

太陽活動領域の特徴量を用いたデリンジャー現象の多変量解析

OZAKI, Seiya / 尾崎, 聖也

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

62

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2021-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00023995>

太陽活動領域の特徴量を用いた デリンジャー現象の多変量解析

MULTIVARIATE ANALYSIS OF DELLINGER EFFECT
USING FEATURES OF THE SOLAR ACTIVE REGION

尾崎聖也

Seiya OZAKI

指導教員 春日隆

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 known to affect the earth and its surrounding outer space, causing various damages to social infrastructure and human life. In this study, two types of multivariate analysis are performed based on the feature database of the solar flare prediction model "Deep Flare Net" and the solar X-ray observation data of the GOES satellite to determine whether or not the solar flare is accompanied by the Dellinger effect. As a result, it was found that the ultraviolet emission of the chromosphere is an important factor for separation in the structural analysis.

Key Words : Dellinger Effect, Solar Flare, Solar X-ray

1. 研究背景

太陽フレアは、太陽系で最大の爆発現象であり、天体プラズマ現象の中でも最も観測データに富んだ現象である。近年では、太陽観測衛星「ひので」やSDO衛星による衛星観測により、常時高分解された太陽表面上の各高度における状態を知ることができるようになった。一方、現代社会において、通信技術の発達が目まぐるしく、一つの社会インフラとして必要不可欠な存在になっている中で、太陽フレアのみならずX線放射、高エネルギー粒子や地磁気擾乱といった現象は、我々の生活に影響を及ぼすものである。特に太陽フレアに伴ったX線強度の急増による短波通信障害（デリンジャー現象）は、航空機や船舶における長距離通信や衛星測位に影響を与える。このような理由から2019年11月7日からNICT（情報通信研究機構）がICAO（国際民間航空機関）のグローバル宇宙天気センターの一員として、太陽活動に伴う通信や測位システムへの影響、放射線被ばく量等の情報（宇宙天気情報）の提供を開始したように、太陽フレア発生メカニズムの理解と予測

精度の向上が喫緊の課題となっている。近年では、太陽における特に磁場の強い領域である太陽活動領域における特徴量を用いた機械学習によって、太陽フレアの予測精度が高まりつつある^[1]。

(1) 太陽フレア

主に活動領域と呼ばれる黒点群で発生する太陽フレアは、太陽外層大気（主にコロナ）において、磁気エネルギーが熱エネルギー、運動エネルギーなどの別の形態のエネルギーに変換される過程である。同時に衝撃波やプラズマ噴出が発生し、地球に接近した際、突然の磁気嵐を起こすことがある。また、太陽全面からの軟X線強度を静止軌道上で常時モニタするGOES衛星群は、観測したピーク放射強度の大きさにより、太陽フレアの規模をクラス分けしている。これをGOES X線クラスと呼び、太陽フレアの規模を表す指標として広く用いられている。表1のように各クラスは1桁ずつ大きさが異なっており、XクラスはMクラスの10倍の放射強度を示していることになる。

表 1 GOES 衛星の X 線強度によるフレアクラスの分類

クラス	X線強度 (erg cm ⁻² s ⁻¹)
A	10 ⁻⁵
B	10 ⁻⁴
C	10 ⁻³
M	10 ⁻²
X	10 ⁻¹

(2) 宇宙天気現象

太陽活動は太陽フレアやコロナ質量放出 (CME) などによって、8 分程度から数日の時間をおいて、さまざまな放出物が地球及び周辺の宇宙空間に影響を及ぼし、社会インフラや人間の生活にまで影響を及ぼすことがある。このような太陽活動による宇宙環境の擾乱のうち人間活動や社会インフラに悪影響をおよぼすものが「宇宙天気」または「宇宙天気現象」と呼ばれる。宇宙天気現象の原因となる主な太陽面現象には、太陽フレア、CME、コロナホールなどが挙げられる。

(3) デリンジャー現象

デリンジャー現象とは、太陽フレアに伴った X 線強度の急増が原因で起こる通信障害の一つである。地球の超高層大気は、太陽からの極端紫外線や X 線の吸収などにより一部が電離された状態になっており、電離圏と呼ばれている。電離圏は高度 60 km から 1000 km 以上にわたって形成され、その高度分布の特徴から D 領域、E 領域、F 領域といった領域に分けられる。X 線強度の急増は、D 領域に異常電離をもたらし、通常は透過される短波帯の電波を吸収してしまうため、航空機や船舶などにおける長距離通信の品質劣化や通信不能となる障害を引き起こす^[2]。

2. 研究目的

太陽フレアの放出物による地球上における社会インフラへの影響の 1 つとして、デリンジャー現象を取り扱う。太陽フレア予測モデルの特徴量データベースおよび、GOES 衛星による太陽 X 線観測をもとにして作成された短波減衰データを用いて、2 種類の多変量解析を行い、デリンジャー現象を伴う太陽フレアかどうか判断するための構造分析とデリンジャー現象の予測を目的としている。

3. 分析方法

活動領域ごとの特徴量とデリンジャー現象の観測データを用いて、以下の 2 種類の多変量解析を行った。特徴量データベースにはそれぞれの活動領域における 1 時間おきの各特徴量の値やフレアクラス、フレアの発生履歴などが保存されている。このデータベースからそれぞれの分析における対象のデータを集めて Flare Data Set (FDS) とし、新しいデータセットを作成した。データセットには以下の 3 種類の活動領域を選択した；1) 地球電離圏でデリ

ンジャー現象を伴う太陽フレアが発生した、2) 地球電離圏でデリンジャー現象を伴わない太陽フレアが発生した、3) 太陽フレアが発生しなかった活動領域である。

(1) 主成分分析による構造分析

主成分分析を用いて太陽活動領域に関する多変量データの構造分析を行った。本分析に用いた各データの選択基準は次に示すとおりである。デリンジャー現象を伴う太陽フレアデータには以下の基準により選択した；1) 太陽フレア発生あり、2) 同フレアに伴いデリンジャー現象の発生した。デリンジャー現象を伴わない太陽フレアデータには以下の基準により選択した；1) 太陽フレア発生あり、2) 同フレアに伴いデリンジャー現象の発生していない。データには以下の基準により選択した；1) 太陽フレアが発生しなかった、2) 同領域 (同 ARID) 内の全観測で太陽フレアが発生しなかった領域である。また、次の基準のいずれかを有した場合は対象から除外した；1) 対象のフレアの発生に伴ったデリンジャー現象か判断できない、2) 他の活動領域で同時刻にフレアが発生している、3) 同活動領域内で直前に巨大なフレアが発生している場合である。各データは Deep Flare Net の特徴量データベース上から取得した。また使用言語は R である。

(2) 重回帰分析によるデリンジャー現象の予測

太陽活動領域の多変量データを用いて、太陽フレアに伴うデリンジャー現象に関して重回帰分析を行った。本分析に用いたデータは以下の基準により選択した；1) M クラスフレア発生の 1 時間前、2) 同フレアに伴ったデリンジャー現象の確認ができた活動領域である。また、除外項目は前述の通りである。R を利用して、効果量、検出力、有意水準、パラメータ数を設定することでサンプル数を 70 個に決定した。各データは Deep Flare Net の特徴量データベース上から取得した。

表 2 サンプル数の決定

パラメータ数	効果量	検出力	有意水準	サンプル数
6	0.25	0.8	0.05	61
7	0.25	0.8	0.05	65

4. 結果

(1) 主成分分析の結果

主成分分析 (PCA) を行った Flare Data Set (FDS) のうち FDS 6 と FDS 11 の結果を以下に示した。FDS 6 は、M クラスフレアに伴ってデリンジャー現象が発生した活動領域を 70 個、太陽フレアの起こらなかった活動領域を 70 個用いて、全特徴量で PCA を行った FDS 5 の第 1 主成分負荷量のうち絶対値が 0.15 以上であった 16 個の特徴量からできている。表 3 に第 1 主成分から第 3 主成分の標準偏差、寄与率、累積寄与率を示した。

表3 FDS 6 の PCA の結果

主成分	PC1	PC2	PC3	...
標準偏差	3.33	1.28	0.96	...
寄与率	0.69	0.102	0.06	...
累積寄与率	0.69	0.79	0.85	...

表2より、PC1とPC2の累積寄与率が0.79であるので、この2つの主成分を用いた散布図(図1)は、データセット内の全変動の79%を示していることがわかる。第1主成分は全て正であったので、大きな測定値を持つ活動領域が大きな値を示している。また、第2主成分は平均磁場、彩層発光の面積、最大強度、輝度総量の4個の特微量とその他の対比で表されている。

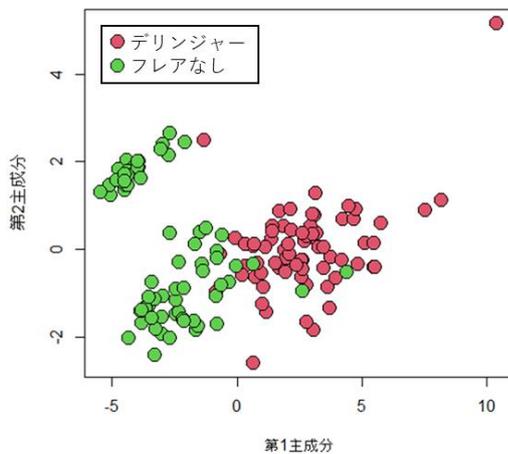


図1 PC1とPC2による分布(FDS 6)

FDS 11は、Mクラスフレアに伴ってデリンジャー現象が発生した活動領域を70個、デリンジャー現象が伴わない太陽フレアが発生した活動領域を70個、太陽フレアの起こらなかった活動領域を70個用いて、全特微量でPCAを行ったFDS 9の第1主成分負荷量のうち絶対値が0.15以上であった15個の特微量からできている。表3に第1主成分から第3主成分の標準偏差、寄与率、累積寄与率を示した。

表4 FDS 11 の PCA の結果

主成分	PC1	PC2	PC3	...
標準偏差	3.95	1.60	0.99	...
寄与率	0.64	0.17	0.07	...
累積寄与率	0.64	0.81	0.88	...

表3より、PC1とPC2の累積寄与率が0.81であるので、この2つの主成分を用いた散布図(図2)は、データセット内の全変動の81%を示していることがわかる。第

1主成分は全て正であったので、大きな測定値を持つ活動領域が大きな値を示している。また、第2主成分は磁気中性線の本数、長さの和、最大長、彩層発光面積、輝度総量、および面積の6個の特微量とその他の対比で表されている。

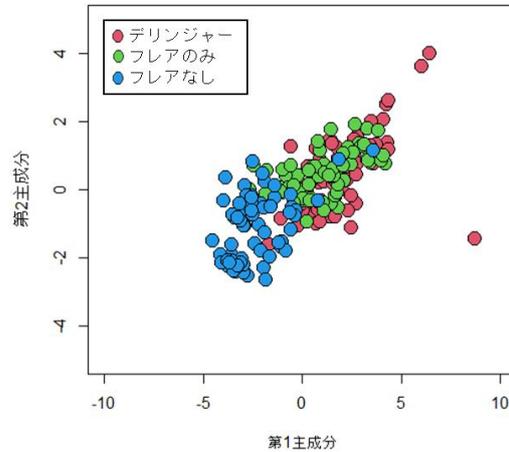


図2 PC1とPC2による分布(FDS 11)

(1) 重回帰分析の結果

デリンジャー現象を伴ったMクラスフレアが発生した活動領域における1時間前のデータを70個用いて、各特微量と目的変数の相関係数を調べた。目的変数には、地球電離圏におけるデリンジャー現象の継続時間と、太陽フレアのX線強度を用いた。その結果、相関係数が高かった特微量7個を取り出し、重回帰モデルを作成した。表5はデリンジャー現象の継続時間を目的変数とした3種類の特微量に関する分析結果である。

表5 デリンジャー現象の継続時間を目的変数とする重回帰分析の結果

変数	偏回帰係数	t値	p値
Flrflag	11.469	1.351	n.s.
logXmax1d	18.255	2.246	*
uv131max1d	0.003	1.082	n.s.
定数項	-12.979	-0.686	n.s.

n.s. : 非有意, * : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.01

表6は、太陽フレアX線強度を目的変数とした同特微量に関する分析結果である。この重回帰モデルの決定係数は0.38であったため、精度は高くないという結果となった。

表6 太陽フレア X 線強度を目的変数とする重回帰分析の結果

変数	偏回帰係数	t値	p値
Flrflag	2.2475	4.53	***
logXmax1d	0.0003	1.74	.
uv131max1d	23.1526	2.30	*
定数項	-7.6036	-3.44	**

n.s. : 非有意, * : $p < 0.05$,

** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$, . : $p < 0.01$

特徴量の中で相関係数が高い特徴量を説明変数とする重回帰モデルでは、デリンジャー現象の発生を予測するのに有意な重回帰モデルを得ることはできなかった。

5. 考察

FDS 6 および FDS 11 の主成分分析の結果から、太陽フレアが発生した活動領域と太陽フレアが発生しなかった活動領域の第1主成分による分離は確認できた。しかし、デリンジャー現象の発生が伴う場合と、伴わない場合を説明する主成分を見つけることはできなかった。それぞれの主成分で共通して第2主成分の正の負荷量に彩層部分の

紫外線発光に関する特徴量を有していたことから、黒点の成長を観測するうえで重要な彩層の活動に注目することによって、太陽フレアの規模をより分離することのでき、その規模の予測によってデリンジャー現象の発生や継続時間も予測できるのではないかと考察する。重回帰分析に関して、デリンジャー現象や太陽フレアの発生予測に有意な重回帰モデルを見つけることはできなかった。その原因として、目的変数と説明変数の相関係数の低さにあると考えられる。本研究では、説明変数からの直接的な予測を目指していたが、主成分分析の結果を踏まえ、今後は彩層面の紫外線発光や磁気中性線の大きさに関する分析を行うことが必要であると考えている。

参考文献

- 1) Nishizuka, N. : Solor Flare Prediction by Deep Neural Networks : Deep Flare Net, The astronomical herald, Vol.112(6), pp. 385-393, 2019
- 2) 桜井隆, 小島正宜, 小杉健郎, 柴田一成 : 太陽 [第2版], シリーズ現代の天文学 第10巻, 日本評論社, 2018, pp169-330.