

帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究 -帯水層の温度応答を予測する集中定数モデルの構築-

地域環境計画分野 伊藤 貴之

Abstract

帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムは建物下の帯水層を蓄熱槽として利用するため、蓄熱空調システムの欠点である槽構築のコストやスペースを必要としないため、既存建物への導入可能性で優れている。しかし、導入事例や既往研究のほとんどが季節間利用を前提としており、昼夜間利用を扱った例は少ない。また我が国で普及していない原因は設計手法が確立されていないためだと考えられる。そこで本研究は前例の少ない昼夜間蓄熱システムに焦点を当て、性能予測ツールの1要素となる帯水層の温度応答を予測する集中定数モデルを構築することで、設計手法確立に貢献することを目的としている。地下水流動解析ソフト FEFLOW の計算値と比較することで、本モデルの精度検証を行い、帯水層の揚水温度を精度良く予測できることを示した。また、流量や注水温について感度解析を行うとともに、井戸間の熱干渉が生じない条件を検討し、実際に設計支援ツールとして運用する際の利用条件を明確にした。

1. 研究の背景

2011年3月11日に起こった東日本大震災の影響は電力供給にまで及び、電力需要が高まる夏期や冬期の電力需給に注目が集まっている。電力負荷平準化に向けた技術である蓄熱空調システムは、負荷の小さい夜間に熱を蓄えて、負荷の大きい昼間に蓄熱分を利用するもので、当初は熱源機の容量削減や容量制御による運転効率の低下を避けることなどを目的として導入されたが、夏にピークとなる電力負荷を夜間に移行するといった平準化にも貢献できることから、近年の設計手法の確立と相俟って、一般的な空調技術として建築設備設計指針などにも採用されるとともに、国レベルでの環境負荷低減技術として位置づけられている。しかし、蓄熱槽構築にコストやスペースが必要となるため、既存の建物への導入が困難である。そこで、建物下の帯水層を蓄熱槽として利用すれば、井戸の掘削費などが必要になるものの、槽構築自体のコストや設置スペースの確保が必要でなくなる(図1)。

2. 研究の目的

帯水層蓄熱システムは欧州を中心に展開されており、積極的な研究開発や導入事例が多く見られているが、日本での適用事例は、テスト的な導入や融雪目的など小規模なものに留まっており、導入件数もわずかである。また、導入事例や既往研究のほとんどが季節間蓄熱利用を前提としており、本研究の対象としている昼夜間利用を扱った例は京大の中村の研究¹⁾を除いては確認できない。また、本システムの国内における普及

課題は設計手法の確立および設計支援ツールの整備であると考えている。しかし、実在帯水層は複雑で蓄熱性能を予測することは困難であり、中村の研究においても短期間の温度応答を再現できていなかった。本研究の目的は、帯水層蓄熱システムの性能を予測するための1要素となる帯水層の短期的な温度応答を予測するモデルの構築である。

これまで、実験により得た実在帯水層の温度応答に対し、独 WASY 社の地下水流動解析ソフト FEFLOW を用いてパラメータ同定を行うことで、温度応答を再現する蓄熱側モデルを得てきた。しかし、設計者が容易に利用できるツールとするためには、FEFLOW のような分布定数モデルよりも出来るだけ簡易なモデルであることが望ましいと考え、本研究では計算負荷や計算時間が縮小できる集中定数モデルでの近似を行った。このモデルは設計手法確立への貢献や設計支援ツールとして機能することができる。

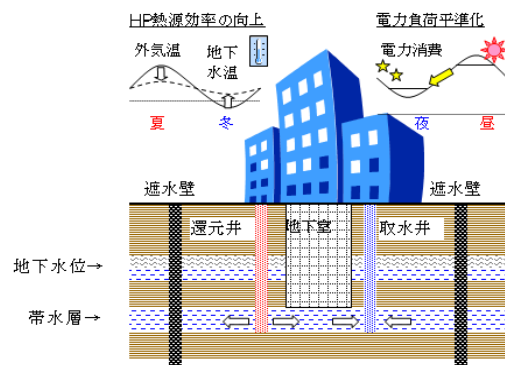


図1 帯水層蓄熱システムイメージ

3.集中定数モデルの構築

これまでの研究で、地下水流動解析ソフト FEFLOW によって帯水層の揚水温度を再現するモデルの構築は、分散長の同定により可能であることがわかった。しかし、分布定数系のモデルでは、長期間の運転シミュレーションや空調設備側モデルも合わせたエネルギー計算を行う際、計算負荷や計算時間が大きくなってしまふ。そこで、モデルの集中定数化を考える。

3.1モデル概要

図 2 にモデル概念図を示す。帯水層を連結型の蓄熱槽とみなし、水蓄熱槽の温度推定に用いられる常微分方程式²⁾を参考にモデルを構築する。井戸から帯水層への熱の広がり半径方向で一様に流れるとみなしたことから、1次元のエネルギー方程式のみを解くこととする。以下に構築する集中定数モデルの仮定条件をまとめる。

- ・自然地下水流が無い条件を仮定する。
- ・1本井戸で注水/揚水を行う。
- ・上下の不透水層への熱伝導を考慮する。
- ・完全混合槽モデルを想定し、槽内の固体部と液体部の温度は等しいと仮定する。
- ・水の密度と比熱は水温に依らず常に一定値とする。
- ・1次元の円筒空間をシミュレーションする。

格子点と距離の定義を図 3 に示す。便宜上、槽間の境界を平行な直線で描いているが、実際には円筒形の空間に対してのシミュレーションを行うので、図中の右上にあるような形をしている。円筒の中心軸(井戸)周りの槽内の格子点の番号を 1 とし、格子点を中間に挟むように各槽の境界面が設定してある。槽数は全部で n 個あり、n 番目の一番外側の境界面の先に n+1 番目の格子点を設けている。これには初期地温一定条件を与える。分割方法としては、井戸周りの分割幅を細かくし、井戸から遠方になるほど粗くすることで、分割数を減らすことができ、計算負荷を小さくできる。そこで、初期分割幅 a、公比 r の等比数列で分割幅を決定していく。

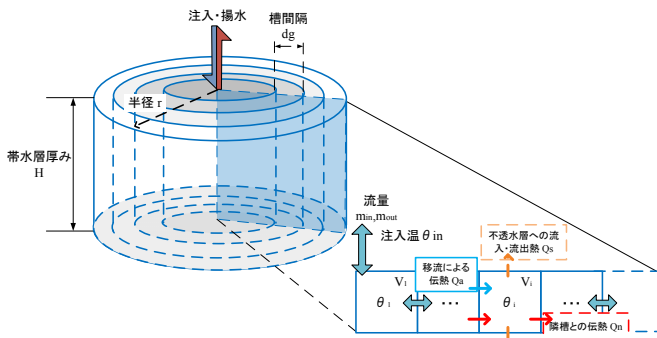


図 2 集中定数モデル概念図

3.2モデルを構成する支配方程式

土壌の熱物性については間隙率を考慮し、固体部と液体部の伝導率と熱容量を合成することで、等価熱伝導率と等価熱容量を得る。熱伝導率に関しては、帯水層部(式(1)参照)と不透水層部(式(2)参照)それぞれについて求める。

$$\lambda_{e_g} = \varepsilon \lambda_w + (1 - \varepsilon) \lambda_{s_g} \quad (1)$$

$$\lambda_{e_c} = \varepsilon \lambda_w + (1 - \varepsilon) \lambda_{s_c} \quad (2)$$

$$(c\rho)_e = \varepsilon (c\rho)_w + (1 - \varepsilon) (c\rho)_s \quad (3)$$

FEFLOW におけるエネルギー方程式⁶⁾を参考に式(4)で表される熱分散率を集中定数モデルに導入する。

FEFLOW の基礎式(18)において熱分散は縦分散長と横分散長の 2 つの特性で表現されるが、集中定数モデルにおいては縦と横を統合した近似分散長として、流速と乗じることで熱分散率を表現する。

$$D = \alpha \times u \times (c\rho)_w \quad (4)$$

$$\lambda_a = \lambda_{e_g} + D \quad (5)$$

$$R_i = \frac{1}{2\lambda_a \pi H_g} \times \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$R_{c,i} = \frac{H_c}{\lambda_{e_c} S_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

熱分散率の次元は熱伝導率 [$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$] と同じになる。熱分散率と式(1)で示した帯水層部の等価熱伝導率の和を帯水層の見掛け熱伝導率として、分散考慮とした。

n 槽から構成される帯水層モデルの第 i 槽における温度は式(11)~式(13)に支配される。ただし、第 1 槽においては、注水時の投入温度との関係に加え、第 2 槽としか熱交換しないため、式(8)~式(10)のようになり、第 1 槽の温度データを揚水温とみなす。左辺に蓄熱による温度変化、右辺に移流による伝熱、隣の槽との熱交換、不透水層との熱伝導が含まれている。運転停止時は移流による伝熱項と分散項が無くなり、隣槽との熱伝導、上下不透水層との熱伝導のみの形となる。槽数が n なので、n 元の連立常微分方程式を解くことになる。本研究ではオープンソースの数値計算ソフトである Scilab を利用し、解法は時間後差差分による陰解法とした。

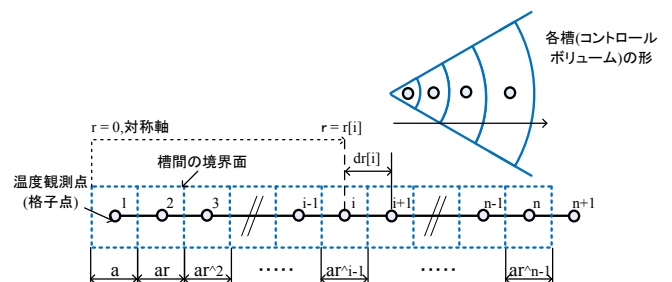


図 3 格子点の距離と定義

●第 1 槽(i = 1)

・注水時

$$(c\rho)_e \cdot V_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = (c\rho)_w \cdot m_{in}(\theta_{in} - \theta_1) + \frac{1}{R_1}(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{R_{c,1}}(\theta_s - \theta_1) \quad (8)$$

・揚水時

$$(c\rho)_e \cdot V_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = (c\rho)_w \cdot m_{out}(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{R_1}(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{R_{c,1}}(\theta_s - \theta_1) \quad (9)$$

・停止時

$$(c\rho)_e \cdot V_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{R_1}(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{R_{c,1}}(\theta_s - \theta_1) \quad (10)$$

●第 i 槽(i = 2~n)

・注水時

$$(c\rho)_e \cdot V_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = (c\rho)_w \cdot m_{in}(\theta_{i-1} - \theta_i) + \frac{1}{R_{i-1}}(\theta_{i-1} - \theta_i) + \frac{1}{R_i}(\theta_{i+1} - \theta_i) + \frac{1}{R_{c,i}}(\theta_s - \theta_i) \quad (11)$$

・揚水時

$$(c\rho)_e \cdot V_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = (c\rho)_w \cdot m_{out}(\theta_{i+1} - \theta_i) + \frac{1}{R_{i-1}}(\theta_{i-1} - \theta_i) + \frac{1}{R_i}(\theta_{i+1} - \theta_i) + \frac{1}{R_{c,i}}(\theta_s - \theta_i) \quad (12)$$

・停止時

$$(c\rho)_e \cdot V_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{R_{i-1}}(\theta_{i-1} - \theta_i) + \frac{1}{R_i}(\theta_{i+1} - \theta_i) + \frac{1}{R_{c,i}}(\theta_s - \theta_i) \quad (13)$$

ただし、 $\theta_{n+1} = \theta_s$ である。

3.3比較対象となる分布定数モデル

集中定数モデルの精度検証のために、FEFLOW による分布定数モデルを比較対象に用いる。そこで、2010 年に行った学内井戸による実験データから同定したモデルをベースに、集中定数モデルの仮定条件の 1 つである自然地下水流を無視という条件を加えた分布定数モデルとした。図 4 に学内井戸実験と同定したモデルの概要を示す。学内帯水層モデルの計算範囲は井戸からの注水・揚水による水頭変化を考慮して十分に大きい 50m×50m 平面としたが、集中定数モデルではエネルギー方程式のみを解くことになるため、短期間蓄熱における熱拡散範囲以上の領域を計算すればよいと考え、半径 12.5m、高さ 3m の円筒を計算領域とした。両モデルに用いる物性値を表 1 に示す。各物性値を集中定数モデルと分布定数モデルのどちらに使用するかについても表中に記した。分布定数モデルと本研究で構築する集中定数モデルの相違点を以下にまとめる。

- ・ FEFLOW では 3 次元の熱流体解析を行っている。
- ・ FEFLOW では物性値の温度依存性を考慮している。
- ・ FEFLOW では自然対流を考慮している。

以上のような相違点を踏まえたうえで、同じ入力条件下において集中定数モデルと分布定数モデルでの計算を行い、結果を比較していく。

3.4精度評価指標

集中定数モデルの精度を評価する際に、分布定数モデルの結果に近いほど予測精度が高いと判断する。そこで評価指標として、式(14)で表される平均二乗誤差 (RMSE)を用いる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\theta_j - \hat{\theta}_j)^2} \quad (14)$$

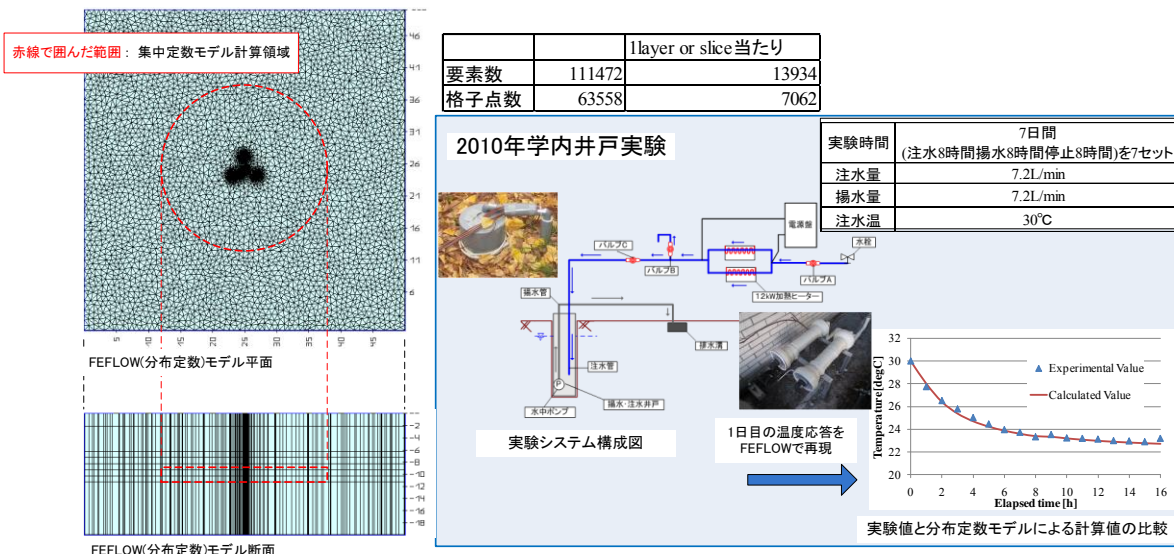


図 4 比較対象となる分布定数(FEFLOW)モデルおよび蓄熱実験概要

3.5集中定数モデルの精度検証

1)計算条件

集中定数モデルと分布定数モデルを用いて、表 2 に示した条件で揚水温度を計算する。その際に近似分散長を試行錯誤的に変化させて、FEFLOW の分散長を変化させた結果と比較する。FEFLOW の計算において、分散長は縦分散長と横分散長を入力するがその比率は 10:1 で固定とする⁵⁾。1つの分散長条件につき、注水 8h、揚水 8h の計 16 データを生成する。

2)計算結果

図 5 に各分散長における揚水温度推移を示す。集中定数モデルにおける近似分散長を変化させていったところ、FEFLOW の分散長の結果と近い結果が得られる値が存在した。揚水期間における RMSE は最大でも 0.12K であり、FEFLOW の結果を精度よく再現できているといえる。これまで実験にて得られた温度応答から FEFLOW によって分散長を同定することで対象帯水層の温度応答モデルを構築してきたが、この結果から集中定数モデルにおいても分布定数モデルと同じ手順によって帯水層モデルが得られることが示された。

4.適用条件の検討

1)検討条件

流量や帯水層への注入温度の条件は導入建物によって様々となる。それゆえに本研究で構築した集中定数モデルにおいてもそれらの条件の変化にどこまで対応できるのか、その適用条件を明らかにしておく必要がある。検討内容としては注水温度を蓄冷時、蓄暖時を想定した 5°C、30°C、50°C の 3 パターンで考え、それぞれのパターンで流量を変化させたときの精度検証を行う。計算条件を表 3 に示す。流量は 2010 年度の学内井戸による実験流量 7.2L/min と 2009 年に行った山形における水理試験の結果である限界揚水量 200L/min を参考に 7.2L/min~200L/min の範囲で変化させた。その際、注水量と揚水量は等しいとし、分散長については、分布定数モデルは表 1 の値を、集中定数モデルには 3.5 の検証で得た等価な近似分散長を用いた。1 ケースにつき、注水時間 8h、揚水時間 8h の計 16 データを生成した。

2)検討結果

各注水温パターンのうち、代表として図 6 に集中定数モデルと分布定数モデルの蓄熱時注水温 5°C における各流量の揚水温度推移を示す。また、集中定数モデルの計算値と分布定数モデルの計算値から算出した流量・注水温別の RMSE を図 7 にて示す。どの温度パターンにおいても低流量域では精度が高いが、流量が大きくなるほど誤差が大きくなっていく傾向がみられた。これは、集中定数モデルがエネルギー方程式のみで構

表 1 物性値一覧

項目		値	単位	モデル	備考
熱伝導率	砂礫	2.49	W/mK	両モデル	TRT(熱応答試験) 文献3)
	粘性土	1.56			
	水	0.59			
熱容量	砂礫	3.18	MJ/m ³ K	両モデル	文献3)
	粘性土	3.06		分布定数	
	水	4.18		両モデル	
透水係数	砂礫	1.60×10 ⁻⁴	m/sec	分布定数	揚水試験
	粘性土	1.00×10 ⁻⁸			文献4)
間隙率		0.3	-	両モデル	文献5)
比貯留係数		4.20×10 ⁻²	l/m	分布定数	揚水試験
分散長	縦	0.1	m	分布定数	FEFLOWにより同定
	横	0.01			

表 2 計算条件

	項目	入力値	単位
共通計算条件	注入温度	30	degC
	注水・揚水流量	7.2	L/min
	注水・揚水時間	8・8	hour
	初期地中温度	22.3	degC
	帯水層厚さ	3	m
	上下の不透水層厚さ	9	m
集中定数モデル固有計算条件	分割数	39	-
	初期空間分割幅	0.03	m
	公比	1.1	-
	近似分散長	変化	m

表 3 計算条件

	項目	入力値	単位
共通計算条件	注入温度	5,30,50	degC
	注水・揚水流量	7.2~200	L/min
	注水・揚水時間	8・8	hour
	初期地中温度	22.3	degC
	帯水層厚さ	3	m
	上下の不透水層厚さ	9	m
集中定数モデル固有計算条件	分割数	39	-
	初期空間分割幅	0.03	m
	公比	1.1	-
	近似分散長	0.085	m

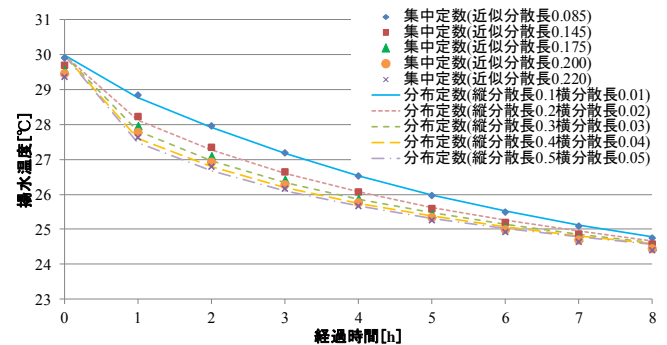


図 5 各分散長における揚水温度推移

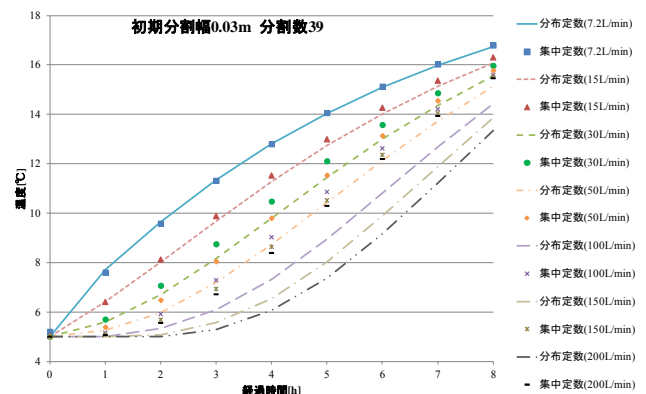


図 6 注水温 5°C のときの流量別揚水温度推移

成されていることにより、井戸内のヘッド差による移流まで考慮できていないことに原因があると考えられる。また、注水温と初期地中温度の差が大きいほど誤差が大きくなった。これは集中定数モデルにおける物性が温度に依らず一定条件であることに起因しているものと推測される。また、図 8 において注水温度差当たりの RMSE を示す。各温度パターンの流量別計算値は単位注水温度差当たりの RMSE に基準化することでほとんど差異が見られなくなった。また、帯水層厚さあたりの流量が 20L/min 以内であれば、注水温度差の 5% 以内の誤差で揚水温度を予測できることがわかる。

5. 性能予測ツール用要素としての利用方法

1) 集中定数モデルの利用方法と条件

1 本井戸モデルを集中定数系で構築したが、設計者が実際にシステムの性能予測ツールとして利用する場合には、図 9 に示すような本モデルを独立に 2 つ用いた地中蓄熱側モデルとヒートポンプユニットなどで構成される空調設備モデルとを組み合わせる。しかし、地中蓄熱側モデルは井戸間の熱干渉はないものとして利用することを想定している。そこで、2 本の井戸が同一帯水層にて利用される場合の熱干渉が起らない運用条件を示し、本モデルの利用条件を明確にする。

2) FEFLOW による熱干渉条件の評価

FEFLOW を用いて次の条件で計算を行う。蓄熱運転時は取水井戸より揚水し、冷却後蓄熱井戸に 5℃ の冷水を注入する。採熱運転時は蓄熱井戸より揚水し、冷熱利用後、取水井戸に注水時と同流量で初期地温と等しい温度の水を注入することとする。蓄熱運転を 10h、採熱運転を 10h、停止期間を 4h とした 24h を 1 サイクルとし、蓄熱運転時の取水井戸の熱干渉を評価する。帯水層の厚さは 3m、5m、10m と変化させるが、帯水層をはさむ上下の不透水層はそれぞれ 5m で一定とした。計算条件を表 4 に示す。透水係数以外の物性値は表 1 と同じである。

図 10 に、注水温度差に対する取水温度差の割合と、無次元数 $\frac{\Sigma t Q(c\rho)_w}{a^2 H(c\rho)_s}$ の関係について帯水層厚さごとにプロットした。これをみると、帯水層厚さに依らず、無次元数 $\frac{\Sigma t Q(c\rho)_w}{a^2 H(c\rho)_s}$ が 2 以下になるような条件(ただし、帯水層厚さが 3m~10m の範囲)でシステムを運用すれば完全に熱干渉は起きないということがわかる。帯水層厚み大きいほど、熱干渉の影響の増加傾向が大きくなるが、これは厚さが大きい方が熱拡散領域の表面積が大きくなるため熱ロスが増加することに起因していると思われる。

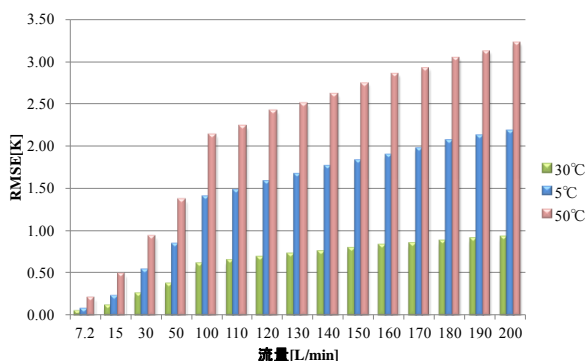


図 7 流量・注水温別 RMSE

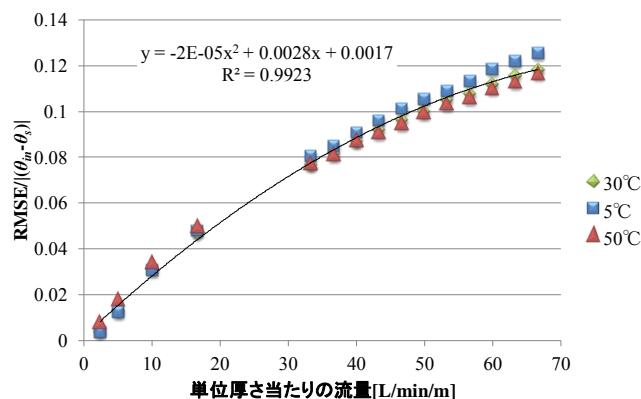


図 8 注水温度差当たりの RMSE

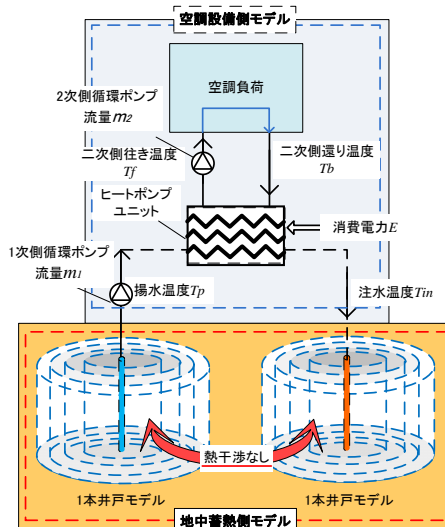


図 9 性能予測ツール概要

表 4 計算条件

計算条件		入力値	単位
計算範囲		200×200×(13~20)	m×m×m
帯水層厚さ		3 or 5 or 10	m
透水係数	砂礫	2.07×10^{-3} (文献7)参考)	m/sec
	粘性土	1.0×10^{-8}	
自然地下水流速		0	m/year
初期地中温度		18	°C
注水温度		5	°C
流量(注水量・揚水量)		300~1000	L/min
境界条件	上面	18 (constant)	°C
	底面	18 (constant)	°C
	四周	18 (constant)	°C

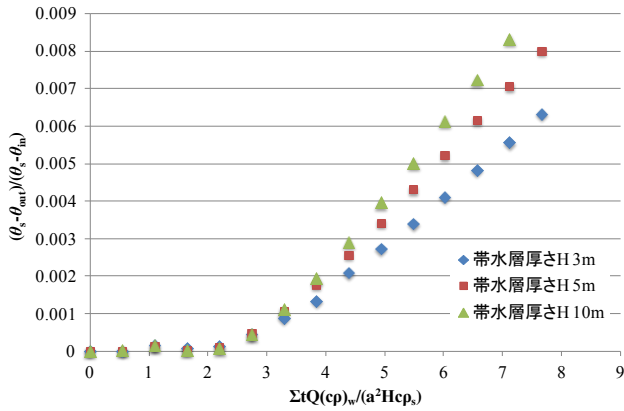


図 10 取水井戸への熱干渉

6.まとめと今後の課題

帯水層の温度応答を予測する集中定数モデルを構築し、適用条件を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 精度検証より、集中定数モデルの近似分散長によって帯水層の温度応答を再現できることが示された。
- (2) システム性能に大きい影響を及ぼす利用流量・注入温度について感度解析を行った。その結果、帯水層厚さあたりの流量が 20L/min 以内であれば、注水温度差の 5% 以内の誤差で揚水温度を予測できることがわかった。
- (3) 実際にシステムシミュレーションを行う際の本モデルの活用方法について示した。また、対象帯水層の厚さが 3m~10m の範囲にあり、無次元数 $\frac{\Sigma t Q (cp)_w}{a^2 H (cp)_s}$ が 2

以下となるような運転条件とすることで、本モデルが性能予測ツール用要素として利用可能であることを示した。

今後の課題として、より汎用性を高めるためにも自然地下水流を考慮したモデルとすることが必要である。

<参考文献>

- 1) 中村ら：システム概念と熱的基本性能の確認 敷地内帯水層蓄熱システムに関する研究(その 1)、日本建築学会計画系論文集第 546 号, 69-74, 2001 年 8 月
- 2) 山口ら：シミュレーションを用いた水蓄熱式空調システムの最適運転法, 空気調和・衛生工学会論文集 No.105, 2005 年 12 月
- 3) 日本機械学会：伝熱工学資料 改訂第 2 版, 1959
- 4) 佐藤邦明、岩佐義朗：地下水理学, 丸善, 2002
- 5) 藤縄克之：環境地下水学, 共立出版, 2010
- 6) WASY Software: FEFLOW 5.3 Reference Manual
- 7) 明石ら：大阪駅前地区における地下街・地下駐車場の設計と施工, 地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集, 1993 年 3 月

記号

- λ : 熱伝導率 W/mK
 - $(c\rho)$: 熱容量 J/m³K
 - ε : 間隙率 -
 - D : 熱分散率 W/mK
 - α : 近似分散長 m
 - u : 断面流速 m/sec
 - R : 熱抵抗 K/W
 - r : 中心軸からの半径 m
 - S : 槽底面積 m²
 - H : 厚さ m
 - V : 槽体積 m³
 - m : 流量 m³/sec
 - θ : 温度(集中定数モデル) °C
 - $\hat{\theta}$: 温度(分布定数モデル) °C
 - n : 槽数
 - m : 時刻ステップ数
 - a : 井戸間隔 m
 - $\Sigma t Q$: 積算投入流量 m³
- 添え字 : i :槽番号 j :時刻 g :砂礫 c :粘性土 e :等価
 s :土壌 w :水 a :見掛け in :注入 out :揚水

[FEFLOW の基礎方程式]

FEFLOW は土壌粒子、液体、気体それぞれに対し、以下の 3 つの保存則からなる基礎式をベースに地下水流動や熱収支を有限要素法により算定する。

<質量保存則>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_{\alpha} \rho^{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_{\alpha} \rho^{\alpha} v_i^{\alpha} E_{\alpha}) = \varepsilon_{\alpha} \rho^{\alpha} Q_{\alpha}^{\alpha} \quad (15)$$

ε : 間隙率 ρ : 密度 v : 流体速度 Q_{α}^{α} : 質量発生項 α : 各相

<運動量保存則>

$$v_i^{\alpha} + \frac{k_{ij}^{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha} \mu^{\alpha}} \left(\frac{\partial p^{\alpha}}{\partial x_j} - \rho^{\alpha} g_j \right) = 0 \quad (16)$$

k_{ij} : 浸透テンソル μ : 粘性係数 p : 圧力 g : 重力加速度

<エネルギー保存則>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_{\alpha} \rho^{\alpha} E^{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_{\alpha} \rho^{\alpha} v_i^{\alpha} E^{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{iT}^{\alpha}) = \varepsilon_{\alpha} \rho^{\alpha} Q_T^{\alpha} \quad (17)$$

E : 内部エネルギー j_{iT} : 熱フラックス Q_T^{α} : 熱量発生項

また、 j_{iT} は熱フラックスとして式(18)で表される。

$$j_{iT}^{\alpha} = -\left(\lambda_{ij}^{cond_{\alpha}} + \lambda_{ij}^{disp_{\alpha}} \right) \frac{\partial T^{\alpha}}{\partial x_j} \\ = -\varepsilon_{\alpha} \left[\left(\lambda^{\alpha} + c^{\alpha} \rho^{\alpha} \alpha_T V^{\alpha} \right) \delta_{ij} + c^{\alpha} \rho^{\alpha} (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i^{\alpha} v_j^{\alpha}}{V^{\alpha}} \right] \frac{\partial T^{\alpha}}{\partial x_j} \quad (18)$$

$\lambda_{ij}^{cond_{\alpha}}$: 移流熱伝達率 $\lambda_{ij}^{disp_{\alpha}}$: 分散熱伝達率 T : 温度 α_L : 縦方向分散長 α_T : 横方向分散長 δ_{ij} : クロネッカーテンソル

式(18)に含まれる α_L と α_T は縦方向と横方向の熱分散長である。分散は土壌間隙内における流れの空間的な非一様性から生じ、土壌内の伝熱機構において非常に重要な因子である。

討 議 等

◆討議 [大島教授(地盤工学研究室)]

帯水層蓄熱システムに関して、季節間での利用は想像できるが、昼夜間利用とはどのようなシステムか。

◆回答：例えば夏期のケースを考えると、夜間に冷凍機を運転し、作った冷水を蓄熱井戸へ注入する。昼間に夜間に蓄えた冷熱を揚水により回収し、回収熱を熱源機器の効率を上げるためや、熱源機器を運転せずに直接冷房に利用する。また、システムを連続で運転することで、帯水層の蓄熱性能が向上する。

◆討議 [中尾教授(地域環境計画研究室)]

発表資料では、夏期の運転でヒートポンプを運転することを前提としているが、ヒートポンプを介さずに直接利用できるのではないか。

◆回答：運転初期は蓄熱性能が低く、熱回収が充分でないため、熱源機器運転のアシストとして地下水を利用することが考えられる。連続運転していくことで、蓄熱性能が向上し、冷却除湿に充分利用できる温度レベルで揚水出来れば、ご質問のとおり、熱源機器を介さずに直接利用できるかと推測される。

◆討議 [西岡准教授(地域環境計画研究室)]

不透水層部は定常計算になっているが、帯水層からの熱ロスを正確に見積もれるのか。

◆回答：本研究においては、計算の簡便化のために、不透水層部は定常計算とした。帯水層蓄熱システムでは、注水・揚水に伴う水位変動による移流伝熱が支配的で熱伝導は影響が軽微であると考えた。

◆討議 [西岡准教授(地域環境計画研究室)]

不透水層部への熱ロスが軽微だと言うが、帯水層の厚さが薄くなれば影響がでてくるのではないか。影響検討しているのですか。

◆回答：集中定数モデルで不透水層厚さの変化による揚水温度への影響を検討した際には無視できる程度の差異しか見られなかった。

◆討議 [大島教授(地盤工学研究室)]

注水・揚水による水位変動はどの程度なのか。一般で普及してきたときにその水位変動が起こるといふことか。

◆回答：流量にも依るが、最大でも井戸周辺は2m程度の水位変動が考えられる。もちろん一般に普及した場合も各々の箇所に変動が起こるが、参考文献によると、2本の井戸で注水と揚水を同時に行っている場合、ダブルット場が形成され、2~3分で定常水位場に戻るとされている。

<参考文献>

横山ら：帯水層を用いた季節的蓄熱利用 日本機械学会論文集(B編), 46巻402号, 昭和55年2月