

氏 名 尾 崎 政 男

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大乙第38号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Particle and MHD Simulations on Nonlinear
Plasma Dynamics Related to Magnetic
Reconnection

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 林 隆 也
教 授 櫻 井 隆
教 授 佐 藤 哲 也
助 教 授 中 島 徳 嘉
教 授 渡 利 徹 夫 (核融合科学研究所)

本論文は磁気リコネクションの非線形時間発展過程の計算機シミュレーションによる解析を主なテーマとしている。磁気リコネクションはプラズマの非線形エネルギー緩和過程において重要な役割を果たすと考えられているが、その基本的な物理機構にまだ未解明な点が多く残されている。本研究においては磁気リコネクション過程に関する多面的な新しい知見を得ることを目指してマクロスケール及びミクロスケールの2つの視点から課題を設定しており、従って本論文は大きく2つの部分から構成されている。

まず前半においては、太陽フレアなどのような高温プラズマにおける爆発的エネルギー解放機構の解明を念頭において、磁気リコネクションのグローバルな空間スケールでの振る舞いを3次元磁気流体シミュレーション手法にて解析している。具体的にはプラズマ対流によって振られたループ状（あるいはアーケード状）磁束の引き起こす緩和過程を調べている。他の類似の研究と比べて、モデリングにおいて周期的境界条件等の人為性を極力排しており、また非線形時間発展も格段に長い時間スケールにわたって追跡することに成功している。シミュレーションはXYZ座標のもとで直方体状の計算領域を設定し、空間3方向に差分法にて時間発展を追跡している。計算領域の底面が太陽光球面に相当するとの想定のもとに初期条件として底面に足を持つループ磁束を与えている。このループ磁束は初期条件においては真空磁場解としてラプラス方程式を解くことにより与えるものである。以後時間の発展とともに境界条件として底面上の磁束の足に対して底面上のプラズマ対流によると想定される捻りが与えられ、そのためにループ磁束に沿うアルペン波が励起されることによって磁束に沿うプラズマ電流が誘起される。このために時間とともに徐々にループ磁束全体が捻じられていくという経過をたどる。本研究においては、このように捻じりによるポインティングフラックスの注入という形で境界から連続的にエネルギーが流入するループ磁束が引き起こすエネルギー緩和現象の非線形時間発展を大規模な計算機シミュレーションによって詳細に調べている。特にこのような緩和過程の中で、エネルギー解放および磁力線のトポロジー変換において重要な役割を果たす磁気リコネクションの時間発展の振る舞いの解析を行っている。その結果、まず振られたループの基本的な振る舞いとして、ループ全体が誘起されたプラズマ電流によるフープ力によって急激に膨張することが明らかとなった。これは、これまで理論解析が行われてきた磁気浮力不安定性などの機構によらずとも、太陽対流層内のプラズマ対流運動によって捻じられた磁気束が光球表面上に浮上することができる機構を示唆するものとして注目される。そしてその後引き続き緩和現象として、ループ磁束が単独で存在するシングルループの場合には全体構造を変えるような目立った磁気リコネクションは起こらないこと、しかしループ磁束が対となって存在するツインループの場合には、二つのループ磁束の間に顕著な磁気リコネクションの発生し、それに伴って磁場構造のトポロジー変換及びエネルギー解放現象が現れることが明らかとなった。さらに興味深いことは、電気抵抗値が小さくなるほどエネルギー緩和過程にインパルスな性質が強くあらわれるという結果が得られていることである。実際の太陽のコロナ領域のプラズマはきわめて高温希薄であるためにプラズマ衝突頻度が小さく無衝突状態に近い。そのため電気抵抗値が小さくいわゆる磁気レイノルズ数が極めて大きい。数値シミュレーションは有限個数の格子点上で行われるためある程度の数値的

拡散が存在する。そのために対象とする物理的拡散が極めて小さく数値的拡散が物理的拡散を上回る場合には、その小さい物理的拡散のもとでの物理過程を正確に数値シミュレーションで模擬することは困難となる。実際の太陽の状態での電気抵抗値は極めて小さく、まさにこのような場合に相当している。そこである程度大きな物理的電気抵抗値のもとでのシミュレーション結果からの外捜で振る舞いを類推することが必要となる。このような制約の下での結果ではあるが、上に述べた傾向は、太陽コロナ領域のような高温プラズマ状態ではエネルギー緩和現象が爆発的に進行し得る可能性を示唆しており、実際の太陽フレアの爆発現象との比較の上で興味深い。さらに、電気抵抗値が小さくなるほど高速（インパルス）に磁気リコネクションが進行することは、通常 Sweet-Parker 理論的な磁気リコネクションに基づく予想とは逆の傾向である。本論文においてはこのような傾向が Sato-Hayashi が提唱した駆動型磁気リコネクションの考え方でうまく説明できることを指摘していることも注目に値する。

本論文の後半においては、磁気リコネクションにおけるよりミクロスケールな詳細構造に着目し、磁気中性面近辺に励起される波によっていわゆる異常抵抗が発生する可能性を粒子シミュレーション手法を用いて追求している。これは磁気リコネクションが無衝突プラズマ中においても磁場の X 点付近で自発的に発生する異常抵抗によって誘起される可能性を調べたものである。シミュレーションは反平行磁場構造に垂直な、磁気中性面電流を面内に含む 2 次元断面に対して行われている。特に、磁気中性面付近においては粒子軌道がいわゆるメアンダリング軌道と呼ばれる複雑なものとなるために理論的解析は一層困難なものとなる。そのため、磁気中性面付近で粒子波動結合効果によって励起される波動を非線型時間発展にいたるまで解析するためには、本研究におけるような粒子シミュレーション手法が強力な手法となる。シミュレーションの結果、これまで異常抵抗をもたらす可能性のある不安定性として理論解析が行われてきた低域混成ドリフト波とは異なる新しい種類の低周波波動が磁気中性面上に励起されることを見出し、その性質を詳細に解析している。シミュレーション結果においては低域混成ドリフト波によるより高周波の静電的ゆらぎも同時に発生しているが、これは磁気中性面からは少し離れた場所で発生することが観測される。本論文で見出した磁気中性面上の低周波波動はこの低域混成ドリフト波の非線型カップリングで形成されたものではなく、本研究において見出した新しい種類の波動であることを丁寧に論証している。またその低周波波動は磁場の揺動を伴うものであり、さらにシミュレーション結果に基づく波動の分散関係の解析においても低域混成ドリフト波とは明らかに異なっている。これらの結果から本論文は異常抵抗発生の新しい機構を提唱するものとして注目される。

論文の審査結果の要旨

論文の結果はいずれも最近 Yohkoh や Geotail 等の人工衛星で観測されているプラズマ諸現象の機構解明、さらには素過程としての磁気リコネクションの基本的性質の理解に貴重な手がかりを与え得るものである。研究の主な内容は申請者が 1994年10月から 1996年3月にわたって核融合科学研究所に常駐して得たものであり、前半、後半のいずれの内容も現時点で磁気リコネクションについての新知見を与える高い価値をもっている。後半の内容は申請者を主著者として *Physics of Plasmas*, 3, 2265(1996) に掲載されており、同じく前半の内容も申請者を主著者として *Astrophysical Journal* 誌に掲載が決まっている。

また、平成9年1月7日に審査委員5名全員出席のもと、口述形式により、出願者の論文内容、関連分野の専門的知識、及び一般的な物理学に対する理解、語学力の試験を行った。出願者は質問に対して誠実・的確に答え、物理学の基本的素養、プラズマ物理学の基礎、専門的知識を十分習得しており、研究の意義や研究内容についても良く理解していることが確認された。また、提出論文が英語で書かれていること、英文の主著論文を数編出版していることから考えて、本人の外国語に関する能力は十分であると判定した。

さらに公開発表会において、出願者は研究内容をわかりやすく説明し、質問に対する回答も適切であった。

以上のように、口述試験、公開発表の内容はいずれも十分評価に値するものであり、合格と認定した。なお申請者は、後期博士課程の単位は取得済であることを付記しておく。

以上を総合的に判断して、研究の新規性、水準は大いに評価されるべきであり、学位を授与するに充分価すると判断した。