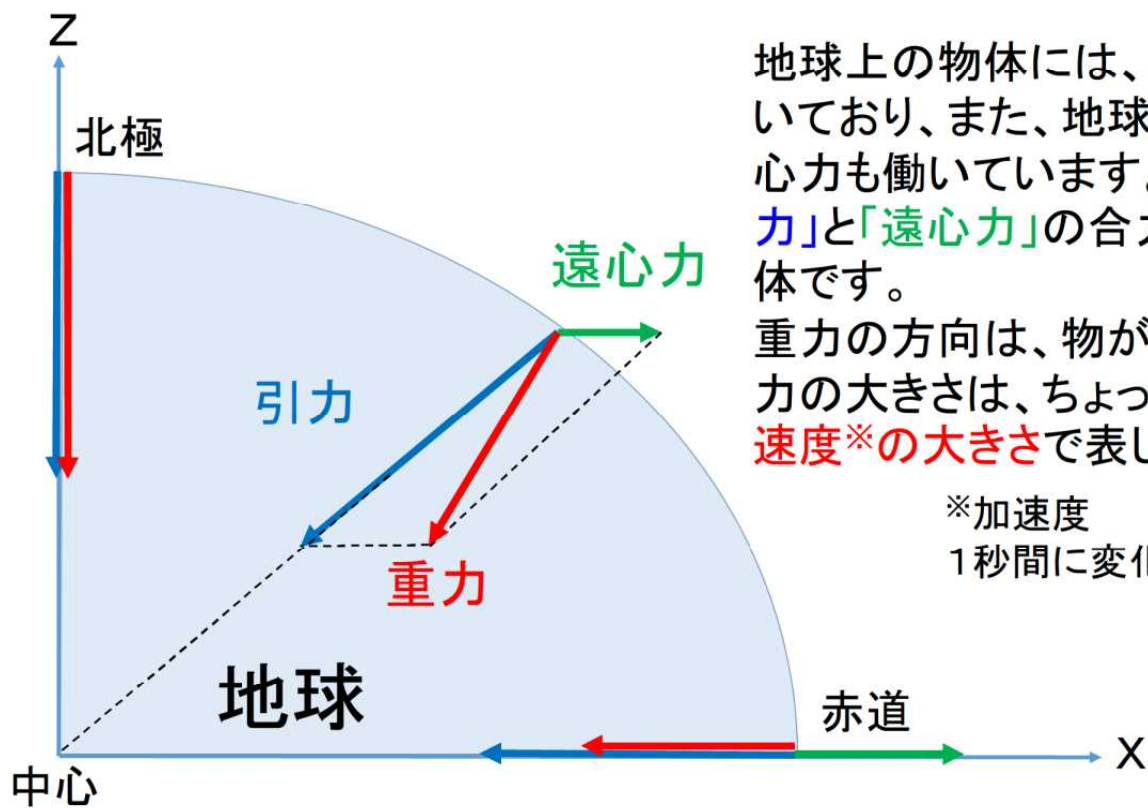


重力ってなに？

重力の正体



地球上の物体には、地球の引力が働いており、また、地球の自転による遠心力も働いています。この地球の「引力」と「遠心力」の合力が「重力」の正体です。

重力の方向は、物が落ちる方向、重力の大きさは、ちょっと難しいけど**加速度※の大きさ**で表します。

※加速度

1秒間に変化する速度の変化量

ガリレオとニュートンを知っている？



ガリレオ・ガリレイ (1564-1642)
天文学の父 **Galileo Galilei**



アイザック・ニュートン
(1642-1727)

重力加速度の表し方

(地上の重力加速度)

$9.8 \text{ [m/s}^2 \text{]}$

$= 980 \text{ [cm/s}^2 \text{]} = 980 \text{ [Gal]}$

$9.8 \text{ [m/s}^2 \text{]}$ は、落下速度が1秒ごとに秒速9.8m速くなっていくことを示す。

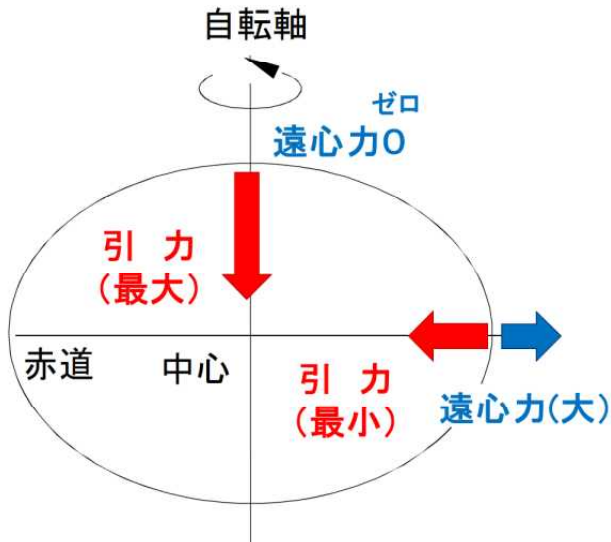
画像出典: <https://commons.wikimedia.org/wiki/>

加速度の単位**Gal**は、ガリレオ・ガリレイにちなみます。ガリレオ・ガリレイは、「ピサの斜塔」から2つの玉を落とし、物体の落下速度は その物体の重さによらず一定であることを見せました。ニュートンは万有引力の法則を発見しました。

重力加速度は場所によって違う1

(重力の性質 その1)

北極や南極に近づくほど重力加速度が大きくなり、赤道に近づくほど重力加速度が小さくなります。



重力は、引力と遠心力の合力です。
赤道では北極や南極よりも約0.5%
小さくなります。

北極・南極

引力(大) - 遠心力(ゼロ) = 重力加速度(大)

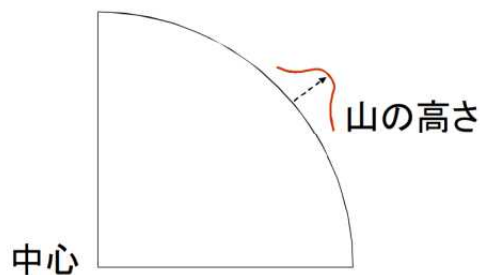
赤道

引力(小) - 遠心力(大) = 重力加速度(小)

重力加速度は緯度によって違います。

(重力の性質 その2)

標高が高いところほど重力加速度が小さくなります。



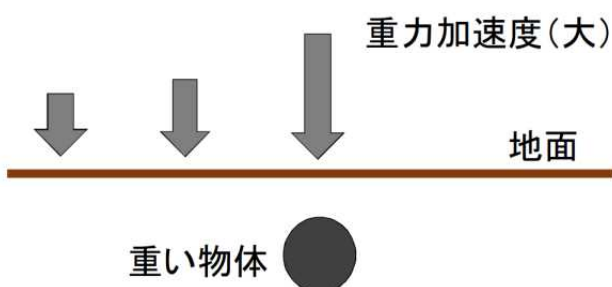
山の高さだけ地球の中心から遠ざかる
ため引力が小さくなり、重力加速度も小
さくなります。

富士山の重力は、ふもとの三保の松原
よりも0.09%小さくなります。

重力加速度は高さによって違います。

(重力の性質 その3)

地下に重い物体があると重力加速度が大きくなります。



地下にある重い物体は引力が強く働き、
真上の地上では重力加速度が大きくな
ります。

重力加速度は地下の物体の重さに
よって違います。

重力加速度は場所によって違う2

北海道札幌と沖縄石垣島、富士山頂の重力加速度は？



緯度	経度	標高	推定重力値
43° 04'04".1	141° 21'02".2	18.000 m	980476.0 mGal



緯度	経度	標高	推定重力値
24° 20'15".9	124° 09'22".1	1.000 m	979007.9 mGal



緯度	経度	標高	推定重力値
35° 21'38".7	138° 43'38".6	3776.000 m	978866.4 mGal

重力加速度は北が大きく南は小さいことがわかります。また、富士山頂は、石垣島よりも緯度が約11度も北なのに、標高が高いことから重力加速度が小さいということがわかります。



重力加速度は生活に欠かせません！

重力加速度は何に役立つの？

□ 正確な標高を知る

- ・標高の基準である平均海面（ジオイドという）の凸凹がわかる

□ 計量機器の校正など

- ・重力加速度の影響を受けるはかりや圧力計などの校正など

□ 地下構造の推定

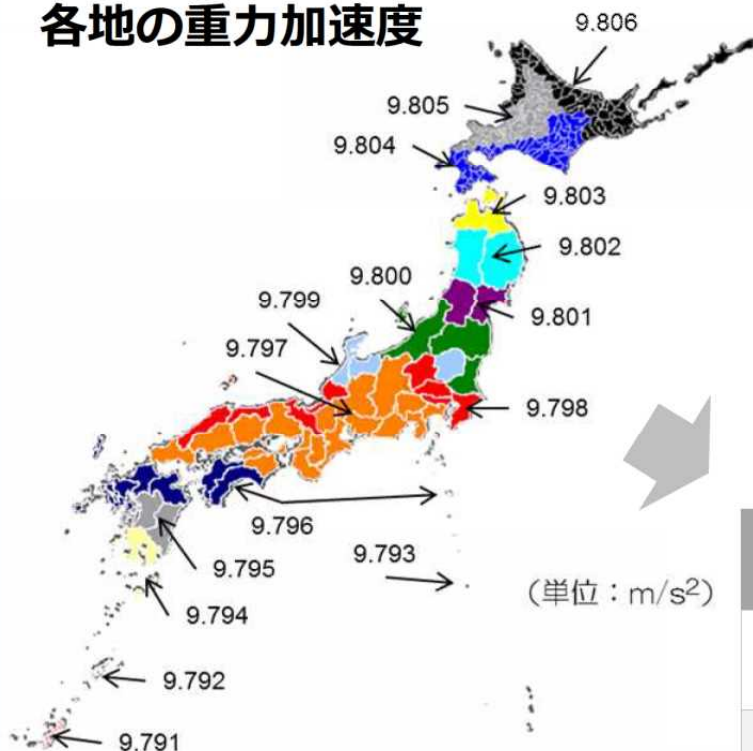
- ・地下構造探査、地下資源探査
- ・活断層調査

□ 家庭用はかりでの活用事例

デジタル体重計では、正確にはかるためにお住まいの地域を設定して、各地の重力加速度を用いて影響を取り除くものがあります。

体重計を新しく購入されたときや、遠くに引っ越されたときには、お住まいの地域を正しく設定して使いましょう。

各地の重力加速度



体重60kgの変化

体重計の地域設定を茨城県として
同じ人が同じ体重計を用いて各地で
はかった場合の体重の表示の変化

地 域	体重計表示 [kg]	増減 [kg]	重力加速度 [m/S ²]
北海道 (稚内)	60.04	+0.04	9.806
茨城県	60.00	—	9.800
沖縄県	59.94	-0.06	9.791

身近なもので 重力加速度を測ってみよう！

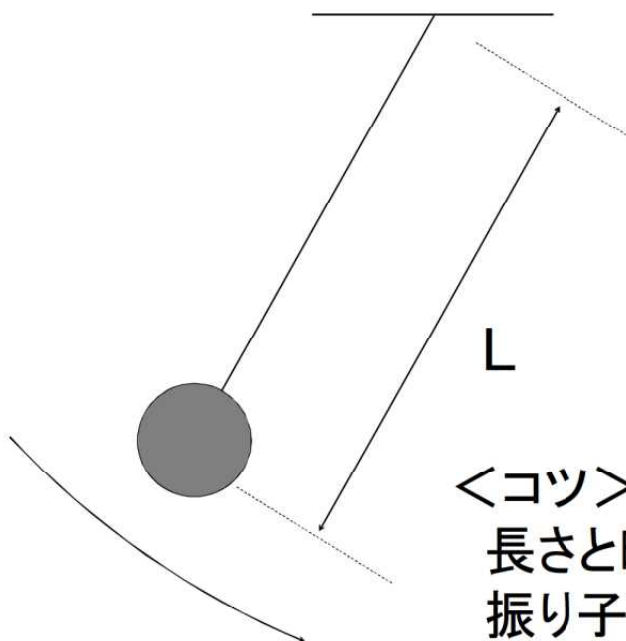
用意するもの：

おもり、長めの糸、ストップウォッチ

測り方

1. 糸とおもりの中心までの長さ“L”(m)を、測ります。
2. 振り子を振らせて、真下に20回来たときの時間を測り、その時間を10で割って、周期“T”(秒)を計算します。
3. 下の計算式で重力加速度を計算します。

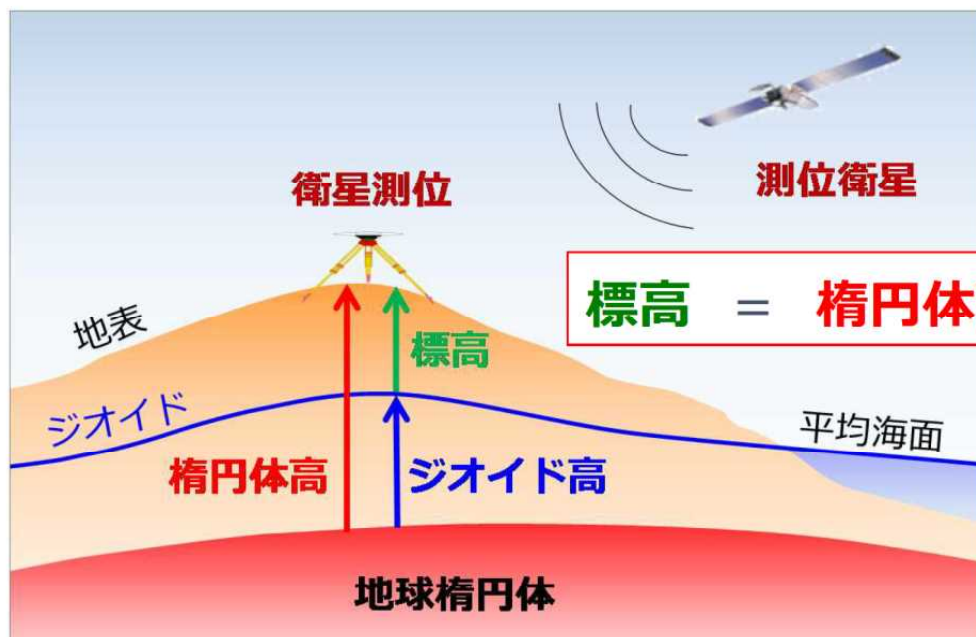
$$\text{重力加速度} = 4 \times (3.14)^2 \times L \div T^2$$



⇒ 9.8m/s^2 に近い値になれば、OK！

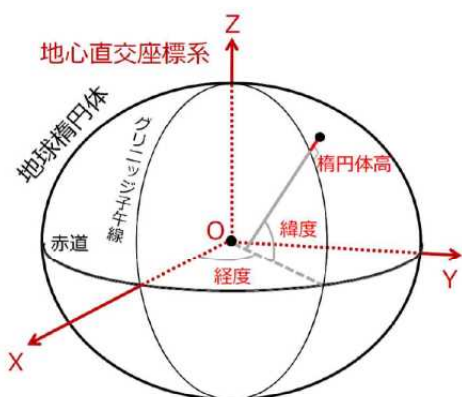
「ジオイド」って何？

平均海面を陸地の内部に延長した面を「ジオイド」といいます。
ジオイドから地表面までの高さが土地の高さとなり、これを
「標高」といいます。
つまり、ジオイドとは標高の基準（0m）のことです。



カーナビなどGPS衛星によってわかる高さは、標高ではなくて楕円体からの高さなんだ。

標高を知るにはジオイド高が必要だったのだね！
なるほど！そのために重力を測ってジオイドを決めるんだね！



ちょっと解説

- 地球楕円体とは回転する地球を楕円体としてモデル化したもの
- 楕円体高とはモデル化した地球楕円体面から地表面までの高さ
- GPSで測る高さはこの楕円体高

なぜ高さに重力が必要？ 1



地下の様子と、重力の方向
と、平均海面の関係を考えて
みよう！

【その1】

地下にある物体の**重さ**に違いが
ないと、**平均海面**は**水平**となる。

平均海面（ジオイド）



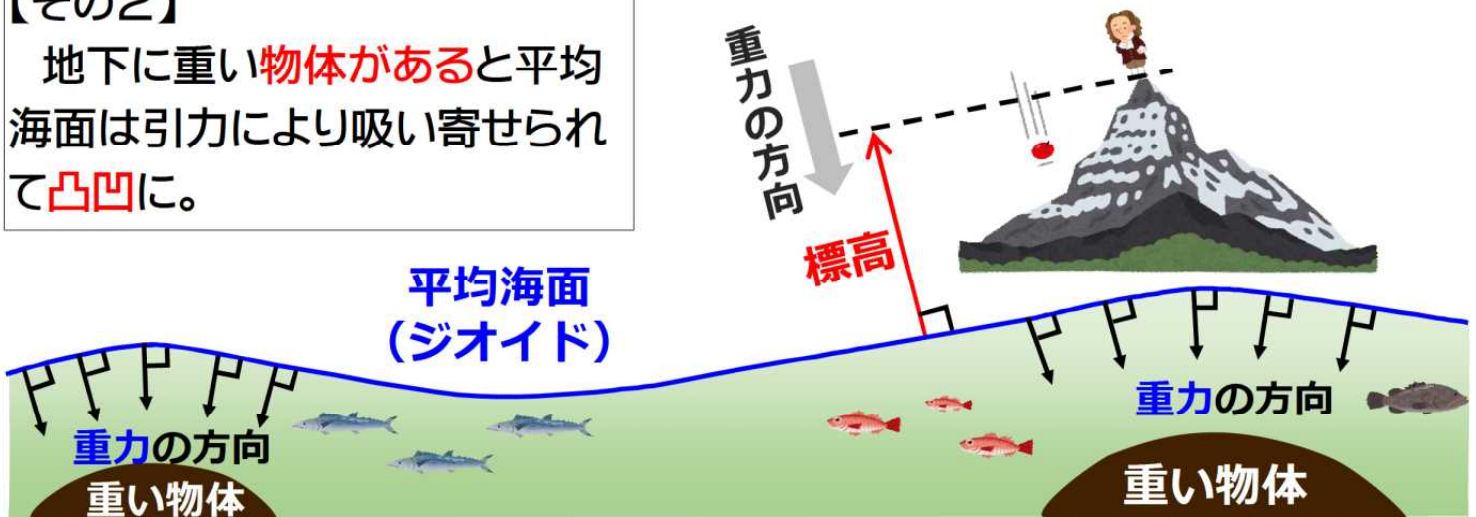
地下の重さに違いがない場合

実際は

【その2】

地下に**重い物体**があると平均
海面は引力により吸い寄せられ
て**凸凹**に。

平均海面
(ジオイド)

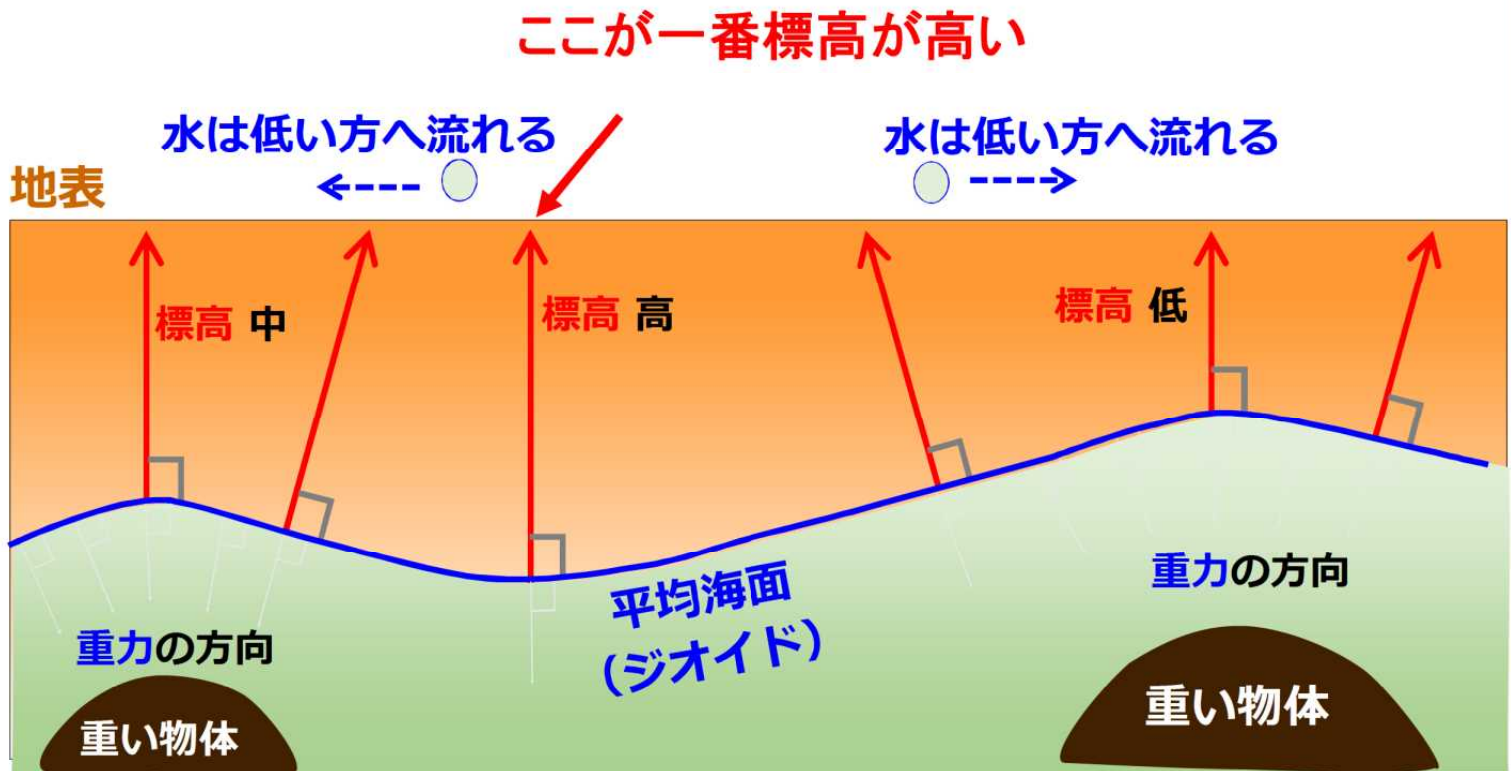


地下の様子がわかると平均海
面の凸凹がかわるんだね！



なぜ高さに重力が必要？2

- ・地表が平らでも標高が同じとは限らない。
- ・水は標高が高い方から低い方へ流れる(当たり前)。
…どうということ？



地表が平らであっても、見えない地下の物体により
平均海面（ジオイド）には凹凸ができる。

この地下の様子を明らかにするために
全国で重力を測るのだ！

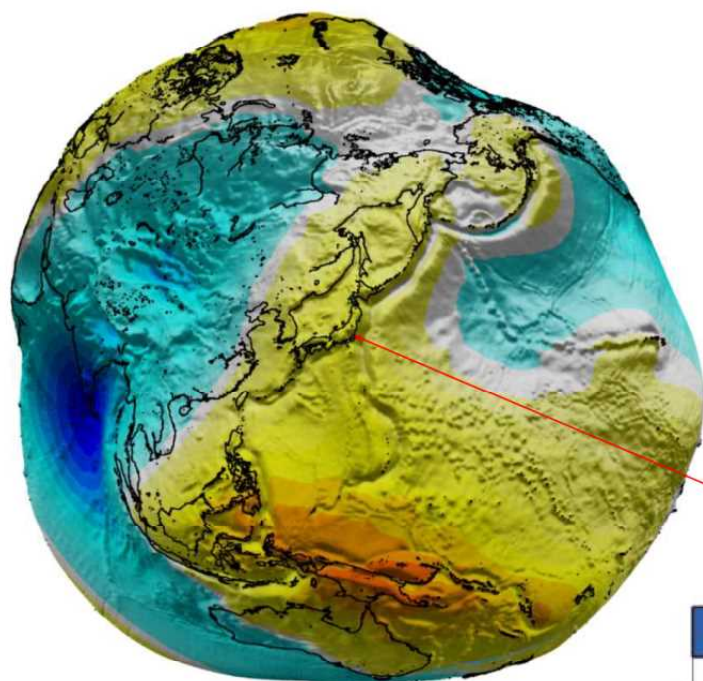


なるほど！だから平均海面の
凸凹がわかって正しい標高が
求められるってことだね。



ジオイドを地球規模で見る

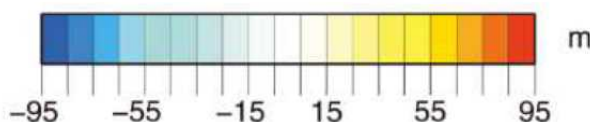
地球のジオイドは凸凹



地球規模で見ると、ジオイドは地球楕円体よりも100m程度低いところから100m程度高いところまであり、凸凹しています。

地球規模のジオイドの計算には、人工衛星により宇宙で測った重力データが活用されています。

東京



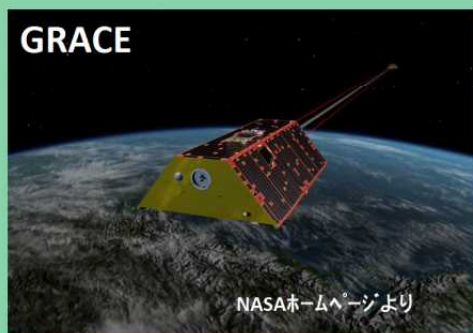
画像は、水平方向に対して鉛直方向を1万倍に誇張して描画したジオイド

人工衛星で重力を測る

米国やヨーロッパを中心に、人工衛星で重力を測る取り組みが進められています。

衛星重力ミッション

GRACE



NASAホームページより

同一軌道を周回する2つの衛星の間の距離の変化や軌道の変化から重力を求めます。

GOCE



欧州宇宙機関 (ESA)
ホームページより

搭載した加速度センサや軌道の変化から重力を求めます。

人工衛星アルチメトリー

Jason-3



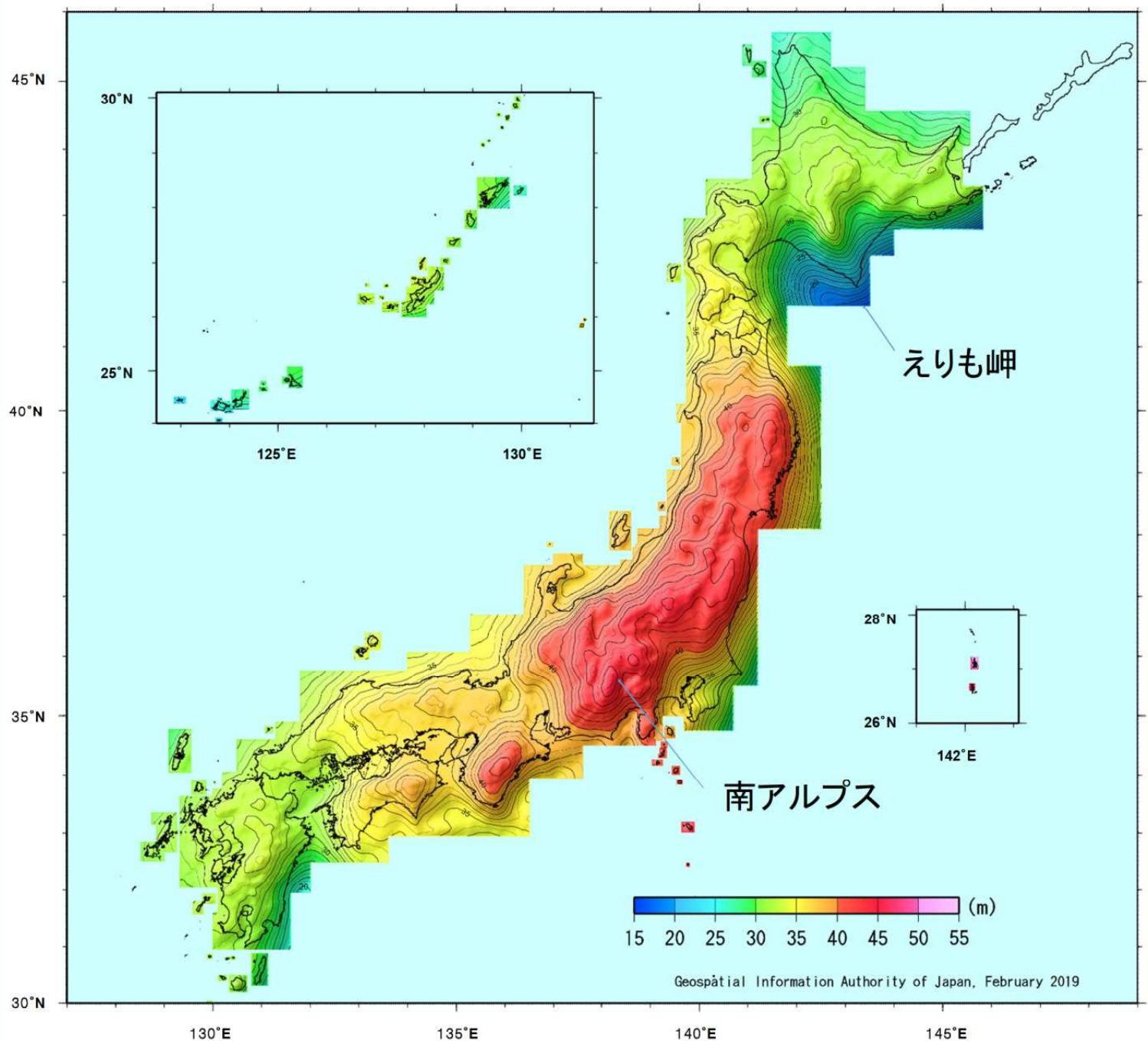
NASAホームページより

地球に向けて電波を照射し、海面で反射した電波を受信して海面高（ジオイド）を求めます。

日本のジオイド

楕円体を基準として見たジオイドの高さは、日本周辺では15m～45m程度高くなっており、北海道のえりも岬周辺では15m程度高く、南アルプス周辺では40m程度高くなります。

「日本のジオイド2011」(Ver.2.1)



重力加速度はどうやって測るの？

ある地点の重力加速度を測る「絶対重力測定」
器械の名前は**FG5絶対重力計**といいます

下の写真は、国土地理院のほか、国際比較観測に参加した機関や研究機関の参加により、絶対重力計のそれぞれの違い（器差）を国際レベルで確認しているところです。



絶対重力測定（FG5絶対重力計）



真空中を落下する物体の位置の変化を、レーザと原子時計で正確に測り、重力加速度を知るのだ。

2点間の重力加速度の差を測る「相対重力測定」
器械の名前は**ラコスト重力計**といいます



相対重力測定（ラコスト重力計）

バネにつり下げた重りは、その場所の重力加速度により下に落ちようとする力と、バネが縮もうとする力が釣り合ったところで静止します。場所が違って重力加速度が違っていると、バネが伸びる長さが変わります。

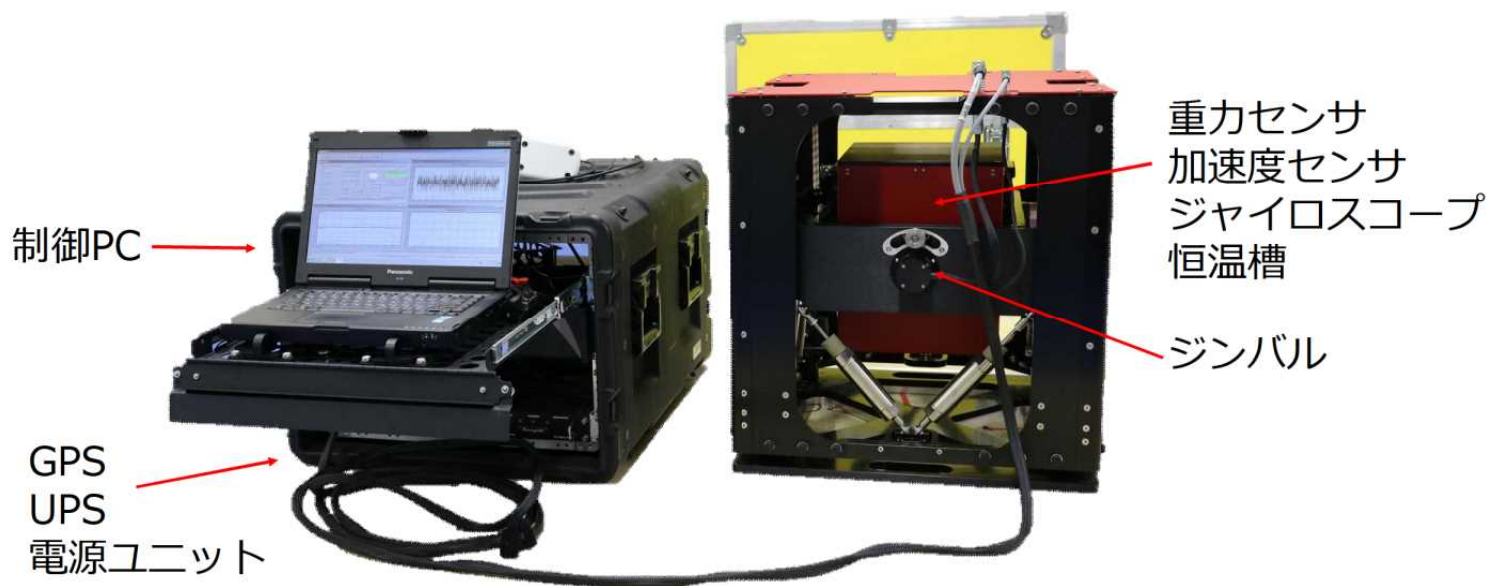
つまり、2地点のバネの長さの違いを測ることで、重力加速度の違いがわかるんだね！



空から地球の重力を測る

－ 航空重力測量を開始 －

2019年度から航空重力測量を開始し、日本の重力データを再整備します。航空重力測量では、航空機に重力計を搭載して上空から重力加速度を測り、これまで測定が困難だった山岳部や沿岸海域の重力データも整備します。航空重力データに、地上重力データや衛星重力データなどを加えて、ジオイドの高さを正確に求めます。



観測風景（米国測地測量局）

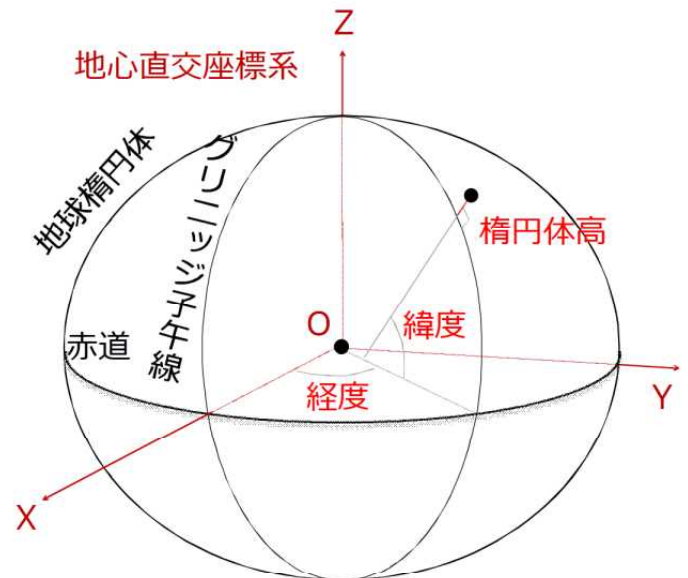
GPSで標高を求める仕組み

GPSにより得られた楕円体高に、ジオイドを補正することにより、標高を求めることができる仕組みを構築します。

楕円体高

=地球楕円体※面から地表までの高さ
←衛星測位によって決定

衛星測位結果の
地心直交座標 (X, Y, Z) を
(緯度, 経度, 楕円体高) へ換算



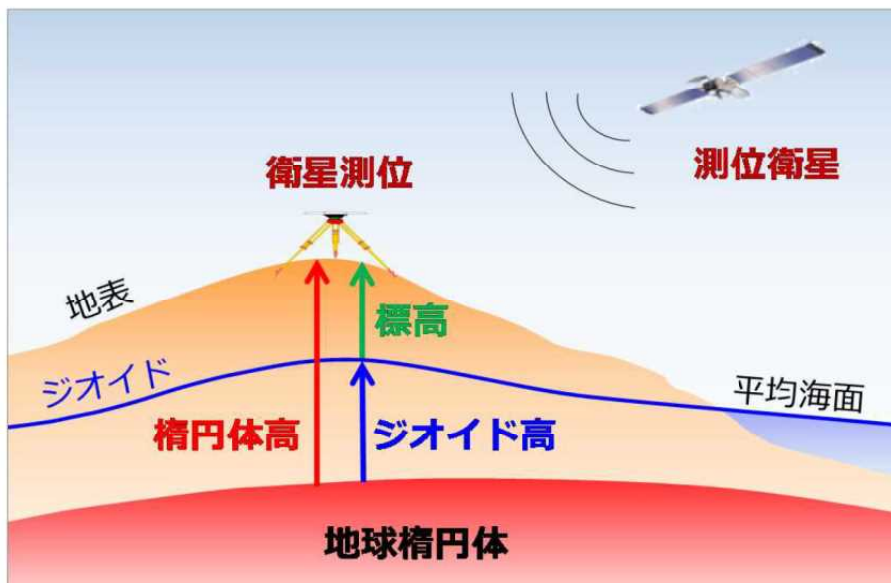
楕円体面～ジオイドの高さ→ジオイド高

※地球楕円体

回転する楕円としてモデル化した地球
幾何学的に定義)

$$\text{標高} = \text{楕円体高} - \text{ジオイド高}$$

衛星測位 重力データ



標高と楕円体高の関係

標高の精度は、

- ① 楕円体高
- ② ジオイド高

の精度で決まる！



衛星測位で標高を決めるためのポイント
→精密なジオイド高の整備

精密重力ジオイドを作る

— 様々な重力データを活用して正確に求めます —

航空重力データのほか、地上重力データや衛星重力データ、海上重力データなどを利用して、日本とその周辺の正確なジオイド高（精密重力ジオイド）を目標精度3cm以内で作ります。



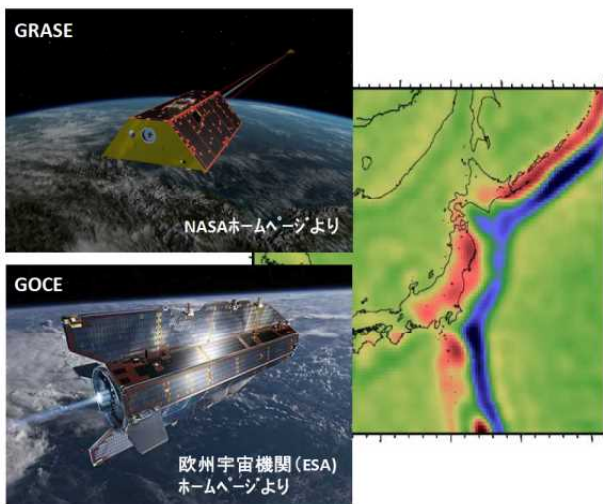
航空重力データ

山岳部・沿岸海域を含む重力分布



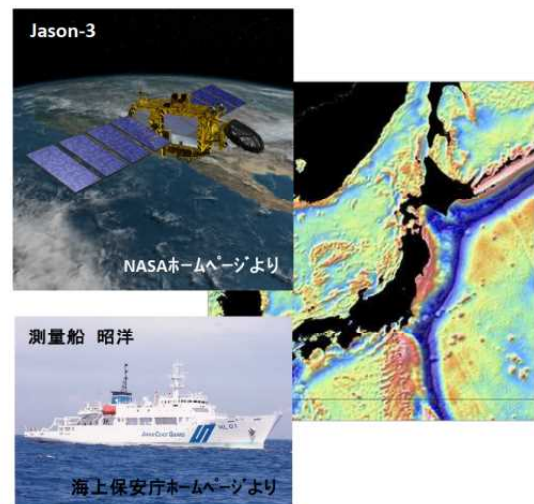
地上重力データ

国際基準に基づく地上重力



衛星重力データ

広域の重力分布



海上重力データ
(衛星海面高度計、験潮)

海域の局所的な重力分布

標高の仕組みを大転換

—GPSで簡単に標高が使える社会へ—

現在、標高は、明治時代から行われている水準測量で管理しています。しかし、水準測量を行うには時間とコストがかかります。航空重力測量で衛星による高さの補正量（ジオイド）を精密に求めることで、衛星測位によって正確な標高が求められる社会を構築します。

これまで



（東北大震災後の測量）

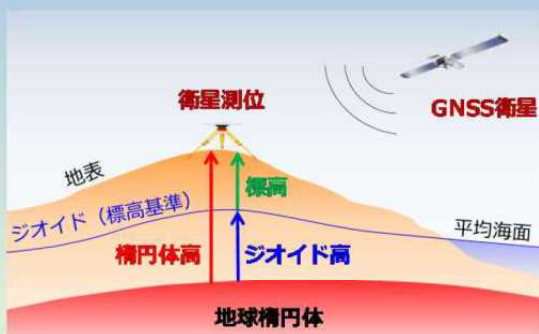
- ・時間がかかる
- ・お金がかかる
- ・測量も大変
- ・地震後にすぐに測れない（復旧・復興に支障）

2024年までに



- ・GPSですぐ分かる
- ・誰でも分かる
- ・スマホでも分かる

今までわからなかったの？



- ・実はGPSの高さは標高ではない！
- ・地下のどこかにある「高さの基準」（ジオイド）が必要
- ・実は重力から計算できる
- ・でもどうやって重力データを集める

航空重力測量の開始



- ・地上で測ると大変
- ・飛行機で効率的に計測
- ・地球2周分以上の距離

国土地理院の重力測量は地球の形を明らかにし、リアルタイムに高精度測位が可能な社会の実現に貢献しています。（GNSSは、米国が運用するGPSはじめ、ロシアのグロナス、日本のみちびきなど測位衛星の総称です。）