

—博士論文(要約)—

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

平成26年12月1日提出

指導教員 小野 靖 教授

東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻

学籍番号 37-127066

井上 静雄

数値シミュレーションを用い磁気リコネクションのエネルギー変換過程の研究を行った。磁気リコネクションは磁場トポロジーの変化を伴い、上流側の磁気エネルギーが下流の運動/熱エネルギーへと変換される過程である。本現象を工学応用したのが磁気リコネクション加熱を応用したプラズマ合体実験であるが、磁気リコネクション中に、磁気エネルギーがどのような過程を経て運動エネルギーに変換されるか、また、磁気リコネクション中にしばしば計測される高エネルギー粒子はどのようにして生成されるのか、物理描像が未だに確立されていなかった。よって、二次元粒子シミュレーションコード PASMO を用い、エネルギー変換過程を研究した。

初めに、1. 磁気リコネクション中に粒子がどのように振る舞うのか詳細に解析した上で、2. 磁気リコネクションのエネルギー変換過程と、3. 磁気リコネクションによる粒子の加速機構について調べた。

まず磁気リコネクション中の粒子の振舞いについて、ゼロガイド磁場磁気リコネクションではイオン・電子共に、磁気拡散領域近傍において、リコネクション電場が粒子を直接加速し紙面方向に高エネルギー成分を持つ粒子が存在しており、そのスケールはイオンはイオンメアンダリング長、電子は電子メアンダリング長であることが明らかとなった。面内の熱速度が低温である粒子ほどヌル点近傍においてメアンダリング運動を長く続ける為、ヌル点近傍では面内の温度成分は低温で、紙面方向に非常に高いエネルギーを有する粒子が存在している事が分かった。イオンの速度分布関数においては、メアンダリング運動を繰り返しエネルギーを得ている事を示唆する、帯状の構造が紙面方向の速度分布関数において確認された。また、ヌル点には非常に強い分極電場が形成されており、イオンは分極電場に引き込まれ分布はリング状となり、その幅は分極電場を形成する静電ポテンシャルと定性的に一致する事が明らかとなった。電子は分極電場によりエネルギーを失う為、リングの幅はイオンより小さくなり、かつ熱速度がイオンより大きいのでリング構造は不明瞭となる。電子の運動で特徴的であるのが、Hall 磁場の形成によってリコネクション電場が電子加速し、沿磁力線方向の加速を生じる点である。初期ハリスシート放出が生じると、下流に密度が pile up しミラー閉じ込めも同時に生じるが、上流領域は磁気エネルギーが解放される前であるため、ミラー閉じ込めの効果は弱く、リコネクション電場による沿磁力線加速が支配的である事が明らかとなった。電流シートのスケールに関して考察すると、電流は大部分が電子電流である事から、そのスケールは電子速度と密度に比例する。密度はイオンメアンダリング運動により特徴的なスケールが決まり、電子の速度は電子メアンダリング長内でのリコネクション電場による加速による為、スケールは電子メアンダリング長で決まる。よって電流シートのスケールは両者のハイブリッド長で表現可能であることが明らかとなった。次に高ガイド磁場磁気リコネクションにおける粒子の振舞いについて調べた。イオン・電子共に、それぞれの拡散領域近傍において、リコネクション電場が粒子を加速するのは共通であるが、リコネクション電場の向きが、ゼロガイド磁場磁気リコネクションにおいては磁力線垂直方向だったのに対して、高ガイド磁場磁気リコネクションにおいては沿磁力線方向となる。先と同様に、イオンはヌル点近傍でメアンダリング運動を繰り返しながら、リコネクション電場に加速される。よってイオンの速度分布関数においては、沿磁力線方向に高エネルギーな粒子がインフロー方向にダブルピークをもった構造となっており、ゼロガイド磁場磁気リコネクション同様、メアンダリング運動を行いながら加速されている事を示唆している。一方電子については、電子メアンダリング長が非常に小さくなるため、本シミュレーションにおいては十分な解像度が得られなかった。ゼロガイド磁場磁気リコネクションでは、面内の熱速度成分が小さければヌル点近傍に長く留まる事ができるが、高ガイド磁場磁気リコネクションにおいては沿磁力線方向に加速される為、磁力線をつ

たつて領域外に出てしまう。よって、ゼロガイド磁場磁気リコネクションにおいて生じた熱速度による選択的な電子加速は、高ガイド磁場磁気リコネクションにおいては生じない。また速度分布空間にダブルピーク構造が現れなかった原因としては、電子は非常に強い加速を受けるため上記理由によりヌル点近傍に滞在する時間が短かった為であると考えられる。電流シートのスケールに関して考察すると、電子の沿磁力線方向の加速が生じるスケールは電子スキン長程度であり、密度のピークは先と同様イオンメアンダリング長程度であるため、電流シートのスケールはそれらのハイブリッドとして表せることが明らかとなった。上記の粒子の振舞いを踏まえ、エネルギー変換機構と加速機構を研究した。

ゼロガイド磁場磁気リコネクションにおいては、流入したポロイダル磁場のエネルギーは定常状態において60%以上が他のエネルギーへと変換されている。また、変換された面内成分磁場のエネルギーの多くが粒子の熱/運動エネルギーへと変換されている事が分かった。粒子のエネルギーの内、イオン、電子が得るエネルギーの割合は三対一とイオンの方が多くエネルギーを受け取る。受け取るエネルギーの内訳は、イオンの場合運動エネルギーと外部に対して成す仕事が一対一程度であるのに対して、電子の場合は運動エネルギーは非常に小さく、外部に対してする仕事が支配的であった。電子、イオンが如何にしてエネルギーを受け取っているかは、エネルギーソース項により表され、電子は誘導電場から広域に渡りエネルギーを受け取る事が明らかとなった。つまり場のエネルギー(ポロイダル磁気エネルギー)が運動エネルギーへと変換されるが、その大部分は静電場の形成に使用され、形成された静電場によってイオンは加速を受ける。よってポロイダル磁場から電子に渡った得ねエネルギーが静電ポテンシャルを介し、最終的にイオンの運動/熱エネルギーとなる事が分かった。高ガイド磁場磁気リコネクションにおけるエネルギー変換過程においては、流入したポロイダル磁場のうち90%以上が変換されるが、ゼロガイド磁場磁気リコネクションと異なり、変換エネルギーの50%を超えるエネルギーが紙面方向の磁気エネルギーとして流出している。残り半分のエネルギーの内、支配的であるのはイオンのエネルギーであり電子のエネルギーは殆ど無視できる。エネルギーの内訳は、イオンについては運動エネルギーと外部に対してする仕事が支配的であり、ゼロガイド磁場磁気リコネクションと同様の割合である。一方で電子については、外部への仕事と運動エネルギーに加え、熱流や粘性として流出するエネルギーが存在する事が分かった。電子、イオンそれぞれのエネルギー変換過程について、先に存在したような誘導電場による広域なエネルギー変換は存在せず、ヌル点近傍の限られた領域で誘導電場によりエネルギーを得ている。得たエネルギーが場のエネルギーへと変換される点は先と同様であるが、イオンが静電場によりエネルギーを受け取る割合はゼロガイド磁場磁気リコネクションの場合とくらべて非常に少ない。よって、電子・イオン共に誘導電場によるエネルギーゲインが支配的であり、静電場を介してやりとりを行ったゼロガイド磁場磁気リコネクションとは、物理描像が異なる事が明らかとなった。

最後に磁気リコネクション中に粒子が如何にして加速されるか、ゼロガイド磁場磁気リコネクション、高ガイド磁場磁気リコネクション双方について解析を行った。ゼロガイド磁場磁気リコネクションにおいてイオンは面内に形成される分極電場により、セパトトリクスを介しインフロー領域からアウトフロー領域へと加速を受ける。高エネルギーイオンのエネルギーの内、約60%がこの静電ポテンシャルによるエネルギーゲインで説明できる。残りの40%はリコネクション電場による寄与である。イオンはヌル点付近でメアンダリング運動を行うが、上記の40%のエネルギーゲインは1周期の間に受け取るエネルギーに等しい事が明らかとなった。メアンダリング運動起因の加速もポテンシャルドロップもアウトフロー領域に局在化するような現象ではないため、イオンのエネルギーはmid-plane上でほぼ一定であ

---

り、アウトフローに高エネルギーなイオンが局在化するようなことは生じない。電子は自身の運動エネルギーと、静電ポテンシャル(一部 Hall 磁場)を形成する為のエネルギーをリコネクション電場により受け取っている。電子もイオン同様ヌル点近傍の電子メアンダリング領域において、リコネクション電場に直接加速される事でエネルギーを得る。双方共、非磁化領域を通過する際にリコネクション電場からエネルギーを得る点は共通である。高ガイド磁場磁気リコネクションにおいては、電場構造がゼロガイド磁場磁気リコネクションより電場構造がやや複雑で、面内にカスプ状の電場が形成される。イオンのエネルギーゲインはカスプ電場による寄与が 30% 程で、残りがリコネクション電場による加速である。電子のエネルギーゲインは磁力線に沿った加速によりエネルギーゲインが支配的である事が分かった。