降雨・気温・土中水分を考慮したボアホール式ヒートポンプ周辺の熱移動解析の試み

名古屋工業大学　学生会員　○柏木　淳
名古屋工業大学　正会員　前田　健一
名古屋工業大学　学生会員　内藤　直人

1. はじめに

近年，再生可能エネルギー導入が進む中で地中熱利用の技術が普及しつつある．この地中熱利用は地下 200m以浅の比較的浅い地盤から得られる熱エネルギーを利用する技術であり，その利用法は多岐にわたっている．しかし，地表面付近の浅い地盤は大気面からの物質収支や温度の影響を受けやすく，長期利用時における地盤への影響は無視できない．

また，その採熱効率も熱帯・寒帯における地盤条件，地下水位の変動や降雨の浸透特性，日照による地表面の温度変化，それらに対する植物根の吸い上げの影響などによって左右される．さらに土中水分量はヒステリシス性を有している．

そこで本研究では，ヒートポンプの外気温，降雨，土中水分等の長期変化を考慮し，地域にあったクローズド型ボアホール式ヒートポンプシステムの最適な運用条件を探るための解析的検討を試みた．

2. 解析手法

本解析では有限要素法に基づいた解析コード HYDROUS 3D を援用した HYDROUS で地盤内の水分流れ，溶質移動，植物根の吸水，熱移動を加味した水分移動が考慮されている．熱と水の移動の連成解析が可能である．本報告では紙面上の都合から，地盤内の水と熱の移動に焦点を絞った．

(1) 水分流れの支配方程式

ここでは，多孔質体中の飽和水分移動式である Darcy 則と連続式から得られる修正 Richards 式 [1)]を用いる．以下にその式を示す．

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[K\left(K_{ij}^{A}\frac{\partial h}{\partial x_j}+K_{iz}^{A}\right)\right]-S \tag{1}$$

θ：体積含水率，h：圧力水頭，S：吸込み項
$x_i(i=1,2)$：空間座標，t：時間
K^A：無次元異方性テンソル，K：不飽和透水係数

ここで不飽和透水係数 K は以下の式から得られる．

$$K(h,x,y,z)=K_s(x,y,z)K_r(h,x,y,z) \tag{2}$$

K_r：相対透水係数，K_s：飽和透水係数

(2) 熱移動の支配方程式

多孔質体の熱移動は次式に示されるような，*Sophocleous* の水蒸気の拡散影響を無視した熱移動式 [2)]を採用した．

$$C(\theta)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_{ij}(\theta)\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)-C_w q_i\frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{3}$$

$\lambda_{ij}(\theta)$：土の見かけの熱伝導率
C_w：液相の体積熱容量
$C(\theta)$：多孔質媒体の体積熱容量

ここで，多孔質媒体の体積熱容量 $C(\theta)$ と土の見かけの熱伝導率 $\lambda_{ij}(\theta)$ は以下の式から得られる．

$$\begin{aligned}C(\theta)&=C_n\theta_n+C_o\theta_o+C_w\theta+C_g a_v\\&\approx(1.92\theta_n+2.51\theta_o+4.18\theta)10^6\ \left(\mathrm{Jm^{-3}\,^{\circ}C^{-1}}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

$C(\theta)$：体積熱容量，n：固相，o：有機物
g：気相，w：液相

$$\lambda_{ij}(\theta)=\lambda_T C_w|q|\delta_{ij}+(\lambda_L-\lambda_T)C_w\frac{q_j q_i}{|q|}+\lambda_0(\theta)\delta_{ij} \tag{5}$$

q：ダルシーの流束密度
δ_{ij}：クロネッカーデルタ
λ_L：縦方向の熱分散性
λ_T：横方向の熱分散性
$\lambda_0(\theta)$：多孔質媒体の屈曲度を考慮した熱伝導率

3. 解析条件

解析対象はわが国で一般的に利用されている形式であるボアホール式ヒートポンプとし，解析対象領

域は地中熱交換器中の流体の往き還り温度差が大きい地表付近とした．**図-1** にボアホール式ヒートポンプの概要[3]，**図-2** に解析対象領域の概要を示す．本解析では物質の熱分散性は等方条件とし，地中熱交換器の出入り口は定温境界条件で計算している．また，夏季と冬季の初期地中温度分布[4]を**図-3** に示す．

4. 解析結果および考察

ここで，解析結果の一例を示す．**図-4** はヒートポンプ作動10時間後における地表面の温度分布を表している．この解析結果より，夏季と冬季の共通点として採熱部付近は地表面の温度差が大きいために，その影響範囲が大きくなった．一方，排熱管付近でも地表面との温度差が小さいためにその影響範囲が小さくなるのがわかった．また，10時間後の地温への影響範囲は概算しておおよそ 40cm 程度にまで及ぶと考えられ，採熱管と排熱管の間で干渉しあい，採熱効率に影響を与える可能性がある．

5. まとめ

本研究では，ボアホール式ヒートポンプの単純な過程と一般的な利用条件を想定して解析を行った．その結果，地中熱交換器の構造上，熱の干渉が十分に及んでいることがわかった．今後は，外気温・湿度，降雨，植物根の吸水，熱交換器の形状が採熱に与える影響を検討する．また，都心部における地中熱利用はヒートアイランド現象の緩和が期待されているため，都心部における利用時を想定した条件から地中熱利用の有用性についても検討する．

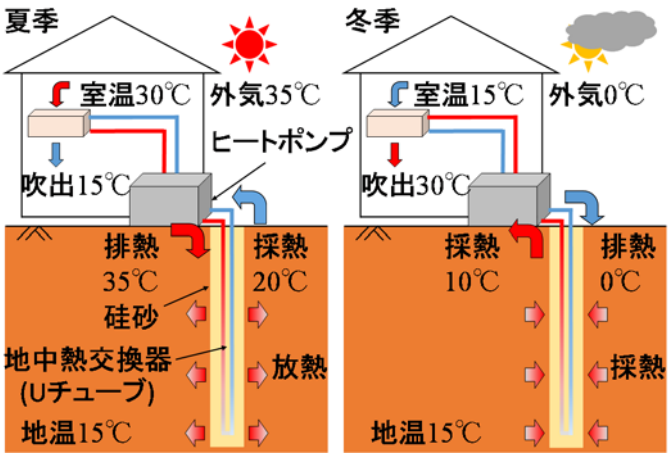
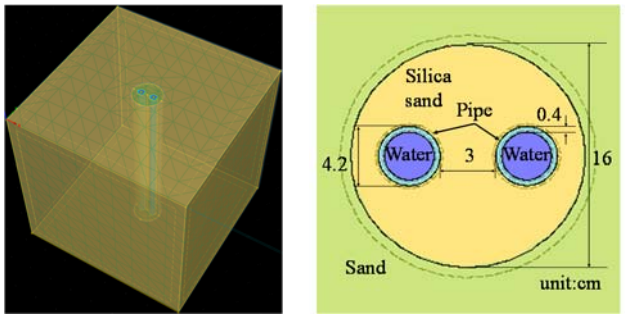
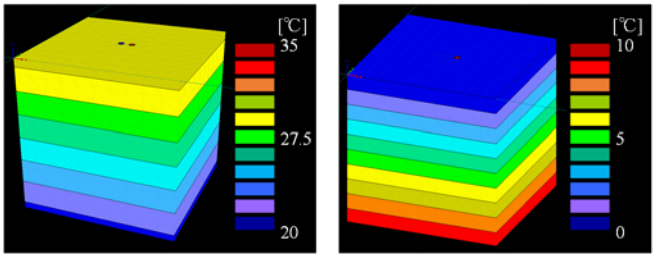


図-1 ボアホール式ヒートポンプの概略図



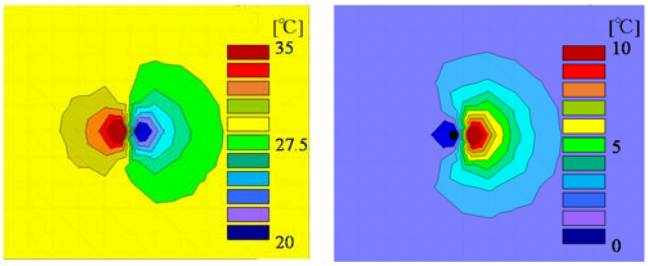
(a)解析領域全景　(b)ボアホール概要

図-2 解析対象領域の概略図



(a) 夏季　(b) 冬季

図-3 地中温度の初期条件



(a) 夏季　(b) 冬季

図-4 熱ヒートポンプ作動後における地表面での温度分布

参考文献

1) Zeng, X. and Decker, M., Improving the numerical solution of soil moisture-based Richards equation for land models with a deep or shallow water table, J. Hydrometeor., 10, 308–319, 2008.
2) Sophocleous, M., Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media, Water Resour. Res., 15(5), 1195-1206, 1979.
3) 環境省，地中熱利用システム　パンフレット，<http://www.env.go.jp/water/jiban/pamph_gh/system/full_a.pdf>，2015.
4) 日本地熱学会，地熱エネルギーハンドブック，p-407，2014.