

目次

1	序論	1
1.1	宇宙・地上にあまねく存在するプラズマ現象	1
1.2	高温プラズマ状態の特徴	5
1.3	プラズマ物理学の研究手法	8
1.4	計算機シミュレーション法	12
2	プラズマの基礎パラメーター	17
2.1	デバイ遮へいとデバイ半径	17
2.2	プラズマ振動数	20
2.3	磁場に伴うパラメーター	21
2.4	粒子衝突の頻度	22
3	与えられた場の中での粒子運動	27
3.1	不変な電磁場中での粒子運動：電場ドリフト	27
3.2	時間的に変化する電場中での粒子運動：分極ドリフト	29
3.3	非一様な磁場中での粒子運動1：磁場こう配ドリフト	31
3.4	非一様な磁場中での粒子運動2：磁力線湾曲ドリフト	33
3.5	非一様な磁場中での粒子運動3：磁場に沿う力	33
3.6	電場の圧力により生じる力	37

3.7	プラズマ圧力の非一様性により生じる電流	39
4	プラズマ運動論の基礎方程式	41
4.1	クリモントビッチ方程式	41
4.2	プラズマ運動論方程式	44
4.3	フォッカー-プランク方程式	46
5	磁場をもたないプラズマ中の運動論的波動	53
5.1	プラズマ固有波動の分散関係式	53
5.2	誘電率テンソルによるプラズマの記述	56
5.3	プラズマ系の初期値と固有モードの関係	59
5.4	縦・横モードの分離	62
5.5	ラングミュア波	64
5.6	イオン音波	67
5.7	電磁波	70
5.8	プラズマエコー	72
6	磁場をもつ一様プラズマ中の運動論的波動	79
6.1	磁化プラズマの誘電率テンソル	79
6.2	静電波動の分散式	83
6.3	磁化プラズマ中の静電波	84
6.3.1	電子プラズマ波	84
6.3.2	静電イオンサイクロトロン波	86
6.4	磁化プラズマ中の電磁波動	87
6.4.1	概観	87
6.4.2	熱平衡プラズマの分散式	88
6.5	磁場と平行に伝わる電磁波	90
6.6	磁場と垂直に伝わる電磁波	95
7	流体理論による線形波動	101
7.1	流体方程式の導入	102

7.2	流体理論でのラングミュア波	104
7.3	磁場方向に伝わる高周波電磁波	106
7.4	アルヴェン波, 磁気音波	107
8	不安定性によるプラズマ波動の励起	113
8.1	プラズマ不安定性	113
8.1.1	不安定性のエネルギー源	113
8.1.2	対流型不安定性と絶対不安定性	115
8.2	ビーム駆動型不安定性	117
8.2.1	冷たいビームプラズマ系	117
8.2.2	有限温度の場合: イオン音波不安定性	119
8.3	磁化プラズマ中でのビームプラズマ不安定性	123
8.4	ベンローズの不安定性規準	125
8.5	温度非等方性により励起される不安定性	128
8.6	圧力非等方性により励起される不安定性	132
8.7	非一様性により励起されるドリフト波不安定性	133
8.8	ドリフト波不安定性の運動論	136
9	プラズマ非線形現象 1: コヒーレント過程	141
9.1	序論	141
9.2	粒子捕捉による不安定波動の安定化	142
9.3	BGK モード: 運動論的定常波	147
9.3.1	BGK 方程式	147
9.3.2	BGK 方程式の解	149
9.4	非線形イオン音波	151
9.4.1	KdV 方程式	151
9.4.2	KdV 方程式のソリトン解	155
9.5	バーガース方程式のショック解	157
9.6	非線形電子プラズマ波	159
9.7	非線形シュレーディンガー方程式	163

10	プラズマ非線形現象 2 : 弱乱流とモード間結合	167
10.1	弱乱流プラズマの運動論 : 準線形理論	167
10.2	弱電子ビーム不安定性の安定化	172
10.3	電磁波に伴う準線形現象の理論	175
10.4	電磁波による粒子のピッチ角散乱	179
10.5	モード間結合 (パラメトリック効果)	181
10.6	共鳴 3 波相互作用	183
10.7	電磁波による電子プラズマ波とイオン音波の励起	186
10.8	誘導ブリルアン散乱	190
10.9	非共鳴的パラメトリック相互作用	193
10.10	異常抵抗と異常拡散	197
11	磁気流体力学	203
11.1	磁気流体方程式の導出	203
11.2	磁気流体方程式の適用範囲	208
11.3	理想 MHD 方程式と磁場の凍りつき	210
11.4	磁気流体平衡	213
11.4.1	磁気流体平衡の方程式	213
11.4.2	磁気流体平衡の例	214
11.4.3	磁気面と安全係数	216
11.4.4	グラード-シャフラノフ方程式	217
11.5	磁気流体不安定性	219
11.5.1	レイリー-テイラー不安定性	220
11.5.2	電流駆動型不安定性	223
11.5.3	圧力駆動型不安定性	225
11.5.4	テアリングモード不安定性	226
12	粒子シミュレーションによるプラズマ非線形現象の研究	231
12.1	運動論的シミュレーション序論	231
12.2	粒子シミュレーションで扱えるプラズマ現象	233

12.3	さまざまな粒子シミュレーション法	235
12.4	マイクロ (微視) スケール粒子シミュレーション	238
12.4.1	ミクروسケールの定義	238
12.4.2	シミュレーションの手順	238
12.4.3	数値的安定性の条件	242
12.5	粒子シミュレーションを行うための準備	243
12.5.1	プラズマの初期化	243
12.5.2	方程式の無次元化	245
12.6	「電磁ハイブリッド」粒子シミュレーション	247
12.6.1	ハイブリッドとは	247
12.6.2	コードのアルゴリズム	248
12.7	変形 2 流体不安定性による高エネルギー電子生成	249
12.7.1	不安定波動の線形成長	251
12.7.2	プラズマの非線形的変化	252
12.7.3	高エネルギー電子生成の機構	254
12.8	アルヴェン・イオンサイクロトロン波の励起とイオン加熱, ピッチ角散乱	257
12.8.1	人工衛星観測の結果	257
12.8.2	不安定性の線形成長	259
12.8.3	プラズマの加熱	260
12.8.4	磁気捕捉による不安定性の安定化	263
13	新しい粒子シミュレーションによる巨視的運動論プラズマの研究	267
13.1	マクロ (巨視) スケールに至る歴史	267
13.2	マクروسケール粒子コードのアルゴリズム	270
13.2.1	粒子の運動方程式	270
13.2.2	電磁場の方程式	271
13.2.3	粒子・電磁場結合方程式	273
13.3	数値的方法によるアルゴリズムの検証	275
13.3.1	線形固有モードの測定	276
13.3.2	有限振幅波による検証	278

13.4 運動論的アルヴェン波の励起とプラズマ加熱	280
13.4.1 背景について	280
13.4.2 線形理論による解析	281
13.4.3 シミュレーションの手順	282
13.4.4 運動論的アルヴェン波の励起	284
13.4.5 プラズマの加熱	286
13.5 電子ビーム入射による電流生成とキンク不安定性	287
13.6 今後の粒子シミュレーションの展望	291
付録 MKSA 単位系による方程式と物理量	295
索引	299