

## 目 次

まえがき .....	IX
訳者まえがき .....	XV

## 第 I 部 基礎編 — 1

<b>第 1 章</b> ニュートンの運動の法則	<b>3</b>
1.1 古典力学 .....	3
1.2 空間と時間 .....	4
1.3 質量と力 .....	11
1.4 ニュートンの第 1 および第 2 法則：慣性系 .....	14
1.5 第 3 法則と運動量保存 .....	20
1.6 直交座標系におけるニュートンの第 2 法則 .....	26
1.7 2 次元極座標 .....	30
第 1 章の主な定義と方程式 .....	39
第 1 章の問題 .....	40
<b>第 2 章</b> 投射体および荷電粒子	<b>49</b>
2.1 空気抵抗 .....	49
2.2 線形空気抵抗 .....	53

2.3	線形抵抗を持つ媒体中における軌道と到達距離	61
2.4	2次空気抵抗	65
2.5	均一磁場における荷電粒子の運動	74
2.6	複素指数関数	76
2.7	磁場中の荷電粒子の運動の解	78
	第2章の主な定義と方程式	80
	第2章の問題	81

### **第3章 運動量と角運動量** 93

3.1	運動量の保存	93
3.2	ロケット	95
3.3	質量中心	97
3.4	単一粒子の角運動量	100
3.5	複数粒子の角運動量	104
	第3章の主な定義と方程式	110
	第3章の問題	110

### **第4章 エネルギー** 117

4.1	運動エネルギーと仕事	117
4.2	位置エネルギーと保存力	121
4.3	位置エネルギーの勾配としての力	129
4.4	$\mathbf{F}$ が保存力である第2の条件	132
4.5	時間依存性がある位置エネルギー	136
4.6	線形1次元系のエネルギー	138
4.7	曲線形の1次元系	145
4.8	中心力	150
4.9	2粒子系の相互作用エネルギー	155
4.10	多粒子系のエネルギー	161
	第4章の主な定義と方程式	166

第4章の問題	168
<b>第5章 振動</b>	<b>181</b>
5.1 フックの法則	181
5.2 単振動	184
5.3 2次元振動子	191
5.4 減衰振動	194
5.5 駆動減衰振動	201
5.6 共振	210
5.7 フーリエ級数*	217
5.8 駆動振動子におけるフーリエ級数の解*	222
5.9 RMS 変位：パーセバルの定理*	229
第5章の主な定義と方程式	232
第5章の問題	233
<b>第6章 変分法</b>	<b>243</b>
6.1 2つの例	244
6.2 オイラー・ラグランジュ方程式	247
6.3 オイラー・ラグランジュ方程式の応用	250
6.4 2つ以上の変数	256
第6章の主な定義と方程式	260
第6章の問題	261
<b>第7章 ラグランジュ方程式</b>	<b>267</b>
7.1 非拘束運動におけるラグランジュ方程式	268
7.2 拘束系の例	277
7.3 一般的な拘束系	279
7.4 拘束がある場合のラグランジュ方程式の証明	283
7.5 ラグランジュ方程式の例	287

7.6	一般化運動量とイグノラブルな座標	300
7.7	結論	302
7.8	保存則の詳細*	303
7.9	磁力に関するラグランジュ方程式*	307
7.10	ラグランジュの未定乗数法と拘束力*	311
	第7章の主な定義と方程式	317
	第7章の問題	318

## **第8章** 2体中心力問題 331

8.1	問題	331
8.2	CM および相対座標：換算質量	333
8.3	運動方程式	335
8.4	等価な1次元問題	338
8.5	軌道方程式	345
8.6	ケプラー軌道	347
8.7	無限ケプラー軌道	354
8.8	軌道の変更	356
	第8章の主な定義と方程式	361
	第8章の問題	362

## **第9章** 非慣性系の力学 369

9.1	回転を伴わない加速	369
9.2	潮汐	373
9.3	角速度ベクトル	379
9.4	回転系における時間微分	383
9.5	回転系におけるニュートンの第2法則	386
9.6	遠心力	388
9.7	コリオリ力	392
9.8	自由落下とコリオリ力	396

9.9	フーコーの振り子	398
9.10	コリオリ力とコリオリの加速	402
	第9章の主な定義と方程式	404
	第9章の問題	405

## 第10章 剛体の回転運動 413

10.1	質量中心の性質	413
10.2	固定軸まわりの回転	418
10.3	任意の軸に関する回転：慣性テンソル	424
10.4	慣性主軸	434
10.5	主軸を求める：固有値方程式	437
10.6	弱いトルクによるコマの歳差運動	441
10.7	オイラー方程式	443
10.8	トルクが働かない場合のオイラー方程式	446
10.9	オイラー角*	451
10.10	回転コマの運動*	454
	第10章の主な定義と方程式	458
	第10章の問題	459

## 第11章 連成振動子と規準振動 469

11.1	2つの物体と3つのばね	470
11.2	同一のばねと質量の等しい物体	474
11.3	2つの弱く結合した振動子	480
11.4	ラグランジュ法：2重振り子	484
11.5	一般的な場合	490
11.6	3重振り子	495
11.7	規準座標*	499
	第11章の主な定義と方程式	502
	第11章の問題	503

## 第Ⅱ部 発展編 — 511

<b>第12章</b>	<b>非線形力学とカオス</b>	<b>513</b>
12.1	線形性と非線形性 .....	514
12.2	駆動減衰振動子線形性と非線形性 .....	519
12.3	DDP の期待される特徴 .....	520
12.4	DDP : カオスへのアプローチ .....	524
12.5	カオスと初期状態に対する鋭敏性 .....	534
12.6	分岐図 .....	543
12.7	状態空間軌道 .....	548
12.8	ポアンカレ断面 .....	558
12.9	ロジスティック写像 .....	563
	第12章の主な定義と方程式 .....	580
	第12章の問題 .....	582
<b>第13章</b>	<b>ハミルトン力学</b>	<b>591</b>
13.1	基本変数 .....	592
13.2	1次元系のハミルトン方程式 .....	594
13.3	様々な次元のハミルトン方程式 .....	599
13.4	イグノラブル座標 .....	607
13.5	ラグランジュ方程式とハミルトン方程式の比較 .....	609
13.6	位相空間軌道 .....	611
13.7	リウヴィルの定理* .....	617
	第13章の主な定義と方程式 .....	625
	第13章の問題 .....	626

<b>第14章</b>	<b>衝突理論</b>	<b>635</b>
14.1	散乱角と衝突パラメータ	636
14.2	衝突断面積	640
14.3	衝突断面積の一般化	643
14.4	散乱の微分断面積	649
14.5	微分断面積の計算	653
14.6	ラザフォード散乱	655
14.7	様々な基準系における断面積*	661
14.8	CM系と実験室系の散乱角の関係*	665
	第14章の主な定義と方程式	669
	第14章の問題	671
<b>第15章</b>	<b>特殊相対性理論</b>	<b>679</b>
15.1	相対性	680
15.2	ガリレイの相対性原理	681
15.3	特殊相対性理論の仮定	686
15.4	時間の相対性：時計の遅れ	689
15.5	長さの収縮	696
15.6	ローレンツ変換	699
15.7	相対論的な速度加算式	704
15.8	4次元時空：4元ベクトル	707
15.9	不変スカラー積	713
15.10	光円錐	716
15.11	商法則とドップラー効果	722
15.12	質量, 4元速度, 4元運動量	725
15.13	運動量の第4要素としてのエネルギー	732
15.14	衝突	739
15.15	相対性理論における力	746
15.16	質量のない粒子：光子	749

15.17 テンソル*	754
15.18 電気力学と相対性理論	758
第15章の主な定義と方程式	763
第15章の問題	766
<b>第16章 連続体力学</b>	<b>785</b>
16.1 ピンと張った弦の横方向の運動	787
16.2 波動方程式	789
16.3 境界条件：有限長の弦上の波*	794
16.4 3次元波動方程式	799
16.5 体積力および面積力	803
16.6 応力とひずみ：弾性率	808
16.7 応力テンソル	811
16.8 固体のひずみテンソル	816
16.9 応力とひずみの関係：フックの法則	823
16.10 弾性体の運動方程式	826
16.11 固体中の縦波と横波	829
16.12 流体：運動の表現*	831
16.13 流体中の波動*	836
第16章の主な定義と方程式	839
第16章の問題	842
付録 実対称行列の対角化	851
A1 単一行列の対角化	851
A2 2つの行列の同時対角化	856
参考文献	859
奇数番号の問題に対する答え	863
索引	901

## まえがき

---

この本は物理学を専攻する学生，特に入門物理学（アメリカの大学における典型的な「新入生の物理学」）の一部として，ある程度力学を学んだことがあり，より深く学ぶ準備ができている物理学科の学生を対象としている。本書はコロラド大学の物理学科における大学3年次レベルの力学コースから生まれたが，そのコースの受講生は主に物理学専攻の学生であるものの，数学・化学・工学専攻の学生もいる。これらの学生のほとんどは1年にわたる新入生の物理学を受講しているので，少なくともニュートンの法則，エネルギーと運動量，単振動などを知っている。本書では一通りの知識のある学生に，これらの基本的な考え方のより深い理解を与えたうえで，ラグランジュ的手法とハミルトン的手法を用いた定式化，非慣性系，剛体の運動，連成振動子，カオス理論などのより進んだ理論を取り扱う。

もちろん力学はどのように物体が動くか，すなわち電子がブラウン管の中をどのように動くか，野球のボールがどのように空を飛ぶか，彗星が太陽のまわりをどのように動くかということを調べる研究分野である。古典力学は17世紀のガリレイとニュートンによって作られ，18世紀と19世紀のラグランジュとハミルトンによって再構成された力学の形式である。200年以上前から，古典力学はすべての考える系の動きを説明することができる唯一の力学形式であると考えられていた。

そして20世紀初頭の2つの大革命において，古典力学は光速に近い物体の運動や，原子を構成する粒子の原子内部の運動を説明できないことが示された。1900年から1930年頃までの期間，主に高速に移動する物体を記述するために相対論的力学が，主に原子核系を記述するために量子力学が発展した。これらの競合する理論に直面して，古典力学はその関心と重要性の多くを失ってしまったと考えられるかもしれない。しかし実際には21世紀初頭において，古典力学はこ

れまでと同じくらい重要で魅力的なものになっている。この復活劇は、3つの事実起因している。第1に、相変わらず多くの興味深い物理系が古典的な用語によって最もよく記述される、ということである。宇宙船や現代の加速器における荷電粒子の軌道を知るには、古典力学を理解する必要がある。第2に、カオス理論の進展に関連する古典力学の最近の発展が物理学と数学の全く新しい分野を生み出し、因果関係の概念の理解を変えたことである。これらの新しいアイデアにより、最高の知性を持つ物理学者の一部が古典力学の研究に戻るようになっていく。第3に今日でも真理であるが、古典力学の深い理解が、相対性理論と量子力学の学習のための前提条件となることである。

物理学者は、「古典力学」という用語を比較的漫然と使用する傾向がある。多数の人々は古典力学をニュートン力学、ラグランジュ力学、ハミルトン力学の意味で使用している。そのような人々にとって、「古典力学」には相対性理論と量子力学は含まれていない。一方で物理学のいくつかの分野においては、「古典力学」の一部として相対性理論を含める傾向がある。このような人々にとって、「古典力学」は「非量子力学」を意味する。この2番目の用法の反映として、「古典力学」と呼ばれるいくつかのコースには、相対性理論の紹介が含まれている。そしてそのような理由で、本書には読者が自由に選択できる相対論的力学の章を含めた。

古典力学の魅力的な特徴は、ベクトル、ベクトル解析、微分方程式、複素数、テイラー級数、フーリエ級数、変分法、行列など、物理学の他の多くの分野に必要な数学的技法を学ぶ絶好の機会を与えてくれることである。これらの話題について、私は（さらに詳しく知りたい場合の参考文献と共に）少なくとも最小限の復習または紹介をおこない、古典力学の極めて単純な文脈の中でその使用法を教授しようとした。読者がこれらの重要な技法を使いこなせるという自信を持って本書から巣立ってくれることを、私は願っている。

本書は必然的に、1セメスターのコースで消化できるよりも多くの題材を含んでいる。ここで私は、何を省略すべきかの選択の基準を述べる。本書は2部に分かれている。第I部には「基礎的」な題材が11章含まれており、順番に読む必要がある。一方で第II部には相互に独立した5つの「発展的」な題材があり、い

ずれも他の章を参照せずに読むことができる。通常、このように分割することはすっきりしたものではないが、これをどのように使うかは読者（または読者の学生）の予備知識によって決まる。コロラド大学での1学期のコースにおける教授経験により、第I部の大部分は着実に取り組む必要があることが分かった。第II部については学生にそのうちの1つを選択させ、課題として学習させた。（学生たちはその活動を楽しんでいたようであった。）本書の予備版から利用した教授の中には、学生たちが最初の4~5の章を素早い復習で済ませることができるよう十分な準備をしており、第II部に使える時間をより多く残せたという経験をした者もいた。また力学のコースが2クォーター続く大学においては、第I部のすべてと第II部の大部分をカバーすることが可能であることも分かった。

第II部の各章は相互に独立しているので、第I部を終了する前にそれらの一部を読むことができる。たとえば第12章のカオスは第5章の振動が終わった後に、第13章のハミルトン力学は第7章のラグランジュ力学の直後に読むことができる。複数の節には、連続性を失うことなく省略できることを示す星印が付いている。（これは重要ではないと言っているわけではなく、後で読者がそれらを読むために戻ってくることを私は望んでいる。）

物理学の教科書を読む際には、各章の最後で多くの演習をおこなうことが重要である。私は教員と学生の両方に多くの選択肢を与えるために、多数の演習問題を含めた。それらの一部は各章の考え方の単純な応用であり、他のものはこれらの拡張である。私は章ごとに問題を入れた。そのため各章を読んですぐに、その章のいくつかの問題を解くことができる（し、またそうすべきである）。（当然のことながら特定の章に記載されている問題は、それ以前の章の知識を必要とするが、その後の章の知識は必要としない。）問題の程度を示すための1つ星(\*)は、ただ1つの内容を含む簡単な演習を意味する。3つ星(\*\*\*)は複数の内容を含み、おそらくかなりの時間と労力を要する挑戦的な問題である。この種の分類はかなり主観的で極めて大まかであり、また驚くほど難しいものである。私は読者がこのようであるべきだと考える変更についての提案を、歓迎する。

問題のなかにはグラフを描いたり、微分方程式を解くのにコンピュータを使用したりする必要があるものが存在する。いずれも特定のソフトウェアを必要とす

るわけではない。MathCadのような比較的単純なシステムでも、Excelのようなスプレッドシートでさえも利用可能である。Mathematica, Maple, Matlabなど、より洗練されたシステムが必要なものもある。(ちなみに本書をもとにした授業は、これらのすばらしいシステムを学ぶためのよい機会にもなる。) コンピュータの使用を必要とする問題は、[コンピュータ]と表示されている。少なくとも必要なコードを作るには多くの時間がかかるという理由で、私はこれらの問題を\*\*\*または少なくとも\*\*にした。もちろんこれらの問題は、必要とされるソフトウェアを利用した経験のある学生にとっては、より簡単なものになるであろう。

各章は、「第××章の主な定義と方程式」という要約で終わる。私はこれらの要約が、読者が各章を理解していることを確認するのに役立つことを、そして読者が本書を読み終わった後に参考書として利用する際に、細部を忘れてしまった数式を見つけようとするときに役立つことを、願っている。

助力や提案をしてくれたことに感謝したい人々が、たくさんいる。コロラド大学では、Larry Baggett 教授, John Cary 教授, Mike Dubson 教授, Anatoli Levshin 教授, Scott Parker 教授, Steve Pollock 教授, Mike Ritzwoller 教授らが含まれる。他大学では、以下の教授たちが原稿を論評したり、授業で予備版を使用してくれたりした。

Meagan Aronson, U of Michigan

Dan Bloom, Kalamazoo College

Peter Blunden, U of Manitoba

Andrew Cleland, UC Santa Barbara

Gayle Cook, Cal Poly, San Luis Obispo

Joel Fajans, UC Berkeley

Richard Fell, Brandeis University

Gayanath Fernando, U of Connecticut

Jonathan Friedman, Amherst College

David Goldhaber-Gordon, Stanford

Thomas Griffy, U of Texas

Elisabeth Gwinn, UC Santa Barbara