

ポッケルスセンサを用いた高速プラズマ流中の エミッシブプローブ特性の変化の測定

東大新領域

渡邊 将

本研究の背景

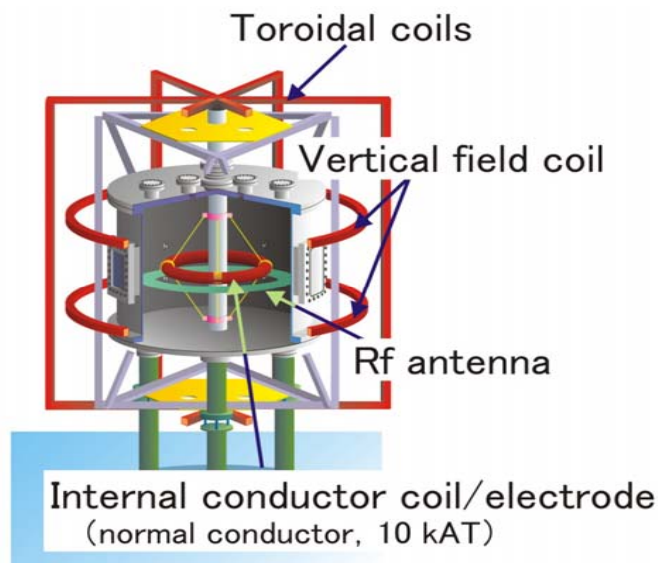
プラズマ中の流れ場と電場構造に関する研究

- ・トロイダル磁場配位における非中性プラズマの閉じ込め特性
- ・高速流プラズマの平衡(Double Beltrami State)*に関する研究

内部導体系プラズマ閉じ込め装置Proto-RT

流れを持つプラズマの平衡の実験的検証

- ・トーラス系非中性プラズマ中の電場構造と閉じ込め特性

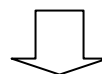


Proto-RT俯瞰図

- ・径方向電場の形成
(外部電場印加、非中性化)
- ・トロイダル方向への流れの駆動
⇒径方向電場構造の測定
エミッシブプローブによる電位分布測定

+

さらに新しい計測法の導入



ポッケルスセンサを用いた電場計測システム

* S.M.Mahajan and Z.Yoshida, Phys.Rev.Lett,81,4863(1998)
Z.Yoshida and S.M.Mahajan,Phys.Rev.Lett,88,095001(2002)

本研究の目的と要点

ポッケルスセンサを用いた電場構造の測定

・ポッケルスセンサによる電場構造の測定

- ・エミッシブプローブによる測定結果との比較
- ・ 純電子プラズマ中の測定 ⇒ 二つの測定結果はよく一致する
- ・ 中性プラズマ中の測定 ⇒ 強い内部電場が存在するときプローブはセンサよりも電場を小さく評価

・強い流れ場でのプローブ特性の評価

- ・流速は $E \times B$ ドリフト速度で計算*
- ・イオン音速を超えるとポテンシャルの測定結果にずれ
⇒ プローブ前方にイオン衝撃波が発生
- ・イオン音波中のポテンシャル構造の計算
⇒ 周辺的空間電位が上昇
エミッシブプローブの特性に変化

* H.Saitoh, et al, Phys.Plasmas,11,3331(2004)

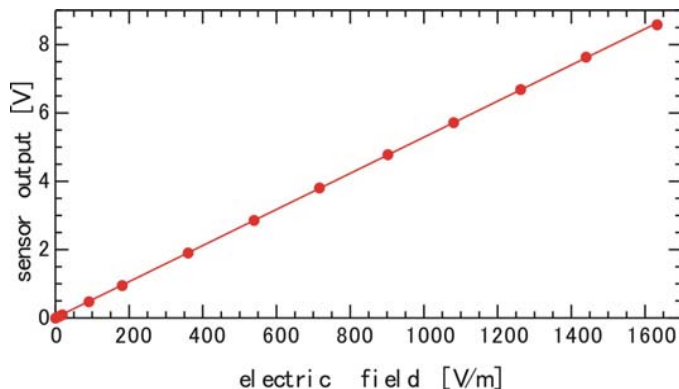
電場の測定方法

電場の計測に用いられる方法

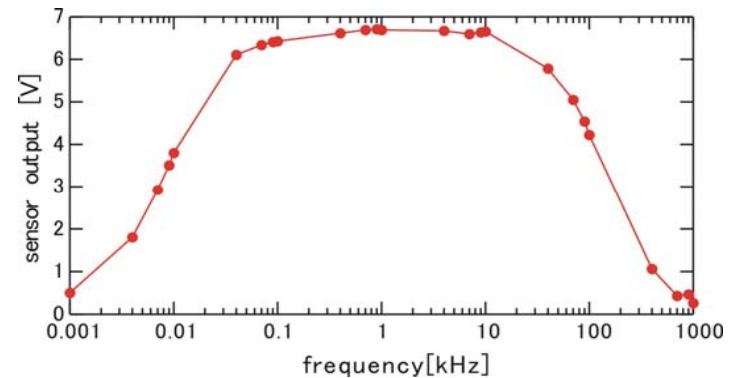
- ポテンシャルから算出
静電プローブ、**エミッシブプローブ**など
- 直接電場を測定
レーザー誘起蛍光法、ピエゾ・逆ピエゾ効果など

ポッケルスセンサについて

- 高周波電場計測法の開発(2000年度八木修士論文)
- プローブ部の小型化と広帯域での測定(トヨタマックス社TM2414)
- 電気光学効果のひとつであるポッケルス効果を用いた電場計測法
- 直接電場を測定することが可能である
- Mach-Zehnder干渉計にて干渉した光の強度から電界強度を測定
- 出力は電場強度に比例、広帯域(50Hz~100kHz)で安定



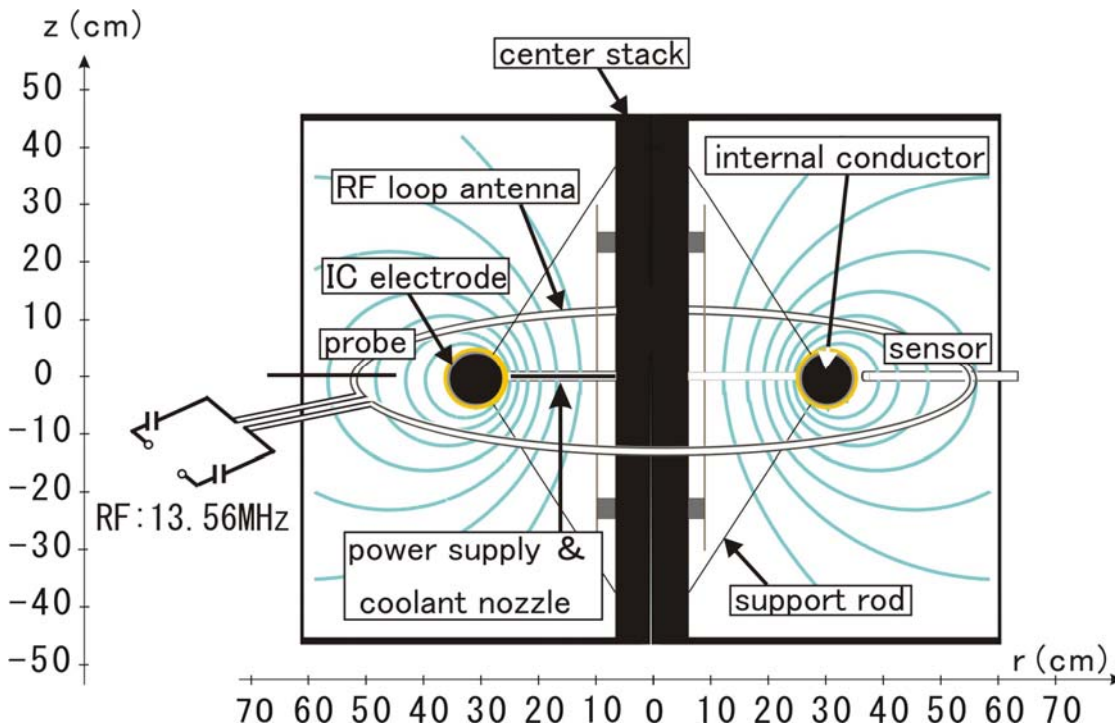
印加電場強度とセンサ出力



センサの周波数特性

実験装置Proto-RTの構成

- ポロイダル磁場配位: dipole磁場(磁場強度 $\sim 100\text{G}$)
- 電子入射: LaB_6 カソード電子銃(加速電圧 $\sim 1\text{kV}$)
- 中性プラズマ: 誘導結合型 13.56MHz RF(100W) 水素プラズマ
- 内部導体電極による外部電場印加($\sim 600\text{V}$)
⇒径方向電場の形成、トロイダル流の生成



Proto-RT装置断面図

◆ プラズマパラメータ

- 電子密度

$$n_e = 10^{15} \text{ m}^{-3}$$

- 電子温度

$$T_e = 10 \text{ eV}$$

- 水素ガス圧

$$4.0 \times 10^{-4} \text{ Torr}$$

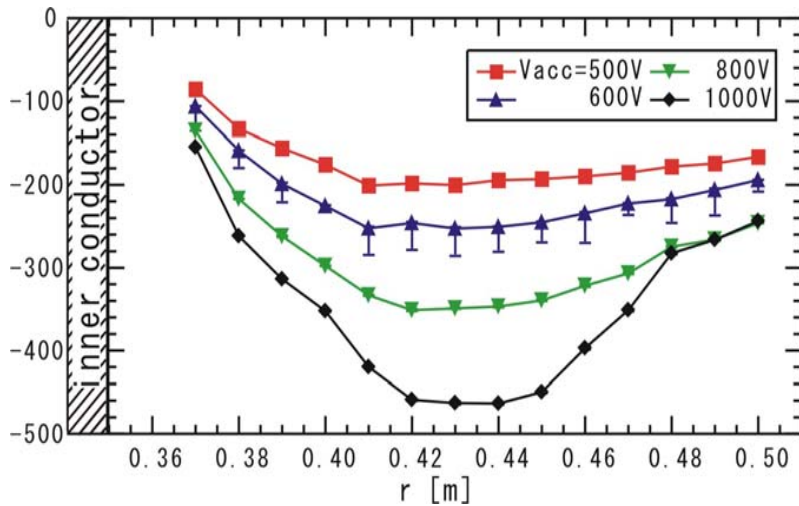
- Alfvén速度

$$v_A = 6.9 \times 10^6 \text{ m/s}$$

- イオン音速

$$C_s = 3.4 \times 10^4 \text{ m/s}$$

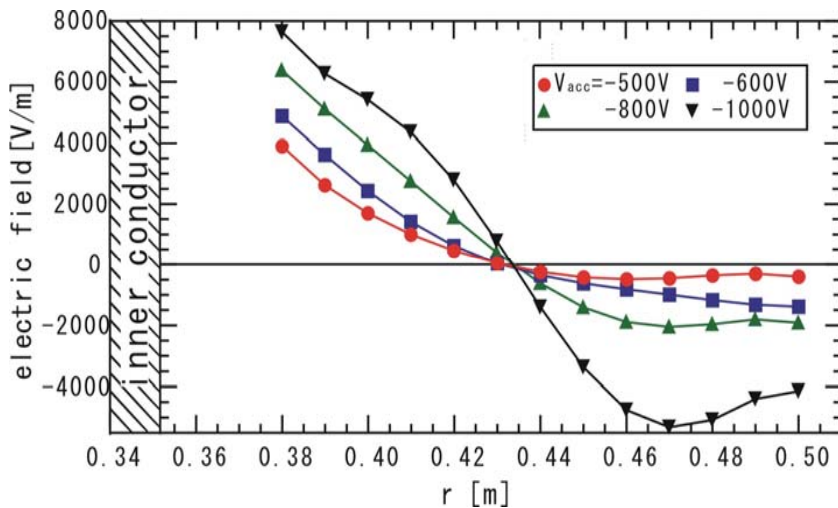
電子プラズマ中の電場構造の測定



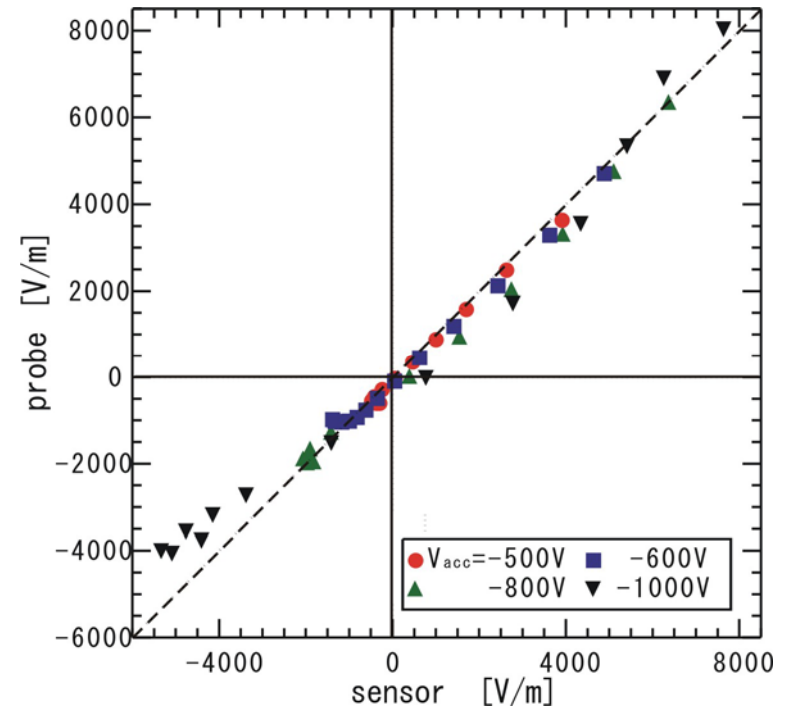
・純電子プラズマ中での測定結果

- ・ $r=46\text{cm}$ の地点から電子を入射
- ・加速電圧を上昇させると形成される電場強度が増加
- ・センサとプローブの測定結果は15%以内のずれで一致

プローブでのポテンシャルの測定結果

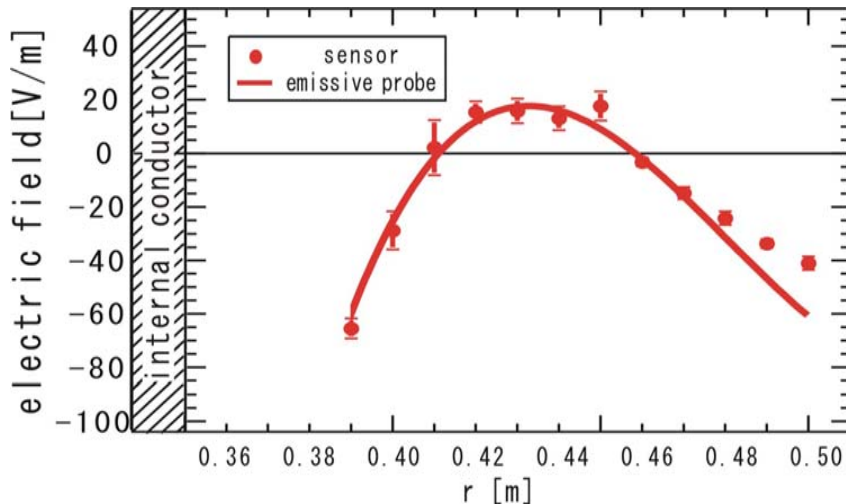


センサによる電場構造の測定結果

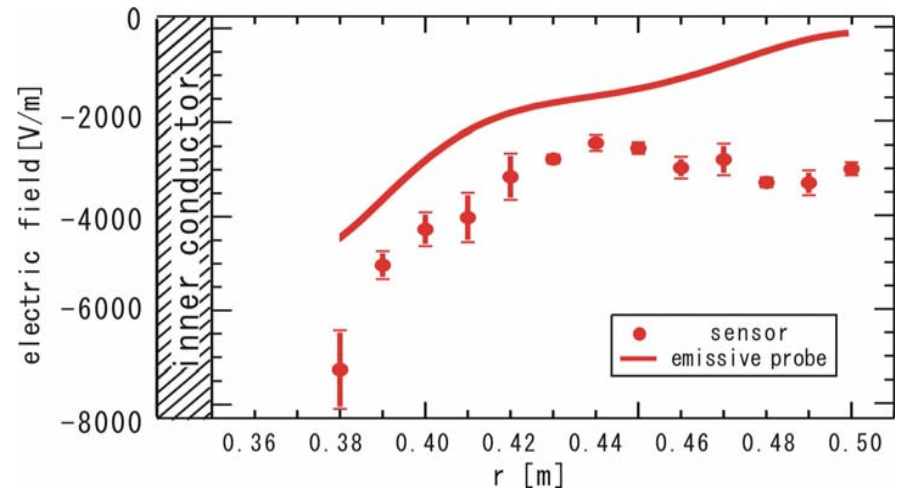


プローブとセンサの測定結果の比較

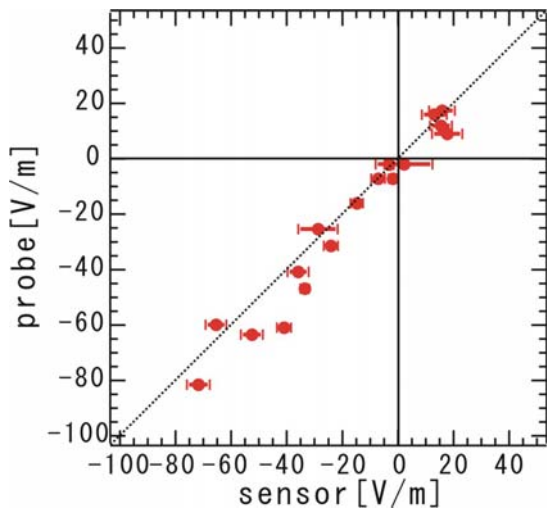
中性プラズマ中の電場構造の測定



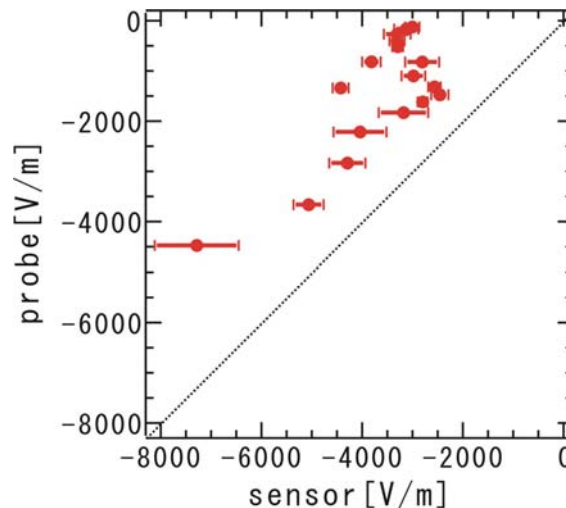
Vic=0Vでの電場強度分布



Vic=-400Vでの電場強度分布



プローブとセンサの比較
(Vic=0V)

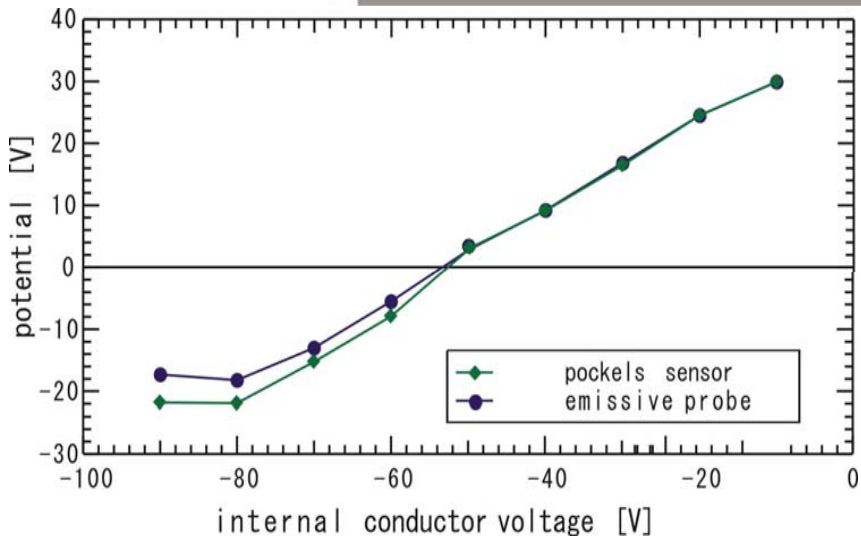


プローブとセンサの比較
(Vic=-400V)

・中性プラズマ

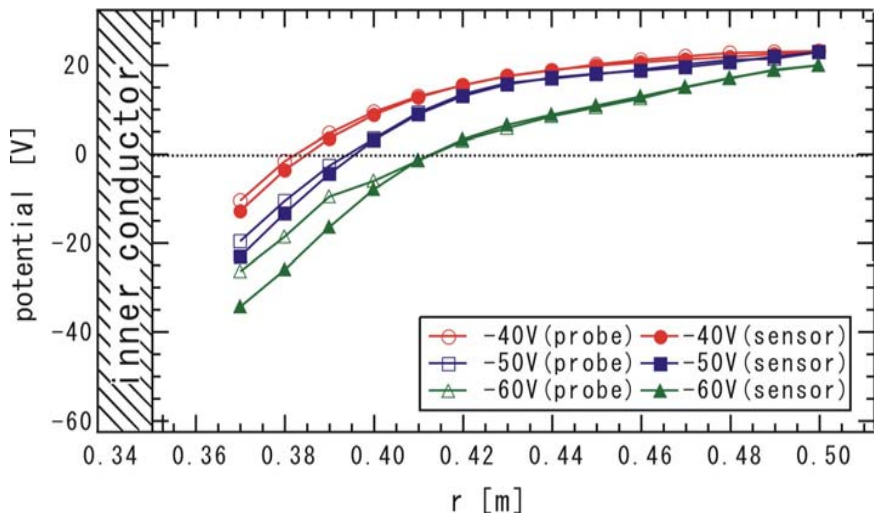
- ・Vic=0Vのとき測定結果はよく一致する
- ・Vic=-400Vのときセンサはプローブよりも大きい測定結果が得られた
- ・このときの流速 $\sim 10^5$ m/s (イオン音速を超える流速)

強い流れ場でのプローブの異常特性

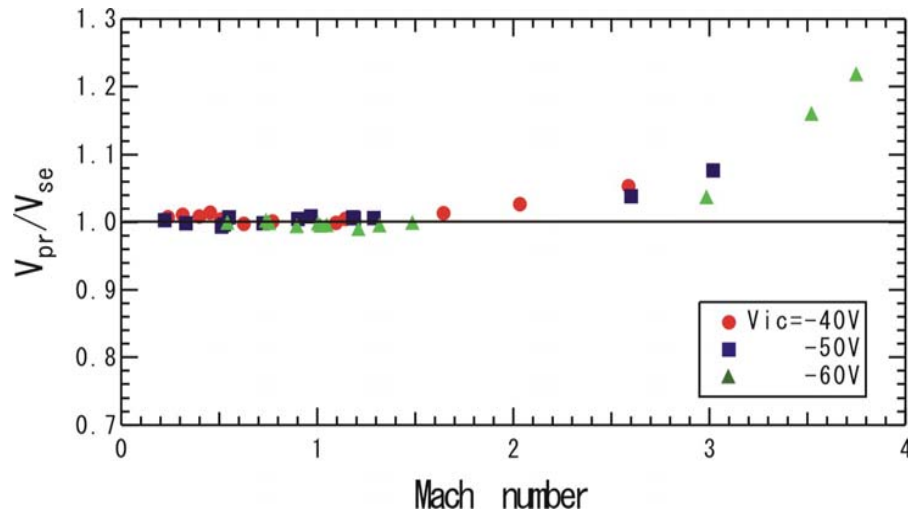


R=40cmでのポテンシャルの測定結果

- $r=40\text{cm}$ でのポテンシャルの測定
 - $V_{ic}=-50\text{V}$ あたりで二つの測定結果にずれ
 - $E \times B$ ドリフト速度がイオン音速を越え始める地点
- $V_{ic}=-40 \sim -60\text{V}$ での径方向分布
 - マッハ数が1.5を越えると測定結果にずれが生じる
 - マッハ数が大きくなるとずれも大きくなる

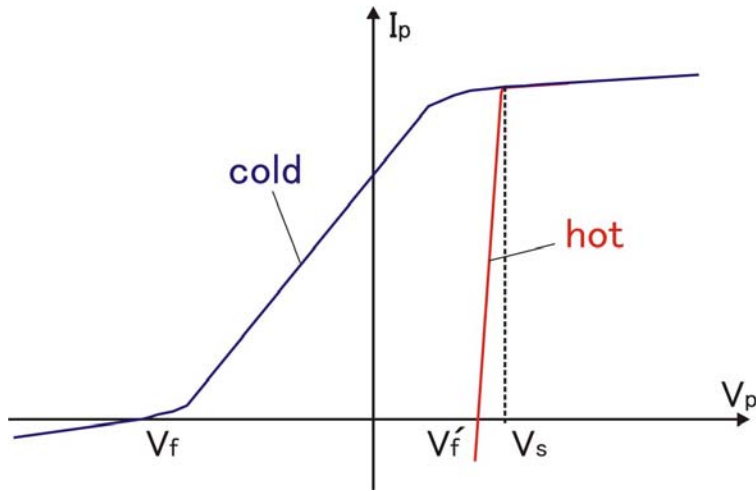


径方向のポテンシャル分布



センサとプローブの測定結果の比較

異常特性の理論的解釈



エミッシブプローブ特性

センサとの比較実験

- ・イオン音速を越えた付近にて測定結果にずれが生じる
- ・電子プラズマ中の測定結果ではこのようなずれは生じない

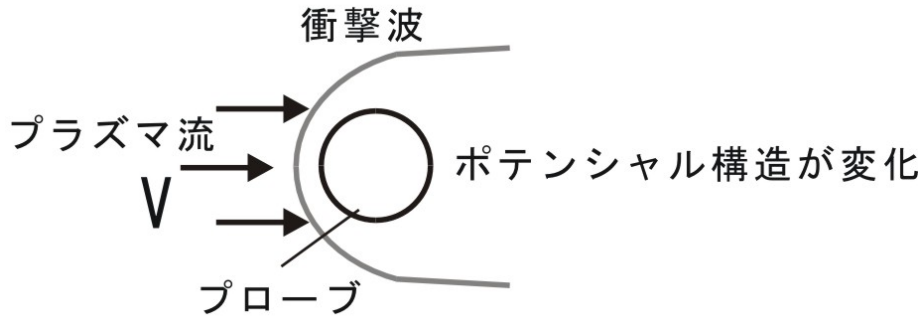
エミッシブプローブの特性

- ・空間電位よりも低いプローブ電位でエミッションを開始
- ・エミッションしないときのプローブ特性と分かれる電位を空間電位として測定

⇒ プローブ周辺のポテンシャルが変化
空間電位の測定にずれが生じる

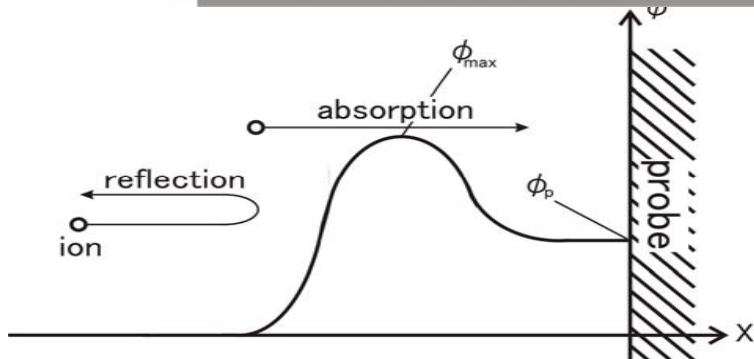


イオン衝撃波の発生が原因

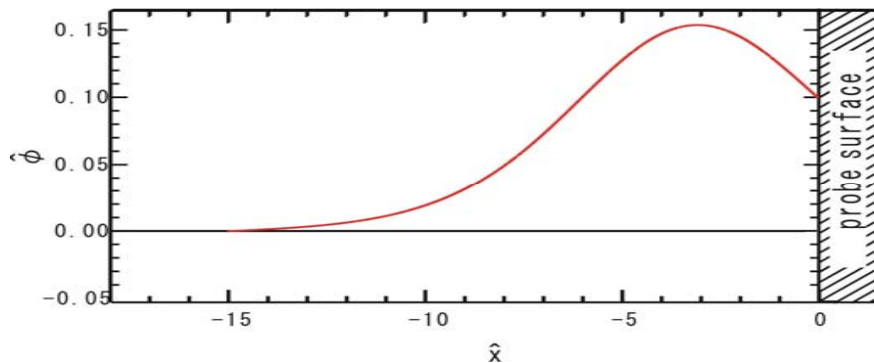


プローブ表面付近での衝撃波の発生

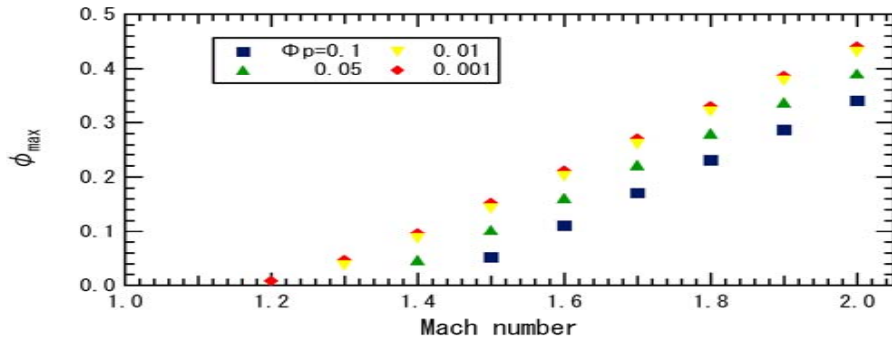
異常特性の理論的解釈(イオン衝撃波)



プローブ周辺のイオン粒子の運動



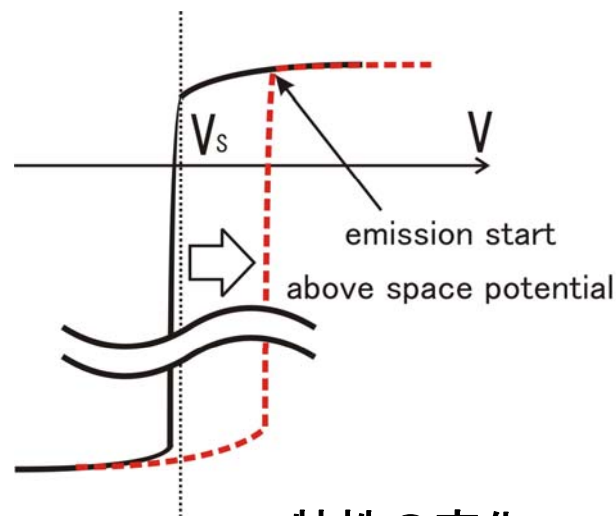
マッハ数1.5のときのポテンシャル



マッハ数との関係

イオンの熱運動を考慮したモデル (無衝突、磁場無視)

- ・マッハ数1.2を越えるとプローブ前方にプラズマの空間電位よりも高いポテンシャル構造が生じる
 - ・マッハ数の上昇と共にポテンシャルの最大値が上昇
- ⇒エミッシブプローブの特性に変化



I-V特性の変化

まとめ

ポッケルスセンサを用いて電場の計測を行なった

- ・エミッシブプローブによる測定結果との比較
 - ・純電子プラズマ中では二つの測定結果はよく一致
 - ・中性プラズマ流中に高速流が駆動しているとき
プローブはセンサより電場を小さく評価
- ・高速流中のプローブの異常特性
 - ・プラズマ流中がイオン音速を超える付近で測定結果にずれが発生
 - ・衝撃イオン音波中のポテンシャルを計算すると、プローブ前方にてポテンシャルの上昇を確認
 - ⇒・プラズマの空間電位より高いプローブポテンシャルにてエミッション開始
 - ・エミッシブプローブの特性が変化