

5-2. 物理

5-2-1. まえがき —何をどこまで—

当該調査研究は、理工系学部教育の質の担保を目的として、具体的に「何をどこまで」教えるべきかについて抜本的な検討を行うことにある。これは、産業構造・生産体制が急速に変化しつつある国際社会において、工業立国としての我が国の将来を議論する上で重要な研究テーマであり、また、「もの（ハード）」作りから「こと（ソフト・仕組み・企画）」作りへと重心をシフトしつつある社会ニーズと関係して、工学の内容自体が大きく変化しつつある現代において、極めてタイムリーな問題提起である。

しかし、対象を「物理学」に限定して「何をどこまで」教えるべきかという問いを発するとき、立場によって様々な考え方がるので、そのいくつかを紹介しよう。

物理学は、アリストテレス、デモクリトスのギリシャ自然哲学から始まり、ガリレオの実験・観測による研究手法の導入、ニュートンの微積分学による解析手法の確立を経て、17世紀中ごろに精密科学としての体裁を整えた。その後、この手法は、熱、電磁気、原子分子、素粒子など、広範な自然現象の記述に適用され、多大な成果を得た。20世紀に入って、力学的自然観から量子力学的自然観への展開があったものの、自然を数学的に記述することによって、自然を理解しようとする立場は一貫して不変である。この精密科学としての「自然哲学」が物理学であるという認識は、欧米では、広く受け入れられており常識的である。従って、欧米では、物理学で何を教えるべきであるかは、既に決まっており、「理工系大学の物理学で何をどこまで教えるべきか」という問題提起すら不自然である。これは、歴史的に見て、物理学が欧米の学者によって創られたことと関係し、現代欧米人の学術活動にその歴史が脈々と影響し続けているためである。実際、欧米の多くの理工系学部のカリキュラムでは、数学と物理学の教育に、極めて多くの時間が投入されている。

これに対し、我が国では、明治以来、完成した欧米の物理学を輸入することに努めた。その際、物理学の「哲学」よりも「知識」が重視され、その「知識」を工学に応用することが緊急の課題であった。このため、本来の物理学とは体裁を異にする「工学のための物理学」又は「物理学的な工学」が作られた。物理学の中から、工学上都合のよい「知識」を選択し、その応用に重点をおいた教育を行うことが現在の工学カリキュラムの基本になっている。これは、明治以来、欧米に追い付き追い越せと急速な工業化を行った際に、極めて効果的に機能した。しかし、これは、欧米の大学教育と比べて特異であり、「木を見て森を見ない」危険性があることに、注意すべきであろう。我が国が工業化に成功したとはいえ、実は、欧米人が見つけた知識を、主に民生産業に適用したに過ぎないという性格が強く、まったく新しい原理的な発見・発明に基づく技術開発は極めて少ない。アジア発展途上国の追い上げの中で、我が国の明治以来の工学教育の継続の是非が問われていると言えよう。

そこで、当該調査研究では、先ず「物理学を構成する科目間の関連」を示し、物理学の全体像を見せることにした。これは、工学の専門分野に必要な物理学の要素（項目）を選択する上で、また、「木を見ることで森をも見せる」新しい工学基礎教育を模索する上で便利に利用できるであろう。次に、物理学の構成科目ごとに、教えるべき内容を具体的に精査し、十数項目にまとめ上げた。そして、これらの項目が工学教育の中でどの程度採用されているかについて、「コア項目」（基本的な必修項目）と「要望項目」（より高度な発展的項目）にレベル分けしつつ、工学の専門分野ごとに現状を調査した。最後に、これらの調査結果から得られた結論を将来への展望とともにまとめてある。

5-2-2. 物理学の構成

物理学は、いくつかの分野（要素的科目）から構成されている。それらは互いに関係している。これらを図5-3、表5-1、表5-2に示す。工学のカリキュラムを考える上で、この関係に留意することが重要である。ただし、図中に含まれる科目名を工学のカリキュラム中にそのままの形で取り込む必要はない。

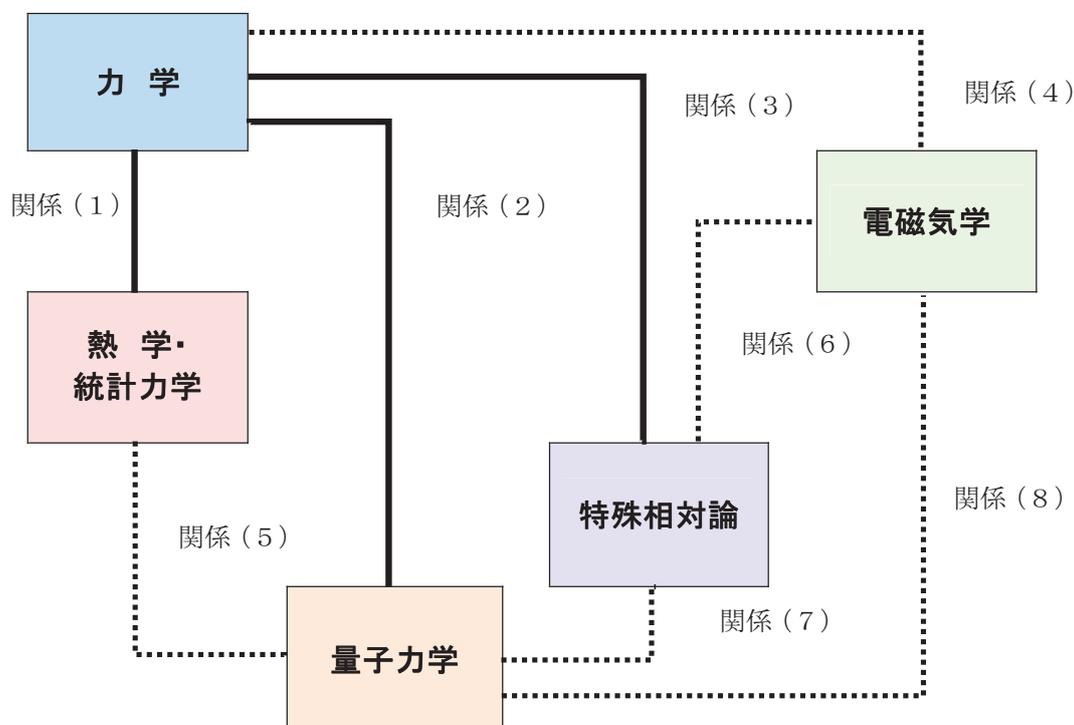


図5-3 物理学を構成する科目とその関係

表5-1 物理学を構成する科目とその関係の説明

関係	内容的関連	教育上の関連
(1)	力学の表現形式(微積分学:因果を記述する形式)を使って、熱力学・統計力学が記述されていること(熱現象の力学的世界観)を示している。	左記の理由により、すべての科目に先立って「力学」から物理学の学習を開始すべきである。
(2)	量子力学がニュートン力学をある意味で修正することによって形成されたこと、ハミルトン形式による力学の記述が量子力学で必修であること。	左記の理由により、解析力学(ハミルトン形式)を量子力学に先立って学習することが好ましい。
(3)	ニュートン力学の時空間の概念を修正して、特殊相対論が形成された。相対論的力学の体系は、ニュートン力学をその一部に含んでいる。	特殊相対論を電磁気学との関連で位置づける立場もあるが、左記の理由により力学との関連を重視すべきである。
(4)	場の物理量の関係も微積分学で記述される。電磁気学の言葉であるベクトル解析は、ベクトルの微積分学である。	目に見えない電気量の関係よりも力学量の関係の方が分かりやすいので、まずは「力学」の記述形式に習熟することが重要である。
(5)	多体系の量子力学の分野で統計力学(フェルミ統計、ボーズ統計)の概念が必要となる。	量子力学の初歩の段階では、これを考慮する必要はない。
(6)	電磁気学が特殊相対論の要請を満たしている。電磁気学が4元形式で記述できる。	電磁気学及び特殊相対論の初歩の段階では、これを考慮する必要はない。
(7)	シュレーディンガー方程式を導くために、相対論的力学の公式 $E=mc^2$ から導かれる関係式(Einstein-Comptonの関係式)が使われる。この関係は、相対論的量子力学を意味しない。	Einstein-Comptonの関係式を $E=mc^2$ から導かない場合には、この関係を配慮する必要はない。
(8)	量子電磁気学(第2量子化)を学習する場合に重要になる関係である。	量子力学の初歩の段階では、これを考慮する必要はない。

表5-2 数学・物理学・工学の連携の現状

科目	学習内容・到達目標	主要項目	工学分野との関連・応用例	数学との関連
<p>力学</p>	<p>広義の力学は、力学と解析力学からなる。力学は、以下の3つに分類して階層的・積み上げ的な学習が必要である。(1)1質点の力学:質点の位置の時間変化に関する法則(運動法則)とその数学的な記述・解析(微積分法、ベクトル解析)に習熟すること。運動量、エネルギー、角運動量などの物理量の定義と意味を理解でき、その時間変化に関わる法則の誘導・応用ができること。(2)質点系及び連続体の力学:質点系全体としての運動法則及び運動量、角運動量などの諸量の時間変化に関わる法則の誘導・応用ができること。質点系の連続体近似式として、波動方程式を理解でき、その応用ができること。(3)剛体の力学:慣性モーメントなどの諸量に習熟し、剛体の運動方程式を使って剛体の運動を解析できること。解析力学は、量子力学を学ぶ上で不可欠であり、ラグランジュ形式とハミルトン形式による記述に習熟する必要がある。ラグランジュ関数やハミルトン関数で系の力学的状態の時間発展が記述できることを理解し、簡単な系での計算ができること。</p>	<p>(1)時間・質量・位置・速度・加速度・力の概念とそれらの関係(運動法則)、(2)運動方程式(微分方程式)の解法、(3)運動量・角運動量・エネルギー保存則、(4)波動の表式と波動方程式、(5)剛体の運動方程式、(6)ラグランジュ及びハミルトンの方程式</p>	<p>力学は、物体の運動や力のつり合いに関係する工学分野において、その解析の基礎を提供している。力学の記述方法は微積分学であり、微積分学は因果関係を記述する学問体系であるという意味で、力学の記述方法(力学的自然観)は多くの自然科学・社会科学の基礎となっている。典型的な応用例に、機械工学(機械部品の運動性能の解析)、材料工学(機械部品の強度や歪の解析)、土木工学(橋梁、ダム等の強度や振動解析)、建築工学(建物の強度や振動解析)、地盤工学(地盤解析)、スポーツ工学(器具の開発、スキーやゴルフの力学)がある。</p>	<p>微分積分法は古典力学の記述言語であり、ベクトル値関数の微分・積分は必要不可欠となる。運動方程式を解くことは微分方程式の初期値問題に相当する。その典型的な例として変数分離形や定数係数線形微分方程式の解法は必須である。質点系の力学や剛体の力学との関連では行列やテンソルの概念も必要である。また、現象記述という立場から偏微分概念を身につけることは波動方程式や解析力学を理解するために有用である。</p>
<p>電磁気学</p>	<p>電荷間に働く力の法則(クーロンの法則)、電流の間に働く力の法則、ファラデーの電磁誘導の法則などの実験法則が理解できること。また、それらが電場と磁場の概念の導入によって、より根本的・統一的に記述できることを理解すること。静電場・静磁場の空間分布に関する法則(ガウスの法則、ビオ・サバールの法則)を使って、簡単な系における電場や磁場の計算ができること。電場・磁場中の荷電粒子の運動が記述できること。電場や磁場の空間的分布及びその時間変化を記述するマックスウェルの方程式(積分形式及び微分形式)に習熟し、それから電磁波の波動方程式や光の屈折の法則などを導けること。 また、これとは別に、現象論的法則(オームの法則、キルヒホッフの法則、ジュールの法則など)及び理論(交流理論、回路理論など)に習熟し、簡単な系での計算ができること。各種物理量(電場、磁場、電位、電流、電荷など)の定義と単位に習熟し、電磁現象の計算が正しくできること。</p>	<p>(1)クーロンの法則、(2)電場と電位の関係式(3)ガウスの法則、(4)ビオ・サバールの法則、(5)ローレンツ力、(6)マックスウェル方程式、(7)電磁物理量の定義とその単位、(8)電気・磁気に関する現象論的法則及び理論(キルヒホッフの法則、交流理論など)</p>	<p>電磁気学は、電気・磁気に関係する工学分野において、解析の基礎を提供している。電磁気学は「場の物理学」であり、「物の物理学」である力学と対照的である。その意味で、電磁気学の記述方法は力学と並んで重要であるが、微積分学で記述するという意味では、力学と同様に因果的記述方法である。典型的な応用例に電気工学(発電機やモーターの特性解析)、電子工学(各種電子部品の性能解析)、プラズマ工学(プラズマの時空間解析)、通信工学(電磁波解析)、計算機工学(デジタル信号解析)、光学部品(レンズ、回折格子、光ファイバー等)の設計がある。</p>	<p>電磁気学の基礎原理であるマックスウェル方程式は、多変数の微分積分法であるベクトル解析の諸概念を用いて記述される。ガウスの発散定理やストークスの定理は、局所的な変化を寄せ集めれば大域的な変化になるという微分積分学の基本定理の1例にすぎない。電気電子の集中定数回路の基本方程式はキルヒホッフの電流則(第一法則)と電圧法則(第二法則)またはそれらの等価表現、ならびに枝特性(素子特性)で記述され、枝特性の線形性や非線形性により、回路方程式は線形や非線形方程式となり、キャパシタやインダクタが含まれるとき、微分方程式で記述される。また、分布定数線路からなる回路の回路方程式は偏微分方程式で記述される。回路では線形代数学、微分方程式論、複素関数論、演算子法、数値解析が有用である。</p>
<p>熱学・統計力学</p>	<p>熱や温度に関するマクロな法則(熱力学第1、第2法則)を理解し、それを使って様々な熱力学現象(エンジン、エネルギー変換など)の解析ができること。熱力学諸量(温度、熱、エントロピー、内部エネルギー、比熱、エンタルピーなど)の定義とその単位に関する事項に習熟して、熱力学的状態の変化を定量的に記述することができ、その数値の計算が正しくできること。可逆変化と非可逆変化の区別が理解でき、熱力学的諸量の変化は準静過程(可逆過程)で計算することを納得すること。準静過程の意味とその意義を認識できること。 また、これとは別に、系の熱力学的状態やその変化を、系を構成する原子分子の運動学からミクロ的に説明する理論(分子運動論)やミクロ的な状態の出現確率から系のマクロ的物理量を計算する理論(統計力学)に習熟すること。力学の枠組みで、熱現象の多くが記述できることを納得し、その計算が正しくできること。</p>	<p>(1)熱力学第一、第二法則、(2)熱力学諸量(温度、熱、エントロピー、内部エネルギー、比熱、エンタルピー)、(3)可逆・不可逆変化、(4)カルノーサイクル、(5)熱機関、(5)分子運動論、(6)カノニカル分布、(7)状態和、(8)熱伝導、(9)拡散現象、(10)揺らぎ</p>	<p>熱学・統計力学は、熱や温度に関係する工学分野において、解析の基礎を提供している。巨視的・現象論的な解析では、熱力学で十分な場合が多いが、現象を微視的な立場から第一原理的に理解するためには、統計力学が有効である。統計力学は熱平衡状態のみならず、過渡現象や揺らぎをも解析の対象とすることができる。微積分学を使った因果的な記述のほかに確率論的な記述が特徴的である。典型的な応用例は、内燃工学(エンジンの特性解析)、化学工学(反応速度解析)、原子力工学(エネルギー変換解析)、物性工学(相転移、熱特性の解析)がある。</p>	<p>熱力学に現れる物理量は一般に多変数関数であり、力学や電磁気学と同様に基礎となる数学は微分積分学である。偏微分を扱うときは固定する独立変数の認識が特に重要であり、多変数関数の微小変化量を表す全微分の概念も必須である。熱伝導や拡散などの物理現象を理解するためには偏微分方程式や確率論も必要となる。</p>
<p>特殊相対論</p>	<p>運動を記述する座標系に絶対的なものがなく、すべての慣性系は対等であること(相対性原理)と光の速度が座標系に依存しないこと(光速の絶対性)からローレンツ変換式を導出できること。ローレンツ変換式から相対論的な速度の合成則を導出できること。ローレンツ変換式を使って、時間の遅れ、空間の収縮を計算でき、時空間の概念を相対論的に把握できること。その結果、相対論的効果を伴う現象(例えば宇宙線の寿命の増大など)を定量的に記述できること。 相対論の時空間は、絶対的時空間に基づくニュートン力学と矛盾するので、ローレンツ変換に対して共変性を有する相対論的力学の必要性を認識できること。相対論的力学の主要な関係式に習熟し、それを使って、簡単な事象(質量とエネルギーの変換など)の計算ができること。相対論的力学はニュートン力学を修正してつくられたものであること、従って、相対論的力学は、光速に対して十分小さい速度においては、ニュートン力学と一致することを数式的に理解できること。</p>	<p>(1)古典的な時間と空間の概念、(2)ガリレイ変換と特殊ローレンツ変換、(3)相対論的速度の合成則、(4)時間の遅れ、(5)空間の収縮、(6)ミンコフスキー空間、(7)相対論的力学の主要な関係式の導出とその応用、(8)4元形式による特殊相対性理論の表式</p>	<p>特殊相対論は、高速(光速に近い速度)で運動する粒子に関係する工学分野において、解析の基礎を提供している。典型的な応用例として、粒子線工学(中性子線、電子線、陽子線などによる各種分析機器の設計)、原子炉工学(炉内反応解析)、宇宙工学(電離層解析)、高エネルギー工学(核融合反応解析)、各種加速器の設計・特性解析がある。</p>	<p>特殊相対論の初歩は特別な数学は必要とせず、中学生レベルの数学知識で、簡単に理解できる。がしかし、電磁気学との関連などより深い理解を得るためには偏微分や座標変換、テンソル解析などの数学が必要である。</p>
<p>量子力学</p>	<p>原子・分子・電子の挙動(黒体放射、比熱、原子の安定性、原子スペクトル、光電効果など)の記述において、古典物理学(ニュートン力学、電磁気学)が破綻し、これらの実験事実を説明するために、様々な仮説(量子仮説)やモデル(ラザフォードモデル、ボーアモデル)が導入された歴史的経緯を把握し、その個々について、数式的な説明ができること。Einstein-Comptonの関係式をたよりに、自由粒子に関するシュレーディンガー方程式が導出できること。一般的な系におけるシュレーディンガー方程式の立て方及びその解(波動関数)の解釈(ボルンの確率解釈)・利用方法(物理量の期待値の計算法)に精通すること。シュレーディンガー方程式を使って、1次元箱形ポテンシャル、調和振動子、水素原子、Kronig-Pennyモデルなど比較的簡単な系の量子的挙動を解析できること。古典力学と量子力学の類似点(Ehrenfestの定理など)・相違点(不確定性原理など)の由来を数式的に把握でき、量子力学の理論体系と古典力学のそれとの関係が理解できること。</p>	<p>(1)黒体放射と量子仮説、(2)原子スペクトルとボーアモデル、(3)光電効果と光子量子仮説、(4)Einstein-Comptonの関係式、(5)シュレーディンガー方程式とボルンの確率解釈、(7)箱形ポテンシャル、調和振動子、水素原子など簡単な系の量子力学的解析</p>	<p>量子力学は、光や粒子(電子、中性子、陽子線など)と物質の相互作用や原子間・分子間相互作用に関係する工学分野において、解析の基礎を提供している。典型的な応用例として、半導体工学(電気特性解析)、金属工学(電気特性・熱特性解析)、化学工学(光化学反応解析、触媒反応解析)、原子力工学(核反応解析)、粒子線工学(粒子線と物質との反応解析)、レーザー工学(レーザー発振解析)、電子物性工学(光電特性、仕事関数、蛍光特性など各種電子物性解析)がある。</p>	<p>量子力学を記述する数学として複素数は不可欠である。そして、線形代数学は量子力学と密接な関係があり、特に固有値、固有ベクトル、正規直交基底、シュミットの直交化、エルミート行列の対角化などの概念を必要とする。関数空間における固有値問題を扱うフーリエ解析も有用な道具として利用される。シュレーディンガー方程式を解くためには、線形偏微分方程式の初期境界値問題の古典的解法である変数分離法が使われ、定数係数線形常微分方程式の解法も必須である。</p>

5-2-3. 物理の到達目標と学修に当たっての配慮事項

物理の到達目標と学修に当たっての配慮事項は、次の5科目について示す。

1. 「力学」
2. 「電磁気学」
3. 「熱学・統計力学」
4. 「特殊相対論」
5. 「量子力学」

1. 「力学」

(1) 力学に関する基礎的な概念

到達目標

- 1-1) 空間（位置）、時間、質量に関する古典的（非相対論的）概念とその数学表現（座標系、ベクトルなど）を理解でき、それらを数量的に表現するための単位（基本単位）に習熟する。
- 1-2) 位置の時間微分は速度であること、速度の時間微分は加速度であることを理解でき、これらのベクトル量を具体的に計算できる。
- 1-3) 全ての力学的物理量の単位は、物理法則を介して、基本単位の組合せで構成できること。また、全ての物理量は次元を持つことが理解でき、次元解析に応用できる。
- 1-4) 物理量とその時間微分の物理量の関係を見つけることで、自然の運動学が記述できることが理解できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・人間が、空間、時間、質量に関する概念を取得した経緯を知り、力学的な自然認識・記述のメカニズムを理解できるよう配慮する。

(2) 運動の第1法則（慣性の法則）

到達目標

- 2-1) 慣性の概念を理解でき、慣性の法則が慣性系で成立することが説明できる。
- 2-2) 恒星に張り付いた座標系は慣性系であり、それに対して等速度で運動する系も慣性系であることを理解できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・「慣性系の概念は、惑星の運動の記述と密接に関係していること」が理解できるように工夫する。

(3) 運動の第2法則（運動方程式）

到達目標

- 3-1) 運動の第2法則の意味を理解でき、それは、力の定義式又は慣性質量の定義式にもなり得ることが説明できる。
- 3-2) 運動方程式は微分方程式であることを理解でき、簡単な系（空気抵抗を含む放物体、空気抵抗を含む振動体など）の初期値問題が解ける。
- 3-3) 力学の記述法の特徴は因果律にあることを理解でき、その決定論的な記述形式の持つ意味と問題点を指摘できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・微分方程式の一般的解法は存在しないので、分類学的処方にとられる。変数分離法と定数係数線形微分方程式の2つのパターンについて、微分方程式が解けるよう、必要十分な数学的能力の付与に努力する。

(4) 第3法則（作用・反作用の法則）

到達目標

- 4-1) 力が作用するためには、最低限2つの物体が必要であることを理解でき、それらの物体に働く力の関係（作用・反作用の法則）が説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・大学レベルの力学は公式を暗記することではなく、少数の基本原理解から、全ての力学現象を統一的に説明することを目指す。具体例の解析を通して、これが理解できるよう工夫する。これは、

力学全般に関する配慮事項である。また、他の物理学の科目においても、同様である。

(5) 運動量とその保存則

到達目標

- 5-1) 運動量の定義と意味を理解でき、その時間変化に関わる法則（運動量の変化と力積の関係）が誘導でき、それを衝突問題などの説明に応用できる。
- 5-2) 運動量が保存するための条件を理解でき、それを衝突問題などの説明に応用できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・運動量の時間変化の表式は、運動方程式による並進運動の記述と数学的に同値であることが理解できるように工夫する。

(6) 角運動量とその保存則

到達目標

- 6-1) 角運動量の定義と意味を理解でき、その時間変化に関わる法則（角運動量の変化と力のモーメントの関係）が誘導でき、それを回転運動の解析に利用できる。
- 6-2) 角運動量が保存するための条件を理解でき、角運動量保存則を使って、等速円運動やケプラーの法則を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・角運動量や力のモーメント（トルク）はベクトル量であり、ベクトルの外積の演算で計算できる。ベクトルの外積に関する補足説明を行う。

(7) エネルギーとその保存則

到達目標

- 7-1) 位置エネルギーの定義と意味を理解でき、力の場の表現式からそれを具体的に計算できる。
- 7-2) 位置エネルギーが定義できる必要十分条件を理解でき、それを数学的に表現できる。
- 7-3) 位置エネルギーと力との関係：積分形式（線積分）と微分形式（微分演算子）に習熟し、それらが数学的に同等であることを説明できる。
- 7-4) 保存系の運動方程式を時間で積分することにより、エネルギー保存則を導くことができる。

学修に当たっての配慮事項

- ・線積分、偏微分、演算子に関する数学的な知識を確認しながら、必要に応じてそれらについて予備的な説明を行う。

(8) 質点系の力学

到達目標

- 8-1) 質点系における全運動量の定義と意味を理解でき、その時間変化に関わる法則が誘導でき、それが保存するための条件を説明できる。
- 8-2) 質点系の重心点の定義と意味を理解でき、その時間変化に関わる法則が誘導できる。
- 8-3) 質点系における全角運動量の定義と意味を理解でき、その時間変化に関わる法則が誘導でき、それが保存するための条件を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・質点系の全体的な並進運動と回転運動は、それぞれ、全運動量と全角運動量の時間変化を記述する式で表現することが理解できるように工夫する。

(9) 波動方程式と波動の表式

到達目標

- 9-1) 質点系の運動方程式の連続体近似から、波動方程式が導ける。それから自由空間での解（平面波解）を導くことができる。
- 9-2) 波を特徴づけるパラメータ（波数、角振動数など）が理解でき、それらと速度の関係式を波動現象の説明に利用できる。
- 9-3) 波の重ね合わせの原理より、波の干渉や回折の現象を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・1次元空間中の波動現象からの類推で、2次元空間、3次元空間中の波動の挙動が理解できるように工夫する。

(10) 剛体の運動方程式

到達目標

- 10-1) 剛体の定義を理解でき、その概念を導入する意義を説明できる。
- 10-2) 質点系 of 全運動量に関する方程式から、剛体の並進運動を記述する方程式を誘導できる。
- 10-3) 質点系 of 全角運動量に関する方程式から、剛体の回転運動を記述する方程式を誘導できる。
- 10-4) 慣性モーメントなどの諸量に習熟し、簡単な場合（回転軸の方向が一定）について、剛体の運動方程式を使って剛体の運動を解析できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・慣性モーメントの計算には、重積分の知識が必要なので、その補足説明を行う。

(11) ラグランジュ形式の力学

到達目標

- 11-1) 一般化座標、一般化速度、ラグランジュ関数の意味を理解でき、ラグランジュの運動方程式がニュートンの運動方程式と同等であることを、簡単な系で確かめることができる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ラグランジュの運動方程式を変分原理で導くなどの厳密な取扱いは避け、実例を使って、この形式に習熟するなど応用的観点を重視する。これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

(12) ハミルトン形式の力学

到達目標

- 12-1) 一般化座標、一般化運動量、ハミルトン関数の意味を理解でき、ハミルトンの運動方程式がニュートンの運動方程式と同等であることを、簡単な系で確かめることができる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ハミルトンの運動方程式を変分原理で導くなどの厳密な取扱いは避け、実例を使ってこの形式に習熟するなど応用的観点を重視する。これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

2. 「電磁気学」

(1) クーロンの法則

到達目標

- 1-1) 電荷間に働く力の法則（クーロンの法則）とその重ね合わせの原理が理解できる。
- 1-2) クーロン力のポテンシャルとして、電位の概念が理解でき、複数点電荷・連続電荷分布によるクーロン電位が計算できる。
- 1-3) 電場の概念が理解でき、複数点電荷・連続電荷分布によるクーロン電場が計算できる。
- 1-4) 電荷、電場、電位の単位に習熟し、それらの具体的な数値が計算できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・力学の「力とポテンシャルの関係」が「電場と電位の関係」と同様であることを留意させる。重ね合わせの原理の説明には、ベクトルの積分計算に関する補足説明が必要である。

(2) ガウスの法則

到達目標

- 2-1) ガウスの法則（積分形式）に習熟し、対称性のよい電荷分布について、この法則より電場が計算できる。
- 2-2) ガウスの定理を理解でき、ガウスの法則の積分形式からその微分形式を導ける。

学修に当たっての配慮事項

- ・面積分・体積分の一般的な計算方法を学習し、一般的な閉曲面でこの法則が成立することが理解できるよう工夫する。

(3) ビオ・サバールの法則

到達目標

- 3-1) 電流素間に働く力の法則（ビオ・サバールの法則）とその重ね合わせの原理が理解でき、電流

分布から磁場（磁束密度）が計算ができる。

3-2) 電流、磁場・磁束密度の単位に習熟し、それらの数値が具体的に計算できる。

学修に当たっての配慮事項

・微小ベクトルの外積とその積分に習熟し、ベクトル量としての磁場の計算ができるよう工夫する。

(4) ローレンツ力

到達目標

4-1) 荷電粒子が電場と磁場から受ける力（ローレンツ力）を理解でき、簡単な系におけるローレンツ力及び荷電粒子の運動が計算できる。

4-2) ローレンツ力とビオ・サバールの法則から、電流間に作用する力の法則が誘導できる。

学修に当たっての配慮事項

・電荷に作用する力として、電場と磁場の役割の相違点を定量的に把握する（例えば、テレビの電子線の走査に磁場が使われる理由など）。

(5) ファラデーの電磁誘導の法則

到達目標

5-1) ファラデーの電磁誘導の実験から、磁場が時間的に変化すると電場が渦状に生成されることを理解でき、それを数学的に表現できる。

学修に当たっての配慮事項

・ストークスの定理、アンペールの法則について補足説明を行い、この法則の微分形式と積分形式での記述が同等であることが理解できるよう工夫する。

(6) マックスウェル方程式

到達目標

6-1) 電場や磁場の空間的・時間的変化を記述するマックスウェルの方程式が発見された歴史的な経緯を理解できる。とりわけ、変位電流の意義について説明できる。

6-2) マックスウェル方程式に習熟し、それから電磁波の波動方程式を導き、電磁波の伝播速度が光速と一致することから、光が電磁波であることを理解できる。

学修に当たっての配慮事項

・マックスウェルの方程式は積分形式のみならず微分形式でも理解できるようにすべきである。微分演算子に習熟することは、量子力学の学習の準備という意味で重要である。

(7) 電気・磁気に関する現象論的法則及び理論

到達目標

7-1) 現象論的法則（オームの法則、キルヒホッフの法則、ジュールの法則など）及び理論（交流理論、回路理論など）に習熟し、簡単な系での計算や回路設計ができる。

7-2) 交流のインピーダンス、アドミッタンスなどの諸量に精通し、それを使って回路の特性を表現できる。

学修に当たっての配慮事項

・これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取舍選択する。

3. 「熱学・統計力学」

(1) 熱力学第1法則

到達目標

1-1) エネルギーの保存則が熱現象を伴う場合にも成立するようにするために、内部エネルギーという概念が導入された経緯を理解でき、その数学表現に習熟する。

1-2) 気体の比熱の意味を理解でき、それを使って理想気体の内部エネルギーを表現できる。

学修に当たっての配慮事項

・内部エネルギーは抽象的な概念なので分かりにくい。理想気体の内部エネルギーを数値計算するなどして、理解を深めるよう工夫する。

(2) 熱機関

到達目標

- 2-1) 熱力学的状態が少数の熱力学変数によって指定されること、及び、熱力学変数は系の平衡状態でのみ意味を持つことが理解でき、具体的な系(例えば、理想気体)の熱力学的状態の指定ができる。
- 2-2) 熱力学的状態の変化を考察するために、準静過程の概念が導入されることを理解でき、準静過程の意味と役割を説明できる。
- 2-3) 準静的等温過程と準静的断熱過程の組合せで構成されるカルノー機関の動作の詳細(温度変化、熱の出入り)が理解でき、熱効率が計算できる。
- 2-4) カルノーサイクルは可逆過程であることが理解でき、その逆運転の結果を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・カルノー機関の動作の詳細を数値計算するなどして理解を深めるよう工夫する。

(3) 熱力学第2法則

到達目標

- 3-1) クラジウスの原理とトムソンの原理を理解でき、両者が等価であることを説明できる。
- 3-2) 可逆変化と非可逆変化の区別を理解でき、非可逆変化と熱力学第2法則との関連を説明できる。
- 3-3) エントロピーの定義と意味を理解でき、簡単な系(例えば、理想気体)のエントロピーが計算できる。
- 3-4) エントロピーを使って、熱力学第2法則を表現できる。
- 3-5) エントロピーの微視的な解釈が理解でき、これより熱力学第2法則を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・熱力学は、現象論的な経験法則であることが理解できるよう配慮する。エントロピーは抽象的な概念なので分かりにくいので、簡単な系において具体的にその数値を計算するなどして理解を深めるよう工夫する。

(4) 熱力学諸量

到達目標

- 4-1) その他の熱力学諸量(自由エネルギー、エンタルピーなど)の定義とその意味を理解でき、熱力学的状態の変化を定量的に記述できる。
- 4-2) 自由エネルギーを使って熱力学の第2法則を記述できる。
- 4-3) 熱力学諸量の単位に習熟し、数値の計算が正しくできる。

学修に当たっての配慮事項

- ・これらの熱力学諸量は抽象的な概念なので分かりにくいので、簡単な系において具体的にその数値を計算するなどして理解を深めるよう工夫する。

(5) 分子運動論

到達目標

- 5-1) 系の熱力学的状態やその変化を、原子分子の運動学からミクロ的に説明する理論(分子運動論)に習熟し、簡単な系(例えば、理想気体)の記述に応用できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・計算機シミュレーションと合わせて学習し、理解を深めることが好ましい。

(6) 統計力学

到達目標

- 6-1) ミクロ的な状態の出現確率から系のマクロ的物理量を計算する原理を理解できる。
- 6-2) ミクロカノニカル分布、カノニカル分布、グランドカノニカル分布について、状態和の計算方法が理解でき、それから各種の熱力学諸量が計算できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

(7) 過渡現象(熱伝導・拡散)

到達目標

- 7-1) 熱伝導に関するフーリエの法則が理解でき、簡単な系の解析に応用できる。
- 7-2) 熱伝導方程式が理解でき、簡単な系の解析に応用できる。
- 7-3) 拡散方程式が理解でき、簡単な系の解析に応用できる。
- 7-4) ミクロ及びマクロの立場から熱伝導・拡散現象が理解できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ 計算機シミュレーションと組合せて学習し、理解を深めることが好ましい。これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

4. 「特殊相対論」

(1) 時空間の概念

到達目標

- 1-1) 人間が時間と空間の概念を取得した経緯を学習し、時間と空間の古典的（ニュートンの）概念が説明できる。
- 1-2) 時間と空間の古典的概念が破綻する実験事実（光速が座標系に依存しない）を学び、新しい時空間の概念の導入が必要であることが認識できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ 物理学は実験事実をできる限り簡単な数学表現で記述することを目指し、そのためには既存概念の修正が必要な場合があることを強調する。

(2) ローレンツ変換

到達目標

- 2-1) 運動を記述する座標系に絶対的なものがなく、全ての慣性系は対等であること（相対性原理）と光速が座標系に依存しないこと（光速の絶対性）からローレンツ変換式を導出できる。
- 2-2) 座標系の相対速度が光速とくらべて十分小さい場合には、ローレンツ変換式はガリレイ変換式と一致することを示すことができる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ 一般的な相対速度に関するローレンツ変換式は複雑なので、特殊ローレンツ変換式（相対速度の方向を x 軸方向とする形式）に限って学習する。

(3) 相対論的速度の合成則

到達目標

- 3-1) ローレンツ変換式から相対論的速度の合成則を導出でき、いかなる速度も光速を超えることがないことが理解できる。
- 3-2) 座標系の相対速度が光速とくらべて十分小さい場合には、相対論的速度の合成則は古典力学（ニュートン力学）の速度の合成則と一致することが理解できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ 一般的な相対速度に関する速度の合成則は複雑なので、特殊ローレンツ変換式（相対速度の方向を x 軸方向とする形式）の場合に限って学習する。

(4) 時間の遅れ・空間の収縮

到達目標

- 4-1) ローレンツ変換式を使って、時間の遅れ・空間の収縮を計算でき、時空間の概念を相対論的に把握できる。
- 4-2) 時間の遅れ・空間の収縮を、ミンコフスキー空間中で幾何学的に把握できる。
- 4-3) 相対論的効果を伴う現象（例えば、宇宙線の寿命の増大など）を定量的に記述できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・ 一般的な相対速度に関する公式は複雑なので、特殊ローレンツ変換式（相対速度の方向を x 軸方向とする形式）の場合に限って学習する。

(5) 相対論的力学

到達目標

- 5-1) 相対論の時空間は、絶対的時空間に基づく古典力学（ニュートン力学）と矛盾するので、ロー

レンツ変換に対して共変性を有する相対論的力学の必要性を認識できる。

5-2) 相対論的力学の公式に習熟し、それを使って、簡単な事象（質量とエネルギーの変換など）の計算ができる。

5-3) 光速に対して十分小さい速度を取扱う場合には、相対論的力学はニュートン力学と一致することを数式的に理解できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

(6) 相対論的力学の4元形式

到達目標

6-1) 相対論的力学の4元形式による記述に習熟し、簡単な事象（相対論的運動方程式による運動の解析など）の説明に活用できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

5. 「量子力学」

(1) 黒体輻射と量子仮説

到達目標

1-1) 黒体のスペクトルの実験結果の説明において、古典物理学が破綻し、量子仮説が導入された経緯を理解でき、量子仮説の意味を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・エネルギー等分配則、振動のモード、状態密度、ボルツマン因子など、関連する事項について補足説明が必要である。

(2) 原子スペクトルとボーアモデル

到達目標

2-1) 原子スペクトルの実験結果の説明において、古典物理学が破綻し、ボーアモデルが導入された経緯を理解でき、ボーアモデルの意味を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・古典的発光のメカニズムとの相違が分かるように工夫する。

(3) 光電効果と光量子仮説

到達目標

3-1) 光電効果の実験結果の説明において、古典物理学が破綻し、光量子仮説が導入された経緯を理解でき、光量子仮説の意味を説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・波のエネルギーと粒子のエネルギーの相違が分かるように工夫する。

(4) 電子線回折と物質波（ド・ブロイ波）仮説

到達目標

4-1) 物質波（ド・ブロイ波）仮説が導入された経緯を理解でき、電子線回折の実験結果が説明できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・電子線回折については、演示実験・計算機シミュレーション又はそのビデオを見せるなどして、実感的に理解できるよう工夫する。

(5) Einstein-Compton の関係式

到達目標

5-1) Einstein-Compton の関係式は、「粒子性に関する物理量」と「波動性に関する物理量」の関係であることを理解でき、これを使って電子の波長や光子の運動量が計算できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・電子顕微鏡中の電子、紫外線、X線、ガンマ線など、具体的にこの関係を使って、波動性と粒子

性に関する理解を深める。

(6) シュレーディンガー方程式とボルンの確率解釈

到達目標

- 6-1) Einstein-Compton の関係式から、シュレーディンガー方程式を導くことができる。
- 6-2) 一般的な系におけるシュレーディンガー方程式の立て方が分かる。
- 6-3) シュレーディンガー方程式の解（波動関数）の求め方が分かる。
- 6-4) 波動関数の解釈（ボルンの確率解釈）が理解でき、波動関数の利用方法（物理量の期待値の計算法）が分かる。

学修に当たっての配慮事項

- ・関数空間、関数のノルム、関数の直交性など、三角関数を例に、波動関数のベクトル的な取扱いに配慮する。6-3) においては、シュレーディンガー方程式の定常解の重ね合わせで、時間的に変動する状態を記述できる点を強調し、定常解を求める意義を明確にする。

(7) シュレーディンガー方程式の応用

到達目標

- 7-1) シュレーディンガー方程式を使って、1次元箱形ポテンシャル中での固有状態を計算できる。
- 7-2) シュレーディンガー方程式を使って調和振動子、水素原子、Kronig-Penny モデルなど、比較的簡単な系の量子的挙動を解析できる。
- 7-3) 古典力学と量子力学の類似点（Ehrenfest の定理など）・相違点（不確定性原理など）の由来を数式的に把握でき、量子力学の理論体系と古典力学のそれとの関係が理解できる。

学修に当たっての配慮事項

- ・シュレーディンガー方程式の数式的な取り扱い、主に1次元系で行い、特殊関数を必要としない範囲でこれを学習する。その類推から、水素原子など特殊関数の知識が必要となる系を理解する。また、必要に応じて、特殊関数に関する補足説明を行う。計算機シミュレーションと組合せて学習し、理解を深めることが好ましい。これらの学習内容とレベルは専門科目との関連で、適宜、取捨選択する。

5-2-4. 各項目の採用状況の専門分野別調査

前節では、物理学を構成する科目ごとに具体的な学習項目を抽出し、それらについて、学習の到達目標を設定した。そして、現状の工学教育において、それらの学習項目がどの程度採用されているかを調査した。本節では、その調査結果を紹介する。学習項目の採用の程度は、工学の専門分野によって異なるので、コア項目（基本的な必修項目）は濃灰色、要望項目（より高度な発展的項目）は薄灰色、不要項目は空欄（白）で示した。ここで示した色分けは、あくまで標準的な例を示しているにすぎない。大学の個性・特徴の出し方によって、これと異なる場合が起こり得る。

凡 例	
コア項目（基本的な事項・必修項目）	
要望項目（より高度の内容・選択項目）	
不要項目	

表5-3 力学

項目	到達目標	機械	電気・電子	建築	土木	化学	バイオ	情報・通信
1) 力学に関する基礎的な概念	1-1) 空間（位置）、時間、質量に関する古典的（非相対論的）概念とその数学表現（座標系、ベクトルなど）を理解し、それらを数量的に表現するための単位（基本単位）に習熟する。							
	1-2) 位置の時間微分は速度であること、速度の時間微分は加速度であることを理解し、これらのベクトル量を具体的に計算できる。							
	1-3) 全ての力学的物理量の単位は、物理法則を介して、基本単位の組合せで構成できること、また、全ての物理量は次元を持つことが理解でき、次元解析に活用できる。							
	1-4) 物理量とその時間微分の物理量の関係を見つけることで、自然の運動学が記述できることが理解できる。							
2) 運動の第1法則(慣性の法則)	2-1) 慣性の概念を理解し、慣性の法則が慣性系で成立することが説明できる。							
	2-2) 恒星に張り付いた座標系は慣性系であり、それに対して等速度で運動する系も慣性系であることが理解できる。							
3) 運動の第2法則(運動方程式)	3-1) 運動の第2法則の意味を理解でき、それは、力の定義式又は慣性質量の定義式にもなり得ることが説明できる。							
	3-2) 運動方程式は微分方程式であることを理解し、簡単な系（空気抵抗力を含む放物体、空気抵抗力を含む振動体など）の初期値問題が解ける。							
	3-3) 力学の記述法の特徴は因果律にあることを理解し、その決定論的な記述形式の持つ意味と問題点を指摘できる。							
4) 第3法則(作用・反作用の法則)	4-1) 力が作用するためには、最低限2つの物体が必要であることを理解し、それらの物体に働く力の関係（作用・反作用の法則）が説明できる。							
5) 運動量とその保存則	5-1) 運動量の定義と意味を理解し、その時間変化に関わる法則（運動量の変化と力積の関係）が誘導でき、それを衝突問題などの説明に活用できる。							
	5-2) 運動量が保存するための条件を理解でき、それを衝突問題などの説明に活用できる。							
6) 角運動量とその保存則	6-1) 角運動量の定義と意味を理解し、その時間変化に関わる法則（角運動量の変化と力のモーメントの関係）が誘導でき、それを回転運動の解析に利用できる。							
	6-2) 角運動量が保存するための条件を理解でき、角運動量保存則を使って、等速円運動やケプラーの法則を説明できる。							
7) エネルギーとその保存則	7-1) 位置エネルギーの定義と意味を理解し、力の場からそれを具体的に計算できる。							
	7-2) 位置エネルギーが定義できる必要十分条件を理解し、それを数学的に表現できる。							
	7-3) 位置エネルギーと力の関係：積分形式（線積分）と微分形式（微分演算子）に習熟し、それらが数学的に同等であることを説明できる。							
	7-4) 運動方程式を時間で積分することにより、エネルギー保存則を導くことができる。							
8) 質点系の力学	8-1) 質点系における全運動量の定義と意味を理解し、その時間変化に関わる法則が誘導でき、それが保存するための条件を説明できる。							
	8-2) 質点系の重心点の定義と意味を理解し、その時間変化に関わる法則が誘導できる。							
	8-3) 質点系における全角運動量の定義と意味を理解し、その時間変化に関わる法則が誘導でき、それが保存するための条件を説明できる。							
9) 波動方程式と波動の表式	9-1) 質点系の運動方程式の連続体近似から、波動方程式が導ける。それから自由空間での解（平面波解）を導くことができる。							
	9-2) 波の特徴づけるパラメータ（波数、角振動数など）が理解でき、それらと速度の関係式を波動現象の説明に利用できる。							
	9-3) 波の重ね合わせの原理より、波の干渉や回折の現象を説明できる。							
10) 剛体の運動方程式	10-1) 剛体の定義を理解し、その概念を導入する意義を説明できる。							
	10-2) 質点系の全運動量に関する方程式から、剛体の並進運動を記述する方程式を誘導できる。							
	10-3) 質点系の全角運動量に関する方程式から、剛体の回転運動を記述する方程式を誘導できる。							
	10-4) 慣性モーメントなどの諸量に習熟し、簡単な場合（回転軸の方向が一定）について、剛体の運動方程式を使って剛体の運動を解析できる。							
11) ラグランジュ形式の力学	11-1) 一般化座標、一般化速度、ラグランジュ関数の意味を理解し、ラグランジュの運動方程式がニュートンの運動方程式と同等であることを、簡単な系で確かめることができる。							
12) ハミルトン形式の力学	12-1) 一般化座標、一般化運動量、ハミルトン関数の意味を理解し、ハミルトンの運動方程式がニュートンの運動方程式と同等であることを、簡単な系で確かめることができる。							

表5-4 電磁気学

項目	到達目標	機械	電気・電子	建築	土木	化学	バイオ	情報・通信
1) クーロンの法則	1-1) 電荷間に働く力の法則(クーロンの法則)とその重ね合わせの原理が理解できる。							
	1-2) クーロン力のポテンシャルとして、電位の概念が理解でき、複数点電荷・連続電荷分布によるクーロン電位が計算できる。							
	1-3) 電場の概念が理解でき、複数点電荷・連続電荷分布によるクーロン電場が計算できる。							
	1-4) 電荷、電場、電位の単位に習熟し、それらの具体的な数値が計算できる。							
2) ガウスの法則	2-1) ガウスの法則(積分形式)に習熟し、対称性のよい電荷分布について、この法則より電場が計算できる。							
	2-2) ガウスの定理を理解し、ガウスの法則の積分形式からその微分形式を導ける。							
3) ビオ・サバールの法則	3-1) 電流素間に働く力の法則(ビオ・サバールの法則)とその重ね合わせの原理が理解でき、電流分布から磁場(磁束密度)の計算ができる。							
	3-2) 電流、磁場・磁束密度の単位に習熟し、それらの数値が具体的に計算できる。							
4) ローレンツ力	4-1) 荷電粒子が電場と磁場から受ける力(ローレンツ力)を理解し、簡単な系におけるローレンツ力及び荷電粒子の運動が計算できる。							
	4-2) ローレンツ力とビオ・サバールの法則から、電流間に作用する力の法則が誘導できる。							
5) ファラデーの電磁誘導の法則	5-1) ファラデーの電磁誘導の実験から、磁場が時間的に変化すると電場が渦状に生成されることを理解し、それを数学的に表現できる。							
6) マクスウェル方程式	6-1) 電場や磁場の空間的・時間的変化を記述するマクスウェルの方程式が発見された歴史的な経緯を理解する。とりわけ、変位電流の意義について説明できる。							
	6-2) マクスウェル方程式に習熟し、それから電磁波の波動方程式を導き、電磁波の伝播速度が光速と一致することから、光が電磁波であることを理解する。							
7) 電気・磁気に関する現象論的法則及び理論	7-1) 現象論的法則(オームの法則、キルヒホッフの法則、ジュールの法則など)及び理論(交流理論、回路理論など)に習熟し、簡単な系での計算や回路設計ができる。							
	7-2) 交流のインピーダンス、アドミッタンスなどの諸量に精通し、それを使って回路の特性を表現できる。							

表5-5 熱学・統計力学

項目	到達目標	機械	電気・電子	建築	土木	化学	バイオ	情報・通信
1) 熱力学第1法則	1-1) エネルギーの保存則が熱現象を伴う場合にも成り立つようにするために、内部エネルギーという概念が導入された経緯を理解し、その数学表現に習熟する。							
	1-2) 気体の比熱の意味を理解し、それを使って理想気体の内部エネルギーを表現できる。							
2) 熱機関	2-1) 熱力学的状態が少数の熱力学変数によって指定されること、及び、熱力学変数は系の平衡状態でのみ意味を持つことが理解でき、具体的な系(例えば、理想気体)の熱力学的状態の指定ができる。							
	2-2) 熱力学的状態の変化を考察するために、準静過程の概念が導入されることを理解でき、準静過程の意味と役割を説明できる。							
	2-3) 準静的等温過程と準静的断熱過程の組合せで構成されるカルノー機関の動作の詳細(温度変化、熱の出入り)が理解でき、熱効率が計算できる。							
	2-4) カルノーサイクルは可逆過程であることが理解でき、カルノー機関の逆運転の結果を説明できる。							
3) 熱力学第2法則	3-1) クラジウスの原理とトムソンの原理を理解し、両者が等価であることが説明できる。							
	3-2) 可逆変化と非可逆変化の区別を理解し、非可逆変化と熱力学第2法則との関連が説明できる。							
	3-3) エントロピーの定義と意味を理解し、簡単な系(例えば、理想気体)のエントロピーが計算できる。							
	3-4) エントロピーを使って、熱力学第2法則を表現できる。							
	3-5) エントロピーの微視的な解釈が理解でき、これより熱力学第2法則が説明できる。							
4) 熱力学諸量	4-1) その他の熱力学諸量(自由エネルギー、エンタルピーなど)の定義とその意味を理解し、熱力学的状態の変化を定量的に記述できる。							
	4-2) 自由エネルギーを使って熱力学の第2法則を記述できる。							
	4-3) 熱力学諸量の単位に習熟し、数値の計算が正しくできる。							
5) 分子運動論	5-1) 系の熱力学的状態やその変化を、原子分子の運動学からミクロ的に説明する理論(分子運動論)に習熟し、簡単な系(例えば、理想気体)の記述に応用できる。							
6) 統計力学	6-1) ミクロ的な状態の出現確率から系のマクロ的物理量を計算する原理を理解する。							
	6-2) ミクロカノニカル分布、カノニカル分布、グランドカノニカル分布について、状態和の計算方法が理解でき、それから各種の熱力学諸量が計算できる。							

表5-6 特殊相対論

項目	到達目標	機械	電気・電子	建築	土木	化学	バイオ	情報・通信
1) 時空間の概念	1-1) 人間が時間と空間の概念を取得した経緯を学習し、時間と空間の古典的(ニュートンの)概念が説明できる。							
	1-2) 時間と空間の古典的概念が破綻する実験事実(光速が座標系に依存しない)を学び、新しい時空間の概念の導入が必要であることが認識できる。							
2) ローレンツ変換	2-1) 運動を記述する座標系に絶対的なものがなく、全ての慣性系は対等であること(相対性原理)と光速が座標系に依存しないこと(光速の絶対性)からローレンツ変換式を導出できる。							
	2-2) 座標系の相対速度が光速とくらべて十分小さい場合には、ローレンツ変換式はガリレイ変換式と一致することを示すことができる。							
3) 相対論的速度の合成則	3-1) ローレンツ変換式から相対論的速度の合成則を導出でき、いかなる速度も光速を超えることがないことが理解できる。							
	3-2) 座標系の相対速度が光速とくらべて十分小さい場合には、相対論的速度の合成則は古典力学(ニュートン力学)の速度の合成則と一致することが理解できる。							
4) 時間の遅れ・空間の収縮	4-1) ローレンツ変換式を使って、時間の遅れ・空間の収縮を計算でき、時空間の概念を相対論的に把握できる。							
	4-2) 時間の遅れ・空間の収縮を、ミンコフスキー空間中で幾何学的に把握できる。							
	4-3) 相対論的効果を伴う現象(例えば、宇宙線の寿命の増大など)を定量的に記述できる。							
5) 相対論的力学	5-1) 相対論の時空間は、絶対の時空間に基づく古典力学(ニュートン力学)と矛盾するので、ローレンツ変換に対して共変性を有する相対論的力学の必要性を認識できる。							
	5-2) 相対論的力学の公式に習熟し、それを使って、簡単な事象(質量とエネルギーの変換など)の計算ができる。							
	5-3) 光速に対して十分小さい速度を取扱う場合には、相対論的力学はニュートン力学と一致することを数式的に理解できる。							
6) 相対論的力学の4元形式	6-1) 相対論的力学の4元形式による記述に習熟し、簡単な事象(相対論的運動方程式による運動の解析など)の説明に活用できる。							

表5-7 量子力学

項目	到達目標	機械	電気・電子	建築	土木	化学	バイオ	情報・通信
1) 黒体放射と量子仮説	1-1) 黒体のスペクトルの実験結果の説明において、古典物理学が破綻し、量子仮説が導入された経緯を理解し、量子仮説の意味を説明できる。							
2) 原子スペクトルとボーアモデル	2-1) 原子スペクトルの実験結果の説明において、古典物理学が破綻し、ボーアモデルが導入された経緯を理解し、ボーアモデルの意味を説明できる。							
3) 光電効果と光子仮説	3-1) 光電効果の実験結果の説明において、古典物理学が破綻し、光子仮説が導入された経緯を理解し、光子仮説の意味を説明できる。							
4) 電子線回折と物質波(ド・ブロイ波)仮説	4-1) 物質波(ド・ブロイ波)仮説が導入された経緯を理解し、電子線回折の実験結果が説明できる。							
5) Einstein-Comptonの関係式	5-1) Einstein-Comptonの関係式は、粒子性に関する物理量と波動性に関する物理量の関係であることを理解でき、これを使って電子の波長や光子の運動量が計算できる。							
6) シュレーディンガー方程式とボルンの確率解釈	6-1) Einstein-Comptonの関係式から、シュレーディンガー方程式を導くことができる。							
	6-2) 一般的な系におけるシュレーディンガー方程式の立て方が分かる。							
	6-3) シュレーディンガー方程式の解(波動関数)の求め方が分かる。							
	6-4) 波動関数の解釈(ボルンの確率解釈)が理解でき、波動関数の利用方法(物理量の期待値の計算法)が分かる。							
7) シュレーディンガー方程式の応用	7-1) シュレーディンガー方程式を使って、1次元箱形ポテンシャル中での固有状態を計算できる。							
	7-2) シュレーディンガー方程式を使って調和振動子、水素原子、Kronig-Pennyモデルなど、比較的簡単な系の量子的挙動を解析できる。							
	7-3) 古典力学と量子力学の類似点(Ehrenfestの定理など)・相違点(不確定性原理など)の由来を数式的に把握でき、量子力学の理論体系と古典力学のそれとの関係が理解できる。							

5-2-5. 理論物理・実験物理・計算物理

共通分野「物理学」に関する当該調査研究報告の冒頭（1.何をどこまで）で、「物理学は、アリストテレス、デモクリトス等のギリシャ自然哲学から始まり、ガリレオの実験・観測による研究手法の導入、ニュートンの微積分学による解析手法の確立を経て、17世紀中ごろに精密科学としての体裁を整えた。その後、この手法は、熱、電磁気、原子分子、素粒子等、広範な自然現象の記述に適用された。20世紀に入って、力学的自然観から量子力学的自然観への展開があったものの、自然を数学的に記述することによって、自然を理解しようとする立場は一貫して不変である」と書いた。この記述に基本的な間違いはないが、20世紀の後半にコンピュータが出現すると、以下に述べるように拡張的に解釈されるようになった。これは、非線形の問題などでは、一般的に、方程式の解が既存の初等関数・特殊関数を使って表現できないことと関係し、数学的な記述に限界があることが明らかになった結果であり、また、物理学の研究対象を「物質」以外に「人間・社会現象」をも包含させようとする動向の結果でもある。

いかなる工学分野においても、「自然のしくみ」の理解が基本である。理解してそれを応用しようとする立場である。ここで、人間も生物の一種であり、生物は自然の一部であるという意味で、人間の活動（社会現象）も自然の一部であると考えられる立場がある。人間・社会現象（その多くは非線形現象）をも物理学の研究対象とする立場を「シナジェティックス」という。「理解すること」は「記述すること」と同義である。記述の仕方によって、現代の物理学は、理論物理、実験物理、計算物理に分類される。図5-4に示すように、「自然のしくみの記述の仕方」には、（1）数式による方法（理論物理学）、（2）実験データによる方法（実験物理学）、（3）計算機による方法（計算機シミュレーション）がある。これは互いに相補的な関係にあり、これらの3つの方法を総合的に運用することで、物質や人間・社会現象の非線形的な性質をも理解しようとするのが、現代の物理学の基本的な考え方になっている。従来の物質を対象とする物理学を「ハードな物理学」、対象に人間・社会現象を含む物理学を「ソフトな物理学」と呼ぶ場合もある。理論物理の発展は数学の発展と関係し、実験物理と計算物理の発展は、実験装置や計算機の発達を介して工学の発展に依存している。このように、数学・物理学・工学は密接に関係しながら発展し続けているのが現状である。「物理学の3つの形態」及び「物理学のソフト化」に十分に配慮しながら、今後の工学教育について様々な創意工夫を行うべきであろう。なお、数学・物理学・工学の連携の現状を63ページの表に示した。

工学教育における物理学の位置づけ

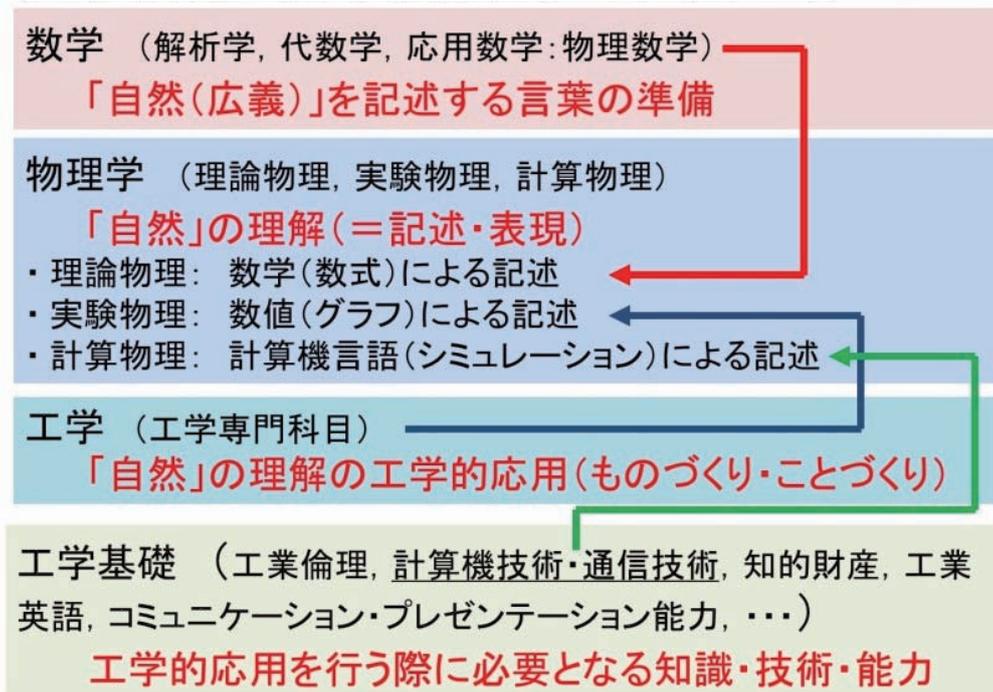


図5-4 工学教育における物理学の位置づけ

5-2-6. 共通分野「物理学」に関する調査研究の結言

物理学は、ギリシャの自然哲学に起源を持ち、その後の発展過程は、人間が自然を理解する試みの連続であり、様々な方法の発見や手法の創成があった。そして、現在でも、その発展が進行している。自然を理解するために行った「人間の思考の創意工夫」が、物理学の歴史に凝縮している。そのため、物理学の学習目的として、(1) 自然現象を理解するための方法自体の習得、(2) 「思考する」ことのトレーニングの場、などの意義を重要視する考え方がある。物理学を精密科学としての「自然哲学」と捉えるこの考え方は、欧米の大学では広く受け入れられており、「個々の自然現象の理解」と同時に「思考の仕方」の習得が物理学の重要な学習目的になっている。

これに対して、我が国では、出来上がった物理学を輸入し、それを工学に応用することに努めた結果、工学教育では、物理学の「自然哲学」としての側面は無視され、専ら工学上都合のよい知識だけを選択し、その応用に特化する教育が為されている。即ち、「工学の道具」としての物理学という考え方である。これは、我が国独自のものであり、現在の工学カリキュラムの基本になっている。このカリキュラムは、明治以来、欧米に追い付き追い越せと急速な工業化を行った際に、自ずと出来上がった形と思われるが、欧米の大学教育のそれと比べて極めて特異あり、物理学に関しては「木を見て森を見ない」教育になっている。我が国が工業化に成功したとはいえ、実は、欧米人が見つけた知識を、単に工学に応用したにすぎない例が多く、原理的な発見・発明に基づく新技術開発は極めて少ない。現在、アジア発展途上国の追い上げのなかで、我が国の明治以来の工学教育の質的な転換が問われている。

原理的な発見・発明に基づく新技術開発は、「新しいものを作り出そうする強い意欲」と「それを可能にする知識」と「そのために深く考える姿勢」と「多くの試行錯誤的な努力」と「試行錯誤の際、多く候補から正しい試行を選択できる良き工学的感性」によって生み出される。従って、我が国の理工系教育の抜本的な改革は、(1) いかにして、新しいものを作り出そうする強い意欲を持たせることができるか、(2) いかにして、新しいものを生み出す基礎となる知識を習得させるか、(3) いかにして、深く考える姿勢を育成できるか、(4) 試行錯誤的な不断の努力を行う人間をどのように育てられるか、(5) 多くの候補の中から正しい試行を選択できる良き工学的感性をどのように育成できるか、これらの問いに解を与えることによって達成できると思われる。

時間的制約から、当該調査研究では(2)に重点を置いて検討を行い、ここにその報告書をまとめることになったが、これを基礎に、それ以外の教育要素(1)、(3)、(4)、(5)についても研究が進展し、我が国の工学教育の将来像がより明確になることを期待したい。

物理学との関連でこれを行うアイデアを以下に述べて、共通分野「物理学」に関する調査研究からの提言としたい。

- (I) 専門の工学に必要な物理学の「知識」を習得することと同時に「物理学の自然理解の方法自体」の学習にエネルギーを投入し、深く考える力を育成すること。
- (II) 具体的には、理論物理、実験物理、計算物理で採用されている多くの具体的な手法の個々について、いかなる仕組みで自然が記述されているかその原理が理解できる工学カリキュラムを開発すること。とりわけ、「物理実験」、「計算機シミュレーション」をこの観点から再構成すること。
- (III) 理論物理、実験物理、計算物理の手法を連動して運用し、総合的に自然を理解する姿勢を育成すること。これを工学的開発に応用できること。
- (IV) 物質を対象とする「ハードな物理学」、対象に人間・社会現象を含む「ソフトな物理学」のそれぞれについて、「工学への応用」、「工学との連携」を強化すること。
- (V) 物理学の知識に基づいて、新しい工学的創造を生み出す「ブレインストーミング演習」を工学教育のカリキュラムに導入すること。この際、学生間及び教員・学生間のコミュニケーションの仕方に工夫を凝らし、工学的感性の育成に資すること。これができる教員を育成すること。