

HIT 基礎物理学シリーズ

2. 工科系のための基礎力学

井上 光*・尾崎 徹**・鈴木 貴***・中西 助次****・細川 伸也*****・大政 義典*****

(平成24年10月30日受付)

HIT Basic Physics Textbook Series

2. Mechanics Basic to Engineering

Hikaru INOUE, Tōru OZAKI, Takashi SUZUKI, Suketugu NAKANISHI,
Shinya HOSOKAWA and Yoshinori OHMASA

(Received Oct. 30, 2012)

Abstract

A series of textbooks on basic physics has been published in our Institute. A group of staffs responsible for the physics education of freshmen has edited and revised these textbooks which are used for lectures, exercises and student experiments for basic physics. In order to notify the character of each textbook, the concept for editing has been described in series for the respective ones. This report is the second one. The textbook used for the lecture in basic physics entitled “Mechanics Basic to Engineering” is presented. The hints for future revisions are offered to make the textbook more useful to the physics education in our Institute.

Key Words: linking education, basic physics, mechanics, textbook

1. はじめに

学生が物理学の考え方をしっかり学ぶことができる環境を整えるにはどうすればよいか。本学では、新入生のための基礎的な物理科目の在り方について、「物理担当グループ」の教員が常に検討を重ねている [1-6]。その営みのひとつは教科書の編集である [2, 6]。昨年度の紀要教育編で、グループの成り立ちと現在の講義・演習・実験で使用中の4冊の教科書を HIT 基礎物理学シリーズとして紹介した [6]。また、それぞれの教科書の編集の方針、内容の特色、今後の課題などを、年度に分けて、1冊ずつ報告する旨を記した。参照の便宜のため、これらの教科書の発行と改訂の一覧を付録の表に再録する。

昨年度は基礎物理演習で使っている「力学 WORKBOOK

第2版)」について報告した [6]。今回は基礎物理学の講義で使っている「工科系のための基礎力学 (第2版)」について報告する。

2. 基礎力学の教科書の作成経緯

1995年に物理担当グループは「物理学実験」と「工学系基礎課程 力学」の2冊の教科書を刊行した。HIT 基礎物理学シリーズの始まりである。これらは93年度の環境学部新設と94年度の工学部再編 (基礎教育部門の解消と一般教育担当教員の学科分属) のもとで編集した。

当時、工学部1年次生には「工業基礎力学」が通年4単位の必修科目とされていた。「工学系基礎課程 力学」はその教科書として作成したもので、グループメンバーの講義ノートをもとに、工学部で1年間をかける力学の講義に望

* 元広島工業大学工学部教授
** 広島工業大学工学部電子情報工学科
*** 広島工業大学工学部電気システム工学科

**** 広島工業大学工学部機械システム工学科
***** 熊本大学大学院自然科学研究科
***** 広島工業大学非常勤講師

まれる基礎的な内容（運動学～剛体の力学）を全6章に収めた。

2000年度には、工学部の学科の組織・名称・カリキュラムが改められた。物理担当グループは工業基礎力学を「基礎物理学Ⅰ（1期）」と「基礎物理学Ⅱ（2期）」に改め、同時に「基礎物理演習（1期）」を新設した。

これらの改新には、当時の新生の動向を見ながら、新しい芽を育てる意図があった。95年度に始めた時間外の補習型教育に限界が見えたところで、高校の担当領域に入り込んで、正規カリキュラム内で大学教育へのスムーズな移行を図る「接続型教育」の提案と実践である。基礎物理演習については、その後たびたび報告した[1-3, 6]。

改新に先だって、講義用の教科書の改作にも着手していた。科目名は変えたが、専門基礎の物理学の修得はまず力学からとの合意があった。前著を下敷きにして、内容を大きく変えることはなく、授業の進めやすさを念頭に項立ての更新や追加する事柄を相談した。中心力に関する事柄を新しくひとつの章にまとめ、さらに、力学と物理学の他の分野との関わりを概観する1章を付け加えて全8章とした。また、微分と積分、国際単位系などの5項目を付録とした。新しい章末演習問題も付け加えた。構成がかなり変わったので、書名を「工科系基礎力学」と改めて2001年初版を出版した。

2006年度には、当時の「ゆとり教育」のもとで育った世代が大学に入学した。そのかなり以前から年ごとに新生の学力の低下が懸念されていたのだが、この年には別種のギャップが大学に到着するかのような議論がかわされて、関係者の間では「2006年問題」とも呼ばれた。

本学ではこの年に情報学部が新設され、全学的にも新しく編成されたH18カリキュラムがスタートした。物理担当グループは、基礎物理科目は従来通りとしたが、この時期以降の講義用の教科書を簡素にすることが必要と考えて、ミーティングでたびたび検討を重ねてきていた。内容を易しく、表現を分かりやすくすることは当然の目標であるが、力学の教科書として望ましいレベルを保ちたいとの意向も強かった。講義スケジュール（シラバス）からはみだす部分があるのもよいとして、必修章節と選択章節を区分し易くすることを考えた。たとえば、前著の「質点の力学」の章を必修の「運動の法則」と選択できる「いろいろな運動」の2つの章に分けた。説明をていねいに書くと、どの章も必然的に長くなり、全体のページ数が気になった。また、この時期には基礎物理演習で使う「力学WORKBOOK」の第2版の準備も進んでいて、両者間の項立てや問題と解答などの整合も必要であった[6]。自習や基礎物理演習の予習にも適するように、力学WORKBOOKスタイルの演習問題も追加した。一方で、過多な章末演習問題を削除し、

付録も2項目に留めた。

こうして、2度目の改作で、全9章のものが出来上がり、書名を「工科系のための基礎力学」と改めて、「ゆとり世代」の入学に間にあう2006年に初版を出版した。ただ、当初にイメージしていた簡素化とはほど遠くなり、易しくすることが最も難しい課題との印象が残った。

2010年度に3度目の改作で全10章とした。これが現在使用中の「工科系のための基礎力学（第2版）」である。この装丁を図1に示す。以上の経緯も含めながら、次節でこの内容を紹介する。

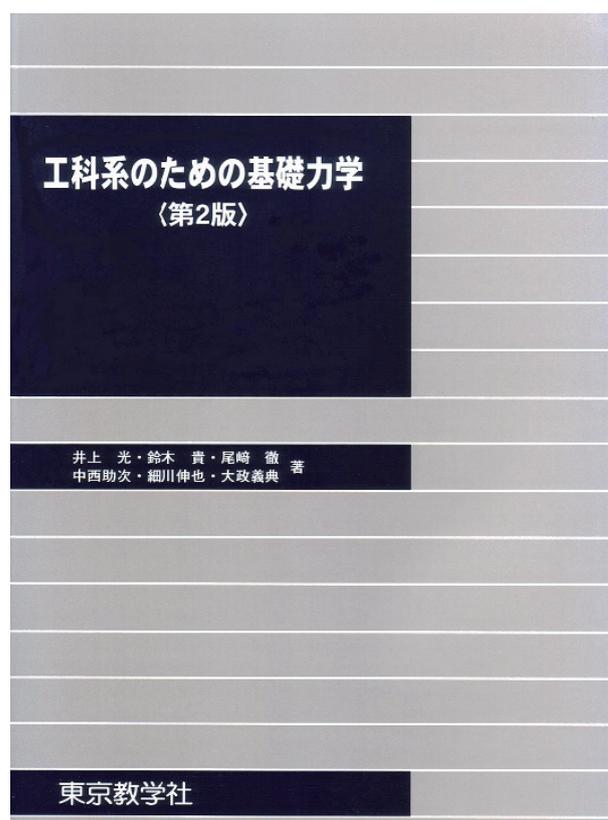


図1. 工科系のための基礎力学（第2版）

3. 「工科系のための基礎力学（第2版）」の内容

現在の教科書には、改作を重ねて考えられたことがさまざまな形で盛り込まれている。まず、各章の内容の特徴的なことがらを書き上げてゆきたい。基本的な考え方にウエイトを置いて記すことにする。各章が占めるページ数を（ ）内に示す。

序章 力学と物理学・工学（8ページ）

科目名を工業基礎力学から基礎物理学と改めたときに、それを力学から始める理由説明が必要と思われた。そこで、力学が物理学の他の分野（電磁気学、熱学、光学、量子力学、相対論）と工学へどうつながるかが分かるように、各分野の考え方や歴史を、イラストつきの旅行地図の

ように、大まかに説明している。とくに、重力と日常生活およびクーロン力と物質の成り立ちに視点を合わせている。以下の各章で引用できる箇所もつくってある。なにごとでも、歴史を知ることが理解を進めるであろう。旅行の前・中・後のどこで見ても役に立つイラスト地図になることを期待している。

第1章 運動の表わし方 (28ページ)

力学は運動の観測から始まることは説得しやすい。工科大学の専門基礎としてゆっくり勉強するときには、力学以前に「運動の表わし方」でベクトルと微分の計算の準備を十分に行うのが区切りがよくて理解しやすい方法と考えている。

この章は座標系の使い方に重点を置いている。運動物体の位置の表し方から始めて、速度や力を例にしてベクトル量の考え方を説明し、瞬間速度の表わし方から微分演算の着想に話を進めている。ここにいろいろなやま場があるのだが、5節で取り上げたい。ベクトルと微分の計算法が分かれば速度ベクトルから加速度ベクトルが得られる。

この章の目標は加速度ベクトルのイメージづくりである。具体例として、放物運動、円運動、単振動の3つの基本的な運動について速度ベクトルと加速度ベクトルのできるように説明している。

第2章 運動の法則 (20ページ)

この章の目標は力学入門である。冒頭に運動の3法則を置いている。以下のすべての章で、物体の運動のようすはこの3法則をもとに計算できることを示す。

第1法則（慣性の法則）の言い回しはかなり知られていると期待できる。ここでは、その表現はこれから使おうとする座標系を選ぶ条件とすることを付け加える。

第2法則（運動方程式 質量×加速度=力）で力とは何かを認識できる。まず、物体Aの運動を考えるとときにはA以外の物体B, C, …からAに作用する力を見分けることが大切なので、力のベクトルを描くときはいつでも「BからAに」、「CからAに」、…と書き添える習慣をつけることを奨めている。それらの日常的な例を多くの図で具体的に示している。また、力の影響を表す動詞を単純に「作用する」に統一している。類義語の「はたらく」、「およぼす」などの混入でA, B, C…についての言い回しがぶれるのを避けるため、この言葉遣いは以下の全章で一貫させている。

第3法則（作用反作用の法則）では、「BからAに」と同格で「AからBに」の表現が使われる。綱引きなどの先入観で、これが力のつり合いの表現と誤認されたままになりやすい。力のつり合いでは第3の物体C（綱引きではC=綱）があることをいろいろな例で説明して、基本的なことで入門時に曖昧さを残さないようにしている。

力の種類と由来を知ることがいつでも大切である。まず、基本的な力として万有引力と電磁気力（クーロン力）を挙げ、次に、日常環境での接触力（微視的なクーロン力の合力）として垂直抗力、摩擦力などを挙げて、上のA, B, C…にあたるものを見分け方を説明している。

運動方程式を使う例は放物運動と等速円運動の2つに留めている。それぞれに大切な特徴がある。

放物運動では、必要になったところで積分を使い始めて、定石通りに初期値問題に持ち込む方法をとっている。学ぶ側にとって「基本法則は微分方程式で表され、個々の現象はその解（積分）で表される」ことを最初に把握できそうな例である。物理現象全般に通用するこの考え方に共感が生まれれば、得たりとするところである。

等速円運動は、初期値問題には適さないが、「運動から力を推測するとき」と「力から運動を推測するとき」の比較説明に適している。両方の見方をすることが必要である。太陽系の惑星群が（近似的な）円軌道を描いていることは運動方程式と万有引力の双方の普遍性を同時に納得できる比類のないテーマである。ここでは、ニュートンによって上の2つの法則が発見されるようすを説得材料にしている。

第3章 いろいろな運動 (18ページ)

第2章の運動の例をごく基本的なものに限るためにこの章を設けている。ここに集めているのは、単振動、単振り子、摩擦力が作用するときの運動、粘性抵抗が作用するときの運動、減衰振動、強制振動などの1次元の質点の運動である。授業時に望む項目を選べるようにしている。

単振動は繰り返し現象の表わし方やそれに関連する用語を知るテーマである。さらに、微分方程式とその解の関係（方程式で決まる量と初期条件で決まる量の区別）を納得するテーマともなる。

摩擦力の関係する運動では、まず、室内に置かれているものが静止している理由（ちょうど必要な大きさの摩擦力の作用状況）から説明している。複雑で微妙な摩擦力の性質はしばしば力と運動の誤概念（たとえば、力を加え続けるので等速が維持できる）のもとになっている。よりよい理解へのステップとなることを望むところである。

粘性抵抗が作用するときの運動および減衰振動や強制振動などは、運動の特徴が微分方程式で表されることや、実現する運動はその解で表されることの基本例になる。ただし、これらのテーマにはさしあたりスキップ可のマークをつけてある。

方程式を解かなくとも定性的に納得できる説明も試みている。たとえば、落下中の雨粒に速くなると大きくなる空気抵抗が作用するなら、雨粒はある程度以上速くなれないと説明してある。エンジンなどにもあてはまる話である。

第4章 仕事とエネルギー (26ページ)

力学的な仕事 (= 力・変位) は力の効果を評価する量として実用的に広く使われる。エネルギーという言葉はさらにきわめて幅広く使われている。○○エネルギーという物理量が自然科学の全分野間で、換算可能な量として、いろいろと名前 (存在形態) を変えて移り変わることによる。

力学では運動エネルギーと位置エネルギーだけになる。両者の意味と算法はよく定義されている。これらのエネルギーの増減にもなって仕事がなされる。それ故に、エネルギーとは「仕事をする能力」と説明している。

この章の第1目標は仕事とこれらのエネルギーの関係を理解することである。第2目標は運動方程式から力学的エネルギーの保存則が得られる場合と得られない場合 (話が別の分野に移る場合) があるのを知ることである。

はじめに、まず「仕事」を定義する。計算法として簡単な1次元の場合から一般的な線積分の場合までをひとつの節にまとめてある。次に、「仕事率」でなじみがある単位ワットを説明している。「運動エネルギー」については、まず定義式を与えて話を簡単にしている。「位置エネルギー」は万有引力について地球表面上の場合と地球から遠く離れた位置の場合で計算法を説明している。

力学的エネルギー保存則の導出に先だって、「保存力」を定義する。一般に、任意の2点間をつなぐ変位で「仕事」が変位の経路によらないことを保存力の資格とする。こうすれば、摩擦などが排除できて、かつ位置だけで決まるエネルギーを定義できる一般的な条件が整う。保存力による運動では、位置エネルギーの減少分 (または増加分) だけ運動エネルギーが増加 (または減少) するので「力学的エネルギー保存則 (合計は変わらず)」が成り立つ。

非保存力の関与が含まれる運動では「力学的エネルギーの散逸」が起こる。例題の「等速で降下するパラシュート」で、運動エネルギーは変わらず、位置エネルギーが一定の割合で失われるようすを説明している。

この章では、話を一般化した箇所に、線積分の定義や偏微分と全微分の表式が含まれている。これらの箇所にはスキップ可のマークをつけてある。

第5章 運動量と角運動量 (10ページ)

この章は第2版で設けた。運動量も角運動量も基本的な力学量である。初版ではこれらの説明が離れた章節にあった。孤立した質点系ではどちらも保存量 (一定値を保つ物理量) であることを後に示すことになる。運動量の時間変化率は本来の運動方程式の左辺になる。角運動量の時間変化率は回転の運動方程式 (第6章、第7章および第8章で使う) の左辺になる。回転の運動方程式は本来の運動方程式を組み替えてできるものである。また、これらの新しい形の運動方程式に関わる物理量 (もしくは概念) として、

力積、撃力、力のモーメントなどがある。そこで、力学の体系としても分かりやすいように、これらの事柄の定義や具体例を短くひとつの章にまとめておくことにした。

上述の話を、運動量の定義、力積と撃力、力のモーメントの定義、角運動量の定義、回転の運動方程式、角運動量保存則、の順に全6節に整理してある。

1年間の講義計画を考えると、この章を分岐点としてその後を選ぶことができる (図2. 参照)。

第6章 中心力による運動 (20ページ)

万有引力とクーロン力は中心力である。中心力を作用しあう2質点A、Bの質量に桁違いの開きがあるとき、質量の大きい質点Bはあまり動かず、質量の小さい質点Aがその周りを動くように見える。さしあたり、Bを固定してAの運動だけを考えることができる。太陽系や原子がこのような構造になっていて運動のイメージを描きやすいのはラッキーである。

この章では、太陽系の惑星 (質点A) の運動を解析する一般的な手法を説明している。Aの運動を極座標 (r, θ) で表して、時間 t の関数 $r(t)$ と $\theta(t)$ の連立微分方程式を正攻法で解くことになる。

第5章の話よりAの角運動量が保存することが分かる。この値を J とする。第4章の話よりAの力学的エネルギーが保存することが分かる。この値を E とする。 J と E の組み合わせで軌道の形が決まると見当がつく。ここで、はじめの連立方程式に戻って時間を消去して座標 (r, θ) の間の2階微分方程式に書き換える。改めて解くと軌道の解 (楕円、放物線、双曲線) が得られる。この解法は定石になっていて、物理的な視点で微分方程式を解く例ともなる。

最後に、この解が惑星の運動についてのケプラーの観測法則を解明した歴史上のいきさつを説明している。中心力問題は力学のふるさとと言える。解く作業は基礎力学としてはレベルが高い。意思のある者が自らの納得のために取り組むことを期待する章である。後半の節にスキップ可のマークをつけている。

第7章 質点系の運動 (22ページ)

互いに中心力を作用しあう複数の質点の集まりを考える。この章の目的はどのような質点系にも通用する基本的なことがらを調べることである。質点の数が2個 (2体問題) の場合および一般に N 個の場合を扱う。

2つの質点A、Bがあるときは、AとBの間で作用しあう内力とA、B以外からA、Bに作用する外力を考えて、A、Bのそれぞれの運動方程式が書ける。初めて第3法則が運動方程式に使われる。方程式を組み合わせると、2質点の「重心」が定義できること、重心の運動は内力に関係なく外力のみで決まること、Bに対するAの運動は相対座標で扱える (第6章に戻る) ことなどが示せる。これらは方

程式を解くのではなく、書き直す（組み合わせ方を変える）だけで分かることであり、力学の基盤を改めて納得できる話になる。

第5章で準備したように、A、Bの運動方程式はそれぞれの運動量を使う形に書き直せる。運動量の合計（全運動量）をつくると、内力に関係しない方程式が得られる。これより、外力のない孤立系では、全運動量は内力に関係しない保存量であること（運動量保存則）が納得できる。角運動量についても同様の計算ができる。

運動方程式を解く具体例として、2質点の衝突現象（外力なし）と2質点の連成振動（外力あり）を扱っている。

質点が N 個ある場合も、外力による重心の運動や孤立系での運動量保存則と角運動量保存則について、2質点の場合と同様の議論ができる。 N 質点系の議論は次章の剛体の運動に適用する。

第8章 剛体の運動 (26ページ)

原子を質点とみなすとすべての物体は質点系である。剛体はそのひとつで、外力を受けても内力（引力と斥力のあるクーロン力）に変化が起こらず、形も大きさも変わらない特殊な質点系とみなせる。剛体の運動の一般論は難しい。しかし、質点系の運動の考え方をそのまま適用できる入門的な部分もあるので、7章の結論を活かしたい。この章はその試みである。

剛体の重心の位置は各原子の位置の平均値になる。和の項数が膨大になるので、これを積分に置き換える。つまり、たくさんの「小さな原子質点についての和」を「微小要素の和の極限」として計算する。この置き換えは積分の意味を理解するのに役立つであろう。2つのイメージを重ねたり分けたりするトレーニングが出来そうである。

重力などの外力が作用する自由な剛体の運動方程式は質点系の運動方程式と同じになる。全質量を集めた重心の運動方程式と重心のまわりの回転の運動方程式である。外力による力のモーメントがゼロならば、角運動量が保存する。6章以前で物体を質点とみなせる理由はここにある。

外力が作用しているが運動が起こらないときには、その剛体で力のつり合いが実現している。力の合計がゼロで、力のモーメントの合計もゼロの場合である。この見方で力のつり合いの1節を設けている。

実用上で重要なものは固定された回転軸を持つ剛体の運動である。すべての質点が円運動をしている。回転の運動方程式を表すのに便利な量として慣性モーメントが定義される。角運動量やエネルギーは慣性モーメントを使って表される。固定軸回転では運動の自由度は1なので、方程式を1次元の質点の運動と比べて説明している。

慣性モーメントの計算では、重心の場合と同様に、和を積分で置き換える方法をとる。いくつかの基本例について

計算法を示し、その他の代表的な形については結果を公式として列挙している。

回転軸の向きが変わるような運動は高度な課題となる。円柱が斜面を転がる場合は回転軸は向きを変えず並行に移動する。本書ではこの場合までを扱っている。

第9章 非慣性系での運動とみかけの力 (12ページ)

「見かけの力」は日常環境のあちこちに現れる。それらは実在の力と混在していて「見かけ」のものとして認めるのは意外に難しく、不用意な説明はあいまいさを残したままで混乱を引き継ぐものになりやすい。たとえば、「遠心力」は日常語にとけこんで、実在の力と同じような文脈で使われることが多い。計算結果が正しければそれでもよいが、分かったつもりでも、その場限りの見方になる。

見かけの力をくっきりと浮かび上がらせて、実在の力との区別をつけるには、慣性系の認識を出発点にする。まわりくどくとも、非慣性系の運動座標系を設定して検討するのが確実である。このために、並進座標系と回転座標系を使う。8章までのすべての話を慣性系に限ったので、このような非慣性系での議論が最後の章になった。

並進座標系は慣性系の再認識のために役立つ。乗り物などでよく経験している現象の見方を、運動方程式を書き換えて納得することになる。

回転座標系でも、運動方程式を書き換える計算が複雑になるが、物理的な考え方は並進座標系と同じである。結果として、遠心力とコリオリ力が浮かび上がる。それぞれの力について例をもとに説明している。遠心力に比べるとコリオリ力は「見かけ」の意味が分かり難い。

運動を慣性系に戻してみれば、すべての場合で「見かけ」の意味が納得しやすくなる。この戻し作業は慣性系とは何かを見直すためにも役立つ。事例には、複雑な計算を要しない場合を選んでみる。

章末演習問題

各章の章末に5～24題の演習問題を添えている。問題は初級と中級くらいの意味でAとBに分けてある。理解を確かめたり、知識を増やしたりするのに演習問題は助けになる。今後の課題は5節で取り上げる。

付録A 微分と積分

微分法は瞬間速度を表すために第1章で使い始める。解析基礎の講義で導関数のテーマが同時進行するころと期待できるが、力学でとくに必要な事柄を知るために、初等関数の微分法と積分法を短くまとめている。

関数の級数表現を利用すると、べき関数の微分法に続けて指数関数や三角関数の展開式を作ることができる。ある級数の導関数がもとの級数に等しいものを探すと指数関数が得られる。また、原点を中心とする単位円上の点の座標の値で三角関数を定義すると、点の微小変位をもとにそれ

らの導関数が得られる。さらに高階導関数も分かるので、実用的な級数展開式を作ることができる。この手順では、数学の標準コースとは別の論理を証明抜きで使って、結論までを短くしている。

積分については、不定積分、定積分、線積分、多重積分の意味を一通り説明している。とくに、定積分は無限小要素の和の極限值であることを強調している。

付録 B 2階微分方程式

第3章の振動問題の運動方程式で定数係数の2階微分方程式が現れる。同じタイプの方程式は他の分野でも頻繁に現れる。第3章のテーマや他の類似テーマのために、ここで同次の場合および非同次の場合の2階微分方程式の一般解と特殊解の意味およびそれらの求め方を解説している。

Coffee Break

Coffee Break と名づけたコラムを第2章から第8章までに14個挿入している。序章が読者に力学を学ぶ動機付けをした後も、それをCoffee Breakで強化している。教科書にそって力学の基礎を身につけつつある読者には、息抜きをして理解を深化させる場を提供している。Coffee Breakでは、日常の複雑そうに見える力学現象が本書で学んだ内容をもとにして理解できること、力学は省エネルギーなどの今日的な課題を解決するための基礎であること、保存量・保存則などの力学の考え方が現代物理学に引き継がれていること、最先端の科学研究に力学が基本的な役割を果たしていること、などを話題にしている。

ここでは、Coffee Breakのタイトルだけを紹介する。基本的な力、歩くとは、仕事ゼロ?? そんな…!!、登山家の仕事、省エネルギー、保存量と保存則、太陽系外惑星の探索、水星の近日点移動の解明、皆既日食、格子振動・フォ

ノン、ゆで卵の回転軸の移動、回転するコマは倒れない、フィギュアスケートのスピン、離れ技。

これらは、本書に挿入された多くの写真や挿絵とともに、本書の特長になっている。

本書の構成と利用のしかた

本書の目次の続きに「この本の構成と利用のしかた」として、図2のスキームが添えてある。①のように6章を飛ばしてもよい。②は2章～6章のどこからでも9章に飛ばすことを示している。

4. 他大学での採用状況

HIT基礎物理学シリーズの「基礎力学」は他の大学、高専等でも教科書に採用されてきた。付録の表について、教科書としての採用があった大学等を表1に示す。

表1 力学教科書採用状況
()内は本学での使用年度

工学系基礎課程 力学 (1995～2000) 三重大学, 鹿児島大学, 八戸工業高等専門学校, 新潟工科大学, 日本大学, 福井工業大学, 福岡工業大学
工科系基礎力学 (2001～2005) 佐賀大学, 宮崎大学, 京都産業大学, 新潟工科大学, 同志社大学
工科系のための基礎力学 初版 (2006～2009) 神奈川大学, 同志社大学, 広島大学, 京都産業大学
工科系のための基礎力学 第2版 (2010～2012) 広島大学, 広島工業大学専門学校

5. 今後の課題

担当者へのアンケート

本稿をまとめるに際して、基礎物理学に携わっている教員に「工科系のための基礎力学(第2版)」に関して、

- (1) 良いところを教えてください。
- (2) 改めてほしいところを教えてください。
- (3) 取り上げてほしいことを教えてください。
- (4) その他

とのアンケートを行い、新任および非常勤の先生方、教育学習支援センターの先生方に自由に回答して頂いた。教えてくださったことは、総論的な事柄から特定の箇所の改善方法まで、たくさんある。丁寧な説明で分かりやすいとの一方で難解でとりつきにくいとの評価も受けている。また、講義の方法をいろいろと工夫されているようすも伺える。これらの内容も織り込む形で以下の報告をまとめてゆきたい。

内容の点検

本稿第2節の経緯で述べたように、この「基礎力学」の教科書はよく改作を重ねている。教育環境の変わり目ごと

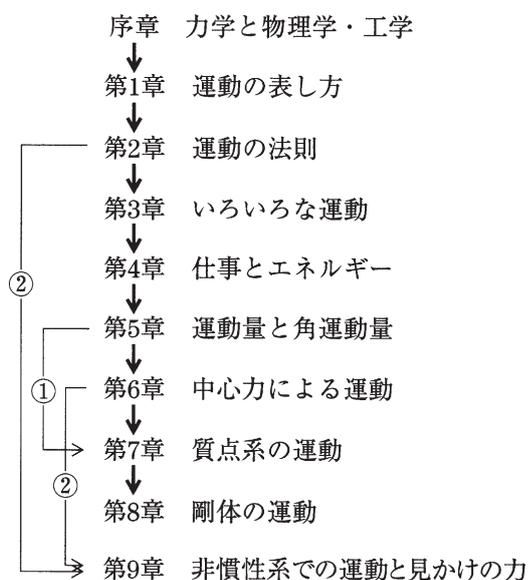


図2. 本書の構成と利用のしかた

になっているが、しばらく使ううちにあちこちに改めたいところが目に入るせいでもある。第3節で述べた現在版の内容は、基礎力学の教科書として、

- ① 体系が整っているか
- ② 講義に適しているか
- ③ 自習に適しているか

を考えながら素材の配列と説明の手順（言葉，式，図）を選んできたものといえる。分担執筆で，著者間の整合も必要であった。侃々諤々の話し合いからいろいろな方針が出てきた。上の①～③のバランスをとるように努めた。

本稿第3節では本書の紙面に出た考え方を報告している。紙面には出ていないが、

- (a) 講義の参考になること
- (b) 次の改訂で考えること

がある。これらを取り混ぜながら，書き手の立場で考えてきたことを順に記してゆく。

全体

力学の出発点は運動の3法則と力の由来の法則である。これらの基本的な法則の組み合わせの上に2次的な法則を築く形になる。本書ではこの筋書きを徹底させるようにしている。力学では，いろいろな事実が体系的に法則化されているので，覚えることは少しで済むと言われることもあるがそうはゆかない。

第1章

出発点に来るために，法則を表すための言葉遣いと計算技法を理解しなければならない。微積分法とベクトル演算に通じることが必要になる。ここが第1章のやま場である。このステップを数学的準備とも言うが，数学だけの準備でもない。最近のプレースメントテストの分析結果では，工学部新入生の80%以上はべき関数の微分公式を知っている。しかし，数学的な形を「覚えること」と物理現象の表現方法として「分かること」の間に大きい隔りがある。

数学科目の授業進度との関連は大切である。物理先行で教えていると思う間は丁寧に説明すべきだが，そこで必要な内容に限定して，むしろ簡潔を図るべきであろう。計算の熟達などで，数学でかけている時間の肩代わりはできない。その辺りは数学科目に期待して任せたい。

物理で大切なことは対象物を式でとらえてイメージつくりを助けることである。ベクトルの矢線にはまず紙の上で出会うのだが，できるだけそれを実物にあてがうように考えてみる。瞬間速度の考え方は微分計算そのものである。すでに微積分に通じている学生にも，さらに「式を読む」ような訓練に効果がある。微積分に未習熟の学生でもここから始めることはできる。速度ベクトルと加速度ベクトルの間にもギャップが感じられるが，目に見えるような実例

をもとに乗り越えたい。加速度ベクトルの向きが想像できれば，それと同じ向きに力が作用していると判断できる。これらが納得できれば第1章のやま場を越えたといえよう。

アンケートで高校物理からの接続がよく考慮されているとの評価を受けているところと思える。

本学の入学前セミナーの物理テキストでは，実際に力学台車を使って，加速・等速・減速運動が起こる状況を作り，観測と解析の方法を具体的に提示している[5]。中学と高校からの接続をよくするために，本書でも活用したい。

第2章，第3章

ある程度の準備ができて，運動の法則に進むことになる。運動方程式（質量×加速度＝力）の左辺は形が決まっているので書きやすい。問題は右辺である。力の項に何がくるかでその後の式の扱い方を変える（微分式か，代数式か，加速度の書き方まで変える）ことになる。素材の並べ方を工夫するところである。

力を見分けるために「…から…に作用する○○力」という見方を奨めている。基本的な第1の○○力は万有引力である。この力は向きも大きさも日常の感覚に入り込んでいて分かりやすい。第2はクーロン力（電磁気力）であるが，この力は普通には見分けられないし，微視的な見方に注意が必要なので，本書の紙面では簡単な説明に留めている。

実用上大切なのは，日常環境のさまざまな接触力である。垂直抗力が万有引力と拮抗しあってその間で摩擦力がうまれたりする状況をつかむ必要がある。工科系ではこの辺りが重要であるが，○○力の名前が専門分野（背後の業界）によって異なっている実情にも出会う。たとえば，反力は反作用の力の意味ではないが紛らわしい用語である。運動の第3法則では作用と反作用を同格に扱うが，普通の文脈では同格ではなく作用に先だって反作用が出ることはない。用語の使い分けは基礎教育と専門教育の接続の課題になっている[4]。このようなことは今後どこでも起こるので，学生には基礎力学の知識をもとに○○力の見分け方に自分で整合をとるようになってもらうのが一番よい。

接触力の根源は物質の表面に現れるクーロン力である。引力と斥力があるクーロン力の普遍性を知ること，垂直抗力や摩擦力などの接触力についても早い段階で違った見方ができるかも知れないと期待している。序章で定性的な説明を試みている。しかし，基礎力学ではクーロン力に立ち入るのはこの程度までにしておく方がよい。

クーロン力の扱いは電磁気学の領域である。一般に，電磁場による力の相互作用の伝達には光速で決まる時間の遅れがある。反作用も場で受けることになる。さらに，原子の話になれば量子力学に入らねばならない。エネルギー保存の仕組みが異なっている。原子構造のボーア模型も今は

演習問題か歴史の話かの境目あたりと考えられる。

運動方程式はもともと微分方程式である。解法の習得に期間が必要である。「いろいろな運動」ふうのテーマのいくつかは基礎物理学の講義ではスキップすることになるが、代表的な課題も解答もここにあること、その課題が力学の体系の中でどの位置にあるかを示しておくことも教科書の役割である。方程式を解かなくても分かることがあれば、できるだけ添えておきたい。

実際には、日常的に見聞している運動を3法則ですぐに理解できるわけではない。3法則に合わないように見える現象が多くある。力学を学ぶ過程は日常の経験でできてしまった誤った見方（素朴な誤概念）を、3法則をもとにして、考え直しては納得し直す過程になる。たとえば、速度ベクトルの向きを力の向きとみる傾向があって力学の理解を妨げている。加速度ベクトルのイメージをしっかりとさせることが大切になる。その他も、少しずつ納得し直すことになるであろう。身につけてほしいのは、力学の基本的な知識と技法、体系の組み上げ方、その学びとり方である。この辺りが基礎力学の役割である。

第4章

「仕事とエネルギー」は重要なテーマである。まず、日常語になっている「仕事」と「エネルギー」から物理的な意味を取り出さねばならない。物理の勉強を力学から始める理由である。

「仕事」の定義では力と変位は独立に指定できて、どのような組み合わせについても計算できる。いくつかの力が混在しているときには、どの力がする仕事を明確にする必要がある。仕事をさせるための動力源の類はたくさんある。その性能を評価するには、望む作業をしている力がする仕事を選ぶ。

「仕事率」は1秒当りの仕事として単位ワットで表される。電力などで日常感覚的になじみのある単位をもとに、仕事の考え方と同時にエネルギーの転換が起こるようすをさらに積極的に説明材料にしたい。

仕事の定義と運動方程式を組み合わせると、仕事と「運動エネルギー」の互換性が示せる。この場合は力の種類に条件を付けなくてもよい。

一方で、「位置エネルギー」の考えを築くには力の種類に条件が付く。このために本稿第3節の4章の項で述べた「保存力」の資格が使われる。これは多くの力学の教科書で伝統的に採用されている厳密な論法であり、本シリーズでも最初版からこの方法を使っている。まず、空間の位置を指定すればそこでの力の大きさと向きが決まる形（場を作る形）になっていることが必要である。万有引力や静電気力がこの性質を持つ。本書では、このような保存力の場を想像しながら位置エネルギーの定義と力学的エネルギーの

保存則を一般的に説明している。ただし、任意経路での線積分を使うなどで入門時には取りつきにくい。

力学的エネルギー保存則が確定しているとすれば、別の方策がある。力学的エネルギー保存則を表す式の両辺を時間で微分すれば運動方程式が現れることは比較的簡単に分かる。ならば、計算を逆に行えば運動方程式から直接に力学的エネルギー保存則が得られることになる。位置エネルギーの式も自然に得られる。この方法はエネルギー積分（運動方程式を解く途中の積分式）を得る手順としてよく知られている。法則どうしが単純に微分と積分の関係になっていることが分かる。力学 WORKBOOK ではこの手順を選んでいる [6]。しかし、摩擦などについてこの積分法を使うと判断を間違ふことになりかねない。保存力と非保存力の見分け方を別途に説明する必要がある。

力学的エネルギー保存則が成り立たないところから、熱学、電磁気学、量子力学へつながることになる。ニュートン力学の体系から脱け出したエネルギー（存在形態が変わる）を全部集めればエネルギー保存則（総量は一定不変）が成り立つことが知られている。この辺りに実例による簡単な説明を含めることが望まれる。

第5章

「運動量と角運動量」は体系を整えるために設けている。内容は第3節で述べた通りである。これ以降の章への経過点としているが、説明がこの章だけにある事項（力積、撃力、質量の相対論的変化）もある。講義の流れに適するかどうか経験的判断を待っている。

第6章、第7章、第8章

入門的なところから中級基礎と応用に移る段階である。講義では後期の後半になる。

第6章「中心力」は始めはごく基礎的な事柄であるが、途中から特異的に難しくなる。

第7章「質点系の運動」では任意の座標系（慣性系に限る）を使って話を進める点が新しい。重心を不動とみなすこともできて、地球から太陽に作用する万有引力で太陽も少し動く、という原理的な話が含まれる。

第8章「剛体の運動」では原子を質点とみなして、前章の結果を活かす方法をとっている。この考えを積極的に取り入れた教科書は他にみかけたことはない。このため「単位胞」という基礎力学ではやや異質な言葉を使うことになる。無論、全原子の和がとれるわけではなく、重心も慣性モーメントも積分で計算する。

これらの3章は今や本学の講義からはみ出す部分を持っている。同じことをもう少し短く書けないだろうか。現在はスキップ可のマークをつけているが、はみだす部分があるなら、速習コースと呼べるものを設ける形にするのがよい。体系上でこの位置にあるが、スキップしても次につ

ながるとのガイドがつくことが望ましい。素材構成から見直して、本学の機械系または建設系の専門科目でも使える内容にできないだろうか。

第9章

「見かけの力」の話は他の入門的な教科書ではコースの中ほどに設けられていることが多い。慣性系での運動方程式の扱いにある程度熟達していないと意味がつかみ難い課題である。本書では最後になっているが基礎力学として省けない章である。

ふたたび全体

講義が進むうちに「なるほど、基礎力学は運動の3法則が出発点」ということが伝わる段階があるだろうか。個人差が大きい問いである。3法則を知っていれば、たくさんのことを学ばなくてもよい、ということ実はたくさんのことを学んだ後に言えることである。時間がかかるが、それを経験することが次の役に立つ。自力で3法則の体系を点検できるところにすれば基礎力学は卒業といえる。

アンケートでは、本書は基礎力学の体系の点ではほぼ網羅できているとの大方の意見である。講義と自習に適するように書き方を変えることの見解は多々ある。易しくしないと読まれないと懸念されている。ただ易しいだけでなく、読めばわかるとの信頼感が生まれることが大切である。

改訂は相当な負担を伴う作業である。適切なプランを練った上で時期を選ぶことが重要である。なお、次のようなことに配慮したい。

知識の定着を図るために

講義された内容のすべてを時間内に理解するほどの学生は減多にいない。学生は講義の前後の内容を教科書から学ぶ必要がある。自習ぬきでものごとの修得はあり得ない。教科書が自習に適していることが大切である。ただし、これは学生が判断することである。

章末演習問題

理解を助けるために章末演習問題の活用が望まれる。推奨できる章末演習問題の番号を本文中の関連箇所に示しておけば自習の役に立つ。すでにいくつかの章でこの配慮はされているが全体的に方針がそろっていないとは言えない。概して、章末演習問題には本文ほどの注意が行き届いていない。解答法も含めてなおも点検が必要と思える。

アンケートで、解法をもっと詳しくとの要望がある。著者側には教科書を分厚くすることへのためらいがある。

演習問題の役割は学生の創造的なはたらきを活性化することである。考える糸口をつかんで、続きを考えることを楽しむように仕向けるものともいえる。少し前に歩を進めることで、左右が見え始めれば面白いであろう。その場限りでなく、次の展開につながる問題が望ましい。問題の作成には授業経験が不可欠である。

アンケートで、章末問題を改題してレポートに活用しているとの話もある。経験の蓄積を願いたい。

言葉の課題

知識の定着には言葉が大きなはたらきをする。言葉と数式のつながりをよくすることは、本書の「まえがき」でも述べている。よかれあしかれ本書で如実に示されている。

一般に、教科書に適する文体というものがあるかどうか分からない。共著の場合、項立てとおおまかな内容を話し合いで決めるが、どう書き上げるかは担当者に任される。共通の用語や言い回し以外は「読み手に伝わる形でなるべく短く」程度の約束で進められる。文章作法は書き手の個性であり、生涯続く修練でもあるので、協力し合うが越権的なことはしないのが良いと考えている。とはいえ、何か共通の目安があると書く作業を進めやすいかもしれない。

仮説的な話を記しておきたい。教科書を読み解きつつある読者がいるとする。書かれてあることがすぐには分からないとき、読者は何回か読み返して、式や文章をそのまま覚えるくらいになるとする。このこと自体は推奨できることである。しかし、覚えた言葉や文脈が適切でない、反芻しても納得にいたらず、読者自身の言葉になる前に、忘れられるであろう。記憶の再現は文章の形をとる。読者に伝えたいことがらは、反芻していればやがて分かるような文章で表すことが望まれる。再現できる考え方を表すには文脈がよいことが大切と思える。2重否定文や反語表現はなるべく避ける。日常用語と専門用語の連携に配慮が必要である。実は、板書や種々のプレゼンテーションで日々試みていることである。教科書の文章も同じ目安で書き上げるのがよいと考える。

学生の姿勢

物理学実験や基礎物理演習の教科書は学生が必ず読むことになる。教員との交流も密接になっていて、分かり難い箇所なども聞きだすことができる。講義の教科書は普段どれくらい読まれているか分からないのだが、しっかり読まれていると分かるときもある。

講義の後日に教科書にしるしをつけて、たびたび教員の部屋までやって来た学生達の姿勢を書きとめておきたい。

K君はいつも数人の仲間を従えて来た。「ここが分からないというのが、こんなにいます」と、自らはホワイトボードで代表質問者になるのが常であった。自分が分かったら仲間に教えるとの意気込みがあった。

A君はいつも1人で来た。納得するための考え方を模索しているようだった。「ここはどう計算をしてもこうなります」と教科書の誤りを訂正してくれたこともあった。

M君はレポートを課したときには毎回のようによくやって来た。次の時間に提出するのだが、こちらが説明したことを自分流に書き直してあった。

教科書は、力学の習得という目標で、学生と教員が共通に眺める材料をいつでも提供してくれる。読むように仕向けることが必要である。

多くの学生に学ぶことへの信頼感と価値観が育つ教科書にしたい。

謝 辞

桑原修三先生（広島工業大学非常勤講師）は、本書を精読して演習問題も解いてくださいました。おかげで本書の信頼度が向上しました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 井上 光, 尾崎 徹, 鈴木 貴, 中西助次, 茂木博, 森滝美治郎, 接続型教育を目指して 第1報 基礎物理演習を通して, 広島工業大学紀要 教育編, 第1巻, 2002, p. 91-102.
- [2] 井上 光, 尾崎 徹, 鈴木 貴, 中西助次, 茂木博, 森滝美治郎, 接続型教育を目指して 第2報 基礎物理演習の実践, 広島工業大学紀要 教育編, 第3巻, 2004, p. 57-69.
- [3] 鈴木 貴, 尾崎 徹, 井上 光, 大政義典, 細川伸也, 北野保行, 接続型教育を目指して 第3報 基礎

物理演習の教育効果, 広島工業大学紀要 教育編, 第9巻, 2010, p. 19-25.

http://www.it-hiroshima.ac.jp/institution/library/pdf/library_education09_15.pdf

- [4] 尾崎 徹, 鈴木 貴, 大政義典, 北野保行, 細川伸也, 接続型教育を目指して 第4報 基礎物理科目から専門科目への接続の調査と改善, 広島工業大学紀要 教育編, 第9巻, 2010, p. 27-36.

http://www.it-hiroshima.ac.jp/institution/library/pdf/library_education09_14.pdf

- [5] 藤岡 淳, 尾崎 徹, 接続型教育を目指して 第5報 入学前セミナーの物理テキストの改訂, 広島工業大学紀要 教育編, 第10巻, 2011, p. 11-19.

http://www.it-hiroshima.ac.jp/institution/library/pdf/education10_11.pdf

- [6] 井上 光, 尾崎 徹, 鈴木 貴, 中西助次, 細川伸也, HIT基礎物理学シリーズ 第1報 力学 WORKBOOK, 広島工業大学紀要 教育編, 第11巻, 2012, p. 39-48.

http://www.it-hiroshima.ac.jp/institution/library/pdf/education11_039-048.pdf

付録 物理担当グループで作成した教科書

1995年以降に物理担当グループで作成した教科書を表に挙げる。現在採用中のものを太字で示す。出版社はすべて東京教学社である。同社以外の出版社の場合は（ ）で示す。

表 教科書作成年表

科目	年/月	書 名	執筆者 *は著者代表
講 義	1995/ 3	工学系基礎課程 力学	小西輝昭*, 北中愛海, 中西助次, 森滝美治郎, 浅井慎
	2001/ 1	工科系基礎力学	井上光, 中西助次*, 浅井慎, 鈴木貴
	2006/ 2	工科系のための基礎力学	井上光, 中西助次*, 尾崎徹, 鈴木貴, 細川伸也
	2010/ 3	工科系のための基礎力学 第2版	井上光, 鈴木貴, 尾崎徹*, 中西助次, 細川伸也, 大政義典
	2007/ 3	基礎物理 WORKBOOK	尾崎徹
	2012/ 9	基礎物理 WORKBOOK 改訂2刷	尾崎徹
演 習	2002/ 3	力学 WORKBOOK	井上光*, 尾崎徹, 鈴木貴, 中西助次, 森滝美治郎
	2007/ 9	力学 WORKBOOK 第2版	井上光*, 尾崎徹, 鈴木貴, 中西助次, 細川伸也
実 験	1995/ 4	物理学実験 (電話印刷)	広島工業大学 物理学実験室編
	1997/ 3	物理学実験 (学術図書出版)	広島工業大学 物理学実験室編
	2003/ 4	工科系のための物理学実験	中西助次*, 井上光, 尾崎徹
	2006/10	工科系のための物理学実験 第2版	中西助次*, 井上光, 尾崎徹, 細川伸也
	2011/ 3	工科系のための物理学実験 第3版	中西助次, 井上光, 尾崎徹*, 細川伸也, 大政義典, 小島健一