

調査研究

【報文】 群馬県平野部における大深度掘削泉の定期モニタリング
 温泉資源保護総合対策調査研究事業(中部地域)
 -温泉揚湯による温泉資源への影響に関する調査研究事業-

齊藤由倫 木村真也 森尾誠*

Monitoring of Deep Hot Springs in the Plains, Gunma

Yoshinori SAITOH, Shinya KIMURA, Makoto MORIO

群馬県の大深度温泉掘削基準を見直す基礎データを得るために、平野部の限定したエリアにおいて、大深度掘削泉の揚湯量、水位、泉温及び電気伝導率の定期モニタリングを行った。全調査源泉は主要成分が類似し、井戸の掘削深度も同程度であることから、同一の堆積盆に由来していることが推測された。5源泉の水位に低下傾向が認められたが、泉温、電気伝導率にその傾向は見られなかった。なお、同様の利用形態であっても源泉ごとに水位低下の程度は大きく異なっていた。揚湯量の抑制により水位低下がおさまり、その後一定水位を維持している源泉があったことから、揚湯量規制は確実な効果を期待できる対策であることが考えられた。低下傾向にあった水位について源泉同士の影響関係を考察したが、今回のモニタリング結果からはその関係が明らかに認められる事象は確認されなかった。むしろ、水位低下は自身の過剰な揚湯が大きな要因の一つであることが示唆された。

Key words : 塩化物泉 Chloride Springs, 化石海水 Fossil Sea Water
 透水係数 Permeability, 水位低下 Drawdown, トレンド分析
 Trend Analysis

1. はじめに

群馬県は県内各地に様々な温泉地を有し、これが県の重要な観光資源となっている。そのため、この観光資源を保護し、恒久的に利活用していくことが県の責務といえる。県の北西部及び南部の山岳部には、昔から多くの温泉地が存在しているが、中部から南東部にかけての平野部では、最近になるまでほとんど温泉は存在していなかった。しかし、近年の温泉掘削技術の進歩に伴って、深度 500 m 以上の大深度型の温泉開発が頻繁に行われるようになると、H5 年頃は数源泉ほどであったのが H21 年 3 月には約 70 源泉にも急増した。平野部における大深度掘削泉は、大昔の地殻変動によって地下に閉じ込め

られた海水や、長い年月をかけて地下に浸透して蓄えられた降水等がその起源と言われているが、いずれにしても循環速度は遅く、過剰に揚湯すれば近い将来枯渇することが懸念されている¹⁾。そのため、県では H17 年 6 月から以下に示す大深度温泉掘削基準を設け、温泉資源の保護につとめている。

大深度温泉掘削基準^{*}の概要

- ・対象地域は県内平野部
- ・500 m 以深の掘削を伴う温泉開発が対象
- ・既存源泉から 2 km 以内は掘削禁止
- ・揚湯量は 150 L/min 以下(1 日最大で 200 m³ 以下)
- ・掘削予定地から 2 ~ 3 km 圏内に既存源泉がある場合は、既存源泉を含めて全体

* 薬務課

の揚湯量は 250 L/min 以下

*基準制定以前から存在する温泉は適用対象外

この基準に対しては、環境省がまとめた「温泉資源の保護に関するガイドライン」²⁾にも示されているとおり、実際に温泉資源の保護が期待できるかその内容を検証し、必要に応じて見直さなければならない。そこで本調査は、この基準の妥当性を検証する基礎データを得るために、平野部の大深度掘削泉に対して1年間毎月1回の定期モニタリングを行った。本報ではこの結果に加え、源泉所有者が自ら行っている定期モニタリングの結果と、さらに県薬務課が毎年1回実施している源泉調査のデータを併せて長期的な解析を行った。

2. 調査方法

大深度温泉掘削基準では、図1に示す県内平野部を統一の内容で規制している。しかし、温泉資源の賦存状態は局地的に異なる可能性が考えられるため、本調査では平野部の中でも大深度掘削泉が集中する県中部地域に絞りを、図2の9 km × 8 kmの限定したエリアを調査対象に設定した。このエリアには ~ 及び x, y の計7源泉が存在し、これらは全て動力揚湯泉である。この中の ~ に対して、揚湯量、水位標高(以後、説明がない限り動水位の標高を意味する)、泉温及び電気伝導率(EC)についてH21年1月から12月まで毎月1回定期モニタリングを行った。揚湯量と泉温は鉱泉分析法指針に準じて測定した。水位は電磁式水位計(ロープ式水位

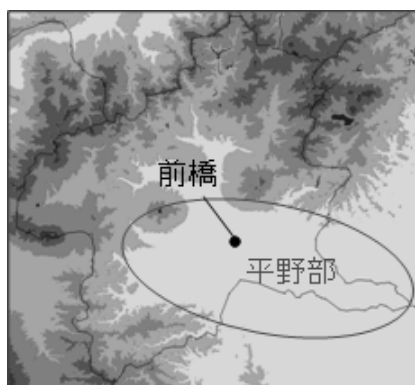


図1. 群馬県平野部の位置

計, YAMAYO)により、ECはポータブル導電率計(D-24, HORIBA)によりそれぞれ測定した。本調査の結果に加え、温泉利用当初から源泉所有者自身が行っている定期モニタリングの毎月の結果及び県薬務課による源泉調査データ(S59年からは県内全源泉に対して毎年1回実施)を併せて長期的なトレンド分析を行った。

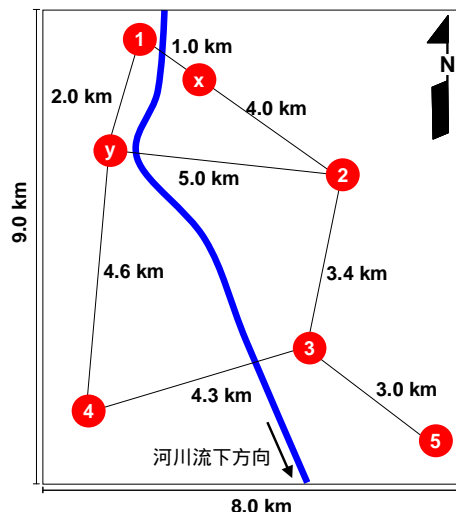


図2. 調査エリアと源泉の位置関係

3. 結果および考察

3.1. 温泉揚湯と温泉流動の概況

調査エリア内の7源泉について、井戸掘削深度、主要成分等の基本的な情報を表1に示した。なお、ポンプ設置日をその源泉の利用開始日として定義した(xは採水日を利用開始日とした)。これらの7源泉は全て500 m以深の大深度掘削泉に該当し、その井戸深度は1200 ~ 1500 m程度と同様に深い。井戸の管構造に関する資料が得られなかったため、ストレーナー(管の採水口)の位置を特定できず、各源泉がどの地下深度から揚湯しているかは不明であった。しかし、ストレーナーを上下の広い範囲に設定することは、地表面付近の冷水の混入を招く恐れがあるため、熱損失の観点からは考えにくい。そこで、7源泉は井戸の最深部においてのみ、同程度の地下深度から揚湯していると仮定した。なお、群馬県の平野部の地下には、新第三紀から第四紀に至る堆積物が厚く発達した堆積盆が形成されていることが知られており、平野部の大深度掘削泉はこの堆積盆から温泉を揚湯していると

表 1. 調査エリア内の源泉の基本情報

| | 井戸深度 (m) | 井戸標高 (m) | 動水位 標高 ^{*1} (m) | ポンプ 設置日 ^{*2} | 採水日 | 泉温 (°C) | 現地 pH | イオン濃度 (mg/kg) | | | | | | | | 泉質 | |
|---|-------------|-------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|------------|----------|------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | | | | | | | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ²⁻ | | |
| | 1301 | 140 | 88.8 | H7.10.2 | H17.4.1 | 59.5 | 7.8 | 945 | 13.6 | 3.85 | 76.4 | 1279 | 0.2 | 566 | 1.2 | Na-Cl・HCO ₃ 温泉 | |
| | 1200 | 113 | 64.5 | H18.4.3 | H17.12.22 | 53.1 | 7.4 | 1100 | 21.3 | 9.16 | 64.3 | 1450 | 6.5 | 732 | 0.7 | Na-Cl・HCO ₃ 温泉 | |
| | 1500 | 105 | 55.0 | H13.3.1 | H12.6.20 | 57.5 | 7.3 | 1397 | 22.6 | 15.7 | 86.5 | 1971 | 5.9 | 643 | 1.0 | Na-Cl・HCO ₃ 温泉 | |
| | 1311 | 109 | 37.4 | H13.2.6 | H12.6.26 | 54.3 | 7.7 | 951 | 12.8 | 8.30 | 34.0 | 1026 | 2.1 | 931 | 1.8 | Na-Cl・HCO ₃ 温泉 | |
| | 1471 | 90 | 48.8 | H16.9.10 | H16.4.28 | 53.4 | 7.5 | 1055 | 14.9 | 8.38 | 49.0 | 1311 | 4.8 | 665 | 0.8 | Na-Cl・HCO ₃ 温泉 | |
| x | 1483 | 132 | - | *2 | H9.6.19 | 65.4 | 7.8 | 2073 | 15.4 | 1.36 | 343.0 | 3760 | 4.9 | 78.5 | 0.4 | Na-Cl温泉 | |
| y | 1386 | 145 | - | | H18.3.28 | H18.1.27 | 51.3 | 7.6 | 700 | 15.9 | 6.76 | 36.7 | 634 | 1.5 | 878 | 1.3 | Na-Cl・HCO ₃ 温泉 |

*1 利用開始当初の水位標高

*2 ポンプ設置日を源泉の利用開始日とする(xは採水日H9.6.19を利用開始日とする)
- は不明

考えられている。したがって、前述の7源泉についても同様に、同一の堆積盆から揚湯しているものと推察された。

地下水の流向は、一般に静水位の高いほうから低い方へ向かうことが知られている。しかしながら、調査源泉の静水位データが揃わなかったため、今回は動水位標高から地下の温泉流向を大局的に推測した。動力ポンプによる揚湯の影響が少ない利用開始当初の動水位標高は、 88.8 m 、 64.5 m 、 55.0 m 、 37.4 m 、 48.8 m (x 及び y については不明)のとおりである(表 1)。各源泉の利用開始時期及び揚湯量は異なるが、動水位標高の関係から、大局的な動水勾配の向きは、() 及び () へ向かう南方向と推測された。なお、井戸標高から判断される地表面の傾斜方向は南方向であり(表 1)、調査エリア内を流れる河川の流向もほぼ南方向であることから(図 2)、推測した温泉の流向は調査エリアの地形的特徴とも一致する。

の源泉については連続揚湯試験の結果が得られ、これをもとにタイスの標準曲線法³⁾から算出した地下帯水層の透水量係数は $7.6 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ であった。これは板寺ら⁴⁾が求めた大深度掘削泉の透水量係数($10^{-4} \sim 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$)と同程度である。板寺らと同様に帯水層厚を 500 m と仮定して透水係数を算出すると、 $1.52 \times 10^{-7}\text{ m/s}$ であり、大深度掘削泉の帯水層が極めて低い透水性であることが改めて確認できる。

3.2. 温泉の起源と源泉同士の関係性

表 1 から調査エリア内の温泉の泉質は、x のみがナトリウム 塩化物泉であり、その他は共通してナトリウム 塩化物・炭酸水素泉である。

x は、他の源泉と比較して Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 濃度

が高く、一方で HCO_3^- 濃度は低い。本調査エリア付近において酒井らは、温泉成分の地理的分布から、よしおが温泉と北橋温泉の間には Cl^- 濃度を急激に増加させる断層のような地質構造が局地的に存在することを推察している⁵⁾。そして、この付近の温泉に含まれる Cl^- を化石海水起源と考察している⁵⁾。x はまさにこの付近に位置し、 Cl^- に富んだナトリウム 塩化物泉を形成していることから、上述の局地的な地質構造の影響により、x は海水を取り込んでいる可能性が考えられた。このことを検証すべく、x 及び海水における主要成分について、 Cl^- に対する当量比の関係を図 3(a)に示した。なお、 Cl^- は岩石等とのイオン交換の影響を受けにくく、沈殿物も生成しづらいため、温泉の生成メカニズムを考察する安定した指標として知られている。このため、温泉中の主要成分を Cl^- と比較することで、温泉の生成メカニズムの推定が行われている⁶⁾。海水に対して x では、 Mg^{2+} 及び SO_4^{2-} の減少が確認されるが、それ以外の成分では良い一致が見られる。減少した Mg^{2+} については、海緑石やモンモリロナイト等の粘土鉱物とのイオン交換によって、 Mg^{2+} が粘土鉱物中に取り込まれ除去された可能性が考えられる^{6, 7)}。また SO_4^{2-} の減少は、地下の還元的雰囲気における硫黄還元バクテリアの作用に由来する可能性が考えられる。したがって x は、起源となる化石海水が地層中の粘土鉱物と硫黄還元バクテリアの作用を受けて生成していることが推察される。なお、x の Cl^- 濃度は海水(約 $20,000\text{ mg/kg}$)のおよそ 2 割程度であることから、成分濃度の低い地下水に化石海水が 2 割程度混入して、生成していることが考えられた。

一方、 \sim 及び y についても同様に、 Cl^-

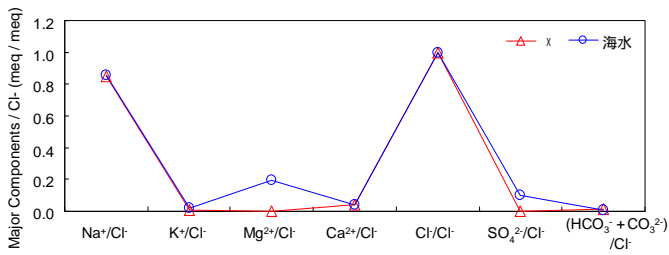


図 3 (a). x と海水との成分比較

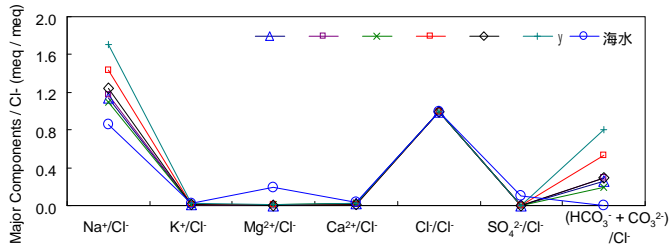


図 3 (b). y と海水との成分比較

に対する主要成分の当量比について図 3 (b)に示した。いずれも海水に対して Mg^{2+} 及び SO_4^{2-} が減少しているが、これらは x と同様に粘土鉱物と硫黄還元バクテリアによる作用と考えられる。一方、 Na^+ と $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ については、x とは明らかに異なり海水に対して増加しているが、この増加については前述の作用とは異なる要因が考えられた。図 4 は 7 源泉及び海水の Na^+/Cl^- と $(HCO_3^- + CO_3^{2-})/Cl^-$ の関係を表したグラフである。このグラフの近似直線は決定係数 (R^2) が 0.99 であることから、両者は強い相関関係にあることが確認できる。近似直線の切片付近には海水と x がほぼ重なってプロットされているが、これは前述のとおり x の主な由来が海水のみであることを示唆している。これに対し y は、 Na^+/Cl^- と $(HCO_3^- + CO_3^{2-})/Cl^-$ が比例的に増加し、その傾きはおよそ 1 である。これは、x に対して Na^+ と $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ が同量ずつ付加されていることを示唆する。つまり、 $NaHCO_3$ 及び Na_2CO_3 を含む水の混入が推測される。したがって、y および z は、化石海水を起源とする x 型の組成の水に、 $NaHCO_3$ 及び Na_2CO_3 を含む水が混入して生成していることが考えられた。なお、x に比べ y 及び z では Ca^{2+} 濃度が低くなっているが(表 1)、これは Ca^{2+} を含む x 型の水に炭酸成分を含む水が混入することで、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の溶解度積が過飽和となり難溶性の $CaCO_3$ が析出したためと考えられる。

以上のことから、本地域には化石海水のみを主な起源とする x 型の温泉と、この x 型の水に炭酸成分を含む水が混合して生成する y 及び z の温泉が存在することが考えられた。これらの源泉は泉質及びその生成メカニズムに関係性が深いことから、源泉同士は何れかの影響関係にある可能性が予測された。

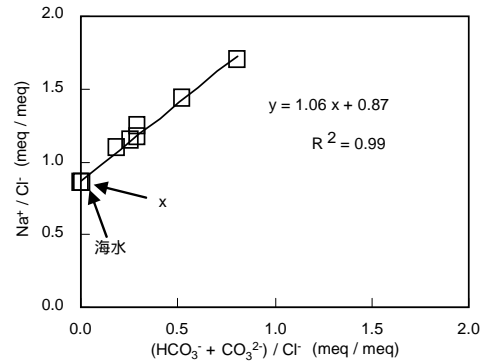


図 4. 7 源泉及び海水の Na^+/Cl^- と $(CO_3^{2-} + HCO_3^-)/Cl^-$ の関係

3.3. 各源泉の長期トレンド

各源泉の揚湯量、水位標高、EC、泉温に関する毎月のモニタリングデータを図 5 に示した。なお図 5 には、本調査の結果に加えて、各源泉所有者から提供されたデータ及び業務課の源泉調査の結果をまとめて長期的な挙動を示した。水位標高については、全源泉において温泉利用開始当初から現在までの間に低下していることがわかった。各源泉の水位標高の長期トレンドを調べるために、経時変化に対する近似直線の傾き(水位変化率)を求めたところ、 ; -0.77, ; -1.1, ; -0.043, ; -0.57, ; -0.078 (単位は $m / month$) であり、程度の違いはあるものの全源泉において水位の低下傾向が明らかとなった。一方で、泉温及び EC には低下傾向は認められず、比較的安定していた。甘露寺らは、温泉の枯渇化現象として温泉の地下水化現象を指摘している⁸⁾。これは、過剰な掘削源泉数の増加や温泉揚湯量の増大などに伴って、まずは温泉水位が低下し、次いで周辺部からの地下水の混入が増大することによる泉温低下、成分濃度の低下(淡水化)を引き起こすという現象である。本調査エリアにおいては泉温及び EC の低下は認められなかったが、水位の低下は認められたことから、甘露寺らが指摘する温泉の枯渇化現象

の第一段階が出現している可能性が高い。

は水位の低下傾向が最も強かった。その揚湯量は 200 L/min 程度であるが、一方で比較的近い時期に利用を開始した は揚湯量 250 L/min 程度と よりもやや多いにもかかわらず、では水位の低下傾向は緩やかであった。このことから、9 km × 8 km の限られた調査エリア内において同様の利用形態であっても、水位変

下率は源泉によって明らかに異なることがわかった。この要因として、透水係数等の地下の水利条件が局地的に異なるためか、或いは付近源泉の影響が考えられたが、後者の可能性は低いことが推察される。では、3.1.で推測した南方向の温泉流向に対して上流側の 及び y が よりも古くから揚湯を行っている。仮にこれらの影響で地下の温泉帯水層がすでに衰退し、周

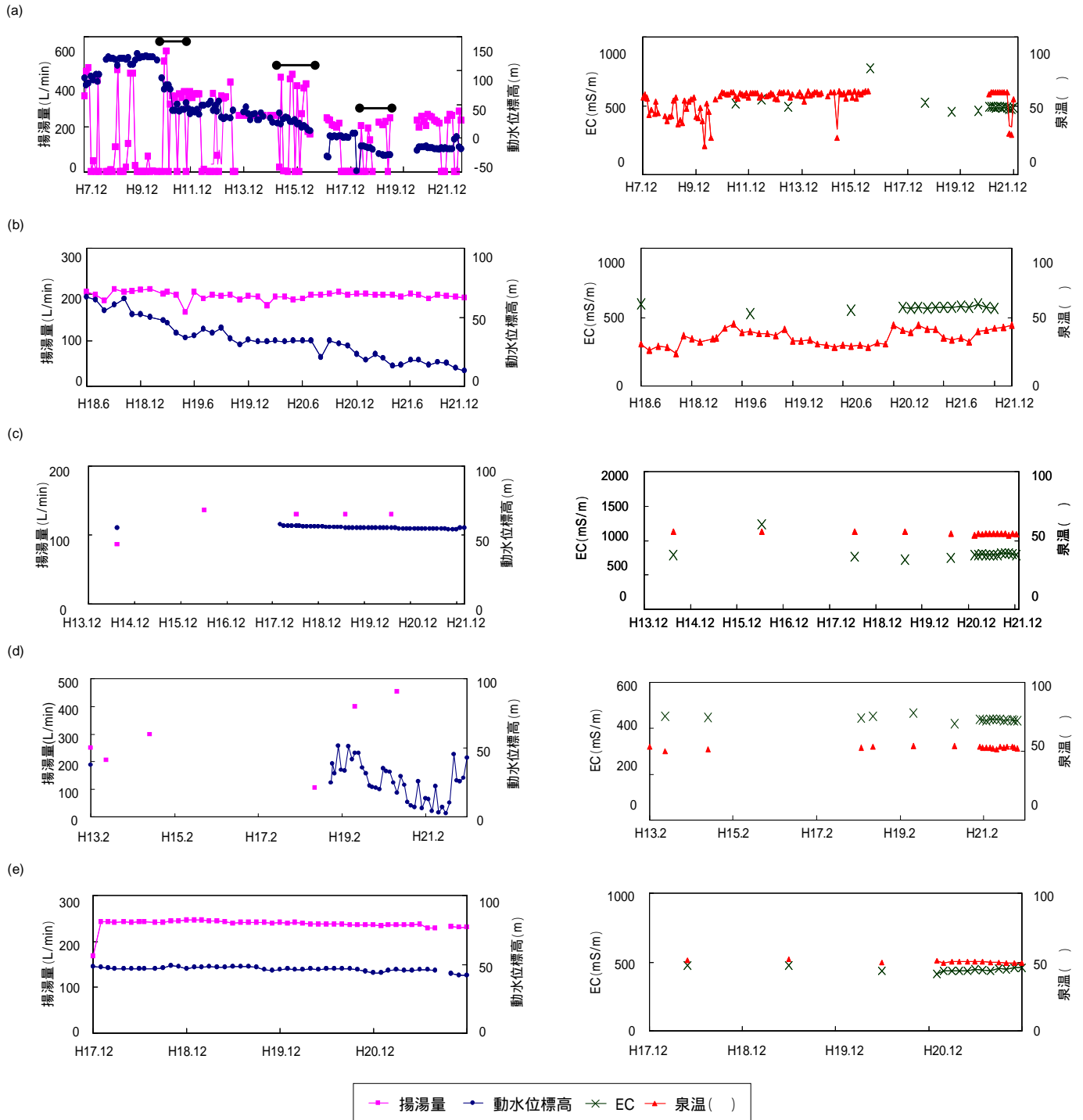


図 5. 各源泉の揚湯量、動水位標高、EC、泉温に関するモニタリングデータ

辺の地下水ポテンシャルが低下していたとすると、における利用開始当初の水位標高も低くなっていることが予想される。しかし、利用開始当初の水位標高について、と利用開始時期が近い及びを比較すると、；64.5 m > ；55.0 m > ；48.8 m であり、この順位は井戸自体の標高順位と一致している(表 1)。このことから、の水位標高は利用開始当初から既に周囲よりも特段低くなっていたとは考えにくく、及びyの影響の可能性は低いことが推測される。したがって、との水位変下率の違いは、透水係数や貯留係数等の水理条件の違いが要因と推察された。しかし、においては連続揚湯試験の結果から透水係数を 1.52×10^{-7} m/s と算出できたが、においては連続揚湯試験の結果が得られなかったため、両者の水理条件の違いを検証することはできなかった。

次に水位の低下傾向が強かったについては、水位と揚湯量の間密接な関係が見られた。の水位は利用開始後の H8 年 12 月～ H10 年 6 月頃まで上昇しているが、これはその時期に自身の揚湯をしていなかった期間が多いことが要因と考えられる(図 5 (a))。その後は、揚湯と供に水位は低下し続け、最高で標高 120m 程度あった水位は H16 年 7 月頃には標高 10m 程度にまで低下した。この水位低下量は、「温泉資源の保護に関するガイドライン」²⁾の中で枯渇化現象が認められている温泉地の事例(湯河原温泉にて 15 年間に 70 m 以上の水位低下)と比較しても大きい。しかし、H17 年 6 月に県の大深度温泉掘削基準が適用され、揚湯量についての規制がなされると、それまで最大で 500 L/min 程度であった揚湯量は 250 L/min 程度に抑えられ、H20 年頃からは水位標高はやや回復し、その後水位低下は収まっている様に見られる。以上のように、の事例からは揚湯量の増減に伴って水位が大幅且つ密接に連動する特徴が見られ、揚湯量の抑制によると推測される水位低下の改善が確認された。これはまさに揚湯量規制の確実な効果を確認できる一例であることが考えられた。なお、は大深度温泉掘削基準制定以前の源泉であるため、基準適用対象外である。

3 番目に水位の低下傾向が強かったも、前述のと同様に水位の変動が大きい(図 5 (d))。

は揚湯量のデータが不足しているが、100～450 L/min 程度の広い範囲で揚湯していることから、やはりと同様に自身の揚湯量の変化が水位変化の要因である可能性が推察された。

調査源泉の中でも、及びについては、水位の低下傾向が強いことから、これらの源泉には第一段階の枯渇化現象が出現している可能性が高い。今後、水位の低下が続けば、いずれは泉温や EC の低下が起きる可能性が考えられるため、これらの項目をモニターし続ける必要があるといえる。なお、その他の源泉については、水位の低下傾向は比較的緩やかであった。

3.4. 水位標高に関する源泉同士の影響関係

一般に温泉は、被圧帯水層に存在するため、源泉の揚湯による帯水層内の圧力損失は、瞬時に周囲の源泉に影響を与えることが予想される。実際に、500 m 離れている源泉同士で、片方で揚湯を開始したところ、その日のうちにもう片方の源泉の水位が低下した事例が存在する⁹⁾。したがって、源泉同士に影響関係がある場合、一方の源泉が揚湯を行えば、その直後にこれに伴う事象が他方の源泉に出現することが予想される。このことを踏まえ、低下傾向が認められた～の 5 源泉の水位標高について、源泉同士の影響関係の有無を考察した。は利用開始が最も早く、その他の源泉が利用を開始する前からモニタリングデータが連続的に取られている。そのため、これを他源泉からの干渉の有無を判断する基準として活用した。図 6 には～の水位標高を整理して示した。

H9 年 6 月にから最も近いxの利用が開始するが、その直後にはの水位に変化は見られない。なお、は H9 年 9 月頃に水位が一時的に低下しているが、これは同時期に自身が 400 L/min 程度で一時的に揚湯していることが要因と考えられる(図 5 (a))。また、期間においての水位は急激に低下しているが、これも同時期にそれまで停止していた自身の揚湯を 500 L/min 程度の大きい揚湯量で再開させているためと考えられる(図 5 (a)の)。その後、揚湯量を 300 L/min 程度に抑えると、水位の低下傾向は改善している。

H13 年の 2～3 月に及びの利用が開始し

た直後に、 の水位は若干低下したように見えるが、これは H11 年 4 月から H15 年 1 月頃の長期的な水位低下の傾向に対して、これを逸脱するほど明瞭な低下とまでは言えない。したがって、 に対する 及び の明瞭な干渉は認められない。なお、期間 において の水位の低下率は若干大きくなるが、これは自身の揚湯量が増大している時期と一致していることから、この変化は 自身の影響と考えられた (図 5 (a) 及び図 6 の)。

H16 年 9 月に の利用が開始しているが、この時期は のモニタリングデータが欠如しているため、影響関係を考察することは困難であった。しかしながら、前述したとおり よりもに近い x 及び の干渉が認められなかったことから、 についても への干渉の可能性は低いことが推察される。

H18 年 3 ~ 4 月に 及び y が利用を開始すると、これとほぼ同時期に の水位は一時的に急降下してから H19 年 6 月頃まで低下傾向にある (図 6 の)。この期間 においては、それまで停止していた 自身の揚湯が再開した時期とも重なるが、しかしこの時の揚湯量(200 L/min 程度)は、揚湯が停止する前の揚湯量と変わらないことから、自身の揚湯再開だけを水位低下の原因とするのは難しい可能性がある(図 5 (a))。しかし、 に関しては、 により近い x の影響が認められなかったことから、 についても に対する影響関係が存在する可能性は低いことが推察される。なお、 y に関しては、 への影響が存在するかは本調査からは不明であった。したがって、期間 の水位変動の要因としては、自身の揚湯の再開が一つ考えられるが、この他

にも y の影響があったかについては不明であり、これを確認するためには、より詳細な調査が不可欠と言える。なお、期間 ~ 以外に大きな水位低下の出現は無く、 の直後から水位標高は若干回復し、最近まで比較的安定している。

以上のことから、 に対する ~、 x 及び y の干渉が明らかに認められる事象は、本調査からは確認されなかった。むしろ、 は H18 年頃まで揚湯量が大きく変動しており、これに伴う水位標高の変動が確認されることから、自らの過剰な揚湯が水位低下を引き起こす大きな要因の一つであることが推測された。なお、このについては前節で述べたとおり、最大 500 L/min 程度であった揚湯量を 250 L/min 程度に抑えた後は、水位標高の若干の回復と安定した状態が見られる。

その他の源泉に関しても、ある時点を境に水位が大きく低下した事象は見られないことから、源泉同士の影響関係の存在は確認できない。なお、 は H21 年 10 月頃から水位が上昇しているが、直前に水位計が故障し修理していたことから、この水位変動が正確なものであるかは定かではない(図 5 (d))。したがって、全源泉において水位標高の低下は確認できたが、源泉同士の間に関係があるかまでは判断できなかった。

4. まとめ

群馬県の大深度温泉掘削基準の妥当性を検証する基礎データを得るために、県内平野部において温泉の定期モニタリングを行った。

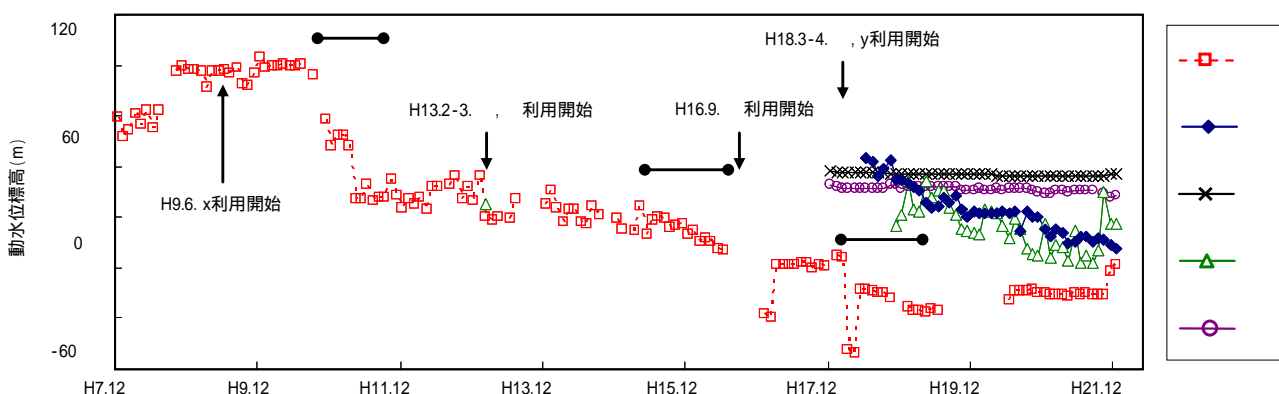


図 6. 調査源泉における動水位標高の経時変化比較

調査エリア内の7源泉は井戸深度が同程度であることから、同一の地下堆積盆から温泉を揚湯していることが推察された。また、温泉の主要成分から、温泉の主な起源は化石海水であり、これが成分濃度の低い地下水に一部混入することで生成するタイプ(ナトリウム 塩化物泉)と、このタイプの水にさらに炭酸成分を含む水が混入することで生成するタイプ(ナトリウム 塩化物・炭酸水素泉)の2種類の温泉が存在することが推測された。これらの温泉は泉質及びその由来に関連性が高いことから、何れかの影響関係にある可能性が予測された。

しかしながら、5源泉において低下傾向が認められた井戸の水位に関しては、本調査結果から源泉同士の影響関係を明らかに証明できる事象は確認されなかった。むしろ、源泉自身の揚湯量の変化に伴って水位が連動する現象が見られたことから、水位低下は自身の過剰な揚湯が大きな要因の一つであることが推測された。

謝 辞

本調査の実施にあたり、源泉所有者の方には定期モニタリングへのご協力、並びにご自身で取得された貴重な長期モニタリングデータのご提供をいただきました。深く感謝いたします。

文 献

- 1) (社)群馬県温泉協会：群馬県温泉協会誌第41号, 2006.
- 2) 環境省自然環境局：温泉資源の保護に関するガイドライン, 2009.
- 3) 山本荘毅：地下水調査法, 490 P, 古今書院, 1983.
- 4) 板寺一洋, 菊川城司, 小田原啓：神奈川県の大深度温泉水の起源, 温泉科学, 59(4), 320-339, 2010.
- 5) 酒井幸子：大深度掘削井の温泉成分比較, (社)群馬県温泉協会学術調査研究調査報告,

2007.

- 6) 酒井幸子：大深度掘削井の温泉成分比較<群馬県南部から西部域>, (社)群馬県温泉協会学術調査研究調査報告, 2008.
- 7) 村松容一, 大城恵理, 安諸政俊, 岡崎公美：関東平野中央部の非火山性温泉における深部流体の生成機構, 地下水学会誌, 50(3), 145-162, 2008.
- 8) 甘露寺泰雄, 益子安：温泉資源の枯渇現象と化学成分の変化, 薬学雑誌, 117(10・11), 836-849, 1997.
- 9) 益子保：温泉の地学(揚湯試験と影響調査, 適正揚湯量について), 第50回温泉経営管理研修会, 2010.