

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540569

研究課題名(和文)単成火山のマグマ上昇はマグマ起源揮発性物質の拡散放出から捉えられるか

研究課題名(英文)Studies on diffuse emission of volcanic volatiles in a monogenetic volcano area

研究代表者

野津 憲治(Notsu, Kenji)

静岡大学・防災総合センター・客員教授

研究者番号：80101103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：マグマ揮発性物質は、火山ガスとして山頂火口や山腹噴気孔から放出しているだけでなく、火山体表面全体から拡散放出している。本研究では伊豆東部火山群の単成火山直下のマグマの動きをマグマ揮発性物質の拡散放出から捉えようとした。1989年の海底噴火で形成した手石海丘では、火口底直上の海水の精密化学・同位体分析から極めて少量のマグマ-熱水起源のCO₂とCH₄の放出を検出した。最近の群発地震震央域の陸上部分や2700年前の割れ目噴火域では、マグマ起源CO₂の拡散放出は検出できなかった。4000年前に生成した大室山では、CO₂拡散放出量は火口内で少し高く、積算放出量は(22+2)トン/日であった。

研究成果の概要(英文)：Magmatic volatiles are released not only as plume efflux from summit craters or flank fumaroles but also as diffuse efflux from whole surface of volcanic body. This work tried to monitor the behavior of magma beneath monogenetic volcanoes of the Izu-Tobu volcanoes by means of diffuse degassing of magmatic volatiles. From the bottom of the summit crater of the Teishi Knoll, formed at the 1989 submarine eruption, extremely trace amounts of magmatic-hydrothermal CO₂ and CH₄ were detected, by means of precise chemical and isotopic analyses of seawater collected just on the crater bottom. No diffuse degassing of magmatic CO₂ was observed at the land area of epicenter regions of recent earthquake swarms nor at the fissure eruption region formed 2700 years before. At Oh-muro-yama scoria cone formed 4000 years before, CO₂ efflux was slightly higher in the summit crater, the total efflux was (22+2) ton/day.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：火山噴火予知 単成火山 伊豆東部火山群 手石海丘 大室山 火山ガス拡散放出 マグマ揮発性物質 炭素同位体比

1. 研究開始当初の背景

(1) 伊豆半島東部地域と隣接する東方海域には、14 万年前から噴火が始まった 100 個以上のスコリア丘、溶岩流、溶岩ドーム、火砕流台地、円形窪地、海底火山がおよそ 40x30km の範囲に分布し、伊豆東部火山群を形成している。この火山群の最大の特徴は、単成火山の集合であることで、隣接する富士火山や大島火山が大きな山体を持つ複成火山であることと好対照をなし、何故この地域だけ単成火山が形成したかという根源的な問題は解決されていない。長期的に見れば現在この地域のマグマ活動は活発で、1978 年以降度々群発地震が発生し、伊東南方の隆起は続き、1989 年 7 月 13 日には伊東沖の海底噴火で手石海丘が誕生した。その後も群発地震活動は続いたが 1998 年の活動を境に頻度が低下し、最近では 2006 年 4 月と 2009 年 12 月に起きただけである。群発地震の震央は手石海丘を含む伊東沖の海域で北西-南東方向に楕円状に分布しており、一部は伊東市東方の陸上部分にまで広がっている。震央域の地下にはマグマが溜まっており、群発地震の度に地表に到達しないダイクの貫入が起き、1989 年だけは海底にまで上昇し噴出したのであろう。将来マグマが地表に現れる可能性を考えると、この地域のマグマの動態の把握は極めて重要である。

(2) 活動的な火山でマグマの動態は、火山性微動の観測、山体膨張の観測、さらには電磁気観測、重力観測などを駆使して調べられているが、新たな有力な手段として火山性揮発性物質の山体からの拡散放出の観測が注目を集めている。マグマに溶け込んでいる揮発性物質は、マグマの上昇とともに溶解しきれなくなり発泡し、火山体の山頂火口や山腹の噴気孔から火山ガスとして放出している。しかし、このような目に見える火山ガス放出以外にも、火山体表面土壌を通してしみ出る「拡散放出」がイタリア、エトナ火山で見つかり、火口や噴気孔からの放出量に匹敵することが示された (Nature 351, 387-391 (1991))。それ以降、世界中の火山で拡散放出の観測研究がなされ、マグマの動態を反映する普遍的な現象であることが分かった。日本では申請者らが多く火山で研究を進め、有珠火山 2000 年の噴火を挟む研究では、マグマの上昇下降を反映した積算 CO₂ 拡散放出量変化が見られることや、CO₂ 拡散放出量の正の異常地点から噴火が起きたことを示した (Science 292, 83-86 (2001))。これまでの研究では常に同じ火道を使ってマグマが地表へ移動する複成火山を対象となっていたが、今回初めて同じ火道は一回しか使わない単成火山を対象に選び、マグマの動態監視の可能性を検討する。

2. 研究の目的

(1) これまでの火山体からの拡散ガス放出の研究は、現在も噴火活動を繰り返している複成火山体の山頂火口内や山腹で領域を決めて測定を行い、マグマ起源の CO₂ がどの場所でのどのくらいの量しみ出しているか調べ、面分布をもとにしみ出している場所の特徴や 1 日あたりの全放出量などを調べる。本研究課題で対象とする伊豆東部火山群は単成火山の集合体で、マグマ供給システムが複成火山とは全く異なるので、拡散ガス放出の特徴も単成火山マグマ供給システムを反映している可能性があり、拡散ガス放出から単成火山におけるマグマ供給のメカニズムやその進化のプロセスを明らかにする。

(2) 伊豆半島東岸から伊東沖にかけての群発地震の震央域地下には単成火山のマグマが存在し、間欠的に起きる群発地震発生時にマグマが上昇すると考えられている。本研究開始時の地震活動は低調で群発地震は起きていなかったため、まずは数 km から 10km 程度の深さのマグマから揮発性物質が拡散放出として検出可能かを明らかにする。その上で 3 年間の研究期間内に繰り返し測定を行い、その期間のマグマ活動の変化がマグマ起源の CO₂ の拡散放出にどのように現れるかを明らかにする。万一研究期間内に群発地震活動が始まれば、呼応して観測を行うことを予定していたが、実現はできなかった。また、現在地下にマグマが存在していると想定される場所と比べる目的で、過去にマグマが上昇して形成された単成火山を対象として、マグマ活動が観測されない場合の拡散ガス放出の特徴の把握に務める。

(3) もっとも最近の火山活動は 1989 年の海底噴火による手石海丘の誕生である。噴火直後は海底火口から激しい噴気活動が見られたが、23 年経過した現在では海底火口からの気泡の放出は見られない。しかし、火口直下にはまだ完全に冷えきっていないマグマが固化した岩脈が存在しているはずで、マグマ起源の気体が放出している可能性が高い場所である。そこで、火口内の海水に溶存している成分の分析から火口底を通してのマグマ起源揮発性物質の拡散放出の検出を試みる。

3. 研究の方法

(1) 陸上部分での CO₂ 拡散放出量の測定は、平成 23 年度に購入した CO₂ フラックスメータ (イタリア、West System 社製) を使用して行なった。測定を行なった場所は、広大な伊豆東部火山群の領域内から、以下に示すように、現在地下にマグマが存在している場所や、比較的最近にマグマが存在していた新しい単

成火山を選んだ。群発地震の震央分布から推定される現在地下にマグマが存在する場所は大部分が海域であり、海域ではCO₂フラックスメータを使ったCO₂拡散放出量の測定は行なえない。したがって震央分布の端が陸上をわずかにかすっている伊東市東部の海岸沿いの地域でCO₂拡散放出量の測定を繰り返し行なった。さらに震源域から南方へ延びる道路沿いで比較の測定を行なった。2700年前には岩ノ山、北ノ山、矢筈山、伊雄山が相次いで噴火生成し、北西-南東方向の割れ目噴火列を形成した。この噴火割れ目を横切る3本の道路沿いに測線で、CO₂拡散放出量の測定を行なった。それらは北から、富士見窪と孔ノ窪の近くで割れ目を横断する大室山西から富士見台へ至る測線、矢筈山と伊雄山の中間あたりで割れ目を横断する伊東市池から市営霊園に至る測線、伊雄山から南東へ割れ目を延長した地点を横断する上入谷から八幡野に至る測線の3測線である。4000年前の噴火で生成したスコリア丘、大室山では、山頂火口域、山腹、山体周辺のおよそ1km x 1kmの範囲で70点のCO₂拡散放出量の測定を行った。とくに山頂火口内では空間密度を細かく測定を行ない、拡散放出の空間的な特徴を求めた。

(2) 1989年の海底噴火で誕生した手石海丘からのマグマ起源揮発性物質の放出の検出は、火口底に接している海水の分析により行なった。平成24年7月17日、漁船(みのる丸)を火口直上に停泊させ、内径12mmの特殊ホースを最水地点に下ろし、海水を甲板上に置いたチューブポンプで吸引し試料容器に導入した。海水採取地点は図1に示す6地点で、火口底直上の3地点(A, B, C:水深107-115m)と火口上の水深100m、80m、50m(D, E, F)の3地点である。

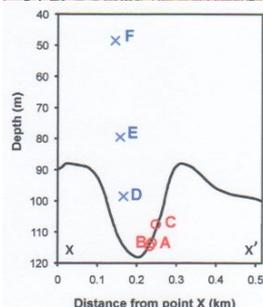


図1 手石海丘(上図)と海水採取地点(下図)

採取した海水試料の化学分析、同位体分析は、国内の多くの研究機関の装置を使って、共同研究で行なわれた。全無機炭素(TIC)濃度とその¹³C/¹²C比(¹³C)は静岡大学理学部のクーロメーターと質量分析装置で、放射性炭素量(¹⁴C)は東京大学のタンデム加速器を用いて測定した。また、CH₄濃度とその¹³C/¹²C比(¹³C)は名古屋大学大学院の質量分析システムで、全有機炭素濃度(TOC)は静岡大学の電炭素分析計で、³He/⁴Heは東京大学大学院の希ガス質量分析装置で測定した。これらの分析結果を総合して水深約100mの火口底を通してマグマ起源物質が海水へしみ出しているかを検討した。

4. 研究成果

(1) 4000年前に噴火して誕生したスコリア丘、大室山は頂上に直径300m、深さ70mの火口が残っており、山頂部分、山麓部分をカバーするおよそ1km x 1kmの範囲で70点のCO₂拡散放出量の測定を行なった。その結果は、0~50g/m²/dの範囲の値で、図2に各点の結果から得られたCO₂拡散放出量の空間分布を示す。スコリア丘周囲、山腹、山頂火口縁ではCO₂拡散放出がほとんどなかったが、火口内の一部からは僅かながらCO₂拡散放出が検出された。空間的に積算して1日当たりのCO₂拡散放出量を計算すると(22±2)トンとなった。

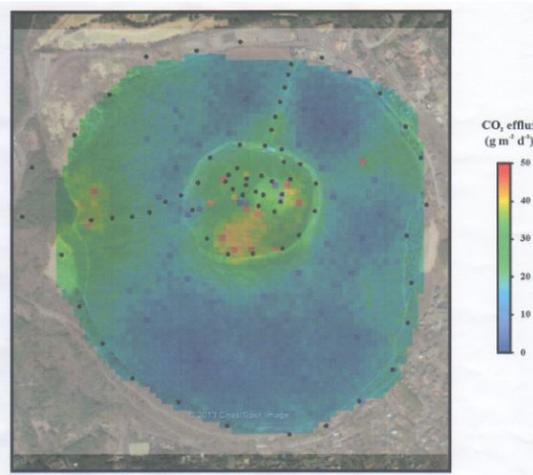


図2 大室山のCO₂拡散放出量

(2) 2700年前に割れ目噴火が起きた岩ノ山、北ノ山、矢筈山、伊雄山を結ぶ列を横断する道路上の3本の測線で実施した。このうち、矢筈山と伊雄山の中間あたりで割れ目を横断する測線は、平成23年と25年度に2度測定を繰り返した。その結果どの測定も、生物活動に由来するバックグラウンドレベルのCO₂拡散放出量で、噴火割れ目の直上に相当する場所でも、特に異常な上昇は見られなかった。マグマ起源の揮発性物質の拡散放出は検出できなかった。この地域の深部に現在マグマが存在している観測的な証拠は一切なく、将来

の活動に備えるバックグラウンドデータを得た。

(3) 群発地震の震央域が陸上部分に及んでいる伊東市東部の荒井から汐吹崎に至る沿岸と少し内陸に入った地域の CO₂ 拡散放出量測定は、平成 23 年と 24 年度に 2 度行なった。観測場所は群発地震震央域の外縁部分にあたり、1989 年に噴火が起きた手石海丘からは数 km 離れている。また、群発地震震央域との対比のため震央域から南に数 km の地点まで道路沿いで同様の測定を行なった。その結果、1 年の間隔の 2 回の測定とともに、生物活動に由来するバックグラウンドレベルの CO₂ 拡散放出量で、震央域内と震央域からはずれた場所との違いも全くなかった。本研究期間は群発地震活動もなく静穏期で、深部のマグマの動きもなかったこともこの結果に反映されているのであろう。将来群発地震活動が活発になった時に備えて、バックグラウンドのデータが得られたことに意義がある。

(4) 手石海丘の火口底やその上方で採取した海水試料の全無機炭素(TIC)濃度、およびその炭素同位体比(¹³C)、放射性炭素濃度(¹⁴C)の水深による変化を、図 3 に示す。

なお、¹³C や ¹⁴C は、

$$^{13}\text{C} = \{ (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_S / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}} - 1 \} \times 1000$$

S: 分析試料、PDB: 炭素同位体標準試料

$$^{14}\text{C} = \{ (^{14}\text{C})_S / (^{14}\text{C})_{\text{OX}} - 1 \} \times 1000$$

S: 分析試料、OX: 1950 年の ¹⁴C の 95%

と定義される。

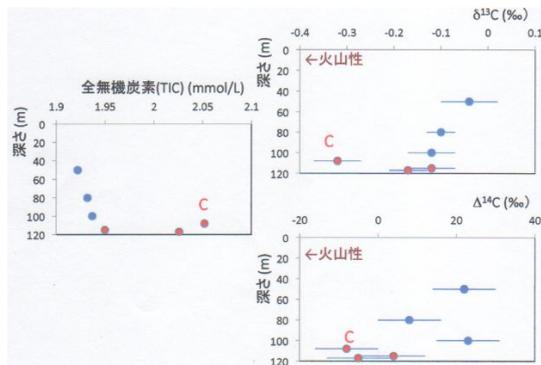


図 3 手石海丘火口内外の海水の TIC 濃度、¹³C、¹⁴C の深さ変化

その結果、TIC 濃度は海水深度が深くなるに従い高くなり、火口底直上が最も高いが、火口底直上の海水 3 試料中でも試料 C が最高値を示す。火口底直上海水中の TIC の ¹³C、¹⁴C はともに上方海水より低く、試料 C が最も低いことから、火口底を通しての炭素同位体比の異なる無機炭素の付加は、試料 C が最も顕著であることが示された。同じく海水中に溶存している CH₄ 濃度とその ¹³C の深さ変化を図 4 に示す。

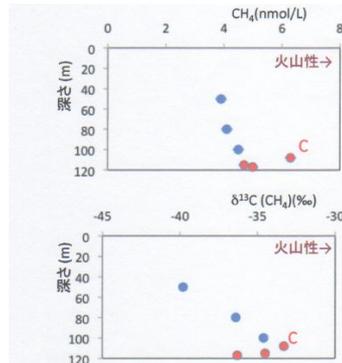


図 4 手石海丘火口内外の海水の CH₄ 濃度、¹³C の深さ変化

TIC と同様に、試料 C の CH₄ 濃度がもっとも高く、¹³C も高いことから、CH₄ も火口底から滲み出していることが示唆される。ちなみに試料 C は、1989 年の噴火の発泡地点に近い場所の海水であり、同じ火口内海底直上の海水でも、マグマ揮発性物質の付加がもっとも期待される試料である。

手石海丘の火口底を通して付加された物質を特定するために、同位体比と濃度の逆数をプロットする 2 成分混合解析 (Keeling plot と呼ばれる) を行なった。図 4 と図 5 に、CH₄ と TIC の結果を示す。

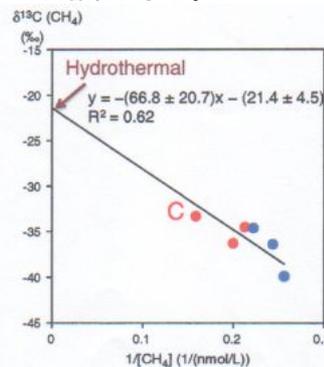


図 4 手石海丘海水の ¹³C(CH₄)-1/CH₄ プロット

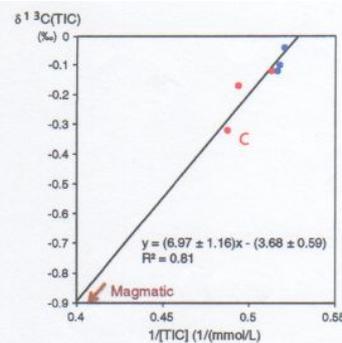


図 5 手石海丘海水の ¹³C(TIC)-1/TIC プロット

この解析では、付加された物質の同位体比は縦軸の切片の値として求まる。付加された CH₄ の ¹³C は、-21.4±4.5‰と計算され、まさに熱分解起源の CH₄ の ¹³C の範囲(-50~-20‰)と重なる。マグマ起源の CH₄ の ¹³C は-10~0‰とより重いことが知られており、手石海丘

の場合は、地下で熱水循環が起きており、マグマの熱で分解生成したメタンを溶解した熱水の滲み出していると考えられる。一方、付加された TIC の ^{13}C は、 $-3.68 \pm 0.59\%$ と計算され、マントル起源の揮発性物質の値 ($-8 \sim -4\%$) に極めて近く、マグマに溶解していた無機炭素が滲み出している可能性が高い。放射性炭素 (^{14}C) の値もマグマ起源の炭素の滲み出しが示され、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ の値も火口底からのマグマ起源物質の混入を示している。今回の実験結果は、1989年の噴火時には大量の発泡が起きた噴気孔からマグマ起源の揮発性物質が熱水とともに23年たった現在でも滲み出していることを示している。しかし、海水中のマグマ起源の揮発性物質濃度は噴火直後に比べ1万分の1以下と極めて少なく、実質的に0に近いことは、手石海丘の噴火活動が終息していることと整合的である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

Notsu K., Sohrin R., Wada H., Tsuboi T., Sumino H., Mori T., Tsunogai U., Hernandez P.A., Suzuki Y., Ikuta R., Oorui K., Koyama M., Masuda T. and Fujii N., Leakage of magmatic-hydrothermal volatiles from a crater bottom formed by a submarine eruption in 1989 at Teishi Knoll, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 査読有, 270, 90-98 (2014)

doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.11.017.

Mori T., Shinohara H., Kazahaya, K., Hirabayashi J., Matsushima T., Mori T., Ohwada M., Odai M., Iino H. and Miyashita M., Time-averaged SO_2 fluxes of subduction-zone volcanoes: Example of a 32-year exhaustive survey for Japanese volcanoes. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 118, 1-13 (2013)

doi:10.1002/jgrd.50591.

Mori T. and Kato K., Sulfur dioxide emissions during the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Japan. *Earth Planets Space*, 査読有, 65, 573-580, doi:10.5047/eps.2013.04.005.

野津憲治、Geochemistry は「地球化学」か「地化学」か: Geochemistry が日本に導入された1920年代の葛藤、地球化学、査読有、47, 105-115 (2013)

http://www.geochem.jp/journal_j/contents/047.html

Melian G., Tassi F., Pérez N., Hernández

P., Sortino F., Vaselli O., Padron E., Nolasco D., Barrancos J., Padilla G., Rodriguez F., Dionis S., Calvo D., Notsu K. and Sumino H., A magmatic source for fumaroles and diffuse degassing from the summit crater of Teide volcano (Teneriffe, Canary Islands): a geochemical evidence for the 2004-2005 seismic-volcanic crisis. *Bull. Volcanol.*, 査読有 74, 1465-1483 (2012) doi:10.1007/s00445-012-0613-1

Padrón E., Hernández P.A., Pérez N.M., Toulkeridis T., Melian G., Barrancos J., Virgili G., Sumino H. and Notsu K., Fumarole/plume and diffuse CO_2 emission from Sierra Negra caldera, Galapagos archipelago. *Bull. Volcanol.*, 査読有 74, 1509-1519 (2012)

doi:10.1007/s00445-012-0610-4

Hernández P.A., Pérez N.M., Fridriksson T., Egbert J., Ilyinskaya E., Tharhallsson A., Ivarsson G., Gislason G., Gunnarsson I., Jonsson B., Padrón E., Melian G., Mori T. and Notsu K., Diffuse volcanic degassing and thermal energy release from Hengill volcanic system, Iceland. *Bull. Volcanol.*, 査読有, 74, 2435-2448 (2012)

doi:10.1007/s00445-012-0673-2

Bajo K., Sumino H., Toyoda M., Okasaki R., Osawa T., Ishihara M., Katakuse I., Notsu K., Igarashi G. and Nagao K., Construction of a newly designed small-size mass spectrometer for helium isotope analysis: Toward the continuous monitoring of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Natural fluids. *Mass Spectrometry*, 査読有, 1, A0009 (2012)

doi:10.5702/massspectrometry.A0009

野津憲治、新元素発見を夢見て 日本の無機化学を築いた「柴田雄次」と新元素、化学、査読無、66 (No.2), 12-18 (2011)

<http://www.kagakudojin.co.jp/book/b82048.html>

Perez N.M., Hernandez P.A., Padilla G., Nolasco D., Barrancos J., Melian G., Padron E., Dionis S., Calvo D., Rodriguez F., Notsu K., Mori T., Kusakabe M., Arpa M.C., Reniva P. and Ibarra M., Global CO_2 emission from volcanic lakes. *Geology*, 査読有, 39, 235-238 (2011).

doi:10.1130/G31586.1

Kazahaya R., Mori T., Takeo M., Ohminato T., Urabe T. and Maeda Y., Relation between single very-long-period pulses

and volcanic gas emissions at Mt. Asama, Japan. Geophysical Research Letters, 査読有, 38, L11307 (2011)
doi:10.1029/2011GL047555.

[学会発表](計16件)

Notsu K., Sohrin R., Wada H., Tsuboi T., Sumino H., Mori T., Tsunogai U., Hernandez P. A., Suzuki Y., Ikuta R., Oorui K., Koyama M., Masuda T. and Fujii N., Volatile leakage from the crater bottom of Teishi Knoll of Izu-Tobu Volcanoes, Japan, 23 years after the 1989 submarine eruption. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, July 20-24, 2013, Kagoshima (Japan)

Mori T., Morita M., Takeo M., Urabe T. and Oikawa J., Automated sulfur dioxide flux monitoring at Asama volcano, Japan. IAVCEI 2013 Scientific Assembly. July 20-24, 2013, Kagoshima (Japan)

Morita M. and Mori T., Automatic continuous observations of SO₂ flux at Suwanose-jima volcano, Southwest Japan. IAVCEI 2013 Scientific Assembly. July 20-24, 2013, Kagoshima (Japan)

Morita M., Mori T., Iguchi M. and Nishimura T., Continuous monitoring of sulfur dioxide emission rate at Suwanosejima volcano, Japan. American Geophysical Union Fall Meeting, December 9-13, 2013, San Francisco (USA)

Notsu K., Sohrin R., Wada H., Tsuboi T., Sumino H., Mori T., Tsunogai U., Hernandez P. A., Suzuki Y., Ikuta R., Oorui K., Koyama M., Masuda T. and Fujii N., Volatile leakage from the crater bottom of Teishi Knoll, Japan, formed by a submarine eruption in 1989. 1st Anniversary International Conference Commemorating the 2011-2012 El Hierro Submarine Eruption, October 10-15, 2012, El Hierro, Canary Islands (Spain)

Hernández P.A., Mori T., Notsu K., Padrón E., Nolasco D., Melián G. and Pérez N.M., Monitoring of CO₂ soil diffuse degassing at Izu-Oshima volcano, Japan. 1st Anniversary International Conference Commemorating the 2011-2012 El Hierro Submarine Eruption, October 10-15, 2012, El Hierro, Canary Islands (Spain)

Mori T., Iguchi M., Nishimura T. and Oikawa J. Precursory gas flux change observed before eruptions at Suwanose-jima volcano, Japan. International

Union of Geodesy and Geophysics 2011, Melbourne (Australia)

Kazahaya R., Mori T., Takeo M., Ohminato T., Urabe T. and Maeda Y., Relation between single very-long-period seismic pulses and volcanic gas emission at Mt. Asama, Japan. International Union of Geodesy and Geophysics 2011, Melbourne (Australia)
Fujii N., Monitoring for an Anticipated Eruption at the East-Izu Monogenetic Volcano Region, MAKAVOI 2011, Teneguia Workshop, October 24-28, 2011, La Palma, Canary Islands (Spain)

[図書](計3件)

野津憲治.丸善出版、同位体環境分析、2013、pp.331。(分担執筆:5同位体の地球科学への応用、p.125-148)

野津憲治.朝倉書店、地球と宇宙の化学事典、2012、pp.479。(分担執筆:年表、p.444-448)

森俊哉.朝倉書店、地球と宇宙の化学事典、2012、pp.479。(分担執筆:化学的噴火予知、p.221)

[その他]

ホームページ等

<http://sakuya.ed.shizuoka.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野津憲治 (NOTSU KENJI)

静岡大学・防災総合センター・客員教授
研究者番号: 80101103

(2) 研究分担者

藤井直之 (FUJII NAUYUKI)

静岡大学・防災総合センター・客員教授
研究者番号: 60011631

森 俊哉 (MORI TOSHIYA)

東京大学大学院・理学系研究科・准教授
研究者番号: 40272463