

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

ア. マグマ上昇・蓄積過程

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-2) 火山噴火予測システム

ア. 噴火シナリオの作成

(5) 本課題の5か年の到達目標：

本研究の目標は、マグマの蓄積期にある桜島を対象に、多項目の5年にわたる長期観測に基づいてカルデラ下におけるマグマの蓄積に伴うその量の推移及び桜島南岳直下へのマグマの移動の過程を把握した上で、火山体構造とその時間変化をあわせ考慮し、桜島のマグマ蓄積・移動・上昇モデルを構築し、今後起こり得る活動について予測することにある。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成 21 年度

火山性地震の稠密観測を桜島及び周辺南九州域において開始する（海域を含む）。GPS 連続観測点の増設を行う。また、地盤変動観測・重力測定・火山ガス放出量、噴出物の分析などの多項目観測を実施する。地震波による反射法探査を実施し、人工地震探査（平成 20 年度）の結果と比較して構造の時間変化を把握する。

平成 22 年度

火山性地震稠密観測及び GPS 観測を継続し、地盤変動観測・重力測定・火山ガス放出量、噴出物の分析などの多項目観測を繰り返す。

平成 23 年度

火山性地震稠密観測及び GPS 観測を継続し、地盤変動観測・重力測定・火山ガス放出量、噴出物の分析などの多項目観測を繰り返すことにより、火山体内及び周辺の応力状態の分布と時間変化を把握し、マグマの蓄積・上昇モデルを構築する。また、空中磁気測量、MT 探査を実施し、平成 19 年度の結果と比較して比抵抗構造の時間変化を把握する。

平成 24 年度

火山性地震稠密観測及び GPS 観測を継続し、地盤変動観測・重力測定・火山ガス放出量、噴出物の分析などの多項目観測を繰り返し、マグマの蓄積・上昇モデルの修正を行う。

平成 25 年度

トモグラフィー的手法による火山体構造探査を行い、平成 20 年度に実施予定の火山体構造探査によって得られた構造と比較し、その時間変化に基づいて、多項目観測から得られたマグマ蓄積・移動のモデルの統合化を図る。モデルに基づいて活動の評価と予測を行う。

(7) 平成 24 年度成果の概要：

2006 年 6 月に噴火活動が再開した桜島の昭和火口における噴火活動は年々爆発回数が増加し、長期的な活発化の傾向にある。24 年度は昭和火口における噴火活動再開後のマグマの蓄積・上昇と放出との関係について地震、地盤変動観測、重力測定、火山ガス放出量、噴出物の分析、地下構造などの多項目観測の結果から考察するとともに、23 年度に実施した地球電磁気学的調査に基づき構造変化を求めた。

昭和火口の爆発的噴火(空振振幅 10Pa 以上)は 2008 年 2 月から発生し始めたが、急激に発生回数が増加したのは 2009 年以降である。活動のピークは 2009 年 12 月～2010 年 3 月、2011 年 2 月、2012 年 1 月、2013 年 1 月以降と 4 回あり、およそ 1 年ごとに消長を繰り返している。爆発回数が増加する時期はハルタ山観測坑道に設置された伸縮計において膨張ひずみ、傾斜計において中央火口丘(南岳～北岳)側が隆起する傾斜変化が観測され、爆発回数が減少する時期は収縮・沈降の地盤変動が観測された(図 1)。傾斜ベクトルからは地盤変動を励起する圧力源の位置は北岳付近の深さ 6km と推定される。また、GPS 観測からも北岳付近の圧力源が求められた(図 2)。火山灰放出量を考慮してマグマの供給率を見積もって見たところ、爆発回数が多く、火山灰放出量が多い時期にはマグマ供給率が増加していることが再度確認できた。噴火活動が活発な時期に火山体が隆起・膨張することは、マグマの蓄積と放出を同時に行っていることを意味し、開口型の火道を持つ桜島の昭和火口での活動の特徴といえる。一方、少ない時期は、マグマの供給はほぼ停止し、それまでに蓄積されたマグマが放出されている。

マグマ供給率の大きい貫入期と放出期を繰り返していることは、他の観測項目とも整合的である。火山灰付着成分の水溶性成分の Cl/S モル比はマグマ供給率が大きい貫入期、特にその初期において大きい値を取り、高温のマグマが供給されたことが示唆される。また、SO₂ の放出量は貫入期において増加している。また、黒神観測井の温泉ガス中の CO₂ 濃度は貫入期に増加する。さらに、貫入期においては噴出物の分析から玄武岩質マグマが関与した SiO₂ の少ないマグマが供給されていることが指摘できる(北大課題研究 1004 と連携した研究)。

1 年ごとに繰り返される変化に加え、より長期間の変化についても考察した。桜島への百年間の平均的マグマ供給率 1 千万 m³/年を上回る供給率が、1995 年以降の GPS 観測データでは、1998 年～1999 年に観測された。昭和火口噴火再開以降では、2009 年後半～2010 年初め、2011 年 8 月～2012 年 2 月に検出された。2000 年から 2009 年までのマグマ供給率は 400 万 m³/年程度に低下したが、2009 年以降は、長期的に見てもマグマの供給率が桜島の平均的なレベルに戻っている。2009 年秋以降、爆発回数が急激に増加している。それに前駆して観測された温泉ガス中の H₂、CO₂ の急激な増加は、その後は減少傾向が続いている。また、噴出物の分析により認められる玄武岩質マグマの関与は、その程度を 2010 年以降弱めている(北大課題研究 1004 と連携した研究)。

一方、火山灰付着成分水溶性成分の Cl/S モル比は長期的には増加傾向にある(図 3)。これは、高温のマグマが浅部まで上昇していることを意味し、しかもその量が増加していることを意味し、噴火活動の継続による火道の拡大が示唆される。

SO₂ 放出量は 2011 年 12 月以降、高いレベルにある(図 4)。これは昭和火口に加え、南岳の火口からも多量の SO₂ 放出が再開したためである。2012 年 7 月 24 日には南岳でおよそ 2 年ぶりに爆発が発生した。この爆発の規模は、1970 年代後半から 1990 年代初めの南岳活動期の爆発の規模の大きいものに位置付けられ、噴煙は 5000m 以上の高度に達し、30 万トンの火山灰が放出された。これに前駆して 21 時間前から隆起・膨張が捉えられた(図 5)。体積増加量は 10⁵m³ であり、昭和火口爆発に前駆する

地盤変動の体積変化量の 10^4m^3 よりも 1 桁大きい。このことは、前駆する地盤変動を励起する圧力源の体積変化量とその速度がその後に発生する噴火の規模を判断するために指標となることを意味する。

2010 年に実施した広帯域 MT 観測のデータを解析し、桜島の 3 次元比抵抗構造が求められた (図 6)。これによると北岳の下 3-5km の深さに顕著な低比抵抗部分が認められた。比抵抗モデルについては更に慎重に検討しなければならないが、この低比抵抗部分は地盤変動観測により求められた圧力源の位置と一致しており、北岳の下のマグマだまりを見ている可能性が高い。2008 年以降、毎年、繰り返してきた反射法地震探査により、桜島の北東部から北部に顕著な反射断面を検出できているが、2010 年以降は、検出される反射断面が少なくなっている (図 7)。このことは、2009 年以降頻繁に噴火が発生し、それに対応したマグマの北岳下への貫入の繰り返しの繰り返しにより、マグマがより上昇しやすくなったものと解釈できる。一方、2011 年に実施した空中磁気測量により、前回、測量を実施した 2007 年からの変化として昭和火口周辺で顕著な磁化の増加が検出できていたが、これは火口周辺への噴出物の堆積に伴う磁化の獲得により定量的に説明できることが確かめられた。2007 年と 2011 年の火口周辺における DEM を用いて噴出物量の増加分による磁化増加を除去したところ、磁化強度は減少しており、昭和火口下では蓄熱が進行していることが分かった (図 8)。

(8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Alanis, P., H. Miyamachi, H. Yakiwara, K. Goto, R. Kobayashi, T. Tameguri, and M. Iguchi, 2012, Seismic velocity structure of the crust beneath the Aira caldera in southern Kyushu by tomography of travel times of local earthquake data, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **57**, 227-234.

井口正人, 2012, 桜島における火山灰放出量予測に関する研究, 京都大学防災研究所年報, **55B**, 169-175.

井口正人, 2012, 桜島火山の噴火活動—2011 年 7 月～2012 年 6 月—, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 1-6.

井口正人・平林順一, 2012, 桜島・黒神における温泉ガス濃度 (2011 年・2012 年), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 87-90.

井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫, 2012, 桜島昭和火口噴火開始以降の GPS 観測 (2010 年～2011 年), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 47-53.

Iguchi, M., 2013, Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58** (in press).

Iguchi, M., T. Tameguri, Y. Ohta, S. Ueki, and S. Nakao, 2013, Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011 *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58** (in press).

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・Nurnaning Aisyah・Aditya Sebastian Andreas, 2012, AMT 法による桜島火山の浅部比抵抗構造調査 2011, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 71-78.

Kanda, W., et al., 2013, Shallow resistivity structure of Sakurajima volcano revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58** (in press).

松本亜希子・中川光弘・宮坂瑞穂・井口正人, 2012, 岩石学的特徴からみる、桜島火山の活動とその評価-2006 年 6 月～2012 年 4 月の昭和火口の活動について-, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 109-118.

Matsumoto, A., M. Nakagawa, M. Miyasaka and M. Iguchi, 2013, Temporal variations of the petrological features of the juvenile materials since 2006 from Showa crater, Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58** (in press).

Miyamachi, H. et al., 2013, Shallow velocity structure beneath the Aira caldera and Sakurajima volcano as inferred from refraction analysis of the seismic experiment in 2008, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58** (in

press).

- 味喜大介・宇都浩三・Nguyen HOANG・石原和弘, 2012, 古地磁気と全岩化学組成から見た桜島火山南岳南西斜面に分布する溶岩流の噴出年代, 京都大学防災研究所年報, **55B**, 177-181.
- 森 俊哉, 2012, 昭和火口と南岳火口の火山ガス HCl/SO₂ 比の推移 (2), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 91-99.
- 野上健治・井口正人・味喜大介・為栗健・山本圭吾・園田忠臣・佐藤泉, 2012, 桜島昭和火口における噴火活動と地球化学的観測研究?火山灰水溶性成分及びガス放出量による噴火活動評価 2009~2012?, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 105-107.
- 大久保修平・田中愛幸・山本圭吾・井口正人・今西祐一・渡邊篤志・坂守, 2012, 桜島火山における絶対重力観測 (3), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成 23 年度分報告書, 65-70.
- Okubo, S. et al., 2013, Absolute gravity variation at Sakurajima volcano from April 2009 through January 2011 and its relevance to the eruptive activity of Showa crater, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **58** (in press).
- 嶋野岳人・井口正人・味喜大介, 2012, 桜島で連続採取した火山灰の分光測色による活動評価指標の検討, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 101-104.
- 為栗 健・井口正人・園田忠臣・市川信夫, 2012, 桜島火山における火山性地震の震源分布 (2011 - 2012 年), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 7-11.
- 筒井智樹・他, 2012, 桜島火山における反復地震探査 (2011 年観測), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成 23 年度分報告書, 25-38.
- Tsutsui, T. et al., 2013, Structure of northeastern Sakurajima, south Kyushu, Japan, revealed by seismic reflection survey, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **58** (in press).
- 植木貞人・太田雄策・出町知嗣・井口正人・園田忠臣・市川信夫, 2012, 桜島火山山腹における GPS 連続観測用電源の降灰対策, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 55-58.
- 宇津木充・井上寛之・神田 径・橋本武志・井上直人・小森省吾・井口正人・味喜大介, 2012, 桜島火山におけるくり返し空中磁気観測 (2007-2011 年), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 79-86.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・横尾亮彦・吉川 慎・井上寛之・堀田耕平・松島 健・内田和也・中元真美, 2012, 水準測量による桜島火山の地盤上下変動 (2010 年 11 月~2011 年 11 月), 京都大学防災研究所年報, **55B**, 155-161.
- 山本圭吾・他, 2012, 水準測量による桜島火山の地盤上下変動 (2010 年 11 月~2011 年 11 月), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 39-45.
- 山本圭吾・他, 2012, 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定 (2011 年 10 月), 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 59-64.
- Yamamoto, K. et al., 2013, Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **58** (in press).
- 八木原寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗健・井口正人, 2012, 鹿児島湾奥部海域における繰り返し海底地震観測, および陸上地震観測網による桜島火山周辺の広域地震活動, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成 23 年度分報告書, 13-23.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

火山性地震稠密観測・地盤変動観測により周辺の応力状態の分布と時間変化の把握精度を向上させる。屈折法探査を実施し、平成 20 年度の結果と比較するとともに、毎年繰り返してきた反射法地震探査を実施し、本研究計画実施中の構造変化と火山活動の関係について考察する。火山ガス放出量、火山灰放出量、地盤変動圧力源の体積変化量からマグマフラックス推移についてまとめる。火山灰水溶性成分の分析と火山灰等の岩石学的分析に基づいて噴出物の化学的特性の時間変化について明らかにする。以上ことの相互関係に基づき、開口型火道を持つ火山におけるマグマ供給・上昇過程モデルを取りまとめる。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

京都大学防災研究所 井口正人・山本圭吾・為栗健・神田径・石原和弘・味喜大介

他機関との共同研究の有無：有

北海道大学大学院理学研究科 大島弘光（代表者のみ）

秋田大学工学資源学部 筒井智樹（ " ）

東北大学大学院理学研究科 植木貞人（ " ）

東京大学地震研究所 森田裕一（ " ）

東京大学大学院理学系研究科 森 俊哉（ " ）

東京工業大学火山流体研究センター 野上健治（ " ）

名古屋大学大学院環境学研究科 中道治久（ " ）

京都大学大学院理学研究科 大倉敬宏（ " ）

九州大学大学院理学研究院 清水 洋（ " ）

鹿児島大学理学部 宮町宏樹（ " ）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：iguchi@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ kazan/default.html

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：井口正人

所属：京都大学防災研究所火山活動研究センター

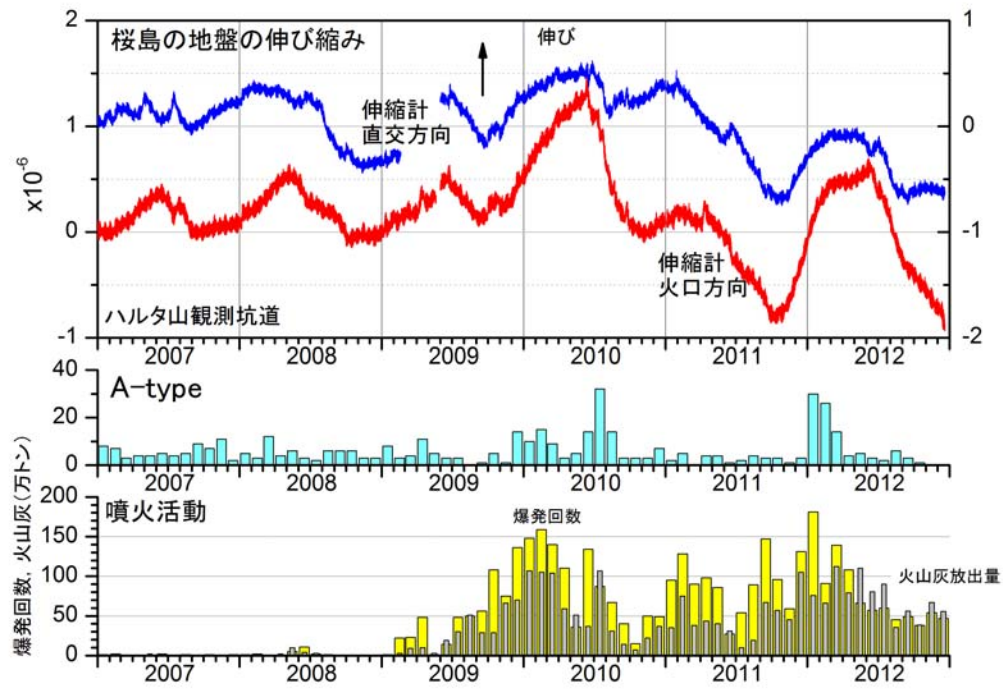


図1 ひずみ変化と噴火活動の関係

上段：ハルタ山観測坑道 (火口から 3.1km) におけるひずみ変化

中段：A 型地震の月別発生回数

下段：昭和火口における月別爆発回数及び火山灰放出量

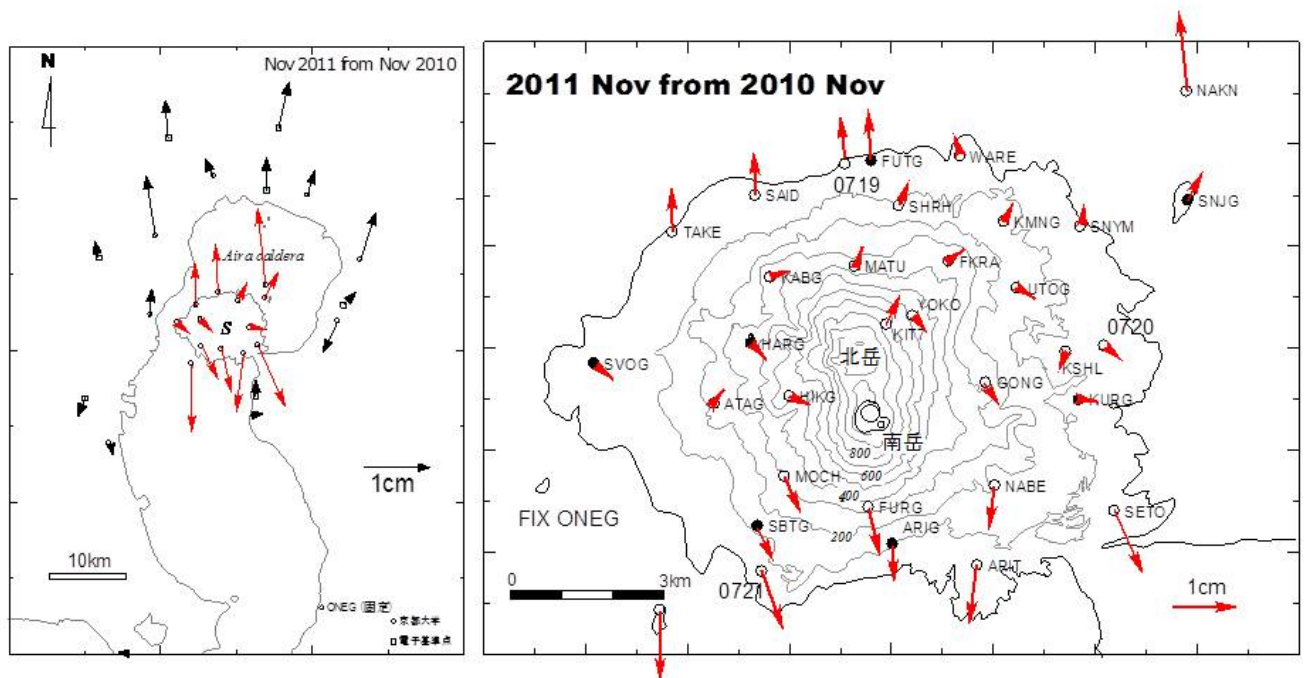


図2 GPSにより観測された桜島及び始良カルデラ周辺の水平変動

桜島を中心に南北方向に変位 (中央部で変位は小さい, 南部は南へ, 北部は北へ) 東西成分の変位が小さい. 開口割れ目の strike 方向は $N80^{\circ}$, 上端の深さは 5km, dip 角は 90° が得られた.

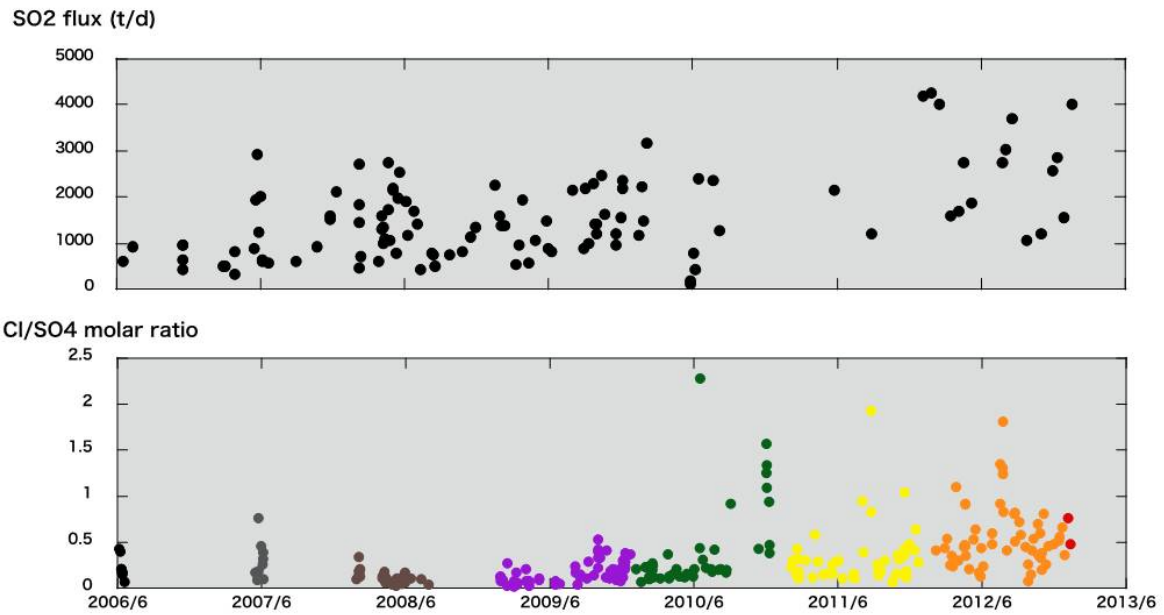


図3 火山灰の水溶性成分の Cl/S 比の時間変化

水溶性成分の変化，特に 2009 年以降の変化はそれ以前の変化と大きく異なる．2009 年からは噴火が頻発し，水溶性成分の Cl/S 比に上昇の兆しが見える．2010 年後半の Cl/S 比の急増はマグマの地下浅部への貫入を示唆する．これ以降，Cl/S 比の急増が頻発するようになり，火口までのパスが形成され，open conduit になっている．SO₂ 放出量の変化 (図 4) と最近 2 年間の Cl/S 比の変化は非常に良く似たトレンドを示しており，マグマの脱ガスが浅いところで起こっていて，時間差がないこともこのことを支持する．

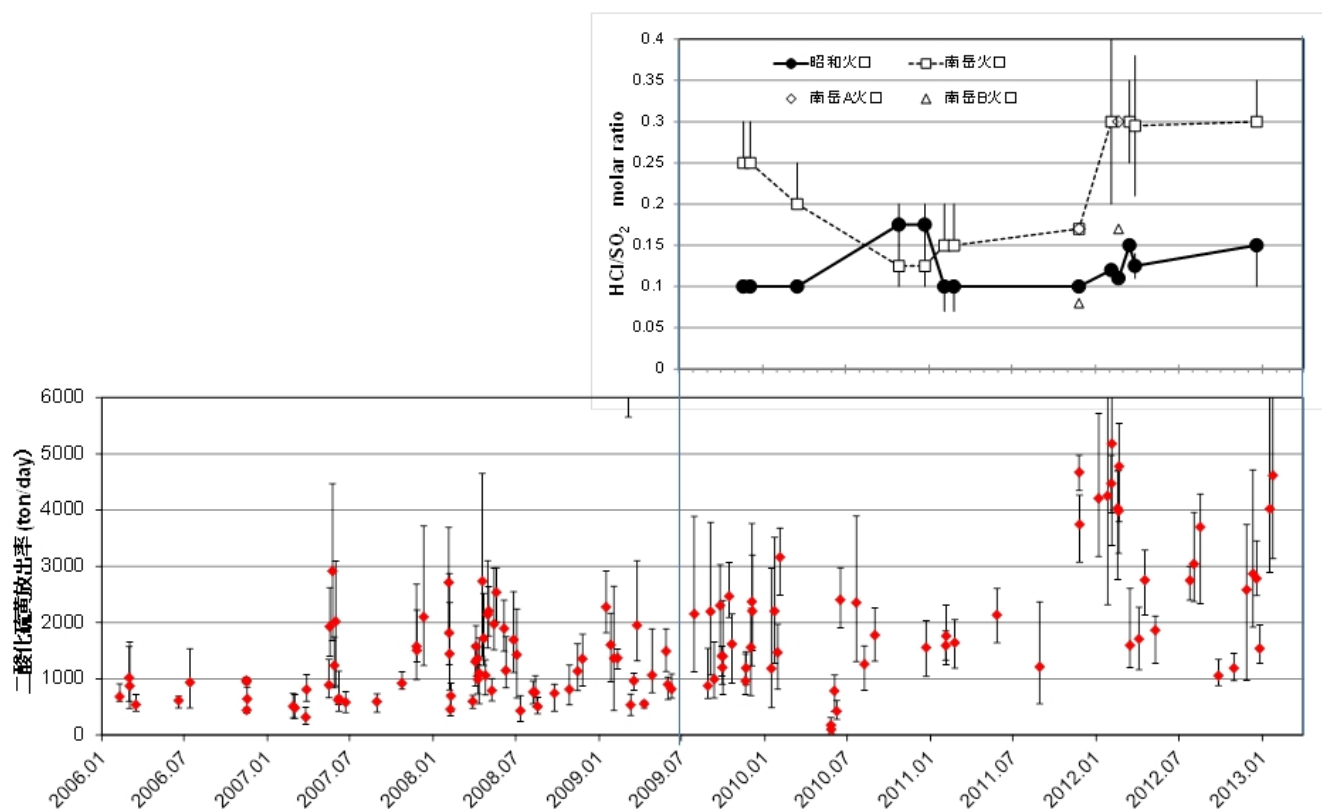


図4 二酸化硫黄放出率の推移と昭和火口・南岳火口の HCl/SO₂ 比の推移

二酸化硫黄放出率は2011年末以降3000ton/dayを超える頻度が高くなり、ガス放出率の高い状態が続いている。昭和火口の HCl/SO₂ 比は2009年後半以降0.1～0.15で推移し大きな変動は見られない。南岳火口の HCl/SO₂ 比は2012年以降、0.3程度と高い値が続いている。

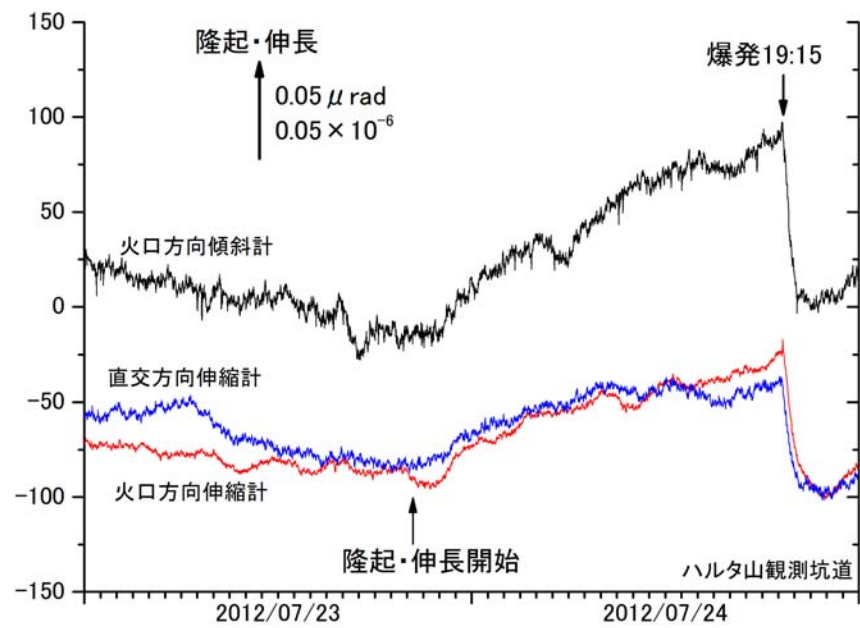


図5 2012年7月24日に発生した南岳の爆発に伴う地盤変動

爆発発生の21時間前から地盤変動が始まった。ハルタ山観測坑道(南岳火口から3.1km)において観測された傾斜及び伸縮変化を示す。

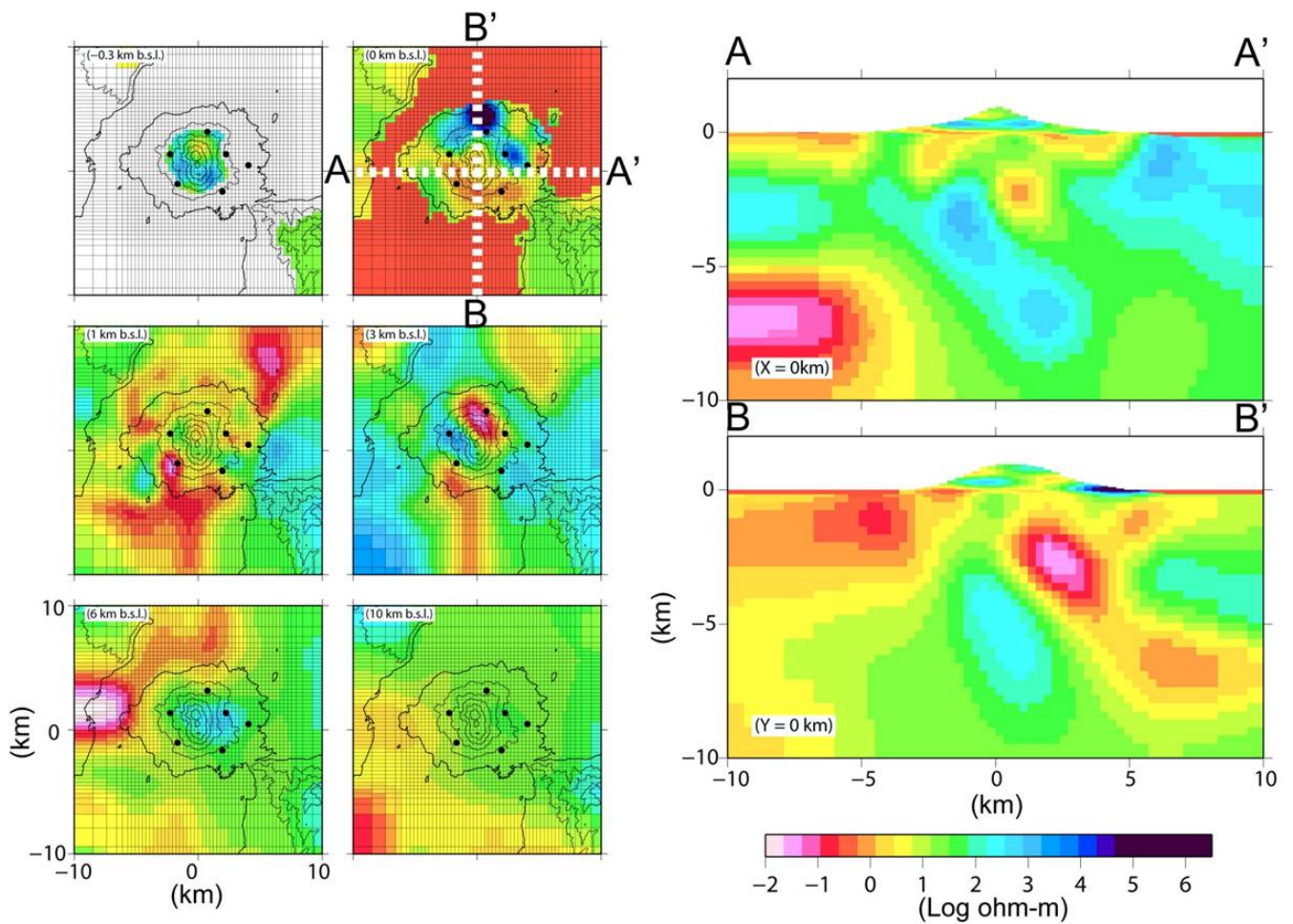


図6 広帯域 MT 観測による 3 次元比抵抗構造

2010 年 2～6 月に 6 点で行った広帯域 MT 連続観測データを使用して、3 次元比抵抗構造を決定した。期間全体のデータをスタックし精度の高いインピーダンス及び地磁気変換関数を求め、それらを 3 次元比抵抗インバージョンコード (Siripunvaraporn and Egbert, 2009) を用いて逆解析した。モデルでは空気を $10^8 \Omega \text{ m}$ のブロックで近似し、地形を階段状に表現した。海水及び海底地形もモデルに組み込み、陸地の初期比抵抗値を $1000 \Omega \text{ m}$ としてインバージョンを実行した。インピーダンスに 10 %、地磁気変換関数に 5 %のエラーバーを与えインバージョンを行った結果、RMS 残差が 1.49 まで下がった。得られた特徴的な構造は、北岳付近地下 3～5 km の低比抵抗体である。桜島島外の構造については、今後検討を要する。

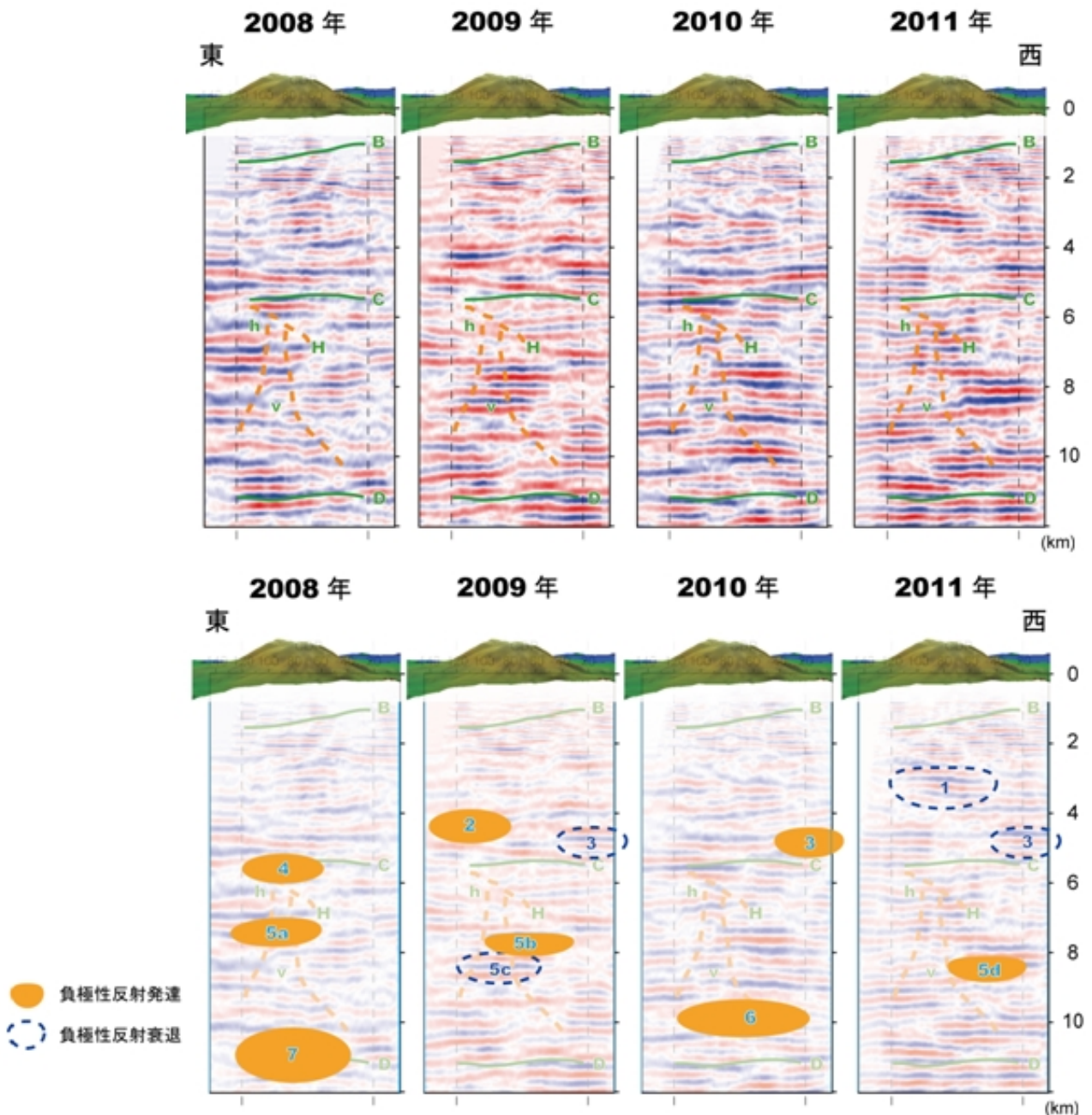


図7 地震反射断面の変化とその解釈

上：差分地震反射断面

記号 B~H, h はそれぞれ特徴的な背景構造の反射パターンを示す。先行観測期間を含む 2011 年までの 4 枚の差分地震反射断面では 4km 以深でマグマの貫入に関連した地震波反射の消長が認められた。特に桜島北東部では山体膨張期にあった 2008 年から 2009 年にかけてマグマの貫入に関連した地震波反射が浅くなる傾向が認められる。一方、2010 年以降は同じ性質をもつ地震波反射変化の平均深度はそれまでより深く現れる傾向がある。

下：その解釈

1~7 は変化領域を示す。領域 5a~5d は特に変化が集中する領域である。変化領域はマグマの動きとの関連があると考えられる。領域 5a, 5b, 5d では 2009 年以降負極性が発達する傾向にある。(負極性反射とは入射した波の位相が逆転して反射することを示すが、負極性反射が発達する場所ではガスなどの流体等マグマに関連する物質が増加している可能性を示唆する。) その一方で領域 1, 3, 5c では負極性反射の衰退が見受けられる。

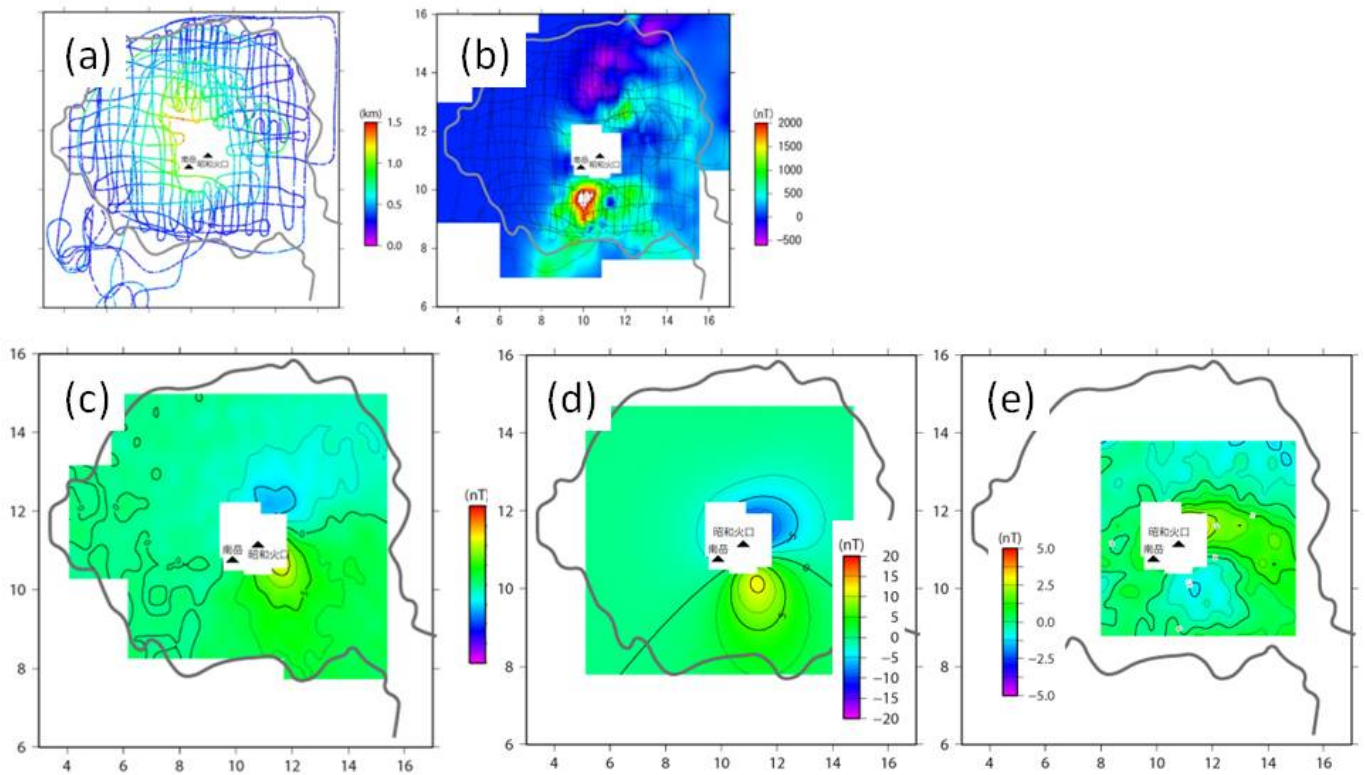


図8 2011-2007 年空中磁気データの比較から得られた磁気異常の時間変化

(a) 桜島・島内で行われた 2011 年空中磁気観測航跡図

(b) 得られた磁気異常分布

(c) 2007 年からの磁気異常時間変化

(d) 地形変動から見積もられた磁場変化量

(e) 2007 年からの磁気異常時間変化に地形変動から見積もられた磁場変化量補正した磁気異常変化