

周辺プラズマにおける 非拡散的な輸送過程の統計解析

Statistical Analysis of Non-Diffusive
Transport Processes at Edge Plasmas

名古屋大学大学院工学研究科
エネルギー理工学専攻 プラズマエネルギー理工学講座
博士課程前期2年 三好秀暁

研究の背景

核融合実験炉における問題

炉心プラズマから流出する熱・粒子束の処理

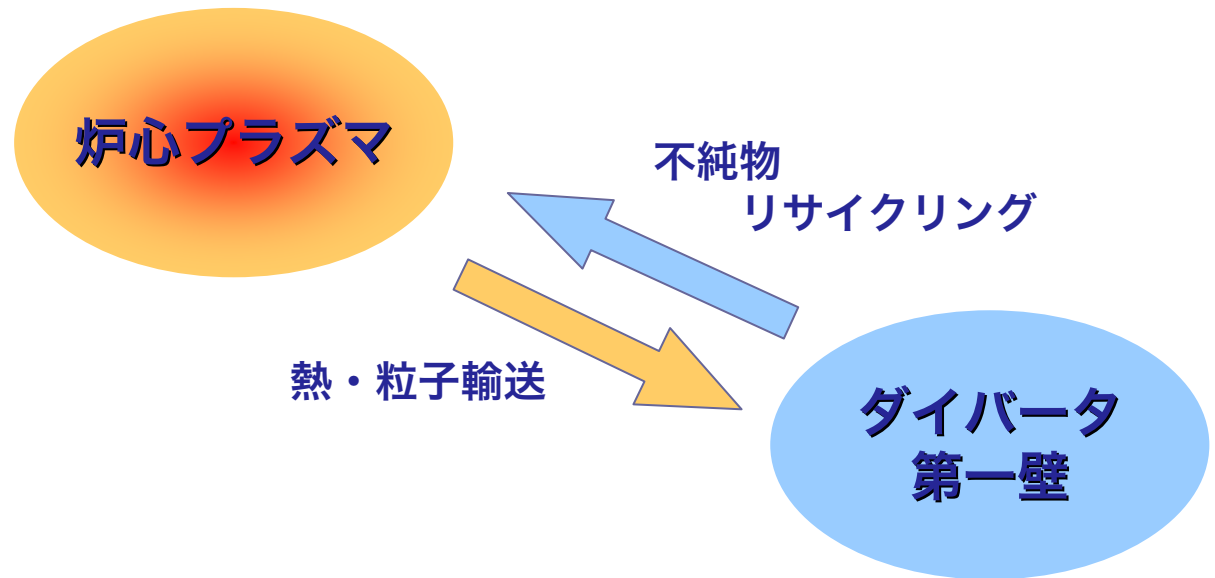
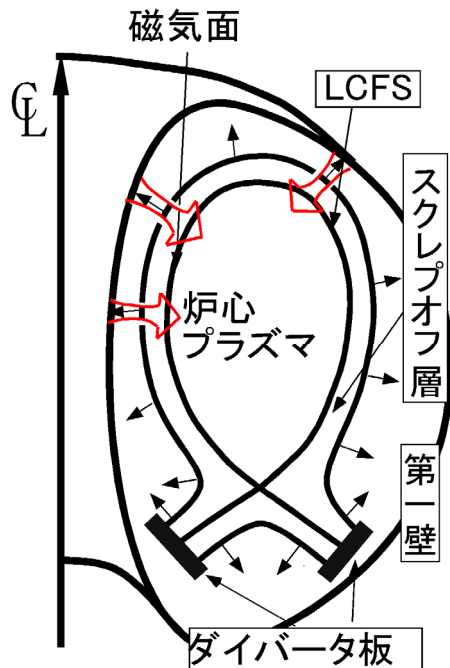
周辺領域における熱・粒子輸送

スクレイプオフ層における磁力線を横切る輸送

→ ダイバータ板, 第一壁への熱負荷, 水素リサイクリング

→ 炉心プラズマへの不純物混入

→ プラズマの閉じ込め性能が劣化



磁力線を横切る輸送

古典拡散

クーロン衝突によるラーマ半径程度の拡散 (均一磁場)

新古典拡散

トーラス効果による案内中心のドリフト (非均一磁場)

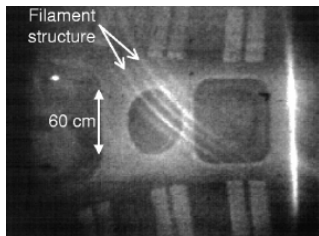
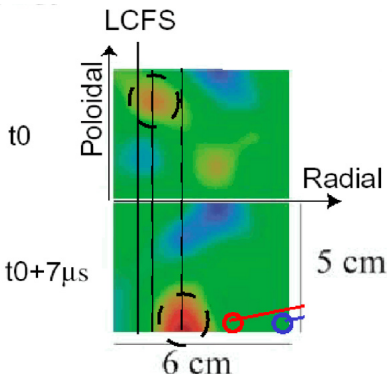
乱流輸送

揺動による輸送

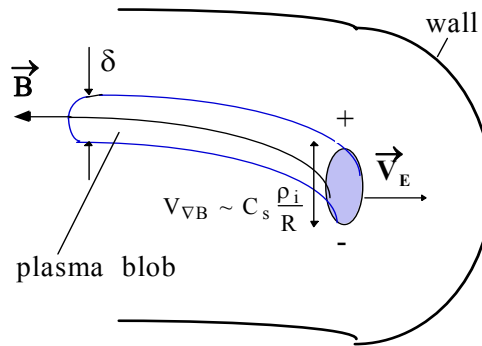
密度 $n = n_0 + \tilde{n}$ 速度 $v = v_0 + \tilde{v}$ とすると

$\Gamma = \langle n v \rangle = n_0 v_0 + \langle \tilde{n} \tilde{v} \rangle$ となり揺動による輸送が発生

バースト的な輸送(Blobs)

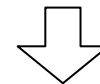


DIII-D, NSTXで観測された磁力線を横切る塊状(Blobs)の密度輸送



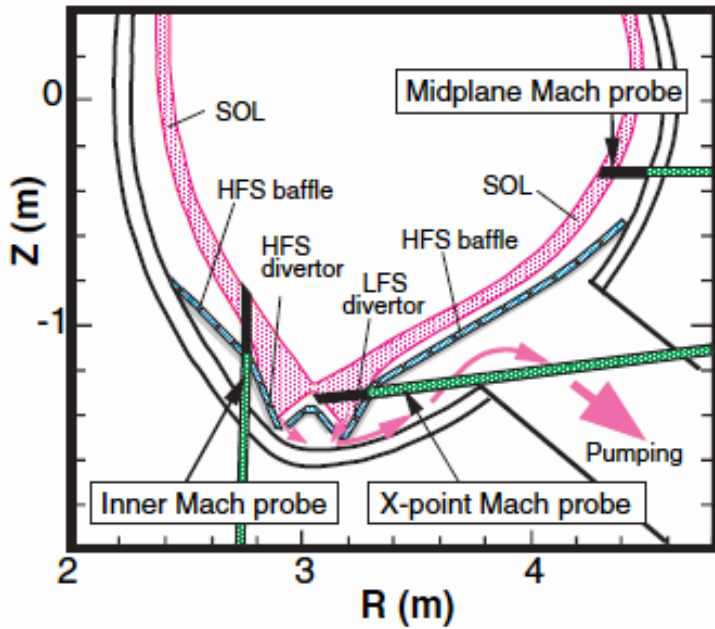
トカマク型装置における Blobsのモデル

磁力線に沿った高密度のプラズマ塊はgradB分極によりE×Bドリフトを受けてSOLの外側へと輸送される。



gradBの効果による理論モデルと実験結果とを比較

JT-60Uにおける計測系



- 掃引型マッハプローブ
(サンプル周波数 200, 500kHz)
→ 赤道面、X点下部、強磁場側ダイバータ

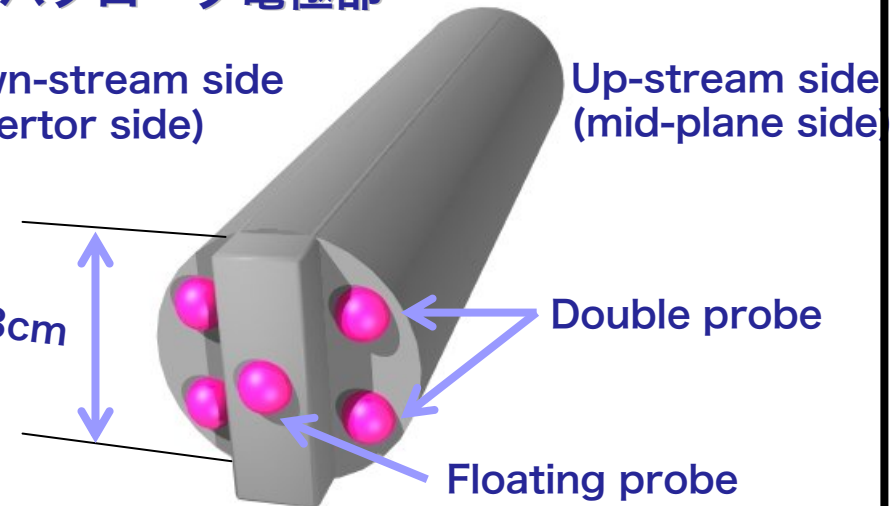
- 2組のダブルプローブ
→ 上流, 下流の T_e , I_{sat} を計測
- フローティングプローブ
→ プラズマ電位を計測

マッハプローブ電極部

Down-stream side
(divertor side)

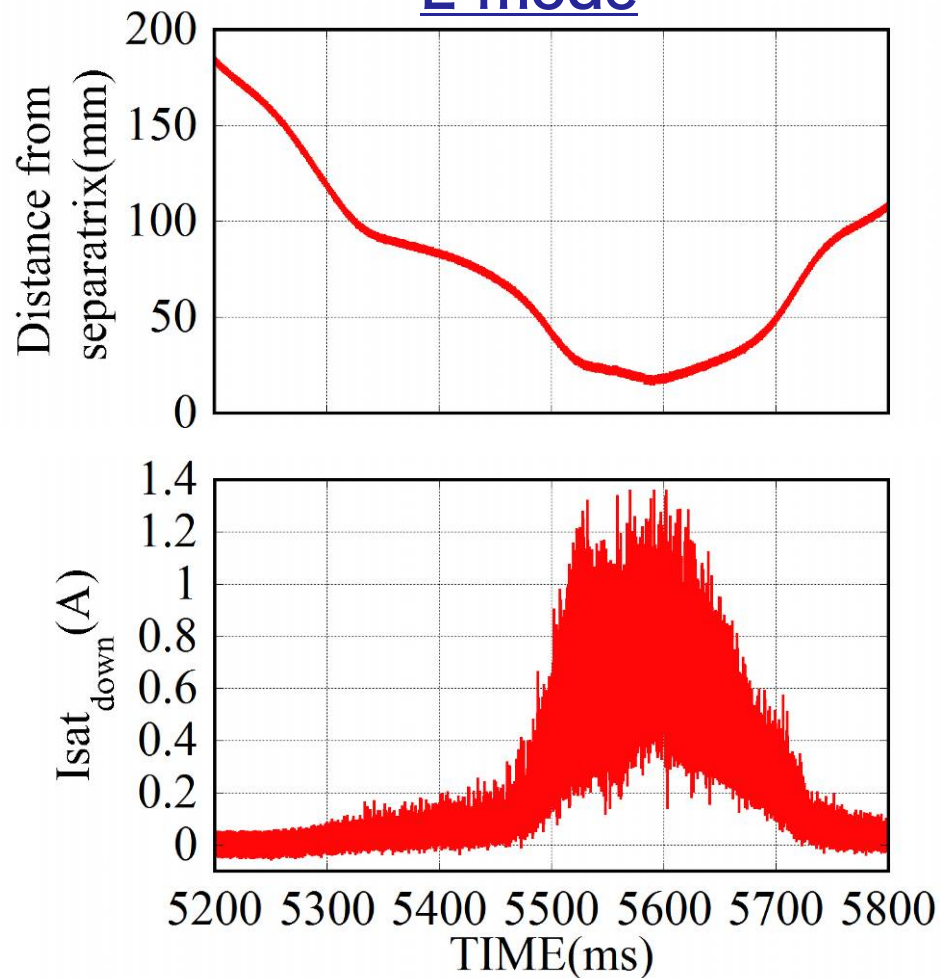
Up-stream side
(mid-plane side)

3cm

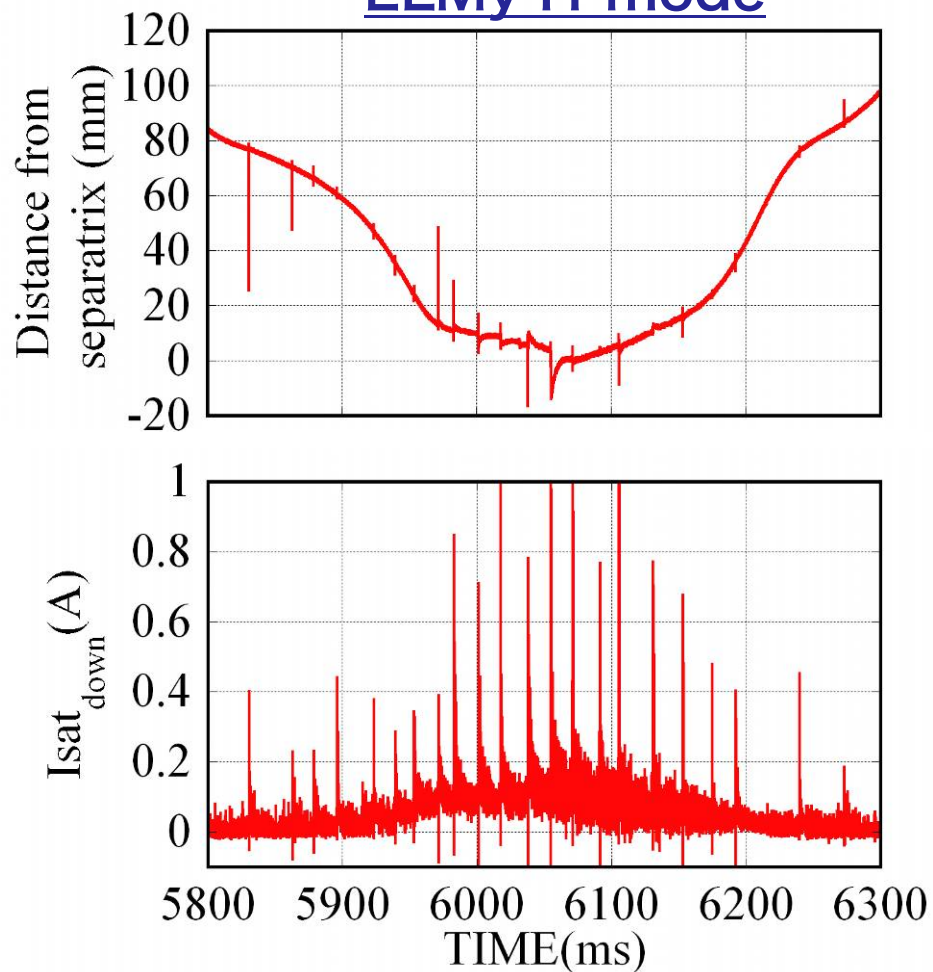


L-modeとH-mode

L-mode



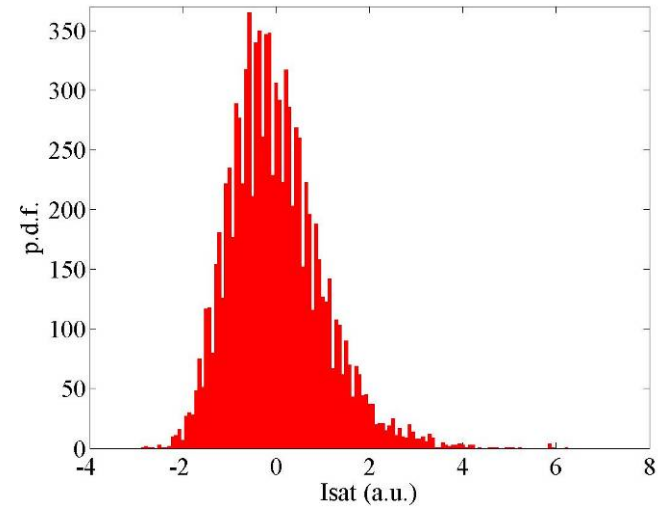
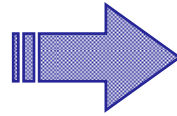
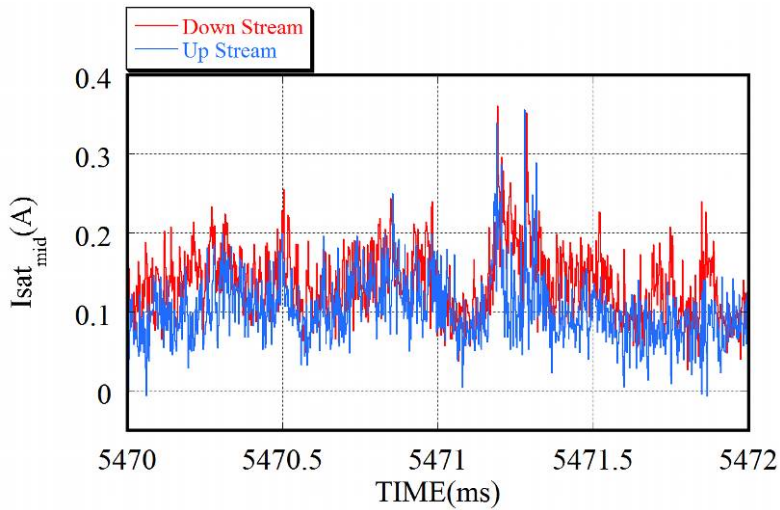
ELMy H-mode



JT-60Uで計測されたL-mode放電とELMy H-mode放電波形

統計解析手法

- イオン飽和電流波形から確率分布関数 (PDF) を作成



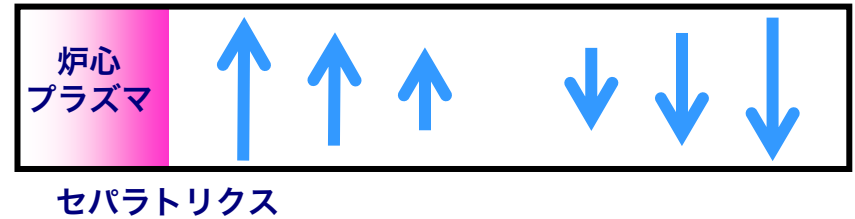
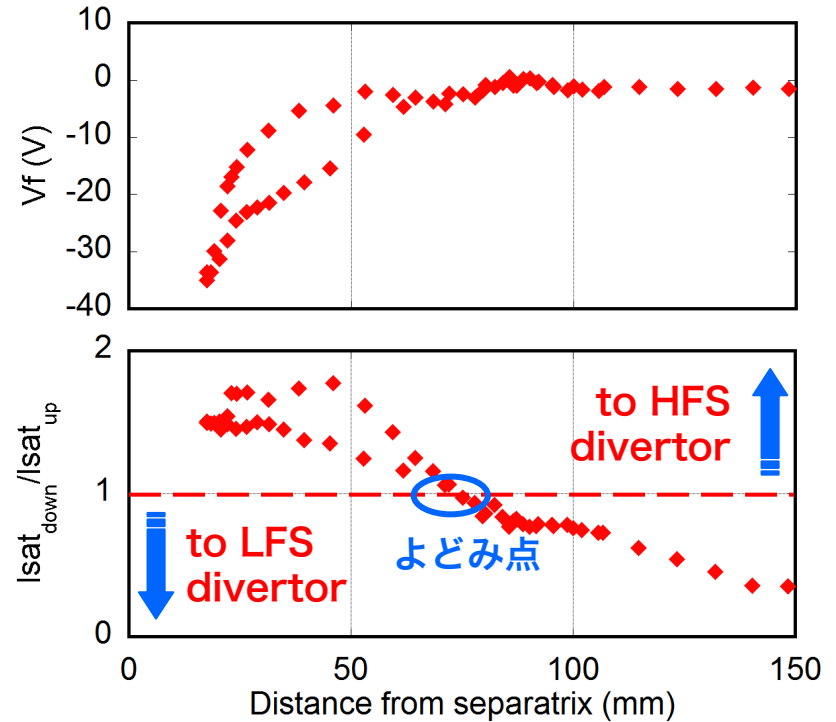
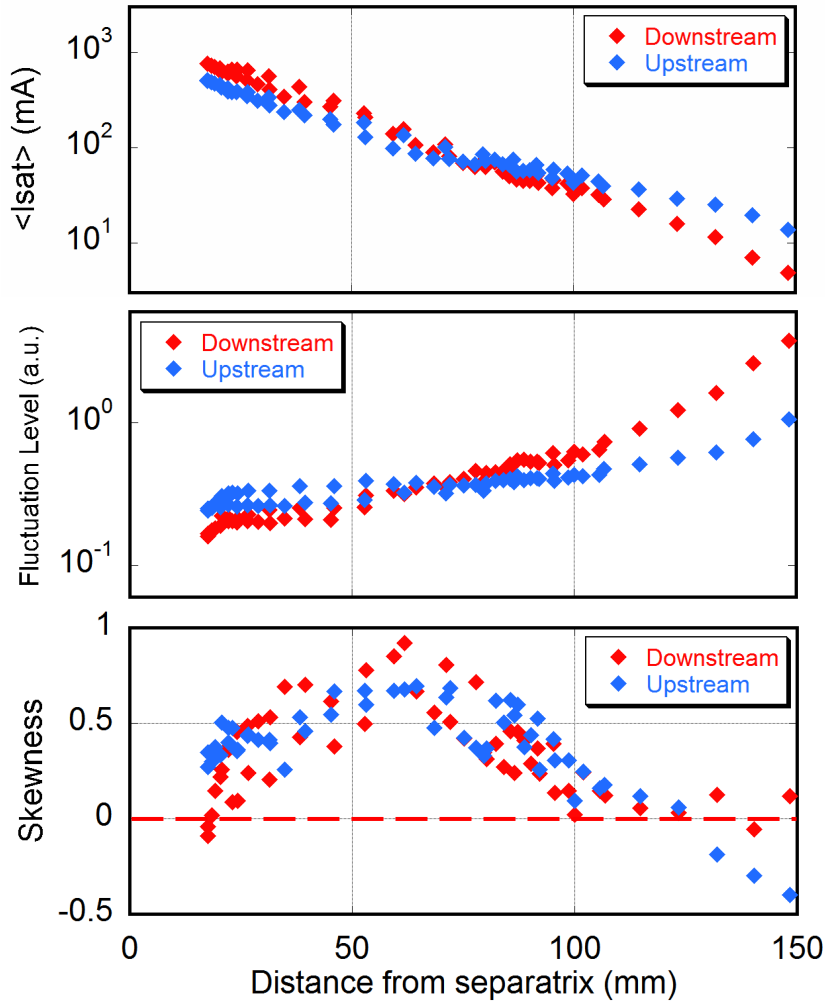
- 確率分布関数から1～3次のモーメントを評価

$$\text{Skewness} = \frac{\langle \tilde{X}^3 \rangle}{\langle \tilde{X}^2 \rangle^{3/2}}$$

: PDFの左右対称性 \longrightarrow ガウス分布では0

揺動特性の径方向分布 (L-mode)

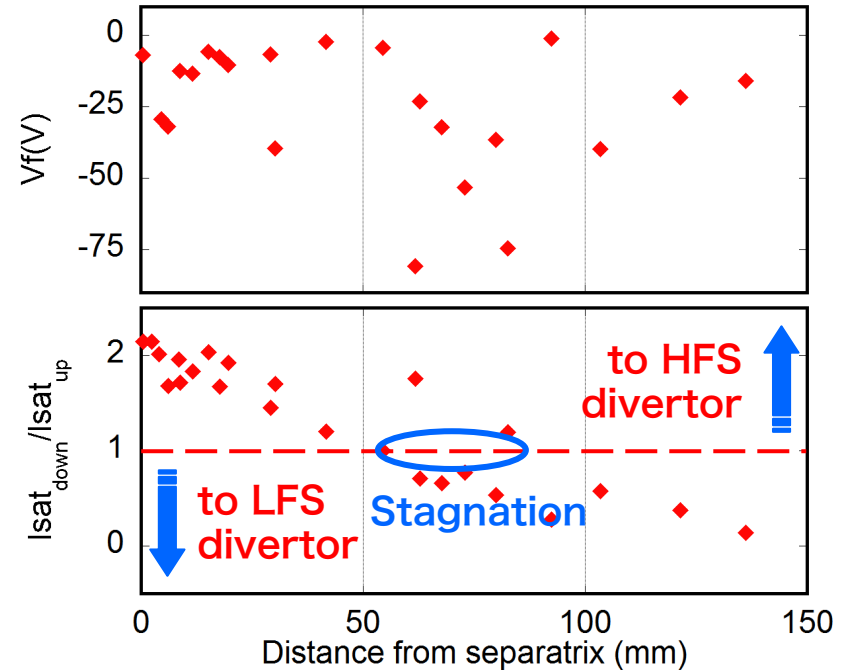
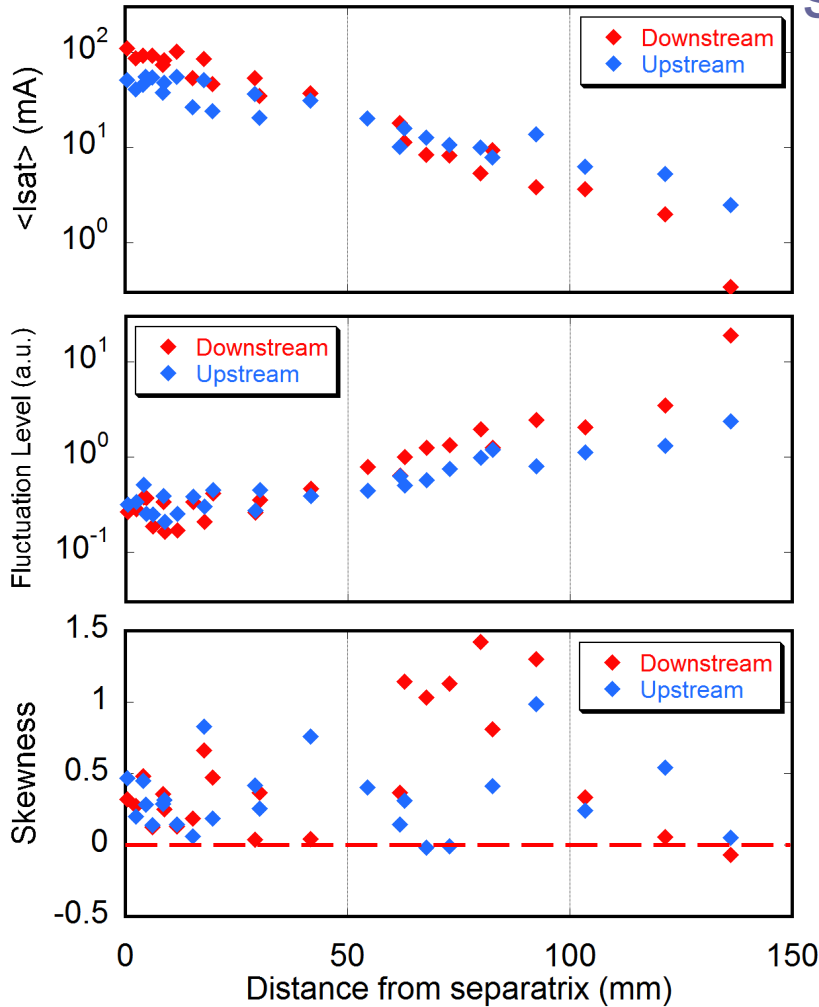
Shot Number : 44421 , time = 5200-5800 ms



- υ Skewnessは距離が60mmあたりで**最大値**をとり、さらに外側で**減少**。
- υ 浮遊電位の勾配が60mm付近で大きく変化。
- υ 60mm付近には磁力線に沿った流れがゼロになる**よどみ点**が存在。
→ $B_{//}$ 方向の流れと B_{\perp} 方向の輸送との間に何らかの関係？

揺動特性の径方向分布 (ELMy H-mode)

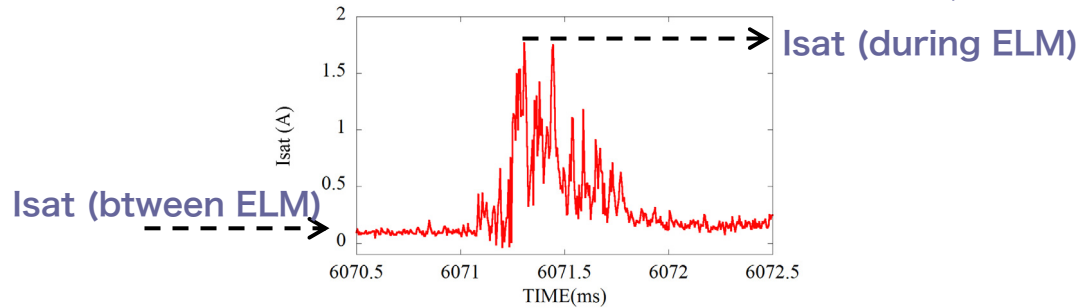
Shot Number : 41784 , time = 5800-6300 ms



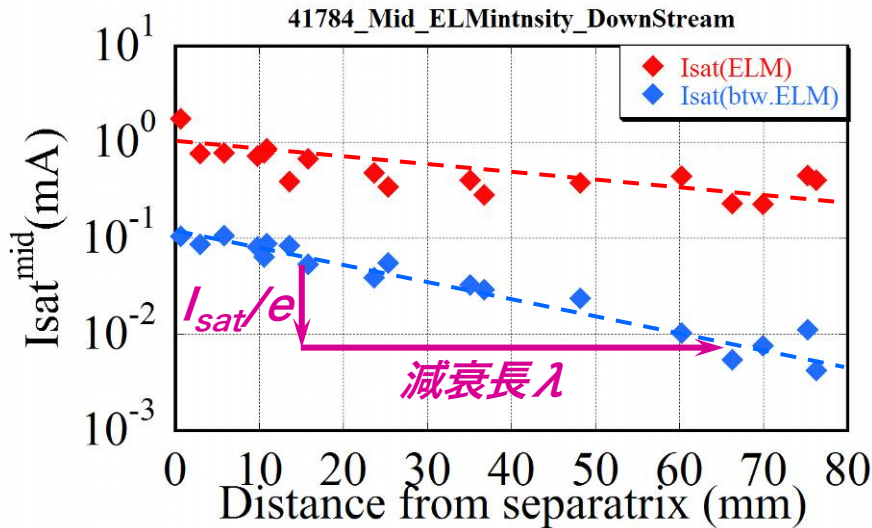
- Skewnessは距離が80mmあたりで**最大値**をとり、さらに外側で**減少**.
- 80mm付近には磁力線に沿った流れがゼロになる**よどみ点**が存在.
- 浮遊電位の構造がL-modeとは異なる.

ELMの伝搬特性

Shot Number : 41784 , time = 5700-6300 ms



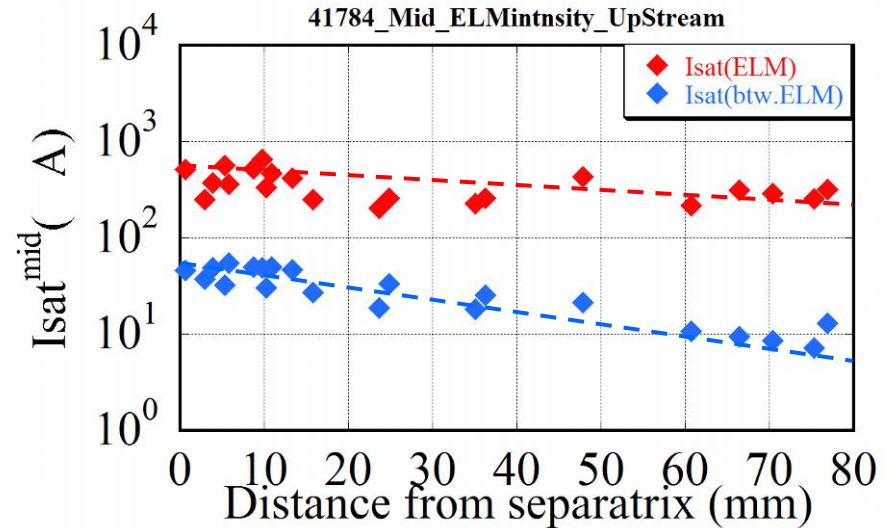
下流側 (Down Stream)



減衰長 ~ 87 mm

減衰長 ~ 25 mm

上流側 (Up Stream)



減衰長 ~ 123 mm

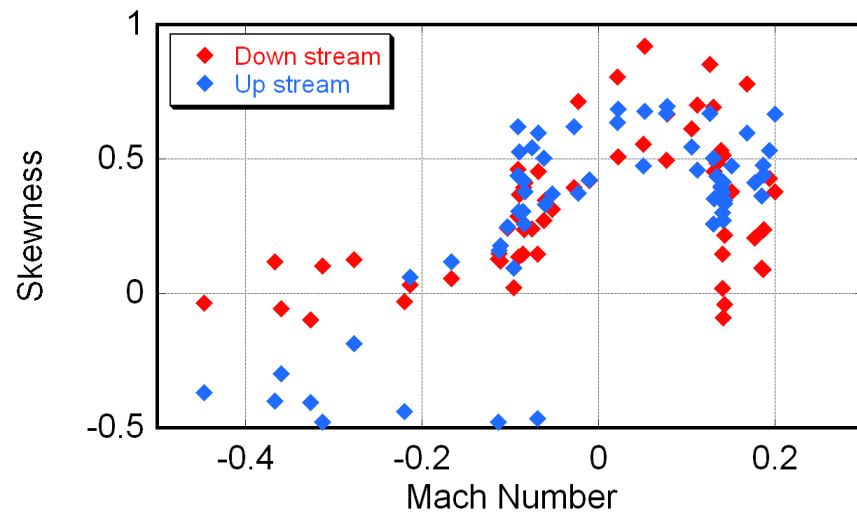
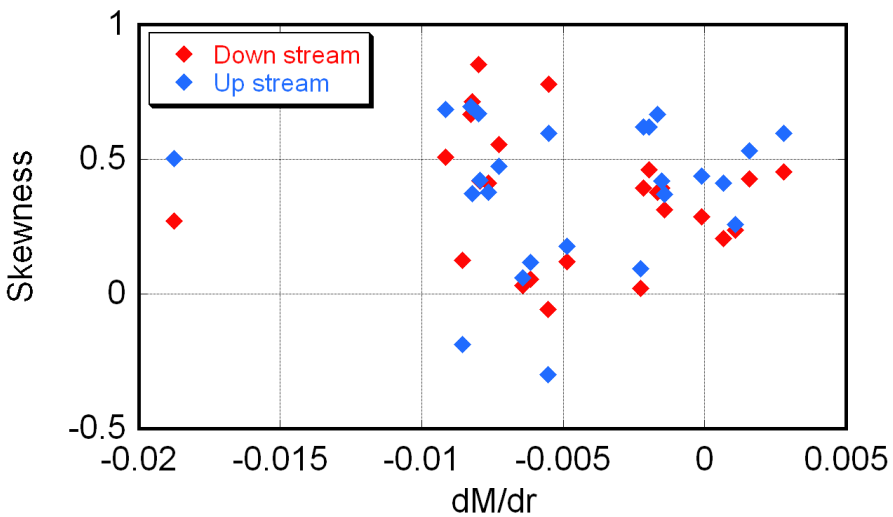
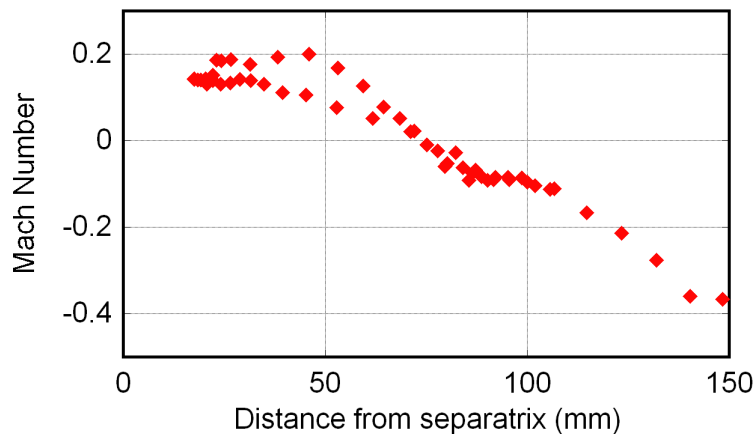
減衰長 ~ 49 mm

ELMの減衰長はELM間のそれと比べて3倍程度長くなっている。

→ ELMはELM間のプラズマと比較して径方向へ輸送され易い。

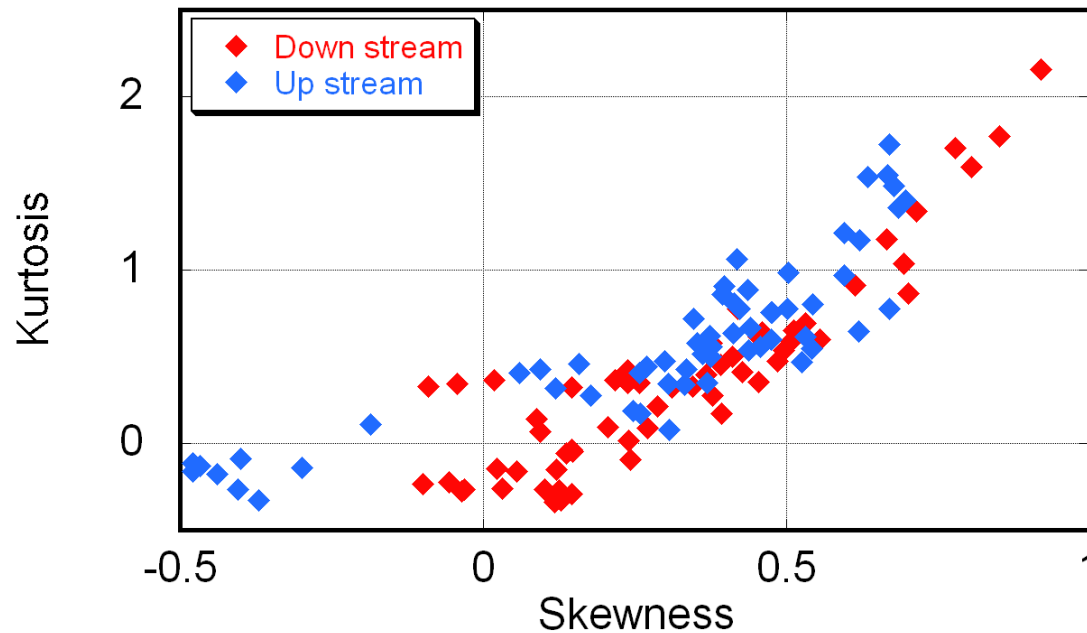
流れと輸送との関係

Shot Number : 44421 , time = 5200-5800 ms



- マッハ数と揺動特性との関係进行评估
- 傾きの評価が課題

歪度と尖度との関係



∪ 係数2程度の比例関係

まとめ

L-modeおよびELMy H-mode放電、ELM間の揺動特性

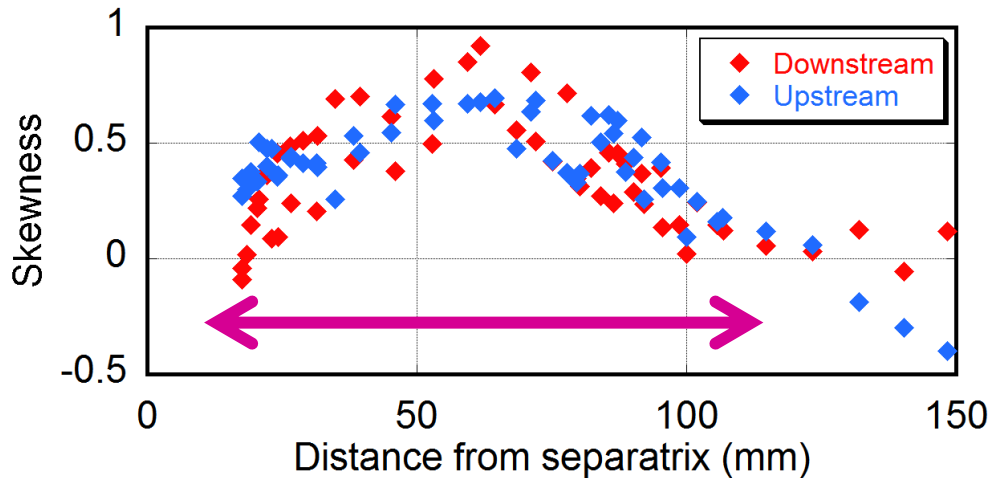
- (1) バースト的な信号の発生頻度はセパトリクスから60-80mm程度離れた位置で最も高くなる。
- (2) 同様の位置には磁力線に沿った方向の流れがゼロとなるよどみ点が存在する。
 - B_{\perp} 方向の輸送と $B_{//}$ 方向の流れとの関係性
 - 現在解析中

ELMの輸送特性

- ELM間およびELM発生時におけるイオン飽和電流の径方向分布から減衰長を評価
- ELMはELM間のプラズマと比較して径方向へ輸送され易い。

実験結果と理論との比較

L-mode放電, SN : 44421



Blobsの輸送速度 :
$$V_b = C_S \left(\frac{\rho_i}{\delta} \right)^2 \frac{\ell_b n_b}{R n_t} \approx 4.4 \times 10^2 \text{ ms}^{-1}$$

Blobsの移動距離 :
$$\Delta_b \approx R \left(\frac{q\rho_i}{\delta} \right)^2 \frac{n_b}{n_t} \approx 34 \text{ cm}$$