

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 24 年 6 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740135

研究課題名（和文） 太陽フレアにおける電子加速・輸送機構の研究

研究課題名（英文） Particle acceleration and transport in solar flares

研究代表者

箕島 敬 (MINOSHIMA TAKASHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・研究員

研究者番号：00514811

研究成果の概要（和文）：太陽フレアにおける粒子加速・輸送機構を理解するために、ドリフト運動論に基づいた数値モデルを開発した。数値シミュレーションの結果、単純なポテンシャル磁場構造では、電子は閉じた磁気ループの頂上と、開いた磁力線に沿って加速されることがわかった。ピッチ角散乱を考慮すると、閉じた磁気ループ頂上の電子の高度がエネルギーによって異なることがわかった。この結果は、「磁気ループ上空の硬 X 線源」の成因を説明することが出来る。一方で、磁場構造が複雑になると、磁気ループ中で磁力線平行方向の突発的電子流が見られた。

研究成果の概要（英文）：To understand the mechanism of particle acceleration and transport in solar flares, we develop a numerical model based on the drift-kinetic theory. Under a potential magnetic field configuration, we find that electrons are accelerated at the top of closed loops and along open field lines. With including the pitch-angle scattering, the peak height of loop-top electrons depends on their energy. This result can explain the origin of the "above-the-loop-top" hard X-ray sources. Under a more complicated field configuration, on the other hand, we find an impulsive electron flux along the closed field lines.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：太陽物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽物理学、太陽フレア、粒子加速

1. 研究開始当初の背景

太陽フレアとは、太陽大気で突発的に起こる増光現象であり、我々の身近で観測される最もダイナミックなプラズマ現象である。現在では、太陽フレアは磁気リコネクションによる爆発的な磁気エネルギー解放の結果と理

解されている。これまでの観測から、リコネクションモデルが予言する磁気流体力学 (MHD) 的現象が確認され、MHD 理論と観測との整合性が得られてきた。

一方で、磁気リコネクションに伴って、MHD 理論では記述できない高エネルギーの非熱

的電子や陽子が発生する（粒子加速）ことが知られている。太陽フレアにおいては、硬 X 線や電波を用いた観測から、速いリコネクションにおいて電子加速が効率的に発生することや、軟 X 線で見られるフレアループの上空で加速が起こっていること、加速された電子の位相空間分布は磁力線に対して異方的であることなどが報告されている。しかし、これらの観測結果の統一的な解釈を試みる理論モデルは提唱されていなかった。

2. 研究の目的

これまで提唱されてきた太陽フレア粒子加速モデルの多くは、単純な一様・定常加速を仮定し、本来加速と同時に起こっている粒子の輸送や散逸過程を無視してきた。そのため、議論は被加速粒子のエネルギー分布のみに終始し、観測されるような空間分布や時間変動についての考察を行うことが出来なかった。そこで本研究では、粒子加速・輸送・散逸過程を全て考慮した非一様・非定常な理論モデルを構築し、被加速粒子の空間分布・時間変動を記述し、観測結果との直接比較を通じて、太陽フレアにおける粒子加速を実証的に理解することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 研究目的を達成するために、本研究では観測結果との直接比較が可能な太陽フレア粒子加速の数値モデルを構築した。太陽大気では、粒子の時空間スケールが現象のスケールに比べて桁外れに小さいため、粒子ダイナミクスを全て取り入れては、太陽大気の現実的なパラメータを用いた数値計算を行うことは極めて難しい。そこで本研究ではドリフト運動論を採用し、太陽大気の現実的なパラメータを用いて、粒子位相空間分布の時間発展を記述する数値計算コードを開発した。

(2) 太陽フレアでは、磁気リコネクションにより磁場構造が変化し、誘導電場が発生する。そこで、単純なポテンシャル磁場構造を観測結果を参考に時間変化させて電場を誘導することで、太陽フレアの電磁場発展をモデル化した。その環境下で、粒子位相空間分布の時間発展を記述するフォッカー・プランク方程式を数値的に解き、粒子加速場所や加速過程、被加速粒子の位相空間分布を調べる。

(3) 太陽フレア高エネルギー電子のダイナミクスにおいて、ピッチ角散乱の重要性が観測から示唆されている。そこで、開発した数値計算コードにクーロン衝突によるピッチ角散乱の効果を加え、ピッチ角散乱が電子位相空間分布に与える影響を調べる。

(4) 太陽大気は磁気レイノルズ数が非常に高いため、フレアの磁場構造は上記で仮定した単純なポテンシャル磁場から大きくずれ

ている場合が考えられる。そこで、磁場構造の違いが粒子分布に与える影響を調べるため、MHD シミュレーションで得られた磁気リコネクション下流域の磁場構造での粒子加速場所や加速機構、被加速粒子の位相空間分布を調べる。

4. 研究成果

(1) 開発した数値計算コードを実行した結果、単純なポテンシャル磁場構造では、電子は主に閉じた磁気ループの頂上で強く加速されることがわかった（図 1）。これは磁気ループの収縮に伴うベータトロン加速であり、電子のピッチ角分布は磁力線垂直方向に卓越する。これに加え、リコネクションを起こす前の開いた磁力線において、反太陽・磁力線平行方向に電子が加速されることを発見した（図 2）。これは、曲がった磁力線が運動することによって生じる遠心力加速である。この結果生じる電子は、太陽から惑星間空間に逃走することが出来るため、III 型電波バーストに寄与する可能性がある。とりわけ、この機構は曲がった磁力線が運動することのみが必要のため、太陽フレアのような特別な状況のみならず、太陽大気で普遍的に発生することができる。そのため、太陽大気で頻繁に発生しているマイクロ III 型電波バーストの有力な起源と考えられる。

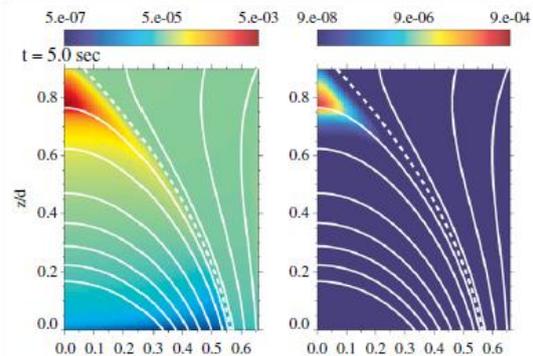


図 1: 20keV (左) と 50 keV (右) の電子の空間分布。白線は磁力線を表す。

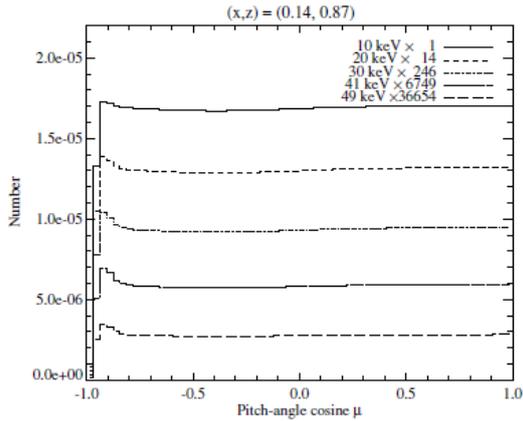


図2: 開いた磁力線の電子ピッチ角分布。左側が反太陽方向、右側が太陽方向。異なる線は電子エネルギーの違いを表す。

(2) ピッチ角散乱を考慮しない場合は、磁気ループ頂上の高エネルギー電子の高度がエネルギーに依らず同じであった。これは、磁場の収縮によって、電子は継続的に加速され、磁気ループ頂上に捕捉されるからである。一方で、ピッチ角散乱を考慮すると、高エネルギー電子の高度がエネルギーによって異なっていた (図3)。具体的には、低エネルギー・高エネルギーの電子は低高度に位置しているのに対し、中間エネルギーの電子は高高度に位置していた。これは、ピッチ角散乱の時間スケール、電子が磁気ループを往復する時間スケール、磁気ループが収縮する時間スケールの3者のバランスの結果である。中間エネルギーの電子は、ピッチ角散乱の時間スケールと磁気ループを往復する時間スケールが同程度になるため、磁気ループからその足元へ向かって逃げ出す時間スケールが短くなり、それが磁気ループが収縮する時間スケールより短い場合、ループが収縮している最中、つまり高高度でピークを持つことになる。しかし、低エネルギー・高エネルギーの電子の場合は磁気ループから逃げ出す時間スケールが長くなり、ループが収縮している間は頂上に捕捉され続け、低高度でピークを持つ。この結果は、太陽物理学長年の未解決問題の一つであった、「フレアループ上空の硬 X 線源」の成因を説明することが出来る。また、フレアループ上空の硬 X 線源と 17GHz 電波源の位置関係についても説明することができる (図4)。

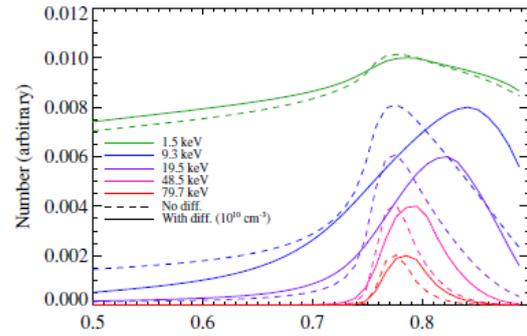


図3: 高エネルギー電子の高度分布。実線及び破線は、ピッチ角散乱を考慮した場合と無視した場合の結果。異なる色は電子エネルギーの違いを表す。

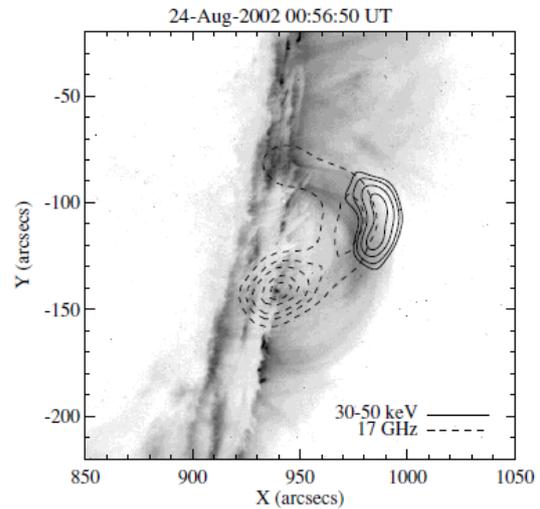


図4: 2002年8月24日に発生した太陽フレアの多波長観測。実線及び破線は、硬 X 線と電波の放射源を表す。背景は極端紫外線の画像である。

(3) 硬 X 線と 17GHz 電波源に加え、34GHz 電波源の高度関係については、34GHz 電波源は高高度に位置する傾向が観測された (後藤智子、2011 年度修士論文、名古屋大学)。この結果は先の数値計算結果では説明できない。モデルに基づいてこの観測を解釈すると、34GHz 電波を放射する非常に高エネルギーの電子については、クーロン衝突に代わる別のピッチ角散乱過程が作用していると考えられる。有力な候補がホイッスラー波動による波動粒子相互作用である。そこで、太陽大気のパラメータを用いて、クーロン衝突とホイッスラー波動によるピッチ角散乱係数を比較したところ、高エネルギー電子に対しては、

ホイッスラー波動によるピッチ角散乱が支配的になる場合があることを示した。この効果が電子空間分布に与える影響については、今後の課題である。

(4) 太陽フレアでは高エネルギー電子が磁気ループの足元に降り込んで硬 X 線を放射するが、これは先のモデルでは再現できなかった。この原因として、仮定した背景磁場構造が挙げられる。そこで、背景磁場構造がポテンシャルからずれた複雑な配位の場合で数値計算を実行したところ、単純なポテンシャル磁場構造では見られなかった、閉じた磁気ループ中で磁力線平行方向の突発的な電子流が見られた。粒子軌道の解析から、これは磁力線の急速な形状変化に伴う粒子の第 2 断熱不変量の破れの結果であることがわかった。この粒子流は、磁力線に沿ってループ足元深くまで侵入できるため、足元での硬 X 線放射に寄与することが出来る。

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 4 件)

- ①籾島敬、増田智、三好由純、草野完也、Coronal Electron Distribution in Solar Flares: Drift-Kinetic Model, The Astrophysical Journal, 査読有, 732, 2011, 111-117, DOI: 10.1088/0004-637X/732/2/111
- ②籾島敬、増田智、三好由純、草野完也、新数値モデリングで迫る太陽フレア粒子加速機構、天文月報、査読有、103 巻、2010、552-560、URL:http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2010_103_09/103_552.pdf
- ③籾島敬、増田智、三好由純、Drift-Kinetic Modeling of Particle Acceleration and Transport in Solar Flares, The Astrophysical Journal, 査読有, 714, 2010, 332-342, DOI: 10.1088/0004-637X/714/1/332
- ④ 籾島敬 他 11 名中の 1 番目、Multiwavelength Observation of Electron Acceleration in the 2006 December 13 flare, The Astrophysical Journal, 査読有, 697, 2009, 843-849, DOI: 10.1088/0004-637X/697/1/843

[学会発表] (計 6 件)

- ①籾島敬、Energetic electron distribution in the solar flare, American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, 2011 年 12 月 9 日、モスクワセンター、サンフランシスコ、アメリカ合衆国
- ②籾島敬、高レイノルズ数磁気リコネクション

ン下流域における高エネルギー粒子分布、日本天文学会 2011 年春季年会、2011 年 3 月 19 日、筑波大学

③ 籾島敬、Drift-kinetic modeling of particle acceleration and transport in solar flares, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010 年 7 月 21 日、ブレーメンエキシビジョン&カンファレンスセンター、ブレーメン、ドイツ連邦共和国

④ 籾島敬、太陽フレア粒子加速におけるピッチ角散乱の影響、日本天文学会 2010 年春季年会、2010 年 3 月 26 日、広島大学

⑤ 籾島敬、太陽面からの逃走電子生成機構について、日本天文学会 2009 年秋季年会、2009 年 9 月 16 日、山口大学

⑥ 籾島敬、GEMSIS-Sun: Drift Kinetic Modeling of Particle Acceleration and Transport in Solar Flares, 地球惑星科学連合 2009 年大会、2009 年 5 月 16 日、幕張メッセ国際会議場

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 移流方程式を数値的に解く方法、並びに、ブラソフ方程式及びマクスウェル方程式を数値的に解く方法、並びに、プログラム
発明者: 籾島敬、松本洋介、天野孝伸、増田智

権利者: 国立大学法人名古屋大学

種類: 特許

番号: 特開 2011-159032

出願年月日: 2010 年 1 月 29 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

籾島 敬 (MINOSHIMA TAKASHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・研究員

研究者番号: 00514811