

審査の結果の要旨

氏名 井上 静雄

本論文は「**数値シミュレーションを用いた磁気リコネクションのエネルギー変換過程の研究**」と題し、プラズマの粒子シミュレーション計算機コードにトカマク合体実験に近い境界条件を取り入れて、磁気リコネクションの磁場エネルギーから運動・熱エネルギーへのエネルギー変換機構を解析し、球状トカマク(ST)合体によって得られる急速加熱効果を明らかにした。磁気リコネクション実験とタイアップした粒子シミュレーションは初めてであり、実験に有用なリコネクション加熱スケーリング則やガイド磁場依存性、エネルギー変換の詳細物理を明らかにしている。

第1章は、「序論」であり、研究の背景となった磁気リコネクション研究の歴史を解説している。磁気リコネクション高速化=加熱の重要性を述べた後、核融合プラズマを急速加熱する反面、熱エネルギーの損失を引き起こして善玉にも悪玉にもなることを述べ、室内実験と比較可能な磁気リコネクションの粒子シミュレーションが現象解明の飛躍につながることを述べている。

第2章は、「計算手法」と題し、解析に用いた2次元粒子シミュレーションコードの詳細が述べられている。基礎方程式とその規格化の説明を行なった後、X点領域のみを四角に切り出したスラブモデルを計算に用い、イオン・電子が上流の電界により、X点領域に流れ込み、下流方向に自由に流れ出ることできる自由境界条件を採用したことを述べている。

第3章は、「磁気リコネクション中のエネルギー変換過程」と題し、Xラインに平行なガイド磁場がゼロの場合、再結合磁場に比べて高いガイド磁場の場合のエネルギー変換過程の内訳を明らかにしている。変換効率は、ゼロガイド磁場の場合、流入したポロイダル磁気エネルギーの75%、高ガイド磁場の場合はほぼ100%で、主としてイオンと電子の熱・運動エネルギーへ変換割合は前者で3:1、後者で2:1程度である。ゼロガイド磁場の場合は磁場ゼロの非磁化領域を有し、複数の加速・加熱機構が生ずるため、イオンのエンタルピーフラックスの占める割合が多く、高ガイド磁場の場合は、電子が沿磁力線に強く加速されるため、電子の占める割合が増加することを述べている。

第4章は、「ゼロガイド磁場リコネクションにおける粒子加速・熱化機構」と題し、イオンのエンタルピーフラックス生成は、電流シート付近の"リング"

構造, "稲穂"型構造等のメアンダリング運動中のリコネクション電場による加速により形成され, Local /Global Speiser イオンが速度空間上において混合すると, "歯型"構造を形成しつつ, ミラー捕捉される事で, 速度空間において熱化する現象を詳細に述べている. 電子は上流において速度分布関数の"三角形"型構造を形成し, 低エネルギーの電子が選択的に磁力線方向にヌル点に補足され, リコネクション電場により強い加速を受けることを明らかにした

第5章は, 「高ガイド磁場リコネクションにおける粒子加速・熱化機構」と題し, イオンの加速をカスプ電場, 静電場, リコネクション電場からなるスカラーポテンシャル場により説明し, イオンの内部エネルギー増加の内訳は $2/3$ はリコネクション電場により加速されており, 残りの $1/3$ がカスプ電場による寄与であることを明らかにした. 電流シートにおいて, 速度分布関数関数の長方形型構造は消失し, 磁力線方向にビーム成分を有する電子が支配的である事を明らかにした.

第6章は, 「リコネクション/プラズマ合体実験とシミュレーション結果との対比」と題し, より明らかにしたエネルギー変換過程の物理を, リコネクション実験やプラズマ合体実験などの実験結果と比較している. 磁場の2乗に比例するリコネクションエネルギーのスケーリング則, ガイド磁場への弱い依存性など合体実験の最新成果が粒子シミュレーションで再現できることを示した.

第7章は, 「結論」で成果を整理し, まとめている.

付録には多数の論文になったプラズマ合体実験へのリコネクション応用, プラズモイド放出を応用した動的ダイバータの研究をまとめている.

以上要するに, 本研究は, 粒子シミュレーションにより, 磁気リコネクションによるイオンおよび電子の高出力加熱・加速のメカニズムを初めて室内実験と比較可能な形で明らかにした. 再結合磁場の2乗に比例するリコネクション加熱や, イオンを主とするイオン・電子へのエネルギー分配, リコネクション加熱のガイド磁場磁場への弱い依存性など, 最新の大型磁気リコネクション加熱実験の成果や太陽プラズマや磁気圏プラズマのリコネクション観測をよく説明する成果といえ, プラズマ工学, 核融合工学, 太陽物理学, 電気電子工学への貢献は大きい. よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる.