

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340142

研究課題名（和文）高速磁気リコネクションの理論とサブストーム・フレア現象への応用

研究課題名（英文）Fast magnetic reconnection theory and application  
to substorms and flares

研究代表者

鵜飼正行（UGAI MASAYUKI）

愛媛大学 宇宙進化研究センター 教授

研究者番号：10036444

研究成果の概要（和文）：自発的高速磁気リコネクション理論を現実的な三次元形状に拡張し、電磁流体シミュレーションによって高速リコネクションの発展過程を調べた。この結果をフレアやサブストーム現象に応用し、フレアリングループやプラズモイドの三次元的構造を明らかにした。また、シア磁場形状におけるプラズモイド発展は、実際の衛星観測とよく一致することを実証した。更に、低ベータでフォースフリー磁場形状における高速リコネクション発展は、爆発的フレアエクспанションや顕著なコロナ加熱を説明しうることを示した。

研究成果の概要（英文）：The spontaneous fast reconnection model is extended to general three-dimensional situations, and the physical mechanism of fast reconnection evolution is studied by MHD simulations. The results are applied to flares and substorms, and the 3D structures of flaring loops and plasmoids are clarified. It is demonstrated that the plasmoid propagation in sheared fields is in good agreement with satellite observations; also, the fast reconnection evolution in low-beta plasmas in initially force-free current sheets is responsible for explosive flaring expansion and remarkable coronal heating.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 3,400,000  | 1,020,000 | 4,420,000  |
| 2010年度 | 4,000,000  | 1,200,000 | 5,200,000  |
| 2011年度 | 2,700,000  | 810,000   | 3,510,000  |
| 2012年度 | 2,700,000  | 810,000   | 3,510,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 12,800,000 | 3,840,000 | 16,640,000 |

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：宇宙プラズマ、磁気リコネクション、電磁流体、磁気圏サブストーム、太陽フレア、プラズモイド、コロナ加熱

## 1. 研究開始当初の背景

太陽フレアや地球磁気圏サブストーム現象に磁気リコネクション過程が基本的であることは観測的にも知られていたが、磁気リコネクションが爆発的に発展する物理機構について理論的論争があった。その当時、広く支持されていた理論モデルは、プラズマの微視的効果である Hall 効果がリコネクションの発展に重要であるというものであった。一方、我々が提唱する自発的高速磁気リコネクションモデルでは、磁気中性点近傍の実質的プラズマ散逸機構(電気抵抗)と巨視的リコネクション流との正帰還が本質的である。これは Hall リコネクションモデルと基本的考えが全く異なるものである。

衛星観測の解釈も多くの場合、Hall リコネクションモデルや直観的リコネクション概念図を基礎に考えられた。例えば、地球磁気圏テール領域で観測されるプラズモイドは、テールプラズマシートで同時に発生する複数のリコネクションの結果生じるものと解釈された。その結果、プラズモイド内部の磁場はヘリカル状になっていると考えられ、フラックスロップと呼ばれた。しかしながら、Hall リコネクションモデルでは、フラックスロップが成長し伝搬する物理機構を実証することはできなかった。

太陽フレア現象に対しては、コロナの磁場形状が直接には測定できないため、多くの場合、リコネクションの概念図を基に直観的に説明されてきた。従って、フレアリング磁気ループの三次元構造やループ根元領域のツーリボン加熱などの物理機構の定量的解析は未解決であった。特に、大規模フレアが発生するフォースフリー磁場形状での高速リコネクションの発展機構やコロナプラズマの効率的な加熱機構を、精密な計算に基づいて解明することが重要な課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙プラズマ現象の長年の基本的問題である地球磁気圏サブストームや太陽フレアなどの爆発現象を、理論的に解明することである。そのために、自発的高速磁気リコネクションモデルという独自の理論モデルを提唱し、その基礎物理機構が爆発的磁気エネルギー変換を生じることを実証する。更に、太陽コロナや地球磁気圏プラズマの現実的三次元形状やパラメータを用い、フレア現象を説明しうるような磁気エネルギー変換が可能な条件を見出す。

次の段階として、実際の地球磁気圏や太陽コロナのプラズマパラメータを用いて自発的高速磁気リコネクションモデルを応用し、衛星観測結果と詳しく比較することによりその有効性を実証する。まず、地球磁気圏テール領域で古くからよく知られ、磁気圏サブ

ストーム現象に最も基本的なプラズマ過程であるプラズモイドのダイナミクスを解明し、実際の衛星観測データと比較検討する。このことにより、複雑なサブストーム現象の発展機構の基礎物理が明らかとなる。更に、サブストームに伴い観測されるカレントウェッジやPi2などの低周波の波動現象の物理機構を解明する。

太陽フレア現象はその場観測はできないので観測データとの詳細な比較はできない。したがって、フレア現象のよく知られた全体的描像を我々の理論モデルによって説明することを目的とする。まず、太陽フレアに伴って観測されるフレアリング磁気ループの三次元構造を解明する。特にその時間的発展を三次元 MHD シミュレーションによって実証する。また、磁気ループの発展とともに形成される磁気ループ根元領域におけるツーリボン加熱の物理機構を解明する。更に、フォースフリー磁場での高速リコネクションの発展機構を実証することにより、大規模フレアの物理機構を解明する。特に、局所的に始まったフレアがどのように爆発的にコロナ領域に広がっていくかを解明する。更に、長年の課題であったコロナプラズマの加熱機構を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

主に電磁流体シミュレーションという手段を用いてフレア現象の物理機構を研究する。現在まで主に二次元電磁流体シミュレーションが主であった。また、三次元シミュレーションは、初期的にシアがなく対称性を持った最も簡単な状況を設定していた。本研究では太陽フレアや磁気圏サブストームのより現実的なパラメータや三次元状況を設定したモデルを設計した。その場合、従来の面対称境界条件を設定できないので、計算結果を実際の観測データに応用するためには多くの計算時間とメモリを必要とし、並列計算のためのスーパーコンピューティングアルゴリズム設計が必要であった。

具体的には、まず太陽フレアの発生にともなう磁気ループの三次元的構造を調べるため、太陽表面彩層では高密度のプラズマ領域を設定し、シミュレーションを実行した。次に、現実的コロナ磁場や磁気圏磁場形状のモデルを設定するため、初期的にシアが存在する形状を考えた。この場合、点対称境界条件が必要となり、従来の面対称の場合に比べて2倍以上の計算領域が必要となった。即ち、従来に比べてより現実に近い複雑なシミュレーションモデルを設計し、実際の衛星観測結果と直接比較できるように工夫した。

## 4. 研究成果

まず、初期的に磁気シアがない場合の三次

元モデルにおいてフレアリング磁気ループ構造の時間発展を調べた。その結果、ループ根元に向かってカレントウェッジが形成されること、これは高速磁気リコネクションジェットがループに衝突することにより生じる発電機電流回路の結果生じることを実証した。その結果、ループ根元の高密度領域にツリーボム状の加熱領域が生じることを示した(文献 19, 18)。また、三次元的な高速磁気リコネクションジェットがもたらすプラズマ量や磁場の時間的・空間的変化は太陽フレアや磁気圏サブストームの衛星観測データと基本的に一致することを実証した(文献 17, 16, 15, 14, 13, 12, 7)。特に、サブストームの発生に伴って観測される低周波波動が、リコネクションジェットと磁気ループとの相互作用の結果生じる電磁流体定在波であることを提案した(文献 11)。

次に、初期的電流シート形状にシア磁場が存在する、より現実的な三次元電磁流体モデルを実行した。まず、シア磁場が高速磁気リコネクション機構の発展過程にどのように影響を与えるかについて、一般的にその基礎物理を調べた(文献 10)。特に、太陽フレアで重要となるフォースフリー磁場における高速磁気リコネクションの形状を調べ、シア磁場が大きくなるほどリコネクション発展の条件が厳しくなることを見出した(文献 9)。次に、この結果をサブストームに最も基本的なプラズモイド現象に応用し、従来考えられてきたプラズモイドの構造とは(特に磁場構造が)全く違ったものであることを指摘した(文献 8, 6)。実際、詳細な衛星観測結果は我々の理論モデルによって正確に説明できることを実証した(文献 4)。更に、フォースフリー磁場中での高速リコネクション発展は、フレアエクспанションやコロナ加熱を説明できることを示した(文献 5, 3)。

最後に、我々が提唱する自発的高速磁気リコネクションモデルが宇宙プラズマ中で発展するための物理条件を詳しく総括するとともに、それが太陽フレアや地球磁気圏サブストーム現象にどのように応用できるかを総括した。まず、基本的に無衝突の宇宙プラズマで高速磁気リコネクションが急激に発展するためには局在化した電流駆動型異常電気抵抗が必要であることを示し、この結果を得るためには(人工的)数値散逸効果を充分小さくすることが重要であることを指摘した(文献 2)。また、サブストーム現象に最も基本的で詳細な衛星観測が得られているプラズモイド伝搬に応用し、定性的にも定量的にも観測結果を説明しうることを示した(文献 1)。以上のように、本研究期間中、宇宙プラズマ爆発現象を説明しうる高速磁気リコネクションの基礎理論を確立するとともに、太陽フレアや磁気圏サブストーム現象

の物理機構を解明することに成功した。

## 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 19 件)

1. M. Ugai, Propagation of plasmoids generated by fast reconnection in the geomagnetic tail, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 査読有, **99**, 2013, 47-52; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.015>.
2. M. Ugai, Physical conditions for fast reconnection evolution in space plasmas, Phys. Plasmas, 査読有, **19**, 2012, 072315; doi: 10.1063/1.4739286.
3. M. Ugai, Plasma-beta dependence of the fast reconnection mechanism in an initially force-free current sheet, Phys. Plasmas, 査読有, **18**, 2011, 102903; doi: 10.1063/1.3655449.
4. M. Ugai, Virtual satellite observations of plasmoids generated by fast reconnection in the geomagnetic tail, Ann. Geophys., 査読有, **29**, 2011, 1411-1422; doi:10.5194/angeo-29-1411-2011.
5. M. Ugai, Structure and dynamics of the fast reconnection mechanism in an initially force-free current sheet, Phys. Plasmas, 査読有, **18**, 2011, 032304; doi:10.1063/1.3567541.
6. M. Ugai, The structure and dynamics of a large-scale plasmoid generated by fast reconnection in the geomagnetic

- tail, Ann. Geophys. 査読有, **29**, 2011, 147-156;  
doi:10.5194/angeo-29-147-2011.
7. K. Kondoh, M. Ugai and T. Shimizu, Multi-point observations of earthward fast flow in the plasma sheet by virtual satellites located in the MHD simulation, Adv. Space Res., 査読有, **48**, 2011, 287-291;  
doi:10.1016/j.asr.2011.03.025.
  8. M. Ugai, Magnetic field structure of large-scale plasmoid generated by the fast reconnection mechanism in a sheared current sheet, Ann. Geophys., 査読有, **28**, 2010, 1511-1521;  
doi:10.5194/angeo-28-1511-2010.
  9. M. Ugai, Three-dimensional evolution of the fast reconnection mechanism in a force-free current sheet, Phys. Plasmas, 査読有, **17**, 2010, 06291;  
doi:10.1063/1.3431097.
  10. M. Ugai, Three-dimensional evolution of the fast reconnection mechanism in a sheared current sheet, Phys. Plasmas, 査読有, **17**, 2010, 032313;  
doi:10.1063/1.3369886.
  11. M. Ugai, Impulsive magnetic pulsations and electrojets in the loop footpoint driven by the fast reconnection mechanism, Phys. Plasmas, 査読有, **16**, 2009, 112902; doi:10.1063/1.3267869.
  12. T. Shimizu, K. Kondoh, M. Ugai, K. Shibata, Magnetohydrodynamic study of three-dimensional fast magnetic reconnection for intermittent snake-like downflows in solar flares, Astrophys. J. 査読有, **707**, 420-427, 2009; doi:10.1088/0004-637X/707/1/420
  13. M. Ugai, Fast reconnection evolution in an arcade-like magnetic loop structure, Phys. Plasmas, 査読有, **16**, 2009, 062312; doi: 10.1063/1.3158949.
  14. T. Shimizu, K. Kondoh, K. Shibata and M. Ugai, MHD study for three-dimensional instability of the spontaneous fast magnetic reconnection, Phys. Plasmas, 査読有, **16**, 2009, 052903; doi:10.1063/1.3095562.
  15. K. Kondoh and M. Ugai, Three-dimensional earthward fast flow in the near-Earth plasma sheet in a sheared field: Comparisons between simulations and observations, Ann. Geophys. 査読有, **27**, 2009, 2297-2302.
  16. K. Kondoh, M. Ugai and T. Shimizu, Three dimensional configuration of earthward fast plasma flow in the near-Earth plasma sheet, Earth Planets Space, 査読有, **61**, 2009, 611-614.
  17. T. Shimizu, K. Kondoh and M. Ugai, Three dimensional nonlinear instability of the spontaneous fast magnetic reconnection, Earth Planets Space, 査読有, **61**, 2009, 569-572.
  18. M. Ugai, K. Kondoh and T. Shimizu,

Modeling of substorms and flares by the fast reconnection mechanism, Earth Planets Space, 査読有, **61**, 2009, 561-564.

19. M. Ugai, Evolution of the current wedge and the generator current circuit by fast reconnection, Phys. Plasmas, 査読有, **16**, 2009, 012901; doi: 10.1063/1.3055598.

[学会発表] (計2件)

1. M. Ugai, Magnetic structure within plasmoids, International Conference on Earth Sun System Exploration: Variability in Space Plasma Phenomena, Hawaii, USA, 2011. (invited).
2. M. Ugai, Evolution of the fast reconnection mechanism in space plasmas, West Lake International Symposium on Space Plasma Physics, Hangzhou, P. R. China, 2010. (invited)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鵜飼正行 (UGAI MASAYUKI)

愛媛大学 宇宙進化研究センター 教授

研究者番号 : 10036444

### (2) 研究分担者

清水 徹 (SHIMIZU TORU)

愛媛大学 宇宙進化研究センター 准教授

研究者番号 : 60196524

近藤光志 (KONDO KOJI)

愛媛大学 宇宙進化研究センター 助教

研究者番号 : 30304653