

## 時間差実体視による 2000 年有珠火山噴火に伴う隆起検出

山科健一郎<sup>1)\*</sup>・西村裕一<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学地震研究所・<sup>2)</sup> 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

## Remarkable uplift associated with the 2000 eruption of Usu volcano, Japan detected by time-differential stereoscopy

Ken'ichiro Yamashina<sup>1)\*</sup> and Yuichi Nishimura<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>2)</sup> Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

### Abstract

A remarkable uplift was detected at the western foot of Usu volcano based on a series of digital photographs taken at 15.3–15.5 km west of the Nishiyama craters, which started to erupt on March 31, 2000. The observed uplift reached more than 1 m per day around 3–4 April, and about 10 m in total after April 3, although the central part of the uplift was invisible from the observation point. In the present research, it was confirmed that the analysis of time-differential stereoscopy using digital photographs is useful to detect crustal deformations, even from a distance more than 15 km.

**Key words:** *Usu volcano, uplift, crustal deformation, time-differential stereoscopy*

### 1. はじめに

有珠火山では、2000年3月27日から小地震が多発し始め、31日に22年ぶりに噴火を開始した。デイサイト質のマグマ活動で知られるこの火山では、最近100年間をみても、1910年、1944–45年、1977–78年に噴火活動を起こし、その度に新しい溶岩ドームや潜在ドームが生成されてきた。こうした活動はそれ以前にも繰り返しており、山上や山麓には、溶岩ドーム・潜在ドームの高まりが、いくつも分布している（例えば、曾屋ほか、1981；勝井、1988）。

過去の噴火の経験をふまえ、地震活動が顕著になった3月28日には山麓の地域に避難が呼びかけられ（自主避難）、29～30日には山麓一帯が無人化された（避難勧告、避難指示）。このような中、31日13時過ぎに西側山麓（西山火口群）で噴火が始まり、翌4月1日の12時前には北西側山麓（金比羅山火口群）にも噴火地点が拡大した（例えば、気象庁火山部ほか、2000；岡田ほか、2000）。

地下のマグマ活動の実態を明らかにし、活動の見通しを考察するためには、地殻変動データを得ることが欠かせない。しかし、火口近くへ立ち入って観測機器を展開することは噴火開始からまもない時点では難しく、また、活動が進展するようなら将来的にも立ち入りが制約される可能性が大きい。そこで、遠方からの定点写真計測により、変動の有無や時間的経過を明らかにすることを目指した。

最初に選んだ観測地点は西山火口域から西北西に15 km以上離れた豊浦町西部の海岸で（Figs. 1–2）、ここからは火口域の一部を直接見通すことができた。手前に丘陵があるため、これ以上近づくと火口は見えなくなってしまう。筆者らは、これまで雲仙ほかで定点撮影写真を利用した火山変動の検出を行ってきたが（例えば、山科、1997；Yamashina *et al.*, 1999）、主な観測地点は変動域から2～5 kmほどの所に位置していた。今回のように10 km以上も遠くからの計測の経験はなく、これだけ離

\* e-mail: yama@eri.u-tokyo.ac.jp

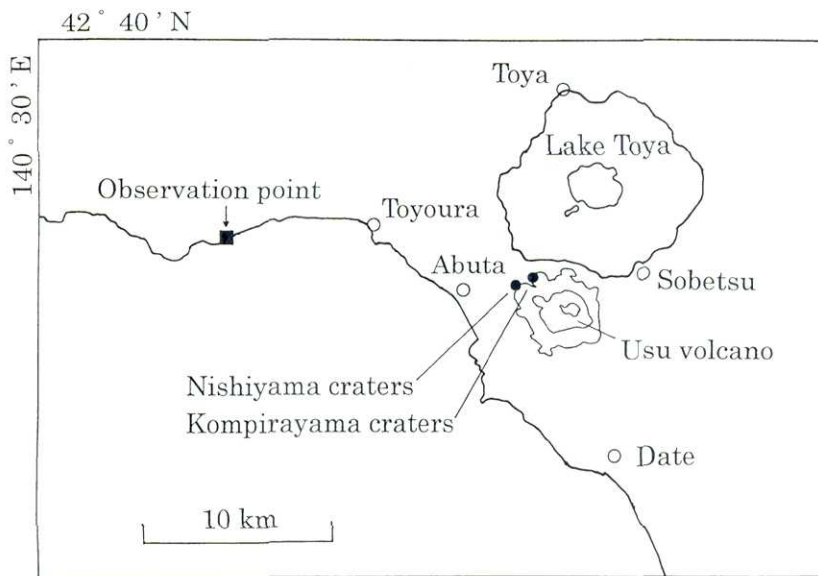


Fig.1. Map of Usu volcano and the observation point west of Okishi, Toyoura Town.

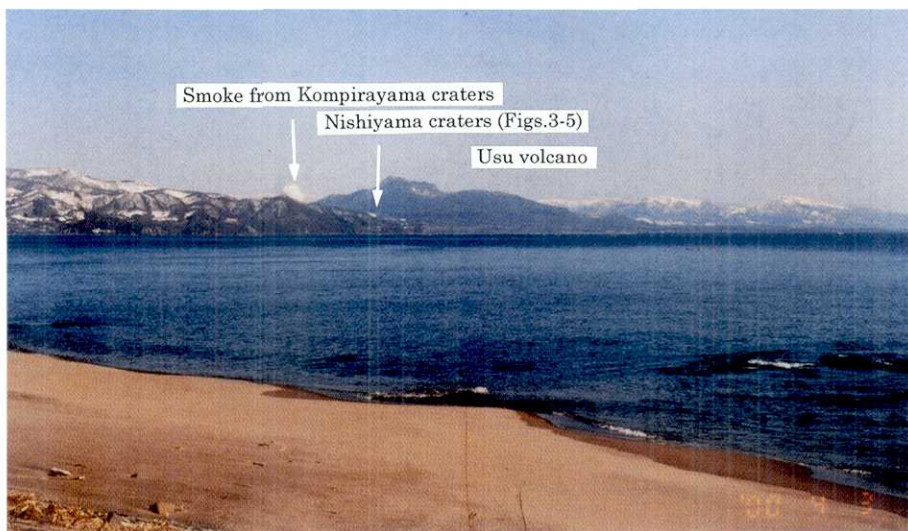


Fig.2. Overall view of Usu volcano (around which snow had melted away due to fallen ash) from the observation point west of Okishi.

れたところから変動を検出することが実際に可能かどうか、今回の観測で試してみたいと考えた。

一方、今回の噴火活動に先立ち、筆者らは遠方からの変動測定にデジタルカメラを使用する準備を進めていた。従来のフィルムの写真画像に比べ、デジタルカメラのデータは画素数が確定していて、分解能をそれ以上に上げることができない。変動計測にデジタルカメラを用いることがどのくらい有効か、具体的に確かめることが今回の調査のもうひとつの目的であった。

## 2. 計測機材と撮影地点

遠方からの写真撮影には望遠レンズをつけたカメラが必要になるが、デジタルカメラはニコン社製 D1 に反射

鏡式望遠レンズ（焦点距離 750 mm 相当）をつけたもの、補助的に用いた 35 mm フィルムカメラはミノルタ社製の  $\alpha$ -sweet に焦点距離 500 mm の反射鏡式望遠レンズをつけたものを主に使用した。反射鏡が組み合わされた望遠レンズは、長焦点にもかかわらず小型で軽く、手軽に持ち運べる利点が多い。ただし、絞りを絞り込むことができない構造になっていて、ここで使用したものはいずれも f8 に固定されている。画像の鮮明さという点で限界があるが、やむを得ない。

計測には、同じ位置から撮影を繰り返す必要がある。そのため、使用する三脚のそれぞれの脚先を置く位置を定め、三脚をそのつど同じ状態に開いて使用した（3段式の三脚の 2 段をいっばいに伸ばし、また全開にして使

用)。これにより、カメラ位置の各撮影時のずれは、おおむね 2~3mm 以内に収まっているものと思われる。

デジタルカメラでは、画像の画素数や保存形式を選択する自由度があったが、最大画素数 2,000×1,312 をいっばいに使い、保存形式は jpeg 方式を選んだ。1 画面当たりのメモリー使用量は画像ごとに違いがあるが、1 メガバイトを少し超える程度の場合が多かった。

西山火口域を西側の地上から見ようとすると、地形的な制約から、撮影場所は豊浦町礼文~大岸間の海岸道路沿いの一部に限定された。撮影を開始した 4 月 3 日当日は道路の路面から外れるとまだかなり雪が残っていたが、海岸道路の脇に設けられた文学碑公園を撮影地点として選ぶこととした。三脚は、文学碑の台座の縁石や床のタイルの継ぎ目に合わせて置いたが、一般に、同じ位置を再現するためには、人工物を目印にしないと難しいことが多い。写真撮影はこの後、同日夕方に火口北方の洞爺湖北岸でも行い、翌日以降、湖の西岸や東岸の各地点、さらに、立ち入り規制が緩和されてからは、西山火口域の南方に広がる虻田の街の西側の高台や、南東側の歴史公園などにも順次広げ、地殻活動の展開に備えた。しかし本稿では、最初に撮影を始めた豊浦町大岸西方の地点からの画像データを取り上げ、西山火口域の変動について議論を進めることにする。

大岸西方から見通すことのできる西山火口域の一部は、撮影地点から 15.3~15.5 km ほど離れている。望遠レンズの画角を考えると、デジタルカメラによる画像は、1 画素あたりおよそ 37 cm くらいの距離に対応する。2 画素程度の誤差はやむを得ないとすれば、1 m 近く以上の変動がないと、この距離から変動を検出することは困難であることが予想された。

### 3. 時間差実体視

撮影された画像は、時間差実体視と筆者らが呼ぶ手法(山科, 1997; Yamashina *et al.*, 1999) でまず検討された。時間差実体視では、同じ被写体を同一地点から異なる日時に撮影し、その 2 枚の画像を左右に並べて実体視する。両画面には同じ被写体が写されており、光線の具合による陰影のつき方などに違いがあるとしても、本来なら特別変わって見えることはない。しかし、地盤が動いて被写体の一部が移動していれば、その部分だけが画面の上で歪みを生じ、実際の遠近とは全く無関係に、不自然な立体感が生じる。

この方法は、もともと実体視(ステレオ視)として知られる手法で、地形観察や地図を作製する作業などに広く利用されてきた。それらは、通常は上空から位置をず

らせて撮影した写真を並べて被写体を実体視し、その立体的な凹凸を誇張して観察する。一方、これらの実体視写真が、海水や河川の水の流れ(例えば, Cameron, 1952; Forrester, 1960; 木下, 1967), あるいは道路を走る車の速さ(例えば, Wohl and Sickle, 1959; 高田・宮本, 1963) などの解析に利用されることがある。その場合、厳密には同一地点から撮影することが好ましいが、対象物の動きが速いため、撮影位置がずれていてもある程度容認される。もっともこうした事象は、むしろ動画によって観察した方がわかりやすいかもしれない。1950~1960 年代頃にその手法が話題にされたが、それ以後の議論の発展はあまりなかったように見える。なお、同一地点から写した 2 枚の写真を用いて被写体の動きを擬似的に立体化して見せたものとして、桜島火山の噴煙の例(村井, 1979) がある。

ところで、写真測量によって地盤の変動を検出する通常の方法では、変動前と変動後の各時期に上空から撮った写真を実体視し、対応する各ポイントの座標値をそれぞれの時期ごとに算出した上でその差をとり、各ポイントの変動量とする。有珠火山においてもこのような作業が国土地理院(長谷川ほか, 2000) や地質調査所(須藤ほか, 2000) によってそれぞれ精力的に行われた。

しかしここで、変動を検出することだけに目的を限定するなら、変動前と後の写真を直接組み合わせるその差の部分だけを抽出すれば、より効率的であろう。このとき、両者を直接比較するためには、変動前と後の撮影位置が正確に同じであることが求められる。そのかわり、画面上の情報から撮影位置を逆算する手順は不要となり、変動検出の精度が一段と向上する。そこで筆者らは、雲仙の固結しかけた溶岩のゆっくりとした移動や山体変動の検出に、定位置から繰り返し撮影した写真を利用することを試みた(山科, 1997; Yamashina *et al.*, 1999)。定位置からの繰り返し撮影を実現するために撮影は地上からに限られるが、そのかわり、必要に応じて頻繁に撮影を繰り返すことができる。

撮影された画像を左右に並べ、時間差実体視することを考える。例えば左側に初めに撮影した画像、右側に新しく撮り直した画像を置き、これを平行法で見ることにしよう(右の画面を右の眼で、左の画面を左の眼で見る)。もしも画面上の被写体の一部が左へ動いていたとすると、その部分だけあたかも撮影者が右へ回り込んで写したかのような画像が得られる。左への動きが大きければ大きいほど、右へ回り込む角度が大きいことに相当する画像になる。これを実体視すると、被写体を見る左右の眼の間隔は固定されているから、左へ動いた部分

は、動きの量に応じて手前に飛び出して見えることになる。逆に、右へ動いた部分があれば、それはあたかも遠くに奥まって位置しているように見える。

この関係は、新旧の画像を置く左右の位置を入れ替えると逆になる。また、もしも画像を交差法で見る（右の画像を左の眼で、左の画像を右の眼で見る）場合には、やはり関係が逆転する。時間差実体視を行ったとき、先入観のために、実際に手前にあるものは手前に、遠方にあるものは遠くにあるかのように錯覚することがある。この場合、画像の左右の位置（あるいは平行法と交差法）を入れ替えたときに立体感が逆転するかどうかを確かめると、本当に変動が生じているのかどうかを確認することができる。

一方、2枚の画像を上下に並べ、これを90度回して横倒しにして実体視すると、上下変動の有無を知ることができる。例えば新しい画像を上、古い画像を下に置いてこれを90度横倒しして平行法で見たとき、左右の動きに関する上記の考察を当てはめると、隆起した部分は奥に、沈降した部分は手前に見えることが期待される。この関係は、並べた画像を右回りに回しても左回りに回しても変わらない。結局、画像を左右に並べれば左右の動きを、上下に並べれば上下の動きを、それぞれ時間差実体視によって明らかにすることができる。また、初めから斜めの方向への動きを見たいときには、その方向に画像を並べておき、これを傾けて実体視すればよい。

このように時間差実体視を実行すると、変動域の範囲や変動の向き、変動の大きさなどの概略を一目で把握することができる。各部分の具体的な変動量をさらに詳しく知るには、画面上の各位置の座標を読みとって比較する。その際、明瞭な人工物がない場合や画像がぼけているときには、2枚の画像上の同一の点を正確に同定することは必ずしも容易ではない。この点、時間差実体視では、それぞれの画像の適当な広がりをもった領域どうしを全体として対応させて見ることになるので、個々の点の座標を正確に読めないときでも、新旧の画像の間の変動がある程度検出できる。そのような場合、パソコンに表示した2枚の画面を実体視しながら、両画面上の対応する点を捜して画素の座標を読むことを試みた。空中写真から地図を作るための特殊装置である図化機が使用できる場合には、これを用いて変動量のコンター図を作成することも考えられる。

写真測量は、可視光線を利用した観測であり、光線の屈折やカメラ機材の光学系の歪みの影響が避けられない。しかし実際に今回得られた画面の上で、それらの影響はあまり大きくはないように見える。特に、繰り返して

撮影する画面の構図をなるべくそろえろとか、変動量を計測する際、画面上のなるべく接近した点を基準にして測るなどを行えば、影響を小さく抑えることができると思われる。このため、予想される変動域になるべく重なるように手前の山並みを写し込むなど、撮影地点の選定や画面の構図の取り方を工夫できると好ましい。

#### 4. 西山火口域の動き

定点として選んだ豊浦町大岸西方の地点からの撮影例を Figs. 3-5 に示す。Fig. 3 は、参考のためにカメラを横に数 m 移動させて撮影した写真を並べたもので、通常の実体視により、遠近の関係などを確かめることができる。これに対して Fig. 4 には、4月3日と4月6日に同一地点から撮影した写真が左右に並べられている。これを時間差実体視すれば、3日から6日までの3日間に生じた火口付近の横向きの動きを見ることができる。Fig. 5 では、4月6日の写真が中央に、4月3日の同じ日の写真がその上と下に並べられている。これを90度回して、写真を横倒した状態で実体視すれば、3日から6日の間に生じた上下変動の分布を読みとることができる。

Figs. 3-5 において、右に見える火口は西山火口群（または西山西火口群）の N1 火口（ただし左下の N2、左上の N3 を含む）、左に見える火口は N7 火口（右側の N17 を含む）に当たる（宇井ほか、2000; Figs. 6-7 参照）。N1 火口は今回の一連の活動の中で最初に噴火を始めた火口で、合計で 30 以上形成された西山火口群の火口の中で最南部に位置している。手前の丘陵に隠されて、西山火口群の全体は撮影地点から見ることはできないが、火口域の中心部は、N1、N7 の左下方へ広がっている。

撮影は4月3日12時53分～12時57分頃が最初で、4日12時16分～12時52分頃に2回目の撮影をすることができた。その日の夜に3日と4日の撮影画像を時間差実体視して検討したが、西山火口群の N1、N7 付近が顕著に隆起し、また、向かって右へ（南向き）の成分をもって押し出されていることがわかった。15 km 以上離れた地点からこれほど明瞭に変動を確認できるというのは意外であったが、量的には、わずか1日の間に1 m 以上も押し上げられたことがうかがえる。

翌5日（11時58分～11時59分頃）は霞が強く良好な画像を得ることができなかったが、それでも時間差実体視を行うと、隆起がさらに進んでいるらしいことが認められた。その傾向は4月6日（13時01分～14時52分頃）、8日と加算し、また、8日（16時13分～16時43分頃）頃までには、変動が徐々に減速していることが明らかになった。大きな地変が、加速ではなく減速に向かっている

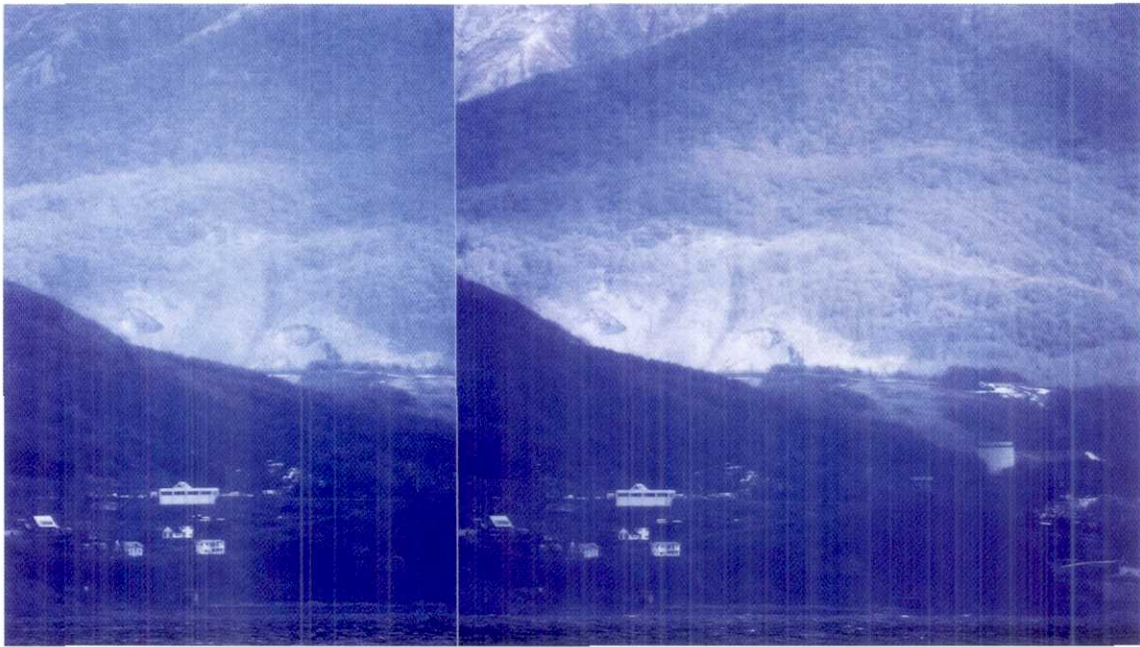


Fig. 3. Stereographic view of the Nishiyama N1 and N7 craters taken on April 6, 2000.

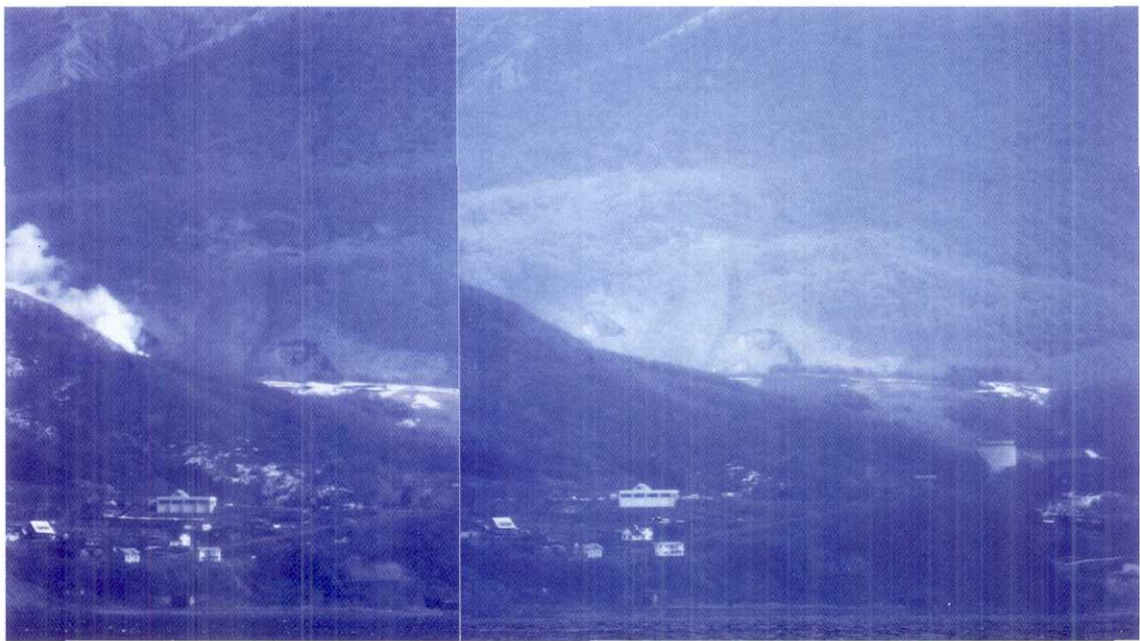


Fig. 4. Photographs taken on April 3 (left) and 6 (right), 2000. Right-ward (i.e. southward) shift of the Nishiyama N1 and N7 craters is visible by time-differential stereoscopy.

ることは、ともかくも一つの安心材料であった。

変動の減速を確かめることができたため、4月8日以後は連日のように観測地点に通う態勢を緩めることにし、この後は、4月13日、30日、9月4日に撮影を繰り返した。全体の経過についての詳細は別稿で議論することにしたいが、N1およびN7火口が画面上で右斜め上方にせり上がっていくようすをFig. 6に、また、隆起量

の時間的経過をFig. 7に示す。これらを見ると、西山火口群付近の変動は4月8日以後も減速しながら進み、4月3日から通算した隆起量の合計は、N1、N7火口付近で数~10mくらいに達したことがわかる。

西山火口群そのものではないが、火口域周辺部の変動については、セオドライトを使用した北西側からの計測が4月5日に始められた(森ほか, 2000)。GPS測量は噴

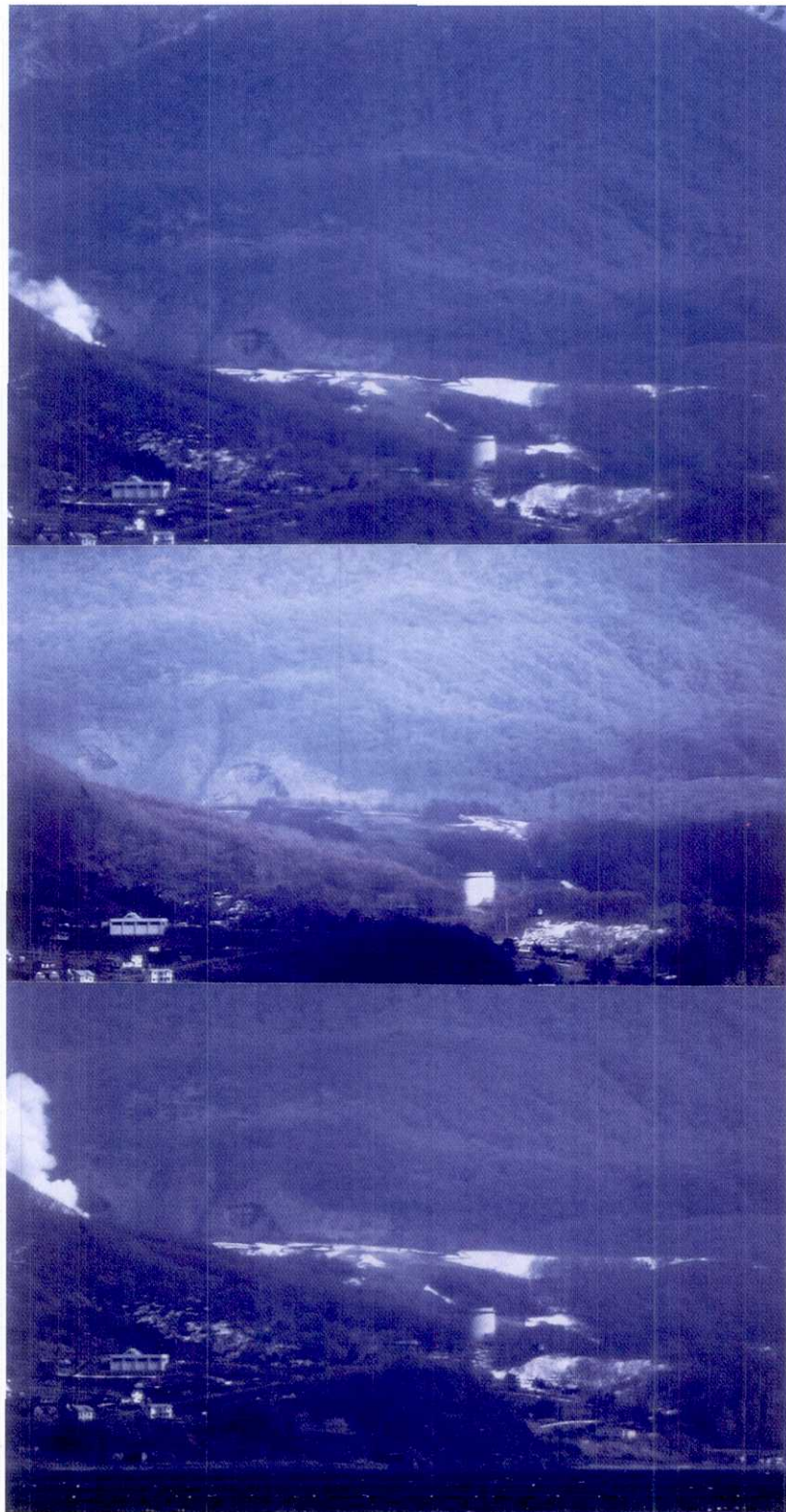


Fig. 5. Photographs for time-differential stereoscopy taken on April 3 (top), 6 (middle), and again 3 (bottom), 2000. When the bottom-and-middle or middle-and-top photographs are rotated 90 degrees and viewed as stereo pairs, uplift of the Nishiyama N1 and N7 craters is perceived farther or closer from the viewer, respectively.

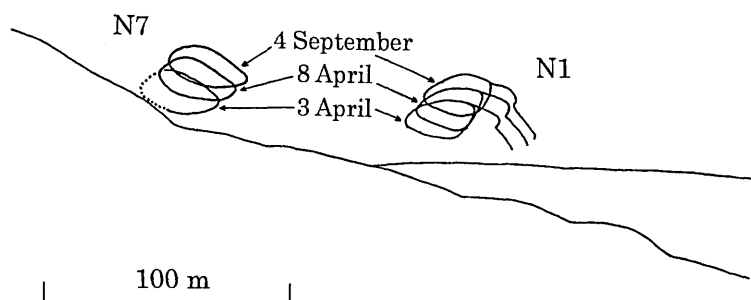


Fig. 6. Uplift of the Nishiyama N1 and N7 craters with a right-ward (i.e. southward) component.

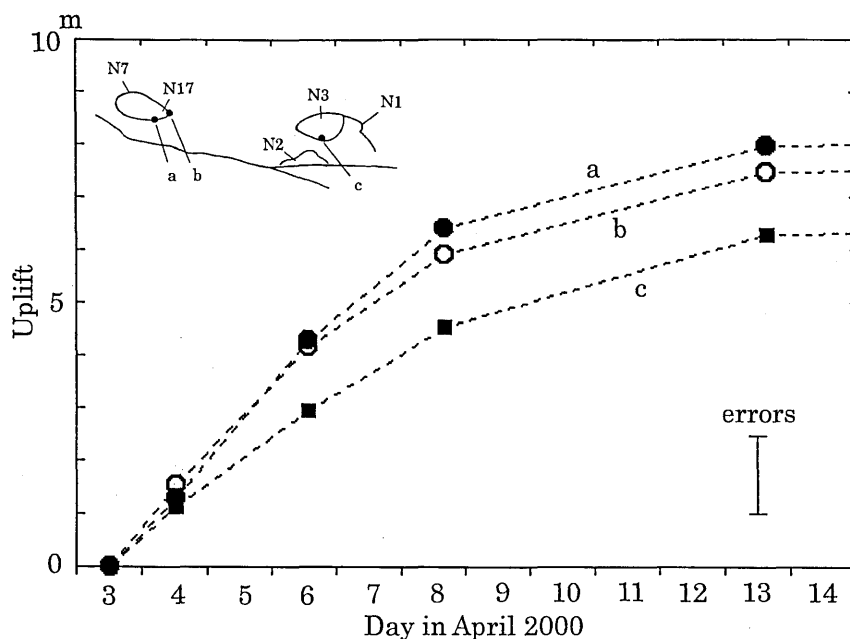


Fig. 7. Discleration of the uplift at the Nishiyama N1 (c) and N7 (a and b) craters.

火開始前から一部で実施されていたが（例えば、高橋ほか，2000；岡崎ほか，2000），4月7日からはさらに多点で展開され始めた（例えば，田中ほか，2000；北川ほか，2000）。4月8日以降になると，セオドライトや光波測距儀を用いた観測態勢もさらに整い（例えば，宝田ほか，2000；斎藤ほか，2000；西村ほか，2000；高木ほか，2000；海老名，2001），より精密な変動の経過が把握されるようになった。

### 5. 考察と課題

大岸西方から観測できる N1, N7 火口は西山火口群の最南部に位置しており，火口群の中心はそこから左方（北～北北西）へ 300～500 m くらいのところにあると思われる。N1, N7 火口付近は 50 度くらいの仰角で右上方に隆起したが（Fig. 6），それを火口群の中心付近まで逆にたどると，変動源の深さはかなり浅く，マグマが地下

数百 m（およそ海拔 0～500 m）ほどのところまで上昇してきた可能性がうかがえる（山科・西村，2000）。変動源がかなり浅いらしいことは，他の変動データの詳しい解析に基づいても明らかにされている（例えば，須藤ほか，2000；村上ほか，2000；高橋ほか，2000）。ここで示したのは遠方の 1 地点からの観測結果であるが，マグマの位置を探る手法の一つとして，今後とも役に立つことがあるものと思われる。

今回の観測では，15 km 以上離れていても，1 m に及ぶような変動があれば，時間差実体視を利用した写真計測によって検出できることが確かめられた。もっともこれだけ遠く離れると，樹木の枝はもちろん太い幹も，かなり条件がよくなないと見分けることが難しかった。計測は，もっと近距離（例えば数 km 以内）から実施できることが望ましいことはいうまでもない。なお，露岩や人工物などが無いと，変動量を具体的に計測することは一

般に難しい。その点、ここで注目した N1, N7 火口一帯は山肌がむき出しになり、4月3日以降は火山灰の堆積や崩落などによる地形変化も少なく、好都合であった。

Figs. 6-7 に示されるように、N1, N7 火口付近は、4月3日以降に合計して数~10m くらい隆起したらしい。同一の場所を測った他の観測データは提出されておらず、その妥当性を直接比較することはできない。しかし、4月3日、4月26日、およびそれ以降に撮影された空中写真に基づく写真測量の結果（長谷川ほか、2000; 須藤ほか、2000）によれば、N1, N7 火口付近が数~10m くらい隆起したことは十分に考えられる。

写真計測では、対象物までの角度の変化を画面上で測り、上下や左右の動きを検出する。これは、セオドライトによる角度測定を代替する方法ともいえる。画面上で前後の動きがあるときには対象物が見える大きさに差が生じるが、よほど大きな動きがなければそれを角度の変化として検知することは難しく、前後の動きを含めた三次元的な変動の実態を明らかにするためには、同一の対象を複数の観測地点から計測する必要がある。ここで取り上げた西山火口群の例では、地形的な制約や立ち入り規制のため、それを実現することはできなかった。

750 mm のレンズを使用した今回のデジタルカメラ画像では、2画素のずれがあれば明瞭に読みとることができ、条件がよければ1画素のずれでも検出できた。これはそれぞれ、 $4.8 \times 10^{-5}$ 、 $2.4 \times 10^{-5}$  ラジアンくらいにあたる。市販されている1,500 mm 相当のレンズの使用や、通常のフィルムの写真を用いれば、条件によっては  $1 \times 10^{-5}$  に近い変化が検出できるように思われる。精密な測量装置による計測に及ばないというものの、現場での作業がごく簡単であること、観測データがそのまま画像データとして保存され、後から再検証できることなどは大きな利点といえる。

セオドライトによる計測の場合、動きを追跡していたポイントが崩れ、観測を継続できなくなることがある。また、変動範囲の拡大や移動などを予見して、各ポイントをあらかじめ計測しておけるとは限らない。この点、定点撮影による画像データが残されていれば、最も知りたい場所の動きを過去にさかのぼってたどることができる。写真計測は、精密な測量の補助として有効であると同時に、場合によってはそれのない長所も持っている。

今回の観測では海岸に撮影地点を定め、海を隔てて有珠山を遠望した。また、ここでは具体的に示さなかったが、有珠山の北側からは洞爺湖の湖面越しに有珠山麓を撮影することになった。海面や湖面を撮影することにより、初めは、高さを測る基準面としてそれらを利用でき

るのではないかと期待した。一方、水面すれすれの空気層は、水温の影響を受けて不自然な気温分布を生じるなど、問題があるかもしれないことも懸念された。撮影された画像の上で実際に検討してみると、その懸念が現実となり、水面付近の地物は、上下方向に多少の伸び縮みが生じる場合のあることがわかった。水面すれすれに写された部分の特に上下変動の検出については、精度を上げることが難しいかもしれない。

デジタルカメラによる画像は、撮影してすぐに内容を確認できる利点は何よりも大きい。噴火活動が進行する中で、変動の有無やその大きさ、広がりなどを速やかに明らかにすることが求められたが、撮影後直ちに前回の画像と比較し、変動の進行状況をその場で確認することができた。しかし、デジタルカメラの利点は、以下のようにならざるを得ない。

デジタルカメラによる画像の場合、いったん画像データを取得した後は、いつでも全く同じ状態でそれを再現でき、画面上の各ポイントの座標値にも変わりがない。光学系を通す従来のフィルム上の画像では、画像を表示したり印画紙に焼き付けたりするときの人為的な歪みが避けられず、しかもそれは、そのつど同じとは限らない。その点でデジタルカメラの画像は、撮影時期の異なるもののどうしを安心して比較することができた。

望遠レンズを通して見た遠方の地物は、よほど空気が澄んでいないとコントラストが弱く、明瞭な画像を得ることがなかなか難しい。デジタル画像データの場合、コントラストを増幅することによって見やすさを格段に改善することができ、作業能率を大きく高めることができた。従来のフィルム画像の場合にも、これをスキャナーでデジタル化して処理することが考えられるが、初めからデジタル画像としてデータを取得することができれば、むだな手間や誤差の要因を減らすことができる。

## 6. 結 論

有珠火山の噴火に伴う山体変動を検出するため、西北西に10数km離れた地点に観測定点を設け、デジタルカメラによる撮影を繰り返した。観測は噴火開始から3日後の2000年4月3日に始められたが、4月4日には、西側山麓に生成された西山火口群付近で1日に1mを超える大きな隆起が進んでいることが明らかになった。隆起速度は日を追ってしだいに減速したが、4月3日以来の隆起量の合計は、大きいところでは最終的に10m くらいに達した。

デジタルカメラで撮影した画像は、まず時間差実体視によって変動の概況を把握した。その後、必要に応じて



画面上の各点の座標を読みとり、それぞれの変動量を算出した。特に今回は、変動域から 15.3~15.5 km も離れた遠方の地点からの計測であったが、大きな変動量が生じたため、明瞭に検出することができた。定点撮影した写真を時間差実体視を利用して計測する手法は、簡便な方法ながら、精密な測量器械を展開することが難しい場合の代替や補助として、今後とも大きな役割を果たせる機会が少なくないと思われる。また、デジタルカメラ画像の利用は、その場ですぐに変動のようすがわかることや画像処理が容易なことなど、大きな利点があることが確かめられた。

### 謝 辞

観測の実施にあたっては、北海道大学岡田 弘教授ほか、有珠火山観測所、有珠山総合観測班の方々に助力をいただいた。また、査読者からは有益な助言をいただいた。あわせて感謝したい。

### 文 献

- Cameron, H.L., 1952, The measurement of water current velocities by parallax methods, *Photogram. Eng.*, **18**, 99.  
 海老名頼利, 2001, 有珠山噴火に伴う測距・測角観測, 国土地理院時報, **96**, 7-16.  
 Forrester, W.D., 1960, Plotting of water current patterns by photogrammetry, *Photogram. Eng.*, **26**, 726-736.  
 長谷川裕之・小荒井衛・渡辺信之・飯田 洋・松尾 馨, 2000, 写真測量で捉えた有珠山の火山活動に伴う地表変動の時系列変化, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 170.  
 勝井義雄, 1988, 有珠山, その生い立ちと噴火, 有珠山—その変動と災害(門村 浩・岡田 弘・新谷 融編), 北海道大学図書刊行会, 札幌, 225-234.  
 木下良作, 1967, 航空写真による洪水流の解析, 写真測量, **61**, 1-17.  
 気象庁火山部・札幌管区気象台・室蘭地方気象台(西出則武), 2000, 平成 12 年(2000 年)有珠山噴火の概要, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 24.  
 北川貞之・藤原健治・中禮正明・笠原 稔, 2000, 1 周波型 GPS によって観測された有珠山周辺の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 166.  
 森 濟・木股文昭・山本圭吾・宮島力雄・高山鐵朗, 2000, 2000 年有珠山噴火の地殻変動観測, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 167.  
 村井俊夫, 1979, 桜島の噴煙写真, 写真測量とリモートセンシング, **18IV**, 3.  
 村上 亮・小沢慎三郎・西村卓也・鷺谷 威・矢来博司・今給

- 黎哲郎・飛田幹男・多田 堯・小牧和雄, 2000, 2000 年有珠山噴火にともなうマグマモデル: GPS 連続観測を主とする地殻変動データによる推定, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 172.  
 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, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 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, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 22.  
 岡崎紀俊・高橋浩晃・笠原 稔・石丸 聡・森 濟, 2000, GPS 観測による 2000 年有珠山噴火前後の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 168.  
 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, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 160.  
 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・塚 幾久子, 1981, 有珠火山地質図(1:25,000), 地質調査所, 火山地質図, **2**.  
 須藤 茂・渡辺和明・斎藤英二・池田国昭, 2000, 空中写真による有珠火山西麓 2000 年火口周辺の山体変動解析, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 49.  
 高田 弘・宮本正三, 1963, 双眼連続写真による交通流測定について, 写真測量, **21**, 8-12.  
 高木朗充・西村裕一・宮村淳一, 2000, セオドライトで観測された有珠山北西部の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 44.  
 高橋浩晃・岡崎紀俊・石丸 聡・森 濟・中尾 茂・三浦哲・加藤照之・松島 健・渡邊篤志・木股文昭・笠原稔, 2000, GPS 観測による 2000 年有珠山噴火前後の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 41.  
 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, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 161.  
 宇井忠英・総合観測班地質グループ, 2000, 有珠山 2000 年噴火: 噴火の推移と災害, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 23.  
 Wohl, M. and S.M. Sickle, 1959, Continuous strip photography - an approach to traffic studies, *Photogram. Eng.*, **25**, 397-403.  
 山科健一郎, 1997, 地面の変動から探るマグマの動き, 火山とマグマ(兼岡一郎・井田喜明編), 東大出版会, 東京, 109-123.  
 Yamashina, K., T. Matsushima and S. Ohmi, 1999, Volcanic deformation at Unzen, Japan, visualized by a time-differential stereoscopy, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 73-80.  
 山科健一郎・西村裕一, 2000, 2000 年有珠火山噴火に伴う変動の時間差実体視観測, 日本火山学会講演予稿集, 2000 年度秋季, 48.

(Received March 22, 2001)

(Accepted July 28, 2001)