



Title	空調用エネルギーパイルシステムに関する研究-数値解析による導入事例の検証-
Author(s)	尚和, 泰宏; 斎藤, 央; 濱田, 靖弘 他
Description	第11回衛生工学シンポジウム (平成15年11月6日 (木) -11月7日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 一般セッション . 5 建築・都市環境とエネルギー有効利用 . P5-5
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 11, 209-212
Issue Date	2003-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7083
Type	departmental bulletin paper
File Information	11-5-5_p209-212.pdf



5-5

空調用エネルギーパイルシステムに関する研究
—数値解析による導入事例の検証—

○尚和 泰宏 (北海道大学)
濱田 靖弘 (北海道大学)
窪田 英樹 (北海道大学)
圓山 彬雄 (アープ建築研究所)

斎藤 央 (北海道大学)
中村 真人 (北海道大学)
落藤 澄 (北海道大学)

はじめに

筆者らは、既報¹⁾において地下熱利用システムにおける地中熱交換器のコスト面の改善を目指して、建築物の摩擦杭を空調用熱交換器として利用するエネルギーパイルシステム^{1)~3)}の地盤内水平2次元数値解析プログラムを開発し、本システムの導入効果の評価を行った。本研究ではこれを3次元モデルに拡張し、より詳細な解析を行うことを目的としたものである。まず、熱水分同時移動、凍結・融解、地下水流の影響を考慮した地盤温度解析モデル、およびトータルシステムの数値解析プログラムの概要を示す。次いで、3次元数値解析プログラムによる地盤の熱特性解析を行う。さらに、水平2次元モデルとの比較を行い、3次元モデルの実用性について検証する。

1. 地盤温度の解析方法

地盤の熱特性解析においては、建設地点の地質、地下水性状などの調査を実施し、以下の基礎方程式を用いた既報⁴⁾の手法によって、地中温度を予測し、地盤熱利用システムのシミュレーションに適用する。

$$\frac{\partial(\theta_a \rho_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\theta_l \rho_l)}{\partial t} + \frac{\partial(\theta_i \rho_i)}{\partial t} = \nabla(D_{\theta} \nabla \theta_l) + \nabla(D_{\theta} \nabla \theta_i) + \nabla(D_{T_v} \nabla T) + \nabla(D_{T_l} \nabla T) - \rho_l g \frac{\partial K}{\partial z} \quad \dots(1)$$

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} + L_b \frac{\partial(\theta_a \rho_v)}{\partial t} - L_f \frac{\partial(\theta_l \rho_l)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(h_v D_{\theta} \nabla \theta_l) + \nabla(h_l D_{\theta} \nabla \theta_i) + \nabla(h_v D_{T_v} \nabla T) + \nabla(h_l D_{T_l} \nabla T) - \rho_l g \frac{\partial(h_l K)}{\partial z} \quad \dots(2)$$

$$RH = \exp\left(\frac{M\phi_m}{\rho_l R T}\right) \quad \dots(3)$$

$$\theta_i = T u_d |T|^{mb} \quad \dots(4)$$

式(1)の右辺における地盤内の水分の移動に関しては、水蒸気流と液水流とが存在するものとし、それらは見かけ上、体積含水率こう配(右辺第1, 2項)、温度こう配(右辺第3, 4項)、重力(右辺第5項)を駆動力として生じる。熱の収支に関しては、式(2)のように、熱伝導の項(右辺第1項)に加え、水分の移動に伴う水蒸気と液水のエンタルピーの移流(右辺第2~6項)を考慮に入れた。右辺の第1項は地盤内の顕熱の貯留成分であり、 $c\rho$ は土粒子・空気・液水・氷の混合物としての地盤の体積比熱(単位体積あたりの地盤の熱容量)である。左辺第2項は地盤内水分の蒸発潜熱、第3項は凍結潜熱の貯留を表している。凍土形成が生じていない場合の未知数は、式(1), (2)において、 ρ_v, θ_l, T の3個であり、熱力学的平衡関係に基づく式(3)の気・液局所平衡式⁴⁾を利用して解を算出する。凍土形成が生じる場合には、未知数として θ_i が加わるため、式(4)の固・液局所平衡の実験式⁴⁾を用いる。飽和地盤内の熱移動解析については、以下の基礎方程式⁵⁾を用いている。

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} - L_f \frac{\partial(\theta_l \rho_l)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(h_l K \nabla \phi) \quad \dots(5)$$

2. 解析プログラムの構成

建築物の摩擦杭を空調用熱交換器として利用するエネルギーパイルシステムの数値解析プログラムを作成した。図-1にプログラムの構成を示す。まず、立地条件・住宅仕様・居住者構成などの計算条件を設定し、汎用熱負荷解析プログラムを援用し暖冷房負荷の解析を行う。プロ

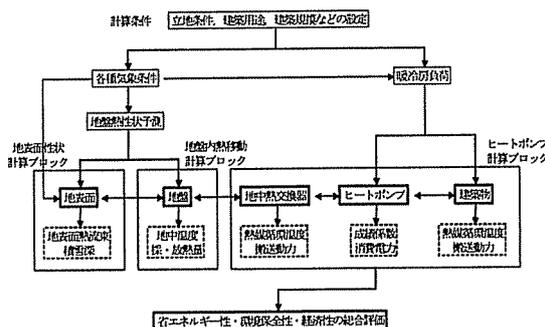


図-1 数値解析プログラムの構成

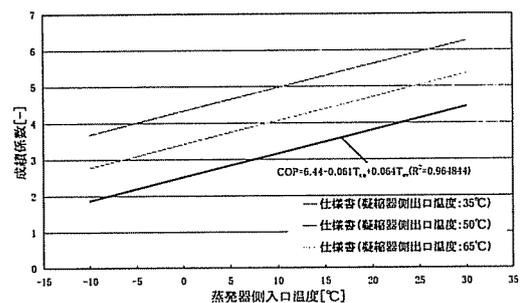


図-2 ヒートポンプ性能曲線

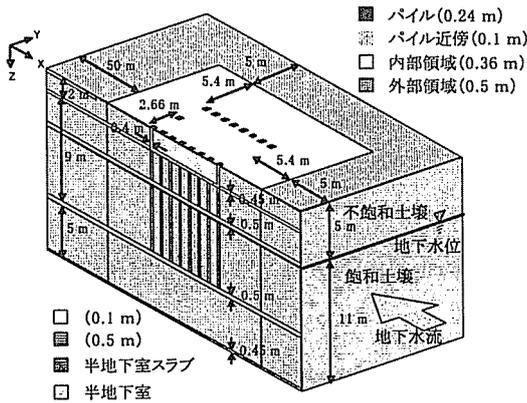


図-3 摩擦杭および周囲地盤の計算領域

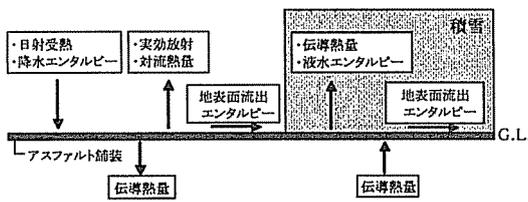


図-4 地表面熱収支

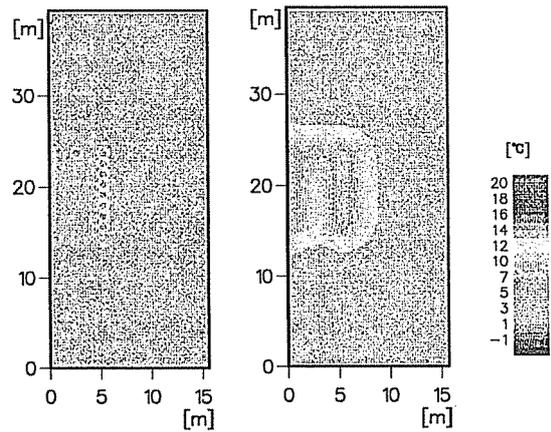
グラムでは、暖冷房負荷に応じたヒートポンプの運転が行われ、その時のヒートポンプの運転状況、搬送動力、および地盤内の温度変化が計算される。ヒートポンプについては、仕様書⁶⁾に基づき、蒸発器側入口温度と凝縮器側出口温度から成績係数(COP)を算出する性能曲線(式5)を求めた。図-2にヒートポンプの性能曲線を示す。

$$COP = 6.44 - 0.061T_{co} + 0.064T_{ev} \quad \dots(5)$$

3. 3次元モデルによる地盤内熱特性の解析

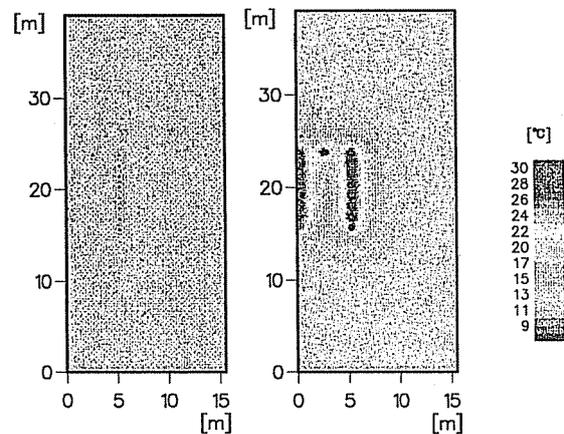
3.1 計算条件

札幌市内の事務所併用住宅を対象とし、2.における解析プログラムによる地盤内熱特性の解析を行った。数値解析手法の詳細は既報⁵⁾によるが今回の解析では、対象建築物の摩擦杭長さが9mと短く、半地下室を有していることもあり、埋設管上下端部の影響を考慮した地盤内三次元問題を取り上げ、前進差分法を用い、地下水の移流項には風上差分を適用した。地質には、砂の値⁵⁾を適用した。図-3に摩擦杭および周囲地盤の計算領域を示す。杭は簡略化のため、1辺が0.24mの正方形に近似し、長さは9mとした。また、合計26本の摩擦杭を擁する系の対称性を考慮して地下水流向に対して中心から半分を計算領域とした。水平面については外周部の杭から周囲境界までの距離は地下水流の下流域のみ約55m、そ



(a) 1日後 (b) 30日後

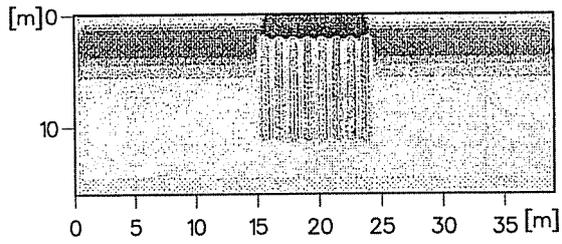
図-5 X-Y平面地盤温度分布 (Z=11m, 管壁温度0°C)



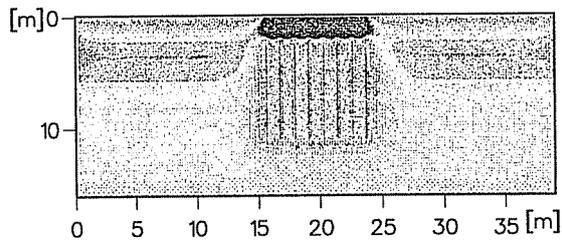
(a) 1日後 (b) 30日後

図-6 X-Y平面地盤温度分布 (Z=11m, 管壁温度30°C)

の他は約10mとした。空間分割幅は、杭近傍、図-3における内部領域、外部領域で、それぞれ0.1m、0.36m、0.5mとした。鉛直方向については、半地下が深さ2mで、スラブ厚さは壁0.4m、床0.25mである。杭の下端部から計算領域下部までの距離は5mであり、また、地下水面を地下5mに設定した。地表面境界について図-4に示す。地表面はアスファルトで舗装したものとし、地盤内との水分授受はないものとした。熱収支においては、日射受熱、実効放射、顕熱フラックスを考慮した。外界気象条件として、外気温、水平面全天日射量、風速、相対湿度、降水量、雲量については、札幌管区気象台の時刻別平均値を用いた。計算期間は2001年11月1日から11月30日までの1ヶ月とした。初期条件としては、事前に鉛直1次元モデルにより算出した2001年11月11日の垂直温度分布を与えた。

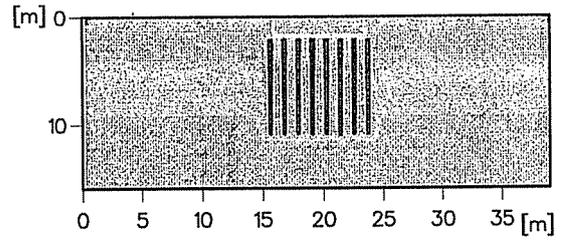


(a) 1日後

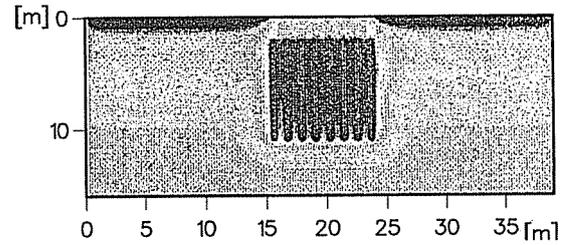


(b) 30日後

図-7 X-Z平面地盤温度分布
(Y=0m, 管壁温度 0°C)

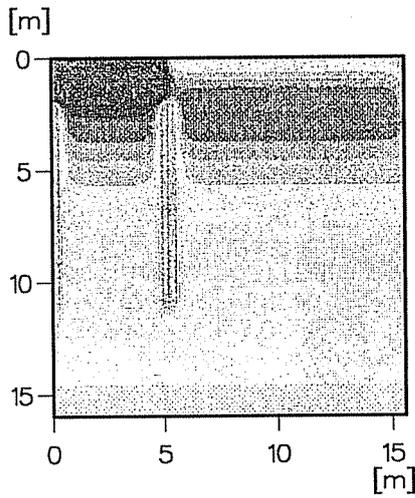


(a) 1日後

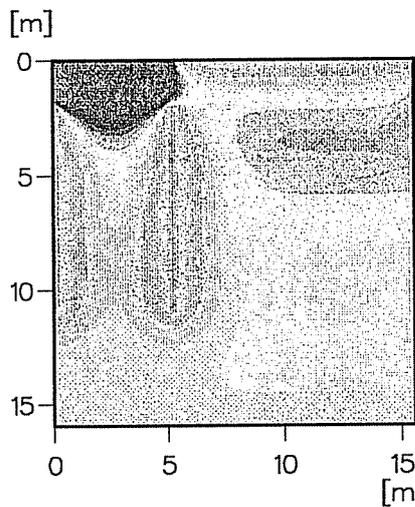


(b) 30日後

図-8 X-Z平面地盤温度分布
(Y=0m, 管壁温度 30°C)

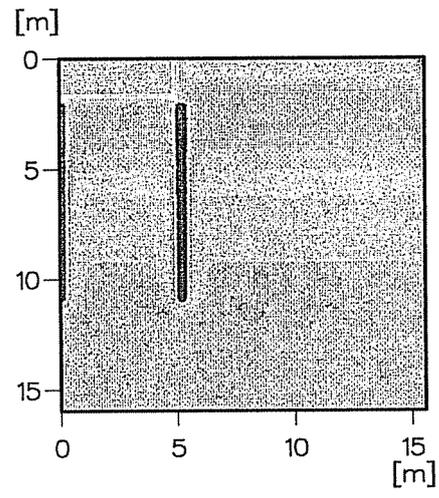


(a) 1日後

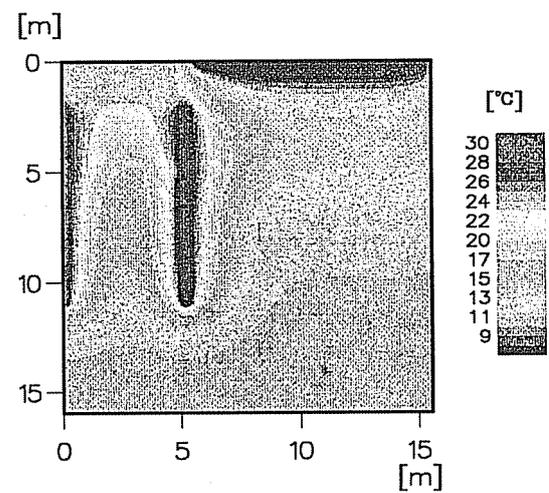


(b) 30日後

図-9 Y-Z平面地盤温度分布
(X=19m, 管壁温度 0°C)



(a) 1日後



(b) 30日後

図-10 Y-Z平面地盤温度分布
(X=19m, 管壁温度 30°C)

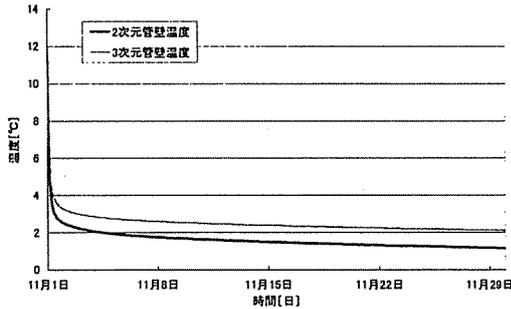


図-11 管近傍温度の変動

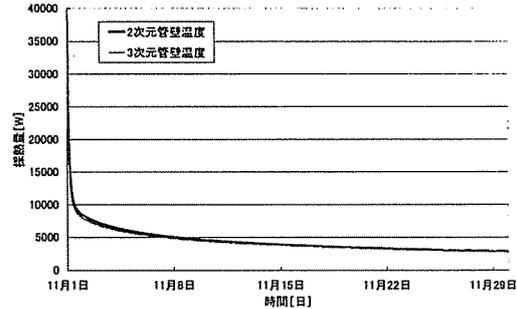


図-12 採熱量の変動

3.2 計算結果

管壁温度を 0°C 、 30°C でそれぞれ一定にした場合の周囲地盤温度を計算した。図-5 および図-6 にそれぞれ管壁温度 0°C 、 30°C のときの X-Y 平面土壌温度分布を示す。Z=11 は杭下端部に相当する。図-7 および図-8 にそれぞれ管壁温度 0°C 、 30°C のときの X-Z 平面地盤温度分布を示す。Y=0 は地下水流方向の中心線に相当する。図-9 および図-10 にそれぞれ管壁温度 0°C 、 30°C のときの Y-Z 平面地盤温度分布を示す。X=19 は地下水流方向に垂直な中心線に相当する。

4. 水平 2 次元の簡易モデルとの比較

埋設間上下端部の影響を考慮しない水平 2 次元の簡易モデルによる解析結果と今回作成した 3 次元数値解析プログラムにより得られた結果との比較を行った。

図-11、図-12 にそれぞれ管近傍温度の変動、採熱量の変動を示す。ここで、3 次元モデルの管近傍温度は約 2°C を示している。冬期採熱運転を想定した今回の計算条件においては、両者の管近傍温度の差は、 1°C 未満であった。また、採熱量については、3 次元解析を行うことにより、約 10% 精度が向上している。今後、年間を通じた解析を行い、さらに検討を進めていく予定である。

まとめ

- 1) 建築物の摩擦杭を空調用熱交換器として利用するエネルギーパイルシステムの数値解析プログラムを開発した。地盤温度の解析では、熱水分同時移動、凍結・融解、地下水流の影響を考慮しており、地盤熱性状とシステム特性および導入効果の関係などに関する評価が可能である。
- 2) 札幌市内の事務所併用住宅を対象として、本解析プログラムによる計算を行った。今回の計算例では、管壁温度を一定として与え、周囲地盤の温度分布などに関する考察を行った。
- 3) 3 次元数値解析によって得られた熱特性と、水平 2 次元の簡易モデルによる結果の差異について検討した。冬期採熱運転を想定した今回の計算条件においては、両者の採熱量の差

は約 10% という結果になった。今後、年間を通じた解析を行って検討を進める必要がある。

記号

c : 地盤の比熱 [J/(kg·K)], D_{Tl} : 温度こう配による液水拡散係数 [kg/(m·s·K)], D_{Tv} : 温度こう配による水蒸気拡散係数 [kg/(m·s·K)], $D_{\theta l}$: 体積含水率こう配による液水拡散係数 [kg/(m·s·(m³/m³))], $D_{\theta v}$: 体積含水率こう配による水蒸気拡散係数 [kg/(m·s·(m³/m³))], g : 重力加速度 [m/s²], h_f : 液水のエンタルピー [J/kg], h_v : 水蒸気のエンタルピー [J/kg], K : 透水係数 [kg/(m·s·Pa)], L_b : 水の蒸発潜熱 [J/kg], L_f : 水の凍結潜熱 [J/kg], M : 水分 1mol あたりの質量 [kg/mol], R : 一般気体定数 [Pa·m³/(mol·K)], RH : 相対湿度 [-], $SCOP$: システム成績係数 [-], T : 地盤温度(セルシウス温度) [°C], T_f : 地盤の凍結開始温度 [°C], T_{ev} : 蒸発器側入口温度 [°C], T_{co} : 凝縮器側出口温度 [°C], Tua : 実験定数 [-], Tub : 実験定数 [-], t : 時間 [s], z : 地表面基準の鉛直下向き距離 [m], θ_a : 体積気相率 [m³/m³], θ_l : 体積含水率 [m³/m³], θ_v : 体積含水率 [m³/m³], λ : 熱伝導率 [W/(m·°C)], Π : 地盤温度(絶対温度) [K], ρ : 地盤の密度 [kg/m³], ρ_l : 水の密度 [kg/m³], ρ_v : 水蒸気の密度 [kg/m³], ϕ : 土中水のポテンシャル [Pa], ϕ_m : マトリックポテンシャル [Pa]

(参考文献)

- 1) 尚和泰宏ら: 空調用エネルギーパイルシステムに関する研究—数値解析による導入効果の評価, 第 10 回衛生工学シンポジウム論文集(2002-10), pp. 57~60
- 2) 濱田靖弘ら: 空調用エネルギーパイルシステムに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001-9), pp.353~356
- 3) 斉藤 央ら: 空調用エネルギーパイルシステムに関する研究—線源理論による設計手法とシステム特性の評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2002-9), pp.1265~1268
- 4) 濱田靖弘ら: 空調用エネルギーパイルシステムに関する研究—冷房運転の実績と長期的利用可能性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2002-9), pp.1269~1272
- 5) 濱田靖弘ら: 積雪地における地下熱利用のための地中温度の予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 68(1998-1), pp.91~100
- 6) 濱田靖弘ら: 標準熱回収率による地下熱利用システムの評価方法および住宅への導入効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 71(1998-10), pp.53~62
- 7) Stiebel Eltron : Wärmepumpen-systeme planung und installation(Mar. 2000), pp.33~374)