

博士論文

Data Driven Study on Characteristic on Anomalies in  
Atmospheric Radon Concentration Related to Earthquakes  
(地震に関連した大気中ラドン濃度異常の特性に関する  
データ駆動型研究)

Daichi IWATA

令和元年

# Contents

Abstract	i
Acknowledgments	ii
Notation	iv
List of Figures	v
List of Tables	vi
Chapter 1. General Introduction	1
Chapter 2. Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes	5
2.1. Introduction	5
2.2. Method and Materials	6
2.2.1. Observations of atmospheric radon concentration	6
2.2.2. Conventional method for analyzing radon anomalies	10
2.2.3. Singular spectrum transformation	12
2.2.4. Comparing similarity of time series of anomalousness	15
2.2.5. Cumulative seismic moment	19
2.3. Results and Discussion	19
2.4. Conclusions	29
Chapter 3. Statistical Estimation of relationship between atmospheric radon anomalies and seismic activities	30
3.1. Introduction	30
3.2. Method and Materials	32
3.2.1. Atmospheric radon concentration data and observation sites	32
3.2.2. ARMA-GARCH model	32
3.2.3. Estimating conditions of earthquakes	34
3.3. Results and Discussion	36
3.4. Conclusions	41
Chapter 4. Bayesian estimation of atmospheric radon concentration using state space model	42
4.1. Introduction	42
4.2. Method and Materials	43
4.2.1. Atmospheric radon concentration data and observation sites	43
4.2.2. State space model	43
4.3. Results and Discussion	44

4.4. Conclusion.....	48
Chapter 5. General Conclusions.....	49
References.....	51

## 第1章 緒言

地震は地殻中に蓄積されたひずみが破壊とともに解放される現象であり、それに先立って地殻中で起こる環境変化が様々な先行現象を引き起こすことが観測的に確認されている。先行現象として考えられているものの中でも、地震に関連した地殻変動に伴って地殻中に存在するラドンなどの化学物質の濃度変化が報告されてきた。

ラドンは、ウラン系列の放射性元素で、地下水・地下ガス・大気中にて測定される。1966年の Tashkent 地震に先行するラドン濃度の異常(Ulomov & Mavashev, 1967)が報告されて以来、ラドン濃度の異常を用いて地震予測を試みた研究が多くされてきた（例えば、Wakita et al., 1980）。内陸型・海溝型地震に先行するラドン濃度異常が多く報告されてきたが、地震に先行するメカニズムは明らかになっていない。ラドン濃度変動の異常の定量的な検出方法がなく、地震発生との関係の定量的な評価がされてこなかった。そこで、ラドン濃度異常を用いた地震発生リスクの評価を行うためには、内陸型・海溝型の地震に先行するラドン濃度異常の統一的メカニズムの検討、実データを用いた定量的な研究が求められている。本研究では、機械学習や統計的方法を用いて、地震に関連した大気中ラドン濃度変動の特徴を観測データに基づいて推定することを目的とする。

## 第2章 地震に関連した大気中ラドン濃度変動の異常検出

ラドンは、地殻に含まれる放射性物質である。地殻に力が加わり、割れ目が発達すると、隙間を通して、地表へ放出される。これまで、地震発生の前後に大気中のラドン濃度の異常変動が指摘されてきた。しかし、地殻中でのラドンの動態は不明なため、異常変動の定義が曖昧であり、地震活動とどのくらい関連するのかを定量的には明らかにはされてこなかった。ラドン濃度の変動から地震発生に関する評価をするためには、まず客観的な異常変動の定義・地震活動との関連性の定量化が求められた。医科・薬科大学で観測されている大気中ラドン濃度のデータに異常検出のデータ解析手法（特異スペクトル変換法）を適用することで、時系列データの異常部分を客観的に抽出した。さらに、地震活動を表す積算地震モーメントの時系列データと比較することで、大気中ラドン濃度の異常変動が地震活動とどの程度関連するかを定量的に明らかにした。また本研究では、地下水位の変化や地殻変動が観測された時期と同期し大気中ラドン濃度の異常変動が認められたことも指摘した。

### 第3章 大気中ラドン濃度変動に寄与する地震活動の特徴の推定

ラドン濃度の変動と地震活動を比較したこれまでの研究では、ラドン観測点近傍の領域を適当に区切って、近傍内で発生した地震とラドン濃度の変動を比べることが主な方法であった。しかしながら、このときに、どのくらいの距離と規模の地震を考慮するかが重要になってくることが考えられる。そこで、大気中ラドン濃度の変動に寄与する地震がどのくらいの震央距離と規模の組み合わせで表せるのかを統計的に推定できることを指摘した。推定された震央距離と地震の規模の関係は、先行研究において地下水位の変動をもたらす地震の距離と規模の経験的に得られた関係を包含する形で調和的であり、共通する物理的メカニズムの存在を明らかにした。

### 第4章 状態空間モデルを用いた大気中ラドン濃度変動の推定

大気中のラドン濃度の測定は、地下水中や地下ガス中のラドン濃度に比べて、測定レベルが低く、気象要因などの影響を強く受けるため、地震に関連した異常を正確に推定することが困難であった。また、回帰分析に基づいた従来の方法では、モデルを当てはめるデータ期間の選び方によってラドン濃度の異常変動の推定結果が変わってしまうことが問題であった。このため、複数観測点の大気中ラドン濃度のデータを比較することが難しく、地震に関連した大気中ラドン濃度異常変動の観測場所依存性などを評価することができていなかった。そこで、大気中ラドン濃度変動の特徴を表す状態空間モデルによる時系列モデルを用いて推定した。状態空間モデルによる時系列解析は、回帰分析に基づいた従来の方法よりも柔軟なモデリングが可能であり、モデルをあてはめるデータ期間や観測場所によらずに大気中ラドン濃度変動を推定できることを明らかにし、異なる観測点での大気中ラドン濃度のデータを比較することが可能となった。

### 第5章 結論

本研究では、機械学習や統計的方法を用いて、地震に関連した大気中ラドン濃度変動の特徴を観測データに基づいて推定を行った。特異スペクトル変換法という方法により、時系列モデルを仮定することなく大気中ラドン濃度の異常な変動を検出可能であることを明らか

にした。大気中ラドン濃度の変動に寄与する地震の震央距離とマグニチュードの関係は、地下水位変動に寄与する地震の震央距離とマグニチュードの関係と調和的であることを明らかにした。状態空間モデルを用いた時系列解析により、大気中ラドン濃度変動を統一的に推定することが可能であることを明らかにした。