

大規模な太陽フレアの発生と太陽黒点の面積変化の関係

TAKAHASHI, Naoki / 高橋, 直己

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026428>

大規模な太陽フレアの発生と太陽黒点の面積変化の関係

RELATIONSHIP BETWEEN THE OCCURRENCE OF LARGE SOLAR FLARES AND CHARACTERIZATION OF SUNSPOT GROWTH

高橋直己

Naoki TAKAHASHI

指導教員 佐藤 修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

Solar flares are huge explosions in the sun that emit of high energy particles and X-rays. The explosions occur near sunspots, because sunspots store much energy in their strong magnetic fields and emit this energy instantly. Ejections from solar flares sometimes effect significant impacts the earth. Solar flares are the cause of radio and GPS failures and major power outages. To protect our lives, it is necessary to observe the sun and predict solar flares. The research focuses on a system for quantifying sunspot images using image processing. The method is proposed to characterize the sunspot growth process more clearly and mathematically using solar images. These images of visible light show the outlines of a sunspot by image processing. Because the sun is a sphere, the latitude and longitude parameters affect the outlines. The system corrects the parameters and draws the outlines. These outlines form sunspot area and help to survey the character of sunspot growth that occurred large solar flares.

Key Words : Sun, Solar Flare, Sunspot, Image processing

1. 研究背景と概要

太陽は我々にとって最も身近な星であり、今日に至るまで地球に多大な影響を与えてきた。最近では、2023 年 1 月 6 日に、X 線強度で分けられる等級において最大クラスの X クラスの太陽フレアが発生した(X1.2)。大規模な太陽フレアの発生は無線通信、送電設備や人工衛星運用などに障害をもたらす可能性がある。そのため、それらの被害を抑えるために、太陽フレアの発生や太陽フレアのメカニズムの解明は世界的に注目を集めている。2022 年 4 月、総務省の宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会（第 8 回）において、宇宙天気の警報基準に関する WG 報告：最悪シナリオが報告された[1]。太陽フレアによる被害シナリオの想定は我が国では初めての報告となった。今日の情報技術の発展に伴いそれらは重要な社会インフラとして機能している。このシナリオで

は、大規模な太陽フレアによって、船舶無線や航空無線、緊急通報の通信が使用不可またはつながりにくい事態が発生することや、衛星測位・運用に障害が発生することにより、それらを利用する車両、鉄道、航空機、ロボットなどの安全な運用が困難となり、農作業や建築作業、物流や交通の大規模な停滞が予測されている。また磁気圏擾乱による地磁気誘導電流の発生によって、電力インフラの保護装置の誤作動や、変圧器の過熱による損傷が起こることにより、広域停電が各地で発生することや電力の供給が困難となることが予測されている。太陽フレアをはじめとした太陽活動は今日の社会インフラに被害を与える可能性がある。今日の日本では国立研究開発法人情報通信研究機構において深層学習を用いた予測モデルが開発され太陽活動の予測がされている[2]。

本研究における最終的な目的は、地球に被害を与える

可能性のある大規模な太陽フレアが発生する際の兆候を探ることにある。太陽黒点は太陽磁場と密接な関係があり太陽活動の指標となるため、太陽黒点の成長過程を特徴づけることが経験的手法として太陽フレアの兆候を示す可能性がある。太陽フレアの発生について活動領域の大きさやその変動は重要性を持つパラメータの一つであると考えられている[3]。太陽黒点の特徴量として、面積と形に注目した。太陽黒点の形は太陽の自転により一定の視点からとらえることが難しく周縁部に近いほど歪んで見えるため、太陽画像から疑似的に太陽黒点を中心に移動し描画するシステムを作成し成長過程を評価する。

2. 使用するデータ

太陽黒点の画像は、NASA が打ち上げた太陽観測衛星 SDO (Solar Dynamics Observatory)[4] に搭載された観測機器 HMI (Helioseismic and Magnetic Imager)[5] によって 617.3 nm の波長(可視光)で撮影された画像を使用した。大規模な太陽フレアを発生させた活動領域のサンプルとして、2017年9月6日 11:53 (UT)に X 線強度が X9.3 クラスの太陽フレアを発生させた活動領域 NOAA 12673 に注目した。この活動領域に対し、2017年9月1日 00:00(UT)から同年9月9日 00:00(UT)までの区間を 12h 刻みでデータを取得した。分析手法の例として2017年9月6日 12:00 (UT)における画像を使用した。元画像のサイズは 4096×4096 ピクセルのものであり、活動領域を図1のようにトリミングして解析する。

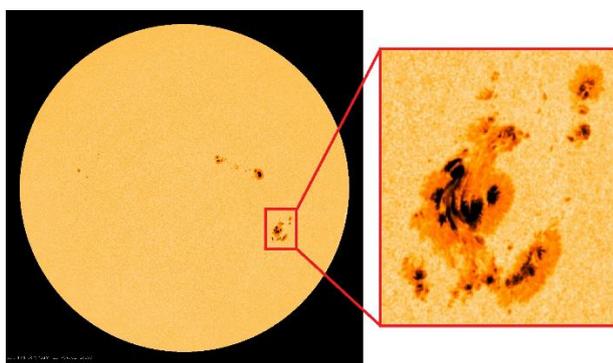


図1 617.3 nm の波長(可視光)で撮影された 2017 年 9 月 6 日 12:00 (UT)の太陽の画像と活動領域 NOAA 12673 をトリミングした画像

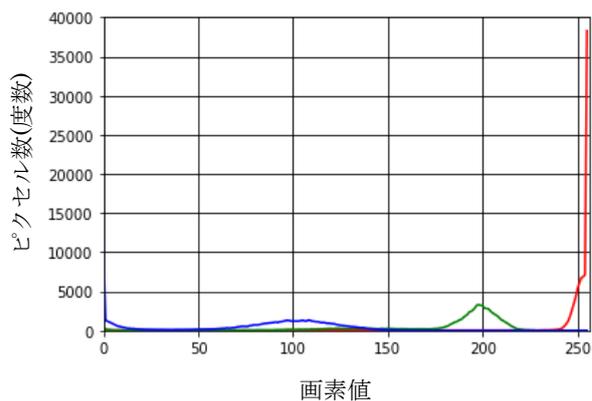
Credit: NASA, SDO, HMI

赤枠内の画像が処理対象画像である。

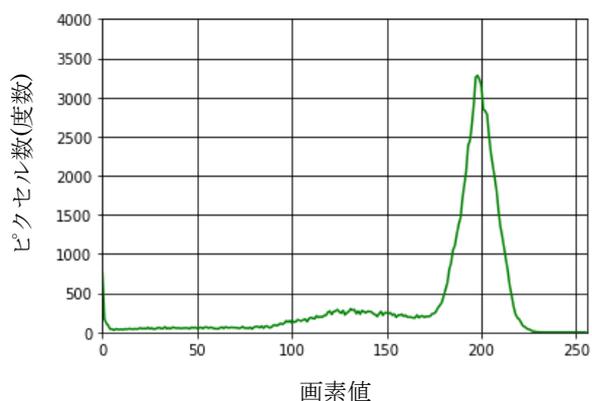
3. 分析方法と結果

太陽黒点の成長過程を定量的に評価するために面積の大きさと形を指標とした。面積と形を定量的に求めるために、太陽表面の緯度経度による歪みを補正する必要がある。本研究では太陽黒点を疑似的に太陽画像の中心に移動させた画像すなわち緯度経度による歪みを補正した画像を作成した。

まず活動領域内の太陽黒点の暗部と半暗部を足し合わせた範囲または暗部のみの範囲を抽出するために、処理対象画像において緑色の画素値のみを抜き出し二値化処理を行った。それぞれの範囲を抽出するための閾値は、太陽黒点の暗部と半暗部を足し合わせた範囲では 160, 暗部のみの範囲では 60 とした。図2は閾値を定めるための図1の処理対象画像における画素値のヒストグラムである。図3は前述の閾値で二値化処理を行った画像である。



(a) 赤色, 緑色, 青色ごとの画素値と度数の関係



(b) 緑色の画素値と度数の関係

図2 活動領域 NOAA 12673 の処理対象画像 (図1) における画素値と度数の関係

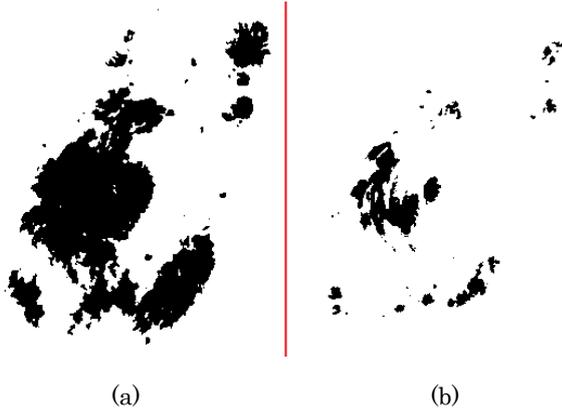


図3 活動領域 NOAA 12673 の可視光画像を
二値化処理した後の画像

- (a) 太陽黒点の暗部と半暗部を足し合わせた範囲
(b) 同じ太陽黒点における暗部のみの範囲

黒く塗りつぶされた箇所が抽出された太陽黒点である。

図3で得られた太陽黒点の二値化画像において、輪郭線を抽出した。図4は抽出した輪郭線の画像である。

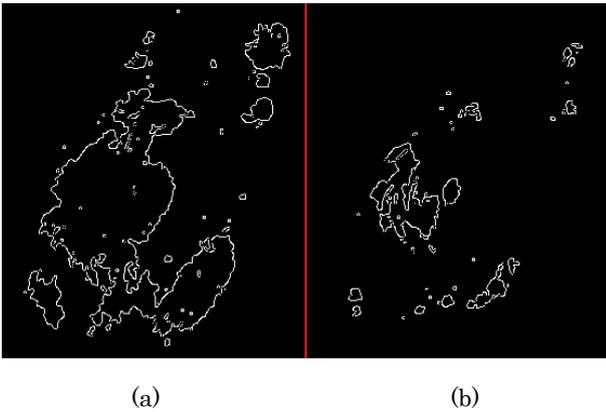


図4 活動領域 NOAA 12673 を二値化処理した画像の
輪郭線の画像

- (a) 太陽黒点の暗部と半暗部を足し合わせた範囲
(b) 同じ太陽黒点における暗部のみの範囲

白い線が抽出された太陽黒点の輪郭線である。

次に輪郭線のデータを疑似的に画像上の太陽の中心に移動した。輪郭線のデータを移動するには、縦方向の軸は下向きに正、横方向の軸は右向きに正とした。画像上の太陽の中心を(2048,2048)とし、画像上の太陽の半径が1887ピクセルであった。このときの緯度を $\theta(0 < \theta < \pi \text{ (rad.)})$ 、経度を $\varphi(-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2} \text{ (rad.)})$ とすると、

輪郭線のデータ点 (y, z) の画像上の緯度と経度は以下のように表される。 x は画像上の手前方向の位置座標、 y は横方向の位置座標、 z は縦方向の位置座標(ピクセル)である。

$$x = \sqrt{1887^2 - y^2 - z^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arccos \frac{z}{1887} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \quad (3)$$

疑似的に画像上の中心に移動させるには移動対象の中心点を定める必要がある。活動領域 NOAA12673 においては、N極の単黒点の位置を追従した。移動対象の中心点の緯度を α と経度を β とすると、これらより、輪郭点のデータを疑似的に画像上の中心に移動させたときの緯度 θ' と経度 φ' は以下のようにあらわされる。

$$\theta' = \theta - \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

$$\varphi' = \varphi - \beta \quad (5)$$

これらより移動後の横座標 Y と移動後の縦座標 Z は以下のように表される。ただし以下の横座標 Y と移動後の縦座標 Z は移動対象の中心点を (y_c, z_c) としたときの値である。 Y, Z がいずれも正の値となるように (y_c, z_c) の値を設定する必要がある。これは座標移動後の画像を作成するための csv ファイルを作成する際のエラー防止のためである。

$$Y = (1887 * \sin \theta' * \sin \varphi') + y_c \quad (6)$$

$$Z = (-1887 * \cos \theta') + z_c \quad (7)$$

求めた (Y, Z) の座標をもとに疑似的に画像上の太陽の中心に移動した輪郭線を作成した。このとき輪郭線をつなぐ(上下左右の1ピクセルで隣接する)ために、求めた (Y, Z) の座標とその周囲1ピクセルに255を、それ以外

の座標に 0 を入力し輪郭線を作成した。図 5 は疑似的に画像上の太陽の中心に移動した活動領域 NOAA 12673 の太陽黒点の輪郭線の画像である。

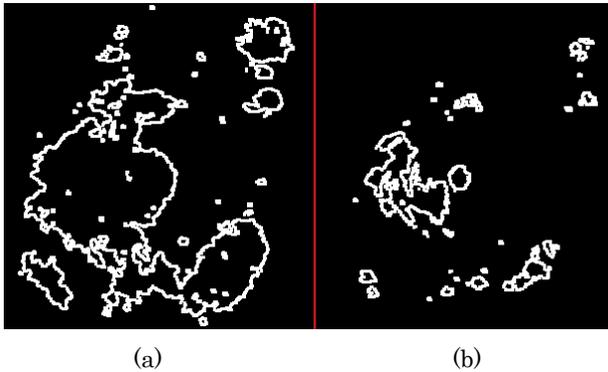


図 5 輪郭線を疑似的に画像上の太陽の中心に移動した活動領域 NOAA 12673 の輪郭の画像
 (a) 太陽黒点の暗部と半暗部を足し合わせた範囲
 (b) 同じ太陽黒点における暗部のみの範囲

白い線が太陽黒点の疑似的な移動後の輪郭線である。

最後に、疑似的に画像上の太陽の中心に移動した太陽黒点の輪郭線の画像において、輪郭に囲まれた範囲を塗りつぶすことによって面積を求めた。図 6 は疑似的に画像上の太陽の中心に移動した活動領域 NOAA 12673 の太陽黒点の輪郭線内を塗りつぶした画像である。図 6 は塗りつぶしの後に色を反転したものであり、図 3 との表示上の縮尺は異なる。同一の縮尺での比較は付録の図 9 に示した。

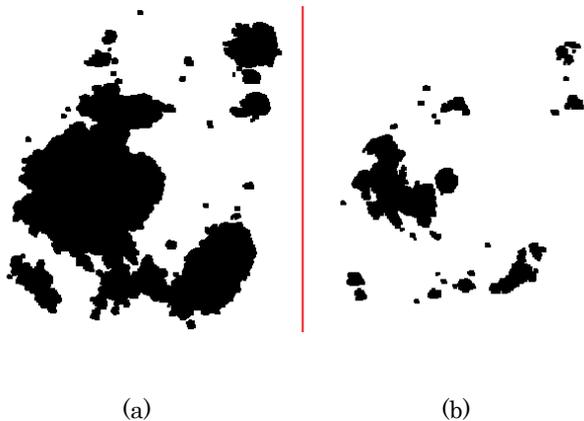


図 6 疑似的に画像上の太陽の中心に移動した活動領域 NOAA 12673 の太陽黒点の輪郭線内を塗りつぶした画像
 (a) 太陽黒点の暗部と半暗部を足し合わせた範囲
 (b) 同じ太陽黒点における暗部のみの範囲

暗部と半暗部を合わせた面積は図 6 (a)の黒色のピクセル数、暗部の面積は図 6 (b)の黒色のピクセル数、半暗部は暗部と半暗部を合わせた面積から暗部のみの面積を減算することによって求めた。

同様に、2017 年 9 月 1 日 00:00(UT)から同年 9 月 9 日 00:00(UT)までの区間における活動領域 NOAA12673 の暗部と半暗部を合わせた面積、暗部の面積、半暗部の面積、黒点全体に対して暗部が占める割合を求め以下の図 7 に示した。

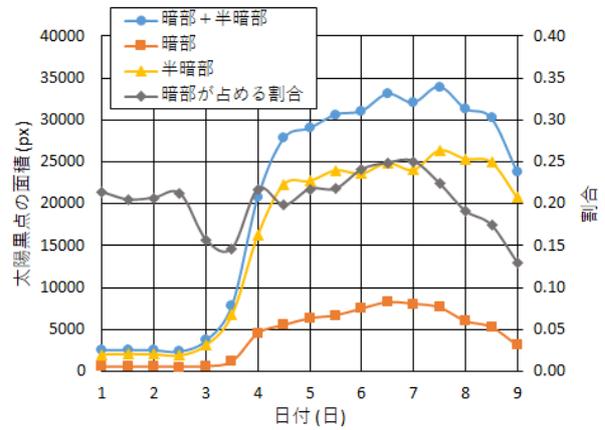


図 7 活動領域 NOAA 12673 の時間経過による面積変動のグラフ

いずれも疑似的に画像上の太陽の中心に移動させる座標の変換を行ったデータを用いている。

活動領域 NOAA12673 において X9.3 クラスの大規模な太陽フレアが 2017 年 9 月 6 日 11:53 (UT)に発生した。この時刻を 0 日としたときの日数と、活動領域 NOAA 12673 の暗部と半暗部を合わせた面積、暗部の面積、半暗部の面積における 12h 経過ごとの面積変化の割合を以下の図 8 に示した。

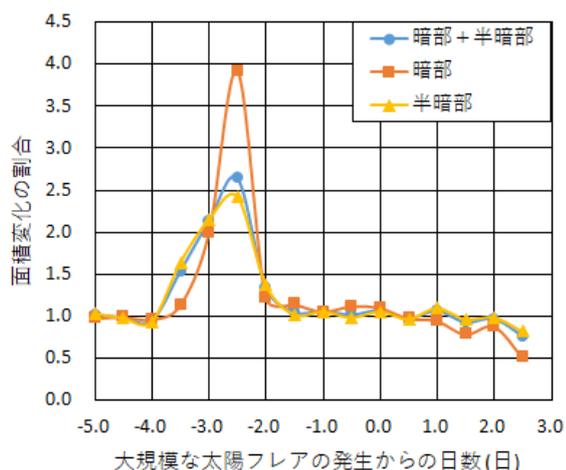


図8 活動領域 NOAA 12673 において大規模な太陽フレア(X9.3)が発生した日(2017年9月6日 11:53 (UT))からの日数と 12h 経過ごとの面積変化の割合のグラフ

4. 結論

緯度経度による歪みを補正することで、球面による影響を減らした太陽黒点の形をとらえることの手掛かりとなった。それにより周縁部を含めた定量的な面積算出が可能となり、観測可能な区間においてより長期的な面積変動を求めることができた(図7)。図8より、活動領域 NOAA 12673 においては太陽フレアが発生する 2~3 日前に太陽黒点の面積が増加することが分かった。特に、暗部では 12h での面積変化の割合が4倍近くを示し、半暗部は暗部よりもより早い時刻から増加する特徴を示した。現状では活動領域 NOAA 12673 に限った調査であるので、大規模な太陽フレアのサンプルを増やし、より一般的な太陽黒点の面積変動の特徴や、発生した X 線強度と面積変動の特徴づけを行うつもりである。

また、疑似的な移動後の輪郭線を描画する手法について、現在行っている周囲 1 ピクセルを同時に描画する手法では、輪郭線はつながりやすくなるが細かい形をとらえることが難しくなる(図9)。加えて、周縁部では絶対的に元画像の輪郭線のデータ点が少なくなることにより人の手でつなげる例があった。これらのことから輪郭線の疑似的な移動に関して議論の余地があると考え評価を続けるつもりである。

5. 付録

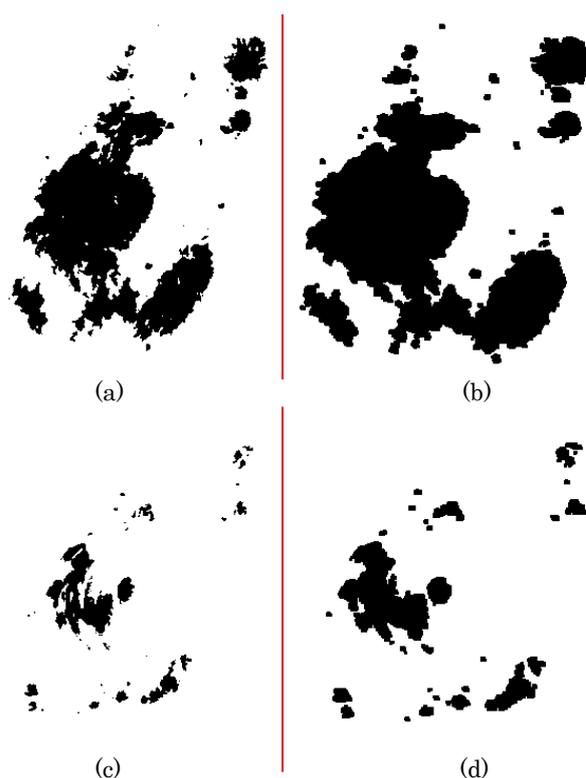


図9 活動領域 NOAA 12673 の太陽黒点の形について

- 同じ縮尺で輪郭線の疑似的な移動前後の比較の図
- (a) 太陽黒点の暗部と半暗部を足合わせた範囲
輪郭線の疑似的な移動はしていない
 - (b) (a)と同じ範囲
輪郭線の疑似的な移動後に塗りつぶした
 - (c) 同じ太陽黒点における暗部のみの範囲
輪郭線の疑似的な移動はしていない
 - (d) (c)と同じ範囲
輪郭線の疑似的な移動後に塗りつぶした

謝辞

本研究にあたり、春日 隆 教授、佐藤 修一 教授より終始多大なご指導、助言を戴いた。ここに深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 総務省, 津川卓也 (NICT) , WG メンバー:
宇宙天気警報基準に関する WG 報告: 最悪シナリオ, 2022
- 2) Nishizuka et al.: Operational solar flare prediction model using Deep Flare Net, Earth, The Astrophysical Journal, 2018 May 10
- 3) Nishizuka et al.: Solar Flare Prediction Model with Three Machine-learning Algorithms using Ultraviolet, The Astrophysical Journal, 2017 February 1
Brightening and Vector Magnetograms
- 4) NASA: SDO(Solar Dynamics Observatory), <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>, 2023年2月1日閲覧
- 5) Stanford University, Stanford Solar Group: HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) <http://hmi.stanford.edu/>, 2023年2月1日閲覧
- 6) S.C.Chapman, S.W.McIntosh, R.J.Leamon and N.W.Watkins: Quantifying the Solar Cycle Modulation of Extreme Space Weather, 2020
- 7) Shin Toriumi, Vladimir S. Airapetian, Hugh S. Hudson, et al.: Sun-as-a-star Spectral Irradiance Observations of Transiting Active Regions, The Astrophysical Journal, 2020 October 10
- 8) 鈴木 建:高校生からの天文学 驚異の太陽 太陽風やフレアはどのように起きるのか, 株式会社 日本評論社, pp.24-70, 2020.
- 9) 花岡庸一郎:太陽は地球と人類にどう影響を与えているか, 光文社新書, p.106, pp.137-141, 2019
- 10) 自然科学研究機構 国立天文台 代表者台長 常田 佐久:理科年表 2020, 丸善出版株式会社, pp.97-98, p.101, 2019.
- 11) 国立天文台:太陽観測プロジェクト 2017年9月の太陽活動, https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/activity/2017/activity_2017.html, 2023年2月1日閲覧