

## 第四章 高さの計測

1. 高さと標高
2. 水準点と水準面
3. ジオイド
4. 測量による標高の計測
5. 地球楕円体
6. GPSによる標高の計測

### 問題

1. 地球を半径6371012mの球体と仮定する．直線距離2kmだとのくらい地球の丸みの影響を受けているか計算しなさい．
2. 直交座標系で表された高知の位置(-3648.0, 3912.0, 3473.7) 単位kmとロサンゼルス(ロサンゼルス)の位置(-2612.3, -4524.6, 3658.3)がある(何れも海拔0m)．これに関して次の問いに答えなさい．なお，地球は半径6378 kmの球形とする．
  1. 高知-ロサンゼルス間の直線距離を求めなさい．
  2. 高知-地球中心-ロサンゼルスのなす角度の余弦を求めなさい．
  3. 高知-ロサンゼルス間の球面上の距離を求めなさい．
3. 備讃瀬戸大橋は東経133° 49' 52.09" 北緯34° 21' 1.67" と，東経133° 49' 11.06" 北緯34° 23' 5.4" が結ばれている．この橋はどの程度地球の丸みの影響を受けているか計算しなさい．なお地球は，半径6,378,140mの球形とする．

# 高さと標高

## 1. 高さと標高の違い

- 高さとは曖昧な表現で、木の高さ、ビルの高さ、山の高さなどと表現されるが、基準が一定ではない。木やビルは、地面からの高さを表すのが普通であるが、山の高さとなると海からの高さを想像する。一方山の高さは、標高とか海拔と呼ばれ、固有の名称を持っている。  
標高は、水準点・水準面というはっきりとした基準が設けられており、厳密な意味で使われる。
- 厳格な意味を持つ標高であるが、その計測は困難を極める。それは、地球が平面でないことに起因する。また細かく見れば、大気や重力の影響も無視できない。

## 2. 標高計測の重要性

- 標高のデータは非常に重要である。地形解析はもちろん、流出解析に応用できる。特に山間部の土木工事においては、標高のデータがなければ路線計画すら建てられない。

## 3. 標高の表現法

- 地球中心からの距離
- 地球楕円体からの高さ
- ジオイドからの高さ

## 高さの基準

### 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. 水準面とは？

- 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り、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かなければならない。
- 海面を計測することによって求めた基準は、少々問題が含まれている。海面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な力とはなっていない。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。

## 水準面

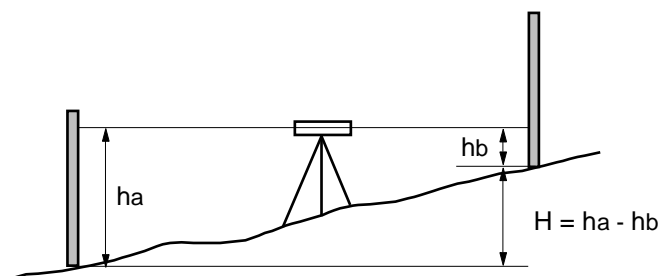
### 1. ジオイド

- 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．

## 測量における標高の計測1

### 1. 直接計測する

- 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．
- 2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する．2点の間にレベル（水平に保った望遠鏡と考えれば解りやすい）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（下図参照）．

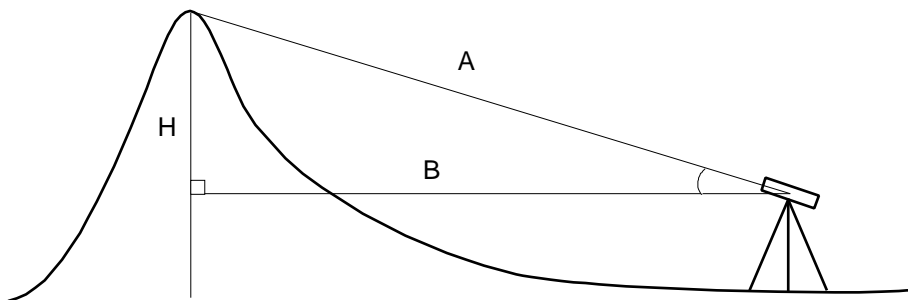


- 見通しがきかなかったり，標尺の長さ以上に高低差が大きい場合には，1度に計測するのではなく何回かに分割して計測しなければならない．

## 測量における標高の計測2

### 1. 間接的に計測する

- 急峻な山の高さなどは、直接レベルでの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ことが多い。
- + 間接的に測るには、水平に据え付けたトランシットなどで、対象物の仰角を計測すれば良い。あと必要な計測は、対象物までの水平距離か、斜距離である。
  - 水平距離が解れば高さHは： $B \tan$
  - 斜距離が解れば高さHは： $A \sin$



- 山などの場合、水平距離を計測するのは困難である。そこで、光波測距儀などを用いて斜距離を精密に計測すれば、簡単に正確な高さを求めることができる。

### 2. 斜距離を使わず山の高さはどのように測るか？

- 斜距離を測れるようになったのは、光波測距儀が開発されたからのごく最近である。それでは、それまではどのようにして山の高さを計測していたのであろうか？

# 地球楕円体

## 1. 地球楕円体

- 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長い回転楕円形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。
- 回転楕円体を水準面とみなすと、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。

## 2. 地球楕円体の種類

- ところで、水準面として回転楕円体を用いることは好ましくないが、測地経緯度は回転楕円体を用いて表している。この事は、第2章でも少々触れた。ここで、地球楕円体の種類について述べておく。
- 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、ベッセル（Bessel 1841）楕円体を用いている。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えない。変更に伴う混乱を避けるためにそのままにしていた訳である。それがとうとう2000年に楕円体の変更がなされた（測地系2000）。

各楕円体の定数

楕円体名称	赤道半径 (m)	逆偏平率 (1/f)
Bessel 1841	6,377,397.155	299.1528128000
WGS84	6,378,137.000	298.2572235630
測地系2000	6,378,137.000	298.2572235630

$f = (a-b) / a$   
 a: 赤道半径  
 b: 極半径

## GPSによる標高の計測

### 1. GPSで計測される標高とは？

- GPSは、人工衛星を利用した測位システムであることは既に述べた（第3章）。GPSでは、まず直交座標系で位置(X, Y, Z)を計測する。その後、地心からの計測地点までの距離が計算され、地球楕円体との差をもって標高としている。
- つまりGPSにおいて水準面は、地球楕円体を利用している。したがって、日本の測地水準面とは合致しない。

### 2. GPSで計測される標高の補正

- + GPSで得た標高は、実際の測地水準面と合致していないため補正する必要がある。現在以下に述べる2つの方法による補正が提案されている。
  - GPSにより得た計測結果を既にある水準点の標高を利用して補間する方法。  
この方法は現実的で、現在最も多く採用されている。
  - ジオイドのモデルを数学的に表現しておいて、GPSにより得た計測結果と比較する方法。  
この方法はモデルの精度が高ければ局所的には有効だが、広域での適用は難しい。