

VII-205 地下貯水槽と地盤との間の熱的相互作用に関する理論的考察 —採熱試験における地下貯水槽貯熱システムの数値計算—

福井大学工学部 学生員 松村量行*
 福井大学工学部 正会員 福原輝幸**
 福井大学工学部 学生員 渡邊 洋*

1.はじめに 筆者らは環境保全および自然エネルギー利用の観点から、地中熱を利用した地下貯水槽貯熱システムによる道路融雪(無散水融雪)に注目している¹⁾。このシステムを通して温熱が安定的に供給されるためには、地下貯水槽(以下、貯水槽と呼称)の形状(容量)と無散水融雪路面の大きさの関係を、より合理的に設計しなければならない。そのためには、貯水槽の貯熱特性を解明する必要があるが、熱効率には気象条件、貯水槽と地盤との間の熱移動、流入・流出口の位置、地下水、運転方法などが複雑に影響を及ぼし合っている。従って、野外実験と数値計算の両面から、貯水槽の貯熱特性を検討することが必要である。

そこで、計算モデルを構築する上で重要な貯水槽と地盤との間の熱的相互作用を詳細に検討する目的で、採熱試験(連続的に冷水を貯水槽下部に供給すると同時に、上部から温水を抽出する実験)²⁾を行った。

本論では、採熱試験下での貯水槽水温および周辺地盤温度の時間的変化について計算し、実験結果²⁾との比較を試みたので、その結果を報告する。

2.地下貯水槽貯熱システム Fig.1は福井大学構内に設置された本システムの熱利用の概要を表す。システムは貯水槽および無散水融雪舗装(以下、無散水舗装体と呼称)から成る。埋設された貯水槽は、内径 2.2m(半径 $R=1.1\text{m}$)、高さ 2.2m、厚さ 0.2m の PC 製ヒューム管であり、底部基礎コンクリートには貯水槽と周辺地盤との間の熱交換を促進させるために、10本の金属板(長さ約 1m)が打ち込まれる。貯水槽の土被り厚は 2m であり、地表面下 0.5m には遮水用のビニールシートが敷設される。また、無散水舗装体は $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.12\text{m}$ のコンクリート製であり、内部には循環パイプ(内径 13mm)が、多重平行流型に埋設(被り厚 0.03m)される。

冬期には路温よりも温度の高い水(温度 T_0)が、貯水槽上部から無散水舗装体へ供給され、路温低下を緩和する。循環水は、無散水舗装体を通過する間に温度低下し、再び貯水槽下部(温度 T_1)へ戻る。ここで、貯水槽水温が地温より低い場合には、周辺地盤から貯水槽へ向かって熱移動が生じ、貯水槽に熱エネルギーが供給される。

3.解析モデルと解析条件

3.1 仮定 貯水槽の熱移動モデルは、工学的(実用的)観点から許容できる範囲内で現象を単純化して計算を行う必要がある。そのために、以下の仮定を設ける。1) 温度成層型の貯水槽水温は半径(r)方向には一様であり、深さ(z)方向にのみ変化する²⁾。2) 流入・流出口での局所的な乱れおよびダイナミックな浮力効果は無視する。3) 貯水槽と地盤との間の熱移動フラックスは、貯水槽水温と周辺地盤温度の差に比例する。4) 貯水槽周辺地盤の地下水流れによる顕熱効果は考慮しない。

3.2 解析モデル 貯水槽の水温分布は、熱伝導、移流および貯水槽と地盤との間の熱移動で規定される(ただし流入部、流出部、では熱の流入 E_i 、流出 E_o を考慮する)。そこで、基礎方程式は次のようになる。

$$\left(\rho c\right)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - \left(\rho c\right)_w v \frac{\partial T_w}{\partial z} + \alpha (T_s - T_w) + E_i - E_o \quad (1)$$

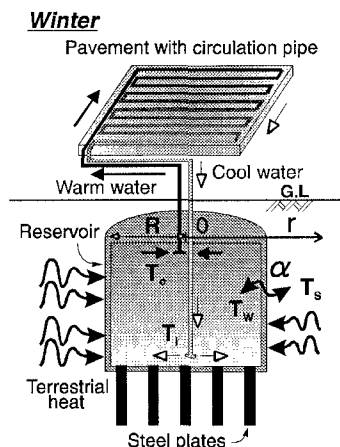


Fig.1 貯水槽の熱移動概念図

キーワード: 地下貯水槽貯熱システム, 地中熱, 熱移動

*〒910-8507 福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 内線 2815 FAX 0776-27-8746
 **〒910-8507 福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 内線 2809 FAX 0776-27-8746

ここに、 $(\rho c)_w$: 水の体積熱容量、 t : 時間、 T_w : 貯水槽水温、 T_g : 周辺地盤温度、 λ_w : 水の熱伝導率($=0.5\text{W/mK}$)、 v : 鉛直方向の移流速度、 α : 貯水槽の熱伝達率である。ただし、貯水槽底部の金属板による熱伝達率については、適切な値が把握できていないために、本計算では α を全周に渡り一定値($8\text{W/m}^2\text{K}$)とする。

地盤中の熱移動は、

$$(\rho c)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (2)$$

で与えられる。地盤は大学内の地盤柱状図を基に、粘土地盤とする。この場合、 $(\rho c)_g$: 地盤の体積熱容量($=731\text{W/m}^3\text{K}$)、 λ_g : 地盤の熱伝導率($=1.1\text{W/mK}$)である。

境界条件として、地表面温度は採熱試験中の全天日射量、気温などの気象データを基に計算され、また貯水槽への流入水温 T_i は実測値が与えられる。

3. 採熱試験²⁾ 採熱試験は1995年5月30日午前3時30分から6月4日午後12時に渡り、福井大学構内の貯水槽融雪システムにおいて実施された。同試験では無散水融雪路面上に氷塊(約1.5t)を載せ、循環ポンプを稼働させることで、冷水(流量 $Q=2\text{l/min}$)が連続的に貯水槽下部へ供給される。

4. 実験結果と計算結果の比較 Fig.2 は、 T_i および無次元半径方向距離 $r/R=0.27$ における深さ(z)毎の T_w 、 T_g の経時変化を示す。なお、同図には計算値もそれぞれ併示されている。貯水槽底部 $z=4\text{m}$ の T_w (∇)は、低温水流入の影響を受けて流入開始後短時間で、日周期的な変化を繰り返しながら低下する。貯水槽上部 $z=2.25\text{m}$ の T_w ($\circ$)は、約 $t=33\text{hr}$ から単調に低下し始める。計算結果もまた、こうした貯水槽内の伝熱傾向を再現している。しかし、 $t=48\text{hr}$ 以降では貯水槽上部に近い水温ほど、実験値と計算値に差が生じやすくなる。

Fig.3 は、 $r/R=0.27, 1.24$ および 2.05 における T_w と T_g の鉛直分布、 T_i (∇)および T_o ($\blacktriangle$)を、それぞれ(a)実験開始時($t=0\text{hr}$)、(b)24時間後($t=24\text{hr}$)および(c)120時間後($t=120\text{hr}$)について示したものである。 $t=24\text{hr}$ の T_w および T_g

の実測値と計算値は、互いに良好に一致する。 $t=120\text{hr}$ の計算値は、 T_w および T_g も実測値より小さくなるが、分布形状は互いに類似する。しかしながら、時間の経過と共に両値の差は(特に、 T_g の方で)広がる傾向にある。この原因の一つは、貯水槽周辺の地下水流れを無視しているためと考えられる。

5. おわりに 実用的な観点から地下貯水槽貯熱システムの単純な数値モデルを提案し、採熱試験の再現を試みた。その結果、貯水槽水温および周辺地盤温度の時間的な変化に関する定性的な傾向は再現できた。モデルの精度を高めるには今後、地下水流れの影響や貯水槽の熱伝達率についてさらに検討しなければならない。

参考文献 1) 渡邊・福原・黒田・川崎: 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回年次学術講演会講演概要集, CS, 1995. 2) 松村・福原・渡邊: 採熱試験における地下貯水槽貯熱システムの特性, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1998

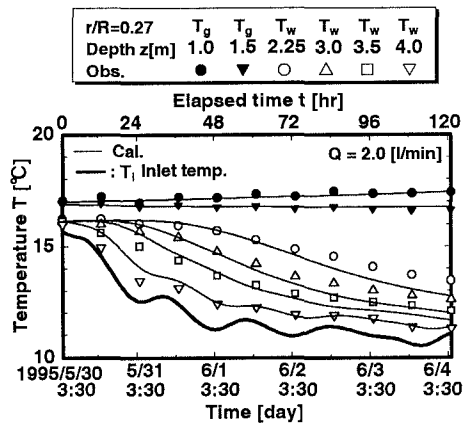


Fig.2 貯水槽水温および周辺地盤温度の経時変化

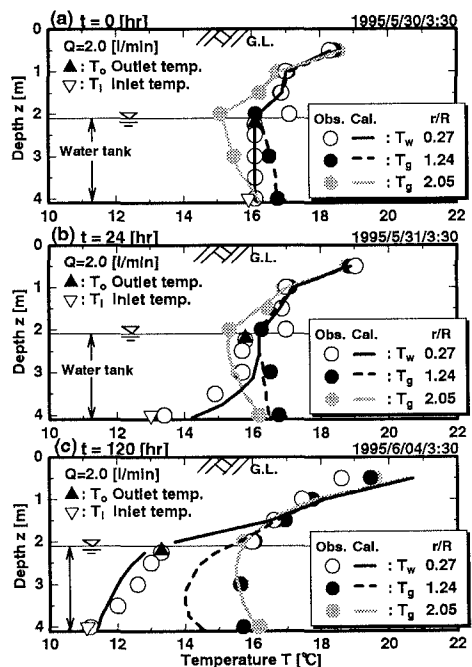


Fig.3 貯水槽水温および周辺地盤温度の鉛直分布