

まえがき

本書は、機械力学と電磁気学をたがいに関係付けながら、両工学分野を同時に初歩からわかりやすく学ぶという、従来にない新しい試みに基づいて執筆された本である。

機械は、力学・電気・熱・流体などの複合領域間を自在に横断するエネルギー変換により使命を果たす道具であり、その開発・製造にたずさわる技術者は、自身の専門分野を超えた工学全般に関する広い素養を必要とする。その中で特に重要なのは、力学と電磁気学である。昨今の物造りは機械と電気の技術融合から成り立っているといても過言ではなく、両分野が同時にわかる技術者に対する各種企業の期待と人材要求は大きい。今や、機械と電気は共にすべての工学技術者にとって必須であり、両専門分野の同時習得は大きい武器になる。しかし、両分野を一体で勉強できる教材は現存せず、また個別の専門書を並行して読破するのは容易ではない。その原因は、両分野の内容の相違に加えて、肌合いや性質の違いにある。

機械屋が電磁気学になじみにくいのは、以下の理由による。

- 1) 力学は‘物’の学問、電磁気学は‘場’の学問である。機械屋には場の概念が理解しにくい。
- 2) 物理事象が日常感覚の外にある。電流や電圧は見えないし、電界や磁界は五感を越える。質量やばねと違って静電容量やインダクタンスの大きさは実感できない。
- 3) 種々の法則が次々と登場し、相互関係が錯綜して、全体の道筋を見失う。
- 4) 内容が抽象的で初歩から高度の数学を用いるから、数学に気をとられて物理現象から意識が離れる。

一方、電気屋が力学になじみにくいのは、以下の理由による。

- 1) 力・運動・変形という現象が表に出て、それらの根幹を支配するエネルギーが陰に隠れた形で展開される即物的力学理論は、エネルギーを直接扱う電気屋には肌が合わない。
- 2) 力学は、「なぜ？」に答える学問ではなく暗記の学問であり、面白くない。ニュートンの法則とはこういうもので、万有引力はこのような形で与えられているから覚えておけ、である。
- 3) 与えられる外作用力の下で生じる運動を求める力学は、力が原因で運動が結果の片道通行の因果関係の学問であり、自然界の対称性と閉じた因果関係が電磁気学のように明確には表現されていない。

これまでの専門書は、どちらか片方の単一分野のみに精通した学者・研究者により、その分野特有の既成パターンや筋書に沿って執筆されており、専門外の人を感じる上記の事項には、当然ながら配慮されていない。電気と機械の間に存在する分野間の壁を取り去る最良の方法は、両分野を同時に初歩からわかりやすく学ぶことができる工学書を同一の著者が執筆することであり、本書の最大の狙いはここにある。

本書は、下記の点に留意しながら執筆されている。

- 1) エネルギーとは、力とは、電流とは、電磁波とはなど、事象・物象の正体の考察から始め、それらをしっかり理解した上で、学問の本論に入る。本書は、howではなくwhyからの工学入門書である。
- 2) 初心者や異分野への入門者が抵抗なく読んでそのまま理解できるように、わかりやすさを最優先する。
- 3) 図を多用し、ビジュアルな理解を可能にする。
- 4) 実用的な例題・問題を豊富に用意して、その場で解くことにより、読み進めるだけで応用力が養える。
- 5) 単なる個別技術・手法の列挙・紹介ではなく、学問の本質を支える重要な基本事項的を絞り、それらを正しく理解することにより、時代の変化に強い基礎力と柔軟・自在な適応力を養う。
- 6) 機械と電気が、融合した一体の学問として身につく。
- 7) 大学・大学院の学・院生、および企業の若手技術者を対象とし、入門から中級までを守備範囲とする。
- 8) 単分野のみの学習にも耐えるように、電気と機械の両分野の独立した学術的一貫性を保持した上で、随所で両分野を関連付ける。

本書は、第1編 力と運動、第2編 電気と磁気、の2編からなり、内容は以下のとおりである。

- 1.1 章では、力学の根幹である力の合成と分解、力のモーメントと偶力を説明する。
- 1.2 章では、運動を表現する位置・速度・加速度を定義し、剛体の回転運動の扱い方を述べる。
- 1.3 章では、ニュートンの3法則を紹介し、それらの内容と意味を詳細に論じる。
- 1.4 章では、エネルギーと仕事の考え方を述べ、力学的エネルギー保存の法則を説明する。また、運動量保存の法則と角運動量保存の法則を講説する。
- 1.5 章では、放物運動、拘束運動、惑星の運動、流体の運動などの、質点と質点系の力学を論じる。
- 1.6 章では、剛体の運動の力学を述べる。慣性モーメントと慣性乗積を定義し、回転体の力学と釣合を論じ、オイラーの運動方程式を紹介し、こまやジャイロの運動を解析する。
- 1.7 章では、弾性体の力学の中核である、自由振動、強制振動、自励振動および波動の力学を論じる。
- 1.8 章では、前章までに説明した在来の古典力学の一部を、著者らが改革することを試みる。すなわち、在来力学に欠けていた、法則の対称性と物理事象の閉じた因果関係を力学に導入する。同時に、力と運動を表に出した在来力学の理論構成を、エネルギーを表に出す形に改める。そして、ニュートンの法則・運動量の法則と対称・双対の関係にある新しい力学法則を提唱する。
- 1.9 章では、古典力学から出発し量子力学への道を拓く解析力学への入口を紹介する。ハミルトンの原理、ラグランジュ関数、ハミルトン関数の物理的意味を説明し、古典力学の運動方程式からラグランジュの方程式とハミルトンの正準方程式を導く。
- 2.1 章では、電荷、電界、電位の物理的意味と相互関係を論じ、場の概念を説明する。
- 2.2 章では、導体と誘電体の性質を紹介し、コンデンサと静電エネルギーを説明する。
- 2.3 章では、電流と抵抗を物理学的に説明し、電源と起電力の考え方を述べる。
- 2.4 章では、磁荷と磁界を物理学的に説明し、ローレンツ力の意味を紹介し、磁性体と磁化を考察する。
- 2.5 章では、前節までに説明した静電界と静磁界を支配する法則を、時間変動する電界と磁界に拡張し、両者の関係を論じ、インダクタンスと電磁エネルギーを説明する。
- 2.6 章では、直流と交流の電気回路を説明する。回路を構成する抵抗、コイル、コンデンサの性質およびそれらを組み合わせた回路における定常と過渡の電流と電圧を論じる。
- 2.7 章では、電磁気学の中核である電磁波の基本を論じる。まず、マクスウェルの方程式を積分形で紹介してその物理的意味を説明し、それが電界と磁界間の対称性と閉じた因果関係を表現することを示す。次に、それを数式展開に便利な微分形に変換して波動方程式を導き、電磁波の正体を明らかにする。また、電磁波のエネルギーを求める。
- 2.8 章では、電磁気学に登場する諸概念と諸法則を整理し、それらの相互関係に筋道を通す。

本書は、同一の著者が力学と電磁気学を対比し関連付けながら一体として執筆しているため、両分野間に学問の壁が存在しないという、従来の単分野の専門書にはない特徴を有している。したがって、電気と機械を融合した授業や、一方の専攻の学・院生に他方の分野を教える授業・ゼミ教育の教科書として、最適である。また、自動車や電機機器など各種製造企業における新入社員や若手技術者の教育テキストとしても大変有用である。さらに、スキルアップを目指す企業技術者や、学際領域への拡張を意図する研究者の自習入門書として、大きい効果が見込める。産学両分野における本書の広範囲の活用をお勧めする。

最後に、本書執筆にあたり終始ご助力いただいた岩原光男工学博士に対し、心から感謝申し上げる。

2012年10月 著者代表 長松昌男

目 次

第 1 編 力と運動

1. 1 力	2	1. 4. 2. 1 運動エネルギー.....	39
1. 1. 1 力とは.....	2	1. 4. 2. 2 位置エネルギー.....	41
1. 1. 2 1点に作用する力.....	3	1. 4. 2. 3 力学的エネルギー保存の法則....	43
1. 1. 3 物体に作用する力.....	5	1. 4. 3 運動量.....	48
1. 1. 3. 1 作用点異なる平面力の合成....	5	1. 4. 4 角運動量.....	53
1. 1. 3. 2 力のモーメント.....	5	1. 5 質点と質点系の力学	55
1. 1. 3. 3 偶力.....	6	1. 5. 1 質点の力学.....	55
1. 2 運動	9	1. 5. 1. 1 放物体の運動.....	55
1. 2. 1 質点の運動.....	9	(1) 重力による運動.....	55
1. 2. 1. 1 運動の定義.....	9	(2) 空気抵抗の下での運動.....	57
(1) 速度.....	9	1. 5. 1. 2 拘束運動.....	58
(2) 加速度.....	10	1. 5. 1. 3 惑星の運動.....	61
1. 2. 1. 2 極座標による表現.....	11	(1) ケプラーの法則と万有引力.....	61
(1) 平面運動.....	11	(2) 潮汐.....	64
(2) 空間運動.....	12	(3) 中心力による運動.....	65
1. 2. 2 剛体の運動.....	15	1. 5. 2 質点系の力学.....	70
1. 2. 2. 1 並進と回転.....	15	1. 5. 2. 1 重心の運動と力学的エネルギー..	70
1. 2. 2. 2 平面運動.....	16	1. 5. 2. 2 運動量.....	72
1. 2. 2. 3 瞬間中心.....	17	1. 5. 2. 3 角運動量.....	74
1. 2. 2. 4 空間運動.....	20	1. 5. 2. 4 2体問題.....	78
1. 2. 3 相対運動.....	21	1. 6 剛体の力学	79
1. 2. 3. 1 平面運動.....	21	1. 6. 1 回転運動と慣性モーメント.....	79
1. 2. 3. 2 空間運動.....	23	1. 6. 1. 1 慣性モーメントとは.....	79
1. 3 ニュートンの法則	29	1. 6. 1. 2 慣性モーメントと慣性乗積....	82
1. 3. 1 ニュートンの力学認識.....	29	(1) 回転軸の位置移動.....	82
1. 3. 2 慣性の法則.....	30	(2) 座標の回転変換.....	86
1. 3. 3 運動の法則.....	32	1. 6. 2 回転体の力学.....	89
1. 3. 4 作用反作用の法則.....	33	1. 6. 3 平面運動.....	90
1. 4 エネルギーと運動量	35	1. 6. 4 空間運動.....	94
1. 4. 1 エネルギーと仕事.....	35	1. 6. 4. 1 オイラー角.....	94
1. 4. 1. 1 エネルギーとは.....	35	1. 6. 4. 2 オイラーの運動方程式.....	96
1. 4. 1. 2 エネルギーの保存.....	36	1. 6. 4. 3 こまの運動.....	98
1. 4. 1. 3 仕事とは.....	37	(1) 軸の1点を支えたこま.....	98
1. 4. 2 力学的エネルギー.....	39	(2) 重心を支えたこま.....	99
		(3) ジャイロ.....	101
		1. 7 振動	103

1. 7. 1 自由振動.....	103	1. 8. 1. 3 対称性.....	135
1. 7. 1. 1 力学特性と運動方程式.....	103	1. 8. 1. 4 今なぜ改革か.....	136
1. 7. 1. 2 不減衰系.....	104	1. 8. 2 状態量.....	138
(1) 固有振動数.....	104	1. 8. 2. 1 基本状態量.....	138
(2) 運動方程式の解.....	105	1. 8. 2. 2 不確定性原理と状態量.....	140
(3) 力学的エネルギー.....	107	1. 8. 3 質量と弾性.....	141
(4) 振動のからくり.....	107	1. 8. 3. 1 力学特性の考え方.....	141
1. 7. 1. 3 減衰系.....	111	1. 8. 3. 2 機能.....	142
(1) 運動方程式の解.....	111	1. 8. 3. 3 質量と弾性の対比.....	144
(2) 振動のからくり.....	112	1. 8. 3. 4 接続.....	147
1. 7. 2 強制振動.....	113	1. 8. 4 粘性.....	149
1. 7. 2. 1 不減衰系.....	113	1. 8. 4. 1 歴史上の背景.....	149
(1) 運動方程式の解.....	113	1. 8. 4. 2 機能.....	150
(2) 共振のからくり.....	115	1. 8. 4. 3 カエネルギー場と粘性.....	151
1. 7. 2. 2 減衰系.....	116	1. 8. 4. 4 発生機構.....	155
(1) 運動方程式の解.....	116	(1) 原子間のカエネルギー場と粘性.....	155
(2) 共振のからくり.....	118	(2) 力学的エネルギーの散逸.....	158
(3) 基礎の振動.....	118	(3) 速度に比例する抵抗力を生じる理由... 161	
1. 7. 3 自励振動.....	120	1. 8. 4. 5 固体・液体・気体の物性.....	162
1. 7. 3. 1 自励振動とは.....	120	1. 8. 5 ニュートンの3法則の対称性.....	165
1. 7. 3. 2 自励振動の解析.....	121	1. 8. 5. 1 力学法則の因果関係と対称性... 165	
1. 7. 3. 3 自励振動のからくり.....	122	1. 8. 5. 2 新しい3法則.....	166
(1) バイオリン.....	122	1. 8. 5. 3 速度の作用と反作用.....	168
(2) カルマン渦.....	124	(1) 速度の作用.....	168
(3) フラッタ.....	125	(2) 速度の反作用.....	169
1. 7. 4 波動.....	125	(3) 弾性に与える速度の作用と反作用... 170	
1. 7. 4. 1 弦の振動.....	125	1. 8. 6 運動量の法則の対称性.....	171
(1) 波動方程式.....	125	1. 8. 6. 1 歴史的背景と現在の認識.....	171
(2) 波動方程式の解.....	126	1. 8. 6. 2 対称性の導入.....	173
(3) 初期条件の導入.....	127	1. 8. 6. 3 単位系.....	174
(4) 境界条件の導入1: 一端固定.....	128	1. 8. 7 力学的エネルギーの対称性.....	176
(5) 境界条件の導入2: 両端固定.....	129	1. 8. 7. 1 運動エネルギーとカエネルギー... 176	
1. 7. 4. 2 棒の縦振動.....	130	1. 8. 7. 2 仕事と力学的エネルギー.....	178
1. 7. 4. 3 音波.....	130	1. 8. 7. 3 不確定性原理と力学的エネルギー... 180	
(1) 気体の弾性.....	130	1. 8. 8 力の釣合.....	181
(2) 平面波.....	131	1. 8. 8. 1 力の釣合とは.....	181
1. 8 力学の改革.....	133	1. 8. 8. 2 力の釣合と作用反作用の法則... 183	
1. 8. 1 力学の考え方.....	133	1. 8. 9 速度の連続.....	184
1. 8. 1. 1 在来力学の流儀.....	133	1. 8. 10 慣性力.....	185
1. 8. 1. 2 因果関係.....	133	1. 8. 10. 1 慣性力とは.....	185

1. 8. 10. 2 慣性力と力の釣合.....	186	(2) 平行板コンデンサ.....	233
1. 8. 11 概念と法則の対称性.....	187	(3) 同心球コンデンサ.....	234
1. 9 解析力学	189	(4) 同軸線路.....	235
1. 9. 1 解析力学とは.....	189	2. 2. 2. 2 コンデンサの接続.....	235
1. 9. 2 ラグランジュの方程式.....	190	2. 2. 2. 3 電界のエネルギー.....	237
1. 9. 2. 1 座標の一般化.....	190	(1) 静電エネルギー.....	237
1. 9. 2. 2 力の一般化.....	191	(2) 極板間に働く力.....	239
1. 9. 2. 3 運動量の一般化.....	193	(3) 帯電球の静電エネルギー.....	240
1. 9. 2. 4 ラグランジュ関数.....	194	2. 2. 3 誘電体.....	241
1. 9. 2. 5 ハミルトンの原理からの導出...	195	2. 2. 3. 1 誘電体とは.....	241
1. 9. 3 ハミルトンの正準方程式.....	201	2. 2. 3. 2 電束.....	242
1. 9. 3. 1 状態変数の変換.....	201	2. 2. 3. 3 ガウスの法則.....	244
1. 9. 3. 2 ラグランジュの方程式からの導出	203	2. 2. 3. 4 誘電率.....	245
1. 9. 3. 3 ハミルトンの原理からの導出...	204	2. 3 電流と抵抗	249
第2編 電気と磁気		2. 3. 1 電流.....	249
2. 1 電界	208	2. 3. 1. 1 電流とは.....	249
2. 1. 1 電荷.....	208	2. 3. 1. 2 電流の物理学的考察.....	250
2. 1. 1. 1 電荷とは.....	208	2. 3. 2 抵抗.....	252
2. 1. 1. 2 電荷保存の法則.....	209	2. 3. 2. 1 オームの法則.....	252
2. 1. 1. 3 クーロンの法則.....	209	2. 3. 2. 2 抵抗の物理学的考察.....	254
(1) クーロン力.....	209	2. 3. 2. 3 抵抗の温度依存性.....	254
(2) MKSA 有理単位系.....	211	2. 3. 2. 4 ジュールの法則.....	255
2. 1. 2 電界.....	213	2. 3. 2. 5 抵抗の接続.....	256
2. 1. 2. 1 電界とは.....	213	2. 3. 3 電源と起電力.....	258
(1) 遠隔作用と近接作用.....	213	2. 4 磁界	261
(2) 電界と電気力線.....	215	2. 4. 1 磁気現象.....	261
(3) 自己力.....	216	2. 4. 1. 1 磁荷.....	261
2. 1. 2. 2 ガウスの法則.....	218	2. 4. 1. 2 電流間に働く力.....	261
2. 1. 3 電位.....	221	2. 4. 1. 3 磁界.....	262
2. 1. 3. 1 電位とは.....	221	2. 4. 2 静磁界の基本法則.....	263
2. 1. 3. 2 ポテンシャル場と作用.....	224	2. 4. 2. 1 静磁界に関するガウスの法則...	263
2. 1. 3. 3 電気双極子.....	227	2. 4. 2. 2 アンペアの法則.....	264
2. 2 導体と誘電体	229	2. 4. 3 ビオ・サバルの法則.....	266
2. 2. 1 導体.....	229	2. 4. 3. 1 ビオ・サバルの法則とは....	266
2. 2. 1. 1 導体とは.....	229	2. 4. 3. 2 ビオ・サバルの法則の導出...	267
2. 2. 1. 2 導体内の電界.....	230	2. 4. 4 磁界内の電流に作用する力.....	272
2. 2. 2 コンデンサ.....	233	2. 4. 4. 1 アンペアの力.....	272
2. 2. 2. 1 コンデンサとは.....	233	2. 4. 4. 2 コイルに作用する力のモーメント	273
(1) コンデンサと静電容量.....	233	2. 4. 4. 3 ローレンツ力.....	274
		2. 4. 5 小さい磁石.....	276

2. 4. 5. 1	円形電流と磁気双極子.....	276	2. 6. 2. 2	電気回路素子.....	314
2. 4. 5. 2	磁荷に作用する力.....	278	(1)	抵抗.....	314
2. 4. 5. 3	小さい磁石が作る磁界.....	280	(2)	コイル.....	315
2. 4. 6	磁性体中の磁界.....	282	(3)	コンデンサ.....	316
2. 4. 6. 1	磁化.....	282	(4)	抵抗, コイル, コンデンサの組合せ..	317
2. 4. 6. 2	磁性体.....	283	(5)	変圧器.....	321
2. 5	電磁誘導	285	2. 6. 3	過渡現象.....	323
2. 5. 1	変化する電界と磁界.....	285	2. 6. 3. 1	$R-L$ 回路.....	323
2. 5. 1. 1	基本法則.....	285	2. 6. 3. 2	$R-C$ 回路.....	325
2. 5. 1. 2	電荷保存の法則.....	285	2. 6. 3. 3	$R-L-C$ 回路.....	326
2. 5. 1. 3	アンペアの法則の一般化.....	286	(1)	時刻歴現象.....	326
2. 5. 1. 4	ファラデーの法則.....	287	(2)	エネルギー保存の法則.....	328
2. 5. 1. 5	準定常電流.....	292	2. 7	電磁波	329
2. 5. 1. 6	磁束中を運動する回路.....	293	2. 7. 1	マクスウェルの方程式.....	329
(1)	コイルの面積変化による起電力.....	293	2. 7. 1. 1	積分形.....	329
(2)	交流発電機.....	296	2. 7. 1. 2	微分形.....	331
(3)	単極誘導.....	297	2. 7. 2	電磁波とは.....	334
2. 5. 2	インダクタンス.....	298	2. 7. 2. 1	波動関数と波動方程式.....	334
2. 5. 2. 1	インダクタンスとは.....	298	2. 7. 2. 2	マクスウェルの方程式から電磁波へ	336
(1)	自己インダクタンス.....	298	2. 7. 2. 3	電磁波のエネルギー.....	338
(2)	相互インダクタンス.....	299	2. 8	電磁気学のまとめ	341
(3)	自己インダクタンスと相互インダクタンス の関係.....	300	2. 8. 1	電気と磁気の対応関係.....	341
2. 5. 2. 2	インダクタンスの接続.....	301	2. 8. 2	法則の整理.....	341
(1)	直列接続.....	301	参考文献	347	
(2)	並列接続.....	302	索引	348	
2. 5. 2. 3	いろいろなインダクタンス.....	303			
(1)	環状ソレノイド.....	303			
(2)	円筒ソレノイド.....	303			
(3)	2重円筒ソレノイド.....	304			
(4)	同軸線路.....	304			
(5)	発電機のインダクタンス.....	305			
2. 5. 2. 4	磁界のエネルギー.....	306			
2. 6	電気回路	309			
2. 6. 1	直流回路.....	309			
2. 6. 1. 1	キルヒホッフの法則.....	309			
2. 6. 1. 2	重ねの理.....	311			
2. 6. 1. 3	テブナンの定理.....	312			
2. 6. 2	交流回路.....	313			
2. 6. 2. 1	交流とは.....	313			