

非中性プラズマの二次元渦運動に見る構造形成

Self-organization of Symmetric Structures in the Vortex Dynamics in a Non-neutral Plasma

際本 泰士 [1]

Yasuhito Kiwamoto[1]

[1] 京大・人環

[1] Grad. Schl. Human & Env. Sci., Kyoto Univ.

<http://www.plasma.jinkan.kyoto-u.ac.jp>

宇宙プラズマの観測、核融合を指向した大型プラズマ実験、理論、数値シミュレーションというプラズマ物理学の手法のなかで、デスクトップ規模の基礎実験に求められる特質の最たるものは、複合的なプラズマ現象における素過程の単離とプロセス間の関係の明確化であろう。基礎実験は数値シミュレーションとは競合的かつ相補的な関係にあり、理論化（普遍化）を経てプラズマ科学の深化と学際域拡大に努めるところに大きな使命がある。

プラズマ基礎科学を支える柱の1本となってきた非中性プラズマの特徴は、長い閉じ込め時間である。この特性は強い保存性を示すマクロナ電磁角運動量に依存するところが大きい。この結果として、粒子数やエネルギーも良く保存されるため、孤立した多粒子保存系としての特質が現れ、それを利用することもできる。例えば、保存量を外的に制御したり、自発的に内部緩和を許すことで、様々なルートを通る自己組織化の過程を机上で展開させることができる。代表的な時間を挙げると、クーロン緩和時間が10ms程度、電子のシンクロトロン放射冷却時間が10秒程度、原子分子過程は1-30秒程度である。プラズマの閉じ込め時間は制御なしの状態でも60秒を越えるため、孤立した多粒子保存系として熱力学的スケールでの状態変化を検証するところまで視野に入っている。クーロン力と重力との距離依存性は同じであり、非中性プラズマには対抗電荷が無いので相互作用の遮蔽効果は極めて小さく、重力系との対比ができる局面も多い。

その一方で、極めて高い保存性のためプローブの挿入など摂動を伴う計測は不可能となる。実現できた手法は破壊的観測である。つまり、孤立状態で緩和しているプラズマ全体を一気に磁力線に沿って取り出して、各磁力線に沿って積分した粒子数の断面分布を二次元数値アレイとして記録する手法である。これには蛍光面とCCDカメラを用いる。観測の度に破壊するため、緩和過程をの時間経過を追跡するには、毎回初期状態から実験を繰り返さねばならず、高い再現性が要求される。CCDカメラに記録できる画像データの分解能は、空間的には $30\ \mu\text{m}$ 、強度的には10/60000程度まで向上している。空間点数は $2048 \times 2048 = 420$ 万点に上る。二次元画像から三次元構造を導出するには静電気学的手法を駆使する。

本講演では、磁場方向には一様な巨視的二次元運動を中心に報告する。この条件下では強く磁化された純電子プラズマは非圧縮性の理想流体に限りなく近い挙動を示す。電子密度は渦度に比例し、等電位面は流れ関数と一致する。空間的に広がったなだらかな渦分布や渦系の配置を様々な形で初期条件として設定して得た実験結果のうち、次のような話題についてご紹介したい。

(1) 多数の渦系の相互作用の中から出現する渦系群は熱力学的に得られた超流動体内の渦系の配置と同じ結晶構造を示す。この結晶構造の緩和過程は、時間に対して対数依存性を示す。この経験則は乱流における不規則な渦間の合体が従うと報告されているべき依存性とは対照的である。

(2) シアの強い連続的な回転流はKelvin-Helmholtz不安定性を起し渦塊に分裂する。これら渦塊は相互作用により合体・減数し再び対称的な回転流を形成する。この間の緩和過程で変化が見られるのはエンストロフィーの減少である。渦力学の視点と乱流理論の視点から論じる。

(3) 上記回転流の中に不安定波動と同位相で回転する小渦塊を置くと、摂動が共鳴的に大きく成長し、周囲分布の巻き込みが起こる。惑星の周りにおいてこのような現象は観測されていないだろうか？

参考文献

- 1) WEB : <http://www.plasma.jinkan.kyoto-u.ac.jp> 当研究室からの出版物や渦動画を掲載。
- 2) 際本泰士 : 「非中性プラズマ中の渦運動」日本物理学会誌 Vol.56, No.4, 253 (2001).
- 3) Y. Kiwamoto et al. Phys. Rev. Lett. Vol.85, 3173 (2000).
- 4) A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, Y. Soga, Phys. Rev. E. Vol.68, 016404 (2003).