

セオドライト観測による2000年有珠山噴火後の地殻変動

高木朗充*・西村裕一**・宮村淳一***

Crustal Deformation Measured by Theodolite during the Eruption
in the North-western Part of Usu Volcano in 2000

Akimichi TAKAGI*, Yuichi NISHIMURA**, Jun'ichi MIYAMURA***

(Received January 22, 2001; Accepted February 27, 2001)

1. はじめに

有珠山では、2000年3月から、約21年ぶりに噴火を開始した。3月31日の噴火開始直前から著しい地殻変動が始まり、噴火後は、有珠山北西部である西山西麓火口群周辺を中心に、局所的な顕著な地殻変動が継続した。

空中写真測量によると、噴火前から4月26日までに最大で約40 mの隆起が観測されている(国土地理院, 2000a)。またGPS観測では、隆起の変動率は3月31日の噴火前後を最大として、時間の経過とともに減衰していることが明らかにされている(気象庁, 2000 a; 西村他, 2000; 北海道立地質研究所, 2000他)。

火山活動の推移を監視するためには、地殻変動を時間的・空間的に高密度に観測する必要があった。しかし、航空写真測量ではコストがかかりすぎて頻繁に観測を継続できない。また、GPS観測などは既存の観測点が必ずしも密に配置されておらず、新たな観測点を隆起域近傍に設置することができなかったことから、地殻変動域の詳細な様子を、噴火後しばらくは十分に把握できていなかった。そこで我々は、セオドライトにより、地殻変動域のみかけの稜線変化を時間的・空間的に密に光学測量することによって、西山西麓火口群周辺で潜在溶岩円頂丘の形成と考えられる隆起活動を観測し、その変動率を把握する試みをおこなった。これは、1943年の有珠山の噴火活動時に昭和新生山が形成された様子を、張った糸と自分の眼・指で観測した三松正夫(昭和新生山生成50周年記念事業実行委員会, 1994)の手法(三松ダイアグラム)を、光学機器により精度よくデジタル化したにすぎない

が、このセオドライトによる地殻変動域の稜線の変化の観測により、活動評価に資するべき火山活動のデータを蓄積することができた。なお、同様の方法で著者の一人らは1991年雲仙岳噴火時に溶岩ドームの成長の様子を克明に観測している(Takagi et al., 1995)。

2. 地殻変動の推移

2000年3月31日から有珠山は、約21年ぶりに噴火を開始した。噴火活動の中心は山頂部ではなく、有珠山北西部の西山西麓火口群及び金比羅山火口群であった(気象庁, 2000 b)。国土地理院(2000 b)によると、地震活動が始まった3月27日から有珠山全域の広範囲で山体が隆起・膨張する顕著な地殻変動が始まり、3月31日の噴火開始とともに沈降と収縮に転じた。しかしながら、気象庁(2000 a)や北海道立地質研究所(2000)等は、西山西麓火口群の周辺では、その後も隆起・膨張が継続し、顕著な地殻変動活動は継続していることを観測した。これは潜在溶岩円頂丘の形成に伴うものと考えられる。噴火活動が徐々に低下した後、観測機器を少しずつより活動域近傍に設置することができ、リアルタイムで詳細な変動を監視することが可能になった。それによると、2000年8月頃まで鈍化しながらも隆起・膨張傾向が継続した後、沈降に反転し、2000年12月現在、鈍化しながらもその傾向が続いている(気象庁, 2001)。

3. 観測

3.1 観測方法

西山西麓火口の南西約1,500 mの虻田町虻田高校付近に虻田高校観測定点(東経140度47分09.4秒, 北緯42度32分41.8秒)を設け(図1), 2000年5月11日から8月23日までに20回の観測をおこなった。虻田高校観測

* 気象庁地震火山部火山課

** 北海道大学理学部

*** 札幌管区気象台地震火山課

定点から西山西麓火口方向に広角約15度の範囲を、5分角毎の水平角で、山体稜線の高度角を測定した。水平角の基準は、ここから南方(S8.5°W)約2.2kmの虻田町歴史公園のロッジ屋根の左角とし、時計回り方向を正とした。観測方法は、雲仙岳測候所(1997)とほぼ同じである。測定角の誤差範囲は、気象条件等を考慮すると、10秒角程度以内と考えられる。これは、虻田高校観測定点から西山西麓火口群周辺を観測した場合の7cm程度に相当する。用いたセオドライトはSOKKIA社製SET4CSトータルステーション及びNIKON社製DTM-500トータルステーションである。角度最小表示はそれぞれ10秒角及び1秒角であり、用いた回数はそれぞれ9回及び11回である。両者の器差は、互いの測定誤差の範囲内であることを確認した。なお、観測期間中に、観測視野内に障害物が生じたため、6月15日に定点の移動を行った。新しい定点は火口方向(東北東方向)に約50m近づいた点である(東経140度47分11.0秒、北緯42度32分42.6秒)。定点の移動により生じた観測値の系統的なずれは、新旧2ヶ所の定点で複数(4ヶ所)の目標物の座標の読み取りにより、近似直線から対応関係を導き出し、旧定点での観測値を新定点に対応する座標値に変換した。

虻田高校観測定点は、観測開始当初において、立ち入りが可能な最前線であった。しかし、7月以降、地殻変動の活動度の低下による変動量の減少により、観測機器の分解能では精度良く観測できなくなったこと、また、噴火活動の低下でより活動域近傍で観測が可能になったことから、より近い新たな虻田泉観測定点を設置し、観測を始めた。虻田泉観測定点は西山西麓火口の西約1,000m(東経140度47分24秒、北緯42度33分07秒)の地点で、2000年7月14日から9月13日までに7回の観測をおこなった。

3.2 虻田高校観測定点からの観測

図2の上は虻田高校観測定点から東北東方向を観測した、5月11日～8月23日までの地殻変動の様子である。西山と三豊丘陵に挟まれた鞍部に、西山西麓火口群が形成され、これを中心とした周辺の地盤の隆起活動の様子が、測定された稜線の変化としてわかる。縮尺は縦軸がおおよそ5倍強調されている。下は、虻田高校観測定点からの写真で、上図の横軸とほぼ一致している。

図3は図2の中心部(水平角224～240度の範囲)を拡大したものである。左軸は折線グラフで描写した稜線に

対応する高度角を示す(縮尺は縦軸がおおよそ7倍強調されている)。棒グラフは、観測開始の5月11日から顕著な隆起活動を継続した7月21日までの71日間の隆起量の積算で、約2.8～5.5mを観測した(右軸)。図3で表された、観測した広角約13度(約350mの範囲)は裸地のため稜線の高度角測定が可能であったが、その周辺部(みかけの左右)は樹林帯であり、測定が不能であった。観測した隆起域の隆起量から、周辺部でも隆起域が広がっていたことは予想される。

図4は、隆起活動がほぼ停止した、7月21日から8月23日までの稜線の変化を示した。左軸は折線グラフで描写した稜線に対応する高度角を示す(縮尺は縦軸をおおよそ7倍強調している)。棒グラフは、この期間33日間の積算である。一部に浸食あるいは崩落によるものと思われる箇所があったが、それ以外は約+0.2～-0.9mを観測し、主な沈降領域は火口を含む北西側(みかけ左上側)であった。その沈降量の平均は-0.12mであった(右軸)。

稜線の高度角を測定した、水平広角13度の間の約150の水平角(5分角間隔)に対応する鉛直角の時間変化を図5に示す。観測期間(5月11日～8月23日)を5つの期間に分け、各高度角の偏差の平均を求めると、5月中旬には1日当たり10.4cmであったものが徐々に減少し、7月上中旬には1日当たり2.3cmになり(表1)、7月下旬以降は沈降に転じたことがわかる。ただし、場所により若干の時間的なずれがあり、7月中旬で沈降に転じたところもあれば、8月中旬でも隆起を示すところもあった。これは隆起中心部と周辺部における活動推移のずれに対応する。

3.3 虻田泉観測定点からの観測

図6の上図は、虻田高校観測定点よりも近い、虻田泉観測定点から東方向を観測した、7月14日～9月13日までの地殻変動の様子である。縮尺は縦軸がおおよそ2倍強調されている。下写真は、虻田泉観測定点からの写真で、上図の横軸とほぼ一致している。ここで観測を開始した7月14日以降は、変動の絶対量が小さいので、この間の観測毎の偏差図を図7に示した。図7の1段目は全期間の稜線変化図、2段目が7月16日～7月22日の偏差図、3段目が7月22日～8月2日の偏差図、4段目が8月2日～8月9日の偏差図、5段目が8月9日～8月29日の偏差図、6段目が8月29日～9月13日の偏差図である。7月16日～7月22日はほぼ全観測点で隆起であったが、7月22日

～8月9日は隆起と沈降を示す点がどちらも見られ、8月9日以降はほぼ全点で沈降となった。また、沈降量はより南方（みかけの右方向）で大きく観測された。この沈降量が大きく観測された領域は、虻田泉観測定点からの観測で、5～7月にはより隆起量が大きかった地域に対応する。隆起期間に隆起量が大きかった領域ほど、沈降期間にも沈降量が大きかったことを示す。

以上の変化を時間順にまとめると以下のとおりである。噴火直後から西山西麓火口群周辺で観測された顕著な隆起を示す地殻変動は、5月には約10cm/day、6月中旬には約5cm/day、6月下旬～7月上旬には約3cm/dayと鈍化し、7月下旬には反転を示し始め、8月中旬以降は全ての点で沈降となった（図8）。虻田高校観測定点からの観測では、7月下旬以降は約0.2cm/dayの沈降率であったが、より活動域に近い虻田泉観測定点からの観測では、この間約0.001～0.022cm/dayの沈降率であった（表1）。これは、観測距離がより大きい虻田高校観測定点からの観測値に、沈降量の過大見積りを含む可能性もある。

これらの推移は上空から観察されている噴火活動の静穏化にも対応している。また、周辺部でGPSにより観測された地殻変動の傾向より若干遅れて生じている。これは隆起の鈍化あるいは沈降への反転が隆起中心よりも周辺部から観測されていることを示す。

3.4 追跡観測による地殻変動

虻田高校観測定点からは、活動域内において明瞭に視認可能な個所の座標を追跡して地殻変動の見かけの変化を観測した。それは、光学的に精密に座標を読み取らねばならないため、ターゲットとしてなるべくピンポイントに近い個所を選んだ。よって人工的な構造物の角等が多い。図9の下図は追跡観測のターゲットとして選んだ7個所の見かけの位置を示す。上図の7枚の図は、下図に示したA～G点の、5月11日～27日のセオドライト観測による2次元的な見かけ変動を示した。いずれの図も縦横比は1：1で、縮尺はすべて1目盛が0.02度角で約50cmに相当する（A点「わかさいも工場」、B点「傾いた家」、C点「あずまや」、D点「焼却場煙突」、E点は「幼稚園」、F点は「階段」、G点は「白樺」）。図8の下図の観測範囲のほぼ中央部の稜線上にあるB点（N-B火口付近、定点から約1,500m）はほぼ直上に約160cm隆起し、これを中心とその左右の観測点では外側に広がるように隆起

している傾向がある。一方、E点（定点から約1,100m）、F点（定点から約1,200m）及びD点（定点から約2,000m）のように、西山西麓火口群より見かけ上手前や奥にある観測点では隆起量は小さい。これらのことから、地殻変動の活動は火口群のうちのN-B火口付近の直下を中心起こっており、放射状に押し出すように起きていると推察できた。

3.5 樹木の傾度分布による地殻変動域の推定

セオドライトを用いて稜線を測定し地殻変動を観測することは、裸地のような明瞭な稜線が測定できない場合、非常に困難である。虻田高校観測定点においては水平角225～239度の範囲に限って地殻変動を確認したが、その左右（北西方向と南東方向）にまで地殻変動域は及んでいることが推察できた。推察できたひとつの理由として、稜線あるいは山肌に植生している樹木が、西山西麓火口群を中心に一様に外側に傾いていることである。これは、地殻変動により植生している樹木の基盤が傾斜変動していることによるものと推定される。横山（1980）は、1977年の有珠山噴火時に伴った地殻変動で、巨大な山塊に植生した樹林が同様に傾いていることを報告している。今回、この様子をセオドライトによって正確に描写した。観測日時は5月18日で、この時期はまだ樹木が葉をつける前であり、とりわけ白樺の主幹は明瞭に確認できた。その白樺の主幹が明瞭なものだけを選んで、各々の傾度を測量した。図10の下図は主幹の傾きの様子を表したものである。水平角225.4～226.4度の範囲には観測可能な樹木がなく不明であるが、稜線測量が不可能であった水平角225度より左方（北西方向）においても、地殻変動が及んでいることがわかる。

図11は樹木の主幹の傾きの大きさ分布を示したものである。注目されるべきことは、観測により隆起中心であると推定されたN-B火口付近から左方に離れても傾度が小さくなっておらず、むしろ大きな値が観測されたことである。

なお、この観測を引き続き継続するつもりであったが、その後樹木の主幹は生い茂りつつある新緑に隠され、再び観測することはできなかった。

4. 考察

得られた観測結果をもとに、地殻変動の力源の推定を行った。計算は地殻変動解析支援プログラムMICAP-G

(内藤他, 1999; Y.Okada, 1992) を用いた。計算方法は山川・茂木モデル (Mogi, 1958) に基づいて、均質半無限弾性体中に点力源を仮定して計算を行って、最もふさわしい解を得た。Lame 定数は $\mu = \lambda$ としている (ポアソン固体を仮定)。観測開始から隆起活動が続いた、5月11日~7月21日までの稜線変化のデータは、N-B 火口直下 330 m に点力源を置き、約 230 万 m^3 の体積膨張があったとすれば、計算結果と調和的である。また、追跡観測の結果も得られている5月11日~5月27日の16日間の、稜線変化と追跡観測結果からは、N-B 火口直下 300 m、体積膨張約 80 万 m^3 とすれば、計算結果と調和的であった (図12)。これらの計算から、5月~7月にかけて体積変化率に変化はあったものの、力源の場所についてはほぼ変化はなかったと推定される。

西村他 (2000) による、西山西麓火口群周辺域の複数観測点からの光波測距観測及びセオドライト観測では、ほぼ N-B 火口直下の約 250 m に圧力源をおいた場合の山川・茂木モデルで説明が可能であるという。これは今回の計算結果とはほぼ一致する。また、観測期間が異なるためそのまま比較はできないが、樹木の傾度分布からは隆起中心域から 250 m 程度の距離で最大傾度が観測されており、上のモデルとも概ね調和的である。

しかしながら、今回の西山西麓火口群周辺の地殻変動は非常に大きく、数 m の比高をもつ断層群が発達するほどであった。上のモデルは、弾性体近似をもとにしており、塑性的変形を考慮したモデル計算が今後の課題である。

5. まとめ

2000年3月31日の有珠山噴火開始後、5月から9月の期間、セオドライトを用いて、有珠火山西山西麓火口群周辺の地殻変動を観測した。

稜線観測によると、5月から7月までは隆起を継続したが、隆起速度は単調減小した。この間に N-B 火口付近で最大約 5.5 m の隆起を観測した。概ね 8 月からは変動は反転し、沈降傾向となった。9月中旬までに約 15 cm の沈降を示した。

また、追跡観測により、N-B 火口付近を中心に放射状に隆起・押し出しが継続していることを確認した。

樹木の傾度分布による観測では、地殻変動分布は稜線観測で確認した領域の周辺にも広がっており、ここでは、相対的に隆起変動の成分よりも水平変動の成分の方が卓

越していた。

以上のことから、西山西麓火口群での噴火開始後、火口群周辺にもたらした局所的な地殻変動は、N-B 火口直下に力源をもつモデルで説明可能な潜在溶岩円頂丘が成長したことによるものと思われる。

今回の噴火活動に際して、国土地理院 (2000c) は合成開口レーダーを用いた観測で、N-B 火口付近を中心として周辺に押し出す傾向の地盤変動を確認した。また、気象庁の設置した西山西麓火口群周辺部の GPS 観測では、これらの地域の地殻変動の停滞傾向をおよそ 1 ヶ月ほど先行して観測した。しかし、これらの観測では活動中心の変動を常時監視することはできず、我々が行った光学的なセオドライトによる地殻変動の観測が活動の現況把握に非常に有効なデータの一つとなった。

6. 謝辞

この観測を行うに際し、有珠山噴火非常災害現地対策本部には多大なる協力を頂き、お礼申し上げます。また、札幌管区気象台地震火山課の方々には、観測の協力を頂き、記してお礼申し上げます。山里課長補佐 (火山課) には、様々な有益なコメントを頂きました。ここに記して謝意を表します。

また、この観測を行うために、雲仙岳測候所には長期間にわたってトータルステーションを借用させていただきました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 北海道立地質研究所 (2000) : 地殻変動観測 (GPS), 2000年有珠山火山噴火観測速報, 23-26.
- 気象庁 (2000a) : 気象庁 GPS 連続観測, 第35回火山噴火予知連絡会有珠山部会記者会見資料, 28-29.
- 気象庁 (2000b) : 平成12年4月地震・火山月報 (防災編), 22-26.
- 気象庁 (2001) : 平成12年12月地震・火山月報 (防災編), 61-62.
- 国土地理院 (2000a) : 有珠山噴火口付近の水平位置・高さの変化 (空中写真による精密計測), 平成12年5月19日記者発表資料.
- 国土地理院 (2000b) : 第85回火山噴火予知連絡会記者発表資料, 14-17.
- 国土地理院 (2000c) : 有珠山の地殻変動 (22), 平成12年4月22日記者発表資料.

- 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.
- 内藤宏人・吉川澄人 (1999) : 地殻変動解析支援プログラムMICAP-Gの開発, 地震2, 52, 101-103.
- 西村裕一, 宝田晋治, 斉藤英治, 宇都浩三, 風早康平, 松島健, 高木朗充 (2000) : 有珠山2000年噴火に伴う西山麓の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 2, 45.
- Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- 昭和新山生成50周年記念事業実行委員会 (1994) : 麦圃生山, 12-13.
- Takagi, A., Shouno, N., Mori, H. and Nishiwaki, M. (1995) : Growing Process of Lava Dome at Unzen Volcano. 国際火山ワークショップ1995小論文・要旨集, 177.
- 雲仙岳測候所 (1997) : 雲仙岳測候所における火砕流・土石流・測量観測の経緯, 福岡管区気象台技術通信, 4, 173-212.
- 横山泉 (1980) : 火山の探求 (文部省学術振興会の映画), 株式会社東映.

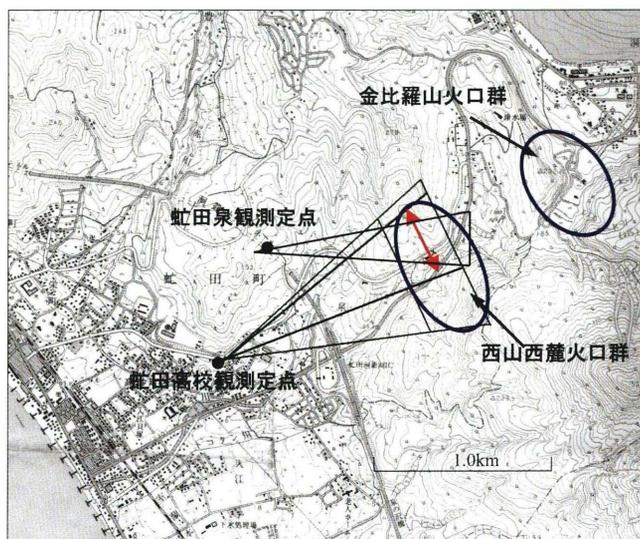


図1 観測点と西山西麓火口群の位置、及び見かけの観測範囲
(国土地理院地形図2万5千分の一「虹田」(1999年)に加筆)

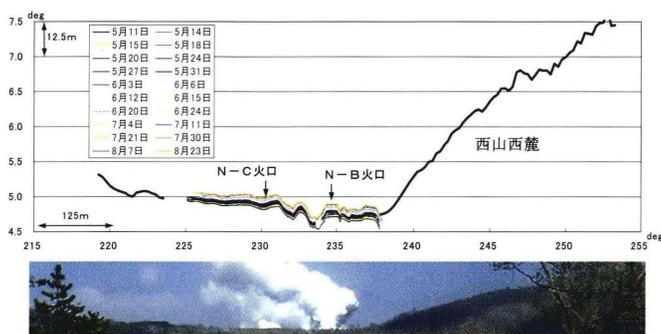


図2 西山西麓火口群周辺の稜線変化(虹田高校観測点)
上図: 5月11日～8月23日の稜線変化、西山西麓火口群の位置及び見かけの観測範囲
下写真: 虹田高校観測点からの遠望風景。2000年5月18日14:01

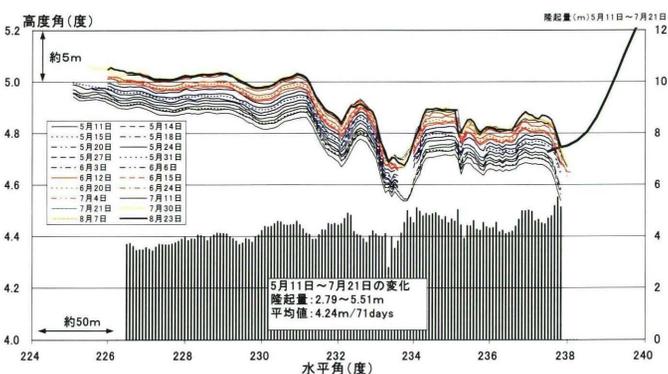


図3 西山西麓火口付近周辺の稜線変化(虹田高校観測点)
2000年5月11日～8月23日。隆起量のヒストグラムは5月11日～7月21日の変化を表す。最大で5.51m。

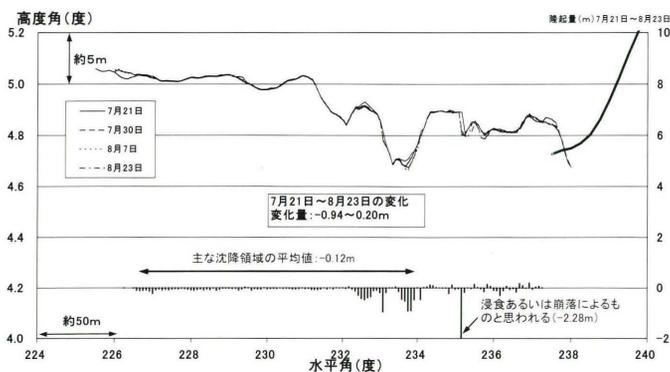


図4 西山西麓火口付近周辺の稜線変化(虹田高校観測点)
2000年7月21日～8月23日。7月下旬から地殻変動は停滞ないしは沈降に転じた。主な沈降領域は火口を含む北西側(みかけ上左側)であった。

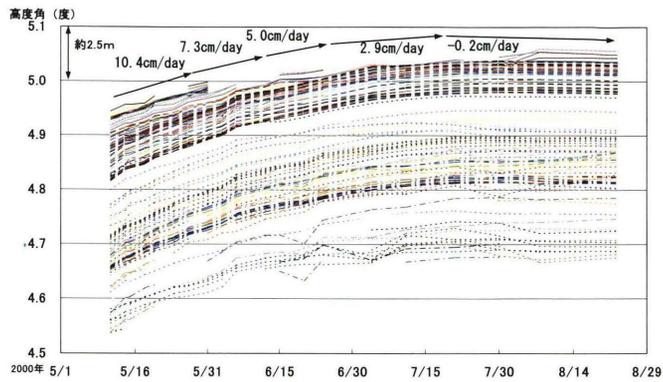


図5 西山西麓火口群周辺の稜線高度角の時間変化
2000年5月11日～8月23日。虻田高校観測定点での各測定水平角(5分角間隔)における稜線の高度角の時間変化を表す。図中の数字は平均の変化量を示す。7月下旬以降に停滞ないしは沈降に転じた。

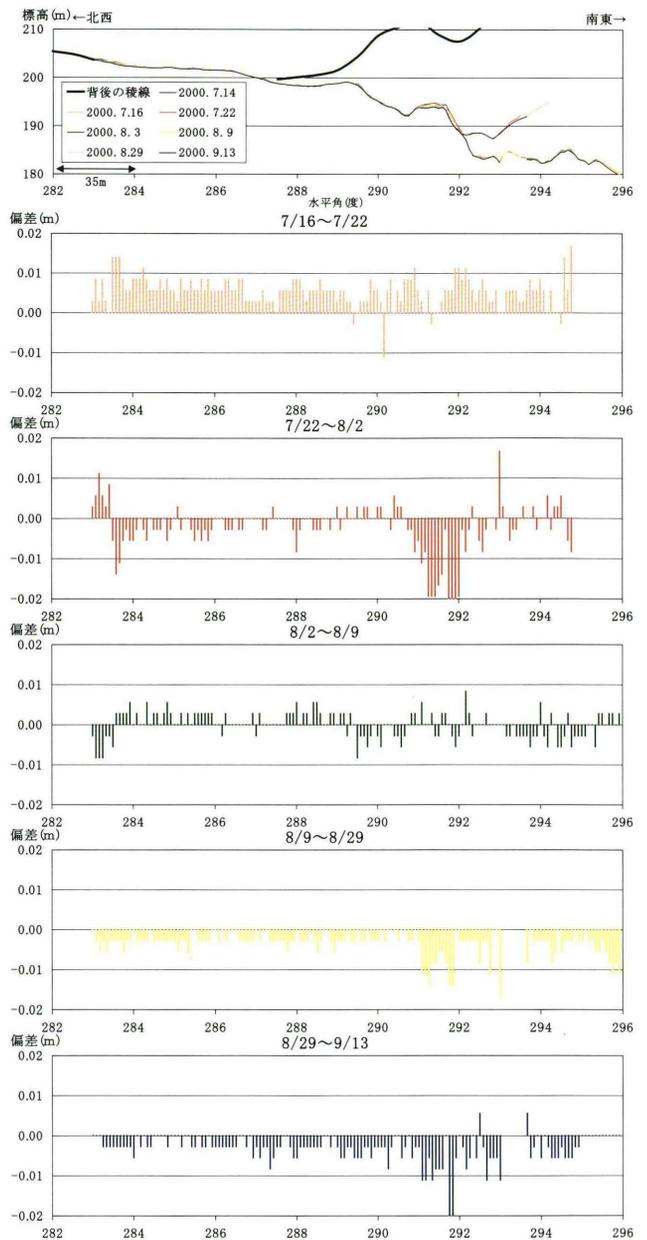


図7 西山西麓火口周辺の稜線変化と各期間の変化量
2000年7月14日～9月13日 (虻田泉観測定点)
7月下旬から地殻変動は停滞ないしは沈降に転じた。沈降はより南方(みかけの右方向)で観測された。

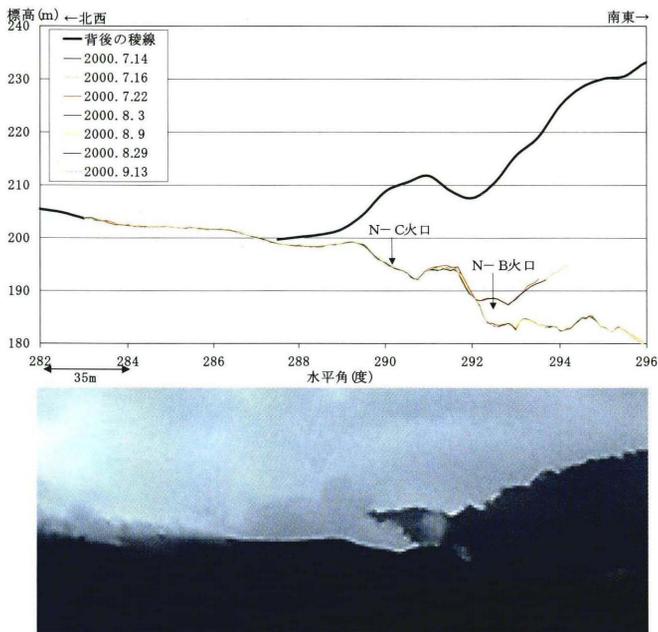


図6 西山西麓火口群周辺の稜線変化(虻田泉観測定点)
上図: 7月14日～9月13日の稜線変化、西山西麓火口群の位置及び見かけの観測範囲
下写真: 虻田泉観測定点からの遠望風景。2000年7月13日 13:38

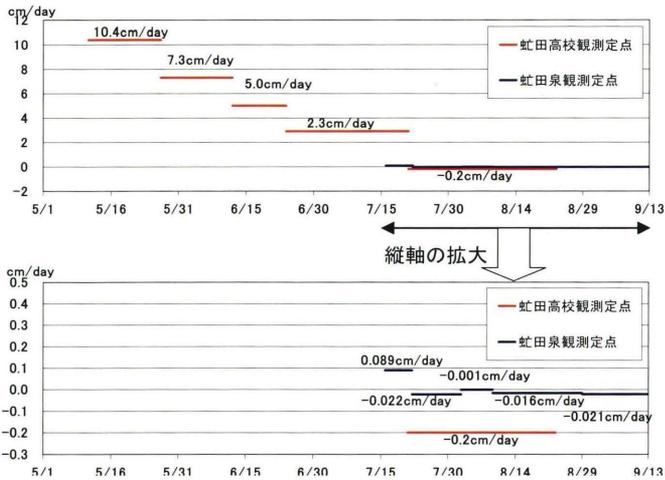


図8 西山西麓火口群周辺の隆起（沈降）速度の時間変化図
2000年5月11日～8月29日（赤色：虹田高校観測定点 青色：虹田泉観測定点）虹田高校観測定点から観測された沈降量は過大見積りるの可能性がある。

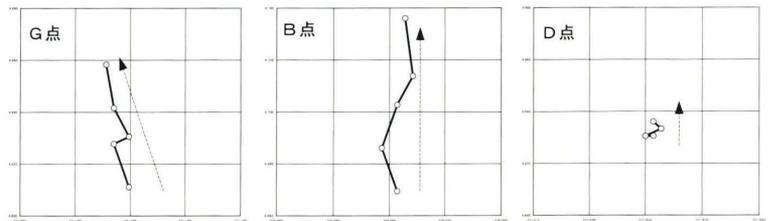


表1 西山西麓火口群周辺の隆起（沈降）速度の時間変化図
2000年5月11日～8月29日。各測定水平角（5分角間隔）における稜線高度の時間変化の平均を表す。7月下旬以降に停滞ないしは沈降に転じた。虹田高校観測定点から観測された沈降量は、浸食・崩落のため、過大見積りるの可能性がある。

期間	平均 (cm/day)	変位量/日数	最小値 (cm)	最大値 (cm)
虹田高校観測点				
5.11-5.27	10.4	166cm/16days	114	217
5.27-6.12	7.3	117cm/16days	55	160
6.12-6.24	5	60cm/12days	21	102
6.24-7.21	2.9	77cm/27days	-30	111
7.21-8.23	-0.2	-8.0cm/33days	-94	20
虹田町泉観測点				
7.16-7.22	0.089	0.536cm/6days	-1.1	1.7
7.22-8.2	-0.022	-0.246cm/11days	-4.2	1.7
8.2-8.9	-0.001	-0.004cm/7days	-0.8	0.8
8.9-8.29	-0.016	-0.330cm/20days	-1.7	0.0
8.29-9.13	-0.021	-0.321cm/15days	-2.8	0.6

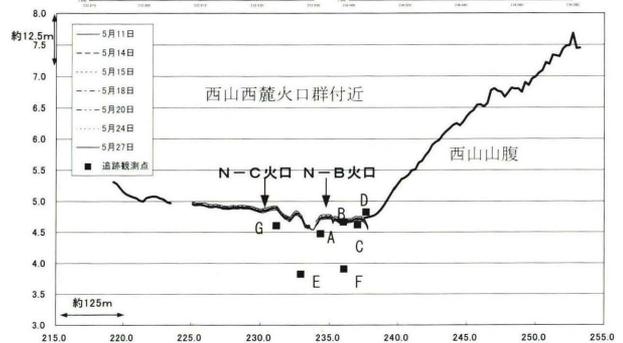
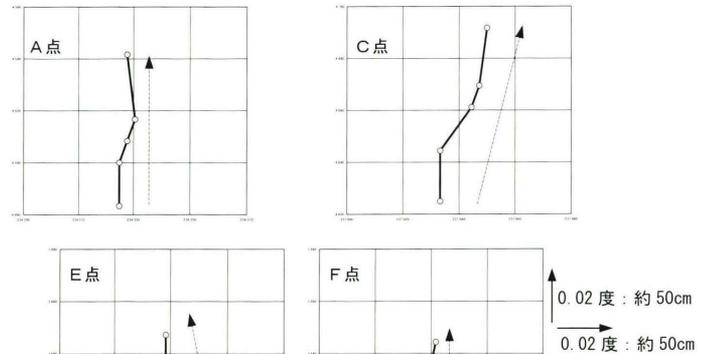


図9 追跡観測による地殻変動

上図：追跡観測ポイントのみかけ変動。下図に示したA～G点の、5月11日～27日のセオドライト観測による2次元的な見かけ変動。いずれの図も縮尺は同じで、縦横比は1：1。1目盛は0.02度で約50cm。（A点「わかさいも工場」、B点「傾いた家」、C点「あずまや」、D点「焼却場煙突」、E点は「幼稚園」、F点は「階段」、G点は「白樺」）

下図：西山西麓火口群付近の稜線変化図と追跡観測点の配置図。

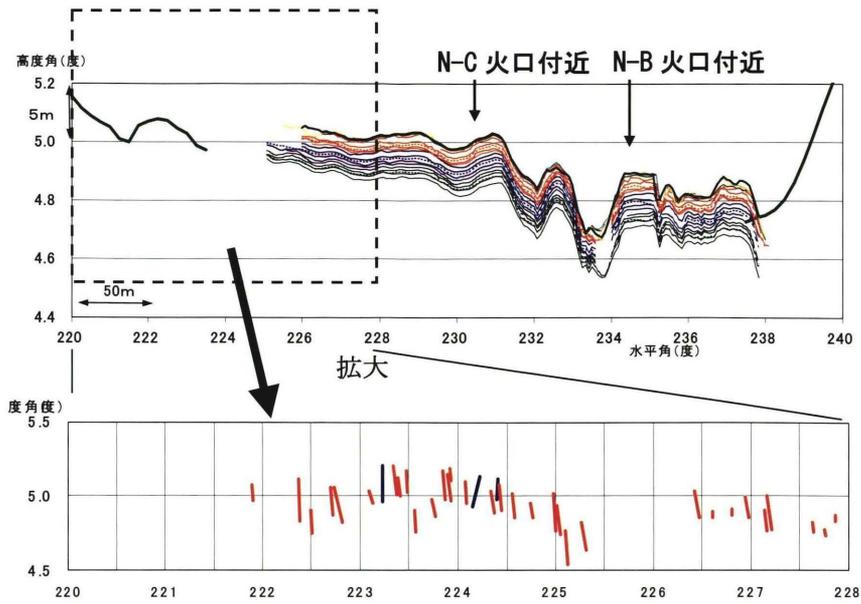


図 10 西山西麓火口群周辺の隆起域の樹木の傾度分布図 1

2000年5月18日 虻田高校観測定点から。

上図：観測範囲の全景

下図：樹木の傾度の様子（上図の破線内における観測結果）

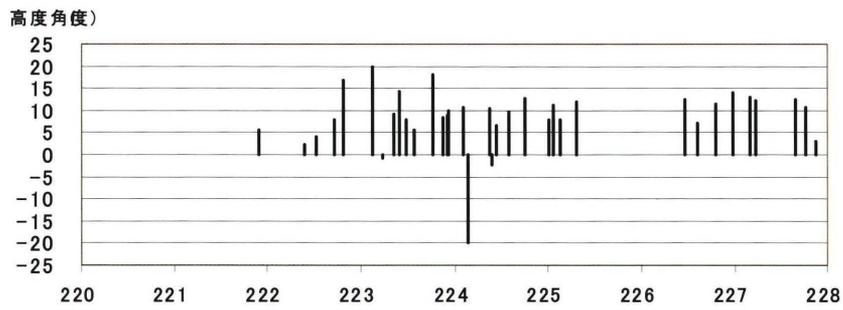


図 11 2000年5月18日 虻田高校観測定点から。

樹木の傾度の分布図（左向きに傾いた角度を正とする）

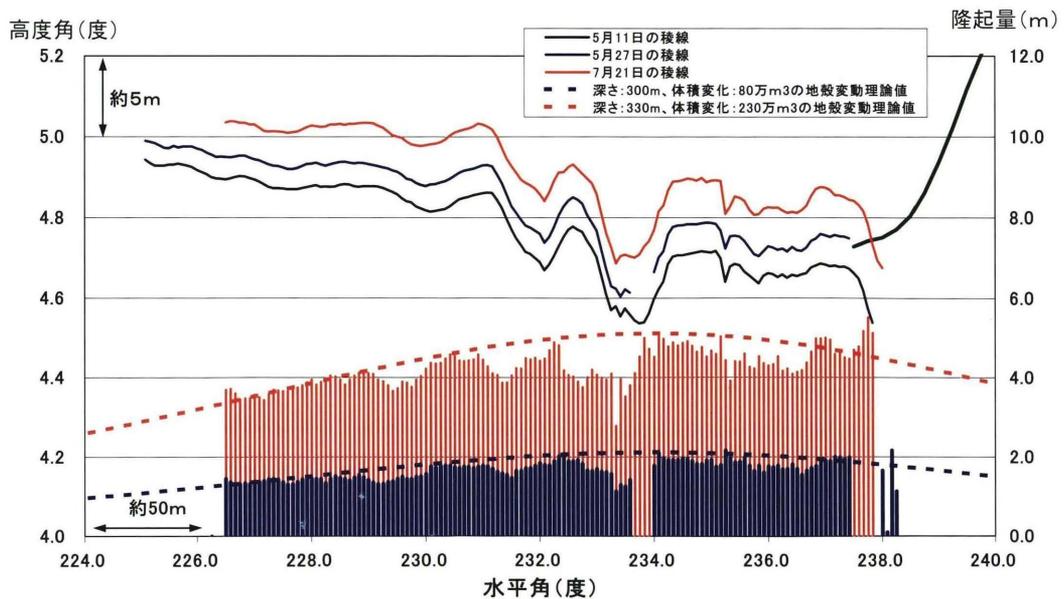


図 12 西山西麓火口群周辺の地殻変動の観測結果と理論値

黒色の折線が2000年5月11日の稜線、青色が5月27日の稜線、赤色が7月21日の稜線。

青色の棒グラフが2000年5月11～5月27日の隆起量、赤色が5月11～7月21日の隆起量。

青色破線の曲線は、N-B火口直下300mの点力源で80万 m^3 の体積変化を与えた場合の隆起量の理論値、赤色破線はN-B火口直下330mの点力源で230万 m^3 の体積変化を与えた場合の隆起量の理論値。