

〔短 報〕

# 降雨による空間放射線量率の変動についての考察

石川県保健環境センター 環境科学部 吉本 高志・内田 賢吾

## 〔和文要旨〕

平常時の空間放射線量率（以下「線量率」という。）は、大気中のラドン-222子孫核種が降雨等により地表面に降下するため、変動が観測される。今回、観測される線量率から降雨による単位線量率増加量を算出する表式を導出し、線量率の変動と単位時間中の降雨のみによる線量率増加量、降水強度当たりの線量率増加量の関係を解析した。線量率増加量は、ポロニウム-218/鉛-214比及び鉛-214/ビスマス-214比に依存するため、適切な放射能比の選択を検討する必要があることが判った。

キーワード：空間放射線量率，降雨，ラドン子孫核種，鉛-214/ビスマス-214 比

## 1 はじめに

平常時における空間放射線量率（以下「線量率」という。）のモニタリングでは、大気中のラドン-222子孫核種が降雨等により地表面に降下するため、数時間から数日の変動が観測されている<sup>1) 2)</sup>。

この変動は、線量率が降雨時に増加し、降雨後に時間とともに減衰し、元のバックグラウンドレベルに戻っていく。連続した降雨の場合、観測される線量率の増加量は、その時点の降雨による増加量とその時点以前に増加した線量率の減衰後の値を足し合わせたものとなっている。このため、降雨による線量率増加量を解析するにあたって、単純にその時点の線量率と降水強度のデータから線量率増加量を求めることはできない。

そこで本報では、観測される線量率から単位時間の降雨による線量率増加量を算出する表式を導出し、線量率の変動事例に適用を試みたので、その結果を報告する。

## 2 方 法

### 2・1 測定及び核データ

測定に使用した線量率測定器、雨量計及び感雨計の仕様を表1に示す。測定間隔は1分毎であり、連続する1分値10個の平均から10分値を算出している。また、

ガンマ線スペクトルを10分毎に測定している。

半減期等の核データについては、アイソトープ手帳(11版7刷)<sup>3)</sup>に記載のものを用いた。

表1 線量率測定器の仕様と測定項目

線量率測定器	型式	アロカ株式会社製 ASM-R22-21553&B
	検出器	3'φ×3' NaI(Tl) シンチレーション検出器
	検出器の位置	地上1.8m
	測定エネルギー範囲	50keV～3MeV
	測定項目	線量率、ガンマ線スペクトル、計数率、通過率
雨量計	型式	光進電気工業株式会社製 RT-1030
	測定方法	温水加温受水口-転倒弁方式
	分解能	0.5mm
感雨計	型式	光進電気工業株式会社製 TRW-011
	測定方法	電極間抵抗変化方式

### 2・2 降雨による線量率増加のモデル

降雨による線量率増加のモデル図を図1に示す。図1の横軸は時刻である。傘マークは、その時刻に降雨があったことを表す。折れ線グラフは観測される線量率である。棒グラフの点線で囲んだ部分はその時刻の降雨による線量率増加量（以下「単位線量率増加量」という。）である。降雨によって増加した線量率は、ある半減期で減衰していく。従って連続した降雨があった場合、観測される線量率はその時刻以前に増加した線量率の影響が積み重なったものとなる。

An Examination of Variation of Environmental Radiation Caused by Rainfall. by YOSHIMOTO Takashi and UCHIDA Kengo (Environmental Science Department, Ishikawa Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science)

Key words : Environmental Radiation, Rainfall, Radon Progeny, Pb-214/Bi-214 ratio

以上から、降雨と線量率の関係を把握するためには、観測される線量率ではなく、単位線量率増加量と比較しなければならない。

図1のモデル図に基づき、単位線量率増加量を算出する式を導出し、単位線量率増加量を算出した。また、降水強度当たりの線量率増加量を求め、観測される線量率、単位線量率増加量、降水強度当たりの線量率増加量の関係について比較、解析した。

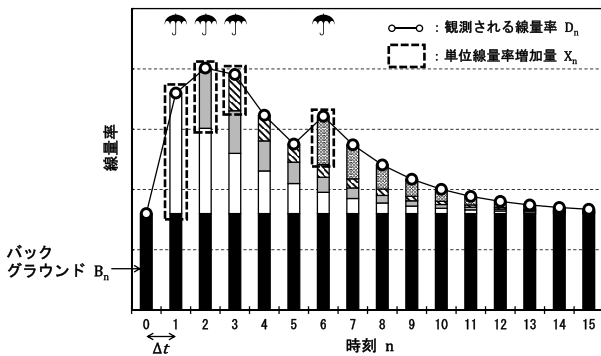


図1 降雨による線量率増加のモデル図

### 3 単位線量率増加量を算出する式の導出

#### 3・1 観測される線量率と単位線量率増加量の関係式

観測される線量率と単位線量率増加量の関係式の導出について、図1のモデル図を基に説明する。

時刻nから時刻n+1となった時、単位時間Δtが経過するとする。時刻nにおける観測される線量率をD<sub>n</sub>、バックグラウンドをB<sub>n</sub>、単位線量率増加量をX<sub>n</sub>とし、X<sub>n</sub>はある減衰関数f<sub>n</sub>(t)に従って減衰していくとする。tは時刻nからの経過時間を表し、f<sub>n</sub>(0) = 1である。

また、降雨がないときX<sub>n</sub> = 0である。

降雨前 (n = 0) の線量率D<sub>0</sub>は、

$$D_0 = B_0 \quad (式1)$$

である。時刻n = 1で初めて降雨があり、線量率がX<sub>1</sub>増加するので、D<sub>1</sub>は、

$$D_1 = B_1 + X_1 \quad (式2)$$

となる。時刻n = 2では、その時刻の降雨により線量率がX<sub>2</sub>増加する。X<sub>1</sub>については、時間がΔt経過したので、f<sub>1</sub>(t)に従って減衰しX<sub>1</sub>f<sub>1</sub>(Δt)となる。従って、D<sub>2</sub>は、

$$D_2 = B_2 + X_1 f_1(\Delta t) + X_2 \quad (式3)$$

となる。時刻n = 3では、その時刻の降雨により線量率がX<sub>3</sub>増加する。X<sub>1</sub>については、時間が2Δt経過したので、X<sub>1</sub>f<sub>1</sub>(2Δt)となる。X<sub>2</sub>については、時間がΔt経過したので、f<sub>2</sub>(t)に従って減衰しX<sub>2</sub>f<sub>2</sub>(Δt)となる。従って、D<sub>3</sub>は、

$$D_3 = B_3 + X_1 f_1(2\Delta t) + X_2 f_2(\Delta t) + X_3 \quad (式4)$$

となる。以上を一般的に表すと、D<sub>n</sub>は

$$D_n = B_n + \sum_{k=0}^n X_k f_k((n-k)\Delta t) \quad (式5)$$

となる。

#### 3・2 観測される線量率から単位線量率増加量を算出する式の導出

3.1で導出した式5から、観測される線量率から単位線量率増加量を算出する式を導出する。

時刻n (n ≥ 1) における線量率と時刻n - 1における線量率の差をとると、

$$D_n - D_{n-1} = B_n - B_{n-1} + \sum_{k=0}^n X_k f_k((n-k)\Delta t) - \sum_{k=0}^{n-1} X_k f_k((n-1-k)\Delta t) \quad (式6)$$

となる。式6右辺の破線で囲った部分について、k = nの部分のみをX<sub>n</sub>として和から取り出し整理すると、

$$X_n = D_n - D_{n-1} - (B_n - B_{n-1})$$

$$+ \sum_{k=0}^{n-1} X_k \{f_k((n-1-k)\Delta t) - f_k((n-k)\Delta t)\} \quad (式7)$$

となる。

ここで、「Δt程度の時間経過ではバックグラウンドはほとんど変化しない」と仮定すると、式7右辺第3項(B<sub>n</sub> - B<sub>n-1</sub>)は0となり、

$$X_n \approx D_n - D_{n-1}$$

$$+ \sum_{k=0}^{n-1} X_k \{f_k((n-1-k)\Delta t) - f_k((n-k)\Delta t)\} \quad (式8)$$

が得られる。単位線量率増加量の減衰関数f<sub>n</sub>(t)の具体的な形が判れば、式8により、観測される線量率から単位線量率増加量を算出できる。

#### 3・3 単位線量率増加量の減衰関数f<sub>n</sub>(t)の導出

降雨による線量率の増加は、降雨中に含まれるラドン-222子孫核種からの放射線によるものであることから<sup>4)</sup>、減衰関数f<sub>n</sub>(t)は、これらの核種の半減期に依存していると考えられる。

ラドン-222子孫核種の放射能の半減期による時間変化を図2に示す。ポロニウム-218、鉛-214、ビスマス-214及びポロニウム-214は、約4時間で放射平衡に達する。また、鉛-210はほとんど生成されていないことから、鉛-210以降の子孫核種は降雨による線量率増加に寄与していないと考えられる。

放射平衡時における、ポロニウム-218、鉛-214、ビスマス-214及びポロニウム-214が放出するガンマ線による線量率寄与率を表2に示す。線量率寄与率は、鉛-

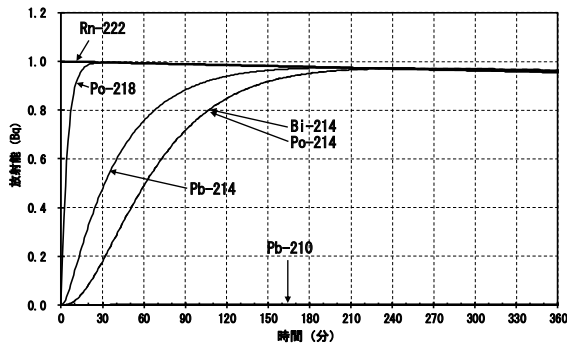


図2 ラドン-222子孫核種の放射能の時間変化

表2 放射平衡時におけるラドン-222子孫核種が放出するガンマ線による線量率寄与率

核種	放出ガンマ線エネルギー (keV) 括弧内は放出比	空気衝突カーマ率定数 (nGy・m <sup>2</sup> ・kBq <sup>-1</sup> ・h <sup>-1</sup> )	放射平衡時における線量率への寄与率
Po-218	なし	-	-
Pb-214	0.242 (7.43%) 0.295 (19.3%) 0.352 (37.6%)	0.0531	22.877%
Bi-214	0.609 (46.1%) 0.768 (4.94%) 1.120 (15.1%) 1.238 (5.79%) 1.765 (15.4%) 2.204 (5.08%)	0.179	77.118%
Po-214	0.800 (0.01%) 他	1.10×10 <sup>-5</sup>	0.005%

214が約23%、ビスマス-214が約77%であり、降雨による線量率増加の原因となる核種は鉛-214及びビスマス-214がほとんどであることが判る。従って、減衰関数 $f_n(t)$ は、鉛-214、ビスマス-214及びそれらの親核種であるポロニウム-218の半減期に依存していると考えられる。

地表に沈着した後のポロニウム-218の放射能 $A_n^{Po}$ 、鉛-214の放射能 $A_n^{Pb}$ 及びビスマス-214の放射能 $A_n^{Bi}$ は、式9、式10及び式11で表される。

$$A_n^{Po}(t) = A_n^{Po}(0)e^{-\lambda^{Po}t} \quad (式9)$$

$$A_n^{Pb}(t) = \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} A_n^{Po}(0)e^{-\lambda^{Po}t} + \left( A_n^{Pb}(0) - \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} A_n^{Po}(0) \right) e^{-\lambda^{Pb}t} \quad (式10)$$

$$A_n^{Bi}(t) = \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Po}} \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} A_n^{Po}(0)e^{-\lambda^{Po}t} + \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Pb}} \left( A_n^{Pb}(0) - \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} A_n^{Po}(0) \right) e^{-\lambda^{Pb}t} + \left\{ A_n^{Bi}(0) - \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Po}} \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} A_n^{Po}(0) - \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Pb}} \left( A_n^{Pb}(0) - \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} A_n^{Po}(0) \right) \right\} e^{-\lambda^{Bi}t} \quad (式11)$$

一方、単位線量率増加量は地表に沈着した鉛-214及びビスマス-214からのガンマ線によるものであることから、単位線量率増加量の減衰 $X_n f_n(t)$ は

$$X_n f_n(t) = \alpha \left( K^{Pb} A_n^{Pb}(t) + K^{Bi} A_n^{Bi}(t) \right) \quad (式12)$$

と表される。ここで、 $\alpha$ は比例定数、 $K^{Pb}$ 及び $K^{Bi}$ はそれぞれ鉛-214及びビスマス-214の空気衝突カーマ率定数である。なお、降雨によって降下したラドン-222子孫核種は一樣に地表に沈着したと仮定している。線量率の測定においては、測定地点周辺の地形や遮蔽物の影響を受けるが、ラドン子孫核種は一樣に地表に沈着すると仮定することで、これらの影響を定数 $\alpha$ で表すことができる。式12に、式10及び式11を代入し整理すると、

$$X_n f_n(t) = \alpha A_n^{Po}(0) \left( {}^1C_n e^{-\lambda^{Po}t} + {}^2C_n e^{-\lambda^{Pb}t} + {}^3C_n e^{-\lambda^{Bi}t} \right) \quad (式13)$$

となる。ここで、 ${}^1C_n$ 、 ${}^2C_n$ 及び ${}^3C_n$ は、

$${}^1C_n = \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} \frac{A_n^{Po}(0)}{A_n^{Pb}(0)} \left( K^{Pb} + K^{Bi} \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Po}} \right) \quad (式14)$$

$${}^2C_n = \left( K^{Pb} + K^{Bi} \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Pb}} \right) \left( 1 - \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Pb} - \lambda^{Po}} \frac{A_n^{Po}(0)}{A_n^{Pb}(0)} \right) \quad (式15)$$

$${}^3C_n = K^{Bi} \left\{ \frac{A_n^{Bi}(0)}{A_n^{Pb}(0)} - \frac{\lambda^{Bi}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Pb}} \left( 1 - \frac{\lambda^{Pb}}{\lambda^{Bi} - \lambda^{Po}} \frac{A_n^{Po}(0)}{A_n^{Pb}(0)} \right) \right\} \quad (式16)$$

である。

式13に $t=0$ を代入すると、 $f_n(0) = 1$ であることから、

$$\alpha A_n^{Po}(0) = \frac{X_n}{{}^1C_n + {}^2C_n + {}^3C_n} \quad (式17)$$

が得られる。式17を式13に代入し、両辺を $X_n$ で除することで単位線量率増加量の減衰関数

$$f_n(t) = \frac{1}{{}^1C_n + {}^2C_n + {}^3C_n} \times \left( {}^1C_n e^{-\lambda^{Po}t} + {}^2C_n e^{-\lambda^{Pb}t} + {}^3C_n e^{-\lambda^{Bi}t} \right) \quad (式18)$$

が得られる。

### 3・4 単位線量率増加量を算出する式

単位線量率増加量を算出する式は、式8、式14、式15、式16及び式18である。式14、式15及び式16の中に、沈着時におけるポロニウム-218/鉛-214比及びビスマス-214/鉛-214比が含まれているため、単位線量率増加

量を計算するにあたっては、これらの比の値が必要となる。

### 3.5 放射能比

ポロニウム-218/鉛-214比及びビスマス-214/鉛-214比を降雨毎に求めるのは困難であるので、これらの値がどの程度の範囲をとるかを推定した。大気中でラドン-222、ポロニウム-218、鉛-214及びビスマス-214が放射平衡となっている状態で、ラドン-222以外の核種が雲粒に捕獲され雨滴となって地表に落下し沈着すると仮定する。雲粒に捕獲されてから地表に沈着するまでの間に、放射能比はラドン子孫核種の減衰に依存して変動する。雨滴に捕獲されたラドン子孫核種の放射能及び放射能比の時間変化を図3に示す。捕獲直後では放射平衡となっているため、放射能比は1となる。ポロニウム-218の半減期は3.10分であり、約30分でほとんど無くなるので、ポロニウム-218/鉛-214比も約30分でほぼ0となる。一方、ビスマス-214/鉛-214比は時間とともに増加していく。ラドン-222によるポロニウム-218の供給が無くなったことから、鉛-214及びビスマス-214は時間の経過とともに新たな放射平衡に向かい、ビスマス-214/鉛-214比は最終的に一定値(3.88)となる。以上

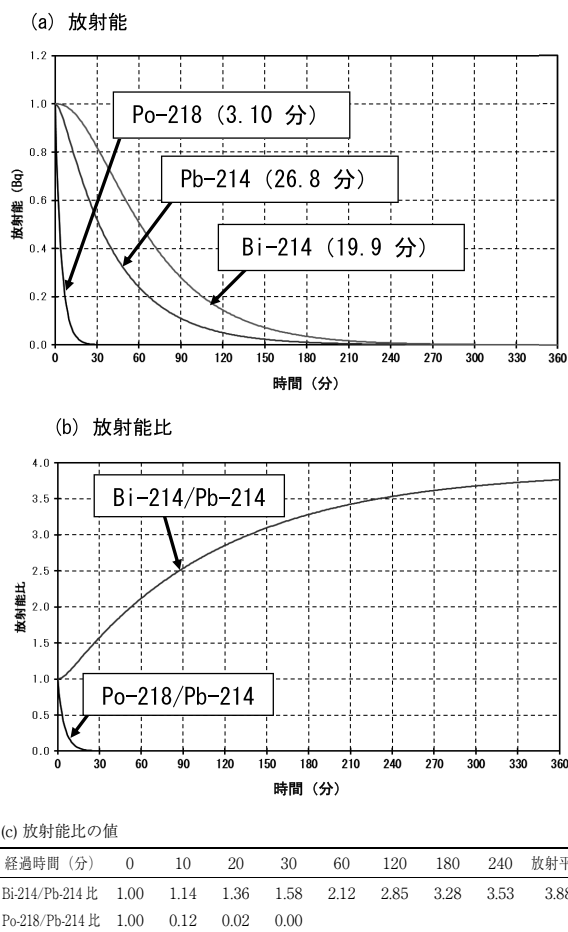


図3 雨滴に捕獲されたラドン子孫核種の放射能及び放射能比の時間変化

から、ポロニウム-218/鉛-214比の取り得る範囲は、1～0、ビスマス-214/鉛-214比の取り得る範囲は、1～3.88となる。これらの比の値は、雲粒に捕獲されてから地表に沈着するまでの経過時間で決定される。経過時間に対する放射能比の値の例を図3(c)に示す。

### 4 観測事例への適用結果

3章で導出した単位線量率増加量の表式を観測事例に適用し、解析した。事例として、2020年10月4日22:00から10月5日6:00に志賀局で観測した線量率の10分値の変動を用いた。その変動状況を図4に示す。この期間中に、志賀局における2020年度の年最大値125.3 nGy/hを観測している。計算はMicrosoft社製Excel2013 VBAでプログラムを作製して行った。計算条件として、 $\Delta t$

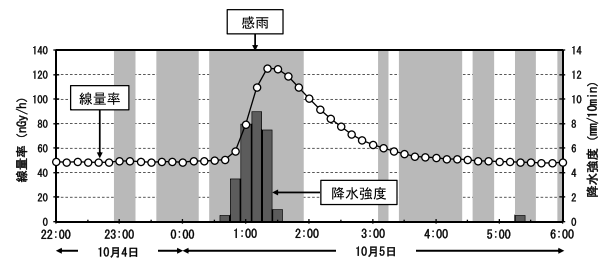


図4 2020年10月4日22:00から10月5日6:00までの志賀局における線量率と降水強度の変動状況

を10分とした。

ポロニウム-218/鉛-214比及びビスマス-214/鉛-214比の値が計算結果に与える影響を確認した。その結果を図5に示す。図5(a)は雲粒に取り込まれた直後、図5(b)はビスマス-214と鉛-214が放射平衡に達した時の比を用いて計算した結果である。ビスマス-214/鉛-214比が大きいほど単位線量率増加量が大きくなる傾向となった。これは、ビスマス-214/鉛-214比が大きいほど減衰関数の減衰が速く、過去の単位線量率増加量の影響が小さくなるためである。ビスマス-214/鉛-214比は、雲粒に取り込まれてからの経過時間が長いほど大きくなっていくことから、降水をもたらす雲の形成プロセス及び雨滴が地表に到達するまでにかかる時間が線量率の変動に影響を与えられたと考えられた。適切な放射能比の選択が今後の課題である。

また、ビスマス-214/鉛-214比が1.00及び3.88における計算結果を各時刻における単位線量率増加量の変動幅として解析を行った。

単位線量率増加量の計算結果を図6に示す。単位線量率増加量と線量率の関係を見ると、単位線量率増加量の最大値の後に線量率の最大値が観測されていた。この結果は、単位時間における線量率と降水強度の比較

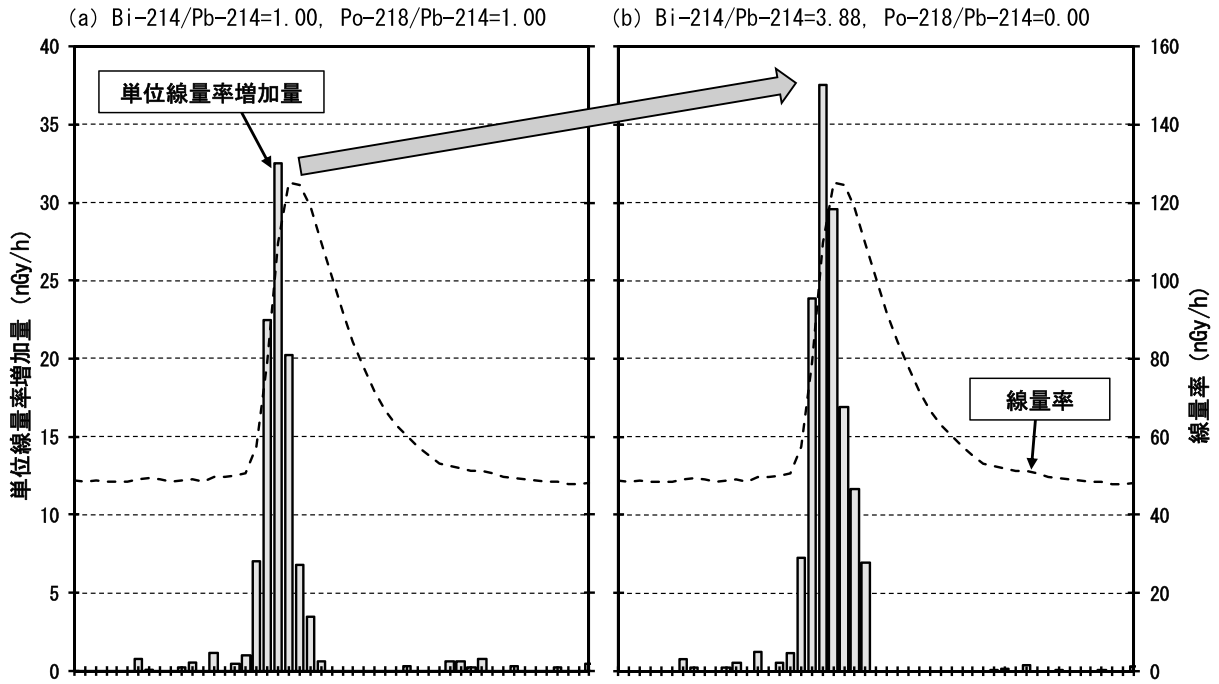


図5 放射能比と単位線量率増加量の関係

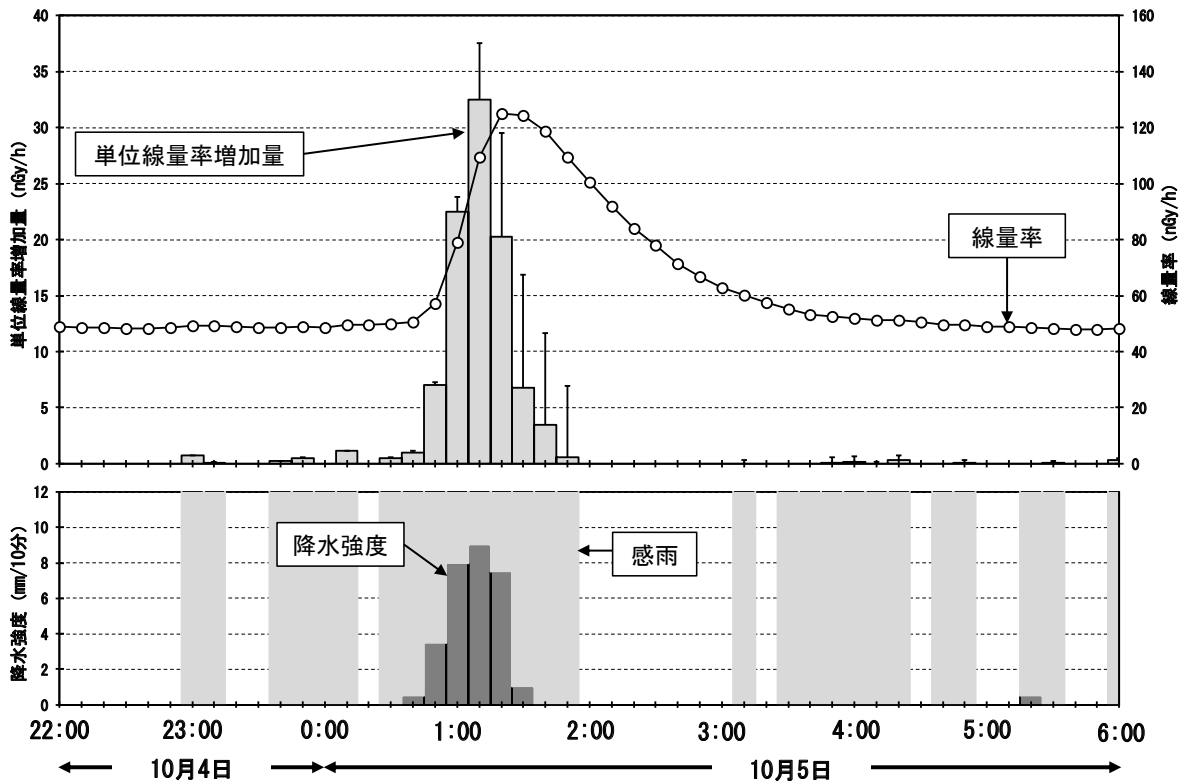


図6 2020年10月4日22:00から10月5日6:00までの志賀局における単位線量率増加量の変動

では、降雨の影響を評価できないことを示している。

線量率濃度の変動を図7に示す。ここで、線量率濃度は単位線量率増加量をその時の降水強度で除した値とした。感雨は観測されているが、降水強度は観測され

ていない場合は、降水強度を0.5mm/10分として線量率濃度を求めた。線量率の最大値を観測した10月5日0:30から1:50における線量率濃度は、降水強度の大きい降り始めに比べて、降水強度の小さい降り終わりの方が

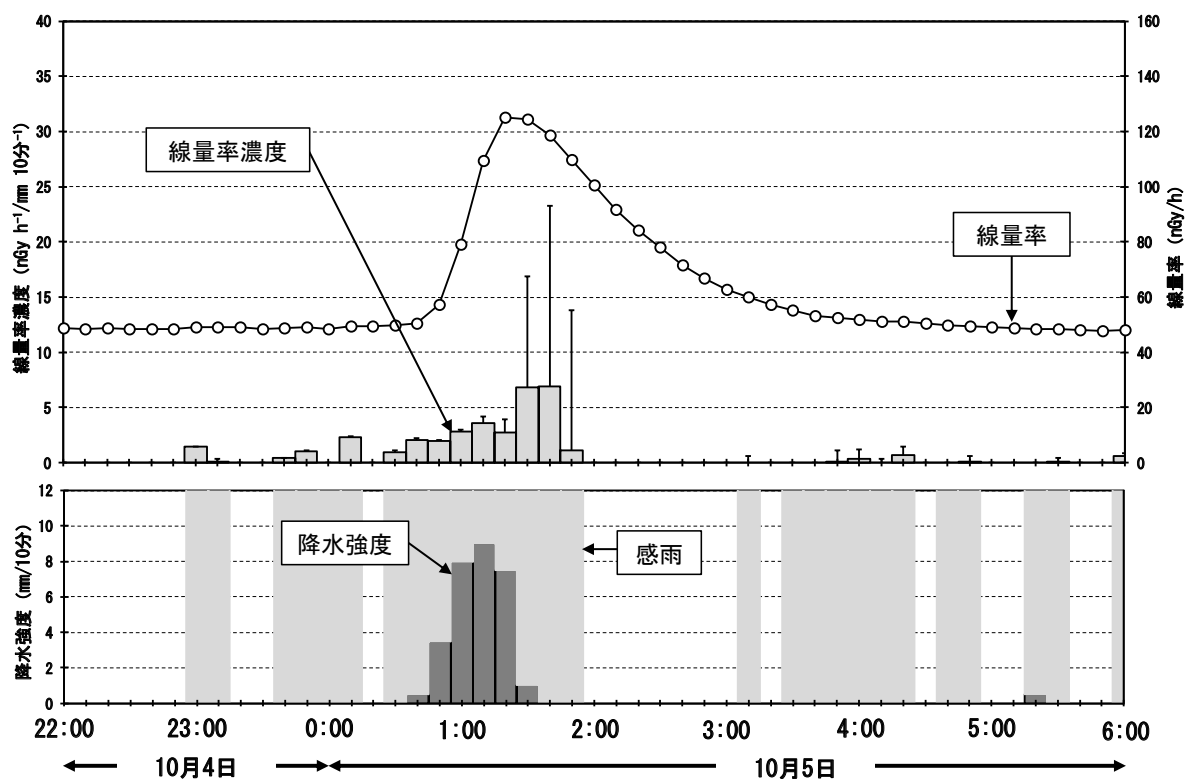


図7 2020年10月4日22:00から10月5日6:00までの志賀局における線量率濃度の変動

大きい結果となった。

### 5 まとめ

線量率の測定値から降雨による単位線量率増加量を算出する表式を導出した。これにより、降雨が線量率の変動に与える影響を直接評価することが可能となった。また、単位線量率増加量は、ビスマス-214/鉛-214比が大きいほど大きくなる傾向であった。

導出した表式を2020年10月4日22:00から10月5日6:00に志賀局で観測した線量率の変動事例に適用し、線量率の変動と単位線量率増加量、線量率濃度の関係を解析した。線量率の最大値の出現時刻と単位線量率増加量の最大値の出現時刻は一致せず、単位線量率増加量の最大値が出現後に線量率の最大値が出現した。この結果は、単位時間における線量率と降水強度の比較では、降雨の影響を評価できないことを示している。

今後の課題として、単位線量率増加量はポロニウム-

218/鉛-214比及び鉛-214/ビスマス-214比に依存するため、適切な放射能比の選択を検討する必要がある。

### 文 献

- 1) 小森正樹, 中谷光, 今井利夫, 安井嘉朗: 石川県における空間線量調査結果 (その1) -6年間の線量率測定結果から-, 石川県衛生公害研究所年報, 26, 447-456 (1986)
- 2) 吉本高志, 鶴谷亮太, 内田賢吾: 石川県における空間放射線量率の時間的・地域的変動についての解析, 石川県保健環境センター研究報告書, 57, 23-30 (2020)
- 3) 公益社団法人日本アイソトープ協会: アイソトープ手帳 (11版7刷), 丸善 (2017)
- 4) ラドン族調査研究委員会: 大気中のラドン族と環境放射能, 187-195, 社団法人日本原子力学会 (1985)