

有珠火山2000年噴火の山体変動 —北東山麓割れ目群の変位およびセオドライトによる北麓, 西麓の観測結果—

羽坂俊一¹ 西村裕一² 宝田晋治³ 高橋裕平³ 中川 充³ 斎藤英二⁴
渡辺和明⁴ 風早康平⁵ 川辺禎久⁶ 山元孝広⁵ 廣瀬 亘⁷ 吉本充宏³

Toshikazu HASAKA, Yuichi NISHIMURA, Shinji TAKARADA, Yuhei TAKAHASHI, Mitsuru NAKAGAWA, Eiji SAITO, Kazuaki WATANABE, Kohei KAZAHAYA, Yoshihisa KAWANABE, Takahiro YAMAMOTO, Wataru HIROSE and Mitsuhiro YOSHIMOTO (2001) Ground deformation of the Usu 2000 eruption: Crack deformation measurements and theodolite monitoring at the northern and western foot of Usu Volcano, Japan. Bull. Geol. Surv. Japan. Vol. 52 (4/5), p. 155 - 166, 11 figs.

Abstract: Numerous cracks were observed at the northern and western part of the Usu Volcano due to the 2000 eruption. Many echelon-type cracks were found at the northeastern foot of the volcano from March 30. Horizontal displacement, width, and vertical displacement of cracks were measured on March 31, April 1, and April 2. Deformation rates were dramatically decreased after the first eruption from 13:07 on March 31. Twelve targets were selected at the northern foot of the Usu Volcano for theodolite monitoring. The monitoring was started on April 5. Northward horizontal movements in the whole northern foot of the volcano were observed until April 6. Deformation area became smaller and limited to the northwestern part of the volcano until April 10. Horizontal movements at the northwestern foot area were stopped around April 25. Many graben-type normal faults were developed at the center of the uplifting area in the western foot of the volcano. Eight targets were selected in and around the uplifting area for the theodolite monitoring. Uplifting and lateral movements at 500m west of the uplifting center were stopped at the end of June. Uplifting and lateral movements in the uplifting-center area were stopped at the end of July. Uplifting rates at the targets in the uplifting center were 90 cm/day - 30 cm/day during the middle of April and the deformation rate was decreased gradually. Targets in the uplifting center were uplifted ca. 10 m and moved toward west ca. 1 m - 3.5 m by the monitoring from an observation point at the southwestern foot of the volcano.

要 旨

有珠火山2000年噴火では,山麓に多くの割れ目群が形成された。3月30日からは有珠火山北東麓の温泉地区でも多くの雁行状割れ目が見つかった。3月31日,4月1日,4月2日に割れ目群の水平変位,開口幅,落差を計測した。その結果,3月31日13時7分の噴火開始後,変位速度が大きく減少したことが明らかになった。有珠火山北麓12ヶ所の目標点を定めて,4月5日からセオドライト観測を行った。その結果,4月6日までは北麓全体で北側へせり出すよう

な水平変動が観察できた。4月10日ごろには,北麓の変動域が北西麓の洞爺湖温泉周辺に限られるようになり,4月25日頃には洞爺湖温泉周辺の水平変動はほぼ停止した。洞爺湖温泉西の洞爺湖温泉中学校は4月5日~25日の間に約1.6m北側へせり出した。西麓8ヶ所の目標点を定めて,4月13日から地溝状の正断層群が発達した隆起中心域とその周辺のセオドライト観測を行った。その結果,隆起中心から西南西500mの地点では6月下旬に隆起がほぼ停止し,隆起中心付近では7月下旬に隆起がほぼ停止したことが明らかになった。隆起中心近くの目標点は,4月中

¹ 北海道センター研究環境管理室

(AIST Hokkaido Research Environmental Management Office)

² 北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター

(Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

³ 北海道地質調査連携研究体 (Hokkaido Branch, GSJ)

⁴ 地質調査情報部 (Geoinformation Division, GSJ)

⁵ 深部地質環境研究センター

(Research Center for Deep Geological Environments, GSJ)

⁶ 地球科学情報研究部門 (Institute of Geoscience, GSJ)

⁷ 北海道立地質研究所 (Geological Survey of Hokkaido)

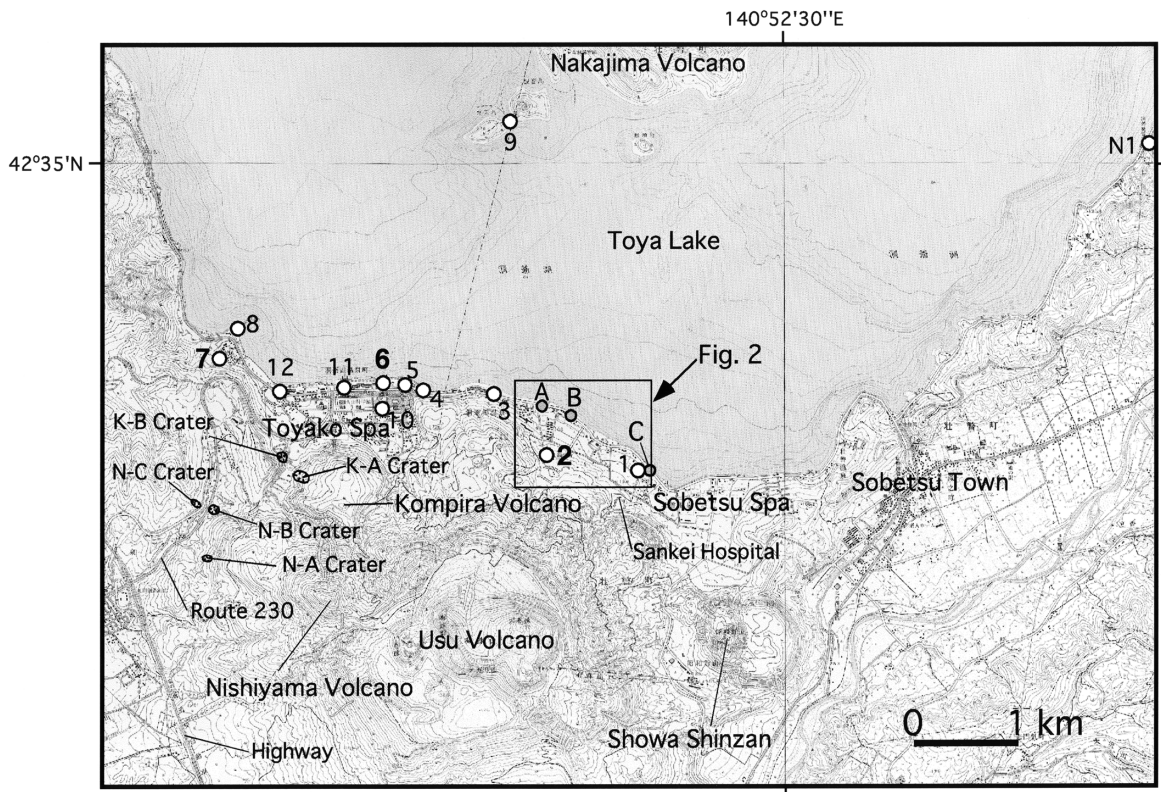
Keywords: Usu Volcano, Usu 2000 eruption, ground deformation, crack, theodolite, monitoring

旬で90cm/日～30cm/日の速度で隆起したが、次第に隆起速度が減少し、7月下旬にはほぼ隆起が停止した。4月13日～7月下旬の期間に隆起中心付近の目標点は約10m隆起し、有珠火山南西の観測点から見て約1m～3.5m西に移動した。

1. はじめに

西南北海道の有珠火山は2000年3月31日13時7分に西側山麓で噴火を開始した(宝田・羽坂, 2000; 川辺, 2000; 川辺ほか, 2000)。4日前の3月27日から有珠火山周辺の火山性地震が急増した。翌28日には地震数が増加し、有感地震や低周波地震も観測された(岡田ほか, 2000; 札幌管区气象台ほか, 2000; 高木・高濱, 2000)。29日, 30日には有珠火山北西の北屏風山西尾根の斜面で断層や地割れが見つかり、山体崩壊、津波の危険性が議論された。3月30日からは、有珠火山の北東山麓の壮瞥温泉地区でも

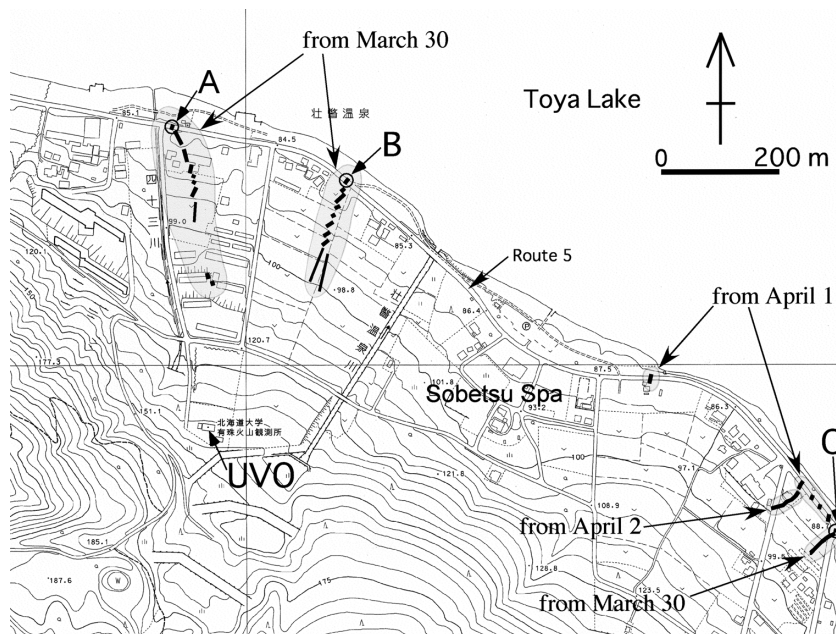
右横ずれ雁行割れ目群や開口割れ目群が見つかった(第1図; 第2図; 広瀬ほか, 2000)。3月29日に現地入りした地質調査所(当時)の宝田・風早・川辺は、北海道立地質研究所の廣瀬や北海道大学(当時)の吉本らとともに、3月31日午前から割れ目群の分布や変位量の調査を行った。3月31日午前, 4月1日午前, 4月2日午前の計3回計測を行った。4月1日と4月2日の計測では3月31日の夜から合流した山元も調査に参加した。その後は、北麓への立ち入りが制限されたため、遠方からでも反射ミラーなどの設置なしに全体の変位量を計測することができるセオドライトによる観測に切り替えた。4月4日から北海道支所(当時)の羽坂は、洞爺湖東岸の洞爺水力発電所前の高台から有珠火山北麓の12点の目標点を定めて観測を開始した。その後、山体の顕著な変動が西山麓で見られるようになったため、4月13日から有珠火山南西の虻田歴史公園の定点からもセオドライトを使って西麓, 南西麓の山体変動の観測を開始した(宝田ほか, 2000)。



第1図 有珠火山北麓のセオドライト観測地点(N1)と目標点(1～12)および北東麓の割れ目群(A,B,C)。N-A, N-B, N-C火口は、4月上旬に西山西麓に形成された活発な噴火口である。K-A火口, K-B火口は4月上旬に金比羅山北西斜面に形成された活発な噴火口である。三恵病院は、1977-78年の地殻変動で倒壊した病院を示す。図中の四角は第2図の範囲を示す。地形図は、国土地理院発行の25,000分の1地形図「有珠火山とその周辺」(平成12年3月調整)を使用した。

Fig.1 Observation site (N1) and targets (1-12) for theodolite monitoring at the northern foot of Usu Volcano. N-A, N-B and N-C craters are active craters formed at the western foot of Nishiyama Volcano in early April 2000. K-A and K-B craters are active eruption craters formed at the northwestern foot of Kompirayama Volcano. The Sankei Hospital was destroyed by an active fault during the 1977-78 eruption. A square in the figure indicates area of Fig. 2. A 1:25,000-scale Mt. Usu topographic map published by GSI on March 2000 was used.

有珠火山2000年噴火の山体変動（羽坂 ほか）



第2図 有珠山北東麓の壮瞥温泉地区の割れ目群。地点A,B,Cは、計測を行った道道5号線上の割れ目群の位置を示す。地形図は、国土地理院発行の5,000分の1地形図「平成12年(2000年)有珠山噴火地形図I(国土地理院技術資料C・1-NO.284; X2-PF31,32)」を使用した。

Fig.2 Cracks in the Sobetsu Spa area at the northern foot of the Usu Volcano, that formed from March 30, April 1, and April 2. A, B, and C indicate crack observation points on Route 5. A 1:5,000-scale Mt. Usu 2000 eruption topographic map published by GSI (C・1- NO.284; X2-PF31, 32) was used.

この論文では、北東麓の割れ目群変位の計測結果、セオドライトによる北麓、西麓の変動観測結果を紹介する

2. 北東山麓割れ目群の変位

2.1 割れ目群の分布

3月30日から有珠火山北東麓の壮瞥温泉地区では、多くの雁行状右横ずれ割れ目群や開口割れ目群が確認された(第2図)。3月31日の午前中に行った現地調査では、北海道大学有珠火山観測所(以下UVOと略す)への上り口付近(四十三川の東、第2図A)、壮瞥温泉ポート乗り場付近(第2図B)、壮瞥研修センター北の道路付近(第2図C)で雁行割れ目群を確認している。

第2図地点Aの割れ目群は大部分が右横ずれ西落ちの割れ目群や開口割れ目であった。割れ目の一部では東落ちの部分も見られた。これらの割れ目群は全体としてN13°Wの方向に伸びており、約300mにわたって追跡できた。有珠火山北東麓の道道5号線上での地点Aの各々の割れ目群(第3図a、第4図A)はN2°E~N44°Eの方向に伸びていた。3月30日の午前9時ごろにこの地点Aを通過した吉本らのグループは割れ目を確認していない。しかし、同日16時ごろ同グループは割れ目を確認している。したがって、3月30日の昼頃に地点Aでの割れ目群の形成が始まった可能性が高い。

第2図地点Bの割れ目群も大部分が右横ずれ西落ちの

割れ目群や開口割れ目であった。一部の割れ目は部分的に東落ちの部分も見られた。これらの割れ目群は全体としてN24°Eの方向に伸びており、約200mにわたって追跡できた。道道5号線上の各々の割れ目群(第4図B)は、N50°E~N70°Eの方向に伸びていた。道路の端の部分では道路自体の継ぎ目などの影響で道路に平行な割れ目もいくつかみられた。地点Bでのこれらの割れ目群も、3月30日午前9時頃には見られず、同日16時頃に発見されている。したがって、これらの割れ目群も3月30日の昼頃から形成が始まった可能性が高い。

第2図地点Cの割れ目群も大部分が右横ずれ西落ちの割れ目群や開口割れ目であった。一部の割れ目は部分的に東落ちの部分も見られた。これらの割れ目群は全体としてN42°Eの方向に伸びており、約75mにわたって追跡できた。道道5号線上では、各々の割れ目(第3図b、第4図C)は大部分がN70°W~N80°Eの方向に伸びていた。しかし、道路の継ぎ目の部分では、道路自体の内部構造に影響されて、道路と平行な方向を向いている割れ目も見られた。地点Cでのこれらの割れ目群は3月30日16時頃には確認されていない。しかし、31日の10時頃にすでに形成されていた。したがって、地点Cの割れ目群は30日の夜から形成が始まった可能性が高い。

4月1日の午前中の調査では新たに地点Cの割れ目群北西の道道5号線上に、4ヶ所の雁行割れ目群が確認できた(第2図)。また、これらの割れ目群の北西350m付近の道



第3図 a: 地点Aの右横ずれ雁行状割れ目群(道路の北西側からみた状況;3月31日10時頃). b: 地点Cの右横ずれ割れ目(道路の北西側からみた状況;4月1日11時頃).

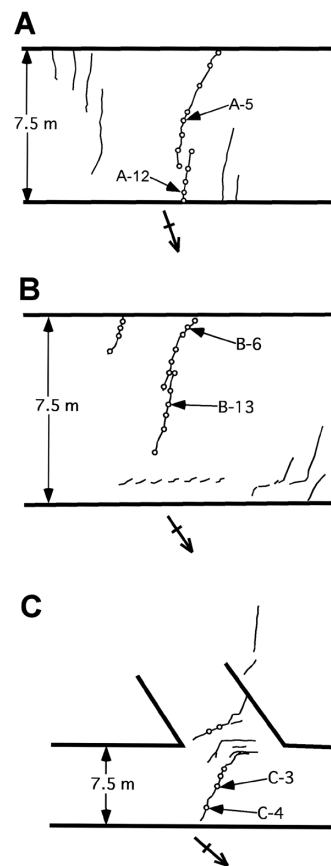
Fig.3 a: Echelon-type, right-lateral moving cracks at site A (taken from NW side of the Route 5; ca. 10:00 AM on March 31). b: A right-lateral moving crack at site C (taken from NW side of the Route 5; ca. 11:00 AM on April 1).

道5号線上でも割れ目が確認できた。さらに、地点Cの東側750mまでの範囲では、道道5号線沿いの歩道上4ヶ所でプレッシャーリッジが確認できた。4月2日午前の調査ではさらに地点Cの北西80mの地点でN83°W~N52°Eの方向に伸びる雁行割れ目群を新たに発見した(第2図)。

第2図の地点A,B,Cの右横ずれ雁行割れ目群の全体的な伸びの方向は、ほぼ有珠山の中心付近に向いている。このことは、有珠山深部へのマグマの貫入によって山体全体が膨張し、その歪みによって有珠山北麓全体が北側へ押し出されるような方向に変位したことを示唆している。こうした変位は前回の1977-1978年の噴火の際にも確認されている(Katsui *et al.*, 1985; 門村ほか, 1988)。前回の1977-78年の噴火では、山頂付近や東麓、北東麓、北西麓などで多数の割れ目・断層群が発達した。北東麓の割れ目・断層群は、1977年8月・9月から始まり、1978年末まで続いた。数cm~数10cmの右横ずれ割れ目群の他に、いくつかの左横ずれ割れ目群も見られた。第2図地点Cの南西400mの地点にある三恵病院(第1図)は、1977-78年の地殻変動で倒壊した。三恵病院を通る断層群の伸長方向は、地点Cから南西方向に伸びている割れ目群の延長線上にあたる。三恵病院を通る断層群は、1910年の噴火の際の地殻変動でも活動している(Katsui *et al.*, 1985; 門村ほか, 1988)。この1910年と1977-78年の噴火の際に活動した断層群が動いたことが、4月1日と4月2日に地点C付近で多数の割れ目群が形成された原因である可能性が高い。

2.2 割れ目群の変位量

第2図地点A,B,Cの3ヶ所の道路上で割れ目群の変位量を計測した(第4図)。地点Aで13ヶ所、地点Bで18ヶ所、地点Cで6ヶ所(第4図の白丸で示した部分)の雁行状割れ目群の変位量を計測した。変位量の測定では、測定日ごとに測定位置にマーカーで印をつけて、折れ尺や定規で、



第4図 地点A,B,Cの道路上で見られた割れ目群の平面スケッチ。割れ目上の小さい白丸は変位を計測した位置を示す。A-5, A-12, B-6, B-13, C-3, C-4は第5図に示したデータの測定位置を示す。

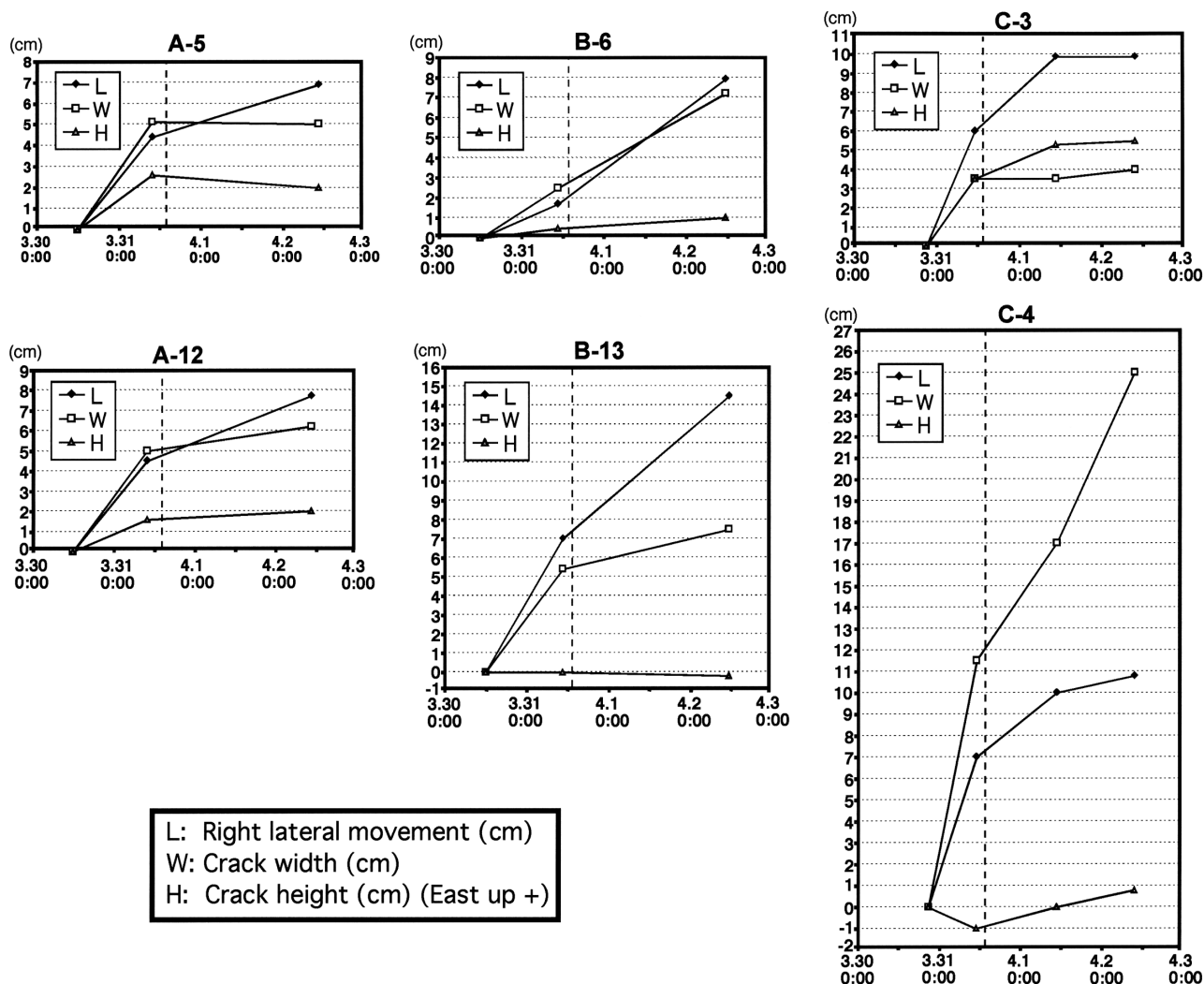
Fig.4 Plan view of crack distributions on the Route 5 at the sites A, B, and C. A-5, A-12, B-6, B-13, C-3, and C-4 indicate measurement points for crack deformation.

水平変位量(L, 右横ずれを正とする), 開口幅(W), 落差(H, 西落ちを正とする)を読み取った. 地点Aの計測は, 3月31日9時45分頃と4月2日10時40分頃の2回, 地点Bの計測は3月31日10時15分頃と4月2日11時15分頃の2回, 地点Cの計測は3月31日11時5分頃, 4月1日10時45分頃, 4月2日9時50分頃の3回行った.

地点Aでは, 3月31日9時45分頃の計測で, 累積水平変位量が最大4.5cm, 開口幅が最大10.4cm, 西落ちの落差が最大5.4cmとなった. 4月2日10時40分頃の計測では, 累積水平変位量が最大7.7cm, 開口幅が最大10.4cm, 西落ち落差が最大5.4cmとなった. 地点Aでの13ヶ所の計測結果のうち代表的なA-5とA-12の2ヶ所(第4図)の計測結果を第5図に示す. この図では, 地点Aでの割れ目の形成が3月30日12時に始まったと仮定しているが, 数時間程度ずれる可能性がある. このことを考慮しても, A-5とA-12の場

所の変位は, 3月31日13時7分の最初の噴火以降, 水平変位, 開口幅, 落差の3成分とも変位速度が大きく減少していることがわかる.

地点Bでの3月31日10時45分の16ヶ所の計測では, 右横ずれ水平変位が最大7.0cm, 開口幅が最大16.5cm, 西落ち落差が最大1.0cmとなった. 4月2日11時15分の計測では累積水平変位量が最大14.5cm, 開口幅が最大16.5cm, 西落ち落差が最大1.0cmとなった. 地点Bでの16ヶ所の計測結果のうち, 代表的なB-6とB-13の2ヶ所(第4図)の測定結果を第5図に示す. この図でも, 地点Bでの割れ目群の形成時間は, 数時間程度ずれる可能性がある. B-13の結果は, A-5やA-12と同様に3月31日13時7分の噴火以降に, 水平変位, 開口幅の変位速度が減少していることを示している. 一方, B-6の結果は, 噴火の前後で変位速度にほとんど差がないことを示している. この原因として, B-6



第5図 地点A(A-5, A-12), 地点B(B-6, B-13), 地点C(C-3, C-4)の割れ目変位の計測結果. L:右横ずれ水平変位(cm), W:開口幅(cm), H:落差(cm;西落ちを正とする).

Fig. 5 Results of crack deformation measurements at site A (A-5, A-12), site B (B-6, B-13), and site C (C-3, C-4). L: right-lateral horizontal displacement (cm). W: crack deformation (cm). H: vertical displacement (cm).

の場所が道路の端に近いので、噴火後も局所的に歪みが集中し変位速度が減少しなかった等の要因が考えられる。

地点Cの3月31日11時5分ごろの6ヶ所の計測では、右横ずれ水平変位が最大7.0cm、開口幅が最大11.5cm、西落ち落差が最大4.0cmとなった。4月1日10時45分頃の計測では、累積水平変位が最大10.0cm、開口幅が最大17.0cm、西落ち落差が最大6.0cmとなった。4月2日9時50分頃の計測では、累積水平変位が最大10.8cm、開口幅が最大25.0cm、落差が最大6.5cmとなった。地点Cの6ヶ所の計測結果のうち代表的なC-3とC-4の2ヶ所(第4図C)の結果を第5図に示す。この図では、地点Cの割れ目群の形成が3月30日21時頃に開始したと仮定しているが、数時間～半日程度ずれる可能性がある。C-3では、A-5、A-12、B-13と同様に3月31日13時7分の噴火以降、水平変位、開口幅、落差の変位速度が大きく減少している。C-4でも同様に、3月31日13時7分の噴火以降、変位速度の減少が見られる。開口幅は4月2日9時50分の計測で25.0cmと大きな値を示している。この原因として、C-4が割れ目端の道路継ぎ目付近にあったため、局所的に歪みが集中した可能性が考えられる。もしくは、1910年と1977-78年の噴火の際に活動した、三恵病院を通る断層群が動いたことによって、局所的にこの地点に歪みが集中した可能性が考えられる。落差は、3月31日の計測では東落ち1.0cmであったが、4月1日では0cm、4月2日では西落ち0.8cmと変化している。

3月31日13時7分の最初の噴火以降、大部分の割れ目群で変位速度が減少している。この事実は、噴火以降に有珠山周辺で発生していた地震回数が大きく減少した(札幌管区气象台ほか, 2000; 高木・高濱, 2000)ことと調和的である。3月30日16時頃に、吉本らのグループは、地点Aの雁行割れ目群を発見した。その調査中に震度2~3程度の地震に遭遇している。このとき、それぞれの雁行割れ目群が振動し、地震のあとわずかな変位が見られた。したがって、壮瞥温泉地区の右横ずれ割れ目群は、クリープ的に動いたのではなく、地震に伴って移動した可能性が高い。3月31日13時7分の最初の噴火によって、有珠山内部に蓄積されていた歪みがある程度解消された結果、地震の回数が激減した。そして、地震回数の減少によって、この地区の雁行割れ目群の変位速度も減少したと考えるとうまく説明できる。

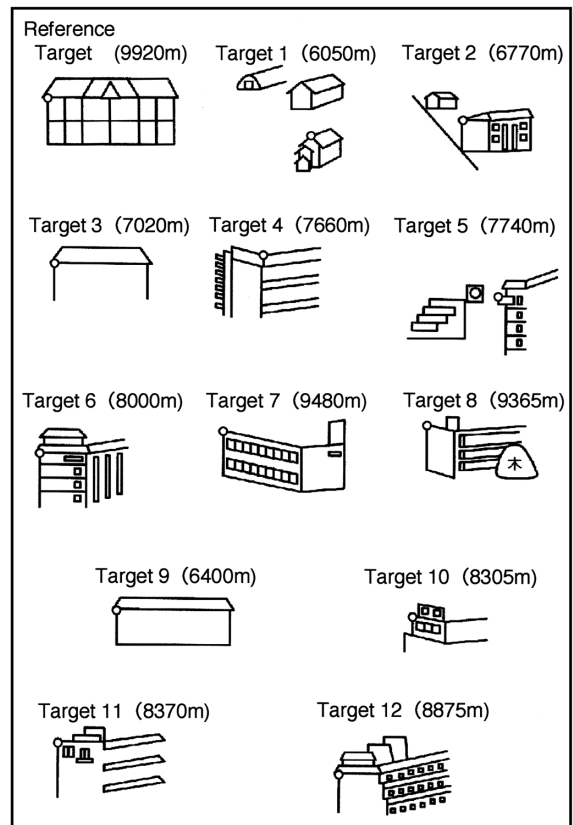
3. セオドライトによる北麓の変動観測

3.1 北麓の目標点

4月3日以降は、北麓への立ち入りが禁止された。このため、遠方からでも反射ミラーなどの設置なしに変位量を計測できるセオドライト(精密経緯儀)による観測を4月5日から実施した。4月4日に北海道支所(当時)の羽坂が現地入

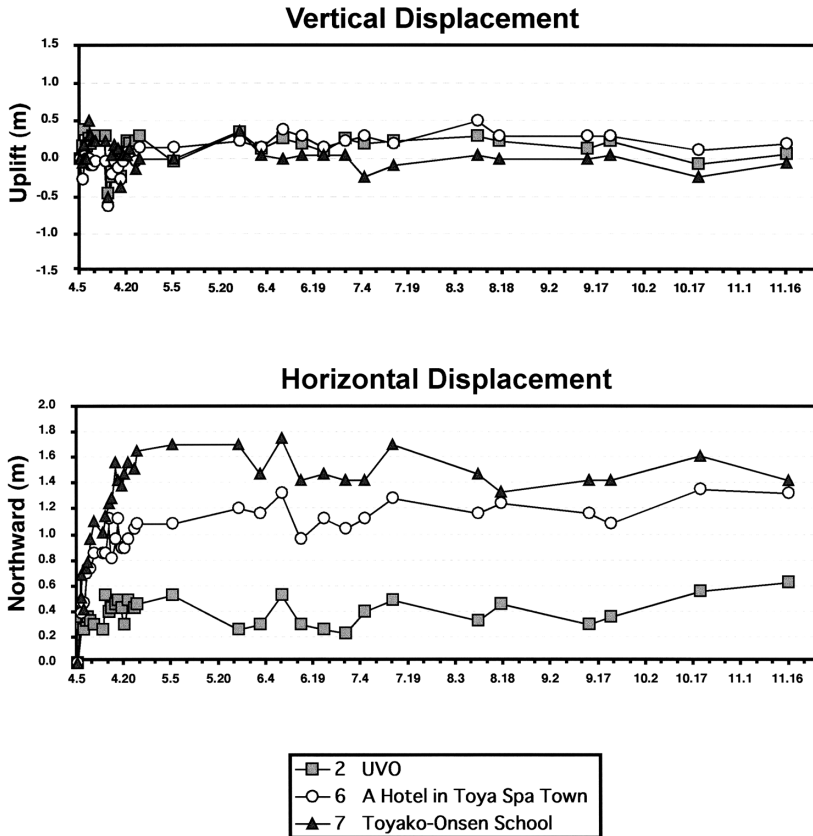
りし、目標点の選定を行った。北方へのせり出しをみかけ上の水平変位として精度よく測定するため、観測地点は北麓全体を見渡すことができる洞爺湖東岸の洞爺水力発電所のある高台(第1図N1)とした。目標点は、壮瞥温泉地区、洞爺湖温泉地区、中島にある各建物の1部分の合計12ヶ所とした(第1図)。第6図に各目標点のスケッチを示す。目標点までの距離は、6050m~9480mであった。基準点として、今回の噴火による変動の影響が少ないと考えられる洞爺湖北西壁の中央付近の高台にある建物の1部分とした(第6図)。

使用したセオドライトは、カールツァイス社THEO 010Aである。機器の最小読み取り角度は、水平角・鉛直角とも1秒である。読み取り誤差は、かげろうや湖面と大気との温度差などの条件が良い場合で±3秒、条件が悪い場合で±5秒であった。したがって、今回の計測の場合、目標点までの距離をかけると、誤差は±9cm~±23cmとなる。



第6図 北麓のセオドライト観測の基準点と目標点(1~12)のスケッチ。図中の小さい白丸は観測ポイントを示す。カッコ内の数字は観測地点からの距離を示す。

Fig.6 Sketches of a reference target and targets for theodolite monitoring in the northern foot of the volcano. Small open circles in the sketches indicate target points. A number in parenthesis show distance from the observation point at N1.



第7図 北麓のセオドライト観測結果(鉛直成分,水平成分).鉛直成分は隆起方向を正,水平成分は東方向を正とした.横軸は日付を示す.2:有珠火山観測所,6:洞爺湖温泉街のホテル,7:洞爺湖温泉中学校.

Fig.7 Results of theodolite monitoring at the northern foot of Usu Volcano (vertical displacement: uplift movement +, horizontal displacement: northward movement +, horizontal axis: date).

計測は以下のような方法で行った. N1の観測点から, 基準点1の真北からの水平角と天頂からの鉛直角をそれぞれ計測する. この計測は誤差の評価のため観測の開始と最後にそれぞれ2回以上行う. 同様に目標点1~12についても, それぞれ2回以上計測し, 真北からの平均水平角と天頂からの平均鉛直角を計測する. 基準点の平均水平角と平均鉛直角の値と, 各目標点の平均水平角と平均鉛直角との差をそれぞれ計算する. 次の計測の際にも, 同様の方法で, 基準点の平均水平角と平均鉛直角と, 各目標点の平均水平角と平均鉛直角との差を計算する. それぞれの目標点と基準点からの差の角度に変化があった場合, その変化角にN1から目標点までの距離をかけると, その目標点が移動した観測方向と直交する成分(水平, 鉛直)の変位を求めることができる. 目標点の真の移動方向を知るためには厳密には2ヶ所以上の観測点からの測定を行い変動成分のベクトル合成を行う必要がある. しかし, 今回の計測では人的, 地理的な制約のため1ヶ所からの観測のみとなった.

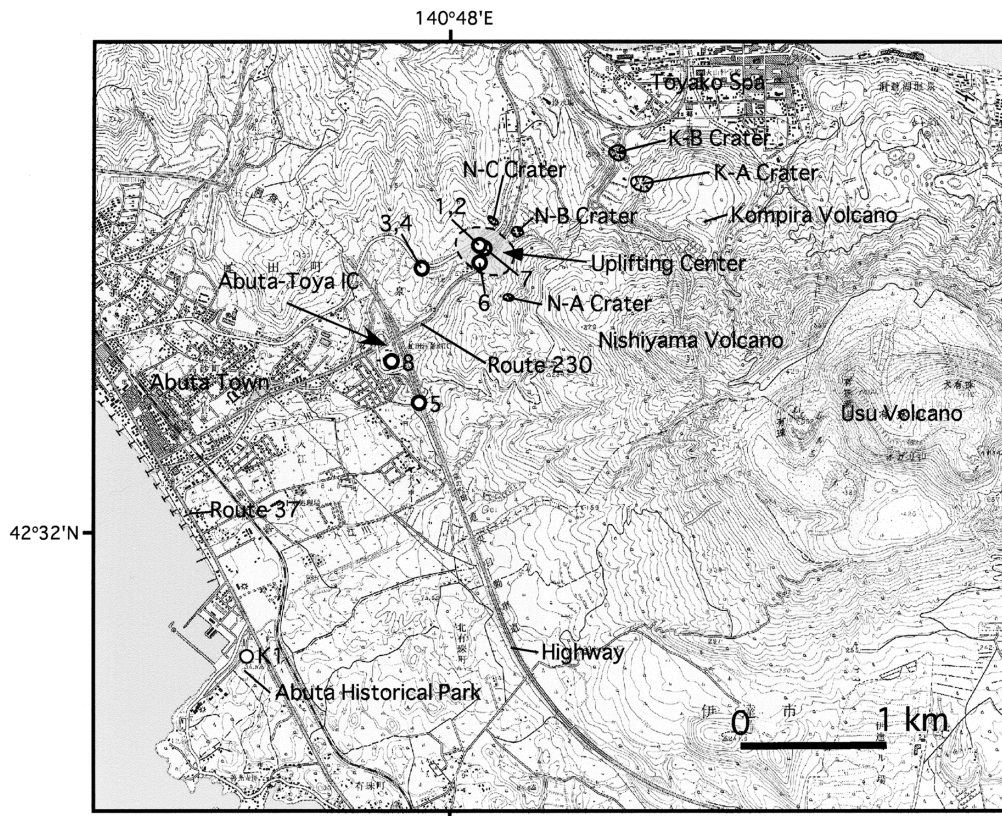
4月5日から計測を開始した. 4月上旬と中旬は悪天候や霧などの条件の悪い日を除いて1日1回~2回, 4月下旬からは1週間~2週間に1回, 7月中旬以降は1ヶ月に1回~2回のペースで計測を行った. 北麓の計測は羽坂が中心となって行った. 高橋, 宝田, 中川も6月下旬ごろまでは交代で観測を行った.

3.2 北麓の山体変動

代表的な目標点2(有珠火山観測所), 目標点6(洞爺湖温泉街のホテル), 目標点7(洞爺湖温泉中学校)の測定結果を第7図に示す. 最も変動量の大きかった目標点7では, 4月5日~6日の観測で1日約50cmの北側への水平変動が観測された. その後は, 4月24日までは1日5cm~20cmの北側への水平変動が見られた. 4月25日以降は水平変動がセオドライトでは観測されなくなった. 結果的に, 4月5日から4月24日までの間に目標点7は約1.6m北側へ水平移動したことが明らかになった. 一方, 鉛直方向の移動は, 誤差範囲内の測定値の変動のみが観測された.

目標点6では, 4月5日~6日の観測で1日約40cmの北側への変動が観測された. その後は1日5~15cmの水平変動となり, 4月10日以降は1日2cm以下の水平変動となった. 4月25日以降は水平変動がセオドライトでは観測されなくなった. 結果的に, 4月5日から4月24日までの間に目標点6は約1m北側へ水平移動したことが明らかになった. 一方, 鉛直方向の移動は, 誤差の範囲内の変動のみであった.

比較の変動の小さかった目標点2は, 4月5日~6日の間に1日約30cm北側に移動した. しかし, その後は, ほぼ水平方向の変動はセオドライトでは観測されなくなった. 結果的に目標点2は北側へ30cm~40cm移動したことが明らかになった. 鉛直方向の変動はほとんど観測されなかった.



第8図 有珠火山西麓,南西麓のセオドライトの観測地点(K1)と目標点(1~8).隆起中心では,地溝状の正断層群が発達した.N-A,N-B,N-C,K-A,K-B火口は4月上旬に形成された多数の火口群のうちの活発な噴火口を示す.地形図は,国土地理院発行の25,000分の1地形図「有珠火山とその周辺」(平成12年3月調整)を使用した.

Fig.8 Observation site (K1) and targets (1-8) for theodolite monitoring at the western and south-western foot of the Usu Volcano. Numerous graben-type normal faults were developed in the uplifting center. N-A, N-B, N-C, K-A, and K-B craters are active craters formed in early April 2000. A 1:25,000-scale Mt. Usu topographic map published by GSI on March 2000 was used.

目標点2,6,7以外の観測点での変動は,目標点2や目標点6とほぼ同じ傾向を示した.

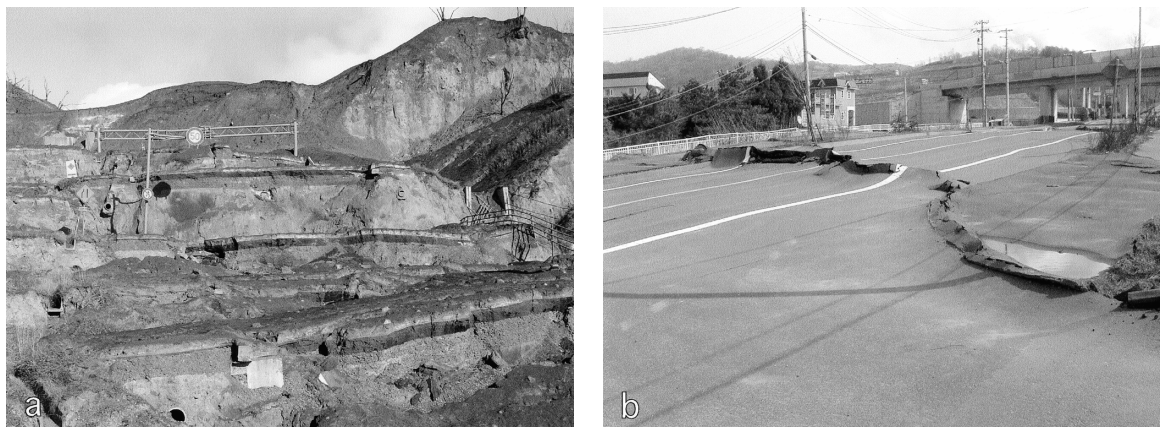
以上の観測結果をまとめる.有珠火山北麓の山体変動は,4月6日までの間は,北麓のほぼ全域で北側へせり出すような変動がみられた.その後4月10日ごろから水平変動は洞爺湖温泉街周辺に限られるようになった.4月25日以降は,洞爺湖温泉街の観測地域周辺の水平変動がセオドライトでは観測されなくなった.この観測結果は,空中写真の図化による解析で明らかになった.山体の変動の中心がK-A,K-B火口(第1図)の南西の場所から次第に有珠山西麓のN-B,N-C火口南の正断層群の領域(第8図)に移動したという事実(須藤ほか,2000)とも調和的である.

4. セオドライトによる西麓の変動観測

4.1 西麓の変動の状況

有珠山の西麓では,4月上旬から中旬の間に,N-A火口(3月31日の噴火口)の北西400mの国道230号線付近に,北西-南東方向にのびた顕著な地溝状の正断層群が見られるようになった(第8図の隆起中心の領域).この領域は7月末の段階で約60m隆起し(国土地理院火山噴火予知連絡会有珠山部会資料),最終的にこの領域にドーム状の地形を形成した.第9図aは国道230号線が正断層群によって大きく変形した状況を示している.各正断層の鉛直方向の変位は最大約10mに達した.

断層群は有珠火山の北西側や西麓で,3月29日ごろから観測されるようになった.一方,道央自動車道よりも南西側では,4月上旬からアスファルト上に多数のプレッシャーリッジが見られた(第9図b).また,隆起中心から放射状方



第9図 a:隆起中心付近の地溝状正断層群によって著しく変形した国道230号線の状況(2000年11月12日). b:虻田洞爺インターチェンジ南西の国道230号線の状況. アスファルトがプレッシャーリッジによって約50cm盛り上がっている. 電柱間の電線も大ききたわんでいる.

Fig.9 a: Severely damaged Route 230 due to graben-type numerous normal faults in the uplifting center (Nov. 12, 2000). b: A 50 cm-high pressure ridge at SW of the Abuta-Toya interchange. Note hanging down electric power lines.

向に並んでいる電柱間の電線に大ききたわみが見られた(第9図b). 一時はJR室蘭本線の線路にも変形が起り, 数週間列車の運行が停止した.

4.2 西麓の目標点

4月・5月の段階では, 火口群周辺の正断層群一帯は水蒸気爆発で非常に危険であったため, 立ち入りが不可能な状況であった. このため, セオドライトよりも1桁精度が高い光波測距(EDM)用の反射用ミラーやGPSを火口周辺に設置できなかった. このため, 4月・5月の段階では, 反射用ミラーなどの設置なしに変動観測が可能なセオドライトによる観測が, 隆起中心付近の変動を観測する重要な手段の一つであった. 得られた観測データは毎回火山噴火予知連絡会有珠山部会に提出され, 活動予測に役立てることができた.

4月13日から隆起中心域およびその周辺の変動を観測するため, 虻田町の虻田漁港近くにある虻田歴史公園管理棟の前(K1)からセオドライト観測を開始した(第8図). このK1では, 光波測距儀による自動多点連続観測も行っている(斎藤ほか, 2001). 4月13日に斎藤と渡辺が目標点の選定を行った(第10図). 目標点¹は, 地溝状正断層群の内部にある傾いた家の基礎の部分()と屋根の部分()である. 目標点²は, 正断層群中央から西南西520mの地点にある「とうやこ幼稚園」西側二階の屋根の角()と東端の屋根の角()の部分である. 目標点³は, 虻田洞爺インターチェンジの南東450mにある高速道路の橋の角である. 目標点⁴は, 目標点³の建物が断層上にあるため, 断層の変位によって次第に見えなくなった場合に備えての代替目標点であり, 4月16日に追加した. 目標点⁵は目標点³の東にあるポール, 目標点⁶は目標点³の東にあるあずま屋の屋根の一部であ

る. 目標点⁷は高速道路周辺の動きを詳しく見るために4月20日に追加した. 目標点⁸は虻田洞爺インターチェンジのループ内にある建物の一角である. 基準点は虻田洞爺インターチェンジの西北西2.8kmの地点にある北海道電力虻田電力所の貯水タンクの一部とした. 目標点までの距離は2150m~3300mであった(第10図). セオドライトの機器は, 4月~5月中旬までは, 北麓と同じカルツァイス THEO 010Aを使用した. 5月下旬以降は, Nikon GF-202を使用した. Nikon GF-202の最小読み取り角度は, 水平角, 鉛直角とも2秒である. 読み取り誤差は, かげろうや地面と大気との温度差などの大気の状態がよい場合で±3秒, 大気の状態が悪い場合で±5秒であった. したがって, 西麓の計測の場合, 目標点までの距離をかけると, 読み取り誤差は±3cm~±8cmとなる. 計測は, 北麓と同様の方法で行った. 西麓の観測ではK1からの観測以外にも, 虻田発電所や虻田町内の虻田高校前, 洞爺トンネル上の三豊からも, 火山観測所の西村や気象庁の高木がセオドライト観測を行っている. これらのデータも考慮すると, 目標点の真の変動ベクトルの方向を求めることができる. しかし, この論文ではK1からの観測結果のみについて紹介する.

観測は, 4月中は1日1回, 5月中は平均2日に1回, 6月中は平均3日に1回, 7月・8月は平均1週間に1回, 9月以降は平均1ヶ月に2回のペースで計測を行っている. 南麓の観測は羽坂と西村が中心になって行った. 6月下旬ごろまでは高橋・中川・宝田も交代で観測を行った.

4.3 西麓の山体変動

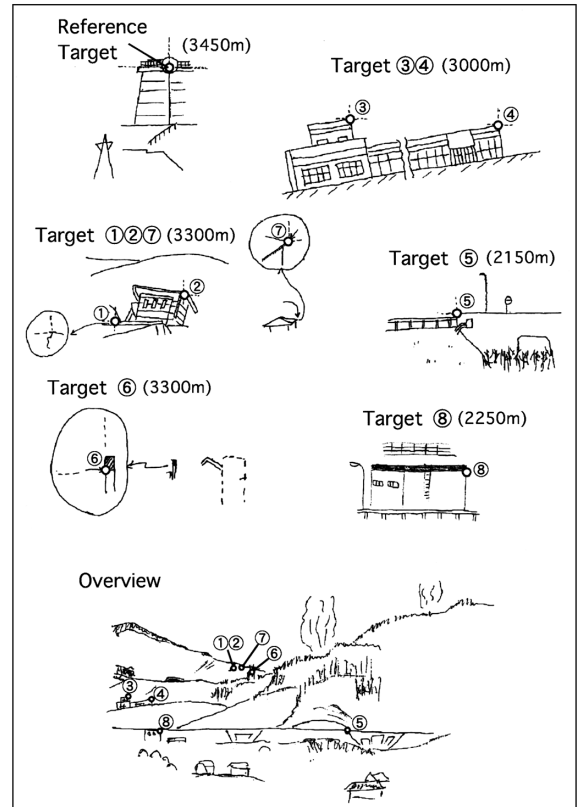
観測結果のグラフを第11図に示す. 正断層群の内部にある目標点¹は, 4月13日~14日の1日の間に鉛直方向に約95cm隆起した. その後, 隆起速度は徐々に減少し

た。4月15日～17日の期間は平均50cm/日、4月18日～20日の期間は平均33cm/日、4月21日～25日は平均21cm/日、4月26日～6月10日は平均11cm/日、6月11日～24日は平均7cm/日、6月25日～7月19日は平均3cm/日の速度で隆起した。7月20日以降は変動量がセオドライトによる測定限界を越えたため、K1からみて目標点の隆起はほぼ停止したように見えた。最終的に4月13日から7月20日までの間に目標点 は約12m隆起し、目標点 は約10m隆起した。目標点 と目標点 の隆起量の差は、傾いている家全体が断層崖をまたいでいるため、次第に家全体の傾きが急になり、目標点 の屋根の部分为目标点 の基礎の部分に対して相対的に沈降したことが原因である。

水平変動については、目標点 は4月13日～14日の1日の間にK1から見て約30cm西方に移動した。その後水平方向の変動速度は徐々に減少した。4月15日～20日の期間は平均5cm/日～20cm/日の速度で西方に移動した。4月21日～7月19日の期間は2cm/日～7cm/日の速度で西方に移動した。7月20日以降は水平変動量がセオドライトの観測限界を越えたため、K1から見てほぼ停止しているように見えた。最終的に目標点 は、4月13日から7月19日の期間にK1から見て約3.3m西方に移動した。隆起中心の正断層群から西南西520mにある目標点 は、4月13日～20日の間に平均20cm/日の速度で隆起した。その後徐々に隆起速度は減少した。4月21日～28日の期間は平均7cm/日、4月29日～6月4日は平均3cm/日、6月5日～6月29日は平均5mm/日の速度で隆起した。6月30日以降は、隆起速度がセオドライトの観測限界を越えたため、K1から見てほぼ停止しているように見えた。目標点 は、4月13日～6月29日の間にK1から見て約3.2m隆起し、目標点 は3.9m隆起した。

水平変動については、目標点 は4月13日～14日の1日で約30cm西方に移動した。その後西方への移動速度は徐々に減少した。4月15日～20日の間に平均15cm/日の速度で、4月21日～6月2日の期間には平均3-4cm/日の速度で、6月30日～7月27日の間は平均2-3mm/日の速度で西方移動した。7月28日以降は水平変動量がセオドライトの観測限界を越えたため、K1からみてほとんど西方移動がなくなったように見えた。最終的に目標点 はK1から見て約3.4m西方に移動した。

4月16日から観測を開始した隆起中心に近い目標点 は4月16日～19日の間に平均40cm/日～50cm/日の速度で隆起した。その後は徐々に隆起速度は減少した。4月20日～28日の期間には平均17cm/日、4月29日～6月29日には平均8cm/日、6月30日～7月27日には平均2cm/日の速度で隆起した。7月28日以降は隆起量が観測限界を越えたため、K1から見て目標点 はほぼ停止したように見えた。最終的に6月16日～7月27日の間に目標点 はK1から見て約8.7m隆起し、目標点 はK1から



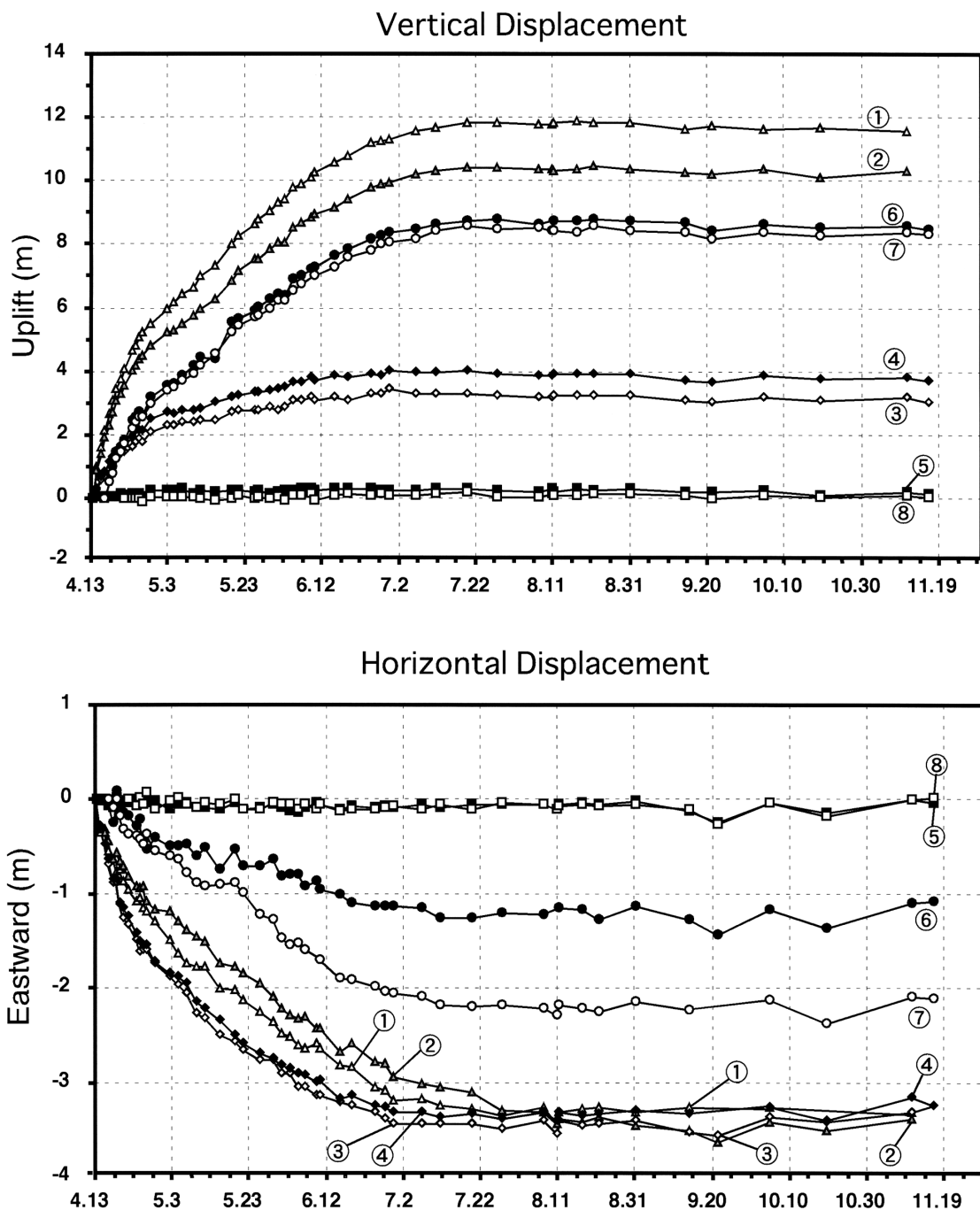
第10図 有珠山西麓のセオドライト観測の基準点および目標点(○)のスケッチ。図中の小さい白丸は観測ポイントを示す。カッコ内の数字は観測地点からの距離を示す。

Fig.10 Sketches of a reference target and targets of theodolite monitoring in the western foot of the volcano. Small open circles indicate target points. A number in parenthesis indicate distance from the observation point at K1.

見て約8.5m隆起した。

水平変動については、目標点 は4月16日～19日の間に平均20cm/日および13cm/日の速度で西方に移動した。その後は徐々に移動速度は減少した。4月20日～28日の間には平均5cm/日および3cm/日の速度で西方に移動した。4月29日～6月29日の間は平均1.6cm/日および2.7cmの速度で西方に移動した。6月30日～7月27日の期間は平均4mm/日および6mm/日の速度で西方に移動した。7月28日以降は、観測限界を越えたため、K1から見て目標点 はほぼ停止したように見えた。最終的に6月16日～7月27日の間に目標点 はK1から見て約1.2m西方移動し、目標点 はK1から見て約2.2m西方移動した。

道央道とインターチェンジにある目標点 と目標点 は、隆起中心からそれぞれ南西に1.1km、南南西に1.25km離れている。このため、測定期間内の鉛直方向および水平方向の変動はセオドライトではほとんど観測できなかった。



第11図 西麓のセオドライト観測結果(鉛直成分および水平成分). 鉛直成分は隆起方向を正, 水平成分は東方向を正とした. 横軸は日付を示す. 図中の番号は目標点の番号を示す.

Fig.11 Results of theodolite monitoring at the western foot of Usu Volcano (vertical displacement: uplift movement +, horizontal displacement: eastward movement +, horizontal axis: date). Numbers in the graph indicate target points.

以上の観測結果をまとめる. 隆起中心に近い目標点
は, 4月13日(16日)~7月下旬までの期間に約
10m隆起し, K1からみて西方に約1m~3.5m移動した. 一
方, 隆起中心から500m離れた目標点
は4月13日から
6月下旬までの期間に約3~4m隆起し, K1から見て西方
に約3.5m移動した. 変動速度は次第に減少した. 変動は,

目標点
では6月下旬でほぼ見られなくなったが, 目標
点
では7月下旬まで継続した. このことは, 地下
浅所へのマグマの貫入深度が次第に浅くなり, 隆起域が
次第に局在化したことが原因の1つであると考えられる.

より精度の高い光波測距と反射ミラーを使った観測で
は, 目標点がK1に対して近づいてくる方向に移動してい

たものが、7月以降隆起中心から遠い目標点から順に反転し、次第にK1から遠ざかる方向に目標点が移動した(斎藤ほか,2001)。このことは、7月以降に地下のマグマの貫入が停止し、マグマの冷却や脱ガスなどによって、隆起中心から遠い地点から順に収縮を始めたことを示唆している。

セオドライト観測で得られた観測データは、K1以外の観測点からのデータを加えて、各目標点の真の移動方向のベクトルを求めた結果、第8図で示した隆起中心の部分からほぼ放射方向に変動が見られることが明らかになった(西村ほか,2000)。この変動データは、正断層群の中心部の直下約250mに圧力源をおいた場合の茂木モデルでほぼ説明できる(西村ほか,2000)。

5. まとめ

(1) 有珠火山北東麓の壮瞥温泉地区では、2000年3月30日以降、多くの雁行状割れ目が形成された。1日あたり数cm～数10cmの右横ずれ変位が観測された。3月31日13時7分～の噴火後、地震発生回数の減少に伴って、変位速度は大きく減少した。

(2) 2000年4月5日から、北麓12ヶ所の目標点のセオドライト観測を行った。4月6日までは北麓全体で北側へせり出すような変動が見られた。4月10日ごろから水平変動は北西麓の洞爺湖温泉付近に限られるようになった。4月5日～25日の間に、洞爺湖温泉内の目標物は最大で約1.6m北側へ移動した。

(3) 2000年4月13日から、西山麓の隆起中心付近とその周辺のセオドライト観測を行った。隆起中心は、4月中旬で90cm/日～30cm/日の速度で隆起した。その後隆起速度は減少し、7月下旬にほぼ隆起が停止した。4月13日～7月下旬の期間に、観測点からみて隆起中心の目標点は約10m隆起し、約1m～3.5m西方に移動した。

謝辞 観測にあたって、太田英順支所長をはじめとする当時の地質調査所北海道支所の方々、磯部一洋部長、宇都浩三室長、篠原宏志博士、伊藤順一博士をはじめとする当時の地質調査所本所の噴火対策チームの方々、北海道大学・北海道立地質研究所の有珠山噴火総合観測班の方々にはさまざまな面で大変お世話になった。また、宇都浩三室長と高田 亮博士によるコメントは本論文を改善するうえで大変有効であった。ここに記して深く感謝する。

文 献

- 門村 浩・岡田 弘・新谷 融(1988)有珠山 その変動と災害. 北海道大学図書刊行会, 札幌, 258p.
- Katsui Y., Komuro, H. and Uda T. (1985) Development of faults and growth of Usu-shinzan cryptodome in 1977-1982 at Usu Volcano, northern Japan. Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. IV, 21, 3, 339-362.
- 川辺禎久(2000)速報:2000年3月31日有珠山噴火. 地質雑, 106, VII-VIII.
- 川辺禎久・風早康平・宝田晋治・総合観測班地質グループ(2000)2000年3月31日有珠山噴火. 地質ニュース, 548, 1-2.
- 広瀬 亘・田近 淳・八幡正弘・宝田晋治・川辺禎久・風早康平・山元孝広・吉本充宏(2000)地表変形からみた有珠山2000年噴火における地殻変動. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 47.
- 西村裕一・宝田晋治・斎藤英二・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. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 45.
- 岡田 弘・森 濟・大島弘光(2000)2000年有珠山噴火はどう予知されたか. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 22.
- 斎藤英二・西村裕一・渡辺和明・宇都浩三・風早康平・宝田晋治・羽坂俊一・高橋裕平(2000)光波測距による有珠火山2000年噴火の山体変動観測. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 160.
- 斎藤英二・西村裕一・渡辺和明・宝田晋治・宇都浩三・風早康平・高橋裕平・羽坂俊一(2001)2000年有珠火山噴火に伴う山体変動観測結果(速報). 地調研報, 52, 207-214. (本特集号)
- 札幌管区气象台・気象庁地震火山部・室蘭地方气象台(2000)平成12年(2000年)有珠山噴火に伴う地震活動と表面現象. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 156.
- 高木朗充・高濱 聡(2000)有珠山における気象庁強震観測. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 157.
- 宝田晋治・羽坂俊一(2000)北海道支所における有珠火山2000年噴火への対応(速報). 地質ニュース, 551, 11-19.
- 宝田晋治・西村裕一・羽坂俊一・高橋裕平・中川 充・渡辺和明・斎藤英二・風早康平(2000)有珠火山2000年噴火の山体変動-セオドライトによる北麓, 西麓の変動観測. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 161.

(受付:2001年1月10日; 受理:2001年1月10日)