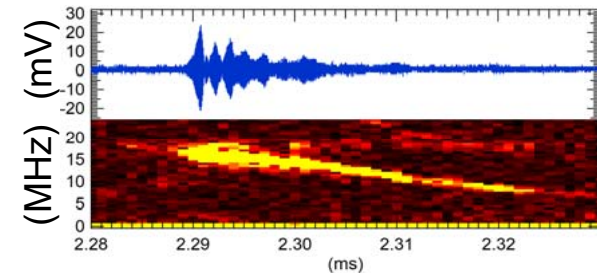
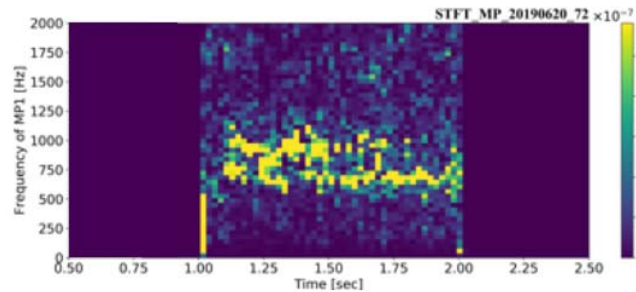


「実験室・宇宙プラズマ研究集会」  
「あらせサイエンス会議・解析ワークショップ」  
合同研究集会, 東京大学本郷キャンパス 2019年9月18日

# 磁気圏型配位RT-1 における実験室プラズマ研究の進展

## 低周波とホイッスラー波帯の揺動計測実験を中心に



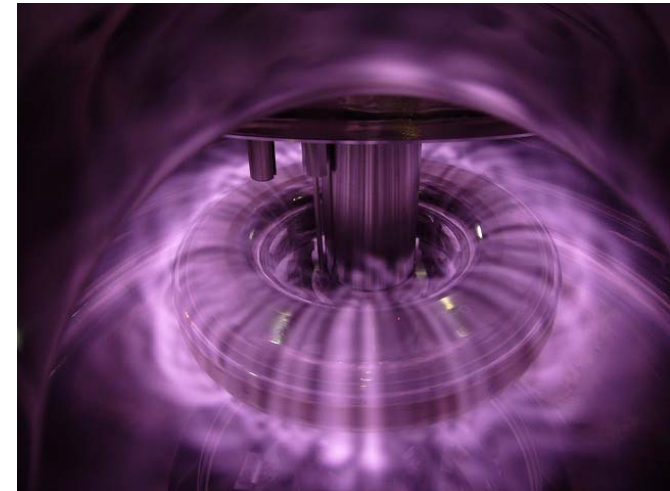
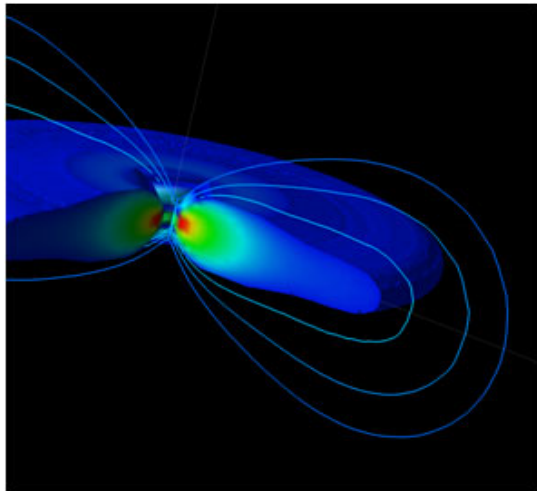
磁気圏型装置RT-1の高温電子プラズマ (左) で自発的に発生する揺動現象 (中央, 右)

東大新流域, 核融合研<sup>A</sup>

吉田善章, 西浦正樹<sup>A</sup>, 鈿持尚輝, ○齋藤晴彦, 中村香織, 森敬洋, 横田侑己, 上田研二

本スライドはpreliminaryなデータを含むため二次利用は御遠慮下さい

- **磁気圏と実験室プラズマ核融合**研究に共通する物理と関連する研究課題
  - 波動粒子相互作用, 粒子加熱, 内向き輸送, 各種不安定性, etc.
  - 流れを持つプラズマ, オーロラ, 放射線帯の発達, リングカレント, 磁気嵐
- **惑星磁気圏**(大域的にはダイポール磁場)を実験室に再現する**磁気圏型配位**



木星の磁気圏とオーロラ, 磁気圏型装置RT-1のプラズマ 2005 Shiraishi & Yoshida PFR; NASA

- **磁気圏現象の実験室研究**
- **磁気圏型プラズマの理学・工学の境界分野への波及的研究**

ダイポール磁場中では，強磁場領域への内向き「拡散」により  
 プラズマの構造形成が実現される（磁気圏と実験室で共通の物理）

- 磁気圏中の荷電粒子の加速と輸送

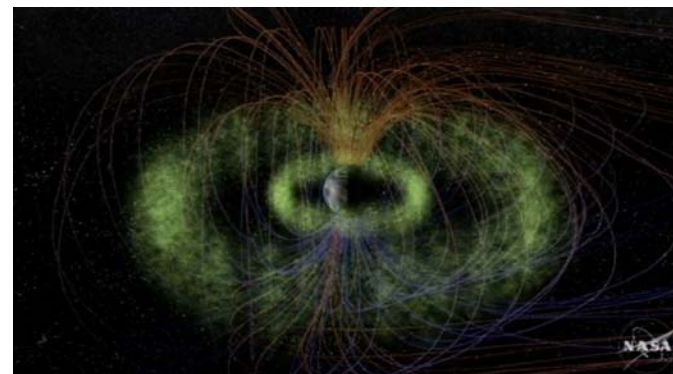
- 断熱的過程 + 波動粒子相互作用

- 「自己組織化」としての理解（緩和現象）

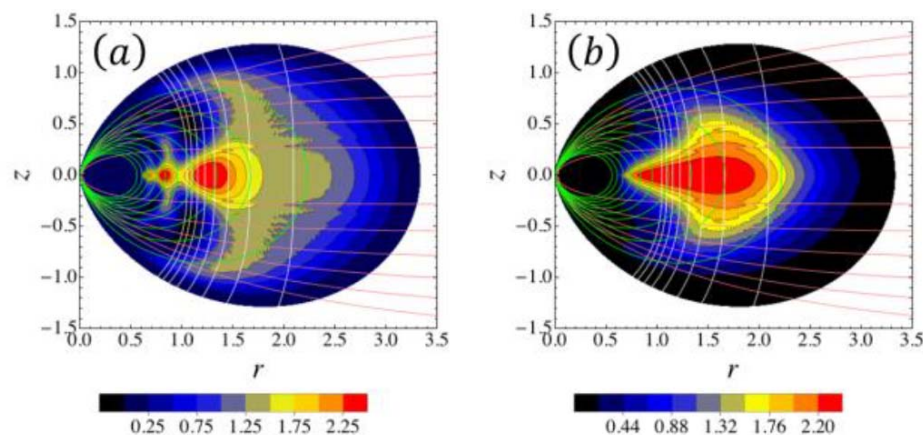
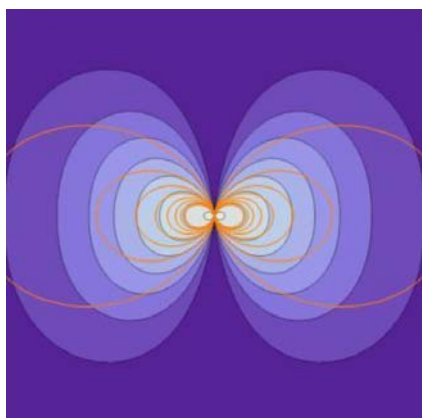
- 強い非一様性を持つダイポール磁場

- 磁化粒子に妥当な位相空間を適用した拡散理論

- 断熱不変量（低周波揺動とスケール分離）による束縛下でエントロピー増大



Van Allen Belts, NASA



2014 Yoshida & Mahajan Prog. Theor. Exp. Phys; 2015 Sato & Yoshida J. Phys. A

実空間では，内向き拡散 (uphill diffusion) によりプラズマが自己組織化する

Ring Trapプロジェクトでは、自然界の惑星磁気圏をヒントに自己組織化するプラズマによる先進的な実験室研究を目指している

- **先進核融合**に適した高 $\beta$ プラズマの閉じ込め原理確立
  - トカマクやヘリカルの既存の配位で実現可能な核融合はD-T反応
  - 超高 $\beta$ を実現する配位では、D-3HeやD-Dの燃焼が可能になる
  - 資源制約や高速中性子の発生が少ない先進核融合の可能性
- 電子陽電子プラズマなどの**反物質トラップ**の実現へ
  - 等質量粒子から構成されるペアプラズマの波動や安定性
  - 高エネルギー天体現象との関連
  - 「非中性プラズマ」からスタートして陽電子実験が展開されている
- RT-1ではこれらの実現を目標に、自己組織化、内向き輸送、流れ、等をキーワードに磁気圏型プラズマの実験的な研究を進めている

マックスプランク研究所（ドイツ）との共同研究

- RT-1のダイポール磁場は大域的には地球等の惑星磁気圏と等価であり、荷電粒子の挙動や断熱不変量を束縛量とした緩和など共通の物理が多い。
- 波動粒子相互作用は、プラズマ加熱やエネルギー吸収、高速イオン損失、また粒子加速現象(放射線帯における相対論的電子の生成など)や輸送等、磁気圏と核融合双方のプラズマ現象で重要な役割を果たしている。
- ダイポール磁場では低周波揺動が駆動する内向き拡散による自己組織化が、普遍的に発生する現象として知られている。
- また、RT-1のECHプラズマでは高温電子の非Maxwell分布や温度非等方性の存在が指摘されており、揺動や各種不安定性等の諸現象を駆動する。
- こうした点に着目し、自然界の磁気圏現象と、詳細な計測が可能な実験室研究を相補的に進める事で、双方に新しい知見をもたらす事が期待される。

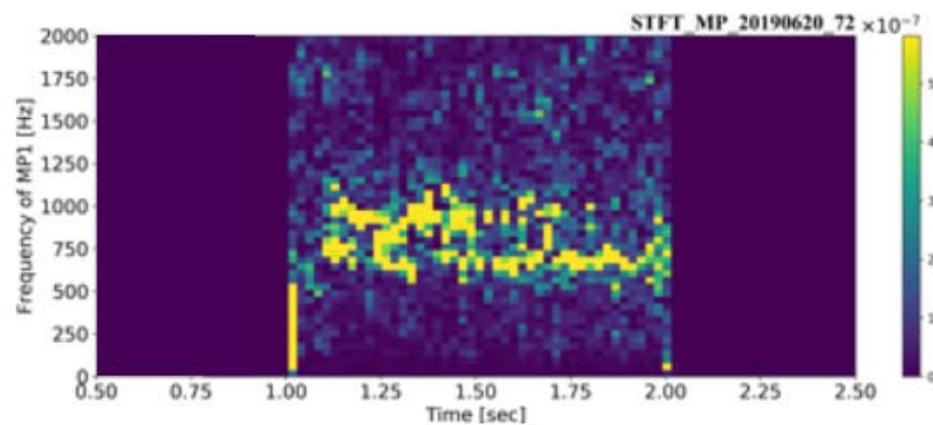
## 本日の講演内容：

- Ring Trap1プロジェクトの概要
- 自己組織化と低周波揺動
- 電子系の電磁揺動(ホイッスラー)

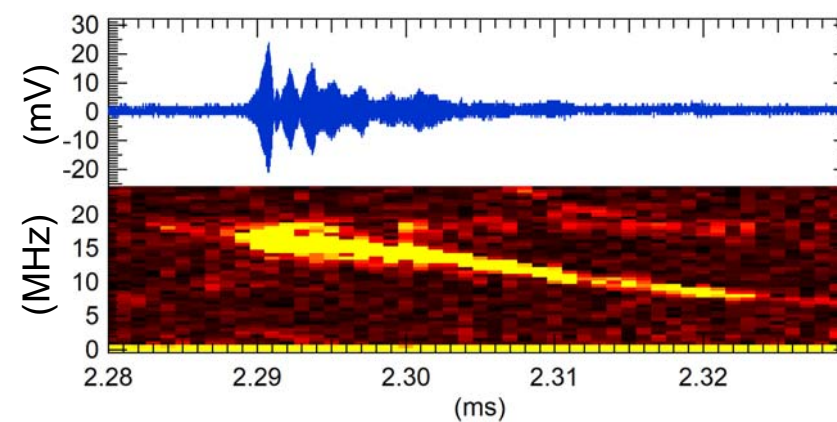
### RT-1における高 $\beta$ プラズマ生成



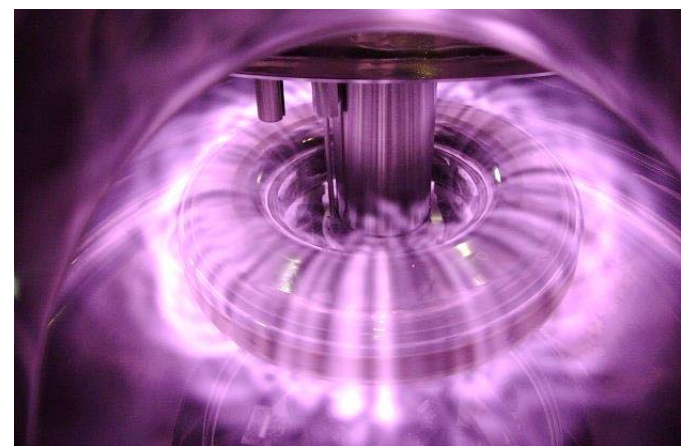
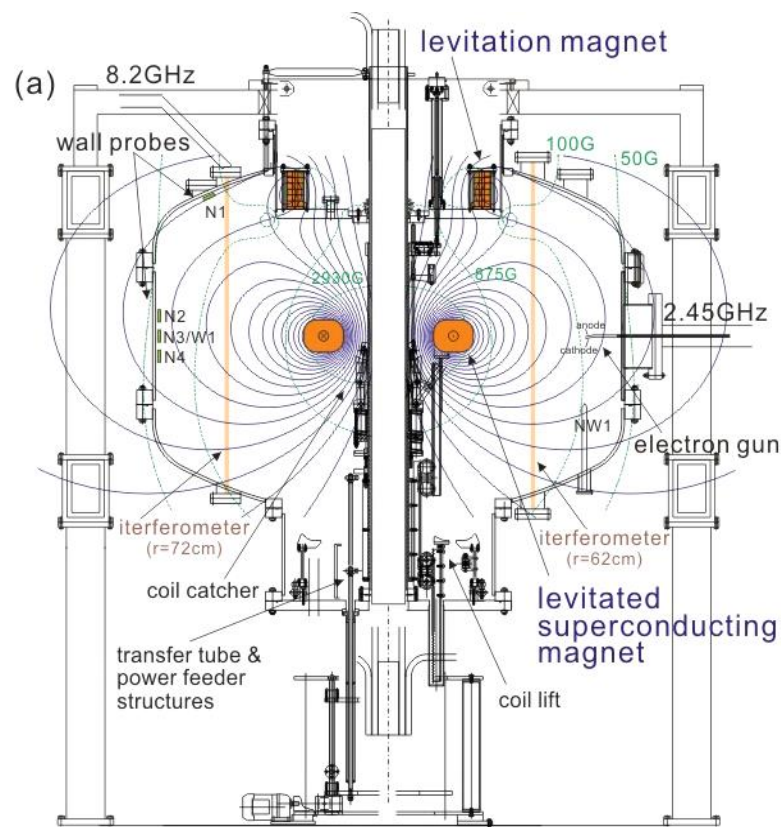
### RT-1プラズマの低周波揺動



### RT-1におけるホイッスラー波帯の磁場揺動



東大RT-1は磁気浮上させた高温超伝導コイルによるダイポール磁場配位であり，実験室に人工磁気圏を作り出す



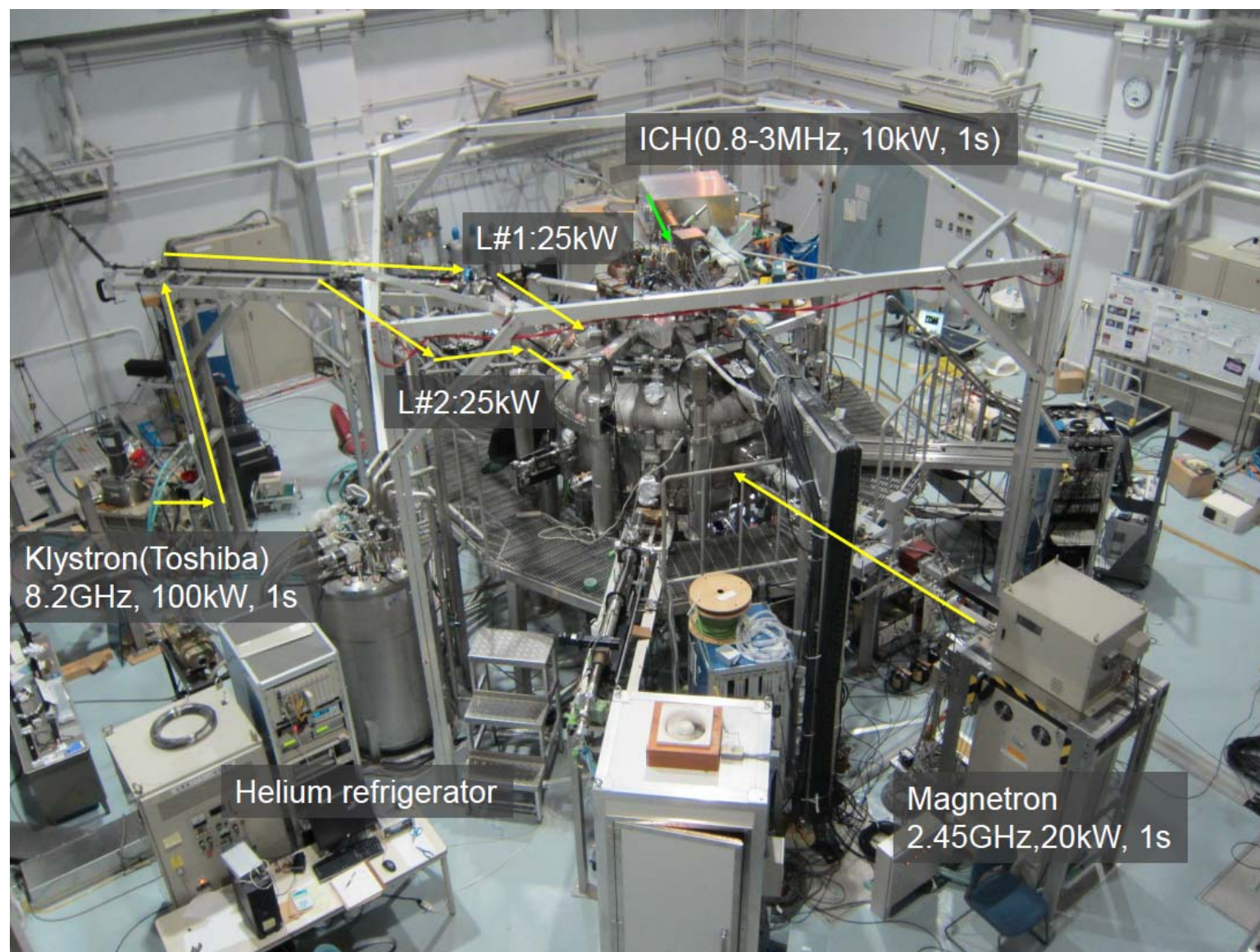
- 高温超伝導 (Bi-2223) コイルをフィードバック制御により磁気浮上，約6時間の無冷却運転
- 2.45GHz/8.2GHzマイクロ波によるECH, ICH
- 磁気計測，分光，トムソン散乱，X線計測，コヒーレンスイメージング等の各種計測

2019 Nishiura+ Nucl. Fusion, Experimental analysis of self-organized structure and transport on magnetospheric plasma device RT-1.

2014 Yoshida+ Prog. Theor. Exp. Phys., Self-organization in foliated phase space: Construction of a scale hierarchy by adiabatic invariants of magnetized particles.

2006 Kawazura+ PoP, Observation of particle acceleration in laboratory magnetosphere.

2.45GHz及び8.2GHzの電子サイクロトロン共鳴加熱と、  
0.8-3MHzのイオンサイクロトロン共鳴加熱を使用している





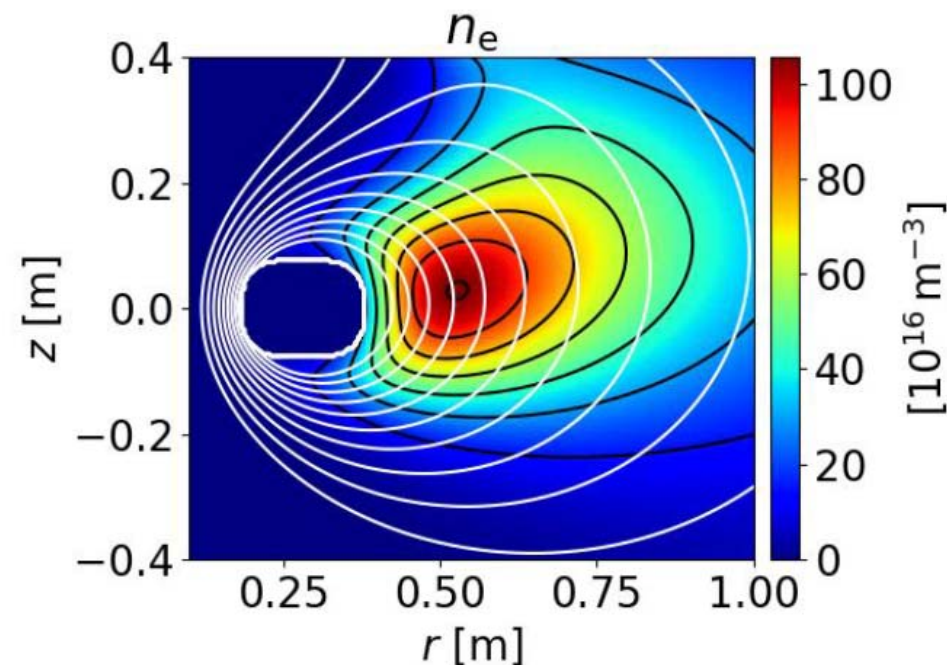
内向き輸送により，強磁場領域で電子サイクロトロン共鳴加熱の cutoff オフ密度を上回る電子密度が実現される

The density cutoff appeared.

- However, taking into account the density profile, the overdens plasma is created at the peak, which exceeds the cutoff density ( $8 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ).



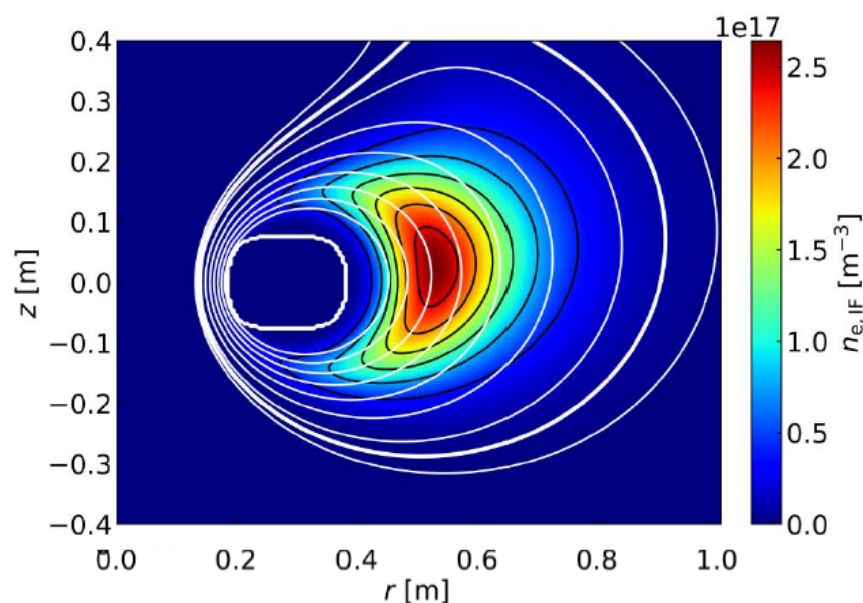
Up-hill diffusion mechanism explains a peaked density profile with the central density, which is higher than the cutoff density.



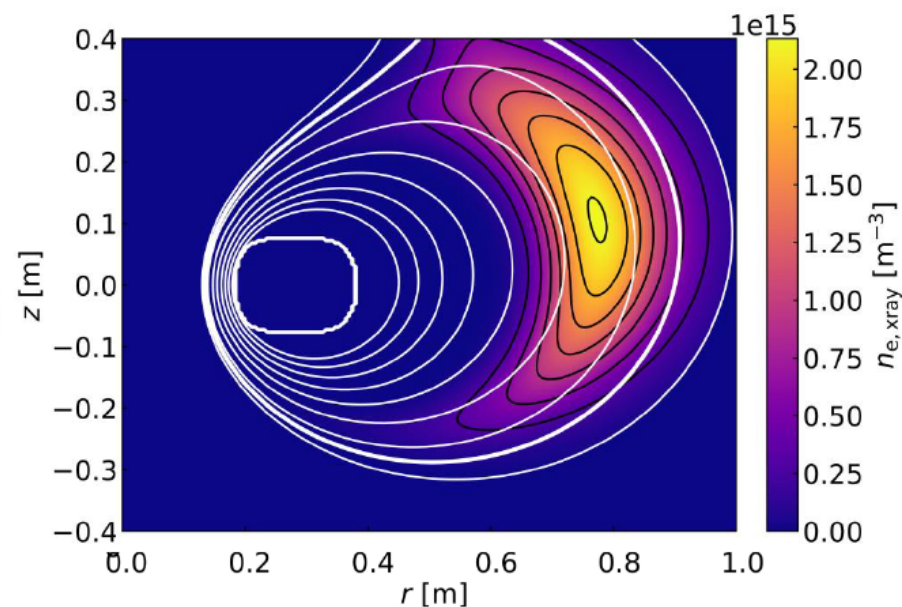
Profile of the electron density reconstructed by three chord interferometers.

低エネルギー ( $\sim 10\text{eV}$ ) と高エネルギー ( $\sim 30\text{keV}$ ) の電子が共存する高 $\beta$  プラズマが生成される

Electron profiles are reconstructed from the interferometers and the x-ray detectors.



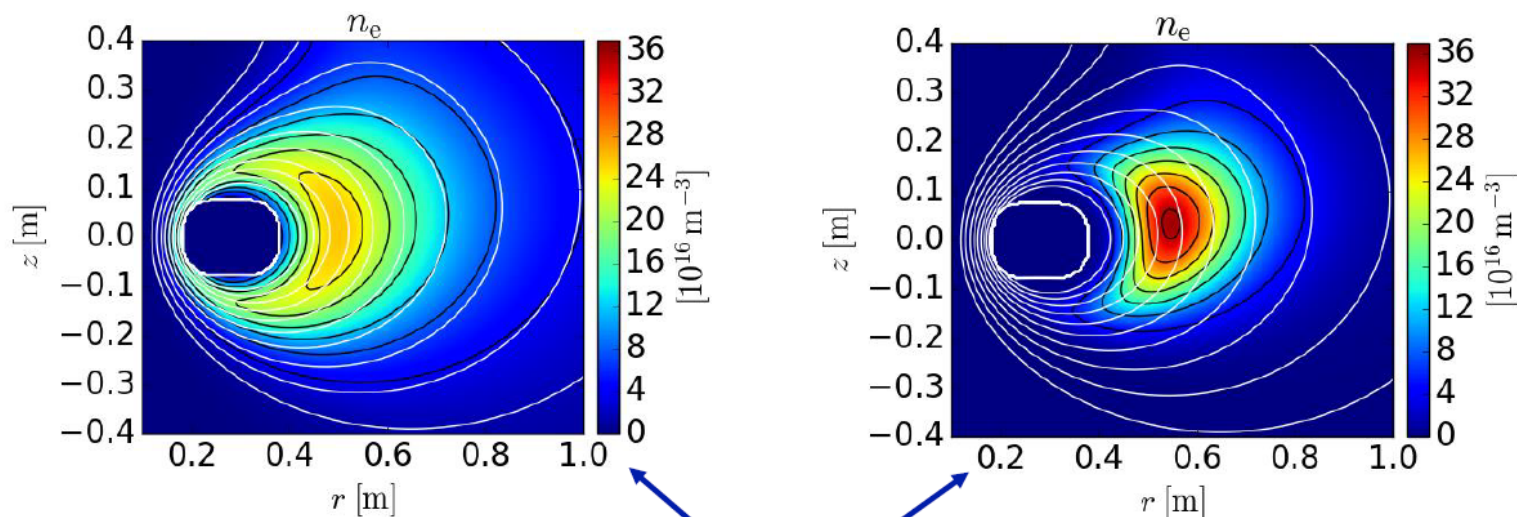
Electron density from the interferometers



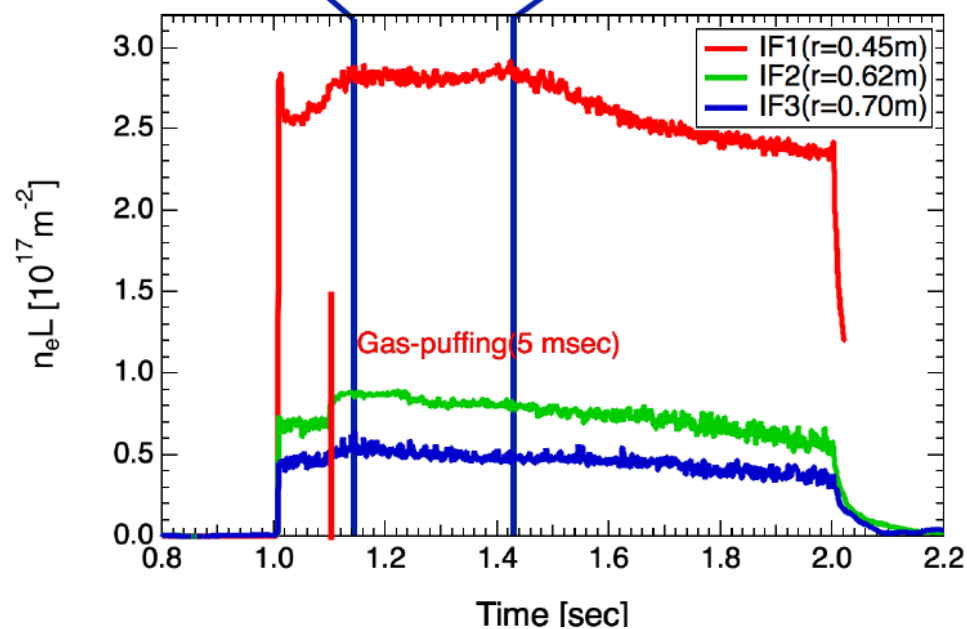
High energy electrons ( $\sim 30\text{keV}$ ) from the x-ray detectors

High energy electrons exist outer confinement region like the Van Allen belt. These electrons dominate the high beta state.

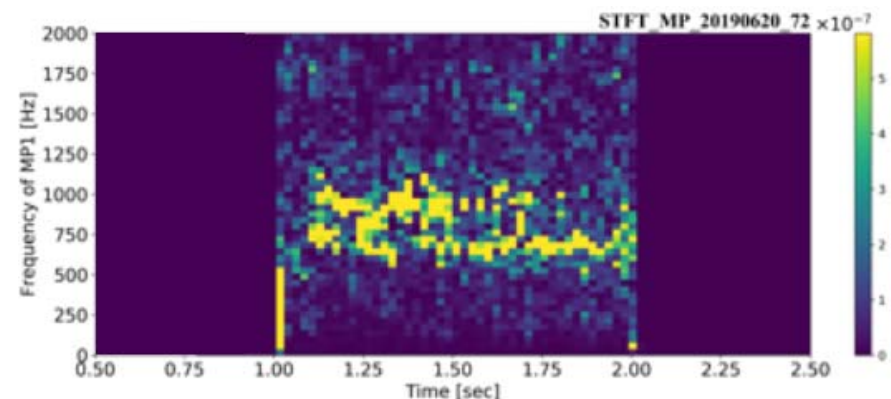
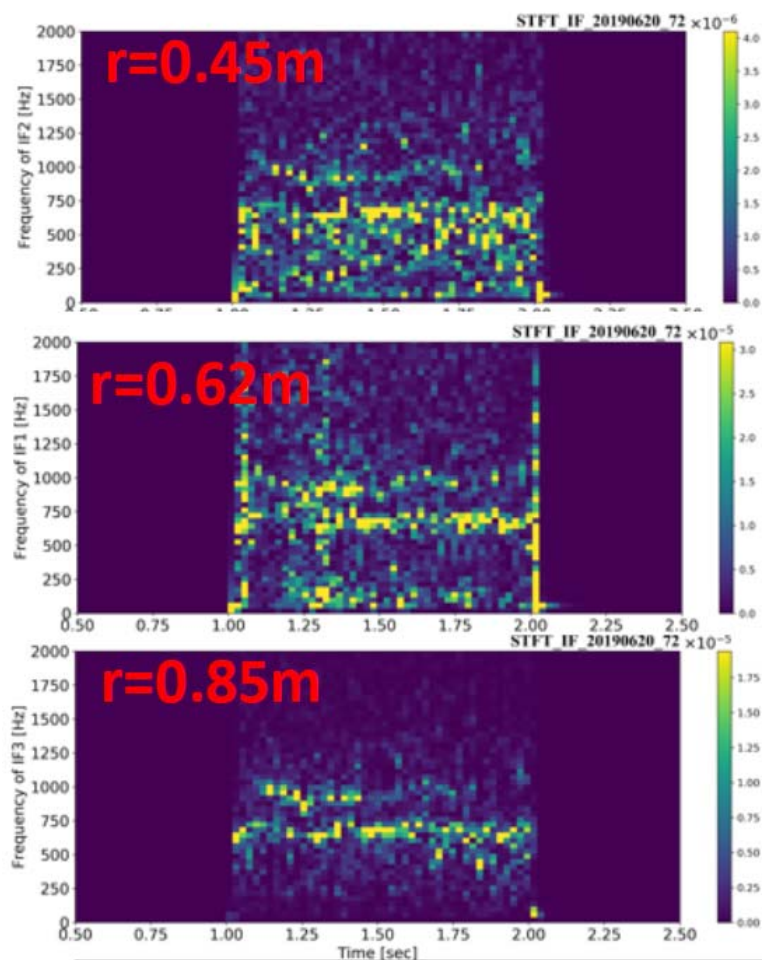
ガスパフにより比較的平坦な密度を形成した後に、低周波揺動を伴う自己組織化によりピークした密度が形成される



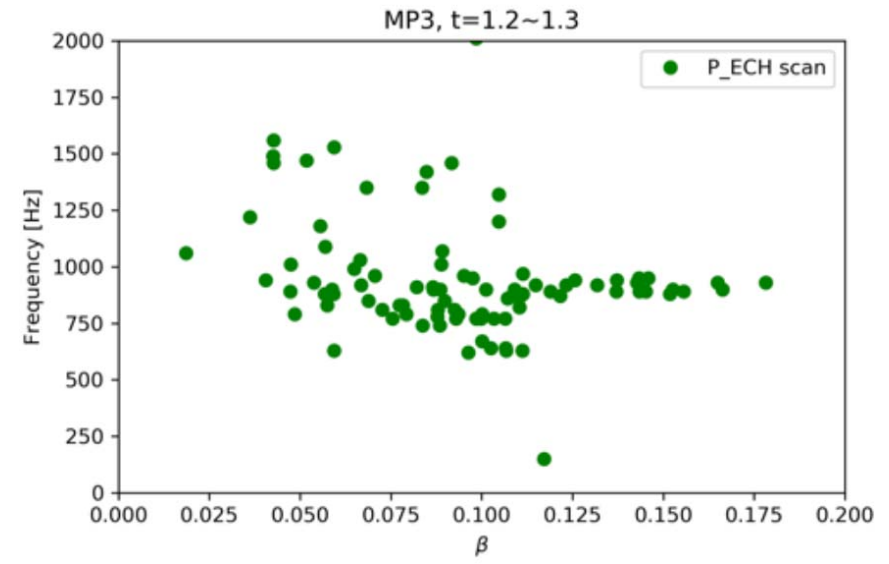
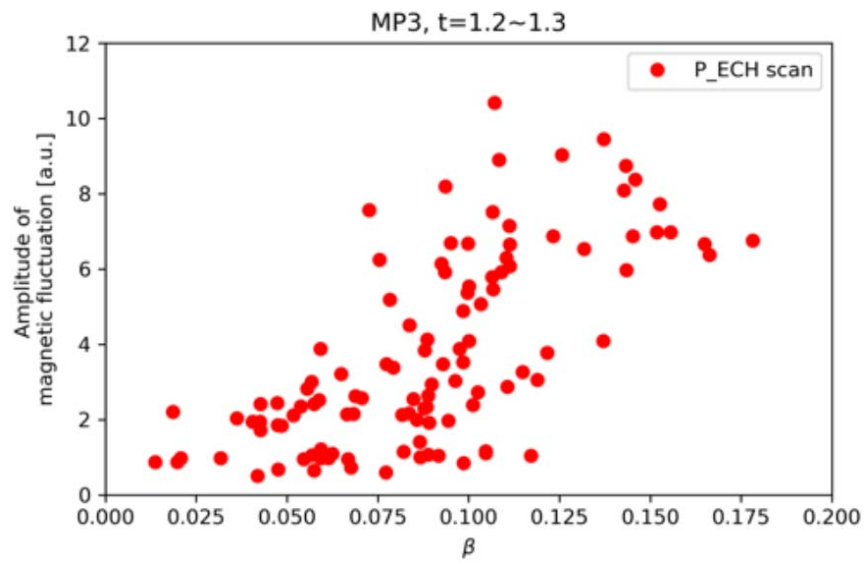
Peaking of  $n_e$  profile is observed with the lapse of time after the gas-puffing



内向き輸送による自己組織化の進展中に低周波（トロイダル周回周波数程度の磁場揺動が出現する

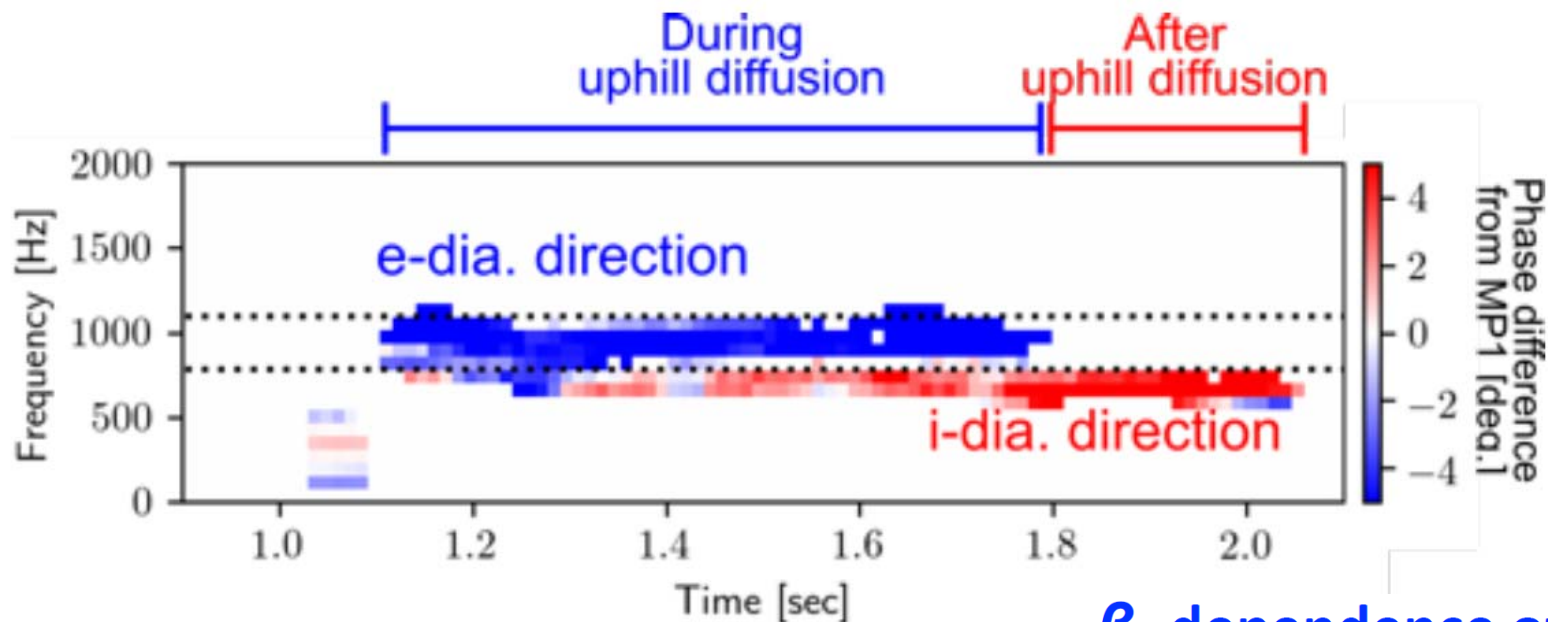


- 電子密度(干渉計), 磁場(磁力線に平行方向のみ), 等に低周波( $\sim 1\text{kHz}$ )揺動が観測される
- 揺動は, ピークした密度分布の周辺領域に局在化して存在している



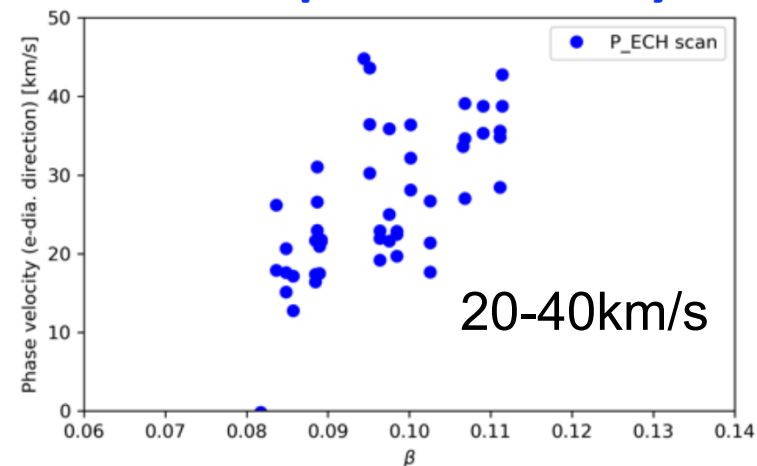
- プラズマ圧力増大と共に振幅は増大 (local  $\beta$ ~10%に閾値)
- 周波数は, 低圧力のプラズマでは明確な依存性が見られず, 高圧力になると1kHz付近に収束する (閾値はやはりlocal  $\beta$ ~10%)

トロイダル方向に伝搬の位相速度が異なる波が共存しており、内向き輸送の過程で卓越するモードが観測される

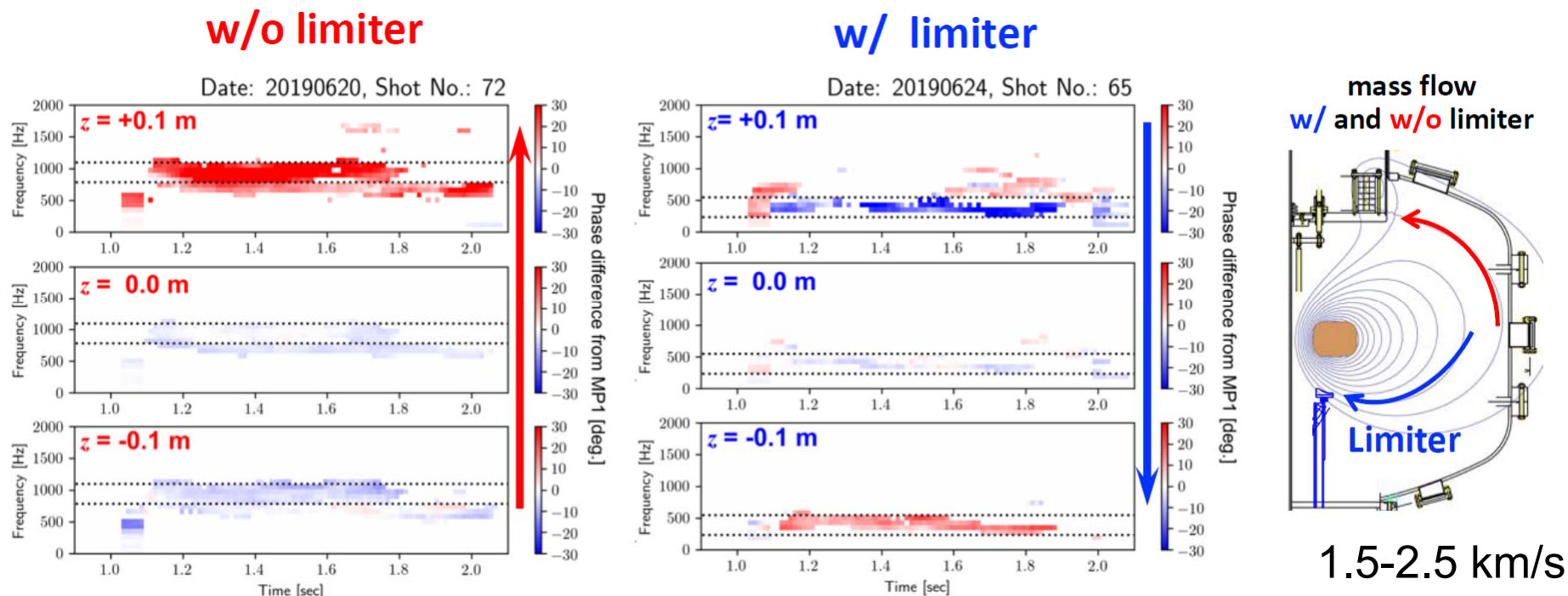


- 内向き拡散中には、 $\sim 1\text{kHz}$ の揺動が電子の反磁性方向に伝搬する
- 内向き拡散の完了後、 $\sim 0.7\text{kHz}$ のイオン反磁性方向に伝搬する揺動が卓越する

### $\beta_e$ dependence of toroidal phase velocity



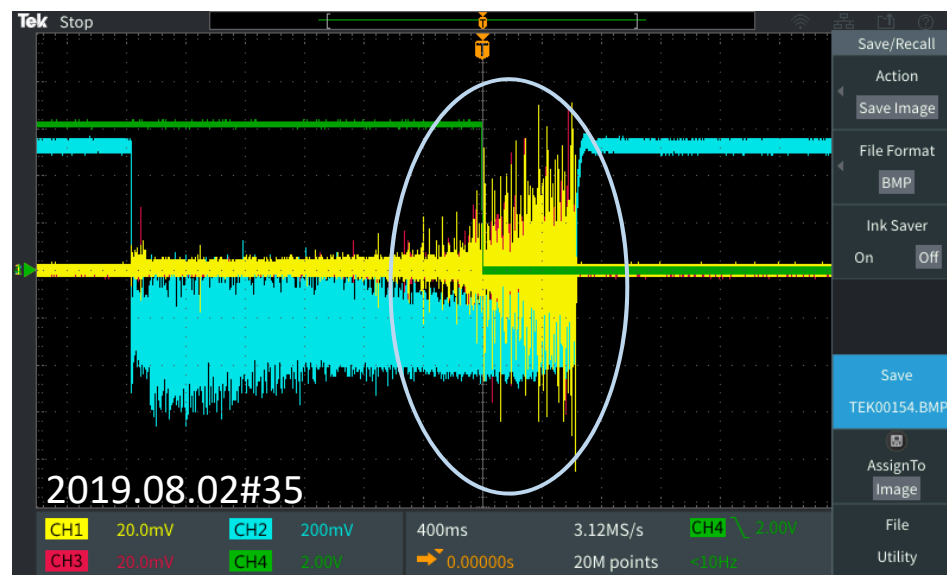
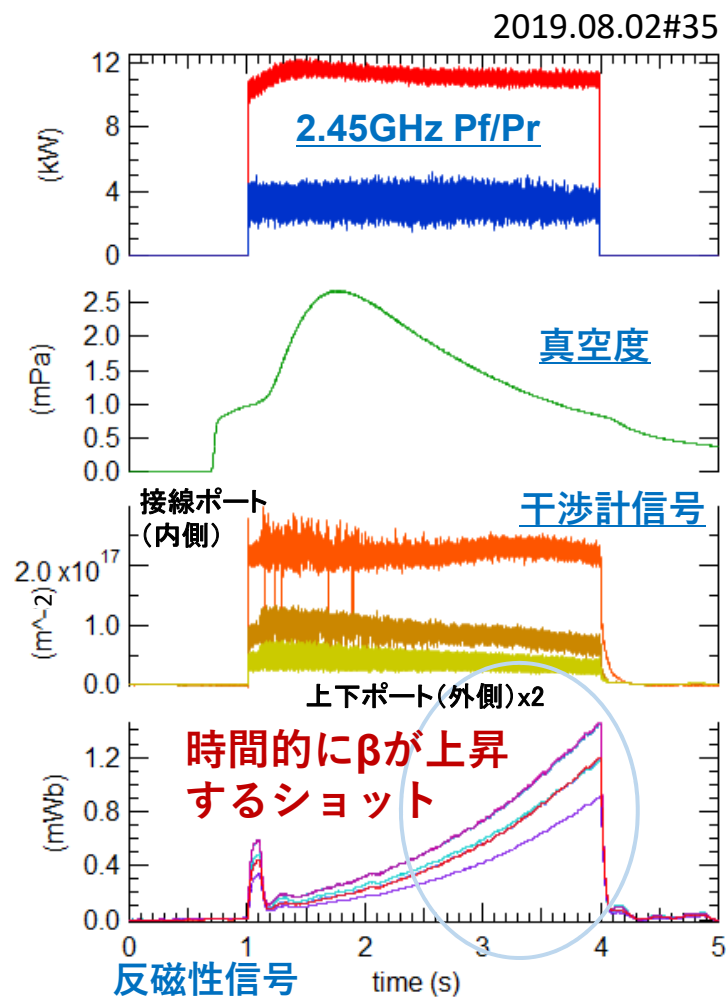
揺動はZ方向に（磁力線に沿って）も伝搬しており，損失源に向かう方向に伝搬している



- 低周波波動は，セパトリクス（リミタ無し時）及びリミタ（導入時）へと向かっており，位相速度はトロイダル方向の10%程度

ECHにより反磁性信号/プラズマ圧力が立ち上がり高温電子成分の割合が顕著になる際、比較的高周波の磁場揺動が観測される

- RT-1の周辺部での磁気プローブ計測によれば、2.45GHz ECHによる高 $\beta$ 時に、中間周波数帯 ( $f_{ci} \ll f < f_{ce}$ ) の磁場揺動が励起される



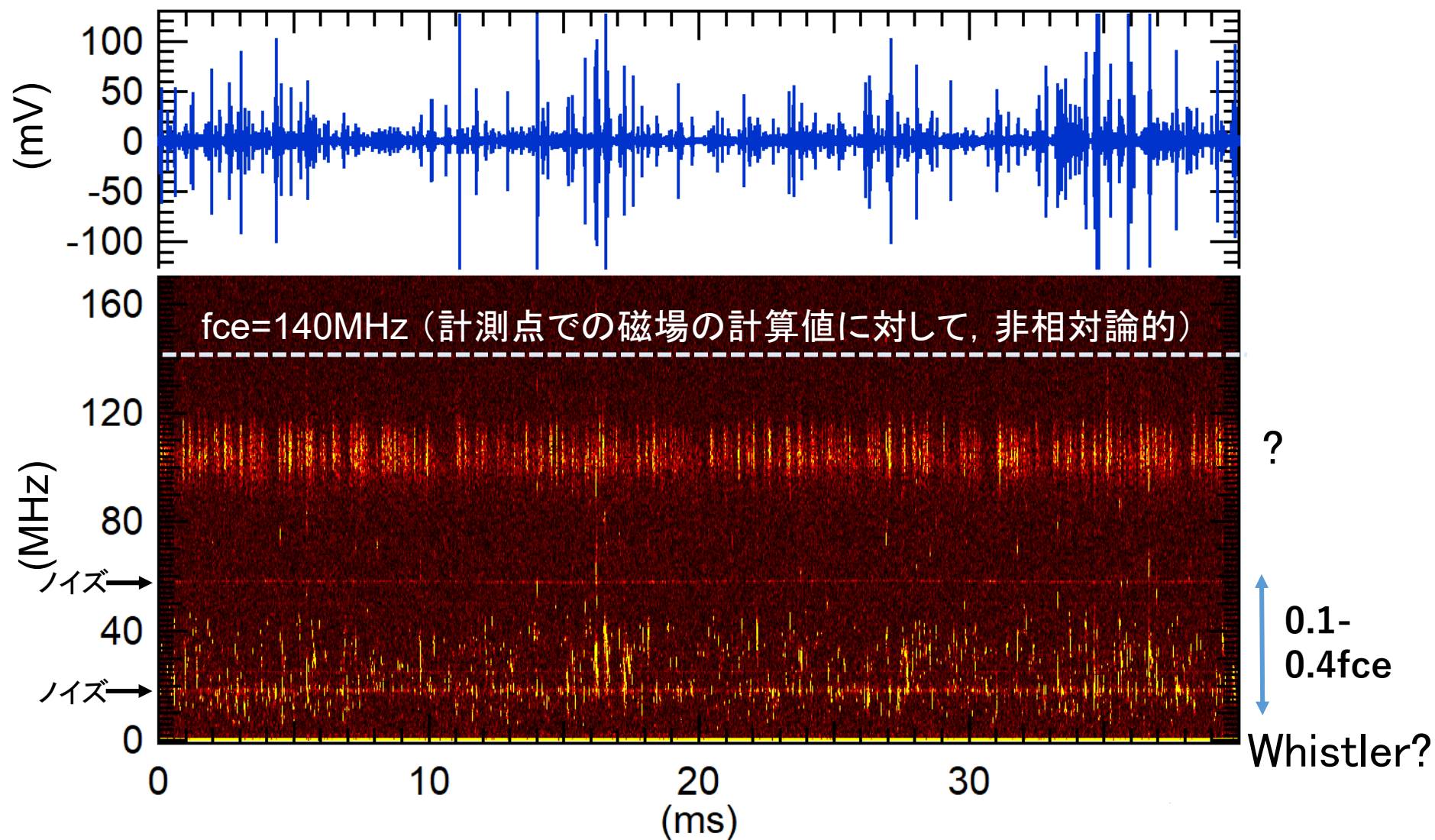
ch1: 磁気プローブ1, ch2: 干渉計, ch3: 磁気プローブ2

- 3秒間のマイクロ波入射で、時間的に中性粒子密度が低下しプラズマ圧力が立ち上がるショット
- スパイク状の磁場信号が繰り返し観測され、異なるプローブ間で同期を示す



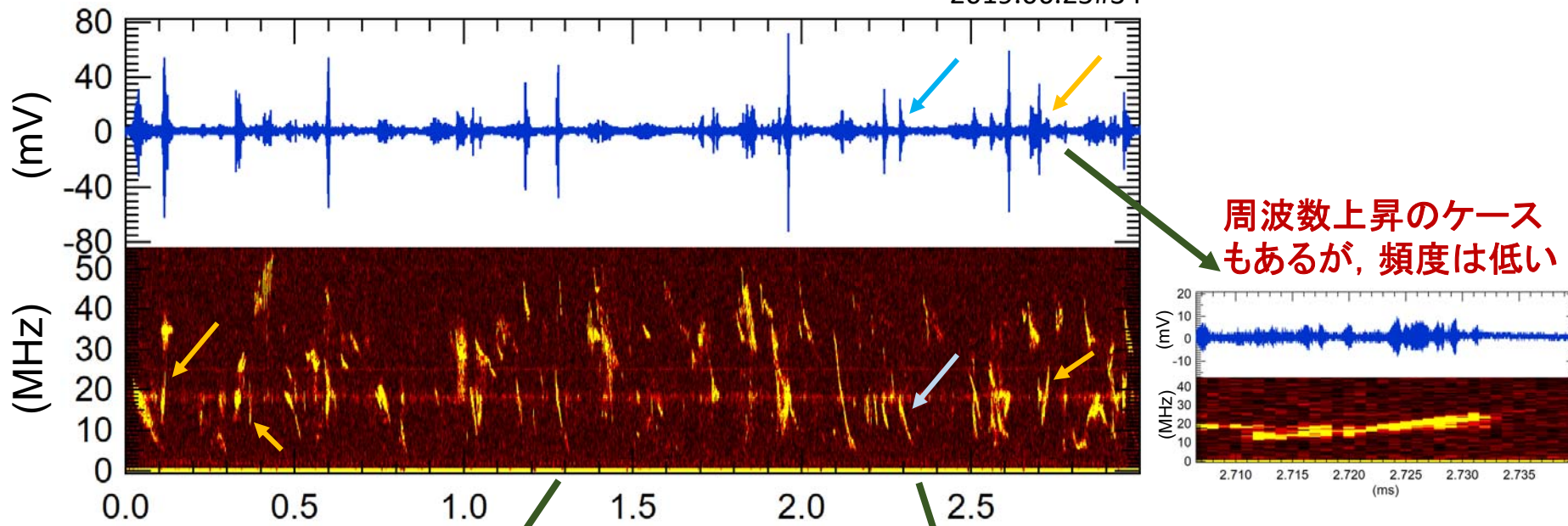
電子サイクロトロン周波数 $f_{ce}$ に対して $\sim 0.1-0.4f_{ce}$ 付近で  
間欠的なスパイク状の信号が繰り返し発生している

2019.06.25#34 高 $\beta$ 状態が比較的定常的に生成されるショット



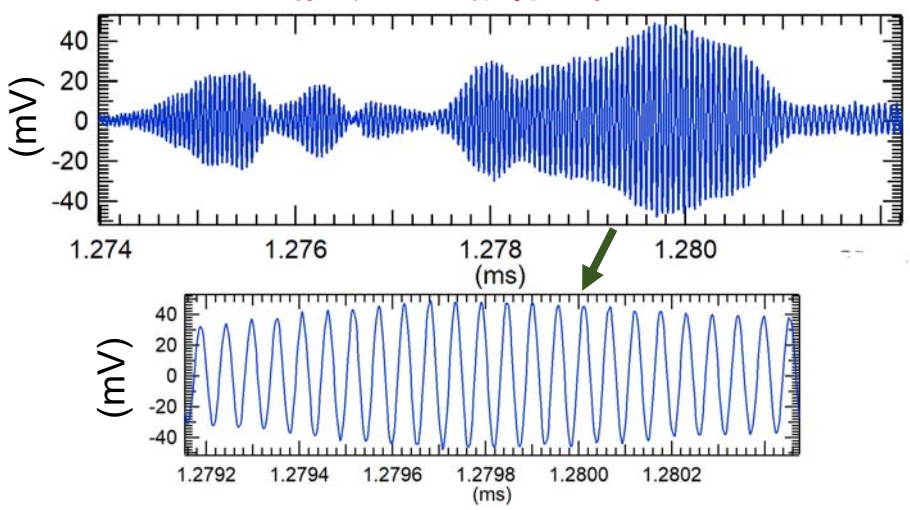
0.1fce~0.4fceに現れる間欠的に見える信号はコヒーレントな揺動から構成されており，多くが周波数の時間的变化を示す

2019.06.25#34

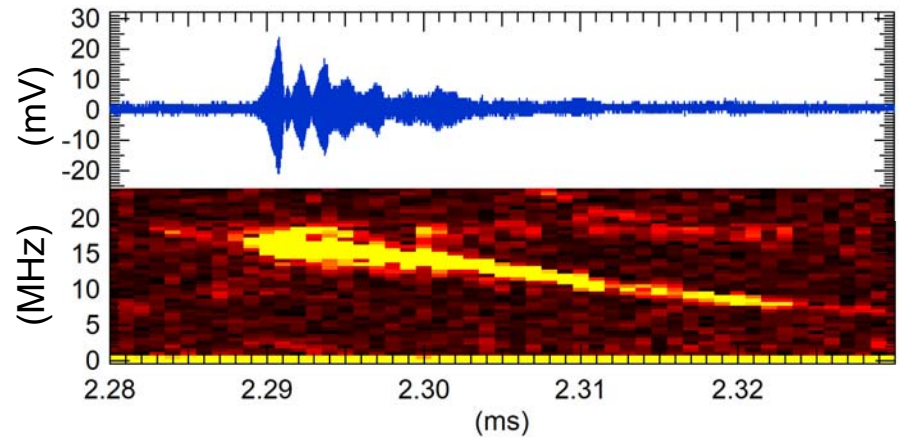


周波数上昇のケースもあるが，頻度は低い

コヒーレントな揺動の包絡線が見えている

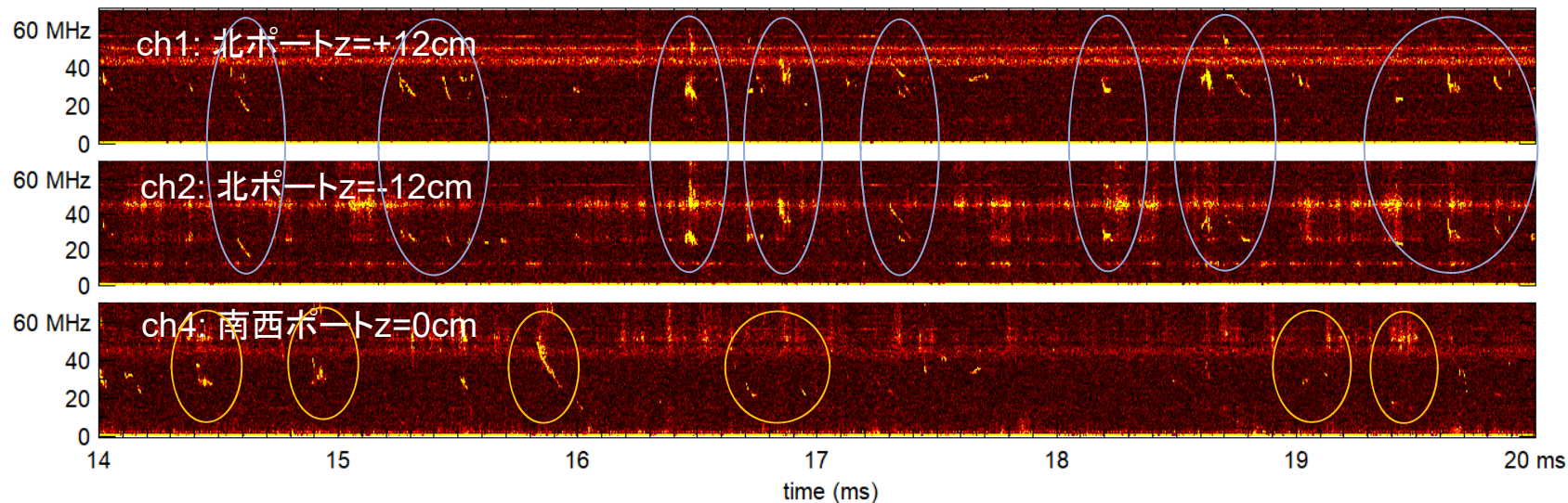
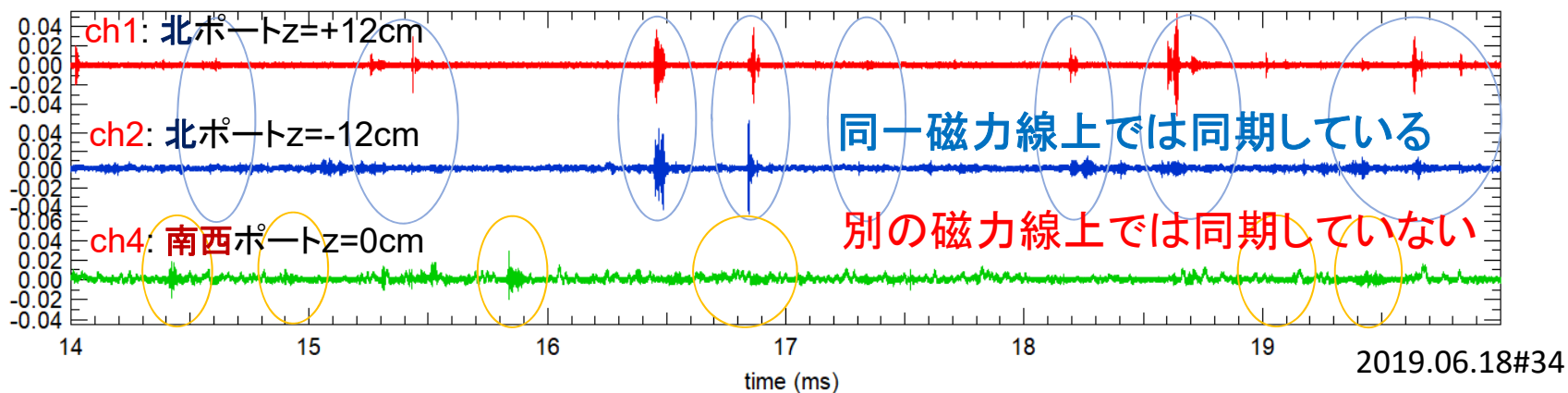
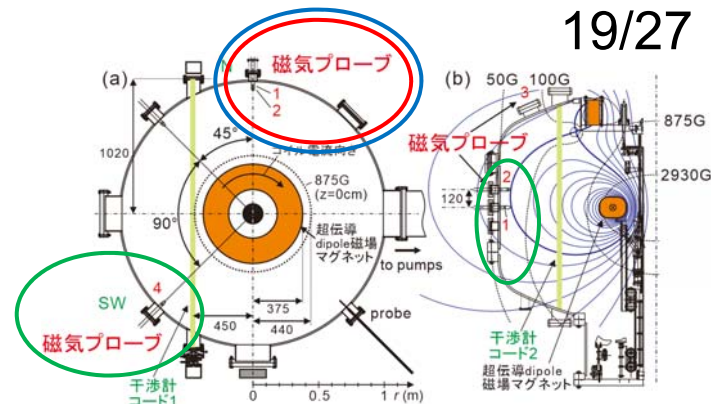


周波数が低下するケースが多い



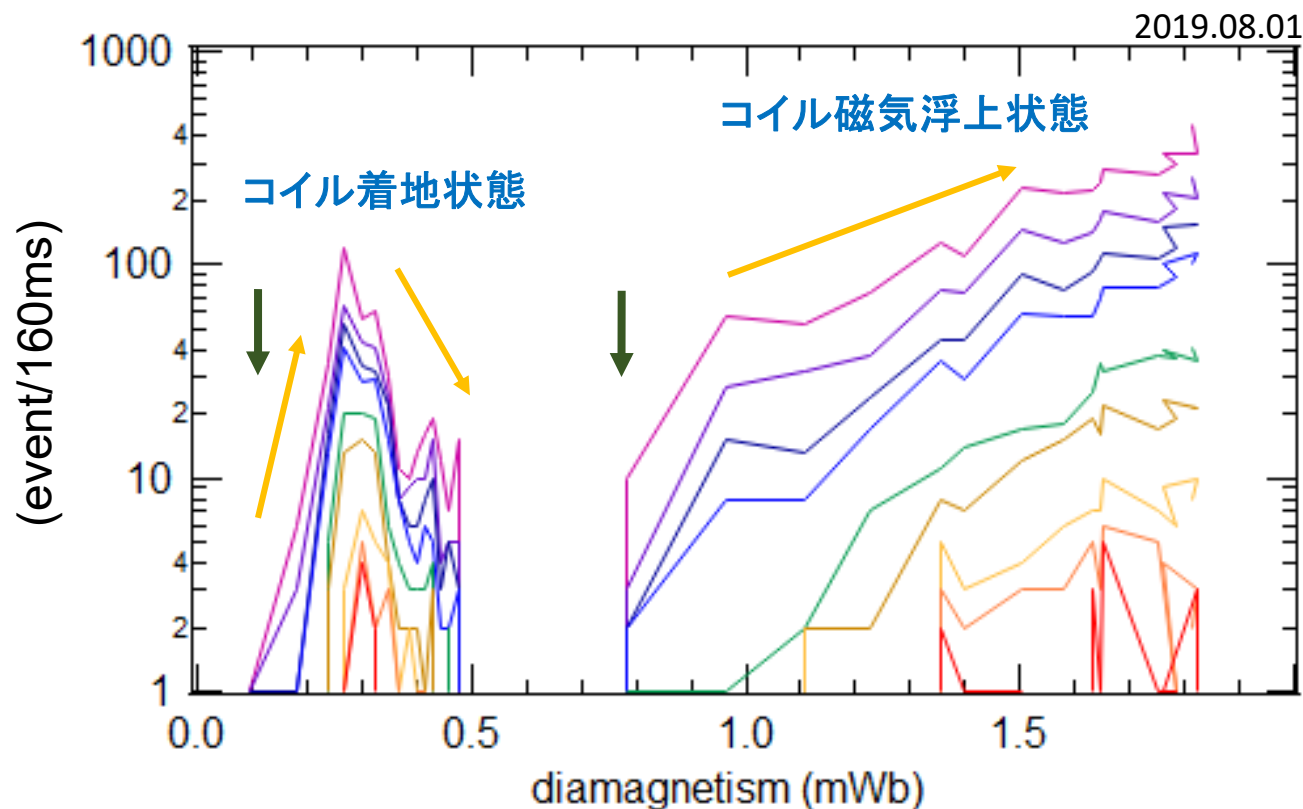
多点計測結果は、波動がダイポール磁場の磁力線に沿って伝搬する事を示している

- 同じポロイダル断面の同一磁力線上のプローブでは類似のイベントが観測されるが、トロイダル方向に異なる位置へは波動は伝わっていない



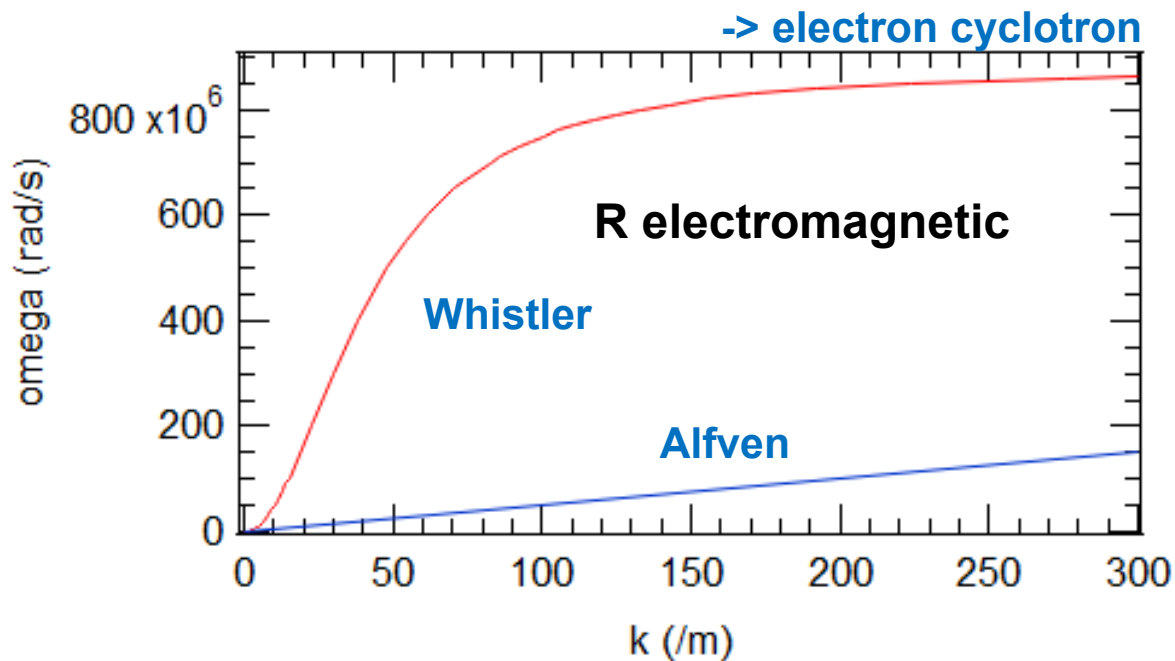
揺動信号の出現頻度は反磁性信号の強度と強い相関を示すが、それ以外のパラメータへの依存性も重要である事が伺える

- 出現する揺動の振幅に応じた出現頻度(赤: 出現した最大振幅)。

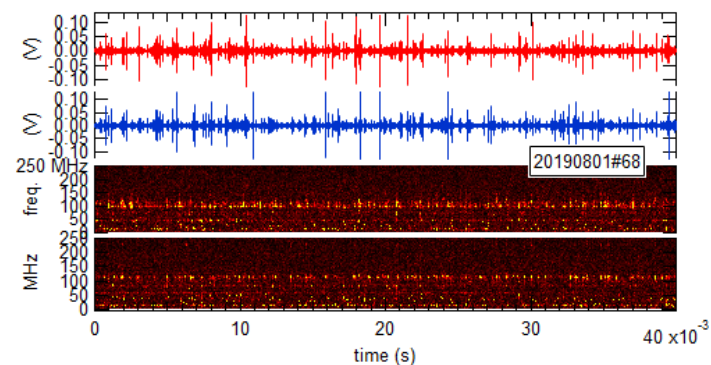
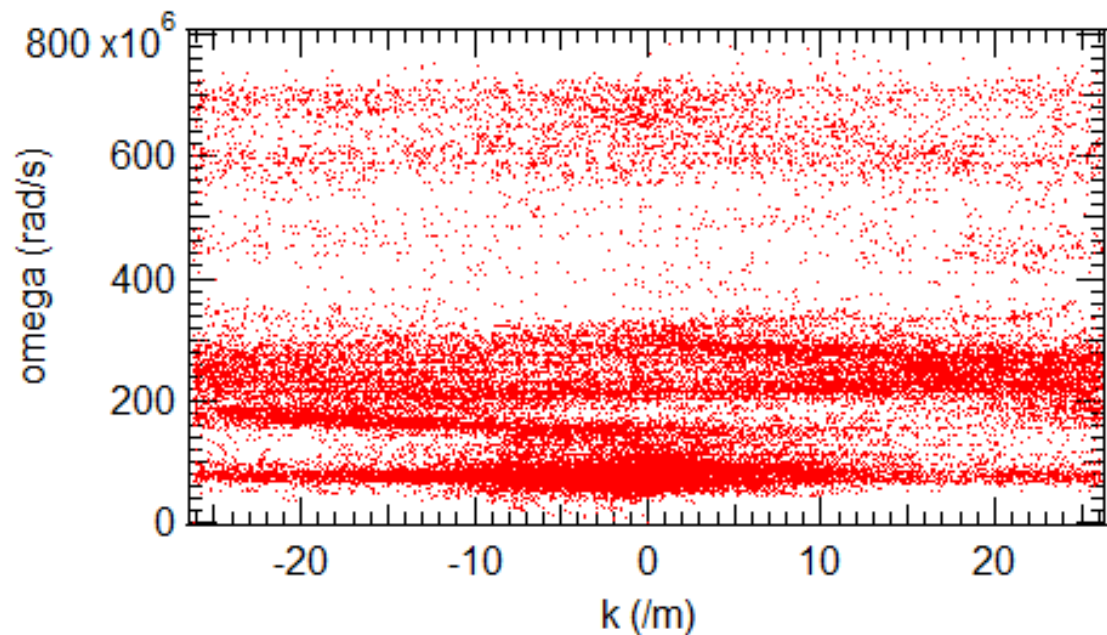


- 静穏状態から揺動が出現する状態に転ずる閾値が存在する(黒矢印)
- プラズマ圧力が低くとも、コイル着地状態でも揺動は出現する

磁力線方向に 2 点同時計測による分散関係 (preliminary)

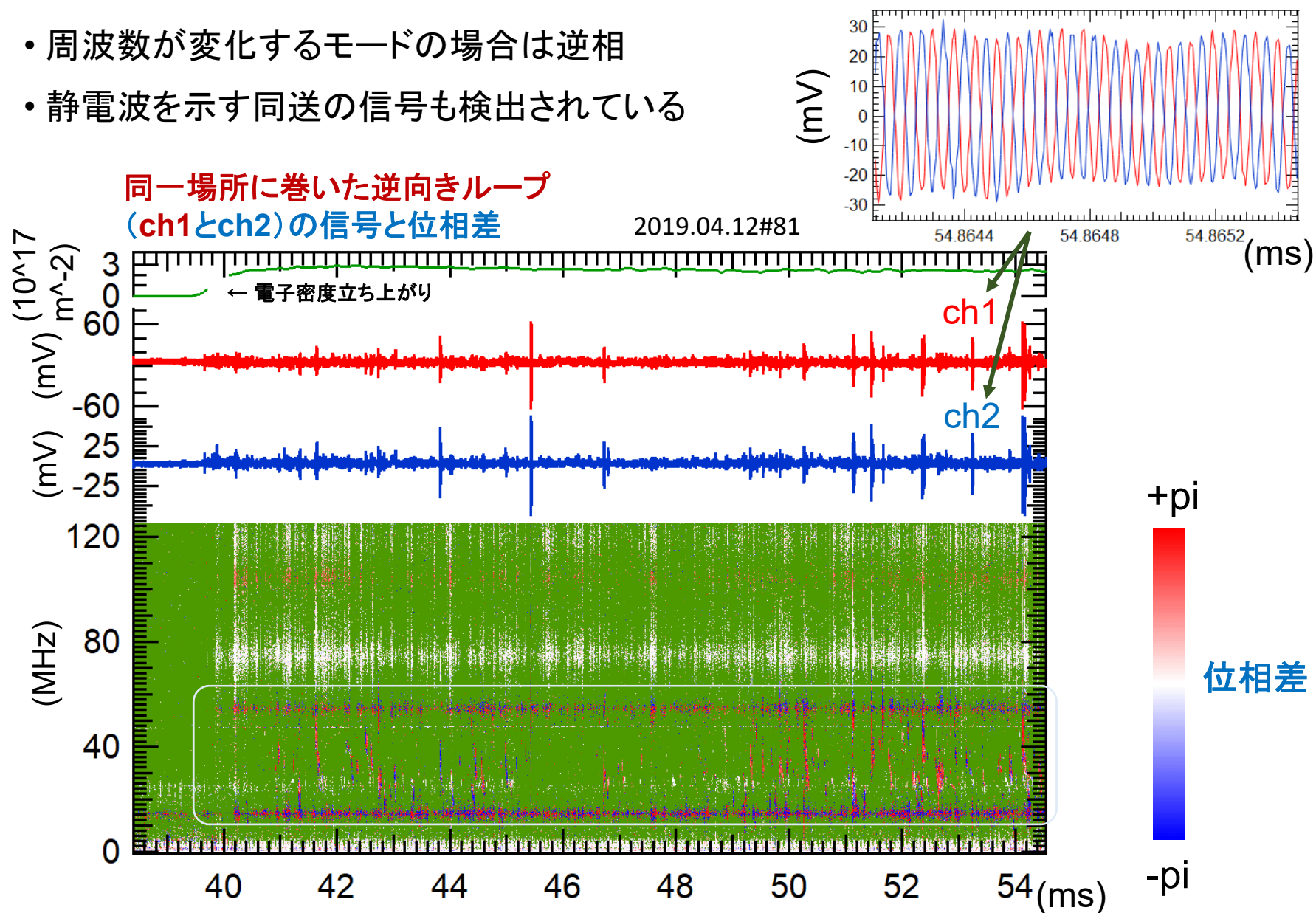


$B = 5 \text{ mT}, n = 5e16 \text{ m}^{-3}$

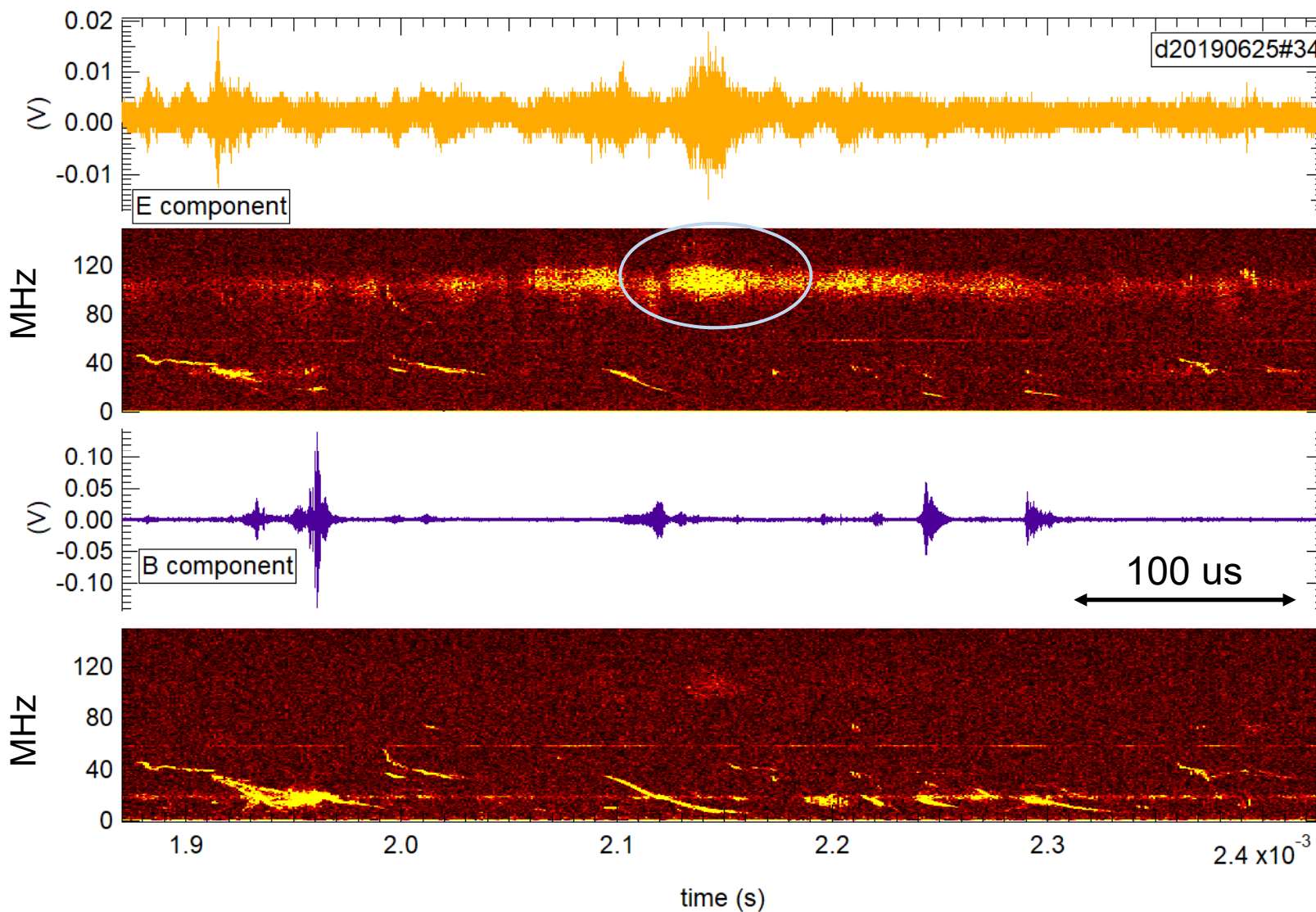


0.1fce-0.4fceに現れる揺動信号に静電的な成分の混入は少なく、  
観測された揺動は磁力線に沿って伝播する電磁的な波である

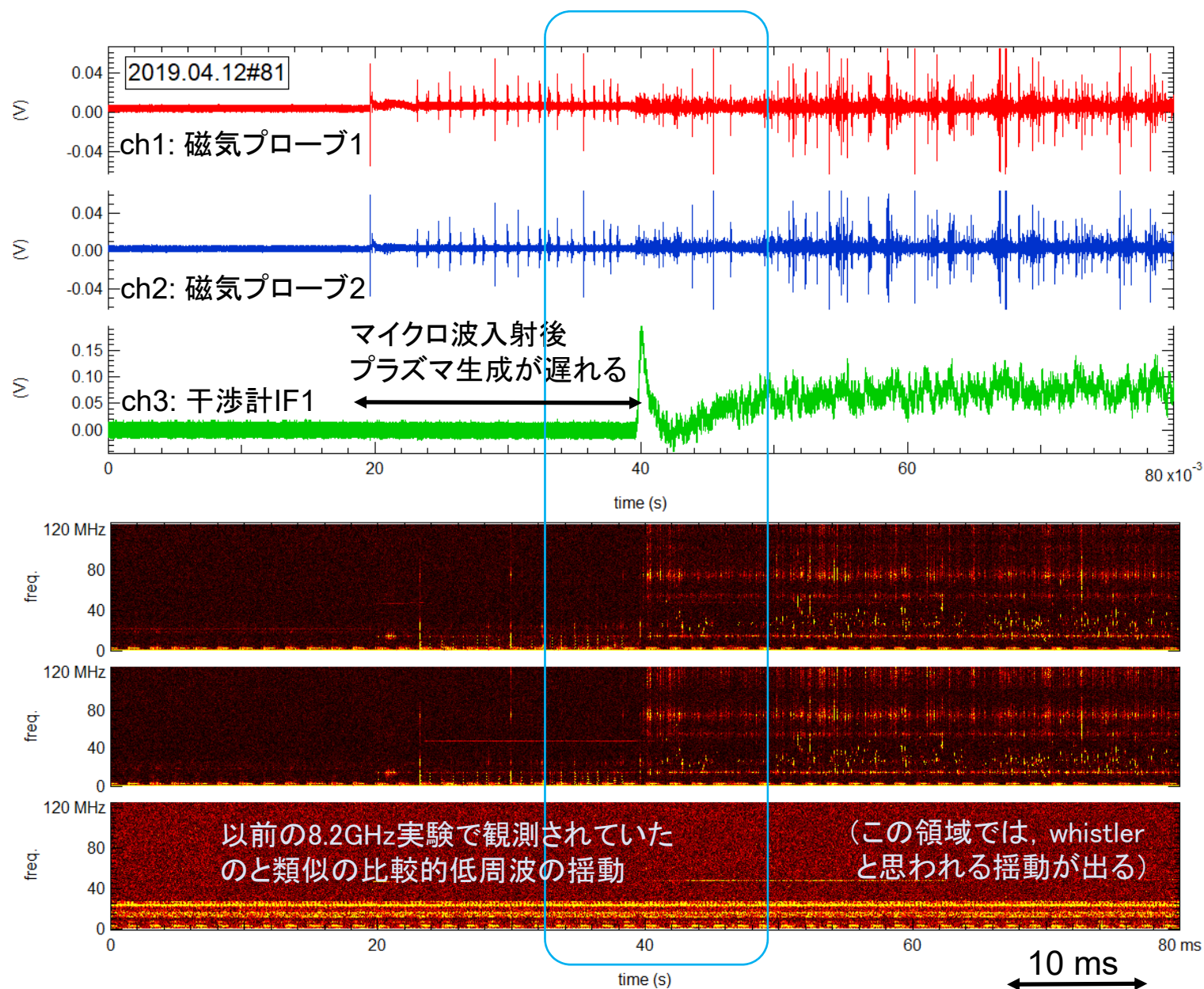
- 周波数が増えるモードの場合は逆相
- 静電波を示す同送の信号も検出されている



周波数変化を示す波動は電磁的, よりfceに近いブロードな  
揺動は静電的な成分が強い



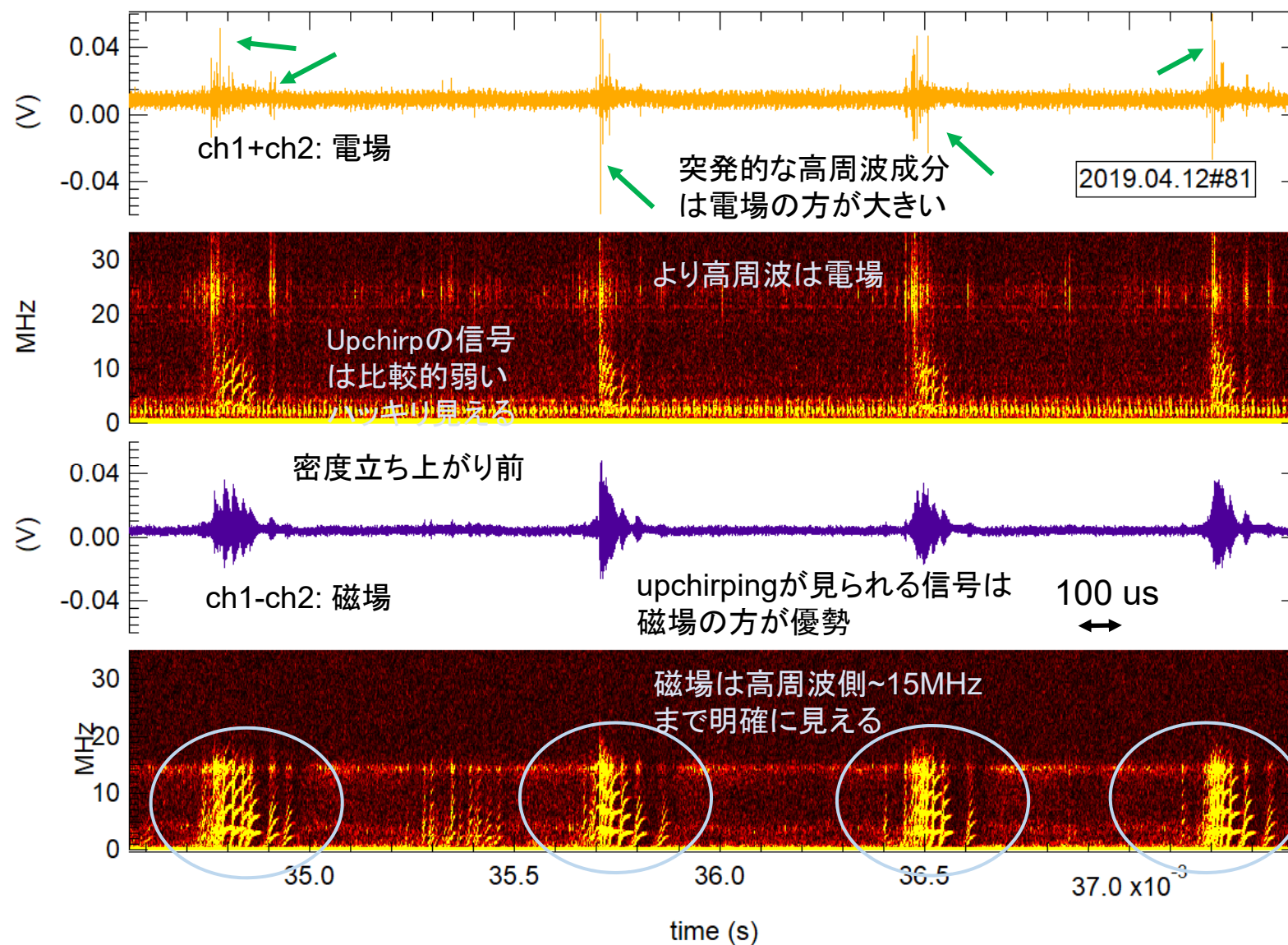
高温電子が顕著な際のRT-1の高 $\beta$ プラズマでは中間周波数帯で様々なモードの磁場揺動が観測されている







低密度状態での磁場揺動の周波数スペクトルはChorusモードと類似したような磁場揺動が観測される



## まとめと今後の課題

- 磁気圏型装置RT-1の最近の実験結果を揺動現象を中心に報告した.
- 内向き輸送によるピークした分布の自己組織化に伴い, 第三断熱不変量を非保存化する低周波の揺動が観測されている.
- 磁化(第一及び第二断熱不変量が保存)した荷電粒子が束縛条件の下で「緩和」する事により構造を形成するという描像と一致している.
- 具体的な輸送の駆動過程については今後の研究課題である.
- ECHによる高温電子が圧力を担う高 $\beta$ プラズマ中で,  $f \sim 0.1-0.4f_{ce}$ 程度の磁力線に沿って伝搬するコヒーレントな電磁的な揺動が見付かった.
- ホイッスラー波の特性とおおむね一致しており, 高エネルギー電子の分布関数や圧力非等方性の効果で不安定化する事を示唆している.
- 中間周波数帯 ( $f_{ci} \ll f \sim f_{ce}$ ) で他にも複数のモードらしきものが見付かっており, より詳細な理解を目指す実験を進めている.

# 19ページと同一ショットの拡大図（赤と青が、24cm離れた同一磁力線上の計測）

