

第5章 測地・固体地球変動

5.6 地球重力場と時間変化

地球の重力場と重力異常

地球表面における重力加速度は約 9.8 m/s^2 であるが、固体地球科学ではこれをしばしば 980 gal と表す。地表における重力は万有引力と自転に伴う遠心力の合力であるため、それらが打ち消し合う赤道直下では両極に比べて 0.5% ほど重力が弱くなる。また中緯度における重力の向きは地球中心からややずれており、重力と直交する等ポテンシャル面も球からずれ、赤道部分が 20 km 程外側に張り出す (平均海面に一致する等ポテンシャル面はジオイドと呼ばれる)。固体地球の表面も大局的にはこの等ポテンシャル面に沿って赤道が張り出している。

重力加速度の絶対値は、真空中での物体の落下の加速度を直接測る絶対重力計を用いて、十億分の一 (μgal) の違いがわかる精度で決定することができる。また、磁気浮上させた超伝導物質でできた球の上下変位を検出する超伝導重力計を用いると、重力のかすかな時間変化も計測できる。こういった重力計を用いて、地表の「点」で重力を計測することが従来の主流であった。しかし昨今では、人工衛星の軌道進化によって、全地球の重力分布 (重力の非球対称成分) を短期間かつ一様な精度で「面」的に計測することができるようになった。

衛星で重力を測る場合、地球の自転がつくる遠心力は考えなくてよい。そのため、衛星で計測した重力場は純粋に地球の質量分布を反映する。例えば地表での計測とは逆に、赤道上空で測った重力は極上空より幾分強くなる。これは赤道部分の膨らみがつくる余分の引力のためである。地球重力場を球面調和関数の重ね合わせで表すと、この成分は次数 2 、位数 0 の成分となるので、 C_{20} 成分 (又は J_2 成分) と呼ばれる。

緯度に依存する C_{20} 成分を除いた後に残った、数十 mgal 程度の重力の不均一を重力異常と呼ぶ。重力異常に寄与するのは地形と地下の密度構造であるが、観測

されたままのフリーエア異常 (観測を行った高度の違いによる差のみを補正) と、地形の分を差し引いたブーゲー異常 (フリーエア異常から、基準面からの地表の凸凹が作る重力の分を計算して取り除いたもの) でその意味合いは異なる。後者は地下の密度分布を反映し、密度の小さな地殻岩石と密度が大きなマンツルの境界であるモホ面の起伏等が浮かび上がって見える。

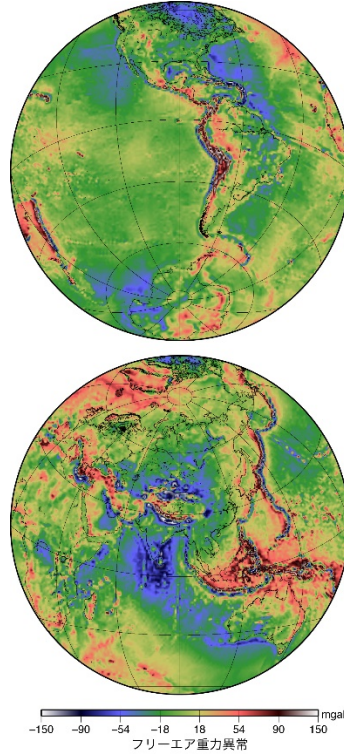


図1 GRACE 衛星で求められたフリーエア重力異常。次数 360 次までの球面調和関数の重ね合わせで表されている。

一方前者のフリーエア異常は、アイソスタシーによって地表の凹凸がモホ面の凸凹で補償されたりほぼゼロとなる。従ってフリーエア異常の存在はアイソスタシーの不成立を意味し、地形が若い、岩盤が固い (リソスフェアが厚い) 等の要因を浮き彫りにする。たとえば、海溝における負の異常、島弧の正の異常な

どが顕著である (図1)。一方安定大陸上の古い山脈 (アパラチア山脈等) が正の異常を伴っていないのは、アイソスタシーが成り立っていることを示唆する。

重力の時間変化

C_{20} 成分などの低次の重力場は、反射鏡を備えた測地衛星に対してレーザ測距を行い、その軌道要素のわずかな時間変化 (摂動) から推定されてきた。しかし地球重力場の「時間変化」の計測は次数 3 (空間分解能で $7,000 \text{ km}$ 程度) が限界であった。2002年に米国とドイツが共同で打ち上げた GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星は、双子衛星の距離変化から約一か月で全球の重力異常を計測できる衛星である。その打ち上げ以来、次数 60 次程度まで (空間分解能で 300 km 程度) の重力時間変化が観測できるようになった。そこから潮汐や大気がつくる既知の重力変化を取り除けば、地球の内部や表層で起こる質量の再分配の様子が浮かび上がる。

重力は様々な時間スケールで変化するが、数 μgal 程度のわずかなものである。ここでは季節変化、突然の変化、ゆっくりとした経年変化に分けて説明する。季節変化はそのほとんどが地表の水の再分配に伴うものである。低緯度地域では雨季と乾季の繰り返しに伴う土壌水分の変化が、また中高緯度では冬季の積雪が、重力の季節変化をもたらす。海洋では一般に重力変化自体が小さいが、狭い海峡でのみ外海とつながる紅海等では海水の質量変化が重力季節変化をもたらす。

突然の重力変化は大きな地震が原因である。2002年の GRACE 打ち上げ以降、2004年のスマトラ・アングマン地震、2010年チリ地震、2011年東北沖地震等の海溝型巨大地震に伴う重力変化が報告されている。地殻変動と同様に、地震時のステップ状の変化と、地震後のゆっくりとした変化の双方が顕著である。地震時の変化は、震源陸側の重力減少で特徴づけられる。それはおもに断層下端の上/下に生じる岩石密度の減少/増加に起因しており、地表やモホ面の上下変動の影響はそれほど大きくない。また地震後の重力変化は断層真上の重力増加で特徴づけられ、上部マンツルの粘性緩和の寄与が大きい。

2002年の GRACE 打ち上げ以降の重力の経年変化に

は、地球温暖化に伴う山岳氷河や大陸氷床の融解の影響による重力の減少が重要である (図2)。重力減少が顕著なグリーンランド南部、アラスカ南西部、チベット高原周縁のアジア高山域、パタゴニアなどが代表的である (図2右上はグリーンランドの時系列)。融解した水は海域の重力を増加させるが、こちらは広域で起こっているため図から読み取ることは難しい。

一方カナダ北部やスカンジナビア半島で重力が増加しているのは、最終氷期で氷床に覆われていた地域の後氷期回復 (Post-glacial rebound) に伴うものである (図2左上は北部カナダの時系列)。氷床の消失に続くアイソスタシー回復の過程として、周辺地域からマンツル物質が流入して地表が隆起し、それが質量の増加として見えているのである。

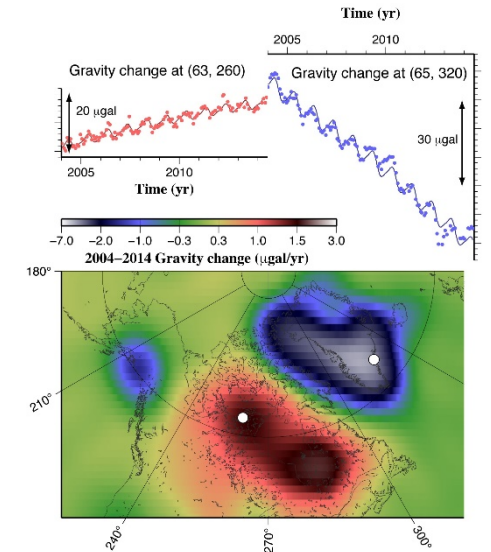


図2 GRACE 衛星で求めた 2004 年から 2014 年までの北米北部における平均的な重力変化の分布を色で示したもの。次数は 60 次までとった。赤は増加域、青は減少域である。上に示す時系列は、地図中に白丸で示すカナダ (左) とグリーンランド (右) の点における重力変化であり、丸が GRACE の観測データ、曲線が季節変化と経年変化で表したモデルを示す。いずれの地点でも季節変化と、経年変化の双方が顕著である。 [日置幸介]