

令和元年6月21日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17618

研究課題名(和文) 太陽磁場の消失過程の解明

研究課題名(英文) Understanding magnetic flux cancellation on the solar surface

研究代表者

久保 雅仁 (Kubo, Masahito)

国立天文台・SOLAR-C準備室・助教

研究者番号：80425777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、磁束相殺現象に関する磁力線の変化を3次的に得ることで、太陽における磁場の消失過程を理解することを目的とした。磁束相殺現象とは、反対極性の磁気要素が衝突した後太陽表面から消えてしまう現象で、太陽のいたるところで様々な空間スケールで観測される。磁束相殺領域でU字型の磁力線構造が太陽表面もしくは表面直下で形成され、その後、磁気リコネクションによる磁力線の繋ぎ変えが起こることを示唆する観測結果を得て、磁束相殺現象の物理過程の理解が進んだ。さらに、磁束相殺現象に伴い、太陽表面付近で繰り返し起こる磁気リコネクションによって、上空で低温のジェットや衝撃波が繰り返し形成されることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽の平均的な磁気活動は、11年周期で変動し、南北半球の支配的な磁気極性も11年で反転する。このような磁場の変動を理解するためには、生成過程だけでなく消失過程の理解も重要である。磁束相殺現象は効率の良い磁束消失過程として重要視されている。また、磁束相殺現象に伴い、太陽大気での増光現象や爆発現象(太陽フレア)が頻繁に観測される。磁束相殺現象の3次元磁場構造を観測的に理解し、その物理過程を明らかにすることは、太陽磁場の変遷を理解するのに必要不可欠であるだけでなく、太陽フレアの地球環境への影響を予報する宇宙天気予報にとっても極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to understand the disappearance process of the magnetic flux on the solar surface. The magnetic flux cancellation is the mutual disappearance of opposite-polarity magnetic elements from the solar surface following their apparent collisions, and it is an important process for the removal of the magnetic flux at various spatial scales. Our results suggest that the U-shaped magnetic field configuration is formed on or just below the solar surface, and then magnetic field lines over the canceling magnetic elements are produced by magnetic reconnection. We also find that the cool jets and shock waves are repeatedly formed by the repeated magnetic reconnection near the solar surface at the magnetic flux cancellation site.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽物理学 電磁流体力学 磁気リコネクション 太陽磁気活動 偏光分光観測

1. 研究開始当初の背景

太陽表面の磁場は、一様に分布しているわけでは無い。200km 程度の大きさで数分の寿命を持つ磁束管から、数十万 km の大きさで 1-2 ヶ月の寿命を持つ黒点まで、磁場構造のサイズや寿命も多様である。磁場構造の生成過程である磁気浮上の研究は、非常に多くあるが、磁場構造の崩壊や消失過程に関する研究は少ない。太陽の平均的な磁気活動は、11 年周期で変動し、南北半球の支配的な磁気極性も 11 年で反転する。さらに、黒点が数十年にわたって全く出なかったことが過去の記録にあり、11 年周期よりもさらに長い変動成分もあると考えられている。このような磁場の変動を理解するためには、生成過程だけでなく消失過程の理解も重要である。太陽表面での磁気要素の動きを観察すると、正負極性の磁気要素が互いに衝突し、消えてしまう現象が頻繁に起きる。この現象は、観測的な用語として磁束相殺現象 (英名: magnetic flux cancellation) と呼ばれる。その物理過程は未だ不明であるが、効率の良い磁場消失を説明するのに重要である。磁束相殺現象は、太陽面上のいたる所、様々なスケールで観測される。太陽の静穏領域の磁束を短時間で入れ替えるのに重要な現象であるという認識は以前からあった [1] が、崩壊する黒点の磁束収支の見積もりから、黒点を構成する大量の磁束を太陽表面から消し去るのにも重要な役割を果たしていることが分かった [2]。黒点から周囲の静穏領域に向かって拡散していく磁束の 90% 以上が、磁束相殺現象によって、静穏領域に到達する前に消えている。

磁束相殺現象は、彩層やコロナの加熱を考える上でも重要である。磁束相殺現象が観測される領域の上空コロナでは、X 線や極紫外線の増光現象が頻繁に観測される。黒点同士といった大規模な衝突現象の場合は、大規模な爆発現象 (太陽フレア) をしばしば引き起こす。これらの結果から、磁束相殺現象に伴い、磁気リコネクションが起きていることが示唆されている。コロナ加熱に重要である磁気リコネクションの物理過程を理解するために、磁束相殺現象は最適な観測対象である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽における磁場の消失過程を理解することである。磁束相殺現象を説明するモデルには、図 1 に示した様に、全く反対のシナリオが提案されている [3]。衝突する正負極性の磁気要素を太陽表面より上で繋ぐ  $\Omega$  型のループの沈み込み、もしくは太陽内部で両者を繋ぐ U 型のループの浮上に伴い、磁気要素が光球面上から消えるというものである。いずれの場合でも、磁束が消失している間は、太陽表面を横切る水平な磁場が正負極の磁気要素間に形成される。これらのモデルの証明には、精度の良い水平磁場の検出とそのドップラー観測が重要であり、「ひので」衛星の可視光磁場望遠鏡によるベクトル磁場観測が最適と考え、水平磁場の検出を試みたが、予想に反してほとんどの場合で水平磁場が出現しなかった [4]。さらに、磁場消失が起きている磁気中性線上で観測される異常な形の偏光線輪郭が、衝突する正負極性の磁気要素が持つ偏光信号を足し合わせることで再現できることが分かった [5]。これらは、「ひので」衛星の高い解像度でも、未だに磁場の消失過程は分解できていないことを示唆する。磁場の消失に起因する磁力線を分解して観測するためには、4m の口径を持つ次世代の大型地上望遠鏡が必要な状況である。

本研究では、考え方を変えて、太陽の光球 (表面) - 彩層 - コロナの同時観測を実施し、得られたデータから磁束相殺現象に関する 3 次元的な磁力線の変化を推測し、磁束相殺現象の物理過程を明らかにする。

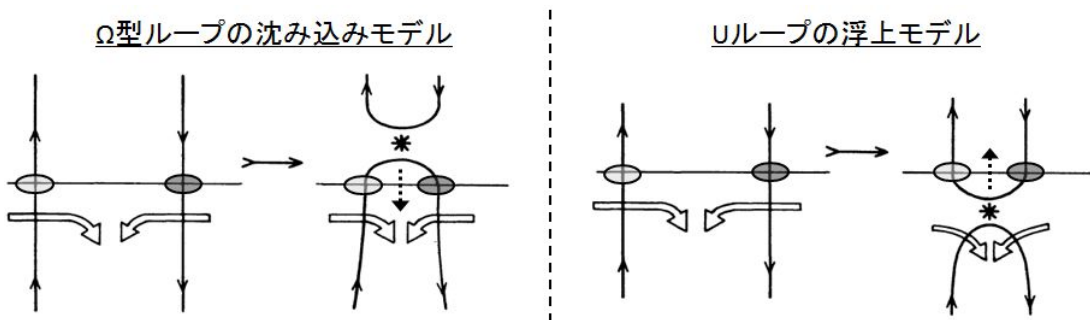


図 1: 磁束相殺現象を説明するモデル (Zwaan 1987)

3. 研究の方法

本研究では、磁場消失を引き起こす磁束相殺現象に関する磁力線の変化を 3 次元的に得ることを計画した。このために、地上の磁場観測装置、「ひので」衛星、NASA の太陽観測衛星 IRIS の共同観測を実施した (図 2)。「ひので」衛星は、太陽光球の磁場の詳細な時間変化を観測するのに最適な装置であり、IRIS 衛星は彩層上部・コロナの高解像度の撮像・分光観測が特徴であ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

る。IRIS を用いることで、増光現象やジェット現象を検出し、その運動を調べることができる。この共同観測の鍵となるのは、地上観測の多波長同時観測で「ひので」衛星と IRIS 衛星の観測を繋ぐことである。地上観測装置は、米国国立太陽観測所サクラメントピーク天文台にあるファブリペロータイプの撮像偏光分光装置 IBIS とスリットスキャン式の偏光分光装置 FIRS を用いた。IBIS は、高い波長分解能を有し、高速で 2 次元的な分光情報及び磁場情報を得ることができる。直接的な磁場観測だけでなく、彩層画像に見られる筋構造から彩層の磁力線構造を推測できる。一方、FIRS は時間分解能が低いものの、より高い精度で彩層の磁場情報を得ることができる。サクラメントピーク天文台では、IBIS と FIRS で同時観測が可能で、両者の良い所を組みわせることで、光球と彩層の詳細な物理診断を行い、「ひので」衛星と IRIS 衛星で得られる情報を結合させる。

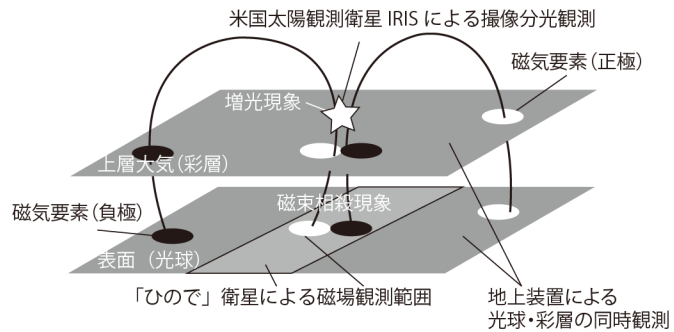


図 2: 共同観測の概念図

置 FIRS を用いた。IBIS は、高い波長分解能を有し、高速で 2 次元的な分光情報及び磁場情報を得ることができる。直接的な磁場観測だけでなく、彩層画像に見られる筋構造から彩層の磁力線構造を推測できる。一方、FIRS は時間分解能が低いものの、より高い精度で彩層の磁場情報を得ることができる。サクラメントピーク天文台では、IBIS と FIRS で同時観測が可能で、両者の良い所を組みわせることで、光球と彩層の詳細な物理診断を行い、「ひので」衛星と IRIS 衛星で得られる情報を結合させる。

4. 研究成果

(1) 研究の方法で述べた共同観測の鍵となる、米国国立太陽観測所サクラメントピーク天文台への観測プロポーザルを 2 度提出し、2 度とも受理された。1 回目の共同観測を平成 28 年 6 月 1 日から 6 月 10 日、2 回目を平成 29 年 4 月 24 日から 5 月 2 日に実施し、いずれも現地で地上装置を使った観測及び衛星観測との調整の指揮を執った。1 回目の共同観測では、静穏領域および形成中の静穏領域ダークフィラメント直下での磁束相殺現象を、2 回目の共同観測では、成長中の活動領域中心付近で起きた磁束相殺現象を、シーイングが非常に安定した状態で数時間にわたって観測することに成功した。この共同観測では、高い時間分解能を狙うためにスリットスキャン分光器の観測視野を絞ったが、発生予測が困難である成長中の活動領域においても、全ての観測装置で同じ磁束相殺現象を捉える非常に貴重な観測となった。この共同観測結果は、米国国立太陽観測所が建設中の 4m の口径を持つ次世代の大型地上望遠鏡と衛星観測との共同観測を立案していく上でモデルケースとなる物である。また、得られた地上観測データの較正を米国国立太陽観測所の研究者と密に議論しながら行い、最新の画像補正や偏光較正の手法を習得することができた。

(2) 静穏領域および形成中の静穏領域ダークフィラメント直下の磁束相殺現象において、磁束相殺現象を引き起こす反対極性の磁気要素が接近すると、彩層で 2 本の小さな暗い筋構造が反対極性の磁気要素に向かって伸びていき、最終的に M 字型の筋構造が形成される(図 3)。さらに、太陽表面の磁気要素の運動と関連して、筋構造の端が磁束相殺領域に引きずり込まれるような運動が見られた。暗い筋構造は、磁力線に絡みついた低温のガスと考えられ、磁力線構造を推測することができる。すなわち、得られた結果は、磁束相殺領域の光球もしくは光球面下で U 字型の磁力線構造を持つことを示唆する。中には、2 つの筋構造がつながって、下向きに凹みのある長い筋構造が一時的に形成されるものもあった。特に、静穏領域のダークフィラメント近傍のイベントでは、より頻繁に観測され、新たに形成された長い筋構造は元々存在するダークフィラメント本体と融合していく様子が観測されている。これは、U 字型の磁力線間で磁気

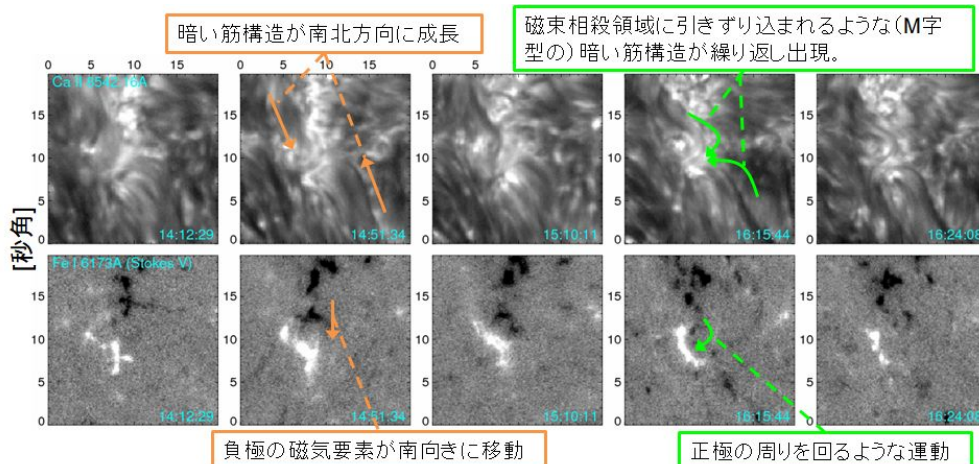


図 3: 静穏領域の磁束相殺現象 (上: 彩層画像、下: 光球視線方向磁場)

リコネクションが起き、繋ぎ変わった長い磁力線が形成されたと考えられる。また、磁束相殺現象の上空の彩層上部やコロナでは、増光現象が度々観測された。ただし、その継続時間は数分程度で、磁束相殺現象やフィラメント形成の時間スケールと比べると圧倒的に短い。したがって、磁束相殺現象に関係するのは、太陽表面付近での磁気リコネクションが支配的で、上空の増光現象を引き起こす磁力線とは必ずしも一致しないと考えられる。

活動領域で発生する磁束相殺現象は、(3)で述べる様に様々な活動現象を引き起こし、磁気リコネクションの理解という観点では非常に興味深い。複数の磁気要素が混在する複雑な配位となるため、上空に形成される暗い筋構造の足元を同定することは難しい。しかしながら、M字型の暗い筋構造が磁束相殺現象とともに形成され、その後磁束相殺現象の上空を覆う比較的長い筋構造が頻りに出現した。また、上空の増光現象が見られない時間帯でも磁束の減少が継続した。これらの特徴は静穏領域の磁束相殺現象と共通する。したがって、周囲の磁力線構造やその複雑さは異なるものの、磁束相殺現象を引き起こす磁力線にのみ着目すると、静穏領域でも活動領域でも統一的な描像を得ることが出来た。

(3)活動領域で発生した磁束相殺現象で、光球での磁束量が減少し始めるとほぼ同時に、低温のジェットが彩層で繰り返し発生し、その低温ジェットに沿って衝撃波を示唆するスペクトルのノコギリ状の時間発展が継続するという興味深いイベントを捉えた(図4)。これは高い時間分解能を狙った賜物である。着目した領域に限らず、正負の磁気要素が接触する領域では、増光現象が頻りに観測された。そこでは、低温のスペクトル線の吸収を伴う高温のスペクトルが度々得られた。これは、もともと存在した低温の彩層プラズマの下に高温のプラズマが形成されていることを示唆しており、太陽表面付近で磁気リコネクションが発生した結果と考えられている[6]。これらの結果から、磁束相殺現象に伴い、太陽表面付近で繰り返し起こる磁気リコネクションによって、上空で低温のジェットや衝撃波が繰り返し形成されるといった新たな知見を得た。磁束相殺現象の上空でジェットが観測されることは珍しくないが、衝撃波を示唆するスペクトルの時間発展が観測されるのは特定のイベントに限られた。今後さらなる観測が必要であるが、周囲の磁場構造の配位が関係していると推測している。

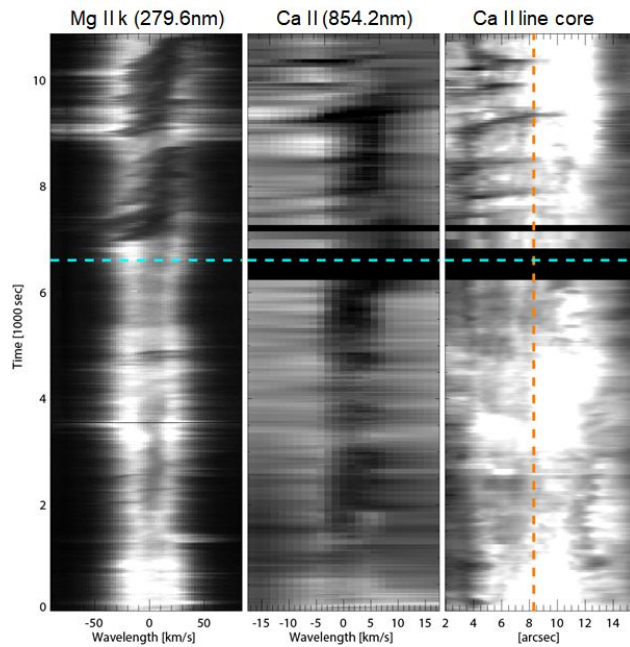


図 4: 活動領域で起きた磁束相殺現象の彩層上部のスペクトルの時間変化(左図)、彩層のスペクトルの時間変化(中央図)、低温ジェットに沿ったx-tプロット(右図)。橙色線が左図・中央図のスペクトルが観測された位置を示し、水色線が太陽表面での磁束の減少が開始する時刻を示す。

<引用文献>

- [1] "Large-scale coronal heating by the small-scale magnetic field of the Sun", Schrijver, C. J., 1998, Nature, 394, 152
- [2] "Elements and patterns in the solar magnetic field", Zwaan, C., 1987, ARA&A, 25, 83
- [3] "Magnetic Flux Loss and Flux Transport in a Decaying Active Region", Kubo, M., Lites, B., Shimizu, T., Ichimoto, K., 2008, The Astrophysical Journal, 686, 1447
- [4] "Granular-scale Magnetic Flux Cancellations in the Photosphere", Kubo, M., Low, B. C., Lites, B., 2010, The Astrophysical Journal, 712, 1321
- [5] "Unresolved Mixed Polarity Magnetic Fields at Flux Cancellation Site in Solar Photosphere at 0.3 Spatial Resolution", Kubo, M., Low, B. C., Lites, B., 2014, The Astrophysical Journal Letters, 793, 9
- [6] "Hot explosions in the cool atmosphere of the Sun", Peter H., et al., 2014, Science, 346, 6207

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 8 件)

Masahito Kubo, Recurrent cool jets associated with chromospheric reconnection at a magnetic flux cancellation site, Hinode-12 Science meeting (国際学会), 2018

Masahito Kubo, Recurrent Chromospheric Jets at a Magnetic Flux Cancellation Site, The 9th IRIS workshop (国際学会), 2018

久保雅仁、活動領域中の磁束キャンセレーションで発生する EITerman bombs と衝撃波の時間発展、日本天文学会 2018 年春季年会、2018

Masahito Kubo, 3D magnetic field configuration of magnetic flux cancellations by IBIS - Hinode - IRIS campaign observations, High-resolution Solar Physics: Past, Present, Future NSO Workshop #30 (国際学会), 2017

Masahito Kubo, 3D Magnetic Field Configuration of Magnetic Flux Cancellations by IBIS - Hinode - IRIS Campaign Observations, Joint Hinode-11/IRIS-8 Science Meeting (国際学会), 2017

久保雅仁、IBIS-「ひので」-IRIS 共同観測による静穏領域フィラメント形成下の磁束キャンセレーション領域の 3次元磁場構造の理解、日本天文学会 2017 年春季年会、2017

久保雅仁、IBIS-「ひので」-IRIS 共同観測による磁束キャンセレーション領域の 3次元磁場構造の理解、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016

Masahito Kubo, How and where is magnetic flux removed solar surface, Workshop on Physics and Diagnostics of Emerging Flux Regions, 2015

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。