

Vortex Dynamics in Nonneutral Plasmas

際本 泰士, 曾我 之泰, 青木 順

京都大学大学院人間・環境学研究科

KIWAMOTO Yasuhito, SOGA Yukihiro, AOKI Jun

Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

非中性プラズマを渦運動と結びつける要素は、荷電粒子の案内中心の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと荷電粒子の密度分布により形成される電場 $\mathbf{E}$ である。一様磁場の中でプラズマの密度分布も磁場方向に一様である場合、磁場に垂直な面内に巨視的な二次元流れが生まれる。更に粒子の gyroradii が電場の空間スケールよりも充分小さくて、粒子のジャイロ軌道に沿って電場が一様であると近似できれば、この流れは案内中心の集団により構成される非圧縮性の完全流体とみなすことができ、流れ関数は等電位面と一致し、渦度が粒子密度に比例することになる。この対応関係を駆使すると、19 世紀以来蓄積された研究の流れにのって渦運動の本質を、プラズマ物理として検討することができる。渦研究の歴史は長いけれども、実験面の制約が強いため、理論的研究の割合が大きい。従って分かっているのは数学的に解ける問題に限られていた。そのような歴史の中で電磁気学と結合した非中性プラズマの実験結果は、渦を現代の物理学の立場から捉え直す大きな契機となっている。磁化された純電子プラズマにおいて我々が学んだ知見の数例を以下にあげる。

- (1) 渦糸の動力学の理論は実験条件の範囲内でほぼ完璧に確認された。
- (2) 理論的には太さを持たせない渦糸は、自然界では有限の分布を持つ。渦糸間の距離がその分布幅に近づくと、渦糸が変形する。その変形により誘起される場によって渦糸は合体する。この過程の実験的観測は渦パッチのモデルで数値的に予測されていたことに近い。
- (3) 合体の過程の中で、渦度分布はフィラメント化して多重に巻き付く。その微細化が流体を構成するミクロなスケール（例えば gyroradii サイズ）に近づくと、渦運動に対しては実効的に散逸が生まれる。 gyroradii は渦スケールの **control parameter** として有効である。
- (4) 合体は渦要素を完全に一体化することはできなくて、（つまり安定な渦糸は固有の分布を持つらしく）、吸収されない部分 (**debris**) は放出されて渦糸周辺に低レベルの背景分布 (**Background Vorticity Distribution**) を形成する。渦糸のみの相互作用では長時間維持される（準）定常配位をつくる条件は極めて狭いが、BGVD があると広い条件に対して対称性の高い渦糸 (**clumps** と呼ぶのが適当か) 配位が自発的に形成される。
- (5) BGVD は渦糸の合体を阻止して渦糸間の距離を保つ働き、循環の異なる渦糸を対称の位置に運ぶ働きを示す。(4) と合わせて渦結晶形成の力学的側面における BGVD の役割は本質的である。統計物理学の視点から興味を持たれているが、まだ良く整理されていない。
- (6) **Penning** 平衡分布は 3 次元の安定渦とみなすことができる。この配位を 2T の強磁場の中で渦糸の合体を通じて形成しようとする、回転楕円体の中核の周りに低密度の **halo** 分布が形成される。この現象は (4) (5) に通じるものであろう。
- (7) 純電子の **Penning** 平衡状態を維持すると数十秒の（原子分子反応）スケールで、電子は負イオンに置き換わり、軽粒子と重粒子が混在した多成分非中性プラズマ渦となる。粒子構成の変化まで含めた平衡間遷移の問題として今後興味深い課題ととらえている。