研究論文

連続モニタによる空間放射線量率の測定と解析

楠 崎 幸 範^{*1}

(1999 年 11 月 17 日受理)
(2000 年 3 月 10 日再受理)

Analysis of Gamma-Ray Dose Rate Measured Continuously with an NaI(Tl) Scintillation Counter

Yukinori NARAZAKI^{*1}

We analyzed data on gamma-ray dose rates measured with an NaI(Tl) scintillator, and made 3 groups: dry days, rainy days, and rain. The hourly gamma-ray dose rate from April 1991 to December 1995 in Dazaifu City was 14.4 cps on average. The average on dry days was 14.2 cps. The daily variation of dose rates was inversely correlated to daily variation of temperature, showing cyclical variations with high values in the morning and low values in the afternoon. The difference between days was 0.8 cps on average, which was relatively small. Monthly variations on dry days were generally high during the period from October to January, and low during the period from June to September. The difference between months was 1.9 cps on average. Annual variations did not appear to be significant. The average on rainy days was 14.6 cps and the range of change was high, 11.1 cps on average. The average in the rain was 15.9 cps and the highest was 24.1 cps. Monthly variations in the rain were high in January and low in August. The gamma-ray dose rate increased rapidly with rain and was changed by the intensity, time and interval of the rainfall. After it stopped raining, it decreased gradually. Measurements that were higher than the value obtained by adding three times the standard deviation of the monthly gamma-ray dose rate to the monthly average gamma-ray dose rate were 2.2% a year on average. Most of them were observed when it rained. They were also observed when it rained after yellow sand was blown in from China.

KEY WORDS : gamma-ray dose rates, dry days, rainy days, rain, daily variation, monthly variations, annual variations, yellow sand

I 緒 言

環境放射線の迅速な検出と把握を目的にモニタリングポストによる空間放射線量の連続監視を実施している。

空間放射線は自然放射線（宇宙線を含む）及び人工放射性核種からの放射線に分類され、通常、人工放射性核種からの放射線の寄与は数%以内である。

自然放射線は地域や気象条件によって異なり、時刻あるいは季節によっても変動する¹⁾。しかも、その変動は1970年代の中国による大気圏内核爆発実験の際に観測された人工放射性核種からの放射線量を大きく上回ることもある。

これらの変動要因は、大気安定度の変化や降水などに

^{*1} 福岡県保健環境研究所：福岡県太宰府市向佐野 39（〒818-0135）
Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences; 39, Mukaizano, Dazaifu, Fukuoka 818-0135, Japan.

よる大気中のラドン娘核種濃度の変動に起因する放射線強度の時間変化によるとされている²⁾。したがって、緊急時における人工放射性核種からの放射線量を正しく評価するには場所ごとの自然放射線の時間変化を詳細に把握しておく必要がでてくる。

そこで太宰府市における1991年4月～1995年12月のモニタリングポストによる空間放射線量率のデータを無降水日、降水日及び降水時に分け、その変動について解析した。

II 方 法

福岡県太宰府市にある福岡県保健環境研究所の屋上(地上20 m)に設置したアロカ(株)製モニタリングポストMAR-15 1"φ×1"NaI(Tl)シンチレータを用いて、30 keV以上の放射線の積分値を連続測定した。空間放射線量率は科学技術庁編放射能測定法シリーズ17「連続モニタによる環境γ線測定法」³⁾に従い、毎正時ごとに各時間帯の測定値を平均計数率として求めた。

また、毎正時ごとの風向、風速、降水量、気温、日照率は、当研究所に設置してあるアメダスの観測データを利用した。降水期間はモニタリングポストに併設した転倒柵型雨量計(検出感度0.5 mm)で確認した。黄砂の観測日時は福岡管区気象台の地上気象観測原簿を参照した。有意差の検定はt検定によって行った。

III 結 果

1. 空間放射線量率の推移

(1) 空間放射線量率の月間推移

1991年4月～1995年12月における空間放射線量率の

Fig. 1 Monthly variation of gamma-ray dose rate (1991/4-1995/12). The monthly average (■) and the range (longitudinal line) of gamma-ray dose rate are shown.

月間推移をグラフ化した結果、最低値は13.0 cps, 最高値24.1 cps, 平均値は14.4 cpsであった (Fig. 1)。また、月間平均値の推移は1年を周期とし、1月に高く、7月に低下する規則的な変化の繰り返しであることが分った。

(2) 空間放射線量率の特異値

月間の平均空間放射線量率にその標準偏差の3倍の値を加えた線量率を超える測定値を特異値とした。1991年4月～1995年12月の各年における特異値の検出割合は平均して年間 $2.2 \pm 0.2\%$ であった。特異値が観測されたのはほとんどが降水時であったが、特異値の0.3%は降水開始時刻の1時間前、4%が降水停止後2時間以内であった。なお、特異値は特に4月及び5月に多く現れた。

(3) 空間放射線量率の多変量解析

空間放射線量率と風向、風速、降水量、気温、日照率で偏相関分析を行った結果、空間放射線量率は降水量と正の偏相関が認められた。そこで、1 mm/h以上の降水量の有無によって無降水日と降水日に分け、空間放射線量率の特徴を解析した。

2. 無降水日における空間放射線量率

(1) 空間放射線量率の推移

1991年4月～1995年12月の無降水日における空間放射線量率の分布は正規分布を示し、最低値は13.1 cps, 最高値19.3 cps, 平均値は14.2 cpsであった。

(2) 空間放射線量率の日変動

空間放射線量率の日変動を調べるには、その月間変動の寄与を除く必要がある。したがって、毎正時ごとの空

Fig. 2 Daily variation of gamma-ray dose rate and temperature on dry days. The averaged values normalized by dividing the gamma-ray dose rates at every hour by the average on the day (■: left scale) and the normalized temperature obtained in the same way (solid line: right scale) are shown.

Fig. 3 Monthly variation of gamma-ray dose rate and temperature on dry days. The monthly average of gamma-ray dose rate (■: left scale) and the standard deviation and the monthly average of temperature (solid line: right scale) are shown.

Fig. 4 Annual variation of gamma-ray dose rate on dry days and changes of cosmic rays. The yearly average (■: left scale) and the standard deviation of gamma-ray dose rate and the rate of yearly average of neutron count (the energy area of more than 11.5 GeV) in Tokyo (step graph: right scale) are shown.

間放射線量率をその日の平均値で除し、規格化した値を平均した (Fig. 2)。

無降水日における空間放射線量率の日変動は1~10時が高く、12~23時に低下した。最大値は8時で、変曲点は11時及び24時であった。日格差の平均は0.8 cpsで1月及び12月の日格差は1.0 cpsと比較的大きく、7月は0.6 cpsと最も小さかった。気温の日変動は6時が最低で、14時が最高であった。空間放射線量率の平均日変動と気温の平均日変動との間には $r = -0.745$ の有意な逆相関が認められた。

(3) 空間放射線量率の月変動

無降水日における空間放射線量率の月間平均値を求めた (Fig. 3)。無降水日における空間放射線量率は1月及び10~12月に高く、2~5月は平均的な値を示し、6~9月に低下した。月格差の平均は1.9 cpsで1~2月及び12月の平均月格差は2.8 cpsと比較的大きく、5月は1.3 cpsと最も小さかった。

気温の月間平均値は2月が最低で、7月が最高であった。空間放射線量率の平均月変動と気温の平均月変動との間には $r = -0.780$ の有意な逆相関が認められた。

(4) 空間放射線量率の年変動

無降水日における空間放射線量率の年間平均値は14.1~14.3 cpsで、年による有意差は認められなかった (Fig. 4)。一方、空間放射線量率の変動因子である宇宙線の年変動は、太宰府市と同程度の地磁気緯度にあたる東京での中性子 (11.5 GeV 以上のエネルギー領域における1時間当りの積分値) のカウント数の変動から、1991~1995年では幾分増加傾向にあった。

Fig. 5 Frequency distribution of gamma-ray dose rate in rain. Frequency distribution of gamma-ray dose rate (bar graph: left scale) and accumulated comparative frequency (■: right scale) are shown.

(5) 空間放射線量率の変動要因

無降水日の空間放射線量率と気温、風向、風速、日照率で偏相関分析を行った結果、無降水日の空間放射線量率は気温と負の偏相関が認められた。また、西日本一帯で春季に観測される黄砂には ^{238}U 、 ^{232}Th 及び ^{40}K が含まれ、黄砂の飛来が観測された日時における空間放射線量率には上昇が認められた。

3. 降水日及び降水時における空間放射線量率

(1) 空間放射線量率の推移

1991年4月~1995年12月の降水日における空間放射線量率の分布は高線量率側がほぼ指数関係で表されるような分布を示した。空間放射線量率の最低値は13.0

Fig. 6 Monthly variation of gamma-ray dose rate in rain and other precipitation. The averaged values normalized by dividing gamma-ray dose rates in the rain by the average on the dry days in the month (■: left scale) and its standard deviation (bar graph: right scale) are shown.

cps, 最高値 24.1 cps, 平均値は 14.6 cps であった。降水日の日格差は最低値が 0.2 cps, 最高値 10.7 cps, 平均値が 2.7 cps であった。

降水時の空間放射線量率の分布も降水日と同様に高線量率側が指数的に減少した (Fig. 5)。降水時における空間放射線量率の最低値は 13.1 cps, 最高値 24.1 cps, 平均値は 15.9 cps であった。

(2) 空間放射線量率の月変動

降水時における空間放射線量率の月変動を調べるには、無降水日に認められる月変動の寄与を除く必要がある。したがって、降水時の空間放射線量率を対応する無降水日の月平均値で除し、規格化した値を月ごとに平均した (Fig. 6)。降水時における空間放射線量率は降水量が少ない 1 月に高く、比較的降水量が多い 8 月に低い値を示した。

(3) 降水時の変動

空間放射線量率は降水 1~2 時間前に上昇することも希にあるが、降水開始と同時に急激に上昇し、降水強度 (1 時間当りの降水量)、降水期間、降水間隔によって変動した。

空間放射線量率は一雨ごとの降水量の多寡とは必ずしも比例しなかった。降水強度の強弱と空間放射線量率の増減は一樣ではなかったが、強い降水強度の下では空間放射線量率は低い傾向を示した (Fig. 7)。

また、降水停止から次の降水が開始するまでの間隔と降水が開始した時の空間放射線量率の変化率 (降水開始時の線量率をその 1 時間前の線量率で除して求める) と

Fig. 7 The relationship between the precipitation rate and normalized gamma-ray dose rate. Normalized value was obtained by dividing gamma-ray dose rates in the rain by the average on the dry days in the month. The precipitation rate means precipitation per hour.

の間に一定の関係は認められなかった。降水停止後は平均 2.2 時間で降水以前の線量率に戻った。

黄砂の飛来が観測された日時の空間放射線量率には上昇が認められ、その後の降水時における空間放射線量率には特異値が確認された。

IV 考 察

1. 無降水日における空間放射線量率

観測される空間放射線の多くは土壌や建物からの直接線や散乱線とされ、場所や高度によって異なるほか、降水などの気象条件によっても不規則な変動がみられる。しかし、無降水日における空間放射線量率の日変動及び季節変動には規則的な変化が認められた。

(1) 空間放射線量率の日変動

無降水日の日格差は平均空間放射線量率の約 5% と小さく、その日変動は気温の日変動と逆相関を示した。このように大気が安定な午前中に高く、大気が不安定となる午後に低くなる空間放射線量率の周期性は、主として気温の変化による大気の混合によって生じる大気中ラドン娘核種濃度の変動⁴⁻⁶⁾が原因と考えられる。

(2) 空間放射線量率の季節変動

無降水日の季節変動は冬季に高く、夏季に低下した。空間放射線量率の季節変動が冬季に高くなるのは、大陸性気団に含有されるラドン娘核種が西高東低の気圧配置による北西からの季節風に乗って冬季に高くなる⁷⁾ことと類似しており、遠方起源のラドン娘核種の影響と考えられる。また、海洋性の太平洋高気圧に包まれる夏季は、ラドン娘核種濃度が低下する⁷⁾ことと一致する。

第32～38回環境放射能調査研究成果論文抄録集(1990～1996)に報告された⁸⁾モニタリングポストによる空間放射線量率調査では、日本海沿岸の地域で、冬季特に2月の空間放射線量率に著しい低下が認められる。冬季の空間放射線量率の低下は積雪や地表面の凍結による土壌からのガンマ線の遮へい効果^{9,10)}によるといわれており、降雪量の少ない太宰府市では認められなかった。

(3) 空間放射線量率の年変動

無降水日の空間放射線量率の年変動に差は認められなかった。空間放射線量率の年変動の因子とされる宇宙線は太陽活動の影響から11年周期で変動する。1991年～1995年の宇宙線量は徐々に増加傾向にあったが、1" $\phi \times 1$ " NaI(Tl) シンチレータにおける宇宙線の寄与は0.7 cps相当(3 MeV以下が0.53 cps, 3 MeV以上が0.13 cps)とされ¹¹⁾、無降水日の平均空間放射線量率の5%以下であることから、年間の平均空間放射線量率の上昇に有意な影響を与えなかった。

2. 降水日及び降水時における空間放射線量率

降水による空間放射線量率の上昇は土壌などから大気に散逸した気体状のラドンの壊変過程で生成する娘核種が降水と共に降下し、地表面に供給され、平面線源を形成するためといわれる^{2,12)}。

(1) 降水時の変動

降水が起こる要因は高気圧、低気圧、前線など様々であるが、雨の降り方は大別して地雨としゅう雨に分けられる。しゅう雨には単独で現れるものと降ったり止んだりを繰り返す断続的なものがある。

福田¹³⁾は、雨の降り方及び降水強度と空間放射線量率の時間変化を詳しく調べ、一過性、持続性及び断続性の3つの降水パターンに対応して空間放射線量率の変化を分類している。すなわち、一過性の降水の場合、降水強度の変化と空間放射線量率の増減は対応する。持続性の降水の場合、空間放射線量率は高い値を維持する。また、断続性の降水の場合、空間放射線量率のピークは分割される。本調査における降水時の空間放射線量率は定性的であるが、これらのパターンとよく一致する。

(2) 降水強度及び降水中ラドン娘核種濃度

降水時の空間放射線量率は降水と同時に急激に上昇し、降水強度、降水期間、降水間隔によって変動した。降水停止後はラドン娘核種のみかけ上の半減期(47分){ $^{214}\text{Pb}(T_{1/2}=27\text{分}) - ^{214}\text{Bi}(T_{1/2}=19.9\text{分})$ }に従って減衰し、その約3倍の時間が経過すると降水以前の線量率に戻った。

空間放射線量率の上昇は一雨ごとの降水量の多寡には

必ずしも影響されなかった。これは降水中のラドン娘核種の大部分は雲中に取り込まれ¹⁴⁾、降水をもたらず気塊の起源及び流跡によってその濃度が大きく変動する¹⁵⁾ためと考えられる。

FUJINAMIら¹⁶⁾は降水強度と降水中ラドン娘核種の間には負の相関があり、降水強度の季節変動が降水中のラドン娘核種濃度の季節変動におよぼす影響を40%と試算している。一般に降水強度は夏強く、冬弱い季節変動を示しており、降水時における空間放射線量率が冬季に高く、夏季に低い関係を示すことと一致する。

(3) 空間放射線量率の上昇要因

空間放射線量率が上昇する自然要因には降水によるラドン娘核種の降下、静電時の逆転層及び大気の安定度による大気中ラドン娘核種濃度の上昇並びに落雷による制動放射線発生などの報告がある^{17,18)}。なかでも、降水時における空間放射線量率の上昇は大きく、ときには特異値も認められる。特異値は4月及び5月に特に多く、黄砂が観測された後の降水時にも確認された。

V 結 語

NaI(Tl) シンチレータを用いた連続モニタによる空間放射線量率について無降水日、降水日及び降水時に分けて長期的な解析を行った。

1) 無降水日の空間放射線量率は平均14.2 cpsで、気温の日変動と逆相関を示し、午前に高く、午後低下した。日格差は平均0.8 cpsであった。

2) 無降水日における空間放射線量率の季節変動は気温の月変動と逆相関を示し、冬季に高く、夏季に低下した。月格差は平均1.9 cpsであった。

3) 無降水日の空間放射線量率の年変動に変化は認められなかった。

4) 降水日における空間放射線量率の平均は14.6 cpsで、日格差は平均2.7 cpsであった。

5) 空間放射線量率は降水開始と同時に上昇し、降水強度、降水時間、降水間隔によって変動した。降水停止後は平均2.2時間で降水以前の線量率に戻った。

6) 降水時の空間放射線量率は1月に高く、8月に低い月変動を示した。

7) 空間放射線量率の特異値は年間約2.2%で、ほとんどが降水時に認められ、黄砂が観測された後の降水時にも確認された。

本論文をまとめるに当り、有益なご助言をいただきました(財)日本分析センターの長岡和則博士及び福岡大学薬学部の加留部善晴助教授並びに参考文献等をご恵贈

いただきました京都府保健環境研究所の藤波直人博士に感謝の意を表します。また、貴重な宇宙線のデータを提供いただきました茨城大学の渡辺堯博士に心よりお礼申し上げます。

なお、本研究は科学技術庁委託「環境放射能水準調査」結果を基に実施した。

参 考 文 献

- 1) 長井達夫, 本多 正, 今井俊男; モニタリングポストによる核実験時におけるフォールアウトの推移について, 日本気象学会機関誌“天気”, **24**, 271 (1977).
- 2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; Ionizing radiations: Sources and biological effects, United Nations, New York (1982).
- 3) 科学技術庁(編); “連続モニタによる環境 γ 線測定法”, 放射能測定法シリーズ 17, 東京 (1982).
- 4) M.H. WILKENING; Daily and annual courses of natural atmospheric radioactivity, *J. Geophys. Res.*, **64**, 521 (1959).
- 5) S.G. MALAKHOV, V.N. BAKULIN, G.V. DMITRIEVA, L. V. KIRICHENKO, T.I. SSISSIGINA and B.G. STARIKOV; Diurnal variations of radon and thoron decay product concentrations in the surface layer of the atmosphere and their washout by precipitations, *Tellus*, **18**, 643 (1966).
- 6) 下 道國, 池辺幸正; 自然環境における ^{222}Rn , ^{220}Rn およびそれらの短半減期娘核種の濃度, 保健物理, **14**, 251 (1979).
- 7) N. MURAYAMA; Mean level of natural radioactivity in the surface air in Japan, *J. Radiat. Res.*, **7** (1), 1 (1966).
- 8) 科学技術庁(編); “第 32~38 回環境放射能調査研究成果論文抄録集”, 東京 (1990~1996).
- 9) 藤元憲三; 大地からの γ 線に対する雪の遮蔽効果, 保健物理, **21**, 3 (1986).
- 10) 長岡 鋭, 坂本隆一, 斉藤公明, 堤 正博, 森内茂; 積雪による地殻 γ 線線量率の減衰, 保健物理, **23**, 309 (1988).
- 11) 長岡 鋭, 森内 茂; NaI(Tl) シンチレーション検出器の宇宙線に対する応答特性の解析, 日本原子力研究所報告, **85**, 35 (1985).
- 12) S. MINATO; Monte Carlo calculation of gamma radiation field due to precipitation washout of radon daughters from the atmosphere to the ground surface, *Hoken Butsuri*, **15**, 19 (1980).
- 13) 福田一義; モニタリングポストによる空間線量率の変動要因について, 日本気象学会機関誌“天気”, **29**, 17 (1982).
- 14) N. FUJINAMI; Observational study of the scavenging of radon daughters by precipitation from the atmosphere, *Environment International*, **22**, 181 (1996).
- 15) F. BARREIRA; Concentration of atmospheric radon and wind direction, *Nature*, **190**, 1092 (1961).
- 16) N. FUJINAMI, S. ESAKA and S. MINATO; Influence of the precipitation rate on the seasonal variation in the specific radioactivity of shortlived ^{222}Rn daughters in precipitation, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Letters*, **95**, 111 (1985).
- 17) 辻本 忠; 環境放射線の変動について, 放射線科学, **37**, 81 (1994).
- 18) 吉岡満夫; 福井県における空間放射線量測定の変遷と現状, 日本分析センター広報, **32**, 40 (1998).