

エネルギー理工学研究所エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稲垣研究室）
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/index.html>
 非平衡開放系プラズマの状態はどのようにして選ばれるのか？

核融合エネルギー開発を指向したプラズマの実験研究をエネルギー理工学研究所の Heliotron-J 装置を用いて行なっています。強力な電磁波を用いて水素を電離し、水素プラズマを磁場により閉じ込めています。しかし、主にプラズマ中に励起される電磁的揺らぎによってプラズマは損失します。このためプラズマを維持するには外部からエネルギーと水素を注入し続けなければならない、プラズマは基本的に非平衡開放系となります。非平衡開放系の物理は平衡系の物理と比べると分かっていない事がたくさんあります。例えば平衡系ではエントロピー最大の原理が成り立ちますが、非平衡系ではそれが成り立つかどうか、あるいはエントロピーに代わる何らかの量が最大化/最小化するのか、は分かっていません。実際、プラズマは、構造を形成し秩序を作り出す、同じ環境で複数の状態を取りその間を何度も流転する、といった平衡系では見られない活性で動的な性質を示します。このようなプラズマのダイナミクスを理解しようとしています。以下に例を示します。

揺らぎの共存と競合：非平衡系を特徴づける量として空間勾配があります。特に核融合プラズマでは 1m でおよそ一億度の温度差が保持されます。勾配が 0 である平衡状態からは非常に遠い系といえます。この勾配をエネルギー源として様々な不安定性が熱揺らぎから励起されます。そして物理的な淘汰を経て、いくつかの不安定性が共存した状態が実現します。生き残った不安定性の中には相反する作用を及ぼすものがあります。通常、不安定性は温度勾配を小さくする輸送を駆動します。しかし、密度勾配等、他の勾配で励起された揺動は温度勾配を上げる効果を持っていたりします。このため物理的淘汰後の状態は多くの不安定性と輸送がお互いせめぎ合ってギリギリの均衡を保っています（図 1 (a)）。**自己組織化臨界現象：**系の一箇所でこの均衡が破れると連鎖的に均衡が破れて、プラズマ全体が雪崩のように応答します（図 1 (b)）。この雪崩では熱や物質は弾道的に輸送され、平衡近傍の酔歩的な熱伝達とは質的にも大ききさ的にも全く異なります。実験では雪崩の際の揺らぎのハースト指数 0.7 程度が観測されており、長期記憶が現れています。**ガウス分布からの解放：**この雪崩の発生確率分布には図 1 (c) のようにべき乗分布が現れます。ランダム事象の確率統計数理や統計熱力学ではガウス分布（正規分布）が現れます。ガウス分布は平衡を統計的に特徴づけるといえます。一方でべき分布は非平衡系を特徴づけるのかも知れません。

プラズマの構成要素であるイオンと電子の間の相互作用や電磁場の振る舞いは全てわかっています。しかし、プラズマ全体のダイナミクスは予測できていません。決定論的描像を離れ、プラズマをせめぎ合う系として理解し、その実現する状態を決める物理的淘汰の機構を明らかにし、プラズマのダイナミクスを予測します。

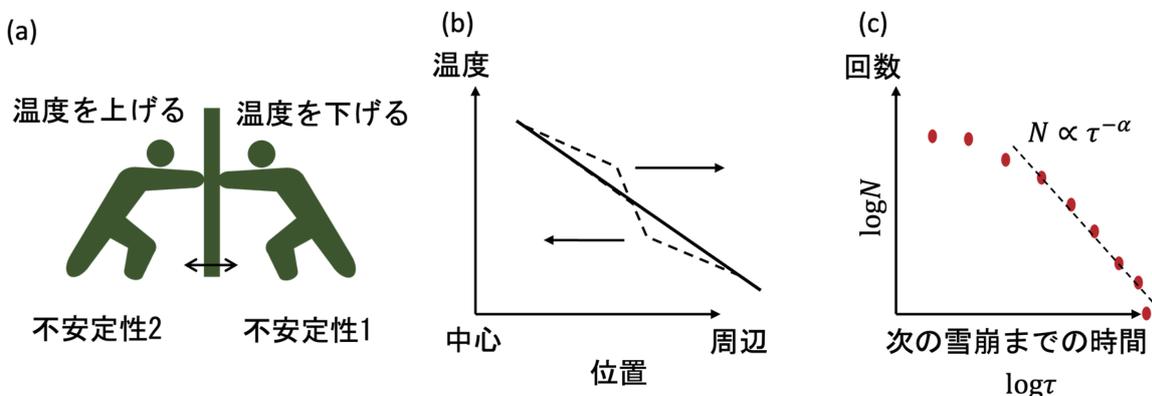


図 1 プラズマにおけるせめぎ合い (a) 多くの電磁揺らぎの共存と相反する揺らぎ間の競合、(b) プラズマに見られる自己組織化臨界現象（熱雪崩）、(c) 雪崩の発生確率分布