

地上**重力**観測で 質量の動きを診る

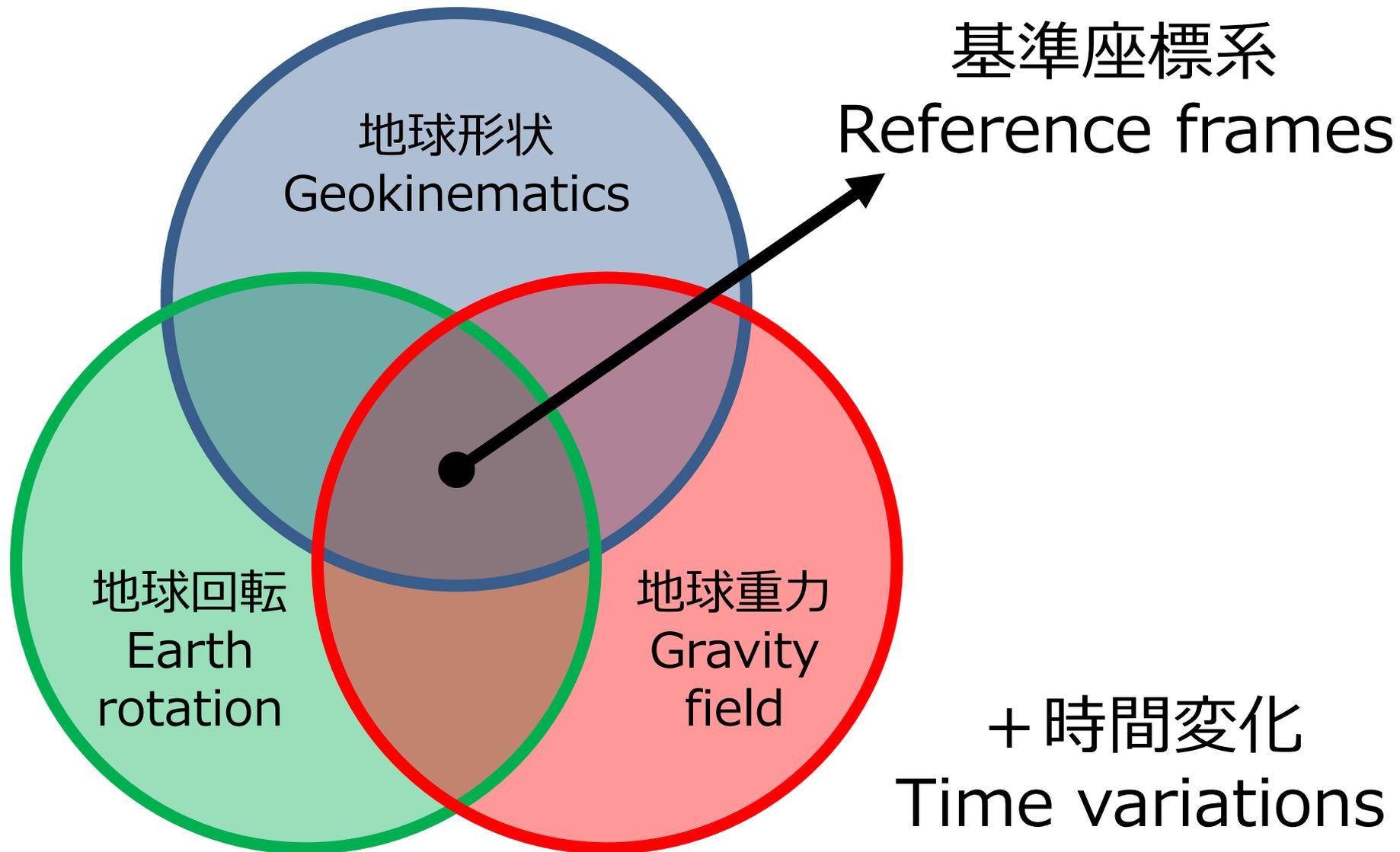
京都大学理学研究科 測地学研究室

風間 卓仁 (かざま たかひと)

takujin@kugi.kyoto-u.ac.jp

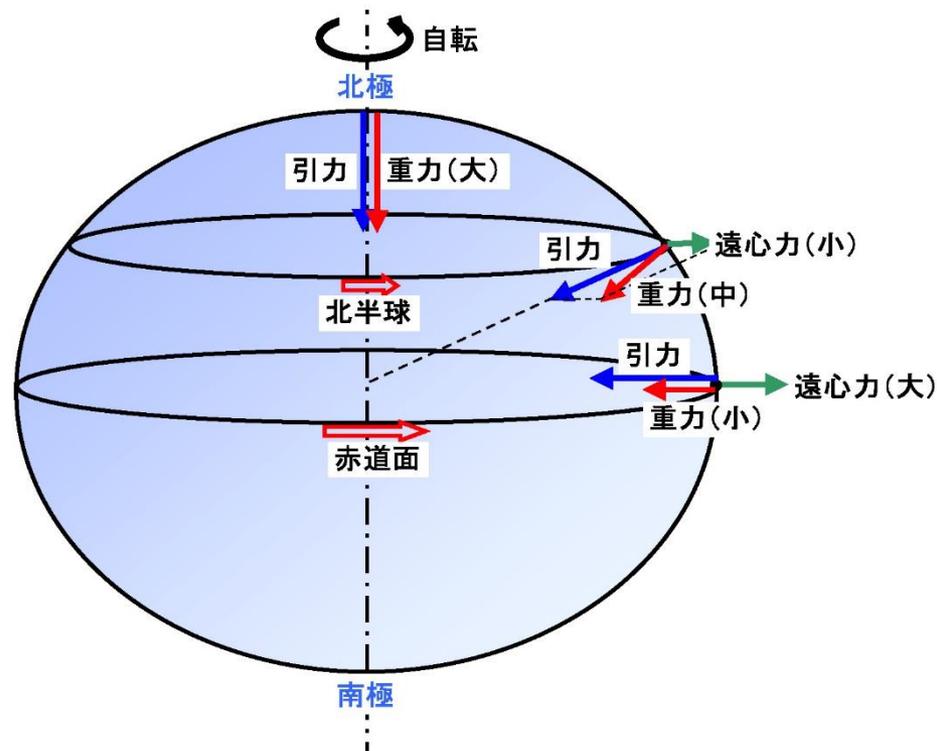
測地学の三本柱

(IAG-GGOSのページを参考)



重力とは何か？

- **万有引力**：地球質量が物体を引っ張る力
- **遠心力**：地球の自転のためにかかる外向きの力
- **重力**は**万有引力**と**遠心力**の和（合力）！



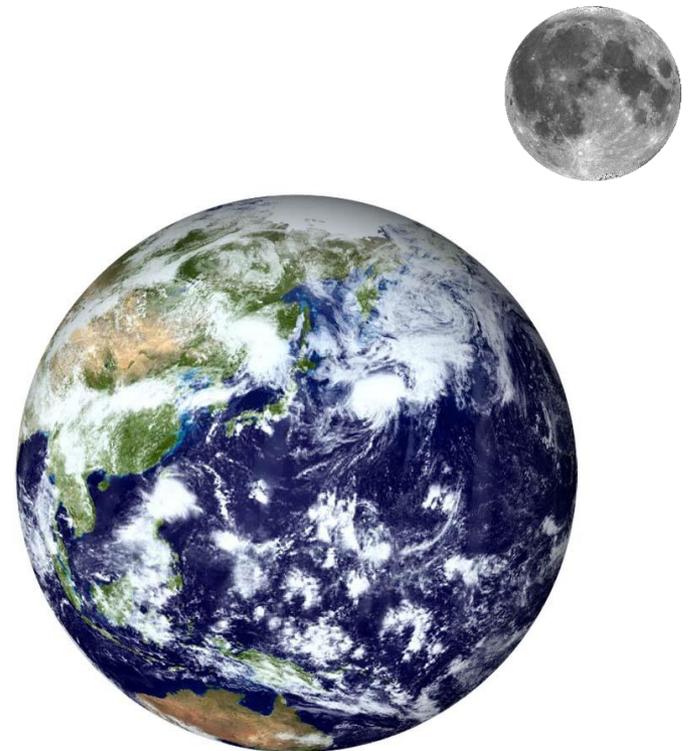
万有引力

- 天体の質量 M が大きいほど万有引力も大きい
- 天体との距離 R が短いほど万有引力が大きい
- G は万有引力に固有の不変定数

$$f_a = \frac{GM}{R^2}$$

地球を円と仮定すると

$$f_a \doteq 9.8 \text{ m/s}^2$$



遠心力

- 回転角速度 ω が大きいほど遠心力が大きい
- 自転軸との距離 r が長いほど遠心力が大きい

$$f_c = r\omega^2$$

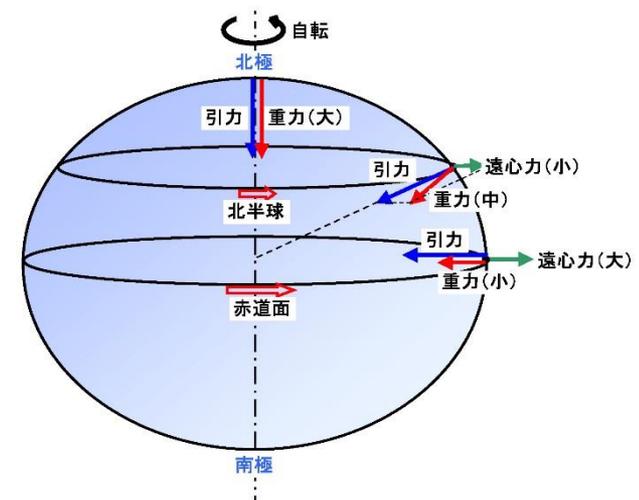
地球の赤道では
 $f_c \doteq 0.03 \text{ m/s}^2$



重力と緯度の関係

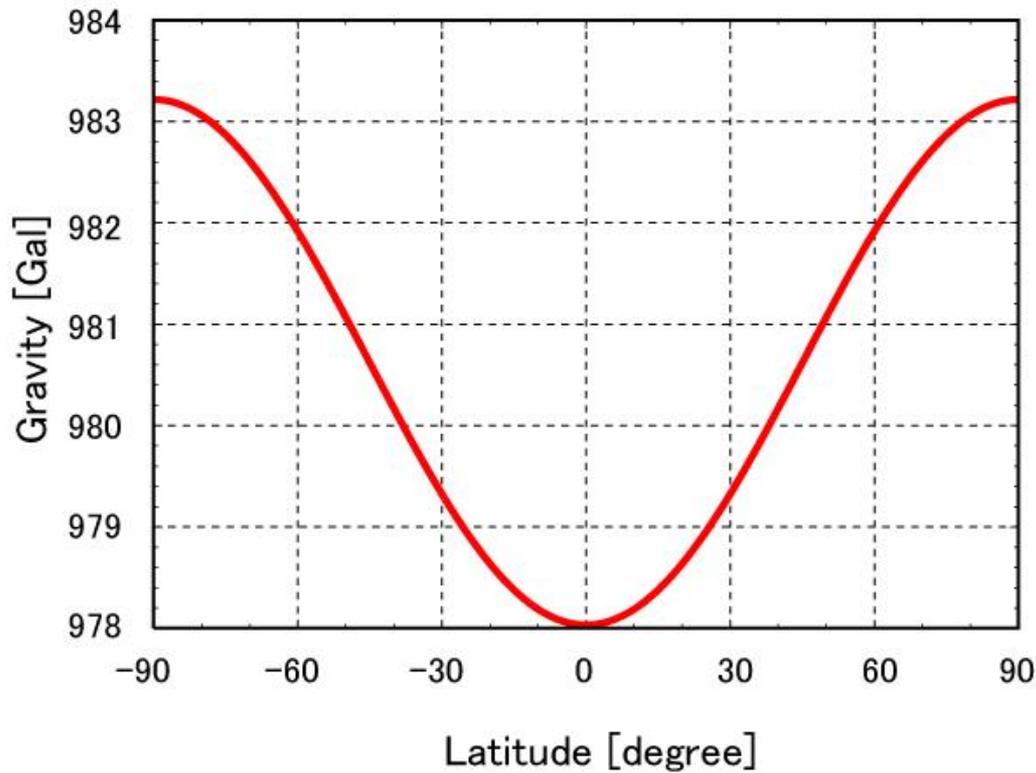
- 地球は自転のため極半径より赤道半径が大きい
→ 万有引力（中心向き）は赤道の方が小さい
- 地球は北極・南極を軸として自転している →
遠心力（外向き）は赤道の方が大きい
- これらの合力である**重力**は、極で大きく、赤道で小さい

地球重力と
地球形状・地球回転の
関連性



重力と緯度の関係

(図・式：測地学テキスト)



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

$$a = 6378137 \text{ [m]}$$

$$b = 6356752 \text{ [m]}$$

$$\gamma_e = 978.032677 \text{ [Gal]}$$

$$\gamma_p = 983.218637 \text{ [Gal]}$$

- 正規重力 $\gamma(\psi)$: 地球の標準的な重力分布
- 重力の強さは緯度によって最大0.3%変化する

重力の単位

■ 地球表面における重力のおおよその大きさ

■ $1 \text{ G} = 9.8 \text{ m/s}^2 = 980 \text{ Gal}$

■ 月 = 0.17 G

■ 火星 = 0.38 G

■ 木星 = 2.37 G

■ 980. 123 456 789 Gal

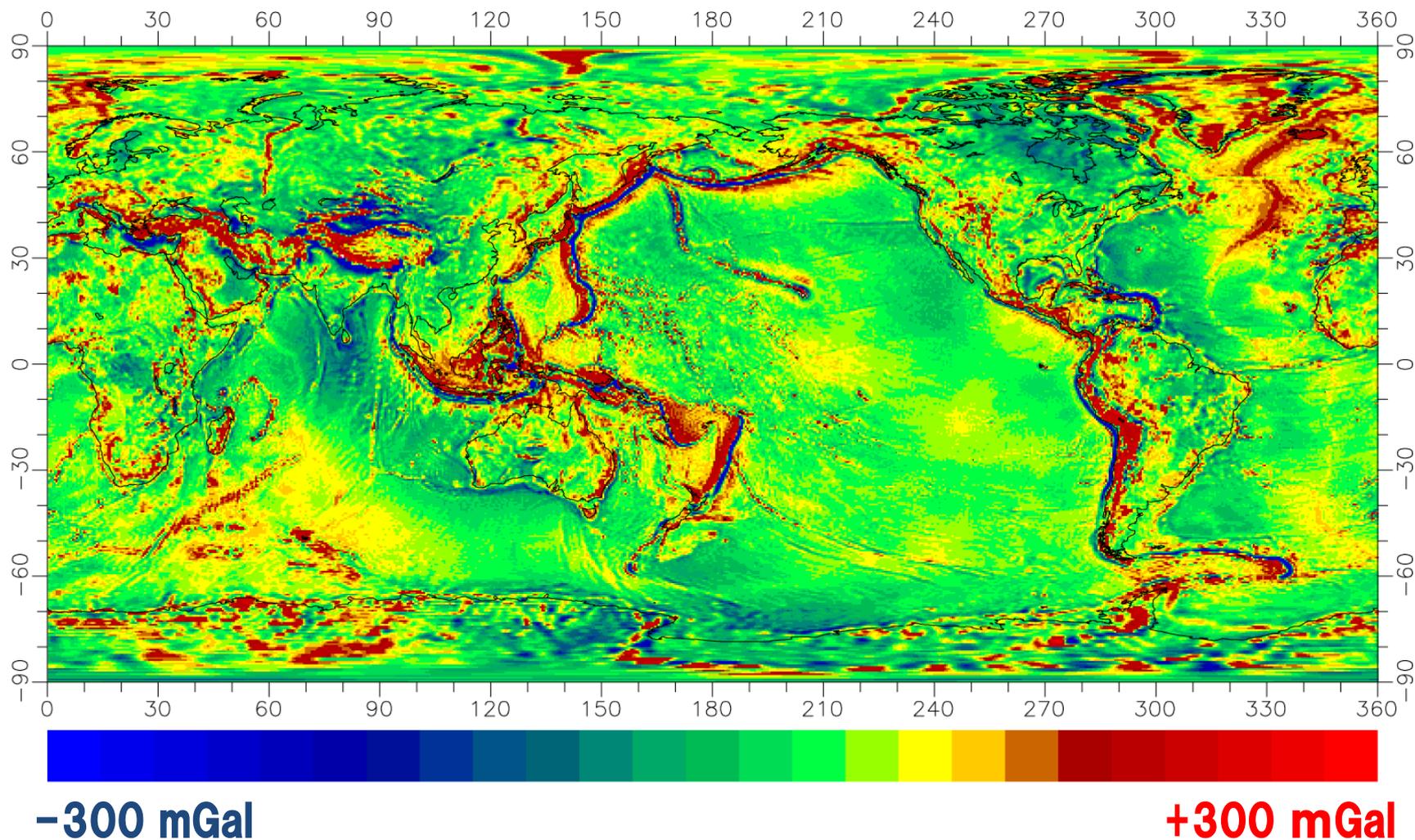
mGal

μGal

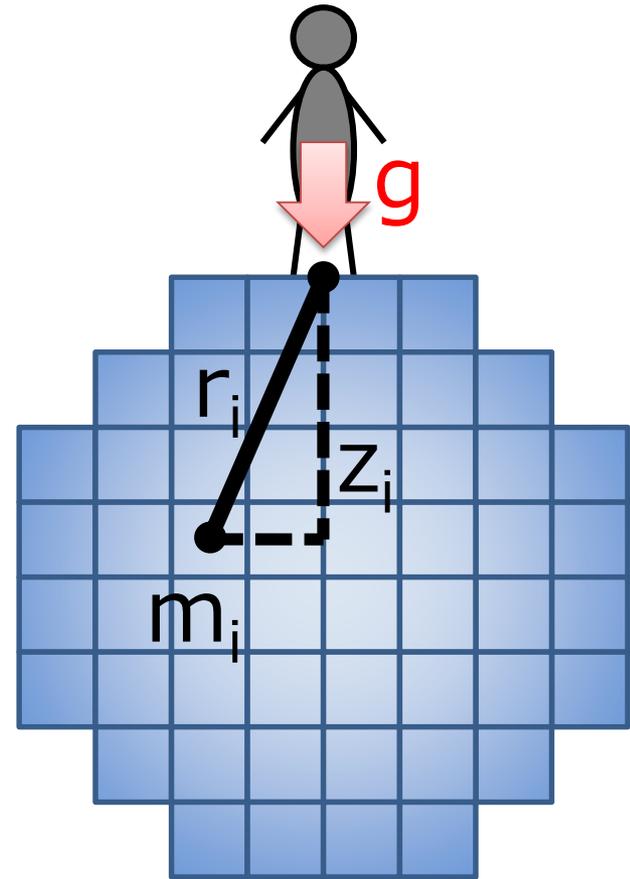
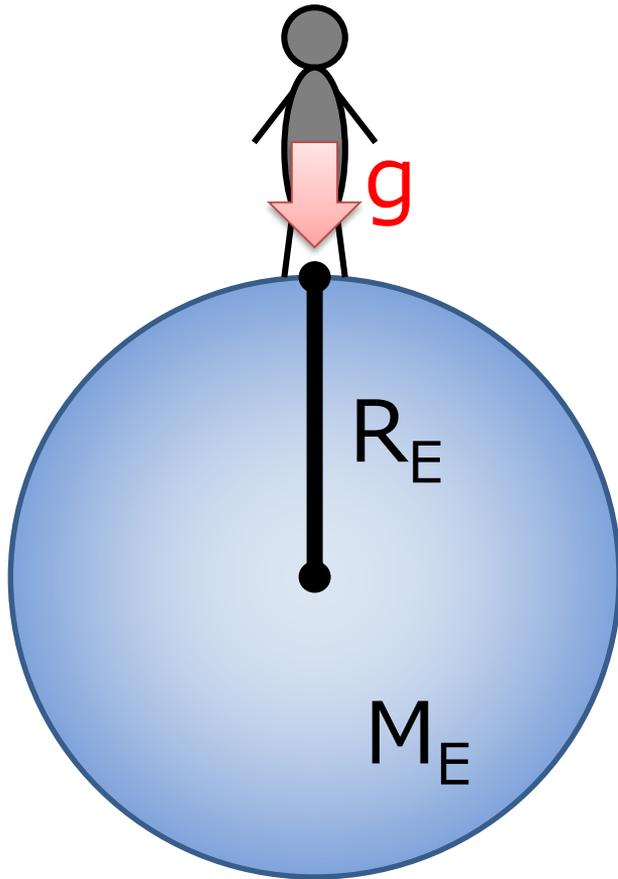
nGal

地上重力 - 正規重力

- 細かな重力分布 (= 重力異常) が残っている



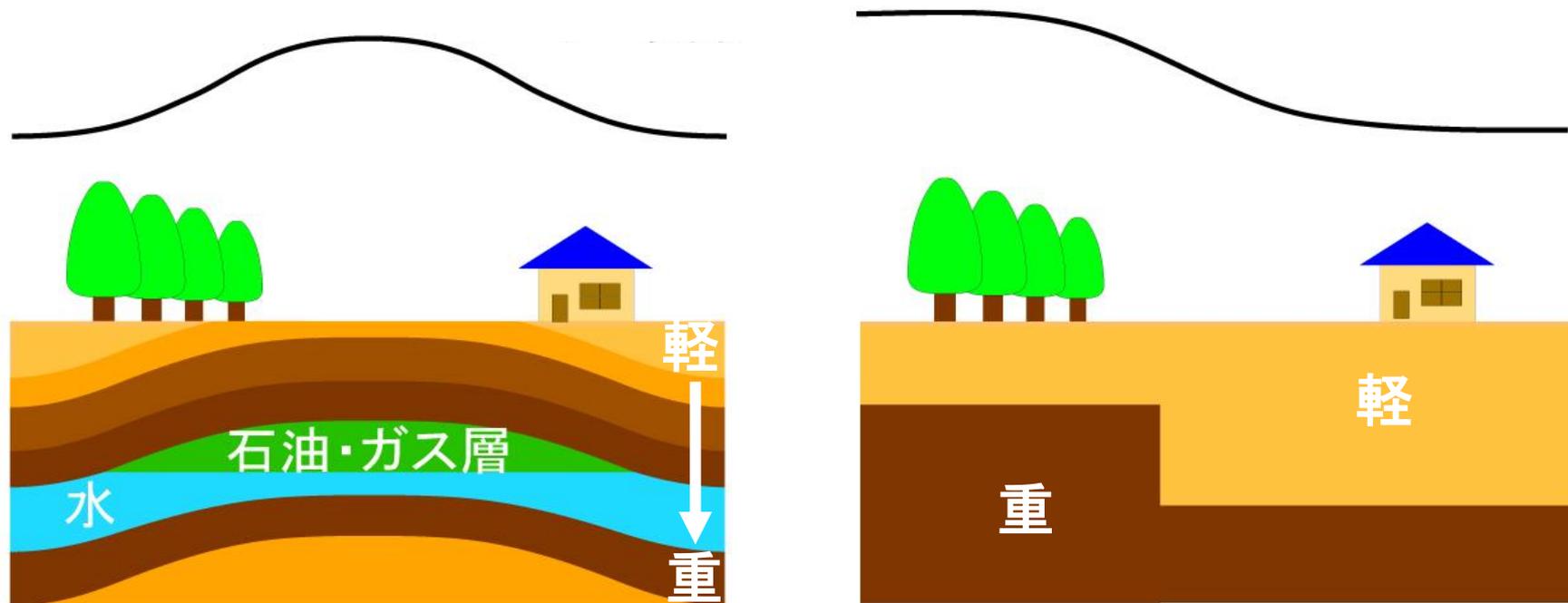
万有引力と質量分布



$$g \cong \frac{GM_E}{R_E^2} = \sum_i \frac{Gm_i}{r_i^2} \cdot \frac{z_i}{r_i}$$

重力異常ができるわけ

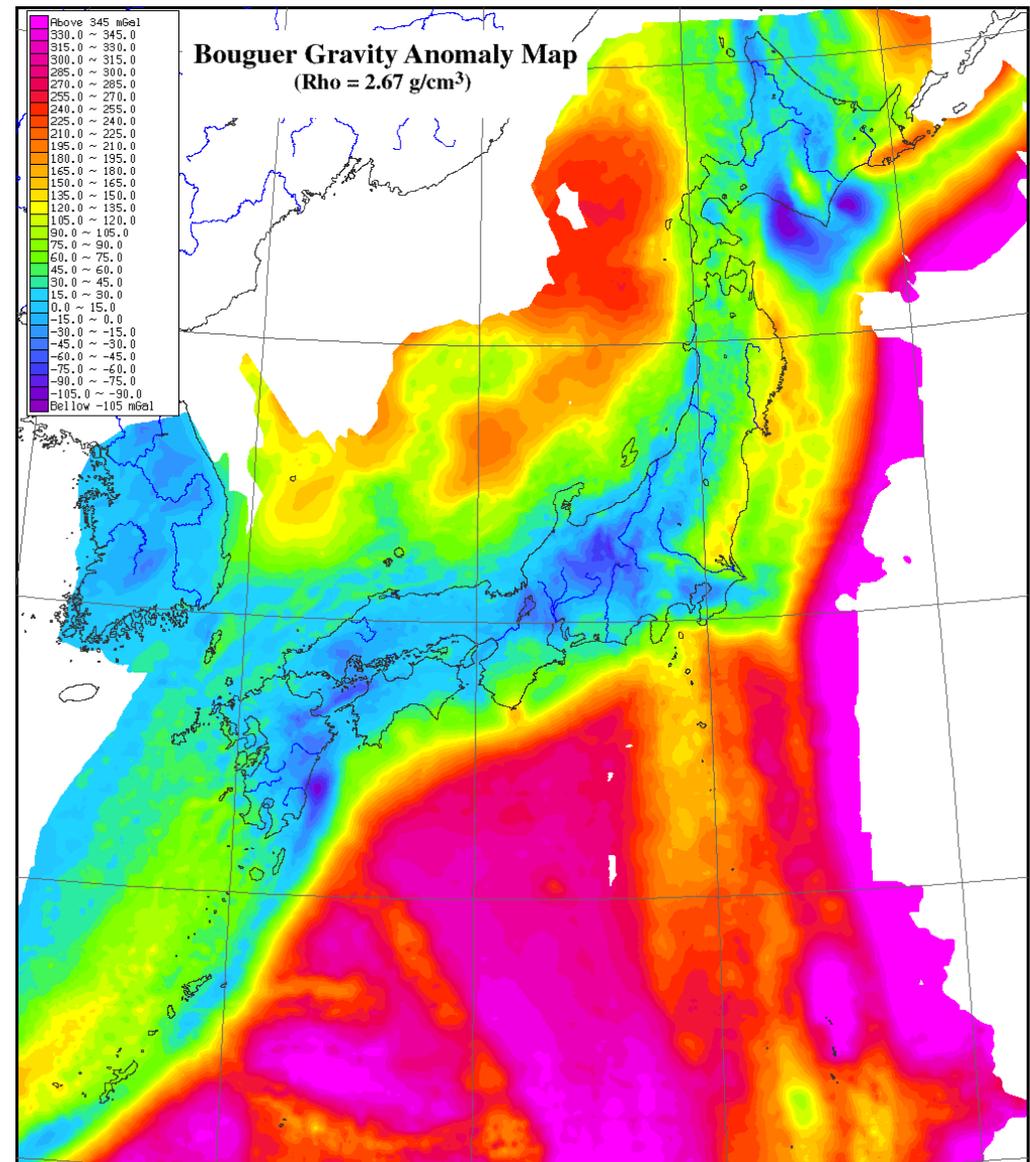
- 地球内部に重いもの・軽いものの不均質があるため、万有引力がわずかに異なるから



(図：日本測地学会)

日本のより詳しい重力異常

- 標高や地形の影響を補正したあとの重力異常図
- 本州中央部で低
- 東北太平洋側で高
- 四国・九州に重力異常のギャップ



(図：産業技術総合研究所)

フリーエア勾配

ここまでのまとめ

- 地球重力(場の決定)は測地学の三本柱の1つで、地球形状や地球回転と密接に関わっている
- 地球重力は約 9.8 m/s^2 だが、場所によってわずかに異なる
 - 緯度依存性：極で重力大、赤道で重力小
 - 水平方向依存性：地下の密度大だと重力も大（→空間的に密な重力測定によって、地下質量の分布を非破壊で知ることができる）
 - 高さ依存性：高い場所ほど重力小

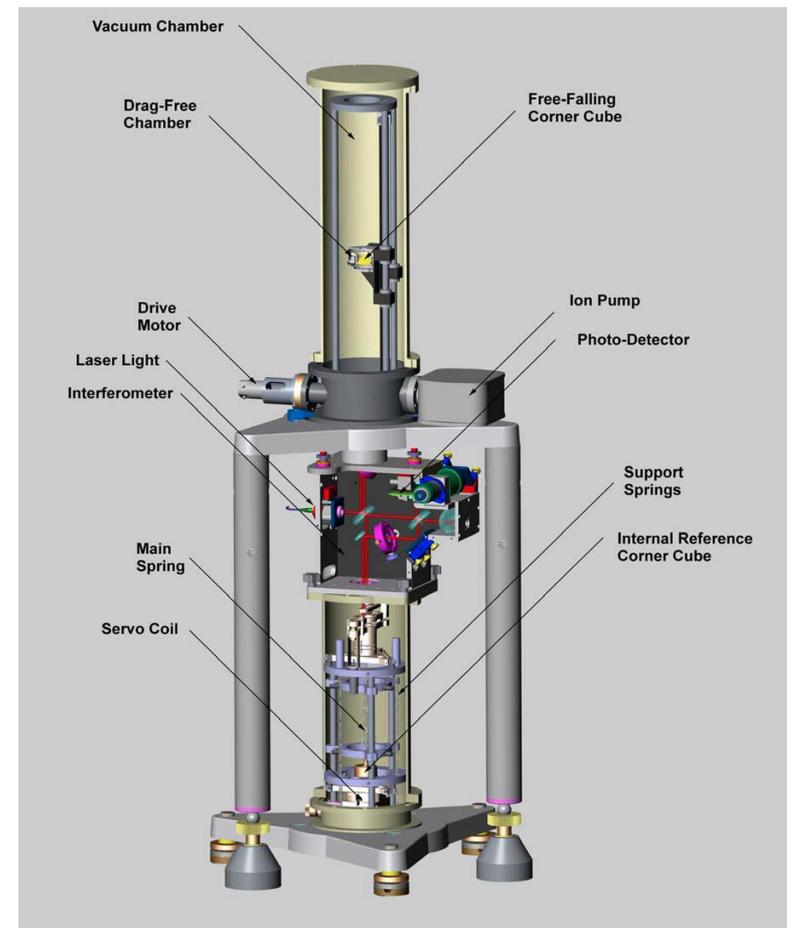
重力をはかる

- 地球重力に支配されている物体の運動を観察・記録すれば、間接的に重力値を測定できる

絶対重力計

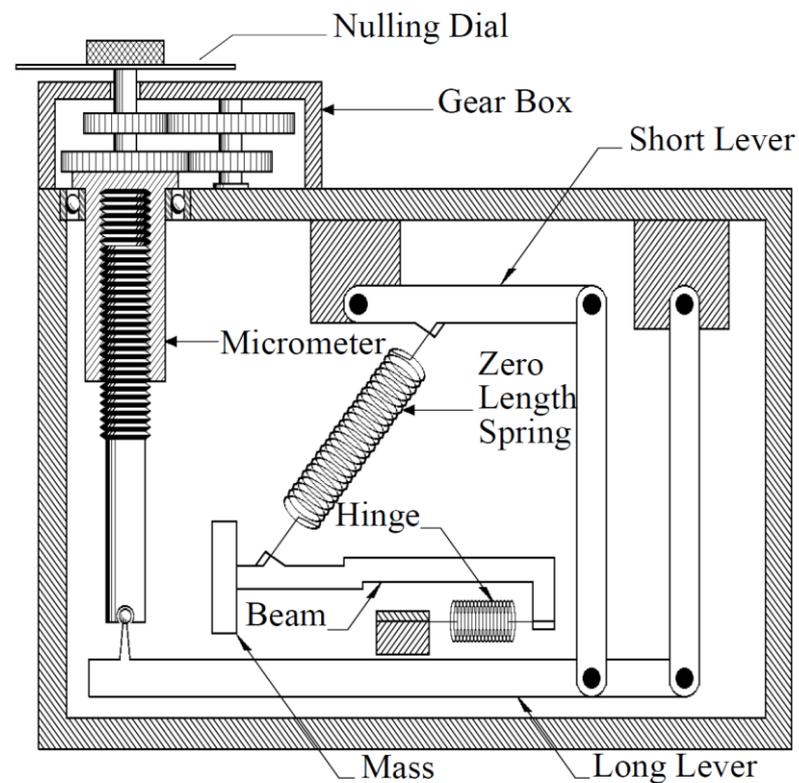
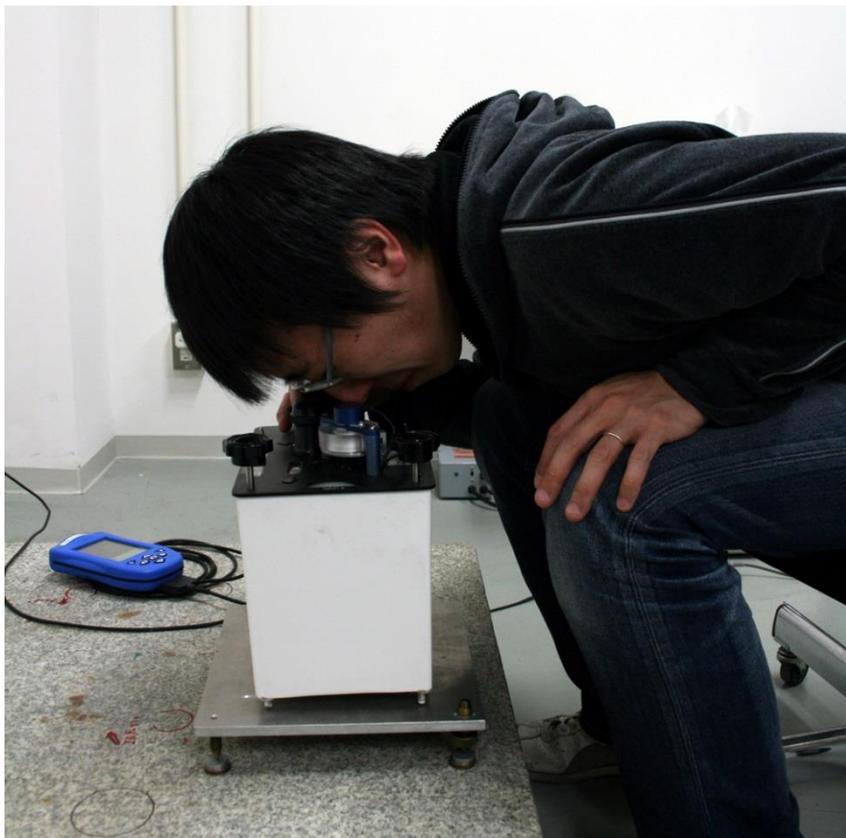
(図 : Micro-g LaCoste)

- 真空中でミラーを落下 → 落下距離・落下時間を精度よく測定 → 絶対重力値を決定



バネ式相対重力計

■ばねののびと重力値の比例関係を利用

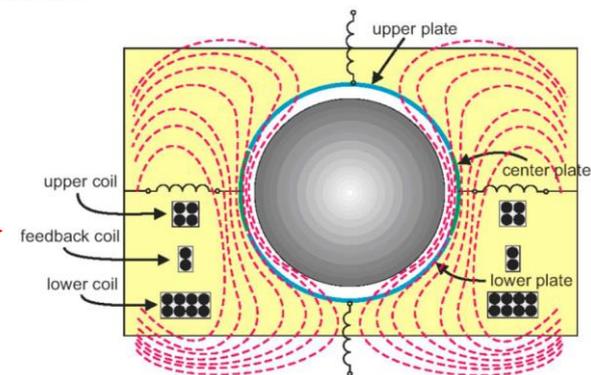
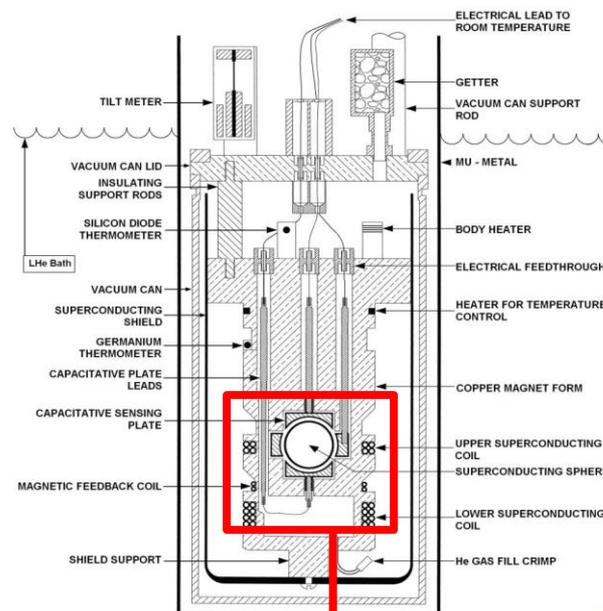


(図 : Micro-g LaCoste)

超伝導重力計

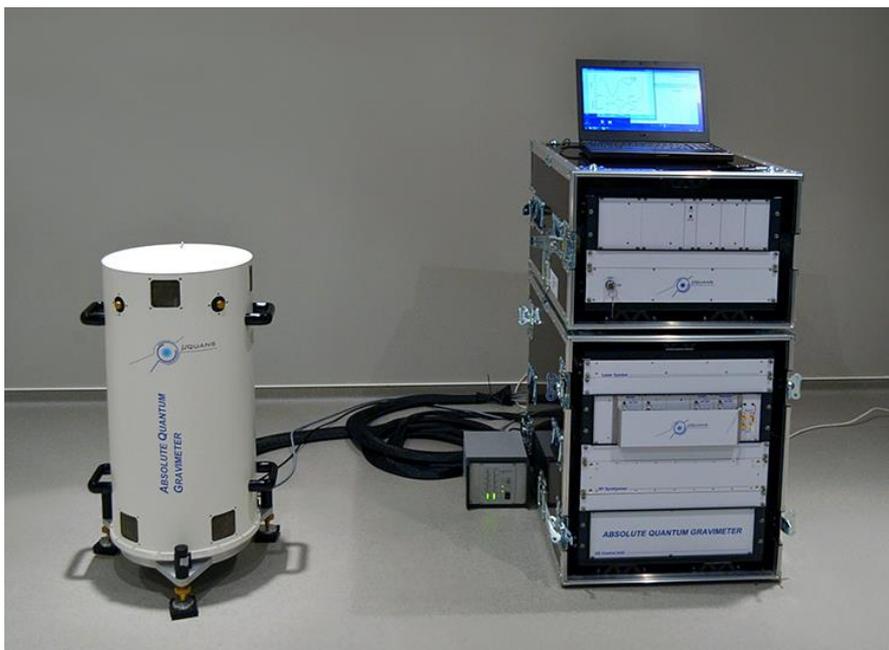
(図 : GWR Instruments)

- 液体He中のコイル（電磁石）に金属球を浮かばせる → 球の上下変位から重力変化を把握

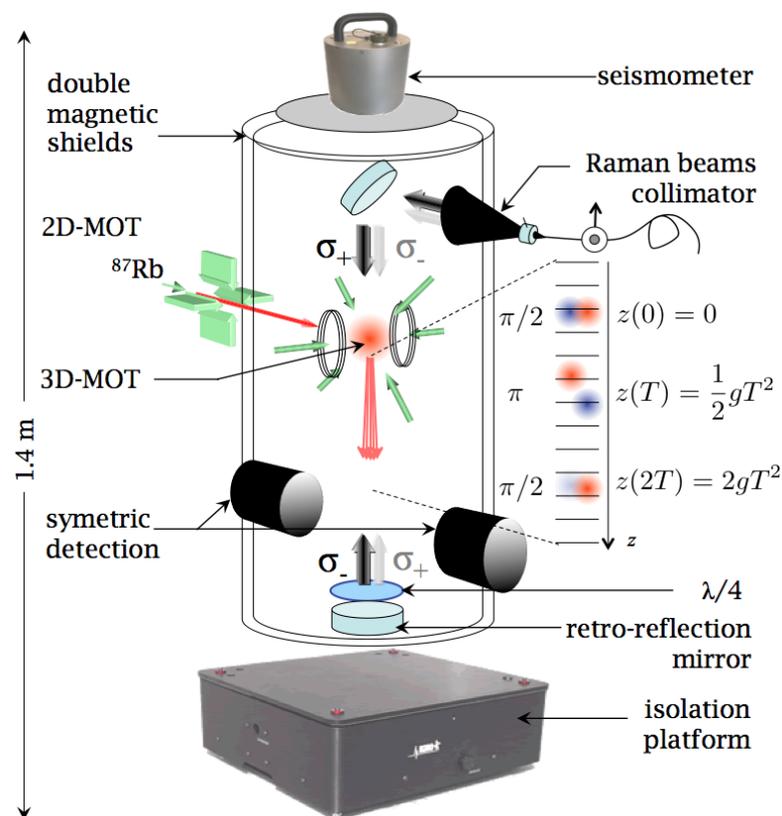


冷却原子重力計

- レーザーで原子を冷却 → 同じレーザーで冷却
原子の落下を観察 → 絶対重力値を決定



(写真 : Muquans)

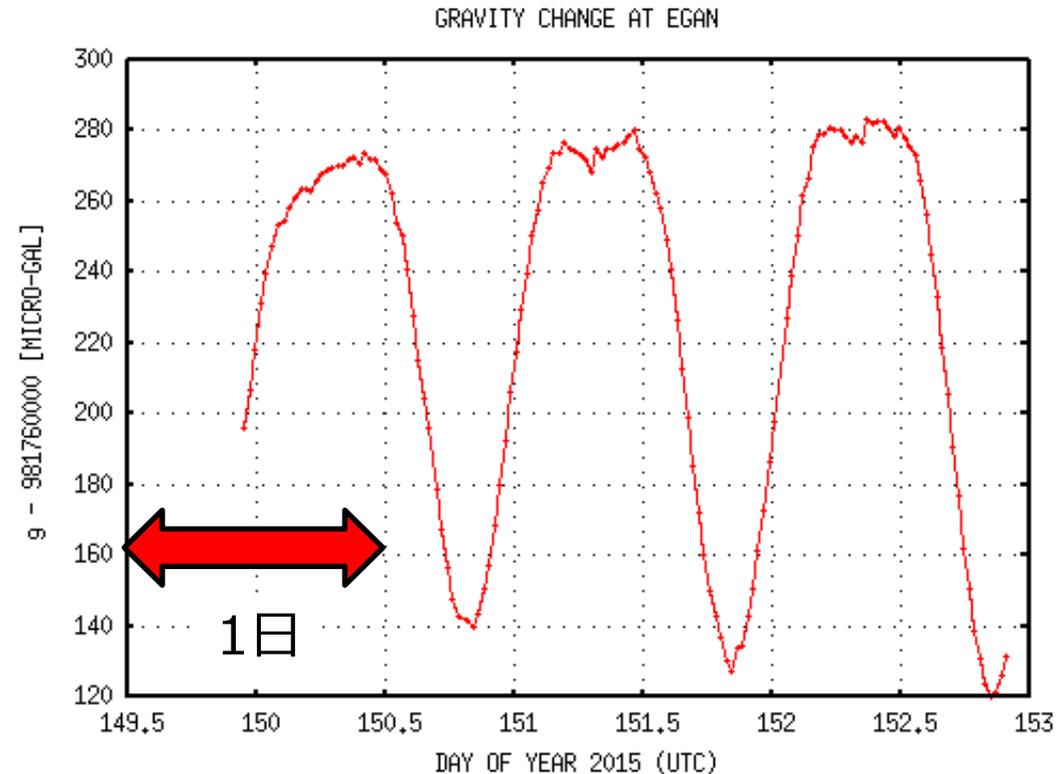


(図 : l'Observatoire de Paris)

いろいろな重力計

	絶対重力計	バネ式 相対重力計	超伝導重力計	冷却原子 重力計
精度 [μGal]	~ 2	~ 10	~ 0.01	~ a few
絶対値	○	×	×	○
器械ドリフト がない	○	×	△	○
可搬性	△	○	△	△
設置・保守が 容易	×	○	△	△
連続観測	△	△	○	○

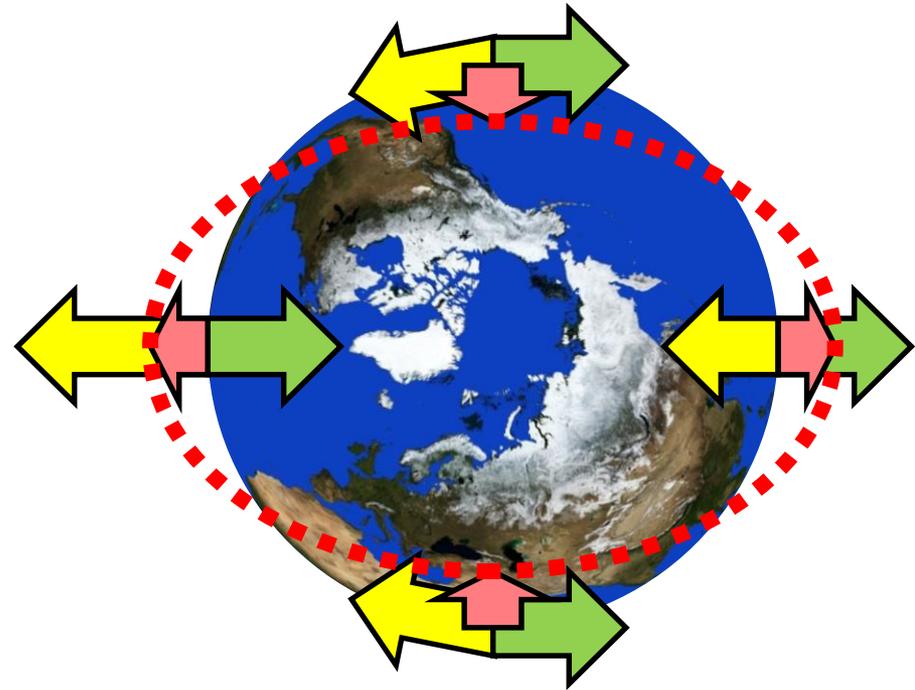
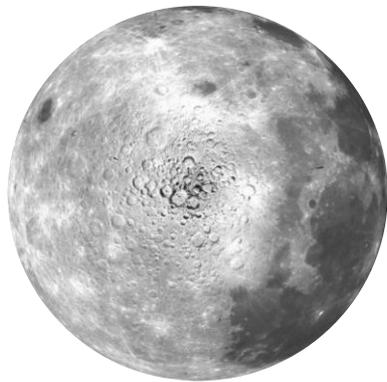
重力観測例①：アラスカ



- 重力値は場所によって異なるだけでなく、時間的にも変化している！

潮汐による重力変化

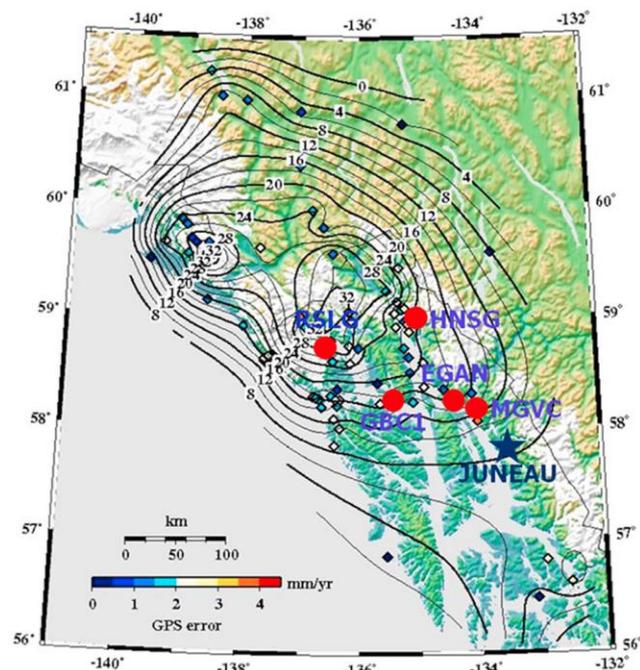
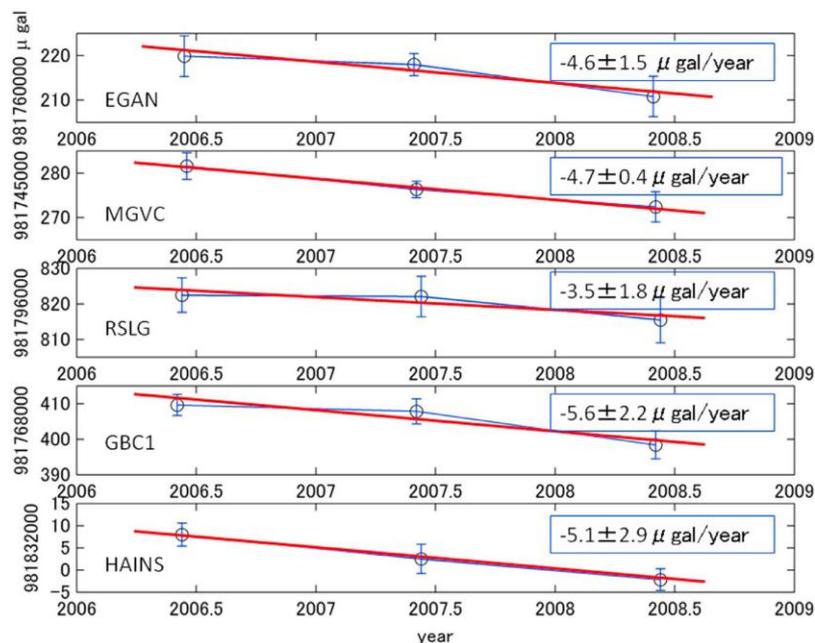
- 天体（地球の場合は月など）との位置関係で潮汐力が生じ、それが地球を変形させる
- 地球内部の質量分布変化や、地球重心からの高さ変化に伴って重力が時間的に変化



潮汐補正後の絶対重力値

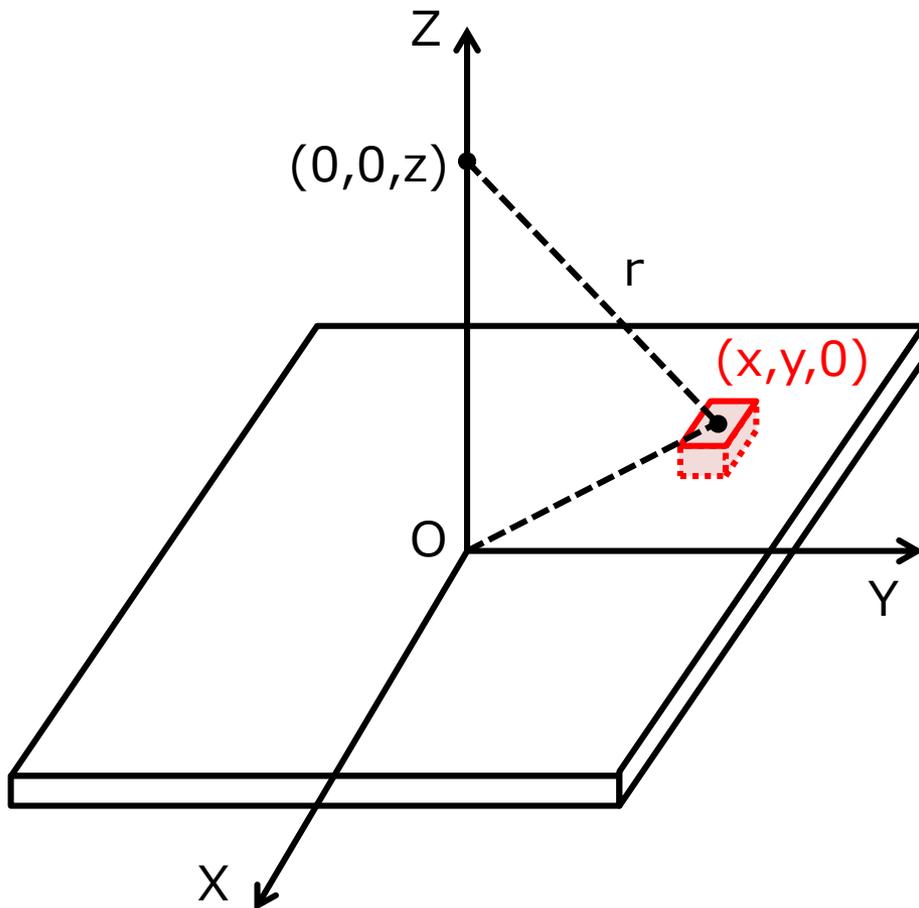
(図 : Sun et al., JGR, 2010)

- 各点は潮汐補正後の重力連続値の平均を示す
- アラスカ南東部では重力値が減少している
- 氷河融解等による質量損失や、地表の氷河荷重の消失に伴う地面隆起を反映



質量変化に伴う重力変化

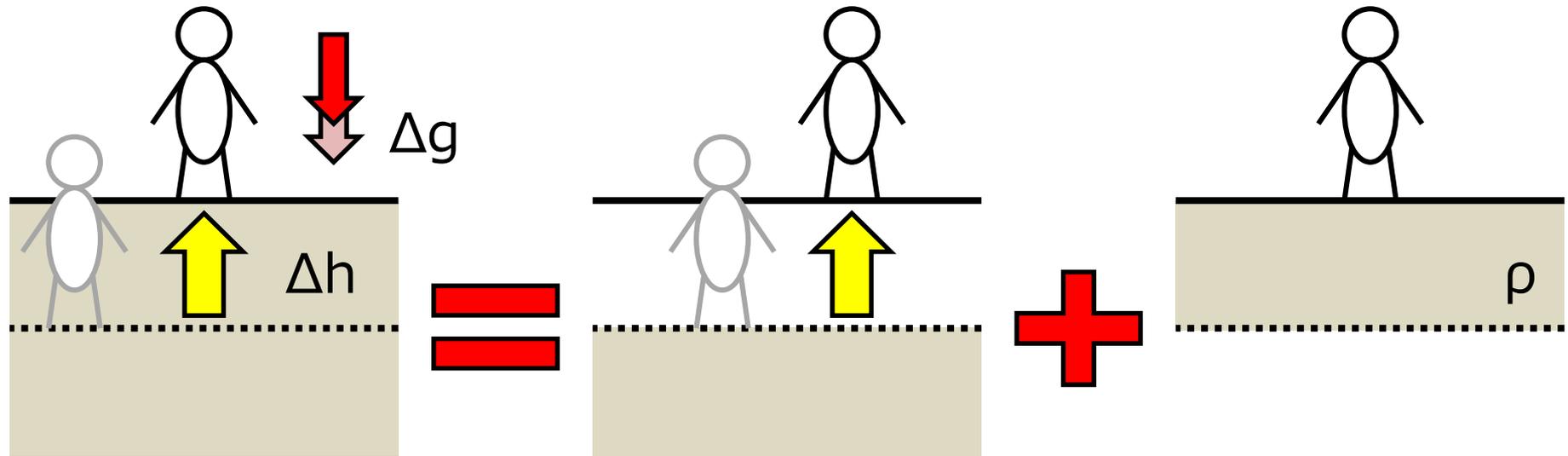
- 密度 ρ , 厚さ h のブーゲー板（無限に広い薄い板）から距離 z だけ離れた場所の重力変化



$$dg = \frac{G \cdot (\rho dx dy h)}{r^2} \cdot \frac{z}{r}$$

$$g = \int_{x=-\infty}^{+\infty} \int_{y=-\infty}^{+\infty} dg$$

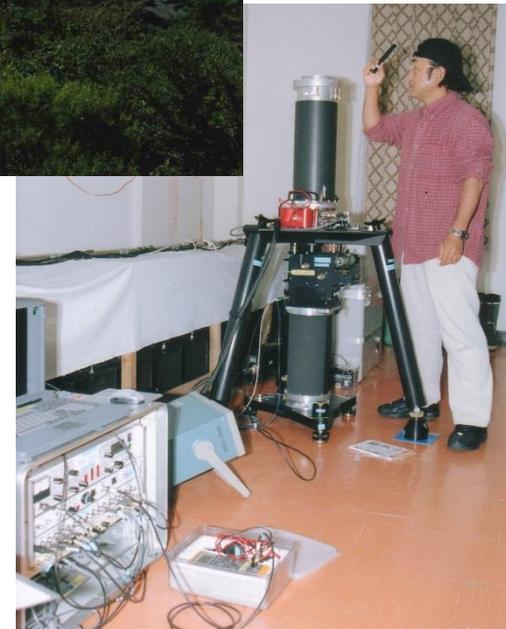
地面上下変動に伴う重力変化



- この重力変化率（ブーゲー勾配）の大きさは媒質密度 ρ によって異なるが、符合が正になることはまず無い

重力観測例②：浅間山

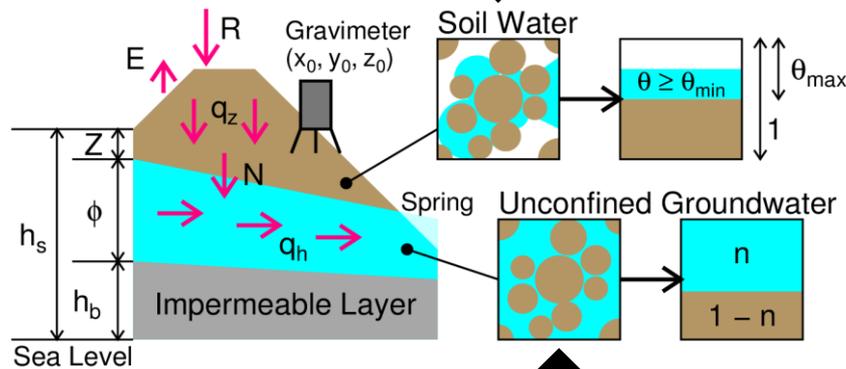
- 2004年9-11月の噴火時に絶対重力連続観測
- 重力点近くのGPS点では有意な高さ変化は記録されず
- 純粹な質量変化の積分値として重力変化を診ることができる！



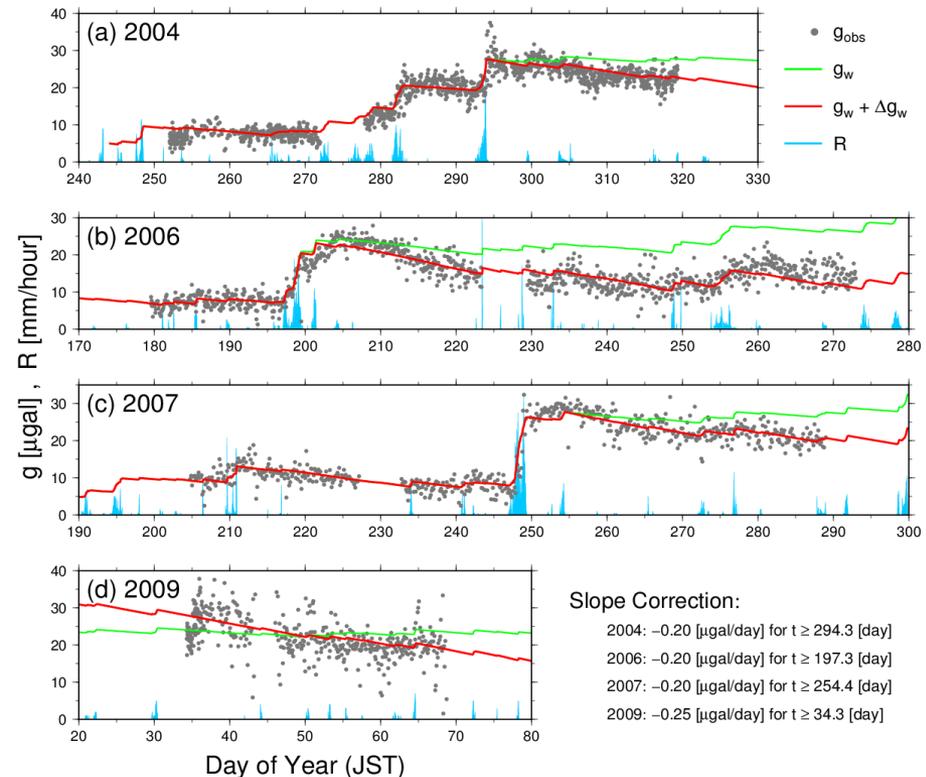
陸水移動に伴う重力変化

(☒ : Kazama et al., JGR, 2015)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_v(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K_v(\theta) \right]$$



$$n \frac{\partial \phi}{\partial t} = K_{hs} \frac{\partial}{\partial x} \left[\phi \frac{\partial(\phi + h_b)}{\partial x} \right] + K_{hs} \frac{\partial}{\partial y} \left[\phi \frac{\partial(\phi + h_b)}{\partial y} \right] + N$$

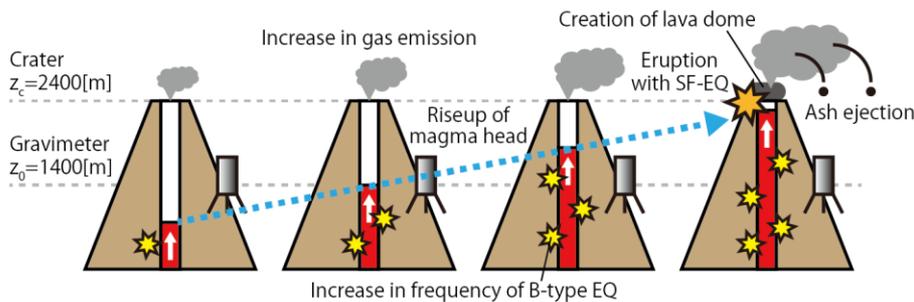
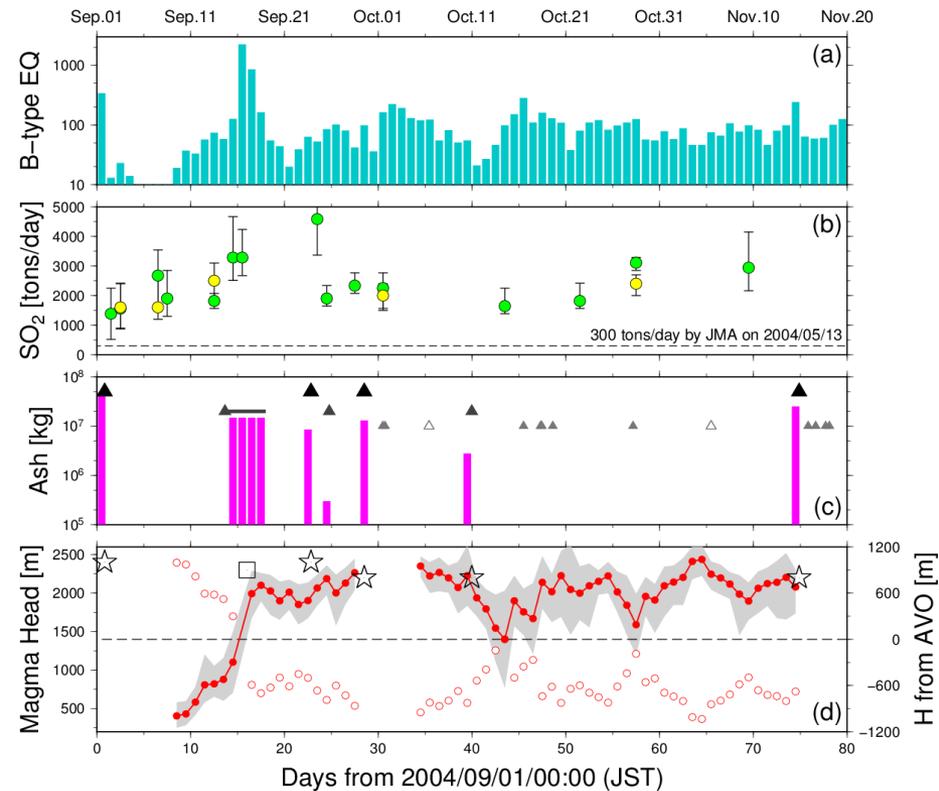
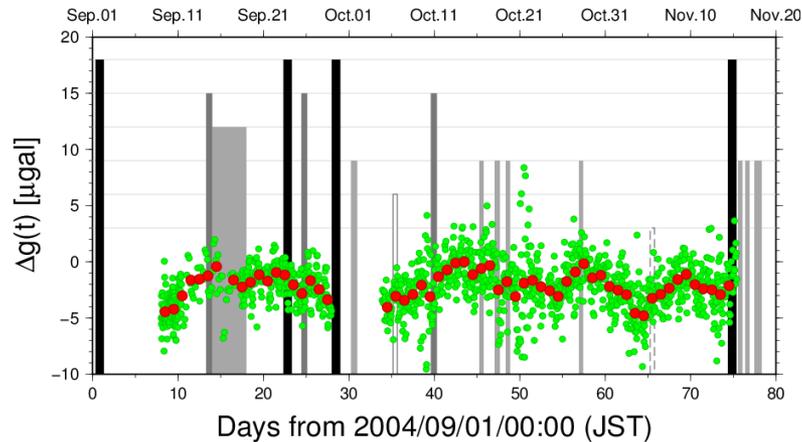


■ 降水 → 土壌水 → 地下水 → 河川水 の一連の流れをシミュレートし、水分分布の空間積分値を重力観測値と比較

陸水補正後の重力変化

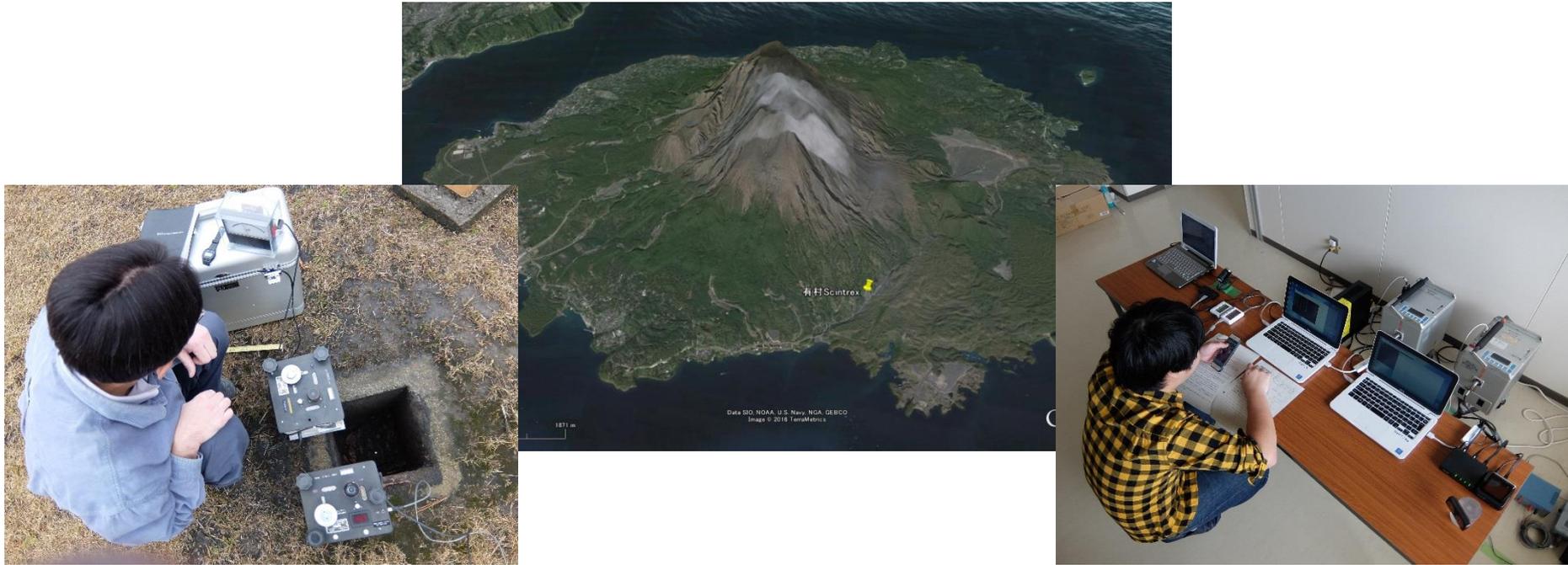
(図 : Kazama et al., JGR, 2015)

Residual Gravity in 2004



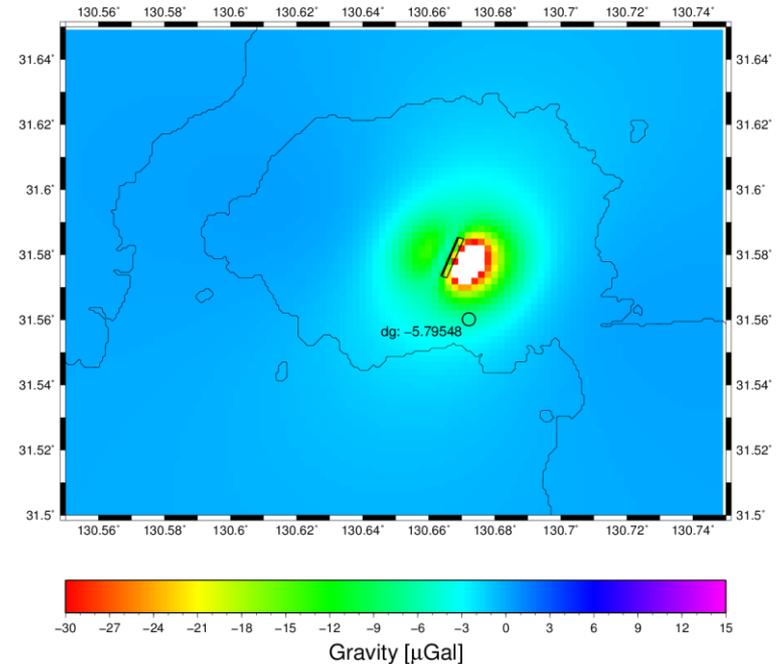
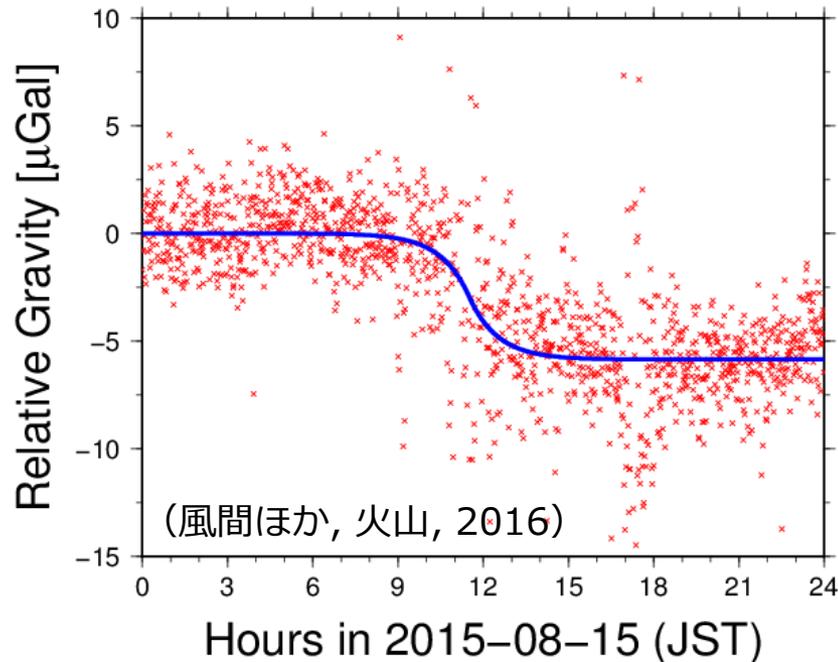
- 噴火時に重力減少 → 火道マグマの上向き引力
- 重力値を火道マグマ位置に変換すると、他の火山学的データの傾向と良く一致する

重力観測例③：桜島火山



- 有史以降も活発な火山活動が継続 → 1970年代以降は島内水準点で繰り返し重力測定
- 2006年以降は昭和火口からの噴火が活発化 → 重力計を据え置いた連続観測を継続

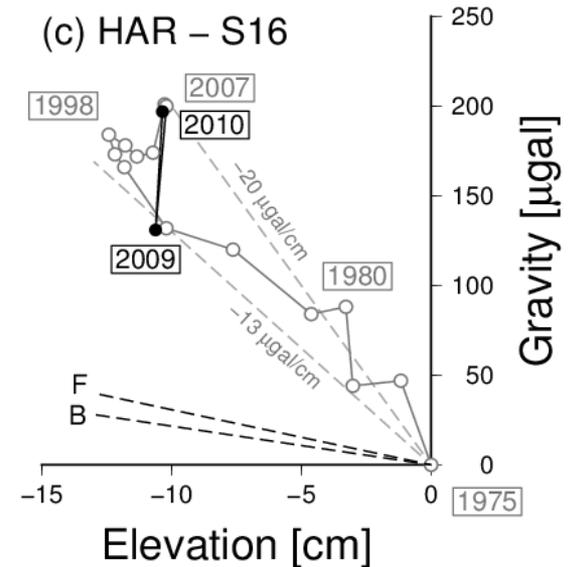
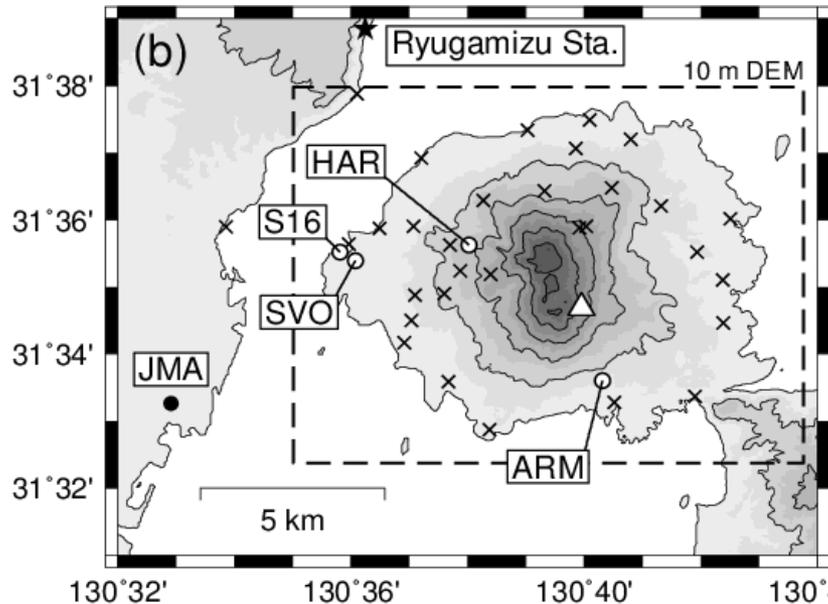
急膨張イベント時の短期重力変化



- 2015/08/15の急膨張時に -5.86 μGal の重力変化を相対重力連続観測で検出
- 国土地理院のダイクモデルに密度 ~ 1 の物質を入れると観測値を説明可 ← 発泡マグマ?

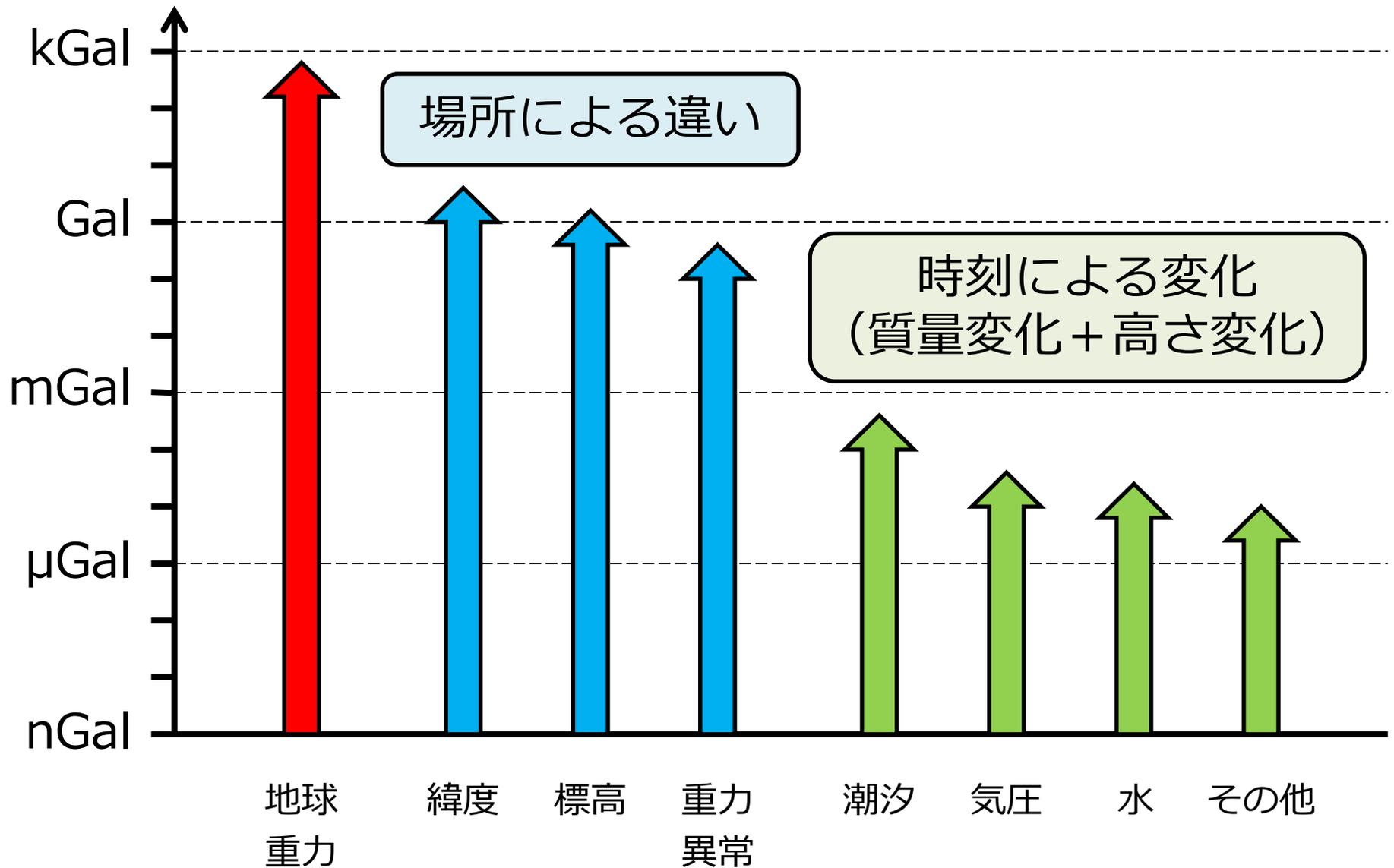
1900年代後半の長期重力変化

(風間ほか, 測地学会誌, 2014)



- 西山麓を基準とした西山腹の高さ・重力変化：重力上昇量がフリーエア・ブーゲーでは説明×
- 西山腹の直下で何らかの質量増加（マグマ蓄積？干上がった地下水の回復？）

重力時空間変化まとめ



本講義のまとめ

- 重力値は質量分布の空間積分なので、質量分布の時空間的变化に伴って重力も時空間変化する
- 重力値を正確に繰り返し（あるいは連続的に）測定し、かつ既知の重力変化の要因を補正することで、質量分布の時間変化やそれを引き起こす地球科学的現象を把握することができる
- 現在使用されている重力計にはそれぞれ長所短所があるので、目的や方法に応じて使い分ける・組み合わせることが重要