

極限的高ベータプラズモイドの超アルヴェン速度衝突実験 Super-Alfvénic collision/merging experiments of extremely high beta plasmoids

浅井朋彦¹, 小林大地¹, 関太一¹, 高橋努¹, 稲垣滋², 岸本泰明³, 井通暁⁴, 高橋俊樹⁵
T. Asai, D. Kobayashi, T. Seki, T. Takahashi, S. Inagaki, Y. Kishimoto, M. Inomoto, T. Takahashi

¹日大, ²九大, ³京大, ⁴東大, ⁵群大
Nihon Univ., Kyushu Univ., Kyoto Univ., Univ. Tokyo, Gunma Univ.

実験室系で最も高い平均ベータ値 ($\langle\beta\rangle\sim 1$) を持ち, その大部分で β が1を超える極限的磁場配位: FRC (Field-Reversed Configuration) を, 相対速度500 km/s (アルヴェンマッハ数 ~ 10) 超に加速・衝突させ, メートルオーダーの大容量中に生成される衝撃波を直接観測する実験を開始した。衝突合体したプラズモイド中では, 磁場構造や強いトロイダルフローなどFRCの特性を失った後, 再度FRCに緩和する, 一般化ヘリシティの保存という枠組みに収まらない磁化プラズマの自己組織化的生成を示す結果も観測されている。

実験は, 日本大学のFAT-CM装置において実施されている[1]。コニカル型シータピンチコイルを用いた逆磁場シータピンチ法 (Field-Reversed Theta-Pinch: FRTP) により生成された2つのFRC様プラズモイドを, ガイド磁場の磁気圧差により超音速/超アルヴェン速度に加速, コイル内径約1mの閉じ込め部へ移送し中央断面で衝突させる。衝突時のプラズモイドのパラメータをTable 1に示す。

磁気圧差で加速された2つのプラズモイドは, プラズモイド境界面のアルヴェン速度を大きく超えて加速され衝突する[2]。衝突時の相対速度は200 - 600km/s, イオンマッハ数 M_s で3 - 4, アルヴェンマッハ数 M_A で6 - 18に達し, 低密度・高温オペレーションでは, イオンの平均自由行程がプラズマのスケール長の数倍以上となる。現在, 移送速度500km/s (相対速度1000km/s) 超の実験を目指して装置改造を行なっている。

Table 1 Parameters of single FRC-like plasmoid

	Speed [km/s]	M_s	M_A	beta	n_e [$\times 10^{20}\text{m}^{-3}$]
min	100	1.5	3	0.95	0.8
max	300	2.0	9	0.98	2
design	550	2.0	10		

FRCは, その極限的に高い β 値のため, ごく表層を除いてイオンは磁化しておらず (Fig. 1), 従ってMHDによる近似と大きく異なる衝突・緩

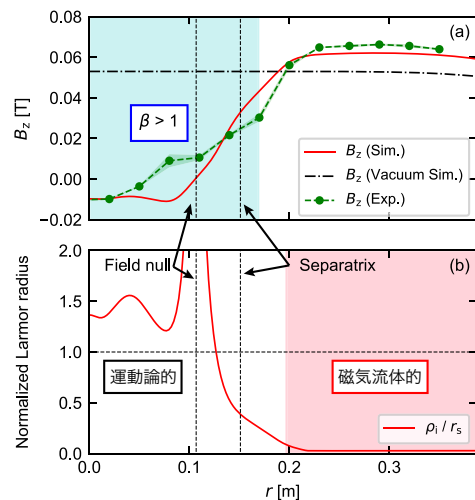


Fig. 1. Spatial distribution of magnetic field and normalized gyroradius

和過程を示す。内部磁場観測では, プラズモイドは衝突時に破壊的な擾乱を受け, 一度その秩序的な磁場配位を失った後, 数十マイクロ秒の緩和過程を経て, 自己組織的にFRC様の磁場配位が形成される様子が観測された[3]。また, FRCは生成後に生じる高速なトロイダルフローをその特徴の一つとするが, 衝突後の合体/緩和過程では, 移送開始時に持っていたトロイダル流が衝突によって一度失われた後, 磁場構造の再形成とともに再びスピナップし, 高速なトロイダル流を持つFRC平衡に達する。

これら観測結果は, トーラス型のシステムにおいて最も単純な磁場構造と極限的に高いベータ値を持つFRCの堅固さを示すと同時に, 既存のMHD緩和理論の枠組みに収まらない, 磁場構造の自己組織化的生成を示唆している。また緩和後のプラズマの状態が衝突速度に依存する結果も観測されており, 衝突で生成される衝撃波がこのプラズモイドの再形成過程において重要な役割を持つものと考えられる。

[1] T. Asai *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 056024 (2019).

[2] D. Kobayashi *et al.*, Phys. Plas. **28**, 022101 (2021).

[3] T. Asai *et al.*, Nucl. Fusion **61**, 096032 (2021).