

帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究

—帯水層蓄熱特性同定方法の検証—

STUDY ON DAILY THERMAL ENERGY STORAGE UTILIZING AQUIFER -VERIFICATION OF THE METHOD FOR IDENTIFYING AQUIFER THERMAL STORAGE CHARACTERISTICS

地域環境計画分野 藤井良平

排熱の貯蔵と有効利用を目的とした帯水層を利用した季節間蓄熱システムが欧州において多く見られる。一方、我々は同システムの昼夜間蓄熱利用の可能性を検討し、導入検討段階で必要となる帯水層蓄熱特性同定方法の確立を目指してきた。注水-揚水を行う蓄熱実験とシミュレーション結果の比較から帯水層蓄熱特性を決定づけるパラメータを同定出来るとしてきたが、本研究では蓄熱実験の簡易化を目的として、その実用性と課題を見極めるための実験とシミュレーションを実施した。There are many examples in Europe that attempts to use aquifer as a means to seasonal thermal storage. We focused on the possibility of utilizing Aquifer for daily thermal energy storage use and aimed to establish the method for identifying aquifer thermal storage characteristics. We come to believe that we can identify the parameters that dictate the aquifer thermal storage characteristics by a thermal storage experiment and heat and moisture transfer simulation studies. The purpose of this study is to consider the possibility that simpler experiment can identify parameters as accurately as large-scaled experiment. Through 16 experiments at 2 wells and simulation studies, the possibility of simplification was shown in some experimental conditions.

1. 研究の背景・目的

近年の電力需給の逼迫を背景として、電力負荷平準化の必要性が広く認識されるようになった。昼間の空調用電力消費を夜間に移行する蓄熱空調システムは、電力負荷平準化に有効な手段である。現在、日本で普及している昼夜間蓄熱システムは主に蓄熱媒体として水や氷を用いるが、我々は地下水で飽和された地層である帯水層に着目している。

帯水層の蓄熱利用は主に欧州で盛んな導入や研究開発が見られるが、日本国内においては試験的な導入や小規模な融雪目的に留まっている。それらは排熱の貯蔵と有効利用を目的とした季節間蓄熱を対象としており、我々が対象とする昼夜間での蓄熱は北海道大学の落藤¹⁾ら、京都大学の中村ら²⁾の研究以外は見当たらない。それらの研究はいずれも帯水層の温度応答特性モデルの構築に課題を残し、研究の進展は見られなかった。一方、我々の研究グループは独 WASY 社の地下水流動解析ソフト FEFLOW を用いて、既往研究で考慮されていなかった分散長というパラメータを考慮した計算を行うことで、複数の地点で蓄熱実験の結果を再現する帯水層のモデル同定に成功してきた。それらの経験から蓄熱実験と熱水分移動シミュレーションの

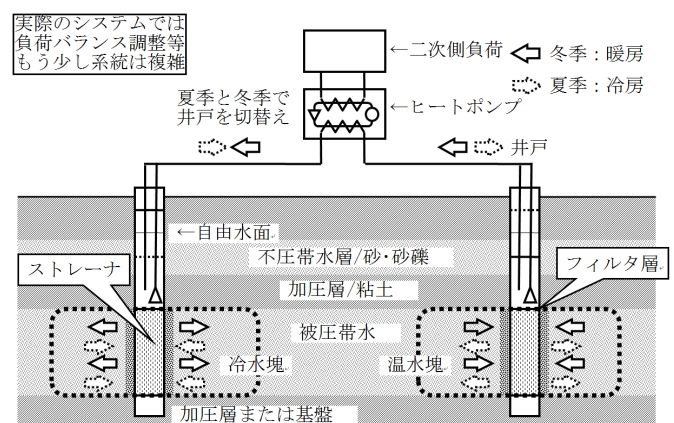


図1 帯水層蓄熱システムの概念図

突き合わせにより帯水層の蓄熱特性を決定づけるパラメータを同定出来るとしてきた。しかし、1本の井戸で複数の蓄熱実験を行なった事例はなく、実験条件と同定値の関係性などは未検討である。仮にどんな条件での実験からも同じ同定値が導かれるとすれば、必要とする注水用水源の容量や、加熱（または冷却）装置の容量低減など実験の簡易化が可能となる。

本研究では以上の目的のもと、パラメータ同定のための蓄熱実験の簡易化に関してその実用性と課題を見極めるための実験とシミュレーションを実施した。

2. 帯水層蓄熱実験

2.1 実験設備

大阪市立大学構内に掘削した2本の井戸（図2）において蓄熱実験を行う。それぞれの井戸は異なる帯水層を対象としており、井戸1に注水を行う時は井戸2を、井戸2に注水を行うときは井戸1を水源とする。

過去の実験とシミュレーション検討から、井戸1の帯水層には自然地下水流動が存在し、井戸2の帯水層には殆ど自然地下水流動が存在しないと予測されている。実験設備全体の概要を図3に示す。温度に関しては各井戸の出入口とチラーの出入口に設置した测温抵抗体、各井戸の帯水層区間に設置した熱電対で計測を行い、流量に関しては地上配管部の電磁流量計で計測する。

2.2 過去に行われた実験

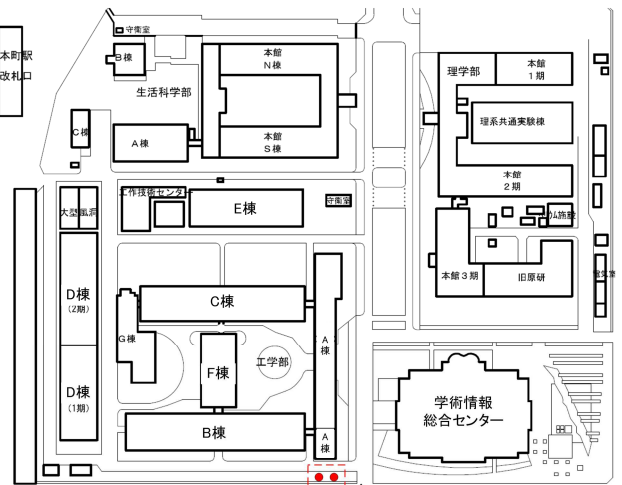
2010年に井戸1、2012年に井戸2で蓄熱実験が行われた³⁾（表1）。実験結果を図4~7に示す。温度応答のほか、式1で定義する熱回収率での評価も行われた。

$$\eta_H = \frac{c\rho_w \sum q_{out}(T_{out} - T_0)}{c\rho_w \sum q_{in}(T_{in} - T_0)} \quad \text{式1}$$

ここに、 η_H は熱回収率、 $c\rho_w$ は水の熱容量、 q_{in} は注水量、 T_{in} は注水温度、 q_{out} は揚水量、 T_{out} は揚水温度、 T_0 は実験開始前の初期地中温度を指す。

表1

	井戸1	井戸2
運転手順	注水 8h → 揚水 8h → 停止 8h	
実験期間	2010/12/7 ~12/13	2012/10/29 ~11/28
注水（揚水）流量[L/min]	7.2 (7.2)	42.0 (39.0)
注水温度[°C]	30.3	5.0
初期地下水温度[°C]	22.3	18.9



実験サイト(左:井戸1 右:井戸2)

図2 大学構内の見取り図と井戸の掘削地点

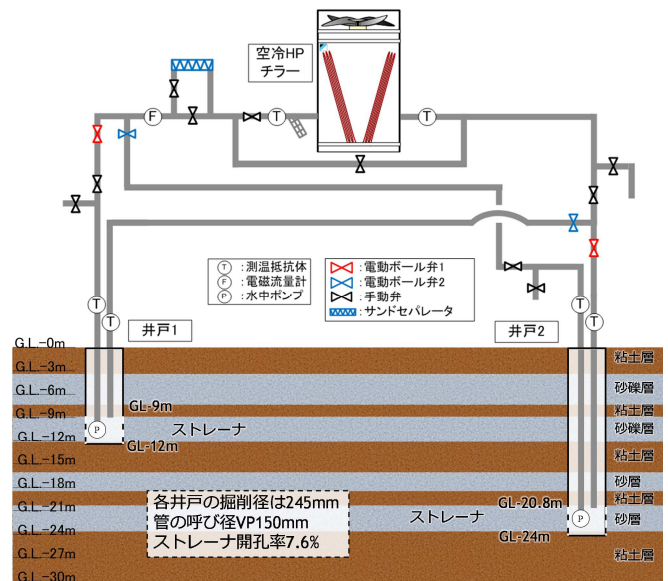


図3 実験設備全体像

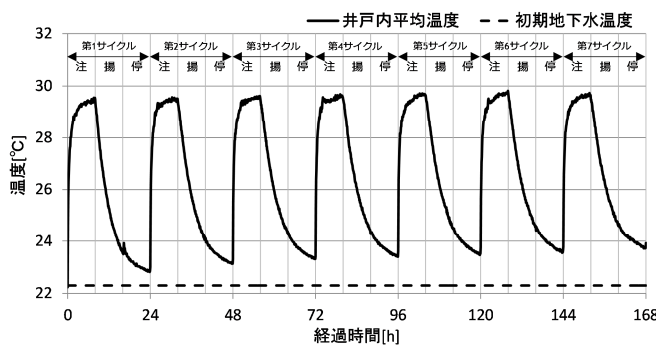


図4 井戸1での実験結果（温度）

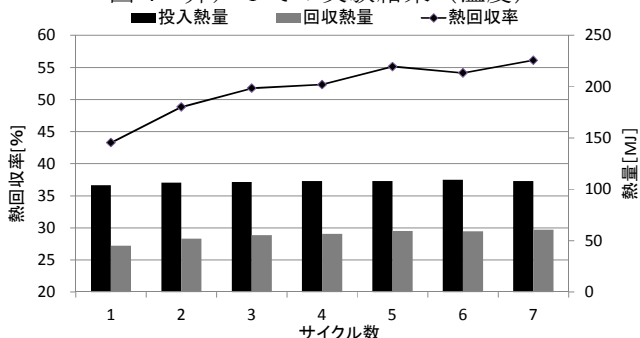


図5 井戸1での実験結果（熱量，熱回収率）

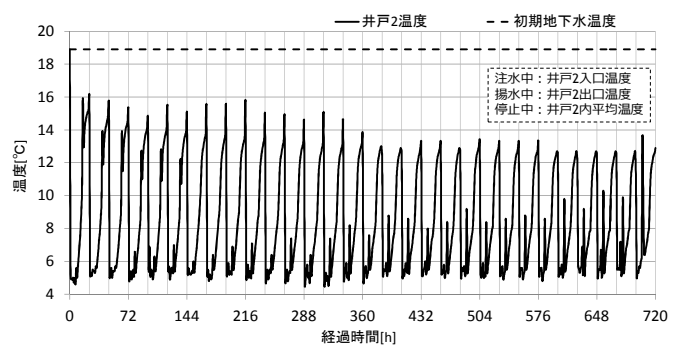


図6 井戸2での実験結果（温度）

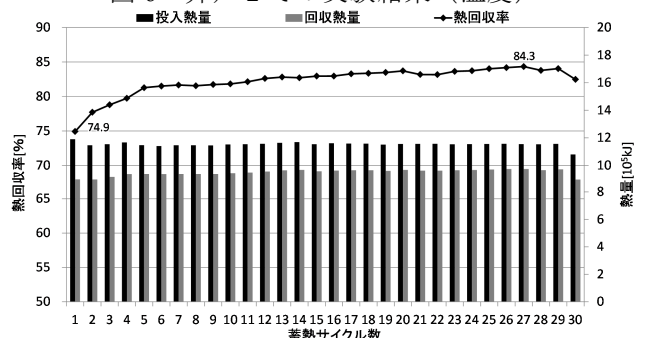


図7 井戸2での実験結果（熱量，熱回収率）

2.3 2013年度に行なった実験

本研究ではパラメータ同定のための蓄熱実験の簡易化を目指し、様々な条件での実験を行った。具体的な実験条件を表2に示す。例えば、実験1~3の結果を比較対象としたシミュレーション検討によって実験時の流量によって同定値に差異が見られるのかを検証することを目的としている。実験1~8は井戸1井戸2の両方で行い、シミュレーションとの比較用として計16個の実験データを集積した。なお、全ての実験は注水→揚水→停止の1サイクルで完結している。

2.4 実験結果

実験結果を図8~13、および次頁表3に示す。井戸1と井戸2の蓄熱特性の違いが揚水温度のカーブの形状に現れており、井戸2の方が優れた蓄熱性能を有することが伺える。ポンプ発熱分を除けば井戸1で47.0~63.5%、井戸2で79.7~91.2%の熱回収率が得られた。なお、注水終了時(=揚水開始時)に温度が上昇して

表2 実験条件一覧

	注水温度 [°C]	注水揚水 時間[h]	注水揚水 流量[L/min]	初期地中温度[°C]	
				井戸1	井戸2
実験1	5	各8	各40	18.7	17.8
実験2	5	各8	各20	20.2	18.1
実験3	5	各8	各10	20.3	17.9
実験4	5	各4	各40	18.7	17.6
実験5	5	各2	各40	19.1	17.6
実験6	7	各8	各40	19.1	17.7
実験7	10	各8	各40	19.9	17.6
実験8	30	各8	各40	20.0	17.7

いるのは安全のためチラーに地下水を通し無加熱(無冷却)で注水が行われるためであり、揚水終了時(=停止開始時)に温度が上昇するのは水中ポンプの残留熱が井戸内に拡がるためだと考えられる。図8~13はポンプ発熱を含んだ温度を表示しているが、シミュレーションとの比較に際しては、揚水温度からポンプ発熱分を差し引いた値を使用している。

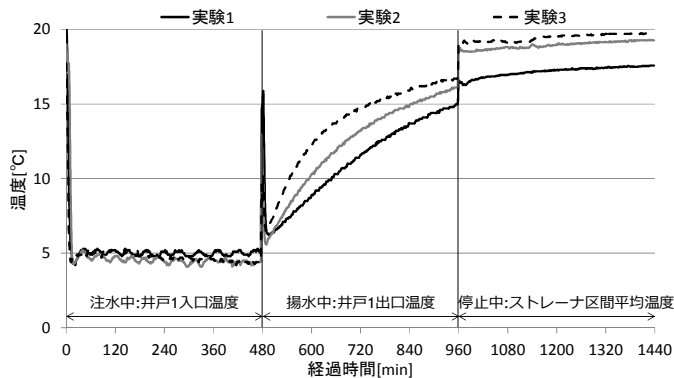


図8 井戸1 実験1,2,3の比較(注水揚水流量)

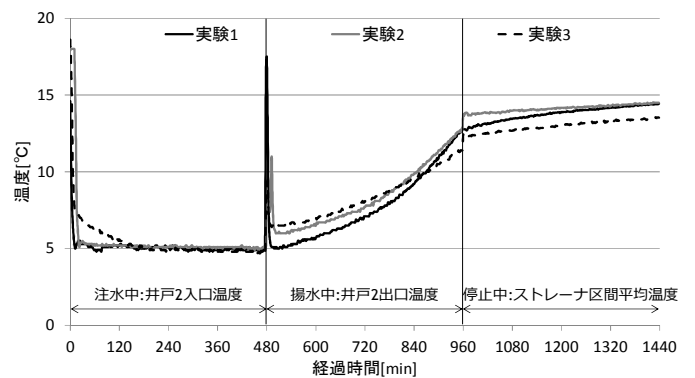


図11 井戸2 実験1,2,3の比較(注水揚水流量)

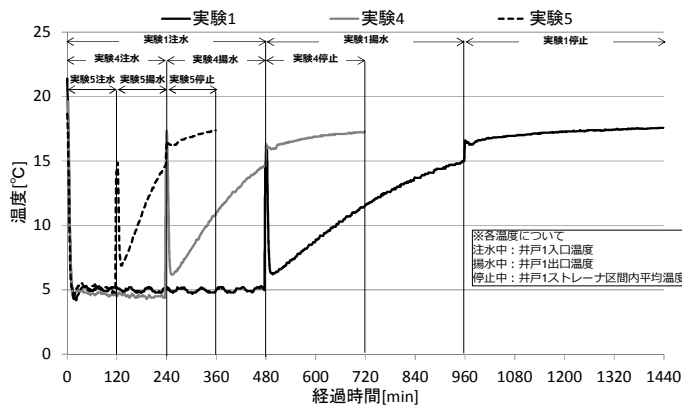


図9 井戸1 実験1,4,5の比較(注水揚水時間)

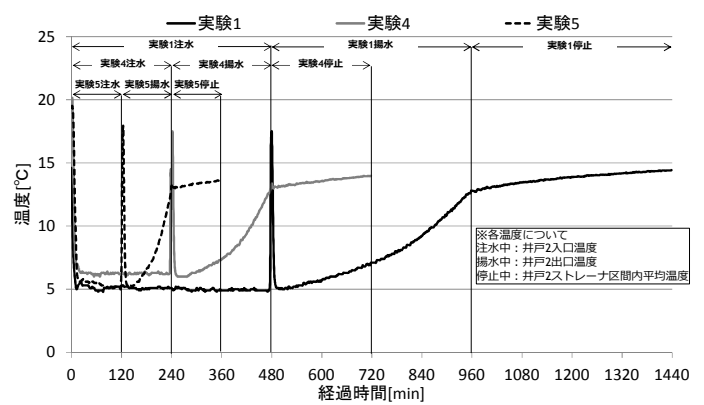


図12 井戸2 実験1,4,5の比較(注水揚水時間)

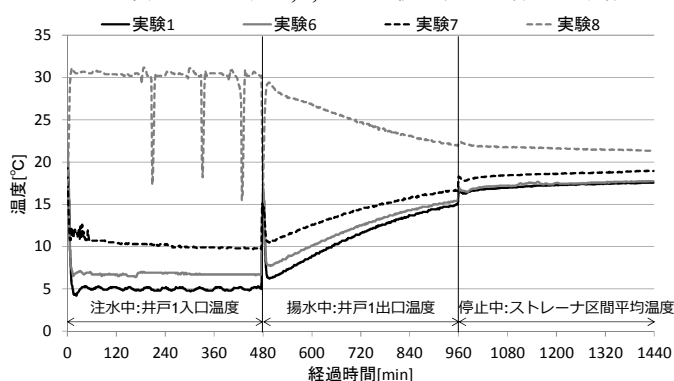


図10 井戸1 実験1,6,7,8の比較(注水温度)

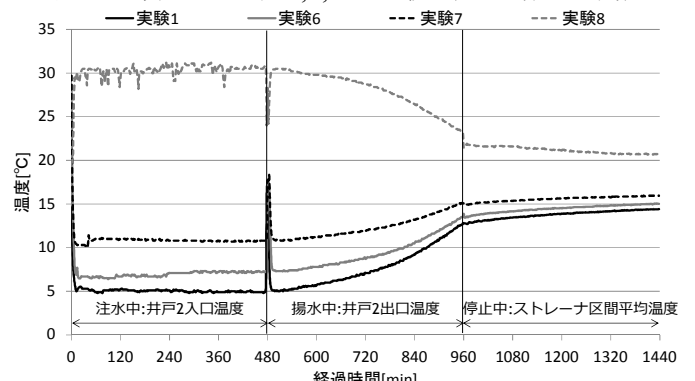


図13 井戸2 実験1,6,7,8の比較(注水温度)

表 3 実験結果

	平均注水温度 [°C]		平均注水流量 [L/min]		平均揚水温度 [°C]		平均揚水流量 [L/min]		熱回収率 [%]	
	井戸 1	井戸 2	井戸 1	井戸 2	井戸 1	井戸 2	井戸 1	井戸 2	井戸 1	井戸 2
実験 1	5.2	5.2	39.5	40.0	11.3 (11.0)	7.8 (7.5)	39.6	39.4	55.3 (57.5)	78.3 (80.6)
実験 2	4.9	5.5	20.1	20.2	12.4 (11.8)	8.4 (7.8)	20.1	20.0	50.9 (54.7)	76.4 (80.9)
実験 3	4.9	5.5	10.4	10.2	13.7 (12.6)	8.4 (7.2)	10.0	9.5	41.2 (48.5)	71.9 (81.0)
実験 4	5.1	6.7	39.5	39.6	10.9 (10.6)	8.3 (8.0)	39.7	38.9	58.0 (60.2)	84.3 (87.0)
実験 5	5.9	6.6	39.6	39.9	11.0 (10.7)	7.7 (7.4)	39.8	39.6	61.3 (63.5)	89.3 (91.2)
実験 6	7.0	7.1	39.6	40.2	12.2 (11.9)	9.5 (9.2)	39.8	39.8	57.1 (59.6)	77.0 (79.7)
実験 7	10.3	10.9	40.0*	40.5	14.1 (13.8)	12.1 (12.4)	40.0*	39.9	60.6 (63.6)	76.8 (81.0)
実験 8	29.8	30.2	39.5	40.0	24.9 (24.6)	28.0 (27.7)	39.6	40.2	50.0 (47.0)	82.7 (80.4)

*井戸 1 実験 7 では電磁流量計の不具合があったため、容積法によって 40L/min を確認した。カッコ内は揚水温度からポンプ発熱 810W を除いた場合の数値

3. シミュレーション検討

3.1 地下水流動解析ソフト FEFLOW

本研究では独 WASY 社の地下水流動解析ソフト FEFLOW を採用している。FEFLOW では適切な layer 分割と各層への物性値の付加により実験地盤を再現し、以下の 3 つの保存則からなる基礎式をベースに熱水分の移動を有限要素法により算定する。井戸周辺はメッシュ分割を細かく行い、計算精度を高めている。

<質量保存則>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha) = \varepsilon_\alpha \rho^\alpha Q_\rho^\alpha \quad \dots \text{式 2}$$

<運動量保存則>

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\varepsilon_\alpha \mu^\alpha} \left(\frac{\partial p^\alpha}{\partial x_j} - \rho^\alpha g_j \right) = 0 \quad \dots \text{式 3}$$

<エネルギー保存則>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{iT}^\alpha) = \varepsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad \dots \text{式 4}$$

ここで α は各相を表している。また j_{iT} は熱フラックスとして式 5 で表される。

$$j_{iT}^\alpha = -(\lambda_{ij}^{cond\alpha} + \lambda_{ij}^{disp\alpha}) \frac{\partial T^\alpha}{\partial x_j} \quad \dots \text{式 5}$$

$$= -\varepsilon_\alpha \left[(\lambda^\alpha + c^\alpha \rho^\alpha \alpha_T V^\alpha) \delta_{ij} + c^\alpha \rho^\alpha (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i^\alpha v_j^\alpha}{V^\alpha} \right] \frac{\partial T^\alpha}{\partial x_j}$$

式 5 に含まれる α_L と α_T は縦分散長と横分散長であり、土壌内の伝熱機構において重要な因子である。横分散長は縦分散長の 1/10 程度とされている。

<記号一覧>

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| ε : 間隙率 | ρ : 密度 |
| v_i, v_j : 速度ベクトル | Q_ρ : 質量発生項 |
| k_{ij} : 浸透テンソル | k : 透水係数 |
| μ : 粘性係数 | p : 圧力 |
| g_j : 重力加速度 | E : 内部エネルギー |
| j_{iT} : 熱フラックス | Q_T : 熱量発生項 |
| λ_{ij}^{cond} : 移流熱伝達率 | λ_{ij}^{disp} : 分散熱伝達率 |
| T : 温度 | λ : 熱伝導率 |
| c : 比熱 | α_L : 縦分散長 |
| α_T : 横分散長 | V : 絶対速度 |
| δ_{ij} : クロネッカーテンソル | |

3.2 過去の実験でのパラメータ同定

図 3 に示した大学構内の地盤を再現し(図 14), 図 4, 6 に示した実験結果の第 1 サイクルの揚水温度カーブの再現を試みた(図 15, 16)。その結果, 井戸 1 で自然地下水流速 1.31[m/day] 分散長縦 0.1[m] 横 0.01[m], 井戸 2 で自然地下水流速 0[m/day] 分散長縦 0.002[m] 横 0.0002[m] という同定値が導かれた。

なお, 井戸 2 に関しては FEFLOW 上で与えうる範囲で熱回収率に最も有利な条件を設定したにも関わらず, 実験値はさらに熱回収率が高い揚水温度カーブを描いた。そのため, 実験値との誤差は残るものの FEFLOW 上で最も実験値と近づく条件として上記の値を同定値とした。

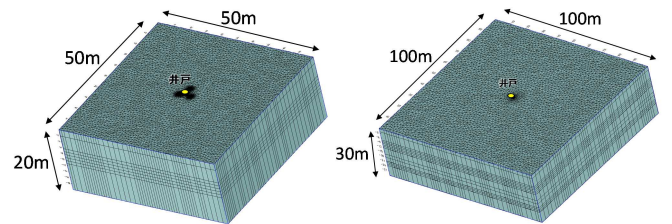


図 14 FEFLOW での地盤の再現 (左:井戸 1 右:井戸 2)

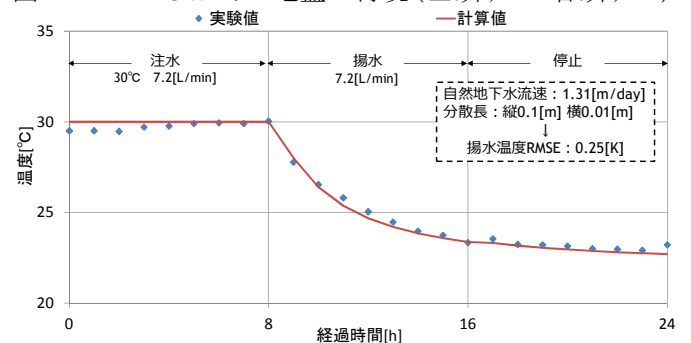


図 15 井戸 1 におけるパラメータ同定

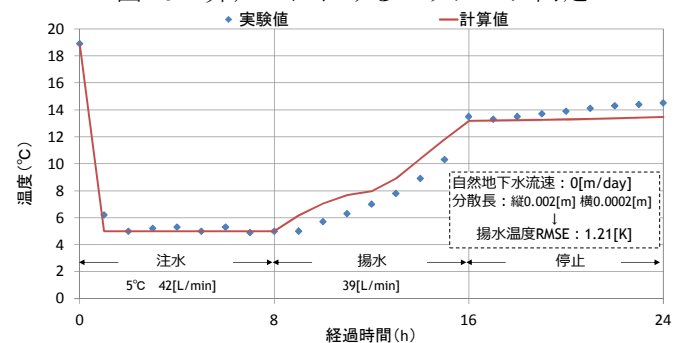


図 16 井戸 2 におけるパラメータ同定

3.3 井戸1におけるパラメータ同定

過去に同定されたパラメータ（自然地下水流速 1.31[m/day]、縦分散長 0.1[m]）を充てたモデルによって実験結果の再現を試みた結果、パラメータを調整することでさらに再現精度が上がる余地があり、別の同定値が導かれると判断した。なお、再現精度に関しては揚水温度に関して、ポンプ発熱を除いた実験値と計算値の平均2乗誤差を評価基準としている。

そこで自然地下水流速を 0~2.63[m/day]の中で5通り、縦分散長を 0.05~5.0[m]の中で5通り設定し、それらの組み合わせで計 25 パターンのパラメータ設定を行い、各実験において同定されるパラメータの傾向を確かめた（図 18~25）。

①注水揚水流量について（実験 1,2,3）

図 18,19,20 を比較する。注水揚水流量を 40~10[L/min]に変化させても分散長は同じレベルが同定された。自然地下水流速に関しては 0~1.31[m/day]と幅があり、特に低流速域の差が小さかった。

②注水揚水時間について（実験 1,4,5）

図 18,21,22 を比較する。注水揚水時間が短くなるほど分散長が小さく同定される傾向が見られた。また、時間が短くなるほど、自然地下水流速に対する揚水温度 RMSE の感度が低くなった。

③注水温度について（実験 1,6,7,8）

冷水を投入した実験 1,6,7(図 18,23,24)の比較から、

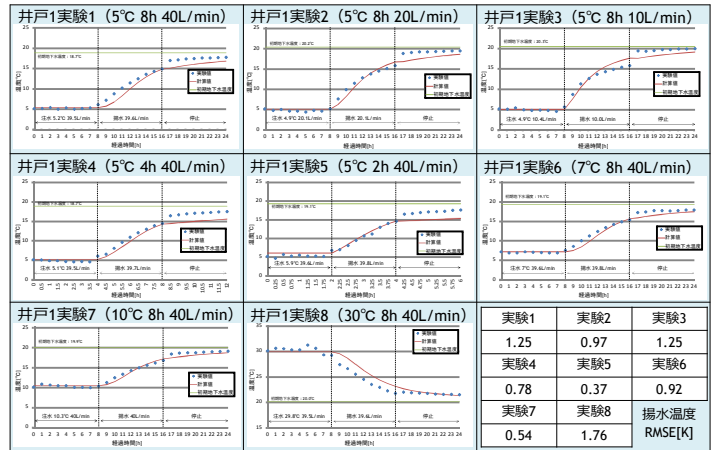


図 17 井戸1実験1~8 実験値と計算値の比較
投入温度差を小さくしても分散長は同程度に同定されることがわかる。ただし、投入温度差が小さくなるほど自然地下水流速、分散長に対して揚水温度 RMSE の感度が低くなる傾向が見られた。

温水を投入した実験 8（図 25）においては他と比較して分散長が大きめに同定された。これは投入した熱が密度差により井戸上部に拡散するなど、FEFLOW上で考慮されない熱ロスを帯水層内の熱ロスに含めて分散長で再現を試みたためかと推察される。

自然地下水流速に関しては本実験の範囲内では安定的な同定は困難だった。短時間の実験において自然地下水流速に対する揚水温度 RMSE の感度が低かったことから、長時間の実験を検討する必要があると考える。

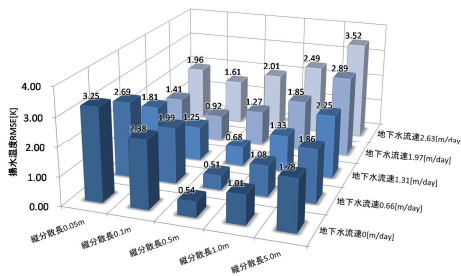


図 18 実験1パラメータ同定

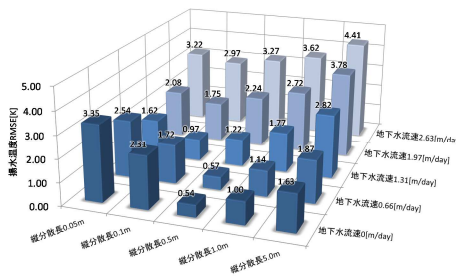


図 19 実験2パラメータ同定

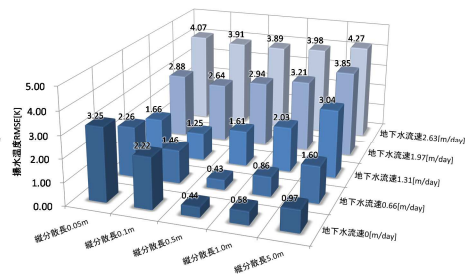


図 20 実験3パラメータ同定

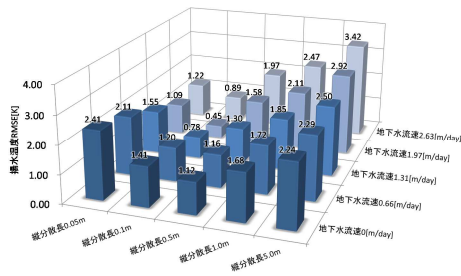


図 21 実験4パラメータ同定

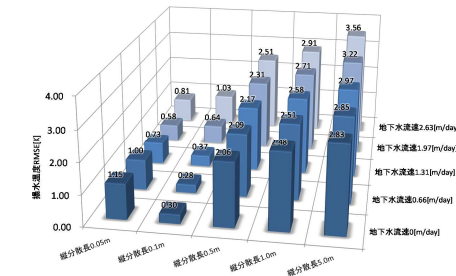


図 22 実験5パラメータ同定

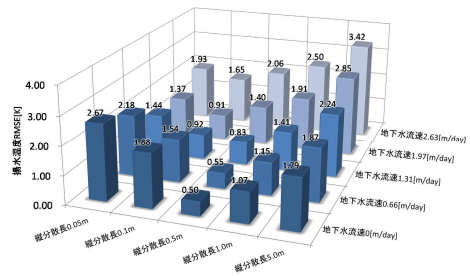


図 23 実験6パラメータ同定

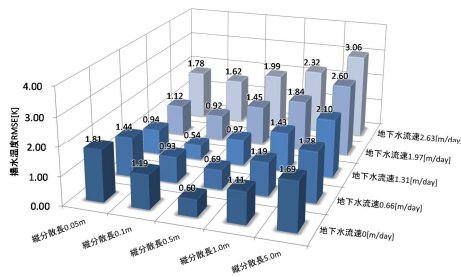


図 24 実験7パラメータ同定

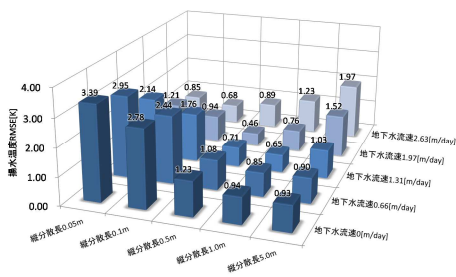


図 25 実験8パラメータ同定

3.4 井戸2におけるパラメータ同定

過去に同定されたパラメータ（自然地下水流速 0[m/day], 縦分散長 0.002[m]）を充てたモデルによって実験結果の再現を試みた結果を図 26 に示す. ここで再現精度の評価基準は井戸1と同様である.

実験値と計算値を比較すると, 全てのケースで実験値のほうが熱回収率が高い傾向, つまり冷水投入の場合低い温度で, 温水投入の場合高い温度で揚水が行われていた. 過去の実験での同定モデルが自然地下水流速, 分散長ともに FEFLOW 上で最も熱回収率に有利な条件を設定しており, パラメータの調整によって実験結果の再現精度を上げることは出来ない.

しかし, いずれの実験からも FEFLOW 上で最も熱回収率に有利なパラメータに行き着くという点に着目すると, 帯水層の蓄熱性能が極めて高い場合は低流量, 短時間, 低温度差など簡易な実験を行なっても, そのことがわかるといえる.

4. 井戸1本で実施する注水揚水試験

実験条件の簡易化は実験の低コスト化, 容易化に直結する. 例えば注水揚水流量, 時間が小さくなれば, 積算流量を超える貯水タンクを用いることで実験井戸の他に水源を必要とせず試験を実施できる. また, 注水流量と投入温度差から算出される加熱装置の容量が小さくなれば, 家庭用給湯器等と LPG ボンベなどをコンパクトにユニット化し, 様々な場所の試験に用いることが可能となる (図 27,28).

5. まとめ

本研究では, 帯水層の蓄熱特性を決定づけるパラメータである自然地下水流速, 分散長を同定するための試験の簡易化の実用性と課題を見極めるために多数の実験とシミュレーション検討を実施した.

[分散長同定に関して]

注水揚水流量を 40~10[L/min]で変化させても分散長は同程度に同定された. 同様に注水温度を 5℃~10℃に上昇させても, 分散長が同程度に同定された. 注水揚水時間を 8~2h に短縮すると, 分散長が小さめに同定される傾向が見られた.

[自然地下水流速同定に関して]

本実験の範囲内では安定的な同定は行えなかった. 特に, 短時間の実験では自然地下水流速に対する揚水温度 RMSE の感度が低下することを踏まえると自然地下水流速の安定的な同定のためには, 長期間の実験が望ましいと考える. 例えば 8h の注水を行なった後, 初期の地下水温度に戻るまで揚水を継続する実験などが考えられる (図 29).

[帯水層の蓄熱性能が極めて高い場合]

簡易な実験を行なっても, 帯水層の蓄熱特性が極めて高ければ, 実験結果からそれが分かる.

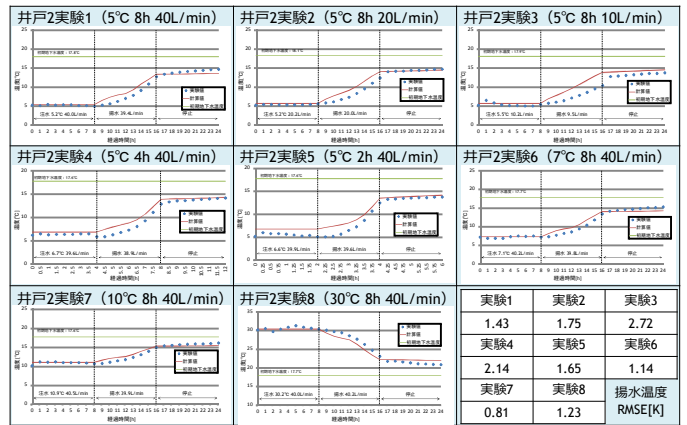


図 26 井戸1 実験1~8 実験値と計算値の比較

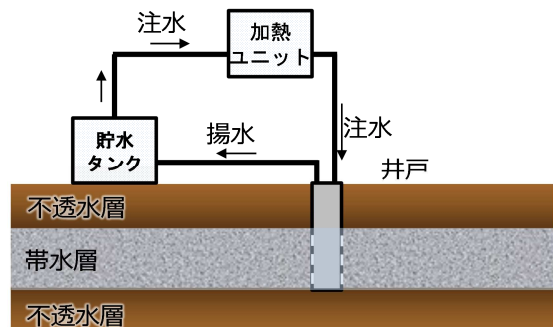
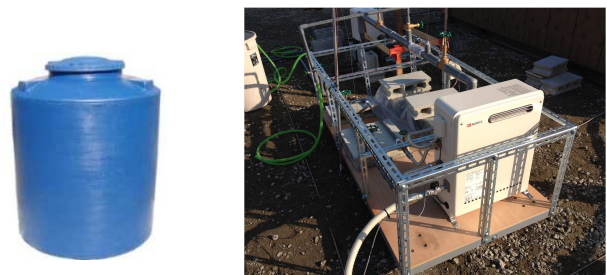


図 27 井戸1本で実施する注水揚水試験



市販品で容量 5000L 程度まで確認 2012年, 香川県高松市内においてキャスター付き車の上にガス給湯器とサーモスタット混合栓などを収めた加熱装置で安定した温水注水を行うことが出来た.

図 28 試験装置 (左: 貯水タンク, 右: 加熱ユニット)

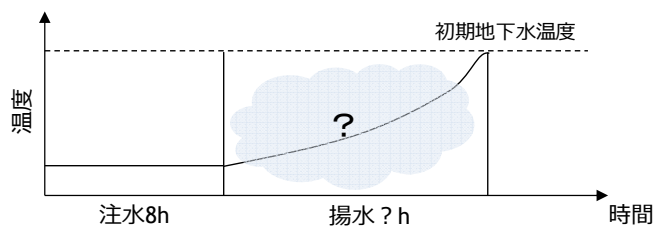


図 29 揚水時間を長く取る実験

参考文献

- 1) 落藤ら: 帯水層による短期・長期蓄熱とその応用, 第1~4報, 空気調和・衛生工学会論文集 p1105-1120, 1998年8月, 第5~7報, 同論文集 p961-972, 1999年9月
- 2) 中村ら: 敷地内帯水層蓄熱システムに関する研究, その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 p1045-1048, 1998年9月
- 3) 中曾康壽: 閉鎖性帯水層の昼夜間蓄熱利用 (第1報) -帯水層モデルの実験検証-, 空気調和・衛生工学会論文集, 2013年1月
- 4) 佐々木ら: 帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究-長期間運転時の蓄熱特性の把握と検証-, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2013年3月

討議

◆討議 [大島教授]

結論として、地下水流速の同定が難しいとしているが、地下水流速は測定法が存在する。地下水流速を測定しなかったのはなぜか？

分散長の値には地盤の性質が効いてくる。間隙率然り。間隙率を一定で扱っていたことに問題はないか？

間隙率を一様に 0.3 としていたのはなぜか？

本来井戸を掘る時に間隙率を調べるべき。間隙率が分散長に影響をおよぼさないか？

◆回答

これまで、蓄熱実験と熱水分移動シミュレーションの突き合わせから自然地下水流速と分散長の 2 項目を同定出来るとしてきた。本研究ではその同定方法の検証が目的であり、具体的にはどのような条件の実験からも同じ同定値が導かれるのかどうか、という点に着目していた。自然地下水流速の計測はその目的とは異なるため、実施しなかった。

参考文献^{*}には、堆積物の間隙率に関して表 1 のように記述されている。間隙率を一様に 0.3 としていたのは、いずれの堆積物においても 0.3 と設定しておけば大きく外れないためである。

間隙率が計算結果に与える影響の一例として、井戸 1 の地盤をモデル化したものに自然地下水流速 0[m/day]、縦分散長 0.1[m]、横分散長 0.01[m]を設定し、間隙率を 0.3, 0.4, 0.5 の 3 通りで計算を行なった。その結果、1 サイクルの計算ではほとんど結果が変わらなかった(図 1)。間隙率が長期間の蓄熱シミュレーションに与える影響については今後の検討課題としたい。

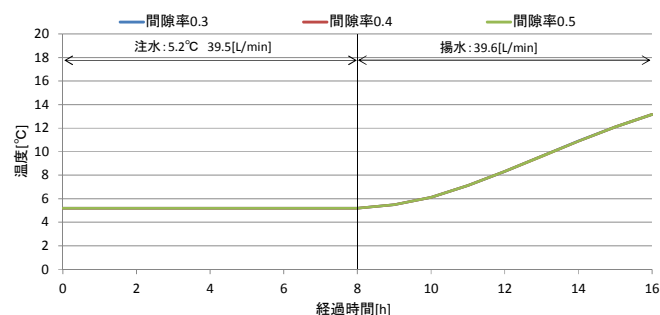


図 1 間隙率ごとの計算結果の比較

表 1 堆積物の間隙率

堆積物	間隙率
礫	0.25~0.4
砂	0.25~0.5
シルト	0.35~0.6
粘土	0.35~0.6
砂岩	0.05~0.3
石灰岩	0.0~0.4

^{*}藤縄克之：環境地下水学，p43 表 3.2，共立出版，2010 年 1 月

◆討議 [鍋島准教授]

地下水流速を測る意味が無いように聞こえるが、測定方法に問題があったのではないか？

有る時間断面で測定したからではないか？

どのような場所で、この方法が利用できるか。周辺の利用状況などにか留意すべき点はないか？

◆回答

具体的な計測方法に関しては下記の中尾特任教授への回答(下記)の通り。ストレーナ形状に関しては改善すべきだったといえるが、局所的な水ミチの存在については測定方法そのものが抱える課題だと考える。

計測する時間断面や周辺の利用状況に関しては、例えば、周囲に特定の時間帯に大量に地下水を汲み上げる施設などがあれば、1 日の中でも計測値は異なると考えられる。実験開始前にその恐れがないか地下水位計測を行って検討すべきである。なお、大学構内の井戸においては地下水位の連続計測を行なったが、そのような傾向は見られなかった。

◆討議 [中尾正喜特任教授]

(過去に)地下水流速の計測を実施した際に、空間的な観点で何か問題があったのか？

間隙率に関して、砂礫層でも幅があるのか、0.3 は妥当なのか？

◆回答

過去に学外で単孔式、学内で多孔式の自然地下水流速計測を行なっているが、いずれの計測値も蓄熱実験の結果を再現するにはほど遠いものであった。

前者は線熱源とその周囲に温度センサを配置した試験装置を井戸に投入し、地下水流速による熱の拡がりの乱れから地下水の流向流速を計測するという方法であった。この時、計測を実施した業者へのヒアリングおよび実施報告書によれば「偏流を生じさせにくいスリット型のストレーナが理想である」とされていたが、計測を行なった井戸は現場施工型の丸穴ストレーナ(4 方向に配列)であった。このようにストレーナ形状にも問題があったと考えられる。

後者は食塩水を井戸に投入し、周囲に掘削した観測用井戸での電気伝導度の変化から自然地下水流向流速を計測する方法であった。この時の計測値は 66[m/day]と極めて大きい値であったが、局所的に水が流れやすい箇所(水ミチ)の存在が懸念された。

砂礫層の間隙率に関しては表 1 の通りであり、0.3 という値は妥当であったと考えている。また、図 1 の結果からも、間隙率がパラメータ同定の結果に影響したということは無いと考えられる。