

FRC 移送過程における磁気圧力勾配の増加による加速性能の向上 Improvement of Acceleration Performance by Increased Magnetic Pressure Gradient in the FRC translation process

○関太一¹, 渡邊達大², 小林大地³, 高橋努³, 浅井朋彦³

*Taichi Seki¹, Tatsuhiro Watanabe², Daichi Kobayashi³, Tsutomu Takahashi³, Tomohiko Asai³

Abstract: Super-sonic collision of field-reversed configurations (FRC) has been conducted in the FAT-CM device at Nihon University for observation of collisionless shock waves that are considered to cause the generation of non-thermal particles. To improve acceleration performance, FRC-like plasmoids formed by the field-reversed theta-pinch are translated by the high-magnetic pressure gradient. The current density of the theta-pinch coil is increased by shortening the axial length of the coil geometry, resulting in a higher magnetic pressure being generated in the formation sections.

1. 背景・目的

日本大学 FAT-CM 装置^[1]では、無衝突衝撃波の生成を目的として、磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) の衝突実験が行われている。図 1 に示す実験装置両端の各生成部において逆磁場テータピンチ (Field-Reversed Theta-Pinch: FRTP) によって生成された 2 つの FRC 様の磁化プラズモイドは、装置中央の閉じ込め領域に向かって磁気圧勾配により移送される。移送時の速度はプラズマ中での磁場揺動の伝播速度となる Alfvén 速度やイオンの疎密の伝播速度であるイオン音速を超え、相対速度でおよそ 300 km/s 程度である。この超 Alfvén 速度/イオン音速での衝突時には、衝突断面において衝撃波の発生が示唆されており、これによって生じる高エネルギー粒子や衝撃波の直接観測が試みられている。

高ベータ (磁気圧力 < プラズマ圧力) かつ運動エネルギーが支配的な磁化プラズモイドの衝突は、無衝突領域にあると考えられる。無衝突領域で生じる衝撃波は、宇宙物理学の分野において宇宙線等の高エネルギー

一粒子の生成に重要な役割を担っていると考えられているが、それらの粒子加速機構は未解明である。

本研究では、衝突時の相対速度を超新星残骸等で生じる無衝突衝撃波の領域 (FRC 衝突時の相対速度: ~1000 km/s) まで拡張することを目標とし、磁気圧勾配の強調による加速性能の向上を試みた。

2. 実験

衝突以前の移送過程に着目すると、装置両端の生成部において FRTP によって生成されたプラズモイドは、テータピンチコイルの磁気圧勾配によりアルヴェン速度程度まで加速される。その後、速度を維持して装置中央の磁場強度の弱い領域 (閉じ込め部) まで移送されて更に加速され、衝突直前には超アルヴェン速度 (~200 km/s 程度) に到達する^[2]。生成部のテータピンチコイルに流れる総電流値が保存すると仮定した場合、コイル素子数を減らすことで各コイルの電流密度が増加するため、生成部の磁場のみが強調され生成部閉じ込め間の磁気圧勾配を高めることができる。コイル素

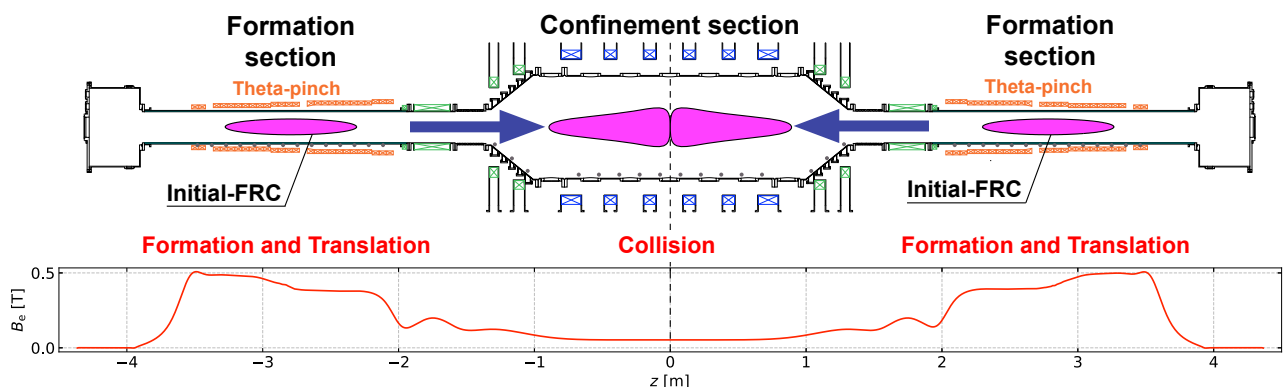


Figure 1. Schematic of collision experiment of FRCs in the FAT-CM device

子数を変化させた場合に生じる磁場強度の軸方向分布を図2に示す。コイルを18個に減らすことにより、生成部に生じる磁場強度は26個の場合と比較しておよそ30%程度上昇している。磁場勾配による加速性能の変化と、短いコイル配置でのFRCの生成を評価するため、これらのコイル配置での片側移送実験を行った。移送速度は移送軸方向に配置された磁気プローブの信号の時間差から導出し、内部磁場の径方向分布を装置部中央断面で計測することにより生成・移送されるプラズモイドの磁場配位を観測した。

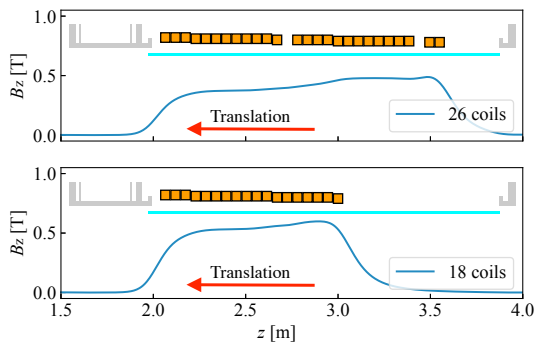


Figure 2. Magnetic field in the formation section in the cases of 26 and 18 theta-pinch coils

3. 実験結果

各コイル配置における閉じ込め部に移送されたプラズモイドの移送速度の平均を図3に示す。エラーバーは標準偏差である。コイル素子数が減少するにつれて移送速度は上昇しており、26個のコイル配置の平均と比較して18個のコイル配置では20%程度上昇していることがわかった。各ショットでの移送速度とセパトリックス半径の関係を図4に示す。コイル素子数を減らした場合、移送速度は上昇、プラズマの半径は減少していることがわかる。また、装置中央断面での内部磁場計測を行ったところ、18、21、26個のコイル配置全ての場合でFRCの特徴の一つである反転磁場構造

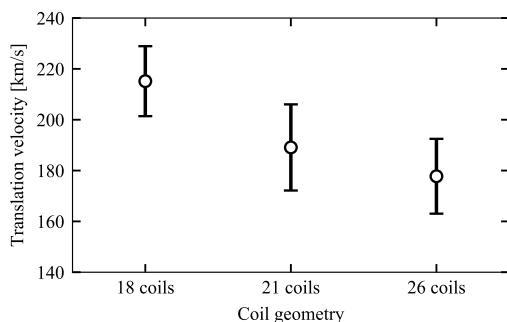


Figure 3. Averaged translation velocity in the cases of 18, 21, and 26 coils

が計測された。コイルの素子数を減少させた場合でもFRC様なプラズモイドが生成されることがわかった。

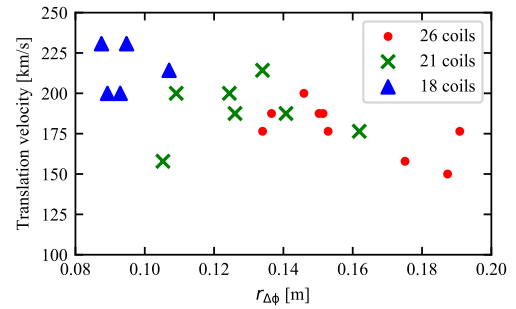


Figure 4. The translation velocity and separatrix radius of the translated plasmoids at the confinement section

4. まとめ

F RTP 法によって生成される磁化プラズモイドの移送速度向上を目的として、磁気圧力勾配を上昇させた場合でのプラズモイドの生成、移送速度の比較を行った。コイル素子数を2/3倍まで減らし、生成部と閉じ込め部間の磁気圧勾配を高めた場合、プラズモイドの移送速度はコイル素子数を減らす前と比較して平均でおよそ20%増加した。また、移送されたプラズモイドの内部磁場を計測したところ、ほぼ全てのショットで反転磁場が計測され、FRC様の磁場配位が維持されていることがわかった。磁気圧勾配の強調により移送速度を向上させることが可能であるが、超新星残骸の膨張速度を再現するためにはピンチコイルの半径および生成部内磁場のテーパ角の調節、電源の増強といった更なる高速化が必要であると考えられる。

5. 参考文献

- [1] T. Asai *et al.* : “Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment”, Nuclear Fusion, Vol.61, 096032, 2021.
- [2] D. Kobayashi *et al.* : “Experimental evidence for super-Alfvénic acceleration of the field-reversed configuration due to a magnetic pressure gradient”, Phys. Plasmas, Vol.28, 022101, 2021.

6. Acknowledgement

This work was partially supported by JSPS KAKENHI Grants Number JP19K21868, 20H00143 and Nihon University, College of Science and Technology, Grant for Project Research.