

大気降下物中に含まれる Be-7 の長期変動の解析 (第 3 報)

Analysis of Long Distance Variation Be-7 Concentration in Fallout (3rd Report)

森 好平
Kohei MORI

勝間 孝
Takashi KATSUMA

要 旨

大気降下物中に測定される Be-7 量と宇宙線由来の中性子線量の関係を解析した。その結果、地球上層大気中で生成された Be-7 が連続的に地上付近に降下している時期と、Be-7 がしばらく上空に滞留し一気に降下するという変動を繰り返す時期があることを想起させる解析結果が得られた。

Abstract

We analyzed the relationship between the Be-7 dose and neutron dose of radioactivity derived from the cosmic rays. The results suggest that the Be-7 produced in the upper atmosphere continuously descends to the ground, while the Be-7 stays in the upper atmosphere for a while and then descends at once.

キーワード : Be-7 降下物 銀河宇宙線 ガンマ線 中性子線 太陽黒点相対数 太陽フレア 太陽磁場

I はじめに

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。^{5) 9)}

第 1 報¹⁾、第 2 報²⁾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、その傾向は高松市のデータだけではなく、全国 8 地点のデータを統合したものにも見られることを報告した。測定される Be-7 量は太陽活動以外に、生成された上層大気から地上で採集されるまでの大気中の移送状況に大きく影響される。対流圏で降雨などの気象現象による変動は、文献 5)、9) などで報告されているが、上層大気で生成された Be-7 が対流圏まで移送される様子については研究が進んでいない。銀河宇宙線由来と考えられる中性子線の量を Be-7 の生成量、雨量補正などした

Be-7 測定量を対流圏内の Be-7 量としてその関係を解析することで、上層大気から対流圏への Be-7 の移送についての情報が得られると考えた。

II 方法

1 γ 線量と中性子線量との比較

γ 線量は、モニタリングポストのスペクトルデータの 3MeV 以上のカウント数を合計したものである。このエネルギーの γ 線を出す放射性物質がほとんどないため、このカウント数を便宜上銀河宇宙線起源とした。しかし 1 年周期の変動など地球由来のノイズを多く含み、正確に銀河宇宙線量の変動を表している確証がない。³⁾ それで、公開されている中性子線観測データと比較することにより、 γ 線と中性子線の特徴を把握し信頼性を高める。そして、観測期間の長い中性子線の測定値と Be-7 測定値との関係を解析する妥当性を判断する。

そのために、以下のデータを使い γ 線量と中性子線量の、時間毎と月毎の集計、相関グラフ、時間変動のグラフを作成する。

(1) 中性子線観測データ

a データソース

名古屋大学が運営している World Data Center for Cosmic Rays のホームページ (<http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCR>) よりダウンロード

b 測定地・測定者

スイス ユングフラウヨッホ (北緯 46.55 度、東経 7.98 度、標高 3570m)

ベルン大学物理学研究所により運営されている観測所。1958 年～現在と長期間の観測データが公開されていることと、高松と地理的・気象的条件が大きく違うため地球由来の共通したノイズがほとんどないと考え、この観測所を選定。

c ダウンロードデータ

1992 年～2019 年 (Be-7 量のデータがある期間) の 1 時間ごとの中性子線のカウント数。(コラム 3 には 1967 年からのデータを使用)

(2) 宇宙線由来 γ 線量

高松市に設置されたモニタリングポストのスペクトルデータより、放射性同位元素が出さない 3MeV 以上の γ 線カウント数を合計したものを、銀河宇宙線由来の γ 線であるとみなした。

2 中性子線と Be-7 の関係

規格化した Be-7 量と中性子線量の時間変化のグラフを作成する。解析の参考にするため γ 線量と反転した太陽黒点相対数も規格化して併記する。また、Be-7 量と中性子線量の相関グラフを作成するが、変動幅を規格化した数値では、近似直線の傾きが正しく表示できないため、13 か月移動平均した規格化していない数値を使用する。その時、国内 8 か所を統合した Be-7 量は規格化して平均しているため使えない。そのため Be-7 量は高松市のデータを使用する。それらのグラフより、高層大気から下層大気への Be-7 の移送に関する情報の抽出を試みる。

(1) Be-7 量データ

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。

(2) 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。

III 結果

1 γ 線量と中性子線量との比較

中性子線量と γ 線量をそれぞれ、時間毎と月毎に集計してグラフ化したのが、図 1～図 4 である。

図 1 では、1%以下のわずかなものではあるが明確な日変化が見られる。

図 2 でも昼頃高く深夜にかけて減少していく傾向は見られるものの、不規則な変動が重なり明確な規則変動があるとは言えない。

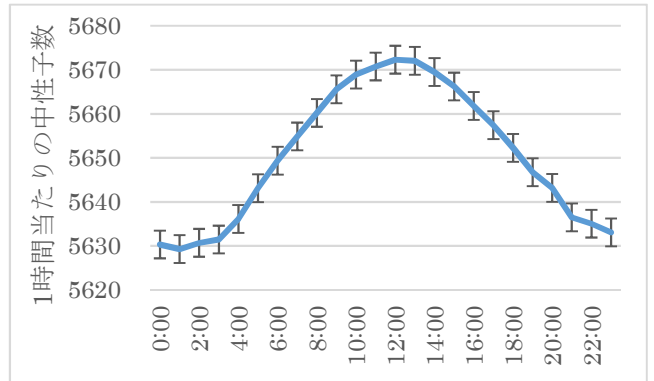


図 1 中性子線量の 1 年間のデータを時間毎の平均

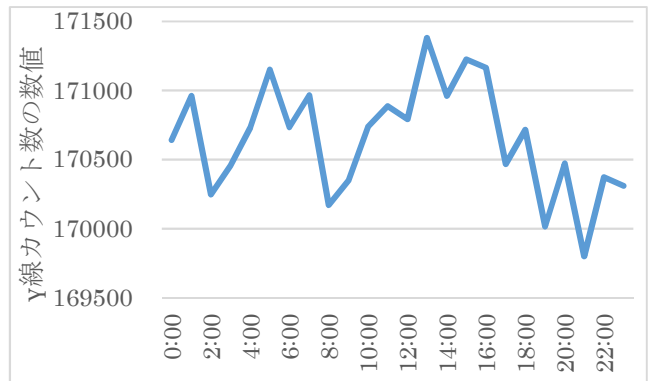


図 2 γ 線量の時間毎の変化

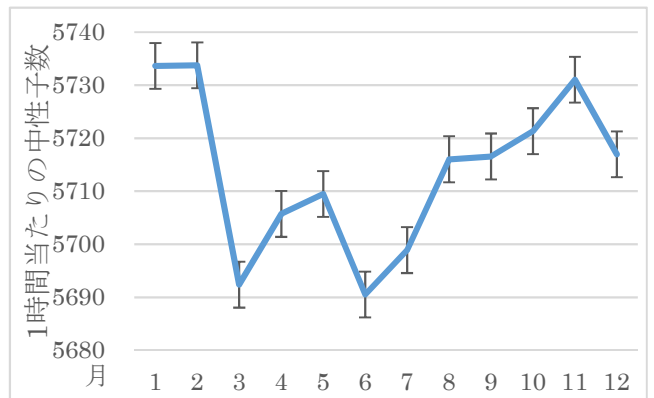


図 3 中性子線量の月ごとの変化

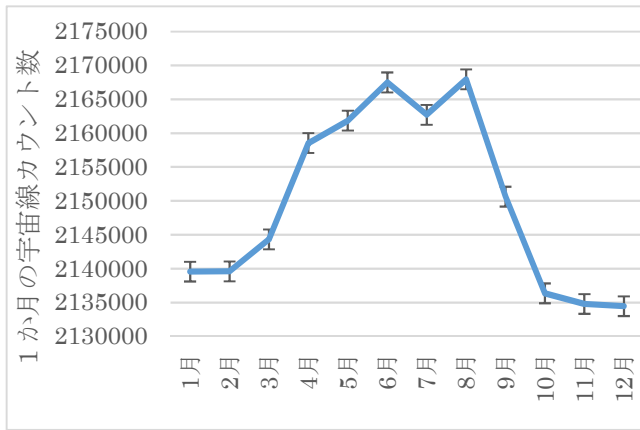


図4 γ 線量の月ごとの変化

図4より、 γ 線は明確に夏高く冬低い季節変化を示すが、図3の中性子線の変化は、夏低く冬高い傾向にあり、 γ 線ほど明確ではない。また、変動幅は γ 線が1.5%程度なのに対して、中性子線はその半分程度である。

γ 線量と中性子線量の相関が図5～図7である。なお、データは時系列に線で結んでいる。

図5より、中性子線量と γ 線量は正の相関がありそうなどが分かる。図6より、 γ 線量を月補正すると相関係数が0.425776から0.677188に上がることから、 γ 線量に季節変化があることと、月補正が有効に作用することが確かめられた。また、図7で相関グラフが劇的に変化したことから、13か月移動平均の有効性が改めて確認された。この補正が有効であるということは、原因を特定できないものの、1年以下の期間での不規則さが存在しているということであり、これは統計的なばらつきだけとは限らない。また、図7では赤丸で囲んだ期間のデータは明らかに他の期間と異質である。

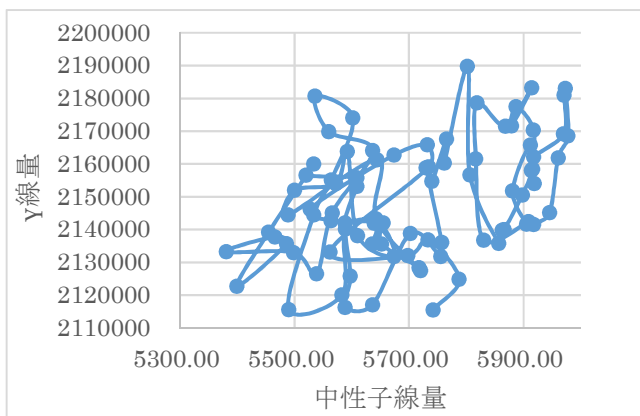


図5 中性子線量と γ 線量の相関グラフ（生データ）

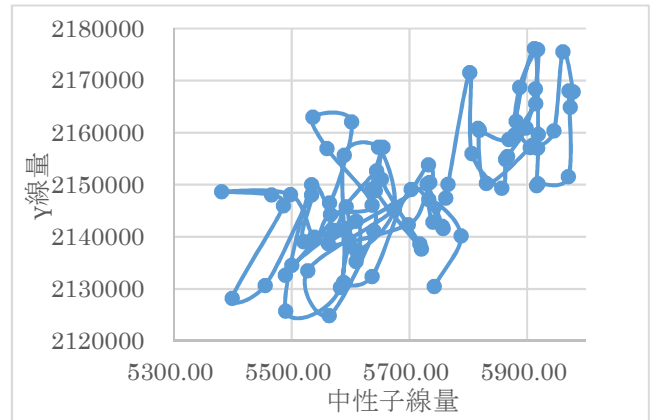


図6 中性子線量と月補正した γ 線量との相関グラフ

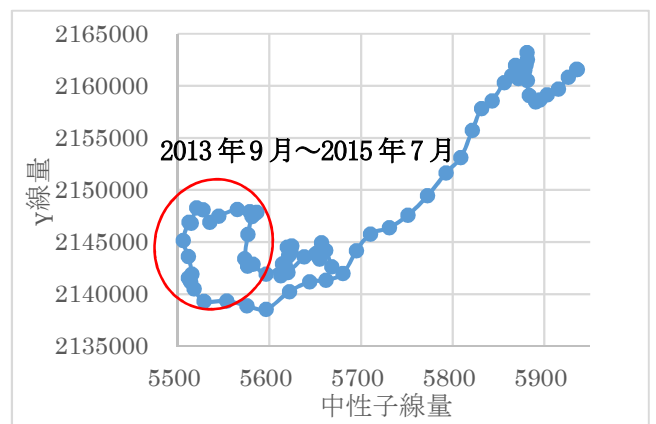


図7 13か月移動平均したデータによる、中性子線量と γ 線量の相関グラフ

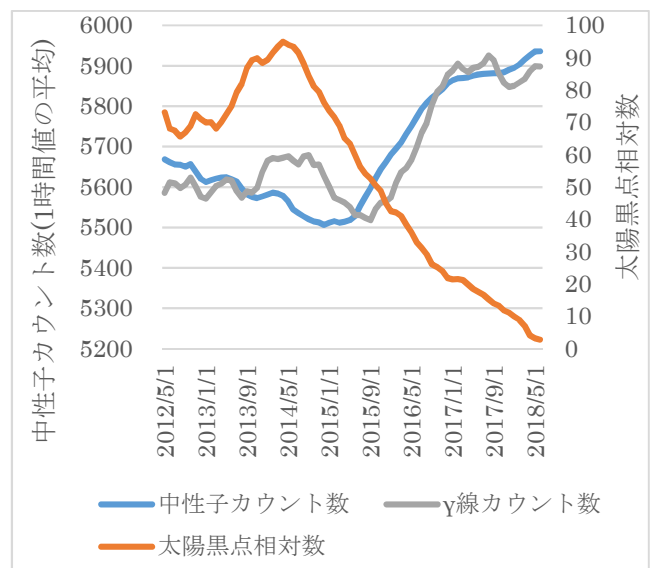


図8 中性子線、 γ 線、太陽黒点相対数の時間変化。 γ 線のカウント数は平均・偏差の絶対値が中性子線と一致するように規格化した値を使っている。

γ線のデータがある期間について、中性子線とγ線、太陽黒点相対数を同じ時間軸で変化の違いを見たのが図8である。図8ではγ線量と中性子線量はほぼ同じように変化しているように見えるが、2013年11月～2015年6月にγ線にある山が中性子線には見られない。図7でγ線と中性子線の相関関係が崩れている時期に対応するものであるが、太陽黒点相対数のグラフにもほぼ対応する山が見られる。

2 中性子線と Be-7 の関係

Be-7 量のデータがある全期間について、Be-7 量、中性子線量、γ線量、太陽黒点相対数の時間変化を図9に示す。ただし、各データは規格化しており、太陽黒点相対数は負の相関を明確にするため上下反転している。

Be-7 量と中性子線量の相関を図10に示す。文献3)で示した、2015年1月～2016年12月にBe-7 量の変動が少なくその前後で変動の大きい時期

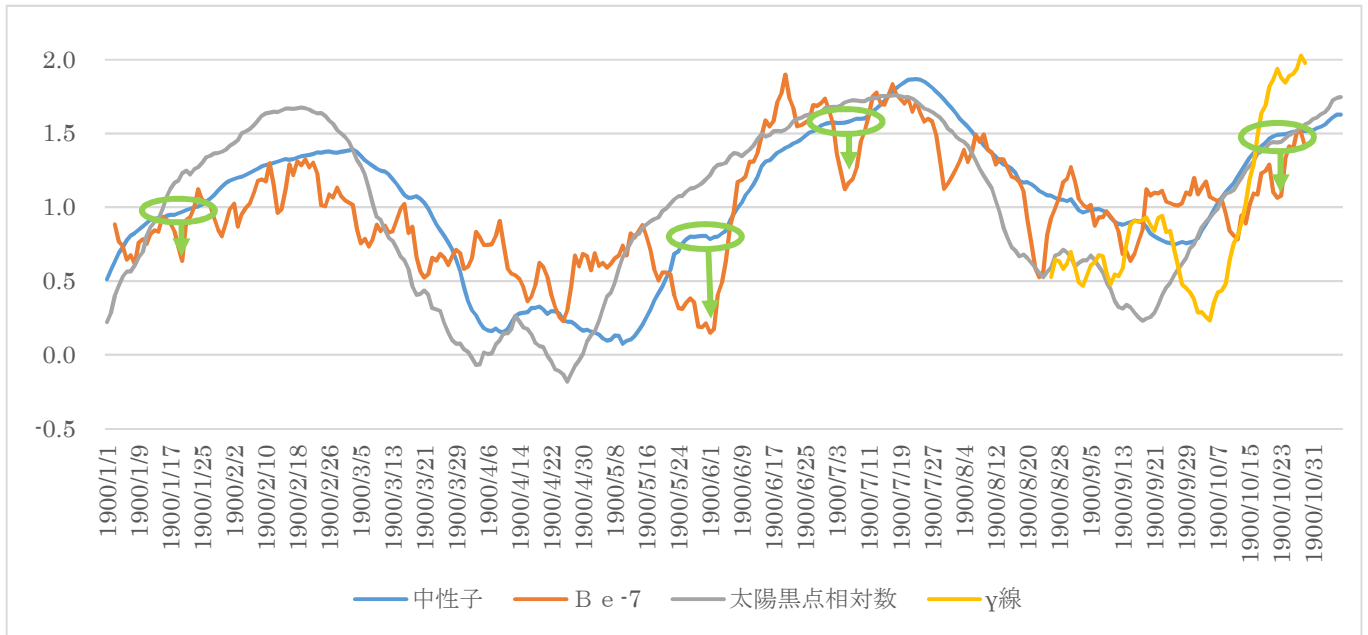


図9 規格化した中性子線量と Be-7 量、反転した太陽黒点相対数

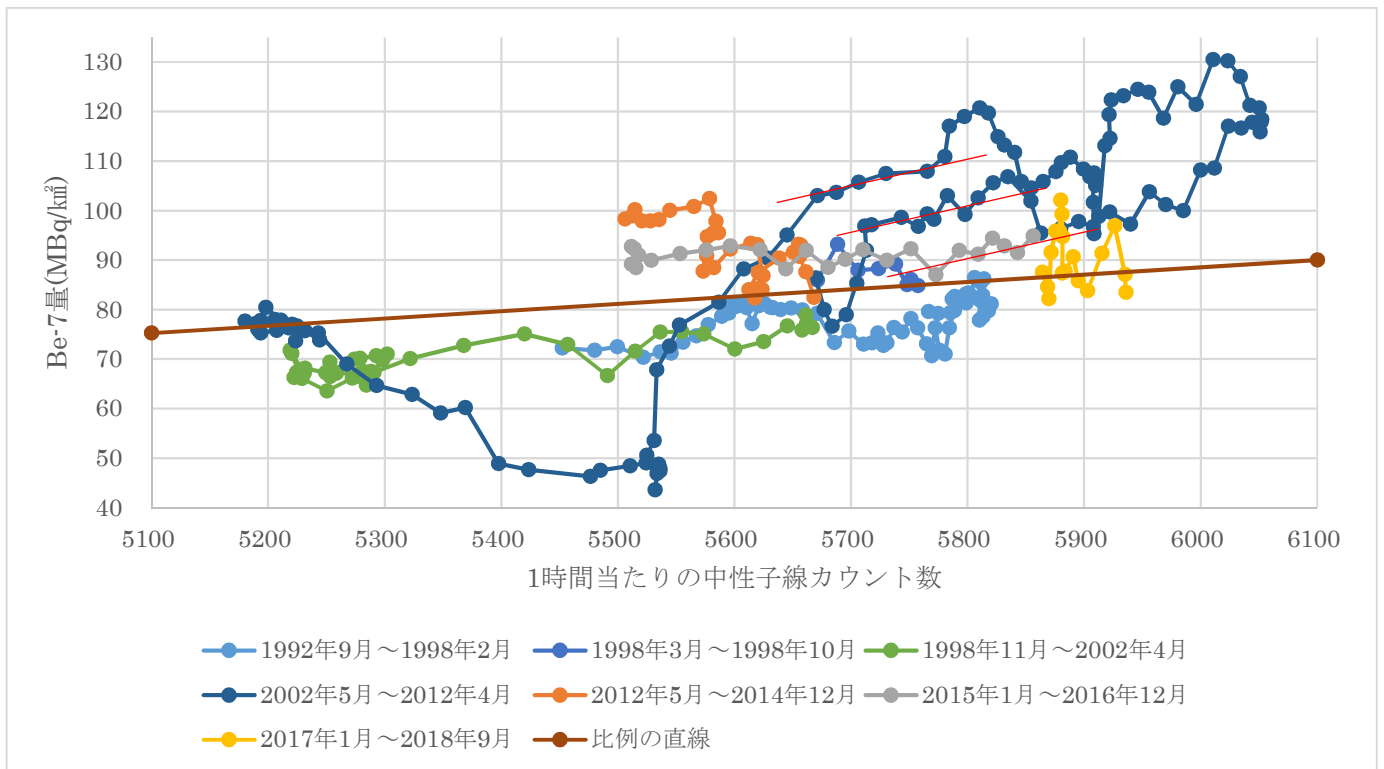


図10 Be-7 量と中性子線量の相関

があることが、図 10 でも表れている。さらに、1992 年 9 月～1998 年 2 月、1998 年 11 月～2002 年 4 月にも同様に変動の少ない時期が現れた。そして、これらの変動の少ない時期は、比例関係の直線に沿った傾きを示している。また、2002 年 5 月～2014 年の変動の激しい期間内にも、傾きが少し異なるが、短期間の変動の少ない時期が見られる。(図 10 中の赤色短い直線)

IV 考察

1 γ 線量と中性子線量との比較

図 1～図 4 から、 γ 線量と中性子線量では日変化、年変化に特徴がある。中性子線の日変化については、太陽系空間の磁場により銀河宇宙線の飛来方向に偏りが出るのを、地球の自転により時間変化として観察していることがわかっている。¹³⁾ しかし、 γ 線量の年変化についての研究は、文献調査で見つけることができなかった。

ここでは γ 線量が季節変化をする原因(コラム 1 参照)について追及することはせずに補正を行い、さらに 13 か月移動平均することで、1 年以下の周期の変動をキャンセルして γ 線と中性子線の比較を行った。その結果、図 7 のように多くの期間では γ 線量と中性子線量はよい相関を示す。ところが 2013 年 9 月～2015 年 7 月は、明らかに相関関係から外れていて、それは図 8 にもカウント数の差となって表れている。 γ 線量は中性子線量に比べ

コラム 1 γ 線量の季節変化についての考察

γ 線も中性子線も、ほとんど高エネルギー陽子である銀河宇宙線が地球上層大気で原子と衝突することによって発生する。そこで発生した中性子は他の原子と反応しにくく、ほとんどそのまま地表に届くと考えられる。しかし、 γ 線は電子対生成により電子と陽電子を作り出し、それが原子核にぶつかり制動放射によって複数の γ 線を作り出す。これを電磁カスケードと呼び地上に到達するまで何度も繰り返される。よって、夏季には上層大気が熱で膨張し、1 次 γ 線が発生する高度が上昇するため、地上に到達するまでの電磁カスケードを繰り返す回数が多くなり γ 線総量が大きくなることが考えられる。これは大気内の要因によるノイズが大きいともいえるが、 γ 線量は中性子線量より上層大気の状態に敏感に反応するセンサーになっているともいえる。

て地球大気の影響を受けやすいと考えられるので、具体的な原因(コラム 2 参照)は確定させなくても、中性子線の方が銀河宇宙線量をより正確に反映していると考えられる。よって、上層大気で生成される Be-7 量の指標として中性子線量を使用していく。

2 中性子線と Be-7 の関係

(1) 全体的な傾向

図 9 より、中性子線量、Be-7 量、反転した太陽黒点相対数は、基本的に同期して変動しているのが分かる。測定期間の短い γ 線では明確でなかったこのことが、長期のデータがある中性子線量を使用することで明確になった。このことより、太陽活動を表す代表的な数値である太陽黒点相対数の変動が、地球近傍の太陽磁場強度の変

コラム 2 γ 線量と太陽活動についての考察

中性子線量と γ 線量が相関関係から外れている期間は、太陽磁場の双極構造が崩れていた時期にほぼ対応する。^{1) 2)} この期間では相関しているときに比べて、 γ 線が多く、または中性子線が少なく観測されているが、 γ 線量の方が地球大気の変動を大きく受けることから、 γ 線が多くなっていると解釈すべきであろう。太陽磁場の双極構造が崩れている時期には、太陽系空間の太陽磁場が銀河宇宙線量に作用する以外に、地球大気に直接作用している可能性がある。例えば、太陽磁場が双極構造をしているときには広く太陽系空間に磁場が広がり、地球磁気圏を強く圧迫しているが、双極構造が崩れると太陽磁場が太陽近傍だけで強くなり、地球磁気圏に対する圧力が弱まるため地球磁気圏が膨張する。それに伴い、バンアレン帯など地球高層の荷電粒子大気が大きく膨張して、1 次 γ 線が発生する高度が高くなり、電磁カスケードの回数が多くなって γ 線量が多くなることが考えられる。逆に中性子線量と γ 線量の比から、高層大気の宇宙空間への広がりが観測できるかもしれない。

文献 3) において、太陽黒点相対数と γ 線量の関係が 2015 年 6 月ごろを境に、正の相関から負の相関になっているように見えることを報告したが、中性子線量ではこの変化は見いだせない。上記のように太陽磁場構造の変動が銀河宇宙線量だけでなく、地球上層大気に直接作用したことが原因だったと解釈することもできる。

動に影響し、地球に降り注ぐ銀河宇宙線量に影響を与えている。そのため、地表に届く中性子線量や、高層大気で生成され大気降下物中に測定される Be-7 量に影響を与える。このようなメカニズムが実際に起こっているらしいことが改めて確認できた。

(2) 第1報¹⁾で指摘した異常期間(表1再掲)

a 表1②

対応する太陽の異常は見つけ出せなかった時期である。第2報²⁾では、太陽黒点相対数と同期しているものの変位が小さい時期と認識し、太陽電波の観測に現れている1990～2010年にかけての太陽全体の活動の低下に対応していると考えた。¹²⁾ この間、規格化した中性子線の変動は太陽黒点相対数よりも小さく、Be-7量の変動に近いものになっている。これは、太陽電波の変動のように、太陽黒点相対数に現れない太陽活動の変動の影響を中性子線量が受けているためだと考えられる。

b 表1④

国内8か所のBe-7測定データに共通してみられた変動であり、大規模フレアの時期と一致することからその影響と考えている。Be-7量の変動はかなりの変動幅であるが、中性子線量のグラフでは増加中の一時的な停滞(シヨルダー形状のグラフ)として現れている。中性子線量の変動が小さいのにBe-7量が大きく変動している原因について、それぞれの発生メカニズムに立ち返りさらに研究する必要がある。

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

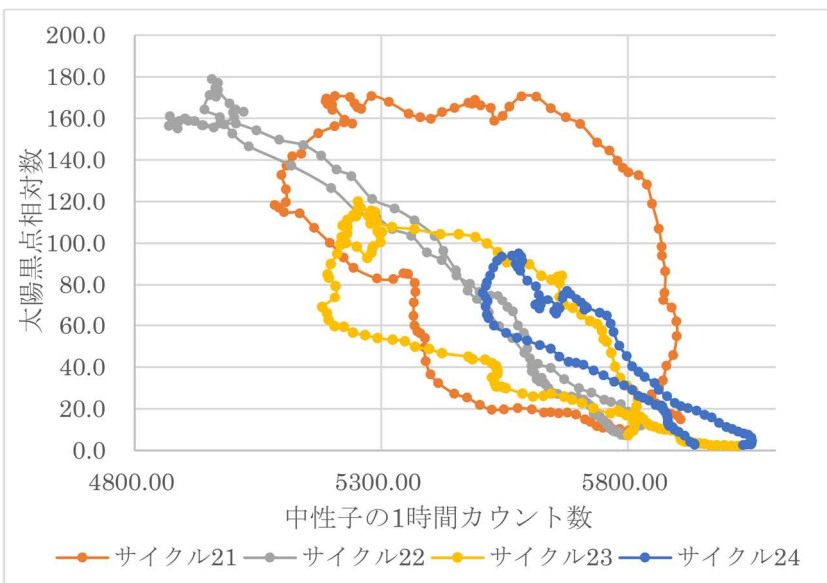
c 表1⑧

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期間である。図9ではBe-7量が2012年2月～2016年4月、中性子線量が2011年4月～2015年5月に太陽黒点相対数より大きい時期がある。これは、太陽磁場の双極構造の崩れが、地球近傍の太陽磁場を太陽黒点相対数相当量より弱くして、銀河宇宙線の遮蔽効果を弱めたため、中性子線量とBe-7生成量が太陽黒点相対数相当量より多くなったと解釈できる。

(3) 中性子線量のシヨルダーとBe-7量の谷の関係

表1④のような中性子線量の増加中のシヨルダーと

コラム3 太陽黒点相対数と中性子線量の時間的なずれ



太陽活動サイクルごとに色分けし、時系列で点を結んだ太陽黒点相対数と中性子線の相関グラフが図11である。全期間を通して負の相関があるが、太陽活動サイクル毎にその様子が違っている。サイクル22では直線状になっており、太陽黒点相対数の変化が時間をおかずに中性子線量に反映している。ところがサイクル21では反時計回りの円形となり、太陽黒点相対数に遅れて中性子線量に変化していることを表している。サイクル23でも遅れる傾向があり、図9で時間方向のずれとなって表れている。

図11 太陽黒点相対数と中性子線量の相関(1967～2018年の13か月移動平均)

Be-7 量の谷の関係は、図9の緑丸と矢印のように、他にも見られる。表1④の他にも2008年2月の谷は、第2報²⁾で、国内8か所のデータで共通した谷であることを指摘している。ノイズではなく、中性子線量を変動させる地球外の要因と同じ要因による Be-7 生成量の変動をとらえている可能性がある。

(4) 太陽黒点相対数と中性子線量の時間的なずれ

図9で1996年9月～2009年2月(23太陽サイクルに相当)では太陽黒点相対数の変動に遅れて中性子線量が増加している。(詳しくはコラム3参照) 中性子線量の変動は地球近傍の太陽磁場の変動により銀河宇宙線量が増加するためと考えているので、このずれは太陽黒点相対数の変動と地球近傍の太陽磁場の変動の時間差と考えられる。第2報²⁾で、太陽黒点相対数の変動と降水物中の Be-7 量の変動の時間的なずれから、高層大気で生成された Be-7 が地上付近に降下してくるのに平均5か月程度かかると推測した。これは太陽黒点相対数の変動がリアルタイムで地球近傍の磁場に影響するとしての計算であったので、太陽黒点相対数の変動と地球近傍の地場の変動の時間差も含んでいる数値であると考えられる。

(5) Be-7 量と中性子線量の相関

文献3)で、上層大気で生成された Be-7 がスムーズに下層大気へ移送される時期と、上空での滞留と一時期に降下を繰り返している時期があることを示したが、図10のように中性子線量と Be-7 量の相関関係にも同様の関係を示す期間が見つかったことから、この説の信憑性が向上した。

しかし、1992年9月～1998年2月、1998年11月～2002年4月と2015年1月～2016年12月は、どちらも比例関係にある時期だが、Be-7 量に違いがある。(グラフが上下に離れている) また、2002年5月～2012年4月の変動が大きい時期が他の時期より期間が長く変動幅もかなり大きい。この原因を上層大気での滞留と一気の降下の結果とするのは難しい。この期間において、赤直線で示す変動の少ない期間が3回確認できるが、Be-7 量は中性子線量と比例関係ではなく、中性子線量が10%上昇すると、Be-7 量が30%ほど上昇する関係になっている。そして、2002年5月～2012年4月の変動全体がこの傾きの直線上に乗っているように見える。(Be-7 量が70を下回る時期は、表1④に対応しており、特別な時期として除外できる) また、この期間は、太陽活動サイクル23のピークからサイクル24のピーク(太陽磁場が南北入れ替わってか

ら次に入れ替わるまでの期間)にはほぼ対応している。中性子線量を使った理由は、地上で観測される Be-7 量の変動を太陽活動の変動と切り離して考えるためであるが、太陽活動の影響が強く残っている可能性もある。

V まとめ

地上で観測される Be-7 量が安定していて中性子線量と比例している時期と、Be-7 量の変動が大きい時期が、複数存在していることが分かった。これは、上層大気から下層大気へと Be-7 がスムーズに移送されている時期と、生成された Be-7 がしばらく上層大気中に滞留し、それが一時期に降下している時期に対応しているのではないかと考えているが、それを裏づけるデータは見つかっていない。地上で観測されるオゾン量の変動の中に、Be-7 と同期した上空のオゾン層の降下に起因する現象⁶⁾が見られないか検討してみたい。

また、特定の太陽活動の時期に起因するのではないかと疑われる、Be-7 と中性子線の生成量の差異が見いだせた。これまで、Be-7 と中性子線は同様に生成されることを前提にしていたが、両者が生成される条件の違いを研究したうえで、太陽活動の影響を補正することが必要であろう。

VI 謝辞

この報告は、中性子線量と太陽黒点相対数の観測に長年携わった観測者の努力があつて成り立っている。観測者の皆さんに敬意を表するとともに、そのデータを整理・公開し、使用を許可して下さった「名古屋大学 World Data Center for Cosmic Rays」「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」に感謝する。

文献

- 1) 森 好平, 勝間 孝: 大気降水物中に含まれる 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) 森 好平, 勝間 孝: 大気降水物中に含まれる Be-7 の長期変動の解析(第2報), 香川県環境保健研究センター所報, 18, 45-53 (2019)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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)
 - 6) 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)
 - 7) 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)
 - 8) 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)
 - 9) 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)
 - 10) World Data Center for Cosmic Ray ホームページ
 - 11) 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)
 - 12) 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)
 - 13) 石崎 章雅:銀河宇宙線強度の太陽時日変化異方性とその長周期変動, STE 研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」
<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/news/workshop/h24shukai/ishizaki130301.pdf>