

静電プローブ計測の基礎と応用

田中宏彦

名古屋大学





氏名:田中 宏彦

- 2011.3 名古屋大学 博士課程 修了
- 2011.4-2016.8 核融合科学研究所 助教
- 2016.9-現在 名古屋大学 助教

専門: 核融合周辺・ダイバータプラズマ

研究対象(実験解析・シミュレーション) NAGDIS-II, LHD, GAMMA 10/PDX, JT-60(U/SA), Magnum-PSI



目次

- 予備知識
- 計測の基礎・理論
- 解析のデモンストレーション
- 使用する<u>ハードウェア</u>
- ・応用(条件付き平均計測)

平易さを優先して、多少正確性に 欠ける表現もあるかと思いますが ご了承下さい。。

参考書:高村秀一『プラズマ理工学入門』(森北出版,1997).

予備知識①:速度分布関数

プラズマ粒子の速度分布は"多くの場合"マクスウェル分布に従う





1荷のイオン(密度 n_i ,速度 v_i)と電子(密度 n_e ,速度 v_e)が 空間中を動くとき





計測の基礎・理論



静電プローブ計測とは

- 最も基本的なプラズマ計測手法
- ラングミュア(Langmuir)プローブ法とも呼ばれる
- プラズマ中に電極(探針)を直接挿入
- 電流(I_p)と電圧(V_p)の依存性(電流-電圧特性)からパラメータを評価

◎利点:簡便、高感度、高空間分解、高時間分解(電圧固定時)
△欠点:プラズマへの擾乱、高熱負荷環境で使用難





測れるパラメータは?

- 電子温度 T_e
- 電子密度 n_e
- 浮遊電位 V_f
- プラズマ(空間)電位 V_s
- フロー速度
- イオン温度
- etc...

計測したい条件やパラメータによって 様々な形状の静電プローブがある



雨宮宏他: プラズマ・核融合学会誌 81 (2005) 482.

Redeedeebee

^{lon} collector

auard electrode

Y. Hayashi et al., Plasma Fusion Res. 14 (2019) 1202135.

On

lectron

-シングル(1芯)プローブの典型的な電流-電圧特性



プラズマ電位より十分にV_pが高い/低いとき







V。がV。より少し小さいとき



V_p変化時のイオン電流I_iの変化は電子電流I_eの変化より十分小さい ⇒① I_i成分を直線フィッティングして除くことでI_e成分を抜き出せる

I_eはV_pの低下に応じて指数関数的に減少 ―――→ ⇒② 片対数プロットの傾きの逆数からT_eを評価できる

$$I_e \propto \exp\left(\frac{eV_p}{kT_e}\right) \quad \therefore \log(I_e) \propto \frac{e}{kT_e \text{ [K]}} V_p = \frac{V_p}{T_e \text{ [eV]}}$$





電子飽和電流・イオン飽和電流









↓ Matlabサンプルプログラムおよびデータ

http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/plaene/member/tanaka/kisopla/



解析結果の一例

Isat=6.71 [mA] / Iesat=222 [mA] Te=4.42 [eV] / ne_Isat=18.6 [E18m-3] / ne_Iesat=10.9 [E18m-3] Vf=-23.5 [V] / Vs_fitting=-6.57 [V] / Vs_theory=-5.65 [V]





静電プローブ本体:高速掃引プローブ



1次元軌道上のパラメータを連続計測可能 大型装置で主に使用



https://www.nifs.ac .jp/itc/itc17/file/PD F_proceeding/I-05 asakura.pdf



H. Tanaka et al., J. Nucl. Mater. 463 (2015) 761.

静電プローブ本体:設置型プローブ



T. Yamada et al., Nat. Phys. 4 (2008) 721.

多チャンネル同時計測により空間分布を取得
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 クロススペクトル
 ・
 ・
 条件付き平均
 etc...





計測系の基本構成:抵抗

<u>シングルプローブ回路例</u>



- <u>一般的な必要物品</u>
- 〇 抵抗
- ケーブル・コネクタ
- アナログ/デジタル変換器(ADC)
 電源・ファンクションジェネレータ

<u>選定項目*</u>

- ・抵抗値(≪1MΩ)
- ・定格電力(超えたときの壊れ方)
- ·温度係数
- ・インダクタンス有無(巻線型注意)

*自分で選ぶ場合の要確認項目





online.com/web/p/through-

hole-fixed-resistors/1644780/

https://jp.rs-

<u>大電力フィルム</u> 抵抗





https://jp.rsonline.com/web/p/throughhole-fixed-resistors/8644061/

https://www.marutsu.co.jp/pc/i/28903804/



計測系の基本構成:ケーブル

<u>シングルプローブ回路例</u>



BNCケーブルは自作もできるが買ったほう が安くて安心(ただし相性が悪い場合もあ るので大量発注は少量確認後が無難)

知る限り最安(2m)↓ 税抜550円/本 税抜472円/本(50本購入時)



https://jp.rs-online.com/web/p/coaxial-cable/1222144/

- <u>一般的な必要物品</u>
- 〇 抵抗
- ケーブル・コネクタ
- アナログ/デジタル変換器(ADC)
 電源・ファンクションジェネレータ





https://www.cablingol.net/homewiring/BNCF-BNCF-50.php



https://www.cablingol.net/homewiring/BNCM-BNCF-T-50.php



計測系の基本構成:AD変換器

<u>シングルプローブ回路例</u>





"非絶縁ADC"を電源上流に接続すると 回路が地絡し大電流が流れて危険

絶縁ADC(例:横河 720254、日置 8968) または絶縁アンプ(例:NF P-62A)を使用、 あるいは電源と抵抗の位置を入れ替える

https://tmi.yokogawa.com/jp/solutions/products/accessori es/modules/4-ch-1ms-16-bit-isolation-module-720254/

- <u>一般的な必要物品</u>
- 〇 抵抗
- ケーブル・コネクタ
- アナログ/デジタル変換器(ADC)
 電源・ファンクションジェネレータ

<u>選定項目</u>

- ・対地/ch間絶縁の有無
- ·最大測定電圧(印可電圧以上)
- ・サンプリング周波数、帯域
- ・分解能(理想は14-16bit) etc...



測定範囲に収まるように、かつ あまり小さすぎないように測定 レンジを設定する



計測系の基本構成:電源





9

H. Tanaka et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62** (2020) 075011.

直線装置で観測される非拡散的輸送現象



高速カメラ動画 128x256pixel (~54x108mm²) Probe 30000fps P=11mTorr B=0.05T Plasma column e B $E_r x B$ direction \int_{-20mm}

下流側の<u>写真</u>

装置



H. Tanaka et al., CPP **50** (2010) 256. H. Tanaka et al., CPP **52** (2012) 424.

2本の静電プローブによる同時計測





条件付き平均計測の手順

2次元プローブ各位置に対し...





解析結果の一例





まとめ

• 静電プローブの基礎~応用までについてを紹介

○ 簡便・高感度・高空間分解能
 ⇒多点同時計測が容易・・・統計解析と相性◎
 △ 精度はほどほど(フィッティングによるばらつき)
 × プラズマを乱す、高熱負荷環境では適用に難

静電プローブは1億度の炉心プラズマ計測には適用できないものの、 基礎・応用研究/小型装置や周辺・ダイバータプラズマの研究では 今後も大いに活躍するものと考えています

ご清聴ありがとうございました