地震とラドン濃度異常 (I) — 従来の観測例 —

石川 徹夫 *¹, 安岡 由美 *², 長濱 裕幸 *³, 川田 祐介 *⁴, 大森 康孝 *³, 床次 眞司 *¹, 志野木正樹 *²

(2008 年 2 月 12 日受理)

(2008 年 3 月 21 日再受理)

Radon Anomalies Prior to Earthquakes (I) — Review of Previous Studies —

Tetsuo ISHIKAWA,*¹ Yumi YASUOKA,*² Hiroyuki NAGAHAMA,*³ Yusuke KAWADA,*⁴
Yasutaka OMORI,*³ Shinji TOKONAMI*¹ and Masaki SHINOBI*²

The relationship between radon anomalies and earthquakes has been studied for more than 30 years. However, most of the studies dealt with radon in soil gas or in groundwater. Before the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, an anomalous increase of atmospheric radon was observed at Kobe Pharmaceutical University. The increase was well fitted with a mathematical model related to earthquake fault dynamics. This paper reports the significance of this observation, reviewing previous studies on radon anomaly before earthquakes. Groundwater/soil radon measurements for earthquake prediction began in 1970's in Japan as well as foreign countries. One of the most famous studies in Japan is groundwater radon anomaly before the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake. We have recognized the significance of radon in earthquake prediction research, but recently its limitation was also pointed out. Some researchers are looking for a better indicator for precursors; simultaneous measurements of radon and other gases are new trials in recent studies. Contrary to soil/groundwater radon, we have not paid much attention to atmospheric radon before earthquakes. However, it might be possible to detect precursors in atmospheric radon before a large earthquake. In the next issue, we will discuss the details of the anomalous atmospheric radon data observed before the Hyogoken-Nanbu earthquake.

KEY WORDS: radon, anomaly, earthquake, groundwater, soil, Hyogoken-Nanbu earthquake, Kobe, atmospheric radon, precursors.

*¹ (独)放射線医学総合研究所環境放射線影響研究グループ; 千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒263-8555)

Environmental Radiation Effects Research Group, National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan.

E-mail: tetsuo_i@nirs.go.jp

*² 神戸薬科大学放射線管理室; 神戸市東灘区本山北町 4-19-1 (〒658-8558)

Institute of Radioisotope Research, Kobe Pharmaceutical University; 4-19-1 Motoyamakita-machi, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-8558, Japan.

*³ 東北大学大学院理学研究科地学専攻; 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 (〒980-8578)

Dept. of Geoenvironmental Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University; 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan.

*⁴ School of Geosciences, University of Edinburgh; West Mains Road, Edinburgh EH9 3JW, UK.

I 緒 言

1995 年 1 月 17 日午前 5 時 46 分に兵庫県南部地震 ($M_j = 7.3$) が発生した*。この直下型地震による犠牲者は 6,000 人以上, 建物や高速道路の倒壊など甚大な被害が発生し^{2,3)}, 阪神淡路大震災と呼ばれている(第 1 図)。この兵庫県南部地震に先行して発生した, 地下水中のラドン (^{222}Rn) 濃度の上昇⁴⁾と大気中のラドン濃度の上昇^{5,6)}は

* 地震のマグニチュードについては数種類の算出法がある。本稿においては, 国内の地震に関しては原則として気象庁マグニチュード (M_j)¹⁾で, 外国の地震 (及び気象庁マグニチュードが不明な国内の地震) に関しては, 各引用文献中に示されていたマグニチュード (M_j の計算法によるマグニチュードとは必ずしも一致しない場合もある) を M の表記で示した。

国連科学委員会の報告書⁷⁾や地震予知連会報⁸⁾にも取り上げられており, 地震前の明確な前兆が捕らえられた観測データとして注目されている。

ラドンは(1)放射能を有するためごく微量でも検出が可能であること, (2)不活性ガスなので濃度変化は物理的な要因のみによって生じることから地震予知研究の中でポピュラーな項目の一つとして古くから観測が続けられてきた⁹⁾。以前に本誌で脇田が「ラドン観測と地震予知」¹⁰⁾と題して解説しているように, 地下水中のラドン濃度が地震の前(後)に変化するという報告は国内, 国外で数多くなされてきた。また地震前には地殻に加わる応力の作用によって, 岩石の割れ目や地下水中に存在する高濃度のラドンが断層などの巨視的割れ目に沿って上昇し, 地表面から散逸するラドンが増加することも予想される。そこで, 断層上で土壌ガス中(土中)ラドン濃度や土壌からのラドン散逸率をモニタリングし, 地震との関連付けを行う試みも行われている。一方で, 地下水中ラドンや土中ラドン濃度に関する報告に比べると, 大気中ラドン濃度と地震との関連に関する報告は非常に少ない。その数少ない例として, 兵庫県南部地震前に安岡と志野木が観測した大気中ラドン濃度上昇に関するデータ^{5,6)}がある(第2図)。

近年, この地震前のラドン濃度上昇を数理モデルに適用する試みが論文発表された¹¹⁾のを機に, 放射線医学総合研究所からプレス発表を行ったところ¹²⁾, 読売, 毎日などの新聞各紙や雑誌等にも取り上げられ, 同時に多くの質問, コメントも寄せられた。そこで本報告では, 2回に渡ってプレス発表の背景, 内容を再度解説するとともに, 本研究分野における現状と今後の展望について述べる。今回は第一報として, 従来の地震予知目的のラドン観測例を地下水中, 土中, 大気中ラドンに分けてレビューし, それぞれの測定の特徴を考察する。

第1図 横倒しになった阪神高速道路と大気中ラドン濃度の上昇を観測した神戸薬科大学(写真:朝日新聞社提供)

II 地震と関連付けたラドンの観測例

地震とラドンとの関連についての研究は古くから行われてきた。以下, 地下水中ラドン, 土壌空气中(土中)ラドン, 大気中ラドンについて, 従来の観測例を簡単にレビューし, それぞれのラドン観測の特徴を考察してみる。地下空間における空気中ラドン濃度測定は, 土中ラドンの項で述べる。

2.1 地下水中ラドン

地震に関連した地下水中ラドン濃度の変化の報告例はわが国では北但馬地震(1925年 $M_j = 6.8$), 長野地震(1941年 $M_j = 6.1$)などかなり古くからある¹⁰⁾。これに対し, 地震の前兆的变化として世界的に注目された例はソ連のタシケント地震(1966年 $M = 5.5$)の前の地下水中ラドン濃度変化であり, 以来この方面での研究が急速に進展した¹⁰⁾。1970年代以降は, 中国, インド, 旧ソ連, 米国, イタリア, 台湾など各国地域から地震前の地下水中ラドン濃度異常が報告されている。諸外国の報告については数が多いので, ここでは詳細に言及しない。TOUTAIN and BAUBRON¹³⁾, あるいは SILEVITCH ら¹⁴⁾のレビューに地震前のラドン濃度異常(大部分は地下水中ラドン)に関連した論文リスト(1970年代から1990年代中ごろまで)があり, よくまとまっている。SILEVITCH らのレビューでは, 地下水中, 土中ラドンを併せて, 86の地震から観測された125のラドン濃度異常を取り上げている。2000年代以降も地下水中のラドン濃度異常についてはいくつもの報告がなされている(例えば KUO ら¹⁵⁾, ZMAZEK ら¹⁶⁾)。

地下水中のラドン濃度測定は, 当初地下水をサンプリングしてきて液体シンチレーションカウンタで測定する方法やバブリングによって追い出したラドンを電離箱で測定する方法が用いられていたが, 測定技術の発達と

第2図 兵庫県南部地震前に観測された大気中ラドン濃度(日最低値)の上昇の様子

もに 1980 年代頃からは連続測定器が用いられるようになった^{17, 18)}。

日本では、1970 年代以降東京大学や地質調査所（現産業技術総合研究所）などのグループが地震予知を目的としたラドン観測を実施してきた。地質調査所では 1978 年より地下水中ラドン濃度の連続観測を続けてきた。当初は東海地震の予知を目的として、静岡県内の 8 地点で観測を行い、延べ 13 箇所までに観測点を増やして測定を行ってきた。その後、観測井の状況により取捨選択が行われ、1996 年の時点ではラドン観測は 3 箇所のみに絞って続けられている¹⁹⁾。東京大学のグループでは、ZnS (Ag) シンチレータを用いた連続測定装置を開発し²⁰⁾、東海地方を中心に観測地点を設けて、地下水中ラドン濃度の観測を続けてきた。この観測の中で、脇田らによる伊豆大島近海地震（1978 年 $M_j = 7.0$ ）前のラドン濃度異常に関するデータ²¹⁾は特に有名である。これは国際地震学及び地球内部物理学協会（IASPEI, International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior）の地震前兆リストにも登録²²⁾されており、周囲にある他の観測点の地下水位変化や体積歪変化とも良く対応した信頼度の高い前兆現象として評価されている。この報告によってラドン濃度変化が地震予知のために重要であると確認された。

また、観測井の地震に対する「感度」も評価されている。東京大学のグループの IGARASHI and WAKITA²³⁾は 1984 年～1988 年の間に、地震後のラドン濃度変化を 12 例見だし、福島県双葉断層上にある鹿島観測井が地震に対して敏感な井戸であることを明らかにした。この 12 例の地震後のラドン濃度変化を調べたところ、地震のマグニチュードが大きいほど、また地震の発生位置が鹿島観測井に近いほど、ラドン濃度異常の振幅が大きいことを明らかにした。ただしこれは地震後の変化なので、予知という面ではなく、震源からの距離、マグニチュードとラドン濃度変化との関係を定量的に明らかにした点で意義深い。前兆的ラドン濃度異常についても、この観測井から約 1,000 km 離れた鳥島近海を震源とする地震（ $M_j = 7.6$ ）の 1 週間前に生じたラドン濃度の異常な上昇を報告している²⁴⁾。また、IGARASHI ら²⁵⁾は鹿島観測井におけるラドン濃度の地震に対する「感度」が長期的には変化するという興味深い事実も報告している。

その他国内の研究機関では、岐阜大学で 0.5 Bq/m^3 という非常に低い濃度まで測定可能な地下水中ラドン濃度観測装置²⁶⁾が開発され、地震予知研究の一環として県内の断層近傍を中心に連続観測が続けられている。現在

では 14 箇所の測定地点におけるデータがホームページ上で公開されている。また近年の国内での観測例としては、冒頭に記した兵庫県南部地震前の地下水中のラドン濃度の上昇について報告したデータ⁴⁾が有名である。

このように地震前の地下水中ラドン異常の観測例は国内外で数多く報告されているものの、地震前のラドン濃度の変動パターンは必ずしも一定ではない。例えば、兵庫県南部地震前に IGARASHI ら⁴⁾の西宮の観測点では濃度の顕著な増加が見られたが、神戸薬科大学における地下水中ラドン濃度は地震の前に下降している²⁷⁾。また、前述の東京大学の福島県鹿島観測井と同じ双葉断層上にある他の観測井では地震に対する感度が低いことが報告されており、同じ断層上にある井戸でも地震に対する感度の高い井戸とそうでない井戸があることが示唆されている。しかも地震に対する感度がどの程度であるかは観測してみないとわからないというのが現状である。これは観測井周辺の局所的な構造の不均一性によるものと推定されている。このような現状を考えると、観測井を多く設けて、それらの地下水中ラドン濃度の変化から震源を特定しようという試みは難しいという考えもある⁹⁾。

このようにラドンという 1 種類のガスのみを観測するだけでは地震に応答するメカニズムを研究する上で限界も指摘されており、近年ではラドン以外の化学種を同時に測定する研究も実施されている。VIRK and WALIA²⁸⁾は He/Rn 比が地震に応答する可能性を示した。この研究では地震の 3 週間くらい前から地下水中のラドン濃度は減少傾向を示し、土中の He 濃度は地震の 2 週間くらい前から増加傾向にあった。He/Rn の比をとると地震の 10 日ほど前に顕著なピークが見られている。地下水中に溶解している複数のガス濃度の比を指標にした前兆現象検出の試みは 1970 年代より報告があるが²⁹⁾、ラドンと他のガスを同時測定して、その比を指標にする試みは比較的新しい。東京大学のグループでもラドン（ ^{222}Rn ）のみならず、 ^4He 、 CH_4 、 N_2 、 O_2 、 ^{36}Ar 、 ^{40}Ar 、 CO_2 、 ^{220}Rn など複数化学種の同時測定を検討している³⁰⁾。

2.2 土中ラドン（地表面からの散逸ラドン）

土壌ガス中のラドンに関しては、古くは HATUDA³¹⁾が 1944 年の東南海地震（紀伊半島南東沖 20 km を震源とする $M_j = 7.9$ の地震）の前に土中ラドン濃度が増加したという報告をしている。HATUDA は京都大学構内において地下 60 cm、1 m、2 m の深さの土中ラドン濃度を継続的に測定していたところ、地下 2 m の深さのラドン濃度が東南海地震前に顕著に増加するのを観測した。これは、次節で述べる OKABE の研究³²⁾とともに地震とラドンと

の関連を指摘した先駆的な研究でありながら, 当時の地震学者からは全く無視されたと岡部は述べている³³⁾。

土中ラドン濃度(土壌表面から散逸するラドン)を測定することで地震との関連付けを検討する試みが本格化するのは1970年代で, それ以降は国内外で多くの報告がなされるようになった。例えば国内では, 地質調査所が断層上の地中に深さ50 cmの観測孔を掘り, その底部に固体飛跡検出器を吊るして10~14日ごとに検出器を交換する方法(α トラック法)を用いて, 土中から放出されるラドン及びその子孫核種の濃度変化を測定する試みを報告している³⁴⁾。また, 地表面にパッシブ型測定器を1~3週間設置し, 地表面から散逸するラドンを積分測定する試みが宇井ら^{35, 36)}によって行われている。1~3週間の曝露期間が終了しだい, 測定器を交換することにより連続的にデータを得て, 地震との関連を考察している。この研究では長野県西部地震(1984年 $M_j = 6.8$)の2週間前から全ての観測点(6地点)で, ラドン濃度が著しく増加したことを報告している。

海外ではKING³⁷⁾がカリフォルニア州で断層上に観測孔を掘ってラドン測定器を設置し, 地震との関連を検討している。ここでは, マグニチュード4.3の地震の数週間前から土中ラドン濃度が急速に上昇する現象を報告している。さらにKINGらは, Landers地震(1992年 $M = 7.5$)の後に, 地表面に現れた断層(地表地震断層)上で同様の観測を行った結果, ラドン濃度が一桁上昇したと報告している³⁸⁾。同じく米国のFLEISCHERらも同時期にパッシブ型測定器を地中深さ60 cmの位置に設置して, 地震との関連を検討している^{39, 40)}。パッシブ型測定器を用いて土中ラドン濃度をモニタリングし, 地震との関連付けを検討する研究は近年でも報告があるが⁴¹⁾, 一方でこの手法では測定器(固体飛跡検出器)を定期的に交換しなければならず, やや手間がかかる面もあった。

近年では土中にプローブを差し込んで土壌ガスを連続的に吸引することによってラドンを連続測定可能な装置が開発され, 市販もされている⁴²⁾。そのため近年では, このような連続測定器を断層近辺に設置して, 土中ラドンと地震との関連付けを検討する研究がギリシャ⁴³⁾, スロベニア⁴⁴⁾, 台湾⁴⁵⁾, フランス・フィリピンのグループ⁴⁶⁾などから報告されている。地震に対する感度に関する検討も行われており, GHOSHら⁴⁷⁾はマグニチュード7級の地震に対しては, 1,000 km程度先の震源の地震に対しても感度があると評価している。土中ラドン測定の多くは, 地表面から1 m以内の深さの観測孔で測定

しているものであるが, PAPASTEFANOUら⁴³⁾は地下25 mから50 mの土中ラドン濃度もモニタリングする試みも報告しており, 地震活動に連動して地下25 mでのラドン濃度が1桁上昇する現象も観測している。STEINTZらは観測孔に沿って4 m, 10 m, 55 mの深さに測定器を設置して, ラドン濃度変動に影響を与えるパラメータを検討している⁴⁸⁾。

今までの地下水中・土中ラドン濃度異常をまとめたレビュー¹⁴⁾によると, 地下水中あるいは土中ラドン濃度異常が始まる時期は, 大半の場合, 地震発生日からさかのぼって約30日以下の時点である。また異常の継続する期間は最大で200日程度と報告されている(地震発後も異常が継続する場合も含んでいる)。前述のように, 地下水中ラドンは地震前に濃度が上昇する例もあれば, 下降する例もある。それに対して, 土中ラドンの場合は, 一般的に地震の起こる数日から数十日前からラドン濃度が異常な上昇を示すパターンが多く見られる。

地下水中ラドンの節でも複数のガスを同時測定する試みについて触れたが, 土壌中ガスについても同様に地震前兆現象検出のためのより良い指標を求めて, ラドンとその他のガスを同時に測定する試みが報告されている。YANGら⁴⁵⁾は土壌ガス中のラドンのみならず, ^3He , ^4He , ^{20}Ne , ^{220}Rn (トロン)を同時測定し, ラドン濃度異常とトロン濃度異常との関連性, あるいは $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の異常とラドン・トロン濃度異常との関連を考察している。ラドン濃度異常とトロン濃度異常が良く相関していること, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の異常とラドン濃度異常とが良く相関していることなどを報告している。

地下空間内(洞窟や坑道)でラドン濃度を観測した例もいくつか報告されている。国内では坑道内で空気中ラドン濃度を観測した例^{49~54)}があり, 地震前に濃度が上昇する現象も観測されている。下と山内⁴⁹⁾は降水, 大気圧と坑道内ラドン濃度との関連を検討した。降水後にラドン濃度が急激に増加する現象については, 降水による地下水の増加によって, 岩盤内の空隙に地下水が入り込むため, 空隙内に存在していたラドンが押し出されるように坑道内に供給されるためであろうと考察している。これにより, 岩盤内でのラドンの移動に地下水が深く関わっていることを指摘した。また, 大気圧とラドン濃度との逆相関も報告している。YAMAUCHI^{51, 52)}は観測坑内における伸縮計とラドン濃度の測定値とを比較検討した結果, 坑道内のラドン濃度が上昇する現象について, 応力が地殻に作用して岩盤の特定の方向の割れ目が開き, その割れ目からラドン濃度の高い地下気が坑道内に

流入するというメカニズムを提案している。この研究は地震前にラドン濃度が変動するメカニズムを説明した点で貴重である。

地下空間の空气中ラドン濃度を測定することによって地震との関連付けを検討する研究は、国内外を含めてそれほど多くの報告はない。地下空間内のラドンは濃度レベルが高いため精度良い測定はできるものの、既設の坑道あるいは洞窟などを利用して測定器を設置するという点では、測定ポイントを選定する自由はあまりなく、ある程度設置場所が限られてしまう点に関係しているかもしれない。

2.3 大気中ラドン

地下水中ラドン、土中ラドンに比べると、大気中（地表面付近ではない空气中）ラドンと地震との関連を検討した例は極めて少ない。古くは1950年代にOKABE³²⁾が地上2mの高さに空気取り入れ口を設けて、大気中ラドン濃度と地震との関連を検討した。KOMURAら⁵⁵⁾は地上1mの大気中ラドン濃度を連続測定していたところ、観測点のごく近傍で発生した地震（1996年9月10日発生、震源：観測点から9km、震源の深さ4.5km、 $M=3.2$ ）の10日前に突然濃度が通常の3～4倍のレベル（60Bq/m³以上）に上昇した例を報告している。これ以外では、大気中ラドンと地震との関連を検討した報告はほとんど見当たらず、兵庫県南部地震前に神戸薬科大学（神戸市東灘区本山北町）で観測された大気中ラドン濃度異常のデータは貴重である。このデータについては次報において詳しく述べるが、地震の約2か月前から継続的にバックグラウンドの 3σ （ σ ：標準偏差）を超えて濃度が上昇する様子が観測された⁵⁾。前述のように、地下水中・土中ラドン濃度異常が大半の場合、地震発生日からさかのぼって30日以下の時点から始まっていることと比べると、より早い時期から継続性のある前兆現象を捉えていたことになる。

またラドン濃度と密接に関係していると考えられる大気イオン濃度に関しては、同じく兵庫県南部地震前に神戸市東灘区魚崎において、大気イオン濃度の異常が観測⁵⁶⁾されており、地震前兆現象として地表面からラドンが異常に発生したことにより、大気イオンが変動したと考察している。さらに、この大気イオン濃度の測定値と、神戸薬科大学の大気中ラドン濃度から見積もられる大気イオン濃度とはほぼ一致していることも報告された⁵⁷⁾。

地震と関連付けた大気中ラドン濃度異常は今まで何故報告が少なかったかについて、次の理由が考えられる。大気中ラドン濃度はおよそ10Bq/m³程度と、土壤中あ

るいは坑道内のような地下空間のラドン濃度（一般に数千Bq/m³以上）、あるいは地下水中のラドン濃度（一般に数万Bq/m³以上）に比べて桁違いに低く、地震の前兆として濃度に変化が起きたとしても気象要因その他の影響による変動に埋もれてしまう可能性が大きいことである。そのため前兆現象を捉えるためには、かなりの長期間平常時のデータを蓄積する必要がある。大気中ラドン濃度は、大気トレーサーの研究などで多くの測定例があるが^{58～60)}、大気中ラドン測定によって地震前兆と思われる異常現象を検出した観測例は上述のように極めて少ない。

地震の前兆現象としては今まであまり観測例のなかった大気中ラドン濃度であるが、従来の主流であった地下水中ラドン、あるいは土中ラドン濃度観測と比較して次のような特徴が考えられる。地下水の流速は非常に遅く、日本における平均的な流速として1m/dが報告されている⁶¹⁾。このことから、地下水中に含まれるラドン（半減期=3.82d）が減衰するまでに地下水が移動できる距離はそれほど長くはない⁶²⁾。これを考えると、地下水中ラドン測定においては観測点のごく近傍に生じた歪の変化に対応したラドン濃度の変化を観測していると考えられる。土中ラドンも大気中ラドンに比べれば移動速度は格段に遅い。そのため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歪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^{59, 63)}。無論、近傍起源、遠方起源のラドンがそれぞれの程度の割合かは、測定場所、気象条件等の要因によって異なるであろう。例えば坂下らのシミュレーション計算によると⁶⁴⁾、観測点（名古屋）を中心とした80kmの円内から発生したラドンのみを考慮すると、20kmの円内で発生したラドンが観測点で測定されるラドンの約75%と評価している。

いわば地下水中ラドン測定が地殻の歪の変化を「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（あるいは「平均化して」）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（第3図）。ただ土中から大気中に散逸して薄まったラドンを「平均化」しているため、地下水中ラドン、土中ラドンに比べて地震に対する感度は低くなる。しかしながら、次報にて詳述するように（1）ラドンを多く含む花崗岩地帯、（2）震源の近傍、（3）地震前の平常時のデータが数

第3図 ラドン濃度異常と地下水中, 土中, 大気中ラドン濃度観測の概念図

年程度は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前兆現象を見出せる可能性がある。

III ま と め

地震との関連付けを目的としたラドン観測の例について, 地下水中ラドン, 土中ラドン, 大気中ラドンに分けて簡単にレビューを行った。次報においては, 兵庫県南部地震において観測された大気中ラドン濃度に関して, 測定やデータ解析の方法について解説するとともに, 大気中ラドンによる地震前兆現象観測の可能性等についても考察する。

参 考 文 献

- 1) 気象庁地震予知情報課; 気象庁マグニチュードの改訂, 地震予知連会報, **71**, 742-746 (2004).
- 2) D. NORMILE; Quake builds case for strong codes, *Science*, **267**, 444-446 (1995).
- 3) D. SWINBANKS; Kobe earthquake shatters faith in engineers, *Nature*, **373**, 273 (1995).
- 4) G. IGARASHI, S. SAEKI, N. TAKAHATA, K. SUMIKAWA, S. TASAKA, Y. SASAKI, M. TAKAHASHI and Y. SANO; Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, **269**, 60-61 (1995).
- 5) 安岡由美, 志野木正樹; ガスモニタが捕らえた兵庫県南部地震の前兆, *Isot. News*, **503**, 74-76 (1996).
- 6) Y. YASUOKA and M. SHINOI; Anomaly in atmospheric radon concentration: a possible precursor of the 1995 Kobe, Japan, earthquake, *Health Phys.*, **72**, 759-761 (1997).
- 7) UNSCEAR; "Sources and Effects of Ionizing Radiation.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with Annexes", p. 99 (2002), United Nations Publication, New York.

- 8) 野津憲治; 地下水観測などで検知された兵庫県南部地震直前の地球化学的異常現象, 地震予知連会報, **67**, 569-575 (2002).
- 9) 小泉尚嗣; 地球化学的地震予知研究について, 自然災害科学, **16**, 41-60 (1997).
- 10) 脇田宏; ラドン観測と地震予知, 保健物理, **31**, 215-222 (1996).
- 11) Y. YASUOKA, G. IGARASHI, T. ISHIKAWA, S. TOKONAMI and M. SHINOI; Evidence of precursor phenomena in the Kobe earthquake obtained from atmospheric radon concentration, *Appl. Geochem.*, **21**, 1064-1072 (2006).
- 12) 放射線医学総合研究所; プレス発表「兵庫県南部地震前に大気中ラドンの濃度変動を観測 臨界現象数理モデルへ適用し地震予知に活用も」, 放射線医学総合研究所ホームページ, Available at: http://www.nirs.go.jp/news/press/2006/01_16.shtml, 閲覧 2008 年 2 月 8 日.
- 13) J. P. TOUTAIN and J. C. BAUBRON; Gas geochemistry and seismotectonics: a review, *Tectonophysics*, **304**, 1-27 (1999).
- 14) M. B. SILEVITCH, C. DIMARZIO, M. LEESER, E. MILLER, C. RAPPAPORT, M. YEGIAN, P. BELANOVIC, J. E. EBEL, R. D. CICERONE, J. BRITTON, H. JIMENEZ and M. VELEZ-REYES; "Earthquake precursors with potential for satellite-based detection. A report on research activities carried out in 2000 for the National Reconnaissance Office (NRO)", p. 48 (2001), Center for Subsurface Sensing and Imaging Systems, Northeastern University, Boston.
- 15) T. KUO, K. FAN, H. KUOCHEN, Y. HAN, H. CHU and Y. LEE; Anomalous decrease in groundwater radon before Taiwan M6.8 Chengkung earthquake, *J. Environ. Radioact.*, **88**, 101-106 (2006).
- 16) B. ZMAZEK, L. TODOROVSKI, M. ZIVCIC, S. DZEROSKI, J. VAUPOTIC and I. KOBAL; Radon in a thermal spring: identification of anomalies related to seismic activity, *Appl. Radiat. Isot.*, **64**, 725-734 (2006).
- 17) T. L. TENG; Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor, *J. Geophys. Res.*, **85** (B6), 3089-3099 (1980).
- 18) F. BELLA, R. BELLA, P. F. BIAGI, M. CAPUTO, G. D. MONICA,

- A. ERMINI, E. PETTINELLI and V. SGRIGNA; Automatic equipment to monitor groundwater radon, *Pure Appl. Geophys.*, **141**, 125–137 (1993).
- 19) 高橋誠; 地震予知のためのラドン観測, 福井正美, 堀内公子 (編) “天然水中ラドン” 専門研究会報告書 KURRI-KR-6”, p. 61 (1996), 京都大学原子炉実験所, 大阪.
 - 20) M. NOGUCHI and H. WAKITA; A method for continuous measurement of radon in groundwater for earthquake prediction, *J. Geophys. Res.*, **82**, 1353–1357 (1977).
 - 21) H. WAKITA, Y. NAKAMURA, K. NOTSU, M. NOGUCHI and T. ASADA; Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, *Science*, **207**, 882–883, (1980).
 - 22) M. WYSS; Second round of evaluations of proposed earthquake precursors, *Pure Appl. Geophys.*, **149**, 3–16 (1997).
 - 23) G. IGARASHI and H. WAKITA; Groundwater radon anomalies associated with earthquakes, *Tectonophysics*, **180**, 237–254 (1990).
 - 24) 五十嵐丈二, 脇田宏, 野津憲治; 地震予知を目的とした地下水中ラドン濃度の連続観測, 下道国, 辻本忠 (編) “環境ラドン”, p. 64 (1992), (財) 電子科学研究所, 大阪.
 - 25) G. IGARASHI, Y. TOHJIMA and H. WAKITA; Time-variable response characteristics of groundwater radon to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 1807–1810 (1993).
 - 26) 田阪茂樹, 佐々木嘉三, 岡澤裕子, 中川雅人; 水中ラドン検出器の開発, *Radioisotopes*, **43**, 125–133 (1994).
 - 27) Y. YASUOKA, T. ISHII, S. TOKONAMI, T. ISHIKAWA, Y. NARAZAKI and M. SHINOBI; Radon anomaly related to the 1995 Kobe earthquake in Japan, T. SUGAHARA, Y. SASAKI, H. MORISHIMA, I. HAYATA, M. SOHRABI and S. AKIBA (eds), “High levels of natural radiation and radon areas: radiation dose and health effects (Proceedings of the 6th International Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas, held in Osaka, Japan between 6 and 10 September 2004), International Congress Series 1276”, p. 426 (2005), Elsevier, Amsterdam.
 - 28) H. S. VIRK and V. WALIA; Helium/radon precursory signals of Chamoli earthquake, India, *Radiat. Meas.*, **34**, 379–384 (2001).
 - 29) R. SUGISAKI; Changing He/Ar and N₂/Ar ratios of fault air may be earthquake precursors, *Nature*, **275**, 209–211 (1978).
 - 30) 角森史昭; 地球化学的地震予知研究のあゆみ, 東京大学アイソトープ総合センターニュース, **36**, 2–5 (2005).
 - 31) Z. HATUDA; Radon content and its change in soil air near the ground surface, *Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto*, **B20**, 285–306 (1953).
 - 32) S. OKABE; Time variation of the atmospheric radon-content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto*, **A28**, 99–115 (1956).
 - 33) 岡部茂; ラドンと地震 - 昔と今, 東京大学理学部地殻化学実験施設彙報, **4**, 16–27, (1996).
 - 34) 加藤完, 伊藤吉助, 永田松三; 活断層周辺の土壌ガス (その2) α トラック法による検討, 地質調査所月報, **30**, 67–68 (1979).
 - 35) H. UI, H. MORIUCHI, Y. TAKEMURA, H. TSUCHIDA, I. FUJII and M. NAKAMURA; Anomalous high radon discharge from the Atotsugawa fault prior to the Western Nagano Prefecture earthquake (M 6.8) of September 14, 1984, *Tectonophysics*, **152**, 147–152 (1988).
 - 36) 宇井啓高, 藤井巖; 活断層破碎帯からのラドン放出と地震活動, 下道国, 辻本忠 (編) “環境ラドン”, p. 86 (1992), (財) 電子科学研究所, 大阪.
 - 37) C. Y. KING; Radon emanation on San Andreas Fault, *Nature*, **271**, 516–519 (1978).
 - 38) C. Y. KING, W. ZHANG and B. S. KING; Radon anomalies on three kinds of faults in California, *Pure Appl. Geophys.*, **141**, 111–124 (1993).
 - 39) R. L. FLEISCHER and A. MOGRO-CAMPERO; Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gasses within the earth: techniques and principles, *J. Geophys. Res.*, **83**(B7), 3539–3549 (1978).
 - 40) A. MOGRO-CAMPERO, R. L. FLEISCHER and R. S. LIKES; Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **85**(B6), 3053–3057 (1980).
 - 41) J. PLANINIC, V. RADOLIC and Z. LAZANIN; Temporal variations of radon in soil related to earthquakes, *Appl. Radiat. Isot.*, **55**, 267–272 (2001).
 - 42) C. PAPASTEFANOU; An overview of instrumentation for measuring radon in soil gas and groundwaters, *J. Environ. Radioact.*, **63**, 271–283 (2002).

- 43) C. PAPASTEFANOU, M. MANOLOPOULOU, S. STOULOS, A. IOANNIDOU and E. GERASOPOULOS; Radon measurements along active faults in the Langadas Basin, northern Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **1**, 159–164 (2001).
- 44) B. ZMAZEK, M. ZIVIC, J. VAUPOTIC, M. BIDOVEC, M. POLIAK and I. KOBAL; Soil radon monitoring in the Krsko Basin, Slovenia, *Appl. Radiat. Isot.*, **56**, 649–657 (2002).
- 45) T. F. YANG, V. WALIA, L. L. CHYI, C. C. FU, C-H. CHEN, T. K. LIU, S. R. SONG, C. Y. LEE and M. LEE; Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan, *Radiat. Meas.*, **40**, 496–502 (2005).
- 46) P. RICHON, J-C. SABROUX, M. HALBWACHS, J. VANDEMEULEBROUCK, N. POUSSIELGUE, J. TABBAGH and R. PUNONGBAYAN; Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: a likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994), *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1481–1484 (2003).
- 47) D. GHOSH, A. DEB, R. SENGUPTA, K. K. PATRA and S. BERA; Pronounced soil-radon anomaly – precursor of recent earthquakes in India, *Radiat. Meas.*, **42**, 466–471 (2007).
- 48) G. STEINITZ, O. PIATIBRATOVA and S. M. BARBOSA; Radon daily signals in the Elat Granite, southern Arava, Israel, *J. Geophys. Res.*, **112**, B10211, doi: 10.1029/2006JB004817 (2007).
- 49) 下道国, 山内常生; 地下道内ラドン濃度におよぼす大気圧と降水の影響, *Radioisotopes*, **29**, 181–183 (1980).
- 50) 山内常生, 下道国; 通気式電離箱による横坑内のラドン濃度の測定, およびその濃度変化と地震発生の関係, *地震 2*, **35**, 435–446 (1982).
- 51) T. YAMAUCHI; Variations in air radon concentrations in tunnels for observation of crustal movement in the Tokai region of Japan, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **12**, 193–201 (1992).
- 52) 山内常生; 地中におけるラドン濃度の変化と地震発生との関係, 下道国, 辻本忠 (編) “環境ラドン”, p. 30 (1992), (財) 電子科学研究所, 大阪.
- 53) 天野光, 小林義威, 桧皮久義, 成戸健治; 地震予知のための坑道内空気中ラドンの連続測定, 下道国, 辻本忠 (編) “環境ラドン”, p. 42 (1992), (財) 電子科学研究所, 大阪.
- 54) 檜皮久義, 成戸健治, 森俊雄, 小林義威, 天野光; 松代の地下坑道内における空気中ラドン濃度の変化と地震活動, 下道国, 辻本忠 (編) “環境ラドン”, p. 96 (1992), (財) 電子科学研究所, 大阪.
- 55) K. KOMURA, A. TOGUCHI and S. YAMAZAKI; Monitoring of radon activity in the tunnel and out-flow water from mining pit of former Ogoya copper mine and radon anomaly related to earthquake of September 10, 1996 at Komatsu area, Japan, A. KATASE and M. SHIMO (eds) “Radon and thoron in the human environment (Proceedings of the 7th Tohwa University International Symposium)”, p. 150 (1998), World Scientific Publishing, Singapore.
- 56) 薩谷泰資; 環境空間における大気イオン分布密度の計測, テレビジョン学会技術報告, **20**, 31–36 (1996).
- 57) Y. OMORI, Y. YASUOKA, H. NAGAHAMA, Y. KAWADA, T. ISHIKAWA, S. TOKONAMI and M. SHINOBI; Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 629–635 (2007).
- 58) T. HATTORI and T. ICHII; Estimates of seasonal variations of ^{222}Rn from different origins by using the correlation between ^{222}Rn and ^{212}Pb concentrations in air, A. KATASE and M. SHIMO (eds) “Radon and thoron in the human environment (Proceedings of the 7th Tohwa University International Symposium)”, p. 259 (1998), World Scientific Publishing, Singapore.
- 59) 吉岡勝廣, 飯田孝夫; 大気中ラドン濃度の周期性長期変動の主要な影響因子—海洋と陸地の違い—, 保健物理, **42**, 53–62 (2007).
- 60) T. IIDA, Y. IKEBE, K. SUZUKI, K. UENO, Z. WANG and Y. JIN; Continuous measurements of outdoor radon concentrations at various locations in East Asia, *Environ. Int.*, **22**, S139–S147 (1996).
- 61) 花田茂久, 松藤敏彦, 東條安匡; 埋立地由来の健康リスク評価モデルの作成, 土木学会論文集 G, **62**, 377–390 (2006).
- 62) 小高俊一; 地震前兆現象のデータベース ラドン, 気象研究所技術報告, **26**, 149–152 (1990).
- 63) 池辺幸正, 西村孝夫, 小島秀蔵, 下道国; 大気中 ^{222}Rn 濃度変動の気象解析, 岡部茂 (編) “大気中のラドン族と環境放射能”, p. 197 (1985), 日本原子力学会, 東京.
- 64) 坂下哲哉, 村上俊行, 飯田孝夫, 池辺幸正, 茅野政

道，鈴木國弘；3次元局地拡散モデルを用いた大気
中ラドン濃度の日変動シミュレーション，保健物理，
31, 161-168 (1996).

石川 徹夫 (いしかわ てつお)

神奈川県生まれ。東京大学工学部原子力
工学科卒業。(株)東芝勤務を経て，現
在放射線医学総合研究所・環境放射線影
響研究グループ主任研究員。博士(医学)。
最近はラドン等の環境放射線(能)に関

する研究に従事。

E-mail: tetsuo_i@nirs.go.jp

Copyright © 2011 by the author(s).
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage or retrieval system, without permission in writing from the publisher.
Printed in Japan.
111