

## 第2部 衛星測位による標高の観測と水準測量

従来、水準測量によって時間と労力をかけて測られてきた土地の高さ(標高)が、衛星測位により迅速かつ簡便に求められる時代が来ています。ただし、そのためには正確なジオイド(≒平均海水面)のモデルが必要となり、国土地理院はその整備のために「明治以来の標高の仕組みを大転換する」として2019年度から航空重力測量を実施する計画です(参考文献1)。

### 2.1 衛星測位と標高

#### 2.1.1 標高の定義と実現

現在の日本の高さは、測量法と同施行令により東京湾平均水面を基準面(標高=0m)として測られたものです(図2.1)。平均水面を地上に固定するために日本水準原点が設置され、それを基準として日本全国に水準点が設けられています。図2.2に示す国道沿いに配置された一等水準測量網が、明治16(1883)年から当時の陸地測量部により組織的に開始され、それ以降9回余りの繰り返し測量が行われてきました(全国を改測するには約10年と膨大な時間が要求されます)。水準路線は主要国道沿いに約2km間隔で設置されていて、現在約1.7万点が国土地理院によって管理・運営されています。これらの水準点を基準として各地の高さが決められているのです。

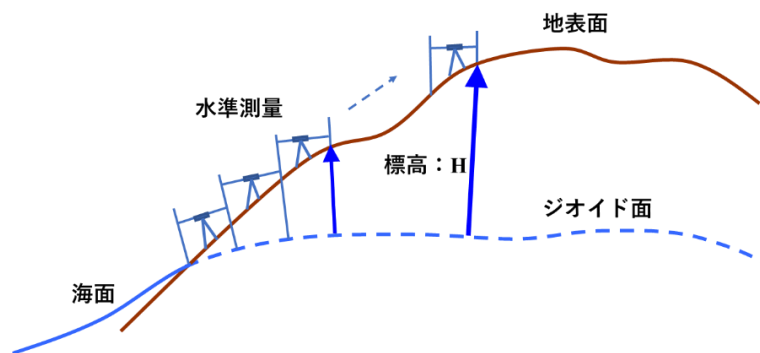


図 2.1 標高と水準測量

(厳密には、標高は水準測量から得られた高さに楕円補正又は正標高補正を加えたものです。)

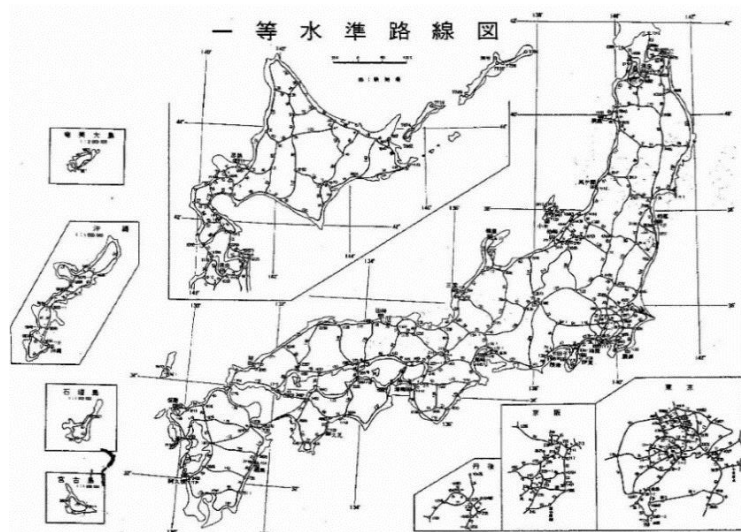


図 2.2 一等水準測量路線(国土地理院による)

## 2.1.2 衛星測位による標高

一方、衛星測位によっても高さの計測は可能です。しかし、衛星測位で直接得られる高さは準拠楕円体からの高さ(楕円体高  $h$ )であり(図 2.3)、そのままでは我々が日常使っている標高とは異なります。楕円体高から標高を得るには、ジオイド(≒平均海面)と準拠楕円体との関係=ジオイド高、が必要になります。ジオイドとは重力の等ポテンシャル面のうちで平均海面を最も良く近似するものと考えられています。ジオイドを知るためには、したがって陸上及び海上での重力データが必要になります。

国土地理院は、重力データより求めたジオイドに衛星測位と水準標高との差から得られた実測ジオイドを組み合わせ日本の高さの基準に適合するように決めた日本のジオイド 2011 (GSIGEO2011) を公表しています。

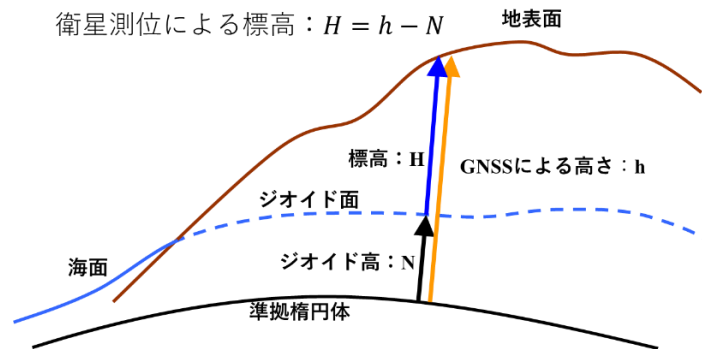


図 2.3 衛星測位による高さジオイド

## 2.1.3 公共測量

国土地理院は 2017 年に、衛星測位を活用した測量の効率化として「GNSS 測量による標高の測量マニュアル」を策定しました。それによると、水準点が近くになくとも電子基準点を既知点とした GNSS 測量による高さとのジオイド 2011 を用いて 3~5cm の精度で 3 級水準点が設置でき、従来の水準測量のみを使用する方法に比べ効率的に標高の測量が実施できるようになっています。ただし、この方法は、衛星測位の高低差を従来の水準測量の代用としたもので、本来の衛星測位の機能を活用したものではありません。

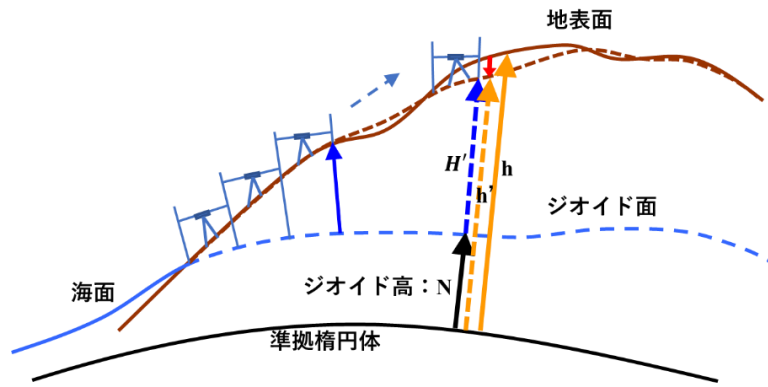
## 2.2 新しい標高体系

### 2.2.1 現在の標高体系の問題点

上でも述べたように高さの基準となる 1 等水準点の標高は水準測量で決定されています。しかし、地震などにより地殻変動が起こり土地の高さが変わってしまった場合は、測地成果を修正するため水準測量をやり直さなければなりません。水準測量による成果の修正には労力と時間がかかるので、復興のために今現在の標高が必要な住民や自治体の要望にすぐに応えられない場合もあります(例えば、参考文献 2)。

衛星測位を使えば、このような課題を解決することができます。標高は図 2.3 に示したように衛星測位から求められ、重力ジオイドは地殻変動の影響をほとんど受けないため、正確なジオイド高があれば衛星測位により即時に正確な標高を得ることができます(図 2.4)。ただし、現在の日本のジオイドに使われている重力データは大部分が古く、また山岳部や沿岸海域など観測が困難な地域にデータの空白域が存在しています。そこで、国土地理院は 2019 年度から 2024 年までの 6 年計画で航空重力測量を中心として全国の重力データを整備する計画を発表しました(参考文献 1)。全国の航空重力測量を実施し、そのデータを基に精密な重力ジオイド(目標精度 3cm)が計算できれば、衛星測位を利用した標高決定が可能となります(図 2.5)。

衛星測位による標高:  $H'_{GNSS} = h' - N$



地殻変動による $h \rightarrow h'$ は、衛星測位ですぐにわかるので  $H'_{GNSS}$ は即時に決定可能だが、水準測量では時間がかかる。

図 2.4 地殻変動と衛星測位による標高決定

参考：地上重力値は、地殻変動の影響を受けます。ジオイド高は、ジオイド上の重力異常の全地球の積分（ストークス積分）から求まり、ジオイド上の重力異常は地殻変動の影響をほとんど受けません。つまり、ジオイドは地殻変動の影響をほとんど受けないという重要な物理的性質をもっています。

明治以来の「標高」の計測の仕組みを抜本的に見直し、GPSや準天頂衛星等でいつでも・どこでも・誰でも迅速に標高が決まる社会の構築に向けて、その基盤となる標高の基準を整備するため航空重力測量を実施します。

航空重力計の搭載・検査(イメージ)      全国の航空重力測量を実施      精密な標高の基準(イメージ)

【効果】

- 【強靱性】 災害後の迅速な復旧・復興に必要な標高の提供
- 【経済性】 標高体系の維持管理コストが削減
- 【社会性】 公共測量作業の生産性向上

衛星測位システム (GNSS) を利用した効率的な測量で標高を決定

図 2.5 航空重力測量（国土地理院より）

## 2.2.2 新しい高さ基準座標系と測量法

現在の標高は、①水準測量による地殻変動の影響を考慮しない**スタティック**標高系、②公共測量作業規程の準則の基準点測量における元期の標高で表示する**セミ・ダイナミック**標高系の2種類が使われています。人間生活に必要な高さは現時点の水面の高さに対応した値、つまり**ダイナミック**な高さですから、重力ジオイドを基準とし水準測量に頼らない標高決定の仕組みはこのダイナミックな高さを実現するもの、新たな高さ基準座標系の構築に他なりません。現在の測量法は水平座標に関しては世界測地系を取り入れた改正が行われましたが、高さに関しては明治以来変わっていません。位置の情報が私たちの生活に活用されるようになるためには測量法の支えが必要ですので、測量法（及びその施行令）も新しく実現さ

れる座標系に合わせた改正が必要となるでしょう。

具体的には、

- ① 施行令に、緯度・経度の他に楕円体高を規定
- ② 法第 31 条の地震等による成果の修正の他に定常的地殻変動に対する成果の修正の追加
- ③ GRS80 楕円体の物理定数である地球の質量及び自転角速度を規定

が必要になると思います。これらの改正の理由としては、①は、衛星測位による測量データの 3 次元処理から求めた楕円体高からジオイド高を使って標高に換算できるため、この標高の法律的根拠が明確になるからです。②は、現時点の標高という概念に定常的地殻変動の修正を明確に規定するものです。③は、標高を得るために必要な楕円補正又は正標高補正は GRS80 楕円体の物理定数から導かれた正規重力に基づいているため、楕円補正又は正標高補正の出所を明記するという事です。

### 2.3 今後の展望と対策

このような標高の改訂は、他国でも実現あるいは実現されつつあります。ニュージーランドはすでに実現、米国が 2022 までに整備の予定となっています(表 2.1)。

表 2.1 ニュージーランドと米国の高さ基準系

	ニュージーランド	米国
高さ基準系	NZVD2016 (ニュージーランド鉛直基準系 2016)	NAPGD2022 (北米及び太平洋地球重力ポテンシ ャル基準系 2022)
ジオイド	NZGeoid2016	GEOID2022
その他		GRAV-D プロジェクト (航空重力観測等)

また、国際的にも高さに関し ITRF (国際地球基準座標系) と同じように統一された基準が必要という動きがあり、IHRIS(国際高さ基準座標系)の概念がまとめられています(参考文献 3)。それによると、鉛直座標系の基準面は、ポテンシャル値が  $W_0$  (ジオイド上) となる等ポテンシャル面 ( $W_0 = 62636853.4m^2s^{-2}$  とする。この値は GRS80 楕円体面のポテンシャル  $U_0$  です。)、となっています (図 2.6)。これは各国の近傍の平均海面とは異なるので、IHRIS が実現された場合は、世界基準との差を正確に算出する必要があるでしょう。もし日本が世界標準となるポテンシャル値を採用した場合、現在の東京湾平均海面から  $W_0$  に標高基準を変更するか世界標準との差を与えることになり、GRS80 楕円体の物理定数 (自転角速度、地球の質量や形状) を施行令に追加規定する必要もあるでしょう。

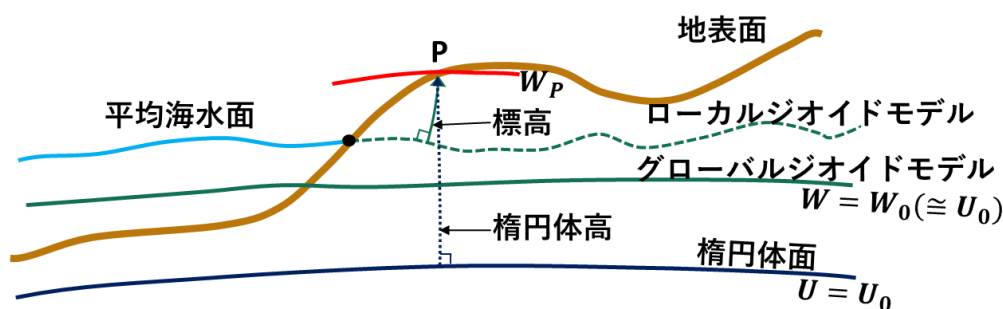


図 2.6 IHRIS の基準面 (グローバルジオイド:  $W = W_0$ )

## 参考文献

1. 矢萩智裕：明治以来の標高の仕組みを大転換，<http://www.gsi.go.jp/common/000201333.pdf>.
2. 河北新報，2015年8月10日.
3. 座標系の話，アイサンテクノロジー株式会社，47p (2018).

(文責：技術顧問 松坂茂)