

プラズマ中に生成される高温バブルの観測

Observation of high-temperature bubbles in an ECR plasma

寺坂健一郎¹, 吉村信次², 田中雅慶¹

Kenichiro TERASAKA¹, Shinji YOSHIMURA², and Masayoshi Y. TANAKA¹

九州大学¹, 核融合研²

Kyushu Univ.¹, NIFS²

核融合科学研究所の直線型高密度プラズマ発生装置 HYPER-I [1] の電子サイクロトロン共鳴 (ECR) プラズマ中に自発的に励起される浮遊電位の負のスパイクが観測されている (図 1). 我々は、浮遊電位のスパイクを伴う非定常的な現象の時間的・空間的性質を調べ、ECR プラズマ中に局在化した高エネルギー電子の泡状構造 (high-temperature bubbles) が形成されることを観測した [2].

コンディショナルサンプリング法を用いてプローブ電流-電圧特性を計測したところ、浮遊電位スパイクの振幅は電子温度の変動を反映し、大振幅イベントにおける電子温度は約 30 eV と未発生時の温度 (約 10 eV) よりも高くなっていることがわかった。また、Rescaled-Range 解析 (RS 解析) を用いた統計解析から Hurst 指数 (H) を評価すると、 $H \sim 1/2$ となり、時間的にランダムに発生する現象であることがわかってきた。この結果は待ち時間 (waiting time) の確率密度分布関数を用いた他の解析結果 [3] と同じであり、プラズマ中に突発的に高電子温度群が形成されては消滅する過程が存在することを意味している。

また、ヘリウムガスを用いた場合の現象の典型的な持続時間 (duration) は 10^{-5} sec であり、電子の特徴的な時間スケールよりも十分長い時間持続する。実際、アルゴン、ネオン、キセノンなど他の希ガスを用いた放電においても、浮遊電位のスパイクの発生が確認されており、平均持続時間はガス質量の正の平方根に比例する。このことは、間欠的な電子の高温化に重い粒子 (イオンおよび中性粒子) のダイナミクスが関与することを意味し、プラズマ全体として構造形成を理解する必要があることを意味している。特に、スパイクのピーク時には電離エネルギーを超える電子温度が実現されていることから、中性粒子を含めて構造形成を理解することが重要であることを示唆している。

HYPER-I 装置で観測されたこの間欠的な現象は空間的にも特徴を持っている。径方向に離れた 2 本の Langmuir プローブを用いた富裕電位の同時計測から相互相関係数を評価すると、プローブの間隔が 40 mm より大きくなると相関係数の値が著しく減少する。この結果は、現象が有限なサイズを持ちプラズマ中に局在化した構造を有していることを意味している。そこで、現象の空間サイズや時間発展を明らかにするために、我々は間欠現象の 2 次元構造を効率的に計測することが可能な high-impedance wire grid (HIWG) [4] や、ICCD カメラを用いコンディショナルサンプリングを適用した分光計測を行い、現象の時空間構造を詳細に調べた。

図 2(a) は HIWG を用いて再構成された泡状構造のスナップショットである。現象はプラズマ断面のいたるところに発生しており、 x 方向、 y 方向の空間サイズはそれぞれ、 $X_W = 30.3 \pm 4.7$ mm, $Y_W = 2.5 \pm 5.4$ mm

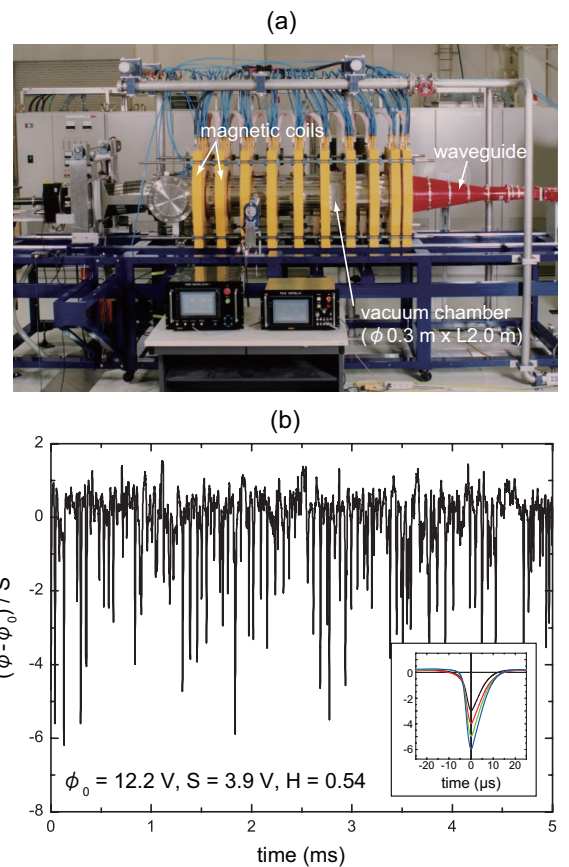


図 1: (a): HYPER-I 装置. (b): 標準偏差器規格化された浮遊電位の時系列信号.

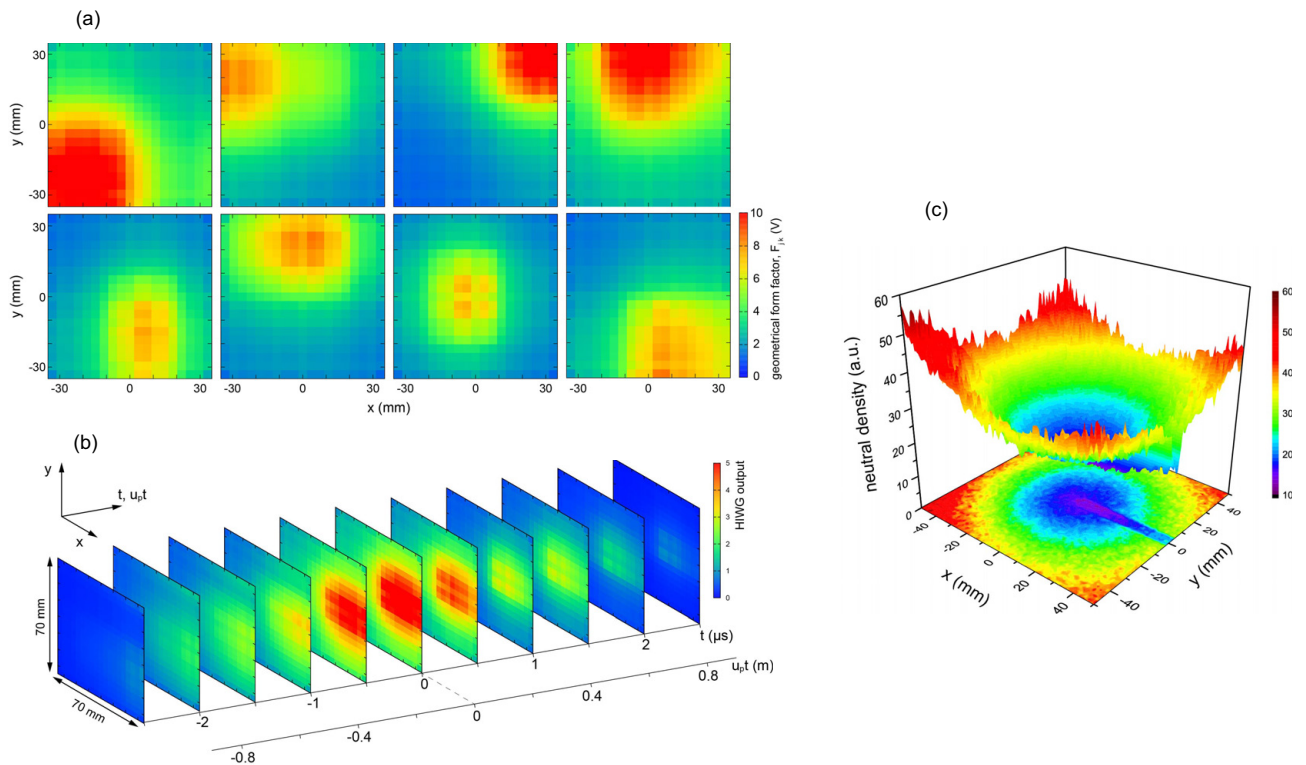


図 2: High-impedance wire grid (HIWG) を用いて可視化された高温泡状構造の (a) スナップショット, (b) 時空間発展. (c) 高電子温度領域の中性粒子密度分布.

である. 発生位置に関する統計を調べると, ある現象の中心位置はその前の現象の中心位置とは無関係であり, 空間的にもランダムに発生することが明らかとなった. ある 1 つのイベントについて断面の 2 次元時間発展を図 2(b) に示す. 軸方向の多点同時計測を行うと現象は軸方向 (磁場方向) に伸び, プラズマ生成点近傍から下流へと伝播していくことから, 図 2(b) は 3 次元的な空間構造とも解釈することができ, 磁場方向に軸を持つ回転楕円体構造を持つことがわかった. また, 本現象は ECR 放電を採用した HYPER-II (九州大学) [5] においても観測されており, 装置固有の現象ではなく少なくとも ECR プラズマが示す普遍的な現象であることも確認されている.

間欠現象は開放系に普遍的に観測され, 混相流や乱流-層流境界など幾つかの性質の異なる物体や波動が共存する際に発生する特徴的な現象である. HYPER-I における高温バブルの発生は電離過程を通してプラズマと中性粒子が相互作用する系で生じる構造形成の一種であると考えられる. 実際, 分光計測による強度比法を用いた評価では, 高電子温度領域の中性粒子密度が周辺よりも減少し, 局所的な中性粒子枯渇が発生している [図 2(c)]. 講演では, ECR プラズマ中で観測された高温バブルに関する時空間計測や統計解析について述べる.

本研究は JSPS 科研費 JP23244112, JP17K14425 および核融合科学研究所 LHD 計画共同研究 (Contract No. NIFS06KOAP016) の助成を受けたものです.

- [1] S. Yoshimura *et al.*, J. Plasma Phys. **81**, 345810204 (2014).
- [2] K. Terasaka *et al.*, Phys. Plasmas **25**, 052113 (2018).
- [3] S. Yoshimura *et al.*, Plasma Fusion Res. **10**, 3401028 (2015).
- [4] K. Terasaka *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 113503 (2014).
- [2] K. Terasaka *et al.*, J. Plasma Phys. **81**, 345810101(2014).