



## 物理学 (第二回)

広島工業大学 特任教授 物理学  
北野保行

**論文要旨** ニュートンの「運動の法則」について解説を行いました。「力」が重要な働きをしています。一言につづめると「力が速さを変える」といえます。速さの変化を「加速度」と言います。「加速度」と「力」の関係を考えます。数学的記述は極力少なくしました。「力」に関連して「慣性力」を説明します。車いす、担架、その他患者の長距離輸送のときに、知っておきたい概念です。「遠心力」や「コリオリの力」は、それぞれ「慣性力」の一つです。ニュートンの「運動の法則」とガリレオの「慣性の法則」との関係、ニュートンの「作用反作用の法則」についても説明します。

### はじめに

ニュートンは三つの偉大な業績を残しました。「万有引力の法則」の発見、「運動の法則」の発見、残る一つは、「微分積分学の創造」です。新しい数学を創りました。前二つの法則を記述するために、数学を創らねばならなかったのです。これら「ニュートンの三大偉業」のうち、第一偉業「万有引力の法則」は前回説明しました。第二偉業「運動の法則」と第三偉業「微分積分学の創造」については、今回説明します。

ニュートンは物体がどのように動くかを考えた末、力が全ての原因であることを突き止めました。動き始めたり、動き方が変わったりするのは、その物体に力が働くからであるとししました。一時的に加わる力だけでなく、万有引力は物体には絶え間なく力がかかっています。ニュートンは、加わり続ける「力」と「動き方」を関係づける法則を見つけたのです。それが「運動の法則」です。「自然の法則」の一つです。今回はこの法則について解説します。この法則のキーワードは、動く物体の「位置」「速度」「加速度」そして「力」です。

これらに関連して「仮想的な力」についてお話しします。仮想的とは言え、場合によってはこの力を実際に受けることとなります。ここでは、実際に受ける場合に限りです。この力は「慣性力」と呼ばれています。バスが動き始めたり止まったりする時に乗客が受ける力です。これらの他に、バスが曲がる時に受ける力・遠心力も「慣性力」です。その他「コリオリの力」と呼ばれる慣性力があります。なじみはないかもしれませんが、この力によって種々の現象が地球上で引き起こされています。

ニュートンは「運動の法則」を3つの法則に分けて記述しました。第1法則はガリレオの「慣性の法則」と同じ内容です。「慣性の法則」は上記の「慣性力」とは違うことに注意してください。第2法則が「運動の法則」の主要部分であり詳しく説明します。この第2法則の特殊な場合が第1法則としてよいでしょう。第3法則は、いわゆる「作用反作用の法則」と呼ばれる法則です。力は、加える側と加えられる側があります。このまま立場を逆さにした時の法則です。分かり切っているとは思わずに読んでみてください。

きたの やすゆき

〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1 広島工業大学 特任教授 物理学

全体にわたって、われわれの日常生活の中に話題を求めました。

第一回目をどれだけ皆さんに読んで頂けたか分かりません。暗中模索の中でもう少し話を進めました。前回は単位系の話もしました。世界条約で共通に使うことにしたSI単位系を、今回も使ってお話します。前回放置した「力」の単位についてはっきりさせます。

## 16. 物体の動き方と力の関係 —止まっている物体に力を加えると動き始める—

ニュートンは「万有引力の法則」の発見者として有名です。このことは前回お話ししました。ニュートンは同時に、物体の動き方についての法則を見つけました。ニュートンの「運動の法則」です。この法則を日常の平易な言葉で言うと、「物体に力を加えると速さが変わります」と言う法則です。私たちはこのことを日頃から当然のように感じています。この法則を感覚的に疑似体験しながら話を進めてゆきましょう。力を出して物体を移動させる時のことです。筋肉に訴えてみるのが可能です。自分で力を出していると思いながら読んでください。そうすると意味がはっきりしてきます。ある物体に力を加えると、その物体の動き方が変わります。どのように変わるのでしょうか。

まず、止まっている物体に力を加えてみます。机の上の鉛筆を転がしてください。鉛筆は動き始めます。ボールを投げる、蹴る、走り始める、荷物を持ち上げる、などです。静止している物体が移動し始めるとき、移動する方向に力が加わっています。

**動き始める方向は加えた力の方向と一致します。**

当たり前ではないか、という声が聞こえますが、当たり前でよいのです。当たり前でないことを物理学では言いません。当たりのことを記述するのが物理学の目的なのです。

ボールを持ち上げてそっと手をはなしてみましよう。ボールは下向きに落ちて行きます。これはボールに下向きに力が加わっているからです。この力が万有引力です。ボールに限らず、地球上では何もかも下向きに力が加わっています。支えがなくなったら地面まで落ちてしまいます。机のような支えがあると、机はその物体を上向きの力で支えていますから、万有引力と差し引きしてちょうど力が0になります。結局、力が働かないのと同じ状態になりますから、机の上で動かずに止まっているのです。止まっている物体には、その物体にどんなに力が加わっていても、加わる力の合計は0になっているのです。

## 17. 物体の動き方と力の関係 —移動方向と平行・反平行に力が加わる場合—

次に、動いている物体に力を加えるとしましょう。すでに右向きに移動している物体に、同じ右向きに力を加えると、動き方はもっと早くなります。ブランコに乗って動いている子供の背中を押すときです。落ち始めたボールは、どんどん速さが大きくなって落ちて行きます。これは絶えずボールには下向きの万有引力が加わっているからです。その力で、下向きの速がますます増大しているのです。ジェットコースターで、下り坂にさしかかった時もそのような状態です。

加える力の向きを逆にしたらどうなるでしょう。物体の動きは遅くなります。さらに、逆向きの力をかけ続けると速さはさらに弱まり、ついには止まってしまいます。車にブレーキをかけて止まる時のことです。タイヤと道路の間に働く摩擦が、走る車に逆向きの力を加えます。

ブレーキをかけると車輪の回転が遅くなります。車体の速さがその回転に見合った速さになるためには、タイヤと道路の間に摩擦があって滑りがないことが必要です。タイヤと道路の間の摩擦力が進行方向と逆の方向に加わるので車は止まるのです。摩擦力のおかげで滑らないで車体の速さが車輪の回転に見合った速さになるのです。もし摩擦がなかったら車輪の回転が遅くなくても、例え回転が止まっても、タイヤは滑ってしまい車体の速さはブレーキをかける前と変わりません。多くの運転手が、濡れた道路や雪道で滑った苦いしかも怖い経験を持っているでしょう。

もちろんこのことは動き始めにも同じことが言えます。ぬかるみにはまり込んで脱出する際、いくら車輪を早く回転させても摩擦がないと車体は動き出しません。車が走るのはタイヤと道路の間の摩擦力が車体を後押しするからです。

動いている方向と逆向きの力がかかり続けると、その物体の動きはだんだん遅くなって、ついには止まってしまいます。それでもなお逆向きに力がかわり続けると、始め動いていた方向とは逆方に動きだします。つるまきバネの振動がこの例です。つるまきバネに錘をつるすとバネは少し伸びます。錘を手で持ち上げてバネを縮めたのち、手をはなすと錘は振動を始めます。バネが縮んだ状態では押されて伸びて行きますが、バネがさらに伸びて行く時は常に、「戻れ、戻れ」と力を受けています。その力のために錘は徐々に速度を落とします。ついには止まってしまいますが、止まった時にもなお、ひき戻される方向に力がかわっています。そのため、止まった直後からすぐに方向を変えて戻って行きます。

さてここで、速さの変化を図に描いてみましょう。速さを1本の矢印で描きます。矢印の方向を速さの向きとし、矢印の長さを速さに比例させることとします。図2-1と図2-2は「始めの速度」と「後の速度」が同じ向きの場合を表した図です。これらの二つの矢印は、同じところから、同じ直線上に重ねて描くべきですが、分かりやすくするために「後の速度」を少し下方にずらして描きました。図2-1では「後の速さ」が「始めの速さ」より大きくなった場合、つまり加速する場合です。図2-2ではその逆の場合で「後の速さ」が「始めの速さ」より遅くなった場合、つまり減速する場合です。

これらの図には「速さの変化」を示す矢印も描きました。それぞれ点線を使って矢印を描きました。「速さの変化」を示す矢印は、「始めの速度」の先端から「後の速度」の先端まで伸ばした矢印です。「始めの速度」の矢印と「後の速度」の矢印は、本来同じ線上にあるべきですから、「速さの変化」を示す点線矢印も同じ直線上に描かねばなりません。図2-1では「速さの変化」を示す点線矢印を「始めの速度」の矢印と同じ直線上に描きました。

この「速さの変化を示す点線矢印は加えた力の方向と一致している」ことに注意してください。



図2-1

移動する方向に力がかわって、「後の速度」が「始めの速度」より増大した場合の「始めの速度」、「後の速度」、「速度の変化」を示す矢印。「速度の変化」は点線矢印で示しました。これら3本の矢印は、本来1本の直線上に描くべきですが、分かりやすくするために、「後の速度」の矢印を下にずらして描きました。「速度の変化」を表す点線矢印の方向は、加えた「力」の方向と一致しています。

逆に速度が低下する場合を図2-2に示しました。速度が増大する場合と同じように考えることができます。「速さの変化」の矢印は、「始めの速度」の矢印の先端から「後の速度」の矢印の先端までの点線矢印です。この場合も「始めの速度」の矢印と「後の速度」の矢印は、本来同じ線上に描くべきです。ですから「速さの変化」を表す点線矢印も同じ直線上に描かねばなりません。分かりやすくするために、図2-2では「速さの変化」を表す点線矢印を「後の速度」の矢印と同じ直線上に描きました。この場合には「始めの速度」の矢印と逆向きの平行な矢印になります。

ここでは速度と逆向きに力を加えたのですから、この場合にも、「速さの変化の矢印の方向は加えた力の方向と一致している」ことに注意してください。

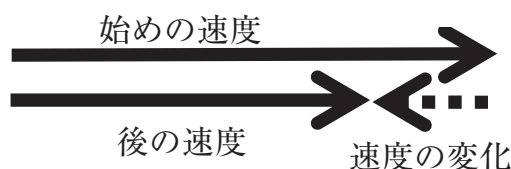


図2-2

移動する方向と逆に力がかわって、「後の速度」が「始めの速度」より低下した場合の「始めの速度」、「後の速度」、「速度の変化」を示す矢印。「速度の変化」は点線矢印で示しました。これら3本の矢印は本来1本の直線上に描くべきですが、分かりやすくするために、「後の速度」と「速度の変化」の矢印を下にずらして描きました。「速度の変化」を表す点線矢印の方向は加えた「力」の方向と一致しています。

18. 物体の動き方と力の関係 —移動方向に直角方向の力が加わる場合—

動く物体への力の加わり方にはもう一つのものがあります。動く物体に横から直角に力が加わる場合です。横から力が加わったら動く方向が変わります。サッカーでころがるボールを横取りする時です。ボールの動く方向が変わります。バレーボールでアタックするときも同じです。上から落ちてくるボールに横から力を加えます。動く方向が変わるのは横から力が加わったからです。

ひもに繋がれた錘が振り回されて、円弧を描いているとします。円弧を描いているのですから、おもりの動く方向は時々刻々変わっています。さて、円弧を描いて動く錘にどんな力が加わっているでしょう。錘はひもを通して中心につながれています。錘に加わる力はこのひもを通してかかる以外他にはありません。ひもの方向はいつも錘の動く方向に垂直です。円を描いて運動する物体には、いつも横から力が加わっているのです。そして動く方向がどんどん変わって行くのです。

アイスダンスデュエットで、男性を中心にしてまわる女性の手は男性の手で引かれています。女性になってみてください。中心の男性から引かれる力以外に、どんな力も加わっていません。男性に引かれる力で女性は男性のまわりを回るので。女性に加わる力は女性の動く方向に直角方向です。よく遠心力が加わっていると言いますが、この力はいわば女性の内部問題です。遠心力については後ほど説明します。

1階から2階へ階段を登るとき、階段の途中でぐるりと方向を転換する場合があります。その時、手すりを体の方向に引っぱるようにしてまわると楽に方向転換できます。ここでも腕を通して体に横から力を加えています。その力で進む方向を変えているのです。

マラソンの練習を運動場のトラックですると疲れるが、普通の道路で行うと同じ距離を走ってもそれほど疲れません。これは曲がり続けるトラックでは、体に横向きの力を余分に加え続けなければならないからです。足で横向きに蹴らなければならないからです。同じ方向にトラックを回るときには、一方の足にだけ負担がかかることになります。両足に均等に負担をかける走り方もあるだろうと思います。スピードスケート競技ではいつも同じ方向にトラックを回っています。やはり同じことがあるでしょう。

横から力が加わる場合の速度の変化を図2-3に描きました。ひもに繋がれた錘の動きを思い浮かべてください。「始めの速度」を右向きの矢印とします。力が加わった「後の速度」は、矢印の向きをたとえば右下斜め方向に変えておけばよいでしょう。矢印の長さは変えないでおきましょう。「速度の変化」を分かりやすくするために、2つの矢印の出発点を一致させて描きました。「速度の変化」は、図2-1や図2-2の時と同じように、「始めの速度」の先端から「後の速度」の先端までの矢印で示すことができます。「速度の変化」の矢印を点線矢印で描きました。ここでは、「始めの速度」の向きに対して横から力を加えた場合を考えました。ここでも、「速さの変化」を考えると、「速さの変化を表す点線矢印は、加えた力の方向と一致している」ことに注意してください。

読者の中には、「力の方向」と「速さの変化の方向」は「一致していない」と思った人がいるでしょう。確かに、図2-3の場合には、「力」の方向が真横からなのに、「速度の変化の方向」は「始めの速度」に垂直ではありません。少しだけ斜めを向いています。ここでは、厳密さを少し我慢して直角と思ってください。そして、「速度の変化」の方向と「力」の方向は同じ方向であるとしてください。後に少し厳密にお話する時が来るでしょう。厳密に記述するには数学的準備が必要となります。



図2-3

移動する方向と直角方向に力が加わり、速さの方向が変化する場合の「始めの速度」、「後の速度」、「速度の変化」を示す矢印。「速度の変化」は点線矢印で示しました。「始めの速度」と「後の速度」の矢印の長さを等しくしました。この2つの速度を比較するために、矢印の出発点を一致させました。「始めの速度」の先端から「後の速度」の先端への点線矢印が「速度の変化」です。この点線矢印の方向は加えた「力」の方向と一致しています。

次に、斜め前から風が吹いてきた場合を考えましょう。歩き方が遅くなると同時に、横によろめいて曲がってしまいます。斜めからの風によって斜めに力を受けます。このような時にはその力を2つに分けて考えるとよいのです。「進む方向に逆平行」の力と「横方向」の力の2つです。「進む方向に逆方向」の力は歩みの速度を低下させる効果があります。図2-2の場合です。また、横向きの力は「歩む方向」を変える効果持ちます。図2-3の場合です。

移動している物体にどの方向から力が加わっても、上に述べたように直交する2つの方向に分けて、それぞれ別々に、速度がどのように変わるかを考えればよいのです。そして最後に、それぞれの効果を加え合わせるとよいのです。

### 19. ニュートンの「運動の法則」－力と速度の変化の関係－

ここまでで分かったことをひとまずまとめておきましょう。第16, 17, 18章で得た共通点は、「速度の変化の方向はその物体に加わる力の方向に一致する」ことです。これが「ニュートンの「運動の法則」の根幹部分です。これは「自然の法則」と呼ばれている法則のひとつです。「自然の法則」とは、自然現象を支配する最も根底にある法則です。全ての現象は「自然の法則」に支配されています。当てはまらない物事はありません。

移動する物体の「速度の変化の方向はその物体に加わる力の方向に一致する」と言う、ニュートンの「運動の法則」の根幹部分は、全てに当てはまる法則です。賢明な読者は「なぜこの法則は成り立つのか？」と質問したくなるでしょう。その質問に対して実は誰も答えようとはしません。単に「事実がそうなっているのです」と答えるだけなのです。その代わりに、実際にそうなっているかどうかは、厳密に調べる必要があります。「事実がそうなっているのです」と自信を持って答えることができるのは、実際に厳密に調べた結果なのです。ここに、物理学が実証的学問であることの証があるのです。

「自然の法則」には理由はありません。「実際そうなっているだけ」なのです。

### 20. ニュートンの「運動の法則」－質量と力と速度の変化の関係－

ニュートンの運動の法則にはもう一つ重要な要素があります。物体の質量です。同じ力を加えたとき、質量の異なる物体ではその「速度の変化」の仕方は異なります。動き方は質量が大きいほど緩慢になります。軽い物体ほど素早く変化します。空中に浮くちは軽くて、吹くだけでどこかへ飛んで行ってしまいます。一方、レールの上に乗っているとはいえ、貨車を1人で動かすことはできません。力をあわせてそろりそろりと動かしているのを目にしたことがあるでしょう。質量が大きい場合には大きな力が必要です。加速するとき・減速するとき・速さの向きを変えようとするとき、いずれの場合にも、質量が大きくなればなるほどそれだけ大きな力が必要になります。

ニュートンの運動の法則をまとめてみましょう。ニュートンの「運動の法則」とは「速さの変化は力に比例し質量に反比例する」という法則です。比例定数は1になるようにしてあります。式で表すと次のようになります。

$$\text{速度の変化} = \frac{\text{力}}{\text{質量}} \quad (2-1)$$

ここで言う「質量」を「慣性質量」と呼びます。一方、前回に説明した「質量」は、「重力質量」と呼ばれています。この二種類の質量は同じ大きさです。

この運動の法則は私たちも実感できて納得のいくものです。この式は前にもお話したように、「自然の法則」です。事実がそうなっているのです。この事実を発見し、そのことを式(2-1)のように書いたのがニュートンなのです。従って、この「運動の法則」の発見者はニュートンなのです。

この自然の法則を表現するために、速度、変化、力、質量などの日常よく使う言葉を使っています。物理学で使う場合には、少し異なった意味を付加したり、厳密さを求める場合があります。例えば、「速度」

とは大きさだけでなく、その方向も意味します。また、マイナスの数値も許すことにします。「力」についても同じことが言え、大きさだけでなくその向きも表します。マイナスの数値も許します。このような量をベクトルと呼んでいます。

「速度」や「力」と言う言葉に、大きさだけでなく方向も持たせるためには、表現の方法を工夫しなければなりません。速度の大きさだけを表すには1つの数値だけで充分でした。速度60km/hとか、風速6m/sなど数値が1つで充分でした。これだけではどちら向きに走ったか、西風か東風かは全く分かりません。それを分かるようにするには、3つの数値を一組にして表すことにすればよいのです。3つの数値を一組にすると、速度の大きさと方向を一度に表せるのです。3つとは、東西、南北、上下それぞれの方向の速度や力と思えばよいのです。このようにして表現できる物理量を「ベクトル」と呼んでいるのです。

「運動の法則」を表す式(2-1)は左辺も右辺もベクトルです。ベクトルとして等しいのですから、速度の変化の方向と力の方向が同じ方向になっていることを表しています。もちろん値が等しいことは言うまでもありません。

## 21. 速さ・速度

ニュートンの「運動の法則」を感覚的に捉えて頂けたと思います。しかし、物理学では感覚だけではいけません。誰もが納得する式にしなければなりません。式(2-1)ではまだ不満足です。式(2-1)の右辺に現れる「速度の変化」を式にする必要があります。そのために「速度」の定義から始めましょう。ここでは説明を簡単にするために、直線上を移動する場合だけを考えましょう。そうすると「速度」は日常使う意味と変わりません。「速度」とは「1秒当たりどれだけ位置が変化するか」を表す量です。「位置の変化」をその変化にかかった時間で割り算すれば速度になります。「位置の変化」とは「後の位置」から「始めの位置」を差し引くと計算できます。従って、「速度」は次の式で表わすことができます。

$$\text{速度} = \frac{\text{位置の変化}}{\text{変化にかかった時間}} = \frac{\text{後の位置} - \text{始めの位置}}{\text{変化にかかった時間}} \quad (2-2)$$

速度の単位をSI単位系で考えましょう。「位置」の単位は、[メートル, m]ですから、「位置の変化」の単位も[メートル, m]です。「移動にかかった時間」の単位は[秒, s]です。従って、「速度」の次元は $\left[\frac{\text{長さ}}{\text{時間}}\right]$ です。それぞれSI単位で記述すると $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$ です。‘メートル毎秒’と読むことになっています。速度は日常的には時速で表しますが、物理学では秒速で表す約束になっています。

## 22. 加速度

次に式(2-1)の右辺に現れる「速度の変化」について考えましょう。これは「加速度」と呼ばれる物理量です。速度が変化する場合のその変わり方を表す量です。車で走り始めるときに、加速のよい車とか、加速の悪い車などと使います。比喩的にも使われます。彼は加速度的に悪の道に染まっていった。速度がどんどん速くなるさまを表します。坂道をころがり落ちる時のように速度の変わってゆくさまを表す物理量です。日常的には加速度の大きさは人によって感じ方が違います。物理学で使うためには、人によって変わることは許されません。同じ数値でなければなりません。そのために式で定義しておきます。前節の「速度」の定義と同様に、次の式で定義します。

$$\text{加速度} = \frac{\text{速度の変化}}{\text{変化にかかった時間}} = \frac{\text{後の速度} - \text{始めの速度}}{\text{変化にかかった時間}} \quad (2-3)$$

どれだけの時間 (単位は秒) の間に、どれだけ速さが変わったかを表しています。簡単な例を挙げてこの式に慣れてみましょう。

信号待ちを終えた車がまっすぐ走り始めたとします。走り始めた車の速度を2秒ごとに測定し、結果を表2-1の第2列に示しました。SI単位系に従うのですから、単位は $[\frac{m}{s}]$ です。第1列は出発時から計り始めた時刻です。単位は[s, 秒]です。

表2-1

| 時刻 [s, 秒] | 車の速度 $[\frac{m}{s}]$ | 車の加速度 $[\frac{m}{s^2}]$ |
|-----------|----------------------|-------------------------|
| 0         | 0                    |                         |
| 1         |                      | 0.5                     |
| 2         | 1                    |                         |
| 3         |                      | 1                       |
| 4         | 3                    |                         |
| 5         |                      | 1.5                     |
| 6         | 6                    |                         |
| 7         |                      | 1                       |
| 8         | 8                    |                         |
| 9         |                      | 0.5                     |
| 10        | 9                    |                         |
| 11        |                      | 0.5                     |
| 12        | 10                   |                         |
| 13        |                      | 0                       |
| 14        | 10                   |                         |

「加速度」の定義式 (2-3) を使って加速度を計算してみましょう。始めの2秒間に速度が $0\frac{m}{s}$ から $1\frac{m}{s}$ まで変わりました。速さの差 $1\frac{m}{s}$ を2sで割って、大きさは0.5となります。加速度は、速さを時間で割ったのですからその次元は $[\frac{\text{長さ}}{\text{時間}^2} = \frac{\text{長さ}}{\text{時間}^2}]$ です。従って単位は $[\frac{m}{s^2}]$ です。これが加速度の単位です。日本語で「メートル毎秒毎秒」と読むことになっています。次の2秒間に速度が $1[\frac{m}{s}]$ か $3[\frac{m}{s}]$ に変わりました。その速度の差は $2[\frac{m}{s}]$ であり、これをかかった時間2sで割って、大きさは $1[\frac{m}{s^2}]$ となります。これは、時刻が2秒から4秒までの2秒間の加速度です。次の2秒間、4秒から6秒までに速度が $3[\frac{m}{s}]$ から $6[\frac{m}{s}]$ に変わりました。その差 $3[\frac{m}{s}]$ を2sで割って、大きさは $1.5[\frac{m}{s^2}]$ となります。この2秒間の加速度です。同様に順次計算して得た加速度を、表2-1の第3列に示しました。

自動車が徐々にスピードを緩めて行き、止まるときには加速度はどうなるのでしょうか。この時は、式(2-3)の「後の速度」が「始めの速度」より小さくなります。従って差は負の値になります。このような場合、物理学では「加速度が負である」として取り扱います。加速度と名前は付いていますが、減速時も同じ加速度という言葉を使います。ただしその値を負として取扱います。減速度とは言いません。

次に、走っている物体に横から力が加わって、走る方向が変わったときはどうでしょう。

式(2-3)の「後の速度」と「始めの速度」の「差」は図2-3の点線矢印です。この点線矢印の大きさは、「始めの速度」の矢印と「後の速度」の矢印の2本の矢印の間の角度を使って表すことができます。その大きさを「かかった時間」で割るとよいのです。この説明には「角度の単位ラジアン rad」の説明が必要です。日常使っている一周360度という角度の表し方は特殊な表し方であり、物理学には使えません。物理学は微分積分学を基礎としているからです。この場合、角度の単位は[rad]でなければなりません。次の機会に説明しましょう。

### 23. 運動の法則

図2-1, 2-2, 2-3から分かるようにどんな場合にも、「加速度」と「力の方向」は平行になっています。ニュートンの運動の法則、式(2-1)は、大きさだけでなく方向も含めて成り立っています。「速度の変化」を「加速度」に書き換えて、もう一度ここに記述しておきましょう。

$$\text{加速度} = \frac{\text{力}}{\text{質量}} \quad (2-4)$$

この式で、「加速度」と「力」はベクトルです。等号で結ばれているのですから、左辺と右辺は等しいのです。数値が等しいだけでなく、「方向も等しい」、つまり、加速度と力は「同じ方向を向いている」と言うことも、この式の中には含まれていることに注意してください。

「運動の法則」とは「加速度は力に比例して、質量に反比例する」と言う「自然の法則」です。つまり、式(2-4)のように記述できる「自然の法則」なのです。なぜこのような関係があるのか理由は分かりません。実際に自然がそうなっているのです。前回第4節で述べた「万有引力の法則」は、物体間に働く力がどうなっているかを示したもう一つの「自然の法則」です。ニュートンは力学における二つの重要な「自然の法則」を発見したのです。

## 24. 微分積分学

実は、これまでの話にはまだ大きな落とし穴があります。これまでの計算や説明では、「速度」や「加速度」は、かかった時間中の平均値です。これまでの話は全て、「平均の速度」と「平均の加速度」だったのです。「物理の法則」は平均値ではだめなのです。自然を正確に記述するためには、実は「瞬間の速度」や「瞬間の加速度」でなければなりません。

かかった時間をもっと短くしてどんどん細かく計算してゆけば詳しいことは分かります。しかし、それにはきりがありませんし、所詮どんな短い時間にせよ「平均値」であることに変わりはありません。物理学では平均値ではなくて「瞬間の速度」や「瞬間の加速度」でないといけないのです。考え方の革命です。ニュートンが起こした革命です。

前節の「運動の法則」を言い換えておきましょう。「瞬間の加速度」が、その時「加わっている力」に比例し、その物体の「質量」に反比例するとなります。図2-3で、速度の変化を示す点線矢印が少し斜めになりましたが、それは瞬間を記述したものではなく、平均だったからです。瞬間を記述すると、「瞬間の速度の変化」は「瞬間の速度」に垂直になります。

この「瞬間の速度」を表現する数学的方法もニュートンが考案したのです。ニュートンは瞬間の物理量の数学的な表現方法を発明したのです。ニュートンは後に、「微分積分学」と呼ばれる新しい数学の分野を創造したのです。ニュートンは「瞬間の速度」や「瞬間の加速度」という新しい概念の発見と、その表現方法の発明を同時に行ないました。

「瞬間の速度」は式(2-2)を使って、この式の分母を限りなく0に近づけた極限を求めることによって計算できるのです。同様に「瞬間の加速度」は式(2-3)を使って、この式の分母を限りなく0に近づけた極限を求めることによって計算できるのです。この手法を数学では微分すると言います。瞬間の速度や瞬間の加速度の単位は、平均の速度や平均の加速度と同じであり、それぞれ $[\frac{m}{s}]$ および $[\frac{m}{s^2}]$ となります。

同じ頃ドイツで、ライプニッツも同じ考えにたどり着いていました。そういう時代になっていたのでしょう。現在では微分の表記法としてライプニッツの表記方法を使うのが主流になっています。

## 25. ニュートンの三大偉業

ここで、ニュートンの業績についてまとめておきましょう。

第一偉業は、第一回にお話した「万有引力の法則」の発見です。二つの物体は必ず引き合う。引き合う力の大きさは、二つの物体の質量に比例して、二物体間の距離の二乗に反比例する。ニュートンは、この自然の法則の発見者です。

第二偉業は、今回お話しました「運動の法則」の発見です。力が加わったときにその物体はどのように動くかを言い表したのです。瞬間の加速度が力に比例して、質量に反比例することを発見したのです。



第三偉業は、前節に述べた、「瞬間の物理量」の概念の発見とその数学的表現方法の発明です。現在では「微分積分学」と呼ばれ、数学における最大の分野となっています。ニュートン以降300年、まだまだ発展進歩し続けている分野です。高等学校や大学で学ぶ数学の大部分は「微分積分学」が占めています。

ニュートンはこれらの発見や発明を駆使して、様々な自然現象を解き明かして行きました。中でも、この新しい概念を世に知らしめたのはハレーでした。ハレーはニュートンの教えに従って、1682年に観測した彗星の軌道の計算を始めました。そして、その軌道が、コペルニクスの時代、1531年に観測された彗星や1607年にケプラーの見た彗星の軌道と同じ軌道を描いていることに気が付いたのです。そしてハレーは76年後1758年にその同じ彗星が再度回帰することを予言しました。ついに1758年の暮れから翌年にかけて彗星は戻ってきました。その時には、ニュートンはもとよりハレーの没後でした。この彗星は今では「ハレー彗星」と呼ばれています。こうして、ニュートンの考え方や手法が確固としたものとして受け入れられてゆきました。

## 26. 自然の記述

ニュートンの新しい概念「瞬間の物理量」およびその数学的手法である「微分積分学」は物理学に革命の変革をもたらしました。物理現象あるいは自然現象を記述することは、その変化を記述することにあります。「変化を記述する」ためには「瞬間を記述する」手段が必要不可欠です。「微分積分学」なくして、それらを記述する方法はありません。天体や宇宙の諸現象だけではありません。我々の身の回りの現象、「電気磁気現象」「熱現象」「物質の性質」の記述には欠かすことができない手段なのです。「微分積分学」なくして森羅万象の自然の記述は不可能なのです。

## 27. 力の単位

ここで力の次元がはっきりしてきました。式(2-4)から力の次元がわかります。力は質量と加速度との積ですから、

$$[\text{力の次元}] = [\text{質量} \times \text{加速度}] = \left[ \text{質量} \times \frac{\text{長さ}}{\text{時間}^2} \right] = \left[ \frac{\text{質量} \cdot \text{長さ}}{\text{時間}^2} \right]$$

となり、力の単位は、 $\left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right]$  となります。これをまとめて、[N, ニュートン] と呼ぶことにしたのです。“キログラムメートル毎秒毎秒”と毎回呼ぶのは煩わしく、また分かりづらいので、つづめて“ニュートン、記号でN”とします。ニュートンの偉業をたたえて力の単位としてその名前を使わせてもらいました。

$$\text{力の単位} = \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right] = [\text{N, ニュートン}] \quad (2-5)$$

第1回第4節で述べましたように、「重さ」は「力」ですから単位は[N]です。「質量」 $m$ [kg]の物体の地球上での「重さ」は、 $9.8m$ [N]です。月の表面に行けば、同じ物体の「重さ」は異なります。9.8をかけるのではなく、違った数値がかかります。宇宙船の中では、テレビでよく見るように「重さ」はなくなっています。宇宙船の中では「重さ」はその質量に0をかけるとよいこととなります。「質量」はいずれの場合にも  $m$ [kg] です。

## 28. 慣性力 I. 加速度運動する乗り物の中で静止物体が受ける力

ニュートンの発見した法則は力に関する法則です。この節では「力」についてもう少しお話ししましょう。読者の皆さんは日頃どんな力を受けていますか。どんな時に力を感じますか。逆立ちをした時や鉄棒にぶら下がったときに「重力」を感じます。これは地球があなたを引っ張る「万有引力」が原因です。誰でもいつでも受けている力です。

電車や自動車に乗っているとき、予期せぬ力を受けることがあります。誰かに直接引かれる力でもありません。誰も何もしないのに力を受けてしまいます。車が止まる時には前向きに、出発時には後ろ向きに、曲がる時には曲がる方向と逆方向真横に力を受けます。この力は一体どこから来るのでしょうか。これらの力を「慣性力」と呼んでいます。

この「慣性力」を受ける時はいつでも、なにか乗り物に乗っているときに限られます。しかもその乗り物が、動き始める時、止まる時、曲がる時に限られます。車が止まっている時にはもちろん力を受けません。車が一定の速度で、まっすぐ走っているときにも、このような力を受けません。力を受けるときはいつでも、乗り物の「速度が変化」しているときです。第17, 18節の図2-1, 図2-2, 図2-3で説明した「速度の変化」をしている時のことです。車に加速度がある時のことです。そのような車の動きを加速度運動と呼んでいます。

加速度運動している車に乗っている人は、車の中で、**車を受ける加速度と同じ大きさの「逆向きの加速度」**を受けるのです。逆向きの加速度を受けるのですから、乗っている人はその加速度に自分の質量を乗じた力を逆向きに受けることになります。質量を乗じる理由はニュートンの運動の法則によります。式(2-3)で加速度に質量を乗じると力です。この力のことを慣性力と呼びます。

車が加速するときは、図2-1で説明したように、車は前向きに力を受けて、前向きの加速度を持っています。乗っている人は同じ大きさの逆向きの加速度を受けて、自分の質量を乗じた力を後ろ向きに受けるのです。電車でもバスでも、出発時に後方に倒れそうになります。車が止まるときには前のめりになりますが、それは、車には図2-2に示したように、後ろ向きの力が加わり、車に後ろ向きの加速度がかかっています。乗っている人には、その逆方向の、つまり前向きの加速度がかかります。乗っている人には、その加速度に自分の質量を乗じた力が前向きの加わることになります。

では曲がる時はどうなっているのでしょうか。車が曲がる時には、図2-3で説明したように、車にはいつも進む方向と垂直方向に力が加わっています。その力によって車は横向きの加速度を持って方向を変えているのです。このように車が曲がる時にもやはり、中に乗っている人には、車にかかる加速度と逆向きの加速度がかかります。その結果、乗っている人には逆向きの加速度がかかり、自分の質量を乗じた慣性力が加わるのです。車が曲がる時に、乗っている人が受ける慣性力を特に「遠心力」と言います。

電車やバスに乗った時に、バスの速度の変化に際して車内で受ける力が「慣性力」です。速度の変化の方向によって、前方、後方、横方向に力を受けます。車内の全ての人や物体は同じ加速度を受けますから、力の大きさは自分の質量に比例します。太った人はそれだけ大きな力を受けることになります。つり革をしっかり握らないとすぐに転んでしまいます。逆に質量の小さな人は、受ける力が小さくてすみます。例え飛行機事故で、大きな速度の変化（加速度）による「慣性力」を受けても、子供や身軽な女性が助かることがよくあります。これは、同じ加速度でも、自分の質量が小さいことによって、受ける力が小さくダメージが少ないことによるといえます。

交通事故の急ブレーキで、**むち打ち症**になる人が多くあります。人体は頭の質量が比較的大きくできていることによります。急ブレーキで大きな加速度を受けますが、その加速度に質量を乗じた力が体の各部所に加わります。一般に頭部の質量が大きいため、頭部は大きな慣性力を受けます。頭部は横からの力に支えがないことも手伝って、加わった力を首が支えきれなくなります。特に子供の頭部は相対的に質量が大きくできています。チャイルドシートでしっかり首を固定することが重要だと思います。

**車いすや担架**を押す場合にも注意が必要です。「速度の変化」を極力小さくすることが大切です。ここで言う速度の変化には、速度の方向が変化するときも含まれています。急激な速度の変化は大きな加速度を与えます。乗っている人はその加速度に応じた慣性力を受けています。乗っている人は、押す人が与える加速度と逆の方向に加速度を受け、乗っている人自身の質量を乗じただけの慣性力を感じているのです。

## 29. 慣性力 II. 回転体の上で移動する物体が受ける力

回転する乗り物の中で、移動すると予期せぬ力を受けてしまいます。遊園地で、回転するメリーゴーランドの中で、子供が母親目指して一步踏みだしたところで、転ぶ光景を見ることがあります。これは

予期せぬ力が走り出した子供に加わるからです。この力も、「慣性力」です。特にこの力のことを「コリオリの力」と呼んでいます。ここでは、我々の身近に見られる「コリオリの力」についてお話することになります。回転体の上で動く時に受ける力です。

メリーゴーランドの外で見ている母親に近づこうと走り寄る子供に、横向きのコリオリの力が加わります。その力のせいで子供は転倒してしまいます。バレリーナが回転する時や、フィギアスケートやアイスダンスで1人回転するときに、まず、腕を両側に思い切り広げて回転を始め、次に、手を素早くすばめて早く回転します。この時の動く手が受けるコリオリの力が、体にさらなる回転力を与えます。子供の好きなブランコ遊びもコリオリの力で漕いでいるのです。ブランコは頂上の支点を中心に回転して、行ったり来たりしています。行きの回転中に立ち上がるとコリオリの力が前向きに加わります。この力の方向が、ブランコのふれが大きくなります。もちろん帰りの回転中にも立ち上がると、今度は後ろ向きに「コリオリの力」を受けます。立ち上がるばかりはできませんから、ちょうどブランコが一番上に登って止まったところでしゃがむとよいのです。

コリオリの力は回転体の上で移動するときに受ける力です。大きさは回転の速さと移動の速さに比例します。早ければ早いほど大きなコリオリの力を受けます。上に挙げた例では、回転体はそれぞれ、メリーゴーランド、バレリーナの体、ブランコであり、その上で移動するものはそれぞれ、子供、腕、体の重心です。

地球は丸くて回転しています。その地球上で我々は動き回っています。我々は常にコリオリの力を受けています。北半球では電車や車は、それがどちら向きに走っても、右へ右へとコリオリの力を受けています。ですから、鉄道は右のレールの消耗が、車では右タイヤの消耗が激しいと言われています。南半球では事情が逆になります。

地球上では空気が動いています。風です。空気は高気圧側から低気圧側に向かって気圧の差で移動し始めます。移動し始めた空気はコリオリの力で横を向いてしまいます。そのため風は等圧線に沿って流れます。冬型気圧配置は西高東低と言われています。西から東に風が吹くのではなく、北風が吹きます。等圧線に沿って風が吹きます。冬の天気図を見て確認してください。日本列島には台風がやってきます。台風の左巻きの渦も同じようにコリオリの力が働いているからです。低気圧のまわりには等圧線に沿った左巻きの渦ができます。竜巻も同じことです。高気圧の周りには逆に右巻きの風になります。広がって行くからでしょうか、それほど強い風にはなりません。

地球の南半球では全てが逆になります。

ロシアには北極海に流れ込む大きな川が何本かあります。水の流れは北向きです。水はコリオリの力で常に右へ右へ力を受けており、東側の岸を削ります。そのため長年の間に、川が東へ東へ移動したと言われています。地質学の研究で明らかになっているそうです。

### 30. ガリレオの慣性の法則 と ニュートンの第1法則

最後に、ガリレオの「慣性の法則」とニュートンの「運動に関する3つの法則」の関係についてお話します。後者は、ニュートンの「第1法則」「第2法則」「第3法則」です。このうち「第2法則」はすでにお話した「運動の法則」です。

ニュートンの「第1法則」は、ガリレオの「慣性の法則」と同じ内容です。物体に力が加わらない時は、その物体はこれまでの運動をそのまま続ける。具体的に言うと、静止している物体は力が加わらなければ、いつまでも静止した状態を続ける。動いている物体は、力が加わらなければ、その時の運動をそのまま続ける。その速さで直線上をいつまでも動き続ける。これが、ガリレオの慣性の法則であり、ニュートンの第1法則と同じ内容です。ガリレオはどのようにしてこの法則を導きだしたのでしょうか。力が加わらない状態をどのようにして創り出したのでしょうか。どんな運動でも実際は何らかの力がかかっています。地面を滑ったり、ころがったりする物体には必ず摩擦力が働きます。空気中を飛ぶ物体には重力がかかっています。重力以外にも、空気の抵抗力が働きます。

ガリレオは力の働かない状態を、振り子の実験をしながら頭で考えだしました。これは、「思考実験」

と呼ばれる手法です。理論的考察を行うときによく使う手法です。ガリレオは振り子を作って錘の動き方を観察しました。振り子の周期が振幅に依らず一定であることを見つけました。振り子の等時性です。また、振り子の長さを長くするとどうなるかを観察しました。錘の動く距離は長くなります。中心付近では、ほぼ一定の速さで進んでいます。そこでガリレオは、振り子の長さをもっと長くしたらどうなるかを想像しました。空気の抵抗も無視して考えました。無限に長い振り子に取り付けられた錘の動きこそ、力の加わっていない時の物体の動きであると考えたのです。あるきまった速さで錘は進むばかりです。ガリレオの「慣性の法則」はこのようにして生まれたのです。

すでに述べた第2法則を力のない状態に適用すると、第1法則を導き出すことができることに注意しておきます。そのため現代では、第1法則に別の意味を持たせていますが、ここではそれにふれません。

### 31. ニュートンの運動の「第3法則」－作用反作用の法則－

「第3法則」は、いわゆる「作用反作用の法則」と呼ばれている法則です。「ある物体Aが他の物体Bに力を加えているとします。その時同時に、物体Bは物体Aに同じ大きさの力を加えています。この二つの力は反対向きです。」と言う法則です。いくつか例を挙げてみましょう。

あなたが机をある力で押しているとします。その時必ず、机はあなたをある力で押し返しています。「この二つの力の大きさは等しく、方向が逆である」という法則です。いつでもどこでもこのことは成り立つのです。

地球は質量  $m[\text{kg}]$  のあなたを万有引力で引っ張っています。その力の大きさは  $9.8m[\text{N}]$  です。この力を「重力」と呼びます（第一回第7節）。この重力の反作用はなにでしょう。主客を逆にすればよいのです。つまり、あなたが地球を引く力のことです。これが反作用の力です。あなたも地球を引っ張っているのです。この二つの力は大きさが等しく方向が逆さまです。引っ張る主と引っ張られる物の主客を反対にすると、一方が作用で他方が反作用です。

地球は月をやはり万有引力で引っ張っています。月も地球を引っ張っています。その力の大きさは等しく方向が逆さまです。太陽は地球を万有引力で引っ張っています。地球は陽を同じ大きさの逆向きの力で引っ張っています。この力の大きさや方向は時々刻々変化しています。それでもその瞬間瞬間では、いつも同じ力で引き合っています。作用反作用の法則は、「力を加える側と力を受ける側を入れ替えて各々の力を較べると、あらゆる瞬間に於いて、それぞれの大きさは等しくて方向は逆さまです」と言う法則です。そうでないなら変な話です。幸い実際に調べて見ると確かにこの法則通りになっています。

A組とB組が綱引きをしているとしましょう。作用反作用の法則から「A組がB組を引く力は、B組がA組を引く力と等しく方向が逆さまです」なのです。この関係は「両組の実力が伯仲して、がんばり合っている時でも、片方が疲れてしまって、どんどん引きずられている時にでもやはり成り立っています」と、ニュートンは言っているのです。どんな状態にあっても、ある瞬間を考えると「A組がB組に加えるは、B組がA組に加える力に等しく方向が逆さまです」なのです。次の瞬間に力の大きさは変わっているかもしれませんが、やはり「A組がB組に加える力は、B組がA組に加える力に等しく方向が逆さまです」なのです。

綱引きの勝ち負けは、別のことを考えねばなりません。各組に加わる力のすべてを考えねばなりません。A組に加わる第一の力は、B組がA組に与える力です。A組に加わる第二の力があります。それはA組の引き手達の足と地面の間の摩擦力です。この第二の力と第一の力を較べて、第一の力の方が大きいときA組が負けるのです。A組が勝つかB組が勝つかは、両組の引き手達の足の摩擦力の大きさによって決まります。B組の地面を氷にしておけばA組は必ず勝利します。例え氷の時でも作用反作用の法則は成り立っているのです。

A組が動くかどうかは、A組に加わる力が問題であり、A組が他の物体に与える力には関係ありません。

ニュートンは太陽と地球の間に見えない糸で引き合う万有引力を考えました。同じ大きさの力をお互いに及ぼし合うと考えたのです。太陽が地球に及ぼす力と地球が太陽に及ぼす力は大きさが等しくて方向が逆であると考えました。そのお互いに及ぼし合う力は（距離が変わるので）時々刻々変化しているけれども、ある瞬間を考えると、「及ぼしあっている力は等しくて方向が逆さまです」であり、次の瞬間も、

同じことが言えるのです。

これは「自然の法則」の一つと言ってよいでしょう。事実がそうなっているからです。

## おわりに

自然現象を記述するための数学としてニュートンは「微分積分学」を創造しました。この「微分積分学」を高等学校課程の物理学で**使わない**ことは致命的な問題です。日本の文部科学省が「微分積分学」を高校の物理教育に使ってはいけないと決めているからです。数学で「微分積分」は教えているにもかかわらず、物理学は「高校物理では微分積分を使わずにやれ」というのです。その理由は知りません。不可解としか言いようがありません。これでは物理学は公式を丸暗記するだけになります。当てもの的クイズをするゲームのようなものになっています<sup>1)</sup>。物理学を日本で興味のない発展性の乏しい科目にしましたのは、文部科学省のこの指導方針にあるのです。

最終節で述べた、ニュートンの「運動に関する三つの法則」を高等学校では最重要項目として教えています。そこでは、第2法則も、第3法則も、瞬間のこととしては教えていません。そのため大変な誤解したままで大学に入学します。そのような学生が多くいるのが現状です。その状況を打開しないとダメです。

## 参考文献

- 1) 砂川重信 精講物理 学生社 発行年月日不記載