

平成 21 年 6 月 17 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540476
 研究課題名 (和文) テアリング不安定による磁気島が磁気流体スケールのプラズモイドへ成長する過程の研究
 研究課題名 (英文) Study on evolution process of tearing mode magnetic islands toward a MHD scale plasmoid
 研究代表者
 篠原 育 (SHINOHARA IKU)
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授
 研究者番号：20301723

研究成果の概要：電磁粒子プラズマシミュレーションコードを用い、テアリング不安定による磁気島が大スケールへと融合する過程の数値実験を行った。計算規模を変えることで初期状態の磁気島の個数を変化させながら、磁気島群が大スケールに発達する様子を調べた。その結果、小スケールの磁気島融合の場合と大スケールの磁気島融合の場合の結果の差から、磁気島合体時における電子加速過程にいくつかの段階があることを明確に示すことに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	900,000	270,000	1,170,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：磁気リコネクション、テアリング不安定、プラズマ粒子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションは、磁場エネルギーをプラズマの熱・運動エネルギーへ変換したり、グローバルな磁場配位の変化を導いたりする、宇宙プラズマ現象の重要な素過程の1つである。我々はその結果生じるグローバルなプラズマ流の分布など、MHD スケールに現れる現象を正確に理解したい。しかし、宇宙空間のような無衝突プラズマ中では、磁気リコネクションのエンジン部である磁場拡散領域は、プラズマの運動論的効果に支配された極めて限られた領域の物理によって駆動されていると考えられている。したがって、電

子の運動論的な時空間スケールから、イオン運動論、MHD 流体の時空間スケールの物理が相互に強く働くシステムとして理解しなければ、磁気リコネクション現象の全体像を捉えることはできない。このような問題アプローチするには粒子効果をフルに含んだ大規模な数値シミュレーションが有効な研究手段であるが、過去には十分に MHD スケールの時空間発展までを含めるほどの計算はほとんどなされていない。それ故、磁気リコネクションの種と考えられている運動論的な時空間スケールのテアリング不安定性が、実際に MHD モデルで予測されているような磁気リ

コネクションへ発展するかどうかは、自明でない問題として残されている。

Ieda et al. (1998) によれば、GEOTAIL 衛星によって観測されたプラズモイドの平均的なサイズは $10 \text{ Re (length)} \times 40 \text{ Re (width)} \times 10 \text{ Re (height)}$ であり、プラズモイドとして同定可能な最小のものでも $\sim 4 \text{ Re}$ 程度のサイズがあるという。一方、粒子計算で扱うテアリング不安定によってできる磁気島のサイズはせいぜい \sim 数十イオン慣性長 (磁気圏尾部で $\sim 0.5 \text{ Re}$ 程度に相当) でしかない。したがって、テアリング不安定を磁気リコネクションの種と考えるならば、10 個程度の磁気島の合体を経てはじめてプラズモイドとして認識できることになる。最近、Vaivads et al. (2004) や Retino et al. (2005) など、粒子シミュレーションの結果を参照しながら Cluster-II の観測データを用いてリコネクション領域の構造を特定するような研究が出始めているが、イオン流のスピードの発達程度など、観測にはシミュレーションでは同定できない点も多く、どこまでシミュレーション結果を直接観測結果との比較に利用してよいのか、疑問点は多く残っている。このように、過去の GEOTAIL や Cluster-II のデータ解析研究からは磁気リコネクション領域周辺の構造や発達したプラズモイドの構造について同定に成功しているものの、テアリング不安定とプラズモイドを繋ぐ理論モデルがない為に、観測データがリコネクションのトリガーからプラズモイドの放出に至るまでのどの段階にあるのか、など、静的な構造の同定にとどまらず動的な発達過程の解釈を含めるレベルにまでデータ解析を進めることができていない。

以上のような状況から、テアリング磁気島が MHD スケールまで十分に発達する過程の研究を進めることによって、磁気リコネクションの観測データ研究の発展に必要な情報を提供することは急務であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、運動論的な扱いから導かれる無衝突テアリング不安定が、どのように MHD スケールの磁気リコネクションへ発展するかを明らかにすることであった。この為に、MHD 的な空間スケールのシミュレーション領域による大規模な粒子シミュレーションを実行し、無衝突テアリング不安定と MHD 磁気リコネクションの関係を明確にすることを目指した。磁気リコネクション研究は NASA MMS 計画がその中心課題として磁気リコネクション研究をあげていることもあって、世界的に盛り上がりつつある。この中で我々は磁気リコネクションのトリガーの問題を中心にこれまで研究を進めてきたが、本研究課題によって MHD スケールまでを含んだ磁気

リコネクションの発達過程を明らかにすることによって、引き続き世界をリードする成果を出していきたい。本研究課題の成果は MMS や SCOPE/Cross-Scale などの将来の磁気圏衛星観測にとっても重要な視点をもたらすものである。

3. 研究の方法

本研究計画では、大規模な粒子シミュレーションによって、無衝突テアリング不安定がどのように MHD スケールのプラズモイドへ進化していくか、を明らかにするものである。その為、シミュレーション・セットアップとして空間領域を最大限に広くとることが必須条件である。空間領域を最大化する為に 3 次元計算をすることはあきらめ、本研究計画では 2 次元計算のみを行う。利用できるメモリを最大限に使用した場合に磁気圏尾部の $5 \text{ Re} \times 4 \text{ Re}$ 程度の空間領域を扱うことができ、プラズモイドとして最小サイズではあるが、十分に MHD スケールと言える領域の計算を実行できる。磁気リコネクションの計算として、これほど空間領域の広い粒子計算を行った例は世界的にもない。時間ステップ方向には ~ 100 イオンサイクロトロン周期スケールの計算が必要になるが、実時間として 1,000 時間程度の計算で結果がでる見込みになるので、過去の実績から 4 ヶ月程度で計算結果を取得することができる。この規模の計算では物理パラメータを多く探索することは不可能であるので、計算結果のデータ解析により磁気島の進化過程を調べることが主たる作業である。

多くの過去の研究では、2 次元計算時には、初期条件として磁場擾乱を与えることによって磁気リコネクションを発生させている。しかし、この方法では初期擾乱によって最初の磁気島の発生がコントロールされてしまうので、本研究の目的には不適である。本研究課題では以下に述べる手法を用いる。まず、テアリング不安定の発生する面と垂直な電流層を支える電流を含む面内の 2 次元シミュレーションを行い、低域混成ドリフト不安定などの電流駆動型不安定の飽和状態までの計算を行う。その結果、電流層の構造は大きく変形される。この飽和状態の電流層状態を新たな初期条件としてテアリング不安定のシミュレーションを開始する。我々のこれまでの計算の結果、この手法を用いて計算した 2 次元のテアリング不安定の発達過程は、3 次元系でのテアリング不安定の時間発展を非常によく再現できることが明らかになっており、その為、最初から磁場擾乱を与える手法に比べてより 3 次元計算に近い形でテアリング不安定を素早く発生させることができる。

4. 研究成果

PIC 法による電磁粒子プラズマシミュレーションコードを用い、電流層中のテアリング不安定の結果生じる最小波長の磁気島が複数個発生できる空間規模の計算を行った。テアリング不安定によって複数の磁気島が発生した場合、テアリング不安定に引き続き磁気島の融合不安定を通して MHD スケールへ急速に発達していくことが予想できるが、融合不安定を粒子シミュレーションで扱うことはこれまでに例を見なかった計算である。

まず、これまでの研究結果で明らかになっていた高速なテアリング不安定性の成長が可能となる 3 次元計算を拡張し、テアリング不安定の線形最大成長率をもつ波長の 2 倍のシステムサイズをもつ系での計算から研究をスタートした。その結果、最初に成長する 2 つの磁気島が合体する際に、以下に述べるようにいくつかの面白い現象が発生することが明らかになった。

- (1) 2 つの磁気島の合体は早い時間スケールでおこり、およそ、最初の磁気島の成長が飽和する時間の 2 倍程度の時間で合体が完了する。
- (2) 2 つの磁気島の合体時には、合体後に 0-line を形成する領域で再リコネクションが生じる。この時、磁気島内部の電流パターンは非常に強くなり、通常 X-line 周辺に現れる磁場の四重極構造とは逆センスの磁場が生じる。
- (3) 強い電子加速が発生する。(図参照) 磁気島の合体が飽和した後に磁気島内部に蓄えられた電子のエネルギー総量は、同じサイズの磁気島を磁気島同士の合体を経ずに形成した場合に比べてかなり多いことがわかった。この結果は、磁気島の合体に伴う電子加速の効率が低いことを期待させる。

電子スペクトルの時間変化とリコネクションの成長段階との対応をつけてわかることは、被加速電子はリコネクションのトリガープロセスによる早い段階での加速と、磁気島の合体時において生成されることである。特にローレンツ因子 γ が 3 を超えるような相対論的な電子のほとんどは磁気島の合体時に発生している。これだけ大きな電子加速の原因は、X-line 周辺に発生するリコネクションの誘導電場であることが明らかになった。実際、磁気島の合体時にはリコネクションレートが ~ 0.4 にも及ぶ非常に強い電場が発生することが確認されており、被加速電子の発生との対応がとれている。以上の結果から、磁気島の合体時には 2 つの磁気島が合体することにもなう大規模な磁場構造の変化が特に X-line 周辺で顕著になるために、X-line 近傍で効率のよい電子加速が発生したことが示唆される。

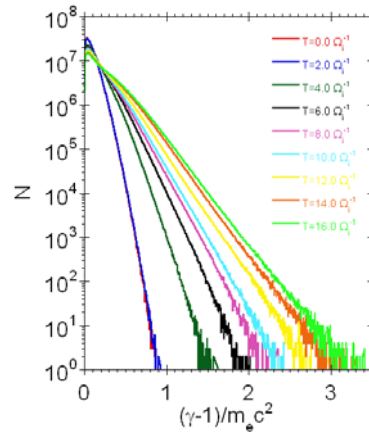


図 磁気島の合体時の電子エネルギースペクトルの時間変化

テアリング不安定の初期に現れる磁気島のサイズは、実際の地球磁気圏にあてはめても高々 ~ 0.5 RE 程度でしかない。したがって、現実の磁気圏では観測されるような大規模なプラズモイドへ発達するまでに何回もの磁気島の合体を経ていることが想像される。

そこで、次のステップとして、2 次元計算により磁気島 2~16 個までの融合不安定のシミュレーション計算結果の解析を行うことで、磁気島の融合する個数の差による大スケールに発達する様子の差異を調べた。その結果、シミュレーションシステムの最大波長まで成長する時間スケールは概ね初期磁気島の個数に比例することがわかった。初期磁気島の個数が 8 個や 16 個のケースでは、それより少ない個数の場合には 2 段階であったのに対して、3 段階の融合プロセスを経て 1 つの大きな磁気島に成長する様子が明らかになった。また、複数の磁気島が合体して大きなスケールに移行するにつれて大きな電子加速が発生することが発見された。粒子軌道の詳細な解析をおこなった結果、トランジェントに発生する大きなリコネクション電場による X-line 近傍での加速が最終的なエネルギースペクトルの決定に大きな役割を果たしていることがわかった。

粒子の軌道解析の結果、小スケールの磁気島融合のケースと大スケールの磁気島融合の差から、磁気島合体時における電子加速過程にいくつかの段階があることを明確に示すことに成功した。即ち、① X-line 近傍においてトランジェントに発生する大きな電場による加速、② 磁場パイルアップ領域における非断熱的な運動による加速、③ 磁気島合体領域における新たな磁気再結合プロセスによる加速、④ 収縮する磁気島内を高速に行き来することによるフェルミ加速、の 4 プロセスである。

以上のような本研究の成果は、磁気島融合に伴う電子加速過程が、磁気リコネクション

に伴う電子加速現象に大きく寄与している可能性を、数値シミュレーションによってはじめて示した重要なものである。今後は電子加速のみにとどまらず、更に時間発展を進めた場合のイオン加速の問題にも研究の展開が期待できる。また、科学衛星による観測的研究に対しても磁気島融合過程を捉えることの意義を示すことができたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ①篠原育、湯村翼、田中健太郎、藤本正樹、Electron acceleration via magnetic island coalescence, Proceedings of the International Conference "Future Perspectives of Space Plasma and Particles Instrumentation and International Collaboration", 印刷中、2009、査読有
- ②岡光夫、藤本正樹、中村琢磨、篠原育、Magnetic Reconnection by a Self-Retreating X Line, Physical Review Letters、101、Id 205004-205007、2008、査読有

[学会発表] (計11件)

- ①篠原育、他3名、DEMONSTRATION OF X-LINE RETREAT BY A LARGE SCALE FULL PARTICLE SIMULATION、2008 URSI XXIX general assembly、2008年8月14日、Chicago、USA
- ②篠原育、他3名、Electron Acceleration during Multiple X-line Reconnection、Asia Oceania Geosciences Society 5th annual general meeting、2008年6月17日、Busan、Korea
- ③湯村翼、篠原育、他2名、Electron Acceleration during Magnetic Reconnection with Multiple X-lines、日本地球惑星科学連合2008年大会、2008年5月25日、幕張メッセ、千葉
- ④篠原育、他3名、Electron Acceleration during Multiple X-line Reconnection、The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection 2008、2008年3月4日、沖縄
- ⑤湯村翼、篠原育、他2名、Electron acceleration during magnetic islands coalescence in magnetic reconnection、American Geophysical Union 2007 Fall Meeting、2007年12月14日、San Francisco、USA

⑥湯村翼、篠原育、他2名、磁気島合体を經由する磁気リコネクションの構造、地球電磁気・地球惑星圏学会第122回講演会、2007年9月30日、名古屋

⑦湯村翼、篠原育、他2名、磁気リコネクションでの磁気島合体における高エネルギー電子生成、地球電磁気・地球惑星圏学会第122回講演会、2007年9月28日、名古屋

⑧湯村翼、他3名、地球磁気圏尾部リコネクション領域での電子加速、日本天文学会2007年秋期年会、2007年9月26日、岐阜

⑨篠原育、他3名、Electron Acceleration during Magnetic Island Coalescence、Asia Oceania Geosciences Society 4th Annual Meeting、2007年7月31日、Bangkok、Thailand

⑩篠原育、他4名、Magnetic island coalescence in a thin current sheet、IUGG XXIV General Assembly、2007年7月3日、Perugia、Italy

⑪湯村翼、篠原育、他2名、磁気リコネクションでの電子加速に与える磁気島合体の効果、日本地球惑星科学連合2007年大会、2007年5月21日、千葉

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原 育 (SHINOHARA IKU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号：20301723

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者