

第9章 見かけの力

～ 相対加速度と非相対加速度による力～

車に乗っていて、加速すると体がシートに押しつけられるのを感じる。このような力は見かけの力とよばれ、遠心力やコリオリの力などもこの力であるといわれる。この力が見かけとよばれる理由は、座標の取り方によって現れるものであり、実在しないという点で見かけとよばれるということらしい。

力に見かけがあるならば、実在の力もなくてはならない。実在の力とは何であろうか。例えば糸を引っ張る力が実在の力であるともいわれる。ならば、玉に糸をつけてぐるぐる回せば糸の張力は実在の力である。しかし、この力は遠心力でもあった。遠心力が見かけの力であるならば、この糸の張力も見かけの力であると見なさなければならぬ。

結局、見かけの力と実在の力との違いは現代物理学においても明確にされているわけではないと結論せざるをえない。この見かけの力と実在の力の違いということは物理学の根幹に関わる重要なテーマであり、決して侮れるものではない。例えば、誰かに殴られたとした場合、その力が見かけの力であるならば、殴った人に罪はないが、実在の力であるならば、傷害罪である。

本章では、この見かけの力と実在の力の違いということを明確にする。本章で得られる結論によって、長い間、物理学者を悩ませてきた"ニュートン、マッハのバケツの思考実験"に対する一つの解答を与えることができるだろう。

9.1 見かけの力として説明されていること

見かけの力とは何なのか。一般に次のように説明される。

「慣性系に対し、加速度 a をもつ座標系があるとき、この座標系でニュートンの運動方程式を立てる際に加速度 a の効果を取り入れるため付加すべき力。この力は座標変換に伴って導入すべきもので、物体に作用する実在の外力ではないため見かけの力とよばれる。この力は慣性力ともよばれ、コリオリの力、遠心力はこの力の一種である。」

この説明では、実在の力のことを「物体に作用する実在の力」といっている。このことから逆に見かけの力とはこの実在の力ではないものということになる。それでは遠心力は物体に作用しない力ということになるが、そのようなことは決してない。遠心力も物体に作用しているからこそ、遠心分離器なる発明品があるのである。ここで挙げた見かけの力の説明は内部矛盾を含んでおり、正しい命題とは言えないものである。この理由は見かけの力とよぶものと実在の力とよぶものの認識の曖昧さと混同によって生じていると考えられる。

ここで挙げた見かけの力とよぶものが、実在の力と混同されていることから、見かけの力について正しく説明することは不可能である。なぜなら、見かけの力とはここで挙げた説明のように「定義」されているとも考えられるからである。したがって、われわれに要求されることは見かけの力といった概念を、このような現象に関する特徴を発見し、再定義しなければならないということである。まずは、現象に関する特徴を発見することから始めなければならない。

先に挙げた見かけの力に対する説明は全体としては否定されたが、前半の部分は特に誤った部分はない。（ここでいう力という概念は不明確には違いないが）そこで、見かけの力とは、

「慣性系に対し、加速度 a をもつ座標系があるとき、この座標系でニュートンの運動方程式を立てる際に加速度 a の効果を取り入れるため付加すべき力」

ととりあえず解釈しておくことにしよう。

9.2 見かけの速度という概念

見かけというような言葉は、何か幽霊のようであり、およそ物理学に使ってはならない言葉のように思われる。どのようなことに対して見かけという言葉が使われるのか明らかにしたい。

力に見かけがあるならば、速度にも見かけがあるに違いない。力とは速度の時間的変化の関数であると見なすことができ、問題とする質量が一定とするならば、力は速度の従属関数であると考えられるからである。とりあえず解釈した命題と同じように速度について書くならば、見かけの速度とは、

「慣性系に対し、速度 v をもつ座標系があるとき、この座標系でニュートンの運動方程式（運動量の方程式）を立てる際に速度 v の効果を取り入れるため付加すべき速度」

ということになるであろう。このような例は、走っている列車から見れば列車の速度と反対方向へ運動していると考えられることと、このように考えることは当然可能である。この際、問題となる速度 v はいわゆる相対速度とよばれる概念と同一のものであることは明らかである。このことから、物理学において使われてきた見かけという言葉の意味は相対という意味に置き換えることが可能であると考えられる。

9.3 見かけに関する用語

見かけという言葉の意味は相対という意味に置き換えることが可能であると考えて、今まで使われてきた物理用語を再定義することにしよう。

$$\text{見かけの速度} \quad ; \quad \text{相対速度} \quad (9.1)$$

$$\text{見かけの運動量} ; \text{相対運動量} = \text{質量} \times \text{相対速度} \quad (9.2)$$

$$\text{見かけの加速度} ; \text{相対加速度} = \text{相対速度の時間微分} \quad (9.3)$$

$$\text{見かけの力} \quad ; \quad \text{相対力} = \text{質量} \times \text{相対加速度} \quad (9.4)$$

相対加速度を用いた力である相対力では、いかなる物体も実際に押す事はできない。今まで使われていた見かけの力の概念には、実在の力も含まれており、ここではっきり見かけの力から実在の力を除外したものを相対力とよび定義することにしよう。後に見かけの力の中で混同されている実在の力を見いだすことにするが、その区別の意味でもあらたな用語として相対力なる概念を定義しておくものである。

これから述べられることで、「見かけの力」という表現を使うときは、古い意味での、既存の物理学の知識における「見かけの力」を指し、ここで再定義された「見かけの力」のことは相対力とよび区別することにしよう。

9.4 既存の物理学の知識では実在の力は表現できない

既存の物理学の知識では、加速する自動車に乗っていて押しつけられる力や、遠心力、さらには重力までも見かけの力であると考えられている。それでは実在の力とはどのような力なのか。既存の物理学の知識では、この実在の力というものを物理的に表現することはできない。なぜなら、既存の物理学の知識は速度というものは全て相対速度であると考えており、その時間微分である加速度は全て相対加速度であると考えねばならないからである。相対加速度とい

うものは見かけの加速度であり、その概念を使った力というものは相対力であることになる。既存の物理学の知識を用いた結論では、力というものは全て相対力であると言わねばならない。

9.5 見かけではない速度とは

既存の物理学の知識では実在の力は表現できないが、力に関する加速度を問題にする前により簡単な概念であると思われる速度について考えることにしよう。

見かけの速度は相対速度と同じものとして考えたが、速度という概念に相対以外のものがあるのであろうか。もし、速度というものが全て相対であるというなら、実在の速度といったものは存在しないことになる。

一般に定義される速度という概念は座標に対する相対速度を既定したものであり、それは相対速度と本質的に変わりがない。このような速度を用いては、実在の速度を表現できないことになる。何か新しい形式で速度を表現することが要求される。

走っている列車から見ると駅は反対方向へ動いているように見える。このとき、列車から見た駅の力学は駅に見かけの速度（＝相対速度）があると考えたと正しくその位置を予測することができる。例えば、数分後の列車から見た駅の位置を予測することができる。相対運動という考えからは、駅も列車もまったく同等に扱われる。にも関わらず、誰も駅が運動しているとは思わない。なぜ、このようなことがわかるのか。どうしてわれわれは運動しているのが列車であって駅ではないと思うのであろうか。ここには明確な違いがあるからである。

駅から見て列車の運動量は

$$\text{列車の運動量} = \text{列車の質量} \times \text{速度}$$

ということになる。反対に列車からみて駅（宇宙？）の運動量は

駅の運動量 = 駅の質量 × 速度

と考えることができる。速度に相対速度しかないとすれば、このような運動量も認めなくてはならない。この駅の運動量のエネルギーを取り出す事ができるであろうか。運動エネルギーという点で、運動エネルギーを持っているのは、列車であって駅ではないと考えることができるといったことから、動いているのは列車であって、駅ではないという違いがわかるのである。その違いは相対速度では表現できないものであり、運動量 = 質量 × 速度という方程式は速度の概念の認識という点で不十分なものである。

この動いているのが列車であり、駅ではないということが表現できる速度こそが実在の速度であると考えられるのである。そして、ここで挙げた違いは、このような速度が存在していると考えられる証拠の一つである。

われわれは、第2章で慣性速度の概念を発見した。この概念を使えば、動いているのは列車であり、駅ではないということを明確に表現することができる。この速度は見かけ（相対）の速度ではなく、実在の速度であると考えられるのである。

「静止している観測者にとっても、またそれに対して一様な平行移動をしている観測者にとっても、いろいろの物理現象の法則は同一であるというのが相対性原理である」という考えは、第4章、第5章でも説明したように、間違っていることは明らかである。静止している観測者にとっても、それに対して一様な平行移動をしている観測者にとっても、慣性速度という物理現象は同一ではないからである。

9.6 実在の力の概念

実在の力とは何であろうか。われわれは実在の速度を慣性速度とよんだのであった。ニュートンの運動方程式は、この実在の力を反

映しているものと考えられ、その記述方法に従えば、実在の力 = 質量 × 実在の速度の時間微分ということになるであろう。このような対応を考慮し、関連する用語を再定義することにしよう。

$$\text{実在の速度} \quad ; \quad \text{慣性速度} \quad (9.5)$$

$$\text{実在の運動量} \quad ; \quad \text{慣性運動量} = \text{質量} \times \text{慣性速度} \quad (9.6)$$

$$\text{実在の加速度} \quad ; \quad \text{慣性加速度} = \text{慣性速度の時間微分} \quad (9.7)$$

$$\text{実在の力} \quad ; \quad \text{慣性力} = \text{質量} \times \text{慣性加速度} \quad (9.8)$$

この中の「慣性力」という用語は、今までは、何か見かけの力の一種あるいはそれ自身として扱われていた。そのような曖昧な概念と、ここで再定義された「慣性力」はまったく異なるものである。できれば混同を避けるために、「慣性力」という用語を新たな物理的意味を持つ用語として使いたくはないが、このよび方は、この力の意味を簡潔に示すのに最も適当であると考えられるので、このようにわれわれはよぶことにする。従来、使われてきた「慣性力」という言葉の意味は加速される自動車に乗っていてシートに押しつけられるような見かけの力ということであるが、われわれはこのような意味で慣性力という言葉は使わないことにする。しかしながら、以後、混同を避けるために、ここで再定義した「慣性力」のことを「実在の力」とよぶことにしよう。

9.7 加速度に伴う力

いよいよ本章の主題である「見かけの力」の考察にはいることにしよう。

いま宇宙空間にエレベータが存在しているものとする。外部からの重力などの外力はいっさいないものとし、このエレベータの内部は慣性座標系であるものと見なすことができ、エレベータの中央にはリンゴが浮かんでおり、この時点でエレベータとリンゴの相対速

度はゼロとし、リンゴはエレベータに対して静止しているとしよう。

エレベータを何らかの方法で引っ張れば、エレベータから見てリンゴには力が働いているように見える。これは、エレベータとリンゴの間の相対加速度によって生ずる相対力であり、いわゆる「見かけの力」である。

リンゴはやがてエレベータの壁にぶつかることになる。このとき、リンゴと壁の間には力が生じ、この力は加速する車に乗った人がシートに押しつけられる力と同じ種類のものである。この力は相対力である「見かけの力」であろうか。この力が相対力であるとなれば、2つの球がぶつかって、はじき飛ばされるとき相互作用も相対力である「見かけの力」であると認めなければならない。

本来この思考実験のリンゴは何もエレベータの内部にある必要はなく、外部にあっても結果は同じであり、ただ2つの物体の衝突の現象にすぎないものである。白球、黒球があるとし、白球が加速しながら静止している黒球にぶつかる、といった現象と本質的に何等変わりがない。白球が黒球にぶつかる前は、白球からみて黒球には相対加速度に見合う力が働いているように見える。やがて、白球が黒球にぶつかったとき、白球は黒球を押し、黒球は反作用で白球を押し返す。黒球の反作用で白球を押し返す力は加速している車に乗った人がシートに押しつけられる力と同じ種類のものであることは明らかである。車に乗った人がシートに押しつけられる力は、普通の意味での力と何等区別する必要はなく、このような力は実在の力であると考えられる。黒球が白球にぶつかる前とぶつかった後の違いは、黒球が実際に動いたか動いていないかの違いがあり、別の言い方をすれば、慣性速度が変化したかしないかの違いがあるのである。

いままで一般に考えられていた「見かけの力」なる概念は、この違いを認識しておらず、相対力と実在の力を混同していたものである。

9.8 相対ということと慣性ということの違い

相対ということと慣性ということの違いをここでまとめておくことにしよう。

(1) 対象とする物体の運動

相対速度や相対力などの概念は、実際に対象とする物体が動いているかいないかということはまったく問題にしない、あるいはできない。動いているということは、再定義された慣性座標系に対してということである。

それに対して、慣性速度や実在の力は慣性座標系に対して実際に動いているかいないかを問題にする、あるいはできる概念なのである。

(2) 運動量（エネルギー）の表現

対象とする物体が相対速度による相対運動量を持っているからといって、相対速度を変化させることで、その相対運動量に相当するエネルギーを取り出すことはできないものである。別の言い方をすれば、いかなる座標系の操作を行おうとも実際にものを動かすことはできないということである。実在の運動量を変化させるには、慣性速度の変化が必要である。すなわち、慣性運動量を変化させる力が実在の力であるのに対し、慣性運動量を変化させることができない力が相対力である。

(3) 反作用を伴う力

(2)とも関連するが、相対力には反作用という効果はない。重力の効果を考えなければ、反作用があるときが実在の力であり、ないときは相対力である。

9.9 回転に伴う力

回転に伴う「見かけの力」として遠心力とコリオリの力があるといわれている。このような力にも、相対的な遠心力と実在の力としての遠心力があるのであって、混同されていることは、9.7の加速度に伴う力と同様である。

相対的な遠心力を相対遠心力、実在の力としての遠心力を慣性遠心力、相対的なコリオリの力を相対コリオリの力、実在の力としてのコリオリの力を慣性コリオリの力などとよぶことにしよう。

物体を回転させるときに生ずる遠心力は、冒頭でも述べたように仕事をするのであって、仕事をしない相対力と同等と見なす事はできないものである。それに対して、実際に回転している座標系から見れば、この座標系に対して相対速度ゼロの物体には遠心力が働いていると考えれば、正しくその位置を予測できるといったことは、相対力の場合と同様であって、このように考えることはできるのであるが、相対的に回転する座標系から見て、周りの物体が外側に押されるということはないのである。もし、実際に物体を回転させずに、観測する座標を回転させることによって、慣性遠心力のような効果を物体に及ぼすことができるとすれば、フィギュアスケートで回転するスケーターを見ている観客は、スケーターから見て外側に押されなければならないということになる。

回転運動を論ずるとき、その回転には相対速度に対応する相対回転と慣性速度に対応する慣性回転とよぶべきものがあるのであって、区別して扱わねばならないのは9.7の加速度に伴う力と同様である。速度の場合と同様にこのことを説明すれば、相対回転は対象とする物体が回転しているかいないかといったことは問題にしない、あるいはできない。それに対して、慣性回転はその対象とする物体自身が回転しているか、いないかということの問題にする、あるいはできるのである。

慣性回転運動は、等速直線運動が歪められるものであるから、そこには実在の力が存在していなければならない。相対回転運動では、物体の運動を変化させている効果は存在していないのである。すなわち、回転に伴って慣性遠心力があるということは、相対的概念ではないのであり、宇宙にただ一つの物体があるといった場合でもその回転を考えることは、慣性速度の場合と同様に可能であり、その慣性遠心力もまた存在すると考えられるのである。

マッハの考えた「バケツの思考実験」では、「宇宙にバケツしかなければ他に比較するものがないのであるから回転させるということに意味はない、バケツを回転させたとしても、遠心力は働かずバケツの水面に変化はない、あらゆる運動は相対的であるから、回転しているかどうか誰にもわからない」と考えるらしい。このような考えが誤っていることは、既に明らかであることと思う。バケツの水面をへこませるのは、水の慣性速度が変化しているからなのであって、慣性速度は相対的概念ではない。

実際に存在する遠心力についてのマッハの説明は次のように述べられている。「回転する座標からみれば宇宙は逆方向へ回転している。そのため、宇宙に分布する質量が何らかの重力的作用を及ぼすことにより遠心力は生ずる」とされる。

このような考えが成立するとすれば、2つの球がぶつかるといったことで現れる力も宇宙に存在する何らかの重力的作用であると考えねばならない。回転に限らず、直線運動する球でもそこに座標を固定すれば宇宙は逆方向へ運動していると考えられるからである。こうした考えは、真面目に評価するに値しないものとわれわれは考えるが、回転に関しても相対という概念では慣性遠心力は説明できないことを示しておくことにしよう。

始めに軸を同一とする2つの円盤 A, B が慣性座標系内に静止しているものとする。次に A のみを一定の回転速度 v で回転させるとする。 A を基準にした座標系から見れば、 B が同じ回転速度 v で回転しているように観測され、 B を基準にした座標系から見れば、 A が同

じ回転速度 v で回転しているように観測される。 A, B それぞれの座標系から見た相対回転速度はまったく等しく区別されない。もし、観測する対象が、 A にとっては B 、 B にとっては A のみであるということであれば、相対回転速度の概念を用いれば、どちらが回転しているのかまったく区別できないことになるが、 A, B の円盤に加速度計が設置してあったとすれば、加速度が観測されるのは A のみであって、 B ではないことがわかるのである。すなわち、慣性遠心力があるのは A であって B ではないということがわかるのである。このことは容易に実験によって示すことができる。

あるいは、 A, B をそれぞれ反対方向へ回転させた場合、回転しているのが A, B ではなく宇宙であるとするならば、宇宙はいったいどちらへ回転すればよいのだろうか。

また、太陽から見れば地球は太陽の周りを回っているが、反対に地球から見れば太陽が地球の周りを回っていることを観測することができる。あらゆる運動が相対的であるというのであれば、太陽が地球の周りを回っていると考えerことはまったく正しい。しかしながら、このように考えて、太陽と地球の間の運動に万有引力の法則を適用すると、太陽は地球から見てどんどん遠ざかっていくことになる。

万有引力の法則が正しいとすれば、あらゆる運動が相対的であるという考えは間違っていることになり、あらゆる運動が相対的であるという考えが正しいとすれば、万有引力の法則は間違っていることになる。こんなことは物理学者であれば、誰でも知っていることであろう。それなのに彼らは、あらゆる運動が相対的であるという考えと万有引力の法則の両方が正しいと主張するのである。あらゆる運動が相対的であるという考えを肯定する物理学者は、何のためにガリレイが努力したのか全然理解していない。地球を基準にした座標系から観測すれば、宇宙は地球を中心に運動していることになる。このような考えはいわゆる天動説であるが、あらゆる運動が相対的であるという考えは、天動説を否定しないものであるから、天

動説を肯定するものである。現代でも天動説は物理学の主流として生き残っているが、この説を支持している物理学者は、自分が天動説を支持していないと思っているのである。

慣性のエネルギーを表現する運動エネルギーは質量に比例する。質量は重力の源であるから、遠心力や慣性による力が何らかの重力的作用であるとする考えは正しいと思われる。ただし、マッハの考えのように外部（宇宙）からの重力的作用と考えることはできないであろう。その効果は物体自身の質量に依存するのであるから、物体自身の質量によって生ずると考えるべきものであろう。

