

# 直線ECRプラズマ装置における ドリフトモードとフルートモードの 競合的關係

鎌滝晋礼、伊藤早苗<sup>A</sup>、永島芳彦<sup>A</sup>、稲垣滋<sup>A</sup>、  
篠原俊二郎、矢木雅敏<sup>A</sup>、山田琢磨<sup>A</sup>、  
河合良信<sup>A</sup>、藤澤彰英<sup>B</sup>、伊藤公孝<sup>B</sup>、  
九大総理工、九大応力研<sup>A</sup>、核融合研<sup>B</sup>



Grant-in-Aid for Scientific Research "Specially-Promoted Research" (MEXT Japan, FY 2004 - 2008)

# Outline

1. 背景・目的
2. 実験装置
3. ドリフトモードとフルートモードの共存現象
4. 周期的競合関係
  - 4-1. 時系列データとスペクトル
  - 4-2. 径方向分布
  - 4-3. ドリフトモードとフルートモードの  
ダイナミクス競合関係(エンベロープ解析)
  - 4-4. 非線形結合(バイコヒーレンス解析)
5. まとめ

# Introduction & Objective

核融合プラズマ実現

- ・異常輸送
- ・ドリフト波乱流

非線形相互作用

- ・ドリフトモードと帯状流  
(多スケール間相互作用)
- ・乱流輸送抑制

Dissipative 不安定性 (ex.ドリフトモード)と

Reactive不安定性 (ex.フルートモード、インターチェンジモード)

- ・マルチスケール相互作用[1]
- ・単純磁場トーラスプラズマ[2]。

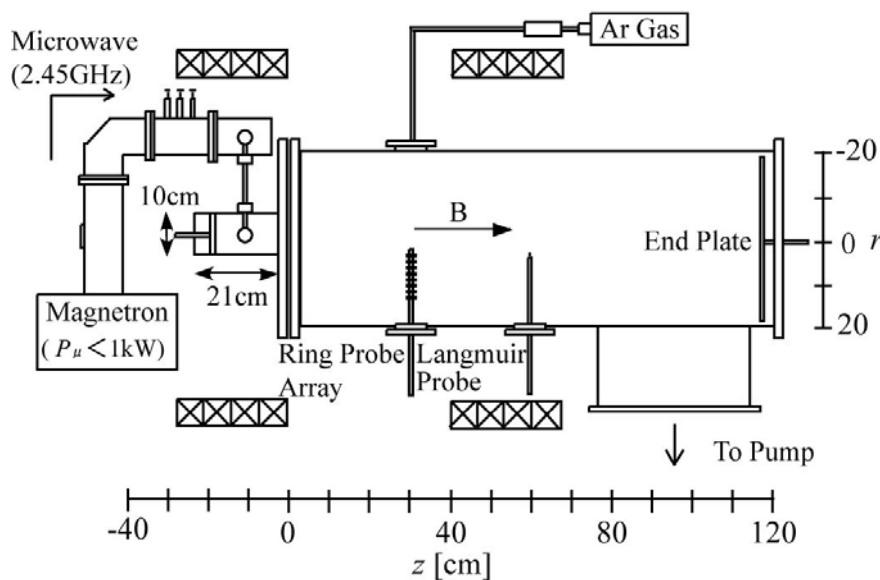
ドリフトモードとフルートモードの共存現象を詳しく調べ、  
両モード間の相互作用のダイナミクスを解明する。

[1] B. B. Kadomtsev and O. P. Pogutse: *Reviews of Plasma Physics* (Consultants Bureau, New York, 1970).

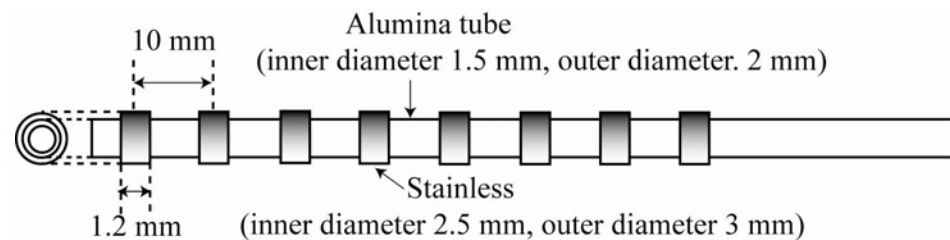
[2] F. M. Poli *et al.*, *Phys. Plasmas* **14**, 052311 (2007).

# 実験装置 ECR (Electron Cyclotron Resonance) Plasma Device

- ・直線円筒形ECRプラズマ装置において実験。
- ・静電プローブによるプラズマ計測。(イオン飽和電流  $I_{is}$ , 浮遊電位  $V_f$ )



ECRプラズマ装置の概略図



リング式マルチプローブアレイ[3]

径方向時空間構造測定可能

[3] K. Kamataki *et al.*, PFR 2 (2007)034.

## 実験条件

ガス圧(Ar) 0.2 – 2 mTorr  
マイクロ波パワー 300 W

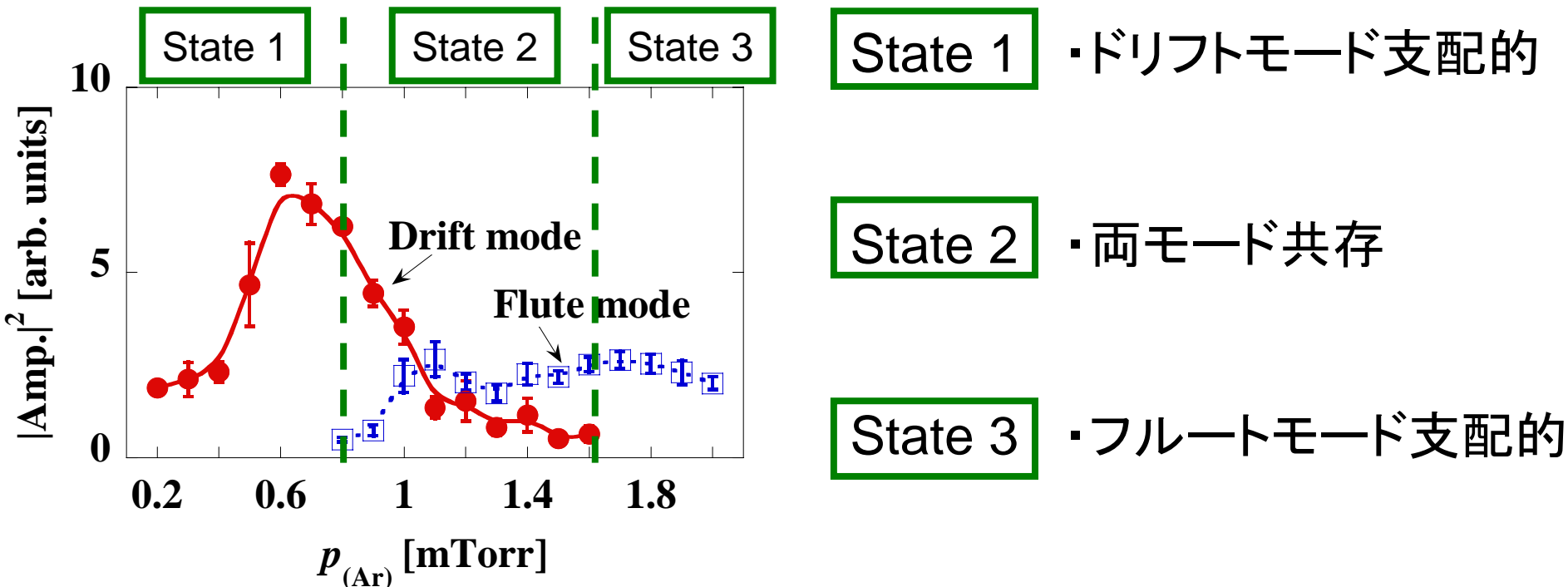
## プラズマパラメータ

電子温度 2 eV  
電子密度  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

# Drift ModeとFlute Modeの共存

- ・ドリフトモードとフルートモードの共存領域[4]観測
- ・ガス圧領域を3つのStateに分割

[4] K. Kamataki *et al.*, JPSJ **76** (2007) 054501.



ドリフトモードとフルートモードのガス圧力依存性  
( 実験条件:  $z=30\text{cm}$ ,  $r=3\text{cm}$ ,  $P_{\mu}=300\text{W}$ ,  $B=685\text{Gauss}$  )

State 2 : State1からState3への遷移の中間 State

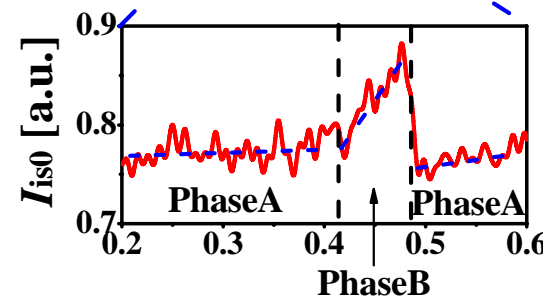
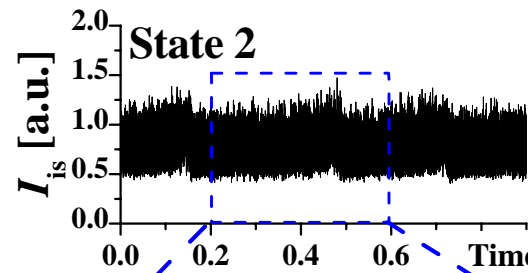
# 中間 State(State2)の Time Evolutionと Spectrum

- ・Cyclic Dynamics (2つのPhase)を観測
- ・共存現象は、ドリフトモードとフルートモードの競合関係

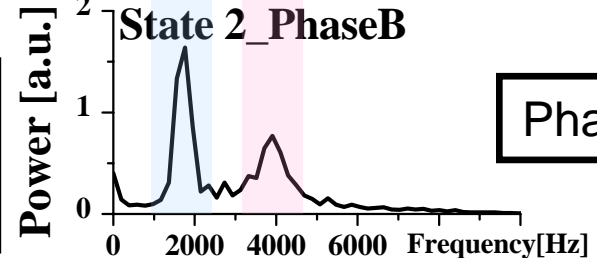
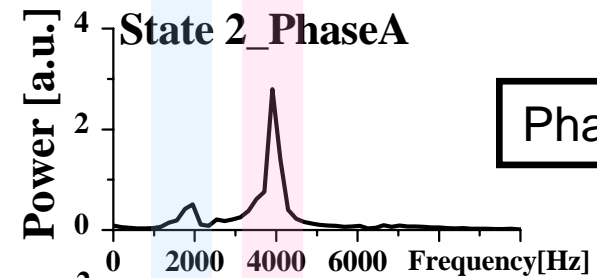
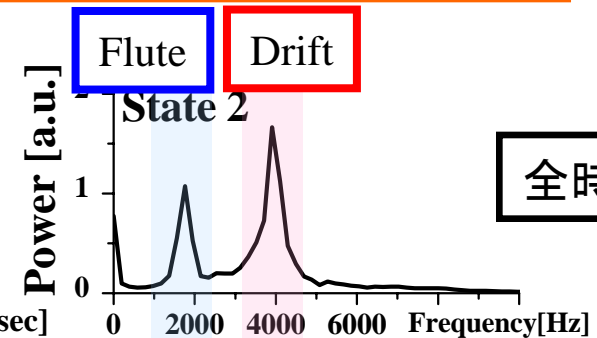
State 2 → 増減  
(2つの周期的Phase)



$t \sim 0.42\text{s}$ において  
 $I_{is0}$ の増加率変化  
 $0.16\text{s}^{-1}$  (PhaseA)  
→  $1.7\text{s}^{-1}$  (PhaseB)  
ドリフトモード  
→ フルートモード

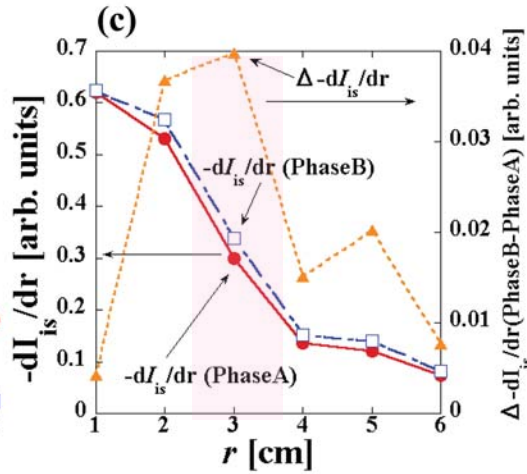
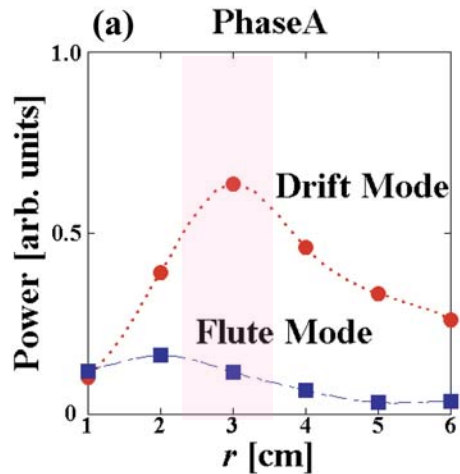


平衡量  $I_{is0}$   
→  $I_{is}$  の 100Hz Low Pass  
Filterを使用

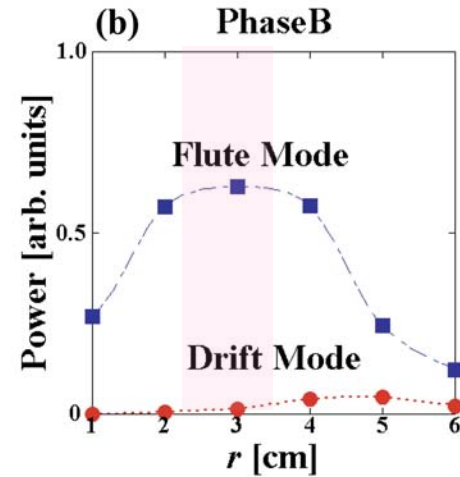


中間Stateにおける  $I_{is}$  の時系列データと周波数スペクトル

# 各PhaseにおけるProfilesの変化



・ドリフトモードとフルートモードがどちらが支配的かで密度等の径方向分布に違いがある。



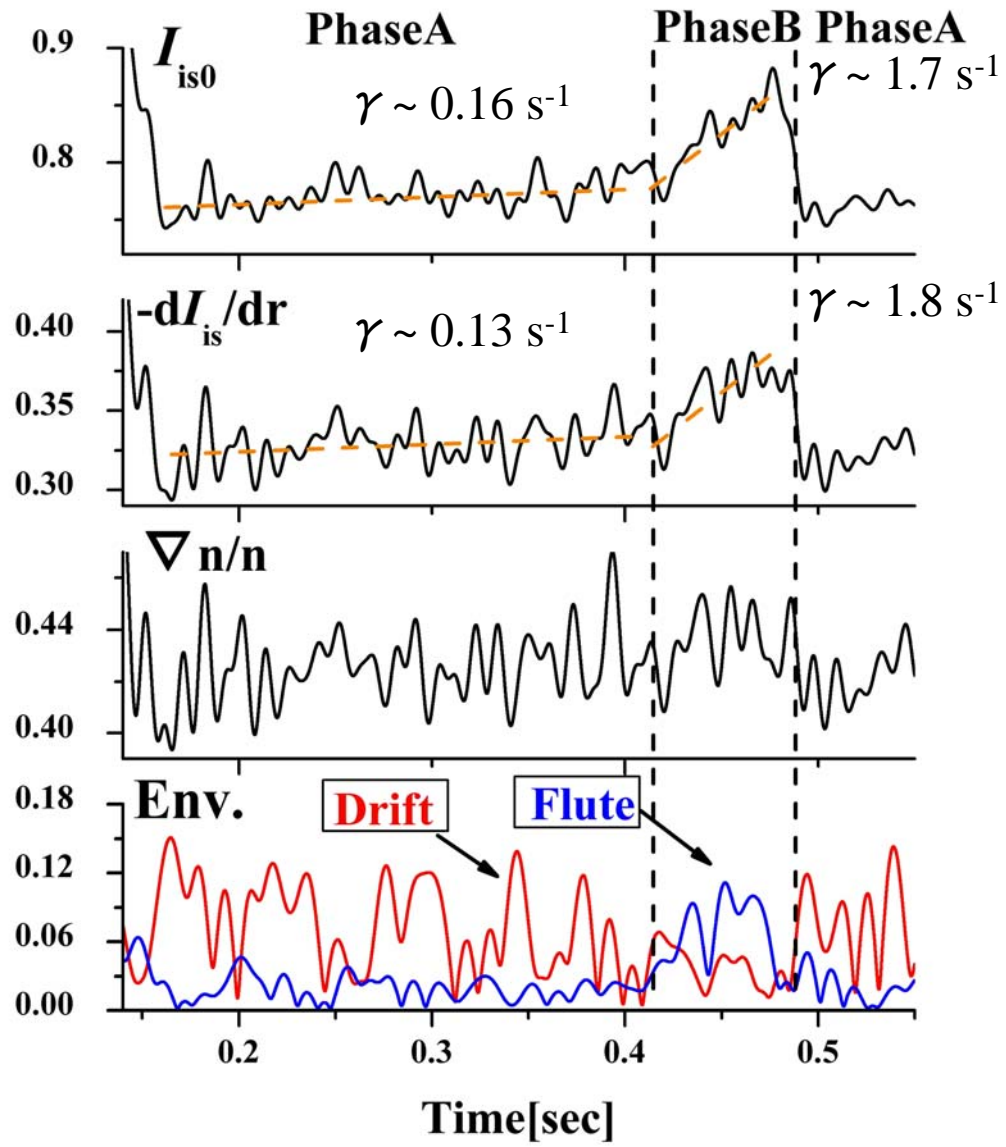
・各Phaseとも  $r = \sim 3\text{cm}$  において両モードが強く励起  
 ・密度勾配も  $r = \sim 3\text{cm}$  において変化が最大



$r = 3\text{cm}$  における両モードの Dynamics に注目

Phase A, B における (a), (b) 両モードの径方向強度分布  
 (c) 密度勾配とその変化の径方向分布

# Dynamics of Drift mode & Flute mode



各成分の時系列データ(r=3cm)

ドリフトモードとフルートモードの周期的競合関係に更に密度分布変化が寄与

1. ドリフトモード振幅増加とフルートモード振幅減少。 $n_e, \nabla n_e$ の単調増加。(PhaseA)
2. ドリフトモード振幅減少とフルートモード振幅増加。 $n_e, \nabla n_e$ の増加率増加。(PhaseBの始め)
3.  $n_e, \nabla n_e$ のある限界に到達時、それらの突発的崩壊(crash)。フルートモード振幅減少とドリフトモード振幅増加。(PhaseBの終わり)

周期 = 密度の立ち上がり時間



# バイコヒーレンス解析

波動間の相互作用 → 非常に複雑で不規則 → 線形理論では難しい。  
(パワースペクトル等)



非線形まで拡張(高次元解析)

バイコヒーレンス解析

波動間の非線形結合度

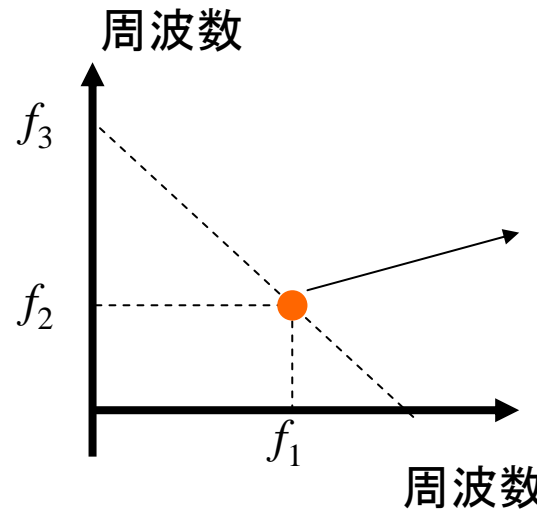
バイコヒーレンス解析結果概念図

バイコヒーレンス解析

$$\hat{b}^2(\omega_1, \omega_2) = \frac{|\hat{B}(\omega_1, \omega_2)|^2}{\langle |X(\omega_1)X(\omega_2)|^2 \rangle \langle |X(\omega_1 \pm \omega_2)|^2 \rangle}$$

$X(\omega)$  : パワースペクトル

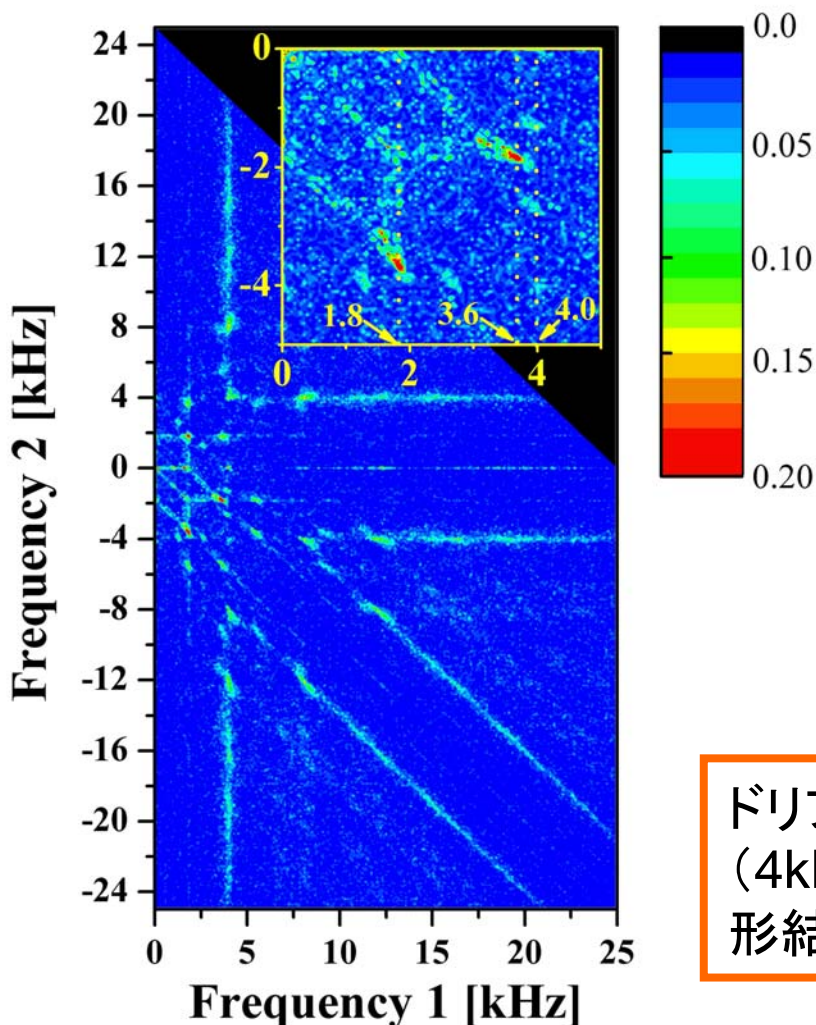
$B(\omega_a, \omega_b)$  : バイスペクトル



- ・周波数 $f_3$ をもつ波が存在する。
- ① $f_3$ 独自の波動である場合、バイコヒーレンス値は0
- ② $f_3$ の波動が $f_1$ の波動と $f_2$ の波動の非線形結合で生成されている場合、バイコヒーレンスはある。

# Direct Interaction

バイコヒーレンス解析結果 ( $r=3\text{cm}$ )



・ドリフトモードとフルートモード間のエネルギーのやり取りはフルートモードが高調波生成の時に比べ、小さい。

[5] K. Kamataki *et al.*, PPCF **50** (2008) 035011.

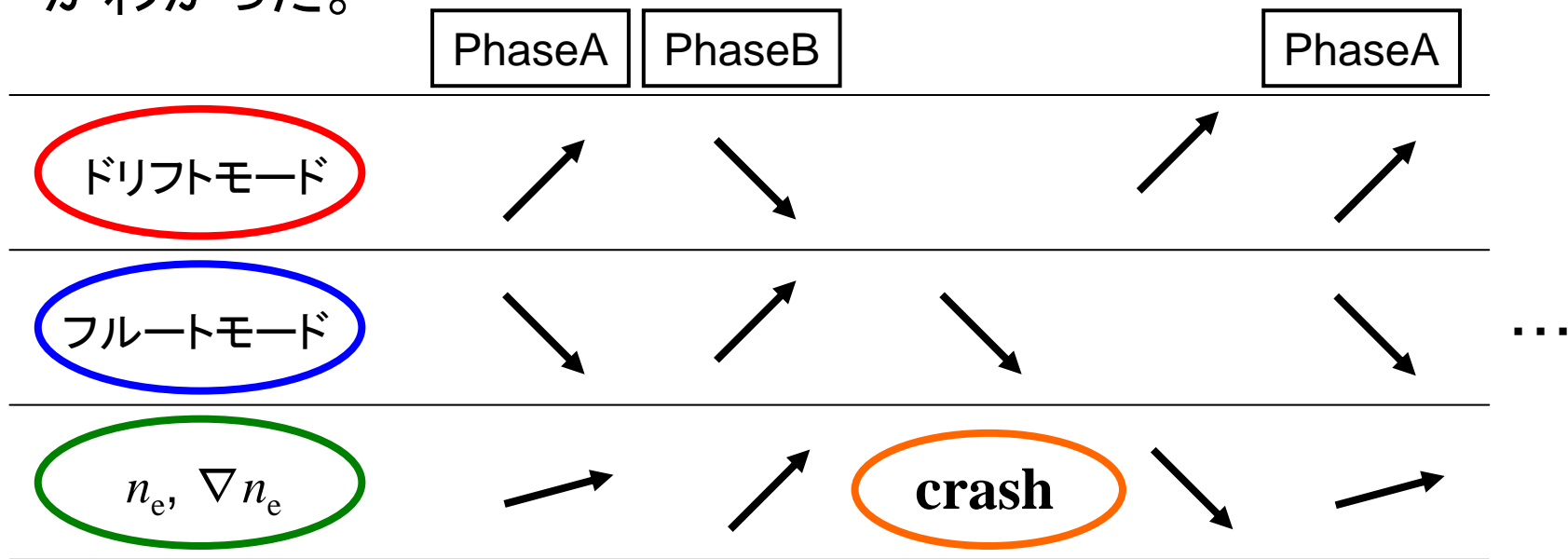
ドリフトモード ( $f \sim 4\text{kHz}$ ) と  
 $f > 8\text{kHz}$  の高周波ブロードバンド成分

フルートモード ( $f \sim 1.8\text{kHz}$ ) と  
 $f < 3.6\text{kHz}$  の低周波ブロードバンド成分

ドリフトモードとフルートモードの非線形結合度 ( $4\text{kHz} - 1.8\text{kHz}$ ) は、フルートモード同士の非線形結合度 [ $1.8\text{kHz} - 3.6\text{kHz}$  (高調波)] の約2割程度

# Summary

・直線ECRプラズマ装置において、ドリフトモードとフルートモードの共存現象を調べた結果、両モード間に周期的競合関係があることがわかった。



・両モード間の非線形結合度は小さく、この周期的競合関係は密度分布緩和に関係していると考えられる。