Literacy in Sicence Orientated College
リテラシーとしての大学教育

Masayoshi Kiguchi
RIST
and
Yasushi Kondo
Department of Physics
Kinki University
3-4-1 Kowakae, Higashi Osaka, Osaka, Japan

平成 21 年 9 月 23 日

概 要

Almost all students, today, enter an engineering division or a scientific one in college without leaning a scientific way of thinking, called scientific literacy. These students do not know how to actively pursue scientific issues, so that it is hard to give them professional trainings. It should be highly required for them to acquire scientific literacy but we cannot find commonly accepted one. We here propose the literacy that should be attained by the students before graduation.

今日, 大学の工学系, 科学系の学部のほとんどの学生は初等教育で科学的な考え方（リテラシー）を学ばずに入学してくる。学生は科学的に物ごとを追求する方法を知らず, よって専門教育に破綻を来している。このような学生に最も重要なことは, 科学的リテラシーを習得させることであるはずであるが, リテラシーに関して共通の意見を見いだすことができない。この小論ではリテラシーとして理工系の学生が卒業までに身につけるべき科学的な考え方について考察する。

Key Words: scientific literacy

1 序論

工学系および自然科学系の学生には大学の初年度に物理学が必修として課されることがほとんどである。これは何故であろうか? 特に主として力学が取り上げられるのは何故であろうか? 筆者は

> 非常に基本的な事柄から論理と実験的事実を積み重ねていくことにより力学体系を学生自ら（再）構築し, その過程で科学的な考え方（リテラシー）を身につけさせる

ことを意図しているためだと考えている。ここで言う力学体系とは通常の力学の教科書にあるような, 以下のような項目（**運動の記述, 運動の法則, 運動とエネルギー, 惑星の運動, 角運動量, 質点系の力学, 剛体の力学, 相対運動**）で閉じる学問体系である。ここでは**運動をどのように取り扱うか**から始めて, **できるだけ少数の原理のみ**を導入して, **実験事実**に基づいた**推論による概念の拡張**によって, 剛体（変形を無視できる物体, すなわち通常の物体）の運動を取り扱う手法まで体系化されている。

大学の物理の学習に戸惑う学生が多いのは当然であろう。一人の高校の物理教員が

> 高校物理は暗記科目である。多くの問題をこなして, 問題と適用可能な公式のパターンを覚えることが高校物理の学習である。

と言った言葉から分かるように, 高校物理には少数の基本的な法則から学問体系を構成する（科学的

な思考方法を学ぶ）という考え方が存在しない[1]。特に, 高校での受験教育で忘れられている最悪の点は, 物理学が実験科学であることである。物理学は, 入試問題を解くような単に仮想的な状況に公式を適用することではない。物理学とは, 実際の現象から操作可能な[2]概念 [1] を構成して**抽象**し, その抽象化された概念を使って**論理的な推論**を行ない, その推論の結果得られた結論を出発点の現象を越えて様々な現象に適用する (**具象化**) という一連の論理的な思考を行なうことである。この抽象化, 論理的推論, 具象化のサイクルこそが**科学的な考え方（リテラシー）**である。簡単に言えば「一を聞いて十を知る」ことができるための思考パターンが科学的な考え方である。そして, 物理学では基礎的な学習段階でもそのサイクルは顕著に表れべきものであり, 大学の初年度の学生に物理学が必修として課されてきたのである。

しかしながら, 近年の学生は科学的リテラシーとしての物理学に大学で始めて遭遇しとまどっているし[3], 大学の専門学校化 [2] に現れているように大学教育でもこのような科学的思考のための教育が近年軽視されてきた。現在の大学での初等物理教育の混迷は, 科学的リテラシーを身につけさせるという本来の目的を忘れ, また科学的リテラシーとして何が必要かの共通認識がなく, 最小限の能力（科学的リテラシー）を説得性のあるレベルで提示できていないためである。

大学における科学的リテラシー軽視の流れに反して, 中央教育審議会（文部科学相の諮問機関）の大学分科会小委員会は 2007 年に, 大学卒業までに学生が最低限身に着けなければならない能力を「学士力（仮称）」と定義し, 国として具体的に示す素案をまとめた。そこには「論理的な思考力」が挙げられている [3]。また, 経済産業省は「社会人基礎力 [4]」を提唱し, その中で「考え抜く力」の重要性を指摘している。これら「論理的な思考力」と「考え抜く力」は, 「科学的な考え方」の別の表現と考えることができる。

本稿では, 大学において科学的リテラシーを教育するための物理学ミニマムを見出す出発点を探ることとする。第 2 節では, リテラシーの典型としての数の取扱いについて論じ, リテラシーとして教えられているものの背後に重要な考え方があることを見る。第 3 節では, 小学校から学びながら大学生になっても理解が不十分な量の取扱いについて論じる。第 4 節では, 物理学の根幹である実験について論じる。第 5 節では, 物理学を物理学たらしめている測定について論じる。第 6 節では物理と数学について論じる。第 7 節では工学と科学の関係について論じる。

2　数の取扱い

ここでは小学生低学年でも知っている数の中に潜んでいる深い考え方, 抽象化と具象化, について考える。基本的なこと（一見, 易しい思えること）であればあるほど, 奥深いものがある。

2.1　数えること

数を数えることの発見は, 人類史上最大の発見の一つである。今では誰でもできる**数える**という操作には非常に深い抽象化と具象化の思想が隠れている。従って, 小学 1 年生がとまどうことがあるのも本当は当然である。

古代の羊飼いも, 羊が迷子になっていないか知る必要があった。最初に行われたと考えられていることは, 牧場に羊を出すときに羊が一匹柵から出る度に石をひとつ袋に入れることであると考えられている。牧場から柵に連れ戻す時には, 羊が柵に一匹入る度に袋から石を取り出して, 羊が全部入ったときに袋の中の石が全部なくなれば良い。このとき, 石ではなく, 木の棒は使えるだろうか? ある羊が出るときに袋に入れた石を別の羊が帰ってきたときに出しているが, 良いのか? 石を使って羊がちゃんと戻ってきているか調べるためだけでも, 以上のような深い抽象化（一対一対応）が行われいる。

数えるという操作にはさらに深い抽象化がある。

[1]大学でも各種資格の取得のために, 高校物理と同じような考え方で公式の使用法のノウハウの伝授を求められることが多々ある点に注意しておこう。高校物理の教科書には, なんとか物理学の考え方を伝えようとする著者たちの努力の跡が認められるが, 現実の教育現場では, その努力が無視されている。物理を修得していない学生を対象とせざるをえない大学教育では, 大学受験予備校教育で達成される学力を与えようとして, 物理の考え方に反する教育がなされようとしている。

[2]実験可能であることを意味する

[3]学生のとまどいの原因の一つは, 高校で物理学を履修していないこともある。高校物理 I も履修していない。しかしながら, 高校での物理学習の有無よりも, 暗記ばかりで科学的な考え方に触れてこなかったことの方が問題である。

1. 一対一対応はひとつではない
石を使っても良いし, 木の棒を使ってもよい。また, 羊でなくても牛に対して行っても良い。
2. その働きをきちんと分析し抽象化する**範疇化**
自然数の体系を考える。
3. その上で壮大な体系をなす操作可能な具体物を作る**脱範疇化**
自然数をどのように表して（シンボル化）, そのシンボル（数字）に対してどのような操作を行うか[4]を決める

必要がある。

2.2 足し算と引き算

足し算と引き算も難しい抽象化の成果である。2007 年に「エジソンの母」という TV 番組があった。主人公は「素朴な疑問を大人に投げかける小学 1 年生の男の子」である。小学校で

$$1+1=2$$

を勉強するのだが, 彼には何故 2 になるのか分からない。教師はみかん 1 個と 1 個で 2 個のみかんになるから, $1+1=2$ だと説明するが, 彼はみかんの皮を向いてみかんの房を数えると $1+1$ は 2 よりも大きな数になると主張する。彼の主張の問題点はどこにあるか分かるだろうか?

子供は小学校に入学する前に, すでに, 小さな正数の足算, 引算を知っている。子供は既に知っていることを基礎にして, 新しいこと（計算）を学んでいく。子供が足算, 引算, 掛け算, 割り算の能力を獲得する上での障害は, 子供が先生の言ったことを, それまでの自分の経験に基づいて, 自分なりの解釈を行い, 実行することである。子供は自分の確信（ルール）に基づいて間違えるが, それを見ている先生は子供が作りだしたルールが分からず, 子供の思い込みを指摘できないことがある。子供は子供で, 自分の答えをつねに否定されるので, 絶望感を抱く。先生が間違いを指摘できなければ, 子供には先生がそのルールを認めているのに, ×をつけるように思われる。

以下のような例があった。

$$1+1=2$$

は覚えている男の子に,

$$1+1+1=$$

の計算をさせてみると, 5 だと答えた。よく話を聞いてみると, + という記号だけで 1 を加えているようである。すなわち, 彼にとって

$$1+1+1 \equiv 1+\underbrace{1}_{+\text{記号}}+1+\underbrace{1}_{+\text{記号}}+1$$

だったのである。大人から見ると上の式と $1+1=2$ との整合性はないが, 彼は自分のルールを正しいと主張した。

「エジソンの母」の例に戻ると, 主人公の男の子は足し算におけるルール（抽象化）とみかんの例（具象化）の調整がうまくできていないことになる。多くの大人たちは本来行うべき抽象化と具象化の調整を放棄しているから, 彼が持ったような疑問を持たないのである。大人は自ら考えることを放棄しているわけで, 科学的な態度とは言えない。

しかしながら, 適用範囲を明確に理解して足し算, 引き算を行う能力を養うことは非常に重要である。小学校低学年で学ぶ算数は人類が獲得した珠玉の成果であり, 人類に与えられた恩寵と言ってもよい。私たちは足算, 引算, 掛け算, 割算などは何も考えずに反射的に行えなければならない。そして, 計算を行う時にいろいろな方法で検算することが重要である。そして, 同じ答えがでないことき, 何かがおかしいと思わないと行けない。数に対する感覚である。このような感覚を持つためには暗算が有効である。

2.3 掛け算と足し算の働き

なぜ物理学の公式が因子の掛け算で表わされているのだろうか。これには掛け算という計算の持つ働きが関係している。その働きが一番よく現れるのは確率である。以下にその働きについて考えよう。

独立な試行の確率について次の定理がある。

二つの試行 T_1, T_2 が独立である時, T_1 で事象 A が起こり, T_2 で事象 B が起こ

[4]数えるという段階では+1 と-1 の操作だけ

る確率は, それぞれの事象の起こる確率 $P(\mathrm{A})$ と $P(\mathrm{B})$ の積

$$P(\mathrm{A}) \cdot P(\mathrm{B})$$

で与えられる。

物理学の公式が掛け算で表されているのは, それぞれの因子が互いに無関係であること, 独立であることを意味している。無関係な因子が一つのことを決めているという**思想**が公式には含まれている。言い替えれば公式を掛け算で表すということは**現象を分析**することを意味している。

物理学, 中でも力学は, 現象を時間の長さ, 空間的な距離, そして物質の量と言う三つの独立な因子に支配されていると見なす。したがって力学の公式はこれら三つの因子の積になる

$$F = ma$$

は, 確かに時間, 長さ, 質量の 3 要素から成り立っている。電気・磁気現象では, さらに電気の量という因子が入る。

次に足し算の働きを考えよう。物理の公式は一般法則を表している。もし一般法則が足算で表されていたら, 全体がどうなっているかが理解できていることになる。足算ができるためには何を全体と考えるかを限定する必要がある。理論が足算で表されるということは, 同じものを積み重ねていった帰納的考察の結論が出たことを表す。**掛け算は因子への分析, 足算は因子の帰納**と言える。

2.4 冪乗の働き

物の大きさによらず成立する関係は冪関数 x^n で表される。たとえば, 物の長さが x なら, 面積は x^2 で変化し, 体積は x^3 で変化する。これは顕微鏡で覗かなければならない小さいものでも, 望遠鏡で覗かなければならない大きなものでも同じである。このように, 冪法則はある現象が起こるメカニズム（原理）が広い値の範囲で同じ場合に現れる。

例として, 地震の起こる回数 n と地震のマグニチュード M の間には, マグニチュード M が $3 < M < 8$ で $\log n = a - bM$, $b = 0.9 \sim 1$ の関係がある (グーテンベルグ - リヒター則) [5]。地震のマグニチュードは地震のエネルギー (断層に働く力 × 断層のずれ E の対数なので, 冪法則 $n \propto E^{-b}$ が成り立っている。経済学ではパレートの法則が知られていいる。売り上げの 80% は 20%の社員が上げている, 80:20 の法則である。これもグーテンベルグ-リヒターと同じく逆 1 乗則である。

冪乗は全く別の場合にも現れる。例えば, ものの対応の仕方を考える時である。N 個の要素 $S = \{1, 2, \ldots, N\}$ からなる集合をの部分集合の数を考えてみよう。$N = 3$ の場合, 部分集合が作る集合は $P = \{\{\}, \{1\}\{2\}\{3\}\{1, 2\}\{2, 3\}\{3, 1\}\{1, 2, 3\}\}$ の 8 個, つまり 2^N 個ある。これは S の N 個の要素から, $X = \{$ 含む, 含まない $\}$ の 2 個の要素への対応の数である。同様にして, N 個の要素を持つ集合 S から M 個の要素を持つ集合 X の上への対応の数は M^N である。

以上まとめると,

- 和は 2 つの同種の物の間の関係
- 積は 2 つの独立なものの間の関係
- 冪は 2 つのものの間にある色々な関数間の関係

を表している。

2.5 比と分数

比を考えるということは二つの変化するものを同時に考えて一つの数にまとめる, つまり一つの概念を構成することであり, 非常に難しい。ある心理学者が小学校低学年の児童が天秤の釣り合いをどう予測するかを研究している。その結果によれば子供はまず重りの数だけに注目して予測する, 重りの数が同じ時, 始めて天秤の腕の長さに目を向ける。重りの数と腕の長さを同時に考えなければならないことに思い至る子供はほとんどいないことが明らかになっている。

二つの変化するものを一つにまとめるというパターンは, 力学の $F = ma$ でも同じである。それまで, ガリレオもホイヘンスもニュートンも力学

[5] $M > 8$ では例が少なく, $M < 3$ では観測が難しいだけで, この法則はさらに広い範囲でなりたっていると考えられている。

[6] 運動方程式を分析すると, 力という概念が不明確になり, 力をどのように測定すれば良いか分からなくなる。したがって, 物理学者は $F = ma$ をそのまま使うことはないが, $F = ma$ は物理学者にとって絶対に手放せない思考のパターンになっている。

は知っていたが, それらは幾何学の証明として記述されており, 使いにくいものであった。それをオイラーが $F = ma$ と概念構成した後, 急激に力学の応用範囲が拡がった[6]。

3　量の取扱い

量の取扱いは小学校高学年で詳しく学んでいる。とくに速度は小学校 6 年の重要な単元であるにも関わらず, 多くの大学生が速度の概念を理解していない。加速度となると, ほとんどの学生の理解の限度を越えているようだ。また, 学生は単位の変換にも困難を感じている。物理学での単位の変換には物理法則の理解が必要になり, 物理法則の理解が不十分なためであろう。

確かに量の概念は本質的に難しいものである。小学校段階ではそうするものだと頭から覚え込むだけで, 水道方式, かけわり算など, いろいろな教育方式が工夫されていても, 多くの生徒が理解不足に陥ることには仕方がない面がある。そのため, 初等教育では量の取り扱いのために多くの時間を割いている。中学校では一次関数の取り扱いで変数記号の使いかたやグラフによって, **変化する量**という概念を学ぶ。高校になれば対数や浮動小数点表示を学ぶことによって, **大きく変化する量の表し方**を学ぶ。そして, 最終的に高校の微分学で量の測定に伴う**誤差**を学び, 積分学, 確率論で**偶然誤差の取り扱いかた**を学ぶ。適切な量の取り扱いのためには, これらの理解がすべて必要でありなかなか難しい。

3.1　単位

ものごとを数量的に考える場合, 考察対象をまず抽象化し, 抽象化した世界で計算を行い, 最後に計算結果を現実の世界に戻す。量を数量的に抽象化するばあい, ある量が単位量の何倍かと考えて, 量を数値化する。

たとえば, 高校の物理では, 質量は kg で測り, 加速度は $\mathrm{m\,s^{-2}}$ で測ると決まっており, 力は N で測ると決まっている。そこで, 質量が 2.5 kg なら, それを抽象化して $m = 2.5$ として, 単位 kg を使って抽象化したという意味で [kg] を添える。加速度が 3.0 $\mathrm{m\,s^{-2}}$ なら $a = 3.0$ と抽象化する。その上で, 力を単位 N で抽象化したとき, その数値を F とすると, 数値 F, a, m の間には関係 $F = ma$ が成り立っていることが実験的に知られているから, $F = 2.5 \times 3.0 = 7.5$ と計算し, 力は単位 N で測るものだから力は 7.5 N であると抽象化された算数の世界から物理の答えへ戻す。

この考えかたは間違っているわけではないが, 数値化の段階で物理法則の考察が捨象されているために, 物理学としては好ましくない。ここでは $F = ma$ は物理法則ではなく, たんなる数値的な実験結果が示す現象論的関係式と見なさざるを得ない。物理法則への考察を捨象してしまうと, 与えられた現象論的な公式のたんなる使いかたの習得になってしまい, もはや物理学とは言えない。物理法則は単位などによらずに $F = ma$ である。

量は単位を使わなければ数値化できないが, 量は単位によらない意味を持っている。その意味の裏には体積は長さの 3 乗に比例するといった単位によらないスケールの法則やその他の物理的な法則が隠れている。比を計算する場合にも, そのような量に対する理解は重要になる。単なる数値ではどちらを分母にするか, 分子にするかはよく分からなくなってしまう。

3.2　変数記号の使い方

記号は何かを指す代名詞である。記号が指すものが話の途中で変わるようなことがあってはならない。中でも物理量を表す記号は単位が変わっても同じものを指すべきである。記号は数値のような単位の選びかたによって変わるものを指していてはならない。たとえば速度を表す記号は数値ではなく単位も含んだものにするべきである。たとえば

$$v = 60\,\mathrm{km/h} = 60 \times 1000\,\mathrm{m}/3600\,\mathrm{s} = 16.6\,\mathrm{m/s}$$

これは記号 v が同じものを指しているから等号を用いることが許される。ただ単に数値だけを見れば, 明らかに数値自体は異なっている。

このような単位が入った量には, 数学を適用できない。物理法則は単位などには依らないから, 物理公式に入る量は単位がない量のはずである。たとえば, 波の伝搬を表す式

$$y = y_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

において, $\sin$ の括弧の中（引数と言う）は単位のない量になっている。時間を表す記号 t には時間

の単位が入っており, 角振動数 ω には時間の逆数の単位が入っていて, 単位は打ち消しあっている。波数 k と位置 r についても同じである。ここでは波数と位置については内積によって 3 次元空間内の伝搬方向に依らないことまで読み取ることができる。また, y_0 は $\sin$ が単位を持たない量であるので, 現実の単位のある量に戻すために使われている。

距離と時間の関係をグラフにする場合を考えよう。グラフの縦軸, 横軸は数値である必要がある。つまり, 単位を意識しないとグラフは描けない。横軸を時間としたとき, 数値化するための基準の値 t_0 を選ばないといけない。そうすれば t/t_0 はたんなる数値になり, グラフを描くことができる。縦軸も同様である。このようにグラフを描く時, どのようにして単位のない数値に抽象化するべきか判断しないといけない。このためには, 法則を理解している必要がある。

3.3 対数

対数関数は

$$\log_e x = \int_1^x \frac{dy(x)}{y(x)}$$

によって定義されている。$y(x)$ は y が x の関数であることを意味する。x は単位を持たない単なる数値であり, $\frac{dy}{y}$ は分子, 分母が単位を持つ量であっても, 単位は打ち消しあうことを表している。また $\frac{dy}{y}$ は $y=0$ では意味がなくなり, $x>0$ の範囲で考えなければならないことが読み取れる。対数関数は正の量をスケールに関係なく考察するための関数である。

よく経済関係のグラフで正の量の変化を表す時, 起点 0 が必要なので起点は表してあるが, 縦軸の途中に波線 $\approx$ を入れて途中を抜かしたものがある。これは人に間違った印象を与えるグラフである。正の大きく変化する量のグラフは対数で描くべきである。

スケールに依らない法則は冪関数で表される。たとえばスケールに依らず半径 r の球の体積は $V=\frac{4\pi}{3}r^3$ である。このとき, 両辺の対数をとると

$$\log(V/V_0) = \log\frac{V_0}{r_0^3} + \log\frac{4\pi}{3} + 3\log(r/r_0)$$

となる。適切な単位を選ぶ必要があることに注意すること。横軸を $\log(r/r_0)$, 縦軸を $\log(V/V_0)$ にとると, グラフは直線になる。このように, スケールに依らない関係式は両対数のグラフを描くと直線になる。

このように単位を消し去ることは, ものごとの法則性を見極めるために不可欠である。三角関数でも, その引数は単位を持った度ではなく, 弧度を使うべきである。弧度 θ は 円周の長さ/円の半径で定義されており, 単位に依存しないことは明らかである。弧度 θ は単位のない, たんなる数値だから, 三角関数を使っていろいろな法則を表すことができる。

3.4 微分

古代ギリシャ, アテネの繁栄の絶頂期, アテネの町にパルメニデスという老人に連れられたゼノンと呼ばれる青年が現れて, どう考えても間違っており事実とあわないが, どうしても論駁できないことを述べ, ソクラテスたちを驚かせたという言い伝えがある。アリストテレスは自然学という著書の第 6 巻 3 章で, ゼノンの論法を次のように述べている。

> いかなる物体も, それ自身と等しい場所を占める時にはつねに静止している。飛ぶ矢は今においてつねにそうである。然らば, 時間におけるどの今においても, 飛ぶ矢は静止しているのだから, 飛ぶ矢は飛ばない。

これは今という時刻がデジタルな値で表される誤差のないものだとすると, 事実と反した奇妙な結論が導かれることを表している。

ゼノンのパラドックスは, 物理量はどのように測定するかが定義されていなければ意味をなさないことと関係している。この場合, 速度という量が問題である。速度を測るのに必要な道具は時刻を測る時計と位置を測る物指で, 測定はある時刻 t での対象物体の位置 x を記録することにより行われる。物理量を数値化するために, 時間は s で距離は m で測ることにする。記録は以下の表のようにまとめられた。

t	x	Δt	Δx	$\Delta x/\Delta t$
0.0 s	5.0 m			
		0.5 s	2.2 m	4.4 m/s
0.5 s	7.2 m			
		0.25 s	3.3 m	13.2 m/s
0.75 s	10.5 m			
		0.05 s	4.8 m	96.0 m/s
0.80 s	15.3 m			

この表の最後の欄の時間の変化に対する位置の変化の割合（変化率）を速度と呼ぶ。この各々の数値はどの時刻の速度だろうか? 分かると言えばゼノンのパラドックスに陥ってしまう。言えることは, 隣り合う測定時刻の間のどこかの時刻であり, 測定間隔を小さくしていけば誤差が小さくなる, と言うことだけである。測定間隔を小さくすると誤差が小さくなることは経験事実である。誤差が制御できるという経験事実が速度の概念を意味のあるものにしている。

物理量は **測定値** $\pm$ **誤差** で表され, 誤差は測定値と同じか, それ以上に重要である。誤差の与えられていないデータは信用できないデータであり, データの価値は, どれくらい確かな誤差の評価をしているかで決まる。

3.5 実数

物理学の立場からは, 実数は測定量を記述するための数と考えることができる[7]。加減乗除は有理数[8]の範囲で閉じているが, 測定量の記述には不十分である。例えば, 直角二等辺三角形の斜辺の長さは他の二辺の長さが 1 なら $\sqrt{2}$ だが, これは無理数で有理数ではない。

実数の性質を突き詰て考えたのは紀元前 200 年頃にローマに対抗したカルタゴの元で活躍したアルキメデスである。アルキメデスは自身の最大の業績は球の体積や表面積はそれに接する円筒の体積, 表面積の 2/3 であることを証明したことだと考えていた。この証明でアルキメデスが使った実数の性質は

> 任意の正の実数 $a > b$ に対して, $a < nb$ となる整数 n がある[9]

で, 実数のアルキメデス性と呼ばれている。

アルキメデスはこれを次のように用いた。AB を放物線の弦, OM を AB の中点 M を通る放物線の径, 放物線と弦で囲まれる部分の面積を S 三角形 MAB の面積を T とする。任意の n に対して, $|S - \frac{4}{3}T| < \frac{4}{3}T \cdot \frac{1}{4^n}$ であることは図を描けば（幾何学を使って）直ちに示し得る。大事なことは $|S - \frac{4}{3}T| = 0$ を示すことである。$|S - \frac{4}{3}T| = \epsilon$ とすると,

$$\epsilon < \frac{4T}{3}\frac{1}{4^n} < \frac{4T}{3}\frac{1}{n}$$

である。もし $\epsilon = 0$ でなければ全ての正の整数 n に対して $n\epsilon < \frac{4T}{3}$ が成り立たないといけない。それは実数のアルキメデス性に矛盾する。この矛盾を解消するには $\epsilon = 0$ でなければならない。アルキメデスは, このような思考法（背理法）で, てこの原理や, 滑車の原理, 浮力の原理を考えていた。

4 実験

物理学教育ににおける実験の目的は以下のように整理されるだろう。

1. 学習意欲の向上

   おもしろい実験を行なって, その科目が好きになって勉強をするようになる。

2. 測定器の取り扱いとその使用法の習得

   機器の取り扱い方や測定の仕方を学ぶ。

3. 科学的な考えかたの習得

   論理の組み立て, 議論の行い方, 発表の行い方を学ぶ。

4. 科学の知識・理論の検証

   机上の理論が正しいことを納得させる。

1 の効用は疑いない。一方, 4 に関しては必ずしも簡単ではない。ほとんどの場合, 実験を行なっても理論通りの結果が得られないからである。実験では理論が捨象した多くの事象が混然と混ざりあっている。実験を行う上で必要なことは, 何を測るべきかを明確にし, それ以外のことが結果に影響しないよう工夫することである。何も考えずに, 教科書どおりの答えが出るような実験を教室で行って

[7]数学としては数直線の有理数の間を埋める数と捉える。

[8]有理数（rational number) とは整数の比 (ratio) で書ける数のことである。小数も有理数であることに注意。一方, 無理数は有限の整数の比では表すことができない数のことである。

[9]簡単に言えば, どんなに大きなプールでも小さなスプーンで水を入れて行くといつかは溢れることである

もあまり意味がない。実験の結果が正しいかどうかは2, 3の裏付けにより可能になる。したがって, 極論として実験は教育には不効率で不要であるという論も出ることになる [7]。

4.1　実験に関わるリテラシー

実験に関連して是非とも身につけなければならない技能について考えよう。

4.1.1　測定器の取り扱いとその使用法

実験を行なう上でスタートになることは, 様々の物理量を測定することである。以下に筆者が必要と考えることを列挙する。

- 基本的な測定器具による測定

  物差しによる長さの測定, 時計による時間の測定, 温度計による温度の測定, 秤による重量の測定, など。また, その測定原理の理解。

- 測定器の説明書を読みこなすことができる語学力

  通常は日本語, しかしながら時には英語などの説明書を読みこなすことが必要になる。

- 科学的な考えかた

  「タマゴが先か? 鶏が先か? 」の議論になってしまうが, 測定を行なうにあたって, 科学的な考えかたができる必要がある。実際は比較的単純な測定を行なうことによって, 科学的な考えかたを習得し, それを元により複雑な測定を行い.... と協調して進んでいく。

4.1.2　科学的な考えかた

この点についてはすでにSFAA[5] の翻訳という形でまとめた [6]。ここでは, そのエッセンスを

- 様々な事象に関して検証を行なう必要があるという認識を持つこと
- 論理的な思考
- 抽象と具象の間を有機的に結びつける

という言葉でまとめよう。

検証の必要性は特に重要である。今日の学生の多くはじっくりと考える時間がないせいか, 自ら導き出した結論の妥当性を評価する態度に全く欠けている。問題は与えられ, 解答に対する正誤は他者が判断するという受験勉強の弊害に他ならない。レポートなどで散見されるのは,「結論は間違っているかも分かりませんが, 先生直してください。」という態度である。

典型的な検証である検算を行う具体的な方法に関しては以下にいくつか挙げよう。

- 単純に計算を繰り返す
- 概算と比較する
- 異なった電卓, ソフトで計算を行なう
- 異なった計算方法で行なう

4.2　論理的な思考の発展例

論理的な思考の発展例として, 電磁気の研究の歴史について考えよう。

古代より「琥珀」を擦ると, ものを吸い付ける力があることが知られていた。下敷きをこすって頭に持っていくと髪の毛が吸い付く, あの静電気現象である。

17 世紀に入ると, 静電気には吸い付ける力だけでなく反発する力となる場合もあることがわかってきた。また, 電気を帯びた物質の側に帯びていない物質を置くと, その物質も電気を帯びるという,「静電誘導」現象が発見される。そして 18 世紀には, 金属などに摩擦電気現象が見られないのは, 金属が電気を逃がしやすいから, ということがわかり,「導体」と「絶縁体」の区分が生まれ, 絶縁体には電気が動かずに留まるということから, ここでやっと「静」電気という概念が生まれる。

フランスのデュフェーが電気には 2 種類あって, 同種のもの同士は反発することを発見する。フランクリンはこの一方をプラス電気, 他方をマイナス電気と名付けた[10]。電気がプラス・マイナスで計算できるものであるという発見は現在の電気現象の理論（可換ゲージ理論）に直接つながっている。

18 世紀の初めにはオランダのライデン大学でライデン瓶が発明され, 電気の研究が進む。18 世紀

[10]引力の場合, 静電誘導現象によりプラス電気もマイナス電気も電気を帯びていない物質を引きつける。従って引力で電荷の正負を判定することは困難である。この静電誘導の理解は 20 世紀になって物質の電子論が発展して始めて理解できた。

の終わりにはイタリアのガルヴァーニが静電気による蛙の筋肉収縮の研究（1791 年,「筋肉運動による電気の力」）によって異なった 2 種の金属を触れることによって電気が発生することを発見する。もっとも, 彼自身はこの電気は蛙（動物）に由来した電気であると考えており,「動物電気」という名称をつけている。一方, イタリアのボルタ（電圧の単位ボルトの元）は, この「動物電気」の考えの定量性の面に疑問を抱き, 動物を使わない実験装置で電気を発生させることによって「2 種の金属の接触によって」電気が発生することを証明する。ボルタの考えの背景にはドイツのズルツアーが,「異なる金属を接触させて, もう一方で舌を挟むと妙な味がする」という報告が挙げられる。ボルタの実験装置は銅板と亜鉛板との間に塩水をしみこませた紙を挟んだものを幾つも積み重ねた「電堆」（1899 年）と, それを改良した「電池」（塩水の代わりに希硫酸を用いる）である。このボルタの電池の発明により動電気すなわち継続して流れる電流が得られるようになり, 電気に関する研究が進む。

電流が得られたことによって電気と磁気の間の関係が明らかになった。エルステッドが電流が磁石に力を及ぼすことを発見したのである。これに引き続いてアンペールが電気と磁気の精緻な数学理論を作り上げるが, それは実体が明らかでないものであった。

ファラディは電場と磁場（電気力線・磁力線）が物理的な実体であると考えた。ファラディは, 場の概念によって電気, 磁気現象の理解を深めることが可能であることを指摘している[11]。イギリスのマクスウェルはファラデーの電気と磁気の理論をもとに 1864 年にマクスウェルの方程式を導いて古典電磁気学を確立した。マクスウェルの方程式から, 電磁波の存在が理論的に予言される。ヘルツはマクスウェルの著書を綿密に読み, 当時の数学で考えられていた電気磁気の遠隔相互作用にマクスウェルのアイデアを添加すると近接相互作用が導かれることから, マクスウェルの理論が本質的に正しいことを確信した。彼は 1888 年に電気火花の実験によって電波の存在証明を行い, マクスウェルの理論を検証した。ここに, 電磁場がエネルギー・運動量を持って運動する物理的な実体であることが確立したのである。

5　測定

物理学は実験, 観測による量の測定のうえに成り立つ学問分野である。物理学の概念はすべて操作的に, つまり, どのように測定するかで定義されている。物理学の学習とは何をどのように測れば何が分かるかを次第に明らかにしていくことであるといっても過言ではない。この点が高校の物理と大きく異なっている。高校の物理では, どのように測定するかを気にせずに条件として様々なもの（例えば, 作用している力）が与えらた場合, どのようなことが起こるかを考える。いったい誰が, その条件を教えてくれるのだろう[12]?

物理量の測定は物理法則に基づいて行うので, 物理法則が分からなければ何を測ればよいのかも分からない。逆に, 何をどのように測ればよいかが明確になったら, そのときには物理法則が分かったと言える。例えば, 電流の測定は, エルステッドが電流の周りでは針磁石にトルク (回転を与える力) が働く事を発見したことから始まる。それはアンペールの法則そのものである。

5.1　時間の測定

現代社会においては, 各人が精度の高い時計を持っている。その時計はブラックボックスと化して, 時間測定の基礎にある法則性が分かりにくくなっている。精密な時計を持たなかった古代の人は,「毎朝太陽が出ては沈む, 一年で季節が一巡す

[11] ファラディは言う。「しばらくのあいだ，この種の憶測が自然哲学では役に立たないとか害があると考えることはやめよう。たしかに，これまで，それらは疑わしく間違いやすく，すぐ変わってしまうものだと思われてきた。しかし，実験家や数学者にとって，それらは素晴らしい助手なのである。あいまいな考えを次第に明晰なものとし，アイデアに確固とした形を与えて実験や解析ができるようにしてきただけではない。演繹や補正によって新しい物理現象の発見に導き，実際の物理的な真理を増やし発展させ，そして，それが，それらを導いてきた仮定と違って，もはや変わらない基本的な知識となってきたのである。」原文は以下の通りである。It is not to be supposed for a moment that speculations of this kind are useless or necessarily hurtful in natural philosophy. They should ever be held as doubtful and liable to error or to charge, but they are wonderful aids in the hands of the experimentalist and mathematician; for not only are the useful in rendering the vague idea more clear for the time, giving it something like a definite shape, that it may be submitted to experiment and calculation; but they lead on, by deduction and correction, to the discovery of new phenomena, and so cause an increase and advance of real physical truth, which unlike the hypothesis that lead to it, becomes fundamental knowledge not subject to change

[12] 現代求められている人材は, 指示に従って動くだけの人間ではなく, 自ら問題を設定し考え行動できる人間である。

る」といった厳然としたリズムが自然にはあり, 人はそのリズムに従って生きていかなければならなかった。世界のリズムを知り, そのリズムの狂いが自分の生活にどの程度響くかを知っていた点で, 古代の人の方が時間測定の本質についてよく理解していたと言えるかもしれない。

ガリレオが 19 歳の時, ピサの大聖堂でシャンデリアの揺れを見て, ガリレオがそれを自分の脈搏と較べたという伝説がある[13]。ガリレオは一定時間にシャンデリアの揺れる数と自分の脈搏数という二つのものを比較して『比』をとった。この比は, いつもおおよそ 一定だった。

> 比が一定であるなら, 基準とする振動を決めておけば, それが何度か振動する間に他の対象物が何回振動するかがわかる。これこそが, 時間測定である。

二つの振動現象を同じ場所で測る限り, 二つの現象の間の振動数の比は, 二つの現象に特有のもので, いつでもどこでも, 同じである。地球上であろうと, 月面であろうと, ブラックホールのすぐ傍であろうと同じである。同じだから, 遠い宇宙の果てで起こっている現象でも時間測定が可能になる[14]。

現在では『秒とは, ^{133}Cs 原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対する放射の 9 192 631 770 周期の継続時間である』と定義されている。注意すべきことは, この定義は現実の物（時計）を使った定義ではなく, 物理法則を使った抽象的な定義だということである。現実には定義通りの系を実現することはできない。真空中に浮かんだ唯一つ静止した原子など, 我々には用意できないのである。科学者は理想に近づけようと様々な努力をしているが[15], どこまでいっても物理法則と現実の物は異なる。しかし, それが近づけるように挑戦し続けないかぎり, 物理法則は物理法則としての役割りを果たせないのである。

さて, 実際に時間を測るには現実の物からできた測定装置を使わなければならない。現実の測定装置には物理法則のようなスケールからの独立性はないので, 測定を得意とする領域もあれば, まったく測定できない領域もある。たとえば, 100 年程度の時間を測定するには原子時計よりも月の公転周期を使う方が精度が高いということも知られている。測定装置を選定するときは, その目的にあわせて, どれくらいの精度で測定できるかをつねに考える必要がある。また, 測定することによって測定対象の性質を変えてしまったら, それこそ, 何を測定しているのかということにもなりかねない。

5.2　距離（長さ）の測定

日常生活では物の広がりは物差しがあれば測れる。しかし, 科学の世界では大は星雲と星雲の間の距離から小は核子内の素粒子間の距離まで測る必要がある。このような距離を測るには, まず, 適切な物差しを作る事から始めなくてはならない。

長さを測る上で重要な概念は合同定理である。すなわち, 合同定理のおかげで三角形そのものを持っていかなくても合同か違うかの判定ができる。合同定理のおかげで, 人間の日常生活の空間の長さを測定する限りは法則ではなく実際のもの（物差し）を基準にして測定を行っても問題はない。メートル原器の活用がその例と言えよう。

ところが, 人間の日常生活の範囲外にまで測定を広げようとすると様々な困難が物差しによる測定には生じる。例えば, 太陽の大きさを測るためメートル原器を太陽に持って行くと原器は融けてしまう。原子の大きさを測ろうとしても, それは原器の刻印の幅より遥かに小さくてどうにもならない。宇宙の大きさは測定できるだろうか。宇宙は膨張していると言われているので, 物差しだって同じように延びているかもわからない。従って, ものには依存しない法則を使って距離を測る必要がある。

いつでも, どこでも使える法則は意外な所から見つかった。アメリカの広大な土地で光の速度を

[13]振り子の等時性の発見として伝えられている話である。振り子の等時性とは, 振り子の長さを ℓ, 重力加速度を g とすると周期 T は単位を持たない量である振幅 θ の単位を持たない関数 $f(\theta)$ を使って $T = f(\theta)\sqrt{\ell/g}$ で与えられるが, 関数 $f(\theta)$ は振幅 $|\theta|$ が小さい時一定であることである。

[14]すぐ傍で測った時間はプロパーな (固有と訳されている) 時間と呼ばれている。実は異なった場所における時間測定には本質的な困難がある。時間測定をする場合, 振動数をなんらかの方法で測らなければならない。原理的には, 波の干渉を応用すればよい。しかし, 離れた場所まで波を伝搬させると, ドップラー効果を引き起こすかもしれない。そのドップラー効果を制御できないと時間測定もまた不確かなものにならざるを得ない。

[15]原子を重力場中で上に放りあげ, 上昇中の速度と落下中の速度をくらべて速度が 0 の状態を推定したり, レーザーを使って電波を誘導放射させて原子がエネルギーを失うよう試みて, 一秒の定義が要求する状態に近い状態を何とか実現しようと努力してる

測った所, 東西に伝わる光の速度も南北に伝わる光の速度も同じだったのである。地球は自転しているから, 地球の回転速度分, 速度が変わるはずなのに, 同じだったのである。この事実をつかうと,

> メートルは光が真空中で $(1/299792458)\,\mathrm{s}$ の間に進む距離である。

と定義できる。つまり, 光を発し距離を測りたい対象物から光が反射して帰って来るまでの時間を測れば距離が測れることになる。

5.3　宇宙を測る

宇宙のような大きな対象の大きさをどのように測るかについて知っておくべきことをまとめよう。ここでは, 様々な努力によって物理法則に基づいて様々な測定が行なわれているかを伺い知ることができる。望遠鏡によって, 惑星のまわりに回る衛星, 超新星の爆発, 渦巻く銀河, などなど, 様々な天体を見ることができるようになった。それらの構造, 性質を考えるとき, どの程度離れた距離にあるのか分かれば, 形, 構造, 性質を決めることができる。また, 逆に, 形, 構造, 性質が分かれば距離を推定することができる。

天体の距離は地球, 太陽間の距離を基準に測る。太陽から春分での地球までの距離を 1 天文単位, 1 AU という。$1\,\mathrm{AU} = 1.49597870 \times 10^{11}\,\mathrm{m}$ である。地球から金星までの距離はレーザー光の帰還時間から測られている。地球太陽間の距離は太陽質量 $\mathrm{M}_{\odot}$ と重力定数 G と惑星の公転周期から力学の法則を使って求められる。

地球は太陽の回りを一年かけて一周する。太陽の近くにある恒星が天空に見える位置は, 遠くの星々を背景として, 一年かけて楕円を描く。半年間での恒星が見える方向の変化から, 1 AU の距離を基線とした三角測量ができる。太陽 H, 地球 E, 恒星 S に対して, HS と HE が垂直であるときの視差の角を $\angle\mathrm{HSE} = \varpi$ とする。基線 1 AU にたいして視差角 ϖ が 1 秒角になるときの距離を 1 pc と書き, 1 パーセク（parallax second, 視差秒角）と読む。$1\,\mathrm{pc} = 3.26$ 光年 $= 10^{16.49}\,\mathrm{m}$ である。太陽に一番近い恒星 ケンタウルス座 α 星 に対して $\varpi = 0,75$ 秒角 はであり, 距離は $1.3\,\mathrm{pc}$ である[16]。

太陽は 1 兆個ほどの恒星からなる私達の銀河（天の川）の中の一つの恒星であるが, 銀河の中心までの距離 (8 kp) を測るのは難しい。光ではほとんど見通せないからである。この銀河は円盤状の形をしているが, 同時に球状星団 (10^6 個ほどの星団) が銀河中心のまわりに球状に分布している。これの分布を測定し, 分布の中心位置を銀河の中心としている。誤差は 2 kpc 程度になる。

私達の銀河の外にある遠くの天体までの距離は色々な観測を通して決められる。その測定は, おおよそ, 物理法則をもととした個々の天体に対する絶対測定と 2 つの距離の異なった天体の距離の比を求める相対測定にわけることができる。

ある脈動変光星までの距離はその変光星の性質（放出する光エネルギーの総量）と見かけの明るさの比から絶対測定することができる[17]。残念ながら, 脈動変光星の構造, 性質はそれほど分かってはいない[18]。どのように精密に考えても一桁程度の誤差は避けられない。しかし, 宇宙には距離の絶対測定ができるものがたくさんある。たとえば, 巨大

[16]現在では人工衛星を使って明るい星に対して 10^{-3}秒角 の誤差で視差 ϖ が測られている。したがって誤差 10%で, 100 pc までの星々の距離が測られている。現在の所, これ以上の距離では三角測量はなされていないが 10^{-5}秒角 の誤差で測定する計画が進められている。

[17]脈動変光星は恒星であり, 恒星内部では光と物質が熱平衡状態にある。温度 T_{eff} の熱平衡状態にあるガス球の半径 R の球の表面から 1 秒あたり $1\,\mathrm{m}^2$ あたりに出るエネルギー, つまり光度 L は $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\mathrm{eff}^4}$ である。ここで σ はステファン・ボルツマン定数である。星の温度 T_{eff} は星の色から分かる。星の光度 L は距離の 2 乗に反比例して小さくなるから, 星の見かけの光度を測れば, 星の半径 R が分かれば距離が分かることになる。脈動星は星が膨張・収縮を繰り返している。もし星が球形を保って振動しているなら, 星のスペクトルを観測することによって, ドップラー効果を使って, 星の振動の速さを観測し, 星の振動の振幅を調べることができる。同時に温度の変化も測定できる。振幅が星の半径に較べて無視できない大きさなら, 星の大きさと星の光度の関係から, R を見積もることができる。

[18]かつて, アンドロメダ星雲までの距離が 2 倍に評価し直されることがあった。当時, 脈動変光星の理論的に知られている光度と周期の関係を使って, 距離を測っていた。脈動変光星には 2 日から 50 日の周期で変光するセファイド型, 乙女座 W 型星と 1 日以下の周期で変光する琴座 RR 型星がある。セファイド型は炭素, 窒素, 酸素などの含有率が大きい新しい星（種族 I）, 後ろ 2 つは少ない古い星である（種族 II)。その光度と周期の関係は小マゼラン雲のセファイド型の星を使って校正されていた。我々の銀河の中, 太陽の近くに三角測量で距離が決められるセファイド型の星が無かったためである。当時, セファイド型と乙女座 W 型は周期が同じなら同じ光度であると思われていた。そうすると, 間違った光度の校正にもかかわらず, 3 つの型の光度と周期の関係は同じ一つの直線上になり, だれもその公式を疑わなかった。しかし, 1952 年に Baade が 200 インチ望遠鏡でアンドロメダ星雲を覗いたとき, 球状星団の中に見えるはずの琴座 RR 星型星が見えなかった。このとき, 始めて, セファイド型の光度の校正を間違えていることに気付いたのである。

な天体の重力のレンズ作用で光が屈折し, 遠くの1つの天体が3つにも5つにも見えることがある。同じ光源から出た光でも時間がずれて到着することになる。この時間差から距離を評価することが可能である。また, 遠くの銀河の集団の中では高温度の電離した電子が存在する。この電子は宇宙の背景からく3 Kの光を散乱し, 宇宙背景輻射のスペクトルをゆがめる。もし電子密度が他の方法で分かっていれば, 背景輻射のスペクトルを観測することにより, 銀河団までの距離がわかる。

一つ一つの絶対測定の精度が悪くとも, 多くの測定を比較すると, 距離測定の精度は上がってくる。この比較を色々な距離にある2天体に対して行うことが相対測定である。私達の住む銀河（天の川）の近くには大マゼラン星雲（距離約50 kpc）やアンドロメダ星雲（距離約800 kpc）といった大きな銀河がある。両銀河ともその中にセファイド型変光星という, かなり性質の分かった変光星がある。これを使って距離を測ることができる。また, 両銀河ともその中にある球状星団の中の星まで望遠鏡で分解することができる。星の明るさ（光度）を縦軸, 色（温度）を横軸にとって散布図（HR図）を書くと, それぞれの星の質量や年齢が分かり, それからも距離が求まる。これらをすべて総合して考えると, 大マゼラン雲への距離とアンドロメダ星雲への距離の「比」を非常に正確に求めることができる。

1 Mpcから100 Mpc程度の距離の相対測定では経験則も使われる。たとえば, 渦巻き銀河の明るさは回転速度の4.5乗に比例する。楕円銀河の明るさは銀河内の星の速度の分散の4乗に比例する。なぜこうなっているか理解できず, どこまで成り立つかもわからないが, それらが正しい距離の比を示せば, 逆に経験則を確立することになる。

100 Mpcを越えると, 長さや角度の意味が日常の経験で知っているものとは異なることにも注意する必要がある。同じ大きさの物を見込む角度も遠くなるほど, 日常経験と反対に, 大きくなる, 光が重力によって曲げられるからである。

大マゼラン星雲は我々の銀河の周りを回る衛星銀河である。アンドロメダ星雲と我々の銀河は同じような銀河で, 我々の銀河とともにローカルな銀河のグループを作っている。そのような銀河群が集団を作って乙女座銀河団（Virgo cluster 距離約15Mpc）や髪の毛座銀河団（Abel 1656,Coma Cluster 距離 約100Mpc）を作っている。それらの銀河団がさらに超銀河団を作っている。これらの階層間の大きさの比はかなり正確であると考えてよい。この相対測定を梯子のように大きな方に積み重ねて行くと, 宇宙の端まで測ることができる。

5.4　質量の測定

5.4.1　慣性質量と重力質量

速度vで動く質量mの物質の運動量はmvである。ニュートンの運動方程式によると運動量の時間変化率は力で与えられる。運動量から測られる質量mを慣性質量という。一方, 地上では, 物体ごとに決まる量m'と重力加速度という物体によらない比例定数gを使って$m'g$と重力が働く。このように, mとm'はまったく由来の異なる量である。しかし, ガリレオが示したように, 物体が一定の距離を落下するのに要する時間は物質によらない。この事実は物質のmとm'は比例する量でなければならず, gの値をうまく選べば$m = m'$とすることができることを意味している。これを等価原理という。

物体に働く遠心力は慣性質量mに依存している。エトベスは地球の自転による遠心力を使って, 等価原理を高い精度で検証した。エトベスの実験装置では, 二つの物体がガラス糸でつり下げた天秤に置かれている[19]。天秤の方向を東西に向けると, もし等価原理が成り立たなければ, ガラス糸を捻る力（トルク）が働く。天秤の作りが悪くて釣り合いの状態が悪くても天秤を傾ける方向に力が働くだけで, 糸を捻る力は働かない。天秤の東西の向きを逆にすると, 糸を捻る力は逆になるので, 両方向で捻る力を較べると, 捻る力の0からのずれは精密に測れる。こうしてエトベスは$m'/m = 1 \pm 2 \times 10^{-8}$であることを示している。

5.4.2　地球の質量を測る

距離r離して置かれた質量Mとmの物体の間には$F = \dfrac{GMm}{r^2}$の力が働く（万有引力の法則）。キャベンディッシュは2つの質量mの物体をガラス糸で吊るした天秤に置き, 近くに2つの質量Mの物体をおいて, mとMの間に働く力を, 糸の捻れに対するフックの法則を使って測った。この力

[19]天秤は重力質量が同じ物体を用意するために使われている。

を質量 m に働く地球重力 $mg = m\frac{GM_\oplus}{R_\oplus^2}$ と較べて地球質量 $M_\oplus$ を求めた。キャベンディッシュの意図は地球質量を決めることであったが, この実験によって万有引力定数が決められたと考えてよい。

5.4.3　質量の単位

現在, 質量は国際キログラム原器という実際の物体の質量を単位に測っている。物理法則に基づいていない唯一の単位で, 現在到達している技術レベルでは役に立たなくなりつつある[20]。

物質の質量がどのような法則にしたがって決まっているのか理解できていないので, 質量をどのように測るべきか分からないという原理的な問題が残っている。しかしながら, もし質量の単位として, 電子の質量を使うならば「量子力学」によって, 電子には個性が無く, すべての電子は同じなので, 以下のように厳密な質量の定義が可能になる。

１個の電子の質量は光と電子の弾性衝突（コンプトン散乱）によって決定することができる。多数の実験を繰り返せば, 衝突の前後で光のエネルギーは測定可能であり, 電子が得たエネルギーを測定することができる。そこで電子の速度を測定し, 運動エネルギーと速度の関係から質量を決めることができる。他の物体の質量は電子の質量何個分と表すことができ, 精密な質量の測定は精密な電子の数の測定に帰着できる[21]。

5.5　単位系

今まで, すでに存在している単位を用いて具体的に測定する方法について議論してきた。ここでは, 単位系をつくる（自然をどのように捉えるか）上での考えかた（思想）について議論する。

ニュートンがプリンキピアを著し力学を数学化したように, J. C. マクスウェルはトリーティーズ (A treatise on electricity & magnetism) を著し電気と磁気を統一し数学化した[22]。ここで言う「数学化」とは, 明確な定義を行なってから推論を進めるアプローチのことである。例えば, 力は運動状態を変化させるものとして「定義」され, 筋肉などとは無縁のものである。両書とも, その後の発展を促すだけの強く深い思考に溢れた書物である。古い誤った観念を留めているが, 明確に数学化, 論理化したため, 誤った観念の呪縛を振り切っている書物である。

マクスウェルのトリーティーズは次の文章から始まる [9]。

『1. 量を表す式はいずれも二つの因子または成分から成り立っている。これらの一つは表現されるべき量と同種のある決まった量の名前であり, それが標準として参照される。他の成分は必要な量を作り上げるために何回標準を繰り返さなければならないか表す数値である。標準量は専門用語で単位と呼ばれ, 数は量の数値と呼ばれる。』

第２節の始まりは次の通りである。

『2. 数学的なシステムの枠組を作る時, 長さ, 時間, 質量の基本単位が与えられており, すべての誘導単位はこれらからもっとも簡単な方法で定義から導かれると仮定する。

私たちが作る公式はどのような国の人でも, いろいろな記号にそれぞれの国の単位によって測られた数値を代入すると正しい結果が出てくるようなものでなければならない。』

量には単位が必要であり, いろいろな単位は, 一つのシステムを作り上げているという理念が重要である。物理学の力の源泉は数学によって表される物理学全体がなすシステムにある。個々の事実が全体のなかに縫目なくぴったりと当て嵌まっているから, 個々の事実をいろいろな面から見ることができ, 誤った結論が自動的に排除される。単位系は物理システムの典型である。単位系を取り入れた計算は基本的な部分での考え間違いを自動的に見つけてくれる。

残念ながら, 高校までで学ぶ物理学では物理学の力の源泉であるシステム化はなされていない。社会人として知っておかなければならない個々の事実の提示で終わっている。したがって, 単位もばらばらに提示されているのみで, 単位系にはなってい

[20] 例えば, 原器の表面には水分が付着し, これが原器の質量を変える。原器の中に含まれている気体が拡散して外へ出る。その他, 色々なことが原器の質量を変えており, 標準としての意味をなさなくなっている。

[21] 原子の数を基本として, 質量単位の再定義を実現させようと国際的な合意事項ができている。[8]

[22] 両書とも, その後の物理学の劇的な発展の出発点となったものである。混乱した考えの中から本質を抉り出した書物だけあって, 現在の完成した記述からかけ離れており, 読みやすいものではない。ニュートンは微分積分を考え出した人物だが, プリンキピアはユークリッド原論にならって幾何学として力学を数学化している。マクスウェルは分子運動論の創始者であるが, トリーティーズでは電荷を場の持つ性質として扱い, 電子の粒子描像を排除している。

ない。高校での物理学では

$$\begin{aligned} a &= 9.8 \quad [\mathrm{m\,s^{-2}}] \\ F &= 4.9 \quad [\mathrm{N}] \end{aligned}$$

と書く。これは量は単位を決めれば, たんなる数値に抽象できるという思想に基づいている。したがって, 高校の物理学では, a も F も [ ] の中に表示されている単位を使って抽象化された単なる数値であると見なさざるを得ない。ここにはいろいろな単位の集まりが全体としてシステムをなすという考えかたは稀薄である。

物理学本来の力を発揮させるためには高校までの表記法ではなく, 実際に社会で使われている表記法, 国際標準規格, ISO 31-0:1992 Quantities and Units を用いるべきである。具体的には物理量を表す式に単位と数値の両方を書き入れることから始めれば良い。たとえば, 加速度 a は

$$a = 9.8\,\mathrm{m\,s^{-2}}$$

のように数値と単位の両方を表記する。力 F は

$$F = 4.9\,\mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$$

のように表記する。単位系の適切な選択には物理に対する深い理解が必要である。我々は, 専門化が議論しつくして決めた ISO 標準に従えばよいであろう。そうすれば, 単位システムの恩恵を受けることができる。

マクスウェルのトリーティーズでは長さ, 時間, 質量が基本と考えられている[23]。マクスウェルは, 長さを表す量を $\ell[L]$ と書いている。ここで ℓ は数値で $[L]$ には, m とか, feet とか尺が入る。$[L]$ に入るものが変われば数値 ℓ も変わるが, 二つあわせて同じものを表す。高校物理のように単位系を固定していない点に注意すべきである。時間を表す量は $\ell[T]$ で $[T]$ には s が入っても年が入ってもよい。質量を表す量は $\ell[M]$ で $[M]$ には ponds が入ってもよいし, 貫[24]が入ってもよい。基本が長さ, 時間, 質量なら, すべての量は $\ell[M]^p[L]^q[T]^r$ と書ける。このとき, この量は質量に関して p 次元, 長さに関して q 次元, 時間に関して r 次元であるという。

現在の標準である SI 単位系では, 電気磁気現象を考える場合, 真空の透磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{N\,A^{-2}}$ という定数を導入して電気的磁気的な力を他の力と区別している。その基本単位は m, s, kg, A である[25]。熱現象を考える時には, ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J\,K^{-1}}$ を導入して熱エネルギーを他のエネルギーから区別している。その基本単位は m, s, kg, K である。ボルツマン定数の数値とアヴォガドロ数 $N_\mathrm{A} = 6.02 \times 10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$ の数値をかけると, 1 の程度 (実際には 8.31) になり, 人間の感覚に訴える大きさになる。SI 単位系では, そのほかに, 物質量 mol, 光度 cd, 平面角 rad, 立体角 str を基本単位として採用している[26]。

ここまで, ニュートンの力学の範疇で単位系を考えてきた。つまり, 単位系の基本量の中には, 時間, 長さ, 質量が必ず入っていた。この範疇のなかで, 狭い範囲の対象が示すいろいろな特徴を取り出して, そこで見出した法則を使って新しい基本量を追加してきた。その典型がアンペア A とケルヴィン

---

[23] これは電気や磁気の現象をニュートンの力学に従って考えることを表している。この単位系は H. ヘルツによってガウス単位系という名のもとに整備されている。ガウスの名前が冠されているのは, 単位系の重要性を最初に力説したのが数学者ガウスであったからである。数学化の完了した物理学にとっては, 電気の理論も磁気の理論もニュートン力学の一分野にすぎない。ガウス単位系は, 真空中の光速度という定数 $c = 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ を導入して, 時間と距離を関連づけた単位系とも言える。考えている対象の速度 v が光速度 c と較べて小さいときに便利な表現であると考えられる。この単位系を使うと, 電気現象, 磁気現象の理論が理解しにくいのは, それが光速度という人間の感覚で捉え難いスケールの原理によって決まっているためであることがわかる。また, この単位系を使うと, 電磁気学の論理が電子の古典半径 $r_\mathrm{e} = e^2/m_\mathrm{e}c^2 = 2.82 \times 10^{-18}\,\mathrm{m}$ と較べて十分に大きな距離で整合性をもち, それより小さい距離では論理的に破綻することも見えてくる。もっとも, 電子のコンプトン波長 $2.43 \times 10^{-12}\,\mathrm{m}$ 以下の距離では古典力学は実験的に成りたたないことがわかっているので, 古典電磁気学の論理的な限界が問題になることはない。

[24] 貫は日本の古い質量の単位である。

[25] G.Giorgi 1901 によるもともとの単位系では電流ではなく抵抗を基本単位としていた

[26] 物理法則は, すべて, 等方であり, 空間に特別な方向はない。したがって, 数学でも物理学でも, 角度は 2 つの長さの比, 立体角は 2 つの面積の比であり, それらは単位を必要としない単なる数である。しかし, 現実の世界では, 特別な方向があり, 方向により重要性が異なる。表したい物理量が全方向に関する量かある方向だけに関する量かを区別する必要も生じる。法則では区別できないにもかかわらず区別せざるをえないことが起こる。そのため, 角度の単位は補助単位に留めておくべきか, 基本単位とすべきか, 論争が続いてきた。物理法則に従う限り論理的には $\mathrm{rad} = 1$, $\mathrm{str} = 1$ であるが, 現実の問題に答えるために必要な単位が入った訳である。時間と距離は, 相対性理論では互いに移り変われる量であるとなったが, 時間的な量と空間的な量は因果律によって厳密に区別できるので, 論理的に別の単位をつけることが出来た。しかしながら, 空間の 3 次元は互いに物理的に区別する方法がないので, 長さ以上の余計な単位を入れる余地がない。それでも空間には 3 つの自由度があるので, 現実の必要に応じて, m, rad, str の単位を導入していると考えることができる。

K である。逆の方向の考えかたもある。ニュートンの力学よりも広い範囲を説明する統一されたシステムが考えられると, 基本単位は逆に減る。実際, 20 世紀初頭に, ニュートンの力学を越えた二つの重要な原理が発見されている。一つはアインシュタインの名に帰されている光速度不変の原理であり, 他の一つはハイゼンベルグの名に帰されている不確定性原理である。ニュートンの力学では基本量は3つであったが, この二つの原理を取り入れると, 基本量はただ一つになる。

光速度不変の原理は真空中の光の速度はそれを観測する立場によらず $c = 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ であることを言う。これによって時間と空間の長さが統一されている。不確定性原理は, エネルギー×時間, 位置×運動量, 角運動量などはすべて同じ単位で測られる量であるが, そのような量には, $\hbar = 1.05 \times 10^{-34}$ J s という, それ以上分解できない単位 (量子) があることを示している。たとえば, 角振動数 ω の光は $\hbar\omega$ のエネルギーを持つそれ以上分解できない粒子の集まりとして振る舞う。角運動量の最小単位は $\frac{1}{2}\hbar$ であり, 電子はこの角運動量で自転している。位置の分散と運動量の分散の積の最小単位は $\frac{1}{2}\hbar$ である, 等々である。

6 物理と数学

大学で学ぶ物理学で最初に躓くのは運動方程式であろう。まったく新しい考えかたを含んでいるからである。学生は「力は運動状態を変えるものである」と教えられてとまどうのである。学生は力と聞いて, 押したり, 引いたりして, 物を動かすことをイメージする。しかし, これは力の定義になってない。物理学では, 力を測定するために, どのような操作を行えば良いかを明確にする必要がある。そのためには, あいまいさなしに力を定義しなければならない。ここでは, このような定義から始まるアプローチのことを「数学化」と呼ぶ。

数学化を始めたのはニュートンで, 有名な「プリンキピア」からである。この書物は, まず, 定義から始まり, 有名なニュートンの 3 法則が宣言され, そこからいろいろな証明が行われる[27]。

プリンキピアは以下の定義から始まる [10]。

- 定義 I
  物質量 (quantus materiae) とは, 物質の密度と大きさ (magnitude) とをかけて得られる, 物質の測度 (mensra) である。

- 定義 II
  運動量 (quantus motus) とは, 速度と物質量をかけて得られる, 運動の測度である。

- 定義 III
  物質の先天的な力 (vis insita) とは, 各物体が, 現にその状態にあるかぎり, 静止していようと, 直線上一様に動いていようと, その状態を続けようと抗う内在能力（potentia）である。
  そしてニュートンはインピータス (impetus) 論を続ける。

- 定義 IV
  刻印された力（vis impressa) とは, 物体の状態を, 静止していようと, 直線上を一様に動いていようと, 変えるために, 物体におよぼされる作用 (actio) である。

さらに定義が続き, 定義の最後に次のように書かれている。

> ここでは, 数学が取り上げられているにすぎない。わたくしはいま, 力の物理的な原因や所在を考察しているわけではないからである。それらの力は物理的にではなく数学的にだけ考えられなければならない。

ニュートンは力の定義を伝統的な考えかたから解き離すことに苦労した。そして, 幾何学の論証によって力学を再構成した。その態度は, プリンキピアの 3 版一般的注解の

Hypotheses non fingo (我仮説を作らず)

[27]完全に数学化された物理学を学んだ我々が読み直すと, きわめて分かりにくい本である。最初に数学化を試みたニュートンも苦労したのであろう。

[28]ニュートンの考えかたは古い考えかたを示した教科書の一注釈として生き長らえた。問題は万有引力の法則にある。万有引力は遠く離れた物体間に働く力です。当時, そのような力は考えられず, 定説は近接作用に基づいたデカルトの渦理論だった。プリンキピアの第 3 編命題 19 問題 3 に「惑星の軸がそれと直交する直径に対する比を見出すこと」がある。ここでニュートンは地球の密度は一定であるとして万有引力の法則に基づいて地球は扁平楕円体であることを示している。デカルトの渦動論では逆になる。1735 年に地球の形が測定された後, 始めてニュートン説が見直された。

に現れている。

ニュートンの考えかたはニュートンが講義をしていたケンブリッジですら受け入れられなかった[28]。ニュートンの考えかたが広まったのは, L. オイラーが運動方程式を $F = ma$ と書き, 数式によって現象を解析できるようにして, じっさいに役に立つことを示した後である。

ニュートンの第一法則が慣性の法則であることが示しているように, 力学の数学化はガリレオの慣性系の発見で可能になった。ガリレオが慣性系の考えかたを発見する前には運動はどう考えられていたのがまとめよう。アリストテレスは物体の落下運動をきちんと観察し, 物体は一定の速度で落下することに気がついた[29]。その速度は物体と媒質の密度の比で決まる。もし, 物体の周りが真空なら, 物体の落下速度は無限大になるはずだが, 無限大の速度は観測されない。従って, 彼は, 地上は空気に満ち, 天上はエーテルに満ちた充満空間 (Plenum) であると考えた。「自然は真空を嫌う」のである[30]。アリストテレスは運動をあるべき場所に戻る自然運動と, 強制運動に分けて考えていた。物体の落下運動は自然運動で, 物を投げた時の運動は強制運動である。自然運動はより自然な状態に物体が戻ろうとする性質があるので, 運動が継続する。ところが, 強制運動では媒質になんらかの作用が刻み込まれ, それが物体の運動を継続させると考えた。刻み込まれた力 (vis impressa) という考えが 6 世紀のアレキサンドリアで, アリストテレス批判としてでてきた。媒質は運動の継続を助けるのではなく, 妨害するもので, 運動は発動者が物体に直接力を刻み込むから動くと考えました。この力は媒質の抵抗にによって徐々に消えて行くと考える。

インピータスという概念は 14 世紀の Jean Buridan によるものである。ビュリダンは, 「ビュリダンのロバ」[31]でよく知られていた人である。インピータスは物体自身が持っている恒常的な力を意味する。物体はインピータスを持っているから動き続けると考える。ものを動かすためには力が必要と考える点で慣性の法則とはまったく異なるが, 内容的には慣性の法則と同じ様なことを述べている。このわずか後には, オッフォクフォードの人達は実験的にマートン・カレッジの法則「一定時間における物体の落下距離はその中央の時刻における速度で等速度的に動く距離に等しい」を見出し, パリの Nicol Oresme は横軸に時間, 縦軸に速度を取ったグラフをかんがえだして, マートンの法則を証明しる[32]。

ガリレオは落下物体の実験をおこない, 斜面の実験によって縦方向の運動と横方向の運動を分けて考察し, 下がっては上がる複斜面の問題で横方向の運動は縦方向の影響を受けないことを見出し, vis impressa 論, inpetus 論を使って真剣に考え続けた。そして, 最終的に, これらの理論には事実を説明しても内容がないことに気づき, 慣性系の概念を発見する。

慣性系の概念が重要なのは, 慣性系は特別な座標系であるが, 唯一つのものではなく, 無限にあることである。ある慣性系に対して一定の速度で動く座標系も慣性系になる。無限にあるから神が選ぶ特別のものではないが, しかし, 絶対的なものである。物体が静止して見えるような座標系はいつでも取れる。しかし, それは恣意的な選びかたである。恣意的な選びかたを排除すると言う意味で慣性系は絶対的なものである。このような座標系が必らず存在することのみを仮定すると, 総運動量が変化しないことが導かれ, 部分の間の相互作用を明らかにすると, 運動を完全に数学的に記述することができる。

慣性系の発見には, 摩擦力のような外力は本質的なものではないという抽象化が必要であった。したがって, 摩擦力が考慮する時には, 一度, 摩擦力などに関係なくなりたつ物理法則に戻って, その物理法則の中で摩擦力の位置付けを考えなければならない。静止摩擦力は, 作用している力と反対向きに作用し, その最大値は垂直抗力に比例すると誰でもが知っている。しかしながら, それは数学化された摩擦力の定義であり, モデルに過ぎない。このこ

[29]密度の高い物体の方が早く落下するし, 物体は空気中の方が水の中よりも早く落下する。

[30]ガリレオの晩年の弟子, トリチェリーが水銀柱を使って真空状態を実現させてみせた実験は大事件だった。

[31]水を飲ますためにロバを 2 つの水飲み場から等距離にある地点に連れていくとロバはどちらにも近付けない。

[32]ガリレオも同じような証明をしていますが, 最初は, 横軸を時間ではなく距離に取り, 間違った証明をして, あとで, 気がついています。ガリレオもグラフを描きながら考えた。

[33]非常に清浄な金属面を持った物体を同じ金属でできた天井に押し付けると物体は接着剤なしで天井に引っ付く。このような状態で物体に力を作用させて, 動かそうとしても, やはり「摩擦力」が働いて物体はある一定以上の力を加えなければ動かない。このような現象はどのように理解すれば, 良いのでしょう? マイナスの摩擦係数を考える必要があるのでしょうか?

とを忘れると摩擦力の本質も見失ってしまう[33]。

7 物理と工学

物理学は工学系, 自然科学系の学生に対して等しく必修と課される場合がほとんどであろう。しかしながら, 自然科学と工学における物理に対する考えかたは大きく異なっている。その違いをよく理解しておく必要がある。

7.1 物理と工学の違い

物理は**自然の理解**を目指すが, 工学は**人工物の設計, 製作, 運転, 保守**を目指す。物理は宇宙の大きさから電子の大きさまで, まったく同じように成り立つ法則の体系を追求する。たとえば電気磁気のマクスウェル方程式は, 星雲に対しても, 電子に対しても, まったく同じ式が成り立つ。工学が対象とする人工物は具体的な大きさを持つ。そこで使う法則には何桁にもわたって成り立つ一般性は不要である。たとえば, 家を建てるとき, 材料の性質は常温 300 K 近傍で分かっていれば十分である。たった 1 桁しか違わない 3000 K での性質など不要である。工学で行なわれるのは物理の基本法則の精密化ではなく, 複雑に組み合わさった相矛盾する要請のあいだの調整である。物理学では自然が示す物理法則のわずかな綻びも見逃さず, それを追求することによって新たな法則を見付けて行く。一方, 工学では物理法則は一つの要請にすぎない[34]。

例えば, ビルを建設する場合を考えよう。ビルの建設は, 資金, 時間, 労働力, 材料などの様々な制約のなかで行われる。ここでは, 物理法則はこれらの制約のひとつに過ぎない。中世のヨーロッパでは, 大きな建造物（教会）の建築において一つの制約である物理学（力学）の理解が不足であったために建築途上で建物が崩壊するという事故が起こっていた。

7.2 力学

大学初学年の物理教育において, 機械や建造物を作るための基礎知識として力学が教えられている場合が多い。それは, 本来の物理の目的, 自然の理解, とは異なっている。そのために, 物理においてはより基本的であるが, 機械や建造物を作るためには重要度が減少する概念がある。また, 逆もある。以下に例を挙げよう。

物理学が対象とする自然理解のためには, ニュートンの 3 法則のなかで慣性の法則が最重要であり, 力学法則を述べる大前提である。しかしながら, 建造物の設計構築では慣性の法則が問題になることは稀である[35]。安定な建造物を構築するためには, 慣性の法則より地球重力への対処, ストレス (応力) の理解と制御が必要である。したがって, その基礎として作用・反作用の法則の使いかたの習得が工学系の学生にとっての最重要課題になるであろう。初等力学ではストレスは張力・圧力や摩擦力（ずれ応力）として表現される。摩擦力は個々の物体の示す個性に過ぎず, 一般的な法則を追求する物理においては, その重要度はあまり高くない[36]。

建造物を構築する場合を考えよう。地上に建設することを考えるので, 重力, 付随した応力や摩擦力が作用する上での静力学を考える。構造物を点と考えることはできず複雑な構造を持ってるので, 全体を部分要素の集まりと考え, ある形を持ったそれぞれの部分要素に働く力を図に書くことから始まる。それらの力は物体の中の力が働く部分を始点とするベクトルとして描く[37]。図への力の記入の仕方は次のようにまとめることができる。

- 作用・反作用
  張力や圧力は物体の面に垂直に描く。ロープで引っ張る場合は張力は物体の一点で働くのでロープの方向に描く。摩擦力は摩擦力が働く面に平行に描く。これらは作用・反作用の法則を満たす力だから, この物体に働く力には反作用の力があり, その反作用は他の物体に働く。この他の物体に働く反作用は他の物体の図に描く。作用・反作用の法則を満たす

[34]物理学でも, 実験を実現するためには様々な制約の調整が必要である。しかし, その目的は矛盾しない物理法則を見つけ出すことにある。

[35]地震でもない限り建造物が大きく動くことはないだろう。

[36]一般法則の追及に対する態度には工学と物理学で大きな違いがある。

[37]高校ではベクトルは平行移動できると教えられているが, ここでは平行移動してはならない。建造物のある場所に働く力はたとえ大きさと向きが同じでも, 別の場所に働く力とは全く異なった作用を持ち得るのである。力のように合成・分解できれば, 平行移動できなくても, それはベクトルである。始点の位置は物体の回転を考えるために必須である。

力は物体の面を通して働くことを理解することが重要である。

- 外力
  外力は面ではなく体積に働く。たとえば, 重力はその部分の重心に働く。

これらの力が洩れなく描ければ, あとは各部分にたいして運動方程式 $\vec{F}=m\vec{a}$ を書き下し, すべての要素にたいする運動方程式を連立させれば問題は解ける。ただし, 今考えている問題では $\vec{a}=\vec{0}$ なので（建築物が動くことは考えない）[38], 力の釣り合いの問題に還元される。このようにして書かれた図は free body diagram と呼ばれることが多い。

さて以上が工学的な視点から見た建造物の各部分に作用する力の考察である。物理学で同様な問題を考察する場合, まず力が働いているかどうかの考察からスタートしなければならず, スタート・ポイントが全く異なっている。物理では特に地上は特別な場所とは考えないので, その建造物が地上にない場合も考えられるだろう。もしも, 無重力状態下に置かれているのならば, 全く別の考察を行う必要がある。

7.3 電気回路

電気回路における工学と物理のアプローチの違いについて見てみよう。

電気回路とは, 電池やスイッチ, 抵抗, コイルやコンデンサーのような 2 端子を持つ部品が導線で結合されたものである[39]。より精密に表現すると, 電気回路は

1. 一つ一つの電池や抵抗やコイルやコンデンサーに導線がつけられた「枝」
2. 導線を結線する「結節点」

からなる。この電気回路における基本法則として, キルヒホッフの法則がある。各枝には方向があり, 枝の端子間の電圧 V と, 電流 I が変数として与えられている。電圧, 電流とは何であるかは問題にしない。電圧と電流のあいだに成り立つ応答法則を使って電気システムを制御することが目的である。キルヒホッフの第一法則は, 各結節点で

$$\text{第一法則} \qquad \sum_i I_i = 0$$

である。和は結節点に入るすべての枝にわたる。電流の符号は結節点に入る方向を正とする。第二法則は, 枝を繋いで閉じられたループに対して

$$\text{第 2 法則} \qquad \sum_i V_i = 0$$

である。和はループを作るすべての枝にわたる。符号はループを右回りする方向を正とする[40]。

工学では**キルヒホッフの法則を基本法則と考え, その法則の下に回路の振る舞いを考察する**。一方物理学では, できるだけ少ない基本法則を用いて自然を理解しようとするので, **キルヒホッフの法則をより基本的な法則から理解できないか**を考える。実は, 電荷の保存則はキルヒホッフの第一法則そのものである。一方, 第一および二法則からテレゲンの定理

$$\sum_i V_i I_i = 0$$

が閉じたループに対して成り立つ。これは電場が電流に行う仕事の原理, つまりエネルギー保存則に他ならない。このように工学と物理学のアプローチは大きく異なっている。

以下には, キルヒホッフの法則を前提として, 電気回路を扱う方法を簡単に述べる。電池は電池の電圧 E と枝の端子間の電圧との関係

$$V = -E$$

で与えられる。回路に電圧の湧き出しがあると考え, 第二法則の右辺が 0 から E に変わると考えてもよい。電流の湧き出しがあるときは, 第一法則の右辺に入れればよい。抵抗やコイル, コンデンサーの性質は枝の両端間で成り立つ

$$V = Z \cdot I$$

で与えられる。Z は電気回路の場合はインピーダンス, 一般にはプロパゲーター（伝達関数）と呼ばれる。大きさ R の抵抗の場合は $Z=R$, インダク

---

[38] 耐震性を考える場合は $\vec{a}\neq\vec{0}$ であり, 問題は複雑になる。
[39] トランジスタのような能動部品は考えない。
[40] 実は符号の取り方は任意である。しかしながら, 一度決めたルールは守らなければならない。
[41] 一部の教科書では, 虚数単位として j を用いる場合がある。これは, 記号 i を電流を表す記号として使う場合が多いからである

タンス L のコイルの場合は $Z = i\omega L$ である。ここで ω は交流の角振動数, i は虚数単位である[41]。容量 C のコンデンサーの場合は $Z = \dfrac{1}{i\omega C}$ である。

このように工学では電気とは何か, それはどのように理解できるかが問題なのではなく, いかにして電気を使い役立てるかを問題にする。そのために必要な特殊な物理法則をとりだし, その法則に対して成り立つメタ法則を分析する。電気回路の場合, そのメタ法則は線型応答の法則であった。この電圧（駆動力）と電流（駆動力に対して生じる流れ）の線型応答関係は他の工学の他に分野でも現れる。たとえば

	電気	(変位) 機械系	(回転) 機械系	流体系	熱系
駆動力	電圧	力	トルク	圧力	温度
ながれ	電流	速度	角速度	流速	熱流量

のような各分野における対応関係を考えることができる。特に電気と熱系の対応は良く, 温度分布と熱流の解析を電気回路の記号を用いて行うことがある。

物理は自然を対象とし自然の理解を目指す。そのため, 自然を理解するためのいろいろな物理法則の間に成り立つ首尾一貫性を追求する。物理学にとってはいろいろな電気現象をシンプルに統一的に理解できることが重要であり, そのためにいろいろな抽象化, 論理展開, 具象化を繰り返しながら理解を深めていく。電気回路の場合, 物理指向の学生ならば, 導線の中には何が流れているのだろうか, 電圧の実体は何だろうか, なぜ導線でエネルギーが輸送できるのだろうか, エネルギーはどのような速度で輸送されるのだろうか等々と考え, そこで成り立つ物理法則を追求していくだろう。工学では物理法則は与えられたもので物理法則を深化させることは重要視せず, その物理法則を役立てるために, 与えられた法則にはどのようなメタ法則が成り立つかを重要視するであろう。

8　まとめ

近年の学生の学力低下により, 大学では専門教育を行うことができなくなっている。専門教育を行う前に理工系の学生ならすべての人が身につけておくべき能力, すなわちリテラシーの教育を行う必要があるはずだが, 教育の現場では何を理工系の学生のリテラシーとすべきかの意見の一致がない。それどころかリテラシーが必要だという認識がなく議論すら行われていない。リテラシー教育はいわば「しつけ」「たしなみ」の教育であり, その教育は学生に対する押しつけにならざるをえない。したがって, 何を教えるべきか, 教育する側の責任は大きい。現在の科学・技術社会のなかで, 何をリテラシーとして教えるべきか, 深く掘り下げる必要がある。

小学校の算数はリテラシー教育の典型である。それはたんに数の計算の仕方を教えるだけであるが, その計算法の背後には人類が歴史の中で獲得してきた深いアイデアがある。算数はそのアイデアを計算という手を動かして使い考えるためのシステムとしたものである。その教育を担当する教員はそのアイデアを深く理解している必要がある。その上でそのシステムを教育技術を駆使して教えなければならない。

大学教育の中で物理学が担うのは科学的リテラシー教育とも言うべきものである。その教育とは仮説を立て（抽象化）, 新しい現象を予測し（論理的な推論）, 実験を行い検証する（具象化）サイクルを繰り返すことによって理解が進むという信念を学生に焼き付けることである。実際, 物理学はこのサイクルを無限と思われるくらい繰り返して発展してきた。最初の段階では何を測定すべきすら分かってないことが常であり, 測定対象が明確になった時点で物理としての問題は解けたと言っても良い。その意味で, 高校の物理教育で行われているのは論理的な推論の一段階だけであり, 科学的リテラシーの教育として非常に不完全である。問題を解くときには何を捨象し何に注目したかを考えながら, 図を描き, 表を作り, グラフを書くことから始めないといけない。問題を解いたら既知の知識を総動員して, その答えにあらゆる面から検討を加える習慣こそが身につけなければならないものである。この意味で, 物理の講義は多くの知識を述べる必要はない。それよりも範囲を制限して, そのなかで物理実験との有機的な結合を図るべきである [11]。このような物理教育では時間がかかりすぎ, 知識の量が不足すると言う批判があるかもしれない。しかし, 知識量の不足のために専門教育が不可能になっているのではなく, 知識を積み上げ育て使っていく能力がないから, 専門教育についていけないのである。マスメディアやインターネットに溢れる知識に対する感受性を育てるにも, 物理学で学ぶ実験的操作的な思考になれていることが重要であろう。

物理学にとっての数学は物理における実験測定

可能な概念を操作的に演繹してさまざまな結論を論理的に導くための強力な道具である。ニュートンが力学を完成したときも, マクスウェルが電磁気学を完成したときも, 彼らは古い誤った考えを十分に払拭しきれていなかった。それにもかかわらず, 一つの新しいアイデアを使って構成した数学の力によって正しい方向が示され, その体系が新しい発展への出発点になったのである。

工学の目的は現実の世界で生じる問題を解決するためにさまざまな相矛盾する要請を調整することにある。工学では物理的な要請も一つの要素にすぎない。科学的な原理的考察も工学的な現実的な態度も重要であるが, その立場の違いを弁えておかなければ, 互いに他方の長所を減殺してしまうことになる。

References

参考文献

[1] Arons. A. B, 1990, *A guide to introductory physics teaching*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-51341-5.

[2] 朝日新聞のシリーズ「新学歴社会」2009 年 1 月 4 日の記事。

[3] http://www.yomiuri.co.jp/kyoiku/news/20070910ur21.htm.

[4] http://www.meti.go.jp/policy/kisoryoku/index.htm

[5] http://www.project2061.org/publications/sfaa/default.htm.

[6] Kondo,Y. and Kiguchi. M., 2008, Science and Thechnology, No. 20, 49 (2008).

[7] 石川孝夫, 学ぶ側の論理・教える側の論理, 物理教育 **26** No.1, 5 (1978).

[8] http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol04_10/vol4_10_p12_13.pdf を参照のこと。

[9] J. C. Maxwell, 1891, *A treaties on electricity & magnetism*, vol.1 & vol.2, Dover edition 1954, ISBN 0-486-60636-8, ISBN 0-486-60637-6.

[10] I. Newton, 1687, *Philosophie Naturalis principia mathematica*. Japanese translation 河辺六男, 1979, **ニュートン**, 中央公論社.

[11] 三沢 和彦, 2008, 大学の物理教育 14, 153.