

精密水準測量概説

—火山活動に伴う微小な地盤上下変動の検出を目指して—

山本 圭吾*

(2021 年 8 月 11 日受付, 2022 年 4 月 6 日受理)

Introduction to the Precise Leveling Survey:
Towards the Detection of Minute Vertical Ground Deformation
Associated with Volcanic Activity

Keigo YAMAMOTO*

1. はじめに

火山活動は、地下におけるマグマの活動によって引き起こされる。活火山の地下では、深部からマグマが供給され、蓄積し、時に地表付近まで移動し、噴出する。地下におけるこれらのマグマの活動やそれに付随する熱水、火山ガスの変動に起因して地表面が変形するが、この変形を火山性地盤変動と言う（火山性地殻変動、山体変形と表記する場合も多い）。このことは、言い換えると、火山性地盤変動を知れば、地下におけるマグマ、熱水や火山ガスの活動に関する情報を得ることができることを意味する。そこで、各火山では、火山性地盤変動を測定し、その結果から火山活動を理解する研究がさかんに行われている（例えば、桜島火山では、江頭, 1989; Ishihara, 1990; Yamamoto *et al.*, 2013; Iguchi, 2018 等）。火山性地盤変動に関する研究は他にも数多くあり、ここで全ては紹介し尽くせないが、Dvorak and Dzurisin (1997) や Dzurisin (2003) では、日本を含む世界中の火山における火山性地盤変動の観測研究について論じられているので参考にさせていただきたい。

火山性地盤変動は、水準測量（二地点間の高さの差を測る）、三角測量（地表面上の三角形の内角を測る）、光波（辺長）測量（二地点間の距離を測る）といった測地

測量を、時間をおいて繰り返すことによって測定することができる。また、傾斜計や伸縮計といった計測器を設置し、その場の地面の傾きや伸び縮みを連続的に測定することも行われている。1990 年代以降は、GNSS 観測によって観測機器設置点の 3 次元的位置を測定する方法、あるいは人工衛星から撮像された画像を用いて面的に地盤変動を検出できる干渉 SAR などの宇宙技術を用いた測定も行われるようになった。なお、これらの各種測定法については、日本測地学会発刊の教科書「Web テキスト 測地学 新装訂版」に詳しく説明されているので参考にさせていただきたい¹。

水準測量と三角測量は 100 年以上前から行われている古典的な手法であるが、測量作業に労力と時間がかかり、繰り返し観測を頻繁に行うこと、すなわち地盤変動データの時間分解能を高くすることは容易ではない。このうち三角測量は、三角点の水平位置を求めるために測定する三角点間の角度の測定誤差が大きく、1960 年代に光波測量が登場すると三角点間の距離を精密に測定できる三辺測量に取って代わられた。さらに現在では、基準点の 3 次元的位置をほぼ連続に測定することができる GNSS 観測に取って代わられた。一方で、水準測量は、上下方向の地盤変動しか計測できない、労力がかかる、

¹ 日本測地学会ホームページ「Web テキスト 測地学 新装訂版」。<http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html>* 〒891-1419 鹿児島市桜島横山町 1722-19
国立大学法人 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター
Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention

Research Institute, Kyoto University, 1722-19 Sakurajima-Yokoyama, Kagoshima 891-1419, Japan.

e-mail: yamamoto@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

データの時間分解能を高くすることは困難といった短所はあるが、GNSS 観測の上下方向成分よりも計測精度が高く、現在でも広く用いられている。例えば、Yamamoto *et al.* (2013) は、比較的最近に桜島火山で行った水準測量において、観測距離 1 km 当たりで平均的に約 0.5 mm、観測距離 10 km 当たりでは平均的に約 1.6 mm の精度で火山性地盤変動を測定している。これは、GNSS 観測の上下方向成分の数倍以上の高い計測精度である。なお、干渉 SAR は、地表の観測機器設置を必要とせず面的に地盤変動を捉えることができる画期的な手法であるが、得られる地盤変動の計測精度は一般的には数 cm 程度で、また衛星が同じ場所に再帰する必要があるため時間分解能は数日以上となる。このように、測定方法ごとに長所や短所があるので、それぞれの特徴をよく理解してデータの評価を行う必要がある。また、火山性地盤変動を正確に捉えるためには、それぞれの短所が補えるように、複数の手法による結果を組み合わせて用いることも重要である。なお、各種測定方法の特徴・比較については、青木 (2016) に詳しくまとめられているので、そちらも参考にされたい。

本稿では、これらの地盤変動測定法の中から水準測量を取り上げ、その原理や測定方法を中心に解説する。第 2 章で水準測量の原理、第 3 章で測量に使用する機材について説明した後、第 4 章で測量前の器材の点検・調整、第 5 章で具体的な測量方法の詳細について解説する。また、第 6 章では測定値から地盤上下変動データを求めるまでのデータ処理を記述する。読者の対象として、学生実習等で初めて水準測量に触れる方を想定し、この測定法を理解し、実践できるような内容とした。なお、水準測量についての実践的なアドバイスや注意点を中心に測量方法を記述した解説書として江頭 (2003) があり、本稿の記述に際しても参考とした点が多い。一方で、本稿では、現在主流となったものの江頭 (2003) ではほとんど取り上げられていないデジタルレベルを使用した測量方法について記述する。

2. 水準測量およびその原理

水準測量とは、Fig. 1 にあるように、地面に鉛直に立てた物差し (標尺 (staff) と呼ばれる) の目盛を、水平に設置した水準儀 (レベル (level) と呼ぶ) という機械で読み取ることで、2 地点間の高低差 (比高) を精密に求める測量方法である。周囲の状況 (道路が曲がっている、あるいは傾斜があるなど) や標尺の目盛を読み取る精度への要請 (標尺と水準儀の位置が離れると目盛を読み取

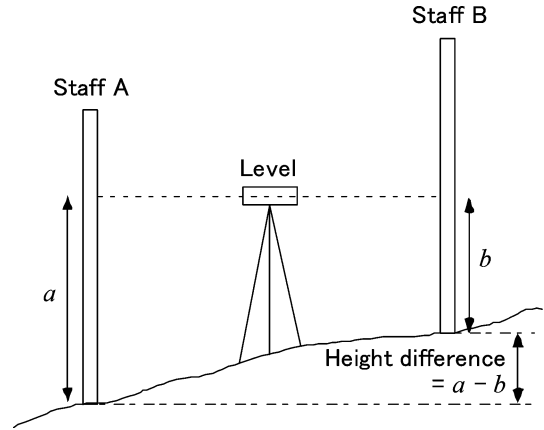


Fig. 1. Basic principle of leveling. Height difference between two points is obtained from the staff readings a and b which are measured through the horizontal line of sight (broken line) of the level.

る精度が悪くなる) から、Fig. 1 のように高低差を 1 回で測定可能な最大距離は数十メートル程度であるが、この作業を繰り返すことで長距離間での高低差を実測できる。

水準測量では、対象地域に高さの基準となる点を数多く設置し、これらの基準点間の高低差を測定する。高さの基準となる点を水準点 (benchmark) という (Fig. 2a)。国土地理院は、全国の主要な国道沿い等に約 2 km 間隔で水準点を設置しているが、火山観測のためには、高い空間分解能で地盤変動を把握する必要があるため、水準点は数百メートル程度の間隔で設置されることが多い。火山に設置された水準点の一例として、京都大学防災研究所が桜島火山に設置している水準点の分布を Fig. 2b に示す。

国土地理院の規定では、水準測量は、観測の精度等に応じて、1 級~4 級水準測量及び簡易水準測量に区分される²。この区分に応じて、使用する水準儀や標尺、つまり測定機器の精度も定められている。通常、大学などが火山観測を目的として行っている水準測量は、国土地理院が定めるこれらの区分のうち最も高精度な 1 級水準測量である。水準測量の測定精度は、測線の出発水準点の高さが、測量によってどれくらいの較差で再現されるかによって確かめており、1 級水準測量では、各水準点間 (観測距離 L km) の高低差の往復観測値の較差を許容範囲 $2.5 \times \sqrt{L}$ mm 以内で、また、測線が環となる水準環 (水準環の観測距離 S km) を形成する場合は、環閉合差を許

² 国土交通省国土地理院ホームページ「作業規定の準則」
<https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>

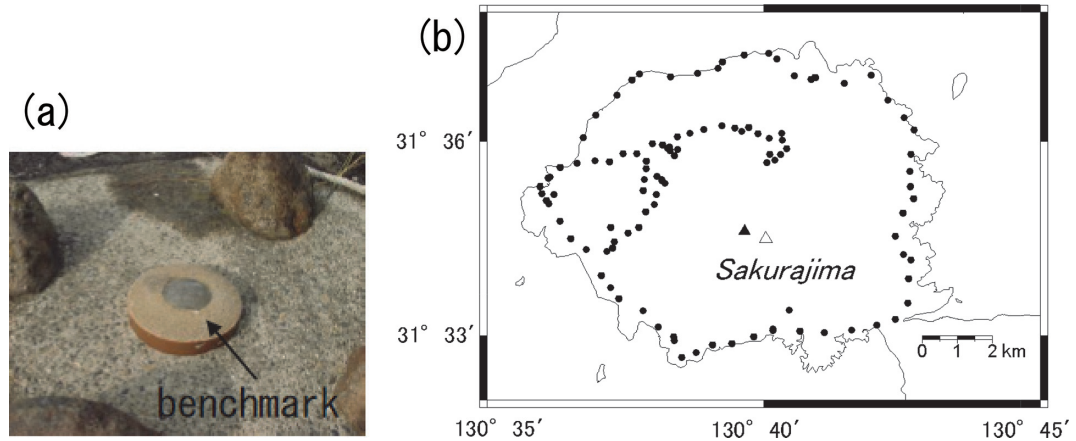


Fig. 2. (a) Photo showing an example of the leveling benchmark. (b) An example of the benchmark distribution around the volcano. These (solid circles) are the benchmarks in Sakurajima volcano installed by Kyoto university. Solid and open triangles indicate the locations of Minamidake and Showa craters of Sakurajima volcano, respectively.

容範囲 $2.0 \times \sqrt{S}$ mm 以内で測定することが求められる。この章の冒頭において Fig. 1 を用いた水準測量の原理の説明で述べたように、2 地点間の高差が正確に求められるのは、標尺を地面に鉛直に立て、水準儀を水平に設置した場合である。すなわち、1 級水準測量のような高精度な測定を達成するには、できる限り標尺を鉛直に立て、またできる限り水準儀を水平に設置することが重要である。後に解説するが、このために水準儀と標尺には、それぞれ水平と鉛直に設置するための機構が備わっており、観測前にこれらを良く点検・調整することが重要である。

Fig. 3 に、水準測量による火山性地盤変動の測定例および得られたデータの解析例を示す。これは、桜島火山周辺において 1996 年 10 月～2007 年 10 月-12 月の期間において測定された地盤上下変動および半無限弾性体内部の球状圧力源モデル (Mogi, 1958: これ以降、茂木モデルと呼ぶ) を用いた解析例である (Yamamoto *et al.*, 2013)。Fig. 3a から、桜島北部付近の顕著な地盤隆起 (約 11 年の期間で最大約 14 cm) が見て取れる。茂木モデルを用いた解析から、桜島北方の始良カルデラ中央部地下約 8.8 km の深さに増圧源 (体積増加量約 7200 万 m^3) が求められ、マグマの貯留が進行していることが推測される。また、Fig. 3b からは茂木モデルにより観測データを非常によく説明できていることが分かる。桜島以外の多くの火山においても水準測量が行われており、例えば御嶽山では 2006 年～2009 年の期間に地盤隆起、2009 年～2014 年の期間には地盤沈降が観測され、それぞれ 2014 年 10 月の噴火に向けたマグマの貫入および 2014 年噴火に伴った地盤の収縮と解釈された (Murase *et al.*,

2016)。また、口永良部島火山では、2014 年 8 月～2015 年 3 月の期間に地盤隆起が観測され、急激なマグマ貫入が生じ 2015 年 5 月の爆発的噴火に至ったと解釈された (Yamamoto *et al.*, 2017)。アメリカ合衆国の Medicine Lake volcano では、1954 年～1999 年の長期間にわたり地盤沈降が観測され、その原因としてマグマの体積減少ではなく火山体荷重による重力沈降が提唱されている (Dzurisin *et al.*, 2002)。なお、火山性の圧力源のモデル化に最もよく用いられるのが茂木モデルである。このモデルは主に当時の水準測量データを説明するモデルとして提唱されたという経緯が示す通り、地盤上下変動データがモデル制約の良い条件となる。このことが、現在でも水準測量が広く用いられるもう 1 つの理由であると思われる。

3. 水準測量に使用する器材

Fig. 1 には、水準測量に使われる器材として、水準儀と標尺を単純化して示した。これ以外にも、水準儀とともに測量手が使用する三脚 (tripod) や温度計 (thermometer) (Fig. 4)、標尺とともに標尺手が使用する標尺台 (ground plate) や支持棒 (support strut) (Fig. 5) といった付属器材を用いる。また、1 級水準測量には、現在、通常では、水準儀として 1 級デジタルレベル (ライカ DNA03, ソキア SDL1X 等: Fig. 4 に示した水準儀はライカ DNA03) およびそれぞれの水準儀に対応したバーコード目盛がついている 1 級水準標尺 (ライカ GPCL3, ソキア BIS30 A 等: Fig. 5 に示した標尺はライカ GPCL3) が用いられる。本稿では、デジタルレベルおよびバーコード標尺を取り上げ、その付属器材とともに説明する。

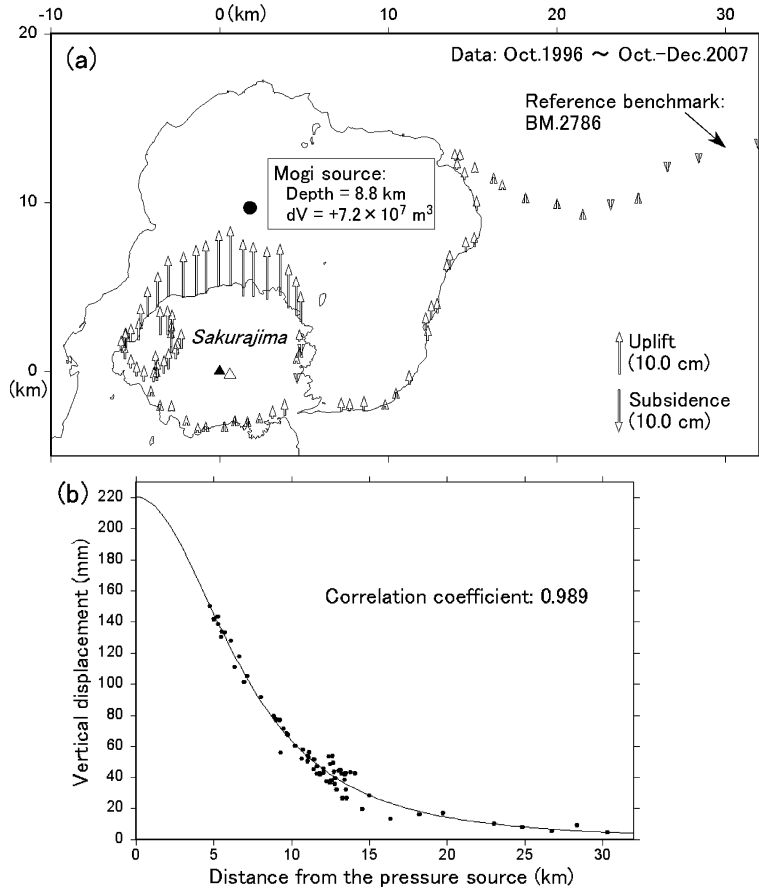


Fig. 3. (a) Distributions of the vertical displacements of the benchmarks in and around Sakurajima volcano referred to BM. 2786 during the period from October 1996 to October-December 2007 (modified from Yamamoto *et al.*, 2013). Horizontal location of the calculated pressure source (solid circle) by using the vertical displacement data is also plotted. Solid and open triangles indicate the locations of Minamidake and Showa craters of Sakurajima volcano, respectively. (b) Comparison between measured vertical displacements (solid circles) and theoretical vertical displacements (solid line) versus radial distance from the pressure source.

3-1 測量手が使用する器材

デジタルレベル (Fig. 4) は、視野内にある標尺のバーコード目盛を読み取り、デジタルレベル内のメモリーに保存されているリファレンスとなるバーコード目盛と比較することによって、標尺上を視準線 (デジタルレベルの望遠鏡の視線) が指し示す高さと同レベルまでの水平距離を算出する。なお、標尺までの水平距離は、スタジア測量という方法により間接的に算出される。デジタルレベルの望遠鏡を覗くと十字線の上下に平行した 2 本の線 (スタジア線) が見えるが、このスタジア線には含まれた標尺上の目盛間隔はデジタルレベルから標尺までの水平距離の 1 次関数となり (水平距離が大きいかほど目盛間隔も大きくなる)、目盛間隔を読み取ることで水平距離を

算出することができる。算出された高さや水平距離のデータは、デジタルレベルの内部メモリーに逐次記録され、測定後に外部媒体へ取り出して解析に利用することができる。

デジタルレベルにはコンペンセータ (自動補正機構) があるので、機器に附属する円形水準器の気泡を、高さ調整用の整準ねじで中央付近に導けば、自動的に水平な視準線が得られるようになっている。

水準儀は三脚に乗せて使用するが、1 級水準測量には、通常、脚が伸縮しない直脚 (Fig. 4) を用いる。伸縮脚を用いると、測定時に非常に僅かな脚の伸縮 (すなわち、水準儀の高さが変化する) が生じ、1 級水準測量の測定精度を保つことができない可能性が高くなる。また、次

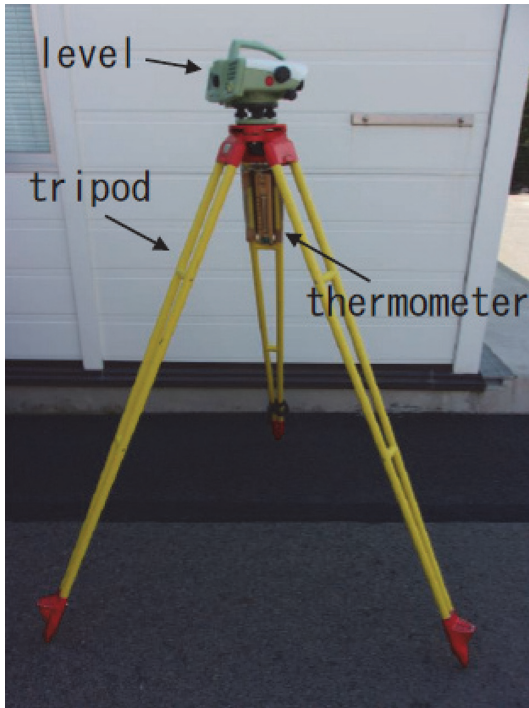


Fig. 4. Photo of level, tripod and thermometer.
The level is Leica DNA03.

節で述べる水準標尺の目盛は、通常、気温に応じた熱膨張の補正をする必要がある。このため、測量中の気温を測定するために三脚に温度計をつけて使用する (Fig. 4)。

3-2 標尺手が使用する器材

水準標尺 (Fig. 5) は通常 3 m の長さのものをを用い、2 本 1 組で使用する。標尺の背後には、標尺を鉛直に立てるための円形水準器がついている。バーコード目盛の部分は、インバール (常温付近で熱膨張率が小さいという特徴を持つ合金) で作られている。熱膨張率が小さいとはいえ、温度変化により僅かな伸縮があるので、気温に応じた膨張の補正 (標尺補正) をする必要がある。ソキア BIS30 A については、目盛部分がニュースーパーインバールという合金で作られ、熱膨張率が限りなく 0 に近いいため、気温に応じた標尺補正を行う必要がない。

標尺を水準点以外の場所に立てる際には、測定時の標尺の沈下を防ぎ、精度よく高さの測定を行うために、下部に 3 本のセラミック製の足がついた標尺台 (Fig. 5) を使用する。標尺台は、標尺 1 本につき 1 台ずつ、合計 2 台用い、標尺台の中央にある丸い突起 (球分体) の上に水準標尺を鉛直に立てて測定を行う。また、標尺を鉛直に立てて保持するための補助道具として、水準標尺 1 本につき 2 本の支持棒 (Fig. 5) を用いる。日本では、Fig. 5

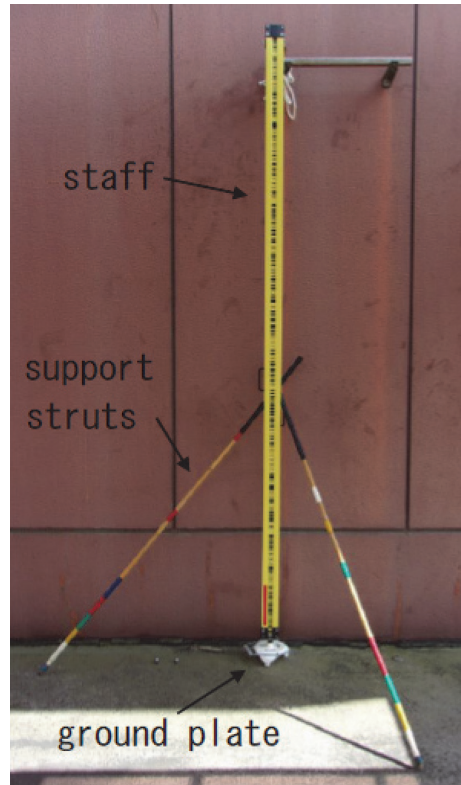


Fig. 5. Photo of leveling staff, ground plate and support struts. The levelling staff is Leica GPCL3.

のような竹棒を用いて作成された支持棒がよく用いられている。

3-3 その他の器材・装備

測量中の水準儀および標尺の位置を道路等に記すためのマーキングチョークを使用する。強い日差しが水準儀や三脚に当たるのを避けるため、また逆光時に水準儀に影を作って標尺の目盛を読み取りやすくするために日傘を使用したほうがよい。デジタルレベルでは、測定データはレベルの内部メモリーに逐次記録されるが、念のため必要なデータは野帳と筆記用具を使用して記録する。路線の途中にトンネルがある場合には、標尺目盛を明るくしてデジタルレベルで見えるように、強力ライト等が必要である。

4. 水準儀と水準標尺の点検・調整

測量前の準備として行う水準儀および水準標尺の点検・調整項目を Table 1 に示した。本章では、これらの点検・調整項目について説明する。

Table 1. List of checking and adjusting of level and leveling staff.

Checking matters	※
Verticality of leveling staff	4-1
Circular level attached to level	4-2
Compensator of level	4-3
Horizontality of line of sight of level	4-4
※ Described section	

4-1 水準標尺の鉛直性の点検・調整

水準測量時に標尺の高さを読み取る際、標尺が鉛直から傾いていると間違った高さを算出することになる。このため、水準標尺には鉛直に立てるための円形水準器が付属しているが、正しく鉛直に立てるためにはこの円形水準器を点検・調整しておく必要がある。これには、まず標尺の左右の傾きを調整するため、標尺の正面から20 m程度離れた場所で錘を糸で吊り下げ、その糸を見通して標尺が鉛直になるようにする。この時、円形水準器の気泡が中央にくるように円形水準器の調整ねじを操作する。次に、標尺の前後の傾きを調整するため、標尺の側面についても同様な方法で円形水準器を調整する。もしセオドライトが手元にある場合は、標尺の前後・左右の傾きについて標尺より30 m以上離れた位置に設置したセオドライト視野内の縦線を使って同様な点検・調整を行う方法もよい。

4-2 水準儀の円形水準器の点検・調整

水準儀に付属した円形水準器を点検するには、整準ねじで気泡を中央に導き、水準儀を水平面で180度回転し、気泡が動かないか確認する。気泡が円形水準器の中央の円からずれるほど動く場合は、気泡のずれが半分になるように円形水準器の調整ねじで調整する。調整した場合は、整準ねじで気泡を中央に導くところからの作業を繰り返し、円形水準器の気泡が、水準儀をどの方向に向けても中央にくるようにする。

4-3 水準儀のコンペンセータの点検

コンペンセータの点検は、故意に水準儀を水平からずらし、それでも視準線の水平は保たれることを確認する。これには、次のような操作を行う。まず、水準儀の円形水準器の気泡が中心位置に来るように整準ねじを調整して水準儀を水平にする。この時、望遠鏡で近くにある壁の模様などを見て、望遠鏡視野内に見える十字線が壁の模様などのどの部分を指し示しているか、すなわち視準線がどこを指し示しているかを確認しておく。続いて、望遠鏡を覗きながら整準ねじのひとつを少し動かして止めることで故意に水準儀を水平からずらす。望遠鏡視野

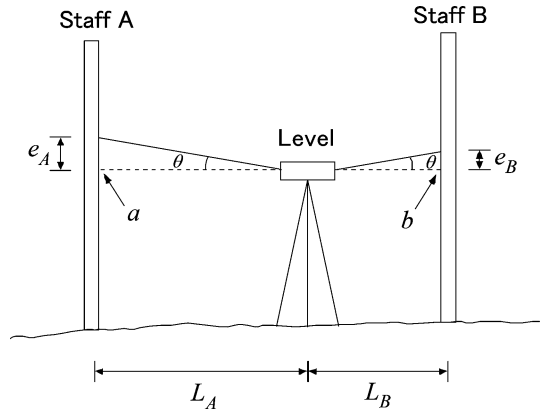


Fig. 6. Schematic illustration explaining the collimation error of the level. Solid lines represent the actual line of sight of the level, which deviate from the horizontal line denoted by broken lines.

内の十字線が若干振動したあと、元に見えていたものと同じ高さを指し示す位置にもどれば、コンペンセータが異常なく作動し、視準線の水平が保たれることが確認できる。

さらに整準ねじを動かし水準儀を水平から大きくずらしていくと、あるところからコンペンセータが作動しなくなる。これが、コンペンセータの作動可能範囲の限界点であり、このときの円形水準器の気泡が中心からどれくらいずれているかを確認しておくことよい。

4-4 水準儀視準線の水平性の点検・調整

デジタルレベルの視準線は、コンペンセータにより自動的にほぼ水平に補正されるが、この補正された視準線が水平線から僅かにずれている場合を考える。Fig. 6のように、視準線の水平線からのずれの角度を θ 、水準儀から標尺A、標尺Bまでの距離をそれぞれ L_A 、 L_B とすると、標尺A、標尺Bの高さの読取値は、本来の a 、 b からそれぞれ $e_A=L_A \tan \theta$ 、 $e_B=L_B \tan \theta$ だけずれる。このようにして生じる誤差を視準線誤差と言う。水準儀から前後の標尺までの距離が異なる、すなわち $L_A \neq L_B$ である場合（つまり、 $e_A \neq e_B$ ）、測定される高低差は、

$$\begin{aligned} \Delta h &= (a + e_A) - (b + e_B) \\ &= a - b + (e_A - e_B) \end{aligned} \quad (1)$$

となり、標尺間の正しい高低差 $a - b$ を測定することができない。

デジタルレベルには、この視準線誤差を点検・調整する機能がメーカーにより組み込まれており、それぞれのマニュアルに沿ってテストをすることで点検・調整を行うことが可能である。ここでは、ライカ DNA03、ソキア

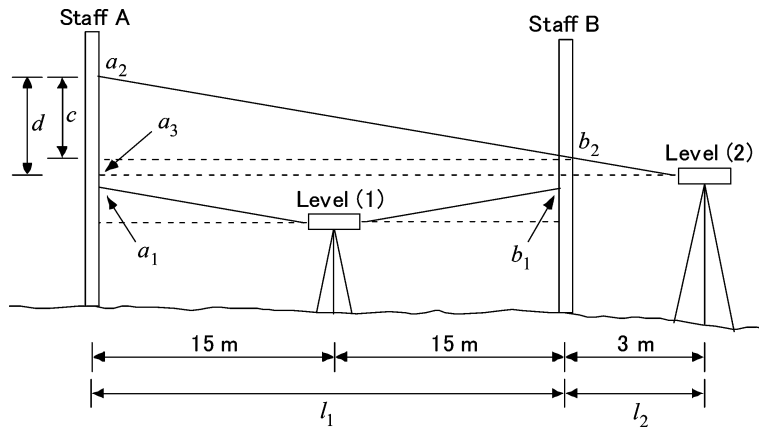


Fig. 7. Checking and adjusting the collimation error of the level (see text). Solid lines represent the actual line of sight of the level, which deviate from the horizontal line denoted by broken lines.

SDL1X のどちらにも組み込まれている杭打ち法について方法とその原理を述べる。これは、2本の標尺を水準儀から不等距離に置いて高さの測定を行い、視準線誤差によるエラーを顕在化し調整するものである。

Fig. 7 に示したように距離を約 30m 離れた A, B 両地点に標尺を立てる。最初に、標尺 A と標尺 B の中央（中心から ±1m 以内）に水準儀を設置する（Fig. 7 の Level (1) の位置）。標尺 A、標尺 B の順番で高さを測定し、それぞれ a_1 , b_1 を得る。標尺 A と標尺 B への視準距離がほぼ等しいので、視準線誤差があっても誤差は相殺され、 $a_1 - b_1$ はほとんど誤差を含まない正しい高低差となる（Fig. 6 で、 $L_A = L_B$ である場合は $e_A = e_B$ となり、式 (1) の $e_A - e_B$ が 0 になる）。次に、水準儀を標尺 B の近く（標尺 B から 3m 外側に離れた位置）に移動する（Fig. 7 の Level (2) の位置）。標尺 B、標尺 A の順番で高さを測定し、それぞれ b_2 , a_2 を得る。もし、 $a_2 - b_2 = a_1 - b_1$ であれば、視準線誤差はないので視準線の調整は必要ないが、視準線誤差がある場合は、 $a_2 - b_2 \neq a_1 - b_1$ となり調整が必要である。実際上は、1 級レベルでは、 $|(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)| > 0.3 \text{ mm}$ (0.3 mm は、公共測量作業規定における 1 級レベルの視準線誤差の許容範囲³) の場合に調整が必要となる。

調整は、Fig. 7 の Level (2) の位置から標尺 A を見たとき、高さの読みが Fig. 7 の d を用いて $a_3 = a_2 - d$ となるようにすればよいことになる。Fig. 7 の c は、上記の $(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)$ であり、 $c : d = l_1 : (l_1 + l_2)$ なので、

$$d = \frac{l_1 + l_2}{l_1} c = \frac{l_1 + l_2}{l_1} \{(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)\}.$$

$$a_3 = a_2 - \frac{l_1 + l_2}{l_1} \{(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)\} \quad (2)$$

となるように調整すればよい。

デジタルレベルの点検・調整プログラムでは、テストで得られた値から、式 (2) の右辺を計算し、高さの読みが正しく a_3 となるように自動で調整される。この後、再度点検・調整テストを行い、 $|(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)| \leq 0.3 \text{ mm}$ が満たされたかをチェックする。満たされていない場合は、点検・調整テストを繰り返す。

5. 1 級水準測量の具体的な手順と誤差軽減法

5-1 測量手順

測量には、それぞれのデジタルレベルに組み込まれている測定プログラムを使う必要があるので、予めそれぞれのマニュアルで使用方法を確認しておく。デジタルレベルを使用する場合の測量には、測量手 1 名、標尺手 2 名の合計 3 名が最低必要である。さらに、交通監視、下記の歩測や標尺台の運搬を標尺手の代わりに行う、水準儀において逆光で読取りができない場合に太陽光線を遮る等の対応のために、1~2 名のサポート要員がいるほうがよい。測定において水準儀や標尺台を設置する場所は、高さが変わる可能性のある側溝の蓋などは避け、できる限り安定した場所を選ぶ。なお、水準儀や標尺台の設置場所の選点や測定方法においては、測定誤差軽減のため、いくつかの注意が必要であるので、測定手順について述べたのち、次節でこれらについても紹介する。以下では、水準点 A から水準点 E までを往復測量する場合

³ 国土交通省国土地理院ホームページ「作業規定の準則」。
<https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>

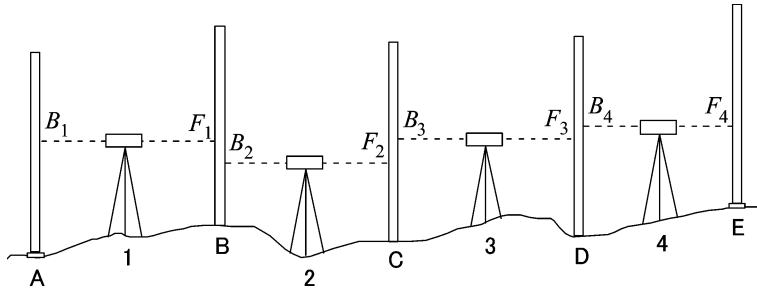


Fig. 8. Leveling survey from benchmark A to benchmark E in the actual field observation. Broken lines denote the (error corrected) line of sight of the level.

を考え (Fig. 8), 順を追って具体的な手順を記す。

(1) まず最初に、標尺手の一人が、水準点 A に標尺を立て、標尺に付属している円形水準器を用いて鉛直にする。

(2) 測量手は、水準儀を Fig. 8 の 1 の位置 (今後、このように水準儀を設置する点を器械点 1 のように記述する) に設置し、水準儀の望遠鏡を水準点 A に立てた標尺に向け、水準儀に付属している円形水準器を用いて整準する。標尺から水準儀までの距離は、平坦路では 20~25 m 程度が良いが、傾斜のある場所では距離を縮めないと水準儀から標尺が見えなくなる。

(3) 測量手は、水準儀の望遠鏡で水準点 A に立てた標尺の目盛を視準し、高さ B_1 (後視) を測定する。この時、高さの測定と同時に、標尺までのおよその距離 (この場合、水準点 A~器械点 1 間の距離) も測定される。なお、高さは 3 回以上測定してその標準偏差を確認するなどし、ばらつき具合が大きい場合は読み直しを行う (デジタルレベルには、このような操作を行う測定モードが備わっているので、それを利用する)。

(4) もう一方の標尺手は、水準点 A~器械点 1 の距離と器械点 1~B 点の距離がほぼ等しくなる位置 B を歩測で求め、その位置に標尺台を設置してもう 1 本の標尺を立てる。

(5) 測量手は、水準儀の望遠鏡を B 点の標尺に向け回転し、 F_1 (前視) を測定する。

(6) 次に、測量手は、水準儀を器械点 2 に移動し、望遠鏡を B 点に向けて整準する。

(7) B 点の標尺手は、標尺台を動かさないように注意しながら標尺台上で標尺を回転して、標尺の目盛りを器械点 2 の方へ向ける。

(8) 手順 (3) から手順 (7) までと同様な作業を繰り返すことで、 B_2 (後視) および F_2 (前視) の測定を行う。

(9) 同様の測定を、水準点 E まで繰り返す。水準点 E には、水準点 A に立てた標尺を立てる。このためには、

測点数 (器械点の数) を偶数回にする。

以上が往観測である。差 B_1-F_1 から、水準点 A と B 点の高低差、差 B_2-F_2 から、B 点と C 点の高低差、同様に各器械点での高低差が求まり、水準点 A と水準点 E の高低差は、これら求めた差の総計となる。デジタルレベルでは、この差の総計 (同時に、水準儀~標尺間の距離の総計も) は測定プログラムにより自動で計算され表示される。

復観測では、往観測のときに水準点 A および E に立てた標尺とは別の標尺を水準点に立て、往観測と同様の手順で水準点 E から水準点 A まで測量を行う。往観測の手順の説明では詳しく述べなかったが、往観測を行う際に、マーキングチョークで器械点の位置 (三脚の下) に Δ 印を、また、標尺位置 (標尺台のすぐ横) には \circ 印をそれぞれ 30 cm 程の大きさでつけておき、復観測ではそれらの Δ 印と \circ 印をたどることで歩測の必要がなくなる。

なお、標尺目盛の熱膨張補正が必要な器材 (ライカ GPCL3 等) を使用する場合は、往観測、復観測のそれぞれの測量開始時および測量終了時の気温を温度計から読み取る。その他にも、測量開始時には、開始時刻、天候や測量手・標尺手名を、また、測量終了時には、終了時刻、計算された水準点間高低差・距離や備考を含め、野帳に記入しておくといよい。

以上が、水準点 A から水準点 E までを往復測量する場合の具体的な手順である。水準測量には、誤差を軽減する工夫があり、これらをできる限り取り入れながら測定することで、精度の良いデータが得られる。次節には、主な誤差要因とその誤差の軽減法についてまとめた。

5-2 主な誤差要因と誤差軽減法

Table 2 に、水準測量における主な誤差要因について示した。以下では、これらの誤差要因とその誤差軽減法について順を追って説明する。

(1) 「視準線誤差」は、整準した水準儀の視準線が水平

Table. 2. Major errors in leveling.

Errors	Description
Collimation error	The error caused when the actual line-of-sight of the leveling up instrument deviates from the ideal horizontal line.
Error due to the earth's curvature	The error arising because the earth's surface is a sphere.
Error due to atmospheric refraction	The error caused by the line-of-sight refracted by the atmospheric temperature changes close to the ground.
Zero error of the staff	The error caused when the zero point of the graduation of leveling staff is not at the bottom of the staff.
Error due to the tripod and staff sinking	The error caused by sinking of the tripod and leveling staff due to their weights during the measurements.

線からずれている場合に生じる誤差である。この誤差の軽減は、4-4 節で述べた点検・調整を行い、視準線と水平線のずれを解消するのが基本であるが、解消しきれないずれが残っている場合も、測定中に後視と前視の距離をできる限り等しくとることによって誤差を軽減できる。例えば、Fig. 6 において $L_A=L_B$ である場合は $e_A=e_B$ であるので、式(1)は $\Delta h=a-b$ となる。すなわち、視準線と水平線のずれが残っている場合でも誤差が打ち消しあうことで標尺間の高低差は正しい値になることが分かる。

(2)「球差による誤差」は、地球表面が球面であるために生じる誤差である。水準儀と標尺間の距離とともに、視準線が球面から乖離していくが、これも後視と前視の距離をできる限り等しくとることによって、後視と前視それぞれの視準線が球面から乖離する量を等しくし、それらが打ち消しあうことで誤差を軽減できる。

(3)「大気による屈折誤差」は、地面に近づくほど気温(大気密度)が変化することに伴い、光の屈折率が変化することで視準線が曲がり、その結果生じる誤差である。日差しにより地面からの熱で大気が温められ、地面に近づくほど気温が上昇することで視準線が上方へ曲がる、すなわち標尺の読み取り値が正しい値より大きくなるためである。これらの誤差は、地面に近い標尺の下方を読取りしない(1級水準測量においては、標尺の下方20cm以下を読取りしない⁴⁾)ことで軽減できる。また、日差しが強い場合には、陽炎が発生することも多く、この場合には視準線が不規則に屈折して標尺の読取りが定まらない状態になることがある。この場合には、視準距離を短くすることにより対処する。陽炎による影響が酷い場合は、日差しの強い昼頃を避け、朝方あるいは夕方に測量を行うのも一つの解決法である。以上述べてきたことか

ら分かるように、晴れた日は測量を行うのに好条件というわけではない。曇りの日が、測量には最適である。

(4)「標尺の零点誤差」は、標尺底面の摩擦等により、標尺の零目盛の位置が標尺の最下端ではない場合に生じる誤差である。これには、2水準点間の観測において、測点数(器械点の数)を偶数回にする、すなわち出発水準点に立てた標尺と同じ標尺を終点水準点に立てることで、零目盛がずれている誤差を消去することができる。

(5)「三脚や標尺の沈下による誤差」は、測定中に水準儀を乗せた三脚や標尺が自重等によって時間とともに沈下するために生じる誤差である。三脚や標尺をできる限り地盤が強固な場所(例えば、気温の上昇により柔らかくなるアスファルト舗装面よりは沈下が少ないコンクリート面)に設置し、測定前に三脚の足や標尺台をよく踏み込んで安定させることで軽減できる。

6. データ処理

本章では、得られた測定値に対し必要な場合に補正を施し、最後に地盤上下変動データを求めるまでのデータ処理について記述する。

水準点 A に対する水準点 B の観測高低差 (m 単位) を h_{AB} (往観測値)、水準点 B に対する水準点 A の観測高低差 (m 単位) を h_{BA} (復観測値) とすると ($h_{AB} \cong -h_{BA}$ であるが、測定誤差があるので通常 $h_{AB} = -h_{BA}$ とはならない)、水準点 A に対する水準点 B の観測高低差 (m 単位) h (往復観測値の平均)、往復観測値の較差 (mm 単位) U は、それぞれ次の式で計算される。

$$h = \frac{(h_{AB} - h_{BA})}{2} \tag{3}$$

$$U = |h_{AB} + h_{BA}| \times 10^3 \tag{4}$$

⁴⁾ 国土交通省国土地理院ホームページ「作業規定の準則」
<https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>

1級水準測量では、 U の許容範囲は、 $2.5 \times \sqrt{L}$ mm 以内 (L : 水準点間の観測距離 (km 単位)) であり、この許容範囲を超えた場合には、再測量をしなければならない。

標尺の温度補正が必要な場合は、各区間における測量中の平均気温 T (測定開始時気温と測定終了時気温の平均値: °C 単位) を求め、標尺目盛の膨張係数 α (ppm/°C) と 20°C における標尺改正数 (単位長さあたりの補正量) C_0 ($\mu\text{m/m}$) を用いて標尺補正量 ΔC (m) が次の式で計算できる (公共測量における作業規定の準則 (付録 6)⁵)。

$$\Delta C = \{C_0 + (T - 20)\alpha\}h \times 10^{-6} \quad (5)$$

標尺補正後の高低差は、 $h + \Delta C$ で計算される。

また、1 km 当たりの水準測量観測の標準偏差 m_0 (mm 単位) は、次の式で計算する (公共測量における作業規定の準則 (付録 6)⁵)。

$$m_0 = \sqrt{\frac{1}{4} \sum \left(\frac{U_i^2}{L_i} \right) \frac{1}{n}} \quad (6)$$

ただし、 U_i 、 L_i 、 n は、それぞれ各区間の往復差 (mm 単位)、各区間の観測距離 (km 単位)、水準路線中の区間値の数である。

水準環で測定する場合は、環閉合差が 1 級水準測量の許容範囲 $2.0 \times \sqrt{S}$ mm 以内 (S : 水準環の観測距離 (km 単位)) を越えた場合には、再測量をしなければならない。環閉合差は、水準環を構成する各水準点間の 1 km 当りの観測の標準偏差に重みをおいて配分し、環閉合差の補正をする。

水準路線に水準点 BM.1, BM.2...BM. (i) があり、BM. (i-1) に対する BM. (i) の高低差 (標尺の温度補正、環閉合差の補正後) (m 単位) を h_i とすると、BM.1 を基準 (不動点) にして、BM. (i) の比高 H_i は、各水準点間の高低差を加算し、次の式で計算される。

$$H_i = h_2 + h_3 + \dots + h_i \quad (7)$$

このような水準測量を時間を置いて繰返し行うことによって、各水準点の比高 H_i がどのように変化したか (すなわち、地表面の上下変動量) を求めることができる。

7. おわりに

本稿では、水準測量の原理を理解し、測定を行い、得られた測定値から地盤上下変動データを求めるまでについて解説した。求めた地盤変動データから地下における火山の活動を理解するには、次に地下における圧力源のモデル化を行うことが必要になる。圧力源モデルについ

ては、本稿ではほとんど取り扱わなかったが、青木 (2016) に詳しく解説されているのでそちらを参照していただきたい。

本稿では、学生実習等を念頭に、初めて水準測量に触れる方がこの測定法を理解し、実践できるような解説に努めた。本稿を実際の測量器材を用いた実習と組み合わせることで、水準測量、さらには火山研究における地球物理学的観測の理解が進むのではないかと期待している。

謝 辞

本稿を執筆する機会を与えていただいた東北大学の西村太志氏に感謝申し上げます。また本稿は、西村太志氏および常葉大学の嶋野岳人氏の丁寧な査読により大きく改善されました。ここに記して感謝いたします。Fig. 2 および Fig. 3 の作成には、GMT ソフトウェア (Wessel and Smith, 1995) を使用した。

引用文献

- 青木陽介 (2016) 火山における地殻変動研究の最近の発展. 火山, **61**, 311–344. https://doi.org/10.18940/kazan.61.2_311
- Dvorak, J. and Dzurisin, D. (1997) Volcano geodesy: the search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. *Rev. Geophys.*, **35**, 343–384. <https://doi.org/10.1029/97RG00070>
- Dzurisin, D. (2003) A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle. *Rev. Geophys.*, **41**, 1001. <https://doi.org/10.1029/2001RG000107>
- Dzurisin, D., Poland, M. P. and Burgmann, R. (2002) Steady subsidence of Medicine Lake volcano, northern California, revealed by repeated leveling surveys. *J. Geophys. Res.*, **107** (B12), 2372. <https://doi.org/10.1029/2001JB000893>
- 江頭庸夫 (1989) 噴火活動に伴う桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤変動. 京都大学防災研究所年報, **32** (B1), 29–39.
- 江頭庸夫 (2003) 一等水準測量の基礎-測量班への実践的アドバイス-. 私家版, 44 p.
- Iguchi, M. (2018) Volcanic activity of Sakurajima monitored using Global Navigation Satellite System. *J. Disaster Res.*, **13**, 518–525. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0518>
- Ishihara, K. (1990) Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In *Magma Transport and Storage* (Ryan, M. P. eds), 335–356. John Wiley and Sons, New York.
- Mogi, K. (1958) Relations between the eruption of various volcanoes and deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99–134. <https://doi.org/10.15083/0000033924>

⁵ 国土交通省国土地理院ホームページ「作業規定の準則」. <https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>

- Murase, M., Kimata, F., Yamanaka, Y., Horikawa, S., Matsuhiro, K., Matsushima, T., Mori, H., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Miyajima, R., Inoue, H., Mishima, T., Sonoda, T., Uchida, K., Yamamoto, K. and Nakamichi, H. (2016) Preparatory process preceding the 2014 eruption of Mount Ontake volcano, Japan: insights from precise leveling measurements. *Earth Planets Space*, **68**, 9. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0386-4>
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1995) New version of the Generic Mapping Tools. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union.*, **76**, 329. <https://doi.org/10.1029/95EO00198>
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K. and Nakamoto, M. (2013) Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996–2010 as revealed by repeated precise leveling surveys. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 137–151. https://doi.org/10.18940/kazan.58.1_137
- Yamamoto, K., Ohkura, T., Yokoo, A., Tameguri, T., Sonoda, T., Inoue, H. (2017) Vertical ground deformation related to the 2014 and 2015 eruptions at Kuchierabujima Volcano, Japan detected by repeated precise leveling surveys. *J. Nat. Disast. Sci.*, **38**, 133–144. <https://doi.org/10.2328/jnds.38.133>

(編集担当 西村太志)