

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 ~ 2008

課題番号：19740348

研究課題名 (和文) 磁化プラズマ渦の流速場計測による粘性係数の決定

研究課題名 (英文) Determination of Viscosity Coefficient by Using Flow-Velocity Field Measurement of Magnetized Plasma Vortex

研究代表者

吉村 信次 (YOSHIMURA SHINJI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：50311204

研究成果の概要：プラズマの流れ構造の決定には様々な力が関係しているが、実験室プラズマにおいては粘性の効果はこれまで無視されてきた。これは衝突に基づく古典粘性係数が非常に小さいためである。本研究ではプラズマの流れと粘性の関係式を導き、実験によって計測した流速場から実効的な粘性係数を決定した。その結果、特異な構造をもたない実験室プラズマにおいても、古典粘性より 2 桁大きな異常粘性が観測された。また、精度の良い流れ計測のためにレーザーを用いた流速計測系を導入した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	0	2,100,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	330,000	3,530,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ基礎

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、プラズマ研究の様々な分野において、プラズマの流れの重要性が認識されている。流れ構造を決定する要因として電場や圧力勾配があるが、プラズマの粘性が重要な役割を果たす場合もある。例えば、磁場閉じ込め核融合実験装置におけるトーラスプラズマではポロイダル方向の流れが実効的粘性によってトロイダル方向の流れを生じさせることが知られており、異常粘性が実験的に観測されている。そのような重要性にもかかわらず、これまで粘性の計測はほとんど行わ

れてこなかった。

(2) 核融合科学研究所の直線型高密度プラズマ発生装置 HYPER-I において、プラズマホールと呼ばれる特異な渦構造が観測されている (K. Nagaoka et al., Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 075001)。その渦度分布は粘性流体に固有な渦である Burgers 渦として説明されるが、渦度分布と径方向流速から評価されるプラズマの粘性係数は Braginski の古典衝突粘性と比べて 4 桁大きな異常粘性となる。この事実は、これまで実験室放電プラズマにおいて無視されてきた粘性の効果構造形成

に重要な役割を果たす場合があることを意味する。

(3) 流れと粘性の関係を研究するためには、正確な流速場計測が必要となる。流速場計測には、簡便な方法としてマッハプローブまたは方向性ラングミュアプローブ (DLP) が用いられることが多いが、解析に用いる理論により較正係数が異なるため、絶対値の決定はそれほど容易ではなかった。流速の絶対値を測定するためには分光学的方法が考えられるが、研究開始当初は十分な空間分解能をもった分光計測は実験室プラズマ分野ではほとんど行われていなかった。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、磁化プラズマの実効的粘性係数をプラズマ中に形成される渦の流速場計測を用いることで実験的に決定することにある。HYPER-I 装置では軸対称性の良いプラズマの回転流 (渦) が形成できるため、プラズマホールのような特異な構造をもつ場合とまたない場合での粘性係数の比較といった興味深い実験も可能である。

(2) 上記目的の遂行のためには信頼性の高い流速計測が不可欠である。そのため、従来用いられてきた DLP だけでなく、絶対値計測が可能なレーザー誘起蛍光 (LIF) ドップラー分光システムの HYPER-I 装置への導入を行い、実験室プラズマにおける流速計測を確立する。

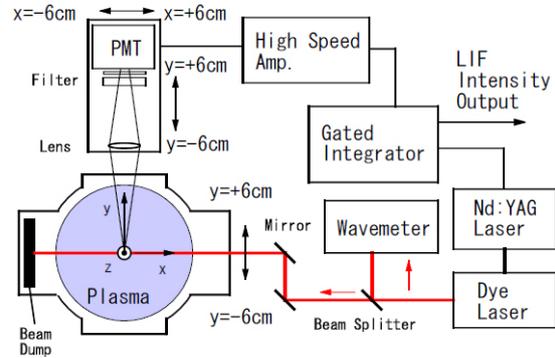
## 3. 研究の方法

(1) プラズマの流れと粘性の間の一般的な関係を導くために、非線形項を含めた流体方程式における力のバランスを考察する。プラズマの運動量の大部分はイオンが担っているため、本研究ではイオン流体方程式を用いて解析を行う。

(2) HYPER-I 装置を用いて実験を行う。特徴的な構造をもたないアルゴンプラズマにおいて、DLP による流速場計測を行う。既設の角度変位可能な径方向駆動機構を用いることで、周方向・径方向流速が計測可能である。得られた流速場とイオン流体方程式の結果を比較することで、プラズマの粘性係数を実験的に決定する。ここで、DLP データの解析には永岡らのモデルを用いる (K. Nagaoka et al., J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 131)。このモデルにおける較正係数  $\alpha$  は、エミッシブプローブを用いたプラズマ電位計測から決定される  $E \times B$  ドリフト速度分布と DLP による流速分布を比較することで決定する。

(3) LIF ドップラー分光法による流速計測を HYPER-I 装置において確立する。プラズマホール構造は主にヘリウムプラズマにおいて研究されてきたが、ヘリウムに対する可視光域の LIF 計測は非常に困難であることが

知られている。1012.36nm のレーザーで励起を行い、320.31nm の蛍光を観測する方法が West Virginia 大のグループにより提案されているが、今までのところ良い結果は得られていない。そこで、本研究ではアルゴンプラズマを用いて実験を行い、アルゴンイオンの準安定状態を利用する。LIF ドップラー分光システムの概略図を以下に示す。



Nd:YAG レーザー励起の波長可変パルス色素レーザーを用いる (30Hz, 60mJ/pulse)。レーザー光はミラー光学系により伝送され、装置側面の石英窓を通してプラズマ中に入射される。ArII の準安定状態を波長 611.49nm のレーザーで励起し ( $3d^2G_{9/2} - 4p^2F_{7/2}$ )、その脱励起時に放射される波長 460.96nm の誘起蛍光 ( $4s^2D_{5/2} - 4p^2F_{7/2}$ ) を観測する。観測には干渉フィルターと光電子増倍管を用い、高速アンプで増幅した信号をゲート積分器にかける。レーザー波長を掃引することで LIF スペクトルが得られ、スペクトルのピークのドップラーシフトから流速が決定される。レーザー光の経路および受光系の位置を変化させることで、アルゴンイオンの流速場が得られる。

## 4. 研究成果

(1) 有限の粘性を考慮したイオンの流体方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \frac{e}{M} [-\nabla \phi + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0] - \frac{1}{Mn} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) - \nu_c \mathbf{v}$$

非線形項も含めて周方向の力のつりあいを考える。定常状態、軸対称性を仮定すると

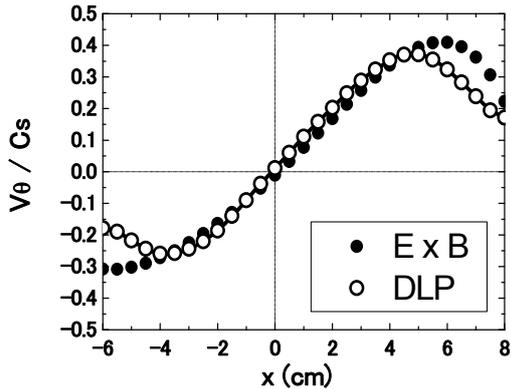
$$\nu_r \left[ \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \right] = -\nu_r \Omega_i + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} \right] - \nu_c v_\theta,$$

この式は、渦度の  $z$  方向成分を用いることで以下の非常に簡単な式に変形できる。

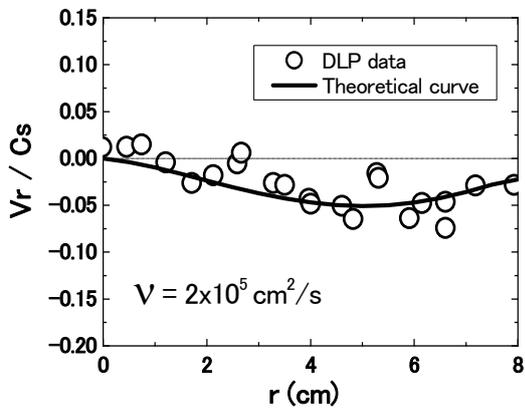
$$\nu_r = \frac{\nu (\partial \omega / \partial r) - \nu_c v_\theta}{\omega + \Omega_i}.$$

この式は径方向流速と粘性係数の関係を示しており、無衝突の場合、径方向の流れは粘性の効果によってのみ駆動されることがわかる。

(2) アルゴンガス圧力  $1.3 \times 10^{-4}$  Torr、マイクロ波パワー 7kW でプラズマを生成し実験を行った。DLP を用いて計測した周方向流速とエミッシブプローブによる電位計測から決定した周方向の  $E \times B$  ドリフト速度の径方向分布を比較することで DLP の較正係数を決定した。結果を下図に示す。ここで、縦軸はイオン音波速度で規格化されている。



較正係数  $\alpha = 0.53$  で両者は良く一致する。径方向流速の決定にもこの較正係数を用いる。この周方向流速分布から、z 方向の温度分布も決定することができる。DLP で計測した径方向流速とイオン流体方程式から得られる理論値の比較を下図に示す。

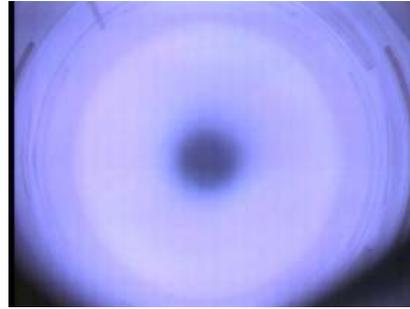


実効的粘性係数を  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$  とすることで両者は良く一致する。衝突により決定されるこのプラズマの古典的粘性係数は  $3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$  である。従って、本実験により、このプラズマの粘性は古典粘性より 2 桁程度大きな異常粘性であるといえる。

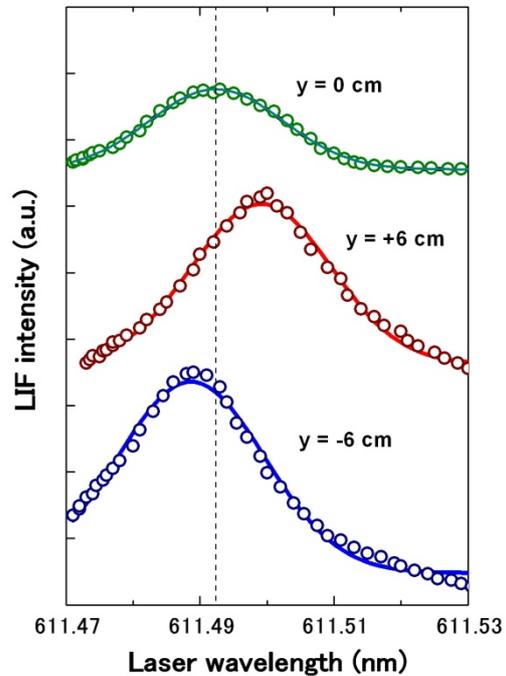
本研究ではイオンの流体方程式を用いたが、プラズマの運動を記述する方程式としては一流体的な MHD 方程式も考えられる。MHD 方程式を用いた場合、径方向流速と粘性の関係式に修正が加わり、z 方向の温度が 0 となる点で径方向流速が発散するという問題が

現れる。MHD 的な記述による径方向流と粘性の関係については、今後さらに研究を進める必要がある。

(3) アルゴンプラズマ中に自発的に形成されるプラズマホールの CCD 画像を以下に示す。



中心部の暗い領域は、密度が周辺部の 1/10 程度の密度ホールとなっている。このプラズマホールに対してレーザー光入射位置を変えて取得した LIF スペクトルを下図に示す。



レーザー光がプラズマホールの中心を通る  $y=0 \text{ cm}$  の場合と比べて、 $y=\pm 6 \text{ cm}$  のスペクトルには明らかなドップラーシフトが観測された。しかしながら、LIF 計測による周方向流速には DLP 計測との不一致が見られた。分布関数を直接計測できる狭帯域の半導体レーザーを用いた LIF 計測の結果と比較し、スペクトルのガウス分布からのずれ等を考慮して、今後さらに解析を進める必要がある。

##### 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6件)

- ① 吉村信次、岡本敦、田中雅慶、Measurement of Ion Flow Velocity Field Associated with Plasma Hole Using Laser Induced Fluorescence Spectroscopy、*to be published in Journal of Plasma and Fusion Research Series*、2009年、査読有(掲載確定)
- ② 吉村信次、岡本敦、田中雅慶、Laser Induced Fluorescence Measurement of He/Ar Mixture Plasma Hole、*Proceedings of Plasma Science Symposium 2009 / The 26<sup>th</sup> Symposium on Plasma Processing*、126-127、2009年、査読無
- ③ 田中雅慶、吉村信次、Quasi-neutrality Breaking in a Rotating Plasma、*IEEE Transactions on Plasma Science*、36巻、1224-1225、2008年、査読有
- ④ 田中雅慶、荒巻光利、荻原公平、江藤修三、吉村信次、Jovo Vranjes、Vortex Formation in a Plasma Interacting with Neutral Flow、*FRONTIERS IN MODERN PLASMA PHYSICS* edited by P. K. Shukla, B. Eliasson, and L. Stenflo (AIP Press)、57-65、2008年、査読無
- ⑤ 吉村信次、田中雅慶、Viscosity Estimation Utilizing Flow Velocity Field Measurement in a Rotating Magnetized Plasma、*Proceedings of the 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator / Heliotron Workshop 2007 (NIFS-PROC Series)*、69巻、238-241、2008年、査読無
- ⑥ 荻原公平、江藤修三、荒巻光利、吉村信次、田中雅慶、LIF Measurement of Neutral Flow Using a Tunable Diode Laser、*Proceedings of the 13th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (NIFS-PROC Series)*、68巻、92-95、2007年、査読無

〔学会発表〕(計11件)

- ① 吉村信次、LIF法による密度ホールを伴うプラズマ渦(プラズマホール)の速度場計測、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月30日、立教大学
- ② 吉村信次、He/Ar混合プラズマホールのLIF計測、プラズマ科学シンポジウム2009、2009年2月2日、名古屋大学
- ③ 吉村信次、ピラミッド型プローブを用いたプラズマ流速計測、第25回プラズマ・核融合学会、2008年12月4日、栃木県総合文化センター
- ④ 吉村信次、Laser Induced Fluorescence Measurement of Plasma Hole in a Helium

Plasma with Argon Impurity、第50回米国物理学会プラズマ物理分科会(APS-DPP2008)、2008年11月19日、ダラス・ハイアットリージェンシー(米国)

- ⑤ 吉村信次、軸対称円柱磁化プラズマにおける径方向流と粘性、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月23日、岩手大学
- ⑥ 吉村信次、Measurement of Ion Flow Velocity Field Associated with Plasma Hole Using Laser Induced Fluorescence Spectroscopy、プラズマ物理に関する国際会議2008(ICPP2008)、2008年9月9日、福岡国際会議場
- ⑦ 岡本敦、レーザー誘起蛍光法を用いたプラズマホールの流れ場計測、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月23日、近畿大学
- ⑧ 吉村信次、磁化プラズマ中におけるプラズマホール形成、第24回プラズマ・核融合学会年会、2007年11月28日、イーグレ姫路
- ⑨ 吉村信次、Evaluation of Kinematic Viscosity of Rotating Cylindrical Plasmas Using Flow Velocity Profile Measurements、第49回米国物理学会プラズマ物理分科会(APS-DPP2007)、2007年11月14日、オーランド・ローゼンセンターホテル(米国)
- ⑩ 吉村信次、Viscosity estimation utilizing flow velocity field measurements in a rotating magnetized plasma、第17回国際土岐コンファレンス(ITC-17)、2007年10月16日、セラトピア土岐
- ⑪ 吉村信次、プラズマホールの流れ構造における遠心力と異常粘性の寄与、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 信次 (YOSHIMURA SHINJI)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：50311204

(2) 研究分担者

( )  
研究者番号：

(3) 連携研究者

( )  
研究者番号：