

箱根湯本福住湧泉の湧出機構について

大山正雄、鈴木正明、平野富雄

神奈川県温泉地学研究所*

Mecanisme du jaillissement de la source thermique de Yumoto,

volcan de Hakone

par

Masao OYAMA, Masaaki SUZUKI et Tomio HIRANO

Institut de Recherche des Sources Thermales du Departement de Kanagawa

Hakone, Kanagawa

(Résumé)

La station thermique «Yumoto-Tonosawa» se trouve à l'est de la caldeira de Hakone avec une superficie de 100km² (Fig.1). Les eaux thermales proviennent des fractures du socle de volcan de Hakone. Les deux sources naturelles et les 80 puits de pompage qui constituent la station thermique ont un débit total de 6,000 ℓ /min. L'une des sources naturelles s'appelle Fukuzumi Yusen (Fig.2), les eaux thermales sortent des fissures d'un tunnel artificiel long de 150m. Nous avons mesuré le débit, la température et la concentration en Cl⁻ de cette source. Les résultats sont ;

1) Le débit de la source est sensible à la précipitation. En general, il augmente en été et baisse en hiver(Fig.3).

2) Le mélange de l'eau chaude avec l'eau froide se fait à un endroit peu profond. L'augmentation sensible du débit en temps de pluie entraine une baisse de température et de concentration en Cl⁻ des eaux thermales.

3) L'eau thermique est poussée en grande quantité à travers les fissures par la pression de l'eau souterraine. Le mélange de l'eau chaude et de l'eau froide séjourne de 20 jours à quelque mois dans les fissures à un endroit peu profond.

4) En 1974, le débit minimal était de 111 ℓ /min, la température maximale de 50.5°C et la concentration maximale de Cl⁻ de 209ppm. De 1974 à 1986, la surexploitation des puits de pompage a fait baisser annuellement le débit de 2.5 ℓ /min, la température de 0.3°C et la concentration en Cl⁻ de 2.5ppm (Fig.4).

* 神奈川県温泉地学研究所 神奈川県足柄下郡箱根町湯本997 〒250-03

神奈川県温泉地学研究所報告 第19巻、第3号、37-54、1988

1 はじめに

温泉は、地層の層理面に沿って流動する層状泉と岩盤の割れ目系を流動する裂罅泉とに大別される(福富、1965; 湯原ら、1969)。箱根火山の温泉の場合、中央火口丘の温泉が前者に、基盤岩類の温泉が後者にあたり、湧出量は各々13,900 l/min、6,950 l/minとなっている。箱根以外でも割れ目系から湧出する温泉は多い。しかし、割れ目系における温泉と地下水の流動や混合についての研究例は少なく、不明の点が多く残されている(福富、1965; 北岡、1983)。本研究では、基盤岩類の割れ目系から湧出する箱根湯本の福住湧泉の湧出量、温度、Cl⁻濃度の変動を検討し、割れ目系温泉の湧出機構について考察を行った。

2 調査地域の概要と観測方法

1) 箱根湯本・塔ノ沢温泉の概要

箱根湯本・塔ノ沢温泉は箱根カルデラの東端に位置し(図1)、箱根火山の基盤岩類の割れ目から湧出している。当地域の温泉は大正時代まで自然湧泉が利用されていたが、昭和3年に深度173mの自噴井が掘削され、昭和8年にはポンプ揚湯が始まり、温泉採取量が急増した。昭和7年に1,630 l/minだった温泉量は、昭和61年には5,689 l/min(平均温度52.8℃)に達している。温泉採取量の増大は多くの



図1 福住湧泉の位置(図中の数値は源泉番号)

自然湧泉を枯渇させたり、自噴の停止をもたらした。ボーリング孔（堅穴井）の温泉も経年的に水位の低下、溶存量の減少、温度の低下が生じており、いわゆる温泉の枯渇が進行している（平野ら、1972、1986；大山・迫、1987）。こうした状況の中で横穴湧泉の第3号泉（福住湧泉）と第7号泉だけが今日も自噴を続けている。

2) 福住湧泉の概要

福住湧泉は、古来から自然湧出していた総湯（第9号泉、現在深度9 mまで掘削されポンプ揚湯している）の南東約100 mに位置している。本湧泉は明治末頃、新期外輪山の湯坂山下部を構成する基盤岩類の須雲川安山岩類に掘削された横穴湧泉である。横穴隧道の入口は幅が1.1 m、高さが1.7 mあるが、内部は幅が0.8~0.9 mと狭く、高さが1.3~2.5 mの素掘の坑道が枝状に延びている（図2）。隧道の総延長は約140 mである。湧泉は、現在（昭和62年7月）、主にNo. 1~5の5箇所の割れ目から流出している。No. 1の湧泉は、最大幅（下端部）20 cm、傾き45°、長さ約1.3 mの割れ目から流出している。湧出量は渇水期に著しく減少、あるいは、枯渇する。温度は渇水期と流出が多い時に25~32℃まで下がるが、渇水期から豊水期にかけて湧出量が増加する時期に50℃を示すことがある。No. 2の湧泉は、長さ2 cmの割れ目から自噴している。湧出量は10~20 l/min程度である。温度は57℃前後で5つの湧出孔の中で最も高い。No. 3は最初に掘りあてた湧出孔といわれているが、現在ではしみ出る程度しか自噴していない。No. 4は、湧出量が最も多く、福住湧泉の主体をなしている。温度は47℃前後である。No. 5の湧出孔は、No. 4から約2 m離れている。湧出温度は、昭和59年3月に47.5℃であったが、次第に上昇し、昭和62年7月には51.8℃を示している。各湧泉はパイプで集められ、No. 6で合流する。No. 7は出口に位置し、旅館に至る中継槽である。

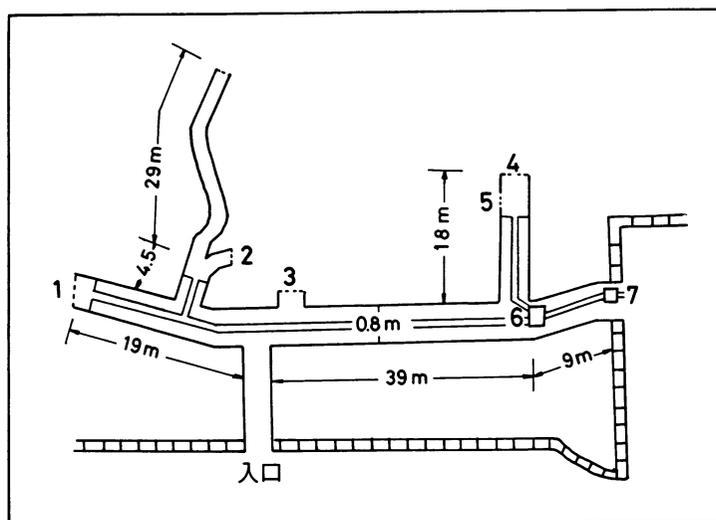


図2 福住湧泉の隧道内概略図（図中の番号1から5は温泉が湧出する割れ目の位置）

3) 降水量と蒸発散量

湯本の年降水量は平均2,593mmである(表1)。湧出量等を測定した昭和49年と昭和57~61年の降水量を概観すると、昭和49年と58年は多雨年で3,229mmと3,226mm、昭和59年は渇水年となり1,544mmであった。蒸発散量(Es)の推定はペンマンの方法(Penman, 1948)より算定した。ペンマンの式は:

$$E_s = f \cdot E_o$$

$$E_o = \frac{[(Q^*/\ell) \Delta + rE_a]}{(\Delta + r)}$$

表1 湯本の降水量と蒸発散量

| 昭和(年) | 降水量(mm) | 昭和(年) | 降水量(mm) | 蒸発散量(mm) |
|-------|---------|-------|---------|----------|
| 44 | 2858 | 56 | 2004 | |
| 45 | 2692 | 57 | 2532 | |
| 46 | 2626 | 58 | 3226 | |
| 47 | 3141 | 59 | 1544 | 650.5 |
| 48 | 2024 | 60 | 2989 | 732.9 |
| 49 | 3229 | 61 | 2243 | 730.1 |
| 平均 | 2762 | 平均 | 2423 | 704.5 |

と表せる。ここで、 Q^* は正味放射量、 ℓ は水の気化熱、 Δ は気温 T_a における飽和水蒸気圧曲線の勾配、 r は乾湿計定数、 E_a は空気力学的効果による蒸発散量である。経験的定数 f は、わが国の実蒸発散量に近いといわれている0.7を用いた(新井, 1978; 榎根ら, 1980)。ただし、正味放射量は次式で計算した。

$$Q^* = (1 - \alpha)(0.22 + 0.52n/N) K_p - \sigma T_a^4 (0.366 - 0.036 \sqrt{e_a})(0.1 + 0.9n/N)$$

ここに、 α ; 地表面のアルベド、 K_p ; 大気上限の日射量、 σ ; ステファンの定数、 T_a ; 基準高度の気温、 e_a ; 水蒸気圧、 n/N ; 日照率である。本研究では、気温、湿度、風速は箱根町消防署湯本分署の測定値、日照率は横浜地方気象台による小田原(湯本の東方約6km)の測定値を用いた。前述の方法を用いて蒸発散量を計算した結果、昭和59年から61年の間の平均蒸発散量は704.5mm/年である(表1)。この値は年間総降水量の約27%に相当する。

4) 観測方法

温度はデジタル温度計で測定した。分解能は0.1℃である。No. 2の湧出量はNo. 6で2ℓの容器に流入させて求めた。横穴からの全湧出量はNo. 7で18ℓの桶で測定した。No. 7での湧出量と温度の測定、湧泉の採水は1~3週に1回、各湧出孔での測定は年に1~2回の割合で行った。採水した湧泉は実験室に持ち帰り Cl^- 濃度の測定を行った。なお、 Cl^- は湯本温泉の主要陰イオンであるので化学成分の指標とした。測定結果は表2と3に示す。測定値の内、昭和49年は平野ら(1980)に、昭和57~59年の温度と湧出量の一部は温泉地学研究所ラドン観測班報告(1986)から再録した。

3 湧出量、温度、 Cl^- 濃度の変化

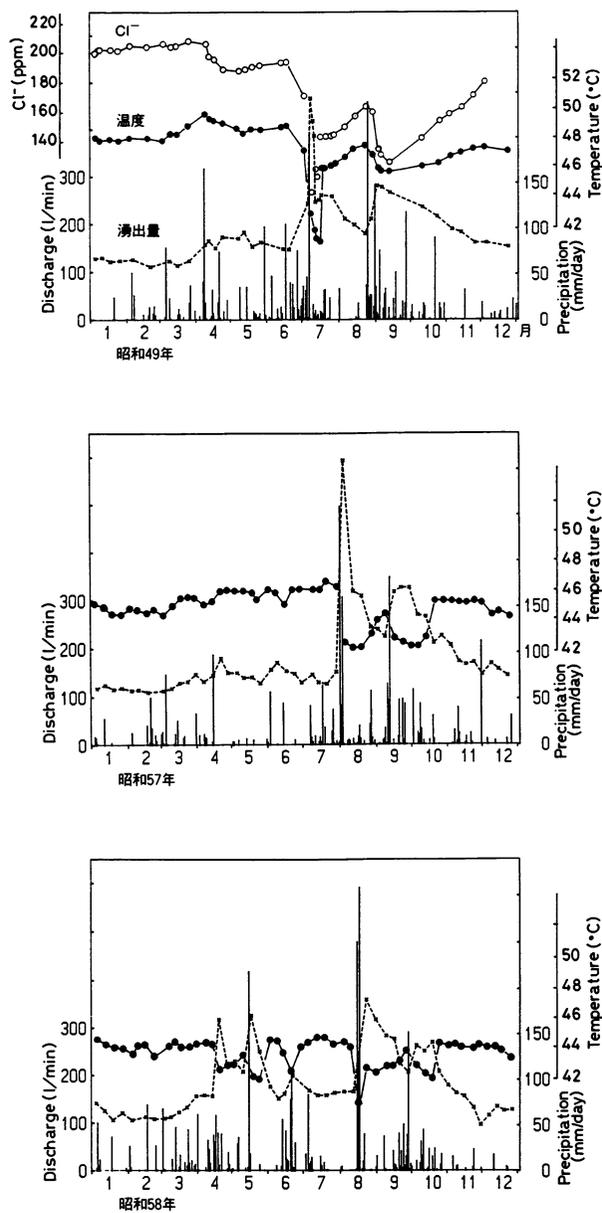
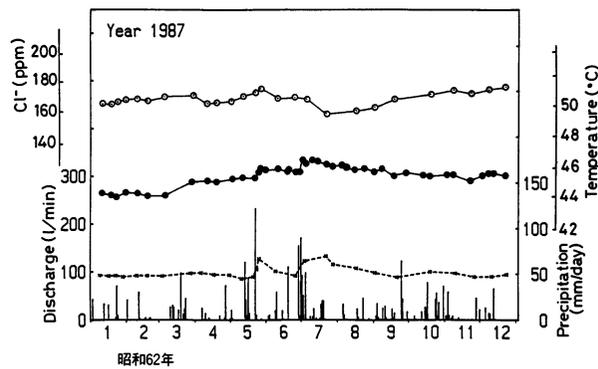
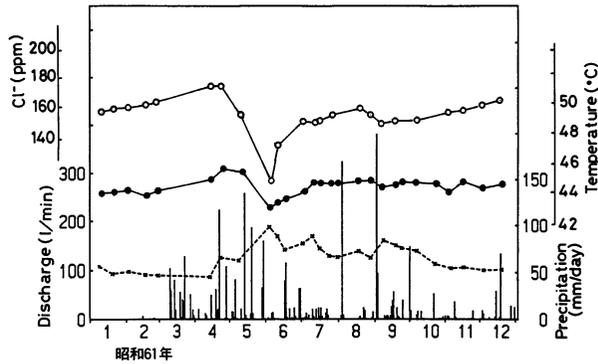
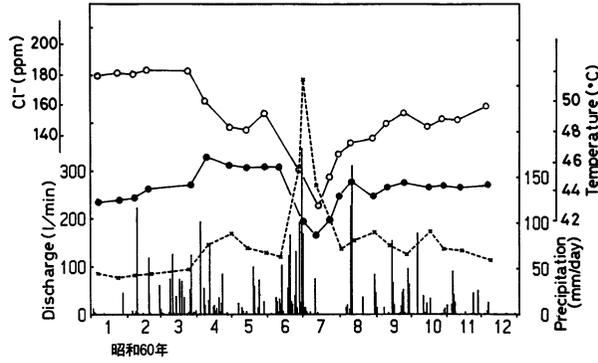
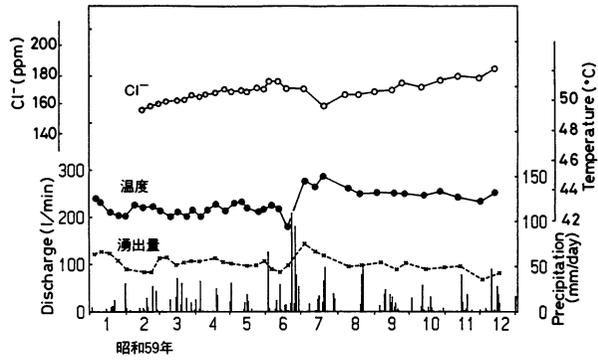


図3 湧出量、温度、Cl⁻濃度の
 ハイδροグラフ



1) 湧出量、温度、 Cl^- 濃度の1年間の変化

図3は隧道の出口No. 7で測定した昭和49年と昭和57～61年の湧出量、温度、 Cl^- 濃度のハイドログラフである。湧出量、温度、 Cl^- 濃度の変化はおおよ次の通りである。

湧出量は2～3月頃に最低になり、豊水期の6～10月の間に最高値になる。湧出量は降水に対して敏感に反応し、昭和49年や58年のように降水量の多い年には4月から11月にかけて150 ℓ/min を上回るが、渇水年の昭和59年には同時期に100 ℓ/min 前後にすぎなかった。湧出量は各降水ごとに変化し、しかもそれまでの累積降水量に左右される。

温度は、湧出量が増加する3月頃から上昇し、4～5月頃にその年の最高値を示す。温度は湧出量が著しく多くなると急速に低下する。昭和49年や57年のように湧出量の多い年には秋から冬にかけて湧出量が減少しても、温度は春先の値まで回復しない。しかし、59年のように湧出量の少ない年には逆に春期よりも冬期の温度の方が高くなる傾向が認められる。

Cl^- 濃度は湧出量の減少とともに増大し、湧出量が増加に転じた4～5月頃に最も高くなる。その後、 Cl^- 濃度は湧出量がさらに増大すると低下し、温度と同様の変化を示している。

以上から、福住湧泉は地下深所から上昇してくる熱水と降水によってかん養された浅層地下水とが比較的浅い場所で混合してから湧出しているものと考えられる。図4はその模式図である。

2) 湧出量、温度、 Cl^- 濃度の経年変化

湯本温泉は、前述したように、全般的に枯渇の傾向にあるので、福住湧泉もその影響を受けていると考えられる。図4は、熱水量の経年変化を推

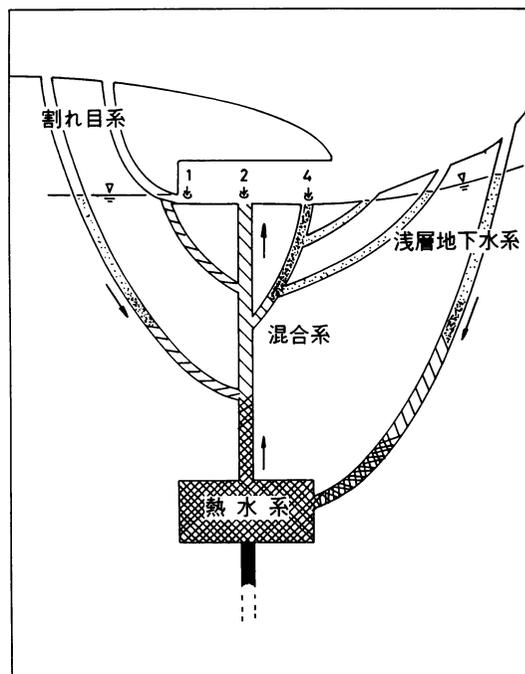


図4 福住湧泉の湧出機構の模式図

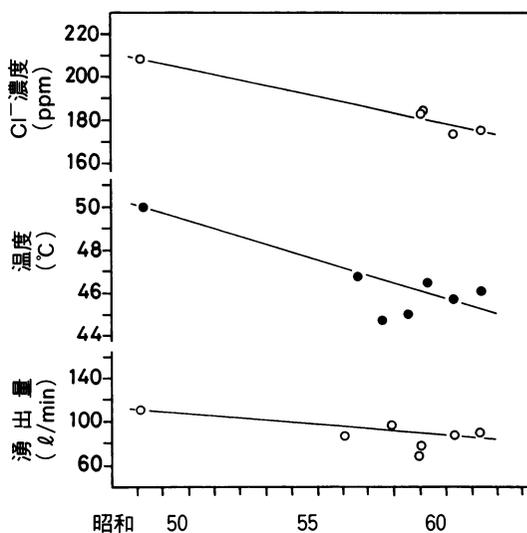


図5 最低湧出量、最高温度、最高 Cl^- 濃度の経年変化

定するために各々の年の最低湧出量、最高温度と Cl^- 濃度の最大値を示したものである。

熱水量は図3の湧出量に対する温度と Cl^- 濃度の関係から、渇水期に湧出量に占める割合が最も高く、また、浅層地下水量に比べて湧出量が安定していると考えられるので、その年の最低湧出量を指標とした。昭和49年の最低湧出量は 111 l/min (2月11日) である。この量は、前年の48年11月11日から49年2月4日までの87日間の降水量がわずか 33 mm であることから49年前後の基底湧出量に相当するものと考えてよいであろう。最低湧出量は、多降水年の58年に 97 l/min (11月30日)、渇水年の59年には 68 l/min (12月3日)、平均的降水年の61年には 88 l/min (4月14日) である。最低湧出量は、49年の値を基準とするならば、その後の12年間に約 23 l/min (1.9 l/min/年) 減少している。

湧出温度は昭和5年8月11日に 56.0°C (396 l/min) が記録されているが、昭和28年以降は 52°C を上回ることがない(平野ら、1980)。昭和49年には 50.0°C (157 l/min)、61年に 45.7°C (126 l/min) である。湧出温度は49年に比べると、61年までの12年間に約 4.4°C (0.3°C/年) 低下している。

最高 Cl^- 濃度は、49年に 208.8 ppm (123 l/min) を示しているが、59年に 182.7 ppm (81.8 l/min)、61年に 173.5 ppm (126.3 l/min) である。49年を基準とすると、その後の13年間に Cl^- 濃度は 33 ppm (2.5 ppm/年) 低下している。

福住湧泉は周囲に分布する竪穴井の動力による揚湯泉と同様に経年的に最低湧出量、温度、 Cl^- 量が各々低下している。最低湧出量、温度、 Cl^- 濃度の低下は熱水湧出量の減少を示唆している。

4 湧出量にたいする Cl^- 濃度と温度の関係

図3の Cl^- 濃度、温度、湧出量の変化を調べると、晩冬から早春にかけてまず Cl^- 濃度、次いで温度、最後に湧出量の順に上昇し、その年の最高値に達する傾向が認められる。図6は、昭和49年と60年の Cl^- 濃度と湧出量との関係を示したものである。49年の例に示すように、 Cl^- 濃度は冬から春先にかけて湧出量が最少値から増加に転じた初期の3月26日 (208.8 ppm) に最も多くなった。その後、 Cl^- 濃度は、湧出量が3月26日の 123 l/min から4月9日の 157 l/min に 24 l/min 増加してもほぼ一定の状態 (208.8 ppm から 206.8 ppm) を保っていた。しかし、湧出量がさらに 7 l/min 増加した4月12日 (165 l/min) には、 Cl^- 濃度は急激に低下 (198.6 ppm) している。 Cl^- 濃度の低下は4月8日の 166 mm の降水が大きく影響していると考えられる。 Cl^- 濃度のさらに著しい減少は7月にも生じている。降水量が6月17日から7月6日までの19日間(降水日数14日)に 446 mm 、7月7日に 201 mm をもたらしたことにより、湧出量は6月20日の 147 l/min から7月6日に 244 l/min 、8日に 466 l/min に達した。このため、 Cl^- 濃度は6月20日の 194 ppm から7月8日に 113.3 ppm まで減少した。湧出量の増加は温度にも著しい低下を引き起こし、7月12日には出口No. 7で 41.2°C になった。利用温度の上昇をはかるため、12日にNo. 1の流入を止めた結果、No. 7での湧出量は 352 l/min から 247 l/min に減少し、温度が 45.7°C に上昇した。 Cl^- 濃度は12日の 116.4 ppm (No. 1は流入) から15日には 143.3 ppm に増加した。 Cl^- 濃度の減少は、8月25日の 240 mm の豪雨でも、8月28日から9月13日の間に生じている。この時にはNo. 1の流入は止められていた。新しい降水による影響は、8月28日にはまだ小さいが、9月2日には顕著に現れている。Cl

No. 2からの湧出量である。温度の最も高いNo. 2は Cl^- 濃度も高く、昭和59年には221.7ppmを示していた。 Cl^- 濃度は湧出量が23 ℓ/min の60年8月2日に181.7ppmまで低下したが、湧出量の減少に対応して回復している。 Cl^- 濃度は59年6月6日から8月21日にかけてNo. 4で27.7 ppm減少しているが、No. 2では8.7ppm増加している。59年は異常渇水年であったが6月23日から8月22日の2月間に年間降水量の35%にあたる541mmがもたらされた。この間の降水量は、6月23日に109.5mm、6月26日に94.5mm、6月27日から8月20日までの合計が246mmである。8月21日の Cl^- 濃度に6月23日と26日の降水が影響しているとするならば、新しく混入した浅層地下水がNo. 4の出口にはすでに達しているが、No. 2には2ヶ月間たっても流出してこず、まだ割れ目内を古い水を押し出しながら流動していることを暗示している。また、昭和59年6月の値を基準にして60年8月と比較すると、 Cl^- 濃度はNo. 2が31ppm、No. 4が57ppm減少している。これは、No. 4の湧泉にはNo. 2よりも多量の浅層地下水が混入しやすいことを示している。昭和60年から62年にかけてのNo. 4の Cl^- 濃度はNo. 2の変化パターンと対応している。このことから、すべての割れ目は浅層地下水の影響を受けている。

6 周囲湧泉の湧出状況

福住湧泉は浅層地下水の影響を敏感に受けていることが明らかなので、浅層地下水を湧出している周辺湧泉のハイドログラフとの比較を図9に示した。対象とする浅層地下水は、福住湧泉より約200m須雲川上流に湧出している玉簾（たまだれ）の滝と須雲川対岸の槍突石（やりつきいし）湧泉である。

玉簾の滝は須雲川安山岩類と新期外輪山溶岩との境界から湧出している。久野久（1972）は新期外輪山中央の基底部に東西方向に走る埋没谷を想定し、新期外輪山溶岩下の地下水が埋没谷を流れ、湯本で流出し、玉簾の滝を形成していると考えた。昭和61年の湧出量は4月頃最低になり、多雨期の6～9月にかけて増大するが年間を通して1,500（4月）～3,050（5月） ℓ/min の範囲にあり、最大湧出量と最小湧出量の比が2.0である。湧出量は豪雨時を除けば個々の降雨に対する反応が遅い。また、湧出孔での水温は14.9～15.3℃を示し、年較差が0.4℃にすぎない。これらのことから、この湧泉は降水が地下に浸透してから湧出するまで長い時間を経過していることを示唆している。

槍突石湧泉は古期外輪山崖錐堆積物と基盤岩の早川凝灰角礫岩との間から流出している。湧泉の集水域は古期外輪山である。湧出量はわさび田の流水の一部を測定した。湧出量は降水に敏感に反応し、降

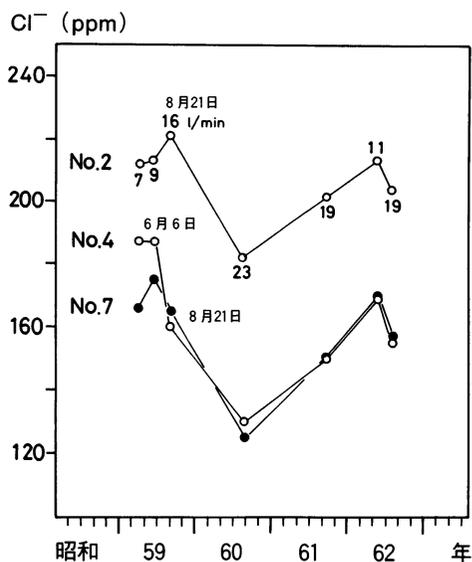


図8 各割れ目の Cl^- 濃度の変化
(No. 2の数値は湧出量 ℓ/min)

水で急速に増加するが、減衰も速い。このため、冬期には著しく減少する。湧出量が最も少なくなるのは2月頃で、玉簾の滝よりも1～2月早い。湧出量は75（2月）～560（5月） ℓ/min の範囲にあり、最大湧出量と最小湧出量の比が7.4に達している。湧出孔での水温は5～6月に最低（12.7℃）に、11月に最高（14.2℃）を示し、年較差が1.5℃である。

福住湧泉のハイドログラフは、冬から春にかけての増水期に玉簾の滝に、秋から冬にかけての減水期に槍突石湧泉によく対応している。

7 湧出量に占める熱水量の割合

福住湧泉が新しい降水でかん養された浅層冷地下水と地下深所から上昇してきた熱水との二成分からなっているとすると、物質保存則から次式が成り立つ。

$$q = q_1 + q_2 \cdots \cdots (1)$$

$$qC = q_1c_1 + q_2c_2 \cdots \cdots (2)$$

ここで、浅層地下水と熱水との混合による総湧出量は q 、その Cl^- 濃度は C 、浅層地下水と熱水の湧出量とその Cl^- 濃度は各々 q_1 、 q_2 と C_1 、 C_2 である。(1)と(2)式から次式がえられる。

$$q_2 = \frac{q(c - c_1)}{(c_2 - c_1)}$$

熱水の Cl^- 濃度としては、福住湧泉周辺で Cl^- 濃度の最も多い第10号源泉（深度247m）の昭和49年時の値954ppm（平野ら、1972）を用いる。浅層地下水の Cl^- 濃度は、槍突石の2.5ppmと玉簾の滝の12.2ppmとの平均値7ppmとする。49年の総湧出量のハイドログラフと上式で計算した熱水の変化を図10に示した。熱水量は、25～35 ℓ/min で総湧出量の約20%たらずであるが、総湧出量の変化によく対応し、総湧出量が最も増大した7月8日には52 ℓ/min を示している。このことは、浅層地下水の水位（圧力）上昇が地下深所の熱水をピストンの押し出していることを示唆している。

8 福住湧泉の湧出機構

湧泉は、秋から冬にかけて降水量が少なくなるにつれて湧出量が減少し、 Cl^- 濃度とともに温度も上昇している。総湧出量の中に占める熱水量が相対的に増加していることから、浅層地下水位の低下によって浅層地下水の混入量は減少している。また、浅層地下水が占めていた湧出孔近傍の割れ目は次第

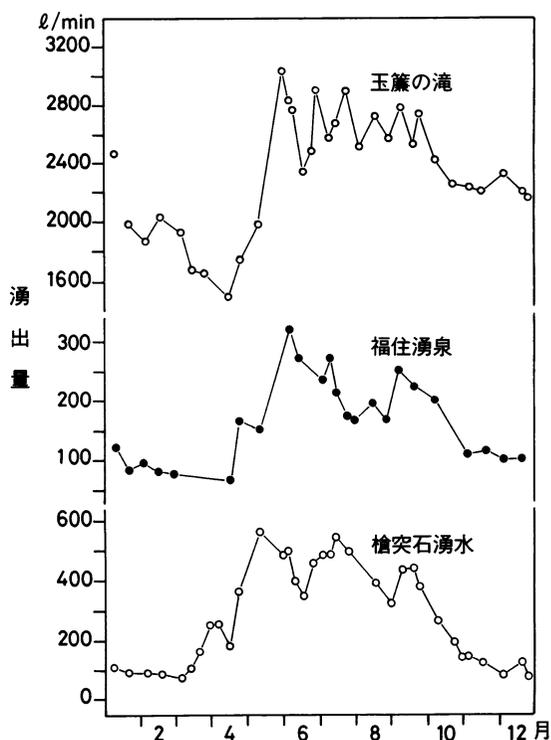


図9 福住湧泉と周辺湧泉の昭和61年のハイドログラフ

に浅層地下水との混合熱水に置換されているものと考えられる。Cl⁻濃度と温度がその年の最高値に達するのは、春先の降水によって湧出量が減少から増加に転じた初期の段階である。このことは、浅層地下水位の上昇が下部の熱水をピストンのように押し出すことによって熱水量が増加しているためと考えられる。Cl⁻は温度に比べて岩石との交流がほとんどないので、湧出孔での現象として、まず、Cl⁻濃度、ついで、温度の上昇が現れる。しかし、浅層地下水位がさらに上昇し、浅層地下水が混合系の中に多量に流入すると、Cl⁻濃度、次いで温度が急速に低下する。熱水と浅層地下水との混合比は両者の水頭（圧力）差に関係している。したがって、Cl⁻濃度と温度の最高値は必ずしも春先に生ぜず、渇水年の昭和59年の場合にように6～7月に出現することもある。Cl⁻濃度は湧出量の著しい増加にともない減少するが、湧出量がピークを越えても数日間停滞あるいは減少してから増加に転じている。この現象は浅層地下水量比の多い新しい混合水が古い混合水をピストンのように押し出しながら流動しているためと考えられる。したがって、Cl⁻濃度は、図6に示すように湧出量の増加時よりも減少時の方が少ない時計回りのヒステリシス・ループを描くことになる。また、割れ目内は多量の浅層地下水の流入で冷やされているので、湧泉温度はCl⁻濃度よりも回復が遅れる（図7）。したがって、Cl⁻濃度と温度はその時の湧出量だけでは決まらず、それまでに経てきた履歴に関係している。

降雨に伴う湧出量の早い応答に関する湧出機構について、次の三つが考えられる。その一つは降雨後の新しい水によって古い水を押し出すピストン流モデル、第2が新しい水と古い水との混合による混合流モデル、第3が降雨中と降雨直後のみ地層中のパイプ（割れ目）を流動する卓越流モデルである（榎根ら、1972、1980；田中ら、1984；北岡ら、1984）。福住湧泉場合、図4の湧出機構に基づいて説明するとおおよそ次のようになる。地下深所から上昇してくる熱水は広域的な浅層地下水の圧力によって押し出されるピストン流である。No. 1の湧泉は、渇水期に著しく減少あるいは枯渇し、豪雨から2～3日後に温度とCl⁻濃度の低い地下水が多量に湧出してくるので、新しい降水が大きな割れ目を流れてくる卓越流と考えられる。No. 2、4、5の湧泉は、隧道の底から被圧状態で湧出するとともに浅層地下水の影響を受けてCl⁻濃度と温度が変化することから混合流とピストン流の組み合わせモデルが考えられる。したがって、割れ目系地下水の流動機構はいずれのモデルも重要な役割をしている。この内、福住湧泉の湧出機構を考える上でピストン流と混合流が最も重要な役割をしている。

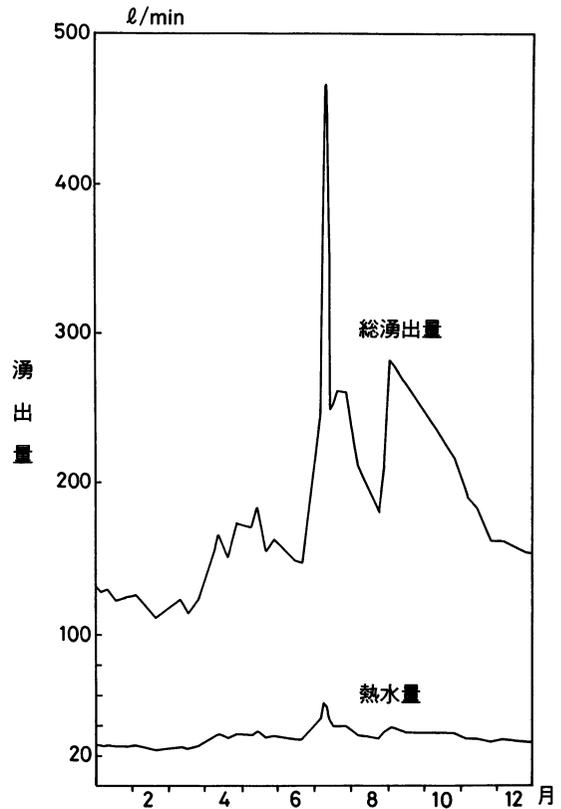


図10 Cl⁻濃度による福住湧泉の昭和49年のハイドログラフの分離(昭和49年1～12月)

本湧泉の主体をなすNo. 4の割れ目は、 Cl^- 濃度と温度の最も高いNo. 2に比べて熱水と浅層地下水とが比較的混合しやすい割れ目系からなっている。豪雨によって多量の浅層地下水が湧出口近傍でさらに熱水と混合してNo. 4の割れ目から湧出するまでの時間は、昭和49年8月25日の豪雨による湧出量と Cl^- との関係(図6)から推定すると、20日程度である。しかし、湧出量が降雨に敏感に反応していることから、循環速度は、豪雨時には速く、渇水期には遅くなるであろう。したがって、豪雨のイベントによって一時的に多量の浅層地下水が熱水と混合してNo. 4から湧出する時間は、20日から数カ月間であると思われる。

浅層地下水は福住湧泉の横穴に達している全ての割れ目内に流入しているが、各々の湧出温度と Cl^- 濃度が異なり、また、降雨に対する反応に差が認められることから、各割れ目間における地下水の交流は少ないものと思われる。

9 まとめ

本研究では、基盤岩類の割れ目から自然湧出する福住湧泉の長年にわたる湧出量、温度、 Cl^- 濃度の調査に基づきそれらの経年変化と湧出機構について考察を行った。本研究の結果、以下のことが明らかになった。

1) 福住湧泉は、昭和49年から61年までの12年間において、最低湧出量が約 30 l/min (2.5 l/min/年)、温度が 4.4°C (0.3°C/年)、 Cl^- 濃度は 33 ppm (2.5 ppm/年) 低下している。これは、周辺温泉の枯渇傾向に対応するものであり、地下深所からもたらされる熱水量の減少を示している。

2) 湧出量は降水量に対して敏感に反応し、それまでの累積降水量にも左右される。温度と Cl^- 濃度は湧出量が増加すると低下する。したがって、福住湧泉は降水でかん養される浅層地下水と地下深所から由来する熱水とが地下浅所において混合して形成される。

3) 浅層地下水は、湧出孔近傍でも割れ目に流入している。しかし、各割れ目から流出する湧泉の温度、 Cl^- 濃度および温度と Cl^- 濃度の変化が異なっている。このことから、割れ目間の水の交流は少ないものと思われる。

4) 熱水量は、浅層地下水の水位変化に敏感に反応し、浅層地下水位が上昇すると増加している。したがって、熱水は浅層地下水によってピストンのように押し出されている。

5) 福住湧泉は、熱水が地下浅所において浅層地下水と混合しながら上昇して湧出している。豪雨時には湧出口近傍で一時的に多量の浅層地下水がさらに混合している。豪雨のイベントによって新しく混合した浅層地下水が湧出するまでの時間は割れ目によって異なる。福住湧泉の主体を成しているNo. 4では、20日～数カ月である。

10 謝辞

本調査にあたり福住湧泉所有者の福住修治氏に現地調査の便宜をはかっていただき、同旅館の菊地辰見氏と秋山健吉氏、温泉地学研究所の横山尚秀主任研究員には調査に協力していただいた。温泉地学研

究所大木靖衛所長からは有益な助言および討論をしていただいた。同所、諸星忠義管理課長をはじめ管理課の方々には調査が円滑に進むよう配慮していただいた。箱根町消防署には気象観測資料を参照させていただいた。以上の方々に厚くお礼を申し上げます。なお、この調査は神奈川県温泉地学研究所温泉湧出機構研究調査費によった。

11 参考文献

- 新井 正 (1978)、三宅島・大路池の水収支、地理評、Vol.51、No.9、704-720。
- 平野富雄、大木靖衛、栗屋 徹 (1972)、箱根湯本、塔之沢温泉の泉質、神奈川温地研報告、Vol.3、No.3、109-130。
- 平野富雄、栗屋 徹、大木靖衛 (1986)、箱根湯本温泉の湧出状況について、神奈川温地研報告、Vol.17、No.5、95-114。
- 平野富雄、大山正雄 (1980)、箱根湯本温泉の自然湧泉について (その3)、第3号泉 (福住湧泉) の経年変化、神奈川温地研報告、Vol.12、No.2、55-66。
- 福富孝治 (1965)、岩石の割れ目中の温泉水の流動、北大地球物理学研究報告、No.14、31-48。
- 榎根 勇、大庭孝夫 (1972)、砂丘地下水の滞留時間、地理評、Vol.45、No.2、143-145。
- 榎根 勇、田中 正、嶋田 純 (1980)、環境トリチウムで追跡した関東ローム層中の土壤水の移動、地理評、Vol.53、No.3、225-237。
- 北岡豪一 (1983)、トリチウムによる浅層地下水の滞留時間の推定、水温の研究、Vol.26、No.4、131-34。
- 北岡豪一 (1984)、トリチウム濃度から推定される六甲山系の水循環の速さについて、日本地下水学会誌、Vol.26、No.4、131-146。
- 久野 久 (1972)、箱根火山地質図および地質図説明書 (箱根火山および周辺地域の地質)、久野 久著箱根火山地質図再版委員会編、大久保書店。
- Penman, H. L. (1948), Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., London, (A), Vol. 139, 120-145.
- 大山正雄、杉山茂夫、平野富雄 (1982)、箱根温泉の温度と湧出量の観測、昭和55~56年 (1980~1981)、神奈川温地研報告、Vol.13、No.5、27-38。
- 大山正雄、水野明哲、平野富雄、荻野喜作、大木靖衛 (1984)、箱根湯本湧泉の流出解析、神奈川温地研報告、Vol.15、No.5、45-54。
- 大山正雄、迫 茂樹 (1987)、箱根湯本・塔ノ沢温泉の水位の経年変化、神奈川温地研報告、Vol.18、No.2、25-36。
- 温泉地学研究所ラドン観測班 (1986)、地下水中のラドンの連続観測 (その2)、神奈川温地研報告、Vol.17、No.5、79-94。
- 田中 正、安原正也、丸井敦尚 (1984)、多摩丘陵源流域における流出機構、地理評、Vol.57、No.1、1-19。
- 湯原浩三、瀬野錦蔵 (1969)、温泉学、p.293、地人書館。

表2-1 第3号泉の温度、湧出量、成分

| 調 査 | | | 温 度 | 湧出量 |
|-----|----|----|------|-------|
| 年 | 月 | 日 | ℃ | ℓ/min |
| 57 | 1 | 6 | 45.3 | 118 |
| | | 13 | 45.1 | 125 |
| | | 20 | 44.7 | 116 |
| | | 27 | 44.6 | 119 |
| | | 4 | 45.0 | 114 |
| | 2 | 10 | 44.8 | 115 |
| | | 18 | 44.7 | 110 |
| | | 24 | 44.9 | 87 |
| | | 3 | 44.5 | 113 |
| | 3 | 10 | 45.2 | 118 |
| | | 17 | 45.8 | 129 |
| | | 24 | 45.8 | 132 |
| | | 31 | 45.7 | 147 |
| | 4 | 7 | 45.3 | 132 |
| | | 15 | 45.5 | 145 |
| | | 22 | 46.2 | 180 |
| | | 28 | 46.2 | 150 |
| | | 6 | 46.2 | 150 |
| | 5 | 12 | 46.1 | 140 |
| | | 19 | 46.0 | 141 |
| | | 26 | 45.6 | 129 |
| | | 4 | 46.2 | 157 |
| | | 9 | 46.0 | 171 |
| | 6 | 17 | 45.2 | 154 |
| | | 24 | 46.2 | 148 |
| | | 30 | 46.2 | 130 |
| | | 9 | 46.2 | 146 |
| | | 14 | 46.2 | 130 |
| | 7 | 21 | 46.8 | 127 |
| | | 29 | 46.4 | 152 |
| | | 4 | 42.6 | 593 |
| | | 12 | 42.3 | 320 |
| | | 19 | 42.3 | 310 |
| | 8 | 27 | 43.2 | 245 |
| | | 2 | 44.0 | 240 |
| | | 8 | 44.5 | 225 |
| | | 16 | 42.7 | 318 |
| | | 22 | 42.6 | 327 |
| | 9 | 29 | 42.3 | 327 |
| | | 6 | 42.3 | 270 |
| | | 13 | 42.9 | 266 |
| | | 20 | 45.4 | 212 |
| | | 27 | 45.3 | 226 |
| | 10 | 4 | 45.3 | 207 |
| | | 11 | 45.2 | 173 |
| | | 17 | 45.1 | 167 |
| | | 24 | 45.3 | 171 |
| | | 1 | 45.2 | 146 |
| | 11 | 9 | 44.3 | 169 |
| | | 15 | 44.6 | 157 |
| | | 23 | 44.2 | 144 |

表2-2 第3号泉の温度、湧出量、成分

| 調 査 | | | 温 度 | 湧出量 |
|-----|----|----|------|-------|
| 年 | 月 | 日 | ℃ | ℓ/min |
| 58 | 1 | 5 | 44.5 | 142 |
| | | 12 | 44.1 | 126 |
| | | 19 | 44.0 | 107 |
| | | 27 | 43.9 | 121 |
| | | 4 | 43.4 | 106 |
| | 2 | 9 | 44.0 | |
| | | 16 | 44.1 | 113 |
| | | 23 | 43.4 | 109 |
| | | 4 | 44.1 | 110 |
| | 3 | 9 | 44.4 | 113 |
| | | 16 | 44.0 | 123 |
| | | 23 | 44.0 | 133 |
| | | 31 | 44.2 | 157 |
| | 4 | 7 | 44.3 | 159 |
| | | 15 | 44.2 | 157 |
| | | 20 | 42.4 | 318 |
| | | 27 | 42.8 | 225 |
| | | 4 | 42.9 | 230 |
| | 5 | 11 | 43.5 | 208 |
| | | 18 | 42.0 | 327 |
| | | 25 | 41.8 | 251 |
| | | 3 | 44.5 | 177 |
| | | 10 | 44.5 | 152 |
| | 6 | 15 | 43.7 | 162 |
| | | 22 | 42.4 | 200 |
| | | 29 | 44.1 | |
| | | 6 | 44.3 | 169 |
| | | 13 | 44.7 | 159 |
| | 7 | 20 | 44.7 | 159 |
| | | 27 | 44.2 | 164 |
| | | 4 | 44.3 | 166 |
| | | 12 | 44.0 | 166 |
| | | 18 | 40.3 | |
| | 8 | 23 | 42.6 | 360 |
| | | 31 | 42.2 | 318 |
| | | 9 | 42.7 | 284 |
| | | 16 | 42.7 | 277 |
| | | 21 | 43.0 | 225 |
| | 9 | 28 | 43.9 | 207 |
| | | 5 | 42.7 | 263 |
| | | 12 | 42.2 | 251 |
| | | 19 | 41.9 | 270 |
| | | 25 | 44.3 | 208 |
| | 10 | 2 | 44.1 | 180 |
| | | 9 | 44.2 | 164 |
| | | 16 | 44.0 | 157 |
| | | 24 | 43.9 | 133 |
| | | 30 | 44.1 | 97 |
| | 11 | 7 | 44.0 | 116 |
| | | 14 | 44.1 | 135 |
| | | 20 | 43.8 | 127 |
| | | 27 | 43.3 | 129 |

表2-3 第3号泉の温度、湧出量、成分

| 調 査 | | | 温 度 | 湧出量 | Cl ⁻ | | | |
|-----|----|------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--|
| 年 | 月 | 日 | ℃ | ℓ/min | ppm | | | |
| 59 | 1 | 5 | 43.6 | 127 | | | | |
| | | 11 | 43.3 | 127 | | | | |
| | | 18 | 42.6 | 123 | | | | |
| | | 25 | 42.4 | 108 | | | | |
| | | | 2 | 1 | 42.4 | 90 | | |
| | | | | 8 | 43.1 | | | |
| | | 16 | 43.0 | 84 | 157.4 | | | |
| | | | 22 | 43.0 | 84 | 158.9 | | |
| | | | 29 | 42.7 | 113 | 159.9 | | |
| | | | 3 | 7 | 42.3 | 115 | 160.8 | |
| | | | | 15 | 42.6 | 99 | 161.8 | |
| | | 22 | 42.2 | 104 | 162.8 | | | |
| 28 | | | 42.7 | 107 | 165.7 | | | |
| 4 | | | 4 | 42.3 | 106 | 164.7 | | |
| | | | 11 | 42.7 | | 166.5 | | |
| | 18 | 43.1 | 113 | 167.2 | | | | |
| | | 25 | 42.7 | 105 | 169.5 | | | |
| | | 5 | 2 | 43.2 | 102 | 168.6 | | |
| | | | 9 | 43.2 | | 168.7 | | |
| | 16 | 42.8 | 97 | 167.7 | | | | |
| | | 24 | 42.6 | 98 | 170.1 | | | |
| | | 31 | 42.8 | 107 | 170.0 | | | |
| | | 6 | 6 | 43.0 | 90 | 174.9 | | |
| | | | 13 | 42.8 | 84 | 174.0 | | |
| | 20 | 41.5 | 98 | 170.1 | | | | |
| | | 7 | 4 | 44.8 | 144 | 170.1 | | |
| | | | 13 | 44.2 | 127 | | | |
| | 20 | 45.0 | 118.7 | 158.5 | | | | |
| | | 8 | 10 | 44.2 | 95.9 | 165.7 | | |
| | | | 21 | 43.8 | 98 | 165.0 | | |
| | 9 | 6 | 43.8 | 104.9 | 167.2 | | | |
| | | 20 | 43.8 | 88.5 | 168.3 | | | |
| | | 28 | 43.7 | 102.8 | 172.9 | | | |
| 10 | 15 | 43.6 | 90 | 171.2 | | | | |
| | | 31 | 43.9 | 93.9 | 174.9 | | | |
| 11 | 14 | 43.4 | 96.4 | 178.3 | | | | |
| 12 | 3 | 43.3 | 68.3 | 176.4 | | | | |
| | | 18 | 43.8 | 81.8 | 182.7 | | | |

表2-4 第3号泉の温度、湧出量、成分

| 調 査 | | | 温 度 | 湧出量 | Cl ⁻ | | |
|-----|------|------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| 年 | 月 | 日 | ℃ | ℓ/min | ppm | | |
| 60 | 1 | 7 | 43.6 | 86.4 | 180.8 | | |
| | | 24 | 43.6 | 77.2 | 181.7 | | |
| | | 7 | 43.8 | 82.4 | 181.3 | | |
| | | 2 | 21 | 44.3 | 85.7 | 183.7 | |
| | | | 3 | 25 | 44.6 | 94.3 | 183.7 |
| | | 4 | 11 | 46.5 | 145.9 | 163.3 | |
| | | | 5 | 1 | 44.9 | 168.8 | 144.0 |
| | | 15 | 44.8 | 138.5 | 142.4 | | |
| | | | 31 | 44.8 | 128.6 | 154.5 | |
| | | | 6 | 12 | | 120.0 | |
| | 28 | 41.3 | | 308.6 | 115.7 | | |
| | | 7 | 1 | 42.0 | 490.9 | | |
| 12 | | | 41.1 | 270.0 | 91.8 | | |
| 24 | | | 42.2 | 196.4 | 110.8 | | |
| | 8 | 2 | 43.8 | 136.7 | 125.4 | | |
| | | 13 | 44.7 | 154.3 | 133.2 | | |
| | | 30 | 43.6 | 171.4 | 136.5 | | |
| | 9 | 12 | 44.2 | 144.0 | 146.3 | | |
| | | 27 | 44.6 | 125.6 | 152.6 | | |
| | | 10 | 17 | 44.2 | 173.3 | 144.3 | |
| 29 | 44.4 | | 137.0 | 148.4 | | | |
| 11 | 14 | 44.2 | 133.2 | 147.7 | | | |
| | | 12 | 9 | 44.4 | 113.1 | 156.0 | |

表2-5 第3号泉の温度、湧出量、成分

| 調 査 | | | 温 度 | 湧出量 | Cl ⁻ |
|-----|---|----|------|-------|-----------------|
| 年 | 月 | 日 | ℃ | ℓ/min | ppm |
| 61 | 1 | 9 | 44.2 | 108.0 | 157.0 |
| | | 20 | 44.2 | 93.9 | 158.4 |
| 2 | | 3 | 44.4 | 98.2 | 159.4 |
| | | 17 | 43.9 | 92.0 | 161.2 |
| | | 28 | 44.3 | 90.5 | 162.8 |
| | | | | | |
| 4 | | 14 | 45.1 | 87.5 | 172.1 |
| | | 23 | 45.7 | 126.3 | 173.5 |
| 5 | | 9 | 45.5 | 120.5 | 153.9 |
| 6 | | 4 | 43.1 | 188.2 | 118.6 |
| | | 11 | 43.4 | 168.8 | 133.2 |
| 7 | | 17 | 43.7 | 142.1 | |
| | | 2 | 44.2 | 154.5 | 148.7 |
| | | 10 | 44.8 | 168.8 | |
| | | 11 | 44.7 | | 147.7 |
| | | 16 | 44.7 | 144.6 | 149.2 |
| | | 24 | 44.7 | 129.2 | 153.6 |
| | | 31 | 44.7 | 126.8 | |
| 8 | | 18 | 44.9 | 138.5 | 150.7 |
| | | 28 | 44.9 | 125.8 | 152.6 |
| 9 | | 8 | 44.5 | 160.8 | 146.8 |
| | | 19 | 44.6 | 150.7 | 147.7 |
| | | 24 | 44.7 | 144.8 | |
| 10 | | 7 | 44.7 | 139.6 | 149.2 |
| | | 24 | 44.6 | 113.4 | |
| 11 | | 6 | 44.1 | 104.5 | 152.6 |
| | | 17 | 44.7 | 106.3 | 154.5 |
| 12 | | 4 | 44.3 | 100.5 | 159.2 |
| | | 20 | 44.5 | 101.6 | 161.8 |

表2-6 第3号泉の温度、湧出量、成分

| 調 査 | | | 温 度 | 湧出量 | Cl ⁻ |
|-----|---|----|------|-------|-----------------|
| 年 | 月 | 日 | ℃ | ℓ/min | ppm |
| 62 | 1 | 9 | 44.4 | 93.4 | 164.7 |
| | | 17 | 44.3 | 92.1 | 164.5 |
| 1 | | 23 | 44.2 | 92.3 | 166.0 |
| | | 29 | 44.5 | 90.2 | 167.0 |
| 2 | | 10 | 44.5 | 92.3 | 168.1 |
| | | 19 | 44.3 | 92.5 | 167.6 |
| 3 | | 4 | 44.3 | 91.9 | 169.0 |
| 3 | | 28 | 45.2 | 97.3 | 171.5 |
| 4 | | 6 | 45.2 | 98.3 | 165.0 |
| 4 | | 17 | 45.2 | 94.6 | 166.2 |
| 4 | | 30 | 45.4 | 93.9 | 167.6 |
| 5 | | 11 | 45.5 | 85.6 | 170.2 |
| 5 | | 14 | 45.5 | | |
| 5 | | 21 | 45.5 | 89.9 | 172.0 |
| 5 | | 23 | 45.8 | | 174.0 |
| 5 | | 24 | 45.9 | 105.4 | 174.9 |
| 5 | | 25 | 46.1 | | 175.0 |
| 5 | | 26 | 46.1 | 127.5 | 173.5 |
| 5 | | 29 | 46.0 | | |
| 6 | | 9 | 46.1 | 101.0 | 169.0 |
| 6 | | 18 | 45.9 | | |
| 6 | | 26 | 45.9 | 92.0 | 168.5 |
| 6 | | 30 | 45.9 | | |
| 7 | | 3 | 46.6 | 136.7 | |
| 7 | | 6 | 46.8 | 122.9 | 168.0 |
| 7 | | 9 | 46.7 | | |
| 7 | | 15 | 46.6 | | |
| 7 | | 22 | 46.4 | 133.2 | 158.0 |
| 7 | | 28 | 46.3 | 115.9 | |
| 8 | | 6 | 46.3 | | |
| 8 | | 8 | 46.2 | | |
| 8 | | 17 | 46.0 | 107.5 | 160.5 |
| 8 | | 26 | 46.1 | | |
| 9 | | 2 | 45.9 | 98.2 | 162.0 |
| 9 | | 8 | 46.0 | | |
| 9 | | 21 | 45.6 | 88.8 | 168.0 |
| 10 | | 1 | 45.8 | | |
| 10 | | 14 | 45.7 | | |
| 10 | | 19 | 45.6 | 99.9 | 171.0 |
| 11 | | 6 | 45.7 | | |
| 11 | | 10 | 45.7 | 96.7 | 174.0 |
| 11 | | 26 | 45.4 | 89.3 | 172.5 |
| 12 | | 4 | 45.7 | | |
| 12 | | 11 | 45.8 | 89.8 | 174.5 |
| 12 | | 17 | 45.8 | | |
| 12 | | 24 | 45.7 | 94.6 | 177.5 |

表3-1 福住隧道内各湧泉

| 調 査 | | | 湧出孔 | 温 度 | 湧出量 |
|-----|---|----|-----|------|-------|
| 年 | 月 | 日 | No | ℃ | ℓ/min |
| 49 | 7 | 12 | 1 | 33.1 | 352 |
| | | | 2 | 53.9 | |
| | | | 3 | 54.8 | |
| | | | 4 | 51.1 | |
| | | | 5 | | |
| | | | 6 | 45.4 | |
| | | | 7 | 41.2 | |
| 50 | 1 | 14 | 1 | 47.0 | 156 |
| | | | 2 | 53.4 | |
| | | | 3 | 55.5 | |
| | | | 4 | 50.3 | |
| | | | 5 | | |
| | | | 6 | 48.7 | |
| | | | 7 | 46.8 | |

表3-2 福住隧道内各湧泉

| 調 査 | | | 湧出孔 | 温 度 | Cl ⁻ | 湧出量 | 外気温度 |
|-----|---|----|-----|------|-----------------|-------|------|
| 年 | 月 | 日 | No | ℃ | ppm | ℓ/min | ℃ |
| 59 | 3 | 28 | 1 | 25.3 | 18.2 | 6.9 | |
| | | | 2 | 55.4 | 211.4 | | |
| | | | 3 | 52.8 | 219.4 | | |
| | | | 4 | 50.5 | 187.6 | | |
| | | | 5 | 47.5 | 171.5 | | |
| | | | 6 | 44.9 | 197.6 | | |
| | | | 7 | 42.7 | 165.7 | | |
| 59 | 6 | 6 | 1 | 28.7 | 13.5 | 9.3 | |
| | | | 2 | 55.8 | 213.0 | | |
| | | | 3 | 53.3 | 214.3 | | |
| | | | 4 | 46.2 | 187.6 | | |
| | | | 5 | 45.1 | 172.7 | | |
| | | | 6 | 48.9 | | | |
| | | | 7 | 43.0 | 174.9 | | |
| 59 | 8 | 21 | 1 | 44.5 | | 16 | |
| | | | 2 | 56.1 | 221.7 | | |
| | | | 3 | 53.3 | 212.3 | | |
| | | | 4 | 46.2 | 159.9 | | |
| | | | 5 | 44.7 | 169.0 | | |
| | | | 6 | 51.9 | 224.0 | | |
| | | | 7 | 43.8 | 165.0 | | |
| 60 | 8 | 2 | 1 | 31.7 | 92.3 | 106.9 | |
| | | | 2 | 59.9 | 181.7 | 23 | |
| | | | 3 | 55.0 | 185.1 | | |
| | | | 4 | 47.4 | 130.7 | | |
| | | | 5 | 46.1 | 129.3 | | |
| | | | 6 | 51.7 | | 23 | |
| | | | 7 | 43.8 | 125.4 | 136.7 | |

表3-3 福住隧道内各湧道

| 調 査 | | | 湧出孔 | 温 度 | Cl ⁻ | 湧出量 | 外気温度 |
|-----|---|----|-----|------|-----------------|-------|------|
| 年 | 月 | 日 | No | ℃ | ppm | ℓ/min | ℃ |
| 61 | 9 | 19 | 1 | 41.6 | 136.3 | 停止 | |
| | | | 2 | 56.9 | 201.0 | 19.3 | |
| | | | 3 | | | | |
| | | | 4 | 46.6 | 150.2 | | |
| | | | 5 | 46.1 | | | |
| | | | 6 | 52.3 | | 19.3 | |
| | | | 7 | 44.6 | 150.7 | 150.7 | |
| 62 | 5 | 11 | 1 | 枯渇 | | | |
| | | | 2 | 57.5 | 212.9 | 11.1 | |
| | | | 3 | | | | |
| | | | 4 | 47.2 | 169.1 | | |
| | | | 5 | 53.4 | 191.5 | | |
| | | | 6 | | | 11.1 | |
| | | | 7 | 45.5 | 170.2 | 86.6 | |
| 62 | 5 | 29 | 1 | | | | |
| | | | 2 | 57.4 | | | |
| | | | 3 | | | | |
| | | | 4 | 48.6 | | | |
| | | | 5 | 53.1 | | | |
| | | | 6 | | | | |
| | | | 7 | 45.8 | | | |
| 62 | 7 | 28 | 1 | 50.0 | | 19.3 | |
| | | | 2 | 57.3 | | | |
| | | | 3 | | | | |
| | | | 4 | 48.7 | | | |
| | | | 5 | 51.8 | | | |
| | | | 6 | | | | |
| | | | 7 | 46.3 | | | |