

原 著

## 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

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>, 小川正彦<sup>2)</sup>,  
橋爪 清<sup>3)</sup>, 野原精一<sup>4)</sup>, 近藤雅秋<sup>5)</sup>, 加治佐隆光<sup>5)</sup>

(平成 22 年 2 月 5 日受付, 平成 22 年 5 月 11 日受理)

## Geochemical Influence of Drilling a New Hole Adjacent to an Existing Hot Spring

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>, Masahiko OGAWA<sup>2)</sup>, Kiyoshi HASHIZUME<sup>3)</sup>,  
Seiichi NOHARA<sup>4)</sup>, Masaaki KONDO<sup>5)</sup> and Takamitsu KAJISA<sup>5)</sup>

### Abstract

During drilling a new bore-hole nearby an existing hot spring, Yunokuchi spa in Kumano city, Mie Prefecture, the existing hot spring water was analyzed continuously for investigation of geochemical influence by the drilling. The concentrations of chloride and copper ions increased obviously accompanying the progress of drilling. It is estimated that the anomalous increases of these ions are derived from the mixing of natural groundwater containing higher concentration of chloride and copper ions. It is demonstrated by natural field observation that an existing hot spring is obviously influenced by a new drilling bore-hole close by. In the enforcement of The Hot spring law, it is thought that the distance extent of geochemical influence observed in this study seems to be a significant reference.

Key words : Yunokuchi spa, Kumano group, Drilling mud, Chloride ion, Copper ion

<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> 三重県環境森林部 〒514-8570 三重県津市広明町 13. <sup>2)</sup> Mie Prefectural Government, Department of Environment and Forestry, 13 Koumei-cho, Tsu 514-8570, Japan.

<sup>3)</sup> 財団法人三重県環境保全事業団 〒510-0304 三重県津市河芸町上野 3258. <sup>3)</sup> Mie Prefecture Environmental Conservation Agency, 3258 Ueno, Kawage-cho, Tsu 510-0304, Japan.

<sup>4)</sup> 独立行政法人国立環境研究所 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2. <sup>4)</sup> National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan.

<sup>5)</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>5)</sup> Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan.

## 要 旨

直近の新規温泉掘削工事に起因する既存温泉の地球化学的影響を調査するため、三重県熊野市に位置する湯ノ口温泉において、掘削工事地点の直近で湧出する既存温泉の成分変動モニタリングを実施した。調査の結果、掘削工事の進行に伴い、既存温泉から湧出する温泉水中の塩化物イオンと銅イオン濃度の異常上昇が認められた。塩化物イオンや銅イオンの異常上昇は、各々の成分が高濃度に濃集する帯水層からの混入によって引き起こされた可能性が考えられる。既存温泉において温泉掘削工事に伴う直接的な地球化学的影響が認められたことは着目されるべきであり、本研究で推定された地球化学的な影響範囲は、温泉掘削許可判断の距離制限等のひとつの参考事例として活用できると考えられる。

キーワード：湯ノ口温泉，熊野層群，掘削泥水，塩化物イオン，銅イオン

## 1. はじめに

温泉を湧出させる目的で土地を掘削する場合、温泉法（以下、法）第3条の規定により、都道府県知事等の許可が必要である。これまで都道府県等は、公益侵害への該当性等を考慮して、制限地域の設定や既存温泉からの距離規制といった一律規制を中心に、土地掘削の許可判断を行ってきた。しかし近年、このような許可判断に対する行政裁判において、行政機関の主張が認められない司法判断のケースが散見されるようになった。例えば、群馬県みなかみ町における温泉掘削申請を県が不許可処分としたことを巡る行政裁判では、2006年8月31日東京高等裁判所が、県の調査結果では申請の掘削が他の温泉に影響を及ぼすかどうかは不確かであり、かつ周囲の既存の源泉所有者の同意書の添付がなかったことは法の不許可事由には該当しないと判断した。

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）の答申「温泉行政の諸課題に関する懇談会報告書」（2006年10月）（環境省2006）では、この東京高裁の判例等を例示しながら、これらの司法判断の要因として、掘削許可等の判断基準の具体的内容が法に明確化されていないことを挙げている。また、具体的な判断基準を規定するために、温泉資源の賦存量、水位、水温等に関するデータや温泉の汲み上げによる温泉資源への影響に関する科学的な知見の必要性を指摘している。このことから、温泉掘削に係る行政処分の科学的な根拠となり得るデータの蓄積は、法所管部局の喫緊の行政ニーズとなっており、既に公設試験研究機関のレベルで各所管地域の温泉資源の賦存や枯渇プロセスに関する調査研究が実施されている（例えば矢野ら、2007；齋藤ら、2008）。

温泉枯渇の課題への対応として、環境省は、温泉の掘削等の不許可事由の判断基準について一定の考え方を示す「温泉資源の保護に関するガイドライン」（環境省、2009）（以下、ガイドライン）を策定した。ガイドラインでは、温泉掘削許可の不許可事由のひとつである「温泉のゆう出量、温度又は成分に影響を及ぼすと認めるとき」（法第4条）の具体的な判断基準のひとつとして、これまでに多くの都道府県が事実上の判断根拠としている既存温泉からの一律の距離規制について述べている。

各都道府県が実施している温泉掘削の距離規制は、25～1,000 mの広範囲にわたっており、各都道府県の取扱いがかなり異なっていることがわかる。ガイドラインは、「一の掘削等により確実に影響を及ぼすことは証明できないが、複合的な影響の一因となる蓋然性が高い場合には、温泉の掘削等を制限することが認められるべき」とする考え方に基づいており、温泉資源の枯渇現象が全国的に顕在化しているなか、これらを判断するための科学的な基礎データの必要性はさらに増していると言える。

環境省が策定したガイドラインは、行政処分の一定の科学的根拠として活用可能であるものの、

湧出量や水位等, 物理的データに関する影響評価に特化しており, 温泉の規定値を満たすか否かを判断するのに必要な地球化学的データの影響評価については, ほとんど言及されていない. 温泉の掘削工事や揚湯が過密に行われている地域においては, 温泉成分濃度の低下に伴う泉質の劣化が深刻な問題となるケースも散見され (例えば甘露寺, 2007), 地球化学的観点からのデータの集積が不可欠と考えられる.

そこで本研究では, 揚湯中の既存の温泉の直近で新規の温泉掘削工事 (代替掘削) が実施された事例を対象とし, 直近の新規温泉掘削工事が周囲に与える地球化学的な影響に着目して, 既存温泉から湧出する温泉水の成分濃度の連続モニタリング調査を実施した. その結果から, 新規温泉掘削工事に伴う局所的な地下流体の影響について検討したので報告する.

## 2. 方 法

### 2.1 モニタリング地点

本研究のモニタリング地点である湯ノ口温泉は, 三重県南部, 和歌山県との県境の熊野市紀和町に位置する. 過去にこの地域は, 銅山の鉱床として稼行されていた経緯があり, 古くから数多くの地質調査の結果が報告されている (佐藤, 1958; 佐伯, 1961; 小野, 1961, 1969, 1971; 阿部・小野, 1967; 佐伯・古藤, 1972; Chijiwa and Tomita, 1981a, 1981b, 1985). 本温泉は熊野酸性火成岩の西側に位置し, 深さ 1,300 m の熊野層群に設置されたストレーナから取水されている. 本温泉の周辺地域の地質図を Fig. 1 に, 地質断面図を Fig. 2 に示す (通商産業省資源エネルギー庁, 1979, 1980; 鈴木ら, 1982). 熊野層群は下位より, 大沼累層, 竹筒累層, 板屋累層, 大河内累層に区別される. 竹筒累層は主に泥岩, 砂岩・泥岩互層からなり, 海棲化石を多産する. 板屋累層は砂岩, 砂岩・泥岩互層, 泥岩からなり, 下部に炭層が挟在している. 炭層は板屋累層下部に挟在するのみであるが, ビトリナイトの細片は竹筒累層, 板屋累層, 大河内累層に豊富に含まれている. 掘削ボーリングの結果, 深度 122.77 m まで板屋累層, 以下 1,202.05 m まで竹筒累層, 以下孔底 1,300.30 m まで竹筒累層に貫入した細粒花崗岩である (鈴木ら, 1982).

モニタリングを実施した湯ノ口温泉 (以下, 既存温泉) は, 1980 年に掘削された. 1990 年 5 月に鉱泉分析法指針に基づいて分析された温泉分析書によると, 泉温 46.2°C, 湧出量毎分 230 L, pH 7.8,

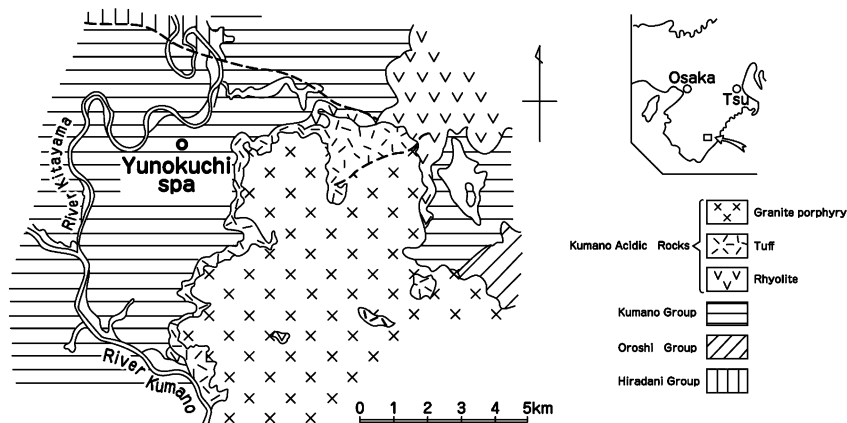


Fig. 1 Geologic map of the area around the hot spring observed (Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of International Trade and Industry, 1979; Suzuki *et al.*, 1982).

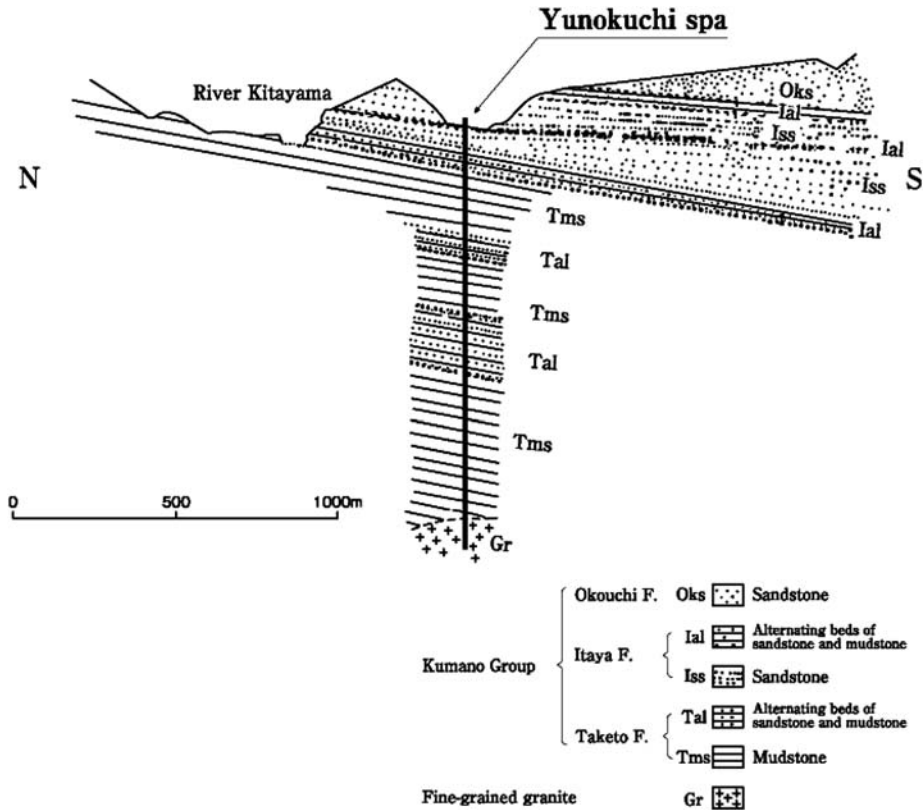


Fig. 2 Geologic column of the part of Kumano group (Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of International Trade and Industry, 1980).

泉質はナトリウム・カルシウム-塩化物温泉として分類されている。掘削当時に実施された主要成分の分析結果を Table 1 に示す。掘削深度 900 m まではケーシング管が埋設されており、深度 900 ~1,300 m から取水されている。

既存温泉の直近地点で、新規温泉掘削工事（代替掘削）が計画された。これは既存温泉の揚湯管が長年の使用により腐食され、必要量が揚湯しにくくなったためである。新規に掘削する温泉は、三重県自然环境審議会の審議を経て、法第 3 条に基づく土地掘削許可が与えられ、既存温泉から水平距離で 35 m 離れた地点で深度約 1,400 m の掘削工事が行われ、「新湯ノ口温泉」（以下、新規温泉）と名付けられた。既存温泉では、新規温泉の掘削工事が終了するまで、揚湯が継続されていたため、揚湯された温泉水を採水・分析することで、直近の新規温泉掘削工事による既存温泉への地球化学的影響を連続的にモニタリングした。

Table 1 The major chemical composition of Yunokuchi spa (Analyzed Data in May, 1990)

	Concentration (mg/kg)	
	Cation	Anion
Li <sup>+</sup>	2.1	F <sup>-</sup> 2.9
Na <sup>+</sup>	470.3	Cl <sup>-</sup> 1357
K <sup>+</sup>	6.8	Br <sup>-</sup> 4.7
Mg <sup>2+</sup>	9.0	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 87.9
Ca <sup>2+</sup>	351.4	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 0.3
Sr <sup>2+</sup>	4.9	
Mn <sup>2+</sup>	0.3	

※ Water temperature 46.2°C  
pH 7.8 Yield 230 L/min.

## 2.2 試料の採取

新規温泉の掘削工事は、2008年2月から4月の約2ヶ月間にわたって実施された。掘削工事前後の以下の期間において、既存温泉のエアリフト式ポンプにより揚湯された温泉水を採取し、分析した。

観測期間Ⅰ：掘削工事前のモニタリング

期間：2006年8月～2007年2月の7ヶ月間

頻度：1週間に1回

観測期間Ⅱ：掘削工事前～工事中～工事後のモニタリング

期間：2007年10月～2008年6月の9ヶ月間

頻度：1週間に2回

観測期間Ⅰの掘削工事前のモニタリングは、自然的要因によるバックグラウンドレベルの時系列変動を把握するために実施した。観測期間Ⅱの掘削工事前～工事中～工事後のモニタリングは、約2ヶ月間の工事期間前後における温泉成分の時系列変動を把握するために実施した。

本掘削工事はタングステンカーバイトチップをビット刃に用いたエアロータリーおよびロータリーボーリング工法により実施された。また、工事の際に使用された掘削泥水を別途調製し、成分分析に用いた。

また、比較対照の参考とするため、モニタリング地点近辺で降った雨水および付近を流れる河川水を採取し（いずれも2010年3月採水）、成分分析に用いた。

## 2.3 分析

採取した温泉水の分析方法は、環境省が定める鉱泉分析法指針（環境省、2002）に準拠したが、観測期間が長期間に及んだことで試料数が膨大であり、分析項目も多岐にわたるため、分析の簡便性等にも考慮して以下のとおりとした。

泉温, pH：ガラス電極法

機器：Sartorius PT-10

測定場所：現地測定

Na, Ca, Mg, K：原子吸光光度法

機器：SHIMADZU AA-6800

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

試料：HCl 固定

F, Br, SO<sub>4</sub>：イオンクロマトグラフ法

測定機器：DIONEX DX-120

カラム：AS-14 (4×250 mm) AG-14 (4×50 mm)

方式：サブレッサ方式 ASRS300 4 mm

移動相：3.5 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+1.0 mmol/L NaHCO<sub>3</sub> 溶液

試料：0.45 μm メンブレンフィルターろ液

Cl：モール法

滴定剤：1/10N AgNO<sub>3</sub>

指示薬 5% K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>

Sr, Mn, Cu, Fe, Li : ICP 質量分析法

機器 : YOKOGAWA HP-4500

試料 : HNO<sub>3</sub> 固定

HBO<sub>2</sub> : ICP 発光分光分析法

機器 : SHIMADZU ICPS-8100

測定結果 : 鈹素分析法指針 (改訂) (環境省 2002) に基づき計算

H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : モリブデンイエロー比色法

機器 : SHIMADZU UV-2200A

測定結果 : 鈹素分析法指針 (改訂) (環境省 2002) に基づき計算

酸素・水素安定同位体比 : 安定同位体比質量分析法

機器 : Thermo Fisher Scientific model DELTA<sup>plus</sup> XL

試料 : 0.45 μm シリンジフィルターろ液

測定結果 : 標準平均海水 (SMOW Standard Mean Oceanic Water) で規格化

酸素・水素安定同位体比は、掘削工事前 2 試料 (2007 年 1 月, 2008 年 1 月), 掘削工事中 5 試料 (2008 年 2 月, 3 月, 4 月 (2 回), 6 月), 掘削終了後 1 試料 (2008 年 8 月) の計 8 試料を分析し算出した。

また、掘削泥水については、0.45 μm メンブレンフィルターによりろ過した後、塩化物イオンおよび銅イオンについて成分分析を行った。銅イオンは温泉水試料と同様に ICP 質量分析法により、塩化物イオンについては以下のイオンクロマトグラフ法により分析した。

Cl : イオンクロマトグラフ法

測定機器 : DIONEX DX-120

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

方式 : サプレッサ方式 ASRS300 4 mm

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

試料 : 0.45 μm メンブレンフィルターろ液

### 3. 結果および考察

調査を実施した期間における既存温泉から湧出する温泉水の成分濃度変動を、Fig. 3 (観測期間 I) および Fig. 4 (観測期間 II) に示す。Fig. 3, Fig. 4 では、本研究で対象とした全成分の概略的な時系列変動を示すため、縦軸を対数表示とした。測定の結果、主成分から微量成分に至るまで、多くの成分のバックグラウンド濃度は、長期的・継続的にほぼ安定していることがわかった。なお、水温は 42.9~44.5°C, pH は 7.8~8.1, 湧出量は 110~140 L/min. で、大きな変動は認められず、また温泉水の濁り等の変化も認められなかった。

これらの各温泉成分の時系列変動の中から、掘削工事に伴う局所的な地下流体の挙動を明らかにするために、特徴的な時系列変動が認められた温泉成分の変動要因について、以下に考察する。

#### 3.1 亜鉛濃度の変動 : 揚湯管交換に伴う人為的影響

観測期間 I ~ II において、既存温泉から採水した温泉水中の亜鉛濃度の時系列変動を、Fig. 5 に示す。

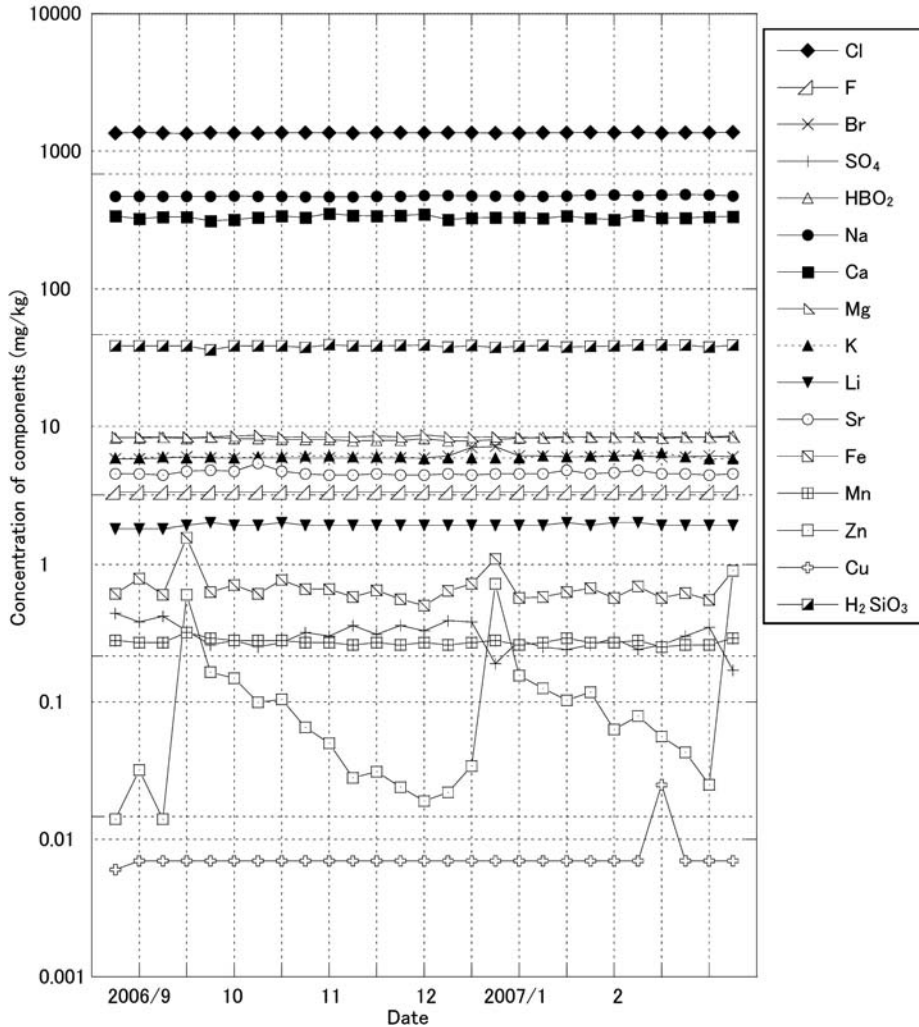


Fig. 3 Temporal variation in ion concentrations in the hot spring-water from an existing Yunokuchi spa (Observation period I). Data Obtained before drilling a new bore-hole.

既存温泉の亜鉛濃度は、バックグラウンド時は0.1 mg/kg程度で推移しているが、急にスパイク状に上昇し、次第に減少しながらバックグラウンドレベルに戻り、またスパイク状の上昇を示した。このような変動は、測定期間中で繰り返し認められた。スパイク状の濃度上昇は、最大で0.9 mg/kgが観測された。

既存温泉ではエアリフト型の揚湯ポンプを使用しており、施設管理上エア管を定期的に交換していた。Fig. 5にエア管の交換時期を示す。このエア管には亜鉛が含まれており、亜鉛濃度の上昇は、エア管の交換時期と同期していたことから、亜鉛濃度のスパイク状の上昇は、エア管からの亜鉛の溶出による人為的影響であることがわかった。

### 3.2 温泉水の酸素・水素安定同位体比

掘削工事前後に既存温泉から採水した温泉水およびモニタリング地点付近で採取した天水（雨

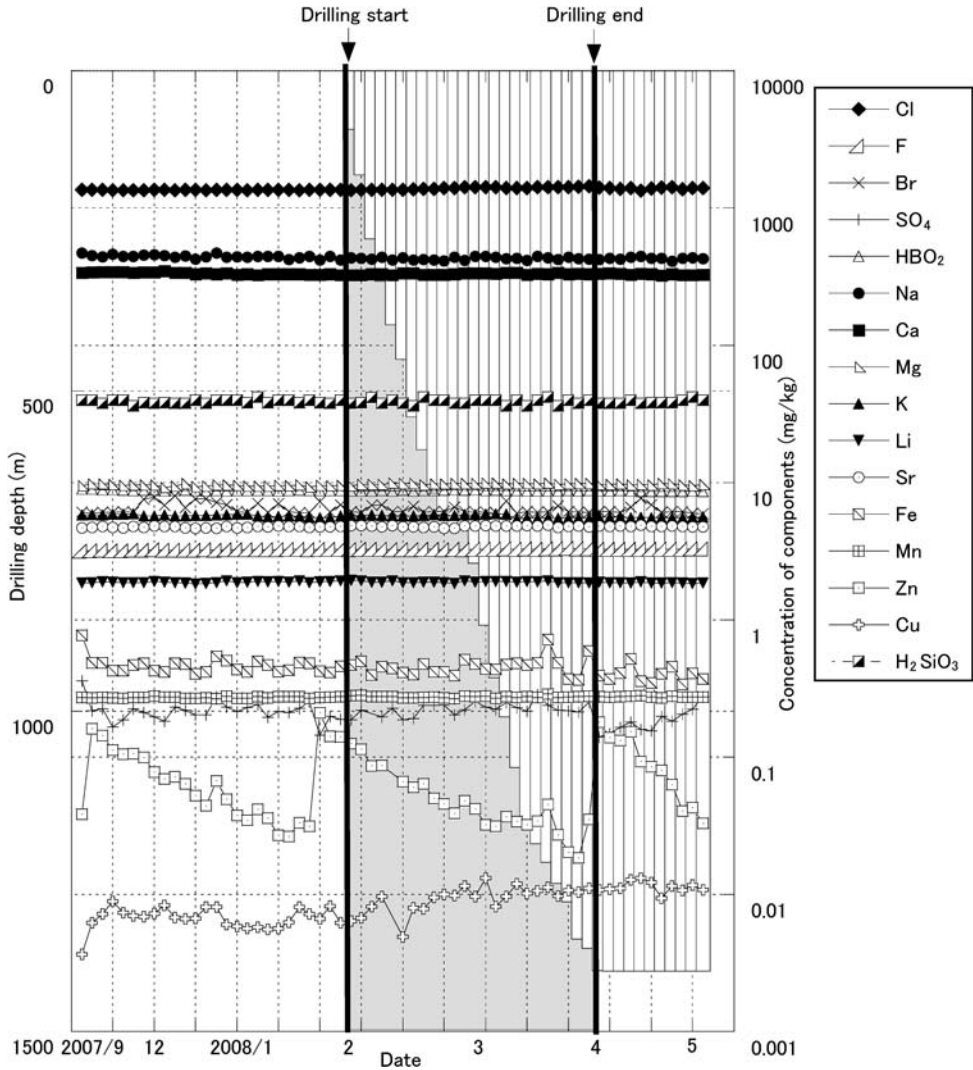


Fig. 4 Drilling depth of a new bore-hole and temporal variation in ion concentrations in the hot spring-water from an existing Yunokuchi spa (Observation period II). Drilling depth is shown by a white bar graph.

水・河川水) の酸素・水素安定同位体比を  $\delta$  ダイアグラムに示す (Fig. 6).  $\delta$  ダイアグラムの酸素・水素同位体比は、式(1)により算出した。

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{試料}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \times 1,000 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、水素同位体比の場合  $R = D/H$   
 酸素同位体比の場合  $R = {}^{18}O/{}^{16}O$

なお、 $\delta$  ダイアグラム中に示した天水線 (Meteoric Water Line 以下, MWL) は、式(2)のとおりである (Craig, 1961).



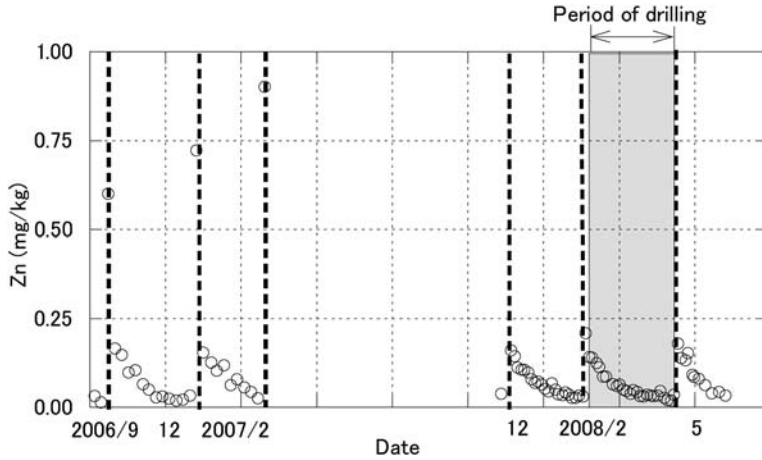


Fig. 5 Observed Zn concentrations at Yunokuchi spa. Dotted lines indicate the time of exchange of air pipe containing Zn (Observation period I ~ II).

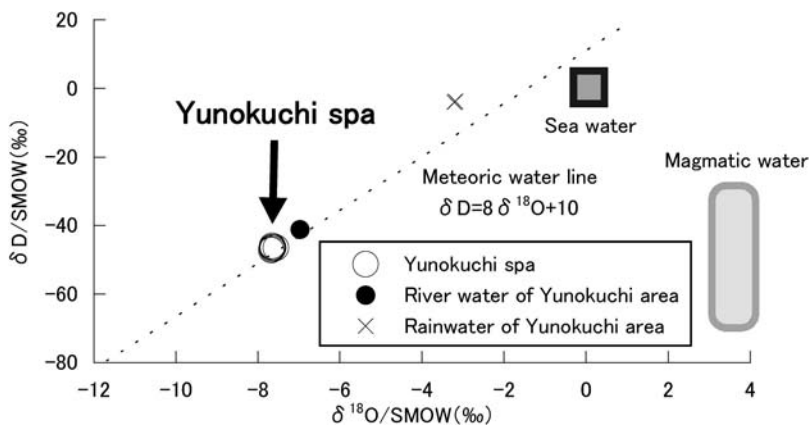


Fig. 6  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ -diagram of hot spring water from Yunokuchi spa.

$$\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10 \dots\dots\dots(2)$$

測定の結果, 既存温泉の酸素・水素安定同位体比は, 掘削工事前後のいずれの時期においても継続的に安定しており, ほぼ MWL 上にプロットされた. このことから, モニタリング期間中の既存温泉において, 地下深部のマグマ水や海水の流入等といった酸素・水素安定同位体比の変化を生じさせる地下水の挙動はなかったと推測される.

### 3.3 掘削工事の影響による塩化物イオン濃度の異常変動

#### 3.3.1 掘削工事前後の塩化物イオン濃度変動

温泉付近で行われた土木工事による影響としては, 水位低下や地下水の濁り等の事例が数多く報告されてきた (例えば西村・桂, 2009). 本研究では, 掘削工事の進行に伴う既存温泉の特徴的な成分変動に着目し, 直下で進行する流体の挙動について考察を試みる.

掘削工事前後に既存温泉から採水した温泉水中の塩化物イオンの時系列変動を Fig. 7 に示す. 掘

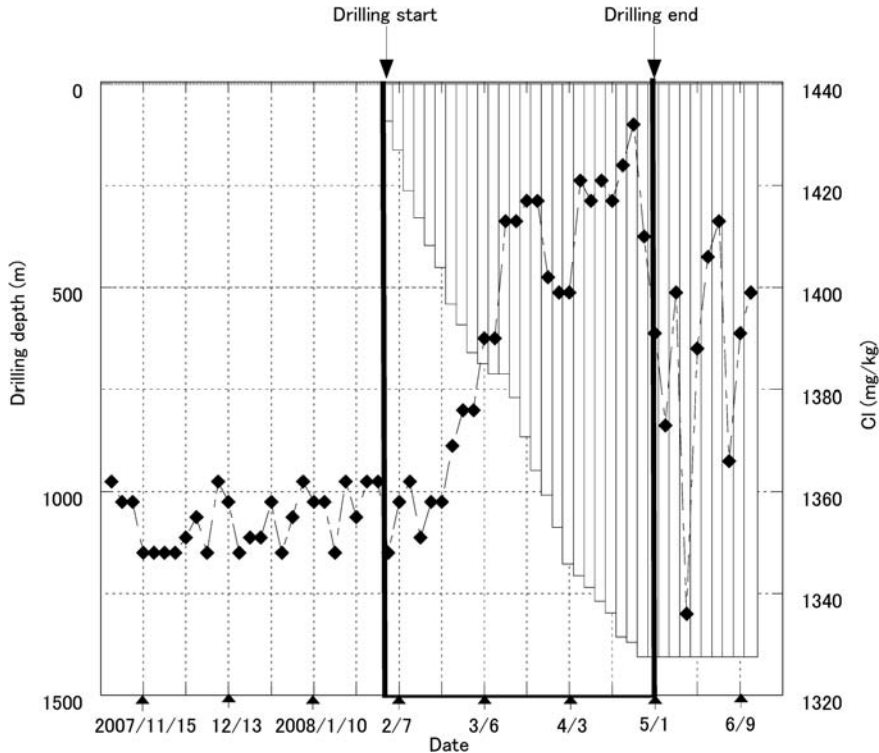


Fig. 7 Observed Cl concentrations at Yunokuchi spa during drilling at adjacent site (Observation period II).

削工事が開始される前の塩化物イオン濃度は、1,350 mg/kg 程度で大きな変動は認められなかった。その後、掘削工事が開始され、掘削深度が約 500 m に進んだ頃から、塩化物イオン濃度が異常上昇に転じた。工事前に、1,350 mg/kg 前後で推移していた塩化物イオン濃度が、掘削工事終了直前には 1,430 mg/kg まで上昇した。工事終了後、塩化物イオン濃度は急激な低下や上昇を繰り返し、モニタリングを終了した 2008 年 6 月まで 1,330~1,410 mg/kg の間で、繰り返し大きな変動が認められた。

既存温泉の塩化物イオン濃度は、観測期間 I (掘削工事前) および観測期間 II の掘削工事開始までの時系列変動は極めて安定的であった。しかしながら、掘削工事の進行に同期して塩化物イオンの濃度変動が認められたこと、また、掘削工事終了後に塩化物イオン濃度の急激な異常上昇が認められたが、工事前のベースラインまでには至らないものの掘削工事終了直前の 1,430 mg/kg からは若干の低下傾向が認められたことから、塩化物イオン濃度の異常変動は、温泉掘削工事そのものに起因する現象であることが示唆された。

### 3.3.2 異常変動を伴う塩化物イオンの起源と地下挙動

本研究により明らかとなった塩化物イオン濃度異常は、温泉掘削工事によって直接引き起こされた地球化学的異常であることに着目し、塩化物イオンの起源と地下挙動について考察を試みた。

一般に、温泉の掘削工事においては、地層の崩壊防止や掘り屑運搬・ビット先の冷却と洗浄を目的として、泥水が使用される(森田, 2000)。本調査対象とした新規温泉掘削工事も、掘削泥水を循環利用する工法により実施されている。掘削中は掘削部から泥水注入を行い、掘削泥水が地表面まで満たされるよう保持させるため、地中の泥水圧は通常時より高くなる。このため、掘削工事の影

響による塩化物イオンの異常上昇の原因は、次の2つの可能性が考えられる。①掘削泥水による地中圧力の上昇による泥水の直接的混入、②掘削泥水の移流等による地下の帯水状態の変化による異なる帯水層からの混入。

掘削泥水の分析結果を Table 2 に示す。掘削工事の影響により塩化物イオンの異常上昇の原因を①の泥水の直接的混入と考える場合、掘削泥水そのものに観測された異常濃度以上の塩化物イオンが含まれていることが前提となるが、分析の結果、掘削泥水中にはそのような濃度の塩化物イオンは含まれていないことがわかった。このことから、塩化物イオンの異常上昇の原因は、②によるものであると推定される。熊野層群は海棲化石が多産される海成堆積層であることから、海塩起源の塩化物イオンが地層内に残存している可能性が高く、本研究対象地域の地下には、高濃度の塩化物イオンが賦存する帯水層の存在が推定される。このことから、掘削泥水の移流によって、地下の帯水状態が変化し、高濃度に塩化物イオンを含む帯水層から既存温泉の取水層への混入が促進され、塩化物イオンが異常上昇したものと考えられる。

また、掘削工事終了後に、塩化物イオン濃度は全体的には低下傾向を示すものの、短期的で急激な濃度変動が認められた。高い泥水圧から開放されてからもなお塩化物イオン濃度が上昇・低下を繰り返したことから、掘削工事前には見られなかった帯水層間の地下水の流動が進行し、擾乱状態となったことが示唆される。また、帯水層内に高圧の泥水が残存していた場合、掘削泥水が既存温泉のストレナに直接流入することにより、塩化物イオンが変動を繰り返した可能性も考えられる。

### 3.4 掘削工事の影響による銅イオンの異常変動と地下挙動

掘削工事前後に既存温泉から採水した温泉水中の銅イオンの時系列変動を Fig. 8 に示す。掘削工事が開始される前の銅イオン濃度は、0.006~0.007 mg/kg 程度で大きな変動は認められなかった。ところが、掘削深度約 700 m まで進行した頃から次第に濃度上昇を示し、掘削深度約 860 m において、銅イオン濃度は掘削工事前の約 2 倍に相当する 0.013 mg/kg の最大ピークを示した。その後も高い濃度を維持しながら、掘削工事終了に至るまで 0.010 mg/kg 前後を推移した。掘削終了後もモニタリングが終了する 2008 年 6 月に至るまで 0.010~0.013 mg/kg の比較的高い濃度を維持した。

掘削泥水を分析した結果 (Table 2)、掘削泥水中の銅イオン濃度は 0.011 mg/kg であり、泥水が希釈作用を受けながら流動することを考慮すると、掘削泥水が直接的に銅イオンの異常上昇を引き起こしているわけではないことが明らかである。

湯ノ口温泉の周辺地域では、深度約 100 m の熊野層群板屋層の下部に炭層が挟在するほか、その下位の竹筒層や細粒花崗岩でもビトリナイトの細片が豊富に含まれている等、広い範囲の鉍化作用が認められる (鈴木ら, 1982)。このため、板屋層下部の炭層のみならず、随所に銅イオンの濃集層が存在している可能性が考えられることから、銅イオンが帯水層間の移流を示す有効なトレーサーと考えることができる。したがって、塩化物イオンの地下挙動と同様、掘削泥水の移流に起因する地下の帯水状態の変化により、高濃度に銅イオンを含む帯水層から既存温泉の取水層への混入が促進され、銅イオンが異常上昇した可能性が考えられる。

### 3.5 掘削工事による地球化学的挙動とその影響範囲

これまでの検討をもとに、新規温泉工事に伴い既存温泉の地下で進行する流体の挙動モデル図を Fig. 9 に示す。

Table 2 Chemical compositions of the drilling mud in this study

Concentration (mg/kg)	
Cl	20.8
Cu	0.011

※ pH 9.7

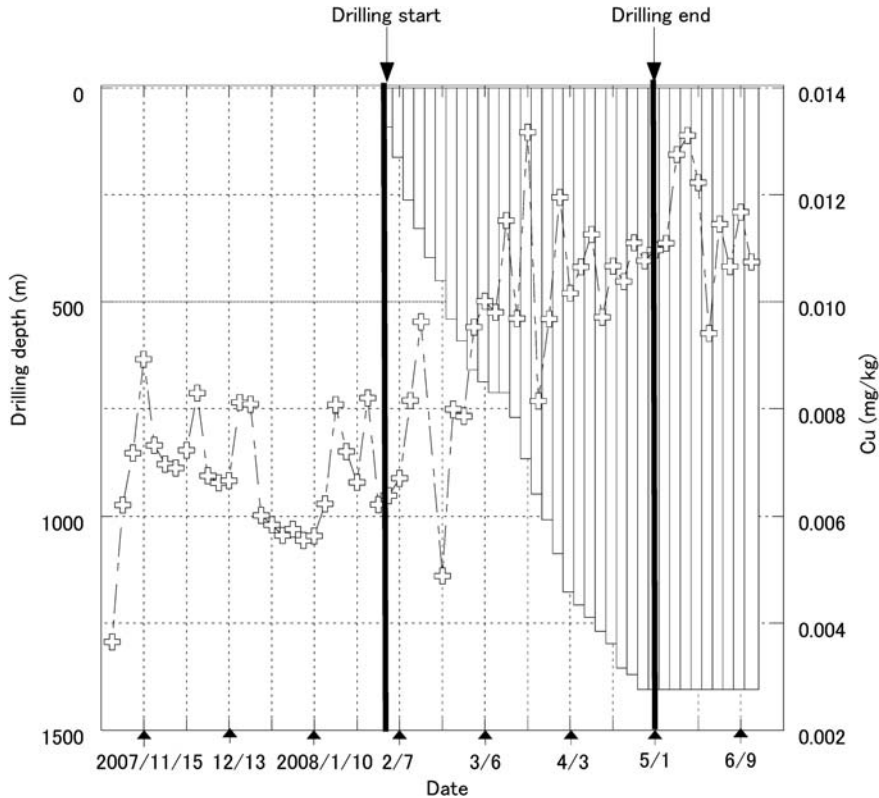


Fig. 8 Observed Cu concentrations at Yunokuchi spa during drilling at adjacent site (Observation period II).

温泉掘削時に掘削泥水が注入されることによって地中の泥水圧が上昇し、地下の帯水状態が変化する。本研究の対象地域は、海成堆積層であること、広い範囲での鉍化作用が認められることから、随所に海塩起源の塩化物イオンや鉍床母岩起源の銅イオンの濃集層が存在する可能性が考えられる。掘削泥水の移流等により、塩化物イオンや銅イオンが高濃度に濃集する各帯水層の地下水が既存温泉のストレーナに到達し、既存温泉の塩化物イオン・銅イオン濃度の異常上昇が引き起こされたものと推定される。またこれらの地球化学的影響は、温泉掘削工事終了後も引き続き観測された。このことから、掘削工事前には見られなかった帯水層間の地下水の流動が進行し、擾乱状態となったことが示唆される。

この温泉掘削に伴う温泉成分の時系列変動から、温泉掘削工事の地球化学的な影響範囲について考察する。新規温泉の掘削深度が塩化物イオンは 500 m、銅イオンは 700 m を超えた頃から、異常上昇が認められた。既存温泉の取水深度は 900~1,300 m であることから、掘削部分からストレーナまでの直線距離が、塩化物イオンは約 400 m、銅イオンは約 200 m であるときに、既存温泉に地球化学的影響が認められたことを示している。これらの調査結果から、新規温泉掘削工事が既存に湧出していた温泉に対して、掘削部分の先端を中心とした地球化学的影響を与える範囲は、約 200~400 m と推定された。ただし、地下水の流動パラメータは水平方向、鉛直方向で異なり、また、地層の走向、傾斜、断層等の不連続面等によっても異なると考えられるため、影響範囲はあくまでひとつの参考事例から得られた値であることに留意する必要がある。

本研究によって得られた結果は、既存温泉の直近の地点において温泉掘削工事が行う際に、地球

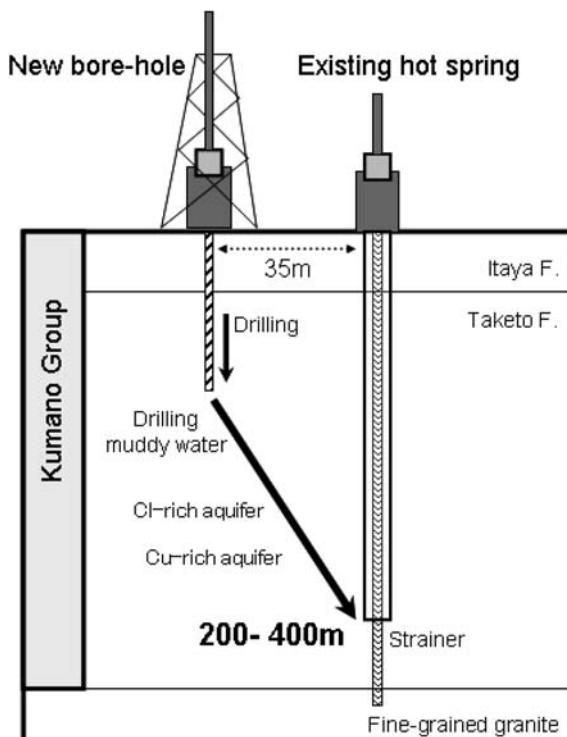


Fig. 9 The model of geochemical influence of existing hot spring by the drilling.

化学的な影響が確認された一事例であるとともに、当該事例から求められた影響範囲については、今後の温泉掘削の行政処分にとって掘削制限のための参考値としての活用が考えられる。

#### 4. ま と め

三重県熊野市湯ノ口において、掘削深度 1,300 m の既存温泉の直近（水平距離 35 m）で新規に温泉掘削工事が行われた。このとき、既存温泉から湧出する温泉水の時系列的な成分変動を調査し、温泉成分の地下挙動と掘削工事による地球化学的影響について検討した。

掘削工事により特に大きな変動が認められたのは、塩化物イオンと銅イオンであった。掘削工事が開始され、その深度が 500 m 以上となった頃から塩化物イオン濃度が上昇をはじめ、1,350 mg/kg 程度で安定的に推移していた塩化物イオン濃度は、掘削工事終了直前には 1,430 mg/kg まで上昇した。また、銅イオンは掘削深度が 700 m 以上となった頃から上昇をはじめ、最大で工事前の約 2 倍の 0.013 mg/kg となった。

塩化物イオンや銅イオンの異常変動は、掘削工事によって注入された掘削泥水による地下の帯水状態の変化によって、高濃度に塩化物イオンや銅イオンを含む帯水層から既存温泉の取水層への混入が促進され、これらの成分の異常上昇をもたらした可能性が考えられた。また、このことによって地下水の流動系を著しく変化させ、掘削工事の終了後も塩化物イオン濃度の上昇・低下を繰り返す変動が認められた。

塩化物イオンや銅イオンに特化して異常変動が認められた原因は、海塩起源の塩化物イオンや鉍

床母岩起源の銅イオンなどが、本研究の対象地域の地下において帯水層内の高濃度の局所的な濃集が推定される成分であったため、これらの成分が地下流体の挙動の変化を示すトレーサーとして機能したものと考えられる。

土木工事等によって水位低下や地下水の濁りが認められた従来の数多くの事例に対して、本研究による調査結果は、新規に掘削した温泉が既存温泉に対して地球化学的な影響を直接的に与えたことを示す一事例として着目すべきであると考えられる。当該成分の時系列変動から、直近の掘削工事が既存温泉に対して地球化学的な影響を与えたことは明らかであり、その影響をとらえることができた意義は大きい。

新規温泉の掘削工事が、その周辺地域の地下水流動系に直接的な影響を与えることが明らかとなったことは、温泉行政における掘削許可判断の際の重要な科学的根拠になりうるものと考えられる。当然ながら、地質の不均質性、断層の存在、地下水流動系の多様性等を考慮すると、それぞれの掘削工事について逐一調査を実施することが望ましいが、全ての温泉について影響調査を実施することは現実的に不可能である。現実的な対応としては、より多くの事例の観察結果を積み重ねることでモデル化し、適切な規制距離を定めることが必要である。その場合に、本研究によって求められた影響範囲 200~400 m は、温泉掘削許可判断の一律距離制限におけるひとつの参考値としての活用が考えられる。

なお、本研究で検討した「地球化学的影響」は、特徴的な温泉成分の異常変動を示したものであり、例えば温泉法の規定値を下回るような資源枯渇をもって「地球化学的影響」と判断しているわけではない。既存温泉に隣接した新規の温泉掘削の場合などの事例では、相互影響が全くない状態を想定することは非常に困難であり、温泉法の運用面からは、相互に影響しあった状態で、相互が持続的に利用するための方法を検討することも重要と考える。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、熊野市、財団法人紀和町観光開発公社、株式会社 NNC エンジニアリングの皆様には、採水やボーリングデータ等関連情報の提供に多大なる御協力を頂きました。データの解釈については、財団法人中央温泉研究所 甘露寺泰雄博士、大塚晃弘研究員、信州大学理学部 塚原弘昭教授には大変有意義なコメントを頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

## 引用文献

- 阿部 顕, 小野廣一郎 (1967): 紀州鉾山の鉾床と最近の探鉾. 鉾山地質, **17**, 121-128.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Chijiwa, K. and Tomita, S. (1981a): Stratigraphic notes on the Kumano Group (A study of the Tertiary Formations of the Kumano Coal-field in the Kii Peninsula, Southwest Japan, part 1). *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Geol.*, **24**, 155-178.
- Chijiwa, K. and Tomita, S. (1981b): Sedimentary Environments of the Main Part of the Kumano Group (A study of the Tertiary Formations of the Kumano Coal-field in the Kii Peninsula, Southwest Japan, part 2). *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Geol.*, **24**, 281-297.
- Chijiwa, K. and Tomita, S. (1985): On the Onuma Formation of the Kumano Group (A study of the Tertiary Formations of the Kumano Coal-field in the Kii Peninsula, Southwest Japan, part 3). *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Geol.*, **25**, 281-297.
- 環境省 (2002): 鉾泉分析法指針 (改訂) (2002年3月), 1-86.
- 環境省 (2006): 温泉行政の諸課題に関する懇談会報告書 (2006年10月), 1-8.

- 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.
- 甘露寺泰雄 (2007) : 温泉法に関する基本問題の検討 (その3) 資源の枯渇現象と温泉法. 温泉科学, **57**, 140.
- 森田高敏 (2000) : 最近の温泉掘削技術, 温泉工学会誌, **27**, 60-71.
- 西村 進, 桂 郁雄 (2009) : 土木工事の泉源への干渉. 第62回日本温泉科学会大会講演要旨集, 21.
- 小野廣一郎 (1961) : 紀州鉾山の鉾床について. 鉾山地質, **11**, 88-94.
- 小野廣一郎 (1969) : 紀州鉾山の地質構造と鉾化金属量との関係. 鉾山地質, **19**, 299-311.
- 小野廣一郎 (1971) : 紀州鉾山の地質構造と鉾床. 鉾山地質, **21**, 150-161.
- 佐伯 宏 (1961) : 紀州鉾業所北部地域の地質および鉾床について. 鉾山地質, **11**, 83-87.
- 佐伯 宏, 古藤次郎 (1972) : 紀伊半島中央部の地質および鉾床. 鉾山地質, **22**, 437-447.
- 齋藤由倫, 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.
- 佐藤重雄 (1958) : 紀州鉾山における富鉾部と丘状構造支配について. 鉾山地質, **8**, 125-134.
- 鈴木舜一, 小田幸人, 南部松夫 (1982) : 紀州鉾山付近における中新統のビトリナイトの熱変質. 鉾山地質, **32** (1), 55-65.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1979) : 1978年度広域調査報告書 (那智地域), 1-56.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1980) : 1979年度広域調査報告書 (那智地域), 1-23.
- 矢野美穂, 川元達彦, 英保次郎 (2007) : 温泉の保護対策及び適正利用に関する研究. 兵庫県立健康環境化学研究センター紀要, **4**, 74-79.

(2008年9月25日 第61回日本温泉科学会大会にて発表)