

浅層帯水層季節蓄熱に及ぼす季節的な気象変化の影響

Influence of seasonal meteorological change on seasonal thermal energy storage in a shallow aquifer

渡邊 洋*・福原輝幸**・足立克巳***

By Hiroshi WATANABE, Teruyuki FUKUHARA, Katsumi ADACHI

Aquifer thermal energy storage (ATES) is recognized as the storage of local and seasonal thermal energy, such as summer heat, winter chill, and industrial waste heat. ATES closed by water proof walls (Closed ATES, CATES) prevents the spread of water quality pollution caused by thermal, biological and chemical change. Especially, the use of ATES in a shallow aquifer will provide low construction costs, reduction of heat transfer loss and easy maintenance besides seasonal extraction of stored thermal energy. ATES in a shallow aquifer, however, should be sensitive to seasonal meteorological changes, so that it involves many uncertainties for seasonal thermal energy storage.

This paper describes characteristics of CATES in a shallow aquifer which is subjected to seasonal meteorological changes, by a numerical computation model.

Keywords : *aquifer, seasonal thermal energy storage, meteorology*

1. はじめに

エネルギーの有効利用は何時においても社会問題として挙げられるが、時代背景によりその着眼点は変化する。1973年の石油危機を境にそれ以前はコスト低下に、以後は資源節減にあった。近年では炭素系燃料と温室効果ガス抑制、近未来には散逸エネルギー量の限定となるであろう。今後の人口増加と経済成長発展、南北格差是正への動向は必然的にエネルギー消費の増大を要求する。上述の地球環境問題はこれらの要求を満足させながら解決すべき困難な課題である。その解決には省エネルギーと未利用エネルギー活用が残された道であり、それらの技術開発が望まれている。

太陽エネルギーや廃熱に代表される未利用熱エネルギーは供給変動が大きく、需要変動に対応し難いことから、利便性を理由に放置されることが多い。帯水層熱エネルギー貯蔵(Aquifer thermal energy storage→ATES)を導入したシステムは、需給変動を調整可能とし、未利用熱エネルギー活用の促進に寄与する。

ATESの実績では、地層の断熱性に着目した熱エネルギー貯蔵が実際の帯水層において試行され、多くの成果が得られた。地層を熱流体に模した数値計算モデルと注入および回収過程の観察により、貯蔵効率を把握する努力がなされ、地下水流や浮力流が及ぼす貯蔵効率への影響も論じられた。また、地域特性を有する帯水層、水理的に閉鎖された閉鎖型帯水層および人工帯水層での実験研究が続く。さらに、熱エネルギーの利用効率を高めるため、大深度帯水層での実験も進められた。一方、各種の熱源を利用したシステムの具体的な応用例が多くなるに伴い、環境や経済コストの問題が顕在化した。そこでは、地層鉱物と熱流体の化学反応の透水性への作用、システム構成や注入井および回収井配置の最適化が研究された。時間経過に伴う帯水層の透水性低下の原因では、微生物増殖の影響も議論された。

こうした先人の経験¹⁾から、防水壁で囲まれた閉鎖型 ATESは周辺環境への熱的、生物学的および化学的な影響も少ない新しい熱エネルギー貯蔵法である。さらに、システムを浅層へ設置することは熱損失を含めた熱輸送コスト、運用保守の容易性から経済性を高めることも期待できる。

そこで本研究では、浅層帯水層を利用した閉鎖型 ATES の熱エネルギー貯蔵に及ぼす季節的な気象変化の影響に注目し、その特性について数値解析から検討を行った。

* 学生員 福井大学大学院博士後期課程システム設計工学専攻 (〒910 福井市文京 3-9-1)

** 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京 3-9-1)

*** 正会員 株式会社大林組 土木技術本部(〒113 東京都文京区本郷 2-2-9 センチュリータワー)

2. エネルギー利用と貯蔵

2.1 熱エネルギー利用の現状とその特性

家庭、産業および公共施設などにおけるエネルギー利用の形態は、最終的に熱エネルギーとして消費されることが多い。**Table 1** に我々が利用できる熱エネルギー源とその特性を示した。第2次大戦以降、消費量が増大した炭素系燃料は、需給変動への対応が容易であり、安定した供給を可能にする点に特徴がある。換言すれば、その利便性が熱エネルギー消費増大を促したと言える。今日では環境破壊および自然保護の観点から、炭素系燃料消費の抑制が望まれており、今後に残された選択は積極的な未利用熱の活用および再利用にある。しかしながら、温度レベルが低く、また、時間的および季節的な変動を有する未利用熱は、要望される安定した熱エネルギー供給に対して、その取り扱いを困難にさせている。

2.2 自然熱エネルギーの季節蓄熱と利用

Figure 1 は時間的、季節的な変動を有する未利用熱の供給(図中実線)と需要(図中点線)との間の関係を、温熱(上図)および冷熱(下図)についてそれぞれ示すものである。温熱および冷熱の需給変動には不均衡が生じ、未利用熱活用の際には、これらの不具合を平滑化する技術の開発が必要となる。例えば、上図では夏期に余剰の温熱が発生し、冬期には不足が生じる。一方、下図では冬期に余剰の冷熱が発生し、夏期には不足を来す。ここで、温熱および冷熱において季節間の蓄熱が実現すれば、両者のピークシェーピング効果から熱源供給施設の肥大化が抑制され、それらの社会基盤整備の建設コストも低減できる。

2.3 帯水層熱エネルギー貯蔵

熱エネルギーを貯蔵するには、比較的高い断熱性能と大きな体積熱容量が期待できる地下地盤、特に地下帯水層の利用が有効である。ATES は、地層内の空隙水(地下水)および土粒子を蓄熱の媒体として利用する技術である。

都市の多くは沖積層や洪積層の砂礫層上に発達し、そこに包含される地下水を生活や産業の水源としてきた。しかしながら、人口集中と活発な産業活動は用水需要の増大を招き、さらに、地下水の枯渇や源水供給能の限界は、表流水への水源転換を促した。すなわち、そこではエネルギー需要地という立地条件に加え、未利用の帯水層が存在する。

ATES の原理的な貯蔵システムの例を大別し、**Figure 2~4** に模式的に示す。**Figure 2** は一本の井戸により注入および回収を行う方式で温熱、もしくは冷熱のいずれかの単一目的利用で採用する。**Figure 3** は二つの井戸による温冷二井方式であり、例えば、時間や季節に応じて注入井戸と回収井戸を切り替えることで、温熱および冷熱を交互に利用する。**Figure 4** に示すような底部の不透水層と遮水壁に囲まれた領域(貯蔵領域と定義)に、熱エネルギー貯蔵を施す閉鎖型は、地下水汚染(熱および水質汚染)の懸念など、環境に十分な配慮を要する場合、もしくは非常に速い地下水流速のある帯水層を用いる場合に採用される。また、自由水面を有する帯水層においては、その貯蔵領域上部に表層からの熱的な影響を低減するための断熱層、雨水や融雪水などの浸透による顕熱流の影響を抑制するための遮水層を設置する場合もある。

Table 2 には ATES の貯蔵方法(開放型および閉鎖型)および設置位置(浅層および深層)に伴う、蓄熱環境および運用の関係を示す。ATES における地下水汚染としては帯水層内の温度変化による熱的、生物学的および化学的な汚染

Table 1 利用可能な熱エネルギー源とその特性

熱源	形態		特性
炭素系燃料	石油、石炭		需給変動容易
	天然ガス		安定供給可能
未利用熱	自然	太陽、風力	時間的変動大
	自然	地熱、水力	温度レベル低
	廃熱	工場廃熱 生活廃熱	時間的変動大

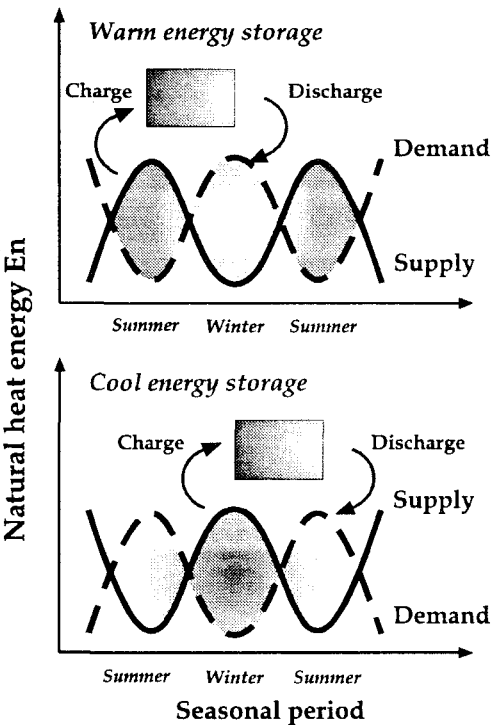


Figure 1 自然熱エネルギー季節蓄熱と利用

Table 2 帯水層熱エネルギー貯蔵とその特性

項目	開放型	閉鎖型	浅層	深層
地下水汚染拡大	×	○	△	△
地下水流の影響	×	○	△	△
地層断熱の効果	△	△	×	○
浸透水の影響	×	○	×	○
建設運用と保守	×	○	○	×
輸送時の熱損失	△	△	○	×

○:適 ×:不適

が懸念され、それに伴う注入および回収井付近で生じる汚染物質の析出や目詰まりは大きな障害を来す。また、地下水質回復に多くの費用と時間を要することを考慮すれば、汚染域の拡大回避は必須の課題である。貯蔵領域を横切る地下水流れは、熱回収率に影響を及ぼす要因の一つであり、回収井のデザインを複雑にする。また、地層断熱効果として、特に深層蓄熱では温度境界条件を一定として取り扱うことが可能で、表層からの気象や浸透水などによる熱的な影響も無視できる。すなわち、数値解析のための外部境界条件も単純化される。一方、熱利用地域と貯蔵領域との距離の増加は熱輸送コストおよび熱輸送時の熱損失に反映する。さらに、システムの種々の維持管理に際しては、浅層に位置するケースでより有効である。

以上の点より、筆者らは日本の帯水層および地下水事情を考慮し、浅層の自由水面を有した不圧帯水層を利用した蓄熱システムを提唱する。

2.4 浅層閉鎖型帯水層熱エネルギー貯蔵

Figure 5 に閉鎖型帯水層熱エネルギー貯蔵の概要および地盤と大気との間の熱的相互作用の概念を示す。浅層（地表からの深さがおよそ 10m までを想定）帯水層の両側方には地下水流の流入出を防止する遮水壁が設けられる。また、図中には注入および回収井が配置され、開放されたストレーナーより温水および冷水が注入、回収される。さらに、貯蔵領域上部には表層の熱・水分輸送による影響を抑制するための断熱層、遮水層が設置される場合もある。一般的には回収された熱源はそのまま、もしくは必要であればヒートポンプ、熱交換器などを介して利用されるが、ここではその熱利用システム構成の詳細については言及しない。

3. 浅層閉鎖型帯水層熱エネルギー貯蔵の熱・水分輸送理論

貯蔵領域内の熱・水分移動は多孔媒体中の質量保存則および熱エネルギー保存則に従う。上述したように、浅層の ATES においては貯蔵領域と大気との間の熱的相互作用は重要である。

3.1 ATES における熱・水分輸送理論

3.1.1 貯蔵領域水分輸送理論

飽和多孔媒体中の流体の流れはダルシー則に従う。ただし、ここで注入および回収量は同時同量であるとし、その速度もダルシー則の適用範囲であることから、多孔媒体の変形はなく、非圧縮流体を

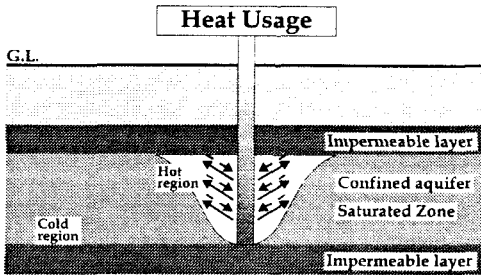


Figure 2 開放型単一井方式 ATES

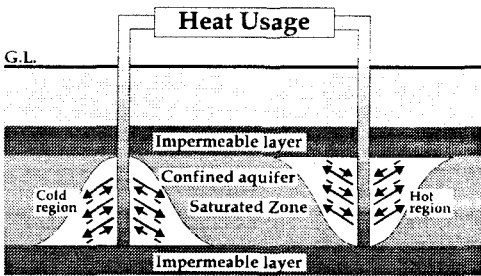


Figure 3 開放型温冷二井方式 ATES

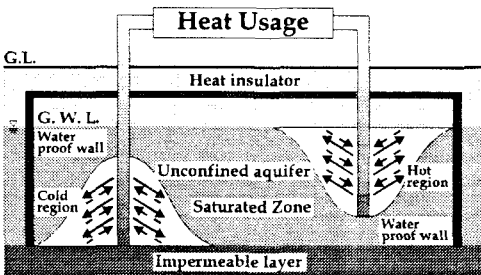


Figure 4 閉鎖型温冷二井方式 ATES

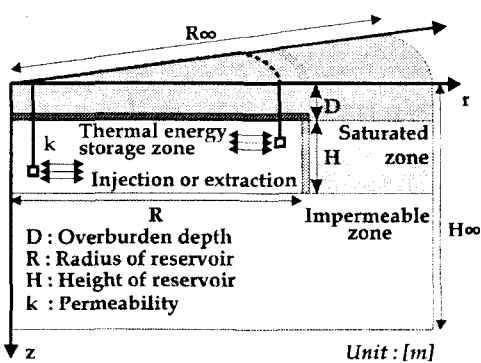


Figure 6 解析モデル概略図

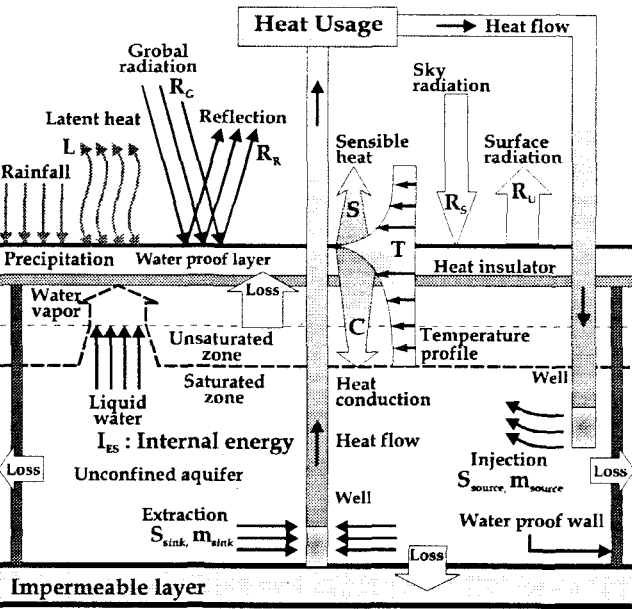


Figure 5 浅層帯水層熱エネルギー貯蔵の概略

取り扱うものとする。よって、この水分輸送支配方程式は式(1)で表される。

-∇(ρv)+msource-msink=0 (1)

ここで、ρ:水の密度、v:流速、msource および msink :注入および回収フラックス、∇:微分演算子、である。また、ダルシー則を構成する密度および動粘性係数は温度の関数であり、浮力流の効果を考慮するため、それぞれの温度依存性は数値解析に含まれる。

3.1.2 貯蔵領域熱輸送理論

貯蔵領域内の熱輸送は伝導、移流、注入および回収エネルギーで支配され、基礎方程式は式(2)のようになる。

(ρc)∂T/∂t= ∇(λ∇T)-(ρcw)v∇T+Ssource-Ssink (2)

ここで、Ssource および Ssink :注入および回収に伴う熱エネルギー密度、(ρcw):水の体積熱容量、T:温度、(ρc):貯蔵領域帯水層の体積熱容量、λ:熱伝導率、である。ただし、ここでは貯蔵領域内で生じる水分の相変化は考慮されない。

3.2 解析モデル概略と境界条件

3.2.1 貯蔵領域境界および地盤条件

Figure 6 に本論で扱う閉鎖型帯水層蓄熱システムの解析モデル概要図を示す。解析には円筒座標系を用い、貯蔵領域の半径は40m、高さは10mである。これに対し、全解析域の半径および深さは、それぞれ300mおよび350mとする。ここで、貯蔵領域周辺地盤は均一とする。地下水位は浅い(地表面下1.5m)条件を設定し、土壌の不飽和域での水分移動およびそれに伴う熱移動は無視される。また、地下水流の影響および浮力流の影響はここでは考慮しない。よって、地盤内の熱移動は式(3)の熱伝導方程式

(ρc)∂T/∂t=∇(λ∇T) (3)

で与えられる。貯蔵領域の土被り厚さは0.5mおよび10mの2種類とし、地質は砂礫層で構成される。貯蔵領域の下方には不透水層が存在する場合を想定する。また、貯蔵領域の遮水壁は厚さ1mのコンクリート製である。さらに、貯蔵領域上方には雨水浸透を防止するための遮水層が設けられており、その熱物性値はコンクリートのそれと同様にする。貯蔵領域に注入および回収を行う井戸ストレーナーは、貯蔵領域上部より4m下方、遮水壁より4m内側に温熱領域ストレーナーを、一方、貯蔵領域上部より6m下方、中心より4mに冷熱領域ストレーナーをそれぞれ設けた。

3.2.2 表層大気境界

Figure 5 に従えば、地盤表層における境界要素の内部熱エネルギーIESの時間的変化率∂IES/∂tは、大気長波放射エネルギーRS、地表放射エネルギーRu、短波放射エネルギーRG、空気移動による顕熱S、蒸発による潜熱Lおよび地中熱伝導エネルギーCで規定される。すなわち、

∂IES/∂t=C+RG+RS-Ru-S-L (4)

となり、地盤表層においての気象変化に起因する熱的挙動は、これらの熱エネルギー成分の収支により支配される。しかしながら、本解析では表層の水分条件の定量的評価が困難であるため、地表からの水分浸透および潜熱Lは考慮していない。

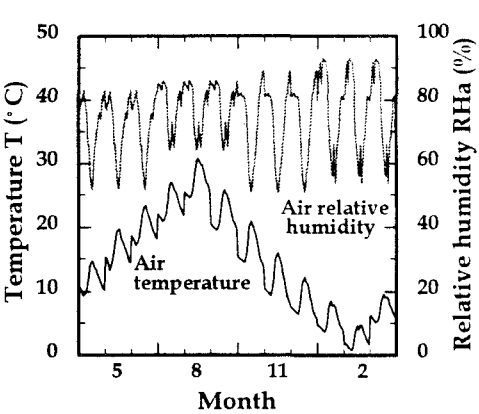


Figure 7 気象条件(気温および湿度)

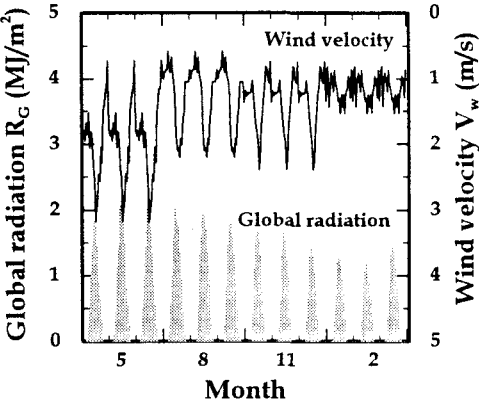


Figure 8 気象条件(全天日射量および風速)

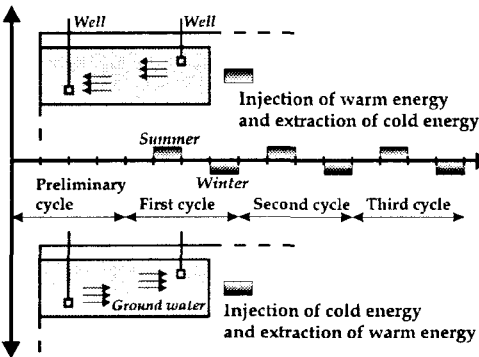


Figure 9 注入および回収運転スケジュール概略

Table 3 計算条件

	Case-1	Case-2
D (m)	1.5	10
H (m)	10	10
H∞ (m)	350	350
R (m)	40	40
R∞ (m)	320	320
k (m²)	3.2×10 ⁻¹¹	3.2×10 ⁻¹¹

3.3 数値解析条件

3.3.1 気象条件

気象データ(気温、湿度、風速、全天日射量)は福井地方気象台(1989年4月から1994年4月の間の1時間毎)の日原簿より得た。それらは月毎にアンサンブル平均され、Figure 7 および Figure 8 に示される。

3.3.2 注入・回収運転スケジュール

Figure 9 には温熱および冷熱エネルギーの注入・回収運転スケジュールが示される。比較検討を簡単化するために、夏期(7、8および9月)には温熱注入部へ35℃の温水が注入されると同時に、冷熱回収部からは同量の水量が、その回収領域での要素温度にて抽出される。一方、冬期(1、2および3月)には冷熱注入部へ5℃の冷水が注入されると同時に、温熱回収部からは夏期と同様に抽出される。夏期および冬期の注入および回収水量は、道路融雪²⁾や路面温度制御施設³⁾の利用を想定して約20ℓ/minと設定する。なお、数値計算は6年間に渡り、行われる。

3.3.3 計算条件および解析手法

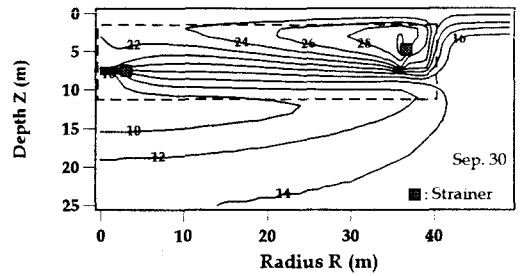
Table 3 に本解析の計算諸条件を示す。表中の係数は Figure 6 中のそれに対応し、Case-1(浅層)および Case-2(深層)には前述した表層の土被り厚さに相違がある。なお、両者の浸透係数は砂礫より構成された帯水層を想定する。

本解析は積分有限差分法により解かれる。

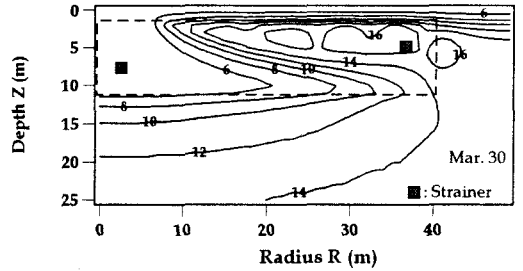
4. 解析結果

Figure 10 (a)~(d)に6年目の夏期(1980日目)および冬期(2160日目)の冷温熱注入回収完了時の内部温度の等温分布を、Case-1 および Case-2 でそれぞれ示した。図中の(■)はストレナーの位置を、破線の枠は遮水壁で囲まれた貯蔵領域をそれぞれ表す。まず、夏期の温熱注入および冷熱回収を完了した Figure 10 (a)および(c)に注目すると、温熱注入部付近の温度は両者ともに30℃程度である。また、両者において、注入された温熱は浮力流の影響により半径方向に(側壁から中心に向かって)広がるが、後者では鉛直下方への発達も観られる。これは、(a)では貯蔵領域上方の地盤温度が低いために、同地盤を暖めながら温熱が広がるのに対して、(c)では貯蔵領域上部水温とその上方の地盤温度との差が小さいために、温熱は水平方向に加えて、鉛直下方にも広がることに起因する。冬期の冷熱注入および温熱回収を完了した Figure 10 (b)および(d)では、冷熱注入部付近の温度は両者ともに5~6℃前後で、その冷熱領域の拡がりには下部の不透水層に沿うように(中心から側壁に向かって)進行する。また、夏期に注入した温熱領域付近の温度低下の程度は前者で約14℃、後者で約8℃であり、前者の方が大きい。この原因は夏期から冬期にかけての貯蔵領域上方からの温熱の散逸が深層に設置した Case-2 に比較して、浅層に設置した Case-1 で大きいためである。さらに、ここでは示していないが、貯蔵領域において、注入域から回収域に向かうような大規模な反時計回りの循環流に加え、注入域と回収域との温度差も大きいことから、Case-2 の貯蔵領域内部の等温分布は、Case-1 のそれに比較して、水平方向の温度成層化が明瞭となる。

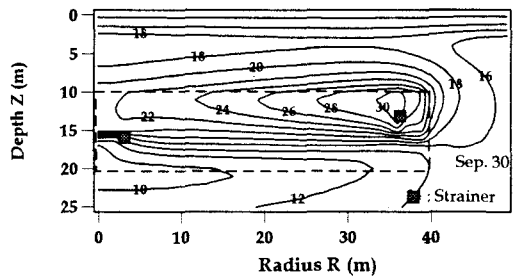
Figure 11 は総熱回収率 $C_T (= \sum (E_w + E_c) / \sum (I_w + I_c) \times 100 [\%])$ 、 E_w および E_c : 回収された温熱および冷熱エネルギー、 I_w および I_c : 注入された温熱および冷熱エネルギーを Case-1 は点線で、Case-2 は実線で示す。また、Case-1 の熱回収率 C_1 を温熱(○)および冷熱(△)について、Case-2 の熱回収率 C_2 も温熱(●)および冷熱(▲)について、同図にそれぞれ示す。なお、温熱の熱回収率は $(E_w / I_w \times 100 [\%])$ 、冷熱の熱回収率は $(E_c / I_c \times 100 [\%])$ と定義され



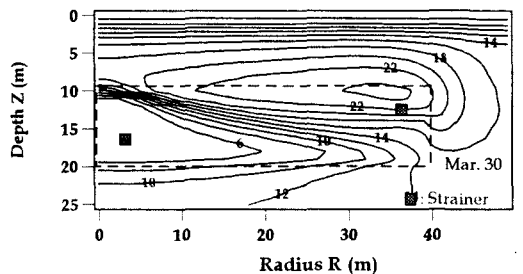
(a) 夏期温熱注入および冷熱回収完了時 (Case-1)



(b) 冬期冷熱注入および温熱回収完了時 (Case-1)



(c) 夏期温熱注入および冷熱回収完了時 (Case-2)



(d) 冬期冷熱注入および温熱回収完了時 (Case-2)

Figure 10 地盤および貯蔵領域等温分布(6年目)

る。さらに、Case-2 に対する Case-1 の熱回収比率 $C_R (=C_1/C_2)$ も温熱(□)および冷熱(▽)について併示する。まず、Case-1 では季節変化とともに温熱(○)の熱回収率は低下し、冷熱(△)は緩やかに増加する。一方、Case-2 ではその関係は逆転し、温熱(●)で増加、冷熱(▲)で僅かに減少する傾向にある。また、総熱エネルギーの熱回収率は両者で緩やかに増加するが、Case-1 (—)に比較してCase-2 (—)で値が高い。Case-2 に対する Case-1 の熱回収比率は温熱(□)で低下、冷熱(▽)で増加する。

Figure 12 (a)および(b)には前述の熱回収率の結果を吟味するため、夏期および冬の貯蔵領域上部および下部を横切る熱エネルギーフラックスの経年変化率 F_i/F_{2nd} (3 年目以降の夏期および冬の熱エネルギーフラックス F_i を 2 年目のそれ F_{2nd} で除したもの、ここで添字 i は経過年数)を Case-1 および Case-2 のそれぞれで示した。まず、貯蔵領域上部境界における夏期の F_i/F_{2nd} は、Case-1 (○)で年の経過に伴い緩やかに増加する。一方、Case-2 (●)では減少する。また、冬の F_i/F_{2nd} は Case-1 (△)および Case-2 (▲)ともに減少傾向にあり、それは後者で顕著となる。これは蓄熱の過程において、貯蔵領域からその上方の地盤に渡る温度勾配が Case-1 で増大し、Case-2 で減少するためである。この主要因は両者で異なり、Case-1 におけるこの温度勾配増大は、貯蔵領域上部を横切る熱エネルギー流出の増加に伴う貯蔵領域の温度低下に起因し、Case-2 におけるこの温度勾配減少は、貯蔵領域上方地盤の温度上昇に伴う貯蔵領域上部を横切る熱エネルギー流出の減少に起因する。これより、前述の Case-1 での温熱回収率の減少および冷熱回収率の増加が理解される。次に、貯蔵領域下部境界において、夏期の Case-2 (●)に注目すると 3 年目を境に符号は逆転する。これは 3 年目までに貯蔵領域下方の地盤から貯蔵領域へ流入していた熱エネルギーフラックスが、流出へ転換することを意味し、その程度は年の経過に伴い顕著となる。一方、夏期の Case-1 (○)、冬の Case-1 (△)および Case-2 (▲)はいずれも年の経過に伴い減少するが、夏期の Case-1 (○)で著しい。これは貯蔵領域からその下方の地盤に渡る温度勾配が、相対的に Case-2 で大きく、Case-1 で小さくなるためである。この主要因も両者で異なり、Case-2 においては、貯蔵領域の温度上昇に伴う貯蔵領域下部を横切る熱エネルギー流出の増加に起因し、Case-1 においては貯蔵領域下方地盤の温度低下に伴う貯蔵領域下部を横切る熱エネルギー流出の減少に起因する。これより、前述の Case-2 の冷熱回収率の減少および温熱回収率の増加が理解される。また、総熱エネルギーの熱回収率が Case-2 に比べ、Case-1 で低くなることは、注入した夏期の温熱が貯蔵領域上部を横切り、その上方の地盤へ移動し、最終的に大気へ散逸したことに起因すると推察される。

5. おわりに

閉鎖型 ATES の熱エネルギー貯蔵に及ぼす季節的な気象変化の影響を示した。浅層に位置する熱エネルギー貯蔵システムの熱回収特性は季節的な気象の影響を反映し、深層に位置するそれとは相違がある。今後は表層からの顕熱浸透流の影響も考慮した計算スキームの構築を試みる。

参考文献

- 1) 足立ら: 帯水層熱エネルギー貯蔵における熱流体の諸問題、日本地下水学会秋季講演会要旨、pp.128-133、1995
- 2) 森山ら: 掘削杭熱交換方式による地層蓄熱と融雪、日本地下水学会秋季講演会要旨、pp.142-145、1995
- 3) 渡邊ら: 貯水槽季節蓄熱方式による路面温度制御 第一報、土木学会第 50 回年次学術講演会概要集、CS、1995

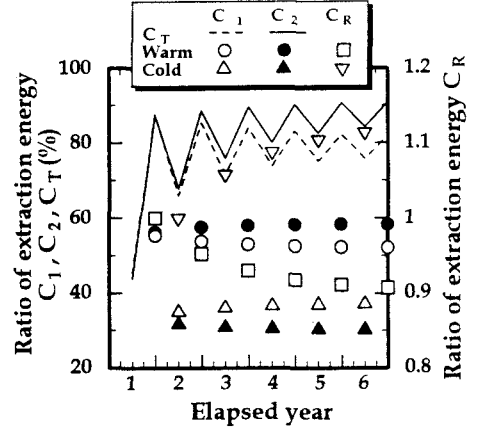
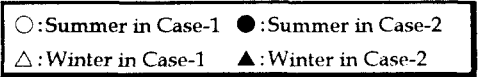


Figure 11 熱回収率の経年変化



(a) 貯蔵領域上部

(b) 貯蔵領域下部

Figure 12 熱エネルギーフラックスの経年変化率