HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	空調用エネルギーパイルシステムの開発-数値解析による導入効果の評価-
Author(s)	尚和, 泰宏; 斎藤, 央; 濱田, 靖弘; 中村, 真人; 窪田, 英樹; 横山, 真太郎; 落藤, 澄; 圓山, 彬雄; 照井, 康穂
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 10, 57-60
Issue Date	2002-10-31
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/7100
Type	bulletin (article)
Note	第10回衛生工学シンポジウム（平成14年10月31日（木）-11月1日（金） 北海道大学学術交流会館）. 3 建築環境・エネルギー利用 . P3-3
File Information	10-3-3_p57-60.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

3－3 空調用エネルギーパイルシステムの開発 －数値解析による導入効果の評価－

○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）
落藤 澄（北海道大学）
照井 康穂（アーブ建築研究所）
斎藤 央（北海道大学）
中村 真人（北海道大学）
横山真太郎（北海道大学）
圓山 彬雄（アーブ建築研究所）

はじめに

本研究は，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，札幌市内の事務所併用住宅における暖房運転の実測結果に基づき，解析プログラムの再現性に関する検証を行う．さらに，地下水流の影響，および建物の熱負荷と摩擦杭規模との関係について検討し，本システムのエネルギー削減効果の評価を行う．

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．

$$\frac{\partial(\theta_a\rho_v)}{\partial t}+\frac{\partial(\theta_l\rho_l)}{\partial t}+\frac{\partial(\theta_i\rho_i)}{\partial t}=\nabla(D_{\theta v}\nabla\theta_l)+\nabla(D_{\theta l}\nabla\theta_l)$$
$$+\nabla(D_{Tv}\nabla T)+\nabla(D_{Tl}\nabla T)-\rho_l g\frac{\partial K}{\partial z} \quad \cdots(1)$$

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t}+L_b\frac{\partial(\theta_a\rho_v)}{\partial t}-L_f\frac{\partial(\theta_i\rho_i)}{\partial t}$$
$$=\nabla(\lambda\nabla T)+\nabla(h_v D_{\theta v}\nabla\theta_l)+\nabla(h_l D_{\theta l}\nabla\theta_l)$$
$$+\nabla(h_v D_{Tv}\nabla T)+\nabla(h_l D_{Tl}\nabla T)-\rho_l g\frac{\partial(h_l K)}{\partial z} \quad \cdots(2)$$

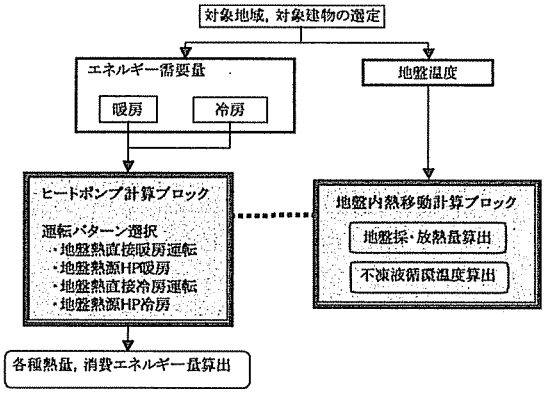

図-1 数値解析プログラムの構成

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

$$\theta_l=Tua|T|^{tub} \quad \cdots(4)$$

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．

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t}-L_f\frac{\partial(\theta_i\rho_i)}{\partial t}=\nabla(\lambda\nabla T)+\nabla(h_l K\nabla\phi) \quad \cdots(5)$$

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

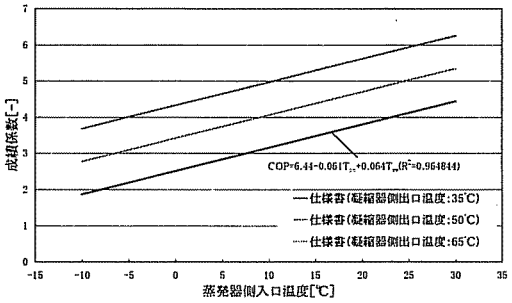

図-2 ヒートポンプ性能曲線

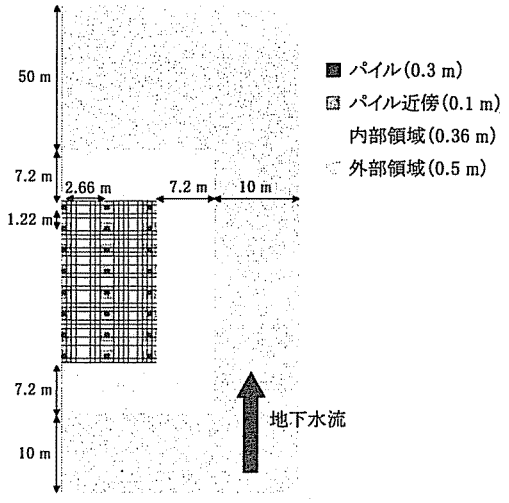

図-3　地盤計算領域

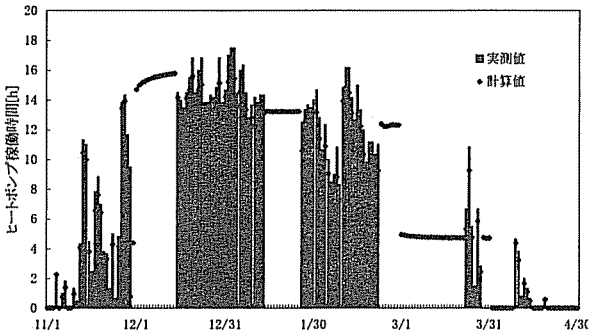

図-4　ヒートポンプ稼働時間の比較

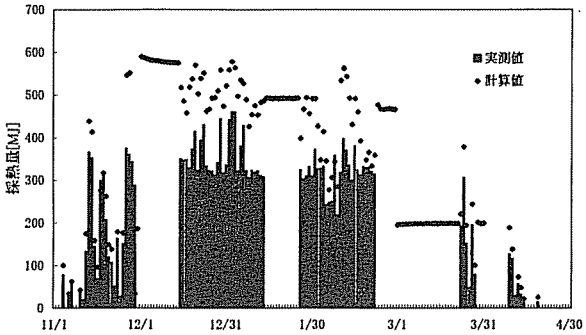

図-5　地盤採熱量の比較

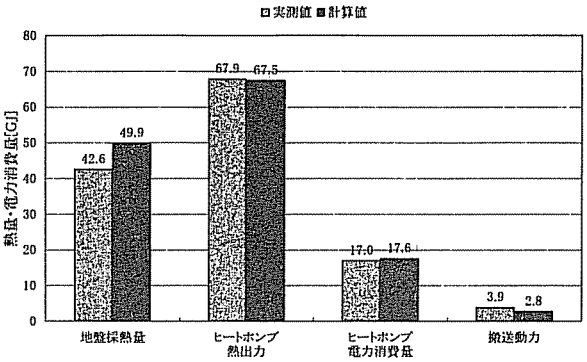

図-6　地盤採熱量・ヒートポンプ熱出力・ヒートポンプ消費電力・搬送動力の比較

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．

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

3．実測結果と計算結果との比較

3.1　計算条件

札幌市内の事務所併用住宅における暖房運転の実測結果に基づき，2．における解析プログラムの再現性に関する検証を行った．数値解析手法の詳細は既報[5]によるが埋設管上下端部の影響を考慮しない無限の長さを有する管における地下水流れ方向の水平二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，地下水の流動性に関しては，調査を行っていないため，今回は隣接する区の地下水流速，40 m/年[5]を与えて計算を行った．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 0.3 m の正方形に近似した．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 57 m，その他は約 17 m とした．また，空間分割幅については，杭近傍，図-3 における内部領域，外部領域で，それぞれ 0.1 m，0.36 m，0.5 m とした．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．入力条件としては，建物側の温水送り・返り温度差と循環流量から算出する時刻別放熱量の実測値を与えている．ヒートポンプの凝縮器側には，負荷の短期的変動を平準化するための 0.2 m^3 の蓄熱槽を設置し，ヒートポンプは定格運転を行っている．蓄熱槽については，温度成層型と仮定し，縦方向 5 層に仮想分割して槽内の温度分布を計算した．仮想分割各層は完全混合として扱い，隣接層間の仮想移動水量は，循環流量の 10%とした[7]．蓄熱槽からの熱損失に関しては，熱貫流率を 1.0 W/(m^2·K)として計算した．

表-1　COP・SCOP の比較

	実測値	計算値
COP	4.5	4.0
SCOP	3.7	3.4

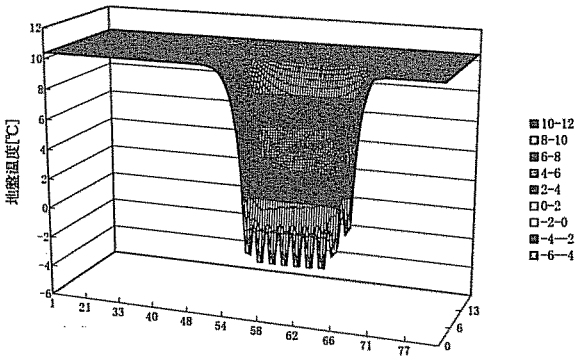

図-7　1月31日における地盤温度分布
(地下水流速：0 m/年)

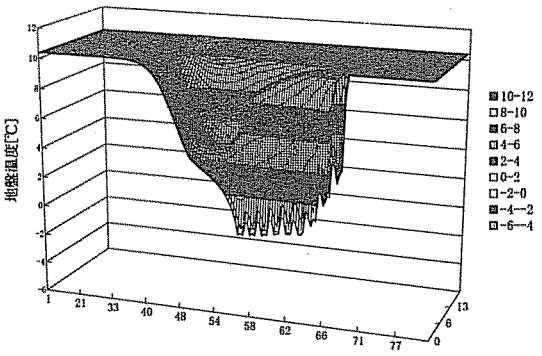

図-9　1月31日における地盤温度分布
(地下水流速：20 m/年)

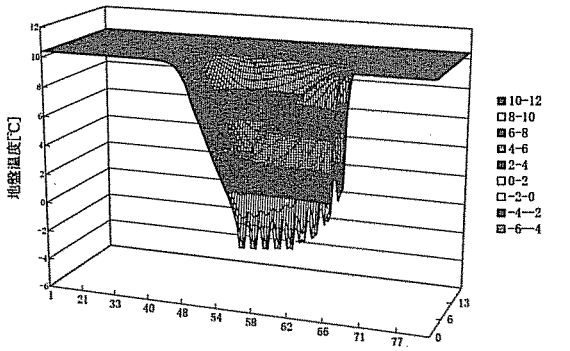

図-8　1月31日における地盤温度分布
(地下水流速：10 m/年)

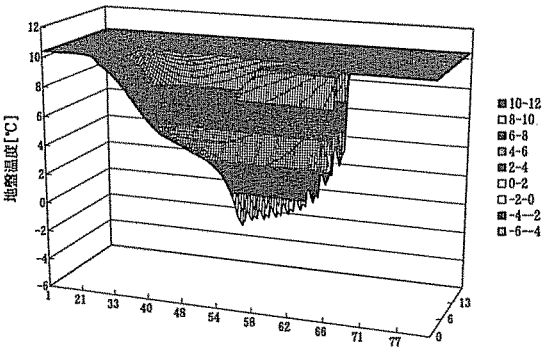

図-10　1月31日における地盤温度分布
(地下水流速：40 m/年)

3.2　実測結果と計算結果との比較

図-4 および図-5 にそれぞれヒートポンプ稼働時間の比較と地盤採熱量の比較を示す．ヒートポンプ稼働時間については暖房期間を通して，計算値は実測値の傾向を比較的よく再現していると考えられる．図-6 に地盤採熱量・ヒートポンプ熱出力・ヒートポンプ消費電力・搬送動力の比較を示す．地盤採熱量と搬送動力には多少の差が見られたものの，ヒートポンプの熱出力と消費電力量は非常によく一致している．表-1 に COP・SCOP の比較を示す．COP・SCOP はともに計算値が実測値を下回る結果となった．この要因としては，実測値と比較して計算値の地盤温度の低下が大きかったことが挙げられ，上下端部の影響を考慮することにより，さらに詳細な解析が可能となると考えられる．

4．数値解析による導入効果の評価

4.1　地下水流の影響

建物規模および摩擦杭規模は 3.1 と同様であり，地下水流速を 0 m/年から 50 m/年まで変化させて計算を行った．図-7 から図-10 に，それぞれ地下水流速 0 m/年，10 m/年，20 m/年，40 m/年のときの 1 月 31 日における地盤温度分布を示す．摩擦杭周辺に地下水流がある場合，下流側への熱の移動が多く，摩擦杭周辺の地盤温度の回復が早まっていることがわかる．図-11 に摩擦杭表面温度の変動を示す．地下水流速が大きくなるほど，摩擦杭表面温度の回復は早いが，今回の計算条件下においては，摩擦杭が比較的狭い範囲に敷設されているため，地下水流速が 10 m/年以上になると，二年目の暖房開始時までに摩擦杭表面温度が回復している．したがって，図-12 に示すように，地下水流速が大きい場合，COP や SCOP の経年変化はほとんど見られず，熱源としての長期的利用の観点からは，地下水流が有利に働く結果となった．

4.2　建物の熱負荷と摩擦杭規模との関係

計算条件は，摩擦杭規模を 9 m，26 本で一定とし，建物の延床面積を変化させて計算を行った．比較の対象としての従来方式には，ガス冷温水機（暖房時 COP：0.8）を想定した．また，エネルギーパイル方式において不凍液が凍結温度に達した場合の補助熱源としても，同様のガス冷温水機としている．図-13 に地盤容量/延床面積比と一次エネルギー削減率との関係を示す（電力の熱量換算値：10.258 MJ/(kW·h)[8]）．熱負荷に対する地盤容量の適正化により，一次エネルギー削減率が 40%程度に達しており，地下水流速が大きいほど削減効果が大きくなっている．ただし，熱負荷に対して地盤容量が過小となると，地盤温度が大きく低下し，地盤容量が過大となると，搬送動力の影響が相対的に大きくなるため，エネルギー削減効果が減少する結果となった．

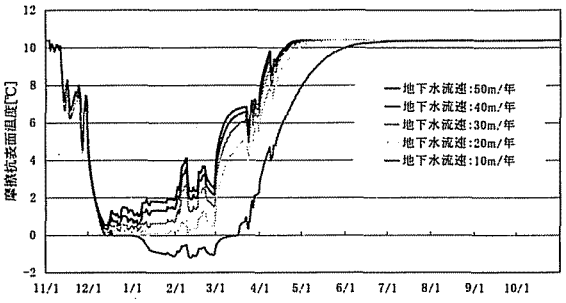

図-11　摩擦杭表面温度の変動

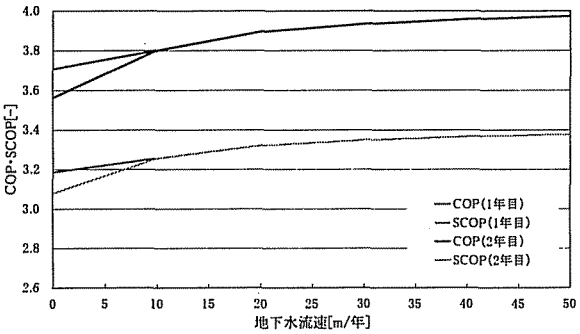

図-12　地下水流速と COP・SCOP との関係

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における暖房運転の実測結果に基づき，解析プログラムの再現性に関する検証を行った．その結果，成績係数は10%程度の誤差が生じており，今後，実際のヒートポンプ性能，地下水流速の調査，地盤内三次元解析による検証などを進める必要があると考えられる．

3) エネルギーパイルシステムの性能に及ぼす地下水流の影響について検討した．今回の計算条件下においては，摩擦杭が比較的狭い範囲に敷設されているため，地下水流速が10 m/年以上になると，二年目の暖房開始時までに摩擦杭表面温度が回復しており，成績係数の経年変化は見られないことを示した．

4) 建物の熱負荷と摩擦杭規模との関係について検討した．熱負荷に対して地盤容量が過小となると，地盤温度が大きく低下し，また，地盤容量が過大となると，搬送動力の影響が相対的に大きくなるため，一次エネルギー削減率を最大とする地盤容量/延床面積比が存在する．この適正化により，一次エネルギー削減率は 40%程度に達することがわかった．

本研究の一部は，財団法人矢崎科学技術振興記念財団 2001 年度奨励研究助成“空調用エネルギーパイルシステムの開発” によった．

記号

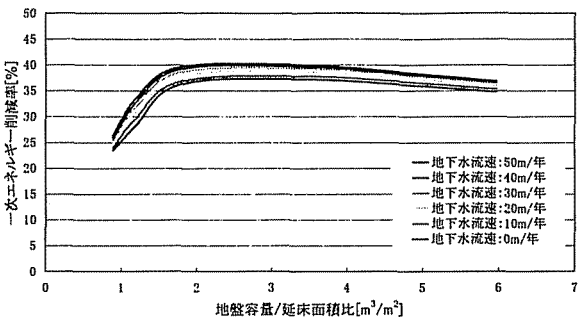

図-13　地盤容量/延床面積比と一次エネルギー削減率との関係

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_l：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)　[℃], T_f：地盤の凍結開始温度　[℃], T_{ev}：蒸発器側入口温度　[℃], T_{co}：凝縮器側出口温度　[℃], 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_i：体積含氷率　[m³/m³], θ_l：体積含水率 [m³/m³], λ：熱伝導率　[W/(m・℃)], Π: 地盤温度(絶対温度)　[K], ρ：地盤の密度　[kg/m³], ρ_i：氷の密度 [kg/m³], ρ_l：液水の密度　[kg/m³], ρ_v：水蒸気のの密度[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) 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
2) 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
3) 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
4) 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
5) 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
6) Stiebel Eltron ：W.rmepumpen-systeme planung und installation(Mar. 2000)，pp.33～374)
7) 宇田川光弘ら：要素モデルによる太陽熱利用システムシミュレーション，日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集(1993-12)，pp.181～184
8) 省エネルギーハンドブック編集委員会：省エネルギーハンドブック ‘98(1998-4)，住宅・建築 省エネルギー機構