

水管式簡易比高計の開発について

向井 厚志
Atsushi Mukai

1. はじめに

測地的な測定においては、多くの場合、測定地点の標高を正確に決定することが必要となる。例えば、地下構造を調べる重力探査では、重力値が地球中心からの距離の2乗に反比例するため、測定地点の標高を用いて、仮想的に測定地点を海面高へ下すフリーエア補正を重力測定値に施す（萩原, 1982）。厳密に標高を測定する方法としては、水準儀と標尺2本を用いた水準測量が一般的である（長谷川他, 2004）。水準測量では、標高が既知の地点と未知の地点にそれぞれ標尺を鉛直に立て、両者の中間点に水準儀を設置する。水準義を用いて各標尺に記された目盛を読み取ることによって、2点間の標高の差である比高を測定し、未知の標高を決定する。水準測量には一等、二等、三等および四等水準測量があり、それぞれ測定精度が $2.5\text{mm}\sqrt{S}$ 、 $5\text{mm}\sqrt{S}$ 、 $10\text{mm}\sqrt{S}$ および $20\text{mm}\sqrt{S}$ （ S は片道の観測距離）と定められている（国土地理院, 2008）。したがって、観測距離が100m程度の狭い観測領域では、一等水準測量で0.1cm以内、四等水準測量で0.6cm以内の誤差で測定することが求められる。水準測量には、水準儀の操作手1名、標尺の保持者2名の計3名が少なくとも必要であり、機器の取り扱いに慣れていないと1回の測定だけで10分近く時間を要することとなる。

狭い観測領域で実施される学生実験としての重力探査を想定した場合、重力測定精度が 10^{-7}m/s^2 程度、鉛直方向の重力勾配が $0.3 \times 10^{-7}(\text{m/s}^2)/\text{cm}$ であることから、標高の測定精度は四等水準測量相当でも十分と言える。また、高々3時間程度の短い授業時間内に作業を終える必要があること、参加可能な学生数が少ない場合があることなどから、測定精度をやや犠牲にしても一般的な水準測量とは異なる簡易な測定方法があれば便利と言える。本稿では、こうした考えに基づき、水準儀等を用いない簡易な比高計として水管式比高計を開発し、その性能評価を行った。

2. 水管式比高計の開発

風や流れのない静水面は重力に対して垂直な平面を形成し、連結している水面は同じ高さとなる。この性質を利用した測定機器に水管傾斜計が存在する。同傾斜計は水の入った2つの容器を水管で接続した構造をもち、各容器内の水位変化を測定することで2点間の比高変化を求め、地面の傾斜変化を正確に決定する。本稿では、この水管傾斜計を持ち運びできるように小型・軽量化し、任意の2点間の比高を容易に測定することができる「水管式比高計」を製作した。図1は、この水管式比高計の測定原理を示している。

水管式比高計では、まず、水管で接続された2つの円筒容器を同じ水平面上に設置し、各円筒容器内の水位を測定する（図1(a)）。このとき、2つの円筒容器の水面は同じ高さとなる。比高を測定したい地点に円筒容器のひとつを移動させると、移動先の標高に応じて円筒容器内の水位は上昇または低下する（図1(b)）。その水位変化は

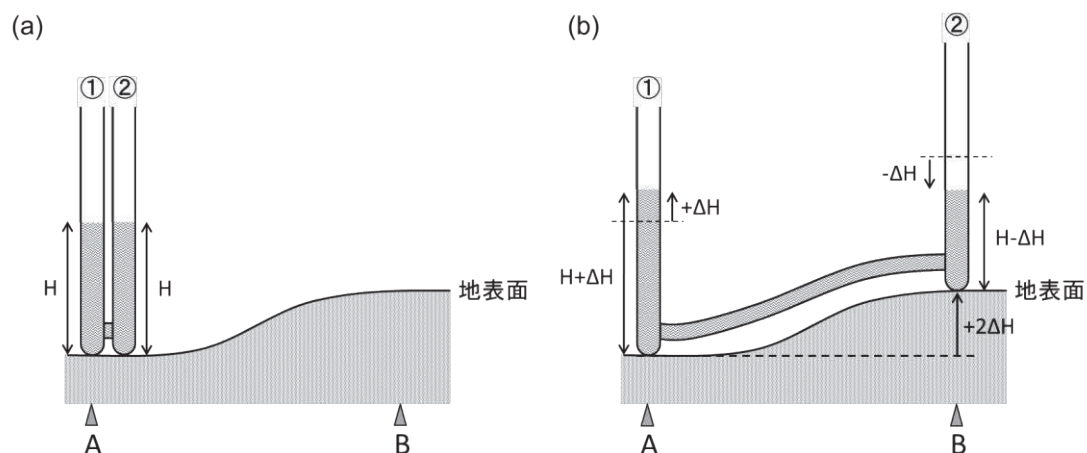


図1 水管式比高計の測定原理

(a) 円筒容器①と②は水管で接続されており、両者の水面は同じ高さ H となる。(b) 円筒容器②を点Bへ移動させると、各円筒容器の水面は上昇または低下する。その水位変化は同じ大きさであり、向きが異なる。円筒容器①の水位変化を ΔH とすると、点Aを基準とした点Bの比高は $2\Delta H$ と求められる。

いずれの円筒容器でも同じ大きさとなるが、変化の方向は異なる。元の地点に置いたままの円筒容器の水位変化を ΔH とすると、移動先の比高は $2\Delta H$ となる。したがって、原理的には、一方の円筒容器の水位変化を測定するだけで比高を求めることができる。ただし、実際の測定では、測定誤差を抑えるため、2つの円筒容器の水位変化を測定し、両者の差を求めることによって比高を決定することが望ましい。

図1に示した測定原理に基づいて、水管式比高計を製作した。図2(a)は水位を測定する計器部の概略図であり、図2(b)は実際に製作した水管式比高計の写真を示す。水管式比高計は、長さ70cm、内径0.7cmの透明な円筒容器を、長さ8m、外径0.7cmの透明なビニールホースで接続した構造となっている。円筒容器の下部には小さな穴が開けられ、その穴を覆うように円筒状の短いコネクタが横向きに組み込まれている。コネクタの一端は密封され、他端には圧力センサが接続されている。圧力センサとしては、メテオ電子製LM31を使用した。この圧力センサは70cmの水位変化を測定することができ、0.2cmの測定精度が保証されている。圧力センサからの出力は電圧計で受け取り、円筒容器の水位に対応する電圧値をデジタルパネルに表示するようにした。電圧計としては、秋月電子通商のデジタルパネルメータPM-328Eを用いた。この装置は電圧測定回路とその測定結果を表示するデジタルパネルが一体化したものであり、20Vレンジで1mVまで電圧測定値を表示することができる。

円筒容器は支柱となるL字型のアルミフレームに接着させ、三脚の中心軸に通した。三脚の上面には気泡管が着けられており、気泡管を確認しながら三脚の足の長さを調整することによって、円筒容器を鉛直に立てることができる。支柱には目盛テープが貼り付けられており、円筒容器内の水位を目視で読み取ることもできる。圧力センサは、地表面に接する支柱の下端から高さ21cmの位置に設定した。やや高め的位置に圧力センサを設置したのは、円筒容器内の水面ができるだけ高い位置にくるようにし、水位変化を目視しやすくするため、また、圧力センサが地表面からの熱の影響を受けにくくするためである。円筒容器の上端は開放されており、そこから水を注入することができる。注水時には水管に気泡が残らないよう、あらかじめ計器のひとつをやや高い位置に設置し、低い位置に置いた計器の円筒容器から少しずつ注水して、気泡を追い出すようにしながら水管を水で満たしていった。2つの計器を同じ水平面上に置いたとき、圧力センサからの水面までの高さが約35cmになるように注水量を調整した。

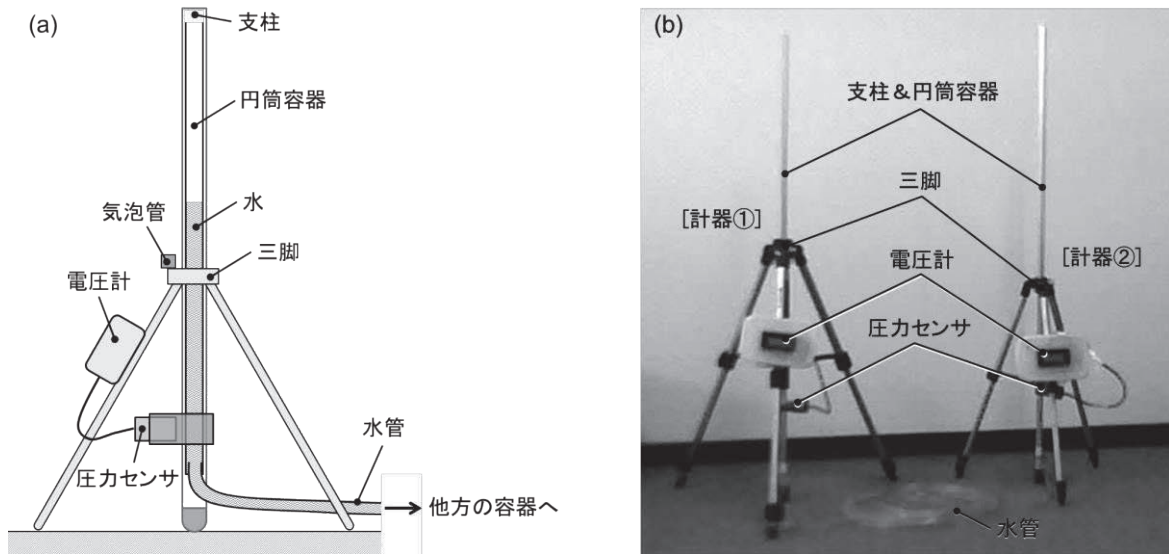


図2 製作した水管式比高計

(a) 水管式比高計の計器部の概略図。(b) 製作した水管式比高計の写真。

注水後の水管式比高計の重さは、計器部と水管を合わせて約 2.5kg であり、ひとりでも持ち運びすることができる。また、三脚を用いて円筒容器の鉛直を保持することから、測定作業もひとりで行なうことが可能となっている。

3. 水管式比高計の感度検定

製作した水管式比高計の感度を調べるために、図 2 (b) に示した計器①の円筒容器の上端から水を少しずつ注ぎ込み、計器①および②の水位を同時に約 2cm ずつ上昇させながら、圧力センサからの出力電圧を記録した (図 3)。このとき、各計器の水位は、支柱に貼り付けた目盛テープを用いて目視により読み取った。

圧力センサとして使用したメテオ電子製 LM31 は、70cm の水位変化を測定することが可能であり、水位が 0cm および 70cm のときにそれぞれ 0.5V および 4.5V の電圧を出力するとされている。今回の感度検定で水位を 6 ~ 72cm の範囲で変化させたところ、この範囲内の水位変化に対しては、圧力センサの出力電圧はほぼ線形に応答していることがわかった。なお、目視により読み取った水位は、圧力センサの中心位置を 0cm としている。

図 3 に示した水位と出力電圧の相関図に、直線の式を最少二乗的に当てはめたとき、その式の係数は表 1 のように求められた。圧力センサ LM31 は 0 ~ 70cm の水位に対して 0.5 ~ 4.5V の電圧を出力するとされることから、その感度は 17.5cm/V が期待される。表 1 に見られるように今回の感度検定では、計器①および②でそれぞれ 17.30 および 17.74cm/V と、ほぼ予測された値に近い感度が決定された。しかし、水位が 0cm のときの出力電圧を見積もったところ、計器①および②でそれぞれ -0.207 および +0.690V と求められ、計器①に関しては、期待される +0.5V から大きく外れた。これは、圧力センサで使用されている電気回路等の特性によるものと考えられる。

表 1 水管式比高計の計器の感度

水位変化に対する出力電圧変化の測定値に当てはめた直線の式 $A \times (\text{出力電圧}) + B$ の係数 A および B の値を示す。また、この直線の式から求めた水位 0cm のときの出力電圧の値も示す。

	傾き A: 感度 [cm/V]	切片 B: 電圧 0V 時の水位 [cm]	水位 0cm 時の電圧 [V]
計器①	17.30 ±0.02	3.59 ±0.02	-0.207 ±0.001
計器②	17.74 ±0.01	-12.24 ±0.01	0.690 ±0.001

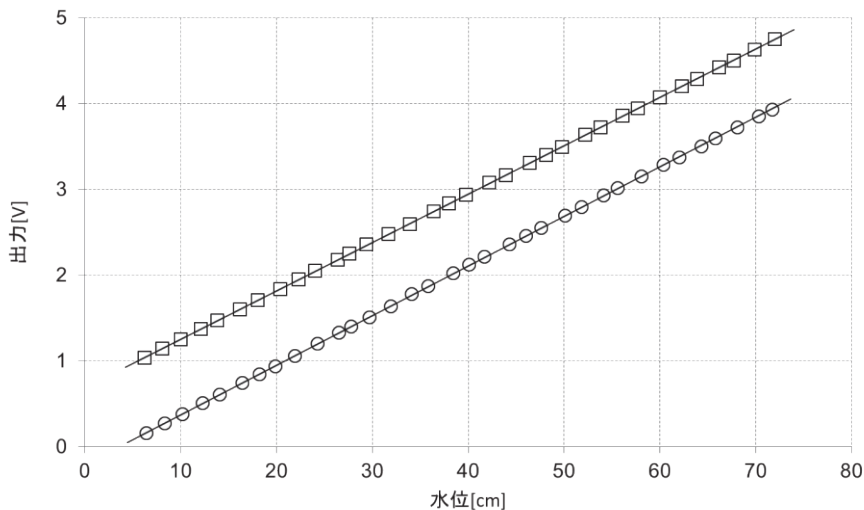


図3 水管式比高計の感度検定

○印および□印は、それぞれ計器①および②の水位に対する出力電圧の測定値を示す。図中の直線は、最小二乗法によって測定値に当てはめた直線を表す。

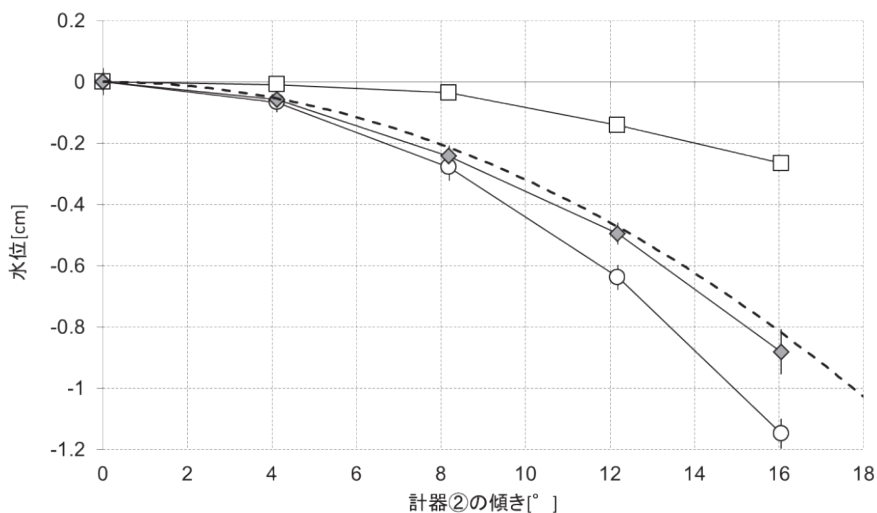


図4 水管式比高計の傾斜に対する応答特性

計器②を傾けた時の水管式比高計の水位測定値の変化を示す。○印および□印は、それぞれ計器①および②の出力電圧から求めた水位である。なお、この水位は、計器②を鉛直に立てたときの水位を 0cm としている。◆印は計器①と②の水位差であり、見かけ上の比高変化を示す。図中の破線は、圧力センサの高さ h が 21cm のときの(1)式のグラフを示す。

水管式比高計で2点間の比高を測定する場合、計器を鉛直に立て、水位が安定した後に出力電圧を記録する。このとき、三脚上面に設置した気泡管を見ながら三脚の足の長さを調整することによって、円筒容器の鉛直性を確認することになる。この操作は手動で行なわれるため、数度程度の傾斜が残る可能性がある。そこで、円筒容器の傾きを変えながら、圧力センサからの出力電圧を測定することによって、水管式比高計の傾斜に対する応答特性を調べた。図4は、計器②の円筒容器を鉛直方向から傾けていったときの水位変化の測定値を示す。ここでの水位は、

圧力センサからの出力電圧に表1の係数を当てはめて求めた値をさす。両計器の水位の差は、計器を立てた地点間の比高を示すことから、図4は、計器を傾けることによって見かけ上の比高変化が生ずることを示している。

円筒容器を傾けると、水面の形状が円から楕円に変化する。このとき、水面の面積が増大するため、図4の○印に見られるように水位が低下する。ただし、この水位の低下は2つの計器とも同様に生ずるため、この効果だけでは見かけの比高変化は現れない。図4の◆印で示された見かけの比高変化は、計器が傾くことによって圧力センサの位置が低くなることに起因する。計器を傾けたときの圧力センサの高さの変化 Δh は、次式で表すことができる。

$$\Delta h = h(\cos\theta - 1) \quad (1)$$

ここで、 h は計器を鉛直に立てたときの圧力センサの高さであり、 θ は計器の傾斜角を示す。

今回、製作した水管式比高計では、圧力センサの高さは21cmである。図4に見られるように、 h に21cmを当てはめたときの(1)式のグラフは、測定された見かけの比高変化をほぼ説明することができる。(1)式によると、計器を 5° 以内の傾きで保持した場合、計器の傾きに起因する測定誤差は0.08cm以下に抑えることができる。

4. 水管式比高計による試験的な比高測定

製作した水管式比高計の性能を評価するため、室内に高さが既知の階段を用意して比高測定を行なった(図5)。階段は6段からなり、一段の高さは2.07cmである。本測定では、まず、水管式比高計の計器2つを床面上に設置した後、同じ標高での出力電圧を測定し、表1の係数を用いて水位を求めた。次に、計器②を床面に残して、計器①を一段ずつ階段に上げてゆき、また、最上段に達した後、順次、階段を下りて行きながら、各段で同様に水位を測定した。さらに、計器①と②の役割を交代し、計器①を床面に残して、計器②を階段上で上下させながら水位変化の測定を続けた。図5に見られるように、階段に上げた計器の水位が低下するのに対して、床面に残した計器の水位は上昇しており、両者の水位変化は明確な負の相関をもっている。なお、計器①と②を同じ床面に設置した状態で、両者の水位に0.2cm程度の系統的なずれが見られる。これは、各計器に貼り付けた目盛の基準位置のずれに起因すると考えられる。

水管式比高計では、計器①と②で測定された水位の差から比高を求める。図6は、水位測定値から求めた高さを実際の高さと比較した結果である。水位測定値から求めた高さはほぼ実際の高さと一致しており、高々0.2cm程度のずれが生じているにすぎない。ただし、そのずれは正の値に偏っており、水位測定値に基づく高さは系統的に高く求められている。この系統的なずれは、計器の傾きは 5° 程度で制御されている場合の測定誤差とほぼ一致することから(図4)、計器の鉛直性の問題に起因する可能性が考えられる。系統的なずれを取り除いたのちの高さ測定値のばらつきは、ほぼ $\pm 0.1\text{cm}$ の範囲内に収まっている。以上のことから、本稿の水管式比高計の測定精度は数mm程度であると考えられる。

距離が長かったり、勾配の激しい路線上の標高を測定する場合、路線を多くの区間を分けて比高測定を繰り返す必要がある。このとき、系統的なずれが存在することは誤差の蓄積を促す結果となり、極めて大きな測定誤差が発生する危険性がある。そのため、鉛直性を確保しやすい、または、鉛直性の影響を受けにくい構造に作り替える必要がある。本稿の水管式比高計では、三脚の足の長さを調整することによって、計器を鉛直に立てるようにしている。この方法では傾斜の微調整が難しいことから、ネジによる傾斜補正機構を三脚に組み合わせることによって、鉛直性を確保しやすい構造に作り替えることが考えられる。

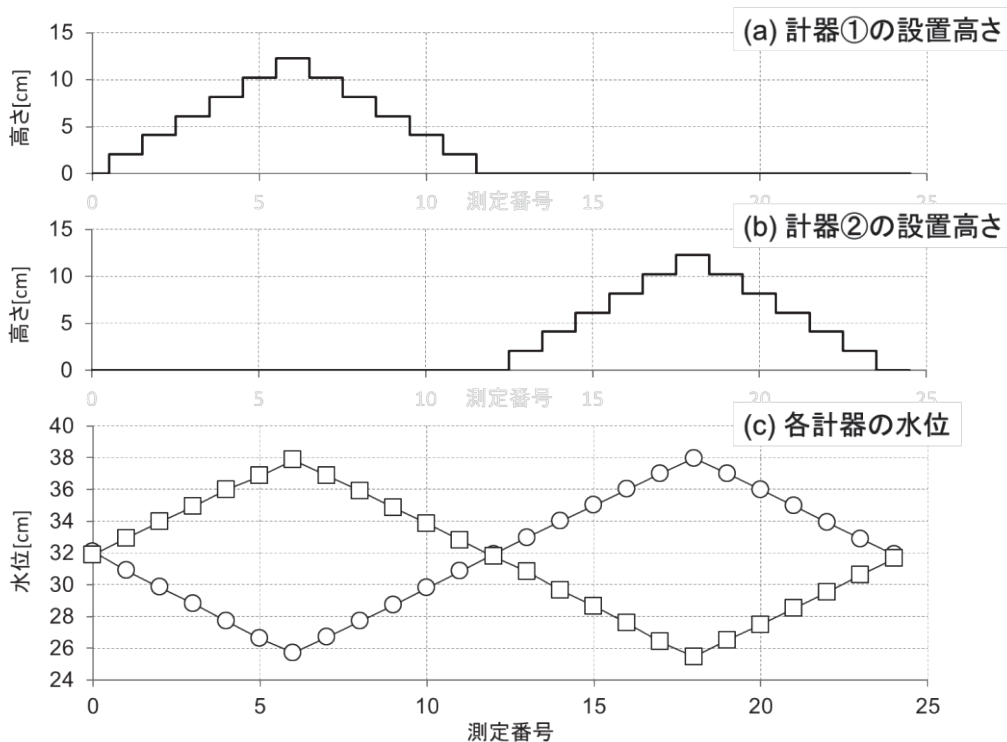


図5 水管式比高計の比高測定試験

水管式比高計の計器のひとつを階段に上げ、各計器の水位を測定した。(a)および(b)は、それぞれ計器①および②の高さの変化を示す。(c)の○印および□印は、それぞれ計器①および②の水位変化を示す。

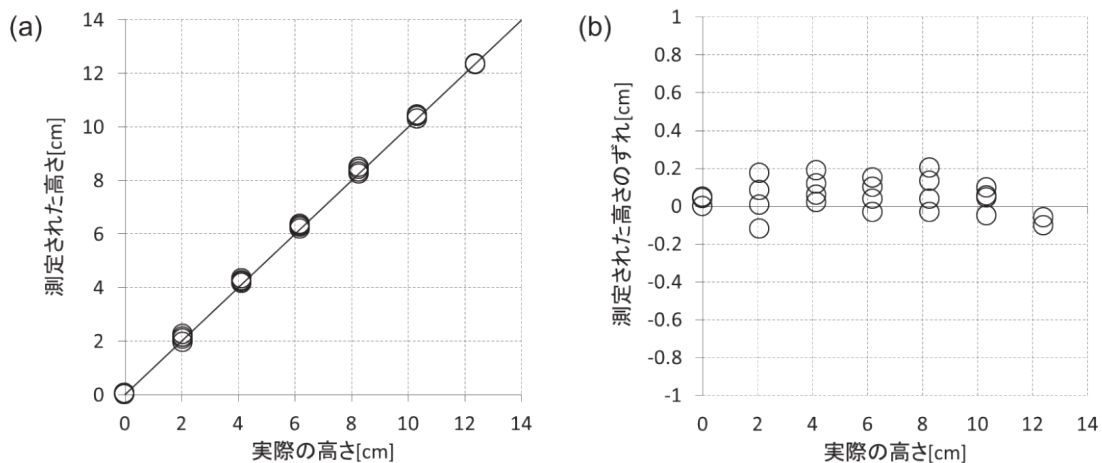


図6 水管式比高計で求めた階段の高さと実際の高さの比較

(a) 水管式比高計の水位測定値から求めた高さを縦軸、実際の高さを横軸として描いたグラフ。実線は原点を通り、傾きが1の直線であり、測定値はこの直線上にのることが期待される。(b) 水位測定値から求めた高さと実際の高さのずれを示す。

また、圧力センサを支柱の最下部に設置することで、計器の傾きの影響を受けにくくすることも考えられる。圧力センサを現在の高さ 21cm の位置から高さ 5cm の位置へ下げた場合、計器の傾きを 5° 以内に制御すれば、水位を 0.02cm 以下の誤差で測定することができる。機器の操作になれていない人でも取り扱うことのできる簡易な測定装置を目指すのであれば、こうした傾斜の影響が現れにくい構造にすることが望ましいと言える。

5. まとめ

学生実験等で実施される重力探査では、重力測定に加えて、短い授業時間の中で測定地点の標高も測定する必要がある。一般には、水準儀と標尺を用いた水準測量を行なうこととなるが、水準儀の取り扱いや標尺の鉛直性の保持などの作業に慣れていない場合、測定に長時間を要することになる。そのため、取り扱いが容易で簡易に標高を測定することができる水管式比高計を製作することとした。水管式比高計は、鉛直に立てた 2 つの円筒容器に水を入れ、両者を水管で接続した構造となっている。円筒容器を上下に動かしたとき、水が水管を通過して移動することによって円筒容器内の水面は常に同じ高さに維持される。この性質を利用し、2 つの円筒容器の水位の差を測定することによって、2 点間の比高を求めることができる。本稿の水管式比高計では、地表面から高さ 21cm の位置に圧力センサを設置し、円筒容器内の水位変化を測定するようにした。ここで使用した圧力センサは 70cm の水位変化を測定することができ、17.5cm/V の感度を有するとされている。実際、円筒容器内に注水しながら水位と出力電圧を測定したところ、ほぼ公称通り 17.5cm/V 程度の感度が求められた。圧力センサを地表面から離して設置したことにより、計器が傾くと見かけの比高変化が生ずることになる。ただし、計器の傾斜を 5° 以下で制御することによって、比高の測定誤差を 0.1cm に抑えることができる。製作した水管式比高計の性能を評価するため、階段状の構造物を利用して比高測定を実施した。測定された高さは実際の高さと 0.2cm 以下の誤差で一致したことから、測定精度は数 mm であると言える。ただし、計器の傾斜に起因すると考えられる系統的なずれが見られることから、圧力センサの設置高さを現在の 21cm から下げるなど、計器の傾きの影響が現れにくい構造に作り替えることを検討する必要がある。

参考文献

- [1] 国土地理院 (2008) : 作業規程の準則「第 3 章 水準測量」, http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/pdf/H25_junsoku_honbun.pdf, 119pp.
- [2] 萩原幸男 (1982) : 測地学入門, 東京大学出版会, 第 5 章「高さと重力」, 78-104.
- [3] 長谷川昌弘・川端良和・大塚久雄・住田英二・藤本吟蔵・道廣一利・武藤慎一・吉岡尚也 (2004) : 基礎測量学, 電気書院, 第 7 章「水準測量」, 147-173.