

有珠山噴火に伴う測距・測角観測 The Observation by Electric Distance Meter and Theodolite for the 2000 Usu Eruption

測地部 海老名頼利
Geodetic Department Yoritoshi EBINA

要 旨

国土地理院は、「平成12年（2000年）有珠山噴火」（写真－1）に伴い、有珠山の火山活動を把握するために様々な緊急測量を実施した。本稿は、噴火後の有珠山の地殻変動を把握するために行った光波測距儀による距離観測（以下測距という）と、セオドライトによる角観測（以下測角という）についてまとめたものである。



写真－1 有珠山噴火（3月31日13時12分ごろ
虻田町虻田漁港付近から）

1. はじめに

GPS連続観測は、火山活動に伴う地殻変動を捉えるためにきわめて有力な手段である。有珠山噴火活動においても電子基準点やGPS機動連続観測点の観測データは、火山活動の推移を見るうえで重要な基礎資料となった。

一方で、GPS連続観測は、設置場所によっては、電源やデータ転送の問題、設置場所への運搬方法等の問題が存在する。これらの問題解決のために研究が重ねられ、商用電源および一般電話のないところでも2周波のGPS観測が行えるGPSリモート観測システム（REGMOS: Remote GPS Monitoring System）等が開発されて問題の解決が図られてきた。

しかし、地殻変動データを取得したい場所が危険地域で、しかも、立ち入りができない危険な時期にはGPSの設置は困難である。その点、測量の基本技術である測距と測角は、観測する場所を危険地域外に設置することができるという利点がある。測距では目標となる反射鏡を

設置するための時間は、GPS等の設置時間に比べて早く、それだけ危険に接する時間を短くすることができる。測角にいたっては、自然物等を目標にすることによって、危険地域へ進入することなくデータ取得が可能である。反面、測距・測角とも観測者が必要であり、連続的に観測を続けるためには多くの技術者の投入が必要である。

火山噴火予知連絡会有珠山部会は、火山活動の推移から、有珠山北西山ろくにおける溶岩ドーム形成活動に移る可能性が高いという見解を示し、地殻変動を捉えるための観測体制の整備・強化が必要とされた。国土地理院は、GPS連続観測のほかに、洞爺湖の東西2箇所から洞爺湖南岸までの測距と洞爺湖西側高台から火口周辺の自然物等を目標にして測角を行い地殻変動の観測を行うことになった。

2. 観測にいたるまでの経過

国土地理院は、3月29日に国土地理院災害対策本部を設置した。

有珠山周辺には図－1に示す配置で電子基準点が設置されており、3月29日ごろからこれらの電子基準点是有珠山を囲む基線長の変化を捉えていた。有珠山の地殻変動を詳しく連続的に監視するため、3月29日現地緊急測量調査班を派遣した。そして、GPS機動連続観測点の設置作業を行っていたところで噴火が始まった。4月1日～2日にかけてGPS機動連続観測点を2点設置し、有珠山噴火非常災害現地対策本部合同会議および火山噴火予知連絡会等へ出席するための関係者を残して4月5日にいったん現地を離れた。

4月5日の火山噴火予知連絡会有珠山部会において、「この噴火活動の様式は、1910年の噴火初期の活動に似ており、西山山ろくにおいては顕著な地形変動が観測されている。当面、有珠山北西山ろくにおける溶岩ドーム活動に移る可能性が高いと考えられる。溶岩ドーム出現前には、爆発的噴火や、それに伴い火砕流や火災サージの発生する可能性がある。このような爆発的噴火の発生に際しては、噴煙の発生状況の変化や地形変動、地殻変動等の前兆的なシグナルが現れると考えられるので、嚴重な観測・監視が重要である」との見解が出された。さらに見解では、「爆発的噴火が発生するとすれば、この2、3日から1、2週間以内の可能性が高い」との見通しを示し、嚴重な監視や警戒が求められた。

また、溶岩ドームが出現すると予想される位置は、有

珠山北西部、西山西側で確認された断層群にはさまれた地溝帯という見解も示された。地溝周辺では、北側（洞爺湖側）の断層群が急速に隆起しているのが有珠山総合観測班が行ったヘリコプターによる上空からの目視観測によって確認されている。

今後の噴火活動状況を把握するため、有珠山総合観測班において観測強化についての検討が行われ、国土地理院にたいし測距による有珠山北部の地殻変動の監視要請があった。国土地理院はこの要請を受け、4月6日より再び現地に職員を派遣した。

有珠山総合観測班と測距および反射鏡の設置場所等について打ち合わせが行われた。その結果、洞爺湖の東西2箇所から有珠山北側にあたる洞爺湖南岸までの測距を行うことが決定した。また、危険地域に立ち入ることを必要としない測角による監視についても検討された。測角は、噴火地点の北西約5kmにあるホテル「エイペックス」の屋上から火口周辺の自然物等を目標として、水平角および鉛直角を観測することが決まった。

東西2箇所から測距を行うことで、その距離の変化から有珠山の北側がどの方向に動いているかがわかる。測角では、観測目標を同じに取り、それを継続することで、角度の変化から目標地点の隆起、移動量を間接的に求めることができる。



図－1 有珠山周辺の電子基準点の配置

3. 観測の体制

測距および測角は、国土地理院災害対策要領に基づいて、現地緊急測量調査班（以下現地班という）の体制で取り組まれた。現地班の基本的な構成と役割は次のとおりである。

総括（部長等）は、必要に応じて現地入りし、有珠山噴火非常災害現地対策本部合同会議等に参加し、観測結

果について説明するとともに、他機関との調整および記者発表等に携わった。班長（課長等）は、現地班の総指揮を取り、場合によっては総括を代行した。副班長（地殻情報管理官等1名および事務系課長補佐1名）は、班長の補佐役として観測作業のとりまとめ、問題点等の改善および現地班本部の運営を図った。安全管理者（課長補佐等1～2名）は、観測現場において作業の安全を管理し、現場と本部間の連絡および観測作業の援助等に携わった。現場を担当する観測班員は、係長および係員等で構成され、4～6名が測距および測角に携わった。

現地班としての体制は、有珠山噴火活動の沈静化、観測の自動化およびGPS機動連続観測点の設置に伴って順次縮小されていくこととなったが、最終的には観測現場において観測に携わった職員は、約40名で、延べ人日数は往復日数も含めて500人日を上回った。

噴火活動が活発な地域における観測作業なので、安全の確保についてはとくに注意が払われ、現地班本部要員が観測現場の状況をつねに把握する体制がとられた。現場からは、現地到着、現地出発、観測開始等の行動内容を無線または携帯電話で随時連絡し、火山活動の急変に備えた。

また、毎晩、班員による打ち合わせ会議が宿泊先において開かれ、観測班の当日の行動、翌日の行動、有珠山噴火非常災害現地対策本部および火山噴火予知連絡会等の動きなどについて報告がなされ、現地班の全員が有珠山に関する情勢を的確に把握できるように配慮された。班長または副班長は、毎日現場の状況を国土地理院災害対策本部に連絡し、現場の行動について日々把握する体制がとられた。

観測データは、測距・測角のデータのうち午前中に取得したものは点検のあと正午をめぐり、一日分の観測データは、点検のあとその日のうちに、ファックスおよびEメールを使って国土地理院災害対策本部あてに送信した。送信されたデータは、解析後グラフ化されて、火山噴火予知連絡会等へ提供された。

4. 観 測

図－2に測距・測角を行った観測点の配置図を示した。測距は4月9日より、測角は4月8日より観測を開始した。観測開始当初は、測距が西側の3点、測角は7方向（目標1～7）の観測を行い、徐々に目標の増設を図り、測距は6月11日まで、測角は6月25日まで行った。

4.1 測 距

4.1.1 選点作業

4月5日から有珠山総合観測班と測距を行うにあたって打ち合わせが行われ、観測の調整、観測場所、立入禁止地域内への反射鏡の設置等について検討された。反射鏡の設置は、有珠山総合観測班に依頼した。

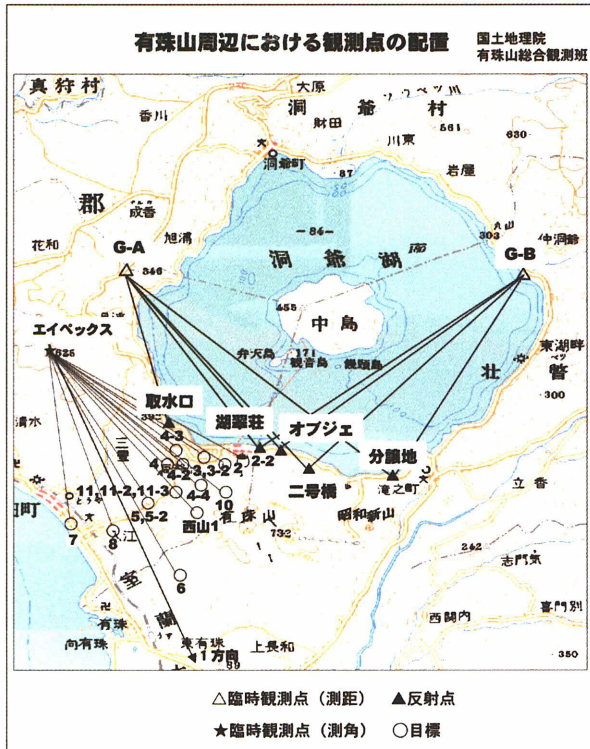


図-2 有珠山周辺における観測点の配置

4月7日、観測地点（器械点）を洞爺湖を東西にはさむ2箇所に選点した。噴火活動の影響がない安全な場所で有珠山北側の区域がよく見渡せる場所を観測点とし、洞爺湖西側の台地からの観測点をG-A点、洞爺湖東側の湖岸の観測点をG-B点とした。

4月7日以降、噴火活動や地殻変動が有珠山北西部から洞爺湖温泉付近に局地化し安定化したことから、壮瞥町壮瞥温泉、昭和新山地区など、159世帯の住民を対象に4月8日、9日の二日間に分けて一時帰宅が実施されることになり、このときに反射鏡を設置することになった。

4月8日に予定された住民の一時帰宅は、天候不良により4月9日13時から実施され、1時間という時間制限のなか、洞爺湖南岸地域の「分譲地」、「二号橋」、「オブジェ」の3箇所に反射鏡を設置することができた（写真-2～4）。

反射鏡は、3 素子一体型を使用した。1 箇所ですべての反射鏡を用いて、一つはG-A点、もう一つはG-B点方向に向けて設置された。長期の観測にも耐えるようにセメントを用いて反射鏡を取り付ける整準台を岩などに固定した。



写真-2 反射点「分譲地」



写真-3 反射点「二号橋」

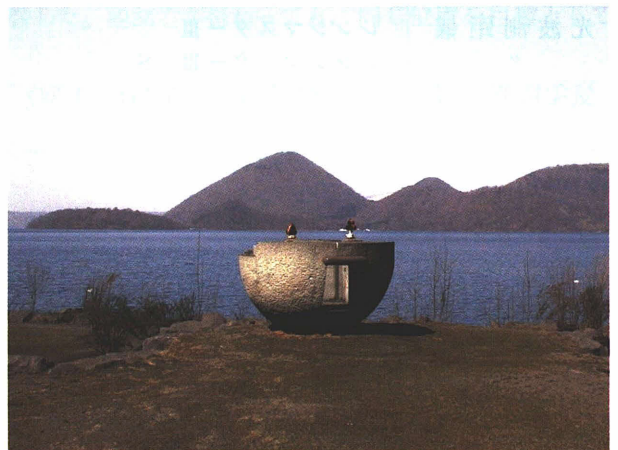


写真-4 反射点「オブジェ」

4. 1. 2 観測作業

観測器械を表-1に示した。観測に使用した光波測距儀は30km以上の長距離を測定できる性能を有し、レンジマスターⅢ-S型は、レンジマスターⅢ型と比べより高出力型であるため、長距離を観測するG-A点で使用した。

4月9日、観測班はG-B点で待機し、反射鏡設置の連絡を無線で受け、14時過ぎより観測を開始し、3方向についてそれぞれ3セットの観測データを取得することができた。G-A点からは翌日の4月10日から観測を開始した。

観測点には、直射日光と風の影響による器械の震動を軽減するため観測用天幕を張った。また長さ50cm、太さ15cmほどの杭を3本打ち込み、そこに三脚を据え、器械を安定させた状態で観測を行った。視通状況の悪い日が多く、反射鏡をとらえるのに技術を要した。

観測は10回の読定を1セットとし、セット内較差は20mm以内を標準とした。セット間の測定間隔は20分以上として、最低2セットの観測を実施した。地面からの輻射熱の影響を避けるため、地上から約3mの高さに電気温度計を取り付け、気象測定は観測開始と終了時に行った。光波測距儀による観測において、光の屈折率に影響を及ぼす気象要素の測定は大変重要である。今回のように5kmを超える測距の場合、器械点と反射点の両地点で気象要素を測定するのが一般的である。しかし、今回は反射点での気象測定が不可能であるため、器械点の気象観測値から、てい減率を用いて反射点の気象要素を計算で求め観測距離に補正した。



写真-5 G-B点からの測距風景



写真-6 G-B点からの観測方向

表-1 観測器械

観測器械	名 称	性 能 等
光波測距儀	レンジマスターⅢ	精度 $\pm(5\text{ mm} + 1\text{ ppm} \cdot D)$
〃	レンジマスターⅢ-S	〃
気象観測装置	隔測通風乾湿計 (TAH-1型)	電気温度計 確度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$
		デジタル気圧変換器 確度 $\pm 0.10\text{ hPa}$

4. 1. 3 反射点の増設

現地の入域規制領域が徐々に緩和され、4月20日から壮瞥町壮瞥温泉から西へ向かう虻田町境界線までの湖岸沿いは、毎日9時～16時のあいだ入域規制が解除となった。このため、さらに火口に近い壮瞥町洞爺湖温泉地区（湖翠荘）にも反射鏡を設置することができた。この付近一帯には3cmほどの火山灰が堆積しており、噴火の爆発音が間近に響く場所である。この領域に立ち入りの際は、必ず観測計画書を火山噴火予知連絡会有珠山部会事務局へ提出することが義務づけられた。

反射鏡設置にあたり、ここでは整準台の代わりに植木鉢を使用した。鉢底に7素子反射鏡をボルトで固定し、中にはコンクリートを詰め湖岸の堤防上にセメントを用いて固定した（写真-7）。

5月10日からはG-A点から「取水口」の観測を開始した。ここは洞爺湖から発電用として送水を行っている場所である。噴火口に近く5月6日には付近に地割れが発生していることが確認された。もし異常が起これば発電が停止するだけでなく水害の危険性もあるため、北海道電力の依頼により測距による監視を行うことになった。こ

の場所も立ち入り規制されている地域である。事前に計画書を提出してから調査を行い、長さ1mほどの鉄製ポールに整準台を固定し、金具を用いて柵に取り付けた。ここでは3素子反射鏡を使用した(写真-8)。



写真-7 反射点「湖翠荘」



写真-8 反射点「取水口」

4. 2 測 角

4. 2. 1 選点作業

測角については、噴火地点の北西約5kmの山頂に建つホテルの屋上を観測点とし、噴火地点周辺の自然物等を目標として水平角および鉛直角観測を実施することにより、土地の隆起と水平変動を監視することとした。

4月8日、観測点であるホテル「エイベックス」の屋上の使用について許可が得られ、当日午後から観測を開始した。

観測地点からは火口周辺をよく見渡すことができ、とくに溶岩ドームが形成されると予想される地域を重点的に目標物を選んだ。住宅の屋根や窓枠、煙突などを観測の目標として測角による監視を開始した。

4. 2. 2 観測作業

観測にはウィルドT2(1秒読み)を使用した。器械への直射日光と風の影響を避けるため、通常は測距の場合と同じように観測天幕の中で観測を行うが、屋上はその余裕のある広さではなかった。そのため、風などによる振動を軽減するため、三脚の先端を屋上面と石こうで固定し、さらに三脚をゴムバンドを用いて引っ張り安定させた状態で観測を実施した。

水平角観測は方向観測法により、望遠鏡正および反の観測を1対回として、2対回の観測を行った。観測の良否を判断する観測値の制限は、基準点測量の制限値を参考にし、水平角観測では倍角差15秒、観測差8秒、鉛直角観測では望遠鏡正および反の1対回観測として、高度定数の較差10秒を観測の目安として実施した。

水平角観測における零方向(図-2において目標1方向)は、伊達市にある伊達火力発電所の鉄塔先端についているフラッシュを観測の基準とした。零方向の観測誤差は全方向に影響を及ぼすため、鉄塔先端のフラッシュは零方向に適した目標物であった。

開始当初は時間的な変動を捉えることができる可能性もあることから、できる限り繰り返し観測を実施し、初日は、目標1~7について、水平角、鉛直角観測とも2セットの観測データを得ることができた。

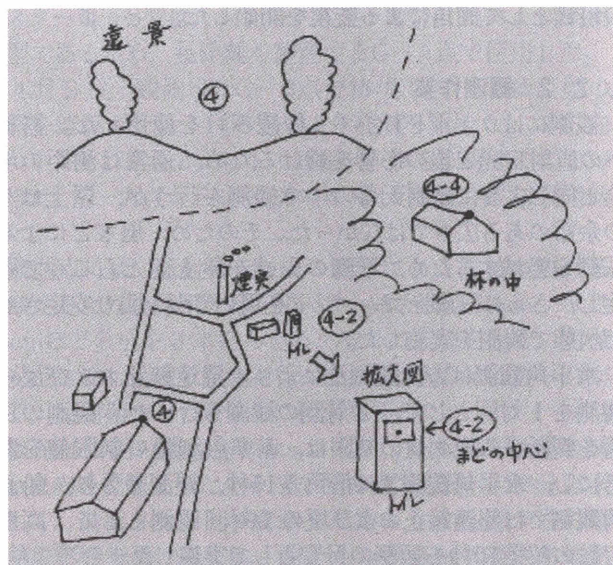
地殻変動が激しく数日で消滅したり傾いたりした目標もあり、そのたびに新たなものを探して観測を継続した。また、5月になると新緑が芽生え、その影響で隠れてしまった目標もある。

観測者全員が同じ目標の同じ位置を観測する必要があることから、目標確認のため観測作業を一日重複させて交替した。観測者が替わっても、同じ位置を目標として



写真-9 ホテル屋上からの測角風景

継続できるように、図－3のように目標の観測位置を明確にして後続の観測者に引き継いだ。



図－3 観測目標点の位置図

5. 観測結果

5.1 測距の結果

図－4に、G－A点（洞爺湖西側）からの距離観測結果と、図－5に、G－B点（洞爺湖東側）からの距離観測結果を示した。図－4において「オブジェ」、「二号橋」、「分譲地」の3地点は4月10日が起点であり、「湖翠荘」の観測は4月21日から、「取水口」の観測は5月10日から始まっている。同様に図－5のグラフでは4月9日がグラフの起点であり、「湖翠荘」の観測は4月20日から始まっている。

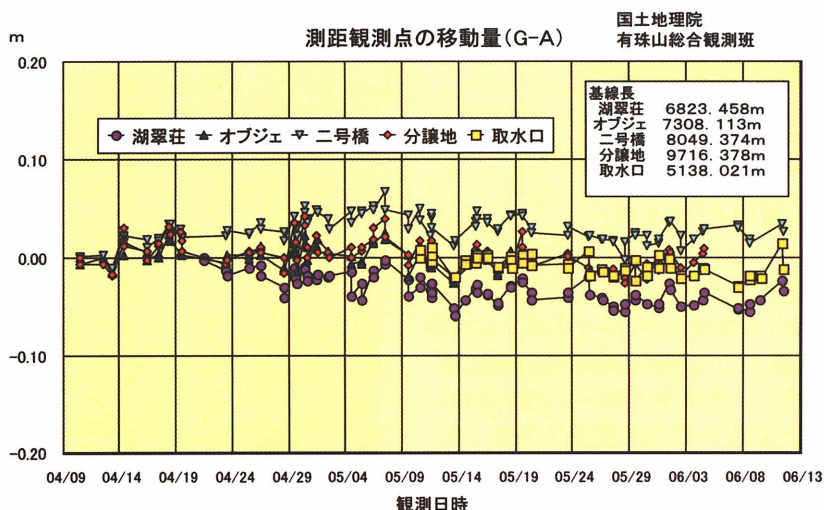
観測を開始してから6月までに、G－A点からの各距離の変化量は、数cmの伸びまたは縮みであるのに対して、G－B点からの距離の変化量は一様に縮みの結果がでている。「分譲地」の縮みは数cmと小さいが、そのほかの方向については10cm～15cmほど縮んだことを示しており、火口に近い反射点ほど移動量は大きく現れている。

G－A点とG－B点の位置関係が反射点に対してほぼ90度方向であることから、同一の反射点における二つの方向の距離変化ベクトルからベクトルの和を求めることによって、反射点の移動方向と移動量を求めることができる。図－6は、この方法によって求めた反射点の位置ベクトルをプロットしたものである。この図から、反射鏡を設置した場所が洞爺湖側（北東）へ押し出されるような地殻変動が検出されている。「湖翠荘」の変動方向は、北東よりやや北向きであり、「二号橋」の変動方向は、北東よりやや東向きであることがよくわかる。「湖翠荘」は4月20日からの観測であることを考えると、火口に近い地点の変動量がより大きく出ていることがわかる。

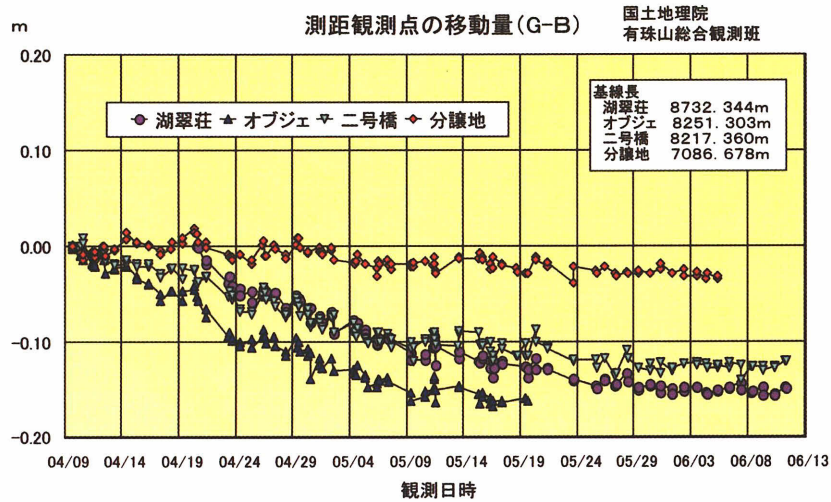
図－4および図－5において、G－A点の観測グラフは、G－B点の観測グラフに比べて累積する変化量は小さいが、日による伸び縮みの変化量がばらついている。

距離測定においては、とくに気温が観測値に与える影響が大きい。G－A点の標高がG－B点より約300mほど高いのにたいして、G－A点の気温がG－B点よりも高いという気温の逆転現象が生じたこともあって、光路上における気温分布が不安定であり、観測点および減率によって求めた反射点の気温による観測値の補正だけでは不十分であったためと考えられる。

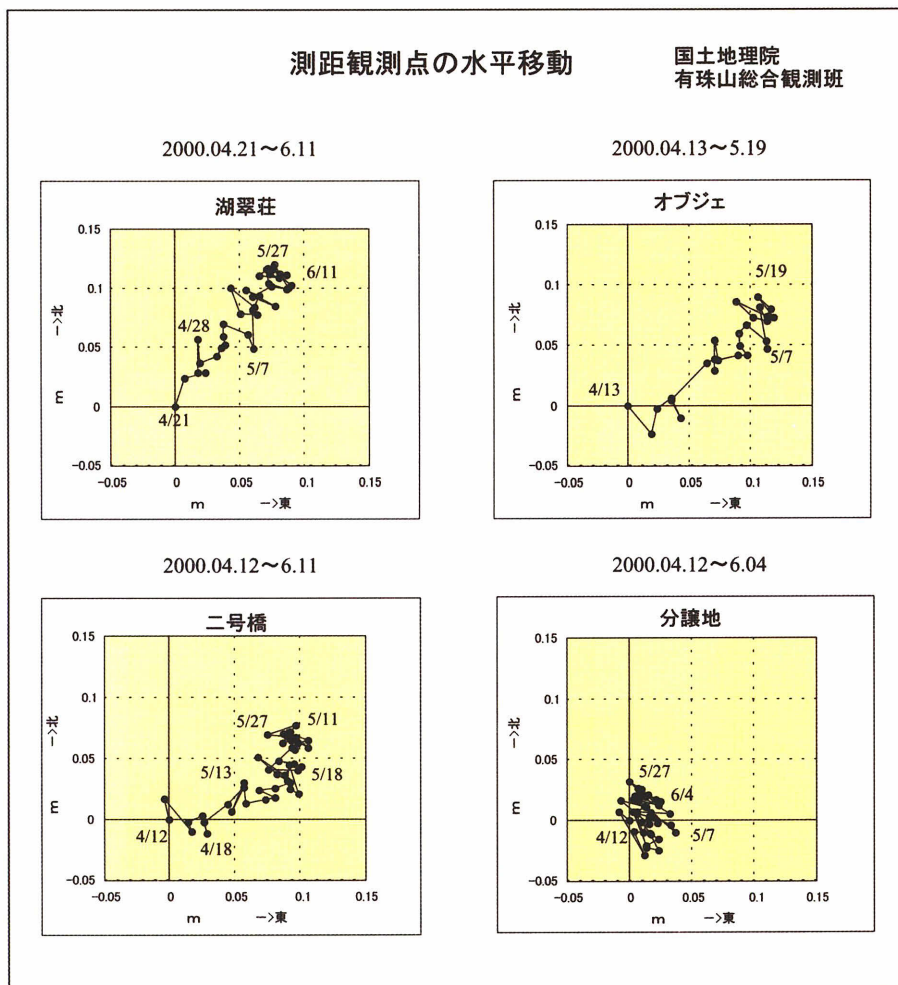
この結果を受けて、測距を引き継いだ測距・測角自動観測システム（APS: Automated Polar System）の洞爺湖西側の器械点は、気象条件を考慮して観測条件が同じとなるような湖岸に設置した。



図－4 G－A点からの距離観測結果



図－5 G-B点からの距離観測結果



図－6 測距観測点の水平変動ベクトル

5. 2 角観測の結果

図-7は、測角による水平角観測から求めた水平成分の移動量で、図-8は、鉛直角観測から求めた高さ成分の移動量である。両図とも観測初日の平均値を基準としている。この基準値と毎日の平均観測値との角度の変化量と、目標点までの概算距離から水平および鉛直の移動量として表したグラフである。水平の移動量のプラスの向きは、目標点が北東側方向（洞爺湖側）へどのくらい移動したかを示している。

目標4、目標4-2、目標4-4、目標11-3は、両図において同様な変化を見せており、これらの目標地点が、大きく変動したことを示している。水平および鉛直とも移動量は、4月15日ころを境にして、以降徐々に小さくなってきた。

水平では、目標西山-1および目標8は反対方向へ移動しており、火口をはさんで移動方向が変わることを示し、火口周辺の局地的な地殻変動とその推移を捉えることができた。

図-9および図-10は、4月8日～12日までの観測値から水平と鉛直の推定変動量を示したものである。目標5の推定変動量は、4月8日～9日の観測結果から、目標10については4月9日に観測された数回の観測値から求めたものである。図-7および図-8の中にこれらの目標が表示されていないのは、変動が激しく短期間で消滅し観測が継続できなかったためである。

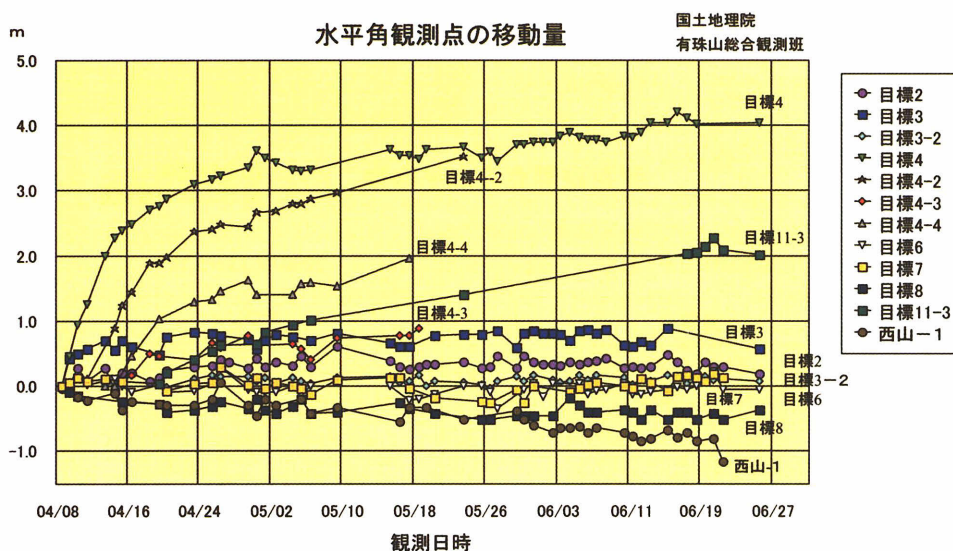


図-7 水平角観測結果

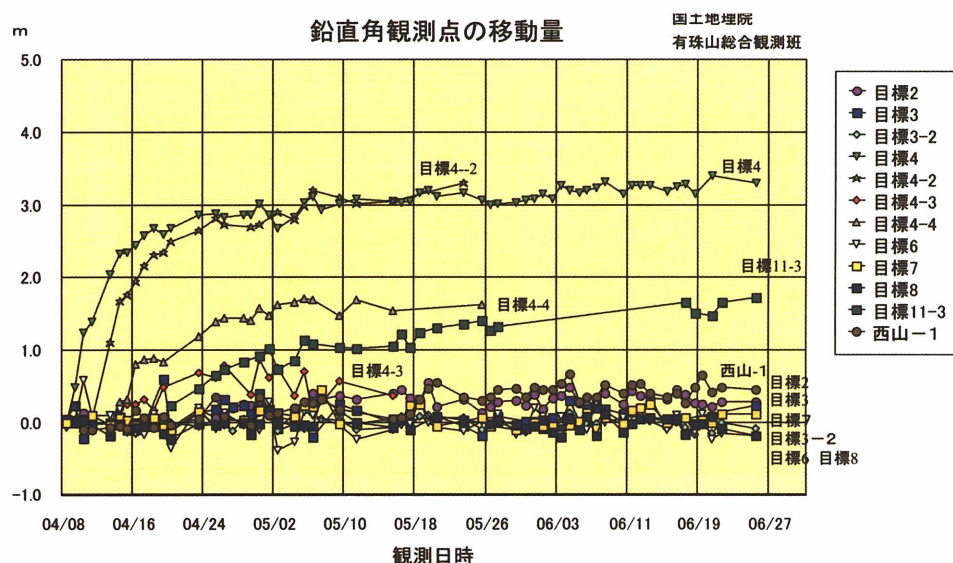


図-8 鉛直角観測結果

有珠山地殻変動測量(測角)

国土地理院
有珠山総合観測班

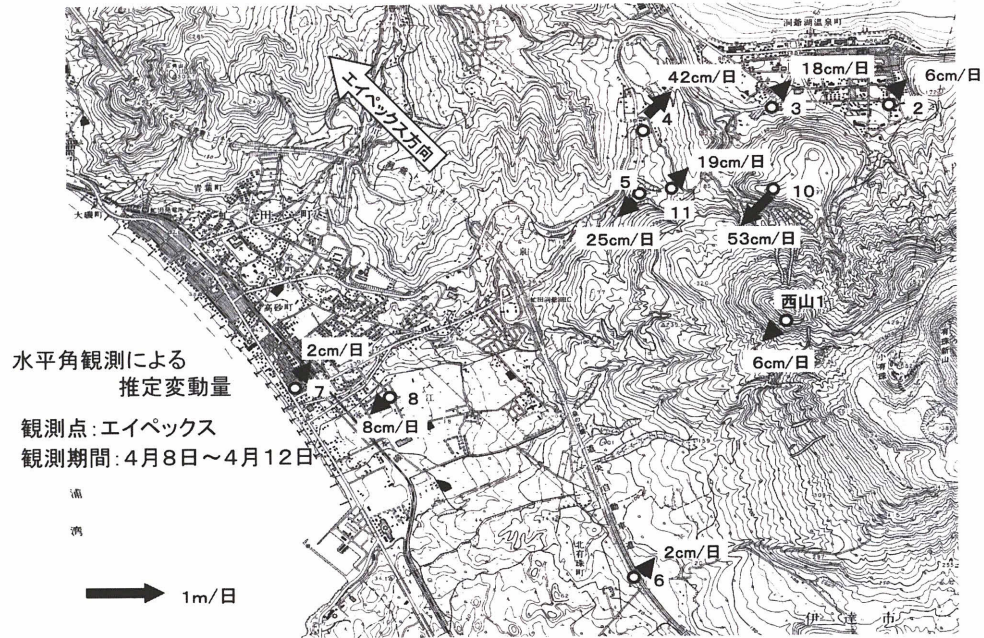


図-9 水平角観測による推定変動量(4月8日~4月12日)

有珠山地殻変動測量(測角)

国土地理院
有珠山総合観測班

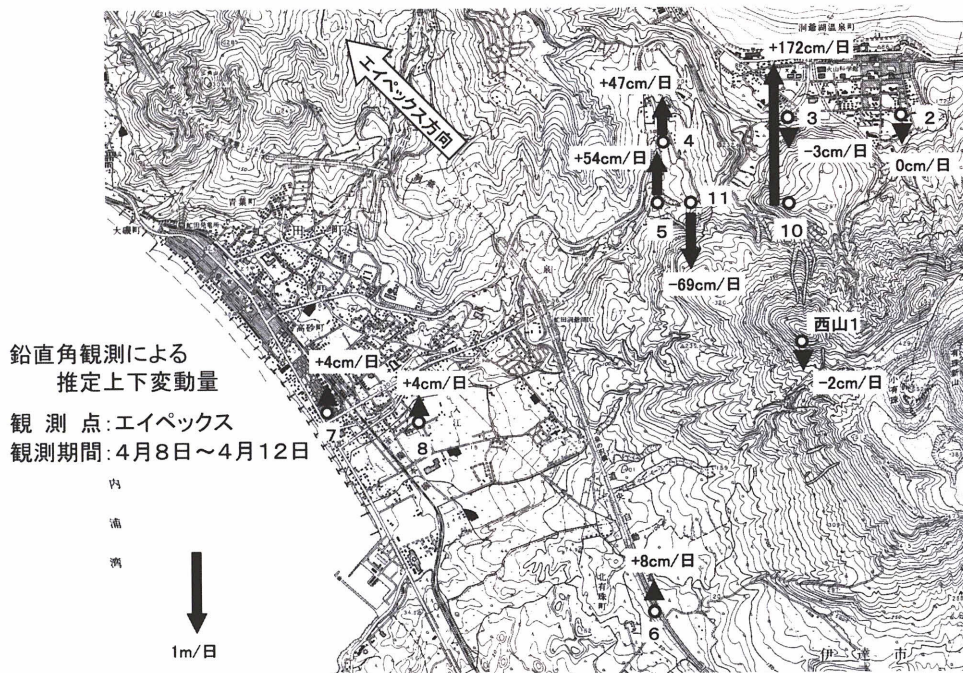


図-10 鉛直角観測による推定変動量(4月8日~4月12日)

6. 自動観測への移行

測距は6月11日まで行い、その後、APSによる自動観測にきりかえ、観測方向数を増やして監視を続けている。

測角は6月25日まで継続されたが、火山活動が沈静化したことから4月8日から行われた観測は終了した。6月30日、測角機材をすべて撤収し観測班は全員帰庁、現地班は自動観測への移行に伴い解散した。その後、有珠山の火山活動は断続的に小爆発を繰り返えし、火山灰を含んだ噴煙を噴出しているが、7月10日に火山噴火予知連絡会は、「深部からのマグマ供給はほぼ停止し、マグマ活動は終息に向かっている」との統一見解を発表した。しかし、統一見解は「当分の間、現在と同様の爆発が西山西側と金比羅山の両火口群で継続する」と指摘しており、現に本稿執筆時点（平成13年1月10日）でも小規模な水蒸気爆発を繰り返えし、火山灰を含んだ噴煙を断続的に噴出している状況が継続している。

現在、国土地理院が行っている有珠山の火山活動の監視は、APSのほか、「火口原」に設置したREGMOSや、「伊達」、「壮瞥」、「虻田」の電子基準点を補完するように設置されたGPS機動連続観測点等により、広域的な観測を継続して行っている。これらの観測結果は引き続き関係機関に提供しており、国土地理院のホームページでも公表している。

7. おわりに

多数の国土地理院職員を動員して実施した測距・測角作業は、厳しい気象条件と緊迫した日々のなか取り組まれ、刻々と変わる有珠山の地殻変動を捉えることができた。火山活動の状況を示した毎日の観測結果は、火山噴火予知連絡会へ報告され、これらに基づいて火山活動の的確な分析が行われた。また、有珠山噴火非常災害現地対策本部にも日々報告され、避難解除および被害を最小限に食い止めることへの判断材料として役立てられたことは、測量技術者として仕事に対する大きな励みにもなった。

国土地理院は、電子基準点をはじめとするGPS観測を中核とした観測手法によって地殻変動のデータを取得・提供し、地震や火山噴火による災害防止に取り組んでいる。GPSによる測量は、測距・測角の従来技術に比べてはるかに精度のよい測量であることは確かで、今後幅広く活躍の場が広がっていくことと確信する。

今回の有珠山においては従来技術の測距・測角に活躍の場があったことも事実であり、地殻変動を監視するフィールドにおいては、測地測量の新旧手法に精通した技術力が必要であると痛感した。

測距・測角の観測にあたっては有珠山総合観測班や関係機関の多くの方々のご協力を得て実施することができた。あらためて関係者の皆様に深く感謝申し上げる。

最後に、被災された方々へ心よりお見舞いの意を表すとともに、今も避難を続けられている住民方々の一日も早い復帰と被災地域の復興を祈念する。

参 考 文 献

毛塚三雄・斉藤隆（2000）：「平成12年（2000年）有珠山噴火」に伴う国土地理院の取り組み（速報） 国土地理院時報 2000, 94集 P1-P14

国土地理院（2000）：有珠山噴火と国土地理院の活動 地図ニュース No.-335 P8-P13

国土地理院（2000）：北海道地方の地殻変動 地震予知連絡会会報 第64巻 P30-P39