

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20379

研究課題名（和文）地磁気擾乱を引き起こす磁気フラックスロープの伝搬過程の研究

研究課題名（英文）Study on propagation process of magnetic flux rope which can be cause geomagnetic storm

研究代表者

伴場 由美（Bamba, Yumi）

名古屋大学・高等研究院（宇宙）・特任助教

研究者番号：30779541

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではまず、太陽風その場観測データから磁気フラックスロープ（MFR）の構造をモデルフィッティングするプログラム群を構築した。このうえで、複数探査機による太陽風その場観測データと太陽表面の観測データが揃っているイベントを対象に、太陽観測衛星SDOおよび内部太陽圏探査機（BepiColombo・Solar Orbiter・Venus Express・WIND・ACE・STEREO-A・MAVEN）のデータ解析を行なった。これにより、太陽表面から噴出したMFRがその伝播過程において太陽風の大規模構造との相互作用等によりで回転や収縮を示唆する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フレア・CMEの発生からMFRの伝搬は連続した過程であるにも関わらず、現状では研究分野が分かれている。本研究は、申請者のこれまでのフレア発生過程の研究（太陽物理学）の知見と、MFRの伝搬過程（惑星間空間物理学）の知見を融合させるものである。従来のCME到来予測モデルは、CMEが発生してから数値シミュレーションを開始しているが、15時間程度で地球に到達するCMEもあり、予測が間に合わない可能性があるが、本研究によってMFR伝搬過程を理解すれば、フレア・CMEの発生から地磁気擾乱を引き起こすMFRの到達の可能性を従来より早くかつ正確に予測する、新しい宇宙天気予報モデルの構築が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We constructed model fitting programs that reproduce geometrical structure of magnetic flux rope from in-situ solar wind data. We then analyzed solar eruption events (flares and coronal mass ejections (CME)) that observed both by solar observing satellite and multiple spacecrafts (BepiColombo・Solar Orbiter・Venus Express・WIND・ACE・STEREO-A・MAVEN). Our analysis results suggest that magnetic flux rope, which erupts from the solar surface, changes its structure by interaction with global structure of the solar wind, during its propagation.

研究分野：太陽物理学，惑星間空間物理学

キーワード：磁気フラックスロープ コロナ質量放出（CME） 太陽フレア 太陽風その場観測 宇宙天気予報

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

太陽表面で発生する太陽フレア (以下、フレア) とコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) はいずれも、太陽表面で発生する、磁気エネルギーの爆発的解放現象である。フレアと CME は太陽表面における同一の磁気エネルギー解放現象の異なる側面を見たものである (e.g., Webb & Howard 2012)。特に、CME が発生すると、磁場を含んだガスの塊が放出され、地球の磁場と相互作用を起こすことで地磁気擾乱を引き起こし、過去に送電網を破壊したこともある (e.g., Gopalswamy+2005)。送電網の発達により、CME による地磁気擾乱のリスクは年々増加しており、その予測が社会的急務となっている。大規模な地磁気擾乱を引き起こすのは、CME で放出されるガスの塊に含まれる磁気フラックスロープ (以下、フラックスロープ) と呼ばれるねじれた磁場構造で、フラックスロープの磁場が強く ( $\geq 10\text{nT}$ )、地球の磁場と逆向き (南向き) で、長時間 ( $\geq 24$  時間) 継続する場合である (cf. オーム社「宇宙環境科学」他)。これまでに、CME で放出されるプラズマの伝搬予測モデルとして WSA-ENLIL+cone model (e.g., Odstrcil+2013) などが提案されているが、フラックスロープの伝搬が考慮されていなかった。そこで近年、フラックスロープの伝搬予測モデルとして、数値シミュレーションに基づく SUSANOO モデル (Shiota & Kataoka 2016) が提案されたが、観測による検証が不十分である。すなわち、地磁気擾乱を起こすようなフラックスロープの地球への到来を正確に予測するためには、フラックスロープの起源であるフレア・CME の発生予測に加えて、「CME により噴出したフラックスロープはどのように時間的・空間的に発展しながら地球に到達するのか」という学術的問いに答える必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、CME で噴出するフラックスロープの伝搬過程、特に磁場構造の発展を理解することである。

## 3. 研究の方法

本研究では、複数の惑星軌道を通じたフラックスロープイベント複数例について、太陽表面から放出されたフラックスロープが水星・金星軌道を経て地球軌道に到達する過程でどのように発展するかを調べた。まず、各惑星軌道上でフラックスロープの磁場強度や速度・密度・温度を「その場」で観測する探査機のデータを用いて、太陽-地球間の各地点における、フラックスロープの3次元磁場構造と伝搬速度を推定する。フラックスロープのその場観測データは、Solar Orbiter (2020年打ち上げ) や BepiColombo (2018年打ち上げ) など、最新の内部太陽圏探査機によるデータを用いる。磁場構造の推定には、円筒形のフラックスロープ形状およびフォースフリー磁場を仮定したモデルフィッティング (c.f., Marubashi & Lepping 2007) を用いた。このうえで、各惑星軌道上でのフラックスロープの3次元磁場構造と伝搬速度をそれぞれ比較することで、フラックスロープが太陽-地球間でどのように磁場構造を変えながら (あるいは保ったまま) 地球に到達するのかを調べた。

#### 4. 研究成果

##### [1] フラックスロープのモデルフィッティングプログラムの改良および関連プログラム群の整備 (c.f., Marubashi & Lepping 2007)

Marubashi & Lepping 2007 により提案された磁気フラックスロープの磁場構造をモデルフィッティングするプログラムの改良を行った。このプログラムでは、線型フォースフリー磁場および軸対称な円筒形のフラックスロープの形状を仮定し、探査機により取得された太陽風磁場（および速度）のその場観測データから、フラックスロープの軸磁場の強度・方位や半径、対掌性などの構造や、探査機との crossing geometry など推定する。本研究により、惑星間空間でその場観測を行う探査機のデータのダウンロード、軌道情報および磁場・プラズマデータの読み込み、モデルフィッティング、フィッティング結果の表示までをより効率的に行うプログラム群を構築した。

##### [2] 2021 年 10 月 9 日 M1.6 クラスフレアにともなう CME の解析

2021 年 10 月 9 日に発生した M1.6 クラスフレアについて、太陽観測衛星 Solar Dynamics Observatory (SDO) により取得された太陽表面磁場データおよび太陽大気の撮像観測データを詳細に解析した。また、太陽表面磁場データから非線形フォースフリー磁場モデリングにより、フレア発生領域上空の 3 次元的磁場構造を推定した。これらの解析に基づき、当該領域での磁気フラックスロープの形成・噴出過程 (M1.6 フレアの発生過程) を調べた。その結果、(1)活動領域の一部がヘールの法則に反している領域の磁気中性線上で磁束の浮上とともにフラックスロープが成長すること、(2) 磁気中性線上に現れた微細磁場構造が逆極性領域に侵入することでフラックスロープが不安定化すること、(3) フラックスロープの噴出にともない M1.6 クラスフレアおよび Halo CME が発生することを明らかにした。

当該フレアにともなう CME は、内部太陽圏に経度方向に並んで存在する BepiColombo (~0.33AU)、Solar Orbiter (~0.68AU)、STEREO-A (~0.96AU)、ACE (~1AU) の 4 つの探査機により観測された。そこで、[1]で整備したフィッティングプログラム群を使用し、各探査機の位置におけるフラックスロープの磁場構造を推定することで、当該 CME が内部太陽圏が伝搬する過程におけるフラックスロープ磁場構造の時間発展を調べた。その結果、当該 CME イベントは Halo CME であったにもかかわらず、フラックスロープはやや北西方向に噴出しており、4 つの探査機はフラックスロープの横腹 (flank) または脚 (leg) の部分を通過したことが示唆された。また、各探査機の位置における、推定されたフラックスロープ軸の向きや半径の比較から、当該 CME イベントが直前に通過した太陽風の大規模構造 (CIR) との相互作用により回転や収縮をした可能性を示唆する結果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伴場由美, 原拓也, 丸橋克英, 岩井一正, 塩田大幸
2. 発表標題 Multi-point spacecraft investigations on the solar erupted magnetic flux ropes propagating through the inner heliosphere on April 2014
3. 学会等名 太陽研究者連絡会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yumi Bamba, Takuya Hara, Katsuhide Marubashi, Kazumasa Iwai, Tomoaki Hori, Go Murakami, Beatriz Sanchez-Cano
2. 発表標題 Integrated multi-point measurements of the solar erupted magnetic flux rope during the CME passage on October 2021 from the solar surface through the inner heliosphere
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of California, Berkeley			
英国	University of Leicester			