



解説

直線磁化プラズマを用いたプラズマ乱流研究の新展開

New Developments on Plasma Turbulence Research
with Linear Magnetized Plasma

文 贇 鎬

MOON Chanho

九州大学応用力学研究所

(原稿受付：2024年7月30日)

九州大学のPANTA装置では、プラズマの乱流輸送機構を解明するための研究が進められており、長年にわたり乱流揺動の振る舞いや非線形相互作用の理解をめざした基礎研究が活発に行われてきた。最近、新しい計測法としてボールペンプローブ法が導入され、プラズマ空間電位のより詳細な測定が可能となった。さらに、イオンスケールの揺動が関わる熱・粒子輸送を研究するために、大口径プラズマソースの増設も行われた。既存のプラズマソースと反対の位置に設置された新プラズマソースはアパーチャー (aperture) によりプラズマ径を制御することが可能で、最大でプラズマ径を2倍程度拡大することができる。これらのPANTA装置のアップグレードにより、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける乱流輸送の機構解明および新しい乱流制御手法の開拓が期待できる。計測や制御の観点から、プラズマ乱流研究の新しい展開に繋がるものと考えられる。

Keywords:

ball-pen probe, plasma space potential, plasma instability, linear magnetized plasma, aperture source

1. はじめに

磁化プラズマにおける熱及び粒子の乱流輸送機構の解明とその制御は、経済的な核融合発電実現の観点から、磁場閉じ込め核融合研究における重要課題として盛んに研究が行われている[1-12]。多くのプラズマ閉じ込め装置では、クーロン衝突に基づく古典及び新古典輸送理論の予測をはるかに上回る“異常乱流輸送”による閉じ込め性能の劣化が観測されており、その原因の解明が求められている。

これまでに、異常乱流輸送の説明として、ドリフト波 (Drift-wave) モード駆動[13, 14]の乱流が提案されているが、このイオン輸送は乱流によって自己組織化される帯状流 (メゾスケール) によって抑制されることも明らかになっている[15-18]。一方、プラズマ乱流輸送の理論では、ドリフト波モードとマクロスケール揺動との非線形相互作用によってもプラズマ輸送が増大されることが明らかになった[19]。即ち、プラズマ乱流輸送に対するドリフト波モードと帯状流の寄与は独立ではなく、最終的にはマイクロスケール及びメゾ・マクロスケールの揺動間の非線形相互作用[20-27]によって輸送が決定されると予測されている。しかしながら、通常の磁化プラズマ実験では、シミュレーション結果のような乱流場全域を局所的かつ精密に調査することは困難であり、マルチスケール揺動間の非線形相互作用と熱・粒子輸送の発現機構を詳細に調査することができなかった。このような背

景のもと、これまでPANTA直線装置で得られた実験結果[28-56]に基づき、我々はマルチスケール揺動間の非線形相互作用による乱流輸送の発現機構を総合的に解明することをめざした装置開発を進めている。

本解説記事では、ボールペンプローブによるプラズマ空間電位の直接計測ならびにプラズマ径を制御可能なプラズマソースの増設について、開発の動機を含めて初期結果を紹介する。

2. プラズマの空間電位の直接測定法

プラズマ乱流研究を行う上で空間電位は非常に重要なパラメーターである。特に、プラズマ乱流揺動の抑制機構などを調べる際に、正確なプラズマ空間電位を通じて電場を求めることができれば、プラズマ乱流揺動の挙動を詳細に解析することが可能となる。プラズマ空間電位の測定方法としては、HIBP (重イオンビームプローブ)[57]やエミッシブプローブ[58]などが一般的に使用されているが、HIBPは適用可能なプラズマ条件が限られており、エミッシブプローブは電圧を印加して空間電位を測定するため、低擾乱な乱流計測が困難といった課題がある。そのため、プラズマ乱流揺動の非線形的挙動を研究するために、欧州で主に使用されているボールペン (Ball-Pen) プローブ[59-65]を九州大学のPANTA装置に初めて設置して初期実験を行った。

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, 816-8580, Japan

author's e-mail: moon@riam.kyushu-u.ac.jp

2.1 Ball-penプローブ法の原理

図1にボールペン (BP) プローブの概略図を示す. BPプローブは, イオンのラーモア半径が電子に比べて格段に大きいことを巧みに利用して, イオンのみを分離捕集することによって, プラズマ中の空間電位 ϕ_s を直接計測する. 高温プラズマではタングステンをコレクターに用いる事が多いが, 低温プラズマではステンレス網を用いることができる. 絶縁体にはセラミック系の材料を用いる. コレクターの深さ h は, イオンラーモア半径程度とするのが一般的である. PANTAでのBPプローブ実験結果については後述する.

図2にBPプローブのI-V特性を示す. 典型的な静電プローブにおける空間電位 ϕ_s と浮遊電位 ϕ_f の関係は, 次の式で与えられる.

$$\phi_s = \phi_f + \alpha T_e \quad \text{with} \quad \alpha = \ln(R) = \ln(I_{sat}^- / I_{sat}^+) \quad (1)$$

ここで $R = I_{sat}^- / I_{sat}^+$ は, 電子とイオン飽和電流の比を表す(アルゴンArの場合 $\alpha \approx 4 \sim 5$ [66]). BPプローブは, ラーモア半径が電子に比べて格段に大きいことを利用して, イオンのみを分離捕集することによって $I_{sat}^- / I_{sat}^+ \approx 1$ とすることができる. このとき(1)式において $\alpha = 0$ となるため, BPプローブの浮遊電位が空間電位を示すことになる.

近年, 欧州の様々な核融合実験装置でBPプローブが導入され熱流束に関する研究に利用されている. トカマク・

ステラレーター・直線装置でのBPプローブの適用例を表1にまとめた. 主に比較的強磁場かつ低密度プラズマの条件下で使用されることがわかる.

2.2 Ball-penプローブの活用

図3(a)にPANTAで開発されたBPプローブを示す. BPプローブは直径3.2 mmのステンレス電極と内径4 mmのセラミックチューブで構成されており, 電極はセラミックチューブ内を移動して, 約0.01 mmの分解能(電極深さ)で調整可能である. またBPプローブの両脇には静電プローブ(LP)が設置されており, ϕ_f を測定することが可能である. 図3(b)にイオン飽和電流 I_{sat}^+ で規格化したBPプローブのI-V特性の電極深さ(h)依存性を示す. BPプ

表1 BPプローブの動作条件と設計仕様の概要[67].
[* Device has not official name, the city / author is used as name.]

Device (Type)	B range [mT]	Density range [m ⁻³]	Electron Temperature [eV]	Collector diameter [mm]	Tube width [mm]
Asdex-U (Tokamak)	Toroidal field 2500	edge 10 ¹⁹ - 10 ²⁰	Edge (H-mode) 100-1000	4	Inner diameter 6
Compass (Tokamak)	Toroidal field 1150	2 - 9 × 10 ¹⁹	10-100	2	Inner diameter 5
Castor (tokamak)	Toroidal field 1300	~10 ¹⁸	10	4	-
ISSTOK (Tokamak)	Toroidal field 500	~10 ¹⁹	10-30	3	-
MAST (s.tokamak)	500	3 - 8 × 10 ¹⁸	-	1.5, 4	-
Torsatron TJ-K (Stellarator)	72	~10 ¹⁷	10	1	0.5
Mirabelle (Linear)	5 - 80	10 ¹⁶ - 10 ¹⁷	1-7	0.3, 0.6, 1	0.3, 0.4, 1
Harris* (chamber)	Up to 500	0.7 - 7 × 10 ¹⁶	~2.7	2, 3.9	1
Ljubiana* (linear)	7 - 20	10 ¹⁴ - 10 ¹⁵	2	1.5, 0.4, 0.2	Inner diameters 2, 0.55, 0.3
Praga* (magnetron)	40	10 ¹⁶ - 10 ¹⁷	-	1.2, 0.8	2, 1.5

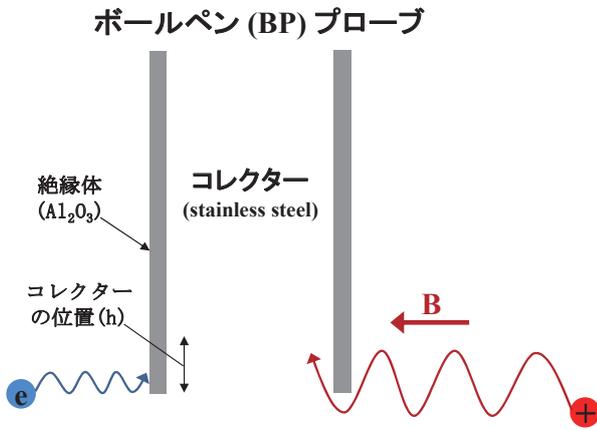


図1 ボールペン (BP) プローブの概略図.

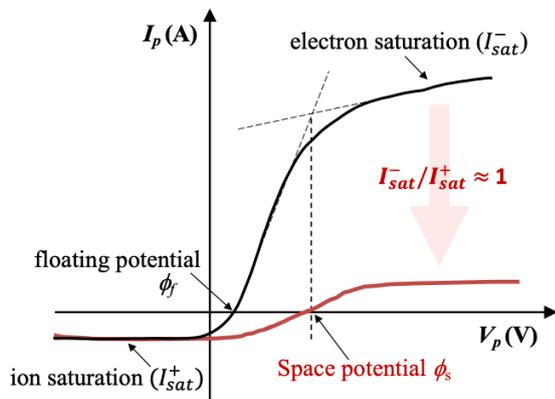


図2 BPプローブ特性 (プラズマイオンのみを分離捕集できた場合, 黒線が赤線に変わる).

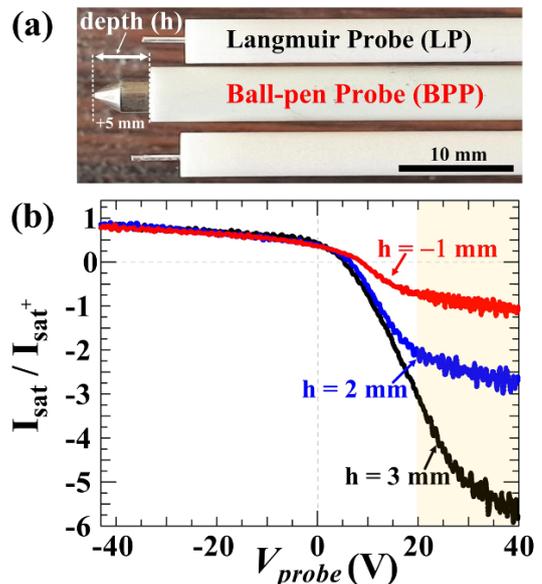


図3 PANTA装置における(a)BPプローブと(b)BPプローブのI-V特性のコレクター深さ h の依存性.

ローブのI-V特性の電子飽和電流 I_{sat}^- は、 $h = -1$ mm の場合が $h = 3$ mm と比較して約7分の1に著しく減少することが明らかになった。さらに、電極の深さが -1.0 mm の場合、 $\ln(R)$ は最小値 (約1) になり、BPプローブの ϕ_f 値が ϕ_s を表すと考えられる。

図4にBPプローブの電極深さ h の依存性を調査した結果を示す。BPプローブの h 値が約 -0.5 mm の場合に $|R| = |I_{sat}^-/I_{sat}^+|$ が1に近い最小値を示す。上で述べたように、この時の浮遊電位がプラズマ空間電位と等しくなる。また、BPプローブの電極深さの依存性については、 h 値の変化によって $|R|$ が単調に変化せず、 $|R|$ が最小となった後に再び大きくなる傾向が観測された。この結果は、他の実験装置のBPプローブでも確認されており、プラズマ粒子の $E \times B$ ドリフトの影響によるものと考えられる [68]。

図5(a)および5(b)は、PANTAプラズマの周辺部 ($r = 2.5$ cm が半径に対応) においてBPプローブで計測した空間電位と電子温度を示す。静電プローブLPのI-V曲線から得られたプラズマ空間電位と電子温度の値をBPプローブから直接得られた結果と比較した。BPプローブから電子温度を求める際には式(2)を用いている。

$$T_e = (V_{Bs} - V_{Lf}/\alpha_{LP} - \alpha_{BPP}) \quad (2)$$

ここで V_{Bs} および V_{Lf} は、BPプローブの空間電位およびLPの浮遊電位を示し、 α_{LP} および α_{BPP} は $\alpha = \ln(R)$ を示す。

$r > 3$ cm では空間電位と電子温度どちらも実験誤差の範囲で概ね一致していることが確認できた。LPと異なりBPプローブは電圧掃引を必要としない手法であり、プラズマの空間電位と電子温度を低擾乱で計測可能な方法の確立に成功した。しかし、磁化プラズマのホールパラメータ (β) が1未満の領域 (プラズマ半径位置 $r < 3$ cm) では、

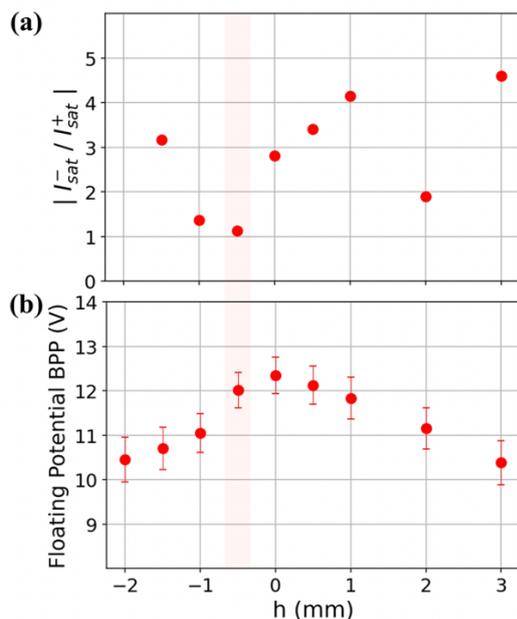


図4 BPプローブにおける(a)イオンと電子飽和電流比と(b)浮遊電位のコレクター深さ h の依存性。

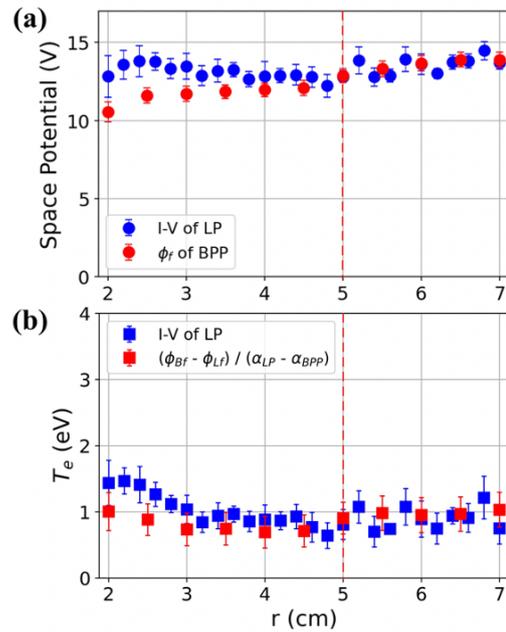


図5 BPプローブとLPのI-V曲線から求めた(a)プラズマの空間電位(b)電子温度の比較。

BPプローブと静電プローブで得られたプラズマ空間電位の差が拡大しており、BPによるプラズマ電位の測定が困難になることが明らかとなった。ここでのホールパラメータ β は、電子のジャイロ周波数と電子と重粒子 (イオンや中性粒子) の衝突周波数の比率として定義される。今後は、これまでPANTAで蓄積された実験結果に基づいて多チャンネルBPプローブの設計・製作を行い、電場および電場揺動を得る計画である。また、揺動乱流が駆動する熱流束・粒子束の定量的な評価も予定している。

3. PANTA直線装置のアップグレードと最近の成果

近年、直線装置PANTAでは、異常な乱流輸送を引き起こす物理機構の解明をめざして磁化プラズマ中のマルチスケール乱流揺動とそれらの非線形相互作用に焦点を当てた研究を開始した。このような取り組みを進めるに当たっては磁化プラズマ中における乱流の空間構造を3次元で詳細に解析し、また熱流束と粒子束の時間発展を2次元で追跡 (合計4次元の情報) することが必要である。そのような研究を可能とするための装置改良を進めている。PANTA装置は均一な磁場中に半径5 cmの円筒状ヘリコン波プラズマを生成 (中心電子温度2-3 eV, 中心電子密度 $0.5-1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) 可能だが、プラズマサイズの小ささから磁化プラズマ中で支配的なイオンスケール (約1 cm) の揺動やドリフト波モードとの非線形相互作用などを大域的に評価することは困難であった。そこで、これまでよりも2倍の大きさ (半径10 cm) の大きさを持つプラズマソースを新しく設置した (図6の大口径ソース)。図6下部に示すように、大口径ソースはアパーチャーを有しておりプラズマの半径を大気側から制御することが可能である。アパーチャーにより、プラズマの直径を最大180 mmから77 mmまで調節することができる。新しく整備した大口径プラズマソースの外観を図7(左)に示す。

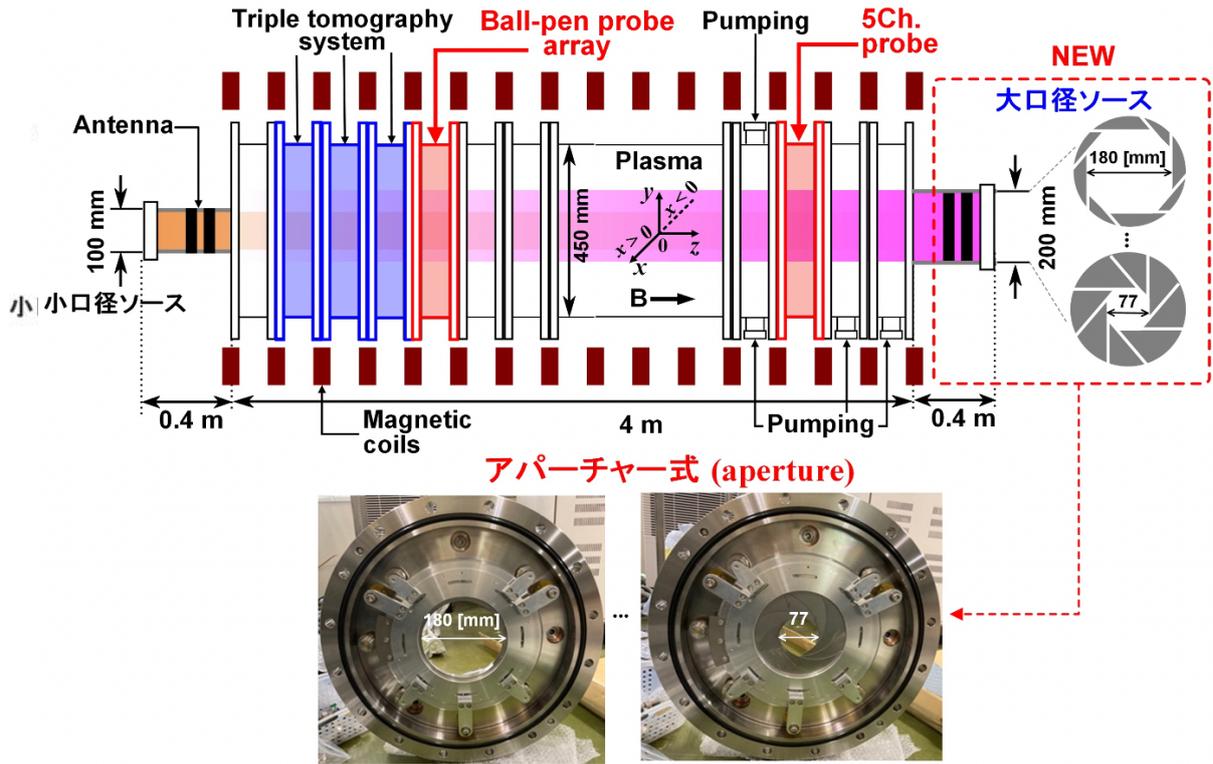


図6 PANTA装置のアップグレードの概略(上)と新プラズマソースの開口部(アパーチャー式)の写真(下)。

PANTAでは高周波によりプラズマを生成するため、放電部である石英管をメッシュ付きのシールドで覆っている。図7(右)から、アパーチャーを調節することによってプラズマの径が制御されている様子がわかる。

アパーチャーの径を変更することでプラズマ空間分布がどのように変化するかを調べるため、10 MHzのヘリコン波プラズマを使って実験を行った。実験の条件は、磁場が1000 G, Arガス圧が0.13 Pa, 入射RFパワーが3 kWである。また、5チャンネルプローブを用いてプラズマ密度と浮遊電位の径方向分布を測定した。図8に示すのは、アパーチャー開口部を113 mm, 153 mm, および180 mmとした際のプラズマ密度の空間分布である。図の点線はアパーチャーの半径に対応している。プラズマ直径が180 mmの場合と153 mmの場合を比較すると、プラズマ密度の値や分布が維持されたままプラズマのサイズが30 mm程度制御されていることがわかる。しかし、

113 mmの場合には径方向分布に違いが見られる結果となった。

図9には、プラズマの浮遊電位の径方向分布を示す。アパーチャーによるプラズマ直径の変更によって、プラズマ密度と異なり、浮遊電位の空間分布も変化する様子が観測された。浮遊電位は乱流による粒子の径方向輸送と関わると考えられ、プラズマ径の変化に対応してプラ



図7 新しいプラズマ源(右)と開口部サイズの変化による実際のプラズマ放電(左)。

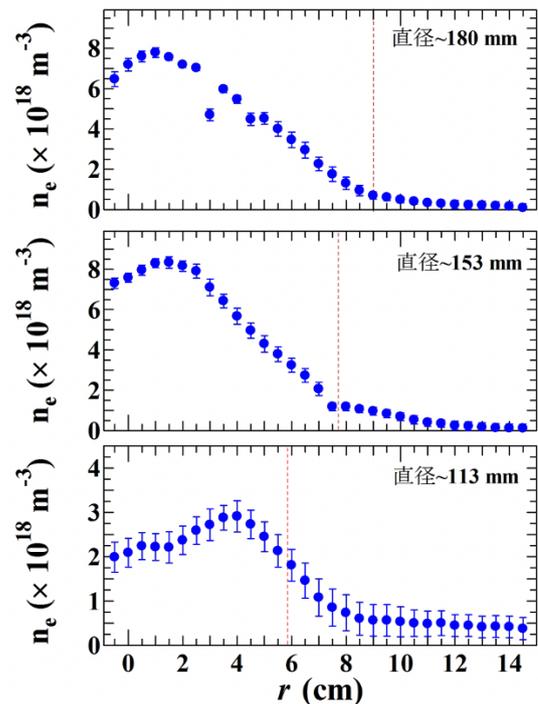


図8 開口部の変化によるプラズマ密度の径方向分布。

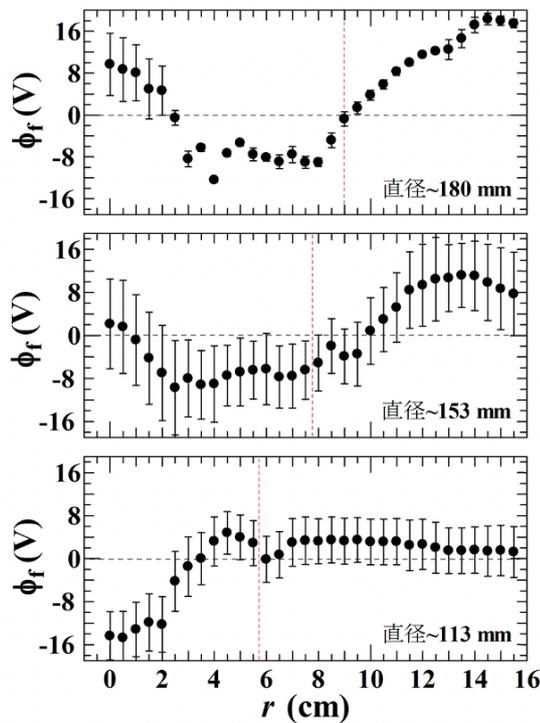


図9 開口部の変化によるプラズマ浮遊電位の径方向分布。

プラズマの粒子輸送にも変化が生じているものと考えられる。初期的な結果ではあるものの、アパーチャーを調整することによってプラズマ径が制御可能であることを確認した。プラズマの大口径化はイオンスケール（約1 cm）の揺動を研究する上で重要な成果であり、非線形プラズマ乱流の実験研究における新しい展開に繋がるものと期待される。

4. まとめ

単純な磁場構造を持つ直線プラズマは乱流揺動に関する物理研究を進める上で多くの利点がある。プラズマ空間電位は乱流による粒子輸送を理解するためのキーパラメータの一つであり、多くの診断法が提案され使用されている。その中でも、電圧掃引を必要とせず、プラズマ乱流揺動を研究するのに適した診断法としてボールペンプローブが注目されている。PANTAにおいてもボールペンプローブを用いた計測を開始した。ボールペンプローブの初期実験結果に基づき、プラズマ乱流揺動による熱流束などを測定するための多チャンネルボールペンプローブの開発を計画している。また、従来の2倍の直径を持つプラズマを生成可能な大口径プラズマソースを増設した。大口径プラズマソースはアパーチャーを有しており、アパーチャーを調節することでプラズマ径を大気側から制御することができる。新たに設置したプラズマソースを用いた初期実験を行い、アパーチャーの開口部を調節することでプラズマのサイズとともに密度と浮遊電位の径方向分布を制御できることを確認した。ボールペンプローブとアパーチャー式大口径プラズマソースを組み合わせることにより、イオンスケールの揺動が駆動する熱・粒子輸送の研究、またイオンスケール揺動を含むマルチスケール揺動の非線形相互作用に関する研究のさらなる

発展が期待できる。

謝辞

PANTA プラズマの実験に際し、多くのご支援を賜りました九州大学の藤澤彰英教授、京都大学の稲垣滋教授に心より感謝申し上げます。また、九州大学の技術職員である新谷一朗氏と牟田口高史氏、ならびに研究室の大学院生の皆様にも多大なるご協力をいただき、深く感謝いたします。特に、本原稿の作成にあたり、準備と日本語の添削をしてくださった東北大学の高橋宏幸講師に、心より感謝申し上げます。研究の一部は、JSPS 科研費(19K23426, 21K13898) およびNIFS 共同研究 (NIFS22KUTR168, NIFS22KIIH001)、ならびに九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] W. Horton, *Turbulent Transport in Magnetized Plasmas* (World Scientific Publishing, Singapore, 2012).
- [2] K. Itoh *et al.*, *Transport and Structural Formation in Plasmas* (IOP, Bristol, 1999).
- [3] K. Ida *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 085003 (2003).
- [4] F. Ryter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5498 (2001).
- [5] M. Erba *et al.*, *Nucl. Fusion* **38**, 1013 (1998).
- [6] W. Dorland *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 5579 (2000).
- [7] P.H. Diamond *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4842 (2000).
- [8] R.A. Moyer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 135001 (2001).
- [9] A. Jacchia *et al.*, *Nucl. Fusion* **42**, 1116 (2002).
- [10] E. Asp *et al.*, *Phys. Plasmas* **15**, 082317 (2008).
- [11] S.K. Mattoo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 255007 (2012).
- [12] X. Wei *et al.*, *Phys. Plasmas* **17**, 042108 (2010).
- [13] W. Horton, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 735 (1999).
- [14] T. Kaneko *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 125001 (2003).
- [15] Z. Lin *et al.*, *Science* **281**, 1835 (1998).
- [16] A. Fujisawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 165002 (2004).
- [17] P.H. Diamond *et al.*, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **47**, R35 (2005).
- [18] A. Fujisawa, *Nucl. Fusion* **49**, 013001 (2009).
- [19] S.-I. Itoh and K. Itoh, *Nucl. Fusion* **53**, 073035 (2013).
- [20] S.-I. Itoh and K. Itoh, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **43**, 1055 (2001).
- [21] F. Jenko, *J. Plasma Fusion Res. Ser.* **6**, 11 (2004).
- [22] Y. Nagashima *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 095002 (2005).
- [23] S. Inagaki *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 115001 (2011).
- [24] K. Itoh *et al.*, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **54**, 095016 (2012).
- [25] C. Moon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 115001 (2013).
- [26] C. Moon *et al.*, *Phys. Plasmas* **22**, 052301 (2015).
- [27] C. Moon *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **58**, 105007 (2016).
- [28] 永島芳彦, 荒川弘之: *プラズマ・核融合学会誌* **88**, 315 (2012).
- [29] 藤澤彰英 他: *プラズマ・核融合学会誌* **95**, 391 (2019).
- [30] 伊藤早苗 他: *プラズマ・核融合学会誌* **96**, 225 (2020).
- [31] 稲垣 滋: *プラズマ・核融合学会誌* **99**, 456 (2023).

- [32] Y. Nagashima *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 063501 (2015).
- [33] T. Kobayashi *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 112301 (2015).
- [34] A. Fujisawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **10**, 1201080 (2015).
- [35] A. Fujisawa *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 25005 (2016).
- [36] S. Inagaki *et al.*, Sci. Rep. **6**, 22189 (2016).
- [37] T. Kanzaki *et al.*, Plasma Fusion Res. **11**, 1201091 (2016).
- [38] T. Kobayashi *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 102311 (2016).
- [39] S. Ohdachi *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **823**, 012009 (2017).
- [40] T. Kobayashi *et al.*, Plasma Fusion Res. **12**, 1401019 (2017).
- [41] K. Hasamada *et al.*, Plasma Fusion Res. **12**, 1201034 (2017).
- [42] K. Yamasaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **88**, 093507 (2017).
- [43] K. Tomita *et al.*, Plasma Fusion Res. **12**, 1401018 (2017).
- [44] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Plasmas **26**, 012305 (2019).
- [45] F. Kin *et al.*, Phys. Plasmas **26**, 042306 (2019).
- [46] B. Zhang *et al.*, Plasma Fusion Res. **14**, 1201121 (2019).
- [47] H. Arakawa *et al.*, IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng. **14**, 1450 (2019).
- [48] B. Zhang *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **61**, 115010 (2019).
- [49] K. Yamasaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **91**, 33502 (2020).
- [50] I. Marui *et al.*, Plasma Fusion Res. **15**, 1201018 (2020).
- [51] T. Kobayashi *et al.*, Phys. Plasmas **27**, 62309 (2020).
- [52] C. Moon *et al.*, Sci. Rep. **11**, 3720 (2021).
- [53] T.-K. Kobayashi *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **63**, 32001 (2021).
- [54] D. Nishimura *et al.*, J. Appl. Phys. **129**, 093301 (2021).
- [55] Y. Kawachi *et al.*, Sci. Rep. **12**, 19799 (2022).
- [56] T.-K. Kobayashi *et al.*, Sci. Rep. **14**, 12175 (2024).
- [57] T. Ido *et al.*, Plasma Fusion Res. **2**, S1100 (2007).
- [58] J.P. Sheehan and N. Hershkowitz, Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 063001 (2011).
- [59] J. Adámek *et al.*, Czech. J. Phys. **54**, C95 (2004).
- [60] J. Adámek *et al.*, J. Nucl. Mater. **390-391**, 1114 (2009).
- [61] G. Boussetin *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **84**, 013505 (2013).
- [62] J. Adámek *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **53**, 39 (2013).
- [63] J. Adámek *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 043510 (2016).
- [64] B.J. Harris *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **28**, 055018 (2019).
- [65] G. Grenfell *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93**, 023507 (2022).
- [66] F.F. Chen, Lecture notes on IEEE-ICOPS meeting (2003).
- [67] D. DiMatteo (2024). "Direct measurement of space potential and fluctuations by using a ball-pen probe in a linear helicon plasma", イタリアミラノ工科大学修士論文.
- [68] S. Murphy-Sugrue *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 055007 (2017).



ムン チャン ホ
文 贊 鎬

九州大学応用力学研究所准教授。2014年東北大学大学院工学研究科、博士（工学）修了。学生時代から主にプローブを用いたプラズマ揺動の研究に取り組んできましたが、現在も研究室の学生たちと共に楽しくプラズマ揺動の研究を続けています。最近、長期間にわたる研究を続けるためには健康が重要であることに気づき、少しずつランニングを始めました。