

高さの計測と地球の形

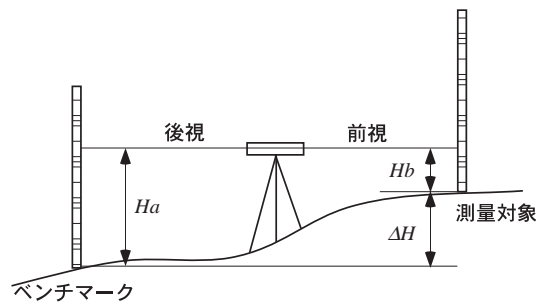
1 水準測量

1.1 直接水準測量

高低差は、レベル(水準儀)と呼ばれる機器を用いて計測するのが普通である。このレベルは、2点間の高低差を計測できる。レベルに据え付けられた視準用の望遠鏡は、水平方向にしか回転しない。そこで下図のように、二つの測点にスタッフ(標尺)とよばれる目盛りのついた物差しを鉛直に設置し、測点の間にレベルを据え付け、それぞれの標尺の目盛りを読み取れば、2点間の高低差が算出できる。このように対象物に直接標尺をおいて測量する方法を直接水準測量と呼んでいる。

$$\Delta H = H_a - H_b \quad (1)$$

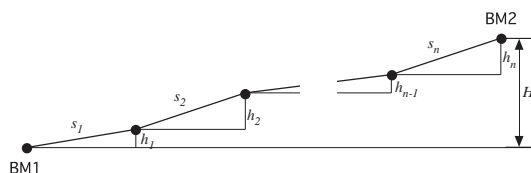
ここで、水準測量の出発点となる基準点は、ベンチマークと呼ばれ、BM と略されて使われることが多い。またレベルを設置し、ベンチマーク側のスタッフを視準することを前視、測量対象側のスタッフを視準することを後視と呼んでいる。



水準測量の原理

見通しがきかなかつたり、標尺の長さ以上に高低差が大きい場合には、1度に計測するのではなく何回かに分割して計測しなければならない。また、水準測量においてもトラバース測量と同様に多点観測を行うことが一般で、閉合差をみて計測の妥当性を判断し、その閉合差によって誤差調整によって各点の補正量を求める。下図は、高低差が H の BM1 から BM2 へ向かって $n - 1$ 個の点を設けて水準測量を実施した場合の例を模式化したものである。 h_i は、各測点間での高低差を示している。実際の高低差 H と水準測量によって得られる高低差との差が閉合差となり、この閉合差を Δ とすると、以下の式で表すことができる。

$$\Delta = H - \sum_{i=1}^n h_i \quad (2)$$



各点における補正量は，水準測量の路線延長距離に比例して大きくなると仮定できる．つまり，BM1に近い所は補正量が小さく，BM2に近づくに連れて Δ に近い補正量と予測される．したがって，各測点間の距離が s_i とすると，補正量 δ_i は，以下の式で計算できる．

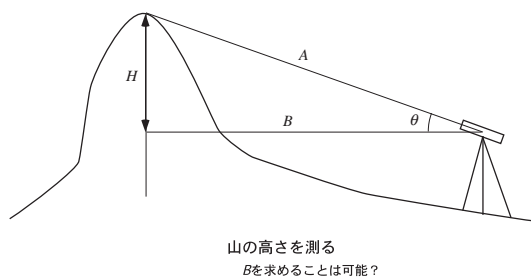
$$\delta_i = \frac{\sum_{j=1}^i s_j}{\sum_{j=1}^n s_j} \Delta \quad (3)$$

1.2 間接水準測量

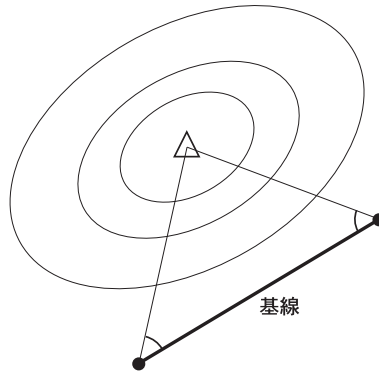
崖等が存在する急峻な山の高さなどは，標尺を置いての直接計測は極めて困難である．したがって，このような場合は間接的に計測する間接水準測量が必要となる．間接的に測るには，下図のようにトランシットなどで，対象物の仰角 θ を計測すれば良い．あと必要な計測は，対象物までの水平距離 B か，斜距離 A で，高さ H は，以下の式で計算できる．

$$H = B \tan \theta \quad (4)$$

$$H = A \sin \theta \quad (5)$$



山などの場合，1箇所から水平距離 B を計測するのは極めて困難である．そこで水平距離 B は，下図のように基線を設け，三角測量によって二箇所から計測することによって求める．



2 高さの基準と地球の形

ここで、高さとは何かについて考えてみたい。地球は平面ではないので、高さといってもその意味は非常に深い。

2.1 高さの基準

2.1.1 水準点

三角点は、平面的な位置の基準点であった。この水準点は、高さの基準点といえる。したがって、標高は水準面からの法線上の距離と定義される。日本の水準原点は国会議事堂のそばにあるが、東京湾の平均海面に基づいて測定されたものである（測地水準点）。そして、全国の海岸線に沿って、また幹線道路に沿って、たくさんの水準点が設置されている。

2.1.2 水準面

水準点は海岸沿いに設置されているので、沿岸部での高度計測は比較的簡単であるが、内陸部になると厄介な問題となってしまう。海岸部の水準点から丹念に測量をしていけば単純に標高が求まると思われがちである。しかし、計測区間が長くなると大気による影響や地球の丸みの影響を考慮する必要がある。海岸部から離れるに伴って誤差が積み上げられてしまう。特に海などを挟んでの計測は非常に難しい。したがって水準面という基準をしっかりと設けておく都合が良い。

2.2 地球楕円体

地球が真の球形であれば、同じ高さの点は、地球の中心からの距離も同じといえる。しかし、地球の形は真の球ではない。地図を作る上では、地球の形は回転楕円体と仮定している。地球は自転の影響で、極方向に比べて赤道方向の方が約 21 長い回転楕円体に近い形をしている。したがって地球に最も近い回転楕円体の定数を決め、その回転楕円体を水準面とみなすこともできる。

地球楕円体については、計測が非常に困難であったため、その決定自体が学問領域であった。1800年代より楕円体の定数（赤道半径と逆偏平率）について議論がなされている。ところが近年、人工衛星による計測が可能になったことをきっかけに楕円体の計測が非常に精密にできるようになった。米国では、既に新しい計測による WGS84 という楕円体常数を用いており、多くの国々がそれに同調している。ところが、日本では、2000 年までベッセル (Bessel 1841) 楕円体を用いていた。かなり古い定数を用いており、精度は今となっては悪いと言わざるを得ない。その差は、400m 程度である。そこで 2000 年に楕円体の変更がなされた。測地系 2000 と呼ばれ、GRS80 という楕円体常数を用いている。WGS84 との差は、数 cm なので、WGS84 との併用に関して実用上は差し支えない。

2.3 ジオイド

地球楕円体を水準面とみなしても少々不都合が生じる。海岸線の標高が 0m とならないのである。海岸の堤防などを設計・施工する際には標高を計測しなければならないが、海岸線が 0m となっていた方が都合が良いといえる。しかし厄介なのは、海面を計測することによって求めた基準でも、少々問題が含まれている。海面の高さは重力の影響を受けており、その重力は地球規模で見ると一様ではない。したがって、ある海域で得た水準面と、違う海域で得た水準面とは一致しないのである。つまり地球の形はでこぼこしている。地球に陸地はなく、海面で全て覆われていたとしてもでこぼこしている。その高さは、地球の重力に左右されている。

すべての海域の高さを基準とすべく、高さの基準として現在最も現実的な水準面がジオイドである。ジオイドとは、地球上が全て海だったとしたときの海面の形といえる。学問的な言葉に置き換えれば、地球重力の等ポテンシャル面のうち平均海水面に一致するものといえる。このジオイドは地球規模で見ると重力異常の影響で意外と凹凸が有り、最高点と最低点の高さの差は 150m に達する。

ジオイド面においては、すべての海岸線の標高は 0m となり、現実世界と一致していることで狭い範囲での計測には便利な基準といえる。ジオイド面という概念は、非常に合理的であるが、その精密な計測は非常に難しい。従来は天文観測や重力測定でジオイドを推定して来た。最近では、人工衛星を用いて計測している。人工衛星の運動は重力の影響を受けており、それを解析すれば重力ポテンシャルを求めることができる。また、人工衛星から海面までの距離を計測することによっても、海面におけるジオイドは決定できる。