

宇宙天気データを11年周期で見る

九州大学 篠原 学

はじめに

2006年12月5日、太陽活動が極小期であるにもかかわらず、X9.0の大規模なフレアが発生した(図1)。長期的に太陽活動を考えた場合、この規模のフレアはどの程度発生しているのだろうか。1976年から2006年までの31年間に発生したフレアを調べると、X9.0を超えるフレアは、31年間に30回発生していた(図2)。単純に計算すると、1年に1回ほどになる。しかし、太陽の活動には、極大期と極小期と呼ばれる大きな変化があり、後に述べるがイベントの発生頻度には大きな差がある。X9.0を超えるフレアの発生時期を調べると、そのほとんどは太陽活動の極大期(赤色の期間)に発生していて、その間の発生頻度は1.35回/年である。一方、極小期の発生頻度は0.27回/年となり、極大期に比べるとかなり少ない。今回の大規模フレアは、4年に1度くらいのまれな現象だということが分かった。

太陽の黒点相対数は、約11年の周期で大きく増減を繰り返している。これにともなって、フレア、磁気嵐、プロトンイベント、放射線帯高エネルギー電子などの宇宙天気現象の発生頻度がどのように変化しているか、極大期と極小期を比較する形で議論する。

フレアの発生数の変化

1976年から2006年までに発生したフレアを図3の上段に示す。横軸は発生日(年)、縦軸はフレアの規模である。この図を見ると、発生するフレアの数、規模ともに大きく変動していることが分かる。下段の黒点相対数のグラフと比較すると周期が一致しており、太陽フレアの活動周期が黒点の増減と強く関係していることが分かる。

続いて、図4中段に、各年毎のフレアの発生件数を示す。Cクラス以上のフレアを緑、Mクラス以上を青、Xクラス以上を赤で示す。数値化すると、活動期によって発生件数が大きく変化することがよりはっきりする。例えばCクラス以上のグ

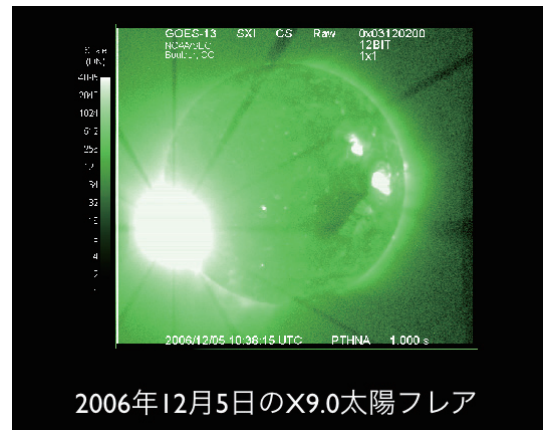


図1 GOES13のX線カメラによる、2006年12月5日のX9.0フレア。

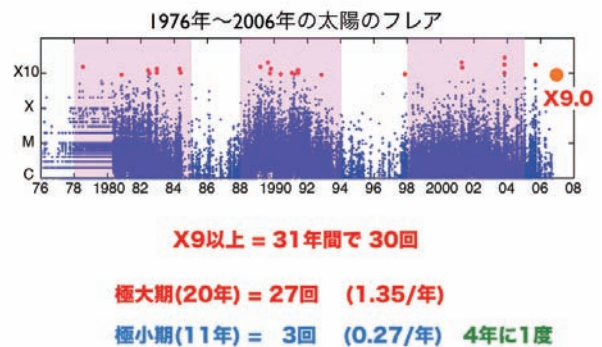


図2 31年間に発生した、X9.0以上の規模のフレア。

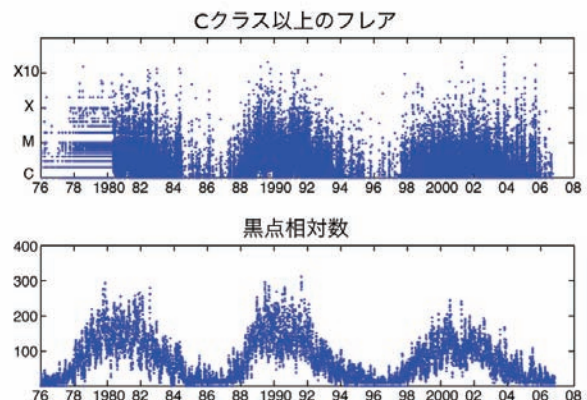


図3 31年間に発生したフレアの数(上段)と、黒点相対数(下段)。

ラフを見た場合、太陽活動が極大のころには、年間2,500回から4,000回にも及ぶ発生件数が記録されているのに対し、極小では200回くらいにまで下がっている。

この違いはM以上、X以上でも同様である。変化を見やすくするために、Mクラスを5倍、Xクラスを50倍したグラフを図4の下段に示す。

発生頻度の違いをまとめるため、1976～2006年の期間を、極大期、極小期のふたつに分類する。年間のフレアの発生件数から、極大期を78～84年、88～93年、98年～04年の20年間、極小期を残りの10年間とした。

各期間のフレア発生件数を表1上段に示す。集計期間が異なるので、年間あたりの平均数にする(下段)、極大期と極小期ではフレアの発生数が10倍程度異なることが分かる。大まかにみると、極大期ではMクラスのフレアが1日1回程度発生しているのに対し、極小期ではCクラスが1日1回起きる程度である。X10を超える猛烈なフレアは、極大期では年に1回程度発生しているのに対し、極小期では10年に1度程度と、たいへん少ない頻度に下がってしまう。

磁気嵐(Dst指数)の発生数の変化

Dst指数の変化より、磁気嵐の発生頻度を調べた(図5)。-200nTよりもDst指数が下がった大規模なイベントを選び出し(緑の○)、太陽フレアのグラフと比較すると、太陽活動が活発な時期に、大規模な磁気嵐がより多く発生していることが分かる。

フレアと同様に、極大期と極小期のふたつに分けると(表2の最上段の図の、赤く色づけした部分が極大期)、大規模磁気嵐の集中ぶりが一段とはっきりする。

それぞれの期間に発生した磁気嵐を、規模別に集計すると、表2中段のようになる。年間の発生数に変換すると(下段)、概ね4倍程度の発生頻度の差が見られる。Dstが-200nTを超える大規模イベントの場合、極大期には年2回程度発生が見られるのに対し、極小期では2年に1度となる。また、-300nTクラスの激しいイベントは、極大期では2年に1度の発生を考慮する必要があるが、

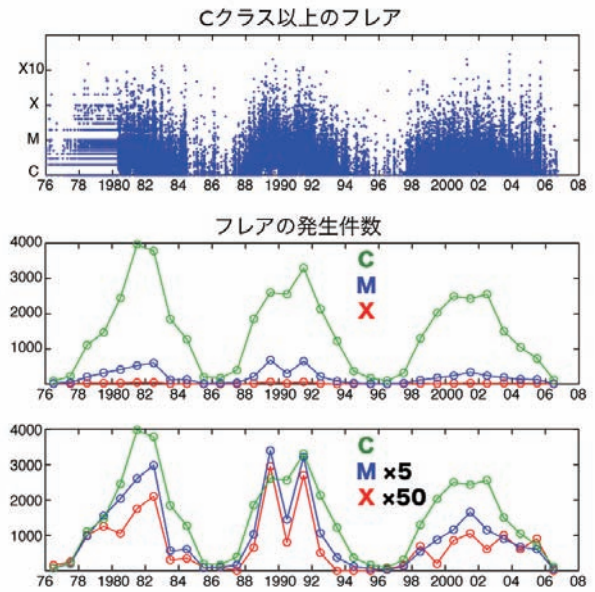


図4 フレアの年間発生数の変化(中段)。C以上(緑)、M以上(青)、X以上(赤)。下段は、Mを5倍、Xを50倍して描いている。

| | 極大期 20年間 | 極小期 11年間 |
|--------|-------------|-------------|
| X10 以上 | 21 回 | 1 回 |
| X 以上 | 408 回 | 34 回 |
| M 以上 | 5,753 回 | 319 回 |
| C 以上 | 42,856 回 | 2,798 回 |

| | 極大期 20年間 | 10倍 | 極小期 11年間 |
|--------|-------------|-----|-------------|
| X10 以上 | 1.1 / 年 | | 0.09 / 年 |
| X 以上 | 20 / 年 | | 3.1 / 年 |
| M 以上 | 288 / 年 | | 29 / 年 |
| C 以上 | 2142 / 年 | | 254 / 年 |

表1 太陽活動の極大期と極小期に発生したフレアの件数(上段)と、年平均(下段)。

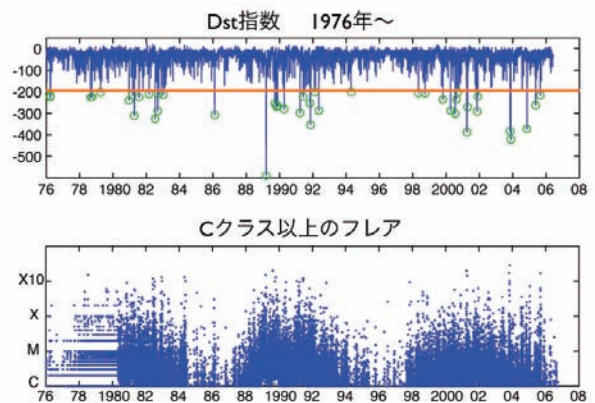


図5 31年間に発生した、-200nT以下の大規模磁気嵐(上段)と、黒点相対数(下段)。

極小期は10年に1度で、たいへん少ない頻度にながっている。

プロトンイベントの発生数の変化

太陽で激しいフレアが発生した時に見られる、プロトンイベントについてまとめる。ここでは、1995年から2006年の11年間にかけて得られた、GOES衛星のデータを用いる。図6は、10MeVプロトンの1日ごとの最大値を示している。プロトンが1,000PFUを超えて非常に強まった期間は、11年間に19イベント、33日間見られた。その多くは、フレアが活発に発生している太陽活動の極大期に見られている。この11年間では、極大期は98年～04年の7年間、極小期は残りの4.5年間である。この間のプロトンが強まっていた日数を求める(表3)。すると、プロトンイベントの場合、極大期と極小期の差は2倍程度になることが分かった。フレアや磁気嵐と比べると、差は小さい。ただし、10,000PFUを超える猛烈なイベントはこの期間に6回(7日間)見られたが、すべて極大期に発生していた。これは、激しいフレアが極大期に多く、極小期の発生頻度が大きく下がってしまうことと関連していると思われる。

放射線帯高エネルギー電子数の変化

最後に、地球周辺の放射線帯に見られる、2MeV以上の高エネルギー電子についてまとめる(GOES衛星の観測による)。高エネルギー電子のデータは、これまでのデータとは異なる性質を示す。図7は、高エネルギー電子の1日ごとの最大値を示している。10,000以上の高レベルの日を赤点で示す。このグラフをフレアのグラフと比較すると、高レベルの日の分布が、フレアの発生分布と必ずしも一致しないことが分かる。フレアが少なくなる前半(96～97年)や、後半(2005年頃)にも、多くの赤点が見られるのである(この中で、2003年は特異な年だったので、別に扱うことにする)。

放射線帯の高エネルギー電子の増加は、高速太陽風の通過時に多く見られる。太陽風が高速になる原因としては、フレアに続いて発生するCME(コロナ質量放出)や、コロナホールからの吹き出

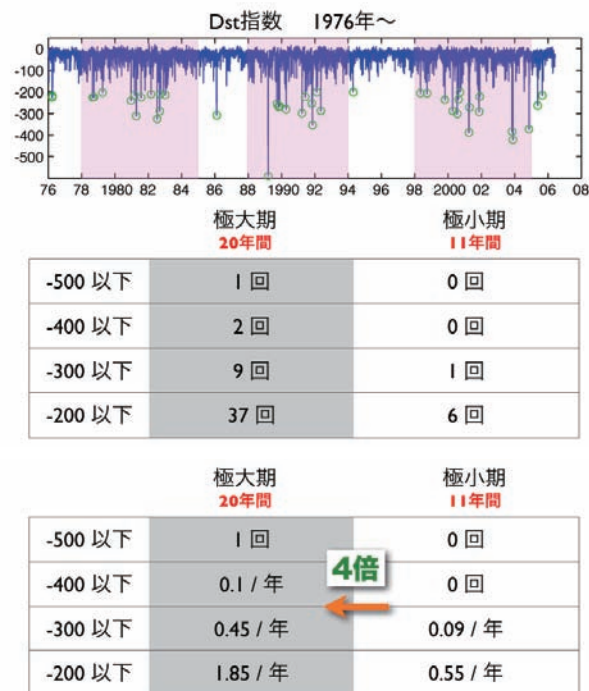


表2 太陽活動の極大期と極小期に発生したフレアの件数(中段)と、年平均(下段)。

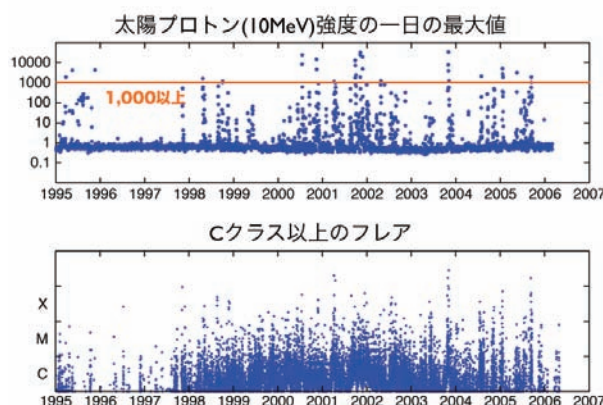


図6 11年間に発生した、1,000PFU以上のプロトンイベント(上段)と、フレアの発生数(下段)。

しによるものがある。CMEはフレアが多くなる太陽活動の極大期に多く発生するが、コロナホールはむしろ極小期に目立つようになる。従って、太陽風速度の長期変化を考えた場合、極大期と極小期それぞれに異なる高速風の原因が存在するのである。図8で、高エネルギー電子と太陽風速度を比較すると、両者の変化がかなりよく一致することが分かる。一方、太陽風速度(図8下段)を、フレアのグラフ(図7下段)と比較しても、単純には関連が見られないことも分かる。

高エネルギー電子の発生頻度の特殊性は、発生日数を分析するとよりはっきりする(表4)。10,000以上に強まる日数を比較すると、極小期のほうが極大期の3倍に達するのである。その一方で、100,000を超える猛烈なイベントは極大期にのみ見られている。

2003年の特殊性について述べると、この年は猛烈なフレア活動が発生するとともに、コロナホールによる回帰性の高速風が安定して続いた年でもあった。この両者が重なったため、他の年を圧倒して高い発生日数を記録したのであろう。10,000を超えた日数は149日に達し、1年の半分に及ぶ期間がたいへん高い状態にあったことになる。

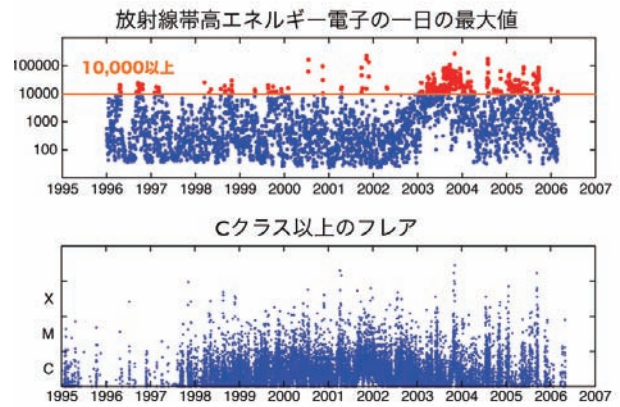


図7 高エネルギー電子が10,000以上に増加した日(上段)と、フレアの発生数(下段)。

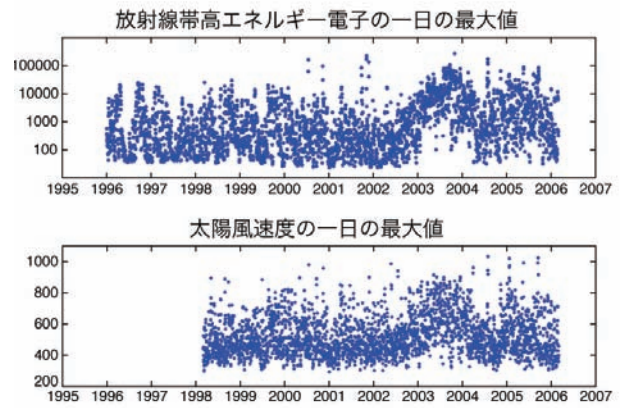
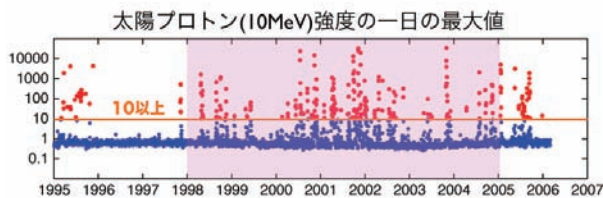


図8 高エネルギー電子(上段)と太陽風速度(下段)の1日の最大値の変化。



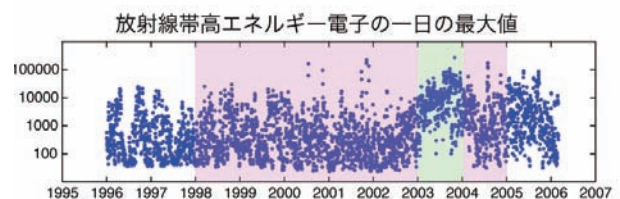
極大期 7年間 極小期 4.5年間

| | | |
|-----------|-------|------|
| 10,000 以上 | 7 日 | 0 日 |
| 1,000 以上 | 24 日 | 9 日 |
| 100 以上 | 78 日 | 35 日 |
| 10 以上 | 217 日 | 67 日 |

極大期 7年間 極小期 4.5年間

| | | |
|-----------|---------|---------|
| 10,000 以上 | 1.0 / 年 | 0 日 |
| 1,000 以上 | 3.4 / 年 | 2.0 / 年 |
| 100 以上 | 11 / 年 | 7.8 / 年 |
| 10 以上 | 31 / 年 | 15 / 年 |

表3 極大期と極小期に発生したプロトンイベントの日数(中段)と、その年平均(下段)。



極大期 6年間 極小期 3.5年間 2003年

| | | | |
|------------|-------|-------|-------|
| 100,000 以上 | 7 日 | 0 日 | 2 日 |
| 10,000 以上 | 90 日 | 139 日 | 149 日 |
| 1,000 以上 | 675 日 | 530 日 | 322 日 |

極大期 6年間 極小期 3.5年間 2003年

| | | | |
|------------|---------|---------|---------|
| 100,000 以上 | 1.2 / 年 | 0 日 | 49 / 年 |
| 10,000 以上 | 15 / 年 | 49 / 年 | 149 / 年 |
| 1,000 以上 | 113 / 年 | 151 / 年 | 322 / 年 |

表4 極大期と極小期に高エネルギー電子が増加した日数(中段)と、その年平均(下段)。