

( 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) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要：

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。25 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，噴出物の分析を継続するとともに，人工地震探査を行い，平成 20 年を基準とする地下構造の変化を抽出した。

人工地震探査は桜島および始良カルデラ周辺において 11 点の爆破と 370 点の地震観測点により実施した。測線は可能な限り 2008 年の測線を再現した。詳細な解析は次年度以降となるが，2008 年および 2013 年に発生させた人工地震の観測波形の相関を調べたところ，桜島の中央火口丘から南東側にかけての観測点において相関係数が小さく，桜島中央火口丘下浅部において地下構造に変化があったことが示唆される(図 1)。

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，特に 10 月以降である。爆発的噴火活動のピークは 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(図 2)。桜島昭和火口における噴火活動期におけるマグマ供給系の特徴は以下のようにまとめられる。

(1) 桜島の主マグマ溜りがあるとされる始良カルデラ下におけるマグマの蓄積は，昭和火口における爆発的噴火の継続にもかかわらず，依然として進行している。(2) 2006 年に始まった昭和火口の噴火活動の大きな変化があったのは 2009 年であり，これに前駆または同期して多くの観測項目において顕著な変化が観測された。(3) 最大の特徴は桜島中央火口丘へのマグマの供給と噴火によるマグマ放出が同時進行していることである。2009 年以降，浅部マグマ供給系が時間をかけてゆっくりと変化してきた。

1) 水準測量により，始良カルデラ西縁の BM2474 における地盤の隆起は依然として継続しており，マグマの蓄積が進んでいることが分かった(図 3)。水準測量及び GPS 観測から求められる地盤変動源(茂木モデル)の位置はこれまでと同様に始良カルデラの中央部の深度 10km 付近である(図 4 および図 5)。圧力源における体積増加率は 800～900 万  $m^3$ /年程度であり，大正噴火(1914 年)以降のマグマの平均的供給率とされる 1000 万  $m^3$ /年程度である。

2) 図 2 に示すように 2009 年の秋以降，爆発回数が急増したが，これに同期して桜島島内の膨張を示す GPS による基線長の伸長，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た(図 6)。傾斜ベクトルの分布から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，GPS 観測からも北岳付近の圧力源が求められた(図 7)。また，桜島東部の黒神観測井の温泉ガス中の  $CO_2$  濃度および  $H_2$  濃度は爆発活動激化に先行して 2009 年 3 月～7 月に急増した。2009 年以降の昭和火口活動期において急激な増加があったのはこの時期だけである。同様に，2009 年後半の爆発活動激化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  $SiO_2$  の少ないマグマが供給されていることが指摘でき，2010 年以降は玄武岩質マグマの関与の度合いが弱まっている(北大課題研究 1004 と連携した研究)。地下構造に大きな変化があったのも 2009 年である。毎年繰り返した相対重力測定の値に大きな変化はないが，2009 年のみ，顕著な比高変化がないにもかかわらず重力値が減少した。さらに 2008 年以降，毎年，繰り返してきた桜島東部から北部にかけての反射法探査による地下構造の変化をみみると顕著な変化があったのは 2009 年・2010 年ごろであることが分かった(図 8)。

3) 2009 年後半から 2012 年前半までは，地盤の隆起・膨張を伴って噴火活動が活発化し，地盤の沈降・収縮期には噴火活動が低下したが，2012 年の後半からは，噴火活動が低下している時期に隆起・

膨張，噴火活動の活発とともに沈降・収縮するようになった。このことは，2009 年後半から 2012 年前半までは桜島中央火口丘下にマグマが貫入してきたときはそのまま噴火によってマグマを放出していたが，2012 年後半以降は貫入してきたマグマをいったん蓄積し，その後，活発な噴火活動によって放出する様式に徐々に変化してきたことを意味する。噴火活動は継続しており，火道系の閉塞度が高くなったとは考えにくく，火道系の拡大によって噴火活動が活発化するのに要するマグマの蓄積に時間がかかるようになったと考えた方がよい。これを示唆するデータが火山灰に付着する水溶性の HCl と SO<sub>4</sub> のモル比であり，2009 年の爆発活動の活発化以降，増加のトレンドを示している（図 9）。このことは火道の拡大により熱フラックスが増大していることを示唆する。SO<sub>2</sub> の放出量も高いレベルにあり，2011 年末から 3000 トン/日を超えていることが多い。また，規模の大きい噴火では火山灰の中に火道角礫岩が検出され，火道拡大の直接的な証拠となっている（北大課題研究 1004 と連携した研究）。さらに，SO<sub>2</sub> 放出量は 2008 年前半、2009 年後半～2010 年始め、2011 年末以降はしばしば 2000 ton/day 以上のフラックスがみられ，特に 2011 年末から 3000ton/day 強にフラックスレベルが達することが多い（図 10）。このような火道系の拡大により個々の噴火の規模も大きくなっている。噴煙高度が 3000m を超える噴火は 2013 年 7 月以降，28 回発生しており，それ以前の 4 年間の 8 回よりはるかに多い。噴火に伴う地盤変動を励起した圧力源の体積収縮量の規模別頻度分布を調べたところ，2013 年 7 月以降，規模の体積変化量の大きいものが相対的に増加していることが明らかになった。このように，昭和火口における噴火活動は火道系の拡大により小規模爆発の多発からやや規模の大きい噴火に変化してきている。

遠隔 FTIR 測定により桜島火山の昭和火口と南岳火口の噴煙中の HCl/SO<sub>2</sub> 比をそれぞれ別けて測定を行った。その結果，両火口で異なる HCl/SO<sub>2</sub> 比をもち，通常南岳火口の方が高い値を持つ。南岳火口の HCl/SO<sub>2</sub> は通常 0.2 以上の値を持つが，2010 年後半から 2011 年末までは 0.2 以下で推移した。これは，南岳火口の活動度が低下していたときに対応し，南岳火口内でしばしば火口湖が報告されていたので，熱水系の影響と考えられる。一方，昭和火口の HCl/SO<sub>2</sub> 比は 0.1-0.175 と比較的安定して推移した。HCl/SO<sub>2</sub> 比 >0.15 だった 2010 年後半は噴火回数や火山灰総噴出量の少ない時期に対応しているが，その関係は明瞭ではない。この 5 年間，二酸化硫黄放出率は通常数百 ton/day から 2000ton/day の範囲で推移したが，2009 年後半～2010 年始め，2011 年末以降はしばしば 2000ton/day 以上のフラックスがみられた。特に 2011 年末からはフラックスレベルが上がり，3000ton/day を超える放出率が頻繁に観測されるようになった。

桜島の主たるマグマ溜りは始良カルデラ下にあるが，桜島の中央火口丘を構成する北岳および南岳の下にそれぞれ，マグマ溜りが推定された。地盤変動観測によれば，活動期に同期する地盤の膨張は桜島北部を中心とする圧力源の膨張が寄与している（図 7）。2010 年に実施した広帯域 MT 観測のデータを解析により得られた桜島の 3 次元比抵抗構造では，北岳の下 3-5km の深さに顕著な低比抵抗部分が認められ，北岳下の圧力源に対応する可能性がある。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 8）。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，個々の爆発に伴う地盤変動に関与する圧力源の位置は南岳下の深さ 4km 付近と昭和火口下 1km 付近に求められるので，個々の噴火活動については南岳下のマグマ溜りが関与すること，昭和火口は南岳下のマグマ溜りから南岳下に向かう中央火道系から枝分かれした細い火道によって接続されていることが類推できる。南岳に向かう火道と昭和火口に向かう火道は浅部において異なることは FT-IR 観測によってえられた HCl/SO<sub>2</sub> の比が南岳の方が常に高いことからわかる。昭和火口に向かう細い火道は 2009 年以降の噴火活動によって拡大を続けていることは先に述べたとおりである。

- ( 8 ) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：  
井口正人，2013，噴火微動を用いた火山灰放出量のモニタリング手法，京都大学防災研究所年報，56B，  
221-226.

- 井口正人, 2013, 桜島火山の噴火活動 2012年7月~2013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24年度分報告書, 1-8.
- 井口正人・平林順一, 2013, 桜島・黒神における温泉ガス濃度(2012年・2013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24年度分報告書, 71-74.
- 井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫・堀田耕平, 2013, 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測(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24年度分報告書, 49-54.
- 堀田耕平・大倉敬宏・井口正人, 2013, 1999年南岳山頂噴火活動および2006年昭和火口噴火活動再開に先行する桜島火山の地盤変動源について, 京都大学防災研究所年報, **56B**, 197-206.
- 宮坂瑞穂・中川光弘・吉本充宏・奥野充, 2013, 桜島火山におけるマグマ供給系の変化 - 始良カルデラ形成噴火以降のテフラ噴出物からの解析 -, 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24年度分報告書, 95-110.
- 森 俊哉, 2013, 昭和火口と南岳火口の火山ガス HCl/SO<sub>2</sub> 比の推移 (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24年度分報告書, 75-80.
- 野上健治・井口正人・味喜大介・為栗 健・山本圭吾・園田忠臣・関 健次郎・佐藤 泉, 2013, 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, 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24年度分報告書, 89-94.
- 大久保修平・山本圭吾・田中愛幸・井口正人・今西祐一・渡邊篤志・坂守, 2013, 桜島火山における絶対重力観測(4), 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24年度分報告書, 65-70.
- 太田雄策・井口正人・植木真人・出町知嗣, 2013, GNSSデータにもとづく噴煙柱検知方法の開発(序報) - 2012年7月24日桜島南岳火口における爆発的噴火への適用事例 -, 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24年度分報告書, 55-58.
- Shimano, T., et al., 2013, Development of an automatic volcanic ash sampling apparatus for active volcanoes, Bull. Volcanol., **75**, 773, doi:10.1007/s00445-013-0773-7.
- 為栗 健・井口正人, 2013, 桜島火山昭和火口の噴火に伴う前駆地震の特徴, 京都大学防災研究所年報, **56B**, 181-186.
- 筒井智樹・他, 2013, 桜島火山における反復地震探査(2012年観測), 京都大学防災研究所年報, **56B**, 207-220.
- 八木原 寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鉄朗・市川信夫・為栗 健・井口正人, 2013, 鹿児島湾奥部海域の繰り返し海底地震観測による桜島火山周辺の地震活動と上部地殻3次元地震波速度モデルとの比較, 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24年度分報告書, 15-24.
- 山本圭吾・大島弘光・前川徳光・植木真人・及川純・園田忠臣・大久保修平・田中愛幸・今西祐一・渡邊篤志・坂守・風間卓仁, 2013, 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定(2012年10月および11月), 平成24年度分報告書, 59-64.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫・大倉敬宏・横尾亮彦・吉川 慎・井上寛之・諏訪博之・松島 健・藤田詩織・神蘭めぐみ, 2013, 水準測量によって測定された桜島火山周辺域の地盤上下変動 2012年11月および12月測定の結果, 京都大学防災研究所年報, **56B**, 187-196.
- Kazahaya R., Mori T. and Yamamoto K., Separate Quantification of Volcanic Gas Fluxes from Showa and Minamidake Craters at Sakurajima Volcano, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, **58**, 183-189, 2013.

(9) 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・中道治久・山本圭吾・為栗健・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 山中佳子 ( " )  
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 ( " )

( 10 ) 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

( 11 ) 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

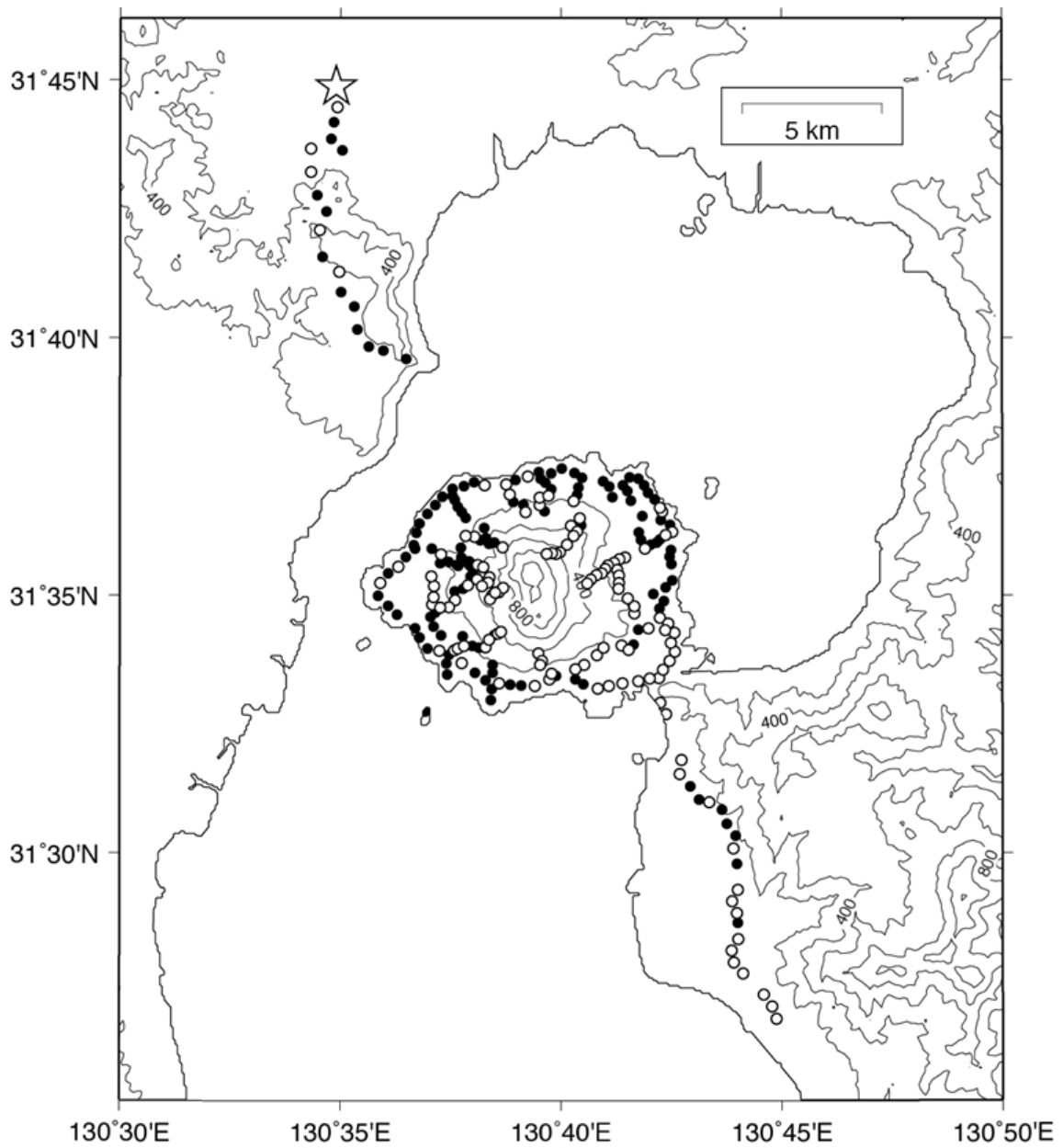


図1 2008年と2013年の発破S1による地震動波形(20秒間)の相互相関係数の分布(グレースケール). 過半数の観測点にて相関は0.8以上であるが、北岳・南岳・昭和火口周辺と桜島東南部では0.4~0.6と低い.

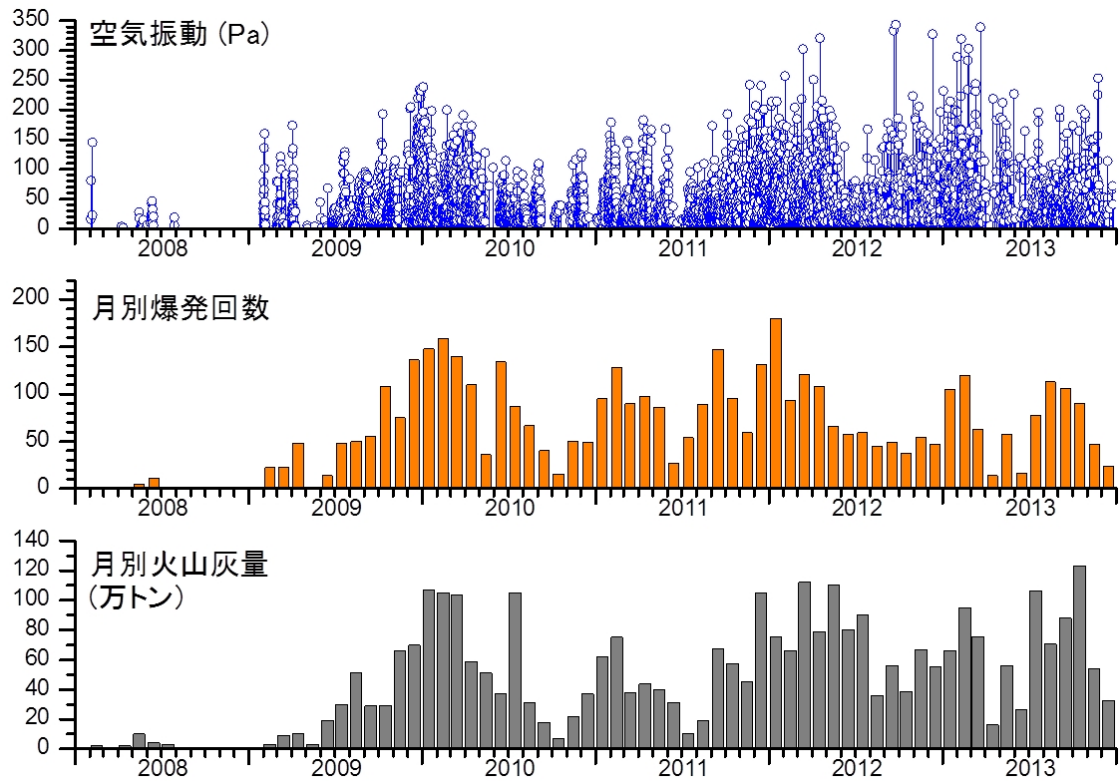


図2 桜島昭和火口における噴火活動の推移。  
 上段：爆発に伴う空気振動の振幅，中段：月別爆発回数：下段：月別火山灰放出量。

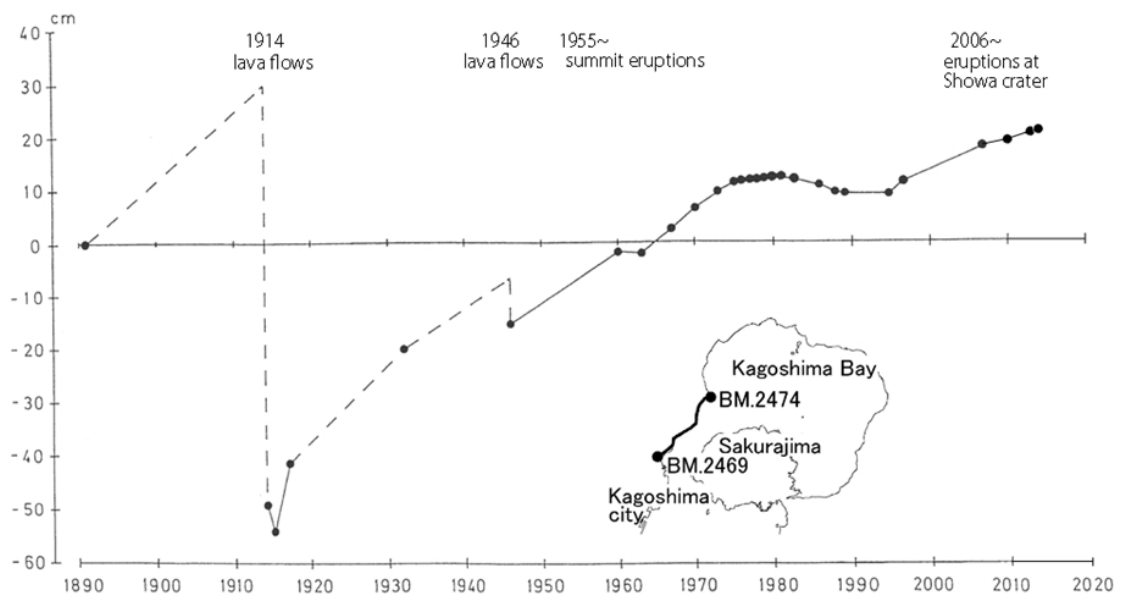


図3 BM2469を基準としたBM2474の比高の経年変化  
 1993年以降，始良カルデラの隆起が継続している。

# Pressure source (Mogi's model)

Data: 2007.10-12~2013.10-11

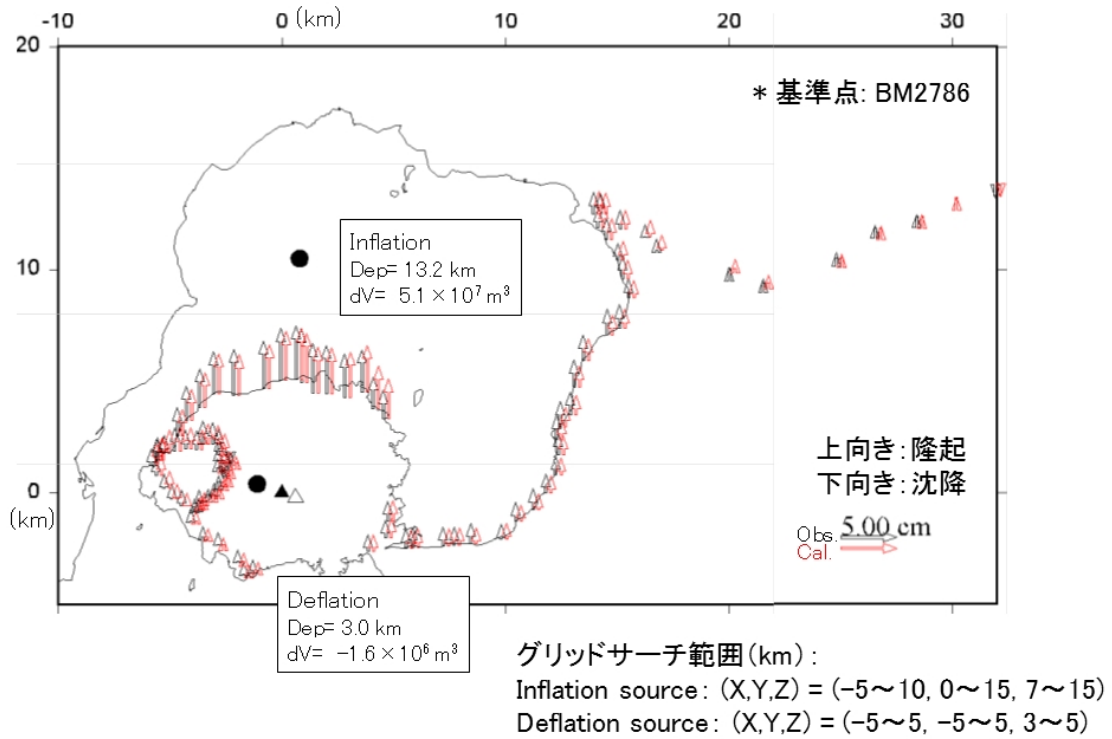


図4 水準測量から得られた上下変動から求めた圧力源・茂木モデル(2圧力源)の位置。

茂木モデル(2圧力源)を適用し、2007年10月-12月~2013年10月・11月の期間の上下変動量データから圧力源の位置を求めると、始良カルデラ中央部地下約13.2kmの深さに増圧源が、また桜島中央部直下約3.0kmの深さに減圧源が推定された。



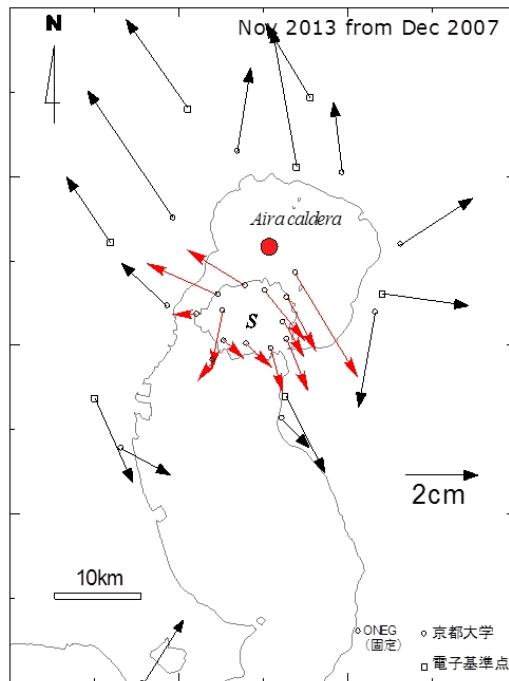


図5 2007年12月～2013年11月における桜島および始良カルデラ周辺の水平変動  
 主圧力源は上下変動と同様に始良カルデラの中央部に求められる。

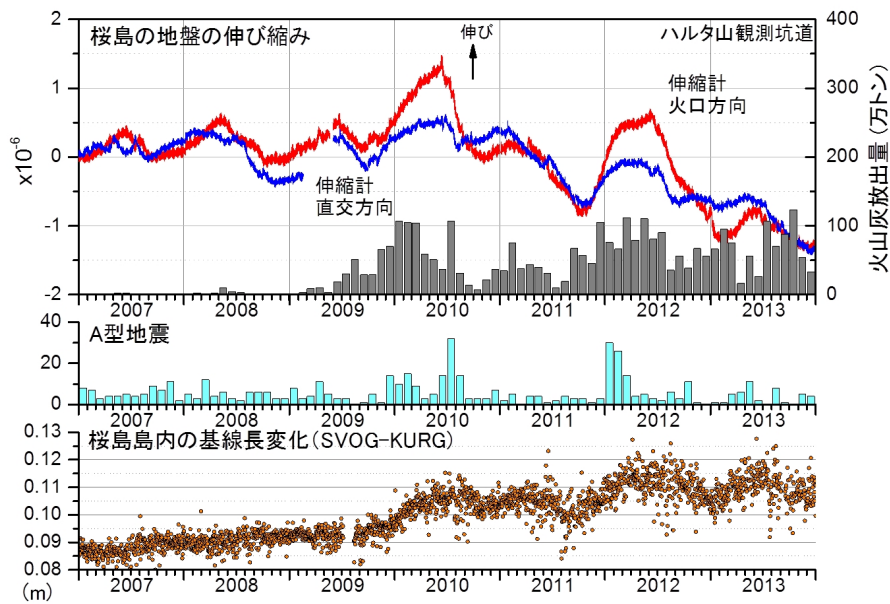


図6 噴火活動と地盤変動，地震活動の関係。  
 上段：ハルタ山観測坑道におけるひずみ変化と月別火山灰放出量．中段：A型地震の月別発生回数．下段：GPSによる桜島の東西方向の基線長変化．

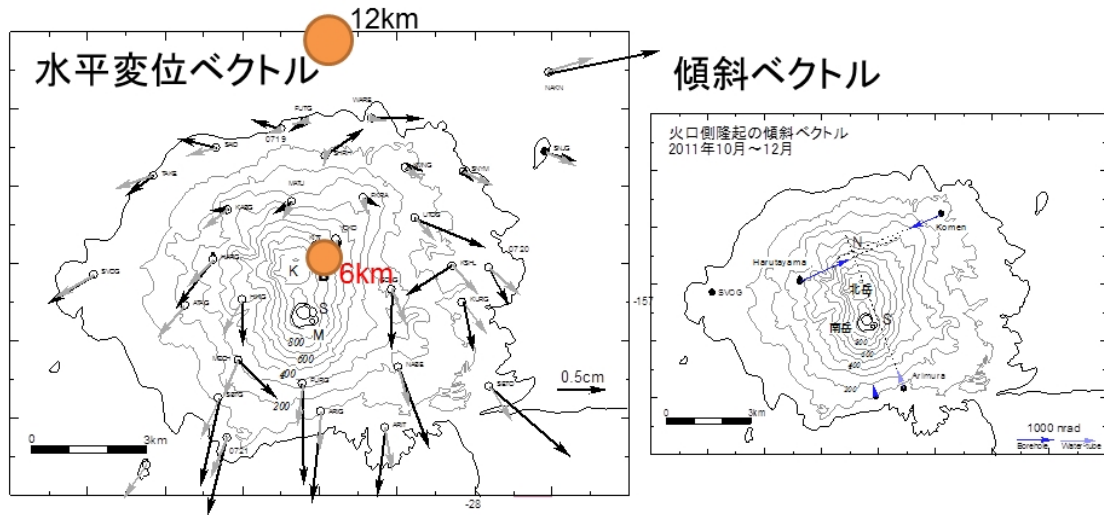


図7 昭和火口噴火活動活発期の初期における始良カルデラおよび桜島地盤変動（水平変動）と圧力源（茂木モデル・2圧力源）の位置

2009年11月から2010年4月までの桜島島内における水平変位ベクトルと圧力源の推定．始良カルデラ中央部の圧力源に加え，北岳下の深さ6kmにも圧力源が推定された．

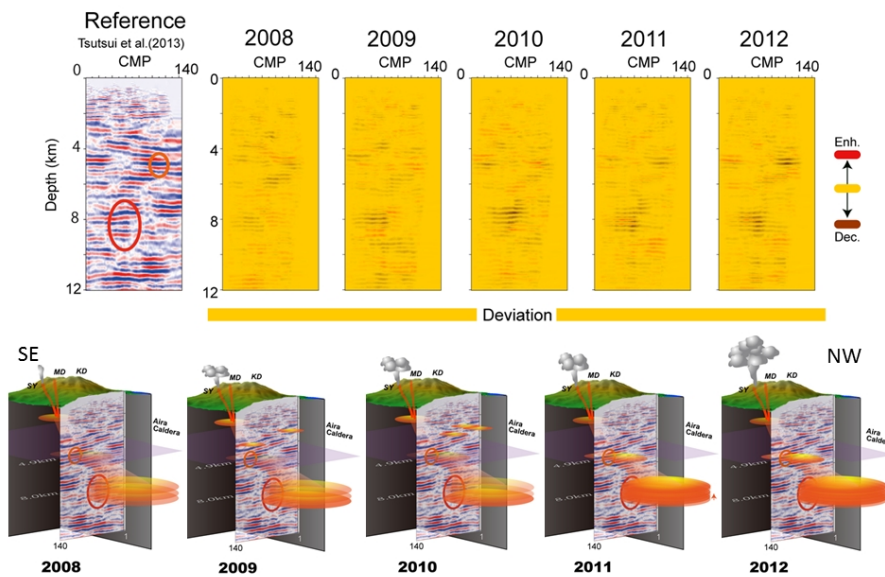
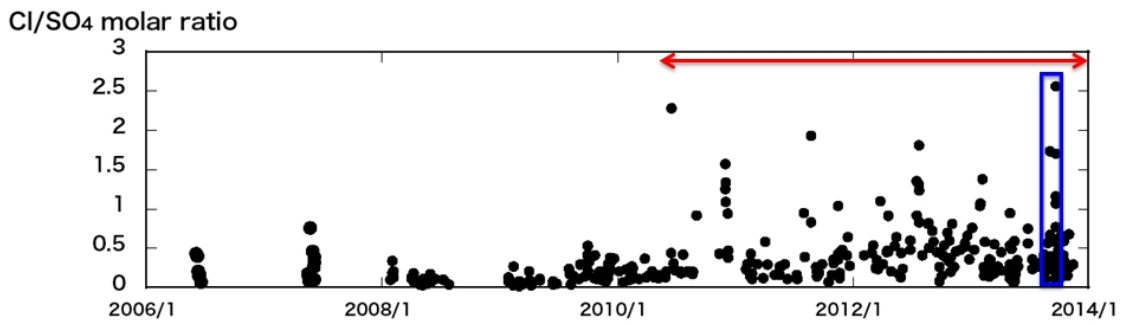


図8 2008年から2013年における桜島北部の地震波反射断面の時間変化．

この間の平均的な断面図から偏差によって上段に示す．また，その解釈を下に模式図として示す．赤い円盤はマグマに見立てた負極性反射体を表し，反射強度を反射体の透明度（透明＝弱い、不透明＝強い）で表現した．2009年から2010年にかけて，8km深でマグマの貯留が進むとともに，浅部へのガス浸入が発生すると推定される．2011年以降は8km深の反射面上昇が認められるとともに，4.9km深の不連続面付近にマグマの注入が進行している可能性が指摘される．



2010年後半からCl/SO4モル比が高い値を示し始める

マグマの火山体浅所への貫入が  
頻繁に起こり始めた

間隔が徐々に短くなっている

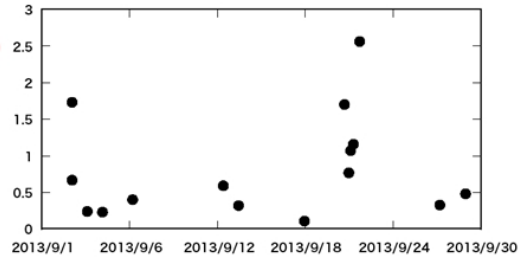


図9 火山灰付着水溶性成分の  $\text{HCl}/\text{SO}_4$  のモル比

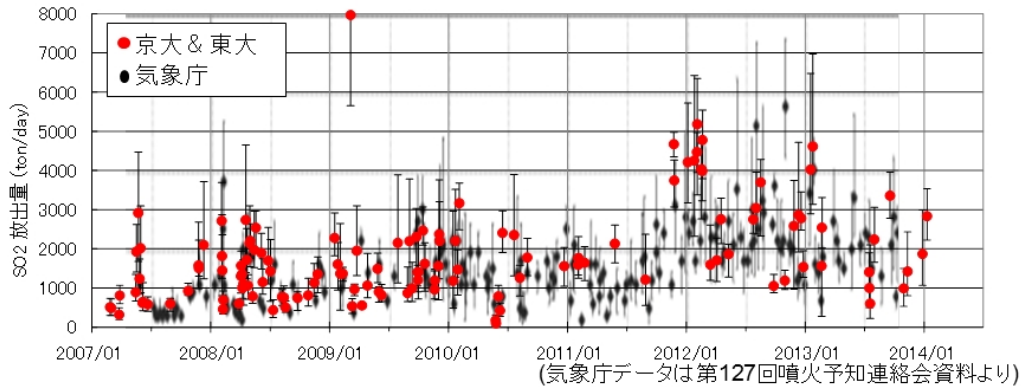


図10 二酸化硫黄ガスの放出率の時間変化 .

京大・東大のデータに気象庁データを重ねた . 2008 年前半、2009 年後半～2010 年始め、2011 年末以降はしばしば 2000 ton/day 以上のフラックスがみられる。特に 2011 年末からフラックスレベルが上がっている (しばしば 3000ton/day 強 )