

ヘリコン波プラズマにおけるイオンセンシティブプローブ計測の検討 Study of Ion Sensitive Probe Measurement in Helicon Plasma

河内裕一 Y. Kawachi
九大総理工 IGSES, Kyushu Univ

1. Introduction

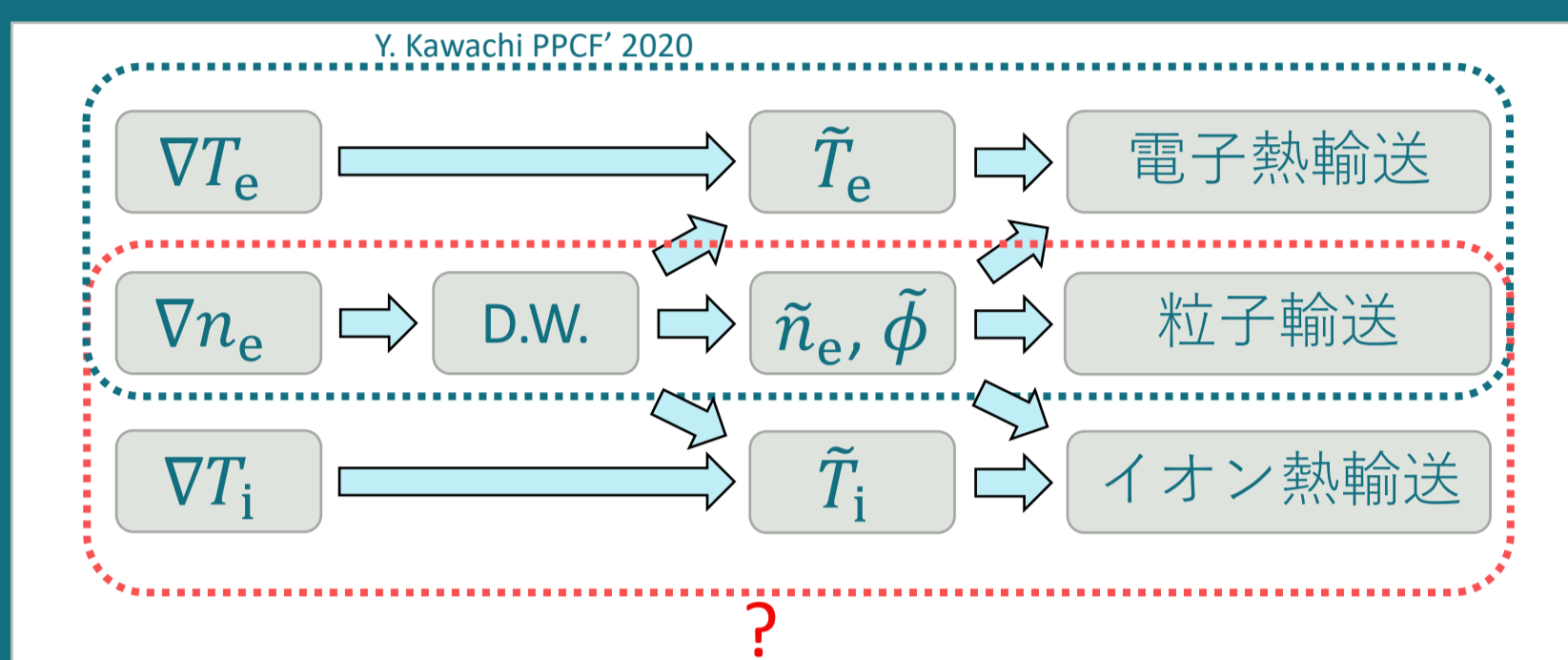
プラズマにおける乱流現象

普遍的：核融合、宇宙プラズマ、プラズマ推進器
輸送：粒子・熱・運動量を輸送
=>閉じ込め悪化/改善、太陽風加速、推進効率

九州大学の直線装置PANTAではヘリコン波で高密度プラズマを生成し、ドリフト波等による乱流非線形現象に関して研究

イオン温度計測の重要性

> 乱流物理の観点:ドリフト波でイオン温度は揺らぐ? ITG?



> ヘリコン波物理の観点: 様々なイオン加熱

- 低域混成周波数付近でのイオン加熱及びイオン温度異方性
- 対向するヘリコン波で作られた定在波による加熱

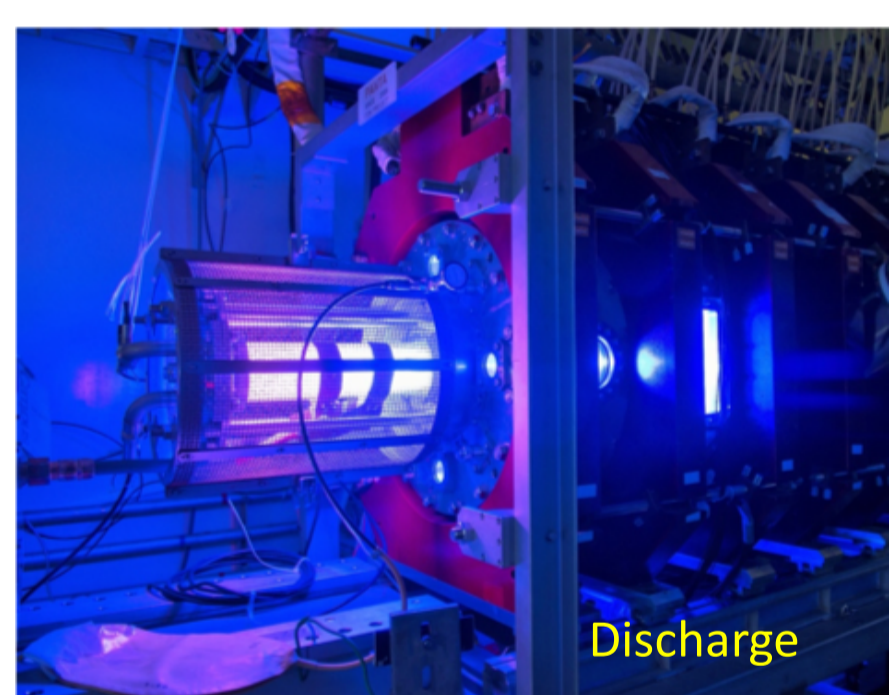
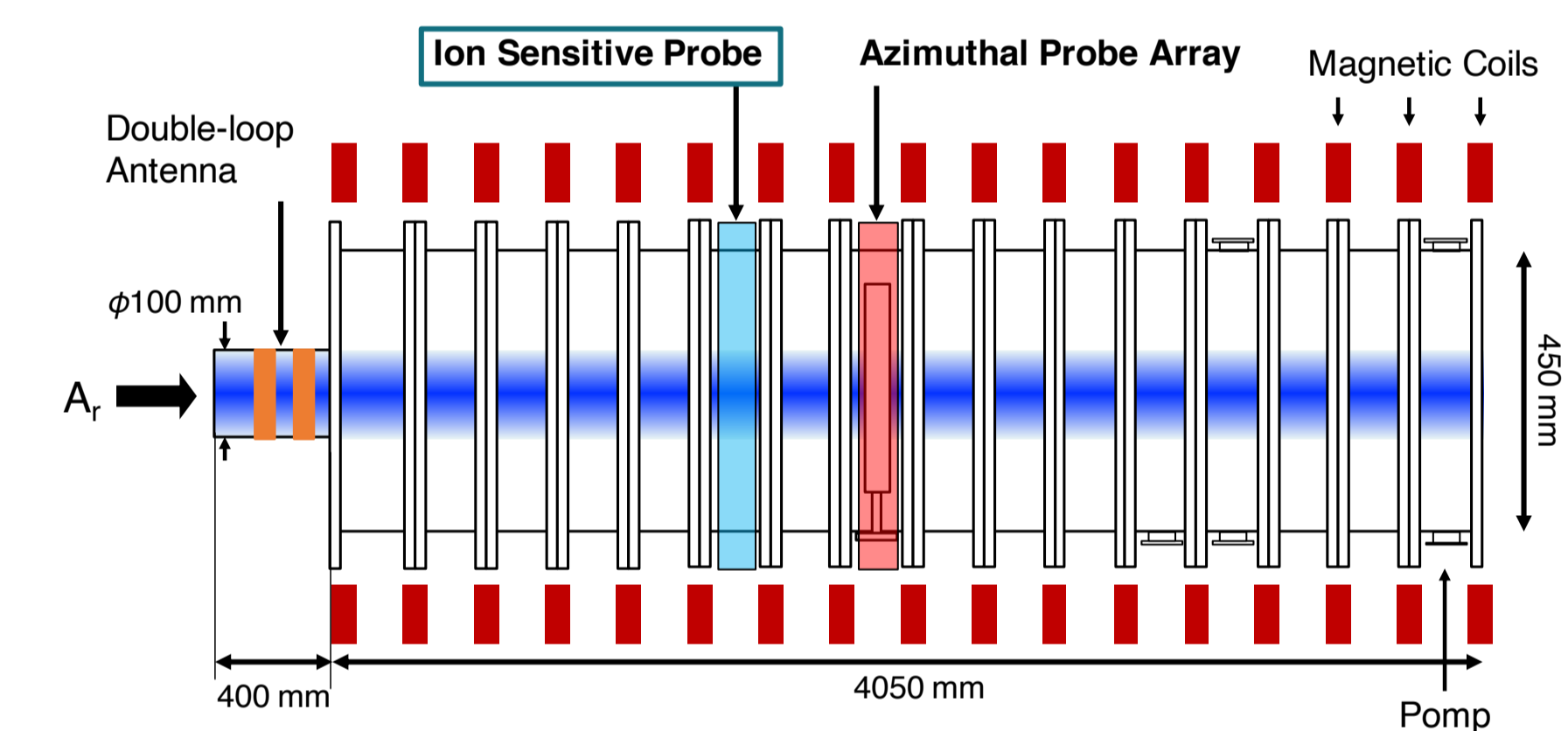
これまでのPANATでのイオン温度計測

レーザー誘起蛍光法=>中心○, エッジ△, 高ガス圧△, 揺動×

イオン温度分布・揺動観測へ向け
イオンセンシティブプローブを開発

2. Experimental Setup

Plasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysis (PANTA)



実験条件・プラズマパラメーター

Gas	Argon
Gas Pressure	~0.1 Pa
RF	3 kW (7 MHz)
Magnetic Field	0.09 T
n_e	$10^{18}\text{-}10^{19} \text{ m}^{-3}$
T_e	~3 eV
ρ_i	~5 mm
ρ_e	~0.05 mm
λ_d	~5 μm

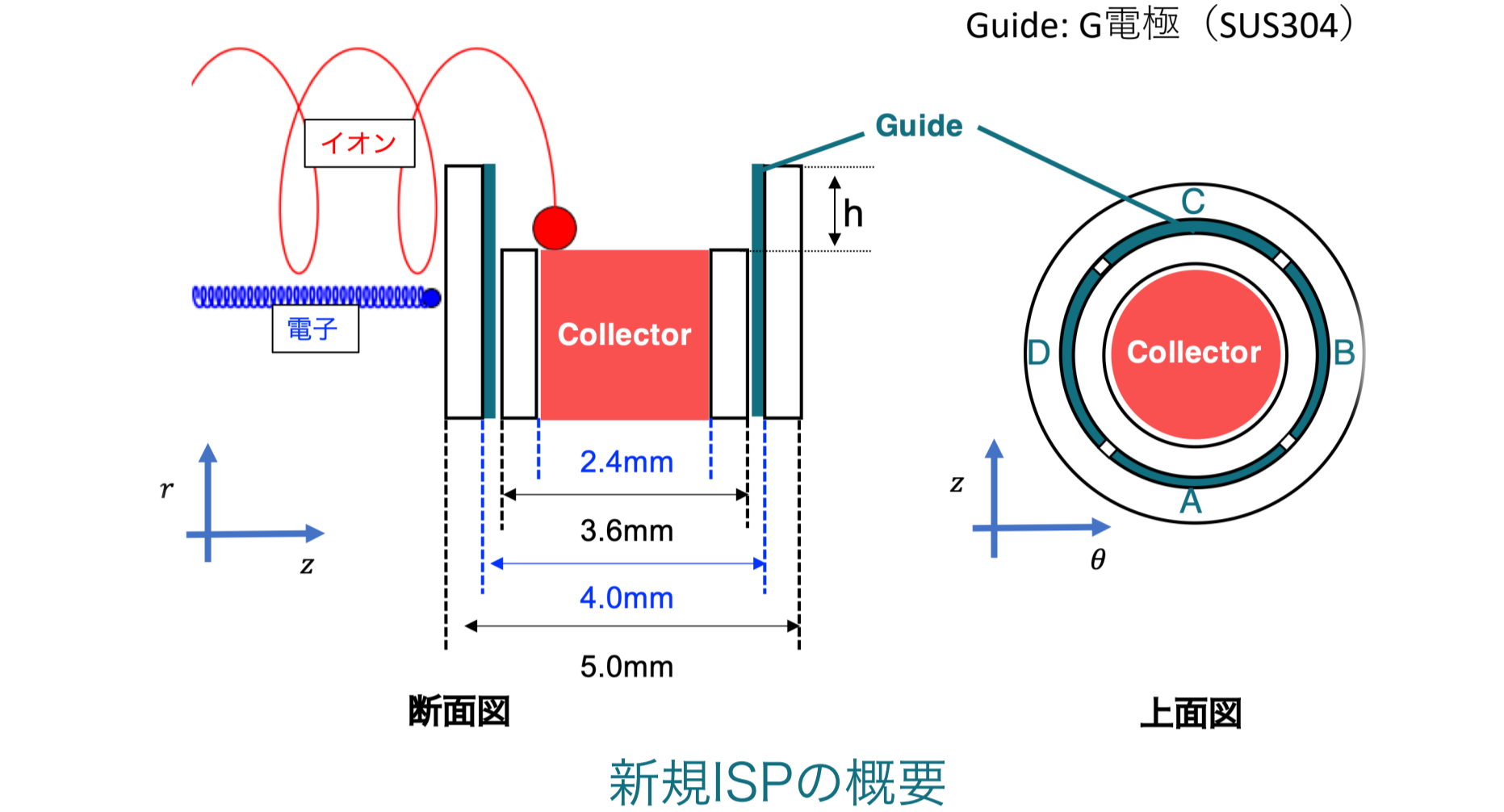
- > 7MHzのRFを用いてヘリコン波プラズマを生成
- > 低温高密度プラズマにおける非線形乱流現象について研究

3. Ion Sensitive Probe (ISP)

3.1 ISP design

イオンセンシティブプローブ(ISP)とは
・イオン/電子のラーマー半径の差を利用してイオンを選択捕集
・イオン捕集電極(C電極)とガイド捕集電極(G電極)から成る
・イオン電流のI-V特性からイオン温度を推定

3.2 Time evolution of swept ISP

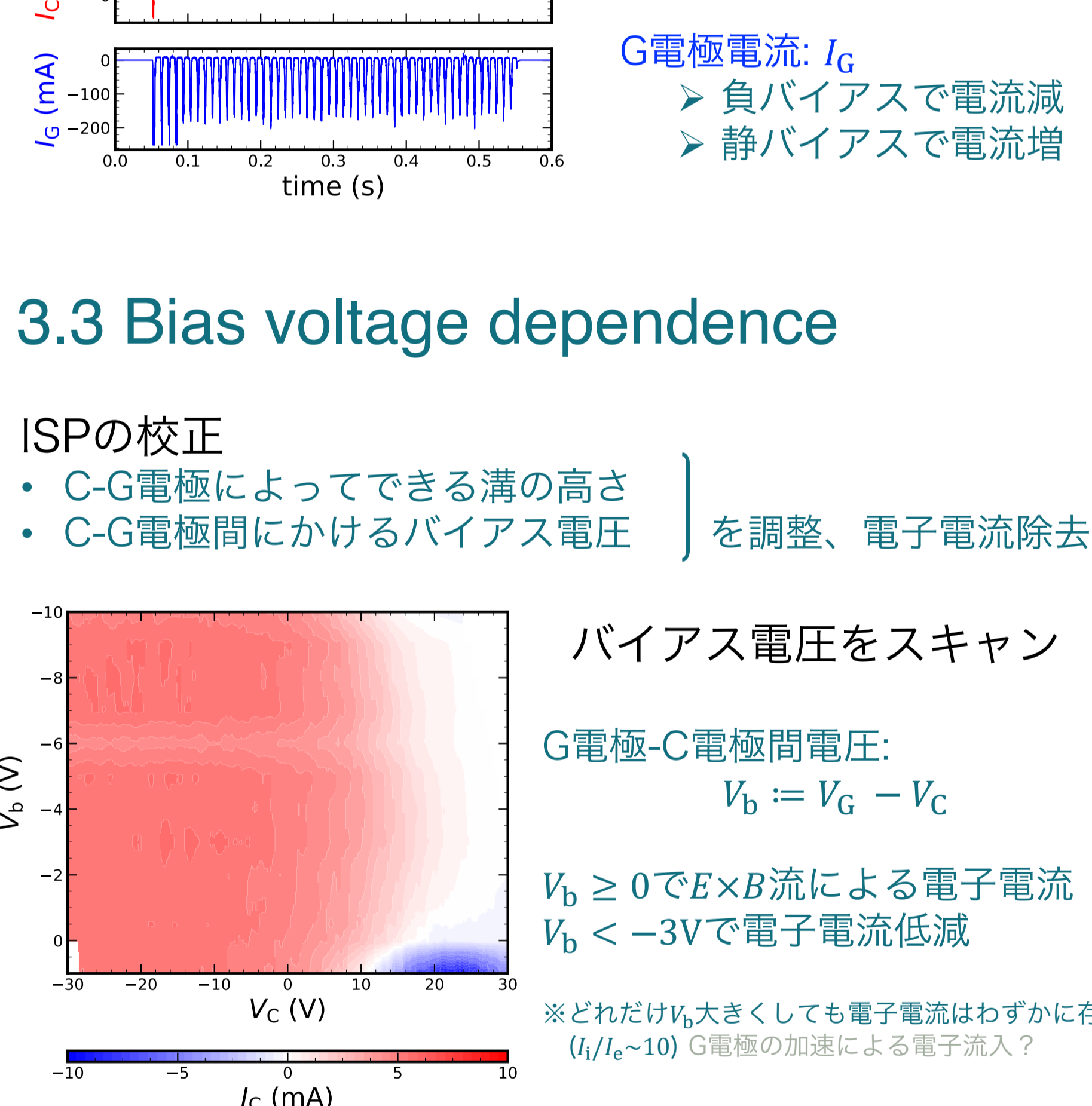


3.3 Bias voltage dependence

- ✓ イオン捕集の面積が大きい(~4.5mm²通常 ~0.5mm²)
- ✓ ガイド電極が4分割=>乱流輸送計測への応用を見据える

ISPの校正

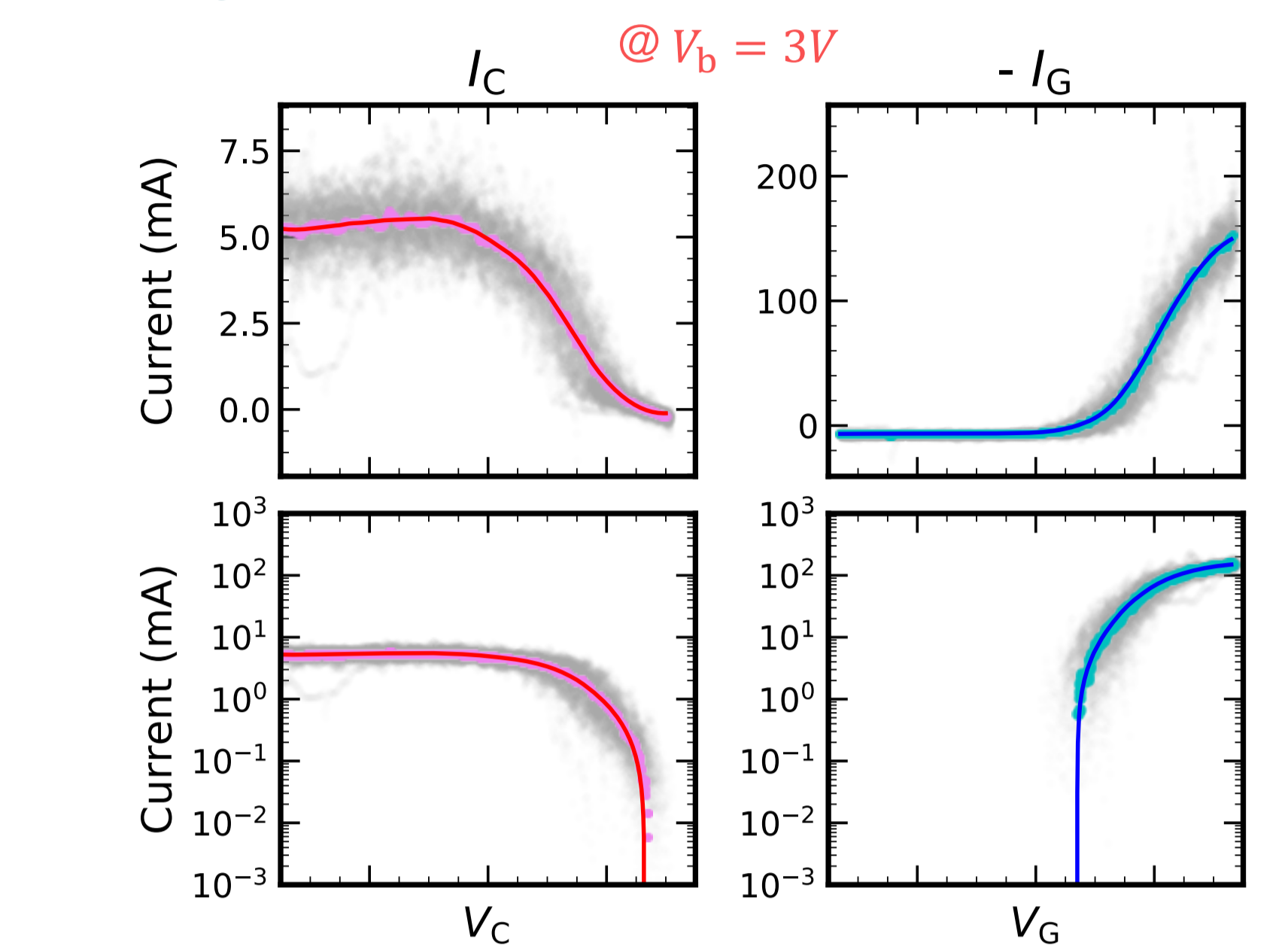
- ・C-G電極によってできる溝の高さ
 - ・C-G電極間にかかるバイアス電圧
- を調整、電子電流除去



バイアス電圧をスキャン
G電極-C電極間電圧:
 $V_b = V_G - V_C$
 $V_b \geq 0$ でE×B流による電子電流
 $V_b < -3V$ で電子電流低減
※それぞれだけ V_b 大きくしても電子電流はわずかに存在
($I_i/I_e \sim 10$) G電極の加速による電子流入?

4. Results

4.1 Typical I-V characteristics



C電極

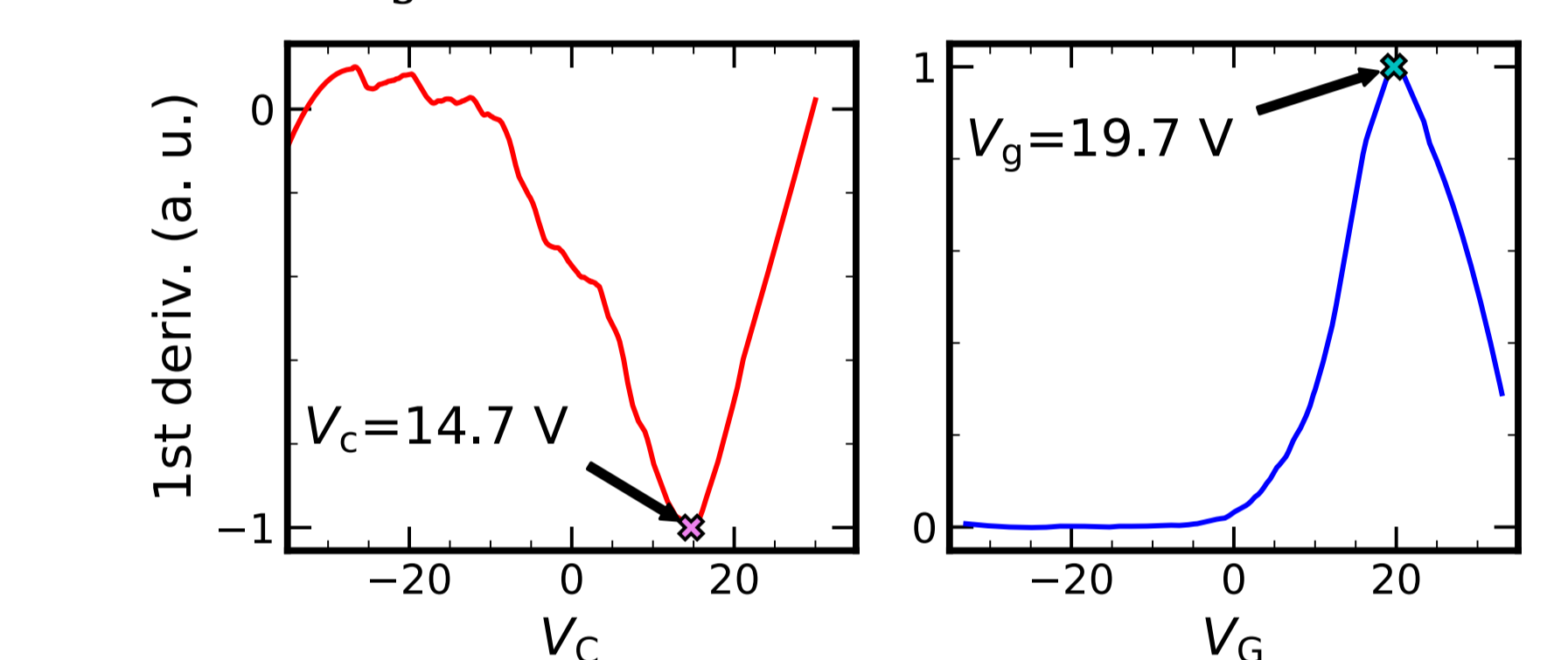
- ・C電極によるイオン電流の分離捕集を確認
- ・逆飽和後, V_C の増加に伴って電子電流が現れる

G電極

- ・典型的な静電プローブのI-V特性

4.2 Plasma parameter evaluation

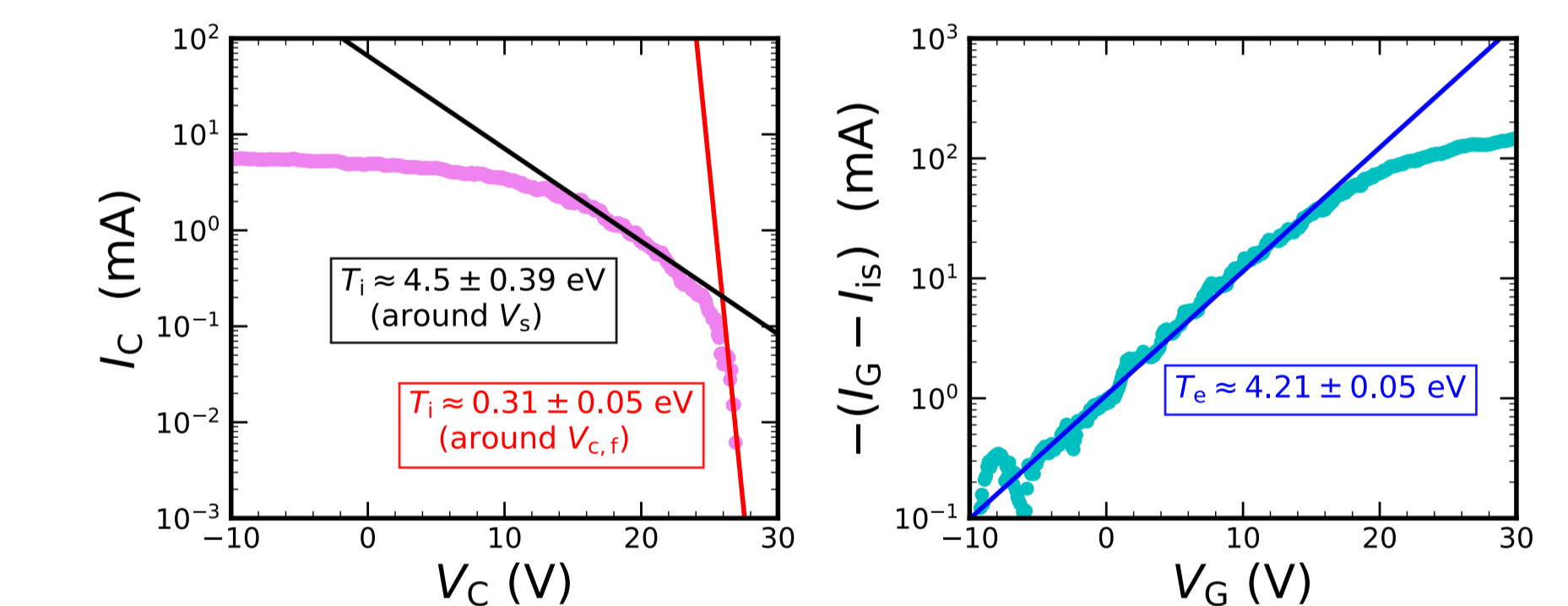
空間電位: V_s



$$\frac{d^2 I_G}{dV_G^2} = 0 \text{ における電圧が空間電位 } \Rightarrow V_s \approx 19.7V$$

浮遊電位と電子温度から推定した空間電位と概ね一致

イオン/電子温度: T_i, T_e



空間電位(V_s) 付近で $T_i = 4.50 \text{ eV}$
浮遊電位($V_{c,f}$) 付近で $T_i = 0.31 \text{ eV}$

後者はLIF計測の結果と概ね一致
Thomson散乱およびダブルプローブの結果と概ね一致

新規ISPでイオン温度・電子温度の計測に成功
得られた温度は他計測の結果と矛盾しない

5. Discussion

新規ISPのI-V特性の歪み

- > $V_s \sim V_c$ で10倍高いイオン温度
 - > $V_s \ll V_c$ でのみ正しいイオン温度を評価
- この様なI-V特性はヘリコン波等のRF放電で観測例あり
=>空間電荷効果によって現れる

ISPにおける空間電荷効果(Space Charge Effect)

1. ISPはイオンのみを捕集=>ISPの溝にはイオン蓄積
2. イオンの電荷によって電場が形成されイオンの捕集を阻害
3. I-V特性曲線が歪められる

空間電荷の影響が大きいと、
> イオン温度を評価できる電圧の範囲が減る
> 電流=0付近の電圧が空間電位に近づく

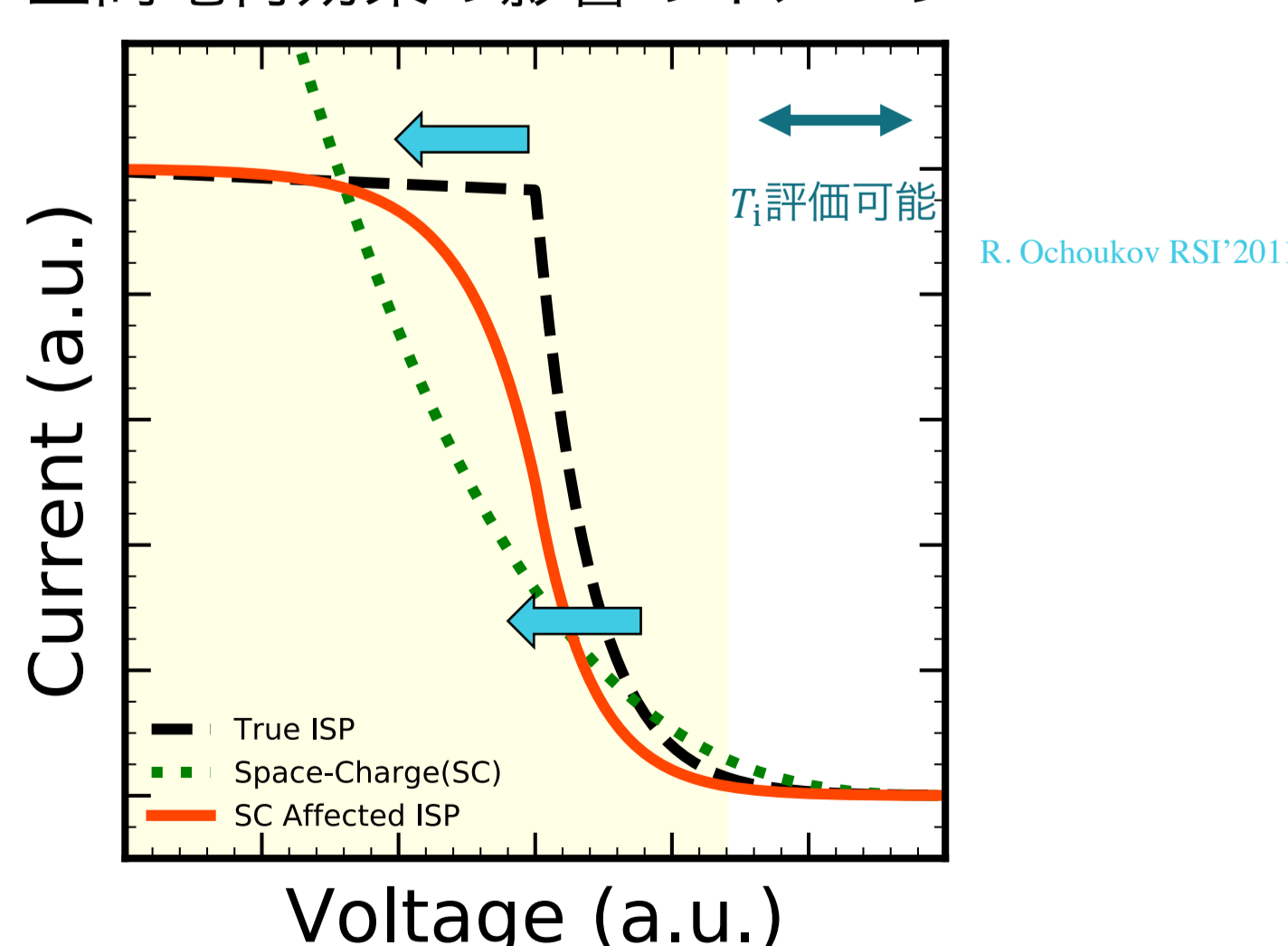
今回のISPでも,電流=0付近で
 $V_G = V_C - V_b = 17.7 \text{ V} \sim V_s$ となり空間電荷に近い
=> 空間電荷効果の影響を示唆

PANTA等のヘリコン波プラズマでは、高密度であるため空間電荷効果が大きく働き

イオン温度が小さいため空間電荷に形成された電場の影響を受けやすい

ロバストな温度計測には空間電荷効果の低減が必要

空間電荷効果の影響のイメージ



6. Summary

PANTAにおけるイオン温度計測に向けて
新規ISPを開発

- バイアス電圧を調整し電子電流の低減を確認
- C電極・G電極で特徴的なI-V特性を得た
- 傾きから評価したイオン温度・電子温度は他計測の結果と矛盾しない
- 空間電荷効果による影響を示唆

7. Future Plan

ISPの空間電荷効果の低減が課題

- ・空間電荷効果は溝の深さを浅くすることで低減
- ・一方で、溝を浅くしすぎると電子がC電極に流入
=>G電極にメッシュを取り付けるMeshed ISP

Meshed ISPのメリット

- > 溝の深さを従来のISPより浅く設計可能
- > C-G間のバイアス電圧も不要

Meshed ISPによるロバストなイオン温度計測

を目指す