波線計算の結果から、プレート境界で反射した土岐アクロス震源の信号は愛知県新城市付近で観測されることが推定されている。また、反射点は深部低周波微動の震源域にあたる。愛知県新城市にある Hi-net 鳳来、および名古屋大学が設置した地震計アレイ観測のデータを利用してモニタリングを行った (渡辺ほか, 2007)。プレート境界からの反射波をある程度の信頼性を持って検討するためには 3ヶ月間記録をスタックする必要があった。得られた伝達関数の P 波初動付近では相互相関係数、走時、振幅の変動は小さく、地下浅部の影響はそれほど大きくないと考えられた。一方、地殻内深部を伝播したと考えられる後続波に大きな時間変動を示すものが認められた。プレート境界からの反射波と推定された波群では、深部低周波微動の活動時期と対応するような相互相関係数、走時、振幅の変化が認められた (Fig. 2)。プレート境界での状態変化、たとえば流体の移動や固着の変化、を示唆するとも解釈できるが、まだ十分に説明がつけられていない (古川ほか, 2008, 渡辺ほか, 2009)。

4.2 森町震源によるモニタリング

森町は東海地震の想定震源域の直上に位置しており、フィリピン海プレート境界面の変化を監視するには最

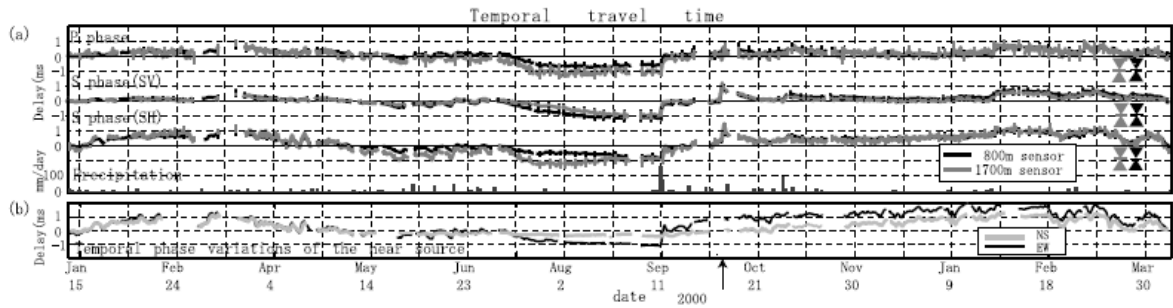


Fig. 1 淡路における伝達関数の P, S 波の走時の時間変化 (Ikuta et al., 2002)

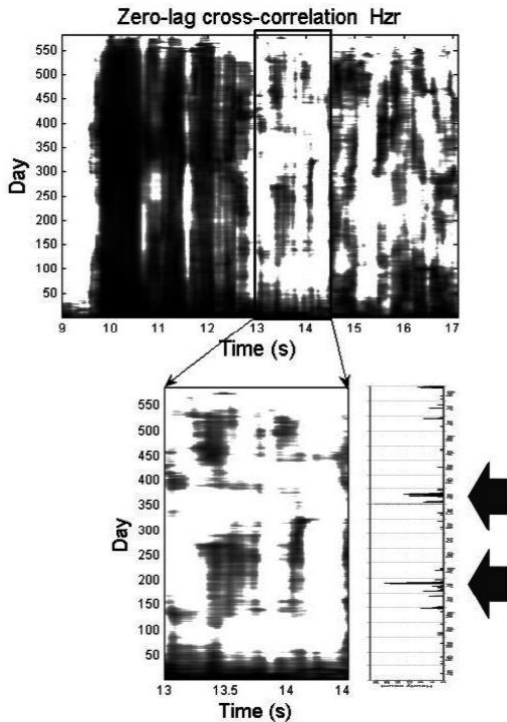


Fig. 2 Hi-net 鳳来における伝達関数 (相互相関係数) の変化と低周波微動活動との比較

適の場所である。2006 年の設置後、数年にわたる周辺の Hi-net 観測記録を解析した結果、伝達関数の各波群の走時変化は (1) 後続相のほうが走時変化量は大きい、(2) 観測点あるいは送信点近傍の降水量に相関のある走時変化が見られる、(3) 観測点あるいは送信点で大きな震動がある (2008 年 8 月駿河湾地震) と走時が変化する、といったことがわかってきた (吉田ほか, 2010)。

また、周辺の観測点では、2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M_W=9.0$) に伴う走時の遅れと回復が観測された (掛川で震度 3) (吉田ほか, 2011)。

4.3 豊橋震源によるモニタリング

豊橋の震源装置は、2001 年～2005 年にかけて発生した東海スロースリップの主要なすべり域の付近に位置している。そこで、豊橋アクロス震源を用いて次に発生する東海スロースリップを連続的にモニタリングすることを目指し、豊橋アクロス信号の検出範囲の評価

とスタック期間を見積もった (鈴木ほか, 2010)。その結果、スタック期間を最長 5ヶ月とした場合、アクロス震源から半径約 40 km 圏内であり、その範囲内に存在する、Hi-net 観測点 17 点のうち、9 観測点をモニタリングに使用できる可能性があることがわかった。

謝辞 生田領野、國友孝洋 (静岡大学)、吉田康宏 (気象研) 始めアクロス関係者および名古屋大学の皆様のご協力を得ました。

参考文献

- Ikuta, R. et al. (2002): Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1627.
- Ikuta, R. and Yamaoka, K. (2004): Temporal variation in the shear wave anisotropy detected using the Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACROSS), *J. Geophys. Res.*, 109, B09305.
- Kobayashi, Y., Watanabe, T., Yamaoka, K., Ikuta, R. and Nishigami, K. (2010): Monitoring of the Nojima Fault structure using Accurately Co,ntrolled Routinely Operated Signal System (ACCROSS), AGU 2010 Fall Meeting.
- 古川俊之, 渡辺俊樹, 羽佐田葉子, 山岡耕春, 生田領野 (2008): Hi-net 鳳来における 17ヶ月アクロス伝達関数に見られる波群の時間変化, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, S226-P012.
- 渡辺俊樹, 生田領野, 相馬知征, 山岡耕春, 藤井直之 (2007): 東海監視に向けた地震波アクロスと小規模地震計アレイによる試験観測, *月刊地球*, 29(8), 475-480.
- 山崎賢志, 渡辺俊樹, 山岡耕春, 中道治久, 羽佐田葉子 (2009): 鳳来アレイ観測による土岐・豊橋・森町に設置された弾性波 ACROSS 信号の解析, *物理探査学会第 121 回学術講演会講演論文集*, 252-255.
- 渡辺俊樹, 山岡耕春, 山崎賢志, 古川俊之, 羽佐田葉子 (2009): 弾性波アクロスを用いた土岐-鳳来間の地震波伝達関数の波群の時間変化, *物理探査学会第 121 回学術講演会講演論文集*, 260-263.
- 吉田康宏, 勝間田明男, 國友孝洋, 熊澤峰夫 (2010): 森町アクロス信号から求めた伝達関数の時間変化, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS018-P14.
- 吉田康宏, 勝間田明男, 國友孝洋, 熊澤峰夫 (2011): 森町アクロス送信信号の準リアルタイム解析, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS034-05.
- 鈴木友理, 渡辺俊樹, 山岡耕春, 國友孝洋, 山崎賢志, 生田領野 (2010): 東海スロースリップの監視を目的とした Hi-net による豊橋 ACROSS 信号の検出範囲の評価, 日本地震学会 2010 年度秋季大会, P3-06.

桜島における ACROSS 観測可能性の検討

○山岡耕春・渡辺俊樹・道下剛史* (名古屋大学) (*現在の所属：気象庁)

Estimation of S/N for ACROSS monitoring in Sakurajima volcano

○Koshun Yamaoka, Toshiki Watanabe and Tsuyoshi Michishita (Nagoya Univ.)

はじめに

ACROSS(精密制御定常震源システム)の実験は、従来淡路島および東海地域で活断層やプレート境界面のモニタリング技術の確立をめざして実施されてきた。しかしながら、物質の移動を伴うことやそれにとまなう変動が大きいことが期待される火山に於けるマグマの移動を検出するために、ACROSS を用いることは十分検討に値することである。数年前より桜島に ACROSS を設置してマグマの動きを捉えるという計画がなされていた。その実現性を評価するため、現有の震源装置を用いた場合に期待される SN 比について検討した。

手法と解析

ACROSS は地下構造の時間変化を地震波信号の変化によって検出することをめざしている。その場合の検出感度は信号の SN 比に依存し、高い SN 比の場合ほど変動の検出分解能は高くなる。桜島には現在愛知県豊橋市にある名古屋大学三河観測所構内に設置してある震源装置の予備を移設することになっている。本研究では、その震源装置を桜島に移設した場合に期待される SN 比について、SN 比の推定方法についての方法論を確立し、2008 年に桜島で実施された人工地震探査の結果を利用して推定することにした。

震源で発生した信号は、観測点までの距離に依存して、幾何学的減衰とエネルギー散逸による内部減衰の影響を考慮する。すなわち r を震源からの距離として、ある周波数帯 ω における震幅 $A(\omega)$ を

$$A(\omega) = a \exp(-br) / r \quad (1)$$

として、震源の強さを示す a と内部減衰による b を求めることにした。

そのためには、現在稼働している震源のデータから a を、また桜島で行われた人工地震探査データから b を推定することとした。

震源の強さ a については、豊橋に設置してあ

る震源と周辺の Hi-net 観測点で得られている記録を (1) 式で近似することで得た。豊橋の震源は 5-15Hz および 10-20Hz の帯域で運転をしているため、それぞれの帯域でフィッティングした。また、参考のために気象研究所が静岡県森町で、3.5-7.5Hz の帯域で運転している震源についても (1) 式でフィッティングを行った。

内部減衰を表す b については、桜島の人工震源の記録の初動から 10 を取り出し、用いる震源と同じ周波数帯域でバンドパスフィルターを書けたときの振幅を、(1) 式でフィッティングすることにより推定した。このようにして現在豊橋で稼働している震源と同じタイプの震源を桜島に設置した場合の振幅を評価することが出来た。

次に、桜島島内のノイズレベルを推定することにより SN 比を見積もることが出来る。島内のノイズレベルについても、2008 年の人工地震探査の結果を用いた、自動車等のノイズが大きいところを除いた、島内の平均的ノイズレベルを推定することが出来た。

結果

これらの結果を総合したのが図 1 である。図は豊橋の震源を 5-15Hz の周波数帯域幅で運転した場合と 10-20Hz で運転した場合の信号強度の距離減衰と、ノイズレベルとの比較である。青線の距離減衰は東海地方で稼働させた場合の距離減衰、赤線は桜島で稼働した場合の距離減衰であり、桜島島内の減衰が大きいことが明らかになっている。ノイズレベルは、スタッキング時間の平方根に逆比例して減少していく。桜島島内の距離減衰と比較すると、遠い場所でも約 1 ヶ月のスタッキングによって信号とノイズレベルが等程度になると想定される。

なお、本年度、科研費の補助を受けて桜島に ACROSS 震源装置を移設することが決まったので、現在移設のための準備を進めている。

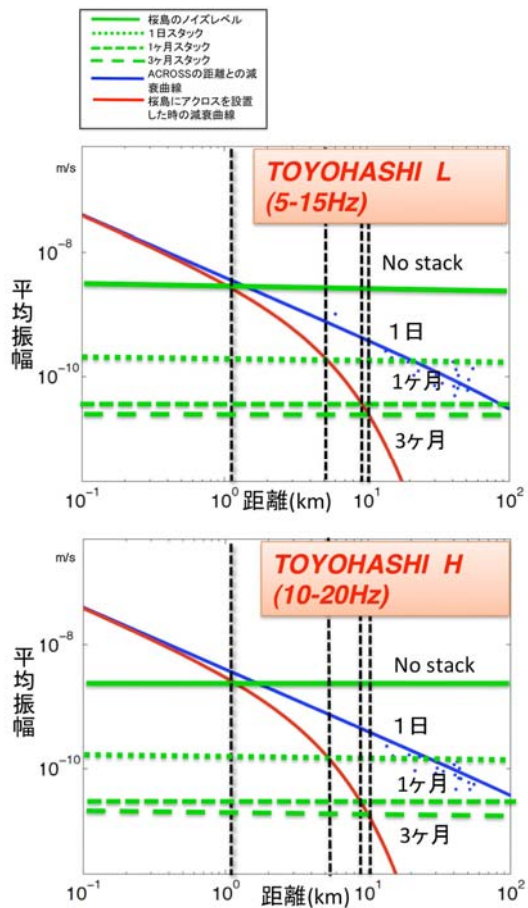


図 1 : 豊橋に設置されている震源と同型の装置を桜島に設置した場合の信号レベルの変化、及びスタッキングによるノイズレベルの減少。

噴火推移予測のためのハイパーハイブリッド重力観測の現状と展望

○大久保修平・田中宏幸・風間卓仁・田中愛幸・今西祐一（東大地震研）

Hyper-hybrid gravity observation for forecasting volcanic activities

○S. Okubo, H. Tanaka, T. Kazama, Y. Tanaka, Y. Imanishi (E.R.I., Univ. Tokyo)

はじめに

地下のマグマ溜まりの膨張・収縮は、火道内のマグマ頭位の上昇・下降を伴うが、その様式は火道の閉塞状況で大きく異なると考えられる。例えば火道が閉じている場合には、マグマ溜まりの増圧・減圧は山体や周囲の地殻を变形させるのに大半が費やされ、火道内のマグマ上昇・下降には大きな抵抗が伴うだろう。一方、開口型火道の場合は、マグマ溜まりの膨張・収縮は、周囲の媒質を变形させる割合が減り、むしろ火道内のマグマの上昇・下降に変換される効率が高くなると考えられる。実際、2009年7月以降の桜島火山をみると、長期にわたる膨大な爆発回数や降灰量に比して、生じている地殻変動はかなり小さく、火道が開いていることをうかがわせる。

このように地殻変動が小さく、その一方で質量（マグマ）が容易に上昇・下降する場合には、その変化が重力の時間変化 $\Delta g(t)$ として現れやすくなる。ただし、実際に重力変化のデータに基づいてマグマ頭位を定量的に推定するには、

- ①火道の形状やその空隙率の推定、
- ②降雨や地下水流動など、火山活動とは無関係な

原因による重力変化の補正

という課題を解決しておくことが不可欠となる。

ハイパー・ハイブリッド重力観測（ステップ1）

上記課題①②は

- (1) 宇宙線を用いた火道の透視、及び
- (2) 降水、蒸発、流動を考慮した陸水の移動の数値シミュレーション

により、達成することができる。これらの支援下で行われる、高精度な絶対重力の連続観測のことを、われわれは「ハイパーハイブリッド重力測定」と称している。

問題を簡単にするために、まず、降雨がほとんどなく、課題②を無視できる2004年9月の噴火を考える。この噴火の場合、9月1日の爆発後、9月13日ごろに溶岩ケーキが山頂火口にできたことから、すくなくとも9月10日前後には、火道は開口状態にあったと考えられる。まず、火道のサイズは浅間山山頂付近の宇宙線透視画像からできる（図1）。火口中央下端部の低密度領域を、空隙率の高い火道として同定すると、その直径は200mと計測される。また、その「みかけ」密度 2.2g/cm^3 から、空隙率が67%と推定される。これらの「計測値」とメルトの

仮定密度 2.45g/cm^3 とから、図2上のモデルに基づいて、重力変化を火道内のマグマ頭位に換算した結果を図2下に示す。

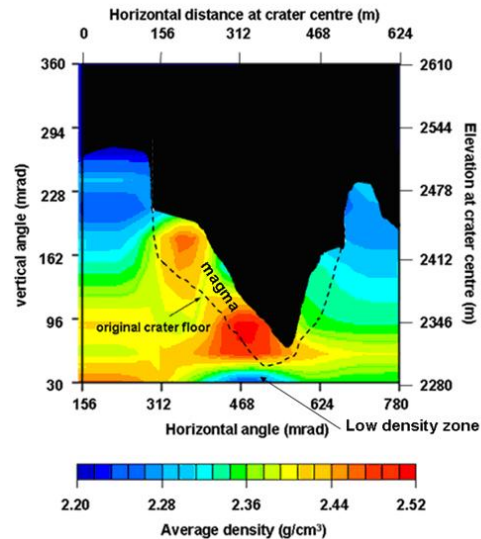


図1. 宇宙線透視画像として得られた、浅間山火口直下のみかけ密度プロファイル (Tanaka et al 2006)。

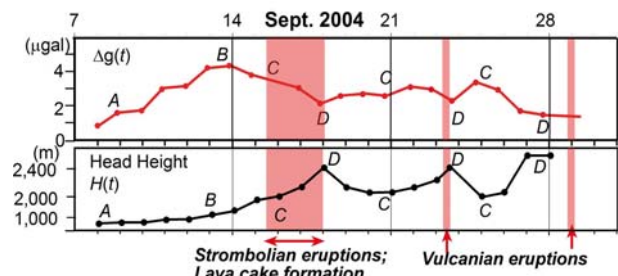
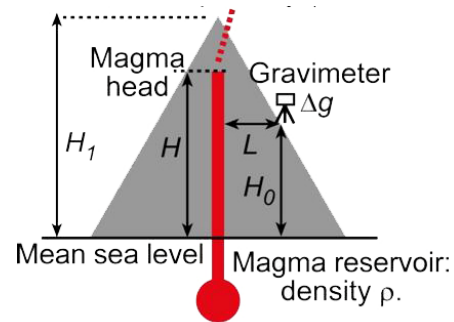


図2. 2004年浅間山噴火のモデル。半径 a の円柱状火道をマグマが昇降するモデル。当初空隙率 ϕ の火道のすきまを、密度 ρ のメルトが上昇・下降するときの重力変化 $g(t)$ から、マグマ頭位 $H(t)$ を求めることができる。

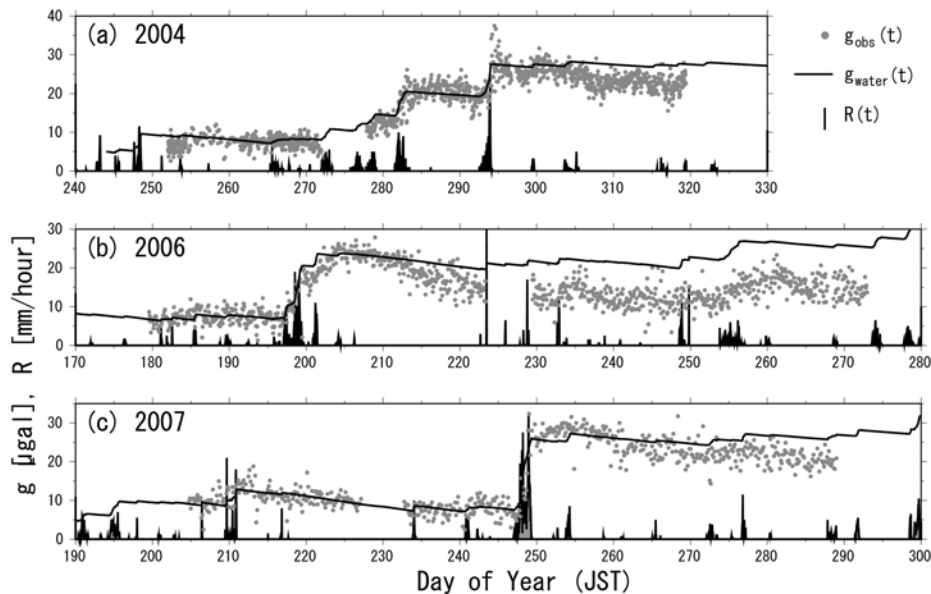


図3 2004年, 2006年, 2007年の浅間火山における絶対重力測定値(ドット)。縦棒は時間降雨量。豪雨時(2004年DOY283, 293; 2006年DOY200; 2007年DOY 248), 重力は10マイクロガルを超えるステップ的な変動を示す。実線は地下水流動モデリングによって見積もられた地下水が及ぼす重力擾乱(Kazama and Okubo 2009)

ハイパー・ハイブリッド重力観測(ステップ2)

次に降雨・地下水等の環境起源の重力擾乱を考える。ひとたび、台風や集中豪雨などで数百mmの累加雨量があるときなどは、10マイクロガルを超える重力擾乱が生じる。前述の2004年浅間噴火においても、10月(DOY283, 295)に2回の台風でそれぞれ約300mmの豪雨を観測し、実際にそれぞれにステップ上の重力変化が生じている(図3)。この重力擾乱を適正に補正することは、長期にわたる火山活動の推移予測を行う上で極めて重要となる。

これまでも、降雨に対する重力変動を経験的な数値モデル(タンクモデル)で補正することがおこなわれてきた。その結果は、一定の成果はあがっているものの、汎用性に欠けているうえに、物理的裏付けに欠けているという難点があった。Kazama and Okubo(2009)では、地表付近の不飽和帯の土壌水分と、それより深部の被圧地下水層の水頭を、陸水移動の方程式から導いている。その結果は図3の実線に示すとおりであり、30日程度より長いタイムスケールでの再現性については課題が残るものの、それより短い短期再現性については満足できる結果が得られている。

桜島火山のハイパー・ハイブリッド重力観測

桜島火山においても、ハイパーハイブリッド観測が行われ、中間的な成果が得られつつある。絶対重力観測は2008年4月以降に連続観測が行われるとともに、宇宙線観測は2009年5月から観測中であり、土壌水分観測も同時に行われている。

まず、地下水層の影響除去の問題では、2010年~2011年の記録が参考になる。2010年6月中旬から7月

下旬の1か月間に、約1000mmもの降雨があり、その結果約20マイクロガルのステップ状の変動が、DOY165-210辺りに生じている(図4)。Kazama and Okuboの方法で地下水補正を施すと、DOY210までは補正がうまくいっているように見えるが、DOY210以降は、地下水補正をしてもしなくても変動パターンに大きな差は認められない。DOY210以降の単調な重力減少が事実なのか、それとも地下水補正に問題が残っているためなのか、調査中である。

一方、宇宙線が桜島火山の山体を通過する時に、透過距離が約4km程度にならざるを得ないため、まだ密度プロファイルを得るには至っていない。

このように、ハイパーハイブリッド重力観測の2本の柱、すなわち①宇宙線による密度プロファイルの取得と、②の地下水が重力変動に及ぼす擾乱の高精度な見積もりは、最終的というよりは現在なお、改良がすすめられているところである。

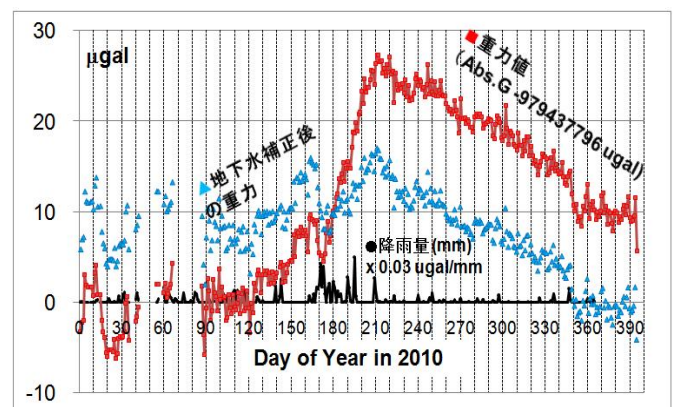


図4 桜島における高品位重力観測。DOY165-195の補正は良好である。

講演では2010年の重力データから導いたマグマ頭位と、爆発・噴火の表面現象とを対比し、活動予測につかえるのか否かを検討する。

活動期の火山における火山ガスモニタリング

森 俊哉・東京大学大学院理学系研究科

Volcanic gas monitoring during the active stage of volcanoes

Toshiya MORI · Graduate School of Science, The University of Tokyo

火山の地下のマグマに溶けている揮発性成分は、マグマが上昇し減圧していく過程で、気泡としてマグマから析出・分離し、火口から火山ガスとして放出される。こうして放出される火山ガスの量や化学組成は、地下でのマグマの温度・圧力などの物理的状況を反映するだけでなく、マグマの量や移動にも大きく影響を受ける。逆に、火山ガスを調べることで、こうした火山地下の様々な現象・状態を推定することが可能である。また、マグマ中の揮発性成分は火山噴火現象に密接にかかわっており、噴火活動を理解するうえで火山ガスの挙動を知ることが有効になる。

火山ガスの測定では、化学組成と放出率に着目する。これらを知るために、いろいろな観測・測定手法が使われている。ひとたび火山活動が活発化すると、火口近傍や噴気孔でのガス採取や測定は危険を伴う。一方、こうした活動的な時にこそ、火山ガス情報が必要となる。このような状況で、火山ガス情報を得るには、離れた所からの測定、遠隔測定が効果的になる。

火山ガス情報の遠隔測定法としては、分光学的手法が一般に用いられる。多くの火山ガス成分は赤外波長域や紫外波長域に吸収帯を持つ。分光学的手法を用いた遠隔測定では、ガス成分による光の吸収を分光計などで測定することにより、火山ガス中に存在するガス種を同定するとともに、そのガス成分の量を測ることができる。赤外分光法を用いた測定では、噴気地帯の高温地表、溶岩流表面や太陽光を赤外光源として使用し、 SO_2 、 HCl 、 HF 、 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 COS 、など多くの火山ガス成分の定量が行われている。桜島でも、太陽光を使い、これまでに SO_2 、 HCl 、 HF の定量が行われている。一方、紫外分光法を用いた測定では、火山ガス成分としては SO_2 しか測定できない。しかし、上層大気で散乱された太陽紫外光を光源として使うことができ、上空のあらゆる方向に光源があるのと同じ状況になるので、その利点を生かし、火山からの SO_2 の放出率を測定するのに使用されている。2000年代に入ってから、手の平サイズの小型紫外分光計を用いて

SO_2 放出率測定がおこなわれている。

火山ガス放出率を求めるには、噴煙断面にある SO_2 量を測定するが、これには、上空の SO_2 量を測定しながら噴煙下を横切ったり、分光計の視野方向を振ることで、噴煙をスキャンして求める。このため、放出率の時間分解能は数分から数十分かかってしまう。最近では、紫外カメラで特定の波長を見ることで、噴煙中の SO_2 分布を可視化測定する技術が開発され、これまで以上の高時間分解能(0.5Hz)で放出率を測定できるようになっただけでなく、噴煙中の SO_2 の挙動も映像としてとらえることができるようになってきた。

これらの分光学的手法を用いることで、活動期の火山であっても、安全な距離から火山ガス組成やガス放出率を測定することが可能であり、火山活動推移のモニタリングに役立っている。近年、いくつかの火山において、火山噴火前の前兆的なガス放出率変動が定量的に測定されるようになってきた(図1)。こうした放出率変動を噴火モデルと結び付けることで、短期的な噴火予測が出来るようになると期待される。

講演では、火山ガスの遠隔測定法、特に赤外分光法を用いた化学組成測定法と、紫外分光法を用いた放出率測定について概説する。また、火山ガス観測データを用いることで、どのような活動予測ができるのかについて、短期予測や長期予測の視点から紹介する。

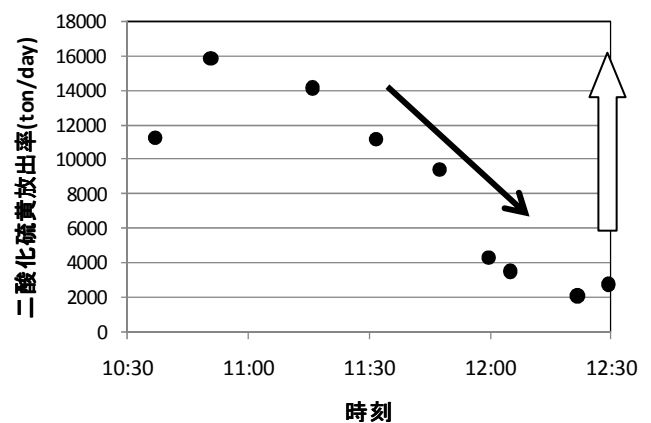


図1. 平成23年2月3日12:18の新燃岳の噴火直前に観測された SO_2 放出率の前兆的減少。右端の白矢印は、噴火噴煙が観測位置上空に到達した時刻を示す。

火山灰付着性成分の時間変化
—噴火準備過程における先行物質である火山ガスとその組成変化—
野上健治（東京工業大学火山流体研究センター）

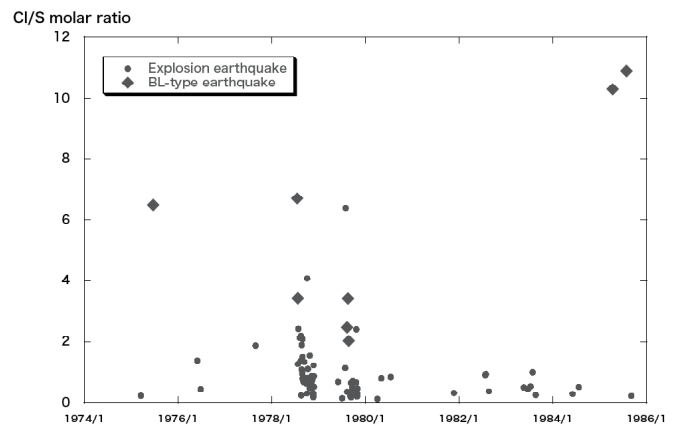
Temporal change in water-soluble components in leachates of ash from Minamidake and Showa craters, Sakurajima volcano
Kenji Nogami (KSVO, VFRC, Tokyo Institute of Technology)

マグマ中には水蒸気を主成分とする揮発性成分が含まれている。マグマが火山体浅部に上昇する過程で圧力が下がると、マグマ中に溶存している揮発性成分が飽和に達し、発泡・脱ガスが起こる。脱ガスした揮発性成分は火山爆発の原動力であり、その挙動が噴火様式に大きな影響を与える。噴火準備過程においては、マグマの上昇に先んじて火山ガスが放出されるため、ガス組成変化はマグマの上昇の指標となりうる。また、噴火時の火山ガス組成を推定し、その組成変化を捉えることは火山活動の推移を予測する上で非常に重要である。

火山灰が放出される際に火山ガス成分が火山灰粒子と反応し、その表面に生成した水溶性の塩類であると考えられる。噴煙中の HCl/SO_2 モル比が同時期に採取された火山灰の水溶性成分の Cl/SO_4 モル比とほぼ一致していることが小坂・小沢（1975）や野上・他（2008）によって明らかにされている。これらの結果は、水溶性成分の組成から火山ガス組成を推定でき、その変化を捉えられることを意味する。

「ストロンボリ式噴火に似た顕著な噴火活動を伴う BL 型地震の群発」の後、「爆発地震を伴うブルカノ式噴火」の発生、「連続微動を伴う連続噴煙活動」へと至るのが閉塞系火道システムだった桜島南岳における典型的な噴火様式の変化である。活動が激化した 1970 年代～1980 年

代に桜島南岳から放出された火山灰の水溶性成分の Cl/SO_4 モル比の変動を図 1 に示す。



比の高い火山灰が放出されていた。これは現在の昭和火口のような開口系となっている火道の深部に揮発性成分に富むマグマが新たに上昇した場合には顕著な地震活動を伴わない噴火が起こるが、Cl/SO₄モル比の上昇によってそれを捉えることは可能であること表している。

2009年以降に昭和火口から放出された火山灰の水溶性成分のCl/SO₄モル比の変動を図2に示す。

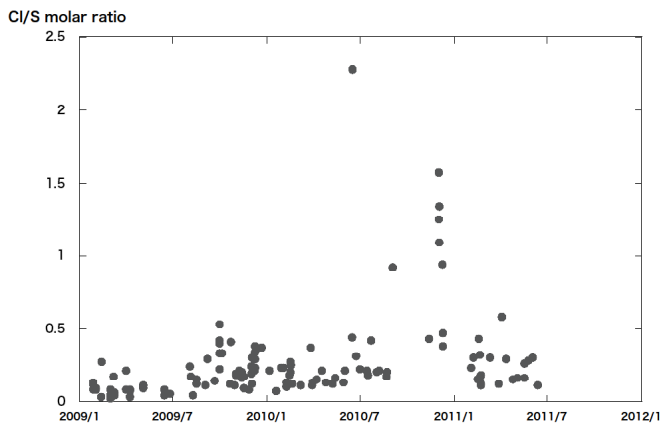


図2 2009年以降に桜島昭和火口から放出された火山灰の水溶性成分のCl/SO₄モル比の変動

この変動から、少なくとも2010年7月および2010年12月末には火道深部への新たなマグマ供給があったものと推察される。

桜島火山の噴火活動様式とマグマ供給系の20世紀からの変化とその意義

松本亜希子*, 中川光弘, 宮坂瑞穂 (北大・院・理)

Change of mode of eruptive activity and the magma plumbing system of Sakurajima Volcano since the 20th century

Akiko Matsumoto, Mitsuhiro Nakagawa, Mizuho Amma-Miyasaka (Hokkaido Univ.)

桜島火山では、1471年の文明噴火、1779年の安永噴火、そして1914年の大正噴火と比較的長期の静穏期を挟んで、プリニー式噴火から溶岩流出の大規模な噴火を繰り返してきた。大正噴火以降は、1946年の昭和噴火で溶岩が流出、1955年から現在までは小～中規模のブルカノ式噴火が頻発している。大正噴火以前は、古記録や堆積物から見ると、1955年以降のようなブルカノ式噴火が頻発した時期があったとは考えにくい。つまり、20世紀になって活動様式が変化し、現在の活動が続いていることになる。この活動様式の変化の原因を明らかにできれば、観測データの解釈や今後の活動予測に役立つと考えられる。我々は、これまでの主要な歴史時代噴火に加え、新たに1955年～2009年までの噴出物の岩石学的検討を行った。その結果、大正噴火から桜島火山のマグマ供給系が変化し、それ以前のマグマ系に新たなマグマが加わったことが明らかになったので報告し、その意味について議論する。

文明および安永噴出物は単斜輝石・斜方輝石デイサイトである。斜長石斑晶コア組成分布はバイモータルであり(図1)、斜長石および輝石斑晶では正累帯・逆累帯構造を示すものが共存する。これらの特徴より、Yanagi et al. (1991)が指摘したように、これら噴出物はマグマ混合の産物であり、デイサイト質マグマと安山岩質マグマが端成分と考えられる。噴出物の全岩化学組成も考慮すると、文明・安永噴火間での端成分マグマの組成変化はないが、安永噴火では安山岩質マグマの混合比が増加している(図2)。大正・昭和噴出物は両輝石デイサイト～安山岩であり、東側の火口からの噴出物には、かんらん石が含まれるようになる。斜長石および輝石斑晶の組成分布は文明・安永噴火と同様に、2端成分マグマ混合の証拠を有する。しかし、共存するかんらん石斑晶は輝石よりもMgに富み、玄武

岩質マグマ由来と考えられる(図1)。つまり、大正・昭和噴出物は、デイサイト+安山岩質の混合マグマに、玄武岩質マグマが混合した3端成分マグマ混合の産物である。これは大正・昭和噴出物と文明・安永噴出物の全岩化学組成の組成トレンドの違いとも調和的である(図2)。更に、1955年～2009年噴出物は、かんらん石斑晶を含むことがある両輝石安山岩であり、大正・昭和噴出物と同じく3端成分マグマ混合の産物である(図2)。即ち、桜島火山のマグマ供給系は、20世紀以前の2端成分マグマ混合から、大正噴火以降の3端成分マグマ混合の系へと変化した。

地球物理学的観測によると、桜島に隣接する始良カルデラ深部にマグマが蓄積され、その一部が桜島深部に移動して噴火に至ることがわかっている。また、桜島周辺では噴火に関連していると考えられる地震も観測されているが、この地震とマグマとの関連はよく理解されていなかった。今回の物質科学的検討の結果、始良カルデラに蓄積されているのは主要なマグマであるデイサイト質マグマで、そこに深部から安山岩質マグマが混合し、その混合マグマが桜島に移動する途中で玄武岩質マグマが貫入、その3端成分マグマが噴火に至る、と解釈される。桜島の深部で観測される地震は玄武岩質マグマの移動に関連しているのかもしれない。

1955年以降の噴火について、噴火の規模と噴出物を比較すると70年代半ばと87年前後の規模の大きな噴火が続いた時に、全岩化学組成がより苦鉄質になる相関が認められる(図3)。つまり3つの端成分マグマのうち玄武岩質マグマの割合が増加したときに、噴火の規模が拡大している。このことは大正噴火と昭和噴火の場合も同じで、特に大正噴火では噴出物中の玄武岩質マグマの比率が高い。これらのことを考慮すると、20世紀になって頻繁に噴火を繰り返すようになったのは、玄武岩質マグマ

が頻繁に上昇し、デイサイト+安山岩質の混合マグマに貫入していることが原因であると考えられる。20世紀以前には玄武岩質マグマの貫入は無かった、あるいは顕著ではないために、桜島直下に十分なマグマが蓄積されてから大規模な噴火に至った。一方、20世紀からは玄武岩質マグマの貫入が

頻繁に起こるため、桜島直下にマグマが十分に蓄積する前に噴火が起こっていると考えられる。今後の桜島の活動推移を予測するためには、始良カルデラから桜島直下へのマグマの移動だけではなく、玄武岩質マグマの移動にも注意を払う必要がある。

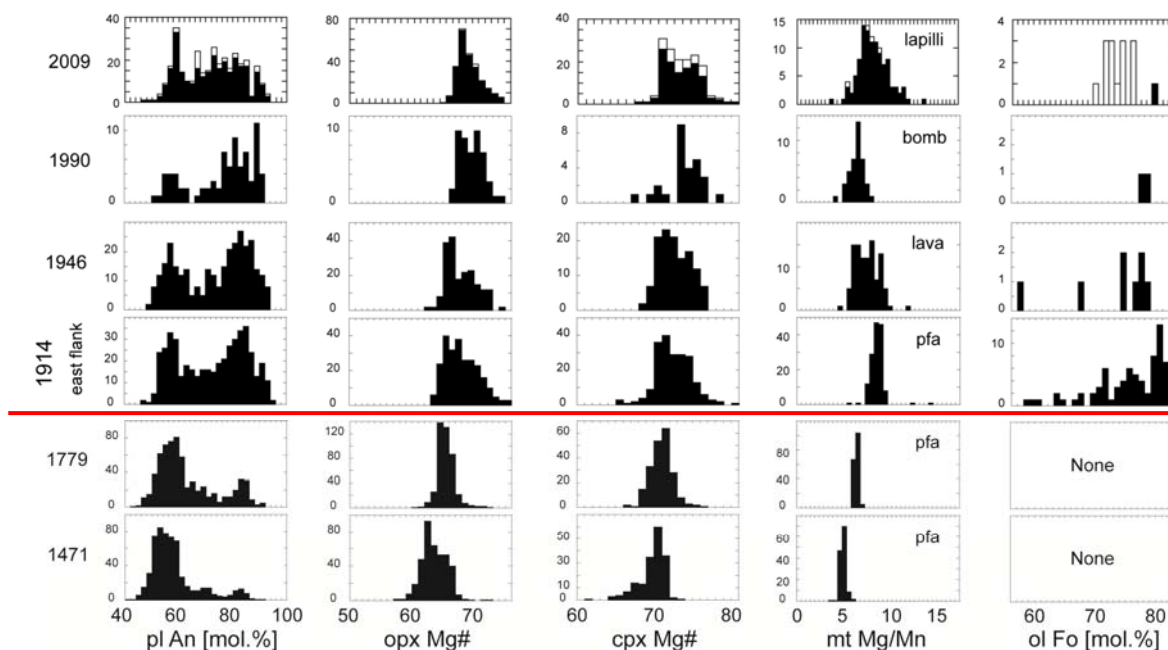
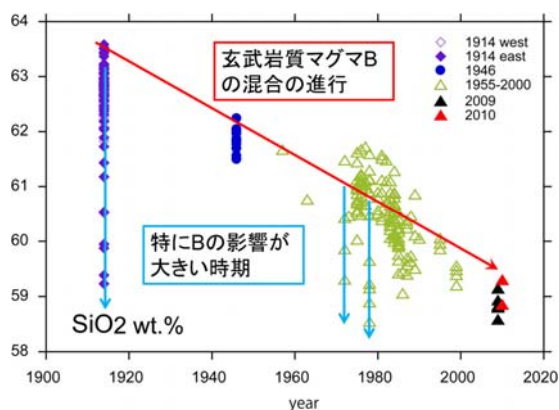
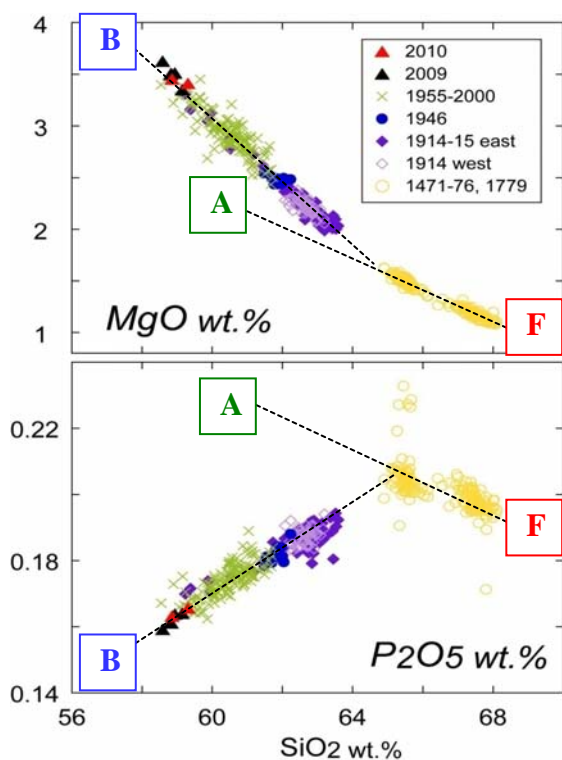


図1. 斑晶鉱物コア組成ヒストグラム。斜長石はバイモーダルな組成分布を示す。大正噴火以降、かんらん石が認められ、共存する輝石斑晶と非平衡な高Fo(≒Mg)値を示す。



↑図3. 全岩化学組成SiO₂量時間変化図。1955年以降の噴出物は全体的に時間とともに苦鉄質になるが、噴火の激しい時期により苦鉄質なマグマを噴出している

←図2. 全岩化学組成ハーカー図。文政・安永噴出物と大正噴火以降の噴出物で組成トレンドが異なり、20世紀からの玄武岩質マグマの寄与が示唆される。

降下火山灰の自動採取によるモニタリング手法の開発

嶋野岳人^{*}・西村太志^{**}・横尾亮彦^{***,****}・井口正人^{***}・味喜大介^{***}

^{*} 富士常葉大学大学院環境防災研究科, ^{**} 東北大学理学研究科, ^{***} 京都大学防災研究所, ^{****} 現所属: 京都大学大学院理学研究科

Development of Monitoring method by Automatic Ashfall Sampling

Taketo SHIMANO^{*}, Takeshi NISHIMURA^{**}, Akihiko YOKOO^{***,****}, Masato IGUCHI^{***} and Daisuke MIKI^{***}

^{*}Fuji Tokoha Univ., ^{**}Graduate school of Sci., Tohoku Univ., ^{**}DPRI, Kyoto Univ., ^{***}Present address: Aso Volcanological Lab., Kyoto Univ..

はじめに

我が国は第一級の火山国である。歴史時代にもたびたび規模の大きい噴火をしているが、その一方で、これらの噴火の間には、さまざまな火山で休止期を挟みつつ断続的に火山灰放出活動を行ってきた(浅間, 阿蘇, 桜島など)。このような小規模噴火から大規模噴火への移行過程の理解は、噴火開始過程の理解および予測(いわゆる予知)と同様に、必須の課題である。さらに言えば、桜島で2006年に58年ぶりに活発化した昭和火口の活動や霧島で活発化した新燃岳の活動については、過去の大噴火と同様の経緯を辿っており、今後、いわゆる百年ないしそれ以上に一度といわれる頻度の活動に対して的確に対処するためには、数年の時間スケールでの将来予測が、これまでに比べて高い時間分解能が必要となっていると言えよう。

そのための手法として、われわれは自動火山灰採取システムを確立し、桜島において約3年間の降下火山灰の連続採取に成功した(現在も継続中)。噴出物の連続観測をいち早く活動予測につなげるためには、噴火現象の本質を捉えつつも、より迅速にデータ提供ができる簡便な手法を用いることが望ましい。われわれはこれまでいくつかの火山活動指標について検討してきた(嶋野ほか, 2008, 2010など)。また、これらの火山灰試料の石基ガラス組成や鉱物組成等の多角的かつ詳細な解析は噴火推移のメカニズムを理解する上で重要であり、現在進行中である。本講演では、これまでに得られた成果について報告を行うとともに、今後の展望について述べたい。

解析に用いた試料は、桜島火山南麓の有村観測点において、われわれの開発した自動火山灰採取装置により、2008年2月14日から24時間間隔で採取した。試料調整は、実験室において乾燥後、篩い分け、秤量を行った。簡便性を優先して目開き1mmのみの篩い分けを行い、粒径が1mm以上および未満の粒子の重量をそれぞれ測定した。石基ガラスの化学組成については東京大学地震研究所のEPMA(分析電子顕微鏡)により分析を行った。分析数は粒子の構成や結晶度によって測定可能数が変動したが、概ね毎日数粒から20粒程度である。

採取火山灰量

これまで約3年間の有村観測点における降灰量(図1; 乾燥重量)は、概ね加速的な増加を経て減速的な増加の傾向にある。すなわち、2008年2月から約1年間の降灰率に対し、2009年2月から同年11月にはその5倍程度、2009年11月から2010年1月には更にその10倍程度の降灰率となり、2010年3月以降はそれまでの半分、5月以降は更にその5分の1程度で推移している。この結果は、有村観測点のみのものであり、一般的には、同一の噴火であっても風向きや火口からの距離によって、観測点毎に異なる結果になることが期待される。実際、短期間で見れば、本研究の結果は月別総降灰量(鹿児島県)とは異なる変化パターンを示しており、桜島上空の卓越風や有村観測点特有の地形条件などの影響を受けていることが伺える。しかし、年スケールで見れば、調和的な結果となっており、長期的な総降灰量に対する風向等の影響が小さかったことがわかる。本手法による観測はまだ3年間のものであるため一般性を議論する段階にはないが、今後同様の傾向が恒常的であることが示されれば、有村観測点での観測結果から年単位程度の総降灰量推定が可能であろう。

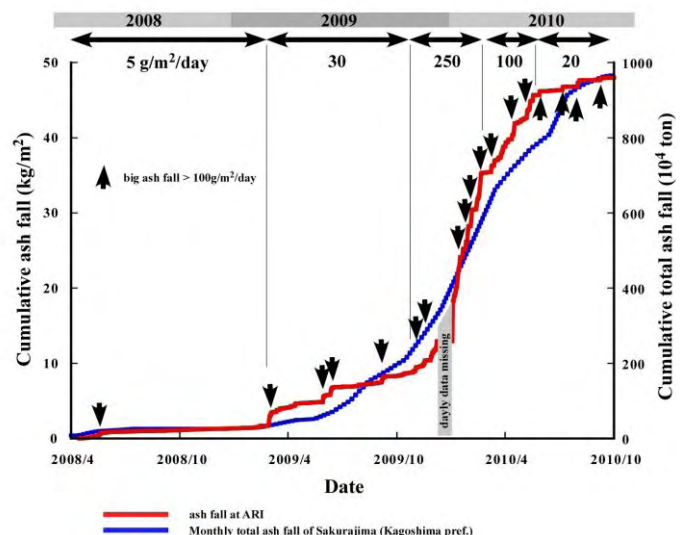


図1 自動火山灰採取装置による桜島有村観測点での積算降灰量

赤線が本研究による有村観測点での1m²当たりの積算降灰量(2008年2月から起算)。矢印は比較的大きい噴火を示している。青線は鹿児島県による桜島全体での月毎の降灰量報告から計算した総積算降灰量(同)。たった1地点の降灰量推移であるが、比較的全体をよく反映している。

活動指標と火山灰粒子粒径

採取試料のうち、粒径1mm未満の粒子の割合は、多くの試料で90%以上(P-type)となったが、山麓に多量の礫が降下した2009年11月17日や軽石噴出が報告されている2010年1月15日以降十数日間の噴出物など、同程度の降灰量でも90%を大幅に下回る試料も認められた(M-type)(図2)。火砕堆積物を構成する粒子のサイズ分布については、古くから解析が行われている。たとえばWalker(1973)やこれに続く一連の研究(Wright et al., 1980など)では、噴火様式の違いが堆積物の分布面積と堆積物を構成する細粒物質の割合によって対応づけられ(F-D図)、地下水の関与が少なく高温のマグマの噴出する「マグマ噴火」に対し、やや冷却の進んだ「ブルカノ式噴火」と地下水の関与が大きい「マグマ水蒸気噴火」を識別している。図2は縦・横軸ともWalker(1973)らの値とは定義が異なり、更に降灰量への噴出時の風向変化などの影響を考慮すると、そのままF-D図と比較することはできないが、上記の2つのタイプの存在は、この図がF-D図と同様に噴火様式を定量的に判定する指標として役立つ可能性があることを示しており、今後もより幅広い活動について継続的に解析を行っていききたい。

活発化と火山灰の石基ガラスの組成変化

火山灰粒子には深部でマグマに既に含まれていた斑晶と、地下浅部を上昇中に結晶化した微結晶が含まれている。また、噴出するまで結晶化せずに残った液体部分は石基ガラスとして固結し、この石基ガラス組成はマグマの上昇中に起こった結晶化の度合いを反映して変化することが知られている。図3は2009年2月から翌年2月の一年間に噴出した火山灰の石基ガラス組成を示している。左上がりの変化傾向は実際に火山灰に含まれる斜長石や輝石等の微結晶の増加と同期しており、マグマの結晶化の進行を示していると解釈ができる。また、ある程度のばらつきを持ちつつ、2本の左上がりの曲線上に組成が集中しており、2009年前半までは下の曲線の低結晶度側(右下)に集中していたが、次第に結晶度が上がり、2009年9月頃から上の曲線の高結晶度側(左上)、さらに2010年に入ってその低結晶度側に集中していった。このことは、主として2種類のマグマがあり、それらが時期によって異なる割合で上昇してきていることを示している。これらの変化は、概ね伸縮計等で観測されている山体の膨張・収縮と同期しており、マグマの地下深部から浅部への新たな注入等をとらえている可能性がある。今後、このような僅かな化学組成変化を捉えることにより、噴火活動の活発化を予め予測することができるかどうか、検討を進めたい。

今後の展望

以上で示した結果は、長期間続く桜島の活動のごく一時期のものであり、ここで示した解釈もあくまでも予察的な

ものである。今後、上記の観測・解析を進めると同時に、火口・噴煙映像記録(横尾ほか, 2010)やその他の地球物理学的時系列データとの比較により、より多角的に検証し、噴火様式の違いやその時間変化を生むメカニズムの理解につなげたい。一方、桜島火山以外においても、霧島新燃岳、諏訪之瀬島でも観測を開始しており(前者は中断中)、様々な火山について比較を行って、噴火推移のメカニズムの理解、さらには噴火推移予測につなげていきたい。

謝辞

本研究で行った桜島での降下火山灰の採取は、京都大学防災研究所附属火山活動研究センター職員諸氏による支援を受けて実施した。自動火山灰採取装置の立案・設計・作製から故障対応までの全般については、東北大学理学部技術部の方々のお力添えによるところが極めて大きい。また、石基ガラス組成分析においては、東京大学地震研究所の方々にお世話になった。以上の方々に厚く感謝いたします。

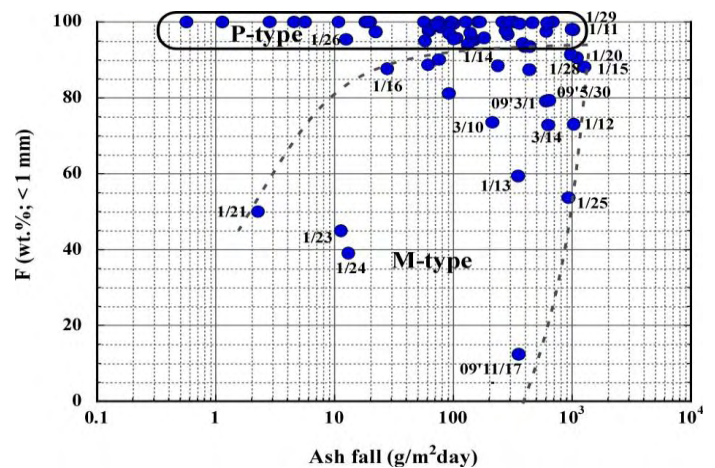


図2 桜島昭和火口噴出火山灰の有村観測点における日別降灰量と1mmより細かい粒子の割合を示すF値(数値は試料採取日を示している;2009年2月から翌年1月) 図の上部にある点ほど細粒物質が多いことを意味する。比較的規模は小さく噴火頻度の高い噴火でP-typeとなるのに対して、規模が大きい、あるいは熱いマグマが噴出していると考えられる噴火でM-typeとなっている。

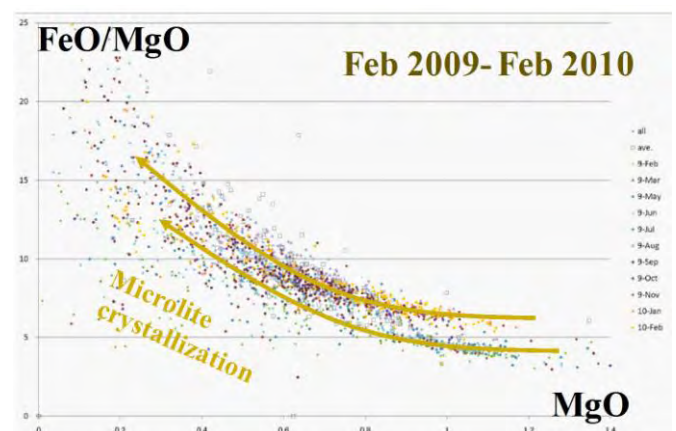


図3 火山灰粒子中の火山ガラスの化学組成

各点は火山灰粒子毎の化学組成。月毎に組成幅を持ったクラスターを形成している。全体として左上がりの2つの曲線状に並ぶ点はいずれもマグマの地下浅部での結晶化を示し(矢印)、曲線が2本になることは2種類のマグマの関与を示している。