

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2009～2012  
 課題番号：21310116  
 研究課題名（和文）海域に推定されるマグマ供給系の地下構造調査による実体解明  
 研究課題名（英文）Research on the true picture of magma supply system, which is supposed to be beneath the sea area, by means of the investigation of underground structure  
 研究代表者  
 神田 径（KANDA WATARU）  
 東京工業大学・火山流体研究センター・准教授  
 研究者番号：00301755

## 研究成果の概要（和文）：

始良カルデラ直下に想定されるマグマ溜りおよび桜島火山へのマグマ供給経路に相当する電気比抵抗の構造を明らかにするために、主としてカルデラを西北西—東南東に横断する2測線に沿って電磁気観測を行った。2009年からの4年間で、海域16点を含む全44点でデータを取得した。2次元および3次元解析の結果、鹿児島地溝に沿って下部地殻から続く低比抵抗の領域がカルデラ中央から東部にかけて見つかかり、マグマ供給系に関連した地下構造であると推測された。

## 研究成果の概要（英文）：

In order to clarify the corresponding electrical resistivity structure to the assumed magma reservoir and to the supply paths to Sakurajima volcano and to the submarine volcano, we have conducted the magnetotelluric (MT) measurement mainly along two traverse lines in the direction of WNW-ESE crossing the Aira caldera since 2009. The MT data at 44 sites in total, including 16 seafloor sites, were obtained for the last four years. As a result of 2-D and 3-D inversions, a high conductive region extending from the lower crust along the Kagoshima graben was found from the central part of the caldera to the eastern part. This conductor is possibly the structure relevant to the magma supply system.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			0
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

## 研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード： マグマ溜り、海底観測、電気伝導度、火山噴火、始良カルデラ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 火山噴火予知計画等に基づく観測網の増強や火山体の構造調査によって、マグマの蓄積・移動について多くの知見が得られつつあ

った。しかしながら、マグマの供給源が海域下に想定される場合には、海底でのデータ取得体制が確立していないため、陸上観測データからの解釈に止まっているのが現状であ

った。また、マグマの移動経路沿いの海域で噴火が発生すれば、その規模は通常火口での噴火より激しくなり易く、火山沿岸都市での津波や火災などの複合災害も懸念されることから、海域下のマグマの蓄積・移動を把握することは大きな課題であった。

(2) 海域における海底電磁気観測装置は、深海底（水深 3~6km）での調査を対象に開発されてきた経緯があり、水深が高々数 100m の浅海底での調査は、様々な困難が予想されたことから、実施には至らなかった。近年、浅海底での利用を念頭にした機器開発が進んできており、火山災害による被害を受ける恐れのある都市沿岸地域での利用にも目途が立ちつつあった。

(3) 本研究では、長年の地殻変動観測および地震観測により、マグマの蓄積が確実視されている桜島火山北方の鹿児島湾奥部（始良カルデラ）を中心とした領域を研究対象とした。始良カルデラは、約 29,000 年前の破局的噴火(VEI=7)によって形成されたとされ、カルデラ内には桜島と若尊という二つの活火山を有している。1914 年の桜島大正噴火の前後で、桜島ではなく鹿児島湾奥部を中心とする南九州の広範囲で地盤の沈降が観測された(Omori, 1916)ことから、始良カルデラの地下 10km 付近には、桜島火山へのマグマ供給源が存在すると考えられている(Mogi, 1958)。桜島火山は、わが国で最も活動的な火山であり、2006 年の昭和火口における活動再開以後、年間数百回を超える爆発的噴火を繰り返し、今後の噴火活動の活発化が懸念されていた。近年の繰り返し地殻変動観測から、このマグマ溜りへのマグマ供給は、平均的に年間 1 千万立米の割合で現在も続いていると見積もられている(井口, 2006)が、始良カルデラの

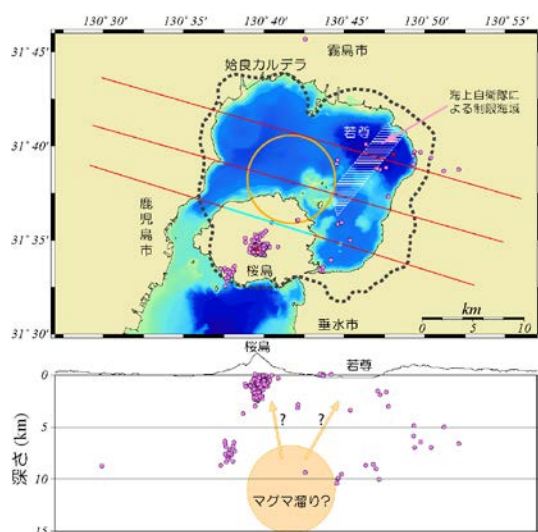


図 1：始良カルデラ地下に想定されるマグマ溜りと測線（赤線）。紫丸は京都大学の観測による地震の震源。

大半が海域にあるため、その実体については良くわかっていなかった。

以上のことが背景にあり、本研究計画を立案した。

## 2. 研究の目的

本研究では、マグマの蓄積が確実視されている始良カルデラを中心とした領域で、海底を含む電磁気構造調査を実施し、始良カルデラ下に想定されるマグマ溜り、および桜島ならびに若尊海底火山への供給路に相当する地下構造を明らかにし、従来の力学的モデルから推定されたマグマ供給系モデルを検証することを目指した（図 1）。

## 3. 研究の方法

(1) 地下構造を推定する方法として、世界中で広く行われている MT 法 (Magnetotellurics) による比抵抗構造調査を実施した。MT 法は、地表における複数の周波数の電磁場観測から、地下の岩石の物性値の 1 つである比抵抗（電気伝導度）の分布を推定する方法である。比抵抗は、溶融体や温度に対する感度が高いため、本研究の目的であるマグマ供給系を調査するには適した物理量である。地下深部の情報が含まれるデータを取得するためには、より長周期の電磁場データが必要であり、長期間の観測が必要となる。また、始良カルデラは、ほぼ鹿児島湾奥部に相当するので、マグマ溜まりが想定される 10~20km 深までの構造を推定するためには、湾奥部のみならず周辺の薩摩半島と大隅半島にも観測点を展開する必要があった。

始良カルデラは、北北東-南南西の走向を持つ鹿児島地溝(早坂, 1987)に位置することから、マグマ供給系は、西北西-東北東に伸張する広域応力場の影響下にあると考えられる。このような理由から、構造走向が北北東-南南西であると仮定して、始良カルデラを西北西-東南東に横断する 2 測線に沿って観測を行った。研究開始当初は、桜島を通る 3 測線目も計画していたが、2 年目までの観

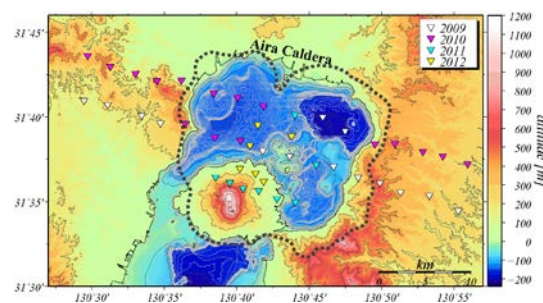


図 2：観測点位置図 (▽)。2009 年からの 4 年間で海域 16 点、陸域 28 点の計 44 点で MT 法による電磁場観測を行った。

測の結果、鹿児島市街地の都市ノイズの影響を大きく受けることが判明したため、桜島島内のみで測定を実施することとした。その結果、2009年~2012年の4年間で陸域28点、海域16点の合計44点において、MT法による電磁場5成分を測定した(図2)。

(2) 海域における観測では、最新のテラテクニカ社製海底電位磁力計(OBEM: Ocean Bottom ElectroMagnetometer; Kasaya and Goto, 2009)を複数台用いて、1カ所につき約2~3週間の海底観測を行った。鹿児島湾奥部では、ほぼ全域で底引き網漁が毎日行われているため、一定期間設置する海底観測の実施には漁業権者から難色を示されたが、交渉の結果、漁場外で実施した2009年を除き、底引き網漁が休漁となる6月に実施することで了解を得た。なお、交渉の過程で、従来は浮上時に投棄してきた錘を回収するシステムの開発も行い、2010年の観測から運用した。海流や都市ノイズの混入により、データの質に問題があった観測点については、2011年度予算の一部を繰り越して周辺での補充観測を行った。

データ解析手順は次の通りである。8Hz サンプリングで取得されたデータを1Hz にリサンプリングし、周波数解析(Chave and Tomson, 1987)から、0.0001~0.1Hzの周波数帯のMT応答関数を推定した。この際、ノイズ除去のために、気象庁地磁気観測所鹿屋出張所の定常観測データを参照データとして用いた。高周波成分は高電気伝導度の海水によって減衰し、また海流の影響を受けるため、陸域のデータに比べて高周波数側のデータを得ることは困難である。

(3) 陸域の観測においては、Phoenix Geophysics社のMTU-5Aシステムを複数台用いて各点約2週間の測定を行った。附属のソフトウェアを用いた解析を行い、0.001Hz~320Hzの周波数帯のMT応答関数を得た。ノイズ軽減のため、国土地理院によって運用されている連続観測データ(江刺観測点)を参照データとして用いた。しかしながら、鹿児島市近郊では都市ノイズの影響を大きく受けたため、長周期側のデータの精度が悪い。また、数カ所では、野生動物(恐らくイノシシ)によってセンサーが掘り起されるという被害を受けたため、解析に用いるデータ期間が短くなり、長周期帯でのデータが得られていない。これを補うために、2013年2月に桜島島内で補充観測を行った。

#### 4. 研究成果

(1) まず、始良カルデラを横断する2測線に沿った2次元構造解析を行った。2次元の構造走向は、陸域の各観測点で取得されたインピーダンスの分解(Groom and Bailey, 1989)

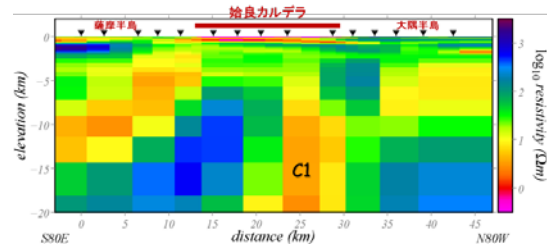


図3:カルデラ中央を通る測線(Line2)の2次元比抵抗構造モデル。

により推定した。解析の結果、各観測点・周波数で推定された構造走向は、両測線ともN5°EからN15°Eに集中していたことから、本研究では、N10°Eをこの地域の2次元構造の走向と仮定した。これは、前述の鹿児島地溝の走向と矛盾しない。

各観測点のインピーダンスを走向方向に回転した後、TMモード(構造走向に平行な磁場成分と直交する電場成分を持つ)のデータのみを用いて2次元インバージョン(Ogawa and Uchida, 1996)を行った。TMモードは、3次元構造の影響を受けにくいモードとされる。Line2(中央を横断する測線)における2次元比抵抗構造モデルでは、始良カルデラ東部の深さ7~8kmより深いところに10Ωm以下の低比抵抗領域が見つかった(図3)。この良導体(C1)は、下部地殻から上方へ延びているようにも見えるが、OBEMで取得したデータは高周波数側がないので、はっきりとはしない。C1は、地盤変動解析から推定されている減圧源の位置(江藤・中村, 1986)と概略では一致している。

(2) 次に、Siripunvaraporn and Egbert(2009)の3次元インバージョンコードを用いて、3次元比抵抗構造モデルの推定を行った。計算には、各観測点のインピーダンス全成分の12周期(0.09~512s)を用いた。初期モデルとして、陸域は100Ωm一様構造で、海底地

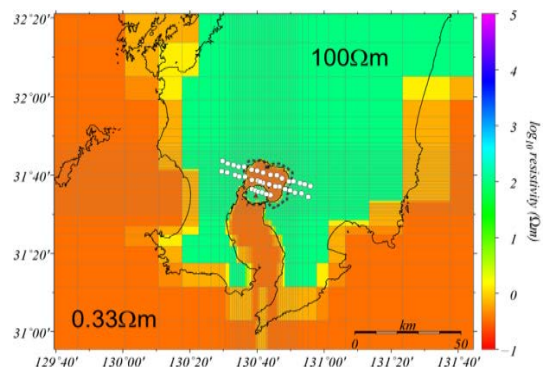


図4:三次元インバージョンに用いた初期モデル。陸域は100Ωm一様で、海底地形を考慮した0.33Ωmの海水に相当するブロックを加えている。

形を考慮した  $0.33\Omega\text{m}$  の海水に相当するブロックを加え、この海水のブロックの比抵抗値はインバージョンの過程で不変とした (図 4)。計算領域は、 $338\text{km}$  (南北方向)  $\times$   $338\text{km}$  (東西方向)  $\times$   $455\text{km}$  (鉛直方向) で、これを  $54 \times 54 \times 54$  個のブロックに分割して、各ブロックの比抵抗値を推定した。水平方向のメッシュ間隔は、カルデラ中央を中心とする  $30\text{km} \times 30\text{km}$  の範囲を  $1\text{km}$  とし、その外側の領域では中心から離れるにしたがって  $\sqrt{2}$  倍ずつ拡大していった。鉛直方向のメッシュは地表から深さ  $60\text{m}$  までを  $10\text{m}$  とし、その下方は次第に大きくなるようにメッシュ間隔を与えた。初期モデルの RMS 誤差は、インピーダンス各成分の最小エラーとして  $10\%$  を与えたところ  $5.1$  であり、インバージョンの結果得られた最適モデルの RMS 誤差は  $1.7$  であった。3 次元モデル計算には、東京工業大学学術国際情報センターの Tsubame2 を使用した。

最適モデルを代表的な深さの水平断面で

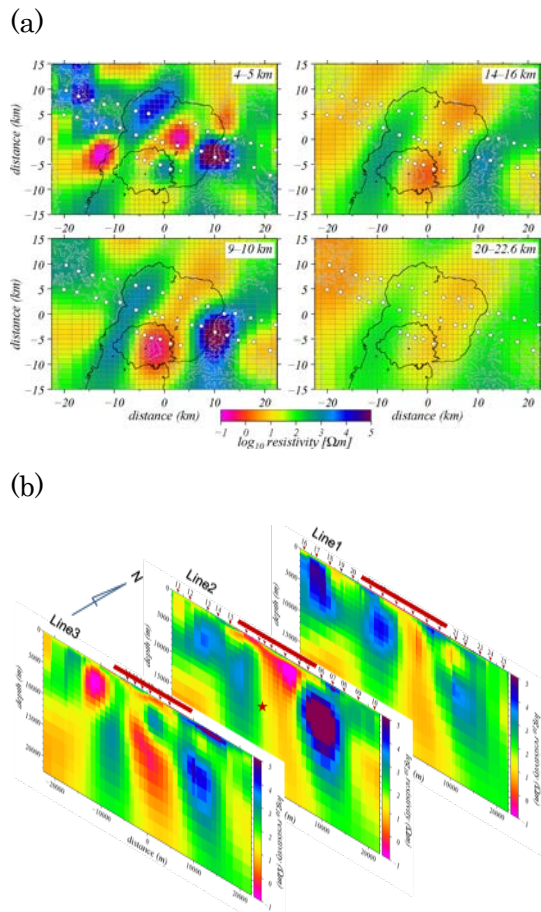


図 5 : (a) 3 次元比抵抗構造モデルの深さ  $5\text{km}$ 、 $10\text{km}$ 、 $15\text{km}$ 、 $20\text{km}$  における水平断面。(b) カルデラを横断する測線に沿った断面図。星印は、最近の地盤変動観測から推定された減圧源の位置 (Yamamoto et al., 2013)。

見てみる (図 5 (a)) と、始良カルデラ中央からやや東にかけての深さ  $5\text{km}$  付近に顕著な低比抵抗領域が見られる。この低比抵抗領域は、深さ  $10\text{km}$  では桜島の東部で最も低い値を示すが、桜島から始良カルデラを横断して北東方向に低比抵抗帯を形成している。この傾向は深さ  $20\text{km}$  付近まで続く。ただし、鹿児島湾と大隅半島の境界付近に極端な高比抵抗体領域が現れていることから、始良カルデラに現れた低比抵抗領域は、高比抵抗体を作る偽像の可能性もある。この高比抵抗体の直上の観測点のデータは、高周波数側から周囲の観測点に比べて一桁以上高い見掛け比抵抗を示す。花崗岩体を有する高隈山地の北限付近にあるため、表層に高比抵抗の岩体が現れている可能性がある。当該観測点のデータについて補正を行った上で再解析するなど、検討の余地が残されている。

次に、得られた 3 次元比抵抗構造モデルを測線に沿った鉛直断面で見てみる (図 5 (b))。3 測線とも、始良カルデラ中央から東よりに、低比抵抗領域が下部地殻から地表付近まで続いている。前述のように、海域の地表付近の地下構造は感度が悪いが、鹿児島地溝に沿って低比抵抗帯ができていようにも見える。広域応力場が東西伸張場であることから、伸張の結果として地殻が薄くなったところをマグマが上昇しているという解釈も可能であろう。

(3) 3 次元比抵抗構造モデルを他の地球物理学的研究から得られている知見と比較した。始良カルデラ直下のマグマ溜りを示唆する最近の地盤変動源の位置は、低比抵抗体と高比抵抗体の境界付近にあり (図 5 (b) 星印)、低比抵抗体がマグマに供給に関連しているという解釈と矛盾しない。また、南九州地域で推定されている地震波構造 (Alanis et al., 2012) では、桜島直下の深さ  $20\text{km}$  にマグマの存在を示唆する高  $V_p/V_s$  領域が見ついている。分解能が異なる (水平・鉛直方向とも  $10\text{km}$  メッシュ) ため単純には比較できないが、低比抵抗領域に対応している。2008 年に実施された人工地震探査に自然地震のデータを加えて解析された地震波速度構造 (為栗・他, 2011) では、深さ  $4\text{km}$  で始良カルデラ内に P 波速度が周囲より遅い低速度領域が見られるが、深さ  $8\text{km}$  では若尊～桜島にかけて高速度領域が検出されている。この高速度領域は低比抵抗領域に対応しているように見えるが、その原因はこれまでのところ不明である。

以上のように、本研究からマグマ供給系の存在を示唆するような低比抵抗領域が始良カルデラ直下に見つかったが、モデルには未だ改良の余地が残されている。他の地球物理学的データとの整合性を説明するためにも、

物質科学的側面からのアプローチなどが今後の課題として挙げられる。

#### 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 4 件)

- ① 神田 径, 小川 康雄, 高倉 伸一, 小山 崇夫, 橋本 武志, 小森 省吾, 園田 忠臣, 佐藤 泉, 井上 直人, 宇津木 充, 桜島火山の三次元浅部比抵抗構造, 2013 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 139-144, 2013, 査読無, [http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2013/Kanda\\_et\\_al\\_CA2013.pdf](http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2013/Kanda_et_al_CA2013.pdf).
- ② Kanda, W., T. Yamazaki, Y. Ogawa, T. Hashimoto, S. Sakanaka, K. Aizawa, S. Takakura, T. Koyama, K. Yamada, T. Kobayashi, S. Komori, Shallow resistivity structure of Sakurajima volcano revealed by audio-frequency magnetotellurics, Bull. Volcanol. Soc. Jpn., 58, 251-267, 2013, 査読有, <http://www.kazan-g.sakura.ne.jp/Vol/58p251a.pdf>.
- ③ Kasaya, T., Goto, T., Baba, K., Kinoshita M., Hamano, Y., Fukao, Y., Recent progress of the electro-magnetic survey to investigate Earth's interior JAMSTEC Report R&D (Special issue). 103-110, 2009, 査読有, [http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/data/doc\\_catalog/media/JAM\\_RandDsp\\_13.pdf](http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/data/doc_catalog/media/JAM_RandDsp_13.pdf).
- ④ Kasaya, T. and Goto, T., A small ocean bottom electromagnetometer and ocean bottom electrometer system with an arm-folding mechanism (Technical Report) Exploration Geophysics, 40, 41-48, 2009, 査読有, [http://www.segi.org/~kashima\\_admin/data/02/B620106.pdf](http://www.segi.org/~kashima_admin/data/02/B620106.pdf).

[学会発表] (計 10 件)

- ① Kanda, W., Kasaya, T., Yakiwara, H., Ichihara, H., Hashimoto, T., Koyama, T., Utsugi, M., Inoue, H., Sonoda, T., Ogawa, Y., Resistivity structure around the Aira caldera, SW Japan, inferred from the magnetotelluric measurements, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター (鹿児島県), 2013年7月23日.
- ② 神田 径, 笠谷 貴史, 八木原 寛, 市原 寛,

橋本 武志, 小山 崇夫, 宇津木 充, 井上 寛之, 園田 忠臣, 小川 康雄, 始良カルデラ周辺の比抵抗構造, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県), 2013年5月19日.

- ③ 神田 径, 小川 康雄, 高倉 伸一, 小山 崇夫, 橋本 武志, 小森 省吾, 園田 忠臣, 佐藤 泉, 井上 直人, 宇津木 充, 桜島火山の三次元浅部比抵抗構造, 2012年度 Conductivity Anomaly研究会, 石岡市中央公民館 (茨城県), 2013年1月10日.
- ④ 神田 径, 小川 康雄, 高倉 伸一, 小山 崇夫, 橋本 武志, 小森 省吾, 園田 忠臣, 佐藤 泉, 井上 直人, 宇津木 充, 桜島火山の三次元浅部比抵抗構造, 日本火山学会2012年秋季大会, エコールみよた (長野県), 2012年10月14日~2012年10月15日.
- ⑤ 神田 径, 小川 康雄, 高倉 伸一, 小山 崇夫, 橋本 武志, 小森 省吾, 園田 忠臣, 佐藤 泉, 井上 直人, 宇津木 充, 桜島火山における浅部比抵抗構造調査2011, 日本地球惑星連合2012年大会, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県), 2012年5月24日.
- ⑥ Kanda, W., Kasaya, T., Yakiwara, H., Ichihara, H., Hashimoto, T., Koyama, T., Utsugi, M., Ogawa, Y., Tank, S.B., Kaya, T., Boonchaisuk, S., Hartkorn, O. A., Resistivity structure around the Aira caldera, SW Japan, inferred from the magnetotelluric measurements, IUGG 2011 General Assembly, メルボルン(オーストラリア), 2011年07月03日.
- ⑦ 神田 径, 笠谷 貴史, 八木原 寛, 市原 寛, 橋本 武志, 小山 崇夫, 宇津木 充, 井上 寛之, 園田 忠臣, 小川 康雄, タンクブレント, カヤチュライ, ボーンチャイスク ソングフン, ハートコルンオリバー, 始良カルデラおよび周辺における電磁気構造調査 (3), 日本地球惑星科学連合2011年大会, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市), 2011年5月23日.
- ⑧ 神田 径, 笠谷 貴史, 八木原 寛, 市原 寛, 橋本 武志, 小山 崇夫, 宇津木 充, 井上 寛之, 園田 忠臣, タンクブレント, カヤチュライ, 小川 康雄, 始良カルデラおよび周辺における電磁気構造調査(2), 日本火山学会 2010 年秋季大会, 京都大学 (京都府), 2010 年 10 月 9 日.
- ⑨ 神田 径, 笠谷 貴史, 八木原 寛, 市原 寛, 橋本 武志, 小山 崇夫, 宇津木 充, 井上 寛之, 園田 忠臣, タンクブレント, カヤチュライ, 小川 康雄, 始良カルデラおよび周辺における電磁気構造調査(序報), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会,

幕張メッセ国際会議場（千葉県），2010年5月25日。

- ⑩ 神田 径, 小川 康雄, 笠谷 貴史, 市原 寛, 八木原 寛, 橋本 武志, 小山 崇夫, Bulent Tank, Tulay Kaya, 宇津木 充, 井上寛之, 始良カルデラおよび周辺における電磁気構造調査(序報), 2009年度 Conductivity Anomaly研究会, 2010年2月16日, 東京大学地震研究所(東京都).

[その他]

ホームページ等

<http://www.ksvo.titech.ac.jp/~kanda/index.files/Page1349.htm>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

神田 径 (KANDA WATARU)

東京工業大学・火山流体研究センター・准教授  
研究者番号：00301755

### (2)研究分担者

橋本 武志 (HASHIMOTO TAKESHI)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70283588

八木原 寛 (YAKIWARA HIROSHI)

鹿児島大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60295235

笠谷 貴史 (KASAYA TAKAFUMI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任

研究者番号：90373456

小川 康雄 (OGAWA YASUO)

東京工業大学・火山流体研究センター・教授

研究者番号：10334525

小山 崇夫 (KOYAMA TAKAO)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：00359192

(H21～H23年度; H24:研究協力者)

### (3)連携研究者

宇津木 充 (UTSUGI MITSURU)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：10372559

市原 寛 (ICHIHARA HIROSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任

研究者番号：90553074