

# 目 次

1. プラズマの基本特性 .....	1
1.1 プラズマとは.....	1
1.2 プラズマの密度と温度 .....	3
1.3 粒 子 的 挙 動.....	5
1.3.1 サイクロトロン運動 .....	5
1.3.2 磁気モーメントの断熱不変性 .....	7
1.3.3 磁力線を横切るドリフト .....	8
1.3.4 クーロン衝突 .....	13
1.3.5 荷電粒子の拡散 .....	15
1.3.6 プラズマの電気抵抗 .....	17
1.4 集 団 的 挙 動.....	19
1.4.1 デバイ遮蔽 .....	20
1.4.2 プラズマのシース .....	21
1.4.3 プラズマ振動 .....	25
1.4.4 プラズマの存在条件 .....	26
1.5 主な基本的プラズマ・パラメータの数値 .....	27
2. プラズマの基礎方程式 .....	30
2.1 プラズマ物理学と電磁気学の関係——マクスウェルの方程式 .....	30
2.2 分布関数による平均化 .....	31
2.3 プラズマの二流体方程式 .....	32
2.4 電磁流体力学方程式 .....	34
3. プラズマの静電的性質 .....	36
3.1 は じ め に.....	36
3.2 電 子 波.....	38
3.3 イ オ ン 音 波.....	39

iv	目 次	
3.4	ペアプラズマ波	42
3.5	イオンサイクロトロン波	43
3.6	ドリフト波	45
3.7	無衝突減衰	46
3.8	非線形現象と乱れ	48
4.	プラズマの電磁的性質	50
4.1	プラズマ中の電磁波	50
4.2	表面波	53
4.3	外部磁界が存在する場合の電磁波	54
4.4	磁力線の凍結	56
4.5	磁気圧とピンチ現象	57
4.6	アルフベン波	59
4.7	磁力線の繋ぎ替え	61
4.8	天体からの電磁放射現象	62
5.	プラズマ生成の原理	64
5.1	衝突断面積と平均自由行程	64
5.2	励起と電離	66
5.2.1	弾性衝突	66
5.2.2	非弾性衝突	67
5.2.3	原子の内部エネルギー状態	68
5.3	放電開始条件	69
5.4	パッシェンの法則	71
5.5	コロナ放電・グロー放電・アーク放電	74
5.5.1	コロナ放電	75
5.5.2	グロー放電	76
5.5.3	アーク放電	77
5.6	両極性拡散	77
5.6.1	拡散と移動度	78
5.6.2	両極性拡散	78
5.6.3	拡散によるプラズマの時間空間変化	79

	目 次	v
5.6.4	磁界を横切る拡散	81
6.	プラズマ生成法	84
6.1	熱電離・接触電離によるプラズマ生成	84
6.2	直流放電プラズマ源	86
6.2.1	平行平板型プラズマ源	86
6.2.2	ホロー陰極放電プラズマ源	87
6.2.3	クロスフィールド放電プラズマ源	88
6.2.4	直流マグネトロン放電プラズマ源	88
6.3	高周波放電プラズマ源	89
6.3.1	容量結合型高周波放電プラズマ源	90
6.3.2	誘導結合型高周波放電プラズマ	92
6.4	マイクロ波放電	95
6.5	電子サイクロトロン共鳴プラズマ源	97
6.5.1	衝突性プラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱	97
6.5.2	無衝突プラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱	99
6.5.3	ヘリコン波プラズマ源	100
6.6	光・レーザー生成プラズマ源	101
6.7	強結合プラズマ源	104
7.	プラズマの計測	107
7.1	静電プローブ法	108
7.1.1	シングルプローブ法	108
7.1.2	ダブルプローブ法	109
7.2	エネルギー分析法	110
7.2.1	ファラデーカップ	110
7.2.2	静電偏向型エネルギー分析器	111
7.2.3	磁界偏向型エネルギー分析器	111
7.3	磁気プローブ法	112
7.3.1	単純コイル	112
7.3.2	ロゴスキーコイル	112
7.4	電磁波による計測法	113

7.4.1 透過法	113
7.4.2 反射法	113
7.5 レーザーによる計測法	114
7.5.1 干渉法	114
7.5.2 トムソン散乱法	114
7.6 発光による計測法	116
7.6.1 スペクトル線強度比法	116
7.6.2 スペクトル線幅による計測	117
7.7 ラジカル計測法	118
7.7.1 レーザー吸収法	118
7.7.2 レーザー誘起蛍光法 (LIF)	119
7.7.3 コヒーレントアンチストークスラマン分光法 (CARS)	119
8. エネルギーとエレクトロニクスへのプラズマ応用	123
8.1 制御熱核融合の原理	123
8.2 核融合プラズマによる発電	126
8.3 低温プラズマプロセス——薄膜形成	129
8.3.1 プラズマ化学気相堆積法	129
8.3.2 スパッタ堆積法	131
8.3.3 プラズマ重合	132
8.4 低温プラズマプロセス——エッチング	132
8.4.1 プラズマエッチングの原理	132
8.4.2 異方性エッチング	133
8.4.3 反応性イオンエッチング	133
8.5 低温プラズマプロセス——表面改質	134
8.5.1 表面改質の原理	134
8.5.2 イオンプレーティング	135
8.6 光源へのプラズマ応用	135
8.6.1 照明への応用	135
8.6.2 レーザーへの応用	137
8.6.3 プラズマディスプレイ	139

9. 材料・環境・宇宙工学とナノバイオ工学・医療へのプラズマ応用	141
9.1 熱平衡プラズマの発生と応用	141
9.1.1 直流アーク放電プラズマ	141
9.1.2 大気圧熱プラズマジェット	143
9.1.3 熱電離プラズマ	143
9.1.4 熱平衡プラズマプロセッシング	144
9.1.5 熱平衡プラズマ廃棄物処理	145
9.2 大気圧非平衡プラズマの発生と応用	145
9.2.1 大気圧非平衡プラズマの原理	145
9.2.2 大気圧非平衡プラズマの応用	146
9.3 液体が関与するプラズマの発生と応用	147
9.3.1 液体中におけるパルス放電プラズマ生成	148
9.3.2 液体中におけるアーク放電プラズマ生成	148
9.3.3 液体を電極としたプラズマ生成	149
9.4 プラズマ推進機への応用	150
9.4.1 プラズマ推進器の原理	150
9.4.2 比推力と比出力	151
9.4.3 イオンエンジン	152
9.4.4 ホール推進機	152
9.5 ナノテクノロジーへのプラズマ応用	153
9.5.1 トップダウンとボトムアップ	153
9.5.2 半導体集積回路プロセス	154
9.5.3 新規ナノ物質創製	155
9.6 バイオテクノロジーへのプラズマ応用	156
9.6.1 滅菌・殺菌	156
9.6.2 凝固・治療・手術	157
9.6.3 製薬・ドラッグデリバリーシステム	157
9.6.4 バイオ分子デバイス	158
9.7 時代を歩み牽引するプラズマ——進展するプラズマ応用	159
演習問題解答	160
参考文献	175
索引	176