原著論文

冬季日本海側における高空間線量率事象の解析

永井 英志^{*1, #}, 山澤 弘実^{*1}, 森 泉 純^{*1}, 平尾 茂一^{*2}

(2018 年 4 月 19 日受付)

(2018 年 11 月 6 日採択)

Analysis of a High Air Dose Rate Event during Winter on the Coast of the Sea of Japan

Hideyuki NAGAI,^{*1, #} Hiromi YAMAZAWA,^{*1} Jun MORIIZUMI^{*1} and Shigekazu HIRAO^{*2}

A high environmental dose rate observed at Rokkasho-mura on December 17, 2015, which was reported to be caused by the wet deposition of radon decay products, was analyzed to depict its spatial distribution and to understand mechanisms of the unprecedentedly high dose rate increase of 0.151 $\mu\text{Gy/h}$. It was pointed out that the high dose rate was observed widely on the Sea of Japan side of the main island of Japan, with areas of slight increases where the precipitation was light. It was also pointed out that the large increases corresponded with the precipitation intensity exceeding about 3 mm/h. However, precipitation events exceeding the value did not necessarily correspond to large increases of the dose rate. According to the analysis using a long-range atmospheric transport model and weather charts, the causal ^{222}Rn was transported from the northeastern part of China and the southeastern part of Siberia, where existed a cold low pressure system transporting ^{222}Rn vertically to form a 1 to 2 km-deep high concentration air layer. This air layer was transported by the winter monsoon to Japan without significant decay of ^{222}Rn . It was found in this analysis that the large dose rate increase was observed at the locations where the significant level of precipitation occurred when the air layer existed.

KEY WORDS: air dose rate, monitoring, radon decay products, wet deposition, precipitation, atmospheric transport model.

I 緒 言

原子力施設周辺では、施設からの人工放射線・放射能の漏洩を検知するためにモニタリングポスト（あるいはモニタリングステーション、以下では両者とも MP と表記）によって空間線量率のモニタリングが行われている。東京電力福島第一原子力発電所事故後、原子力施設周辺での配置密度の増加と配置範囲の拡大が行われ、全国規

模での空間線量率測定ネットワークが形成された。しかし、空間線量率の上昇は人為的な要因だけでなく、降水時の大気中 ^{222}Rn 壊変生成物 (^{214}Pb , ^{214}Bi 等) の湿性沈着といった、自然現象によっても引き起こされることが知られており、放射線監視の観点からは妨害要因となっている。

本論文で用いるデータ公開元での空間線量率の値は $1 \mu\text{Gy/h}$ を $1 \mu\text{Sv/h}$ と換算されているが、本論文では値はそのまま、空気吸収線量率（あるいは空気カーマ率）の本来の単位である $\mu\text{Gy/h}$ を用いることとし、以下では紛れがない場合は単に線量率と表記する。

2015 年 12 月 17 日、青森県六ヶ所村内の MP で $0.151 \mu\text{Gy/h}$ という高い空間線量率を記録した（原子力規制庁 HP, 10 分値）。この値はこの MP での観測史上一番高い値であり 2015 年 12 月の平均線量率

^{*1} 名古屋大学大学院工学研究科：愛知県名古屋市千種区不老町（〒464-8603）

Department of Applied Energy, School of Engineering, Nagoya University; Furou-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603, Japan.

^{*2} 福島大学環境放射能研究所：福島県福島市金谷川 1（〒960-1296）
Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, 1 Kanayagawa, Fukushima-shi, Fukushima 960-1296, Japan.

[#] Corresponding author; E-mail: nagai.hideyuki@e.mbox.nagoya-u.ac.jp

0.027 $\mu\text{Gy/h}$ の 5 倍以上である。青森県の調査報告書¹⁾によると、降水事象との関連や γ 線スペクトルの分析からこの線量率上昇は降水で沈着した ^{222}Rn の壊変生成物に起因していることが明らかになっている。しかし、今回のような 0.1 $\mu\text{Gy/h}$ 以上の極端な線量率上昇幅は前例がなく、なぜこれほどの線量率上昇となったのかは明らかでない。

関係するこれまでの研究では、猪股ら²⁾は高空間線量率事象が再度発生する時間間隔の統計的な特徴を明らかとし、高線量率が異常値かどうかを判定する実用的な方法を提唱した。しかし、高空間線量率事象の発生メカニズムには触れていない。MERCIER et al.³⁾はカナダのオタワ及びセントジョーンズでの降水事象について雲中 ^{222}Rn 濃度と γ 線線量率に相関があることを示している。YAMAZAWA et al.⁴⁾及び LIU et al.⁵⁾は、名古屋での降水中 ^{222}Rn 壊変生成物である ^{214}Pb (半減期 26.8 min) 及び ^{214}Bi (同 19.9 min) の濃度測定結果を解析し、大陸性気団の降水は海洋性気団の降水に比べて顕著に濃度が高いことと、大陸性気団でも対流性(積雲等)降水中濃度が非対流性降水に比べて有意に高いことを明らかにした。また、東アジア域を対象とした ^{222}Rn 長距離輸送モデルによる計算との対比で、対流性降水中濃度はモデルによって計算された名古屋上空の気柱中の ^{222}Rn 量と比較的良好な比例関係にあることを指摘した。降水時の空間線量率上昇は、ガンマ線放出核種であるこれら ^{214}Pb 及び ^{214}Bi が地表面(土壌面の他に植生、建物上面等も含む)に湿性沈着することにより起こるため、気団の起源や降水形態と線量率上昇が密接に関係していることが想定される。

これらの空間線量率上昇及び ^{222}Rn 壊変生成物降下量に関する知見に加え、HIRAO et al.⁶⁾及び MORIIZUMI et al.⁷⁾は、長距離輸送モデル解析及び八丈島等での地上大気中 ^{222}Rn 濃度の長期連続観測より、日本の地上濃度に対して大陸起源の ^{222}Rn が有意に寄与していることを指摘した。また、これらの研究で用いられた長距離輸送モデルは、SCHERY and WASIOLEK⁸⁾、HIRAO et al.⁹⁾あるいは HIRAO et al.¹⁰⁾の地表面 ^{222}Rn 散逸率分布との組み合わせで地上濃度が良好に再現されることが示されている。

これらの知見を踏まえると、上記の空間線量率上昇の事例は大陸起源 ^{222}Rn の壊変生成物の湿性沈着に起因している可能性が高いと考えられる。そこで、本研究ではこの高空間線量率事象のメカニズムの解明を目的とし、高空間線量率事象の日本国内での空間的分布及び降水との関係の解析と、長距離輸送モデルを用いて線量率上

昇時のラドンの濃度の 3 次元的な分布の特徴及び輸送過程の検討を行う。線量率が大きく上昇するためには、1) 上空(地上から降水が発生する高度まで)のラドン濃度が高く壊変生成物を多く供給できることと、2) 上空の壊変生成物を効率よく地表面へ輸送する(沈着する)過程が存在することの両方の条件が満たされる必要があると考えられることから、本論文では主に前者について検証済みの長距離輸送モデルをツールとして用いて解析を行う。

II 高空間線量率事象の発生状況の解析

1. 解析の視点と対象データ

2015 年 12 月 17-18 日に青森県六ヶ所村尾駁で観測された高空間線量率事象は、ラドン壊変生成物の湿性沈着によるものと判断されるが、その事象の全国規模での発生状況、時間経緯、及び降水との対応関係を明らかにするために、日本全体での線量率の推移を調べた。解析に用いた空間線量率データは原子力規制庁の「放射線モニタリング」¹¹⁾に収録されているデータから、全国 211 か所の MP を選択し、2015 年 12 月の当該期間の 10 分ごとの空間線量率データを対象とした。降水量については、MP で測定されている場合はそのデータ、MP での降水量がない場合は気象庁 AMeDAS データから MP に最も近い測定点を 182 か所選定した。予備的な空間線量率データの解析から、同期間での顕著な空間線量率上昇は主に日本海沿岸で起こっていることから、地点の選択では日本海側を中心とし内陸部や太平洋岸についても地域的な空白がないように地点を選定した。これらの線量率は NaI(Tl) シンチレーション検出器による測定結果であるが、検出器の設置高度等の状況は、本研究では個々には把握できていない。したがって、線量率上昇の大きさの絶対値には、モニタリング設備周辺の環境(設置地上高度、建屋の状況、地表面の水はけ、樹木等)の影響が含まれているため、必ずしも沈着過程(降水中濃度、降下量)の差異のみが反映されているとは限らない点に留意する必要がある¹²⁾。

Fig. 1 に今回高空間線量率事象が観測された 12 月 17 日 0 時(JST: 以下、時刻はすべて JST)から 18 日 12 時までの各地点の最大線量率上昇値を示す。ここで、線量率上昇値は降水の影響のない時間帯での極小値からの増分と定義した。この結果から、北海道札幌市から山口県まで全国規模で日本海側を中心に 0.06-0.13 $\mu\text{Gy/h}$ 程度の線量率上昇が起こっていること、また六ヶ所村のような 0.10 $\mu\text{Gy/h}$ 以上の大きな線量率上昇は新潟県上越

Fig. 1 Maximum increase in dose rate during 00 JST December 17 to 12 JST December 18, 2015.

市、糸魚川市、刈羽村、福井県美浜町、鳥取県米子市、琴浦町でも起こっていることが確認された。線量率上昇の大きさについては、これらの同一県内でも大小の差があり、例えば青森県六ヶ所村内でも尾駁では $0.131 \mu\text{Gy/h}$ 、千歳平では $0.039 \mu\text{Gy/h}$ といったように局所的に線量率上昇値が大きく異なる場合もある。この点については、以下の第3節で議論する。

一方、日本海沿岸から離れた内陸部及び太平洋岸では、最大線量率上昇値は顕著に小さく、おおむね $0.06 \mu\text{Gy/h}$ 以下であるが、徳島県三好市では $0.068 \mu\text{Gy/h}$ と $0.06 \mu\text{Gy/h}$ を超えている。また線量率上昇の大きい青森県の尾駁と北海道の室蘭市は太平洋側であるが、西からの風については津軽海峡の風下に位置し、日本海との間に高い脊梁山脈は存在しない。

Fig. 2 に 2015 年 12 月 17 日の 3 時間ごとの最大線量率上昇値及び積算降水量の分布を示す。なお、元データからは降水が雨であるか雪であるかの判断はできないので、以下では単に降水と表記する。この結果から、線量率上昇の起こっている地点は同時刻に降水が観測されていることがわかる。日本海側ではないが比較的大きな線量率上昇がみられた徳島県三好市でも同日降水が観測されていた。逆に降水が観測されていない時間帯に線量率上昇が起こっている地点はほとんどなく、日本海側も顕著な降水が観測されなかった秋田県では大きな線量率上昇は起きていない。

この日の降水の分布は午前中は新潟県から北陸地方を中心としたもので、午後から夜にかけて山陰地方にも降水の範囲が広がっていくものであった。線量率上昇の分

布も降水の分布と同様に新潟県、北陸地方から山陰地方に広がっていく分布ではあるが、福井県、山陰地方は降水が起こり始めたのが 12–15 時であるのに対して明確な線量率上昇が起こったのは福井県で 15 時以降、山陰地方では 18 時以降であり、降水の開始時刻と顕著な線量率上昇の時刻は必ずしも一致していない。

2. 各地点の時間経過

特に線量率上昇が大きかった青森県六ヶ所村尾駁、新潟県刈羽村、鳥取県米子市及び六ヶ所村尾駁から 12 km 離れた六ヶ所村千歳平について空間線量率と降水強度の時間変化を Fig. 3 に示す。線量率、降水強度ともに原子力規制庁の「放射線モニタリング情報」¹¹⁾ より得た 10 分値のデータである。

線量率上昇の大きかった 3 地点とも線量率上昇が見られた時間帯には降水が観測されている。いずれの地点も 15 日午後以降に弱い降水が始まり、その後、米子市では 18 日夜まで、六ヶ所村及び刈羽村では 19 日未明まで降水が断続的に継続した。しかし、きわめて大きい線量率上昇が起きた時刻は早い順に刈羽村が 17 日正午頃、六ヶ所村が同日午後 14 時頃、及び 19 時頃、米子市が同日 20 時頃であり、必ずしも降水の開始時刻や極大の時刻とは一致していない。

3. 降水と線量率の関係

前述の解析で比較的狭い範囲で線量率上昇の大きさが異なることが示された。そこで、ここでは比較的近距离でありながら線量率上昇の大きさの異なる青

Fig. 2 Maximum increase in dose rate (left) and 3-hourly precipitation (right).

Fig. 3 Time series of dose rate and precipitation at Obuchi, Kariwa-mura, Yonago-shi, and Chitose-daira.

森県六ヶ所村尾駁，及び千歳平を対象に，線量率上昇の大きさを決める要因を検討する。

Fig. 3の尾駁，千歳平の降水量を比較すると尾駁では継続的に0.5–1.5 mm/10 minの雨が降り続けているのに対し，千歳平では断続的に0.5 mm/10 minの雨が観測されているだけで降水量に大きな差があったことがわかり，これが線量率の差に表れていた。しかし，逆に降水強度が強い時刻に線量率が高くない場合（刈羽村の18日以降や米子市の14日等）もあり，降水強度と線量率上昇の関連性は明瞭には見られない。この結果から，今回の線量率上昇は降水が原因ではあるが，特異的に大きな値が観測された理由は降水とは別にすることが推察される。これについては，III章で大陸起源 ^{222}Rn の輸送過程との関係を議論する。

III 長距離大気輸送モデルによる ^{222}Rn 輸送過程の解析

1. モデル及び計算条件

線量率上昇時の上空の ^{222}Rn 濃度の広域的な分布及び輸送過程を把握するために長距離大気輸送モデルによる数値計算を行った。線量率上昇に寄与する核種は主に ^{222}Rn の短半減期壊変核種の ^{214}Pb 及び ^{214}Bi であり，これら核種の大気中濃度は局所的な ^{222}Rn の壊変による生成と壊変及び沈着による減少の釣り合いでほぼ決定され，これら壊変核種自体の長距離輸送の影響はほぼ無視できるため，長距離大気輸送の解析対象は ^{222}Rn のみとした。また，輸送の3次元構造と ^{222}Rn 濃度の絶対値を評価するために，以下に示すモデル構成とした。

計算にはHIRAO et al.⁶⁾により開発された3次元ラドン長距離輸送モデルを用いた。このモデルは，大気中の ^{222}Rn の起源及び輸送過程を明らかにするための数値計算モデルであり，コミュニティモデルとして広く用いられている完全圧縮・非静水圧近似の領域気象モデルWRF (Ver3.8)とHIRAO et al.が独自に開発したオフラインかつオイラー型の移流拡散モデルから構成されている。モデルの構成及びデータの流れの概略図をFig. 4に示す。領域気象モデルでは計算領域内の風速場及び乱流場（鉛直乱流拡散係数）3次元分布を計算し，その気象場に基づきラドン輸送を計算し，大気中ラドン濃度の3次元分布を得る。より詳細なモデルの記述は前出の参考文献⁶⁾に譲る。

今回計算した東アジア域の計算領域は領域気象モデル，移流拡散モデルともに130°E，43°Nを中心とした

Fig. 4 Schematic of the long-range radon transport model.

水平方向 7,776 km × 9,792 km (格子間隔 72 km 四方, 格子数 136 × 108 個) である。鉛直方向は 10 km までを下層ほど密に不等間隔に 30 層に分割し, 層厚は最下層で 10 m, 地上約 1 km で 250 m, 地上約 5 km で 1,000 m である。計算期間は, 計算領域内の地表面からの散逸に応じた大気中 ^{222}Rn 濃度場が形成されるまでの助走期間を含め 2015 年 11 月 1 日–2015 年 12 月 31 日とした。計算のタイムステップ及び出力間隔は気象モデルはそれぞれ 180 s, 3 h とし, 移流拡散モデルは 30 s, 1 h とした。

領域気象モデルの入力は, 気象場として気象庁全球客観解析データ (GANAL), 海面水温として気象庁全球日別海面水温解析データ (MGDSST), 土地利用として USGS (U.S. Geological Survey) 作成の植生・土地利用データ (Vegetation/Land-use Data) を用いた。また, ^{222}Rn 散逸率は, 陸地には SCHERY 散逸率分布⁸⁾の月別平均値を用い, 海面には 0.14 mBq/(m²s) の一定値を用いた。

2. 大気中 ^{222}Rn 量及び鉛直濃度分布

青森県六ヶ所村, 新潟県刈羽村及び鳥取県米子市上空について, ^{222}Rn 鉛直積分濃度の 12 月 13 日から 18 日までのモデル計算結果を Fig. 5 に示す。 ^{222}Rn 鉛直積分濃度は各地点の鉛直分布を地表面からモデル上端まで積分することで, 単位面積地表面上の気柱中の ^{222}Rn 量として算出した。

計算結果によると, 12 月 13, 14 日はいずれの地点も 2–6 kBq/m² 程度の比較的低い値であるが, 14 日夜からやや増加し, 16 日まで 6–8 kBq/m² でおおむね一定であるのに対して, きわめて高い線量率上昇があった 17 日の午後にはいずれの地点も 15 kBq/m² 程度の大きなピークを示している。Fig. 3 に示した顕著な線量率上昇の発生時刻及び継続時間は, この図の鉛直積分濃度のピークとよく対応している。例外は刈羽村で, 鉛直積分濃度は 17 日 17 時頃まで 12 kBq/m² 以上の高い値を示している一

Fig. 5 Trend in the vertically-integrated radon concentration calculated by the model.

方, 線量率は 16 時頃には減少している。この時刻は, 同地点での降水強度がきわめて弱くなった時刻に対応している。以上より, 線量率の顕著な上昇は, 上空の鉛直積分濃度が高く, かつある程度の降水強度がある場合に起こっていると結論される。また, この「ある程度の降水強度」は, II 章 3 節の議論と, Fig. 3 の 10 分間降水強度の時系列や Fig. 2 の 3 時間降水強度と線量率上昇の関係から, おおむね 1 時間降水量の目安として約 3 mm (Fig. 3) で示した降水強度の測定下限値である 0.5 mm/10 min が 1 時間継続した場合に相当) と評価される。

また, 各地点において上空の ^{222}Rn 鉛直積分濃度が極大に達した時刻 (六ヶ所村 12 月 17 日 14 時, 刈羽村同日 17 時, 米子市同日 17 時及び, 極大時以前 (14 日 15 時) の ^{222}Rn 濃度の鉛直プロファイルの計算結果を Fig. 6 に示す。六ヶ所村の 12 月 17 日 14 時の ^{222}Rn 濃度は 14 日 15 時に比べ地上から 1 km 付近まで約 10 Bq/m³ と極端に高くなっており, さらに 2 km まで逡減しつつも高い値である。また, 刈羽村, 米子市の地上 ^{222}Rn 濃度は約 7 Bq/m³ であり, 刈羽村は地上約 4 km まで漸減する分布, 米子市は地上約 3 km まで 5–7 Bq/m³ の比較的濃度の高い層が存在していることがわかる。いずれの地点でも, 上空 2–3 km までの範囲で 14 日に比べ濃度が顕著に高い。

上空の ^{222}Rn 濃度の実測値はこれまでほとんど得られていないが, HIRAO et al.⁵⁾ や筆者らの東アジア域対象の多数の数値シミュレーションでも, 上空 2–3 km で濃度が 5–10 Bq/m³ 程度に達することは希である。発生頻度を定量的に示すことは現段階ではできないが, これらのことから 12 月 17 日に日本列島上空の ^{222}Rn 濃度が通常時より顕著に高くなっていたと考えることができ, それが今回の大きな線量率上昇に寄与したと結論される。

^{222}Rn 壊変生成核種が多量に湿性沈着するためには, この ^{222}Rn 高濃度の高さ範囲と降水による壊変核種の取り込みの範囲が重畳する必要がある。対象地点上空の降水の構造を直接示すデータはないが, 六ヶ所村に最も近い気象庁の高層気象観測所である秋田では, 12 月 17 日 21 時には, 地上約 0.8 から 2.1 km まで相対湿度が 100% に近い層が存在し, 同時刻の 850 hPa 高層天気図では, 秋田及び六ヶ所村は同一の湿潤域 (気温と露点温度の差が 3 K 以下の領域) に含まれており, 両地点間ではこの湿度構造が類似していると考えられる。地上で降水が観測されていることから, この層では降水が形成されていると推定され, その鉛直範囲は前述の ^{222}Rn 濃度が高い層と対応する。また, この層の気温は約 0.8 km で

Fig. 6 Vertical profiles of ^{222}Rn concentration calculated by the model.

-4.4°C, 約 2.1 km で -14.1°C であることから, 雪による壊変生成核種の取り込みが起こっていたものと考えられる。しかし, 線量率測定地点上空での観測がないこと, また用いた気象モデルの降水再現精度の制約から, 現時点では沈着過程についてこれ以上の詳細な考察は困難である。

3. ^{222}Rn 長距離輸送過程

本節では, 2015 年 12 月 17 日の午後に日本列島全体で上空の ^{222}Rn 濃度がきわめて高くなった原因について, 該当期間の地上及び高層天気図と, ^{222}Rn 濃度のモデル計算結果を用いて解析する。本節の議論の主対象は, 高濃度 ^{222}Rn の発生域と輸送過程を明らかにすることである。

Fig. 7 に高線量率事象が発生した日より 2 日前からの 1 日ごとの地上及び高度 1,000 m でのモデル計算で得られた濃度の水平分布 (計算領域の一部) を示す。12 月 15 日 9 時には, 大陸東岸の地上で低風速による高濃度域が形成され, 中国北東部では高度 1,000 m でも 5 Bq/m³ を超える高濃度域が形成されている。その高濃度域は, 16 日から 17 日にかけて日本に向けて移動しており, 17 日 9 時時点では日本に達しており, 特に北陸から北海道にかけて濃度が高い状況にある。また, 水平分布で見ると, 日本周辺では大陸起源の ^{222}Rn 濃度は地表付近より高度 1,000 m の方が高く, 大陸上空での高濃度がほぼ維持されて日本に達しており, 上空経由の輸送が卓越していることが示されている。

高線量事象の原因である ^{222}Rn の由来を調べるために計算上での ^{222}Rn 発生領域を区切り, 六ヶ所村, 刈羽村, 米子市それぞれで高線量率が計測された時間に上空にあった ^{222}Rn への寄与の大きさを算出した。発生領域

の区切り方を Fig. 8 に示す。①から④の各領域からのみ ^{222}Rn が大気中に散逸するとして計算により各評価地点上空の濃度を 4 ケース独立に計算し, 寄与率を求めた結果を Table 1 に示す。この寄与率は, それぞれの地点で鉛直積分濃度が期間中に最大となった時間 (六ヶ所村: 17 日 14 時, 刈羽村: 17 日 13 時, 米子市: 17 日 16 時) について求めたものである。この結果から今回の高線量率事象の原因となった ^{222}Rn は対象の 3 地点のすべてで約 8 割が Fig. 8 の①の範囲 (中国北東部及びシベリア南東部) で, 日本から見て北西側の大陸起源であり, 日本列島や日本から見て南西方向の中国中央部及び南部からの寄与はほとんどないことが示された。また, さらに遠方の大陸内部からの寄与も小さいことがわかる。

次に今回の高線量率事象が起きた際の日本周辺の気象状況について Fig. 9 に 12 月 14 日 (左) と 15 日 (右) の 21 時の日本周辺の気象庁高層天気図 (850 hPa) を, Fig. 10 に 12 月 17 日 9 時の日本周辺の気象庁地上天気図を示す。Fig. 9 から, この期間において高線量率事象の原因となる ^{222}Rn の主要な寄与域である中国北東部に低気圧が存在していることがわかる。この低気圧は偏西風から切り離された寒冷低気圧で 12 月 14 日から 15 日にかけて中国北東部に停滞していた。したがって, この期間中国北東部では低気圧の範囲で上昇気流が継続的に発生しており, これによって低層の ^{222}Rn が上空に輸送され, 地上から比較的高い高度まで ^{222}Rn 濃度が高くなっていたと考えられる。この特徴は, 15 日 9 時の計算結果でも上空 1,000 m に 5 Bq/m³ を超える範囲が約 500 km 四方の範囲として現れている (Fig. 7 上段右図の白枠)。この高濃度域は, 1,000 m の高度で最大濃度 10.0 Bq/m³ であり, 5 Bq/m³ を超える濃度が高度 2,000 m まで及んでいるとの計算結果である。

Fig. 7 Horizontal distribution of the calculated ²²²Rn concentration at the surface (left) and 1,000 m (right) levels.

Fig. 8 Map of source areas for model calculations.

Table 1 Contribution (%) of each source area to the concentration calculated for air columns at the locations

	① N. E. China & S. E. Russia	② Cntl.-S. China	③ Japan	④ Others
Rokkasho-mura	78.1	2.4	0.5	18.9
Kariwa-mura	84.1	3.1	0.6	12.2
Yonago-shi	84.4	0.6	1.1	13.8

また、Fig. 10 より実際に線量率上昇があった時刻の数時間前である 12 月 17 日 9 時には日本付近は典型的な西高東低の冬型の気圧配置であり、等圧線の間隔も狭いことから大陸から日本列島に向かって強い風が吹いており、寒冷低気圧によって形成された比較的高い高度までの高 ^{222}Rn 濃度の気層が、短時間で日本列島まで輸送されてきていたと考えることができる。計算結果によると、17 日 9 時での日本海から北海道－東北北部に至る範囲での上空 1,000 m の風速 (Fig. 7 下段右側) は約 10 m/s であり、中国北東部からシベリア南東部の高濃度形成域から東北北部までの距離 1,000–1,500 km を約 2 日で移動する速度に相当する。

以上をまとめると、今回の高線量率事象の要因は大陸 (中国東北部) 由来の ^{222}Rn であり、1) 寒冷低気圧の停滞による継続的な上昇気流による中国北東部・シベリア南東部での上空 2,000 m 程度までの高 ^{222}Rn 濃度気団の形成、2) その後の冬型気圧配置にともなう季節風吹き出しによる高速での輸送、及び 3) 冬型気圧配置での日本海側での降水が重なったため起きた事象であったと結論される。本論文は事例解析に留まるため、このような事象がどの程度の頻度で起こるのか、またこれら 3 段階の過程が重なって起こることがどの程度の普遍性を持つのか (気象場の一連の変化の中である程度の必然性をもって起こるのか) についての考察はできない。

Fig. 9 Upper weather chart (850 hPa) at 21 JST December 14, 2015 (left) and 21 JST December 15 (right), issued by Japan Meteorological Agency.

Fig. 10 Surface weather chart at 09 JST December 17, 2015, issued by Japan Meteorological Agency.

IV 結 論

2015年12月17日に起こった青森県六ヶ所村の高線量率事象について原子力規制庁の放射線モニタリングデータと気象庁 AMeDAS データを用いて解析を行ったところ、今回の事象は日本海側を中心とした全国規模の事象であり、六ヶ所村以外でも北越地方、山陰地方で $0.1 \mu\text{Gy/h}$ を超える線量率を観測していたことが確認された。どの地点も高い線量率が観測された時間帯に降水が観測されていたが、降水の開始や極大と大きな線量率上昇は必ずしも対応せず、降水強度と線量率との明確な相関関係は見られなかった。

また、今回の事象を ^{222}Rn 長距離輸送の観点からモデル計算と天気図を用いて解析を行い、今回の事象が起こった主たる原因の一つとして、日本列島上空 2 km 程度まで ^{222}Rn 濃度が高くなっていた可能性が高いことが指摘された。この高濃度 ^{222}Rn は中国北東部・シベリア南東部由来であり、その領域での寒冷低気圧の停滞による継続的な上昇気流による高濃度層の形成、冬型の気圧配置に伴う季節風による速い輸送、及び冬型での日本海側での降水といった気象条件の重なりによって発生したとの結論を得た。

今回の解析は ^{222}Rn 輸送の観点を中心に行ったが、上空の ^{222}Rn 壊変生成核種の降水による湿性沈着の効率は考察できていない。また、空間線量率の測定条件の違い

などから線量率上昇の値と ^{222}Rn 濃度の関係の定量的評価は十分行うことができない。空間線量率測定点の周辺状況を加味することにより、線量率上昇値と ^{222}Rn 壊変生成核種の降水量の関係を定量評価することができれば、降水に伴う線量率上昇と長距離 ^{222}Rn 輸送の関係のより詳細な議論が可能になる。

謝 辞

本研究は科学研究費補助金（課題番号 17K08008）により行われたものである。

参 考 文 献

- 1) Aomori Prefecture; Nuclear facility environmental radiation survey report (Third quarter report 2015).
- 2) Y. INOMATA, Y. IGARASHI, M. CHIBA, M. AOYAMA, K. HIROSE, et al.; Estimate of return periods for enhanced gamma ray dose rates due to precipitation, *Jpn. J. Health Phys.*, **42**, 63–70 (2007) (in Japanese).
- 3) J. F. MERCIER, B. L. TRACY, R. D'AMOURS, F. CHAGNON, I. HOFFMAN, et al.; Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass, *J. Environ. Radioact.*, **100**, 527–533 (2009).
- 4) H. YAMAZAWA, M. MATSUDA, J. MORIIZUMI and T. IIDA; Wet deposition of radon decay products and its relation with long-range transported radon, proceedings of 8th international symposium on the natural radiation environment, *AIP Conf. Proc.*, **1034**, 149–152 (2008).
- 5) H. LIU, D. KONDO, M. MATSUDA, S. HIRAO, J. MORIIZUMI and H. YAMAZAWA; On the characteristics of the wet deposition process using radon as tracer gas, *Radiat. Protec. Dosim.*, **160**, 83–86 (2014).
- 6) S. HIRAO, H. YAMAZAWA, J. MORIIZUMI, K. YOSHIOKA and T. IIDA; Development and verification of long-range atmospheric radon-222 transport model, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 166–172 (2008).
- 7) J. MORIIZUMI, T. OHKURA, S. HIRAO, Y. NONO, H. YAMAZAWA, et al.; Continuous atmospheric radon-222 concentration observation in East Asia, *AIP Conf. Proc.*, **1034**, 181–184 (2008).
- 8) S. D. SCHERY and M. A. WASIOLEK; Modeling radon flux from the earth's surface, A. KATASE and S. SHIMO (eds.), "Radon and Thoron in the Human Environment," 207–217 (1998), World Scientific, Singapore.

- 9) S. HIRAO, H. YAMAZAWA and J. MORIIZUMI; Inverse modeling of Asian (222)Rn flux using surface air (222)Rn concentration, *J. Environ. Radioact.*, **101**, 974–984 (2010).
- 10) S. HIRAO, H. YAMAZAWA, J. MORIIZUMI and T. IIDA; Measurement and simulation of radon transport in East Asia and their implication on source distribution, IAEA Proceeding Series ‘Sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate and air quality studies,’ 135–140, 2012.
- 11) Nuclear Regulation Authority; Monitoring information of environmental radioactivity level [online]. Available at: <http://radioactivity.nsr.go.jp/map/ja/download.html>, Accessed 24 May 2016.
- 12) J. HIROUCHI, S. HIRAO, J. MORIIZUMI, H. YAMAZAWA and A. SUZUKI; Estimation of infiltration and surface runoff characteristics of radionuclides from gamma dose rate change after rain, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 48–55 (2014).

永井 英志（ながい ひでゆき）
2017 年名古屋大学工学部物理工学科卒業。現在名古屋大学大学院修士課程在学中。空間線量率の上昇のメカニズムについて研究中。

山澤 弘実（やまざわ ひろみ）
名古屋大学大学院工学研究科教授。日本原子力研究所主任研究員，名古屋大学准教授を経て 2009 年より現職。環境放射能の大気中動態及び大気拡散モデルの開発・検証が専門。

森泉 純（もりいずみ じゅん）

名古屋大学大学院工学研究科准教授。科学技術振興事業団特別研究員，名古屋大学助教を経て 2009 年より現職。専門は環境放射能，主に大気中ラドン，炭素 14 の動態解析。

平尾 茂一（ひらお しげかず）
福島大学環境放射能研究所講師。2015 年より現職。放射性核種の環境動態に関して観測・数値計算を用いて研究中。
E-mail: s-hirao@ipc.fukushima-u.ac.jp