

# 浅層地下水の循環利用による無散水融雪 —鉄、遊離炭酸、細砂への対応—

宮本重信\*1

建石豊\*2

橋詰善光\*3

茅田幹男\*4

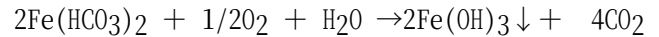
## 1. はじめに

福井平野の多くで、1960年頃までは浅井戸を飲用や雑用水に利用していた。上水道の整備されると融雪以外は未利用になり、そのことで関心ももたれなくなった。身近な環境は里山や里海と同じように持続可能に利用されてこそ保全もされる。鉄分の多い地下水は散水融雪にも嫌われて良質の水を求めて、深さ20～40mから更に深い70～120mの礫層からの揚水に至っている。このように深くなれば井戸設置費が高くなる。未利用となった多層に存在する浅い帯水層地下水の利用であれば注水しても浅くて設置費は安価である。その利用の桎梏は、この浅い帯水層は表1のように水質が悪くて、井戸と熱交換器の目詰まりを招くことである。この水質の悪い地下水を融雪や空調に熱利用し、そこでのトラブルを安価に実用的に対処できたので紹介する。

## 2. 鉄をイオン状態に保持する酸素の遮断

福井での地下水のEh(酸化還元電位)を調べ、それを既存の地下水水質のEh-pHダイアグラムにドットで示した(図1)。図1から、福井市内では鉄が56mg/ℓ(10E-3mol/ℓ)であっても、FeはFe<sup>2+</sup>として帯水層内に存在し、これが空気に触れてpHが約7以上になればFe(OH)<sub>3</sub>となることが分かる。この地下水は大気に

触れると水中の遊離炭酸が炭酸ガスとなって大気中に放出され水のpHが上がり、空気中の酸素が水中に溶解する。これらの水を大気に開放された容器に入れておくと褐色に変わり、褐色の沈殿物が生じる。これは、地下水中の2価の鉄イオンFe<sup>2+</sup>が酸化され、水酸化第二鉄Fe(OH)<sub>3</sub>が析出することによる。



鉄イオンFe<sup>2+</sup>は大気の酸素と触れて水酸化第二鉄Fe(OH)<sub>3</sub>となって析出するから、地下水を酸素(大気)と触れないようにすればイオン状態が保持されて目詰まりにならない。また、鉄バクテリアの活性化も生じにくい<sup>1)</sup>。更に、40mgSiO<sub>2</sub>/ℓ以上のケイ酸を含んだ地下水であっても酸素に触れなければ「白っぽいコロイド状の濁り」の浮遊するシリカ鉄コロイドは形成されない<sup>2)</sup>。その上、酸素の遮断は管路内の金属の防食にもつながる。

マンガンも多いが、マンガンはpHが10前後になって酸化が行われるので、Mn<sup>2+</sup>を含む地下水を汲み上げて気曝してもpHは8.6なので、マンガンは酸化されずイオン状のままで存在し<sup>4)</sup>、目詰まり等の原因にはならない。

井戸水面からの酸素供給はわずかで、鉄の酸化で酸素はなくなり、井戸深部では酸欠を保持している。しかし、

表1 福井平野の地下水水質

|             | 単位   | 福井市<br>城東<br>深さ<br>7m/12m | 坂井<br>中学校<br>深さ<br>15m | 坂井中<br>学校深<br>さ35m | 福井市<br>河増町<br>深さ6m | 福井市<br>石盛町<br>深さ<br>7.5m | 福井市<br>石盛町<br>深さ<br>22m |                                                           |            |       |
|-------------|------|---------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|------------|-------|
| pH          | —    | 6.7                       | 7                      | 7.2                |                    | 6.4                      | 6.9                     | 冷凍<br>空調<br>機器<br>用冷<br>却水<br>基準<br>(冷<br>却水<br>系一<br>過式) | 基準<br>項目   | 6～8   |
| 酸消費量(pH4.8) | mg/L | 153                       | 224                    | 95.4               |                    | 109                      | 219                     |                                                           |            | 50以下  |
| 全硬度         | mg/L | 94                        | 193                    | 72.6               |                    | 105                      | 204                     |                                                           |            | 70以下  |
| カルシウム硬度     | mg/L | 56                        | 142                    | 40.2               |                    | 73.1                     | 131                     |                                                           |            | 50以下  |
| イオン状シリカ     | mg/L | 38                        | 47                     | 24                 |                    | 52                       | 49                      |                                                           |            | 30以下  |
| 鉄           | mg/L | 74/2.7                    | 6.7                    | 1                  | 52                 | 31                       | 0.48                    |                                                           | 参考<br>項目   | 1.0以下 |
| アンモニウムイオン   | mg/L | 2.1                       | 5.1                    | 0.3                |                    | 3.6                      | 0.1未満                   |                                                           |            | 1.0以下 |
| 残留塩素        | mg/L | 0.01未満                    | 0.01未満                 | 0.01未満             |                    | 0.05未満                   | 0.05未満                  |                                                           |            | 0.3以下 |
| 遊離炭酸        | mg/L | 85.3                      | 24.3                   | 13.1               | 144                | 155                      | 53.5                    |                                                           |            | 4以下   |
| 有機体炭素       | mg/L | 2.4                       | 17                     | 2.9                |                    | 11                       | 1.5                     |                                                           | 水道水<br>質基準 | 5以下   |
| 濁度          | 度    | 170                       | 39                     | 8.1                |                    | 84                       | 3.4                     |                                                           |            | 2以下   |
| ランゲリア指数     | -    | -1.3                      | 0.5                    | -1                 |                    | -1.7                     | -0.6                    |                                                           |            |       |

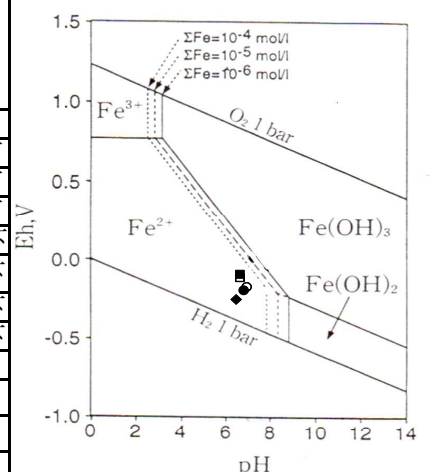


図1 福井の地下水 Eh-pHダイアグラム

\*1 福井大学

\*2(株)サンケン試験コンサルタント

\*3三谷セキサン(株)

\*4福日機電(株)

温水が井戸内に注水されると温度成層が崩れて対流が生じ、井戸内に酸素が供給されと考えられる。

井戸水面からの酸素浸透を遮断するため、井戸揚水管に水膨張ゴムを巻いてケーシングとの間隙を狭めて水没させた。この材料費はゴムパッカーに比べ安価で実用的で、従来揚水管が水面で赤黒くなったのが減じた。

表1の福井市河増町深さ6mの井戸水（鉄分52PPM）を地下水循環させる途中に、分解できるプレート式熱交換器を設置した。水膨張ゴムを揚水（注水）管を巻いて井戸内からの酸素の浸透を抑制した。管路は呼び径20Aの塩化ビニル管で、その延長は約10mと短い。約12～16ℓ/分を連続282日通過させた時点での熱交換器の内部は酸化鉄などの発生は全く見られず新品同様であった。水膨張ゴムを巻かなかった当初の1年後の自然水位から約3mまでの揚水管は黒い酸化鉄と思われる物質の付着で変色していた。また、後述する酸素遮断がされていない地下水循環融雪実験装置では、井戸内に挿入した温度センサには帯水層の深さまで黒い付着が見られて引き上げると悪臭が漂った。

水膨張ゴム利用パッカーで井戸ケーシング内の上下のを完全に遮断すると揚水井戸の水圧が下がるなどが気になりでもある。そこで、水浸透のない保温カバーを揚水管に水位変化の上下を含む広い上下の区間にわたり巻き付けた。この方法であれば、保温カバーとケーシング、揚水管とはわずかな隙間が長く続くので、水の温度変化に伴う対流は生じなくて、水面の酸素の下面浸透は抑制される。更に、水面の面積が大幅に削減されて酸素浸透が抑制される。表1の福井市城東（福井土木事務所）では、鉄分が74PPMの地下水を冷房に用いた。注水と揚水の井戸の揚水管には前述の酸素浸透抑制の保温チューブを巻いた。ここでは、分解洗浄できないプレート式熱交換器内蔵の水熱源ヒートポンプを取り付けた。そのヒートポンプの流入口に、別に分解できるプレート式熱交換器を設置した。流量17ℓ/分で冷房の1シーズン経過時の内部は、目づまりとなるようなことはないが、わずかにねずみ色になった。スタート時、もしくは25Aの塩化ビニル管長さ約30mの管路からの空気の浸透が地下水の鉄の酸化を招きわずかな着色に至ったと推測される。

表1の坂井市中学校では、深井戸（鉄分1PPM）の水質の良い地下水を先に揚水に使った。そして、井戸は揚水管と注水管を断熱材で覆って、配管はアルミ複合三



写真1 融雪水井戸流入後の酸化鉄付着の熱交換器

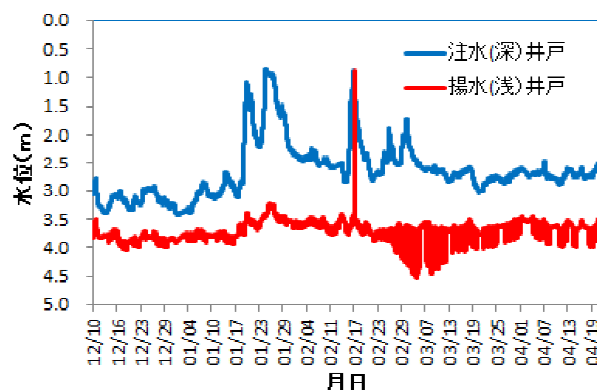


図2 融雪水井戸流入前後の地下水水位の変動

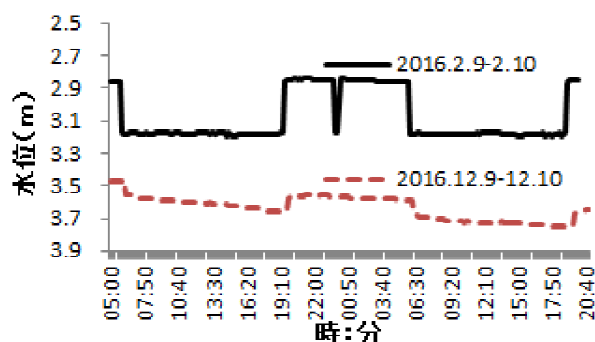


図3 揚水井戸の地下水水位の変動

層ポリエチレン管呼び径20Aを用いて、管路内への酸素浸透を遮断した。

その上で、分解洗浄できないプレート式熱交換器内蔵の家庭用水熱源ヒートポンプを取り付けて実験した。半年後の暖房では、先に冷房で注水した水を揚水するので、それが続く範囲では鉄分が基準の6.7倍の浅い帯水層の地下水は揚水されない。ここでは3年運転経過したが流量は安定し目づまりの兆候は見られない。

鉄分が2ppmの地下水を大気開放でペットボトルに10日もすると底に茶色の異物が生じた。2個のガラス瓶に鉄分31PPMの地下水を入れ1個だけ流動パラフィンを浮かべて比較した。数日後流動パラフィンを浮かべたものは蒸発による水位低下は見られなかったがいずれのビン底にも茶色の異物が生じた。



福井市石盛町の保育園で地下水を揚水し(水質は表1)、ヒートポンプ床暖房での熱利用後の地下水は注水井戸に戻す実証施設を行った。2月中旬にサイトガラスに突然赤黒色の付着が生じて、熱交換器も写真1のようになった。これは駐車場の積雪が溶けた水が流れて井戸ピット内は満水になって井戸ケーシングの上面から井戸の中に進入した。更に、この水は揚水管を覆った断熱材とケーシングの隙間から下にと流れた。図2は、揚水井戸と注水井戸の水位の変化である。2月中旬、浅い井戸水位が急に上昇している。その数日後から、揚水時の水位低下が大きくなっていることから井戸スクリーンに鉄バクテリアなどによる目詰まりが生じたと推測される。ピット内に見栄えが良いように入れた砂利を除去し進入した水を貯水できるようにしたことで、その後はこのようなトラブルは生じていない。



写真2 注水井戸での気泡の浮上

### 3. 炭酸ガス気泡による注水井目づまりと浮上自動排出

表1の福井市河増町で揚水量20ℓ/分の運転を行ったが、運転1ヶ月後に、注水井戸のみ水位が上昇し、地下水が地表に溢れ始めた。そこで、注水井戸から揚水し、それを排水口に布を当てて排水した。布には極わずかな砂しか見られなかった。その後元の配管経路に戻すと注水井戸の水位上昇は最初の状態に戻り、目づまりは解消されたようである。運転再開した後の再度の目詰まり(水位上昇)では、注水井戸からの揚水をビニル袋で覆い、袋内部の炭酸ガス濃度を計測した。炭酸ガス濃度は3000PPMに至った。既往の空気での気泡目づまりの研究<sup>3)</sup>から目づまりの原因は、河川水の注水での酸素とは異なり<sup>4)</sup>、炭酸ガス気泡によると推定された。この地下水の遊離炭酸は144PPMで、観察すると注水井戸から気泡が湧き出ている(写真2)。こうした現象と前述の既往研究から、地下水が自吸式ポンプで減圧揚水されるので水中の遊離炭酸が炭酸ガス気泡となって、注水井戸のスクリーンの目を詰め、注水井戸での水位上昇となったと推定した。注水井戸から揚水を行うと、スクリーンに付着した気泡は排出され、目づまりはなくなった。また、注水井戸内で直径の大きな気泡は浮力で浮き上がったと解釈される。

この対策としての自吸式ポンプから水中ポンプへの変更は、揚水と注水でポンプが2台になることと揚水管内径を大きくする必要から制約がある。定期的な注水井戸からの揚水とその排水は有効であるが、ここではこの気泡の浮上をヒントにしてより簡易な方法を行った。まず、より良質で同じように溶存酸素がない地下水を先に揚水して、次は注水と揚水を切り替えて、注水した良質の地下水が揚水循環となるようにする。



写真3 気泡抜きヒートポンプ

写真3で、自吸式ポンプ通過前まで減圧された地下水はポンプ直後に加圧されて高圧で膨張逃しタンク内に、タンクの底から流れる。タンク内で流速が遅くなれば、炭酸ガス気泡は浮上する。満水にしたタンクの水位は35mL/日の速度で低下した。気泡の蓄積が運転の支障にならないように自動空気抜き弁を取り付けた。別の同様の自動空気抜き弁なしでの装置は、半年の運転でタンク内が気泡で満たされて地下水循環ができなくなった。また、タンク内がポンプ停止で負圧になっても弁が大気開放されて管路の地下水が落水したり、空気(酸素)が入らないように空気抜き弁は逆止弁付きとした。

福井市内で、深い帯水層の地下水を夏の日中に揚水し、融雪面内の放熱管に流して約30℃の温水で浅い帯水層に戻し、冬に約2℃高温となった地下水を融雪面の放熱管に流す融雪実験を2011年8月から実施した。この井戸では、他との比較のために、揚水管を断熱材で覆うことや水膨張ゴムで酸素を遮断することは行っていない。また、管路途中にタンクを設けた気泡排出も行っていない。循環流量12ℓ/分は運転中一定であった。このサイトは表1の福井市河増町に近く、鉄分と遊離炭酸が多い。このサイトでは、気圧測定による水位を得た。なお、目詰まりの問題を考えているので、以下の計測水位では大気圧の変動による校正は行わずに、201

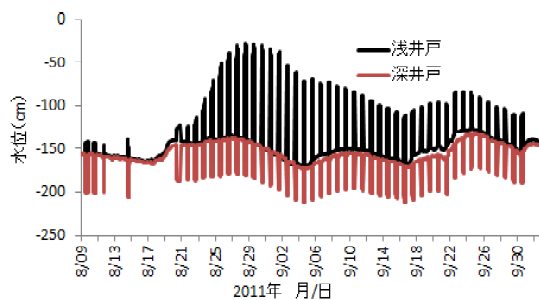


図3 浅(注水)井戸と深(揚水)井戸の水位変化

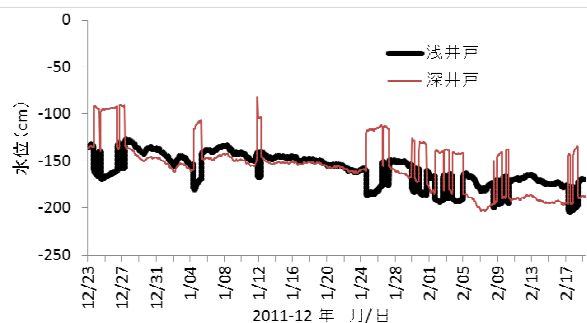


図4 浅(揚水)井戸と深(注水)井戸の水位変化

3年2月9日での運転しない時の地表面からの水位は上層、下層の各々1.8mと2.2mであったが、以下の図では同じ水位に見やすくした。

2011年夏の地下水水位を図3に示す。揚水井戸の水位は揚水によって約50cm弱低下するが、それには変動がない。しかし、浅(注水)井戸の注水時の水位上昇は、スタート直後の8月10日に約12cmだったものが、10日間ほどの運転で40cmに、その後も急激な上昇で8月30日には約1mにもなっている。その後9月20日頃までに約40cmにまで減り、その状態で9月30日運転を終了した。12月24日からの融雪の図4では、今度は揚水井戸となった浅い井戸の水位低下は約25cmに回復している。その後も安定している。注水側になった深い井戸は、前年冬の揚水とほぼ同じ40cmが注水時の変化となっている。翌年2012年の7月からの蓄熱運転では、浅い(注水)井戸は注水時約40cmの水位上昇で、その後は次第に上昇し9月には約75cmになった。融雪時には、前年度と同じように、揚水井戸になった浅い井戸は約40cmの水位変化にまで回復した。

以上の現象は、次のように解釈される。夏には炭酸ガス気泡によって注水井戸に目詰まりが生じた。それが冬までに無くなったか、揚水によって排出された。それで冬の揚水時には目詰まりにはならなかった。夏の注水で目詰まりが顕著なのは、二酸化炭素の溶解度が水温が高くなると減少することによるのかも知れない。



写真4金網で形状保持した布袋

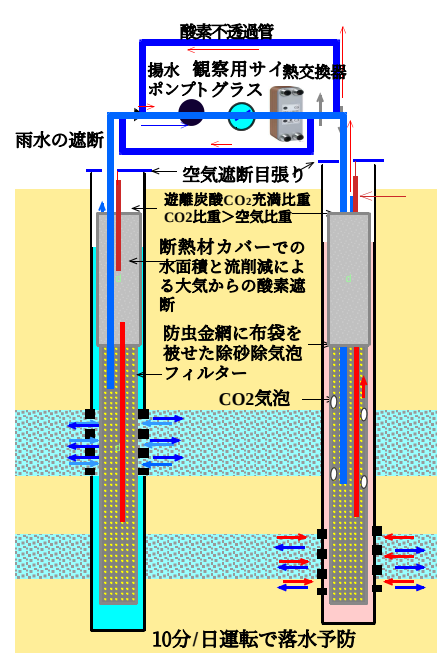


図5 酸素遮断カバーと除砂布袋

#### 4. 井戸内長尺布袋による砂目づまりとCO2気泡の除去

自吸式ポンプの直前に90メッシュスクリーンで除砂したが、2年で2回もポンプの軸に異常が生じた。浅い帯水層はウルム氷期に形成された礫層でない砂層である。それでも直径10cmほどのケーシングでも100ℓ/分以上揚水しても帯水層まで水位が低下することはない。その井戸では、20ℓ/分の揚水が砂がワンタッチ取り替えの150メッシュU型スクリーンを10分以内に目詰まりさせた。エアリフトによる井戸内洗浄が十分されていないことや塩化ビニル管にスリットの井戸で、充填砂利も十分でないことなどが原因だと考えられる。

その対応として、虫遮断の窓金網で円筒にして形状を保持させ、それを細長く布袋で覆い、これで井戸の注水管を覆った(写真4)。この布袋はU型スクリーンの濾過面積の3桁で目詰まりは抑制され、布袋スクリーンで進入が阻まれた砂は井戸の底に落下するはずで、持続性もあると思われる。材料費は2000円程であった。

その布袋スクリーンでの注水井戸の状況を地上に透明塩ビ管を井戸ケーシングに見立てて可視化した(写真5)。写真6に示すように、布袋スクリーンには、微小な気泡が付着し、これが次々と後から来る気泡と合体して大きくなり浮上していた。遊離炭酸が自吸式ポンプで気泡化し、スクリーンで合体集合し浮上する。二酸化炭素は比重が空気より重いから、この塩ビ管上部の気体の二酸化炭素濃度は3000ppmになっていた。遊離炭酸の気泡は、注水管の中にも見られたが、注水管





写真5 注水井戸の地上可視化



写真6 注水井戸内布袋への  
気泡付着と集合での浮上



写真7 監視サイトガラス

の外でも増えているように見られた。気泡は自吸式ポンプ経過直後に全てがでけるのではなく、時間遅れの注水管から出た後にも、目視できるほど大きくなると観察された。布袋スクリーン通過後は気泡は見られなかった。このことから、この布袋スクリーンは前述した二酸化炭素気泡による井戸スクリーンの目づまり抑制に効果的なことが分かる。更に、二酸化炭素の気泡は大気より比重が大きいから、井戸のケーシング上部に貯まることで、注水井戸では酸素の浸透を遮断する。

この布袋スクリーンで夏と冬実験運転したが、目づまりはなく、支障なく運転できた。布袋を地上に引き上げたが、砂の付着は見られなかった。またこの従来サイトでの塩ビ揚水管は水面から下面に赤黒色の酸化鉄の付着が見られた。しかし井戸上面をガムテープで覆うことで浮上した二酸化炭素で井戸水面上面を充填できそれも見られなかった。揚水井戸と注水井戸の布袋スクリーンを地上に引き上げ観察したが、砂の付着は見られなかった。揚水管のケーシング底に砂の沈下があったかは確認していない。

なお、このように二酸化炭素の気泡が大気に出ることでの影響はそれほど大きくない。例えば散水融雪で、遊離炭酸100ppmの地下水1m<sup>3</sup>/分の100h/年が大気に流れても二酸化炭素排出量は420kg/y (6000m<sup>3</sup>/y\*100g/m<sup>3</sup>

\*44(CO<sub>2</sub>)/62(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>))である。その揚水ポンプの消費電力を50kWと見積もれば、二酸化炭素排出量は3000kg/y (0.6kg-CO<sub>2</sub>/kWh \*50kW\*100h/y)で、遊離炭酸を含んだ地下水を散水しても二酸化炭素排出量は揚水ポンプに比べると1桁小さい。

しかし、布袋スクリーンからの二酸化炭素の浮上が大きくて、揚水・注水が繰り返されると、地下水のpHが高くなる。pHが高くなれば図1により鉄イオンの析出を招く。この点から注水井戸での二酸化炭素の浮上は問題となる。

自吸式ポンプ揚水直後の微小な気泡が時間経過で大きくなるようで、負圧になり易いためか、細かな気泡が生じ時間遅れで布フィルターに付着する。時間遅れがあれば流速を遅くしたタンクで気泡は浮上除去できているか疑問が残る。

注水井戸への入口位置に写真7のように、サイトガラスを設け、鉄の酸化などの目づまりや点検監視とした。ガラス内に、気泡ができてガラスの上に浮上する。これが繰り返されてもガラスの水位は下降せずに、流れは継続する。気泡はその後方に流れているようには見えない。ガラス上部の気泡は、再び地下水の中に、遊離炭酸として溶けているようにも見られる。

なお、温泉水でもエアリフトポンプで揚水すると気泡分離脱出するので、pHが高くなり、炭酸水素イオンが炭酸イオンになり炭酸カルシウムが析出する。そこでエアリフトポンプを水中ポンプに替える炭酸ガス分圧が0.0001atmが0.18atmに、pHは8.1が6.5になり、炭酸カルシウムの析出が抑制されるとある<sup>5)</sup>。同様に、負圧となりやすい自吸式ポンプを水中ポンプなどにすると遊離炭酸のガス化は抑制される可能性がある。

さて揚水の帯水層からの砂の流出が進行すれば砂の流れ出す帯水層の箇所は井戸ケーシング付近から奥へ奥へと移動し半径が増えるから、地下水流速は減じ砂の流出量も減るだろう。にも拘わらず、限界揚水量を上回ると井戸周辺の流速が層流から乱流になり粒子移動が大きくなり目詰まりが生じるとされている。日本では段階揚水試験時の揚水量と水位変化を両対数グラフにプロットした際の屈曲点（急変点）を乱流から層流になる限界揚水量とされている。これを間違いだとする報告があった<sup>6) 7)</sup>。水位降下量-流量曲線は2次曲線で近似され不連続な勾配変化点は生じない。これを両対数表示にすると数学的に最大曲率点が生じるが、その最大曲率点は物理的に揚水量の限界を表すものとは無関係であるとの報告である。ポンプ吸い込みや帯水層の直上まで水位降下させても一般に良いとしている。

仮に、砂などでの目詰まりで限界揚水量を決めるならば、直接砂量を計測して検証すべきである。筆者らはエアリフトで揚水した地下水の砂量を布で濾して計量した。砂量が急変する変化点は見られなかった。

なお、注水井戸では、懸濁物質や砂がスクリーンの流れの速い箇所を経て流れの弱まった箇所で堆積、目詰まりに至るとされている<sup>8)</sup>。それならば揚水後に懸濁物質や砂などを前掲の布袋などで除去すればよい。

## 5. 標準貫入試験を兼ねた帯水層の水量調査

設計時に揚水可能量の見積もりが必要になる。ビルなどでは地盤の支持力や基礎杭の調査で標準貫入試験を多くは第1礫層の深さまで行う。この標準貫入試験を兼ねてやや太いケーシングを設置し、その孔内に井戸ケーシングを挿入し、周囲に砂利を充填することで帯水層にも依るが前述した限界揚水でなければ福井平野では50ℓ/分の揚水は可能となるだろう。この井戸では下層と上層の帯水層の中間に遮水ペレットを落下させて2層井戸を1孔で作った。なお、地下水をエアリフトポンプで揚水し砂を除去する井戸の仕上げで、その揚水を水中の布袋で濾すと二酸化炭素気泡が大量に出てくることが観察される。この観察とペットボトル採水の経過観察で水質の簡易判定となる。

## 6. まとめ

この地下水が溶存酸素ゼロなので、酸素の遮断は管路内の金属腐食にも好ましい。地下水は鉄分と遊離炭酸が多いと、そのままでは井戸や熱交換器の目づまりを招く。鉄分については、地下水を大気から遮断することでイオン状態に保持できた。井戸内に雪解け水が流れると、数日後に井戸スクリーンも目詰まりし、透明だったサイトガラスと熱交換器も赤黒い付着となった。このことから酸素遮断の有用性が示された。

遊離炭酸を多く含む地下水は負圧になり易い自吸式ポンプの使用もあっても炭酸ガス気泡を作り、これが注水井戸のスクリーンを目詰まりさせた。流速を遅くしたタンク上面には炭酸ガス気泡が浮上した。この炭酸ガスは逆止め弁付き空気抜き弁で自動排出し、気泡だまりによる流量ロックをなくした。

U型フィルターを10分間で砂の目詰まりとした地下水で、井戸ケーシング内に細長い布袋フィルターで揚水管を覆うと目詰まりなく運転できた。非常に安価に除砂面積を桁違いに増やせて、砂は底に沈下し、また次第に砂

も減ることから持続性を有すると思われる。

このようにしてヒートポンプでの冷暖房を遊離炭酸と鉄分を多く含む地下水を揚水、注水の循環運転を2～4年継続することができた。なお、冬から夏の間に落水すると自吸式ポンプでも自吸できないことが生じた。これは毎日10分間ポンプをタイマー稼働させ解決できた。

課題として一連の実証施設はいずれも20ℓ/分までの揚水注水で、帯水層下面や地上あふれまでを限界流量とすると10倍以上の流量を循環できることになる。そのことができれば、全くの未利用で、かつ浅い井戸で従来の井戸コストを大幅に安価にできる。浅いことで、ビル工事で現場にある杭打ち機でセメントミルクを椰子由来のゲルに置き換えての大口径の孔内掘削での井戸製作も実証しており更にコストが削減できる<sup>9)</sup>。利用面でも、冷暖房と無散水融雪に兼用して、また災害での非常用雑用水としての利用できる。

## 謝辞

本研究は環境省地球温暖化対策技術開発事業、NEDO再生可能エネルギー熱利用技術開発の一部として実施されている。福井県、坂井市、(株)コロナ等にはご協力を頂いた。東京大学大岡龍三教授と東邦地水(株)、ゼネラルヒートポンプ工業(株)には助言を頂いた。記して謝辞とする。

## 文献

- 1) 坂井宏行：バイオフィルム形成によるトンネル排水路阻害の改善, RRR(鉄道総合技術研究所), 2009.8
- 2) 半谷高久, 坂井雄, 小倉紀雄：水質調査ガイドブック, pp.129-131, 2009.4
- 3) 長瀬和雄：秦野盆地の地下水管理, 日本水門科学会誌, 第40号, 第3号, pp.109-120. 2010
- 4) 福尾義昭, 石川昌司：地下水の人工涵養に関する研究(I), 奈良教育大学紀要, 第29巻, 2号, 1980
- 5) 森一司, 阿部栄一, 飯塚康太：段階揚水試験におけるs-Q曲線に関する検討事例, 応用地質, 第55巻, 第4号, 177-184頁, 2014
- 6) 東北農政局農村計画部資源課：適正揚水量の評価手法について 地下水調査 開発調査とりまとめ東北地区報告書, 東北地区報告書, 2008
- 7) 滝沢智：地下熱利用の技術—8. 地下熱利用のための水質対策. 地下水学会誌, 第53巻第4号401-409, 2011
- 8) やませみ：温泉の科学5-5-5 [http://www.asahi-net.or.jp/~ue3t-cb/bbs/special/science\\_of\\_hotspring/sien](http://www.asahi-net.or.jp/~ue3t-cb/bbs/special/science_of_hotspring/sien)
- 9) 福井大学・三谷セキサン(株)・岡山大学・北海道大学・福井県：平成24年度地球温暖化対策技術開発・実証研究事業委託業務報告書「杭打ち機を用いた井戸熱交換杭の開発と地中熱利用等への適用」2013.2