論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　　異極性スフェロマック合体における非MHD効果の検証

氏　　名　　神納 康宏

互いに逆極性のトロイダル磁場を持つスフェロマックを合体させることで高ベータ配位である磁場反転配位(FRC)を生成する異極性スフェロマック合体法は大磁束のFRC生成に適する効率的な手法であるが，本研究では異極性スフェロマック合体法に関して実験，MHDシミュレーション，Hall-MHDシミュレーション，粒子シミュレーションにより合体プロセスの素過程および非MHD効果の解明を行った。実験ではプラズマ合体実験装置TS-4を用いて低s領域での異極性スフェロマック合体実験を行い，Hall効果がトロイダル磁場の極性の正負の組み合わせ(Case-O, Case-I)に関する対称性の破れとしてX点の移動を生じさせること，およびX点の移動がリコネクション下流側の磁気圧，リコネクション電流シートの変形を介してLorentz力の分布を変形し，径方向に一方向に偏ったアウトフロー分布を形成することを明らかにした。Case-OではX点はoutboard側に移動し，アウトフローはinboard側に強く生じ，case-IではX点はinboard側に移動しアウトフローはoutboard側に強く生じることにより，合体後のFRCの粒子損失に関してcase-Oは配位の内部に閉じ込められるが，case-Iでは配位外部に損失し，またセパラトリクス半径と磁気軸半径はcase-Oが大きくcase-Iは小さく，合体中のリコネクション現象として生じた非MHD効果が合体後に形成されるFRCの緩和に影響を与えることが分かった。このように，異極性スフェロマック合体によるFRC生成過程における非MHD効果(特にHall効果)の実験的検証を行った。

次に数値的検証として，Hall-MHDシミュレーションおよびPICシミュレーションによる異極性合体の素過程の解明を行った。まずプラズマ合体に適したHall-MHDコードの開発を行った。プラズマ合体法は合体する2つのトーラスプラズマという大域的な現象と磁気リコネクションという局所的な現象という2つの異なる空間スケールの現象が相互に作用し合う数値的に計算コストの大きい現象であり，特に磁気リコネクションに本質的に重要な役

割を果たしうるHall効果の導入は陽解法におけるCFL条件の観点から計算コストを大きく増大させてしまう作用がある。そこで本研究ではHall効果による計算コストの増大を緩和するため，MHD波であるAlfven波から決まる時間刻みとHall-MHD固有の波であるWhistler波から決まる時間刻みに分離し，計算コストの多くを占める流体量(密度，圧力，運動量)の計算をMHD時間刻みで行い，磁場の誘導方程式をHall-MHD時間刻みで解く手法をプラズマ合体コードに適用した。この手法により計算コストを通常の40%程度に削減することができた。

次に，このHall-MHDコードを用いてMHD/Hall-MHDにおける異極性合体の素過程の検証を行った。まずHall効果のないMHDシミュレーションにおいてポロイダル磁場のリコネクションを担うトロイダル電流シートとトロイダル磁場のリコネクションを担うポロイダル電流シートに関してその幾何学的構造の相違から生じる分布の相違およびその結果としてのトロイダル，ポロイダルアウトフローの分布の違いを明らかにした。さらにパラメータ依存性として電気抵抗と粘性係数が合体に与える影響について検証を行った。電流シート幅は電気抵抗に関して0.5乗の依存性を示し，異極性合体においてもMHD条件下では概ねSweet-Parkerモデルと定性的に合致する結果を得た。

次に，2次元Hall-MHD合体コードによりHall効果に関する検証を行った。Case-O, Case-IがMHD領域において完全に対称であることを示し，Hall効果の導入により対称性が破れることを数値シミュレーションの観点から検証した。Hall効果によるX点の移動，電流シートの変形がポロイダルフロー，トロイダルフローの加速領域に関してMHDとは異なる特徴的な構造を形成し，実験と同様の一方向に偏った径方向アウトフローをもたらすことを明らかにした。また，低アスペクト比のトーラスプラズマ合体の性質であるトロイダル効果として，MHD条件下においてもinboard側のリコネクション電流，電磁力はoutboard側に比べて強くなり，リコネクションによって生じるアウトフローはinboard側が強くなることを示した。このトロイダル効果とHall効果の重畳としてcase-O, case-I異極性合体の極性効果が表れ，径方向フローの分布によってcase-O, case-Iで下流側の圧力分布が大きく異なること，およびトロイダルフロー分布が異なることを明らかにし，実験結果と定性的に合致するフロー・圧力分布の形成を観測した。

次に，3次元Hall-MHDコードを用いて異極性合体に対する3次元効果に関する検証を行った。MHD条件下において3次元効果として合体中にn=1トロイダルモードが成長し配位が崩壊することが分かった。3次元性に対するHall効果の影響にとしてはMHD条件下では電流シートのn=1キンクモードとして軸対称性の破れとして表れるが，Hall-MHD条件下ではリコネクションのトロイダル非一様性として3次元性が現れることが判った。Hall効果は3次元的不安定性の成長を促進することが分かった。

粒子シミュレーション(PIC)では，電子とイオンそれぞれに対するエネルギー変換に関する検証を行った。PICシミュレーションにおいてもHall-MHDシミュレーションと同様のX点の移動を観測し，X点の移動量がイオン/電子の質量比に依存することを示した。また，イオ

ンのエネルギーゲイン領域はセパラトリクス近傍かつ片側に偏った分布となる一方で電子に関してはイオンと異なり，X点周辺の電流シートに局在化したエネルギーゲイン領域の分布となり，イオンと電子で大きく異なった分布となることが分かった。以上より，実験と電磁流体シミュレーション，粒子シミュレーションを用いて異極性スフェロマック合体法における非MHD効果，極性効果に関して総合的に明らかにした。