

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740130

研究課題名(和文)電磁流体・電離非平衡計算コードの開発

研究課題名(英文)Development of MHD code coupled with time-dependent ionization

## 研究代表者

今田 晋亮(Shinsuke, Imada)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：40547965

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：電磁流体・電離非平衡を計算するコードの開発をおこなった。この計算コードを用いて、太陽観測との比較研究を行った。太陽フレアにおける磁気リコネクション領域周辺の研究、フレア時の彩層蒸発流の研究などを行った。結果として、太陽フレア時に理論的に予測されている高温・高速流が観測で見つからない事や、フレアの彩層蒸発時に観測される数百万度プラズマの下降流等、これまで説明できなかった現象を電磁流体に合わせて電離過程をも考察する事で説明できる事を明らかにした。本研究課題で開発した電磁流体・電離非平衡計算コードは、熱的非平衡プラズマという重要な視点を与え、新しい太陽物理学の方向性を切り開いた。

研究成果の概要(英文)：We have developed MHD code coupled with time-dependent ionization. We have studied the flare related phenomenon, such as magnetic reconnection and chromospheric evaporation with our developed code. We found that the some observational facts which could not be interpreted by usual MHD simulation can be clarify with our numerical clacuration. The view point of Thermal non-equilibrium plasma is very new in the category of solar physics. Our MHD code coupled with time-dependent ionization can open the new window in solar physics.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽 プラズマ 電磁流体力学 電離非平衡

### 1. 研究開始当初の背景

太陽大気ダイナミクスを理解するために観測及び数値計算を用いた研究は非常に有効である。これまで、それぞれ目覚ましい進歩をとげ、太陽フレア、コロナ加熱をはじめ様々な太陽物理の問題解明に貢献してきた。

太陽コロナは非常に高温・希薄なプラズマであり、無衝突プラズマ状態であると考えられている。無衝突プラズマでは粒子間でのクーロン衝突による運動量交換が非常に長いタイムスケールで行われるため、熱的に非平衡状態になる。太陽コロナでは現象によっては空間スケールがクーロン衝突のスケールと同程度になりうる。そのため熱的に平衡・非平衡性の両者を兼ね備えたプラズマと言える。熱的非平衡プラズマは大きく分けて(1)非Maxwellianエネルギー分布関数、(2)粒子種間での温度非平衡、(3)電離非平衡、(4)化学反応非平衡、の4つが考えられる。近年(3)の重要性も太陽コロナにおいて着目され、実験室プラズマとの連携の下に、活発に議論されるようになった。特に、コロナ中で起こる短時間で加熱・加速現象では、ダイナミカルなタイムスケールと電離のタイムスケールが同程度となり、電離非平衡の考察が必須であると考えられる。近年、数値計算コードや観測手法など様々な観点から、プラズマの電離非平衡について研究が進められている。

### 2. 研究の目的

太陽大気ダイナミクス(例えばコロナ加熱問題など)を理解するために、観測結果と数値計算シミュレーションを比較し議論する事は非常に有用である。しかし、多くの研究は双方を定性的に比較するにとどまっている。定量的な比較研究まで発展できない理由の一つに、密度や温度等の物理量と合わせて輝線放射量を求めるためには電離仮過程を計算する必要が挙げられる。そこで、本研究では、観測と数値シミュレーションを直接比較するために電離過程を計算コードの開発を行う。

### 3. 研究の方法

太陽コロナ中で急激な加熱現象を理解するため、電離非平衡シミュレーションコードの開発を行う。計算コードは大きく3つのパートに分かれていて、それぞれ電離計算、流体・電離非平衡計算、輻射計算からなる。電離非平衡計算コードの電離非平衡計算部分は既存の公開コード(CANS)を使う。また輻射計算も既存の公開コードCHIANTIを元に作成したものを用いる。また数値計算結果と比較する観測結果の解析も行う。特に、ひので衛星に搭載されている極端紫外線撮像分光装置(EIS)を用いて、コロナ加熱や太陽フレアといった短い時間で起こるダイナミカルな

現象のデータを解析する。

### 4. 研究成果

電離非平衡を計算するコードの開発に成功した。この電離非平衡計算コード及び太陽観測、両者の比較研究を行った。科学課題として、太陽フレアにおける磁気リコネクション領域周辺の観測計算結果の比較研究、フレア時の彩層蒸発流の観測計算結果の比較研究などを行った。

具体的には、磁気リコネクション領域周辺の研究として、2012年1月27日に西のリムで起こったX-ClassフレアのEIS観測と電離計算の比較研究を行った。このフレアは初めてEISが観測したリムで起こったX-Classフレアである。高温フレアループの直上の光量の非常に弱い領域で非常に速い成分(レッドシフト、またはブルーシフトで500 km/sec程度)がFeXXIV(数千万度)のラインで観測された。これまでEISは数々のフレアを観測してきたが、スタンダードフレアモデルで予言されている、磁気リコネクションによって生じるはずの高温(数千万度)かつ高速(1000 km/sec程度)の成分が観測される事はきわめてまれである。この一つの理由は磁気リコネクションのタイムスケール(Alfven time scale ~ a few ten second)が電離のタイムスケールより短く、そのため電離非平衡状態になり、これまで考えられてきた輝線で十分な光を放出できないことが観測と電離計算の比較によりわかった。

また、フレアの彩層蒸発に関しても同様に比較研究を行った。EIS観測から、フレアの非常に初期に、数百万度プラズマが数10 km/sec程度で下降流(通常は数十万度プラズマのみ下降流)を示すことが明らかになった。しかし、これまでの数値計算では、数百万度の下降流を作ることは非常に難しく、議論が続いていた。今回、開発したコードを用いて、電離非平衡と熱伝導の飽和の2つの要素を取り入れて計算を行ったところ、見事に数百万度プラズマの下降流を作ることに成功した。

以上のように、本研究で開発した電離非平衡シミュレーションコードは、熱的非平衡プラズマという重要な視点を与え、新しい太陽物理学の方向性を切り開いた。

### 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11件)

1. Asgari-Targhi, M., J.T. Schmelz, and S. Imada, Modeling of Hot Plasma in the Solar Active Region Core, *Astrophys. J.*, accepted, 2015. 査読有

2. Imada, S., Y. Bamba, and K. Kusano, Coronal Behavior Before the Large Flare Onset, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, S17, 2014. 査読有
  3. Bamba, Y., K. Kusano, S. Imada, and Y. Iida, Comparison between Hinode/SOT and SDO/HMI, AIA Data for the Study of the Solar Flare Trigger Process, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, S16, 2014. 査読有
  4. Toriumi, S., Y. Iida, K. Kusano, Y. Bamba, and S. Imada, Formation of a Flare-Productive Active Region: Observation and Numerical Simulation of NOAA AR 11158, Solar Physics, 289, 3351, 2014. 査読有
  5. Asgari-Targhi, M., A.A. van Ballegoijen, and S. Imada, Comparison of Extreme Ultraviolet Imaging Spectrometer Observations of Solar Coronal Loops with Alfvén Wave Turbulence Models, Astrophys. J., 786, 28, 2014. 査読有
  6. Lee, K.-S., S. Imada, Y.-J. Moon, and J.-Y. Lee, Spectroscopic Study of a Dark Lane and a Cool Loop in a Solar Limb Active Region by Hinode/EIS, Astrophys. J., 780, 177, 2014. 査読有
  7. Suzuki, T. K., S. Imada, R. Kataoka, Y. Kato, T. Matsumoto, H. Miyahara, and S. Tsuneta, Saturation of Stellar Winds from Young Suns, Publ. Astron. Soc. Japan, 65, 98, 2013. 査読有
  8. Imada, S., K. Aoki, H. Hara, T. Watanabe, L. K. Harra, and T. Shimizu, Evidence for Hot Fast Flow above a Solar Flare, Astrophys. J. Lett., 776, L11, 2013. 査読有
  9. Kawate, T., and S. Imada, The Relationship Between EUV Nonthermal Line Broadening and High-energy Particle During Solar Flare, Astrophys. J., 775, 122, 2013. 査読有
  10. Sakao, T., N. Narukage, M. Shimojo, K. Watanabe, Y. Suematsu, S. Imada, and S. Ishikawa, The soft x-ray photon-counting spectroscopic imager for the sun, Proc. SPIE, 8862, 88620T, 2013. 査読無
  11. Toriumi, S., Y. Iida, Y. Bamba, K. Kusano, S. Imada, and S. Inoue, The Magnetic Systems Triggering the M6.6-class Solar Flare in NOAA Active Region 11158, Astrophys. J., 773, 128, 2013. 査読有
- 〔学会発表〕(計 18 件)
1. 今田晋亮、村上泉、渡邊鉄哉、彩層蒸発の観測と電離非平衡計算の比較研究、日本天文学会春季年会、2015年03月18日、大阪大学、大阪
  2. Imada S., Hirai M., Hoshino M., Favorable condition for energetic ion and electron acceleration during magnetic reconnection, ICS 12<sup>th</sup>, 2014年11月11日, Ise, Mie
  3. Imada S., Murakami I., Watanabe T., Comparative Study of Hinode/EIS Spectroscopic Observation and Ionization Non-equilibrium Calculation of Chromospheric Evaporation, 2014 LWS/Hinode/IRIS Workshop, 2014年01月02日, Portland, Oregon
  4. 今田晋亮, Solar-C で探る磁気リコネクションの物理, 日本天文学会秋季年会, 2014年09月13日, 山形大学、山形
  5. Imada S., Comparative Study of Hinode/EIS Spectroscopic Observation and Non-equilibrium Ionization calculation of Hot Fast Flow Above a Solar Flare Arcade, AOGS 11th meeting, 2014年07月30日, 札幌、北海道
  6. Imada S., Chromospheric evaporation during solar flare: Non-equilibrium Ionization calculation, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, 2014年05月22日, 東京大学、東京
  7. 今田晋亮、村上泉、渡邊鉄哉、彩層蒸発の電離非平衡計算, 日本天文学会春季年

- 会, 2014年03月21日, ICU、東京
8. Imada S., Bamba Y., Kusano K., Coronal Signatures before the Large Flare Onset, CAWSES II, 2013年11月19日, 名古屋大学、愛知
  9. Imada S., Bamba Y., Kusano K., Coronal Behaviors before the Large Flare Onset, Hinode 7, 2013年11月14日, 高山、岐阜
  10. 今田晋亮、平井真理子、星野真弘、向井利典, 磁気リコネクションにおける高エネルギー電子観測が起きやすい条件, SGPSS, 2013年11月03日, 高知大学、高知
  11. 今田晋亮、片岡龍峰、鈴木建、宮原ひろ子、常田佐久, 天文学的視点から見た Faint Young Sun Paradox, 日本天文学会秋季年会, 2013年09月10日, 東北大学、宮城
  12. Imada S., Murakami I., Watanabe T., Hara H., Shimizu T., Kamio S., Inomoto M., and Ono Y., Radiation from Magnetic Reconnection Region: Corona & Lab. Plasma, IPELS, 2013年07月04日, Hakuba, Nagano
  13. 今田晋亮、片岡龍峰、鈴木建、宮原ひろ子、常田佐久, Faint Young Sun Paradoxへの天文学的アプローチ, JPGU, 2013年05月18日, 幕張メッセ、千葉
  14. 今田晋亮、平井真理子、磯部洋明、渡邊恭子、岡光夫、蓑島敬, 地球磁気圏尾部及び大洋コロナにおける粒子加速の比較研究, JPGU, 2013年05月18日, 幕張メッセ、千葉
  15. Imada, S., Energetic particles in the Earth's magnetotail observed by GEOTAIL, GEOTAIL 20th Anniversary Workshop, 2012年11月12日, Tokyo Institute of Technology, Tokyo
  16. 今田晋亮、青木邦哉、原弘久、渡邊鉄哉、Harra L. K., 清水敏文, リムXクラスフレアにおけるEISで観測した高速流, 2012年日本天文学会秋期年会, 2012年09月21日, 大分大学、大分
  17. Imada S., and Zweibel E. G., Self-organization of Reconnecting Plasmas to a Marginally Collisionless State, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection 2012, 2012年05月25日, Univ. Princeton, Princeton
  18. Imada S., Aoki K., Hara H., Watanabe T., Harra L. K., and Shimizu T., High-Speed Plasma Flows Observed by EIS During X-class Limb Flare, Hinode 6th Meeting, 2012年08月14日, Univ. St. Andrews, Scotland

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 取得年月日:  
 国内外の別:

〔その他〕  
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今田 晋亮 (IMADA, Shinsuke)  
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教  
 研究者番号: 40547965

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: