

長期蓄冷・蓄熱システムの研究開発（その1）

——帯水層蓄熱のシミュレーション解析による熱回収評価——

三小田 憲 司 酒 井 寛 二
藤 田 尚 志

Development of a Long-Term Thermal Energy Storage System (Part 1)

——Thermal Recovery Evaluation of Aquifer Thermal Energy Storage Using Numerical Simulation——

Kenji Mikoda Kanji Sakai
Hisashi Fujita

Abstract

We have developed a three-dimensional numerical simulation program for long-term thermal energy storage in a confined-aquifer. The program objectives were to clarify the mechanism of heat transfer in underground water and to obtain a technique to predict thermal energy storage in the concerned aquifer. The program was calculated using finite-difference methods and cartesian coordinates. This three-dimensional program calculates the underground water flow and free thermal convection, making it possible to trace an area of warm water in a confined-aquifer. This was previously examined through heat storage experimental results in Mobile, Alabama (Moltz et al, 1983). As a result of the numerical simulation analysis, the following points were made clear: firstly, the storage of groundwater in a stagnant, confined aquifer is effective for heat transfer, and secondly, the underground water flow velocity, injection volume, and thickness of an aquifer have a great influence on the storage effects.

概 要

被圧帯水層への長期蓄熱において地下水中の熱移動現象を明らかにし、蓄熱効果の予測技術を開発する目的で3次元シミュレーションプログラムを作成した。計算方法は直交座標系の差分法であり、3次元モデルなので地下水流や自然対流を考慮した蓄熱塊の挙動の追跡を行うことができる。シミュレーションプログラムの妥当性については、アラバマ州モービルで行われた温熱蓄熱実験結果（Moltz 他, 1983）と比較して確認した。シミュレーション解析の結果、帯水層蓄熱では蓄熱塊が長期間保持されるため、停滞性の強い被圧帯水層で蓄熱効果が高いことや、地下水流速、注入水量、帯水層の厚さなど蓄熱効果を左右する諸因子の影響の大きさが明らかになった。

1. はじめに

地下帯水層への長期的蓄熱は水を媒体とした大容量の蓄熱法であり、省エネルギー、環境保全といった視点からも有望視されている。他の地下蓄熱方式と比較した場合、帯水層蓄熱の利点として恒温性が高くローカルエネルギーを利用した季節間蓄熱に適していることや、大容量のシステムが実現しやすい点があげられる。

地下蓄熱は目視不可能なために、シミュレーションによる熱的性能評価が不可欠である。とりわけ地下帯水層への蓄熱は自然地下水流による外力および温度差に起因する自然対流の影響を受けるため、蓄熱塊の移動や膨張・収縮を予測する技術が重要である。本報告では地下帯水層の熱移動現象を3次元シミュレーションによって明らかにするとともに、蓄熱効果に影響を及ぼす諸因子

について考察したものである。

2. 地下帯水層の熱輸送に関する解析方法

2.1 計算条件

計算するに当たり、以下の条件を適用する。

- ① 地下水の流れはダルシー則に従う。
- ② プシネスク近似で浮力以外の密度変化を無視する。
- ③ 異方性は鉛直方向の透水係数のみ考慮する¹⁾。
- ④ 帯水層内で、化学的な変質や地層のしゅう曲はない。
- ⑤ 揚水・還元中の井戸鋼管の熱損失は無視する。

2.2 支配方程式

被圧帯水層を飽和多孔質体として扱い、帯水層を上下から挟んでいる土層を難透水性地盤とすると、熱移動と水分移動の連立解析により、運動方程式、連続の式、熱

移動方程式, 状態方程式が以下の通り成立する。

$$V = -\frac{k}{\mu}(\nabla P + \rho g \nabla Z) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\nabla \cdot V + Q_w = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$(c\rho)_c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_c \nabla^2 \theta \quad (\text{不透水層}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$(c\rho)_e \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_e \nabla^2 \theta - (c\rho)_w V \cdot \nabla \theta + (c\rho)_w Q_w (\theta_{in} - \theta_{well})$$

(被圧帯水層) \dots\dots\dots(4)

$$\mu = 6.46 / (1 + 0.037\theta + 0.000164\theta^2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\rho = 1,000.5 - 0.0687\theta - 0.003578\theta^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

V : 地下水流速ベクトル

P : 圧力

μ : 水の粘性係数

k : 透過率

ρ : 密度

$(c\rho)_e, (c\rho)_w$: 帯水層, 水の熱容量

g : 重力加速度

Q_w : 地下水涵養量

θ : 温度

λ_e : 帯水層の熱伝導率

$\theta_{in}, \theta_{well}$: 自然地下水, 井戸の水温

2.3 数値解法

3次元直交モデルにより差分法で計算を行う。なお移流項は数値分散を避けるため一次の風上差分として扱う。計算対象領域は注入・涵養による影響半径も考慮して十分にとった。

2.4 境界条件

図-1に解析モデルの概要を示す。温度境界条件は断熱とした。圧力境界条件は水平境界を遠方境界, 下部を不透水境界, 上部を解析解境界とした。

3. シミュレーションプログラムの検証

3.1 目的

プログラムの汎用性・妥当性について検討するためには, 実験データとの照合が欠かせないが, 3次元シミュレーションと比較しうる実証実験の実施は容易でない。そこで, Moltzらの実験報告結果²⁾と本シミュレーションプログラムの計算結果を比較して検証した。

3.2 比較対象実験の概要

Moltzらはアラバマ州のモービルで1978年に温水蓄熱実験を実施した。表-1に帯水層の諸物性値を示す。帯水層は深さ40~61m, 厚さ21mと蓄熱に適している。北西の方向には年間19mの地下水の流れが存在する。実験は1978年1月17日に開始され, 平均55°Cの温水を蓄熱井戸から79日間に約54,800m³注入し, その後約51日間放置した。その後41日間に約55,300m³の地下水を揚水し熱回収を図った。

3.3 シミュレーション解析

図-2に注入終了直後の帯水層水温分布を示す。aが実測値, bが解析値で, 破線の部分は観測井戸の位置を示

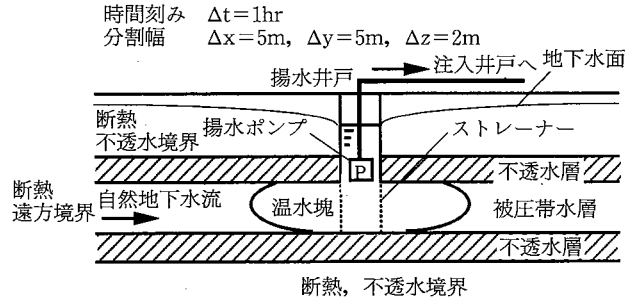


図-1 解析モデルの概要

表-1 モービルの帯水層の諸物性値²⁾

項目	数値	単位
地下水流	19	m/h
透水係数	2.25	m/h
空隙率	0.25	—
熱伝導率	2.29	W/m·K
熱容量	2,760	kJ/m ³ ·K
地下水温	20	°C

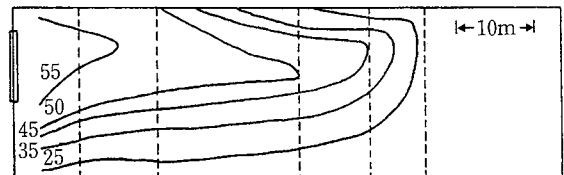


図-2(a) 注入終了直後の帯水層水温分布 (実測値)

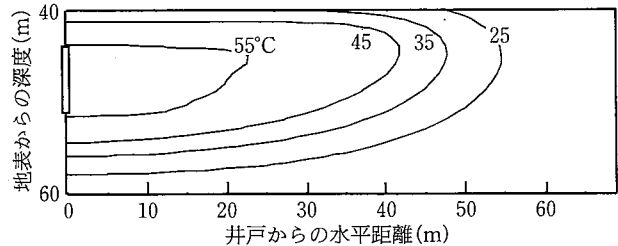


図-2(b) 注入終了直後の帯水層水温分布 (解析値)

す。シミュレーション解析によって, 蓄熱塊の成長や自然対流による上部への熱移動の傾向を捉えることができた。実験対象となった帯水層では地質の不均質性が存在し, それが実測値にも反映している。シミュレーション解析では, 水の粘性係数や密度の温度依存性や透水係数の異方性は考慮されているが, 地質の不均質性の入力は現実的には不可能である。しかしながら, 熱の保存状態と移動現象を全体的にほぼ正確にとらえることができ, シミュレーションによる予測として十分機能していると判断した。

3.4 妥当性の検証

熱回収時の蓄熱井戸の水温変化は実験では56°Cから33°Cに降下し, 解析値では52°Cから32°Cに降下した。これをもとに熱回収率を算定したところ61.3%であった。実測値では熱回収率は66%であり誤差は4.7%であった。帯水層内の地下温度分布の比較結果(図-2)と併せて,

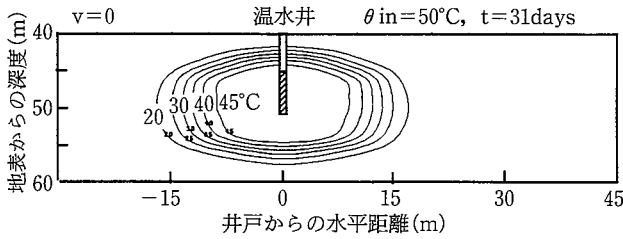


図-3(a) 注入終了直後の帯水層水温分布 (地下水流なし)

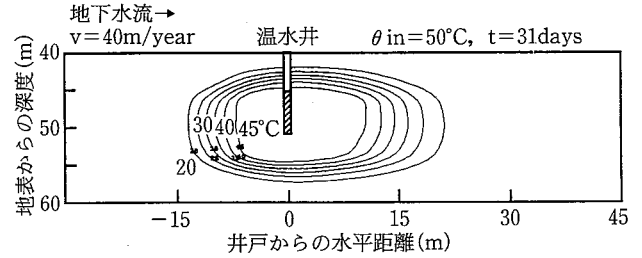


図-3(b) 注入終了直後の帯水層水温分布 (地下水流あり)

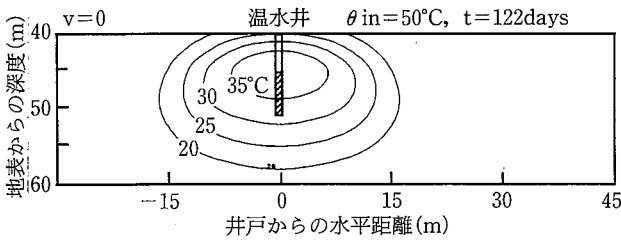


図-4(a) 蓄熱終了直後の帯水層水温分布 (地下水流なし)

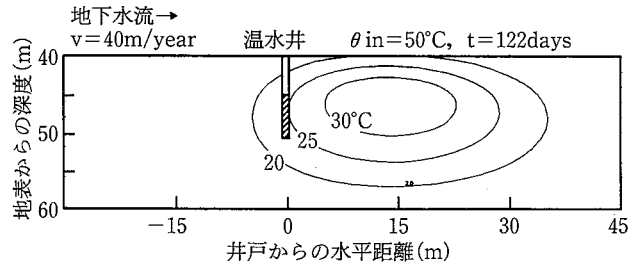


図-4(b) 蓄熱終了直後の帯水層水温分布 (地下水流あり)

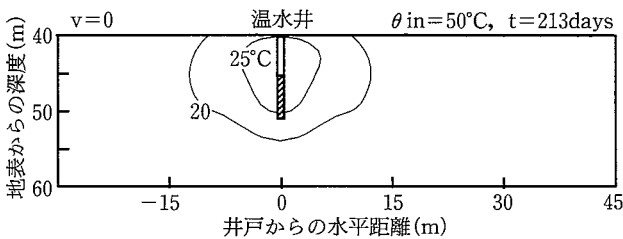


図-5(a) 熱回収終了直後の帯水層水温分布 (地下水流なし)

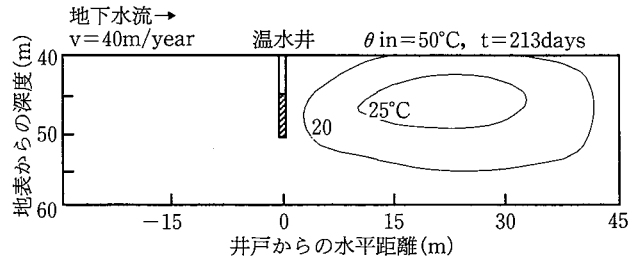


図-5(b) 熱回収終了直後の帯水層水温分布 (地下水流あり)

本プログラムにより、帯水層蓄熱の熱移動現象をシミュレートできることを確認した。

4. シミュレーション解析による熱回収評価

4.1 計算条件

地表から深さ40~60mの位置にある帯水層を対象にシミュレーション解析を行い、帯水層蓄熱の熱回収評価について検討した。計算対象領域は被圧帯水層とその上下の不透水層で、井戸を中心に160×160×60mとした。

4.2 蓄熱塊の形成と消滅

注入期間を31日、蓄熱期間を91日、熱回収期間を91日として自然地下水温15°Cの帯水層に50°Cの温水を5,000m³注入・揚水するシミュレーション解析を行った。

4.2.1 温水注入期間 注入終了時の帯水層の水温分布を図-3に示す(a.地下水流なし, b.地下水流あり)。地下水流がある場合、上流側では地下水流による正の力(下流方向を正にとると)、井戸からの注入による負の圧力が生じる。総じて注入圧力の絶対値は地下水流による外力より大きく、蓄熱塊が広がろうとする。それに対して下流側では、地下水流に蓄熱井戸からの注入圧力が加算されることになる。そのため蓄熱塊の広がり方は上流側より大きい。したがって、注入終了直後には、上流に対

して等温線の込み合った楕円形の蓄熱塊となる。地下水流がない場合には井戸を中心とした楕円形の蓄熱塊が形成される。

4.2.2 蓄熱期間 蓄熱終了時の帯水層の水温分布を図-4に示す(a.地下水流なし, b.地下水流あり)。蓄熱塊は地下水流により下流に流され、自然対流により温水塊は上層部へ移動する。このとき蓄熱塊の移動速度は地下水流速とほぼ一致していることが分かる。周囲の地下水との熱交換は蓄熱塊の外周部分との間でやりとりされるため、蓄熱塊の中心核は保護される。そのため蓄熱終了直後には高温の温水を中心部分に保つ等温線の緩やかな蓄熱塊が下流方向に存在する。

4.2.3 熱回収期間 熱回収終了時の帯水層の水温分布を図-5に示す(a.地下水流なし, b.地下水流あり)。上流側では地下水流による正の力と、井戸からの揚水に伴う吸引圧により正の圧力勾配が生じる。一方、下流側では地下水流に対抗して井戸からの吸引圧が働く。そのため蓄えられた熱量の回収は、上流に対しては下流方向より進行が早い。したがって熱回収終了直後には、半楕円形の低密度の蓄熱塊になる。このとき地下水流のある場合には熱回収の効率が悪く残存熱が多くなる。

4.2.4 蓄熱評価 帯水層に温水を注入した場合、温水

塊が形成され、その崩壊は周囲の地下水と蓄熱塊外周の間で行われる緩やかなものであり、長期的な蓄熱効果が高いことを示した。また自然地下水流の影響は大きく、これが大きな場合には蓄熱塊が流されてしまい、熱回収が困難になることが明らかとなった。約 54,800 m³の温水を注入したモービルの検証例では、蓄熱塊中心部が保護され蓄熱期間中の温度降下はわずか 3°Cであったが、5,000 m³の注入を行った本章の解析例では、蓄熱期間に 12°C温度が降下した。このように蓄熱効果は注入水量にも大きく左右され、長期的な蓄熱効果を上げるためには十分な注入水量が必要である。厚さ 20 m の恵まれた帯水層を対象に行ったここでの試算では、上部不透水層からの熱損失は、帯水層内での熱拡散に比べて小さかった。

4.3 地下水流速と回収温度の関係

帯水層蓄熱は停滞性の帯水層で行うことが原則といわれ、蓄熱の可否を問う時に第一に検討されるのが地下水流の存在である。図-6 に地下水流速を変化させたときの揚水温度を示す。条件は前節と同じである。地下水流速の増加に伴う熱回収の効率低下は顕著であった。

4.4 注入水量と熱回収率の関係

次に注入水量を変化させてシミュレーションを行った。条件は注入期間を91日、蓄熱期間を91日、熱回収期間を91日とする。図-7 に注入水量を 5,000m³から 100,000m³まで変化させたときの積算熱回収率を示す。注入水量の増加に伴い積算熱回収率も上昇するが、ある程度注入水量が大きくなると上昇幅は次第に小さくなる。熱回収率の期待値は注入水量 20,000 m³以上の良好な条件下で 50~60%程度であると推定される。

4.5 帯水層の厚さと熱回収率の関係

次に帯水層の厚さを変化させてシミュレーションを行った。条件は注入期間を31日、蓄熱期間を91日、熱回収期間を91日、注入・揚水は 5,000 m³とする。図-8 に帯水層の厚さを変化させたときの積算熱回収率を示す。温水蓄熱では自然対流により温水が上部へ移動するが、帯水層が厚いときは温水塊と上部土壌との接触が小さく不透水層への熱損失が小さい。しかし帯水層が薄いときは、温水塊が押し潰された形で水平に広がり、下部の不透水層とも接触し不透水層への熱損失が大きくなる。そのため厚さ 5 m から 30 m の帯水層に対しては、帯水層厚に比例して熱回収率が上昇するとの結果が得られた。

5. まとめ

帯水層蓄熱の3次元シミュレーションプログラムを作成し、その妥当性を確認した。そして地下水流や自然対流を考慮したうえで帯水層蓄熱の熱回収評価について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- ① 帯水層蓄熱を行うと蓄熱塊が形成され、その崩壊は周囲の地下水と蓄熱塊外周の間で行われる緩やかなものであり、長期的な蓄熱効果が高い。
- ② 自然地下水流の蓄熱に及ぼす影響は大きく、温水塊が流されてしまい、熱回収が困難になることもある。

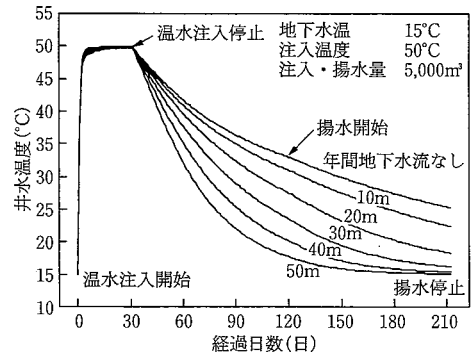


図-6 自然地下水流と熱回収温度の関係

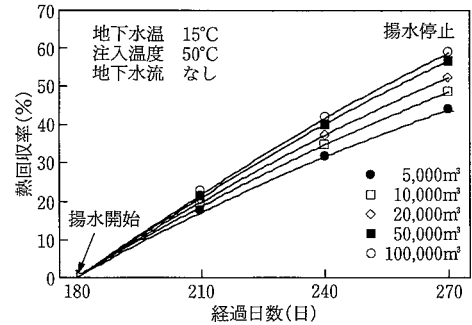


図-7 注入水量と熱回収率の関係

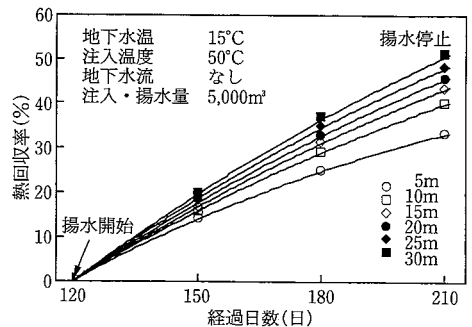


図-8 帯水層厚と熱回収率の関係

③ 蓄熱効果は注入水量にも左右される。注入水量が少ないと地下水と蓄熱塊の接触面積が大きくなり、温度レベルの高い蓄熱塊の中心核が失われるためである。長期的な蓄熱効果を上げるためには十分な注入水量が必要である。

④ 厚みのある帯水層で蓄熱した場合、蓄熱塊と上部土壌との接触が小さく不透水層への熱損失が小さくなる。したがって厚さ 5 m から 30 m の帯水層に対しては、帯水層厚に比例して熱回収率が上昇する。

参考文献

- 1) 横山孝男, 他: 任意かん養地を対象とした蓄熱シミュレーションの開発, 日本機械学会論文集 B 編59巻563号, p. 200~205, (1993)
- 2) Moltz, Melville, Guven, Parr: Aquifer Thermal Storage, An Attempt to Counter Free Thermal Convection, Water Resource Research Vol.19, No4, p. 922~930, (1983)