

熱と電磁気の出会いー火山活動の定量的理解にむけて
Combination of Geothermal and Electromagnetic Aspects in Research Field of Volcanic Activity

鍵山 恒臣 (京都大学)

Tsuneomi Kagiya (Kyoto University)

Abstract

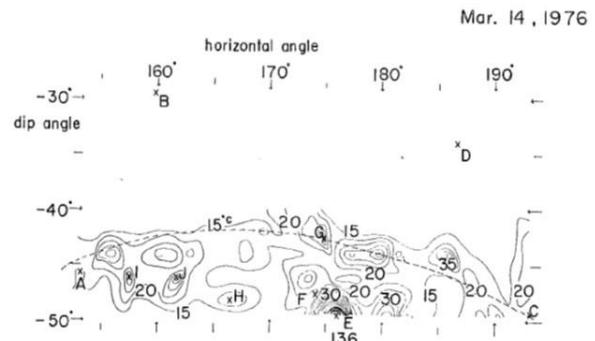
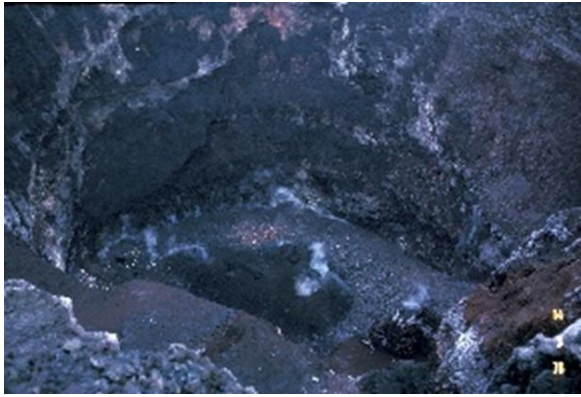
The author has carried out geothermal survey in volcanic field since 1975. These surveys succeeded to detect significant changes in geothermal activity by around 1980's, but we need a better understanding on volcanic activity; why and where these changes occur. After the eruption of Miyake-jima Volcano in 1983, the author cooperated with electromagnetic scientists. We could detect significant change of geothermal activity related with the significant change of resistivity structure beneath the summit crater. Similar combinations of geothermal and electromagnetic research have been carried out in some volcanoes, Izu-oshima, Suwanose-jima, Unzen, Kirishima, etc. Our research indicated shallow low resistivity layer related with ground water and/or geothermal water layer and deep low resistivity layer related with magma, and these layers have important rules in precursory phenomena and in changing volcanic activity. This combination will be a powerful tool to evaluate the mass of degassing gas from magma, and to understand phreatic eruptions and failed eruptions in the future.

1. はじめに

2018年1月に東京大学地震研究所で開催されたCA研究会において、定年を迎える研究者として所見を述べさせていただき、栄誉をいただいた。多くの若手研究者が先進的な研究成果を限られた時間内に紹介されているなかで私が昔話をしてしまうことに戸惑いを感じたが、これまでに感じていたことを述べることで若手研究者の思索の一助にもなればと思い、お引き受けした。私の研究課題は、1975年4月の修士課程入学時から火山の熱的活動を対象とし、当時新しい観測手法として注目をあびていた赤外による遠隔観測を使用するものであった。この研究は、1983年の三宅島噴火の際に大きな課題に直面することとなり、1987年に霧島火山観測所へ異動したのを契機として、MT観測により得られる地下の比抵抗構造と火山活動との関係を検討する課題に取り組むこととなった。2004年以降は、この研究をさらに発展させて、火山活動の多様性を対象とするようになった。本稿では、これらを紹介しつつ、現時点で私が気になる事項について、紹介させていただく。

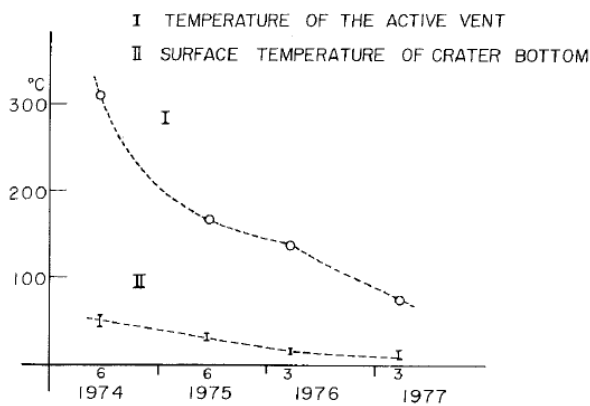
2. 赤外による火山における熱観測

赤外線を利用した地表面温度測定は、1970年代に利用が始まった（たとえば Hase, 1974）。測定器には、航空機搭載型の MSS（マルチ・スペクトロ・スキャナー）と地上設置型装置があり、地上設置型の測定器には、1点の温度を測定する放射温度計と面的な温度分布を測定する赤外映像装置とがあった。当時の赤外映像装置は、センサーを冷却するための液体窒素を必要とするほか、AC電源（あるいは発電機）を必要とした。総重量は100kgほどにもなる（たとえば加茂・他, 1977）。一方、放射温度計は蓄電池駆動が可能であり、重量も10kg程度である（後述の測風経緯儀などを含めると30kg程度となる）。私の属した研究室では、放射温度計を購入し、独自に測風経緯儀を改造して水平方向にスキャンできるようにし（Shimozuru and Kagiya, 1978）、鉛直角を変えながら水平方向にスキャンした。信号はアナログ出力で、ペンレコーダーに記録した。第1図は、1976年3月の伊豆大島火山三原山の火口底の写真と、ペンレコーダーの記録を読み取り、作成した温度分布図である。火口底の数か所に温度の高い領域が



第1図 伊豆大島三原山の火口底（左図）と表面温度分布（右図）1976年3月14日。

Fig.1 Crater bottom of Izu-oshima Volcano (Left), and surface temperature distribution (Right), March 14, 1976.



第2図 伊豆大島火口底の表面温度の変化

Fig.2 Change of surface temperature of the crater bottom of Izu-oshima Volcano.

存在することがわかる。同様の調査を繰り返し行い、温度分布図の中で最高温度を示す点と火口底の平均的な温度を示す場所の温度変化を示すと第2図のようになる。過去に測定されたデータも加えてプロットすると、1974年6月の噴火以降、最高温度は急速に低下し、平均的な場所の温度も徐々に低下していることがわかる。当時、「伊豆大島火山の活動が活発化した後に、関東地震や富士山の噴火が発生する」という学説が出され、1974年6月の伊豆大島火山の噴火は、その予兆であるといった主張を述べる研究者もいた（たとえば横山泉研究代表の伊豆大島集中観測報告書1975年に述べられている）。この観測結果は、伊豆大島火山の活動は1974年6月の噴火以降は低下していることを示すものであった。

こうした観測は、草津白根火山や霧島火山においても行い（鍵山他, 1978, 1979）、それぞれの火山において熱異常域の特定や放熱率の推定などを行ってきた。しかしながら、1枚の面的温度分布を得るのに数時間を要することや測風経緯儀などの付属品の重量がかさむこと、データの出力が紙ベースであることなどで多大な労力を要していた。こうしたことから1982年以降、松下技研作製のパナサーモを購入した。パナサーモは、赤外カメラの信号をビデオ信号として可搬型のビデオレコーダーに記録し、研究室でビデオ信号から温度データに変換するものであった。1枚の面的データを得るのに数秒、総重量は蓄電池も入れて10kg程度であった。また、もっとも大きな改善点は、RS232Cを介して温度データをデジタルで取得可能となったことである。パナサーモを使用した観測は、伊豆大島や三宅島、霧島の他に、北海道や東北などで実施された集中総合観測にも参加し（たとえば kagiyama and Hagiwara, 1980）、観測項目の1つとして考えられるようになった。

3. 熱観測と電磁気観測の出会い

3-1. 三宅島で得た教訓

こうした調査を繰り返していた中、1983年の三宅島噴火に遭遇した。噴火は10月3日の午後には始ま

り、夜までには終わっていた。噴火後の三宅島に上陸した我々は、どこからどう手を付ければよいのか途方にくれた。噴火地点に向かう道路は大量の噴出物で不通箇所が多く、接近できたとしても噴火で流れ出した溶岩流は、まだ赤熱するほどの高温であり、手持ちの測定器ではスケールアウトして測定ができなかった。また、温度の連続観測をしようにも高温のためケーブルをひくことも測定器を置く場所を確保することもできなかった。我々のこれまでの観測は、せいぜい 100℃を少し超える程度を対象としており、赤熱する対象物には歯がたたなかった。また、仮に繰り返し観測ができて温度の低下が観測できたとして、それが火山の理解にどうつながるのかという点でも見通しはなかった。この時我々は3つの大きな教訓を得た。1つは、「低温火山学」から脱却できる装備を持つこと、2つ目は個々の火山において何を調査すべきかを事前に計画しておくこと、3つ目は移動手段と拠点を事前に確保しておくことであつた。

1983年三宅島噴火

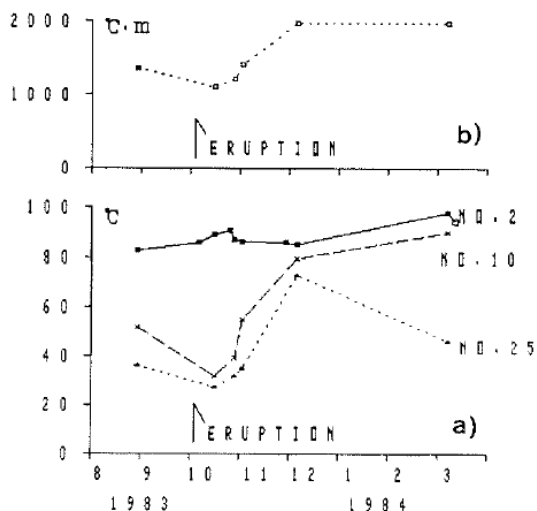


- 我々は低温火山学だった
- 繰り返し観測で冷却を捉えて何になる？



第3図 1983年三宅島噴火後の調査の情景。赤熱した溶岩と調査方針を相談するメンバー。

Fig.3 typical scene after 1983 Miyake-jima Eruption.



第4図 三宅島山頂雄山における地中温度の1983年噴火前後の変化。a)3地点の地中温度の変化。b)3地点の温度積分値の変化。噴火後に上昇している。

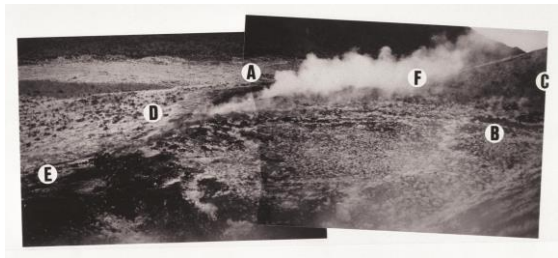
Fig.4 Temporal variation of geothermal activity before and after the eruption, a)ground temperature,b)integrated value of the temperature.

3-2. 三宅島における熱・電磁気観測

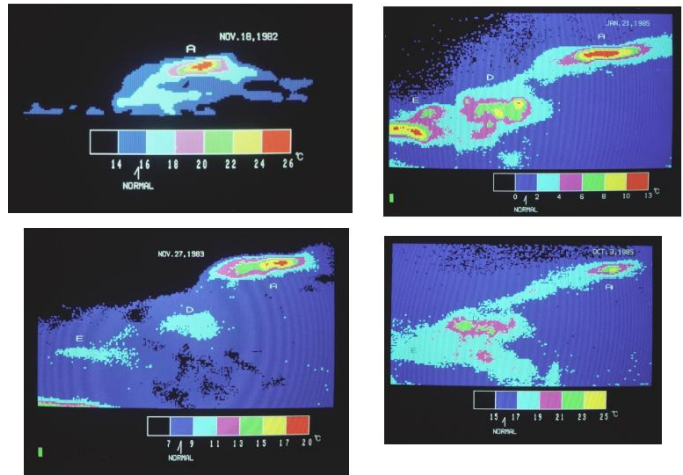
この三宅島噴火後の調査に関しては、冷静に考え直して以下のような方針で臨むこととした。三宅島の過去の噴火では、山腹割れ目噴火の後に山頂噴火が起きたり（1940年噴火）、山腹割れ目噴火の後に山頂の地熱活動が活発化する（1962年噴火）などの現象が起きていた（田中・古田、1979）。したがって、山頂の地熱活動に変化が現れないかを調査する、また噴火した山腹の温度はどのような冷却をするのかを明らかにするような調査を行う。

この調査の結果、山頂の地熱活動は、第4図に示すように、10月3日の噴火直後まで噴火前から継続していた温度低下が継続していたこと、噴火後に温度上昇が開始したことが明らかとなった（鍵山他、

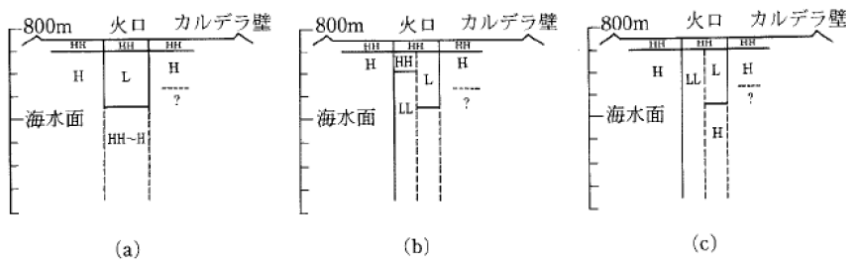
1984). さらに、赤外映像観測を繰り返した結果、第5図、第6図に示すように、噴火後に旧上段火口の西側(A領域)で温度上昇が開始し、次第に東側に拡大していったことが明らかとなった(鍵山他, 1987). 一方電磁気観測では、ELF-MTによって三宅島内の比抵抗構造の特徴が明らかにされた(歌田他, 1984). 特に山頂の雄山周辺については、繰り返し観測を継続した結果、山頂部の地熱活動の変化に対応して、上段火口の地下の比抵抗が低下していく様子が捉えられた(歌田他, 1987). これらの変化をまとめると、第7図に示すような地下の比抵抗構造の時間変化に対応して、上段火口西部の地熱活動の増大がしだいに東部に拡大していく変化が明らかとなった(Kagiyama et al., 1988).



第5図 三宅島山頂雄山の旧上段火口
Fig.5 Buried U-Crater in the summit of Miyake-jima Volcano.



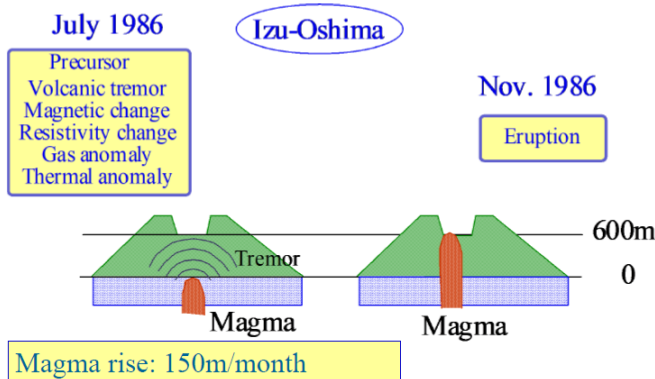
第6図 赤外による繰り返し観測で検知された熱異常の拡大
Fig.6 Increase of geothermal activity detected by IR observation.



第7図 三宅島山頂部における噴火前後の比抵抗構造の変化(原図は歌田による)
Fig.7 Change of resistivity structure beneath the summit of Miyake-jima Volcano. a: Oct. 1980, b: Nov. 1983, c: Feb. 1984.

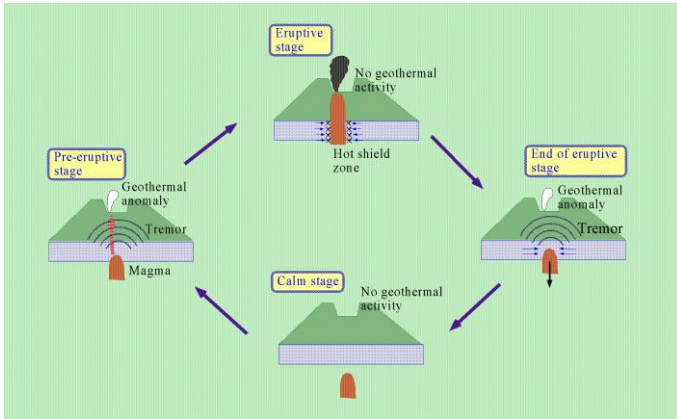
3-3. その後の他の火山における熱・電磁気観測

三宅島の調査以降、火山体浅部の比抵抗構造と火山活動との関係についての理解が深まった. MT法の研究が大きく進み、火山体の浅部に低比抵抗層が広く存在すること、その層は帯水層に対応していることが明らかとなった(現在は、この理解はさらに進み、より浅部には熱変質した粘土層が不透水層の役



第8図 伊豆大島1986年噴火前に発生した前兆現象の解釈
Fig.8 Interpretation of the precursors before the 1986 Izu-oshima Volcano.

割を果たし、その下に熱水や地下水が広がっていると考えられている)。また、この層は、火山噴火の前兆や噴火様式の規定に深く関わっていることが明らかとなった。伊豆大島火山の地下では、海水面とほぼ同じ深さに低比抵抗層が初めて確認された (Utada and Shimomura, 1990)。1986年11月の噴火に先立ち、7月から間欠的な火山性微動が観測され、その後、火口底の熱異常の拡大 (鍵山・辻, 1987)、噴気ガスの化学成分の異常などが起き、噴火1か月前の10月には火口下150mの深さにおいて熱消磁が観測された。これらの異常現象を検討することによって、「伊豆大島地下の海水面とほぼ同じ深さに帯水層が存在し、マグマの頭位が帯水層を突き抜けることに伴って微動の発生、火山ガス異常、熱異常が発生した。マグマの上昇速度は1か月におよそ150mとするとこれらの現象が容易に説明できる」ことが明らかとなった。

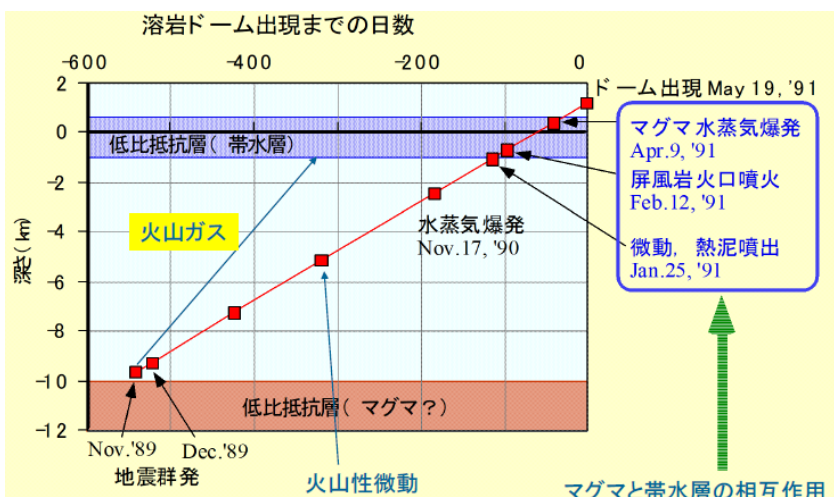


第9図 諏訪之瀬島火山における噴気活動の変化と噴火活動との関係

Fig.9 Schematic model of relation between fumarolic activity and volcanic eruption in Suwanose-jima Volcano.

諏訪之瀬島火山は、噴火活動期と静穏期を繰り返している。この火山の調査を行ったところ、静穏期には山頂火口の噴気が消滅しているが、活動期の前に火山性微動の発生や噴気活動異常が見られる、噴火活動期には、山頂火口に黒っぽい噴煙が見られるが噴気活動は確認できなくなる、噴火活動期の終盤になると噴気活動が復活し、静穏期には再び噴気活動が消滅するという変化が見られた (鍵山・増谷, 1993)。この変化は、海水面とほぼ同じ高さに帯水層があり (鍵山他, 1993)、そこにマグマや高温の火山ガスが地下深部から注入されることによって起きていると解釈された。この考え方は、2000年の三宅島噴火の際に適用され、島の防災と復興の契機となった。三宅島の島民全島避難の前後で、噴出した火山灰の付着成分を分析した結果、それまでの低温タイプの成分の付着から高温タイプの成分の付着へと変化しており、他の観測結果とあわせて、「火道は高温のガスが安定して通過している状態であり、大規模な水蒸気爆発は発生しないであろう」と判断された。火山噴火予知連から出されたこの評価を受けて、東京都は防災対策を開始する判断を下したと理解している。

1990年の雲仙普賢岳の噴火においても、異常現象や噴火様式の系統的变化が比抵抗構造と密接に関係していることがわかった (Kagiyama et al., 1999)。普賢岳の噴火は、1989年末に西の橘湾において地震



第10図 マグマの上昇速度を1日20mとした場合に推定されるマグマの深さと特徴的な火山活動との関係

Fig.10 Calculated depth of the top of the magma column vs. volcanic activity.

が群発，1990年7月に山頂において火山性微動が発生，1990年11月17日に最初の噴火（熱泥噴出），1991年1月25日に火山性微動の復活，1991年2月12日以降に屏風岩火口からの水蒸気噴火，1991年4月9日以降にマグマ水蒸気爆発，1991年5月19日にドームが出現して，それ以降はドーム成長と火砕流の発生という経過をたどった．雲仙普賢岳地下の比抵抗構造は，高比抵抗の山体表層，海拔400m付近から海拔下1km付近まで帯水層と思われる浅部低比抵抗層，その下に基盤と思われる高比抵抗層，深さ10km付近に深部低比抵抗層が確認された．ドームが地表に出現する前後において，マグマの上昇速度は1日におよそ20mと推定されたので，この上昇速度が活動の初期から変わっていないと仮定してマグマの頭位を計算すると，1989年末にマグマが地震群発とともに上昇を開始し，1991年1月下旬から2月初旬にかけてマグマが帯水層に到達すると屏風岩火口において水蒸気噴火が発生，マグマが帯水層を突き抜ける4月9日以降にマグマ水蒸気爆発が頻発，5月19日に海拔1200mの山頂部にドームが出現することになる．このことは，帯水層とマグマの相互作用によって水蒸気噴火やマグマ水蒸気爆発が発生したことを示唆している．さらに，マグマがまだ地下深部にいたと計算される1990年7月に火山性微動が発生し1990年11月に水蒸気噴火（熱泥噴出）を発生させたことは，マグマから分離した火山ガスが1990年7月に帯水層に到達したと考えれば説明可能である．同じ時期に雲仙温泉の噴火ガスにマグマ起源物質が検出されていることも，この考えを支持している．これらの事例は，比抵抗構造（とりわけ帯水層）が火山活動の変化に重要な役割を果たしていることを示したと言える（鍵山，1995）．

4. 私が気になる最近のできごと

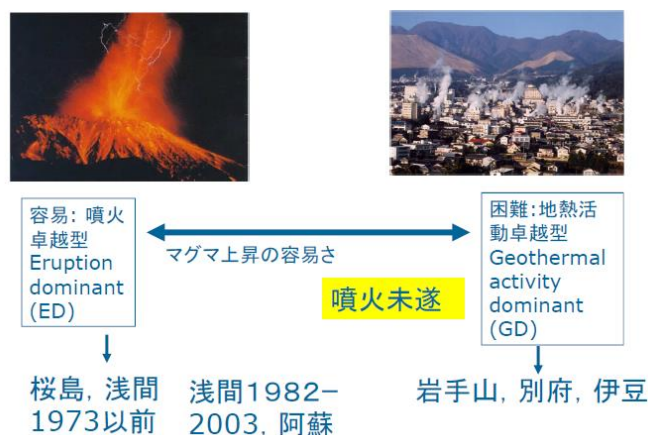
以下に，私が最近気になった出来事について，じゃっかんのコメントを加えたい．

4-1. 火山活動の多様性と水蒸気噴火・噴火未遂

1つ目は，水蒸気噴火に関する研究の位置づけである．御嶽の水蒸気噴火以降，水蒸気噴火に対する関心は高くなっているが，研究計画の柱として，「マグマ噴火発生場の物理」と「水蒸気噴火発生場の物理」を2つの並立した柱とした計画を見ることがある．しかし，この2つの噴火様式は，2つが独立にあるわけではなく，2つの端成分の間にさまざまな様式が存在しており，その違いを支配しているのはどのような物理パラメータか？という発想で研究に臨むべきと私は感じている．

火山噴火の前に地震が群発したり微動が発生したり山体が膨張するなどの異常現象が発生することは，多くの火山で観測されている．しかしながら，異常が起きているのに大きい噴火をしない火山や，地熱活動の異常で終わる火山など，噴火に至る過程は多様である．これらの火山活動は，多くの場合，マグマの上昇が途中で停止して，マグマ中に含まれていた揮発性成分（火山ガス）が分離上昇してきたため

噴火に至る過程の多様性



第11図 噴火に至る過程の多様性の概念図

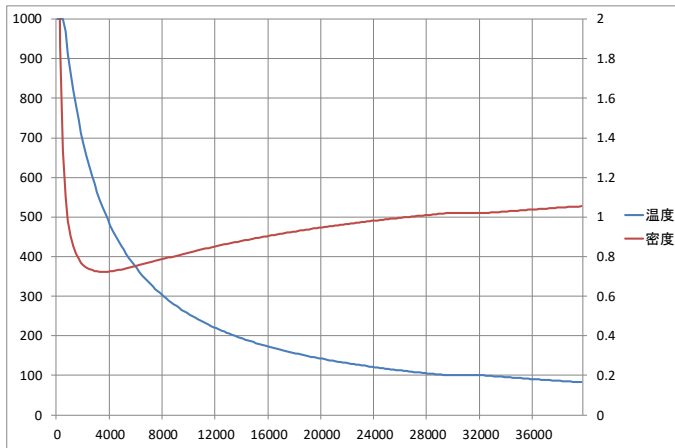
Fig.11 Diversity of volcanic process related with eruptions and geothermal activities

に起きている（鍵山，2008，2010）．私たちは，過去に噴火したマグマの残骸である火山岩を研究することから火山学を発展させてきた．そのため，とすれば，マグマは固形成分と揮発性成分からなっていることを忘れてしまいがちである．また，揮発性成分と固形成分は，常に行動を共にしているという呪

縛にとらわれている。しかし、最近私たちが手掛けている火山活動を見れば、両者は、ある場合は行動を共にするが、多くの場合は別々に行動することが多いことを見てきている。たとえば上記の雲仙普賢岳の噴火では、1990年11月17日の熱泥噴出に先立ってマグマから分離した火山ガスが7月に火山体浅部に上昇して火山性微動を発生させ、小規模な熱泥噴出の後、1991年1月下旬にマグマが火山体浅部に上昇してきてその後の本格的噴火につながったと考えられる。揮発性成分がどの程度固形成分とともに上昇するかによって、「マグマ噴火」、「マグマ水蒸気噴火」、「水蒸気噴火」、「噴気異常」、「地熱活動」と活動様式は変化していくと考えるべきであろう。

4-2. 噴煙高度の高い水蒸気噴火・マグマ水蒸気噴火

2つ目は、水蒸気噴火に関する考え方である。阿蘇火山では、2014年11月25日～2015年4月のマグマ噴火の後、2015年9月14日から10月23日にかけて水蒸気噴火（あるいはマグマ水蒸気噴火）が断続的に発生した。この時の噴火では、比較的低温の火砕流が発生するとともに、高度2000mの噴煙が発生している。また、2016年10月8日には、爆発的な噴火が発生し、直径1mを越える噴石が火口周辺に放出されたほか、低温の火砕流と高度11kmの噴煙が放出された。また、2015年5月29日の口永良部島火山の噴火（水蒸気噴火あるいはマグマ水蒸気噴火）でも高度9kmの噴煙を伴っている。これらの噴火は、水蒸気噴火（あるいはマグマ水蒸気噴火）とされているが、高度数1000mを越える噴煙が果たし



第12図 1000°Cの溶融したマグマ 2500kg と 0°Cの空気 Mkg (横軸) が混合した場合の温度と気塊の密度。

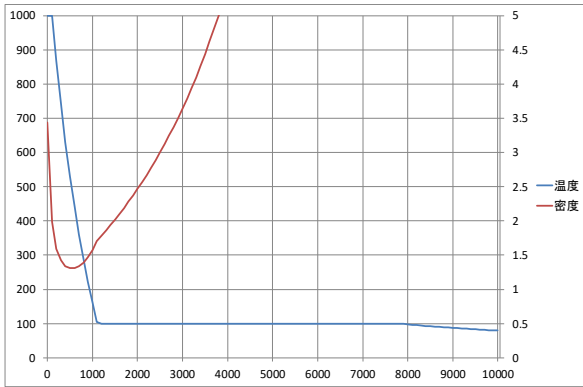
Fig.12 Temperature and density of fluid combined magma (1000°C) and air (0°C).

て生成可能であろうか？水蒸気噴火の説明では、マグマの熱によって間接的に地下水が温められて噴火する、あるいは火山ガスによって地下水が温められて噴火するとされている。また、マグマ水蒸気噴火は、マグマが地下水などと接触し噴火をすると説明されている。

まず比較のために、マグマが噴火する際には、どれくらいの温度、体積、密度になるかを考えよう。たとえば、水を5重量%含み、温度1000°Cの溶融した密度2.5のマグマ1 m³が1気圧下で0°Cの空気Mkgと混合した場合の温度と密度を計算すると第12図のようになる。空気と混合していないマグマの密度は、3.4kg/m³であるが、混合する空気の量が増えるにつれて急激に温度は低下するが、同時に密度も低下する。3400kgの空気と混合した場合に密度は0.72kg/m³と最も小さく、さらに混合する空気が増えると密度は大きくなるが、空気の密度1.2kg/m³以下を維持し続ける。このことは、浮力を受けて噴煙が上昇することを示している。一方マグマと0°Cの地下水Wkgが混合した場合を計算すると、第13図に示すように、温度、密度ともに急速に減少するが、加える水の重量が700kgを越えると密度は再び増加する。また密度は常に空気の密度よりも大きい。このことは、マグマ水蒸気噴火が側方に広がるサージと弾道を描く火山弾を主としており、高高度の噴煙を伴わないという特徴と調和的である。第14図は、最も低密度となったマグマと地下水700kgの混合物に対して0°Cの空気Mkgを加えた場合の温度と密度を示している。空気が加わると、温度はさらに低下するものの密度は空気よりもやや低い気塊を作ることになる。しかしながら、マグマ噴火の場合に比べると低密度の気塊は作られず、高高度の噴煙を伴うマグマ水蒸気噴火が発生することは、熱収支の観点からは難しいことがわかる。同様に、マグマ中に含まれていた水蒸気（火山ガス）のみが0°Cの地下水と混合した場合を計算すると、図には示さないが、混合する地下水が増えれば増えるほど温度は急速に低下して、密度も大きくなる。マグマに含まれていた水蒸気

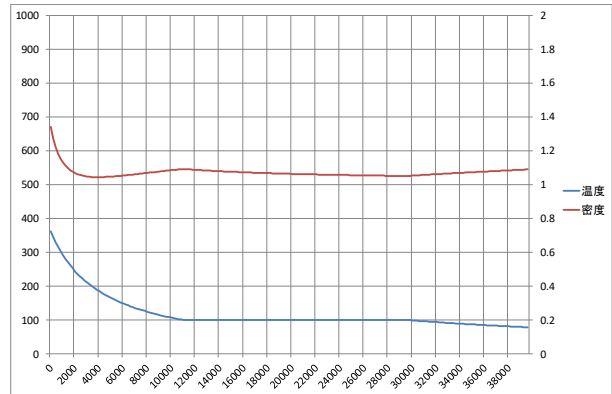
125kgの2倍の地下水と混合した場合には、密度は空気よりも重くなり、噴煙は上昇できなくなる。

こうしたことを考えると阿蘇火山や口永良部島火山などで見られた水蒸気噴火は、どのようにして数1000mを超える噴煙を形成したのか疑問が生じる。1つの考え方は、噴火の初期には、火山ガスと地下水が混合した気体に火道を埋めていた低温の固形物を放出するが、噴火の後期には、マグマが噴出して、高度の高い噴煙を形成したとするものである。Miyabuchi et al.(2018)は、2015年9月14日の噴火をマグマ水蒸気噴火であったとし、噴火の推移を示している。しかし、マグマに直接由来する噴出物は見出していない。小林(2017)も、口永良部島火山の噴火について懐疑的である。



第13図 1000°Cの溶融したマグマと0°Cの地下水（横軸）が混合した場合の温度と密度

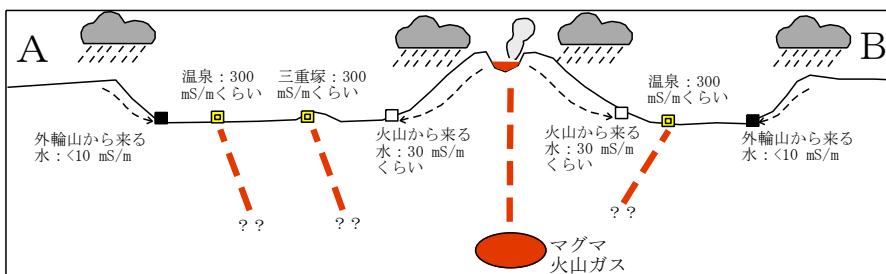
Fig.13 Temperature and density of fluid combined magma (1000°C) and water (0°C).



第14図 1000°Cの溶融したマグマと0°Cの地下水700kg、0°Cの空気（横軸）が混合した場合の温度と密度

Fig.14 Temperature and density of fluid combined magma (1000°C), water (0°C, 700kg) and air (0°C).

2つ目の考え方として、以下のような可能性がある。上記のマグマ噴火における熱エネルギー計算では1000°Cの揮発性成分（水）と1000°Cの固形成分が放出する熱エネルギーと0°Cの空気が得る熱エネルギーの収支から温度と密度を計算していた。1000°Cの固形成分のかわりに、たとえば800°C程度に加熱された古い岩片を加えても、十分に軽い気塊を作ることは可能である。たとえば、阿蘇火山では、噴出する火山ガスによって加熱され赤熱状態となった火口底を見ることができる。この場合、地質学的にはマグマに直接由来する噴出物は含まれないので（あまり多くない量のガラス質岩片は除く）、噴火は水蒸気噴火と言わざるをえない。「水蒸気噴火」という言葉には、温度が低く小規模な噴火というイメージを抱いてしまうが、「水蒸気噴火」には幅広い意味があり、こうした噴火の様式もあることを意識しておく必要がある。



第15図 阿蘇カルデラにおける温泉水・湧水の電気伝導度の特徴。

Fig.15 Electrical conductivity of hot spring & spring water in Aso Caldera.

4-3. 温泉水・湧水の電気伝導度

3つ目として、電磁気学的研究において、温泉水や湧水の電気伝導度も、そこから得られる情報の重要性を認識する必要がある。たとえば、阿蘇カルデラに湧出する温泉水・湧水には第15図に示すような傾向が見られた。カルデラ外輪に起因する湧水の電気伝導度は8mS/m程度（少なくとも10mS/m以下）

であった。一方、中央火口丘に由来すると思われる湧水の電気伝導度はおよそ 30mS/m 程度であった。この違いは、マグマからの揮発性成分がより多く含まれるためと解釈されている。このほかに、カルデラ内で湧出する温泉水は電気伝導度の幅が大きい、200~400mS/m 程度であった。鍵山(2017)は、こうした結果と VLF-MT による表層電気伝導度の測定結果を比較して、空隙率 20%程度（湖底堆積物であることを考慮）の地層中に上記の水が含まれているとすれば妥当であると結論づけている。MT 観測で推定される比抵抗値（電気伝導度）から、母岩の電気伝導度がどれくらいで、空隙中の水の電気伝導度がどれくらいかを知ることは重要であり、Komori et al.(2013)などの研究も行われているが、湧出している水の電気伝導度と温度係数も必要となる情報である。また、火山体の帯水層を通してマグマから散逸する揮発性成分の量を推定することも重要な研究項目であり、Komori et al.(2014)は、雲仙火山において深部までの比抵抗構造の情報をもとに揮発性成分の散逸量を試算している。鍵山(2017)はカルデラ内の地下水の電気伝導度に地域性があることを見出し、かつ、カルデラ内の地下水が東から西に流れているという水理条件を活かして、地下水に溶け込み流出している阿蘇カルデラの揮発性成分の量を推定している。

4-4. 熱エネルギーの定量的検討に基づく火山活動の予測

4 つ目は、火山活動の予測、あるいは理解をするうえで熱的な情報を含めた総合的な検討が有意義であると感じた事例をあげておきたい。霧島火山群・硫黄山は 2014 年 8 月に山体膨張を伴う火山性微動が発生して以降、2015 年 12 月にしばらく途絶えていた噴気活動が山頂付近で再開し、その後、地盤変動を伴う微動が頻発することや地熱活動の活発化が起きているために、噴火の発生が危惧されている。九州大学らによる水準測量の結果では、硫黄山地下において増圧が検出され、浅部になんらかの流体が供給されていることが明らかとなった。鍵山他(2017)は、以前から硫黄山周辺において地中温度調査や湧水・温泉水の電気伝導度・化学分析を行ってきた。湧水の化学分析の結果は、塩素イオン/硫酸イオン比が硫黄山近傍の湧水では急増しているのに対して 1 km ほど離れた温泉水では逆に減少する結果を示した。この矛盾する結果は、深部から供給される熱水が浅部で沸騰して塩素イオンはガスとして上昇し、より浅部の地下水に溶け込んでいるのに対して、硫酸イオンは沸騰せずに熱水に留まり、側方に移動して温泉水となっているため、比は一見矛盾する結果を示したと考えられる。

上記のように、発生しつつある現象の意味するところは明らかとなったが、結果としてこれらの異常現象が水蒸気噴火につながるかどうかを判断することは難しい。こうした状況で、以下のような考察を行った。

硫黄山周辺の湧水・温泉水の化学成分から推定される平衡温度は 250°C 程度であるので、地下に供給された熱水を 300°C 程度と仮定する。熱水のエンタルピーは、 3×10^6 J/kg となる。火山性微動が多発している時期に検知された山体膨張は、九州大学らの推定では、 4×10^4 m³ であるから、膨張の原因がすべて熱水によるものと考えれば、供給された熱水の熱エネルギーは 1.2×10^{14} J と計算される。一方、熱放出率は気象庁の推定では、2MW 程度である。この放熱率は年換算では、 6×10^{13} J/yr となる。このことは、地下に供給された熱エネルギーは、現在の熱的活動が継続すれば 2 年程度で消費できる量である。硫黄山の 1978 年頃の放熱率は 60MW 程度であったので、既存の放熱システムにはこの程度の放熱の能力があると考えれば、十分に放熱できる程度の供給であり、噴出孔を拡大してより大きな放熱を行う必要はないと考えられる。

5. まとめ

私は、火山地域において熱的活動の時間変化や熱エネルギーの放出率の測定を行う研究を進めてきた。1983 年の三宅島噴火に際して、これまでの研究では火山活動を理解することにつながらないことを強く感じ、電磁気学的観測により地下構造を推定する研究を同時に行う方向に舵を切ることになった。この研究によって、火山体下に地下水や熱水を保持する低比抵抗層が広く分布しており、この層が火山噴火の前兆や活動様式の変化に重要な役割を演じていることを突き止めることができた。こうした研究の流れを紹介するとともに、現在感じている「火山活動の多様性」に関する 4 つの事項について所見を述べさせていただいた。

謝辞

CA 研究会において講演する機会および本稿を投稿する機会を与えていただいた山口 覚大阪市立大学教授、上嶋 誠教授をはじめ、CA 研究会の各位に感謝申し上げます。長年にわたる火山地域における共同研究のパートナーであり、電磁気学の師匠でもあった歌田久司東京大学教授には、深く感謝いたします。また、観測研究の師としてご指導いただいた田中良和京都大学名誉教授、笹井洋一博士、観測研究の同志であった宇津木充博士をはじめとする多くの CA 研究者に感謝いたします。

文献

- Hase, H., Geologic remote sensing of the Kusatsu-Manza geothermal area, Central Japan, Report No.252 Geological Survey of Japan, 1974.
- 鍵山恒臣・小山悦郎・行田紀也・下鶴大輔, 草津白根火山の地熱調査, 震研彙報, 53, 581-605, 1978.
- 鍵山恒臣・宇平幸一・渡部暉彦・増谷文雄・山口勝, 霧島火山の地熱調査, 震研彙報, 54, 187-210, 1979.
- Kagiyama, T. and M. Hagiwara, Geothermal survey in and around O-ana Crater and Jodo-daira Flat, the volcanoes Azuma, Bull. Earthq. Res. Inst., 55, 681-703, 1980.
- 鍵山恒臣・宇平幸一・山本博二・辻浩・荒木卓次・長田昇・小山悦郎・竹田豊太郎・渡部暉彦, 1983 年三宅島噴火の熱的調査, 火山, 29, S158-S174, 1984.
- 鍵山恒臣・辻浩, 三宅島火山の 1983 年噴火後の熱的活動の推移, 第 2 回三宅島集中総合観測報告, 47-64, 1987.
- 鍵山恒臣・辻浩, 1986 年伊豆大島噴火の熱的前兆と現況, 月刊地球, 9, 435-440, 1987.
- Kagiyama, T., H. Utada and Y. Sasai, Controlling factor of occurrence of thermal precursor of volcanic eruptions, Proc. Kagoshima International Conference on Volcanoes, 187-190, 1988.
- 鍵山恒臣・増谷文雄・井口正人, 諏訪之瀬島火山の E L F, V L F - M T 測定, 「第 2 回諏訪之瀬島火山の集中総合観測報告書」, 55-66, 1993.
- 鍵山恒臣・増谷文雄, 諏訪之瀬島火山の遠望観測, 「第 2 回諏訪之瀬島火山の集中総合観測報告書」, 81-93, 1993.
- 鍵山恒臣, 火山地域における低比抵抗層の火山学的意義, CA 研究会 1995 年論文集, 106--112, 1995.
- Kagiyama, T., Utada, H. and Yamamoto, T., Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure., Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 89, 35--42, 1999.
- 鍵山恒臣, 噴火卓越型火山活動と地熱活動卓越型火山活動—新しい視点で見る火山活動—, 地熱学会誌, 30, 193-204, 2008.
- 鍵山恒臣, カルデラ生成噴火の準備過程解明に向けた研究の展望, 地質学雑誌, 116, 463-472, 2010.
- 鍵山恒臣・吉川 慎・大沢信二・三島壯智・黄 有志, 霧島火山群硫黄山周辺の地熱活動の変化, 京都大学防災研究所年報, 60B, 408-416, 2017.
- 鍵山恒臣, 表層電気伝導度から示唆される阿蘇火山の活動様式と中部九州の活構造, 2017 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 1-8, 2017.
- 加茂幸介・江藤康夫・西 潔・石原和弘, 桜島火山の熱映像の調査研究, 自然災害特別研究「噴火予知のための主要活火山における熱的状态の研究: 研究代表者横山泉」報告書 A-52-1, 129-153, 1977.
- 気象庁, 霧島山, 第 137 回噴火予知連資料, http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf, 2017/
- 小林哲夫, 口永良部島・新岳の 2014・2015 年噴火: 水蒸気噴火の可能性, 地質学雑誌, 123, 309-319, 2017.
- Komori, S., Kagiyama, T., Takakura, S., Ohsawa, S., Mimura, M. and Mogi, T., Effect of the hydrothermal alteration on the surface conductivity of rock matrix: comparative study between relatively-high and low temperature hydrothermal systems, J. Volcanol. Geotherm. Res., 264, 164-171, 2013.
- Komori, S., Kagiyama, T., Fairley, J.P., Possibility of effective magma degassing into groundwater flow systems

- beneath Unzen volcanic area, SW Japan, inferred from the evaluation of volcanic gas fluxes using electrical conductivity structures, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 283, 73-81, 2014. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.05.024
- 九州大学, 精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下変動, 第 137 回噴火予知連資料, http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/137/137_02-4.pdf, 2017
- Miyabuchi, Y., Iizuka, Y., Hara, C., Yokoo, A. and Ohkura, T., The September 14, 2015 phreatomagmatic eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 351, 41-56, 2018.
- Shimozuru, D. and Kagiya, T., A newly devised Infra-red ground scanner and its application to geothermal research in volcanoes, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4, 251-264, 1978.
- 田中康裕・古田美佐夫, 三宅島, 気象技術研究報告第 2 号, 主要活火山の地殻変動並びに地熱状態の調査研究, 182-186, 1979.
- 歌田久司・笹井洋一・中川一郎・小山 茂・石川良宣・浜野洋三, 1983 年三宅島火山の噴火に関連した電気抵抗変化, *火山*, 29, S113-S124, 1984.
- 歌田久司・笹井洋一・下村高史・行武 毅・山本哲也, 三宅島における 1983 年噴火後 2 年間の電気比抵抗変化, 第 2 回三宅島集中総合観測報告, 35-46, 1987.
- Utada, H. and Shimomura, T., Resistivity structure of Izu-oshima Volcano revealed by the ELF-VLF Magnetotelluric method, *Jour. Geomag. Geoelectr.*, 42, 169-194, 1990.
- 横山 泉・他, 伊豆大島三原山の集中観測—1974 年 6 月 (自然災害特別研究「噴火予知のための主要活火山における熱的状态の研究」報告書, 1975.