

夏の暑さを冬まで保存

～帯水層を利用した地中蓄熱の可能性を探る～

The Way to Preserve Hot Summer Energy until Winter in the Ground.

畠中 真一 *1
Shinichi HATAKENAKA

勝俣 盛 *1
Mori KATSUMATA

甲木 里沙 *2
Risa KATSUKI

越後 滋 *3
Shigeru ECHIGO

温暖化防止をはじめとして、よりよい環境を未来へ継承するために、今のうちから再生可能エネルギーへの切り替えを進めてゆくことが切望されている。しかしながら、再生可能エネルギーは、化石燃料等に比べてエネルギー密度が低いため利用にあたっては、大きな面積や大きな空間といった、大きな設備が必要となる課題を抱えている。このような課題に対し、筆者らは地中熱利用や廃熱回収などの設備を取り扱う中で、池や井戸水、土壌や地盤といった自然環境をそのまま蓄熱体として有効に利用できないかを模索してきた。この度、信州大学の藤縄教授のご提案により、帯水層を利用した地中蓄熱の可能性を検討する機会を得たことから、夏に排出される温熱を地中に埋蔵することを想定した実験を行った。本文では、温熱源が地中でどのように変動するのかを時系列的に観測した結果を示したほか、地下水の領域で発生した温熱塊の散逸現象に関して、原因と考えられる地下水の挙動を観測したので、併せて報告する。

キーワード：蓄熱，太陽熱，再生可能エネルギー，帯水層，地中熱

1. 目的

本検討において帯水層蓄熱が想定しているシステムとしては、帯水層を利用した季節間蓄熱であり、主に夏期の温熱源を利用した暖房の効率化を目指している。具体的には以下の2種類である。

①地中の年間熱収支がマイナスとなるような暖房主体の寒冷地において、夏期の太陽熱を集熱し温水として地中に注入し、年間の熱収支バランスを補正する。

②夏期の太陽熱温水器等で発生する余剰温熱を温水として地中に注入し蓄熱することで、冬期の地中熱暖房の効率を改善する。

このような改善を想定した蓄熱において、地中に温水を注入した場合の蓄熱効果が未解明であることから、地中に温度計を設置し、数日～数週間にわたり温水を注入した場合の地中温度の変化を把握することを目的に実験環境を構築し測定を行った。

2. 試験概要

試験の実施場所は、栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台の川田工業株式会社の敷地内であり、過去のボーリング調査から、図1のように深度20mまでのローム層の下に厚さ8m程度の砂礫層があり、地下水の存在が確認されている。

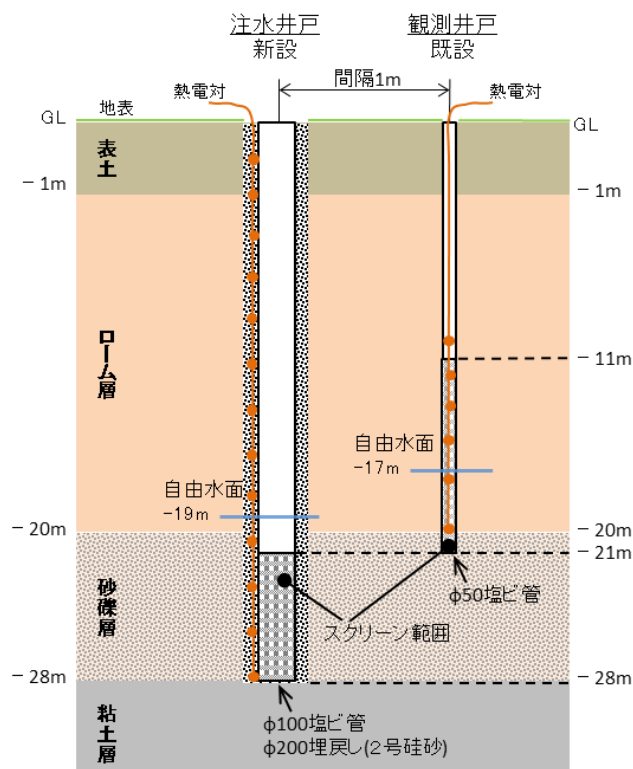


図1 注水井戸と観測井戸

*1 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 主幹
*2 川田テクノロジーズ㈱技術研究所

*3 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 所長

地下水(自由水面)の,年間を通じた変動はGL-7~17m程度と比較的大きいものの,今回の実験を実施した冬季(2~3月)はほぼ,最低水位を維持していた。

ここへ注水井戸を新たに掘削し,注水井戸に温水を定期的に注水した場合の地中温度を観察した。以下に井戸の構成と試験方法について詳述する。

(1) 井戸配置

今回の試験では,帯水層への蓄熱(Aquifer Thermal Energy Storage : ATEs)を想定した検討を行うため,深度28mの粘土層が井戸の底になるように掘削し,注水井戸として使用した。注水井戸の掘削手順は,図1(左)に示すように直径200mmの掘削孔に直径100mmの塩化ビニル管(VP100)を挿入して,周辺の隙間を2号珪砂にて埋め戻す手順により設置した。通水のためのスクリーンは,ローム層からの微粒子の侵入を避けるためローム層よりやや深く,深度21~28mの範囲に配置した。スクリーン形状は図2のような直径9mm程度の孔を中心間隔が約30mmとなるように千鳥に穿孔したVP管の表面を樹脂ネットで覆ってある。

注入した温熱が水平方向に拡散する状況を把握する参考となるよう,注水井戸は既設の観測井戸から1mの距離となるように掘削した。観測井戸は,図1(右)のように深さ21mの掘削孔に,井戸管として塩化ビニル管(VP50)が挿入されており,深度11m以深がスクリーン範囲である。スクリーン部分は注水井戸と同様に穿孔したVP管にネットをかぶせた構造であるが,スクリーン範囲がローム層に位置し,ロームの微粒子が侵入し底部1m程度は沈殿物の蓄積が予想されるため,水位測定には水圧型の水圧計を深度20mに設置して測定を行っている。なお,観測井戸は2010年に施工されたものである。



図2 スクリーン加工

表1 測定機器の配置

測定項目	位置	
地中温度	注水井戸	VP管の外周 30点 (0~5m)は0.5m間隔 (5~20m)は1.0m間隔 (20~28m)は2.0m間隔
	観測井戸	VP管の内部 7点 (8~20m)に2.0m間隔
地下水位	注水井戸(水位計の深度は27m) 観測井戸(水位計の深度は20m)	
気温	外気温, 計測小屋室温	
水温	保温タンク内水温	

(2) 機器の構成

試験に使用した主な機器の構成を図3に示す。地中へ注入する温水の生成にあたり,ベース熱源としては,同試験サイトが有する太陽熱集熱パネルを使用する。太陽熱で昇温された温水は300Lの集熱タンクに蓄えられ,この中から地中注水用に100Lを保温タンクに移しヒータにて温度調節する。50℃に保温された温水を,定期的に地中へ注水する際には,タイマーコントロールにより

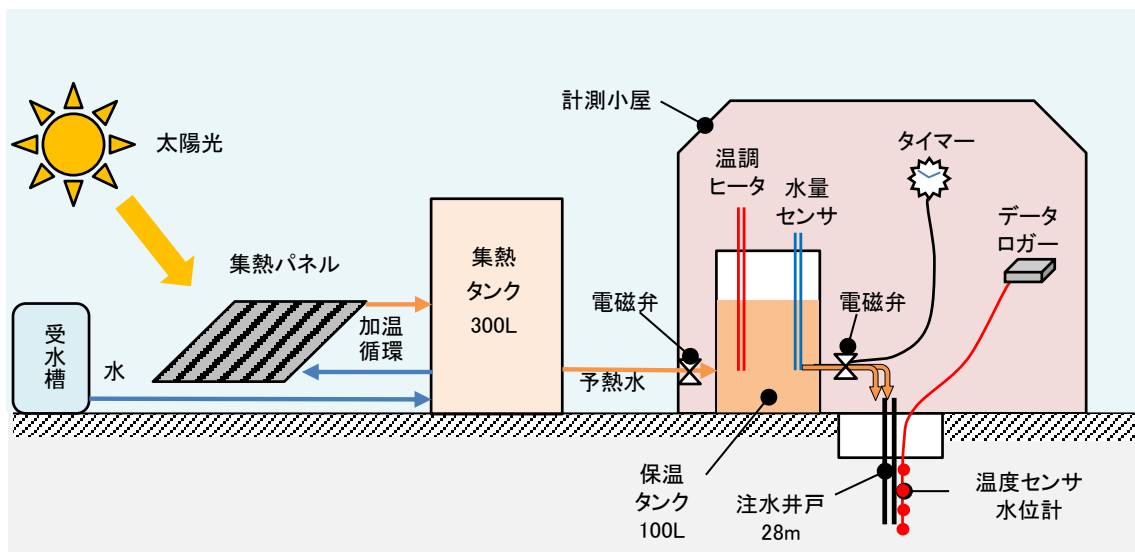


図3 実験システムの構成

注水弁を開き、タンクからの自由落水により所定の水量を放水した後、注水弁を閉じ、予熱水を給水するための弁を開くという順序にて行い、井戸への注水温度が変化しないよう制御した。

観測では、表 1 に示す測定器を配置し、注水による地中の温度変化や、環境温度の変化、注入井戸の水位変化などをデータロガーに記録した。

(3) 注水サイクルと試験ケース

温水を注入するにあたっては、入熱量を把握するために温度と注水量を正確に把握する必要があるが、連続的に注水する方法では温度応答性や流量自体が少ないことによる測定誤差の発生が懸念された。このため、保温タンクに蓄えた一定量の水を一定温度に調節し、決められた時間間隔で注水することで、入熱量をより正確に把握できることから、本試験では、保温タンクを仲介した断続注水方式を採用した。なお、試験時期が水温の低い冬季であることや曇天による太陽光の採熱不足などを勘案し、注水サイクルの間隔を 4 時間に設定した。表 2 に一日の注水スケジュールを示す。

注水井戸の埋戻し部分を流下する温水がどのような挙動を示し、周辺の温度に影響を及ぼすのかについても検証するため、試験ケースは図 4 に示すように①地表注水と②井戸内注水の 2 種類とした。①の注水井戸の埋戻し部（2号珪砂）に注水する場合には、井戸管(VP管)が深度 21m までは無孔部分であることから、温水は井戸管内部へは流入せず、埋戻し砂と周辺土壌へ温度影響を与えながら流下するものと想像される。

一方②の井戸内注水では、断熱材を巻いた注水管で深度 15m まで導水してから地下水面へ放水するため、温水は井戸内の地下水と混合された後、深度 21m 以深のスクリーン部分から周辺土壌へと温水が浸透するものと考えられる。それぞれのケースについて、17 日間、31 日間にわたり注水を行った。

表 2 注水スケジュール

時刻	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00	22:00
注水(100L/回)	●	●	●	●	●	●
保温タンクへ給水	●	●	●	●	●	●
加温・保温(50℃)	●—	●—	●—	●—	●—	●—
間隔(6回/日)	4時間	4時間	4時間	4時間	4時間	4時間

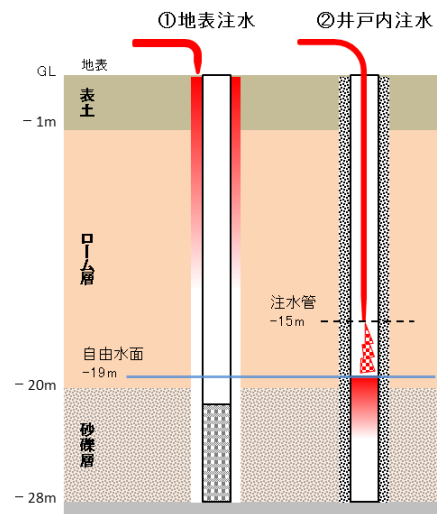


図 4 2種類の注水方法

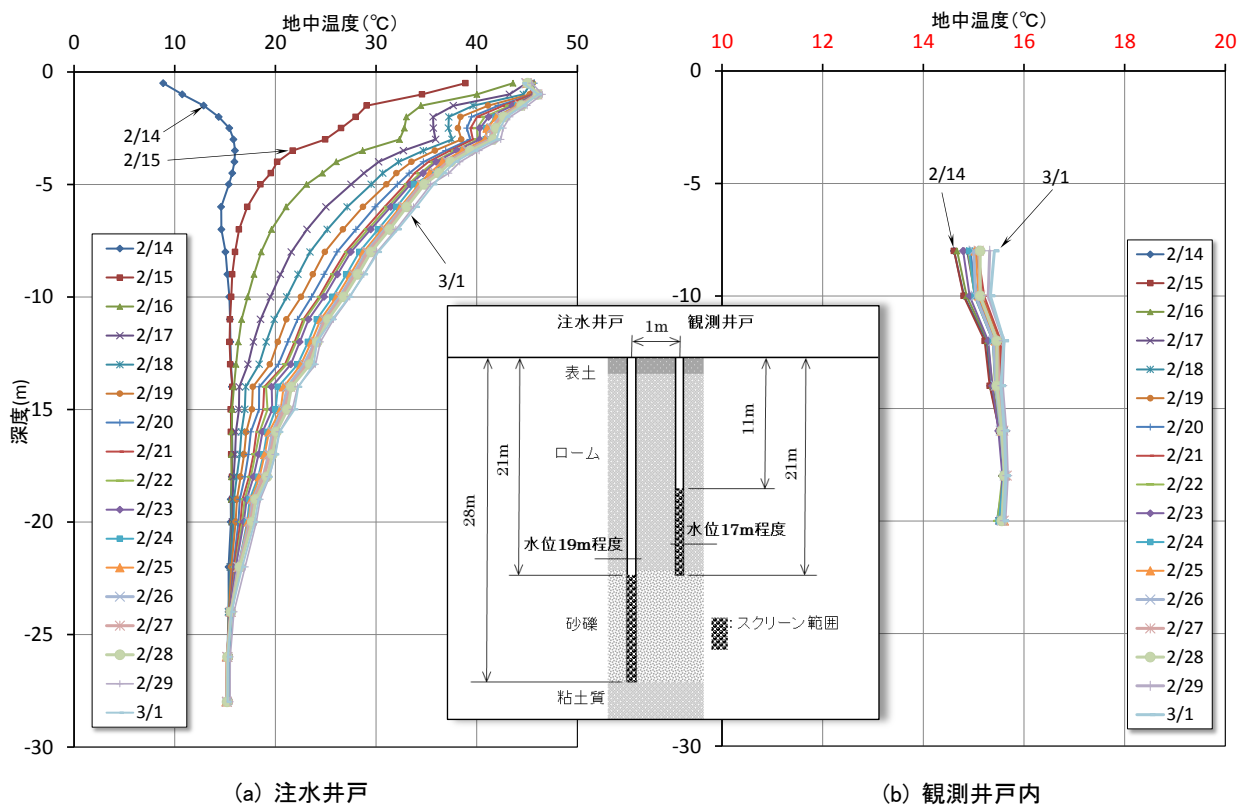


図 5 地表注水による温度プロファイルの遷移(各日とも 23:58 の温度分布)

3. 試験結果と考察

(1) 地表注水

地表注水は、2/15 14:00 に開始し、3/2 10:00 まで 17 日間にわたり継続した。1 回の注水にかかる時間は、初回が約 16 分であったが、サイクルを重ねる間に徐々に短縮され、2/22 以降は 11 分程度であった。

初期の地中温度を 15°C と見なした場合、温度差 ΔT は $\Delta T=35^\circ\text{C}$ となり、17 日間(96 回)の注水による投入熱量は、約 390kWh と計算される。試験継続中の各日 23:58 時点での温度プロファイルの遷移を図 5 に示す。(a)注水井戸と(b)観測井戸の間隔は 1m であり、(b)の温度変化量が微小であるため横軸の幅は拡大して表記(朱書)した。図 5 から読み取れる事項を以下に示す。

■2/14 のプロファイルは温水注入前であり、地表から 5m 程度までは気温の影響を受けて曲線を描いているが、それ以深は地温不易層となり、ほぼ 15°C の一定温度を保っていることが確認できる。

■温度プロファイルは日を追う毎に上昇し、注入開始から 1 週間程度で 0.5~1.5m の範囲は 45°C に達している。

■温度上昇の幅は、日ごとに小さくなっており、地中に注入された温熱エネルギーが水平方向に伝播されているものと予想される。

■埋戻砂には比較的粗い 2 号珪砂を使用した。浸透にかかる時間は初回で 16 分かかった。珪砂の粒子間に元土壌の土粒子が充填され、流れにくい層(プラグ)が形成されているものと想像されるが、3m 付近にプラグの存

在を仮定すると、2~3m 範囲で急速に温度上昇していることが説明できる。

■観測井戸は注入井戸から 1m の位置にあり、観測井戸の水位は期間中 17m 程度であったことから、図 5 (b)における 17m 以浅は、井戸中の空気の温度を測っていることになるが、注入井戸周辺の温度変化に伴い、計測期間中に最大で 1°C 程度の温度上昇が確認される。

(2) 井戸内注水

井戸内注水は、3/2 14:00 に開始し、4/1 14:00 まで 31 日間にわたり継続した。1 回の注水にかかる時間は 4 分 30 秒程度で、注水直後には注入井戸の水面が上昇し、例えば 3/8 の観測例では最大 4m 強の上昇が確認された。

試験期間前半には、不定期に 6 回の注水不良が発生したものの、31 日間で合計 175 回の注水を行い、初期地中温度を 15°C と見なした場合の投入熱量は、約 711kWh となった。試験継続中の各日 23:58 時点での温度プロファイルの遷移を図 6 に示す。グラフが輻射するので、(a)前半と(b)後半に分割して掲載した。図 6 から読み取れる事項を以下に示す。

①地表注水停止後の影響

■地表注水を終了したため、17m 以浅の温度は日を追う毎に低下し、3/1 に最高温度であった深度 1.5m の地点では、1 ヶ月の間に 46°C から 17°C まで約 30°C の温度低下を示した。

■地表注水による温度上昇効果に対し、終了後 1 ヶ月後の残存温度を計算すると、平均で 19%程度となった。

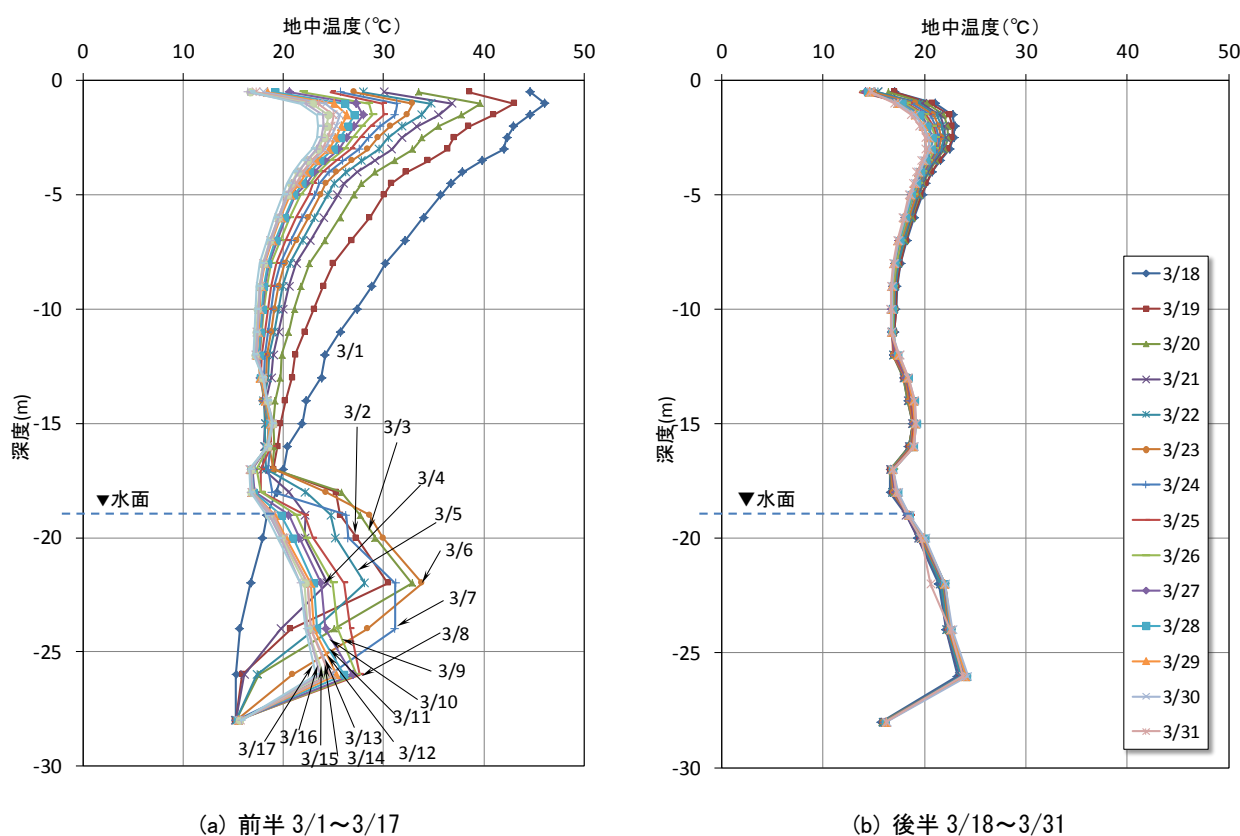


図 6 井戸内注水による温度プロファイルの遷移 (各日とも 23:58 の温度分布)

②井戸内注水の影響

■19m 以深は自然水面以下であり、注入した温水の影響で温度の上昇が確認される。

■注入開始後 3/6 までは、深度 22m 付近を中心に顕著な温度上昇が確認され、34℃まで上昇していることが判る。

■3/6 以降は最高温度を示す深度が 26m に移動し、最高温度も 27℃程度に低下した。

■3/6 以降の最高温度は日ごとに低下し、3/17 までの 11 日間で、23℃程度まで低下している。注入熱量よりも拡散する熱量が多い状態と判断される。

■試験期間の後半における遷移は(b)に示すように、温度プロファイルがほぼ固定化されており、注入熱量と拡散する熱量が釣り合った状態が維持されているものと予想される。

(3) 注水井戸内の水流

図 6 では試験の後半において、深度 26m に 24℃の温度のピークを保ったまま、温度プロファイルが固定化された。井戸内でどのような現象が発生しているのか考察するため、1 分毎に採取している温度データから、図 7 のように時刻を横軸に展開した温度分布図を作成し、経時変化を詳しく観察することとした。図 7 は、温度上昇の傾向が逆転した 3/8 18:00 以降の観測例である。

【18:00～18:20】白点で示す地下水位は、注水直後から上昇するものの、①に示すように 15 分程度で平常状態まで回復する。

注入された温水は、井戸管内の地下水面に一旦停滞するものと予想されるが、井戸管のスクリーン範囲が 21m 以深であるため、②に示すように温水が直接流出する 21～23m の温度がいち早く上昇する。スクリーンから流出した温水が埋め戻し層を伝って上下に移動すれば、時刻とともに 19～20m の浅い方向へも高温帯が拡大すると

予想されたが、高温帯の拡大は深い方向のみとなっているのが特徴的である。

【18:20～18:40】温度のピークは③に示すように 22m 付近にあるが、高温帯の広がりには深い方向へ偏っている。この時点で、22m 以深の温度成層は深くなるほど低温であり、安定した温度層構造を成している。注水完了から 20 分以上経過しており、注水による擾乱も静まるに十分な時間が経過しているため、溜まり水であればこれ以降の温度変化は、極めて緩やかになることが予想される。

【18:40 以降】40 分以上経過すると、地下水帯全体の温度は徐々に低下しつつも、高温のピークは④や⑤に示すようにより深い方向へ移動し、24m 付近に移っていることが確認できる。さらに時間の経過とともに、温度ピークが深い位置へ移動し、80 分経過後の⑥から⑦に至るまでは 26m 付近に移動していることが確認できる。

③の時点で安定した温度成層が形成されているにもかかわらず、経時的に不安定化する方向へ変化する原因としては、何らかの水流の存在が予想されるが、現象を説明できる水流の形態として 2 つの仮定が考えられる。

1 つめは、地下水は水平方向に流れているものの、深さにより速度差があり深度 26m 付近に比べ 22m 付近では速く流れている場合であり、2 つめは注入井戸の内部で下降流が発生している場合である。

冒頭の図 1 に示すように、注水井戸から 1m 離れた位置に観測井戸があり、平均的な自由水面は注水井戸が深度 19m 程度、観測井戸が深度 16～17m 程度と、観測井戸の水位が常に 2～3m 程度高く観測されている。水位差が発生する原因としては、井戸の深さやスクリーン範囲が異なるなどの条件の違いがあるが、21～28m 付近の砂礫透水層が同一層であると考えれば、2～3m の水位差は大きすぎるように思える。また、掘削時に採取したコアや土質試験の結果を見ると、砂礫層と見なしていた 20～

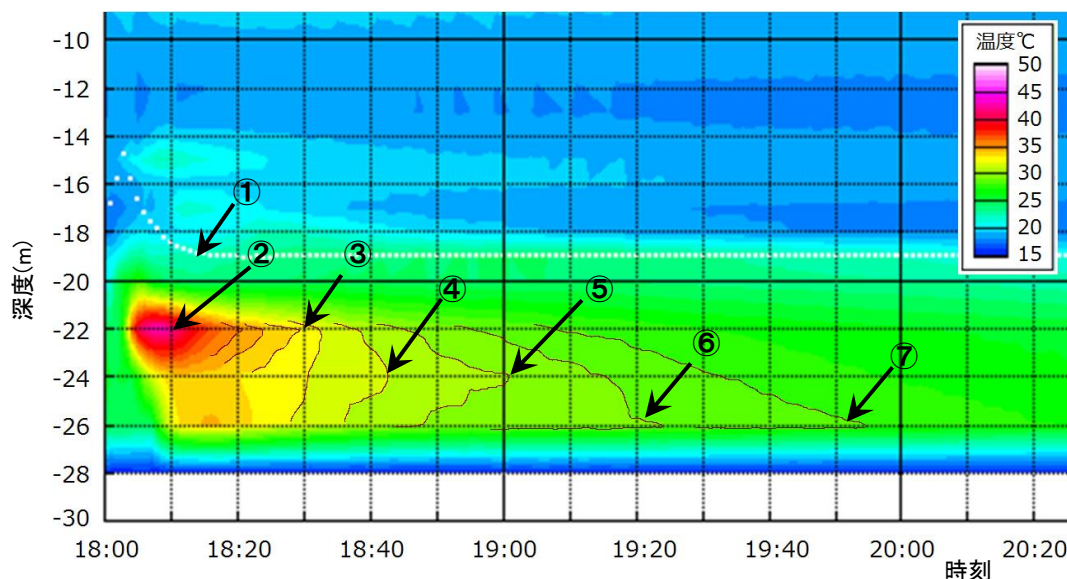


図 7 注水後の経時変化 (3 月 8 日 18:00 注水後)

28mの層の中の22~23mの範囲には、粘土質に偏った透水係数のやや小さい層の存在が観察された。

以上の条件から総合的に判断するに、地下水層は23m付近の粘土層により2層に分かれており、図8のように被圧水層Aが21m付近に存在し、それより若干水圧の低い被圧水層Bが23m以深に存在していると考え、矛盾無く説明できる。このように、2つの帯水層が存在すると仮定すれば、先の温度分布が逆転する過程についても、注水井戸の埋戻砂の中を被圧水層AからBへ下向きの水流が発生していることが原因であると説明できる。流速は極めて緩慢であることが予想されるが、注入した温水は主に被圧水層Bに浸透し徐々に下流へと移動しているものと判断される。

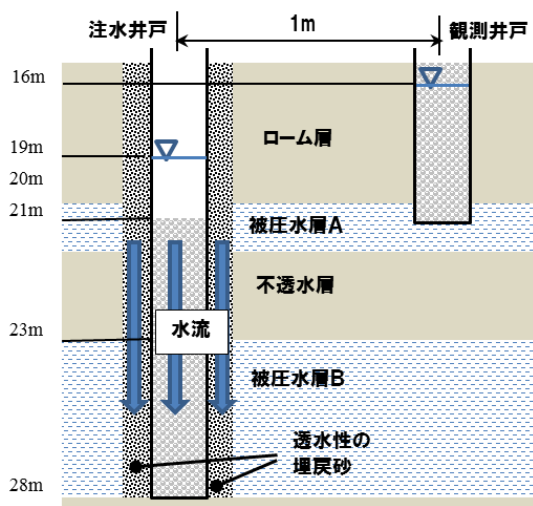


図8 観測結果から推定される層構造

(4) 鉛直流の計測

地下水の流動を計測する機器の多くは水平面内での流向流速を計測する仕様であるため今回、地下水流向流速計(PZ1005)にアタッチメントを取付けて、鉛直流に感応するよう改造して測定を行った。スリット範囲が深度21~28mであることから、21m以深について0.5m毎に測定したが、最底部付近は粘土質の堆積物により測定不能であった。各深度での平均下降流速を表3に示す。下降流の流速には、深度によりばらつきが見られるが、深度21.5~25.0m区間は、明らかな下降流を示していることが判る。測定された下降流速に基づき、21.5m~25.5mの4m区間の移動にかかる所要時間を計算すると、約76分となる。この時間は、前項の図7において、22m付近の温度のピークが26mまで移動するのに要した80分に極めて近い。地下水流向流速計の本来の使用法ではないため、あくまで参考値扱いではあるが、温度成層を逆転させる時間によく一致する結果が得られた。

表3 鉛直流速分布(参考値)

深度	下降流速
21.0 m	-1.0 m/h
21.5 m	6.4 m/h
22.0 m	3.5 m/h
22.5 m	2.9 m/h
23.0 m	2.2 m/h
23.5 m	2.2 m/h
24.0 m	3.1 m/h
24.5 m	2.9 m/h
25.0 m	3.6 m/h
25.5 m	-1.7 m/h
26.0 m	-1.6 m/h
27.0 m	-1.8 m/h

平均流速 3.1m/h

が低い地域において、地下水面と地表面のちょうど中間位置に蓄熱塊が形成されるよう、注入深度をコントロールするのが望ましい。今後は、蓄熱塊が水平方向に形成される過程を把握すべく、検討を進めたいと考えている。

4. まとめ

実験から得られた知見を以下にまとめる。

- ①地表注水実験では、地表付近を中心に蓄熱され、水平方向にも拡散していると考えられるが、供給停止後の温度の散逸も比較的速く、注水井戸周辺に生じた温度変化の1ヶ月経過後の残存温度は、19%程度となった。
- ②井戸内注水実験では、地下水の循環の影響を受け、投入した熱量の殆どが、下層の地下流水により水平移動したものと考えられる。
- ③深度21~28mの砂礫層は、23m付近の透水性の低い層により2層の被圧水層に分離されている可能性が高いことが判明した。

地中蓄熱では、地表からの散逸の影響が大きく、また地下水面以深では地下水の挙動を正確に把握しなければ、散逸のリスクが高まることから、年間を通じて地下水面

謝辞

本検討は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の調査委託事業『戦略的省エネルギー技術革新プログラム/省エネルギー技術開発事業の重要技術に係る周辺技術・関連課題の検討』における「太陽熱の帯水層蓄熱と地下水熱源ヒートポンプを併用した空調利用技術の調査研究」の一環として、帯水層の蓄熱ポテンシャルを調査するため実施した帯水層蓄熱実験の結果の一部に、別途実施した地下水流動測定試験の結果を追加したものである。一連の検討の機会を与您いただき、ご指導を賜った信州大学 藤縄克之特任教授、ならびに、観測データの可視化と現地地質情報の調査、流動測定試験にご協力いただいた東京建設コンサルタントの長沼宏一郎、名本伸介グループ長、小島崇主任技師、松延和彦技師の皆様には心より感謝を申し上げます。