

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04033

研究課題名(和文) 百年間のデータを駆使した太陽活動とその地球環境への影響の研究

研究課題名(英文) Studies on solar activity and its influence on Earth's environment using data over a century

研究代表者

櫻井 隆 (SAKURAI, Takashi)

国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・名誉教授

研究者番号：40114491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：140年以上にわたる太陽黒点群面積のデータを統計的に解析した。面積の分布関数がべき乗分布であれば、どんなに大きな黒点群も長く待ちさえすれば現れることになるが、現在までのデータですでに、べき乗分布より急速に減少する振る舞いが見えている。言い換えれば、いくら待っても超巨大黒点は現れ得ないということになる。同様の解析を、40年にわたる太陽フレアのX線観測データ、太陽類似星の可視光のフレア観測データについても行なった。どちらのデータについても、分布関数は大エネルギー側ではべき乗分布より急激に減少している、即ち太陽フレアにも恒星の超巨大フレアにも規模の上限がある、という結論を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、太陽の活動とその地球環境への影響について注目が集まり、宇宙天気予報というキーワードで全世界で研究が進められている。フレア爆発は人工衛星の故障、高緯度地方の送電網への被害も起こすことが知られている。大きなフレアほど、あるいはフレアのエネルギーの源である黒点群の面積が大きいほど、地球への影響も大きいと予想される。恒星で起こる巨大黒点、巨大フレアとの類推から、太陽でも激甚宇宙天気災害があり得るとの説もある。しかし今回の研究では、これまでなされていなかった、長期間にわたる観測データの詳細かつ厳密な統計解析の結果、そのような可能性は極めて低いことを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：The data of sunspot group areas accumulated over 140 years were statistically analyzed. If the distribution function of sunspot areas is a power-law distribution, extremely large sunspots may appear if we wait long enough. However, the data to date already show a decline of the distribution faster than a power-law distribution. In other words, no matter how long we wait, no super giant sunspots will appear. A similar analysis was performed for X-ray observations of solar flares over a 40-year period and visible flare observations of solar-like stars. In both cases, we can conclude that the distribution functions decrease faster than the power-law distribution at high energies. Namely, there is an upper limit to the sizes of solar flares and stellar superflares.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽 太陽黒点 太陽フレア 太陽の周期活動 恒星フレア 太陽活動の地球影響 太陽の長期変動

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

(1) 近年、太陽の活動とその地球環境への影響について注目が集まり、全世界で研究が進められている。その一つは「宇宙天気研究」と呼ばれるもので、太陽での爆発(太陽フレア)がいつ、どのくらいの規模で起こるか、起こった後1~2日して地球軌道に達する擾乱(コロナ質量放出、CME)が地球に衝突するかどうか、地球に当たる場合我々の生活にどのような影響があるかを研究する。大きなフレアの後には、電波通信障害、人工衛星の故障、高緯度地方では送電網への被害もあることがわかっている。これに対して「宇宙気候学」と呼ぶような、太陽黒点の11年周期活動やさらに長期の太陽変動と地球環境との関係も注目されている。大フレアは大黒点群によって引き起こされることが多いので、太陽はどのくらい大きな黒点を持ちうるのか、をできるだけ長期間のデータを用いて実証的に示すことができれば、大フレアによる地球への影響の上限を見積もることができる。NASAの太陽系外惑星探査衛星 Kepler が、太陽類似星において超巨大フレアを検出した(文献1)ため、太陽でもそのような極端現象が起こりうるのかどうかにも注目が集まっている。

(2) 「宇宙気候学」ではまた、17世紀(1645~1715年)の黒点が異常に少なかった時期(モーンダー極小期)には全地球的に寒冷(0.5度ほど低温であったとされる)であったことから、太陽活動の変調が地球の気候変動の一要因となっているかどうか、も大きな研究テーマである。しかし例えば、気候に影響を与えそうな太陽の紫外線強度など、近代的な観測データの蓄積はまだ50年に満たないので、太陽活動の気候影響を論ずるには、黒点数など百年以上の蓄積がある太陽活動の指標と、近代的な太陽観測データ、および気候の指標の間の定量的関係を導く研究がまず必要である。そのような研究が世界的にも徐々にではあるが始まっている。

### 2. 研究の目的

(1) 1610年のガリレオやハリオットによる黒点の発見に始まり、黒点数のデータはすでに400年以上の蓄積がある。より定量的な、黒点群の面積については、英国グリニッジ天文台で1874~1976年に観測が行われ、これを延長した米国・海洋大気庁(NOAA)などのデータが現在まで続いている。この黒点群面積のデータから、その統計分布を解析し、大面積群の発生頻度を推定する。

(2) 太陽フレアについては、最も信頼できるデータは米国 NOAA の GOES 衛星の X 線観測で1975年からのデータがある。これを解析して大フレアの発生頻度を求めるとともに、太陽類似の恒星に見られる超巨大フレアの発生頻度分布との比較を行う。

(3) 太陽の紫外線放射の間接的指標となると考えられる電離カルシウムの K 線(波長 393.4nm)は、国立天文台に1917年からの太陽全球画像データがあり、フランスのムードン天文台(1893年から)、インドのコダイカナル天文台(1904年から)、米国のウィルソン山天文台(1917年から)とならぶ貴重なデータである。これを活用して、太陽活動と地球の気候変動の関係を探る手がかりとする。

### 3. 研究の方法

(1) 140年以上にわたる太陽黒点群面積のデータ(データの提供元は英国グリニッジ天文台と米国 NOAA)を統計的に解析する。分布関数としては、べき乗分布の他、大面積側でこれより速く減衰するガンマ関数分布や対数正規分布、ワイブル分布など、地震のエネルギー分布の解析にも用いられる分布関数も候補とする。結果の信頼度の評価も、ブートストラップ法や AIC(赤池情報量基準)など、確立した厳密な方法に則って実施する。同様の解析を、40年にわたる太陽フレアの X 線観測データ(データの提供元は NOAA)、太陽類似星の可視光のフレア観測データ(NASA の Kepler 衛星による)についても行なう。

(2) カルシウム K 線の波長で撮影された太陽画像はフランス、インド、アメリカ、日本などにあり、観測期間が異なる。観測期間が重複する年でも、一観測所だけでは観測日に抜けがあるため、データベースとして充実させることが先ず必要である。そのため、多国にわたる国際共同研究を実施する。

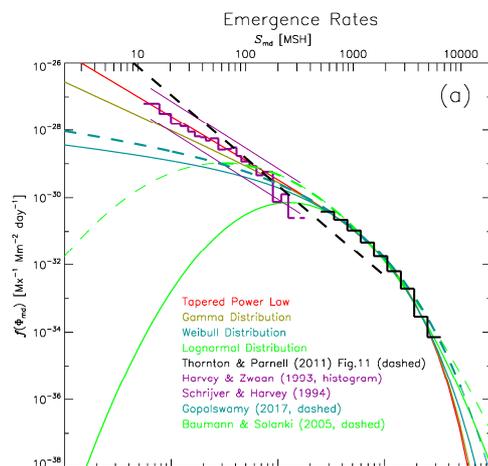


図1: 太陽黒点群の磁束(グラフ下の横軸)および面積(グラフ上の横軸)に対する発生確率の分布。黒の階段状グラフが観測値、赤と草色が我々のモデル、他の色はこれまで出版されていた結果やモデルである(文献2)。

#### 4. 研究成果

(1) 140年以上にわたる太陽黒点群面積のデータを統計的に解析した結果、べき乗分布より急速に減少する、指数関数的振る舞いが見えている、という結果を得た(図1)。最もよく合うのはガンマ関数分布である。面積の分布関数がべき乗分布であれば、どんなに大きな黒点群も長く待ちさえすれば現れることになるが、今回の結果によれば、太陽黒点の大きさには実質上上限があり、いくら待っても超巨大黒点は現れ得ないということになる。一方、太陽表面に同時に存在する黒点の総面積は、個々の黒点が超巨大でなくても、黒点の寿命が長ければ大きくなる。これは、太陽類似星で観測されている巨大黒点が、活発な磁気活動の他に、黒点の散逸過程が抑えられていれば実現しうることを示唆している。これらを主張した論文を *Astrophysical Journal* 誌より出版した(文献2)。

(2) 同様の解析を、40年にわたる太陽フレアのX線観測データ、太陽類似星の可視光のフレア観測データについても行なった結果、どちらのデータについても、分布関数は大エネルギー側ではべき乗分布より急激に減少している、即ち太陽フレアにも恒星の超巨大フレアにも規模の上限がある、という結論を得た(図2)。この結果は *Physics* 誌より出版した(文献3)。

(3) このほか、国立天文台とその前身機関により1917年から蓄積されてきた太陽彩層の活動度を示すカルシウムK線画像の解析は、ドイツ、イタリア、フランス、スペイン、アメリカ、インド、ロシアなど多国にわたる共同研究として、日本からは国立天文台と京都大学が参加して結実し出版した(文献4)。これは、太陽活動と地球の気候変動の関係を探る上で重要な達成点と考えている。

(4) 国立天文台で実施している磁場観測については、水平方向磁場の統計的性質(文献5)や、ロシアの共同研究者と実施した他の観測装置との比較校正(文献6)について論文を出版した。また磁場観測を含む国立天文台の長期継続観測プログラムについても報告した(文献7)。

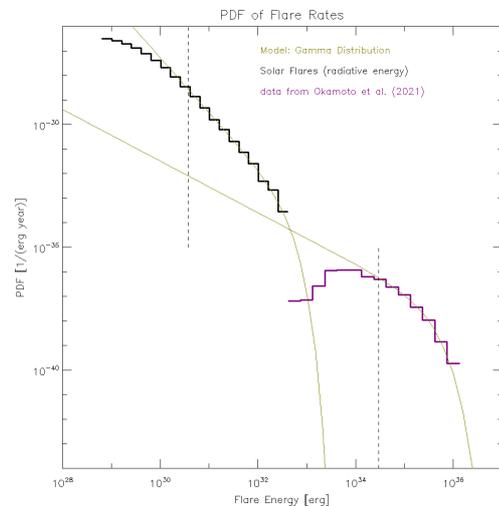


図2：太陽フレア(黒) 恒星フレア(紫)のエネルギー頻度分布と我々のモデル(草色)(文献3)

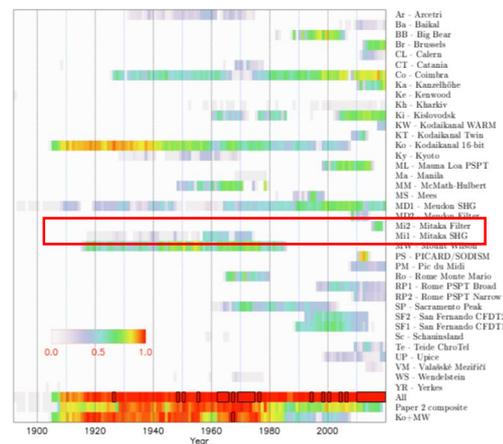


図3：国際共同研究によるカルシウムK線のデータベース(横軸は年)。赤枠で囲ったのが国立天文台の寄与部分である(文献4)

#### <引用文献>

1. Maehara, H. et al., Superflares on solar-type stars. *Nature* 2012, 485, 478-481.
2. Sakurai, T. and Toriumi, S., Probability Distribution Functions of Sunspot Magnetic Flux. *Astrophys. J.* 2023, 943, 10.
3. Sakurai, T., Probability Distribution Functions of Solar and Stellar Flares. *Physics*, 2023, 5, 11-23.
4. Chatzistergos, T. et al., Analysis of full-disc Ca II K spectroheliograms III. Plage area composite series covering 1892-2019. *Astron. Astrophys.* 2020, 639, A88.
5. Hanaoka, Y., Sakurai, T. Internetwork Magnetic Fields in Fe I 1564.8 nm Full-disk Images. *Astrophys. J.* 2020, 904, 63.
6. Demidov, M., Hanaoka, Y., Sakurai, T., Wang, X.F. Large-Scale Solar Magnetic Fields Observed with the Infrared Spectro-Polarimeter IRmag at the National Astronomical Observatory of Japan: Comparison of Measurements Made in Different Spectral Lines and Observatories. *Solar Phys.* 2020, 295, 54.
7. Hanaoka, Y., Sakurai, T., Otsuji, K., Suzuki, I., Morita, S. Synoptic solar observations of the Solar Flare Telescope focusing on space weather. *J. Space Weather Space Clim.* 2020, 10, 41.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Kusano Kanya他50名、Sakurai Takashiを含む	4. 巻 73
2. 論文標題 PSTEP: project for solar-terrestrial environment prediction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 id.159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01486-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shin Junho, Kano Ryouhei, Sakurai Takashi, Kim Yeon-Han, Moon Yong-Jae	4. 巻 23
2. 論文標題 Detailed Calibration of the Off-Axis Optical Characteristics for the X-Ray Telescope onboard Hinode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EGU General Assembly	6. 最初と最後の頁 id.13004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/egusphere-egu21-13004	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Demidov M. L., Hanaoka Y., Sakurai T., Wang X. F.	4. 巻 295
2. 論文標題 Large-Scale Solar Magnetic Fields Observed with the Infrared Spectro-Polarimeter IRmag at the National Astronomical Observatory of Japan: Comparison of Measurements Made in Different Spectral Lines and Observatories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 id.54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11207-020-01620-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chatzistergos Theodosios、ほか18名（Sakurai Takashiを含む）	4. 巻 639
2. 論文標題 Analysis of full-disc Ca II K spectroheliograms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A88 ~ A88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202037746	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Hanaoka Yoichiro, Sakurai Takashi, Otsuji Ken'ichi, Suzuki Isao, Morita Satoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Synoptic solar observations of the Solar Flare Telescope focusing on space weather	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Space Weather and Space Climate	6. 最初と最後の頁 41~41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/swsc/2020044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hanaoka Yoichiro, Sakurai Takashi	4. 巻 904
2. 論文標題 Internetwork Magnetic Fields Seen in Fe i 1564.8 nm Full-disk Images	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63~63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbc07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wiegmann Thomas, Sakurai Takashi	4. 巻 18
2. 論文標題 Solar force-free magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Living Reviews in Solar Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41116-020-00027-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakurai Takashi, Toriumi Shin	4. 巻 943
2. 論文標題 Probability Distribution Functions of Sunspot Magnetic Flux	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 10~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca28a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakurai Takashi	4. 巻 5
2. 論文標題 Probability Distribution Functions of Solar and Stellar Flares	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics	6. 最初と最後の頁 11~23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/physics5010002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 桜井 隆、鳥海 森
2. 発表標題 太陽フレア、恒星フレアのエネルギー頻度分布
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桜井 隆、鳥海 森
2. 発表標題 太陽黒点群の出現頻度分布、面積分布、及び総面積分布
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森田 諭、花岡庸一郎、桜井 隆、勝川行雄、末松芳法
2. 発表標題 国立天文台三鷹太陽フレア望遠鏡近赤外偏光分光観測装置の SQL-DB と連携した pipeline 処理と較正精度向上
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田 諭、桜井 隆、花岡庸一郎、勝川行雄
2. 発表標題 国立天文台太陽フレア望遠鏡赤外偏光分光観測装置データ評価と機器較正改修
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桜井 隆、鳥海 森
2. 発表標題 太陽表面の磁場構造のサイズ分布
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2021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			
ドイツ	マックスプランク太陽系科学研究所			
ロシア連邦	ロシア科学アカデミー太陽地球間物理学研究所			
中国	中国国家天文台雲南天文台			
韓国	慶熙大学	韓国天文研究院		