

原 著

## 「温泉資源の保護に関するガイドライン」に基づく 動力装置による周辺源泉への影響調査

森 康則<sup>1)</sup>, 吉村英基<sup>1)</sup>, 前田 明<sup>1)</sup>, 志村恭子<sup>1)</sup>,  
大熊和行<sup>1)</sup>, 近藤雅秋<sup>2)</sup>, 加治佐隆光<sup>2)</sup>

(平成 22 年 7 月 7 日受付, 平成 22 年 8 月 27 日受理)

## Investigation of the Influence of Lift Pump Installation Based on the “Guideline for the Protection of Hot Spring Resources”

Yasunori MORI<sup>1)</sup>, Hideki YOSHIMURA<sup>1)</sup>, Akira MAEDA<sup>1)</sup>, Kyoko SHIMURA<sup>1)</sup>,  
Kazuyuki OHKUMA<sup>1)</sup>, Masaaki KONDO<sup>2)</sup> and Takamitsu KAJISA<sup>2)</sup>

### Abstract

An investigation of the influence of lift pump installation on water quality by the “Methods of influence investigation of lift pump installation” provided in the “Guideline for the protection of hot spring resources” was conducted in the Yunoyama area, Mie Prefecture. Since few such investigations have been reported nationwide, we compiled a survey of the available results of such investigations, and also presumed the behavior of the hot spring water under the ground in the Yunoyama area. Although it is assumed that variation of water quality is stable under both incremental and continuous pumping up in the observation wells, it is recognized that incremental pumping up causes a geochemical anomaly such as decreasing of pH and concentration of fluoride and chloride ions in the target well. Concentration of fluoride ion strongly correlates with that of chloride ion in the Yunoyama area. It is assumed, therefore, that the aquifer has a function of major source of both fluoride and chloride ions to the hot springs. The difference of the ratio of concentration of fluoride and chloride ions in the target and the observation wells suggests strongly, however, that the sources of aquifers of these wells are different. Accordingly, it is thought that the hot spring sources may not compete with each other. Because the water quality of hot springs can be significantly affected by conditions of pumping up, it is recommended that such geochemical consideration should be incorporated into the evaluation method based on the guideline.

<sup>1)</sup> 三重県保健環境研究所 〒512-1211 三重県四日市市桜町 3684-11, <sup>1)</sup> Mie Prefecture Health and Environment Research Institute, 3684-11 Sakura-cho, Yokkaichi 512-1211, Japan.

<sup>2)</sup> 三重大学大学院生物資源学研究所 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577. <sup>2)</sup> Graduate School of Bio-resources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan.

Key words : Guideline for the protection of hot spring resources, Yunoyama spa, Fluoride ion, Chloride ion

## 要 旨

三重県菰野町の湯の山周辺地域において「温泉資源の保護に関するガイドライン」の「動力装置の際の影響調査等実施手法」に基づく動力装置による周辺源泉への影響調査が実施された。このような調査事例は全国的にも報告がほとんどないため、本研究ではこの影響調査の結果を概括的に整理するとともに、得られたデータから、対象地域の温泉水の地下挙動を推測した。調査の結果、連続揚湯・段階揚湯とも、観測源泉では大きな変動は認められなかったが、対象源泉については、段階揚湯試験時に pH、F<sup>-</sup> 濃度、Cl<sup>-</sup> 濃度の低下等、人為的な地球化学的変動が認められた。湯の山地域一帯では、温泉成分の Cl<sup>-</sup> 濃度と F<sup>-</sup> 濃度に高い相関があることから、F<sup>-</sup> と Cl<sup>-</sup> を含む帯水層が存在し、温泉成分の主要な供給源として機能していると推定される。しかし、対象源泉と観測源泉では、これらの濃度比が異なることから、それぞれ別の帯水層を供給源としている可能性が高いと考えられ、温泉資源の保護という観点から、地下資源の競合等の可能性は低いと考えられる。温泉の揚湯状況によって、温泉成分濃度は大きく変動することから、ガイドラインの影響調査手法の評価には、温泉資源の量的な視点に加え、地球化学的な視点が必要と考えられる。

キーワード：温泉資源の保護に関するガイドライン、湯の山温泉、フッ化物イオン、塩化物イオン

## 1. はじめに

温泉資源保護の行政的課題について検討した環境省の諮問機関である中央環境審議会（自然環境部会温泉小委員会）は、「温泉資源の保護対策及び温泉の成分に係る情報提供の在り方等について」（中央環境審議会，2007）の答申において、「新規事業者による掘削や動力装置の許可等の基準の内容や、都道府県における温泉資源保護のための望ましい仕組みについて、国は、温泉は国民共有の資源であるという観点に立って、できる限り具体的・科学的なガイドラインを作成すべきである。」と指摘した。これを受けて、環境省により、「温泉資源の保護に関するガイドライン」（以下「ガイドライン」、環境省，2009）が策定された。このガイドラインでは、都道府県の自治事務である温泉の掘削等の不許可事由、温泉掘削許可の行政処分等の判断基準等に対する技術的助言として、全国的に汎用性のある一定の考え方が示されている。しかしながら、地域により、周辺環境、利用状況、地質等は多様であり、温泉資源の保護のためには、その地域的特性に応じた視点に立ったモニタリング調査が不可欠である。このことはガイドラインでも「本ガイドラインは、ごく一般的な温泉資源の状況を念頭に記述をしているが、地質の構造、泉脈の状態または周辺での温泉の開発状況に応じて、温泉資源の保護のために必要な対策の内容が異なるのは当然である。最終的には、地域の温泉資源の特性を十分に考慮し、許可等の判断に当たる必要がある」と特記され、個別的な許可判断のためのローカルな影響調査の必要性を指摘している。

このような行政ニーズに対応して、各都道府県の公設試験研究機関の所管地域の地域性に応じた温泉資源の賦存や枯渇プロセス解明に関する研究が進められている（例えば板寺ら，2010；齊藤ら，2008）。それらの一環として三重県では、三重県熊野市に位置する湯ノ口温泉において、直近の新規温泉掘削工事が既存温泉に与える局所的な地球化学的影響を調査する等（森ら，2010）、温泉資源の保全や適正利用を目指して、温泉法上の行政的課題の解決に向けた研究を進めてきた。

そのような背景のなかで、三重県菰野町に位置する湯の山温泉において、ガイドラインに規定された「動力装置の際の影響調査等実施手法」に基づく、動力装置の周辺源泉への影響調査が実施さ

れることとなった。ガイドラインが策定されてから間もないこともあり、このような調査は県内初の事例であり、また、全国的にもほとんど報告されていない。このことから、本研究では、影響調査の手法と結果を概括的に整理した。加えて、温泉成分の時系列変動データから、湯の山地域における地下流体の挙動について検討した結果、有用な知見が得られたので報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 土地掘削許可申請と審議の経緯

湯の山温泉(三重県菟野町)は、三重県を代表する温泉保養地のひとつである。この湯の山地域一帯の一ヶ所を対象として、温泉法(1948年7月10日法律第125号。以下「法」)第3条に基づく土地掘削許可申請および法第11条に基づく動力装置許可申請が県知事あてに提出された。申請された源泉(以下「対象源泉」)の掘削深度は208m、ケーシング管のストレーナは深度53~70mで、深度80m以深は裸孔である。対象源泉の掘削地点付近には既存の温泉が存在すること、また湯の山地域一帯は既存温泉を活用した温泉利用施設が密集した観光地域であり、枯渇リスクの低減のために細心の注意を払う必要があること、特に県内では貴重な自然湧出泉の残る地域であるため、これを保全する必要があること等の背景に鑑み、三重県自然環境保全審議会温泉部会(法第32条の規定に基づく諮問機関。以下「審議会」)によって、専門の見地から許可の可否が審議された。

審議の結果、許可することが妥当としたうえで、許可の条件として、次のような意見が提示された。①申請された源泉の対照とする既存源泉(以下「観測源泉」)を選定し、ガイドラインに規定された「動力装置の際の影響調査等実施手法」に基づく影響調査を実施すること、②観測源泉は、同一性の高い地質帯に位置する温泉を選定すること、③湯の山地域は三重県内でも数少ない自然湧出泉の残る地域であることから、観測源泉には自然湧出泉を選定すること。

審議会から提示された条件に合致し、調査の実施に協力が得られる源泉を選定のうえ、ガイドラインに基づく影響調査は計画された。実際の検体の採水および試験分析については、申請者から三重県保健環境研究所に委託された。

### 2.2 研究対象地域の地質と湧出する温泉水の特徴

ガイドラインでは、「対象源泉」「観測源泉」を以下のとおり定義している。

対象源泉：動力の装置が「温泉のゆう出量、温度又は成分に影響を及ぼす」か否かを判断するため、動力を装置しようとする源泉

観測源泉：対象源泉の周辺の既存源泉

観測源泉は、対象源泉の周辺にある既存温泉の中から、審議会の意見に基づき、①高頻度の採水が可能であること、②自然湧出泉であること、③対象源泉の湧出地域と同一性の高い地質帯に存在すること、④対象源泉からの距離が近いこと、⑤温泉利用施設数が多いこと等に着目して、以下のとおり選定した。観測源泉、対象源泉の位置および周辺の概略的な地質をFig. 1に示す。観測源泉と対象源泉との水平距離は約1,800mであるが、観測源泉は、周辺の数多くの宿泊施設・入浴施設に配湯される源泉であり、万が一枯渇に至った場合の社会的・経済的影響を重視して選定された。温泉法および鉱泉分析法指針(改訂)(環境省, 2002)に基づく定期的な温泉成分分析の結果(抜粋)をTable 1に示す。

各源泉の特徴をそれぞれ示す。

観測源泉Ⅰ：自然湧出泉。観測源泉Ⅱと極めて近接して湧出しているため、温泉利用上、観測源泉Ⅰ・観測源泉Ⅱの混合泉として取り扱われている。混合泉として、単純弱放射能

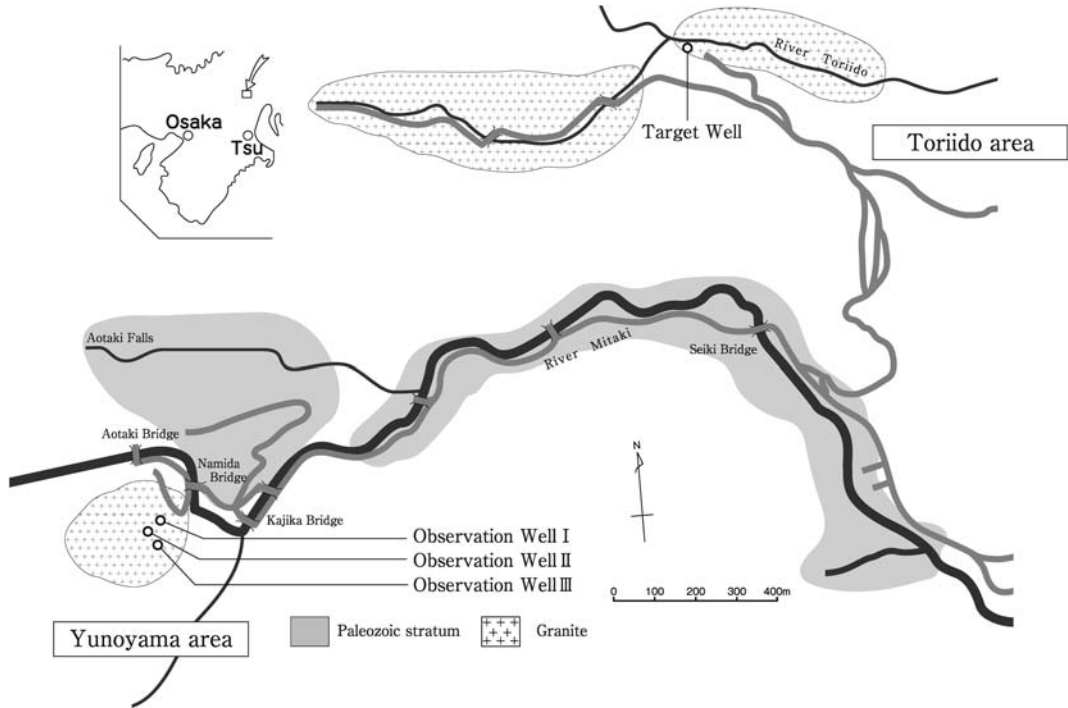


Fig. 1 Location of the observation and target wells on the schematic geologic map (after Hot Spring Research Center, 1962).

Table 1 Water quality of the observation and target wells

Monitoring items	Observation well		Target well
	I + II * <sup>1</sup>	III	
Date of analysis	29/Nov/2004	12/Dec/2008	12/Dec/2008
Water temperature (°C)	26.1	21.4	15.9
pH	9.1	8.8	8.2
Quantity of water discharge (L/min)	90	14	32
Na <sup>+</sup> (mg/kg)	47.4	39.6	69.2
K <sup>+</sup> (mg/kg)	0.6	0.8	1.8
Ca <sup>2+</sup> (mg/kg)	2.8	4.6	11.4
F <sup>-</sup> (mg/kg)	11.5	8.3	5.0
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	10.2	20.0	12.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	4.9	4.7	7.9
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (mg/kg)	29.2	29.2	16.6
HBO <sub>2</sub> (mg/kg)	2.8	2.6	4.1
Rn (Bq/kg)	137	33.4	111

\*<sup>1</sup>) The observation wells I + II : Composite samples were analyzed because their springs are located very close each other.

温泉 (低張性弱アルカリ性低温泉). フッ化物イオン 11.5 mg/kg, ラドン 137 Bq/kg が温泉法上の規定値 (フッ化物イオン 2 mg/kg, ラドン 74 Bq/kg) を満たす.

観測源泉Ⅱ: 自然湧出泉. 観測源泉Ⅰを参照.

観測源泉Ⅲ: 自然湧出泉. 冷鉱泉 (低張性アルカリ性冷鉱泉). フッ化物イオン 5.0 mg/kg が温泉法の規定値を満たす.

対象源泉: 水中ポンプ式動力揚湯泉 (掘削深度 200 m). 単純弱放射能冷鉱泉 (低張性弱アルカリ性冷鉱泉). フッ化物イオン 5.0 mg/kg, ラドン 111 Bq/kg が温泉法上の規定値を満たす.

本調査研究の対象地域の地質については, 中央温泉研究所 (1962, 1970), 原山ら (1989) によって詳しく調査されている. 観測源泉である湯の山温泉を通過して東流する三滝川, 菰野富士の北を同じく東流する鳥居道川沿いに露頭が続く. 露出する岩層は, 古生層であるホルンフェルス, チャート, 古生層に貫入した黒雲母花崗岩や, これらの中に見られるアプライト, ひん岩の岩脈で, 川沿いの平地にはこれらの岩層の崩壊物や沖積層が分布している. ホルンフェルスと花崗岩との境界は明確なものではないが, 三滝川, 鳥居道川いずれにおいても上流側では花崗岩のみとなる. 河川上流部に広く卓越する花崗岩は鈴鹿花崗岩と呼ばれ, 中粒-粗粒斑状角閃石を含む黒雲母花崗岩である. 鈴鹿花崗岩は, 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. 河野・植田 (1966) による K-Ar 法による年代測定では, 鈴鹿花崗岩中の黒雲母は 65 Ma と算定されている.

本研究における対象源泉と観測源泉は, いずれも風化した鈴鹿花崗岩を湧出母岩とする. 観測源泉においては, これまでに自然影響要因による温泉成分変動を把握するため, 2005年7月~2006年7月の約1年間にわたり, 温泉成分のバックグラウンド変動の連続モニタリング調査が実施され, その結果の一部が報告されている (森ら, 2006). この連続モニタリング結果を, Fig. 2 (泉温, pH, 湧出量), Fig. 3 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Rn) に示す.

### 2.3 観測期間と観測項目

段階揚湯試験および連続揚湯試験の実施方法については, 三重県が定める方法 (三重県, 2008) に準拠して実施した. 段階揚湯試験は, 対象源泉の需要量を考慮して, ①第1段階 6 L/min ②第2段階 9 L/min ③第3段階 18 L/min ④第4段階 33 L/min ⑤第5段階 36 L/min の計5段階で実施した. また, 段階揚湯試験の翌日から, 連続揚湯試験 (25 L/min 1,740分継続揚湯) を実施した.

調査方法については, 原則として, ガイドラインに規定される「動力装置の際の影響調

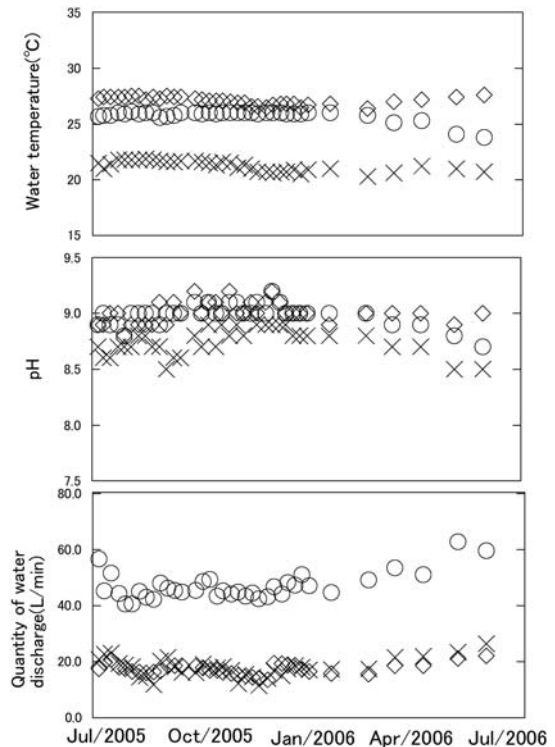


Fig. 2 Observed data of water temperature, pH and quantity of water discharge from July, 2005 to July, 2006 at the observation wells I-III (data from Mori *et al.*, 2006). Symbols: ○, Observation well I; ◇, Observation well II; ×, Observation well III.



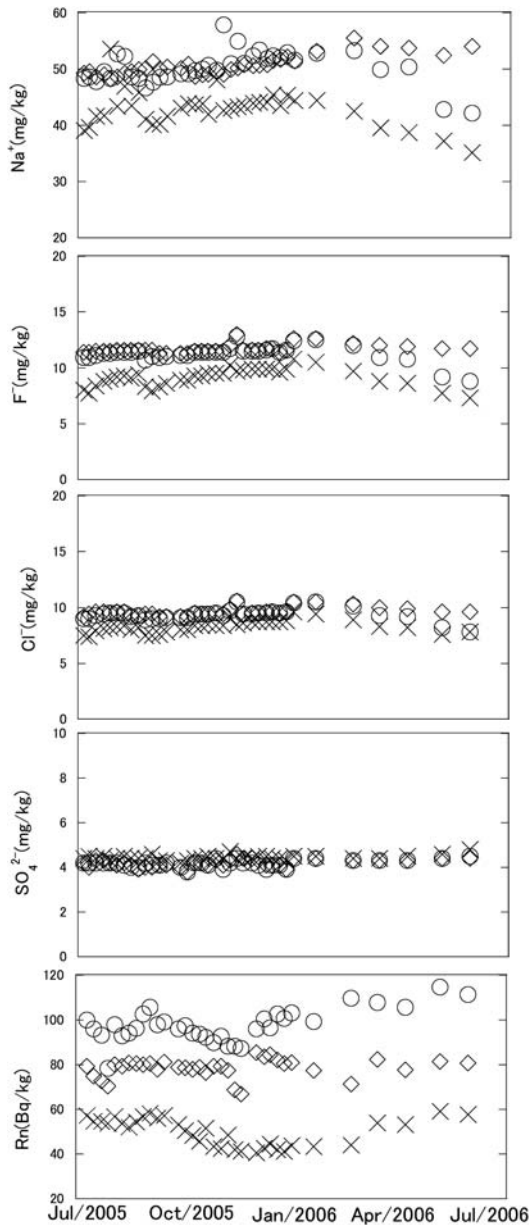


Fig. 3 Observed data of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and Rn concentrations from July, 2005 to July, 2006 at observation wells I - III (data from Mori *et al.*, 2006). Symbols : ○, Observation well I ; ◇, Observation well II ; ×, Observation well III.

査等実施方法」に準拠することとし、源泉の湧出状況等、状況に応じて適切な方法をとった。これらの調査の観測期間と観測項目、調査概要を Table 2 に示す。対象源泉を揚湯しない状態での観測源泉における自然要因によるバックグラウンド変動を把握するための「事前調査」、対象源泉の段階揚湯試験時に、湧出量を段階的に増加させた状態で観測源泉においてどのような影響が出現するかを把握するための「影響調査」、対象源泉の段階揚湯・連続揚湯を行った後、揚湯を停止した状態での観測源泉がどのような変動を示すかを把握するための「事後調査」の三つの調査期間を設定し、それぞれ事前調査 (3回/3日間)、影響調査 (5回/段階揚湯試験時)、事後調査 (3回/3日間) の現地調査 (手観測) および採水を実施した。

なお、ガイドラインでは「事前調査」「影響調査」「事後調査」について、以下のとおり規定されている。

事前調査：観測源泉の通常期 (対象源泉の影響がない状態) の湧出状況を把握するための調査で、3日間程度の観測期間を考慮する。

影響調査 (狭義)：観測源泉において、対象源泉の揚湯による影響の有無と程度を確認するための調査で、対象源泉の湧出量を段階的に増加する方式を推奨する。湧出量の設定は、下限は使用ポンプでの最小湧出量、上限は許可制限、対象源泉の適正採取量又は計画使用量とし、5段階程度に区分する。

事後調査：影響調査時に出現した変化が対象源泉によるものか否か (影響か否か) を確認する調査で、事前調査と同じく、3日間程度の観測期間を考慮する。影響調査時に明確な変動がなければ、事後調査の実施は省略できる。

観測項目については、ガイドラインでは、湧出量、泉温、pH、静水位を測定するよう規定されて

Table 2 Observation period and monitoring items

Investigation	Well	Date of investigation	Monitoring items
Preliminary investigation	Target well	11/Aug/2009	Water level
	Observation well	18/Aug /2009	Quantity of water discharge · Water temperature · pH F <sup>-</sup> · Cl <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · Na <sup>+</sup> · Rn
		25/Aug /2009	
Influence investigation	Target well	1/Sep/2009	Water level · Quantity of water discharge · Water temperature · pH F <sup>-</sup> · Cl <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · Na <sup>+</sup> · Rn
	Observation well		Quantity of water discharge · Water temperature · pH F <sup>-</sup> · Cl <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · Na <sup>+</sup> · Rn
Follow-up investigation	Target well	8/Sep/2009	Water level
	Observation well	15/Sep/2009	Quantity of water discharge · Water temperature · pH F <sup>-</sup> · Cl <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · Na <sup>+</sup> · Rn
		24/Sep/2009	

おり、温泉水中の溶存成分測定については特に規定されていない。ガイドライン策定以降、野田(2009)により、ガイドラインに示された温泉モデルに対して、化学的側面から考察する必要性が提案されるなど、各源泉の相互影響を検討するために、化学的データが必要となる可能性が考えられる。このことから本研究では、対象源泉および観測源泉の温泉成分の中から、主要成分の Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> と、観測源泉・対象源泉に特徴的な温泉成分 F<sup>-</sup>、Rn について分析を行った。

## 2.4 分析方法

温泉水の分析方法は、原則として環境省が定める鉱泉分析法指針(改訂)に準拠するとともに、分析操作の簡便性等を考慮し、以下のとおりとした。

泉温：標準温度計による測定

測定場所：現地測定

pH：ガラス電極法

機器：HM-60G(東亜ディーケーケー株式会社製)

測定場所：実験室内測定

(試料採取後、実験室に持ち帰って測定を行う。採取から測定まで約1時間程度以内で実施可能)

湧出量：定量容器による測定

測定場所：現地測定

Na<sup>+</sup>：原子吸光光度法

機器：AA-6800(株式会社島津製作所製)

方式：Air-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> フレーム

試料：HCl 固定

F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>：イオンクロマトグラフ法

測定機器：DX-120(日本ダイオネクス株式会社製)

カラム：AS-23(4×250 mm) および AG-23(4×50 mm)

方式：サブレッサ ASRS300 4 mm

移動相：4.5 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0.5 mmol/LNaHCO<sub>3</sub> 溶液

流速：1.00 mL/min

試料: 0.45 $\mu$ m メンブレンフィルター (日本ミリポア株式会社製) ろ液

Rn: 液体シンチレーションカウンタ法

測定機器: LB-5 (アロカ株式会社製)

サンプルの調製: 直接法 (Yasuoka *et al.*, 2009) による

なお, 対象源泉においては, 地表から水位までの距離を測定し, これを静水位とした。

### 3. 結 果

#### 3.1 事前・事後調査

事前・事後調査における主な調査項目の時系列変動について, pH, 湧出量, 泉温を Fig. 4 に, Na<sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Rn 濃度を Fig. 5 に, それぞれ示す。

泉温は, 観測源泉 I が 23.8~26.1°C, 観測源泉 II が 27.4~27.6°C, 観測源泉 III が 20.8~21.9°C, pH は, 観測源泉 I が 8.51~9.04, 観測源泉 II が 8.85~9.06, 観測源泉 III が 8.23~8.84, 湧出量は, 観測源泉 I が 43~63 L/min, 観測源泉 II が 16~21 L/min, 観測源泉 III が 12~24 L/min の範囲でそれぞれ推移した。なお, 対象源泉の静水位については, 降水等の影響と考えられる 0.08~1.40 m の変動であり, 事前・事後調査の間で大きな変動は認められなかった。

本調査研究の対象地域から湧出する温泉水は, 他の地下水・温泉水に比べて, F<sup>-</sup> 濃度や Rn 濃度が高いことが特徴的である。F<sup>-</sup> 濃度については, 観測源泉 I が 7.8~12.7 mg/kg, 観測源泉 II が 10.6~12.5 mg/kg, 観測源泉 III が 4.9~9.9 mg/kg で推移した。F<sup>-</sup> は温泉法の定義として, 規定値 (2 mg/kg) 以上と定められており, いずれの測定においても規定値の 2 倍を優に超えていることから, 安定的に温泉法第 2 条に規定する温泉に該当していることが明らかになった。Rn 濃度については, 観測源泉 I が 94.9~114 Bq/kg, 観測源泉 II が 74.8~79.5 Bq/kg, 観測源泉 III が 50.1~56.1 Bq/kg であり, 溶存イオンや Rn について, 大きな変動は認められなかった。観測源泉 I・II は, 法の規定値 (74 Bq/kg) 以上の Rn を含有しており, 法第 2 条に規定する温泉に該当していることがわかった。

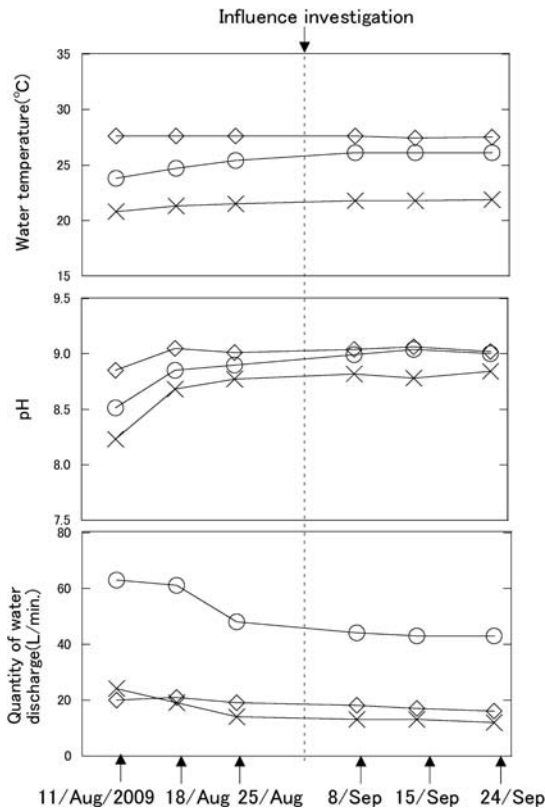


Fig. 4 Temporal variation of water temperature, pH and quantity of water discharge, respectively, observed in preliminary and follow-up investigations. Symbols : ○, Observation well I ; ◇, Observation well II ; ×, Observation well III. Dotted line indicates the date of influence investigation (1/Sep/2009).

#### 3.2 影響調査

動力装置の影響調査における主な調査項目の時系列変動について, pH, 湧出量, 泉温を Fig. 6 に, Na<sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Rn 濃度を Fig. 7 に, それぞれ示す。湧出量は, 段階揚



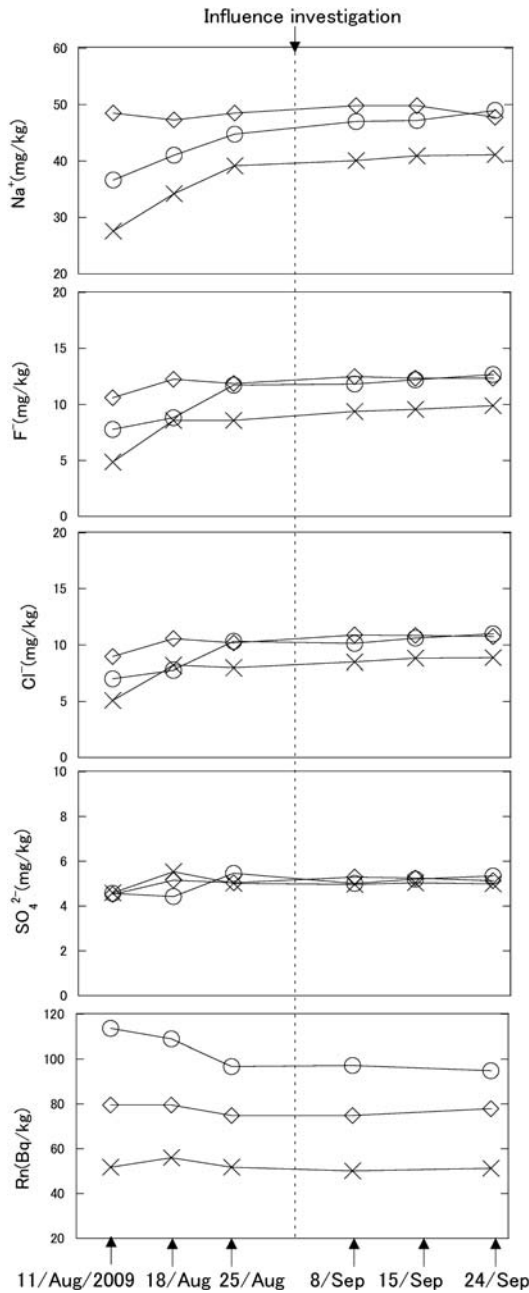


Fig. 5 Temporal variation of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and Rn concentrations, respectively, observed in preliminary and follow-up investigations. Symbols:  $\circ$ , Observation well I;  $\diamond$ , Observation well II;  $\times$ , Observation well III. Dotted line indicates the date of influence investigation (1/Sep/2009). Rn data on 15/Sep/2009 were not shown because of trouble of liquid scintillation counter.

湯試験として、対象源泉の湧出量を 6 L/min (第 1 段階: Q1), 9 L/min (第 2 段階: Q2), 18 L/min (第 3 段階: Q3), 33 L/min (第 4 段階: Q4), 36 L/min (第 5 段階: Q5) と上昇させ、その間の観測源泉や対象源泉の各分析項目を測定した。

泉温は、観測源泉 I が 25.8°C, 観測源泉 II が 27.5~27.7°C, 観測源泉 III が 21.7°C で、事前・事後調査に比べて変動は少なく、安定的に推移した。これに対して対象源泉は、16.1~16.4°C の範囲で、段階が進むごとに 0.1°C ずつの泉温低下が認められた。

pH もまた、観測源泉 I が 8.95~9.08, 観測源泉 II が 9.04~9.13, 観測源泉 III が 8.77~8.86 と安定的であった。しかし対象源泉では、第

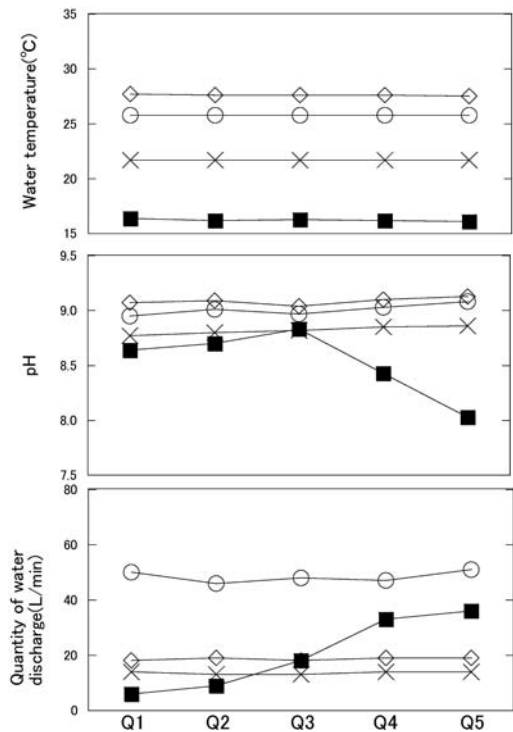


Fig. 6 Temporal variation of water temperature, pH and quantity of water discharge respectively, observed in the influence investigation (1/Sep/2009). Q1-Q5 represent the stage of quantity of water discharge in the examination of incremental pumping up. Symbols:  $\circ$ , Observation well I;  $\diamond$ , Observation well II;  $\times$ , Observation well III;  $\blacksquare$ , target well.

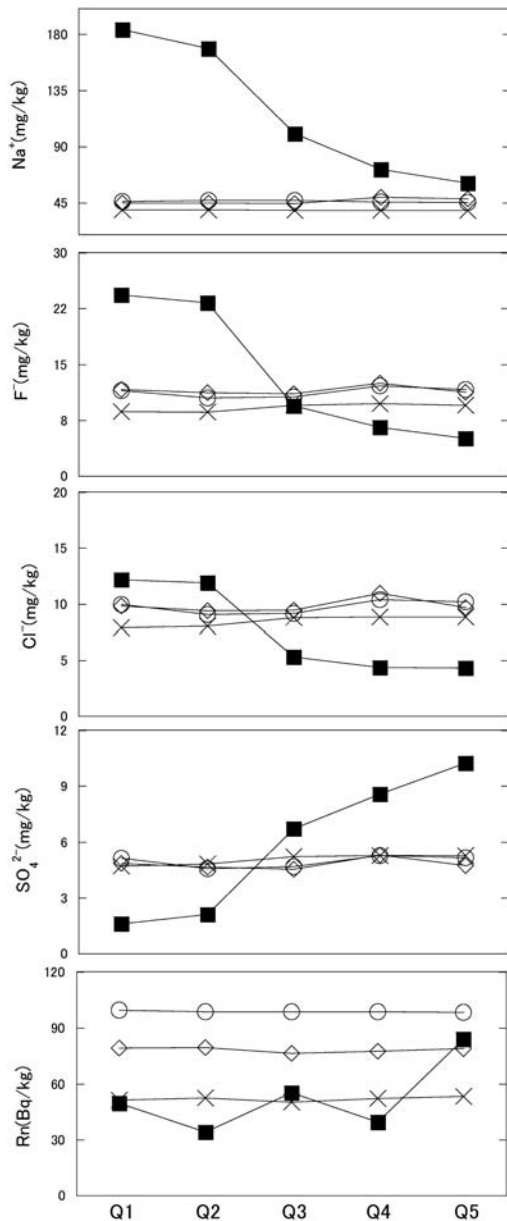


Fig. 7 Temporal variation of Na<sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Rn concentrations, respectively, observed in a influence investigation (1/Sep/2009). Q1-Q5: See Fig. 6 caption. Symbols: ○, Observation well I; ◇, Observation well II; ×, Observation well III; ■, target well.

1段階の8.64から第3段階の8.83までは比較的安定であったが、その後の第4段階が8.43, 第5段階が8.03と、段階が進むにつれて急激なpH低下が認められた。湧出量は、観測源泉Ⅰが46~51 L/min, 観測源泉Ⅱが18~19 L/min, 観測源泉Ⅲが13~14 L/minであり、観測源泉には大きな変動は認められなかった。

溶存イオンについても、観測源泉Ⅰ~Ⅲでは濃度変動は少なく、安定的であったが、対象源泉では大きな変動が認められた。Na<sup>+</sup>濃度は、第1段階の184 mg/kgから段階が進むごとに減少し、第5段階では61.2 mg/kgにまで低下した。F<sup>-</sup>濃度やCl<sup>-</sup>濃度も同様で、F<sup>-</sup>は24.4 mg/kgから5.1 mg/kgに、Cl<sup>-</sup>は12.2 mg/kgから4.4 mg/kgに、それぞれ段階が進むごとに低下した。これらの成分とは対照的にSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度については、第1段階の1.6 mg/kgから段階が進むごとに増加し、第5段階では10.2 mg/kgまで上昇した。Rn濃度もまた、第1段階49.7 Bq/kgから第5段階84.2 Bq/kgと、極めて不安定な変動ながらも、全体的には段階が進むごとに上昇の傾向が認められた。

### 3.3 段階揚湯試験

段階揚湯試験における水位降下量の時系列変動を Fig. 8 に、水位降下量と動力揚湯による湧出量の関係を Fig. 9 に示す。

両図に示すとおり、水位降下量の変曲点は第4段階(湧出量33 L/min)に認められた。変曲点が認められた揚湯量を限界揚湯量とすると、適正揚湯量は、式(1)のとおり定義される(三重県, 2008)。

$$\begin{aligned} \text{適正揚湯量(L/min)} &= \\ & \text{限界揚湯量(L/min)} \times 0.8 \quad \dots\dots(1) \end{aligned}$$

したがって、本研究のデータから得られた対象源泉における限界揚湯量は第4段階(33 L/min)であるから、対象源泉における適正揚湯量は、式(2)のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{対象源泉の適正揚湯量(L/min)} &= \text{対象源泉の限界揚湯量(L/min)} \times 0.8 \\ &= 33 \times 0.8 = 26.4 \dots\dots(2) \\ &\approx 25 \text{ (L/min)} \end{aligned}$$

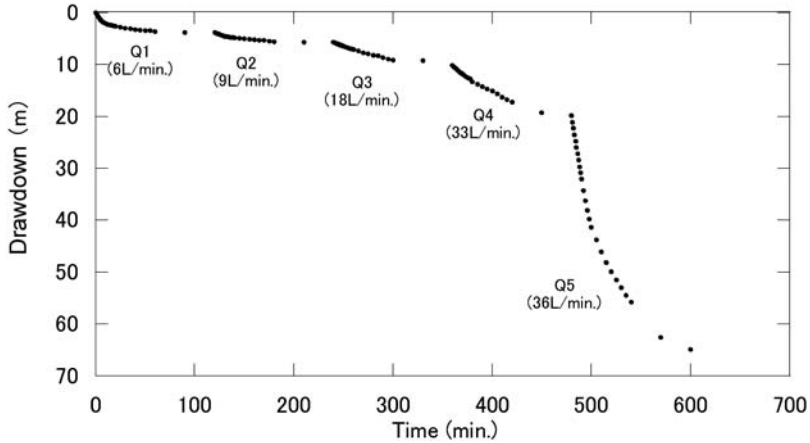


Fig. 8 Temporal variation of drawdown in the examination of incremental pumping up. Q1-Q5 : See Fig. 6 caption.

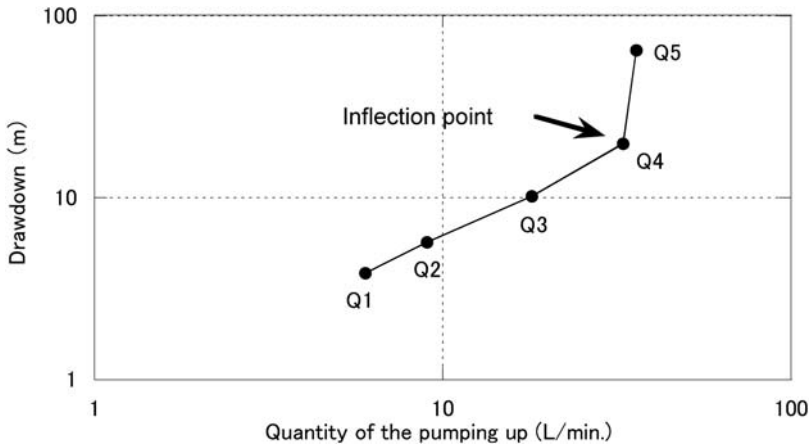


Fig. 9 Relationship between volume of pumping up and drawdown in the examination of incremental pumping up. Q1-Q5 : See Fig. 6 caption.

計算上の適正揚湯量は 26.4 (L/min) であるが、安全側に考えて、適正揚湯量は 25 L/min とした。求められた適正揚湯量により、連続揚湯試験を行った (Fig. 10)。その結果、連続揚湯時の動水位の安定および揚湯停止後の自然水位への回復が観察されたことから問題は認められなかった。

## 4. 考 察

### 4.1 段階揚湯試験における対象源泉の地球化学的変動

段階揚湯試験時における対象源泉の観測値の変動の大きさを比較するために、影響調査における各観測源泉の観測値の変動係数 ( $CV_{inf}$ ) と対象源泉の観測値の変動係数 ( $CV_{tar}$ ) を算出した。各変動係数 ( $CV_{inf}$ ) の平均値と、対象源泉の観測値の変動係数 ( $CV_{tar}$ ) の計算結果を Table 3 に示す。

その結果、いずれの項目においても  $CV_{inf}$  の平均値に比べて  $CV_{tar}$  が大きく、観測源泉に比べて、

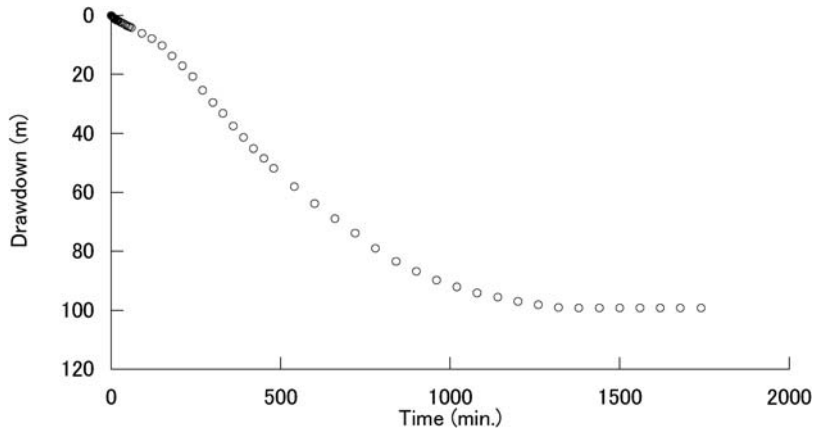


Fig. 10 Temporal recovery of water level after stopping of continuous pumping up for 1,740 min at 25 L/min.

Table 3 Comparison of the coefficients of variation of the observed results between the observation wells and the target one

Monitoring items	The average of $CV_{inf}$ (Observation well I ~ III)	$CV_{tar}$
Water temperature	0.09	0.70
pH	0.45	3.67
$Na^+$	2.30	47.71
$F^-$	5.51	67.75
$Cl^-$	6.14	53.18
$SO_4^{2-}$	5.90	65.83
Rn	1.49	37.11

対象源泉の変動が極めて大きいことがわかった。特に、温泉水中の溶存成分についてその傾向は著しく、 $Na^+$ の $CV_{inf}$ の平均値が2.30であるのに対して $CV_{tar}=47.71$ 、 $F^-$ の $CV_{inf}$ の平均値が5.51であるのに対して $CV_{tar}=67.75$ など、段階揚湯を行うことによる地球化学的影響は極めて大きいことが明らかとなった。

また、Fig. 6, Fig. 7 に示した各分析項目の時系列変動のグラフから、段階揚湯試験において、段階が進むごとに進行した地球化学的变化として、① pH の低

下、②  $Na^+$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$  の濃度低下、③  $SO_4^{2-}$  濃度の増加、④ Rn 濃度の上昇傾向の不安定変動に整理することができる。

#### 4.2 フッ化物イオン濃度と塩化物イオン濃度の高い相関性

森ら (2006) は、本研究の観測源泉 I ~ III の連続モニタリング調査を実施した結果から、温泉地下水中の  $F^-$  濃度と  $Cl^-$  濃度の間に高い相関があり、これらの2成分が含まれる帯水層(以下「F/Cl 帯水層」)を主要な温泉成分の供給源として機能している可能性が高いことを示唆した。そこで、森ら (2006) のデータに本研究によって得られたデータを加えて、 $F^-$  と  $Cl^-$  の散布図を作成した (Fig. 11)。その結果、本研究によって得られたデータを加えてもなお、観測源泉 I ~ III のプロットはほぼ同一直線上にプロットされ、相関係数が0.957 と、高い相関関係が認められることがわかった。

観測源泉 I ~ III における  $F^-$  濃度と  $Cl^-$  濃度の回帰直線は、式 (3) のとおり表される。

$$[Cl^-]_{obs} = 0.62 \times [F^-]_{obs} + 2.5 \dots\dots\dots(3)$$

一方、影響調査時において対象源泉から湧出した温泉水中の  $F^-$  濃度と  $Cl^-$  濃度は、いずれの段階においても観測源泉のプロット位置とはやや離れた位置にプロットされた。影響調査時の対象源泉における  $F^-$  と  $Cl^-$  の第 1~5 段階の結果による回帰直線は、式 (4) のとおり表される。

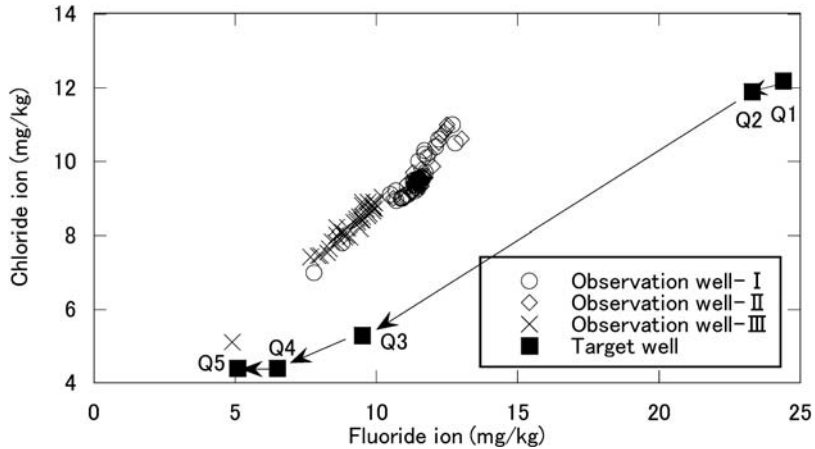


Fig. 11 Correlation between concentration of fluoride ion and that of chloride ion observed in this study and previous study (data from Mori *et al.*, 2006).

$$[Cl^-]_{tar} = 0.43 \times [F^-]_{tar} + 1.7 \dots\dots\dots(4)$$

対象源泉においても相関係数 0.996 であり、観測源泉と同様に  $F^-$  濃度と  $Cl^-$  濃度には高い相関があることがわかった。したがって、対象源泉においても、観測源泉と同様に、 $F/Cl$  帯水層の存在が示唆された。

### 4.3 段階揚湯量試験に伴う地下流体挙動の変化

観測源泉 I ~ III における回帰直線は、傾きがほぼ一致することから、それぞれの温泉水に含まれる  $F^-$  と  $Cl^-$  は、同じ割合で混合された同一の  $F/Cl$  帯水層から供給されている可能性が高いことが推測される。しかしながら、観測源泉 I ~ III の傾きが 0.62 であるのに対し、対象源泉においては 0.43 であり、異なった割合で  $F^-$  と  $Cl^-$  が混合されていることが推測される。

また Fig. 11 から、 $F^-$  濃度と  $Cl^-$  濃度が、段階揚湯試験における揚湯量の増加に対して、どのような変動を示したかについて着目する。第 1 段階と第 2 段階では、ほぼ同じ位置にプロットされたものの、第 3 段階からは  $F^-$  濃度、 $Cl^-$  濃度が半分以下に低下した位置にプロットされた。第 4 段階、第 5 段階もまた、第 3 段階よりもさらに  $F^-$  濃度、 $Cl^-$  濃度が低下した位置にプロットされた。第 5 段階は、第 4 段階のほぼ真横の位置にプロットされていることから、第 4 段階、第 5 段階では  $F^-$  濃度は減少するが、 $Cl^-$  濃度は維持されていることがわかった。

このことから、段階揚湯試験の段階が進むごとに、従来供給を受けていた  $F/Cl$  帯水層からの寄与率が下がり、 $F^-$  と  $Cl^-$  を比較的含んでいない地表水による希釈作用を受けて、プロット位置が変化したものと推測される。一般に、雨水や河川水が浸透して間もない地表水中に、4 mg/kg 程度の  $Cl^-$  が含まれることは想定されるが（日本農業土木総合研究所，2001），そのような地表水中の  $F^-$  濃度は比較的低いと考えられるため、第 4 段階、第 5 段階においては  $F^-$  濃度のみの減少が認められたものと推測される。

また、 $Rn$  の段階毎の上昇傾向の不安定変動については、 $Rn$  が半減期 3.8 日の放射性物質であり、 $Rn$  濃度は、 $Rn$  を含む地下水が湧出に至るまでの経過時間に鋭敏に反応することを考慮しなければならない。段階が進むごとに  $Rn$  濃度の上昇傾向が認められた要因として、揚湯量の増加に伴い、 $Rn$  が水相に移行してから比較的短時間で湧出に至ったからである可能性が考えられる。ただし、



本研究で得られた結果は、段階が進んだ際の濃度変動の傾向が不安定であるため、詳細については今後のデータの蓄積が必要である。

#### 4.4 対象地域における温泉成分の賦存状況と挙動の推定

湯の山地域の地下流体挙動に関しては、以下の推論が報告がされている(森ら, 2006)。(1)湯の山地域一帯の温泉水は、花崗岩クラックを湧出母岩とする停滞性の被圧地下水を起源とすること。(2)  $F^-$  濃度と  $Cl^-$  濃度には高い相関があり、共通の帯水層から湧出している可能性が高いこと。(3)湧出の過程において、地表水が混合され、自然的要因による深層起源流体との混合割合が変化することで、湧出する温泉水の成分濃度が変動すること。

これらの推論を背景として、本研究によって得られた時系列変動データを加えて、湯の山地域における地下流体の挙動について検討した。

前項で考察したように、森ら(2006)の報告と同様、対象源泉においても  $F^-$  と  $Cl^-$  には高い相関が認められた。しかし、観測源泉と対象源泉の回帰直線の傾きが異なることから、対象源泉では、観測源泉の  $F/Cl$  帯水層とは  $F^-$  と  $Cl^-$  の混合割合が異なる  $F/Cl$  帯水層から、 $F^-$  および  $Cl^-$  が供給されていることが考えられる。なお、対象地域の成分濃度レベルの  $F^-$  と  $Cl^-$  の混合割合を式(3)および式(4)から算出すると、観測源泉の  $F/Cl$  帯水層の濃度比はおよそ  $[F^-] : [Cl^-] = 10 : 9$ 、対象源泉の濃度比は  $[F^-] : [Cl^-] = 10 : 6$  である。

また、段階揚湯試験の段階が進むごとに認められた地球化学的変動について着目すると、 $Na^+$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$  の濃度は、対象源泉の段階が進むごとに、明確に濃度が低下したが、それと相反するように  $SO_4^{2-}$  濃度は上昇した。比較的地下の深部を起源とすると推測される  $F^-$  と  $Cl^-$  濃度が低下したこと、また浅層を起源とすると仮定される  $SO_4^{2-}$  濃度が上昇したことは、深部起源流体と浅層起源流体の混合割合の変化によって、温泉水の成分濃度が変動するとした推論(森ら, 2006)を支持するものである。対象源泉の揚湯量を人為的に大きくすることによって、浅層起源流体の割合が急激に増加したものと推測される。

第1段階から第5段階の中で最も大きな濃度変動が認められた  $SO_4^{2-}$  で計算すると、

$$[SO_4^{2-}]_{Q5} / [SO_4^{2-}]_{Q1} = 6.34 \dots \dots \dots (5)$$

したがって、第5段階においては、第1段階における浅層起源流体寄与量の少なくとも6倍程度の浅層起源流体が温泉水に影響した可能性が考えられる。

以上のように得られた仮説については、影響調査において温泉水の成分濃度分析を実施した結果、考察されたものである。このような温泉成分濃度の相関性等によって、温泉資源の賦存状況や地下挙動を推測することができる可能性があるため、必要に応じて地球化学的側面からの影響調査を行っていくことが望ましいと考える。

## 5. ま と め

本研究によって、以下の知見が得られた。

- ・「温泉資源の保護に関するガイドライン」に規定された「動力装置の際の影響調査等の実施方法」に基づく影響調査を実施し、その結果を整理した。同ガイドラインに基づく影響調査は県内初の事例であり、全国的にも報告事例が少ないため、今後の調査の参考として活用可能である。
- ・段階揚湯量試験時における対象源泉の成分変動を調査したところ、段階が進む毎に  $Na^+$  濃度、 $F^-$  濃度、 $Cl^-$  濃度の低下、 $SO_4^{2-}$  濃度の上昇が認められた。
- ・湯の山地域一帯における地下流体の挙動について考察した。対象地域では、 $F^-$  と  $Cl^-$  を含んだ帯

水層が存在し、温泉成分の主要な供給源として機能していると推定されるが、対象源泉と観測源泉では、それぞれの供給源の帯水層は異なっていると推測される。また、連続揚湯試験時に対象源泉で地球化学的変動が認められた要因は、浅層起源流体と深層起源流体の混合割合が変化したためと考えられる。

また、今後議論が必要と考えられる課題は、以下のとおりである。

- ・本調査研究は、段階揚湯試験時に進行する湧出量等の物理量の変動だけでなく、いわば地球化学的変動をとらえた有用な参考事例のひとつと考えられる。現行で運用されている段階揚湯試験の方法や、ガイドラインの影響調査手法では、温泉資源の量的な保全は考慮されているものの、地球化学的視点からの保全についてはほとんど考慮されていない。本研究で得られたように、段階揚湯試験の段階が進むにつれて温泉成分の濃度が変動するという現象は、他の温泉でも十分に起こる可能性があるものと考えられる。このことから、特に温泉資源の枯渇に対する予防対策のためには、地球化学的な視点からの対策が必要であると考えられる。
- ・ガイドラインに基づく動力装置の際の影響調査実施手法においては、事前調査および事後調査について、観測期間を3日間程度とする、と明記されている。しかしながら、通常時の自然変動を把握するためには、3日間程度では少ないものと考えられた。特に雨水や潮汐等自然影響を受けやすい温泉や、観測源泉が対象源泉の近傍に確保できない場合等は、より長期の観測と多くのデータが必要となる。ガイドラインでは、少なくとも5年度ごとにガイドラインの総点検を実施するとともに、随時、その更新を行う予定となっており、このような課題に対応できるよう、適切な改定が必要と考えられる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、菰野町、株式会社希望荘、財団法人中央温泉研究所の皆様には、採水や関連データの提供等に多大なる御協力を頂きました。この場をお借りして深謝いたします。

## 引用文献

- 中央環境審議会 (2007) : 温泉資源の保護対策及び温泉の成分に係る情報提供の在り方等について、2007年2月6日付け中央環境審議会通知。
- 中央温泉研究所 (1962) : 三重県菰野富士周辺温泉資源調査報告。1-12。
- 中央温泉研究所 (1970) : 三重県三重郡菰野町湯の山温泉資源開発調査報告。1-9。
- 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)。地質調査所報告, 59-70。
- 環境省 (2002) : 鉱泉分析法指針 (改訂) (2002年3月), 1-86。
- 環境省 (2009) : 温泉資源の保護に関するガイドライン (2009年3月), 1-57。
- 河野義礼, 植田良夫 (1966) : 本邦産火成岩の K-Ar dating (V) 西南日本の花崗岩類。岩鉱, **65**, 191-221。
- 板寺一洋, 菊川城司, 小田原啓 (2010) : 神奈川県の大深度温泉水の起源。温泉科学, **59**, 320-339。
- 三重県 (2008) : 温泉法施行要領の改正について (揚湯試験の実施方法について)。2008年10月1日付け三重県環境森林部自然環境室長通知。
- 森 康則, 長谷川圭司, 小川正彦, 橋爪 清 (2006) : 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。三重県科学技術振興センター保健環境研究部年報, **51**, 31-38。
- 森 康則, 吉村英基, 前田 明, 志村恭子, 大熊和行, 小川正彦, 橋爪 清, 野原精一, 近藤雅秋,

加治佐隆光 (2010) : 直近の新規温泉掘削が既存温泉に与える地球化学的影響. 温泉科学, **60**, 22-36.

日本農業土木総合研究所 (2001) : 地下水, 33-52.

野田徹郎 (2009) : 化学は温泉の成り立ちを解き明かす. 温泉科学, **59**, 159-165.

齊藤由倫, 飯島明宏, 木村真也, 小澤邦寿, 野原精一 (2008) : 温泉中の微量金属元素および水素・酸素安定同位体比のキャラクタリゼーション. 第 61 回日本温泉科学会大会講演要旨集, 25.

Yasuoka, Y., Ishikawa, T., Fukuhori, N. and Tokonami, S. (2009) : Comparison of simplified liquid scintillation counter (Triathler) with conventional liquid scintillation counter in the measurement of radon concentration in water. J. Hot Spring Sci., **59**, 11-21.

(2010 年 9 月 15 日 第 63 回日本温泉科学会大会にて発表)