

九州・台湾における火山活動・地熱活動の研究

鍵山 恒臣

(地球熱学研究施設火山研究センター)

私は、2004年9月1日に理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センターに教授として採用され、以来14年弱、京都大学において教育と研究の人生を有意義に送ることができました。特に学部からの教育にも関与できたことは、教育者としていろいろと考える機会を得ました。ここでは、京都大学に感謝しつつ、私の所感をいくつかご紹介したいと思います。

火山熱観測から熱・電磁気観測へ

私は、1975年3月に東京大学理学部地球物理学科を卒業後、4月から同大学院修士課程に入学し、地震研究所において、火山の熱的活動を研究の対象としました。当時新しい観測手法として注目されていた赤外線による遠隔観測手法などを使用して、火山の熱的活動の時間的な推移や火山活動を熱エネルギーという尺度で議論する研究を進めました。1979年6月に助手に採用されて以降は、火山噴火予知研究の一環として、全国の火山の集中共同観測において熱的観測を分担しました。個々の火山について、熱異常域の分布や活動の程度を明らかにして報告書をまとめる作業を行いつつ、日本列島の火山全体について、非噴火時に火山が放出する熱エネルギーは噴火時に放出する熱エネルギーに匹敵する、あるいは数分の1に達するといった結論も得ました。

しかし1983年の三宅島の噴火で、大きな課題に直面しました。噴火で被災した困難な条件下で噴火地点における熱的狀態を測定することはできましたが、その結果が三宅島火山の理解にどう結びつくのかという基本的な問題を実感するようになりました。この課題に直面して、私は電磁気観測グループと協力するようになりました。1983年噴火の前ではなく、後に三宅島の地熱活動が活発化し、それに伴って山頂火口直下の比抵抗が低下していることを明らかにしました。地下の状態の変化に対応して地表の熱活動が変化していることを初めて明らかにできたのです。

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研究に取り組むことになりました。当時は、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りました(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ます)。そしてこの層は、火山噴火の前兆や噴火様式の規定に

雲仙の地下構造と火山活動の変化が対応

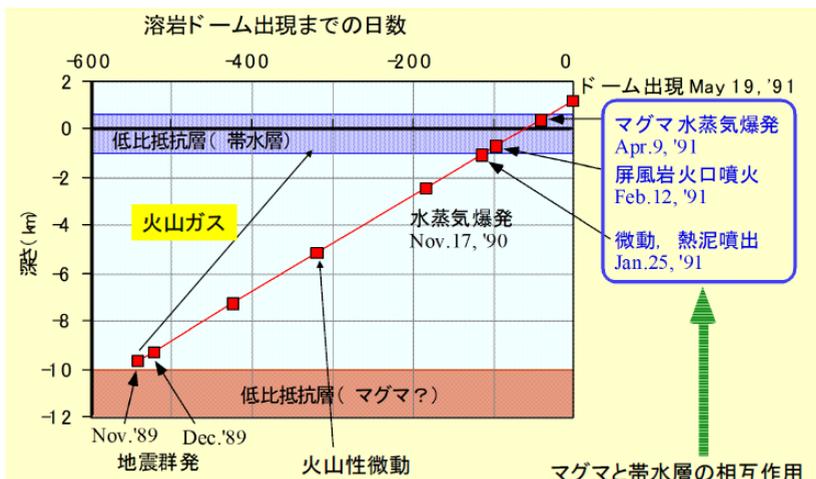


図1 雲仙・普賢岳の噴火における主要な活動の転換時期と地下構造との関係(Kagiyama et al., 1999)。

深く関わっていることを明らかにしました。たとえば雲仙・普賢岳の噴火は、1989年末に西の橋湾において地震が群発、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の頻発、1991年4月9日以降にマグマ水蒸気爆発の頻発、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りました。一方、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ました。地下の比抵抗構造と火山活動の推移という2つの情報を組み合わせると面白いことに気が付きました。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、図1に示すように、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下部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ります。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ます。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）が発生したことは、そのままでは簡単に説明が付きません。しかし、マグマから分離した火山ガスが先に上昇し、1990年7月に帯水層に到達したと考えれば説明可能となります。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たことも、この考えを支持しています。類似の研究成果は、伊豆大島や諏訪之瀬島などでも得られ、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ました。

京都大学における火山・熱学関係の教育現場での思索

上記のように、火山活動の時間的推移は、火山体浅部の構造に規定されていることが明らかとなりました。しかし、火山噴火予知の観点から見ると、さらに解決すべき課題があることがわかりました。火山噴火の前に、地震の群発や山体膨張などの異常現象が起きることはよくあるのですが、一方で異常現象が起きて噴火しない場合や、噴気異常、少量の火山灰を噴出するだけといった場合が多いことをどう考えればよいか疑問に思うようになりました。2004年に京都大学に異動して学部からの教育に携わる中で、多くの学生や一般人が持っている火山に関する先入観（火山が爆発して真っ赤な溶岩が流れてくるという、桜島とハワイの噴火を足したようなイメージ）をどのようにして打ち破り、火山活動の本質を考える面白さを伝えるにはどうすればよいかを考えていくうちに、火山活動の多様性を紹介していこうと思うようになりました。

火山活動と地熱活動—火山活動の多様性

火山と温泉（地熱活動）との間には、密接な関係が古くから指摘されており、湧出温度の高い温泉のほとんどは、火山の周辺に分布しています。しかし、火山の近くに必ず温泉があるわけではなく、富士山の周辺などには温泉はあまりありません。少し古い温泉や地熱活動に関する本を見ると、温泉は老衰期の火山に多く、若い火山には少ないと書かれています。しかし実際にはそうではないと思います。たとえば、頻繁に噴火する桜島では、年間1000万 m^3 のマグマが地下深部から供給されていますが、歴史時代にマグマ噴火を行っていない別府温泉でも、熱エネルギー放出率は400MW程度と推定されており、このエネルギーは、年間600万 m^3 のマグマが1000°Cから0°Cまで冷却した場合の熱エネルギーに相当します。つまり、2つの火山は、どちらも活発な火山であって、エネルギーの放出形態が、噴火主体であるか地熱活動主体であるかの違いであると考えべきなのです。

そうした立場でいろいろな火山噴火を眺めてみると、図2に示すようなイメージを持つことができました。マグマ噴火を頻繁に繰り返す桜島は左端に位置し、歴史時代にマグマ噴火を行うことなく、活発な温泉活動を継続している別府は右端、その中間に様々な活動を配置することができます。伊豆半島の火山も、別府と同様に群発地震の発生や地殻変動が検知されていますが、伊東沖の海底噴火以外には噴

火山活動の多様性



図2 火山活動の多様性を示す概念図。鍵山(2010)に加筆。

火は起きていません。1982年の浅間火山の水蒸気噴火は、その後の調査で、地震の群発を伴いながらマグマが上昇するが、浅部まで上昇することなく水蒸気噴火を行ったことがわかっています。これらの火山活動は、マグマが容易に地表まで上昇してくる活動とマグマが地表まで上昇しない活動が両極端にあり、その中間に様々な活動があると考え、火山活動を系統的・普遍的に理解することが可能になります。火口が赤熱状態になっても微量の火山灰を噴出するだけという状態が継続している時の阿蘇火山は、この図の中央やや右側に位置付けることができます。地熱活動と火山活動（というよりも噴火活動と呼ぶべきでしょう）は、この図の中では両極端に位置づけられることになります。

マグマからの揮発性成分の散逸

では、この図に配置されている火山では、具体的に何が起きていると考えられるでしょうか？今さら言うことではありませんが、マグマは、冷却して岩石になる固形成分と冷却過程でほぼ散逸してしまう揮発性成分（火山ガス）からできています。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ました。ですから、とすれば固形成分主体で火山活動を考えてしまいがちです。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ます。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ます。たとえば図1に示した雲仙・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、本格的噴火につながったと考えられています。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られます。

火山ガスの散逸（脱ガス）を観測するー火山体浅部と温泉水・湧水の電気伝導度

それでは、火山ガスはどの程度マグマから抜けていると思われるか？その証拠はあるのかを考えてみます。図3は、阿蘇カルデラにおいて表層の電気伝導度を測定した結果です。これを見ると、電気伝導度の低い中央火口丘群の中であって、中岳だけは、電気伝導度が高くなっています。これは、中岳第1火口に強酸性の湯だまりがあることから推測されるように、火山ガスが溶け込んだ熱水が火口の周辺に浸み込んでいるためと考えられます。また、この高電気伝導度は南北のカルデラ床に向かって伸びていることもわかります。このことは、熱水が地下水層を通して周辺に広がっていることを示しています。

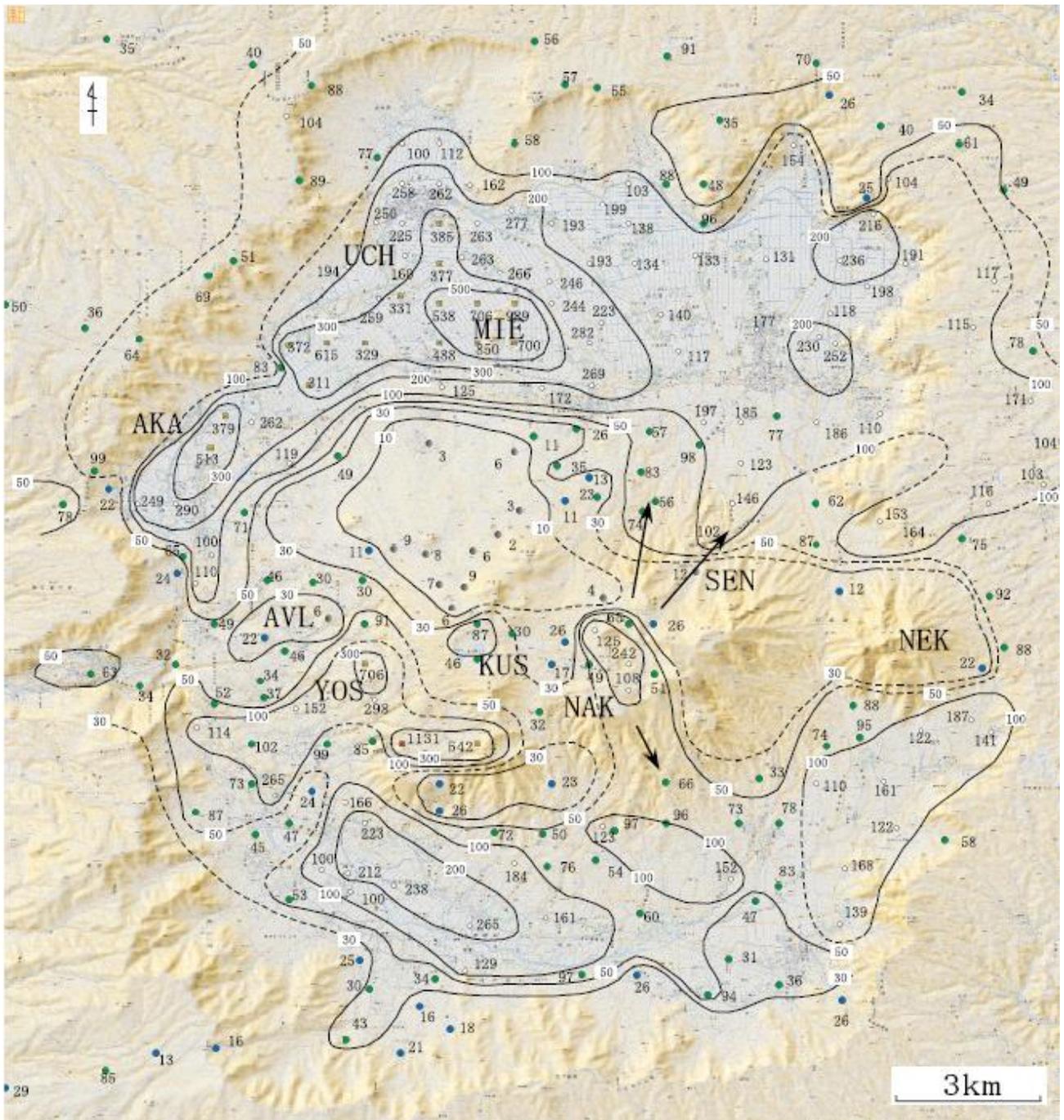


図3 阿蘇カルデラにおける表層電気伝導度分布(単位： $\mu\text{S/cm}$)。NAK：中岳、KUS：草千里、MIE：三重塚。鍵山(2017)に加筆。

阿蘇カルデラには多くの温泉水や湧水が湧き出しています。これらの水の電気伝導度を調べると図4に示すような傾向が見られます。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）であり、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 程度となります。この違いは、中央火口丘から流下する地下水には、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ます。このほかに、カルデラ内で湧出する温泉水の電気伝導度は、測定される数値がばらつきますが、 $200\sim 400\text{mS/m}$ 程度となっています。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合わせて考えると、おおよそ空隙率 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ほぼ説明が可能であることがわかりました。さらに MT 観測で測定された電気伝導度は、カルデラの東側よりも西側の方が高いこと、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考慮して、地下水に溶け込み流出している揮発性成分の量を、二酸化硫黄換算で、年

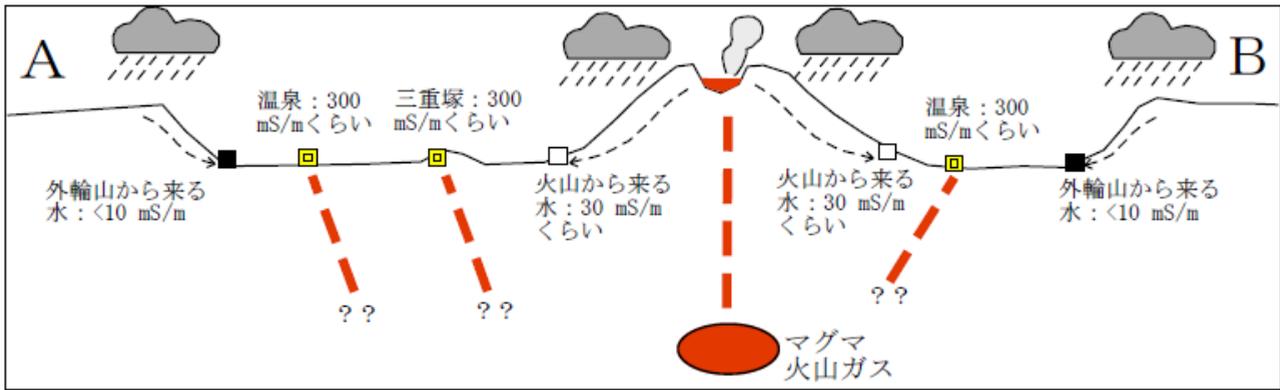


図4 阿蘇カルデラにおける湧水・温泉水の電気伝導度の特徴

間4万8千トンと推定することができました。MT観測から推定される大地の見かけの電気伝導度から母岩と空隙中に含まれる水の電気伝導度をより厳密に推定する手法もKomori et al.(2013)によって開発されており、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原理的には可能となっています。たとえば、Komori et al.(2014a)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ます。

水蒸気噴火・マグマ水蒸気噴火に関する疑問

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）が断続的に発生しました。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の噴煙が発生しました。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の噴煙が放出されました。同じように、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の噴煙を伴っています。これらの噴火は、水蒸気噴火（あるいはマグマ水蒸気噴火）とされていますが、高度数1000mを越える噴煙が果たして生成可能でしょうか？水蒸気噴火とは、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ものと説明されています。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ます。

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、密度になるかを高校の化学程度の知識で考えてみましょう。たとえば、水を5重量%含み、温度1000℃の溶融した密度2500kg/m³のマグマ1m³が1気圧下で0℃の空気Mkgと混合した場合の温度と密度を計算すると、図5のようにな

マグマと空気の混合 温度と密度の変化(水5%の場合)

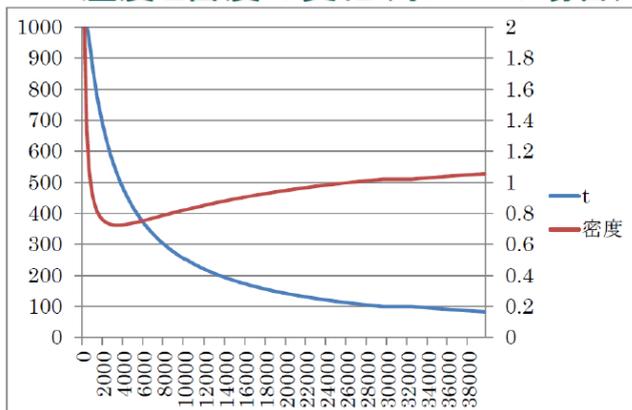
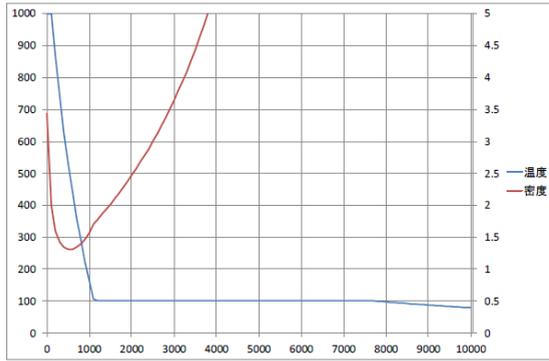


図5 水5%を含む1000℃の溶融したマグマと空気が混合した場合の気塊の温度と密度。横軸は空気の重量(kg)、左縦軸は温度(℃)、右縦軸は密度(kg/m³)。

- 3400kgの空気と混合する時もっとも軽くなる

マグマに地下水が加わった場合の温度と密度



- 少量の水で密度は低下するが、空気よりも重い
- マグマ水蒸気噴火では噴煙は高く上昇しない

図6 図5と同じマグマが地下水と混合した場合の気塊の温度と密度。横軸は、地下水の重量(kg)、左縦軸は温度(°C)、右縦軸は密度(kg/m³)。

ります。空気と混合していないマグマの密度は、 3.4kg/m^3 ですが、混合する空気の量が増えるにつれて急激に温度も密度も低下します。3400kgの空気と混合した場合に密度は 0.72kg/m^3 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りますが、空気の密度 1.2kg/m^3 より小さい値を維持し続けます。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ます。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、図6に示すように、温度、密度ともに急速に減少しますが、加える水の重量が700kgを越えると密度は再び増加します。また密度は常に空気の密度よりも大きくなっています。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事実と調和的です。最も低密度となるマグマと地下水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計算すると、空気が加わるにつれて温度はさらに低下しますが、密度は空気よりもやや低い気塊を作ることができます。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ります。

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、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ります。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ります。

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ます。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と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、発泡したマグマが噴出して高度の高い噴煙を形成したというものです。2015年9月14日の噴火はマグマ水蒸気噴火であったと考える研究者もいますが、マグマに直接由来する噴出物は見出されていません。口永良部島火山の噴火についてもマグマの関与に懐疑的な研究者がいます。2つ目の考え方として、以下のような可能性があります。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ます。 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、熱的には十分に軽い気塊を作ることには可能です。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ます。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ません。一般的には「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いがちですが、「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ります。



鄧麗君(テレサテン) 紀念公園



図7 調査の合間に台湾・大屯火山群北麓にある鄧麗君記念公園で献花。老師の間では大いに共感を得たが、年輕学生はきょんとしていました。

台湾における火山調査と国際交流

台湾で開催された WPGM に参加して、台湾に活動的な火山があることを知ってまず驚きました。噴気もあり温泉もあり、地形を見ると新しそうな火口があるのに噴火の履歴はほとんど不明という状態でした。台湾・中央研究院の陳中華地球科学研究所副所長が地球熱学研究施設の外国人客員教授として火山研究センターに着任されたのを機に、台湾・大屯火山群と九州の火山との比較研究をやるということになり、若手の研究者や大学院生とともに現地観測を数年にわたり行うことになりました。表層電気伝導度を調査すると、別府地域に匹敵する広さの高電気伝導度領域が見られました。温泉による放熱率は日本と違って資料がないために推定できませんでしたが、同じ規模の地熱活動の存在（揮発性成分の散逸）が予想されました。その後、深部までの電磁気構造探査を行い、予想した通り大規模な高電気伝導度領域が広がっていることがわかりました (Komori et al., 2014b)。中央研究院や国立台湾大学、中央気象局、中央地質調査所などの台湾側の研究者との議論を通して、大屯火山群では、マグマからの揮発性成分の散逸が大きいと予想され、爆発的な噴火が少なくなるという結果を得ました。このことは、軽石や火山灰を噴出する活動が少なくなり、結果として噴火履歴調査を行いにくくなることを意味します。また、溶岩噴出を主とした活動になることが予想されますが、揮発性成分が熱エネルギーとともに放出されるために、マグマの粘性が高くなり、ドームを生成する活動が多くなることが予想されます。こうした特徴は、九州の火山にも似ており、比較研究の実をあげることができたと考えています。また、台湾の生活は、安全で快適なものでした。駅などの街角の表示も戦前の漢字が書かれていると思えば、問題なくとっさの判断もできました。若手研究者に国際交流の経験をしてもらえたことも財産になったように思います。私個人としては、同じ世代であった鄧麗君 (テレサテン) さんのお墓に献花できたことが思い出として残っています(図7)。

学部1回生からの現地滞在型教育

全学の少人数セミナー (ポケゼミ) では、理系文系を問わず火山や地熱活動について何かを得てもらうきっかけになればと開講しました。開講に際して、受講の動機や地球科学に関係するキーワードにどれくらい親しみがあるかを尋ねるアンケートを実施してきました。火山研究センターに宿泊できて、阿蘇山を見ることができる、中学高校で地学に興味があったがもう少し触れてみたいといった動機が多かったと思います。定員10名でしたが、倍率が6倍程度の人気科目だったようです。アンケートの結果は、ある程度予想していましたが、火山の噴火を見た経験のある学生よりも交通事故に遭った学生の方が多いことが明らかとなりました。自分たちの研究分野は、自らは一番面白い一番重要だと思っていますが、社会一般から見た場合には、きわめて特殊であることを改めて自覚しました。また図8は、同様の調査

用語認知度の推移(地球熱学)

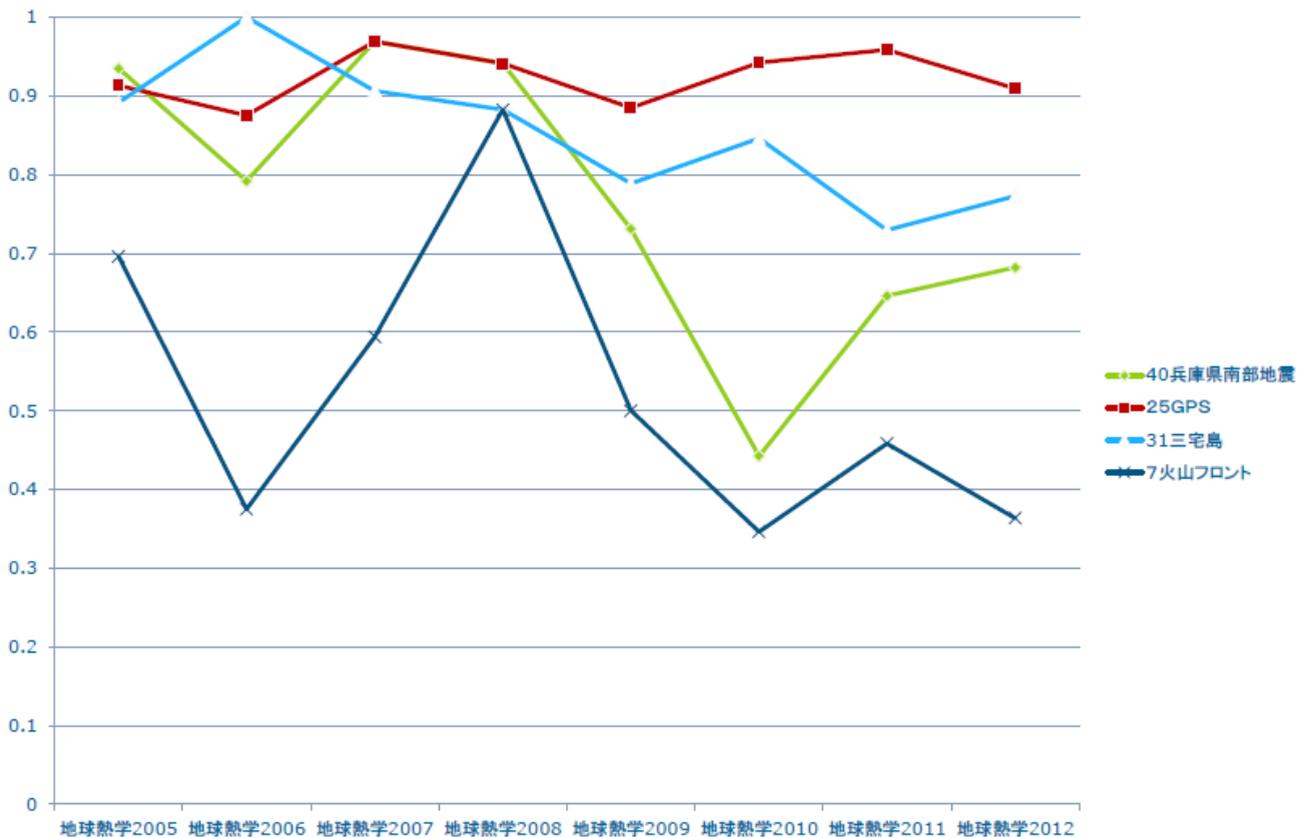


図8 地球熱学の講義前に実施したキーワードアンケート（意味を知っている、言葉を聞いたことがある、聞いたことがない、を選択）の集計結果の一部。

を地球熱学受講者に対して行った結果ですが、兵庫県南部地震の知名度が年とともに低下していく傾向があったが、東日本大震災以後再び高くなっている、GPS の認知度は極めて高いなどが明らかとなりました。授業では、知識としての火山学・地球熱学ではなく、そもそも火山活動・地熱活動とは何か？を自分自身にも問いかけつつ授業を行っていきました。ポケゼミの学生のうち、理学部の学生の半数ほどは、その後地球惑星科学に来て時々顔を合わせていました。また、とある火山の防災会議の席で、このゼミの出身者と偶然顔を合わせる場面にも恵まれて、当ゼミの趣旨が生きていたと感じた幸いです。

おわりに

2018年2月に開催された知球会において、講演させていただき榮譽をいただき感謝します。2016年4月に発生した熊本地震によって火山研究センターは被災しましたが、関係者各位のご尽力・ご支援により、教育および研究の機能を阿蘇市坂梨の仮研究棟に移して存続させているところです。近年中には火山研究センターを復旧する見通しとなっています。道半ばにして退職することは、心残りではありますが、関係各位の引き続きのご支援を賜りたいと思います。講演では、火山活動の噴火にかかる部分と地熱活動にかかる部分について、九州や台湾の火山を素材として私の所見を述べさせていただきました。地球物理学教室の今後の発展を祈念します。

文献

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, 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, 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.
- Komori, S., Kagiya, 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., Kagiya, 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
- Komori, S., Utsugi, M., Kagiya, T., Inoue, H., Chen, C-H., Chiang, H-T., Chao, B-F., Yoshimura, R. and Kanda, W., Hydrothermal system in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan, inferred from crustal resistivity structure by audio-magnetotellurics, *Progress in Earth and Planetary Science 2014*, **1:20**, doi:10.1186/s40645-014-0020-7