内陸型地震におけるラドン・エマネーションの挙動 ——ガンマ線リモートセンシング——

The Behavior of Radon Emanation related to The Inland Earthquake action ——Gamma Ray Remote Sensing——

荒木 春 視*, 高田 和 典**, 鎌倉 友 隆**

Harumi ARAKI, Kazunori TAKADA, Tomotaka KAMAKURA

目 次

1. 地震予知と阪神大地震

1. 1 直下型地震に見舞われた兵庫県南部地区
1. 2 本震と余震
1. 3 野島地震断層の活動
1. 4 井戸水のラドン濃度観測と直下型地震の予知

2. 大気中のラドン分布とラドン・エマネーション

3. 大気中のラドン分布と断層活動史

3. 1 2,300万年以前の断層（棚倉構造線）
3. 2 160万年以降の活断層（糸静構造線）
3. 3 2万年以降の活断層（仲禅寺断層）
3. 3 1927年の郷村地震断層
3. 4 1948年の福井地震断層
3. 5 1984年の王滝村震源断層
3. 6 1995年の野島地震断層

4. 地上付近のラドン・エマネーション

4. 1 岩石からのラドン・エマネーション
4. 2 断層からのラドン・エマネーション
4. 3 火山噴火地からのラドン・エマネーション

5. ラドン・エマネーションの移動モデル

5. 1 無火山・無地震地域でのラドン移動
5. 2 地殻変動域でのラドン移動
5. 3 地震前後におけるラドン移動

6. 淡路島北部でのモデル検証

6. 1 検証1（本震震源地と大気中のラドン分布）
6. 2 検証2（野島地震断層と大気中のラドン分布）
6. 3 検証3（断層変位とラドン・エマネーション）
7. γ 線リモートセンシングによる地震予知法の提言
参考文献

1. 地震予知と阪神大地震

1.1 直下型地震に見舞われた兵庫県南部地区

淡路島から六甲にかけて密集する活断層は、日本経済の動脈である新幹線、高速道路を横断している。関東大震災級の地震にも耐えられる筈の土木施設が、ことごとく打撃を受け、死傷者は4万人を越え、家屋損壊も約16万に達した。このような大被害を阪神地区にもたらしたのは、1995年1月17日早朝に、明石海峡の深さ約14kmで発生したM7.2の兵庫県南部地震であり、1948年の福井地震以来の都市直下型地震である。地震発生から僅か10秒間に毎秒3 kmの速さで断層は広がり、地殻破壊は約45kmの長さには達した。淡路島北部の北淡町では11kmにわたって地震断層（野島断層）が地上に現れ、最大で1.7mの横ずれと1.3mの縦ずれを起こし、変位量は2.1mに達した¹²⁾。

1.2 本震と余震

地震で破壊された地層が、地上に現れたものを地震断層、現れなかったものを震源断層と呼んでいる。地震断層は地震規模が大きく、震源が比較的浅い、と地表に現れる。1984年に王滝村で発生したM6.8の長野県西部地震では、地震断層は現れなかったが、この

* 環境地質研究室（埼玉県所沢市）

** 朝日航洋（株）技術センター（埼玉県川越市）

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 34, No. 5, 1995

ような場合でも震源断層の広がりや余震震源分布から推定できる。

図1は淡路島北部地区における阪神大地震前後の地震震源分布を示したものである。図1の上図には阪神大地震以前で発生した深さ30km以浅で、M2以上の地震震源分布を示したものである⁹⁾。地震予知の観点からすれば、帯状に分布する地震帯の中で地震の起きていない空白域があれば、将来、地震の発生する可能性がある、と注目することになる。図1の上図から、野島断層に近い将来、震源として活動することを予想するのは難しい。しかし阪神大地震 M7.2 は起きた。余震震源地が淡路島北西岸中部から北東へ約45kmにも達する規模のものであり、それは野島地震断層を出現させた¹¹⁾。

1.3 野島地震断層の活動

野島地震断層は阪神大地震で地表に出現する以前か

図1 阪神大地震前後の地震震源地分布図

ら、航空写真の地形判読で活断層として、その存在が推測されていた。活断層とは、過去、だいたい百万年以内に繰り返し活動し、今後も活動すると思われる断層のことで、地震を引き起こす確率は、活断層のものでも、千年に一回程度である。そのために活断層の活動の時期を特定するのは、極めて困難なことと考えられてきた。

阪神大地震では、淡路島の北淡町で活断層上の民家の塀が無惨に破壊されたが、横の家は無事だった例もあり、活断層存在に対する危険認識度は人により差が生じている。しかし、最近の活動記録のない断層では、近い将来での地震活動による被害を念頭にいた、公共施設の建設が望まれることになる。

1.4 井戸水のラドン濃度観測と直下型地震の予知

地震予知の現代的な課題は科学の視点、技術の力点を生命の安全に移すことであり、途中段階の研究データを社会が共有し、防災対策に反映させていく努力である、と考える。

地震予知は従来の地震学・測地学的手法に加え、電磁気学や地球化学等を応用し、総合的、かつ学際的に進めなければならない時代にきている。

阪神大地震では、発生に先だつ50分前に超長波の異常電波が捕らえられている。際だった地震前兆としては、西宮市の深さ17mの井戸で、水中ラドン濃度の激増が観測されている。図2は阪神大地震発生前後における井戸水ラドン濃度変動を示したものである¹⁰⁾。観測は地震発生の約3カ月前から開始され、それ以降、水中ラドン濃度は不規則なサイクルの中で漸増し、地震発生8日前には過大な増加を示した。以降、急激な減少を続けて地震発生に至っている。地震発生以降の水中ラドン濃度は3ヶ月前のものよりも低下している。

水中ラドン濃度の増加現象が17mの浅井戸で地震発生の3ヶ月前から見られたことは、地殻破壊が3カ

大地震前後の井戸水ラドン濃度変動

図2 阪神大地震発生前後の井戸水ラドン濃度変動 (佐伯ほか¹⁰⁾に加筆)

月以前から進行し、破壊に合わせてラドンの地中移動・上昇が起きていたことを示している。そして、この地殻破壊は、ノイズ並の低エネルギーであったために、通常データに埋没し、前兆現象として捕らえられなかった、と推測される。

2. 大気中のラドン分布とラドン・エマネーション

2.1 エアボーン γ 線スペクトロメトリ

ヘリコプターに1,608cm³のヨウ化ナトリウム結晶を8個積み、高度100～150m から0.5秒間の環境 γ 線をマルチチャンネル型波高分析器を介して、所定のエネルギー帯域の放射線量を高度と共に連続記録する。観測成分とエネルギー帯域は以下の通りである。なお、観測飛行を時速90km で実施した場合、空間分解能は12.5m である。

なお、観測 γ 線成分のビスマス²¹⁴Bi はラドン同位元素のラドン²²²Rn (半減期3.82日) から、タリウム²⁰⁸

チャンネル No.	エネルギー帯域 MeV	観測 γ 線成分
Ch1	0.50～0.08	ビスマス ²¹⁴ Bi タリウム ²⁰⁸ Tl 散乱 γ 線
Ch2	1.30～1.60	カリウム ⁴⁰ K
Ch3	1.60～2.00	ビスマス ²¹⁴ Bi
Ch4	2.40～2.80	タリウム ²⁰⁸ Tl
Ch5	0.15～3.00	全環境 γ 線

Tl はラドン同位元素のトロン²²⁰Rn (半減期55.6秒) から生成される。ここでガンマ線スペクトロメトリではCh1 を散乱 γ 線成分 (γ')、Ch2 をカリウム成分 (K)、Ch3 をラドン成分 (Rn)、Ch4 をトロン成分 (Tn)、Ch5 を環境 γ 線成分 (γ) と呼称することにする。

2.2 大気中のラドン分布

エアボーン γ 線スペクトロメトリで観測される環境 γ 線には、地殻と大気からのものとがある。地殻からの γ 線としては、カリウム⁴⁰K、ビスマス²¹⁴Bi、タリウム²⁰⁸Tl があり、これらは岩石・鉱物中のカリウム⁴⁰K とラドン元素 (²²²Rn、²²⁰Rn) に起源を持つ。また大気からの γ 線としてはビスマス²¹⁴Bi、タリウム²⁰⁸Tl があり、これらは大気中に浮遊するラドン元素 (²²²Rn、²²⁰Rn) に起源を持つ。従って地殻起源の γ 線はカ

リウム⁴⁰K と深い関係にあり、大気起源の γ 線はカリウム⁴⁰K と無関係に存在していることになる。これらの関係を数式で示すと次のようになる。

$$K = K \text{ (2)} \tag{1}$$

$$Rn = Rn \text{ (1)} + Rn \text{ (2)} \tag{2}$$

また

$$Rn \text{ (2)} = aK \text{ (2)} + B \tag{3}$$

但し、 K：エアボーン γ 線調査で空中観測されたカリウム⁴⁰K

Rn：エアボーン γ 線調査で空中観測されたビスマス²¹⁴Bi、またはタリウム²⁰⁸Tl

a：地質・岩質で変わる係数

B：地域で決まる常数

(1)：大気起源

(2)：地殻起源

即ち、大気中のラドン分布は大気起源のラドン Rn

(1) の観測から求められるものであるから、式 (1) ～(3) から

$$Rn = Rn \text{ (1)} + aK \text{ (2)} + B \tag{4}$$

更に、エアボーン γ 線調査における空中観測では、
Rn (1) > > B と仮定すれば

$$Rn = Rn \text{ (1)} + aK \text{ (2)} \tag{5}$$

となる。エアボーン γ 線調査の観測結果からラドン Rn とカリウム K との一次回帰式

$$Rn = aK \text{ (2)} + b \tag{6}$$

を求めれば、大気中のラドン分布 Rn (1) は

$$Rn \text{ (1)} = b \tag{7}$$

として知ることができる。

2.3 ラドン・エマノメトリ

マグマから生成された地殻の新鮮な岩石にはカリウム⁴⁰K、ウラン²³⁸U、トリウム²³²Th、と言った放射性元素が一定の割合で含まれ、その割合は岩質の違いで大きく変わらない。これらの元素では、その後の地質学的な時間経過と共に放射性壊変が進行し、ラドン同位元素のラドン²²²Rn、トロン²²⁰Tn を経て鉛元素へと変わっていく。これらのラドン同位元素は不活性の気体であり、一部はラドン・エマネーションとして、地殻変動や続成作用を受けて岩石から飛び出し、亀裂を伝わって大気中、あるいは地下水中に溶解し、地層中を移動する。ラドン・エマネーションを大気中や地層中へ送り出すポンプの役割りを担うのが、潮汐作用であり、地下水位鼓動、そして気温・気圧の変動である。

これらの関係を数式で示すと次のようになる。

$$Rn(0) = a_0 K(0) + B_0 \quad (8)$$

地殻変動，続成作用により

$$Rn(0) = Rn + \Delta Rn \uparrow \quad (9)$$

また

$$K(0) = K + \Delta Ar \uparrow \quad (10)$$

但し， K ：エアボーン γ 線調査で空中観測されるカリウム ^{40}K

Rn ：エアボーン γ 線調査で空中観測されるビスマス ^{214}Bi ，またはタリウム ^{208}Tl

a_0 ：岩質で変わる係数

B_0 ：地域で決まる常数

$\Delta Rn \uparrow$ ：飛び出したラドン・エマネーション

$\Delta Ar \uparrow$ ：飛び出したアルゴン

(0)：マグマ起源

即ち，ラドン・エマネーションは創成期の岩石中のラドンと現地調査で観測されたラドンの差として，求められるものであるから，式(8)～(10)から

$$\Delta Rn \uparrow = a_0 K + a_0 \Delta Ar \uparrow + B_0 - Rn \quad (11)$$

ここで， ΔAr は観測センサに補足されないので， $a_0 \Delta Ar = 0$ とみなすことができ，(11)式は

$$\Delta Rn \uparrow = a_0 K + B_0 - Rn \quad (12)$$

となる。なお，係数 a_0 及び常数 B_0 には，第四紀火山でマグマから生成された新鮮な岩石の分布する地域を選定して γ 線スペクトロメトリを実施し，その観測結果からラドン Rn とカリウム K との一次回帰式

$$Rn = a_0 K + B_0 \quad (13)$$

を求め，ここでの a_0 及び B_0 の値を使用すればよい。

従って，観測地のラドン・エマネーション ΔRn は，観測地のカリウム K 値とラドン Rn (ビスマス ^{214}Bi ，またはタリウム ^{208}Tl)値を(12)式に代入すれば，求めることができる。

3. 大気中のラドン分布と断層活動史

3.1 2,300万年以前の断層（棚倉構造線）

八溝山脈（堆積岩が主体）と阿武隈山地（変成岩類・花崗岩類が主体）との間には，北北西－南南東方向に走る，幅数kmの大きな断層破碎帯が存在する。この破碎帯は中生代白亜紀から新第三紀にかけて活動した断層運動の名残りであって，現在は静穏な状態にある。

図3に活動史の異なる地質構造線上空でのラドン分布を示す。図3によると，棚倉構造線では

1) 散乱 γ 線成分が，180と特に少なく，カリウム成

図3 活動史の異なる地質構造線上空でのラドン分布

分との相関係数が，0.97と，格別，高い

2) ラドン成分が，-22と格別に少なく，カリウム成分との相関係数が，0.95と，格別，高い

3) トロン成分が，-47と格別に少なく，カリウム成分との相関係数が，0.90と，格別，高い

従って，棚倉構造線上空でのラドン分布を総括すると，上空の浮遊ラドンが特に少なく，また，地上ではラドン元素がカリウム成分と，格別，高い相関性を維持しており，地殻が格別に安定している，と推測される。

3.2 160万年以降の断層（糸魚川－静岡構造線）

本州を横断する糸魚川－静岡構造線はM7～8級の大地震を発生させる能力のある大きな活断層である。被害地震は松本以北では知られているが，松本以南での記録はない。しかし古代から縄文時代に諏訪周辺で大地震の起きた証拠が残っており，過去の約8000年間に少なくとも3回以上，大地震は起きている。最新の地震は，1000～2000年以前に発生している³⁾。諏訪盆地の凹地形は，諏訪湖を挟んで両側に断層が通り，その間の土地の陥没で形成されたものである。この断層が

糸魚川－静岡構造線である。

図3の活動史の異なる地質構造線上空でのラドン分布を見ると、糸魚川－静岡構造線では

- 1) 散乱 γ 線成分が、塩尻市地内では、845と特に多く、カリウム成分との相関係数も0.80と高い
- 2) ラドン成分が、塩尻市地内では127と多く、カリウム成分との相関係数は、0.41と低い
- 3) トロン成分が、岡谷市の天竜川よりで、66と多く、カリウム成分との相関係数が0.03と、特別、低い

従って、糸魚川－静岡構造線上空でのラドン分布を総括すると、塩尻市地内では上空の浮遊ラドンが多い。、地上でのラドン元素とカリウム成分との相関性はやや低くなるが、地殻は比較的に安定している、と推測される。なお、岡谷市の天竜川よりでは、表層の地質が格別に乱れている。

3.3 1927年の郷村地震断層（北丹後地震）

山陰の沿岸地域には過去の大地震の証拠になる明確な活断層がほとんど認められない。そのような地域で1872年の浜田地震 M7.1 以降、1943年鳥取地震 M7.2 までの71年間に但馬地震 M6.8、1927年北丹後地震 M7.3 等の直下型大地震が連続して4件も発生している³⁾。古い過去の地震で、地表まで到達しなかった震源断層か、もしくは侵食と堆積で断層地形が隠されてしまったのか、そんな伏在断層が地中にあったのかもしれない。

図4に各地震断層上空におけるラドン分布について、比較した結果を示す。図4によると、郷村地震断層では、

- 1) 散乱 γ 線成分が、1196と異常に多く、カリウム成分との相関係数は0.69と、やや低い
- 2) ラドン成分が、212と異常に多く、カリウム成分との相関係数は0.19と、特に低い
- 3) トロン成分が、120と異常に多く、カリウム成分との相関係数は0.22と、特に低い
- 4) ラドン分布において、本震震源地から遠ざかるにつれて、3成分とも、ラドン量が減少し、カリウム成分との相関係数が増加する

従って、郷村地震断層上空でのラドン分布を総括すると、本震震源地の上空では浮遊ラドンが異常に多く、また、地上のラドン元素とカリウム成分との相関性は特に悪い状態にあって、地殻が未だ安定な状態に戻っていない、と推測される。しかし本震震源地から離れ

るにつれて、地殻が急速に安定な状態に移り変わっている。

3.4 1948年の福井地震断層（福井地震）

日本海側の福井平野の中心的な都市、福井市。その近郊を震源地とした M7.1 の都市直下型の地震が福井地震である。その時、死者は3848人にのぼった。福井地震断層は延長が約25 kmである。なお福井地震断層は南南東に根尾谷断層、柳ヶ瀬断層と続く、大きな破砕帯を伴う福井・根尾谷ブロックの一員でもある。

図4の地震断層上空におけるラドン分布比較図によると、福井地震断層では

- 1) 散乱 γ 線成分が、1093と異常に多く、カリウム成分との相関係数は0.64、とやや低い
- 2) ラドン成分が、164と異常に多く、カリウム成分との相関係数は0.34、と低い
- 3) トロン成分が、111と異常に多く、カリウム成分との相関係数は0.20と特に低い
- 4) ラドン分布において、本震震源地から遠ざかるにつれて、3成分とも、ラドン量が減少し、カリウム成分との相関係数が増加する

従って、福井地震断層上空でのラドン分布を総括すると、本震震源地の上空では浮遊ラドンが異常に多く、また、地上のラドン元素とカリウム成分との相関性は特に悪い状態にあって、地殻が未だ安定な状態に戻っていない、と推測される。しかし本震震源地から離れるにつれて、地殻が急速に安定な状態に移り変わっている。

3.5 1984年の王滝村震源断層（長野県西部地震）

地震が小規模であったり、震源が深いと、地表に地震断層が現れない。M7未満の地震では地震断層の地表に現れないことも少なくない。御岳山腹の大崩壊が3600万 m³の岩屑流となって山麓に被害を与えた M6.8 の長野県西部地震でも震源断層は地表に届かなかった³⁾。

図4の地震断層上空におけるラドン分布比較図によると、王滝村震源断層では

- 1) 散乱 γ 線成分が、676と多いが、カリウム成分との相関係数は0.91と、格別、高い
- 2) ラドン成分が、82と少なく、カリウム成分との相関係数は0.79と、高い
- 3) トロン成分が、30と、少ないのに、カリウム成分との相関係数は0.58と、やや低い
- 4) ラドン分布において、本震震源地から遠ざかる

のにつれて、3成分とも、ラドン量が減少し、カリウム成分との相関係数が散乱 γ 線成分とラドン成分では僅かに、トロン成分ではやや大きく増加する

従って、王滝村震源断層上空でのラドン分布を総括する本震震源地の上空では浮遊ラドンが少なく、また、地上のラドン元素とカリウム成分との相関性は地殻では良いものの、表層では少々、悪い状態にある。地殻は安定な状態にあるものの、表層では未だ十分な安定状態にない、と推測される。しかし本震震源地から離れるのにつれて、表層も急速に安定な状態に移り変わっている。

3.6 1995年の野島地震断層（兵庫県南部地震）

六甲山麓から明石海峡の震央を経て淡路島北部にかけ、活断層（六甲断層系）が発達している。淡路島北淡町の野島江崎から直線状に小倉まで伸びる延長約7kmの活断層が野島断層であり、兵庫県南部地震では、この断層が動いている。野島断層の活動度を $1\text{m}/10^3$ 年の変位量とすると、活動再来期間は約2千年になる¹²⁾。

図4の地震断層上空におけるラドン分布比較図によると、野島地震断層では

- 1) 散乱 γ 線成分が、808と、特に多く、カリウム成分との相関係数は0.24と、特に低い
- 2) ラドン成分が、83と、少ないのに、カリウム成分との相関係数は0.10と、特に低い
- 3) トロン成分が、88と、特に多く、カリウム成分との相関係数は-0.18と、格別、低い
- 4) ラドン分布において、本震震源地から遠ざかると、3成分とも、ラドン量が減少し、カリウム成分との相関係数が激増する

従って、野島地震断層上空でのラドン分布を総括すると、本震震源地の上空では浮遊ラドンのうち、ラドン成分 ^{222}Rn が少なく、トロン成分 ^{220}Rn が多くなっている。また、地上のラドン元素とカリウム成分との相関性は特に低く、表層では格別に悪い状態になっている。地殻は不安定な状態に、表層では一層、不安定状態にある、と推測される。しかし本震震源地から離れるのにつれて、安定な状態に移り変わっていくが、それも表層で、やや顕著に進行する。

図4 地震断層上空におけるラドン分布比較

4. 地上付近のラドン・エマネーション

4.1 岩石からのラドン・エマネーション

岩石にはウラン ^{238}U 、トリウム ^{232}Th 、カリウム ^{40}K が含まれ、各元素の半減期は4,498my, 13,900my, 11,850myで、それぞれが鉛 ^{206}Pb 、鉛 ^{208}Pb 、アルゴン ^{40}Ar に壊変する。これら各元素の壊変過程で生成されるビスマス ^{214}Bi やタリウム ^{208}Tl 、あるいはカリウム ^{40}K からガンマ線が放出され、放射性壊変は、一層、進行する。地質時間の経過につれて、これらの放射性元素は岩石から減少することになる。

ここで、地殻変動に遭遇した岩石にあっては、ビスマス²¹⁴Bi、タリウム²⁰⁸Tlの親核種であり、かつ気体元素でもあるラドン²²²Rn、トロン²²⁰Rnのエマネーション化が起こる。即ち地殻変動が原因で岩石・鉱物中に歪み、亀裂、風化、変質等が発生すると、エマネーション化したラドンは母岩・原岩から移動し、一部が間隙水に溶解したり、粘土鉱物に吸着されるものの、大気中にまで到達し、浮遊ラドンとなる。地殻変動に遭遇する頻度の多い古期岩石地域においては、浮遊ラドンは新期岩石地域よりも多くなる。

図5にラドンエマノメータ(応用光研工業：福生市)により地上で観測された、地域の岩質とラドン・エマネーション量(2インチNaIシンチレータによる観測)の関係を示す。図5によると

- 1) ラドンエマノメータの使用により、各種岩石から、ラドン・エマネーションの成分を分離観測できた
- 2) 活断層地域では、岩質と無関係に、散乱 γ 線成分

分 $\Delta\gamma'$ 、ラドン成分 ΔRn が少なくなっている

- 3) 温泉地域は、比較的に新期の安山岩類のうち、過去に地殻変動を受けているものの、近年において地盤変動の少ない地域に存在している

- 4) 火山活動地域ではラドン・エマネーションが少なく、特に、散乱 γ 線成分 $\Delta\gamma'$ の逸失が目立つ従って、岩石からのラドン・エマネーションについて総括すると、活断層地域では地殻変動でラドン・エマネーションの逸失が起きており、温泉地域では過去の地殻変動でラドン・エマネーションの一部が逸失しているものの、近年の地盤変動が少なく、一層の逸失は抑制されている。また火山活動地域では散乱 γ 線成分の逸失が多くなっている。

4.2 断層からのラドン・エマネーション

繰り返し活動した断層面は圧砕され、断層粘土や断層破砕帯ができる。断層は地殻内情報を地上にもたやす伝達機能を持っている。その際の情報媒体がラドン・エマネーションである。ラドン・エマネーションは不活性気体であり、水のような流体と違って、小さな隙間や亀裂でも浸入でき、移動できる。そんな性質からラドン・エマネーションは地層の間隙水圧や粒子間応力の時間的な変化をリアルタイムで把握し、情報媒体となって、地上に伝達する特性を持っている。

活断層地域のラドン・エマネーション量は周辺地域と比較して、平常時にあっては、少ない。しかし断層が活動すると、断層面を伝わってラドン・エマネーションの顕著な移動が起きる。それも断層運動の規模が大きくなると、移動するラドン・エマネーションも多くなる。

図6にラドン・エマノメータで観測された、地震断層・活断層付近から放出されるラドン・エマネーションを、成分相関図($\Delta\gamma'/\Delta Rn/\Delta Tn$)にして示す。図6によると

- 1) 地震断層のラドン成分 ΔRn は活断層と比べ、等価の散乱 γ 線成分、もしくは等価のトロン成分において、明らかに大きくなっている
- 2) 最大横ずれが1.7mの野島地震断層(M7.2)と0.5m石廊崎地震断層(M6.9)を比較するとき、等価ラドン成分において、野島地震断層の散乱 γ 線成分、トロン成分が大きく、トロン成分にあっては差が大きくなっている
- 3) 郷村地震断層と、近接する仲禅寺断層との比較では、ラドン成分において明らかに地震断層で

図5 地中からの移動ラドン・エマネーション量と岩質

図6 地震断層・活断層付近から放出されるラドン・エマネーション

大きくなっているものの、分布の重なるものも存在する

従って、断層からのラドン・エマネーションを総括すると、地震断層においてはラドン成分が活断層よりも多くなり、また地上変位の大きなものにあつては、トリトン成分まで一段と多くなる。

4.3 火山噴火地からのラドン・エマネーション

火山活動で噴出されるマグマでは放射性核種の壊変は未だ進んでいないので、ラドン・エマネーションもゼロに近い。しかし山体には既に放射性壊変の進んでいる岩石が広く分布している。上昇するマグマ火道周辺の地下水は高温高压の水蒸気と化し、山体岩石の間隙まで埋めつくしている。そこを通る散乱γ線成分は吸収される。

図7にラドン・エマノメータで観測された、噴火口・

温泉地から放出されるラドン・エマネーションを成分相関図($\Delta\gamma'/\Delta Rn/\Delta Tn$)にして示す。図7によると

1) 噴火口の散乱γ線 $\Delta\gamma'$ は温泉源泉と比べ、等価ラドン成分において、明らかに小さくなっている

2) 噴火口にあつては、各成分($\Delta\gamma'$, ΔRn , ΔTn)とも負値で、ゼロ周辺に集合している

従って、火山噴火地からのラドン・エマネーションを総括すると、噴火口にあつては、各成分ともゼロに近い負値を示し、温泉源泉との比較では散乱γ線成分が明らかに少なくなっており、上述のような状況を裏付けている。

記入データ: 地震断層 (野島断層, 丹那断層, 郷村断層), 活断層 (交野断層, 糸静構造線, 仲禅寺断層)
温泉 (北海道十勝岳, 上信越, 北陸, 日光, 伊豆半島), 火山 (三宅島), その他 (周辺地域)

図7 噴火口・温泉地から放出されるラドン・エマネーション

5. ラドン・エマネーションの移動モデル

5.1 無火山・無地震地域でのラドン移動

火山活動もなければ, 被害地震もない, そんな地域では地殻も, 地盤も安定している。地中歪みの大きな蓄積も, 地層間隙水圧の異常な増大も, ない。そのため岩石・鉱物中の空隙も, ごく僅かで, ラドンがエマネーション化して鉱物から抜け出し, 移動することは容易でない。その結果, 無火山・無地震地域上空に浮遊する大気中のラドンは少ない。一方, 地殻変動の少ない地上では, ラドンがカリウム成分と, 高い相関性を持ち, 一体となって存在する。

図8は無地震・無火山帯と地震火山帯について, 大気中に浮遊するラドンを, 比較したものである。この図から

- 1) 無火山・無地震帯では大気中のラドンが少なくなっている
- 2) 火山・地震帯で, ラドン成分にあつては, 特に多くなっている
- 3) 地上における各成分とカリウム成分との相関性においては, 火山・地震帯で低くなっている。特にトロロン成分にあつて, 格別低い相関を示す地区では, 有史前の大規模地滑り跡が発見されており, 地盤に乱れが存在することが明らかで, 上述の推論の正しさが裏付けられている。

5.2 地殻変動域でのラドン移動

地震活動では本震に始まり, 余震域が活動断層面に沿って広がる。本震震源地では大きな地殻変動が起こり, 岩石・鉱物中に空隙, 亀裂が形成される。そこには水分子が通れなくても, 不活性気体元素ラドンの通

図8 上空ラドン分布の無地震・無火山帯と地震火山帯での比較

れる狭いものもある。地殻変動で岩石・鉱物からエマネーション化したラドンの中には、地中を上昇し、大気中にまで到達するものもある。地殻変動の大きな本震震源地に近い地域ほど、大気中に放出されるラドンは多くなる。地中から上昇してきたラドンには表層で

捕獲されるものもある。地上ではカリウム成分と母岩を異にするラドンも出現し、ラドンとカリウム成分の相関性が乱れる。それが負相関にまで悪化することもある。しかし、本震震源地から離れ、地殻変動が少なくなるにつれて、岩石・鉱物からの、ラドンのエマネーション化は減少する。大気中に放出されるラドンも少なくなり、地上でのラドンとカリウム成分との相関性は快復傾向を辿る。

図9は地殻変動域での大気中のラドン分布と、地上でのラドンとカリウム成分の相関性との関係を示したものである。この図から

- 1) 野島地震断層を初めとし地震断層、震源断層とも本震震源地で、多量の大気中ラドン分布と、ラドンとカリウム成分の相関性の悪さが見受けられる
- 2) 野島地震断層を初めとし地震断層、震源断層とも本震震源地から離れるのにつれて、大気中ラドン分布の減少と、ラドンとカリウム成分の相関性の快復が起こる
- 3) 最新の地震断層である野島地震断層を、大気中のラドン分布が等価のなかで、他の断層類と比較するとき、地上でのラドンとカリウム成分の相関性が格別に低くなっている

ことが明らかで、上述の推論の正しさが裏付けられている。

5.3 地震前後におけるラドン移動

地殻では、地中応力が静かに、時間をかけて、付加

図9 地殻変動域での大気中のラドン分布

され、歪みが蓄積されていく。そのために地層間隙水は過剰水圧状態になることもなく排水され、地中応力は岩石・鉱物間の応力に転化していく。この過程では、岩石・鉱物中の空隙は縮小し、ラドン・エマネーションの移動が抑止される。この地域での大気中のラドン分布は減り、地上でのラドンとカリウム成分の相関性が良くなる。更に地中応力の蓄積が進むと、岩石・鉱物においては外部応力に耐えきれなくなって、部分的な破壊が進行しはじめる。そのような状態になると、エマネーション化とラドン・エマネーションの移動が、再度、進行しはじめる。大気中のラドン分布も増えはじめ、地上でのラドンとカリウム成分の相関性が落ちる。

岩石・鉱物の破壊が全面的に広がり、そこを本震震源地とした地震発生に至る過程に対応して、大気中のラドン分布は激増し、地上でのラドンとカリウム成分間の相関性が極端に悪化する。破壊面が拡大する過程で、地下水の破壊面への浸入が併行して進行し、ラドン・エマネーションの移動は抑制され、大気中のラドン分布が減る。そして、本震震源地での地震発生となる。

地震発生以降、ほぼ逆工程を経て地震発生前の状態に長年月かけて復帰する。

図10は地震後における地盤・地殻の安定化の状況を既存の地震断層から見たものである。図9と重ねて見ると

- 1) 地上の散乱 γ 線成分とカリウム成分の相関性から地殻の水圧状態をみると、地震後の時間経過と共に正常状態に復帰する傾向が見られる
- 2) 地上のラドン成分とカリウム成分の相関性から地殻の歪み状態をみると、地震後の時間経過と共に正常状態に復帰する傾向が見られる
- 3) 地上のトロン成分とカリウム成分の相関性から表層の亀裂度・安定度をみると、地震後の時間経過と共に正常状態に復帰する傾向が見られることが明らかで、上述の推論の正しさが裏付けられている。

6. 淡路島北部でのモデル検証

6.1 検証1（本震震源地と大気中のラドン分布）

明石海峡の深さ約14kmに本震震源を持つ兵庫県南部地震 M7.2 では、淡路島北端で、大気中のラドン分布

大気中のラドン分布
(活断層)

* : ^{222}Rn NaIシンチレータ8本による空中観測5秒間カウント数

図10 地震後における地盤・地殻の安定化とラドン

が格別に多く、地盤・地殻の変動が激しかった、と予測される。図11は阪神大地震後の淡路島北部上空でのラドン分布を示したものである。この図から

- 1) 本震震源地から最も近い測線、特に西側域の上空で、ラドンの各成分（散乱 γ 線・ラドン・トロン）が格段に大きなものになっている
- 2) 本震震源地から最も近い測線、特に西側域の地上ではカリウム成分と、散乱 γ 線、ラドン、トロンの各成分間の相関性が極めて悪く、トロン成分においては負相関になっている。地盤・地殻の変動が極めて激しかった

ことは明らかで、上述の予測が検証できる。

6.2 検証2（野島地震断層と大気中のラドン分布）

活断層の野島断層が兵庫県南部地震で動き、野島地震断層からのラドン・エマネーションの放出が予測される。特に地表付近の地盤変動では散乱 γ 線成分とトロン成分が関与する。西側の海岸線近くを通る、地震断層を包括する北淡町では、淡路町・東浦町よりも、大気中のラドン分布（散乱 γ 線成分・トロン成分）が多く、また地上ではカリウム成分と、散乱 γ 線、トロンの各成分との相関性が落ち込んでいる、と予測される。図11は阪神大地震後の淡路島北部上空でのラドン

図11 阪神大地震後の淡路島北部上空でのラドン分布

分布を示したものである。この図から野島断層を包括する淡路島北部西域の北淡町では、淡路町・東浦町よりも

- 1) 大気中のラドン分布 (散乱 γ 線成分・トロン成分)

分) が多くなっている, また

- 2) 地上ではカリウム成分と, 散乱 γ 線, トロンの各成分との相関性が落ち込んでいる
- ことは明らかで, 上述の予測が検証できる。

6.3 検証3 (断層変位とラドン・エマネーション)

地殻変動では岩石・鉱物からのラドン・エマネーションの移動が進行し, 地震断層から放出されるラドン・エマネーションも多くなる。その際, 地殻変動の規模が大きなものだと, 断層面が地上に現れ, 地震断層になって, 地表に変位をもたらす。従って, 地震断層の上空域において観測される大気中のラドン・エマネーション ($\Delta\gamma'$, ΔRn , ΔTn) にあつては, 断層変位との相関性が高くなる。特に地盤変動との関連性の強いトロン成分 ΔTn において, その傾向が顕著になる, と予測される。図12は野島地震断層の変位量と, 断層上空域でのラドン・エマネーションとの関係を示したものである。この図から

- 1) 野島地震断層の最大変位が現れている地域では, ラドン・エマネーションも多くなっている
- 2) 野島地震断層での変位はトロン成分 ΔTn と高い相関性が見られる

ことは明らかで, 上述の予測が検証できる。

7. γ 線リモートセンシングによる地震予知法の提言

内陸型地震予知のために下記の観測手法が有効であると判断し, 以下の提言をしたい。

- (1) 大気中のラドン分布の航空機観測

図12 野島地震断層の変位量と断層上空のラドン・エマネーション量

年1回以上、エアボーン γ 線スペクトロメトリを実施し、対象地域の大气中のラドン分布を観測する。これは国家機関で実施されるのが適切であろう

(2) ラドン・エマネーションの走行連続観測

月1回程度、走行自動車からの γ 線スペクトロメトリを実施し、市町村域のラドン・エマネーションを観測する。これは自治体で実施されるのが適切であろう

(3) ラドン・エマネーションの固定連続観測

観測強化地域では固定観測点を設定し、24時間連続で、ラドン・エマネーションの観測を実施する。これは国家機関で実施されるのが適切であろう

(4) 測地・地震情報との連動評価

国家機関での情報の総括を基本原則とし、ここで得られた大气中のラドン分布、地中からのラドン・エマネーション、並びにラドン変動の要因となった地盤・地殻変動情報を、既存の測地・地震情報に加え、専門家による地震予知判定の材料とする

参考文献

- 1) 荒木春視 (1983) ヘリコプターによるリモートセンシング—熱赤外線およびガンマ線の利用—, 写真測量とリモートセンシング, Vol.22, No.3, 34-44
- 2) 荒木春視 (1987) 超低空からのリモートセンシング技術, 写真測量とリモートセンシング, Vol.26, No.3, 31-42
- 3) 中村一明・松田時彦・守屋以智雄 (1987) 火山と地震の国, 岩波書店発行
- 4) 荒木春視 (1990) γ 線リモートセンシング—地上データの収集—, 写真測量とリモートセンシング, Vol.29, No.4, 24-41
- 5) 活断層研究会 (1991) 新編 日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会発行
- 6) 荒木春視・杉浦邦朗 (1993) エアボーン γ 線スペクトロメトリ (I), 写真測量とリモートセンシング, Vol.32, No.1, 36-43
- 7) 荒木春視・杉浦邦朗 (1993) エアボーン γ 線スペクトロメトリ (II), 写真測量とリモートセンシング, Vol.32, No.2, 25-37
- 8) 荒木春視 (1994) エアボーン・ラドンエマノメトリ—ラドン・エマネーションの測定—, 写真測量とリモートセンシング, Vol.33, No.4, 32-57
- 9) 荒木春視 (1995) リモートセンシング, 最新地盤調査ハンドブック, 417-438, 建設産業調査会発行
- 10) 佐伯雄司ほか (1995) 兵庫県南部地震前後の西宮における地下水中ラドン濃度の変動, 第32回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p.158
- 11) 吉田明夫 (1995) 1995年兵庫県南部地震, 地質ニュース, No.486, p.8
- 12) 栗田康夫ほか (1995) 1995年兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層, 地質ニュース, No.486, p.16