

# まえがき

本書はこれまで本著者が相対性理論に関連したテーマで様々な機会に行った講義が元になっている。入門講義と中間講義の前半は、東京大学教養学部、放送大学放送授業および面接授業で取り上げた題材が多い。また、中間講義の一部を含め、特別講義と題した最後の3章の内容は各地の大学学部、大学院、あるいは、夏の学校等における集中講義の際に取り上げた題材のうち、量子論に立ち入らずにその本質を捉えられ、かつ中間部までの内容とも自然に関連するものを選んで取り入れた。

全体として、著者の専門である基礎理論物理（素粒子理論を中心とする場の量子論、および重力を含めた統一理論、特に弦理論）からの観点を強調しているが、最初の1/3程度は、初めて相対性理論を学ぶ場合でも十分に読みこなせるだろう。特に第3,4,5章では初学者にとって把握が難しい相対論的な時間の性格について詳しく解説した。また、この段階から一般相対論への動機付けを兼ねて加速運動を詳しく取り扱った。第7章からの一般の粒子と場の相対論的力学（電磁相互作用、スカラー相互作用）、一般相対論（重力相互作用）へと進む中間から後半にかけては、中間講義としてより進んだレベルの内容を盛ってある。さらに第10章からの「特別講義」は、主に点電荷の自己エネルギーの問題に端を発する古典電磁気理論の困難を解決する試みにつなげる意味で、三つのテーマを取り上げた。自己場の問題、点電荷の困難を解決する理論の構築を目指したディラックの膜電子模型とボルン-インフェルトの非線形電磁場理論、そして最後に重力を含む相互作用の統一理論を目指す弦理論に関連して、相対論的弦の古典力学について初歩的な観点から述べた。これらに関しては、古典論の枠内で弦理論とこうした電子論の歴史的課題とを関連づけている意味で、おそらく類書ではあまり扱われていない内容にもかなり踏み込んだ。大学院で研究者を目指そうとする学生諸君にも役立てていただけるものと期待している。

本書はSGCライブラリとしてのページ数の制限もある中で、上のような特徴を持たせて企画したものなので、「相対論」として通常標準的に扱われている題材を全て網羅することには拘らなかった。それ等については読者の好みにより数多ある本から選んで本書と並行して学ぶとよいだろう。相対論に限らず、物理の基礎を学ぶには様々な異なった観点から書かれた本に親しむことが重要である。あるいは、本書では詳しく取り上げていないいくつかの標準的題材については、筆者の前著『時間と空間の物理—電気、磁気、重力と相対性理論』（岸根順一郎氏との共著、放送大学教育振興会、2013年）、および、特に電磁気学に関しては、ファラデーとマックスウェルの精神に立ち返って相対論の観点から初等電磁気学を組み立て直す意図のもとに執筆した本書の姉妹編『初歩の相対論から入る電磁気学』（朝倉書店、2018年）を参照してある程度は補っていただくこともできるだろう（一部本書と重なる部分もある）。それぞれ【参I】、【参II】として本文中に引用するので、気に留めていただければ幸いである。

2018年9月

米谷 民明

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>入門講義：運動と相対性</b>	<b>1</b>
1.1	相対論の小歴史	1
1.2	ガリレイの相対性原理：ニュートン力学の時間・空間	3
1.3	電気・磁気と相対性	4
1.4	マイケルソン-モーリーの実験	6
1.5	波の伝播と相対性	8
1.5.1	波動方程式：1次元で音波の場合	8
1.5.2	波動方程式のガリレイ変換とローレンツ変換	10
1.5.3	虚回転としてのローレンツ変換	14
<b>第 2 章</b>	<b>入門講義：アインシュタインの特殊相対性理論</b>	<b>16</b>
2.1	電磁気現象の相対性	16
2.2	相対性原理と光速不変の原理	17
2.2.1	同時性の定義	17
2.2.2	距離と時間の相対性	18
2.3	位置と時刻の座標変換（ローレンツ変換）の導出	19
2.4	結果の物理的意味	22
2.5	速度の合成	24
2.6	ドップラー効果と光行差	26
<b>第 3 章</b>	<b>入門講義：相対性理論の意味</b>	<b>30</b>
3.1	いくつかの「パズルの」問題	30
3.2	相対性理論に対する反論についての対話	33
<b>第 4 章</b>	<b>入門講義：ミンコフスキー空間とテンソル解析</b>	<b>40</b>
4.1	4次元ミンコフスキー空間とローレンツ変換	40
4.2	ミンコフスキーのダイアグラム	43
4.3	4元ベクトルとテンソル	44
4.4	固有時間	46
4.5	運動量・エネルギー 4元ベクトル	48
4.6	因果律と光速	51
<b>第 5 章</b>	<b>入門講義：相対論的運動と時間空間</b>	<b>53</b>
5.1	相対論的運動方程式	53

5.2	相対論的運動の典型例 . . . . .	55
5.2.1	例 1: 等速直線運動 . . . . .	55
5.2.2	例 2: 信号のやり取りにより固有時間の違いを確かめる . . . . .	56
5.2.3	例 3: 定数の力による一定加速運動 . . . . .	61
5.2.4	加速系同士の信号のやり取り . . . . .	63
5.3	ローレンツ変換の合成とトーマス歳差 . . . . .	67
<b>第 6 章</b>	<b>入門講義: 場のテンソル解析と電磁場</b>	<b>69</b>
6.1	場のローレンツ変換と方程式の共変性 . . . . .	69
6.2	電磁場の相対論的取り扱い . . . . .	71
6.2.1	マックスウェル方程式 . . . . .	71
6.2.2	電磁場テンソル . . . . .	72
6.2.3	力の密度ベクトル . . . . .	75
6.2.4	電磁場のローレンツ変換 . . . . .	77
6.2.5	電磁波とローレンツ変換 . . . . .	79
6.3	4 元ベクトルポテンシャル . . . . .	81
<b>第 7 章</b>	<b>相対論的力学 I</b>	<b>85</b>
7.1	荷電粒子の運動方程式 . . . . .	85
7.2	電磁場のエネルギー・運動量・応力 . . . . .	89
7.3	粒子系のエネルギー・運動量テンソルと保存則 . . . . .	93
7.3.1	電磁場と相互作用する粒子 . . . . .	93
7.3.2	相対論的理想流体 . . . . .	97
7.4	もしも磁気単極子が存在するとしたら . . . . .	101
<b>第 8 章</b>	<b>相対論的力学 II</b>	<b>104</b>
8.1	保存則の一般形とローレンツ変換 . . . . .	104
8.2	相対論的角運動量 . . . . .	106
8.3	スピン角運動量 . . . . .	110
8.4	スカラー場による力 . . . . .	112
8.5	作用原理 . . . . .	114
8.5.1	粒子の作用積分 . . . . .	114
8.5.2	場の作用積分 . . . . .	117
8.6	スカラー場の物理的性質 . . . . .	122
8.7	電荷を帯びた場の例: 複素スカラー場 . . . . .	125
<b>第 9 章</b>	<b>重力と一般相対性理論</b>	<b>129</b>
9.1	等価原理と一般座標不変性: 物理学の幾何学化 . . . . .	129
9.2	重力場中の粒子と共変微分 . . . . .	135
9.3	重力場の方程式 . . . . .	138

9.4	重力場の物理的性質 . . . . .	141
9.4.1	弱い重力場と重力波 . . . . .	141
9.4.2	重力場のエネルギー運動量 . . . . .	144
9.4.3	重力場と点電荷の自己エネルギー . . . . .	146
9.4.4	ブラックホールと時空の特異点 . . . . .	150
<b>第 10 章</b>	<b>特別講義 I：自己場の問題</b>	<b>156</b>
10.1	点電荷と電磁場の自己エネルギー . . . . .	156
10.2	自己力の導出 . . . . .	158
10.3	ローレンツ-ディラック方程式 . . . . .	162
10.4	スカラー場の自己力 . . . . .	168
<b>第 11 章</b>	<b>特別講義 II：古典電子模型と非線形電磁場理論</b>	<b>172</b>
11.1	古典電子模型 . . . . .	172
11.1.1	ローレンツ-ポアンカレの電子模型とその後の歴史 . . . . .	172
11.1.2	ディラックの膜電子模型 . . . . .	175
11.2	非線形電磁場理論 . . . . .	178
11.2.1	不変作用積分とエネルギー運動量テンソル . . . . .	178
11.2.2	静的点電荷の場 . . . . .	180
11.2.3	運動の近似的取り扱いと問題点 . . . . .	182
<b>第 12 章</b>	<b>特別講義 III：弦の相対論的古典力学</b>	<b>185</b>
12.1	粒子の作用原理の再定式化 . . . . .	185
12.2	弦の作用原理と運動方程式 . . . . .	187
12.3	弦の相互作用：相互作用の統一と無限大の解消 . . . . .	190
12.4	弦の相対論的古典運動 . . . . .	194
12.5	開弦とボルン-インフェルト理論 . . . . .	198
	参考文献	201
	索引	204