

2.2 霧島山新燃岳の噴火に先行した山頂部の地殻変動

2.2.1 はじめに

霧島山は九州南部の宮崎県と鹿児島県境付近に位置し、複数の火山からなる火山群である。このうちの新燃岳において、1991 年以来となる小規模な水蒸気噴火が 2008 年 8 月に発生した。その後 8 回の水蒸気噴火が発生した後、2011 年 1 月 26 日に多量の火山灰を連続的に噴出する準プリニー式噴火を発生させるに至った。この噴火では多量の火山砕屑物が噴出したが、噴火直前には顕著な地震活動は伴っていなかった。一方、広域の地殻変動観測では、2009 年 12 月頃から膨張が観測され、膨張は 2011 年 1 月 26 日の噴火に至るまで継続した。国土地理院による GNSS 連続観測システム（以下、GEONET と呼ぶ）では、その膨張の分布から圧力源が新燃岳の北西約 10km 付近の深さ約 7.5km にあることが推定された（国土地理院、2011）。

気象研究所と福岡管区気象台火山監視・情報センターは、2011 年 1 月の本格的なマグマ噴火開始に至るまでの約 10 年間、霧島山新燃岳の周辺において GPS 連続観測及び繰り返し観測を実施していた。その観測結果からは、2011 年噴火の前に観測された膨張が始まる 4 年前の 2005 年 12 月頃から山頂付近の局所的な変動が見られ、得られた変動分布の解析から、新燃岳火口直下を圧力源とする局所的な膨張と収縮であることがわかった。この変動は、GEONET 等の広域観測網で把握されていた新燃岳の北西約 10km 付近を圧力源とする膨張が始まる 2009 年 12 月よりも前に停止していた。

これまでの火山における観測研究で、火山噴火に至るまでの地殻変動観測により、マグマ起源と考えられる深い圧力源の活動とともに、火口直下のごく浅い圧力源の活動も認められることがあることがわかり始めていた。例えば 2009 年 2 月の浅間山噴火の前には、浅間山山体北西側深部を圧力源とするマグマに起因すると考えられる膨張に加え、山頂部でも局所的な膨張が観測された（高木他、2010、等）。霧島山 2011 年噴火に至る地殻変動観測においても、深い圧力源の活動と浅い圧力源の活動が噴火前に存在しており、これらの関係を明らかにすることは、地殻変動観測というアプローチから、噴火に至るシナリオづくりに貢献するものと考えられる。

2.2.2 GPS 観測

霧島山周辺では、本格的な噴火活動が始まる 2011 年 1 月 26 日の時点で、8 地点で GPS 連続観測を実施していた（うち現地収録型は 2 点）。これらのうち 1 点の 2 周波型 GPS 観測点を除き、1 周波型 GPS 観測点であった。また、新燃岳火口周辺の 6 点では 1 周波型 GPS（以上、1 周波型 GPS 受信機はすべて古野電気社製 MG2100）による繰り返し観測を実施していた（Photo. 2.2.1）。新燃岳周辺で GPS 観測を実施していた連続観測点 3 点と繰り返し観測点 6 点の座標値を Table 2.2.1 に示す。これらはすべて 1 周波型である。GEONET 観測点からなる基線長は 20.7~23.5km と長い。気象庁連続観測点 3 点からなる基線の長さは 2.4~3.9km である。また、新燃岳火口周辺の 4 点からなる基線の長さは 0.49~0.83km と短距離である。Fig.2.2.1 に各観測点の配置図を示す。

繰り返し観測は 2002 年以降、2010 年までに 20 回実施した。1 回の繰り返し観測の測定時間は 2~3 日である。

観測データの基線解析は Bernese Ver.5.0 (Darch et al., 2007) を使用した。また、周辺の GEONET 観測点等 4 点の 2 周波 GPS データを用いて電離層補正値を算出し、1 周波の解析結果に施した。基線解析の参照点は連続観測点 GC02 とし、参照点に対する繰り返し観測点、連続観測点及び GEONET 観測点との基線解析をおこなうことにより、GEONET の F3 座標値と結合した。



Photo 2.2.1 GPS campaign site GS05 on the southern rim of Shinmoedake crater.

Table 2.2.1 Location of GPS observation sites around Shinmoedake.

Site	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Altitude (m)
Single-frequency type. Parmanent site.			
GC02	31.8747	130.9045	872
GC05	31.9585	130.8958	756
GC08	31.8863	130.9203	1507
Single-frequency type. Campaign site.			
GS01	31.9129	130.8790	1344
GS02	31.9152	130.8840	1373
GS03	31.9106	130.8873	1395
GS04	31.9065	130.8878	1319
GS05	31.9078	130.8833	1398
GS06	31.9099	130.8839	1295

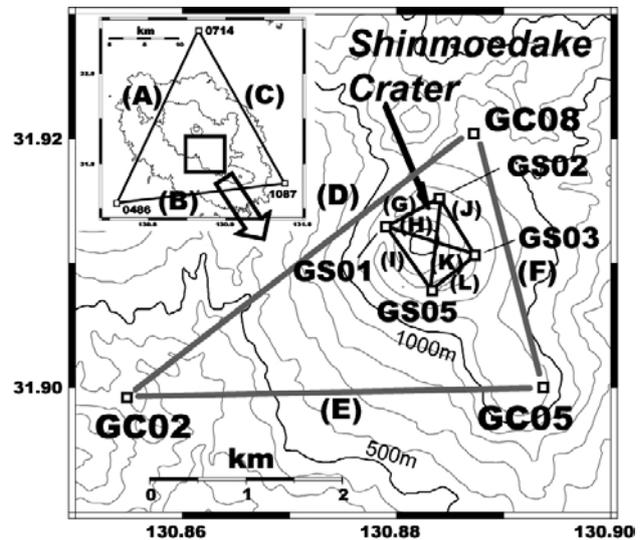


Fig.2.2.1 Distribution of GPS observation sites around Shinmoedake. Letters in parentheses correspond to time series in Fig. 2.2.2.

2.2.3 解析結果

Fig.2.2.1 に示した基線(A)~(L)の 2002~2011 年の基線長変化を Fig.2.2.2 に示す。このうち山頂部繰り返し GPS 観測点からなる基線の基線長を Table 2.2.2 に示す。観測回数が少ない GS04 と GS06 にかかわる基線は省いた。このうち、(A)~(C)は広域の GEONET 観測点の基線であり、この基線長変化からは霧島山とその周辺の変動場を把握することが可能である。(D)~(F)は気象庁の 1 周波連続点の基線で、新燃岳山体周辺の動きを把握することができる。また、(G)~(L)は 1 周波繰り返し観測点の基線であり、新燃岳火口付近の局所的な挙動を見ることができる。

霧島山周辺の広域応力場の動きもとらえる GEONET の基線(A)~(C)を見ると、北北東-南南西の基線(A)及び東北東-西南西(B)の基線は経年的に短縮し、北西-南東の基線(C)がやや伸長していることから、霧島山周辺は北西-南東方向に伸張の応力場にあったことが推測される。その傾向は 2009 年 12 月頃まで継続したが、その後膨張の傾向に反転し、とくに北東-南西に卓越したことがわかる。この急速な膨張場の傾向は、2011 年 1 月の噴火直前まで継続した。

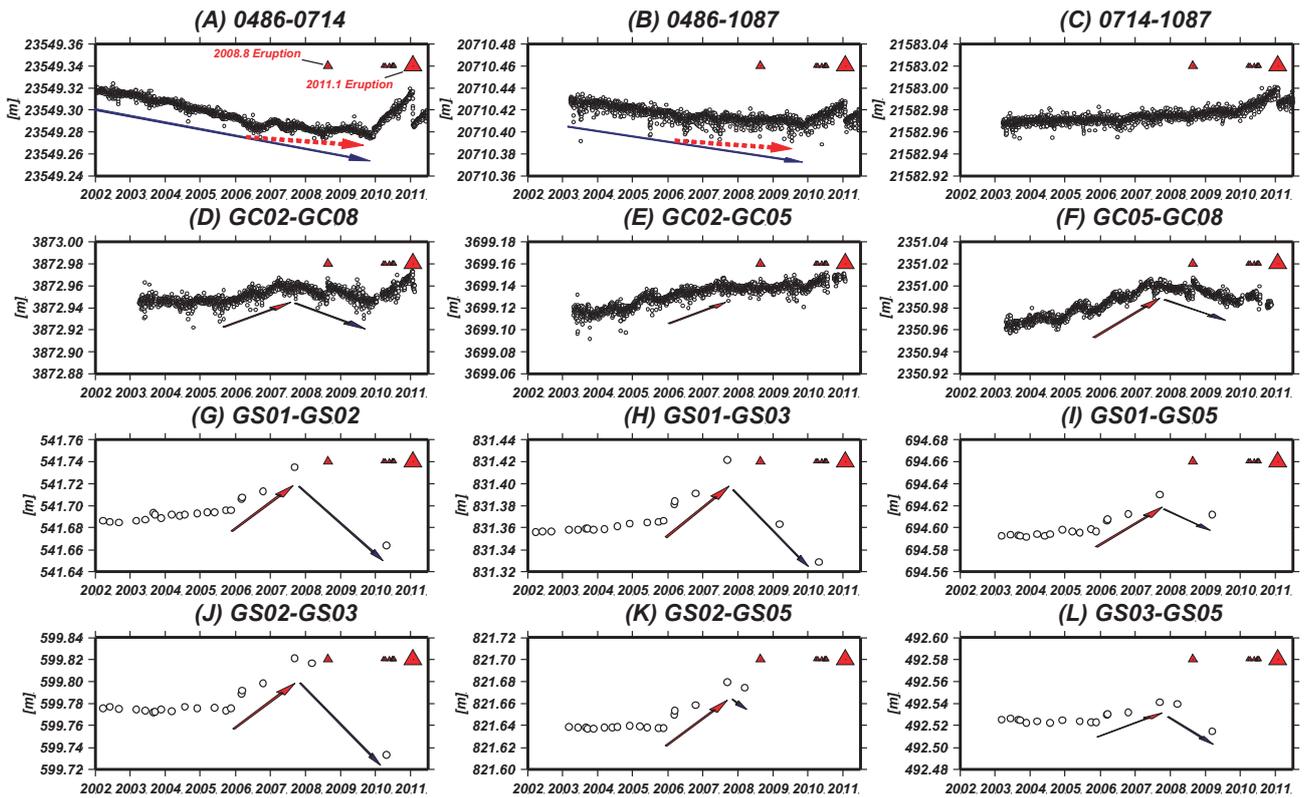


Fig.2.2.2 Time series of GPS baseline lengths. A–C are long baselines by GEONET. D–F are short baselines around Shinmoedake by the JMA GPS network. G–L are baselines in the crater area measured during campaign observations by JMA and MRI. Red triangles correspond to eruptions at Shinmoedake.

一方、新燃岳周辺の連続観測点の基線長変化(D)~(F)を見ると、2005年12月頃から基線が伸び始めて2007年中頃まで続いたことがわかる(山頂部膨張期)。その後短縮して、2009年12月頃まで続いた(山頂部収縮期)。この間に発生した2008年8月の水蒸気噴火に伴い、基線は短時間に伸張した。その後は広域の基線と同様、2011年噴火直前まで膨張した(広域膨張期)。火口近傍の4点からなる6基線(G)~(L)を見ると、(D)~(F)と同じ傾向を示すが、変動の絶対量は大きい。

これらの基線解析結果から、茂木モデル(Mogi, 1958)を適用して、各期間の地殻変動を説明できる新燃岳浅部の圧力源パラメータを推定した。その結果と変動分布について、山頂部膨張期(2005年9月~2007年9月)をFig.2.2.3に、山頂部収縮期(2007年9月~2010年4月)をFig.2.2.4に示す。GEONETにも検知された広域膨張期(2009年11月~2011年1月)については、明らかに南北方向の伸張が東西方向の伸張より卓越しており、茂木モデルよりも開口断層を仮定した方がその変動パターンを説明できるため、Okada(1992)により圧力源を推定した(Fig.2.2.5)。いずれも上段(A)が水平変動、下段(B)が上下変動を示す。白い矢印が観測結果、黒い矢印が計算値を示す。これらの計算は火山用地殻活動解析支援ソフトウェア(福井他, 2011)を使用した。

山頂部膨張期の圧力源は新燃岳火口直下610m(標高790m)の極めて浅い場所に求められ、体積増加量は $0.088 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された。また、山頂部収縮期の圧力源も新燃岳火口直下510m(標高890m)と浅く、体積減少量は $0.116 \times 10^6 \text{m}^3$ と見積もられた。なお、山頂部収縮期におけるキャンペーン観測の頻度が少ないため、解析で使用した収縮期の最後の観測日を2010年4月とした。しかし、連続観測(Fig.2.2.2(A)-(E))をみると、この時期は広域の膨張期に入っているため過小評価している可能性が高く、実際の収縮量はこれより大きいと推定される。

広域膨張期の圧力源は、新燃岳山頂から西北西約5kmの深さ6kmを中心とする、長さ4km深さ2kmのほぼ東西

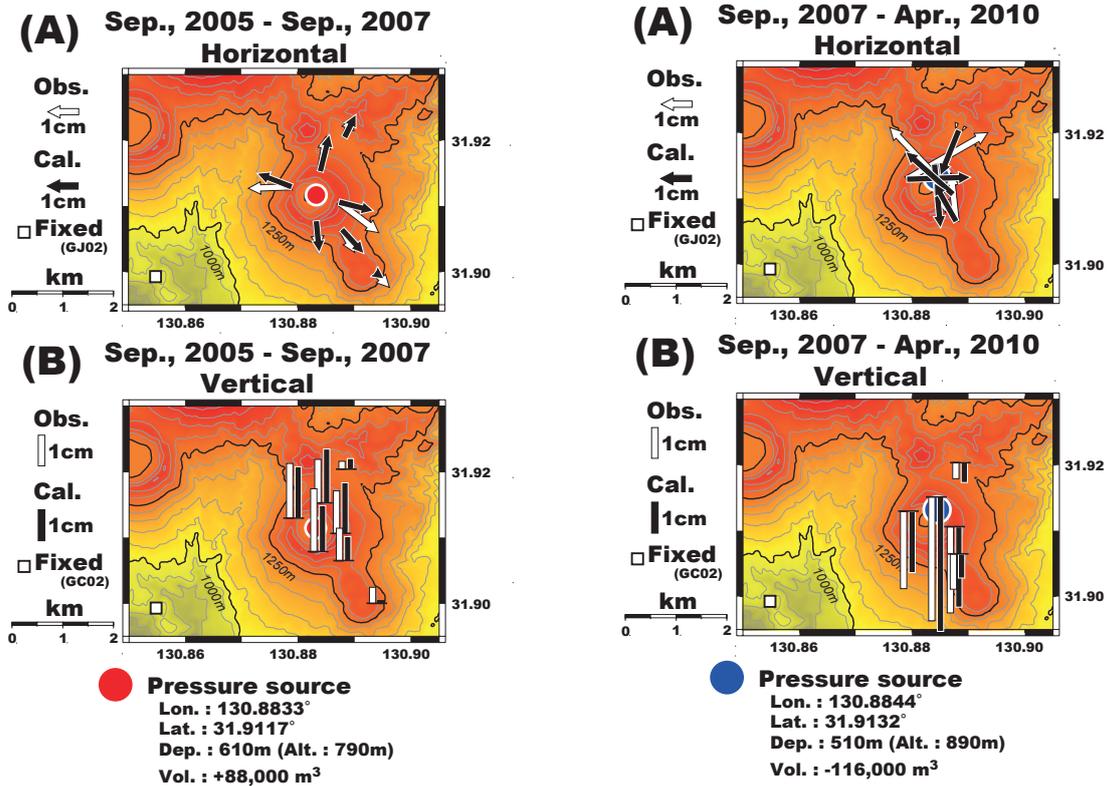


Fig.2.2.3 Estimate of the local inflation pressure source under Shinmoedake based on GPS campaign observations from September 2005 to September 2009: (a) horizontal component and (b) vertical component.

Fig.2.2.4 Estimate of the local deflation pressure source under Shinmoedake based on GPS campaign observations from September 2007 to April 2010: (a) horizontal component and (b) vertical component.

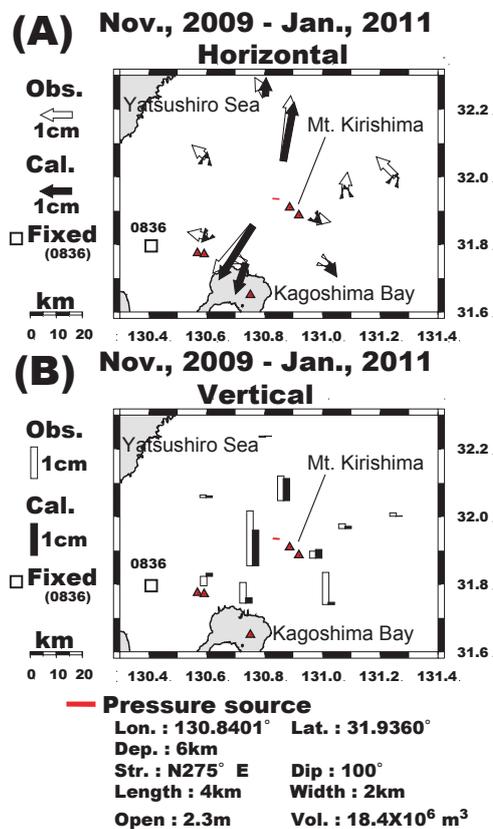


Fig.2.2.5 Estimate of the deep inflation pressure source under Shinmoedake based on GEONET observations from November 2009 to January 2011: (a) horizontal component and (b) vertical component.

方向の走向をもつほぼ直立した断層が 2.3m 開口すれば説明できることがわかった。その場合の体積増加量は $18.4 \times 10^6 \text{m}^3$ と見積もられた。

2.2.4 まとめと考察

霧島山新燃岳では深部だまりへの本格的なマグマ蓄積が、2009 年 12 月から開始されたと推測されるが、新燃岳山頂付近で実施した詳細な GPS 繰り返し観測からは、2005 年 12 月頃から山頂部の局所的膨張が始まっていたことがわかった。一方、2009 年の急速な広域膨張が開始するまでは短縮傾向であった GEONET の長基線 (Fig.2.2.2(A)(B)) も、2006 年頃から短縮速度が鈍化していたことがわかる (図中の赤い破線矢印)。深部マグマはこの頃から蓄積過程を開始していた可能性がある。

この 2006 年頃からの深部圧力源での膨張と同期して、山頂周辺部び GPS 観測から火口直下でも膨張を示していたことがわかった。その圧力源の深さは 500~600m と極めて浅いため、マグマ自体の充填というよりも、熱水だまりの活動が励起されていた可能性を示唆している。しかし、膨張開始の約 2 年後に山頂部が収縮に転じ、その過程においてなぜ最初の水蒸気噴火が始まったのか等、今後明らかにすべき課題は多い。Fig.2.2.6 に見積もられた圧力源パラメータと、それらから推測されるマグマ系の概念図を示す。

地震活動に注目すると、最も規模が大きかった 2011 年 1 月 26~27 日の噴火活動の時期も含め、新燃岳噴火に至る火道付近での顕著な活動は観測されていない。浅間山や桜島等のわが国の主な安山岩質火山では、噴火時に火道では地震活動が活発化しやすいことがわかっている (例えば、Takeo et al., 2006)。デイサイト質火山ではあるが、雲仙岳では 1990 年の噴火に至るまでに、火道のマグマ上昇を地震活動が明瞭にモニターしていた (例えば、馬越他, 1994)。新燃岳ではマグマだまりと考えられる膨張の継続は認めながらも、準プリニー式噴火という規模の大きい噴火が発生する場合には、事前に活発な地震活動が存在するはずであり、本格的な噴火活動は直ちには開始しないだろうと考えていた関係者は少なくなかった。しかし、2011 年新燃岳噴火に至るマグマ移動を地震活動ではモニターすることは容易ではなかった。地殻変動からは深部マグマだまりの可能性をあらかじめ推測することが可能であった一方で、山頂火口周辺における局所的な活動も明らかにされた。

今後、これらの観測事実を火山活動の噴火過程として明らかにすることは、これまで主として地震観測により噴火シナリオを想定してきた現実から、地殻変動観測におけるシナリオ作成の有効性を進化させることにつながると考えられる。さらに「地殻変動観測におけるシナリオ作成」の課題へのアプローチのひとつとして、物質科学を検討することは

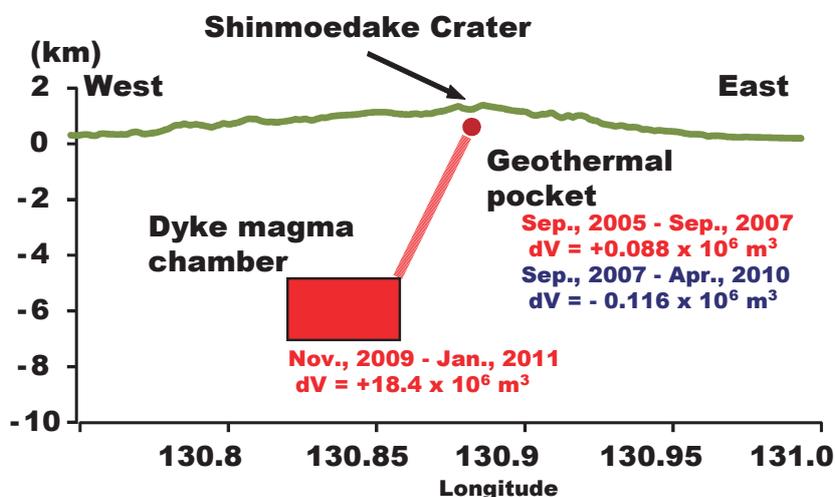


Fig.2.2.6 Estimated pressure-source parameters and schematic model of the magma system of the 2011 Shinmoedake eruption based on GPS observations.

重要であると考え。例えば、火山ガスや噴煙のモニタリングで得られた放出量に基づき質量収支を検討することである。これまで浅間山や三宅島の活動期においては、火山ガス放出量と地殻変動量の収支について議論されてきたことがある。今回の新燃岳噴火の活動前については明瞭な噴煙活動は報告されていないが、今後、他の火山も含め、マグマ蓄積期において物質科学的観測を考慮した地殻変動観測におけるシナリオを作成していくアプローチも検討していくべき価値があると考え。

(高木朗充)

謝辞

地図データとして国土地理院作成の「数値地図 50m メッシュ (標高)」を使用した。GPS 繰り返し観測では、福岡管区気象台の多くの職員の協力を得た。GPS 繰り返し観測では、東京大学地震研究所のベンチマークを使用した。解析の一部には国土地理院の GEONET を利用した。ここに、深く感謝の意を表す。

参考文献

- Darch R., U. Hugentobler, P. Fridez and M. Meindl, Eds., 2007: Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute of University of Berne, 612pp.
- 福井敬一・安藤忍・坂井孝行・高木朗充・鬼澤真也・新堀敏基・山里平・大須賀弘, 2011: 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発(4)ー重力データ解析機能, 回転楕円体モデルの組み込み. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SVC050-P05.
- 国土地理院, 2011: 霧島山, 第 118 回火山噴火予知連絡会資料, 110-127.
- Mogi, K., 1958: Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. Bull. Earthq. Res. Inst., 36, 99-134.
- Okada, Y., 1992: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- 高木朗充・福井敬一・新堀敏基・飯島 聖, 2010: 光波測距の数値気象モデルに基づく大気補正ー浅間山への適用ー. 火山, 55, 41-51.
- Takeo, M., Aoki, Y., Ohminato, T., and Yamamoto, M., 2006: Magma supply path beneath Mt. Asama volcano, Japan. J. Geophys. Res., 33, L15310.
- 馬越孝道・清水洋・松尾のり道, 1994: 精度の良い震源分布から推定した 1990-94 年普賢岳噴火活動のマグマ上昇経路. 火山, 39, 223-235.