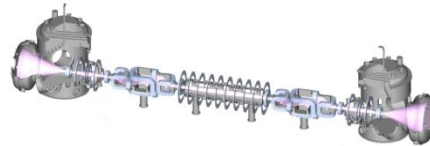


GAMMA10における自発励起ICRF波動 の反射計を用いた空間構造計測

池添竜也, 市村真, 佐藤達典, 今井康隆, 村上達也, 岩井透,
横山拓郎, 宇賀神ゆめと, 平田真史, 嶋頼子, 吉川正志, 今井剛
筑波大学プラズマ研究センター



第14回若手科学者によるプラズマ研究会

「周辺プラズマから対向壁までの物理的・工学的研究の現状と展望」

日本原子力研究開発機構・那珂核融合研究所

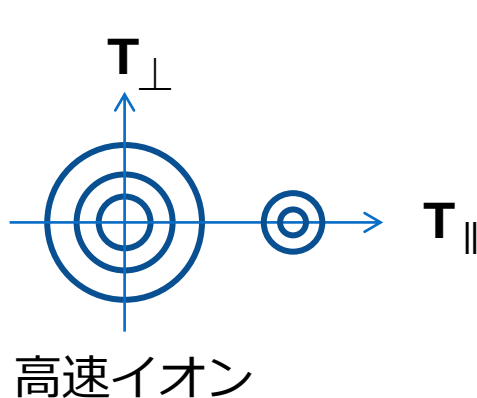
平成23年3月7～9日

温度非等方性による不安定性の駆動

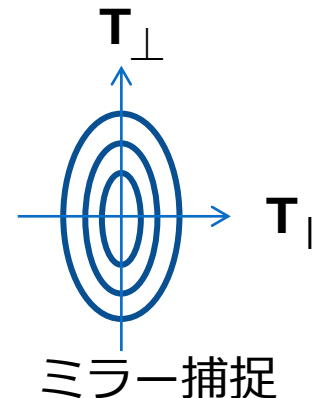


- 磁化プラズマでは種々のパラメータの非一様性, 非等方性, それらの間の相互作用により種々の不安定性が励起される.

特に, 温度非等方性が駆動する不安定性として,
→ アルヴェン固有モード, AIC, etc.

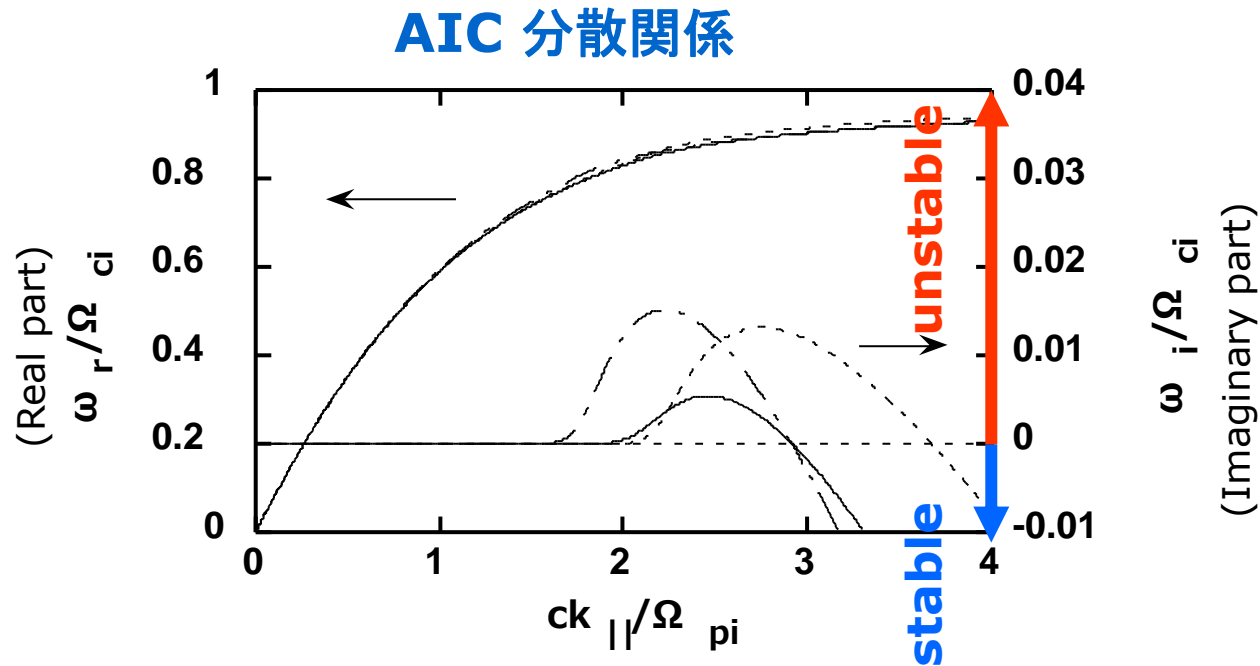


アルヴェン固有モード
(TAE, HAE, ...)



AIC (Alfvén ion cyclotron) 波動

AIC波動の分散関係



--- $T_{\perp}/T_{\parallel}=10, \beta_{\perp}=0.01$
 --- $T_{\perp}/T_{\parallel}=15, \beta_{\perp}=0.01$
 -.- $T_{\perp}/T_{\parallel}=10, \beta_{\perp}=0.02$

- AIC波動は強い非等方性, 高い β 値において不安定となり, 駆動力は $\beta(T_{\perp}/T_{\parallel})^2$ に比例する.
- イオンサイクロトロン周波数より少し低い周波数をもつ.

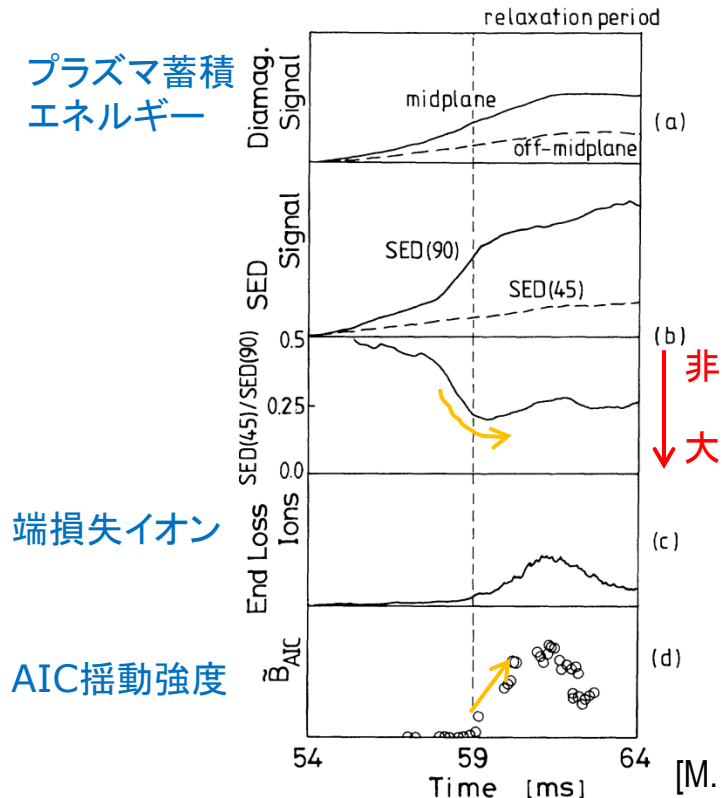
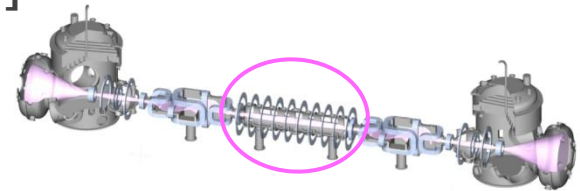
GAMMA10におけるAIC波動の自発励起



- GAMMA10では、ICRF加熱によりプラズマの生成・加熱を行う。

[主プラズマ閉じ込め領域（セントラルセル）のパラメータ]

- 中心磁場強度：～0.4T
- ミラー比：5
- イオン温度：数keV >> 電子温度：<100eV
- 温度非等方性： $T_{\perp}/T_{\parallel} > 10$



非等方度と β 値の上昇

AIC波動の自発励起

(イオンのピッチ角散乱)

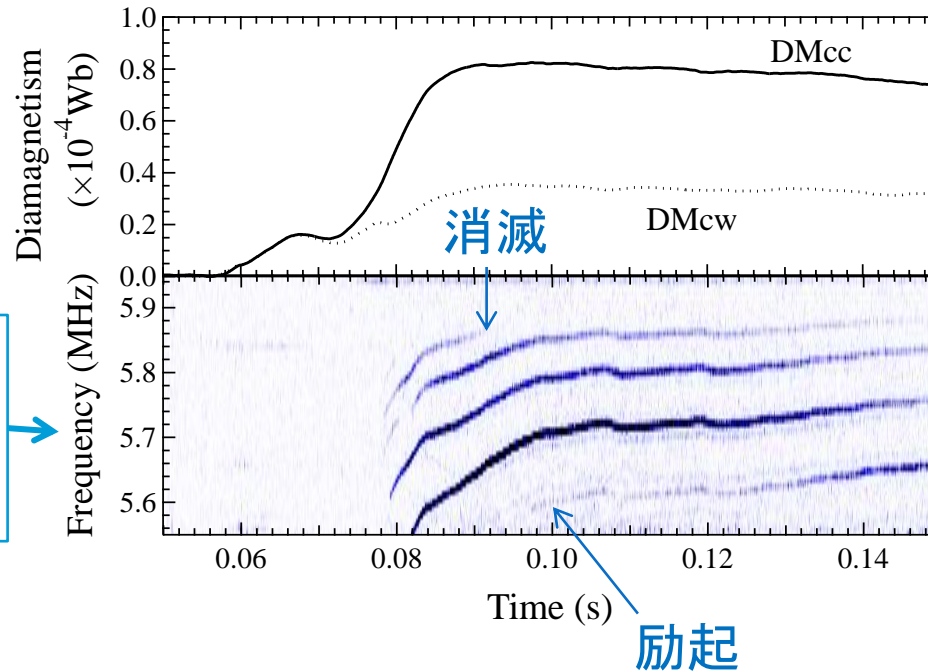
高エネルギーイオンの損失増大

温度非等方度の飽和
(非等方性の緩和)

複数のピーク周波数の出現



GAMMA10セントラルセルにおける周辺磁場揺動スペクトルの時間発展

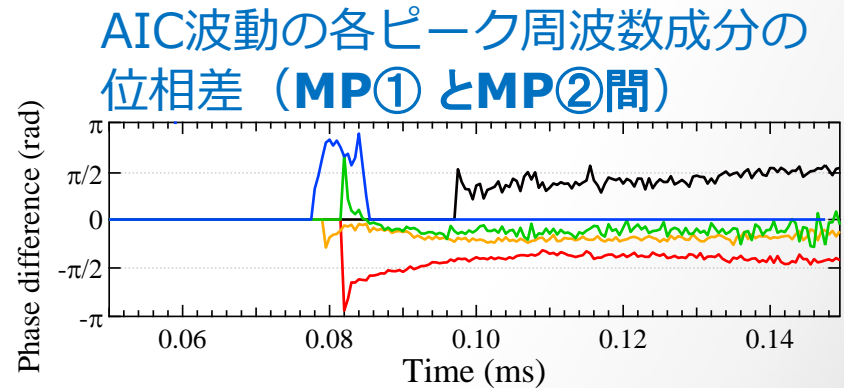
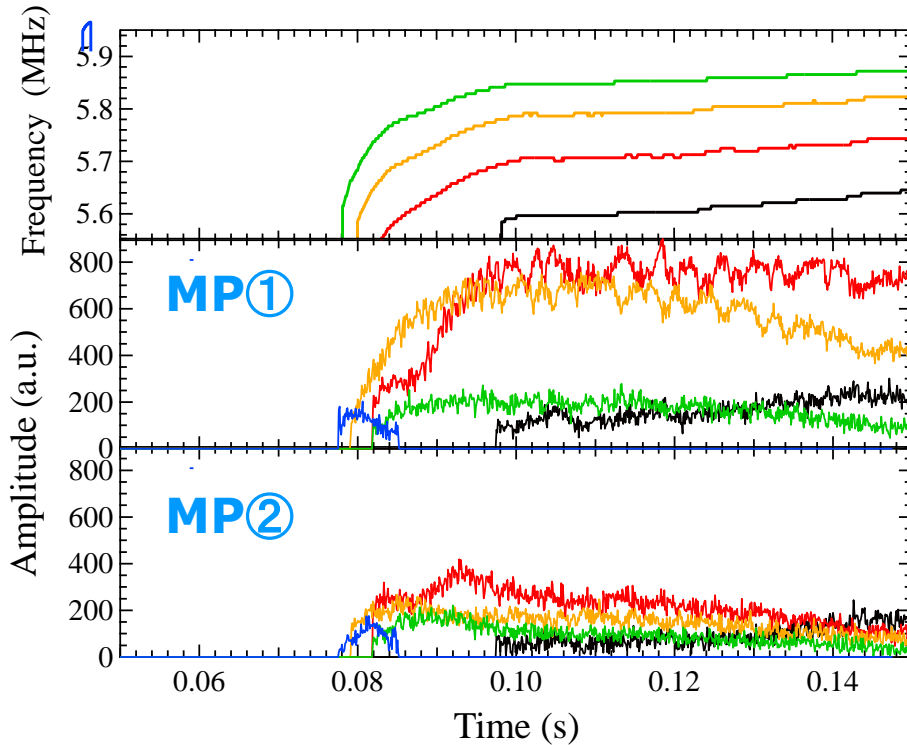
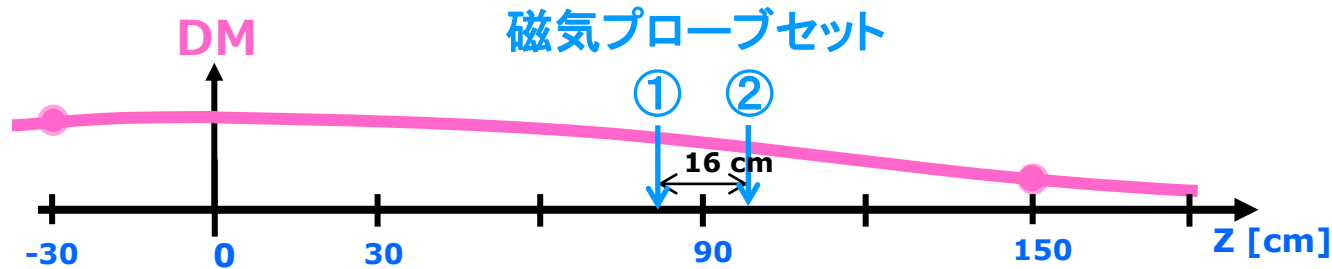


- 5.5 – 6.0 MHzの間に複数のピーク（ブランチ）が出現する.
- ピーク周波数はプラズマパラメータと共に時間的に変化し, その数も変化する.



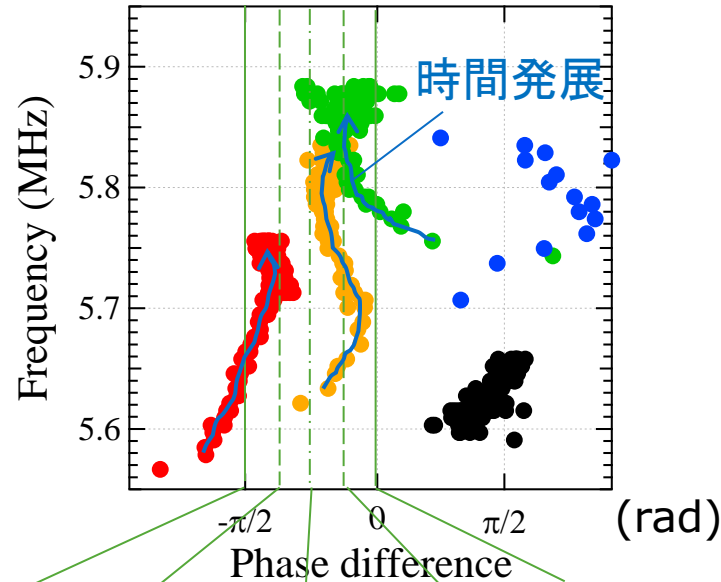
複数励起されるAIC波動の励起機構, 境界条件は？

ピーク毎に異なる揺動振幅，軸方向波数の時間発展



- 揺動の強度，その時間発展はピーク毎に異なる。
- 軸方向に並べた二つの磁気プローブ間の位相差の時間発展もピーク毎に異なる。

AIC波動の軸方向波数の同定



軸方向波数 k_{\parallel} :	9.8	7.4	4.9	2.5	0
軸方向波長 λ :	0.64	0.85	1.28	2.56	∞ (m)

- 周波数の高い二つのピーク（ブランチ）は定常状態に近づくにつれ、 k_{\parallel} が近付くが、低い周波数とは異なる k_{\parallel} をもつ。
→ 軸方向に異なる固有モードとして成長している
- 定常状態では、揺動振幅の大きなピークの軸方向波数 k_{\parallel} は 0~10（波長 > 0.5 m）である。

反射計による内部領域におけるAIC波動の計測



詳細な空間構造計測には、内部領域の情報、プラズマパラメータが異なる様々な軸方向位置における情報が必要。

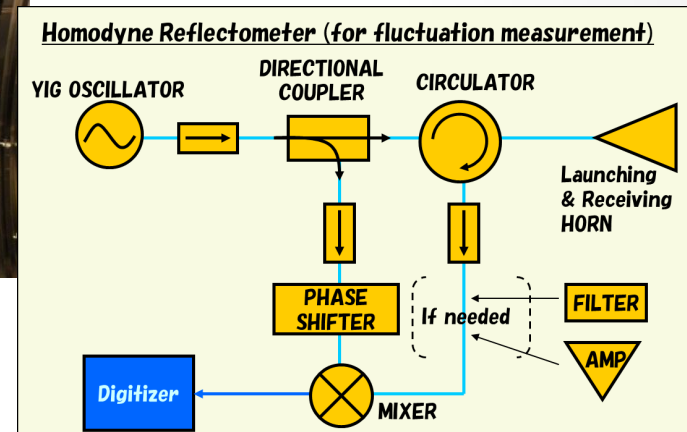
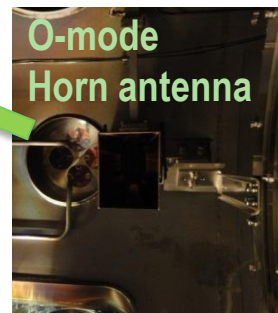
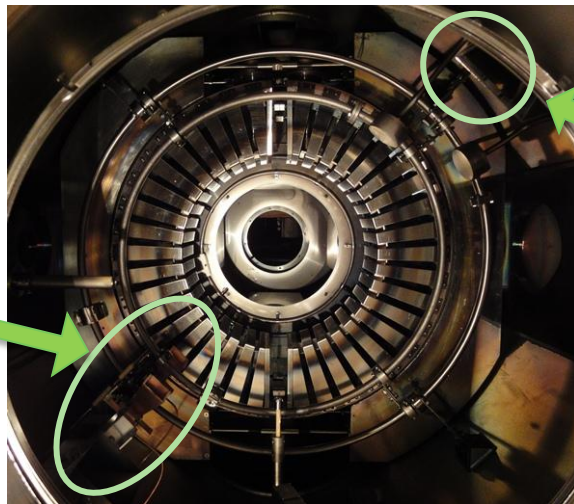
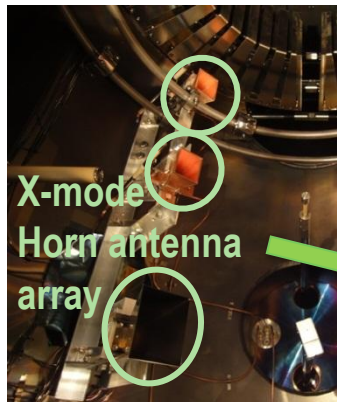
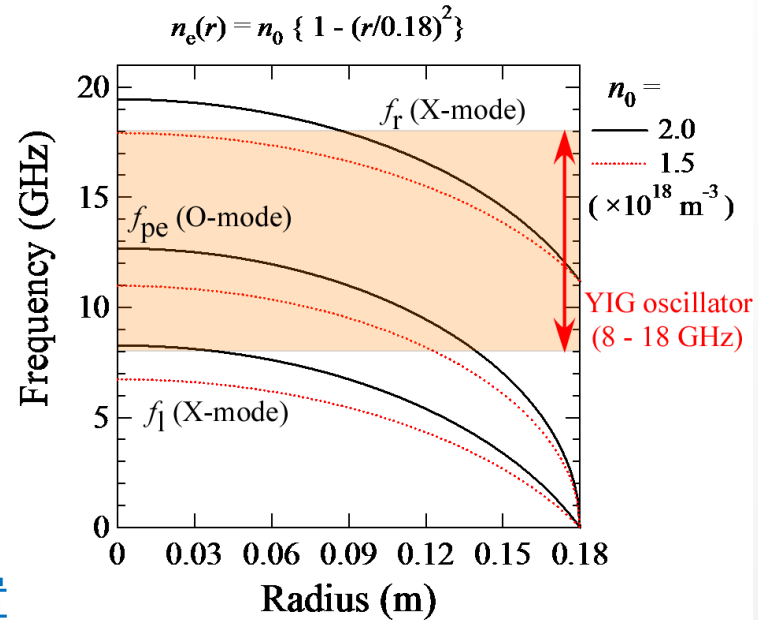


反射計を用いることで、内部領域における密度揺動を計測することができる。

(実験と理論の両方において、AIC波動が密度揺動を伴うことが確かめられている。 [H. Hojo et al. (1993), A. Mase et al.(1995)])



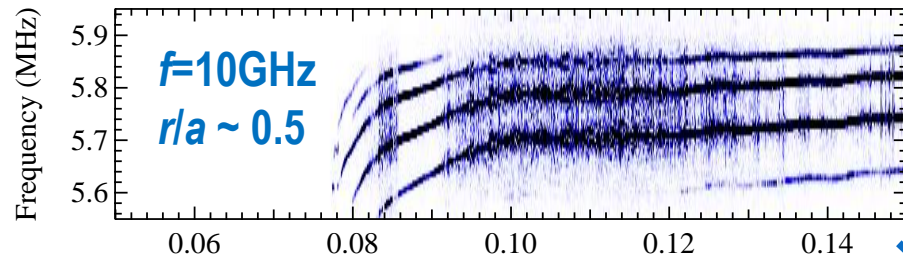
- 径方向の情報 → 発振周波数を変化させる
- 軸方向の情報 → 異なる軸方向位置にアンテナを設置



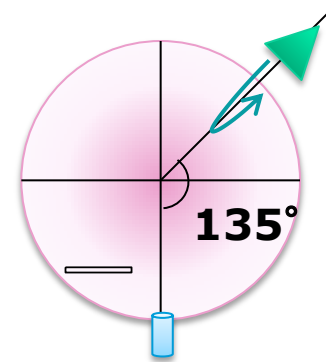
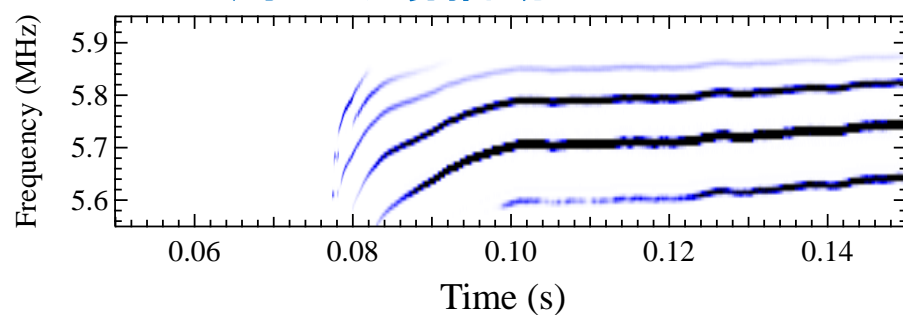
内部密度揺動と周辺磁場揺動との間の強い相関



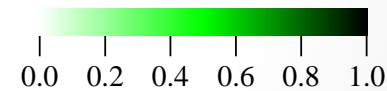
内部密度揺動



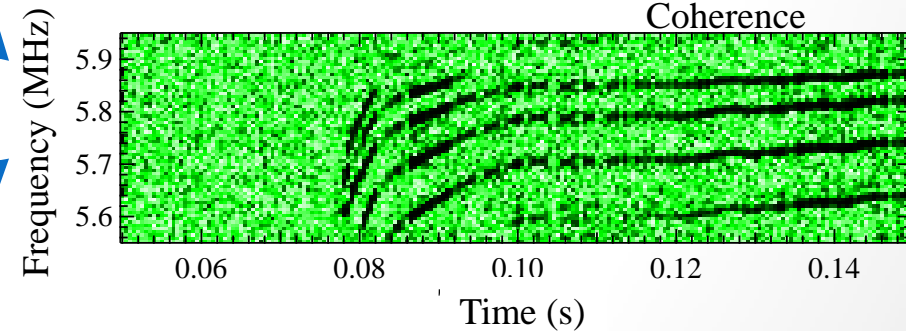
周辺磁場揺動



$z \sim 1.1\text{m}$ 断面



Coherence

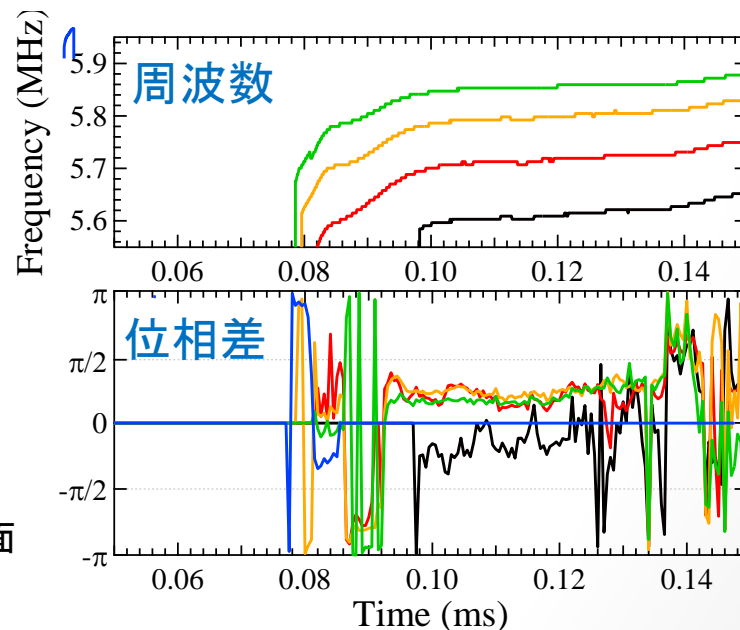
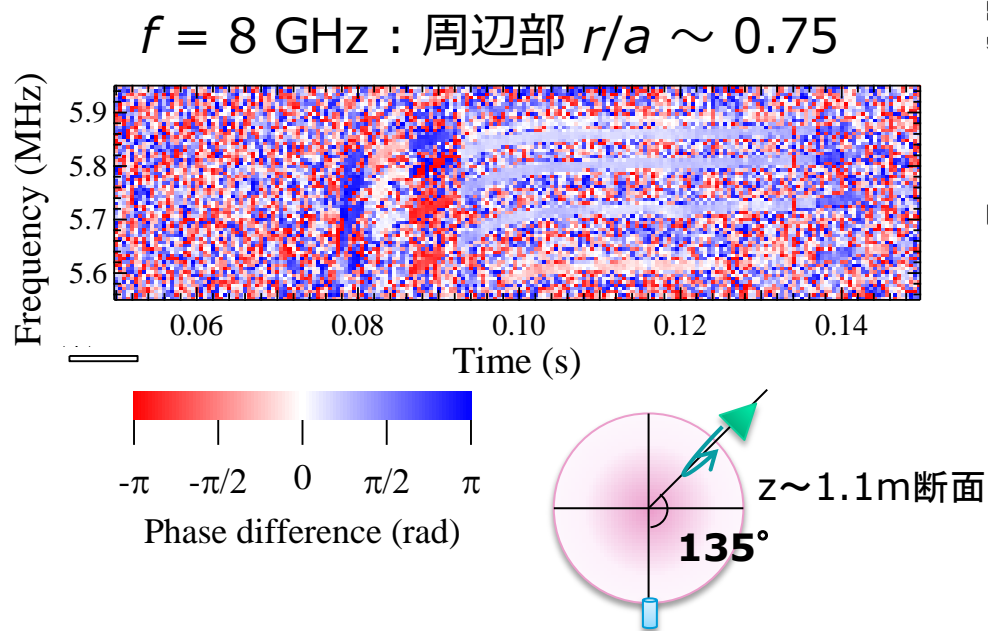


- AIC波動に起因する内部密度揺動を反射計を用いて計測できた。
- 同時に計測した周辺磁場揺動との間に強いコヒーレンスが得られた。

内部密度揺動と周辺磁場揺動との位相差の時間発展



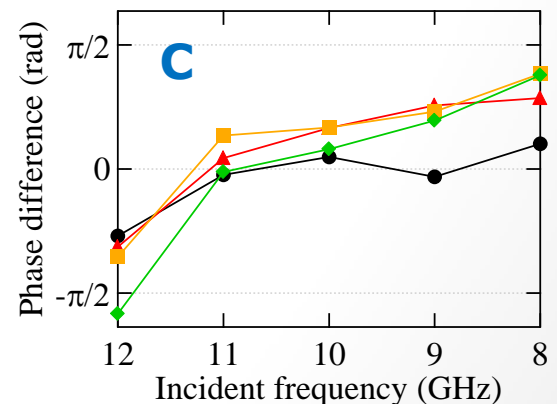
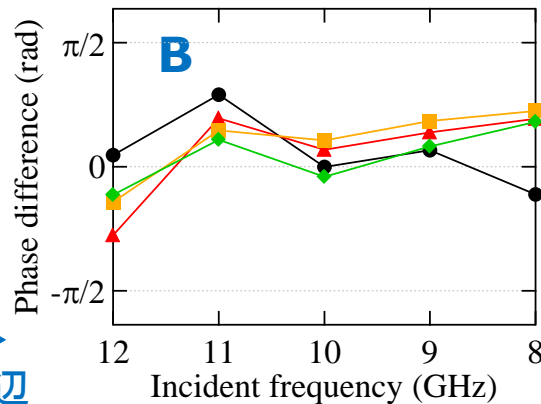
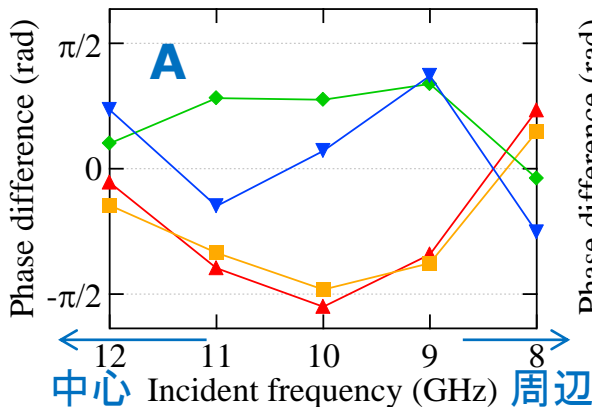
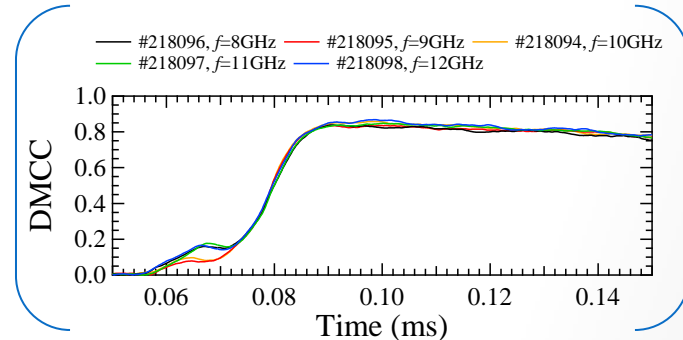
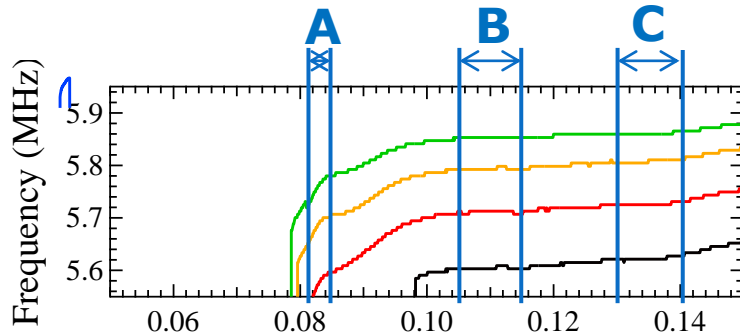
内部密度揺動と周辺磁場揺動と間に強い相関が得られたので、その二信号間の位相差を評価することができる。



- 特に励起直後の周波数上昇フェーズではピーク毎に位相差異なるが、放電後半では、互いに近づく様子が観測される。
- プラズマパラメータが大きく変化する時に、位相差が $\sim \pi$ ずれる様子が観測される。

内部密度揺動と周辺磁場揺動との位相差の半径方向分布

再現性の良い放電条件において、ショット毎に反射計の発振周波数を変化させて、**位相差の半径方向分布**を計測。



- AIC波動が励起された直後(A)はピーク毎に異なる半径方向分布、構造をもつが、定常状態に近づくにつれて、ピーク間の差異はなくなる(C).
→半径方向には同一構造として成長することが示唆される。

まとめ



GAMMA10では、温度非等方性に起因する微視的揺動であるAIC波動が自発的に励起され、イオンサイクロトロン周波数より少し低い周波数に複数のピーク(ブランチ)が現れる。それらピークごとの振る舞いの差異に着目し、詳細な構造、時空間発展の計測を行った。

主な結果

1. 複数のピークは軸方向に異なる波数を有しており、定常状態における軸方向の波数 k_{\parallel} は0~10(波長0.5m ~ ∞ (定在波))であることが判明した。
→ 軸方向に異なる固有モードとして成長していることを示唆
2. プラズマ内部密度揺動と周辺部磁場揺動との間に強い相関が確認された。その位相差の半径方向分布は、AICの出現初期ではピークごとに異なるが、定常状態に近づくにつれて揃う傾向にある。
→ 半径方向には同じ構造であることを示唆

今後

反射計を用いた二地点間における位相差評価が波動の空間構造を調べる上で有用なことがわかったので、プラズマパラメータの異なる位置に設置したアンテナ、磁気プローブ群を用いて、AIC波動の3次元空間構造解明に向けた研究を進める。