

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 6月 4日現在

機関番号：12103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2012

課題番号：20540242

研究課題名（和文）新しい磁気リコネクションモデルの「ひので」による検証

研究課題名（英文）Inspection of a new magnetic reconnection model by Hinode

研究代表者

新田 伸也（NITTA SHIN-YA）

筑波技術大学・障害者高等教育研究支援センター・准教授

研究者番号：30377121

研究成果の概要（和文）：研究代表者の提唱している「自己相似モデル」の現象論的検証を目指す研究を行った。本研究課題の研究開始直後から太陽の磁気活動は歴史的低調期に入ってしまったため、「ひので」データでの検証から、より多様な現象での将来的な検証に向けて、現象論的予言の推進と本モデルの拡張に重点を移して研究を実施した。本モデルの排他的検証には至らなかったが、太陽現象での予言的成果（浮上磁気ループフレア、彩層蒸発）とモデルの拡張（相対論化、銀河風への応用）に繋がった。

研究成果の概要（英文）：I focused my research on developing phenomenological exclusive prediction for other astrophysical objects than the sun as well as theoretically extending my original magnetic reconnection model (the self-similar model). My initial plan to focus on phenomenologically examining the self-similar model by using Hinode data of solar phenomena was changed due to the unexpected historical inactive phase of the solar magnetic activity. While the achievement of the initial plan is less than I expected, this program succeeded to progress phenomenological prediction about flux-emerging-type solar flares and chromospheric evaporations and also to progress theoretical extension to the special relativistic model and to reconnection events in galactic wind termination shocks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：磁気リコネクション、宇宙物理、太陽物理、地球電磁気、プラズマ物理

1. 研究開始当初の背景

プラズマ中のハイパワーエンジンプロセスとして、1964年に初めての「速いリコネクション」モデルであるPetschekモデルが提案された。特に、実際の太陽フレアや地球磁気嵐を説明しうる程ハイパワーであるため、注目された。これ以来、多数の理論的、数值的、現象論的研究が行われてきた。今日では、一般の恒星、原始星や活動銀河中心部の降着円盤、銀河団など多様なスケールの高エネルギー現象に応用できる汎用性も認められており、日本天文学会年会の多数の分科会での講演が磁気リコネクションに触れているのが現状である。

これほど学界に浸透したため、リコネクションの基礎理論はすでに完成していると誤解している研究者が多く、圧倒的多数の研究は応用面に偏っている。しかし、いくつかの未解決重要問題が残されている。特に

- ・トリガーとなる異常抵抗（局所的に増大した電気抵抗）の微視的素過程
 - ・エネルギー変換パワー（リコネクションレイト）を決定する巨視的素過程
- が重要な未解決問題であった。

自己相似モデルは、流体描像での巨視的研究によって以下の新たな知見を与えた。異常抵抗の微視的素過程を考慮する代わりに、電気抵抗値に関連する無次元パラメータ（磁気レイノルズ数）の値の広い変化に対する挙動を網羅的に調べた。リコネクションシステム全体を自己無撞着に準解析的に解いた結果、リコネクションによって生じた流れ自身が自発的に変換パワーを決定している事が明らかになった。これが自己相似モデルの最大の功績である。同時に、従来の研究で十分に解明されていなかった高磁気レイノルズ数領域でのリコネクションの挙動を明らかにした点も重要である。

また、今日隆盛を極めている計算機による流体シミュレーションでリコネクションを研究する際には、特に高磁気レイノルズ数領域で、おそらく不可避の本質的困難を伴うことにも注意しなくてはならない。あまり認識されていないが、広く普及しているメッシュ法を用いたシミュレーションでは、高磁気レイノルズ数リコネクションの計算は事実上行えない。天体現象では、高磁気レイノルズ数での現象がしばしば重要となるが、この問題については数値計算は有効でないと言える。この事情から、従来の研究では高磁気レイノル

ズ数でのリコネクションについての理解はほとんどなされていないはずである。本研究で注目する極小フレアを理解するには、自己相似モデルを適用するのが最善である。

高性能の最新プロジェクト「ひので」が驚くべきデータを出し始めたこと、本課題開始時から11年周期の太陽活動の活発期（2011-12年と予想されていた）に向かうこと、新理論モデルがほぼ完成していることなどを総合すると、本課題の応募は最高のタイミングであると言えた。

しかし、後に述べるように、本課題の採択直後から、太陽の磁気活動は予測不可能なほどの歴史的低調期に入ってしまった。このため、本課題での研究は大幅な方針変更を余儀なくされた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者自身が提唱している磁気リコネクションの新しいモデル「自己相似時間発展モデル」（以下では「自己相似モデル」）を、最新の太陽観測衛星プロジェクト「ひので」のデータ解析によって検証する事である。

3. 研究の方法

本研究は

- (1)自己相似モデルによる現象論的予想
- (2)データ解析に基づく自己相似モデルの実証の2つの要素からなる。それぞれについて、下記の方法で研究した。

(1)について

- ①浮上磁気ループでのフレアに着目して、自己相似モデルに基づいて現象論的予測を行う。
- ②カスプ型フレアでの彩層蒸発に注目して、自己相似モデルによるエネルギー解放の特徴的時間発展をもたらす蒸発流構造を予測する。
- ③自己相似モデルを特殊相対論化する。
- ④銀河風終端衝撃波近傍でのリコネクションモデルを構築する。

(2)について

彩層蒸発を「ひので」軟X線望遠鏡動画から検出し、特徴的な蒸発流構造と時間発展を自己相似モデルの予言と比較する。

4. 研究成果

本研究課題開始直後の2008年から、太陽の

磁気活動は予測不可能なほどの歴史的低調期に入ってしまった。このため、本課題での研究は、大幅な方針変更を余儀なくされた。

今太陽活動サイクルの歴史的異常性を踏まえれば、当初に予定していたように「ひので」のデータを用いて今サイクルでの現象にてモデル検証を完結させる事に拘るよりも、検証のための理論的/現象論的知見を拡大させた方が、最終的には目的達成のために有望であると判断した。太陽現象およびより高エネルギーの天体現象での検証を目指して、予言的研究を推進した。

(1)太陽での現象論的予測

①浮上磁気フラックスによるフレアへの応用
Nitta (2010) Astrophys.J. 719, 1828-1843
自己相似モデルは、エネルギー解放の時間変化（光度曲線）に於いて排他的特徴を持っている。従来、周辺環境要因から説明される事の多かった複雑な時間変動を、プラズマの内的要因から初めて説明した。太陽での現象として、実際にどのように観測されるはずかを予言するため、最も単純なりコネクションシステムである、浮上磁束管とコロナ磁場の間で生じるフレア現象に応用した。

光度曲線は磁気Reynolds数に強く依存して、その特性を変える（図1、2参照）。これに伴って、軟X線画像の蒸発流の構造の時間発展の様子も磁気Reynolds数に強く依存して変化する事が分かった（図3、4参照）。

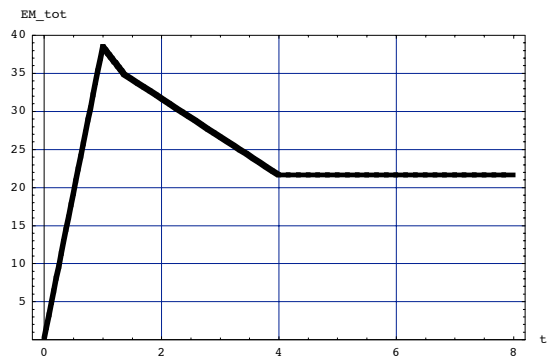


図1：エネルギー解放の光度曲線（低磁気Reynolds数）

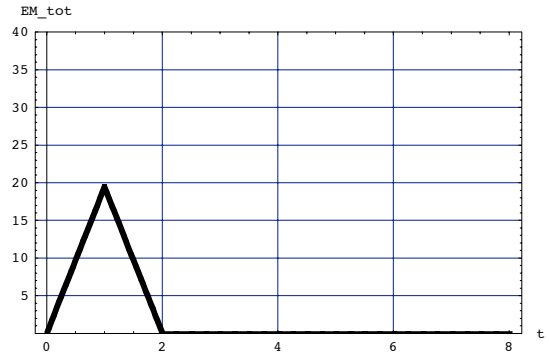


図2：エネルギー解放の光度曲線（高磁気Reynolds数）

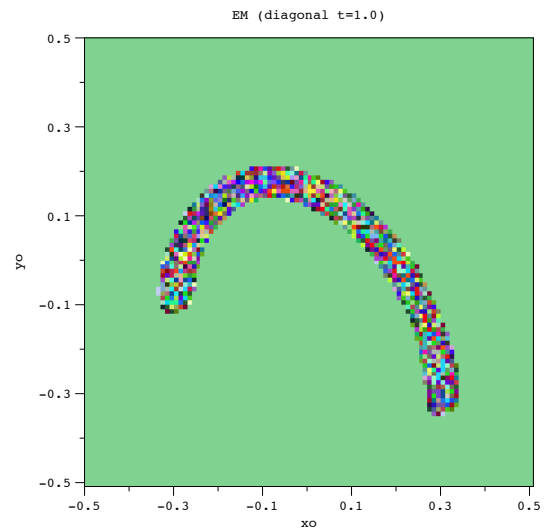


図3：フレアの予想軟X線画像（低磁気Reynolds数）

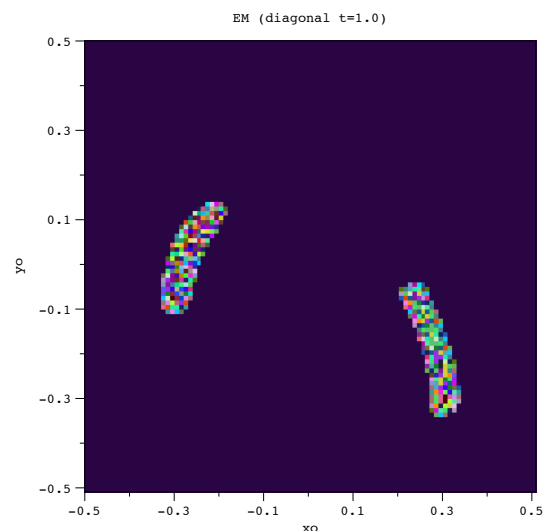


図4：フレアの予想軟X線画像（高磁気Reynolds数）

これらの特徴を観測的に見いだす事が出来れば、自己相似モデルの排他的検証が可能になると期待できる。

②カusp型フレアに伴う彩層蒸発への応用
 自己相似モデルをカusp型フレアに伴う彩層蒸発現象に応用すべく研究した。輻射冷却や熱伝導を無視した単純な状況を仮定し、磁気ループ上空で自己相似リコネクションが起こった時の彩層蒸発を解析的に議論した。リコネクションによるエネルギー解放の特徴的時間変化を反映させた結果、彩層蒸発流の構造と時間発展が磁気Reynolds数に鋭敏に依存した特徴を持つ事が分かった。この特徴を持つ彩層現象を発見し解析する事でのモデル検証を目指した。定量的な予言にするために、京都大学・磯部洋明氏と共同で、輻射冷却や熱伝導を取り入れたより現実的な数値シミュレーションを行った。ループ上空での磁気リコネクションによって加熱された領域からの熱伝導に駆動された蒸発現象をシミュレーションした結果、自己相似モデルで予言される解放エネルギーでは、熱伝導や輻射冷却が非常に強く影響し、(2)で検出されたような10Mm程度のスケールの彩層蒸発流では、リコネクションによるエネルギー解放の時間変動が作る特徴的な内部構造をほぼ完全に均してしまう事が判明した。パラメータを変動させて広く調べたが、常に構造が均されてしまいポジティブな結果が得られなかったため、この方針での研究を断念した。

(2)ひのでデータによる太陽での現象解析
 Nitta et al. (2012) Solar Phys. 276, 183-197
 上記(1)と並行して、ひのでの高解像度軟X線動画から彩層蒸発流の構造と時間発展を見いだす研究を行った。

ひので衛星打ち上げ直後の2006.12から2008.12までのX線望遠鏡(XRT)のアーカイブデータを精査し、上空でのリコネクションによって引き起こされたと考えられるループ状のほぼ対称的な彩層蒸発現象を13イベント検出した。このように教科書的な描像そのままの彩層蒸発現象が観測的に確認されたのは初めての事である。その内、太陽の磁気活動が極端に低下した2008年には1イベントも検出されなかった。検出されたイベントは、いずれもループの両足元からほぼ対称に蒸発流が成長する特徴を持っている(図5参照)。

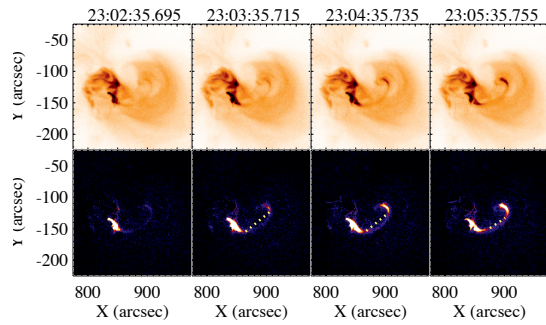


図5：彩層蒸発流の時間発展の様子

形態学的にその見かけの上昇速度を測定し、統計的性質を検討した所、約46%はループ内の電離水素ガスの音速程度と見られる100km/s程度であったが、約23%は500km/s程度の非常に大きな速度であり、二分化していた。中間の速度は全く検出されなかった(図6参照)。この2つの大きく乖離した典型速度は、蒸発流の加速機構が複数存在する事を示唆しているが、それ以上の物理的考察を出来るだけのデータは得られなかった。

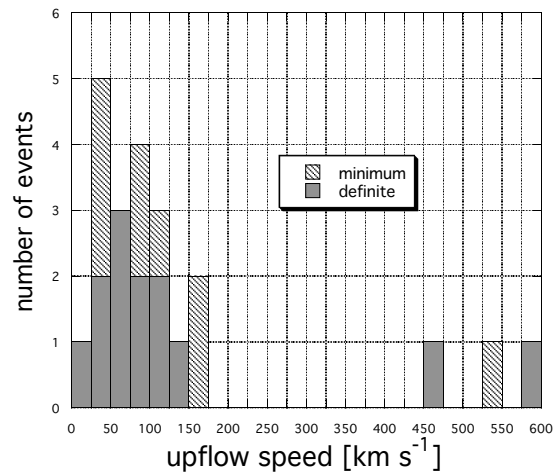


図6：上昇速度の統計性

上空のリコネクションで解放されたエネルギーによって引き起こされる彩層蒸発は、エネルギー解放に時間変動があれば、その影響を受けて、蒸発流に不均一な内部構造を形成すると期待される。もし、自己相似モデルのみ排他的に説明できる特徴が検出されれば、自己相似モデルの検証に繋がる。蒸発流の構造を観測的に明らかにしようとした。

太陽の磁気活動が低調であった事も影響し、今回検出された蒸発流はいずれも10Mm程度の非常に小さなサイズであり、ひのでXRTの高解像度を持ってしても内部構造を明らかにする事は出来なかった。このため、駆動エネルギー源であるリコネクションの時間発展の推定に繋がるようなポジティブな結果は得られなかった。

(3)銀河風への応用

Tsuchiya et al. (2013) Mon.Not.Roy.Astron.Soc. (in printing Apr. 2013), doi: 10.1093/mnras/stt638, arXiv: 1304.6824

銀河風は、銀河間空間への重元素の輸送媒体として、また銀河間空間の高温ガス形成のエネルギー輸送媒体として重視されている。高温ガス形成機構は、終端衝撃波およびそこの磁気リコネクションが担っている可能性があり、ここに自己相似モデルを応用するための研究を開始した。筑波大研究者グループとの共同研究である。

衝撃波を形成するには、遷音速銀河風が必要である。太陽風のParker解で知られるように、遷音速の加速過程には重力分布が強く影響する。ここでは、球対称定常の単純なモデルではあるが、できるだけ現実的な重力分布を取り入れるため、CDMシナリオから予言されるダークマター分布、銀河バルジのバリオン成分分布、銀河中心大質量ブラックホールを取り入れた解析を行った。最初の成果を上記査読論文として出版した。続編の論文も作成中である。

この研究では、リコネクション研究とは直接繋がらない以下の重要成果が得られた。銀河の現実的な質量分布を考慮しての遷音速解析の結果、従来予想されていなかった非常に遠方（銀河中心から約百kpc）に遷音速点が出る事が分かった（図7参照）。このような遠方での遷音速点形成は初めて指摘された上に、遠方の希薄なガスの運動を観測する有効な手段は確立されていない。従って、従来の観測では、ガスが濃密な亜音速領域しか観測されておらず、銀河風が存在していても見落とされていた可能性がある。これによって、これまで特定の銀河で指摘されて来た矛盾（銀河全体のX線画像解析から銀河風の存在が強く示唆されているにも関わらず、観測可能な領域のガス分布は静水圧平衡的で流れの存在に否定的である）が解決できる。

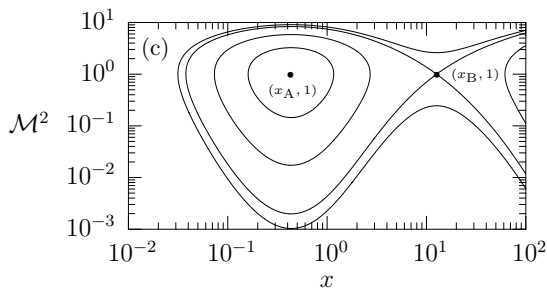


図7：遠方で遷音速点形成される例

この研究では、磁場の効果は含まれていない。今後より詳細に解析を加え、磁場の効果

や衝撃波形成も取り入れる予定である。続いて銀河風終端衝撃波近傍での磁気リコネクションモデルを確立したい。

(4)自己相似モデルの特殊相対論化

太陽の磁気活動が非常に低調になってしまった事から、ひのでデータを用いての太陽現象での自己相似モデル検証は困難であると判断し、2009年からは理論的な予言研究重視の方針変更した。最も注力したのが自己相似モデルの特殊相対論化である。

プラズマが希薄で磁場強度が大きいとき、流入領域でのAlfven速度が光速に近くなり、相対論的な扱いが必要になる。パルサーやブラックホールの磁気圏現象、超新星爆発やガンマ線バーストなどでも磁気リコネクションは重要な役割を果たしていると予想されているが、これらを理解するための相対論的リコネクション理論は未だ確立しておらず、現在のホットトピックである。研究代表者のオリジナルモデルである自己相似モデルは、天体現象でのリコネクションを記述するために適しているので、これを相対論化する事にした。

2009年からの2年間で基礎方程式系を導出し、数値的求解コードを作成した。これを元に2012年秋には初期成果を得られたが、その解は予想外の複雑な解分岐を含んでいた。現在、Alfven速度が光速の約70%程度の所まで解の振る舞いを把握できているが、それ以上Alfven速度が大きい領域を解くためには、新たな分岐解を探す必要があり、非常に多大な時間を掛けての試行錯誤を要する事が予見された。

(5)非対称電流シートへのモデル拡張

地球磁気圏前面や高エネルギー天体からのアウトフロー終端衝撃波近傍でのリコネクション現象に応用すべく、自己相似モデルを非対称電流シートでのモデルに拡張する研究を開始した。愛媛大研究者との共同研究である。現在、単純化した解析モデルを作成し、これに対応した基礎方程式系を導出中である。

以上のように、太陽磁気活動の歴史的低調のため、期待したような大規模な太陽活動現象は検出できず、「ひので」データを用いての自己相似モデル検証はできなかった。しかし、将来、観測的/現象論的にモデル検証するための現象論的予測の研究（太陽フレア、彩層蒸発、銀河風への応用）と理論的発展研究（モデルの相対論化、非対称電流シート系への応用）は着実に進められた。現在も研究は進捗中であり、今後も科研費等の研究助成を得てPDを雇用する等研究体制も強化して推進して行きたい。

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3件)

- ①M.Tsuchiya, M.Mori, S.Nitta, Transonic solutions of isothermal galactic winds in a cold dark matter halo, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. in printing 査読有 doi: 10.1093/mnras/stt638, arXiv:1304.6824 (2013)
- ②S.Nitta, S.Imada, T.T.Yamamoto, Clear detection of chromospheric evaporation upflows with high spatial/temporal resolution by Hinode XRT, Solar Phys. 査読有 276, 183-197 (2012)
- ③S.Nitta, Observational prediction of high magnetic Reynolds number pre-flare reconnection events: an application of the Nitta's self-similar reconnection model', Astrophys.J. 査読有 719, 1828-1843 (2010)

〔学会発表〕 (計10件)

- ①五十嵐朱夏、森正夫、新田伸也、定常銀河風における銀河中心超巨大ブラックホールの影響、日本天文学会 春期年会、2013.3.22 (さいたま市)
- ②五十嵐朱夏、森正夫、新田伸也、球対称等温定常銀河風の加速過程に与えるダークマターと星の質量分布の影響、日本天文学会 秋期年会、2012.9.19 (大分市)
- ③森正夫、新田伸也、五十嵐朱夏、コールドダークマターハローにおける遷音速銀河風解析、日本流体力学会 年会、2012.9.16 (高知市)
- ④新田伸也、自己相似リコネクションモデルの相対論化、日本天文学会 春期年会、2012.3.22 (京都市)
- ⑤土屋聖海、森正夫、新田伸也、球対称定常銀河風の遷音速解：銀河の質量密度分布との関係、日本天文学会 秋期年会、2011.9.20 (鹿児島市)
- ⑥新田伸也、磯部洋明、自己相似リコネクションモデルから予言される彩層蒸発、日本天文学会 秋期年会、2010.9.23 (金沢市)
- ⑦新田伸也、高磁気Reynolds数でのMHD磁気リコネクションの新モデル、日本地球惑星科学連合、2010.5.23 (千葉市)
- ⑧新田伸也、今田晋亮、山本哲也、「ひので」XRTによる彩層蒸発の直接イメージング観測、日本天文学会 秋期年会、2009.9.16 (山口市)
- ⑨新田伸也、自己相似リコネクションによるカスプフレアはどう見えるのか？、日本天文学会 秋期年会、2008.9.12 (岡山市)

- ⑩新田伸也、＜招待講演＞A new model of magnetic reconnection beyond the Petschek model、International Workshop on New Astronomical Facilities in Peru --In honor to Mutsumi Ishitsuka--、2008.7.1(Peru)

6. 研究組織

(1)研究代表者

新田 伸也 (NITTA SHIN-YA)

筑波技術大学・障害者高等教育研究支援センター・准教授

研究者番号：30377121