日本付近の地震発生日と高崎の 大気中ベリリウム-7濃度の関係に係る統計分析

日本原子力研究開発機構核不拡散科学技術センター* 市橋正生†

A Statistical Analysis of the Relationship between Days of Earthquake in Japan and Its Vicinity and Beryllium-7 Concentrations in the Surface Air at Takasaki

Masaki ICHIHASHI†

Nuclear Nonproliferation Science and Technology Center, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

(Received October 16, 2009; Accepted June 7, 2011)

The relationship between the days of earthquake in Japan and its vicinity and the Be-7 concentrations in the surface air at Takasaki were statistically analyzed. A day when one or more earthquakes of $M5$ or greater occurred in Japan and its vicinity was defined as a “day of earthquake”. Earthquakes which were deemed aftershocks were not included in the analysis. In order to avoid the effect of seasonal variation, the residuals obtained by deducting 31-day moving averages from Be-7 concentrations and those obtained by deducting the ‘21-day’ moving averages of the periods from -15 to $+0$ days and from $+11$ to $+15$ days were analyzed. The ‘21-day’ moving averages were also calculated to avoid the effect of aftershocks. Rank-sum tests of the residuals showed that the Be-7 concentrations decreased from the 31-day and ‘21-day’ moving averages on days of earthquake. A binomial test showed that there were significantly more days of earthquake when the Be-7 concentrations were smaller than the medians of Be-7 concentrations for the 31-day periods (from 15 days before to 15 days after days of earthquake) than those when the Be-7 concentrations exceeded the medians. These suggest that the Be-7 concentrations decrease on days of earthquake. It is noted that the Be-7 concentrations on days of earthquake decreased on days of both precipitation and non-precipitation, respectively.

Key words: Statistical analysis, Be-7 concentrations in surface air, Cosmogenic radionuclide, Day of earthquake, In Japan and its vicinity

§1. はじめに

太陽及び惑星間磁場の極性の長期変動に伴う長期の宇宙線の変動が、大気圧の変動を通じて、世界の大地震の発生数の長期的な変動に先行する要因となる可能性があ

るとの分析結果が報告されている [Morozova *et al.* (2000)]. 本研究は、宇宙線と大気との核反応によって生成する誘導放射性核種 [永井 (2000)] の一つであるベリリウム-7 (以下, 「Be-7」という) の大気中濃度と日本付近の地震の発生日との関係を調べることを目的とする。

Be-7 は、成層圏及び対流圏高層で、銀河宇宙線の二次宇宙線が大気中の窒素、酸素などの原子核と衝突し生成され、成層圏で約 70%, 対流圏で約 30% が生成される。Be-7 の半減期は 53 日で、生成後、直ちに BeO となり、エアロゾル粒子に付着する [Lal and Peters (1967)]. 平均滞留時間は、成層圏で 1~2 年、対流圏で 10~35 日

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

† 現所属: 宇宙航空研究開発機構研究開発本部宇宙環境グループ

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

† Present affiliation: Space Environment Group, Aerospace Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

と評価されている [Bleichrodt (1978), Graustein and Turekian (1986), Yoshimori (2005)]. 成層圏においては滞留時間が1~2年と長いため、大気中濃度の緯度分布は均一化し、これが中緯度の圏界面から対流圏へ移動し大気の循環により対流圏内を移動する。一方、対流圏内における生成速度は中緯度において最も高いと考えられ、対流圏における分布は、この2つの成分の和となり、対流圏上部の中緯度で、Be-7の濃度が最も高いと考えられている。その後は主に大気の大循環により、対流圏下部へ運ばれ、地表・海面に降下する [永井 (2001)].

地上の大気中のBe-7濃度の長期的な変動は、宇宙線の強度変動と対応づけられる。地表に到達する宇宙線の多くは銀河系由来の荷電粒子であるが、太陽活動が活発になる(太陽黒点数が多くなる)と、太陽系からの磁場が強くなって銀河系宇宙線を弱め、結果として大気中のBe-7生成量が減少すると考えられている [石川・他 (2005)].

地上でのBe-7濃度は、季節、場所、地域の気象条件などにより、複雑に変化する。Viezee and Singh (1980)は、幾つかの緯度帯で、地表のBe-7濃度と低気圧トラフの発生に高い相関があることを報告している。

成層圏と対流圏の大気の変換量は緯度に大きく依存し、Be-7濃度の季節変化のパターンは、緯度に依存すると考えられている。緯度が40~50°Nの高緯度地域では、夏季だけ高濃度になる一山型変化を示し、緯度が35~37°Nの中緯度地域では、春季と秋季に濃度が高くなる二山型変化の傾向を示す。これらの変動は、太陽活動や銀河宇宙線に関係していないことから、季節的な大気の動きで生じていると考えられている。春のピークについては、冬から春にかけて成層圏から対流圏へ、ジェット気流により圏界面を通して、物質の移行が高められることで説明されている。また、日本では、春・秋の温帯性高気圧や温帯性低気圧との関係が議論されている [例えば、阿部・阿部 (1991), 土井・他 (1993), Yoshimori (2005)]. Be-7濃度の季節変動の要因と考えられるものとして、(1) 成層圏と対流圏の大気の変換、(2) 対流圏における大気の流れ、(3) 低緯度と高緯度の大気の流れ、(4) 降雨によるスカベンジング効果が提案されてきている [Feely *et al.* (1989)].

大気中のBe-7濃度の日毎の変動については、その変動が大きいこと、局地的な気象条件、特に降水が大きく関与すること、気圧配置が関連していることがわかっており、気圧配置が日々のBe-7の降下にかかなり影響していると考えられている [阿部 (1995), 阿部・阿部 (1991)]. しかし、どのような気象要素が日毎の変動に影響しているのか、そしてその影響は極めて狭い地域に限定されて

いるのか等については、わかっていない [櫻井・菊地 (2008)].

本研究では、2003年8月25日から2008年12月28日までの期間を対象に、次節で定義した地震発生日(日本付近で、M5以上の地震(余震を除く)が発生した日)と高崎の大気中Be-7濃度について統計分析を行った。次に、春季と秋季にBe-7濃度が高くなる二山型変化は、高崎でも見られたことから、季節変動に伴い1月から12月までの各月毎に変動するBe-7濃度が、地震発生日に、これらの変動から、どのように増減するかを調べた。具体的には、各日のBe-7濃度から、31日移動平均値を除去した残差を求めるとともに、更に、各日の前後31日間のうち、余震の影響を考慮して、地震発生日後の10日間を除いた、21日間のBe-7濃度の平均値(以下、「21日」移動平均値という。)を除去した残差を求め、地震発生日とそれ以外の日で順位と検定を行った。また、地震発生日のBe-7濃度と、地震発生日の15日前から15日後までの31日のBe-7濃度の中央値との大小を比較し二項分布評価を行った。

§2. データ

2.1 日本付近の地震発生日

日本付近の地震として、M5以上の地震で、Fig. 1で示した北緯25~47度、東経128~150度の領域で発生したものを対象とした。大気中Be-7濃度の観測地点である高崎は、この領域のほぼ中心に位置する。M5以上の地震(余震を除く)が発生した日(日本標準時)を「地震発生日」、それ以外の日を「地震なし日」と定義した。なお、宇津 (1999) に示された計算方法を用い、本震 $5 \leq M < 6$ については、細野・吉田 (1992) の係数、本震 $M \geq 6$ については、松浦 (1993) の係数を用いて、M5以上の余震が発生する確率が0.01/日より大きい日の期間を求め、保守的にこれより長い期間を本震のM毎に余震期間として設定した。具体的には、余震期間を、10日 ($5 \leq M \leq 5.6$)、20日 ($M5.7, M5.8$)、30日 ($5.9 \leq M \leq 6.4$)、90日 ($6.5 \leq M \leq 7.1$)、130日 ($M7.2, M7.3$)、200日 ($M7.4, M7.5$)、250日 ($M7.6, M7.7$)、300日 ($M7.8$)、360日 ($M7.9$)、460日 ($M8$) と設定した。震源から緯度1度以内及び経度 $1/\cos(\theta)$ 度(但し θ は、震源位置の緯度)以内で、余震期間内に発生したM5以上の地震を余震とみなし、対象から除いた。

2003年8月25日から2008年12月28日までの期間の、地震発生日の日系列のグラフをFig. 2aに示す。

上記で設定した地震の対象域の広さは、大気の後方流跡線解析で大陸の大気が降下してくる水平距離の規模に対応しており、また、成層圏の大気が、対流圏界面の折

れ込みから対流圏へ流入することにより、地表の Be-7 濃度が上昇する現象をとらえる上でも適切なスケールとなっていると思われる [例えば、植崎・他 (2008)].

M5 以上の地震 (余震を除く) の震源位置 (深さを含む) を Fig. 1 に示す.

2.2 高崎の大気中 Be-7 濃度

日本原子力研究開発機構の高崎観測所は、包括的核実験禁止条約 (CTBT) の検証のための放射性核種監視システムの一つであり、北緯 36.3 度、東経 139.0 度の標高約 100m に位置する (Fig. 1 参照). 全自動放射性粒子モニタリング装置 (RSA) [Bowyer *et al.* (1997)] を用い、前日の午後 3 時 50 分頃 (日本標準時) から、当日の午後 3 時 50 分頃まで、24 時間連続で大気を捕集 (約 1000 m³/時) し、毎日の平均の放射性核種濃度を γ 線測定 (検出感度: ¹⁴⁰Ba で約 10 μ Bq/m³) している [篠原・他 (2004)]. なお、吸気口の地表からの高さは、約 6m である.

RASA は、米国エネルギー省のパシフィック・ノースウェスト国立研究所 (PNL) で開発が進められてきた装置で、大気捕集部では、ロール状フィルター (3M 製造のポリプロピレン) が配置されており、捕集された大気中ラドン娘核種を 24 時間減衰させた後、高純度ゲルマニウム半導体検出器により、24 時間の γ 線スペクトロメトリ分析が行われる [熊田・他 (2002)]. フィルターは、粒径 0.2 μ m に対し 80% 以上の捕集効率、全体では、粒径 10 μ m に対し 60% 以上の捕集効率が求められている [Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (1997)]. Be-7 は、477.59 keV の γ 線を計測することにより放射能が測定される. なお、Be-7 濃度の観測データは、有効数字 2 桁のものを用いて分析した.

Fig. 1. Map of the study area. Earthquakes ($M \geq 5$) within the study area (25–47°N, 128–150°E) are analyzed. Circles are the locations of the foci of earthquakes ($M \geq 5$). Earthquakes which are estimated to be aftershocks are not included.

(a) Days of earthquake

(b) Be-7 concentrations at Takasaki

Fig. 2. Time series of (a) days of earthquake and (b) Be-7 concentrations at Takasaki.

2003年8月25日から2008年12月28日までの期間の各日のBe-7濃度の日系列グラフをFig. 2bに示す。なお、Be-7濃度の表示のない期間は、観測機器の停止等によるものである。

§ 3. 結 果

3.1 地震発生日とBe-7濃度

期間全体では、地震発生日及び地震なし日ともにBe-7濃度データが取得された月は、全体で46ヵ月（正味延べ期間39.3ヵ月）あり、そのうち、地震発生日の平均Be-7濃度が、地震なし日の平均Be-7濃度より小さい月の方が、29ヵ月（正味延べ期間25.5ヵ月）と多かった。地震発生日及び地震なし日の各々について、7日前から7日後まで重ね合わせた各日の平均Be-7濃度をFig. 3に示す。Be-7濃度は、地震発生日の4日前頃から減少の傾向が見られ、地震発生日前日から地震発生日にかけて減少し、地震発生日後に増加する傾向が見られる。

地震発生日及び地震なし日のBe-7濃度の総括表を、Table 1に示す。対象期間全体でBe-7濃度のデータが取得された日のうち、地震発生日は206日、地震なし日は997日あり、地震発生日のBe-7濃度の平均は 4.3 ± 0.2 mBq/m³、地震なし日のBe-7濃度の平均は、 4.6 ± 0.1 mBq/m³であった。地震発生日のBe-7濃度と、地震なし日のBe-7濃度を比較し、ノンパラメトリック検定の一つである順位和（ウィルコクソン）検定（以下、「順位和検定」という。）を行った結果、片側検定の帰無仮説を棄却する有意水準 $p \leq 0.05$ に対し、 $p = 0.084$ となっ

た。これは、地震発生日のBe-7濃度が、地震なし日のBe-7濃度より、ほぼ有意に小さくなっていることを示している。

地震発生日と地震なし日のBe-7濃度の季節変動をFig. 4に示す。日本の他の観測例に見られるように、春と秋にBe-7濃度が増加しているが、地震発生日のBe-7濃度は、地震なし日のBe-7濃度より、春から冬まで、四季を通じ小さい傾向がある。

3.2 地震発生日と31日移動平均値残差

このように季節変動に伴い1月から12月までの各月毎に変動するBe-7濃度が、地震発生日に、これらの変動から、どのように増減するかを調べるために、まず、各日のBe-7濃度から31日移動平均値を除去した残差（以下、「31日移動平均値残差」という。）について分析を行った。その結果を、Table 2の上段に示す。地震発生日の31日移動平均値残差の平均値は、 -0.29 ± 0.16 mBq/m³、地震なし日の31日移動平均値残差の平均値は $+0.06 \pm 0.07$ mBq/m³となった。順位和検定を行ったところ、地震発生日と地震なし日の31日移動平均値残差に有意な（ $p = 0.012$ ）違いがあるとの結論が得られた。これらは、地震発生日のBe-7濃度が、地震なし日のBe-7濃度より、31日移動平均値を基準とすると、より負の方向に変動していることを示している。季節変動に伴い1月から12月までの各月毎に変動するBe-7濃度が、地震発生日に地震なし日より、これらの変動から、有意に減少していることを示している。

Fig. 3. Variation in Be-7 concentrations (average) from 7 days before days of earthquake (or non-earthquake) to 7 days after days of earthquake (or non-earthquake). Error bars are standardized deviations of the averages.

Table 1. Summary of Be-7 concentrations on days of earthquake and non-earthquake respectively during the period from August 25, 2003 to December 28, 2008.

	d (n)	Average (mBq/m ³)	σ (mBq/m ³)	$\sigma/\sqrt{n}$	Max. (mBq/m ³)	Min. (mBq/m ³)	Median (mBq/m ³)	p -value
Days of earthquake +Days of non-earthquake	1203	4.5	2.6	0.075	18	0.11	4.3	—
Days of earthquake	206	4.3	2.5	0.18	16	0.18	3.8	0.084
Days of non-earthquake	997	4.6	2.6	0.08	18	0.11	4.4	—
Days of earthquake (focal depth <60 km)	131	4.4	2.6	0.23	16	0.21	4.1	0.14
Days of non-earthquake (focal depth ≥0 km)	997	4.6	2.6	0.08	18	0.11	4.4	—
Days of earthquake (focal depth ≥60 km)	80	4.2	2.5	0.28	9.6	0.18	3.6	0.096
Days of non-earthquake (focal depth ≥0 km)	997	4.6	2.6	0.08	18	0.11	4.4	—

The p -value is the significance level for rejection by the rank-sum (Wilcoxon) test of the null hypothesis that these two distributions of Be-7 concentrations are samples from the same population.

Fig. 4. Seasonal variations in Be-7 concentrations on days of earthquake and non-earthquake, respectively. Error bars are standardized deviations of the averages of Be-7 concentrations on days of earthquake (or non-earthquake) for each season.

3.3 地震発生日と「21日」移動平均値残差

地震発生日の数日後までの期間には、余震が発生していることも多く、Fig. 3に示す地震発生日の数日後のBe-7濃度の増加は、統計の対象外とした余震が関係している可能性も考えられる。このBe-7濃度の増加の影響で、地震発生日の31日移動平均値残差が、地震なし日の31日移動平均値残差より小さくなっている可能性

も考えられる。従って、これらの影響を避けるため、地震発生日後の10日間について、31日間の移動平均値の計算から除外し、「21日」移動平均値を求め、各日のBe-7濃度から、「21日」移動平均値を除去した残差（以下、「残差」という。）について、同様の分析を行った。

地震発生日及び地震なし日の残差についてまとめた結果を、Table 3の上段に示す。地震発生日の残差の平均

Table 2. Summary of residuals obtained by deducting the 31-day moving average from Be-7 concentrations on days of earthquake and non-earthquakes respectively during the period from August 25, 2003 to December 28, 2008.

	d (n)	Average (mBq/m ³)	σ (mBq/m ³)	$\sigma/\sqrt{n}$	Max. (mBq/m ³)	Min. (mBq/m ³)	Median (mBq/m ³)	p -value
Days of earthquake +Days of non-earthquake	1203	0.002	2.3	0.067	11.7	-6.2	-0.21	—
Days of earthquake	206	-0.29	2.3	0.16	9.6	-5.4	-0.67	0.012
Days of non-earthquake	997	0.06	2.3	0.07	11.7	-6.2	-0.13	—
Days of earthquake (focal depth <60 km)	131	-0.25	2.4	0.21	9.6	-5.4	-0.70	0.033
Days of non-earthquake (focal depth $\geq$ 0 km)	997	0.06	2.3	0.07	11.7	-6.2	-0.14	—
Days of earthquake (focal depth $\geq$ 60 km)	80	-0.42	2.2	0.25	4.2	-4.5	-0.61	0.043
Days of non-earthquake (focal depth $\geq$ 0 km)	997	0.06	2.3	0.07	11.7	-6.2	-0.14	—

The p -value is the significance level for rejection by the rank-sum (Wilcoxon) test of the null hypothesis that these two distributions of residuals are samples from the same population. For five days of earthquake, earthquakes with focal depth <60 km and $\geq$ 60 km respectively both occurred on a single day.

値は、 -0.26 ± 0.17 mBq/m³、地震なし日の残差の平均値は $+0.06 \pm 0.07$ mBq/m³となり、順位和検定の結果、地震発生日と地震なし日の残差に有意($p=0.020$)な違いがあるとの結論が得られた。これらは、地震発生日のBe-7濃度が、地震なし日のBe-7濃度より、「21日」移動平均値を基準とすると、より負の方向に有意に変動していることを示している。このことから、地震発生日のBe-7濃度の減少は、地震発生日の数日後のBe-7の増加が統計評価に影響した結果によるものではないと考えられる。

3.4 地震発生日のBe-7濃度と地震発生日の15日前から15日後までの31日のBe-7濃度の中央値の比較

地震発生日のBe-7濃度と、地震発生日の15日前から15日後までの31日のBe-7濃度の中央値（以下、「31日中央値」という。）との大小を比較し、二項分布評価を行った。地震発生日のBe-7濃度から31日中央値を引いた差の頻度分布をFig. 5に示す。

地震発生日208日中、地震発生日のBe-7濃度が31日中央値より小さい日が118日、大きい日が87日、等しい日が3日となった。二項分布評価の結果、地震発生日のBe-7濃度は、31日中央値より小さい日が有意に多い($p=0.018$)。

次に、Be-7濃度の値には、数~10%程度の誤差が見込まれることから、地震発生日のBe-7濃度と31日中央

値の差が、地震発生日のBe-7濃度の $\pm 20\%$ 以下のものは、等しいと判定し評価を行った。その結果、地震発生日208日中、地震発生日のBe-7濃度が、31日中央値より小さい日が89日、大きい日が54日、等しい日が65日となった。二項評価分布の結果、地震発生日のBe-7濃度は、地震発生日の15日前から15日後までのBe-7濃度の中央値より小さい日が有意に多いとの結論が得られた($p=0.011$)。

これらは、地震発生日に、その前後の期間に比べて、Be-7濃度が減少している日が多いことを示している。

以上の結果、季節変動を除いた場合、地震発生日には地震なし日より、Be-7濃度が減少していると結論することは妥当と思われる。

3.5 Be-7濃度から「21日」移動平均値を除去した残差と震源深さ

地震発生日を震源深さで分類し、各深さの層毎の残差についてまとめた結果をTable 3の中・下段に示す。深さが60 km未満の浅い震源の地震の地震発生日と、地震なし日の残差について、順位和検定を行ったところ、有意な違いがあり($p=0.042$)、地震発生日にBe-7濃度が「21日」移動平均値を基準として、より負の方向に有意に変動していることが確認された。また、深さが60 km以上の深い震源の地震についても同様の傾向が見られ、順位和検定では、有意に近いものとなった($p=0.068$)。なお、31日移動平均値残差の順位和検定では、深さが

Table 3. Summary of residuals obtained by deducting the '21-day' moving average of the periods (from -15 to $+0$ days and from $+11$ to $+15$ days) from Be-7 concentrations on days of earthquake and non-earthquake respectively during the period from August 25, 2003 to December 28, 2008.

	d (n)	Average (mBq/m ³)	σ (mBq/m ³)	$\sigma/\sqrt{n}$	Max. (mBq/m ³)	Min. (mBq/m ³)	Median (mBq/m ³)	p -value
Days of earthquake +Days of non-earthquake	120	0.005	2.4	0.068	11.3	-6.3	-0.20	—
Days of earthquake	206	-0.26	2.4	0.17	10.9	-6.2	-0.71	0.020
Days of non-earthquake-days	997	0.06	2.3	0.07	11.3	-6.3	-0.12	—
Days of earthquake (focal depth < 30 km)	52	-0.21	2.4	0.33	4.3	-6.2	-0.38	—
Days of earthquake (30 km ≤ focal depth < 60 km)	82	-0.25	2.6	0.29	10.9	-4.9	-0.75	—
Days of earthquake (60 km ≤ focal depth < 90 km)	23	0.14	2.3	0.49	4.3	-3.3	-0.20	—
Days of earthquake (90 km ≤ focal depth < 120 km)	5	0.84	2.2	0.98	3.4	-2.0	1.31	—
Days of earthquake (120 km ≤ focal depth < 150 km)	4	-1.83	1.6	0.81	0.4	-3.0	-2.3	—
Days of earthquake (150 km ≤ focal depth < 300 km)	11	-0.55	2.5	0.75	2.4	-4.2	0.89	—
Days of earthquake (focal depth ≥ 300 km)	38	-0.59	2.1	0.35	4.3	-4.3	-0.75	—
Days of earthquake (focal depth < 60 km)	131	-0.23	2.5	0.22	10.9	-6.2	-0.73	0.042
Days of non-earthquake (focal depth ≥ 0 km)	997	0.06	2.3	0.07	11.3	-6.3	-0.12	—
Days of earthquake (focal depth ≥ 60 km)	80	-0.37	2.3	0.25	4.3	-4.3	-0.65	0.068
Days of non-earthquake (focal depth ≥ 0 km)	997	0.06	2.3	0.07	11.3	-6.3	-0.12	—

The periods from $+1$ days to $+10$ days are not included for the calculation of the moving averages in order to avoid the effect of aftershocks. The p -value is the significance level for rejection by the rank-sum (Wilcoxon) test of the null hypothesis that these two distributions of residuals are samples from the same population. For five days of earthquake, earthquakes with focal depth < 60 km and ≥ 60 km respectively both occurred on a single day.

60 km 以上の深い震源の地震の地震発生日と、地震なし日の間で、有意な ($p=0.043$) 差があるとの結果が得られている (Table 2 下段)。これらの結果から、60 km より深い震源の地震発生日にも Be-7 濃度が減少している可能性があるように思われる。

3.6 Be-7 濃度から「21 日」移動平均値を除去した残差と降水量、気圧の関係

降水量、気圧のデータとして、高崎の約 10 km 北方に位置する前橋気象官署 (北緯 36.4 度、東経 139.0 度、標高 112.1 m) の観測データを用い、残差と降水量、気圧との関係について分析を行った。

Be-7 濃度の観測時刻に合わせ、各日の前日午後 4 時

から当日の午後 4 時までの降水量を各日の降水量、また、その間の、毎時の気圧の平均を各日の平均の気圧 (以下、「気圧」という。) と定義する。

残差を、地震発生日と地震なし日、降水日 (>0 mm/日) と降水なし日 (0 mm/日) に分類した結果を Table 4 (a) に示す。また、残差を、地震発生日と地震なし日、高気圧日 (Be-7 濃度の観測期間における中央値 (1000.5 hPa) 以上の気圧の日) と低気圧日 (中央値 (1000.5 hPa) 未満の気圧の日) に分類した結果を Table 4 (b) に示す。降水日の方が降水なし日より、また、低気圧日の方が高気圧日より、残差が有意に小さい (「21 日」移動平均値を基準として、より負の方向に変動) 値となった

Fig. 5. Frequency distribution of differences obtained by subtracting medians of Be-7 concentrations of 31-day periods (from 15 days before to 15 days after days of earthquake) from Be-7 concentrations on days of earthquake.

Table 4. Summary of averages of residuals obtained by deducting '21-day' moving averages of the periods (from -15 to $+0$ days and from $+11$ to $+15$ days) from Be-7 concentrations for days of (non-) precipitation (16:00-16:00), days of low (high) -pressure (16:00-16:00) and (non-) days of earthquake. (a) Days of precipitation (>0 mm/d) and non-precipitation ($=0$ mm/d). (b) Days of low-pressure ($\geq$ median (1000.5 hPa)) and high-pressure ($<$ median (1000.5 hPa)).

(a)			Unit: (mBq/m ³)
	Days of earthquake	Days of non-earthquake	Total
Days of precipitation	-0.97 (73)	-0.73 (308)	-0.77 (381)
Days of non-precipitation	0.12 (133)	0.41 (686)	0.37 (822)
Total	-0.26 (206)	0.06 (997)	0.00 (1203)
(b)			Unit: mBq/m ³
	Days of earthquake	Days of non-earthquake	Total
Days of low-pressure	-0.66 (109)	-0.36 (497)	-0.42 (606)
Days of high-pressure	0.18 (97)	0.48 (500)	0.43 (597)
Total	-0.26 (206)	0.06 (997)	0.00 (1203)

Each figure in brackets is the number of days for each category.

(ともに、順位と検定で $p < 0.001$)。他方、降水日と降水なし日の両方ともに、また、低気圧日と高気圧日の両方ともに、地震発生日の方が地震なし日より、残差は小さく(「21日」移動平均値を基準として、より負の方向に変動)なっている傾向が見られた。

§ 4. 議 論

本論文は、大気中 Be-7 濃度変化と地震発生日との関係を見いだしたことを報告することに重点がある。その因果関係までを明らかにすることは、本論文の範囲を超えており、地震発生日に Be-7 濃度が減少する原因を、今後、検討していく必要がある。

地震発生日の Be-7 濃度の減少は、大気圧の変動が Be-7 濃度を減少させていることが可能性として考えられるが、対象の地震は、Fig. 1 に示されるように、大多数が海底下で発生している。静的平衡下においては、海面に働く大気圧は、海水の流出入により打ち消され、結果として海洋底では一定の圧力となる (inverse barometer effect) [Ohtake and Nakahara (1999), Apel (1987)] ことから、これらの海域の地震が大気圧の変動により引き起こされていることは考えにくいかも知れない。

今回の分析結果は、(1) 地震発生日の Be-7 濃度の減少が、降水日や降水なし日、低気圧日や高気圧日を通じて共通して見られることや、(2) 深い震源の地震発生日にも Be-7 濃度が減少している可能性があること示していることから、地震の発生に大気圧の変動と異なるメカニズムが働いていることも考えられる。

§ 5. ま と め

日本付近の地震発生日 (M5 以上、余震と考えられるものを除く) と高崎における大気中 Be-7 濃度の関係について、統計分析を行った。季節変動に伴い 1 月から 12 月までの各月毎に変動する Be-7 濃度が、地震発生日に、これらの変動から、どのように増減するかを調べるために、各日の Be-7 濃度から、31 日移動平均値を除去した残差や、余震の影響も考慮した「21日」移動平均値を除去した残差について、順位と検定を行った結果、Be-7 濃度が、地震発生日に地震なし日より、31 日移動平均値や「21日」移動平均値を基準として、より負の方向に有意に変動していることが確認された。また、地震発生日の Be-7 濃度が、地震発生日の 15 日前から 15 日後までの Be-7 濃度の中央値より小さい日が有意に多いことが、二項分布評価で確認された。これらの結果は、地震発生日に地表大気中の Be-7 濃度が減少している可能性を示している。また、地震発生日の地表大気中 Be-7 濃度の減少は、降水日及び降水なし日、低気圧日

及び高気圧日を通じて共通して見られた。

謝 辞

Be-7 濃度の観測データは、包括的核実験禁止条約 (CTBT) の放射性核種のモニタリングの一環として、日本原子力研究開発機構の CTBT 関係者により観測されたデータを使用させて頂きました。本研究を実施するにあたり、多くのご教示等頂きました臼田重和、篠原伸夫、中原嘉則、小田哲三、広田直樹の各氏に感謝申し上げます。また、貴重なご助言頂きました松村正三氏に感謝申し上げます。なお、地図の作成には、SEIS-PC for Windows を使用させて頂きました。ここに謝意を表します。地震カタログは、気象庁編集の「地震年報」及び「地震・火山月報 (カタログ編)」のデータを使用しました。

文 献

- 阿部道子, 1995, 大気中 ^7Be の時間的変動と滞留時間, エアロゾル研究, **10**, 283-288.
- 阿部道子・阿部史朗, 1991, 浮遊じん, 岩倉哲男・稲葉次郎 (編)「環境モニタリングの今日的意義」, 放医研環境セミナーシリーズ, No.17, 実業公報社, 132-146.
- Apel, J.R., 1987, Principles of Ocean Physics, International Geophysics Series, vol.38, Academic Press, London, 634pp.
- Bleichrodt, J.F., 1978, Mean tropospheric residence time of cosmic-ray-produced beryllium 7 at north temperate latitudes, J. Geophys. Res., **83**, C6, 3058-3062.
- Bowyer, S.W., H.S. Miley, R.C. Thompson, and C.W. Hubbard, 1997, Automated particulate sampler for Comprehensive Test Ban Treaty verification (The DOE radionuclide aerosol sampler/analyzer), IEEE Trans. Nucl. Science, **44**, 551-556.
- 土井妙子・細野正明・溝口次夫・佐藤 純, 1993, 筑波における大気中のオゾンとベリリウム-7 の濃度変化, 天気, **40**, 828-834.
- Feely, H.W., R.J. Larsen, and C.G. Sanderson, 1989, Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air, J. Environ. Radioactivity, **9**, 223-249.
- Graustein, W.C. and K.K. Turekian, 1986, ^{210}Pb and ^{137}Cs in air and soils measure the rate and vertical profile of aerosol scavenging, J. Geophys. Res., **91**, D13, 14355-14366.
- 細野耕司・吉田明夫, 1992, 余震活動の予報, 気象研究所研究報告, **42**, 145-155.
- 石川陽一・高橋正弘・橋本和子・山崎興樹・鈴木博之・植崎幸範, 2005, 日本の幾つかの地域における大気中 ^7Be 濃度の季節変動, Proceedings of the Sixth Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2005-4, 77-80.
- 熊田政弘・小田哲三・宮本ユタカ・打越貴子・中原嘉

- 則・山本洋一・伯耆田貴憲・広田直樹・井上洋司・篠原伸夫, 2002, CTBT 検証体制における放射性核種監視観測所, 第 25 回核物質管理学会日本支部年次大会論文集, 39-44.
- Lal, D. and B. Peters, 1967, Cosmic ray produced radioactivity on the earth, in *Handbuch der Physik*, **46**, ed. by K. Sitte, Springer-Verlag, New York, 551-612.
- 松浦律子, 1993, 改良大森公式中のパラメーター値について—日本付近の $M \geq 6$ の余震活動 (1969-1991)—, 地球惑星科学関連学会 1993 年合同大会予稿集, F21-P101.
- Morozova, A.L., M.I. Pudovkin, and T.V. Barliaeva, 2000, Variations of the cosmic ray fluxes as a possible earthquake precursor, *Phys. Chem. Earth (A)*, **25**, 321-324.
- 永井尚生, 2000, エアロゾル中の天然放射性核種, エアロゾル研究, **15**, 321-326.
- 永井尚生, 2001, 東京における雨水中の宇宙線生成核種 ^7Be , ^{10}Be , *Proceedings of the Second Workshop on Environmental Radioactivity*, KEK Proceedings 2001-14, 175-178.
- 植崎幸範・田上四郎・山本重一・藤川和浩・力 寿雄・大久保彰人・大石興弘・岩本眞二・小林ちあき・藤高和信, 2008, 大気中 ^7Be をトレーサーとした成層圏オゾンの流入評価, *Proceedings of the Ninth Workshop on Environmental Radioactivity*, KEK Proceedings 2008-9, 132-137.
- Ohtake, M. and H. Nakahara, 1999, Seasonality of great earthquake occurrence at the northwestern margin of the Philippine Sea plate, *Pure Appl. Geophys.*, **155**, 689-700.
- Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test -Ban Treaty Organization, 1997, Annex II Report of Working Group B to the Second Session of the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBT/PC/II/1/Add.2, 1-66.
- 櫻井敬久・菊地 聡, 宇宙線生成核種の強度変動と地球環境, 2008, 梶野文義・佐藤文隆・村木 綏・戒崎俊一 (編)「地文台によるサイエンス 極限エネルギー宇宙物理から地球科学まで」, ユニバーサル・アカデミー・プレス, 161-167.
- 篠原伸夫・井上洋司・打越貴子・小田哲三・熊田政弘・黒澤義昭・広田直樹・伯耆田貴憲・中原嘉則・山本洋一, 2004, 原研における CTBT 関連技術開発研究の状況, 第 25 回核物質管理学会日本支部年次大会論文集, 51-58.
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 876pp.
- Vieze, W. and H.B. Singh, 1980, The distribution of beryllium-7 in the troposphere: implications on stratospheric/tropospheric air exchange, *Geophys. Res. Letts.*, **7**, 805-808.
- Yoshimori, M., 2005, Beryllium 7 radionuclide as a tracer of vertical air mass transport in the troposphere, *Advances in Space Research*, **36**, 828-832.