

3L12 重力は力でなく加速度である

原 宣一 (宇宙航空研究開発機構)

Gravity is not a force but an acceleration.
Norikazu Hara (JAXA)

Key Words: Gravity, Force, Acceleration, Weightless, Motion

Abstract

The law of Universal Gravitation which was led by Newton is expressed as an equation of a force dimension. However this force is not a real force but an apparent force. It is the gravitational acceleration that we can lead deductively from Kepler's laws of three. There is no evidence for the fact that Gravitational force is a real force. If a real force acts an object, stress and strain are occurred inside the object. The reason for the weightless state of the space station orbiting the Earth is not for the balancing the gravitational force and inertial force but for the disappearing of the gravity as Einstein comprehended it in 1907. The gravity acts all of the objects as an accelerated motion.

1. はじめに

航空宇宙工学ではロケットの軌道解析においても構造強度の解析においても、ニュートン力学で何ら不都合はない。一方、理論物理学ではアインシュタインの相対性理論がニュートン力学に修正を加えた。ただし、この修正は光速に近い運動の場合に必要なことであって、航空・宇宙工学の範囲では相対性理論による修正は全く必要がない。

そうではあるが、アインシュタインが一般相対性理論に取り組むきっかけとなった思考実験は地球の重力で生ずる自由落下であった。地球上の自由落下であれば航空宇宙工学の範囲である。アインシュタインはニュートン力学のどこに不備があることを見つけたのであろうか。

2. 重力(Gravity)とはなにか

物が落ちる現象は誰もが観察するあまりにもありふれたことで通常は意識することさえない。しかし、高い場所から落ちて怪我をすれば落ちることを意識せざるを得ない。

古代ギリシャのアリストテレスは物体には落ち着く場所が決まっていそこに向かうからだとした。つまり、落ちるのは物体の保有する性質であると考えた。ガリレオは斜面を転がるボールの時間を計って、物体によらず加速度が一定であることを見出した。ニュートンが始めて物体が落ちるのは地球の重力が力として働くからであるとした。この背景にはニュートンの万有引力とニュートンの運動の第 2 法則がある。

地球の重力は万有引力と地球の自転による遠心力の和であるが、詳細には地球の密度分布や太陽や月の影響で、場所によっても時間によっても違ってくる。国土地理院はホームページで日本各地の重力加速度の実測値を掲載している。このホームページでも、重力は力の和であるという説明であるが、実測値は単位を $[N]$ とする力ではなく、加速度 $[m/s^2]$ で表示されている。

本論では重力は万有引力のことであるとして支障がないので、以下では区別しない。

3. 力とはなにか

標題で重力は力でないと明言するために、まず力とは何かを明確にしておく必要がある。力という用語は広く使われ過ぎているくらいがあるが、物理用語としての力は比較的明確である。

諺で、力が入らない状況を「暖簾に腕押し糠に釘」と言うように、力は常に釣り合い状態にあって初めて存在する。

何も無い宇宙空間で、ロケットがエンジンを作動させて飛行している間、ロケットは加速度運動をしているとともに、そのロケットは全ての部分で応力・歪を生じている。このロケットの推進力に釣り合っている力は、加速度にロケットの質量を乗じた量の大きさの慣性力である。ロケットエンジンのように物体に外から働く力を外力と称すると、外力に釣り合う力は慣性力である。

一方、がっぷり四つに組んだ二人の力士は動かない。体の中には力がみなぎっているが均衡しているので少しも加速しない。外力と外力が釣り合っていると加速しない。この釣り合い状態では、物体に運動はないが内部には応力・歪が生じている。

外力と外力の釣り合いは、外力と慣性力の釣り合いを、もう一組の慣性力と外力の釣り合いを重ね合せたものと考えることができる。従って、外力は常に慣性力と釣り合っていると見なして良い。

物体に及ぼす外力の作用には 2 種類ある。その物体に応力・歪を発生させる作用と加速度運動を引き起こす作用である。力の大きさの定義は後者によっている。質量 $1[kg]$ の物体に働いたとき、その物体に $1[m/s^2]$ の加速度を生じさせる力を $1[N]$ とするものである。しかし、実際上は力の計測は歪を測定することから決めていて、加速度を計って力の大きさを決めることはしていない。

ここで注意しなければならないのは、”見かけの力”という用語である。”見かけの力”は外力でない力という意味で使われていることも多い。しかし、本論では物体に作用しても加速度を生じるだけで、応力・歪を発生しない数式上の力を”見かけの力”と呼ぶ。”見かけの力”に対して、実際の力は作用した物体に応力・歪を生じさせる外力である。このように、力には”見かけの力”と、実際の力の2種類の分け方が出来る。

さて、ニュートンは、物体が落ちるのは重力という力が作用しているからだとした。重力が力であるとするならば、この力と釣り合っている力は何であろうか。ニュートン力学では、当然、自由落下中の物体は重力と慣性力の釣り合い状態にあるという答えになる。ところが、自由落下中の物体には応力・歪が発生していない。従って、重力は力であるとしても、”見かけの力”ということになる。そして、自由落下中の物体は見かけの力(重力)と見かけの力(慣性力)が釣り合っているという説明にならざるを得ない。これは物理の説明としては実証できないから無意味である。

物体に固定した座標系では、その物体が自由落下中であろうと、推力飛行中であろうと、その物体の座標は動かないから加速度もゼロとなり、質量を乗じても数式上の力はゼロである。ところが、推力飛行中のロケットは座標系の取り方に関係なく応力・歪を生じている。ロケットのエンジンを停止させると、その瞬間に加速も停まり、応力・歪も消える。つまり、実際の力による応力・歪の発生は座標の取り方に関係しない。一方、”見かけの力”はコリオリの力のように座標系の取り方に依存する。

同じニュートン力学の範疇でも軌道解析では物体の運動を問題とする。質点系力学として物体の質量を1点に集中させた仮定を置いても支障がない。当然のことながら物体の応力・歪は関心外である。一方、強度解析では物体の破壊を問題とし、力と言えば応力・歪の大小が関心の対象で、物体の運動は問題としない場合が多い。

4. 重力は加速度

ニュートンはケプラーの法則から万有引力の式を導いた。しかし、ケプラーの法則から仮定を置かずに、演繹的に導けるのは加速度までである。次にそのことを示す。

ケプラーはチコ・ブラーエの観測データ(時間と位置座標)から惑星の運動が次の三つの法則に従っていることを発見した。これらをケプラーの法則と呼んでいる。

第1法則: 惑星は太陽を一つの焦点とする楕円軌道を動いている。

第2法則: 惑星は、太陽までの距離、つまり動径、が掃引する面積速度が一定であるように動く。

第3法則: 惑星の運動する公転周期の2乗は楕円軌道の長径の3乗に比例する。

惑星は太陽の周囲を回っており、等速直線運動ではない。つまり、何らかの加速度運動をしている。この

加速度を g で表す。面積速度一定の条件から動径に直角方向の加速度はゼロであることが導ける。つまり惑星運動の加速度 g は常に動径方向である。

楕円軌道を回っている惑星は太陽に近いところでは速く、遠いところでは遅い。速さが変わっているのであるから、動径に直角方向の速さも変化してると考えなければならない。速さは変化していても動径に直角方向の加速度がゼロであることは証明が必要である。しかし、ここでは参考資料¹を引用することで、その証明を省略する。

長径の3乗が公転周期の2乗に比例することの条件から、加速度 g の大きさは太陽からの惑星までの距離 r の2乗に逆比例することが導ける。

比例乗数を K とすると、加速度 g は次式のような形に書いて、距離の逆2乗に比例するのである。

$$g = \frac{K}{r^2} \quad \dots (1)$$

ニュートンは K が太陽の質量 M に比例するに違いないと考え、新たに比例乗数 G を採用し、次式で書き直した。この G が後に万有引力定数と言われるものである。

$$K = GM \quad \dots (2)$$

ニュートンは加速度 g が作用しているということは重力という力 F がかかっているからだと考えた。惑星の質量を m とすると、ニュートンの運動の第2法則から、次式が成立する。

$$g = \frac{F}{m} \quad \dots (3)$$

これら三つの式から、次のニュートンの万有引力の式が導き出された。

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad \dots (4)$$

ニュートンは万有引力の式を幾何学的に導いているが、要約するとケプラーの法則から万有引力の式の導出経緯は上述ようになる。

さて、(1)式の導出であるが、惑星は楕円軌道なので参考資料¹にあるように、2元のベクトル表示による計算が必要である。ただ、近似的に惑星の運動は太陽を中心とする円軌道であるとみなせば、逆2乗則になることは次のように簡単に示すことができる。

半径 r の円周を速さ v で回転運動をしている物体の遠心力加速度 α は次式である。

$$\alpha = \frac{v^2}{r} \quad \dots (5)$$

周期 T は円周の長さを v で割ったものである。

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad \dots (6)$$

ケプラーの第3法則から、比例乗数を A とすると、

$$T^2 = Ar^3 \quad \dots (7)$$

(7)式に(6)式を代入する。

$$\frac{(2\pi)^2 r^2}{v^2} = A \dot{r}^3$$

従って、

$$v^2 = \frac{(2\pi)^2}{Ar}$$

(5)式と組み合わせて、

$$\alpha = \frac{(2\pi)^2}{A} \cdot \frac{1}{r^2} \propto \frac{1}{r^2} \quad \dots (8)$$

(8)式は、求める加速度が半径の逆 2 乗に比例していることを示している。

ニュートンは万有引力の式を導出するときに、加速度 g を $\frac{F}{m}$ で置き換えて力の式にした。しかし、実際に二つの質量に万有引力が実際の力として作用している証拠は何もない。ニュートンの運動の第 2 法則である $F = m\alpha$ は力が作用すれば加速度運動が生じることを示しているが、加速度運動があれば力が作用しているという逆は必ずしも成立しないのである。チコブラーエの観測データから見出されたケプラーの法則を元に、仮定を置かず演繹的に導けるのは加速度 g までである。

加速度の項を力と質量の比で置き換えて得られたニュートンの万有引力の式は、力の次元の式ではあるが実際の力である証拠は何もないので、数式上の“見かけの力”である。

ニュートンはケプラーの法則からの誘導を次式の g に止めていたならば、ニュートンの万有加速度と呼ばれていたであろう。

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad \dots (9)$$

5. ニュートンの運動方程式

既に(3)式で天上下りに使ったが、ニュートンの運動の第 2 法則は、質量 m の物体に力 F を加えたとき、物体は加速度 α の運動を行うとき次の関係があり、この式は運動方程式とも呼ばれる。

$$F = m\alpha \quad \dots (10)$$

上述の式は重力加速度 g の重力場では、次式で一般化する必要がある。

$$\frac{F}{m} = \alpha + g \quad \dots (11)$$

地上に置かれた物体は静止している。この時、 α がゼロであるから、(10)式から $F = mg$ の力を地上から受けている。自由落下を止めるために必要な力は“実際の力”である慣性力 mg に等しい。

重力加速度の測定は、測定機器が動かないという前提に立っている。加速度の大きさは座標系に依存するので、運動は常に相対的であるから論理的には、(9)式から定義された力の大きさは、厳密には測定できないことになる。

6. 結論

重力の物体に及ぼす作用は、応力・歪を発生させない。重力は物体に加速度運動を与えるだけである。この加速度運動を変化させるときには慣性力に釣り合う外力が必要である。

現行のニュートンの運動の方程式は重力のないときの式であり、重力があるときの運動方程式に一般化する必要がある。この一般化は重力を外力としてではなく、重力加速度として考慮する。

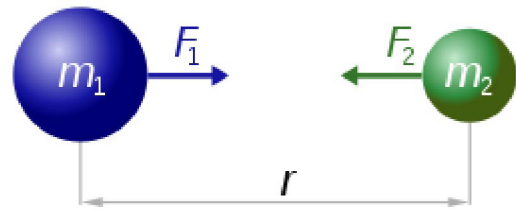
実際の力の大きさは、応力・歪の関係式であるフックの法則を元に定義することも考えられる。

7. 備考

1) 慣性質量と重力質量について

(3)式の質量 m は、ニュートンの運動の第 2 法則で定義された質量で慣性質量とも呼ばれる。一方、(2)式で取り入れられた重力の発生元になっている太陽の質量 M は重力質量と呼ばれる。慣性質量と重力質量が同じであることは実験で証明する努力も続けられた。実験結果は常に測定誤差の範囲で一致していた。そして、天上下りに同じであると認め、等価原理とされてきた。

しかし、2 連星の運動を考えれば容易に推察できるように、どちらが M でどちらが m でも同じ式になる。 m と M は区別できないのであるから、本来の等価原理により同じなのである。敢えて違う名前を付ける必要はなかった。質量は慣性質量の意味だけでよく、重力質量の概念は当初から不要であった。このことは小野健一が指摘している²。



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

図-1 万有引力の一般的な説明

質量とは重さと似たようなものと説明されることも多いが、全く異なる概念である。質量は動かしにくさの程度を表す概念であり、重さは実際の力であって重量とも呼ばれる。重さは地球の重力場で自由落下を静止させるときに発生する慣性力である。

2) 潮汐力について

自由落下により重力が消える領域は局所的である。重力の方向が 1 点である中心を向いていることから

大きな物体では左右両端の重力の方向が平行とならない。厳密に述べると自由落下が拘束され、圧縮応力が発生する。さらに、(1)式が逆 2 乗則であることから、大きな物体では上下方向で加速度の大きさが異なる。このため厳密にはやはり自由落下が拘束される。この拘束は物体に引張り応力を発生させる。これら二つの力はどちらも潮汐力と呼ばれている。

潮汐力は重力が実際の力であると誤解される一因でもあるが、国際宇宙ステーション (ISS) 程度の大きさは地球の重力に対して十分局所的である。但し、細長い宇宙機は LDEF のようにこの潮汐力だけで姿勢安定を保てる。

深宇宙ミッションの宇宙機は惑星の重力を利用してフライ・バイをすることが多い。フライバイも自由落下に変わりはなく、フライバイで宇宙機が如何に大きな加速度飛行をしようとも、その宇宙機が破壊することはない。宇宙機の大きさは、惑星の重力に対して十分局所的であるほど小さいからである。

3) 加速度計について

世の中に存在する加速度計には多くの種類があるが、一つの例外を除いて重力加速度だけは検知できない。何故なら、それらの加速度計はまず力を検知して加速度に変換しているからである。このことは重力が実際の力ではないことを示している。

この力の計測器の校正に使うため直接重力加速度を精密に測る計器を用いている。この重力加速度を検知する加速度計は真空パイプの中を鉄球を落下させ、その時間を計測している。加速度を計測するためには計測する座標系が動いていないことが前提である。地球の表面は、動かないという仮定の元に重力加速度が計測されている。

4) 時空のひずみについて

アインシュタインは大きな質量の周囲では時空がひずんでいると考えた⁴。この時空の歪んだ空間を重力場ともいう。重力場に置かれた物体には実際の力が働くのではなく、加速度運動が生じるだけである。1907年にこのことに気が付いたアインシュタインは、時空のひずみと質量分布の関係式を表したアインシュタインの方程式を1916年に導いた。

5) 慣性運動について

ニュートンは物体に何も力が働いていないとき、静止している物体は何時までも静止しており、運動している物体は、定速の直線運動を続けるとし、運動の第一法則とした。物体に何も力が働いていないとき、物体のこの運動の性質があることを慣性の法則ともいう。

重力は実際の力でないから、慣性の法則は一般化する必要がある。即ち、何も力が働いていない時、重力場にある物体は自由落下運動をする²。

ニュートンの運動の第一法則は重力がない特別の場合に成立する。ロケットはエンジンの推力を停止した後、慣性飛行に入る。つまり、慣性飛行は自由落下

運動に他ならない。

6) 自然界に存在する4つの力について

自然には4つの力が存在すると言われている。重力、電磁力、強い力、弱い力の4種である。このうち強い力と弱い力は原子の領域であるから強い相互作用、弱い相互作用と言い換えている本も多い。一方、重力、電磁力もよく考えると物体に応力・歪を発生させるとは言い難い。最初から4つの相互作用と称している本³もある。

8. あとがき

ケプラーの法則から仮定を置かずに演繹的に導けるのは重力加速度までであることを示した。

ニュートンは万有引力の式として力の次元の式にしたが、この力は”見かけの力”である。

現行の運動力学で軌道計算など実質的な変更はないものの、重力に対する認識は”力”から”加速度”に変える必要がある。例えば、航空機の揚力に釣り合う力は重力でなく重量または重さである。

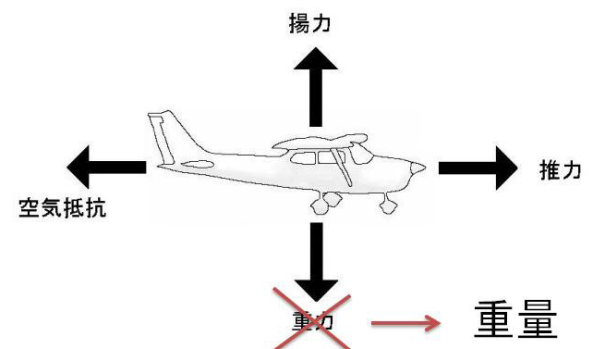


図- 2 揚力と釣り合うのは重量

参考資料

- 1) 力の本質を秘める逆2乗則、荒木不二洋、別冊数理科学、サイエンス社、1995年
- 2) アインシュタインの発想-相対性理論とは何か、小野健一、講談社、1981年
- 3) 宇宙の科学、江里口良治、東京大学出版会、1994年
- 4) アインシュタイン「相対性理論」、佐藤勝彦、NHK出版、2012年