

# 原子・緩和過程を取り入れた粒子シミュレーションと応用研究

## —電離性複雑媒質とプラズマ転移現象の理解に向けて—

岸本 泰明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院エネルギー科学研究科

物質の第4の状態であるプラズマは、様々な状態にある中性媒質から、複雑な原子・分子過程や衝突・輻射過程を通して生成される。そのとき普遍的に現出する予測困難な状態の突発的変化や複雑な構造形成は、宇宙・天体や地球・惑星を含む自然プラズマや産業応用を含めた実験室プラズマの中核をなす物理現象であり、構造の起源を問う物理学の本質に関わる問題である。その代表例は雷・放電である。雷は、地球・惑星科学の重要課題であり、避雷・耐雷を含め、人間の生活・生存と直結している。放電は、ガス・水処理などの環境浄化、ナノ粒子生成や表面処理など新材料開発の基盤である。また、電離過程が示すデトネーション特性は、新しい動力源や核燃焼の学術基盤である。宇宙に遍在する粉塵・塵も、複雑な電離過程を通して微粒子プラズマを作り、宇宙の構造形成に寄与する。しかし、これらは、因果関係を問うことが困難なほど多様性と複雑性に満ちた現象であり、これまでも様々な試みがなされてきたが、特に、突発性と構造形成を予測する理論基盤は皆無に等しく、未だに原理的解明に至っていない。

中性媒質(固体・液体・気体)における状態変化は、相転移として、熱平衡状態の仮定の下に理論基盤が構築されてきた。一方、核融合や宇宙・天体などの高温プラズマでも、揺らぎや閉じ込め状態が急激に変化する現象が観測され、相転移として理解されている。これに対して、中性媒質からプラズマへ状態変化を相転移として扱った例はない。これは、両者の中間状態である電離過程が、中性原子や分子、帯電微粒子やクラスター、多価イオンや自由電子などの多様な物質種に加え、広域の電磁場や揺らぎが共存した、複雑性レベルの極めて高い非平衡かつ非定常な新しい物質相の出現を伴い、熱平衡状態を仮定した従来の相転移概念の導入が困難なことによる。

ここでは、この物質相を電離性複雑媒質(ICM: IonizedComplex Medium)として参照する。このような中性媒質からプラズマへ状態変化は、

### ① 突発性に至る初期状態の形成

(初期状態の科学)

### ② その下でのトリガーと連鎖のダイナミクス (引金・連鎖の科学)

### ③ その後の大域的な構造発展とパターン形成 (構造発展の科学)

という時空間スケールの異なる三つの素過程に要素還元することが可能であり、それらが系固有の物理過程によって干渉・連結することにより、大域的かつ突発的な構造を現出すると考えられる (図1参照) [1]。

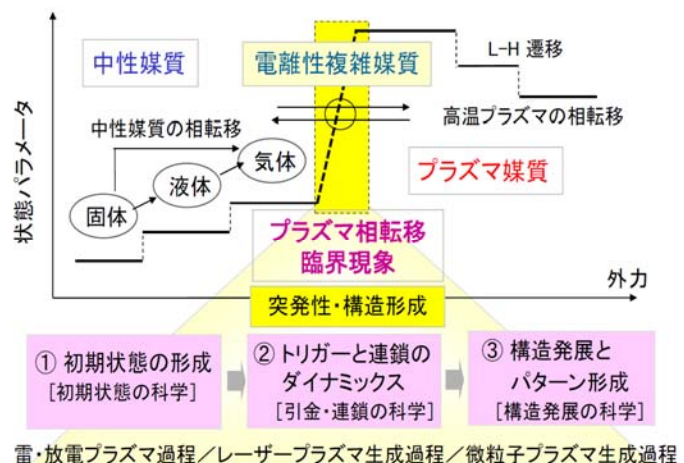


図1 中性媒質とプラズマの中間状態にある新しい物質相(電離性複雑媒質: ICS)とプラズマ相転移の基本概念。

ここでは、上述の中性媒質からプラズマが生成されるダイナミクスや構造形成を高精度で再現・模擬するため、高温プラズマ分野において広く使用され、メソスケールからマクロスケールの相互作用の記述に優れている超粒子 (PIC : Particle-In cell) 手法を基礎に、これに代表的な原子・分子過程や衝突緩和過程を取り入れた拡張型統合化粒子コード EPIC3D (3-dimensional Extend Particle based Integrated Code) とそれに用いた応用研究について紹介する。

EPIC3D では、荷電粒子間および荷電粒子、中性原子の衝突・緩和過程モデルとして、衝突前後の運動量、およびエネルギーを相対論的に厳密に保存する pairing 法をモンテカルロ法と併用して用いている。これにより、電子の平均自由行程に対して温度勾配のスケール長が同程度となり、Fick の法則 (拡散近似) が成立しない状況下での非局所熱伝導過程などを再現することができる。原子過程に関しては、電磁場によるトンネル電離、単一・多光子吸収による光電離、電子衝突による電離過程が導入されている。再結合過程・内部励起、レーザーなどの高強度場に伴う電子・陽電子生成や輻射減衰効果による X 線発生などの効果も今後導入予定である [2]。

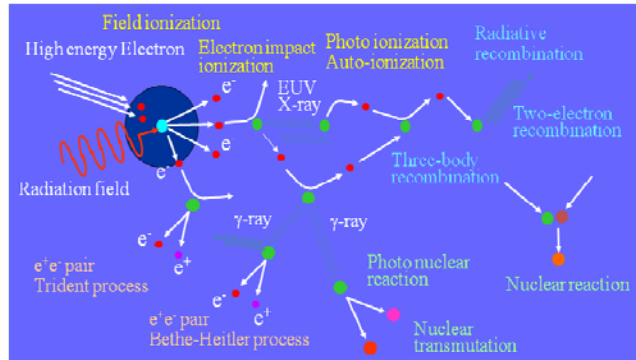


図 2 EPIC3D に導入されている衝突・緩和過程、原子過程

プラズマ転移の典型例として、放電・雷過程のシミュレーションを行い、それらの現象で普遍的に観測される突発性と構造形成の研究に取り組んできた。図 3 は、ネオン (Ne) の高圧ガス (密度 :  $4.6 \times 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ ) に静電界 ( $1.1 \times 10^7 [\text{V/cm}]$ ) を印加したとき、初期に配置した  $\text{Ne}^{+2}$  の微小な電離スポットから放電が進行する様子を示した 3 次元シミュレーションの結果である。初期に配置した電離スポットから、高電界によって線状の放電経路が生成され、それらが発展している様子が分かる。プラズマは、中央に形成された放電路から左右に急速に広がっていく。また、近年、医療応用などを目的とした超高強度レーザーと物質との相互作用による高エネルギー粒子加速に関する研究が精力的に行われている。図 4 は、 $10^{20} \text{W/cm}^2$  の超高強度レーザーを照射されたアルゴンの粒状物質 (クラスター) のシミュレーション結果を示している。レーザー場によってアルゴンクラスターは急速に電離するとともに、多価イオンが数 100MeV まで加速される [2]。

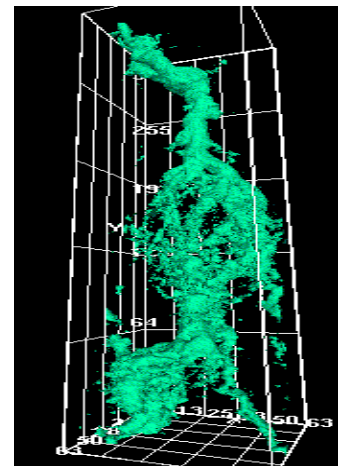


図 3 圧縮ネオンガスの放電過程のシミュレーション

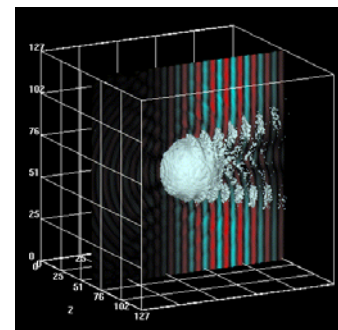


図 4 超高強度レーザーに照射されたアルゴンクラスター

[1] 岸本泰明編 : 「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」プラズマ・核融合学会誌・小特集、Vol. 84, No. 7, No. 8, 2008.

[2] 岸本泰明 : 「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」プラズマ・核融合学会誌 vol. 8, 484 (2008)