

空間線量率の自然変動の特徴とその要因に関する考察

二宮久 末光篤 田邊宗一郎

1. はじめに

愛媛県では、四国電力伊方原子力発電所(以下「伊方原発」)周辺の約5km 圏8箇所に空間線量率等の自動連続測定局を設置して、テレメータシステムにより常時監視を行ってきたが、東京電力福島第一原子力発電所事故(以下「東電事故」)を踏まえて監視体制を強化するため、約 30km 圏に12 局の増設を進めており、2013 年度内に完了する予定である。また、国からの委託により設置している県下の広域局としては、従来松山市1局であったところ、2012 年度に5市5局へ増設を完了している。

これらの測定局における空間線量率の測定値は、原子力施設事故や核実験による影響を受けることがあるほか、医療用放射性同位元素被投与者の接近によっても影響を受けることがある。また、降雨等による自然放射線の変動によっても影響を受ける。このため、伊方原発の異常の有無を的確に監視するためには、このような空間線量率の変動の特徴やその要因について把握しておくことが重要である。

ここでは、人為的な特異事象がない場合の空間線量率の変動について、これまでに蓄積されたデータを基に、季節変動や日変動等の特徴を確認した。また、データの変動状況を様々な視点から定量的に解析し、その特徴を明らかにするとともに、変動をもたらす要因について考察した。

また、監視強化の一環として、2012 年度にテレメータシステムを更新し、計算機技術

や通信インフラの進歩を採り入れたシステムの多重化、高速化を図るとともに、追加機能の一つとして、空間ガンマ線スペクトルのリアルタイム解析も可能にし、その後約1年間のデータを蓄積できたことから、この従来得ることができなかった新しい項目についても解析を行った。

2. 方法

2.1. 空間ガンマ線線量率

以下に示すモニタリングポストの検出器による空間ガンマ線線量率の1時間平均値を用いた。検出器メーカーは、機器の更新に伴う変更があり一定ではないが、毎年校正を含む保守点検を実施し、国家標準とのトレーサビリティを確保している。

2.1.1. 愛媛県設置モニタリングポスト

設置地点: 旧伊方町内8局

検出器:

- ・2"φ×2"NaI シンチレーション検出器(温度・エネルギー補償機構付)
- ・加圧型電離箱検出器(アルゴン封入)

2.2. 空間ガンマ線スペクトル解析(各寄与成分線量率)

2.1.1 に記載した 2"φ×2"NaI シンチレーション検出器及び多重波高分析器により測定した1時間の空間ガンマ線スペクトルについて、テレメータシステムに組み込んだ Canberra 社製スペクトルエクスペローラにより、レスポンスマトリクス法によるリアルタイムスペクトル解析を実施し、カリウム-40(K-40)、ウラン-238(U-238)系列及びトリウム-232(Th-232)系列の各寄与線量率

を求めた。レスポンスマトリクスには Minato(2001)¹⁾を用いている。各局の検出器位置や周辺物の状況は、用いたレスポンスマトリクスの前提条件とは厳密には一致しないが、一定の検出器によるスペクトルから統一的な手法で得られた解析値であり、指標値として有効と考えられる。

2.3. 気象要素

2.1.1に記載した愛媛県設置モニタリングポストで測定している気象要素のうち、降雨の有無の指標である感雨を用いた。感雨データは、測定時間中の降水滴を感知した時間の割合(%)として得られる。

3. 結果及び考察

大気中には、自然放射性核種である U 系列及び Th 系列の子孫核種が浮遊しており、降雨時にはこれらが地表に落下してくるため、空間線量率が上昇することが知られている。このため、今回の検討に当たっては、対象データを「雨なし時」と「雨あり時」に分類して解析を行った。分類は、2.1.1.に記載した全8局の感雨計のデータに基づき、当該時刻にいずれかの局で「感雨≠0%」の場合に「雨あり」とした。降雨後の雨が降っていない時間帯にも雨の影響が残る場合があるが、線量率への影響が大きいウラン系列のビスマス-214(Bi-214)の半減期が約 20 分であるため、上記の条件により機械的に分類を行うこととした。

3.1. 季節変動

比較対象期間の降雨状況の違いによる影響を排除するため、雨なし時のデータについて解析を行った。図1に 2012 年の年間データから算出した各月毎の雨なし時の平均値を示した。モニタリングステーション(九町越局)のみ標準偏差も図示したが、このばらつきを考慮しても、7~8月に低く冬

季に高くなる明らかな季節変動を示している。但し、その変動幅は、最大でも約 2nGy/h と小さい。

この原因を検討するため、九町越局での各成分の寄与線量率について、月毎の雨なし時の平均値を図2に示した。U 寄与線量率のみがガンマ線線量率と同様の季節変動を示し、それ以外の K 及び Th 寄与線量率は年間を通じてほぼ一定であることから、季節変動は主に U 系列核種によって引き起こされていることがわかる。U 系列には、半減期約 3.8 日のガス状核種であるラドン-222(Rn-222)が存在するため、大気の大距離移動が影響することも起こり得ることであり、そのような報告もある。すなわち、夏場には南からの季節風により U 系列核種濃度の低い海洋上の空気が流入しやすく、冬場には北西の季節風により同濃度の高い大陸上の空気が移流してくることが影響している可能性がある。

3.2. 日変動

図3に 2012 年の年間データから算出した1日の各時間帯毎の雨なし時の平均値を示した。いずれの局においても、明らかな日変動は認められない。

3.3. 変動の地点差

表1及び表2に 2012 年の年間データから算出した各測定局における空間線量率の平均、分散等の変動パラメータを、雨なし時及び雨あり時の別に示した。

平均値及び分散には地点差があり、各地点の地質など周辺環境の違いに起因するものと考えられる。

平均値の雨なし時と雨あり時を比較すると、前述した降雨による影響により各地点とも雨あり時の方が高くなっている。この増加の主成分について検討するため、NaI 検出器で測定された各寄与成分別の線量率を

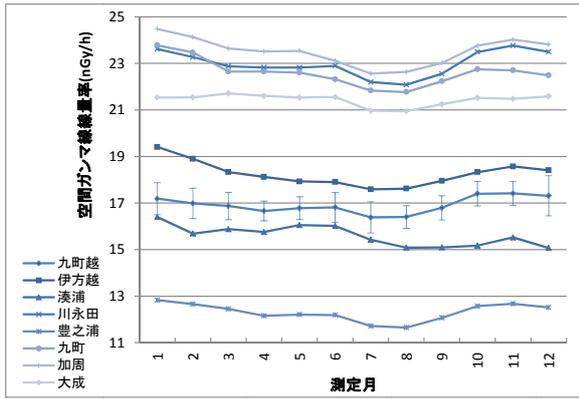


図1 空間線量率の季節変動

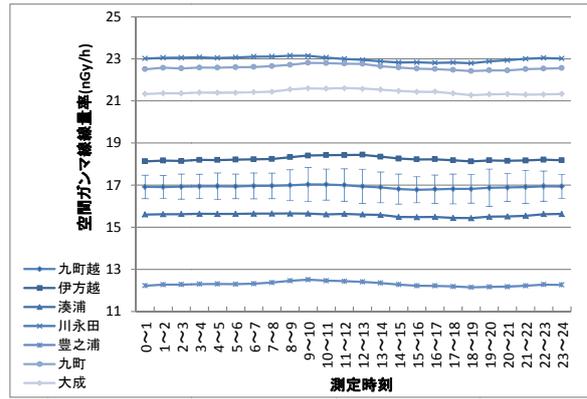


図3 空間線量率の日変動

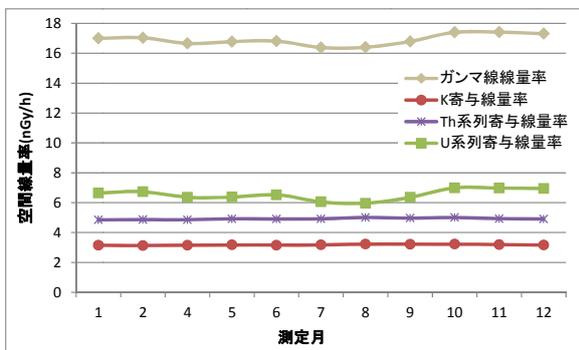


図2 各寄与成分の季節変動(九町越局)

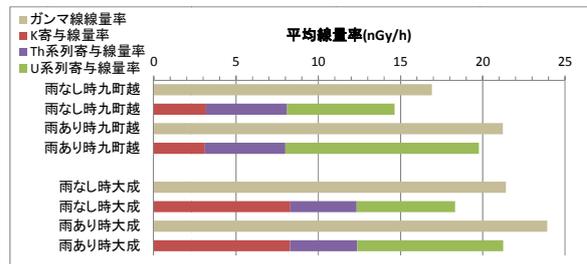


図4 線量率成分の雨なし・あり時の比較

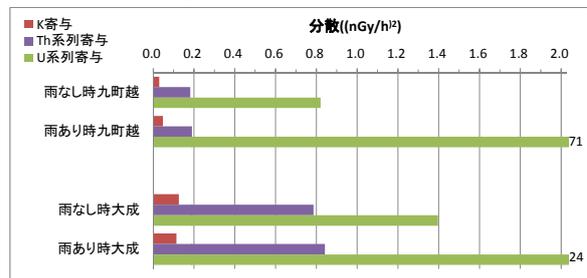


図5 分散の成分の雨なし・あり時の比較

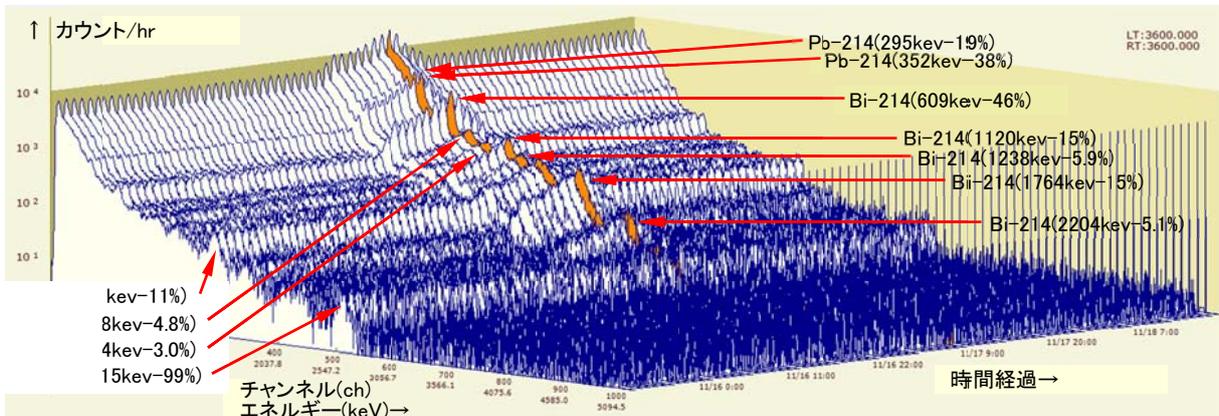


図6 雨に伴うガンマ線スペクトルの変化

表1 各測定局における空間線量率(NaI 検出器)の変動パラメータ

測定局		九町越	伊方越	湊浦	川永田	豊之浦	九町	加周	大成	
雨なし時	平均(nGy/h)	16.9	18.2	15.6	23.0	12.3	22.6	23.5	21.4	
	標準偏差(nGy/h)	0.69	0.80	0.73	0.79	0.68	0.81	0.83	0.46	
	分散((nGy/h) ²)	0.48	0.65	0.53	0.63	0.47	0.65	0.69	0.21	
雨あり時	平均(nGy/h)	21.0	21.6	18.6	26.5	16.8	26.0	27.4	23.8	
	標準偏差(nGy/h)	6.9	5.8	5.2	6.1	7.5	5.8	6.5	3.9	
	分散((nGy/h) ²)	47.1	33.8	26.9	37.4	56.1	33.5	42.1	15.4	
	増加部分に指数 分布を当てはめ ^{*2}	λ ((nGy/h) ⁻¹)	0.146	0.175	0.205	0.186	0.145	0.169	0.154	0.250
		$1/\lambda^2$ ((nGy/h) ²)	46.9	32.7	23.8	28.9	47.6	35.0	42.2	16.0
		R^2	0.928	0.956	0.905	0.955	0.935	0.928	0.945	0.972

*1 各局の2012年1月1日00時～2012年12月31日24時の1時間値データを基に算出。

*2 「雨なし時の平均値」からの増加分の分布に、確率密度関数 $f(x)=\lambda e^{-\lambda x}$ を最小自乗法で当てはめた場合の λ 値及び相関係数 R^2 を記載

表2 各測定局における空間線量率(電離箱検出器)の変動パラメータ

測定局		九町越	伊方越	湊浦	川永田	豊之浦	九町	加周	大成	
雨なし時	平均(nGy/h)	62.4	46.3	46.4	64.0	38.9	53.3	49.4	45.9	
	標準偏差(nGy/h)	1.01	0.74	0.88	1.24	0.74	0.76	0.72	0.65	
	分散((nGy/h) ²)	1.01	0.54	0.77	1.54	0.54	0.58	0.52	0.42	
雨あり時	平均(nGy/h)	66.1	48.9	49.2	67.4	42.6	56.6	52.8	48.3	
	標準偏差(nGy/h)	6.1	4.6	4.8	5.7	6.2	5.6	5.4	4.1	
	分散((nGy/h) ²)	37.2	21.5	22.8	32.5	38.7	31.3	29.7	16.9	
	増加部分に指数 分布を当てはめ ^{*2}	λ ((nGy/h) ⁻¹)	0.163	0.226	0.197	0.187	0.171	0.184	0.173	0.234
		$1/\lambda^2$ ((nGy/h) ²)	37.6	19.6	25.8	28.6	34.2	29.5	33.4	18.3
		R^2	0.966	0.928	0.954	0.935	0.901	0.939	0.942	0.954

*1 各局の2012年1月1日00時～2012年12月31日24時の1時間値データを基に算出。

*2 「雨なし時の平均値」からの増加分の分布に、確率密度関数 $f(x)=\lambda e^{-\lambda x}$ を最小自乗法で当てはめた場合の λ 値及び相関係数 R^2 を記載。

図4に示した。雨なし時と雨あり時を比較して、K及びTh系列寄与にはほとんど変化がないが、U系列寄与は雨あり時に増加しており、降雨時の線量率上昇の主成分であることがわかる。

図6に、雨により2012年に九町越局で線量率が最大となった11月17日11時とその前後のガンマ線スペクトルを3D図で示した。時間の経過にしたがってピークの発生・消滅や伸長・縮小を顕著に示しているのはU系列のBi-214及びPb-214のみであり、Th系列であるTl-208やK-40には変化がみられないことを、視覚的に確認することができる。

分散は、雨なし時に比べて雨あり時の方がはるかに大きく、雨あり時には、線量率の分布全体が単に高い方にシフトするだけでなく、激しく変動することを示している。

この分散は、地点によってかなり差があり、大成局は、NaI検出器及び電離箱検出器とも一致して特に小さい。この要因を検討するため、寄与成分別の分散の状況を図5に示した。線量率の場合と同様に、U系列寄与のみが雨あり時に増加しており、降雨時の線量率の分散増加の主要因はU系列の影響によるものと考えられる。また、地点による分散の大小についても、各地点の周辺環境の違いに起因するU系列の状況の

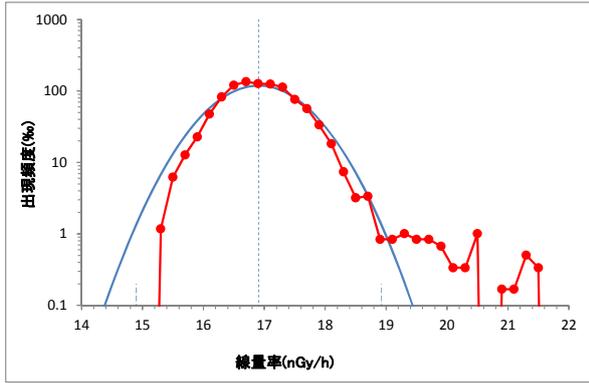


図6 ガンマ線量率の雨なし時の頻度分布(九町越局)

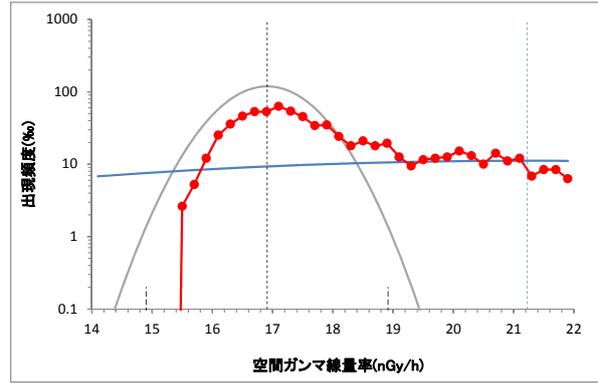


図10 ガンマ線量率雨あり時の頻度分布(九町越局)

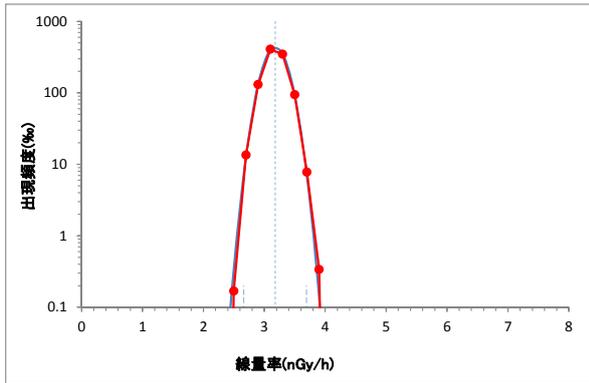


図7 K 寄与線量率の雨なし時の頻度分布(九町越局)

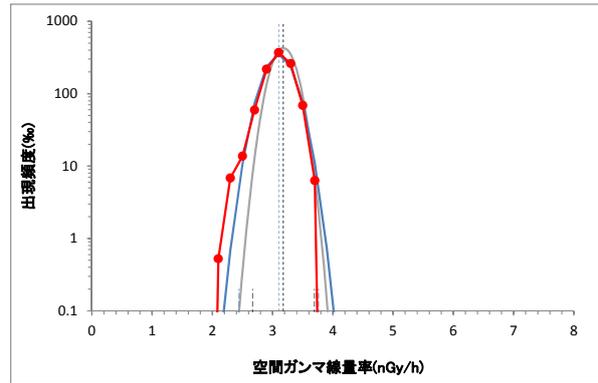


図11 K 寄与線量率の雨あり時の頻度分布(九町越局)

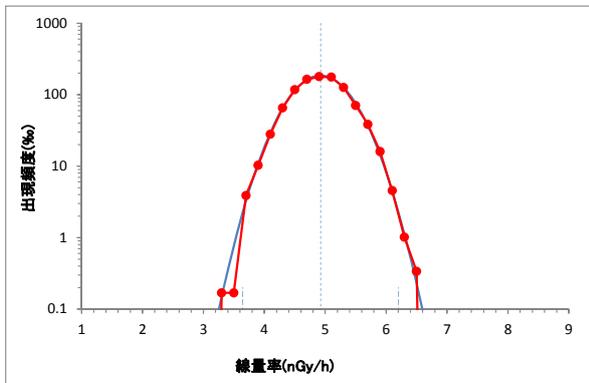


図8 Th 寄与線量率の雨なし時の頻度分布(九町越局)

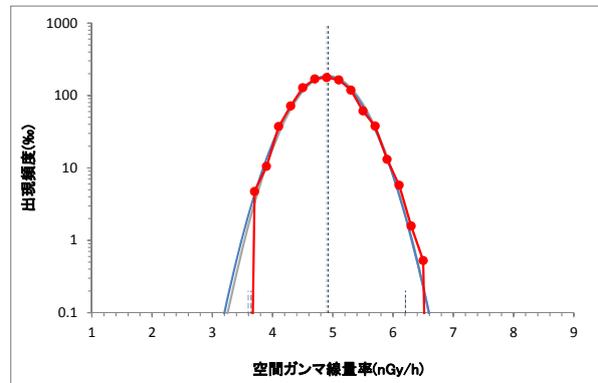


図12 Th 寄与線量率の雨あり時の頻度分布(九町越局)

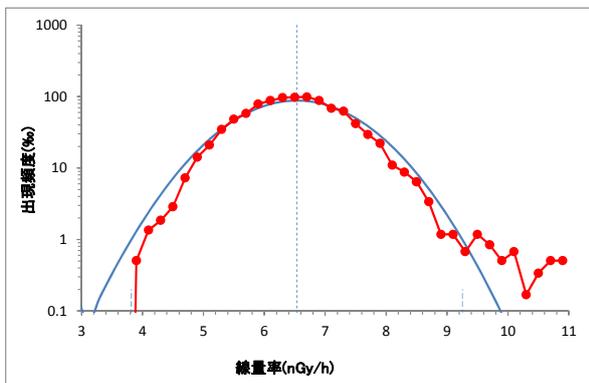


図9 U 寄与線量率の雨なし時の頻度分布(九町越局)

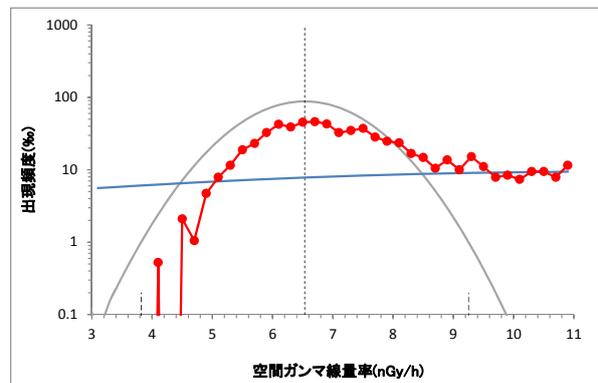


図13 U 寄与線量率の雨あり時の頻度分布(九町越局)

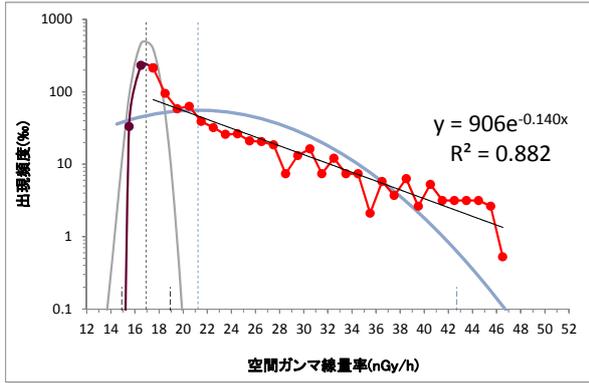


図 14 ガンマ線線量率雨あり時の頻度分布(九町越局)

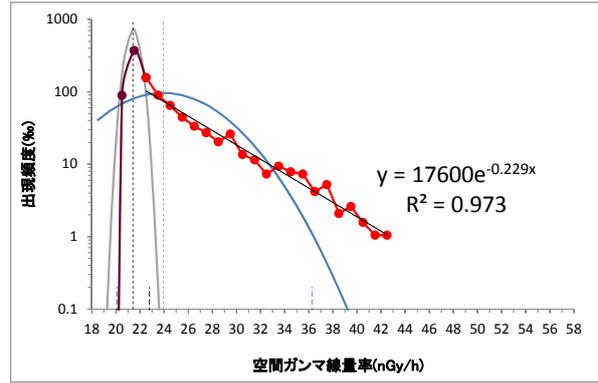


図 16 ガンマ線線量率雨あり時の頻度分布(大成局)

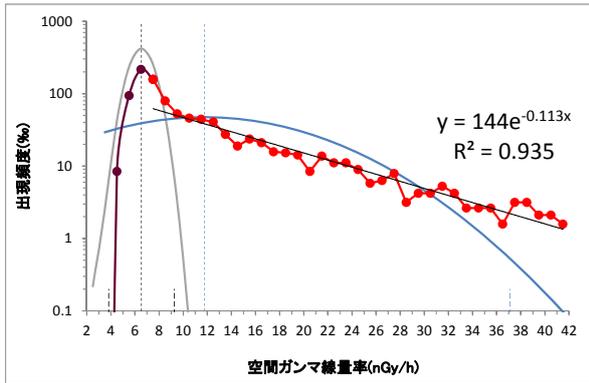


図 15 U 寄与線量率の雨あり時の頻度分布(九町越局)

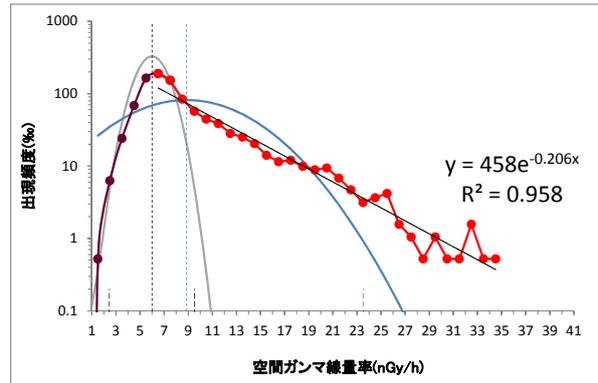


図 17 U 寄与線量率の雨あり時の頻度分布(大成局)

違いによるものと考えられる。

3.4. 線量率の頻度分布

前項まで、データ集団全体のパラメータによって考察してきたが、本項では、さらにデータの頻度分布を定量的に解析する。

図6～13に2012年4月～2013年2月の九町越局における NaI 検出器によるガンマ線線量率及び各成分線量率の1時間値の頻度分布を示した。横軸及び縦軸のスケールは統一してある。

図6～9は雨なし時であり、赤色は観測値、青色の長い破線は平均値、短い破線は平均値±標準偏差の3倍、実線は平均値及び標準偏差から期待される正規分布を示している。いずれの項目もほぼ正規分布を示しているが、U 系列の高線量率側の頻度は、1%以下の領域で正規分布から上側に外れており、その影響でガンマ線線量率も同様

の分布形となっている。

図 10～13 は雨あり時であり、書式は図6～9と同様であるが、灰色によって、雨なし時の平均値、平均値±標準偏差の3倍、平均値及び標準偏差から期待される正規分布を追記している。雨あり時には、ガンマ線線量率の雨なし時からの増加分が、高線量率側で正規分布から大きく逸脱しており、雨なし時の正規分布に降雨イベントによる上昇分の分布が重なった結果と考えられる。図には示していないが、電離箱検出器によるガンマ線線量率についても同様の分布を示した。

さらに成分別に見ると、U 系列寄与がガンマ線線量率と同様の分布を示しており、K 及び Th 系列寄与は雨なし時とほとんど変わらない正規分布をしていることから、ガンマ線線量率の降雨による分布の変化は、U 系列寄与線量率の分布の変化により支配されて

表3 λ (nGy/h)及び P の値に対する a (nGy/h)

P	(備考)	$\lambda=0.05$	$\lambda=0.10$	$\lambda=0.15$	$\lambda=0.20$	$\lambda=0.25$	$\lambda=0.30$
15.9%	(正規分布での $P(x>M+\sigma)$)	36.8	18.4	12.3	9.21	7.36	6.14
2.28%	(正規分布での $P(x>M+2\sigma)$)	75.7	37.8	25.2	18.9	15.1	12.6
1.00%		92.1	46.1	30.7	23.0	18.4	15.4
0.135%	(正規分布での $P(x>M+3\sigma)$)	132	66.1	44.1	33.0	26.4	22.0
0.100%		138	69.1	46.1	34.5	27.6	23.0

いることがわかる。

この降雨による線量率の増加分は、指数分布をすることが知られている。そこで、今回当該部分に、次の確率密度関数で表される指数分布を最小自乗法によりフィッティングし、 λ 値及び相関係数 R^2 を求めた。

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (x \geq 0) \quad (1)$$

具体的には、「雨なし時の平均値が属する次の階級」から「度数が初めて 0 となる階級」までの出現頻度を基に λ 値を算出したが、雨なし時の平均に近い領域は、雨なし時の正規分布の確率密度が大きいため、 λ 値を若干大きめに評価している可能性がある。 λ 値を精密に見積もるためには、この影響を受けない高線量率側の頻度減少領域に最小自乗法を適用すべきであるが、出現頻度の減少に伴ってばらつきも大きくなるため、留意が必要である。

表1及び表2に 2012 年の各局のガンマ線線量率から求めた λ 値、 R^2 等を示す。いずれの局も高い相関係数を示し、指数分布に非常によく一致している。 λ 値は、大きいほど高値側の出現頻度の減少が著しいことを意味しているが、局によって異なり、0.15～0.25 の範囲となった。また、同じ局の NaI 検出器と電離箱検出器の λ 値は、概ね一致している。また、10 分間値についても同様である。

指数分布の分散は $1/\lambda^2$ となるが、表1及

び表2に示したとおり、 λ 値から算出した分散と観測された分散は良く一致している。局別にみると、大成局が最も大きな λ 値を示しており、3.3 項で言及した大成局の分散が最小であることとよく整合している。その原因としては、大成局が、8局の中で最も海に近いこと、局舎及び周辺の地面の広い範囲がコンクリート張であることから、U 系列であるラドン-222(Rn-222)の大気中濃度が他局と比べて低くなっているためと推定される。

ガンマ線線量率と同様に、U 系列寄与線量率についても、雨なし時の平均からの増加分に指数分布をフィッティングした。図 14～17 に 2012 年 4 月～2013 年 2 月の九町越局及び大成局におけるガンマ線線量率及び U 系列寄与線量率の結果を示す。4つの図の横軸及び縦軸のスペンは統一してある。U 系列寄与線量率の相関係数も非常に高く、指数分布によく一致している。また、各局のガンマ線線量率と U 系列寄与線量率の λ 値は同程度の値となっている。これらのことから、ガンマ線線量率の高線量率側の分布は U 系列によって支配されていることが明らかとなった。

3.5. 線量率の超過確率

線量率の分布を定量的に明らかにすることができれば、線量率が特定の値を超過する確率を数式によって算出することができる。

式(1)から、指数分布の累積分布関数 $F(x)$ は、

$$F(x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = [-e^{-\lambda x}]_0^x = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2)$$

となる。この(2)式を用いて、指数分布している線量率 x (nGy/h)がある値 a (nGy/h)を超える確率 $P(x > a)$ を求めると、

$$P = F(\infty) - F(a) = 1 - (1 - e^{-\lambda a}) = e^{-\lambda a}$$

(3)

で与えられる。さらに、(3)式を変形して

$$a = -\frac{\log_e P}{\lambda} \quad (4)$$

となる。(4)式により、 λ が既知であれば、監視したい超過確率レベル P を指定することによって、監視値 a を決定することができる。表3に、具体的な λ (nGy/h) 及び P の値のいくつかの組み合わせケースについて、 a (nGy/h) の計算値を示した。降雨による線量率の上昇とそれ以外の異常を監視するうえで、指標とすることができる。

4. まとめ

本稿では、空間ガンマ線量率の変動について、以下の知見を明らかにした。

- ① 空間ガンマ線線量率は、U 系列寄与線量率の変動により、7～8月に低く冬季に高くなる季節変動を示す。その変動幅は最大で約 2nGy/h と小さい。Rn-222 濃度の異なる海洋上と大陸上の大気が季節風によって交互に流入してくることが影響している可能性が考えられる。
- ② 空間ガンマ線線量率の日変動は認めら

れない。

- ③ 雨なし時は、K, Th 系列, U 系列の各寄与線量率及び空間ガンマ線線量率とも、ほぼ正規分布を示す。それぞれの平均及び分散には地点差があり、各地点の地質など周辺環境の違いに起因するものと推定される。
- ④ 雨あり時には、空間ガンマ線線量率が増加するが、その増加分は指数分布によく一致し、 λ 値は 0.15～0.25 となった。この増加は、U 系列寄与線量率によって支配されており、K 及び Th 系列の寄与線量率は、平均及び分散とも雨なし時とほとんど変化しない。
- ⑤ λ 値が既知であれば、超過確率レベル P を指定することによって監視値 a を決定することができ、監視指標として有効である。

以上、今回は既設8局について解析を行ったが、今後、2013年度から本格稼働する増設12局についても、データを蓄積して同様の解析を行い、通常時に観測される自然変動の特徴を把握しておくことが重要である。特に、既設局は全て半島部に位置しているが、増設局は内陸部にも設置されるため、今後その特徴に着目して比較検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) S. Minato, Radioisotopes, 50 (2001) 463.
- 2) 文部科学省, 空間 γ 線スペクトル測定法, 財団法人日本分析センター, 1990.