

太陽活動現象におけるフレアとCMEの関係性

Scaling Relations Between Solar Flares and Coronal Mass Ejections

武蔵高等学校1年 皿海翔大

背景・目的

太陽面の磁気現象

フレア
コロナ質量放出(CME)

磁気活動に伴い
両者ともが発生する

背景

片方のみが観測されるイベントも存在する
長寿命フレア(LDE)はCMEを起こしやすい
両者のエネルギーについて典型的には同程度とされているが、厳密ではない

目的 フレア観測量からCMEエネルギーを推定する
手法を明らかにする

方法

方針

フレアに対応するCMEを抽出し、関係性を議論する
対象イベント

フレアカタログ^[1]に載る2006年11月から2024年12月までのC8クラス以上の全イベント(3000件弱)

→時間・位置を参考にCMEカタログ^[2]と対応させる

時間はフレアから1時間後まで、位置は同じARにあることを条件とした^註

抽出したデータ

フレア時間,ピークフラックス,CMEエネルギー

→時間発展を線形に近似してエネルギーを算出

註.CMEの同定条件から、同じARで1時間以内に発生したフレアは同一として扱った

結果1

フレアが観測されるCMEを伴っていた割合の統計

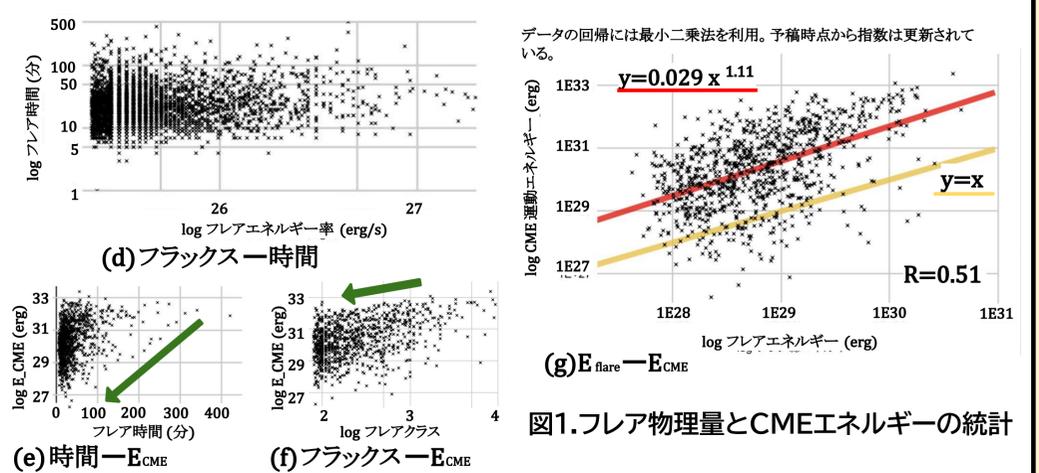
表. フレア統計別CME発生率

(a)フレアの発生時期別			(b)フレアクラス別		(c)フレア時間別	
表内は割合を表す 下はデータ数(表左から)	23c	24c	C	全CME	~15分	全CME
初期	0.31	0.39	667	強CME 0.10	893	強CME 0.10
439, 777	0.23	0.22	M弱	全CME 0.30	15-45分	全CME 0.32
ピーク ^註	0.39	0.27	1652	強CME 0.16	1464	強CME 0.18
258, 1115	0.25	0.15	M強	全CME 0.50	45-75分	全CME 0.53
減衰	0.35	0.34	470	強CME 0.35	268	強CME 0.41
23, 363	0.17	0.23	X	全CME 0.73	75分~	全CME 0.70
全体	0.35	0.34	114	強CME 0.66	187	強CME 0.55
	0.17	0.23	0.18	強CME:10 ³¹ erg以上, M弱:M3.0未満, M強:M3.0以上		

- ・時期別に統一的な傾向はみられない (a)
但し、24周期は強めのCMEが放出される確率が比較的高かった可能性がある
- ・大規模長寿命なフレアはCMEがみられやすい(b)(c)
大規模なCMEの割合も高い 註.ピークは黒点相対数^[3]の前後6ヶ月とした

結果2

フレア物理量とCMEエネルギーの統計



- ・時間はフラックスと関係なく、凡そ一定の分布をしている(d)
- ・エネルギーどうしは指数1.11±0.10(90%CI)のべき関係に近似(g)
→比例関係は信頼区間から外れており、棄却できる可能性が高い
- ・図e,fは右下、左上の端のデータが線形に並んでいる

議論1. 結果1について

- (1) 時期別に統一的な傾向が見られなかった
→24周期で南北のピークがずれた影響か
Wilson90%信頼区間は±0.04程度 = 埋もれている可能性も
- (2) 大規模長寿命なフレアはCMEをよく伴う
→ヘリカルな磁場は大規模長寿命フレアを起こしやすい可能性

議論2. 結果2について

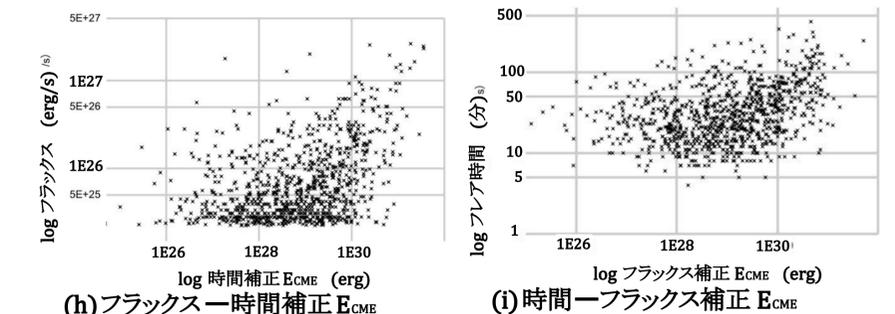
- (1) 時間/フラックスは独立に分布する
エネルギー→磁気エネルギーE_{mag}; B²L³のスケール
時間→アルヴェン波通過時間τ; L/Bのスケール
フラックスf→E_{mag}/τのスケール; B³L²のスケール
→L, Bへの依存が異なり、関係がみられなかった
- (2) 概してE_{CME} > E_{flare}となった
→フレアは局所的、CMEはローブ全体の再結合が関与
- (3) E_{CME} ∝ E_{flare}^{1.1}となった

$E_{flare} \sim \epsilon_{flare} B_{rec}^2 L^2 \delta / 2\mu_0$ ($\delta \propto L^\alpha, 0 \leq \alpha \leq 1$)	plasmoid不安定を仮定 *凡例 ε _{flare} フレアエネルギー効率, ε _{CME} CMEエネルギー効率, B 代表磁場, B _{loc} 局所磁場, L 代表長さ, δ 電流シートの厚さ
$E_{flare}^{1.1} \propto \epsilon_{flare}^{1.1} B_{rec}^{2.2} L^{2.2+1.1\alpha}$	
$E_{CME} \sim \epsilon_{CME} B^2 L^3 / 2\mu_0$	

→優勢な量によってε_{flare} ∝ ε_{CME}^{0.9}やB_{rec} ∝ B^{0.9}やα ≈ 0.7で成立
…それぞれ十分成立しうる
→一方、大規模フレアではピークが短波長側にずれ、観測されるエネルギーが小さくなった可能性も

議論3. 領域制限について

- データバイアスではないかの確認
- 制限線にそって回帰補正 = 補正CMEエネルギー
- もう一方の値と比較する



- (1) 図hについて、時間補正Eが小さなものはフラックスが小さく、観測的バイアスである可能性が高い
- (2) 図iについて、フラックス補正Eが大きなエリアでも単寿命なフレアは存在していて、フレアピークフラックスがCMEエネルギーに上限を課している可能性もある
フラックス ∝ B³L², E_{CME} ∝ B²L³
→2つはB, Lへの依存が似ている
→Bはイベントごとの違いはあまり大きくないために、制限をかけているようにみえた可能性

結論

- ・大規模長寿命なフレアほどCMEを伴いやすく、両者はともにヘリカルな磁場で起こりやすいことを指摘した
- ・CMEはエネルギー的にフレアに卓越している→リコネクションの関与する領域が大きいと考えられる
- ・両者のエネルギーは指数1.11±0.10のべき関係→plasmoid不安定の指数αなどに示唆を与えた
- ・フレアピークフラックスがCMEエネルギーに上限を与えている可能性がある→物理量への依存性によるものか

主要参考文献

[1] Watanabe, K., S. Masuda, and T. Segawa, Solar Physics, 279, 2012.
 [2] SOHO CME Catalogue, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/, ESA & NASA. 2025/12参照.
 [3] 黒点面積データ, https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/db_sunspot.html, NAOJ. 2025/12参照.
 [4] シリーズ現代の天文学10「太陽」, 桜井 隆ら, 日本評論社, 2018.
 [5] シリーズ宇宙物理学の基礎2「宇宙電磁流体力学の基礎」, 柴田 一成ら, 日本評論社, 2023.

謝辞

本研究はJAXAとISEEが管理する“ひのでFlare Catalogue”及び、NASAと米Catholic大学が海軍研究所の協力を得てCDAW Data Centerで作成管理しているSOHO, ESA, NASAのプロジェクトの“SOHO LASCO CME Catalog”を利用して実施されました。
 また、参加にあたって武蔵高等学校教諭及びN高グループ研究部の支援を受けました。