

火山地帯での自動準儀による 1 等水準測量

火山活動研究センター
桜島火山観測所 高山 鉄郎

1. はじめに

桜島火山観測所による桜島火山の水準測量の歴史は古く、1955 年 10 月山頂噴火再開の約 1 年後には水準点の埋設が実施され、1957 年 2 月から島を 1 週する測量が開始された。その後は繰り返し測量の中で徐々に登山道・磯・カルデラルートの中継点の水準点が整備され現在の水準測量路線が完成した（図 1）。

著者が水準測量に始めて従事したのは 1967 年で、それから 32 年余りにわたり測量に携わったことになる。その間最初から測量手（読み手）として水準儀を操作したのではなく、標尺手や記録手での下づみが 20 年あった。測量手になるため休憩時間を利用して水準儀に触れ、時には標尺を固定して自分で記録しながら読み取りの訓練を行った。そしてやっと 1 人前の測量手として水準儀を扱えるようになった（当時水準測量の大屋、江頭庸夫助手の許可がでた）のが 1990 年 11 月雲仙普賢岳噴火の時からである。

ここでは著者がこれまで先輩に教わりつつ培ってきた Wild 自動水準儀 NAK2 に、外付け 10 mm マクロメータ GPM3 による技術的な測量方法を中心に、桜島火山、岩手山での研究成果、およびデジタルレベルとの比較などをまとめてみた。



図 1 . 桜島火山観測所での繰り返し水準測量路線

2. なぜ火山地帯で水準測量が有効なのか

火山周辺域における地殻変動の圧力源を議論する場合のモデルとして茂木モデル (Mogi, 1958) があるがそれは次のようなものである。

桜島では大正 3 年 (1914 年) 1 月山体の両山腹より大量 (約 1.3km³) の溶岩を流出す

る大噴火が発生している。噴火前（1890. 1905 年）と噴火後（1914 年 8 月）に実施された桜島周辺の水準測量による上下変動結果を図 2 に示した。この図で解るように鹿児島湾の×A 点を中心とし同心円上に広い範囲で地盤の沈降が見られる。図 3 は×A を地盤沈降の中心として距離と沈降量の関係を示した曲線であるが、この図から計算して圧力源の深さを求めると 10 km と推定できる。このように火山周辺の地下で圧力源が増減すると広範囲にわたり、圧力増減の大きさに比例して地盤の沈降・隆起が起きることが解っている。このことから、なぜ火山地帯での水準測量が有効なのか理解出来る。



図 2 . 大正 3 年 1 月の大噴火による
桜島周辺の地盤沈降(Mogi, 1958)

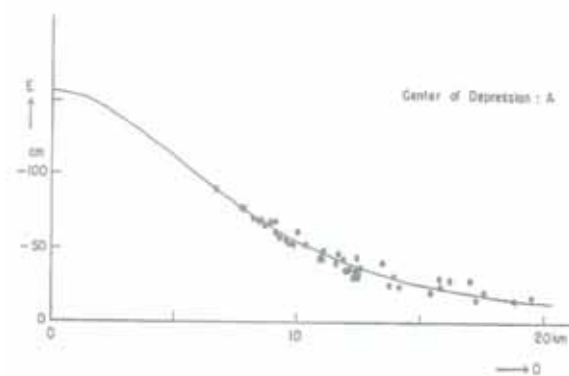


図 3 . × A からの距離と沈降量の関係
(Mogi, 1958)

3 . 水準測量の基準

水準測量とは地表の 2 点間、または多数の点の高低差を求める測量、および目的の高さを設定する測量である。1 等水準測量は往復測量を基本とし、国土地理院ではその往復の誤差の限度を $2.5\sqrt{L}(\text{km}) \text{ mm}$ 式で表している。L は測量距離で、例えば 1 km の距離を往復測量した場合、その時の往復誤差上限は 2.5mm となる。また、桜島のように周囲を 1 週する環の場合の許容併閉合差は $2\sqrt{L}(\text{km}) \text{ mm}$ 式で表され高精度の測量技術が要求される（桜島 1 週 36 km の場合 12.0mm）。

火山地域での高さの基準点は一般的に、火山活動の影響が少ない離れた水準点を基準点としている。

4 . 標尺と水準儀の検定

4-1, 標尺の検定

一般的に 1 等水準測量に使用する標尺は長さ 3 m 強の木製枠に、両端をスプリングで吊られたインバルベルトが取り付けられている。インバルベルトには読み違いをなくするため 1 cm 間隔で左右に目盛りがついていて(図 6 参照)、左右の目盛りの読定差は 301.550 cm または 303.500 cm (WILD G P L E 3) である。標尺全体の厳密な検定は数年おきに日本

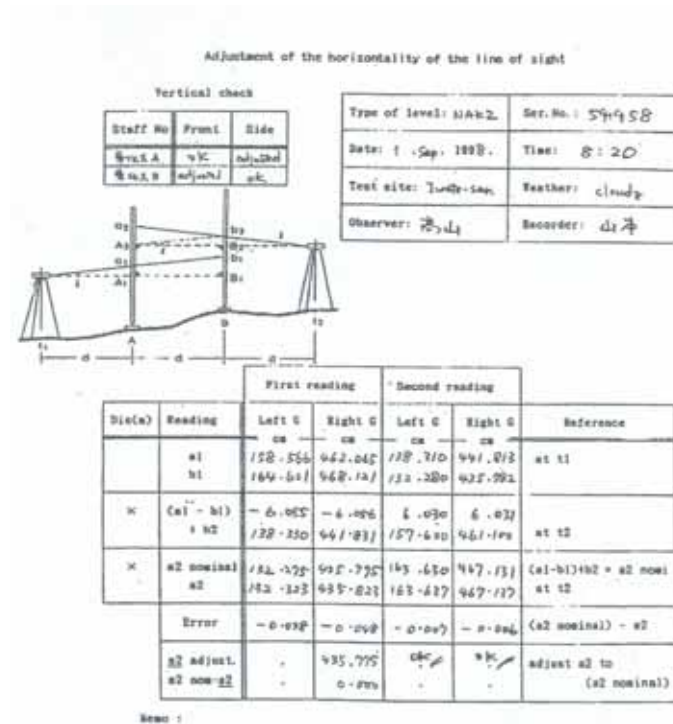


表 1 . 検定例 (98/9/1 於岩手山), 標尺の左右の差は 303.500 cm である .

4-3. 調整方法

上記の条件から t2 の視準線は a2 の値 (435.823) にある . もし視準線が傾いていなければ a2 の値は a2 nominal の値 (435.775) に等しいはずであるが , 0.048 cm の差 (Error) が生じている . そこで視準線を機械的に動かして 0.048 cm の差をなくす調整作業を次の手順で行う . 1). マイクロメータの摘みをまわして下 3 桁の読みを 0.075 cm に合わせ , 2). さらに A 尺を覗きながらクサビ型クロスヘアで , マイクロメータを廻してずれた分だけ , 接眼鏡付近にある調整ピンを動かし正確に上 3 桁の 435 を挟んで合わせ込む .

これで調整は修了であるが , 調整結果を確認するため再度検定を行う . その場合水準儀の位置は現在設置している t2 の点から始めても良いし , t1 に帰って再設置してからでも良い . t2 から始めるときは三脚を再度踏み込むことが肝心である . 表 1 の Second reading 調整後の結果であるが , 0.048 cm から 0.007 cm へと明らかに Error が小さくなっている .

5 . 測 量

測量の実施に至るまでは例えば水準点の確認など多岐にわたる準備が必要である . ここではそれに触れず , 図 5 により準備万端のもとに水準点 A B 間の高低差を求める目的で測量開始の段階から説明する .

5-1. 標尺手

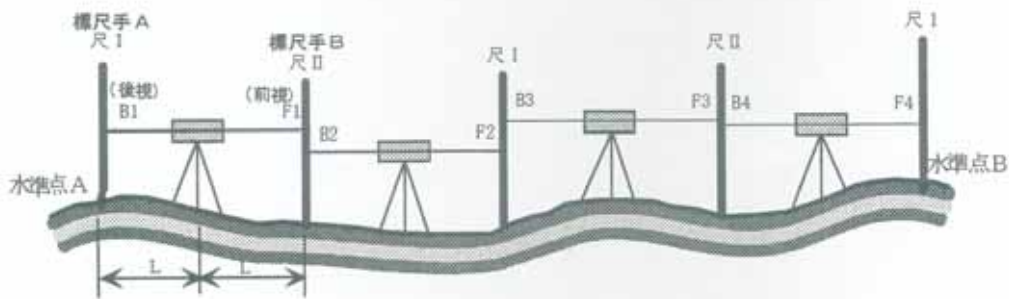


図 5 . 測量要領

- ・ 標尺手Aは尺 I を静かに水準点の上に立て、補助棒 2 本を使い標尺が垂直になるように標尺に付いている円形水準器の気泡を中心に合わせ、測量手が B 1 (前視)を読み終わるまでに固定する。
- ・ 標尺手Bは測量手の指定した距離 L を水準点Aから歩測し、そこに中間点マーカを置く、さらに L だけ進んで尺 II を立てる。手順は次項 5-4 に続く。

5-2. 測量手

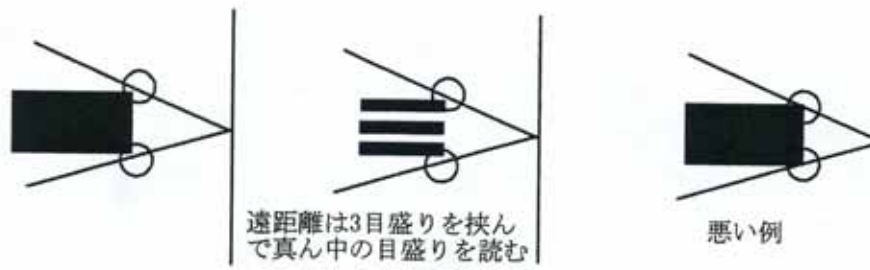
- 1). 三脚の設置：標尺手Bのマークした中間点に整準盤の円形気泡がほぼ中心にくるように三脚を立てる。脚の沈み込みを防ぐため3つの脚を足で強く踏み込んで固定する。
- 2). 整準：視準線を尺 I に向け整準盤の円形気泡を正確に中心に合わせる。
- 3). 望遠鏡のピント：望遠鏡を覗いて標尺の目盛りにピントを合わせる。
- 4). 読み取り：図 6 の方法で左目盛り (右目盛りも同様) を読んで記録手に伝える。



図 6 . 標尺の読みとマイクロメータの読み

4) - 1. 左尺読み

左手で水平微動ネジを廻しながら右手でマイクロメータの摘みを廻し (クロスヘアを



クサビ型クロスヘアで○印のように等間隔にわずかに隙間を開けて挟む

図7．クサビ型クロスヘアの挟み方

上下に動かして視準線の位置にある標尺のバーを挟む（ここでは 51 cm のバー）。クサビ型クロスヘアをバーから上下平等にわずかに離す挟み方が良い（図7参照）。その時のマイクロメータの読みが 0.828 cm であるので記録手に 051828（マル、ゴ、イチ、ハチ、ニ、ハチ）と伝える。

4) -2. 右尺読み

左手で水平微動ネジを廻してクロスヘアを右へ僅かにずらし、右手でマイクロメータの摘みを廻し 355 cm のバーを挟む（バーの挟み方は左尺読みと同じ）、その時のマイクロメータの読みが 0.327 cm であるので記録手に 355327（サン、ゴ、ゴ、サン、ニ、ナナ）と伝える。なお、クロスヘアと目盛りを最終的に合わせようとする段階ではマイクロメータの廻し方を右廻し、または左廻しのいずれか一方に決めておかなければならない。その都度回転方向を変えると、マイクロメータのあそびがあるため誤差が生じる。

5-3. 記録手

1). 測量手が読んだ左尺の値を復唱しながら測量手簿に記入する。（図表2 測量記録手簿参照）

2). 右尺の値も復唱しながら記入するが、その時左尺の値と比較してその差を暗算して測量手に伝える。

3). 計算（標尺の左右の差は 303.500 cm とする）

051.828 + 303.500 から、左・右尺の読み取り差が ± 0 ならば右尺の値は 355.328 でなければならないが、355.327 と読んでいるので $355.328 - 355.327$ から左・右尺の読み取り差は 0.001 cm、つまり 1/100 mm であるので 1（イチ）と伝える。

左右の差が 0 から 15（15/100 mm）以内であれば読定差の許容範囲（著者は 10 以内を基準にしている）に入っているから、尺 I の B1 は終了であるから、測量手は尺 I の標尺手へ次に水準儀と尺 I を立てる場所を歩数で指示する。

5-4.（標尺 B はその時にはすでに測量手の伝えた距離、L+L の地点に次の手順をふまえて尺 II を立てている）

- ・手に持っていた標尺台をおろし、その上に乗って体重で台を踏み込む。
- ・尺 II を静かに標尺台の上を立て、測量手の方を向いて補助棒 2 本を使い、尺が垂直にな

るように尺に付いている円形水準器の気泡を中心に合わせ、測量手が F 1 を読むのを待つ。
図 6 から、測量手の F 1（後視）左尺の読み取りは 251.355、右尺 544.853 でその差は 2
となる。（記録手簿の記入は表 2 を参照のこと）。

・測量手が尺 II の F 1 を読み終え移動しはじめたら、尺を標尺台に載せたまま 180 度向き
直って再び尺を垂直に立てて B 2 の読み終わるのを待つ。回転のときは周囲に注意を払い、
足で標尺台を蹴らないように回転する。

5-5. 測量手の移動

測量手は三脚を両手で抱え、なるべく垂直を保ち振動を与えないように次の測点（標尺
手 A が中間点マークを置いてある所）に移動し、上記 5-2. 2) からの作業を繰り返す。

水準儀の据付は尺 I と尺 II の中心に設置し、偶数回で最終点に到達する事が基本である。
すなわち、2 本の標尺を交互に立てるから水準儀の据付を偶数回にすれば最初に立てた標
尺を最後の点にも立てることになり、もし両方の標尺の 0 目盛りが一致してなくても、その
ためによる標尺誤差を消去できる。つまり、図 5 において尺 I・II の 0 点誤差を $\delta I \cdot \delta$
II とし、水準点 A・B 間の比高を求めるとき、

$$(B1 + \delta I) - (F1 + \delta II)$$

$$(B2 + \delta II) - (F2 + \delta I)$$

$$(B3 + \delta I) - (F3 + \delta II)$$

$$(B4 + \delta II) - (F4 + \delta I) \quad \text{の合計であるから}$$

$(B1 + B2 + B3 + B4) - (F1 + F2 + F3 + F4)$ により I・II の 0 点誤差は消去さ
れ水準点 A、B の高低差が求まる。止むを得ず奇数回で終了するときは、最後に標尺手 A
がダブって水準点に標尺を立てようにする。また、往路と復路では水準点に立てる標尺を
入れ替えることが肝心である。

5-6. 往復測量

2 点間の測量を行う場合は必ず往復測量を行い、往復の測定誤差が許容範囲であるかど
うか調べ、もしその範囲を超えたときはその原因を調査し再測量を行わなければならない。

5-7. 測量誤差

測量誤差には機械的なものや人為的な要素で生ずる誤差などがある。機械的な要素では
消去できないものもあるが、人為的なものでは測量中に気を付ければ解消されるものもあ
る。

(1). 水準儀の誤差

4 章で述べた視準儀のずれによる誤差が最も大きく、検定および水準儀と後・前視まで
の距離を等しくする事で最小限にできる。

(2). 標尺の誤差

標尺の不正・零点誤差・附属水準器の調整不完全などがある。標尺の検定や水準儀と後・
前視までの距離を等しくする事で最小限にできる。

(3). 水準儀の取り扱いに起因する誤差

観測中の水準儀の沈下、太陽の直射による水準儀の温度上昇によるものがある。三脚は強

く踏み込み、水準儀に影を与えるなどの工夫が必要である。

(4). 標尺の取り扱いに起因する誤差

標尺の沈下や傾斜によるものがある。標尺台の場所を例えばコンクリートの上などを選び強く踏み、標尺の傾斜は附属水準器の気泡が正確に中心にくるようにする。

(5). 測量手に起因する誤差

水準儀の整準不完全・標尺の読み取りが正確でないためにおきる誤差があげられる。

円形気泡を正確に中心にもっていき、正確な読み取りは熟練により克服できる。

(6). その外に気象現象による陽炎が原因で大きな誤差を生ずることが多い。真夏のアスファルト道路や炎天下の車の横、また、排気ガスによるものなどがある。陽炎火での読み取りには熟練も必要であるが、水準儀と標尺の距離 (図5のL) を短くする、あるいは真昼の作業は避けるなどの時間調整も行う。

水準測量は一般的に県道・国道など車の往来が激しい所で行う作業のため、車による振動は避けられない。特に大型車の往来には記録手が気を配って測量手に促すなどの配慮も必要である。

5-8. 標尺の温度補正

インバール標尺でも気温の変化には微妙な伸び縮みを伴う。水準点間の測量の開始と終了には気温測定を行い、その平均値から購入時に附属している標尺補正表により補正係数S (10⁻³mm/°C/m) を見出し、高低差の絶対値 (| H |) に係数Sを加算しする。

$$\text{標尺補正值} = | H | \times S$$

$$\text{補正後の高低差} = | H | + (| H | \times S) \text{ で表される。}$$

6 . 測量記録手簿 (A4 サイズ両面のもの)

表 2 . 測量記録手簿の記入例 (1999 年 10 月 31 日岩手火山の例)

表2は1999年10月31日に岩手火山で実施（5回目）した時の記録手簿のコピーである。

手簿には測量地、年月日時間、天気、測量開始・終了時の気温、標尺手（A・B）・記録手・測量手の名前などを記入する。また、測量の過程で発生した自然現象（地震、陽炎など）も記録する。記録の途中で読み間違いや書き間違いがあったら、消しゴムは使わずに横線で消して後で確認出来るようにする。

6-1. 測量値の記録方法

測量手の読み上げた数字を上3桁下3桁に分け、後視左目盛りの値、後視右目盛りの値、一行下げて前視左目盛り、前視右目盛りと記入していく。測量距離が長く測定回数が12回以上の場合は裏面へ続けて記入する。

6-2. 計算と結果

左目盛り後視を全て加算（269.047）。次に同じく前視を加算（2845.458）視、後視の値から前視の値をひいて、その差（-2576.411）が左目盛りの高低差である。同じように右目盛りも計算して高低差（-2576.414）を求め、その平均値（-2576.413）を往路の測量結果とする。復路の結果（2576.416）との平均値（2576.415）に尺補正值（+0.26mm）を加算してその区間の測量値とする。また、往・復路の差を1/2（4捨5入）し測量値の往復誤差とする。表2で示した水準点No.54, 55の高低差は25m76cm4.11mm±0.02mm、つまり水準点No. 54に対してNo. 55が数値の分だけ高い位置にあるということになる。この表は5回目の測量につき距離の覧が記入されていないが、初回の測量時には望遠鏡内のスタジア線を使い必ず距離の測定を行い記入する。また、その距離で区間の許容誤差を算出する。

7 .

7-1. 桜島

桜島および始良カルデラ周辺の水準測量からみた噴火活動に伴う地盤変動の過程は、ルデラ中央部地下約10kmに推定される主圧力源（マグマ溜り）と、桜島中央部地下約3kmに推定される副圧力源内のマグマの貯溜と放出に伴う現象として説明されている。

1967年頃から噴火活動が静穏化すると、主圧力源の増圧（マグマの貯溜）により桜島の北部が隆起を始めている。1973・74年以降1992年までは、活発な噴火活動によってマグマの放出量が増加（火山灰の放出：年間1,000～3,000万トン）して、主圧力源と副圧力源の減圧によって、桜島の北東部から内部にかけて地盤の沈降した。

1995年5月～8月および1999年4月の水準測量によって推定された桜島北部の再隆起現象は1993年頃からの噴火活動の静穏化に伴い、主圧力源内において再びマグマの貯溜が始まったことを示す現象と解釈される。このことは噴火あるいは噴煙活動に伴う降下火山灰の量とも良く合っている（図8）。この解釈を模式的に表現したのが図9の地盤の変形とマグマの収支の関係である。

1999年10月中旬から活発化した山頂噴火回数は12月末までに150回を数えた。中

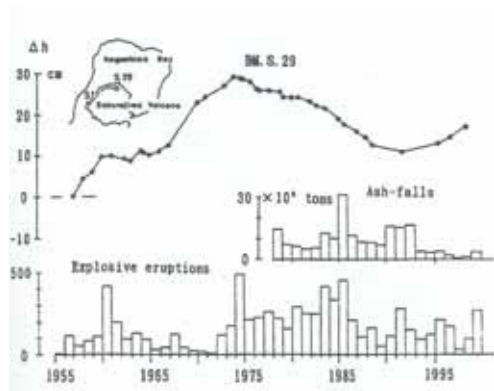


図8，桜島南岳の山頂噴火活動と水準測量量による垂直変動との関係
 上：水準点S17（桜島港）に対するS29（桜島北東部）の比高変化，中：年間推定降下火山灰量，下：年間噴火回数

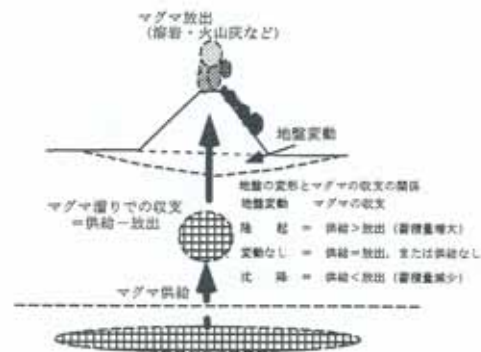


図9．地盤の変形とマグマの収支の関係模式図(石原，1994)

も12月の噴火回数は104回と、過去最も活動していた1974年6月の113回に次いで2番目の対記録となった。1999年1年間の降下火山灰量は7月から増加して257万トンと過去4年間では最も多い量である。これまでのデータでは、年間降灰量が1,000トンを超えないと沈降しないので、現在も桜島の北側は隆起の傾向にあるはずだ。実際GPSデータで隆起傾向が続いているのは、まだマグマの放出量が少ないからだろう。

7-2. 岩手火山

1998年以降火山活動が活発化している岩手山において、北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、鹿児島大学からなる合同観測班で、火山活動に伴う地盤の上下変動とその圧力源を議論する目的で水準路線を設置し、1998年7, 9, 11月、1999年5, 10月の5回にわたり水準測量を繰り返してきた。岩手山南麓では1998年7~11月の4ヶ月間に40mmに達する山側隆起の上下変動が観測され、その圧力源は岩手山西方の深さ3kmと推定された。そのことを踏まえ当初35.6kmあった水準路線は、縄張温泉から北西へ延長され現在では延べ40kmの間に81の水準点を設け、3~4班構成で実働8~10日かけ水準測量を実施している(図10)。

図11に各期間における上下変動を示した。いずれの期間も岩手高原付近から縄張温泉にかけ山側隆起の地盤変動が観測されている。

このデータを基に茂木モデルにより圧力源の位置を推定すると、図10に示した点線の丸で示す範囲、つまり縄張温泉を中心に東西5km、南北2kmの範囲内を移動している。移動のしかたに規則性はなく深さも0.4kmから6.2kmと巾が大きい、今後も定期的な水準測量を繰り返すことにより、噴火予知の手掛りが得られるであろうと期待される。

図中98/9/3-98/9/7の期間は1998年9月3日の岩手県内陸北部を震源とする地震(M6.1)に伴う地盤変動で、震源地域では断層が露出し、翌朝から直ちに震源地域周辺の測量を行った結果最大20cmの上下変動が観測された。(地震は著者等の測量中に発生し震度VI弱の揺れを体験できた)。

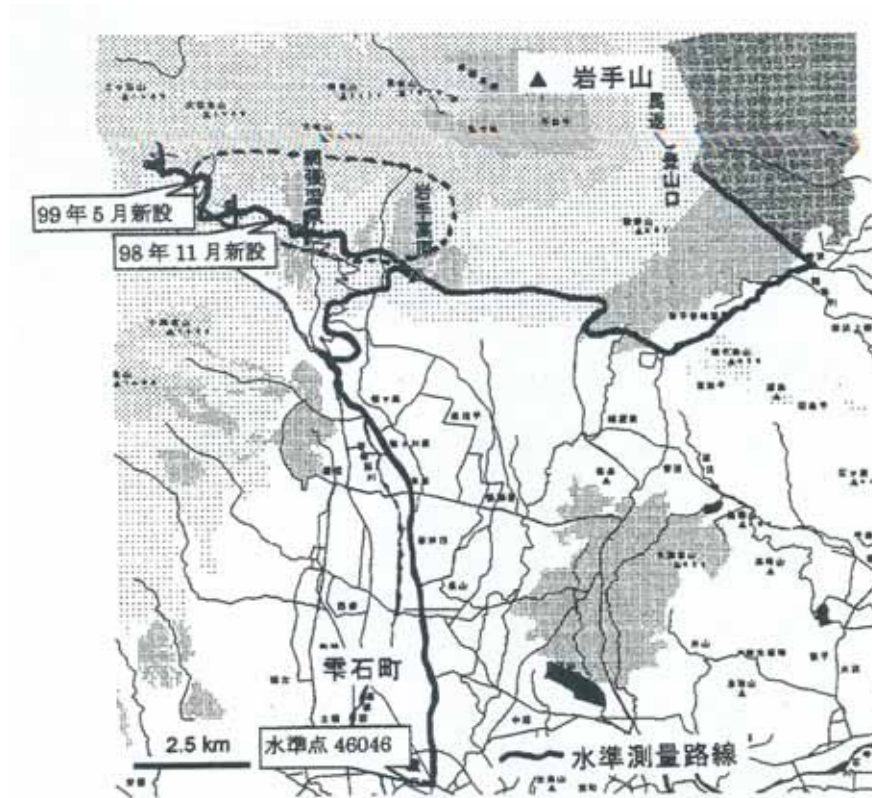


図 1 0 . 岩手山南山麓の水準測量路線 (総延長 40 km , 水準点 81 点 , 木股他 1999)

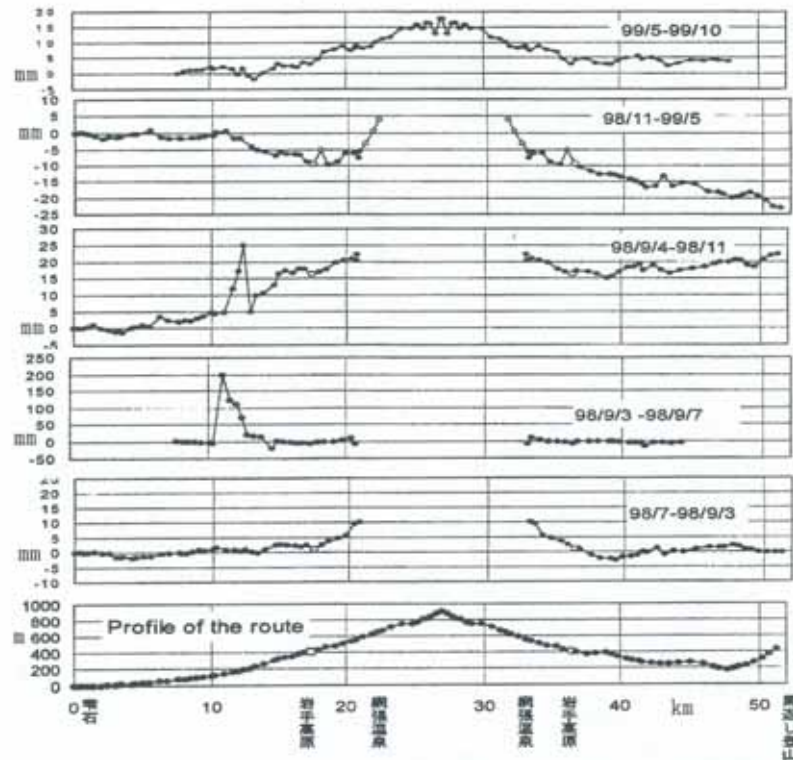


図 1 1 . 岩手山麓の上下変動 (1998 年 7 月 ~ 1999 年 10 月 , 木股他 1999)

8. おわりに

デジタル技術改革の昨今であるが、言うまでもなく1等水準測量にもバーコード標尺を利用して測量する精密デジタルレベルが主流になってきた。

大学の火山研究機関で始めてデジタルレベルを用いて水準測量を実施したのは1991年12月の「第8回桜島火山集中総合観測」であった。目的は従来の自動水準儀とデジタルレベルによる測量を並行して行い、それらの結果を比較検討する事であった。著者は幸いに元地震研究所の宮崎務先生とデジタルレベル担当班の測量手を担当することになり、初めての経験からメーカーの担当者も交えて1チーム4名構成で、桜島1周（延べ36.8 km）実働12日間の測定を行った。測定結果の環閉合差は自動水準儀2.6 mm、デジタルレベル1.2 mmと両方とも1等水準量の精度基準をクリアし、初めての経験から得られた結果は有効なものであった。その比較測量を基に現在活火山の周辺で著者等が実施している国立大学合同観測班でも、例えば雲仙普賢岳・岩手山で、また各大学が単独に実施している有珠山など北海道の火山、浅間山、阿蘇山においてデジタルレベルを用いた測量が行われている。

8-1. 自動水準儀とデジタルレベルの比較

表3に著者の経験から両方を比較して思い付きに箇条書きにした。それぞれ長所・短所はあって甲乙付けがたいが、これから先の若い研究者・技術者においては測定精度を控えめにみても、スタッフの必要数と測定結果の計算時間で勝るデジタルレベルが主流を占めるであろう。しかしながら、水準儀を整備し標尺にピントを合わせてポンとボタンを押すだけの簡単な単純作業であるが、それなりの経験を踏み基本技術を身につけた者でないと良好で有効な結果は得られるものではない。

	自動水準儀 (AL)	デジタルレベル (DL)	備考
スタッフ	4名	3名	DLは2名でも可能
測定精度	良い	劣る	一概に言えないが著者の経験から
測定距離	最大40m	50m	平坦地はDL, 急坂はALが効率的
重量	3.5kg	2.5kg	三脚は含まず
暗い所での測定	可	不可	ALはスポット照明で可
まばらな影	可	弱い	DLの尺は完全な影か日向に
操作性	操作が少ない	キーが多く取説必携	
蓄電池	不要	必要	DLは測定後の計算に至るまで必要
測定結果計算	電卓による	モジュールに記録	DLは直接パソコンに接続

表3. 自動水準儀(AL)とデジタルレベル(DL)の比較

著者はそのような経験の中、視力・体力を必要とする昔ながらの自動水準儀による測量を好んで行っている。計算についやする時間を除いて比較すればデジタルレベルの4.0 km

／日に対して控えめにみても 3.5 km／日の距離は測定@できる技術をここ 4.5 年の間の習得した。雲仙普賢岳では永年にわたり京大（理）阿蘇火山研究施設（現，理学部附属地球熱学研究施設火山研究センター）の皆さんをはじめ，全国の火山観測所の技官の方々といっしょに合同観測に参加し、さまざまな経験もさせてもらえたが 1 人・2 人と定年を迎えられ寂しい昨今である。が，著者は今後も機会ある毎にアナログ人間を行い職人気質で精度の高い水準測量による噴火予知に貢献したい。

最後に原稿を書くにあたり，構成の時点から最後までご指導いただいた当センターの石原和弘教授に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1). 茂木清夫 桜島の噴火と周辺の地盤変動との関係 火山第 2 集第 1 巻第 1 号
- 2). 岡積 満 水準・スタジア・平板測量 森山出版
- 3). 江頭庸夫 1 等水準測量の基礎 —測量班への実践的アドバイス—
- 4). 宮崎 務・高山鉄朗・加茂幸介（1995）：自動読み取り・記録方式レベルにの桜島火山における試験水準測量，第 8 回桜島火山の集中総合観測報告書
- 5). 江頭庸夫・高山鉄朗・他（1998）：桜島火山周辺における水準測量結果について，第 9 回桜島火山の集中総合観測報告書
- 6). 木股文雄・高山鉄朗・他（1999）：水準測量による岩手山南山麓における上下変動（1998 年 7 月～11 月），京都大学防災研究所年報第 42 号