

大気降下物中に含まれる Be-7 の長期変動の解析(第 2 報)

Analysis of Long Distance Variation Be-7 Concentration in Fallout (2nd Report)森 好平
Kohei MORI勝間 孝
Takashi KATSUMA

要 旨

前報¹⁾で、大気降下物中に測定される Be-7 の量が太陽黒点相対数と負の相関関係にあること、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ることを報告した。しかし、降下物中の Be-7 の測定値は、気象現象など多くの要因で変動するため、高松市での測定データの変動原因を太陽活動の変動だと断定することはできない。そこで、国内各地での降下物中の Be-7 測定データを用いて、太陽活動との関係の解析に取り組んだ。

国内 8 地点のデータを用いて解析した結果、太陽黒点相対数と降下物中の Be-7 の測定値は負の相関関係にあることが再確認された。また、太陽黒点相対数を後ろに 5 か月ずらした時、Be-7 と最も関係性が高いため、高層大気中で宇宙線により生成された Be-7 が地上付近に降下するのに平均 5 か月かかるのではないかと推測される。また、大規模フレアなどの太陽活動の異変が地上で測定される Be-7 量に反映していることもあらためて示唆された。

Abstract

In our previous paper, we reported that the amount of Be-7 measured in atmospheric fallout correlates to the relative sunspot number. Additionally, we reported that there is a clear distinction between periods of strong correlation and non-correlation. Large solar flares or disturbances in the dipole magnetic field of the sun occurred during a number of periods of non-correlation. However, because the measurement of Be-7 in atmospheric fallout can change depending on a variety of meteorological phenomena, we cannot determine that the fluctuations in data taken in Takamatsu City were the result of changes in solar activity. As a result, we analyzed the relationship between measurements of Be-7 in atmospheric fallout and solar activity using data taken from all over Japan.

Analyzing data taken from 8 locations throughout Japan, we reconfirmed that there is a relationship between periods of correlation and the relative sunspot number. Furthermore, because this relationship was strongest when we shifted the relative sunspot number back by 5 months, we hypothesize that it takes approximately 5 months for the Be-7 produced by cosmic rays in the upper atmosphere to fall to the surface of the earth. The data also suggests that the measurements of Be-7 taken at ground-level reflect changes in solar activity, such as large solar flares.

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、地域ごとの気候の違いにより、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。²⁾⁶⁾

前報¹⁾で使用したデータは、1992 年 3 月～2018 年 4 月に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、ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトルメトリー(以下 Ge-γ 線検出器)により測定した Be-7 量のみである。降水量による補正と 13 か月移動平均を行い、ノイズができるだけ少なくなるよう検討したものの、補正できなかった各種の影響を太陽活動と関係づけて誤認したことも考えられる。そのため、今回の解析作業では、気候が異なる国内 8 地点のデータを使い、地上の気象現象の影響の少ない客観的な結果と

して太陽活動との関係を検討することを目指した。

2 解析に関する基本的な考え方

8 地点の観測データを同じ方法で補正し解析する。補正方法は、前報¹⁾に準ずる。さらに、8 地点のデータを統合して解析する。また、前報¹⁾では相関グラフから目視によりデータ分類したが、客観性を高めるため可能な限り目視による操作を行わない。(雨量補正用のデータに太陽黒点相対数補正をかける処理を除く)

II 方法

1 データ

・Be-7

①高松市、②岡山市、③広島市、④札幌市、⑤盛岡市、⑥市原市(千葉市を含む)、⑦金沢市、⑧鹿児島市での降下物中の Be-7 の測定値は「原子力規制庁. “環境放射線データベース”. <https://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top>、(参照 2018-11-13)」に公開されているものを使用する。

・降水量

①～⑧の測定地点での降水量は「原子力規制庁. “環境放射線データベース”. <http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top>、(参照 2018-11-13)」に公開されているものを使用する。

・太陽黒点相対数

国立天文台での観測データ。「国立天文台太陽観測科学プロジェクト 三鷹太陽地上観測 (<https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/solarobs.html>)」に公開されているものを使用する。

・データの期間

1992 年 3 月～2018 年 4 月で公開されている全データ。

2 処理方法

(1) 測定地点毎の散布グラフによる解析

① 日数補正

降下物中の Be-7 測定値について、降下物の収集日数が一定でないため、一か月を 30 日として測定値を補正する。

② 雨量補正值算出用の Be-7 量の黒点相対数補正

日数補正した Be-7 量と太陽黒点相対数の散布グラフを作成する。散布グラフ中の負の相関が見られる部分に目測で近似直線を引き、その傾きより、太陽黒点相対数が 60 になるよう Be-7 測定データを補

正する。補正した Be-7 測定値と降水量の散布グラフを月ごとに作成し、近似直線の傾きを算出する。

③ 降水量補正

②で算出した月ごとに異なる近似直線の傾きを補正計数とし、一か月の降水量が 100mm とした時の値を降水量補正值とする。

④ 13 か月移動平均

日数補正值と降水量補正值をそれぞれ 13 か月移動平均し、Be-7 の補正測定値とする。

⑤ 散布グラフ

①～④を測定地点毎に行い、太陽黒点相対数と日数補正值または降水量補正值とでそれぞれの散布グラフを測定地点毎に作成する。

(2) 各測定地点のデータを統合した解析

① 補正方法の決定

(1) の雨量補正もした散布グラフと日数補正のみの散布グラフから、より補正に成功している方を選ぶ。

② 測定値の規格化

観測地により Be-7 量の変位レベルが異なるため、全地点を統合して解析するには、規格化により同水準にする必要がある。

規格化の方法については、最高値と最低値を利用する方法も検討したが、1 つでも大きな測定値が出た場合、その影響が正しく反映されない恐れがあるため、平均値を 1、偏差の絶対値の平均を 0.5 として規格化する方法を採用した。

III 測定地毎の散布グラフによる解析の結果

国内 8 地点(①～⑧)における降下物中の Be-7 の測定値について、(A)日数補正と 13 か月移動平均したもの、(B)日数補正後に雨量補正し 13 か月移動平均したもの、それぞれと 13 か月移動平均した太陽黒点相対数との散布グラフが図 1 と図 2 である。

なお、測定地点毎に降下物中の Be-7 の測定レベルが異なり、同じ目盛のグラフでは各測定地点の特徴が判別しにくくなるため、横軸の目盛をグラフごとに最適化している。

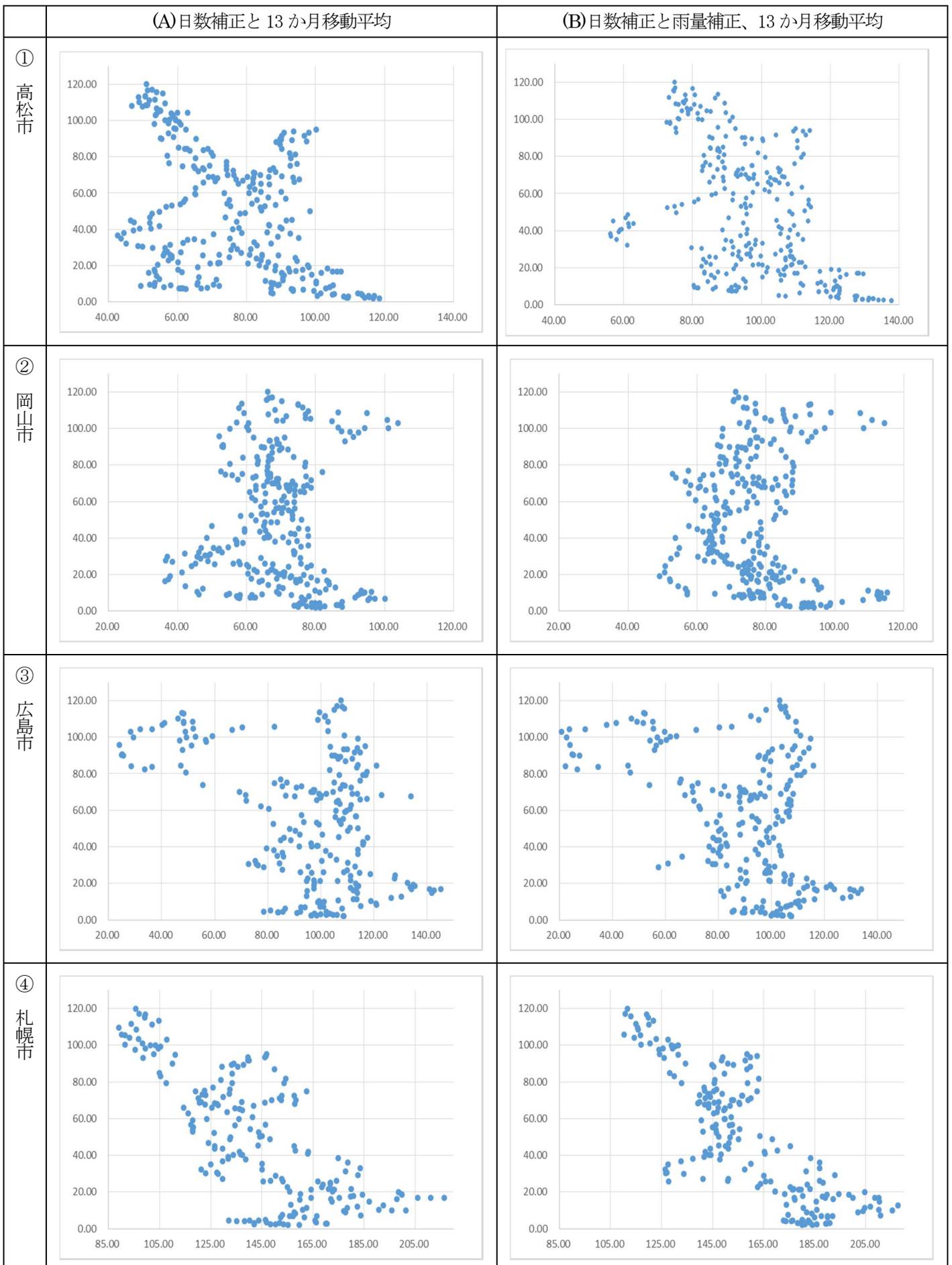


図1 高松市, 岡山市, 広島市, 札幌市のBe-7(横軸)と太陽黒点相対数(縦軸)の散布グラフ

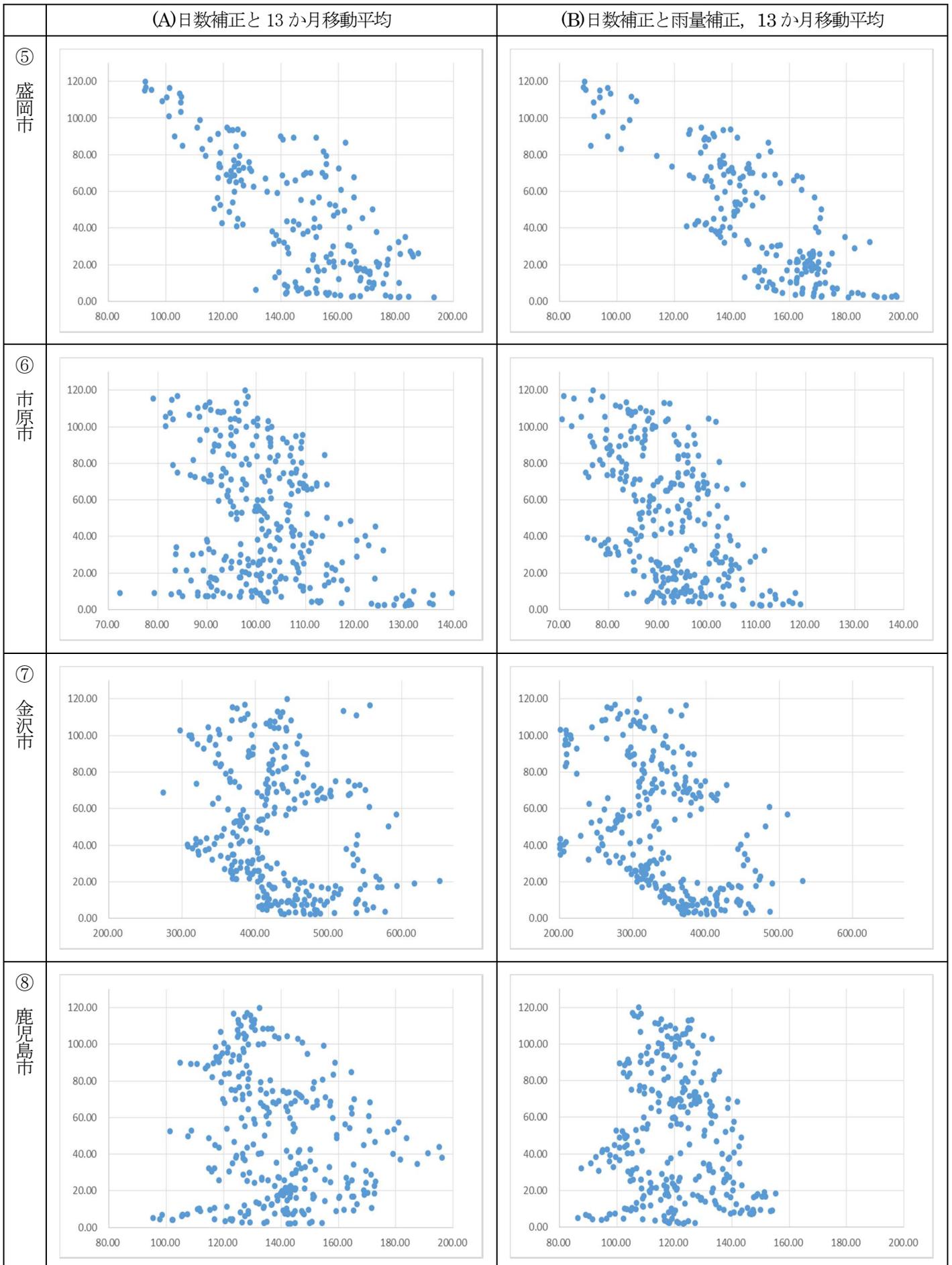


図2 盛岡市, 市原市, 金沢市, 鹿児島市の Be-7(横軸)と太陽黒点相対数(縦軸)の散布グラフ

IV 測定地毎の散布グラフによる解析の考察

1 雨量補正の有効性

雨量補正の有効性は、相関関係からずれた領域があることを前提としているため、相関係数の比較では判断できない。そのため、(A)と(B)のグラフを目視で比較しなければならない。全般的に見ると(B)のグラフの方が横軸方向に縮まっている傾向がある。顕著な例は④札幌市で、(B)のグラフの方が負の相関関係にある領域の幅が狭くなり、そこからずれている領域が明確になっている。このように横軸方向の広がりや縮まっているため、雨量補正が有効と考え、この後の解析では雨量補正したデータを使用する。

2 散布グラフの地域特性

Be-7量は観測地点による差が大きい。金沢市が特に高く、札幌市と盛岡市が続いている。これは降雪や偏西風による影響がうかがえる。

Be-7量と太陽黒点相対数の散布グラフのパターンは、気候が似ている観測地点では似通ると予測していたが、①高松市と②岡山市のように違ったものとなった。このように気候の違いによるパターンの違いは見出すことができない。

図1、図2のグラフを点の分布の形状から次の3パターンに分類した。

- A 比較的明確な1つの相関領域があるもの
 - ①高松市、④札幌市、⑤盛岡市
 - B 相関領域があまり明確でないもの
 - ②岡山市、③広島市、⑥市原市
 - C 相関の軸が2つあるように見えるもの
 - ⑦金沢市、⑧鹿児島市
- Bのパターンは、他のパターンの要素を含んでいるもの、ノイズに埋もれ見えにくくなっていると思われる。

Cのパターンは、その地域特有の現象の有無が影響している可能性がある。金沢市では豪雪の年と雪の少ない年、鹿児島市では桜島の噴火している時と静穏な時、というようなことが考えられる。

B、Cのパターンではその観測地点に合った適切な補正をかければAのパターンに帰着する可能性があると考えられる。

3 まとめ

観測データから太陽黒点相対数とBe-7の測定値の間には、基本的に負の相関があることがうかがえる。ただし、測定地点により散布グラフのパターンは異なっており、高松市のデータに現れたように、相関領域とそれからはずれる領域を明確に分離することは難しい観測データの方が多い。これは地域により気象現象などの影響の現れ方が異なるため、一律な補正方法では限界があるためだと思われる。しかし、その地域に合わせた有効な補正方法を見つけ出すことは困難である。

また、前報¹⁾での高松市の解析では、領域の分離は目測で行ったが、この操作も客観的に行うことが難しい。よって、散布グラフの解析により、地域性に依存しない太陽活動とBe-7の関係を見出すことは難しいと考える。そのため、この後の解析作業では、図1、図2は補助的なデータとして扱い、各測定地点のBe-7測定値を規格化したグラフを使い進めていく。

V 各測定地点のデータを統合した解析の結果

図3に各測定地点のBe-7測定値に日数補正と雨量補正をして13か月移動平均したものの変化を示した。各地の変動パターンには似通った部分も見受けられるが、

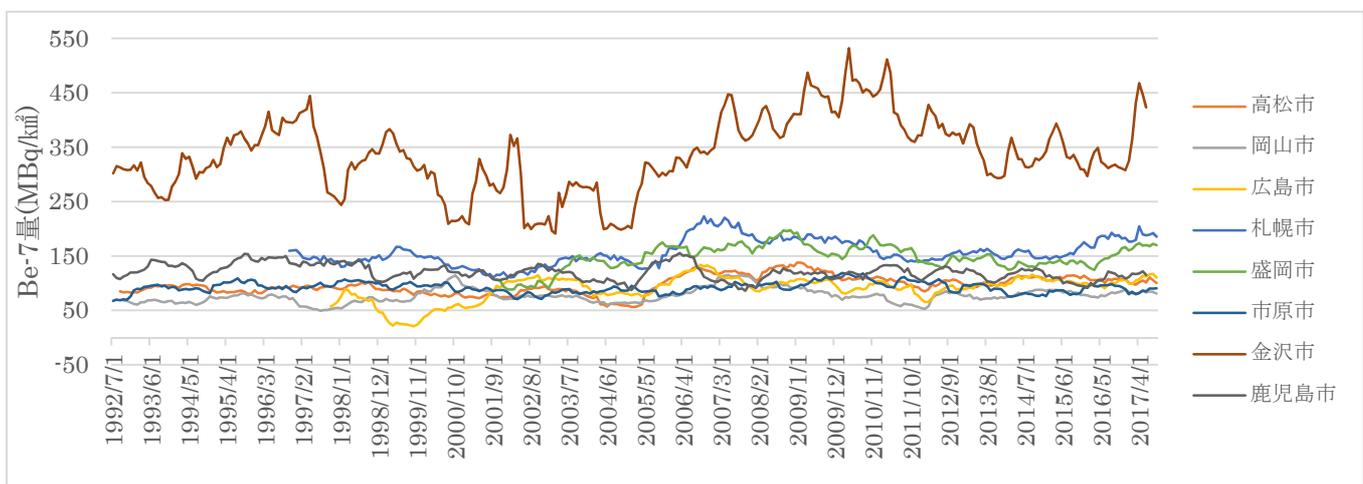


図3 各測定地点のBe-7測定値の変化（日数補正と雨量補正をして13か月移動平均したもの）

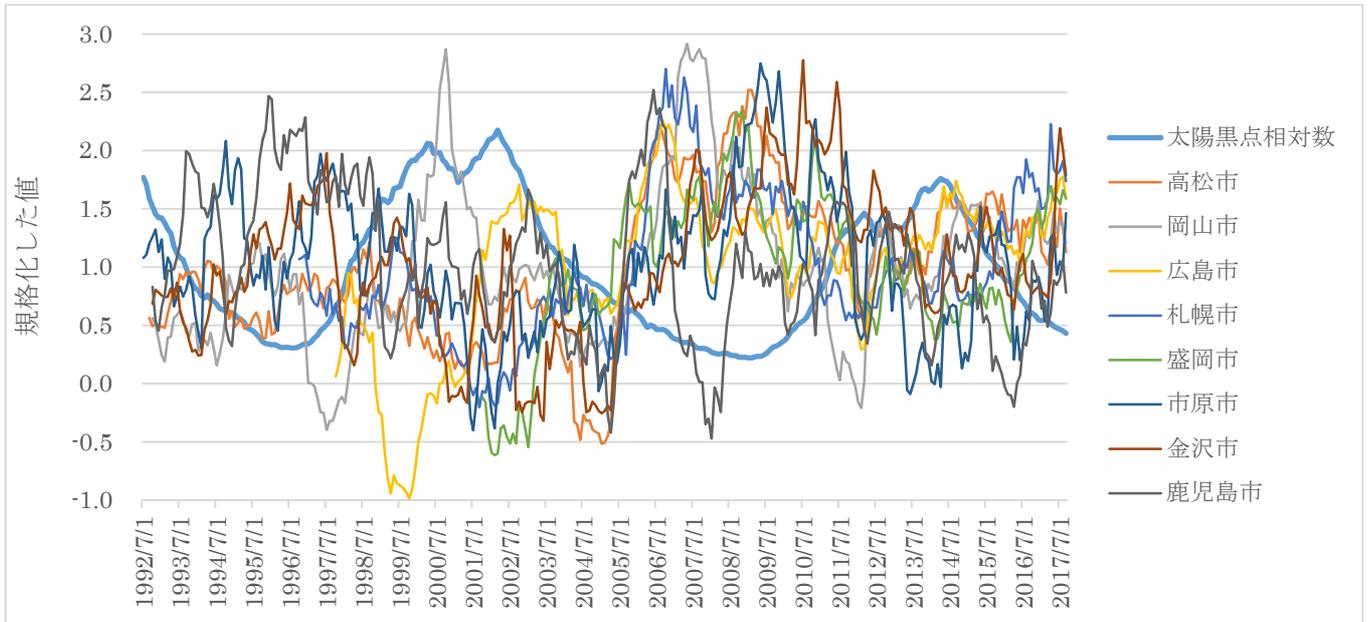


図4 規格化した各測定地点の Be-7 測定値と太陽黒点相対数の変化

測定地点によって値がかなり違っているため、単純に統合して解析することができない。そこで、数値を規格化しその結果を図4に示した。

図4より、多くのデータが同じ傾向で変動しており、規格化した太陽黒点相対数とおおむね逆の変化をしていることが分かる。これは、前報¹⁾での高松市のデータ解析結果と一致する。

全地点の規格化した値を平均することで8地点のデータを統合した。そして、太陽黒点相対数と Be-7 量は基本的に負の相関にあるので、その関係を明確にするため太陽黒点相対数のグラフを、1を軸として上下反転して図5に表示した。また、考察するときの資料として、前報

¹⁾で高松のデータを用いた「相関関係の期間と分類」を表1として再掲する。

VI 各地のデータを統合して解析した考察

1 全体を通しての傾向

図5のグラフは全体としてよく同期しており、基本的に太陽黒点相対数と Be-7 測定値は負の相関関係にあることを裏付けている。基本的に太陽黒点相対数に同期した大きな変動に重なり、1年程度の幅を持つ大小の鋭いピークや谷が見られる。これは、短期または単発の変動が13か月移動平均により1年程度の変動として表現されていると考えられる。



図5 反転した太陽黒点相対数と規格化した各測定地点の Be-7 測定値の平均の変化

表1 相関関係の期間と分類(高松でのデータ)

	期間初め	月数	分類
①	1992年9月	1年4か月	相関
②	1994年1月	3年10か月	異常L
③	1997年11月	5年9か月	相関
④	2003年8月	2年3か月	異常L
⑤	2005年11月	5年5か月	相関
⑥	2011年4月	9か月	異常H
⑦	2012年1月	1年3か月	相関
⑧	2013年4月	2年1か月	異常H
⑨	2015年5月	1年8か月	相関
⑩	2017年1月	3か月	異常L
⑪	2017年4月	7か月	相関
⑫	2017年11月	1か月	異常L
	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	

2 上層大気からの下層大気への移送時間

図5において太陽黒点相対数の変化より遅れて Be-7 の測定値が変化しているように見えるところがあるため、(図5の緑丸の部分) 反転した太陽黒点相対数の値を1か月ずつ後ろにずらしていきながら、8地点の平均値との差を取り、観測期間を平均した。ずらす月数による計算値の変化を示したのが図6である。

図6から太陽黒点相対数のデータを5か月後ろにずらした時、2つのグラフが最も一致することが分かる。このことより、高層大気中から下層大気中へBe-7が移動

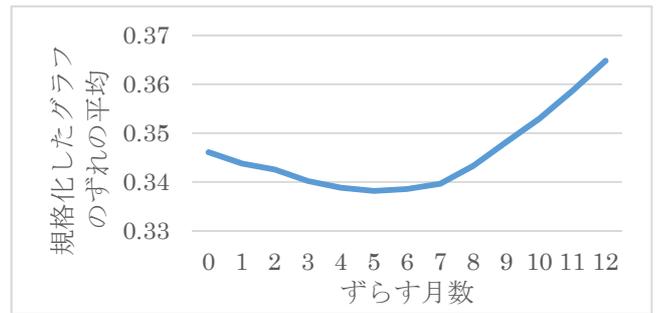


図6 規格化し反転した太陽黒点相対数を1か月ずつ後ろへずらした時の、規格化した8地点のBe-7測定値の平均との差の絶対値を観測期間平均値

するのにかかる時間が平均5か月程度と推測される。前報¹⁾で報告した、高松市のデータの相関関係にある期間の相関係数が高くなるように求めた2か月より、8地点のデータを統合したものであり目視によるデータ分類を行っていないため信頼性が高い。5か月ずらした、規格化して反転した太陽黒点相対数と、各測定地の規格化したBe-7測定値の平均のグラフを図7に示す。

3 前報¹⁾で取り上げた3つの異常期間(表1②④⑧)

表1②は原因となりそうな太陽活動の異常が見つけれなかった時期である。図7ではAの区間に相当し、太陽黒点相対数と同期して変動しているが変位の小さい時期と認識している。太陽電波の観測によると、1990年～2010年にかけて、太陽全体の活動が徐々に弱くなっているとの報告があり⁹⁾、地球近傍での太陽磁場強度もそれに伴い弱くなり、銀河宇宙線量が増加してきていると考えられる。この期間 Be-7 量の変動幅が後半の期間より

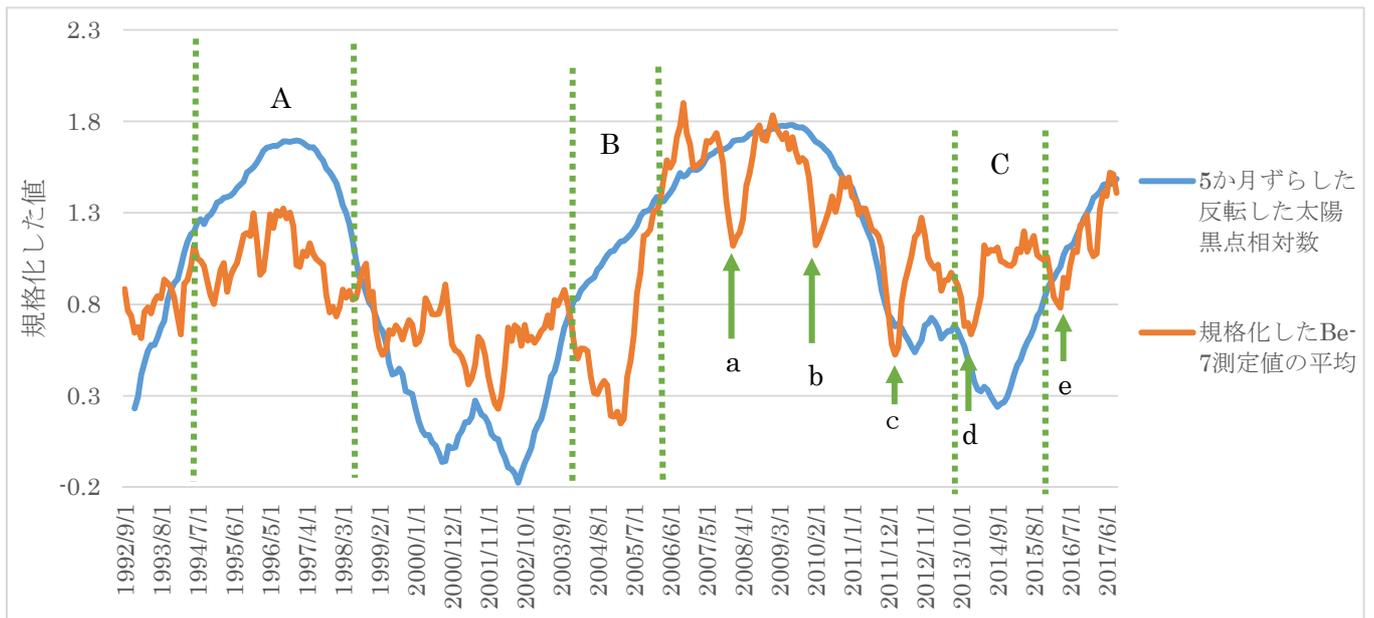


図7 図5の太陽黒点相対数を後ろへ5か月ずらしたグラフ

小さいのは、このことを反映しているとも考えられる。

表1④は図7ではBの区間に相当する。高松のデータのみ解析で見つかった異常L期間が図7でも明確に表れた。図4の測定地別のグラフを見ても一致して減少が見られる時期で前報¹⁾では大規模太陽フレアの頻発の影響と考察した。大規模フレア発生は2003年の10月28日(X17.2)、10月29日(X10.0)、11月2日(X8.3)、11月4日(X28.0)である。なお、()はフレアの規模を表している。これらのフレアがBe-7生成量にすぐに影響したとして、先に考察した5か月の差と移動平均の期間を考慮すると、2003年10月のデータから影響が現れ始める。これは図7と一致する。ところが変動の負のピークは2005年4月であり、1年間かけて徐々に変動が大きくなり、その後、半年ほどで回復している。このことから、大規模フレアを起点として始まった太陽磁場の異変があり、その影響が半年ほどかけて徐々に拡大していったように見える。そして、Be-7量最小値以降はその影響が突然なくなったように見える。(13か月移動平均のため、影響期間が6か月広がる。)大規模フレアが生じた際の太陽系空間へ与える影響の研究に役立つことを期待する。

表1⑧は図7ではCの区間に相当する。高松のデータで異常H期間として、太陽磁場の双極構造の崩れが原因ではないかと指摘した。図7ではもう少し長い2012年2月～2016年4月がBe-7の多い時期であるように見える。また、2016年4月の異常H期間の終わりの原因となる太陽磁場や宇宙線の変化時期が、Be-7の降下時間ロスによ

り5か月前の2015年11月となる。これは、所報18号(2019)「モニタリングポストのスペクトルデータの活用」で報告している銀河宇宙線量と太陽黒点相対数の相関関係のグラフが大きく変化し新たなパターンに入った2015年10月とよく一致する¹¹⁾

太陽黒点相対数の変動より太陽活動が極大と言われる時期は、電波観測や太陽表面磁場観測では太陽極域の活動が極小となっており、太陽磁場が反転することが知られている。⁹⁾表1の⑧の期間は反転がスムーズに起こらず双極構造が崩れたことが人工衛星での観測により明らかになっており⁸⁾そのため異常H期間ができたと考えられる。

4 1年程度の幅の鋭い谷や山

図7には1年程度の幅の鋭い谷や山が数多くみられ、特に顕著なのがa～eのほぼ等間隔に並んだ谷である。図4では線が重なって観測地ごとの変化の様子が分からなくなっているため、数値を1ずつずらしてグラフ化したのが図8である。図8でBの区間の各地のデータを見ると、その期間の変化の様子に多少違いはあるが、その期間内に谷型の変化をしていることは共通している。それに対してa～eの下向きのピークは、観測地により下向きのピークが見られなかったり、あっても時期がずれていたりするものが見受けられる。aは比較的多くの地点で谷が見られ何かの現象を反映しているのかもしれないが、他は原因となる自然現象があるとは考えにくい。

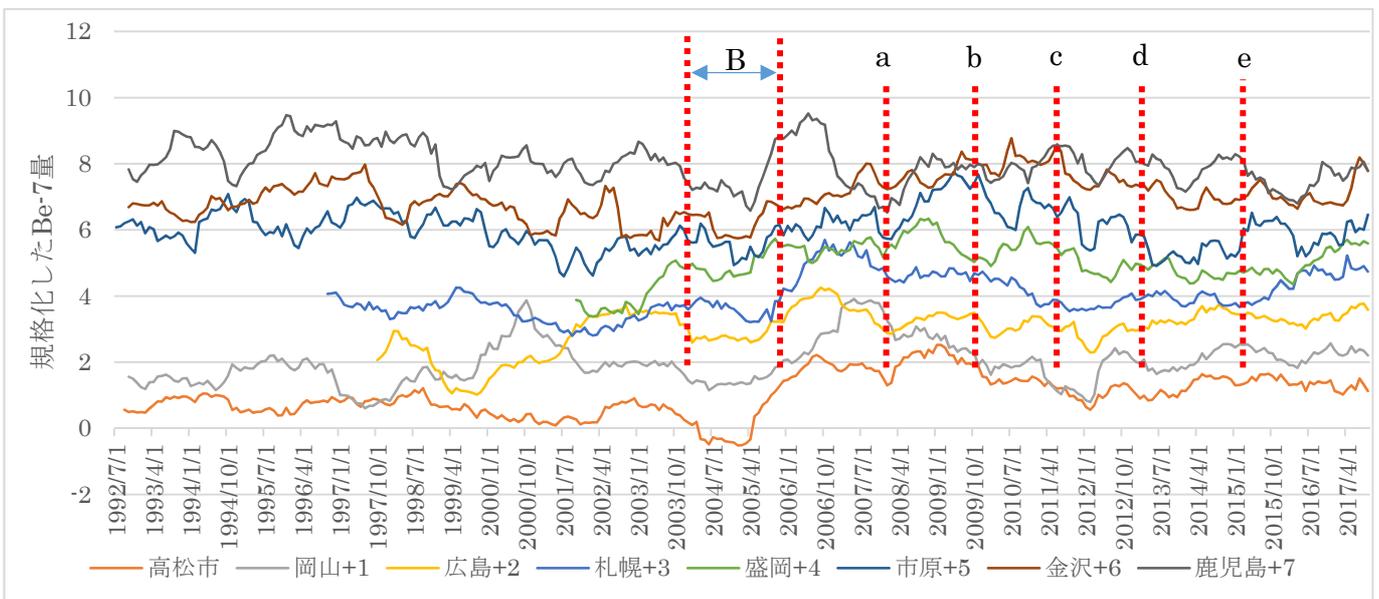


図8 ずらして表示した各地点の規格化したBe-7の値

Ⅶ まとめ

太陽黒点相対数と、国内8地点の大気降下物中のBe-7測定値を解析することにより、前報¹⁾で報告した次の2地点が、高松のデータだけでなく国内の他の場所のデータからも見出され、高松の地域性によるものではないことが確認できた。

- ① 太陽黒点相対数とBe-7量は基本的に負の相関関係にある。
- ② 太陽フレアなど特別な現象により、その関係から外れる時期がある。

これは、日本だけのデータで必ずしも全地球的ではないが、太陽活動の変動が地球近傍の太陽磁場に影響し、地球に降り注ぐ銀河宇宙線量が変動している表れと考えられる。

さらに、太陽黒点相対数と大気降下物中のBe-7測定値の変化に5か月ずれがあることから、高層大気中で銀河宇宙線により生成されたBe-7が地上付近に降下するのに平均5か月程度かかるのではないかと推測される。

前報¹⁾で報告した高松市のデータの太陽黒点相対数とBe-7量のずれの大きい3つの期間については、国内8地点の測定結果を統合したデータでも同じ傾向が見られた。そのため、このずれの原因は地域特性によるものではなく、太陽活動異常などの現象を反映していることを示唆している。

Ⅷ 今後の課題

今回の解析により大気降下物中のBe-7測定値と太陽活動の関係が明らかになってきた。Be-7測定値の変動が太陽活動の極大期や極小期、大規模フレア発生期などと符合していて太陽と無関係とはいえない現象ばかりである。そのため、太陽研究の専門家が引き継いでくださることを期待する。

本研究は、高層大気から下層大気への物質の移送などに関連しており、オゾン層のO₃が地表付近の大気に与える影響³⁾や、宇宙線により生成された凝結核が下層大気で雲を発生させるメカニズムの研究など、気候変動や大気環境変化の予測の精度向上につながる研究であり、さらに研究を進めていきたい。

文献

- 1) 森 好平, 勝間 孝: 大気降下物中に含まれるBe-7の長期変動の解析, 香川県環境保健研究センター所報, 17, 51-56(2018)
- 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O₃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)
- 9) 国立天文台研究成果: 太陽と惑星間空間の活動の関係(2012年9月19日)
- 10) 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)
- 11) 森 好平, 勝間 孝: モニタリングポストのスペクトルデータの活用, 香川県環境保健研究センター所報, 18, 54-64(2019)