

3. 落下法則

落下法則で法則の存在感を 今まで、運動学というと、生徒には、その公式が本当に成り立つかどうかわからないまま計算をさせられ、仕方なしにこれを覚え込むことがごく普通のこととなっていた。したがって、大部分の生徒は動力学の入り口ですでに興味と関心を失ってしまっていた。一方、落下法則は運動法則の特殊な例題であったり、広い運動学の中のほんの一部として扱われるのが普通であり、正面から位置づけられることはほとんどなかった。

ここでは、運動学の一般的扱いをできるだけ避け、実際の落下運動の中から法則を発見する立場をきちんと貫こうとしたことである。落下運動は等加速度運動以外の運動を許さない。そこが一般的運動学と違うところである。法則の存在感はこの勝手な解釈を許さないところに生ずる。実際に成り立つ法則だという法則観—単純だが実に見事な法則が存在するものだという法則の存在感と、自然は法則通り応答するものだという法則に対する信頼感—は落下法則を通して著しく強まるように思われる。動力学の冒頭に落下法則を持ってきたのはこのためである。それに、運動学は自然観にかかわるものとして教えられたことはほとんどなかった。ガリレオが落下法則を発見する過程でアリストテレスの自然観に正面から挑戦し、その一つ一つを掘り崩していったような、そんな運動学の試みがあってもよいのではないか。落下法則を運動学の中心にすえるのは、生徒の自然観を問いただす糸口にしていきたいからなのである。

タイマーから「命中式速度計」へ 授業は「速さのはかり方」から始まる。運動している物体の速さはどうしたらうまくはかれるか。このことは決して小手先の問題には思えない。PSSCの登場以来、記録タイマーはあらゆる学校に浸透し切った。ところがこれが煩雑なデータ処理に解消されむしろ概念形成を妨げるような傾向さえ生み出した。概念形成に役立ち、法則がむき出しになって法則に対する信頼感がますような「速さのはかり方」はないものだろうか。私はその一つの方法として「命中式速度計」（水平飛距離で速さを比較する）の方法を採用した。この方法を使えば実に簡単に速さが比べられる。

〔問題1〕, 〔問題5〕がそれである。これによって、落下法則は、 $v \propto t$, $s \propto t^2$ ばかりでなく $s \propto v^2$ まで一挙に検証可能となった。これはとてもタイマーではまねのできない方法である。ものさしに空きビンのフタを吊るだけである。予想する位置に球が命中するかどうかで速さを比べる。“パチン”と命中すれば、“法則は正確に成り立つものだ”と、法則に対する信頼感はいやがうえにも増さざるをえない。時々、距離をはかっているものを見かけるが、距離をはかると誤差が気になってかえって法則に対する信頼感を失ってしまう恐れがある。それに対して、目標に命中させるやり方は、多少の誤差があっても命中するため、かえって正確感が増すのである。

この方法はこれから習うべき法則を前提としていて問題だという反論があるかもしれない。確かにその通りであるが、生徒は少しも変に思わない。もし疑問をもつ生徒がいたら「詳しくは後で学ぶ」といっておけばよい。

速さの概念 落下法則の前に、明確にしてしておきたいことがある。普通、多くの教科書では「速さの定義」 $v=s/t$ から出発している。しかし、「速さとは何か」とか「速さはどう定義されるか」ということは、初期の段階ではそれほど必要なこととは思われない。なぜなら、生徒は幼い頃より直感的ではあるが「スピード感」としての速さの概念（「度」としての速さ）をすでに持っており、この「度」としての速さの概念に依拠して、これをいかにして量的にはかりうる速さ（「量」としての速さ）の概念にまで高めるか、そこが問題なのである。生徒の持つ直感的速さの概念を全く無視して、定義した速さをむりやり押しつけても、彼らの持つ速さ概念は一向に高まらない。それどころかそれは単なる約束事になってしまうのである。

$$vt=s \text{ (等速直線運動の時)} \dots\dots\dots\text{①}$$

これは法則である。さらに、「いくら速さが変わっても、平均の速さがわかれば法則①をもとに移動した距離がわかる」という法則がある。

$$\bar{v}t=s \text{ (}\bar{v}\text{: 平均の速さ)} \dots\dots\dots\text{②}$$

法則①, ②は、極端に言えば落下運動の定量的予測を可能にするためにやるといってもよいだろう。要するに、ここでのねらいは「生徒のもつ直感的速さ

の概念に依拠して、これを量的にはかりうる速さの概念にまで高めながら、 v , t , s 間の法則的認識を形成すること」にある。

落下法則と原子論的自然観 真空中では羽毛も鉄片も全く同じように落ちる。このことはほとんどの高校生が知っている。そこで、大粒と小粒の雨とではどちらが速く落ちるかと聞くと多くの生徒は同じだと答える。ところが実際は大粒の雨の方が速く落ちる。紙の上の知識より、アリストテレスの観察の方が正しい。しかし事実が正しくても「重いものほど速く落ちる」という解釈がいつでも正しいとは限らない。問題は空気をどうとらえるかにかかっているわけである。一方では、空気がなければ鉄片も羽毛も同時に落ちると知っているが、小さな原子や大きな月にも落下法則が成り立ち、地球の引力圏脱出速度が分子も石ころもロケットも同じになるとは、生徒は思いもよらない。

落下法則は質量によらない普遍的法則である。だから一つのをどのよう分割しても、まとめても、落下法則は変わらない。落下法則は分割したものどおしの間に相互作用の力があってもなくても変わらない。そういう法則なのである。第二法則 $F/m=g$ からみると、すべてのものが g = 一定になるのは質量 m と重力 F がいつも比例しているからである。だから落下法則が普遍性をもつのである。以上のことは原子論的に見れば大変わかりやすい。

古代原子論によれば、空虚のなかでは妨げるものがないので、運動は変化しない。重さも運動に関係しなかった(重さの違いは妨げてみてわかる)。これは慣性運動にはそのままあてはまるが、落下運動はそうはいかない。妨げるものがなくても重力のために、運動は変化し加速する。ところがガリレオがそうであったように加速の原因—重力に目をつぶってみよう。すると何らかの加速の原因があるにしても、そのことよりも妨害がない以上、落下運動に質量の違いは影響を及ぼさない。この点に限れば慣性運動も落下運動も同じである。このように見ると落下法則では、等加速度運動の認識と共に、運動を妨げない真空(裏返して考えれば運動を妨げる空気)の把握がもうひとつのポイントであったことがわかる。原子論的に見た真空とは原子も何もないからっぽの空間のことであり、運動に対して完全に無抵抗な空間のことである。この意味では力

学的真空というにふさわしい。ニュートン力学の空間概念は一様等方空間である。このような空間概念を形成する上で原子論的力学的真空はきわめて大切であった。

科学の論理を浮きぼりにする単純明快な実験 「落下運動は等加速度運動以外の運動を許さない」。つまり、落下法則では $v=at$ (a ＝一定) を仮定し、法則②をもとに、 $s \propto v^2 \propto t^2$ を導き、これを実験で検証すること、これがひとつのキーポイントになる。

これまで常識の論理と対決し、科学の論理がむきだしになるような、そういう単純明快な実験はそれほど多くはなかった。このような実験を工夫することは、授業展開の上では決定的に重要である。なぜなら、生徒の興味と関心、学ぶ意欲はこのような具体的教材に直結しているからである。今まで、数式の羅列感ばかり印象づけてきたのも、実はこのような対決実験がほとんど行われたことがなかったためでもある。ここでは、落下法則の検証に実に単純明快な方法を取り入れた。カーテンレール1本と数個の球を用意するだけでよい。斜面を使えば時間を好きなだけ引きのばすことができる。それなら、直接運動が観察できるほど斜面を極端にゆるくしてみてもどうか。〔問題4〕の実験の発想はこういう発想である。時間をはかるのに時計などいらぬ。最初の1目盛を落ちる時間 (t) だけ時間差をつけて次々と球を落せばよい。これで一定時間をきざむことができる。次々と落した球が1, 4, 9……の目盛上に同時に並ぶようなら、それで等加速度運動の検証になる。たったこれだけの工夫で、実に簡単に落下法則が検証できるのである。

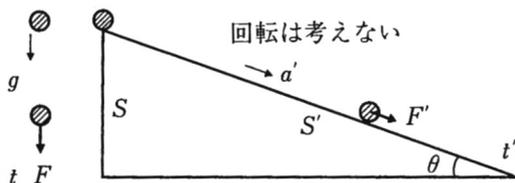
落下法則は一つである。しかし、これを式で表わすと、

$$v=at, \quad s=(1/2)at^2, \quad v^2=2as$$

という3つの式が必要となる。しかし、〈話5〉のように s , v , t の間の関係を1つの表にすると、落下法則はひとまとまりの法則として概念的立体的に把握できて大変都合が良いこともつけ加えておこう。

このような導入が可能となったのは、〈命中式速度計〉と斜面を積極的に位置づけたからだと思う。

時間を遅らす道具—斜面 斜面は力を小さくする道具であり、時間を遅らす道具でもある。ところが、この時間のことは今までほとんど注目されてこなかった。この授業では、斜面が時間を遅らす道具であることを明確に位置づけ、斜面を積極的に利用した。下図のように符号を取ると、



$$\sin\theta = \frac{S(\text{高さ})}{S'(\text{斜面の長さ})} = \frac{F'(\text{重力の斜面成分})}{F(\text{重力})} = \frac{t(\text{自由落下時間})}{t'(\text{斜面を下る時間})}$$

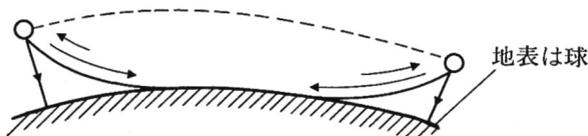
を簡単に示すことができる。

つまり、 $F_s = F's'$ $Ft = F't'$ である。

落下法則のエネルギー論的把握 〔問題1〕 (p.202) のように同じ高さから異なる斜面を下ったとき、下端の速度が同じになるという結論は高校生には自明でない。調査によれば、速さが同じと答えた高校生は40%に満たない(大学生75%)。「急斜面の方が加速がついて速くなる」という高校生もかなり多い。

これまで、この種の問題はエネルギー概念を学習した後、力学的エネルギー保存のところでも取り上げられてきた。それをわざわざ〔問題1〕として落下法則の冒頭にもってきたのは、原子論的見方とエネルギー論的見方の二つを背景として力学を教えればずいぶんわかりやすくなると思ったからである。エネルギー論的といっても、何もエネルギー概念を正面から教えようというのではない。

「落下速度は高さだけで決まる」ということ、これをその後の展開の前提として使っていったらどうか。そして、「 $v^2 \propto s$ 」法則を重視しようというのである。これが可能となったのは「命中式速度計」を導入したからである。実は、このエネルギー論的考え方を前提に議論を展開した人がガリレオであった。彼の落下法則はエネルギー論的であったため、慣性の法則の発見を容易にした反面、慣性の法則を円慣性の考えに縛りつける役割も果たした。これは上



高さだけで速さは決まり、高さが同じなら速さも同じ

図をみれば一目瞭然である。

エネルギー論的落下法則は地動説に対する有力な武器であった。ガリレオやケプラーは、太陽から各惑星までの距離 (r) と公転速度 (v) の関係に大きな関心を持っていた。ガリレオは定性的にはあるが「遠い星ほど周期が長い (速さが遅い)」ことに注目した。すると、遠い星ほど静止に近づき、無限遠方ではついに止まってしまう。天が一日に一回転するという天動説はいかにも不合理である。さらにガリレオは、神がある時、静止した天よりそれぞれの惑星を太陽に向かって落とし、途中で円運動に向きを変えたとすれば、太陽に近い星ほど速さが速くなるはずだとまで想像している。²⁾

ケプラーの第2、第3法則はすべて r と v との定量的関係を示すものである。面積速度一定の法則 (第2法則) は角運動量保存の法則を表わす。これに対し第3法則がエネルギー法則を表わすということは今まで全く指摘されてこなかったように思う。 ($T^2 \propto a^3$ は $r \bar{v}^2 = const.$ と書き直せる) 参照 (p.270)。

$v^2 \propto s$ 法則は自動車の制動距離に関係づけると大変身近なものとなる。もし仮に2倍の速度になれば2倍すべって止まると思っている生徒がいたら車の運転はとてもしさせられない。これを知らないと自分の身だけでなく人の身まで直接の危険にさらされる。 $v^2 \propto s$ 法則はそういう法則なのである。若者の無謀運転が多いときだけに、特にこの法則を重視したい。

- 註 (1) 【科学教育研究】No6 1971 国土社
板倉聖宣 授業書〈速さと距離と時間〉解説
- (2) ガリレオ【天文対話】(上)
(青木訳) 岩波文庫 p.50