第３章　ニュートンの法則

　ガリレオは、運動を記述しましたが、力との関係ははっきりわかりませんでした。運動と、その原因としての力の関係を正確に示したのがニュートンです。今回は、この力と運動の法則について勉強してみましょう。

　ニュートンはこの法則が、重力に関するある法則を仮定すると、惑星の運動も同じ運動の法則で理解できることを見ました。しかも、その重力の法則は ch じょうでも成り立つのです。それまで､天空世界の法則と地上の法則は全く別のものと思われていたのですが､これらを統一的に理解したのです。科学の基本原理の一つが、全く別に見える２つの現象にも、意外な関係があることもあることです。今回は、ニュートンの見つけた法則について勉強してみましょう。

ニュートンと運動の法則

ガリレオは運動について客観的な解析をしました。しかし、何がその運動を引き起こすかについては問いませんでした。この問いを発したのが**アイザック・ニュートン**です。力が運動を引き起こします。その運動や力の加わり方には幾つかのルールがあります。これは、ニュートンによって３つの運動の法則としてまとめられています。以下にこのニュートンの法則を勉強してみましょう。

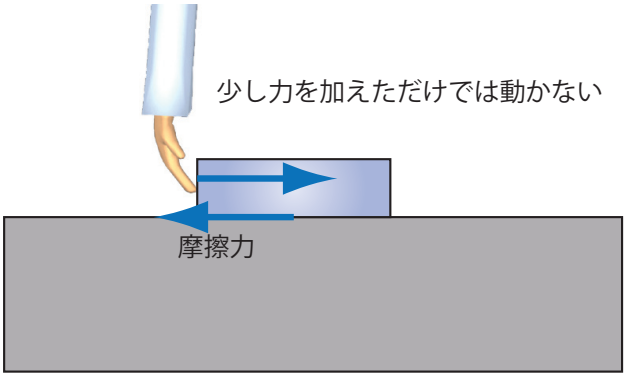
ニュートンの第一法則とは？

ニュートンの第一法則とは、ガリレオの考え方を次のようにまとめたものです。

> **すべての物体は、外から力が加わらない限り、同じ速さで直線運動をし続ける。**

単純なことですが、以下の２点に注意が必要です。

まず、動いている物体にのみ力が働いているわけではないということです。もう一度、本を横から押してみましょう。本を指で動かそうとすると、少しの力では動きません。動かない状態でも指からは本に力が加えられています。また摩擦力とあわせて力がゼロとなり静止しています。止まっているが力が加わっていることがあるのです。つまり、じっとしていても力が加えられることがあります。ただし、足しあわされた力は全体ではゼロであるのです。また、壁を押しても押し返されます。これも動いていない壁によって力を受けていることになるのです。



第２に、力とは運動を引き起こすものであり、運動の結果に起こる何かわけのわからない漠然としたものではないことです。たとえば、摩擦力は止めようとする傾向であるとか曖昧なものでなく、物質に働く確固たる力です。こんなことは解っている人には当たり前に聞こえますが、力そのものは目に見えないので、このことは解らない人にはとことんわかりにくいことなんです。何事もまず、何が解りにくくしているのか自分の深層心理を暴き出すのが理解の早道なのです。

このように、動いているものはそのまま動こうとし、止まっているものはそのまま止まっていようとすることを**慣性**と言います。そのため、ニュートンの第一法則は**慣性の法則**とも言われます。慣性というとなんだかなじみがありませんが、私たちの行動もまた同じような慣性があります。たとえば、寒い日に布団の中から出ないでいつまでも布団の中から出ようとしないとか、ロールプレイングゲームをやり続けると朝までやってしまうとかが同じ現象です。これは、またの名を惰性と言いますが、物理ではそれではかっこ悪いので、もっと高尚に慣性という言い方をするわけです。

アリストテレスはこう考えた

机の上に本を置き、横から押してみましょう。この本を読めなくなるなんて思ったら、他の本を置いてください。とにかく、少し力を加えるだけでは動きませんが、ある程度強い力を加えると、本は机の上を滑り出しますね。しかし、力を加えるのをやめると、本は止まってしまいます。これは、誰もが知っている現象ですね。このことから次のように考えるのは当然です。物質は**力**を加えれば動き、力を加えなければ止まる。さて自分の潜在意識の中で、力と運動というのを区別するのが非常に重要です。科学での運動は、物体が動くということだけでなく静止しているということも含みます。そして力＝運動ではありません。つまり、力は加える力であって、動くとか止まるというのが運動です。皆さんの中にはこの区別がつきにくい方がいますので、これが体得できるまで、机の上の本を動かしてみてください。

さて、このような力による運動という考え方を最初にしたのは紀元前のアリストテレスです。この考え方は非常に長い間支持されてきました。

アリストテレスの考え方をまとめると次のようなものになる。

1．すべての運動には原因がある。この原因は力である。力がなければ物体は止まる。

2．力には２種類ある。一つは押したり引いたりするちからで、接触することによって起こる力である。もう一つは、物体に内在する力であり、坂で転がり落ちていくときなどに必要な力である。

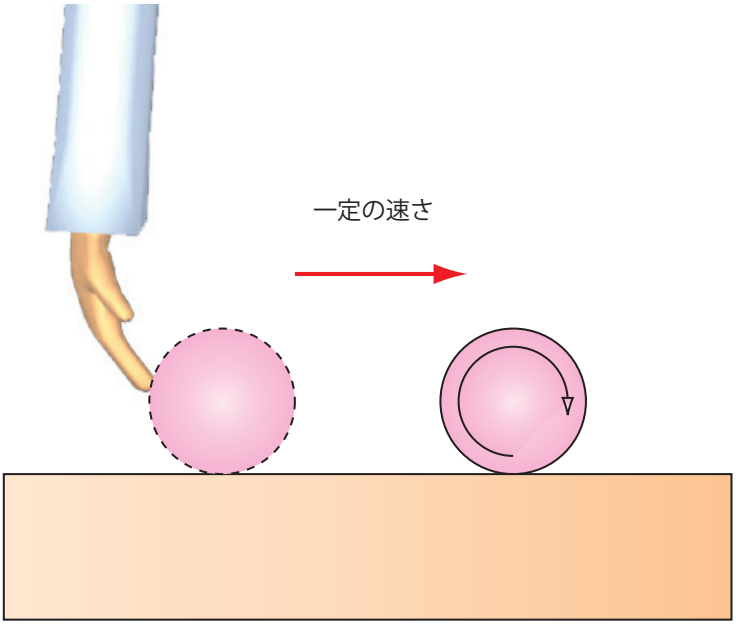
ちなみに、このように何種類かあるなどという言い方は説得力があるので議論で使えるようにしておきましょう。

3．重力とは物体が落ちようとする傾向によっておこる。重い物体の方がよりその傾向が強くなる。つまりは、重力は物体に内在する力である。

4．重い物体は、軽い物体よりも速く落ちる。速さは重い物体の方が大きくなる。

私たちもニュートンがあらわれる以前の時代に暮らしていれば、おそらくアリストテレスの考え方を信じていたに違いありません。それでも疑問は残ります。たとえば、物体は放り投げると、地面に落ちるまで運動し続けますね。これは、どうやって説明するんでしょうか？アリストテレスによると、これは次のように説明しようとしました。たとえば、砂場の砂に石をなげると、砂に石がめり込んで後ができます。そこで同様に、空気中に投げた石の後方には空気の渦ができ、これが石を押し続けると考えたのです。その頃でもこの考えはちょっと変だなと考えた人もいただろうが当時としてはこのような説明で満足していました。

ガリレオの登場で何が変わった？

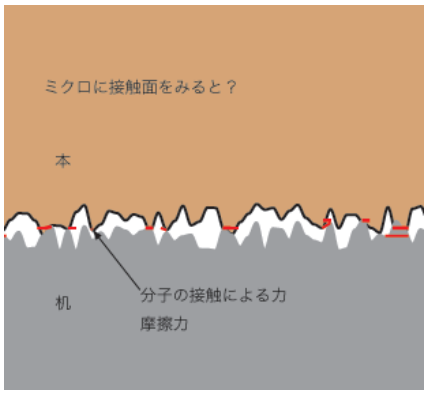


ガリレオはそれまでの発想を転換し、力が加えられなければ一定の速度で移動すると考えた。

アリストテレスには熱狂的な信奉者が現れ長らく世界の潮流をリードしていました。過去の偉大な人物が正しいと思う傾向は、どこの国でもあるものなのです。このアリストテレスの考え方に果敢に反旗を翻したのはガリレオです。

机の上で、円筒状のボールペンを転がしてみましょう。缶ジュースの空き缶などでもかまいません。すると、ほぼ一定のスピードで転がっていきます。ガリレオはこれを、アリストテレスが考えたように空気が押しているというわけではなく、むしろ力が加えられなければ一定のスピードで転がると考えました。これは発想の転換でした。

それでは逆に、本の場合にはなぜ止まるのかを考えてみましょう。どんなに平らに見える表面もミクロに見るとごつごつしています。そして、本と机の表面がざらついているために、運動を止めようとする力が働きます。実際、机の上に手のひらをあてて左右に手を動かしてみましょう。机から動かさないようにする力を受けているのがわかるはずです。これを、**摩擦力**と言います。物体が重いと、接する面が増加し、摩擦力が強くなります。このようにミクロに見たとき、本の表面の分子と机の表面の分子が引き合う力が摩擦力となるのです。また、こすれ合う力を生み出すのは分子間引力があるためです。

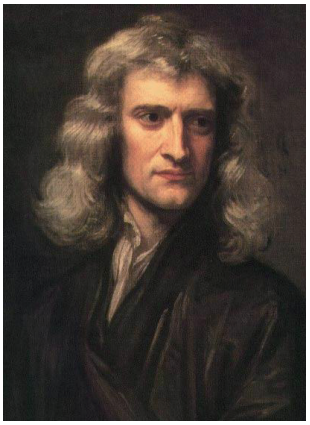


摩擦力はミクロにみると分子間力に起因する。

そのため、重力などと異なり、摩擦力は根本的な力ではないことにも注意しましょう。

さて、こんなことは簡単すぎると言う方もいますね。しかし、それには注意が必要です。科学を学ぶことの一つの重要な点は、その当時の状況の中でどのような発想の転換をしたかを学ぶことです。その教訓を元に、現在の状況に対して新しい発想の転換を見つけられる可能性があるわけです。その意味で先人たちがどのように考えていったかを考えることは重要なんです。

アイザック　ニュートン (1643-1727)



アイザックニュートンは 1643 年 1 月 4 日に生まれました。それはガリレオが亡くなった 1 年後です。生まれた場所は、イングランドの東海岸に位置する母方の農場でした。未熟児で生まれ、医者は長くは持つまいと思いましたがしっかり成長しました。彼の父は、彼の誕生の数ヶ月後に亡くなったため、母は再婚し、その後祖母に育てられました。母はやがて義父が亡くなったためその子供たちと共に母の実家の農場に戻ってきました。家族は彼に農場をついて家計を支えてくれることを期待していました。そして、14 歳のとき、彼は母の農場を継ぐために学校をやめます。しかし農家としては彼は怠け者でした。隣の薬屋から本を借りて読んだりしていましたし、家業にはうわのそらでした。その後、彼の叔父が彼の学者としての才能に気づき彼をケンブリッジ大学に戻します。

彼が２４歳のとき、イングランドでペストが流行したため、母の農場に戻ります。彼はそこに 18 ヶ月滞在しましたが、そのときに光学の基礎を作ります。光の分散や合成などを解析しました。また反射式望遠鏡も作りました。このときにはまだ後に彼が言うほど、運動の法則や万有引力に関してはあまり研究していません。

ケンブリッジ大学に戻った彼は、微分積分学を興します。なおリフシッツも独立に微積分を作りました。ニュートンは数学者として認められ、数学科の教授となり 28 年間つとめます。

1679 年にバネのフックの法則で有名な、フックが次のアイデアを出します。力は逆二乗の法則で、中心に対して垂直方向には等速運動であるというのです。ニュートンはこのアイデアを学び、1980 年に惑星の楕円運動が、逆二乗の法則に従う重力と運動の法則により説明できることを示します。楕円運動が導かれることが万有引力の法則の根拠になるわけであり、これは非常に大きな進歩でした。しかし彼はその結果を公表しませんでした。それは、以前公表した光の法則に関する論文がフックを始め多くの人の批判を浴びたことに嫌気がさしていたからでした。

1684 年に、後にハレー彗星の回帰年の予言で有名になるハレーが、ニュートンを訪ねてきました。彼もまたフックなどとの議論で運動が楕円になることを示そうとして失敗していたのです。そして彼に逆二乗の法則による運動のことを聞くとニュートンに聞くとそれは楕円であると即座に答えたようです。それを聞いたハレーは驚き、ニュートンにその出版を強く薦めます。そして、ニュートンが４２歳のとき、「プリンキピア」を出版し、そこで物理学の数々の発見を初めて公表しました。

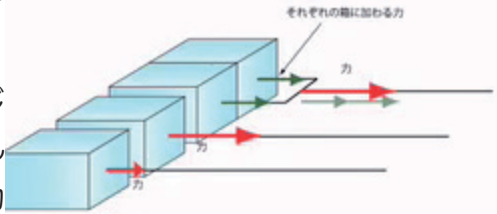
彼は、どうしてそんなにたくさんの発見を出来るのかと聞かれたとき、「問題の解決は、突然のひらめきによってなされたのではなく、たゆまぬ継続的な思考の結果である」と述べています。彼は普段は穏やかですが、批判に関しては極度に神経質で他者に批判的であったようです。他の人が独創的なアイデアを出しても、それが完成された物でなければ敬意を払いませんでした。1705 年にナイトの位を得、85 歳まで生きました。

ニュートンは、それまで別々であるとされてきた宇宙の法則と、地上の世界の法則を融合し、科学を大きく進歩させたのです。

力と運動の関係：ニュートンの第二法則

さて、これまで力と運動を別々に見てきたわけですが、今からこの２つを結びつけてみましょう。

机の上に本を置いて、横から押してみましょう。押す力を変えて同じ時間だけおしてみます。すると、力が強いほど、速度がより大きくなりますね。これから、力と速度が比例するというのは早計です。最初は速度がゼロです。そのため、もし仮に力と速度が比例していれば、押した瞬間に一瞬にして速度が増加しなければならないの状態となってしまいます。力を強くして変わるのは最終的な速度です。つまり、力の強さによって速度の変化量が異なるのです。すると、速度の変化量、加速度が力に比例するというのが自然な考え方となりますね。つまり、物体の加速度はその物質に与えられた力に比例するのです。ただし、机の上の本の場合、摩擦力があるので、単純に比例するとは言えません。しかし、自然法則は元来単純にできているはずで、摩擦のほとんどないところで実験すると確かに加速度が力に比例することは正確に成り立つのです。



次に、重い本を押してみます。すると、同じ力を加えても軽い本ほど速度が上がりませんね。ためしに同じ本を２冊重ねた場合、同じ力では本一冊の場合より速度は半分くらいにしかなりません。これから、加速度は、質量に反比例するという関係が推測できます。これも厳密に実験すれば成り立つが、だいたい体感できるでしょう。

また、加速度が質量に反比例するというのは次のようにしてもわかります。図のように箱をロープでひっぱります。二つの箱を引っ張る場合、同じ力でもそれぞれの箱に加わる力は半分になってしまいます。このため加速度は半分となりますね。つまり、加速度は単位質量（1kg）あたりに加えられる力に比例するのです。これは箱に限らずすべての物質でも同じですので、力が一定の場合、加速度は質量に反比例することがわかります。

これら力と質量、加速度の関係をまとめたのが次の**ニュートンの第２法則**です。この法則は次のように述べられます。物体の加速度は、物体に加えられた合力に比例し、物体の質量に反比例する。式で書くと、

加速度＝合力÷質量

の関係があるのです。またこれは、

加速度は 1kg あたりに加えられる力

と言ってもいいでしょう。このようにニュートンの第２法則は、力と加速度の比例関係を表していますが、逆にこの法則を利用して力の単位を決めておくと便利です。つまり、１ｋｇの物体に１m/s2（メートル毎秒毎秒、メーターパーセカンドスクエア）の加速度を与える力を１Ｎ（ニュートン）と言います。これが先に出てきた力の単位の正確な定義となります。つまり、重力による力は、１ｋｇの物体におよそ 10m/s2 の加速度を与えるわけです。

質量と重さとは違うの？

手に、本を持ってみましょう。手を離すと本は机の上に落ちますね。つまり、止まった状態から動いている状態になるわけです。ニュートンの第一法則は、力が働いていなければ同じスピードであるということですから、本には力が働いているということを意味するわけです。本だけでなく、すべてのものが地球に引きつけられています。たとえば、私たちも友達がいすに座ろうとしているとき、いすをどけると友達が床に転がります。小学校でやったことがあるでしょうが、これは、重力が働いているためと言っても友達は許してくれません。いずれにせよこのように、地球に向かって引きつけようとする力を**重力**と言います。手に本をのせた状態では、本を手で支えています。つまり、本には、手から同じ大きさで逆向きの力が加えられ、全体として力が働いていないので手の上で静止しているわけです。この感覚がわかるまで手のひらの上に本をのせておきましょう。

辞書など重い本を持つとより手にかかる力が大きくなります。つまり、重力は質量に比例するわけです。

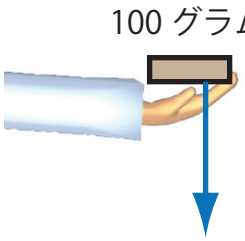
さて力の単位についてみてみましょう。まず**質量**は、物体固有の量であり通常 kg ではかります。一方、重さというのは物理では力に相当します。そして、力の単位は**ニュートン**（N Newton）と言います。このニュートンという単位はあまりなじみがないかもしれません。地球上で平均的には

質量 1kg の物体に働く重力の大きさ =9.8N（ニュートン）

という関係があります。

この質量と重さ（重力）は非常に混同しやすいので注意が必要です。たとえば、宇宙飛行士が月面に降り立つと、その宇宙飛行士の重さは、およそ６分の１になります。しかし、質量は変わりません。このように重さはあくまで力であり、質量とは物質に固有の変わらない量である点に注意してください。

またここでは、ある程度力の単位の大きさを自覚しておく必要がある。ほとんどの人は、1kg の物質の重力 =9.8N なんて数字を使う必要はありません。1kg に働く重力 =10N で十分なんです。つまり、だいたい、１００ｇで 1N です。秤を持っている人は少ないので、スーパーマーケットかコンビニに行って、１００ｇの挽肉のパックを探して持ってみみましょう。これを持ったときに加わる力が 1N の力です。何回も手に持って 1N を体感してみましょう。ただし、他の人に見つかるとかなり変な人に思われるので気をつけてください。



百グラムの物体を持ったときに手の受ける力がおよそ１ニュートン

作用反作用の法則と相互作用とは？

力についてすこし難しい言葉を導入しておきましょう。

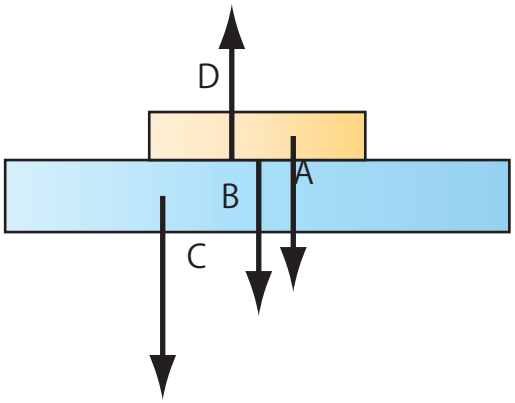
ものを押したり押されたり、引っ張ったり引っ張られたりするのは身近に感じる力ですね。たとえば、壁を押してみると、壁があなたを押しかえします。片方だけ力を押しっぱなしということはありません。このように力は必ず２つのものの間に相互に力が働くことを**相互作用**と言います。難しい言い方ですが、文字通り相互に作用しあうことを表しています。壁相手には実感できないって方もいるでしょう。それでは両手を合わせて拝むような格好をしてみよう。ただし、頭は下げなくてもかまいません。そして、両手に均等に力を入れて手のひらを押しつけてみますみ。すると、それぞれの手には同じだけの力が働いていることがわかるでしょう。左手から右手への力と、右手から左手からの力が相互作用です。**ニュートンの第３法則**は、

ある物体１が物体２に力を与えると、物体２から物体１に同じ大きさで逆向きの力が働く

というものです。これは**作用反作用の法則**とも言われます。

机の上に本がある。力のうち、作用反作用の法則に関係する力は？

（A）本に働く重力、
（B）本が机に与える力
（C）机に働く重力
（D）机が本に与える抗力



作用反作用とは、別のものに働く力の組み合わせであることに注意しましょう。(B) と (D) が作用反作用の関係ですね。

ここで作用反作用の法則と誤解しやすいのが、力の釣り合いとの関係です。力の釣り合いとは、ある一つの“物”に対して働く力の合力がゼロの状態です。それに対して、作用反作用の法則というのは、別のものに対して働く力であることに注意しましょう。上の問題の場合、本にとって A と D が釣り合いに関係する力です。

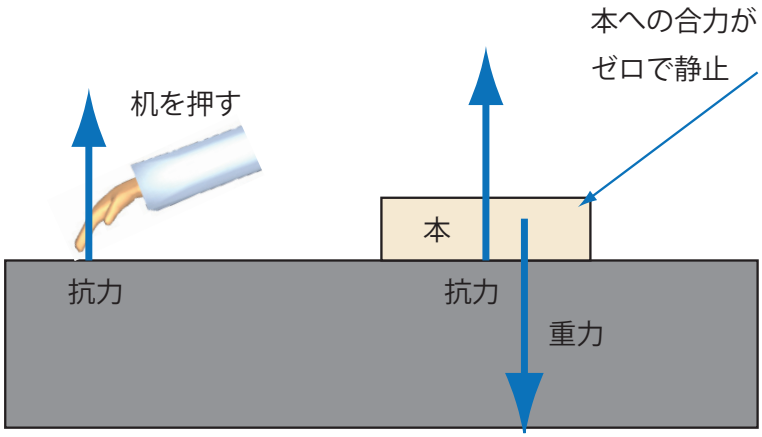
そこでもう一度両手を合わせた場合に戻ってみましょう。右手に加わる力を見てみることにします。右手には、右手の手首からの力と、左手からの力が釣り合って静止していますね。それでは、左手の力だけを抜いてみます。すると右手に左手が押し込まれる格好になりますね。しかし、手のひらに働く力に注意してください。押し込まれていても右手が左手を押す力と左手が右手を押している力は同じ大きさです。変わっているのは手首から手のひらに加えられる力だけであることに注意してください。このようにたとえ静止していなくてもいつでも作用反作用の法則は成り立つのです。

本を持って上に持ち上げてみます。すると本を加速するので静止しているときより大きな力が必要です。この反作用として感じるのが、あなたが本から受ける力です。

このように相互作用という言葉は、相互に作用し合うという力の性質を端的に言い表しているのです。

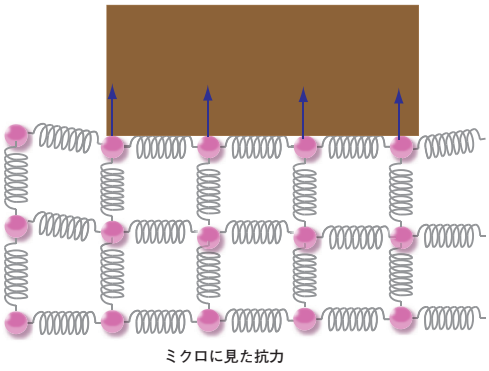
抗力とは？

本を手に持っている状態では、本には、重力と手からの力が働き、全体として合力がゼロになっていることを見ましたね。それでは、本を机の上に戻してみましょう。この状態でも静止しているということは、本は重力とそれと逆向きの力が机から受けているということを意味します。この力を抵抗する力ということで、**抗力**と言います。抗力は一般に押される力と同じ大きさの力となりますが、押さえられる力に対抗できなくなったらものが変形したり壊れたりしてしまいます。



押し返される力　抗力

それでは抗力はどのようにして起こるのでしょうか？ミクロに見ると、机の分子は仲良く整列した状態にいる。本を上に置かれると、押されてお互い引っ張り合った状態でこれに抵抗しようとします。　私たちがこの分子になった気持ちを体感するには満員電車がいいでしょう。満員電車の中で、外からさらに乗ってこようとすると、押し返そうとします。さもないと私たちがつぶれてしまうからです。私たちが分子で、外から入ってこようとする物体があると押されて抵抗する。これが抗力です。分子たちはお互いに分子間力でくっついています。外から力が働いて位置が変わるとこの分子間力で押し返します。つまり、摩擦力と同様に抗力も分子間力ということになります。



抗力も摩擦力と同様に分子間力に起因する

このように力学では力がいろいろ出てきますが、摩擦力や抗力は、分子間に働く電気的な力が元になっており、それ自体が本質的な力ではないことに注意してください。一方、重力はこの原因となる力という言い方が（一般相対性理論を除いて）できないので、重力は本質的な力です。抗力は、物体同士が接している面に対して斜め方向の力になりますが、それの垂直方向の成分を**垂直抗力**といい、水平方向の成分を摩擦力と言います。

力学的平衡状態とは？

合力がゼロの状態では、ニュートンの慣性の法則により、同じ速さで直線運動するか静止しています。この力の釣り合った状態を**力学的平衡状態**と言います。

力学的平衡状態として誤解されやすいのが、力学的平衡状態は静止している状態とは限らないという点です。たとえば、空き缶を地面の上で転がしていても転がっている状態は、一定の速さで直線的に運動していますので、全体として力は働いていません。つまりこれも力学的平衡状態です。

力の種類は何種類あるの？

力学に出てくる力の種類は多数あります。まず、今まで出てきた中では、**重力**が一番なじみ深いでしょう。地上のすべてのものはその質量に比例した力で地球に引かれています。

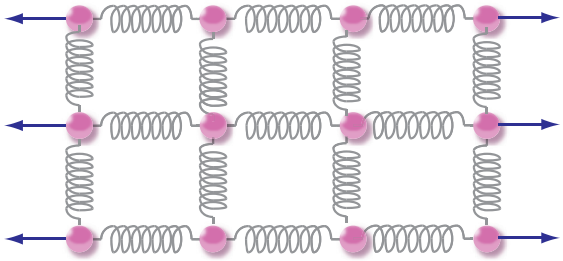
次に、先ほど出てきた**抗力**です。これは、机の上に乗って静止している消しゴムや鉛筆なども受けている。また、床の上の机自身も床から抗力を受け、重力と釣り合って静止しているわけだ。また、斜めのところで静止している物体には**摩擦力**が働いています。摩擦がなければ滑り落ちるはずです。

一方、風による力、**風力**があります。これは、風の強い日にはよく感じるでしょう。これと同様の現象が**空気抵抗**です。台風のときにはその力は強力なのがわかりますね。

また、糸やロープで吊しているものには、糸の引っ張る力が働きます。これを**張力**といいます。

今見たように力の種類は非常に多く感じるでしょう。

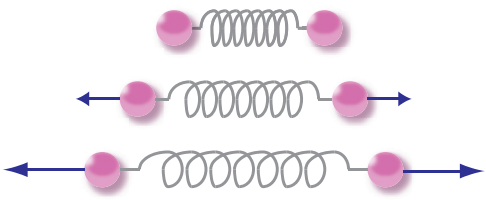
次にこれらの力をミクロな観点から見てみましょう。まず、先ほどの抗力や摩擦力は分子間力に起因していました。そして、空気抵抗や風力は、空気の分子と物体との衝突によって起こります。これもまた分子間力です。張力はどうでしょう。糸の分子同士が硬く結びついています。つまり仲良したちがお互いに結束しているようなものです。外から引き離そうとする力が働くとお互いに離れたくないためにお互いに引っ張り合って外からの力をこらえます。しかし、分子間力よりも大きな力では糸が切れてしまいます。つまり張力もまた分子間力ということになりますね。それでは、分子間力はどのような力でしょうか？11 章で学びますが、それらの根源は電磁気的な力であることが知られています。つまり、日常の現象に現れる力は、重力をのぞいてほとんどが電磁気の力なのです。いずれにせよ、重力と電磁力は本質的な力であり、抗力などとは格が数段違います。「週間ランキング」の力部門があったとしたらでは、重力、電磁気力が毎週共にトップを争い、抗力、摩擦力などは上位には食い込めないでしょう。



ミクロに見た張力

バネの性質は？

実際のバネなどは固体の弾性力を利用しています。こののびと力にはどのような関係があるのでしょうか？図のように、のびの長さと加える力は比例します。これを**フックの法則**と言います。



のびの長さと力

フックの法則は、分子間の位置を元に戻そうとすることからくる力に対して成り立ちます。ただし、のびがあまり大きいと実際にはフックの法則からずれたり、バネが伸びたまま戻らなくなったりしますね。実際の分子間力は、電気的な力であり、分子間の距離が大きくなるとフックの法則が成り立たなくなるのです。

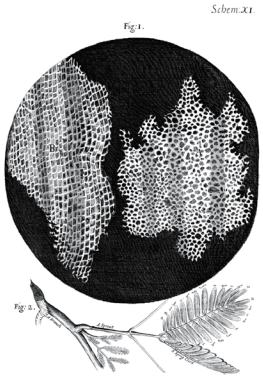
ロバート　フック (1635-1702)

フックは自然哲学者であり発明家です。子供の頃から発明に優れ、木の時計や、銃を発射したり泳いだり出来る人形を作ったりしていました。1648 年にロンドンに移り勉強し、1655 年からボイルの助手となります。ボイルのために空気ポンプを発明し、ボイルが有名なボイルの法則 (一定温度の元では、体積と圧力とが反比例すること) を発見するのを助けました。また彼は時計の改良に取り組みます。時計に螺旋状のスプリング（バネ）を使い、大幅に性能を上げることに成功します。このことが後に、弾性の法則、バネによる力の強さはその伸びの長さに比例するという法則の発見につながりました。これを**フックの法則**と言います。フックの法則は固体の静的な性質だけでなく、振動や波の性質に至るまで幅広く応用されます。

1660 年に、オックスフォードの人たちはロンドンに移り、科学者たちによる世界初の学会、ロンドン王立協会を設立します。フックは設立の中心的な存在であり、週に一度の会合の度に２つか３つの実験をして見せたようです。これらの実験から生まれた成果は、1965 年に「ミクログラフィア」と言う本で発表されました。この中に取り上げられている事柄は次のように大変幅広いものです。

まず、光についてはこれを小さな振幅の波であるとします。このために、彼はレンズを二つ重ねて見たときに起こる干渉縞を解析します。これは現在「ニュートンリング」として知られています。また、波面の概念を導入し屈折を説明しました。

彼は顕微鏡の改良にも取り組みます。そして、図のように生物が箱状のパーツからなっていることを発見します。彼はこれを細胞 (cell) と名付けました。これは正確には現在の細胞とは異なる物ですが、科学者たちは現在もフックがつけた名前を用いているのです。これは、生物学にとっては革命的な概念となりました。



フックは細胞（cell）の名付け親でもある

天体望遠鏡の改良にも取り組み、星までの距離を測る努力をしたり、燃焼の過程では空気が必要であることを発見したりします。また、彼は建築家であり 1666 年のロンドン大火の後、病院や大学などの設計をしました。

彼はまた、重力が距離の二乗に反比例する力であり惑星の運動はこの力によるものであることを手紙でニュートンに提唱しています。ただし、数学的な力の差で、ニュートンによって先にこの問題が解かれてしまいました。

フックは他分野にわたり非常に多くの発明をしました。フックが亡くなったあと、ニュートンが王立協会の会長となりました。すると、フックの業績の評価が正しくなされなくなりました。また、フックの死の直後にニュートンの提案によってなされた引っ越しの際になぜか彼の肖像画がなくなってしまいます。そして、それに変わって流通したのが彼が性格のゆがんでいるかのように書かれたものでした。また、フックのことを書いた最初の歴史家が、彼は傲慢で嫉妬深い性格であったと書いたため、その後の彼の歴史的評価に悪影響を与えました。しかし、現在では比較的詳しい資料によりフックは大変社交的であったこともわかり、また彼の業績の多くが正しく見直されています。

人体と加速度

私たちはいつも加速度を経験しています。ベッドに寝ていても地球に重力加速度で引きつけられています。バスに乗っていると発進するときは後方に向かっての加速度を経験し、バスが止まるときには前方への加速度を経験しますね。重力加速度を１ジーとしますと、列車にのって発進するときの加速度はわずか０．０２ジー程度です。これを超えると不快な気分になってきます。通常の人では２ジーを超える加速度を経験することはありませんが、宇宙飛行士などはこれを経験します。このようなときに人体にどのような影響がでるのでしょうか？

骨や筋肉などは１０ジーを超える加速度でもその形を保つことができます。それに対して大きな影響が出るのが血液です。血液は心臓によって送り出されています。心臓よりも高い位置にある血液は加速の影響で非常に重い状態になりますので心臓の圧力では移動できなくなり血液が循環しなくなってしまうのです。

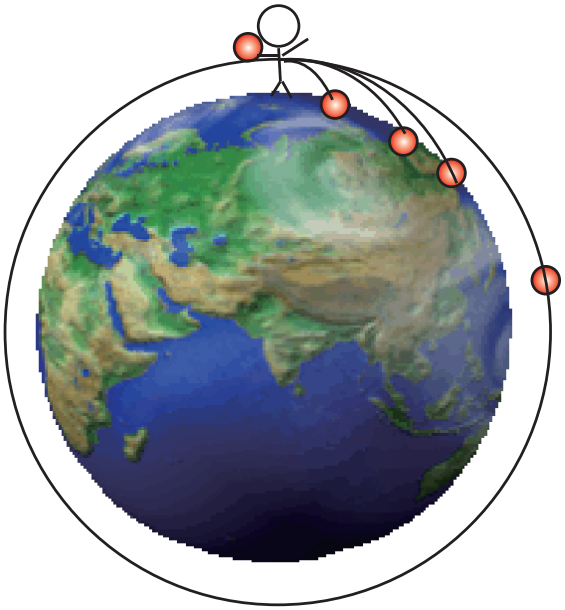
この現象は日常でも起こっています。たとえばたった状態では頭の血圧は心臓よりも小さいため血液の循環が悪くなります。また眼球の毛細血管の血圧はさらに下がっているため、貧血で血圧が下がると立ちくらみや目が見えなくなり倒れるといった現象が起こります。

たった状態では４ジー程度で失神しますし、寝ている状態では心臓と頭が同じ高さにあるため１０ジー程度までは意識を保つことができると言われています。宇宙飛行士が上向きで座った状態で発進するのは頭の血圧を下げないようにするためです。

非常に大きな加速度で加速するスペースシャトル
打ち上げ時

ニュートンが発見したのは？

リンゴが落ちるのと、月が地球の周りを回っているのは同じ力が原因であることに気づいたのはニュートンです。それまでは、宇宙での出来事と地上での出来事は全く違うものであると思われてきました。しかしニュートンが示したのは宇宙空間の法則と、身近な現象が同じことで説明できるということです。ためしに、地上から物を投げてみます。といってもすこし極端にして、空気の薄い高い山から投げることを思い浮かべてみましょう。そして、実際には無視できないのですが、ここでは空気抵抗を完全に無視しておきましょう。そっと落とすとボールは地面に落ちます。水平方向にもっと速く投げると、より遠くに落ちます。ものすごく速くなげると、図のように、地球が丸いので落ちて行きつつ地球を回るようになっていきます。つまり、落ちるまでに地面が遠ざかっていってしまうと、地球には落ちないで戻ってきます。つまり、地球に落ちると言うことと地球を回ると言うことは実は同じ力で説明できるのです。ちょうど、地球の中心から引っ張る力が糸でボールを引っ張る力と同様にして円運動しますね。ちなみに重力自身はニュートンが発見したのではないことに注意しましょう。ニュートンの発見したのは重力に関する法則です。ニュートンの考え方は、自然科学に対しての近代的な考え方を宇宙全体について表した最初の例と言えるのです。



ニュートンは落下することと地球を回ることは同じことであるのに気づいた

万有引力の法則とは？

ニュートンは、重力がすべてのものに働くことを発見したのです。まさにすべての物にある、万有の力です。ニュートンの万有引力の法則は、すべての物は引き合い、その大きさは、それぞれの質量に比例し、その距離の２乗に反比例するというものです。重力は２つのもの相互に働き、作用反作用の法則が成り立つことにも注意しましょう。式で書くと、

重力＝比例係数×質量１×質量２÷距離の２乗

となり、この比例係数を**ニュートンの万有引力定数**と言います。つまり、

重力＝万有引力定数×質量１×質量２÷距離の２乗

となります。

たくさんのことが一度に出てきて解りにくくなったので、例題で勉強してみましょう。

問題

それぞれある質量を持った２つの物体がある距離だけ離れている。

（１）　片方の質量が２倍になると力の強さは何倍になるか？

（２）　それぞれの質量が共に２倍になると力の強さは何倍になるか？

（３）　距離が２倍になると力の強さは何倍になるか？

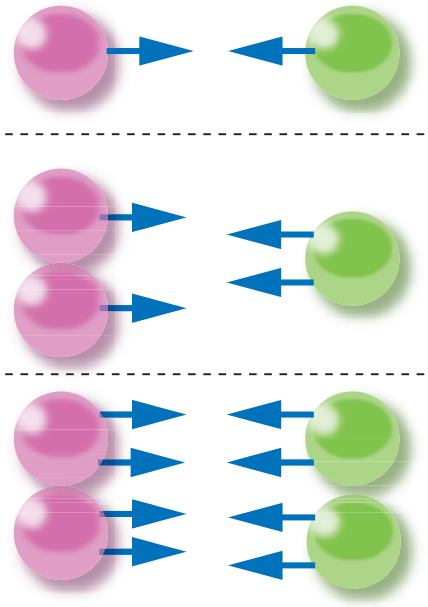
（１）　では、ボールとボールを思い浮かべよう。一方がボール２個になると、それぞれに力が働くので合わせて２倍。つまり２倍の質量には２倍の力が働く。

（２）　では、ボール二つずつある場合だ。相手方２つからそれぞれのボールに力が働くのでボール一つには２倍の力が働く。ボール２つ合わせて４倍の力となる。

このように、力はそれぞれの質量に比例するというのは、力における重ね合わせの原理の結果です。

（３）　距離が２倍になると、その２乗は４倍。これに反比例するので力は４分の１となります。距離が大きくなると急速に力が弱くなるのがわかりますね。

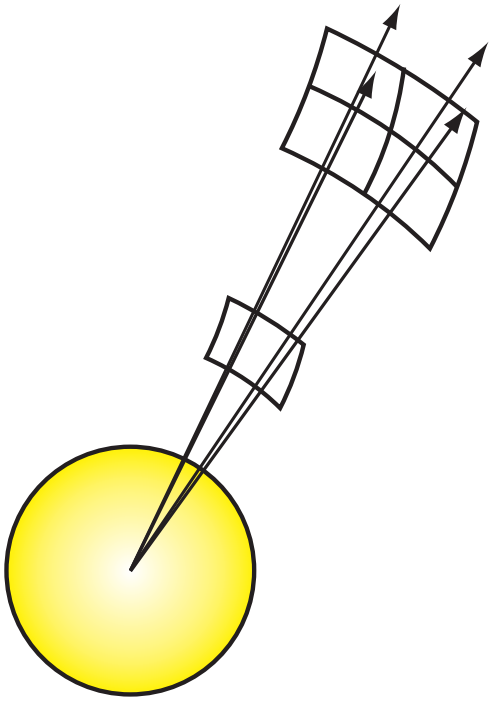
距離の２乗に反比例するというのは様々なところに出てきます。これを**逆２乗の法則**と言います。



力の重ね合わせの原理により、重力による力はそれぞれの質量に比例するようになる。

光の強さと逆二乗の法則

距離の二乗に反比例するという性質は物理では様々なところに登場します。この性質についてのイメージをつくるために、スタンドの電球を見てみましょう。電球からある距離で紙をあててみます。その紙を２倍の距離にもっていくと、紙にあたる光は暗くなります。それではいったいどのくらい暗くなっているのでしょうか？それにはまず、そもそも明るさということを考えなければなりませんね。最初の位置から離していくと、最初あたっていた光が広がっていきます。２倍離れたら縦方向も横方向も２倍のところまで広がっていくことになりますね。よって、最初紙にあたっていた光は縦２倍横２倍とあわせて紙４枚分に広がってしまったことになります。光の量は同じなので、一つの紙にあたる光の量は４分の１になってしまったわけです。これより、



明るさは光源からの距離の二乗に反比例する

ことがわかりますね。

重力に対してイメージするなら、光と同様に、物質からは引きつけようとするオーラが出ている。このオーラの強さに比例した力が働くのが重力と思ってもよいでしょう。このような引きつけるオーラを重力場と言います。後でみるように電気の力も逆二乗の法則が成り立ちます。一見、光の強さと力の強さとは何の関係がなさそうですが、１２章ではこれが単なる類似以上であることを見ます。

重力って強い力？

地球からの重力は非常に強く感じます。風邪などで体が弱っているときには特に強く感じて寝ていたいと思いますね。しかし万有引力はすべてのものに成り立つはずなんですが、鉛筆と自分が引き合う力なんて感じたことがないことでしょう。また周りの人と自分とも引き合っているはずです。でも気に入った相手に近づいていっても中には反発力を感じて逃げていってしまう人もいるくらいです。これはどうしてでしょうか？この答えも、ニュートンの万有引力の法則に含まれています。万有引力の法則では万有引力定数が非常に小さいのです。たとえば、１ｋｇの物体２つが１ｍ離れておいてあるときに働く力はなんと

0.0000000000667 N

です！１Ｎはどのくらいか体感しているあなたはこれがどれだけ小さいかわかるでしょう。では逆になぜ地球からの力が大きく感じるかというと、地球の質量が非常に大きいからです。地球の質量は、およそ 6000000000000000000000000kg ゼロの数が２４個つきます。塵も積もれば山となるのです。このために私たちには地球の重力は強く感じるわけです。

重力加速度との関係は？

それでは、万有引力の法則と地上での重力に出てくる重力加速度との関係はどうなっているのでしょうか？万有引力の法則によれば、私たちと地球の引き合う力は、お互いの距離の二乗に反比例します。しかし、地球は半径約６４００ｋｍですので、地上 100m くらいでも、中心からの距離はほとんどかわらないことになります。このため、地上では高さによらず一定の重力の大きさとなるわけです。物体の質量以外は地球の半径や地球の質量で書けるのでそれより実際にそれぞれに数値を代入してみると、重力加速度＝ 9.8m/s^2 となることが万有引力の法則により導くことができるわけです。ただし、地球は完全に円形ではなく、場所によって地球の中心までの距離も異なりますし、地球内部も一様ではありません。またそのため、重力加速度は場所によって異なる値となります。基本的な法則はあくまでニュートンの万有引力の法則であり、地表での重力の性質はそこから導かれるものなのです。

以下は式が出てきますので、面倒と思う人は読み飛ばしてもかまいません。

それではより具体的に考えてみましょう。地上のある物体と地球とが引き合う力は、万有引力の法則から

重力＝万有引力定数×質量×地球の質量÷地球の半径の二乗

となるわけです。これは

重力＝質量×（万有引力定数×地球の質量÷地球の半径の二乗）

となりますので、

重力＝質量×重力加速度

と比べると

重力加速度＝万有引力定数×地球の質量÷地球の半径の二乗

となりますね。これは地球の質量や半径などを代入すれば計算できますね。その答えは、9.8m/s2 となり、天空の運動と地上での運動が同じ法則に従っていることがわかるのです。

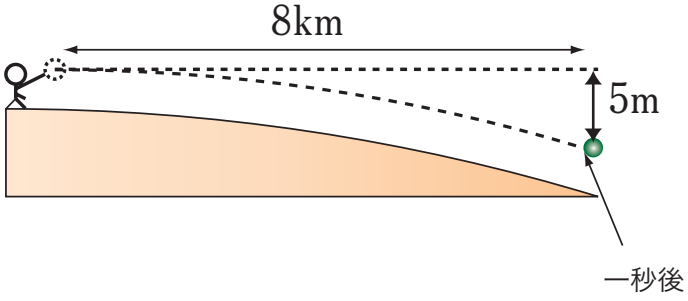
このようにニュートンは天空の法則と地上の法則を統一しました。

衛星の軌道

今度はあなたがＮＡＳＡの衛星の司令室にいることをイメージしてみましょう。あまり現実的ではありませんが、レンタルビデオ屋さんで「アポロ１３号」などを借りてきて気分を盛り上げてみましょう。さて、司令室では、まず、衛星の軌道のことを知らなければいけません。現在非常に危険な国があるので、その国のミサイル基地を探査する探査衛星を打ち上げることにします。いわゆるスパイ衛星です。まず宇宙とは地上からどのくらいにあるのかを見てみます。実は地表から１００ｋｍ上空で空気が非常に薄くなります。そのため、人工衛星の場合、上空２００ｋｍから４００ｋｍで打ち上げればよいのです。これは、東京から名古屋くらいまでの距離になります。また、地上から近い方がより大きく地表が見えるので、スパイ衛星としては好都合です。一方、地球の中心からから地上までの距離は６４００ｋｍですので、地球のサイズからみると、２００ｋｍ上空でも地表を跳んでいるのとそれほど重力の強さは変わりません。変わるのは、地上と異なり空気抵抗を受けないことです。いずれにせよ、重力だけの力を考えればいいので計算は易しくなります。

地上近くでは、そっと落とされた物体は、一秒間に 5m 落下します。この間に地球の曲がりで地上も 5m ほど下にいっていれば地上に落ちないようになるのです。半径６４００ｋｍの地球では、およそ 8km 進むと 5m 地上が下に沈みます。このため、円運動する速さはおよそ秒速８ｋｍとなります。地球の中心からの距離が解っているので、地球の円周の長さがわかり、その距離を秒速８ｋｍｍでかかる時間は、およそ８０分となる。やりかただけわかれば実際に計算する必要はありません。この見積もりを実際の人工衛星と比較してみます。実際の人工衛星やスペースシャトルは、すこし地表から離れているので、一周するのにかかる時間は９０分くらいです。これからおよそ９０分に一回その国を偵察できることがわかります。しかし、この場合次のような問題があります。それは地球が自転しているため、一周して戻ってきたら地球の自転で目標とする国がずれた位置にいることになってしまうのです。このため、こうした衛星を複数機用いて、地球が自転しても絶えず観測できるようにしておく必要があります。

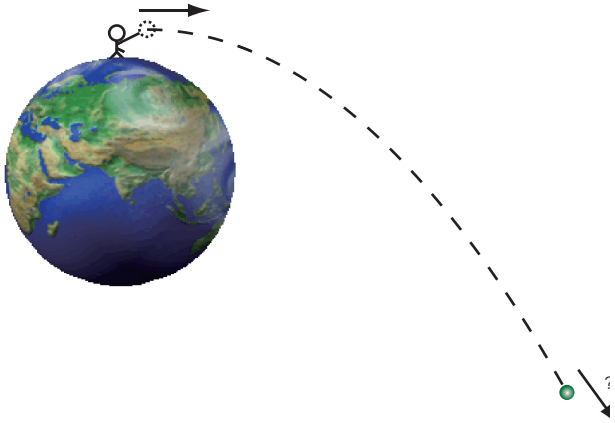
スパイ衛星としてのもう一つのアイデアは、地球の自転と同じようにまわる衛星を使えばよいということです。いわゆる静止衛星です。しかし静止衛星となるためには、一周するのに２４時間ということで、地球からかなり遠いところをまわる必要があります。すると、ミサイル基地のような細かな情報が見られなくなってしまいます。このように、静止衛星は地上の細かい地点の観測には適していいません。静止衛星は、気象観測などで威力を発揮します。



空気抵抗がなければ水平に秒速８ｋｍで投げると地球に落下しないようになる。

楕円軌道

地球から秒速８ｋｍで投げると円軌道になることをみました。それでは、もっと素早く投げるとどうなるのでしょうか？するとより地球から離れてしまうでしょう。それでも地球に引かれてもどってきます。この軌道は、**楕円**になることが計算で示すことができます。これがケプラーの第一法則です。また、非常に速度が大きいと、地球には戻ってこなくなります。このための計算は最低限高校の数学Ⅲの知識が必要で、かなり高度です。そのため一般教養として導出はお奨めしません。実際、物理学科の学生でも最近は本を見ながらでなければ計算ができない学生が多いくらい難しいのです。それでもその奥義を見てみたいというひとだけ勉強するようにしましょう。



問題

地球から非常に速い速度で投げると、物体は落下していき、地球から遠ざかった。このときの速さは？

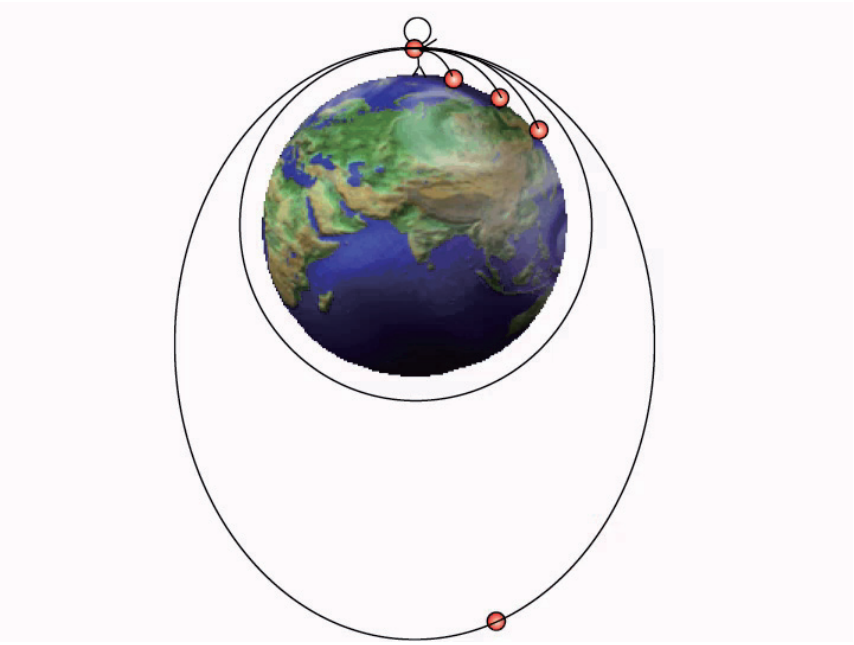
（A）最初の速さよりも速い

（B）最初の速さよりも遅い

（C）最初の速さと同じで一定

（D）これだけではわからない。

答えは、（B）です。落下して行くにしたがって遅くなると考えてしまいそうですが、力の方向を見てみる。力は地球の中心に引きつける方向に働きますね、そのため、遠ざかる方向の速度が小さくなりゆっくりになっていくわけです。そして最も遠い地点に達したあとは、今度は地球に向かって加速されてきて、楕円を描くことになるのです。このように、楕円軌道では、地球から最も遠い点でスピードが一番遅くなり、一番近い点での速度が一番速くなります。これは、より正確にはケプラーの第２法則として惑星の観測によりわかった結果と一致します。



地球から離れるほど、地球からの重力で減速していくのでスピードがゆっくりになる。これがケプラーの第二法則にあたる。

ヘンリー　キャベンディッシュ (1731 - 1810)

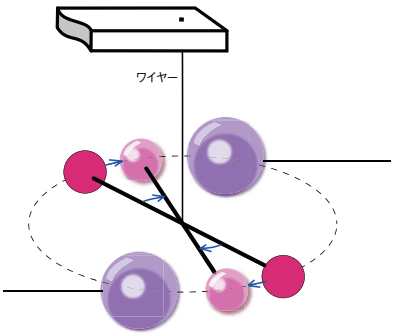
ヘンリーキャベンディッシュは、１８世紀を代表する、化学者であり物理学者です。彼の父親チャールズキャベンディッシュは、非常に裕福な貴族であり化学に興味がありました。３５才で政治的な活動をやめ科学に専念しますが、後に王立協会でマネージメントを行います。子供のヘンリーも幼小の頃から科学に親しみ１８才でケンブリッジ大学に進みました。

キャベンディッシュは非常に恥ずかしがり屋で、ごく親しい王立協会の人たち以外とはほとんどしゃべらなかったと言います。家の召使いとさえ手紙でやりとりしていました。ある日、家に見知らぬ女性がいたときに、手で顔を覆って逃げ出したと言います。彼が研究者として重鎮になってからも、友人の家を訪ねるときも家の前でノックしようか随分まよっていたところを目撃されています。

彼は、水素を発見したことで有名です。また空気の精密な分析でおよそ８０パーセントが窒素であり２０パーセントが酸素であることを突き止めます。

彼はこの他にも多数の発見をしていましたが、多くを論文として発表せず、他の人の業績として後に発表されたものが多数あります。たとえば、電気の研究では、クーロンの法則を１パーセントの精度で確かめていますし、オームの法則も発見していました。また、ダルトンの分圧の法則や気体のシャルルの法則なども発見していました。これらがキャベンデッシュが最初に見いだしたものであることは、１９世紀後半になってから解りました。

彼が重力に関する有名な実験を行ったのは６６才のときです。彼の長年親しくしていたジョンマイケルが、ある実験を設計しました。これは２つの球の間に働くごくわずかな重力をワイヤーのわずかなひねりにより計ることで測定しようとするものです。残念ながらマイケルはこの実験が慣性する前に亡くなってしまいました。そのため、キャベンディッシュがこの実験を引き継ぎ、その精度の良い実験から現在ではキャベンディッシュ実験として有名です。この力の測定より万有引力の比例定数を精度良く計ることができました。これを用いて地球の半径の測定と重力加速度から逆に地球の質量をおどろくほどの精度で測定することができたのです。



キャベンディッシュ実験
物質同士に働く重力を精度良く　測定できる

ヘンリーキャベンディッシュは、日頃は背広の一張羅をすり切れるまで着ているような質素な生活をしていました。しかし、彼が亡くなったあとに遺産が１００万ポンド以上あったと言います。父親から受け継いだ遺産は、誠実な銀行家の投資に任せていて彼は資産については干渉しませんでした。彼は「賢者の中で一番の金持ち。金持ちの中で一番の賢者。」と言われます。

彼は結婚しませんでしたので、彼の莫大な遺産は、親戚のウイリアムキャベンディッシュに受け継がれました。ウイリアムはその金をさらに増やしました。そして、ケンブリッジ大学の総長となり、1870 年にキャベンディッシュ研究所を創設します。この研究所はノーベル賞受賞者を多数輩出し、２０世紀まで世界の最先端を行く研究を行っていることで有名です。

キーワード

ニュートンの運動の法則　ニュートンの第一法則　ニュートンの第２法則　ニュートンの第３法則　慣性、等速運動　等加速度運動　力、 質量、 重力　ニュートンの万有引力の法則　重さ、相互作用、作用反作用