

第11回若手科学者によるプラズマ研究会「プラズマ中の現象の視覚化とその展望」
平成20年3月17(月)-19(水) 於 日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所

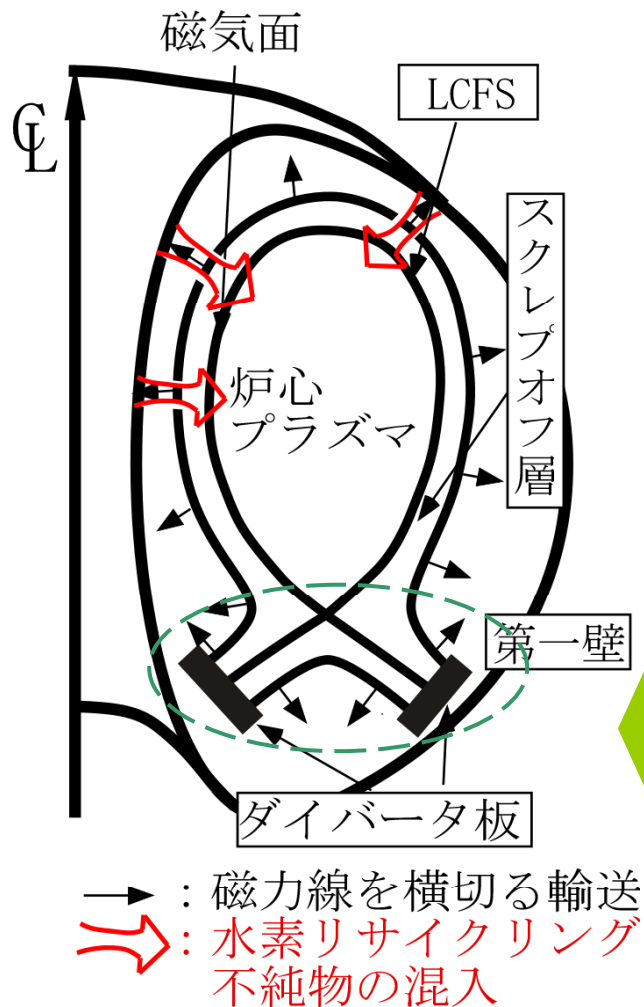
流体乱流研究手法による プラズマ乱流データ解析

名古屋大学 工学部 B4

大野研究室

田中宏彦

研究の背景



異常輸送…磁場閉じ込め核融合炉実現課題の一つ

- ▶ 磁力線を横切る輸送
- ▶ 古典、新古典理論から予想される拡散を上回る
- ▶ 原因の同定など十分でない

問題点

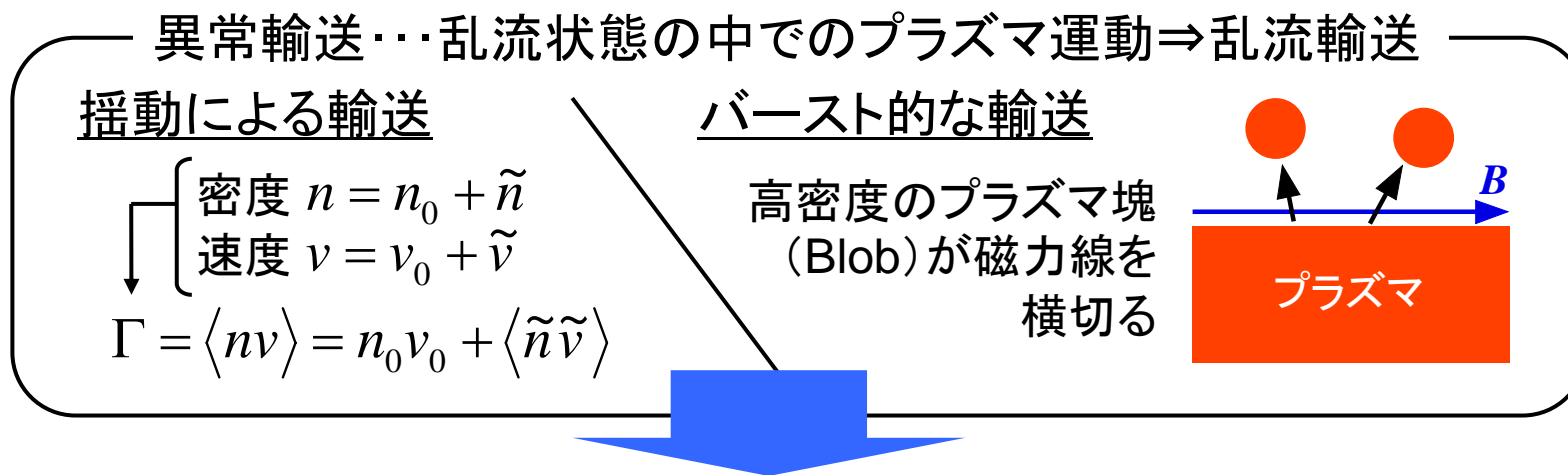
- 水素リサイクリング
- 不純物の発生
- 炉壁の損耗

非接触プラズマ

- ダイバータ板熱負荷低減に期待
- 体積再結合によりプラズマ消失
- 再結合時間 \gg (接続長/イオン音速)
⇒ 熱流拡散に異常輸送も寄与？

異常輸送物理機構の解明は重要

研究の目的



古くから発展してきた**流体乱流解析手法**に注目、プラズマへの応用

乱流データの新たな物理的解釈の模索

各種解析手法の学習・・・流体乱流の専門家 同専攻辻准教授による指導

解析データ

- NAGDIS-II: 四探針プローブ計測 (接触・非接触)
- LHD: 非接触状態でのダイバータプローブ計測
- (JT-60U: 高速挿引プローブ計測)

直線型ダイバータ模擬実験装置NAGDIS-II

NAGDIS-II

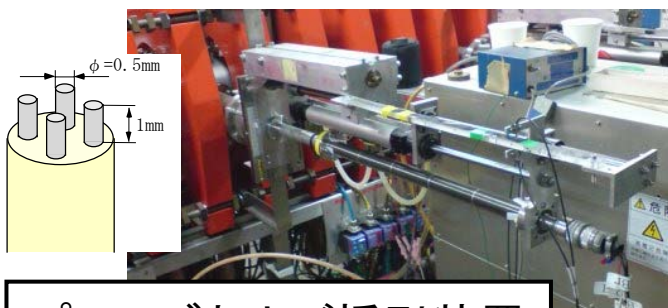


装置全容

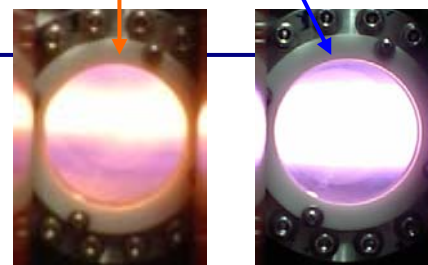
- ◆ 環状装置の周辺プラズマ(SOL)領域とダイバータ板部分を直線型装置で模擬
- ◆ 定常高密度プラズマの生成が可能
- ◆ 放電部とプラズマテスト部に圧力差
⇒ 同一プラズマ源による接触・非接触状態の比較が可能

四探針プローブ計測・・・装置横から挿入

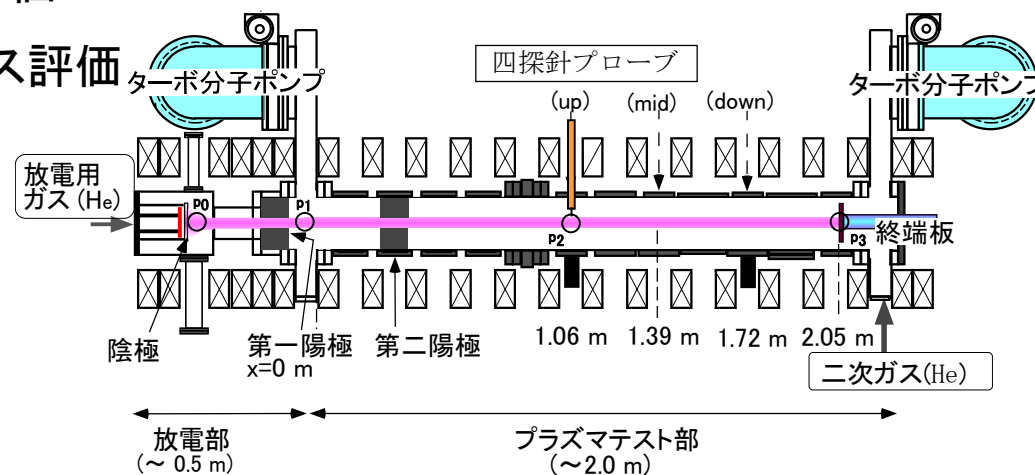
- 速い現象の測定が可能
- 各種プラズマパラメータを評価
- $E \times B$ ドリフトによるフラックス評価



プローブおよび挿引装置



模式図



揺動データ計測

静止したプローブにより定常データを計測

接触時密度ピークを $r=0$ として2mm間隔17点で測定

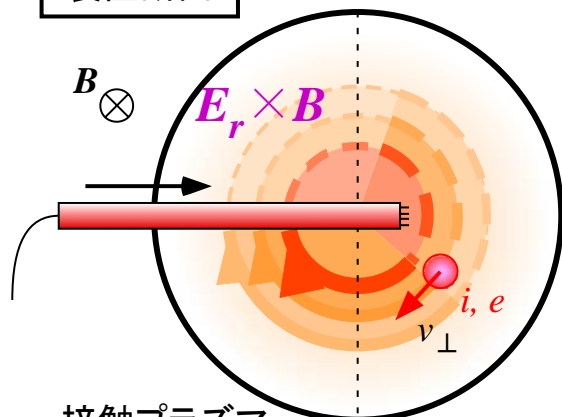
放電条件

ガス種	He
放電電力	4kW
磁場	0.1T
ガス圧 (up部)	接触: 9.1mTorr 非接触: 14mTorr
ガス圧 (終端版)	接触: 5.5mTorr 非接触: 33mTorr

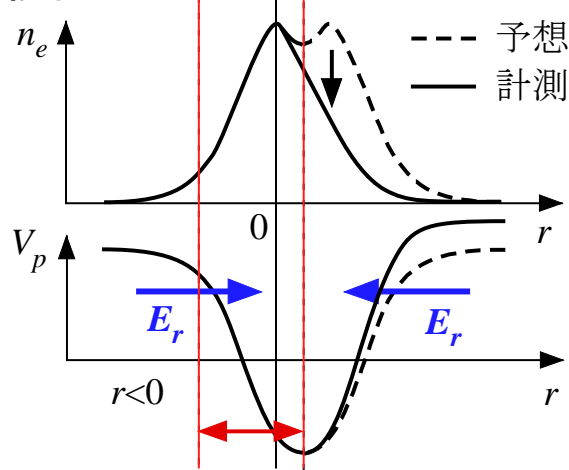
計測条件

サンプリング周波数 f_s	1MHz
計測時間	0.01s

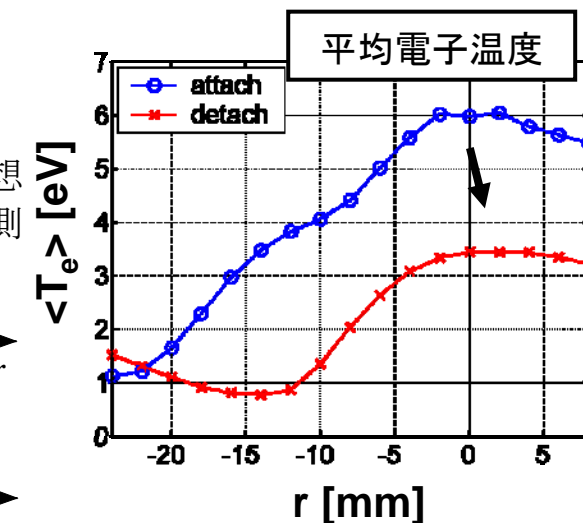
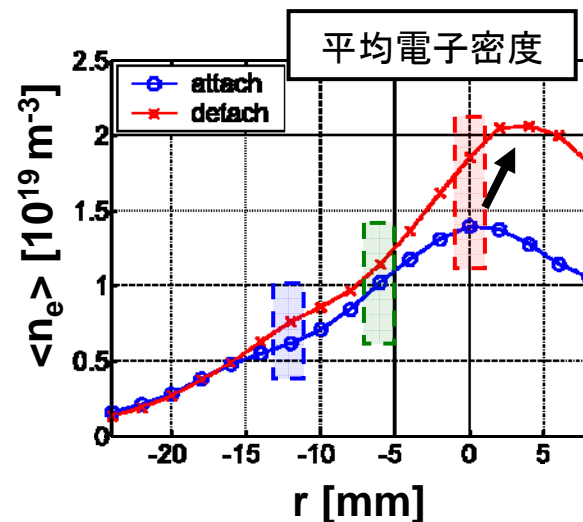
装置断面



接触プラズマ

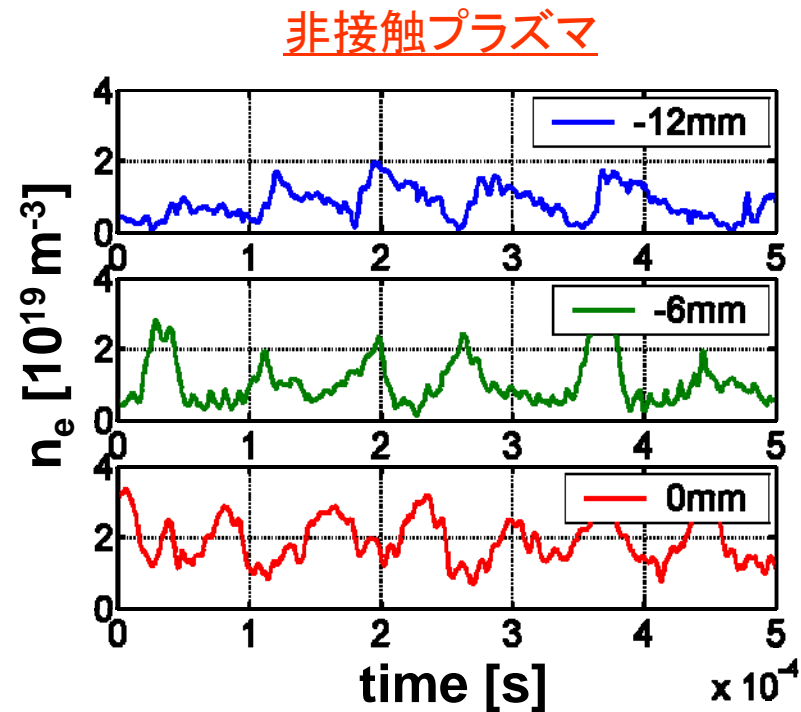
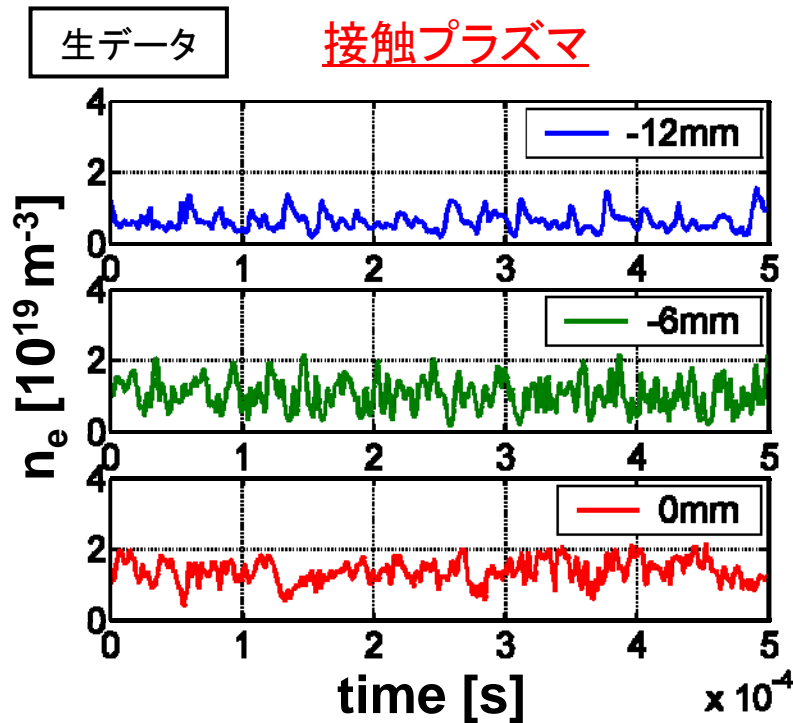


計測範囲



ガス圧制御で低温高密度の
非接触プラズマ生成

電子密度の揺動解析

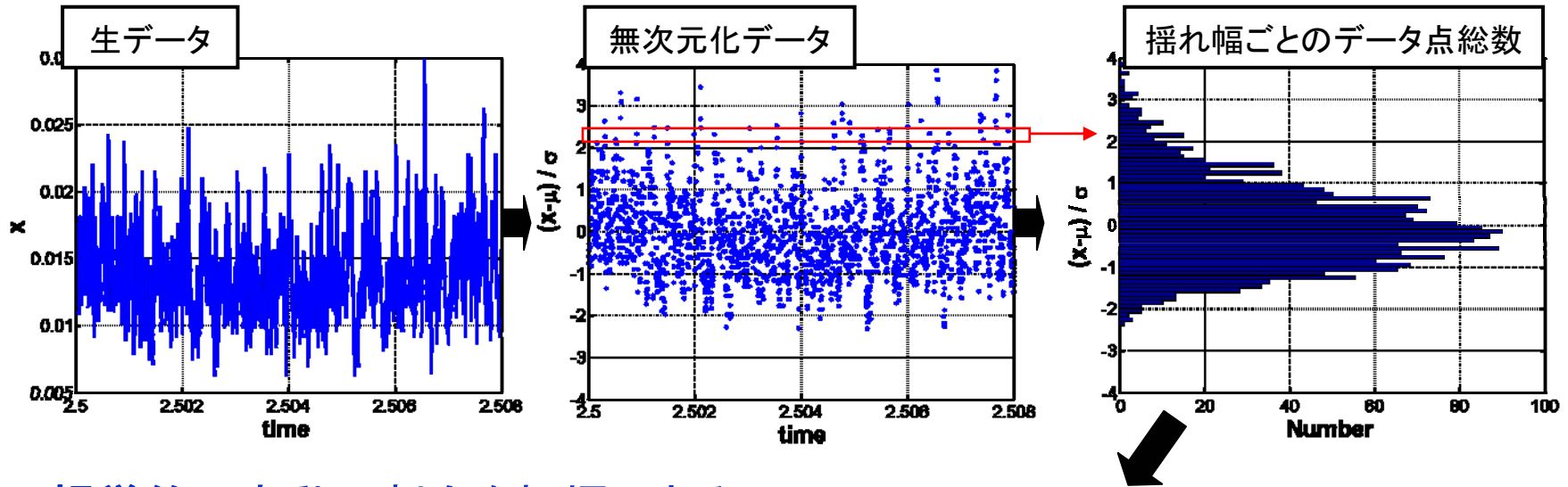


- 周辺部では正のバーストが支配的
- 接触・非接触では周波数の異なる周期変動
 - ◆ ドリフト波不安定性 (密度勾配に起因)
 - ◆ フルーツ波不安定性 (遠心力に起因) の可能性?

径方向各位置における揺動の性質を確率密度関数を用いて調べる

確率密度関数 (PDF)

無次元化した確率密度関数の計算方法



視覚的に変動の割合を把握できる

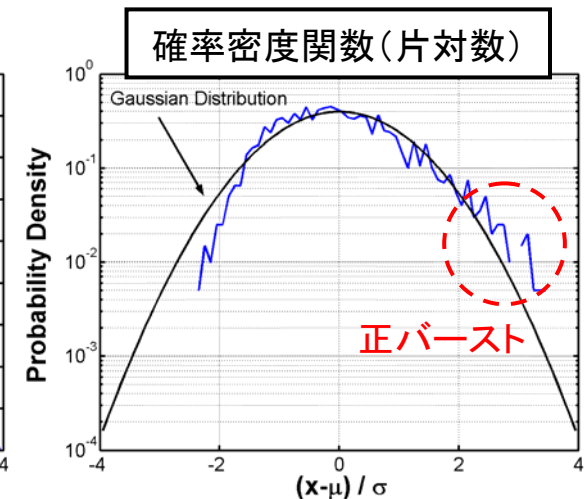
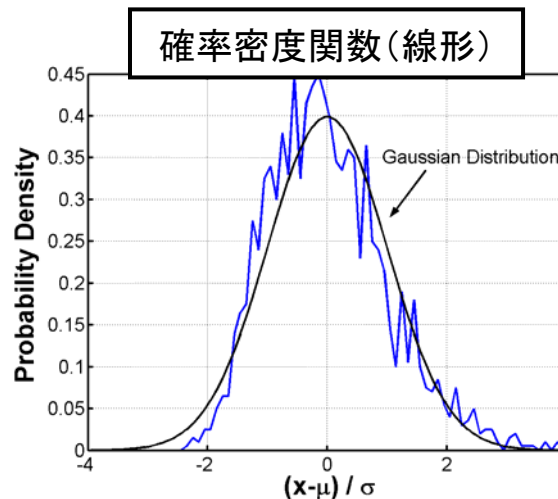
点数を確率密度に正規化

定量的にPDF型を評価

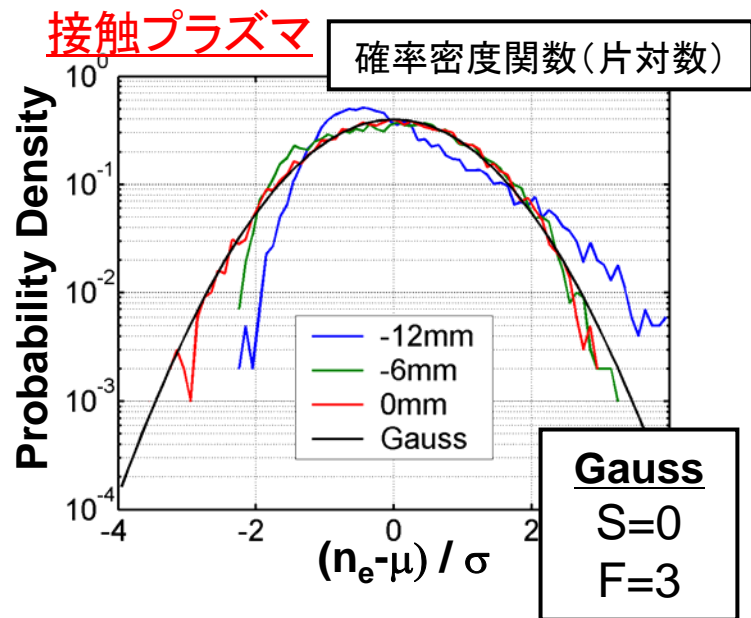
- Skewness, Flatness
- Gram-Charlie級数展開

PDF型の類似度を評価

- カルバックライブラーのダイバージェンス



Skewness・Flatness



<p>-12mm S=1.0 F=4.0</p>	<p>-6mm S=0.1 F=2.4</p>	<p>0mm S=-0.0 F=2.7</p>
---	--	--

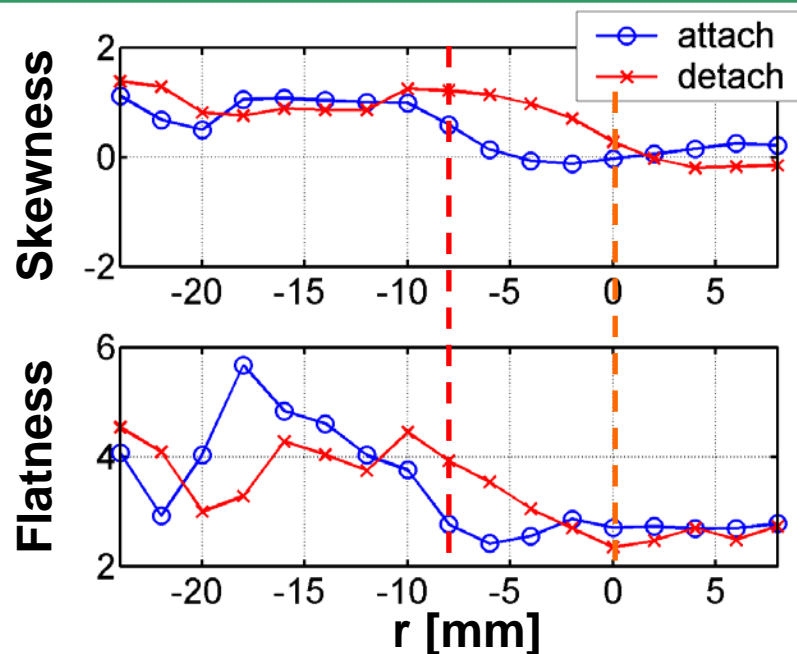
<p>接触 $r < -8\text{mm}$</p> <p>非接触 $r < 0\text{mm}$</p>	}	<p>$S > 0, F > 3$ 正のバースト</p>
<p>接触 $-8\text{mm} < r$</p> <p>非接触 $0\text{mm} < r$</p>	}	<p>$S \Rightarrow 0, F \Rightarrow 3$ ≡ Gauss</p>

歪度 (S)・・・分布左右対称性のずれ

$$Skewness = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^3 p(x) dx}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \right]^{3/2}} = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$$

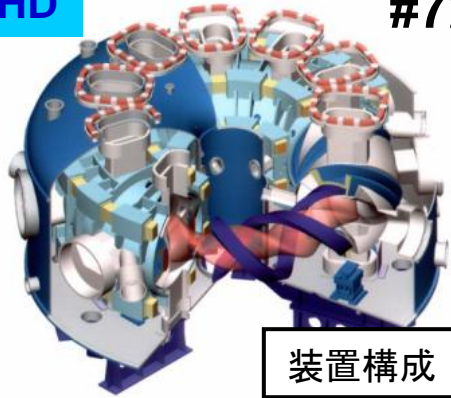
扁平度 (F)・・・分布の広がりのなだらかさ

$$Flatness = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^4 p(x) dx}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \right]^2} = \frac{m_4}{m_2^2}$$



大型ヘリカル装置LHDデータ解析

LHD



装置構成

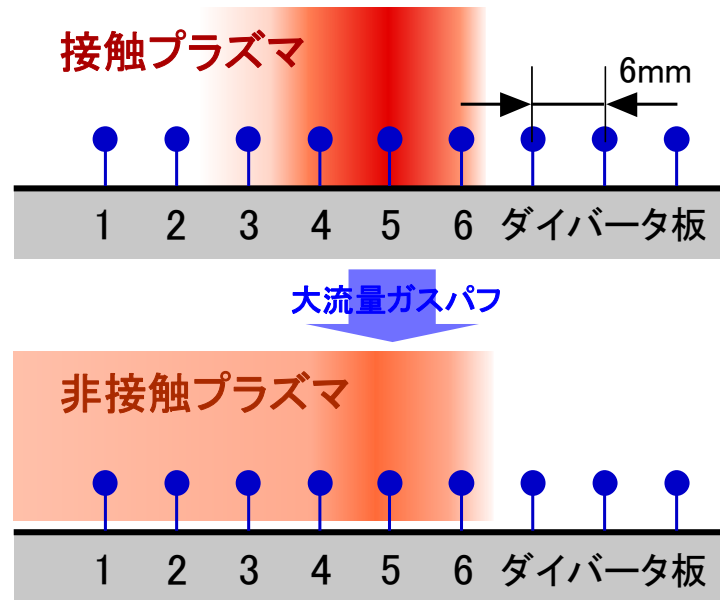
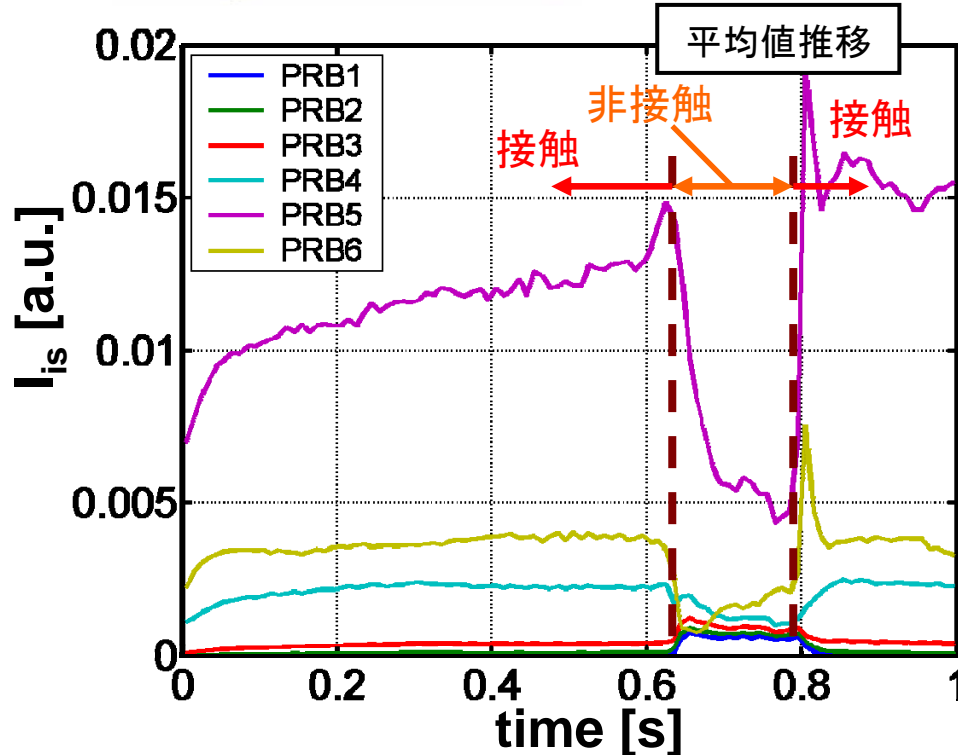
#72428 外寄せ配位における高密度ガスパフ放電実験
放電および計測条件

ガス種	He, 水素
R _{ax}	3.9m
B _t	2.539T
f _s	500kHz

ダイバータプローブにより
イオン飽和電流 I_{is} 計測

$$I_{is} \propto n_e \sqrt{T_e}$$

$$\Rightarrow \tilde{I}_{is} \propto \tilde{n}_e \quad (\tilde{n}_e \gg \sqrt{\tilde{T}_e})$$

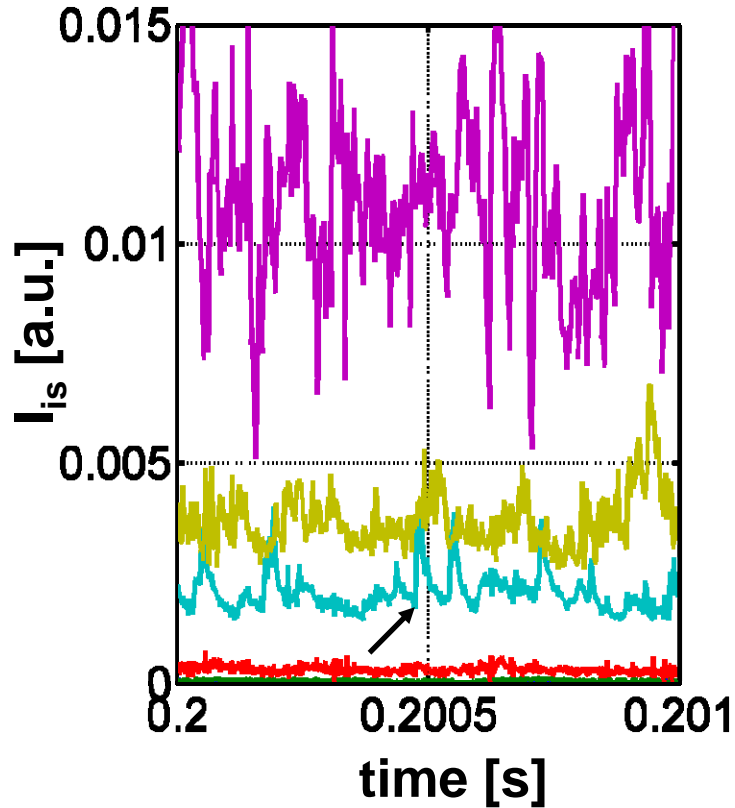


非接触状態ではプラズマが広く薄く存在

プラズマ中の揺動

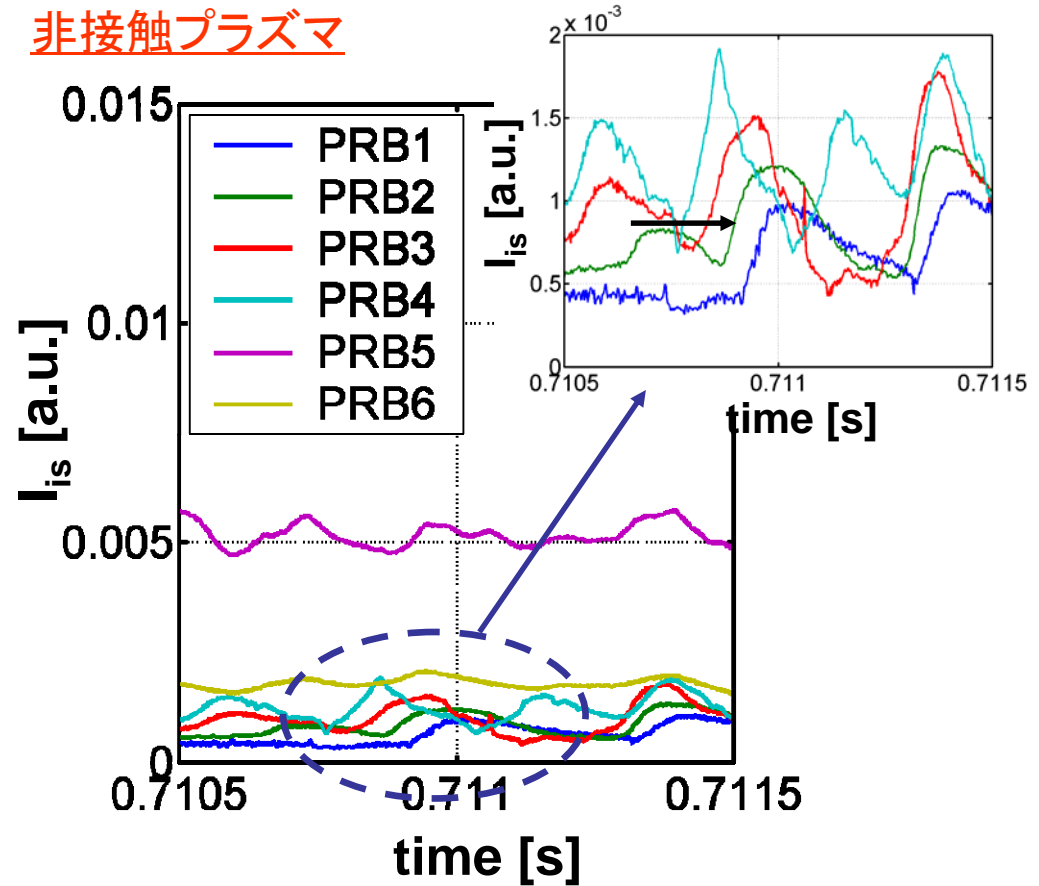
生データ

接触プラズマ



- PRB4に急峻な立上りとゆっくりした減衰
- PRB5, 6では比較的乱雑に変動

非接触プラズマ



- 接触時PRB4に比べバースト持続時間長
- PRB4→3→2 →1とバーストが明瞭に伝播

⇒プローブ間の相互相関から伝播を評価

プローブ間の相関評価

相関関数

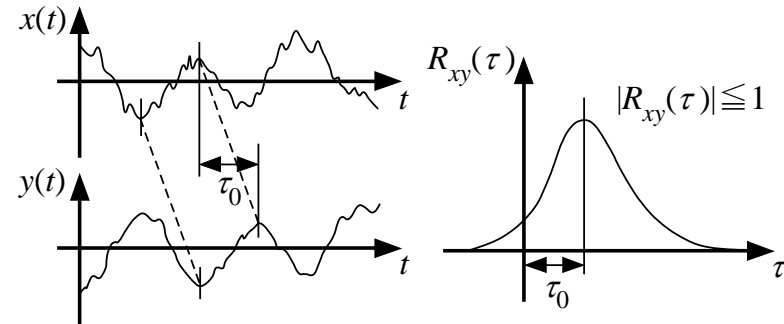
相互相関関数 (x, y は揺動成分)

$$C_{xy}(\tau) = x(t)y(t+\tau)$$

相互相関係数

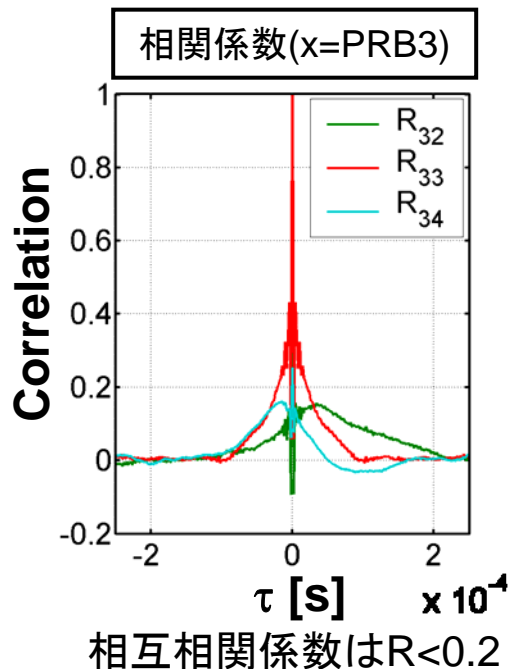
$$R_{xy}(\tau) = C_{xy}(\tau) / \sqrt{x^2} \sqrt{y^2}$$

x 同士の相関は自己相関関数、自己相関係数

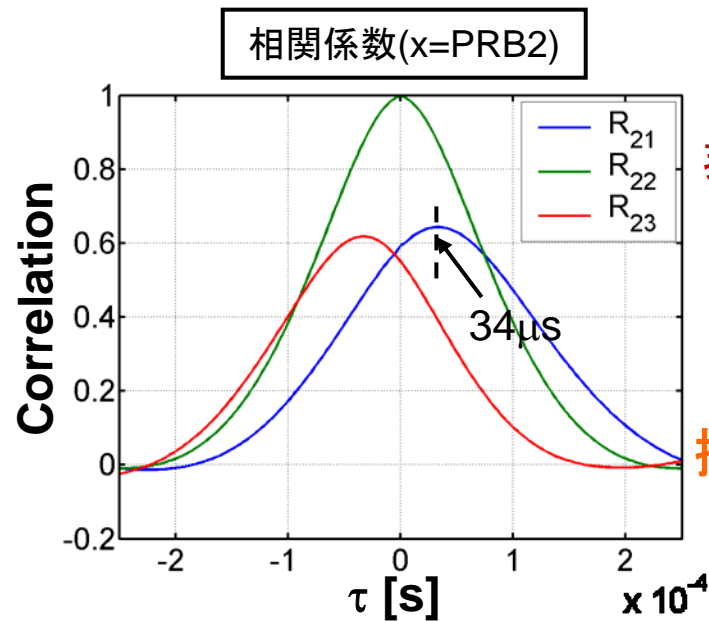


相互の信号の相関の大きさとその時間遅れ(進み)を検出できる

接触プラズマ



非接触プラズマ



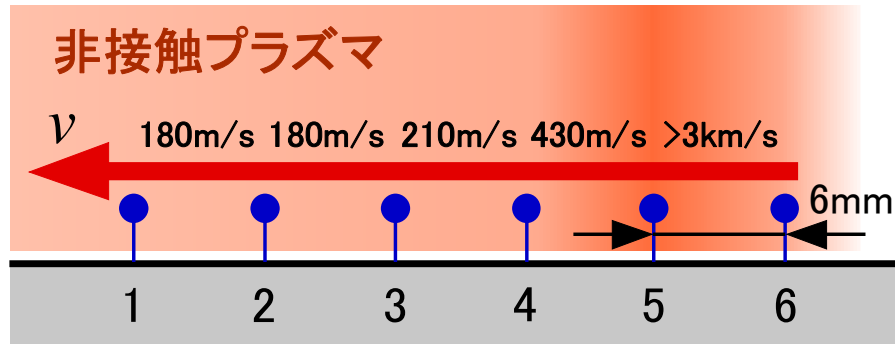
非常に大きな相互相関
ピークに明確なズレ



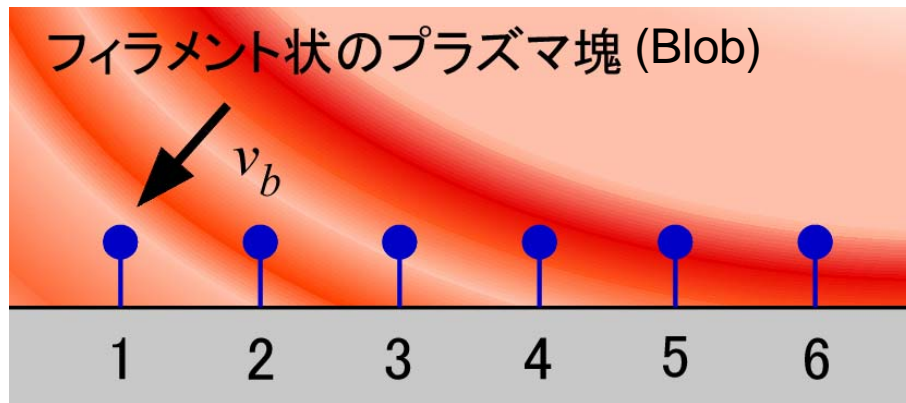
プローブ間の
揺動平均速度の導出

揺動平均速度の評価

速度計算結果



矛盾しないモデル



非接触プラズマ中(ガスパフ中)で
Plasma Blob輸送が増大した可能性

PRB5, 6に同時バースト

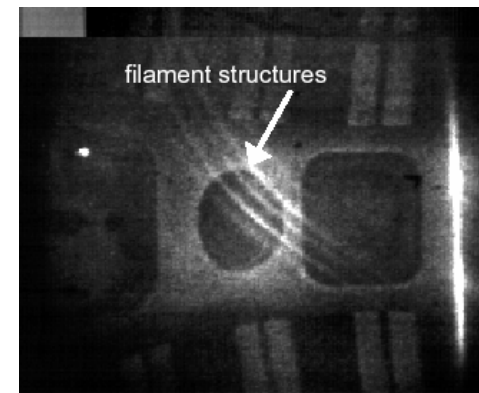


PRB5→4→3と速度減少



PRB3→2→1は等速度で伝播

球状トカマクNSTXにおいて計測された
Plasma Blobのフィラメント構造



R.J. Maqueda et al., Rev. Sci. Instrum **72**(2001)931

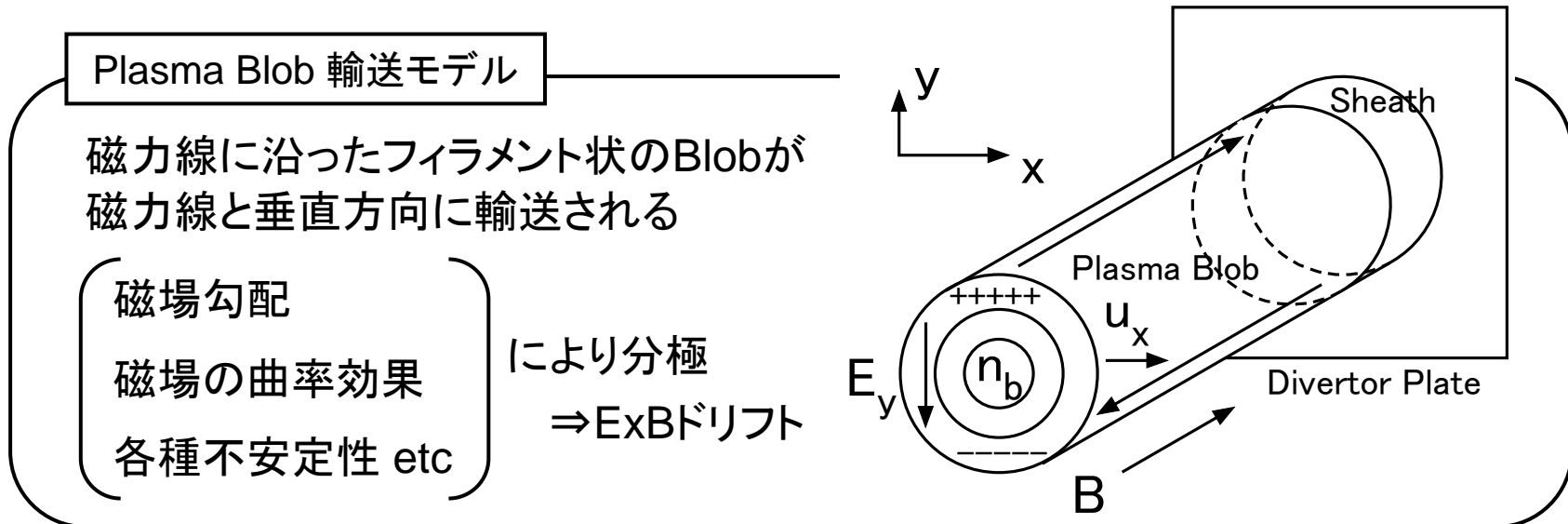
まとめと今後の課題

[NAGDIS-II]

- 接触・非接触プラズマ中での各種プラズマパラメータ揺動計測を行った
- 揺動データの確率密度関数計算および定量化を行った
- より詳細なデータ取得を予定

[LHD]

- 非接触プラズマ中においてプローブ間に大きな相互相関を確認した
- 相関のズレから揺動の平均速度を導出した
- Plasma Blob 輸送の理論的な一致を調べるために磁力線追跡が必要



ポスター用資料

Gram-Charlier級数展開

確率密度関数 $p(x)$ を直交展開

Hermite多項式(直交関数)

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2/2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2/2}$$

$$\int H_m(x) H_n(x) \phi(x) dx = \begin{cases} m! & (m=n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases}$$

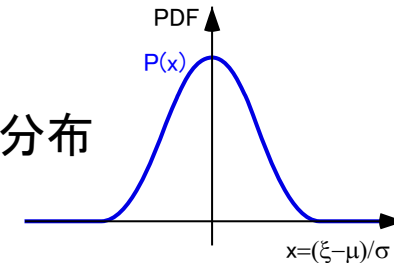
(複素フーリエ級数)

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{j2\pi nt/T}$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi nt/T} dt$$

無次元化した変数 $x = (\xi - \mu)/\sigma$ について

$$\begin{cases} p(x) = c_0 \phi(x) + \frac{c_1}{1!} \phi'(x) + \frac{c_2}{2!} \phi''(x) + \dots + \frac{c_n}{n!} \phi^{(n)}(x) \\ \phi^{(n)}(x) = (-1)^n H_n(x) \phi(x), \phi_x : \text{ガウス分布} \\ c_n = (-1)^n \int_{-\infty}^{+\infty} H_n(x) p(x) dx \end{cases}$$



$\Rightarrow c_0 = 1, c_1 = c_2 = 0, c_3 = -\frac{m_3}{\sigma^3}, c_4 = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3$
Skewness Flatness

ガウス分布

$$c_0 = 1, c_n = 0 \quad (n \geq 1)$$

確率密度関数の展開係数 C_n を求めることで
ガウス分布からの偏差を定量的に評価

カルバックライブラーのダイバージェンス(KLD)

カルバックライブラーのダイバージェンス
(Kullback-Leibler Divergence)

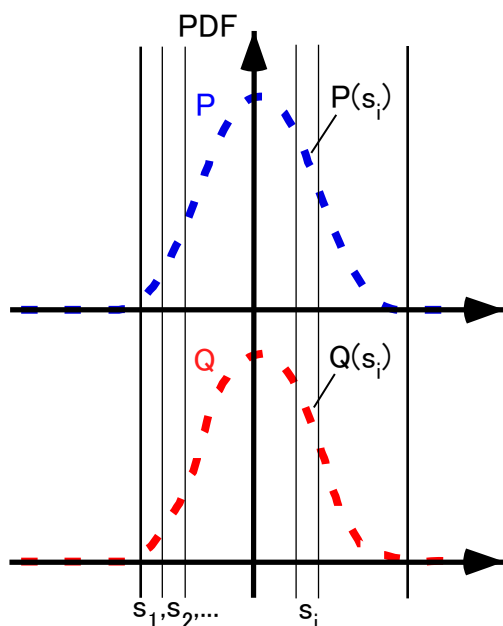
$$D(P \parallel Q) = \sum_{\{s\}} P(s_i) \log(P(s_i)/Q(s_i))$$

$P(s)$ と $Q(s)$, $\{s\} = \{s_1, s_2, \dots\}$ は離散化されたPDF



$$\begin{cases} P = Q \Rightarrow D(P \parallel Q) = 0 \\ P \neq Q \Rightarrow D(P \parallel Q) > 0 \end{cases}$$

PDF型が異なるほどD大



■ PDF型の類似度を判断する指標

■ 微妙な差異を識別可能

■ 情報理論の分野で広く用いられる

$$\begin{aligned} D(P \parallel Q) &= -\sum_{\{s\}} p(s_i) \log q(s_i) + \sum_{\{s\}} p(s_i) \log p(s_i) \\ &= H(P, Q) - H(P) \end{aligned}$$

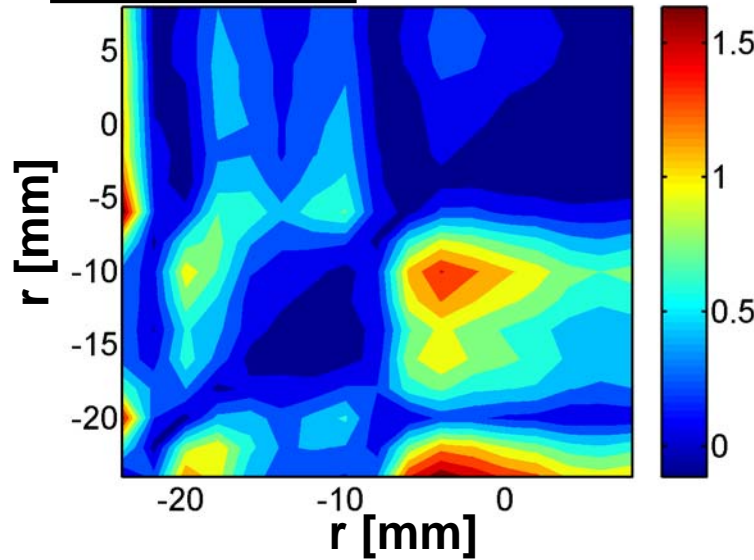
■ **積分範囲**を定める必要がある ($P(s_i) \neq 0, Q(s_i) \neq 0$)

⇒ 短時間データや型が大きく異なるPDFでは
テール部分の評価ができない

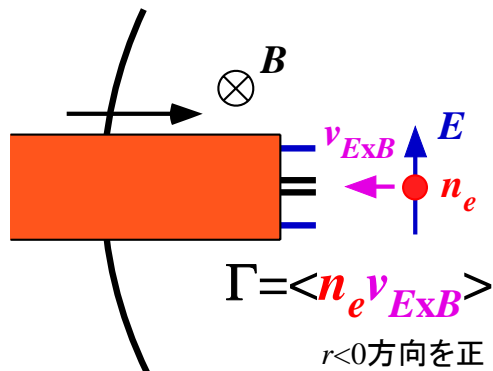
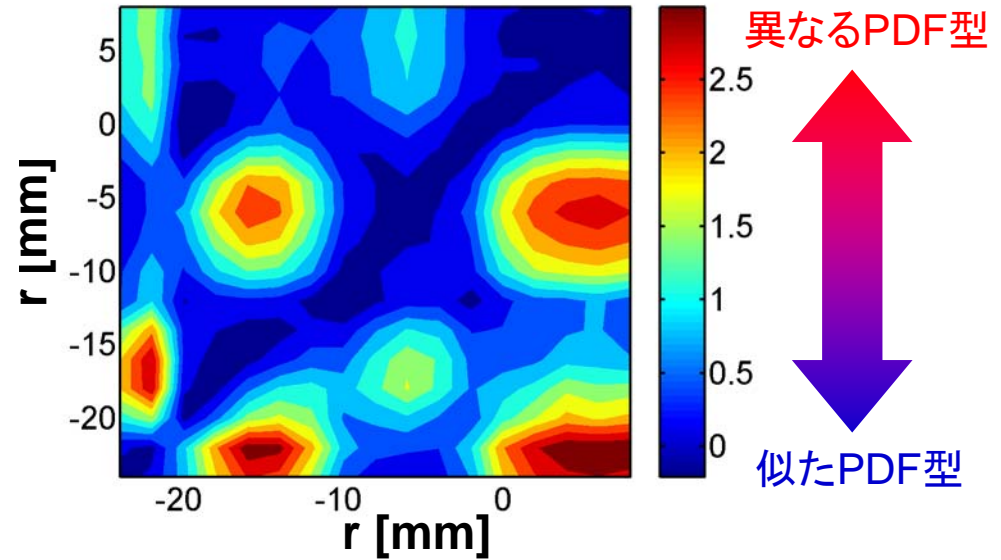
電子密度のKLD / 揺動による輸送の評価

電子密度のKLD

接触プラズマ



非接触プラズマ



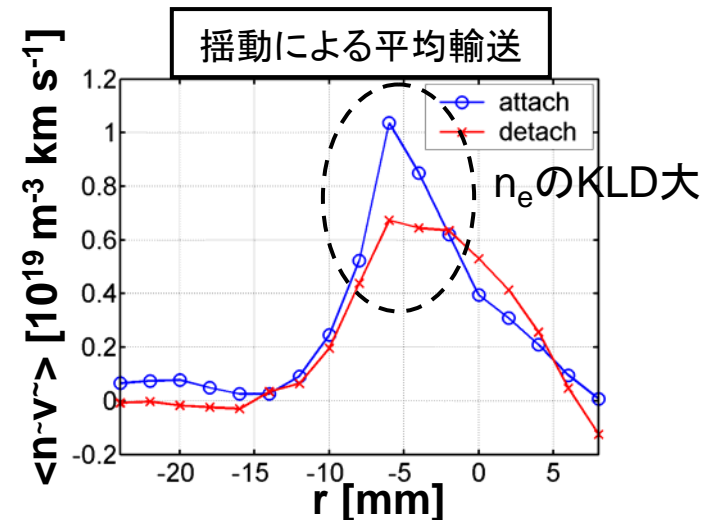
フラックスの評価法

揺動による輸送

$$\langle \tilde{n} \tilde{v} \rangle = \Gamma - \langle n \rangle \langle v \rangle$$

$$\tilde{n} \tilde{v} = n v - \langle n \rangle \langle v \rangle$$

周期的に変動
⇒ 不安定性が駆動源？



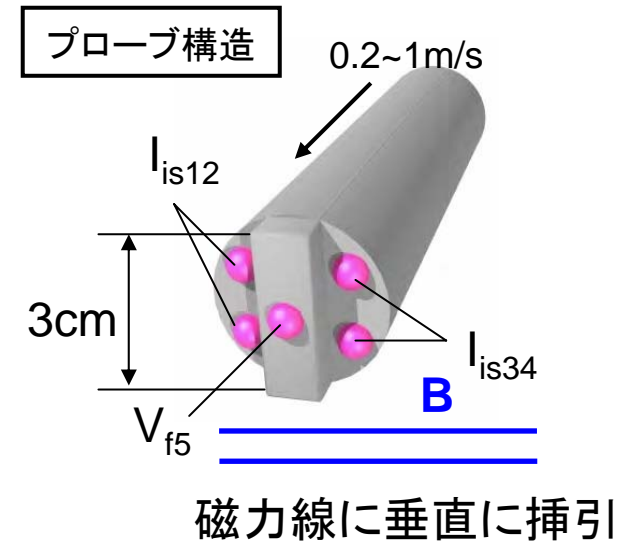
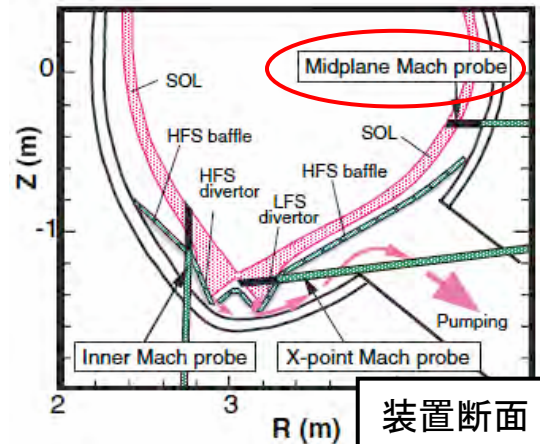
大型トカマク装置JT-60Uデータ解析

JT-60U #45723

L-modeプラズマ高速挿引プローブ計測

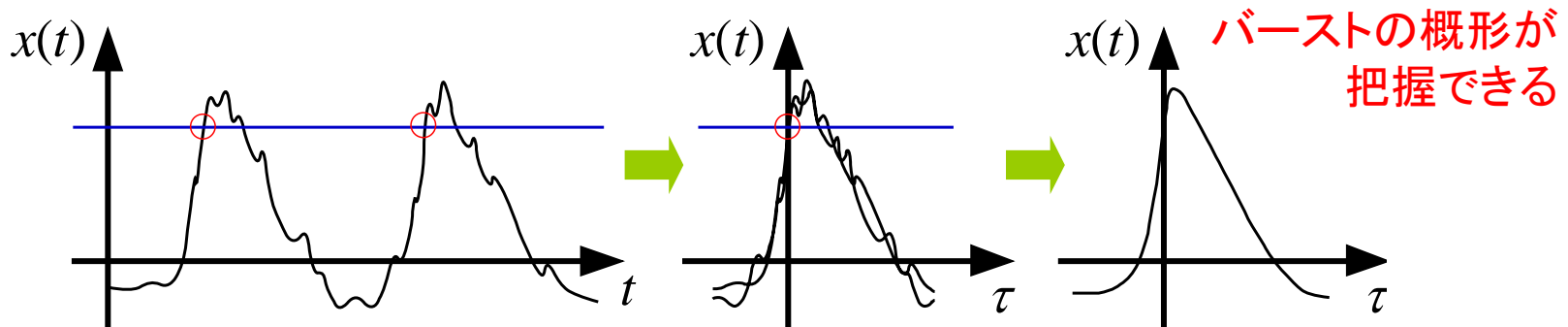
放電および計測条件

I_p	1A
B_t	3.2T
n_e	$1.8 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3}$
f_s	500kHz

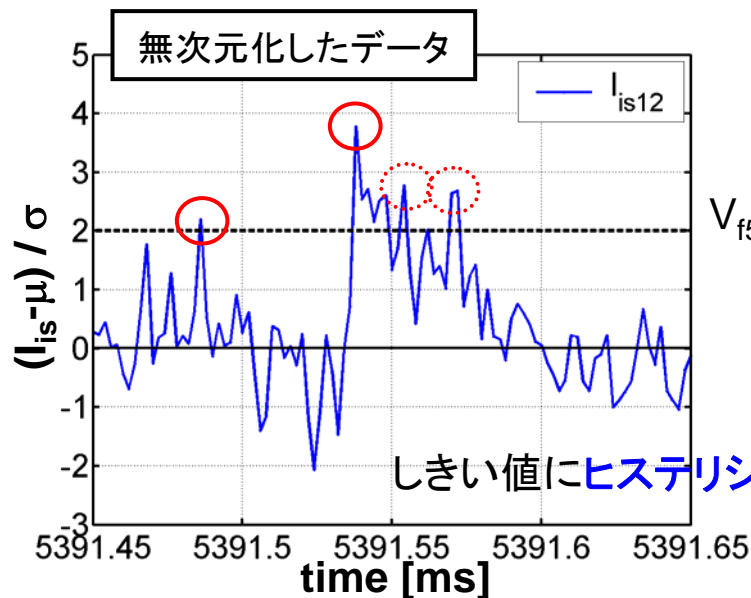


条件付き平均法 (Conditional averaging)

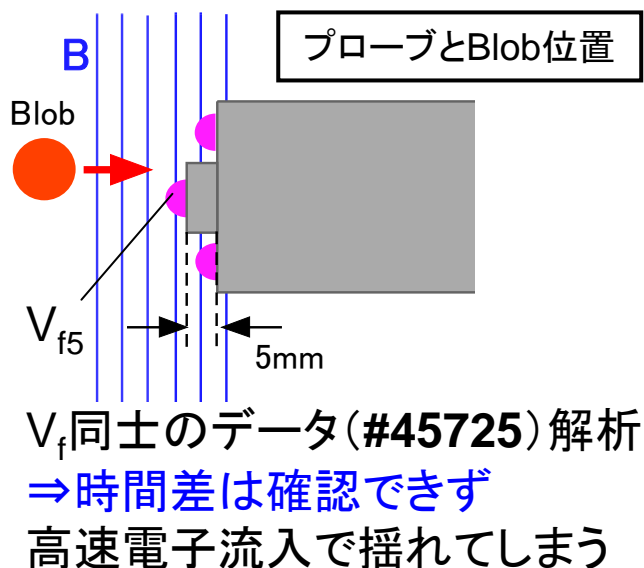
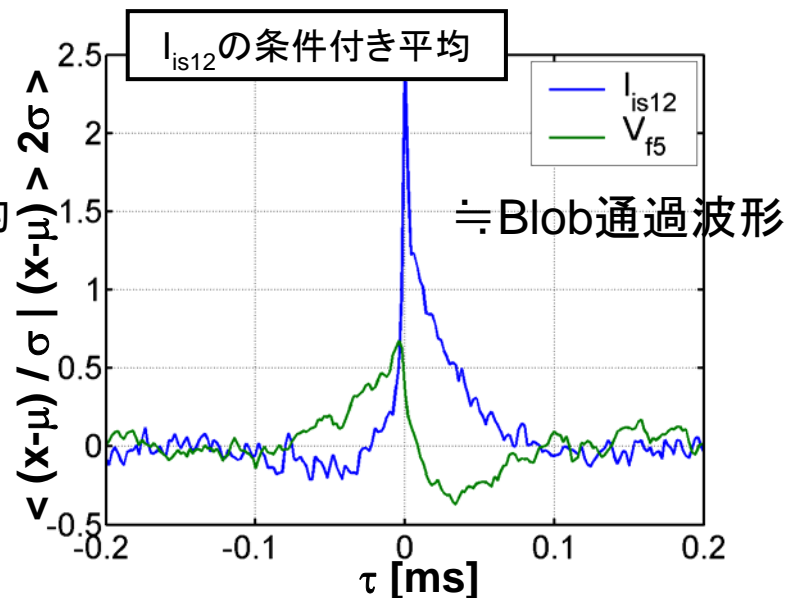
しきい値を越える信号をバーストと判定⇒立上り位置を基準として平均化



条件付き平均法 / 実験提案

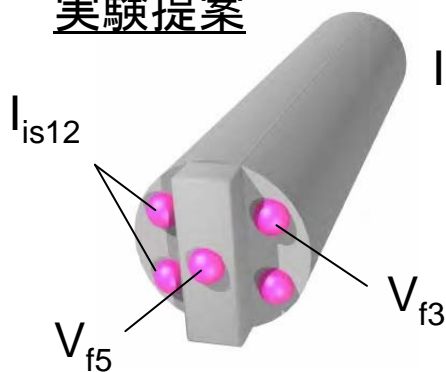


V_{f5} も同時平均

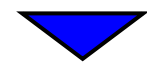


I_{is12} の正バーストと V_{f5} に明確な依存性

実験提案



I_{is12} の正バーストを条件付き平均

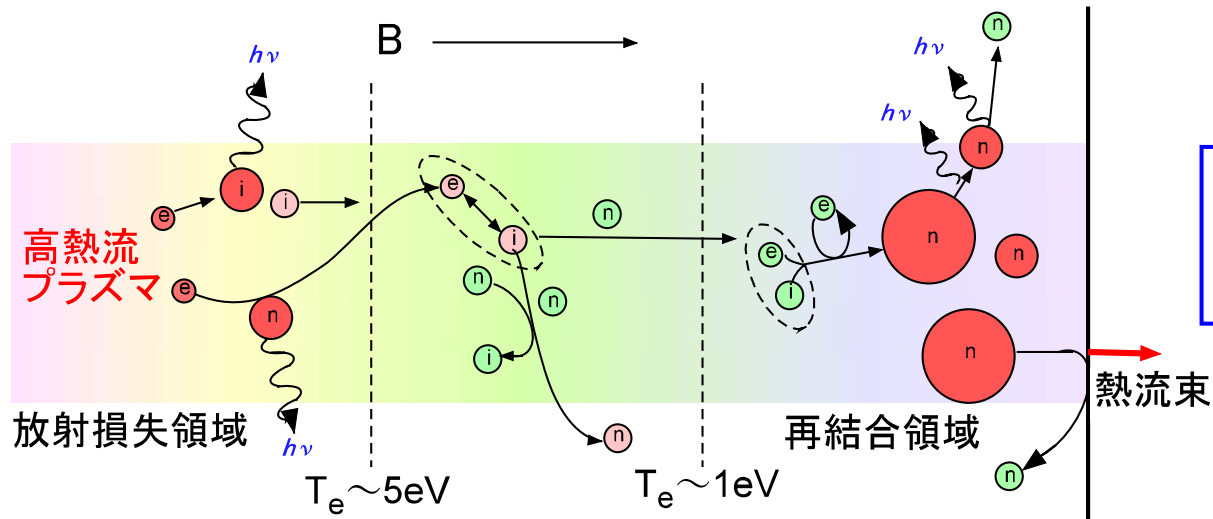
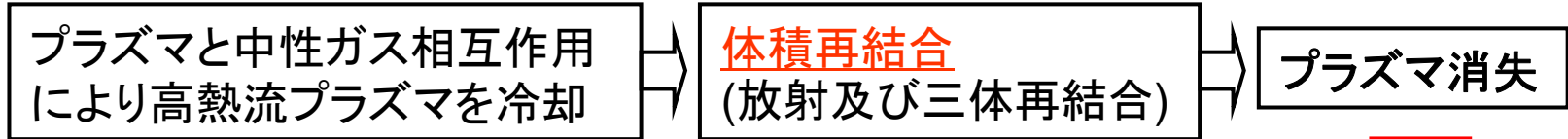


同時平均した V_{f3} , V_{f5} の
時間差から速度導出

BlobやELMの速度が導けるかもしれない

付録

非接触プラズマ

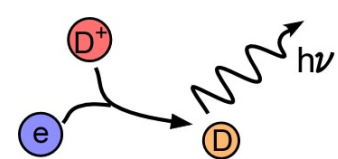


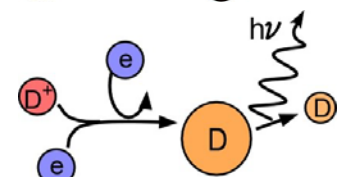
非接触プラズマ中の輻射過程

↓

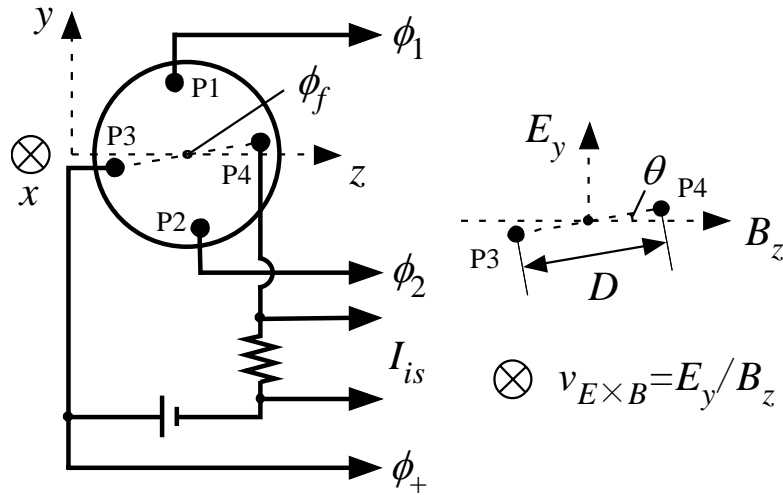
ダイバータ板
熱負荷低減

- ◆ 放射再結合

$$D^+ + e^- \rightarrow D(nl) + h\nu$$

- ◆ 三体再結合

$$D^+ + e^- + e^- \rightarrow D(nl) + e^-$$


四探針法



浮遊電位 $\phi_f = (\phi_1 + \phi_2)/2$

電子温度 $T_e [eV] = (\phi_+ - \phi_f) / \ln 2$

電子密度 $n_e = \frac{\exp(1/2)}{S \sqrt{e^3}} \frac{\sqrt{m_i / T_e [eV]}}{\exp[(\phi_+ - \phi_f) / T_e [eV]] - 1} I_{is}$

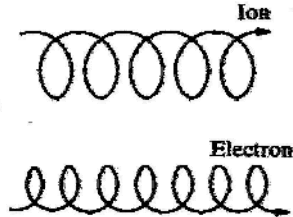
プラズマ電位 $\phi_p = \phi_f + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{m_i}{2\pi m_e} \right) T_e [eV]$

e : 電気素量, m_i : イオン質量, m_e : 電子質量

k : ボルツマン定数, S : 電流捕集表面積

$E \times B$ ドリフト

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$



$$v_{E \times B} = (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) / |\mathbf{B}|^2$$

$$v_{E \times B} = E_y / B_z = -(\phi_1 - \phi_2) \cos \theta / DB_z$$



フラックス

$$\Gamma = n v_{E \times B} \propto \frac{I_{is}}{\sqrt{T_e}} (\phi_1 - \phi_2)$$



揺動データの取り扱い

信号

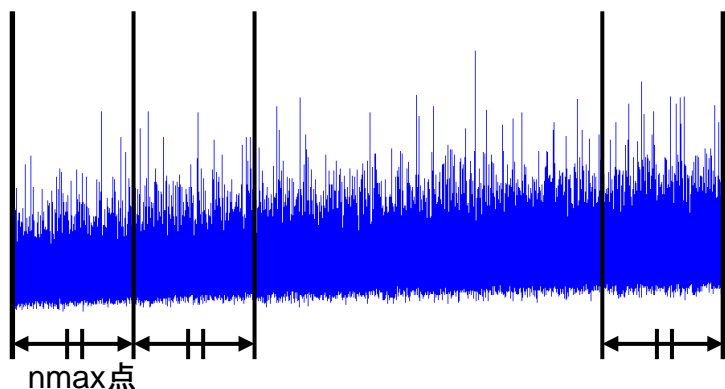
$$x = \tilde{x} + \bar{x}$$

揺動成分 平均値

大型装置の揺動解析における問題点

- ◆ 長時間のデータが得られない
- ◆ 平均値成分が常に変動(非定常)

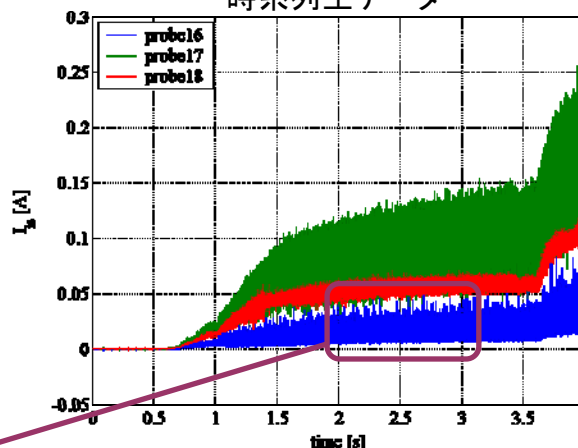
x_1, \bar{x}_1, σ_1 x_2, \bar{x}_2, σ_2 x_N, \bar{x}_N, σ_N



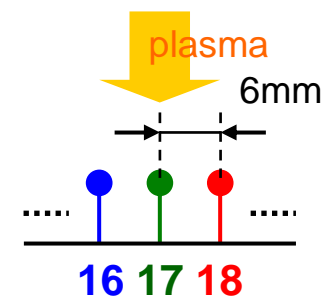
平均値成分... 平均値or最小2乗法
nmax ≫ 注目する揺動のスケール

LHD #44190 ダイバータプローブデータ

時系列生データ



弱磁場 ⇄ 高磁場



16 17 18
イオン飽和電流測定

$$I_{is} \propto n_e \sqrt{T_e}$$

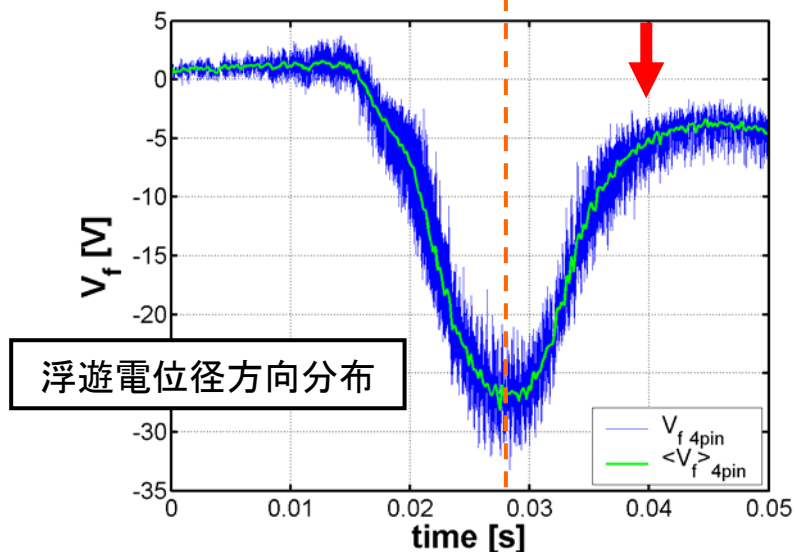
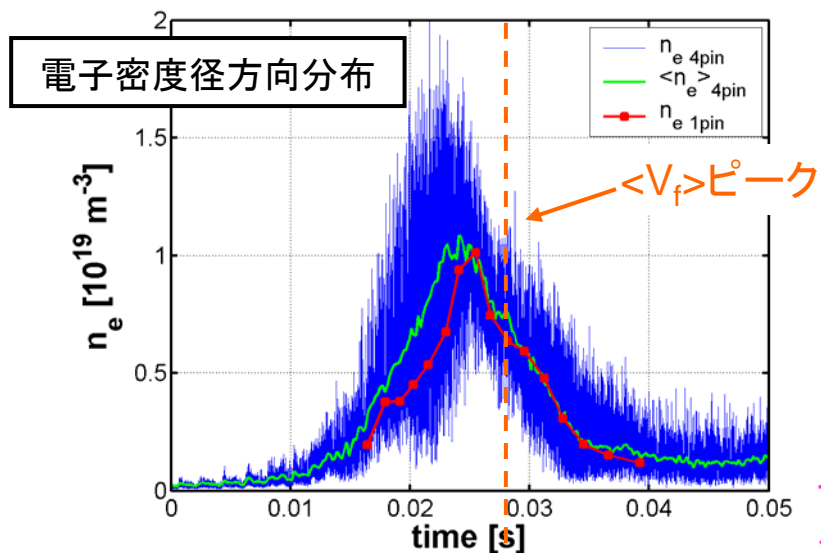
解析手順(計算:f)

- ① 対象信号の切り出し及び等分割
- ② 各分割の平均値、標準偏差 σ の決定
- ③ 各分割を準定常と仮定、解析
- ④ 計算結果をアンサンブル平均

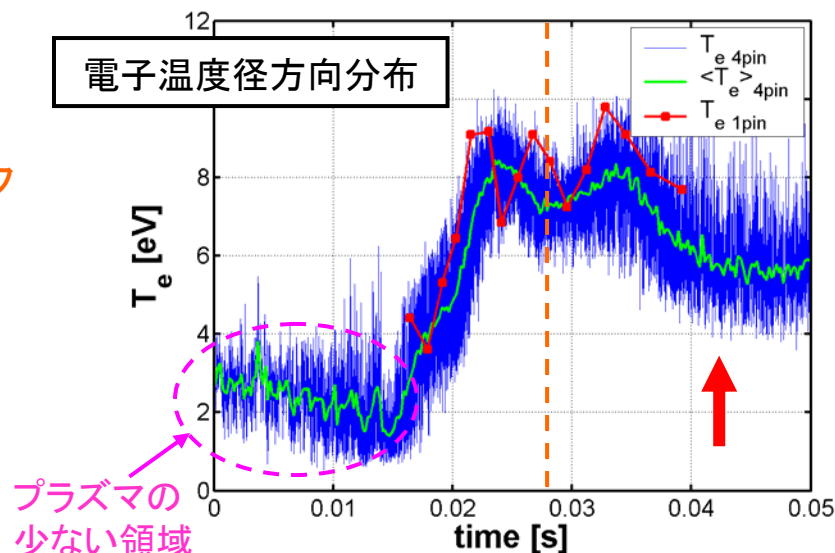
$$E[f(\tilde{x}, \sigma)] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(\tilde{x}_k, \sigma_k)$$

径方向プロファイルの高速挿引計測(接触時)

挿入側→装置中央→反対側



挿入側→装置中央→反対側



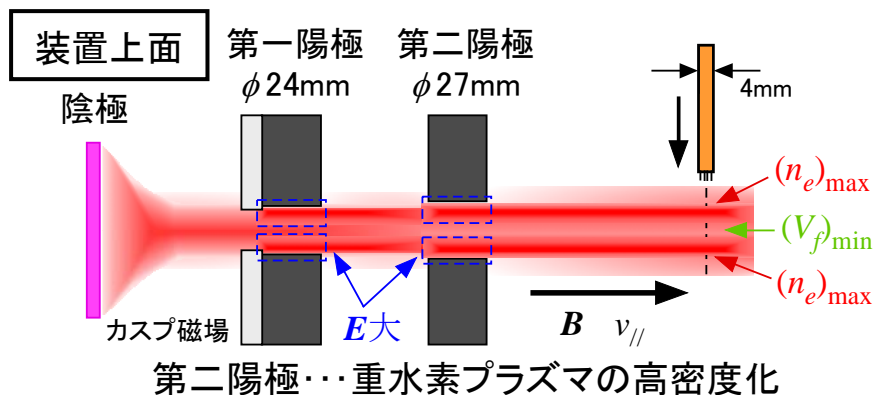
■ 四探針法、単探針法結果のよい一致

- $\langle n_e \rangle$ ピーク、 $\langle V_f \rangle$ ピークにずれ
 - $\langle T_e \rangle$ 中央の谷、 $\langle V_f \rangle$ ピーク的一致
- ⇒ $\langle n_e \rangle$ 分布はふた山分布の可能性

- $\langle T_e \rangle$, $\langle V_f \rangle$ に明確な左右非対称性
- ピーク過ぎの n_e 揺らぎ幅減少

⇒ $E \times B$ ドリフトによるプラズマ回転

径方向プロファイル計測結果の評価



陽極付近でプラズマが多く生成

プローブ位置までふた山密度分布が維持

装置中央の浮遊電位(V_f)_{min}は
周囲の(n_e)_{max}に挟まれる

谷型のプラズマ電位(浮遊電位)

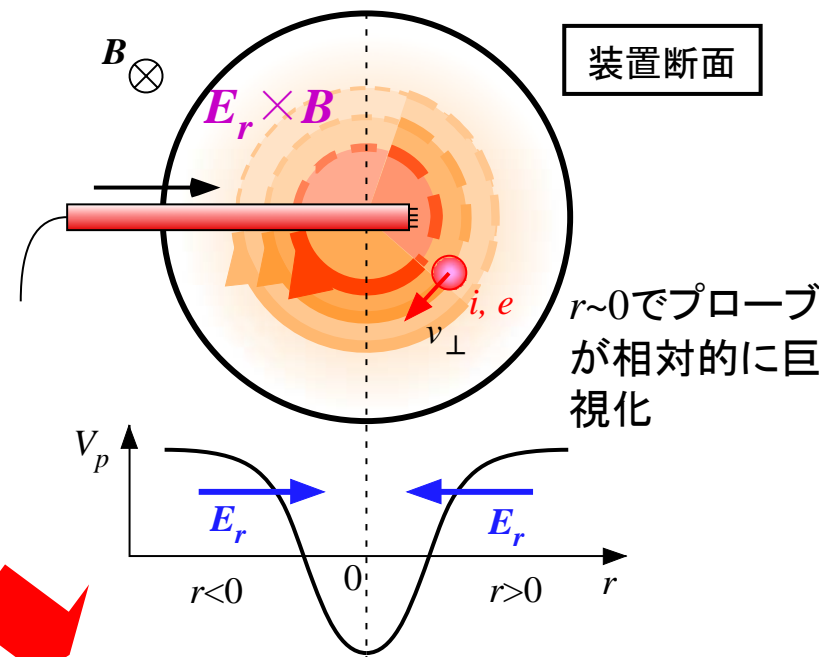
径方向電場 E_r による $E \times B$ ドリフト

$r > 0$ ではプローブの影となり密度減少

(n_e)_{max}点でのイオン速度見積もり

$$\begin{cases} \langle v_{i||} \rangle |_{n_e=(n_e)_{\max}} \approx 0.2 \cdot C_s \approx 2.8 [\text{km/s}] \\ v_{i\perp} |_{n_e=(n_e)_{\max}} = E_r / B \approx 20 [\text{km/s}] \end{cases}$$

プローブ直径を進む間に2.8回転
(静止プローブ結果では7.7回転)



$r > 0$ でのデータは解析に不適

揺動による輸送解析

