

Mechanism of Plasma Hole Formation

田中雅慶, 吉村信次

核融合科学研究所

TANAKA Masayoshi Y. and YOSHIMURA Shinji

National Institute for Fusion Science

磁化プラズマは渦の宝庫である。その理由は、プラズマ中の $E \times B$ ドリフトが容易に回転流を誘起するからである。いま、磁場に垂直な面内で 2 次元的に局在するポテンシャルがあるとすると、プラズマはその等ポテンシャル線に沿って $E \times B$ 回転することになる。したがって、ポテンシャルの局在構造は渦である。このような渦の代表例が、ドリフト波のつくる渦で、プラズマ中の基本渦構造であると考えられてきた (1-3)。しかし、最近観測されたプラズマホールと呼ばれる渦は、従来の描像と異なって、粘性が支配する渦であることが明らかになった。粘性があると、渦度の集中と拡散という二つの相反する効果の競合が可能になり、両者の釣合いの結果として局在構造 (粘性渦) の形成が起こる。本講演では、有限粘性プラズマにおける渦形成のメカニズムを、プラズマホールの場合を例として渦度のダイナミクスの観点から述べてみたい。

実験は直線型高密度プラズマ発生装置 (HYPER-I) で行った。プラズマ直径は 30cm、軸方向長さは 200cm である。軸に沿って磁場 ($\sim 1\text{kG}$) が加えられており、プラズマはこの磁場と径方向電場により、軸の周りに $E \times B$ 回転する。(プラズマホールの実験結果の詳細については、文献 4 参照) ヘリウムやアルゴンのプラズマで実験条件を適当に設定すると、ある領域で中心に密度の“穴”を伴う構造が観測される。この構造は、軸方向から眺めた時の印象によってプラズマホールと名づけられた。プラズマホールは装置断面全体を覆う巨視的な渦であり、磁場に垂直な断面における速度場は、Fig. 1 に示すような時計回りの吸い込み構造を示している。磁場は紙面奥から手前向きに加えられており、渦の回転方向は上に凸のポテンシャルが作る $E \times B$ ドリフトに一致する。実際、ポテンシャル計測を行い、周方向回転は $E \times B$ ドリフトであることを確認している。

ここで、Fig. 1 の流れ場には径方向流れが存在することに注意したい。なぜなら、磁化プラズマは通常径方向には流れないと考えられているからである。磁場を反転させたところ、周方向流れの回転は予想通り反転したが、径方向流れは内向きのまま不変であった。この結果は、径方向流れの原因が $E \times B$ ドリフトでないことを示している。

イオン流体の運動方程式の周方向成分は、軸対称性がある場合

$$\nu_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} = -\nu_r \Omega + \nu (\nabla^2 v)_\theta$$

と書ける (Ω はイオンサイクロトロン周波数)。いま、粘性がないとすると ($\nu=0$)、対流項 (左辺) とローレンツ力 (右辺第 1 項) が釣合うこと

になるが、この場合 v_r が 0 でありさえすれば、いつでも周方向の運動量

収支は満たされる。したがって、非粘性の場合、径方向流れが発生する必然性は無い。しかし、粘性があると (右辺第 2 項)、周方向の運動量収支を満たすためには径方向流れが必ず存在しなければならない。別の言い方をすれば、径方向流れがあるということは、観測している現象に対して粘性が本質的に関与しているという事と同じである。

渦度のダイナミクスを考えると、径方向流れの存在は渦度の局在構造の出現を可能にする。即ち、径方向流れによって中心に集められた渦度が、粘性による拡散と釣合って定常な局在構造をつくる。渦度方程式はそのような局在構造としてガウス分布型の定常解を持っている。この解は、発見者の Burgers (1948) の名に因んでバーガース渦と呼ばれている (5, 6)。プラズマホールは、渦度のダイナミクスの観点からすればバーガース渦に他ならない。

一方、プラズマのダイナミクスを考えると、プラズマホールは異常性のかたまりである。渦の特性長から算定される実効粘性は古典粘性にくらべ 3 桁以上大きな値を示し、また、渦の回転は $\phi \geq 100\text{V}$ ($\sim 5T_e$) 以上のポテンシャルによって駆動されている。この異常に高いポテンシャルが高々数センチの範囲に局在しているために、プラズマの準中性度は通常の場合に比べて 3 桁程度高い値を示す。つまり、渦の中心部は準中性条件が破れていると言える。これらの異常性がどのような機構で発生しているのか非常に興味深いのが、詳細は現在研究中である。

参考文献

1. A. Hasegawa and K. Mima, Phys. Fluids **21**, (1978) 87.
2. V. D. Larichev and G. K. Reznik, Polymode News **19**, (1976) 3.
3. M. Kono and E. Miyashita, Phys. Fluids **31**, (1998) 326
4. K. Nagaoka, A. Okamoto, S. Yoshimura, M. Kono and M.Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **89**, (2002) 075001.
5. J. M. Burgers, Adv. Appl. Mech. **1**, (1948) 171.
6. T. Kambe, J. Phys. Soc. Jpn. **53**, (1983) 13.

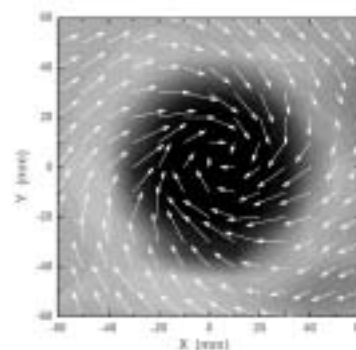


Fig.1 プラズマホールの速度場