

中高理科教育法（4）

関口 昌秀

補注7. 昔の気温を測る方法

ふつう気温は温度計で測る。しかし、温度計ができる前の昔の気温については、どうするのか。昔の気温を知る方法はいくつかある。

1000年程度前までなら、木の年輪から推計できる。木が生えていない海については、サンゴ礁からわかる。もっと古い時代については、ボーリングで地面に穴をあけて、その穴から昔の気温がわかる。この方法だと、場所によっては600万年前までわかる。以下は、伊藤公紀『地球温暖化一埋まってきたジグソーパズル』¹を主な参考とした。

温度計による測定

精度のよい温度計を使って測定するようになったのは、1800年頃のイギリスらしいが、全世界の気温についてデータベースが出てくるのは、1860年頃。当然、欧米中心である。GHCN (Global Historical Climatology Network) に登録されている現在の観測所は約6000地点、その内100年以上の記録があるのは約10%。これも欧米中心である。

ただし、この同じデータを基にしても、研究者によって地球平均気温について違ってくる。伊藤の本には、イギリスのジョーンズのグループがまとめたもの、アメリカのハンセンらのもの、そしてアメリカとロシアの合同グループのものデータのグラフが載せてある（42頁）。

1980年頃からは衛星を使って地球全体の温度をモニターする方法も開発された。測定原理は、酸素分子が出す電波の強さを測定する。この方法は、水蒸気や雲に邪魔されない利点がある。衛星による測定は、地上での測定と違って、1980年以降気温上昇を示さなかった。ICPPで使われているのは、地上の観測データである。地上と衛星でデータの差が大きかったのは、地表の観測データが少ない海域や南極大陸だった。この違いは今後の課題である。

歴史の記録文書

昔の気温について知る方法としては、まず文書がある。温度それ自体は知りえないが、暖かったか寒かったかについては書かれている。

¹ 伊藤公紀『地球温暖化一埋まってきたジグソーパズル』日本評論社、2003年。

日本の史料で、長野県の諏訪湖の凍結の日付を記録したのがある。諏訪神社の神主が室町幕府の命令で1400年頃から記録した。「御神渡り（おみわたり）」である。湖面の凍結が進むと、氷が砕けて盛り上がり、湖面に長い筋ができる。これを神様が渡ったとして、「御神渡り」と呼ぶ。その記録を見ると、1700年頃から御神渡りの初日の日付が遅くなっている。つまり、凍結の日が遅くなり、暖かくなってきたということである。

日本の史料も、ヨーロッパの史料と同様に、先に述べた「小氷河期」からの回復傾向を示す。御神渡りの資料は、赤祖父の本にそのデータのグラフ「1845年～1995年における世界各地の川、湖の凍結日と融解日」（赤祖父，84頁）が紹介されている。このような文書記録からも気温の変化は推測できる。

木の年輪

木の年輪からは次のようにする。木は一般に気温が高い方が成長する。他に、二酸化炭素があれば成長する。これは光合成の仕組みからわかるだろう。降水量も関係する。また、木は若いときの方が成長が速く、歳を取ると遅くなる。だから、年輪は中心部が広く、外側ほど狭くなる。これらの多数の要因を補正して、気温を推定する。

この補正方法の違い、そして集めた試料の場所の違いなどによって、推定温度は研究者の間で一致しないこともある。

木があるのは、温帯と冷帯に限られる。熱帯については、サンゴ礁を使う。

サンゴにも年輪に似たものができる。「サンゴの骨格の同位体分析」である。空気中の酸素には、酸素16だけでなく、わずかに酸素18もある。サンゴは炭酸カルシウムの骨格をつくる時に、水を必要とする。水の分子には、酸素18を含むものもある。酸素18を含んだ水分子は重い。したがって、沸点が高く、蒸発しにくい。水温が低いほど、この差が大きくなる。つまり、海水温が低くなるほど、酸素18が入っている水が多くなる。そういう理由で、年輪に似た縞模様がサンゴにできる。

ボアホール

木の年輪で測定できるのは、1000年程度である。それより昔については、ボアホールを使う。地質のボーリング調査をするときに開いた穴を、ボアホールという。その穴の壁に昔の気温が残っている。地表で気温が変化すると、その変化が熱伝導で地下深くまで伝わるので、穴の壁の温度分布を測定すると、昔の地表の気温が逆算できる。

穴は陸地に掘る場合と氷の下に掘る場合がある。「グリーンランドの氷床ボアホールのデータ」（伊藤，60頁）を見ると、1000年頃の中世温暖期もわかれば、5000年前から8000年前頃が今より暖かかったことがわかる。日本では、縄文時代に「縄文海進」というのがあって、現在より海面が3～5mほど上がっていた。この事実と、データは整合している。

氷床コア

ボアホールでなく、ボーリングで取り出した氷床コアの方を分析することもできる。2000mも掘ると15万年前まで昔の氷がある。氷の中には二酸化炭素が含まれているから、その濃度もわかる。「南極バーストック基地の氷床コアの分析による過去16万年の気温と二酸化炭素濃度」（64頁）のデータを見ると、気温と二酸化炭素濃度が激しく変化している

こと、そして両者の変化のパターンが同じになっていることがわかる。

この相関を、二酸化炭素の温室効果の証拠と考えるかということ、そうではない。「今では気温の方が初めに变化して、後から二酸化炭素やメタンの濃度が変わったという結論になっている」(65頁)、と伊藤は紹介している。

別のデータ、グリーンランド氷床コアを分析することによって、もっと細かい変化までわかる。10年間で気温が数度変化したこともある(64～65頁)。

海底に積もったプランクトンの解析

南極の氷床コアは岩盤まで掘っているのもそれ以上深く掘れない。海底ならそれより深く掘れるから、もっと昔までわかる。海底に積もったプランクトンを解析する。プランクトンの殻が、サンゴと同様に炭酸カルシウムできていれば、同じ同位体分析ができる。それを使うと600万年前の気温変化が推計できる。

もちろん測定するのは、気温ではなく、酸素18の濃度である。その結果を見ると、いくつもの気温変化の周期があることがわかる。2万4千年、4万1千年、そして10万年周期である(66～67頁)。

ミランコビッチサイクル

これらは「ミランコビッチサイクル」と呼ばれている。ユーゴスラビアのミランコビッチが1920年頃提唱した。太陽と地球の位置関係の変化によるという。

約10万年の周期に対応するのは、地球の公転軌道の離心率の変化である。地球の楕円軌道の「つぶれ具合」が周期的に変化することである。

4万1千年周期は、地軸の傾きが22度から24.5度へと変化する周期である。

2万4千年周期は、地軸の歳差運動(みそすり運動)の周期である。歳差運動というのは、コマが回っているときコマの軸(回転軸)に少し力を加えると軸が斜めになった状態でコマが回転するようになる。それをよく見ると、斜めになった軸がゆっくりと回転するのがわかる。この回転軸のゆっくりした回転が歳差運動である。地球の場合、地軸がコマの回転軸に対応する。地軸は斜めに24.5度ほど傾いているから、その軸が歳差運動をするわけである。

念のために言うと、現在の地軸の歳差運動は2万6千年周期というのが正しい。したがって、海底堆積物の酸素18の分析結果の2万4千年とはずれている。

自然変動による地球の気温の変化

地球の気温は温室効果ガスだけによって変化するのではない。自然変動がある。「氷河期」が存在したのだから、気温の自然変動が存在することは確かである。ただ、そのメカニズムについてはまだまだ未知の部分が多い。

温室効果ガスや、いま述べた地球と太陽の位置関係や地軸の傾きの変化や歳差運動の他に、地球の気温変化の要因として考えられるもので、大きなものは太陽から来るエネルギーが考えられる。

たとえば、太陽の黒点の運動である。太陽の活動は、地球の気温だけでなく、より広く気候全体に影響を与えていると考えられる。地球の磁場や大気電界などに影響を与えてい

る。また、月からの影響も考えられる。

自然変動の要因については、ほとんど未知である。

補注8. 物理と数学のちがい

方程式を立てて問題を解く

高校物理は、運動方程式に代表されるように、方程式を立てて問題を解いていくことが多い。方程式を解くことは数学の問題だから、物理と数学はどこがちがうのか、わからなくなるときがある。

物理において数学は道具として使用するというのが、正しい答えとなる。だが、どうしても物理すべてが数学のように見えてしまう。そういう経験が私にはあった。物理において「数学が道具である」ということは、一体どういうことなのか。その点について述べてみたい。

遠隔作用力としてのクーロン力

たとえば、物理と数学のちがいは、次のようなところがあると理解するのがよいだろう。クーロンの法則の式

$$F = kqQ/r^2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

がある。

高校で物理を習った諸君には周知のことだが、説明の順序として、まず(1)の式の意味を確認しておく。(1)式は、距離 r 離れた2つの帯電粒子 q と Q の間に F の力が働くことを示している。 k は定数である。この力 F を「クーロン力(ないし静電気力)」という。

万有引力の式($F = -GmM/r^2$)と同じ形になっている。使っている記号が異なるのは、単に慣例にしたがってのことであり、数式としては全く同じ形になる。万有引力もクーロン力とともに距離の2乗に反比例する力である。ちがいは、質量(m と M)が正の量であるのに対し、電気量(q と Q)には正負があることである。同符号の電気同士は反発し、異符号のとき引き合う。つまり、 $qQ > 0$ のとき F は反発力となり、 $qQ < 0$ のとき F は引力となる。万有引力の式に負号(マイナス)が付いているのは、万有引力が引力となるからである。

電気での単位は次のようになる。電気の単位で身近にあるのは、アンペア(A)である。国際単位系(SI系)はこれを基本単位とする。SI系での電気量はクーロン(C)という単位になる。1[A]の電流が1秒[s]間流れたときの電気量が1[C]である。つまり[C] = [As]である。クーロンの法則の式(1)の左辺 F は力だから、単位はニュートン(N)となる。右辺の定数 k を除いた部分の単位は[C²m⁻²]となる。両辺の単位は当然等しく、ニュートン(N)となるはずである。そのためには、右辺に[Nm²C⁻²]を掛ければよい。よって定数 k の単位は[Nm²C⁻²]となる。以上で単位は決まる。

クーロンの法則は、経験的な法則、つまり実験的に確認できる法則なので、定数 k はある値になる。それに関しては、電磁気学の単位系についてのややこしい話があるので、ここでは紹介しないでおく。興味ある諸君は大学の電磁気学の教科書を見てほしい。

中学・高校では、SI系（国際単位系）を使うことになっている。長さをメートル（m）、質量をキログラム（kg）、時間を秒（s）とする。そして電気の基本単位をアンペア（A）とする。MKSA単位である。だから、SI系をMKSA単位系ともいう。ここまでのことは理科教員として知っておいてほしい。

近接作用力として理解する電気的力

さて、クーロンの法則の式（1）を2つに分ける。一つは、

$$E = kQ/r^2 \dots\dots\dots (2)$$

もうひとつは、

$$F = qE \dots\dots\dots (3)$$

（2）と（3）を連立して、 E を消去すれば（1）の式が得られる。数学的にはそれだけのことだ。しかし、物理的には、（1）の式と、（2）（3）の式では、大きな違いがある。

（1）のクーロン力は「遠隔作用の立場」である。万有引力と同様、どれだけ離れた距離にあらうとも、2つの帯電粒子の間で力が作用する。「力が伝達する時間はどうなるのか」などという問いは発さない。そういう問いは、物理的でないのだ。ただ、現象として、事実として、電気量 q と Q を帯電した2つの粒子が、距離 r だけ離れたところにあると、（1）の式で表される力 F が、それぞれの粒子に作用する。そういう事実がある、と（1）の式は主張する。

（3）の式で表される力 F は、（1）とちがって、「近接作用の立場」で考えられた力となる。電気量 q の帯電粒子が「電場」 E の場所に置かれたとき、電気的な力 F が作用すると考えるのである。「電場」 E というものの中に帯電粒子 q が置かれたときに、（3）の力 F が作用する、とイメージする。「電場」という空間的な「歪み」があるとイメージして、それによって帯電粒子に力が働くと考えるのである。電場 E に帯電粒子 q が接触しているから、力 F が作用する。（3）の力 F は「接触力」なのである。日常世界で経験するのは、磁石を唯一の例外として、力はすべて接触したところで働く。このように、日常的経験に近いイメージで考えられた「接触力」を（3）式は表している。

（2）の式は、空間的歪みとしてイメージされる「電場」 E がどうなるかを示している。電気がある周りに電場がつくられ、それがどうなるかを表している。電気量 Q の帯電粒子があり、そこから距離 r 離れたところで、電場 E の大きさは電気量 Q に比例し、距離 r の2乗に反比例する。そして、電場の向きは、 $Q > 0$ のとき帯電粒子から出て行く向きとなり、 $Q < 0$ のとき帯電粒子に向かう向きとなる。

（3）の電気量 q も正負、どちらの場合もある。 $q > 0$ のとき、力 F は、電場 E の向きと同じになる。 $q < 0$ のときは、力は電場の向きと逆になる。こうすると、クーロンの法則の式の条件と同じになる。

式には物理的な意味がある

数学的に見れば、（2）と（3）の方程式は、（1）を導き出す連立方程式でしかない。しかし、（2）と（3）の2つの式は、物理的には、「電場」の存在を主張し、帯電粒子に

働く力 F を「近接作用の力」と考えるのである。

このように、式には物理的な意味がある。式の物理的な意味を考えると物理本来のことであり、立てた式を解くのが数学となる。だから、物理では、数学を道具として使う。それは、物理の法則を表現するための道具であるとともに、予想される解を求めるための道具（連立方程式）でもある。

補注9. 慣性座標系

ローレンツ力

「近接作用の立場」で考えるならば、電場があれば当然磁場もある。したがって、(3)の式は、次のように一般化される。

$$F = q(E + v \times B) \dots \dots \dots (4)$$

この力をふつう「ローレンツ力」という。 v は帯電粒子の速度である。 B は磁場を表すのだが、正式な名称は「磁束密度」と呼ばれるものである。 v と B は両方ともベクトルだが、それらの間にある「 \times 」(カケル)記号は、ベクトルの「外積」を表している。これは、ふつう3次元のベクトルでのみ定義される。²

ローレンツ力に対する磁場からの効果は、帯電粒子が動いているときにのみ出てくる。 $v = 0$ のときは、(4)式が(3)式に等しくなることは、すぐわかるだろう。

電磁場は座標系が異なると異なるものになる

今、静止座標系において、電場がゼロで、磁場（磁束密度） B だけがある中に、帯電粒子 q を置く。この粒子を静止座標系で観測すれば、粒子に作用するローレンツ力はゼロだから、粒子は静止しつづける。

これを、一定の速度 $-v$ で動く座標系から観測しよう。この座標系で観測すると、粒子は一定速度 v で動いている。したがって、この粒子に作用するローレンツ力は $F' = q(E' + v \times B')$ となる。粒子は等速度 v で動いているのだから、粒子に作用する合力はゼロのはず。したがって $F' = 0$ 。すると $E' + v \times B' = 0$ 。つまりこの座標系では、 $E' = -v \times B'$ となる電場 E' が観測される、ということになる。

静止座標系では電場ゼロだったが、等速度で動く座標系では電場 E' が観測されるのである。

上の議論で帯電粒子 q の電気量が両座標系で同じになると仮定したことに疑問が出るかもしれないが、ここで重要なのは q の値が変化しても $E' = -v \times B'$ となる電場 E' が観測されることである。この簡単な思考実験から、静止座標系で観測した電場と等速度運動する座標系で観測した電場とは異なる、という結論が導かれた。当然、電場だけでなく、磁場も異なって観測されると考えられるだろう。

このように、電場と磁場は、観測する座標系によって異なる値となるのである。

² 「外積」を一般化することも可能である。しかし、これはだいぶ高度な話となる。次を参照。Flanders, *Differential Forms with Applications to the Physical Sciences*, 1963.

実は、この議論には、等速度で運動する座標系と静止座標系とはともに「慣性座標系」として同格である、ということが前提されている。補注6で述べたように、慣性の法則が「慣性座標系の存在」を保証する。しかし、それは1つではない。いくつでも存在する。等速度運動する座標系はすべて、ニュートンの運動方程式が成立する「慣性座標系」となるのである。

補注10. 力の原因を生徒に問うときの注意

「原因」という言葉の意味の多様性

力の原因を生徒に問うときには、注意する必要がある。「原因」という言葉は、日常でよく使う言葉である。それだけに、意味が多様に広がっており、物理の授業で発問するときにはよく注意する必要がある。

作用反作用の法則を説明する場面において

物理において「原因」という言葉が使用される場面としてまず考えられるものとして、作用反作用の法則を説明する場面がある。物体AとBがあり、物体BがAに力を及ぼしている。その力を F_1 とすると、作用反作用の法則から、このとき物体AはBに対して力を及ぼす。その力を F_2 とすると、両者の間には、次の関係がある。

$$F_1 = -F_2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

式(1)の関係は、作用 F_1 と反作用 F_2 は、大きさが等しく、向きが反対になっている、ということを表している。これが作用反作用の法則の内容である。

このとき、「Aに作用する力 F_1 の原因はBにある」ということができる。「原因」という言葉の使い方の1つはこのようなものである。

F_1 と F_2 が、たとえば、万有引力のときを考えてみよう。すると、 F_1 は

$$F_1 = -Gm_1m_2/r^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

と表すことができる。質量 m_1 の物体Aと質量 m_2 の物体Bが距離 r 離れたところにあるとき、物体Aに働く万有引力が F_1 である。このとき、「Aに作用する万有引力 F_1 の原因は物体Bにある」と言うことができる。

式(2)の右辺は m_1 と m_2 が対称である。つまり物体AとBが対称である。だから、式(2)を見ただけでは、Aに作用する力 F_1 の原因がBだということは、わからない。それがわかるのは、AとBの間に作用する力 F_1 と F_2 が作用反作用の関係にあることが前もってわかっているからである。つまり、式(1)を知っているからである。

式(2)は、力の大きさ(と向き)が両者の質量と距離に関係することを表している。そこに作用反作用の法則を適用して、 m_1 に作用する力の原因は質量 m_2 にあり、逆に m_2 に働く力の原因は m_1 にある、ということ、わたしたちは知るのである。

質量間で引力が作用する「原因」を問うことは物理学的な問いではない

「原因」という言葉の使い方としては、別の言い方もある。2つの質量の間に力が作用

する「原因」、あるいは「理由」は何か、という問い方である。

万有引力の例でいえば、なぜ万有引力という力が存在するのか、という問いである。万有引力が存在する理由の問いである。これは「万有引力の本性的問題」と言われる。このときにも、わたしたちは「原因」という言葉を使って、万有引力が存在する原因は何か、と問いを表現することがある。

質量をもった2つの物体が引き合う、という現象を、私たちが日常で経験することはない。隣に立つ友人に引かれる感覚を、私たちが経験することは絶対にない。だから、質量同士が引き合うと言われてみても、納得いかない。万有引力というものは、そういう点では、不思議な力である。そういうこともあり、ガリレイからニュートンの時代にかけて、歴史的に「発見された」わけである。

そういう「新しく知られた力」であるということもあって、2つの質量の間に引力が作用する「原因」は何か、という問いが生じることがある。

しかし、この問いは物理学的な問いではない。どういう「原因」で質量同士は引き合うのかとか、質量同士の間に引力が作用する「理由」は何かという問いを、物理学は発しないのである。物理では、ただ、式(2)で表現される力の「現象」だけが確認される。その「事実」だけを認める。

物理学で問われるのは、距離の -2 乗に比例するのほどこまで正確か、というような問いである。正確には -2 乗ではなく、 $-2+h$ と仮定して、この誤差 h がどの程度になるかと問う。ちなみに、電気に関するクーロン力では、 h が10のマイナス9乗より小さいことがわかっている。

物理的な問いにならない「なぜ」もある

質量同士の間で「なぜ」引力が作用するか、という問いは物理学的な問いにはならない。しかし、初心者には、このことはわからない。

歴史的事実として、じつは、ニュートン以後のイギリスにおいて、「万有引力の原因は何か」という「万有引力の本性的問題」が取り上げられたことがある。そして結局のところ、どうなったかという、「万有引力という物理的な原理のよってきたるところは、神に帰す」、というようなことになってしまった。³

この歴史が示しているのは、質量同士の間に作用する万有引力の原理の「よってきたる原因」を問うという問い方は、科学的な問いとはならなかったということである。このように、物理的な問いとはある限定された問いであって、無制限に何事についても「なぜ」と問いかけることではない。

何が物理的な問いとなるか。この点に注意しなくてはいけない。だが、これは、理論的に物理学を理解しようとするときに出現してくる問いであり、前もって何が物理理論として意味があり意味がないのかを見分けることは難しい。さきほど述べたイギリスの事例は、そういうことを語っている。

科学の特徴は、「観察」→「疑問」→「仮説」→「予測」→「実験」というプロセスであるといってきた。この特徴づけにしたがえば、(2)の万有引力の式は、ひとつの「仮説」

³ 村上陽一郎『近代科学と聖俗革命』新曜社、1976年、31-33頁。

である。そう理解するのがよい。だから、(2)の式で、「なぜ質量 m_1 と質量 m_2 の間で引力が働くのか」という問いは、出てくる余地がない。(2)を「仮説」として計算すると、「太陽の引力による惑星の運動が楕円軌道を描く」ことが「予測」される。そして、この予測値が現実に観測された惑星の運動に一致することが確認された。

高校時代の私は、17世紀のイギリス人と同様の疑問を持っていた。どうして質量間に引力が作用するのだろうか、と。しかし、残念ながら、上で説明したように、この問いは、物理学では問わないのである。高校時代の私と似た問いをもつ生徒に対しては、それが物理的な問いでないことを、物理の教員は指摘してほしい。

補注11. 単磁極は存在しない

磁気では必ずN極とS極がペアで登場する

磁石はN極とS極からなり、N極だけの磁石とか、S極だけの磁石というものは存在しない。ところが、電気の正負は片方だけで存在できる。正電気だけでも、負電気だけでも存在できる。実際、電子は負電気を帯びた粒子である。電気の正負が単独で存在できるのに対して、磁気は必ずNとSのペアで存在する。ここが、磁気と電気の大きな違いである。

N極だけ、あるいはS極だけで存在しないことを、簡単に「単磁極は存在しない」という。これは電磁気学の基本的な立場の1つとなっている。

力学の基本方程式としてニュートンの運動方程式があるように、電磁気学にも基本方程式がある。それはマクスウェルの方程式と呼ばれる。運動方程式はベクトル方程式が1つだけであるが、マクスウェルの方程式は4つのベクトル方程式の連立である。こちらの方が複雑で難しい。

マクスウェルの方程式の中に、“ $\text{div } B = 0$ ”という式がある。これが「磁気に関するガウスの法則」を示す。この式の右辺が0であることが、「単磁極が存在しないことを示している」⁴。

B は「磁束密度」であり、“ div ”という記号は「発散」という偏微分の形である。つまり、この式は、磁束密度の発散がつねに0になることを示している。それが磁気におけるガウスの法則の中身ということになる。簡単には、N極から出た磁力線がつねにS極へと入っていくことである。

ところが、プラスから出た電気力線はマイナスへ入っていかないことがあってもよい。プラスの電荷からは電気力線は出るだけである。

「電気に関するガウスの法則」を真空中で成り立つ式で示せば、“ $\text{div } E = \rho/\epsilon$ ”となる。ここで“ E ”は電場の強さを表し、“ ρ ”は電荷密度を表す。“ ϵ ”は「誘電率」と呼ばれ、物質の電氣的性質を表している。「磁気に関するガウスの法則」が“ $\text{div } B = 0$ ”となっていることは、電荷密度“ ρ ”に対応する磁荷密度が存在しないことを示している。

念のために言うておけば、一般の物質で成立する「電気に関するガウスの法則」は、真空中の場合より複雑となる。「電気に関するガウスの法則」は、ふつう“ $\text{div } D = \rho$ ”と表される。 D は「電束密度」あるいは「電気変位」といわれる量であり、電場の強さ E と

4 砂川重信『電磁気学』岩波書店、1977年、216頁。

の関係はふつう $D = \epsilon E$ の関係がある。ただし、誘電率 ϵ は一般の物質では定数とならない。ここが真空中と違う。詳しくは、大学の電磁気学の教科書を見てほしい。

磁気に関するクーロン力の問題性

今述べたように、磁荷なるものは、存在しない。ところが、高校の物理の中には、「磁気に関するクーロン力」を取り上げている教科書⁵もある。

「磁気に関するクーロン力」は高校の物理で教えられるべきものとして、学習指導要領に入っているわけではない。指導要領において「磁気に関して教えるべき内容」とされているのは、ア) 電流がつくる磁界、イ) 電流が磁界から受ける力（ローレンツ力を含む。）、ウ) 電磁誘導、エ) 電磁波の4つである。⁶

磁気に関するクーロン力 F は、次の式で表される。

$$F = -km_1m_2/r^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 m_1 と m_2 は2つの磁極の磁気量を表している。言い換えれば、磁荷である。 k は定数である。 r は2つの磁極の間の距離である。

仮に、 m_1 と m_2 が電気量（電荷）だとすれば、電気に関するクーロン力の式となる。電気と磁気で定数 k の値（と単位）は、当然異なるが、形式的には全く同じ形となる。だから、「クーロン力」という同じ名前が付いているわけである。しかし、さきにも述べたように、単磁極は存在しない。磁荷が存在しないとする立場からすると、(1) 式は不相当である。なぜなら、式 (1) の形は、磁気量（磁荷） m_1 と m_2 があたかも単磁極として存在するかのようになっているからである。

したがって、高校の教科書に「磁気に関するクーロンの法則」が出てきたとき、それを教えるには注意が必要である。

式 (1) は、歴史のある時に唱えられたものである。しかし、その式は単磁極の存在を仮定したものであり、これは現代の電磁気学の立場ではない。だから、その式は現代では意味がない。使用している教科書に出てきてしまったら、教師としては無視するわけにもいかない。そのときは、(1) の式が提唱されたことは科学的に事実であるが、現代では意味がないから覚えなくてよい、と生徒に告げるのがよい。電磁気現象は複雑だから、できるだけすっきりさせるためには教えない方がよい。

ともかく、現代の電磁気学では、単磁極の存在は仮定しない。そのことをはっきり自覚して、生徒たちに教える必要がある。

複雑な電磁気現象をすっきりさせることを考える

高校の物理として、電磁気をどう教えるか。それは多様にあるだろうが、理論的にすっきりさせるためには、やはりマクスウェルの方程式の4つの法則（4つの式）にのっとる

5 たとえば、『改訂物理』東京書籍、2017年検定済、307頁に「磁気に関するクーロンの法則」の記述がある。

6 『高等学校学習指導要領』（2018（平成30）年告示）、科目「物理」の「内容、(3) 電気と磁気、(イ) 電流と磁界」参照。

のがよいのではないだろうか。

もちろんマクスウェルの方程式そのものは大学レベルだから、それをそのまま教えることはできない。しかし、その中には、式の形は大学のベクトル方程式として表現されていなくても、高校の物理において教えるものもある。だから、マクスウェルの方程式の4法則に近い形で教えるのが、すっきりするのではなかとと思う。

マクスウェルの4つの方程式を名前と呼ぶと、つぎの4つの法則になる。ア) 電気に関するガウスの法則、イ) 磁気に関するガウスの法則、ウ) アンペール・マクスウェルの法則、エ) ファラデーの電磁誘導の法則である。

この4つの法則のうち、最後のエ)の「電磁誘導の法則」は高校の物理で出てくる。

他のものも名称こそ出てこなくても、イ)の「磁気に関するガウスの法則」は単磁極が存在しないことであるから、高校でも実質的に出てくる。これは、具体的な形でイメージすれば、N極から出た磁力線が必ずS極へと入っていくことである。

ア)の「電気に関するガウスの法則」は、帯電粒子がその周りの空間に電場をつくることである。だから、たとえば、 $E = kQ/r^2$ とかの具体的な式を教えればよいのではないだろうか。

ウ)の「アンペール・マクスウェルの法則」だけは、高校では教えられない。これはレベルが高い。高校で教えるのは、「アンペールの法則」、電流が磁場をつくるという事実である。「アンペール・マクスウェルの法則」は、「変位電流」の存在が仮定されることである。「変位電流」については、大学の電磁気学で習う。

これらに加えて、電磁場が粒子に及ぼす力としてのローレンツ力を教える必要がある。ローレンツ力は近接作用の立場の力だから、補注8の(2)と(3)から(1)を導いたように、電場の式から遠隔作用力であるクーロン力を導ける。

以上、マクスウェルの方程式のすべてではないが、ほとんどが高校で教えられている。ただ、それらにまとまりをつけることは難しい。

しかし、まとまりの難しさは大学レベルでも同じである。実際、多くの電磁気学の教科書では、マクスウェルの4つの方程式を導くことが1つの目標にされている。たいてい上下2巻になる大学レベルの電磁気学入門の教科書は、上巻の最後にマクスウェルの4つの方程式を書いて整理して終わる。下巻でマクスウェルの方程式からさまざまな電磁気現象の問題を解いていくというプロセスになる。しかし、実際に方程式を解くのは電磁波の存在を示すことくらいである。マクスウェルの方程式からすべての電磁気現象を説明していくのは、レベルの高い教科書である。

大学レベルでも、電磁気現象の理解は、マクスウェルの4つの方程式を理解するだけでは不十分で、たとえば、電気回路については、高校で習う「キルヒホッフの法則」が基礎方程式となる。交流回路でも基礎方程式はそうなる。低周波の場合は「変位電流」が無視できる。そうすることによって、マクスウェルの方程式から「キルヒホッフの法則」が導かれる。これについては、大学の中級レベルの教科書に説明してある。⁷

このように、電磁気現象は複雑で、どうしても個々の現象ごとに理解していかないとけないことがある。

⁷ たとえば、前掲、砂川重信『電磁気学』、「第6章 準定常電流」(248頁以降)参照。

したがって、高校レベルで、まとまりのない部分が残るのはやむを得ない。変位電流は教えられないのだから、電気回路については、オームの法則とその拡張としてのキルヒホッフの法則が成立することを教えることになる。交流でも、日常で使用している50サイクルや60サイクル程度の低周波数では、変位電流が無視できるから、キルヒホッフの法則が高い近似で成り立つ。

指導要領にもある電磁波については、変位電流を扱わないのだからその発生は扱えない。電気の振動が電磁波を発生させるという結論だけ伝え、あとは、電磁波の「波」としての扱いをしていけばよいということになるだろう。

第8章 STS教育

科学の社会性とSTS教育

第2章の最後で述べたように、科学は社会と関係する。科学の成果である技術は、社会にプラス・マイナスの影響を与える。理科が学校で教えられているのは、その知識が社会に役立つからである。この章で扱う「STS教育」というのは、それに関係する。社会との関係でいえば、むしろ社会に及ぼすマイナスの方を意識してのことが多いというべきかもしれない。前もっていえば、STS教育は理科とは別の教科になる、と現在私は考えている。もちろん、理科と無関係ではない。

「STS教育」を簡単に言えば、科学が社会の中ではたす役割について考えよう、というような意味と理解するのがよい。「STS」は、「Science, Technology, & Society」の頭文字をとったものであり、科学技術が社会の中ではたしている役割や意味を研究することを指している。

科学技術が社会においてはたしている役割については評価が分かれる可能性がある。その理由により、それが理科教育に位置づくかは微妙となる。教科書に載っているのは、社会に役立つ科学技術だけであり、問題となるものは載せない傾向が高い。

載せない深い理由、科学的な理由もあるとわたしは考えている。社会に対する影響のメカニズムが科学的に十分解明されていない場合である。科学的に未知なものを、理科(=科学)の内容とはできない。さきに述べたように、地球温暖化問題は社会科ではふれられているが、理科ではふれていない。その理由の一つは、科学的なメカニズムが解明されていない点にあると私は考えている。[2021年検定の東京書籍『地学基礎』の「5編 地球に生きる私たち」においては、地球温暖化問題が触れられている(同書160頁)。ミランコヴィッチサイクルや小氷河期も出てくる。ここは、「地球規模の自然環境に関する資料に基づいて、地球環境の変化を見いだしてその仕組み理解するとともに、それらの現象と人間生活との関わりについて認識すること」、という学習指導要領の「地球環境の科学」の規定に対応する。これはSTS教育に近い。]

科学的に未知なものとは、科学の最先端ということでもある。だから、それを取り扱う場合は、総合的な学習の時間との連携を視野に入れて、生徒の調べ学習を中心にする、ということも考えられる。これだと理科の授業とはだいぶ違うことになるだろう。

教科としてのSTS教育 — 「演繹的思考」と「科学的説明」

さきに述べたように、典型的なSTS教育は、一つの「教科」として成立するものだと思う。実際、イギリスでは「科学と社会」という教科がいくつかの大学で入試科目となったことがある。⁸「科学と社会」という名称からみて、これが理科と違うことは想像できるだろう。

それがどんな教科か。そのすべてについてここで言うことは、あまりにも理科教育法としては深入りしすぎるので、理科と違うことを示す例を少し紹介しておこう。⁹

「科学と社会」で教えるとされた項目の一つに、「演繹的思考」と「科学的説明」との違いを理解するということがある。

「演繹的思考」は数学の特徴である。演繹とは、公理から定理を論理的に導くことである。「公理」とは「正しい真理」のことである。したがって、演繹的思考というのは、正しいとされる公理から、正しい論理を使って、つねに成立する正しい定理を導くことである。数学とは、そういうものである。

その典型は、ユークリッド幾何学である。君らが中学校で習った三角形の合同や相似、円に関する定理などは、ユークリッド幾何学の一部である。ユークリッド（エウクレイデス）が著したとされる『幾何学原論』は、簡単な公理から諸々の定理を論理的に導き出している。

ただし、君たちが、高校まで習ってきた数学は、そういう構成にはなっていない。そういう公理的な形で著わされた数学の本は、大学レベルの教科書でないとお目にかかれなない。教育的な配慮から、高校までの数学は十分に公理的な形になっていない。だから、数学の例を持ち出しても、演繹的思考というものの例が少しピンと来ないかもしれない。

中学校の合同でも、それをユークリッド幾何学の形に厳密に構成されたものとして理解するのはそんなに易しくない。君たちが物理でよく使う微分積分については、大学生用の教科書として、杉浦光夫『解析入門Ⅰ,Ⅱ』（東京大学出版会）を見るとよい。論理的に厳密に、微分積分を展開している。これを見れば、公理的な構成というものの感触が少しわかるだろう。

それに対して、「科学的説明」というのは、物理学などの自然科学における法則を指している。第2章で、「科学の特徴」として、「観察」→「疑問」→「仮説」→「予測」→「実験」というプロセスをあげた。「実験」をして「予測」がはずれた場合、「仮説」は間違っていたことになり、捨てられる。「実験」をして「予測」が当たった場合に、その前提となった「仮説」の正しさが証明される。

そして、「法則」とか「理論」というのは、「実験」によって検証されてきた「仮説」の中で、とくに適用範囲の広い一般性をもった説明のことである。それはたった1回の実験によって検証されたのではなく、何度も検証され続けたものである。科学者たちが、そういう形に「仮説」を「法則」とか「理論」にまで作り上げて、適用範囲を広くしてきた。

⁸ 小川正賢監修『科学・技術・社会（STS）を考える—シスコン・イン・スクール』東洋館出版社、1993年。「教師のための解説：STS教育とは何か—SISCON-in-Schools教師用指導書から（抜粋）」（同書182—196頁）参照。

⁹ 詳しくは、拙稿「総合学習と理科教育—STS教育をめぐる」（『神奈川大学心理・教育研究論集』第42号、2017年）を参照してほしい。

そういう「理論」を今君たちが見ているのである。

科学理論あるいは科学の法則といわれるものには、数学の定理のような「科学的真理の永続性」がない。これが「科学的説明」の特徴である。数学の定理は、未来永劫正しい。正しい公理から、正しい論理を使って導かれた定理の正しさは、永遠である。「演繹的思考」はつねに正しい真理を導く。それに対して、「科学的説明」には未来永劫正しいという保証はない。科学的真理は変更される可能性があるのである。

科学における真理変更

真理変更については、すでに補注2「科学の社会性」で指摘しておいた。2006年、それまで惑星だった冥王星が準惑星となった。これは、大きな真理変更だった。あまりこのようなことは起きないが、「科学的説明」では、このような真理変更が生じる可能性がある。

真理変更としては、理論の適用範囲の縮小化、適用範囲の制限というものもある。理論的にみると、こちらの方が真理変更としては大規模でかつ根本的である。代表的な例としては、ニュートン力学の適用範囲の制限がある。

ニュートン力学はきわめて高い確実性をもっている。しかし、20世紀初頭に、それまですべての範囲において成立すると考えられていたニュートン力学が、光速近くでは成立せず、またミクロの世界においても成立しないことがわかった。

光速は絶対速度であり、それを超える速度はない。そのように考えるアインシュタインがつくった特殊相対性理論が今日では正しいとされている。光速に近い運動を議論するときには、特殊相対性理論を適用しないと正しい予想とならないのである。

原子や分子レベルの大きさでは、運動する粒子の位置と速度を同時に測定することができない。これを「不確定性原理」という。わたしたちの日常生活に適用するニュートン力学では、当然のことであるが、運動する粒子の位置と速度は同時に測定できる。「不確定性原理」がなぜ正しいのかの方が、君たちには疑問だろう。しかし、「不確定性原理」を基本的原理の1つとして含んでいる量子力学が正しい理論とされている。原子の世界では、量子力学の予測が正しい結果を与え、ニュートン力学は正しくならない。

このように、ニュートン力学は、速度が光速に比べて遅く、原子よりはるかに大きな世界にのみ適用可能な理論となった。ただし、補足すると、その範囲での「仮説」としての「予測」の確実性はきわめて高い。ロケットを飛ばし、人工衛星の軌道を制御するのは、基本的にはニュートン力学に基づいている。もちろん実際の計算は、コンピュータを使わないとできない複雑な計算になるが、理論の基礎はニュートン力学といってよい。

英国における教科「科学と社会」

英国における教科「科学と社会」において、教えるとされている項目に「民主的決定への市民の参加」というものがある。

たとえば、「科学と社会」向けに作成されたある教科書の中では、「原子力施設から放射性物質が漏れたとき、専門家の意見が分かれる」という問題を扱っている。¹⁰ そのとき、

¹⁰ 前掲、『科学・技術・社会を考える』、「第2単元 科学は本当に確実なものだろうか—科学の本性」（同書51—90頁）。

一市民として、どのように行動するか。このような問題を考えるのである。

ここに正解はあるかという点、ふつうの意味での正解はない。人によって、考えは異なる。専門家で意見が分かれるのだから、どのように行動するか、ということに簡単に答えを出すことはできない。誰でも悩むことである。

一市民としてすべきことは、できるだけ多くの専門家の意見を聞き、自分たちで調べていくしかないだろう。それを、学校教育でもするわけである。「民主的決定への市民の参加」というのは、イギリスでは原発の稼働を停止させる住民投票とかの制度があり、最後はそういう形で市民が民主的決定へ参加する、ということを示している。

ここで出された「民主的決定への市民の参加」とか、あるいは「原発からの放射性物質漏洩」というテーマは、社会問題といってもよい。それが現代的な課題といわれるものの中心である。STS教育としての「科学と社会」は、そういう現代的な課題を取り上げるという性格を持っている。

こういう視点は、理科よりも、社会科に近いといった方がよいかもしれない。このように、「科学と社会」は理科とはだいぶ異なった教科である。これがSTS教育の典型的な形だと私は考えている。

今日求められる科学的リテラシー

今STS教育は理科とは性格が違うといった。しかし、理科で育成されるべき科学的リテラシー（科学的な能力）という観点から考えると、共通するものがある。PISAは、理科教育で育成されるべき科学的リテラシーについて、次のように述べている。

PISAというのは、先進諸国の経済組織であるOECDが3年ごとに実施している高校1年生を対象とした学力調査のことである。科学的リテラシーについては4項目にまとめられ、その中の1項目として次のものがある。

「思慮深い市民として、科学的な考えをもち、科学が関連する諸問題に、自ら進んで関わること」¹¹

「思慮深い市民 (reflective citizen)」として「科学が関連する諸問題 (science-related-issues)」に自ら進んで関わること、それが科学的リテラシーなのである。「科学が関連する諸問題に自ら進んで関わる」のだから、放射性物質漏洩をした原発を停止ないし廃棄するために、「市民参加として住民投票をする」という行動をすることは、PISAの科学的リテラシーの趣旨にかなっているわけである。

PISAでは、このように理科で育成されるべき科学的リテラシーを、STS教育の目的と重なる部分にまで広げてとらえている。今世界的に求められている理科教育というのは、こういうものである。

市民教育の一環として、理科教育を考える限り、科学的リテラシーの内容をこのように考えることは、理の当然である。今後のわが国における理科教育を考えると、STS教育的なものは大いに必要性がある、ということにもなるわけである。

¹¹ 国立教育政策研究所編『生きるための知識・技能 OECD生徒の学習到達度調査 (PISA) 2012年調査結果報告書』明石書店。PISAの科学的リテラシーの性格について、詳しくは、拙稿「PISA=DeCeCoにおける科学的リテラシーの考え方」『神奈川大学心理・教育研究論集』第37号、2015年、45-52頁参照。