

原著

## 湯ノ山温泉連続モニタリングによる 温泉水の地下挙動と湧出モデルの考察

森康則, 長谷川圭司<sup>1)</sup>, 小川正彦, 橋爪清

三重県三重郡菰野町に位置する湯ノ山温泉は、三重県を代表する温泉保養地のひとつである。温泉資源の有限性が叫ばれる中、筆者らは、温泉を保護し、その適正利用を図ることを目的として、平成17年7月から7ヶ月にわたり温泉水の連続モニタリング調査を実施した。測定の結果から、湯ノ山温泉地下では風化した鈴鹿花崗岩のクラックを流路とした被圧性の地下水が帯水し、地下深部では塩化物イオン、フッ化物イオンなどに富む流体が、浅層部では硝酸イオンや硫酸イオンなどに富む流体が、それぞれ混合して湧出していることが示唆された。現時点において泉質の低下は認められないが、浅層起源流体や深層起源流体の供給率の変動が、今後の地下挙動の変化ならびに泉質の低下を予見し、これに应答する先行的対策を講じるための良い指標となる可能性がある。

キーワード：湯ノ山温泉，地下挙動，温泉法，ラドン，鈴鹿花崗岩

### はじめに

平成16年、長野県松本市白骨温泉の入浴剤添加問題に端を発し、温泉の不当表示問題が全国的に表面化した。一連の騒動を契機として、平成17年5月には加水、加温、入浴剤の添加、循環ろ過の使用について表示義務付けを内容とする温泉法施行令の改正（平成17年環境省令第2号、温泉法施行規則の一部を改正する省令、平成17年2月24日公布、同年5月24日施行）<sup>1)</sup>が行われた。現在も温泉に対する信頼を回復させるべく、温泉業界の関係者は取り組みを継続している。

これらの一連の温泉騒動の根本的な原因のひとつとして、温泉資源の有限性に対する情報不足があると考えられる。需要過多による過剰な温泉水の揚湯が行われたり、地殻変動によって、地震地球化学的な泉質変化や枯渇が発生したりする事例が散見される<sup>2) 3) 4) 5)</sup>。こうした事例を教訓とし、特に温泉資源そのものが観光産業を支えている地域においては、温泉水やそれに含まれる溶存成分は不変ではなく、本来的に地下環境の変動によって常態的に変化を続けるもの

であることを強く認識する必要があるだろう。

温泉法の第1条には次のように記されている。「この法律は、温泉を保護しその利用の適正を図り、公共の福祉の増進に寄与することをもって目的とする」。温泉を保護し、利用の適正を図るためには、成分変化を監視し続けることによる温泉成分変動の基礎データの蓄積が有効である。これらのデータの蓄積から温泉資源の時系列的な変化を把握し、有限な温泉資源の地下挙動を解明し、持続的な温泉利用を計画するためのひとつのヒントとなり得るからである。

三重県では、平成7年度に津市の榊原温泉において、温泉資源の保護対策を目的とした地下水挙動調査が実施されている<sup>6)</sup>。本研究では、榊原温泉とならび、三重県を代表する温泉保養地のひとつである湯ノ山温泉において、温泉源の湧出状況や溶存成分の経時変化の連続モニタリング調査を実施し、温泉水の地下挙動と湧出メカニズムについて考察を行ったので、以下に報告する。

1) 四日市農林商工環境事務所

## 対象と方法

### 1. 観測源泉

本研究でモニタリング対象とした湯ノ山温泉は、三重県三重郡菟野町、御在所山頂の東に位置する。対象地域一帯には比較的新しい深層掘削温泉も含めると多くの源泉が存在するが、本研究では、動力ポンプ操作による人為的影響を排除するため、古くからの自噴泉を選定した。

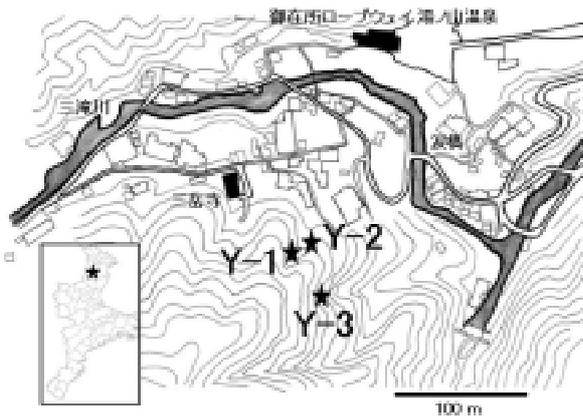


Fig.1 観測源泉の位置図

連続モニタリングを実施した3つの源泉の位置をFig.1に示し、本研究ではこれらの源泉を、それぞれY-1, Y-2, Y-3と表現する。これらの源泉から自然湧出した温泉水が、付近の宿泊施設等に日常的に配湯され、古くから利用されている。湯ノ山温泉はラドン濃度が高いことが特徴的で、鉱泉分析法指針<sup>7)</sup>に規定する療養泉の放射能泉として、利用されている施設が多い。

湯ノ山温泉付近一帯は、鈴鹿花崗岩の一種である中粒-粗粒斑状角閃石含有黒雲母花崗岩が広く分布している。これらは、主要鉱物では、斜長石、石英、カリ長石、黒雲母、角閃石の順に多く含有している<sup>8)</sup>。

### 2. 観測方法

温泉成分の測定は、対象源泉の泉質、特徴的な含有イオン、測定の簡便性等から勘案し、泉

温、湧出量、pH、ラドン、フッ化物イオン、塩化物イオン、亜硝酸イオン、硝酸イオン、硫酸イオン、ナトリウムイオンの10項目を行うこととした。サンプリングは原則として週に1度とし、7ヶ月にわたってこれを継続した。また日周変動等短期的な変化も考えられることから、11月5日～6日には2時間ごとに採水を行い、これを24時間継続した。

泉温、湧出量はいずれも現場で測定した。泉温は標準温度計を用いた。湧出量は定量容器(3.7L)を用いて、その容器が満水になるまでの時間を測定して算出した。pHは現場でチモールブルーによる比色法により記録し、実験室に持ち帰った後、ガラス電極pH計で再度測定を行った。

陰イオン類の分析にはイオンクロマトグラフ法(DIONEX DX-120 カラムAS-14 エクスターナルモードオートサンプラーAS3500)<sup>3)</sup>を採用した。溶離液には3.5mmol/L炭酸ナトリウム溶液と1.0mmol/L炭酸水素ナトリウム溶液の混合液を用いた。ナトリウムイオンの分析には、原子吸光光度法を用いた(SHIMADZU AA-6800 Air-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> フレーム)。

ラドンの定量には、液体シンチレーションカウンター(ALOKA LB-5)を用いた。サンプルの調製には鉱泉分析法指針に基づく「抽出法」ではなく、安岡(2004)<sup>9)</sup>が提案する「直接法」を採用した。「直接法」の特長は操作の簡便性である。長期にわたる連続モニタリングを手法とする本研究においては、サンプル数が膨大となり、操作の簡便性を重視する必要があるため、本手法を採用した。以下にその概略を記す。

あらかじめトルエン40mLとシンチレーター10mLの混合液を100mLテフロンびんに入れて現場に持参する。シンチレーターはDPO(2,5-ジフェニルオキサゾール)約4.0g/LとPOPOP(1,4-ビス(2-(5-フェニル))ベンゼン)約0.1g/Lをトルエンに溶解させたものである。現場では、混合液を入れたテフロンびんに試料水50mLを

Table 1 観測源泉の測定値

	pH	湧出量(L/min.)	Na <sup>+</sup> (mg/kg)	F <sup>-</sup> (mg/kg)	Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)
Y-1	8.9~9.4	40~55	48.5~58.5	11~12	9~11	0~0.2	3.8~4.4
Y-2	8.9~9.5	10~20	48.5~53.5	11~12	9~11	0	3.8~4.6
Y-3	8.7~9.3	10~22	38.5~53.5	8~10	7.5~9	0~2.5	4.2~4.6

すばやく入れて、約 30 秒間振盪し、ラドンをトルエン層に抽出させる。これを実験室に持ち帰り、放射平衡に達するのを待って、液体シンチレーションカウンターによる測定を行い、50keV-∞、75keV-∞、100keV-∞の積分カウント値を外挿して得られた 0-keV の積分カウント値をもとに、ラドン濃度を算出する。

また、本研究で測定対象としていない項目を補足するため、菰野町が平成 16～17 年に分析を行った温泉分析データの提供を受け、これを一部議論に用いた。実際の観測源泉周辺の温泉利用施設では、Y-1 と Y-2 が直近で隣接しているため、それらを混合して利用している。したがって、菰野町が分析を行ったデータは、Y-1 と Y-2 を区別しない、両源泉の混合泉のデータであることを付記しておく。

### 結 果

各観測点における測定値の概要を Table1 に示す。

泉温の経時変動を Fig.2 に示す。泉温は Y-2 が 27℃前後と最も高く、Y-3 が 21℃前後と最も低い。温泉法では、「温泉」の定義を温度や溶存成分濃度により設定しており、そのうちのひとつの基準として、25度以上の地下水を「温泉」として定義している。したがって、Y-1 ならびに Y-2 については溶存成分の多少に関わらず、通年的に「温泉」として分類される。また、Y-2、Y-3 は、冬季において 1～1.5℃程度の泉温低下が認められる。

次に主な含有イオンの時系列変動を以下に示す。Fig.3～5 はそれぞれ塩化物イオン、フッ化物イオン、硝酸イオンの経時変動である。温泉法に規定する「温泉」の定義のひとつとしてフッ化物イオンが 2mg/kg 以上との基準がある。したがって、Y-1、Y-2 のみならず、Y-3 も通年的に「温泉」として分類される。特徴的なのは、平成 17 年 11 月から 12 月においてフッ化物イオンならびに塩化物イオンが、いずれのモニタリング地点についても、明瞭なピークが随伴して認められる点である。硝酸イオンについては、多くの場合 Y-3 のみ検出されており、Y-1、Y-2 ではほとんど検出されない。また、Y-3 での硝酸イオンは、平成 17 年 8 月下旬から 9 月にかけて大きなピークが見られる。

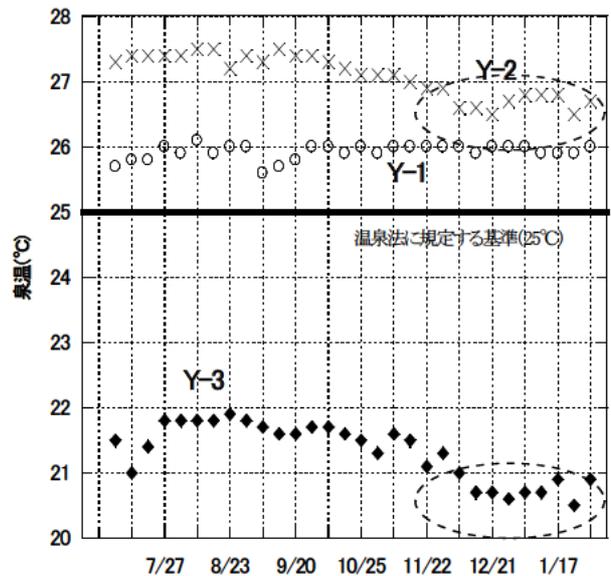


Fig. 2 泉温の経時変動

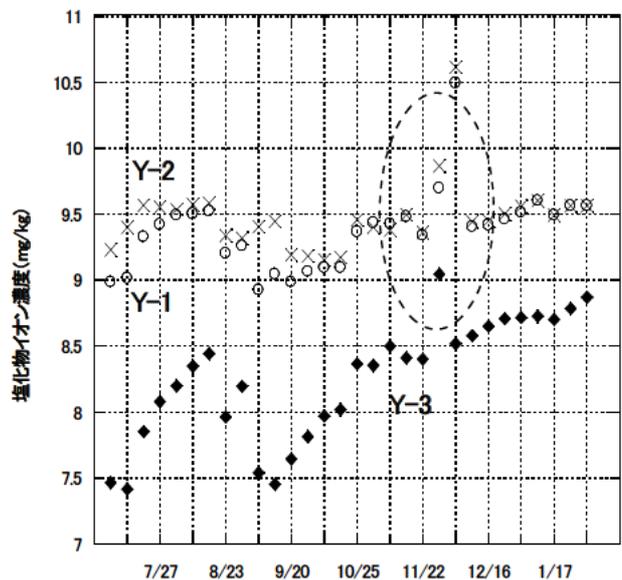


Fig. 3 塩化物イオンの経時変動

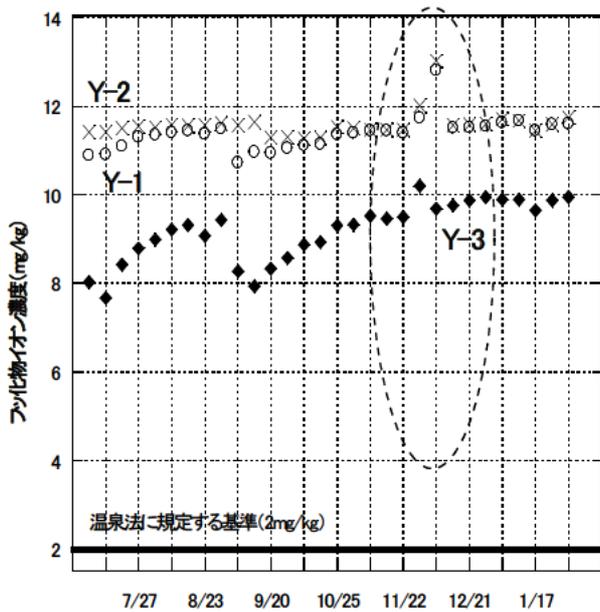


Fig. 4 フッ化物イオンの経時変動

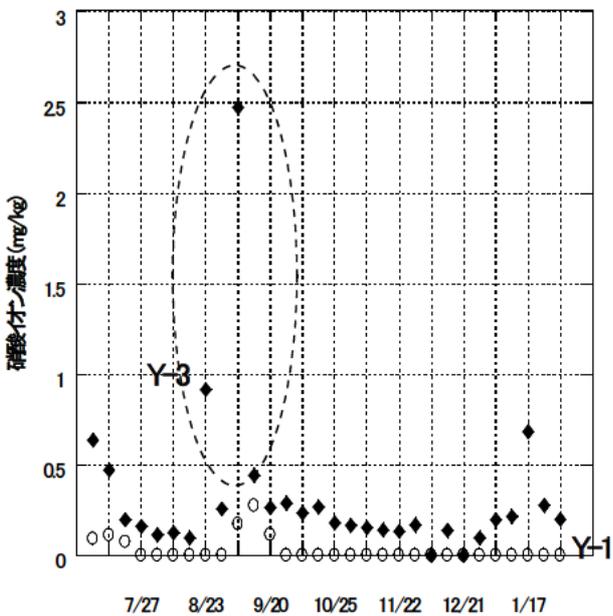


Fig. 5 硝酸イオンの経時変動

Fig.6 はラドン濃度比の経時変動を示す. それぞれのラドン濃度は, 各モニタリング地点間の比較を容易にするため, 各々の平均的なラドン濃度によって規格化した. ラドン濃度については, 鉱泉分析法指針に基づく分析法を採用していないため, 温泉法の基準との正規の比較はできないが, 濃度比の変動については明確に議論することができる. この結果から, Y-1 と Y-2 のラドン濃度比変動の同期性が認められる. 特に8月上旬の濃度比低下時や12月から翌年1月にかけての濃度比上昇時において, 2つのモニタリング地点の変動が随伴している.

24 時間連続サンプリングの結果については, いずれの成分についても顕著な変動が認められなかった (Fig.7). 短期的な変動の代表的なものとして, 地球潮汐による地盤の体積歪による日周変動が挙げられる<sup>4)</sup>. 本研究においては, これらの変動が明瞭には認められないことから, 採水を行った時刻の起潮力による変化は無視できるものとして, 測定値の補正は行わなかった.

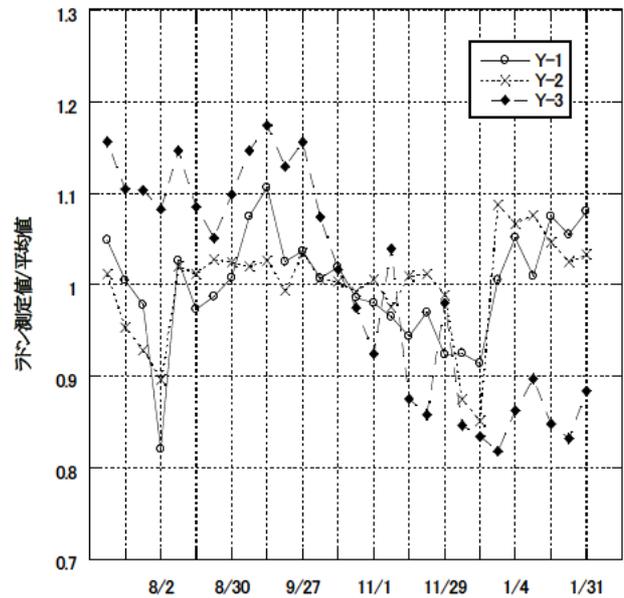


Fig. 6 ラドン濃度比の経時変動

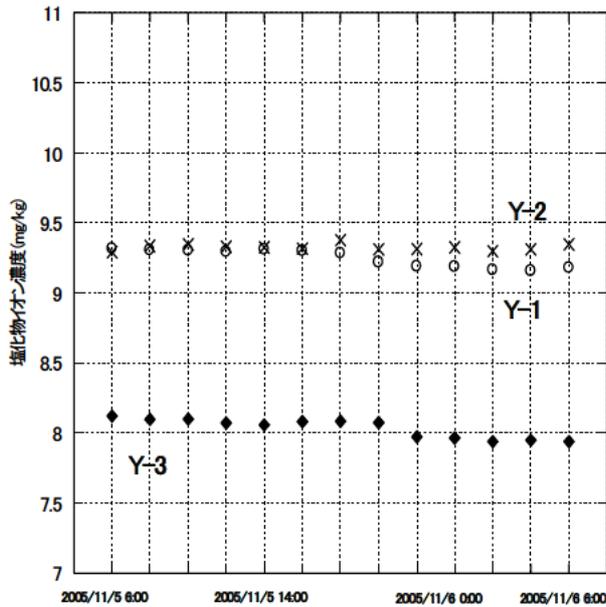


Fig. 7 塩化物イオンの経時変動  
(24時間連続サンプリング)

## 考 察

### 1. 浅層起源流体の挙動：泉温の季節変動と硝酸イオン、硫酸イオンの変動

Y-1 においては、年間を通してほぼ泉温が一定であるのに対して、Y-2, Y-3 においては冬季の泉温低下が認められる。特に Y-3 については、温度の変動幅が大きく、季節変動が顕著である。また Y-3 は硝酸イオンの濃度が他の2つの観測点に比べて高い。硝酸イオンは大気または有機物の酸化分解を起源とするため、浅層の地下水に多く含まれる成分である<sup>10)</sup>。このことから、Y-3 で温泉水が湧出する際に、気温の影響を受けやすい浅層で影響を受けることで泉温が低下し、また Y-3 では硝酸イオンを多く含む地下水の流入を受けて、地表に湧出していることが考えられる。Y-2 についても、硝酸イオンの流入影響は受けていないものの、浅層での涵養時間が長いなど、気温の影響を受けやすい湧出経路をとっている可能性が高い。硫酸イオンについては、その起源については不明であるが、Y-1, Y-2 に比べて Y-3 に硫酸イオン濃度が比較的高いことから、硝酸イオンと同様に浅層からの流入寄与率が高いことが示唆される。

また、過去の文献値との比較を行うと、泉温、湧出量の値は、20年ほど前に報告された原山ら

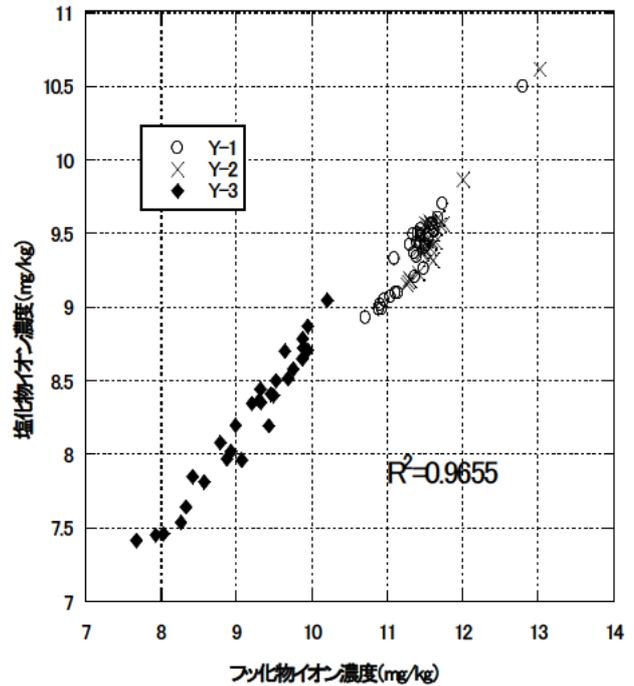


Fig. 8 塩化物イオンとフッ化物イオンの相関  
プロット図

(1989)<sup>8)</sup>の報告と大きな差異は認められなかった。湧出量については、源泉に連続流量計を常設する等、より精度の高い測定方法に変えれば、湧出する成分の総量計算等、厳密な議論が可能となるかもしれない。今後の検討課題のひとつとして挙げておきたい。

### 2. 深層起源流体の挙動：塩化物イオンとフッ化物イオンの相関関係

Fig.8 は Y-1, Y-2, Y-3 の塩化物イオンとフッ化物イオンの相関を示したプロット図である。いずれの観測点においても、この2成分の相関に非常に強い相関関係 ( $R^2=0.9655$ ) が認められた。このことから、観測源泉の3カ所の温泉水は、湧出母岩を等しくしていることがわかる。そしてこの2成分は同じ帯水層で混合され、湧出していると考えるのが妥当であろう。塩化物イオンは一般に地下深部起源であることが多く<sup>10)</sup>、観測点地下でも同様であると仮定すると、塩化物イオンならびにフッ化物イオンは、地下深部から供給されていると考えられることができる。

### 3. ラドン：観測付近一帯に分布する花崗岩

ラドンは岩石中の<sup>226</sup>Raが崩壊して生成される。湯ノ山温泉付近一帯では鈴鹿花崗岩が広く分布しており、観測源泉付近の露頭でも風化作用を受けた鈴鹿花崗岩が観察される。現場の地質状況から考えて、温泉水はこれら風化した花崗岩のクラックを流路として地下から湧出していると考えるのが妥当であろう。一般にラジウム塩濃度は塩基性岩よりも酸性岩において高く、また風化の進んだ花崗岩は、微視的表面積が大きくなるため、より風化した花崗岩の方が、水中へのラドンの溶出効率が高くなる<sup>11)</sup>。このことから、モニタリング地点周辺で風化した鈴鹿花崗岩からラドンが発生し、温泉水に溶出しているものと推測される。花崗岩に卓越した観測源泉周辺では、広範囲にラドン発生能が期待できるが、Y-1、Y-2においては、ラドン濃度の増減に相関が認められるため、Y-1、Y-2の温泉水に寄与率の高い共通の帯水層へのラドンの供給が、ラドン濃度の増減に影響を及ぼしていることが推測される。

### 4. キーダイヤグラムによる地下水の分類と整理

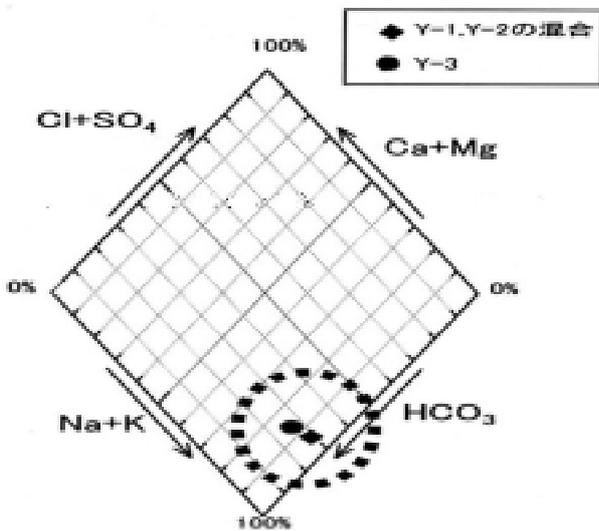


Fig.9 キーダイヤグラム

温泉水の水質を明確に分類するため、それぞれのモニタリング地点の主成分をキーダイヤグラム (Fig.9) に整理した。ここでは Y-1、Y-2 の混合ならびに Y-3 の分析データを用いて議論する。いずれの観測源泉も陰イオンは炭酸水素イオン、陽イオンはナトリウムイオンとカリウム

イオンの溶存割合が高いエリアにプロットされる。このエリアは汚濁を受けない自由水面を有する地下水が補給源、またはそれに近接する被圧地下水とされる<sup>10)</sup>。被圧地下水はその帯水層の上部に難透水層や非透水層が存在し、これらが加圧層として機能している。帯水層中の地下水が圧力を受けているため、井戸を掘ったときに地下水位は帯水層より上部に上昇する。湯ノ山温泉が自然湧出しているのはこのためであると考えられる。

### 5. 湧出モデルの考察と成分変動の解釈

これまでの議論をもとに、湯ノ山温泉地下で進行していると推測される湧出モデルを以下に整理し、これを Fig.10 に模式的に示す。

湯ノ山温泉の地下には広範囲に停滞性の被圧地下水が涵養している。深浅の差異によって、起源の異なる成分が各々の濃度で溶存しており、浅層帯水層の流入を受けながら、花崗岩のクラックに沿って地表に湧出している。

強い相関を示す塩化物イオンとフッ化物イオンは、地下深部の帯水層に賦存されていると推測される。花崗岩の表面から溶出したラドンは広範囲に発生能が期待されるものの、Y-1、Y-2に寄与率の高い帯水層からの流入量が多い。浅層では、有機物分解起源の硝酸イオンや硫酸イオンが湧出途中の地下水に付加される。Y-3の湧出過程においては、この浅層起源成分の流入寄与の影響が大きく、泉温低下や希釈効果による地下深部起源成分の濃度低下が引き起こされていると推測される。

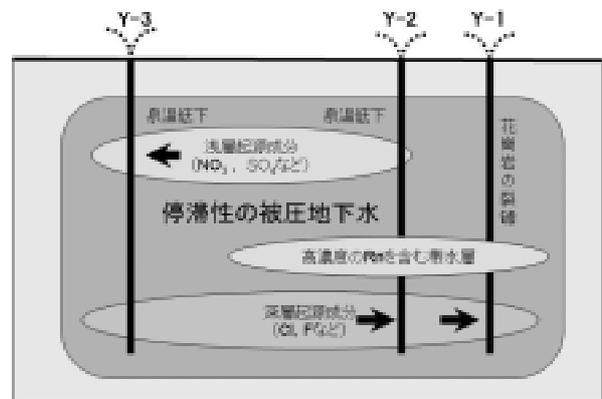


Fig.10 湧出モデル図

したがって、平成 17 年 11 月から 12 月にかけて全モニタリング地点で認められたフッ化物イオンと塩化物イオンのピーク、同 8 月から 9 月にかけて Y-3 に認められた硝酸イオンのピークは、何らかの要因により浅層起源流体と深部起源流体の混合割合が変化したものと考えられる。例えば、平成 17 年 8 月下旬から 9 月にかけて Y-3 の硝酸イオン濃度のピークが発現した時、塩化物イオン濃度の低下が随伴している。要因は特定できないものの、何らかの理由により浅層起源流体の寄与率が高くなり、これに対応して深部起源流体の寄与率が低下したものと解釈できる。

### 結 語

湯ノ山温泉地下で進行していると推測される温泉地下水の湧出メカニズムについて考察を行った。考察の結果、加圧された地下水が花崗岩のクラックを流路として地表に湧出する過程において、深部起源成分に浅層起源成分が流入されることにより、様々な組成の温泉水が湧出するモデルを提案した。

湯ノ山温泉では、泉温、ラドン濃度及びフッ化物イオン濃度が温泉法に規定する基準よりも高いことで、「温泉」としての取扱いを受けている。この湧出モデルによって、湯ノ山温泉源泉が湧出していると仮定すると、「塩化物イオンやフッ化物イオン等の深部起源流体ならびにラドン等の寄与率が高くなることで、温泉としての泉質を維持しており、逆に硝酸イオンや硫酸イオンなど浅層起源流体の希釈を受けることで、その泉質や泉温は低下する」と解釈される。換言すると、硝酸イオンや硫酸イオン等の浅層起源流体の濃度上昇は、湯ノ山温泉の温泉水を「資源」として考えるうえで、温泉水の枯渇に至るプロセスにおける有効な指標になりうる可能性を有している。

温泉を「資源」として考え、保護していくことは、経済的にも、地域文化的にも、地球化学的にも重要である。本研究において議論した温泉連続モニタリングによる湧出モデルは、その資源を保全していくための有効な評価手法のひとつとなりうることを提案できたと考える。しかし、他の数多くの温泉に対して水平的に議論を展開するには、未だデータが不足しているのが現状である。連続モニタリングを高頻度に行

うには、多くの労力と費用が必要であるが、還元されるメリットは大きい。温泉資源の保護に対する先行的な対策を講じ、可及的高頻度の温泉分析を実施していくよう、適宜啓発に努めることが必要である。

### 謝 辞

源泉所在地の土地所有者である菰野町には本研究による温泉水の採取を許可していただき、また、必要なデータの提供をいただきました。ここに記して、深く感謝致します。

### 文 献

- 1) 環境省自然環境局長通知、温泉法施行規則の一部改正について、平成 17 年 2 月 28 日付け環自整第 050228001 号、2005
- 2) 甘露寺泰雄、温泉水の過剰採取と枯渇現象について(その 4)-伊豆長岡(古奈、葦山を含む)湯ヶ島及び白浜温泉における適正総採取量の推定-, 温泉工学会誌, 15, 38020, 67-76, 1981
- 3) 益子安ら、本邦諸温泉における枯渇現象の実態、温泉の枯渇現象と適正採取量に関する研究(昭和 50 年度),環境庁, 1975
- 4) 川辺岩夫、地震に伴う地下水・地球化学現象, 地震 2, 44, 341-364, 1991
- 5) 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
- 6) 平成 7 年度温泉源保護対策事業榊原周辺温泉資源調査委託業務報告書, 財団法人中央温泉研究所, 1996
- 7) 鉱泉分析法指針(改訂), 環境省自然環境局, 2002
- 8) 原山智・宮村学・吉田史郎・三村弘二・栗本史雄, 1989, 御在所地域の地質 地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 59p-70p, p127
- 9) 安岡由美、標準となる水中ラドン測定法の提案, 日本保健物理学会企画行事シンポジウム「水中ラドン-今、何が問題か」講演要旨集 p4-7, 2004
- 10) 堀内清司: 地下水, 季刊 化学総説, 14, 80-89, 1992
- 11) Jun Sato and Toshihiro Nakamura: Leaching of Radon from Weathered Granite into Water, Radioisotopes JN, 42, 667-675, 1993

## **Groundwater behavior research on hot spring water by continuous monitoring at Yunoyama observation well**

Yasunori MORI, Keishi HASEGAWA, Masahiko OGAWA and Kiyoshi HASHIZUME

Yunoyama hot spring, which is located in Komono town, Mie district, Mie prefecture, is one of the most popular hot springs in Mie prefecture. Confronting danger of the limitedness of hot spring resources, we investigated the hot spring water of Yunoyama by the way of continuous monitoring for seven months from July 2005, with the view of protecting the hot spring resources and regislatng the use of it. Our investigation shows the following: that the pressured underground water is stored in the underground of Yunoyama hot spring which flows from the cracks of aerated Suzuka granite, and that the mixture of the two types of fluid wells up, one mostly consists of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{F}^-$  from deep layer and the other does of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  from shallow layer. There is no sign at the moment of decrease of the hot spring quality. However, there would be a possibility that the changes of supply rate of deep and shallow layer fluid give good indications of predicting the change of ground water behavior and the decrease of hot spring quality and of taking precaution against the decrease of the quality of hot spring resources.

Keywords: Yunoyama hot spring, groundwater behavior, Hot springs law, radon, Suzuka granite