

一等水準測量

技術室（火山活動研究センター）

福島 麻沙代

1. はじめに

一等水準測量とは、各水準点間（路線距離 L [km]）の高低差を往復誤差 $2.5 \sqrt{L}$ [mm]以内で測定する高精度な水準測量である。水準測量を繰り返すことにより、地表面の上下変動量を高精度で測定することが可能なので、GPS が普及した今でも主要な活火山地域では重要な観測項目のひとつである。

水準測量の歴史は古く、例えば日本水準原点は 1891 年に作られたものである。また、桜島火山観測所による桜島内水準測量も半世紀近くにわたって繰り返し行われてきた伝統のある観測である。

その間に水準儀もチルティングレベルから自動レベル、そしてデジタルレベルへと進化を遂げた。

デジタルレベルはバーコード標尺を使用する水準儀であり、測定値（ $1/100$ [mm]の値まで）と標尺までの距離（ $1/10$ [m]の値まで）が自動的に測定され、データが水準儀に搭載されたメモリーに記録される。これによって、水準測量班の標準的な構成は、従来行われてきた自動レベルの測量手（1名）・記録手（1名）・標尺手（2名）から測量手（1名）・標尺手（2名）と構成員も 1 名少なくてすむ。

著者初体験となる 2005 年度の水準測量は、3月23日から4月15日までの期間に行われ、水準点整備等の事前準備を含め 18 日間、観測自体は天候を見ながら路線距離の合計 20[km]程度を実働約 9 日間で行った（写真 1）。



写真 1 水準測量風景

2. 準備

2-1. 水準点の確認と整備

- ・水準点掘り起こし、周辺の草刈

2-2. 観測に必要な機材の準備

- ・水準儀（デジタルレベル NA3003）1 台
- ・三脚（直脚のもの）1 脚
- ・バーコード標尺 2 本
- ・標尺台 2 個
- ・竹棒（標尺を直立させるための補助道具）4 本
- ・温度計 1 台（三脚に取り付ける）

- ・その他（筆記用具、マーキングチョーク、日傘）
- ・道路使用許可証

2-3．機材のチェック

2-3．a．標尺の検定および調整

標尺の円形気泡管を使用し、標尺を直立させる。標尺から 30[m]以上離れた場所に置いたセオドライトの十字線の縦線を利用して標尺が直立しているか検定する。これを標尺の正面と側面について行う。標尺が傾いているときには、標尺付属の円形気泡の調整ネジを慎重に動かして標尺が直立するように調整する。

2-3．b．水準儀の検定および調整（CHECK&AJUST=不等距離法によるテスト）

器械の視準線の正確な水平値からの差（コリメーションエラー）は、従来の光学式レベルでは光学的なものだけであったが、デジタルレベルでは電子的なコリメーションエラーも生じる。これを、デジタルレベルが内蔵している“CHECK&AJUST”プログラムによってテストし、調整する。

まず、標尺を立てる安定した2点（A、B）を探す。2点間の距離は約45[m]にする。図1のように、1/3の位置に器械（水準儀）を設置する。器械点は正確に1/3の位置にあるのが理想だが、1/5から2/5の間であれば問題はない。両方の器械点（ t_1 、 t_2 ）で、近い方の標尺から測定する。

* コリメーションエラーの変化の計算式

$$\alpha = \arctan\{(A_1 - B_1 + B_2 - A_2)/(d_1 - d_2 + d_3 - d_4)\}$$

A_1, A_2, B_1, B_2 : 標尺の読み d_1, d_2, d_3, d_4 : 個々の測定距離

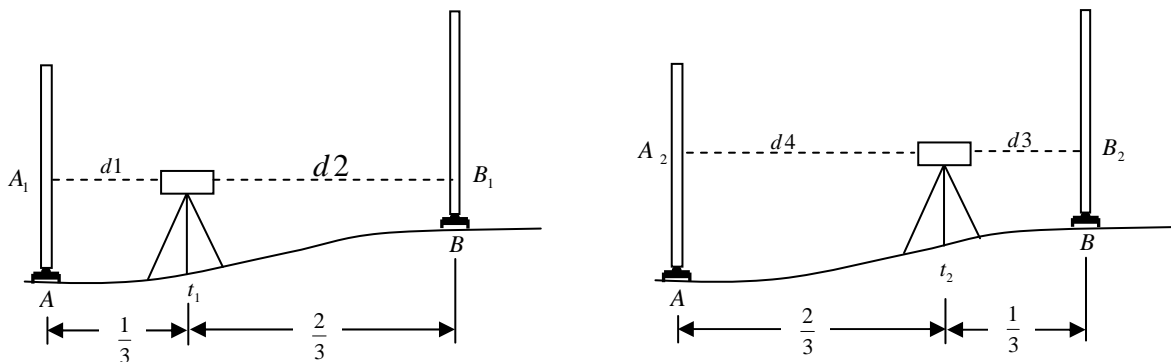


図1 不等距離法によるテスト（1：2法）

2-3．c．三脚の点検

三脚各部の増し締めをして、三脚の各部がガタつかないようにしておく。ただし締め付けすぎには注意する。その後、三脚の各脚がスムーズに開閉できるか確認する。

2-3．d．標尺台の点検

標尺台の球部分が錆びているときには細かいサンドペーパーでよく磨き、油布で拭く。また、新品の標尺台は足先が尖っているため測量中に標尺台が沈下してアスファルトに穴

が開き系統誤差の原因となる。この対策として新品の標尺台に足先は直径 1[cm]程度を、グラインダーでわざと平らにしておくことと標尺台の沈下が少なくなる。

2-3 . e . 竹棒

標尺を直立させるときに、標尺手が補助道具として 2 本の竹棒を使用する。竹棒の下端に地面にひっかかり滑らないようにコンクリート釘を入れて固定して、2 本の竹棒が交差する部分(竹棒の上部)にビニールテープを巻いていると滑りにくく標尺を固定しやすい。

3 . 誤差について

一般的に水準測量での誤差は、往復観測の較差のことである。どんな測量にも定誤差と不定誤差があり、原因がわかっていて消去できる定誤差は消去するよう努めなければならない。

以下に、水準測量での定誤差とその原因および消去法をまとめた。

3-1 . レベルに関する誤差

3-1 . a . 視準軸誤差

望遠鏡の視準軸と気泡管軸が平行でないために生じる誤差。視準距離（レベルと前後の標尺の距離）を等しくすることにより消去。

3-1 . b . 両差（球差・気差）

球差：地球表面が球面であるために生じる誤差。視準距離（レベルと前後の標尺の距離）を等しくすることにより消去。

気差：大気の密度差により視準線が屈折して生じる誤差（陽炎もそのひとつである）。視準距離（レベルと前後の標尺の距離）を等しくする、標尺最下部付近の視準をさける、標尺との距離を短くする（区間内の測定回数を増やす）ことにより消去。

3-1 . c . 鉛直軸誤差

鉛直軸が傾いているために生じる誤差。レベルの望遠鏡と三脚の向きを特定の標尺に対向させるように据付け、観測することによって誤差を軽減する（完全に消去することはできない）。

3-1 . d . 三脚の沈下による誤差

地盤の弱い場所に三脚を据え付けた場合、三脚の沈下により生じる誤差。地盤堅固な場所に据えかえる、脚杭や足場によって三脚が沈下しないようにすることにより消去。

3-1 . e . 視差による読み取り誤差

対物レンズと接眼レンズの焦点が合っていないために生じる誤差。接眼レンズを調整し、十字線が明瞭に見えるようにしてから観測することにより消去。

3-2. 標尺に関する誤差

3-2. a. 標尺の傾きによる誤差

標尺が鉛直に立てられていないために生じる誤差。円方気泡管や支持棒を用いて、標尺を鉛直に立てるようにすることにより消去。

3-2. b. 標尺の零点誤差

標尺底面の摩耗等により、零目盛の位置が正しくないために生じる誤差。測定回数を偶数回にする（出発に立てた標尺を終点に立てる）ことにより消去。

3-2. c. 標尺の目盛誤差

標尺の目盛りが正しくないために生じる誤差。尺定数により補正する、所定制度の標尺を使用することにより消去。

3-2. d. 標尺の沈下・移動による誤差

観測中の標尺の沈下や移動による誤差。標尺台を用いて観測する、標尺台をしっかり踏み込んで地面に食い込ませることにより消去。

4. 測量路線と測量結果

図2に桜島の水準点分布図を示す。桜島内には70点ほどの水準点があるが、今回の測量路線は赤線で示した、北岸ルート（S17からS30）および山道ルート（S17からハルタ山BMSVO）を実施した。

水準測量の結果を図3に示す。S17を基準とした上下変動量（dH）のグラフである。前回（2003年）の測量時より、桜島北部の地盤が最大（S26'、S27）で約15[mm]隆起したことがわかる。

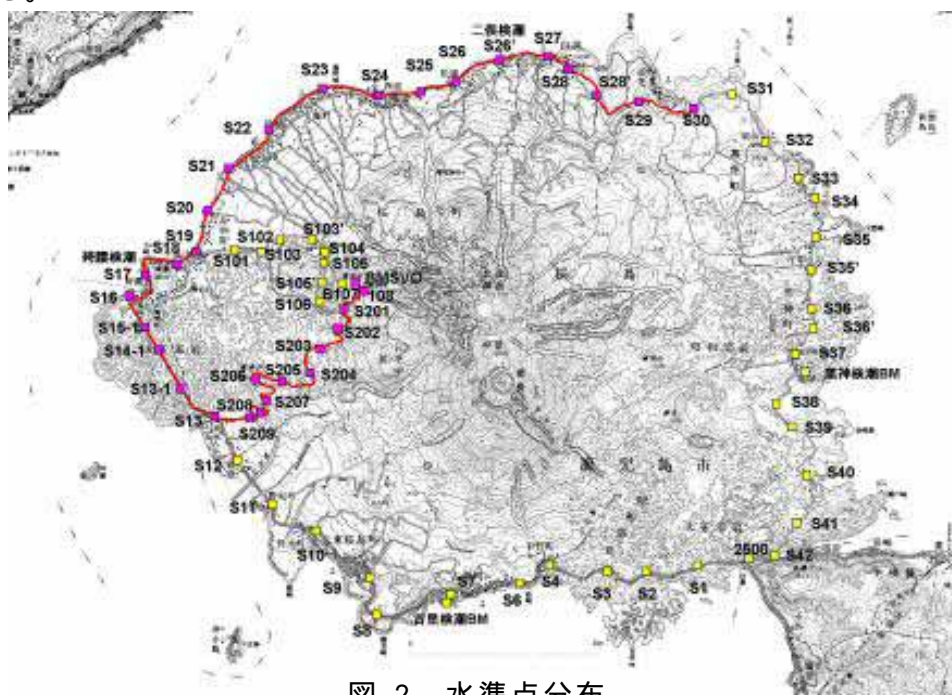


図2 水準点分布

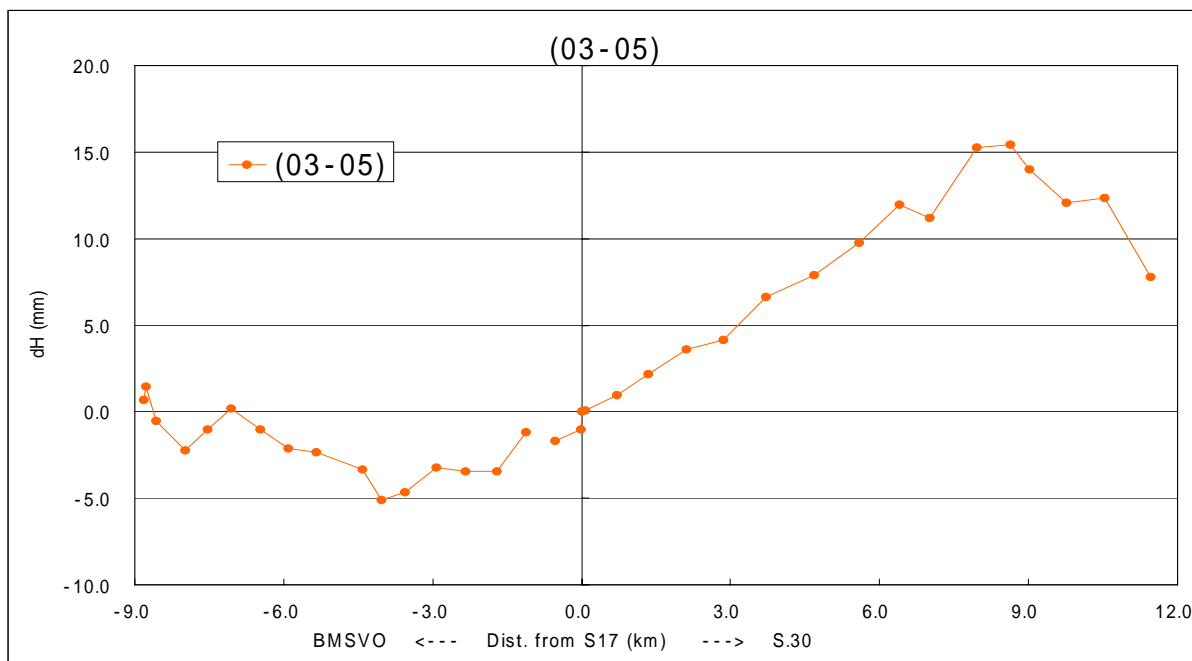


図3 水準点測量結果

5. 水準点整備と新点の設置

水準測量終了後に、今回の測量では使われなかった桜島内および島外の水準点（しばらく使われていないため工事などで壊されている点や、整備が必要な点）の整備と新点の設置を行った。水準点の整備では草刈や、火山灰に埋もれてしまった水準点の掘り起こし、標杭のなかった水準点に標杭や標識をとりつけた（写真2）。

次に、工事等で壊されてしまった水準点の設置を行った（写真3）。

新しく設置する水準点は、地盤が堅固で安定し、長期間水準点の保存が可能であり、道路工事等により破壊されないと考えられる場所を選ぶ。桜島火山観測所の初代水準点で今も唯一残っているものは神社の中にある。その他、学校、記念碑、公園、官公庁や公共施設等の施設内やその近傍に設置すると長期保存しやすい。その際、実際に測量するときのことを考え、水準儀の予定位置から水準点に立てた標尺が読める範囲に作らなければならない。

今回の水準点設置は、道路沿いにあるコンクリートにドリルで直径約 1[cm]、深さ約 5[cm]の穴を開け、その穴に金属標識の足を打ち込んでまわりを接着剤で固めるドリル方式で行った。

他には写真 2 にも写っているような京大桜島方式というのがある。あらかじめ内径 10 ~ 15[cm]、長さ 40 ~ 50[m]、肉厚 5[mm]の硬質ビニールパイプ内に砂とセメントを練り合わせて入れたセメント柱を作っておく。

そのセメント柱にドリル方式と同様に直径約 1[cm]、深さ約 5[cm]の穴を開け、水準点標識を接着剤で固定する。次に、地面に 50[cm]程度の穴を掘って、栗石と捨てコンクリートで基礎を作り、用意していたセメント柱を埋め込む。さらにそのまわりをモルタルと栗石で固め、長めの自然石 4 個を保護石として埋める。桜島のように火山灰が降るところでは、セメント柱を地表より 10[cm]程度出しておかないと水準点が埋まってしまうこともある。



写真 2 水準点整



写真 3 新水準点の設置

6. おわりに

最後に、水準測量を通して感じたことや思い出などを書こうと思う。水準測量デビューはもちろん標尺手からである（写真4）。

最初にひと通り標尺の取り扱いや注意について教えてもらったが、標尺を標尺台から落とさないように言われても落としてしまったり、チョークでのマーキングを忘れることがたびたびあった。

標尺の持ち運びは重くはないが3mと長いので、慣れるまでに少し時間がかかる。また標尺を片手で担いで、もう片方の手で標尺台と竹棒を持つのだが、2本の竹棒と標尺台を片手で握るのに、初日はたった2、3時間で手の握力がなくなってしまった。

たぶん余計な力を使っていたせいだろうと思うが、それを見て



写真 4 初水準測量

いた大先輩が翌日にはその竹棒より細い竹棒2本を用意してくれていた。

手が小さい私にはとても助かった。そして、自分に合った道具を持つというのは大事なことだと思った。

標尺手は測量手ほど判断するという作業がなく、慣れれば同じことの繰り返し。だから、気の緩みや何かハプニングがあった後にミスをしないように気をつけることが大切である。

ハプニングというと大げさだが、1度水溜りのところで標尺を担いだままこけかけたとき、標尺に水がかかってないかが無性に気になって、次の標尺を立てる点で後ろ向きになるときに標尺を持ち上げてしまい、その区間がやり直しになったことがある。

すべての測量が終了してから、みなさんに付き合ってもらって1区間分だけ測量手の練習もした（写真5）。

測量手の手順や注意点を頭に入れても、体がついていかないというか、一連の作業として全くスムーズにいかなかった。特に不思議だったのが、望遠鏡の十字線を一番はっきり見えるように合わせて、標尺に焦点を合わせるのだが、その際何度かエラーが出てしまったことである。自分の目はいい加減なものだなあと実感した。

水準点整備のときには、通り道にあった足湯に入った。垂水にできた日本一長い足湯らしい。なんでもギネス申請しているとか（写真6）。

桜島はとても景色の良いところである。風の強い日は標尺を固定するのが大変だったが、桜島の海沿いを測量しながら歩いていくのはとても気持ち良かった。



写真5 測量手の練習風景



写真6 日本一長い足湯

参考文献：江頭庸夫著『一等水準測量の基礎』
測量士補国家試験問題集 回答と解説（U-CAN）

コメント

火山活動研究センター 井口正人

火山活動研究センターに新たに技術職員が配置されるのは、桜島火山観測所の時代から数えて30年ぶりのことである。この30年という数字が現在の防災研と技術室のかかえる問題をそのまま反映している。桜島はまだいい方であると思われる方も多いであろう。そのような状況の中でこれまでに技術室において培われてきた技術を次の世代に伝えるために様々な努力が払われており、福嶋さんが火山活動研究センターに配置されたのもその一環であると理解している。ここで、福嶋さんが紹介している水準測量は、鹿児島湾周辺においては旧帝国陸軍参謀本部陸地測量部の時代から行われており、100年以上の歴史をもつ。防災研究所が桜島火山観測所を設置してからも40年以上の観測期間がある。水準測量についてこれだけのデータの蓄積のある火山は世界でも皆無である。水準測量に限らないが、観測については一人の研究者だけで行えるようなものではなく、複数の研究者・技術職員の連携が必須である。今後、同様の観測を繰り返すことで、技術をどんどん身につけていくことと思う。一方で、フィールドにおける観測では技術だけでなく、体力も必要である。かつては私も、福嶋さんのいう大先輩と40kgのバッテリーを背負って口永良部島などに登山したものである。そこにはどうしても若い力が必要である。福嶋さんは今年2月の口永良部島での観測ではGPS受信機2台を山頂まで担ぎ上げた。若手男性研究者よりもよほどパワーがある。将来が期待できる人材である。