

2 (2) (2 - 2) 火山噴火準備過程

「火山噴火準備過程」計画推進部会長 井口正人
(京都大学防災研究所)

火山噴火予知研究の目標は、噴火の時期、場所、規模、様式及び推移を予測することであるが、活動的で数多くの噴火履歴があり、多項目観測や各種調査が実施されている幾つかの火山であっても、観測と経験則により異常の原因が推定できる段階にとどまっている。これを、「現象を支配する物理法則を明らかにし、観測結果を当てはめて、将来の予測ができる段階」に引き上げるためには、マグマ供給系を含む地下の構造や状態の時間変化の把握によりマグマ上昇・蓄積過程と、地質学的調査研究に基づく噴火履歴の解明とマグマの発達過程を解明し、モデル化する必要がある。火山噴火準備過程研究計画では、「ア．マグマ上昇・蓄積過程」と「イ．噴火履歴とマグマの発達過程」の研究を二つの柱とし、両者をあわせて考察することにより噴火現象をモデル化し、それを導入した噴火シナリオの作成に資することを目的としている。

ア．マグマ上昇・蓄積過程

日本の多くの火山では火山性地殻変動を捕捉できる段階にある。例えば、気象庁[課題番号:7019]は陸域観測技術衛星だいちのSARデータを干渉画像解析し、十勝岳、有珠山など全国の13火山について火山性地殻変動をとらえた。

2011年1月26日に準プリニー式噴火が発生した霧島山新燃岳においては、噴火前の2009年12月からの約1年間に新燃岳の北東数kmにある球状のマグマ溜まりが体積にして約1500万 m^3 の膨張を示し、1月26日以降の約1週間の噴火により約1200万 m^3 の体積が減少した(図1)と推定されている。すなわち、噴火前に新たに蓄積されたマグマが一連の噴火イベントによっておおそ解消された形である(国土地理院[課題番号:6016])。

静穏期にある火山においても特徴的な膨張・収縮が繰り返されており、国土地理院[課題番号:6016]はGPSデータの解析により伊豆大島が膨張・収縮を繰り返しながら、2004年から2010年までに約1600万 m^3 の体積膨張したことを示した。また、東北大学[課題番号:1209]は、岩手山で地盤変動イベント(2009年10月～2010年4月)が発生し、その変動源は1998年活動初期の震源域の直下に位置することから1998年と同様に浅部へのマグマの供給が繰り返されていると推定している(図2)。

桜島においては地盤変動の様式がより複雑となっている。2006年6月には昭和火口において噴火活動が再開したが、2010年には1033回の爆発が発生し、670万トンの火山灰が放出されるなど活発化の傾向にあり、地盤変動様式の複雑さは、噴火活動が長期にわたり同時進行していることによる。2009年10月から2010年5月までの期間における地盤の隆起・膨張から推定されるマグマ供給量の増加(20万 m^3 /月→50万 m^3 /月)とともに爆発活動が活発化したが、2010年6月から10月までの期間では小規模な爆発は発生したが、地盤は急激に沈降・収縮し、マグマ供給はほぼ停止した(図3; 京都大学[課題番号:1809])。膨張・収縮が繰り返されたことは伊豆大島と類似しており、現在の桜島はさらに激しい噴火活動の準備期であることが示唆される。また、準備期といっても新燃岳のように顕著な噴火なしにマグマを蓄積し、それを一連の噴火により一挙に開放したものとも異なる。注目すべきは始良カルデラ内の深さ10 kmの膨張圧力源に加え、桜島島内北岳の北東から北山麓に圧力源が推定されたことである。始良カルデラ内の圧力源は膨張を続けているが、北岳の圧力源が膨張・収縮を繰り返している。

一連の活動の推移の中で、本格噴火に先行すると考えられる先行物質の変化が捉えられた。2009年10月から新鮮なマグマ物質が放出され、活動期においては SiO_2 の組成比が減少し、活動低下期においては増加することが明らかとなり、噴火活動度が上昇するとマグマ組成（火山ガラス）が玄武岩質に近づく（図4；北海道大学[課題番号:1004]）。また、一連の活動期をとおして、火山灰付着成分の水溶性成分の Cl/S モル比は増加を続けている。特に、次の新たな膨張が検出され始めた2011年12月には、0.5以下で増加していた Cl/S モル比が1以上に急増した。この値は南岳起源の火山灰よりも高くなっており、火山ガスの高温化とより揮発性成分に富むマグマが上昇していることが示唆される（図5）。このような塩素の増加は、FTIR分光放射計を用いた噴煙中の火山ガス HCl/SO_2 比の測定によっても確認されている。

このような先行噴出物解析の重要性は山頂北側斜面の噴気帯が拡大し、湯釜東壁において2011年秋から噴気活動が顕在化している草津白根山でも指摘できる。東京工業大学[課題番号:1602]は、この異常領域で噴気ガスを繰り返し観測した結果、北側噴気帯から放出されるガスとは組成が大きく異なり、特に水素の割合が高く、マグマから直達していると考えている。

イ．噴火履歴とマグマの発達過程

本研究の目的は、伊豆大島、桜島、有珠山などを対象に集中的な地質調査、浅部のボーリング・トレンチ調査、噴出物の化学分析及び年代測定を実施して、噴出量階段図を作成し、噴火の規則性を理解するとともに、噴出物の分析からマグマ混合や分化過程などを明らかにし、長期的な火山噴火予知に資することである。

重点火山のうち桜島について、北海道大学[課題番号:1004]は火山噴火履歴を高精度に復元するためトレンチ調査を行い、鍵層として1987年噴出物を認識した。また、ボーリング調査を行い、南岳成長期（～3000年前頃）のテフラ層序を明らかにしつつある。また、桜島の大正噴火以降の噴出物を分析し、南岳山頂活動期以降についても大正噴火と同様に玄武岩質マグマの関与が認められ、それが大きいと噴火規模が大きくなることを見出した。このことから玄武岩質マグマの動向を把握することが重要であることを指摘した。伊豆大島について20世紀の噴出物について組成分析を行い、詳細な試料採取を行い、全岩化学組成の測定・鉱物化学組成の測定を行った。その結果、1986年のA火口を除く噴出物は、 SiO_2 量が53 wt.%程度のマグマと57 wt.%程度のマグマとの混合によって形成されたこと、また1986年や1951年の噴出物に含まれる斜長石斑晶は、噴出物よりも CaO 量や MgO 量が高いマグマから晶出したことなどが明らかになった。

重点火山以外では、雌阿寒岳、岩木山について噴火履歴の精密化と物質科学的検討が行われた。雌阿寒岳については、過去13000年間の噴火履歴を引き続き検討することにより、マグマ噴火が頻繁に発生する活動期と静穏期が4回繰り返され、現在は静穏期にあることが分かった。また、ポンマチネシリ火山形成期の初期に活動した単成火山である西山と阿寒富士火山形成期のマグマ供給系について考察がなされた（公募研究[課題番号:2904]）。また、岩木山においては前年度に推定した形成年代を詳細な調査により補強するとともに、各溶岩ドーム及び付随する噴出物の規模を求めて噴出量積算図を作成した（公募研究[課題番号:2905]）。

課題と展望

これまでの研究により多くの火山において火山性と考えられる地盤変動が検出された。それは以下のようにいくつかに分類できる。1) 一つは膨張と収縮を繰り返している火山であり、噴火活動の静穏期にある火山が多い。静穏期においてもマグマの貫入が繰り返されていることが指摘で

きる。2)1回のマグマ貫入によって蓄積されたマグマが一回の噴火で消費される場合もある。2011年新燃岳の噴火については約1年かけて貫入・蓄積されたマグマが一連の噴火でほぼ放出された。少なくとも最近10年間の地盤変動をみる限り膨張・収縮が繰り返されることなく、1回のマグマ貫入により噴火に至ったように見える。桜島の個々の爆発についてはこのパターンが多い。3)マグマ貫入と並行して噴火し、かつマグマを蓄積し続ける場合で、2006年以降の桜島の昭和火口噴火活動がこのパターンである。前計画(第7次火山噴火予知計画)では、全国の大学は協力して総合集中観測と火山体構造探査を、毎年対象とする火山を変えて実施してきたが、このようなマグマ貫入様式の多様性を把握するためには多数の火山での比較研究を行うことが重要である。

1)の場合、膨張と同期して火山性地震活動が活発化することが多い。伊豆大島ではよく知られた事実となっている。問題は、2)と3)の場合であり、顕著な地震活動の変化がみられず、火山性地震発生による応力の時空間分布を把握することが困難である。いずれも主噴火の前に先行する噴火活動があり、火道が既に開放している、あるいは完全に閉塞した状態ではないと考えられる。このような火山に対処するためには、一つは地盤変動観測の高感度、高精度化に加えて広域化が必要である。桜島昭和火口の1回の爆発に伴う体積変化量は 10^3m^3 のオーダーであるが、この程度でも伸縮計により捉えられているし、近接観測であれば 10^2m^3 のオーダーの変化を捉えることもできる。二つ目は地下の構造変化である。準静的に地下の圧力が変化していくにしても、マグマが貫入してきていれば地下の構造は変化するはずであり、地下構造の時間変化を抑えていくことが重要である。また、東北大学[課題番号:1209]の高分解能トモグラフィー解析によって桜島直下にマントルウェッジから地殻を貫いて地表へ続く低速度域の存在が示されているが(図6)、その時間変化も追跡していく必要があろう。三つ目は火道が既に開放している、あるいは完全に閉じた状態でなければ、先行物質としてのマグマ物質とその量と組成の変化を捉える好機である。従来物質科学では、噴火イベントごとの限られた資料の分析に力がそそがれてきたが、高頻度サンプリングが可能な状況では、多量の資料の物質科学的解析の迅速化、あるいは準リアルタイム化に向けた開発、体制づくりが重要である。四つ目は現在の桜島や諏訪之瀬島に特に言えることである。現在の地震・火山噴火予知計画の部会の構成は火山噴火準備過程と火山噴火過程に分けられている。過去に噴火したいくつかの火山では火山噴火に前駆する過程と噴火中の過程を分けることが可能であるが、上記の二つをはっきり分けることが難しい。従来は、初期噴火発生後の噴火活動推移の複雑さが強調されてきたが、火山活動は噴火に先行する時期でも複雑なふるまいをする。両方を統合した研究体制が望ましいと考える。

参考文献

- Aizawa, K., A. Yokoo, W. Kanda, Y. Ogawa, Y. and M. Iguchi, 2010, Magnetotelluric Pulses Generated by Volcanic Lightning at Sakurajima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 37, L17301, doi:10.1029/2010GL044208.
- Aizawa, K., W. Kanda, Y. Ogawa, M. Iguchi, A. Yokoo, H. Yakiwara and T. Sugano, 2011, Temporal changes in electrical resistivity at Sakurajima volcano from continuous magnetotelluric observations, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 199, 165-175.
- 相澤広記・神田径・小川康雄・井口正人・横尾亮彦・八木原寛・菅野貴之, 2010, MT連続観測による桜島地下浅部の比抵抗変化, 「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21年度分報告書, 73-80.
- Asamori, K., K. Umeda, Y. Ogawa and T. Oikawa, 2010, Electrical resistivity structure and

helium isotopes around Naruko Volcano, northeastern Japan and its implication for the distribution of crustal magma, *Int. J. Geophys.*, 738139, doi:10.1155/2010/738139.

伴雅雄, 2011, 活火山のマグマ供給系進化に関する岩石学的研究の進展—噴出物の高分解時間変化からの知見—. *地質学雑誌* (印刷中).

伴雅雄, 2010, 岩石組織・化学組成から見た、東北日本・蔵王山・Z-To-5 テフラ (約5,800年前) のマグマ溜り, *日本鉱物科学会2010年度秋季大会講演要旨集*, 21.

Ban M. and S. Hirotsu, 2010, Origin of Quaternary low-K basalts in rear arc side of NE Japan. *Western Pacific Geophysics Meeting 2010, Abstract*, T53A-054.

長谷川健・中川光弘・伊藤順一・山元孝広, 2011, 北海道東部, 釧路地域に分布する第四系の年代: 高分解能テフラ層序に基づく対比と編年, *地質学雑誌* (印刷中).

廣谷志穂・伴雅雄・石塚治, 2010, 東北日本, 白鷹火山の爆発的噴火期の珪長質マグマの生成機構—副成分鉱物の溶融の証拠—, *日本地質学会第117年学術大会講演要旨集*, 126.

井口正人・横尾亮彦・為栗 健, 2010, 桜島昭和火口噴火の規模について, *京都大学防災研究所年報*, 第53号B, 233-240.

井口正人, 2010, 桜島火山の噴火活動—2009年2月～2010年5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21年度分報告書, 1-8.

井口正人・植木貞人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫, 2010, 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS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21年度分報告書, 47-53.

井口正人・平林順一, 2010, 桜島・黒神における温泉ガス濃度, 「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21年度分報告書, 81-85.

Kanda, W., M. Utsugi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, I. Fujii, T. Hasenaka and N. Shigeno, 2010, A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 189, 158-171.

気象研究所, 2010, だいち/PALSARを使った桜島噴火前後における地殻変動および火砕流の検出, 火山噴火予知連絡会会報第100号, 95-98.

気象研究所, 2010, 2006年2月1日07時44分霧島山新燃岳で発生した火山性微動に対応した傾斜変動, 火山噴火予知連絡会会報第100号, 122-125.

気象研究所, 2010, だいち/PALSARの干渉SARによる十勝岳62-2火口の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報第101号, 25-27.

気象研究所, 2010, だいち/PALSARの干渉SARでみた吾妻山の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報第101号, 33-35.

Kiyosugi, K., C. Connor, D. Zhao, L. Connor, and K. Tanaka, 2010, Relationships between volcano distribution, crustal structure, and P-wave tomography: An example from the Abu monogenetic volcano group, SW Japan, *Bull. Volcanol.* 72, 331-340.

国土地理院資料, 2011, 伊豆大島の体積変化, 第181回噴火予知連絡会 (印刷中).

Matsumoto, A. and M. Nakagawa, 2010, Formation and evolution of silicic magma system: Petrology of the volcanic rocks of Usu volcano, Hokkaido, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 196, 185-207.

森 俊哉, 2010, 遠隔FT-IR測定による昭和火口と南岳火口の火山ガスHCl/SO₂比, 「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21年度分報告書, 87-92.

Nishimura, T. and S. Ueki, 2011, Seismicity and magma supply rate of the 1998 failed eruption at Iwate

volcano, Japan, Bull. Volcanol., 73, 133-142.

野上健治・井口正人・味喜大介・為栗 健・山本圭吾・園田忠臣, 2010, 「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21年度分報告書, 97-100.

Ohba, T., T. Sawa, N. Taira, T. F. Yang, H. F. Lee, T. F. Lan, M. Ohwada, N. Morikawa and K. Kazahaya, 2010, Magmatic fluids at Tatun volcanic group, Taiwan, Appl. Geochem., 25, 513-523.

大泉涼・伴雅雄, 2010, 東北日本、月山火山新期噴出物の岩石学的特徴の変遷. 日本火山学会2009年度秋季大会講演予稿集. 106.

大久保修平・菅野貴之・風間卓仁・山本圭吾・井口正人・田中愛幸・孫文科・高山鐵朗・坂守・松本滋夫, 2010, 桜島火山における絶対重力観測, 「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21年度分報告書, 65-71.

Okubo, A. and W. Kanda, 2010, Numerical simulation of piezomagnetic changes associated with hydrothermal pressurization, Gephys. J. Int., 181, 1343-1361, 2010.

太田雄策・三浦 哲・松村信介・森 俊行, 2010, 低価格2周波GPS受信機とデータロガーを用いたGPS観測システムの構築, 測地学会誌, 56, 101-106.

太田雄策・植木貞人・井口正人, 2010, 桜島火山山腹におけるGPS連続観測点の増設(2009年度), 「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21年度分報告書, 55-58.

小沢 慎三郎, 2011, 伊豆大島の体積変化, 国土地理院調査研究年報(印刷中).

佐藤鋭一・和田恵治, 2010, 大雪火山噴出物の露頭紹介1-大函の御鉢平カルデラ噴出物-. 北海道教育大学大雪山自然教育研究施設研究報告, 44, 1-5.

嶋野岳人・横尾亮彦・井口正人・味喜大介, 2010, 粒径に着目した桜島昭和火口噴出物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21年度分報告書, 93-96.

高木朗充・福井敬一・山里平・藤原健治・加治屋秋実, 2010, 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定, 気象研究所研究報告, 61, 1-11.

武部義宜・伴雅雄, 2010, 蔵王火山、熊野岳アグルチネートの岩石学的特徴. 地球惑星科学連合2010年大会講演要旨. SVC062-P09.

為栗 健・井口正人・寺石 眞弘・大倉敬宏・園田忠臣, 2010, 桜島火山における震源再決定と自然地震観測, 「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21年度分報告書, 29-33.

寺田暁彦, 2010, 火山における熱観測, 火山, 55, 155-163.

筒井智樹・他35名, 2010, 桜島火山における反復地震探査(一回目), 京都大学防災研究所年報 第53号B, 241-259.

筒井智樹・他35名, 2010, 桜島火山における反復地震探査(2009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21年度分報告書, 9-28.

Wang, J. and D. Zhao, 2010, Mapping P-wave anisotropy of the Honshu arc from Japan Trench to the back-arc, J. Asian Earth Sci. 39, 396-407.

Wei, W., D. Zhao, and Y. Shi, 2010, Three-dimensional P-wave tomography of the volcanic areas in southwest Japan, Earth Sci. Frontiers 17(3), 149-157.

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, 2010, 鹿児島湾の桜島火山周辺海域における海底地震観測, 「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21年度分報告書, 35-39.

- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川慎・井上寛之・松島健・内田和也, 2010, 桜島火山周辺における水準測量(2009年11月および2010年4月), 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 227-232.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川 慎・井上寛之・松島 健・内田和也, 2010, 桜島火山周辺における水準測量(2009年11月および2010年4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21年度分報告書, 41-46.
- 山本圭吾・他11名, 2010, 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定(2009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21年度分報告書, 59-63.
- Yoshida Y., Issa, M. Kusakabe, H. Satake and T. Ohba, 2010, An efficient method for measuring CO₂ concentration in gassy lakes: Application to Lakes Nyos and Monoun, Cameroon. *Geochem. J.*, 44, 441-448.
- Yoshimoto, M., T. Fujii, T. Kaneko, A. Yasuda, N. Nakada, A. Matsumoto, 2010, Evolution of Mount Fuji, Japan: Inference from drilling into the subaerial oldest volcano, pre-Komitake, Island Arc, 19, 470-488.
- Zhao, D. and L. Liu, 2010, Deep structure and origin of active volcanoes in China, *Geoscience Frontiers* 1, 31-44.
- Zhao, D., S. Ueki, Y. Nishizono, and A. Yamada, 2010, New seismic evidence for the origin of arc and back-arc magmas, In J. Ray, G. Sen, B. Ghosh (Eds.) *Topics in Igneous Petrology*, 117-132, Springer Press.
- Zhao, D., S. Yu, and E. Ohtani, 2011, East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics. *J. Asian Earth Sci.* 40, 689-709.

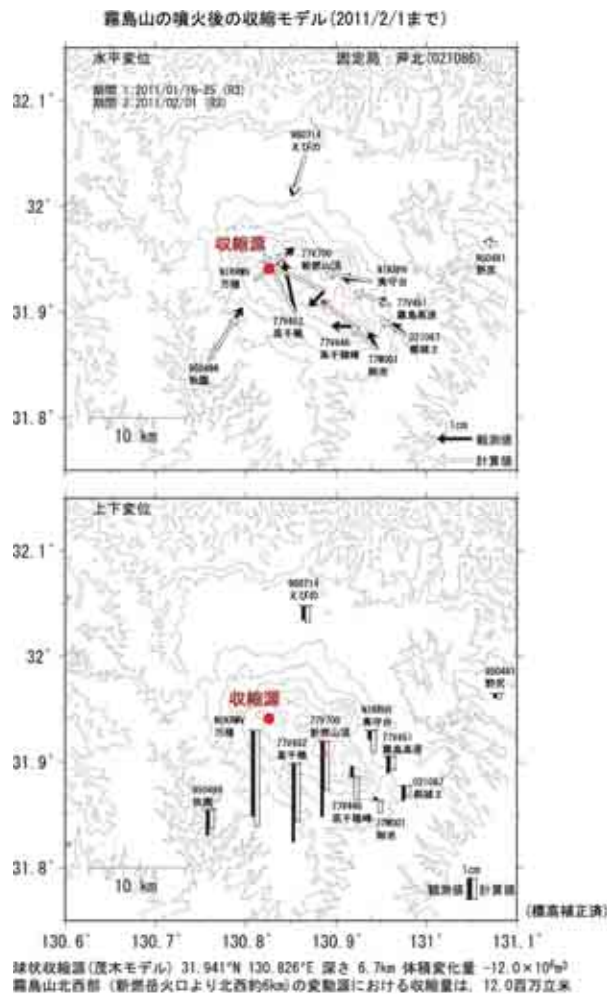


図1．霧島山新燃岳2011年噴火に伴う地殻変動と力源モデル（国土地理院[課題番号:6016]）

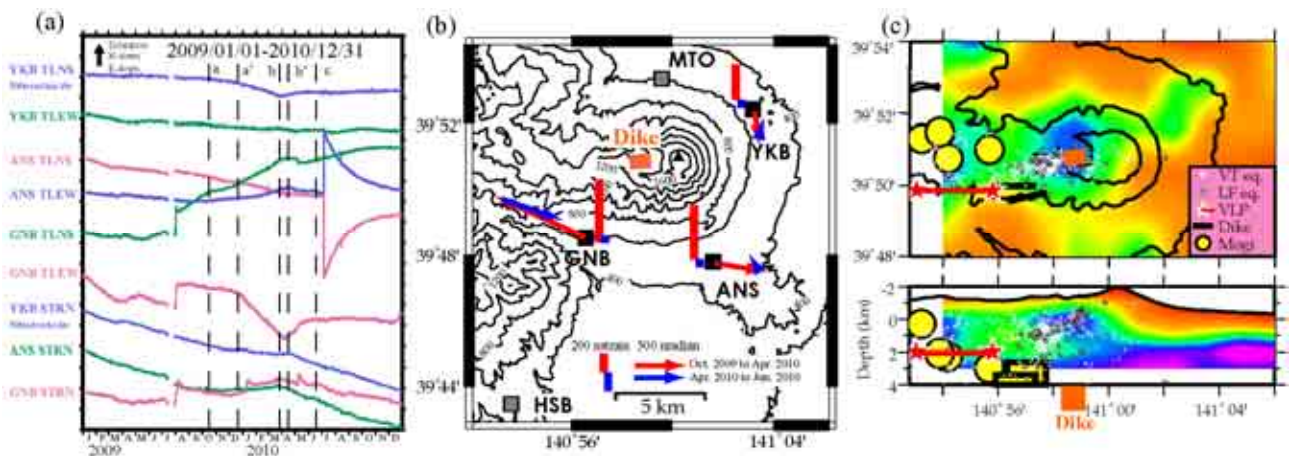


図2．岩手火山で観測された短期地盤変動(a,b)と変動源モデル(b,c)（東北大学[課題番号:1209]）

(a)傾斜・ひずみ連続記録、(b)赤と青のシンボルが2009年10月～2010年4月と4月～6月の変動量。橙色長方形は前期の変動源モデル。(c)岩手火山周辺のP波速度偏差分布、1998年の活動 (Tanaka et al., 2002) と変動源モデル。

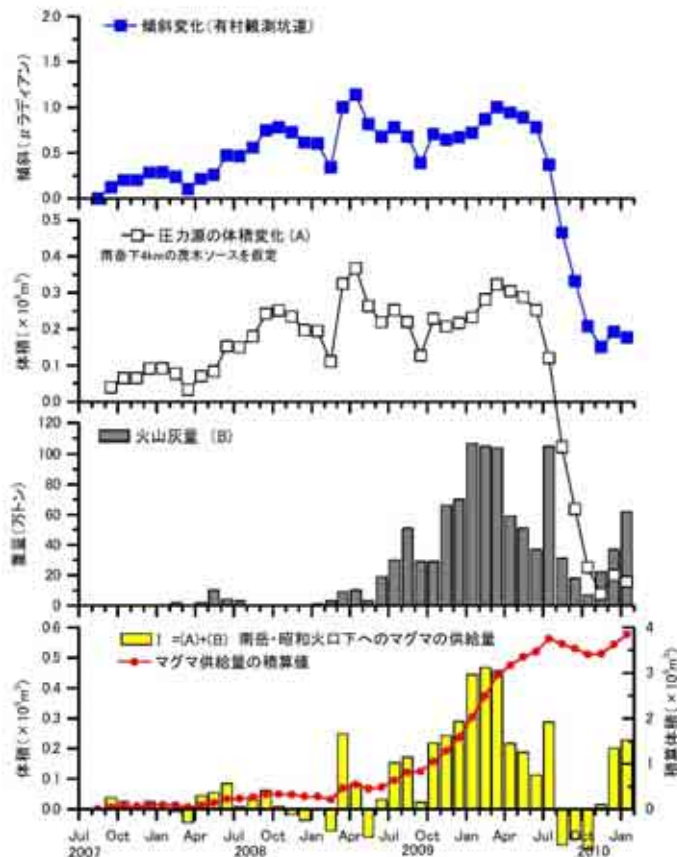


図3．桜島山頂へのマグマ供給量の増加（京都大学防災研究所〔課題番号：1809〕）

- 1 段目：昭和火口から2.1 km 離れた有村観測坑道における傾斜量の月平均値、
- 2 段目：山頂直下の深さ3.5 km に茂木ソースを仮定したときの月別体積変化量、
- 3 段目：火山灰放出量（鹿児島県の降下火山灰量による）、
- 4 段目：桜島山頂への月別マグマ供給量の積算値

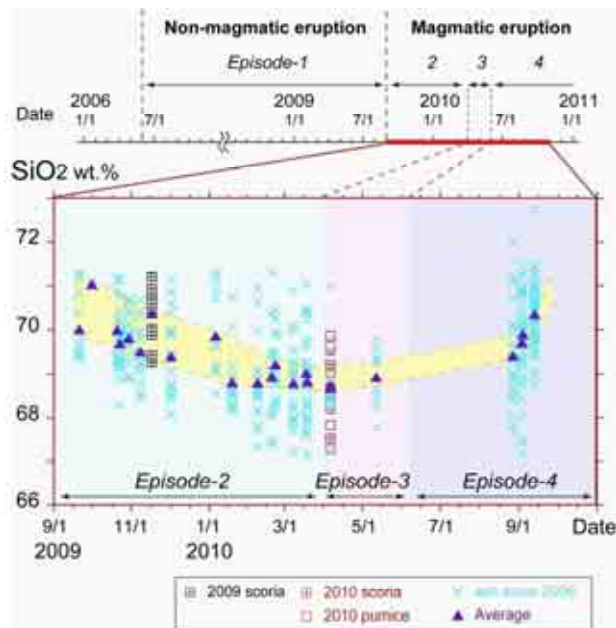


図4．桜島火山2006年からの噴出物のガラス組成（北海道大学〔課題番号:1004〕）

Cl/S molar ratio

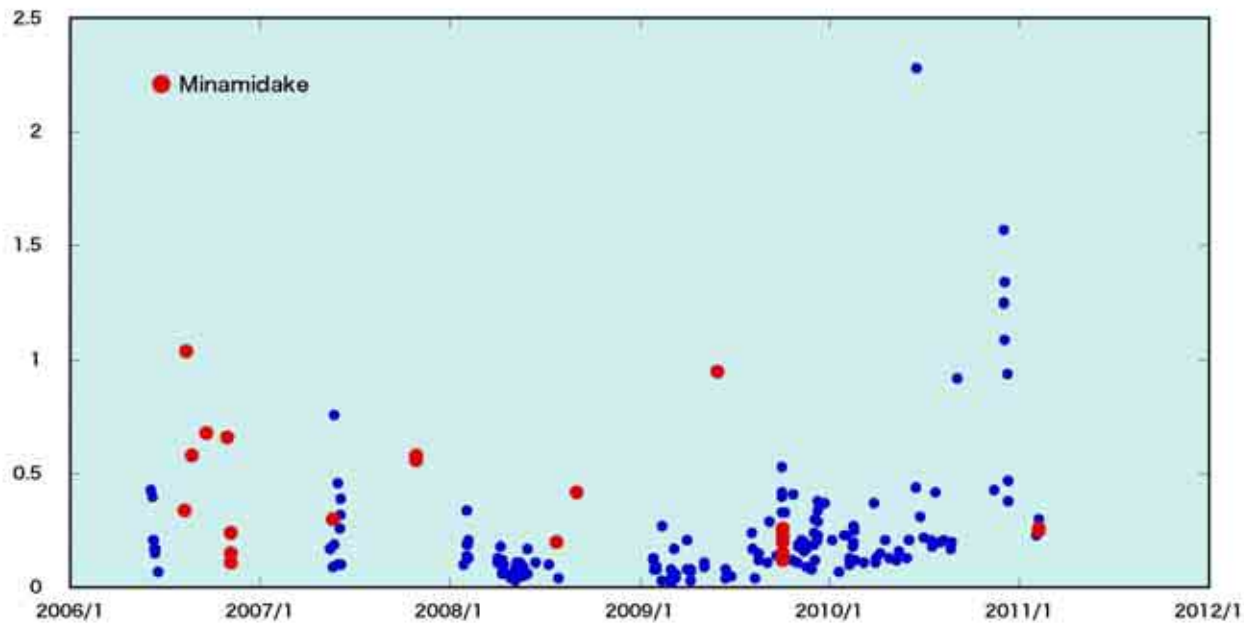


図5．火山灰付着水溶性Cl/Sモル比の時間変化（京都大学防災研究所 [課題番号：1809] ）

青：昭和火口から放出された火山灰，赤：昭和火口

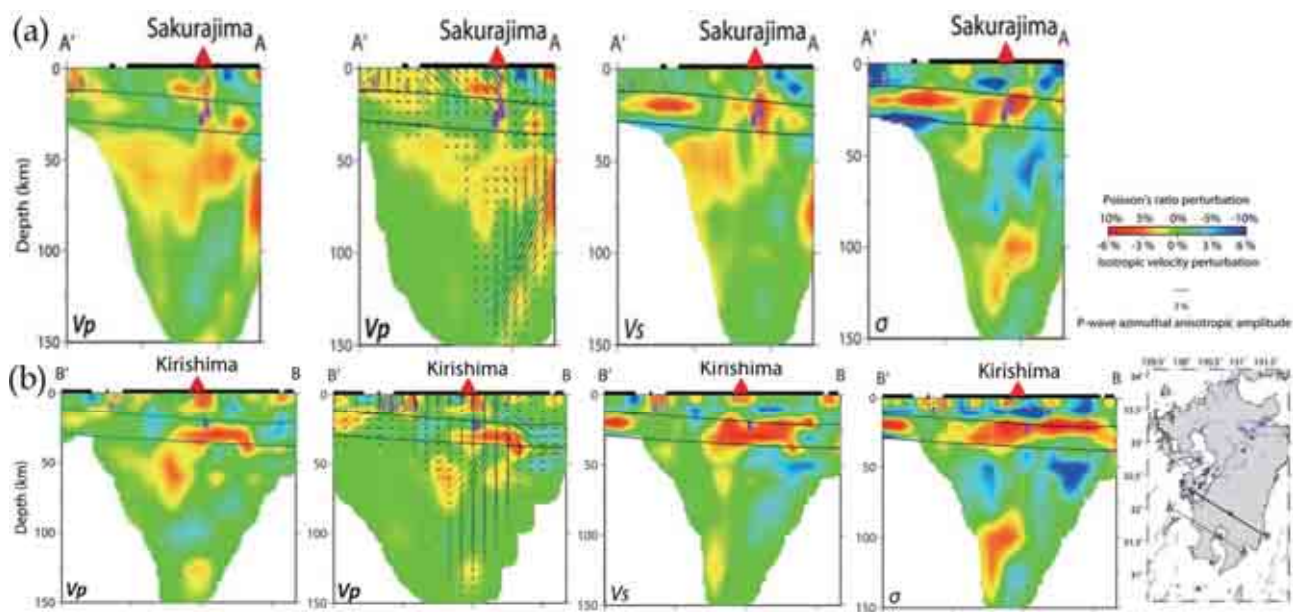


図6．南九州火山地域の速度断面．（東北大学 [課題番号：1209] ）

桜島火山(a)ならびに霧島火山(b)下の北西 - 南東断面における、左から順に、P波速度偏差，P波速度異方性，S波速度偏差，ポアソン比偏差の深さ分布。