

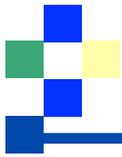
# トカマク・ヘリカル配位における 非接触ダイバータプラズマ揺動解析

核融合研、(前:名大):田中宏彦

名大:大野哲靖、辻義之

原研:朝倉伸幸、JT-60Uチーム

核融合研:増崎貴、森崎友宏、LHD実験グループ



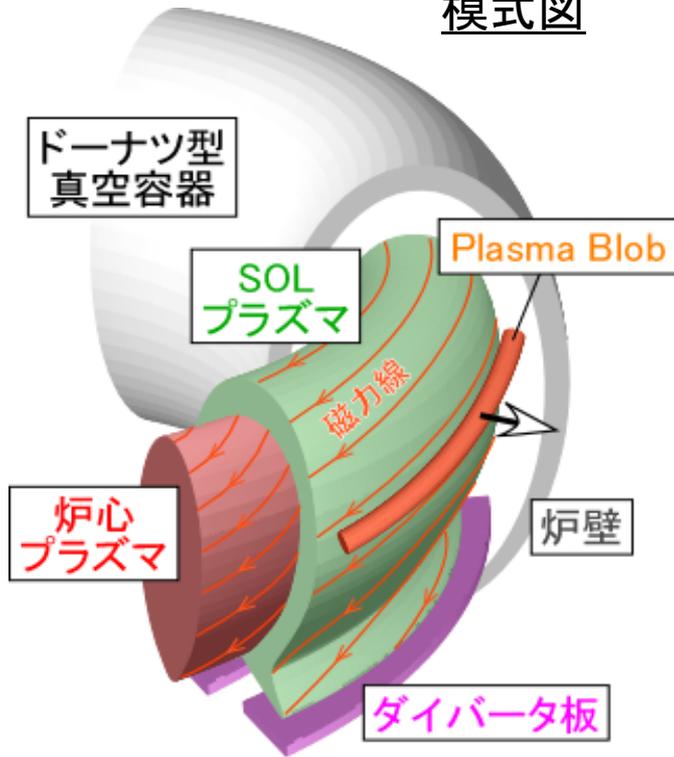
# 目次

---

- 研究背景
  - Plasma Blob輸送とダイバータ状態の関係性
  - 直線型装置における輸送研究
- JT-60Uにおける研究
- LHDにおける研究
- まとめ

# 周辺領域における間欠的輸送現象

模式図



スクレイプ・オフ層 (SOL) 領域

## “Plasma Blob 輸送” の報告

- ① 磁力線に沿ってフィラメント状
- ② 磁場を横切り対流的に輸送
- ③ SOLプラズマに比べ高密度



- SOL中のプラズマ密度分布の平坦化
- 径方向粒子束の50%程度を担う

J.A. Boedo *et al.*, Phys. Plasmas 8 (2001) 4826.

⇒ 周辺プラズマ物理に大きな影響

- ・他の磁場配位装置(直線・ヘリカル)でも観測
- ・輸送特性がダイバータ状態(例:デタッチ)に依存する可能性

# Plasma Blob輸送理論

## 有力な輸送モデル

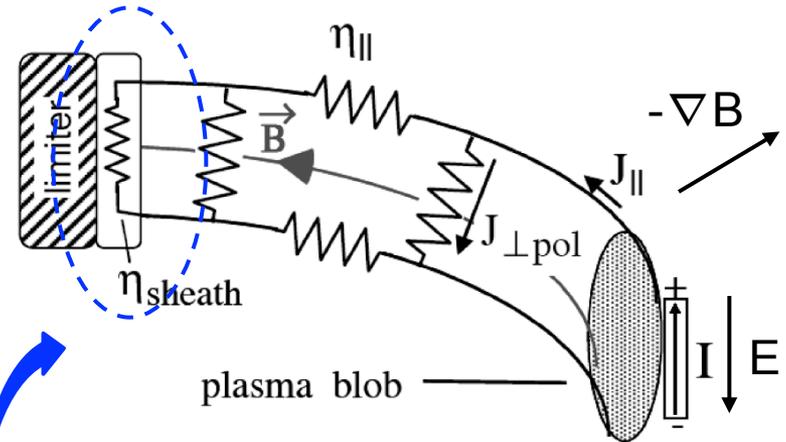
プラズマの塊が炉心から剥離、  
フィラメント構造を形成

磁場勾配と曲率の効果(等)で荷電分離

等価回路内の抵抗により分極保持

電場Eと磁場Bの $E \times B$ ドリフトにより  
弱磁場側へ輸送

## Plasma Blobの等価回路



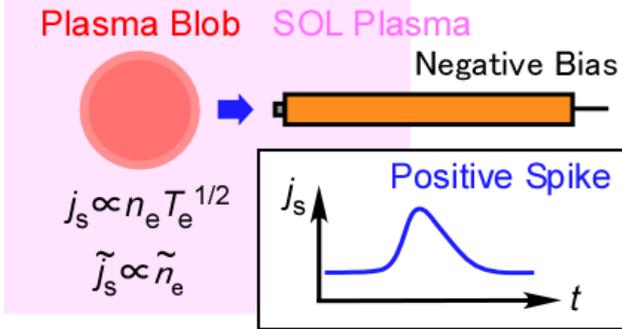
S.I. Krasheninnikov *et al.*, J.  
Plasma Phys. 74 (2008) 679.

ダイバータ領域

例えばダイバータ板前面のシース抵抗が短絡電流のメインパスとなる場合、輸送特性はダイバータプラズマ状態(接触・非接触)に依存して大きく変化することが予想される

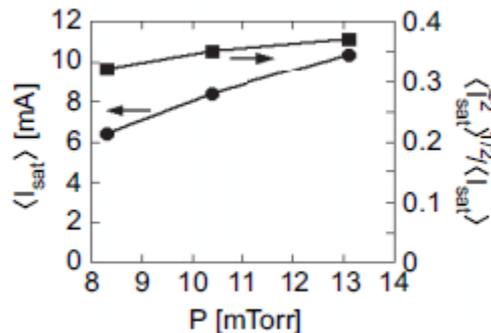
# 直線型装置における非接触プラズマ中の輸送研究

## プローブ計測

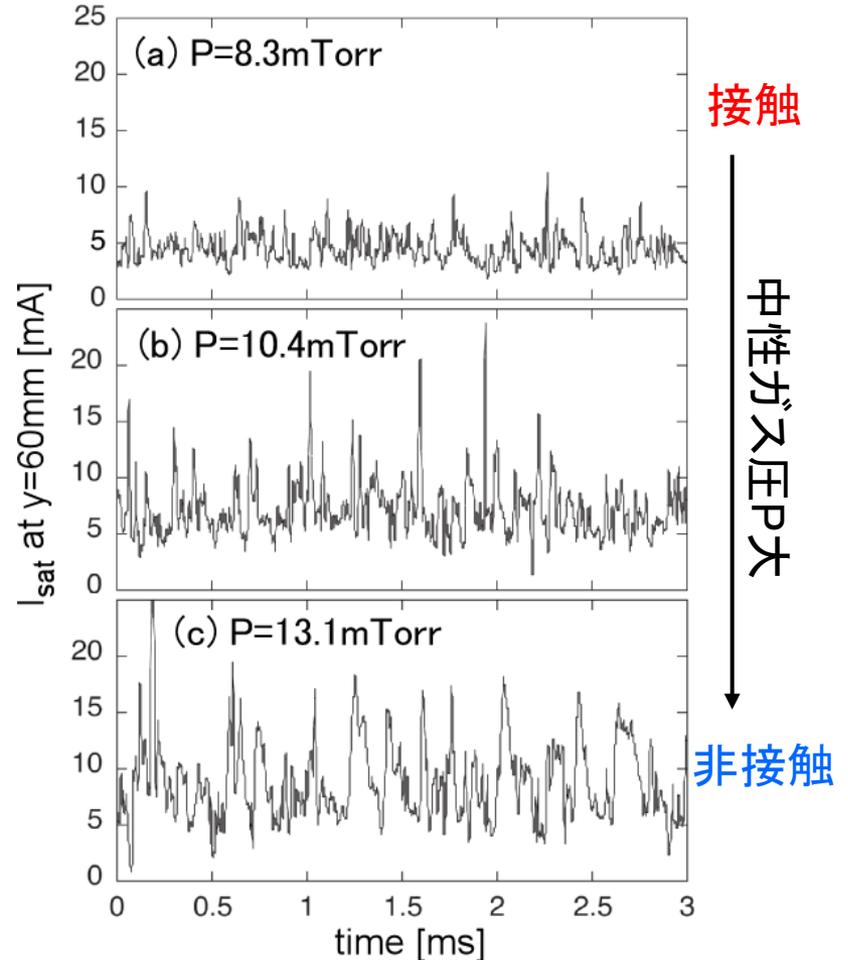


**Blob-likeな輸送が非接触ダイバ  
ータ状態時に顕著に発生**

## 平均値及び揺動レベル

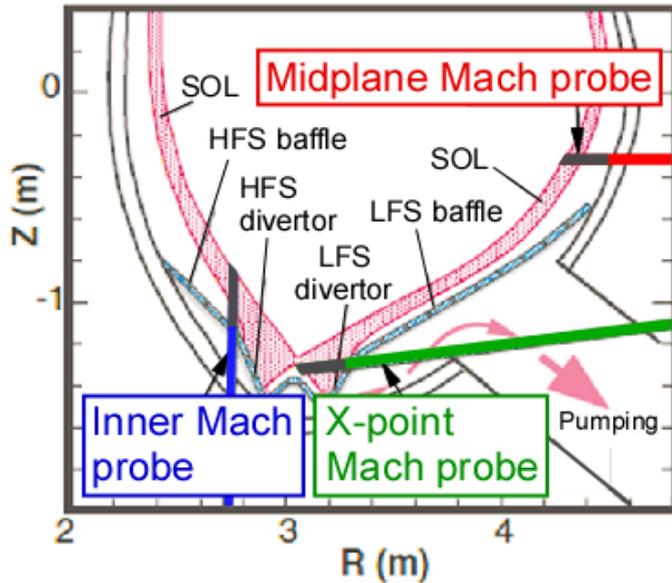


## 直線型装置NAGDIS-IIの周辺領域で 計測されたイオン飽和電流波形

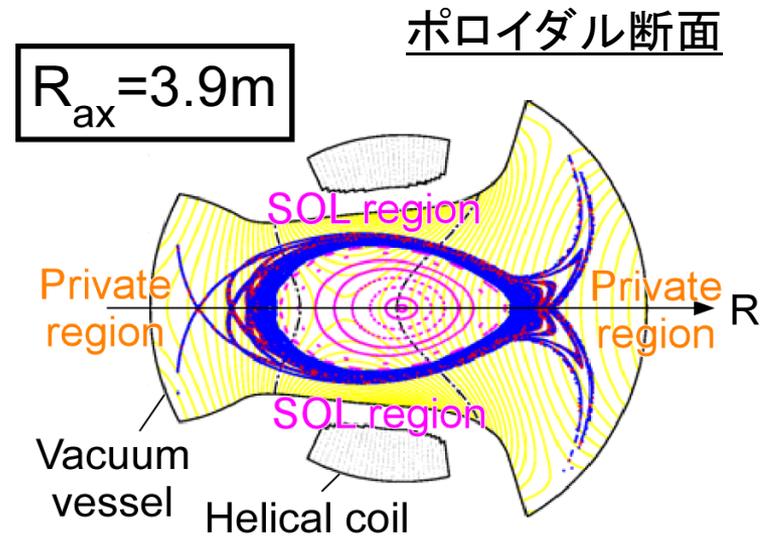


# 本発表内容

大型トカマク装置JT-60U



大型ヘリカル装置LHD



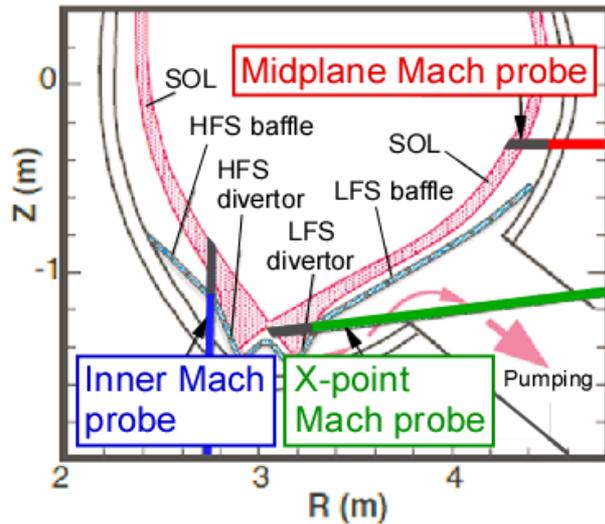
周辺領域において計測されたイオン飽和電流揺動を解析



**2つの異なる磁場配位(トカマク・ヘリカル)において、接触・非接触ダイバータの違いが非拡散的輸送にもたらす影響を調査**

# JT-60U: 接触状態時の輸送発生領域

## プローブ配置

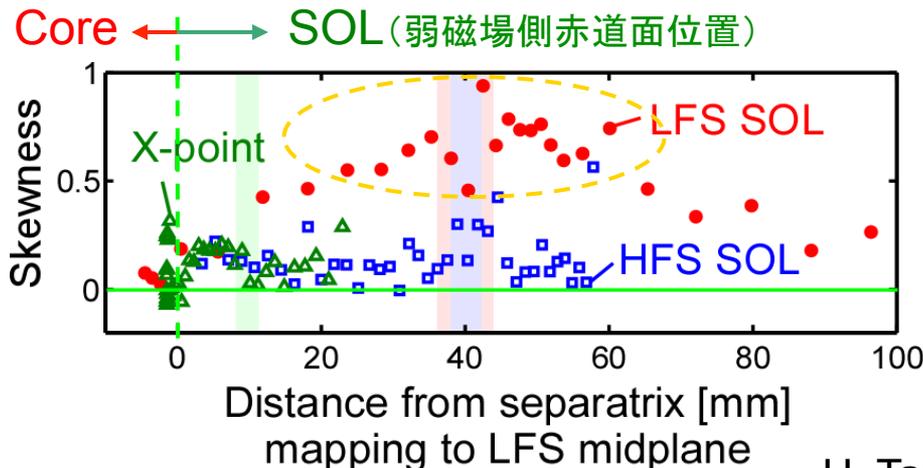


弱磁場側赤道面直下、強磁場側バップル上、X点直下を計測可能な3本の高速掃引プローブ

$$S = \frac{\langle \tilde{j}_s^3 \rangle}{\langle \tilde{j}_s^2 \rangle^{3/2}}, \quad \tilde{j}_s = j_s - \langle j_s \rangle$$

Skewness > 0 = 揺動が正にスパイク的  
⇒ Plasma Blob 輸送発生を示唆

## Skewnessの径方向分布



接触状態時には

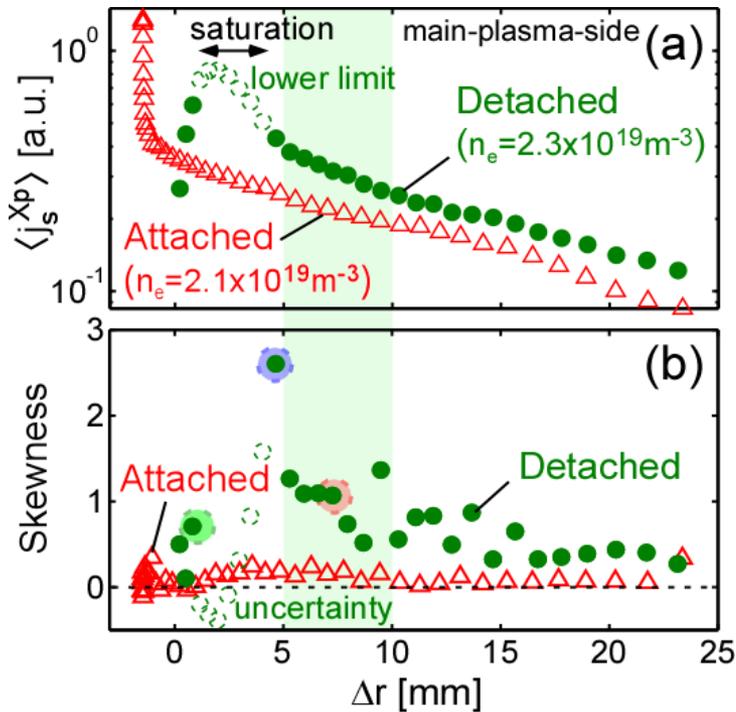
- Plasma Blob輸送は弱磁場側 SOL中で顕著に出現
- ダイバータ領域内では発生は見られず



接触・非接触状態で比較

# JT-60U:ダイバータプラズマ揺動特性比較

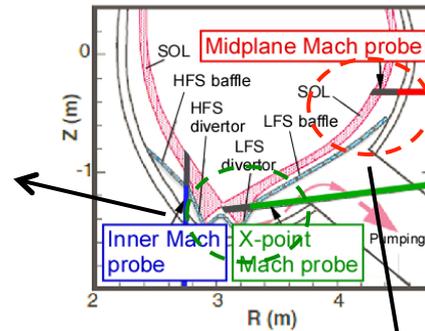
接触・非接触状態時のX点周辺での  
平均値、Skewnessの径方向分布



周期揺動  
(~2.3kHz)

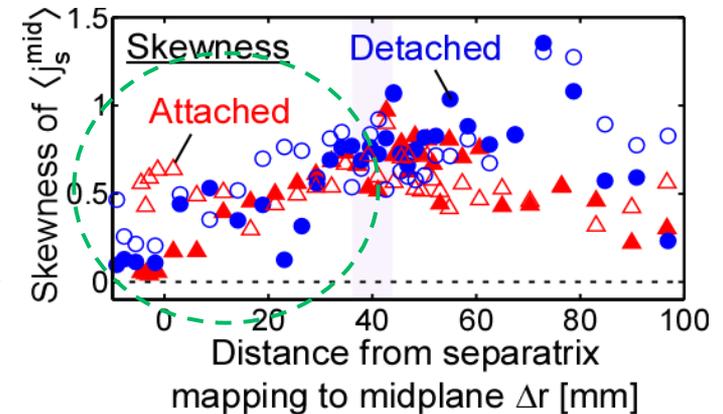
ダイバータ上流位置では  
X点周辺の変化に比べて  
明瞭な違いは得られず

- セパトリス近傍で部分非接触化
- セパトリス外側近傍で周期揺動
- その外側でSkewness>0の領域

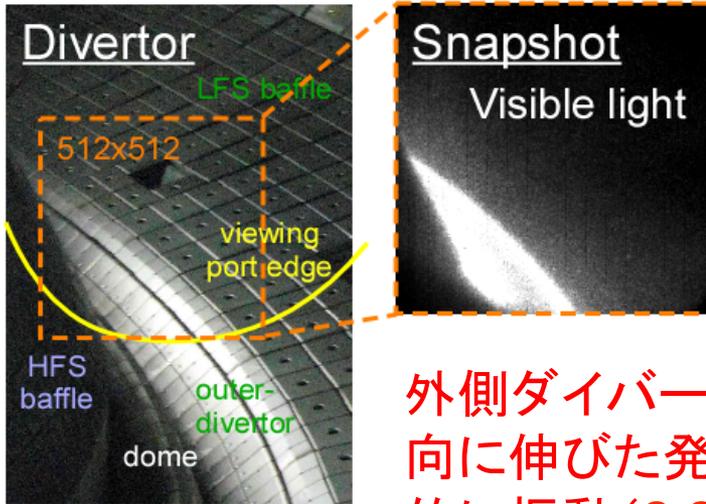


プローブ配置

弱磁場側SOL中の  
Skewnessの径方向分布



# JT-60U:非接触状態時のTVカメラ計測信号

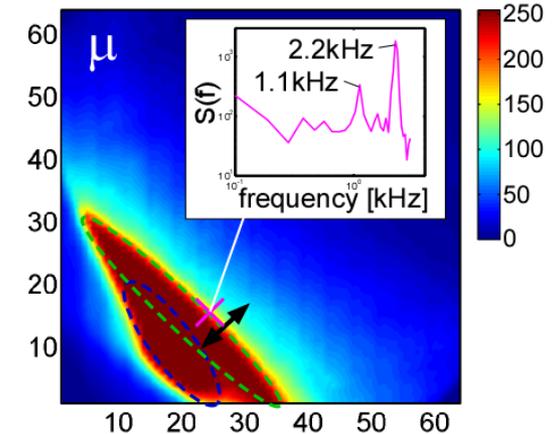


TVカメラ計測信号( $f_s=6\text{kHz}$ )を解析  
(ダイバータプローブで2.2kHz周期揺動が見られた非接触放電)

外側ダイバータ付近でトロイダル方向に伸びた発光が周期的かつ空間的に振動(2.2kHz)

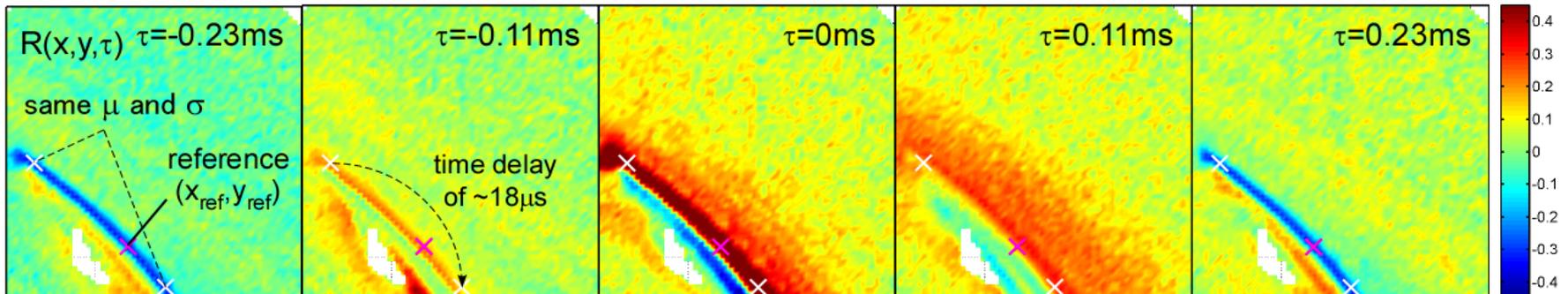
発光端部からの正相関を広範囲で確認

## 平均値分布とパワースペクトル



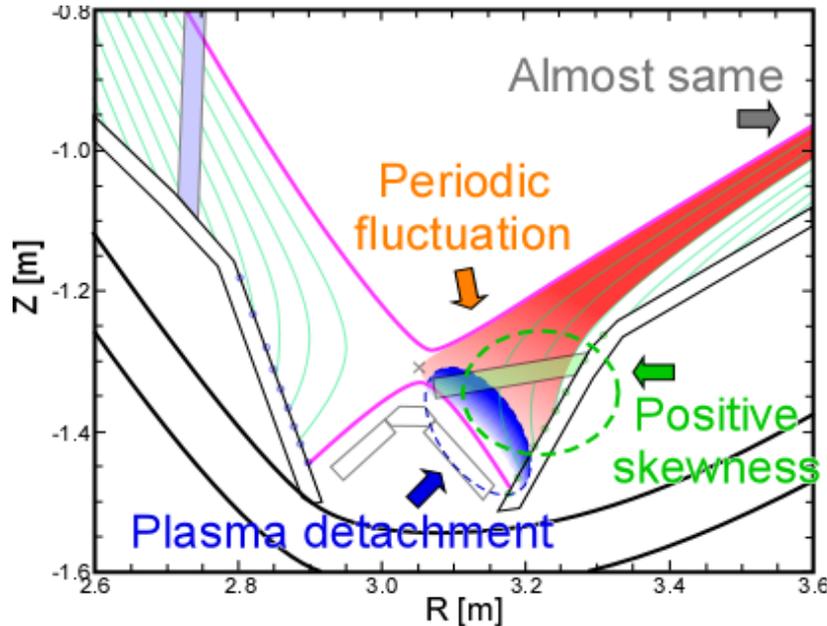
## 時空間相関(スプライン補間)

$$R(x, y, \tau) = \langle \tilde{I}(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}}, t) \tilde{I}(x, y, t + \tau) \rangle / \langle \tilde{I}(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}}) \rangle^{1/2} \langle \tilde{I}(x, y) \rangle^{1/2}$$



# JT-60U解析まとめ

## 解析結果の模式図



トカマク装置では接触状態時弱磁場側 SOL中でPlasma Blob輸送が発生

(部分)非接触ダイバータ化したとき

○ セパトリス付近で周期揺動

( $\sim 2.3\text{kHz}$ )が発生

○  $j_s$ にSkewness $>0$ の領域が出現

○ 周期揺動に伴って、広い範囲で正の相関を確認

⇒ **ダイバータ領域内で、周期揺動に起因した磁場を横切る輸送の発生を示唆**

○ 弱磁場側SOLのダイバータ上流位置で揺動特性に大きな変化が見られない

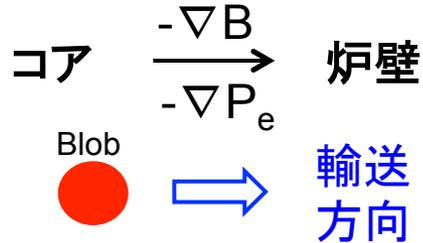
○ 接触状態時にX点近傍では

Skewness $\sim 0$

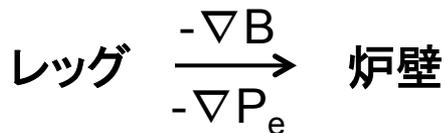
⇒ Plasma Blobはダイバータまで接続しておらず、ダイバータ状態に大きく依存しない可能性

# LHD:ヘリカル装置のBlob輸送発生領域

トカマク装置の弱磁場側SOL



ヘリカル装置のプライベート領域

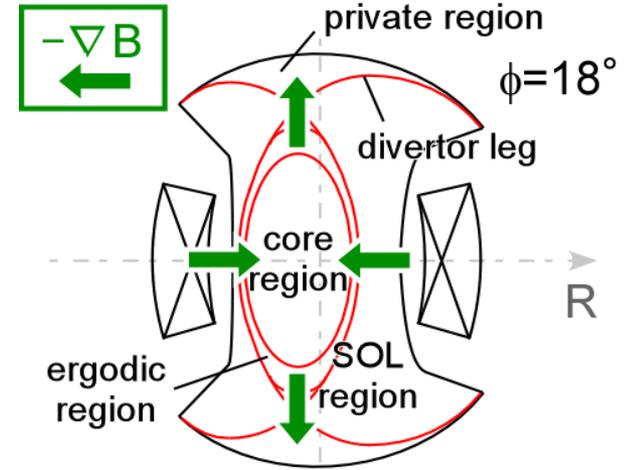


同領域中で実際にBlob輸送発生を示す結果が得られている

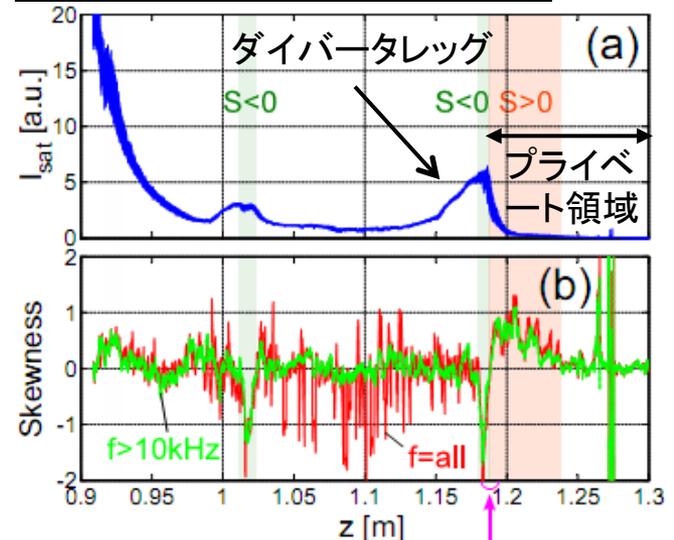
- ・ダイバータ領域内
- ・磁力線長が短い ( $L_c < 10\text{m}$ )

⇒ ダイバータ状態の影響を受けやすい

ヘリカル装置中の磁場勾配方向

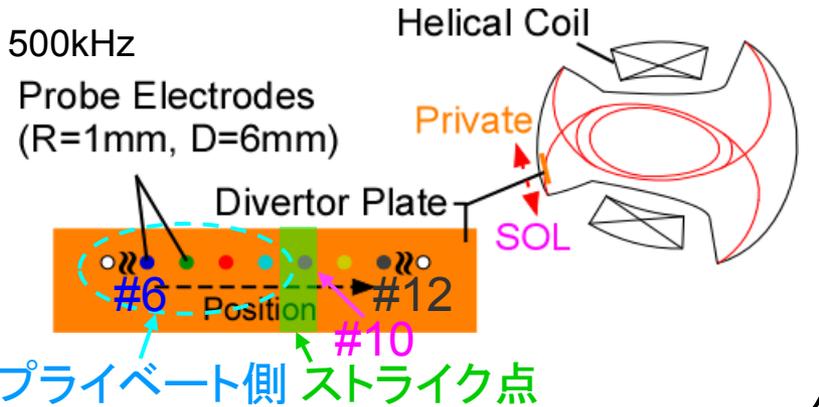


掃引プローブにより計測されたイオン飽和電流とSkewness



# LHD:接触・非接触ダイバータ板上での静電揺動計測

## ダイバータプローブアレイ配置

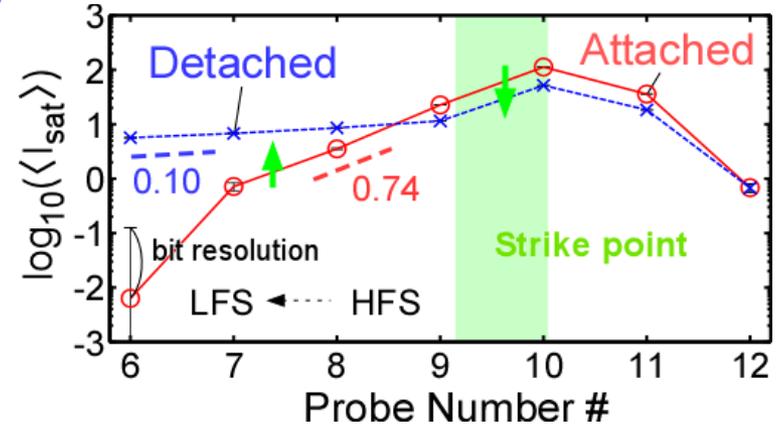


## 接触・非接触ダイバータ状態の比較

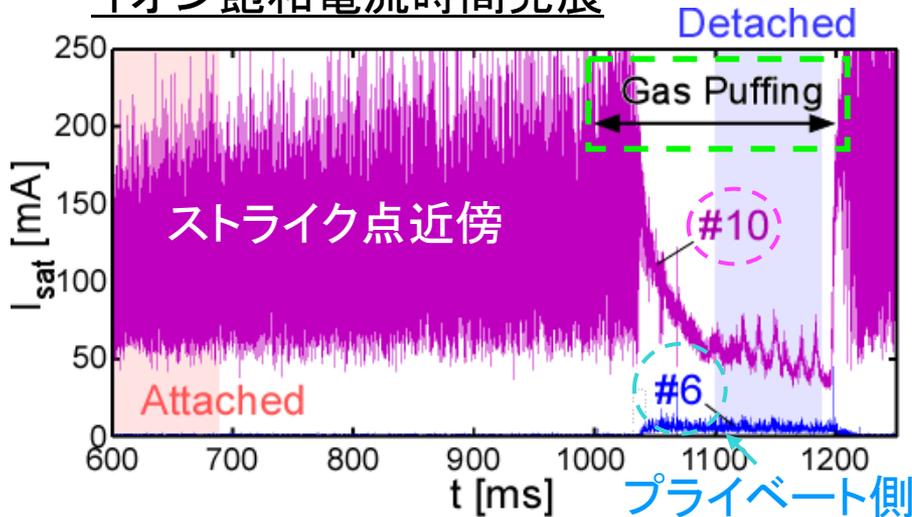
放電途中の大流量ガスパフ

⇒ 非接触ダイバータ状態

平均値分布(片対数表示)



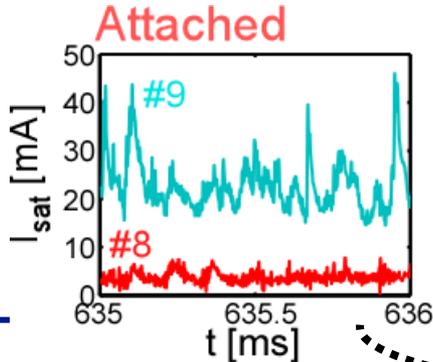
## イオン飽和電流時間発展



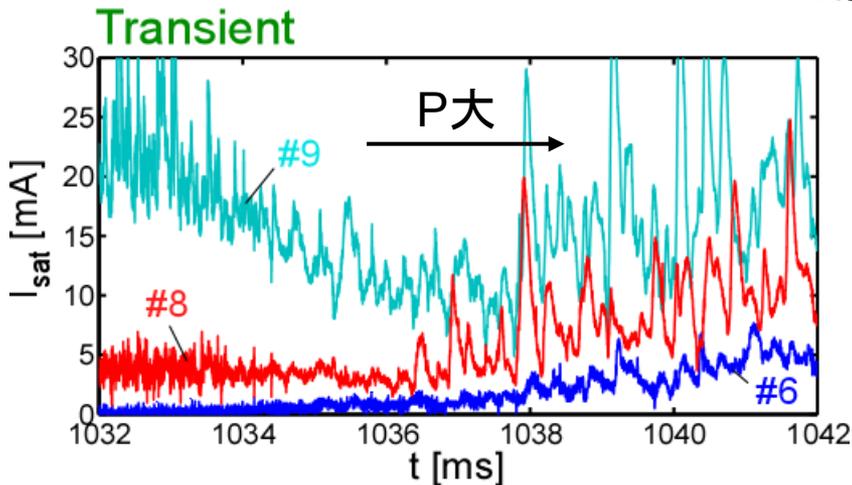
- ・ストライク点付近(#9-11)でイオン飽和電流減少
- ・プライベート側位置(#6-8)でイオン飽和電流増加(2~3割程度の広域化)

# LHD:揺動の生波形

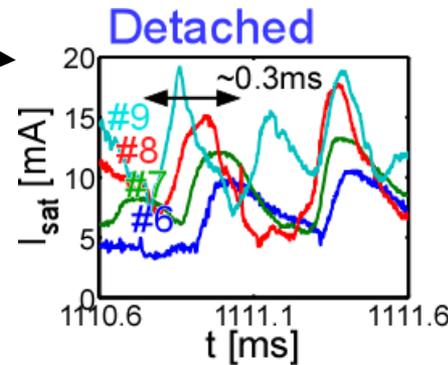
イオン飽和電流時間発展の拡大図 H. Tanaka, et al., Phys. Plasmas 17 (2010) 102509.



接触状態時・・・ストライク点のプライベート側に位置するプローブ(#9)でPlasma Blob通過波形と似た正スパイク



接触から非接触状態への変化時  
 ...プライベート側プローブ(#6-8)で  
 スパイク揺動振幅増加と平均値増加



相互相関解析



#9 → #8 → #7 → #6  
 プライベート側への  
 対流的な伝播

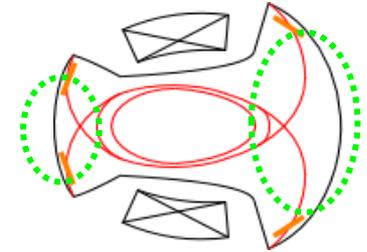
非接触状態時・・・ピークのずれた類似  
 した正スパイク波形を多数観測



非接触状態時にPlasma Blob様の構造が  
 より遠くまで輸送され平均値分布を広域化

# LHD解析まとめ

LHDではプライベート領域内でPlasma Blob輸送が発生



非接触状態となったとき

- イオン飽和電流最大値の減少
- プライベート領域側への分布広域化
- プライベート領域側へ正スパイク揺動が長距離伝搬

⇒ Plasma Blob輸送が非接触状態時に顕著化し、粒子束分布を広域化

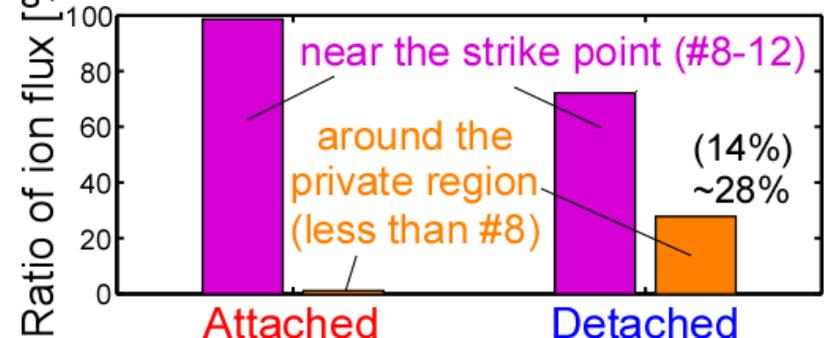


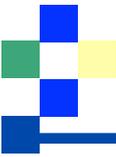
ダイバータ領域中の非拡散的輸送はダイバータ板保護の観点からは望ましい現象



制御することができれば、ダイバータ板への負荷軽減運転に貢献

ストライク点近傍とプライベート領域に流入する粒子束の割合





# まとめ

---

JT-60UおよびLHDにおいて接触・非接触ダイバータ状態時の間欠的輸送の調査を行った

○ JT-60Uにおいては、通常発生している弱磁場側SOL中のPlasma Blob輸送起因の正スパイク揺動に明瞭な変化は見られなかったが、ダイバータ領域中で周期揺動と対流輸送発生を示唆する結果が得られた

・・・再現性の調査、ダイバータ板上フラックス分布広域化効果の検証、他装置との比較が必要

○ LHDではプライベート領域中で発生するPlasma Blob輸送が非接触状態時に顕著化し、これに伴い粒子束分布の広域化が確認された  
・・・熱流束の広域化効果の検証、ポロイダル・トロイダル異方性の調査、キーパラメータの推定が重要