

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740132

研究課題名(和文) 3次元太陽フレア数値シミュレーションによる粒子加速モデリング

研究課題名(英文) Three-Dimensional Numerical Modeling of Particle Accelerations in Solar Flares

研究代表者

西塚 直人 (Nishizuka, Naoto)

独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・研究員

研究者番号：10578933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：太陽フレアに伴う粒子加速数値モデリングを行った。我々は太陽フレア噴出を高分解能3次元磁気流体シミュレーションで再現し、3次元非定常な磁気リコネクションと電流シートの乱流構造、そしてその中の小さなプラズモイド生成を解明した。小さなプラズモイドの運動は局所的に電場を強め、粒子を加速する。またグローバルな磁束管噴出速度の変化も粒子加速に影響する。テスト粒子計算で乱流電流シート内の加速過程や、噴出磁束管中を伝わりながらの加速過程を発見した。また磁気リコネクションのフラクタル性により幂分布スペクトルを自然に説明できることを示した。さらに電波観測と比較し、数値モデルの検証を行った。

研究成果の概要(英文)：We performed a numerical modeling of particles acceleration in solar flares. We performed high resolution 3D magnetohydrodynamic simulation of solar flares, where unsteady patchy reconnection and turbulent structure of a current sheet with small plasmoids are reproduced. The ejections of both small scale and large scale plasmoids affect particle acceleration, by enhancing electric field both in micro and global scales. We found test particles accelerated in a turbulent current sheet, and also in an erupting flux rope. We also theoretically showed that the power-law distribution of energy spectrum of particles can be naturally explained by the fractal of magnetic reconnection. Finally we compared our simulation results with solar radio observations.

研究分野：太陽プラズマ物理

キーワード：太陽フレア 粒子加速 数値シミュレーション プラズマ 磁気リコネクション X線観測 電波観測

### 1. 研究開始当初の背景

太陽粒子加速をめぐる問題点は、加速領域が希薄で X 線を放射せず、直接観測が困難なことである。そのため、どこでどのように粒子が加速しているのか、場所も加速機構も十分に解明されていない。またラーマー半径と太陽フレアとの 7 桁ものスケールギャップが、理論的アプローチを困難にもしている。

これまでの太陽粒子加速モデリングでは定常かつ 2 次元的な場の中で行われていたため、奥行き方向に無限に粒子加速が起こる問題があった。一方で観測的にも、フレアに伴う硬 X 線源や電波・可視光源の 3 次元分布と間欠性が示されており、より現実的な 3 次元シミュレーションの必要性が高い。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽フレアに伴う粒子加速機構を基礎物理的観点から解明することである。太陽粒子加速現象は非定常で 3 次元性が重要であることが観測的に明らかになりつつある。しかしながら、これらを考慮した太陽粒子加速数値モデリングは進んでおらず急務である。

本研究では 3 次元磁気流体シミュレーションとテスト粒子計算とによる太陽粒子加速の新しい数値モデリングにより、太陽フレアの非定常 3 次元グローバルダイナミクスと粒子加速との関連を解明する太陽フレア統一モデルの確立を目指す。特に高分解能計算によって 3 次元電流シート中に生成される小さなプラズモイドを計算し、それらの噴出や衝突によって増幅された電場や生じた衝撃波による加速機構に着目する。さらに、大きな磁束管の噴出が電流シート内の加速機構に与える影響も明らかにする。こうした非定常な大域的な場の中で、テスト粒子がどのように統計的に加速されるのか解明する。

### 3. 研究の方法

本研究では、太陽フレア中で起こる非定常磁気リコネクションを 3 次元磁気流体シミュレーションによって再現し、さらにテスト粒子シミュレーションを行うことで、非定常性で生じるプラズモイド噴出やマルチ衝撃波に伴う統計的(多段階)粒子加速について解析する。粒子は陽子、電子それぞれの加速過程について別々に計算し、短時間における加速過程と、磁気ループ捕捉を考慮した長期変動過程と両方を調べる。得られた粒子のエネルギースペクトルや 3 次元速度分布の計算結果を衛星・地上観測データと比較検討し、太陽フレア・3 次元非定常磁気リコネクション中の粒子加速過程について理論観測の両面から総合的理解を目指す。

### 4. 研究成果

(1) 3 次元磁気流体(MHD)シミュレーションによる非定常 3 次元太陽フレア・磁気リコネクションのシミュレーションコード開発を行い、太陽フレア中の 3 次元電流シート形成と磁束管噴出のダイナミクスのシミュレーションを再現した(下図 1)。

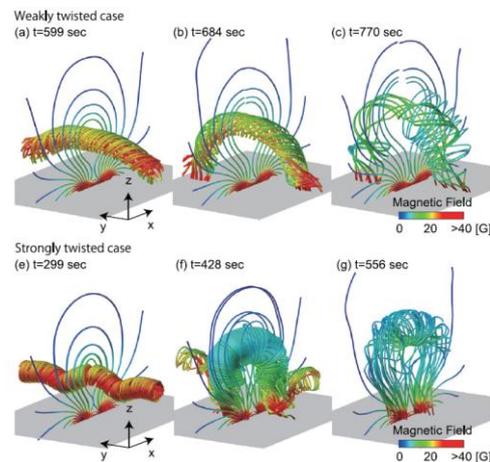


図 1: 太陽フレア磁束管噴出の 3 次元 MHD シミュレーションの時間発展(磁束管の捩れが強いケース(a-c)と弱いケース(e-g))

平衡かつ不安定な条件化の水平磁束管に擾乱を与えることでシミュレーションを開始し、磁束管は浮上を始めた。噴出磁束管は周囲の磁場を取り込みつつ自ら捩れながら(キンク不安定)噴出し、かつ磁束管下部にも電流シートを形成する(図 2)。この電流シートでは非定常な磁気リコネクションがパッチーに発生し、複数の X 点が形成された。そしてそれによって、小さな磁束管(プラズモイド)も複数形成された。



図 2: 電流シート中に形成された複数のプラズモイド(白枠)と、その上下で強められた電場(ピンク表面)。線は磁力線、色は磁場強度。

これらのプラズモイドは上下に噴出運動と合体を繰り返す。その際に局所的、かつ完結的に電場を強める(図 3)。同様にフレアのグローバルな磁束管噴出も、電流シート内の電場をグローバルに増加させる。特に磁束管の捩れが強い際には、不安定性によって噴出現象は加速され、電場もより大きく強められる。従って、電流シート中ではグローバルな磁束

管噴出とマイクロなプラズモイド噴出とによって、長時間かけてグローバルに、短時間で間欠的かつ局所的に、の両時間空間スケールで電場が強められ、粒子加速に影響しうることが示された。

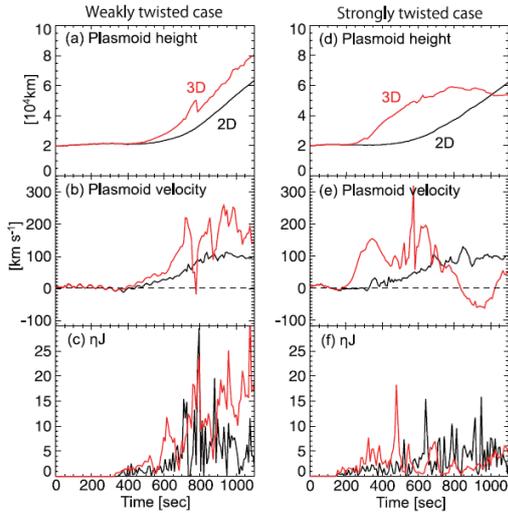


図3: 磁束管噴出に伴う電場(リコネクションレート)の増強の時間変化(磁束管の振れが弱い場合(左列)と強い場合(右列))

(2) 次にテスト粒子シミュレーションを行い、3次元MHDシミュレーションによって求めた電場と磁場による注入粒子の加速過程を調べた。粒子は乱流的な電流シート中の複数のX点で間欠的に複数回の加速(多段階加速)を繰り返したり、ループトップの衝撃波で加速されたりした(図4)。さらに加速によりピッチ角が小さくなると、フレア磁気ループの2つの足元に落下した。

一方で電流シートから上方に抜け出す粒子があり、それらは噴出磁束管の螺旋状ループに沿って伝播して、離れた磁気ループ上空のX点に到達した。磁束管中を伝播する際、粒子は磁束管の曲率形状による曲率ドリフト加速や、磁束管自身の加速の影響を受けた。また、別のX点到達後、粒子はそのループ足元に落下した。これにより、太陽フレアで観測されるペアのフレア輝点の他に、隔たった位置に同時に観測されるフレア輝点も説明できることが示された。

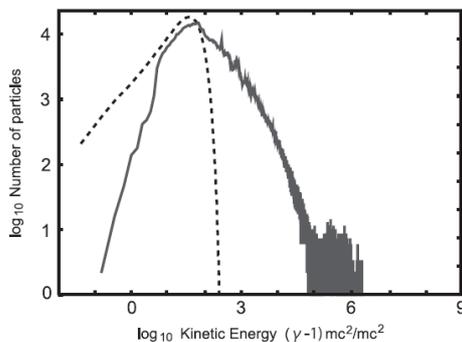


図4: テスト粒子計算によるエネルギースペクトル(加速前(点線)と加速後(実線))

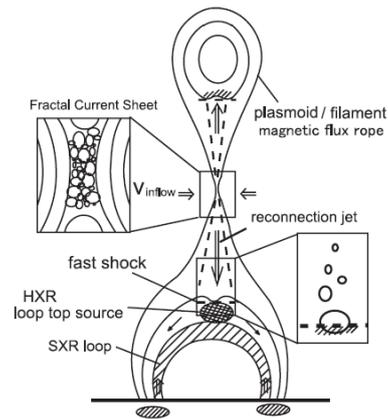


図5: 太陽フレア中のフラクタル磁気リコネクション(複数プラズモイド生成)と粒子加速のシナリオ図

以上の数値シミュレーション結果から、2次元だけでなく3次元MHDシミュレーションでも電流シート内に小さなプラズモイドが複数形成され、それが間欠的なりコネクション率(電場)の増加と激しい粒子加速につながることを示された。それらを元に、太陽フレアの新しい粒子加速モデルとして、図5のように、磁気リコネクションのフラクタル性と粒子加速が結合した新モデルを提案した。この時、フラクタル的に大小様々なスケールのプラズモイドが形成されると、各プラズモイドの周囲で加速された粒子のエネルギースペクトルが重ねあわされて我々の観測するX線や高エネルギー粒子の冪分布を自然と説明できることを示すことに成功した。

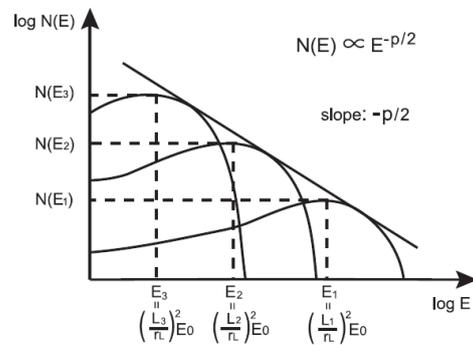


図6: 磁気リコネクション(プラズモイド)のフラクタル性を仮定した時のエネルギースペクトルの重ね合わせによる冪分布

(3) 研究代表者は本研究期間に、太陽電波観測で有名なチェコ共和国のオンドレヨフ観測所に3ヶ月滞在し、数値シミュレーション結果と電波観測との比較研究を行った。

同観測所の受入教員(共同研究者)のKarlicky教授は電波スペクトル観測によって複数プラズモイド噴出の証拠を発見した第一人者であり、かつKarlicky教授とBarta研究員は数値シミュレーションによるプラズモイド形成と粒子加速の研究も行っている。同観測所で観測保存された10年分の電波データを用い、シミュレーションとの比較を行った。

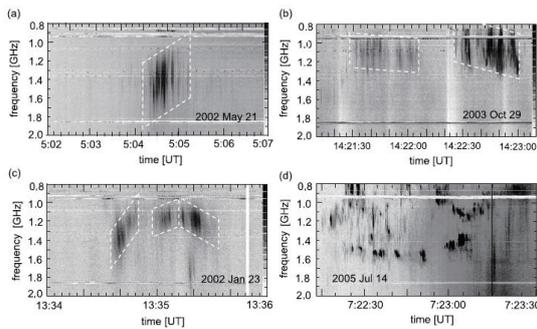


図7: 太陽電波スペクトル観測によるプラズモイド噴出(ドリフト・パルス構造)の4種類への分類(単一・複数の単調周波数シフトイベント、加速周波数シフトイベント、単複混合の複雑イベント)

電波スペクトル周波数は、粒子周りのプラズマ密度によって変化するため、複数プラズモイド噴出はドリフト・パルス構造として観測される。2002年から2012年の11年間で106例のイベントを発見した(図7)。途中で周波数シフト率が変化するものが多く、これはプラズモイドが途中で加速(もしくは減速)されていることを意味する。この際に硬X線放射も同期して観測され(図8)、数値シミュレーションで示された結果と同様、間欠的なプラズモイドの形成と噴出は、磁気リコネクションの非定常なダイナミクスを誘導し、一時的にエネルギー解放の速さを促進、粒子加速にとって有効である可能性を示した。

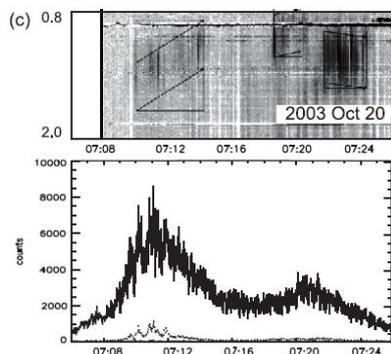


図8:電波スペクトル観測によるプラズモイド噴出(ドリフトパルス構造)と硬X線放射との比較

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13件)

- ① Nishizuka, N., Karlicky, M., Janvier, M. & Barta, M., “Particle Acceleration in Plasmoid Ejections Derived from Radio Drifting Pulsating Structures”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 799, 2015, 126-141, DOI: 10.1088/0004-637X/799/2/126
- ② Aschwanden, M., J., Crosby, N. B., Dimitropoulou, M., Georgeoulis, M. K., Hergarten, S., AmAteer, J., Milovanov, A. V., Mineshige, S., Morales, L., Nishizuka, N., 他5名 “25 Year of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics” *Space Science Review*, 査読有, Web open-access, 2014, 1-120  
DOI: 10.1007/s11214-014-0054-6
- ③ Nishida, K., Nishizuka, N. & Shibata, K. “The Role of a Flux Rope Ejection in a Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of a Solar Flare”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 775, 2013, L39-L44  
DOI:10.1088/2041-8205/775/2/L39
- ④ Schmieder, B., Guo, Y., Moreno-Insertis, F., Aulanier, G., Yelles Chaouche, L., Nishizuka, N., Harra, L. K., Thalmann, J. K., Vargas Dominguez, S., Liu, Y., “Twisting Solar Coronal Jets launched at the Boundary of an Active Region”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 559, 2013, A1 (11p)  
DOI: 10.1051/0004-6361/201322181
- ⑤ Nishizuka, N. & Shhibata, K., “Fermi Acceleration in Plasmoids Interacting with Fast Shocks of Reconnection via Fractal Reconnection”, *Physical Review Letters*, 査読有, 110, 2013, 051101(5p)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.051101
- ⑥ 西塚直人, “「ひので」-実験室プラズマ共同研究による彩層ジェット再現実験に成功” 日本天文学会『天文月報』、国際文献社発行, 査読有, 106巻, 2013, 434-441  
[http://www.asj.or.jp/geppou/archive\\_open/2013\\_106\\_06/106\\_434.pdf](http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2013_106_06/106_434.pdf)
- ⑦ 井通暁, 西塚直人, “プラズモイド放出と非定常リコネクション”, *プラズマ・核融合学会誌小特集「俯瞰と展望：磁気リコネクション研究の最前線」* 査読有, 89巻第11号, 2013, 769-773,  
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2013\\_11/jspf2013\\_11-jp.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2013_11/jspf2013_11-jp.pdf)
- ⑧ 西塚直人, “プラズモイドによる異常プラズマ加熱・加速”, *プラズマ・核融合学会誌小特集「俯瞰と展望：磁気リコネクション研究の最前線」* 査読有, 89巻, 第11号, 2013, 796-800  
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2013\\_11/jspf2013\\_11-jp.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2013_11/jspf2013_11-jp.pdf)
- ⑨ 西塚直人, 磯部洋明, “弱電離プラズマ中のリコネクション”, *プラズマ・核融合学会誌小特集「俯瞰と展望：磁気リコネクション研究の最前線」*, 査読有, 89巻, 第12号, 2013, 849-852  
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2013\\_12/jspf2013\\_12-jp.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2013_12/jspf2013_12-jp.pdf)
- ⑩ Nishizuka, N. & Hara, H. “Spectroscopic Observations of Continuous Outflows and Propagating Waves from NOAA 10942 with EIS/Hinode”, *ASP Conf. Series, The Proc. of Hinode-4: Italy* (eds. L. R. Bellot Rubio, F.

Reale, and M. Carlsson), 査読有, 455, 2012, 219-224  
<http://aspbooks.org/custom/publications/paper/455-0219.html>

- ⑪ Nishizuka, N., Matsumoto, T., Morita, S., Hara, H. & Shibata, K. “Propagating Slow Magnetoacoustic Waves along the Continuous Outflows observed with EIS/Hinode” ASP Conf. Series, The Proc. of Hinode-3, Tokyo (ed. T. Sekii, T. Watanabe, T. Sakurai), 査読有, 454, 2012, 157-161  
<http://aspbooks.org/custom/publications/paper/454-0157.html>
- ⑫ Singh, K. A. P., Isobe, H., Nishizuka, N., Nishida, K. & Shibata, K. “Chromospheric Anemone Jets and Magnetic Reconnection in Partially Ionized Solar Atmosphere”, The Astrophysical Journal, 査読有, 759, 2012, 33-46, DOI: 10.1088/0004-637X/759/1/33
- ⑬ Nishizuka, N., Hayashi, Y., Tanabe, H., Kuwahata, A., Kaminou, Y., Ono, Y., Inomoto, M. & Shimizu, T., “A Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection: Outflows, Heating, and Waves in Chromospheric Jets”, The Astrophysical Journal, 査読有, 756, 2012, 152-162  
DOI: 10.1088/0004-637X/756/2/152

[学会発表] (計 28 件)

- ① 西塚直人, “Modeling of Fractal Reconnection and Particle Acceleration in Solar Flare”, 12<sup>th</sup> Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2015), 招待講演, 2015 年 8 月 1 日~5 日, サンテックシティ(シンガポール)
- ② 西塚直人, “Numerical and Laboratory Experimental Modeling of Solar Jets and MHD waves”, 12<sup>th</sup> Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2015), 招待講演, 2015 年 8 月 1 日~5 日, サンテックシティ(シンガポール)
- ③ 西塚直人, “Particle Acceleration in an Unsteady Fragmented 3D Current Sheet in a Solar Flare”, 40<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly (Committee on Space Research), 2014 年 8 月 2 日~10 日, モスクワ(ロシア)
- ④ 西塚直人, “Plasmoid-induced Reconnection and Particle Acceleration in Solar Flares”, 4<sup>th</sup> East Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, 招待講師, 2014 年 7 月 28 日~8 月 1 日, ハルビン(中国黒龍江省)
- ⑤ 西塚直人, “Magnetic Reconnection in Partially Ionized Chromospheric Plasmas”, SHINE conference 2014 (Solar Heliospheric & Interplanetary Environment), 招待講演, 2014 年 6 月 23 日~27 日, テルライド(米国)
- ⑥ 西塚直人, “3D Fractal-like Current Sheet in a Solar Flare and Transient Particle Acceleration as seen in Radio Bursts”, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2014), 招待講演, 2014 年 5 月 20 日~23 日, 東京大学(東京都文京区)
- ⑦ 西塚直人, 西田圭佑 “Nonlinear Fragmentation of Flare Current Sheets”, Hinode-7 Science meeting, 招待講演, 2013 年 11 月 11 日~15 日, 飛騨・世界生活文化センター(岐阜県高山市)
- ⑧ 西塚直人, “Fractal Structure (Turbulence) and SOC of a Current Sheet in a Solar Flare via Dynamic Magnetic Reconnection”, ISSI meeting (International Space Science Institute, ‘Self-Organized Criticality and Turbulence’), 招待講演, 2013 年 9 月 16 日~20 日, ベルン(スイス)
- ⑨ 西塚直人, “Plasmoids, Fractal Reconnection and Particle Acceleration in Solar Flares and Laboratory Experiments”, IPELS2013 (12<sup>th</sup> International workshop on the relationship between Plasma Experiments in the laboratory and in space), 招待講演, 2013 年 7 月 1 日~5 日, 白馬東急ホテル(長野県白馬村)
- ⑩ 西塚直人, Karlicky, M., Janvier, M. & Barta, M. “Plasmoid Ejections observed in Radio emissions and Particle Acceleration in Solar Flares”, CESRA Workshop 2013, 2013 年 6 月 24 日~28 日, プラハ (チェコ共和国)
- ⑪ 西塚直人, 西田圭佑, 柴田一成 “Fractal Reconnection and Stochastic Particle Acceleration induced by a Prominence Eruption”, International Astronomical Union Symposium, IAUS300: Nature of Prominences and their role in Space Weather, 2013 年 6 月 10 日~14 日, パリ(仏国)
- ⑫ 西塚直人, “Solar Jets as Sources of Outflow, Heating and Waves” 2013 Meeting of the Americas, American Geophysical Union (AGU), 招待講演, 2013 年 5 月 14 日~17 日, カンクン(メキシコ)
- ⑬ 西塚直人, 西田圭佑 “Numerical Modeling of Fragmenting Prominence Eruption and a Fragmented Current Sheet in a Solar Flare on 2011 June 7”, Hinode-6 Science Meeting, 2012 年 8 月 13 日~17 日, セントアンドリュース(英国)
- ⑭ 西塚直人, 西田圭佑 “3D Dynamics of Eruptive Phenomena and Particle

- Acceleration in a Solar Flare” 39<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly 2012, 2012年7月14日~22日, マイスール(インド)
- ⑮ 西塚直人, 林由記, 田辺博士, 桑波田晃弘, 井通暁, 小野靖, 清水敏文 “Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection: Outflows, Heating and Waves in Chromospheric Jets” US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2012), **招待講演**, 2012年5月23日~25日, プリンストン(米国)
- ⑯ 西塚直人, 原弘久 “Time Variation of Active Region Outflow with Recurrent Outflows and Waves” Spectroscopy of the Dynamic Sun, 2012年4月18日~20日, ロンドン(英国)
- ⑰ 西塚直人, Karlicky, M., Janvier, M., Barta, M., “電波ドリフト・パルス構造から導出したプラズモイド噴出中の粒子加速”, 日本天文学会春季年会, 2015年3月18日~21日, 大阪大学(大阪府豊中市)
- ⑱ 西塚直人, Sterling, A.C., “光球磁場と彩層磁気活動ジェットとの関連性について”, 日本天文学会秋季年会, 2014年9月11日~13日, 山形大学(山形県山形市)
- ⑲ 西塚直人, 西田圭佑 “Particle Acceleration in a 3D current sheet of a Solar Flare and Comparison with Solar Radio observations”, 日本地球惑星科学連合大会 2014年大会, 2014年4月28日~5月2日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
- ⑳ 西塚直人, 林由記, 田辺博士, 桑波田晃弘, 神納康宏, 井通暁, 小野靖 “ひので-実験室プラズマ共同研究による黒点ライトブリッジにおける彩層ジェット現象の磁気リコネクション再現実験”, 日本物理学会, 2014年3月27日~30日, 東海大学(神奈川県平塚市)
- 21 西塚直人, 林由記, 田辺博士, 桑波田晃弘, 神納康宏, 井通暁, 小野靖, 清水敏文 “ひので-実験室プラズマ共同実験による彩層ジェット再現実験” 日本天文学会 2014年春季年会, 2014年3月20日~22日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- 22 西塚直人, “太陽と実験室プラズマの共同研究で得た共通物理”, 磁気リコネクションと太陽プラズマ研究会, **招待講演**, 2014年3月3日~5日, 京都大学東京オフィス インターシティ品川(東京都品川区)
- 23 西塚直人, “彩層ジェット・スピキュールに関する観測・理論研究”, 太陽研究者連絡会シンポジウム, **招待講演**, 2014年2月17日~20日, 京都大学(京都府京都市)
- 24 西塚直人, 原弘久, Brooks, D, 西田圭佑, “Hinode Spectroscopic observation of Magnetic Reconnection in a Solar Flare”, 日本地球惑星科学連合大会 2013, 2013年5月20日~23日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)
- 25 西塚直人, 西田圭佑 “太陽フレアにおける磁束管噴出 3次元ダイナミクスと乱流電流シートによるフラクタル磁気リコネクションと粒子加速”, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26日~29日, 広島大学(広島県広島市)
- 26 西塚直人, 西田圭佑 “Contribution of Reconnection-accelerating Particles to SEPs”, 日本天文学会 2013年春季年会, 2013年3月20日~23日, 埼玉大学(埼玉県さいたま市)
- 27 西塚直人, “フレア噴出現象の観測によるエネルギー解放機構の理解と課題”, 太陽研究者連絡会シンポジウム: 太陽活動期の太陽研究, そして新たな太陽研究への布石, **招待講演**, 2013年2月20日~22日, 立教大学(東京都豊島区)
- 28 西塚直人, 西田圭佑, “3D Dynamics of Eruptive Phenomena and Particle Acceleration in a Solar Flare”, 日本地球惑星科学連合大会 2012, **招待講演**, 2012年5月20日~25日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西塚 直人 (NISHIZUKA, Naoto)  
 独立行政法人 情報通信研究機構・  
 電磁波計測研究所宇宙環境インフォマテ  
 イクス研究室・研究員  
 研究者番号: 10578933