

# 目 次

## 第 1 章 序 説

1.1	プラズマの定義と多様なプラズマ	1
1.1.1	プラズマの定義；物質の第 4 態	1
1.1.2	多様なプラズマ	2
	低電離プラズマと高（完全）電離プラズマ——プラズマとして取り 扱いうるパラメータ領域——固体プラズマ・縮退（量子）プラズマ ——太陽とその周辺プラズマ——実用的な各種応用プラズマ	
1.2	プラズマ研究の歴史	5
	放電物理としての発展——地球（宇宙空間）物理分野での発展—— 原子核物理との結び付き	
1.3	プラズマの主要パラメータと特性量	6
1.3.1	プラズマ密度	6
1.3.2	プラズマ温度と速度分布関数	7
1.3.3	各種の特性量	8
1.4	プラズマの媒質としての特徴	10
1.4.1	磁界中での異方性	10
1.4.2	電磁（磁気）流体としての挙動	11
1.4.3	デバイ遮へいとデバイ長	12
1.4.4	プラズマ振動	15
1.4.5	クーロン衝突；2 体衝突と多体衝突	16
	荷電粒子間衝突現象の特徴——2 体衝突からみたクーロン衝突—— 運動量伝達断面積の定義——クーロン衝突断面積	
1.5	プラズマの理論的取扱い	20
	電磁（磁気）流体力学による取扱い——気体運動論による取扱い	
1.6	プラズマからの電磁放射	22
	低温弱電離プラズマからの電磁放射——制動放射——サイクロトロ ン（シンクロトロン）放射	
1.7	その他の基礎事項	26
問 題		26

## 基礎篇

## 第2章 プラズマ粒子の軌道運動論

2.1 $E \times B$ ドリフト	28
空間的に一様な静磁界と静電界中のドリフト——一様な静磁界と一様な一般力が重なった場合のドリフト運動——一様な静磁界に空間変動静電界が重なった場合の $E \times B$ ドリフト運動 (有限ラーマ半径効果)	
2.2 非一様磁界中のドリフト運動	31
磁力線の基本的性質——磁力線の曲がりによるドリフト運動	
2.3 単純トラス・プラズマ中の荷電粒子の挙動	34
2.4 磁気モーメントとその断熱不変性	35
時間的な変化の場合——空間的な変化の場合	
2.5 プラズマの磁気断熱圧縮加熱と磁気鏡	37
プラズマの磁気断熱圧縮加熱——磁気ミラー (磁気鏡)	
2.6 静磁界に垂直なプラズマの実効誘電率	39
2.7 空間的に非一様な高周波電界中での荷電粒子の運動	41
問 題	43

## 第3章 電磁流体力学によるプラズマの取扱い

3.1 流体力学的な平均量 (モーメント)	45
3.2 ボルツマン方程式とマクスウェルの輸送方程式	47
3.2.1 ボルツマン方程式	47
3.2.2 マクスウェルの輸送方程式	48
3.3 プラズマ粒子群に対する保存則	51
3.4 多成分プラズマに対する電磁流体力学方程式	52
3.4.1 方程式群の種類	53
3.4.2 新しいパラメータの導入と保存則表示	53
3.4.3 マクスウェルの電磁界方程式	57
3.4.4 気体としての熱力学的状態方程式	57
3.5 一般化されたオームの法則	58
3.5.1 衝突項について	58
3.5.2 弱電離3成分プラズマの一般化されたオームの法則	59
ホール効果——イオンスリップ効果——導電率のテンソル表示	

## ——導電率テンソルの物理的意味

3.5.3 完全電離プラズマに対する一般化されたオームの法則	61
3.6 簡単化された電磁流体方程式	62
3.7 磁界の誘導方程式と磁力線の凍結	64
3.7.1 磁界の誘導方程式	64
3.7.2 磁界 (磁力線) の拡散	65
3.7.3 磁力線の凍結	65
3.7.4 磁気レイノルズ数	67
問 題	68

## 第4章 プラズマの気体運動論と輸送・緩和現象

4.1 ブラゾフ方程式とフォッカー・プランクの方程式	71
4.1.1 ブラゾフ方程式	72
4.1.2 フォッカー・プランク方程式	72
4.2 弱電離プラズマ中の輸送定数 (磁界なしの場合)	74
4.2.1 移動度	74
4.2.2 拡散定数	74
4.2.3 導電率	76
4.2.4 熱伝導度	76
4.2.5 粘性係数	78
4.2.6 イオンによる輸送定数	79
4.2.7 両極性拡散現象	79
4.3 弱電離プラズマの磁界に垂直方向の輸送定数	81
4.3.1 移動度と拡散定数	81
4.3.2 導電率	83
4.3.3 (電子) 熱伝導度	83
4.3.4 両極性拡散定数	83
4.4 完全 (高) 電離プラズマの輸送定数	85
4.4.1 拡散定数	85
磁界がない場合——磁界が存在する場合	
4.4.2 導電率	87
磁界がない場合——磁界が存在する場合	
4.4.3 熱伝導率	88
磁界がない場合——磁界が存在する場合	
4.4.4 粘性係数	90
磁界がない場合——強磁界が存在する場合——粘性による磁界に垂	

直な粒子の流れ	
4.5 プラズマ中の緩和現象	91
4.5.1 弱電離プラズマ中の電子温度緩和	92
4.5.2 荷電粒子間衝突による平均速度の減少と速度拡散	93
静止イオンとの衝突による電子の速度拡散——マクスウェル分布プラズマへの荷電粒子入射に伴う平均速度の減少と速度拡散——マクスウェル分布プラズマへの入射高速荷電粒子ビームの緩和時間	
4.5.3 高電離非平衡プラズマの緩和時間	100
クーロン衝突の累積 90° 変向時間——同種荷電粒子間のエネルギー緩和時間——粒子減速時間——二つのマクスウェル分布プラズマ間のエネルギー緩和	
4.6 逃走電子	103
問題	104
<b>第5章 プラズマ中の振動・波動現象</b>	
5.1 分散（関係）式	107
5.1.1 分散（関係）式とは？	107
5.1.2 位相速度と群速度	108
5.1.3 屈折率	109
5.2 2流体プラズマ方程式に基づく波動の基本式	110
5.3 静電波	111
5.3.1 電子プラズマ波	111
5.3.2 イオン音波とイオン波	112
イオン音波の分散式——物理的解釈——イオン波の全体像	
5.4 “冷たい” 一様プラズマ中の波動の分散式	115
5.4.1 分散式の導出	115
5.4.2 波の遮断および共振（共鳴）条件	118
5.4.3 衝突効果の取入れ	119
5.5 電磁流体波	119
5.6 電磁波	123
5.6.1 外部磁界が存在しない場合の電磁波	123
5.6.2 外部磁界が存在する場合の電磁波	124
外部磁界と並行に伝搬する電磁波の分散式——外部磁界に垂直に伝搬する電磁波	
5.7 CMA 線図	130
5.8 ランダウ減衰とサイクロトロン減衰	134

5.8.1 ランダウ減衰	134
5.8.2 サイクロトロン減衰	136
問題	137
<b>第6章 磁界中プラズマの力学的平衡と安定性</b>	
6.1 磁界中プラズマの力学的平衡（釣り合い）	139
6.1.1 電磁流体力学に基づく力学的平衡の基本式	139
6.1.2 閉込めの基本的性質と磁気圧の導入	141
6.2 磁界中のプラズマ閉込め時間	143
6.3 プラズマ不安定性とその分類	144
6.3.1 プラズマ不安定性とその理論的取扱い	144
線形化解析——エネルギー判別法——準線形理論と計算機シミュレーション	
6.3.2 プラズマ不安定性の分類	146
6.4 交換形（レーレー・テラ形）不安定性	149
6.4.1 粒子ドリフト運動に基づく理解	150
6.4.2 エネルギー原理による解釈	151
6.5 電流（ビーム）駆動形不安定性	154
6.5.1 折れ釘（キンク）形不安定性	154
6.5.2 2流体（ビーム）不安定性	155
6.6 ドリフト（波）不安定性	158
6.6.1 低ベータ・プラズマのドリフト（波）不安定性の概要	159
6.6.2 ドリフト（波）不安定性の特性	160
6.7 速度空間不安定性	162
6.8 各種不安定性の安定化制御法	162
6.8.1 極小磁界配位の採用	163
開放形プラズマに対する“絶対”極小磁界配位の形成と安定化の実証——トーラス・プラズマへの平均極小磁界電位の適用とその安定化実証——ドリフト（波）不安定性制御への（平均）極小磁界配位の効果——回転変換を伴うトーラス磁気容器と平均極小磁界配位	
6.8.2 磁気シャーとその安定化効果	172
磁気シャーの概念——巨視的不安定性に対する磁気シャーの安定化効果——磁気シャーの巨視的不安定性に対する安定化効果の特徴——微視的不安定性に対する磁気シャーの安定化効果	
6.8.3 有限イオン・ラーマ半径の交換形不安定性に対する安定化効果	176
6.8.4 磁力線連結効果	178

6.8.5 プラズマ安定化制御の要約	182
問 題	182

## 第7章 プラズマ-固体壁材料間の相互作用

7.1 序 説	185
7.2 相互作用に含まれる各種の基礎過程	186
7.3 吸蔵ガスの放出 (脱離)	187
7.4 スパッタリング	188
7.5 薄膜の形成	190
7.6 中性子入射	192
問 題	193

## 応 用 篇

### 第8章 プラズマ生成法

8.1 熱 (平衡) プラズマの生成	195
8.1.1 高気圧・定常アーク放電プラズマ	195
概要—熱ピンチアーク	
8.1.2 体積熱電離プラズマ	198
8.1.3 接触熱電離プラズマ	200
8.1.4 衝撃波プラズマ	201
8.2 非 (熱) 平衡プラズマの生成	204
8.2.1 PIG 放電プラズマ	205
8.2.2 低気圧誘導 (無電極) 放電プラズマ	205
8.2.3 低気圧高周波 (またはマイクロ波) 無電極放電プラズマ	207
8.2.4 電子サイクロトロン共振 (鳴) (ECR) プラズマ	209
8.2.5 プラズマ銃によるプラズマ生成・射出	210
8.3 電子ビーム入射によるプラズマ生成	211
8.3.1 高気圧ガス中の電子ビームによるプラズマ生成	212
8.3.2 低気圧ガス中の電子ビームによるプラズマ生成	213
8.4 光照射によるプラズマ生成	216
8.4.1 紫外光照射による予備電離プラズマ生成	216
8.4.2 高出力レーザ光照射によるプラズマ生成	217
レーザ光による気体の絶縁破壊—逆制動放射によるプラズマ加熱	

—固体表面への照射によるプラズマ生成と加熱—磁界中での固体生成プラズマの挙動—爆縮プラズマの生成

問 題	225
-----	-----

### 第9章 超高温プラズマへの加熱

9.1 高エネルギー中性粒子ビーム入射加熱	227
9.1.1 高エネルギー中性粒子発生装置の概念構成	228
9.1.2 負イオン源の導入	229
9.2 高周波加熱	230
9.2.1 イオンサイクロトロン共振 (鳴) 加熱 (ICRF 加熱)	231
9.2.2 電子サイクロトロン共振 (鳴) 加熱 (ECRF 加熱)	232
9.2.3 低域ハイブリッド共振 (鳴) 加熱 (LHRF 加熱)	234
9.3 その他の加熱法	235
9.3.1 磁気断熱圧縮加熱	235
9.3.2 磁気ポンプ加熱	236
問 題	237

### 第10章 非熱平衡プラズマの応用

10.1 放電プラズマによる固体表面洗浄	239
10.2 プラズマエッチング	240
10.2.1 加工作業の概念	240
10.2.2 含まれる基礎過程	241
10.2.3 異方性エッチング	241
10.2.4 各種のエッチング方式	242
平行平板 (またはその変形) 電極配置による高周波プラズマ方式— マイクロ波を用いた ECR プラズマ方式—電子ビーム発生プラズ マを用いる方式	
10.3 プラズマを用いた薄膜形成	244
10.3.1 プラズマ CVD 法	245
10.3.2 スパッタ堆積法	246
10.3.3 プラズマ重合法	248
10.4 プラズマを用いた表面改質	248
10.5 特殊放電プラズマの応用	250
10.5.1 オゾン発生装置 (オゾナイザ)	250
10.5.2 イオン源プラズマ	251
イオン源プラズマと要求される特性—高密度正イオンの生成—	

高密度負イオンの生成	
10.5.3 マグネトロン (直交) 放電プラズマ	256
10.5.4 レーザ励起用プラズマ	256
問題	257

## 第11章 熱 (平衡) プラズマの応用

11.1 高気圧プラズマジェット (トーチ)	259
11.2 プラズマ溶解, 溶断および溶接などへの応用	261
11.3 プラズマ溶射	261
11.4 皮膜形成・表面改質	262
11.5 超微粒子の生成	263
11.6 廃棄物処理と無害化処理	264
問題	265

## 第12章 電磁流体の流れと応用

12.1 電磁流体 (MHD) 発電	267
12.1.1 流路中の電流	268
12.1.2 MHD 流路の諸電極形成	269
連続電極ファラデー形流路—分割電極ファラデー形—分割電極 ホール形	
12.1.3 発電出力密度と電気的変換効率	270
発電出力密度—電気的変換効率	
12.1.4 その他の MHD 発電方式	272
12.1.5 発電プラント実現への構想と実験的研究の状況	273
12.2 電磁流体 (MHD) 加速	274
12.3 液体 (溶融) 金属流とその応用	275
12.3.1 ハルトマンの流れ	276
12.3.2 ハルトマンの流れの諸応用	279
電磁流量計—溶融金属 MHD 発電—電磁ポンプ, 電磁推進船, 電磁移送樋	
問題	280

## 第13章 核融合プラズマと核融合エネルギー開発

13.1 核融合反応と核融合動力炉の概念	281
13.1.1 地上で平和利用が可能と思われる核融合反応と核反応率	281
13.1.2 核融合炉の概念	285

制御熱核融合反応炉の概念—他の原理による核融合炉の可能性— 高温プラズマの閉込め方式	
13.1.3 核融合炉に必要なエネルギー収支条件	286
エネルギー増倍率—核融合炉心達成に向けての必要プラズマ条件	
13.2 磁気閉込め核融合プラズマとその進展	290
13.2.1 トーラス形核融合プラズマ方式	291
内部電流系トーラス—外部導体 (ヘリカル) 系トーラス	
13.2.2 開放形核融合プラズマ方式	308
タンデムミラー方式—カスプ磁界方式	
13.3 慣性 (爆縮) 核融合プラズマとその進展	314
13.3.1 慣性 (爆縮) 核融合炉およびシステムの原理的事項	314
13.3.2 レーザビーム照射方式とその進展	317
レーザドライバの開発—爆縮過程とターゲットペレットの設計・ 製作—課題と進展状況	
13.3.3 荷電粒子ビーム照射方式	322
軽イオンドライバ方式—重イオンドライバ方式	
13.4 核融合エネルギー開発と課題	327
13.4.1 核融合炉と核融合プラントシステム	327
磁気閉込め核融合炉—慣性閉込め (爆縮) 核融合炉	
13.4.2 核融合工学の進展	331
核融合炉心工学技術の進展—核融合炉工学技術の進展	
13.4.3 核融合エネルギー開発上のシステム工学的課題	337
安全性と環境保全性の確保—核融合炉の建設・運転に必要な資源 量問題—材料開発に必要な 14 MeV 中性子源の確保—初期ト リチウム燃料の確保	
問題	340

## 第14章 プラズマ計測法

14.1 プローブ (探針) 法	343
14.1.1 静電プローブと高周波プローブ	343
14.1.2 磁気プローブ	346
14.2 電磁波計測	347
14.2.1 電磁波伝搬法	347
干渉計法—電磁波反射法—ファラデー回転法	
14.2.2 サイクロトロン放射による電子温度測定	351
14.2.3 レーザ散乱計測法と LIDAR 法	352

14.3 全放射エネルギー測定と分光計測 .....	355
14.3.1 全放射エネルギーの測定 .....	355
14.3.2 可視・近紫外・真空紫外域の各分光法 .....	357
可視域制動放射の強度測定 (平均イオン価数の決定)——スペクトル線幅測定 (ドップラー効果とシュタルク効果)——線スペクトル強度比測定	
14.3.3 X線分光法 .....	362
エネルギー分散計測——波長分散計測	
14.3.4 赤外線レーザー吸収分光法 .....	364
14.3.5 レーザ誘起蛍光法とレーザー分光計測 .....	365
レーザー誘起蛍光法——非線形ラマン分光法	
14.4 粒子計測 .....	369
14.4.1 粒子分析法 .....	369
高速中性粒子計測によるイオンエネルギーの決定——各種粒子の質量およびエネルギー分析器	
14.4.2 核反応生成物測定によるプラズマ診断 .....	373
中性子計測——核反応生成高速イオン計測	
14.5 ビームプローブ法 .....	375
14.5.1 能動的な高速中性粒子ビーム測定法 .....	375
14.5.2 重イオンビームプローブ法 .....	377
14.5.3 ビームプローブ分光法 .....	379
基礎的事項——中性粒子プローブ用ビーム源——発光分光との組合せ計測法——レーザー分光との組合せによる実効磁界・電界測定	
問 題 .....	385
付 録 .....	387
問題解答 .....	397
索 引 .....	408