

日本火山学会公開講座

## 2016年熊本地震と阿蘇山噴火

主催：日本火山学会

日時：2017年9月24日（日曜日） 13:00~15:30

会場：熊本大学工学部百周年記念館（黒髪南キャンパス）



# 講演

1. 「中部九州のテクトニクス：地震・火山活動によるストレス発散の歴史と現在」  
講師：竹村恵二（京都大学大学院理学研究科）
2. 「平成 28 年熊本地震と布田川・日奈久断層帯」  
講師：清水 洋（九州大学大学院理学研究院）
3. 「阿蘇は活発だけれども不思議な火山ー桜島・別府との違い」  
講師：鍵山恒臣（京都大学大学院理学研究科）
4. 「質問コーナー」

## はじめに

2016年4月の熊本地震で亡くなられた方々にお悔やみ申し上げますとともに、被災されました皆様にお見舞い申し上げます。

この地震では、地震断層に沿う地域で甚大な被害が発生しました。また、火山噴出物で覆われた阿蘇地域では多数の土砂災害が発生し、多くの犠牲者が出ました。そして、この地震の影響で活動活発化が懸念された阿蘇火山は、地震の半年後に噴火し、観測史上最大の噴煙高度が記録され、遠くは四国でも降灰が観測されました。

本講演会では、この地域で地震や火山活動を生み出す背景はなにか、熊本地震やその後の阿蘇山噴火に至る過程で何が起こったのか、阿蘇火山の今後の噴火活動はどうなるのか、などについてこれまでの研究で明らかにされてきたことを紹介します。

この講演会によって皆様の地震・火山噴火現象に対する理解が深まり、ひいては防災意識向上の機会となれば幸いです。

2017年9月24日

日本火山学会 2017年秋季大会実行委員長  
日本火山学会学校教育委員会委員長

大 倉 敬 宏

# 中部九州のテクトニクス：地震・火山活動によるストレス発散の歴史と現在

## 竹村 惠二（京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設）

### はじめに：

2016年4月には、熊本地震が発生し、阿蘇火山では、約20年ぶりのマグマ性噴火が2014年11月に発生し、約40年ぶりの爆発的噴火が2016年10月に発生しました。このように最近の中部九州は自然災害を引き起こすような地震・火山活動が頻発している状況が続いています。ここでは、これらの活動を引き起こした場所の数十万オーダーの長期間にわたる大地の運動について、またこの間の九州の地震・火山活動を考えてみます。

### 火山活動と地震活動：それをつなぐテクトニクス

テクトニクスは地殻の構造や物性および、その時間を通しての進化をコントロールするプロセスです。また、地震や火山活動を理解するための基本的な枠組みです。

大地(地殻)にはいろいろの力がかかります。その力と対応して応力(ストレス：物体の内部に生じる力の大きさや作用方向を表現するために用いられる物理量で、物体の変形や破壊などに対する負担の大きさを検討するのに用いられる。)が生じます。大地のストレスの状態により、地震活動や火山活動が生じると考えられます。このような応力の状態と変遷もふくめて、大地の成り立ちを考える鍵がテクトニクスという言葉に含まれています。

### 九州は本当に開いているか？：

かなり以前だと思いますが、九州の新聞に大きく“九州は開いている”という記事が掲載されました。現在の九州が南北に開いているという概念は、別府―島原地溝(松本、1979など)という魅力的な考えが大きくその成立に影響を与えてきました。それは、全体として重力負異常分布の情報、正断層の密な分布、測地・測量の観測データの解析、火山の配列などから考えられてきました。しかし、最近のGPSの成果でもみられるように、広い領域で南北に単純に開いているという情報はあまり多くないようです。九州中部地域のこのような構造的な背景を

考えるためには、多くの営力や構造の総合的な視点と互いの関連の解析が必要だと思われますし、地域的な影響の受け方の差異を考慮することが必要です。

### 九州にはどのように力がかかってきたか、かかっているか？―中部九州のテクトニクス

九州のテクトニクスに関係する営力に関するキーワードとして、フィリピン海プレートの沈み込み、活火山活動、張力的応力場と沖縄トラフ、北西九州ホットリージョン、中央構造線の活動、三次元地殻構造、アムールプレートの運動などが考えられます。長岡(2001)によりまとめられた九州および南西諸島周辺のプレート境界とテクトニクス・火山の図に、上記のほぼすべての構造要素の分布が図示され、図から読み取れる分布・方向・位置関係などの情報が説明のために役にたつと考えられます。

### 中部九州における地震・火山活動によるストレス発散の歴史・現在：

九州では、最近30年間でも、1991年の雲仙普賢岳、1995年の久住硫黄山、霧島、桜島、阿蘇山での噴火が起こりました。また、鹿児島県北部地震、福岡県西方沖地震、そして2016年熊本地震と多くの地震が発生しました。このような地震・火山活動とテクトニクスの関係について考えてみます。

先に述べた火山は、すべて活火山と呼ばれます。活火山は現在「概ね過去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」(火山噴火予知連絡会、2003)と定義され、最初は108でしたが、現在は111の火山がリストアップされています。

これらの火山は、基本的に九州をやや東よりの南北方向に、由布・鶴見、久住から阿蘇、霧島、桜島から南海上まで、琉球海溝と並行するように並んで、火山フロントと呼ばれています。火山フロントの形成はフィリピン海プレートの沈み込みと関連して解釈されます。雲仙火山の場所は、それらから離れて中部九州の西端に位置しています。これらの火山活動史のうち、重要な画期は30万年前ころにあると考えられま

す。阿蘇火山地域では、このころ以降に、4 回の大規模のカルデラ形成の噴火（約 27 万年前、14-15 万年前、13 万年前、9 万年前）があり、九州中部を中心に大規模の火砕流で覆われました（小野・渡辺，1983）。雲仙、久住、由布一鶴見火山群の活動もこのころに活動の画期が認められます。30 万年前頃の画期がなぜ起こったかについてのテクトニクスからの情報は少ないようです。それ以後のカルデラ噴火はどのように準備されてきたのか、カルデラ噴火間の現在の中央火口丘形成時の活動はどんなマグマ活動でどのように推移するかなどは、重要な課題であり、現在の噴火予知に向けても大切です。現在の中岳第一火口を中心とした活動のサイクルとしては、非活動期には「湯だまり」と呼ばれる火口湖が形成され、活動期には湯だまりが消失して黒色砂状の火山灰を放出し、赤熱噴石・スコリアの放出を伴うストロンボリ式噴火も発生し、時には、激しい水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火を起こすことがあります。現在の観測体制はいろいろの地球物理学的観測から、そのような変化の際の微小な変化をとらえつつあります。現在の中央火口丘周辺のテクトニクスとマグマ活動との関連をそのような情報に基づいて整理することが重要です。

地震と密接に関係する活断層は 3 つの条件が必要で、**比較的最近に活動し、繰り返し活動しており、今後も活動する可能性がある断層**と考えられています。活断層が活動するということは地震が起こるということを意味するとみなさん考えているようです。

九州地域では、内陸活断層の活動による多くの被害地震が記録されてきました。最近も 2005 年福岡県西方沖地震、1975 年大分県中部地震、1997 年鹿児島県北西部地震、などが起こり、熊本でも 1975 年阿蘇山北縁地震、1889 年熊本地震が起こりましたが、地表変位をもたらすほどの大きさではありませんでした。九州では、679 年筑紫地震や 1596 年慶長豊後地震などは地表変位をもたらす規模の断層活動が推定されていますが、今回の 2016 年熊本地震は、この規模に相当すると考えられます。1995 年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）以後、国は地震調査研究推進本部を中心に、大地を揺らす原因の断層とその活動の長期評価を実施してきました。また、平成 25 年（2013 年）には、九州地域の活断層の長期評価をまとめました。それまでは基

盤的調査観測対象の活断層帯（地表長さ 20 km 以上、活動度 B 級 <0.1~1m/千年> の個々の主要活断層帯ごとに評価してきたものを、被害地震を考慮して、周囲の活断層を総合的に評価することが必要と考え、地域評価の手法を取り入れることにしました。その結果、活断層と発生する M6.8 以上の地震発生確率（今後 30 年間）を九州全域、九州北部・中部・南部という形で公表しました。

また、中部九州東部と四国の関係の評価も重要になります。平成 28 年度まで実施された「別府一万年山断層帯の重点的な調査観測」の多様な地球科学的総合的調査の成果から、中央構造線からの横ずれ断層活動にともなう九州中部東部の地下構造の形成過程のまとめや、現在の活断層分布や活動時期の推定がなされました。

テクトニクスの研究と理解は時間を考慮した 4 次元空間認識の考え方が重要になってきており、それらを統合して、連続的変化とイベント的事件の組み合わせで考えることが必要です。火山活動では、カルデラ噴火とその間の火山活動の消長、地震と断層活動では、断層活動による地震の発生と静穏な時間の認識などです。たとえば、大きな地震が確実に起こらなかった地球科学的情報を収集して、長期間の変動に関する情報を整理していくことは大切な課題となります。

## 終わりに：地球史的時間と人間の時間と災害、素因と誘因

2016 年熊本地震は、地表に明瞭な断層変位をともなう被害地震でした。また、M7.3 に達する規模であったことも示されました。この規模の地震は、地形学的情報等に明瞭に記録・保存される可能性が高いものです。しかし、地震被害は、地表変位を伴わない規模の地震であっても生じることは私たちの歴史が示しています。カルデラ噴火や M7 をこえる規模の地震を起こす断層活動は、数千年～万年規模で起こっています。しかし、その規模には達しない規模の地震、マグマ噴火、マグマ水蒸気噴火などは、私たち人生の中でくりかえし起こる可能性を秘めています。普段の調査・観測はその推移や地殻変動の様相を見守り、予測可能性等も含めて、重要な位置を占めていると考えます。地震災害・火山災害は大地の動きの規模（誘因）のみで決まるものではありません。私たちが住んでいる大地の表面の地形・地質などの様相（自然

素因) や私たちが作ってきた社会的様相 (社会素因) に大きく左右されます。災害と向き合い、減災を進めるためには、大地の大きな変動に対応できる社会の作り方にも目を向けることは重要だと考えます。

引用文献：

地震調査研究推進本部 (2013) 九州地域の活断層地域評価.

[http://www.jishin.go.jp/evaluation/long\\_term\\_evaluation/regional\\_evaluation/kyushu-detail/](http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/regional_evaluation/kyushu-detail/)

松本徭夫 (1979) 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. 地質学論集, no.16, 127-139.

長岡信治 (2001) 九州・南西諸島のテクトニクス, p.2 図 1.1.1, 九州・南西諸島 (日本の地形 7) (東京大学出版会)

小野晃司・渡辺一徳(1983) 阿蘇カルデラ. 月刊地球, 44, 73-82.

# 平成 28 年熊本地震と布田川・日奈久断層帯

清水 洋（九州大学・地震火山観測研究センター）

## はじめに

2016年4月14日、熊本県熊本地方でマグニチュード6.5の地震が発生しました。この地震により、熊本県益城町で最大震度7を観測し、大きな被害をもたらしました。さらに、16日にはM7.3の地震が発生し、建物の倒壊、土砂災害により50人の尊い生命が失われました。この2つの地震は、熊本県を北東-南西方向に横断する布田川・日奈久断層帯が活動したものです。布田川・日奈久断層帯は、活断層であることから、将来も活動して大きな地震を発生させると考えられます。したがって、熊本地震と布田川・日奈久断層帯の特徴を知っておくことは、将来の災害の軽減のために必要であると思います。この講演では、今回の熊本地震はどのような地震だったのか、布田川・日奈久断層帯のどの部分がどのように動いたのか、今後の活動の可能性はどうか、などについて、これまでの調査研究から分かってきたことを紹介します。

## 平成 28 年熊本地震の発生メカニズム

熊本地震の発生にともなって、阿蘇カルデラから御船町にかけての約31-33kmにわたり、地表に断層が現れました（図1）。

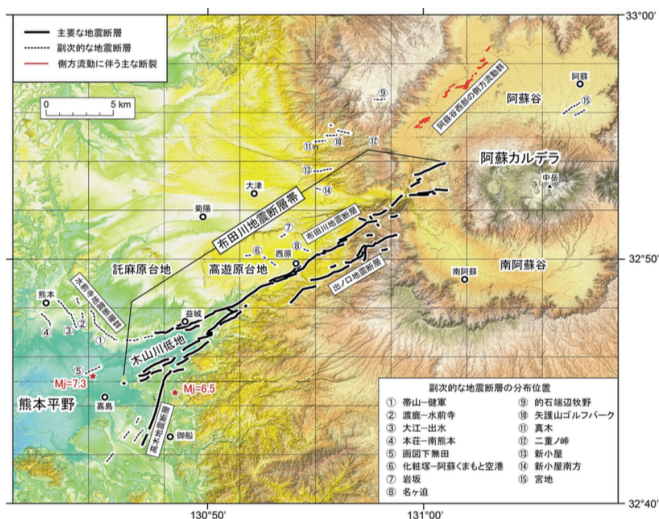


図1. 平成28年熊本地震にともなって地表に現れた断層と断裂の分布（平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査・平成28年度成果報告書, 2017）

これらの断層は、おおむね既知の活断層である

布田川・日奈久断層帯に沿っており、地表に生じた「ずれ」の向きは、右横ずれ断層成分と正断層成分が卓越し、最も大きくずれた場所は、右横ずれ2.5m程度、南西側隆起2m程度でした（平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査・平成28年度成果報告書, 2017）。

ところで、右横ずれ断層というのは、図2の左図に示すように、断層をはさんだ相手側のブロックが右方向にずれ動く断層のことであり、正断層というのは、図2の右図に示すように、縦にずれ動く断層のことです。

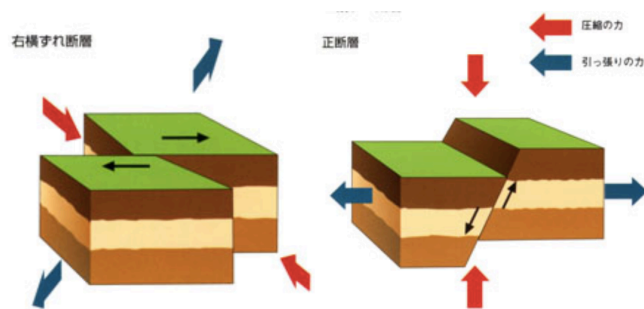


図2. 断層の模式図

左図：右横ずれ断層，右図：正断層。  
なお、左図と反対向きに動く断層を左横ずれ断層と呼び、右図と反対に動く断層を逆断層と呼びます。

このような断層の型が分かると、この地域の地下（地殻）に働いている力（正しくは応力といいます）の向きを知ることができます。図2の青い矢印が「引っ張り」を、赤い矢印が「圧縮」をそれぞれ示します。熊本地震の場合は、立野から益城付近までの布田川断層は「正断層成分を含む右横ずれ」であり、図2の両方の型が合わさった動きでした。また、益城から御船付近までの日奈久断層は「右横ずれ」でした。これらの断層が走る方向とずれの向きから、この地域の地殻には、ほぼ南北方向の引っ張り応力が強く働いていることが分かります。一方で、圧縮応力の方向は安定せず、場所によって東西方向であったり上下（鉛直）に近かったりしていると推定されます。熊本地震は、このような力によって布田川断層と日奈久断層の一部が急激にずれ動いて発生したのです。

それでは、熊本地震を引き起こした断層は地

下ではどうなっているのか、もう少し詳しく見てみたいと思います。地下での断層（震源断層）の位置や大きさ、ずれ動きの方向や大きさなどは、熊本地震にともなう地殻変動や震源分布、地震波の波形解析から推定することができます。4月14日の最大前震（マグニチュード6.5）と4月16日の本震（マグニチュード7.3）では、前述の地表に現れた断層のずれ以外にも断層に沿った広い範囲で地面が変形し、これらの変形をGNSS（GPSのことです）や測地衛星（干渉SARという手法です）で捉えることができました。また、地震動がたくさんの地震計で捉えられました。これらの解析により、平成28年熊本地震の震源断層として動いた布田川断層は長さ約25kmで、北西方向に約60度傾斜していること、震源断層の日奈久断層部分は長さ約10kmで北西方向にさらに高角度で傾斜していることが推定されました。本震発生時の断層のずれ動きは、日奈久断層北部の深部から開始し、それが布田川断層に移って北東方向に広がり、阿蘇カルデラ西部で停止したと考えられます。震源断層で一番大きくずれ動いたところは布田川断層の地下約8~10kmの深さで、約5mもずれ動いたことが分かりました（Asano and Iwata, 2016）。

さらに、熊本地震の震源分布などから、前震と本震の震源断層の詳細な分布と位置関係なども明らかになりました。それらを図3に模式的に示します。

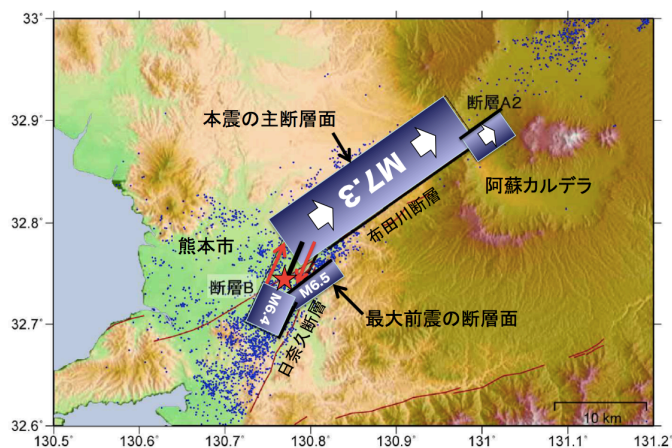


図3. 平成28年熊本地震の前震と本震の震源断層（模式的図）  
震源断層を地表面に投影。赤い星印は本震の震源（断層運動の開始地点）。青い点は前震と余震の分布。

4月14日21時26分の最大前震（マグニチュ

ード6.5）は布田川断層の西端部で発生しましたが、その断層面は布田川断層とは逆の南東方向に傾斜していたと考えられます。引き続き15日00時03分の前震（マグニチュード6.4）は日奈久断層の北端部が動いたものと考えられます。ところが、16日の本震（マグニチュード7.3）は、図中の赤い星印の地点から、日奈久断層とも布田川断層とも一致しないほぼ鉛直の断層が右横ずれした後、布田川断層が正断層成分を含みながら右横ずれを起こしたと推定されます。震源分布からは、これら以外にも複数の小断層の存在が推定され、非常に複雑な断層構造をしていることが明らかになりました。

平成28年熊本地震では、これらの断層群が連鎖反動的に動くことにより、二度の震度7をもたらした前震と本震に加え、非常に活発な余震および誘発地震活動を引き起こした可能性が高いと考えています。

### 大地震はどこでも発生するのか？

平成28年熊本地震は活発な余震活動を伴いましたが、布田川・日奈久断層帯に沿って一面に地震が発生したわけではありません。医学で体の断層写真を撮影するCTスキャンに用いられるトモグラフィ法を、地震波を使って行うことができますが、この手法を熊本地震の震源域に適用して地下の地震波速度構造を調べたところ、地震活動は主に周辺より地震波が伝わる速度が大きい領域で起こっていることが明らかになりました（Shito et al., 2017）。これは、地下の断層が急激にずれ動いて地震を発生するためには、その領域がある程度「固い」必要があることを示しています。つまり、例えば粘土のように柔らかい領域は力が加わった時にグニャッと変形してしまい、バリッと割れて急速にずれ動く（＝地震を起こす）ことはないという理屈です。

一方、地面に電極と磁力計を埋めて電場と磁場を計測することによって、地下の電流の流れにくさ（比抵抗といいます）を調べることができます。この方法で、熊本地震の活発な地震活動と比抵抗構造との対応について調査しました。その結果、地震活動は低比抵抗体の周辺、やや高比抵抗寄りで発生していることが明らかになりました（Aizawa et al., 2017）。図4に、地下の深さ8kmにおける比抵抗と震源分布の比較を示します。図中で黄色から赤い色の部分が比抵抗が小さい（電流が流れやすい）領域です。熊本地震の余震・誘発地震活動は、図中の右上



の別府市付近から左下の八代市付近まで分布していますが、九重山直下や阿蘇山直下の低比抵抗領域ではほとんど発生していません。1975年1月23日の阿蘇北部地震（マグニチュード6.1）、同年4月21日の大分県中部地震（マグニチュード6.4）などの過去の大きな地震の震源も、同様に低比抵抗域を避けてその周辺部に位置していることがわかります。

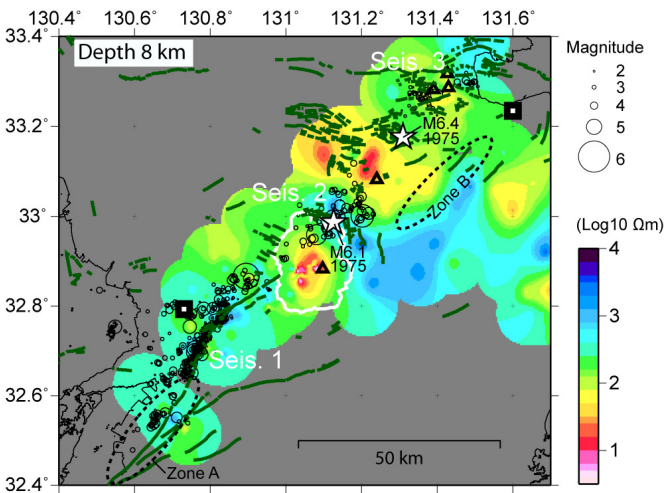


図4. 九州中部における深さ8kmの比抵抗構造と熊本地震後1ヶ月間に発生した地震活動との関係 (Aizawa et al., 2017 による)

黒丸は、熊本地震の余震と誘発地震の震央。  
星印は、1975年の阿蘇北部地震と大分県中部地震の震央。

深さ8kmで比抵抗が極端に小さい九重山や阿蘇山の直下には、マグマが存在している可能性が高く、マグマが存在するとその領域は高温で柔らかくなるので、地震波の低速度領域と同様に地震が発生しにくいと考えられます。

これらのことから、大地震はどこでも発生するのではなく、今回の熊本地震のようにマグニチュード7を超えるような広域に甚大な被害をもたらす大地震は、阿蘇山や九重山の直下では発生する可能性が低いことが示唆されます。しかしながら、阿蘇山や九重山の周辺部では地震活動そのものはむしろ活発であり、マグニチュード6クラスの地震が過去に発生しています。これらの地震でも震源付近では震度6以上の強い揺れになることが多く、家屋倒壊や斜面崩壊などの災害が発生することに留意しなければなりません。

**布田川・日奈久断層帯で将来大きな地震が発生する可能性は？**

布田川断層帯と日奈久断層帯で、将来どれくらいの確率で大きな地震が発生するのか（これを地震の長期評価といいます）については、平成28年熊本地震以前に国の地震調査研究推進本部・地震調査委員会で評価され、公表されています。図5に布田川断層帯と日奈久断層帯の位置と活動区間を示しますが、布田川断層帯は、阿蘇西外輪（立野）付近から宇土半島に向かって、布田川区間、宇土区間、宇土半島北岸区間の3区間に区分されています。また、日奈久断層帯は、益城町付近から水俣市西方沖にかけて、高野-白旗区間、日奈久区間、八代海区間の3つに区分されています。

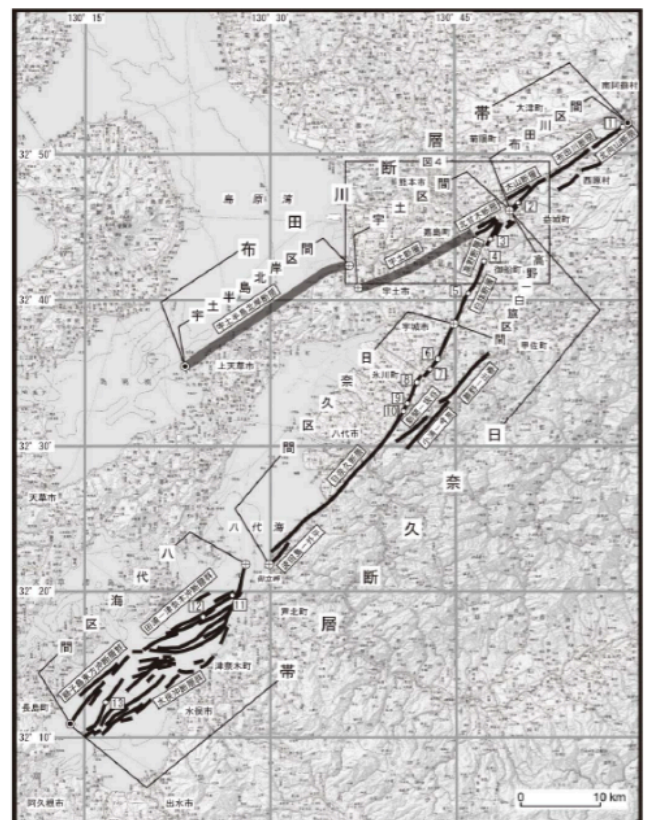


図5. 布田川断層帯と日奈久断層帯の断層位置と活動区間 (地震調査研究推進本部・地震調査委員会,2013)

そして、これらの各区間の今後30年間の地震発生確率は、布田川区間でほぼ0~0.9%、日奈久区間でほぼ0~6%、八代海区間でほぼ0~16%であり、宇土区間、宇土半島北岸区間、高野-白旗区間では不明とされていました。今回の熊本地震が発生したことで、布田川区間のひずみエネルギーはほぼ完全に解放されたと考えられますが、高野-白旗区間については完全には解放されていない可能性があり、さらにその他の区間については依然としてひずみエネルギーを蓄積したままと考えられます。

このことから、これらの区間の活断層調査が

必要であり、文部科学省の「平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」によって、今年 1 月～3 月に宇土区間の人工地震探査、高野-白旗区間と日奈久区間のトレンチ調査、八代海区間の海底音波探査とボーリング調査などが実施されました。その結果、宇土区間には地下に潜在する断層が確認され、日奈久断層の各区間では過去の活動情報が得られました。特に、これまで活動履歴がよく分かっていなかった高野-白旗区間では、15000 年前以降 5 回の断層活動 (=大きな地震の発生) が生じていたことが明らかとなりました。また、今回の熊本地震を除く最新の活動時期が 1400～800 年前、平均活動間隔が約 3800～2600 年と推定されました (平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査・平成 28 年度成果報告書, 2017)。今後、これらの調査結果を踏まえて、将来の地震発生確率が再検討されるものと思われまます。

#### おわりに

平成 28 年熊本地震と布田川・日奈久断層帯の研究は現在も続けられており、熊本地震の発生のしくみについて多くのことが明らかになりつつあります。また布田川・日奈久断層帯の構造や過去の活動履歴などについても調査が進んでいます。ここではそれらの成果の一部を紹介しましたが、現時点では確度の高い地震予測はできず、本講演の内容も防災に直ぐに役立つものではありません。しかしながら、私たちの住んでいる地域の地震や活断層の特徴を理解することは、地震時にいのちを守るために意味があることと考えます。地震や活断層を正しく知り、正しく備えていただきたいと思います。

#### 引用文献 :

Aizawa K. et al. (2017), Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan. *Earth, Planets and Space*, 69.

<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0590-2>

Asano K. and Iwata T. (2016), Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data. *Earth, Planets and Space*, 64.

<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0519-9>

地震調査研究推進本部 (2013) 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価 (一部改定) .

[http://jishin.go.jp/main/chousa/13feb\\_chi\\_kyushu/k\\_11.pdf](http://jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_11.pdf)

文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学 (2017) 「平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」平成 28 年度成果報告書.

Shito A. et al. (2017), Seismic velocity structure in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Japan, *Geophys. Res. Lett.*

<http://dx.doi.org/10.1002/2017GL074593>

# 阿蘇は活発だけれども不思議な火山ー桜島・別府との違い

鍵山恒臣（京都大学・火山研究センター）

## はじめに

この講演を聴きに来られた方の多くは、「火山噴火の予知はできるのだろうか?」といった疑問を持たれていると思います。この疑問に対する答えは、一言で言えば、「火山噴火の前には何らかの異常をつかむことはできる。そして、異常を検知した後に噴火が発生することもあるが、一筋縄ではいかない場合もある」ということです。テレビを見ていると、「火山に詳しい専門家」が、「そもそも火山噴火の予知はできません」と気軽にコメントされている様子を見ることがありますが、実はそうではありません。「予知が簡単にできる火山もあれば、難しい火山もあります。難しい火山には、ちゃんとした理由があります。」というのが正しいコメントなのです。本日は、その理由をお話しようと思います。そして、実は阿蘇火山も難しい火山の一つなのです。また、阿蘇火山の興味深さは火山噴火だけではなく、阿蘇カルデラの周辺には豊かな湧水や温泉もあります。これらについても、どのようなことがわかりつつあるかを紹介したいと思います。

## 噴火の予知が簡単な火山、難しい火山

火山には、異常現象に引き続いて噴火をする火山とそうではない火山があります。たとえば、図1に示すように桜島では地震の群発や山が膨らむとほぼ間違いなく噴火が起きます。一方、伊豆半島や箱根火山では、地震が群発してもなかなか噴火しません。別府の温泉では、近くの鶴見岳・伽藍岳で数千年前にマグマ噴火が起きていますが、過去2千年の間では、水蒸気噴火がまれに起きているだけです。こうした状態を、

「火山噴火にいたる過程の多様性」と私たちは呼んでいます。では、なぜこのような多様性があるのでしょうか?

私がかつて勤務していた浅間火山観測所で、1982年に変わった水蒸気噴火が発生しました。浅間火山と言えば、阿蘇山と並んで日本有数の活火山です。火山性の地震の発生が高まってくるとマグマ噴火が繰り返し発生するので、地震観測をすることで噴火を予測していた火山です。その浅間火山で、繰り返し地震が発生するのに一向に噴火が発生しない状態が何年も続いた後に、1982年4月に突然水蒸気噴火が発生しました。この噴火は、その後の研究でマグマが火口底近くまで上昇できなかった後で噴火が発生したことがわかりました（詳しくは第10回火山学会公開講座のテキストに書かれています）。こうした事例は多くの火山で見られています。地震などの異常現象を伴いつつマグマが上昇するが、途中で上昇できなくなり、火山ガスだけが上昇して噴気異常を起こす場合や水蒸気噴火が発生することが多いこともわかりました。液体のマグマが上昇する時には、浅い部分で体積の膨張が起きて地殻変動などの異常現象が検知されるので、噴火は比較的簡単に予測することができます。しかし、マグマが停止して火山ガスだけが上昇すると地殻変動などの異常現象はあまり起きなくなります。噴火直前に火口直下で水蒸気圧の上昇を検知しなければいけないので予測はとても難しくなるのです。

## 火山の爆発はガス爆発と同じ?

ではなぜマグマの上昇停止は起きるのでしょうか?このことを考える前に、そもそも火山噴火はどのようにして起きているのかを考えましょう。最近あまり聞かれなくなりましたが、以前は、家庭でガス爆発があったというニュースを時々耳にしました。このガス爆発と火山の爆発とは同じでしょうか?違いがあるとすれば何でしょうか?この質問を大学生にすると意外に即答できる人はあまりいません。ガス爆発は、メタンやプロパンなどのガスが酸素と化合して二酸化炭素と水に変わる化学反応なのです。瞬時にこの反応が起きて高温高压の状態が作られ



図1 火山噴火にいたるまでの多様性

るために爆発が起きています。では、火山の爆発は、「火山ガスが瞬時に酸化」して起きているのでしょうか？答えは否です。

### マグマ噴火・水蒸気噴火

マグマは冷えて固まった時に溶岩となる成分（固形成分）に火山ガス成分が溶けたものなのです。固まった溶岩を熱して融かしたとしても元のマグマとは違った性質を持っているのです。圧力の高い地下深部では、 $1100^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 程度の融けたマグマに数%程度の水や二酸化炭素、二酸化硫黄などの火山ガスが溶けています。マグマが地表近くまで上昇してくると、周囲の圧力が低くなり、マグマに溶けている火山ガスが泡になって急激に体積が膨張します。ビールやコーラの瓶を振った後で栓を抜くと激しく噴き出します。火山噴火は、これと同じことが起きており、こうした噴火をマグマ噴火と呼びます。たとえば、火山ガスを5%程度含んだ $1000^{\circ}\text{C}$ のマグマが地表に上昇してくると、その体積は700倍以上に膨張します。この膨張が、火山噴火の原動力となっているのです。

火山噴火にはもう1つ別の種類があります。高温のマグマが地下水や海水と接触すると、マグマの熱で地下水が水蒸気になって急激な体積膨張を引き起こします。こうした噴火を水蒸気噴火、あるいはマグマ水蒸気噴火と呼びます。同じく火山ガスを5%程度含んだ $1000^{\circ}\text{C}$ のマグマが $0^{\circ}\text{C}$ の水と混合すると、最も体積が膨張する場合、温度は $360^{\circ}\text{C}$ 程度に低下しますが、体積は2300倍以上に膨張します。マグマが水と接触すると爆発的になることが、この数字からも想像できます。

### マグマの粘性と噴火

ここまでで、マグマは固形成分と火山ガス成分がいっしょになっていることを説明しました。火山噴火には、この他にもう1つ重要な性質があります。理科の教科書を見ると、「玄武岩はさらさらと流れやすく、楯状火山を作ります。粘り気の強いマグマは（安山岩と書いてある教科書やデイサイトと書いてある教科書もあります）、爆発的な噴火をします。」と書いてあります。別の教科書には、「粘り気の強いマグマは、昭和新山のような溶岩ドームを作ります」と書かれていることもあります。生徒たちは、なんだかよくわからないけれど、とりあえず、「玄武岩はハワイのような楯状火山、安山岩は桜島の

ような爆発的噴火、デイサイトは昭和新山のような溶岩ドーム」と暗記をしているというのが実情です。私の講演を聴いた高校生が「地学は暗記科目だと思っていたけど、けっこういろいろと考える学問だとわかりました」とアンケートに答えていたのには、愕然としてめまいを感じました。

さて、なぜマグマの粘性は大事なのでしょうか？人ごみの中を歩くことを考えてみましょう。1人1人がばらばらに歩いている場合は、ぶつかりそうになりながらもなんとかすれ違って歩いていけるでしょう。では、お父さんお母さんと子供2人の4大家族が仲良く手をつないで歩いて行ったらどうなるでしょう？すれ違うことはとても大変になります。マグマの主要成分であるケイ酸が少ない（言い換えると金属元素が多い）玄武岩質マグマは、ケイ酸の分子同士が手をつなぐことを金属原子が邪魔をするのに対して、ケイ酸が多い安山岩質マグマやデイサイト質マグマでは、ケイ酸の分子同士が手をつなぎやすくなるのです。たとえて言えば、玄武岩は1人1人がばらばらの集合の状態、安山岩やデイサイトは2人とか4人が手をつないだ状態と考えられます。粘性の低いマグマは流れやすく、高いマグマは流れにくくなるのです。

この粘性は、さらにもっと重要な意味を持っています。前の節で示したように、融けたマグマが地表に向かって上昇とすると圧力が低くなり、それまで溶けていた火山ガスが溶けきれなくなって泡が生じるようになります。その時、粘性の高いマグマでは、泡は液中を移動することが難しいので（泡が移動するということは、周りの液体が流動するということですから、高粘性の液体の流動は難しいのです）、周りの圧力が低くなるにしたがって、その場所で大きな泡になろうとします。しかも、周りの液体は粘性



図2 伊豆大島火山の溶岩噴泉 1986年11月

が大きいので簡単には膨張させてくれません。閉じ込められた泡は高い圧力を持った状態になります。まわりの液体がこの高圧ガスを閉じ込められなくなると爆発が発生します。その時、泡と泡の間に残された小さい液体が急冷されて固まると火山灰になります。この噴火では、高温の火山ガスと細かい火山灰が爆発的に噴出することになります。泡の成長があまり激しくない場合には、火山灰ではなく軽石になります。

一方、粘性の低いマグマでは泡が液体の中を移動しやすく、泡同士が合体して大きい泡になったり、マグマの外に逃げ出していったりします。こういう状態でマグマが地表に噴出すると、液体の部分と気体の部分が簡単に分かれてしまうために、図2に示すような噴水のような噴火（溶岩噴泉）となったり、図3の左下に示すような大きな泡が破裂することによってマグマのしぶきを噴出する「ストロンボリ式噴火」が起きたりします。阿蘇中岳のマグマ噴火は、しばしばこのタイプになります。

### マグマの脱ガスと水蒸気噴火・地熱活動

先ほど述べていたマグマの上昇停止はどのように起きているかをここで考えてみましょう。マグマの上昇停止の理由にはいくつかの説がありますが、1つの有力な説として、マグマから火山ガスが抜けていくこと（脱ガス）が考えられています。マグマの上昇や上昇停止には、マグマに溶けている火山ガスの発泡が大きく影響します。マグマ中に溶けていた火山ガスが泡となると見かけ上の密度は、周囲の岩石よりも軽くなるので、浮力を受けてより早く上昇すると考えられています。しかし泡となった火山ガスがマグマから抜けていくと、見かけ上の密度はあまり軽くならないので上昇速度は小さくなり、場合によっては停止することになります。マグマが上昇している間は、地震の群発などの異常現象が起きますが、上昇が止まると異常現象はなくなると考えられます。

マグマは停止しますが、マグマから分離した火山ガスは上昇を続けます。上昇して地下水層に達すると、火山ガスが地下水に加わることで温泉水が作られたり、加わる火山ガスの量が多ければ、地下水が沸騰して水蒸気になるため、地表に噴気が出現したりします。もっと多量の火山ガスが加われば、蒸気の圧力が高くなり、水蒸気噴火となることもあります。つまり、マグマからの脱ガスの程度が、マグマ噴火が起き

るかどうかに大きく影響を与え、さらに脱ガスした火山ガスの量が多いか少ないかで、水蒸気噴火になるか、噴気異常、温泉の温度異常程度で終わるかも変わってくるようになります。地下水が水蒸気になる時に、火山性微動が発生したり、火口直下で圧力増加を示す膨張が検出されることもあります。そのシグナルはごく小さいものです。こうしたことが、水蒸気噴火の予測を難しくしているのです。

### 阿蘇火山の活動の特徴

阿蘇中岳の活動には、図3に示すような三角モデルがあります。静かな時には火口に湯だまりがあり、活発になってくると湯量が減少して火口底が赤熱、やがてマグマ噴火になるというものです。阿蘇中岳の活動状況は、この図を参照するとよく分かります。ただし、ここには注目すべき重要なポイントが2つあります。

第1のポイントは、水温です。火口湖を持つ多くの火山では、水温は普通の川の水と同じで、魚が住んでいる湖もあります。中岳の火口は、水温が50°Cから70°Cという本当の意味での湯だまりです。また、火口湖の湯のpHは1~0であって、強酸性です。中岳は、火山活動が静かな状態であっても、他の火山よりははるかに活発であり、常に高温の火山ガスが火口底から供給されているのです。言い換えれば、阿蘇のマグマは常に脱ガスが起きていることを示しています。

注目すべき第2のポイントは、湯だまりの水量が徐々に減少して噴火にいたるということです。他の火山であれば、地震の数が増えていきなり噴火することもまれではありません。つまり、中岳は、常時火山ガスを放出しているが、これまでの経験では、マグマは急激に上昇してくることはほとんどないということを意味しています。もしマグマがこの経験則を破って急激に上昇してくれば、湯だまりの湯は減少することなくいきなり噴火することになるでしょう。

### 阿蘇火山の噴火予測

これまでの阿蘇火山の研究によれば、湯だまりの量が減少してくると火山性微動の大きさ（振幅）が大きくなって火山灰を噴出したり、微動が急に停止すると爆発的な噴火になるといったことが言われてきました。気象庁の火山活動の監視においても湯だまりの量や火山性微動の振幅などは重要な要素となっています。しか

し、微動の振幅の増減と噴火活動とは必ずしも一致していません。また、「今は微動が起きて、火山灰も降っているが、これからもっと活動は大きくなるのか、あるいはこれで徐々に収まっていくのか」といった疑問には答えることができませんでした。しかし、最近の研究で、これらに答える糸口が見えつつあります。

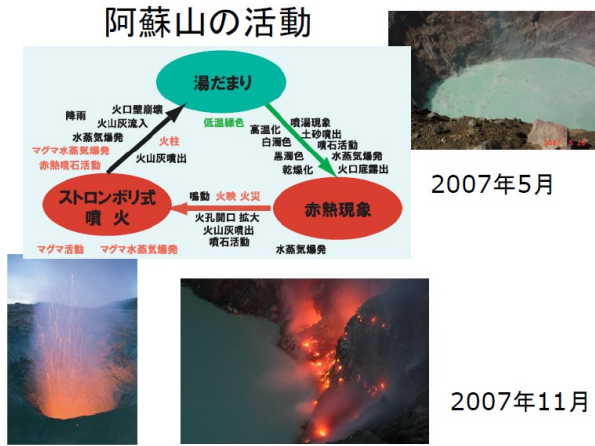


図3 阿蘇中岳火口の活動のモデル

阿蘇中岳のマグマ溜りは、草千里の地下5 km付近にあることが以前からの研究で明らかとなっていました。一方、中岳火口の地下には図4に示すように、クラック状火道が北北西-南南東方向に伸びており、この向きは第1火口から第4火口の並びの向きと一致しています。マグマ溜りから供給されたマグマ（あるいは火山ガス）は、クラック状火道を通過する際に周期10~15秒程度の超低周波微動を引き起こしています。火山活動が活発になると、超低周波微動の振幅が増大したり発生頻度が高くなることがわかってきました。このクラック状火道の上部には熱水溜りがあり、電磁気探査によって極めて比抵抗が小さい領域として検出されています。火山活動が活発になると高温の火山ガスが深部から供給されるために、熱水溜り内の蒸気の比率が水の比率よりも大きくなる変化が捉えられています。この熱水溜りと火口底の間には粘土などの水や蒸気を通しにくい不透水層があり、通常は層の隙間から火山ガス噴き出しています。この領域では短周期の連続微動が発生し、熱消磁と言われる現象も起きています。この不透水層が破壊されると爆発的な水蒸気噴火が発生すると考えられています。

2014年から2016年にかけてのマグマ噴火や一連の噴火の研究によって、新たな知見が得ら

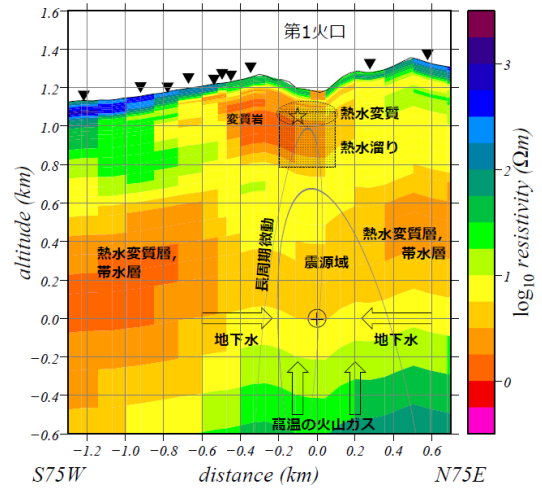


図4 中岳火口地下の比抵抗構造と火山活動。

中岳の地下には低比抵抗の帯水層が広がっているが、第1火口の真下では相対的にやや抵抗が高くなっている。ここは、超低周波微動を発生させながら高温の火山ガスが通過するクラック状火道に対応している。その上方の火口直下には低比抵抗の熱水溜りが存在する。(図は神田氏提供)

れつつあります。GPS観測によって、草千里の地下に存在するマグマ溜りは長い年月にわたって収縮していましたが、2014年のマグマ噴火の前に膨張に転じ、2015年2016年の爆発的な噴火の前にもやや膨張する傾向が捉えられました。また、マグマ溜りの膨張の後、クラック状火道の超低周波微動の活発化、連続微動の振幅増大などが起きました。特に爆発的な噴火の前には、火口直下の圧力増大を示す傾斜やひずみの変化が捉えられています。

これまでの火山活動の監視は、連続微動の振幅や湯だまりの水位、二酸化硫黄の放出量などの観測に頼っていましたが、第1のチェック項目として「マグマ溜りは膨張しているか？」第2のチェック項目として「超低周波微動の活動は高まっているか？」第3のチェック項目として「火口直下の圧力は増大しているか？」を見ることによって、マグマ噴火や爆発的な噴火の発生予測が可能になる見通しができたように思われます。また、マグマ溜りの膨張の程度は、20世紀初頭の噴火活動が活発だった頃に比べるとまだ大きくはなく、現状では当時のような規模の大きな噴火は起きないと考えられています。

## 阿蘇カルデラの表層電気伝導度分布

阿蘇カルデラの内外には多くの湧水が見られ、熊本市の水道の大部分は地下水によってまかなわれているほど地下水の果たしている役割は重要です。また、カルデラ内外には多くの温泉もあります。一方、中岳第1火口の湯だまりには高温で強酸性の湯が満ちています。これらの温泉は、火山活動とどういう関係があると思われるかを紹介しましょう。

図5は、地表付近の大地の電気伝導度（電気の流れやすさ）を調べた結果です。この数字が大きいほど電気が流れやすいことを示しています。図を見ると、阿蘇谷や南郷谷と呼ばれるカルデラ床は、比較的高い電気伝導度（ $100 \mu\text{S/cm}$ 以上、 $\mu\text{S/cm}$ は電気伝導度の単位でマイクロジーメンズ・パー・センチメートル）を示しており、ところによっては $300 \mu\text{S/cm}$ 以上となっています。これは、阿蘇カルデラが比較的長期間カルデラ湖であったため、カルデラ床には水を多く含む湖底堆積物が厚く堆積しているためと考えられます。一方、中央火口丘では電気伝導度は低くなり、杵島岳や米塚などでは $10 \mu\text{S/cm}$ 以下、草千里などでは $50 \mu\text{S/cm}$ 程度となっています。これは、中央火口丘を作っている火山岩が固結した溶岩などで覆われており水をほとんど含んでいないためと考えられます。ただ中岳火口の周辺だけは、 $100 \mu\text{S/cm}$ 以上となっており、強酸性の湯だまりが存在することと整合的です。また、よく見ると中岳火口の北側および南側に電気伝導度の高い領域が伸びており、湯だまりの湯が山麓方向に地下水として流れていることを示唆しています。中岳ほど顕著ではありませんが、西側の地獄・垂玉温泉や湯之谷温泉周辺にも電気伝導度の高い領域が分布しています。

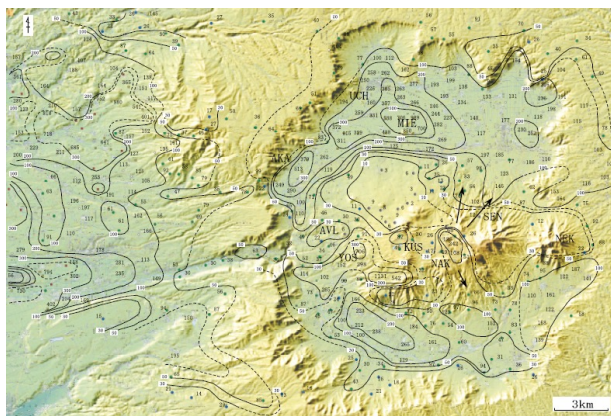


図5 阿蘇カルデラの表層電気伝導度分布  
NAK:中岳 MIE:三重塚 UCH:内牧 単位は $\mu\text{S/cm}$

## 阿蘇カルデラにおける水・火山ガスの流動

上記の表層電気伝導度分布を見ると、中岳火口や中央火口丘西部において上昇してきた熱水が山麓部に流下していることが想像されます。実際の温泉水や湧水を調べるとどうなるのでしょうか？通常は水の化学成分や同位体比など調べるのですが、水の電気伝導度を調べることでわかることがあるのです。

図6は、阿蘇カルデラに湧出している湧水や温泉水の電気伝導度を示しています。カルデラの外輪山起源の湧水は北外輪でも南外輪でもおよそ $10\text{mS/m}$ 以下となっています。 $\text{mS/m}$ というのは、電気伝導度の単位で、 $10 \mu\text{S/cm}$ が $1\text{mS/m}$ に対応します。一方、阿蘇谷の阿蘇神社や役犬原（やくいんばる）、南郷谷の湧水はおよそ $30\text{mS/m}$ 程度となっています。これらの湧水は、中央火口丘方面から流れてきた湧水です。阿蘇カルデラに湧出している温泉水は、ばらつきが大きいのですが、低い電気伝導度でも $100\text{mS/m}$ 以上、高い所では $400\text{mS/m}$ 程度となっています。また温泉水ではありませんが、三重塚と呼ばれる約4万年前に噴火した火山周辺の地下水の電気伝導度も $300\text{mS/m}$ 程度となっています。この水は、硫酸イオンや鉄イオンを多く含んでおり、地元では赤水と呼ばれています。

これらの水の電気伝導度の違いは、図6下図のように解釈することができます。外輪山に降

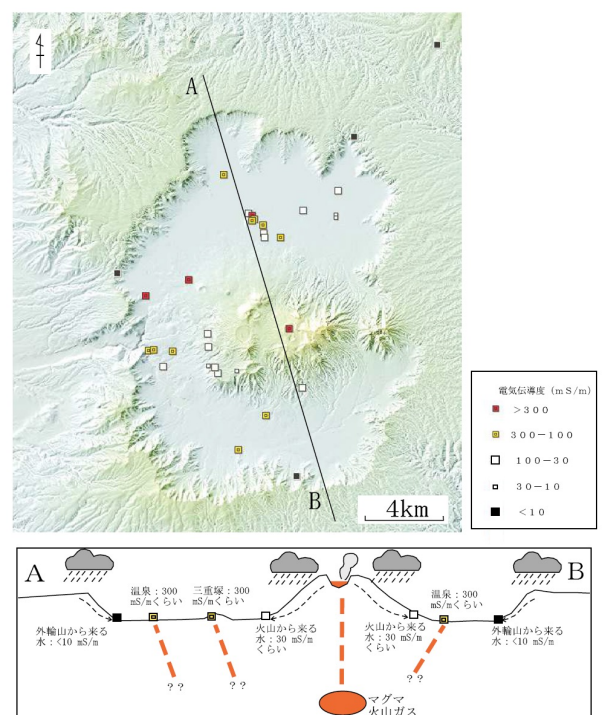


図6 上図は、阿蘇カルデラの湧水・温泉水の電気伝導度。下図は、上図の断面A-Bで見た水の動きの概念。単位は $\text{mS/m}$

った雨水は、地下に浸み込み移動するうちにろ過されてほとんど何も溶けていない水として湧出しているのに対して、中央火口丘に降った雨水は、地下に浸み込み移動するうちにマグマから供給された火山ガス成分を溶かした水になるため、電気伝導度がやや高くなっています。このように、阿蘇カルデラの湧水は、外輪系と中央火口丘系に分けられるようですが、これに加えて温泉水や三重塚の赤水が地下水に加わっているようです。図5の表層電気伝導度分布を見ると、阿蘇谷の東側では、 $150 \mu\text{S/cm}$  程度となっていますが、三重塚や内牧温泉付近で電気伝導度は  $500 \mu\text{S/cm}$  に増大し、西側では高い値が分布しています。これは、阿蘇カルデラに降った雨水は、西側に流動して立野の火口瀬を経て熊本に流れているからです。南郷谷でも同じように西側で電気伝導度が高くなっています。

阿蘇カルデラ内の温泉水や三重塚の地下水の電気伝導度が高くなっているのは、これらの水にイオンが多く溶けているからです。どこからそのイオンがきたかはまだ十分に明らかにされてはいません。しかし、外輪山系の湧水の電気伝導度が  $10\text{mS/m}$  以下と低く、中央火口丘系の湧水の電気伝導度が  $30\text{mS/m}$  とやや高くなっていることを考えると、阿蘇火山のマグマに関係している可能性は高いと思われる。

## まとめ

本講演では、火山噴火の様子が、マグマに含まれる火山ガス成分の挙動によって大きく変化することを紹介しました。マグマの上昇が停止することなく噴火するマグマ噴火は予測が簡単であるのに対して、マグマの上昇が停止した後の現象は、上昇してくる火山ガスの量によって水蒸気噴火から温泉活動まで幅広い可能性を持っており、その中から水蒸気噴火を予測することが難しいことを紹介しました。こうした観点をふまえて、阿蘇中岳の活動がマグマからの脱ガスが顕著な火山として特徴を紹介しました。

阿蘇カルデラの湧水や温泉水は、3つに大別され、あまりイオンが溶けていない外輪山系湧水、火山ガス成分をやや溶かした中央火口丘系の湧水、マグマからの火山ガス成分を多く含んだ温泉水であることを紹介しました。温泉水や三重塚の地下水が、中岳の火山活動と直接関係しているかどうかは、明らかではありませんが、興味深い問題です。

## 参考文献

鍵山恒臣, 浅間山の観測と噴火予知, 第10回火山学会公開講座「浅間山の活動と防災」

<http://www.kazan-g.sakura.ne.jp/J/koukai/03/kagiyama.html>

井田喜明(2003), マグマの上昇と火山噴火の物理, 地球科学の新展開 3「マグマダイナミクスと火山噴火」鍵山編, 第3章, 朝倉書店, 67-78.

須藤靖明・他(2006), 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり ー長期間の変動と圧力源の位置ー, 火山2集, 51, 291-309.

Kanda, W. et al. (2008), A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake crater, Aso volcano, as inferred from magnetotelluric surveys, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 32-45.

Yamamoto, M. et al. (1999), Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano, Japan, Geophys. Res. Lett. 26, 3677-3680.



日本火山学会 2017 年秋季大会（熊本市）  
日本火山学会公開講座 2016 年熊本地震と阿蘇山噴火

編集  
特定非営利活動法人日本火山学会 学校教育委員会  
大倉敬宏

2017 年 9 月 24 日発行

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-2-9  
モンテベルデ第 2 東大前 406