

# 太陽フレアが地球の気候に与える影響

## 抄 録

本研究では、まず太陽活動と地球気候がどのように相関しているかを考察し、次に太陽活動の変動と地球気候の変動の関係性を導くことで、太陽活動が地球気候に具体的にどのくらいの影響を与えているかを議論した。その結果、太陽活動が雲量に7%程の影響を与えていること、雲量が地球気候の要素のなかで、最も太陽活動の影響を受けやすいということが分かった。

キーワード：太陽フレア，気候変動，相関分析，フーリエ解析，宇宙天気

## 1. はじめに

### 1.1 研究動機

最近、地球は温暖化等の気候変動が起こっていると言われている。太陽は地球の唯一のエネルギー源であり、地球気候に様々な影響を与えており、それによって地球気候は様々な変動をしている。しかし、現在起こっていると言われる地球温暖化等の気候変動は産業革命以後における人間の活動による二酸化炭素の排出が最大の要因として強調されている。筆者は地球温暖化の要因は人為的なものだけなのかという疑問を過去に持ったことがある。これが本研究を始めた背景である。また、個人的な背景として、筆者は趣味で天文台に行くことが好きで、特に太陽活動に以前から興味を持っていた。

この研究で取り扱う太陽フレアとは、太陽面の黒点の周辺で突然明るく光る現象のことである。太陽フレアは太陽系最大の爆発現象で、爆発に伴ってプラズマや高エネルギーの粒子、大量の放射線（X線など）が発生する。太陽フレアは黒点の磁場の変化によって発生すると考えられている。筆者が特に太陽活動の中で太陽フレアに着目したのは、太陽フレアの良い指標である黒点相対数が長年に渡って記録されており、入手が容易であるからである。

### 1.2 研究目的

本研究では、太陽活動（特に太陽フレア）が具体的にどのくらい地球気候に影響をあたえているのかを明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究方法

太陽活動と地球気候がどのように変化しているかを調べるためには過去の記録を遡る必要がある。ただし、本研究で分析するのは数日～数十年の単位の変動であるため、使用するデータは1日ごとのデータである。

太陽活動の指標としては、黒点相対数という指標を用いる。これは1849年にスイスの天文学者ルドルフ・ウォルフによって提唱された、太陽の黒点および黒点群の総量を数値化した指標である。黒点数を  $f$ 、黒点群数を  $g$ 、観測地点や計測方法による補正係数を  $k$  とすると、相対黒点数  $R$  は、 $R = k(10g + f)$  で表される。観測によって、太陽活動は約11年の周期で活発になったり静穏になったりしていることが知られている。太陽の黒点数も、同じく約11年周期で増減を繰り返しており、黒点が多いと太陽活動が活発になり、太陽フレアも起きやすくなる。逆に黒点がないと太陽フレアは起きない。従って、太陽黒点数は太陽活動の一つの指標としてよく知られている。本研究では、自分で太陽を観測して記録することは不可能だと判断したため、国立天文台太陽活動データベースの黒点相対数の1日ごとの値を用いる。国立天文台太陽活動データベースには、1929年から現在までの黒点相対数の記録が存在する。

気候の指標としては気圧・気温・雲量・日射量などの指標を用いて解析を行う。気候のデータは国土交通省気象庁過去の気象データベースにある南極の1日ごとの値を用いる。地点を南極にした理由は、人間の活動の影響が及びにくいと考えられる場所だからである。

これらの数値は分析①を除いて、区間数100の移動平均によって平滑化した。移動平均を用いた理由はこれらの気象データや黒点数のデータは日々の変動が大きいため、大きな傾向を掴むためである。

本研究では、これらの各指標を用いて、分析①～分析③を行った。

### 分析①

短期間の太陽活動の変化と地球の気候にはどのくらいの関係があるか調べるために、1日ごとの黒点相対数と各気候の指標のデータに対して相関分析を行った。具体的には、気温と黒点相対数、雲量と黒点相対数、気圧と黒点相対数に対して相関係数を求めた。

相関分析とは、2種類のデータ間の関係を数値で記述する分析方法である。相関分析では、相関係数という値を求める。相関係数とは、2種類のデータの関係を示す指標である。相関係数  $r$  は、 $-1 \leq r \leq 1$  であり、 $r$  が1に近いほど強い正の相関関係があり、 $r$  が-1に近いほど強い負の相関関係がある。 $r$  が0に近いと直線的な相関関係はほとんどない。正の相関関係とは、一方の値が増えればもう一方の値も増えるような関係のことである。負の相関関係とは一方の値が増えればもう一方の値が減るような関係のことである。概ね、0～0.2未満はほぼ無相関、0.2～0.5未満は弱い相関、0.5～0.7未満は比較的強い相関がある、0.7以上は強い相関があると言われている。本研究でもこの解釈に従う。しかし、相関分析はあくまで、線形な関係の指標を調べることにすぎず、因果関係を説明するものでもない。実際、偶然、相関が見られる場合や、潜伏変数によって因果関係のない2つの事象間に因果関係があるかのように推測される場合（疑似相関）もある。本研究でもこの点に留意して分析を行った。

期間は1978年7月～12月と1989年3月～8月としてそれぞれ1カ月毎の相関係数、6カ月毎の相関係数を求めた。ただし、ランダムに2つの時期を選んだ。

## 分析②

中期間では太陽活動の変化と地球の気候にはどのくらいの関係があるか調べるために、11年ほどの期間の1日ごとの黒点相対数と各気候の指標のデータに対して相関分析を行った。この分析に使用した各データは区間数100の移動平均によって平滑化してから用いた。期間は1970年から1982年までとした。さらに、各指標の時系列グラフを作成し、比較した。中期間の変化を見るために、グラフの中に近似曲線として、多項式近似曲線を描いた。多項式近似曲線とは多項式によって系列データを近似することである。

## 分析③

分析①と分析②は太陽活動と地球の気候の関係の度合いを調べるために相関分析を行ったが、どのような周期でそれぞれが変化しているのかは分からない。また、目的変数を予測することもできない。そこで、測定されたデータに最もフィットする周期関数を求める周期回帰分析と、求めた周期関数にはどのような周期成分が含まれているかを分析するスペクトル解析を行った。周期回帰分析は時系列解析の一種であると同時に回帰分析の一種でもあり、データの時間的な変動を三角関数で近似する。そのため普通の回帰分析で行うことと全て同じように行える。周期回帰分析は説明変数が時間で目的変数が時間変動する測定値なので、説明変数が原因で目的変数が結果という因果関係がはっきりしている。黒点相対数や気候は周期的に変動しているので、この方法が適している。これらの解析では、時系列データを周波数データに変換するフーリエ変換（この分析では離散フーリエ変換）や周波数データを時系列データに変換するフーリエ逆変換（この分析では逆離散フーリエ変換）を用いる。周期回帰分析では、寄与率という値を求める。寄与率はデータの全情報の中で、要素のもつ情報が占める割合のことである。（出典：<http://arduinoqid.web.fc2.com/M35.html>）

周期解析では各周期成分の振幅を用い、各周期成分が周期変動に対してどの程度寄与しているか、つまり各周期成分がどの程度含まれているかの目安にする。

本研究ではまず、気温、雲量、気圧、日射量の各データ（1970年～1992年の1日ごとのデータを区間数100の移動平均を用いて平滑化した値 $8192=213$ 個）をスペクトル解析して、各周期成分の振幅を求め、周期を横軸に、振幅を縦軸にしたグラフを作成し、どの周期成分がそれぞれのデータにどのくらい含まれているのか分析した。太陽黒点数に関しては $16384=214$ 個のデータを先ほどと同じように分析した。2の累乗個のデータであれば、高速フーリエ変換（FFT）によって、通常のフーリエ変換よりも計算を速くすることが出来る。また、今回のフーリエ解析では、リーケージ誤差を少なくすることを重視しないため、窓関数は使用していない。

次に、それぞれの気候データに対して太陽活動に起因する11年周期だけを取り出した周期回帰モデルを仮定し、周期回帰モデルと元々の気候データとの寄与率を求めて、分析を行った。

### 3. 研究結果

#### 分析①

この分析における各気候データと黒点相対数の間の相関係数は次の表1の通りである。

表1 各気候データと黒点相対数の相関係数

期間	雲量	気温	気圧	期間	雲量	気温	気圧
1978/7	.276	.325	.041	1989/3	-.294	-.302	.067
1978/8	-.121	-.064	.421	1989/4	-.223	-.331	.318
1978/9	.202	.465	-.324	1989/5	-.050	-.453	-.080
1978/10	.001	.253	.028	1989/6	.706	.490	-.125
1978/11	-.329	-.439	.417	1989/7	-.103	-.219	.566
1978/12	.495	-.351	.291	1989/8	.187	-.023	.504
全期間	.104	.323	.193	全期間	-.084	-.362	.045

表1より、各気候データと黒点相対数の間では正の相関関係が現れたり、負の相関関係が現れたりし、一定の傾向を示さないことが分かる。

#### 分析②

この分析における各気候データと黒点相対数の間の相関係数は、気温と黒点で  $r=.518$ 、雲量と黒点で  $r=.402$ 、日射量と黒点で  $r=-.484$ 、降水量と気温で  $r=.006$ 、気圧と気温で  $r=-.184$  となった。

この結果より、気温と黒点相対数、雲量と黒点相対数の間には、比較的強い正の相関関係があると考えられる。また、日射量と黒点相対数の間には比較的強い負の相関関係があると考えられる。気圧と黒点相対数、降水量と黒点相対数の間にはほとんど相関がないと考えられる。

また、各気候データ及び黒点相対数の時系列グラフは以下の通りである。

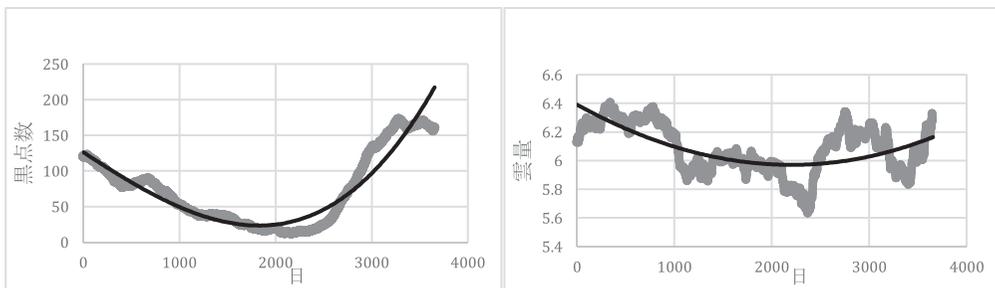


図1 黒点

図2 雲量

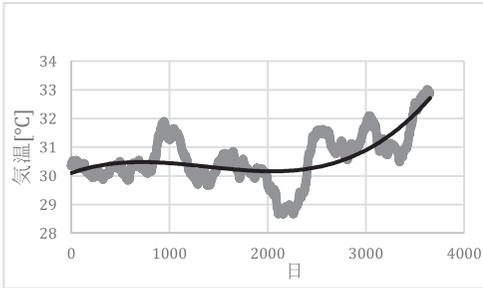


図3 気温

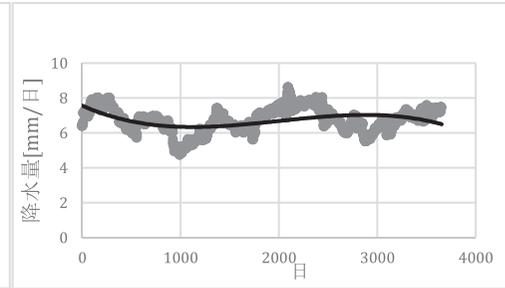


図4 降水量

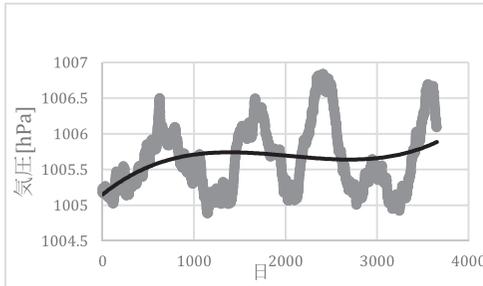


図5 気圧

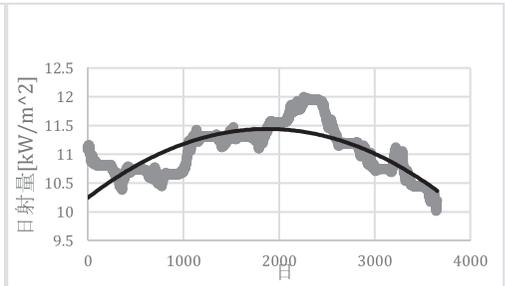


図6 日射量

図1より、黒点相対数の変動の様子から、11年ほどで黒点の数が変動していることが分かる。

図2と図1より、雲量と黒点相対数の変動の様子から、近似曲線上ではほとんど変動が一致していることが分かる。

図3と図1より、気温と黒点相対数の変動の様子から、近似曲線上では概ね気温と黒点相対数の変動が一致していることが分かる。しかし、実際の気温の変動では黒点の変動と一致していないところもある。

図4と図1より、降水量と黒点相対数の変動の様子から、黒点数と降水量はあまり変動が一致していないことが分かる。

図5と図1より、気圧と黒点相対数の変動の様子から、気圧と黒点数はあまり変動が一致しないことが分かる。

図6と図1より、日射量と黒点相対数の変動の様子から、日射量と黒点相対数はよく似た逆の変動をすることが分かる。

### 分析③

#### 1. スペクトル解析に関する結果

各気候データ及び黒点相対数のデータの、各周期成分と振幅の関係を表すグラフは以下の通りである。ただし、黒点・気温・雲量のみ掲載する。図8、図9中の点線は、黒点の変動の主要周期を示し、破線は、地球の公転周期を示す。

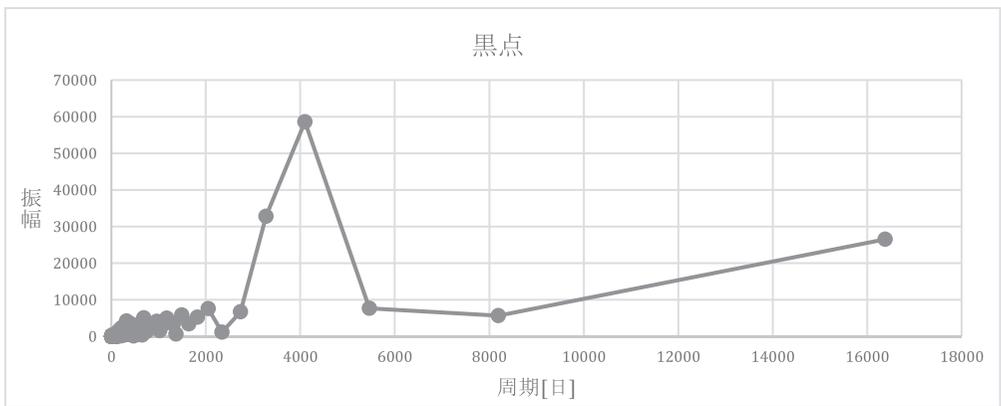


図7

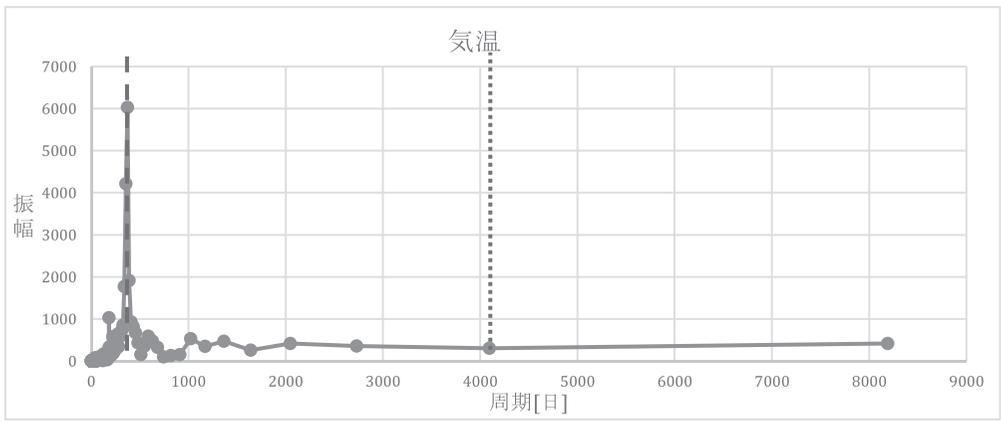


図8

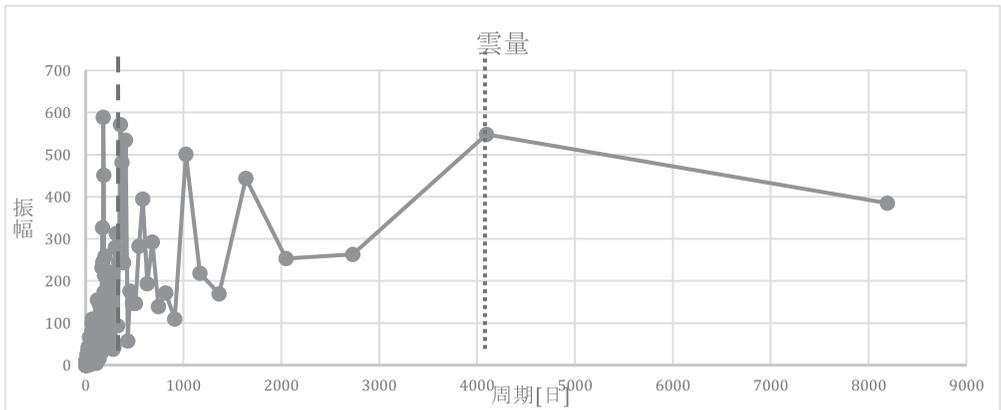


図9

図7より、黒点相対数のデータでは4096日周期の振幅が58613.92（全ての周期の平均は174.72）と最も大きいことが分かる。

図8より、気温のデータでは地球の公転周期に相当する365日周期の振幅が6030.955（全ての周期の平均は24.668）と最も大きいことが分かる。

図9より、雲量のデータでは地球の公転周期に相当する365日周期の振幅571.78と黒点の11年周期に相当する4096日周期の振幅548.36（全ての周期の平均は11.712）が大きいことが分かる。

気圧及び日射量のデータでは1年に相当する365日周期の振幅が最も大きく、それ以外の周期で振幅が大きいものは見つからなかった。

## 2. 周期回帰分析に関する結果

この分析では、先程離散フーリエ変換を行った気候のデータのうち分析③.1から分かった太陽黒点の変動の主要周期である4096日周期の成分を取り出し、逆離散フーリエ変換を行い元のデータとの相関係数及び元のデータに対する寄与率を求めた。

気温の分析では  $r=.036$ ,  $R^2=.001$  となり、黒点相対数の変動は気温の変動に約0.1%寄与していた。

雲量の分析では、 $r=.264$ ,  $R^2=.069$  となり、黒点相対数の変動は雲量の変動に約6%寄与していた。

日射量の分析では、 $r=.051$ ,  $R^2=.002$  となり、黒点相対数の変動は日射量の変動に約0.2%寄与していた。

気圧の分析では、 $r=.068$ ,  $R^2=.004$  となり、黒点相対数の変動は気圧の変動に約0.4%寄与していた。

## 4. 考察

分析①では、短期間の太陽活動の変化と地球の気候にはどのくらいの関係があるか調べた。そして、各気候データと黒点相対数の間では正の相関関係が現れたり、負の相関関係が現れたりし、また、ほとんど相関がない期間もあったことから、各気候データと黒点相対数の間では1ヶ月ほどの短期間では一貫した相関関係がない、つまり短期的な太陽活動の変化は地球の気候に殆ど影響を及ぼさないと考えられる。

分析②では、相関分析によって、中期間では太陽活動の変化と地球の気候にはどのくらいの関係があるか調べた。その結果、気温と黒点相対数、雲量と黒点相対数、日射量と黒点相対数の間では比較的相関が見られたことから、気温、雲量、日射量は中期間では太陽活動の影響をある程度受けると考えられる。また、気圧、降水量に関しては殆ど太陽活動の影響を受けないと考えられる。しかし、この分析では、疑似相関及び偶然による相関の可能性を排除できない。

分析③では、フーリエ解析によって、太陽活動の変化と地球の気候の変化にはどのくらいの関係があるか調べた。その結果、太陽黒点数の変化は雲量に約7%寄与していることが分かった。他の気候データに対しては太陽黒点数の変動は雲量ほど寄与していなかったため、太陽活動は雲量に最も影響を与えようと考えられる。また、太陽活動の変化に起因する雲量の変化をある程度予測することも可能であると考えられる。

増田（2013）によると、宇宙線を原因とした大気イオンによる雲核生成が地球の気候変動を制御している可能性を検証するための室内実験が行われており、ある程度成功している実験もあるという。また、宮原（2014）によると、太陽黒点数は銀河宇宙線（太陽系外から来る非常にエネルギーの高い宇宙線）と逆相関があるという。このため、太陽活動の変動が銀河宇宙線の変動と関係し、更にそれが雲量の生成と関係している可能性がある。

## 5. 結論

以上より、本研究では比較的長期間では、太陽活動が雲量に7%程の影響を与えていること、雲量が最も太陽活動の影響を受けやすいということが分かった。また、室内実験により、具体的な宇宙線の雲核形成の過程が再現できてきているようである。雲量は気温など様々な気象要素に影響を与えているので、今後宇宙線の雲核形成の過程が完全に再現できたら、太陽活動が地球気候に与える影響がさらに解明されるだろう。

本研究の課題は、時間や費用の問題から、より詳細に長期間のデータを調べられなかったことである。過去のデータを詳細に調べることは太陽活動の変動と地球の気候の変動の理論を作る上で非常に重要であり、今後機会があれば、更に研究を進めたいと思う。

## 参考文献

- ・気象庁 過去の気象データ検索南極  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>（2020年9月21日）
- ・草野完也（2014）「宇宙気候学の現状と課題」
- ・国立天文台 黒点相対数観測値  
[https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/db\\_sunspot.html](https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/db_sunspot.html)（2020年9月21日）
- ・増田公明（2012）「太陽活動が地球気候に及ぼす影響 —銀河宇宙線によるエアロゾル生成—」
- ・増田公明（2013）「宇宙線による微粒子形成」
- ・宮原ひろ子（2014）「地球の変動はどこまで宇宙で解明できるか」化学同人