

4. 慣性の法則・相対性原理

「進向方向への力」をなぜ書くのか 生徒の判断基準の分析 すでに

〔1〕章で見たように、かなり多くの生徒が等速度の物体に進行方向への力を書く。一体彼らは何を判断の基準としてこのような力を書くのだろうか。彼らの発言を整理してみるとおよそ次のようになる。

(I) 「運動と静止は見ただけで違う」：この考えは生徒にとって不動に近い確信になっている。生徒はこの考えを前提として、あらゆる力学現象を判断しようとする。

(II) 「静止の自然観」：静止が本来の姿であり、動いているものは摩擦がなくても自然に止まってしまう。だから動きつづけるためには絶えず力が必要だと考える。

(III) 「運動は静止とどこが違うのか」：彼らはその理由を自分の経験の中に見つけようとする。確かに「燃料なしに動く乗り物などどこにもない」し、「初めに力を加えなければ動きださない」「何もせずに初めから動いている状態は考えられない」のである。つまり、彼らは現在の運動を過去に（静止から運動し始めるまで）何がなされたかというところにさかのぼって判断しようとする。この判断は間違いではない。しかし、この考えが等速度運動している時にまで拡大されてしまうのである。だから、等速度運動している時でも、初め加えた力が“そのまま働いて”いたり、“残存力”になったり、“こめられた力”や“運動する力”、“勢い”になったりするわけである。

相対性原理を前提に このような生徒の判断基準にたいして、ガリレオの相対性原理を事実上の前提とした導入をはかると大変わかりやすい授業展開ができる。私はこのことを二十数年前から主張し実践してきた¹⁾。幸い仮説実験授業「力と運動」²⁾のプランにそのことが大変うまく生かされ、こういう導入の仕方の有効性は検証されつつあるように思う。

等速度で走る乗り物の上でものを落としたり、打ち上げたりする実験を通して、「静止か、運動か」という生徒の判断は、「等速度と静止は力学的に全く

同じ」だというガリレオの相対性原理と真っ向から衝突する。乗り物の上で離れたボールは水平には「力を全く加えていないのに、前へ動き続ける」のである。ここでは「何もせずに初めから動いている状態」、まさに「自然に動いている状態」が実現しているのである。このように、相対性原理を事実上の前提として導入すると、明らかに生徒の“経験”や“感覚”と矛盾を引き起こし、生徒の常識的判断の枠組みは根本的変更を迫られることになる。しかし、これが疑いようのない事実としてある以上、いくら“不思議”であっても、これを認めざるをえないのである。

静止と等速度の力学的同等性—相対性原理—を承認すること、これは感覚と経験だけでは頼れないことを示す、まさにその典型である。私達は大地が動いていてもその動きを感じとれない。これは不思議だともとれるが、もっと積極的に把握すれば、相対性原理は動きを感じることを禁止する法則なのである。

以上の点をふまえ、相対性原理をとりあげる基本的意義をまとめておくと、

- ① 静止の自然観・自己中心的自然観を打ち破る。
- ② 感覚や経験だけにたよれない、理性的・法則的認識こそ信頼に値することを示す典型である。
- ③ ニュートン力学のかなめの一つとなる原理である。
- ④ すべての自然法則に普遍化されたアインシュタインの相対性理論に直接つながるという点で、さらに、物理法則の対称性（運動量保存と空間の一様性、エネルギー保存と時間の一様性など）という現代物理に直接つながるという点でもきわめて現代的意義を持っている。

〔問題1〕(p.222)は討論に入るときまって議論が沸騰する。この種の問題は、小中学生でも電車などの乗り物のなかでいつも経験しているあたりまえのことであるが、ちょっと考えたただけだと自分のもつ“静止の自然観”と衝突し、「ちょっと待てよ、本当はどっちかなあ」と戸惑い議論してみたいくなる問題である。高校生にはボールが自転車と一緒に走っているとはなかなか思えないらしい。このように日常経験に依拠すると、面白く、やさしい導入ができる。ところが、これほど大切に、面白くかつやさしい導入ができる相対性原理が、不

思議なことに高校の教科書ではほとんどでてこない。大学になって初めて登場するのが通例である。大学の教科書には普通次のような表現がされている。

(ア) ガリレイ変換における力学法則不変。

(イ) ニュートン力学の成立する座標系はすべて力学的に等価である。

(ア) は物理法則の対称性を念頭においた表現、(イ) はニュートン力学の成立条件としての慣性系を念頭においた表現である。この表現を文字通りうけとると、相対性原理はニュートン力学を学んでからでないと教えられないことになってしまう。高校で取り上げられないのは、多分こういうためだと思われる。

高校の初歩の段階では、このように何もわざわざ難しく教える必要はない。

(ウ) 等速度運動しているものの上では、静止の時とくらべて何一つ力学的違いが見つからない。(静止と等速度の力学的同等性)

こういう表わし方をすれば、ニュートン力学の内容をまだ習っていない段階でも、事実として承認できる典型的実験のいくつかから「何一つ力学的違いが見つからない」と飛躍することはそれほど難しくはないのである。問題はいかに典型的事実を示すかにかかっている。

感動的な実験を この原理は電車の中の例を出せば、日常的に当たり前のことなので、話をするだけで生徒は「何だそんなことだったのか」と簡単にわかった気持ちになってしまう。ところが静止の自然観が邪魔をするので簡単に見えて少しも簡単にならない。だから、ここではしっかり討論して、感動的な実験を行ないたい。当たり前だからといって、実験を省略したりしないことである。実験事実だからどうしようもないというところから出発したい。

実験といっても、電車の中では当たり前すぎる。第一、授業中実験できない。それに電車の中だと、物を落としても「空気も電車に閉じ込められて動くから、空気に運ばれる」と考える生徒もでてきて、常識的自然観と少しも衝突せずに正解が得られる。その点、〔問題1〕(1)のように自転車を利用すれば、これらの問題はみごとに解決する。この実験は青空教室での実験でもあり、単純なわりには**意**外と効果的である。卒業生から時々この実験の思い出の

手紙が来たり、会うと必ずこの実験のことが話題となるのは、この実験の印象深さを物語っているように思う。〔問題1〕(2)の等速度で走る車からの球の打ち上げ実験も感動的な実験である。スポッと元の位置に球が入ると一斉に歓声とどよめきが上がる。

数年前から、走りながらバレーボールを打ち上げる実験を同僚と工夫した³⁾のをはじめ、私は、命中式速度計の発展として徹底して命中方式を取入れた放物運動の検証実験、力学的メカだけで簡単に製作できるモンキー・ハンティング、ミニモンキーの実験などを工夫して使っている。厚手の平らな板(スチール机、黒板、コタツ板など)を斜面として使うと3次元の運動が2次元の平面上の運動に限定されるので、実験がずいぶん簡単にできるようになった。しかも半ば瞬間的な運動をスローモーションにできるメリットは大変大きい。

運動の相対性と相対性原理 運動の相対性と相対性原理は言葉は似ているが重要な違いに注意を要する。相対性とは、相手に関連させて初めて自分の性質が決まるということであり、物体の位置や運動は相手(座標系)を設定して初めて意味をもつ。これはあらゆる運動にあてはまる。それに対して、相対性原理では相対的運動の中でも力学法則が不変となるような系と系の関係に限られ、その系は互いに等速度運動という条件に狭く限られる(慣性系)。そのかわり、この系は運動学的だけでなく力学的にも相対的である(優劣がつけられない)。だからこの原理は単なる運動学と違って力学的原理なのである。

相対的見方は、自己中心の見方に陥りやすいなかで、あらゆるものごとを固定化、絶対化することを防ぐ。視点を変えろということ、これは簡単なようではなかなかできにくい。それだけにこの見方は大切である。しかし、ここでの授業のねらいは、運動の相対性より、相対性原理にポイントがおいてある。これは見方を変えても変わらない法則があるということを確認し、理性的・法則的認識のすばらしさというものをしっかりおさえておきたいからである。

慣性の法則と相対性原理 相対性原理は力学法則が不変となるような座標系どうしの関係(互いに等速直線運動)に着目したものである。これに対して、慣性の法則はこれらのある系から特定のある物体に着目した時、その物体もま

た等速直線運動をするという法則である。だから目のつけどころの違いだといってもよいだろう。慣性系と呼ばれるのはこのためである。ニュートンの運動法則は基準となる座標系（慣性系）から特定の物体に着目したときのその物体に関する法則である。だから非慣性系からみればニュートンの運動法則は崩れてしまう。つまり慣性の法則はニュートン力学の成立条件を与えているのである。慣性の法則を第二法則の特殊な場合として片付けてしまえないのはこのためなのである。もちろん慣性の法則や慣性の概念が一切のものの量的関係を問わない法則であることもつけ加えておく必要があるだろう。

第2法則の特殊法則としての慣性の法則 慣性の法則は「 $F=0$ なら、 $a=0$ 」という法則である。第2法則 $F/m=a$ に、 $F=0$ を代入すれば、 m の大きさに関係なく、 $a=0$ が導かれるので、慣性の法則は第2法則の特殊法則とみることができる。これはどのような意味を持っているのだろうか。

第2法則 $F/m=a$ によれば、 a を決めるものは F と m であり、運動はこれらの2つの量のかねあいで決まる。

F ：外力の合力 運動の形成因（速度変化の原因）…外からうける量

m ：慣性質量 運動形成を妨害（速度変化に逆らう）…もののもつ量

ここで注意を要するのは、慣性質量 m は外力 F が働く時に限ってその量が問題になるということである。慣性質量は速度変化に逆らう限りにおいて登場する量である。 $F=0$ のもとでは慣性質量の定義が出来ない。しかし定義が出来ないからといってそのことで慣性質量がなくなることはありえない。もののもつ量が外力を取り去るとなくなってしまうとすれば大変なことである。

$F=0$ の条件のもとでは、慣性質量の「量」が問題にならなくなっただけで、慣性質量の「質」、つまり「速度を一定に保つ」という性質までなくなったということを意味しない。速度変化に逆らう必要がなくなり、もののもつ本来の性質が実現しているだけのことである。慣性とは慣性質量の量を問題とせず質のみを問題とする時用いる言葉なのである。

このように、慣性の法則は第2法則の特殊な場合としてみた時初めて物の属性—慣性—に関する法則であると位置づけることができる。

「すべてのものに慣性がある」つまり、運動の状態をそのまま保ち、変えようとしない性質は、もの（原子）のもつ性質である、という原子論的導入をすれば、慣性の法則はきわめて直感的でわかりやすく、すなおに理解することができるであろう。等速度運動している物体には進行方向の力はいらないと習っても、「だって、ふつうの力とは違うにしても『動力』とか『慣性力』とか『動きつづける力』というものがあるでしょう？」と生徒はいう。実際は「力」でなく、 m ないし、 mv 、 $1/2mv^2$ に相当する、もののもつ量を頭に思い描くのだが、それを表わす適当な言葉がない。そこでこれを「力」と表現しようとするにすぎない。「力を取り去っても等速度運動を続けるのは、物には慣性があるからだ（または運動量、ないしは運動エネルギーをもっているからだ）、それを力とはいわないのだ」と教えられれば十分納得できるものが、何も教えてくれなければ常識的に「力」というしかないのである。その点、教科書や教える教師よりよほど生徒の方が素朴ではあるが健康な実体概念を持っている。ただ生徒の持つ素朴な概念が正当に科学的に位置づけられていないだけなのである。したがって慣性の法則は、単に $F=0$ なら $v=\text{const}$ にとどまらず、物の属性としての認識にまで深められる必要がある。これが、慣性の法則を第2法則の特殊法則として位置づけることなのである。

放物運動と運動の合成・分解—法則の存在感と法則に対する信頼感の確立—

この授業の特徴は、放物運動の実験を通して、自動的に運動の合成・分解ができるように心がけたことである。 $v=v_0+at$ という式で v_0 と at がどうしてもたし算になるのか大変戸惑う生徒がいる。この式は、初速度 v_0 の慣性運動に、等加速度運動 at がつけ加わるというものだが、説明だけでは生徒は納得しない。「事実こうなるではないか」と実験的に示すことがないと、このような生徒の疑問に答えることができない。だから、この場所でこそ一気に法則の存在感と法則に対する信頼感を確立したい。特に、〔問題6〕(p.231)、〔問題7〕(p.232)の実験で、どう飛ばしても100発100中に近いということが示されれば、“法則はずい分正確に成り立つものだ”と法則に対する信頼感はぐっと増す。運動の合成・分解は事実としてできるのであり、教師の勝手な解釈でな

いということをはっきりさせたい。

運動の独立性は大学生にはほとんど自明のようでも高校生には自明でない。

〔問題 5〕 (p.230) の実験で A,B 同時に床につくことを確かめたと思ったら、即座に「そんなはずはない。B の水平速度が遅いから同時になるだけだ。B が時速150km のピッチャーのボールだったら、B のほうが遅くなる」と生徒はいうのである。これはボールに回転がかかってアップするので生徒のいい分が正しい。

〔問題 7〕 (p.232) はモンキーハンティングの問題である。この問題に対する高校生と大学生への調査結果によれば絶対命中するというという高校生は 1 割程度しかいない。打ち出す条件によるという意見がかなり多い (高校生 65 %, 大学生 25%)。高校で習ったはずの大学生でも正当率は 7 割に下がる。だからどう打っても 100 発 100 中になるという実験は、実に驚きであり感動的となる。この実験はほぼ 100 発 100 中でないと効果がうすれる。

この問題は慣性運動 (水平方向に限らずどちら向きでもよい等速直線運動、これを満たす空間は一様な空間であり、慣性空間とよばれる) と重力方向への等加速度運動の互いに独立な運動の合成によって放物運動ができあがることを示している。これは向きを変える力と慣性運動の直線性との関係で再び取り上げることになる。

この授業では放物運動の式を導くのに、水平→斜め投げ上げという 2 次元の運動をやってから、鉛直方向の 1 次元の運動を扱っている。そしてその後、一般の等加速度運動を導く。このやり方は今までに全く例のないやり方である。これは、2 次元の方が慣性運動と等加速度運動の合成がわかりやすいという考えにもとづくものである。こうすれば、直線運動の場合でも慣性運動に等加速度運動がつけ加わるということをわかりやすく教えられると思う。

慣性質量の導入 等速度で走る自転車からソフトボールを落とす〔問題 1〕を討論すると、「車の窓からキャラメルを外へ捨てたら後へ飛んでいった」という経験事実がいつも引き合いにでてくる。静止の自然観を裏づけるためにでてきたキャラメルの中の運動は、〔問題 4〕 (p.228) では「軽くてヒ

「ラヒラ飛ぶ」からソフトボールとは違って例外となってしまう。軽いものに慣性があるとは思えないのである。

こうした考え方を打ち破るために、〔問題4〕と〔研究問題〕(p.228)をつくった。ソフトボールとチリ紙の運動に違いが生じるのは、空気抵抗のためである。運動を妨げる力(F)が働けば、当然質量(m)の大小が運動(a)に影響を与える。 $F=ma$ をまだ習っていない段階でも、空気抵抗のある中で質量の違いに注目させ、慣性質量の導入をはかっておこうというわけである。慣性質量の概念は本格的には $F=ma$ を習う時点で完成させたい。

このように意識的に空気抵抗中の運動を取り上げることにより、慣性の法則は空気の妨害など力が働かなければ質量の大小は全く関係のない法則であることがいっそう浮きぼりになると思う。

「後ろへヒラヒラと飛ぶ」、このことが人間の生命にかかわる重大な社会問題に発展する例として、1966年に起きた全日空羽田沖墜落事故を取り上げた。これはNHK TV「現代の映像」⁴⁾にも取り上げられ『科学朝日』にも山名正夫氏が「ロングベースナウ」という詳細なレポートを発表している⁵⁾。

〔研究問題〕は、航空学の権威といわれる東京大学名誉教授K氏が大変軽いエンジンの覆いが「海水に接する時のあおりをくらって後へヒラヒラと飛んだ」と国会で証言したことについて、果たしてそれが物理的に成り立つかどうかという点に焦点を絞ってある。

慣性の法則という基本法則を通して、このような社会問題にも一定の判断ができるような力をつけたい、そんな意味もこめて作った問題である。

註

- (1) 飯田洋治「力と運動をむすぶものの一物の慣性」『理科教室』 1971.9～12月号
- (2) 板倉聖宣「力と運動」の授業書『科学教育研究』No6 1971.10
- (3) 愛知岐阜物理サークル『いきいき物理わくわく実験』新生出版 p.35 その後、自動車のチューブ3つと掃除機で人が乗れるホバークラフトを簡単に自作して、その上で打ち上げ実験をしている。
- (4) NHK TV 現代の映像「全日空機事故」 1971.2.4.放映
- (5) 山名正夫「ロングベースナウ」『科学朝日』 1971.1～6月号