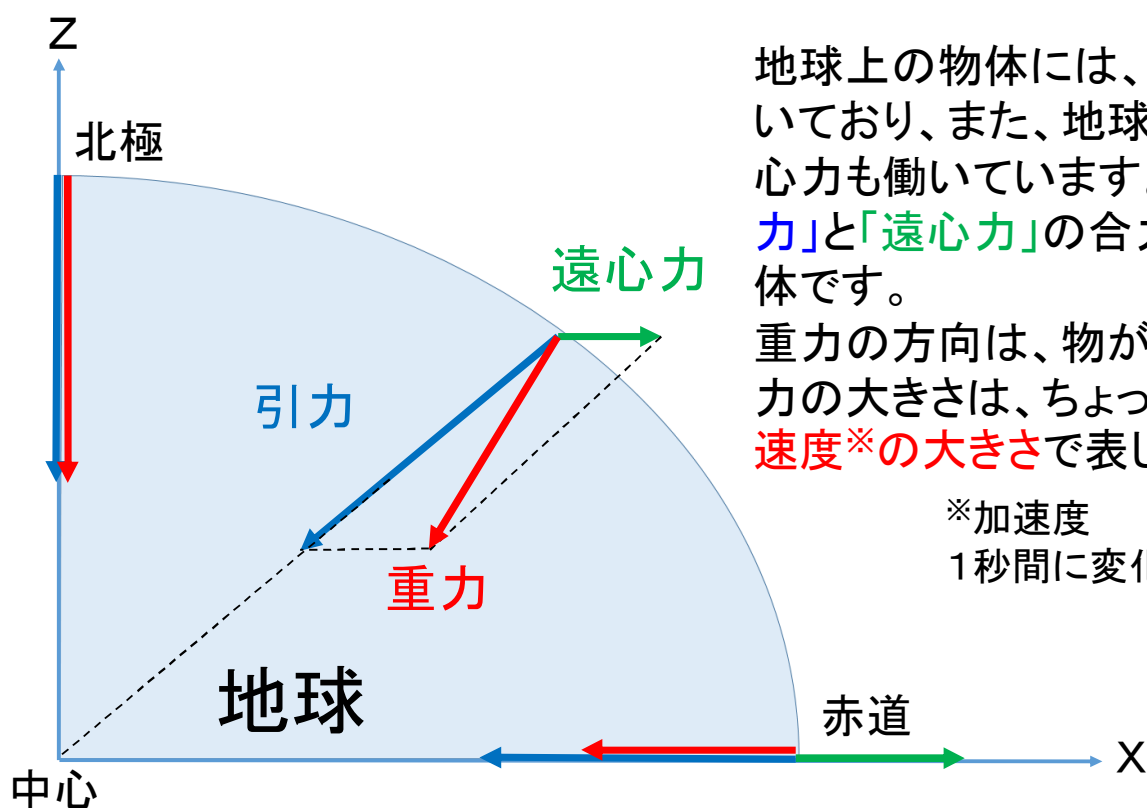


重力ってなに？

重力の正体

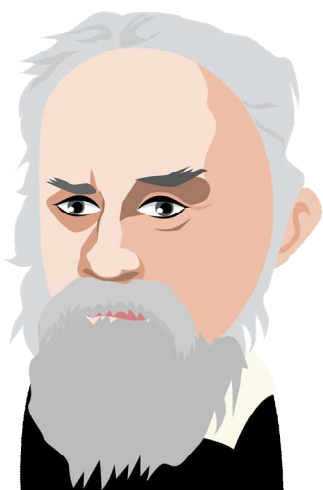


地球上の物体には、地球の引力が働いており、また、地球の自転による遠心力も働いています。この地球の「引力」と「遠心力」の合力が「重力」の正体です。

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 [m/s²] 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。

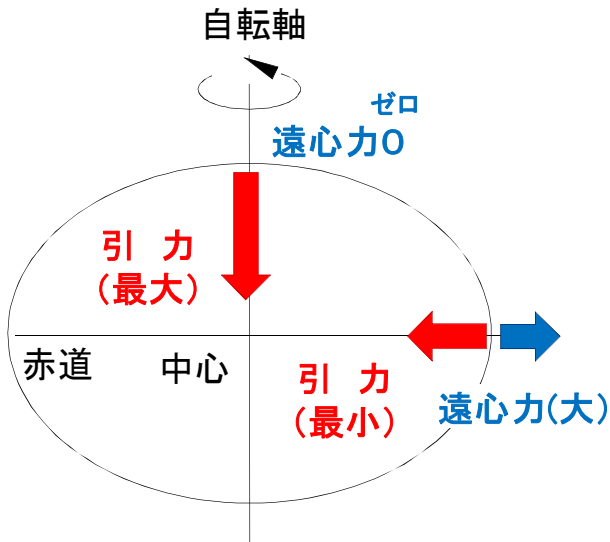
画像出典: <https://commons.wikimedia.org/wiki/>

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}0 = 重力加速度(大)

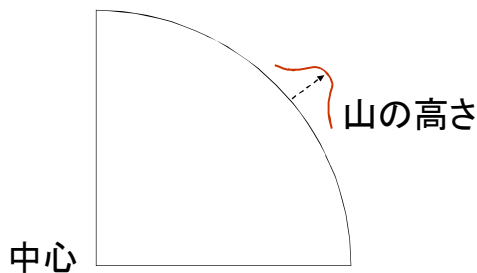
赤道

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。



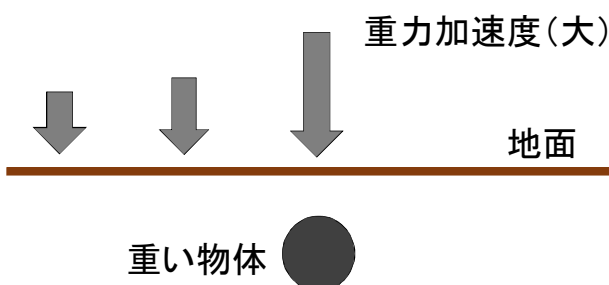
山の高さだけ地球の中心から遠ざかるため引力が小さくなり、重力加速度も小さくなります。

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なり働き、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？

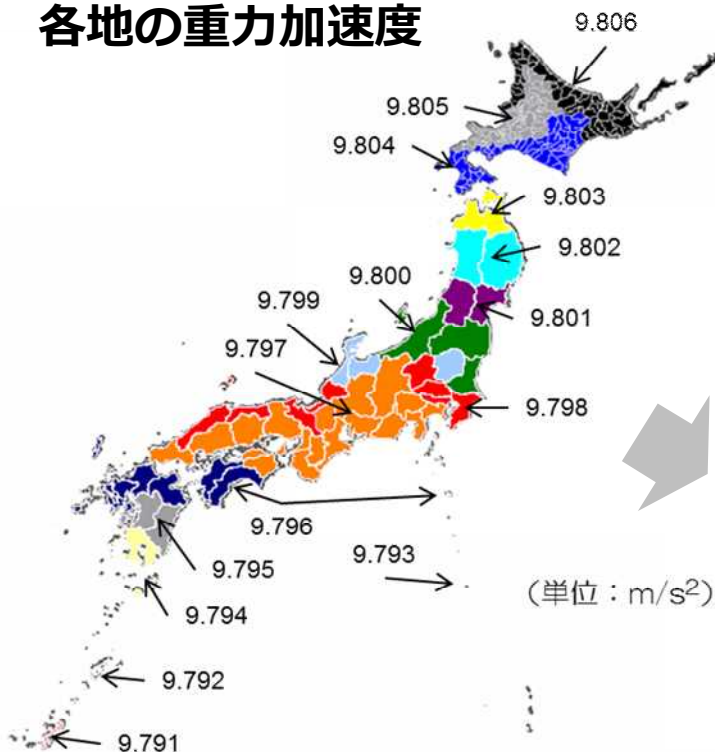
- 正確な標高を知る
 - ・標高の基準である平均海面(ジオイドという)の凸凹がわかる
- 計量機器の校正など
 - ・重力加速度の影響を受けるはかりや圧力計などの校正など
- 地下構造の推定
 - ・地下構造探査、地下資源探査
 - ・活断層調査

□ 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！

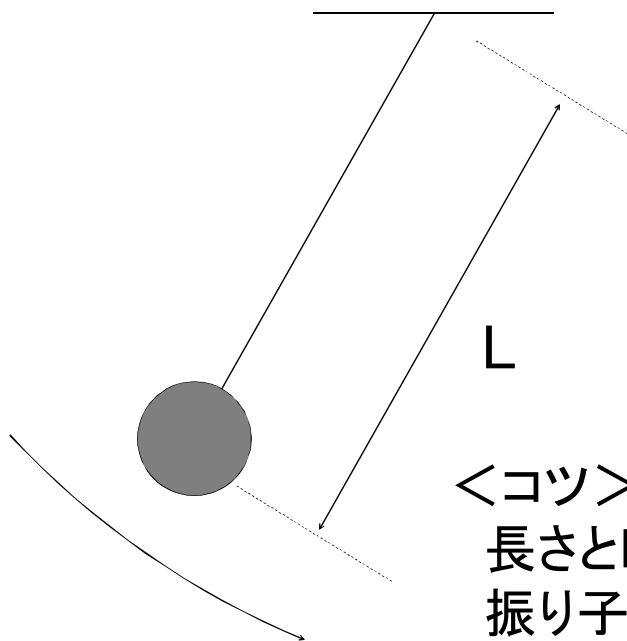
用意するもの：

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。

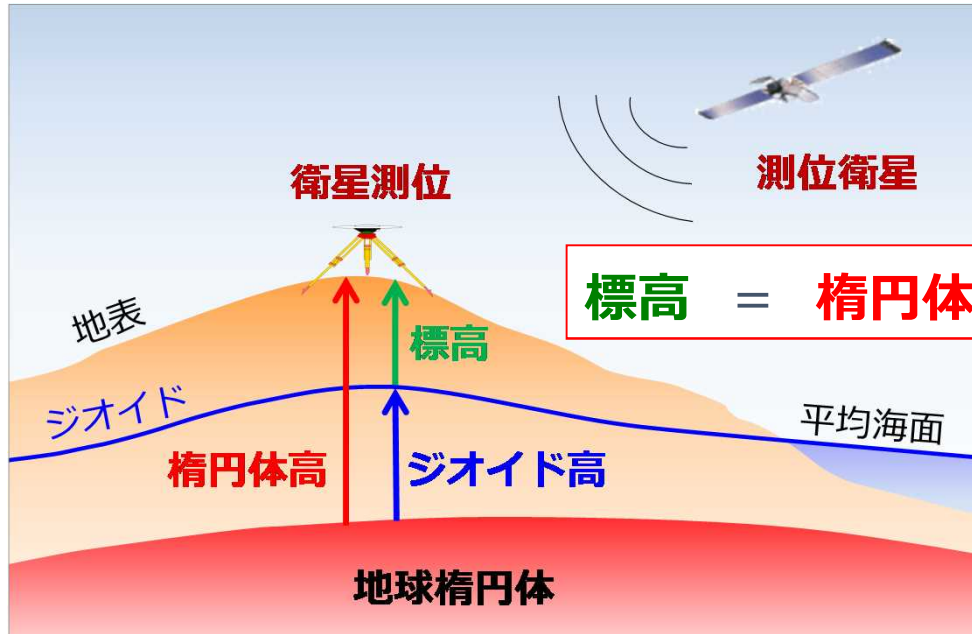
$$\text{重力加速度} = 4 \times (3.14)^2 \times L \div T^2$$



⇒9.8m/s²に近い値になれば、OK！

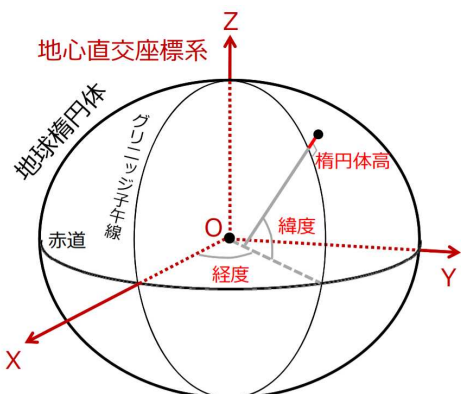
「ジオイド」って何？

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

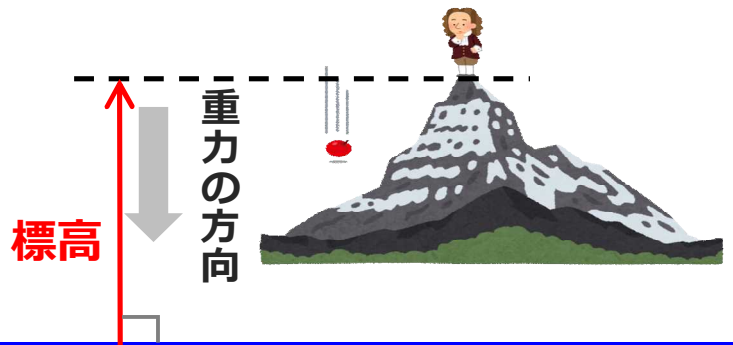


地下の様子と、重力の方向と、平均海面の関係を考えてみよう！

【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）



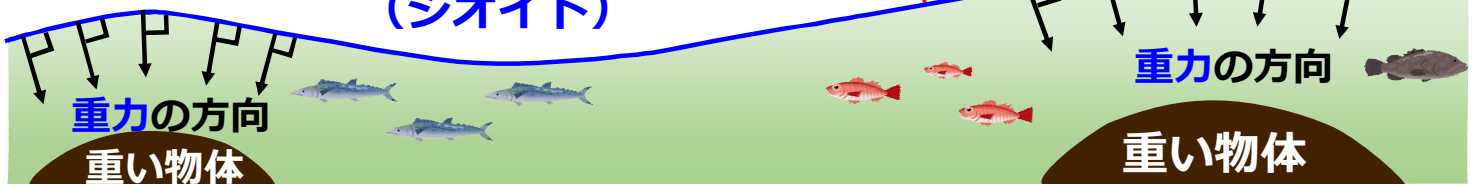
地下の重さに違いがない場合

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）



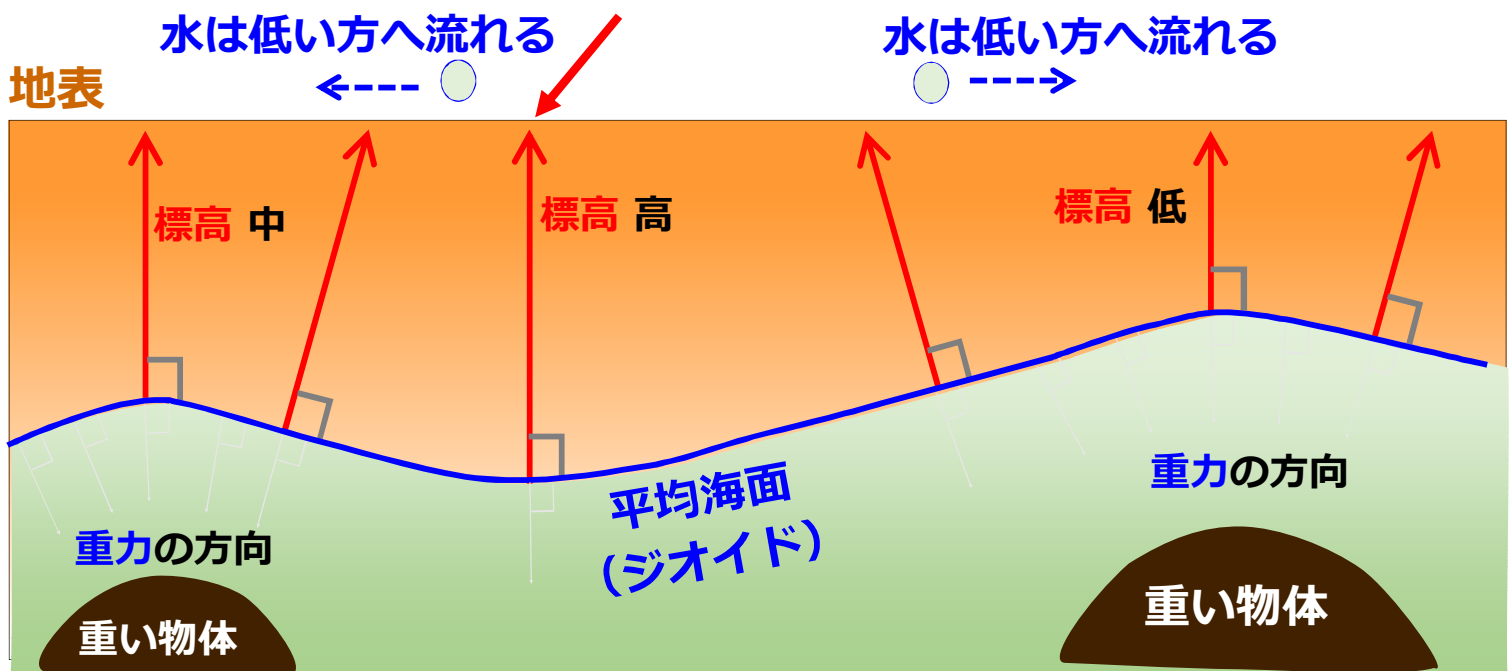
地下の様子がわかると平均海面の凸凹がかわるんだね！



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？

ここが一番標高が高い



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！

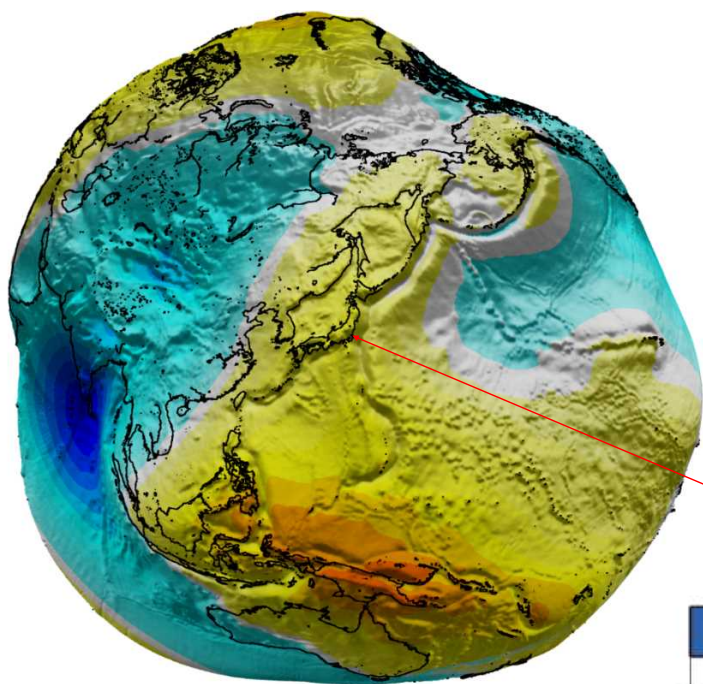


なるほど！だから平均海面の
凸凹がわかって正しい標高が
求められるってことだね。



ジオイドを地球規模で見る

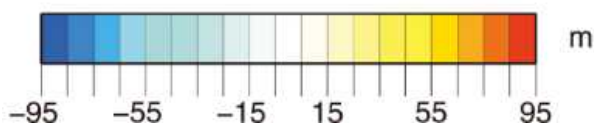
地球のジオイドは凸凹



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



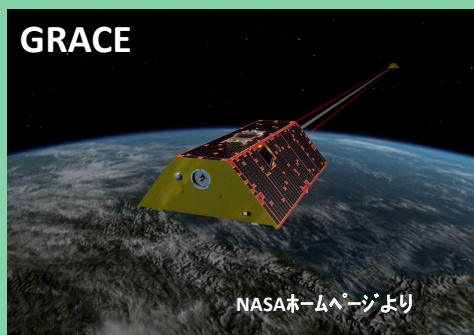
画像は、水平方向に対して鉛直方向を1万倍に誇張して描画したジオイド

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

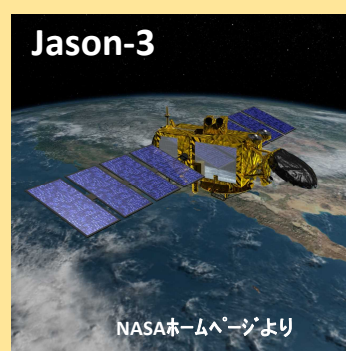


欧州宇宙機関 (ESA) ホームページより

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



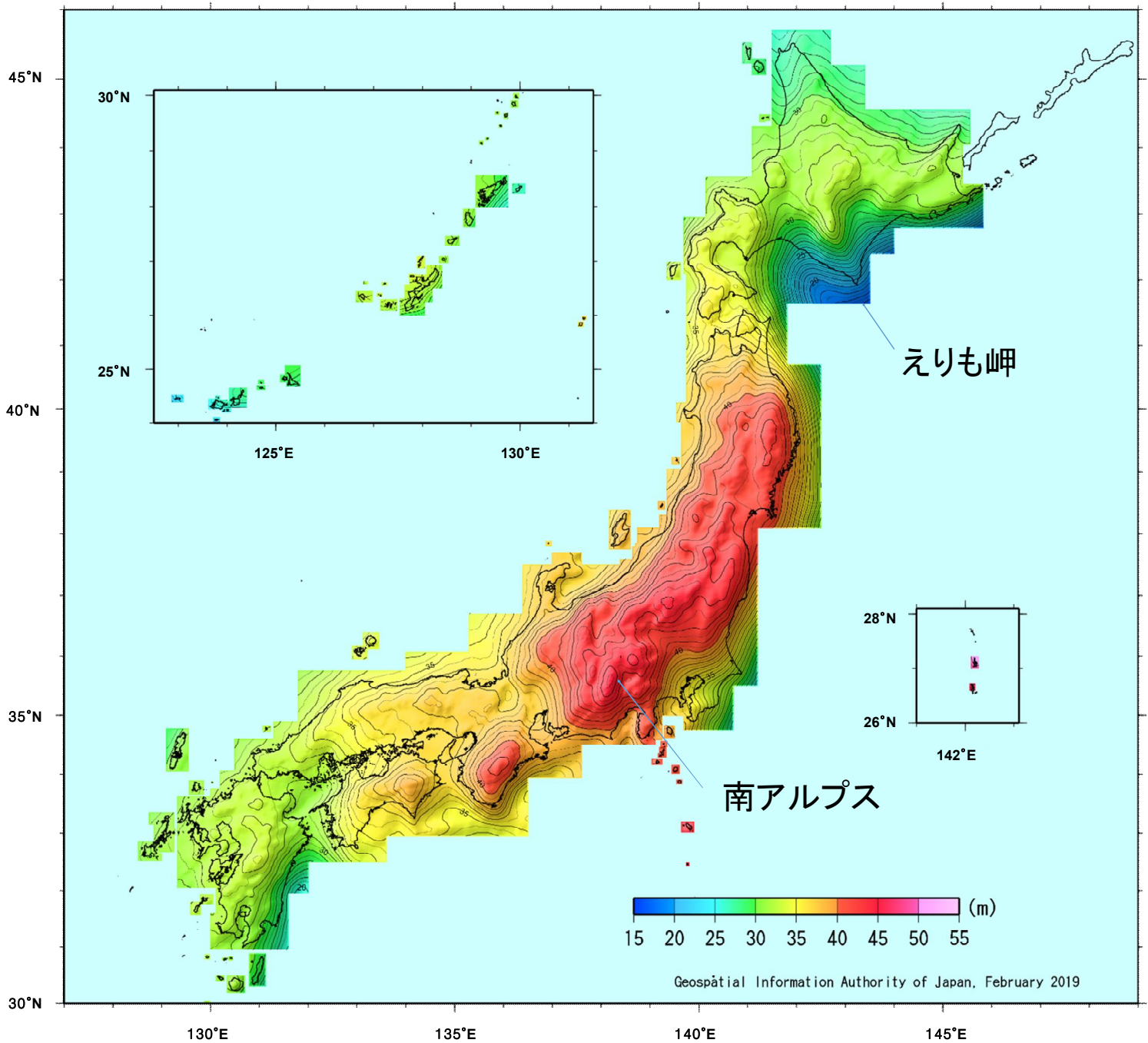
NASAホームページより

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。

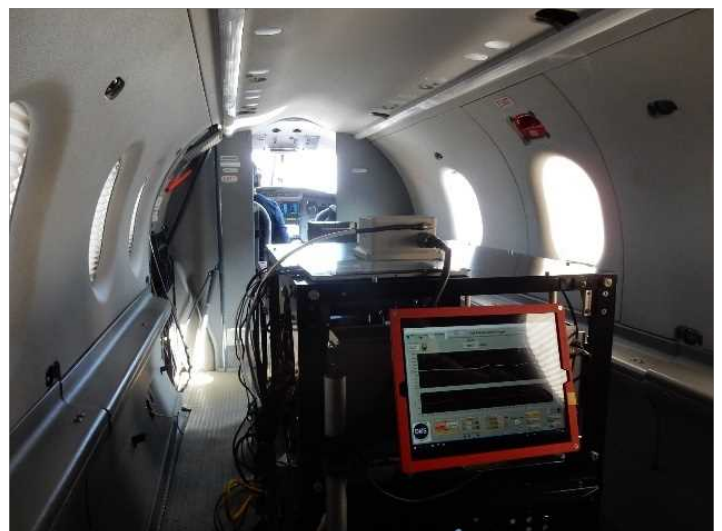
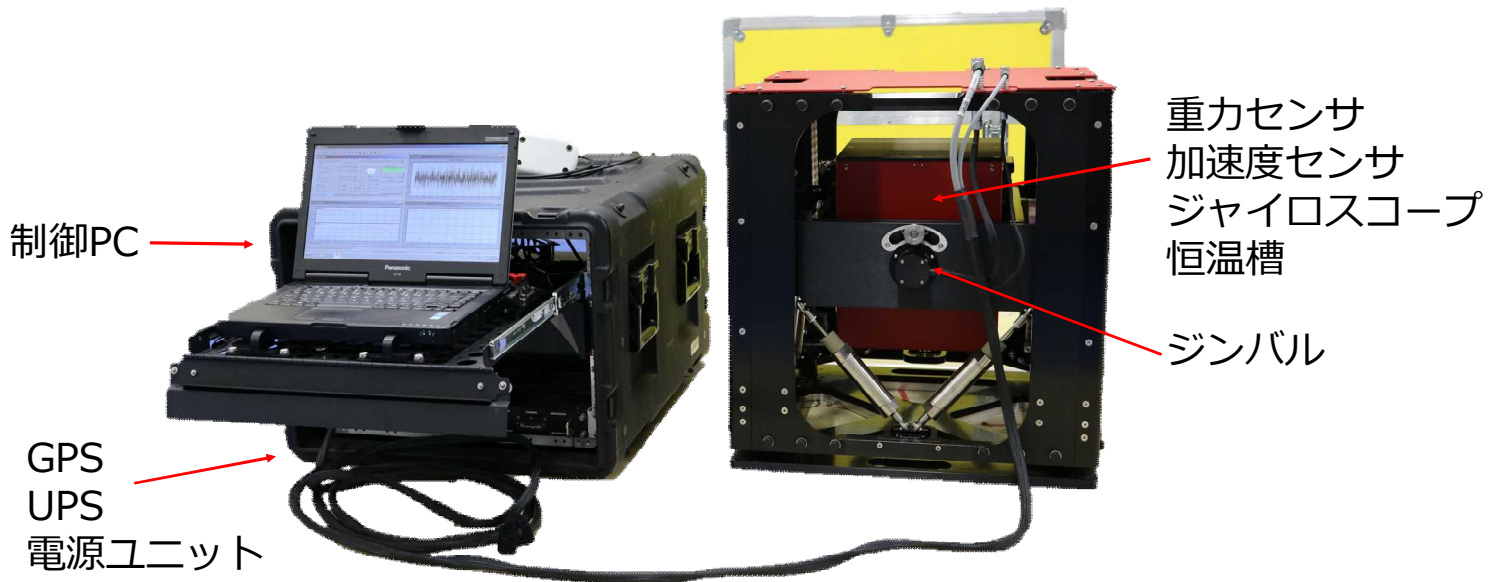
つまり、2地点のバネの長さの違いを測ることで、重力加速度の違いがわかるんだね！



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）

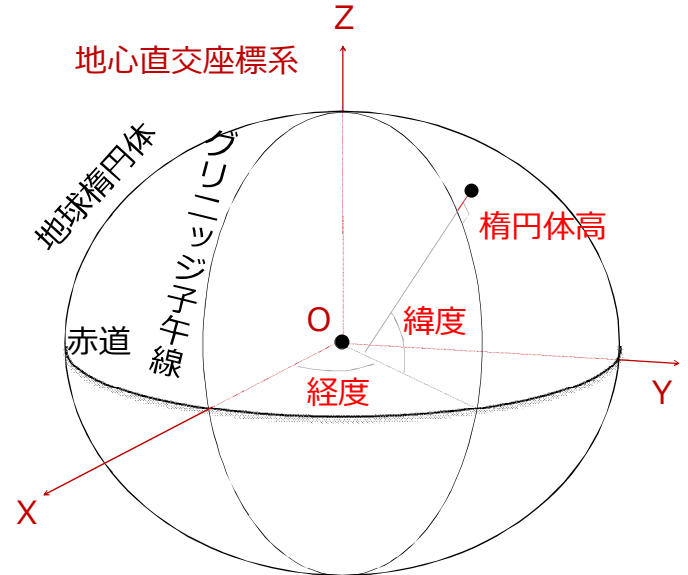
GPSで標高を求める仕組み

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



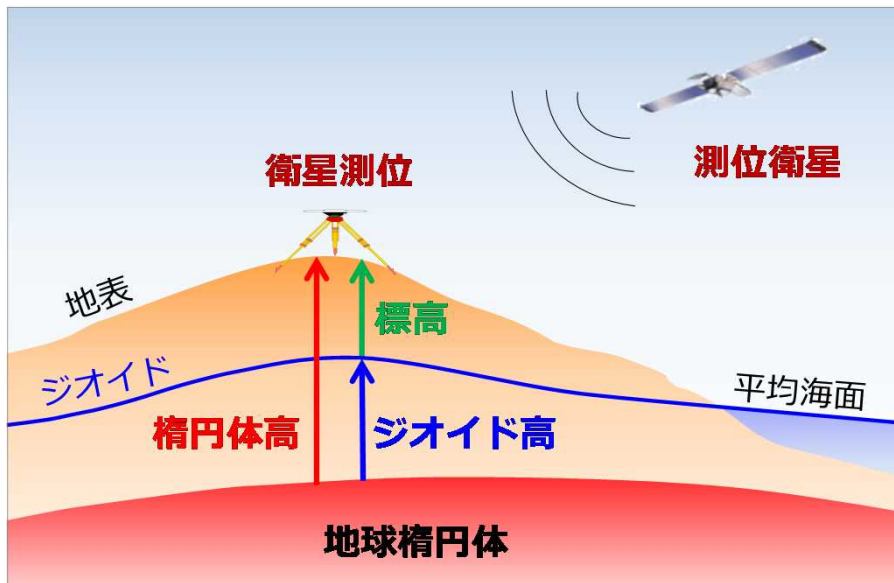
楕円体面～ジオイドの高さ→ジオイド高

※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。



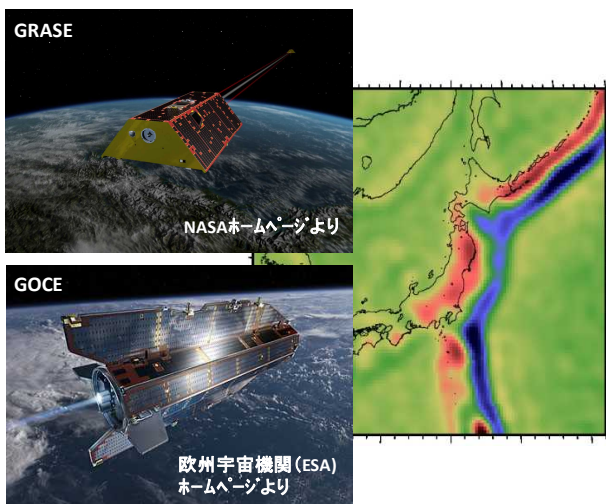
航空重力データ

山岳部・沿岸海域を含む重力分布



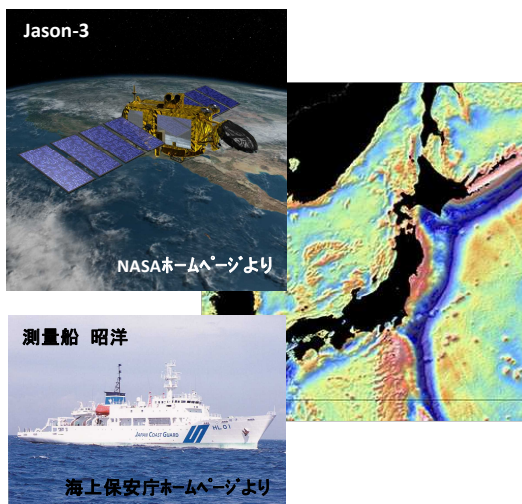
地上重力データ

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)

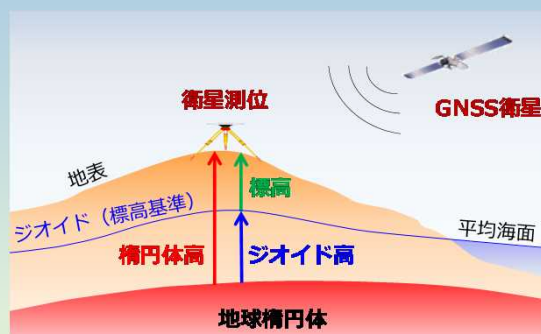
- ・時間がかかる
- ・お金がかかる
- ・測量も大変
- ・地震後にすぐに測れない
(復旧・復興に支障)

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。)