

地球に働く力

(1) 力

物理学の「力」とは、物体を動かしたり（物体の状態を変化させる）、変形させたりする原因となるものです。力大きく分けて、自然界に存在する 4 つの基本的な力と、身の回りでよく見られる力に分類されます。自然界の 4 つの力は、重力、電磁気力、強い力、弱い力です。身の回りの力としては、重力のほかに、弾性力、摩擦力、垂直抗力、磁力、張力などがあげられます。重力は物体を地球の中心に向かって引き寄せる力です。電磁気力は電気と磁気の力で、静電気、磁石の力、そして電子と原子核を結びつける力、原子同士を結びつけて分子を作る力などで、プラスとマイナスの電荷を持つ物体同士が引き合い、同じ電荷同士が反発しあう力です。強い力は原子核の中で陽子と中性子をまとめる力です。弱い力は放射性崩壊（ベータ崩壊）など素粒子の種類を変える力です。ここでは重力のみ取り上げます。

(2) 重力

空中でものを離すと、その物体は下へ落ちるのは、その物体に重力が働いているからです。地球は自転しているため、地球上の物体は引力だけでなく、遠心力の影響も受けることになります。このふたつの力を合わせた力を「重力」といいます。万有引力は地球の物体（質点）からの距離の 2 乗に反比例します。地球の質点（地球の全質量）は地球の中心にあると考えますので、^{かいてんだえんたい}回転楕円体（地球の大きさに近い楕円形を短軸の周りに回転させてできる立体）である地球では赤道が距離最大となり、引力は最小になります。極は距離が短いため最大になります。遠心力は地球の自転軸（回転軸）からの距離に比例します。したがって、赤道で最大、極で最小（回転軸上にありますので距離が 0＝遠心力 0）となります。力には、「大きさ」と「方向」があり（ベクトル）、引力と遠心力は働く「方向」が異なる（大雑把に言うと引力に逆らう向き）ため、合力と言っても引力から遠心力を差し引いた形になります。したがって、赤道では「引力（最小）－遠心力（最大）＝重力（最小）」、極では「引力（最大）－遠心力（0）＝重力（最大）」となります。「大きさ」は、「加速度」で表します。

一般的には、重力による加速度（単位ガル [Gal]：ガリレオ・ガリレイにちなむ）を単に重力と言います。遠心力は引力に比べ非常に小さいので、多くの場合、遠心力を無視して重力＝引力とします。なお、遠心力は、回転する座標系から見た場合

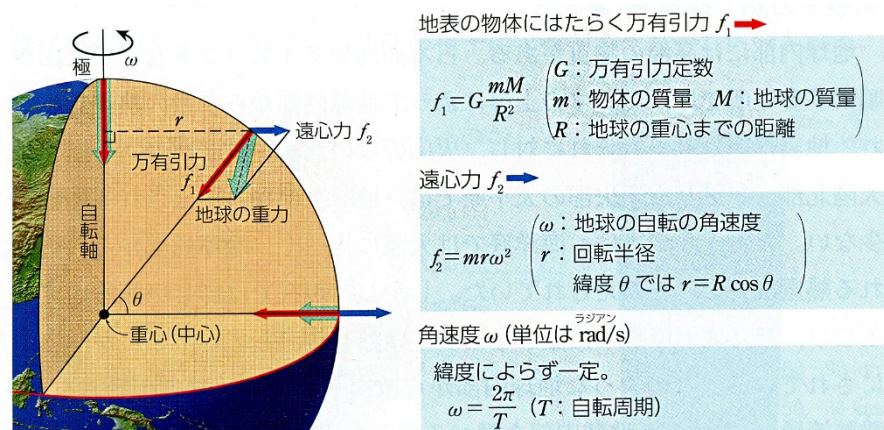


図1 地球に働く、万有引力・遠心力・重力（磯崎ほか、2025）

の「見かけの力」であり、実際に物体に働く力ではありません。静止した観測者から見ると、物体には向心力のみが働いているように見えます。実際には緯度が少々変化しても重力（物体の重さ）はわずかしき変化しませんが、ロケットのような重量のある物体の打ち上げには、効いてくるようです（後述）。

（３）重力の測定の方法—宇宙船の中ではどのようにして測るか 体重計の重力補正機能

重力の測定には、大きく分けて**絶対測定**と**相対測定**の二通りの方法があります。絶対測定は、ある場所の重力値をその場所だけの測定で求める方法です。かつては振り子の周期の測定から求めていましたが、振らせ方や、測定時の温度など誤差が大きい欠点があります。現在は、真空中で投げ上げられ自由落下する物体の高さが時間とともにどう変化するか（測定面間を物体が通過する時間の変化）を測定し重力加速度そのものを求めます（図 2(a)）。相対測定（比較測定）はスプリング式とも呼ばれ、おもりをつるしたばねの伸びが、重力の大きさに比例することを利用します（図 2(b)）。ばねの伸びの違いから重力の大きさの差を求め、重力値が分かっている場所からの重力値の差を測定します。宇宙船（無重力状態）で使われる体重計測器には、バネが内蔵されており、宇宙飛行士の体重測定に利用されています。

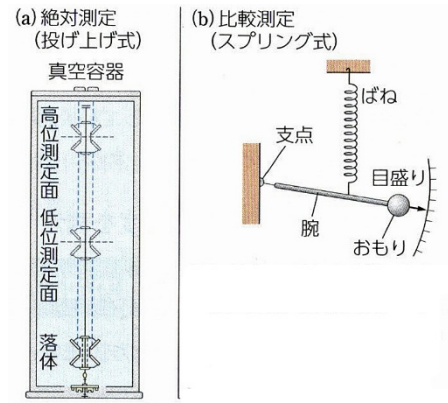


図2 重力計の原理（磯崎ほか，2025）

また、人工衛星の軌道（主に高度）からも重力測定がされています（地球の重力の大きいところでは人工衛星の高度が低くなります）。

さて、私たちが使う体重計も緯度によって測定値に違いが出ることになり、赤道に近い場所では、体重計で測定する体重が実際よりも軽く表示されることになります。北海道と沖縄を比べると、北海道の方が約 0.15%重くなるようです。**体重計には、使用する地域の緯度に合わせて重力補正を行う機能が搭載**されています。ある企業の製品は北海道・本州～九州・沖縄の三地域に分けて調整（地域設定）してあるそうです。これにより、どの地域でも正確な体重を測定することができます。同様に、北海道で 1kg の肉が沖縄では同じ 1kg でも量が増えるという現象が起きてしまいます。そのため「はかり」にも同様な地域設定（キャリブレーション）がなされているそうです。

日常生活では緯度による重力（物体の重さ）は大きな影響はありませんが、ロケットのような重量のある物体の打ち上げには、無視できないようです。天体の重力圏から物体が完全に脱出するために必要な最小速度を脱出速度といいます。地球からの脱出速度は約 11.2km/s です。その対策の一つとしてロケットの打ち上げ場は多くの国では自国の中で赤道に近い（比較的重力の小さい）地域につくると聞いたことがあります。ただ、Web サイトで調べると、赤道近くほど地球の自転速度が速いことを利用するための要因の方が大きいようです。ロケットを地球の自転方向に打ち上げると、地球の自転速度をロケットの速度にプラスすることができます。東向き（地球の自転方向）にロケットを打ち上げる場合が多いのもこの理由からです。世界の主なロケット打ち上げ場所には、ケネディ宇宙センター（NASA：アメリカ南西部のフロリダ半島中の東海岸：スペースシャトルの打ち上げで有名 図 3）、ギアナ宇宙センター（南米のフランス領ギアナ：欧州宇宙機関 ESA）、種子島宇宙

センター（鹿児島県種子島：日本の基幹ロケットの発射場）、内之浦宇宙空間観測所（鹿児島県肝付町：小型ロケットの発射場 図4）はいずれも東海岸にあります。中国のいくつかの発射場は1つを除いて内陸にあります。ロシアのロケット打ち上げに使用されるバイコヌール宇宙基地は、ロシアの南にある内陸のカザフスタンという国にあります（現在は独立国ですが、ロシアの租借地になっています）。ここは世界最初の人工衛星（スプートニク1号）の打ち上げ、ガガーリンの世界初の有人宇宙船の打ち上げ、宇宙飛行士でない日本人の宇宙への打ち上げなど話題が多い宇宙基地です。また、ロケットは爆発の危険がゼロではないことや、ロケットが切り離れた残骸が空から降ってくるという危険、打ち上げ時の騒音問題もあり、ロケットを安全に打ち上げるために、発射場は都会を避け、人里離れた平坦部が選ばれています。



図3 ケネディ宇宙センター
スペースシャトル打ち上げ場の見学台から撮影



図4 内之浦宇宙空間観測所（雨天でした）

（4）重力異常

地球を内部の密度分布が場所によらず均一な回転楕円体（地球の大きさのものを地球楕円体と呼びます）であると仮定したときの、各緯度の重力の理論値を**標準重力（正規重力）**と呼びます（図5）。実際に測定する場所は、地球楕円体上にはないことがほとんどです。標準重力と実測値の重力の差を重力異常といいます。前述したように、重力値は赤道上で最小、極で最大値となること、地球上で標高が高い場所（地球の中心から離れる）ほど重力は小さくなること、潮汐や周囲の地形の影響でも変化します。例えば付近に高い山が聳えていればその山体によって上に引き付けられ、その場所の重力値は小さくなります。これらの影響を計算で取り除きます。この作業を地形補正、フリーエア補正などと呼びます（高校の地学では扱いますがここでは省略します）。しかしこうした補正をしても重力は場所によって違うので、これは地下の密度構造の地域差が原因と考えられます。つまり、**重力異常によって地下構造がどうなっているか知ることができるのです。**

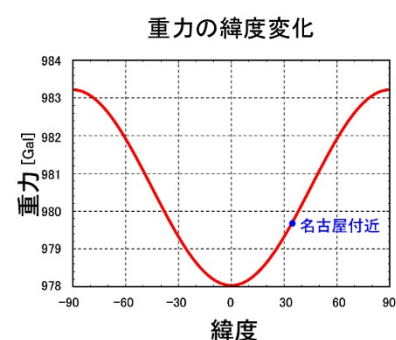


図5 標準重力（URL1に加筆）

重力異常の測定はいろいろなところで利用されていますが、代表的なものには石油や温泉の探査があります。直接的にそこに石油がある、温泉がある、と分かるわけではなく、石油が埋蔵していそうな構造や、地下水（温泉）がたまっていそうな構造が推定できるのです。恐竜滅亡のきっかけになったメキシコのユカタン半島の隕石クレーターもこれによって分かったのです。また、地表に現れていない断層やカルデラなどの地質構造も重力異常を用いると見えてくることがあります。

図 6 は愛知県付近のブーゲー異常(地形や標高の影響などを補正する計算した後に残る重力の大きさ)と残留重力の様子です。ブーゲー異常の図で赤は相対的に重力が強く、青は相対的に重力が弱いことを示しています。濃尾平野など新しい堆積物からできている地域は重力が小さいことがわかります。

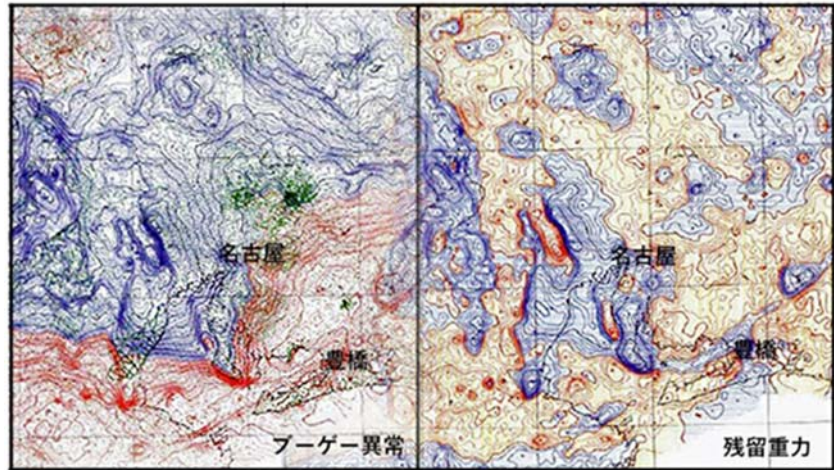


図 6 愛知県周辺のブーゲー異常と残留重力（駒澤，2000 を改）

また、中部山岳地域が強い負の重力異常が見られることも特徴です。これは、山岳地帯の地下に密度の低い物質（花崗岩など）が存在するためと考えられています。残留重力は、浅い所の構造による重力を知るために深い構造による影響を除いたものです。ほぼ 2~3km より浅い構造が見やすくなっています。中央構造線はマイナス（青）の領域になっており、岩石が破碎され密度が低くなっているのが一つ

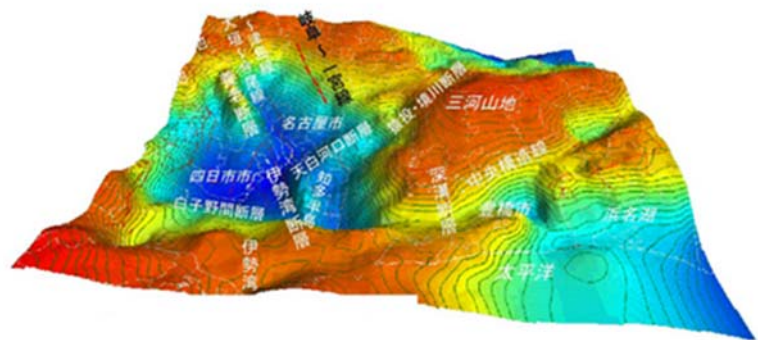


図 7 重力基盤の鳥観図（URL2）

の原因と考えられます。また、赤色部分はプラスで中生代層や深成岩などの基盤岩が分布していると考えられます。図 7 は鳥観図で、図 6 と同様に、赤い地域は相対的に重力が強いところです。

主な参考文献

藤井洋一郎・藤原嘉樹・水野浩雄，1994，地球をはかる．東海大学出版会．

磯崎行雄・川勝均・佐藤薫（編），2025，高等学校地学．啓林館．

駒澤正夫，2000，重量から見える地下構造．地質ニュース，548，口絵

URL 1：<https://geod.jp/web-text/part2/2-2/index.html>

URL 2：<https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Aichi7A/3-4-5.htm>