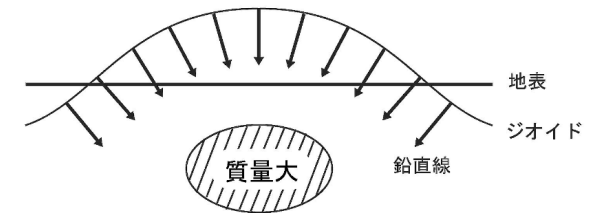
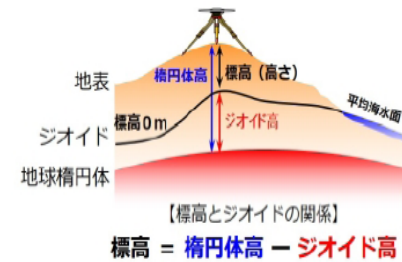


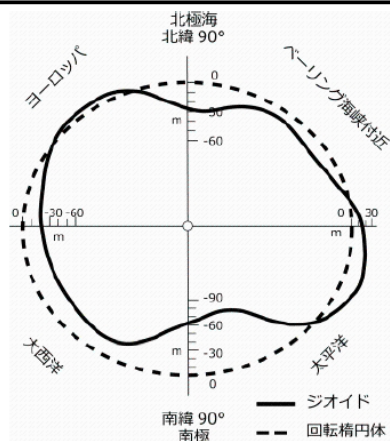
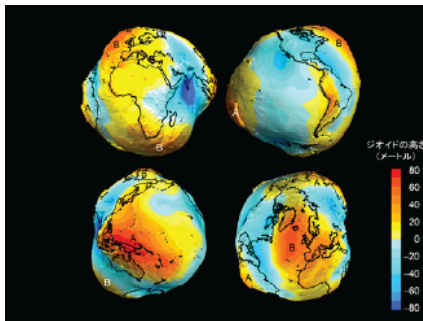
# ジオイド・重力異常・アイソスタシー

講義資料: 東北大学理学部地球科学系内部向け情報  
<http://www.es.tohoku.ac.jp/JPrivate/class/index.html>

## 地球楕円体・ジオイド・標高



## 地球楕円体・ジオイド



西経 15°東経 165°を通る地球の南北断面  
 参考資料: Milan Bursa-Karel Pec(1998). Gravity Field and Dynamics of the Earth, Academia, P87

## 重力加速度・重力異常

$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

$$f = mR\omega^2 \cos\phi$$

$$\gamma_0 = |F - f|$$

$$80'' - \gamma_0 = 4g_0''$$

$$4g_0'' > 0$$

$$4g_0'' < 0$$

## 地球の重力

万有引力:  $f_1 = GmM/R^2$

mとMは、それぞれ物体と地球の質量, Rは地球の半径, Gは万有引力定数

遠心力:  $f_2 = mr\omega^2$

rは回転の半径,  $\omega$ は角速度 ( $\omega = 2\pi/t$ )

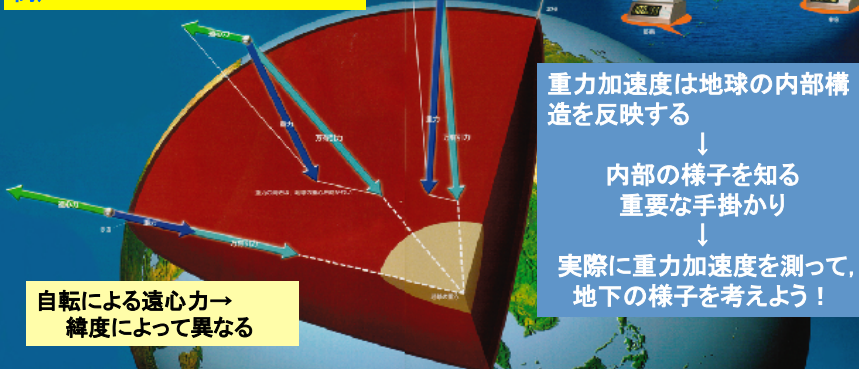
重力 = 万有引力 + 遠心力

## 重力加速度は場所により異なる!

万有引力の法則

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2} = m_2 g$$

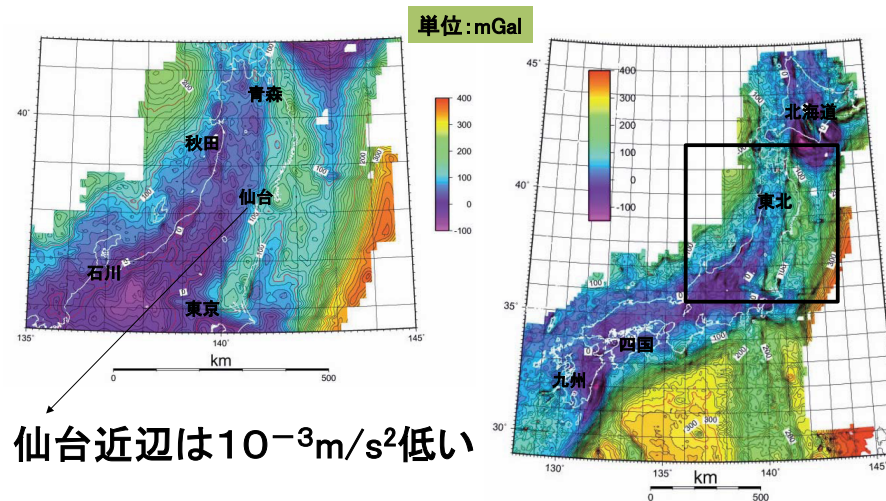
距離と、地下の密度で変化する(標高)



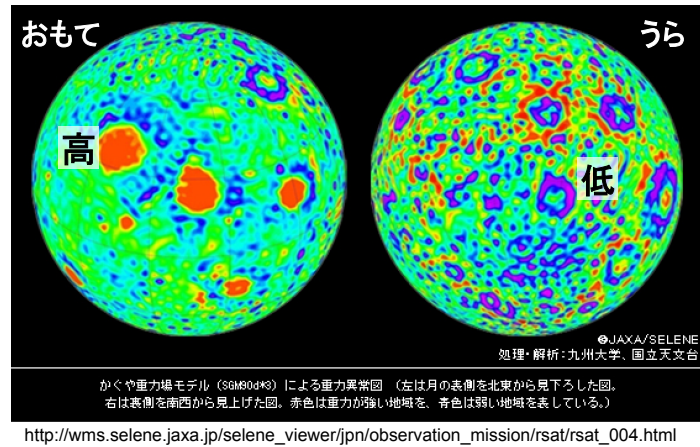
## 重力加速度の単位系

MKS単位系	CGS単位系
10	$10^3 = 1k$
$10^{-2}$	1
$10^{-5}$	$10^{-3} = 1m$
$10^{-8}$	$10^{-6} = 1\mu$
$10^{-11}$	$10^{-9} = 1n$
$ms^{-2}$	Gal

## 重力加速度を精度よく測定すると、地球の内部構造が推定できる



## 重力加速度から月の構造進化を探る



## 地球楕円体の重力と正規重力

地球楕円体のように、回転している楕円体の重力ポテンシャル、あるいはその重力を求めることは基礎編の程度を越えた問題なので、詳細は第4部付録に譲るとして、概略は、まず、地球楕円体面が1つの等ポテンシャル面であるという条件より、地球楕円体による重力ポテンシャル $U$ が求まり、その勾配をとることにより、地球楕円体の重力、すなわち正規重力を与える次式が得られる。

$$\gamma = \frac{(a\gamma_e \cos^2 \psi + b\gamma_p \sin^2 \psi)}{\sqrt{a^2 \cos^2 \psi + b^2 \sin^2 \psi}}$$

ここで、 $a$ は地球の赤道半径(6,378,137[m])、 $b$ は極半径(6,356,752[m])、 $\gamma_e$ は赤道における正規重力(978.032677[Gal])、 $\gamma_p$ は極における正規重力(983.218637[Gal])であり、この式を正規重力式と呼ぶ。この式を用いてある測地緯度 $\psi$ での地球の標準的な重力値が得られるので、実測された重力値からその値を差し引くことで、重力異常が計算される。

## 正規重力 $\gamma$

測地基準系1980での正規重力を表す重力式1980の展開形としてチェビシェフ近似による、

$$\gamma = 978.03267715(1 + 0.0052790414 \sin^2 \psi + 0.0000232718 \sin^4 \psi + 0.0000001262 \sin^6 \psi + 0.0000000007 \sin^8 \psi)$$

がよく用いられる。この式の誤差は、0.1[ $\mu$ Gal]である。

測地緯度 $\psi$

## 正規重力 $g_N$

正規重力とは、海拔0mにおける各緯度 $\psi$ での平均的な重力値

$$\gamma = 9.7803267714 \left( \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \psi}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \psi}} \right)$$

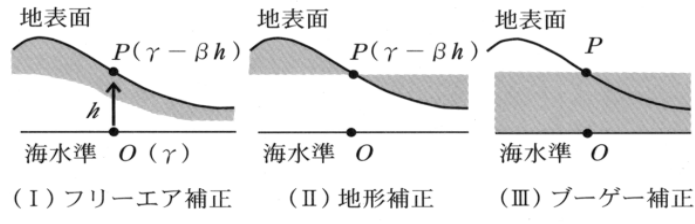
東北大学理科実験棟の緯度では正規重力は  
**9.80016m/s<sup>2</sup>**

標高による重力変化を補正しないと比較できない  
(標高による重力変化は重力異常ではない！！)

## 地形補正

ふつう重力の測定を行う地点は、海拔0mでもないし、また平坦な地形でもない。そこでまず、地形を(仮想的に)平坦にならす。つまり、標高 $h$ mの高さで測定したとすると、そこを標高 $h$ mの広大な台地であるとして実測重力を補正する。

下図のような斜面で測定したとすると、そこより標高の高い部分の岩石による引力を受け、逆にそこより標高の低い部分は岩石と比べて質量が無視できる空気しかない。そこで、標高の高い部分の岩石を取り去り、標高の低い部分を岩石で埋めると考えるのである。



## フリーエア補正・フリーエア異常

地表での重力測定値を用いて重力異常を計算する際には、次式に示すように、重力の鉛直勾配 $dg/dz$ と正標高から、ジオイド上での重力値を計算し、その後、楕円体上での正規重力値を差し引くことになる。

$$\Delta g = g + \left(\frac{dg}{dz}\right)h - \gamma \quad (1)$$

このうち、重力の鉛直勾配 $dg/dz$ が場所により異なるため、代わりに、正規重力の鉛直勾配である $d\gamma/dz (= 0.3086[mGal/m])$ を用いると次式となる。

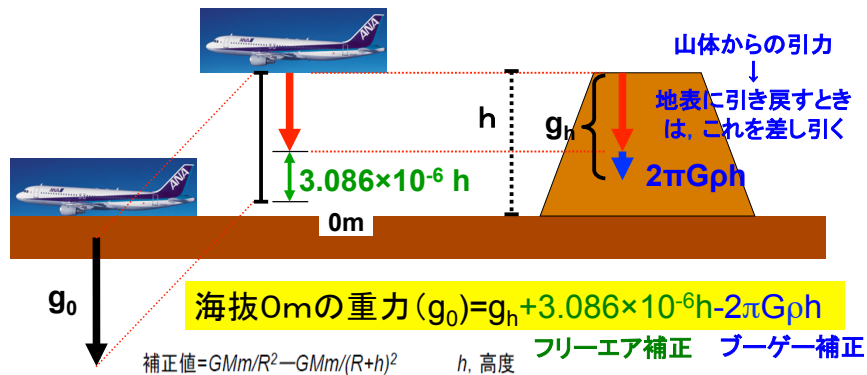
$$\begin{aligned} \Delta g = \Delta g_F &= g + \left(\frac{d\gamma}{dz}\right)h - \gamma \\ &= g + 0.3086h - \gamma \end{aligned} \quad (2)$$

地球物理学では、このような高さの補正をフリーエア補正、計算された重力異常をフリーエア異常 $\Delta g_F$ と呼んでいる。

## フリーエア補正とブーゲー補正

フリーエア補正: 空中で標高(=R大)による重力減少を、1mあたり $3.086 \times 10^{-6}m/s^2$ で補正。

ブーゲー補正: 標高68.0mの間の岩石による影響を除く



## ブーゲー異常

標高 $h$ の点で、フリーエア異常からブーゲー異常を計算するには、通常、地形の起伏の影響を取り除く地形補正と、地形のなされた密度 $\rho_r$ と厚さ $h$ の無限平板の影響( $2\pi G\rho_r h$ )を取り除くブーゲー補正を施せばよい。これらをまとめ、地形補正を $\rho_r T$ ( $T$ は岩石密度を1としたときの地形補正量)とすると、ブーゲー異常 $\Delta g_B$ は、

$$\Delta g_B = \Delta g_F - 2\pi G\rho_r h + \rho_r T$$

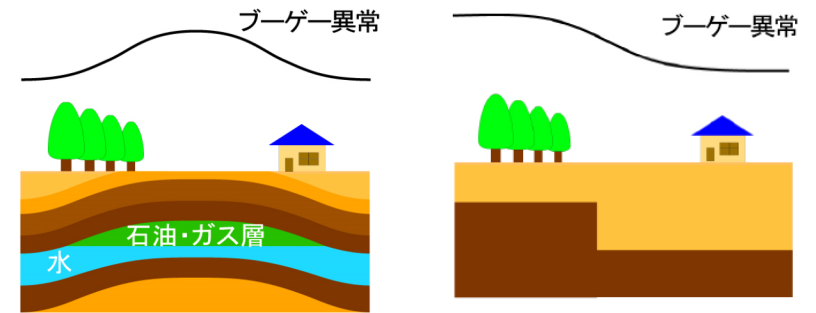


## 重力異常およびその意味

フリーエア異常: アイソスタシーが成立していれば, 本来0。  
上昇や沈み込みの余分な力が作用して質量異常が  
作られていることを示す。

ブーゲ異常: 地下の質量異常を示す。地下に相対的に重い  
ものがあれば正の, 軽いものがあれば負のブーゲ異常となる。  
その水平方向の変化から, 地下構造も読み取ることが出来る。

## ブーゲ異常



背斜構造

基盤岩の構造

## ブーゲ異常 ( $\Delta g_b$ ) の意味

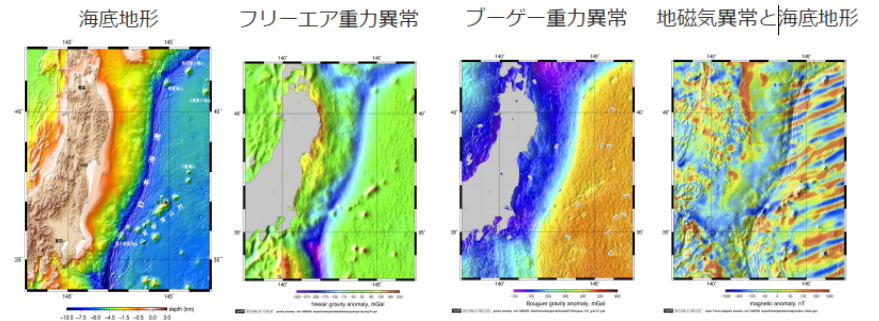
$\Delta g_b > 0$ , 地下に重いものがある



$\Delta g_b < 0$ , 地下に軽いものがある

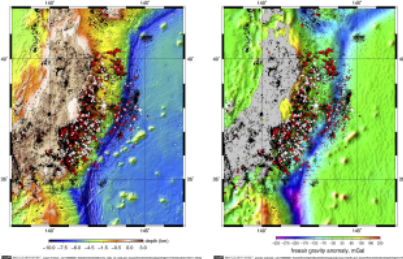


## 日本海溝周辺の重力異常



海底地形

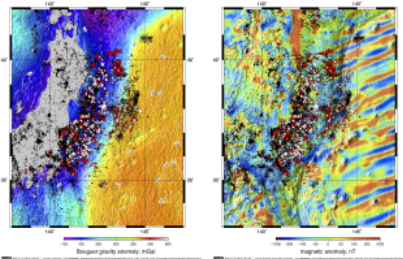
フリーエア重力異常



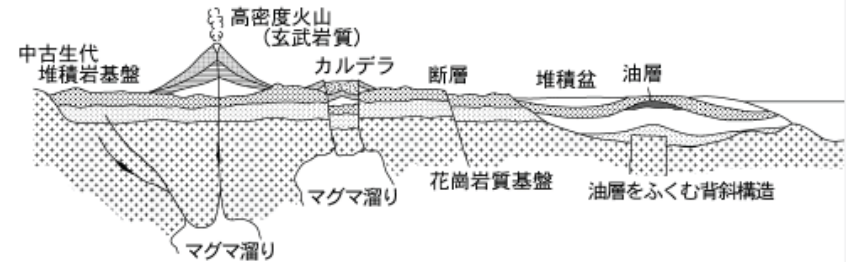
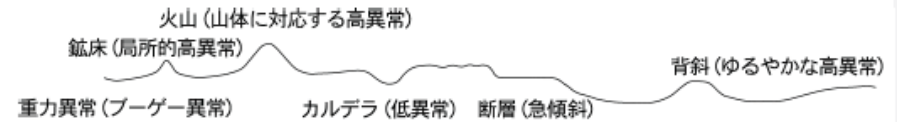
## 日本海溝周辺の地震分布と重力異常

ブーゲー重力異常

地磁気異常と海底地形



## 重力異常と地質構造



## 重力異常

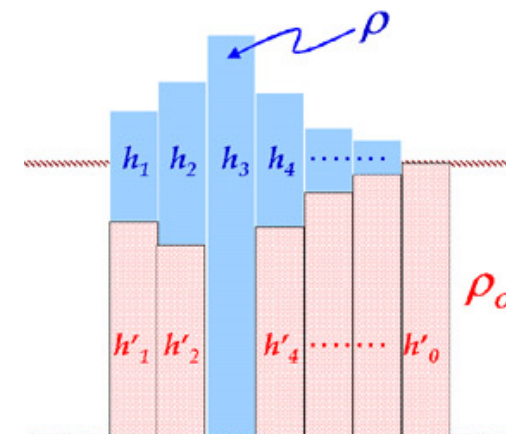
- 正規重力と、海拔0mに引き直した測定値との差  
→ 重力異常(地下の密度異常に起因)

$$\Delta g = (\underbrace{g}_{\text{測定値}} + \underbrace{3.086 \times 10^{-6} h}_{\text{フリーエア補正}} - \underbrace{2\pi G\rho h}_{\text{ブーゲー補正}}) - \gamma$$

海拔0m(ジオイド面上)で測定される重力

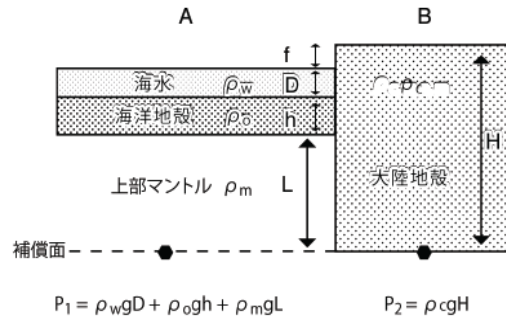
- 差がプラス、本来より引っ張られている  
→ 平均的な岩石より密度が大きい物質存在
- 差がマイナス、本来より引っ張られていない  
→ 平均的な岩石より密度が小さい物質存在

## アイソスタシー



$$\rho_0 h_0 = \rho h_1 + \rho_0 h'_1 = \rho h_2 + \rho_0 h'_2 \dots \dots (\rho_0 > \rho)$$

# 問題



アイソスタシーが働いている=補償面では荷重が釣り合っているととして

- 大陸地殻の平均的な密度が 2800kg/m<sup>3</sup>
- 海洋地殻の平均的な密度が 3000kg/m<sup>3</sup>
- マントルの平均的な密度が 3300kg/m<sup>3</sup>
- 海水の密度は 1000kg/m<sup>3</sup>
- 大陸地殻の厚さを 30km (ちょっと観測平均より薄いけど)
- 海洋地殻の厚さを 7km
- 海底の平均水深を 4km とすると

上の図の f (continental freeboard といわれる) はどれくらい? 実際の地球の陸域の平均標高と比べると?

# 問題(宿題)

高さ2500mの山岳地域でアイソスタシーが成り立っているとすると、この地域の地殻の厚さはどれだけか。

ただし、地殻の密度は、 $2.7 \text{ g/cm}^3$  の単一の層で、それより下の物質の密度は  $3.3 \text{ g/cm}^3$  の単一の層とする。

# 日本列島周辺の重力異常

## フリーエア異常・ブーゲー異常

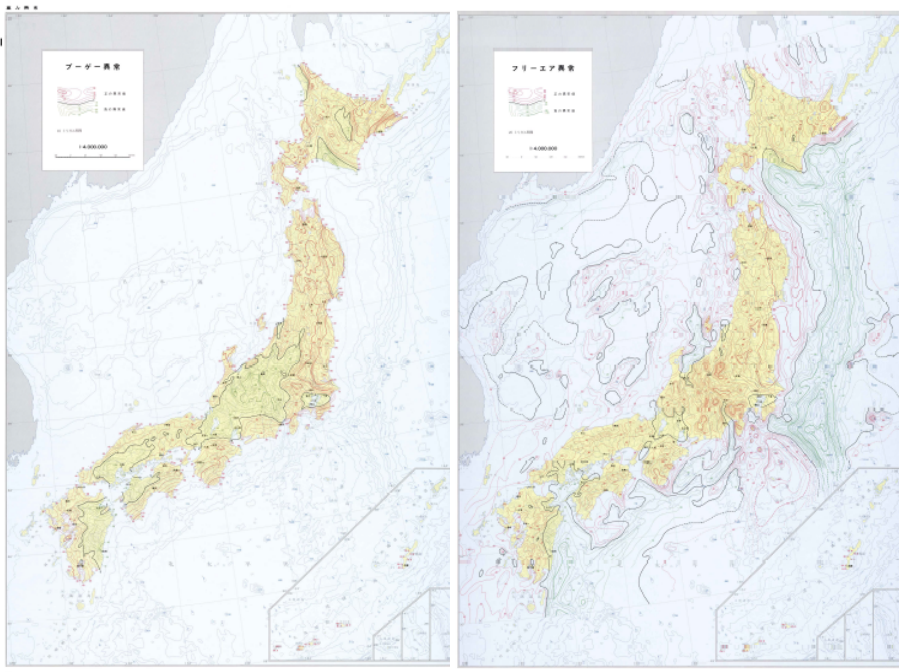
フリーエア異常: 地形質量の過剰・欠損を示す。

ブーゲー異常: 地下質量の過不足を示す。

アイソスタシーが成り立っていれば、フリーエア異常は0、均衡異常は0である。このブーゲー異常は、負となる。

アイソスタシーが成り立っていない海溝では、フリーエア異常は負で、海洋プレート沈み込みによって、日本海溝では海面下の物質が質量不足が起こっている。

北上山地では、フリーエア異常は正となっており、物質が付加され質量が過剰となっていると考えられる。



# 海嶺付近の重力異常

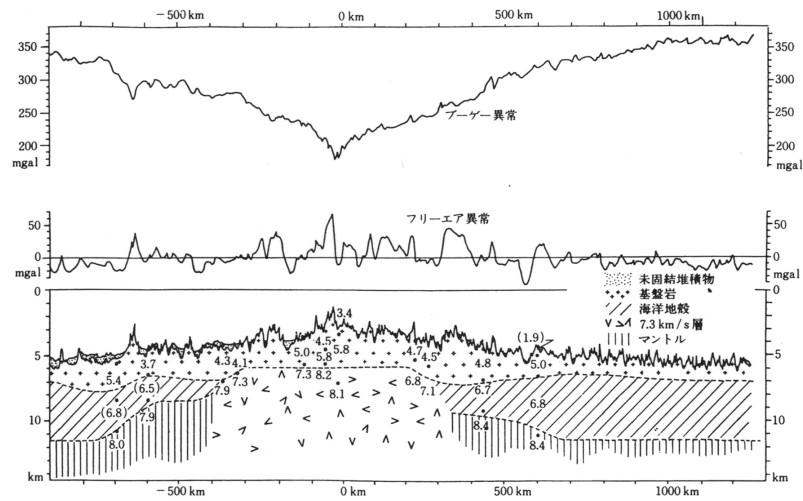


図 3.3 重力および地震探査法による大西洋中央海嶺(MAR)の構造断面(Talwani et al., 1965). 数字は  $V_p$ (km/s). 縦横スケール比は 40 : 1.