

気象要素が大気中²²²Rn 濃度と空間 γ 線線量率の変動に及ぼす影響

武田尚彦 善家久隆 菅 忠明 友岡美智代 藤田慎二郎 篠原広充

Effects of Meteorological Factors on Variation of Atmospheric ²²²Rn Concentration and Gamma-Ray Dose Rate

Naohiko TAKEDA, Hisataka ZENKE, Tadaaki KAN
Michiyo TOMOOKA, Shinjirou HUIJITA, Hiromitsu SHINOHARA

The atmospheric ²²²Rn concentration was measured at the monitoring station in Ikata-cho from April, 2001 to March, 2002. As the result, seasonal and diurnal variation of the atmospheric ²²²Rn concentration were observed, and its annual mean value was 7.2 Bq m⁻³. The atmospheric ²²²Rn concentration increased in winter about the seasonal variation, suggesting that ²²²Rn came from distant place under the influence of the monsoon from north. The diurnal variation was considered to be due to the ²²²Rn accumulation by the formation of inversion layer.

The atmospheric ²²²Rn concentration depended on meteorological factors, such as rainfall, atmospheric pressure, temperature, humidity, wind direction, wind speed, and net radiation. It was most strongly influenced by rainfall.

Except the data measured in rainfall, the relationship between the atmospheric ²²²Rn concentration and the gamma-ray dose rate was depended on humidity most strongly, and its annual mean value of the contribution rate was 0.096nGyh⁻¹(Bqm⁻³)⁻¹.

Keywords : atmospheric ²²²Rn concentration, meteorological factors, gamma-ray dose rate

はじめに

愛媛県は伊方原子力発電所(以下発電所という)周辺における環境放射線等の状況を監視するため「伊方原子力発電所周辺環境放射線等調査計画」に基づいて調査を実施している。その調査項目の一つとして、伊方町に設置したモニタリングステーション(以下MSという)及びモニタリングポストにおいて空間 γ 線線量率の連続測定を行っており、発電所からの予期しない放射性物質の放出を監視している。

空間 γ 線線量率の変動要因としては、発電所からの放射性物質の放出以外にも、気象条件による自然放射性核種濃度の変化¹⁾、太陽の周期活動による宇宙線量の変化²⁾及び過去に行われた核実験等による人工放射性核種の降下³⁾などが報告されているが、近年の傾向として、その大部分は自然放射性核種濃度の変化によるものと考えられる⁴⁾。主な自然放射性核種としては、壊変系列をもつU、Th、Ac系列核種及び壊変系列をもたない⁴⁰Kが存在し、陸圏、水圏、大気圏に分布する。それらのうち

土壤に多く存在するU系列の²²⁶Raの壊変によって発生する²²²Rnは放射性希ガス(半減期3.824日)で、その娘核種である²¹⁴Pb等の壊変により発生する γ 線が自然放射性核種による空間 γ 線線量率の自然変動の主たる要因であるとされる⁵⁾。そのため大気中²²²Rn濃度を調査することは²²²Rn娘核種の動態を解明する上で有意義と考えられる。

²²²Rnの起源については大陸または海上由来の遠方成分と近距離から発生した近傍成分とがあり、遠方起源の²²²Rnについては、季節風が²²²Rn濃度の高い大陸から吹く場合と濃度の低い海上から吹く場合で季節変動を観測する例⁶⁾がある。近傍成分の²²²Rnについては、放射収支量の変化に伴う大気逆転層の形成により日内変動を観測する例⁷⁾が見られる。このような環境中における²²²Rnの湧出量や拡散挙動は、その地域の地形条件や気象条件に大きく影響を受ける事⁸⁾が知られている。

今回、平成13年度よりMSに²²²Rn濃度測定器を設置し、大気中²²²Rn濃度の連続測定を行い、大気中²²²Rn濃度と気象条件及び空間 γ 線線量率との関係について考察し、若干の知見を得たので報告する。

調査方法

- 測定場所：愛媛県西宇和郡伊方町九町越
愛媛県 MS 敷地内 標高約 190m (図 1, 2)
- 測定期間：平成 13 年 4 月 27 日～ 14 年 3 月 31 日
(11 月 12 日～ 28 日は機器調整のため欠測とした。)
- 測定：測定は 10 分間行い、1 時間値として平均したものを測定値とした。
- 測定器
○ラドン濃度測定器：AlphaGUARD (GENITRON 社製)
検出器：通気型電離箱
検出器容積：全容積 0.62L
有効容積 0.56L
サンプリング：パッシブ型
○空間 γ 線線量率測定器：2" ϕ \times 2" NaI (Tl) シンチレーション検出器 ADP-122R1 (アロカ社製)
温度補償, エネルギー補償回路付
3MeV 以下の γ 線を対象とする。
○波高分析器：ASU-352U (アロカ社製)
○気象測定器：MS 設置の風向風速計, 温度計, 湿度計, 気圧計, 雨量計, 放射収支計 (小笠原計器製作所製)

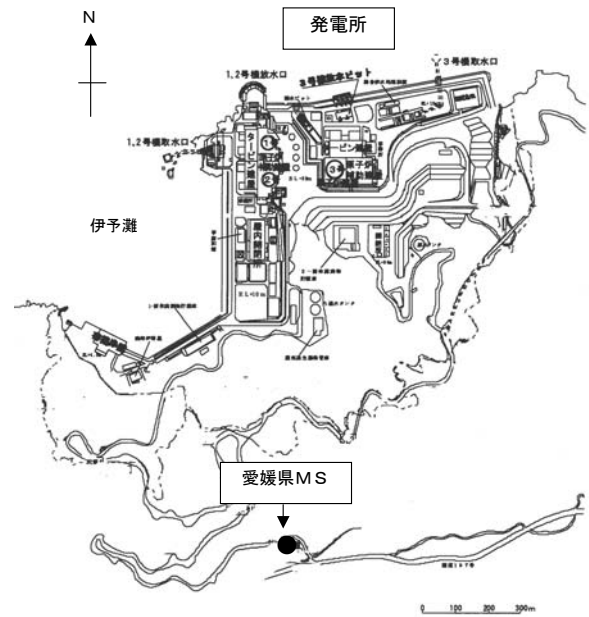


図 1 愛媛県 MS の位置

調査結果及び考察

1. 大気中²²²Rn 濃度

MS で測定された大気中²²²Rn 濃度は年間平均値として 7.2Bq/m³であった。屋外における大気中²²²Rn 濃度については、国連科学委員会では 10Bq/m³程度と推定²⁾している。また、国内の調査結果では全国平均値 6.1 Bq/m³ (愛媛地区 7.5Bq/m³) との報告⁹⁾がある。地表面からの距離など測定器の設置条件が異なるため、これらの結果と厳密な比較は出来ないが、ほぼ同等の測定値と考えられる。

これは、²²²Rn は主に土壌中の²²⁶Ra より壊変生成する¹⁰⁾が、MS における土壌中の²²⁶Ra 放射能濃度 (平成 13 年測定結果) が平均 53.7Bq/kg であり、標準的な土壌中²²⁶Ra 濃度 10 ~ 50Bq/kg の値¹⁰⁾とほぼ同等であること、また周辺には冷、温泉などの湧出もなく、MS の土壌が²²²Rn の湧出環境において特異なものではないと

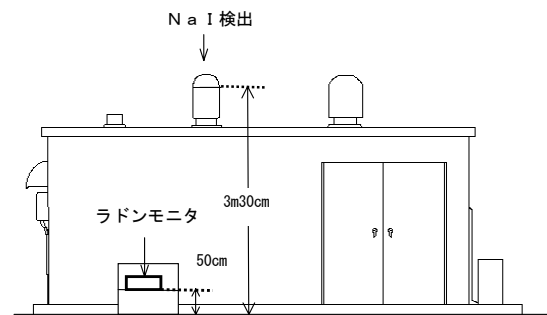


図 2 ラドンモニタ設置位置

判断されることから裏付けされる。

2. 大気中²²²Rn 濃度の季節変動

月毎の気象データを表 1 に、大気中²²²Rn 濃度の推移を図 3 に示す。大気中²²²Rn 濃度の季節変動については、一般的に夏は低く、冬に高いという報告¹¹⁾があるが、今回の結果も、春から梅雨時期は低く、冬に高くなる同様の傾向を示した。ただ、初夏にも上昇する傾向がみられ、これについては MS における 8 月以降の北よりの風の影

表 1 月毎の気象データ

月		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	年間
気温 (°C)	平均値	15.3	18.3	21.8	26.1	26.5	22.7	19.0	14.2	8.2	6.8	7.4	10.9	16.7
	最大値	20.0	25.6	29.1	33.1	33.2	28.6	25.2	20.7	15.0	16.9	14.0	20.6	33.2
	最小値	10.6	11.3	16.3	20.5	19.7	15.5	13.5	8.8	3.7	-1.4	1.7	4.2	-1.4
湿度 (%)	平均値	78.2	75.5	81.7	80.9	76.6	76.6	72.3	70.8	64.9	67.6	64.8	66.2	72.7
	最大値	96.0	96.0	96.0	95.0	94.0	94.0	94.0	94.0	95.0	95.0	96.0	95.0	96
	最小値	41.0	28.0	31.0	55.0	52.0	39.0	46.0	45.0	44.0	34.0	29.0	30.0	28
気圧 (hp)	平均値	993	988	987	988	987	990	995	996	1000	995	998	994	992
	最大値	998	997	994	993	997	1000	1005	1004	1007	1005	1007	1006	1007
	最小値	984	977	976	983	965	980	978	987	989	981	990	980	965
風速 (m)	平均風速	3.6	3.9	3.5	3.3	3.8	3.6	4.2	4.9	5.8	6.8	5.1	5.1	4.5
	最大風速	7.0	12.0	8.2	7.2	13.6	9.9	11.8	13.5	15.1	18.7	15.8	14.9	18.7
	最小風速	0.5	0.1	0.0	0.4	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	0.5	0.0
風向	最多風向	NNW	NNW	SSE	SSE	NNW	NNW	NNW	NW	NW	NW	NW	NNW	NNW
雨量 (mm)		25.0	151.5	234.0	88.5	108.0	147.5	257.0	78.5	75.5	52.0	38.5	121.5	1377.5
降雨時間 (時間)		35	99	153	40	53	91	115	62	86	113	52	76	975

響によると推察した。

大気中²²²Rn濃度が季節変動する原因の一つとして、季節風の風向の変化により大陸で発生した高濃度²²²Rnの飛来による影響が報告⁶⁾されている。MSにおいては、南よりの内陸風が支配的な6、7月は低い数値を示すが、8月以降北よりの風が支配的になると濃度の上昇を示し、風速が強まる1～3月にかけて最も高い数値を示す傾向であったことなどから、大陸より飛来した高濃度²²²Rnによる影響が示唆された。

測定地点近傍の²²²Rn発生については、降雨時間の影響が考えられ、特に梅雨の6月に低い数値を示す原因と考えられるが、これについては、4. 1)降雨の影響のところで考察する。また、夏季の上昇については、土壌中の水分量が減少するため土壌の空隙率が大きくなり、²²²Rnの湧出量が増加する²⁾ことも一因と考えられるが、いずれにしても、これらの推察は²²²Rnの発生地域が遠方か近傍かを特定するには至らず、季節変動の厳密な解析は困難である。この問題の解決には、大気中²²²Rn濃度の測定と並行して屋外の高純度Ge測定器による²²²Rn娘核種の連続測定が必要と考えられるが、これについては今後の検討課題である。

3. 大気中²²²Rn濃度の日内変動

年間を通じて、日内変動が最も顕著に現れた月は6、7月であった。例として7月の大気中²²²Rn濃度の日内変動を放射収支量及び空間γ線線量率の日内変動とともに図4～6に示す。なお、降雨時は降雨に伴った特異な変動を示すため除外している。

午前中に大気中²²²Rnが高濃度になる原因としては、放射収支量が負から正に転じた後、地上付近に大気逆転層が形成し²²²Rnが蓄積することによると考えられている⁷⁾。

空間γ線線量率については、大気中²²²Rn濃度の日内変動が数時間ずれた変動を示しており、これは²²²Rn濃度の増加に伴い、その娘核種が放射平衡に達する数時間後に上昇するためと考えられる。19時以降の夜間は²²²Rn濃度の上昇による空間γ線線量率への寄与が低下しているが、このことは午前と夜間で²²²Rnの拡散の仕方が異なる可能性を示唆するが、この原因については今後の検討課題としたい。

また、6、7月において日内変動が最も顕著に現れているが、この原因としては、6、7月は内陸風が支配し、大陸方面からの飛来が少なく、測定地点近傍の土壌より発生した²²²Rnが大気中濃度を支配するためと考えられる。

4. 大気中²²²Rn濃度と気象

1) 降雨の影響

降雨については、愛媛県と(株)四国電力設置の気象観測装置の雨量計、感雨計等の測定結果より判定している。大気中²²²Rn濃度の測定結果を降雨時と降雨時以外に分けると濃度の出現比率の分布は図7のようになり、降雨

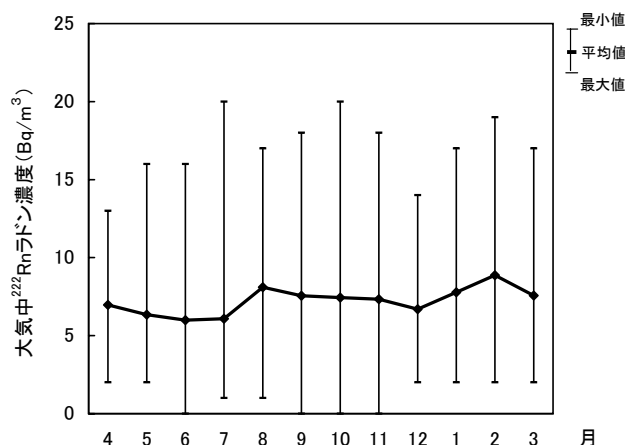


図3 大気中²²²Rn濃度の推移

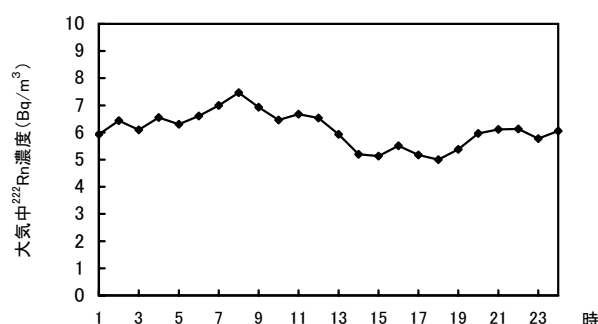


図4 7月の大気中²²²Rn濃度日内変動 (降雨時以外)

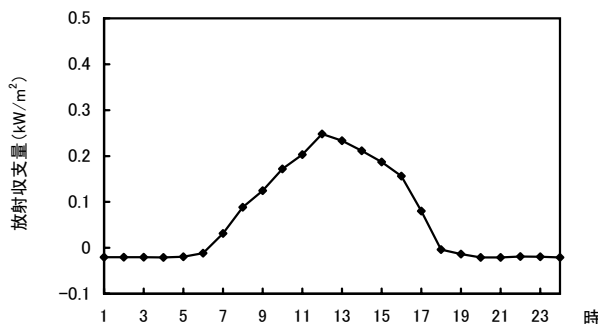


図5 7月の放射収支量日内変動 (降雨時以外)

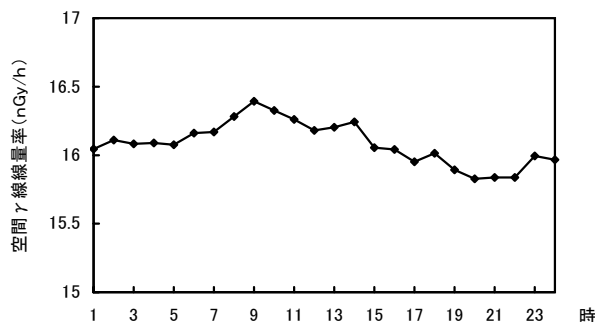


図6 7月の空間γ線線量率日内変動 (降雨時以外)

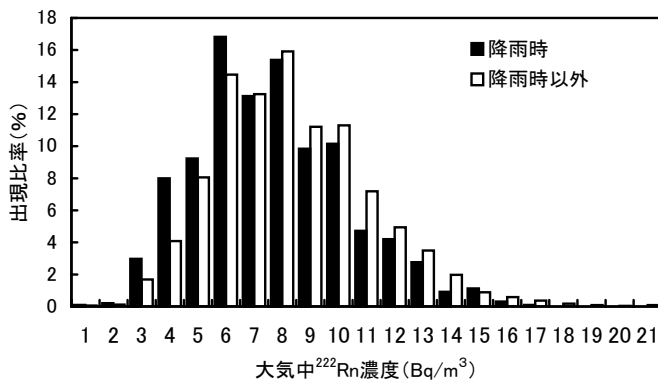


図7 大気中²²²Rn濃度 (Bq/m³)

時は $6.7 \pm 2.7 \text{ Bq/m}^3$ 、降雨時以外は $7.3 \pm 2.8 \text{ Bq/m}^3$ で降雨時以外の方が 0.6 Bq/m^3 高い。この差について t 検定による有意性検定を行うと、表2に示すように危険率1%で有意性が認められ、降雨時以外の方が明らかに大気中²²²Rn濃度は高い。

従来から愛媛県では空間γ線線量率については、降雨時と降雨時以外で測定値が明らかに異なることから、降雨時と降雨時以外に分けて評価してきた。平成13年度のMSにおける降雨時と降雨時以外の空間γ線線量率の測定結果を度数分布図として図8、9に示す。降雨時の空間γ線線量率の上昇は、固体²²²Rn娘核種がレインアウト、ウォッシュアウト効果で雨滴とともに降下するためとされる^{2),11)}。このことは線量率測定器付属の波高分析器シングルチャンネルアナライザー(以下SCAという)における²¹⁴Biの1764.5KeVに相当するγ線の計数率と空間γ線線量率の強い相関(図10)及びマルチチャンネルアナライザーによるスペクトル解析結果

表2 大気中²²²Rn濃度の降雨時と降雨時以外の母平均の差の検定結果

	降雨時	降雨時以外
平均値 (Bq/m ³)	6.7	7.3
標準偏差値 (Bq/m ³)	2.8	2.7
n数	975	6776
自由度	7749	
検定結果 $t=6.604 \gg T(0.01, 7749) = 2.576$		
危険率 ($T < t$) 両側	4.3E-11	
t-検定 (危険率1%有意)		

(図11)からも確認される。降雨時の大気中²²²Rn濃度と空間γ線線量率の時間推移の例を図12に示す。大気中²²²Rn濃度は降雨開始時には変動しないが、降雨が数時間続くと土壌からの湧出を妨げられ減少に転じている。空間γ線線量率は降雨開始時に雨滴と共に降下する²²²Rn娘核種の増加により顕著な上昇を示し、降雨強度が小さくなるにつれて下降に転じている。この現象は、大気中²²²Rn濃度と空間γ線線量率の相関が、相関係数として降雨時(図13)の方が降雨時以外(図14)より小さいことに反映される。

2) 気圧の影響

降雨時以外の大気中²²²Rn濃度と気圧との関係について、²²²Rnの拡散要素を一定にするため、風速が1m以下のときの大気中²²²Rn濃度を抽出して、測定器近傍から発生する²²²Rn量に及ぼす気圧の影響をみた。降雨時以外については、大気中²²²Rn濃度と気圧との間には負の相関関係がみられるとの報告¹²⁾があるが、今回の結果

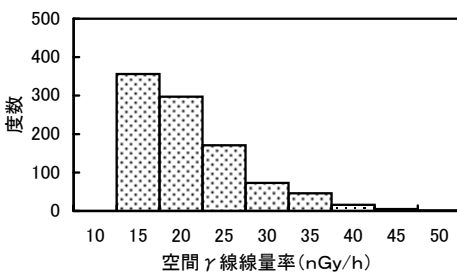


図8 降雨時の空間γ線線量率 (n = 965, 平均値 23.7nGy/h)

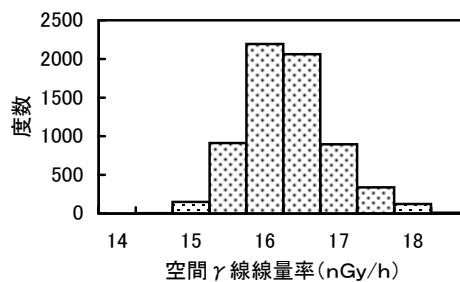


図9 降雨時以外の空間γ線線量率 (n = 6694, 平均値 16.5nGy/h)

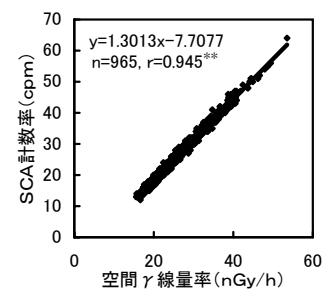


図10 降雨時の空間γ線線量率とSCA計数率の相関

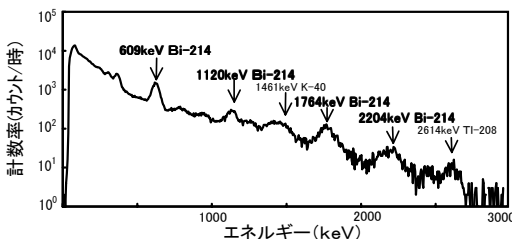


図11 降雨時「平均値+標準偏差の3倍」を超えたものの例 (8月26日5時 線量率 54nGy/h)

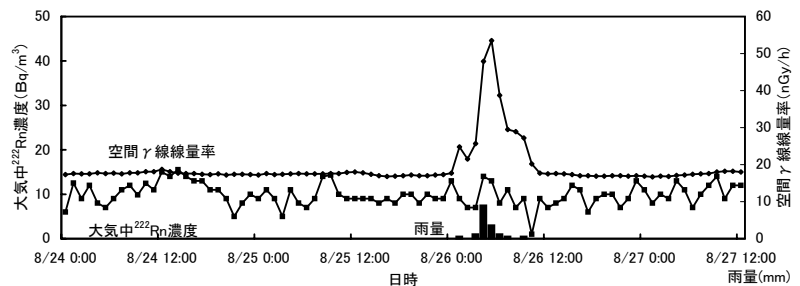


図12 降雨時の大気中²²²Rn濃度と空間γ線線量率の時間推移の例

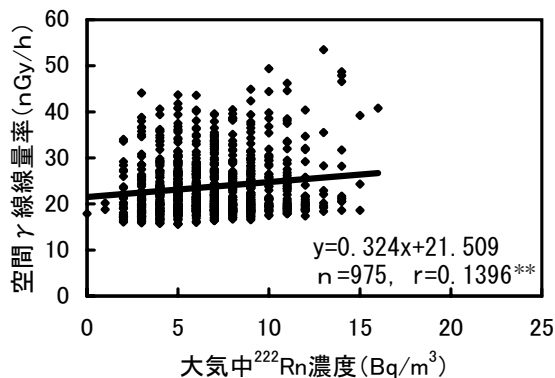


図 13 降雨時の大気中²²²Rn 濃度と空間γ線線量率の相関

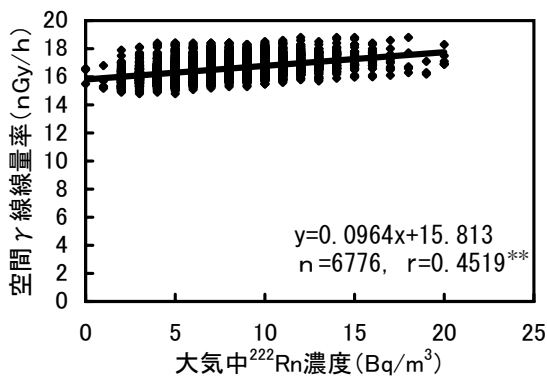


図 14 降雨時以外の大気中²²²Rn 濃度と空間γ線線量率の相関

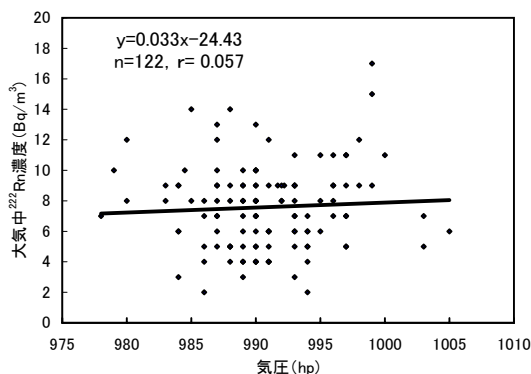


図 15 大気中²²²Rn 濃度と気圧の相関 (全風向, 風速 1m 以下)

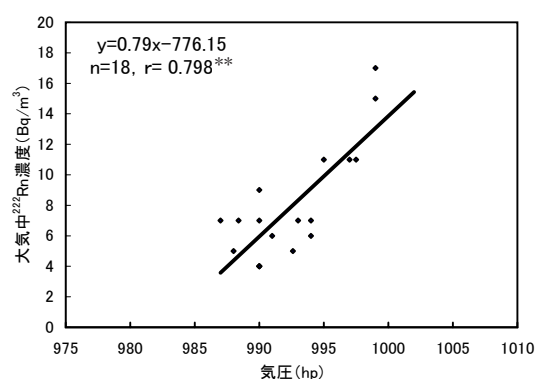


図 16 大気中²²²Rn 濃度と気圧の相関 (風向 SSE, 風速 1m 以下)

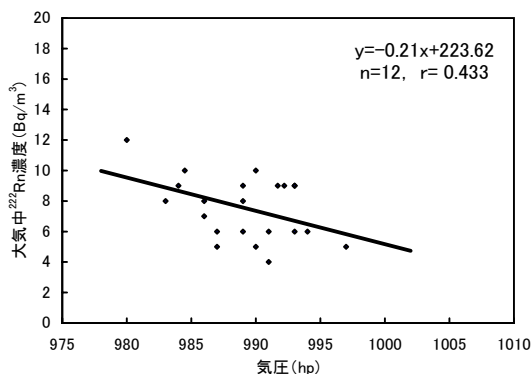


図 17 大気中²²²Rn 濃度と気圧の相関 (風向 NW, 風速 1m 以下)

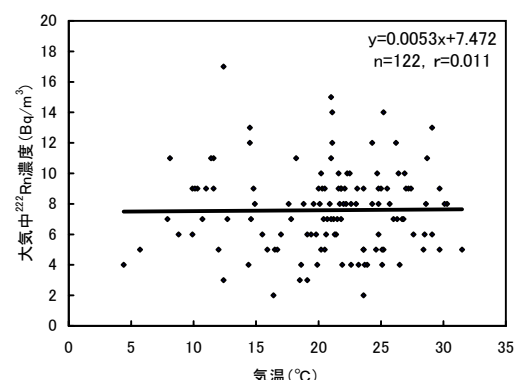


図 18 大気中²²²Rn 濃度と気温の相関 (全風向, 風速 1m 以下)

では、大気中²²²Rn 濃度と気圧との間には相関関係は認められない(図 15)。しかし、風向の要素から、南南東の風の場合(図 16)と北西の風の場合(図 17)に分けて大気中²²²Rn 濃度と気圧の関係をみると、南南東の風の場合は強い相関関係が認められる。大気中²²²Rn 濃度と気圧との間に風向の要素を加味した場合、特定の風向において相関が認められる点については更に検討したい。

3) 気温の影響

気圧の場合と同様、風速が 1 m 以下のときの大気中²²²Rn 濃度を抽出して、測定器近傍から発生する²²²Rn 量に及ぼす気温の影響をみた。気温の影響については、国連科学委員会では、はっきりした相関関係は認められないと報告¹⁰⁾しているが、地域によっては、辻本らによる

大気中²²²Rn 濃度と気温との間に負の相関関係が認められるとの報告¹³⁾もある。今回の結果では大気中²²²Rn 濃度と気温の間には、はっきりした相関関係は認められなかった(図 18)。

5. 大気中²²²Rn 濃度と空間γ線線量率

降雨時以外における大気中²²²Rn 濃度と空間γ線線量率との間には、正の相関関係が認められることを前述した(図 14)。図 14 は全データについて処理したが、各月について両者の関係をみると、表 3 のとおりとなり、相関係数は 0.191 ~ 0.631 で変動しているが、すべて 5% 以内の危険率で有意性が認められた。ここで両者の関係における一次回帰式の傾きは大気中²²²Rn 濃度の単位あたりの増加がどの程度空間γ線線量率の上昇に寄与して

いるかを示しており、この寄与率は図19～22の太線で示すように0.033～0.137 [nGy/h] / [Bq/m³]の範囲で変動し、7月が最も大きく、2月が最も小さい。寄与率については室内で²²²Rn 娘核種が一様に拡散したとき、半径15m球では0.018 [nGy/h] / [Bq/m³]、半無限球では0.385 [nGy/h] / [Bq/m³]と黒澤ら¹⁴⁾は推定している。この報告をもとに、今回のMSにおける降雨時以外の年間寄与率の結果0.096[nGy/h]/[Bq/m³]について、大気中²²²Rnとその娘核種が放射平衡であったとして評価すると、線量率測定器の十数m範囲内の比較的近傍に分布する大気中²²²Rn 娘核種の濃度変動が空間γ線線量率の変動に寄与する可能性を示唆した。

寄与率と気象要因との関係を見ると表4のように湿度との関係が最も強く次に気温で、風速と気圧は負の関係である。さらに寄与率の年間変動と気象要因の変動を時系列に示し、相互の関係を見ると(図19～22) 寄与率

の変動パターンに最も相似しているのはやはり湿度であるが、この理由については今後の検討課題である。

6. 今後の調査

平成13年度は²²²Rn濃度測定器を地表面近くに設置し測定を行ったが、平成14年度は空間γ線線量率との相関をより厳密に確認するため、測定位置をMS局舎屋上の空間γ線線量率測定器の近傍とし調査を続行している。この調査結果により、高度の違いによる大気中²²²Rn濃度の垂直分布傾向についても知見が得られるものと考えられる。

まとめ

平成13年度より、空間γ線線量率の変動に寄与すると考えられる大気中²²²Rn濃度を、愛媛県が設置した伊方町MSで連続測定し、大気中²²²Rn濃度の変動と気象条件の関係について調査するとともに空間γ線線量率の

表3 降雨時以外の大気中ラドン濃度の空間線量率との関係

月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
測定回数(1時間値)	60	643	567	704	691	629	629	280	653	631	620	669
相関係数 r	0.305*	0.481**	0.476**	0.631**	0.524**	0.528**	0.274**	0.191**	0.300**	0.368**	0.210**	0.378**

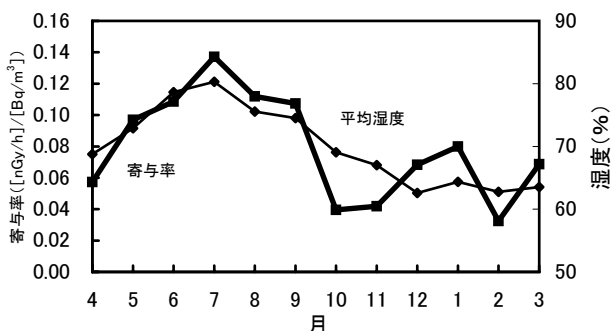


図19 寄与率と湿度

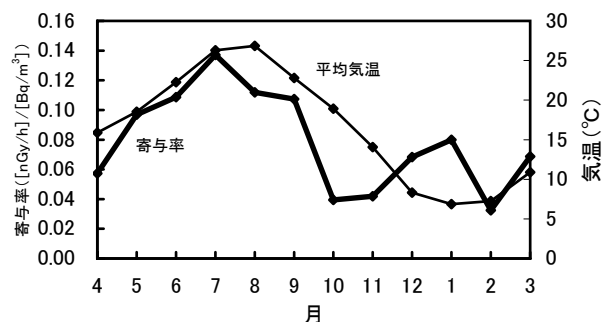


図20 寄与率と気温

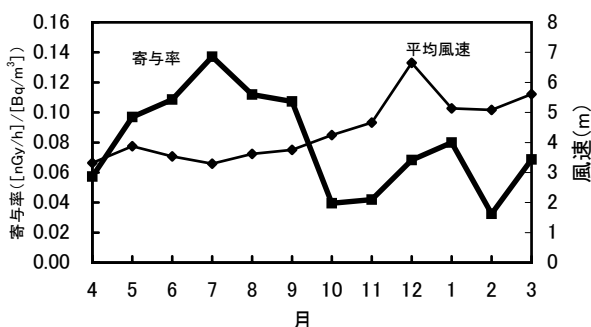


図21 寄与率と風速

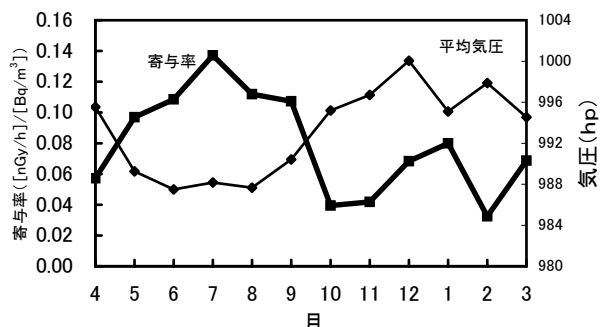


図22 寄与率と気圧

表4 寄与率と気象要因との相関係数 r

	湿度 (%)	気温 (°C)	風速 (m)	気圧 (h p)
寄与率 ([nGy/h] / [Bq/m ³])	0.812**	0.708*	-0.496	-0.850**

変動に及ぼす大気中²²²Rn濃度の影響について考察した。

その結果、地表より50cmでの大気中²²²Rn濃度は年間平均7.2Bq/m³で国内外の数値と同等の値であった。また大気中²²²Rn濃度の季節変動や日内変動が認められ、季節変動については、冬季の大気中²²²Rn濃度上昇より、北よりの季節風の影響で大陸性の遠方由来²²²Rnが飛来することが示唆された。日内変動については、大気逆転層の形成に伴う²²²Rnの蓄積が考えられた。

大気中²²²Rn濃度は降雨、気圧、気温、湿度、風向、風速、放射収支量などの気象条件により影響を受けるが、特に顕著な影響を及ぼす要素は降雨であった。

降雨時以外については、大気中²²²Rn濃度と空間γ線線量率の間には有意な相関関係が認められ、空間γ線線量率に寄与する大気中²²²Rn濃度の割合が、寄与率として年間0.096 [nGy/h] / [Bq/m³]であったことから、大気中²²²Rnとその娘核種が放射平衡であったとすると、十数m近傍の²²²Rn娘核種の濃度変動が空間γ線線量率の変動に寄与する可能性を示唆した。寄与率の変動パターンに最も相似しているのは湿度であったが、この理由については今後の検討課題である。

文 献

- 1) 環境放射線モニタリング, 財団法人原子力安全研究協会 (1992)
- 2) UNSCEAR: SOURCES AND EFFECTS OF

IONIZING RADIATION (2000)

- 3) 矢野隆司ほか: 愛媛県公害技術センター所報, 8, 42~47 (1986)
- 4) 菅 忠明ほか: 愛媛県立衛生環境研究所年報, 3, 81~86 (2000)
- 5) 下 道国ほか: 続大気中のラドン族と環境放射能, ラドン族調査研究委員会, 119~125 (1990)
- 6) 今野達矢: 宮城県原子力センター年報, 18, 12~19 (2000)
- 7) 藤波直人: 大気中のラドン族と環境放射能, ラドン族調査研究委員会, 99~105 (1985)
- 8) 西川嗣雄ほか: 続大気中のラドン族と環境放射能, ラドン族調査研究委員会, 151~155 (1990)
- 9) 菅野信行ほか: 第42回環境放射能調査研究成果論文抄録集, 科学技術庁, 34~35 (2000)
- 10) UNSCEAR: IONIZING RADIATION SOURCES BIOLOGICAL EFFECTS (1982)
- 11) 環境放射線モニタリング, 財団法人原子力安全研究協会, 80, (1992)
- 12) 岡部 茂: 続大気中のラドン族と環境放射能, ラドン族調査研究委員会, 1~16 (1990)
- 13) 辻本 忠ほか: 大気中のラドン族と環境放射能Ⅲ, ラドン族調査研究委員会, 65~68 (1995)
- 14) 黒澤龍平ほか: 東大炉室内のガンマ線線量に対するラドン・トロンに寄与に関する研究 (2000)