

( 1 ) 実施機関名：

東北大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

地震に先行する大気中ラドン濃度変動に関する観測

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-1 ) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

( 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：

地震発生直前に地表の微小なひずみが観測されることなく、大気中ラドン濃度が上昇することが最近の放射化学的観測から明らかにされており、経験的な地震の短期予測手法として意義がある。大気中へのラドンガス放出の素過程は未解明であるものの、地震と関連した現象であるため、地殻の変形活動と関係があると考えられる。そこで、本研究では、地殻変形とラドンガス放出の関連を明らかにすることを目的とする。本課題は平成 24 年から「地震発生先行過程に伴うラドン放出・電磁放射と地殻変形(公募研究, 課題番号 2906)」から(常設)課題へ移行した。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

地震の先行現象として地下水中・土壌中・大気中のラドン濃度変動がこれまでに報告されている。地下水中ラドン, 土中ラドンに比べると, 大気中ラドンと地震との関連を検討した例は極めて少ない。地震前に地下水中や土中ラドン濃度に異常が見られた場合, それはおそらく局所的な地殻のひずみを反映した異常であると考えられる。それに対して, 大気中ラドンは観測点の直下の地面から散逸してくるラドンのみならず風や気団によって近傍から, あるいは遠く大陸から運ばれてくるラドンも含めて観測している。従来の地下水中ラドン測定が地殻のひずみの変化を「点」で観測しているのに対して, 比較的広範囲に起きている変化を面」で捉えられるという点が, 大気中ラドン濃度測定の特徴と言える(1)ラドンを多く含む花崗岩分布域や地震前後の広域にひずんだ地域(必ずしも震源断層付近に限らない)に観測点が位置する(2)地震前の平常時のデータが数年程度蓄積されている等々の諸条件が整えば, 大気中ラドン濃度の観測から地震の先行現象を見出せる可能性がある。放射線管理施設の給気口と排気口におけるラドン濃度差は小さく, 更に HEPA フィルターによりラドンの娘核種が除去されるという報告があり, 放射線管理施設の排気モニターで施設外の大気中ラドン濃度の変動を捕えることができる。兵庫県南部地震の前の大気中ラドン濃度変動を神戸薬科大学の放射線管理施設の排気モニターが, 東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動を福島県立医科大学の放射線管理施設の排気モニターがとらえていたことが分かってきた。放射線管理施設のモニタリングネットワークによって, 広域な大気中ラドン濃度変動をモニタリングすることができる。そこで, 本研究では放射線管理施設が有する排気モニターを用いて, 全国で大気中ラドン濃度の測定を行い, 巨大地震前の地殻変動を大気中ラドン濃度変動からモニタリングすることを目的として, 全国規模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観測データの解析に基づいた予知研究を行うことを目的とする。

( 7 ) 平成 24 年度成果の概要 :

1) 全国規模で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

放射線管理施設が有する排気モニター( 通気式電離箱 )を用いた大気中ラドン濃度の測定を行い、巨大地震前の地殻変動を大気中ラドン濃度変動からモニタリングすることを目的として、全国規模で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を進めている。

昨年度は、慶応大学医学部、東京大学医学部、東京医科大学、弘前大学、東北薬科大学の放射線管理施設( データ提供は承諾済み；HEPA フィルター使用施設 )の排気モニターデータの解析( 気象要因の除去を含む )を行い、大気中ラドン濃度変動の解析を行った。特に東北地方太平洋沖地震前のラドン濃度変動解析を行った。

今年度は、札幌医科大学、独協医科大学、名古屋市立大大学院医学研究科アイソトープ研究室、香川大学放射性同位元素実験部門、大分大学総合科学研究支援センター RI 実験部門、弘前大学アイソトープ総合実験室、東京工業大学大学バイオ研究基礎支援総合センター、京都薬科大学放射線管理施設のモニタリングデータの取り出しを行った。施設により測定管理システム内のデータ抽出に業者の協力を必要とすることがあり、その際にはデータ抽出とデータの電子ファイル化に経費( 消耗品費 )を使用した。現在取り出したデータの解析を進めている。

2) 地震に先行する大気ラドン濃度の変化に関する観測

2-1) 巨大地震前の大気中ラドン濃度変動

1) で記した施設のデータの解析結果と牡鹿半島でのラドン濃度測定結果( 宮城県原子力センターと共同研究 )と福島県立医科大学内放射線管理施設の測定データとの比較検討を行い、東北地方太平洋沖地震前の東北地方太平洋側陸域におけるラドン濃度変動を検討し、海溝型巨大地震前の陸域における地震先行大気中ラドン濃度変動の実態解明を進めている。大気中ラドン濃度は地殻ひずみ  $10^{-8}$  に呼応して変動すると考えられており、陸域での測定から得られる成果は、大変重要である。またこの試みは、国際的に見ても新しい試みである。

上記計画を進めつつ、日本アイソトープ協会、日本放射線管理学会、放射線測定機器メーカーなどから情報を提供して頂き、現在上記施設以外の九州や北海道に位置する放射線管理施設と交渉を進め、全国規模で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を進めている。

2-2) 宮城県牡鹿半島における大気中ラドン濃度の観測

局所的な地質の不均一構造の影響を比較的受けにくい大気中ラドン濃度が、地震の発生過程を知るための観測項目の1つと成り得ると指摘されている( 石川ほか, 2008 )。他方、ラドン濃度は大気の動態に大きく依存するため( Porstendoerfer, 1994 ), ラドン濃度変動は地殻の情報( 例えば、ラドン散逸率の変動 )のほかに気象の情報も含んでいると考えられる。したがって、通常の( つまり、地震に関連しない )変動が何に起因しているのかを明らかにする必要がある。我々はこれまでに、宮城県牡鹿半島にある宮城県原子力センターモニタリングステーション( 女川、小積、飯小浜地区 )でアルファガードを使用して観測されている大気中ラドン濃度データに、地震に関連した変動が含まれていないかを検討し、牡鹿半島における大気中ラドン濃度が特徴的な季節変動を示すことを報告した( Omori et al., 2009 )。

大気中ラドン濃度( 計測期間：2005 年 7 月～2011 年 3 月 )及び気象要素( 気温・風速・放射収支量・雨量；計測期間：2005 年 4 月～2011 年 3 月 )の解析から、毎年 1 月から 12 月の各月の平均ラドン濃度日変動は、日中に低く夜間に高くなる傾向を示した。日中において風速は強く放射収支量は正の値となり、また夜間においては日中とは反対に、風速は弱く放射収支量は負の値となった。このことは、大気安定性が大気混合層・安定成層の形成・消失に伴い変動していることを示している。したがって、ラドン濃度の日変動は、大気構造の変化に伴う大気安定性の変動に起因していると考えられる。

一方で季節変動は、日最大値に関して夏季と冬季に高い濃度となり、春季と秋季に低い濃度となるバイモーダルな変動を示した。日本に到達する気団は冬季が大陸性気団で夏季が海洋性気団で異なる

ため、この夏季と冬季のラドン濃度の特徴は異なる要因が関係していると考えられる。さらに、風速と放射収支量から大気安定度階を求め、各月の夜間における大気安定度の頻度を調べたところ、夏季に顕著に強い安定性は認められなかった。夜間の大気中ラドン濃度変動が大気安定度と地面からのラドン散逸率に依存 (Sesana et al., 2003) することを考慮に入れると、バイモーダルな季節変動には地面からのラドン散逸率変動が要因として考えられる。大気中ラドン濃度変動は、気象由来成分及び地殻由来成分に大別される。ラドン濃度変動と気温変動を関連付けることにより気象由来成分を評価し、地殻由来成分を導出するモデルを構築した。このモデルは、気温及び顕熱を観測することにより、地殻からのラドン散逸量を求めることを可能とする。

地殻からのラドン散逸量は、地殻内流体の流量に依存することに基づき、地殻応力の変化に起因する地殻内流体の間隙圧変化を計算し、流量の変化を求めることが可能となった。このことにより、地殻応力とラドン散逸量の量的関係が明らかとなっている。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) によって発生した津波によって、牡鹿半島小積、飯小浜地区のモニタリングステーションは全壊及び浸水した。そのため、ラドン測定器 (アルファガード測定器) とデータ計測用パソコンが海水による被害を受けたが、宮城県原子力センター所長らとラドン測定器とデータ計測用パソコンを回収し、計測データを救出した。その救出測定データ (小積地区の測定データは2005年中旬から2011年3月11日まで) を用いて、上記の点を考慮した解析を大森 (放射線医学総合研究所)、藤原・石川 (宮城県原子力センター)、長濱・武藤・杉山 (東北大学) で現在進めている。2005年から2011年までの毎年、前年の12月から翌年3月までの大気中累積ラドン濃度 (散逸率) が、2010年10月から2011年3月にかけて低かったことが明らかとなった (図1)。この結果は、福島県立医科大学で測定された大気中ラドン濃度の解析結果 (次章) と整合している。

#### 2-3) 福島県立医科大学通気式電離箱観測によるラドン濃度計測

東北地方太平洋沖地震以降、福島県立医科大学 (福島県福島市光が丘1番地) の本間好施設長・鈴木俊幸施設管理者から観測データを入手し、現在までそのデータを用いて東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度の解析を安岡・本間・鈴木・長濱・武藤らの共同研究で行っている。今年度は、管理施設の排気モニターの電離値とラドン濃度との校正比較を、ウラン鉱石によるラドン場とポータブルラドンモニター (アルファガード) を用いて行った。この結果を日本保健物理学会で発表し、J. Radioanal Nucl. Chem. に掲載した。この構成結果により、通気式電離箱の電離値とアルファガードで測定したラドン値との校正比較が可能になり、牡鹿半島で行っていたアルファガードを用いた大気中ラドン濃度変動の解釈が可能になった。

季節により規則正しい増減傾向を示す大気中ラドンガスの濃度は2008年ごろからその濃度変動が乱れ始め、2010年6月から半年間増加し、その後、急激に減少し地震発生までの約3月間、低いレベルを維持した停滞状態が続いていた。その間、茨城県沖地震 (2008年5月8日, Mw 6.8)、岩手・宮城内陸地震 (2008年6月14日, Mw 6.9)、福島県沖地震 (2008年7月19日, Mw 6.9)、福島県沖地震 (2010年3月14日, Mw 6.5) と呼応して残差値は変動した。この結果は、多少変動の時期がことなるが、東北薬科大学や牡鹿半島での測定されたラドン濃度変動と整合的な変動であった。

#### 2-4) 福島県立医科大学のラドン濃度経時変化と東北薬科大学のラドン濃度経時変化の比較

福島県立医科大学 (FMU; 福島市) のデータ測定 (2003年1月1日~2011年11月3日) を2003-2007年の日最低値データの日ごとの平均値を算出し、平滑化して年変動を計算し、福島県立医科大学のラドン濃度経時変化と東北薬科大学 (TPU; 仙台市) のラドン濃度経時変化 (図2a, b) の比較図を示した (図2b, c)。

2009年以降は、値の上下変動周期がほぼ一致している。とくに2010年の変動は、福島県立医科大学のラドン濃度変動とよく呼応している。その変動の振幅は、東北薬科大学の測定データの方が福島県立医科大学の測定データよりも小さい。また2008年に求められる両者の変動ピーク発生時期は、ず

れていた。

東北薬科大学の管理施設で測定されたラドン濃度（電離値）の日最低値変動は、福島県立医科大学の管理施設で測定されたラドン濃度（電離値）の日最低値変動と類似した変動であった。2008年のピークはずれていたが、2009年以降の変動は類似しており、とくに2010年の変動は、福島県立医科大学の変動とよく呼応した。東北薬科大学で観測された日蓄積量の変動が大きく変動し始めた時期は、福島県立医科大学で測定されたラドン濃度日最低値の残差の変動が始まった時期（2008年6月頃）と一致していた。

## 2-5) 札幌医科大学で観測されたラドン濃度変動

札幌医科大学基礎棟P2RI実験室系（札幌市）における排気モニターの日最低値変動について神戸薬科大学の安岡と札幌医科大学の坂下がデータを取り出し、その後神戸薬科大学の安岡・多鹿が観測データの解析を進め、その結果を日本放射線安全管理学会で報告した。また地殻変動データとの比較を現在行っている。多鹿ほか（2012）が日本放射線安全管理学会で報告した概要を以下に記す。

### （1）測定解析方法

札幌医科大学基礎棟P2RI実験室系では、地上61mの外気を、RI施設（容積：542.1 m<sup>3</sup>）へ、給気（8600 m<sup>3</sup>/時）していた。その空気をHEPAフィルターでろ過後、排気モニター（通気式電離箱）で測定し、排気していた。排気モニターの電離値データ（2000年1月1日-2012年3月27日）を大気中ラドン濃度とみなした。給排気が8時23時の定時運転のため、9時17時の間の日最低値を指数平滑化法により平滑化し、このデータから平年変動を差し引いた結果を日最低値（残差）（図3黒線）とした。平年期間（2005年-2009年）の日最低値（残差）について、平均として線型回帰曲線（図3グレー実線）と標準偏差（ $\sigma$ ）を求め、平均 $\pm 3\sigma$ （図3グレー点線）を越えたデータを異常ピークとみなした。

### （2）結果

図3より全期間において日最低値（残差）の減少傾向が見られ、東北地方太平洋沖地震（図3の3：2011年3月11日）の発生前にラドン濃度の上昇が見られた。さらに、有珠山噴火（1：2000年3月31日）、十勝沖地震（2：Mw = 8.0, 2003年9月26日）、浦河沖地震（4：Mj = 6.2, 2011年11月24日）の発生後に大気中ラドン濃度の変動に $3\sigma$ を超える変動が認められた。このように地震前後に地殻変動（余効変動も含め）と大気中ラドン濃度変動との呼応が認められた。

2003年十勝沖地震発生直後の3か月で、余効変動により、北海道全域ではほぼ南東方向の変位が観測されている。この変位の大きさは徐々に小さくなっているものの、その特徴は、2004年釧路沖の地震発生前まで続いていた（水藤・小沢, 2006, 国土地理院時報 No.110）。図3の2のラドン濃度変動の時期は、水藤・小沢（2006）の2003年11月28日-2004年2月28日（図2b）の変位増大期とほぼ一致している。

## 2-6) 兵庫県南部地震で観測された先行現象間の比較

1995年の兵庫県南部地震に先立って大気中ラドン濃度の異常が観測された（Yasuoka and Shionogi, 1997）。ラドン濃度は地震発生までの時間のべき乗則・対数周期振動モデルに従って増加しており（Yasuoka et al., 2006）、これは、地殻岩石のダメージ発展に伴うクラック・透水係数の増大による地殻内流体の流量増加を示唆している（Kawada et al., 2007）。しかし、ラドン濃度の異常上昇やその中に含まれている周期性をもたらした要因は明らかにされていない。同地震では大気中のラドン濃度の他にも地震に先立った異常が、地球物理学・地球化学的観測から報告されている。そこで本研究では、複数の異常例を比較することにより大気中ラドン濃度異常の要因を明らかにするとともに、地震発生先行過程の解明における大気中ラドン濃度観測の有用性の検討を神戸薬科大学（安岡）、放射線医学総合研究所（石川・大森）、弘前大学（床次・細田）、東北大学（長濱）らが行ったこれまでの研究成果から行った（石川ほか, 2008; Yasuoka et al., 2009; 安岡ほか, 2012; Yasuoka et al., 2012a）。また兵庫県南部地震を発生させた六甲断層系周辺の地表変位分布と大気中ラドン散逸との関係を、Yasuoka et al. (2012b)で報告した。

- ( 8 ) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：  
 畠中弘哉，安岡由美，長濱裕幸，坂下守，向高弘，排気モニターによる大気中ラドン濃度測定 その  
 3：札幌医科大学における変動，日本放射線安全管理学会，大阪府吹田市，2012/12/6。  
 長濱裕幸，2011 年東北地方太平洋沖地震 ( Mw= 9.0 ) 前の大気中ラドン濃度変動 地球電磁気・地球  
 惑星圏学会 ( 2012 年秋学会 ) 講演会，招待講演，2012/10/20 札幌市。  
 中村沙紀，安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間好，坂下守，向高弘，排気モニターによる大気中ラ  
 ドン濃度測定 その 2: 3 地点 ( 札幌・福島・岡崎 ) における平年変動の解析，日本放射線安全管理  
 学会，大阪府吹田市，2012/12/6。  
 Tajika, Y., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Suzuki, T., Homma, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S., Mukai, T., Janik,  
 M., Sorimachi, A., Hosoda, M., Radon concentration of outdoor air: Measured by an ionization chamber  
 for radioisotope monitoring system at radioisotope institute. J. Radioanal Nucl. Chem. 295, 1709-1714,  
 2012。  
 多鹿優佳里，安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間好，石川徹夫，床次眞司，反町篤行，細田正洋，Miroslaw  
 Janik，向高弘，排気モニターによる大気中ラドン濃度測定 その 1: RI 施設の影響，日本放射線安全  
 管理学会，大阪府吹田市，2012/12/6。  
 Yasuoka, Y., Ishikawa, T. Omori, Y. Kawada, Y. Nagahama, H., Tokonami, S., Shinogi, M., Handbook  
 of Radon: Properties, Applications and Health, Editors: Zachary Li and Christopher Feng, Anomalous  
 Atmospheric Radon Variation before an Earthquake: A Case Study of the 1995 Kobe Earthquake, Japan,  
 Nova Science Publishers, NY , USA., 2012a。  
 Yasuoka, Y., Kawada, Y., Omori, Y., Nagahama, H., Ishikawa, T., Tokonami, S., Hosoda, M., Hashimoto,  
 T., Shinogi, M., Anomalous change in atmospheric radon concentration sourced from broad crustal  
 deformation: A case study of the 1995 Kobe earthquake. Applied Geochemistry, 27, 825-830, 2012b。  
 安岡由美，石川徹夫，長濱裕幸，川田祐介，大森康孝，床次眞司，志野木正樹，地震とラドン濃度異  
 常，地震予知研究の最前線 - 地震予知工学・耐震工学・地震学の融和をめざして - ，早川正士 ( 監  
 修 ) ，日本専門図書出版，2012。  
 安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間 好，排気モニターによる広域大気中ラドン濃度測定の提案 巨  
 大地震前後の地殻変動解析に挑戦してみませんか Isotope News, 693, 17-19, 2012。  
 安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間 好，向 高弘，「ラドン濃度変動と地震 - 地震先行現象の痕跡  
 を排気モニターに求めて - 」FBNews ，428 ，1-5。( ホームページ公開 ) ，2012。  
 Yasuoka, Y., Tsuge, M., Miyamoto, S., Nagahama, H., Suzuki, T., Homma, Y., Kubota, K., Mukai, T.,  
 Atmospheric Radon Variation Before and After the 2011 Tohoku Earthquake (Mw = 9.0) NARE  
 2012 SYMPOSIUM on the NATURAL RADIATION EXPOSURES and LOW DOSE RADIATION  
 EPIDEMIOLOGICAL STUDIES, Hirosaki, 2012/3/2。  
 安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間好，久保田和人，片岡賢英，2012。「2011 年東北地方太平洋沖  
 地震前 (Mw= 9.0) の大気中ラドン濃度の顕著な変動」日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会，  
 千葉市 2012/5/24。  
 安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間好，石川徹夫，床次眞司，向高弘，柘植麻里奈，宮本莊子，Miroslaw  
 Janik，反町篤行，細田正洋，「排気モニター ( 通気式電離箱 ) による空気中ラドン濃度測定につ  
 いて」日本保健物理学会第 45 回研究発表会 名古屋市，2012/6/17。  
 安岡由美，長濱裕幸，鈴木俊幸，本間 好，向 高弘，大気中ラドン濃度変動：2011 年東北地方太平洋沖地  
 震と 1995 年兵庫県南部地震の先行現象，第 2 回地震予知研究シンポジウム，大阪市，2012/9/29。

( 9 ) 平成 25 年度実施計画の概要：

大学研究機関などの放射線管理施設 ( HEPA フィルター使用施設 ) の排気モニター ( 通気式電離箱 ) の解析 ( 気象要因の除去を含む ) を行い，大気中ラドン濃度変動の解析を行う。特に東北地方太平洋沖地震前のラドン濃度変動解析を行う。その際に，各施設の排気モニターの電離値とラドン濃度との

校正比較を、ウラン鉱石によるラドン場とポータブルラドンモニター（アルファガード）を用いて行う。施設により測定管理システム内のデータ抽出に業者の協力を必要とすることがあり、その際にはデータ抽出とデータの電子ファイル化に経費（消耗品費）を使用する。

得られたデータの解析結果と牡鹿半島でのラドン濃度測定結果（宮城県原子力センターと共同研究）と福島県立医科大学内放射線管理施設の測定データとの比較検討を行い、東北地方太平洋沖地震前の東北地方太平洋側陸域におけるラドン濃度変動を検討し、海溝型巨大地震前の陸域における地震先行大気中ラドン濃度変動の実態を解明する。

上記計画を進行させつつ、平成24年度成果を踏まえ、日本アイソトープ協会、日本放射線管理学会・主任者部会等にも継続的に働きかけ、西南日本や北海道における放射線施設が有する排気モニターデータを入手し解析する。また巨大地震前の地殻変動を大気中ラドン濃度変動からモニタリングすることを目的として、日本全国規模で放射線施設のモニタリングネットワークの構築を行い、大気中ラドン濃度変動と地震（火山噴火）活動との関連を調べる。

（10）実施機関の参加者氏名または部署等名：

長濱裕幸（研究総括者）、武藤潤

他機関との共同研究の有無：有

安岡由美（神戸薬科大学）、本間好（福島県立医科大学）、鈴木俊幸（福島県立医科大学）、大森康孝（放射線医学総合研究所）

（11）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti@aob.gp.tohoku.ac.jp

URL：http://dges.es.tohoku.ac.jp/kozo/

（12）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：長濱裕幸

所属：東北大学大学院理学研究科地学専攻

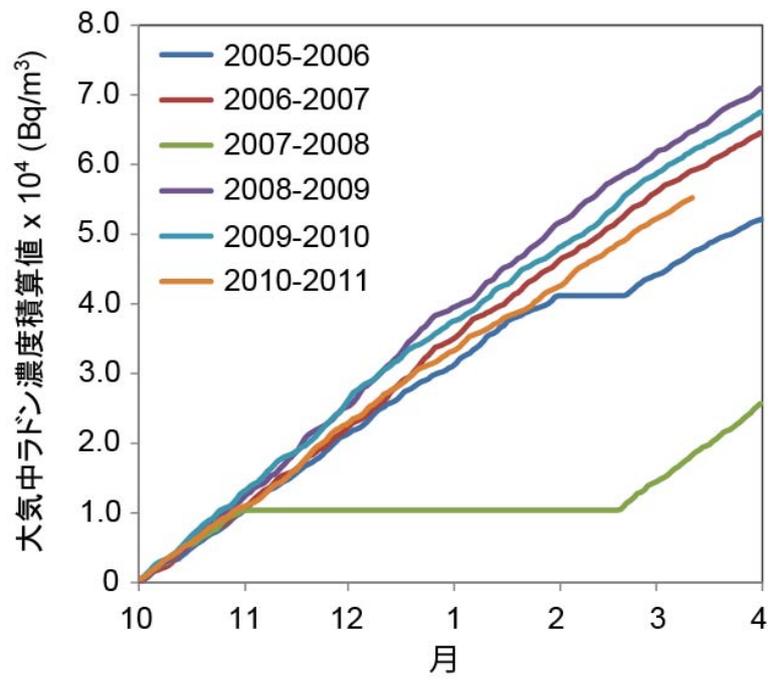


図1. 2005年から2011年までの大気中累積ラドン濃度(散逸率).  
 毎年, 前年の12月から翌年3月まで累積変化を示す.

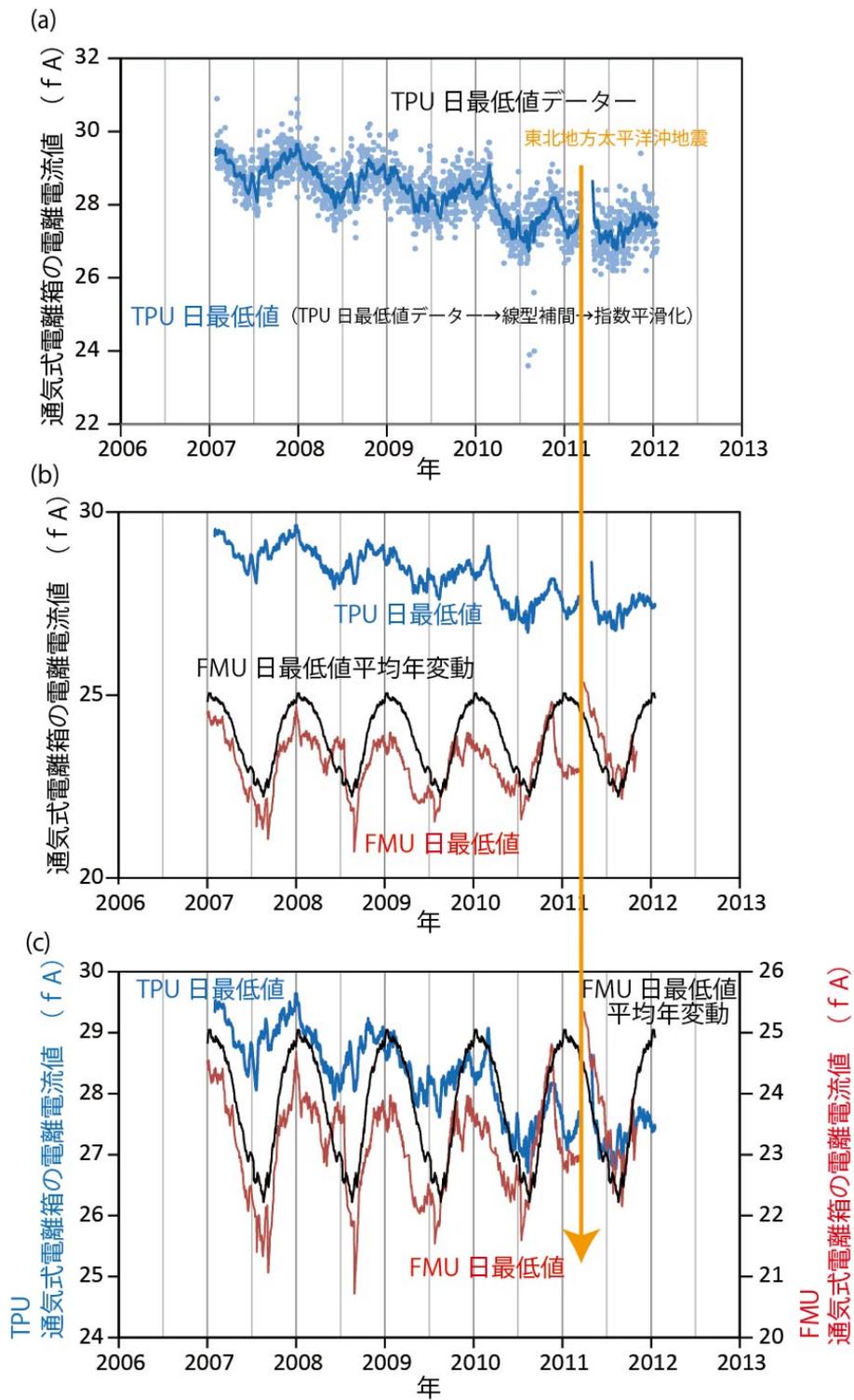


図 2. 東北薬科大学 ( TPU ) と福島県立医科大学 ( FMU ) の排気モニターの日最低値の変動 .

a) TPU の日最低値データと平滑化曲線, b) TPU と FMU の日最低値変動 ( 平滑済 ) , c) a を拡大し , 2 つの変動を重ねた .

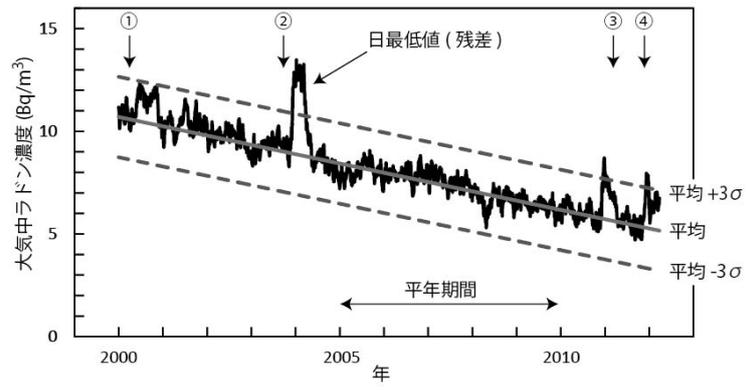


図 3. 札幌医科大学における排気モニターの変動