

(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7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1) 状態空間法を用いたポータブルタイプ電離箱の解析

本研究は、全国の環境放射線センターなどで用いられるポータブルタイプの電離箱による大気中ラドン濃度観測値を使い、地殻変動やラドンの動態を明らかにする研究である。これまで、全国のラジオアイソトープ（RI）施設などで用いられる大型の空間電離箱による大気中ラドン濃度の連続観測から地殻変動に呼応する大気中ラドン濃度変動を測定してきた。一方、世界的にはより小型かつポータブルな測定機器（アルファガードなど）が比較的安価であることから、多くの計測に使用されている。一方で、小型であるために測定時に取込むことができる気体体積が小さく、RI施設などの大型の空間

電離箱と比較すると測定値がばらつきやすい傾向がある。そこで、時系列データから観測できない状態を推定して抽出することが可能な状態空間モデルを用いて、ポータブルタイプの電離箱による測定値から変動のトレンドを抽出した(図1)。抽出したトレンドと大型の空間電離箱による観測値を比較すると、類似したピークや変動を抽出できていることが確認された。また得られた2つの変動時系列の類似性を評価するため、動的伸縮法(DTW法)を用いた類似度の計算から、トレンド抽出前のポータブルタイプの電離箱による測定値と比較して、トレンド抽出後は大型測定機との類似度が向上していることも確認された。以上から、測定時の気体取り込み量の小さい観測機においても、状態空間法を用いることで、地殻変動に起因するラドン濃度変動を抽出できる可能性が明らかになった。そこで、地震前の大気中ラドン濃度変動を対象としてこの手法の有用性を検討するため、ポータブルタイプの電離箱で測定された大気中ラドン濃度を対象に、東北沖地震前の異常検知を行った。宮城県環境放射線監視センター(旧 宮城県原子力センター)小積局に設置されたポータブル電離箱での測定値を対象に状態空間モデルを用いてトレンドを抽出し、ランダムフォレスト解析を行い、東北沖地震の前に、大気中ラドン濃度が高くなる異常を検知した(図2)。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した。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。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年の期間の濃度を予測した結果、2010年7月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。また、2008年7月の福島県沖地震の前にも同様の 3σ を超える異常が認められた。

これらの異常は、大型の空間電離箱で測定された大気中ラドン濃度を用いた異常検知でも指摘されている異常である(Tsuchiya et al., 2024)ことから、ポータブル電離箱による観測値も、状態空間モデルによってトレンドを抽出することで、大型の空間電離箱で測定したラドン濃度の観測値と同様に異常検知に使用できることが明らかになった。これにより、各都道府県の原子力センターなどに設置されているポータブル電離箱で得られる大気中ラドン濃度を異常検知に用いることが可能になる。さらに、都市部から離れた山間部など、大型の空間電離箱の設置が困難な地点でもポータブル電離箱を用いることで、比較的低コストで大気中ラドン濃度の測定が可能となり、異常検知の対象とする観測点を拡充できる可能性がある。

(2) ニューラルネットワークを用いた大気中ラドン濃度変動の時系列解析

大気中ラドン濃度異常の検知手法として、ニューラルネットワークをベースとして構築した解析手法の提案と実データへの適用を行った。これまで行われてきた解析手法には、1. 定常期間設定の任意性と時間の経過に伴う残差の増大、2. 事前パラメータ設定の難解さと結果の変動、3. 異常検知指標に残される季節性などの問題があった。そこで、Recurrent Neural Network (RNN)と呼ばれるニューラルネットワークの一種を核とした解析手法(Cai et al., 2019, Mukesh et al., 2024)を援用し、これらの問題の解決を試みた。本手法においては異常検知の指標として、観測値とモデルにより学習された予測値との差分(残差)を、同じくモデルから推測された誤差で割った値(標準化残差)を用いる。

解析に使用したデータは、2011年東北沖地震前に福島県立医科大学において観測され、大気中ラドン濃度と線形変換が可能である電離電流値を利用した。2002年末から2011年3月10日までの期間を学習することで得られたモデルから予測された誤差変動は、季節性を示し、これは観測データの分散値変動が示す季節性と一致する。また、算出した標準化残差の変動は、同じく長期間解析を行った先行研究(Iwata et al., 2018)で用いられた異常検知指標と比較して、季節変動が大きく軽減されていた(図3)。このことは、RNNを用いた本手法が大気中ラドン濃度変動の季節変動成分を捉え、評価できていることを示す。

標準化残差に対して、既存研究で用いられてきた標準偏差の3倍($\pm 3\sigma$)を異常の閾値として設定した結果、全観測期間において、計24の異常イベントを検出した(図4)。特に2010年後半から2011年初頭にかけては、ランダムフォレスト法により検出された高濃度異常(Tsuchiya et al., 2024)が複数の期間に見られたことに加えて、低濃度を示唆する負異常も複数検知された。これは、2011年東北地方太平洋沖地震と関連した該当地域の地殻変動に起因する、大気中ラドン濃度の不安定な変動を捉えたものと推察される。

以上の結果は、大気中ラドン濃度変動の異常検知において、ニューラルネットワークを用いた本手法の有用性を示したものである。特に、従来の手法において解析結果に季節変動が残されていた理由として、大気中ラドン濃度の変動の不安定性に季節性があり、それによって予測のしづらさにも季節性が生じていることが示唆された。

・「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実現に向けた技術的基盤が確認された。特に、全国の放射線管理センターが保有するポータブルモニターの観測データを活用することで、既存インフラを用いた比較的低コストかつ広域にわたるリアルタイム異常検知システム導入の実装可能性が示された。

今後の展望：

さらなる実測データの体系的蓄積および全国の放射線管理施設とのネットワーク拡充により、既存モデルの予測精度および汎用性の向上を図る。加えて、リアルタイム観測データの統合的比較・解析基盤を整備し、広域分散型の異常検知システムの高度化を目指す。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7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

・学会・シンポジウム等での発表

渡邊朋子、安岡由美、床次眞司、細田正洋、大森康孝、長濱裕幸、武藤潤、向高弘 (2025) 活性炭型ラドン検出器による土壌からのラドン散逸率の推定, 第75回 日本薬学会関西支部総会・大会

土谷真由, 長濱裕幸, 武藤潤, 安岡由美 (2025) 状態空間モデルを用いた時系列データのトレンド抽出と異常検知への応用. 日本地球惑星科学連合2025, 千葉県幕張, 2025年5月.

針谷駿斗, 長濱裕幸, 武藤潤, 安岡由美 (2025) テンソル分解を用いた異常検知手法の開発：時系列変動データのテンソル分解による異常値検知法の開発. 日本地球惑星科学連合2025, 千葉県幕張, 2025年5月.

(9) 令和7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8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

所属：東北大学大学院理学研究科地学専攻

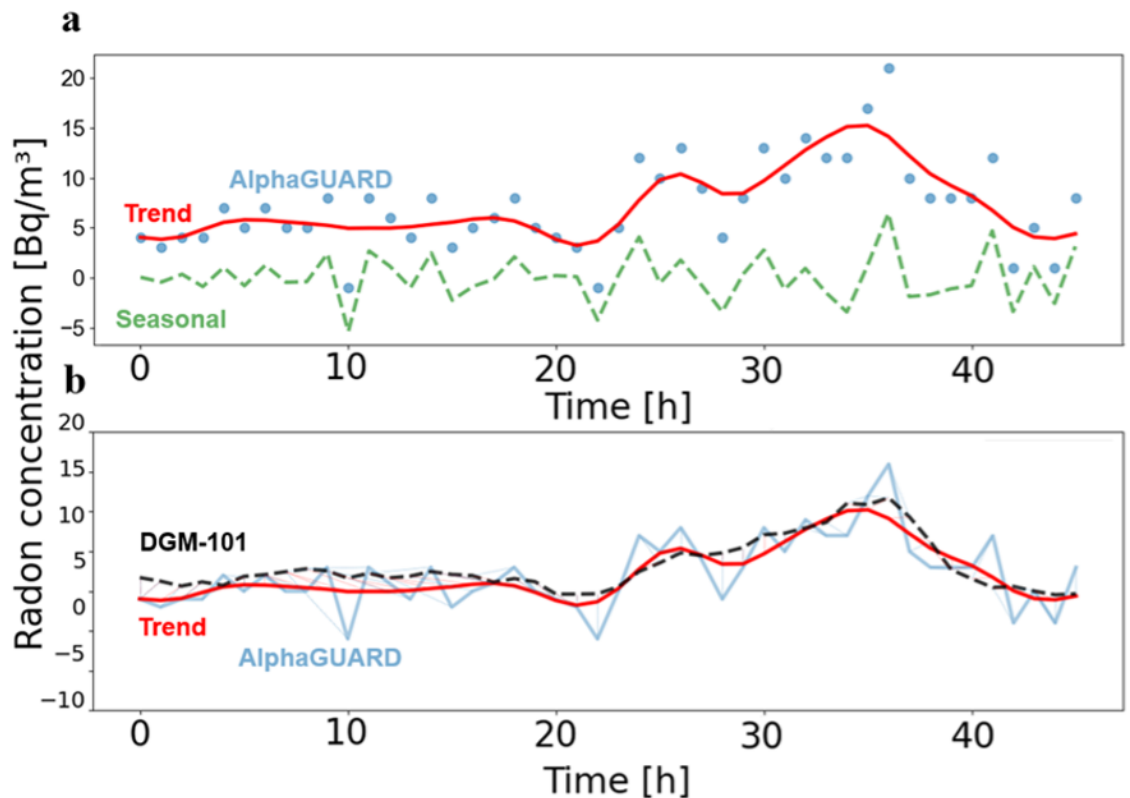


図1. 福島県立医科大学のポータブルタイプの電離箱と大型の空間電離箱による観測値の比較

a) ポータブルタイプの空間電離箱による観測値(青点)から状態空間モデルでトレンド(赤線)と周期成分(緑点線)を抽出した結果を示したグラフ。b) 抽出したトレンド(赤線)と大型の空間電離箱による観測値(黒点線)を比較したグラフ。データはTajika et al., 2013で測定されたものを使用。

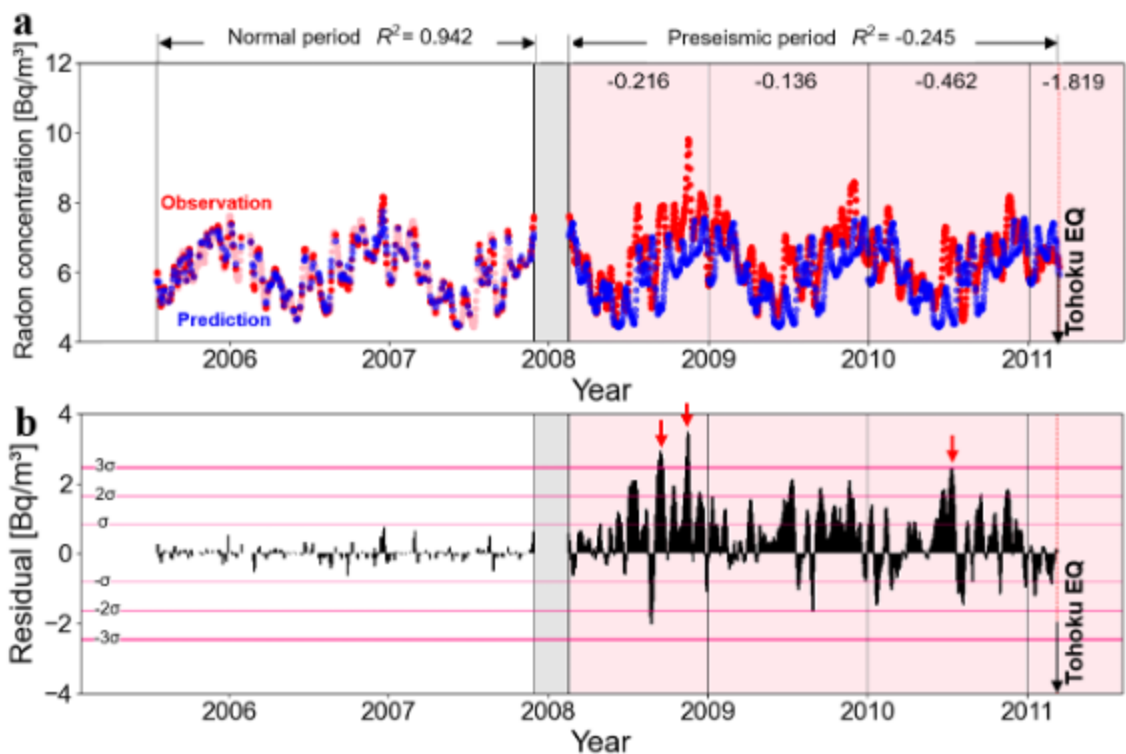


図2. 状態空間モデルとランダムフォレスト解析を組み合わせた異常検知

a) ランダムフォレスト解析による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。ランダムフォレストによる予測値は、宮城県原子力センター小積局のポータブルタイプ電離箱で測定された大気中ラドン濃度データから、状態空間法によりトレンドを抽出しその値を観測値として使用している。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。赤矢印は有意に差が 3σ を超えたことを示す。

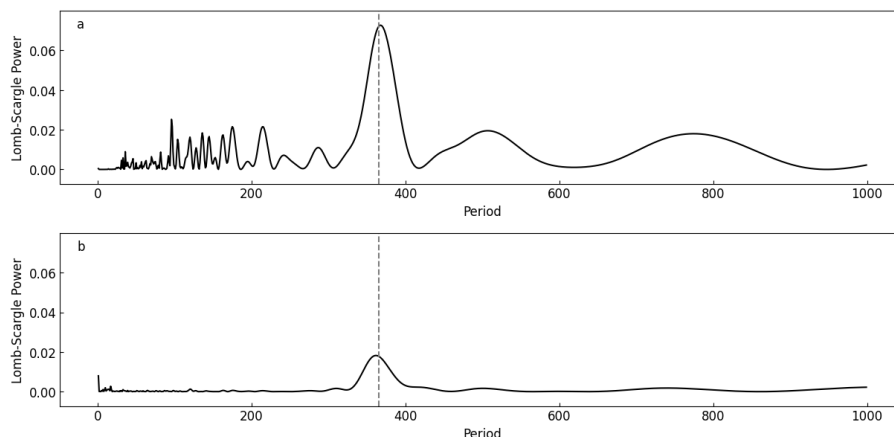


図3. SSTによる異常度の周期性とニューラルネットワーク法による標準化残差の周期性

a) 先行研究(Iwata et al., 2018)で用いられたSSTによって算出された異常度の変動に対するlomb-scargleピリオドグラム。b) 本研究で算出した標準化残差の変動に対するlomb-scargleピリオドグラム。灰色の点線は365日の周期（年周期）を示す。

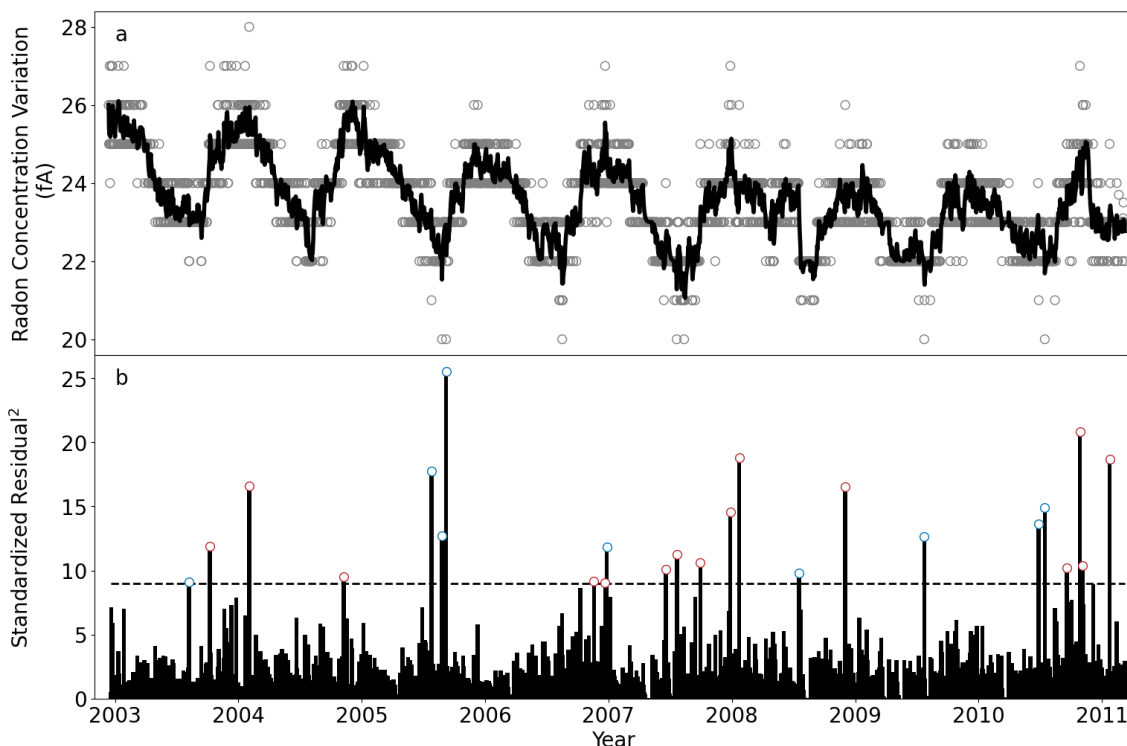


図4. ニューラルネットワーク解析における異常検知の結果

a) 灰色の丸は観測値、黒色の線は観測値を指数平滑化した値を示す。b) 黒線は標準化残差の平方値、水平な点線は異常の閾値、赤丸は標準化残差が閾値を上回った時点、青丸は標準化残差が閾値を下回った時点を示す。

