

22. 浅間火山北東山麓における光波測量 (第 1 報)

地震研究所	}	竹田 豊太郎
		行田 紀也
		小山 悦郎
		長田 昇
京都大学防災研究所	}	江頭 庸夫
		園田 忠惟

(昭和 53 年 4 月 28 日受理)

1. はじめに

浅間山の火山活動と地形変動との関係に関する研究は、高橋竜太郎、水上 武らによって傾斜観測、水準測量などが行われていた。水上は浅間火山観測所敷地内に、一辺約 25 m の菱形基線を設け、辺長の測定を行って来た。浅間山を中心とした辺長測量基線網設置の一環として、長スパンの菱形基線網が計画された。設置場所は比較的平坦な浅間山北東山麓黒豆河原を選んだ。菱形基線網は第 1 図に示すように、天丸山 (011) および小浅間山 (012) と結んである。

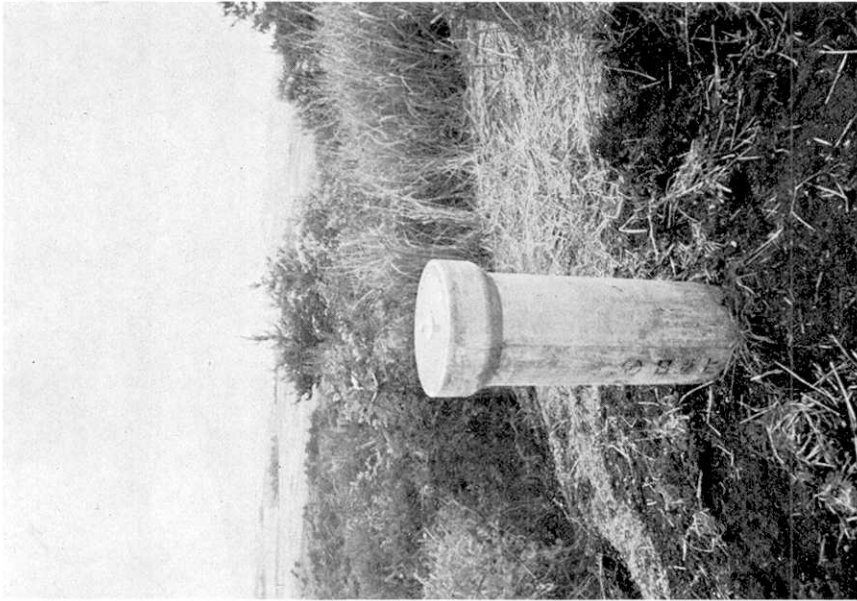
一般に行われているように、光波測距儀および反射鏡を三脚を使用して測定することは基準点上に正確に設置することが難しいので、繰返えし測定によって、微少な変動量を検出するためには好ましくない。従って、我々は、基準点として観測塔を 1977 年 6 月に作製した。

以上の辺長基線網ができた 3 カ月後の 1977 年 9 月 20—30 日に、浅間山集中火山観測の一環として、第 1 回目の測定を行った。使用した器機は AGA 社 Geodimeter model 700 である。また実験的な観測として、京都大学防災研究所の AGA-6BL との比較観測も行った。また、菱形基線網の 3 次元の変動をも把握する目的で、基準点間の水準測量も併せ行った。

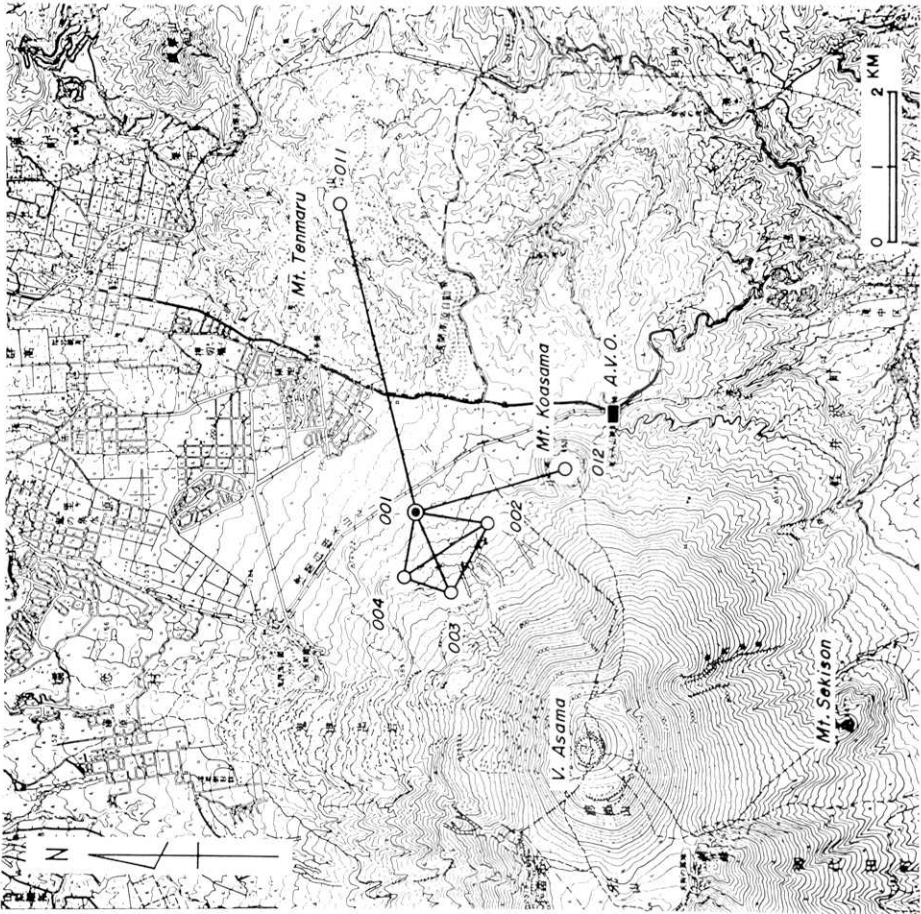
今回の観測は第 1 回目であって、変動量その他の結果はないが、浅間山の平穏時の測定値として、将来の基本的な資料となる。ここでは測定方法、測定値および測定に関する 2—3 の問題について、検討し考察した点について述べる。

2. 基準点

基準点の選定に当っては、その相互間がすべて見透しがきくよう設計されている。今回実際に測定したのは第 1 図に示した 8 測線である。



第2図 観測塔



第1図 浅間辺長測量基線網

基準点はすべて第2図に示すような観測塔形式とした。この塔は市販のヒューム管を使用した鉄筋コンクリート製で、地下に約1m立方の基礎を持ち、地上部は直径約40cm高さ約1.2mの円柱構造になっている。塔の最上部には黒御影の円板がはめこまれ、ステンレス製のボルトがその中央部に埋め込まれている。このボルトには Geodimeter や Reflector はもちろん、その他の測量器機も簡単に着脱できるよう造られている。また、火山活動の際、火山弾や火山礫から守るため、使用しない時は鉄製のキャップをかぶせてある。

一般に野外測量では、この塔の代りに三脚を使用するのが普通であり、振り下げ等の操作が不可欠である。この場合、±1mm程度の求心誤差(第4表の3と4)は避けられない。特に山間部においては測定基準点間の高度差が大きい場合が多く、器機の地上設置高が測長に及ぼす影響を無視できなくなる。今回浅間の基線網で採用した観測塔は、これら誤差の入り込む余地を無くしたばかりか、作業能率の向上にも役立っている。

3. 測定方法

今回辺長測量に使用した光波測距儀は AGA 社 Geodimeter model 700 である。菱形基線の水準測量には ZEISS 社 Ni2 を使用した。両測量を含めた実施期間は9月20日から30日の11日間である。AGA-700による辺長測量記録の概略を第1表に示した。

光波測量は大きく気象条件に左右され、第1表に示すように、測定数が少ないために再測を行った測線(*印)が3つある。一般に、1日中で大気の状態が最も安定し温度勾配が少ないのは、季節や地形で一概には言えないが、日出と日没前後の時間帯と言われている。このことを配慮し、今回の光波測量は支障のない限り夕方から夜にかけて行うよう心掛けた。日中に行う場合でも、なるべく高曇りの日に行うようにした。

測定値の読取りは、5秒間隔で4分間行い、これを1set(49読定)とし、5set行うことを標準とした。この際、1set毎に Geodimeter 本体が測距動作に入るまでの、あら

第1表 1977年・浅間辺長基線網における測量記録

Base-line	Date	Time	Weather	Number of Reflector	Number of Data	
					Set	Reading
001→011	Sep. 20	1946 ^h -2109 ^{h m}	Cloudy	9	4	196
001→002	Sep. 20	1933-2101	Cloudy	3	5	245
003→004	Sep. 21	1747-1853	Fine	7	3	147
*003→001	Sep. 21	1756-1831	Fine	7	2	98
*003→002	Sep. 21	1808-1840	Fine	7	2	98
001→003	Sep. 22	1133-1241	Cloudy	7	5	245
001→004	Sep. 22	1142-1248	Cloudy	7	5	245
002→003	Sep. 22	1333-1441	Cloudy	7	5	245
002→004	Sep. 22	1342-1447	Cloudy	7	5	245
*001→012	Sep. 28	1437-1450	Cloudy	7	2	98
001→012	Sep. 30	1207-1250	Cloudy	7	5	245

ゆる初期設定をやりなおすことになる。この1測線 5 set の測定を完了するには、およそ40~50分を費やす。

気象測定には、温度計にアスマン型通風乾湿計、気圧計としてポーリン高度計を使用し、5分間隔で読取りを行った。温度測定は原則的に地上約2mで行った。測定は今後の一環性を考えて Geodimeter と Reflector の近傍、すなわち光路の両端で行った。この2地点測定の単純平均値を気象補正に用いた。

ある測線の Geodimeter と Reflector の配置関係は、測定作業能率だけから決定され、第1表から明らかなように無秩序である。すなわち、今回の測定では Geodimeter と Reflector を入れ代えての測定は行わなかった。

4. 測定結果

浅間基線網で測定された斜距離と高度差（基点001が原点）を第2表に示す。測定誤差として、斜距離には5 set 245 読定の標準偏差を、高度差には水準測量の往復差を示してある。それらの誤差は ± 3 mm で同程度である。

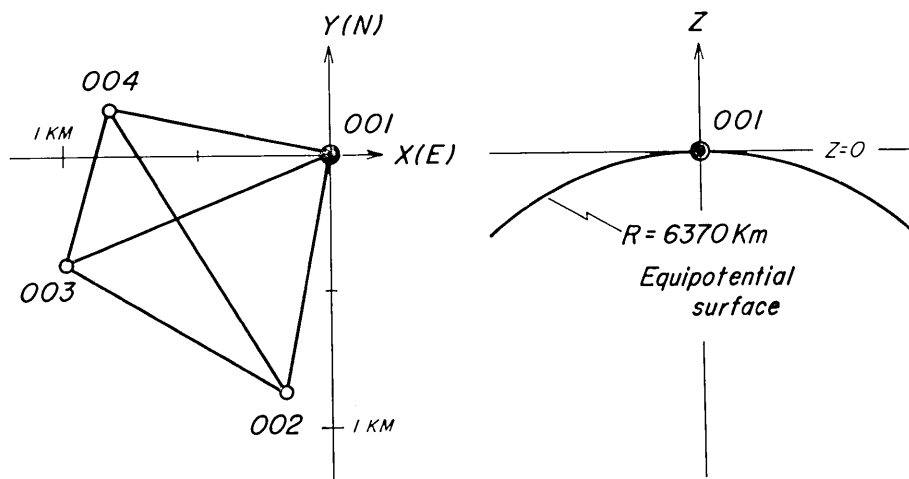
これらすべての測定値のうち、基線が閉じている（001~004で構成される）菱形基線の各測定値について、網平均で評価を試みた結果を第3表に示した。第3表に示した高度差の測定値には地球の曲率補正（ $R=6370$ km）を施してあるため第2表の測定値そのもの

第2表 各測線の斜距離と高度差、高度の原点は001である

Base-line	Slope distance	Height difference
001-002	893.675 ^m ±0.003	68.930 ^m ±0.003
001-003	1,078.818±0.003	121.937±0.002
001-004	849.524±0.003	66.946±0.002
002-003	953.678±0.003	53.006±0.003
002-004	1,231.912±0.003	1.985±0.003
003-004	590.134±0.002	-54.991±0.002
001-011	4,263.336±0.005	
001-012	2,025.085±0.003	

第3表 菱形基線を網平均した時の偏差値

Base-line	Slope distance		Height difference	
	Measured	Deviation	Measured	Deviation
001-002	893.675 ^m	-0.5 ^{mm}	68.868 ^m	-0.0 ^{mm}
001-003	1,078.818	+0.9	121.846	+0.0
001-004	849.524	-0.7	66.889	-0.0
002-003	953.678	-0.7	52.978	+0.0
002-004	1,231.912	+1.0	1.979	+0.0
003-004	590.134	-0.7	54.957	+0.0



第3図 基線網の (X, Y, Z) 直交座標系

とは違っている。この網平的では簡単のために、3次元の直角座標を採用し、斜距離と高度差とは同じ重さで最小2乗法により計算されている。3次元直角座標 (X, Y, Z) と原点の選び方を参考のため示したのが第3図である。この座標選択の仕方は、網平均の計算と今後の変動量を比較する時に必要なものであり、本報告では本質的な問題ではない。

第3表の偏差値を見る限り、斜距離についてはその値はすべて1mm以下で、その測定値に対する相対精度は003-004測線での 1.2×10^{-6} を除けば 10^{-7} の桁である。従って、網平均で用いた測定値の単位がmmであることを考慮すれば、非常に精度のよい測距であると判断できる。高度差の偏差値そのものには物理的意味はなく、非常に小さいということを表現するために、計算値をそのまま記入したものである。ただ高度差が測線長に比べて1/10以下であることを加味しても、より小さな偏差値であり、測定精度の高さを暗示している。

5. 測定誤差に関する吟味

前節に述べたように、今回の最終測定値の相対精度は 1×10^{-6} 程度であり、測定距離を考慮して、今後 2×10^{-6} 以上の歪が観測されれば完全に有意なものと解釈できる。この節では測距に係りのある各種の誤差に立ち帰った吟味を試みる。

Geodimeterを使用する距離測定で問題になる誤差は、大別して測定距離に関係(比例)する項と、そうでない固定項に分類することができる。第4表はこれらの誤差の概略を列挙したものである。ここに“Setting”というのは主に受光量の調節に伴う誤差であり、“Geodimeter constant”とはGeodimeter固有の誤差であり、後節で触れる。なお周波数については測量実施前後に検定することにしており、 3×10^{-7} の精度内に調整される。

第4表から精度向上に対する最大ネックは気象補正による誤差であることは明らかである。言うまでもなく、Geodimeterは光速の一定性が物差しになっている。すなわち光

第4表 Geodimeter 測定の誤差

	Mean square error	Proportional error
1. Setting	$\pm 2^{\text{mm}}$	$10^{-6} \times D^*$
2. Geodimeter constant	± 2	—
3. Eccentricity, Geodimeter	± 1	—
4. Eccentricity, Reflector	± 1	—
5. Frequency setting	—	± 0.4
6. Frequency ageing	—	± 0.5
7. Meteorological data	—	± 1
Total	$\pm 4 \text{ mm}$	$\pm 1 \times 10^{-6} \times D$

* D =Distance

路中の平均的な大気の屈折率をいかに精度よく決定するかが重要な問題である。

光の屈折率は使用波長，気温，気圧，水蒸気圧によってほぼ原理的に表現できる。これを測定距離 (D) に対する補正值 (dD) で示したのが次式である。

$$dD = \left[308.6 - \frac{107.92P - 15.02W}{273.2 + T} \right] \times D \times 10^{-6},$$

(Wave length = 632.8 nm)

where

T : Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

P : Pressure (mmHg)

W : Water vapour pressure (mmHg).

精度 1×10^{-6} を確保するためには上式から，気温 1°C ，気圧 3 mmHg，水蒸気圧 20 mmHg 以下の気象測定精度が要求される。前節に述べた気象測定器機は上記の精度を完全に満足するものである。実際は，光路全体にわたるこれらの気象要素をいかに正確に捕えるかにかかっている。

より詳細な議論は本報告の主旨を逸脱するので，以下に実際に検討し実験した項目について紹介する。

5-1. 水蒸気圧の測定

Geodimeter AGA-700 の manual によれば，水蒸気圧による気象補正は不必要となっている。AGA-700 における全気象補正には，気温と気圧のみを用いて $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ の桁まで読み取れる Nomograph が用意されている。

AGA-700 で可能な最長測定距離は，Reflector の数にもよるが 5 km 前後である。この最長距離を前出の気象補正式で水蒸気圧 $W=0$ として計算した場合は少々問題である。ただし Nomograph 自体は $W=10 \text{ mmHg}$ に固定した補正值が刻まれており，極く一般的な気象条件における水蒸気圧は $10 \pm 5 \text{ mmHg}$ であることを考慮すれば，その精度は 3×10^{-7} 以内となる。従って気象補正にこの Nomograph を使うことは，その他の補正精度から言って問題ないと推察できる。

第5表 水蒸気圧を考慮した気象補正

	001-002	001-011
Formula	893.6747 ^m ($W=10.5$)	4,263.3357 ^m ($W=11.0$)
$W=0$	893.6742 (6×10^{-7})	4,263.3333 (6×10^{-7})
Nomograph	893.6746 (1×10^{-7})	4,263.3349 (2×10^{-7})

今後、基線網を拡張した時に予想される長基線測定の子行も兼ねて、水蒸気圧の測定を試みた。第5表はそのうちの2測線について、前出の気象補正式に実際に測定された水蒸気圧を代入した時と0を代入した時、及びNomographを使用した時について測定距離を計算し、水蒸気圧が測距に及ぼす影響を確かめた結果である。ここに示した例は、測定距離が短い場合で、しかもこの例のような一般的な気象条件では、Nomographの使用に制限を加える必要がないことは明確である。

5-2. 基線間における気象測定

測距における誤差の最大問題は気象補正であり、“光路における平均的な気象要素をいかに正確に把握するかにかかっている”ということは先に述べた。従って、光路中の多数点において気象測定することが望ましいわけであるが、人数や経費の制約を受ける。一般には、光路の両端、すなわち器機点と反射点の測定値を単純平均した値を使用しているのが現状である。

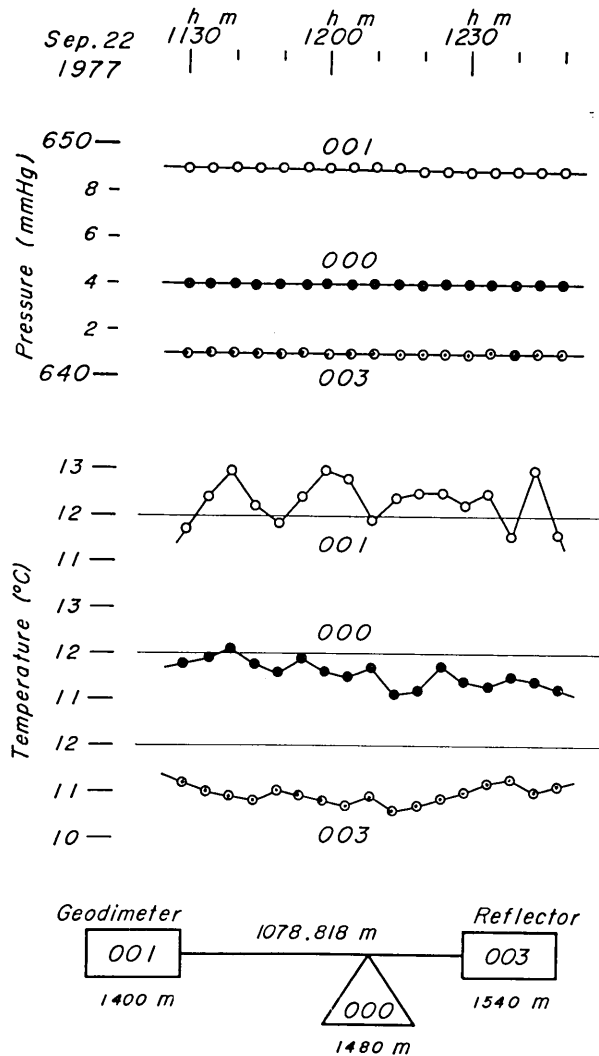
今回、この両端に加え、光路中の1点で気象測定を行ったので、その1例を第4図に示す。この例における3点での気温・気圧の測定値は、それら基準点の高度と高度差を考慮すれば、非常によい調和を示している。このことは第1図からも明らかのように、地形的に一樣な斜面であること、及び測定時刻における大気の状態が非常に安定していたためと思われる。

第2表に示した基線長は、今後の一環性をはかる意味で両端の気象測定値のみを採用した結果であるが、この例ではそれに中間点の値を加えても結果は同じであった。しかし、実際には測線中に深い谷や川があったりして、この補正值は簡単に捕えにくい場合が多い。

5-3. 絶対長さとの比較

Geodimeterで測定された距離と絶対距離を比較すると、どうしても個々のGeodimeterに固有な一定の差が生じる。この値は測定距離に無関係な量で、第4表の2に示した“Geodimeter constant”がこれにあたる。一般にこの値は小さいので、地殻変動など相対精度に着目するのであれば、同一器機を使用している限り問題ではない。しかし種々の器機を使用した測定で、しかも短距離で伸び縮みを議論する場合は、この定数を正確に捕えておく必要がある。

上記の定数検定の目的で、1977年6月1日に武蔵村山基線場(国土地理院)を借用して測定を行った。この基線場の基準点自体は強固にできているが、基線中に障害物があり、直接の見透しがきかない。そしてどちらか一方の器機を基準点上約7mのやぐら上



第4図 3地点で気象測定を行った時の気温・気圧の変化

に設置しなければ測定ができない。従って、器機の設置誤差を配慮すれば、村山基線場は検定基線としては余り好ましくない。検定測定の結果を第6表に示した。この表は地殻変動移動観測班から拝借したものである。同表には、器機の各種機能の点検も兼ねて、地震研究所地階の基線で行っている測定値の抜粋も参考のため列記した。ここに記さなかったDataも総合して、AGA-700の定数は+4~7mmと判断される。すなわち絶対長さに対し、地震研究所のAGA-700での測定値は少し長めに出ることになる。

第6表 地震研究所地階の基線と村山基線場における Geodimeter の検定

Date	Model 8	Model 700	Base-line length
1975. 6	55. ^m 007	55. ^m 012	55.000±10 mm (E.R.I.)*
" 10	—	55.010	
1976. 3	55.004	55.010	
" 4	55.008	55.011	
" 9	55.007	55.012	
1977. 2	55.005	55.010	
1977. 6	1100.805±2 mm	1100.820±3 mm	1100.813 (G.S.I.)**

* Measurement by steel tape.

** Measurement by invar wire.

第7表 AGA Geodimeter model 700 と 6BL の比較測定, 1977年9月20日

Measured line	Number of reflector	Geodimeter 700	Geodimeter 6BL	Difference
001→002	3	893. ^m 675	893. ^m 661	14 mm
001→011	9	4,263.336	4,263.340	4 mm
Accuracy of the measurement		±0.003	±0.004	

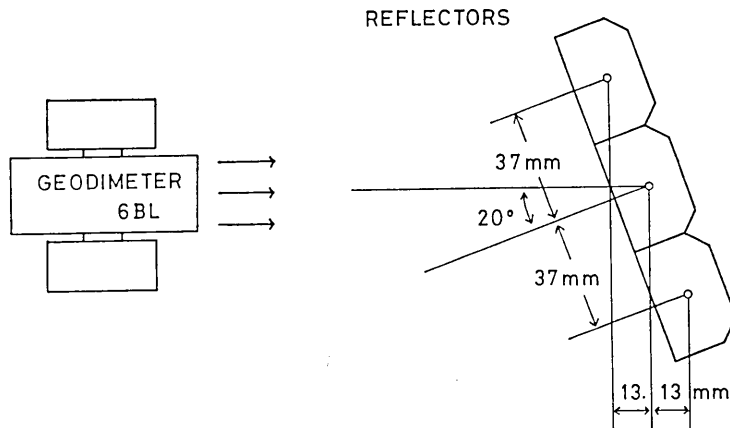
6. Geodimeter AGA-700 と 6BL との比較測定

今回浅間の基線網で、京都大学防災研究所の AGA-6BL と前出の AGA-700 とで比較測定を行った。比較測定基線は 001-011 と 001-002 の 2 測線で、測定は両器機とも 1977 年 9 月 20 日の 20 時から 23 時にかけて行った。測定に当っては、両器機の測距に影響を及ぼす気象条件や、その他の測定環境条件を極力同じになるよう配慮した。

長短 2 測線での比較測定結果を第 7 表に示す。両器機による測距の差は、001-011 測線 (約 4263 m) については 4 mm で測定誤差内に入っているのに対し、001-002 測線 (約 893 m) では 14 mm という測定精度を越える差が出た。従って、この比較測定からは AGA-6BL の Geodimeter constant を決定することはできない。

001-002 測線での比較測定で出た 14 mm の差を究明するために行った実験測量と、その解釈はおおよそ次のようなものである。

AGA-700 は本体から発射する Laser beam の幅を手動で変えることが可能であるが、AGA-6BL は変えることができない。この点が両型式間の光学的機構上の相違である。Manual によれば、AGA-6BL 本体より発射された Laser beam は 1 km の距離で幅 30 cm、上下 200 cm に拡がる。一方測定に使用した 3 素子の Reflector の直径は 12 cm であるので、1 km 程度の短測線の測定時には AGA-6BL の水平微動ネジを十分注意して調整しないと、3 素子の Reflector に均等に光が当たらない可能性が生じる。今回、



Position of a single prism used for the measurement	Slope distance measured with Geodimeter 6BL	Difference of the slope distance	
		measured	calculated
Right prism	2,012.806 ^m	-14 mm	-13 mm
Center prism	2,012.820		
Left prism	2,012.837	+17 mm	+13 mm
Accuracy of the measurement	±0.001		

第5図・第8表 AGA Geodimeter 6BL で行った実験測定. Reflector 面の法線が Laser beam に対して 20° だけ傾けてある. 測定は 1978 年 2 月 24 日に (桜島火山観測所-愛宕山) 基線で行った.

001-002 測線の AGA-6BL による測定では距離に比して Reflector の素子数が多すぎ、3 素子の Reflector に均等に Laser beam が当らなかったことが考えられる。さらにその時に Reflector 面が正しく本体方向に向かず、若干角度を持って設置されていた場合は、第5図に示すごとく左側1素子の Reflector だけに光が当たっていた場合と、右側だけに当たっていた場合とでは測定結果に当然差が生じよう。

上記のような条件のもとで、はたして測定結果に差があるかどうかを調べるために、京大桜島火山観測所と愛宕山間 (約 2 km) の測線で、第5図に示すように Reflector 面の法線を本体方向の左 20° に向け、3 素子の Reflector の各 1 素子ずつを使って測定を行った。その測定結果を第8表に示す。右、左1素子の Reflector による測定値と、中央1素子による測定値との差は 14 mm と 17 mm であった。これらの差は Reflector を 20° ずらした時の計算値による差 13 mm にほぼ等しい。このような試験測定により考察すると、001-002 測線での AGA-6BL の測定結果は測線長に比して Reflector の数が多く、

3 素子の Reflector に Laser beam が均等に当らず、しかも Reflector 面が本体方向より 20° 程度ずれていたことが推定される。

今回の浅間における比較測定では、4 km 程度の測線については AGA-700 も 6BL も同じ測定結果が得られた。しかし 1 km 以下の短測定の測定に AGA-6BL を使う場合、1 素子 (中央) の Reflector を正確に本体方向に向けて設置しないと測定結果に誤差が生じることがわかった。高度差の大きい測線では常にこのような状態が起るわけで、今後十分に注意を払う必要がある。

7. おわりに

今回が最初の測定であり、ここに地形変動と火山活動について言及できないのは残念であるが、測定値は最終的に 1×10^{-6} の精度を確保できたので、早期の再測と短い間隔での繰返し測定が待たれる。

浅間山は 1973 年の噴火以後ずっと平穏な状態であるが、今回の測量は現状把握の視点から重要な資料となる。噴火活動様式と、測量の繰返し頻度に限界のあることを考慮すれば、今後傾斜計などの連続観測との併用が望まれる。なお、今後浅間山の辺長基線網を拡大することによって、浅間山の火山活動と地形変動との関係を明らかにしたい。

8. 謝 辞

基線網の選定・設置にあたり、宮崎 務助手、沢田宗久助手、下鶴大輔教授の各位から多くの助言を戴き労力を提供された。その御協力に対し心よりお礼申し上げる次第である。なお基準点の借地にあたり、便宜を計って戴いた国土計画株式会社の御好意に感謝申し上げます。

Geodimeter その他の周辺器機については地震研究所地殻変動部門柴野陸郎助手に御指導戴き、村山基線場の測量に関して寺尾弘子助手の御援助を戴いた。また下鶴教授には本報告をまとめるにあたり御指導戴き御検討を加えて戴いた。併せて感謝申し上げます。

今回の測量に要した経費の一部は火山地震移動観測事業費によってまかなわれた。関係当局に謝意を表する次第である。

文 献

- 半田孝司, 1976, 光波測量の精度について — ジオジメーター 700 型の特性 —, 静岡大学地球科学研究報告, 2, 19-34.
- MINAKAMI, T., 1942, On volcanic activities and tilting of the earth's surface, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 20, 431-504.
- MINAKAMI, T., 1960, Fundamental research for predicting volcanic eruptions (Part 1). Earthquakes and crustal deformations originating from volcanic activities, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 38, 497-544.
- MINAKAMI, T. et al., 1970, Seismometrical studies of Volcano Asama (Part 2). Anomalous distribution of the P arrival times and some information of the velocity of the P wave propagating through the volcano, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 48, 431-489.
- AGA, GEOTRONICS., 1973, Geodimeter 700 surveying system, Operating manual.

- 下鶴大輔・他, 1975, 1973年の浅間山噴火活動について, 地震研究所彙報, 50, 115-151.
 須田教明, 1971, 電磁波測距儀, 森北出版 KK.
 須田教明, 1974, 電磁波測距儀による測量, 日本測地学会, 測地学の概観, 42-48.
 高橋竜太郎, 1936, 小浅間及棒録三角点に於ける緯度の測定, 地震研究所彙報, 14, 29-37.
 TAKAHASHI, R. and MINAKAMI, T., 1937, Tilt observations during the recent activities of
 Volcano Asama, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 15, 463-491.
 東京大学地震研究所地殻変動観測班・富士川地殻変動観測所, 1977, 伊豆半島北東部における光波測
 量 (1), 地震研究所彙報, 52, 151-162.

22. *The Geodimeter Survey of the North-eastern Foot
 of the Asama Volcano in 1977 (Part 1).*

By Toyotaro TAKEDA, Noriya GYODA,
 Etsuro KOYAMA and Noboru OSADA,
 Earthquake Research Institute,
 Tsuneo ETO and Tadayoshi SONODA,
 Disaster Prevention Research Institute,
 Kyoto University.

A rhombus shaped geodimeter survey net was established in June, 1977, at the NE foot of the Asama Volcano as a part of the program of the ground deformation study. For the purpose of the precise measurement, a concrete pier was constructed at each corner above which the geodimeter, the reflector and even the theodolite can be fixed with screws. Thus, we can obtain the distance measurement with high accuracy. The observation was carried out in September 1977 along the project of the Joint Geophysical Observation of Asama by use of AGA geodimeter 700. In order to obtain three dimensional deformation, a levelling survey was also conducted on the rhombus net.

Furthermore, observation was made to compare our results with the geodimeter 6BL. The significant difference of the slope distance measured by the two geodimeters was obtained and it was attributed to the direction of the reflector. The careful experiment shows that if the plane of the reflector is not precisely perpendicular to the laser beam, AGA-6BL yields a slightly different distance according to the position of the reflection of the laser beam. The effects of meteorological data were also examined.
