

小特集

原子・分子過程によって支配される
プラズマの複雑性と構造形成Complexity of Plasmas and Structure Formation Dominated
by Atomic and Molecular Process

1. はじめに

岸本 泰明

京都大学

(原稿受付: 2008年3月10日)

今回「原子・分子過程によって支配されるプラズマの複雑性と構造形成」というタイトルのもとで小特集を組むことになりました。これまで、核融合プラズマや宇宙・天体プラズマをはじめ、散逸の微小な高温プラズマ（無衝突プラズマ）の物性が精力的に研究され、理解が進展してきました。特に、本タイトルのキーワードである「構造形成」は、磁場方式、レーザー方式を問わず、高性能の核融合プラズマを実現する上での基礎概念として定着しつつあり、本核融合学会誌においてもこれまで議論がなされてきました[1-3]。その背景には、プラズマの高性能化とともに時空間的なエネルギー密度が格段に上昇し、その結果、プラズマが内在的に持っている“非線形性”や“非局所性”が起因となって様々なスケールのダイナミックスや構造が創出されることが挙げられます。磁場核融合では、ミクロスケールの乱流から非線形過程を通じて形成される帯状流などのマクロスケールの揺らぎが閉じ込め・輸送に重要な影響を与えることが明らかになっています[1]。また、高速点火概念に基づくレーザー核融合では、相対論的な電子ビームの自己組織化過程など、プラズマの非線形性に準拠した物理過程が工学レベルで導入されつつあります[2]。宇宙・天体分野でも本学会誌において様々な構造形成現象やその重要性が議論されています[1, 3, 4]。これらは、図1に示されているように、散逸の微小な高温プラズマがデバイ長を超えたスケールにおいて様々な現象を創出し、それらが非線形性や非局所性を通して互いに連結したり相互作用したりすることに起因しています。

一方、自然界のプラズマや実験室・産業応用のプラズマに広く目を転じると、そこでは、固体や液体などの凝集相、

気相、あるいは少数多体系としての顕著な特性を示すクラスターや粉塵など、様々な状態にある物質が様々な波長領域の電磁波や荷電粒子と相互作用を繰り返しながら、原子過程や分子過程、衝突・緩和過程や輻射過程を通して、中性原子や分子、多価イオンや電子などが共存した複雑なプラズマ状態を作り出します。このようなプラズマは、プラズマの有するマクロな特性に加え、上述のようなデバイ長内部のミクロな過程が加わることによって複雑性のレベルは格段（相乗的）に増大し、これが起因となって高温・無衝突プラズマの特性だけでは捉えることのできない豊富かつ新奇な構造やダイナミックスを創出します(図1参照)。

そのような過程でなじみ深い現象の典型例は、実験室や大気圏・高層大気で発生する放電・雷現象です[5-9]。2006年は雷が電気現象であることを発見した Benjamin Franklin (1706-1790年) の生誕300年にあたり、その先駆的な業績が偲ばれました[8]。雷は、一方では、送電線や構造物などへの落雷やそれに伴う電磁放射現象など、電気工学の観点から研究がなされ、工学的な評価モデルやシミュレーション手法なども進展しています[5, 6]。他方では、それらが有する予測困難な突発的な発生機構や微細な突起構造、あるいはそれらの雪崩的伝播など、いずれも非線形物理学や統計力学などの観点からも興味深く魅力的な課題ですが、原子・分子過程を含んだプラズマ挙動は極めて複雑であり、モデル化も容易でないことから必ずしも全体像の解明には至っていないようです。実際、今世紀に入ってから様々な学術雑誌において放電・雷現象の観測研究やその素過程に関する研究が多く掲載されています[10]。まさに古くて新しい研究課題です。

Complexity of Plasmas and Structure Formation Dominated by Atomic and Molecular Process 1. Introduction

KISHIMOTO Yasuaki

author's e-mail: kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp

原子・分子過程 衝突・緩和、輻射過程
Debye 長内部のミクロなスケールの素過程と相互作用
中性原子・分子、多価イオン、励起イオン、電子等が共存・混在したプラズマ状態

相乗的な相互作用  新たな構造・ダイナミクス

微小散逸（無衝突）・高温プラズマ
Debye 長を超えた様々なスケールとスケール間の相互作用による構造・ダイナミクス創出
・プラズマの非線形性、非局所性、確率性 ・幅広い時空間スケールの素過程や現象間の相互作用 ・開放系としてのエネルギーや情報の授受

図1 高温プラズマにおける構造と原子・分子過程等、デバイ長内部のミクロ過程との相互作用による新たな構造／ダイナミクスの創出（相乗的複雑性）

この放電・雷現象は、中性媒質からプラズマが生成される際に必ず通過する普遍的な状態であり、プラズマへの「相変化」とそれに伴う「臨界現象」と捕らえることができます。これらの過程は、大気圧プラズマや核融合プラズマの着火をはじめ、身近な例ではスパークプラグによるエンジン点火や燃焼などが挙げられます。最近では有害物質除去などを目的とした大気圧放電プラズマが精力的に研究され、放電過程の制御が重要課題になっています。また、新しい粒子線源や中性子源、EUVやX線等の放射線源の開拓を目標に、高強度レーザーと物質との相互作用研究が精力的に進められていますが、そこでも物質の電離ダイナミクスが重要な役割を果たします。宇宙や天体においても原子・分子過程は重要な役割を果たします。星間ガス中の原子・分子過程は輻射過程とも結合して宇宙のグローバルな構造や進化とも密接に関わっています。また、中性子星などからの高強度の輻射によって生成される光電離プラズマや超新星爆発による相対論的な爆風波と星間物質の相互作用過程なども原子過程が重要な役割を果たし、対象は多岐に渡ります。

上記のような現象は、原子・分子過程、衝突緩和・輻射過程などのデバイ長内部のミクロなダイナミクスや構造が無衝突プラズマとしてのマクロなダイナミクスや構造と相乗的に相互作用することによって、「摂動」としてではなく、媒質の全体構造やマクロなダイナミクスに直接影響を与えている点に大きな特徴があります。言葉を変えれば、原子・分子過程が“力学系”としてのプラズマの基本構造を支配しているとも言えます。本特集は、このようなプラズマ過程を「原子・分子が関与したプラズマの複雑性」

と位置づけ、これによって支配される新奇なプラズマの特性に関連した分野の研究者と連携して分野横断的に理解することを目指しています。本特集の具体的な構成は以下のとおりです。

- はじめに（京都大学・岸本泰明）
- プラズマの着火過程における電離ダイナミクスと構造
 - 実験室プラズマの着火過程と構造（京都大学・長崎百伸／愛知工業大学・高村秀一 他）
 - マイクロ波による気中放電のダイナミクスと構造形成（原子力機構・小田靖久 他）
 - 大気圧放電プラズマにおけるストリーマのダイナミクスと構造（大分大学・金澤誠司）
- レーザー生成プラズマの電離ダイナミクスと構造
 - デトネーションにおける構造形成とレーザー駆動デトネーション（広島大学・遠藤琢磨）
 - レーザーを用いたエンジンの点火・燃焼ダイナミクスと構造（産業技術総合研究所・古谷博秀 他）
 - Warm Dense 物質の電離・励起構造と物性（電気通信大学・米田仁紀）
- 大気圏・電離圏における雷・放電現象の構造と素過程
 - 雷放電現象の構造と素過程（大阪大学・河崎善一郎）
 - 雷雲γ線の生成と粒子加速（理化学研究所・土屋晴文 他）
- 宇宙における原子・分子過程と構造
 - 宇宙・惑星における原子・分子過程と構造（情報通信研究機構・島津浩哲）
 - 原子・分子過程を介した星間媒質の非線形ダイナミクス（京都大学・井上剛志 他）
- 原子・分子過程を含むプラズマの理論・シミュレーションモデル
 - 放電・雷における原子・分子過程のモデル化（産業技術総合研究所・加藤進 他）
 - 物質の電離ダイナミクスと構造形成のシミュレーション（京都大学・岸本泰明 他）
- まとめ：原子・分子物理とプラズマ物理の新たな接点と求めて

第1章は本稿です。第2章は、実験室プラズマを中心とした大気圧プラズマや核融合プラズマの着火過程における顕著なダイナミクスや構造を応用研究の視点も含めて取り上げています。第3章は、デトネーション (Detonation) や燃焼波など、レーザーと物質との相互作用による電離過程や化学反応について、また、中性物質と高温プラズマの中間状態と位置づけられ、原子過程が重要な影響を及ぼす warm dense 物質と呼ばれる新奇な物質状態について紹介します。デトネーション (Detonation) は、エンジンの燃焼や超新星爆発時の核燃焼などでも起きる普遍的な現象です。第4章は、大気・電離圏における雷・放電現象に関する

る内容であり、雷雲中での雷の発生ダイナミックスやトリガーの物理機構に迫る話題について紹介していただきます。第5章では、ミクロな原子・分子過程が宇宙や惑星におけるプラズマと結合することによってマクロな構造やダイナミックスを創出する話題について紹介していただきます。特に、原子・分子過程は輻射との結合を介して熱的不安定性などの非線形性をプラズマにもたらし、これによって宇宙の構造や進化が方向づけられます。このような原子・分子過程が関与したプラズマの相乗的な複雑性を探求するためには、それを再現・模擬するための理論やシミュレーション研究が重要な役割を果たします。第6章では、そのようなプラズマの複雑性を記述するための理論・シミュレーションの取り組みについても議論します。扱う事象に依存して現象が発現する時空間スケールは様々ですが、それらに内包する非線形性や非局所性、あるいは突発的な発生機構やそれに伴うダイナミックスには共通した普遍的物理があることが期待されます。そのような分野を横断した共通の物理概念を導くことを目標に、第7章では関連した研究者に議論していただく予定です。

これまでの、原子・分子内部のミクロな過程を扱ってきた研究者と高温プラズマの物理過程を扱ってきた研究者は独立の興味のもとに研究を進めてきた経緯があるように思います。本特集が、今後これら異なった分野の研究者が連携して新しいプラズマの可能性を切り開いていくきっかけになれば幸いです。

なお、本研究は自然科学研究機構・核融合科学研究所における「国際共同研究拠点ネットワークの形成」プロジェクトによって支援されています。

参考文献

- [1] 例えば、岸本泰明編：小特集「プラズマの非局所輸送現象と様々な構造形成」プラズマ・核融合学会誌 **78**, 857 (2002)；「異なった時空間スケールが関与する多階層シミュレーション研究」プラズマ・核融合学会誌 **79**, 460 (2003).
- [2] 三間罔興編：小特集「高速点火核融合の統合シミュレーション」プラズマ・核融合学会誌 **82**, 135 (2003).
- [3] 犬竹正明編：講座「高速プラズマ流と衝撃波の研究事始め」プラズマ・核融合学会誌 **83**, No.1-No.5 (2007).
- [4] 松元亮治編：小特集「宇宙プラズマシミュレーションの現状と展望」プラズマ・核融合学会誌 **83**, 731 (2007)；亘慎一、永岡賢一編：小特集「宇宙天気予報」プラズマ・核融合学会誌 **82**, 737 (2006).
- [5] 高木浩一：講座「身近なプラズマ ～雷～」プラズマ・核融合学会誌 **80**, No.7, 588, No.8, 662 (2007).
- [6] 根本孝七、新藤孝敏編：特集「プラズマシミュレーションの最前線 –放電はどこまでシミュレーションできるか–」放電研究（放電学会誌）**50** (No.2), 1 (2007).
- [7] 湯本雅恵編：講座「大気圧プラズマを点けてみよう」プラズマ・核融合学会誌 **83**, No.11, 911, No.12, 942 (2007).
- [8] E. Philip Krider, "Benjamin Franklin and Lightning Rods", *Physics Today* **59**, No.1, 42 (2006).
- [9] 福西浩：解説「雷雲から超高層大気への上方放電発光現象の研究」天気 **53**, No.1, 7 (2006).
- [10] 例えば、V.P. Pasko *et al.*, Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere, *Nature* **416**, 152 (March, 2002); H.T. Su *et al.*, Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere, *Nature* **423**, 974 (June, 2003).