

# PANTAにおける揺動解析

九州大学総合理工学府

金 史良

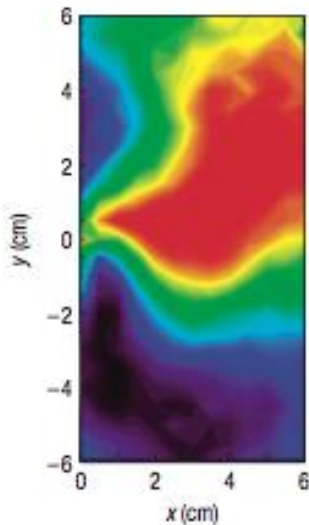
挾間田 一誠

プラズマ乱流は輸送を決定するためその理解と制御は重要

## プラズマ乱流

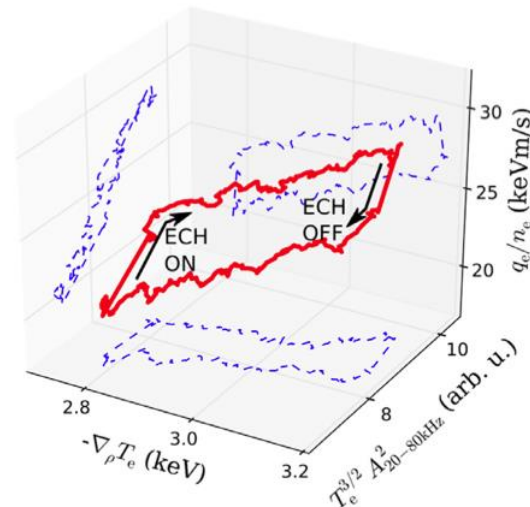
静電的・・・イオン温度勾配モード、ドリフト波

電磁的・・・MHD乱流、RF/ECH波動と乱流の相互作用



ドリフト波の  
モジュレーション

T. Yamada *et al.*,  
Nature Phys. (2008)

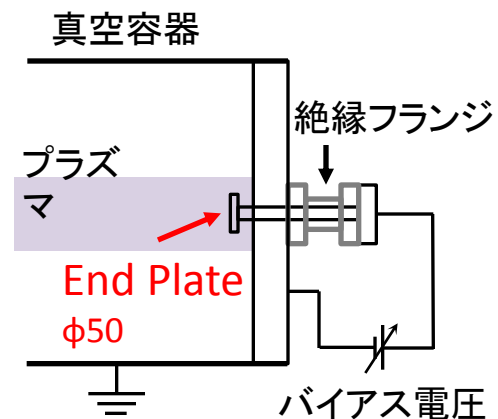
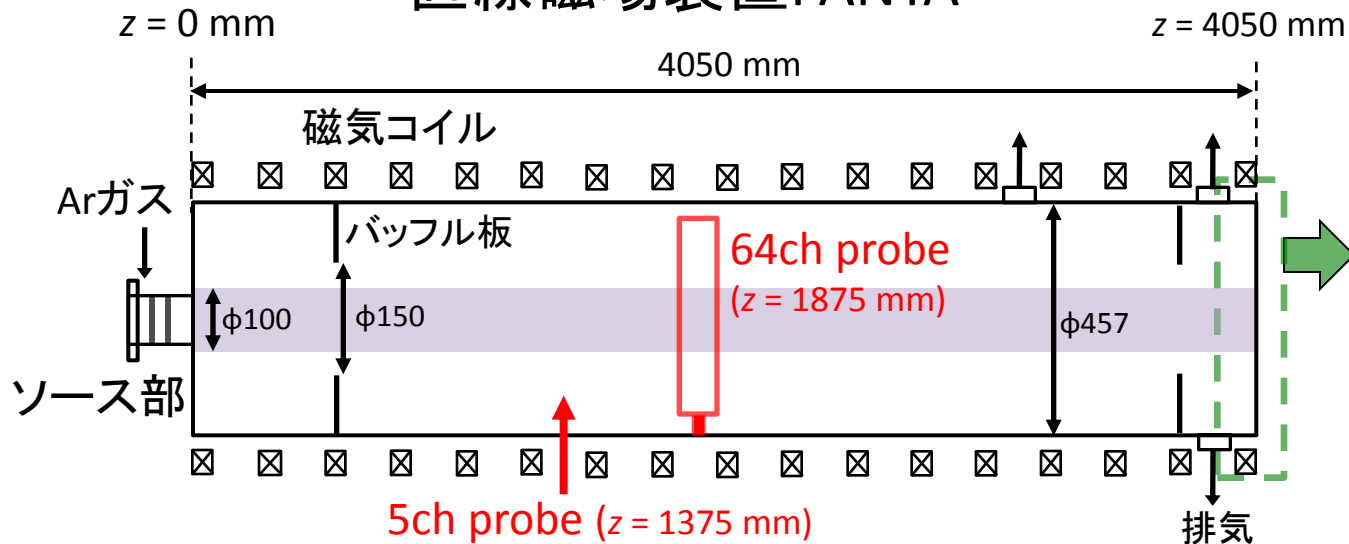


ECHと乱流の  
直接の結合

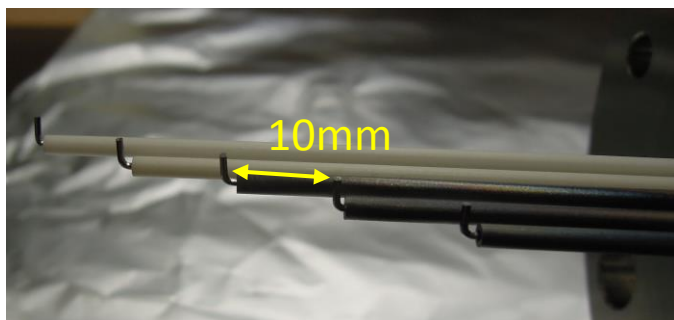
S. Inagaki *et al.*,  
Nucl. Fusion (2013)

直線磁場装置PANTA(Plasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysis)では乱流の詳細計測が可能

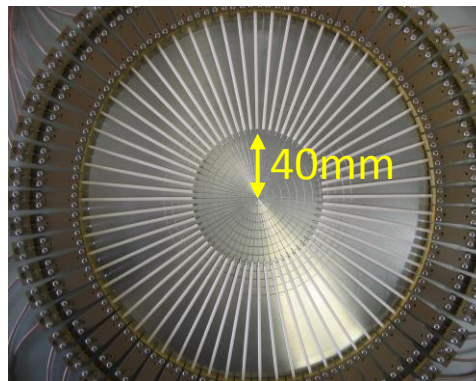
## 直線磁場装置PANTA



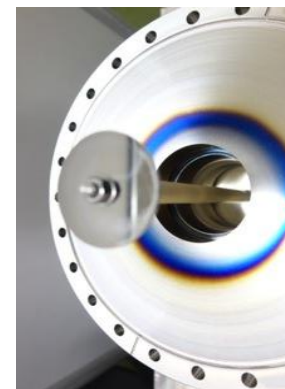
5ch probe ( $r = 10\text{-}50\text{ mm}$ )



64ch probe ( $r = 40\text{ mm}$ )



End Plate



- ヘリコン波放電 (3kW/7MHz)
- $B \sim 0.09\text{T}$ ,  $P_n \sim 0.8\text{ mTorr}$

- $n_e \sim 10^{19}\text{m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 3\text{eV}$ ,  $T_i \sim 0.3\text{eV}$
- ドリフト波が励起

PANTAにおける静電的・電磁的揺動の解析結果を発表する

## ①静電的揺動

→ 静電揺動の非線形結合の変化の観測

発表者: 金

## ②電磁的揺動

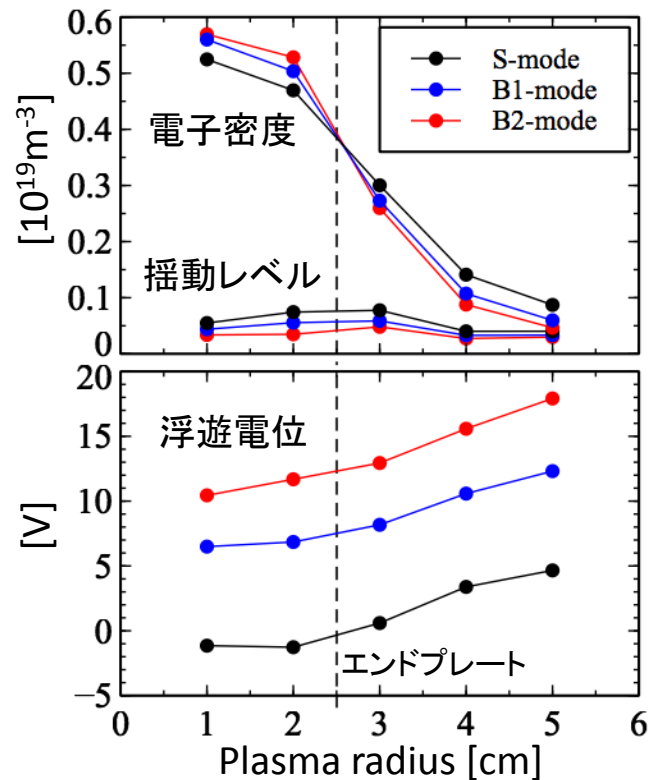
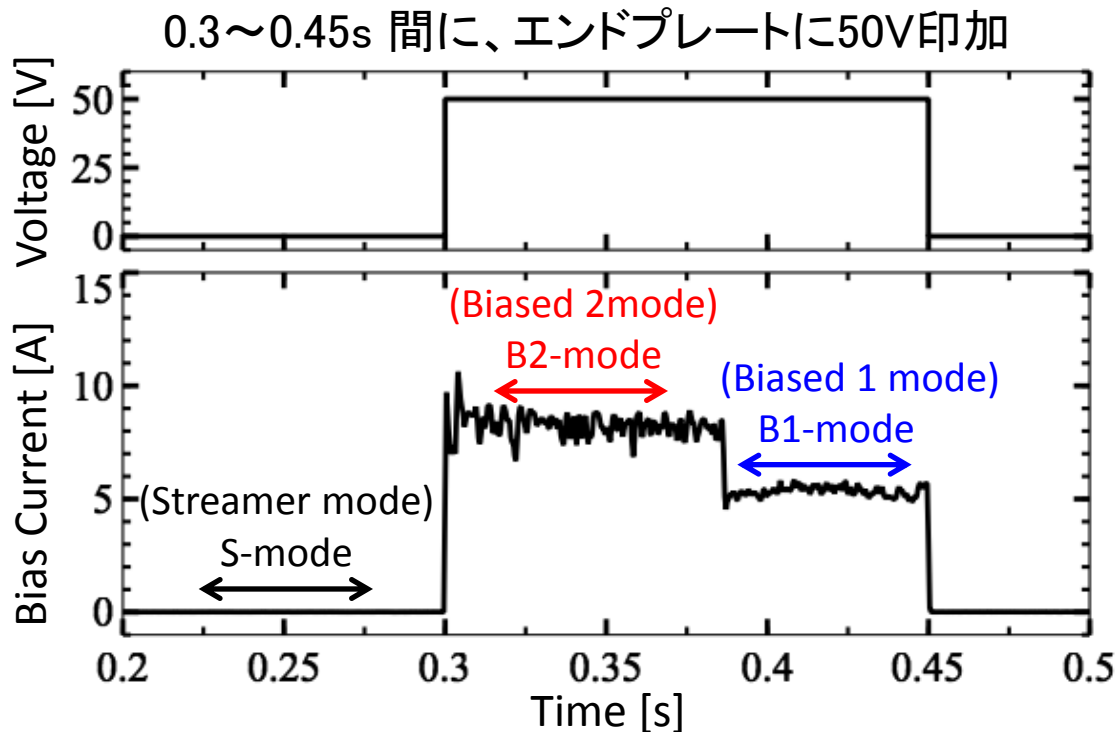
→ イオンサイクロトロン周波数帯の揺動の同定

発表者: 挾間田

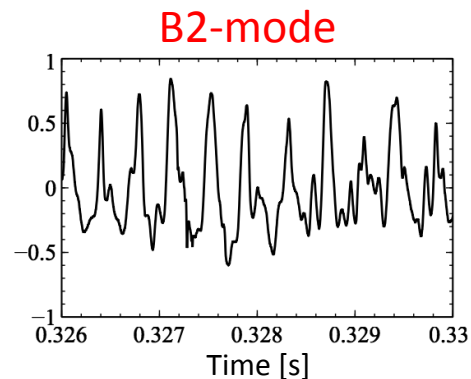
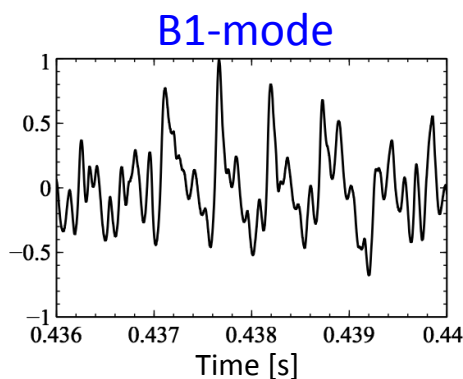
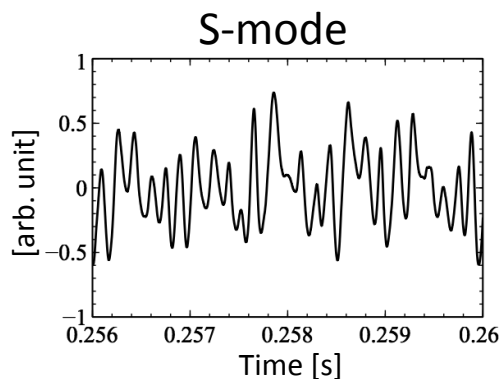
1. 揺動の非線形結合変化の観測

2. イオンサイクロトロン周波数帯  
揺動の同定

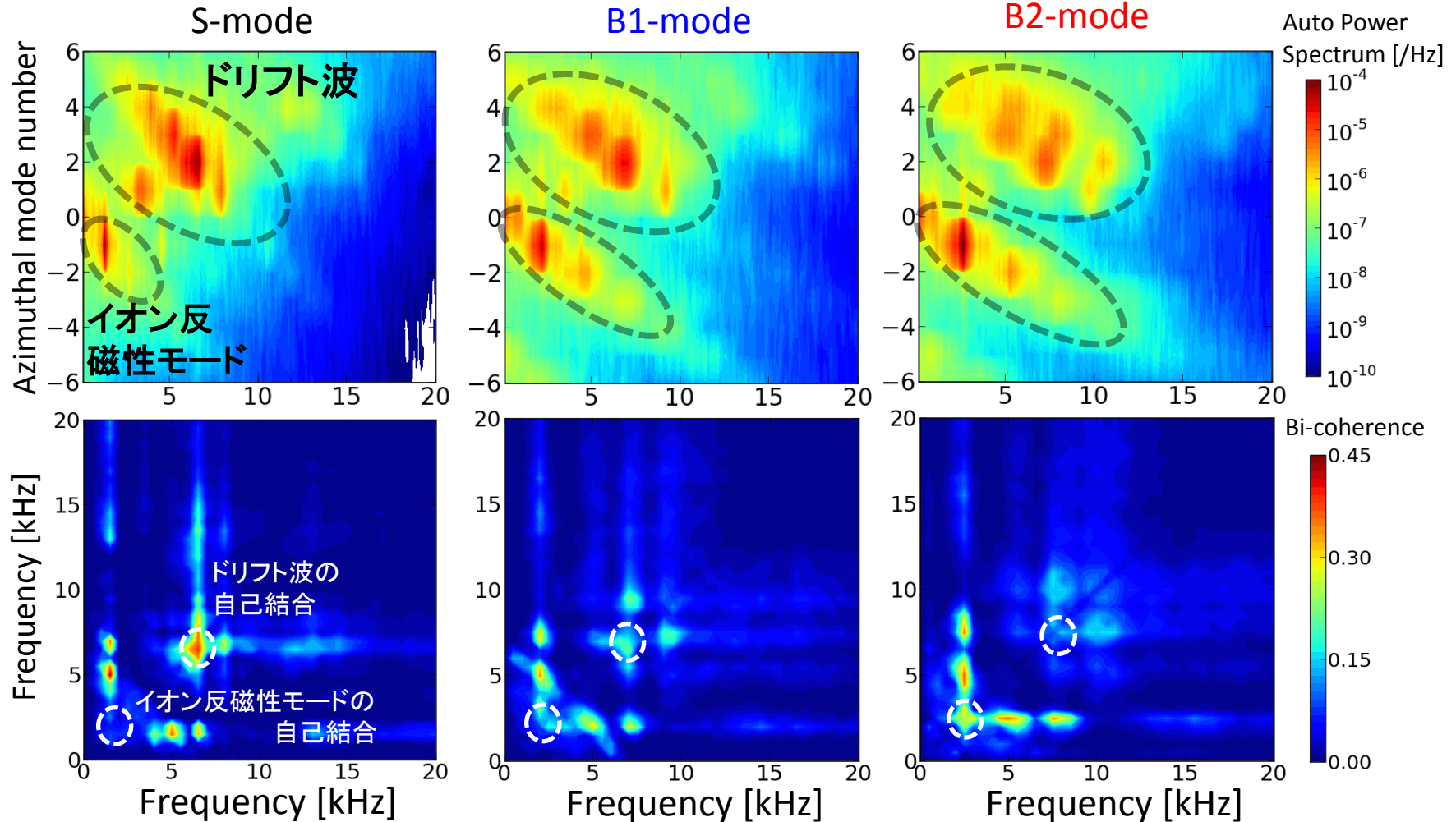
# エンドプレートバイアス実験



イオン飽和電流の波形変化



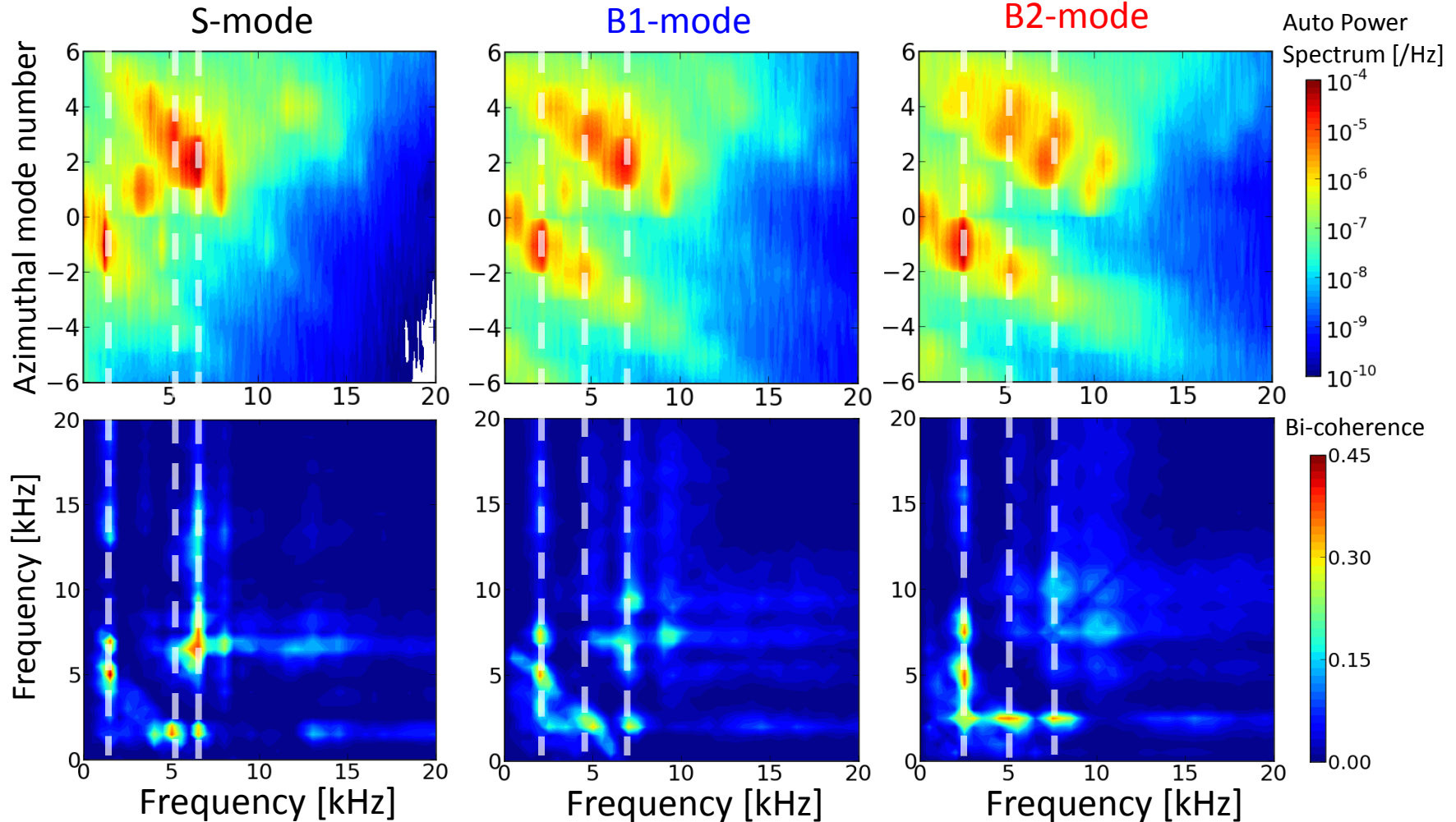
バイアス印加により乱流構造が変化する



- ・ドリフト波のパワー、自己結合は減少
- ・イオン反磁性モードは高調波が出現、自己結合は増加

# 密度揺動のバイコヒーレンス

6/15

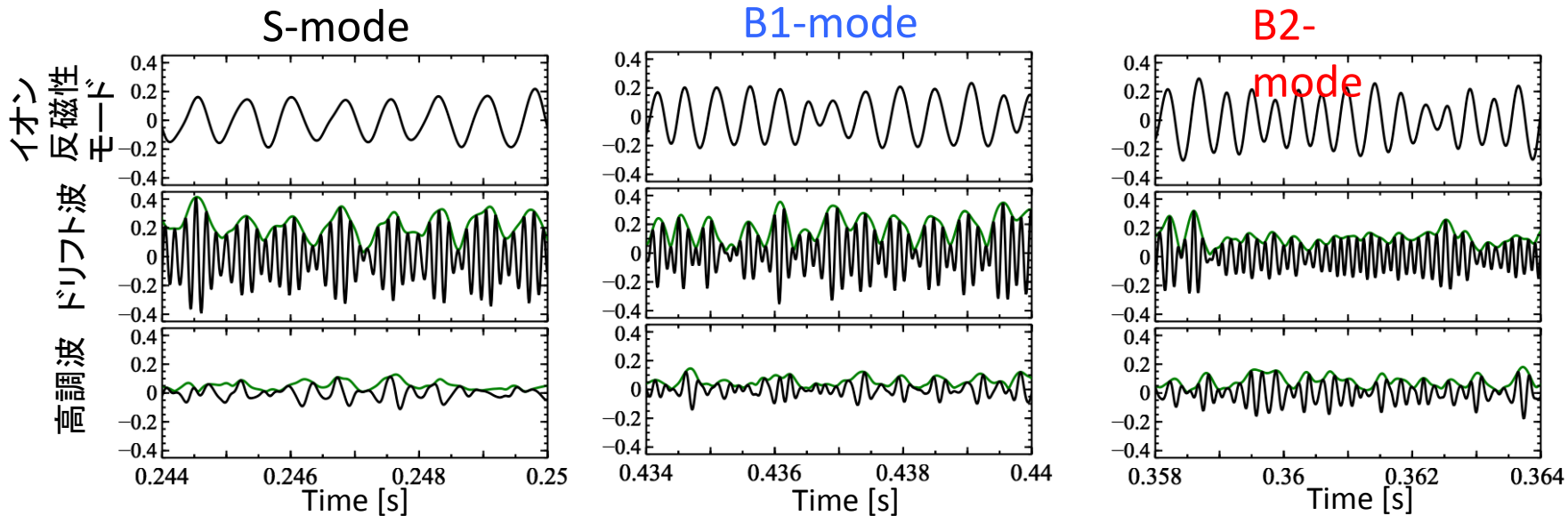


イオン反磁性モード-ドリフト波間の結合と  
イオン反磁性モード-高調波間の結合は周波数が同一で区別できない



# エンベロップ相関解析

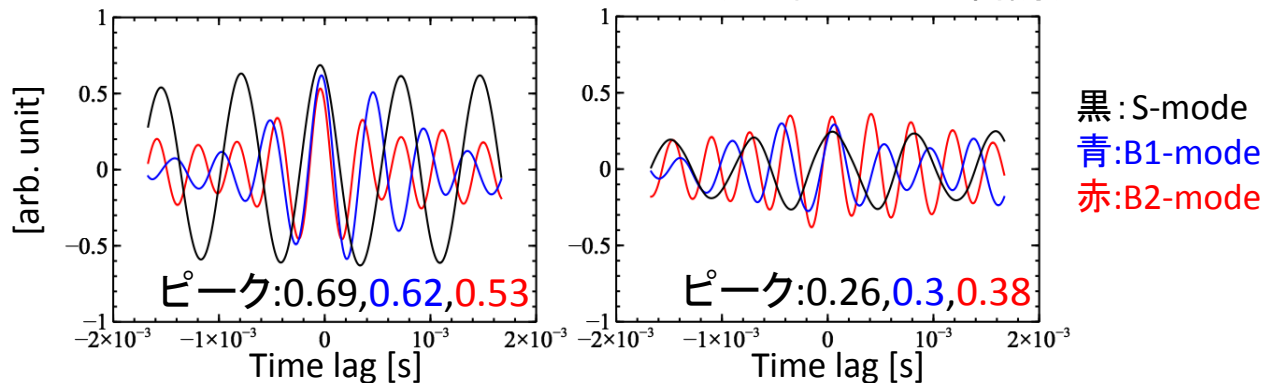
7/15



## イオン反磁性モードと揺動のエンベロップの相互相関

イオン反磁性モード vs ドリフト波

イオン反磁性モード vs 高調波



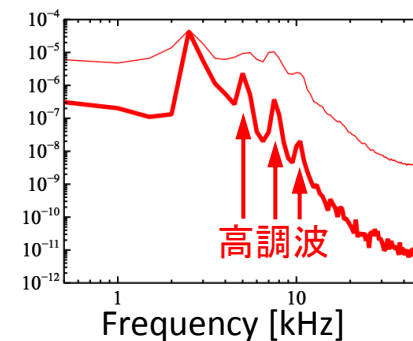
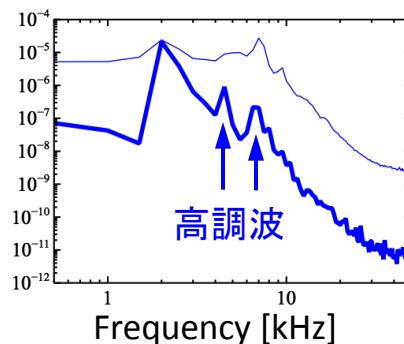
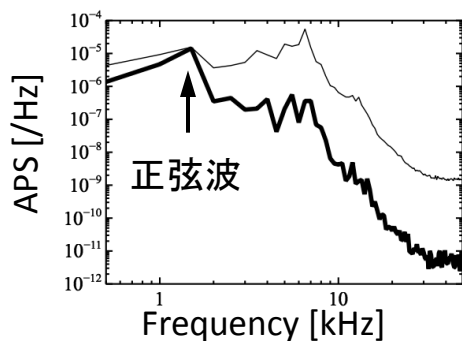
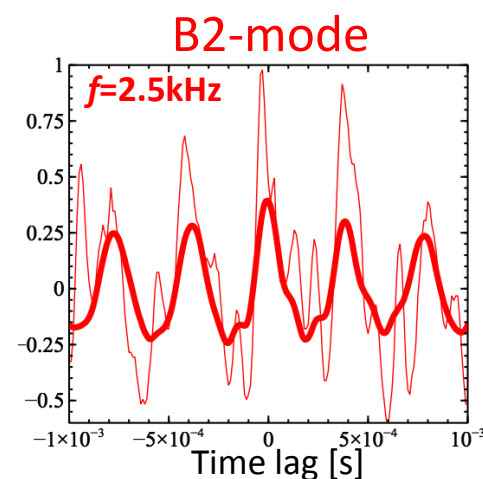
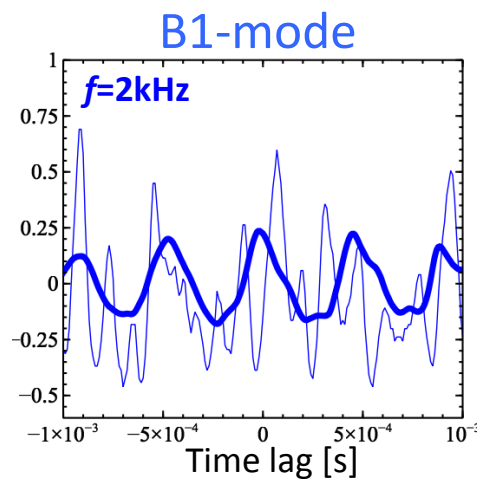
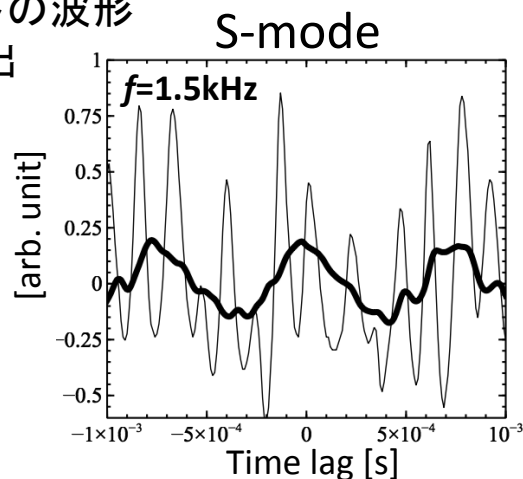
イオン反磁性モードとドリフト波の相関時間は減少  
→ イオン反磁性モード-ドリフト波間の結合は弱くなる

# ノイズに埋もれた非線形波形の抽出

畳み込み平均 → ノイズを除去し、非線形波形の抽出が可能

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N} \dot{a} \sum_{i=1}^N x(t_i + t) \quad t_i: \text{特定の揺動の位相が0を通った時間}$$

イオン反磁性  
モードの波形  
を抽出



イオン反磁性モードの波形は正弦波から孤立波形状(高調波の出現)  
→ イオン反磁性モード-高調波間の結合は強くなる

1. 揺動の非線形結合変化の観測

2. イオンサイクロトロン周波数帯  
揺動の同定

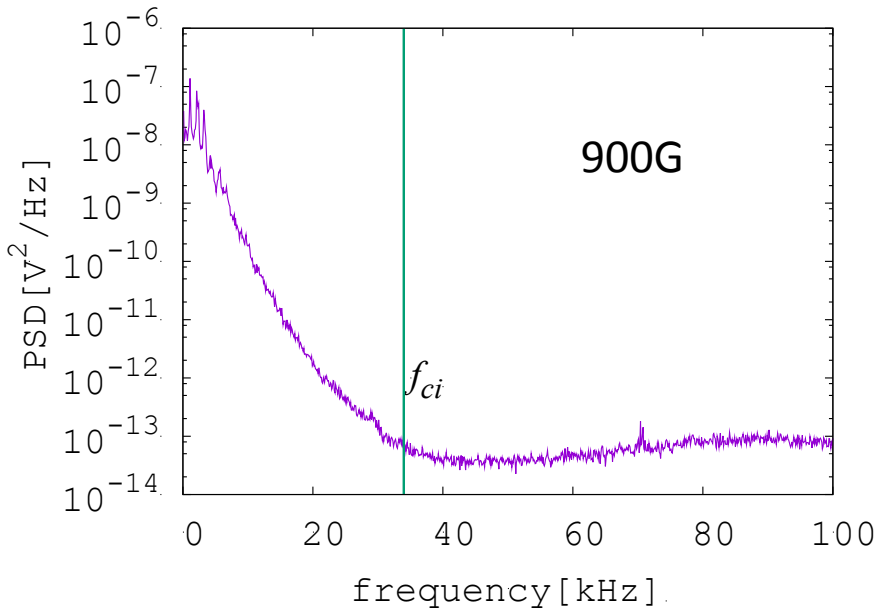
# イオンサイクロトロン周波数帯の揺動

9/15

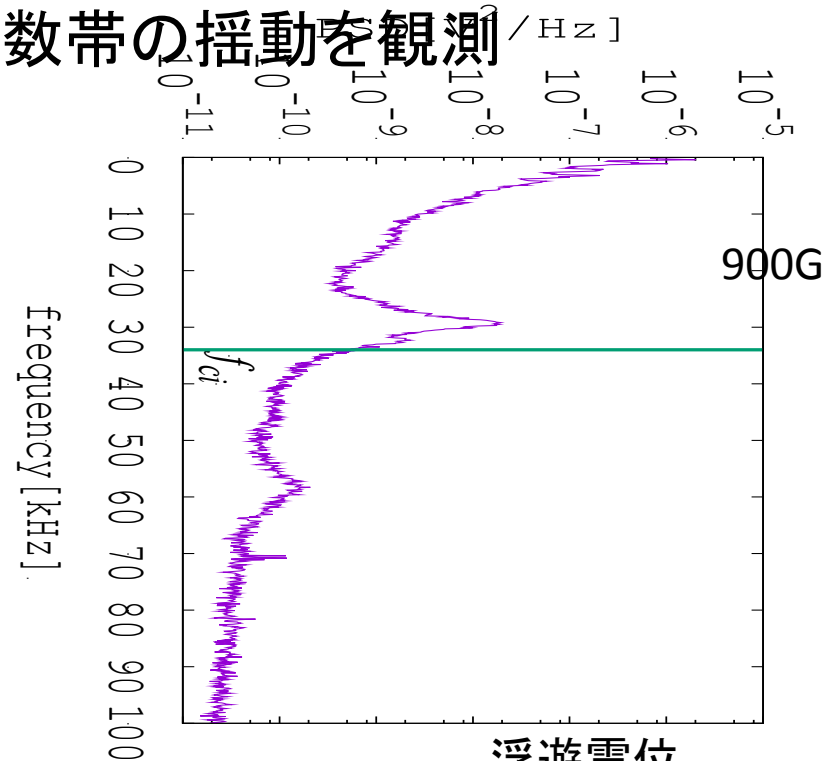
加熱に用いられる高周波の波(数10kHz～数MHz)と  
輸送に係わるドリフト波(～数kHz)が結合することが示唆されている

S. Inagaki, et al., Nucl. Fusion **53** 113006(2013)

PANTAでイオンサイクロトロン周波数帯の揺動を観測



イオン飽和電流



浮遊電位

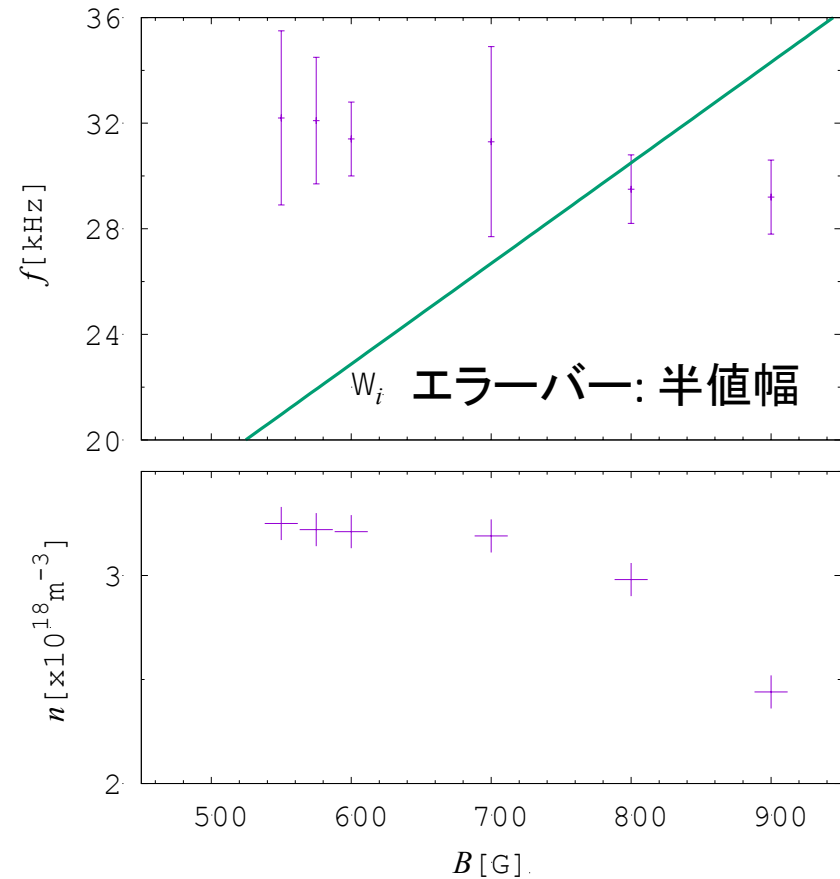
データ提供 松岡(久留米高専)

- 浮遊電位に強く現れる
- 周方向のモードナンバーが0

ピークの導出

$$f_p = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} fS(f)}{\sum_{f=f_1}^{f_2} S(f)}$$

- 各パワースペクトルにスムージングをかける
- 30kHz付近のピークで強度の最大値を調べる
- 最大強度の半分の強度をもつ範囲を調べる
- 得た範囲で重み付け平均をとりピーク周波数とする



- 磁場の増加に対してピーク周波数の変化は小さく、減少する傾向にある

- イオンサイクロトロン波ではないことが示唆される
- 密度も同時に変化していた

仮定: ①  $k_r=0, k_\theta=0$  ② 電磁波 ③  $f=0.86f_{ci}$

$$* \omega_R = \frac{\Omega_e}{2} + \left( \left( \frac{\Omega_e}{2} \right)^2 + \omega_{pe}^2 + |\Omega_e \Omega_i| \right)^{1/2} \quad \omega_L = -\frac{\Omega_e}{2} + \left( \left( \frac{\Omega_e}{2} \right)^2 + \omega_{pe}^2 + |\Omega_e \Omega_i| \right)^{1/2}$$

$$\frac{\omega^2}{c^2 k_{\parallel}^2} = \frac{(\omega + |\Omega_i|)(\omega - \Omega_e)}{(\omega - \omega_R)(\omega + \omega_L)}$$

The dispersion relation of R wave ( $\omega \sim \Omega_i$ )

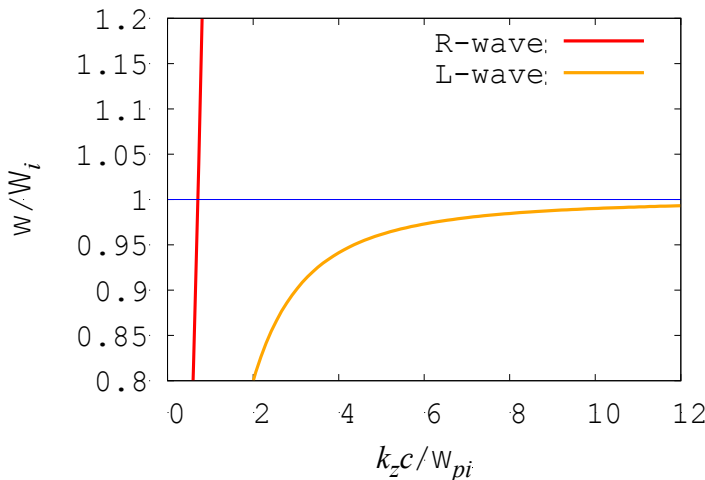
$$\omega = 2\Omega_i \left( \sqrt{1 + 4\omega_{pi}^2/k_z^2 c^2} - 1 \right)^{-1}$$

$$\frac{\omega^2}{c^2 k_{\parallel}^2} = \frac{(\omega - |\Omega_i|)(\omega + \Omega_e)}{(\omega + \omega_R)(\omega - \omega_L)}$$

The dispersion relation of L wave ( $\omega \sim \Omega_i$ )

$$\omega = \Omega_i (1 + \omega_{pi}^2/k_z^2 c^2)^{-1}$$

- 磁場: 線形に依存
- 密度: プラズマ振動数を通して依存



R波: 軸方向モード数 0 ~ 1

L波: 軸方向モード数 2 ~ 3

上式とPANTAパラメータを使って記述した分散関係

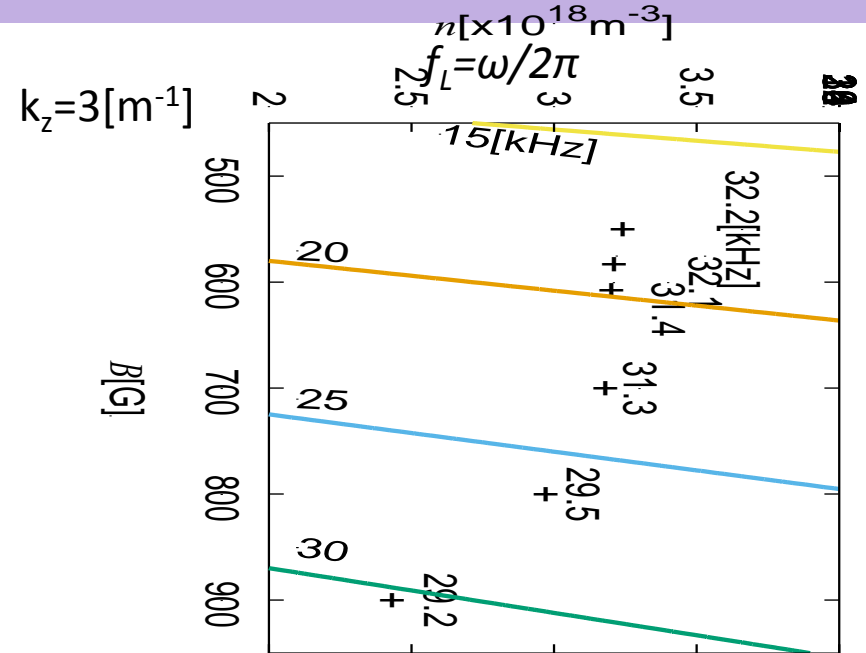
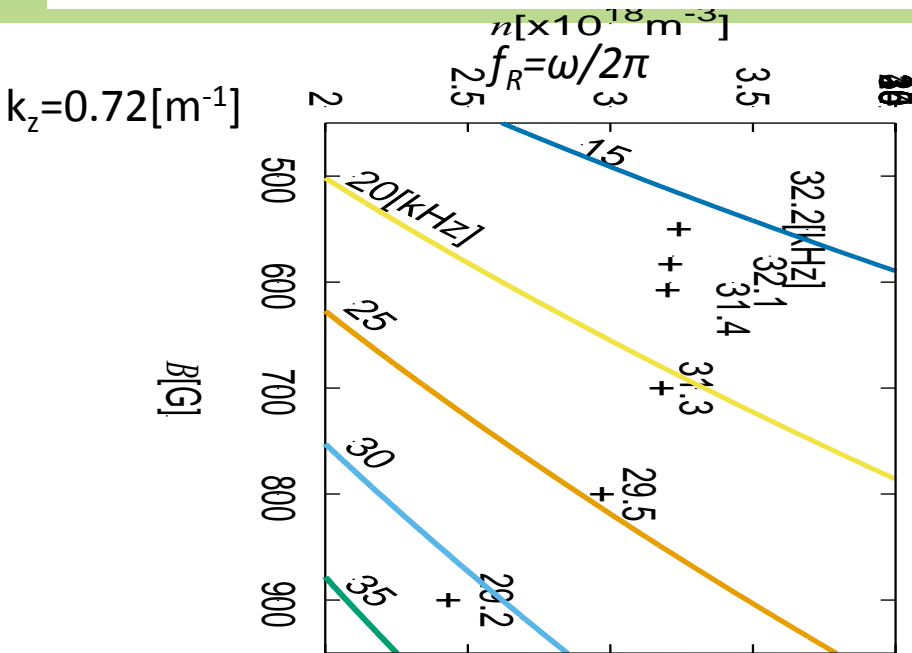
# 線形解析との比較1

R wave

$$\omega = 2\Omega_i \left( \sqrt{1 + 4\omega_{pi}^2/k_z^2 c^2} - 1 \right)^{-1}$$

L wave

$$\omega = \Omega_i \left( 1 + \omega_{pi}^2/k_z^2 c^2 \right)^{-1}$$



実験結果: 右下に下がるほど周波数は減少  
 解析結果; 右下に下がるほど周波数が増加



# 線形解析との比較2

	experiment	R	L
Dispersion relation		$\frac{2\Omega_i}{\sqrt{1 + 4\omega_{pi}^2/k_z^2 c^2} - 1}$	$\frac{\Omega_i}{1 + \omega_{pi}^2/k_z^2 c^2}$
Dependence on $B$	nonlinear	linear	linear
Dependence on $n$		through $\omega_{pi}$	through $\omega_{pi}$
Azimuthal mode num.	0	0	0
Axial mode num.		0~1	2~3
Radial wave num. $k_r[\text{m}^{-1}]$		0	0
Fluctuation of $B$		exist	exist

- 密度を含めた解析でも再現できなかった
- 磁場に対する依存性は通常のイオンサイクロトロン波とことなる

外部で発生した電磁波がプラズマに浸透してきたものを観測したのではないか

PANTAにおける特徴的な揺動の解析結果を示した

## ①静電的揺動

ドリフト波とイオン反磁性モードの非線形結合の変化をバイコヒーレンス解析、畳み込み平均等を用いて観測した

## ②電磁的揺動

イオンサイクロトロン周波数帯の揺動をパラメータスキャンを行い、スペクトル解析を用いて特徴づけた