

# 大気降下物中に含まれる Be-7 の長期変動の解析

## Analysis of Long Distance Variation Be-7 Concentration in Fallout

森 好平                      勝間 孝  
Kohei Mori                Takashi KATSUMA

### 要 旨

高層大気で宇宙線により生成され地上に降下して観測される Be-7 の量は、太陽磁場や地球の気象現象など多くの要因で変動する。13 か月移動平均や雨量による補正をして、短期の変動要素を少なくすることで、太陽黒点相対数との負の相関を見出すことができた。また、太陽黒点相対数のデータを後ろへ2 か月ずらした時に相関が最も強くなることから、高層大気中から地表に移送されるのに2 か月程度かかっていることが予想される。Be-7 の量は太陽黒点相対数と相関が強い時期と相関していない時期にはっきり区分でき、相関が見られない時期のうちいくつかは大規模フレアの発生時期や太陽磁場の双極構造の乱れた時期に対応していて、太陽活動の異変が Be-7 の生成プロセスに影響していることがうかがえる。

### Abstract

Be-7 is formed by cosmic ray in the upper levels of the atmosphere, after which it descends to the surface of the earth. The amounts of Be-7 that are observed at ground level can vary depending on many factors, including the solar magnetic field and meteorological conditions. By correcting for the 13-Month Running Mean and amount of rainfall, we reduced short term fluctuations in the amounts of Be-7. This enabled us to observe the negative correlation between the amount of Be-7 and the relative sunspot number. In addition, because shifting the data regarding the relative sunspot number back 2 months maximizes this correlation, we can assume that Be-7 takes 2 months to descend from the upper atmosphere to the ground. Amounts of Be-7 can be clearly divided by periods in which the relative sunspot number correlation is strong and periods of decorrelation. Among these periods of decorrelation, many correspond with occurrences of large solar flares or disturbances in the dipole magnetic field of the Sun. As a result, we believe that irregularities in solar activity effect the production of Be-7.

キーワード：Be-7 降下物 太陽黒点相対数 太陽フレア 太陽磁場

## I はじめに

### 1 目的

Be-7 は、上層大気中の窒素原子などが高エネルギーの銀河宇宙線により崩壊して生じる放射性物質である。半減期 53.29 日で、軌道電子捕獲により Li-7 となり安定するが、その時 478keV の X 線を放出する。Be-7 は、上層大気から下層大気に移送され、降雨とともに地表付近に届き、大気浮遊じんや降下物中に検出される。そのため、太陽活動や気象現象など、いろいろな要因で変動することが知られている。特に、地域ごとの気象条件の違いにより、国内においていくつかのパターンの年変化があることが報告されている。<sup>2) 6)</sup>

今回の解析作業では、地域や季節による変動をできるだけ排除し、1 年以上の長い周期での変動とその原因を解明することを試みた。

### 2 Be-7 の変動に関する基本的な考え方

Be-7 が地上で観測されるまでには、図1のように、多様な要素が関係してくると思われる。

このため、Be-7 の変動の解析は様々な目的で利用できる。従来行われている研究は、地域特性や季節変化など、主に気象現象との関係が調べられることが多い。<sup>2) 4) 6)</sup> また、Be-7 を指標として高層大気からの物質の移送メカニズムの研究もされているようである。<sup>1) 3)</sup> 今回の解析の目的は、太陽黒点相対数との相関を基に Be-7 の生成過程や下層大気への移送について長期変動を探ることにある。そのために、季節変化や降雨などの短時間の気象現象による影響をできるだけ排除・平均化するなど、データを補正することが重要である。

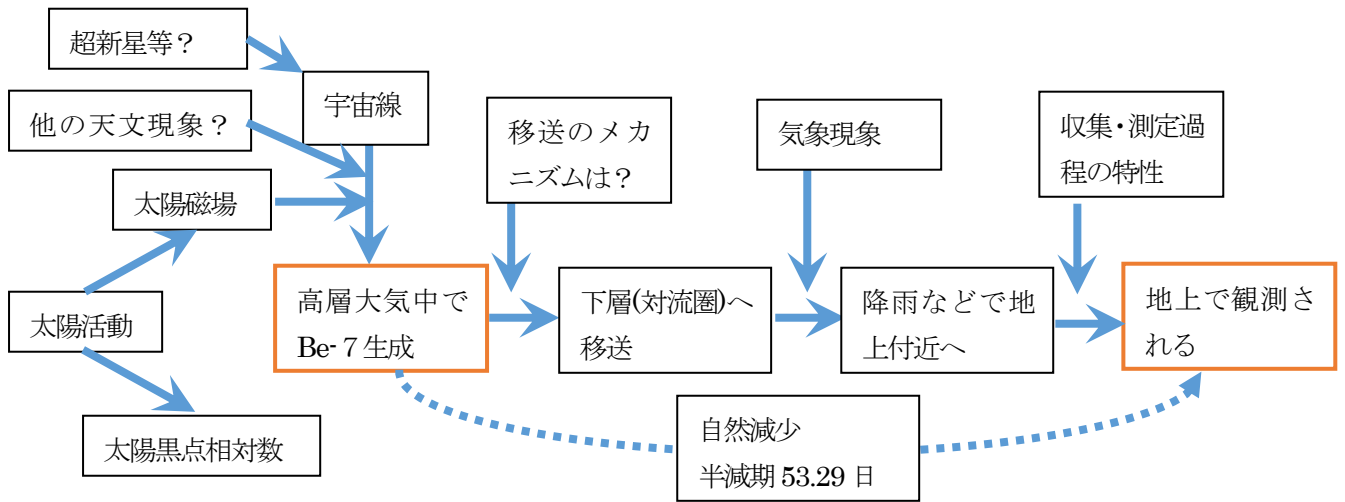


図1 Be-7の生成と地上での観測に関係していると思われる事象

## II 方法

### 1 データ

・Be-7

香川県環境保健研究センター屋上に設置している水盤で1か月ごとに採集し、濃縮などの前処理を行い、Ge-γ線スペクトルメーターにより測定したデータを使用。

・雨量

高松地方気象台(観測地点:高松市伏石町)の1か月雨量。気象庁のホームページで公開されているものを使用。

・太陽黒点相対数

国立天文台での観測データ。国立天文台ホームページで公開されているものを使用。

・データの期間 1992年3月~2018年4月

### 2 処理方法

MicrosoftExcelを用いて、上記のデータに補正を加えてグラフ化することにより、傾向を視覚化した。

## II 結果

### 1 データ補正

#### (1) 採集日数補正

降下物の採集は1か月間であるが、実際は25日~38日と大きな差があった。そのため30日間あたりに換算した数値をその月の測定値とした。

#### (2) 13か月移動平均

太陽黒点の観測データは11年周期を明確に表示するためによく13か月移動平均が使われる。これをBe-7の量に適用すると季節変化が平均化され今回の解析の目的

に合ったデータが得られると考え、太陽黒点相対数とBe-7双方のデータともにこの平均法を採用した。

(1)(2)の補正をした後の相関が図2である。なお、相関係数は-0.40536である。

相関係数では負の相関があり、はっきりとした負の相関を示す部分と、逆に正の相関を示すような部分が共存しているように見える。

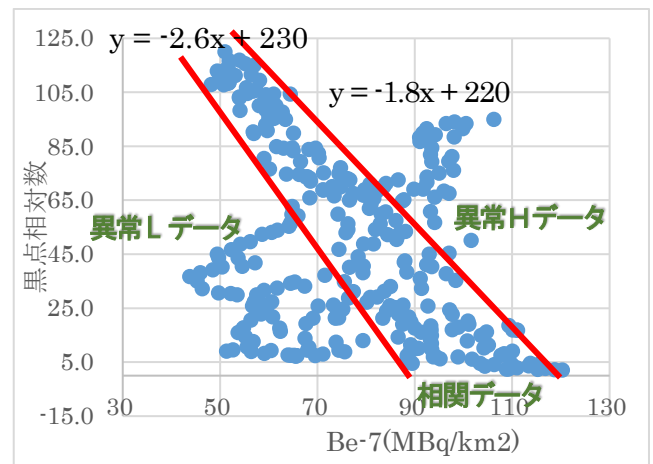


図2 13か月移動平均でのBe-7量と太陽黒点相対数の相関関係

#### (3) 相関関係のない時期のデータの削除

図2において目測により相関関係にある部分を2本の赤線で挟んで示した。グラフ中の数式は、2本の直線を表す式であり、これを使って全データを、相関データ、異常Hデータ、異常Lデータに分類する。表1が分類した期間をまとめたものである。また、抽出したデータの相関係数は-0.93132である。

表1より、相関データと異常データは期間によりはっきり分別できる。また、2011年4月までは、相関、異常

の期間が比較的長く続いているが、それ以降は比較的短い間隔で入れ替わりが起きている傾向がみられる。

期間初め	月数	分類
1992年9月	1年4か月	相関
1994年1月	3年10か月	異常L
1997年11月	5年9か月	相関
2003年8月	2年3か月	異常L
2005年11月	5年5か月	相関
2011年4月	9か月	異常H
2012年1月	1年3か月	相関
2013年4月	2年1か月	異常H
2015年5月	1年8か月	相関
2017年1月	3か月	異常L
2017年4月	7か月	相関
2017年11月	1か月	異常L

表1 相関関係の期間と分類

合計	25年3か月
相関期間	16年0か月
異常L期間	7年5か月
異常H期間	2年10か月

(4) 相関関係データのみでの時間差補正

(3) で取り出したデータのみを使い、太陽黒点相対数のデータを後ろに1か月ずつずらして Be-7 量のデータとの相関係数の変化を見たのが図3である。これでは2か月ずらした時、相関係数の絶対値が最も高い。平均値として、太陽黒点相対数の変動が2か月後に地上での Be-7 の量に反映しているらしいことがわかる。また、相関データのみを2か月ずらした時の分布が図4である。

(5) 雨量補正

13 か月移動平均で季節による変動はほぼ平均化されたと考えるが、同じ季節でも年ごとに雨量は異なり、測定される Be-7 の量にはかなり影響が出ていると思われる。しかし、図4で分かるように太陽黒点相対数の変化により、Be-7 量は 40~120MBq/km<sup>2</sup>と大きく変化している。雨量による補正が必要かどうかを判断するには、太陽黒点相対数により補正したデータを使う必要がある。相関期間だけでなく異常期間のデータも含めた、13 か月移動平均した全データについて、図4の近似直線に沿って斜めに移動し、太陽黒点相対数を60とした時の Be-7 量のデータを作った。それを月ごとに雨量と Be-7 の量との相関を取った。その結果が表2である。ここで、傾きと y 切片は相関分布の近似直線の傾きと y 切片である。これにより、値にばらつきはあるが、雨量と Be-7 の量には正の相関がある。ただし、近似直線の傾きが月により

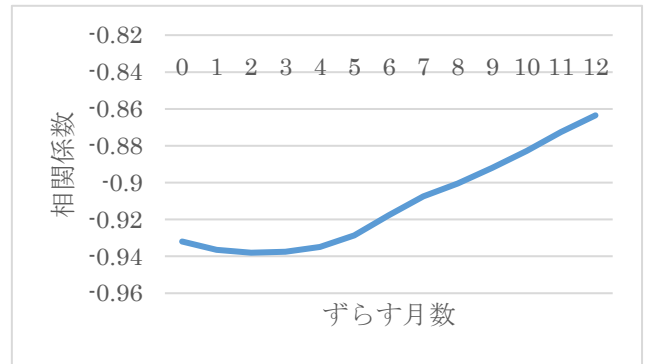


図3 データをずらした時の相関係数の変化

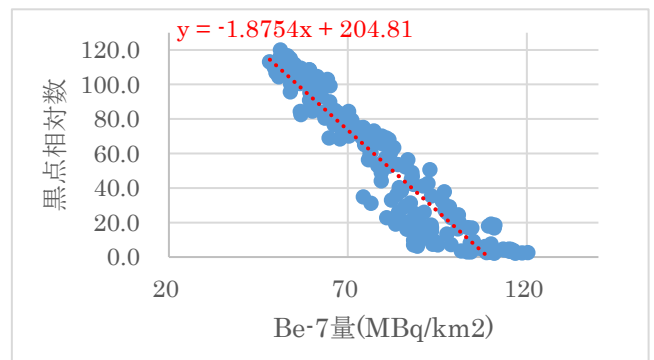


図4 2か月ずらした相関期間のデータの分布

0.15~0.84 と差が大きく、年間を通じて一律に補正するより、月ごとに補正するほうがより正確だと考えた。各月の近似直線に沿って測定値を斜めにずらし、雨量 100 mm とした時の値を雨量による補正值とした。それにより、相関係数は-0.4776 に上がった。

表2 月ごとの雨量との相関

月	傾き	y 切片	相関係数
1	0.7787	19.108	0.647316
2	0.8029	19.701	0.643228
3	0.5902	48.232	0.47185
4	0.2589	59.583	0.177572
5	0.2502	55.456	0.279316
6	0.3845	43.373	0.6592
7	0.1511	38.151	0.414025
8	0.2636	13.578	0.666234
9	0.1902	45.922	0.457884
10	0.3917	40.193	0.61045
11	0.4515	31.687	0.472298
12	0.8409	15.298	0.570469
平均	0.4462	35.85683	0.50582
年間	0.2687	44.788	0.47264

## IV 考察

### 1 太陽黒点相対数と Be-7 量の関係の解析

#### (1) 時系列での比較

Ⅲで補正した Be-7 の 13 か月移動平均と太陽黒点相対数を、同じ時間軸上に表示したのが図5である。ただし、2 か月間ずらしているため、年月は太陽黒点相対数の月に合わせてある。

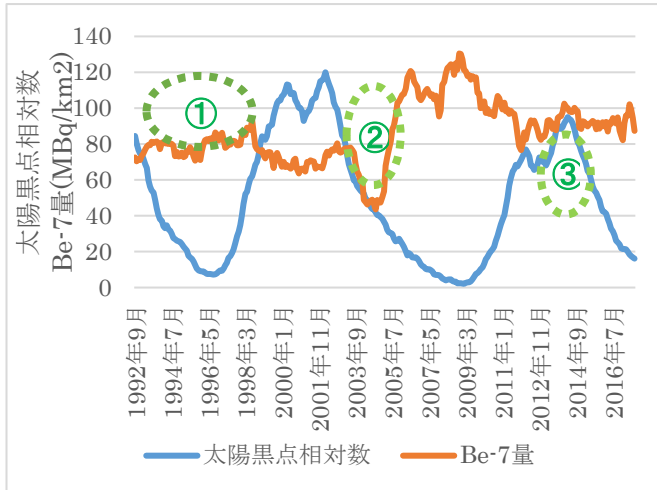


図5 太陽黒点相対数と Be-7 量の変化

Be-7 量と太陽黒点相対数は強い負の相関がある期間とそうでない期間がはっきりしているが、それが図5にも表れている。負の相関の期間はグラフが上下反転した形になる。太陽黒点相対数が小さい値の2006～2010年あたりで Be-7 量が多くなっているのがその典型である。それからのずれで特に気になるのが①～③の期間である。①は太陽黒点相対数が小さくなっているのに、Be-7 量が増えていない。②は太陽黒点相対数がピークから減少に転じるにつれ Be-7 量が増加始めていたが、急に減少に転じ深い谷型のグラフになっている。③は2013年3月までは細かな変動まで太陽黒点相対数と逆の動きをしているのに、それ以降急に同じ山形の変動を見せるようになった。この3か所が特に目立った逆相関からのずれである。

#### (2) 逆相関からのずれの原因究明の考え方

太陽黒点相対数と地上で測定される Be-7 量との間には、図1のような関係がある。これは、宇宙空間に原因がある Be-7 生成までの過程と、地球大気に原因がある生成された Be-7 が地表に移送される過程に大きく分けられる。逆相関を妨げる宇宙空間に原因がある事象としては、A) 太陽系に届く銀河宇宙線量の変動、B) 地球に届く宇宙線量を変動させる天文現象の発生、C) 太陽黒点相対

数と太陽磁場強度のずれ、D) 太陽磁場の形態変化による宇宙線遮蔽効果の変化、などが考えられる。また地球大気に原因がある事象として、E) 上空大気や宇宙線で生成された核種の宇宙空間への離散量の変化、F) 下層大気との物質交換量の変化、G) 気象現象の変化による地上到達度の変化、H) 採集・測定機器の特性の変化などが考えられる。

A) については、宇宙からの中性子線量を測定しているデータ<sup>7)</sup>から太陽活動との相関は確認できたが、(1)①～③に対応する変化は特に見当たらなかった。B) の天文現象の1つとして、大規模な太陽フレアがある。太陽フレア時には多量のプラズマが放出されることにより地球の周りの太陽磁場の強度が増加する。このため、銀河宇宙線の低エネルギー成分の地球への飛来が阻まれ、多くの場合、全体として地球近傍の宇宙線強度は低下する。このことが「Forbush 減少」として知られており、2003年10～11月に宇宙線量が減少した観測報告がある。<sup>5)</sup> フレア以外の天文現象については何が影響を及ぼすかわからないので確認が難しい。C) D) については各種の太陽観測データがインターネット上に公開されているが利用や解析に専門的知識が必要となりすぐには取り組めていない。E) F) についてはメカニズムがよくわかっていないので、関連するデータを見つけ出すことは難しい。G) の気象現象では地域特性や季節変化に伴うものは排除する方向で解析しているので、地球規模でかつ数年で変化する要因との関連を考えるべきであろう。例えば、エルニーニョ、ラニーニャ現象を思いついたが、気象庁のホームページで確認したところ、図5①～③の変化に対応していないようであった。H) については継続して同じ方法がとられており、測定機器の更新も適切に行われたとし、考慮の対象から外す。

#### (3) 太陽に関する要因の探索

太陽の観測は、ガリレオが黒点を発見して以来続けられており、新しい観測手段が開発されても、古くから使われている太陽黒点相対数を継続して併用することにより、太陽活動変化の長期の一貫したデータの蓄積を図っている。そのため、今回の解析でも太陽黒点相対数を使用した。この数値は太陽磁場など新しい概念の太陽活動を正確に反映していない可能性がある。そのため2のC) D) が逆相関を妨げている原因である可能性がある。

太陽黒点相対数でみた太陽活動はおよそ11年の周期で変動しているが、極大期におけるピークの高さは周期

ごとに違いがあるし、北半球と南半球でピークがずれることも多い。図5で極大期付近にピークが2つあるのはこのためである。そして、極大期に太陽磁場が南北逆転することが知られている。北半球と南半球で磁場が逆転する時期がずれると、南北両極が同じ磁極となったり双極構造が崩れたりする。この現象が2012年から始まっており、<sup>8)</sup> 図5の③の時期に近い。双極構造が崩れると惑星公転軌道方向の磁場は弱まるのではないかと考えられる。そうすると深宇宙からの放射線を遮蔽する効果が弱まり Be-7 の生成量が増える。その結果、太陽黒点相対数が大きいわりに Be-7 の観測量が増えることになり、観測データを矛盾なく説明できる。

観測史上最も激しいフレア(規模: X28.0)は2003年11月4日に発生している。その少し前から、10月28日(X17.2)、10月29日(X10.0)、11月2日(X8.3)と大規模なフレアが続いて発生している。これは1991年6月(11日間にX10.0以上のフレアが6回発生)以来の激しさである。この2003年10~11月は図5の②の減少を始めた時期に一致する。フレアによる地球近傍の太陽磁場が強まり宇宙線が遮蔽されて Be-7 の生成が抑えられたとすると、観測データを説明できる。しかし、文献5)では宇宙線量は10月30日に急激に減少した後に緩やかに増加し、11月5日ごろにはほぼ元のレベルに戻っている。11月4日の史上最大規模のフレアに対応する変化が認められない。また、図5では②の期間は2年間もあり、13か月移動平均といえども②の変動を必ずしも説明できていない。文献5)のデータは11月30日まででありその後には影響が出たのかもしれないが確認できない。

図5の①の時期については太陽活動に特異なふるまいがあったという記録は見当たらない。太陽観測衛星が今ほど充実していない時期であったので、③の時期ほど詳細なデータがあるわけではないが、太陽に原因を求めることは難しそうである。

## V まとめ

### 1 まとめ

Be-7 が降下物として測定される量(13か月移動平均)は、太陽黒点相対数(13か月移動平均)と負の相関がある時期と、相関から外れる時期にはっきり分けられる。そして、負の相関がある期間について、2か月ずらすことにより相関係数の絶対値が最も大きくなることから、高層大気中で宇宙線により生成された Be-7 が地上に移

送されるのに、平均で2か月ほどかかっていることが推測される。

Be-7 と太陽黒点相対数が負の相関から外れる理由として、太陽活動の異変が考えられる。2013~2014年ごろの Be-7 増加は、太陽磁場の双極構造が崩れている時期と一致し、2003年の Be-7 減少は、大規模な太陽フレアの発生時期と一致する。しかし、どちらも確定的な根拠はなく、断定することはできない。また、1994~1997年の Be-7 が少ない時期には対応する太陽の異変を見つけることができなかった。

## 2 今後の課題

今回の解析により、降下物中の Be-7 量と太陽活動の間の興味深い関係が見いだせたが、根拠に乏しく断定することはできない。太陽活動に関する諸データを精査し、明確な根拠を示していきたい。

太陽黒点相対数と地上で観測される Be-7 量の因果関係の中間点に地球に届いている宇宙線の量がある。モニタリングポストのスペクトルデータの 3MeV 以上の値を合計したものが宇宙線由来の  $\gamma$  線と考えられるとのことであるので、このデータを集計することで、「太陽活動と宇宙線遮蔽効果の関係」、「宇宙線量と Be-7 生成量の関係」についてデータが得られる可能性があるため、今後、検討していきたい。

これらの関係が明確になると、太陽活動の変化を予測することで、上層大気中の Be-7 生成量を推計できることになる。それと地上で観測される Be-7 量の関係から、高層大気から地上への物質移送のメカニズムの解明につながる。それを利用すると、オゾン層中のオゾンの地上大気への影響についての研究につながる。また、高層大気中で宇宙線により生成される凝結核の対流圏への移送とそれに伴う雲量の増加のメカニズムの解明につながり、太陽活動と地球の気候の関係へと研究が広がっていく。重要な内容だと考えているので、さらに研究を深めたい。

## 文献

- 1) 冠野 禎男、西原 幸一: 地表大気中の Be-7 濃度の変動について, 香川県環境研究センター所報, 17, 73-77(1992)
- 2) 檜崎 幸範、藤高 和信: 宇宙線生成核種 Be-7: 大気中濃度と日本への降下量, 平成 21 年度放射能分析確認調査技術検討会資料, 117-132(2009)

- 3) 磯村 公郎, 平木 隆年, 池澤 正: Be-7 を用いた都市部の光化学オキシダントに占める成層圏 O<sub>3</sub> の寄与の評価, 平成 19 年度放射能分析確認調査技術検討会資料, 187-193 (2008)
- 4) 石川 陽一, 檜崎幸範, 鈴木 利孝: 降下物の放射能測定における大陸起源エアロゾルの影響, 平成 17 年度放射能分析確認調査技術検討会資料, 163-166 (2006)
- 5) 藤波 直人, 渡辺 哲也, 前田 高志, 荒木 智徳, 筒井 剛毅: 環境放射線モニタに認められた太陽フレアの影響, 平成 16 年度放射能分析確認調査技術検討会資料, 185-189 (2005)
- 6) 檜崎 幸範, 藤高 和信, 五十嵐 修一, 石川 陽一, 藤波 直人: 日本における Be-7 降下量の地域別季節変動, 平成 9 年度放射能分析確認調査技術検討会資料, 1-12 (1998)
- 7) World Data Center for Cosmic Ray ホームページ
- 8) 塩田 大幸: 太陽周期活動と太陽極域磁場, 天文月報, 109, 705-710 (2016 年 10 月)