



JT-60Uにおける 周辺プラズマ揺動解析

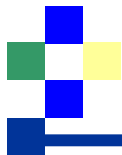
田中宏彦¹,

大野哲靖¹, 朝倉伸幸², 辻義之¹,
川島寿人², 梶田信³

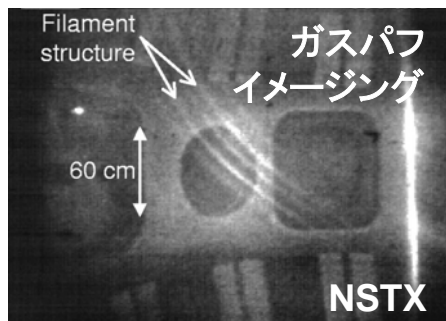
¹名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻

²日本原子力研究開発機構那珂研究所

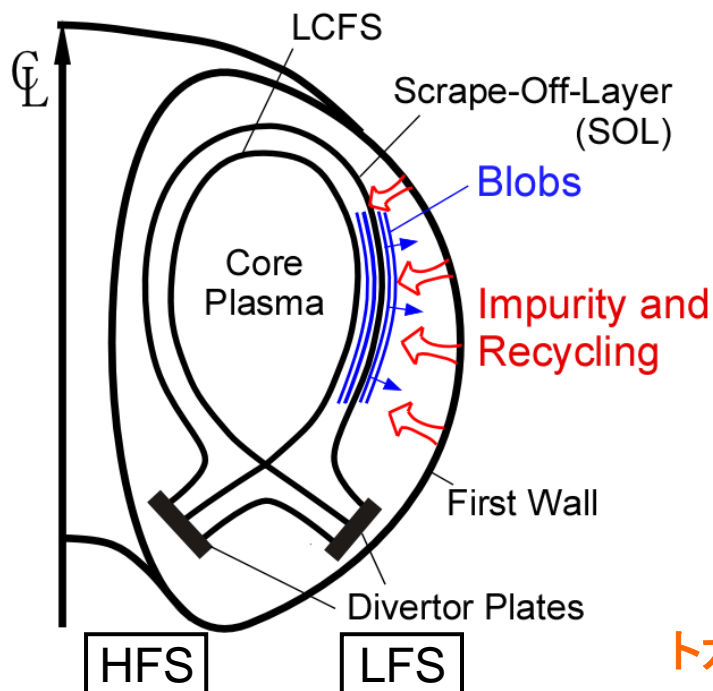
³名古屋大学エコトピア科学研究所



Plasma Blob輸送現象



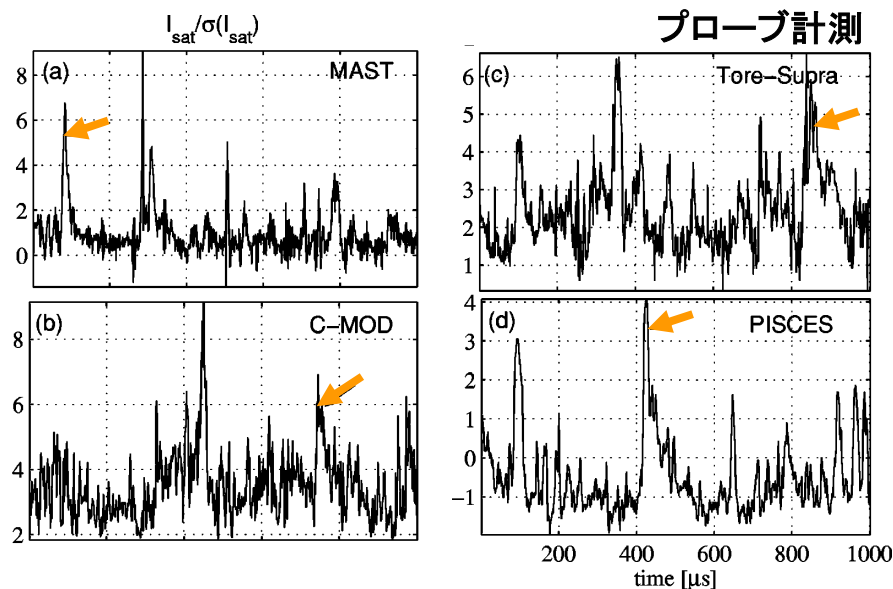
R.J. Maqueda, et al., Rev. Sci. Instrum. **72**, 931 (2001)



◆スクレイプオフ層(SOL)中で見られる非拡散的輸送現象

◆磁力線に沿ったフィラメント状の高密度プラズマ塊(Plasma blob)が磁力線を横切る

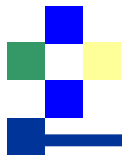
>>第一壁における不純物発生、リサイクリング



G.Y. Antar et al., Phys. Plasmas **10**, 419 (2003)

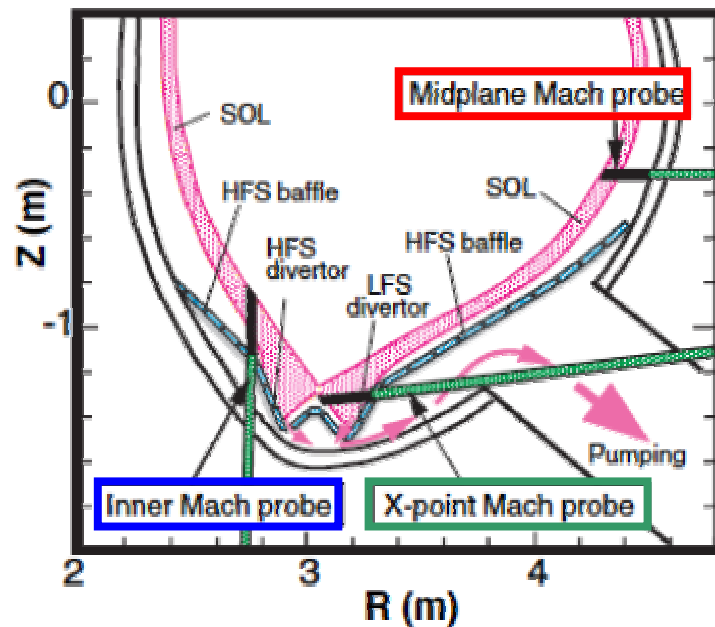
◆Plasma Blob通過時に静電揺動にバースト

トカマク装置では弱磁場側SOLにおいて多数の報告



JT-60U 計測系

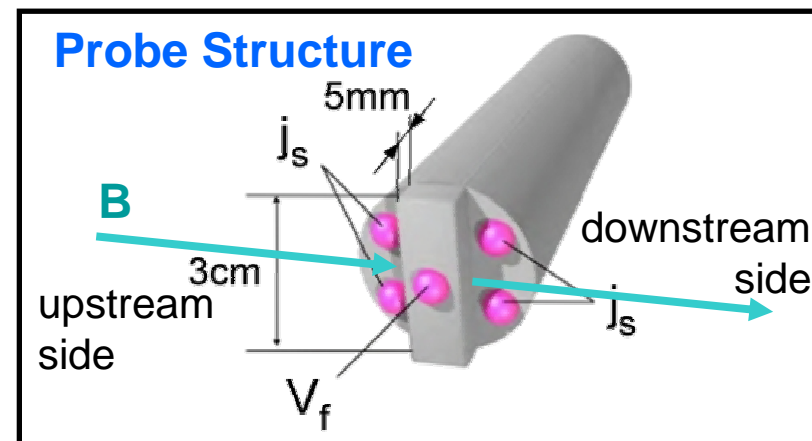
Cross-section of JT-60U



高速挿引プローブ

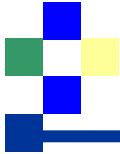
(サンプリング周波数: 500kHz, 挿引速度: ~50cm/s)

- Low-field-side (LFS) midplane
- High-field-side (HFS) above baffle
- below the X-point



研究目的

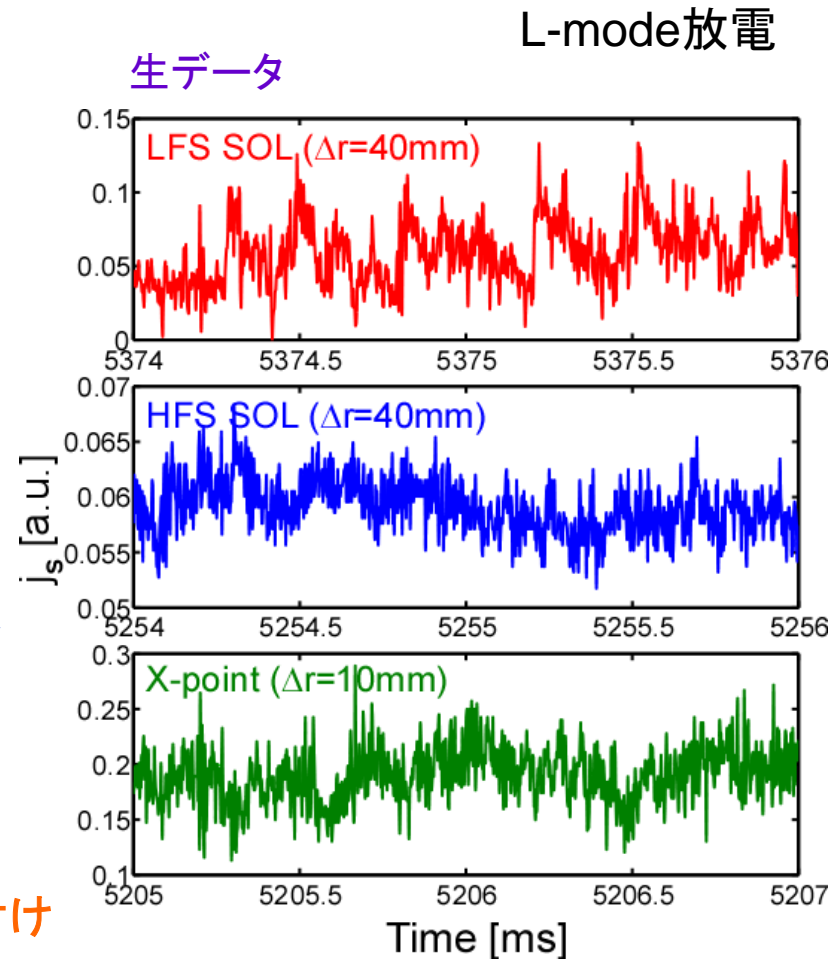
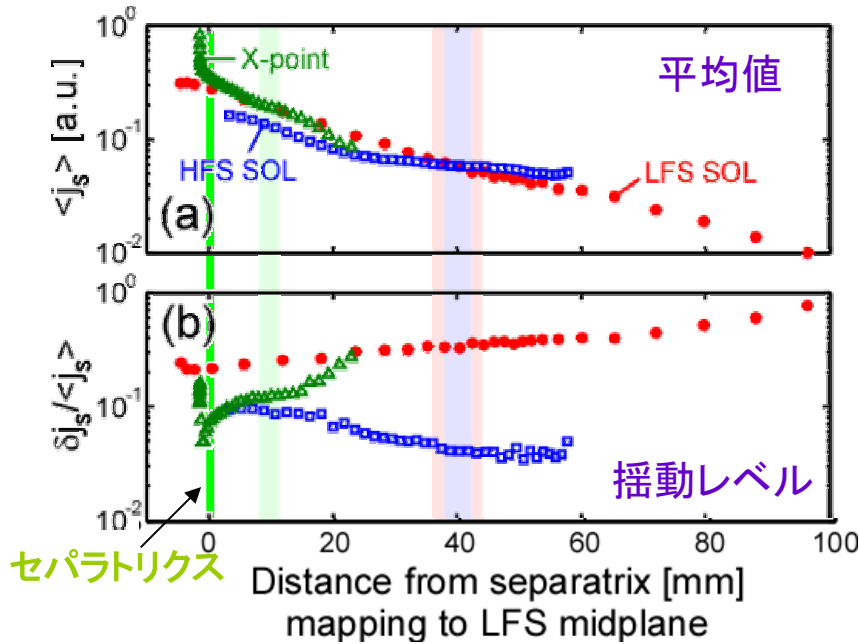
- 磁場構造の異なるポロイダル各位置における揺動特性の比較
- 大型トカマクJT-60UにおいてPlasma Blob輸送を調査



イオン飽和電流 計測結果

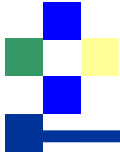
Shot number #45723 - LFS & HFS SOL (midplane-side)
Shot number #48473 - X-point (main-plasma-side)

$(I_p[\text{MA}], B_t[\text{T}], n_e[10^{19}\text{m}^{-3}], P_{\text{NB}}[\text{MW}])$
= (1, 3.2, 1.7, 4.0) at # 45723
= (1, 3.2, 2.1, 3.5) at # 48473

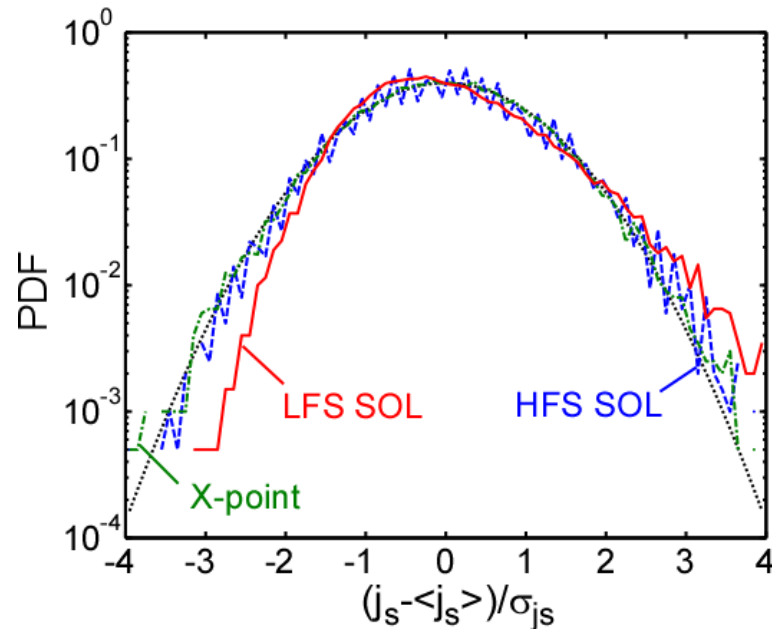
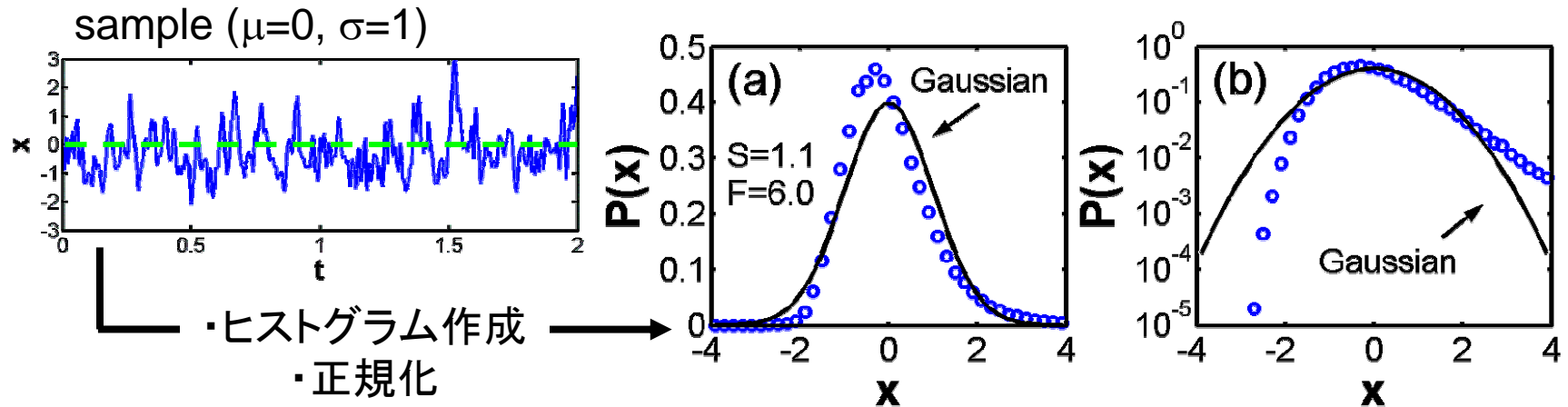


- ◆ 揺動レベルはHFSに比べLFSの方が一桁程度大きい
- ◆ LFSでのみ正バーストを明瞭に観測
>> Plasma Blob輸送の発生

⇒統計手法(確率密度関数)による特徴付け



確率密度関数 (PDF)



- ◆ LFSのPDFは正にテールが伸びている
- ◆ HFSやX-pointでのPDFはガウス分布に近い

PDF: 視覚的な評価

⇒ 定量的な評価法

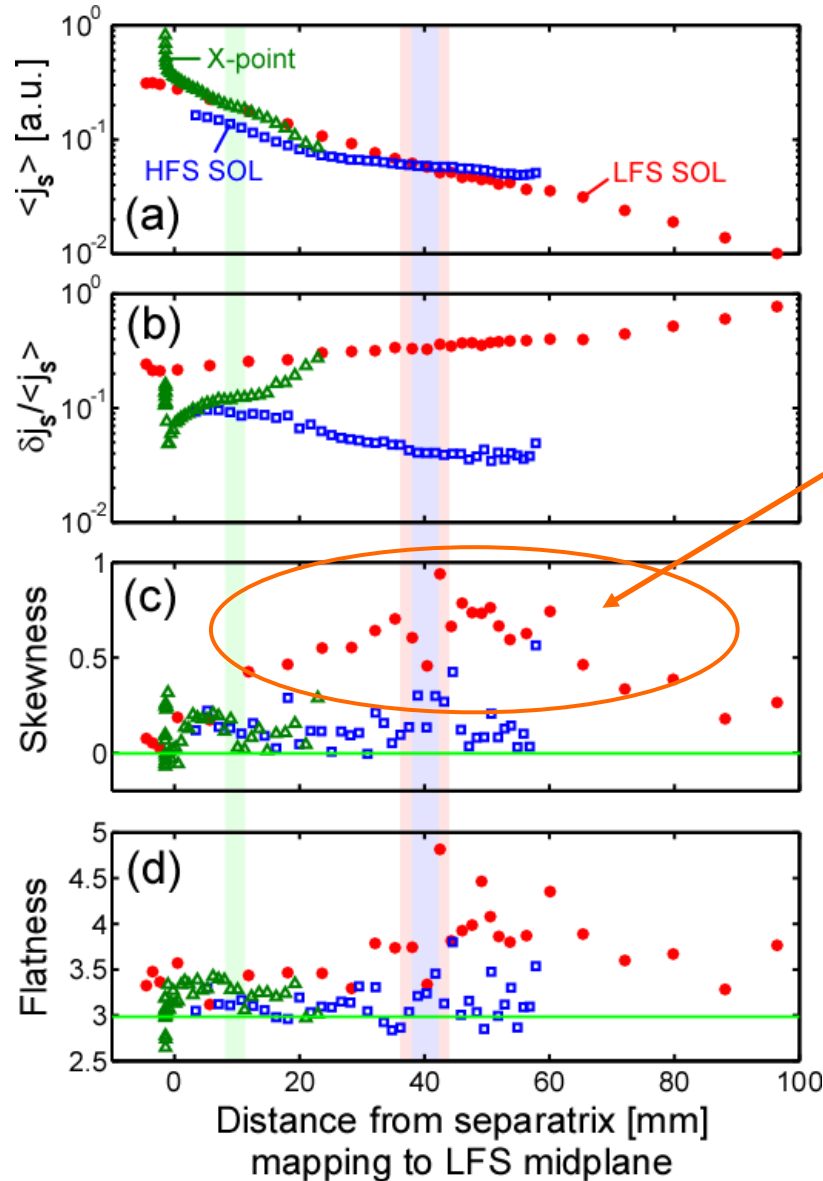
$$\text{Skewness} : S = \frac{\langle \tilde{j}_s^3 \rangle}{\langle \tilde{j}_s^2 \rangle^{3/2}}$$

$$\text{Flatness} : F = \frac{\langle \tilde{j}_s^4 \rangle}{\langle \tilde{j}_s^2 \rangle^2}$$

Gaussian $\rightarrow S=0, F=3$



揺動特性の径方向分布



$$\text{Skewness} : S = \frac{\langle \tilde{j}_s^3 \rangle}{\langle \tilde{j}_s^2 \rangle^{3/2}}$$

$$\text{Flatness} : F = \frac{\langle \tilde{j}_s^4 \rangle}{\langle \tilde{j}_s^2 \rangle^2}$$

Gaussian \rightarrow $S=0$, $F=3$

◆ LFSは広い範囲($\Delta r > 10\text{mm}$)でS大

Plasma Blobによる揺動が支配的
構造を有したまま輸送される

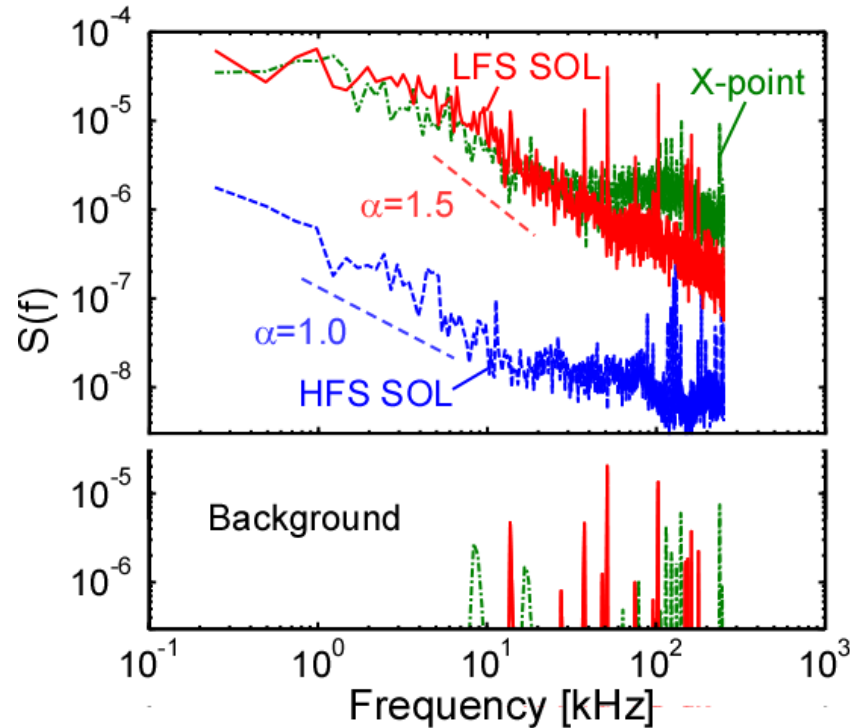
◆ HFS, X-pointではGauss分布に近い

\Rightarrow 各位置における揺動の
統計性質比較



周波数解析

パワースペクトル



自己相関係数

- ◆ LFSではBlobバーストによる相関
- ◆ HFS, X-pointでは乱雑成分が大きい

◆ ノイズによるピークを除きパワースペクトルにピークは見られない

>> Plasma Blob通過は非周期的

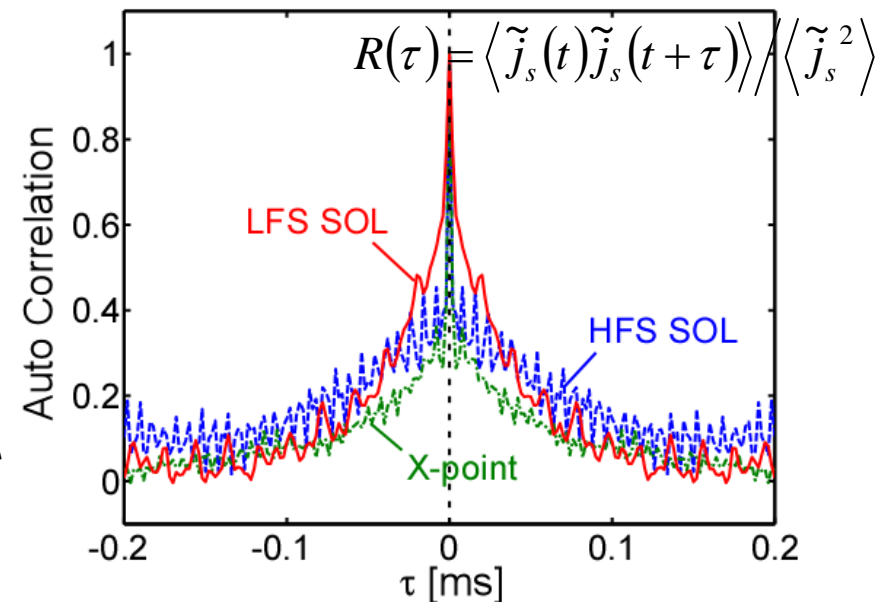
◆ べき乗則 $S(f) \sim f^{-\alpha}$ が見られる

LFS: $\alpha = 1.5$ HFS: $\alpha = 1.0$

G.Y. Antar et al., Phys. Plasmas **10**, 419 (2003)

MAST, Tore Supra, C-Mod, PISCES

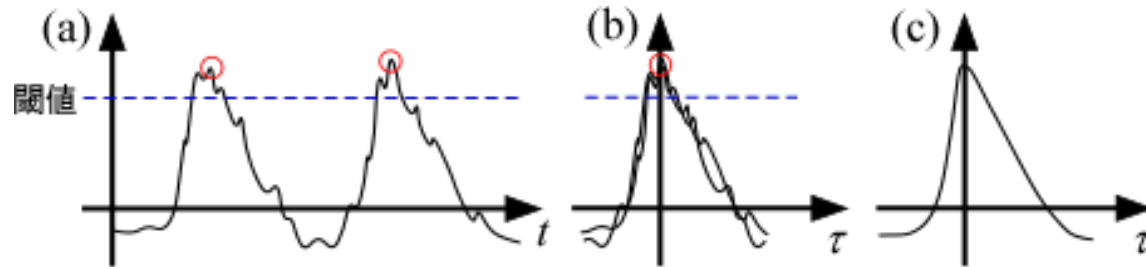
$\alpha = 1.6$



Plasma Blobバースト形状の抽出

条件付平均法(Conditional Averaging)

バースト形状の同定によく用いられる手法



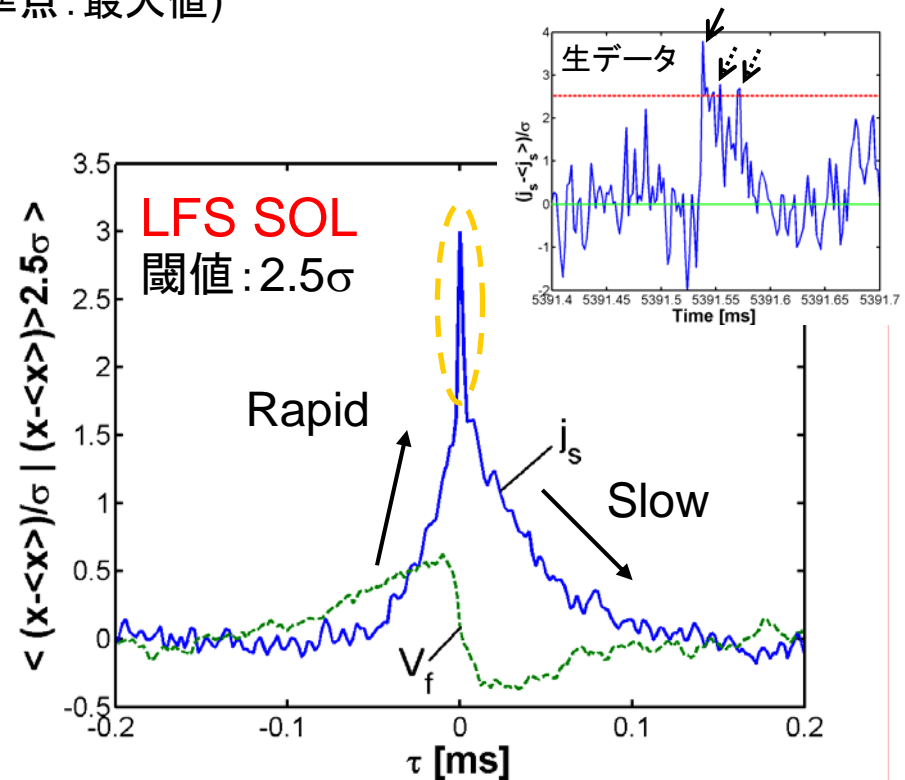
(a) 指定した"条件"でバーストを切り出して
⇒(b) "基準点"で集めて
⇒(c) 平均化

例・・・ (条件: 閾値を超えたとき、基準点: 最大値)

- ◆ 鋭い立ち上がりと緩やかな減衰
⇒ Plasma Blobが進行方向に対して
前面で密度が急峻化
(他の実験結果や理論と一致)
- ◆ 浮遊電位 V_f との間で依存性を確認

問題: 高周波ノイズによる影響

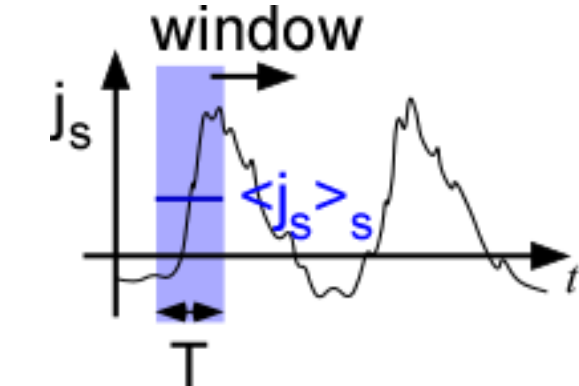
- 最大値を中心に平均化
⇒ 人工的なピーク
- 検出点のオーバーラップ
⇒ プロファイルが広がる





VITA法の導入

VITA (Variable-interval time-averaging) 法



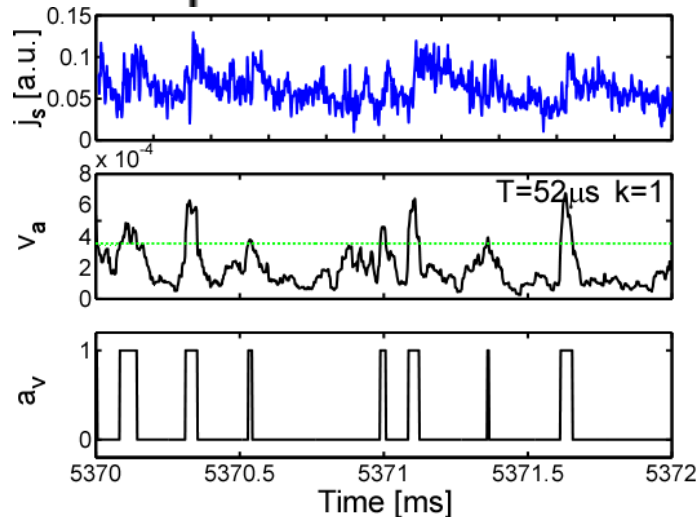
時間窓 T 内の局所的な分散(移動分散)を定義する

$$v_a(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (j_s(t'))^2 dt' - \left[\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} j_s(t') dt' \right]^2$$

移動分散 \geq 分散の k 倍のとき検出関数を1とする

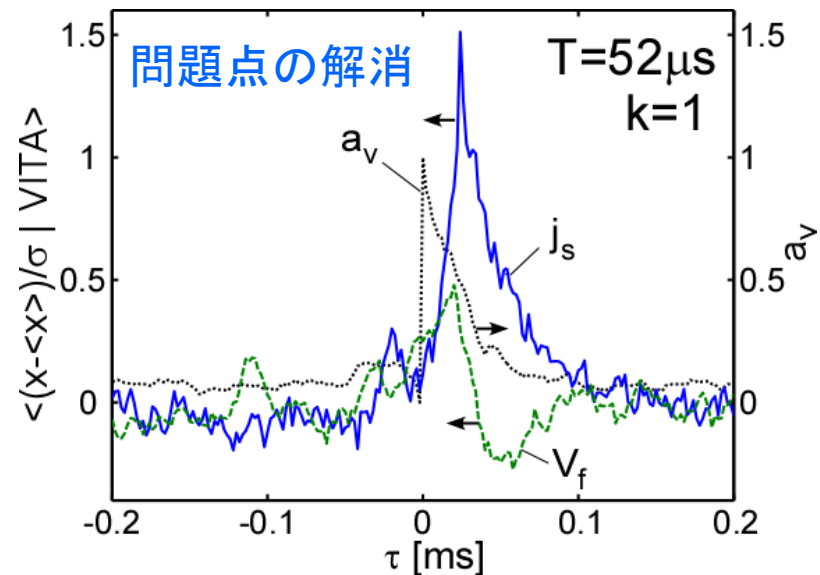
$$a_v(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } v_a(t) \geq k \langle (j_s - \langle j_s \rangle)^2 \rangle \\ 0 & \text{for else} \end{cases}$$

>> 時間窓 T の急激な変化を検出



バーストの急激な立ち上がり注目

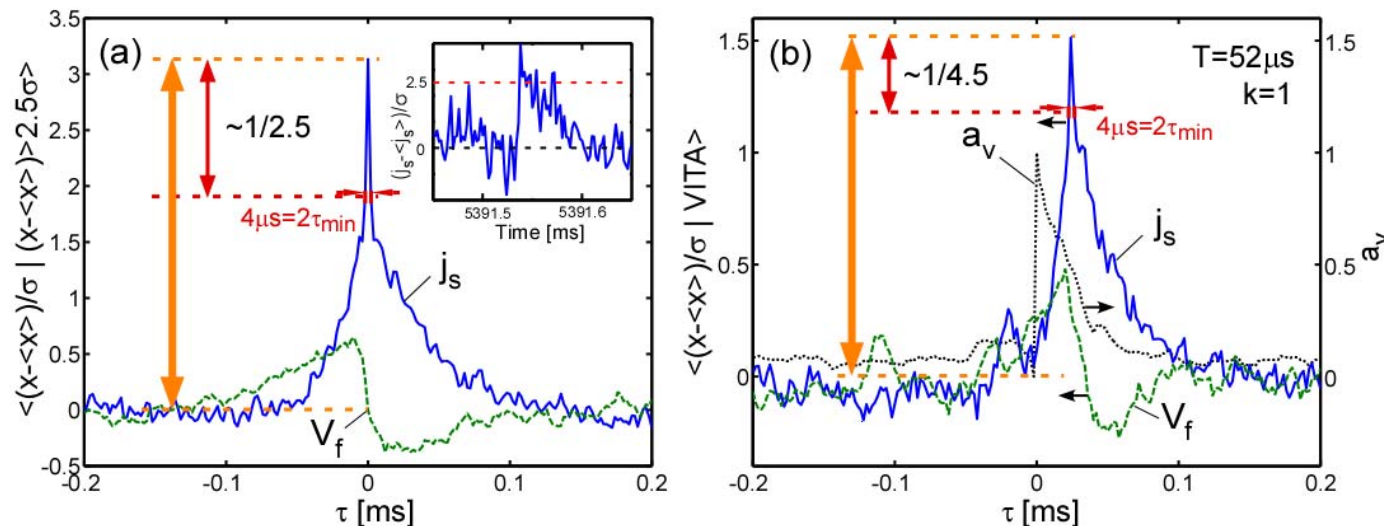
高周波ノイズ $\ll T <$ バースト持続時間





まとめ

- JT-60U設置の高速挿引プローブを用いて、弱磁場側、強磁場側、およびX点付近での揺動特性の比較を行った
- 弱磁場側ではPlasma Blob通過によると思われる正にバースタ的な揺動を多数観測した
- 強磁場側、X点付近においてはPDF型はガウス分布に近く、Plasma Blob通過による揺動の振る舞いは見られなかった
- VITA法を用いた条件付き平均法により、フィルタを通さず、問題点を回避したPlasma Blob通過波形(急峻な増加、緩やかな減少)を得た



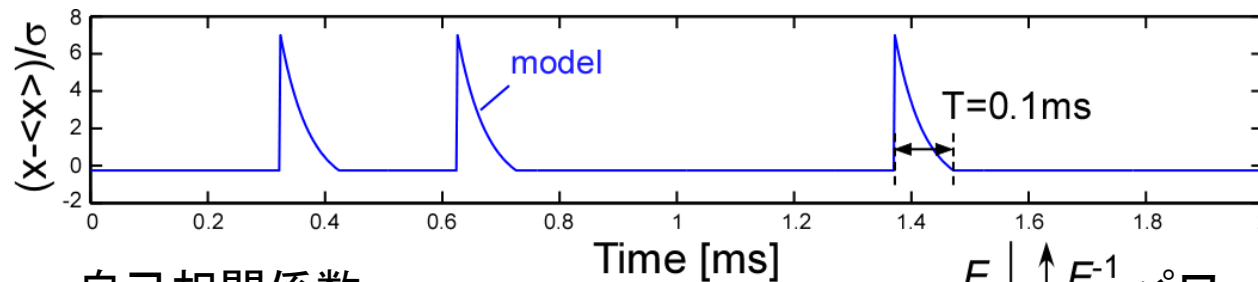


モデル波形による検証

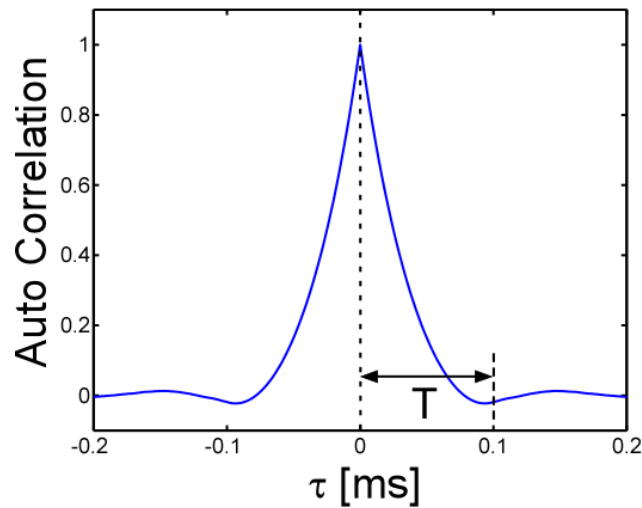
バースト波形 x_b をランダムに配置

$$x_b(t) = \begin{cases} \exp(-2t/T) - \exp(-2) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{for else} \end{cases}$$

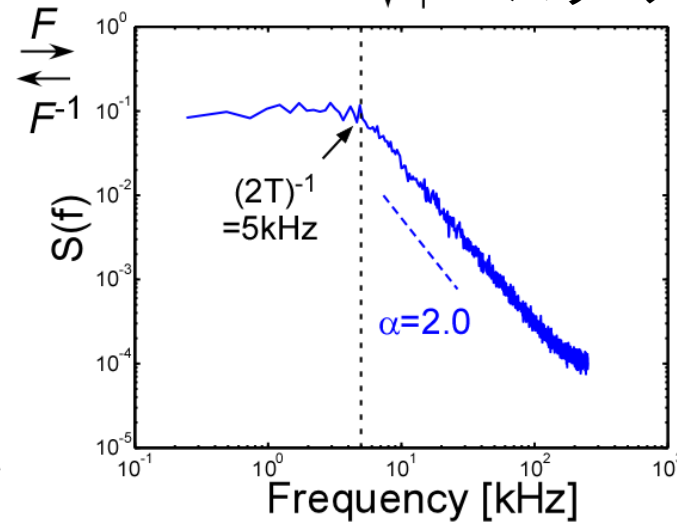
モデル波形



自己相関係数



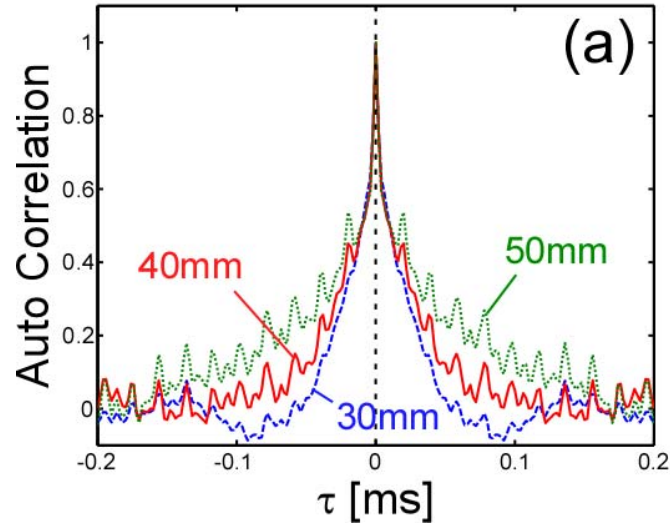
$F \downarrow \uparrow F^{-1}$ パワースペクトル



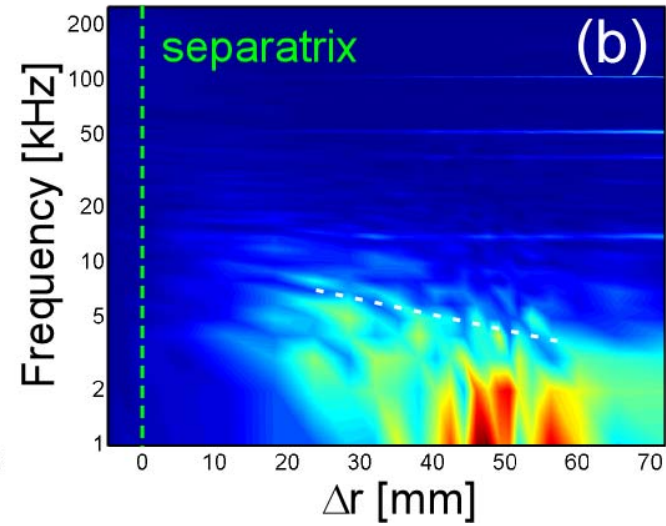


バースト持続時間の径方向分布調査

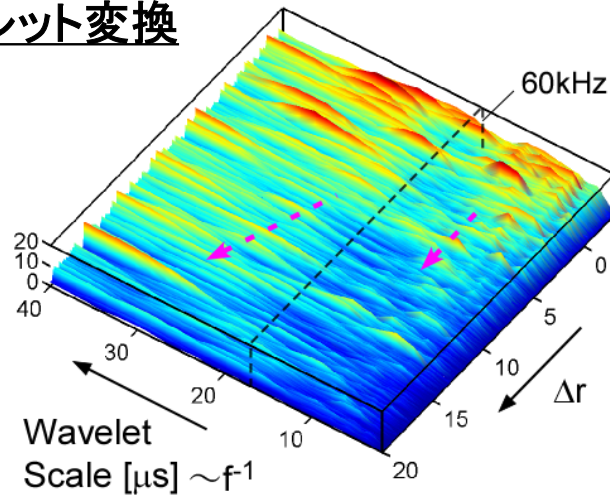
自己相関係数



無次元化短時間フーリエ変換



ウェーブレット変換



⇒セパトリクスから離れるにつれBlobバースト持続時間大