

中高理科教育法 (2)

関口 昌秀

補注3. 自然の階層性と「実体的な力」と「現象的な力」

「実体的な力」と「場」の理論

ここで「実体的な力」と言ったのは、「現象的な力」とは区別される意味で、自然界に「本当に」存在する力のことである。厳密に言うと、「力」というより、「電磁場」とかの「場」とした方がよい。「重力」が作用するのは「重力場」においてであり、「電磁力」が作用するのは「電磁場」があるからである。理論的には、実在するのは「場」の方だと考えた方がよいのだという。

現在わかっていることは、「クォーク」まで含めた自然の全階層において存在するのは、「電磁場」、「重力場」、「弱い相互作用の場」、「強い相互作用の場」の4つだという。¹「弱い相互作用の場」、「強い相互作用の場」というのは、何とも変な名称であるが、原子核をつくっている力はこの2種類に分けられるということである。

原子核が陽子と中性子から構成されることは、一般には高校で教えらる。中学校3年のある教科書には、ヘリウム(He)の原子核が陽子2個と中性子2個からできている図が掲載されている。²

しかし、よく考えてみれば、陽子2つと中性子2つが結びついて原子核をつくる現象は、不思議である。陽子同士は電氣的に反発し合うはずだから、なぜこれらが結びついて硬い原子核をつくっているのか。理科学的関心のある高校生なら、こういう疑問をもつはずである。原子核を結びつけている力が何かについて説明する必要はない。だが、原子核を結びつけている「未知の力」、重力でも電磁力でもない「未知の力」が存在することは、教える必要があるのではないだろうか。少なくとも、生徒から質問があったときには、一般の理科教師でも、今まで教えられていない「未知の力」があると答える必要があるだろう。

「弱い相互作用の場」と「強い相互作用の場」において作用する「力」は、原子核内にある「クォーク」を論じるときだけ考慮に入ればよい。宇宙レベルから分子・原子レベルの階層までなら、「電磁場」と「重力場」だけになる。「実体的な力」としては、「重力」と「電磁力」の2つだけになるわけである。高校までの自然観はきわめて簡単になる。

¹ W.N.コッティンガム・D.A.グリーンウッド『素粒子標準模型入門』丸善出版、2012年。2頁。

² 『新版 理科の世界3』大日本図書、2015年検定済、155頁の「図12 ヘリウム原子のつくり」。

万有引力と電磁力

すると、「人間」レベルの階層では、重力（万有引力）と電磁力（電磁氣的な力）の2つの力だけで説明される、ということである。

重力すなわち万有引力は、2つの物質の質量に比例し、その距離の2乗に反比例する。ここで重要なことは、万有引力は質量同士で作用する力であり、それがつねに引力となるということである。

これに対して、「静電気力（クーロン力）」は2つの粒子の電気量に比例し、その距離の2乗に反比例するところまでは、万有引力に似ている。しかし、電気量はプラスとマイナスがある。ここが質量とちがう。だから、クーロン力は引力にもなるし、反発力にもなる。2つの粒子の電気量がプラスとマイナスのとき引力となり、同符号のときに反発力となる。ここが万有引力と違うところである。

静電気力は、じつは特殊な状況のとき、つまり2つの粒子が静止しているときに現象する力であって、一般的には「ローレンツ力」と呼ばれる力の一部である。電子が静止していれば「静電気力」だけが作用する。しかし、電子が運動すると「ローレンツ力」を考えなければいけない。これについては、すぐ後で述べる。

万有引力と電磁力のどちらかだけで式を立てられることが多い

さらに言うと、「人間」レベルの理論モデルをつくるにあたっては、万有引力と電磁力（ローレンツ力）の2つを両方使う必要はあまりない。

たとえば、電子について考えてみる。2つの電子の間に作用する万有引力と静電気力（クーロン力）の大きさを計算してみると、それらは大きく異なる。電子間に作用するクーロン力の方が万有引力より、遥かに大きい。10の42乗倍という桁違いの大きさになる。したがって、電子同士の作用を考えるときは、万有引力は無視して、電氣的な力だけを考えればよいことになる。

念のために言うと、今述べたのは電子と電子の間の作用についての話であって、地上におかれた電子の場合はちがう。地上におかれた電子には重力（地球による万有引力）が作用する。それについては考慮する場合もある。一般に実際の計算では、無視できない大きさの力を考えるということになる。地上での電子の運動を考える場合は、電子に作用する重力とローレンツ力の2つを考えることもある。上で述べたのは、電子同士の万有引力が無視できるということである。

太陽系とか銀河系とかの宇宙空間では、電氣的にプラス・マイナスがほぼゼロとみなせることが多い。したがって、宇宙空間では、電磁場からの力を無視して、万有引力だけ計算に入れればよいということが多くなる。

しかし残念ながら実用上は「実體的な力」だけでなく、「現象的な力」を考えることがふつうである。計算上、そうした方が便利だからである。

現象的な力

中学1年の理科で「身のまわりに働く力」として、弾性力、摩擦力、磁力、電気の力、重力、そして、圧力、水圧、浮力などが出てくる。³ これらの力は、私たちが直接観測す

³ 『新版 理科の世界1』大日本図書、2015年検定済、168-193頁。

る力を、現象ごとに名づけたものである。そういう意味で、これらの力を「現象的な力」と呼んでおく。

正確に言えば、このうち磁力と電気の力と重力は、すでに述べた「実体的な力」に属する。重力は、地球と物質の間に働く万有引力のことである。だから、地上の物質では、その質量に比例した重力が働く。磁力と電気の力は、「実体的な力」である電磁力が、現象的に磁力と電気の力とに分かれて観測されたものである。

板などを押すのは圧力である。圧力は、同じ面積当りにどのくらいの力が働くかを表わしたものである。だから圧力は力の一種ではなく、力とは別物である。その証拠に、圧力の単位は力と次元を異にする。力の単位がN「ニュートン」であるのに対し、圧力は N/m^2 「ニュートン毎平方メートル」である。

板を押すのが空気の圧力とすれば、板の上にある空気すべての重力が板に働く力となる。このときの圧力は大気圧である。板を押すのが水るとき、つまり水中で考えれば、その圧力は水圧となる。大気圧は大気、つまり空気に働く重力から求め、水圧は水に働く重力から求める。

フレミングの左手の法則と電磁力

中学3年で、フレミングの左手の法則が出てくる。このときの力が、電磁力（ローレンツ力）である。磁石の間の空間には磁場がある。その空間に電線を置き、そこに電流を流す。すると電線が動く。つまり電線に力が作用したことが確認できる。その力がローレンツ力である。電流とは電子の集合の流れである。ただし、電流の向きと電子の向きは、逆向きに定義された。歴史の事実としてそうってしまった。少しだけ不便である。

高校で教わることだが、電子に働くローレンツ力は $F = evB$ と表わされる。ここで、 e は電子の電気量、 v は電子が動く速さ、 B は磁石間の磁場の強さ（正しくは磁束密度）である。もっと正確に言えば、 v は速度であり、積 vB はふつうの積ではなくベクトル積 $v \times B$ と表わすのが正しい。ベクトル積はベクトルになり、その向きは v とも B とも垂直の向きとなる。これは大学で教わる。フレミングの左手の法則の場合、 v と B が直交するので、最初の式のようになる。

大事なことは、ローレンツ力が電子の速さに比例していることである。この式は、磁気的な力だけを表わしているが、電気的な力を含めて一般的な形でローレンツ力を表わせば、 $F = e(E + v \times B)$ となる。 E は電場を表わす。電場というのは、磁石の周りに磁場ができるように、電気が存在するとその周りに電場ができるのである。この式の形からわかるように、電子が静止していれば、電磁場からの効果は $F = eE$ となり、電気的な力だけが働くことがわかる。これが静電気力なのだが、この式は場の力として表したものである。クーロン力というときは電場を考えない。だから式の形が違っている。ここがわかりにくい所なのだが、それらの関係については後の章で述べることにする。

弾力や摩擦力は、物質の原子間の電気的な力などの効果である。原子間の効果の理論化はあまりにもむずかしいので、ふつう「現象的な力」としてモデル化していく。原子間の効果など、多数の粒子が集まった場合は、総じて簡単なモデルをつくっていく。これが「現象的な力」である。

第4章 粒子モデルのむずかしさ

中学生がどこまで粒子モデルを理解できるか

さきに補注1の中で少しふれた「粒子モデル」の問題について、ここで少し詳しく考えてみよう。それは、袋に入れた液体エタノールを暖めると袋が膨らむ現象を「粒子モデル」で説明する、ということであった。⁴

「粒子モデル」で説明すること自体は科学的なことである。それは現代科学の原子論的見方に立ったものである。しかし、それを中学校レベルでどこまで理解できるか。「粒子モデル」とは、科学的概念の考え方で表現すると、「分子運動論」である。分子運動論は高校の物理でその初歩が登場する。このことからみても、「粒子モデル」を中学生に理解させるのは無理があるのではないだろうか。

「粒子モデル」において、気体の圧力は、「分子運動論」の仮定を前提とし、高校レベルの力学を使って計算した結果として求められる。袋の壁に粒子が衝突すると粒子の運動量が変化する。運動量の変化は壁に力積を与え、それが壁の圧力となる。この論理は、確かに高校レベルの物理として理解でき、その計算の結果が正しいことも理解できる。ただし、理解できるのは、高校レベルの力学を理解したからであって、中学校レベルでは無理である。

さきの「補注1」で、わたしは、生徒から質問があった場合は、「温度が上昇すると、粒子の運動が激しくなり、袋の壁に大きな力を加えることになるから膨らむ。」と答えたらよいと提案した。しかし、それはその理由をわかるように説明するという意味ではない。結果だけを伝えるということである。

「温度の上昇は粒子の運動の激しさになる」というのは、分子運動論の考え方の出発点である。温度とは分子の運動エネルギーだと考えるのが分子運動論だから。

「粒子の運動が激しくなり、壁に働く力が大きくなり、その結果として膨らむ」というのは、力学の計算結果である。これについては、今述べたように高校の力学の知識が必要になる。だから、そこは中学生には結果だけ伝えるのである。

「粒子モデル」の腑に落ちなさ

高校における私自身の経験としては、計算結果について理解はできた。しかし他方で、「何となく腑に落ちない」という印象をもったことも事実である。

分子運動論は、分子1個1個の与える衝撃力を全体としてならしたものが圧力なのだと言う。しかし、「衝撃力」が「圧力」になるというのが、実感と結びつかなかった。「衝撃力」はバットの衝撃でイメージされる。「圧力」は水圧でイメージされる。バットの衝撃力がどうして水圧の圧力になるのか。どうしてもそこが実感と結びつかないのである。これが私の高校時代の経験である。今でも、「衝撃力をならしたものが圧力になる」という事実を実感として理解しているかという、あやしい。計算の結果がそうなるとして納得しているだけである。

「科学的真理は直観的常識を裏切っていく」という板倉の言葉は、おそらく、このよう

⁴ 『新版 理科の世界1』大日本図書、2015年検定済、101頁。

なことも指しているのだと思う。そうだとすれば、高校時代の納得以上のものを求める必要はないということになる。腑に落ちなくても、計算結果が正しく現実を予想すれば、それでよいということである。

以上の体験をふまえて、再び、「生活的概念」から「科学的概念」への転換という文脈において「粒子モデル」の問題を考えてみると、「分子運動論」が前提とする「粒子モデル」というのは、「生活的概念」からはものすごく離れたところにある「科学的概念」である。それを理解させることは至難に近いのではないだろうか。

仮説にもとづいて計算した結果の予想が観測される値に合えば、それが科学の正しさを証明する。この「科学の特徴」を生徒に理解させれば、「粒子モデル」の考え方の正しさも少しは納得してもらえるだろう。そのためには、どうしても「計算」を導入しなければならない。そう考えると、計算についてあまり教えない中学校段階では、どうしてもむずかしいということになる。

「粒子モデル」は与えるべきものである

「粒子モデルで考えよ」と言いながら、その前提が曖昧なことも気になる。それは原子論的な見方なのだから、生徒の生活体験からは出てこない。だから、そのモデルについて生徒に考えさせたいのなら、そのモデルの前提を正確に与えてその上で考えさせないと意味がない。

じつは生活的概念も事実そのものではなく、事実についての「解釈」である。「解釈」という意味では、生活的概念も科学的概念も同じである。だから、「粒子モデル」で解釈させたいのなら、その前提をきちっとしておく必要がある。そうしないと、ありとあらゆる解釈が生徒たちの間から出てきて、授業の收拾がつかなくなってしまう。

「粒子モデル」は、板倉聖宣がいう意味での「基礎的一般的な概念」である。それは1回実験ただけで理解できるようなものではない。板倉は次のように言っている。

「科学でもっとも基礎的一般的な概念というものは」、「1回実験ただけではとても理解できるものではない」。それは「非常に広い範囲にわたって有効である」ので、「何回もいろいろな場面を見させ、いろいろな条件で実験して見せなければならない。」(板倉聖宣「仮説実験授業について」⁵⁾)

ふつう、「いろいろな場面で条件を変えて実験する」ということは、学校教育の現実を考えると難しい。いろいろな場面で条件を変えて実験することができないのであれば、むしろ教師は「上から」生徒にしっかりと「基礎的一般的な概念」を与える必要がある。「粒子モデル」とは、そういう前提を正確に与えたときに成立する概念である。

「粒子モデル」の前提

「粒子モデル」の前提は、いくつかある。

- 1) 粒子の数は増えない。
- 2) 粒子が大きくなったり小さくなったりしない。
- 3) そして、粒子はすべて同じものとする。

⁵⁾ 板倉聖宣『科学と方法』季節社、1969年、258-259頁。

最後の3)はモデルを簡単にするためのものだが、前の2つは「粒子モデル」の基本的前提である。

「粒子モデル」が事実として正しいかどうかについて、中学生のレベルで実験することはできない。だから、教科書も、物質は「原子」からできていると「考えよ」と「上から」説明している。教師は、その前提を徹底することである。これは、現代科学の立場の徹底である。

「粒子モデル」の粒子とは、重さも大きさも変化しない。その個数が増減することもない。個数・重量・大きさを不変量とする。それが「粒子モデル」であることをきちんと確立する。そうしなければ、「粒子モデル」に立って温度上昇で袋が膨らむことについて合理的な推論を働かせたことにならない。

粒子数の増減を認め、粒子の大きさの変化を認める前提に立つならば、粒子数が増えたりあるいは粒子が膨らんだりすれば袋が膨らむことは、その論理的帰結として許されることになる。その前提の上では、合理的である。

ここで生徒に考えさせたいのは、個数不変・体積不変という粒子の存在を仮定して、袋の体積膨張を考えることである。推論の出発点として、個数も体積も変化することを認めてしまえば、これらの結論のうちどれが正しいのかは決着しない。決着しないことを考えさせても意味がない。

「粒子モデル」は分子運動論の考え方に立つことである

「粒子モデル」というのは気体分子運動論の考え方をすることだが、分子運動論では、熱とは気体分子の運動エネルギーであると解釈することから出発する。これは実験からの結論ではなく、分子運動論という理論の出発点である。あくまでも「解釈」である。「熱エネルギー＝気体分子の運動エネルギー」とする解釈が分子運動論の議論の出発点である。これを前提とすることから、すべてがはじまる。

ところが、教科書はこれを導きたいと考えている。しかし、それはそもそも理論の出発点なのであって、推論の結果として出てくるものではない。この教科書の作成者は、マクスウェルやボルツマンなどの分子運動論者の発想を推論させようとしているのか。すべての中学生にそれを求めることは、そもそも無理である。

「粒子モデル」で考えるということで、生徒に伝えるべきことは、こういう分子運動論の発想を教師が生徒に伝えることだろう。生徒がこの発想もあながち誤りではないかな、と思ってくればそれでよい。私のように納得できないとする生徒も一方に層をなしているだろうが、それでよいとすべきである。

補注4. 熱現象理解の2つの考え方

熱現象理解の2つの考え方

熱現象の理論化には、大きく2つの考え方がある。「熱力学」と「分子運動論」の2つである。「粒子モデル」は、「分子運動論」の考えに基づくものである。しかし、「粒子モデル」が出てくる単元の中でも、「気体の状態変化」に限れば、「熱力学」の考え方につながる。その数量的取扱いは、高校の化学や物理に出てくる「ボイル・シャルルの法則」と

か「気体の状態方程式」になる。

高校物理では、気体の状態方程式の他に、簡単な分子運動論の計算も出てくる。たとえば、すべての分子の速度を一定と仮定して、力積と運動量の変化の関係から、気体分子の状態方程式を導く。力積が運動量の変化に等しいという関係は、力学の法則だから、分子運動論においては、力学から熱力学の式を導き出せるかのように見えてしまう。しかし、導き出せるのは、あくまで熱力学の中の一部の式であって、力学から熱力学の全体が導けるわけではない。

力学と熱力学では考え方の根本が異なる—可逆性と不可逆性

じつは力学と熱力学とは、考え方が根本的に異なる。理論の性格が根本的に違うのである。この2つをどのようにつなげるか。これについては、大学レベルでも、必ずしも意見が一致していない。⁶

熱力学は、化学の中の「物理化学」において「平衡熱力学」⁷といわれるものである。「熱力学」というのは物理学での名称である。分子運動論は、大学では「統計力学」とよばれることになる。

これら2つの理論の考え方の違いは、次のところにある。

熱現象の大きな特徴は、熱が高温のところから低温の方へ流れ、その逆には決して流れないことである。熱は高温から低温へと一方向に流れる。低温から高温の方向に熱が流れることはない。これを不可逆現象という。この不可逆現象の存在が熱力学を特徴づける。それに対して、力学は可逆的である。

この可逆的というのは、力学の理論が可逆的だということであって、わたしたちの身近な物理現象が可逆的になっている、という意味ではない。現実には、摩擦力が働くから、運動は可逆的にならない。摩擦力では熱が発生する。つまり、現実の物理現象の多くは、純粋な力学現象ではなく、熱現象をともなっている。

しかし、力学の理論にだけ限れば、可逆となる。ここで述べていることは、きわめて理論的なことなのである。

ニュートンの運動方程式のもつ可逆性

力学におけるニュートンの運動方程式と同じように、熱力学にも基礎方程式というものがある。それがどういうものかは、熱力学の教科書の内容になるので、ここでは述べる必要がない。ここでは、基礎方程式の中身ではなく、それが存在することを使って可逆不可逆について説明する。

ニュートンの運動方程式では時間 t を $-t$ に置き換えても運動方程式は成立する。ところが、熱力学では時間 t を $-t$ に置き換えると方程式は成立しない。理論的にいうと、運動方程式は時間対称的であり、熱力学の方程式は時間対称的でないということである。

⁶ 田崎晴明は、熱力学と統計力学の両方の教科書をつくっている。『熱力学』培風館、2000年、及び『統計力学 I, II』培風館、2008年。田崎のこれらの教科書の「はじめに」と「あとがき」を読むと、熱力学においても統計力学においても、それをどのような構成で組み立てるかの理論が安定していないことがわかる。

⁷ 『アトキンス 物理化学』東京化学同人、第8版、2009年、(上) v頁。

時間対称的というのは、運動をビデオに撮ってそれを逆回しにした運動が成り立つということである。熱力学ではそれが成立しない。これは、熱が高温のところから低温の方へしか流れないことに対応している。

閉じた箱の中を2つに仕切って、その片方にだけ気体粒子を入れておく。その仕切りをある時刻に取り外したとすると、気体粒子は空の箱の方に拡散していく。この現象を逆転させることはできない。これが不可逆現象である。

「分子運動論」は、理論的基礎をニュートン力学においている。したがって、それは時間対称的である。しかし、熱現象の本質は、高温から低温方向にしか熱が流れないという不可逆性にある。この性質を、どのように「分子運動論」的考え方で処理できるのか。そこに「分子運動論」の理論的難点がある。

「分子運動論」が導出する式は、熱的平衡状態において成立する関係式であって、熱的な変化そのものを扱っているわけではない。「平衡熱力学」と言われるのは、そのためである。熱的な変化そのものを取り扱うのは、今でも「熱力学」の専売特許とするところである。統計力学は平衡状態だけを扱うのみと言ってよい。非平衡の統計力学はやっと始まったばかりである。

ともかく、熱現象の理論化には、不可逆性を扱う熱力学と、平衡状態だけを扱う分子運動論の発展としての統計力学という、やり方の違う2つの道があるということである。

熱現象理解の2つの考え方と中学理科

中学1年の「物質の状態変化」の単元は、基本的に「熱力学」に発展するものである。ところが、この単元中の「粒子モデル」は「分子運動論」の考えに基づく。「粒子モデル」が出てきても、「物質の状態変化」の単元全体が「分子運動論」の考え方に貫かれていると誤解してはいけない。この単元全体は基本的に「熱力学」に発展するものなのである。君たちは、そこを押さえておかないといけない。

「物質の状態変化」の中心は、大学風に言えば「純物質の物理的な変態」である。氷から水、そして水蒸気というのは、大学でいう「相」の話題である。「物理化学」においては、相図とか相律とかいうものに発展する。蒸留は「混合物」の話題である。それは、大学の「物理化学」では、ギブスエネルギーとかの化学ポテンシャルを議論することになっていく。

「物質の状態変化」の単元は、たしかに、わたしたちの日常生活の身の回りの話題である。しかし、その科学理論は、このように、とんでもなく難しい理論となる。このことを押さえておく必要がある。

熱力学や統計力学は、化学と物理を専攻する学生にとっては、その専門の基本的教養となる。しかし、すべての理科教師がそこまで理解しておく必要はない。ただし、熱現象の理論的処理には、考え方の違う2つの理論があるということだけは知っておいてほしい。そして、中学1年で教える内容が、将来そういう方向に発展することを理解しておいてほしい。

補注5. 原子の実在性の確認のむずかしさ

原子の実在性の確認のむずかしさ

「分子運動論」には、不可逆現象を扱う理論的な困難の他に、原子・分子の存在を示す証拠が示せるのか、という原子の実在性に関する実験的確認の問題があった。こちらは過去形である。今、原子の存在を疑う科学者はいない。

中学校から、原子の存在は当り前のこととして、理科の授業を行う。しかし、今でも、「原子の実在の証拠」というのは難しいことがらである。

歴史的には、「科学者の共同体」が原子・分子の存在を最終的に受け入れるまでには、長い時間がかかった。簡単に、原子が存在することが確認されたわけではない。この間の事情について、統計力学を専門とする田崎清明は次のように述べている。

「多くの文献にブラウン運動の理論と実験が原子・分子の最終的な証拠を与えたという記述があるが、より重要なのは、この頃〔1908年からのペランの実験〕までに、気体の諸性質、ブラウン運動、黒体放射のスペクトルをはじめとした様々な方法でアボガドロ定数が評価され、それらがすべて $6 \times 10^{23}/\text{mol}$ に近い結果を示していたことである。原子・分子が単にマクロな現象を「経済的に叙述し直観するための概念」にすぎないなら、これほどに広範な（そして、互いに独立に見える）実験結果がほぼ等しいアボガドロ定数の値を示唆するという整合性は、全くの奇跡であろう。こうして、二十世紀の初頭には、原子・分子の実在を疑う物理学者はほとんどいなくなった。……科学者社会が原子・分子の存在を最終的に受け入れるまでにこれほどの時間がかかったことは意外に思えるかもしれないが、目に見えない存在を受け入れるというのは、それほどに大きなステップだったのである。」⁸

ペランの実験

ペランの実験については、江沢洋『だれが原子をみたか』⁹が参考になる。これは、中高校生向けに書かれた本である。ここではそれに基づいて、ペランの実験の意義を説明しよう。

ブラウン運動というのは、1828年に植物学者のロバート・ブラウンが報告して知られるようになった。ある植物の花粉を水に浮かべておく。しばらくすると、花粉は水を吸って破裂し、そこから微粒子がたくさん出てきた。その細長い数 μm ほどの微粒子を顕微鏡で観察してみると、不規則で乱雑な動きをすることが確認された。この不規則な運動がブラウン運動である。

ペランが1908年からの実験で使ったのは、花粉から取った微粒子ではなく、形も大きさも均等な乳濁液からつくった微粒子である。そして、その動きを一定の時間間隔で追った。

結果として得られたことは、時間間隔をどんなに短くしていても、運動の軌跡がジグザグなままだったことである。

⁸ 田崎清明『統計力学 I』培風館、2008年、10頁。

⁹ 江沢洋『だれが原子をみたか』岩波現代文庫、2013年。

ふつうの物体の運動ならば、測定時間の間隔を小さくしていけば軌跡は滑らかになっていく。しかし、そうはならなかった。そうならない理由として考えられるのが、微粒子に衝突する分子の衝撃力である。水分子が微粒子にぶつかってその衝撃力でジグザグと動いていると考えるのである。つまり、微粒子のジグザグした動きが水分子の存在を示すということである。

アインシュタインのブラウン運動の理論の確認

念のためにいえば、ペランが行った実験はもっと精緻なものである。なにしろこれでノーベル賞を取ったのだから。

微粒子の速度と時間の関係から分子運動論の正しさを確認し、微粒子の大きさと速度の関係から流体力学の式の成立も確認した。こうして、1905年のアインシュタインのブラウン運動の論文の正しさを確認したのである。1905年のアインシュタインのブラウン運動の論文というのは、アインシュタインのノーベル賞受賞の理由の1つとなった論文である。

たしかにペランによるブラウン運動の実験は原子・分子の存在を示す強い証拠である。しかし、それだけで原子仮説が認められたわけではない。

先の田崎の引用にあるように、独立に思えた様々な現象において、原子仮説の上に立つアボガドロ定数の評価がすべて $6 \times 10^{23}/\text{mol}$ に近い結果を示すという「奇跡的事実」があったこと、それが原子仮説を認めさせたのである。そういう意味では、ペランによるブラウン運動の実験も、ブラウン運動に関するアインシュタイン論文の正しさを確認したことによって、原子仮説の正しさの証拠を積み上げたということである。

科学はたった一回の実験によって確立されるのではない

くどいようだが、科学はたった一回の実験によって確立されているのではない。科学理論を構成する様々な仮説から出る結果の間の整合性が、科学理論を根拠づけるのである。

原子仮説は、まさに現代科学の本質的部分を構成するものである。そこから導かれる諸結果は整合性を示す。

このことから示唆されることは、教師は生徒に対して、原子は存在する、と上から教え込むしかないということである。現在の科学理論の正しさの根拠を理解することは、田崎の引用が挙げている例からわかるように、大学中級レベルの統計力学や量子力学等々を勉強した後でないと納得できない程度のものである。そうである以上、原子は存在すると、「上から」教えるしかないのである。

その正しさは、生徒がその後に学習していく理科の内容が、原子仮説と整合していることにより、生徒自身によって実感されることになるだろう。「教師が上から言うだけで、実験的証拠が不十分だ」と感じた生徒は、原子仮説の正しさの実験的証拠を求めて、その後自主的に勉強していくことを期待してもよい。

補注6. 科学的力学観のむずかしさ

慣性の法則のむずかしさ

日常世界を支配しているのはニュートン力学である。しかし、その考え方を理解することは簡単でない。

日常世界ではつねに摩擦力が働いている。このことが、ニュートンの法則の理解を困難にする。わたしたちが目にするものは、必ず止まる。永遠に動くものはない。摩擦力が働いているからである。例外は星の回転、恒星の日周運動である。これがアリストテレスが地上世界と天上世界を区別した理由である。この事実は昔も今も変わらない。地上世界での経験によれば永遠に動くものはないから、ニュートンの第1法則である慣性の法則を感覚的に理解することには無理がある。

慣性というのは質量がもっている性質で、それまでの運動を続けようとする性質のことである。質量を有する物体に力が働かなければ、その物体はそれまでの運動を続ける。具体的にいえば、物体の速度が変わらないということである。物体は等速直線運動を続けるか、あるいは静止したままである。これが慣性の法則の意味することである。

しかし、日常世界には永遠に等速直線運動をしている物体は、存在しない。日常世界ではつねに摩擦力が働くから、物体を動かすつづけるためには、外部から力を加えつづけないといけない。これが、日常の経験である。

永遠に運動しているように見えるのは、アリストテレスの時代と同様に、星の回転運動の方である。したがって、力が作用しなければ物体は等速直線運動をつづけるという慣性の法則の内容を、わたしたちが経験することはない。慣性の法則を科学的真理と理解することは、きわめて困難なのである。

だから、アリストテレスほどの偉大な学者でさえ、それを把握できなかった。それをどうやって生徒に理解させるのか。このように考えれば、慣性の法則を理解させることの困難さが想像つくだろう。

力学をニュートンの法則から演繹的に理解する

わたし自身、中学時代に慣性の法則について理解できなかった。50年も前のことだが、思い出すことが一つある。地区の研究発表会へ連れて行ってもらったとき、授業の担当でなかった教頭先生が、ロケットは作用反作用の法則で飛ぶのだと言ったが、わたしには何のことかさっぱりわからなかった。中学卒業後どのように私が作用反作用の法則を理解したかといえば、おそらくニュートンの法則から演繹的に理解したのだと思う。

慣性の法則も作用反作用の法則も、根本的なものとして成立する第一原理として、いわば公理的なものとして理論の出発点とし、これが正しいと信じた。そして、それを使ってさまざまな例題を計算していく中で、その法則の真実性を「体験的」に納得してきたのだと思う。

ここでいう「体験」とは、例題の問題や演習問題を計算して解いていくという「机上の体験」である。計算上の体験であって、日常の経験ではない。だから、それは、日常経験の感覚からニュートンの法則を納得したのではない。

むしろ逆に、ニュートンの法則を日常世界に適用し、その計算結果に矛盾が発生しないこと、計算結果の予想が的中することを経験し、それを信じてきたのである。

理科の教師に「法則だ」と言われたから、慣性の法則も正しい法則の1つとして、信じてきただけである。その「信仰」が多少強くなって確信となったのは、その後の大学へ向かっての力学の勉強の結果としか言いようがない。

慣性の法則についての思考実験

高校の「物理基礎」のある教科書には、「慣性の法則」に関するガリレオ・ガリレイの思考実験を説明した箇所がある。¹⁰

左右が滑らかな斜面と小球を用意する。小球を左側の斜面におけば小球は滑り出し、反対側の斜面に上っていく。斜面が滑らかであれば、小球は出発点と同じ高さの所まで上っていくと想像できる。このことは、日常経験から想像できる。完全に滑らかな面は用意できないが、滑らかな面についての経験から、このことは想像できる。

次からが思考実験である。右側の斜面の角度を緩やかにした場合を考えていく。このようにしても、滑らかな斜面ということから、小球は出発点と同じ高さの所まで上っていくと考えられる。これを別の側面から見ると、斜面を緩やかにした結果、小球が水平方向にころがる距離が長くなったということになる。

そして、頭の中で次々と、斜面を緩やかにしていってみる。現実には斜面を緩やかにすれば摩擦力の効果が大きくなる。だが、頭の中で斜面が滑らかだとしているので、摩擦力の効果はない。そう考えるのである。摩擦がないとすれば、小球は同じ高さまで上がるはずである。つまり、小球が水平方向にころがる距離が長くなっていく。

こうして思考をつづけると、右側の斜面を水平まで緩やかにしたとすれば、小球はどこまでも右に運動しつづけると考えられることになる。これが思考実験の結果である。

このようにして、水平方向に動いている小球は滑らかな水平面の上では、どこまでも動き続けていくということが、思考実験の結果として導かれた。小球に作用している力は、重力と面からの垂直抗力だけである。水平面では水平方向に働く力はない。したがって、小球に対して水平方向の力が作用しない場合には、小球は水平方向の運動を保存するということが導かれたことになる。

慣性の法則が、思考実験の結果として導き出されるというわけである。

授業の展開としては、慣性の法則が成立すると最初に教えておき、そのあとで、この思考実験を提示するのがよいと思う。何もない前提の上で思考実験をやった場合、アリストテレス的解釈に戻ってしまう可能性がある。

実験とはある仮説を前提として、その確認のためにやるものである。思考実験もそれと同じように、仮説を前提とする。この思考実験は、摩擦力が働かないという理想状態を前提した場合に、慣性の法則が成立することを確認するために行うものである。そこをきちんと押さえておかないと、この思考の展開についていくことは難しくなるだろう。

¹⁰ 『改訂 物理基礎』東京書籍、2016年検定済、57頁の本文および「図19 ガリレオの思考実験」。本稿では、ガリレオ・ガリレイについて、「ガリレイ」と表記する。

慣性の法則の意味

じつは、慣性の法則の意味は、それほど明らかでない。

運動方程式 $F = ma$ において $F = 0$ とすれば、 $a = 0$ が出る。つまり、物体に力が作用しなければ、物体の加速度はゼロとなる。加速度がゼロということは、物体は等速直線運動をしているか、あるいは静止しているということである。

「物体に力が作用しない」という条件を運動方程式に適用すると、慣性の法則の結果が導出されるのである。これは、運動方程式から慣性の法則が導かれることを示す。第2法則から第1法則が導かれたのである。

すると、第2法則と区別して、第1法則として慣性の法則を立てる意味はないようにも考えられる。

ここに、慣性の法則を第1法則として立てる意味は何なのか、という問題が発生する。これに対する答えは次のようになる。

「実は力が働いていようがいまいが、ある1つの粒子にだけ着目して、その粒子がうける加速度と同じ加速度のもとで運動する座標系から観測すれば、粒子の運動は等速直線運動となるであろう。一方仮に、複数の自由粒子が図Aのような〔合同でない曲線を描く〕運動をしているとすれば、第1法則は成り立たないことになる。

その意味では第1法則の主張の本質は、「慣性系」という特殊な座標では「すべての自由粒子」が図Bのような〔直線を描く〕運動をしているように観測される点にある。したがって、第1法則は慣性系という力学の記述にとって本質的な座標系の存在を主張したものであり、次の第2法則に含まれるものではなく、より基本的な原理と解釈すべきものである。」¹¹

運動方程式が成立する「慣性座標系の存在」という主張である。随分哲学的な話だと思うだろう。

慣性座標系の存在の有無などという迂遠な話に興味がなく、ただ問題を解き運動を予想するという実用目的のためだけには、慣性の法則は不要である。それは運動方程式から出てくる結論でしかない。

高校生にどう教えるべきか。慣性の法則についての上記の哲学的な位置づけがあることを知った上で、実用性の観点から、力学は第2法則と第3法則だけで成立すると伝えるのもよいだろうし、あるいは慣性の法則が存在することの意味を熱っぽく話すのでもよいだろう。そこに、教師の物理学観がでてくる。

しかし、どちらもそれは現代の科学観に属しているといつてよい。科学観といつても、ここは哲学的な話に近いから、この程度の幅があるということである。

科学的事実は正確に

ガリレイの思考実験について、先に掲げた「物理基礎」の教科書の記述には、ある問題点がある。それは科学的事実を歪めている点である。

慣性の法則についての教科書の説明は、ガリレイの説明を変形したものとなっている。ガリレイ自身は、地球の中心力が作用する地上における「円慣性」を考えた。そういう意

¹¹ 須藤靖『解析力学・量子論』東京大学出版会、2008年、7-8頁。

味では、ガリレイは正確な意味での「慣性の法則」を見つけ出したのではない。

「円慣性」というのは、地球を回る等速円運動のことである。ガリレイは地上での運動を議論した。小球が斜面を下るのは重力による。重力とは地球の引力である。地上で水平面を考えているから、水平面を延長していけば地球を1回転する面となる。したがって、等速運動していく小球は、じつは地球を回る等速円運動をする。¹²

ガリレイのこの議論はなかなか鋭いが、小球には重力以外に面からの垂直抗力も働いていることを忘れていた。さきの教科書の説明は、ガリレイのアイデアをアレンジしたものである。しかし、アレンジした説明を「ガリレイの思考実験」と名づけることには違和感を覚える。

科学史は歴史的事実である。したがって、それは正確な叙述が求められる。たしかに、注記をよく追って行けば、ガリレイの「円慣性」に辿り着くこともできる。しかし、これは不親切である。教科書本文の記述では、「ガリレイはこのような思考実験から、物体の自然な運動は、等速直線運動であると考えた。」(57頁)と表記している。これは歴史的事実に反する記述である。

本文においては「ガリレイの思考実験」という表現をやめ「思考実験」だけとし、それがガリレイ自身の発想の変形であることを注記するという形をとるべきであった。理科においても歴史的事実を歪める行為は慎まなければならない。教科書作成者は、ガリレイの議論が「円慣性」であることを知っているのだから、なおさら科学的記述については正確を期すべきだった。

理科の教科書は現代の科学的概念を教えるものである。だから必ずしも科学史の記述を入れる必要はない。科学的概念の発展を理解することは、科学的基礎概念を教える場合にも重要となることもある。科学的概念の発展について不正確に理解することは、科学的概念を理解するうえで弊害となることもある。それゆえ、科学的概念の歴史は正しく記述されなければならないのである。

理科教育と科学史

摩擦力の中で暮らしている私たちにとって理解しにくい「慣性の法則」に関して、ガリレイのアイデアだけ借りて「思考実験」させようとした教科書作成者の発想にはわたしも賛成である。日常生活から摩擦力を取り除くには、論理の力による想像を使う「思考実験」がよい。そう思えばこそ、画竜点睛を欠くではないが、ガリレイという歴史的名前を挙げてしまったことが悔やまれる。ここの叙述はガリレイを出さなければ、むしろ普遍的事実を語るものとして、現代の科学観の中にすんなりと入るものである。

そうすれば、科学史的事実との整合性という、めんどろな事柄について悩まずに済む。なぜ、あえて科学史的事実を出したのか、理解に苦しむ。わたしは理科教育における「思

¹² ガリレイの思考実験は、『天文対話 上』岩波文庫、222-226頁にある。学生諸君が読むなら、朝永振一郎『物理学とは何だろうか』(岩波新書、1979年、上65-69頁)の方がわかりやすいだろう。ちなみに、同書下Ⅲ-3(51-150頁)では、エルゴード定理を使って分子運動論の基礎づけをしている。これは、先に「補注2. 科学の社会性」の「個人的に経験した真理変更」の項で述べたとおり、田崎晴明(『統計力学Ⅰ』培風館、2008年、98頁)によって「的を外した」考え方として批判されているものである。

考実験」の重要性を認めるからこそ、科学史と科学教育は厳格に区別されなければならないと考えるものである。

理科教育は、現代の科学観に立って、その内容を生徒に理解させることを任務とする。そこにおいて、科学史的事実がどういうものとして必要とされるかは、十分に注意しておく必要がある。単なるエピソードとして提示するのであれば、そういう位置づけでよいだろう。しかし今取り上げている事例は、ガリレイの名を挙げたばかりに科学史的事実として不正確なものになってしまった。

正確に言えば、本文の記述は不正確であり、かつ、それを訂正するかのように欄外で注を示す形となっている。厳しく批判すれば、本の作り方が雑で、立場の一貫性が不足している。どうして、こういうことになってしまったのか。教科書作成の現場について何も知らない者から見ると、多くの検定教科書は何年も作り込んできているはずだから、学習指導要領の改訂があろうとも、一貫性を欠くようなことになるとは思えないので不思議と言うしかない。

科学史は科学教育から厳格に区別されて存在すると考える立場からすると、理科教育においては、科学史的事実はむしろ除外されるべきである。理科教育において貫くべきことは、現代科学の理論的立場の一貫性である。そのために役立つなら、科学史上のエピソードを使ってもよいだろうが、その場合には理論の中に明確に位置づけられるようになっていなければならない。

「ガリレイの思考実験」で言えば、先にも述べたように、ガリレイの名は出さず、あるいはせいぜい注に示す程度に留めておいて、滑らかな斜面の上を小球を転がす思考実験について述べればよかったのである。ガリレイの名を出して、あたかも科学史上の事実であるかのような叙述をしてしまった点が誤りなのである。

科学史は、理科教育から離れて、それ自体として存立する。ガリレイについての科学史的位置づけは科学史の中できちんと行われるべき事柄である。その位置づけ自体は一般の歴史的事実についての位置づけと同様に、そんなに簡単に学説としてまとまるものでないと考えておいた方がよい。

ガリレイについての位置づけがすでに決まっているかのように思うのは、理科教師の思い上がりである。それは科学史における議論を知らないからである。科学史上の人物や学説の位置づけについては、理科教師は慎重であるべきである。科学上の歴史を扱う場合はくれぐれも注意してほしい。