

平成22年4月7日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540523

研究課題名（和文） 回転プラズマにおける台風様渦形成の理論

研究課題名（英文） Theory of Typhoon-like Vortex Formation in Rotating Plasmas

研究代表者

河野 光雄 (Kono Mitsuo)

中央大学・総合政策学部・教授

研究者番号：00038564

研究成果の概要（和文）：

HYPER-I(核融合科学研究所 NIFS)で観測された台風様渦に伴うポテンシャル構造と密度構造を無撞着に決める方程式系を導出し、それらを数値的に解いて、実験データが再現できることを示した。ポテンシャルは、イオンの異常 ExB ドリフトと分極ドリフトを考慮した非線形方程式を解いて求められ、大振幅ポテンシャルによって励起された異常 ExB ドリフトによる遠心力が圧力とバランスするように密度構造が決まっていることが明らかにされた。

研究成果の概要（英文）：

The potential and density structures associated with typhoon-like vortices observed at HYPER-I in NIFS have been self-consistently determined and shown to reproduce the experimental data. The potential has been obtained by solving a nonlinear equation involving the anomalous ExB drift and polarization drift for ions. The density structure is shown to be determined by the balance between the centrifugal force due to the anomalous ExB drift and the pressure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：異常 ExB ドリフト、台風様渦、密度ホール、磁化プラズマ、プラズマ核融合

1. 研究開始当初の背景

プラズマにおける構造形成は輸送とも関係して基本的な問題であり、プラズマに内在する物理過程を明確にして、新しい概念や認識を獲得する基礎研究の独自性の重要性を表

している。本研究では、円筒軸対称形の磁化プラズマ HYPER-I(NIFS)で観測されている台風様渦構造の素過程の解明を目指す。これは、これまで週方向流れについては、遠心力とローレンツ力のバランスで決まるドリフ

トは無限遠で発散するので物理的でなく、数学的な買いにすぎないとの理由で通常の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが一意的な解とされてきている。ところが HYPER-I で観測された台風様渦は大振幅のポテンシャルを生み出し、それによる $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは音速と同程度になり、遠心力とローレンツ力のバランスできる以上 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトであることを示していた。こうしてこれまで無視されてきた解がプラズマ物理の新しい側面を切り開き、プラズマに内在する豊かな減少を暴く契機を与えてくれるものと期待された。図1に実験で観測された台風様渦を示す。対応するポテンシャルを図2に示す。



図1：HYPER-Iで観測された密度ホール

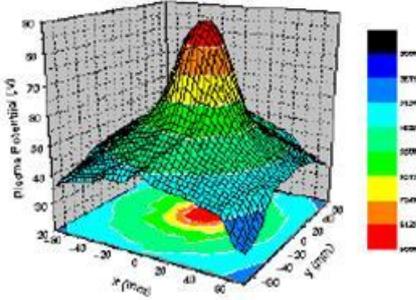


図2：HYPER-Iで観測されたポテンシャルの2次元空間分布

2. 研究の目的

HYPER-Iで観測された密度ホールの物理的の解明を目的とした。回転プラズマの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは遠方で剛体回転に収束するので、境界条件に合わないため、異常 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは近軸だけで成り立つものであり、遠方の境界条件を満たす正常 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトとクロスオーバーするように、渦の中心部と周縁部では異なる運動様式をもちながら組織化されていることになる。解決すべき課題は

- (1) ポテンシャルの決定
- (2) 流れの決定
- (3) 密度構造の決定

である。

3. 研究の方法

- (1) ポテンシャルの構造はイオンの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ド

リフトと、分極ドリフトを連続の式に代入して、準中性条件から求めた非線型方程式の定常解として求める。

(2) イオンの運動方程式からローレンツ力、遠心力、ポテンシャル力がバランスしているときに定常状態が得られ、速度場がポテンシャルの関数として求められる。

(3) 電子とイオンの運動方程式からポテンシャルを消去することで遠心力と圧力とがバランスして密度勾配を記述する式が得られる。

4. 研究成果

(1) ポテンシャル構造

異常 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトを使った中心部、正常 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトを使った周縁部、異常ドリフトと正常ドリフトとのクロスオーバーは、イオンのサイクロトロン周波数と渦度との極性が反対のため、ちょうどキャンセルする地点が接合点である。ここでは粘性がポテンシャルを決定する。運動方程式から

$$\mathbf{v}_{e\perp} \cdot \nabla_{\perp} \ln \frac{|1 + \omega_{e\perp}/\Omega_{e\perp}|}{n_e} = \frac{\nu_e}{\Omega_{e\perp} + \omega_{e\perp}} \left(\nabla^2 - \frac{1}{\nu_e \tau_e} \right) \omega_{e\perp}$$

$$\mathbf{v}_{e\perp} = \frac{C_s^2}{\Omega_{iz}} \mathbf{b} \times \nabla_{\perp} \left(\frac{e\phi}{T_e} - \ln n_e \right)$$

$$\mathbf{v}_{i\perp} = \frac{C_s^2}{\Omega_{iz}} \mathbf{b} \times \nabla_{\perp} \Phi_i + \frac{1}{\Omega_{iz}} \mathbf{v}_{i\perp} \cdot \nabla_{\perp} \mathbf{b} \times \mathbf{v}_{i\perp}$$

$$\simeq \frac{C_s^2}{\Omega_{iz}} \{ \mathbf{b} \times \nabla_{\perp} \Phi_i - \rho_s^2 (\mathbf{b} \times \nabla_{\perp} \Phi_i) \cdot \nabla_{\perp} (\nabla_{\perp} \Phi_i) \}$$

$$\Phi_i = \frac{e\phi}{T_e} + \frac{T_i}{T_e} \ln n_i$$

を得る。電子の運動方程式から、

$$\ln \frac{n_e}{n_{e0}} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{e(\phi - \phi_0)}{T_e}$$

が得られ、電子密度が渦中心 ($0 < \alpha < 1$) ではボルツマン分布を取らないことが分かる。準中性条件をつかって、イオンの運動方程式からポテンシャルを記述する方程式が

$$\{ \mathbf{b} \times \nabla_{\perp} \Phi_i - \rho_s^2 (\mathbf{b} \times \nabla_{\perp} \Phi_i) \cdot \nabla_{\perp} (\nabla_{\perp} \Phi_i) \} \cdot$$

$$\nabla \ln \frac{|1 + \omega_{iz}/\Omega_{iz}|}{n_i} = \frac{\nu_i}{\Omega_{iz} + \omega_{iz}} \left(\nabla^2 - \frac{1}{\nu_i \tau_i} \right) \omega_{iz}$$

と得られる。イオンの渦度は

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{iz}}{\Omega_{iz}} &= \frac{1}{\Omega_{iz}} \mathbf{b} \cdot \nabla \times \mathbf{v}_{i\perp} \\ &\simeq \rho_s^2 \nabla^2 \Phi_i. \end{aligned}$$

と決まる。図2のポテンシャルの構造から、 ω は渦の中心部で負、周縁部で正となるので、 $\Omega + \omega$ は負から正に変わる可能性がある。これが負であれば異常 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト、正であれば

ば正常 ExB ドリフトであり、ゼロとなる点が異常 ExB ドリフトと正常 ExB ドリフトの結節点である。この結節点近傍のポテンシャルは

$$(\nabla^2 - \frac{1}{\nu_i \tau_i}) \nabla^2 \Phi_i = 0.$$

を解いて、結節点前後のポテンシャルと滑らかにつながる様に解くことになる。渦の外側は通常プラズマであり、電子密度はボルツマン分布に従っているため、イオンに対しては正常 ExB ドリフト領域の運動方程式を使って准中性条件のもとで解けばよい。解を図3に示す。点線が実験データ、実線が理論データである。

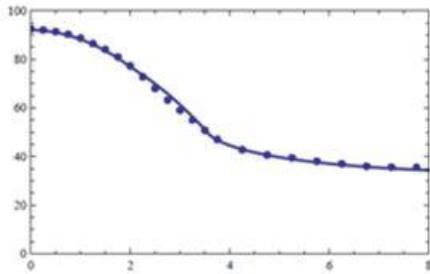


図3：ポテンシャルの動径方向分布

(2) 流れの決定：周方向速度

ポテンシャルが与えられれば、遠心力とローレンツ力によるバランスから周方向速度が求まる。イオンの動径方向の運動方程式から

$$(\Omega_i + \frac{v_{i\theta}}{r}) v_{i\theta} = C_s^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r}.$$

を得るので、就方向速度は

$$\frac{v_{i\theta}}{C_s} = \frac{r}{2\rho_s} \left\{ -1 \pm \sqrt{1 + 4 \frac{\rho_s^2}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r}} \right\}$$

と求められる。ここで根号の前の符号が負のものが異常 ExB ドリフトで、これまで物理的でないものとして捨てられてきたもので、正のものが正常 ExB ドリフトである。先に求めたポテンシャルから求めた速度場を図4に与えた。点線が実験データ、実線が理論データである。

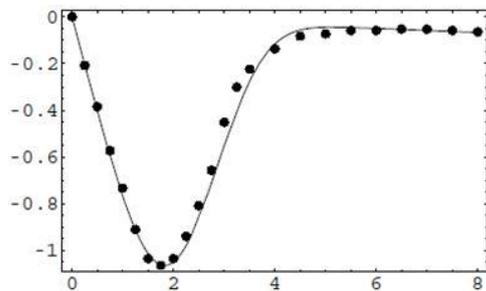


図4：周方向速度場の動径方向分布

この速度分布から渦度を求めることができ

て

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{iz}}{\Omega_{iz}} &= \frac{1}{\Omega_{iz} r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{i\theta}) \\ &= -1 \pm \sqrt{1 + 4 \frac{\rho_s^2}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r}} \pm \frac{\rho_s^2 r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right)}{\sqrt{1 + 4 \rho_s^2 \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r}}} \end{aligned}$$

とあらわされる。空間構造は図5に示した。

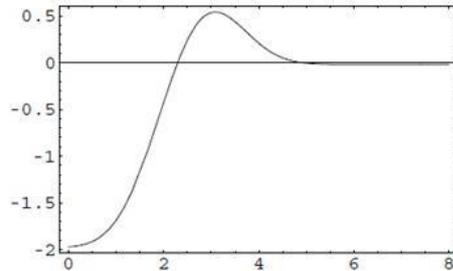


図5：渦度の動径方向分布

(3) 密度構造

電子には正常 ExB ドリフトしかない。イオンの運動方程式と組み合わせて、電子とイオンの周方向速度差が作る軸方向磁場の揺らぎは無視できるとすれば密度構造を決めることができる。

$$\frac{1}{r} \frac{v_{i\theta}^2}{C_s^2} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left(1 + \frac{T_i}{T_e} \right) \ln n + \frac{1}{2} \frac{v_{ir}^2}{C_s^2} \right\}$$

これを積分すれば

$$\ln \frac{n(r)}{n(0)} = \frac{T_e}{T_e + T_i} \left\{ \int_0^r dr \frac{1}{r} \frac{v_{i\theta}^2(r)}{C_s^2} - \frac{1}{2} \frac{v_{ir}^2(r) - v_{ir}^2(0)}{C_s^2} \right\}$$

密度分布が得られる。径方向速度は周方向速度に比べて無視できるので、積分して密度分布が求められる。周方向速度の空間分布から密度ホールが明らかである。

$$\ln \frac{n(r)}{n(0)} \propto \left(\frac{r}{\rho_s} \right)^2$$

図6に密度の径方向分布を示す。点線が実験データ、実線が理論データである。

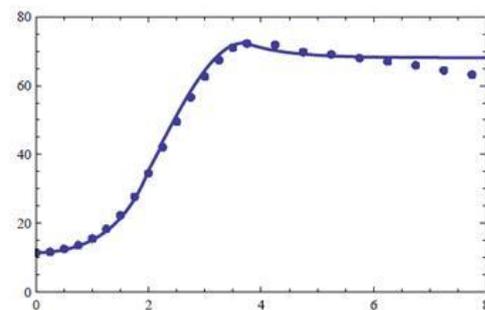


図6：密度の径方向分布

(4) 異常粘性

異常 ExB ドリフト領域と正常 ExB ドリフト領域を接続するには、粘性を考慮した方程式を解かねばならない。この粘性による拡散方程式の解が結節点の前後の解と滑らかにつながるためには、粒子の衝突過程で決まる古典粘性ではなく、その 400 倍もある異常粘性を使わなければならない。しかし、粘性を決めているスケール長と時間を渦に固有のものに取りなおせば、すなわち実効的粘性を（音速/サイクロトロン周波数）の自乗と渦度の積として表すと、解を滑らかにつなぐことができる。したがって、渦が励起している系での輸送係数は、渦を単位とするダイナミクスで支配されていると考えればよいことが分かる。

(5) 研究成果の意義

これまで数学的な解にすぎないとして無視されていた解が物理的実体として観測され、理論によって裏付けられたことは、非線形分散媒質としてのプラズマの持つ多様性を示したものであり、線形世界の常識にとらわれていると大きな見落としがあることを教えてくれた。Mikhailovskii というプラズマ物理学における巨人の言説が覆ったことで、内外に大きなインパクトを与えたと評価できる。

多体粒子系での相互作用の結果、マクロなスケールの構造が形成されるばあいには、そこでの輸送にも階層性が現れて、階層に固有の運動様式が生まれるという一般的なシナリオの確かさを、プラズマにおける渦励起を通して確認できた。今後、ミクロとマクロの相互浸透性を暴き出す実験が出てくることを望みたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① J. Vranjes, S. Poedts, M. Kono and M. Y. Tanaka, Effects of friction on modes in collisional multicomponent plasmas, Journal of Physics, Conference Series **査読有** 162 (2009) 012017(1-10)

② J. Vranjes, M. Kono, S Poedts and M. Y. Tanaka: Collisional energy transfer in two-component plasmas, Physics of Fluids **査読有** 15(2008) 092107(1-5)

[学会発表] (計 1 件)

① 吉村信次、河野光雄、田中雅慶；プラズマホールの流れにおける遠心力と異常粘性の寄与、日本物理学会 62 回年会、2007 年 9 月 22 日、北海道大学

[その他]

ホームページ等

<http://fps.chuo-u.ac.jp/~kono>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 光雄 (KONO MITSUO)

中央大学・総合政策学部・教授

研究者番号：00038564