

氏名 北 端 秀 行

学位（専攻分野） 博士（学術）

学 位 記 番 号 総研大甲第194号

学位授与の日付 平成 8 年 3 月 2 1 日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 局所開放系における磁気リコネクションの緩和過程

論文審査委員 主 査 教 授 岡 本 正 雄

教 授 佐 藤 哲 也

教 授 林 隆 也

教 授 大 薮 修 義

教 授 内 田 豊（東京理科大学）

## 論文内容の要旨

外部から継続的にエネルギーが供給されるような開いた局所系において、プラズマのエネルギー解放と構造形成に、間欠性や回帰性といった興味深い性質があるということがこれまでのシミュレーション研究から見つかっている。我々はプラズマのような複雑系では非線形な系の応答における様々な階層でこのような間欠的な性質が存在し得ると考える。そこで本研究では磁気プラズマのエネルギー解放機構に目を向け、その重要な素過程である磁気リコネクションにおいても、その緩和過程に間欠性を見いだせるのではないだろうか、という推察のもとに研究を行った。研究方法としては、圧縮性、抵抗性を考慮したMHD（磁気流体力学）プラズマの大規模な計算機シミュレーションによっておこなう。

シミュレーション計算は、局所開放系において空間的に一様な電気抵抗を仮定し、反平行磁場の平衡解を初期配位として磁気流体駆動型リコネクションモデルで行う。すなわち、反平行磁場に垂直なプラズマフローを上下の境界から対称的に流入させることでフローのぶつかる中性面上で磁気リコネクションが誘発される。つまりこのフローを通じて系内に自由磁場エネルギーが継続して注入される。これまでにも磁気リコネクションのシミュレーション研究は国内外を問わず活発に行われてきた。その多くはリコネクションレート、すなわちリコネクションが起こる速さが飽和レートに到達する、いわば初期成長段階での計算で、リコネクション点近傍の構造変化に着目したものである。

ところで、磁気リコネクションが始まるとそのリコネクションレートは上昇し、その後次第に飽和する。従来の磁気流体駆動型リコネクションでは、その飽和レートは駆動している外部フローに対応して決まり、そのピーク値も飽和レベルであると信じられていた。またリコネクションレートが飽和レートにまで到達すると、その駆動レートが高いほど強いプラズマフローが発生し、数値的な不安定を生じる。そのために計算をさらに長時間続けるのは非常に困難であった。しかし今回この障壁を何とか打ち破るために、数値的に安定なコードを開発し、従来の計算に比べてはるかに長い時間スケールでのシミュレーションを可能にした。

その結果、局所開放系において継続的にエネルギーが供給されているにもかかわらず、極めて衝撃的かつ間欠的なエネルギー緩和過程を発見した。驚くべきことに、リコネクションレートのピーク値が瞬間的に駆動レートの10倍を超える値にまで到達し、なおかつそれが繰り返し断続的に発生することがわかった。そして、そのときの磁場構造の変化を調べてみると、初期段階においてリコネクションの成長が飽和した後、さらに計算を続けた結果、それまでリコネクション点であった電流層付近に突然、磁気島が発生し、成長することを発見した。つまり、それまでX点であったところがO点へと形状が変化したのである。そしてその後十分に成長した磁気島が上下からの流入フローに押されてクラッシュを引き起こし、この瞬間にリコネクションレートが急上昇する。まさにこのとき、非常に速いリコネクションが実現している。またこのとき、初期の典型的なアルベン速度の10倍を超える爆発的なプラズマジェットが発生しており、クラッシュによって分断された磁気島はプラズモイドとなって下流域へ走り去る。そしてクラッシュ直後にはまた新たな磁気島が発生し成長している。以上、このような、磁気島が生まれ、成長し、壊れるという一連の現象が繰り返されるといふ磁場構造の変化がみられた。

さらに、系内に蓄積された全磁場のエネルギー変換率の時間変化を調べると、外部から供給された磁場のエネルギーがゆっくりと系内に蓄積される相と、急速に熱及び運動エネルギーへ変換されることによって解放される相が交互に繰り返しあらわれることをはっきりと見ることができ、このゆっくりとした蓄積相は磁気島の成長が担っていることがわかった。そしてそのバースト的な磁場エネルギーの解放はジュール熱へ変換されるより、プラズマの加速による運動エネルギーへ変換される方が支配的である。

またこの物理的成因を明らかにするために外部パラメータの依存性を調べた結果、1) クラッシュの起こるタイミングは外部フローの流入領域に依存している。2) クラッシュによるリコネクションレートのピーク値は外部フローが強いほど、また流入領域が大きいほど高いレートを実現する。3) 逆に外部フローがある臨界値を下回ると、磁気リコネクションの緩和過程に間欠的性質は失われ、ほとんど定常的な状態に落ち着く。4) 磁気島はテアリングモード的な不安定性によるものではなく、その両端にできたリコネクション点から磁気フラックスが供給されることによって成長し、発生直後は急速に成長するが、すぐにその成長率はずっと低いレベルにまで減少する。さらにこの衝撃的な速いリコネクションを実現しているリコネクションレートの継続時間を調べたところ、5) 外部フローが強いほど継続時間は短くなり、パルス的性質がより強くなる傾向がみられた。

これまで、太陽フレアで観測される爆発的なエネルギー解放やトカマクプラズマでみられる鋸歯状振動のような磁気プラズマにおける衝撃的な現象において、磁気リコネクションは基本的な役割を演じていると考えられてきた。しかしそのような古典的な拡散時間より数桁も速い時間スケールでの現象を十分に説明できるような速いリコネクションがいかんして実現できるのかは未だに理解されていない。最近ではこの速いリコネクションを実現するために、一般化したオームの法則からの電子の慣性項や圧力項を導入した磁気流体シミュレーションが行われている。しかしながら、本研究ではそのような項をつけ加えずともリコネクションレートのピーク値が駆動レートの10倍を超えるような、速いリコネクションが実現できることを発見した。また、局所開放系における磁気リコネクションの緩和過程に間欠性を見だし、その衝撃的な現象の物理的成因を調べた。

## 論文の審査結果の要旨

磁気流体プラズマ中における磁気リコネクション過程は、プラズマ中のエネルギー解放現象やトポロジー変換現象の鍵を握る重要な素過程であるが、これまでの長い間の研究の歴史にもかかわらず、その基本的な性質にまだ、未解明の点が多く残されている。特に近年、核融合プラズマや宇宙プラズマにおいて古典的拡散時間に比べて極めて高速に進行する磁気リコネクション過程と解釈される現象が観測されており、その物理機構の解明は極めて重要な課題となっている。

本論文は、大規模な計算機シミュレーション手法を用いることにより、磁気リコネクション過程の非線形な時間発展を詳細に解析することを目的としている。このようなシミュレーション計算においては、従来、数値的な不安定性の発生のために過程の時間発展を長時間にわたって追跡するのは非常に困難であった。本論文においては、過程の進行とともに計算領域内部で発生する爆発的なプラズマ流速が計算境界において数値的に不自然に反射されるのを抑制し、そのために従来の研究と比較して極めて長い時間スケールにわたって時間発展を追跡することに成功したことがまず評価される。このような計算を実行できるようにした結果、磁気リコネクションが間欠的・爆発的に発生することを発見したことが本論文での最も重要な内容である。しかもこのような性質がモデル方程式系において一般化されたオームの法則を用いない、最も基本的な磁気流体モデルの枠組みの中であらわれることを見いだしている。この発見は、世界における最近の磁気リコネクション研究の流れとは全く異なる新しい視点を提供しており、いわゆる「速いリコネクション」現象を説明し得る新しい物理機構として注目に値するものである。本論文ではさらに、シミュレーション計算におけるいくつかのパラメータを変化させた計算を実行することによって、間欠性の性質を支配する物理機構の一部を明らかにしている。

また、論文の後半においては磁気リコネクションにおいてあらわれる特異的電流層の構造の詳細な解析をおこない、プラズマ圧力の役割が重要であることなどいくつかの知見を得ている。この結果は、現在磁気リコネクションの研究において非圧縮性モデルを用いることが主流となっている状況への警鐘を与えるものであり、やはり重要な内容を含んでいる。

本論文において見いだされたこれらの結果は、今後太陽フレアや核融合プラズマにおいて見いだされてきた緩和現象に対して新しい物理機構を提唱するものである。これらの点を総合的に評価した結果、本論文は博士論文として十分な内容をもつと判定した。