

マグマからの脱ガスと電磁気観測－休止期の長い噴火を考える－

京都大学理学研究科 鍵山 恒臣

Electromagnetic observation focusing degassing process of magma to understand eruptions after long term resting phase

Tsuneomi Kagiya, Graduate School of Science, Kyoto University

Research on prediction of volcanic eruptions has succeeded in detecting many precursory phenomena. However, this research has left a lot of problems. For instance, eruption has not occurred in many volcanoes, though many precursory phenomena were detected. Moreover, we cannot predict when eruptions will start after long term resting phase. These problems originate in the difficulty of forecast of magma ascent. This paper proposes two aspects on these problems. It is firstly important to know the density difference with magma and surrounding mediums. Magma will stop rising after it reaches a low density medium, while it continues to rise in a high density medium. Therefore, future experiments for the structure of volcano are requested to detect significant amount of magma, which has been stored during resting phase. Secondary, the observation that can discuss the degassing from the magma should be required. According to the TDEM survey in Unzen Volcano, a high conductance zone trending W-E direction in the shallow part is found along the high seismic zone from the magma reservoir toward the summit. This evidence indicates the emission of volcanic gases into the shallow water saturated layer through the fault system in the western part of Unzen during the magma migration of the latest eruption. The research on prediction of volcanic eruptions is requested to answer the above mentioned problems, and new technique for geophysical survey is also requested.

1. はじめに

火山噴火を事前に予測することは、近年の火山噴火予知研究によって相当程度可能になってきた（たとえば、石原, 1997; 浜口, 2003）。有珠山では、2000年噴火の前に緊急火山情報が出され、行政は事前に住民を避難させるまでになっている。気象庁による火山の監視体制の整備も進みつつあり、一部の財務関係者からは、もはや火山噴火予知研究はそれほど必要ではなく、火山活動の監視を充実すればよいという考えも示されているという。しかし一方で、噴火予知や防災対応が、国民の期待に十分応えきれないケースも数多く見られる。鍵山(2006)は、その事例を以下の4つにまとめている。第1は、火山研究者が何らかの異常や危険性を察知しながら行政がうまく対応していないケースである。近年、火山活動の監視は大きく整備され、活動に関する情報を受けて防災対応がとられる場合も多くなっているが、まだ十分ではない。第2のケースは、数百年の噴火履歴を基に防災対応を準備したが数千年ぶりの現象が起きてしまった場合である。たとえば、1990年から始まった雲仙火山の噴火は、直近の江戸時代の噴火を想定して研究者も行政も対応していたが、火砕流を伴う4000年ぶりの規模の大きい噴火となり、噴火の規模や様式の予測において、期待に十分応えられなかった(Nakada et al., 1999)。三宅島では、15世紀以降繰り返し発生してきた山腹割れ目噴火とそれに付随する山頂噴火を想定した防災対応を行

っていたが、3000年ぶりにカルデラを生成する活動となり(中田・他, 2001), 対応が十分ではなかった。こうした事態は、もっと長期間にわたる火山活動の歴史を調査することが必要と考えられる。しかし、より根源的に考えるならば、想定していた噴火ではなく数千年に一度の噴火になぜなるのか、言い換えればシステムとしての火山の理解が足りないために生じた誤りと言える。第3のケースは、噴火の噂はあるが監視機関や研究者が明確に見通しを語ってくれない場合である。富士山はその典型であり、噴火の風説に対して、「現在は噴火の発生を示唆する異常現象は観測されていない」とコメントできるが、数ヶ月後、数年後まで噴火しないとコメントできない。これは、噴火直前の前兆が捉えられた後に進行する過程についての理解は進んでいるが、そこに至るまでの長い活動の休止期にどのような噴火の準備が進行しているかを我々が理解していないことによる。数千年から数万年に一度発生するカルデラを生成する噴火も同じ問題であり、時間スケールとしては延長上に位置づけられる(鍵山・森田, 2006)。第4のケースは、異常は捉えられたが噴火しない場合である。たとえば、岩手山1996-2000年(浜口, 1999)、箱根山2001年の異常活動など多くの事例があり、目立たないが噴火予知的中率を最も下げている原因である。また、噴火したがあまり規模が大きい場合もある。1980年代以降の浅間山は、1970年代以前の噴火よりも小規模の噴火であったし、雲仙火山の噴火は、ピナツボ火山のマグマとほとんど同じであったが、爆発的ではなかった。本稿では、第2, 第3, 第4の問題が基本的にマグマの上昇停止の問題に帰結することを述べ、次に電磁気観測の観点からどのような研究が期待されるかを考える。なお、鍵山(2006)は、第4の問題について構造探査全般の観点から総括しているので、重複する部分については概略を示すにとどめる。

2. 噴火予知の課題とマグマの上昇停止

2. 1 噴火未遂とマグマの上昇停止

噴火予知の精度をもっとも下げている第4の問題については、鍵山(2006)が検討している。浅間山では1973年以前の噴火が火山性地震の群発から間をおかずに発生していたのに対して、1982年および1983年の噴火は、地震の多発直後には噴火は発生せず、数週間の時間間隙をおいた後に突然発生した。鍵山・他(1985)は、1982年および1983年の噴火の特異性はマグマの上昇が途中で停止し、マグマから発散される火山ガスによって高温の類質岩片を噴出したことによると考えた。鍵山(2006)は、浅間山で得られた知見を拡張し、噴火未遂を含む噴火の前兆現象とマグマの上昇停止との関係を第1表に示すように整理した。それによると、桜島や1973年以前の浅間山の噴火は、地震の群発活動を伴いながらマグマが上昇し、そのまま噴火発生に続いている場合と考えられる。これに対して、岩手山の噴火未遂事件は、地震を伴いながらマグマが上昇するが、何らかの原因で停止してしまい、噴火は発生しなかった。地下に貫入したマグマの熱エネルギーは地熱活動が活発化して発散された。両者は、マグマの上昇という観点では互いに対極にあたる。一方、浅間山の1982年や1983年の噴火は、マグマが途中で停止した後にはマグマから発散される火山ガスによって高温の類質岩片を噴出しており、両者の中間的な性質を持っている。このような位置づけを行うと、上記3種類のさらに中間的性格を持つ関係も存在することがわかる。十勝岳の1988-1989年噴火は、火道において固結していた岩石が再熔融して噴出したことが明らかにされている(中川・他, 1989; Ikeda et al., 1990)。この噴火は、マグマが上昇を止めた後に火山ガスが分離上昇し、その熱によって岩石が再熔融しているので、桜島などの噴火と浅間山の1982年噴火との中間的な性質を持つものと解釈できる。また、2003年の浅間山の噴火は、時々地震が多発し、

第1表 マグマの上昇状況の違いによる噴火活動の比較

Table 1. Comparison of eruptions in the aspect of the rising manner of magma

火山活動	活動状況	マグマ上昇
桜島 浅間 (1973 年以前)	噴火は地震群発に引き続いて起きる	マグマ上昇は容易
十勝 1988-1989	噴出物中に火道を埋めていた物質が溶融したものが含まれる	マグマは上昇途中で停止 高温の火山ガスによって火道を埋めていた物質が溶融して放出される
浅間 1982, 1983	噴火は地震群発の数ヵ月後に発生 噴出物中にマグマ由来物は含まれない	マグマは上昇途中で停止 高温の火山ガスが火道を埋めていた物質を噴出
浅間 2003 阿蘇 2004	火口の温度が上昇した後に微量の火山灰を噴出 地震は多発しているが、特に噴火前に増加はしていない	マグマは上昇途中で停止 高温の火山ガスが上昇し微量の火山灰を噴出
岩手 1996-2000	マグマの貫入に伴う地盤変動や地震の群発が発生するが噴火は発生しない 地熱活動が活発化	マグマは上昇途中で停止 マグマから分離した火山ガスが上昇し地熱活動となる

火口底の温度が上昇している状態で、山頂火口付近にわずかに降灰が確認される程度の微噴火であった。この噴火は、浅間山の1982年噴火と岩手山の噴火未遂事件との中間的な性質を持つと解釈できる。このように、異常現象に引き続いて噴火を行う火山や異常現象が起きても噴火しない火山、あまり大きな噴火をしない火山といった火山噴火の多様性は、マグマの上昇の容易さ、マグマから発散される火山ガスの多少によって系統的に議論できるように思われる。

2. 2 休止期の長い噴火とマグマの上昇停止

第2, 第3の問題は、数百年あるいは数千年に一度の噴火がどのように準備されているかという問題に帰結する。この問題に対しては、通常我々が行っている観測を噴火が起きるまでの数百年間継続するだけでは何ら解決にならず、新しい視点が必要である。藤井・他(2002)は、富士山の宝永噴火が大規模で爆発的な噴火となった理由について、以下に示すモデルを提唱している。それによると、富士山の地下に蓄積されていたデイサイトマグマに新たに地下深部から供給された玄武岩質マグマがぶつかり、デイサイトマグマの加熱・発泡と噴火が起こり、それに引き続いてデイサイトマグマの噴火による圧力急減による玄武岩質マグマの急激な発泡・噴火が連動して起きたとされる。地下に蓄積されていたデイサイトマグマは、過去に地下深部から供給された玄武岩質マグマが周辺の物質を溶融することで生成されたと考えられている。このモデルは、休止期の長い噴火について、以下のような仮説を想起させてくれる。マグマの上昇停止が比較的浅い部分で起きた場合、地下水との相互作用などによって様々な異常現

象が発生するので、我々はこの状況を前節で考えた「噴火未遂」と認識する。しかし、マグマの上昇停止が比較的深部で起きた場合には、山体の膨張が検知される以外にはきわだった異常は検知されないの
で、我々はこの現象を「マグマ蓄積」と呼ぶ。地下に滞留したマグマは、分化や地殻の同化が進行する。
マグマの上昇停止がしばしば発生する火山では、マグマが蓄積され続けることになり、我々はこの期間
を火山噴火の休止期と認識することになるであろう。この滞留したマグマに深部から新たに供給された
マグマがぶつかると、次節に述べるように滞留しているマグマが密度障壁となって新たに供給されたマ
グマの上昇を阻害する場合や、ある種の条件が整えば、滞留しているマグマの発泡が連鎖的に進み、宝
永噴火のような大規模噴火となるかもしれない。この仮説に従えば、以下のようなこれまでの研究で認
知されてきた事実も説明が可能になる。たとえば、滞留しているマグマが多くなればなるほど、新たに
供給されてきたマグマが滞留しているマグマにぶつかる確率が高くなる。そのため、ある一定の時間間
隔において大規模噴火が発生しやすくなる。また、一部の例外を除いて、頻繁に噴火する火山も休止期
の長い火山も平均的なマグマ噴出率は、1000年あたりおよそ1立方kmとなること、休止期の長い噴
火は大噴火となる傾向がある事も説明が可能となる。このように、休止期の長い噴火には、マグマの上
昇停止が大きく影響していることが考えられる。

3. マグマの上昇を規定する要因と電磁気探査

上記の問題は、火山活動を普遍的に議論することを求めており、その研究はきわめて高いレベルを要
求している。鍵山(2006)は、物理探査に関連して3つの視点を示しているが、本稿では電磁気観測から
の視点を示すことにする。

3. 1 マグマの上昇停止と密度構造

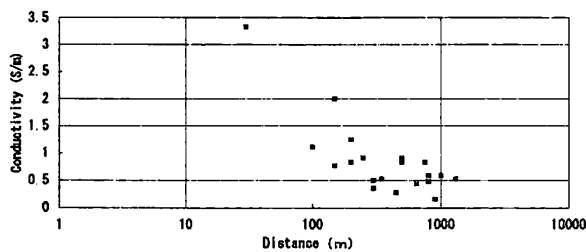
マグマの上昇や噴火を抑制する要因は、まだまだ十分に解明されていないが、現段階では以下の2つ
の視点が考えられる。1つは、マグマが上昇してくる経路付近の密度構造である。マグマの密度が、上
昇経路周辺の媒質の密度よりも小さい場合、マグマは上昇を続けるであろうが、媒質に密度のギャップ
があって、マグマの密度よりも小さくなる不連続が存在すれば、その深さでマグマは上昇を停止すると
考えられる。この密度のギャップは、たとえば、高密度の基盤の上に低密度の火山噴出物が堆積してい
る場合や過去に噴出することなく地下にとどまったマグマの場合などがありうる。中川・伊藤(2000)は、
岩手火山西部が東部と比較してマグマ噴火を行うことがまれである理由を、岩手火山西部の浅部に滞留
している古いマグマが密度障壁となって新たに深部から供給されてきたマグマの上昇を抑制している
ためと考えている。したがって、物理探査によって、密度構造、とりわけ密度障壁となりうる既存のマ
グマを検知できるかどうかが重要である。

3. 2 マグマからの脱ガス

マグマの上昇を抑制するもうひとつの視点は、マグマに含まれている揮発性成分の散逸(脱ガス)で
ある。マグマがより低温低圧側である上方に移動すると、発泡が進んでマグマの密度は小さくなるので、
マグマはさらに上昇しやすくなる。一方、同じマグマであっても、脱ガスが起きると、マグマの発泡は
あまり進まないの
でマグマの密度はあまり低下せず、マグマの上昇も促進されない。脱ガスは時間とと
もに進行するので、マグマの上昇はさらに抑制されることになる。こうした過程を電磁気探査によって

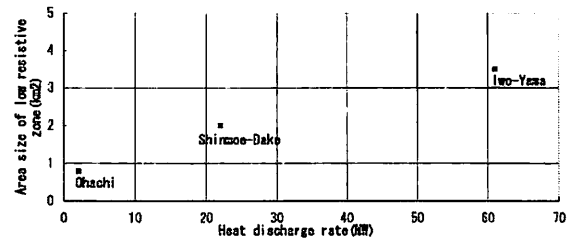
我々は知りうるであろうか？この課題は難しいかもしれないが、以下にその可能性を紹介する。

一般に、地下の岩石には空隙があり、地表直下の空隙は空気であらゆるが、数 10m ないし数 100m の深さになると地下水によって満たされるようになる。これに対応して表層の比抵抗は高比抵抗であるが、ある深さからは低比抵抗になる。この空隙は、2km ないし 3km 程度の深さになると圧密によって急激に減少するため、比抵抗も再び高くなる。火山の地下では、地下深部からマグマ、あるいはマグマから分離した高温の火山ガスが供給されている。この火山ガスは、一部は火口から放出されるが、一部は、地下水に溶け込み周囲に広がっていると考えられる。鍵山(1998)は、霧島火山群において鍵山(1994)および鍵山・他(1994)が VLF, ELF-MT によって推定した比抵抗構造について、帯水層の電気伝導度(比抵抗の逆数)と火口からの距離との関係を検討した。その結果、第 1 図に示すように電気伝導度は距離とともに小さくなっていることが明らかとなった。このことは、帯水層中に溶けている火山ガスの量が火口からの距離によってしだいに減少している、あるいは、熱変質の程度がしだいにやわらいでいることを示している。第 2 図は、霧島火山群を構成する 3 つの火山について、それぞれの火山の火口からの放熱量と帯水層の比抵抗が $10 \Omega \cdot m$ 以下となる面積との関係を示している。両者の間には正の相関関係が見られる。このことは、地下深部から供給される熱エネルギー(火山ガスの量)が大きい火山は、地表から放出する熱エネルギーが大きいと同時に、火口周辺の地下水により多くの火山ガスが溶け込んでいることを示すと思われる。この結果は、火口周辺の浅部低比抵抗域の広がりやを測定することによって、火山ガスの散逸の状況を知り得ることを示している。



第 1 図 霧島火山群における火口からの距離と帯水層の電気伝導度との関係。

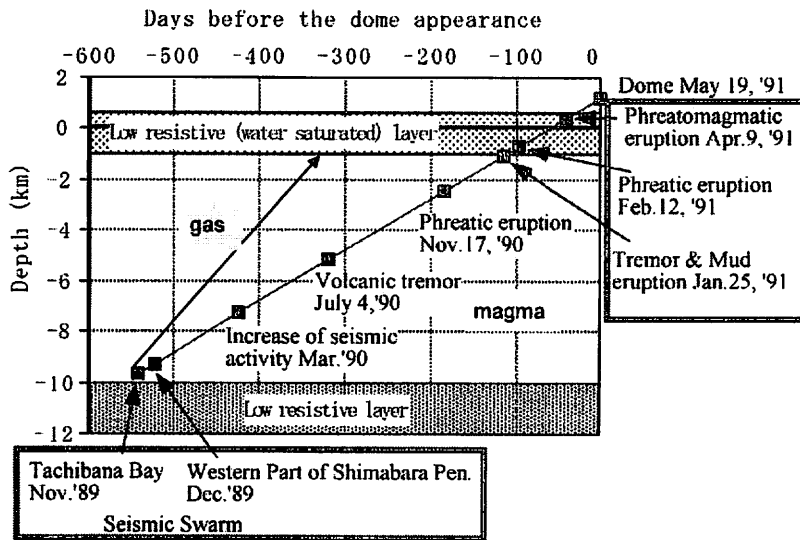
Fig.1. Relation between the conductivity of the water saturated layer and the distance from the crater in Kirishima Volcanic Group.



第 2 図 霧島火山群における放熱量と低比抵抗域 ($10 \Omega \cdot m$)の面積との関係。

Fig.2. Relation between the area size of the low resistive zone ($10 \Omega \cdot m$) and the heat discharge rate in Kirishima Volcanic Group.

また、雲仙火山では以下に示すように、マグマからの脱ガスを示唆する証拠が得られている。雲仙火山の噴火は、同じデイサイトマグマの噴出でありながら、フィリピンのピナツボ火山の噴火のように爆発的噴火とならず、非爆発的な活動となった。その理由は、マグマに含まれていた揮発性成分の脱ガスによると考えられており、雲仙地域において科学掘削を含む多くの研究が実施された(宇都・中田, 2000)。Kagiya et al.(1999)は、雲仙火山の比抵抗構造と噴火様式の時間変化との関係を第 3 図に示すようにまとめている。図の縦軸は、海水準を基準とした深さ、横軸は、溶岩ドームが海拔 1200m の地表に出現したと推定される 1991 年 5 月 19 日を起点としたドーム出現前の日数である。雲仙火山の地下およそ 10km の深さにマグマに関連すると思われる深部低比抵抗域、海拔 400m から海拔下 1km に地下水を



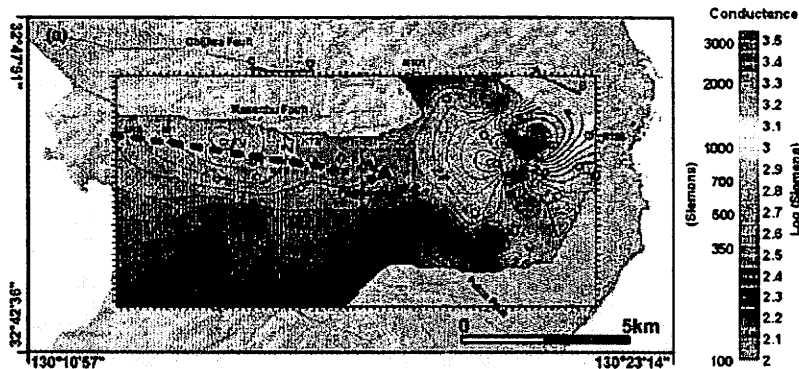
第3図 雲仙火山のドーム出現前に推定されるマグマの位置. 活動の節目は構造と密接に関係して発生している。

Fig.3. Calculated depth of magma head before the dome appearance in Unzen Volcano in 1991. Typical events occurred closely related with the structure of volcano.

活動とともに深部低比抵抗域からマグマの上昇が開始, 1990年7月以降の火山性微動発生と11月17日の最初の小規模水蒸気噴火を経て, 1991年1月末にマグマは浅部低比抵抗域(帯水層)に到達して火山性微動の再発や熱泥噴出, 1991年2月12日以降に規模の大きな水蒸気爆発がほぼ連続的に発生するようになっている。4月9日には, マグマは浅部低比抵抗域(帯水層)を通過してマグマ水蒸気爆発が発生するようになり, 5月20日に溶岩ドームの出現が確認されている。このように, 雲仙火山の活動様式の変化や火山性微動などの前兆現象の発生の多くが統一的に説明可能である。しかし, 上記のモデルでは, 山頂付近で火山性微動が発生し始めた1990年7月の時点や1990年11月17日の最初の噴火の時点では, マグマは深さおよそ5kmおよび3km付近に位置していることになる。山頂付近で発生する火山性微動は, 他の火山における研究の結果では, 火口直下の帯水層内で発生することが多いので(たとえば鍵山, 1997), マグマが深部にある段階で微動を発生させるには, マグマ以外の物質, たとえば高温の火山ガスが1990年7月の時点で帯水層に達している必要がある。小坂・他(1997)は1990年7月の段階で雲仙温泉地域の噴気ガスにマグマ起源と考えられる水素ガスを見出しており, この仮説を支持している。また, 火山ガスがマグマから分離して上昇しているとするれば, 雲仙火山のマグマの上昇が遅かったことや非爆発的噴火となったことが定性的には説明可能となる。このような事実を示す証拠は他にないであろうか? Wahyu et al. (2006)は, 島原半島において実施したTDEM法探査によって得られた各測定点における1次元比抵抗構造からコンダクタンス(電気伝導度の深さ方向の積分値)を計算し, 平面分布を示した。その結果, 第4図に示すように, 島原半島の西部から普賢岳に向かう東西の帯状の地域と島原半島東部の眉山周辺の2箇所において高いコンダクタンスが得られた。このうち前者は, 馬越・他(1994)によって精密に決定された普賢岳噴火前に発生した群発地震の震源の並びと一致している。Umakoshi

et al. (2001)は, 震源の東への移動などから, マグマはこの地域を東に移動しながら上昇したと推定し

多く含み一部は熱変質を受けた浅部低比抵抗域(帯水層)が存在している。マグマの上昇速度は1日に20mと推定されるので, 1991年5月19日に海拔1200mの位置に到達したマグマの頭位を過去にさかのぼって計算すると, 活動の節目が構造と密接に関わっていることがわかる。たとえば, 1989年末に島原半島西部で地震の群発



第4図 島原半島におけるコンダクタンスの分布. 破線は, 1989-1991年の震源.
 Fig.4. Distribution of conductance in Shimabara Peninsula from the TDEM data. Dashed line indicates the distribution of hypocenters from 1989-1991 (Umakoshi et al., 1994).

ている. このことは, マグマが島原半島西部の深部から普賢岳方向に移動していく途中において, 火山ガスがマグマから放出され, 断層沿いに上昇するために, 電気伝導度の高い領域が帯状に形成された

と考えるとつごうがよい. 島原半島西部では, 1990年の噴火以外にも1974年, 1984年など繰り返し有感地震を含む群発地震活動が発生し, 雲仙火山において有毒ガスの噴出事故なども発生している(気象庁, 2005). したがって, 島原半島西部に見られる高いコンダクタンスの領域は, すべて1990年の噴火の際に形成されたと考えるよりは, 繰り返し発生する群発地震のたびに, マグマから発散される火山ガスが島原半島西部に供給され, 高いコンダクタンスの領域が形成されたと考えるほうが妥当である. この結果は, 島原半島で発生している群発地震の際に「噴火未遂」が繰り返し起きていたことを意味すると思われる. 以上の結果は, 雲仙火山においてマグマからの脱ガスを示す証拠と考えられ, マグマからの揮発性成分の散逸を検討する際の突破口になると期待される.

4. まとめ

本稿では, 火山噴火予知研究がこれまでに多くの成果をあげながら, なお多くの課題を抱えていることを示した. 特に, マグマが容易に上昇できない, あるいは途中で停止することに起因する問題が重要であることを強調し, 2つの視点から電磁気探査に期待される課題を示した. 第1に, 上昇してくるマグマに対して密度障壁となりうる既存のマグマを検出することが重要である. 第2に, マグマからの脱ガスを議論できる観測を行うことである. これからの火山噴火予知研究は, この問題に解答することが求められており, 電磁気探査にもこの問題を解決するための方策が求められている. 上記の疑問に制約を与えるような結果が得られれば, 火山噴火の普遍的モデルの構築に寄与できるばかりではなく, 火山噴火予知の精度を大きく改善できると期待される.

参考文献

- 藤井敏嗣・吉本充宏・安田 敦 (2002): 富士火山の次の噴火を考えるー宝永噴火の位置づけ, 月刊地球, 24, 617-621.
 浜口博之 (1999): 1998年岩手山の噴火危機, 月刊地球, 21, 255-256.
 浜口博之 (2003): 第6次火山噴火予知計画で何がわかったか, 火山2集, 48, 79-86.
 Ikeda, Y., Katsui, Y., Nakagawa, M., Kawachi, S., Watanabe, T., Fujibayashi, N., Shibata, T. and

- Kagami, H. (1990): Petrology of the 1988-89 Essential Ejecta and Associated Glassy Rocks of Tokachi-dake volcano in Central Hokkaido, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Ser. 2, 35, 147-162.
- 石原和弘(1997): 火山観測による噴火の仕組みの理解, 火山2集, 42, 445-458.
- 鍵山恒臣・行田紀也・小山悦郎・辻浩 (1985): 浅間火山小規模噴火の地学的背景と前駆的現象, 「科学研究費報告自然災害特別研究(1) 59020001 火山体の物理的場の比較研究による噴火災害予測 代表岡田弘」, 92-101.
- 鍵山恒臣 (1994): 霧島火山群の構造調査の意義, 地震研究所彙報, 69, 177-188.
- 鍵山恒臣・山口勝・増谷文雄・歌田久司 (1994): 霧島火山群・硫黄山周辺のVLF, ELF-MT測定, 地震研究所彙報, 69, 211-239.
- 鍵山恒臣 (1997): 火山体構造探査と噴火予知, 火山2集, 42, 115-118.
- 鍵山恒臣 (1998): 火山ガスフラックスの指標としての火山体下の浅部低比抵抗域 (演旨), 日本火山学会 1998年秋季大会講演予稿集, 70.
- Kagiyama, T., Utada, H. and Yamamoto, T. (1999): Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 89, 35-42.
- 鍵山恒臣・森田裕一 (2006): カルデラ研究の展望, 月刊地球, 28, 63-66.
- 鍵山恒臣 (2006): 火山噴火予知研究の課題と構造探査, 物理探査, 59, 539-548.
- 気象庁 (2005): 日本活火山総覧 (第3版), 504-518.
- Nakada, S., Shimizu, H., and Ohta, K. (1999): Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 89, 1-22.
- 中田節也・長井雅史・安田敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001): 三宅島 2000年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴, 地学雑誌, 110, 168-180.
- 中川光弘・勝井義雄・河内晋平・池田保夫・藤林紀枝・後藤芳彦 (1989): 十勝岳 1988~1989年噴火における本質噴出物と噴火現象(日本火山学会 1989年秋季大会演旨), 火山2集, 34, 341.
- 中川光弘・伊藤和伯 (2000): 岩手火山のマグマ供給系: 時空変遷と最近 1000年の現状, 日本火山学会 2000年秋季大会講演予稿集, A58.
- 小坂丈予・山本雅弘・黒崎 誠・吉田 稔・野上健治・平林順一 (1997): 雲仙温泉地域に噴出するガス成分の変化と普賢岳の噴火, 温泉科学, 47, 22-28.
- 馬越孝道・清水洋・松尾のり道 (1994): 精度の良い震源分布から推定した 1990-94年普賢岳噴火活動のマグマ上昇経路, 火山2集, 39, 223-235.
- Umakoshi, K., Shimizu, H. and Matsuwo, N. (2001): Volcano-tectonic seismicity at Unzen Volcano, Japan, 1985-1999, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 112, 117-131.
- 宇都浩三・中田節也 (2000): 雲仙科学掘削プロジェクトの概要, 月刊地球, 22, 215-218.
- Wahyu, S., Kagiyama, T., Kanda, W., Munekane, H., Hashimoto, T., Tanaka, Y., Utada, H. and Utsugi, M. (2006): Resistivity structure of Unzen Volcano derived from Time Domain Electromagnetic (TDEM) survey, *Ann. Rep. Inst. Geotherm. Sci. Kyoto University*, FY2005, 36-38.