

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）地殻変動に伴う大気中ラドン濃度変動

（英文）Fluctuations in atmospheric radon concentrations associated with crustal deformation

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地震発生確率の時間更新予測

イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 本課題の5か年の到達目標：

全国の放射線管理（RI）施設に協力を求めてRI施設ネットワークの拡大を図り、地殻変動に関連した大気中ラドン濃度変動のメカニズム解明と先行傾向の統計的評価を目指す。大学及び研究機関のRI施設から得られた排気データを用いて、広域な大気中ラドン濃度変動解析を進める。特に、地殻変動や地震・火山活動のデータに限らず、地球潮汐データ、電磁気学的データ（たとえば、大気電位データ）、地下水データなどと大気中ラドン濃度の異常発生との統計的な相関を調べ、地震・火山噴火に対する中短期的な先行性を評価することを目的とする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

令和6年度は、地殻変動モニタリングに使用できるRI施設に協力を求め、全国をくまなくカバーすることのできる全国放射線管理施設ネットワークの拡大を進める。大学及び研究機関の各放射線管理施設から得られた排気データを用いて、広域な大気中ラドン濃度変動解析を進める。得られたデータを対象に、機械学習等のデータ駆動手法を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みる。2年目（令和7年）以降においても、地殻変動モニタリングに使用できる放射線施設に協力を求め、全国をくまなくカバーすることのできる全国放射線管理施設ネットワークの拡大を進めつつ、広域な大気中ラドン濃度変動解析を行う。

各年度において大気中ラドン濃度の異常変動発現メカニズムの解明と機械学習等のデータ駆動手法を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みる。特に、特異スペクトル変換法による大気中ラドン濃度変動の異常判定やランダムフォレスト・ARIMA・ニューラルネットワーク法による時系列解析を行い、大気中ラドン濃度に及ぼす地殻変動の効果を明らかにする。また各種放射線計測機器を用いた空気中へのラドン散逸の動態解明を目指した環境放射能および放射線計測を行う。

(7) 令和6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1) 全国規模で混の放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築や測定データの解析

令和6年度までに29施設の全国医薬系放射線管理施設が参画した。今年度は、星薬科大学（東京都品川区）から2017年1月以降のデータ、獨協医科大学（栃木県）から2018年9月以降のデータ、さらに金沢医科大学（石川県）から2002年5月以降を入手し、解析を進めている。さらに、これまでに得られている他の放射線管理施設の大気中ラドン濃度変動データの解析を進めた。学会や論文等で解析データの公表が可能になった際に、協力事業所名を公表する。また全国の放射線管理施設で長期間の大気中ラドン濃度計測データを持つ協力機関を新たに探し、ネットワーク拡大を進めている。

2) 機械学習を使った地震に関連する大気中ラドン濃度の異常検出

本研究は、地震前の大気中ラドン濃度の変動に潜む異常を定量的に評価するため、従来の統計解析手法に代わり、機械学習の一種であるランダムフォレスト解析を適用する試みである。従来の解析では、モデルパラメータの設定に依存して異常判定が行われていたが、本手法では大きな地震が発生しなかった期間のラドン濃度を平年変動として教師データに用い、学習したモデルにより地震前の濃度を予測し、観測値との差分を算出する。なお、この差分の標準偏差 σ に基づき、 3σ を閾値として設定し、閾値を超える場合に異常と判定する方法を採用した。

兵庫県南部地震に関しては、神戸薬科大学が提供する排気モニターの大気中ラドン濃度データを用い、1984年から1988年の期間を平常期として学習し、1990年から1995年の予測期間における実測値との比較を行った結果、1994年末から観測値が予測値を上回る傾向が継続し、地震発生の25日前において観測値と予測値の差分が 3σ を超える異常が確認された（図1）。

また、東北地方太平洋沖地震に関しては、福島県立医科大学において、排気モニターで観測された電離電流値をラドン濃度と線形関係にある指標として利用した。2002年から2007年を平年変動として教師データに設定し、2008年から2011年の期間における電離電流値を予測した結果、2010年10月末において観測値と予測値との差分が 3σ を超える異常が検出された（図2）。さらに、2010年は通常の冬季ピークが例年より早く秋から冬にかけて現れたことや、2008年7月の福島県沖地震の1週間前にも同様の 3σ を超える異常が認められたことから、東北地方太平洋沖地震発生前にも大気中ラドン濃度の異常な上昇が生じていたと推察される。

以上の結果は、ランダムフォレスト解析を用いることで、従来手法と同様の時期に異常が検出可能であることを示し、観測された電離電流値を直接利用することで前処理の手順が簡略化される点も明らかとなった。さらに、大地震が少なかった期間のデータを学習することにより、地震前の濃度予測が可能となるため、将来的にはリアルタイムでの観測値との比較による異常検知システムの構築が期待される。この成果を Scientific Reportsで報告した。

3) 空気中のラドン濃度計測における実用的なカットオフ値の決定

これまで、我々のグループは全国の放射線施設の排気モニタのデータをラドン濃度に変換することで、地震発生前の大気中ラドン濃度変動を解析してきた。そのため、正確な大気中ラドン濃度を得るためには、排気モニタが正常に作動しているかを確認する必要がある。世界保健機関（WHO）は、室内のラドン濃度を 100 Bqm^{-3} に設定することを推奨しており、事前調査においてその基準値を超えているか否かを簡便に判断するためにはカットオフ値が有用である。そこで、排気モニタで室内のラドン濃度を測定し、そのラドン濃度をラドン簡易モニタのPicoRadという活性炭コレクターにより決定する方法で、排気モニタの作動確認を行い、その成果をRadiation Protection Dosimetryで報告した。

図3に高感度のラドンモニターで測定した値とPicoRadコレクターで測定したラドン値との関係を示した。PicoRadコレクターで測定したラドン値が 83 Bqm^{-3} の場合（図3の緑の点線）ラドンの真の値は95%予測区間として図3のIIの範囲をとることが分かった。その結果、PicoRadのカットオフ値は 80 Bqm^{-3} であり、この値以下であれば、ラドン濃度が安全範囲にあると判断できることが示された。本研究により、得られた簡易計測器のカットオフ値は、ラドン濃度の事前調査やリスク管理において役立つ指標となり、PicoRadを用いた断層からのラドン散逸の空間変化などの解析にも資することが期待される。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と災害軽減への貢献：

本手法により、リアルタイム異常検知システムの構築可能性が示され、地震発生確率の時間更新予測精度の向上を通じた早期警戒システムの実現が期待される。

今後の展望：

さらなる実測データの蓄積と全国放射線管理施設とのネットワーク拡大により、既存モデルの精度向上を図る。加えて、リアルタイムでの観測値比較による異常検知システムの構築を目指す。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tsuchiya, M., Nagahama, H. Muto, J., Hirano, M. and Yasuoka, Y. (2024) Detection of atmospheric radon concentration anomalies and their potential for earthquake prediction using Random Forest analysis. Scientific Reports, (2024) 14:11626.
doi:10.1038/s41598-024-61887-6,査読有,謝辞有

Yasuoka, Y., Takemoto, J., Omori, Y., Goda, N., Nagahama, H., Muto, J., Kawamoto, N., Tokonami, S., Hosoda, M., Iimoto, T. and Mukai, T. (2024) Practical cut-off value for radon concentration in indoor air using an activated-charcoal radon collector. Radiation Protection Dosimetry, 200 (16–18), 1701–1705. <https://doi.org/10.1093/rpd/nae108>,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Mayu Tsuchiya, Hiroyuki Nagahama, Jun Muto, Mitsuhiro Hirano & Yumi Yasuoka (2024) Random Forest Analysis of Atmospheric Radon Concentration for Anomaly Detections of Earthquake Precursors, 8th International Workshop on Earthquake Preparation Process, May 2024, Chiba.

Akito Miura, Yumi Yasuoka, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama (2024) Detection of atmospheric radon concentration anomalies prior to earthquakes using a statistical time series model, 8th International Workshop on Earthquake Preparation Process, May 2024, Chiba.

土谷真由, 長濱裕幸, 武藤潤, 平野光浩, 安岡由美 (2024) ランダムフォレスト解析による地震前の大気中ラドン濃度の異常検知, 日本地球惑星科学連合2024, 2024年5月26日, 千葉

三浦壮翔, 安岡由美, 武藤潤, 長濱裕幸 (2024) 統計的時系列モデルによる地震活動に伴う大気中ラドン濃度の異常検知, 日本地球惑星科学連合2024, 2024年5月26日, 千葉

西村夏樹, 安岡由美, 長濱裕幸, 武藤潤, 向 高弘 (2024) 兵庫県南部地震前の大気中ラドン濃度の日変動, 第74回 日本薬学会関西支部総会・大会, 2024年10月4日, 兵庫県西宮市

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和7年度実施計画の概要：

地殻変動モニタリングに使用できるRI施設に協力を求め、全国をくまなくカバーすることのできる全国放射線管理施設ネットワークの拡大を進める。大学及び研究機関の各放射線管理施設から得られた排気データを用いて、広域な大気中ラドン濃度変動解析を進める。得られたデータを対象に、機械学習等のデータ駆動手法を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みる。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

武藤 潤 (東北大学), 長濱 裕幸 (東北大学)
他機関との共同研究の有無：有
安岡 由美 (神戸薬科大学), 大森 康孝 (弘前大学)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：武藤潤

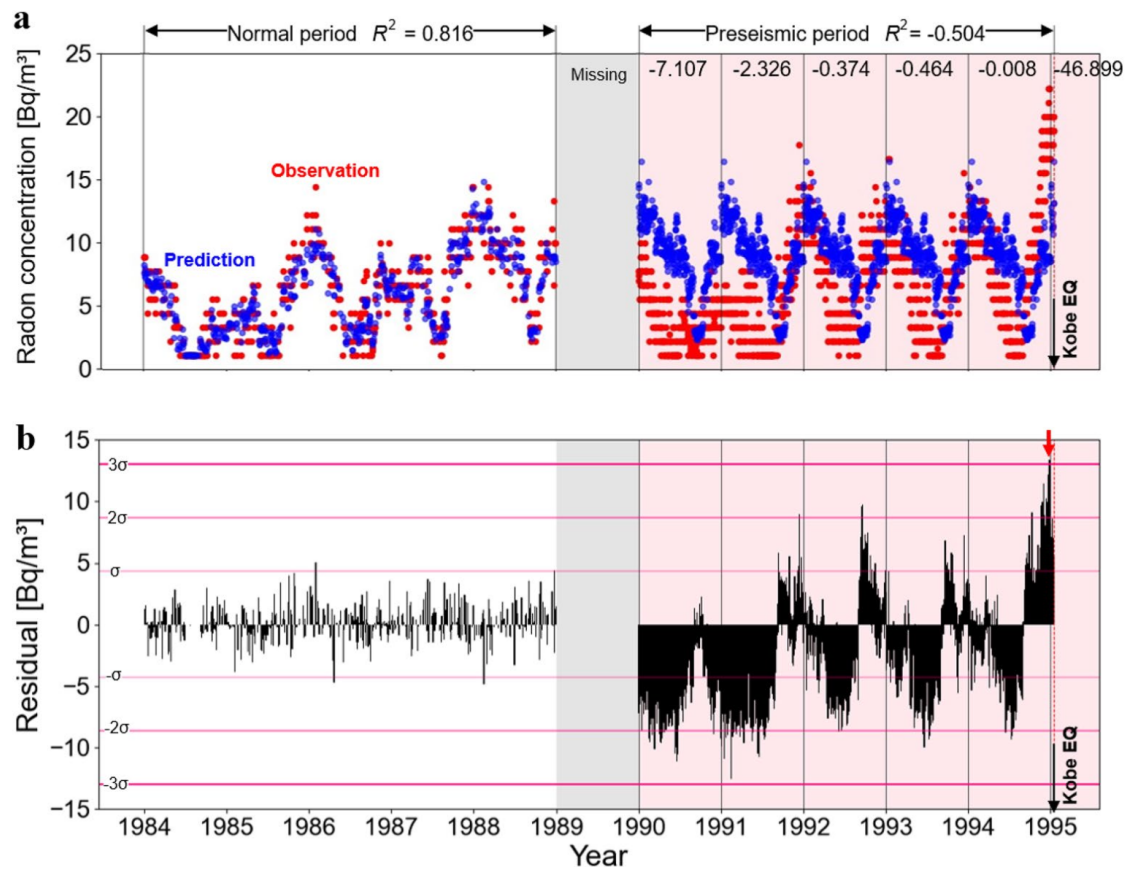


図1. 神戸薬科大学におけるランダムフォレスト解析の結果

a) 予測値と観測値の比較を表すグラフ。赤点が大気中ラドン濃度の観測値、青点がランダムフォレスト解析で得られた予測値、上部の数字は観測値と予測値の類似度を測るための決定係数を示す。b) 大気中ラドン濃度の観測値と予測値の差分を示すグラフ。赤の横線は、差の標準偏差から求めた $\pm\sigma$ 、 2σ 、 3σ を表す。赤矢印は1994年12月23日と28日に有意に差が 3σ を超えたことを示す。

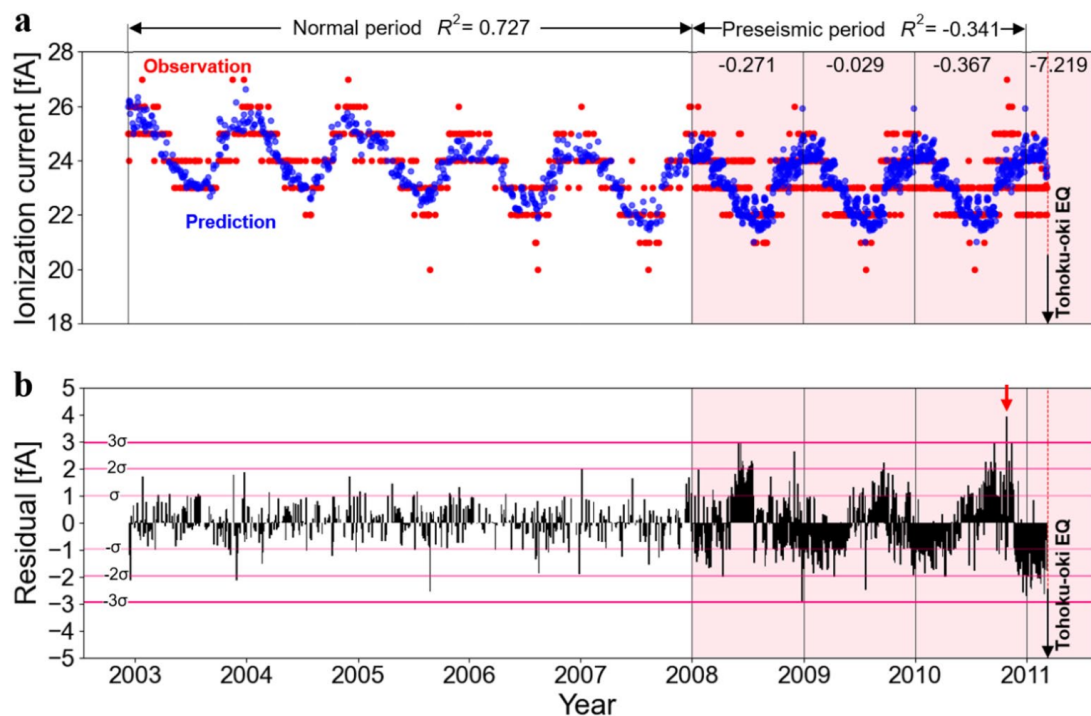


図2. 福島県立医科大学におけるランダムフォレスト解析の結果

a) 予測値と観測値の比較を表すグラフ。赤点が大気中ラドン濃度の観測値、青点がランダムフォレスト解析で得られた予測値、上部の数字は観測値と予測値の類似度を測るための決定係数を示す。b) 大気中ラドン濃度の観測値と予測値の差分を示すグラフ。赤の横線は、差の標準偏差から求めた $\pm\sigma$ 、 2σ 、 3σ を表す。赤矢印は2010年10月28日に有意に差が 3σ を超えたことを示す。

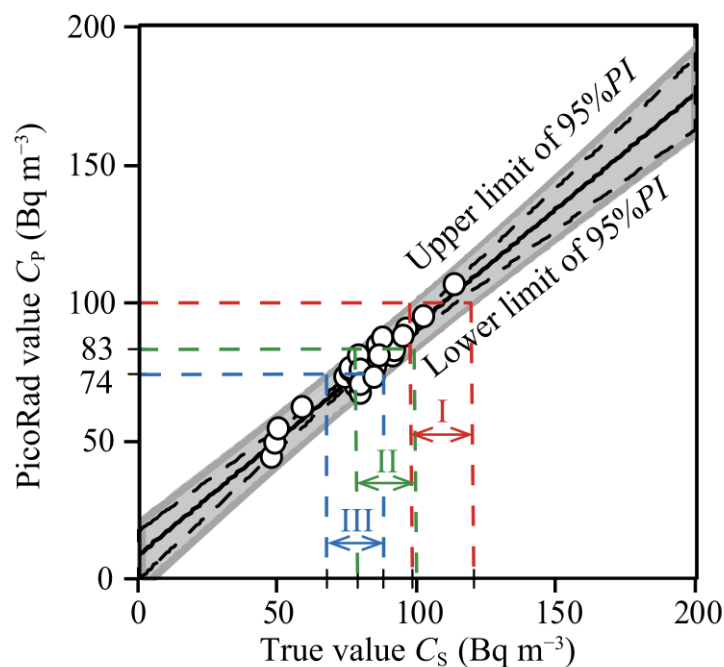


図3. PicoRadのラドン濃度の95%予測区間

ピコラドの測定値(○)とその線形回帰(黒線)に基づいて、決定した95%信頼区間(破線)と95%予測区間(灰色の領域)を示した。

