

磁気圏型配位 RT-1 の高温電子高 β プラズマにおける揺動現象

東大新領域 齋藤晴彦

Fluctuation phenomena in hot-electron high-beta plasma in RT-1 magnetospheric experiment

GSFS U. Tokyo H. Saitoh

Ring Trap-1 (RT-1) は、磁気浮上させた超伝導コイルによりダイポール磁場を生成するプラズマ実験装置である[1,2] (図1)。強い非一様性を持つダイポール磁場中で、プラズマは急峻な圧力勾配に対して強靱な安定性を持ち、高性能プラズマの優れた閉じ込め性能を示すことが示されている[3]。揺動が駆動するプラズマの自己組織化と緩和現象[4]に着目して、ダイポール磁場配位では先進核融合に適した超高 β プラズマの基礎研究や、反物質プラズマの実現を目指す非中性プラズマの研究が進められている[5-7]。リング状コイルが作り出すダイポール磁場は惑星磁気圏と大域的に同一の構造を持つ。プラズマが示す揺動の発生条件や伝搬特性、また波動粒子相互作用の諸特性は磁場構造に強い依存性を示すと予測され、RT-1 ではジオスペース現象に関する実験室研究の実現可能性がある。様々な機構で発生する波動と粒子との相互作用は、実験室やジオスペースのプラズマに観測される重要な素過程であり、相対論的荷電粒子から構成される放射線帯の消滅生成過程や、プラズマの構造形成や閉じ込めにも主要な役割を果たす。プラズマが示す突発的な揺動発生や、様々な時間スケールで発生する輸送や緩和現象の背景には、実験室とジオスペースに共通する物理機構が存在すると目されている[8]。実験の特性を生かした高い計測密度と優れた再現性及び制御自由度を持つプラズマ研究を、探査機による観測や理論及びシミュレーション研究と相補的に実施することにより、先進核融合の実現や宇宙天気予報のモデル高精度化等の学際的分野への発展が期待される[8]。本研究では、コイル磁気浮上により擾乱を最小化した RT-1 のダイポール磁場中で生成したプラズマの諸性質と、これまでに観測された揺動現象の特性について報告する。

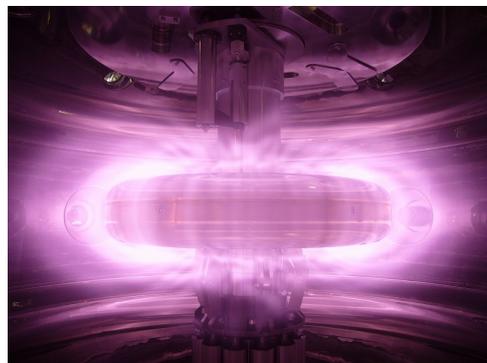


図1 RT-1装置の超伝導磁気浮上ダイポール磁場コイルと生成されたプラズマ。

RT-1 ではこれまで主に 8.2GHz 及び 2.45GHz のマイクロ波を用いた電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) を実施しており、比較的低密度 (2.45GHz 実験では $\sim 10^{17} \text{m}^{-3}$) のため、主として高温電子が圧力を担う高 β プラズマが生成される。マイクロ波入射及び運転条件の最適化により、局所 β が 100% に達するプラズマの 1 秒以上の安定生成が実現され、急峻な密度勾配を持つ安定構造の自己組織化が観測された[6]。RT-1 の高温電子高 β プラズマには複数の揺動モード[9]が出現し、それらはプラズマの自己組織化を駆動する低周波 ($\sim \text{kHz}$, トロイダル方向の粒子周回の周波数程度) 揺動と、より高周波の現象に大別される。これらのうち低周波揺動

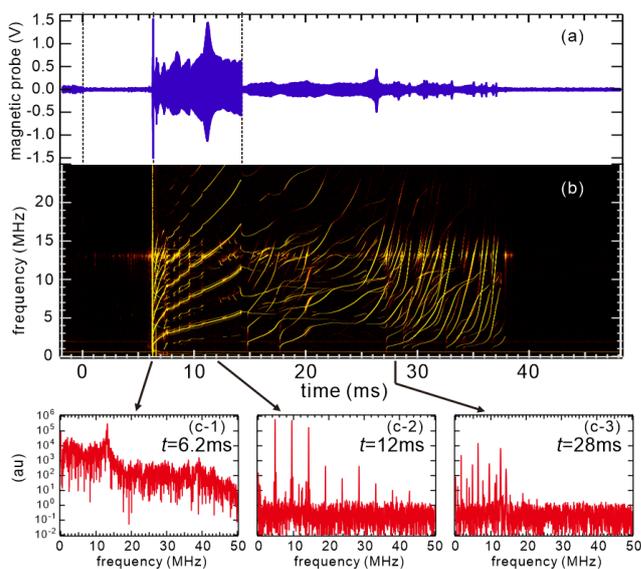


図2 高温電子成分の増大時のフルート状モード。

は、プラズマの安定な分布構造が再構成される際に高頻度で出現し、第三断熱不変量の非保存化による径方向輸送と、強磁場領域への輸送による粒子加熱の役割を担っている。高い出現頻度で観測されるのは、異なる場所で発生する 1kHz 及び 0.7kHz 付近の揺動であり、磁力線方向とトロイダル方向の双方への伝搬を示す。類似の揺動現象として、米国のダイポール磁場装置である LDX[7]で観測されたエントロピーモード[11]との類似性が認められる。

高周波の揺動は、更に 2 種類に分類される。これらのうち主に 20 MHz 程度以下で観測されるのは、高温電子が駆動する交換型不安定性と考えられるフルート状のモード[10]である(図 2)。多点計測によればこの揺動はトロイダル方向(磁場に垂直方向)に伝搬し、磁力線方向には位相差を持たない。プラズマ中の高温電子成分の割合が非常に高い場合には、特にマイクロ波停止後に電子密度の急激な変動が見られ、輸送との関わりを示唆している。

より高周波(計測点における電子サイクロトロン周波数 f_{ce} 程度)側では、磁気圏のコラスモードとの関連が疑われる揺動が観測される(図 3)。この揺動は、ECH による高温電子高 β プラズマの安定生成中に観測される。上述のフルートモードとは異なり、磁力線方向のみに伝搬しており、磁力線垂直方向(ダイポール磁場中ではトロイダル方向)には局在化した現象として出現する傾向が強い。図 3 に示すように揺動は突発的な発生と減衰を繰り返し、継続時間が 100 μ s 程度のコヒーレントな揺動が間欠的に発生し、電磁波と静電波の双方が観測される。磁場揺動の多くのイベントでは周波数変動が観測され、ライジングトーン

とフォーリングトーンの双方の発生が確認されている(出現頻度としては後者が多い)。揺動の出現頻度は、ECH により生成維持された高温電子によるプラズマ圧力と強い相関を示し、揺動発生が維持されるためには、反磁性信号が約 0.8mWb(最大局所 β 値 \sim 15%)を上回る必要がある。RT-1 の ECH 実験では、電子の強い温度非等方性を持つプラズマが生成されており、磁気圏のコラスモードと類似した駆動機構を示唆している。テスト粒子軌道計算によれば、R 波との相互作用により RT-1 の磁場配位中で電子が効率的な加熱を受け、軌道がカオス化する可能性が示されている。

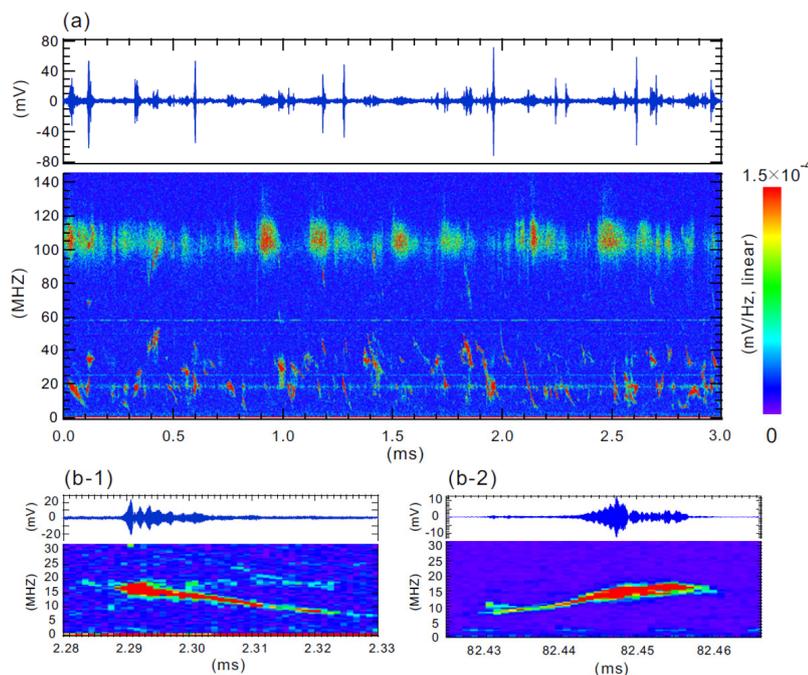


図 3 RT-1 の高温電子プラズマで観測されるコーラス状の揺動。 f_{ce} 付近に静電的なモード、また主に $0.4f_{ce}$ 付近には周波数変動を示す電磁揺動が間欠的に発生する。

- [1] 2006 Z. Yoshida+, Plasma Fusion Res. **1**, 008. [2] 2004 小川,三戸,柳+, 低温工学 **39**, 174.
 [3] 1987 A. Hasegawa, Plasma Phys. Contr. Fusion **11**, 147. [4] 2016 Yoshida, Adv. Phys. X **1**, 2.
 [5] 2010 Yoshida+, Phys. Rev. Lett. **104**, 235004. [6] 2015 M. Nishiura+, Nucl. Fusion **55**, 053019.
 [7] 2010 Boxer+, Nat. Phys. **6**, 207. [8] 2021 永岡,大村,三好,吉田,加藤+, プラ核学会誌 **97**, 261.
 [9] 2022 N. Kenmochi+, Nucl. Fusion **62**, 026041. [10] 2012 Saitoh+ Phys. Plasmas. **19**, 064502.
 [11] 2007 Kouznetsov+ Phys. Plasmas **14**, 102502; 2009 Kobayashi+ Phys. Rev. Lett. **103**, 055003.