

広域プラズマ科学入門

— プラズマ特性・診断の基礎と
地上から宇宙までの多面的応用展開 —

篠原 俊二郎【著】

コ ロ ナ 社

まえがき

物質は温度が上がると、固体、液体、気体と状態が変化する。さらに高温になると、「プラズマ」と呼ばれる第4の状態となり、これは地上から宇宙まで広い範囲で見られる。例えば、自然現象として観察できるプラズマとしては、地球から遠い宇宙へ向かって、火花、雷、オーロラ、太陽、恒星、銀河群／銀河団がある。より身近な例としては、ローソク、蛍光灯、ガス着火装置などがあり、プラズマが直接見えている。プラズマを応用した技術は、半導体（作製）、環境（空気・水の浄化など）、核融合（発電）、プラズマを用いた電気推進ロケットや、最近では医療や農業関連まで、多くの領域に展開されており、現代生活に欠かせない。

すなわち、現在の「プラズマ」は、従来の放電工学、プラズマ物理学、プラズマ化学などの枠を超え、広域プラズマ科学と呼べるまでに発展しており、21世紀の重点研究分野とも密接に絡んでいる。しかし、このようにプラズマは重要な役割を果たしているにもかかわらず、他分野と比較して目立たず、基本的なプラズマの性質や物理現象については意外と知られていない。

本書は、このプラズマを基礎から丁寧に解説し、広域プラズマ科学分野に興味のある方々に役立つように留意した。主な対象者として、大学学部3年生以上や大学院修士課程学生を想定している。また、プラズマ研究歴が浅い研究者や他分野の方にも役立つよう執筆した。本書を読む前提として、電磁気学、力学、簡単な数学の知識があることを期待しているが、基本的には、本書を読むだけで内容を理解できるようにした。例えば、電磁気学や数学の基礎などは、付録にあるので参照できる。

本書では、幅広くわかりやすく、系統的な記述を目指した。さらに、従来の教科書とは異なり、執筆のうえで幅広い視点を保つよう留意し、特定の分野に偏った記述を避けた。プラズマの基礎分野を幅広く扱い、初学者が理解に困る点にもわかりやすい説明を加え、物理学や自然科学分野の共通性や現象についても意識して記述している。低温プラズマの基礎・応用から、核融合で代表される高温プラズマまでに至る著者の長年の研究・教育経験をベースとして、限られた紙面の中で、理解しやすかつバランスのとれた内容となるよう構成した。

また、入手しやすい文献（Websiteでダウンロード可能なものも含む）も多く引用、紹介した。便利なQRコード（株式会社デンソーウェーブの登録商標）も表示した。文献のURLは、すべて2026年7月時点での情報である。参照しやすいように、付録には実験例を含むユニークな解説、換算式、表や図なども盛り込んだ。他書ではほとんど見られないが、カラーの口絵で種々の分野の興味深いプラズマの例を紹介した。さらに、本書で扱う変数などの記号については、途中から読み始めても理解しやすいように本書の冒頭に「記号の説明」としてまとめた。

いる。もちろん、豊富な索引も本書の最後に付した。

冗長を避けるため、補足的な説明は脚注に記している。内容は、追加の理解や簡単な問題・演習に役立つ式の変形、物理量の典型的数値、参考内容（進展した内容や最近の話題も含む）などである。さらに、読者の興味や学習背景によってはやや発展的で難しいかもしれない節や項には（※）記号を付して示した。逆に、より一層興味を持った読者には、多くの参考文献や脚注（†）および（※）を付した節や項が、発展的内容の学習に役立つと考えられる。読者のレベルと興味に応じて、取捨選択すると良い。

今後の学習に役立つため、英語の学術表記も必要な箇所に挿入した。本書では基本的には国際単位系（SI）を用いたが、一部慣例（密度や圧力など）として、CGS系が使われているのは容赦されたい。電場／磁場については電界／磁界の表現もあるが、前者の「場」を用いた。磁束密度 $\mathbf{B}$ と磁場 $\mathbf{H}$ については、単に磁場と書いた場合は、本書でも混同がなければ $\mathbf{B}$ で使う場合もある。

本書の構成を簡単に述べる。1章と2章では、簡単にプラズマを紹介する。3章と4章では、プラズマの粒子と流体としての特長をそれぞれ解説し、発展的内容として5章、6章、7章では、それぞれ輸送現象、平衡と安定性、およびプラズマ波動について説明した。類書では見られない特徴として、8章ではプラズマ診断、9章では種々のプラズマ研究の現状や展望について触れている。プラズマ基礎の入り口と、種々に展開されている現状をひとまず簡単に知りたい場合には、1章と9章をまず読むと参考になる。なお、本書は著者の英語専門書（High-Density Helicon Plasma Science—From Basics to Applications, Springer（2022））の前半部の、プラズマの基礎部分を参照しつつ、よりわかりやすく大幅に加筆・補筆した内容となっている。

執筆にあたり、貴重なコメントをいただいた、東海大学・谷川隆夫名誉教授、九州大学・羽田亨名誉教授／松清修一教授／諫山翔伍助教、中部大学・桑原大介准教授、神戸大学・古川武留助教の各先生に感謝します。口絵資料にご協力くださいました多くの方々にも謝意を表します。長年の私の研究・教育にご助言、ご協力をいただき支えてくださった方々、および多くの参考文献の著者の方々にもお礼を申し上げます。コロナ社の関係者には、最初から最後まで辛抱強くご尽力いただきお世話になりました。最後に、妻仁子の長年のサポートに感謝する。

2026年7月

篠原 俊二郎

目 次

1 章 は じ め に

1.1 多様に展開するプラズマの世界	1
1.2 プラズマ生成	3
1.2.1 種々のプラズマ生成法 3 / 1.2.2 定常ガス放電 4	
1.2.3 AC・高周波・マイクロ波放電 6	
1.3 プラズマにおける非線形性	7
1.4 温度換算および熱速度と波長の温度依存性	8
引用・参考文献	9

2 章 プラズマの基本的性質

2.1 プラズマ振動	10
2.2 デバイ遮蔽	13
2.3 結合係数, プラズマ条件, 温度の概念	15
引用・参考文献	17

3 章 電磁場中の荷電粒子の運動

3.1 サイクロトロン運動	18
3.2 種々のドリフト運動	19
3.3 磁気モーメント	23
3.3.1 磁気モーメントの保存 23 / 3.3.2 ミラー磁場配位 26	
3.4 3つの断熱不変量 (※)	28
引用・参考文献	30

4 章 磁気流体としてのプラズマ

4.1 マクスウェル輸送方程式とモーメント	31
4.2 磁気流体力学の方程式	35
4.3 単純化した磁気流体力学方程式と磁気レイノルズ数 (※)	38
4.3.1 単純化 MHD 方程式と電磁場のエネルギー (※)	39
4.3.2 磁場の拡散と磁気レイノルズ数 (※)	40
4.3.3 単純化 MHD と理想 MHD の方程式のまとめと MHD 波 (※)	43
引用・参考文献	45

5 章 輸 送 現 象

5.1 種々の衝突とプラズマ抵抗	46
5.1.1 衝突と平均自由行程	46
5.1.2 完全電離プラズマでのクーロン衝突	47
5.1.3 弱電離プラズマでの中性粒子との衝突	48
5.2 拡散パラメータ	51
5.3 両 極 性 拡 散	52
5.4 磁場を横切る拡散	53
5.5 円柱プラズマでの拡散と再結合 (※)	55
5.6 異 常 拡 散 (※)	57
5.7 固体壁での条件	59
5.7.1 固体壁付近の電位構造とイオン速度 (※)	59
5.7.2 プラズマ-壁相互作用	62
引用・参考文献	63

6 章 プラズマの平衡と安定性

6.1 プラズマ平衡	64
6.1.1 平衡と安定性のイメージ	64
6.1.2 磁気流体力学的平衡 (※)	66
6.1.3 トーラス系の平衡 (※)	68
6.1.4 ベータと反磁性電流	71
6.2 プラズマ不安定性	72
6.2.1 不安定性の定義と解析法	72
6.2.2 トーラス系の不安定性 (※)	75
6.2.3 交換不安定性	76
6.2.4 ドリフト波不安定性	79
6.2.5 典型的な低周波不安定性のまとめ (※)	81
引用・参考文献	84

7 章 基礎プラズマ波動

7.1 波動の基礎	85
7.2 冷たいプラズマの分散関係	88
7.3 冷たいプラズマでの波動特性	91
7.3.1 無磁場中の波動	91
7.3.2 磁場に平行な伝搬波	93
7.3.3 磁場に垂直な伝搬波	95
7.3.4 共鳴とカットオフ	96
7.3.5 典型的な波動のまとめとCMA図	97
7.4 種々のプラズマ波動現象 (※)	100
7.4.1 非一様性と境界の効果 (※)	100
7.4.2 波動のエネルギー (※)	102
7.4.3 波動減衰・吸収機構 (※)	104
7.4.4 波動解析のための分類と特徴 (※)	108
7.4.5 熱いプラズマの分散関係 (※)	110
7.4.6 ナイキストの判定条件 (※)	111
7.5 高周波プラズマ源	112
7.5.1 容量性結合型プラズマ	113
7.5.2 誘導性結合型プラズマ	116
7.5.3 表面波プラズマ	116
7.5.4 ヘリコン波プラズマ	117
7.5.5 電子サイクロトロン共鳴プラズマ	118
引用・参考文献	119

8 章 プラズマ診断法

8.1 電気的測定	121
8.1.1 シングルプローブ	122
8.1.2 ダブルプローブ	125
8.1.3 トリプルプローブ (※)	126
8.1.4 マッハプローブ (※)	126
8.1.5 そのほかのプローブ (※)	127
8.2 磁气的測定	128
8.2.1 磁気プローブ	128
8.2.2 ログスキーコイル (※)	129
8.3 電磁波による測定	130
8.3.1 受動的な電磁波測定 (※)	130
8.3.2 能動的な電磁波測定	131
8.4 光と放射による測定	133
8.4.1 受動的な光と放射測定	135
8.4.2 能動的な光と放射測定 (※)	137
8.5 粒子による測定	141
8.5.1 受動的な粒子測定	141
8.5.2 能動的な粒子測定 (※)	144
8.6 データ収集と解析	145
引用・参考文献	146

9 章 広域プラズマ科学の展開

9.1 本書の内容のまとめ	150
9.2 現状と今後の展望	151
9.2.1 全体の概観 151 / 9.2.2 基礎分野 154	
9.2.3 種々の応用分野 163	
9.3 最後 に	173
引用・参考文献	174

付 録

A.1 基本パラメータ（国際単位系（SI））	178
A.1.1 物理定数 178 / A.1.2 プラズマでの便利な式 178	
A.2 有用な数学と物理学の公式	179
A.2.1 ベクトル公式 179 / A.2.2 ベクトル積分 180	
A.2.3 円柱座標での偏微分 180 / A.2.4 マクスウェルの方程式 180	
A.2.5 ベッセル関数と変形ベッセル関数 180	
A.3 波動解析用光線追跡法	182
A.4 高周波を主とした実験システム	182
A.4.1 実験システム例 182 / A.4.2 高周波システム 184	
A.4.3 インピーダンス整合 184 / A.4.4 アンテナ抵抗 185	
A.4.5 ノイズ除去 186	
引用・参考文献	187

索 引	188
-----------	-----

記号の説明

ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説明	ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説明
a	典型的な粒子間距離；プラズマ半径；小半径（従半径）；カットオフ-共鳴対の幅	d	電極間の距離
		D	拡散係数；分散関係式(7.9)；分散関係
A	分散関係式(7.21)；アスペクト比；静電プローブの表面積；磁気プローブの断面積；ログスキーコイルの断面積；質量数；放射遷移確率	$\mathbf{D}$	電束密度（電気変位）
		D_a	両極性拡散係数
		D_B	ボーム拡散係数
$\mathbf{A}$	ベクトルポテンシャル；一般的ベクトル	D_e	電子拡散係数
		D_i	イオン拡散係数
		D_k	k 種粒子の拡散係数
A_θ, A_ϕ	ベクトルポテンシャルの周方向（定義により θ か ϕ ）成分	$D_\perp$	磁場を横切る拡散係数
b	2 粒子間が最も近づいた距離	e	電気素量
B	磁場（正確には磁束密度）強度；分散関係式(7.22)	E	エネルギー；運動エネルギー；電場
$\mathbf{B}$	磁場；一般的ベクトル	$\mathbf{E}$	電場
B_b	軸方向バイアス磁場	$\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_z$	径方向，周（方位角）方向，軸方向の単位ベクトル
b_k	k 種粒子の $(k_\perp \rho_L)^2$	E_r, E_θ, E_z	電場の径方向，周（方位角）方向，軸方向成分
B_m	ミラー磁場でのコイル直下の軸方向磁場	E_r, E_θ, E_ϕ	電場の径方向，周（方位角）方向，トーラス方向成分
B_r, B_θ, B_z	磁場の径，周（方位角），軸方向成分	E_x, E_y, E_z	電場の x, y, z 方向成分
B_{zc}	径方向周辺の軸方向磁場	E_{1x}, E_{1y}, E_{1z}	1 次の 3 方向成分の電場
B_0	ミラー磁場中心の軸方向磁場；軸方向磁場；プラズマがない場合の磁場；0 次の磁場	f	周波数
		F	推力
$B_{0r}, B_{0\theta}$	0 次の径，軸方向磁場	$\mathbf{F}$	一般的な力；線形化 MHD 運動方程式の力
B_1	ミラー磁場中央面での軸方向磁場；磁場の 1 次摂動	f_{ce}	電子サイクロトロン周波数
B_ϕ, B_t	トロイダル磁場	f_{ci}	イオンサイクロトロン周波数
B^*	磁気中性面での磁場；有理面近傍での磁場	$f(E)$	電子エネルギー分布
		$f_k(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$	k 種粒子の位相空間内での密度分布関数
B_ω	変動磁場	f_{LH}	低域混成周波数
c	光速	f_n	中性原子の位相空間内での密度分布関数
C	分散関係式(7.23)；音波速度	F/P	推力電力比
C_p	並列容量	f_{pe}	電子プラズマ周波数
C_s	イオン音波（ボーム）速度；直列容量	f_{pi}	イオンプラズマ周波数
		f_{pk}	k 種粒子のプラズマ周波数

ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明	ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明
$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$	位相空間内での密度分布関数	k_0	自由空間での波数; カットオフ共鳴対から離れた領域の波数; 入射波数
$f(v)$	速度分布関数	$k_{//}(k_z)$	磁場方向の波数; z 軸方向の波数
$F_{//}$	磁力線に沿っての力	$k_{\perp}$	磁場に垂直方向の波数
g	重力加速度	l	0 以上の整数
$g(\alpha)$	正規化した速度分布関数	L	典型的なプラズマサイズ; 典型的な空間変化長; 粒子反射の両端間距離; 系のサイズ; 衝突のステップ長; 平均自由行程; ケルビンヘルムホルツ不安定性中のパラメータ; 分散関係式(7.12); 軸長; 波動の伝搬距離; 粒子の走行距離; 揺動の幅; インダクタンス
h	プランク定数	$\ln \Lambda$	クーロン対数
H	ホールパラメータ; 分散関係	l_t	コイル全長
$\mathbf{H}$	磁場/磁界	l_0	平均自由行程
H_i	ナイキスト線図の虚部	$L(\psi)$	トカマク平衡方程式の項
H_r	ナイキスト線図の実部	m	質量; 周 (方位角) 方向モード数; 気体分子の平均分子量
$H(\omega/k, k)$	解析的な複素数の分散関係	M	マッハ数
I	電流; 振動電流; 線強度	m_e	電子質量
I_A	アンテナ電流	m_i	イオン質量
$I_{\text{Ar I}}, I_{\text{Ar II}}$	Ar I と Ar II の発光強度	m_p	陽子 (プロトン) 質量
I_C	コレクタ電流	n	粒子密度; プラズマ密度
I_d	電子電流とイオン飽和電流との差	$\tilde{n}$	密度揺動
I_e	電子電流	N	モル数; 屈折率
I_{es}	電子飽和電流	$\mathbf{N}$	屈折率 (ベクトル)
$I_{\text{is}}, I_+, I_{11}, I_{12}$	イオン飽和電流	n_c	カットオフ密度
I_m	第 1 種変形ベッセル関数	N_c	コイルのターン数
I_p	プローブ電流	n_e	電子密度
I_{sp}	比推力	n_{e0}, n_{e1}	0 次と 1 次の電子密度
I_z	z 軸方向電流	n_h	高調波の次数
I_0	積分した強度	n_i	イオン密度
I_1, I_2	チップ電流	n_{i0}, n_{i1}	0 次と 1 次のイオン密度
$I(\Psi)$	トカマク平衡方程式の項	n_k	k 種粒子の密度
I_{ω}	変動電流	n_n	中性粒子密度
$\mathbf{j}$	電流密度	n_s	シース密度
$J (J_1, J_2, J_3)$	作用変数 (断熱不変量)	n_0	積分定数としての粒子密度; 初期粒子密度; 0 次の粒子密度
J_m	第 1 種ベッセル関数	n_1	1 次の粒子密度
j_r, j_{θ}, j_z	電流密度の径方向, 周 (方位角) 方向, 軸方向成分	N_0	不安定モードの数
$\mathbf{j}_{\perp}$	反磁性電流	$N_{//}$	磁場に水平方向の屈折率
k	波数	$N_{//(R, L)}$	R 波と L 波の屈折率
$\mathbf{k}$	波数 (ベクトル)	$N_{\perp}$	磁場に垂直方向の屈折率
$\mathbf{K}$	行列演算子; 比誘電率テンソル		
k_B	ボルツマン定数		
$\mathbf{K}_h$	比誘電率テンソルのエルミート項		
$\mathbf{K}_i$	比誘電率テンソルの反エルミート項		
K_m	第 2 種変形ベッセル関数		
k_x, k_y, k_z	波数の x, y, z (軸方向) 成分		

ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明	ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明
p	ガス圧力；圧力；プラズマ圧力； 角運動量；流体圧力	$\mathbf{R}_e$	電子抵抗
$\mathbf{p}$	運動量；角運動量	RF	高周波
P	物理量；入力電力；分散関係式 (7.10)	$\mathbf{R}_i$	イオン抵抗
$\mathbf{P}$	ポインティング・ベクトル；分極	R_m	磁気レイノルズ数（ランキスト数）
p_{abs}	単位体積当りの波の吸収電力	R_p	プラズマ負荷抵抗
P_{abs}	吸収電力	R_t	プラズマ存在時の全負荷抵抗
p_{Ar}	Ar 中性ガスの圧力	R_w	ω_{pe}/ω_{ce}
p_B	磁場圧力	s	(磁場に沿っての) 距離
P_c	実効的衝突断面積	S	表面積；エントロピー；磁束管の 断面積；分散関係式(7.8)；実効 排気速度
P_{loss}	損失電力	$\mathbf{S}$	磁束積分の表面；全エネルギー流 束
p_e	電子圧力	S_p	偏光指数
p_i	イオン圧力	t	時間
P_{ij}	圧力テンソル	T	粒子温度；プラズマ温度；周回時 間；時間の関数；運動エネルギー； 気体温度；波のトンネル係数；磁 力線方向の張力
P_{inc}	入射電力	$\mathbf{T}$	非電磁的エネルギー流束
P_{inp}	入力電力	T_e	電子温度
P_{loss}	損失電力	T_i	イオン温度
p_n	中性ガス圧力	u	電子エネルギー (eV 単位)
P_{net}	吸収電力	$\mathbf{u}$	(平均) 流体速度
P_{ref}	反射電力	$\mathbf{u}_D$	反磁性ドリフト速度
P_{th}	電力の閾値	$\mathbf{u}_e$	電子流体速度
p_0	換算ガス圧力；0 次のプラズマ圧力	$\mathbf{u}_{E \times B}$	$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度
p_θ	θ 方向の角運動量	$\mathbf{u}_i$	イオン流体速度
q	電荷；一般化座標；安全係数	$\mathbf{u}_n$	中性粒子流体速度
$\mathbf{q}$	熱流束密度	u_x, u_y, u_z	(荷電粒子や流体) 速度の x, y, z 方向成分
Q	物理量；電荷；モーメント；衝突に よる熱；プラズマのエネルギー；系 に流入する熱；共振ピークの鋭さ； クライン・クックのパラメータ；エ ネルギー増倍率；放出ガス量	$\mathbf{u}_\perp$	磁場を横切る流体のドリフト速度
q_k	k 種粒子の電荷	$v, \mathbf{v}$	速度
q_0	点電荷	$\bar{v}$	平均速度
r	位置；半径；中心からの距離	V	速度；電圧；容器体積
$\mathbf{r}$	位置	$\mathbf{V}$	平均流体速度
R	ミラー比；中心軸からの半径；気 体定数；位置 r の関数；大半径 (主 半径)；磁場の相対減少量；分散 関係式(7.11)；波の反射係数；イ オン飽和電流の比；磁気コイル半 径；抵抗	v_A	アルベン速度
$\mathbf{R}$	中心軸からの距離；衝突による抵 抗	V_A	アンテナ電圧
R_c	回路抵抗	V_{ac}	加速電圧
$\mathbf{R}_c$	湾曲磁場での中心軸からの半径	V_C	コレクタ電圧
R_E	地球半径	V_d, V_{d2}, V_{d3}	チップ間の印加電圧
		$\mathbf{v}_{de}$	電子ドリフト速度
		$\mathbf{v}_{di}$	イオンドリフト速度

ローマ字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明	ギリシャ文字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明
$\mathbf{V}_e$	(電子) 平均流体速度	α	電離度；再結合係数；密度差のパラメータ；粘性率と拡散係数の等価的な比
$\mathbf{v}_{E \times B}$	$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度		
$\mathbf{v}_{E \times B(k)}$	電場の空間変化による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度	α_L	散乱パラメータ
v_{ex}	推進剤の排気速度	β	プラズマ圧力と磁場圧力の比
$\mathbf{v}_F$	一般的な力 $\mathbf{F}$ によるドリフト速度	β_w	磁場に対する方向正弦
V_f	浮遊電位	γ	比熱比；成長率
$\mathbf{v}_g$	群速度	Γ	結合係数；粒子束
$v_i, \mathbf{v}_i$	イオン速度	Γ_c	衝突による補正項
$\mathbf{V}_i$	(イオン) 平均流体速度	Γ_e	電子束
$\mathbf{v}_k$	k 種粒子の速度	$\Gamma_{e//}$	磁場方向の電子束
V_{ol}	体積	$\Gamma_{e\perp}$	磁場に垂直方向の電子束
$\mathbf{v}_p$	位相速度	γ_i	イオン比熱比
V_p	プラズマ電位	Γ_i	イオン束
$\mathbf{v}_{pol}$	分極ドリフト速度	$\Gamma_{i//}$	磁場方向のイオン束
$\mathbf{v}_R$	曲率（または湾曲）ドリフト	$\Gamma_{i\perp}$	磁場に垂直方向のイオン束
$\mathbf{v}_{R + \nabla B}$	非一様磁場でのドリフト速度	Γ_k	k 種粒子の粒子束
$\mathbf{v}_{\nabla B}$	$\nabla \mathbf{B}$ (磁場勾配) ドリフト	γ_w	磁場に対する方向余弦
v_{th}	熱速度	$\Gamma_{\perp}$	半径方向（磁場に垂直方向）の粒子束
v_{the}	電子熱速度	$(\partial f / \partial t)_c$	衝突項
v_{thi}	イオン熱速度	δ	スキニング長
v_x, v_y, v_z	速度の x, y, z (軸) 方向成分	δ_{ij}	クロネッカーのデルタ
v_{z0}	初期軸方向速度	$\Delta \mathbf{k}$	入射と散乱波数ベクトルの差
v_0	初期速度；(シース端の)イオン速度	ΔT	運動エネルギーの変化
v_{θ}	周方向速度	Δv	速度増加分
$v_{//}$	磁場方向の速度	$\langle \Delta \mathbf{v} \rangle, \langle \Delta \mathbf{v} \Delta \mathbf{v} \rangle$	Δt の時間での衝突による変化の平均量
$v_{\perp}, \mathbf{V}_{\perp}$	磁場に垂直方向の速度	ΔW	(径全体の) ポテンシャルエネルギーの変化
$\mathbf{w}$	残差速度 (ランダム速度)	$\Delta \lambda$	ドップラーシフトした波長
W	系全体のポテンシャルエネルギー	$\Delta \lambda_D$	スペクトル広がり尺度
W_B	磁場のエネルギー密度	$\Delta \lambda_T$	半値全幅の波長 (トムソン散乱)
W_E	電場のエネルギー密度	$\Delta \lambda_{1/2}$	半値全幅の波長
W_k	粒子の運動エネルギー	$\Delta \phi$	位相差
W_w	波動のエネルギー密度	ε	誘電率
x	変位；位置	ε_d	絶縁体の比誘電率
$\bar{x}$	デバイ長で規格化した長さ	ε_k	k 種粒子の電荷の符号
x_c	カットオフの位置	ε_0	真空中の誘電率
x_0	初期位置	ζ	プラズマ分散関数の変数
Y_m	第 2 種ベッセル関数	η	比抵抗 (抵抗率)；波動の透過・反射を決める量；プラント効率；高周波電力吸収効率
Z	電荷数；プラズマ分散関数		
Z_k	k 種粒子の電荷数	η_c	銅の比抵抗
Z_L	負荷インピーダンス		
Z_0	出力インピーダンス		

ギリシャ文字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明	ギリシャ文字 (網掛けの記号は 本書中で複数の 定義を持つもの)	説 明
η_{sp}	スピッツアー比抵抗	ρ_{m0}	0 次のプラズマの質量密度
η_i	推進効率	σ	(衝突) 断面積
$\eta_{\perp}$	磁場に垂直方向の比抵抗	$\sigma_{//}$	電気伝導度
θ	円柱座標での周 (方位角) 方向角度; 単純トーラスの小半径での周方向角度 (ポロイダル方向); ピッチ角; 波数と磁場との角度; 入射波と反射波との角度	τ	衝突時間; 距離の尺度
		τ_{A}	アルベン・トランジット時間
		τ_{c}	粒子の衝突時間
		τ_{E}	エネルギー閉じ込め時間
θ_{m}	ロスコーン境界のピッチ角度	τ_{ei}	電子-イオンクーロン衝突時間
κ	モデル依存の係数	τ_{en}	電子-中性粒子衝突時間
λ	波長; 緩和状態の方程式の定数; 磁場の曲がりの特徴的長さ	τ_{in}	イオン-中性粒子衝突時間
Λ	光学的厚さのパラメータ	τ_{R}	抵抗性表皮時間
λ'	中心波長からの波長差	ϕ	静電ポテンシャル; トーラス方向の角度; 方位角; 一般的スカラー
λ_{D}	デ바이長	Φ	磁束
λ_{m}	平均自由行程	$\bar{\phi}$	電子エネルギーで規格化した静電ポテンシャル
λ_0	自由空間での波長; 中心波長; レーザー波長	$\tilde{\phi}$	静電ポテンシャル揺動
$\lambda_{//}$	軸方向波長	ϕ_{w}	壁の電位
μ	磁気モーメント; 移動度	ψ	磁気面関数
μ'	流体粘性率	ω	角周波数
μ_{e}	電子の移動度	Ω	渦度
μ_i	イオンの移動度	ω^*	電子反磁性ドリフト角周波数
μ_k	k 種粒子の移動度	ω_{c}	サイクロトロン角周波数
μ_0	真空中の透磁率	ω_{ce}	電子サイクロトロン角周波数
$\mu_{\perp}$	磁場に垂直方向の移動度	ω_{ci}	イオンサイクロトロン角周波数
ν	周波数 (振動数)	ω_{ck}	k 種粒子のサイクロトロン角周波数
ν_{c}	衝突周波数	ω_{De}	電子の反磁性ドリフト角周波数
ν_{e}	電子衝突周波数	ω_{E}	$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト角周波数と周方向モード数 m の積
ν_{ei}	電子-イオンクーロン衝突周波数	ω_{EM}	最大の ω_{E}
ν_{en}	電子-中性粒子衝突周波数	ω_{i}	虚部の角周波数 (成長率)
ν_{in}	イオン-中性粒子衝突周波数	ω_{LH}	低域混成角周波数
ν'	動粘性率	ω_{pe}	電子プラズマ角周波数
ξ, ξ	変位量	ω_{pi}	イオンプラズマ角周波数
Π_{ij}	圧力テンソルの非等方成分	ω_{pk}	k 種粒子のプラズマ角周波数
ρ	電荷密度; 流体密度; 単位長さ当たりの密度	ω_{r}	実部の角周波数
ρ_{e}	電子ラーマー半径	ω_{res}	共鳴角周波数
ρ_{i}	イオンラーマー半径	$\omega_{\text{R,L}}$	R 波と L 波のカットオフ角周波数
ρ_{L}	ラーマー半径	ω_{UH}	高域混成角周波数
ρ_{m}	プラズマの質量密度	ω_0	転回点間を往復する角周波数

1 章

はじめに

プラズマは、さまざまな興味ある複雑な現象や、多くの予期せぬ非線形性（1.3 節参照）を示す。例えばプラズマ状態の急激な変化を伴う構造（モード遷移：後述の図 1.4 が例）は、プラズマ不安定性（6.2 節参照）などによる余剰エネルギーにより引き起こされる。また多彩な様相（図 1.1 や表 1.1 参照）を示すため、基礎から応用までの多くの分野開拓につながってきている。

本章では、プラズマ科学の先端的内容（表 1.1 や 9.2 節を含む）に到達する前の最初のステップとして、プラズマとは何かという基本的な紹介後、この多様なプラズマが展開する世界を概観する。まず、プラズマ密度・温度空間での非常に広範な存在領域や、光・熱・電気・力学・化学反応・核反応などの多くの手段によるプラズマ応用例を、身近な例も入れて簡単に示す。次に、プラズマの生成原理や生成方法などを、プラズマの特性やプラズマ分野で使用する電磁波の分類を含めて概観する。

1.1 多様に展開するプラズマの世界

現代の宇宙論や天文学によれば、未知の形態である暗黒物質と暗黒エネルギーは、宇宙のほとんどの物質を占めるといわれている。残りの原子などの物質が占める割合はわずか 5 % 程度であるが、その中の 99 % 以上は宇宙に広く存在するプラズマ（plasma）である（プラズマは他分野でいろいろな意味で使われていることに注意）^{†1} (†1)。宇宙には何兆個もの銀河があり、各銀河には千万～百兆個程度の恒星が存在すると考えられている²⁾。しかしながら、惑星上のさまざまな物質の必要条件から、生命が存在できるのはかなり厳しいと考えられる。つまり、固体、液体、気体からなる体を持った人類が、大気温度が水の沸点より低く（一般には凝固点よりも高い）、種々の物質が存在する地球に居住できるのは奇跡で僥倖^{きようこう}というべきである。

ところで物質の温度を上げると、固体、液体、気体（例えばそれぞれ氷、水、水蒸気）となっていくが、さらに上げると 4 番目の状態といわれるプラズマとなる。原子・分子は電荷を持たないが、プラズマは電荷を持った粒子群からなる電離（イオン化：ionization）した状態で、別々となって運動するイオンと電子から成り立つ（†2）。もちろん、中性粒子も一緒に存在可能である（後述の式(1.1)参照）。プラズマは導電体として働き、短距離から長距離まで作用する

†1 肩付きの数字は、章末の引用・参考文献番号を表す。

†2 プラズマの語源はギリシャ語の形成を意味するが、アーヴィング・ラングミュア（Irving Langmuir）がこの荷電粒子の集団をプラズマと呼んだ。医学・生物学方面では血漿や原形質という意味でも使われている。中国語では等離（実際は離の字）子体と呼ばれ、いい得て妙である。なお、8.1.1 項の静電プローブは彼の名前をとって、ラングミュアプローブともいわれる。

電磁力が支配的である。図 1.1 に示すように、ほかの固体物性と比較して、プラズマは考えられないほどに、非常に広範な電子密度 n_e と電子温度 T_e 空間に存在する。典型的な n_e でさえも 20 桁以上、 T_e でも 6 桁以上にまたがっている。ここで、 T_e で使われている eV（電荷素量 (elementary charge) e を持つ荷電粒子が、1 V の電位差で得るエネルギー）は、11 600 K の（実効的）温度に相当する（式(1.2)と†7 参照）。

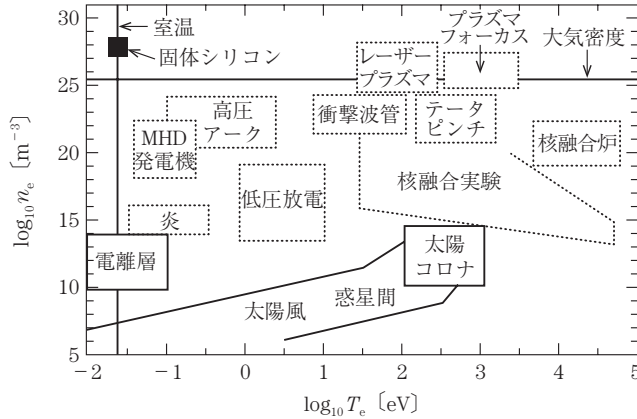


図 1.1 第 4 の状態であるプラズマ。対数スケールでの非常に広範な電子温度 T_e - 電子密度 n_e 空間での存在領域。ここで、実線枠内は自然界の現象で、点線枠内は実験例を示す（Springer の許可を得て文献 3）から転載）

ただし、図 1.1 のように、プラズマでは大気より温度が十分高く見えても、核融合プラズマなどを除き、粒子束や熱流束は低温・低密度プラズマでは大気室温環境下より小さい（つまり熱く感じないはずである）。なぜなら、プラズマでは温度が室温より遥かに高くても、図 1.1 にあるように大気密度よりプラズマ密度が遥かに低い場合が多いためである（1.4 節も参照）。

なお、電離度 α は式(1.1) (n_n : 中性粒子密度) で表し、中性粒子もプラズマ状態では電子・イオンと一緒に存在する（動作ガス圧力が大気圧近傍も含む）。大気圧プラズマ⁴⁾ (口絵 11 参照) や高圧アークなどでは、弱电離（または弱电離）プラズマと呼ばれて α は小さい反面、高温の核融合プラズマや高電力を用いた電磁波動（7 章参照）によるプラズマ生成では、 α は大きく強電離（または高電離）となり、 α は 1 で完全電離状態となる。

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_n} \quad (1.1)$$

図 1.1 に示したように、この広範な領域を持つプラズマの性質のため、自然界や、日々展開を続ける工学技術による人工物（表 1.1）を見ると、多様なプラズマ状態を活かす宝庫となっていることが理解できる。この表より、光、熱、電気、力学、化学反応、核反応を利用して、ナノテクノロジー、材料、情報、通信技術、宇宙、エネルギー、環境、バイオテクノロジーなどの多くの領域で、高度な技術革新にさらなる拡張・改良がほどこされ、日々の生活に豊か

表 1.1 多くの制御手段による種々のプラズマ応用例 (Springer の許可を得て文献 3) から転載)

手 段	実 例
光	プラズマディスプレイ, 光源, レーザリソグラフィ, マイクロプラズマなど
熱	溶接・溶断, 放電加工, 精錬, ごみ処理など
電 気	電気集塵機・塗装, 空気清浄機, スイッチ素子, レーザー誘雷, MHD 発電など
力 学	ロケットエンジン, 異種イオン分離・遠心分離, レールガン, 加速器など
化学反応	エッチング・CVD, フラーレン・ナノチューブ, フロン・PCB 分解, ダイヤモンド合成, 環境 (浄化など), 農業, 医療・生命誕生など
核反応	核融合, 中性子・イオン源など

さをもたらしていることがわかる。

例えば、「まえがき」でも一部述べたが、家庭のキッチンやリビング内でも、ローソク、ガスレンジの着火装置、蛍光灯、(無電極) プラズマランプ、プラズマテレビ、プラズマ殺菌・滅菌機、プラズマで製造・利用した LED、液晶ディスプレイ、オゾナイザー (オゾン発生器) など多く挙げられる。いうまでもなく、パソコンは、半導体を含めプラズマテクノロジーの結晶である。産業でも巨大な投資を占める半導体関連に加え、太陽電池、表面処理、溶接、レーザーなどがあり、環境分野では、水や空気の前化、殺菌・滅菌、産業廃棄物処理、医療・バイオ分野 (医療器具や細胞への直接照射による治療など) や農業分野 (殺菌や植物の生長を活性化) まで進展している。

市販されている電気製品を再度見てみると、大気圧プラズマ放電を用いた空気清浄機や、それをエアコンやガス暖房機に搭載して家庭内の室内空気の前染・除菌を行ったり、ドライヤーで髪への良い効果を宣伝したりしている例もある。さらには科学研究分野では、素粒子研究や医療用の粒子加速器のイオン源、高温プラズマを利用し人工太陽を目指した核融合研究 (1 兆円以上経費のかかる国際熱核融合実験炉 ITER 計画⁵⁾も進展) も鋭意行われている。宇宙関連では宇宙環境の模擬実験や、化学ロケットに比して小電力で低推力ながら、高燃費となる (電気を前いた) プラズマ推進ロケット研究⁶⁾も盛んとなってきている。これらのプラズマの基礎から応用研究に關しての具体例や今後の展開は、9 章で現状や展望について概観する。

なお、広範なプラズマ分野のイラストや写真付きの基礎的紹介のポスターは、Web からダウンロードできる資料⁷⁾を参照されたい。



1.2 プラズマ生成



1.2.1 種々のプラズマ生成法

プラズマ生成には、何らかのエネルギーを与え、原子やイオンに束縛されていた電子を飛ばし出させる電離が必要である。電離する過程はさまざまあるが、i) 中性粒子への電子衝突やイオン衝突による電離 (衝突については 5.1 節, 図 8.6 参照), ii) 原子・分子への十分なエネ

ルギーを持った短波長の光子の照射による光電離, iii) イオン化 (電離) ポテンシャルの低いアルカリ金属やアルカリ土類金属などの蒸気粒子ビームを, 高温金属板に当てる熱 (接触) 電離などがある。ここで, イオン化ポテンシャルは, 原子を原子核と電子にイオン化させるエネルギーであり, 水素と貴ガス (希ガス, 稀ガスとも書く) の例は表 1.2 に示す。

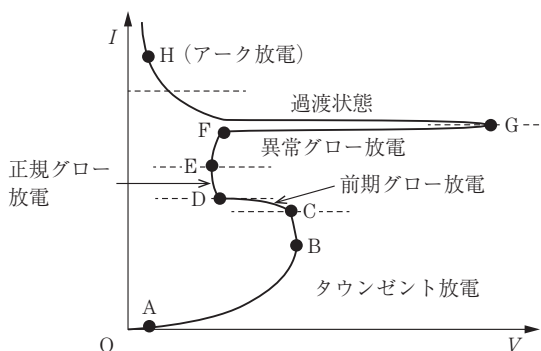
表 1.2 種々のガス種でのイオン化ポテンシャル

ガス種	H	He	Ne	Ar	Kr	Xe
イオン化 ポテンシャル [eV]	13.6	24.6	21.6	15.8	14.0	12.1

プラズマ生成には種々の具体的方法がある。基本的には, 金属板間での直流電圧 (グロー (glow)⁸⁾, アーク (電弧: arc)⁹⁾ (これら 2 つは図 1.2 参照), ペニング (Penning) 放電¹⁰⁾ など, 交流やパルス電圧印加による方法や, 高周波やマイクロ波を用いた電磁伝搬波動 (または非伝搬波動) による方法 (7.5 節参照) などがある。さらには, 上述の熱電離や光電離法に加え, 電場と直交する磁場を印加した直流放電であるマグネトロン (magnetron) 放電 (口絵 14 参照), 金属表面に誘電体を置いた誘電体バリア放電 (または無声放電: Dielectric Barrier Discharge)¹¹⁾, パルス状のレーザーやマイクロ波の大電力印加によるガス放電, 同軸型電極にパルス電圧を印加するプラズマ銃 (plasma gun), 平行電極を用いたレールガン (rail gun)¹²⁾, 1 ターンコイルにパルス状の大電流を流すテータピンチ (図 6.4 (a) 参照) など, 多くの手法がある。

1.2.2 定常ガス放電

陰極 (カソード: cathode) と陽極 (アノード: anode) の電極間に一定電圧を印加した際の, 絶縁体であるガスの定常 DC (Direct Current) 放電について簡単に述べる。印加電圧 V と流れる電流を I とした場合のイメージを図 1.2 に示す。

図 1.2 定常 DC ガス放電での一般的な電流 I -電圧 V 特性

点 A から点 B 付近はタウンゼント放電 (Townsend discharge)¹³⁾ と呼ばれる。この放電では, α 効果 (上記電離度の α と異なることに注意), β 効果, γ 効果という気体分子への衝突による 3 つの電離機構がある。それぞれ, 電子による衝突電離, α 効果により生成されたイオンによ

る衝突電離，およびイオンが陰極表面に当たって生じた2次電子による衝突電離であり，いずれも衝突によって当初の電子数より増えれば放電が持続できる。

次に，点Bから点Cでは I は増加するが V は減少する（負性抵抗）。点Cから点Dの間の前期グロー放電（glow discharge）を経て，点D-E付近の正規（正常）グロー放電となり， V はあまり変わらず I は増加する。その後，点E-F-Gでは I より V がだんだん大きく上昇する異常グロー放電となる。一般的に，グロー放電は暗部も存在するが全体的に電極間で光る場合が多い（口絵12参照）。次に，ピークの点Gからは I の増加とともに急激に V が下がる過渡状態となり， V が十分下がった点H付近の領域を，アーク放電（arc discharge：口絵5参照）と呼び，強い発光が見られる。ここでは，陰極と陽極では発光領域は収縮し，狭いスポット（spot）状となる。また，陰極加熱で気体温度が上がり，熱電離して電離度 α も高くなる。

絶縁破壊を起こす放電開始電圧 V_s は，ガス圧力 p と電極間距離 d の積 pd の関数となる。図1.3はパッシェン曲線（Paschen curve）¹⁴⁾と呼ばれ，ガス種によるが V_s は大体1 Torr・cm付近の領域の pd （圧力はTorr，距離はcmの単位が慣例）で，最小（点L）となる。空気の場合，点Lでは $V_s \sim 330$ V， $pd \sim 0.6$ Torr・cm付近であり，大気圧（760 Torr）の場合は，1 mmの平行平板の間隔では3 kV程度の電圧が必要となる（点Lより右の高 pd 側に相当する）。ただし，上記の放電特性は電極材質や電極表面の状態でも変わり，定常電圧印加でなく，後述の高周波やマイクロ波印加でも周波数によっても異なる。

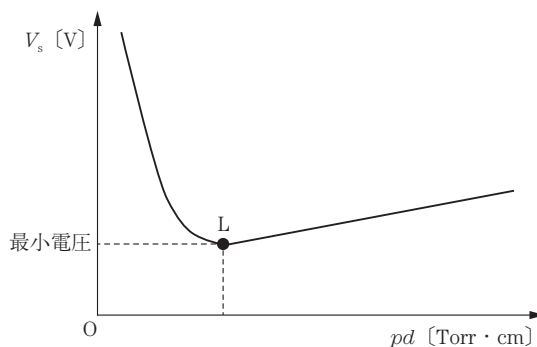


図1.3 パッシェン曲線の概念図：絶縁破壊電圧 V_s の pd 依存性（ p ：ガス圧力， d ：電極間距離）

なお，現在広く利用され発展している分野として，大気圧プラズマ（真空装置不要でコストが低い）があり，主として以下の2つに分けられるが，いずれも電離度は低い（†3）。1つ目のアーク放電による熱プラズマは，電子，イオン，原子などのすべてが高温でほぼ熱平衡（それぞれの粒子温度がほぼ等しい）の状態で，エネルギー密度が高い。そのため，溶射，材料創製，廃棄物処理など，広い分野で用いられる。一方，2つ目の，尖った電極近傍の不均一電場

†3 大気圧プラズマのような中性粒子密度が非常に高い場合は，荷電粒子と中性粒子との衝突周波数も高い（5.1節参照）。磁場を印加した場合のサイクロトン運動（3章参照）を考えると，周回する前に衝突があり，円運動ができなくなる。つまり，無磁場の場合と同じ挙動となる。

索引

【あ】

アイنشユタインの関係式 51
アーク 4, 5, 162, 167, 169, 170
アークジェット 167
アクセス可能条件 (accessibility) 86, 113, 118
アクチノメトリ 137
アスペクト比 114, 118, 168
熱いプラズマ (分散関係) 55, 96, 103-105, 109, 110, 182
圧縮モード 94, 98
圧力駆動 (不安定性) 73, 75-77, 79
圧力テンソル 33
アフターグロー 56
アブレーション 77, 162
アーベル変換 146
アルベン速度 42, 94
アルベン波 94, 97, 98, 107, 113, 159
安全係数 76
アンテナ抵抗 185

【い】

イオン-イオン混成共鳴 101
イオンエネルギー分析器 (IEA) 141
イオン音波 92, 98, 106, 108
イオン化ポテンシャル 4, 49, 134, 170
イオン源 161
イオンサイクロトロン (共鳴, 周波数, 波) 19, 74, 96-98
イオンスラスト 167
イオンセンシティブプローブ 127
イオン-中性粒子衝突 51, 68
イオントラップ 156
イオン波 97, 108
イオンバーンスタイン波 101, 102
イオンプラズマ振動 12
イオンプレーティング 169
イオン飽和電流 123, 125, 126
異常拡散 57, 58

異常波 (X 波)

95-97, 99, 102, 113, 130, 132
異常輸送 58, 81, 157
位相速度 86
一般化されたオームの法則 36
移動度 (易動度) 51
陰極 (カソード) 4, 167
インパルスビット 167
インピーダンス整合 61, 115, 117, 129, 184

【う】

ヴァン・アレン帯 27, 30, 158
渦 度 42, 81
宇宙エレベータ (軌道エレベータ) 168
宇宙生物学 160
宇宙線 29, 108, 159
宇宙太陽光発電 168
宇宙天気 158, 160
運動量移行 48, 107
運動論的不安定性 74

【え】

エキゾティック領域 152
エスケープファクター 134
エッチング 61, 168
エネルギーカスケード 157
エネルギー原理 74
エネルギースペクトル 157
エネルギー積分 74
エネルギー増倍率 163, 164
エネルギー輸送 34, 103
エミッシブプローブ 124
遠心分離 162
エントロピー 34, 40, 44
エントロピー波 44
円偏光 88, 93, 96, 97, 117, 133

【お】

オゾナイザー (オゾン発生器) 3, 170, 171
オーム加熱 40, 107, 115
オームの法則 39
オーロラ 158
音波速度 (音速) 92

【か】

回転 (温度) 137
解 離 35, 62
解離性再結合 134
カオス 28, 107, 157
拡散係数 51, 52, 57, 58, 127
拡散方程式 (磁場) 40
核燃焼 58
核変換 62, 165
核融合 3, 42, 68, 77, 163
ガス中性化セル 161
カスプ磁場 27, 28, 79
カットオフ 86, 96, 100
カットオフ-共鳴対 100
荷電交換 51, 56, 142, 144
荷電交換再結合分光 (CXRS) 144, 161
壁リサイクリング率 49
カーボンナノチューブ (CNT) 169, 170
間欠現象 157
干渉法 131
慣性核融合 163, 164
完全電離 2, 32, 35, 47, 57, 66, 68
簡単化 MHD (方程式) 39, 43

【き】

逆 (転) 磁場ピンチ 55, 68, 70, 160
逆ランダウ減衰 (ランダウ増幅) 79, 105
キャビティリングダウン分光 (CRDS) 法 140
吸収分光法 140
吸 着 49, 62
強結合 15, 155
強度比 136
共 鳴 86, 96, 100, 104, 117, 139
共鳴プローブ (インピーダンス プローブ) 127
共鳴粒子 106
極小磁場 28, 79
局所熱平衡 (LTE) 134
極前方散乱 (法) 138

極低温 156
 曲率（湾曲）ドリフト 21
 巨視的不安定性 73
 キンク不安定性 76

【く】

空気力学 167, 168
 空洞共振器 116, 131
 屈折 86, 109, 137
 クライン・クック（パラメータ）
 138

クルスカール・シャフラノフ（条件）
 76
 クルック衝突項 32, 68
 グロー 4, 5, 170, 172
 クーロン衝突 32, 42, 47, 50, 68
 クーロン対数 47
 クーロンポテンシャル 14, 15
 群速度 86, 182

【け】

結合係数 15, 155
 ケルビン・ヘルムホルツ（KH）
 不安定性 81

【こ】

高域混成（周波数、波） 95, 127
 高エネルギー密度 152
 光学的（厚さ） 130, 131, 134
 交換不安定性 27, 76, 83
 高周波プラズマ源 112
 高周波（RF）補償 125, 186
 高衝突領域（修正された古典拡散
 領域／フィルシユールシユ
 ーター領域） 58
 光線追跡法 109, 182
 構造形成 8, 155, 156
 光電子増倍管（PMT） 139, 145
 光電離 4, 170
 光波 91, 108, 132
 高ベータ（ β ） 71, 73, 156
 凍り付き 41
 国際宇宙ステーション（ISS）
 30, 168
 国際核融合材料照射施設（IFMIF）
 164
 国際トカマク炉（INTOR） 164
 国際熱核融合実験炉（ITER）
 3, 164
 黒体輻射 130
 国立点火施設（NIF） 164
 固体壁 59
 コヒーレント・アンチストークス・
 ラマン散乱（CARS）法 140

コヒーレント・ストークス・
 ラマン散乱（CSRS）法 140
 コレクタ 141
 コロナ質量放出（CME） 158
 コロナ平衡 134, 137
 コロナ放電 6, 170
 コンパクト・トロイド 70
 コンピュータ断層撮影 125, 145

【さ】

サイクロトロン運動 18
 サイクロトロン加熱 25
 サイクロトロン共鳴 107
 サイクロトロン減衰 103, 104
 再結合 32, 49, 52, 55, 134, 155
 再結合放射 135
 サイモン・ショートカット効果
 13, 54
 サブストーム 158
 サブハーモニックス 108
 サーマスタ 137
 作用積分 24, 29
 散逸的（不安定） 73, 83
 残留ガス分析器（RGA） 143

【し】

シア（磁気） 76, 79, 81
 シア（速度） 58, 81, 82, 127
 シアアルペン波 44
 シア波 156
 シアモード 94
 磁気嵐 158
 磁気音波 44, 98
 磁気圏 43, 82, 93, 156-159
 磁気島 76
 磁気中性線放電（NLD） 113
 磁気中性点（ヌル点） 67, 107
 磁気中性面 76
 磁気粘性率 40
 磁気ビーチ 96, 100, 118
 磁気プローブ 128, 129
 磁気ヘリシティ 70
 磁気面関数 59, 69
 磁気モーメント 23, 107
 磁気流体力学（電磁流体力学）
 （MHD）
 20, 27, 35, 38, 66, 157, 170
 磁気レイノルズ数（ランキスト数）
 40, 159
 自己組織化 8, 70, 156, 160, 169
 自己点火条件 163
 自己バイアス 61, 115
 四重極質量分析器（QMA） 143
 シース 13, 59-62, 107, 114,
 123, 124, 155

質量分析 162
 質量分離 162
 磁場核融合
 21, 58, 68, 81, 157, 160, 163
 ジャイロボーム拡散 58
 弱結合 15
 弱电離（低電離）
 2, 36, 48, 51, 56, 68
 シャドウグラフ（法） 137
 重イオンビーム 145, 165
 重イオンビームプローブ（HIBP）
 145
 自由エネルギー 73
 自由-自由間遷移 135
 修正アルペン波 98
 自由-束縛間遷移 135
 集中定数回路 185
 重力不安定性 77
 シュタルク（効果、広がり）
 136, 144
 出現質量分析計 143
 シュテルマーポテンシャル 28
 シュリーレン（法） 137
 準位系 139
 準中性 10, 13, 15, 36, 59, 78
 衝撃波
 60, 92, 157, 159, 167, 170, 172
 状態方程式 39, 40
 焦電検出器 137
 衝突エネルギー 61, 115
 衝突減衰 96, 107, 115-118
 衝突時間 16, 32, 46, 54, 82
 衝突周波数 5, 34, 36, 42, 46-53,
 57, 96, 107, 151
 衝突断面積 46-51, 136, 144
 衝突電離 4, 5, 134, 145
 衝突放射（モデル） 135
 衝突励起 133, 145
 シリコン表面障壁ダイオード 130
 磁力線（磁気）再結合
 43, 55, 67, 76, 158-160
 深宇宙探査 165, 167
 シングルプローブ 122, 126, 127
 シンクロトロン放射 162
 新古典拡散 58
 シンチレータ 144
 振動（温度） 137

【す】

推進効率 166
 推進剤 49, 165-167
 推力 165-167
 推力電力比 166
 スキン長（表皮長さ）
 91, 113, 116, 117

ストリップングセル 142
 ストリーマー放電 6, 170
 ストリーミング不安定性 73
 スパッタ堆積法 169
 スパッタリング
 49, 61, 62, 122, 168
 スピッツアー比抵抗 42, 47
 スフェロマック 70, 159
 スプリットタンク (回路) 185
 スペースデブリ 161, 167, 168
 スミスチャート 185
 スロット 116, 118
 スロート 26, 27, 29

【せ】

正常波 (O 波)
 95, 97, 99, 113, 119, 132
 成長率 72, 76, 78, 79
 静電加速 166, 167
 静電加速器 161
 静電近似 97
 静電シールド 186
 静電プローブ (ラングミュア
 プローブ)
 14, 61, 121, 124, 132, 141, 145
 静電偏向型分析器 142, 143
 静電ポテンシャル
 10, 13, 47, 60, 80, 97
 制動放射 135
 絶対不安定性 73
 セバトリックス 67
 ゼーマン効果 136, 144
 遷移確率 137, 140
 旋回中心 18, 20-23, 35, 47
 選択則 137

【そ】

双極子 (ダイポール)
 28, 30, 113, 128, 156, 159
 相変化 7, 156
 層流 41, 73
 素過程 62, 133-135, 144, 155
 速進波 (速波)
 91, 94, 98, 100, 101
 速度分布関数 16, 27, 34, 105,
 106, 124, 139, 142
 束縛-束縛間遷移 135
 ソーセージ不安定性 73, 75

【た】

第 1 宇宙速度 168
 大気圧プラズマ
 2, 3, 5, 137, 160, 172
 帯状流 157
 ダイナモ 157

ダイバータ 61, 69, 144, 164
 太陽風 83, 93, 157-159
 太陽フレア 43, 158
 対流損失 59
 対流不安定性 73
 タウンゼント放電 4
 楕円偏光 88, 95
 ダスト
 15, 62, 138, 155, 156, 158
 ダスト音波 156
 脱励起 134, 155
 縦波 87, 95, 156
 ダブルプローブ 125-127
 ダブルベルトラミ 70
 弾性散乱 51, 144
 弾性衝突 35, 48-50
 断熱圧縮 67, 168
 断熱条件 13, 38-40, 79
 断熱不変量 23, 28

【ち】

遅進波 (遅波)
 91, 94, 98, 100, 101
 チャープパルス増幅 (CPA) 164
 中間 (衝突周波数) 領域
 (プラトー領域) 57
 中性子 62, 121, 143,
 144, 154, 161, 165
 中性粒子ビーム 141, 144, 161
 中和器 167
 チューナー 117, 185
 超音速 92, 93, 159
 超高層雷放電 158
 超新星残骸 159
 直線偏光 88, 117

【つ】

ツィオルコフスキー・ロケット
 方程式 165
 冷たいプラズマ (分散関係)
 37, 88, 91, 103, 104, 109

【て】

ティアリング不安定性
 41, 76, 157
 低域混成 (周波数, 波) 95, 102
 抵抗性 MHD (方程式) 41
 抵抗性表皮時間 (磁場拡散時間)
 41, 71
 抵抗力 34, 36
 定在波 (定常波)
 72, 102, 109, 116, 117
 低衝突周波数領域 (バナナ領域)
 57, 58
 デイスラプション 76, 164

デイスラプティブ (不安定性) 73
 低電離度 42, 91
 テータピンチ 4, 67
 デバイ球 15, 47
 デバイシース 13, 85
 デバイ遮蔽 13
 デバイ長
 14, 59, 60, 113, 138, 142
 電荷移行再結合 134
 電気光学変調器 (EOM) 140
 電気集塵機 6, 170
 電気推進 20, 166, 167
 電磁加速 166, 167
 電子サイクロトロン共鳴 (ECR)
 96, 102, 109, 113, 117, 118
 電子サイクロトロン周波数
 113, 130
 電子サイクロトロン波 96, 113
 電子サイクロトロン放射 (ECE)
 130
 電子-中性粒子衝突 68
 電子波 97, 108
 電子バーンスタイン波 113
 電子ビーム 127, 143
 電子付着 156
 電子プラズマ 15, 155
 電子プラズマ波
 92, 93, 102, 108, 162
 電子飽和電流 123
 電熱加速 166
 電波法 6
 電離層 12
 電離度 2, 5, 113
 電流駆動
 36, 70, 75, 95, 113, 161

【と】

動圧 57, 66
 等温条件 13, 38
 統計過程 107
 統計加熱 107, 117
 統合コード (シミュレーション)
 146
 動重力 28, 162
 トカマク 22, 57, 68-70, 76,
 79, 130, 163-165
 ドップラーシフト
 96, 104, 107, 118, 135, 139
 ドップラー (反射計) 133
 ドップラー広がり 138, 140
 ドーピング 144
 トムソン散乱 (法) 138
 トランジット・タイム減衰 107
 ドリフト運動
 19-23, 29, 53, 73, 80, 162

ドリフト波 74, 76, 79-81, 83
トリプルブローブ 126
トレーサ 136
トンネル (透過) 係数 100

【な】

ナイキスト線図 112
ナイキストの判定条件
(ペンローズ基準) 111, 112
内部輸送障壁 (ITB) 160
ナノ物質 156, 169, 170
ナビエ・ストークスの式 34, 42
波と波の結合 108

【ね】

熱運動 14, 91-93, 96, 98, 138
熱速度 8, 50, 52, 105, 106, 123
熱 (接触) 電離 4, 5, 170
熱プラズマ 5, 170
熱平衡 5, 6, 73, 74, 134, 169, 170
粘 性 41, 73, 82, 127, 155, 162

【の】

ノズル 134, 169

【は】

バイアス磁場 67
バイアス (電圧) 122, 126, 141
配位空間 (不安定性) 73
廃棄物処理 3, 170, 171
ハイブリッド (粒子コード) 146
ハイブリッド炉 165
バウショック 93, 159
バウンス運動 28
爆 縮 77, 78, 164, 165
薄膜形成 (堆積) 62, 168, 169
長谷川-三間方程式 81
バッシュン曲線 5
バッデン方程式 100
はやぶさ, はやぶさ2 167
パラメトリック (不安定性) 73, 108
ハリス不安定性 74
パルスパワー 159, 165, 172
バルーニング (不安定性) 73
バルマー系列 136, 140
反磁性 19, 71, 72
反磁性電流 35, 71
反磁性ドリフト 34, 35, 71, 80, 81
反射係数 100
反射法 132

反転 (逆転) 磁場配位 67, 68, 70
反応性 (プラズマ) 35, 136, 169
反応的 (不安定) 83

【ひ】

飛行時間 (TOF) 138, 143
微細加工 152, 168-170, 172
非磁化モデル 127
微視的不安定性 73, 79
比推力 165, 167
ヒステリシス (履歴) 7, 8, 65
非線形ランダウ減衰 108
非中性プラズマ 15, 155, 156
ピッチ角 26, 27
比抵抗 (抵抗率) 36, 42, 47, 57, 76
非電磁エネルギー 103
非熱平衡 6, 170
ビーム発光分光法 (BES) 144, 161
ビームブローブ 144, 145
比誘電率テンソル 86, 89, 97, 102, 110
表面改質 62, 135, 169, 171
表面波 113, 116, 117, 127
微粒子 15

【ふ】

ファブリ・ペロー (干渉計) 132
ファラデー回転 (法) 133
ファラデーカップ 141
負イオン 141, 155, 161, 170
フィックの法則 51, 52, 57
フィラメント放電 161
フェルミ加速 29, 108
フォッカー・プランク方程式 32
複雑性 (複雑系) 8, 43, 153, 155, 160
普遍的不安定性 74, 79
浮遊電位 (不動電位) 123, 124, 142
フラウンホーファー (回折) 法 138
プラズマ CVD 168-170
プラズマ・アクチュエータ 82, 168
プラズマウィンドウ 162
プラズマ回転 144, 161, 162
プラズマ加速 162
プラズマ-壁相互作用 59, 61, 62, 164
プラズマ吸収ブローブ (表面波
ブローブ) 127
プラズマ結晶 15, 155, 160

プラズマジェット 134, 169, 171, 172
プラズマシート 76, 157
プラズマ銃 4
プラズマ重合法 169
プラズマ周波数 12, 108
プラズマ振動ブローブ 127
プラズマ推進 (ロケット) 3, 20, 36, 49, 165-168
プラズマディスプレイパネル
(PDP) 156
プラズマ電位 (空間電位) 59, 123-125, 142, 145
プラズマトーチ 170
プラズマ分散関数 111
プラズマボール 170
プラズマ溶接 170
プラズマランプ 3
ブラソフ方程式 (無衝突
ボルツマン方程式) 32, 110
ブラッキング 28
ブラックアウト 168
ブラッグ (散乱) 138
プラトー領域 57
ブランクとアインシュタインの
関係式 9
ブランケット 61, 62, 144, 163
フルート (不安定性) 74, 76, 153
ブレイクイーブン 164
プレシース 59, 62
プロセスプラズマ 62, 156
分極電流 23
分極ドリフト 23, 78, 80
分散関係 37, 78, 86, 182
分子動力学 (MD) 62, 155, 169
分布定数回路 185

【へ】

平均極小磁場 79
平均自由行程 46, 48-50, 54, 59
平衡方程式 68-70
並進 (温度) 137
ベータ (β) 69, 71, 156, 159
ベッセル関数モデル 70
ベDESTAL 160
ベニング (トラップ) 156
ベニング放電 4
ヘリカル系 (ステラレータ) 22, 70, 164
ヘリコン波 36, 55, 65, 101, 102,
108, 109, 113, 117, 140, 153,
160, 167
ベレット 77, 165, 171
変換効率 163, 164, 166
偏光指数 88

【ほ】

- ボアソンの式 10, 11, 60
 ホイッスラー波 94, 97, 109, 117, 159
 ポインティング・ベクトル 39, 103
 ポイント (点) カスプ 28
 放射遷移 134, 155
 放射損失 57, 137
 捕捉粒子 26, 27, 29
 保存則 33, 35, 39, 54, 59, 103
 ボーム拡散 58
 ボームシース基準 61
 ボーム速度 (イオン音波速度) 60, 123
 ポリトロピックの関係 13
 ホール項 36
 ホールスラスト 20, 37, 167
 ホール素子 129, 184
 ボルツマンの関係式 13, 80, 92, 98
 ボルツマン方程式 32, 38, 79, 110
 ホール電流 37, 167
 ボール (トラップ) 156
 ホールパラメータ 37, 53, 57, 71
 ボロメータ 137

【ま】

- マイクロプラズマ 152, 156, 170
 マイケルソン (干渉計) 132
 マクスウェル (速度) 分布 16, 73, 79, 106, 110, 112, 123, 126, 134, 135
 マクスウェルの方程式 37, 39, 40, 69, 70, 89, 103, 110, 128, 129, 180
 マクスウェル輸送方程式 33
 マグネトロン放電 4
 摩擦 32, 161
 マシユー (方程式) 143
 マッチング条件 108, 138, 140
 マッハ数 60, 61, 93, 122, 127
 マッハ・ツェンダー (干渉計) 132
 マッハプローブ 60, 126, 183
 マルコフ過程 32

マルチグリッドエネルギー
 分析器 141

【み】

- ミー散乱 138
 ミラー磁場 (磁気ミラー) 23, 26-29, 74, 77, 89, 164
 ミラー比 27

【む】

- 無衝突電子加熱 117
 無相関 (非協同) 電子散乱 138
 無電極 3, 167, 170
 無力磁場 55, 70, 117, 160

【め】

- メゾエキゾティック領域 152
 メタマテリアル 156

【も】

- モーショナル・シユタルク効果
 (MSE) 144
 モード変換 86, 101, 102, 109, 113, 117
 モンテカルロ衝突
 シミュレーション 169

【ゆ】

- 誘電体バリア放電 4, 137, 168, 170, 171
 誘導性結合型プラズマ (ICP) 65, 107, 113, 116, 118, 160, 162, 170
 誘導方程式 41
 有理磁気面 76
 湯川ポテンシャル 14
 雪かきモデル 67

【よ】

- 陽極 (アノード) 4, 167
 ようこう 158
 陽子線 161
 容量性結合型プラズマ (CCP) 107, 113, 115, 118, 155, 160
 横波 87, 95, 116
 予備電離 67

【ら】

- ライダートムソン散乱法 138

- ライン (線) カスプ 28
 ラーマー運動 25
 ラーマー半径 18-21, 24, 54, 58, 61, 71, 88, 124, 145, 155, 159, 162
 ラマン-ナース (領域) 138
 ラムザウアー・タウンゼント効果 49
 ラングミュアプローブ 1, 121
 ランダウ減衰 103, 105-108, 117
 乱流 41, 58, 73, 81, 82, 107, 108, 117, 157, 158, 160

【り】

- リジタノコイル 118
 理想 MHD (方程式) 41, 43, 44, 75
 リミター 61
 粒子加速器 3, 161-163
 両極性拡散 52-54, 59
 量子コンピュータ 44, 154, 156
 臨界条件 163
 レイノルズ数 41
 レイリー散乱 138
 レイリー・テイラー (フルート) 不安定性 73, 74, 76, 78
 レーザー位相差法 138
 レーザー核融合 74, 77, 164, 165
 レーザー航跡場 162
 レーザー光脱離法 141
 レーザー生成 (プラズマ) 133, 137, 153
 レーザー誘起蛍光法 139
 レーザー冷却 156
 レート方程式 135
 レールガン 4

【ろ】

- ロゴスキーコイル 129, 184
 ロスコーン 26, 27, 74
 ローソン条件 163

【わ】

- 悪い曲率 67, 77

【A】

- ALD 169
 ALE 169

【C】

- CMA 図 97, 98, 100, 108

【D】

- DD 反応 163
 DT 反応 143, 163, 164

【E】	
E×B ドリフト	
20-23, 34, 35, 58, 59, 78, 82	
E (モード) 放電	114, 116, 118
【H】	
H (モード) 放電	116, 118
H モード	58, 65, 82, 157, 160
【I】	
ICRF	101, 113
【L】	
L 波	19, 88, 93, 94, 97, 99, 133
L モード	58, 65, 160
【M】	
MEMS	152, 169
MHD 加速	36
MHD 波	43
MHD 発電	20, 36, 170
MHD 平衡	64, 66, 67, 75
MPD (スラスタ)	37, 167

【N】	
NLD	113
【O】	
OES	135
O ポイント	67, 69
【P】	
Particle-In-Cell (PIC)	146
PPT	167
【Q】	
Q 値	125, 185
【R】	
R 波	19, 88, 93, 94, 96, 97, 99, 102, 119, 133
【T】	
TG 波	70, 101, 102, 108, 117
【W】	
WDM	152
WKB (近似)	133

【X】	
X ポイント	67, 69
【Z】	
Z ピンチ	67, 159, 165
【ギリシャ文字】	
α 効果	4, 115
α 粒子	144
β 効果	4
γ 効果	4, 115
∇B (磁場勾配) ドリフト	21
【数字】	
1 流体	35, 66
2 光子吸収レーザー誘起蛍光法	140
2 次電子	5, 49, 62, 115, 122, 142, 169
2 周波重畳型高周波	115
2 体再結合	56, 134
2 電子性再結合	134
2 流体	35, 66, 73
3 体再結合	56, 134
3 流体	68

— 著 者 略 歴 —

1976 年 東京大学理学部物理学科卒業
1978 年 東京大学大学院理学系研究科修士課程（物理学専攻）修了
1980 年 同大学院理学系研究科博士課程（物理学専攻）中退
1980 年 東京大学理学部物理学教室助手
1984 年 理学博士（東京大学）
1993 年 九州大学大学院助教授
2010 年 東京農工大学大学院教授
2017 年 同大学院卓越教授
2018 年 西南物理研究院客員教授（2024 年まで）
2018 年 中部大学客員教授（2026 年まで）
2018 年 九州大学客員教授（2020 年まで）
2019 年 中国科学技術大学客員教授（2020 年まで）
2019 年 東京農工大学名誉教授
2019 年 法政大学兼任講師（2024 年まで）
2020 年 九州大学学術研究者
現在に至る

【受賞歴】

2010 年 文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）
2016 年 プラズマ・核融合学会賞（技術進歩賞）
2018 年 プラズマ・核融合学会賞（論文賞）

【著書】

High-Density Helicon Plasma Science—From Basics to Applications, Springer (2022)
理工系のための解く！力学（第2版），講談社サイエンティフィク（2014）（平山修氏と共著）

広域プラズマ科学入門

— プラズマ特性・診断の基礎と地上から宇宙までの多面的応用展開 —

Introduction to Comprehensive Plasma Science

— Fundamentals and Diagnostics of Plasmas: —

From Terrestrial Applications to Space Frontiers —

© Shunjiro Shinohara 2026

2026 年 9 月 11 日 初版第 1 刷発行



検印省略

著 者 ^{しの}篠 ^{はら}原 ^{しゅん}俊 ^じ二 ^{ろう}郎
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来 真也
印 刷 所 壮光舎印刷株式会社
製 本 所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06678-4 C3042 Printed in Japan

(西村)



< 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつと事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。