

近畿地方における放射能泉と そのラドン源について (その三)

京都大学理学部地質学鉱物学教室

桂 京 造

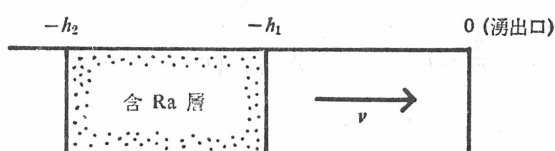
Radioactive Spring in the Kinki District and Their Radon Sources (Part 3)

Kyozo KATSURA

Department of Geology and Mineralogy, Faculty of Science, Kyoto University

V. 放射能泉のラドン量の理論的考察

(1) 温泉水が自噴するとき



温泉水 1 cc 中に存在するラドンを ρ とする。

$$\rho = \int_{-h_2}^{-h_1} \frac{n}{q} e^{-\lambda \frac{x}{v}} dx = \frac{n}{k\lambda} \left(e^{-\lambda \frac{h_1}{v}} - e^{-\lambda \frac{h_2}{v}} \right) \quad v \neq 0$$

湧出口で 1 cm^2 あたり 1 sec に通るラドンを q とすると

$$q = \frac{n}{\lambda} v \left(e^{-\lambda \frac{h_1}{v}} - e^{-\lambda \frac{h_2}{v}} \right) \quad v \neq 0$$

但し n : 含 Ra 層で生成し水中へ溶存したラドン $\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$

v : 温泉水の流速, k : 空係率 $\times 10^{-2}$, λ : ラドンの壊変定数

$$\rho \text{ を max にするには } \frac{d\rho}{dv} = 0 \quad v = \frac{\lambda(h_2 - h_1)}{\log h_2/h_1}$$

$$\rho_{\text{max}} = \frac{n}{k\lambda} \left\{ \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\frac{h_1}{h_2 - h_1}} - \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\frac{h_2}{h_2 - h_1}} \right\}$$

$$v \rightarrow 0 \quad q \rightarrow 0$$

$$q_{v \rightarrow \infty} = \frac{n}{\lambda} v \left\{ \left(1 - \frac{\lambda h_1}{v} + \dots \right) - \left(1 - \frac{\lambda h_2}{v} + \dots \right) \right\} = n(h_2 - h_1)$$

$$h_1 = 0$$

$$\rho = \frac{n}{k\lambda} \left(1 - e^{-\lambda \frac{h_2}{v}} \right)$$

$$q = \frac{n}{\lambda} v \left(1 - e^{-\lambda \frac{h_2}{v}} \right)$$

(2) 温泉水を汲み上げたとき

静止している温泉水を $x = 0$ で汲み始めるが $t = 0$ からすべての温泉水が流速 v で動き含 Ra 層

で生成したラドンは外へ拡散しないと仮定する。ラドンは汲み出しを始める前に溶存していた ρ_1 とそれ以後に溶存される ρ_2 の和となる。

(i) ρ_1

$$0 < t < \frac{-h_1}{v} \quad \rho_1 = 0$$

$$\frac{-h_1}{v} \leq t \leq \frac{-h_2}{v} \quad \rho_1 = \frac{n}{k\lambda} e^{-\lambda t}$$

$$\frac{-h_2}{v} < t \quad \rho_1 = 0$$

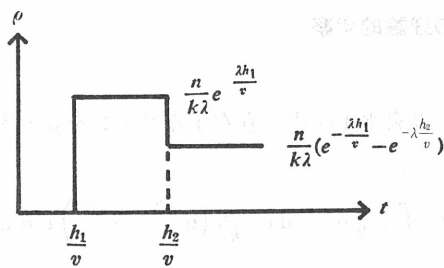
(ii) ρ_2

$$0 < t < \frac{-h_1}{v} \quad \rho_2 = 0$$

$$\frac{-h_1}{v} \leq t \leq \frac{-h_2}{v} \quad \rho_2 = \int_{-vt}^{-h_1} \frac{n}{kv} e^{-\lambda \frac{x}{v}} dx = \frac{n}{k\lambda} \left(e^{-\lambda \frac{h_1}{v}} - e^{-\lambda t} \right)$$

$$\frac{-h_2}{v} < t \quad \rho_2 = \int_{-h_2}^{-h_1} \frac{n}{kv} e^{-\lambda \frac{x}{v}} dx = \frac{n}{k\lambda} \left(e^{-\lambda \frac{h_1}{v}} - e^{-\lambda \frac{h_2}{v}} \right)$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2$$



$$0 < t < \frac{-h_1}{v} \quad \rho = 0$$

$$\frac{-h_1}{v} \leq t \leq \frac{-h_2}{v} \quad \rho = \frac{n}{k\lambda} e^{-\lambda h_1}$$

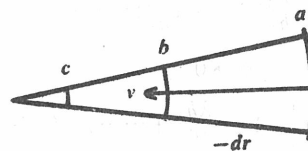
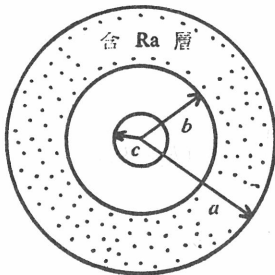
$$\frac{-h_2}{v} < t \quad \rho = \frac{n}{k\lambda} \left(e^{-\lambda \frac{h_1}{v}} - e^{-\lambda \frac{h_2}{v}} \right)$$

(3) 花崗岩砂層より温泉水を汲み上げたとき

a : 含Ra層の外径, b : 含Ra層の内径, c : 汲み出し口の外径, Q : $r = c$ の球面から流入する量 $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$, v_0 : $r = c$ の流速

$$4\pi r^2 \cdot v \cdot k = 4\pi c^2 \cdot v_0 \cdot k = Q$$

$$\therefore v = \frac{Q}{4\pi k} \frac{1}{r^2} \text{ cm/sec}$$



$r = r$ から $r = c$ まで流れるのに要する時間

$$t = \int_r^c \frac{dr}{v} = -\frac{4\pi k}{Q} \int_r^c r^2 dr = \frac{4\pi k}{3Q} (r^3 - c^3)$$

前と同様に $\rho = \rho_1 + \rho_2$ とする.

(i) ρ_1

$$0 \leq t < \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3) \quad \rho_1 = 0$$

$$\frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3) \leq t \leq \frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3) \quad \rho_1 = \frac{n}{k\lambda} e^{-\lambda t}$$

$$\frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3) < t \quad \rho_1 = 0$$

(ii) ρ_2

$$0 \leq t < \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3) \quad \rho_2 = 0$$

$$\frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3) \leq t \leq \frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3)$$

$$\rho_2 = -\int_{\zeta}^b \frac{4\pi n}{Q} r^2 e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (r^3 - c^3)} dr = \frac{n}{k\lambda} \left\{ e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3)} - e^{-\lambda t} \right\}$$

$$t = \frac{4\pi k}{3Q} (\zeta^3 - c^3)$$

$$\frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3) < t$$

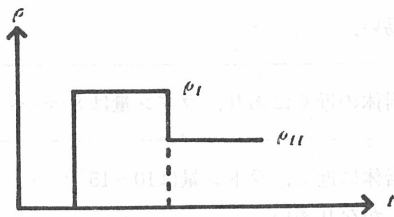
$$\rho_2 = \frac{n}{k\lambda} \left\{ e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3)} - e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3)} \right\}$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2$$

$$0 \leq t < \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3) \quad \rho = 0$$

$$\frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3) \leq t \leq \frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3)$$

$$\rho = \frac{n}{k\lambda} e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3)} \dots \dots \rho_I$$



$$\frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3) < t$$

$$\rho = \frac{n}{k\lambda} \left\{ e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3)} - e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3)} \right\} \dots \dots \rho_{II}$$

ρ_I は Q を大きくするほど大きくなる.
 ρ_{II} を max にする Q は $\frac{\partial}{\partial Q} \rho_{II} = 0$

$$\frac{\lambda 4\pi k (b^3 - c^3)}{3Q^2} e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (b^3 - c^3)} - \frac{\lambda 4\pi k (a^3 - c^3)}{3Q^2} e^{-\lambda \frac{4\pi k}{3Q} (a^3 - c^3)} = 0$$

$$Q = \frac{\lambda 4\pi k (a^3 - b^3)}{3 \log \frac{a^3 - c^3}{b^3 - c^3}}$$

総 括

放射能泉にはラジウムを含むものとラドンのみを含むものがあり、両者の関係については^{25),26),27)}の研究が発表されている。近畿地方の放射能泉にはラジウムが検出された例は少なく、日本鉱泉

誌にわずか7例あるのみで昭和29年以降に発見された源泉については、ラドン量しか報告されていない。筆者が指導開発した数多くの源泉でもラジウムの存在は認められなかった。湧出地の地質は花崗岩13, 花崗岩接触変成帯3, 花崗閃緑岩3, 石英粗面岩3, 古生層5, 沖洪積層4と圧倒的に花崗岩が多く、放射能泉と花崗岩に密接な関係が存在することはすでに指摘した通りである。また湧出形態は種々あるが第4表にまとめて表わす。

放射能泉としてラドン量と湧出量がともに優れているのは、最初にあげた花崗岩内部の断層に由来する泉源であり、冷泉では掘さく深度も100m内外で今後ますます開発される可能性が高い。

強放射能泉の成因に関しては二次的な放射性沈殿物(とくにRa塩)が地下浅所に形成され、ラドンはそれより供給されるという機構を黒田²⁵⁾は発表している。筆者は昭和27年に行なわれた有馬温泉より約2km北へ離れた西宮市山口町上山口南部の、有馬川流域における温泉探査に参加し、地中空気による放射能探査を受持ったがそのときの1mの深さの空気のラドン濃度は、最高が83.6

第4表 近畿地方の放射能泉の湧出形態

地質および湧出状況	実 例	性 質
花崗岩体内部の断層 破碎帯から湧出	城崎温泉(兵庫県) 湯村温泉(〃) 白鳥山源泉(京都府) 南滋賀源泉(滋賀県) 平津源泉(〃) 瑞宝寺源泉(兵庫県) 大山寺源泉(〃)	湧出温度の高い城崎, 湯村温泉はこの型に属する。 ラドン量, 湧出量とも大きいものが多い。 瑞宝寺源泉(有馬)は特別な例である。
花崗岩が深部まで風 化され泉脈は形成さ れていない。	蓬萊峽源泉(兵庫県)	ラドン量非常に多いが湧出量は少ない。ボーリング孔に地表から送水すれば, ラドンを獲得して復水する。
花崗岩表面の亀裂か らの自然湧出	北白川放射能泉群(京都府) 信貴山温泉(奈良県) 越木岩新田冷泉群(兵庫県)	湧水量は一般的に少なく, ラドン量が多いが変動し易い。
花崗岩砂層から湧出	銀閣寺鉦泉(京都府) 北小松ヶ浜源泉(滋賀県)	花崗岩体の近くにあり, ラドン量は8マッヘ位
花崗岩の接触変成帯 から湧出	茶屋源泉(京都府) 湯ノ花第二源泉(〃) 七谷川温泉(〃)	花崗岩体に近く, ラドン量は10~15マッヘ, 湧出量もかなり多い。
石英粗面岩の断層破 碎帯から湧出	加舎鉦泉(京都府) 名塩温泉(兵庫県) 宝塚高原源泉(〃)	ラドン量は10マッヘ前後である。
花崗閃緑岩の断層破 碎帯から湧出	五洲閣源泉(大阪府) 常盤源泉(兵庫県)	近くに大きな構造線が存在し, ラドン量は10マッヘ位だが, 深さにより異なる。
古生層から湧出	岩倉鉦泉(京都府) 霊山新温泉(〃)	ラドン量は10マッヘ位, 両泉ともラドン源は近い。
沖・洪積層から湧出	雄琴温泉(滋賀県) 大野源泉(〃)	基盤は花崗岩で断層が存在する。ラドン量は小さい。

エマンで平均は約40エマンであった。初田²⁸⁾が京都大学理学部地質学鉱物学教室の裏庭で測定した深度1mの空気のラドン濃度は、平均11.7エマンにすぎずいかにこの測定値が異常に高いかがわかる。また昭和41年にはその対岸になる上山口太郎治山で、γ線シンチレーション・サーベーターを用いて放射能探査を実施したが、有馬川より引水している農業用水路沿いに同区域の他の部分における、平均値の約1.5~2倍の放射能強度が続いているのを発見した。この現象は有馬温泉から有馬川に流れ出たラジウムが沈殿した結果と解釈され、有馬瑞宝寺ラジウム泉の成因を裏付けする一つの実例と考える。しかしながら有馬、増富などのとくに強い放射能泉は別として、近畿地方に数多く存在する放射能泉の成因は、それらの大部分が花崗岩と何らかの形で関連していることに注目して、両者の関係により普遍的な成因を求めべく本研究を進めたものである。

本論文をおわるにあたって、終始懇切な御指導を頂戴した京都大学初田甚一郎教授(現、名誉教授、嵯峨美術短大教授)に筆者は衷心から感謝の意を表わします。また京都大学笹嶋貞雄助教授(現、教授)、阿部悦夫講師からは、適切な御助言をいただき、畏友京都女子大学伊藤英文助教授(現、教授)は数学的立場より、大阪府立大学西村進講師(現、京都大学助教授)は全般にわたって本論文の完成に協力していただいた。ここに併せて厚く感謝致します。

おわりに

「近畿地方における放射能泉とそのラドン源について(その一)を本誌第21巻第3~4号(1970)に掲載してから数年が経過した。近年俄かに“ラドンによる地震予知”が注目されるに至り(その二)、(その三)を発表する次第である。

追 補

前報(1970)以降近畿地方では次の放射能泉が登録された。

昭和45年以降発見された放射能泉

府県名	No	泉 源 名	所 在 地	ラドン (マッヘ)	泉温 (℃)	備 考
京都府	25	るり溪シャレー温泉第一源泉	船井郡園部町大河内グミノキ	9.83	11.9	180m掘さく 自噴1.7l/min. フッ素2.25mg/l
大阪府	4	四条畷白石温泉(2号泉)	北河内郡四条畷町下田原	18.28	17.2	深さ8m 12l/min. 湧出
"	5	北箕面温泉	豊能郡能勢町下田尻	8.48	15.6	200m掘さく 水中ポンプ62l/min.
兵庫県	10	高丸	西宮市山口町下山口字高丸	8.19	15.2	400m掘さく ポンプ120l/min. フッ素2.40 メタ珪酸51.86mg/kg
"	11	有馬グランドホテル	神戸市兵庫区有野町カヲト字水無山	5.69	19	200m掘さく 自噴1l/min. cl 1266 HCO ₃ ⁻ 530.6l メタ珪酸83.77 遊離炭酸1658mg/kg
"	12	岩屋1号	津名郡淡路町岩屋498の1	8.28	19.3	300m掘さく 自噴50l/min.
"	13	塩屋2号	神戸市垂水区塩屋町南谷	15.19	20.5	250m掘さく ポンプ18l/min.
"	14	岩屋	津名郡淡路町岩屋字大谷3570-1	7.87	16.8	25m掘さく 自噴15l/min. フッ素1.99mg/kg
"	15	姫路土地株式会社所有泉	飾磨郡夢前町塩田字中内	5.85	17.2	200m掘さく 120l/min. 湧出
"	16	岩屋2号	津名郡淡路町岩屋912	8.90	20.3	350m掘さく 自噴130l/min. HCO ₃ ⁻ 491.3 メタ珪酸50.96mg/kg
"	17	(株)商栄所有泉	朝来郡山東町柴日向山	6.99	12.8	自噴7l/min. Fe ²⁺ 24.04mg/kg
"	18	頭司静男所有泉	川辺郡猪名川町上野字北畑	7.78	15.5	200m掘さく 22l/min. 湧出 HCO ₃ ⁻ 1295mg/kg
"	19	㊤旅館	西宮市塩瀬町名塩	5.79	24.5	深度1.5m 自噴13l/min. フッ素5.21mg/kg
"	20	玉瀬	宝塚市玉瀬字イヅリハ	16.12	20.5	深度12m 28l/min. 湧出 フッ素2.40mg/kg

府県名	No	泉 源 名	所 在 地	ラドン (マッヘ)	泉温 (℃)	備 考
"	21	市ラジウム	神戸市北区有馬町齒染ヶ尾	45.0	30	自噴14l /min. フッ素5.61mg/kg
"	22	ゆづりは	宝塚市小林字西山	19.1	14.5	300m掘さく 水中ポンプ452l /min. フッ素2.60mg/kg
"	23	城崎温泉 No.24	城崎郡城崎町湯島薬師暇温泉寺境内	7.59	72.5	350m掘さく 40l /min. 湧出 Cl ⁻ 3013 フッ素3.39mg/kg
"	24	(株)大昌所有泉	川辺郡猪名川町清水字前谷	5.97	16.3	30m掘さく 水中ポンプ10l /min. フッ素3.01mg/kg
"	25	小林正二所有泉	川辺郡猪名川町民田コケナル土手内	8.99	15.6	50m掘さく ポンプ27l /min. フッ素11.01mg/kg
"	26	宝塚高原 2号	神戸市北区道場町生野字南山	9.37	15.0	650m掘さく 深井戸ポンプ13l /min.
"	27	波賀温泉	宍粟郡波賀町原	10.12	13.5	24m斜掘 自噴14.0l /min.

以上の他に筆者は温泉規格以上のラドンを含む次の湧水，井戸水を発見している。

所 在 地	ラドン (マッヘ)	泉温 (℃)	備 考
京都府			
京都市左京区北白川山ノ元町	13.35	16.5	日本バプテスト病院 70m掘さく井 水中ポンプ 72l /min
宮津市文珠	8.47	11.1	民家打込井戸 ホームポンプ
宮津市文珠	8.81	11.0	民家丸井戸 ホームポンプ
宮津市府中	6.62	14.8	民家打込井戸 ホームポンプ
相楽郡南山城村	7.12	14.0	グリーンヒル月ヶ瀬工事用水丸井戸
相楽郡南山城村	8.35		グリーンヒル月ヶ瀬花崗岩亀裂 量少い。
亀岡市広野	8.27		100m掘さく 水中ポンプ 5l /min 中分析実施中
兵庫県			
神戸市北区八多町	8.08		有馬高原シンボルゾーン200m掘さく井 -110m採水 水位-45m
宍粟郡千種町鍋ヶ谷	9.79	10.8	花崗岩小断層に伴う湧水
宍粟郡千種町鍋ヶ谷	11.98	11.0	上記小断層を25m斜掘
宍粟郡千種町西山	11.57		花崗岩亀裂湧水 量極少
宍粟郡千種町岩野辺	10.25	13.0	花崗岩亀裂湧水
宍粟郡千種町岩野辺	10.60	14.0	花崗岩亀裂湧水

文 献

- 25) 黒田和夫：前掲
- 26) 中井敏夫：日化，**59**，1179～1180。(1938)
- 27) 杉原 健：温泉科学，**19**，54～60。(1968)
- 28) Hatuda, Z. : Mem. coll. Sci., Univ. Kyoto, B, **20**，285～306。(1953)