

空気中に存在する放射性の貴ガス：ラドン

東京理科大学 教養教育研究院 野田キャンパス教養部 准教授 ながの 永野 かつひろ 勝裕

■ はじめに

読者の皆さんは、「ラドン」という言葉を聞いたことはありますか？ 健康にいいと言われるラドン温泉、理科の授業で勉強した貴ガス（以前は希ガスと書かれていました）の1つ、プテラノドンが突然変異したといわれる怪獣などを思い浮かべる人もいるかもしれません。

ラドンとは、元素の1つで、周期表の右端の18族に属する貴ガスです。貴ガスは、周期表の右端の上（原子番号の小さい方）から、ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドンであり、一番下にラドンがあります。貴ガスのアルゴンは、大気中の存在比率が容積比で0.93%と、窒素（78%）、酸素（21%）について3番目に多く含まれる大気成分で、ヘリウムは $5.2 \times 10^{-4}\%$ 、ネオンは $1.8 \times 10^{-3}\%$ 、クリプトンは $1.1 \times 10^{-4}\%$ と微量ながらも大気中に含まれています。ラドンも貴ガスで気体ですので、上記のものと比べると非常に微量ですが、大気中に存在しています。

ラドンは放射性物質でもあります。そのため、自然放射線といわれるものの1つとして日常的な被ばくの原因ともなります（といっても通常は健康への被害を気にするレベルではありませんので安心してください）。ラドンは放射線を出すために微量でも観測が可能なため、大気中での空気塊や大気汚染物質の輸送のトレーサーとして利用され、役立てられてもいます。さらに、地震の前に地下水中や大気中でのラドン濃度に異常が起これるとの報告もあり、地震予知に利用できるともいわれています。

ラドンは大気中に存在していますが、その量（濃度）は時間的・空間的に変動します。本稿では、ラドンそのものの性質についてや、ラドン濃度の変動がなぜ起こるのかなどについて紹介します。

■ ラドンは放射性物質

ラドンは周期表の下の方にあり、原子番号86と原

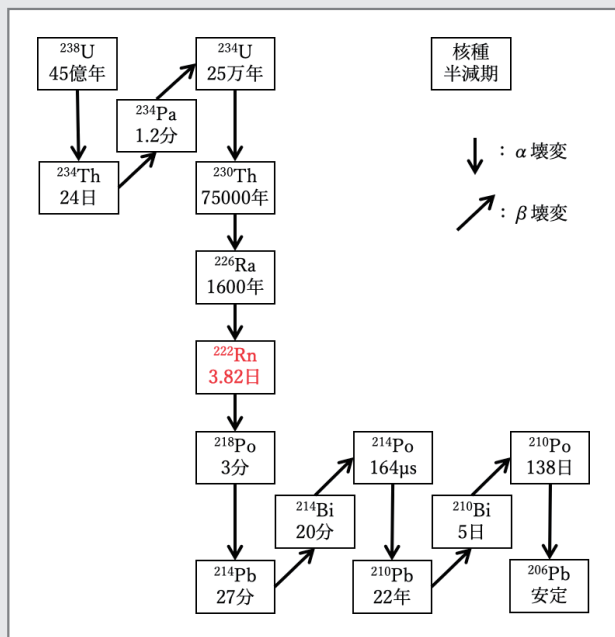
子番号が大きい元素なので、安定同位体はありません。同位体とは、陽子数（原子番号）が同じで、中性子数が異なる原子のことであり、周期表の同じ位置にあって化学的性質は同じでも、中性子の数が違うので原子核としては異なるというものです。同位体には、放射線を出す放射性同位体と放射線を出さない安定同位体があります。ラドンの同位体はすべて放射性同位体であり、放射線を出す放射性物質です。

大気中に存在するラドンの主な放射性同位体には、ラドン222とラドン220があります。ここで元素名ラドン（元素記号はRn）の後に書かれている数字は質量数（陽子の数と中性子の数の合計）を表します。ちなみに、ラドン222を狭義の意味でラドンといい、ラドン220をトロンということもあります。

放射性同位体は、原子核がエネルギー的に不安定な状態になっているので、安定な状態になるために、余分なエネルギーを放射線として放出します。このときに放出される放射線が、 α 線、 β 線、 γ 線と呼ばれるものです。 α 線は原子核から飛び出した陽子2個と中性子2個からなるヘリウムの原子核、 β 線は原子核の中の子が陽子と電子（と反電子ニュートリノ）になり、その電子が原子核から飛び出てきたもの、 γ 線は原子核から放出された電磁波です。

放射性同位体から、 α 線が放出されると、その原子核から陽子が2個と中性子が2個飛び出すので、その原子核の陽子数が2、中性子数が2減り、原子番号が2だけ小さい異なる種類の原子核に変わります。陽子数だけでなく、中性子の数まで含めて区別した原子核の種類のことを核種といいますので、 α 線の放出によって核種が変わります。このように放射性核種が放射線を出して異なる核種に変わることを壊変（または崩壊）といい、壊変前の核種を親核種、壊変後の核種を子孫核種といいます。 α 線、 β 線、 γ 線を出す壊変はそれぞれ α 壊変、 β 壊変、 γ 壊変といいます。

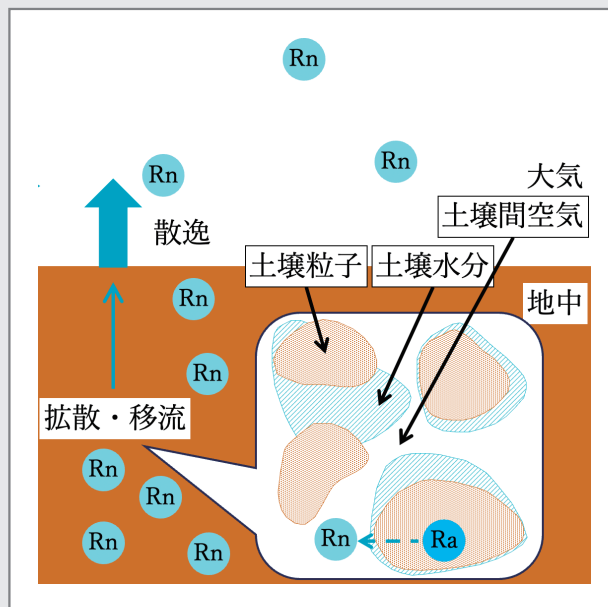
放射性核種が放射線を出すと別の核種に変わりますから、時間が経つと元の核種の数減っていきます。放射性核種の量が、元の量から半分の量になるまでの時間を半減期といいます。半減期は放射性核種によ



【図 1】 ウラン系列（主要な壊変のみを示し、ラドン 222 を赤字で示している）

て大きく異なり、長いものでは地球の年齢（約 46 億年）と同じくらいの数十億年、短いものは μs (10^{-6} 秒) や ns (10^{-9} 秒) などのものまで様々です。同じラドンでも、半減期はラドン 222 が 3.82 日、ラドン 220 が 55.6 秒と大きく異なります。ちなみに、半減期の 2 倍の時間が経つと、最初の半減期で半分になり、次の半減期では残った半分がさらに半分になるので、元の量の 4 分の 1 となります。最初の半減期で半分になり、次の半減期で残りの半分がなくなって 0 になるわけではありません。半減期が経つごとに残っているものが半分になっていくので、2 分の 1、4 分の 1、8 分の 1 というように指数関数的に減少していくものです。

ラドン 222 の半減期が 3.82 日なのに、なぜ今でも残っているのでしょうか。半減期が地球の年齢と同じくらいの核種であれば、現在でも残っていておかしくありませんが、ラドンのように半減期が地球の年齢と比べて非常に短い核種は、地球を作るときに取り込まれたものが現在まで残っているわけがありません。このように現在存在している半減期が短い核種は、現在新たに作られたものになります。このように自然界に存在している放射性核種には、地球が誕生したときに取り込まれたものと、今でも生成され続けているものがあります。ラドン 222 は後者で、ラジウム 226 が α 壊変して作られています。このラジウム 226 の半減期は 1600 年で、ラドン 222 と比べると長いのですが、地球の年齢と比べると短いので、これも別の核種の壊変により後から作られたものになります。こ



【図 2】 地中でのラドンの発生と地表からの散逸

のように辿っていったとき、1 番最初に位置する核種は、半減期が 45 億年のウラン 238 です。ウラン 238 の半減期は地球の年齢と同じくらいなので、地球誕生時に地球に取り込まれたものがまだ半分くらい残っています。このように、ウラン 238 は 1 回の壊変で安定同位体にはならず、次々に壊変していきます。このような壊変の連鎖を壊変系列といいます。ウラン 238 から始まる壊変系列はウラン系列といわれ、【図 1】のように、左上のウラン 238 (^{238}U) が半減期 45 億年で α 壊変（下向きの矢印）してトリウム 234 (^{234}Th) になり、それが半減期 24 日で β 壊変（右上向きの矢印）して…、というように、次々に壊変を繰り返して、最終的に鉛の安定同位体である鉛 206 (^{206}Pb) で終わります。

ラドン 220 は、半減期 141 億年で α 壊変するトリウム 232 から始まるトリウム系列で生成されたラジウム 224 の α 壊変によって生成されます。これ以降の話では、ラドン 220 (トロン) の半減期が 55.6 秒と短いため、ラドン 222 の話に限定し、特に断りがない場合は、ラドンはラドン 222 を表しています。

■ 地表から大気中へのラドンの散逸

ラドンは地中に広く分布するラジウムの壊変により地中で発生し、貴ガスであるため地中での拡散や移流によって、大気中にでてくることができます。その様子を模式的に示した図が【図 2】です。この図の Rn がラドン、Ra がラジウムを表しています。土は一見すると隙間などないように見えますが、【図 2】の地

中の拡大図のように、小さな土壌粒子の集まりで、その間には隙間（土壌間空間）があり、そこに土壌水分や土壌間空気が存在します。ウランは土壌粒子の中に含まれていて、ウラン系列のラジウムまでは固体粒子なので土壌粒子の中で壊変していきます。しかし、ラジウムが壊変すると、化学的に不活性な貴ガスであるラドンになるので、地中の他の物質と反応することなく、気体として土壌間空気中に出てきます。その後、ラドンの一部は土壌間空気中を通り、拡散や移流によって地表に運ばれ、大気中へと出ていきます。このように地表からラドンが出てくることを散逸といいます。

地中でのラドンの拡散は深さによるラドン濃度の差によって起こります。ここでのラドン濃度とは、土壌間空気中のラドン濃度であり、土壌粒子中に残っているラドンは含みません。地中の浅いところ（地表付近）では、ラドンが大気中に出ていくのでラドン濃度は低く、深いところでは、ラドンがラジウムの壊変によってできるのでラドン濃度は高くなります。実際のラドン濃度の値は、土壌粒子中のラジウム濃度や空隙率（土壌の体積に対する土壌間空間の体積の割合）などによって、数 m 以上の深さでは、数千、数万、数十万 Bq/m³ など文字通り地域によって桁違いに異なりますが、地表付近と比べると非常に高濃度になっています。ここで、[Bq]（ベクレル）は放射能の単位で、1 秒間に壊変する原子核の数を表しています。数 m 以上の深さに対して、大気中のラドン濃度は数 Bq/m³ 程度なので、この大きなラドン濃度の差によって地中の深いところから地表に向かうラドンの拡散が起こります。

地中でのラドンの移流は土壌間空気の気圧差（気圧傾度）によって起こります。気圧差は水平方向にもありますが、ここでは地表からのラドンの散逸との関係で鉛直方向の気圧差を考えます。ただし、静力学平衡、つまり空気の重さの影響も考慮する必要がありますが、ここでは簡単のため割愛します。地中の浅いところの気圧よりも深いところの気圧の方が高ければ、気圧の高い深いところから気圧の低い地表に向かって空気が動き、深いところにあるラドン濃度の高い空気が地表に移動することになります。

■ ラドンの地表からの散逸は気象条件で変動

地中から地表面を通り大気中へと散逸するラドンの量は空間的にも時間的にも変化します。空間的には、土壌の種類によって変わり、土壌に含まれるラジウムの量や土壌間空間の大きさである空隙率などによって

変わります。また、時間的には、同じ場所でも気象条件によって変わります。

地中から地表面を通り大気中へと散逸するラドンの数が、ラドン散逸率 [Bq/(m²s)] で表されます。これは、地表面の単位面積を通り単位時間到大気中へと散逸するラドンの量を放射能の大きさを表したものです。放射能の大きさは、単位時間に壊変する原子核の数なので、ラドン原子の数が多いほど、壊変するラドン原子の数が増えることから、ラドン原子の数と関係しています。このことから、ラドン散逸率は、地表面の単位面積を通り単位時間到大気中へと散逸するラドン原子の数と関係していると考えられます。

ラドン散逸率の時間的な変化の例として、【図 3(a)】に、東京理科大学野田キャンパスにおいて 1998 年 3 月に観測された地表からのラドン散逸率の時間変化を示しました。横軸は日にちです。これを見ると、ラドン散逸率は、同じ場所（土壌中のラジウムの量などは同じ）でも一定ではなく、時間的に変化していることがわかります。例えば、19 日から 20 日にかけて約 5mBq/(m²s) から約 15mBq/(m²s) へと大きく増加していたり、11 日夜遅くから 12 日明け方にかけて、変化は小さいですが急激に減少したりしています。地中で生成されるラドンの量は変わらないはずなのに、なぜこのような変動が起こるのでしょうか。

【図 3】には、ラドン散逸率の時間変化だけではなく、【図 3(b)】に同じ場所で観測された地表面気圧と降水量の時間変化も示しています。これらの比較から、低気圧の通過や降水の有無のような天気の変化が、ラドン散逸率の変化に関係していることがわかります。

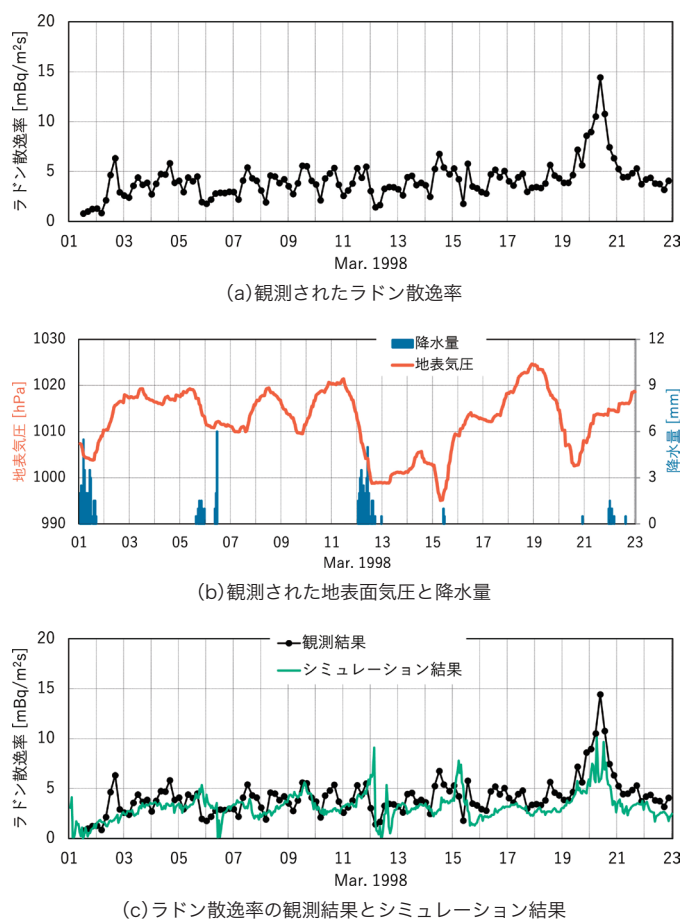
まず、【図 3】で、ラドン散逸率が大きく増加していた 19 日から 20 日にかけての変化を見てみます。【図 3(b)】の地表面気圧の変化を見ると、地表面気圧は約 1020 hPa から 1000 hPa 近くまで下がっていますので、低気圧が通過したのではないかと推測できます。実際には、19 日に日本を覆っていた移動性高気圧が移動し、その後移動してきた温帯低気圧から伸びる寒冷前線が通過していましたが、前線は気圧の谷と呼ばれる低気圧と同じような気圧の低い部分です。ここで、地中の気圧の変化を推測してみると、深いところでは地表の影響はあまり受けずに気圧の変化はありませんが、浅いところでは地表面気圧の低下の影響を受けて気圧が低くなっていくと考えられます。つまり、地表面気圧の低下とともに、地中では浅いところの気圧が低く、深いところの気圧が相対的に高いとい

う鉛直方向の気圧差ができることになります。この気圧差による、気圧の高い深いところから気圧の低い地表に向かう移流によって、この期間のラドン散逸率が大きく増加したものと推測できます。

【図3(c)】には、観測されたラドン散逸率とともに、その場所の土壌の条件や観測された地表面気圧、深さ20 cmと50 cmの地中水分量（降水量と関係するものです）を用いて、著者らが開発したモデル¹⁾でシミュレーションを行ったラドン散逸率の時間変化も示しました。19日から20日にかけてのシミュレーション結果の変化を見ると、観測結果と同様にラドン散逸率が増加しています。モデルには地中水分量（降水量）の影響も考慮されていますが、19日から20日にかけて降水はありませんでしたので、地表面気圧の低下によってラドン散逸率が増加したといえます。

次に、【図3】で、ラドン散逸率が急激に減少していた11日夜遅くから12日明け方にかけての変化を見てみます。【図3(b)】の地表面気圧の変化を見ると、この期間も先ほどの期間（19日から20日にかけて）と同様に地表面気圧は約1020 hPaから1000 hPa近くまで下がっています。そのため、地中での深いところからの移流によってラドン散逸率が増加してもおかしくないように思えますが、ラドン散逸率は急激に減少しています。ここで【図3(b)】の降水量の変化を見ると先ほどの期間との相違がわかります。先ほどの期間では降水がありませんでしたが、この期間では12日の午前中ずっと1時間の降水量が約3 mm前後の雨が降っていました。この雨によって、土壌間空間が土壌水分で満たされてしまい、ラドンの通り道である土壌間空气がなくなったために、ラドンの地表への移流が起こらず、ラドン散逸率が急激に減少したと推測できます。

【図3(c)】の11日夜遅くから12日明け方にかけてのシミュレーション結果の変化を見ると、少し時間がずれてはいますが、観測結果と同様にラドン散逸率が急激に減少しています。モデルには地中水分量（降水量）の影響も考慮されていますので、降水によってラドン散逸率が減少したといえます。ラドン散逸率の減少が、観測では11日夜遅くから始まっているのに対して、シミュレーションでは12日の未明というように少し時間がずれています。これは、シミュレーションでの降水の影響として、深さ20 cmと50 cmの地中水分量を用いているためだと考えられます。観測では降水とともにすぐに深さ0 cmや数 cmの部分



【図3】 東京理科大学野田キャンパスにおいて、1998年3月に観測された (a) 地表からのラドン散逸率、(b) 地表面気圧と降水量、および (c) ラドン散逸率の観測結果とシミュレーション結果の時間変化

が塞がれてラドン散逸率が減少しますが、シミュレーションでは深さ20 cmに降水による水分がたどりついた時間が降水の時間になるので、その深さまで水分がたどりつくのに時間がかかるため、その分の時間がずれてしまいます。シミュレーションで12日未明にラドン散逸率が増加しているのは、シミュレーションではまだ降水が起こっていない（深さ20 cmの水分量が増えていない）ので、地表面気圧の変化の影響です。

■ 地中からのラドンが家屋内へと侵入

地中のラドンの一部は地表に運ばれ、大気中へと出ていきますが、地上に建物があった場合には、その建物の中に侵入し、中にいる人に被ばくという健康被害をもたらす可能性があります。大気中に存在するラドンおよびその子孫核種は、呼吸によって吸い込まれて肺に到達し、肺の中で放射線を放出するため、肺がんとなるリスクが高まります。この場合は、ラドンよりもラドンの子孫核種（特にポロニウム218、鉛214、ビ

スマス214) が問題となります。これは、ラドンが気体のため、吸い込んででもすぐに呼気として排出されますが、ラドンの子孫核種は個体粒子であるため、肺に吸い込んだときに、気管支や肺胞に付着して排出されにくいからです。

このようなラドンによる被ばくは、世界平均では自然放射線による被ばくの約半分に相当します。自然放射線とは、人工的に原子力発電などで生成される放射性物質ではなく、自然界にもともと存在している放射性物質からの放射線のことです。これには、銀河や太陽からの宇宙線のような宇宙からの放射線、食品に含まれるカリウム40（半減期13億年）などのような食物からの放射線、土壌に含まれるウランなどによる大地からの放射線、そして空気に含まれるラドンおよびトリトンからの放射線があります。日本では、石造りの家や地下室があるような欧米などと異なり、風通しのよい（気密性の悪い）木造建築が多いので、ラドンによる被ばくは世界平均の半分以下です。

屋内では、屋外と比べてラドン濃度が高くなっています。屋内では、地中から出てきたラドンが、配管、床と壁の接合部、床のヒビなどの隙間から侵入しますし、石の建材やコンクリートなどからもラドンが発生します。このようなラドンが屋内に蓄積して、屋内のラドン濃度が高くなります。しかし、屋外のラドン濃度は屋内と比べて低いので、窓を開けるなど換気を行うと、急速にラドン濃度が低下します。意図した換気ではなくても、人が出入りするときのドアの開閉が換気となりますので、人の出入りがあるかないかも屋内のラドン濃度に関係します。

■ 大気中のラドンも気象条件で変動

地表面から散逸してきたラドンは、家屋などがなければ、そのまま大気中に広がり、拡散や風による移流で輸送されます。ラドンの発生源は地表面なので、地表付近（大気中での話なので下側です）は濃度が高く、上空は濃度が低くなっており、拡散によって上方へと輸送されます。このため、家屋ほどのラドンの蓄積はないので、屋内と比べて屋外の濃度は低くなります。ただし、ここでの拡散は、いわゆるブラウン運動による分子拡散ではなく、乱流拡散と呼ばれるものです。乱流拡散は、分子の運動よりもずっと大きなスケールの空気の渦（乱流）による拡散です。また、水平方向には風によって輸送されます。風は低気圧や高気圧などによって発生しますので、水平方向のラドン濃度の

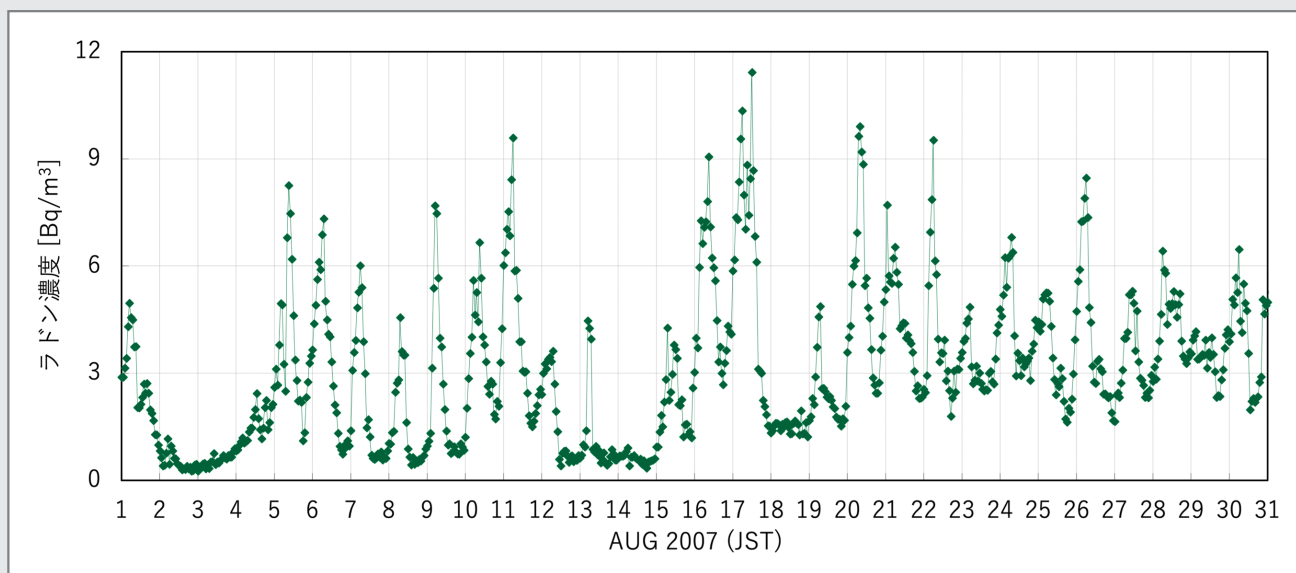
分布が気圧配置によって変わってきます。

大気中のラドン濃度の時間変化の例として、【図4】に東京理科大学野田キャンパスにおいて2007年8月に観測された高さ約10m（4階の窓から観測）でのラドン濃度の時間変化を示しました。横軸は日にちです。この濃度の変動には、1日周期の変動と数日周期の変動という2つの特徴的な変動が見られます。

1日周期の変動は、夜間増加し、日中減少するという大きな濃度の日変動で、1日の間の大気安定度の変化が影響しています。大気安定度とは、天気予報で「大気が不安定になっているので、雷や急な雨に注意」などと聞いたことがあるかもしれませんが、この「大気が不安定」ということに関係するものです。大気が不安定とは、下（地表付近）が暖かく上（上空）が冷たい状態で、上昇気流がでやすく、乱流が発生しやすい状態です。逆に、大気が安定とは、下が冷たく上が暖かい状態で、上昇気流がでにくく、乱流が発生しにくい状態です。一般に晴れている日は、日中は太陽放射によって地表面が暖められて、それに接した地表付近の空気も暖かくなるので、大気が不安定になります。逆に夜になると、放射冷却によって地表面が冷やされて、それに接した地表付近の空気も冷たくなるので、大気が安定になります。このように、日中は大気が不安定になるので、地表面から散逸したラドンが乱流によって上空へと拡散されてしまい地表付近の濃度が減少し、夜間は大気が安定になるので、地表面から散逸したラドンが上空へと拡散できずに地表付近に滞留するために地表付近の濃度が増加します。

数日周期の変動は、日中の濃度の極小値の部分の変動のことで、総観規模といわれるスケールの現象の影響です。7～9日あたりと20日以降の極小値を見比べるとわかると思います。総観規模とは、低気圧や高気圧などの天気図で表現されるような規模のことです。つまり、低気圧や高気圧などによる風によってラドンが輸送されて濃度が変化します。このとき重要になるのが陸と海でのラドンの散逸率です。海水中のラジウム濃度は地殻中のそれより4桁以上も低いため、陸上と比べると海上でのラドン散逸は無視できるくらい小さなものとなります。このため、ラドンは陸上だけから発生し、海上からは発生しないと考えられます。これによりラドン濃度は、陸から風が吹いてくると増加し、海から吹いてくると減少することになります。例えば、2～3日は台風の接近で太平洋からの風が吹いていたために濃度が減少しています。

ラドン濃度の変動には、1日周期や数日周期以外に



【図 4】 東京理科大学野田キャンパスにおいて、2007 年 8 月に観測された大気中ラドン濃度の時間変化

も 1 年周期という季節的な変動もあります。季節変動は、季節の特徴が国によって違うため、国によって異なりますが、日本では夏に減少し冬に増加します。日本は、北西にユーラシア大陸、南東に太平洋があり、ちょうど大陸と海洋の境界にあたります。それによって夏は南寄りの風、冬は北寄りの風という季節風が吹きます。このこととラドンが陸上から発生し、海上からは発生しないことを踏まえると、夏はラドンの少ない海からの季節風が吹き、冬はラドンの多い大陸からの季節風が吹くことから、ラドン濃度が夏に減少し冬に増加することになります。

このラドンの数日周期の変動が、近年問題となっている越境大気汚染という汚染物質輸送のよいトレーサーともなります。ラドンが化学的に不活性な放射性の貴ガスであることから、大気中での輸送途中で化学変化によって別の物質に変わることはなく、輸送中のラドンの減少は壊変によってのみ起こります。さらにラドンは、人間が活動している陸上を発生源とする汚染物質と同様に、陸上から発生し、海上からは発生しないという特徴もあります。これらのことから、ラドンは陸上から発生して、途中で未解明の化学変化をせずに輸送される物質で、放射線を出すので少量でも観測しやすい物質ということで、汚染物質輸送のよいトレーサーになります。

■ ラドンで地震予知もできる？

ラドンの発生源である地殻に応力がかかることによって地震が発生しますので、地震の発生前にラドン濃度に異常が起こるといわれています。ここでいうラド

ン濃度は、地下水、井戸水、洞窟内の空気、大気中とさまざまな場所での濃度です。地下水や井戸水は地中で発生したラドンの一部が溶け込んでいますし、洞窟は地中といってもいいような場所ですし、大気中へは地表面からラドンが出てきています。地震の発生前に大きな力が加わった地殻内では、岩石の構成粒子の粒径に対して数分の 1 から数倍程度の大きさをもつ微細な割れ目が多数発生していると考えられています。これらの割れ目が、地下水や地表面への通常とは異なるラドンの通り道となり、さまざまな場所でのラドン濃度に異常が発生すると考えられています。このことから、ラドン濃度の変動を調べることで地震予知ができないかといった研究も行われています。

■ おわりに

本稿では、ラドンの特徴、地中や大気中でのラドンの輸送、屋内のラドンによる被ばく、ラドンの地震予知への可能性など、ラドンについて簡単に紹介させていただきました。ラドンなんて初めて聞いたとか、温泉の成分でしょとか、貴ガスはキセノンまでではなくその次にラドンがあるの？ とかいう方も多いかもしれませんが、本稿を読んで、ラドンというものについて多くの方に興味を持っていただければ幸いです。

参考文献

- 1) Katsuhiko NAGANO, Hiroshi KOJIMA. Effects of Meteorological Factors on Radon Exhalation by Using Radon Transport Model in Soil. Japanese Journal of Health Physics. 2010, Vol. 45, No. 3, p. 262 (in Japanese). <https://doi.org/10.5453/jhps.45.262>