

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：21601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13620

研究課題名（和文）大気ラドンは地震をとらえているのか？：大気と地中の同時測定による検証

研究課題名（英文）Does radon concentration in the air respond to earthquake occurrence?: Examination from simultaneous radon measurements in the air and ground

研究代表者

大森 康孝 (Omori, Yasutaka)

福島県立医科大学・医学部・助教

研究者番号：70637602

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：大気中に含まれる気体のラドンが、大地で発生する地震のシグナルをとらえている可能性がある。本研究では、大地から大気へのラドンの輸送を明らかにするため、大気と土壌のラドン濃度および地表面のラドン・フラックス（ラドン放出量）の同時測定をおこなった。その結果、ラドン・フラックスの変化は、夜間における大気中ラドン濃度の変化量として表れることが分かった。また、ラドン・フラックスが高い時期と土壌ラドン濃度が低い時期が概ね一致し、土壌ラドン濃度がラドン・フラックスに対して土壌間隙水の変化を通じて受動的に変動することを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果、大地から大気へのラドン輸送のメカニズムが明らかとなった。地震発生に伴って大気ラドン濃度が異常に変化した場合、異常が発生した時間帯をみることでラドンがどの地点から放出されたのかを特定することができる。さらに、本研究では土壌ラドン濃度はラドン・フラックスに対して受動的に変化した。今後多様な土壌種で土壌ラドン濃度とラドン・フラックスの関係を明らかにすることができれば、どこが主なラドン放出源となりうるか推定することができる。これらにより、地震発生とラドンの関係に関する理解が深化すると期待される。

研究成果の概要（英文）：Radon in the air may respond to occurrence of earthquakes. In this study, simultaneous measurements of radon concentrations in the air and soil and radon flux at the ground surface were performed to clarify radon transport from the soil to the air. The results showed that nocturnal evolution of the radon concentration in the air increased with the radon flux. In addition, the period when the radon flux was high fairly coincided with the period when soil radon concentration was low. This finding implied that soil radon concentration varied passively with the radon flux through the variation in soil moisture.

研究分野：保健物理

キーワード：ラドン フラックス 土壌 大気 気象 地震

## 1. 研究開始当初の背景

土壌や地下水に存在するラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) の濃度が地震発生前に異常な変化を示すことがしばしば報告され、地震予知を目指した研究が長くおこなわれてきた (Woith H., *Euro. Phys. J.*, 2015)。しかし、異常な変化が発生した時期と地震発生時期が近接していることを除くと、地殻歪 (大地の伸縮) や地震発生数との関係など地震と直接関連づける根拠が乏しく、そのメカニズムが科学的に立証された例はない。

申請者は、従来の研究とは異なり、世界に先駆けて大気ラドンに注目し、地震との関係を解き明かそうとしてきた。これは、大気ラドン濃度が変動する原因が大気安定度の変化や日本に到来する気団の季節的な変化などと明らかで (Omori Y., *Radiat. Meas.*, 2009; Omori Y., *Boundary-Lay. Meteorol.*, 2016)、土壌や地下水中のラドン濃度と比較してデータの解釈が容易なことによる。この特徴に基づき、2011年の東北地方太平洋沖地震や和歌山県北部地震では、地震に伴う大気ラドンの増加を発見した (Hayashi K., Omori Y., *J. Environ. Radioact.*, 2015; Goto M., Omori Y., *Radiat. Prot. Dosim.*, 2016)。さらに、ラドン濃度が地震発生前に生じた地殻歪の変化に応じて変動していることを見出し、地球物理学的現象 (地殻歪) と地球化学的現象 (大気ラドン) の明確なつながりを明らかにした (Yasuoka Y., Omori Y., *Phys. Chem. Earth*, 2009)。

大気ラドンの増加は、大気安定度や気団の変化を除くと、土壌からのラドンの供給量 (ラドン・フラックス) の増加を意味する (Omori Y., *Radiat. Meas.*, 2009; Yasuoka Y., Omori Y., *Appl. Geochem.*, 2012)。すなわち、土壌のラドンが増加し大気へ放出された結果、大気ラドンが増加したと考えられる。しかし、このことは直接確認されておらず、土壌ラドンの増加が本当に大気ラドンの増加をもたらすのか、もし土壌と大気ラドンが直接リンクする場合、両者の関係はどのような特徴を有するのかなど、土壌から大気へのラドンの輸送過程を明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

上記の背景を受けて、大気と土壌のラドン、さらに両者をつなぐキー・パラメータとなる地表面のラドン・フラックスを同時に測定することで三者の関係を明らかにし、土壌から大気へのラドンの輸送過程を明らかにすることを着想した。そこで、大気ラドン、土壌ラドンおよびラドン・フラックスを測定するシステムを構築するとともに、各パラメータに対する気象の影響を整理し、各パラメータ間の相関関係を調べることにより土壌から大気へのラドンの輸送過程を解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) ラドン測定系の検討

本項では、ラドン測定に対するトロン ( $^{220}\text{Rn}$ ) の影響に関する検討およびラドン・フラックス測定系におけるポンプ流量の最適化をおこなった。

環境中にはラドンの放射性同位体であるトロン ( $^{220}\text{Rn}$ ) が存在する。トロンはラドンと物理化学的性質が同じ (半減期を除く) ため、ラドン測定を妨害する因子となる。そのため、本研究で使用する2種類の測定器について、どの程度トロンの影響を受けるか評価した。評価には、トロン濃度を一定に保つことができるトロンチャンバーを用いた。トロン空気に測定器を曝露し、トロン濃度に対する測定器の指示値をトロンの影響度とした。

ラドン・フラックスの測定方法は、地表面に容器を設置し、容器内に蓄積したラドンをポンプで測定器へ吸引して測定する方法を採用した。この方法は測定系のポンプ流量の影響を受けることが予想される。そこで、ポンプ流量の値を変化させてラドン・フラックスの変化を調べ、それらの影響を受けないポンプ流量を決定した。

### (2) ラドン・気象要素の観測

大気・土壌ラドン濃度、ラドン・フラックスならびに大気および土壌の気象要素の連続観測をおこなった。観測は、棚倉破砕帯南端に位置する茨城県北部でおこなった。観測地は、東日本太平洋沖地震の発生以降、地震が活発化した地域に隣接している。

大気ラドン測定では電離箱式ラドン測定器を用い、土壌ラドン測定およびラドン・フラックス測定では半導体式ラドン測定器を用いた。土壌ラドン測定では、深さ 20 cm、40 cm、80 cm に測定器を設置し、「(1) ラドン測定系の検討」によりトロンの影響を低減する措置を施した。

気象要素の測定では、気温、湿度、大気圧を測定するとともに、深さ 0 cm、20 cm、40 cm、80 cm における土壌の温度と水分を測定した。

## 4. 研究成果

### (1) ラドン測定系の検討

大気ラドンの測定で使用する測定器は、トロンの影響度が 8%であった。大気中トロン濃度は

ラドン濃度よりも概して低いため、トロンの影響は無視しうると考えられた。また、土壌ラドンの測定で使用する測定器は、トロンの影響度が34%であった。トロンへの防護措置を取った結果、トロンの影響度は無視できるレベルまで低減した。この措置によるラドン測定への影響は認められなかった。

ラドン・フラックス測定系のポンプ流量依存性については、ポンプ流量が0.15 L/min以下では評価されたラドン・フラックスは一定の値を示したが、0.15 L/minを超えると流量が増加するに従ってラドン・フラックスは増加した(図1)。流量の増大に伴い捕集された空気が測定器へ達するまでの時間が短縮され、十分に放射壊変しなかったトロンを測定器がラドンとして誤って検出する。さらに、流量の増大に伴い測定系容器内の圧力が低下し陰圧状態となるため、土壌空気の吸い上げが生じる。これらの要因が、ラドン・フラックスの見かけ上の増加をもたらしたと考えられる。本結果より、ラドン・フラックス測定系のポンプ流量を0.15 L/minより低い0.10 L/minに決定した。

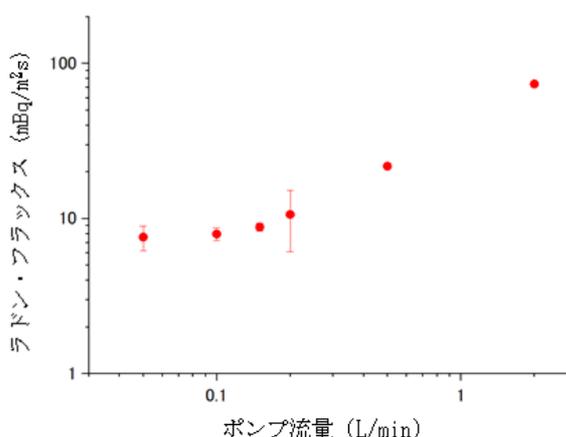


図1. ラドン・フラックスのポンプ流量依存性

## (2) ラドン観測

大気ラドン濃度は、日中に低く、深夜から早朝に高くなる日変動を示し、気温の変化とは逆相関を示した。これは、日中は地表面が日射で温められて大気が不定となり、夜間は地表面が冷却されて大気が安定となる、大気の熱的安定層の消失と生成に起因する(Omori Y., *Radiat. Meas.*, 2009; Omori Y., *Boundary-Lay. Meteorol.*, 2016)。つまり、夜間の熱的安定層の生成で地表面から散逸したラドンが地表近くの大气にトラップされ濃度が増加し、日中は熱的安定層が消失し大気混合が活発化して、地表近くにトラップされたラドンが上空などに拡散すると考えられた。また、大気ラドン濃度の日最小値は、春から夏に低く、秋から冬に高くなる傾向を示した。これは、広域大気輸送に起因する変動であると考えられた(Omori Y., *Radiat. Meas.*, 2009)。観測地点を含む太平洋沿岸域では、夏には海洋性気団が到来し、冬には大陸性気団が到来する。ラドンの発生源は陸域であるため大陸性気団の方がラドンを多く含む結果、冬の大気ラドン濃度が高くなると考えられる。他方、日変動の振幅は夏と冬に極大値をとった。これは、広域大気輸送以外の局地的な影響に起因すると示唆される。

ラドン・フラックスは、夏に高くなり冬から春に低くなる季節変動を示した。この季節変動の一部は、類似の傾向を示す土壌温度の変化に起因すると考えられる。土壌温度が高くなると、土壌粒子からのラドンの生成や土壌空隙中の拡散による移動が促進される。さらに、水蒸気はラドンを運ぶキャリアガスとして機能する。土壌水分の観測では、降雨(または降雪)により土壌水分が増加した時、夏ではその後の土壌水分の減少が著しいが、冬では減少幅が小さく比較的土壌水分を保持しやすい傾向であった。これは、土壌温度が高いため土壌水分の蒸発が促進されたことを意味する。したがって、水蒸気の生成がラドン・フラックスの増加に寄与している可能性もある。また、ラドン・フラックスの日変動は概ね認められなかったが、夏の限られた期間において夜に増加し昼に減少する日変動が認められた。この期間は土壌温度が気温よりも高い傾向にあったことから、日変動は温度逆転による熱的不安定性とそれを解消するための対流の誘起に起因すると考えられた。さらに、降雨に伴いラドン・フラックスが短期的に最大で1桁程度上昇する現象が確認された。しかし、全ての降雨で生じてはならず、雨水が土壌深度80 cm程度まで浸透する降雨のときに認められたが、雨水が土壌深度20 cm程度までしか浸透しないような少雨では認められなかった。これは、地表面が雨水でキャップされたことにより、雨水の影響を受けていないラドン・フラックス測定系の設置面から選択的にラドンが散逸したためと考えられる。これに加えて、雨量に依存することから、土壌空気が雨水の浸透によって加圧されて移流が生じたためと考えられる。

土壌ラドン濃度は10 kBq/m³程度の値を示し、土壌深度が深くなるにしたがってラドン濃度が高くなる傾向にあった。気温や土壌温度の変化に対応する日変動や、大気圧変化による変動、季節変動は、20 cm、40 cm、80 cmのいずれの深さにおける観測でも認められなかった。他方、数日から半月スケールの変動が認められ、この変動は春から秋にかけて顕著であった。さらにこの変動は、降雨に伴う雨水の土壌への浸透とその後の蒸発に起因する土壌水分の変化と連動していた。特に、深さ80 cmにおけるラドン濃度は、同深度よりも地表の土壌水分の変化によく応答した。このことから、土壌ラドン濃度の変動は、同深度において土壌粒子からのラドン生成が変化したことよりも、土壌の空隙が水で満たされてラドンの地表への移動が抑制されたことが要

因であると考えられた。

(3) 大気ラドン、土壌ラドン、ラドン・フラックス間の関係

大気ラドン濃度とラドン・フラックスの関係では、日最小値同士の比較では相関は認められなかった。大気ラドンの日最小値は、日中の大気がよく混合された状態のときに測定される。他方、ラドン・フラックスの日最小値は、大気へ供給されるラドンの量の観測地におけるベースラインであると考えられる。したがって、日最小値同士の比較で相関が認められなかったことは、日中に検出される大気ラドンで観測地に起源を有するラドンはごくわずかであることを意味する。また、大気ラドンの日変動の振幅とラドン・フラックスの比較では相関が認められた。特に、夜間における地面からのラドンの供給量と大気ラドン濃度の増加の間には強い相関が認められた(図2)。これは、大気安定層の形成により、観測地近傍で生成されたラドンの大気ラドンに寄与する割合が増大したことを意味する。

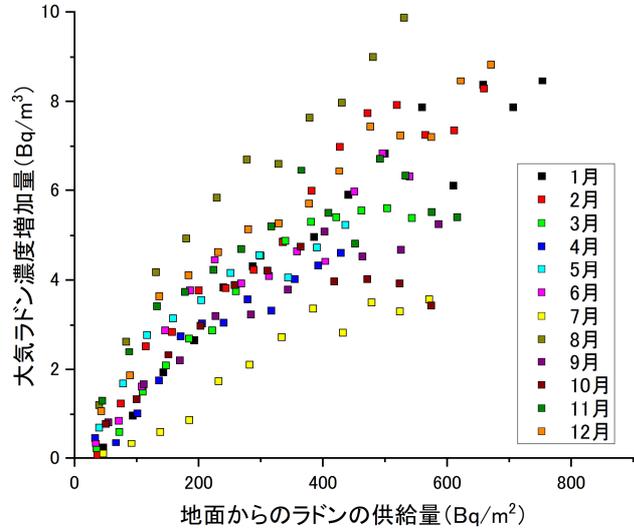


図 2. 大気ラドン増加量と地面からのラドン供給量の比較

土壌ラドン濃度とラドン・フラックスの関係では、ラドン・フラックスが高い時期と土壌ラドン濃度が低い時期が概ね一致した。ラドン・フラックスと土壌ラドンをつなぐ重要なパラメータは土壌水分であると考えられる。土壌ラドン濃度は土壌水分の変化に依存し、日射により土壌水分が減少するにしたがって土壌ラドン濃度が減少する傾向にあった。これは、土壌間隙水が減少することによる地表への流路の形成や、蒸発した土壌間隙水によるラドンの運搬を示唆する。これらの結果、ラドンの地表への移動が促進され、土壌ラドン濃度が減少するとともに、地表へ移動したラドンが大気へ散逸してラドン・フラックスが増加したと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Omori Yasutaka, Tamakuma Yuki, Nugraha Eka Djatnika, Suzuki Takahito, Saputra Miki Arian, Hosoda Masahiro, Tokonami Shinji	4. 巻 17
2. 論文標題 Impact of Wind Speed on Response of Diffusion-Type Radon-Thoron Detectors to Thoron	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Research and Public Health	6. 最初と最後の頁 3178 ~ 3178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijerph17093178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Omori Yasutaka, Nagahama Hiroyuki, Yasuoka Yumi, Muto Jun	4. 巻 11
2. 論文標題 Radon degassing triggered by tidal loading before an earthquake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4092 ~ 4092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-83499-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大森康孝
2. 発表標題 天然放射性核種ラドン測定に対する放射性同位体トロンの干渉
3. 学会等名 放射性物質環境動態・環境および生物への影響に関する学際共同研究 2018年度キックオフミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大森康孝
2. 発表標題 天然放射性核種ラドン測定に対する放射性同位体トロンの干渉
3. 学会等名 放射性物質環境動態・環境および生物への影響に関する学際共同研究 2018年度最終報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森康孝、玉熊佑紀、鈴木崇仁、Nugraha Eka Djatnika、Saputra Miki Arian、細田正洋、床次眞司
2. 発表標題 拡散型ラドン・トロン測定器に使用される子孫核種除去フィルタのトロン浸透特性
3. 学会等名 日本保健物理学会第52回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森康孝、玉熊佑紀、鈴木崇仁、Nugraha Eka Djatnika、Saputra Miki Arian、細田正洋、床次眞司
2. 発表標題 ラドン・トロン拡散型測定器に使用される子孫核種除去フィルタのトロン浸透率
3. 学会等名 放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点2019年度年次報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大森康孝
2. 発表標題 地表ラドン散逸率の変動要因：多深度土壌ラドン濃度測定に基づく検討
3. 学会等名 日本保健物理学会第53回研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

潮汐に由来する大気中ラドン濃度の変動を検出 ～兵庫県南部地震発生前の5年間に周期的に変動～  
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/02/press20210219-02-radon.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------