

温泉井の電導度検層

¹ (株)日本地科研究所, 273-0033 千葉県船橋市本郷町 658-2

² (株)日本地下探査, 273-0033 千葉県船橋市本郷町 658-2

佐藤幸二¹, 高屋 正², 千葉 忠²

(平成 15 年 4 月 2 日受付, 平成 16 年 5 月 20 日受理)

Conductivity Logging for Thermal Spring Well

Koji SATO¹, Tadashi TAKAYA², Tadashi CHIBA²

¹ Nihon Chika Kenkyuusho Co. Ltd., 658-2, Hongo, Funabashi, Chiba 273, Japan

² Nihon Chika Tansa Co. Ltd., 658-2, Hongo, Funabashi, Chiba 273, Japan

Abstract

Formerly, we-the present authors reported on the loggings of the self-flowing thermal well (Sato *et al.*, 1999), and estimated the inflowing depth, temperature, volume and conductivity of thermal water flowing into the well. This estimation was based on the changes of the temperature, flow rate and electric conductivity of the thermal water.

We report the results of loggings of fluid temperature and fluid conductivity performed inside the casing pipe of two thermal spring wells.

At "Y" spring well, after the drilling of 1,500 m, the loggings of temperature, differential temperature, natural gamma, self potential, electric resistivity, fluid conductivity and differential conductivity are carried out. From the results of these loggings, we proposed the set up depths of strainer. When the uplifting of the thermal water (temperature 40°C, flow 160 l/min, water level-50 m) is stopped temporally, the loggings of fluid temperature and fluid conductivity are done inside the casing pipe. The effective strainer and ineffective strainer are distinguished mainly by the change of the fluid conductivity.

At "S" spring well (1,023 m depth), as the temperature of the uplifted thermal water has been lowered largely (54.5°C→ca30°C); the uplifting is stopped and the loggings of fluid temperature and fluid conductivity are tried inside the casing pipe. The invasion of the different water (perhaps the sea-water) through the broken part of the casing pipe is inferred from the changes in fluid temperature and in fluid conductivity. It is supposed that the steel casing pipe is corroded by the salty water flowing outside of the pipe.

Key words : Thermal water well, Logging of conductivity, Logging of temperature, Inflow of water

キーワード : 温泉井, 電導度検層, 温度検層, 水の流入

1. はじめに

温泉掘削孔については各種の物理検層が行われ、地質柱状と共にいろいろな検討を行うための資料を提供している。しかし掘削孔にケーシング管が挿入されると、ケーシング管材として鋼管が使用される場合がほとんどで、電気検層などの検層が出来なくなるなど検層の種類が制限されてくる。佐藤ほか(1999)は、自噴温泉井内において流速検層、温度検層および電導度検層を行って、孔井内に流入する温泉水の流入深度、その温泉水の温度や成分濃度などを推定した。今回は、ある期間揚湯を続けた温泉井について温度検層と電導度検層を行って孔井内に流入する流体の流入深度、温度や成分濃度の推定を試みた。

2. 温泉の電導度

電導度は電気伝導率、導電率などともよばれているが、電気の流れやすさを示す定数であって、単位はジーメンズ/メータ (S/m) が用いられる。この逆数は電気の流れにくさを示す電気比抵抗 ($\Omega\text{-m}$) である。すなわち水の電気伝導度 (EC) と電気比抵抗 (Rw) との関係は次のようになる。

$$Rw = 1/EC$$

温泉水や地下水のように水を溶媒とする電解質の電導度は溶液中のイオン移動に基づくもので、溶存物質質量によって異なるのは当然であるが、温度の依存性も高い。それで一般には 25°C における値を用いている。電導度の測定は電導度計によって比較的簡単にかつ短時間で計測され、携帯用の電導度計もあるので現場測定が容易であり、25°C 値への温度補正が内蔵されているものも多い。温泉水の場合も、溶存物質質量の多少を大まかではあるが迅速に知ることが出来るために比較的多く用いられる。

ところが、温泉水の電導度と溶存物質質量の双方が判明している測定例は意外と少ない。手許にあるそのような測定例 (例えば渡辺, 1975) を両対数グラフ上に示した (Fig. 1)。電導度は 25°C の温度での補正值であり、温泉の温度、pH、泉質などは無視した。理科年表 (国立天文台, 1998) に記載されているいくつかの電解質水溶液 (0.1 モル/l) の 25°C における電気伝導率 (以下、統一して電導度と称する) をも併せて示してある。これをみると温泉水の電導度 (EC) と溶存物質質量 (TSM) との間には正の相関があり、一般に云われているように次のような関係がある。

$$EC(S/m) \times 7 \approx TSM(g/l)$$

電解質水溶液のうち、KCl (理科年表には 3 通りの濃度で温度が異なる時の電導度が示されている) および NaCl は温泉水と同じようであるが、HCl, HNO₃, H₂SO₄, NaOH, CuSO₄, NH₃ の水溶液は温泉水とは異なるようである。

一方、理科年表に示されている KCl 標準水溶液の電導度を両対数グラフ上にプロットすると、Fig. 2 のように KCl の濃度による電導度の変化と共に水溶液の温度による変化もみられる。水溶液中の溶存物質の濃度が濃く温度が高い場合は、電導度が高いということになる。この KCl の場合でいうと電導度は溶存量が多い程また温度が高い程大きく、同じ濃度でも 25°C の電導度は 0°C の場合の 1.7~1.8 倍程度大きい電導度を示すこととなる。山口 (1963) は NaCl 溶液の濃度と電気比抵抗 (電導度の逆数) との関係を、両対数グラフ上に示し 0~50°C の温度での両者の関係をも併せて示している (Fig. 3)。濃度が同じでも温度が高くなるにつれて、電気比抵抗は小さく (電導度は大きく) なることが示されている。

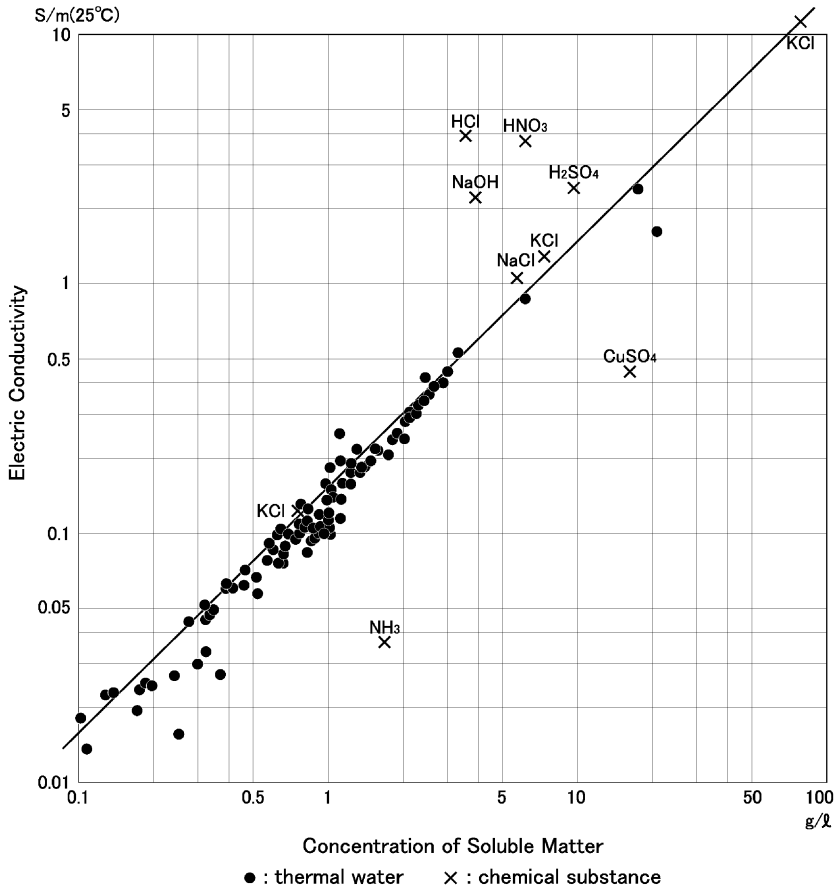


Fig. 1 Relation between Concentration of Soluble Matter and Electric Conductivity.
 図 1 溶存物質量と電導度の関係

3. 温泉孔の電導度検層の例

今回使用した検層装置はロバートソン社 (英国) 製で、プローブ (センサー, ゾンデともいう) は泥水電導度, 1 m 間の示差電導度, 自然放射能, 温度および 1 m 間の示差温度を測定出来るコンビネーションプローブ (Fig. 4) である。電気比抵抗や自然電位を測定するには別のプローブを用いるようになっている。電導度の測定レンジは $50 \sim 50,000 \mu\text{S}/\text{cm} = 0.05 \sim 50 \text{ mS}/\text{cm} = 0.005 \sim 5 \text{ S}/\text{m}$ であり, 自然放射能は NaI (TL) シンチレーターを用いて 1 秒間のカウント数, CPS で示される。温度は半導体トランスデューサーを用いている。プローブの直径は 38 mm, 長さ 2.44 m, 重量 7.7 kg であり, 耐熱温度は 125°C, 耐圧は 210 kgf/cm² である。電導度の測定精度は 0.5 S/m の時 ± 2.5% であり, 温度の精度は ± 0.5°C である。

プローブの降下, 上昇は速度を 30 m/min まで変えられるウィンチを用い, 8 m/min の降下速度で測定した。なお電導度の値は温度補正が行われていないので, 正確には測定深度における温度にしたがっての補正を行わなければならない。

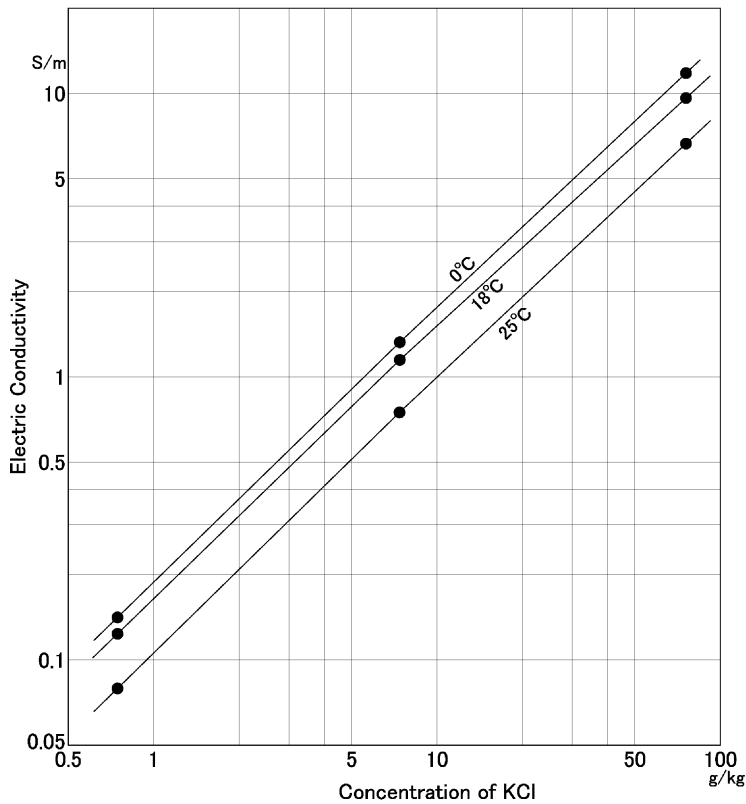


Fig. 2 Electric Conductivity of KCl Solution.

図 2 KCl 溶液の電導度

3.1 “Y” 温泉井の例

関東平野にある源泉で、1,500 m の深度まで掘削した後、ケーシング管を挿入する前に孔内検層（温度、示差温度、自然放射能、自然電位、電気比抵抗、泥水電導度および示差電導度）を実施して、ケーシング管のストレーナ部の設置深度を検討した。その結果、Fig. 5 のように、岩質の礫岩部および砂岩部、電気比抵抗の高比抵抗部、示差泥水電導度の変動部であって、孔内温度が 45°C より高いといった点から深度 1,185~1,268 m、1,369~1,380 m、1,458~1,469 m の 3 ケ所にストレーナ位置を選定した。

揚湯水位が -50 m という状態で泉温 40°C の温泉水 160 l/min を揚湯していた。その後ケーシング管内において温度検層と電導度検層（慣習的に mS/cm の単位で示されている）を行った結果、Fig. 6 のように孔内温度は掘削直後に比較して 7°C 程度上昇し、電導度は同じく 3 S/m 程度上昇すると共に、1,250 m 深度の以浅と以深とで明瞭な変化がみられた。孔内温度は深度 1,185~1,268 m のストレーナ設置区間での上昇は 1°C ±/100 m と緩やかであるが、-1,185 m 以浅では 2°C ±/100 m、-1,268 m 以深では 3°C ±/100 m とやや急である。電導度は深度 1,250 m 付近で 3.5 S/m から 4.1 S/m へと 0.6 S/m 程度の急上昇がみられ、以深はほぼ安定した電導度（4 S/m 前後）を示す。

これらの状況は深度 1,185~1,268 m のストレーナ部から温度 52°C 程度、電導度 4 S/m 程度（溶

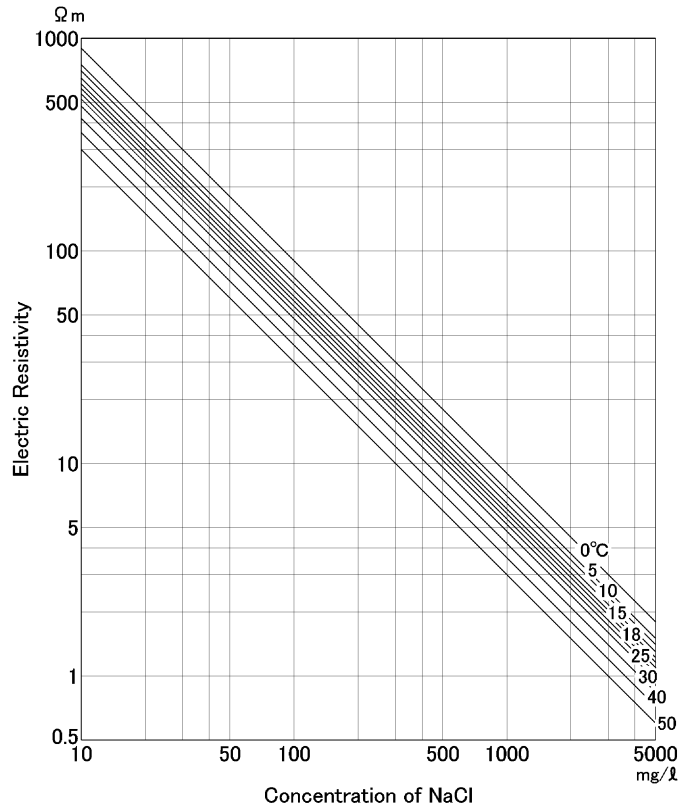


Fig. 3 Relation between Concentration of Na-Cl Solution and Electric Resistivity at different Temperature (Yamaguchi, 1963).

図 3 NaCl 溶液の濃度、電気比抵抗と温度の関係 (山口, 1963)

存物質質量 28 g/l 程度) の温泉水が孔内に流入しており、もっと深い -1,369~1,380 m, -1,458~1,469 m のストレーナ部からは温泉の流入はないか、あっても極めて少量の何れかであることを示している。

掘削直後で未だ揚湯していない状態での電導度は掘削泥水の電導度を示し、0.25 S/m 前後の値を示している。一方揚湯後の約 1,250 m 以深の高い電導度 (4.1 S/m 前後) は停滞温泉水の電導度を示すものであろう。

なお、掘削直後の検層では深度 900 m 付近に電気比抵抗と自然放射能とに変化がみられ、地層境界に対応するものと考えられる。しかし深度 1,310 m 付近の自然電位の変化が何を示すものかは明らかでない。

3.2 “S” 温泉井の例

海岸にある源泉であって、約 1,000 m の深度まで掘削した後に全深度に鋼管をケーシング管 (880 m 以深はストレーナ) として挿入し、泉温 54.5°C, pH 6.8, 溶存物質質量 17.38 g/l の Na-Cl 泉 260 l/min を水中モータポンプによって揚湯していたが、6 年の後に泉温が 31.2°C に低下して pH 6.9, 溶存物質質量 31.54 g/l の Na-Cl 強塩泉と変わった (Table 1 参照)。

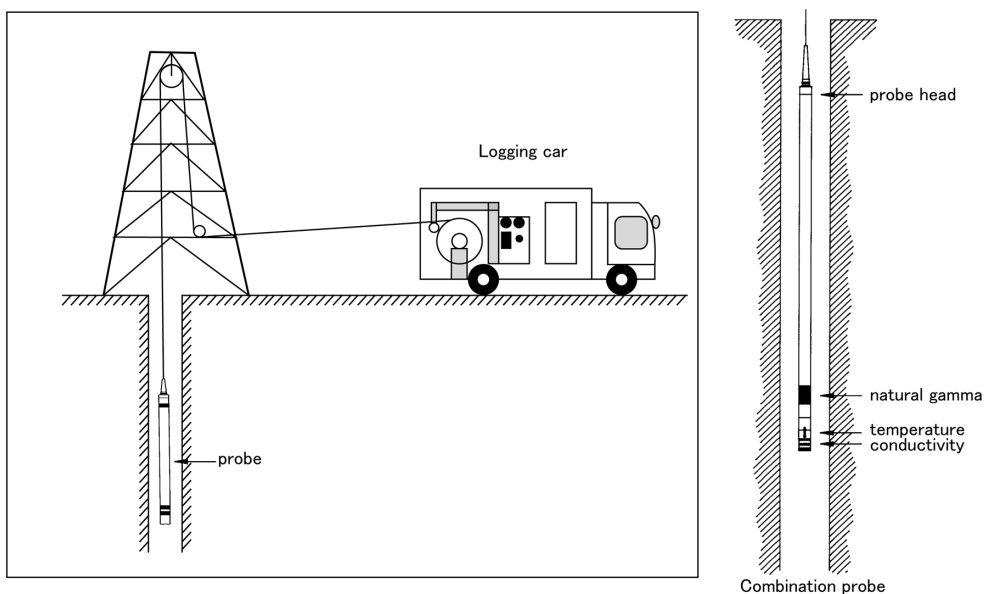


Fig. 4 Equipment of the Well Logging.

図 4 検層概念図

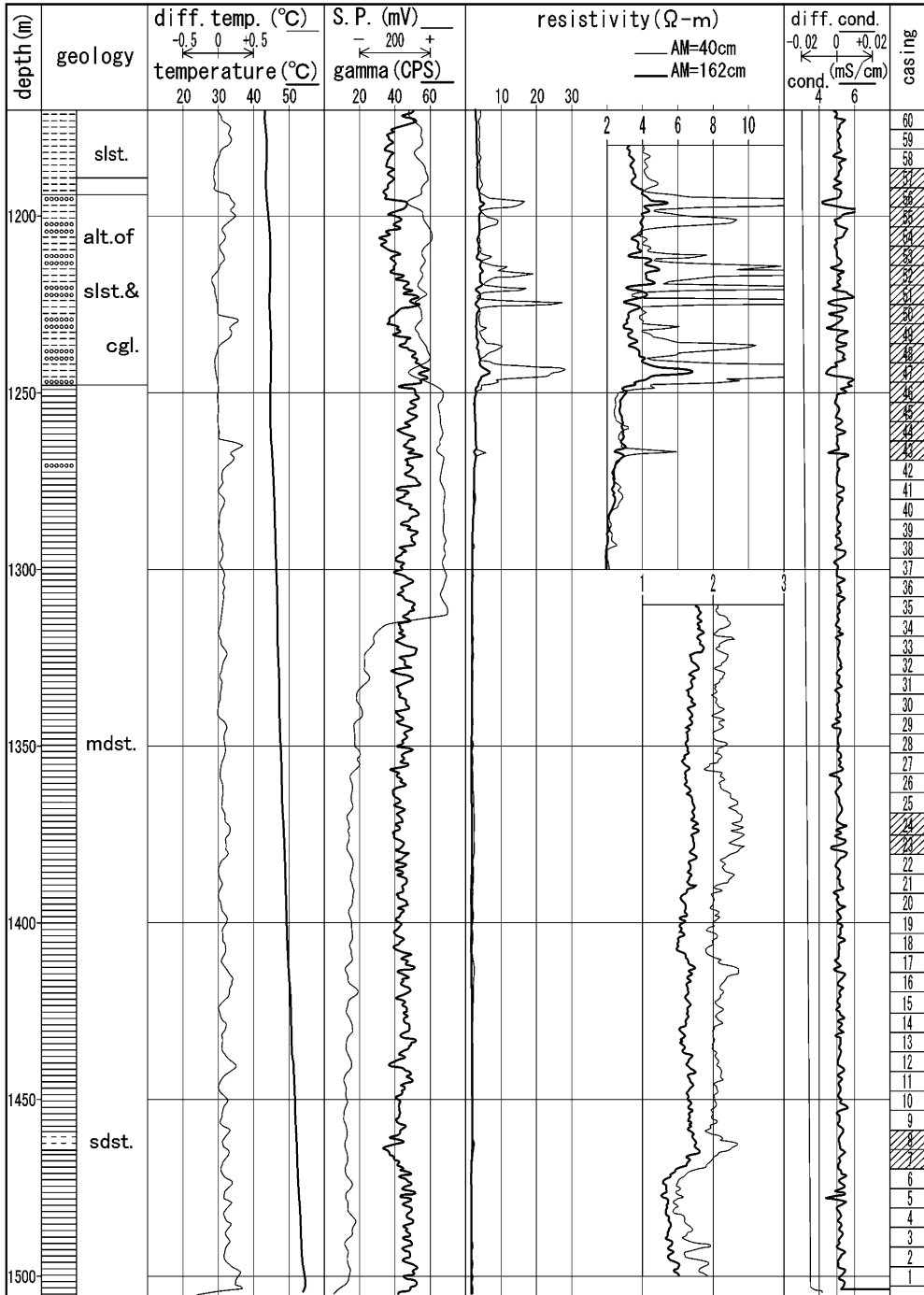
この変化の原因を明らかにするために、ケーシング管内の電導度検層および温度検層を実施した。なお掘削時の検層結果はなく、Fig. 7のように地質柱状に孔底温度が記載されているのみである。

最初の検層（第1次）の時にプローブが320 m深度までしか降下しなかったために、浚渫工事が行われて940 m深度までの検層を行うことが出来た。検層は数回行われたが、第2次の1とした検層は、孔内泥水の循環停止後22時間が経過した時に行われた。なお、浚渫工事に使用した泥水の粘速は33（泥水500 ccがファンネルビスコシメータから流出する秒数）、泥水の比重は1.02であった。

検層（第2次の1）の結果はFig. 8（深度140 m～820 m）に示すが、その結果をみると、温度は静止水位-25 mの24℃から上下しながら-340 mの32.2℃まで上昇した後に低下し、-370～535 m間は27～29℃となる。以深は上昇して-570 mで38℃となり、その後は順調に上昇して-850 mの49℃となる。これに対して電導度（この図でも慣習的にmS/cm単位で示されている）は静止水位の0.9 S/mから上下しながら-340 mの1.65 S/mまで上昇した後に-370～400 mの1.5 S/mと低下し、以深では急上昇して-480 mの4.6 S/mとなる。次いで段階的に急低下し-570 mで1.85 S/mとなり、以深は緩やかに上昇して-850 mで2.5 S/mとなった後に上下しながら900 m以深の2.0 S/mとなる。

深度210 m, 300 m, 365～400 mなどでは温度が低下すれば電導度も低下するといった状況がみられるが、深度480 mを中心とする電導度のピークには温度のピークが対応していないで、温度とは無関係な電導度の変化がみられたことになる。

この検層結果から、ストレーナの設置深度（880 m以深）よりも浅い部分である深度480 m付近から、温泉水とは別の水が孔井内に流入しているものとみられた。流入水の温度は24.5℃程度、流



slst: siltstone, alt: alteration, cgl: conglomerate, mdst: mudstone, sdst: sandstone
 diff: differential, cond: conductivity, //: strainer

Fig. 5 Logging Chart of "Y" Spring Well (1170-1500 m depth).

図 5 "Y" 温泉井の検層図 (1,170-1,500 m 深)

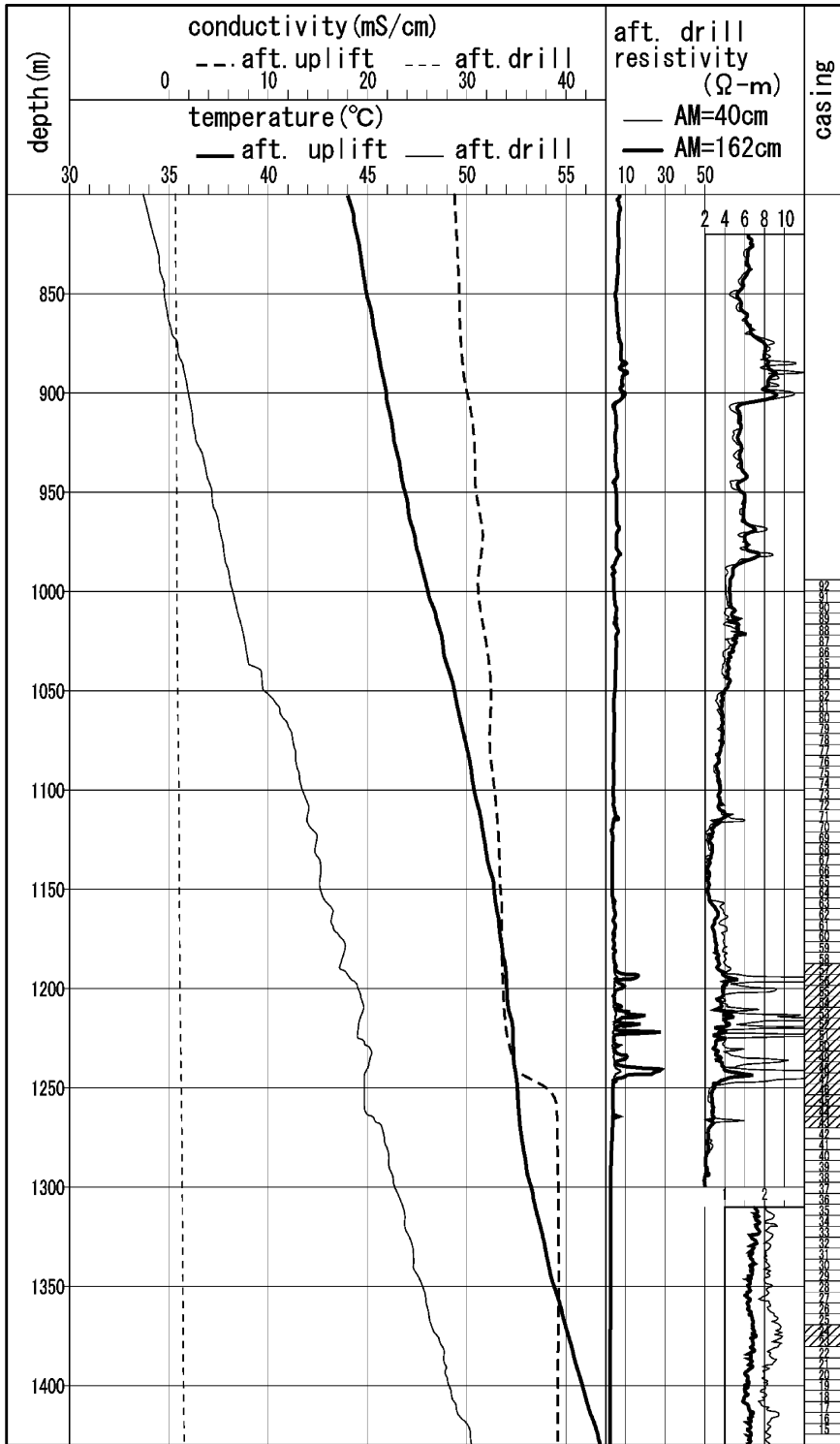


Fig. 6 Logging Chart of "Y" Spring Well (800-1480 m depth)-before and after uplifting.

図 6 "Y" 温泉井の検層図 (800-1,480 m 深) —揚湯前後の変化—

Table 1 Chemical Composition of Thermal Water of "S" Spring.

表 1 "S" 温泉の化学組成

Date (Year, Month)	1994. 8		2002. 9	
Temperature (°C)	54.5		31.2	
Flow (l/min)	260		-	
PH, on site, in laboratory	6.8	6.89	6.9	6.82
Rn $\times 10^{-10}$ Ci/kg	0.82		0.6	
E.R. g/kg	17.38		31.54	
Component	mg/kg	mval%	mg/kg	mval%
Sodium ion Na ⁺	5300.0	74.79	9067.0	77.09
Potassium ion K ⁺	248.2	2.06	345.1	1.73
Ammonium ion NH ₄ ⁺	21.8	0.39	10.4	0.11
Magnesium ion Mg ²⁺	362.9	9.69	984.0	15.83
Calcium ion Ca ²⁺	799.0	12.94	527.0	5.14
Ferrous ion Fe ²⁺	8.0	0.09	9.9	0.07
Manganese ion Mn ²⁺	3.6	0.04	1.3	0.01
Fluride ion F ⁻	0.2	0.00	1.5	0.02
Chloride ion Cl ⁻	9819.0	93.58	16390.0	90.93
Bromide ion Br ⁻	47.4	0.20	54.9	0.14
Sulphate ion SO ₄ ²⁻	523.1	3.68	1881.0	7.70
Bicarbonate ion HCO ₃ ⁻	457.5	2.53	375.3	1.21
Nitrate ion NO ₃ ⁻			0.2	0.00
meta-silicate H ₂ SiO ₃	185.1		247.0	
meta-boric acid HBO ₂	8.0		40.0	
Free carbon dioxide CO ₂	166.8		92.0	
Characterictic	Na-Cl spring		Conc. Na-Cl spring	

入水の電導度は 4.6 S/m 程度 (溶存物質質量としては 32.2 g/l 程度) と推定された。この源泉が海岸にあること、海水の溶存物質質量は 34~35 g/l とされている (高橋ほか, 1997) ことからこの流入水は成分が海水に近い微温のものであると考えられた。したがって上述の -480 m 付近の温泉水の温度低下、電導度の増大は、おそらくケーシング管 (鋼管) の腐食・破断による海水の混入であると考えられた。そしてその影響は -420~560 m 間に及ぶとみられた。その他の電導度の上昇を伴わない低温部は、恐らくケーシング管外を流動する低温水による冷却のためであって、低温・低濃度の地下水の流入は一寸考え難い。同じ孔井で翌日 (泥水循環停止後 43 時間) に行われた検層 (Fig. 8 の第 2 次の 2) では、同じ深度からの海水浸入の影響は主として深部にその範囲を拡大して -420~650 m の範囲となった。

その後、同じ孔井内に耐熱塩化ビニール管を 550 m の深度まで仮に挿入して同じ検層 (第 3 次)

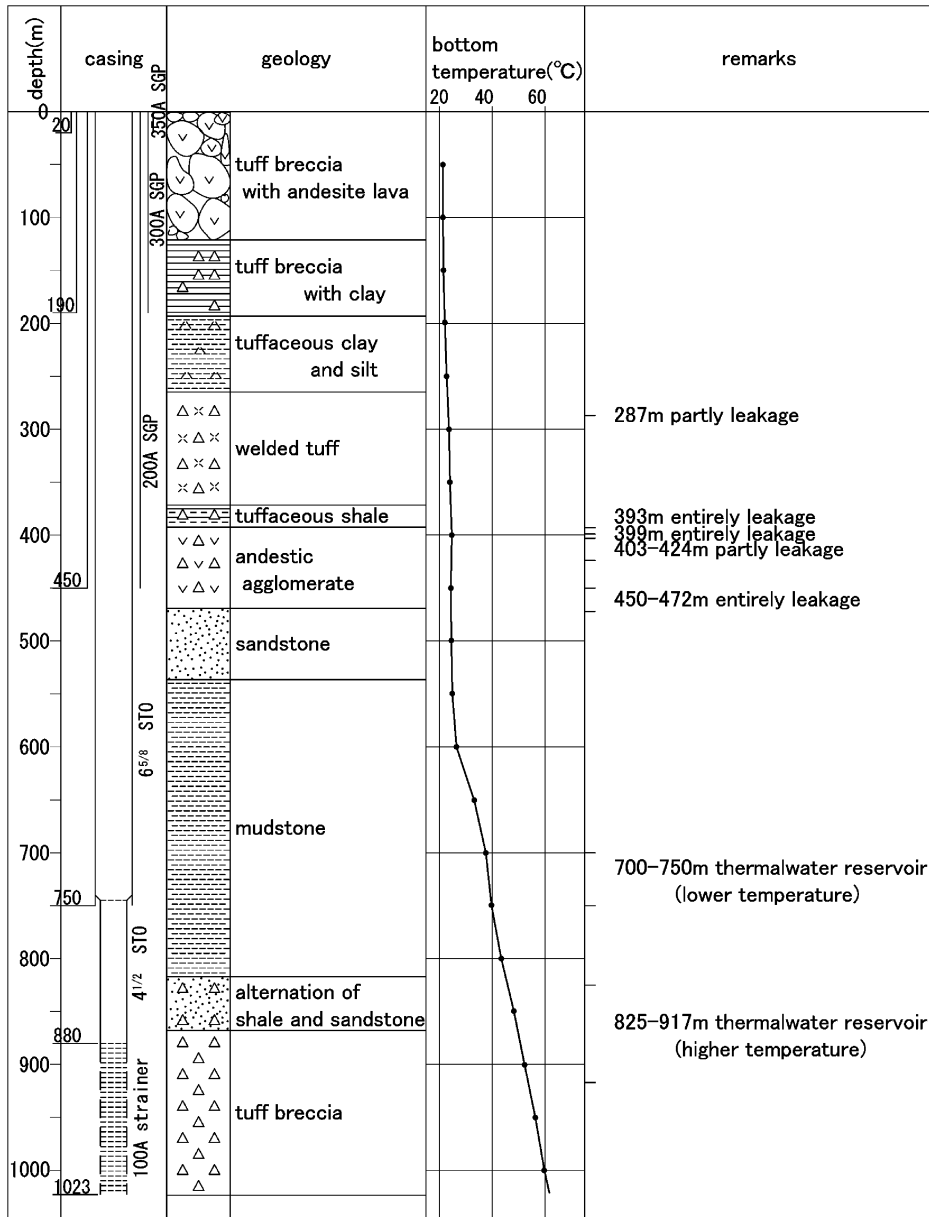


Fig. 7 Columnar Section of "S" Spring Well.

図 7 "S" 温泉井掘削柱状図

を行ったところ、Fig. 8 に示すように電導度のピークの深度は 550 m となり、480 m の深度から流入した海水が塩化ビニール管の管尻（深度 550 m）からの孔井内流入となったとみられた。その流入の影響範囲は深度 500~650 m となっている。

影響範囲以外の深度での低い電導度は、浚渫に際しての工事用泥水や塩化ビニール管挿入に際しての工事用水と本来の温泉水との混合の結果であると考えられる。

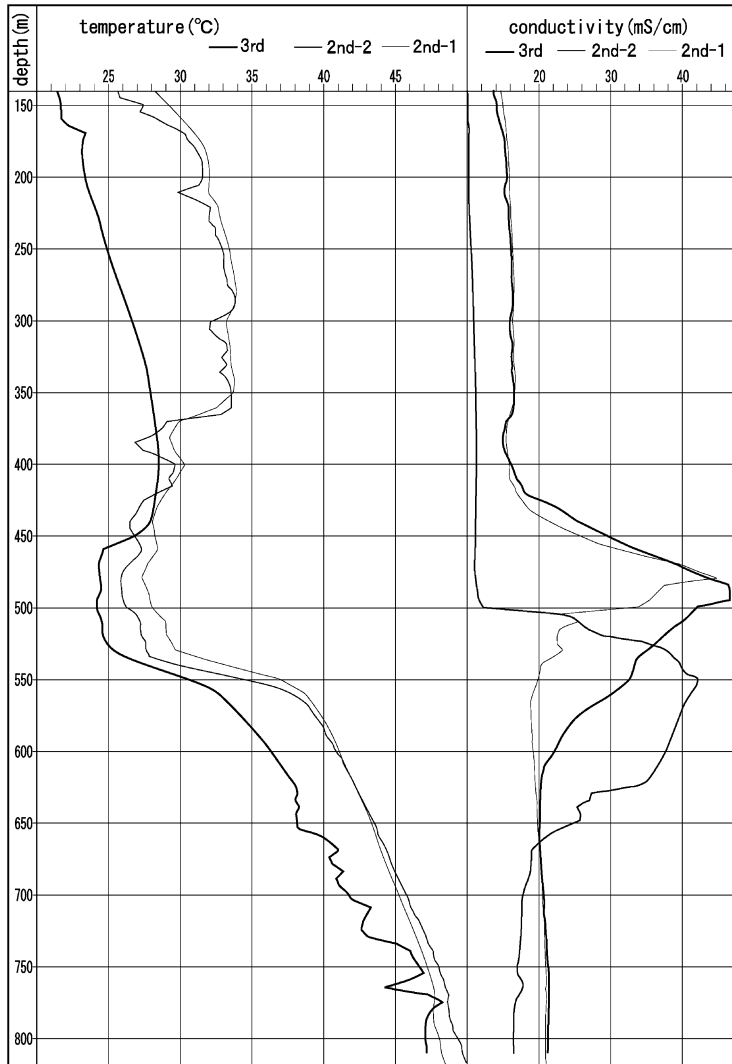


Fig. 8 Logging Chart of "S" Spring Well (140-820 m depth).

図 8 "S" 温泉井の検層図 (140-820 m 深)

4. 考 察

紹介した 2 温泉とも、ケーシング管内の電導度検層および温度検層によって、溶存成分の多い (電導度の高い) 温泉水あるいは海水 (?) のケーシング管内への流入が認められたものであって、その挙動は電導度を主な手掛かりとして捉え易かったといえよう。したがって溶存成分の少ない (電導度の低い) 温泉水や地下水の場合には、あまり有効ではないかもしれない。しかし近年多くなっている深度の深いいわゆる大深度掘削温泉の場合は、例えば松波ほか (2000) にみられるように溶存成分の濃い温泉に遭遇することが多く、このようなケーシング管挿入後や揚湯後の電導度検

層, 温度検層は, ストレーナの有効性の検討やケーシング管の破損位置の検討などに有効であるとみられる.

掘削孔内の物理検層には多くの種類の検層があり, ケーシング管が挿入してあっても, また孔内水がなくても適用出来る検層もある. 掘削孔のそれぞれの状況に応じて適切な検層を選んで実施することによって, 様々な情報が得られるであろう.

今後もいろいろな孔内物理検層を行って, その有用性や限界を明らかにして行きたい.

最後に, 査読者の適切な御助言によって本稿が大いに改善された. 記して謝意を表するものである.

(平成 15 年 9 月 26 日 日本温泉科学会第 56 回大会で発表)

文 献

国立天文台 (1998): 理科年表, 第 71 冊, 丸善, 東京.

佐藤幸二・高屋 正・松枝富士雄 (1999): 温泉井検層による流入温泉水の推定例, 温泉科学, 48 (4).

松波武雄・藤本和徳・鈴木隆広 (2000): 北海道の温泉井と“新規温泉地”について, 北海道立地質研究所報告, 第 71 号.

高橋 裕・綿抜邦彦・久保田昌治・和田 攻・蟻川芳子・内藤幸徳・門馬 晋・平野 喬 編 (1997): 水の百科事典, 丸善, 東京.

渡辺淳夫 (1975): 宮城県の温泉, 渡辺淳夫還暦記念会.

山口久之助 (1963): さく泉の電気検層法, 昭晃堂, 東京.