

AIST12-K00007

地質調査総合センター研究資料集, no. 573
Open-File Report of Geological Survey of Japan, no. 573

独立行政法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター 第20回シンポジウム

地質学は火山噴火の推移予測にどう貢献するか

平成 25 年 1 月 22 日 (火)

秋葉原ダイビル コンベンションホール

主催

独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

後援

一般社団法人 全国地質調査業協会連合会

地質学は火山噴火の推移予測にどう貢献するか

開催趣旨

産総研では、多様な噴火現象を理解しその活動推移を予測するために、地質学的・物質科学的な調査・研究を行い、噴火履歴の把握とそれを引き起こしたマグマ活動機構の理解を進めている。本シンポジウムでは、火山噴火推移予測への地質学・物質科学の貢献について、産と官の立場からご講演頂くとともに、産総研で行われている最新の研究成果を紹介し、火山国日本において「安全で安心な社会を構築」するための研究のあり方について議論する。

開催日 平成25年1月22日（火） 13:15～18:00

会場 秋葉原ダイビル コンベンションホール
(東京都千代田区外神田 1-18-13 <http://www.akibahall.jp/>)

主催 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

後援 一般社団法人 全国地質調査業協会連合会

プログラム

司会 風早 康平

- 13:15 開 会
- 13:15-13:20 開会挨拶
佃 栄吉 (産業技術総合研究所 理事・地質分野研究統括)
- 13:20-13:30 本シンポジウムの趣旨と構成
篠原 宏志 (地質情報研究部門 マグマ活動研究グループ長)

【基調講演】

- 13:30-14:00 産業界から見た火山災害軽減への地質学的新手法 -レーザ計測と赤色立体地図-
千葉 達朗 (アジア航測株式会社 技師長)

【産総研における研究成果1 国内事例】

- 14:00-14:25 富士火山における噴火の特性と想定される噴火災害
山元 孝広 (地質情報研究部門 主幹研究員)
- 14:25-14:50 伊豆大島の噴火シナリオ高度化に向けて
川辺 禎久・石塚 治 (地質情報研究部門 火山活動研究グループ)

- 14:50-15:45 【ポスター発表 コアタイム】

司会 篠原 宏志

【提言講演】

- 15:45-16:15 火山活動予測に地質学など物質科学的手法が果たす役割と期待
山里 平 (気象庁地震火山部 火山課長)

【産総研における研究成果2 新手法と海外事例】

- 16:15-16:40 感度法による K-Ar 年代測定システムの高度化
山崎 誠子・松本 哲一 (地質情報研究部門 火山活動研究グループ)
- 16:40-17:05 岩石学的手法による噴火研究 -霧島火山新燃岳を例として-
斎藤 元治 (地質情報研究部門 マグマ活動研究グループ)
- 17:05-17:30 過去 1000 年間に3回も巨大噴火が起こったインドネシアから学ぶこと
高田 亮 (マグマ活動研究グループ)・古川 竜太 (火山活動研究グループ)

- 17:30-17:55 全体質疑

- 17:55-18:00 閉会挨拶
牧野 雅彦 (地質情報研究部門 部門長)

【ポスター発表】

- P01 火山噴火緊急減災対策における地質情報の活用
吉田 真也・近藤 玲次 (一般財団法人 砂防・地すべり技術センター)
- P02 地質学的アプローチによるリアルタイムの噴火観測
田島 靖久 (日本工営株式会社)
- P03 桜島昭和火道直下の脱ガスと噴火プロセス
宮城 磯治 (地質情報研究部門 長期変動研究グループ)・ほか
- P04 物理探査および数値シミュレーション計算を活用した火山防災対策への適用例について
鴨志田 毅・大坪 隆三 (株式会社 地圏総合コンサルタント)
- P05 繰り返し空中磁気探査による火山活動推移評価の研究 - 有珠火山を例として -
大熊 茂雄 (地質情報研究部門 地球物理研究グループ)・ほか
- P06 火山灰粒子の岩石学的特徴から見た火山噴火様式とその推移の予測
大石 雅之 (地質情報研究部門 マグマ活動研究グループ)・ほか
- P07 日本の火山第3版
中野 俊 (地質情報研究部門 火山活動研究グループ)・ほか
- P08 日本の第四紀火山岩体・貫入岩体データベース
西来 邦章 (地質情報研究部門 長期変動研究グループ)・ほか
- P09 InSAR 解析の火山地域への適用
田中 明子 (地質情報研究部門 マグマ活動研究グループ)
- P10 地球物理的手法による活動的火山のリアルタイムモニタリング
松島 喜雄 (地質情報研究部門 マグマ活動研究グループ)・ほか
- P11 活火山の最新地質図 - 諏訪之瀬島・桜島(第2版)・榛名山 -
下司 信夫 (地質情報研究部門 火山活動研究グループ)・ほか
- P12 地殻下部起源の火山性熱水流体の特徴と分布
風早 康平 (地質情報研究部門 深部流体研究グループ)・ほか
- P13 浅間火山における SO₂ 放出率の変動と火山活動の関係
大和田 道子 (地質情報研究部門 深部流体研究グループ)・ほか
- P14 火山衛星画像データベース
浦井 稔 (地質調査情報センター 地質・衛星情報整備企画室)
- P15 衛星画像を用いた噴火履歴の高分解能把握
阪上 雅之・向山 栄 (国際航業株式会社)
- P16 インドネシア, リンジャニ火山の13世紀カルデラ形成噴火
古川 竜太 (地質情報研究部門 火山活動研究グループ)・ほか
- P17 レーザ計測赤色立体地図を使用した火山地形判読と地質調査の事例
千葉 達朗 (アジア航測株式会社)・ほか
- P18 火山噴火に起因した土砂災害の予測技術の現状と課題
山越 隆雄 (独立行政法人 土木研究所)
- P19 火山ガス観測手法の進展
篠原 宏志 (地質情報研究部門 マグマ活動研究グループ)

目次

【講演】

産業界から見た火山災害軽減への地質学的新手法 -レーザ計測と赤色立体地図-	1
富士火山における噴火の特性と想定される噴火災害	5
伊豆大島の噴火シナリオ高度化に向けて	7
火山活動予測に地質学など物質科学的手法が果たす役割と期待	11
感度法による K-Ar 年代測定システムの高度化	15
岩石学的手法による噴火研究 -霧島火山新燃岳を例として-	19
過去 1000 年間に 3 回も巨大噴火が起こったインドネシアから学ぶこと	23

【ポスター】

P01 火山噴火緊急減災対策における地質情報の活用	28
P03 桜島昭和火道直下の脱ガスと噴火プロセス	29
P05 繰り返し空中磁気探査による火山活動推移評価の研究 - 有珠火山を例として-	30
P06 火山灰粒子の岩石学的特徴から見た火山噴火様式とその推移の予測	31
P07 日本の火山 第3版	32
P08 日本の第四紀火山岩体・貫入岩体データベース	33
P09 InSAR 解析の火山地域への適用	34
P10 地球物理的手法による活動的火山のリアルタイムモニタリング	35
P11 活火山の最新地質図 - 諏訪之瀬島・桜島(第2版)・榛名山 -	36
P12 地殻下部起源の火山性熱水流体の特徴と分布	38
P13 浅間火山における SO ₂ 放出率の変動と火山活動の関係	39
P14 火山衛星画像データベース	40
P15 衛星画像を用いた噴火履歴の高分解能把握	41
P16 インドネシア, リンジャニ火山の 13 世紀カルデラ形成噴火	42
P17 レーザ計測赤色立体地図を使用した火山地形判読と地質調査の事例	43
P19 火山ガス観測手法の進展	44

産業界から見た火山災害軽減への地質学的新手法

ーレーザ計測と赤色立体地図ー

千葉達朗（アジア航測株式会社・総合研究所）

1. はじめに

火山地質調査にとって地形図は、現在位置の確認や記載のための補助的なものであった。ところが、最近レーザ計測技術の進歩により、地質調査の手法が大きく変わりつつある。レーザ計測から作成した詳細な地形画像から地質を推定し、現地調査で確認しながら調査するという流れである。

レーザ計測は、上空を飛行する航空機からレーザパルスを地表に向けて発射し、往復時間、飛行機の位置や姿勢情報を元に、地表面の高さを精密に計測する測量法である（図1）。統計処理によって、樹木データを排除できるので、詳細な（たとえば1mや50cmメッシュ）微地形情報を取得可能である。

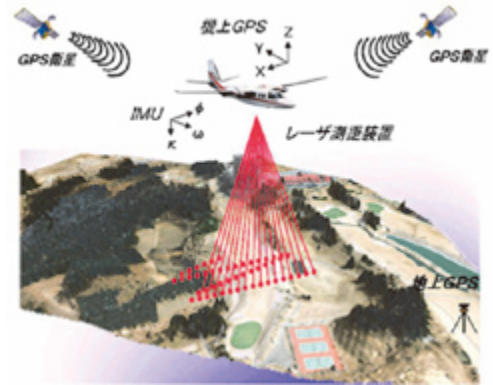


図1 航空レーザ計測のイメージ

ここでは、詳細地形データを可視化する「赤色立体地図」手法の概要と特徴を述べ、それをを用いて、火山

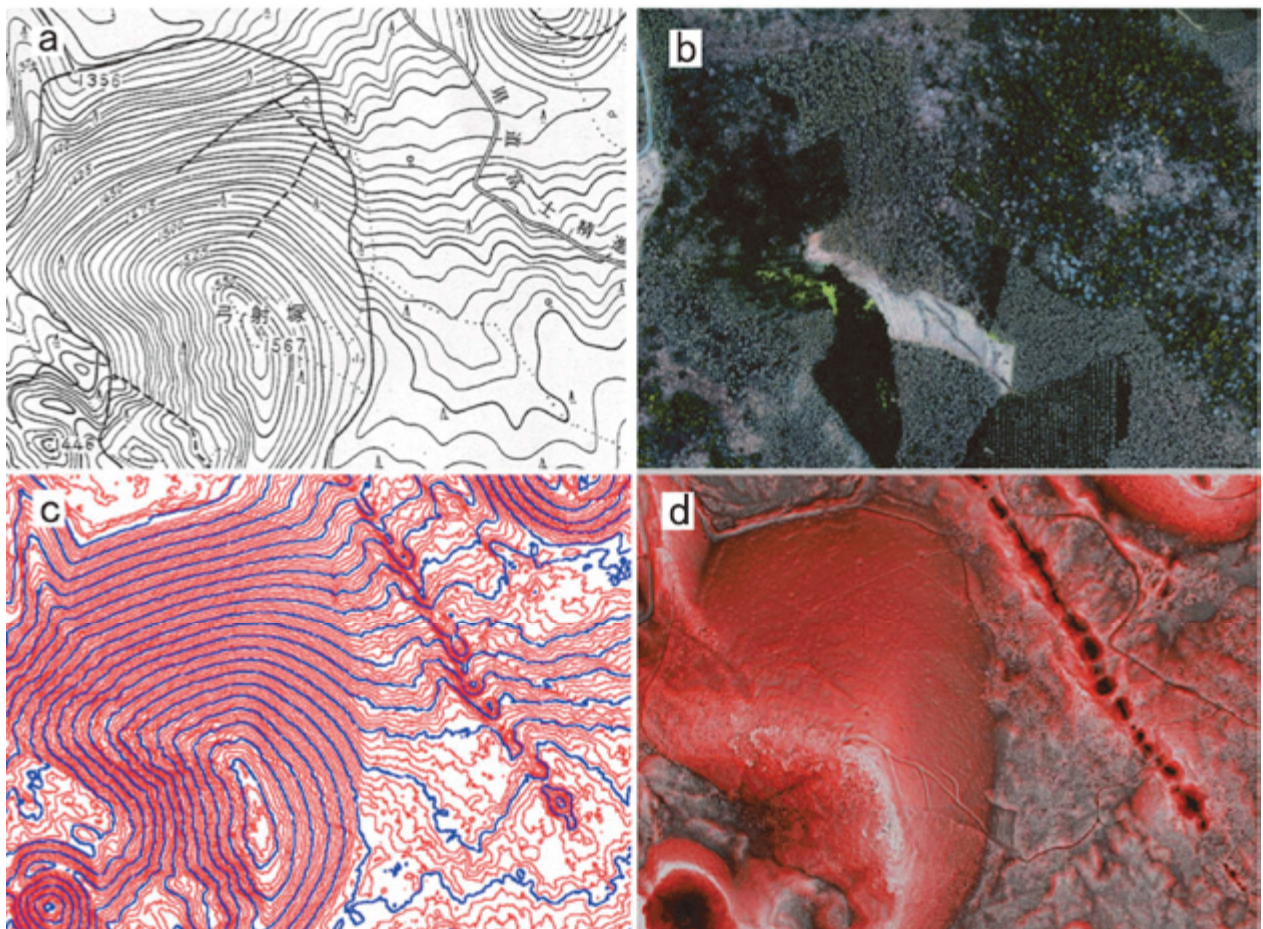


図2 富士山弓射塚付近の地形の表現法比較（千葉ほか，2007a）

a:航空写真測量図化による等高線図（氷穴火口表現なし） b:航空写真（オルソフォト） c:航空レーザ計測（1mDEM）による等高線図（氷穴火口見える） d:航空レーザ計測による赤色立体地図（氷穴火口列と登山道も見える）

地質の調査や災害軽減に活用する事例を紹介したい。

2. 青木ヶ原樹海

富士山の北西山麓にある木ヶ原樹海は、今から約1100年前の平安時代に流出した青木ヶ原溶岩流の上に樹林が発達した地域である(図2)。その噴出量は $1.3 \pm 0.2 \text{ km}^3$ に達し、溶岩表面には、溶岩じわや亀裂が発達して非常に複雑な形状をしている。しかし航空写真からは樹海(図3)の微地形は、ほとんどわからない。空中写真測量は、2枚の写真に同じものが写っていて、はじめて高さを計測できる手法である。樹木の下にある光が届かない、小火口や溶岩トンネルの位置や深さを計測することは、さらに困難であった(図2a)。

2002年5月、国土交通省富士砂防事務所は、青木ヶ原溶岩の航空レーザ計測を実施した。等高線間隔1m、縮尺1/2500の等高線図で、火口は見事に表現できていた。しかし、溶岩表面の微妙な凹凸は等高線ではわかりにくいものだった(図2c)。



図3 青木ヶ原樹海内部の状況

私は、この等高線図を使用して地質調査を担当する機会があったが、この図での調査は困難と思われた。そこで、「等高線を使用しない地形表現法」を急遽、開発するべく、1mメッシュのDEMデータをもとに、様々なフィルタ計算と色合成の試行錯誤を行い、できたのが「赤色立体地図」であった(図2d)。

現地調査に使用したところ、高さ数m程度の微妙な地形的な特徴が把握でき、周囲を10mほど見通せれば、現在位置の確認が可能であった(図4)。赤色立体地

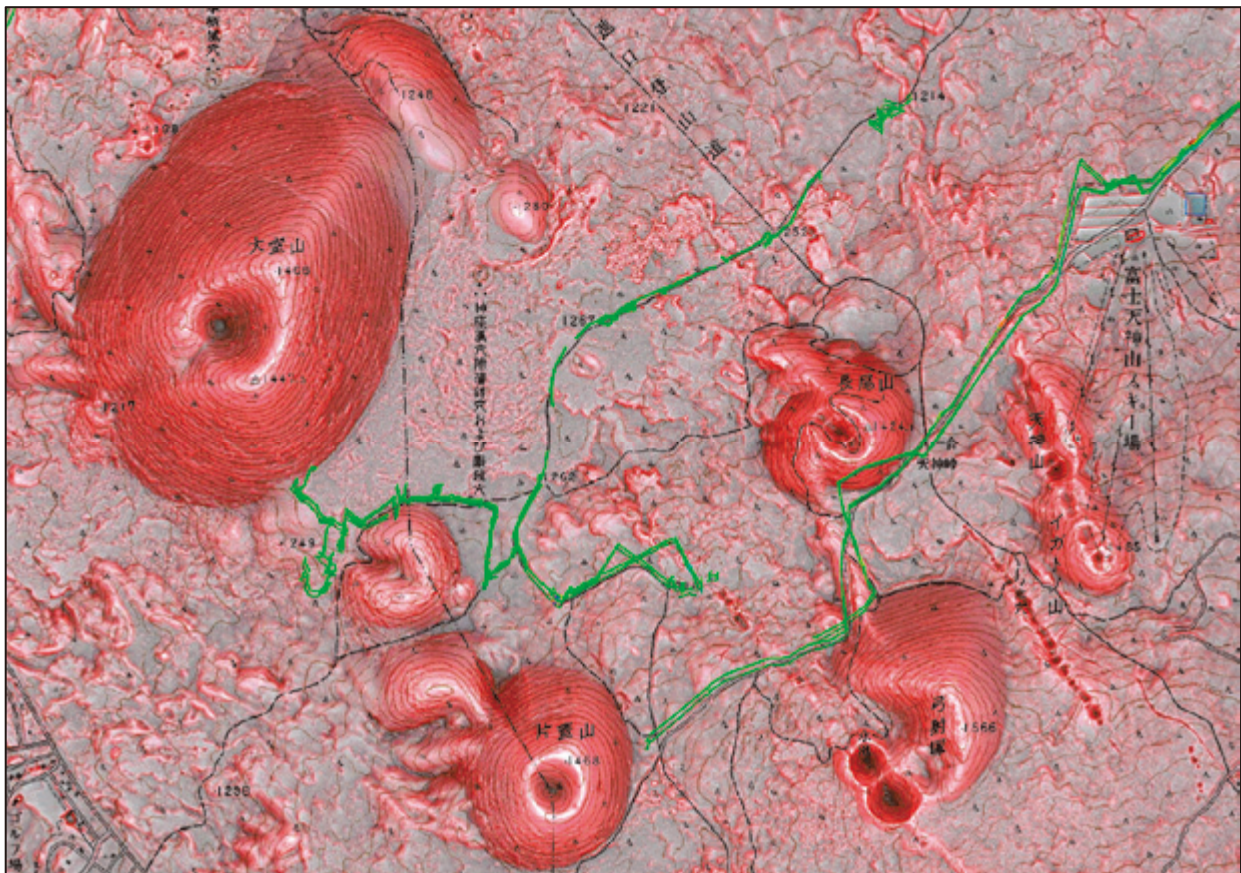


図4 大室山付近の地質調査状況 (千葉ほか, 2007a に加筆)

国土地理院の1/2.5万地形図と1mメッシュの赤色立体地図を重ねた。複数ある丸い赤色の盛り上がり見える地形は富士山の側火山、青木ヶ原溶岩流は隙間を流れている。緑色の線：現地調査時のGPSのトラックデータ

図を利用することで、航空レーザ計測の成果を余すことなく活用した現地調査が可能となり、青木ヶ原溶岩流についてさまざまな成果を上げることができた（千葉ほか、2007a, 2010）。

3. 既往地形表現と赤色立体地図

(1) 既往表現手法

地形表現手法の比較解説のために、北海道有珠山の四十三山付近のレーザ計測結果を使用する。

まず、等高線図では、凹凸が複雑に分布する火口付近の形状が、きわめてわかりにくい（図5）。

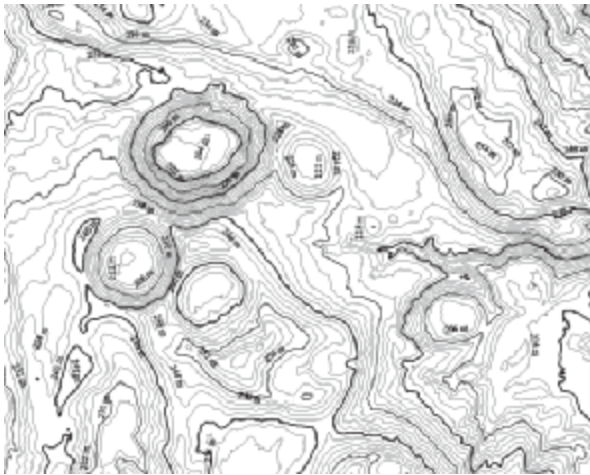


図5 等高線図

立体感を強調したいときに、最もよく使用されるのは陰影図である。しかし、凹凸が複雑に入り組む場合、火口の凹部が浮き上がって見えたり、光源の方向によって印象が変化する。この方向依存性のため、複雑な地形の表現には、複数の陰影図が必要となったり、現地調査に混乱を生じることがある（図6）。

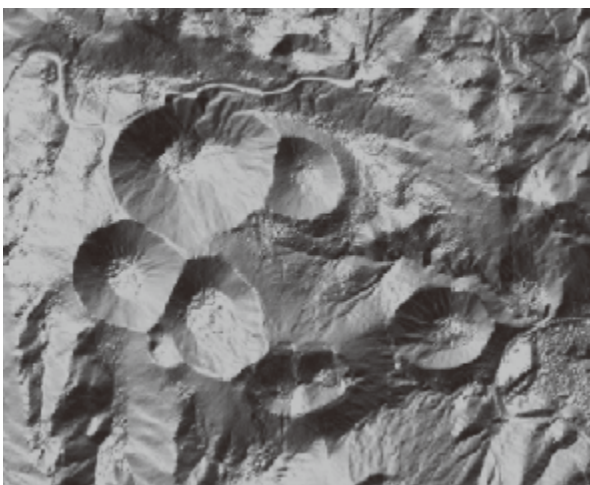


図6 北西光源陰影図

急斜面ほど暗く表現した斜度図は、陰影図のような方向依存性はないが、凹凸の区別がつかない（図7）。

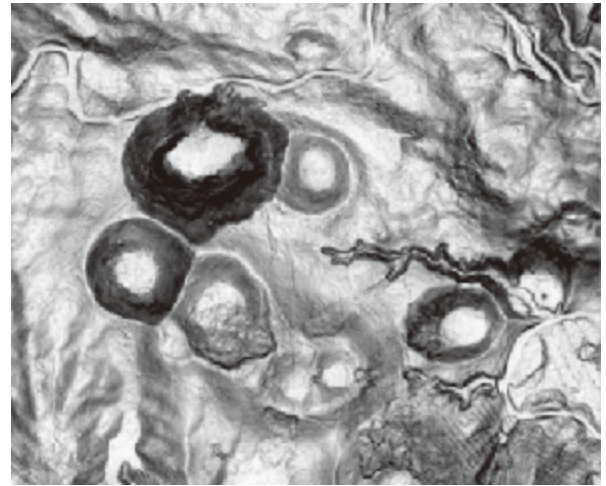


図7 斜度図

地上開度と地下開度（横山ほか、1999）には、方向依存性がない凹凸感がある。しかし、地上開度は凸部、地下開度は凹部の表現力があり、両方見るには2枚の図が必要となる点が問題である（図8,9）。

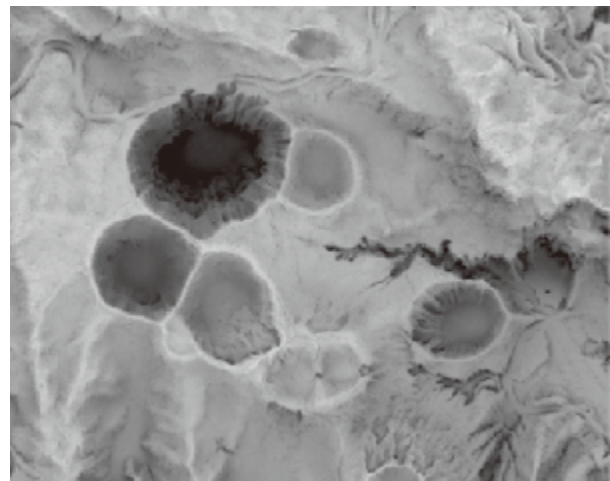


図8 地上開度図（考慮距離50m）

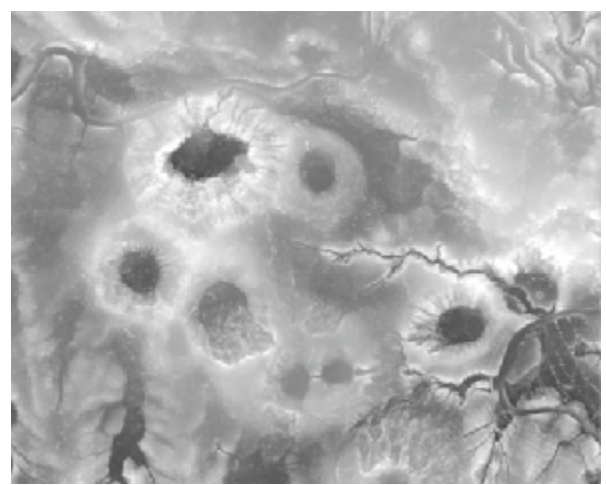


図9 地下開度図（考慮距離50m）

(2) 赤色立体地図

赤色立体地図は、まず、地上開度値から地下開度値

を引き 1/2 にして求める尾根谷度図を作成し、その後、斜度図を赤のグラデーションにした画像と合成して作成する(千葉ほか, 2007b)。**急斜面ほどより赤く、尾根ほど明るく、谷ほどより暗く調整した画像である(図 10)。**人間の目の特性として、赤色が最も微妙な彩度の違いを認識できるので、微地形判読には赤色が適している(千葉, 2006)。また、立体感には赤色だけでなく他の色相でも生ずるが、赤の場合に立体感が強い、ので赤色立体地図として利用することが多い。

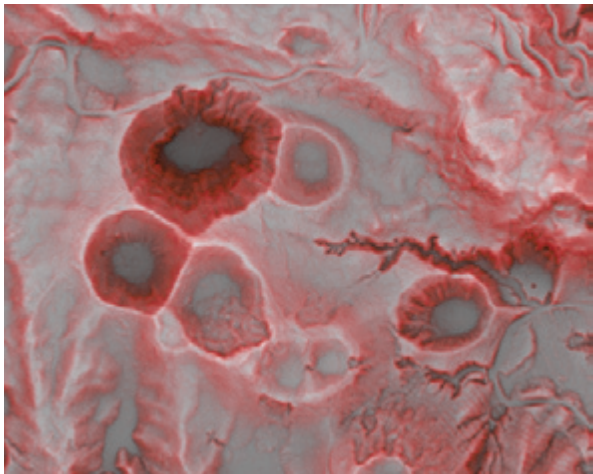


図 10 赤色立体地図

また、この画像は、地形図と重なるオルソ(正射)画像でありながら、1枚で実体鏡や特殊な眼鏡なしで、立体感を生ずる。印刷図でも、片目でも立体感が感じられる。両眼視差ほどの立体感ではないが、弱い立体感があるので、判読にとって重要な、尾根と谷を勘違いすることはない。立体視と違い、画像をどの方向に回転させても、立体感があり、逆転することもない。微地形と大地形を同時に把握できるので、フラクタルな地形の判読は、より客観的となる。火山地形の判読や火山地質調査には最適な画像であった。

4. 火山調査等への応用事例

これまでの、10年間で、富士山をはじめ、有珠山、御嶽山、浅間山、三宅島、伊豆大島など各地の火山地形地質調査に赤色立体地図を使用し、その後の火山防災等に利活用を行ってきた。

例えば、御嶽山における約 5000 年前の火砕流堆積物の発見(鈴木ほか, 2007, 2009)は、赤色立体地図の判読により、沢沿いでも道沿いでもない、熊笹密集地帯で露頭を発見できたことが端緒となった。その後の調査で、過去 2 万年以内に複数のマグマ噴火が発生していたことが明らかとなった(図 11)。これなどは、火山地形の詳細な判読が、地質調査精度の向上につなが

り、火山災害の軽減に役立った好事例であろう。

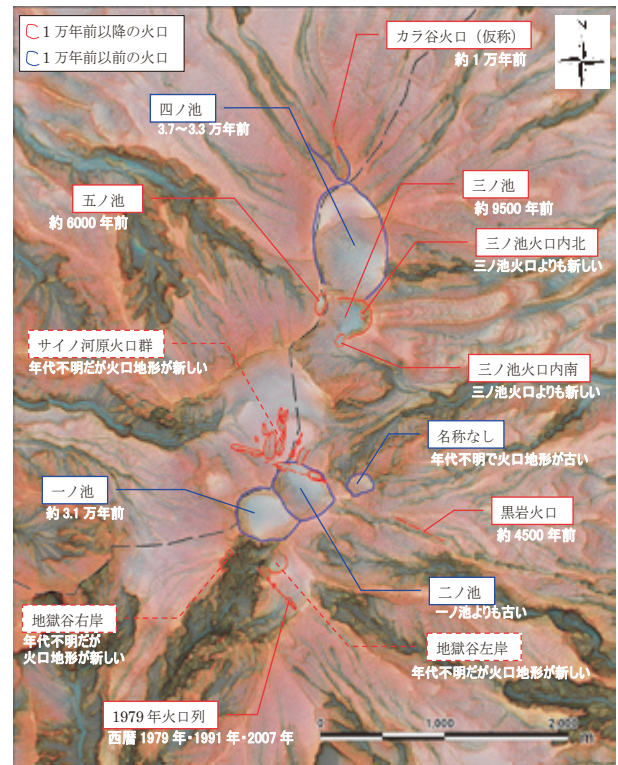


図 11 御嶽山の火口分布(鈴木ほか, 2009)
(国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所提供)

文 献

- 千葉達朗 (2006) 赤色立体地図で見る日本の凸凹. 技術評論社, ISBN-978-4-7741-2834-4, 148p.
- 千葉達朗・富田陽子・鈴木雄介・荒井健一・藤井紀綱・宮地直道・小泉市朗・中島幸信 (2007a) 航空レーザ計測にもとづく青木ヶ原溶岩の微地形解析. 富士山, 349-363.
- 千葉達朗・鈴木雄介・平松孝晋 (2007b) 地形表現手法の諸問題と赤色立体地図. 地図, 45, 27-36.
- 千葉達朗・鈴木雄介・荒井健一・富田陽子・小泉市朗・中島幸信・小川紀一郎 (2010) 富士山青木ヶ原における貞観溶岩流の計測 -航空レーザ計測と赤色立体地図による詳細地形調査とボーリング調査-. 新砂防, 63, 44-48.
- 横山隆三・白沢道生・菊池 祐 (1999) 開度による地形特徴の表示. 写真測量とリモートセンシング, 38, 26-34.
- 鈴木雄介・田中倫久・千葉達朗・塩谷みき・伊藤達也 (2007) 御嶽山北西山麓での約 5000 年前のスコリア流堆積物の発見とその意義. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, V156-P030.
- 鈴木雄介・岸本博志・千葉達朗・岡本 敦 (2009) 御嶽山の新时期活動に関する新発見- マグマ噴火を中心として -. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集, J237-005.

富士火山の噴火の特性と想定される噴火災害

山元孝広（地質情報研究部門）、高田 亮（地質情報・マグマ活動研究グループ）、
中野 俊、石塚吉浩（地質情報・火山活動研究グループ）

1. はじめに

富士山はれっきとした活火山であり、いずれ噴火が起こることは確実である。現在の富士山周辺には多数の観光施設やゴルフ場、サーキット場もあり1年を通して多くの人が集まる日本有数の地域である。さらに、山麓には東海道新幹線、東名高速道路、第二東名高速道路などの重要交通網が通る国土の一大幹線となっている。このような場所にある富士山が再び噴火し災害をもたらせば、地元の産業に直接の影響があるだけでなく、日本全体に間接的影響がおよぶことは必至であろう。火山学の進歩により、いくつかの火山では、たとえば2000年有珠火山のように、直前の噴火予知も可能にはなっている。しかし、これは数10年おきに噴火をくり返すような十分な観測記録の蓄積のある火山にかぎられている。ところが、富士山では江戸時代の宝永年間の噴火を最後に噴火は起きていない。富士山のように近代観測網下で噴火したことがない火山では、何が噴火の兆候となるのか判断するだけの知見は乏しく、観測網が整備されているにせよ事前の噴火予測は相当困難であることが予想される。それゆえ富士山のような活火山では突発的に噴火が起こるような事態においても、あらかじめ対応策を用意して、これに備えておくことが重要となる。

2. 富士山の噴火史

火山の噴火災害は複雑で、溶岩流、降灰、火砕流、泥流など多様な現象が同時または連鎖的に起きることが多く、噴火の兆候が観測でとらえられたとしても、噴火開始後にどのような現象が起こるのかを事前に正確に予知することは難しい。そこで過去数千年や数万年前にまでさかのぼった噴火の履歴を調査し、この場合は富士火山固有の噴火様式や発生する災害の癖を理解することがまず必要とされた。そのような調査研究の結果、つくられた災害実績図を積み重ね、そこから噴火のパターンやシナリオを構築し、起こりうる災害を抽出して噴火ハザードマップが作成されている。

これまでに噴出物の層序から我々が明らかにした富士火山の噴火史は以下の通りである。

1) 約10万年前から始まった富士山の活動は、爆発的な噴火が卓越し、山体の東には関東ロームと呼ばれる厚い風成堆積層が形成された。この活動で出来た山体はBC18,000年頃に南西に向かい大規模に山体崩壊し(田貫

湖岩屑なだれの発生)、その大半が失われている。

2) BC15,000年～BC6,000年頃には、それまでの活動とは異なり、玄武岩溶岩流の山麓への大量流出が繰り返された。

3) BC6,000年～BC3,600年頃は、活動低下期で、山麓には富士黒土層が形成された。

4) BC3,600年～BC1,700年頃には、噴火活動が活発化し今の中心火道の位置から溶岩流出が繰り返され、現在の主成層火山が形成された。

5) BC1,500年～BC300年頃には、山頂・山腹から爆発的噴火が繰り返された。また、BC900年前後には今の山頂の東南東にあった古い山体の残骸が東に向かって山体崩壊を起こした(御殿場岩屑なだれの発生)。

6) BC300年～AD1,200年頃には、山腹からの溶岩流出が繰り返され、山頂からの大きな噴火はない。

7) AD1,707年に南東山腹から爆発的な噴火(宝永噴火)が起こる。以後、表面的な活動は停止する。

3. 履歴に基づく噴火活動の将来予測

上記の噴火史から指摘できることは、富士山の場合、似通った様式の噴火を繰り返す活動ステージが認められ、その期間は1千～数千年であることと、活動ステージ毎には噴火の様式が異なることである。従って、噴火頻度の高いある活動期間内においては将来予測は比較的容易であるものの、活動ステージの変わり目においては、次の噴火の時期やその様式を予測することが極めて難しいことを意味している。例えば、1.5 km³の溶岩流を北西山麓から流出させた貞観噴火(864～866年)を含む平安時代の8～9世紀頃は、特に噴火頻度の高かった時期であり、おそらく10～20年間隔で山腹噴火が繰り返されたことが、噴出物から確認されている。しかし、富士山全体の噴火史から見るとこのような活動ステージは噴火頻度が急減する鎌倉時代以降、既に終了したものと認識でき、再び9世紀頃のような噴火活動が繰り返されるとする根拠はない。宝永噴火から300年余りが経過した現在、次に起こる噴火はこれまでとは別の噴火ステージとして起こるものと考えが必要があり、起こりうる様々な噴火様式を想定しておく必要がある。

4. 富士山の爆発的噴火による降灰災害

富士山で想定される噴火災害の中で、広範囲に影響をも

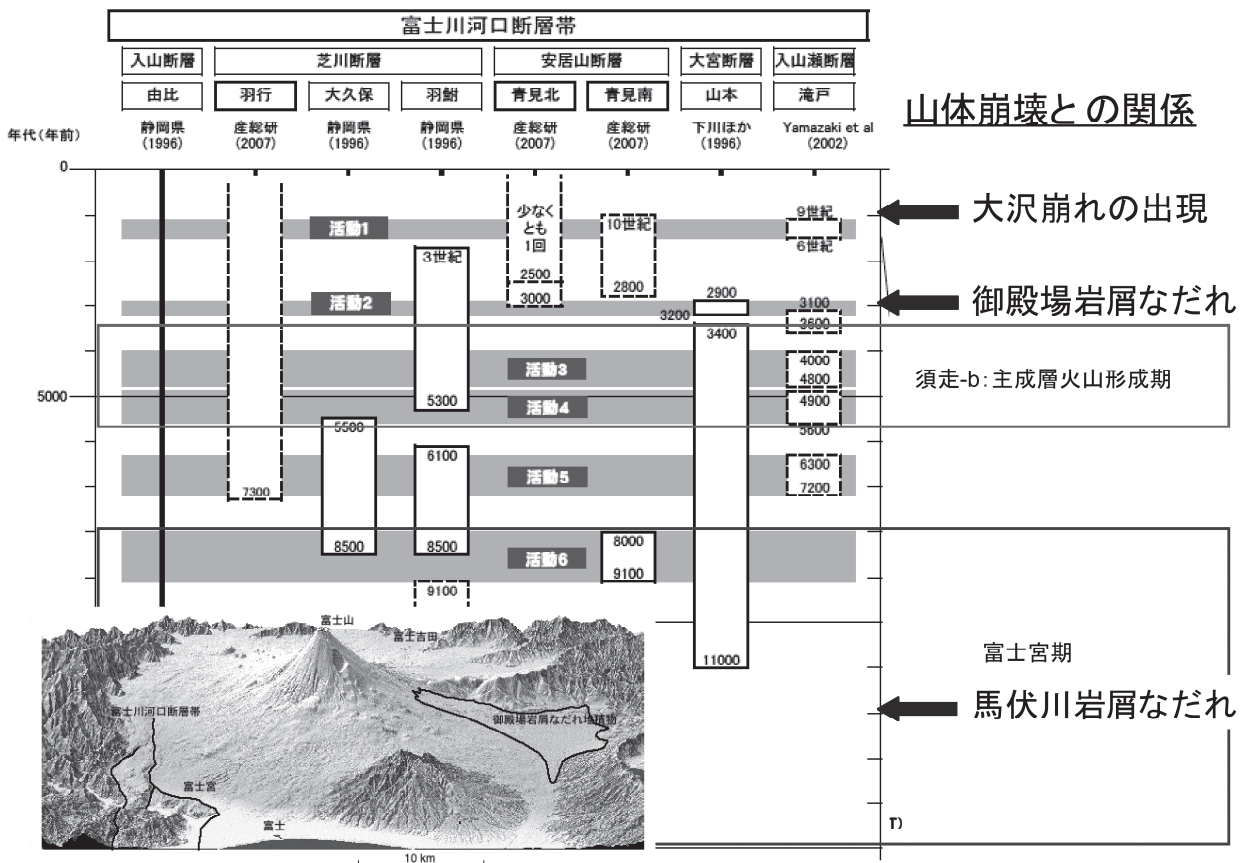
たらし得るものは、宝永噴火のような爆発的噴火による降灰災害である。宝永噴火は、歴史噴火のなかでは特異なものではあるが、10 万年間の富士山の噴火史の中では最も頻度の高い、標準的な噴火様式であり、その災害をまず想定しておく必要がある。すなわち、宝永噴火では 0.7 km^3 のマグマが爆発的に放出され、溶岩流とはなっていない。爆発によりマグマは火山礫や火山灰へと砕かれ上空へと立ち上がる噴煙柱となり、これらは風下の江戸に向かって飛んでいった。江戸での降灰量は数 cm であったが、山麓部では数 m の火山礫・火山灰に覆われ、田畑や家屋が放棄されている。また、今の神奈川県内では、斜面にたまった火山灰が雨のたびに土石流となって河川の氾濫をくり返したことも記録されている。

内閣府の宝永噴火タイプを想定した降灰ハザードマップでは、宝永と同規模の噴火となった場合には、東京を中心とする首都圏が火山灰に覆われる確率がかなり大きいことが示されている。江戸時代と異なり現代社会では数 cm の降灰でも都市機能がストップしてしまうと予想される。降灰が 1 cm をこえると車の運転は困難で、交通事故の多発が予想される。また、火山灰は高温加熱されるとマグマに戻るため、航空機のジェットエンジンに吸いこまれるとエンジン内部に張りつき、エンジンを停止させてしまう。そのため、降灰予想域にある羽田空港や成田空港は閉鎖せざるを得ない。2010 年に大西洋に浮かぶアイスランドで起きた噴火

でヨーロッパの航空網が停止した時と同じことが首都圏でも懸念されている。また、湾岸部にある火力発電所群は大半がガスタービン方式であるため、空気中に浮遊した火山灰に弱く、首都圏への電源供給を停止せざるを得ない事態も想定されている。宝永の噴火では、当時の江戸が昼間であるにもかかわらず、暗闇に覆われ行燈を灯したことが記録されている。300 年前ならその程度の対策ですんだ同じ現象が、文明の進んだ社会では甚大な都市型災害となってしまうことは、なんとも皮肉なことである。

5. 山体崩壊の可能性

富士山で起こりえる最も破局的な災害は、大規模な山体崩壊である。2011 年の東北地方太平洋沖地震以降、低頻度地質災害に対する関心が高まり、富士山周辺での活断層調査の結果もあって、その可能性がマスコミでも取り上げられている。実際に、富士山の下には駿河湾トラフから延びる富士川河口断層帯が存在し、BC900 年頃の御殿場岩屑なだれは、この断層が起こした M8 クラスの大地震が原因で発生したものと考えられている。しかし、富士川河口断層帯では最近 1 万年間で 6 回の活動が認識されているものの、大規模な山体崩壊を伴った事例は 2.9 千年前の活動 2 のイベントのみであり、極めて頻度の小さい現象であることが活断層と山体崩壊履歴からは指摘できる(図)。



伊豆大島の噴火シナリオ高度化に向けて

川辺禎久, 石塚治 (地質情報・火山活動研究グループ)

1. はじめに

近年、噴火災害軽減のために、様々な噴火現象の影響範囲を地図上に表現したハザードマップ (火山噴火災害予測危険区域予測図) に加えて、噴火に伴う現象の推移を時系列として示した噴火シナリオの作成が多く火山で進められている。噴火シナリオの作成により、噴火でどのような現象がどのような順序、規模で発生し、いつ、どの範囲で、どのような被害を受けるのか、関係機関が共通のイメージを持つことができる。また様々な防災上の課題を抽出し、時間や場所等を入れた具体的な火山防災対策の策定に役立てることが期待されている。

具体的な噴火シナリオ作成例として、2005年から2008年にかけて、産総研も参加した火山噴火予知連伊豆部会

伊豆大島勉強会で伊豆大島火山の噴火シナリオ作成作業が進められ、2008年9月に報告書としてまとめられた (気象庁, 2008)。完成した噴火シナリオは、現時点での伊豆大島の噴火推移予測として一定の成果を挙げたと考えられてはいる。しかし、シナリオ作成作業を通じていくつかのデータ不足な点もあぶり出されてきた。本講演では、伊豆大島火山噴火シナリオ作成で見えてきた伊豆大島火山噴火史の課題と、それを解決し噴火シナリオを高度化するために産総研が行ってきた各種調査の概要を紹介する。

2. 伊豆大島火山噴火シナリオ

伊豆大島噴火シナリオは、これまで知られている伊豆

伊豆大島火山噴火推移イベントツリー

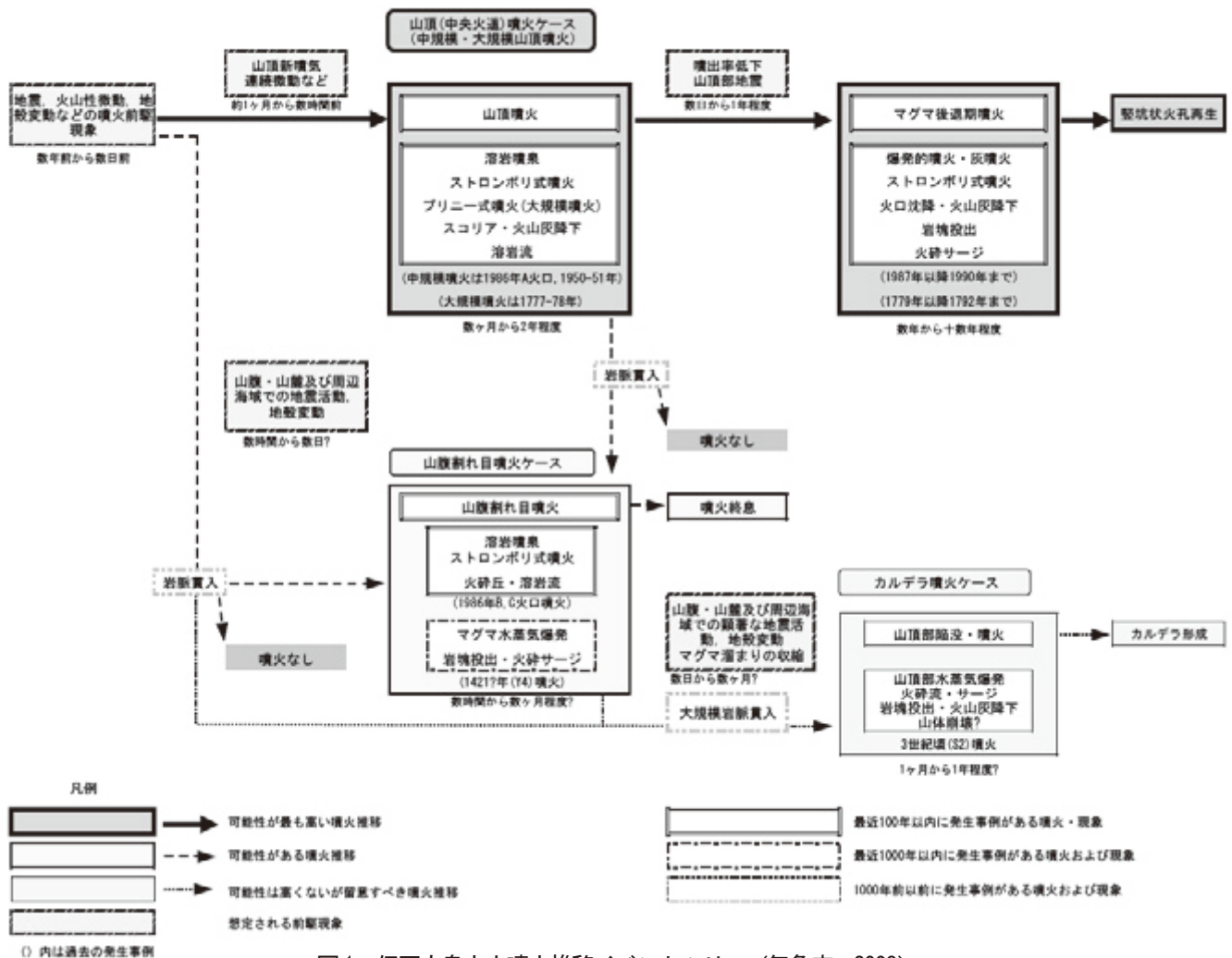


図1 伊豆大島火山噴火推移イベントツリー (気象庁, 2008)

大島火山の噴火歴史記録、観測記録や地質学的記録を整理し、他の類似火山の事例なども参考にして、伊豆大島火山の噴火類型を設定、岩石学的、地球物理学的なモデルを基に作成した。作成した噴火推移イベントツリーを図1に示す。イベントツリーは、噴火類型として、1.大規模・中規模山頂噴火、2.側噴火を伴う噴火、3.カルデラ形成噴火に分けられ、それぞれがどのような先駆現象が想定され、どのような現象が発生しどう推移するかを、過去のよく記録が残り噴火推移が分かっている噴火の例からモデル化し推定したものである。

この噴火シナリオ作成により、おおよその噴火推移は把握できたと考えられるが、一方、噴火シナリオ作成作業を進める中で、いくつかの課題も明らかになった。すなわち、

- ・ 溶岩も含めた中長期マグマ噴出率
- ・ カルデラ形成噴火の推移・カルデラ構造
- ・ 側噴火を伴う大規模噴火の推移
- ・ 海域も含めた側噴火マグマ供給システム

などのデータがまだ不足していることが指摘され、より高度な噴火シナリオを作成するために、これらの課題を解明する必要があることが指摘された。

これらの課題を解明するため、産総研では地質情報研究部門の重点研究「噴火シナリオの高度化」で、

- ・ カルデラ構造を解明するためのカルデラボーリング調査
- ・ 側噴火を伴う大規模噴火の噴火推移解明のためのトレンチ・地表地質調査
- ・ 周辺海域での海底調査

を行った。以下にそれぞれの概要を紹介する。

3. カルデラボーリング調査

伊豆大島火山山頂カルデラでは、これまでに何回かボーリング調査が行われている（一色ほか、1963; 中田ほか、1998）。しかし調査域が北部と南西部に偏っており、カルデラの広がりや深さ、形成過程、埋積過程の理解が必ずしも十分ではない。そのため中長期火山活動度評価に必要なマグマ噴出率も不十分な理解しか得られていない。これらの課題を解決するため2009年に山頂カルデラ東部でボーリング調査を行った。

ボーリング調査(GSJ-OSM-1)は、1951年溶岩流東端付近(34°44'30.6"N, 139°24'54.6"E)の標高約449mの地点で行い、掘削深度は100mであった。地質図上はY₂溶岩流の分布域で、地表は1986年Bスコリアに覆われている。回収されたコアは、溶岩(クリンカー含む)が約42%、降下スコリアなど火砕岩が約58%の割合だった(図2)。溶岩は少なくとも7層確認できた。このうち最上位の

LV1は山頂付近から噴出したY₂溶岩に、LV4は側火口からのS₂溶岩にその全岩組成、鉱物組成から対比できる可能性が高い。溶岩の間にはさまる火砕岩もいくつかの岩相に区分でき、溶岩(LV)、降下火砕物を主体とする岩相(PF)、火山角礫岩(VB)、洪水堆積物(FL)と区分し、それぞれを上位からPF1, PF2...のように命名した。

このうちPF3, PF4, VB1, PF5の一連の層序は同様の層序を示すS₂期からN₄期(Nakamura, 1964)の堆積物に対比されると考えられる。S₂部層は現在のカルデラ地形を作った噴火の堆積物と考えられており、溶岩の化学組成、ボーリングコアの¹⁴C年代測定からもGSJ-OSM-1は新期大島層群カルデラ形成期噴出物を貫き、先カルデラ堆積物である古期大島層群まで達したと

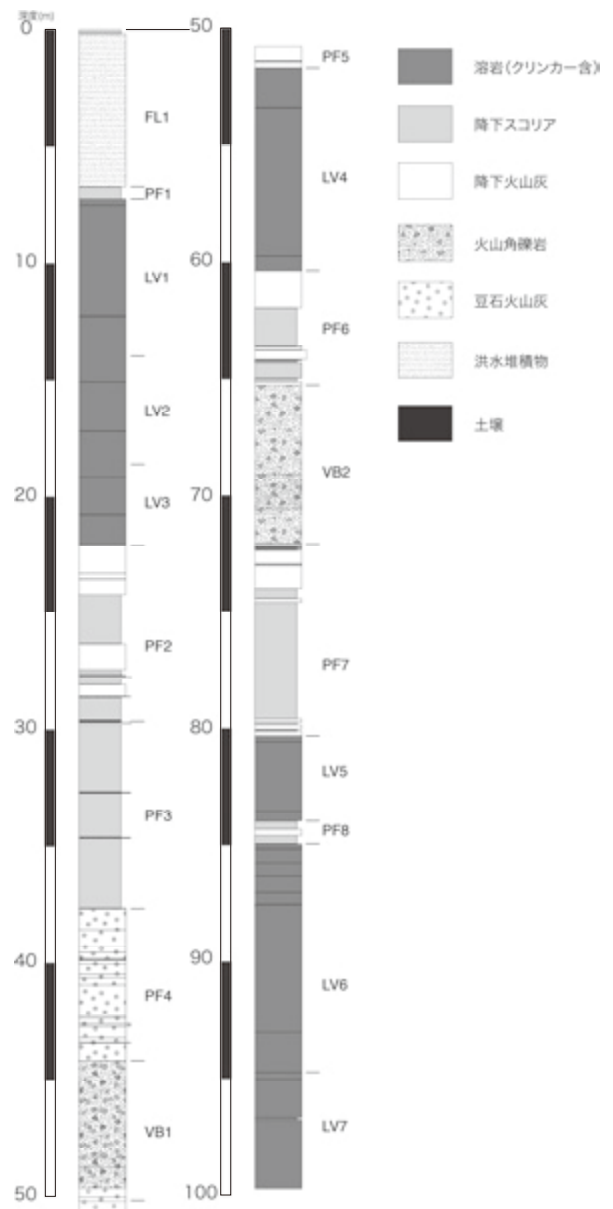


図2 GSJ-OSM-1の柱状図

考えられる。S₂部層の角礫岩層に相当するVB1の底面深度は50.20mであり、標高約400mにカルデラ形成以前の地表が存在することになる。一色ほか(1963)は、カルデラ北部の掘削結果からカルデラ形成直後のカルデラ底高度は標高330~340m付近と推定しており、GSJ-OSM-1掘削地点ではカルデラ形成期堆積物が少なくとも60m以上高いところに存在することになる。このことは約1700年前(山元, 2006)に形成された最新期カルデラの広がりにはNakamura(1964)などで想定されていたものより狭いことを示す。

また深度85mから22.5mの間に、およそ5000年前から数百年前まで山頂付近からの溶岩流がほとんど到達していないことは、掘削地点より西側に地形的なバリア、すなわちカルデラ縁があったことを示唆する。現在ほとんど埋没し不明瞭になっているカルデラ東縁はより古いカルデラの縁であり、伊豆大島山頂カルデラは古い東部カルデラと最新期の西部カルデラが複合して形成されたものである。

西部カルデラ底高度をNakamura(1964)と同じとすると、西部カルデラ埋積容量は約1.6km³となる。温泉ホテルボーリングの結果(一色ほか, 1963)からのカルデラ埋積物の溶岩と火砕物の構成比を与えると、埋積溶岩質量は約30億トンとなる。最新期カルデラから溶岩流が溢流するようになったのは、Y₄期(1421年?)から(Nakamura, 1964; 一色, 1984)と考えられており、S₂期以降Y₄期までにカルデラ埋積がほぼ終わったと考え、この間にテフラ質量19億トン(小山・早川, 1996)+溶岩質量30億トンの計49億トンが噴出したと推定できる。S₂期を約1700年前とするとこの間の平均マグマ噴出率は0.04億トン/年となる。この値はY₃期以降の噴出率とほぼ同じで、伊豆大島火山新时期大島層群の最近約1700年間のマグマ噴出率はほぼ一定となった。

4. 山頂噴火と側噴火

1986年伊豆大島噴火での側噴火や1991年雲仙岳噴火、2000年三宅島噴火など、歴史噴火で経験していない噴火が発生し、防災対応などに混乱が生じた例が存在する。そのようなことを防ぐために、できるだけ多くの噴火事件の推移を知っておくことは重要であり、歴史記録がない噴火の推移も地質学的手法でできる限り明らかにしておく必要がある。

伊豆大島火山の噴火で防災上留意しなければならない噴火に側噴火がある。これまで詳細な噴火推移データがある側噴火は中規模噴火の1986年噴火だけで、側噴火を伴う大規模噴火での噴火推移は不明だった。側噴火を伴う大規模噴火推移はどうなっているのか、その例として、

Y₄期噴火の推移についてトレンチ調査並びに地表地質調査を行った。

その結果、伊豆大島南部に分布するY₄期噴火噴出物は、複数のユニットに区分でき、下部を占める降下スコリア層は厚さ10~20cmほどの細粒スコリア火山灰層で区分され、大きく2層識別できることが判明した。このうち下位スコリア層は割れ目火口との距離、位置で厚さが大きく変化し、側噴火火口近傍ではスパターに移行して直接下位の土壌を覆っている。それに対し上位の降下スコリア層は広く分布するが厚さの変化が乏しく、側火口溶岩流を覆うことがわかった。全体の分布をみると下位の降下スコリア層は側火口起源、上位降下スコリア層は山頂火口起源と考えられる。このことはY₄期噴火は山頂噴火に先行または少なくとも大規模な噴火がないうちに側噴火が発生し、その後に山頂火口から準プリニー式噴火が発生したことを示している。

5. 周辺海域海底調査

側噴火の発生予測には、その発生頻度、分布、側噴火をもたらずマグマ供給システムの理解が重要である。伊豆弧の火山では、応力場や地殻構造を反映してマグマの水平方向への地殻内長距離移動が起きていることが明らかになってきた(例えば三宅島2000年噴火(Geshi *et al.*, 2002)や八丈島(Ishizuka *et al.*, 2008))。これらの火山では、広域応力場に規制された比較的長距離のマグマ移動と、火山体内部での局所的な応力場に規制された短距離の移動の大きく分けて2種類のマグマ移動が起きている可能性が高く、側火口の分布や噴出するマグマの組成に影響を及ぼしていると考えられる。

伊豆大島火山では、陸上部に多くの側火口が分布し、割れ目噴火に伴う火口列の形成も知られているが、その海底部については側火口の存在の有無や噴出物の特徴など明らかになっていなかった。そこで伊豆大島火山における地殻内マグマ長距離移動の検討と側火口へのマグマ供給システムを解明する目的で、1) 海洋研究開発機構の調査船及び無人潜水船による、伊豆大島火山周辺の海底火山体の詳細な地形データの取得及び火山噴出物、層序の観察と系統的岩石試料採取、2) 伊豆大島陸上部の側火口及び山頂火口の火山噴出物の岩石試料採取及び系統的¹⁴C年代測定、3) 伊豆大島沿岸部の精密海底地形観測、を実施した。

その結果、伊豆大島の北西及び南東沖合には、北西-南東方向に配列する火山体の列が多数存在することが明らかになった(図3)。三原山山頂からの距離は22km以上に達する。これら火山体の噴出物は岩石学的、地球化学的特徴が伊豆大島陸上部の火山噴出物と類似し、火

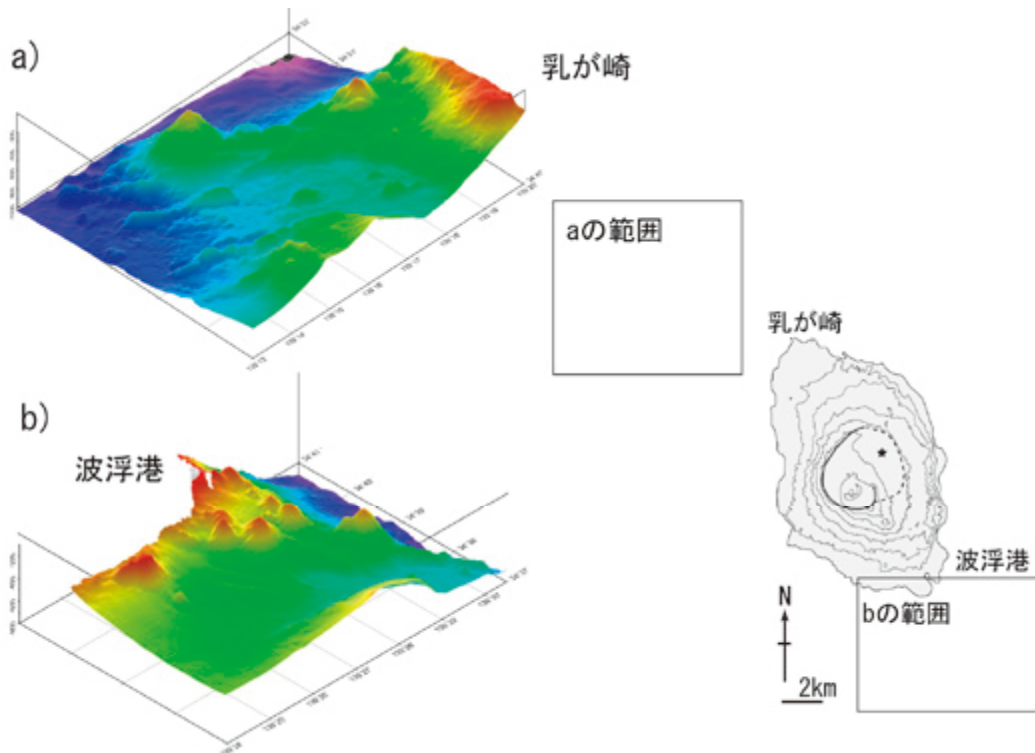


図3 a) 伊豆大島北西海底部, b) 南東海底部, の地形鳥瞰図. 深さ方向3倍誇張. 北西—南東方向のリッジを形成するものと, 円錐形の小型火山体が存在する. 海底観察結果からリッジ状の地形はおもに割れ目噴火によって形成された可能性が高い.

山体が伊豆大島の側火口に相当すると考えられる.

それぞれの側火口列内の噴出物の微量成分組成や同位体組成は極めて均質である. これは, 同一火口列内の各火口から噴出したマグマが同じ親マグマを持つと考えて矛盾がない. すなわち側火口列が地殻内長距離マグマ移動によって形成されたことを強く示唆する. また北西側の火口列を横断する反射法地震探査断面は, この地域が北東 - 南西方向の伸張場に置かれていることを示唆する. 沿岸部の精密海底地形観測においても, 正断層系に伴う可能性のある複数の北西 - 南東方向のリニアメントが見いだされ, 特に野田浜付近から北西に延びる崖は極めて連続性が良く, 比高は約 18m に達する. 八丈西山火山の場合と同様, 広域応力場が側火口列の配列, 成長方向を決定するとともに, 伊豆大島周辺を長大な火口列の形成に好適な場に行っていると考えられる.

陸上噴出物の系統的な分析から, 伊豆大島の側火口噴出物の化学組成が過去 10,000 年間, 非常に系統的な時間変化を示すことが初めて明らかになった. この事実と海底側火口噴出物の化学的特徴は, 陸上部から海底部に伸びる火山列が, 約 10,000 年前からごく最近に至るまでのそれぞれ異なる時期の長距離マグマ移動イベントにより形成された可能性を強く示唆する.

文 献

- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S. (2002) Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, **64**, 55-68.
- 一色直記 (1984) 大島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 133p.
- 一色直記・中村一明・早川正巳・平沢清・行武毅・荒井綏・岩崎文嗣 (1963) 試錐結果から見た伊豆大島火山のカルデラの構造. *火山*, **8**, 61-106.
- Ishizuka, O., Geshi, N., Itoh, J., Kawanabe, Y. and Tuzino, T. (2008) The magmatic plumbing of the submarine Hachijo NW volcanic chain, Hachijojima, Japan: long distance magma transport?. *J. Geophys. Res.*, **113**, B08S08, doi:10.1029/2007JB005325.
- 気象庁 (2008) 火山噴火予知連絡会伊豆部会 伊豆大島の火山活動に関する勉強会報告書 -伊豆大島噴火シナリオ-. 気象庁, 158p.
- 小山真人・早川由紀夫 (1996) 伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史. *地学雑誌*, **105**, 133-162.
- Nakamura, K. (1964) Volcano-stratigraphic study of Oshima Volcano, Izu. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **42**, 649-728.
- 中田節也・藤井俊嗣・大塚一浩・渡辺秀文 (1998) 伊豆大島火山カルデラ内での掘削成果(2)—コアの地質学的解析結果 (速報). 日本火山学会講演予稿集, 68-68.
- 山元孝広 (2006) 伊豆大島火山, カルデラ形成期の火砕物密度流堆積物: 差木地層 S₂ 部層の層序・岩相・年代の再検討. *火山*, **51**, 257-271.

火山活動予測に地質学など物質科学的手法が果たす役割と期待

山里 平（気象庁地震火山部火山課）

1. はじめに

火山災害の軽減のためには、火山活動の監視と評価が重要である。我が国では、気象庁が、全国の火山を対象に火山観測を実施し、噴火警報等の防災情報を発信している。従来火山活動予測には地球物理学的手法が多く使われ、気象庁の火山監視も地球物理学的手法が主軸となっている。一方で、地質学や地球化学など物質科学的手法も火山活動評価に大きな役割を果たす。近年物質科学的火山学が果たしてきた実績と気象庁から見た今後に向けた期待について述べる。

2. 噴火履歴の解明

地球物理学的な火山観測は、直前噴火予測において大きな成果をあげているが、近代的な観測の歴史は浅く、過去に起こった大規模な噴火あるいは多様な噴火様式に対しては我々の経験は不足している。また、火山監視や防災を考える上では、個々の活火山の将来の噴火ポテンシャルを何らかの方法で評価しておくことも重要である。このよ

うな中長期的な噴火予測や噴火推移予測のためには、地質学的手法による噴火履歴の解明や過去の噴火推移の理解が不可欠になる。

2.1 活火山カタログの整備

火山防災施策の検討や火山研究を進める上で基本となるのが活火山カタログの整備である。気象庁は、現在、活火山を「概ね1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」と定義しており、具体的な活火山の選定は火山噴火予知連絡会が行っている。当然ながら活火山選定の決め手となる古い噴火履歴は火山地質学の成果によるところが大きい。2011年には、北海道で活火山定義に当てはまる2つの火山が新たに活火山に選定され、現在は110の火山が活火山とされている。

また、我が国では、気象庁の発刊している「日本活火山総覧」が、防災機関、報道機関や研究者に広く利用されている。気象庁は、産業技術総合研究所の研究者をはじめとする火山噴火予知連絡会関係者の協力も得て、現在第4版

(87. 霧島山)

87. 霧島山 Kirishimayama 常時観測火山

北緯31° 56' 03" 東経130° 51' 42" 標高1,700m (鶴岡岳(三角点・西霧島山))
 北緯31° 54' 34" 東経130° 53' 11" 標高1,421m (新燃岳(三角点・新燃))
 北緯31° 53' 11" 東経130° 55' 06" 標高1,573m (高千穂峰(三角点))




霧島山主要部 2011年10月18日 西側上空より 気象庁撮影
 右: 新燃岳火口、中央手前: 大浪池、左中程: 鶴岡岳、左後方: 夷守岳

概要

霧島山は、宮崎・鹿児島県境に位置する加久藤(かくとう)カルデラの南縁部に生じた玄武岩・安山岩からなる小型の成層火山・火砕丘等であり、20を超える火山体が識別できる。成層火山としては鶴岡岳、新燃(しんもえ)岳、中岳、大権山、御鉢、高千穂峰などがあり、火砕丘としては鶴岡岳、大浪池などがある。御鉢はマールである。山体の大きさに比べて大きな火口をもつ火山が多い。また、大浪池、大権池、御池、六観音池など多くの火口湖がある。有史以降の活動は、主に御鉢と新燃岳で噴火を繰り返してきた。御鉢は霧島火山中、最も活動的な火山であるが、1923(大正12)年の噴火以降は噴火の記録はない。新燃岳では2009年から2010年にかけて小規模な噴火が続き、2011年に本格的なマグマ噴火が発生した。霧島山の南西側山腹には温泉・地熱地帯が存在し、かつてえびの高原の硫黄山では噴気活動が活発であった。玄武岩・安山岩のSiO₂量は49.6~66.9 wt.%である。

(36. 磐梯山)

噴火活動史

・過去1万年間の噴火活動

磐梯火山では約2.5万年前以降にはマグマ噴火は記録されておらず、水蒸気噴火だけが起きている(山元・須藤, 1996)。堆積物として記録が残る水蒸気噴火は1888年噴火や806年噴火も含めて、最近5000年間で4回発生しており、その発生間隔は1100~1700年である。また、山体崩壊は、1888年の他、約2500年前に鍾乳洞方面でも発生している。

噴火年代	噴火場所	噴火様式	主な現象・マグマ噴出量
9.4ka ¹⁾		マグマ噴火 ¹⁾	火砕物降下。
8.3ka ²⁾		水蒸気噴火 ¹⁾	火砕物降下。
7ka ³⁾		水蒸気噴火 ¹⁾	火砕物降下。
6.6ka ⁴⁾		水蒸気噴火 ¹⁾	火砕物降下。
5.8ka ⁵⁾		水蒸気噴火 ¹⁾	火砕物降下。
5.4ka< ⁶⁾	鍾乳洞上洞付近 ¹⁾	(山体崩壊) ¹⁾	小水蒸気層なだれ。
5.4→2.5ka ⁷⁾	沼ノ平~中ノ湯? ⁸⁾	水蒸気噴火 ⁴⁾	火砕物降下。
2.7→2.5ka ⁹⁾	沼ノ平~中ノ湯? ⁸⁾	水蒸気噴火→ (経流発生) ⁵⁾	火砕物降下→泥流。
2.7→2.5ka ⁹⁾	大磐梯山 東側崩壊 崖及び小磐梯山噴 雲 ⁵⁾	(山体崩壊) ⁵⁾	鍾乳洞岩層なだれ(0.1 km ³) ⁵⁾ 。

※年代、噴火場所、噴火様式、噴火イベント等については、(独)産業技術総合研究所の活火山データベース(江藤・星住, 2006)を参考とした。なお、年代は暦年代で示す。表中の「ka」は「1000年前」を意味し、西暦2000年を0 kaとして示した。
 A→B: A年からB年までの間のどこかで起こった噴火イベント
 A<: A年以前に起こった噴火イベント

・有史以降の火山活動(▲は噴火年を示す)

噴火年代	現象	活動経過・噴出状況等
▲806(大同元年) ^{1,5)}	水蒸気噴火	火砕物降下。噴火場所は大磐梯山頂東方火口 ¹⁾ 。
1643(寛永20)年 ¹⁾	噴動 ⁹⁾	
1655(明暦元)年 ¹⁾	噴動 ⁹⁾	
1719(享保4)年頃 ¹⁾	噴火 ⁹⁾	
1787(天明7)年頃 ¹⁾	噴火 ⁹⁾	
▲1888(明治21)年 ^{1,3,5)}	小規模: 水蒸気噴火、 (山体崩壊、 泥流) 大規模: 水蒸気噴火、 崖崩壊、 土石流	7月15日。低温の火砕サージ→岩層なだれ→火砕物降下・泥流。噴火場所は大磐梯山頂北方 ^{3,6)} 。噴動前から弱い地震。7:00頃活動始まり。7:30頃から強い地震が3回発生。7:45頃大噴響とともに爆発。短時間に噴霧が15~20回反復して小磐梯山の大半を崩壊させた。同時に鍾乳洞に近い岩風(火砕物一ジ)と土石流が発生し、南東山麓の村を破壊した。爆発音が50~100kmまで聞こえ、降灰は太平洋岸に達した。火口は北に向いてU字形に開き、東西約2.2km、南北2kmで埋積物総量は1.5×10 ⁹ m ³ 。大規模な岩層なだれ(45~77km/時)を生じて山麓の5村11集落を埋没し、死者461名(477名とも)。家屋山林崩壊の被害大きく、陥没部などが生じた。この後に土石流(火山泥流)が数多く発生した。(VEI) ⁵⁾ 。
1897(明治30)年 ^{11,12)}	噴動 ^{11,12)}	7月5~8日 ^{11,12)} 。
1938(昭和13)年 ^{10,11)}	山崩れ ^{10,11)}	5月9、15日。崩壊は延長約3km、面積2.3×10 ⁹ m ² 以上。両日の被害合計は死者2名、負傷者5名、流失及び半壊家屋4棟 ^{10,11)} 。
1954(昭和29)年 ^{10,11)}	山崩れ ^{10,11)}	4月3、6、7、22、24、25、29、5月5日。数回にわたり1888年の爆発火口崩壊 ^{10,11)} 。
	地震 ¹¹⁾	7月1~5日 ¹¹⁾ 。

図1 日本活火山総覧(第4版)(刊行準備中)の一部。左: 霧島山。右: 磐梯山。

の発刊のための準備を進めている(図1)。第4版においては、新しい知見の反映に加え、火山防災協議会、ハザードマップ、噴火警戒レベル等の防災に関する事項の充実などの改善を図っている。噴火履歴に関しては、産業技術総合研究所の活火山データベースを大いに参考にするとともに、火山地質図などの研究成果も多く取り込んだ。なお、2013年7月に開催される IAVCEI 鹿児島大会に向けて、日本火山学会と共同で、英訳版の発行も準備中である。

このような活火山カタログは、火山監視や火山研究の基礎資料になるとともに、火山防災の普及啓発にも役立つことが期待される。今後も、新たな活火山の選定も含め、活火山カタログの充実を図っていくことは重要であり、特に過去の噴火履歴や噴火推移の解明における火山地質学の研究進展が望まれる。

2.2 噴火ポテンシャルの評価

110の活火山のうち、気象庁は、防災上重要な火山を「常時観測火山」として4箇所の火山監視・情報センターで24時間監視を行っている(山里, 2005)。もちろん全ての活火山に充実した監視体制を敷くことは理想的ではあるが、現実的には困難であり、それぞれの活動度に応じた監視体制をとっている。現在は、2009年に火山噴火予知連絡会が概ね100年程度の中長期的な噴火の可能性を評価して「監視・観測体制の充実等の必要な火山」として選定した47火山(火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会, 2009)を「常時観測火山」とし、地震計などの観測機器を設置して24時間監視を行っている。また、後述する地域の火山防災協議会における避難計画の共同検討も、これら47火山を優先して進めているところである。

火山噴火予知連絡会による47火山選定の過程では、地震活動や地殻変動、地熱活動などの現在の火山活動の状況に加え、富士山など近年の火山活動が比較的静穏な火山については過去の噴火履歴を考慮した選定が行われており、火山地質学の成果が生かされた面も大きい。一方、火山噴火予知連絡会は、報告の中で、十分な噴火履歴が判明しておらず、選定すべきかどうか意見が分かれた活火山が多くあるとして、今後も選定結果の変更を行う余地を残しており、火山地質学の研究進展が望まれる。

また、過去の噴火履歴や噴火推移の解明は、今後発生するであろう噴火の様式や規模を推定するのに役立つ。あらかじめ噴火による危険性を地図上に視覚的に分かりやすく明示した火山ハザードマップは、噴火時等の避難計画の策定等において基本的な資料となる。さらに、過去の噴火推移の知見は、避難等のタイミングの検討においても重要で、後述する気象庁の噴火警戒レベル設定の基礎となっている噴火シナリオの検討においても火山地質学の知見

は不可欠である。ハザードマップや噴火シナリオは、それぞれの火山の地質学的知見なくして作成は不可能であり、これまでも多くの火山地質の研究者が携わってきているが、今後も貢献に期待したい。

3. 物質科学的手法による火山活動予測

気象庁の24時間火山監視は、映像観測、地震観測、地殻変動観測など地球物理学的観測が中心であるが、噴出物の調査や火山ガスなどの観測も火山機動観測の一環として実施している。地質学や地球化学など物質科学的手法は、中長期的な活動予測だけでなく、短期的な噴火予知・現状の火山活動の評価にも重要な役割を果たす。

3.1 地質学手法による火山活動予測

噴火が発生したとき、その噴火の規模や様式をできるだけ早く正確に把握することは極めて重要である。噴火活動は最初の噴火から次第に拡大していくことも多く、噴火のリアルタイム把握は、その後の活動推移の予測にも重要な役割を果たす。

現状においては、気象庁は、監視カメラや地震計・空振計によって噴火を検知し、必要に応じて現地調査などを実施している。顕著な噴火が発生した際には、産業技術総合研究所などの地質専門家と連携して、火山灰などの噴出物の分布調査などを行い、噴火の規模をできるだけ早期に把握できるように努めている。

2011年の霧島山新燃岳の噴火においては、1月下旬の準プリニー式噴火によって多量の軽石や火山灰が噴出した。産業技術総合研究所や気象庁などは連携して火山灰の降下量についての調査を実施、準プリニー式噴火に伴う火山噴出物量の推定を行った。しかしながら、当初は火口に近い領域の堆積量の見積りに任意性があり、機関によってかなり幅のある推定量となった。新燃岳では、準プリニー式噴火に伴い新燃岳北西数kmの地下深くのマグマだまりが収縮したが、地殻変動観測から求まる収縮量と噴出物量との対比は活動予測において極めて重要な要素のひとつであり、最終的な噴出物量が推定されるまではかなり頭を悩ます問題となった。今後はできる限り早期に正確な噴出物量が推定できる手法の開発も望みたい。

火山灰などの噴出物のリアルタイム把握は、火山活動の評価のみならず、それがもたらす災害の予測においても重要である。そのうち火山灰については広域に社会的な影響をもたらすことから、気象庁は、2008年から降灰予報を発表しているが、現在は降灰域のみの予測となっており、今後量的な予測情報も含めた高度化をすべく検討を開始している。予測手法の検証等において火山地質学分野の研究者との連携にも期待している。

一方、噴出物の分析から、噴火様式や地下のマグマの状態を推定することも活動評価にとっては重要である。2000年以降の我が国の火山噴火においてみても、例えば有珠山噴火や三宅島噴火がマグマ水蒸気爆発であったことは噴出物の分析結果から得られた事実である。前者ではマグマの関与が時間とともに次第に少なくなって活動が低下していく様子が捉えられ、後者では、結果としては発生しなかったが高温の火砕流の可能性が指摘されることになり、それぞれ、火山噴火予知連絡会の活動診断に反映され、地元の防災対応判断に大きな影響を与えた。2004年の浅間山噴火においては、最初の爆発的噴火の噴出物にマグマ物質が含まれていることが判明、爆発的噴火が続く可能性を火山噴火予知連絡会が指摘、その後、火口底へのマグマ上昇、爆発的噴火の続発という活動経過をたどった。一方、2011年新燃岳噴火においても、本格的マグマ噴火の1週間前に発生した最初の小規模噴火の火山灰の中にマグマ物質が相当程度含まれており、その後のマグマ噴火への移行を示唆する結果が得られていた。しかし、それがわかったのは、本格的マグマ噴火の発生当日であった。

気象庁では、従来から、噴火が発生した場合に現地調査で収集した火山灰を産業技術総合研究所などの地質専門家に郵送して分析依頼を行っているが、新燃岳での教訓を踏まえ、産業技術総合研究所の協力を得て、現地官署で顕微鏡写真を撮影して電子メールで送付する体制を構築すべく、鹿児島地方気象台において業務実験を開始している。

3.2 地球化学手法による火山活動予測

火山活動の監視観測のうち、火山ガスの観測も重要な項

目のひとつである。火山ガスはマグマから分離して上昇するため、顕著な地震活動などを伴わず、火山活動の活発化に先駆けて火山ガスの変化が捉えられることがある。また、火山ガスには有毒な成分が含まれていることがあるので、防災上も重要である。

火山ガスの研究者と気象庁が連携した成果のひとつが、三宅島における二酸化硫黄放出量の観測である。

2000年三宅島噴火において、8月中旬の噴火以降、硫黄臭がするという発見者通報が相次いだ。噴火が続く雄山山頂火口に近づくことは危険であり、気象庁は、東京工業大学や産業技術総合研究所(当時工業技術院地質調査所)の指導を得て、COSPEC(紫外線関連スペクトロメータ)による二酸化硫黄の放出量の観測を開始した。当初は島内からの観測、後に関係機関の協力も得てヘリコプターに機器を搭載してトラバース観測を行うようになった。図2に最近の観測データも含め示す。多量の二酸化硫黄放出活動をこれだけの頻度で観測した例は海外も含めほとんどなく、火山学的にも貴重な資料が得られた(Kazahaya *et al.*, 2004)。また、火砕流の危険性から全島避難になった三宅島では、多量の火山ガス放出が住民の帰島を阻むことになったが、気象庁の二酸化硫黄放出量の観測データは、帰島時期など防災上の判断にとって重要な資料となった。三宅島では、それ以外にも、火山ガス組成の時間変化の観測(Shinohara *et al.*, 2003)やカルデラ内の火山ガス採取観測(平林ほか, 2002)など、火山ガスの研究者と気象庁の連携により挑戦的な取り組みも行われた。

三宅島の経験を経て、気象庁は、2002年からの火山監視・情報センターによる集中火山監視体制構築の中で、二酸化硫黄の放出量の観測を全国的に展開していった。そ

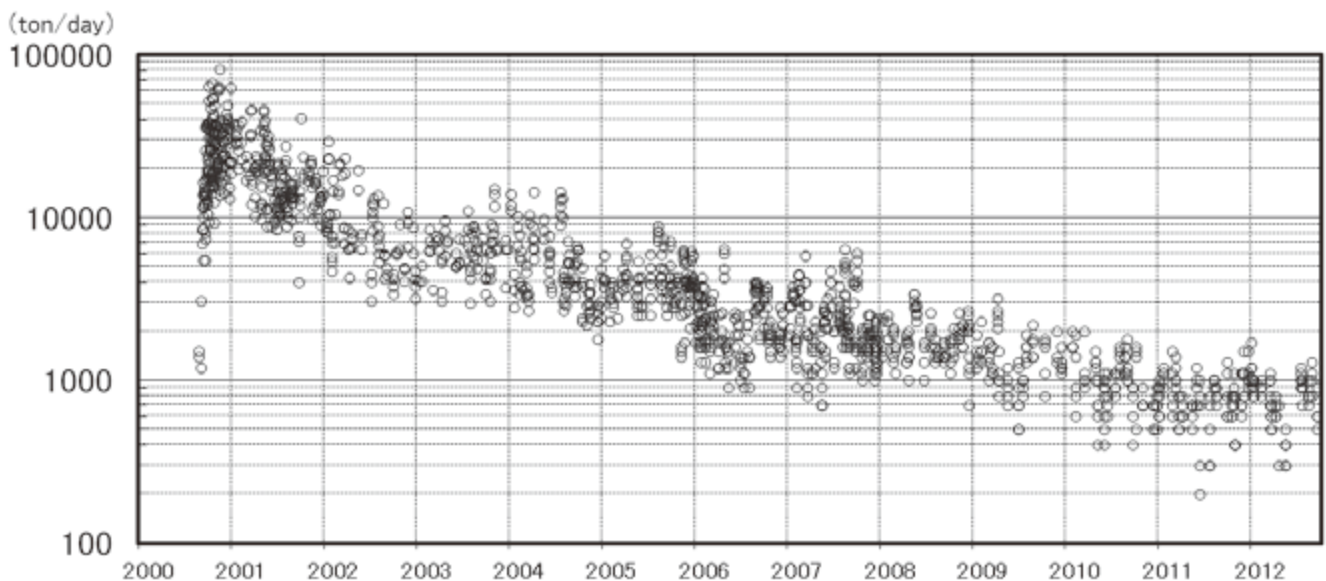


図2 三宅島の二酸化硫黄放出量の推移(2000年8月~2012年12月)。

の中でも、火山ガス研究者の技術的な指導が大いに役立った。今後は、二酸化硫黄以外の火山ガスも含め、リアルタイムかつ連続的な観測手法の開発にも期待したい。

4. おわりに

以上述べてきたように、火山地質学は噴火の中長期予測において貢献してきているが、今後も、各火山の噴火履歴や噴火推移の解明が進むことを期待したい。これは火山監視体制の整備や防災対策の優先度に係わるのみならず、今後発生する可能性のある噴火活動に対する防災対策にも生かされることになる。

現在、気象庁は、火山活動の状況に応じた防災機関や住民等のとるべき防災行動に対応して5段階に区分けした噴火警戒レベルを29火山で運用している。これは、各火山で過去の噴火履歴などから想定される火山活動の推移(噴火シナリオ)と危険区域(火山ハザードマップ)をもとに、関係機関が、災害の及ぶ範囲のイメージを共有して、避難や登山規制などの防災対応の開始時期を表す基準を共同で事前に決定しておくという考え方に基づいている。つまり、噴火警戒レベルは、気象庁の地球物理学的な観測を中心に判断されるが、その基盤となっているのは、火山地質学の成果である。各火山の噴火履歴や噴火推移の解明が進むことによって、想定する噴火シナリオやハザードマップ、さらには噴火警戒レベルが改善され、火山防災対策も進化することになる。このような検討は各火山の地元の火山防災協議会で関係機関が共同して行うことになっているが、火山地質の研究者がその中で重要な役割を果たしている火山も多い。また、噴火警戒レベルを運用している火山の中には、大規模な噴火に対する具体的な対策が必ずしも明確に決まっていない火山も多い。火山地質学の成果を火山防災に生かすという視点で、各火山の火山防災協議会の取り組みにも火山地質学の研究者の貢献を期待したい。

一方、火山地質学等の物質科学的手法は、短期的な火山噴火予知にも重要な役割を果たしている。火山噴火予知連絡会などの場においても、物質科学の役割は大きくなっている。気象庁としては、今後は、より一層迅速で定量的な活動評価に資する成果を期待したい。現在のこれらの手法は、丹念に地道に現場を歩くことにより成果を挙げてきているが、例えば、火山灰や火山ガス放出量など火山噴出物のリアルタイムかつ連続的な観測手法の開発などにも期待し

たいところである。

さらに、火山噴火予知の究極の目標は、噴火の時期、場所、規模、様式及び推移を予測することにある。噴火予知の発展段階は、

- (1) 観測によって異常を検知する
 - (2) 観測と経験則から異常の原因を推定する
 - (3) 現象を支配する物理法則から将来を予測する
- とされている(地震及び火山噴火予知のための観測研究計画:文部科学省科学技術・学術審議会, 2008)。現状では、多くの火山は(1)の段階にあり、活発な活動を続け様々な知見が得られてきている火山においても(2)にとどまっている。今後(3)の段階にまで火山噴火予知技術を向上するためには、地質学などの物質科学と地球物理学の連携による基礎研究の一層の進展が望まれる。

文 献

- 平林順一・野上健治・森 健彦・大場 武・風早康平・気象庁・東京都 (2002) 三宅島における火山ガス観測—陥没火口からの火山ガス直接採取の試み。日本火山学会秋季大会講演予稿集, A04.
- Kazahaya, K., Shinohara H., Uto K., Odai M., Nakahori Y., Mori H., Iino H., Miyashita M. and Hirabayashi J. (2004) Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse. *Geology*, **32**, 425-428.
- 火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会 (2009) 中長期的な噴火の可能性の評価について—監視・観測体制の充実等の必要な火山の選定—。16p.
- 文部科学省科学技術・学術審議会 (2008) 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画 (建議) 。69p.
- Shinohara, H., Kazahaya, K., Saito, G., Fukui, K. and Odai, M. (2003) Variation of CO₂/SO₂ ratio in volcanic plumes of Miyakejima: Stable degassing deduced from heliborne measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 10.1029/2002GL016105.
- 山里 平 (2005) 近代火山観測の歴史—気象庁の監視観測を中心に—。火山, **50**, S7-S18.

感度法による K-Ar 年代測定システムの高精度化

山崎誠子, 松本哲一 (地質情報・火山活動研究グループ)

1. はじめに

地質年代情報は、その事象が「いつ起こったか」、「どのくらい継続したか」という2つの制約を与え、火山の活動履歴や噴火推移を明らかにする上で欠かせない。年代法は、テフクロロジーのように地層の上下関係から相対的な新旧を明らかにする「相対年代法」と、試料の直接分析から具体的に何年前なのかを求める「数値年代法」に二分される。放射年代法は放射性核種の放射壊変を利用する、代表的な数値年代法である。各種の放射年代法は、放射壊変における半減期や試料の元素濃度等により、それぞれ適用できる年代範囲や対象が異なるため、試料に適した年代測定を選択する必要がある (図 1)。その中で K-Ar 法は地質試料中にカリウムが普遍的に含まれるため、適用できる試料の種類が多く、幅広い年代を求めることができ、最も広く利用されてきた。1980 年代後半に開発された「感度法」による K-Ar 年代法は、世界的に見ても日本とフランスでしか行なわれておらず、従来法である「同位体希釈法」による K-Ar 年代法と ^{14}C 年代法の年代空隙を埋める重要な立場にある。現在、産総研では、当初使用されていた質量分析計より高感度の分析計を導入し、より少量の試料で高精度に測定できるよう新型装置システムの改造を実施中である。また、高精度システムというハードウェア的な整備とともに、前処理法や年代解釈法の検討というソフトウェア的な整備も進めていく予定である。本講演では、感度法による K-Ar 年代法の概要を解説するとともに、他の手法との違いや最近の研究動向、今後の研究課題について紹介する。

2. K-Ar 年代法と感度法について

K-Ar 年代法は、岩石・鉱物試料中の ^{40}K が半減期 12.5 億年で ^{40}Ar と ^{40}Ca に放射壊変することを利用した年代測定法であり、岩石試料中の現在の ^{40}K と、蓄積された放射起源の ^{40}Ar の量がわかれば、希ガスである Ar を岩石に保持できるようになってからの時間、すなわちガス保持年代を算出することができる (例えば、兼岡, 1998)。年代算出式は下記ようになる:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda_e} \frac{{}^{40}\text{Ar}^*}{{}^{40}\text{K}} \right)$$

t : K-Ar 年代

λ : ^{40}K の壊変定数 ($5.543 \times 10^{-10}/\text{y}$)

λ_e : ^{40}K から ^{40}Ar への壊変定数 ($0.581 \times 10^{-10}/\text{y}$)

$^{40}\text{Ar}^*$: 放射起源 ^{40}Ar 量 (mol/g)

^{40}K : ^{40}K 量 (mol/g)

火山においては、K-Ar 年代は基本的には、溶岩として地上に噴出・急冷し、固化してからの時間を示す。

試料中の ^{40}K 量は蛍光光度法等を用いて全カリウム濃度を求めたのち、カリウムの同位体存在比の値を用いて算出される。一方、試料中の ^{40}Ar 総量は希ガス質量分析計により求められる。試料中の ^{40}Ar には ^{40}K の放射壊変による放射起源の ^{40}Ar のほかに、試料形成時にもともと含まれていた初生 ^{40}Ar が存在するため、放射起源 ^{40}Ar 量を正しく求めるには、初生 ^{40}Ar を差し引かねばならない。従来法である同位体希釈法では、既知量の ^{38}Ar を内標準 (スパイクと呼

年代測定法	適用年代(年)						対象試料
	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	
^{14}C 法	---	----					有機物, 炭酸塩
K-Ar法			感度法	同位体希釈法			岩石・鉱物
$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法			---	-----			岩石・鉱物
フィッショントラップ法		-----	-----	-----	-----		鉱物・ガラス等
Rb-Sr法				---	-----		岩石・鉱物
U-Pb法					---	-----	岩石・鉱物

図 1 各種の年代測定法の適用年代と対象試料。感度法による K-Ar 法は、従来の同位体希釈法より若い年代にも適用可能であり、カリウムを含む多様な岩石・鉱物が対象となる。

れる)として、測定時に添加して ^{40}Ar と ^{36}Ar の量を測定し、初生アルゴン同位体比を現在の大気のと等しい ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$) という仮定のもとで年代値を算出する。しかし、年代値が 0 と見なせる歴史溶岩の測定から、初生アルゴン同位体比は大気アルゴン同位体比からずれており (283.5~356.6)、この仮定が厳密には成立しないことが示された (Dalrymple, 1969)。このずれは基本的に質量分別と呼ばれる質量差に比例した同位体変化によるものであり (Krummenacher, 1970; Kaneoka, 1980)、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$ 、 $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=0.1869$ を通る質量分別直線の上に分布することがわかっている(図 2; 松本ほか, 1989)。そこで、質量分別効果について、スパイクを添加せずに「感度法」により試料そのものの ^{40}Ar 、 ^{38}Ar 、 ^{36}Ar を定量し、安定同位体である ^{38}Ar と ^{36}Ar の比を利用して初期 Ar 比の質量分別補正する方法が開発された (図 2; 高岡ほか, 1989)。年代の古い試料や K 量が多い試料では、岩石形成時の初生比の影響は少ないが、特に数十万年より若い年代値を持つ試料や K 量の少ない試料は放射起源 ^{40}Ar の蓄積量が微量であるため、この初期値のずれが年代値に有意に影響することになる。Matsumoto *et al.* (1989) は、10 万年より若い新期御嶽火山について、感度法による初期値の補正により、同位体希釈法では層序と不一致が見られた試料の正確な年代が得られることを示した (図 3)。

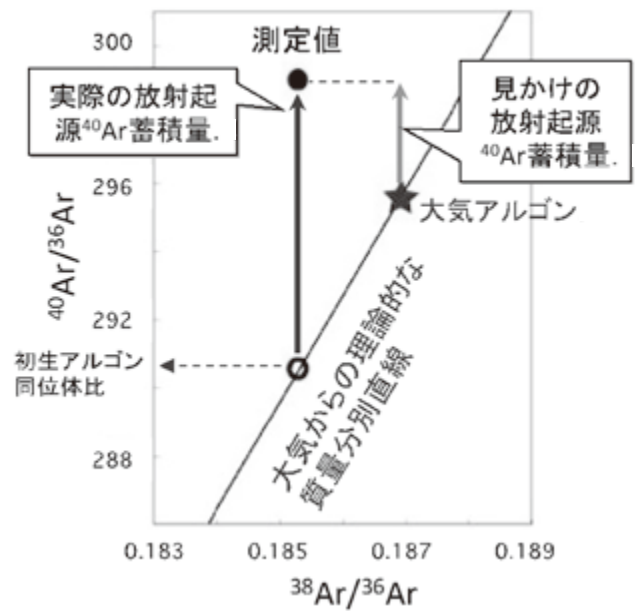


図2 アルゴン同位体の質量分別補正。感度法では、初生アルゴン同位体比が質量分別直線上にあると仮定して、試料の $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値から初生 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ を推定する。同位体希釈法では試料の $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値は測定できないため、初生 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ が大気アルゴンと等しいと仮定し、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の増分から放射起源 ^{40}Ar の蓄積量を求める。

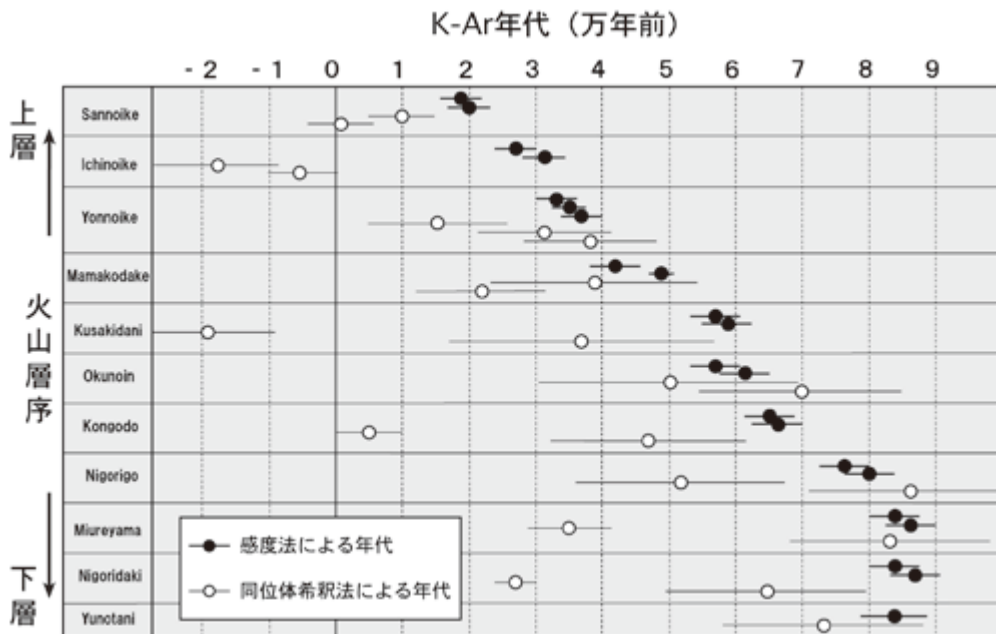


図3 感度法による年代測定例 (Matsumoto *et al.*, 1989)。同位体希釈法では、初期同位体比を大気のと等しいと仮定して年代を算出するため、ときに未来 (マイナス) の年代を示すこともあるが、感度法による測定で同位体分別補正を適用することで、層序と調和的な結果が得られている。

3. 有意な K-Ar 年代値を得るために

先に示した初生比の問題に加えて、得られた K-Ar 年代が意味のあるものになるためには、いくつかの仮定を満たしている必要がある。これは分析値の測定精度とは別途検討すべきであり、精度に対して確度（年代の確かさ）を評価する上で重要である。満たすべき仮定は主に次のようなものである。

まず、(1)放射壊変定数が不変であること。この仮定は必ずしも理論的に証明されているわけではないが、地球科学で用いられる年代の範囲ではこの効果を考慮する必要はない(兼岡, 1998)。K-Ar 年代においては、 ^{40}K の壊変定数は Steiger and Jäger (1977)の値を用いるよう統一され、実験室間の計算過程でのずれを防いでいる。

次に、(2)閉鎖系が保たれていること。岩石形成後、放射壊変以外の要因で K, Ar の出入りがあると、得られた年代値は意味を持たないことになる。この条件が満たされているかを判断することが、年代測定において最も重要な課題の一つである。試料の変質により、特にガスである Ar は容易に逸脱するため、用いる試料が「新鮮」であることが要求されるが、その選定基準は必ずしも決められていない。Yamasaki *et al.* (2011)は層序がわかっている連続露頭から採取した変質程度の異なる試料の年代測定を実施し、薄片観察や変質の目安となる特定の元素濃度比、大気混入率等を用いて年代値の評価を行なった。この研究は陸上のソレイト試料に対して行われたもので、他種の試料に同じ基準が適用できるとは限らないため、それぞれの岩種について同様な手順で基準を確立していく必要がある。

(3)試料形成時 ($t=0$ の時)、放射起源 ^{40}Ar が 0 であること。地球深部には長い時間を経て蓄積された ^{40}Ar が高濃度で含まれている。初生アルゴンは噴出時に大気の数値からの

質量分別直線上に分布していたことが前提とされているが、地下深部における高い $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同位体比が保持されたまま固化的場合があり、そのようなアルゴンは過剰 ^{40}Ar と呼ばれる。質量分別と異なり、過剰 ^{40}Ar は試料形成後の放射起源 ^{40}Ar と区別できないため、感度法でも同位体希釈法でも正しく補正することが不可能である。これまでの研究で、斑晶やゼノリス、また急冷したガラス部分に過剰 ^{40}Ar が多く含まれることがわかっており、火山岩の測定においては、ガラス部や斑晶をできる限り除いた完晶質の石基のみを用いて分析することが一般的に行われる。また、分析に用いる粒径を小さくすることで、ある程度の過剰 ^{40}Ar を減らせることがわかってきている (Ozawa *et al.*, 2006)。しかし、細かくしすぎることによって表面積に吸着する大気アルゴンの量も増加するとともに、作業性も悪くなるため、最適な粒度を決める必要がある。検討を進めている。それでも、過剰 ^{40}Ar の混入を完全に排除できたかどうかを確認する方法はないことを付け足しておきたい。

(2)および(3)の評価においては、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の段階加熱法で評価が可能な場合がある。この手法では、段階的に試料を加熱し、各温度で放出された Ar 同位体比を測定することで、本来の値からずれたと考えられる部分を除外することが可能である。全体の数十%以上の割合で一定の年代が得られた場合、その年代を「プラト一年代」と呼ぶ。しかし、その評価基準は明確に決められておらず、二次的に Ar が逸脱、もしくは過剰 ^{40}Ar が含まれている場合でもプラト一年代を示す場合があるため注意が必要である。また中性子照射時に初生アルゴン同位体比は失われるという欠点もあり、同一試料を用いた K-Ar 法と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法の相互評価が重要になる。ただし、現状では日本の実験原子炉は全て稼働しておらず、再稼働の見通しも立っていない状況である。



図4 構築中の感度法によるアルゴン測定用希ガス質量分析計 (右: Micromass 5400Ar) および試料前処理ライン (左)。

4. 高精度システムの構築に向けて

1990年代頃からの希ガス質量分析計の技術的な発展に伴って、K-Ar年代データの測定精度は格段に進歩している。産総研では、当初用いていたイギリスVG社製VG1200型の希ガス質量分析計に加え、より高感度のMicromass 5400Ar(図4)を導入した。大気中にはアルゴンが約1%存在するので、測定ブランクを低減させるため装置内は超高真空を保つ必要がある。また、存在量が3桁以上異なる ^{36}Ar 、 ^{38}Ar 、 ^{40}Ar を同時に出来る限り高精度で測定するために、測定限界ぎりぎりの最適な試料量を準備すべきであり、試料ごとの予備実験を実施していくことが必要である。新型装置では、ファラデー検出器のほかに電子増倍管が装備されており、ピーク高の低い ^{36}Ar 、 ^{38}Ar をより低ノイズで精度よく測定できる。このため、必要試料量の低減も期待できる。現在、標準大気の繰り返し測定による測定誤差の評価および分析手順の最適化を進めている。感度法では、スパイクを用いない代わりに、毎試料の測定前に ^{40}Ar 量既知の標準大気試料を測定することで感度決定を行うが、年代に伴う誤差計算にとって一番影響が大きいのが装置感度の安定性による誤差である。測定時のタイミングも安定性を左右するため、いかに毎回スムーズな手順で測定するか、集中力との勝負でもある。

5. 火山の年代測定に関する今後の研究

火山の活動履歴を1万年より長い期間で評価し、噴火推移予測を高度化するためにも、高精度のK-Ar年代測定装置・手順を整備し、信頼性の高い年代データの蓄積が求められる。今後、まず噴火履歴調査および火山地質図作成を進めている蔵王火山と九重火山を対象に年代測定を進める。両火山において今年度、年代用試料を採取し、現在、前処理を進めている。

蔵王火山は東北日本火山フロントの中央部に位置する複成火山であり、約100万年前に活動を開始し、主となる山体は約32-12万年に形成されたと考えられる(高岡ほか, 1989)。高岡ほか(1989)により質量分別補正の必要性を初めて示された火山であり、約50試料について年代値が報告されている。層序や古地磁気データとの比較により年代値の妥当性が評価されているが、一部、カリウム含有量が低い試料等において矛盾する年代もあり、また未調査の地域もあったため、再度調査と年代測定を実施する。当時より高精度で詳細に層序関係を議論することを目標とし、今回、同地点からも試料を採取した。

九重火山は、中部九州の火山フロントに位置し、20座以上の溶岩ドームや小型成層火山からなる複成火山であり(鎌田・池邊, 1999)、1995年には333年ぶりに水蒸気

噴火が起こっている(例えば、星住ほか, 1996)。 ^{14}C 法やテフクロロジーに基づき数万年前までの活動履歴が復元されてきているが(例えば、Kamata and Kobayashi, 1997)、より古い活動の詳細な時空間分布は未解明の部分が多い。同位体希釈法によりマイナスの年代が得られている地域や、変質により測定が困難な地域もあったため、再測定に向け、出来る限り新鮮な試料採取を試みた。今回、様々な岩質で変質程度の異なる試料が得られたため、変質の評価と前処理法の検討にも用いたいと考えている。

文献

- Dalrymple, G. (1969) Potassium-argon ages of Recent rhyolites of the Mono and Inyo Craters, California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **3**, 289-298.
- 星住英夫, 川辺禎久, 鎌田浩毅, 斎藤英二 (1996) 九重火山1995年噴火とその堆積物. *地質ニュース*, **498**, 33-35.
- 鎌田浩毅, 池邊浩司 (1999) 2. 九重火山 333年ぶりに目覚めた溶岩ドームの連なる活火山. 高橋正樹・小林哲夫 編「九州の火山」, フィールドガイド 日本の火山 **5**, 33-48.
- Kamata, H. and Kobayashi, T. (1997) The eruptive rate and history of Kuju volcano in Japan during past 15,000 years. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **76**, 163-171.
- Kaneoka, I. (1980) Rare gas isotopes and mass fractionation; an indicator of gas transport into or from a magma. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **48**, 284-292.
- 兼岡一郎 (1998) 年代測定概論. 東京大学出版会, 350p.
- Krummenacher, D. (1970) Isotopic composition of argon in modern surface volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **8**, 109-117.
- Matsumoto, A., Uto, K., and Shibata K. (1989) K-Ar dating by peak comparison method -New technique applicable to rocks younger than 0.5 Ma. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **40**, 565-579.
- 松本哲一, 宇都浩三, 柴田賢 (1989) 歴史溶岩のアルゴン同位体比 - 若い火山岩のK-Ar年代測定における初生値補正の重要性 -. *質量分析*, **37**, 353-363.
- Ozawa, A., Tagami, T., Kamata, H. (2006) Argon isotopic composition of some Hawaiian historical lavas. *Chem. Geol.*, **226**, 66-72.
- Steiger, R. and Jäger, E. (1977) Subcommittee on Geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **36**, 359-362.
- 高岡宣雄, 今野幸一, 大場与志男, 今田正 (1989) 蔵王火山のK-Ar年代測定. *地質学雑誌*, **95**, 157-170.
- Yamasaki, S., Sawada, R., Ozawa, A., Tagami, T., Watanabe, Y. and Takahashi, E. (2011) Unspiked K-Ar dating of Koolau lavas, Hawaii: Evaluation of the influence of weathering/alteration on age determination. *Chem. Geol.*, **287**, 41-53.

岩石学的手法による噴火研究—霧島火山新燃岳噴火を例として—

齋藤元治（地質情報・マグマ活動研究グループ）

1. はじめに

火山噴火推移予測を行うためには、どのようなマグマが活動しているかを知る必要があり、そのためのツールが岩石学である。産総研では岩石学的手法を用いて噴火機構の解明やマグマ供給系の実態把握に関する研究を進めている。本講演では、その一例として2011年に起きた霧島火山新燃岳噴火の研究成果について紹介する。

2. 霧島火山新燃岳噴火の経緯

霧島火山は30x20kmにわたり約20個の火山体や火山口がある火山群の総称である。霧島火山の活動は30万年前を境に、古期および新期の活動に大別される(井村・小林, 2001)。2011年に噴火した新燃岳は、この火山群の南東に位置し、その活動はおよそ1万8000年前に始まった。有史時代(472年以降)10回以上の噴火記録があり、1716-1717年の享保噴火では大きな災害を与えている。この噴火以降、マグマを噴出する噴火は無かったが、小規模な水蒸気爆発が、1959, 1991, 2008年に発生した(下司ほか, 2010)。

新燃岳2011年噴火は、1/19のマグマ水蒸気爆発から始まった(例えば、中田・森田, 2012)。1/26-27に準プリニー式噴火が複数回発生し、噴煙が8km程度まで上昇した。この噴火による噴出物量は地質調査の結果、24 Mt(古川ほか, 2012)と見積もられている。準プリニー式噴火後には、山頂火山口内に溶岩を流出する活動に移行している。この溶岩流出量は気象庁、東大地震研、国土地理院、防災科研により39-46 Mtと見積もられている。その後、ブルカノ式噴火と小規模な火山灰噴出活動が断続的に起きた。ブルカノ式噴火は3月まで、火山灰噴出活動は9月まで続いた。これらの噴火活動に伴い、顕著な地殻変動も観測されている。すなわち、1/26-2/1には収縮、2/1は膨張に転じ、その膨張は11月まで続き、その後、停滞している(今給黎・西村, 2012; 中尾ほか, 2012)。また、噴火とともに火山ガス放出活動が始まり、1月末までにSO₂放出率が10,000 t/dを超える値が測定されたが、その後、放出率が徐々に減少している(森・鹿児島気象台, 2012)。

3. マグマの特徴を調べる

産総研では、1月から9月までの噴火の噴出物(火山灰、火山礫、火山弾)について継続的に観察・分析を実施している。主な分析項目は、火山灰構成粒子の

種類・量比、火山岩の化学組成、鉱物の種類・量比・化学組成、メルト含有物や石基の化学組成である。以下に1-2月の噴出物の岩石学的特徴を概説する。

火山岩の全岩化学組成はマグマの基礎的な情報のひとつである。1/26-27噴火軽石(灰色軽石と白色軽石)、2/1火山弾の全岩化学組成を蛍光X線分析装置で測定した(下司ほか, 2011)。1/26-27軽石のうち主体である灰色軽石と2/1火山弾の化学組成はほぼ一致し、かつ、1716-1717年噴火の軽石と同様な化学組成(安山岩)を持つことが判明した。一方、わずかに存在する白色軽石は灰色軽石よりも高いSiO₂, K₂O濃度を持つ、いわゆる分化した組成であり、今回の噴火に複数のマグマが関与した可能性を示唆する。

火山岩は、斑晶(0.1mm以上の大きさの鉱物)、石基(ガラスと0.1mm以下の微小な鉱物で構成)、空隙(噴火前・噴火中には火山ガスが存在していた)で構成されている。斑晶は地下のマグマで晶出した鉱物、石基は噴火直前のメルトである。従って、これらの鉱物種や化学組成、量比は、噴火直前のマグマの情報を保持している。新燃岳の噴出物の斑晶は、斜長石、単斜輝石、斜方輝石、かんらん石、磁鉄鉱がある。1/26-27の準プリニー式噴火軽石は、約20 vol.%の斜長石、数%の単斜輝石および斜方輝石、1%以下のかんらん石、鉄チタン鉱物を含み、その斑晶量は26-28 vol.%である。また、電子線マイクロアナライザー(EPMA)で主要鉱物である斜長石を分析したところ、斜長石の斑晶コア(斑晶の中心部分)はAn40-90の幅広い組成を示し、An50-60とAn80-90にピークがあることが判明した。斑晶コアの組成は斑晶の形成開始時のマグマを反映しているため、斜長石が少なくとも2種類のマグマから形成されたことを示している。他の岩石学的特徴とともに検討した結果、これらは高温・未分化マグマ(以後、“マフィックマグマ”と呼ぶ)と低温・分化マグマ(以後、“フェルシックマグマ”と呼ぶ)に由来するものと推定された。一方、斑晶リムや石基の微小斜長石の組成はAn70に集中している。これらの結果は、2種類のマグマが噴火直前には混ざって“混合マグマ”になったことを示す。一方、かんらん石、単斜輝石、斜方輝石は、それぞれ単一のピークを持つ分布を示す。それぞれの化学組成から、かんらん石はマフィックマグマから、輝石はフェルシックマグマを起源としていると考えられる。

さらに、マグマ混合を起こした各マグマの化学的特

徴を把握するため、メルト包有物の化学分析をEPMAで行った。メルト包有物とはマグマ内で斑晶が晶出する際に捕獲されたメルトであり、これを分析すればマグマ混合前の各マグマのメルトの組成を知ることができる。その結果、メルト包有物には、主に、玄武岩質安山岩、デイサイト、流紋岩の組成の3種類があることが判明した(図1)。玄武岩質安山岩メルト包有物はかんらん石に含まれ、その主成分元素組成は、7000年前、1235年噴火のマグマ全岩組成に類似している。このメルト包有物のMgO濃度から Sugawara (2000) に基づいてマグマ温度を推定すると 1100°C が得られた。デイサイトメルト包有物は、単斜輝石(接触部 974°C を示す輝石ペアの単斜輝石)、斜方輝石、斜長石に含まれる。同温度は噴火直前の安山岩マグマ溜まりの温度と推定されていることから、このメルト包有物はこのマグマ溜まりのメルト組成を持つと考えられる。流紋岩メルト包有物は、斜長石、単斜輝石、斜方輝石のコアに存在する。玄武岩質安山岩メルト包有物のH₂OおよびS濃度は1-2 wt.%, 0.05-0.20 wt.%, デイサイトおよび流紋岩メルト包有物のH₂OおよびS濃度は1-2 wt.%, 0.02 wt.%以下だった。一方、石基の化学組成を

EPMA で測定したところ、安山岩組成(SiO₂濃度 61-62 wt.%)であった。石基は噴火マグマのメルトが固化したものであるため、マグマ混合の結果、メルト組成は安山岩になったと解釈できる。

4. マグマ溜まりとマグマ混合

以上の分析結果を元に、噴火マグマを供給したマグマ溜まりの温度・圧力・化学構造やマグマ混合割合を推定した。マグマ溜まりの温度は、測定した鉱物の化学組成に輝石温度計や鉄チタン酸化物温度計を適用して得られる。1/26-27 軽石の鉱物化学組成からマグマ溜まりの温度として、880°C、960-970°Cが見積もられた(東宮ほか, 2011; 斎藤ほか, 2011)。また、噴火直前には、マグマ温度が1000°C以上に上昇している傾向も見られる。この結果は、鉱物やメルト包有物の分析から推定されている高温のマフィックマグマの注入と矛盾しない。また、"MELTS"を用いたマグマ溜まり状態(圧力、鉱物量)の推定も実施した(宮城ほか, 2011)。MELTSとはマグマの相平衡に関して実験岩石学データを元にシミュレーションを行う計算プログラムである。1/26-27 噴火の灰色軽石の全岩化学組成、

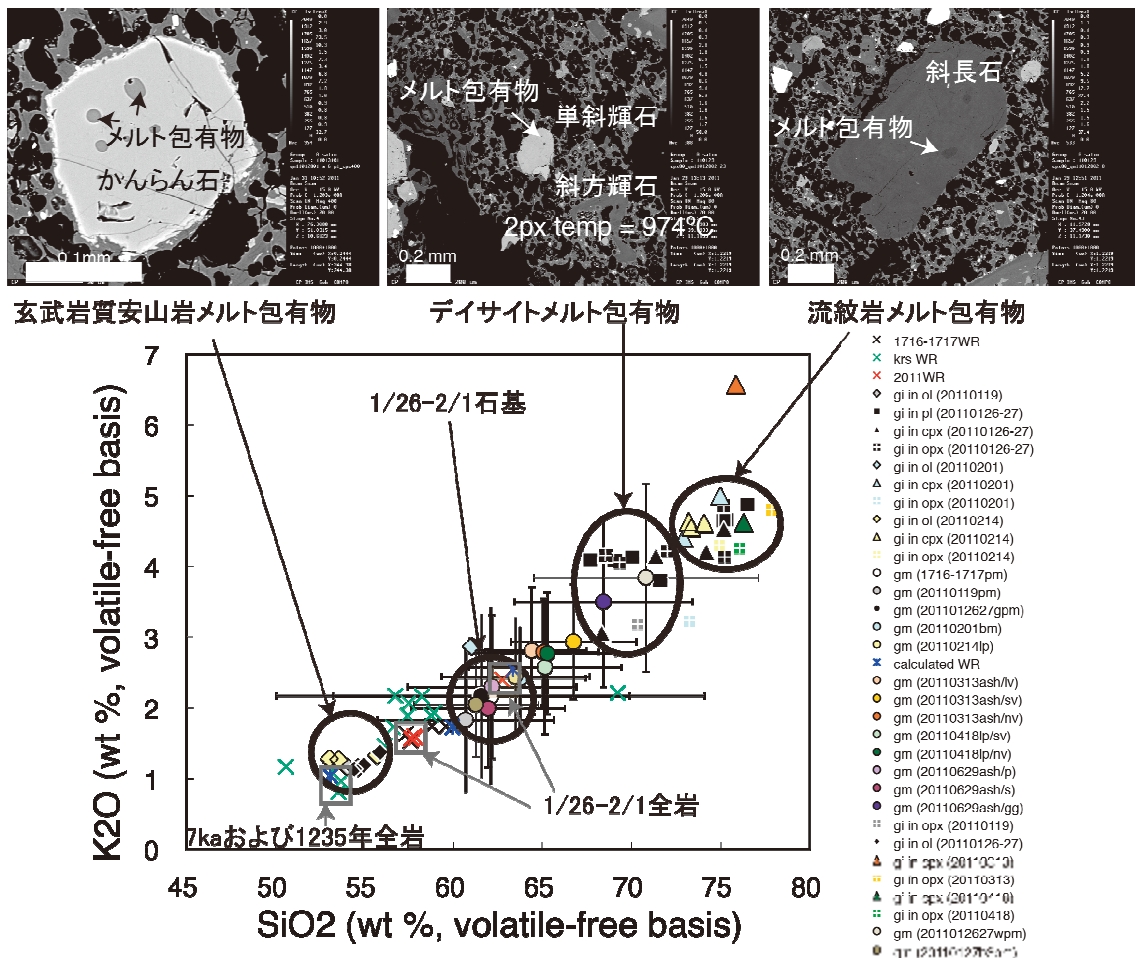


図1 全岩、石基およびメルト包有物の化学組成。横軸はSiO₂濃度(wt.%)、縦軸はK₂O濃度(wt.%)。メルト包有物とその母斑晶の反射電子像も示す。

斜長石の化学組成、温度 (960-970°C)、含水量等の情報からマグマ溜まりの圧力が 150 MPa と見積もられた。この圧力は深さ 6 km に相当し、地球物理学データから推定されているマグマ溜まりの深さ (10km 程度；中田・森田, 2012) に比べわずかに浅い。また、同様な計算を白色軽石と温度 880°C についても行い、マグマ溜まりにおいて結晶度が 60 vol.% 以上のほぼ固化したマグマもマグマ溜まりに存在する可能性を示した。これらの結果を元に宮城ほか (2011) は、周縁部に 880°C、内部に 960-970°C の安山岩マグマで占められるマグマ溜まりが噴火直前に形成されていたことを明らかにした。また、斎藤ほか (2011) は斑晶モード組成や化学組成、メルト包有物および石基の化学組成を用いて 2011 年噴火マグマのマフィックマグマとフェルシクマグマの混合の質量比は 4:6 であると見積もった。これらの結果は、1100°C のマフィックマグマが深さ 6-10 km にあるマグマ溜まりに注入し、ほぼ同量の 960-970°C のフェルシクマグマと混合後、噴火したことを示す。

5. 噴火のタイムスケール

岩石学的な解析により、噴火がどのようなタイムスケールで起きているかを推定する事ができる。上記のように 2011 年マグマは噴火直前にマグマ混合を起こしている。化学組成の異なるマグマが混ざると、メルト-斑晶間の元素の濃度差の変化により、斑晶内で元素の移動 (拡散) が起こり、元素濃度分布 (ゾーニング) が生じる。この拡散は噴火によって停止する。このゾーニングパターンを測定し、斑晶内の元素の拡散係数とから、マグマ混合から噴火までの時間 (噴火タイムスケール) を見積もることができる。東宮ほか (2011) は 1/26-27 の準プリニー式噴火軽石の磁鉄鉱内のアルミニウムやマグネシウムのゾーニングを調べ、マグマ混合が起きてから噴火するまでの時間を 1 日程度と見積もった。また、かんらん石斑晶の Mg/Fe 比についても同様な検討を行ったところ、マグマ混合から数日で噴火したと見積もられている (斎藤ほか, 2011)。従って、マグマ溜まりにマフィックマグマが注入して比較的短時間で噴火に到ったことが明らかになった。

6. 噴火活動の推移とマグマ

2011 年噴火では、マグマ噴出量の大きい準プリニー式噴火と溶岩流出は 2/1 までに終了し、2/2 以降はマグマ噴出量の小さいブルカノ式噴火や小規模な火山灰噴出に移行した。1716-1717 年には噴火が断続的に 1 年半続いており (井村・小林, 2001)、噴火推移を注視していく必要があった。産総研では、活動度の

評価や噴火活動の推移を検討するために、火山灰中の噴火マグマ片の有無やその割合、石基の化学組成を継続的に測定している。大石ほか (2012) は、1-9 月の火山灰粒子について光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) による形態観察を行い、火山灰中の新鮮なマグマ片の割合の経時変化を調べたところ、増減はあるものの、おおまかにはどの噴火にも、新鮮なマグマ片が半分程度含まれていることを明らかにした。さらに、構成鉱物の斑晶量や量比、化学組成、石基化学組成、輝石温度計によるマグマ温度についても経時変化を観測しているが、大きな変化は見られない (大石ほか, 2012；斎藤ほか, 2012)。これらの結果は、2 月以降の噴火でも 1/26-27 噴火について推定されたマグマ混合過程が起きている可能性を示唆している。すなわち、マフィックマグマがマグマ溜まりに注入するイベントが断続的に続いていたことと考えられる。

7. 地下のマグマ量

噴火現象やマグマ供給系の実態を定量的に把握する上で、地下のマグマ量は重要な情報である。上記のメルト包有物や石基の化学分析から混合マグマの S 濃度は 0.07 wt.% と見積もられた。混合マグマの S が火山ガスの SO₂ として火口から放出されているので、この S 濃度と火山ガス観測で得られている SO₂ 放出率 (例えば、森・鹿児島地方気象台, 2012) から脱ガスしたマグマの体積を算出できる (表 1)。1/26-27 の準プリニー式噴火での脱ガスマグマ量は 4 Mm³ と見積もられ、テフラから推定される噴火マグマ量 (9 Mm³) より少ない。ただし、噴火最盛期の SO₂ 放出量は測定されておらず、また測定値も噴煙中火山灰の影響で過小見積もりである事を考慮すると、この脱ガスマグマ量は大幅に過小であると考えられる。また、1/28-2/1 の溶岩流出時の脱ガスマグマ量は 29 Mm³ でこの期間の溶岩蓄積量 (15-18 Mm³) に比べ多い。さらに、マグマ放出が非常に少ない 2/2-9/7 には 20 Mm³、その後の 9/8-2012/9/26 は噴火が全く無かったにもかかわらず脱ガスマグマ量は 11 Mm³ となった。1/28 以降の脱ガスマグマ量が噴火マグマ量に比べて多いのは、マグマ溜まりのマグマが火道内対流で脱ガスしているためと考えられる。また、1/26-27 噴火マグマで推定したマグマ混合が 2/2-2012/9/26 の期間に起きていると仮定すると、脱ガスしたマフィックマグマ量は 12 Mm³ と見積もられる。この量は地殻変動観測で推定されている 2-11 月のマグマ溜まりの体積膨張量 (10 Mm³) と同程度であり、深部からマグマ溜まりに注入されたマフィックマグマが脱ガスしている仮説に矛盾しない。また、12 月以降、地殻変動が停止し、SO₂ 放出率も 100 t/d 以下に

表1 噴火マグマ量、脱ガスマグマ量および地殻変動量の比較

年/月/日	噴火様式	噴火マグマ量		脱ガスマグマ量		地殻変動量(GPS) (Mm3)
		(Mm3)	(Mt)	(Mm3)	(Mt)	
2011/1/26-27	準プリニー式噴火	9	24	>4	>11	
2011/1/28-2/1	溶岩流出～ブルカノ式噴火	15-18	39-46	29	74	-24 (収縮, 1/28-2/1)
2011/2/2-9/7	ブルカノ式噴火～小規模噴火	<0.4	<1	20	52	
2011/9/8-2012/9/26	噴火無し	0	0	11	29	+10 (膨張, 2月-11月)
合計		24-27	63-70	>64	>166	

噴火マグマ量は、東大地震研・国土地理院・防災科研・産総研の観測データ、古川ほか (2012)より

地殻変動量は、中田・森田 (2012)、中尾ほか (2012)、今給黎・西村 (2012)より

SO₂放出率は、気象庁・東大の観測データ、森・鹿児島地方気象台 (2012)より

低下していることは、深部からのマフィックマグマの供給が停止しているためと解釈できる。

8. まとめ

近年、火山観測、特に地球物理観測手法の発展と観測網の充実により、マグマの上昇・蓄積を検知することが可能になってきている。しかし、噴火の活動推移を的確に行うには、地下にどのようなマグマが蓄積し、どのような過程を経て噴火するか、を理解する必要がある。火山岩はマグマが噴火にいたるまでに地下で経た過程を記録しており、岩石学はその記録をひも解きマグマの実態を明らかにできる。本講演で示した岩石学的手法を火山観測とともに行う事で、噴火活動推移予測の実現を進めることができると考えている。

文献

- 古川竜太・下司信夫・及川輝樹・千葉達朗・中田節也・長井雅史 (2012) 霧島山新燃岳火山 2011 年噴火の降下火砕物噴出量. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-P36.
- 下司信夫・宝田晋治・筒井正明・森 健彦・小林哲夫 (2010) 霧島火山新燃岳 2008 年 8 月 22 日噴火の噴出物. 火山, **55**, 53-64.
- 下司信夫・斎藤元治・東宮昭彦・宮城磯治・古川竜太・中野俊・星住英夫・宝田晋治 (2011) 霧島山新燃岳火山 2011 年 1 月噴火を駆動したマグマ. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会講演要旨, SVC050-04.
- 今給黎哲郎・西村卓也 (2012) 火山 GPS 統合解析データに基づく霧島山の変動源モデル (続報). 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-P32.
- 井村隆介・小林哲夫 (2001) 霧島火山地質図. 火山地質図 no.11, 地質調査所, 8p.
- 宮城磯治・斎藤元治・下司信夫・東宮昭彦・石塚 治 (2011)

霧島火山新燃岳 2011 年噴火: マグマ溜まりの収支. 日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, 33-33.

森 俊哉・鹿児島地方気象台 (2012) 新燃岳 2011 年噴火における二酸化硫黄放出率の推移 II. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-06.

中尾 茂・森田裕一・後藤和彦・八木原 寛・平野舟一郎・及川 純・上田英樹・小園誠史・平田安廣・高橋浩晃・一柳昌義・太田雄策・松島 健・井口正人 (2012) 霧島火山における 2011 年 1 月の噴火以降の GPS 連続観測による地殻変動. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-01.

中田節也・森田裕一 (2012) 霧島山新燃岳噴火に関する総合調査の概要と噴火シナリオ. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-21.

大石雅之・下司信夫・篠原宏志・Nicolas Vinet (2012) 細粒火山灰の構成粒子観察に基づく霧島火山新燃岳 2011 年噴火の噴火様式変化の考察. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-P40.

斎藤元治・下司信夫・篠原宏志 (2011) 鉍物・メルト包有物分析から推定される霧島火山新燃岳 2011 年噴火のマグマ混合・脱ガス過程. 日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, 30-30.

斎藤元治 (2012) 霧島火山新燃岳 2011 年 3-6 月の小規模噴火の岩石学的特徴とマグマ混合過程. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会講演要旨, SVC50-P41.

Sugawara, T. (2000) Empirical relationship between temperature, pressure, and MgO content in olivine and pyroxene saturated liquid. *J. Geophys. Res.*, **105**, B4, 8457-8472.

東宮昭彦・斎藤元治・下司信夫・宮城磯治 (2011) 新燃岳 2011 年噴火直前の高温マグマ注入過程: 磁鉄鉱に着目した解析. 日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, 31-31.

過去 1000 年間に 3 回も巨大噴火が起こったインドネシアから学ぶこと

高田 亮（地質情報・マグマ活動研究グループ）, 古川竜太（地質情報・火山活動研究グループ）

1. はじめに

巨大噴火はあの世の出来事だろうか？確かに日本では7000年前以後巨大噴火の経験がない。しかし、日本で近い将来巨大噴火が起こらないという保証はない。北朝鮮と中国の境界にある白頭山は、10世紀にカルデラ噴火をした（町田・新井, 2003）。インドネシアでは13世紀（Takada *et al.*, 2003）、1815年、1883年に地球規模の影響を与えた巨大噴火がおきた。世界で過去200年間の火山噴火による犠牲者数の50%である13万人が、これらのインドネシアの巨大噴火によるものである。さらに巨大噴火後の二次災害三次災害は世界中に拡大した（図1）。タンボラ火山1815年の噴火は、その翌年である1816年に北半球の高緯度地方に、寒冷な夏をもたらし、農作物に大きな影響を与えた。飢餓と疫病が蔓延した。この年は欧米では「The Year Without A Summer」といわれている（Stommel and Stommel, 1983）。そこで、日本では有史に経験をしたことのない巨大噴火の事例を、インドネシア火山地質災害防災センターとの共同研究で学ぶことにした。対象は、クラカタウ火山1883年の噴火、タンボラ火山1815年の噴火、リンジャニ火山13世紀の噴火である。リンジャニ火山13世紀の巨大噴火に関しては、本会場でポスター発表している（古川ほか）。

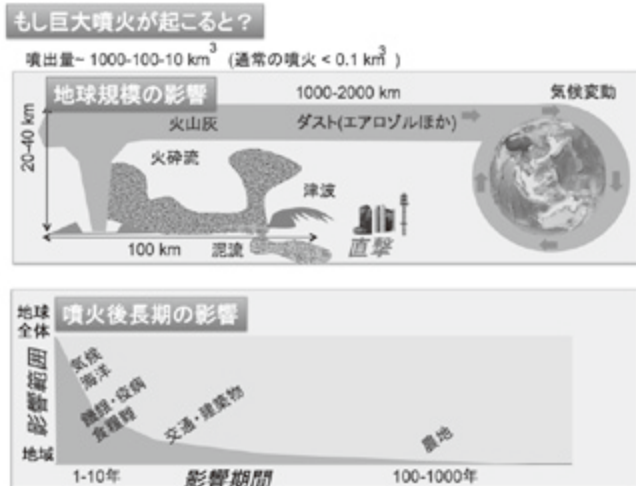


図1. 巨大噴火とは。上図は巨大噴火による空間的影響。火山近傍では、火砕流の直撃に見舞われる。細粒の火山灰やエアロゾルなどのダストは、地球規模の寒冷化をもたらす。下図は時間的影響。厚い火砕流に覆われた地域は、浸食されない限り1000年たっても農地には回復しない。

2. 巨大噴火とは

富士山の宝永噴火は0.7km³（宮地, 1988）である。カルデラを形成したフィリピンのピナツボ1991年噴火では、数km³のマグマが噴出したといわれている（Koyaguchi, 1996）。インドネシアのクラカタウ火山1883年の噴火では約12km³（Mandeville *et al.*, 1996）、タンボラ火山1815年の噴火では約50km³のマグマが噴出し、径数kmのカルデラが形成された（Sigurdsson and Carey, 1989）。第四紀の最大級の噴火である、7万5年前のトバカルデラ（スマトラ島）の噴火では、2000-3000km³のマグマが噴出した（Chesner and Rose, 1991）。統計的には、カルデラを形成するような巨大噴火は、例えば噴出量が50km³クラスで1000年間に数個程度と見積もられている（Simkin and Siebert, 1994）。ただし、この時間範囲では地域により偏りがある。インドネシアで最近200年間に2回、1000年間で3回と頻度が高い（図2）。しかし、10万年間でみれば日本でもインドネシアでも同じような確率に見える。

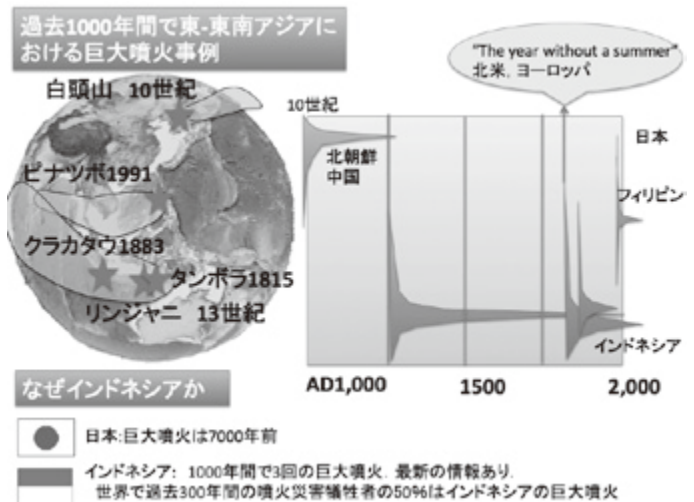


図2. 過去1000年間で東-東南アジアにおける巨大噴火事例とその影響概念図。ロンボク島では、リンジャニ火山の13世紀の噴火による火砕流堆積物に覆われた地域は、河川により浸食された場所のみ農地として利用されている。1815年のタンボラの噴火では、その翌年、北半球の高緯度地方の特に北米やヨーロッパに、寒冷な夏をもたらした。タンボラ火山のあるサンガル半島では、火砕流に覆われた土地は農地に回復していない。

3. 巨大噴火へ至る中長期準備過程

巨大噴火のインパクトについては、欧米の研究が多く行われているが、巨大噴火に至る準備過程の地質的な研究はほとんどないので、そこに注目した。巨大噴火の準備過程の抽出である(図3)。一般に大きな複成火山や成層火山成長には10万年以上の歳月がかかる。

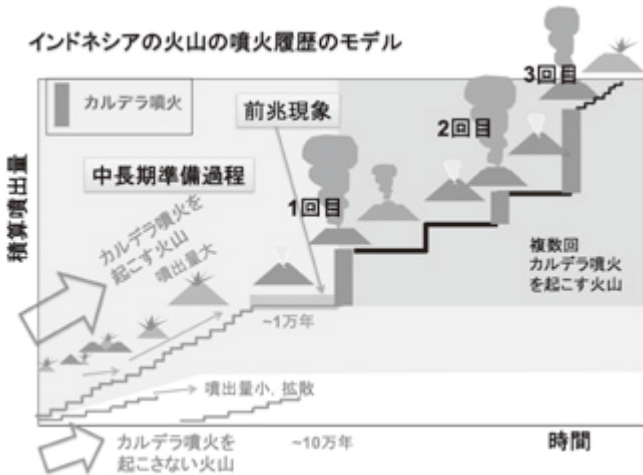


図3. カルデラ形成を伴う巨大噴火を起こす火山とそうでない火山の進化モデル, 縦軸は精算噴出量。

る。

(1) 巨大噴火を起こす火山とそうでない火山: インドネシアでは、カルデラを形成するような巨大噴火を起こした火山とそうでない火山がある(図3, 4)。一般にインドネシアの火山は、複数の火山が寄り集まって火山群を形成する。火山群を構成する個々の火山の規模が小さく中心火口間の距離が離れていると、カルデラを形成しないように見える。一方、複数の火山が集中し、大きな成層火山や楕状火山が発達すると、カルデラ形成を伴う巨大噴火に至る進化をたどることがわかってきた。10万年スケールで眺めると、カルデラを形成した火山は平均噴出率が大きく、結果として大



図4. バリ島からスンバワ島までの火山分布. 白線で囲った火山はカルデラ形成を伴う巨大噴火を起こした。

きな山体を成長させる (Toshida *et al.*, 2012)。

(2) 巨大噴火を起こす火山の噴火履歴

インドネシアの巨大噴火に至る噴火履歴を、カルデラ噴火をしたタンボラ火山 (Takada *et al.*, 2000; Matsumoto and Takada, 2000; 高田・山元, 2008) とリンジャニ火山 (Takada *et al.*, 2003) を例にして、特徴をまとめた。巨大噴火以前には、大きな山体を作っていたこと、すなわち、約10万年間程度高い噴出率を維持してきたこと、噴火の1万年から数千年前には噴出率が激減し、噴火様式が爆発的になったこと(図5)、噴火位置の範囲が縮小したり、中心から移動したりしたこと(図6)などの特徴を見いだすことができる。

カルデラ形成への準備過程

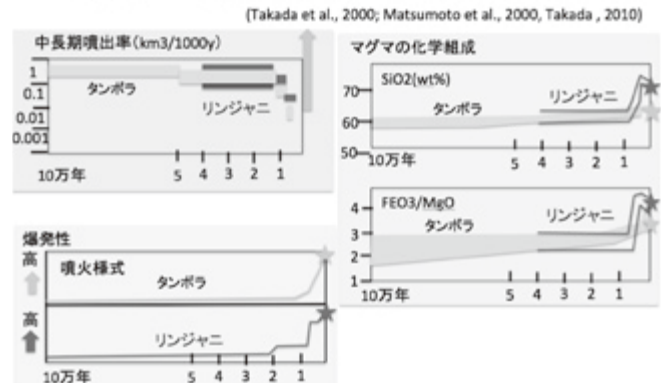


図5. カルデラ形成を伴う巨大噴火(星印)に至る進化過程1. 中長期噴出率の激減, 爆発性の増加, マグマのSiO₂量増加が起こる。

火口位置の変化

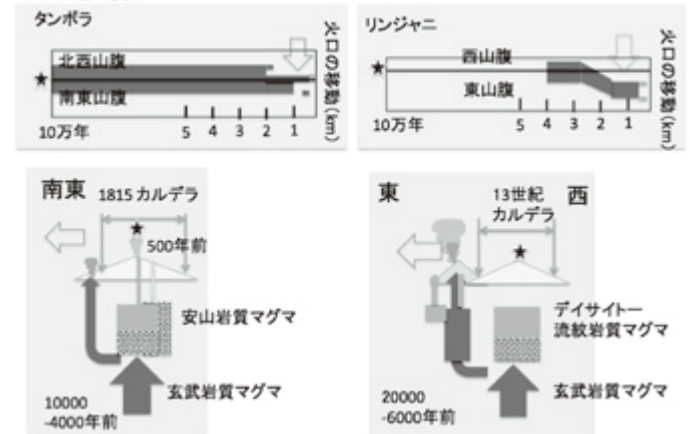


図6. カルデラ形成を伴う巨大噴火に至る進化過程2. 火口位置の変化(上)とマグマ供給系のモデル(下). 星印はカルデラの中心位置。

以上より、大きな山体をもちながら、短期間活動が静穏の火山、時々爆発的な小噴火する火山は、巨大噴火を将来起こすポテンシャルがある、すなわち、必要条件を満たしているといえる。

必要条件を満たしても、噴出率が激減した時期に、中小規模の爆発的な噴火を起こすことがあり、これらがすぐに巨大噴火の直前の現象なのか、まだ静穏期の準備過程なのかを判断することは難しい。たとえば、タンボラ火山では、最後の1000年間に2回の小規模なサブプリニアン噴火を起こしているが、巨大噴火には至っていなかった。

(3) 巨大噴火を複数回起こす火山：巨大噴火と巨大噴火の間には、複成火山ないし成層火山が成長するケースが多い(Furukawa *et al.*, 2012)。バリ島のバツール火山やロンボク島のセガラアナ火山、クラカタウのアナクラカタウ火山がある。もし、これらの火山の噴火活動が静穏になる、またはよりSiO₂量の多いマグマが噴火を始めた場合、地下に巨大噴火を起こしうるポテンシャルがあると考えられる。2回目のカルデラ噴火であ

る、クラカタウ1883年噴火では、噴火前には火山活動が、少なくとも300年間は低下し静穏であった。

4. 前兆現象

既存の文献より、有史のクラカタウ火山1883年噴火とタンボラ火山1815年噴火についてクライマックスに至る3ヶ月の前兆現象を図7にまとめた(Simkin and Fiske, 1983; Stothers, 1984; Self *et al.*, 1984; 高田, 2010)。科学的な観測データが多い、最近のフィリピンのピナツボ火山1991年噴火の前兆現象(Newhall and Punongbayan (eds.), 1996)も比較に入れた。上記3火山の噴火の例を見る限り、いきなり破局的な巨大噴火を起こさずに、少なくとも2-3ヶ月前から、小規模噴火が発生していた。小規模噴火が継続している期間の間だった特徴として、噴火孔、噴気孔や熱水爆発孔の数や活動する範囲が2km以上、場合によっては数kmの規模に達する特徴が見られる。巨大な規模でのマグマの動きによる火山体の膨張が原因と考えることができる。しかし、ピナツボ火山の1991年噴火を除くと定量的な観測が行われていなかった。

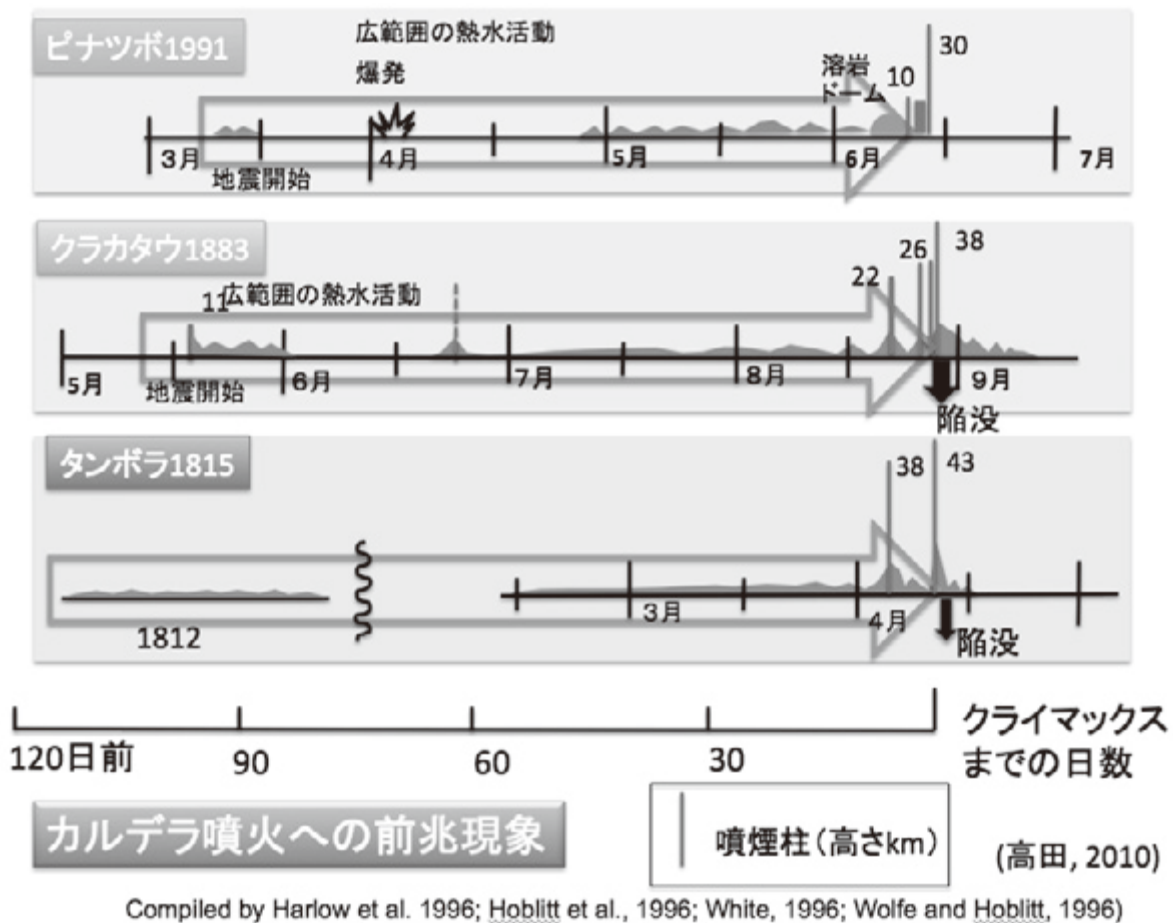


図7. 巨大噴火へ至る前兆現象. 縦軸は噴煙柱高度 (km) . 横軸はクライマックスまでの日数.

5. 巨大噴火の潜在的ポテンシャル評価

以上のように、3と4の例をもとに考えると、今後巨大噴火を起こす可能性がある火山をピックアップできる。(1) 山体高度が2500mを超すが静穏な時期が長く続いている火山、または、(2)すでに過去にカルデラ形成を経験したが、現在後カルデラ火山群の成長が長期間停まっている火山が対象である。

6. 今後の課題

なぜマグマが蓄積するか

マグマ溜りのマグマは、自身の結晶分化や地殻融解により、高粘性になり上昇しにくくなるというのが第1の解である。一般に噴出量に比べて貫入量が多い(Takada, 1999)。例えば、マグマ供給系の成長とともに、下部地殻からの一定のマグマ供給率では、成長していくマグマ溜りの温度を一定には保つことはできずに温度低下が始まる。

一方、マグマ溜りの上部地殻の広域ないし局所応力場がより、中立か水平圧縮的になりマグマが上昇しにくくなり、結果としてマグマの分化が進んでいくというのが第2の解である。

どちらのモデルでも、結果として、マグマ溜りの下から供給される玄武岩質マグマは、その密度が珪長質マグマより大きいいため、珪長質マグマを突き抜られなくなる(図6)。地表にはマグマ溜りの陰ができ、玄武岩質マグマの噴火は、その外側で起こるといわれている(例えば、Bacon, 1985)。

人類はどのような備えをしたらよいか

噴火の規模を予測するのは、現段階では難しい。しかし、巨大噴火のポテンシャルがある火山のピックアップは可能だろう。世界の人口は急増している。世の中がハイテク文明社会に進化している。過去の巨大噴火に比べると人類社会に対するダメージは大きいであろう。噴出量が10km³から50km³程度の噴火に関しては、統計的には100年間でも1回は起こりうる。この程度の巨大噴火に対しては、前兆現象の解析、クライマックスに対する避難方法、地域に応じた2次災害、3次災害へ波及していくシナリオ作り、そして大気、海洋、土地の回復過程のモデルを考えておく必要があるだろう。

文献

Bacon, C.B. (1985) *J. Geophys. Res.*, **90**, 11243-11252.
 Chesner, C.A., Rose, W.I. (1991) *Bull. Volcanol.*, **53**, 343-356.
 Furukawa, R., et al. (2012) G-EVER1 Abstracts Volume,

Open-File Report of GSJ, no.557.
 Koyaguchi, T. (1996) *Fire and Mud*, Univ. Washington Press, 583-600.
 町田洋・新井房夫 (2003) 新編 火山灰アトラス[日本列島とその周辺]. 東京大学出版会, 336p.
 Mandeville, C., et al. (1996) *Bull. Volcanol.*, **57**, 512-529.
 Matsumoto, A., Takada, A. (2000) ITIT Report*. 83-87.
 宮地直道 (1988) 地質学雑誌, **94**, 433-452.
 Newhall, C., Punongbayan, R. (eds) (1996) *Fire and Mud*, Univ. Washington Press, 1126p.
 Self, S., et al. (1984) *Geology*, **12**, 659-663.
 Sigurdsson, H., Carey, S. (1989) *Bull. Volcanol.*, **51**, 243-270.
 Simkin, T., Finke, R. S. (1983) *Krakatau 1883*, Smithsonian Institute Press, 464p.
 Simkin, T., Siebert, L. (1994) *Volcano of the world*, 2nd, Geoscience Press INC, Tucson, 349p.
 Stommel, H., Stommel, E. (1983) *Volcano Weather*. Seven Seas Press, Newport RI, 177p.
 Stothers, R.B. (1984) *Science*, **224**, 1191-1198.
 Takada, A. (1999) *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **93**, 93-110.
 Takada, A., et al. (2000) ITIT Report*, 42-79.
 Takada, A., et al. (2003) 地球惑星関連科学合同大会 2003.
 高田亮・山元孝広 (2008) 火山の事典, 朝倉書店.
 高田亮 (2010) 地質学雑誌, **116**, 473-483.
 Toshida, K., et al. (2012) G-EVER1 Abstracts Volume, Open-File Report of GSJ, no.557.
 *ITIT Report: Report of International Research and Development Cooperation ITIT Projects. Research on Volcanic Hazard Assessment in Asia. AIST, METI, 115p.

【ポスター】

P01

火山噴火緊急減災対策における地質情報の活用

吉田真也, 近藤玲次 (一財 砂防・地すべり技術センター)

1. はじめに

日本には活火山が110存在し、そのうち緊急度の高い29火山を対象にして、国と県の砂防部局が種々の火山防災対策を行っている。

ここでは個々の火山防災対策と、それを検討する中で地質情報がどのように活用されているかを紹介し、今後地質情報をより活用するための方向性について述べる。

2. 砂防部局が取り組んでいる火山防災対策

砂防部局が関係機関と連携して進めている火山防災対策には、主に以下のものがある。

(1) ハザードマップの作成

過去の噴火実績を元に将来想定される噴火に対して、現象の種類、影響範囲、到達時間など火山防災対策の基礎として必要な情報を盛り込んだマップを作成する。

(2) 火山・土砂移動現象監視機器の整備

ハザードマップに基づきカメラ、センサーなど監視機器を平穏時から設置し、噴火時の火山活動と土砂移動現象を監視し、住民避難や対策工事の安全をはかる。

(3) 火山砂防計画による施設整備

想定される噴火に対して人命・財産を保全するため、平穏時から土砂を捕捉し安全に流下させる砂防施設を計画的に整備する。

(4) 緊急減災対策計画の策定

噴火が切迫した等の緊急時に、土嚢やブロック積みなど簡易で迅速な対策の施工、火山活動に応じた危険区域の随時想定など、空間的・時間的に制約がある中で最大限の対策を行い、出来る限り噴火による被害を現象させるための対策をあらかじめ検討しておく。

(5) 火山噴火に対する緊急調査

噴火が発生した際に、降灰量と影響範囲およびその後の降雨による土石流の危険区域と基準雨量について、法律に基づき国が調査し地方公共団体に情報提供する。

3. 火山防災対策の基礎資料としての地質情報

火山防災対策を実施するにあたっては、まず対象となる火山において「過去に何が起きたのか」を把握し、それを踏まえて今後の噴火でどのような現象が、どの程度の規模で発生するかを想定することが必要となる。

過去の噴火実績については文献記録から判明することは、長い火山活動のほんの一部であり、表層調査やトレンチ・ボーリングによる堆積物調査から得られる地質情報が、想定において決定的な役割を果たす。

特に全ての対策の基礎資料となるハザードマップ(災害予想区域図)を作成するに当たっては、①地質情報から得られた現象到達範囲を実績図としてそのまま記載する、②地質情報を元に、過去の噴火により発生した現象の種類、堆積物の到達範囲、総量、粒度分布などを整理し、それを元に数値シミュレーションなどの手法により到達範囲を想定する、③数値シミュレーションのうち値が不明なパラメータについては、実績の到達範囲を再現することにより検証する、という3つの観点から地質情報が活用される。

4. 今後の地質情報の活用について

当財団の自主研究として、気象庁の日本活火山総覧(第3版)や産業技術総合研究所がHPで公開している活火山データベースを用いて、過去の噴火回数を統計的に整理することにより今後数十年の噴火発生確率を試算した。

その際に「噴火回数」や「一連の噴火」をどう定義するかにより発生確率が変化することが課題として挙げられた。

また、ほとんどの火山において過去の噴火における時間的な情報が得られていないため、緊急減災対策計画では対策可能期間を仮定してその時間内で対策が可能な工法・規模・構造を検討している。

火山防災対策の基礎資料として地質情報は非常に重要な役割を果たしているが、よりきめこまかい対策を実施するにあたり地質情報に時間軸を、特に噴火の前兆期から噴火に至るまでの時間的な情報をできるかぎり入れることが望まれる。



緊急減災対策のイメージ図

桜島昭和火道直下の脱ガスと噴火プロセス

宮城磯治, 篠原宏志, 伊藤順一 (地質情報研究部門)

1. はじめに

火道上部におけるマグマ脱ガス過程は、火山噴火のメカニズムを理解するうえで基礎となる情報である。桜島では2008年2月以降主に昭和火口において火山灰の噴出を繰り返す活発な活動が続いており、新鮮なマグマ試料を頻繁に得ることが可能である。また桜島周辺には様々な観測機器が設置され噴火映像や地球物理学的データの時間変化が得られているため、地球化学的データとの組み合わせによる新たな理解の進展が期待できる。そこで本研究では桜島の火山灰の水溶性付着成分(Cl, F, S)と色の時間変化を調べることにより、桜島の火道上部で何が起きているのかを考察する。

2. 火山灰試料と分析内容

1981 - 2011年に桜島火山の南岳山頂火口および昭和火口から放出された火山灰を、気象庁鹿児島地方気象台が採取した(一部試料の採取は地質調査総合センターによる)。火山灰試料は噴火直後に採取されたため基本的に雨に一度も濡れていない。この火山灰試料に一定量の純水を加え一定時間振盪させた上澄み液を濾過し、イオンクロマトグラフにかけ、水溶性付着成分量を得た。また、土色計(Minolta SPAD-503)を用いて、生の火山灰と、特定粒径に篩分けた火山灰粒子に対して色の測定を行なった。色の測定方法は宮城・東宮(2002)による。

3. 結果

水溶性付着成分量により火山灰は、S/Cl比が約10のグループとS/Cl比が約1のグループに大別された。水溶性付着成分量には経時変化が認められる。1981 - 1991年に南岳山頂火口の活発な噴火で放出された火山灰は、S/Cl比が約1のグループに属する。これに対し、2008年に活動を再開した昭和火口の火山灰は、ほとんどがS/Cl比が約10のグループに属するが、時間とともに付着成分量が低下し、2010年にはS/Cl比が約1のグループも出現した。火山灰の色調にも経時変化が認められる。2008年に昭和火口から放出された火山灰の色調は、時間とともに黄色みが強いものから弱いものへと推移した。

4. 考察

気象庁が公開している桜島の噴火時刻情報をもとに、火山灰をもたらした個々の噴火前の休止時間の長さや火山灰の分析結果とを比較した。その結果、休止時間の長さや火山灰の水溶性付着成分量との間に正の相関が有ることが判明した。また火山灰の黄色味の強さも、休止期間の長さや正の相関を持つことがわかった。桜島の火山灰にみられる黄色みの強い色調は、自然硫黄(黄色)や熱水変質鉱物の存在を反映していると考えられている(宮城ほか, 2010)。火山灰の水溶性付着成分量および黄色味の強さと、噴火休止時間の長さとの間にみられた相関は、火道頂部に滞留しているマグマが、火山灰となって噴火する前に、滞留時間に応じ、噴気ガスの一部を蓄積したことを反映していると思われる。1981 - 2011年にかけて観察された火山灰の水溶性付着成分量と色の変化は、火道内マグマ対流と噴火によるマグマの入れ替わり頻度に対応した、火道頂部におけるマグマ平均滞留時間の変遷を反映していると解釈される(Miyagi *et al.*, in press)。

文 献

- 宮城磯治・東宮昭彦(2002) 色変化に基づく火山灰加熱温度の推定: 三宅島火山 2000年8月18日火山弾の着地温度への適用. 火山, **47**, 757-761.
- 宮城磯治・伊藤順一・篠原宏志・鹿児島地方気象台(2010) 火山灰から見た2008年の桜島昭和火口の再活動過程. 火山, **55**, 21-39.
- Miyagi, I., Shinohara, H., and Itoh, J. (in press) Variations of color and leachate contents of volcanic ashes from Sakurajima volcano, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan.

繰り返し空中磁気探査による火山活動推移評価の研究 —有珠火山を例として—

大熊茂雄, 中塚正 (地質情報・地球物理研究グループ), 橋本武志 (北大理), 宇津木充 (京大理)・
神田径 (東工大火山流体), 小山崇夫 (東大震研), 有珠山空中磁気探査グループ

1. はじめに

GPSを利用した位置標定法の向上や高度変化を伴う測定データの任意の曲面へのリダクション法の確立により, 火山地域での高分解能空中磁気探査が実用化され, 国内外の火山で調査が実施されるようになった. 筆者等は高分解能空中磁気探査を同一火山で繰り返し実施し, その時空間変化から火山下に貫入したマグマの位置や分布, またその冷却過程など調査する火山活動推移評価に係わる研究を開始している. 本発表では, 有珠火山を例として大学側と共同して行った関連調査・研究について発表する.

2. 空中磁気探査

有珠火山では, 一回目の高分解能空中磁気探査として, 地質調査所(現産総研)が有珠火山 2000 年噴火の直後の 2000 年 6 月に調査を実施している(大熊ほか, 2001). 二回目は, 北大が中心となって, 2000 年噴火から 10 年を経過した 2010 年 9 月に一回目の調査と直交する東西測線配置で調査を実施している(Hashimoto *et al.*, 2011).

3. 磁気異常の時空間変化

拡張交点コントロール法(Nakatsuka and Okuma, 2006)により, 二回の調査データを用いて, 測線の交点での磁気異常変化を計算したところ, 顕著な磁気異常変化が 2000 年噴火域, 山頂カルデラ内及び昭和新山で検出された(中塚ほか, 2011). これらの地域では 2000 年噴火以降, 北大により地上定点での繰り返し磁気測量が行われており, その結果得られた磁気異常変化と繰り返し空中磁気探査による磁気異常変化とで良い一致が認められた(Hashimoto *et al.*, 2011). この結果は, 繰り返し空中磁気探査による磁気異常の時空間変化検出の有効性を示している.

4. 磁気構造の時空間変化

2000 年噴火以降 2010 年までの 10 年間の空中磁気異常の時空間変化データを 3 次元イメージング(Nakatsuka and Okuma, 2011)し, 磁気構造の変化を求めた. この結果, 2000 年噴火域, 山頂カルデラ内(銀沼火口周辺, 屏風山南

方)及び昭和新山では, 帯磁を示す正の磁化強度域が解析され(図 1), 冷却過程が進行していることを示している. また, 2010 年の調査範囲端部に位置するものの, 明治新山南方の地下でも正の磁化強度域が解析されている.

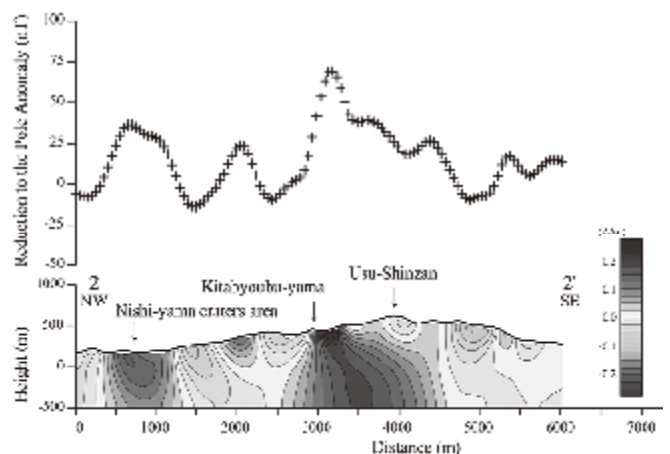


図1 磁気異常時間変化の3次元イメージング例
西山火口地域から山頂火口をNW-SEに横断する磁化強度断面

5. まとめ

有珠火山で繰り返し空中磁気探査を実施し 2000 年以降 10 年間の磁気異常時間変化の検出と対応する磁気構造のイメージングに成功した. 他の火山でも同様の調査を実施することにより, 冷却過程に加え噴火の準備過程も検出できる可能性があり, そのためには, まずは高分解能な空中磁気探査を実施し火山毎にデータを整備する必要がある.

文献

- Hashimoto *et al.* (2011) *Proc. 10th SEGJ Intl. Symp.* SEGJ, 276-279.
Nakatsuka and Okuma (2006) *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)*, **59**, 449-458.
Nakatsuka and Okuma (2011) *Proc. 10th SEGJ Intl. Symp.*, SEGJ, 285-289.
中塚ほか (2011) Conductivity Anomaly 研究会 2011 年論文集, 37-44.
大熊ほか (2001) 地調研報, **52**, No.4/5, 149-154.

火山灰粒子の岩石学的特徴から見た火山噴火様式とその推移の予測

大石雅之, Nicolas VINET (地質情報・マグマ活動研究グループ),
下司信夫 (地質情報・火山活動研究グループ)

1. はじめに

火山噴火活動は数ヶ月から数年間続くことが多く、その推移を予測することは防災上、重要である。火山噴火の推移予測には近年、火山性地震や地殻変動などの観測的手法が大きく貢献している。一方、降下火山灰などの噴出物は、火山内部のマグマの情報を豊富に持つ物的証拠であり、その分析による噴火推移の高精度予測手法の確立も、火山防災にとって有益である。

本研究は、噴火時にマグマが上昇し火山灰を形成して放出するまでのメカニズムを、火山灰の粒子構成、マグマ由来の粒子の形態・組織、化学組成といった岩石学的特徴に基づいて解明することを、目的としている。そのために実際の噴火事例において、観測された表面現象と火山灰の特徴とを対比し、火山灰のどのような特徴に着目すれば噴火様式の推移を即時的な分析によって予測できるのかについて明らかにすることを目指している。

本発表では特に、2011年霧島火山新燃岳噴火において、噴火様式の変化と降下火山灰の特徴との対比を行った研究成果について紹介する。

2. 2011年霧島火山新燃岳噴火

霧島火山新燃岳では、2011年1月19日にマグマ水蒸気爆発で噴火活動が始まった。同26日には、準プリニー式による数時間にわたって噴煙が上がる連続的な大規模爆発的噴火が発生した。その直後には火口底に溶岩が出たことが確認され、それ以後、ブルカノ式噴火と呼ばれる短時間の爆発的噴火が繰り返される活動に移行した。噴火頻度は2月初旬で高かったものの、4月以降は極めて低調となり、2011年10月以降（2012年12月26日現在）新燃岳では噴火は発生していない。

3. 分析と成果

私たちは、一連の噴火活動の全期間を網羅するように降下火山灰を入手した。それらについて、構成粒子の分類とその含有量、実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) による、マグマ由来と思われる粒子の外形および内部組織、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による石基化学組成の分析を行った。

その結果、マグマ由来と推定される新鮮なガラス質粒子は、活動全期間を通じて火山灰中に 50% 以上含まれていた。また、同様にマグマ由来と推定される気泡を多く含む粒子も、含有量に変動はあるものの活動全期間を

通じて含まれることが明らかになった。これら粒子は、上昇してきたマグマが火口直下などに滞留することなくそのまま火山灰となって噴出したものと考えられる。新鮮なガラス質粒子の形態や内部組織、ガラス部の組成には、全活動期間を通じて顕著な時間変化は認められない。

これらのことから、霧島火山新燃岳 2011 年噴火は、準プリニー式の大規模な爆発的噴火もブルカノ式の小規模な単発の爆発も、ともに火山体下部から新鮮なマグマが直接放出されることによって引き起こされていることが明らかになった (Oishi *et al.*, 2012)。従来、ブルカノ式噴火は、火口直下に滞留・固化した溶岩を吹き飛ばす噴火とのイメージが一般的であった (例えば、Morrissey and Mastin, 2002) が、本噴火は必ずしも溶岩の吹き飛ばしだけではではない。

4. 桜島火山および将来の噴火活動への応用

桜島火山では、半世紀以上にわたって断続的に噴火が頻発し、とくに最近では年間 1000 回近い爆発的噴火が発生するなど、極めて活動的な状態にある。

霧島火山と同様、降下火山灰の構成粒子を始めとする岩石学的特徴を見ると、マグマ由来と推定される気泡を多く含む粒子の含有量は十数%以下と低く、溶岩を破碎したようなブロック状のガラス質粒子を豊富に含む。このことから、桜島火山では火口直下の溶岩の栓を、断続的に吹き飛ばしてブルカノ式噴火が発生しているものと推定される。

本研究では、火山灰中のマグマ由来粒子のうち、特に気泡を多く含む粒子の含有量が、噴火様式、具体的には噴煙高度、噴出量、噴火継続時間といった数値と相関するとの作業仮説を持っている。そこで、桜島火山のほか、浅間火山 2004 年噴火などの事例や今後発生し得る噴火についても火山灰の構成粒子に着目して分析・比較していく予定である。これらにより、噴火が発生した際に、いち早く火山灰を採取し即時的な分析を行うことで、噴火メカニズムの推定と噴火推移の予測が迅速に行えるように、手法の確立を目指していく。

文 献

- Morrissey and Mastin (2002) Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, 463-475.
Oishi *et al.* (2012) Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2012, EGU2012-9563.

日本の火山（第3版）

中野 俊, 西来邦章, 宝田晋治（地質情報研究部門）

1. はじめに

200万分の1縮尺の地質編集図「日本の火山（第3版）」が完成、2013年に刊行される（中野ほか、2013）。1968年に初版が、1981年に第2版が発行されており、第3版は32年ぶりの大幅改訂版である。第2版出版以後、放射年代測定技術や化学分析装置が飛躍的に進歩し、膨大な年代測定値や化学組成などが蓄積してきた。また、2009年の国際地質科学連合（IUGS）による時代区分の定義変更（第四紀の下限が約180万年前から約260万年前に変更）に対応したことにより、第2版よりも大幅に火山数が増えており、日本列島の第四紀火山を一覧できる最新の火山分布図である。火山数で言えば、第2版が約300、第3版が約460である（第2版は枝番を使っており単純比較はできないが、第3版と同様の数え方をした）。

2. 第3版の内容及び特徴

分布図は20万分の1日本シームレス地質図を基に編集し、基本的に1火山・火山群を1区分で表現するため、シームレス地質図の地質界線の統廃合を行った。また、2012年時点で公開されているシームレス地質図は旧来の時代区分に基づくため、西来ほか（編）（2012）に基づき、鮮新世から新たに第四紀に変更されたジェラシアン期の火山抽出作業も行った。なお、シームレス地質図で第四紀火山岩とされているが、最新の知見ではそう判断できないものは新第三系火山岩として区分する作業も行った。

火山群については、時間的、空間的にある程度まとまった活動範囲とみなせる火山の集合体を1火山群とした。1火山あるいは火山群の定義は、これまで初版、第2版のほか、既存研究で使われてきた名称・定義を踏襲したもの、新たに区分し直したもの、また、再定義により改称したものがある。特に中部九州では、これまで未整理であったいわゆる豊肥火山岩類については、時代・岩質・分布等に基づき大幅に修正・再定義している。

大規模火砕流を噴出したカルデラ火山については、先カルデラ火山、カルデラ火山、複数の後カルデラ火山に区分したことがある。活動期に時間間隙がない場合、あるいは詳細が不明で研究例が少ない場合など、これらをまとめて1火山として扱っている。

海域については、海底噴火地点に加え、変色水や海底熱水活動などの火山現象が確認された地点に限って表示した。海底から採取された岩石試料の年代測定により、

第四紀であることが判明している火山もいくつかあるが、ここでは表現していない。また、海底カルデラについては、火山現象の確認された地点に絡むもの以外は基本的に省略した。

陸域の火山については、時代再定義により大幅に追加されたが、そのほか第2版と比べ、年代測定などにより新規に第四紀と判明したことにより組み入れられたものがある。また、旧来の定義による第四紀火山は、第2版のほか、火山学会1999年発行の火山カタログ、地質調査総合センター発行の数値地質図（火山岩の産状編集委員会、2000）及びそれに基づいて2001年にWeb公開が開始された「日本の第四紀火山」、西来ほか（編）（2012）などに基づく。活動年代については多数の未公表データも参照した。

これらのもととなったデータについては、地質調査総合センターが編集するWeb公開データベース「日本の火山」として2013年以降、逐次公開予定である。これには2012年時点で公開されている「日本の第四紀火山」及び「活火山データベース」が統合、再構築される。

第四紀の下限がさかのぼることにより、より開析された火山が多くなるだけでなく、特に第四紀前半の変動地帯では火山岩が堆積岩中に挟在し、変形している場合も見られるようになる。これらのうち元の火山体の復元が困難な場合は、火山として認定しなかった。また、特に九州地域には給源不明の火砕流堆積物が多数分布するが、これらについては分布図に図示したが火山として認定していない。孤立した分布を示す溶岩岩体の場合は、給源が特定できなくても火山活動中心がそれほど遠方であると考えられず、ほぼ現在の分布域付近に給源があると想定し、1火山として扱った。

文 献

- 火山岩の産状編集委員会編（2000）日本の新生代火山岩の分布と産状 Ver.1.0. 数値地質図 G-4, 地質調査所。
 中野ほか（2013）日本の火山（第3版）。200万分の1地質編集図, no.11, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
 西来ほか（編）（2012）第四紀火山岩体・貫入岩体データベース。地質調査総合センター速報, no.60, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。

日本の第四紀火山岩体・貫入岩体データベース

西来邦章, 伊藤順一, 上野龍之 (地質情報研究部門)

1. はじめに

現在活動的である火山,あるいは既に開析が進んだ第四紀火山においても,それは火山体の成長・形成過程の一過程を見ているにすぎない。つまり,噴火現象の多様性や新規火口の出現,火山活動場の変遷など,長期~超長期の火山活動推移を理解するためには,数万~数十万年程度の地質学的スケールで,火山体のみならず,火山群あるいは火山クラスターとしての活動履歴を解明することが重要となる。そのためには,精度の良い時間軸を持った各火山の活動史が復元されていることが必要である。本発表では,全国の第四紀火山・火成活動に対する最新の研究成果を収集し,最も基礎情報となる各火山体の分布とその活動時期を一元的に整理した「第四紀火山岩体・貫入岩体データベース」(西来ほか(編),2012)について紹介する。

2. 採録されたデータ

第四紀の時間的定義は,2009年の国際地質科学連合(IUGS)によって,その下限が1.806 Maから2.588 Maに変更された。地質調査総合センターでは,研究情報公開データベース(RIO-DB)で,「日本の第四紀火山」をWeb公開するなど,第四紀火山に関する情報発信を行っているが,これらは旧来の時代区分でのデータセットであるため,新たな第四紀の定義に則したデータベースの構築が求められている。そこで,我々は,日本列島のす



べての火山岩類を対象に既存の文献データを用いたスクリーニング作業を重点的に行い,既存のデータベースでは第四紀火山としてリストアップされていなかった火山,第四紀の下限の変更に伴い新たに第四紀に帰属することとなった火山および火山岩体,および,現地表に露出した第四紀貫入岩体のデータを収集し,本データベースに採録した。なお,これらの分布については,「日本の火山(第3版)」(中野ほか,2013)に反映されている。

3. 内容と最新情報への更新

本データベースはブラウザ上で閲覧可能で,シームレス地質図やRIO-DB「日本の第四紀火山」とリンクしている。採録したデータは,これまでに公表された学術論文,学会講演要旨等を用いた火山岩・貫入岩体の地質レビューに基づいている。構成内容は,「火山・岩体名」,「地層名」,「主要な位置」,「形式・構造」,「活動年代」,「主な岩石」,「新規追加の根拠」および「引用文献」とした。今後の研究によっては第四系から除外される可能性のあるもの,あるいは周辺の火山の一部として取り扱うべき可能性のある火山岩体・貫入岩体も収録した。

研究は日進月歩で進んでおり,最新の成果は,常に公表され続けている。従って,データベースは,責任のある管理体制の元において常に最新の情報に更新され,情報発信されることが望ましい。このような観点から,本データベースは,定期的に更新作業を行い,最新バージョンを公開していく予定である。最新のバージョンは,<http://unit.aist.go.jp/dgcore/db/QVDB/> から入手できるように整備を進めている。

謝辞

本データベース作成は,原子力安全・保安院(現,原子力規制委員会原子力規制庁)「平成23年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した。

文献

- 中野ほか(2013)日本の火山(第3版).200万分の1地質編集図,no.11,産業技術総合研究所地質調査総合センター。
西来ほか(編)(2012)第四紀火山岩体・貫入岩体データベース。地質調査総合センター速報,no.60,産業技術総合研究所地質調査総合センター。

InSAR 解析の火山地域への適用

田中明子(地質情報・マグマ活動研究グループ)

1. はじめに

火山・地震現象などに伴う地表変動を検出するために有効な手段の中の一つとして、衛星搭載型の合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, SAR) を用いる干渉 SAR (Interferometric SAR, InSAR) 解析がある。ここでは、この解析手法を用いた解析例をあげる一方、限界点や今後の展望について述べる。

2. InSAR 解析の利点・課題・今後の展望

InSAR は、同一地域を異なる時期に得られた複数のデータのマイクロ波信号の位相差を計算することにより、データ取得間に生じた衛星と地面間の距離 (レンジ) 変化を検出する。この解析手法は、火口域、極域、政情不安定地域など、現場へのアクセスが困難な地域についての地表変動検出のほぼ唯一の手段である。1992 年ランダース地震に伴う地表変動の検出を捉えた図が Nature の表紙 [Massonnet *et al.*, 1993] を飾ったことにより一躍脚光を浴びて以来、火山・地震現象などに伴う地表変動の研究に用いられてきた。宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター [<http://www.eorc.jaxa.jp/>] や国土地理院 [<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>] などにより、火山や地盤沈下地域の定常的な処理結果が公開されることにより、カラフルな図が目に触れる機会が多くなった。

衛星搭載型の InSAR 解析は、センサの特性、観測面積、空間解像度、観測頻度、運用期間などさまざまな制限があるとはいえ、衛星観測の特性である、広域性 (~100 km 四方程度)、周期性 ((数)十日に1回) に加え、ある程度の期間にわたりデータがアーカイブされている点からも、時間変化をとらえる目的にかなっている。さらに、マイクロ波を利用するため、夜間や雲に覆われた状況下などでも地表の情報を取得することができる。しかし一方短所もあり、それらを補うためのさまざまな工夫や解析方法の高度化が図られている。ここでは、衛星搭載型の InSAR 解析を用いて火山活動に伴う地表変動を検出する際に、問題となるであろう点に絞って紹介する。

2-1. どのようなモニタリングが可能か?

GPS が、mm オーダーの変位や mm/year オーダーの速度の測定に使われてきたのに対し、InSAR 解析は、火山噴火や地震時に伴うような顕著な変動 (~sub-cm) を起こすイベントに数多く利用されてきた。これは、誤差を補正する方法が確立されてはならず、変動の検出に限

界があったことも大きな一因である。しかし、近年はデータの量・質の充実・向上および解析手法の高度化に伴い、多数の SAR データを用いることにより、高精度 (~sub-mm) の地表変位測定を行うためのアルゴリズムが開発されている。その一手法として、PS-InSAR (Permanent/Persistent Scatterer (恒久/永続散乱体) InSAR) という技術がある [例えば, Ferretti *et al.*, 2000]。これは、反射の位相が非常に安定なターゲットである PS を含むピクセル候補の値だけを使用する。このことにより、標準的な InSAR と同様に地表変動の空間パターンが得られるだけでなく、各ピクセルの時系列の変化を得ることが可能となる。この手法は、各干渉画像から視線方向の速度を求めそれらの平均を求める単純なスタッキング [Wright *et al.*, 2004] を適応することのできない、変動速度が一定とみなせないマグマ溜まりの不規則な膨張・収縮などの場合にも適用することができる。

2-2. 火山活動予測に役立つのか?

観測頻度が高く、良く研究されている火山については、噴火前に山体膨張速度の加速を捉えることに成功している例はある [例えば, 2011 年 3 月キラウエアの噴火]。しかしながら、衛星搭載型の InSAR 解析の実用的な火山活動予測への活用はまだ程遠い段階であろう。

3. おわりに

火山の噴火現象のみを考慮するのであれば、あまり大きな問題となる例は多くはないと予想されるが、衛星搭載型の InSAR 解析には他にもさまざまな制約条件がある。大きな問題として、衛星観測の特性である観測間隔が長いことがあげられる。これには、複数の衛星データの利用を考慮するより他に対処方法はない。他にも、レーダ視線方向の一成分のみしか観測できないこと、観測幅が 100 km 程度と小さいことなどもある。これらの欠点を補うためには、複数の視線方向のデータを利用すること、幅 300km 以上の領域を同時に観測する ScanSAR という広域観測モードのより一層の利用などが考えられる。

文献

- Ferretti *et al.* (2000) IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **38**, 2202-2212.
 Massonnet *et al.* (1993) Nature, **364**, 138-142.
 Wright *et al.* (2004) Science, **305**, 236-239.

地球物理的手法による活動的火山のリアルタイムモニタリング

松島喜雄, 斎藤英二, 西祐司, 高倉伸一 (産総研 地質調査総合センター),
鬼澤真也 (気象研究所), 長谷英彰 (東京大学地震研究所), 石戸経士 (産総研 地質調査総合センター)

1. はじめに

産総研では、噴火予知技術の高度化を目指しており、その一環として、火山活動のシミュレーションを実施し、マグマの上昇とそれに伴う火山性流体の挙動を予測するシステムの作成に取り組んでいる。そのため、マグマや流体の流動に伴うであろう地殻変動と自然電位を観測し基本データとしている。ここでは、口永良部島火山におけるGPSの連続観測、伊豆大島火山における自然電位の連続観測の結果について発表する。

2. 口永良部島火山でのGPS観測

口永良部島火山は有史以来、水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発を数年から30年の間隔で繰り返している。最近の1980年の噴火以来、32年経過し次の噴火へ向けての準備が進行している。1999年頃から地震活動の活発化とそれに伴う地殻変動、地磁気異常、火山ガス放出量の増大、新たな噴気孔の出現など非常事態を表すシグナルが観測されてきた。しかしながらいまだ噴火には至っておらず、噴火準備過程の複雑さを示すとともに、その解明は緊急の課題となっている。2004年に口永良部島火山の新岳火口および古岳火口周辺の2ヶ所と山麓の3カ所にGPS連続観測点を設置した(斎藤・井口, 2006)。各地点で30秒毎に衛星からの電波の位相データを記録するとともに、携帯電話回線網を通じてほぼリアルタイムにつくばへデータ転送し、1日1回、山頂部測点間の基線ベクトルを自動解析している。変動が小さいと予想される山麓観測点は、データロガーにより蓄積し、適宜回収・解析することでやや深部の長期的変化を観察している。山頂部の新岳火口の北西約250m地点では、これまでに4回の累積膨張変動が検出されている。膨張源は新岳山頂火口直下300m以浅に推定されている。このような興味深い変動は、火口付近での連続観測を行うことによって初めて明らかにされた。この変動は、地震活動の高まりや地磁気の消磁の進行、火山ガス放出の一時的な活発化と連動しており、高温の火山性流体の流動を示唆している。すなわち、一連の現象は、深部からの高温の火山ガス供給量の増大に起因するものと考えられる。今後はGPS観測点を増やすとともに、火山ガス、熱等の観測結果と合わせ、火山性流体の流動様式をモデル化する予定である。

3. 伊豆大島火山での自然電位観測

伊豆大島では1986年の噴火以降19年経過し、次期噴

火への対応を強化するべき段階にあるといえる。火山活動が活発化した場合に、マグマからの火山ガス放出量が増加すると期待される。その際の火山性流体の挙動を予測することを目的にし、自然電位(SP)の連続観測と熱水系の数値シミュレーションの両面から研究を進めている。SPとは岩石の空隙中を流体が流動する際に流体中に電流が流れることによって地表に形成される電場である。地表に複数の電極を設置し、電極間をケーブルでつないで電位差を測定することによって観測される。この性質を利用して、SPの分布から地下の流体の挙動を推測することができる。産総研では、1989年から2000年まで計7回、三原山を東西に横切る約8kmの測線でSP分布を測定し、1986年噴火以降の経年的な変動を捉え、火山活動に伴うSP異常の特性を研究してきた。それによると、将来的なマグマの上昇によってSP異常の発生が期待されるが、短期的な変動を調べるためには、電極を固定設置した連続観測が不可欠である。そこで、SPの異常が発現すると予想される地域に連続観測用測線を設定した。測線は三原山下から剣ヶ峰脇を経て、楯形山麓を通りカルデラ南東側の裏砂漠へ向かう11地点(測線長約2km)からなる。各地点の1分毎の電位差を測定しデータロガーで記録するとともに電話回線にて最短で一日一回つくばへデータを転送している。また、カルデラ内の1地点において気温、気圧、降水量等の接地気象要素を測定しデータロガーで記録している。約1年の欠測(2010年4月~2011年5月)、複数回の2ヶ月程度の欠測、裏砂漠の観測地点においてノイズが激しいことを除いて、おおむね順調にデータを取得している。基準点の取り方によって各地点の変動の様子は変わるが、全地点に共通して年周変動を示し、夏季に値が高く、冬季に低くなる傾向にあり、振幅の最大は100mVに達する。降雨に伴い数日間の短期的な変動を示し、これは1m程度の深さまでの地中の水分量が増加することによって生じ得ることが分かっている。年周変動もおそらく、より深部にわたって地中の水分量が増加することによって現れているものと考えられる。このような年周変動を除くと、各地点とも経年的なトレンドとして今のところ顕著な変化は示していない。

文献

斎藤・井口 (2006) 火山, 51, 21-30.

活火山の最新地質図

—諏訪之瀬島・桜島（第2版）・榛名山—

下司信夫, 山元孝広 (地質情報研究部門)

1. はじめに

産総研地質調査総合センターでは、活火山地域の地質図として5万分の1地質図幅及び火山地質図を作成している。このうち5万分の1地質図幅は国土の基礎的な地質情報として、火山地質図は活火山の活動履歴の把握を主たる目的として作成されている。近年、榛名山、諏訪之瀬島、桜島について新たに地質図が整備されたのでここに紹介する。今回作成されたこれらの活火山の地質図は、既存の研究成果の取りまとめと独自の調査結果、それらに対する最新の解釈を示している。また、これらの地質図の作成には各火山に対して詳細な調査・研究を行ってきた大学等の研究者の参加・協力を受けている。

2. 活火山の最新地質図

2.1 5万分の1「榛名山」地質図幅

群馬県中央部にある榛名火山は、関東地方と信越地方を結ぶ交通の要衝にあり、また山麓部には渋川市や高崎市といった都市が存在することから、その火山活動史を把握することは今後の活動予測にきわめて重要である。最新の噴火は古墳時代の6世紀ごろ2度にわたって発生し、東山麓の広い範囲に火砕流や火砕サージが到達し(図1)、また厚く堆積した降下軽石によって多くの古代集落が埋没したことが知られている。地質図幅調査により約5万年前の榛名カルデラの形成後、約1万年間隔で大規模な噴火を繰り返してきたこと、また噴火の推移はそれぞれ異なり、また噴火地点も東西に移動していることが明らかにされた。それぞれの噴火地点には大型の溶岩ドームが形成されている(図1)。

2.2 諏訪之瀬島火山地質図

諏訪之瀬島火山は九州南方のトカラ列島にある活火山で、最近数10年間ほぼ連続的に噴火を続けるわが国でも最も活動的な火山の一つである。1813年には大規模な噴火が発生し、全島民が避難しその後長期間にわたって無人島となった歴史がある。諏訪之瀬島は離島で交通の便も悪いことからその地質や活動履歴については明らかにされていなかったが、火山地質図の作成によりその長期間の噴火履歴が明らかにされた。約3万年前以降大規模な軽石噴火が繰り返され現在の山体主要部が形成されたこと、過去1万年間は現在と同じような火山灰の長

期間にわたる火山灰の噴出と、比較的規模の大きな火砕噴火、溶岩噴火が繰り返されたことが明らかにされた。また、山体主要部や集落はこれら江戸時代以降の噴出物に広く覆われていることが地質図から読み取れる(図2)。

2.2 桜島火山地質図(第2版)

桜島火山はわが国でも有数の活動的な火山であり、1950年代以降噴火が継続している。特に2008年以降は昭和火口での爆発噴火が活発化しており、今後の活動推移が注目されている。桜島火山地質図は火山地質図シリーズの第1号として1980年に作成されているが、その後の調査による最新の知見を総合した第2版の火山地質図が作成された。これにより、火山体を形成する先史時代の複数の噴出物の分布や層序、年代が明らかになった。また歴史時代の大規模な噴火の火口位置やその噴出物の分布もより正確に把握された。特に、現在活動中の南岳の形成過程について、南岳山体を形成する溶岩流の噴出活動や山麓に堆積する火山砂の層序や年代についての理解が進んだ。これらの成果により、過去約2万年間の桜島火山の活動履歴の総合的な理解が可能となった。

3. 地質から読み取る火山の活動史

火山噴火の履歴は地層中の噴出物として残されており、地質学的手法によるその詳細な検討によってはじめて火山の長期的な活動の理解が可能となる。例えば榛名山のような噴火間隔の長い火山では、その噴火履歴は地質調査によってのみ明らかにできる。また諏訪之瀬島や桜島のように活発な活動が続いている火山では、現在の噴火活動がこれまでの活動の中でどのような位置づけにあるのかを地質調査により知ることが必要である。

火山地質情報の収集技術や解析方法は進化しつつあり、常に最新の技術や知見をこれらの地質図作成に反映してゆくことが欠かせない。桜島火山地質図第2版のように、適宜版を重ねて最新の知見を取りまとめることは活火山の地質調査では極めて重要である。また、地質図から読み取れる知見等をどのように将来の活動予測に結び付けてゆくのかといった地質情報の利活用方法も、地質図の作成と並行して検討してゆくべき課題である。

P11

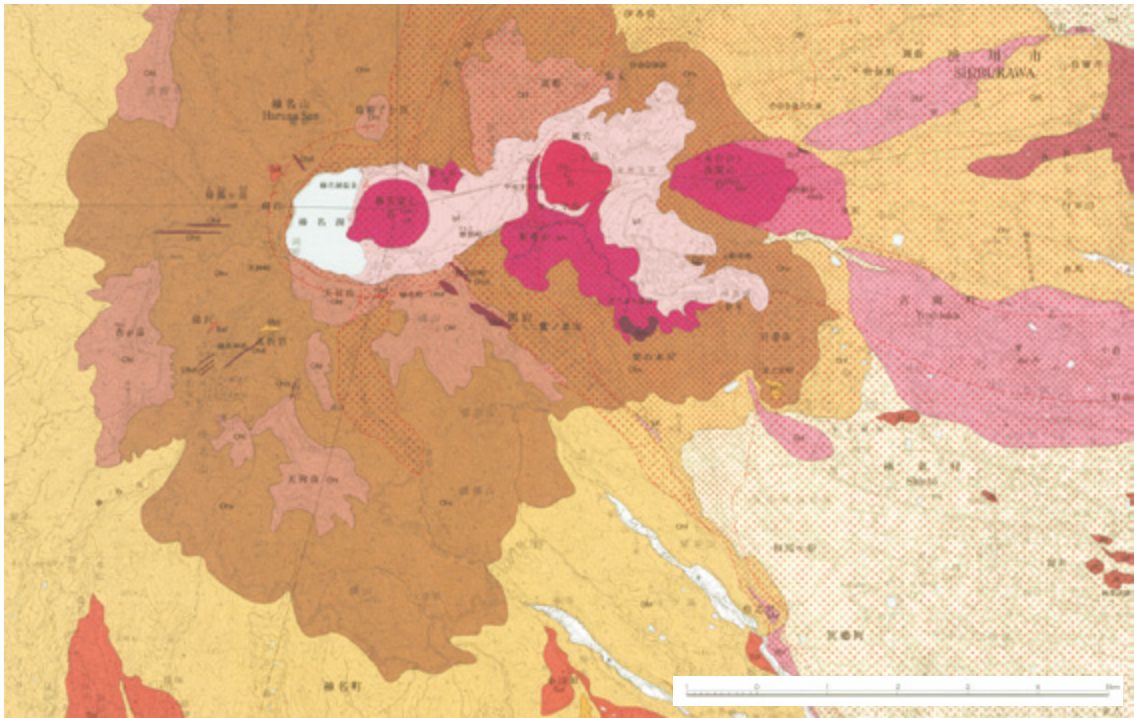


図1 5万分の1「榛名山」図幅より榛名山山頂部（一部・縮小）。約5万年前の榛名カルデラ形成以降に噴出した5つの溶岩ドームが濃い赤色で示されている。また6世紀ごろに発生した最新の噴火で噴出した火砕流堆積物の分布がピンク色で、火砕サージの到達範囲が赤の斑点で示されている。



図2 作成中の諏訪之瀬島火山地質図（部分・縮小）。1813年噴火噴出物が薄紫色、1884-85年溶岩が濃紫色、それを覆う最新の火砕丘が灰色の領域として示されている。また火口（赤実線）や馬蹄形崩壊地形（青実線）が表現されている。またこれらより古い火山体についても、層序や地形的特徴からいくつかのグループに区分されている。

地殻下部起源の火山性熱水流体の特徴と分布

風早康平, 高橋正明, 安原正也, 尾山洋一, 切田司 (地質情報・深部流体研究グループ)

1. はじめに

近年, 多くの火山周辺の直下20-40kmにおいて深部低周波(DLF)地震が発生していることが明らかになっている(高橋・宮村, 2010). また, DLF地震の発生はその地震学的特徴からマグマそのものではなく熱水流体の関与が指摘されている(長谷川ほか, 2008). これらの DLF 地震分布の特徴は, タイプ1: 西南日本において, 沈み込むフィリピン海プレートの上表面に相当する部分において深さ約35km 幅約1000km にわたり生じるもの. タイプ2: 第四紀火山近傍, および, タイプ3: 火山の存在と無関係に深さ20-45kmにおいて点在するものがある. 我々はこれらの地震に関する熱水の情報を得るため, 震源周辺の地下水データを調査し, その化学・同位体組成等に関する特徴をまとめた. 注目すべき点はこれらの塩水は, 同位体的にも, 化学的にも, 非常によく似た特徴を持っているということである. 本研究では, 深部に由来する成分の特徴を明らかにするとともに, その熱水の成因に関して議論したい.

2. 深部起源の熱水流体の特徴

全国で行っている深層地下水調査結果(高橋ほか, 2010)により DLF 地震の震源周辺に特徴的な深部流体が存在していることがわかった. その特徴は, 1) 水の同位体組成はマグマ起源と同じ, 2) NaCl-CO₂ 型の水質を持つ, 3) Li/Cl 比が高い(重量比で0.001以上)などである.

3. DLF 地震に関連する熱水の成因

タイプ1の DLF に関連すると考えられる水は, 中央構造線に沿って四国-近畿-東海にかけて存在する有馬型塩水がある. このタイプは硫黄種に欠乏するという特徴があり, 地下深部の還元的環境で硫黄種は硫化物として沈殿したのであろう. 構造線に沿って塩水ではないが, 遊離炭酸ガスを多く含む炭酸水も多く存在する. このスラブ内の地震発生場所の上盤には付加体があり, マントルは存在しない. したがって, この塩水はマグマ起源ではなく, スラブ内の変質玄武岩が脱したものであろう.

第四紀火山周辺直下で生じているタイプ2の近傍においても, 遊離炭酸を多量に含む塩水が存在する. この熱水は浅部マグマ起源の熱水のように酸性でなく, 中性~CO₂ による弱酸性である. この熱水は, 浅部マグマより放出されたものではなく, 地殻下部にある玄武岩質マグマが固化したときに放出された熱水ではないかと考えられる.

非火山地域で生じるタイプ3の DLF 地震は中国-近畿地方および東北-北海道地方に存在している. この地震に対応するように, 非火山性流体と考えられる CO₂ 含有の塩水が湧出している地点がいくつか確認された. 地殻下部においてマグマが固化したときに放出される流体あるいはスラブから直接熱水流体として供給されたものであろう. 地殻熱流量の分布(田中ほか, 2004)とこれらの熱水分布を比較することにより, マグマ起源かどうか半別できる可能性がある. もし, マグマが関与しているのであれば, 将来, この DLF 地震を起こしている地域の近傍で新規に火山が出現するかもしれない.

4. 熱水流体の上昇

一方で, DLF 地震が観測されていないにもかかわらず NaCl-CO₂ 型の温泉水がわき出している場所も存在する. 東北日本の火山地域直下の地殻内で多数発見されている地震波の反射面は熱水溜りをとらえている可能性がある(堀ほか, 2004). 地殻下部で発生した熱水が浅い地殻内に移動後, 長期貯留された後に地表へ上昇している可能性がある.

スラブ起源深部流体の分布域は Omuralieva *et al.* (2012) による深さ10kmより浅い微小地震の多い地域あるいは D90 (微小地震の深さ下限の指標) が浅い地域とよく一致する. これは, 深部流体の上昇が微小地震の発生を活性化する要因のひとつであることを示す. 微小地震の多い地域が空間的な広がりを持つことは, 深部流体の上昇域は点や線ではなく, ある程度の広がりを持つことを示唆している. 流体の上昇には断層・構造線等に存在する亀裂などの水みちが必要であり, 深部流体の上昇が微小地震活動を補助する働きをしているのであろう.

文 献

- 高橋・宮村 (2009) 北海道大学地球物理学研究報告, **72**, 177-190.
 長谷川ほか (2008) 地学雑誌 **117**, 59-75.
 高橋ほか (2011) 深層地下水データベース. 地質調査総合センター研究資料集, no.532, GSJ-AIST.
 田中ほか (2004) 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図 DGMP-5, GSJ-AIST.
 堀ほか (2004) 地震 **2**, **56**, 435-446.
 Omuralieva *et al.* (2012) *Tectonophysics*, **518-521**, 93-105.

浅間火山における SO₂ 放出率の変動と火山活動の関係

大和田道子, 風早康平(地質情報・深部流体研究グループ), 森俊哉(東大院理・地殻化学),
平林順一(東工大), 宮下誠(気象庁), 鬼澤真也(気象研), 森健彦(東大・地震研)

1. はじめに

浅間山は常時ガスを放出し続けている活火山であり、1973年、1982年、1983年、2004年、2008年および2009年に噴火した。浅間山では、相関スペクトロメータ(COSPEC)を用いた SO₂ 放出率観測が1972年から開始され、2003年からは小型紫外スペクトロメータシステム(COMPUSS: Mori *et al.*, 2007)を用いた観測が開始された。そして、2004年噴火以後は、短い間隔での繰り返し観測を実施している。本研究では、浅間山における1972年からの40年にわたる SO₂ 放出率の変動について報告すると共に、2004年噴火以降の脱ガス活動について、脱ガスマグマ量を見積もることにより議論する。

2. SO₂ 放出率と B 型地震の関係

浅間山における1972年からの長期的な SO₂ 放出率の変動としては、非噴火時は平均2 kg/s程度の小さい放出率であるのに対し、噴火時には10 kg/sほどに増大していたことがわかる。しかし、2004年の噴火に際し、SO₂ 放出率はこれまでで最大の53 kg/s、さらに2008-2009年の噴火活動においては47 kg/sに達した。また、2004年以降の繰り返し観測からは、噴火活動期間に SO₂ 放出率が大きく変動していること、そしてその変動が火山浅部で発生するB型地震の増減と相関があることが明らかになった。そして、2004年以降の浅間山における脱ガス活動を、2004年、2008-2009年噴火により SO₂ 放出率が増大し、地震回数も多い活発期と SO₂ 放出率が小さく安定しており、地震回数が少ない静穏期とが交互に繰り返される4つの期間に区分することができた。

浅間山では、火口内の噴出孔からの SO₂ 放出と火山性長周期震動(VLP)の地震モーメントの間の相関から、ガス放出と地震発生の関連が示されている (Kazahaya *et al.*, 2011)。さらに、B型地震は水やマグマなど流体の移動によって発生することから、活発期の SO₂ 放出率と B 型地震回数の連動した増加は、マグマ供給による脱ガスの活発化によるものと考えられる。さらに、活発期の期間には、両者の急激な増加が繰り返されており、マグマ供給が数回にわたり起こった可能性が示唆される。

3. マグマの脱ガス活動

SO₂ 放出率とマグマの S 濃度から見積もられた脱ガスマグマ量はそれぞれ、2004年以降の活発期で590 Mt および450 Mt、静穏期で50 Mt および115 Mt 以上(現在も継続中)となり、活発期には静穏期の5-10倍の量のマグマが脱ガスに関与した。2004年噴火によって地表に噴出したマグマの体積は、GPS 観測から約 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (村上, 2005)、航空機搭載型合成開口レーダ観測から $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (大木ほか, 2005; DRE (dense rock equivalent volume) 換算では $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$) と見積もられている。マグマの密度を 2600 kg/m^3 と仮定すると活発期の脱ガスマグマの体積は、それぞれ $2.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ となり、噴出したマグマに比べ2桁大きい。地表への噴出なしで大量のマグマを脱ガスさせる機構としては、火道内におけるマグマ対流 (Kazahaya *et al.*, 1994) が考えられる。浅間山では、活発期に火口付近で火映が観察されていること、また、B型地震が火口下に鉛直に分布していることから (Takeo *et al.*, 2006, Maeda and Takeo, 2011)、マグマが火道の浅所に上昇していたことが示唆され、マグマ対流による脱ガスを支持する。また、脱ガスしたマグマ量をマグマ溜まりに新たに供給されたマグマ量とみなすと、2004年および2008-2009年噴火における平均マグマ供給率は、それぞれ $9.4 \times 10^3 \text{ kg/s}$, $9.0 \times 10^3 \text{ kg/s}$ 、静穏期の平均マグマ供給率は $1.1 \times 10^3 \text{ kg/s}$ と見積もることができ、マグマ供給率の変化がマグマ対流による脱ガス活動を変化させ、SO₂ 放出率や地震発生に影響を与えていると考えられる。

文献

- Kazahaya, K. *et al.* (1994) *Bull. Volcanol.*, **56**, 207-216.
 Kazahaya, R. *et al.* (2011) *Geophys. Res. Lett.*, **8**,
 doi:10.1029/2011GL047555.
 Maeda and Takeo (2011) *Geophys. J. Int.*, **185**, 265-282.
 Mori *et al.* (2007) *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **52**, 105-112.
 Takeo *et al.* (2006) *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L15310,
 doi:10.1029/2006GL026247.
 村上 (2005) 火山, **50**, 347-361.
 大木ほか (2005) 火山, **50**, 401-410.

火山衛星画像データベース

浦井稔（地質調査情報センター 地質・衛星情報整備企画室）

1. はじめに

火山は美しい風景を創造し温泉や金属資源等の恩恵を与える一方で、多大の火山災害を与えてきた。インドネシア、タンボラでは1815年に発生した大噴火によって92,000人が死亡した。我が国も火山国の一つであり、多くの火山災害が発生している。1792年には雲仙普賢岳が噴火し、噴火に伴う山崩れと津波で15,000人が死亡した。最近でも、雲仙普賢岳、有珠山、三宅島が噴火し多大の火山災害を与えている。これらの火山災害を低減するため、各種の火山観測が実施されるようになってきた。この中でもリモートセンシングによる火山観測は著しい進歩を遂げ、火山観測の重要な位置を占めるようになってきた。ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) サイエンスチームは全世界の火山をASTER (Yamaguchi *et al.*, 1998) を使って観測する計画を作成し、2000年から観測を開始した(浦井ほか, 1999)。火山衛星画像データベースはこの計画で観測された火山の衛星画像を蓄積し、これを時系列として表示することによって火山監視や火山災害の低減に役立つことを目的として構築された。本データベース[<http://igg01.gsj.jp/vsdb/image/>]には世界の964火山を登録し、これらの火山について2000年以降にASTERで観測された全ての衛星画像を公開している。新たに観測された画像はそのつど追加される。本データベースは世界の火山研究者のために開発したが、報道関係者、教育機関、さらに火山に関心を持つ一般の方々にも使っていただければ幸いである。

2. 火山の検索方法

火山は「地域別世界の主な火山」、「ABC 順世界の火山」または「Google Earth [<http://earth.google.co.jp/>] 版」で検索できる。「地域別世界の主な火山」では、独自に選定した世界の主な107火山を地域別に検索できる。「ABC 順世界の火山」では、このデータベースに登録された964火山をABC順に検索できる。「Google Earth 版」では、このデータベースに登録された964火山をGoogle Earthから検索できる。「Google Earth 版」を使用するためにはGoogle Earthをインストールする必要がある。「ABC 順世界の火山」と「Google Earth 版」で検索できる火山は同じで、「地域別世界の主な火山」ではその一部が検索できる。

3. 使い方

火山を選択すると、火山名、最も鮮明なVNIR画像のサムネール、火山の位置、標高が表示される。最も鮮明なVNIR画像のサムネール(Best VNIR image)をクリックするとこれまでに取得されたVNIR画像中で最も鮮明な画像が表示される。Smithsonian Global Volcanism Programへのリンクが表示されている場合は、これをクリックして、噴火履歴等を見ることができる。もし、その火山にASTERから作成されたデジタル地形モデルが登録されている場合にはDigital Elevation Model generated with ASTERというリンクが表示されるので、これをクリックするとデジタル地形モデルのページされる。次に火山の位置を中心とする20km×20kmの範囲のASTER画像が時系列で表示される。一つの欄が1回の観測に相当する。観測日は一番左側の欄の最初の6桁でYYMMDDの形式で表示され、これに続く3桁の番号は衛星の軌道番号を示す。VNIR画像は可視-近赤外の波長で観測された画像で、火山の噴煙や火山による変水海域の検出が可能である。SWIR画像は短波長赤外の波長で観測された画像で、夜間観測で熱異常を観測することができる。ただし、SWIR装置は2008年4月に故障し、それ以降は有効な画像が取得できなくなった。TIR画像は熱赤外の波長で観測された画像で、明るい部分は高温であることを、暗い部分は低温であることを示す。ここで表示される画像はサムネール画像であり、これをクリックすることによって本来の解像度の画像(VNIR, SWIR, TIR 画像はそれぞれ15m, 30m, 90m)が表示される。2012年11月現在、全体で67,000以上の昼間の画像と93,000以上の夜間画像が登録されている。

4. まとめ

火山衛星画像データベースは2000年以降にASTERで観測された全ての衛星画像を火山ごとに時系列で公開している。火山の検索にはGoogle Earthも使用できることから、幅広い方々に利用していただけることを期待している。

文 献

- Yamaguchi *et al.* (1998) IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **36**, 1062-1071.
浦井ほか (1999) 火山, **44**, 131-141.

衛星画像を用いた噴火履歴の高分解能把握

阪上 雅之, 向山 栄 (国際航業株式会社)

1. はじめに

噴火履歴の高分解能把握, とりわけブルカノ式噴火の噴火履歴の把握に当たっては, ①火口近傍に過去の複数の噴火イベントによる噴出物が分布していることが多く, 対象となる噴火イベントの噴出物を特定することが容易ではない, ②噴出物には類質物が多く, 本質物が少ないケースが多い等の課題が挙げられる。これらの課題を克服するためには, 噴火直後の迅速な現地踏査による噴出物の特定および採取が求められる。しかし, ブルカノ式噴火は間欠的に噴火を繰り返すため, 噴火直後の調査で火口近傍に長時間滞在することは困難である。また, 一般的に噴火活動が活発な場合, 広範囲において火山近傍への立ち入りが規制されることもあり, 噴火直後の現地踏査は難しい。現地踏査が困難な場合, 火口近傍における噴出物の分布をリモートセンシングの手法によって把握しようとする試みがある。だが, 火口上空に飛行規制が行われる場合があり, 噴火直後に航空写真などの画像が必ずしも得られるわけではない。近年, 地上分解能 2.5 m 以下の高分解能衛星画像が地質災害はじめ多くの災害状況把握に利用されている(例えば, 小荒井ほか, 2008)。本発表ではリモートセンシング技術を活用し, 浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火を対象に噴火イベントに対応する噴出物(以下, 弾道噴出物の意味で用いる)を現地踏査と高分解能衛星画像や室内分析の情報によって高分解能な噴出物特定を行った事例を紹介し, リモートセンシング技術を活用した噴火履歴の高分解能把握への可能性について検討する。

2. 衛星画像情報の活用(浅間火山 2004 年 9/1 噴火)

浅間火山 2004 年一連の噴火活動で最も大きな噴火であった 9/1 噴火では, 衛星画像(以下, 高分解能衛星画像の意味で使用する)を用いた状況把握が行われた。佐々木・向山(2006)は 2002 年 9 月 24 日と噴火 2 週間後の 2004 年 9 月 15 日に撮影された IKONOS 衛星画像の対比により, 噴出物等の飛散物質によって形成された着弾痕(以下, インパクトクレーターの意味を含む)を認定している。IKONOS 衛星画像の地上分解能は 1 m, 水平誤差は ± 3.5 m である。IKONOS 衛星画像から読み取れる着弾痕は最小 3 m であり, 3 m 以上の微小な地表の凹凸(着弾痕・植生変化)が抽出可能である。また, これらの微地形を形成する噴出物の噴出時期の推定や, 現地では容易に把握できない広域的な噴出物分布の抽出に有効である。さらに, 複数の波長帯を合成カラー表示することにより, 植生変化(噴火

による焼失地域等)の抽出が可能である。図 1 に衛星画像を用いて判読された噴出物が地表着地時に形成したと考えられる着弾痕の方位別分布密度図を示す。3 m 以上の着弾痕は, 火口から 1 km 程度離れた地域に多く分布する。また, 着弾痕は全体的に火口の東側より西側に集中していることがわかる。阪上ほか(2011)は現地踏査を行い, 衛星画像によって認定された噴出物の分布を現地で確認し, 室内分析による検討を加えて 9/1 噴火の噴出物を特定した。1回の噴火本質物を特定できたことで, 今まで火口近傍では不明であったブルカノ式噴火のより詳細な噴出物分布の把握や岩石学的検討が可能となった。このように衛星画像を活用することで弾道噴出物のような地層として残りにくい噴出物の把握等が可能となり, 人が立ち入ることが難しい活火山で広域的な噴出物の分布を抽出する方法として, 噴火活動中の現地把握や噴火現象を検討する上での基礎情報の収集として大変有効であることがわかった。

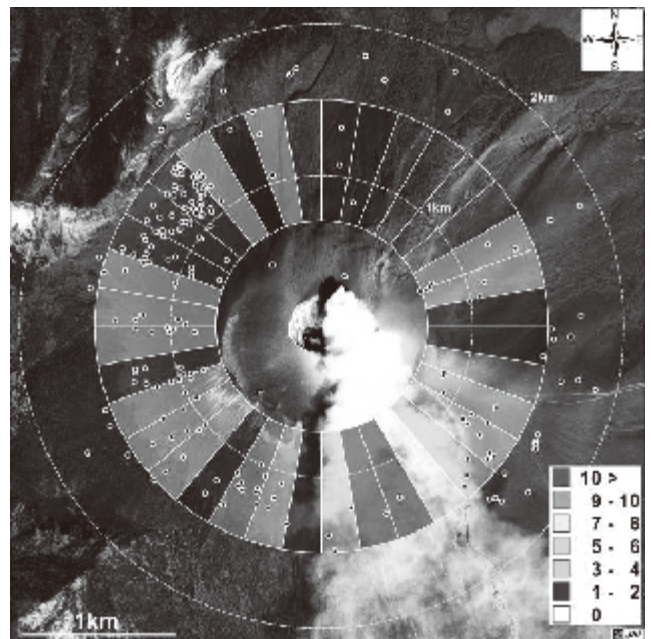


図1 噴石着弾痕分布図(佐々木・向山, 2006)

文献

- 小荒井衛・佐藤 浩・宇根 寛・天野一男(2008) 地質雑, 114, 632-647.
 阪上雅之・佐々木 寿・三宅康幸・向山 栄(2011) 地質雑, 117, 671-685.
 佐々木 寿・向山 栄(2006) 火山, 51, 63-73.

インドネシア，リンジャニ火山の13世紀カルデラ形成噴火

古川竜太（地質情報・火山活動研究グループ），高田 亮（地質情報・マグマ活動研究グループ），
Nasution, A.（バンドン工科大学）

1. 概要

リンジャニ火山はインドネシア，ロンボク島にある径6x8kmのカルデラを持つ火山で，13世紀の破局的噴火で形成された（Nasution *et al.*, 2003; 高田ほか, 2003）。ロンボク島には総体積2000km³におよぶ火山群が存在するが，リンジャニ火山以外にカルデラを形成した火山は見つからない。カルデラ形成に先立って，およそ2万年前から1万年前にかけてリンジャニ火山が標高3726m，総体積100km³の成層火山体を建設した。およそ5000年前からは爆発的噴火を間欠的に起こし，13世紀の破局的噴火に至った。

2. 13世紀噴火の推移

カルデラ形成噴火の推移は噴火堆積物から6ステージに区分できる。各ステージ間に顕著な時間間隙を示す証拠は見つかっていない。ステージ1の小規模な水蒸気噴火のあと，ステージ2ではプリニー式噴火によって発泡の良い軽石を主体とする降下火砕物を西側の広い範囲に堆積させた。ステージ2末期では粒径が細くなり，異質岩片が増加する。ステージ3では火砕流が発生し，北麓で層厚10m以上の無層理塊状の軽石流堆積物を分布させた。南西麓や遠方の地域には成層した火山灰流堆積物が広く分布する。層厚数cm~50cmまで層厚が変化し，地形的凹地では厚く堆積し，下位の降下軽石層を削り込むことがある。推定噴出源から50km近く離れた南西地域や，海を隔てたギリ諸島にも堆積していることは，高い噴煙柱から崩壊した希薄な火砕流堆積物であることを示唆する。ステージ4はふたたびプリニー式噴火となる。降下軽石堆積物は級化構造の繰り返しと細粒火山灰が挟在することから，ステージ2に比べてプリニー式噴煙が不安定であったことを示唆する。ステージ5では，ふたたび火砕流が発生し，厚い無層理の軽石流堆積物が山麓を30km以上の範囲を覆って海岸線に到達した。火砕流堆積物には花崗閃緑岩など地表に露出しない岩石が含まれる。ステージ6ではプリニー式噴火が発生したが，ス

テージ2と4に比べると規模は小さい。

噴火に関与したマグマはSiO₂=62.5-66 wt.%, Na₂O+K₂O=7.5-8.7wt.%の粗面安山岩から粗面岩質である。ステージ3から4にかけてより珪長質な軽石が増加する。ステージ4のプリニー式噴煙が不安定で，ステージ5で大規模な火道の浸食が起こったことを考慮すると，ステージ4から大幅な火道の拡大あるいは新たな火道形成によって，それまで噴出していなかったマグマが吸い出された可能性がある。ステージ6のプリニー式噴火は崩壊したカルデラ床によって閉塞された細い火道から起こったと考えると説明可能である。

3. 噴火年代と気候変化

南極およびグリーンランドの氷床試料では西暦1259年相当の層準に硫酸酸性の強いスパイクがあることが以前から指摘されていた（Palais *et al.*, 1992）。氷床試料から抽出した火山ガラス片の主成分化学組成はこれまでメキシコのエルチヨン火山に対比されていたが，リンジャニカルデラ形成噴火の火山ガラス組成は，両極地方の火山ガラス組成により近い。よってリンジャニカルデラの形成は1259年である可能性がある。両極地方の硫酸堆積量から計算されたSO₂放出量は最近千年間で最大の200メガトンであり（Langway *et al.*, 1988），リンジャニカルデラ形成噴火が地球規模の気候変化に影響を与えた可能性がある。

文 献

- Langway *et al.* (1988) *Annals. Glaciol.*, **10**, 102-108.
Nasution *et al.* (2003) *IUGG Abstracts*, V08/02A/A02-01.
Palais *et al.* (1992) *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 801-804.
高田ほか (2003) 地球惑星科学関連学会 2003 合同大会要旨集 V055-001.

レーザ計測赤色立体地図を使用した 火山地形判読と地質調査の事例

千葉達朗, 荒井健一, 岸本博志, 佐々木 寿, 廣谷志穂 (アジア航測株式会社)

1. はじめに

火山防災減災のためには、精度の高い噴火履歴調査をもとにした噴火シナリオの作成が重要である。近年も頻繁に活動を繰り返している火山では、噴火の観測記録をもとに噴火シナリオを作成することができる。この中では、火山活動の時間推移や前兆現象等を具体的に想定することができる。しかし、噴火の観測記録を持たない火山においては、地質調査にもとづく噴火履歴情報を最大限に活用し、起こりうる噴火現象を想定していく必要がある。

2. 噴火シナリオに求められる事項

噴火シナリオの作成にあたっては、対象とする現象がどのような推移・規模で発生するのか、出来る限り時間軸を入れて想定する必要がある。なかでも、活火山の定義にそって約1万年前以降の噴火について、現象の推移や規模、火口位置などを明らかにすることが重要である。ただし、低頻度大規模噴火については、1万年間の事例だけでは不足するため、より古い年代の活動を参考にする。防災マップの作成や防災計画の策定を目的としているときは、シナリオを設定した後に、想定火口に想定噴出量や対象火山を代表する噴出物の物性等の仮定条件を与えて、数値シミュレーションにより噴出物の到達影響範囲を把握する。このため、想定火口範囲の設定と既往噴火による噴出物の到達範囲の情報が非常に重要な意味を持つ。

3. レーザ計測赤色立体地図の活用による進展

1990年代には当時の建設省や国土庁から火山防災(砂防)のためのハザードマップ作成の指針が示され、全国で火山ハザードマップが作られた。この頃のマップは、空中写真判読と現地踏査をもとに、ベースは2万5千分の1地形図が多い。2000年代に入ると、測量技術が大きな転換期を迎え、空中写真に加えて航空レーザ計測が広く公共事業に用いられるようになった。航空レーザ計測で取得される高精度かつ大容量の数値地形情報は従来の等高線では表現力が不足し、利用上の大きな課題となった。この問題の解決策として、登場した赤色立体地図は、地形地質の現地調査において、非常に有効に利用されてきた。

4. 火山調査等への応用事例

これまでの10年間で、富士山をはじめ、有珠山、浅間山、御嶽山など各地の火山地形地質調査に赤色立体地図を使用し、火山防災等に利活用を行ってきた。

ポスターでは特徴的な地形の表現事例を紹介したい。

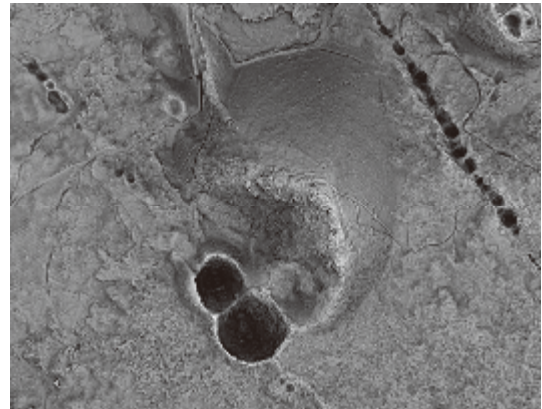


図1 富士山の側火口群と溶岩流地形 (千葉ほか, 2010)
国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所提供

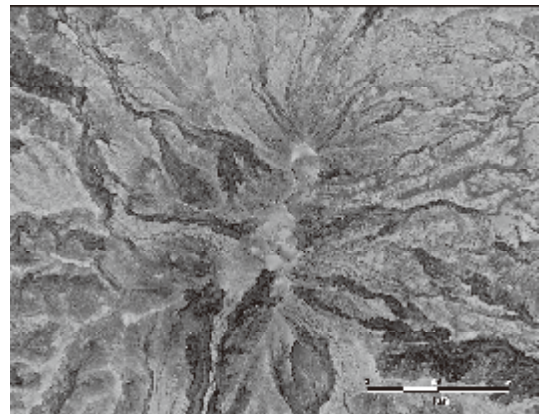


図2 御嶽山の火口群の地形 (鈴木ほか, 2009)
国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所提供

文 献

- 鈴木雄介・岸本博志・千葉達朗・小川紀一郎・岡本 敦 (2009) 御嶽山における火山噴火緊急減災計画策定のための火山噴火履歴調査. 平成21年度砂防学会研究発表会概要集.
千葉達朗・鈴木雄介・荒井健一・富田陽子・小泉市朗・中島幸信・小川紀一郎 (2010) 富士山青木ヶ原における貞観溶岩流の計測 -航空レーザ計測と赤色立体地図による詳細地形調査とボーリング調査-. 新砂防, 63,44-48.

火山ガス観測手法の進展

篠原宏志 (地質情報・マグマ活動研究グループ)

1. はじめに

火山ガス組成はマグマからの脱ガス条件などに支配されているため、火山活動の評価の指標として重要である。従来、火山ガス組成の観測は、観測者による噴気ガスの採取分析に依っていたため、観測者が接近できる噴気孔での観測に限られていた。近年、Shinohara (2005) により噴煙中での火山ガス成分の濃度測定に基づく火山ガス組成の推定手法およびそのための観測装置が開発された。この手法により 1) 噴気孔から離れた場所での観測、2) 自動繰り返し観測、3) 無人航空機による観測、などが可能となり、それにより、大規模な火山ガス放出活動や噴火活動中の火山などの火山ガス組成の変化の観測が可能となり、火山ガス組成観測による火山活動監視や噴火過程の研究の可能性が大幅に拡張された。本発表では、この新たな火山ガス組成観測手法の概要と応用例および今後の課題と展望について紹介する。

2. Multi-GAS (携帯型噴煙観測装置)

噴煙は火山ガスと大気の混合物であり、噴煙中の火山ガス成分の濃度は両者の組成を端成分とする変動をするため、その変動を解析することにより火山ガスの組成を推定することができる。Multi-GASはこの噴煙観測を目的として開発された、小型の各種ガスセンサーを組み合わせた可搬型の装置であり、現状では以下のセンサーが用いられている：赤外 CO₂-H₂O 計、SO₂-H₂S 化学センサー、半導体水素センサー。外気をポンプで吸引し、外気中のこれらの成分の濃度変化をロガーに記録する。本体は 36 x 20 x 15 cm, 4.3 kg であり、12V リチウムバッテリーとロガーを含めて、一人の観測者がバックパックなどに入れて運搬可能であるため、人間が接近可能な噴気地帯や山頂火口周縁にて火山ガス観測を容易に実施可能である。今までに、三宅島、諏訪之瀬島、阿蘇、浅間山など山頂に登山可能なほとんどの火山での火山ガス観測が実施されている。観測には特別に技能を必要としない。

3. 自動繰り返し観測

Multi-GAS は野外に設置して定点での自動繰り返し観測にも応用可能であり、既に三宅島、浅間山、阿蘇、新燃岳での観測実績がある (例えば、Shinohara, 2013)。自動観測により、火山ガス組成の変動の詳細の取得や噴火などで山頂に接近できない期間の火山ガス組成も取得が

可能となる。Multi-GAS は原理的には連続運転観測が可能であるが、各種センサーの寿命および消費電力を考慮して、通常は 1 時間程度の観測を毎日繰り返す設定にしている。50W 程度の太陽電池で毎日 1 時間の観測が可能であるため、電源の無い地点への設置も可能である。噴煙観測は、噴煙が観測点に到達するような風向・風速の場合にのみ火山ガス組成の算出が可能であるため、その意味でも連続データを得る事は困難である。また、各種センサーは、標準ガスを用いた校正を行うために、定期的に交換をする必要がある。

4. 無人航空機観測

噴火活動の危険が予測される場合、人間が接近する事は不可能であるため、無人航空機の活用が観測に有用である。Multi-GAS を無人航空機に搭載し、噴煙中を飛行することにより火山ガス組成の観測が可能になる。2011 年 5 月には、無人飛行機に Multi-GAS を搭載することにより、未だ広い範囲が立ち入り禁止であった新燃岳の山頂直上を飛行し、火山ガス組成の推定が行われた (Shinohara, 2013)。また、2012 年には桜島においても、東京大学地震研究所との共同研究で、無人ヘリコプターを用いて山頂周辺において噴煙組成観測が実施された。

5. 課題と展望

Multi-GAS は、非熟練者による観測、自動繰り返し観測および無人航空機などによる観測が可能であり、火山ガス組成観測の可能性を大幅に拡大した。Multi-GAS を用いた活発な噴煙活動中の火山ガス組成の把握により、火山ガスの供給過程の理解が大きいに進んだ。今後は、自動観測および無人機による観測により、噴火活動中の火山ガス組成の把握に基づく、噴火過程の理解の進展が特に期待される。反面、Multi-GAS に用いられているガスセンサー類は頻りに校正を行う事が想定されており、自動繰り返し観測で長期間使用するには、装置を一度回収して再校正を行った後にはじめて測定精度・確度が確認されるため、長期観測で軽微な変化を検知する事は困難である。今後は、センサー安定性の評価を進めるとともに、センサーそのものの開発・改良を含めたセンサー安定性の向上が課題である。

文献

Shinohara (2005) J. Volcanol. Geotherm. Res., **143**, 319-333.
Shinohara (2013) Earth Planet and Space (accepted).

文献引用例

山元孝広・高田 亮・中野 俊・石塚吉浩 (2013) 富士火山の噴火の特性と想定される噴火災害. 地質調査総合センター研究資料集, no. 573, p.5-6.

地質調査総合センター研究資料集, no. 573

地質学は火山噴火の推移予測にどう貢献するか
(地質調査総合センター 第20回シンポジウム)

編集・発行

独立行政法人 産業技術総合研究所

地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東1丁目1-1 つくば中央第7

<http://www.gsj.jp/HomePageJP.html>

発行日

平成 25 年 1 月 22 日
