地中熱ヒートポンプシステムにおける地中熱交換器仕様の設計方法 に関する研究

その1 地中熱交換器の採放熱量の定量化とその応用

A STUDY ON DESIGN METHOD FOR THE GROUND HEAT EXCHANGER'S SPECIFICATION OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM

Part 1 Quantification of ground heat exchangers' extraction or injection performances and its application

葛 隆生*, 長野克則**, 中村 靖***

Takao KATSURA, Katsunori NAGANO and Yasushi NAKAMURA

In this paper, the authors define the heat extraction or injection rate of ground heat exchanger (GHEX) per length and temperature difference as the coefficient of heat extraction or injection. Applying the definition, the heat extraction or injection performances of GHEXs are quantified corresponding to the conditions such as ground properties and GHEXs' specifications are changed.

In addition, the authors compared to the quantified heat extraction or injection performances. When the flow condition of heat transfer medium in GHEX turns from laminar flow to turbulent flow, the heat extraction or injection performances of GHEXs increase 5~12%. On the other hand, the increase of heat extraction or injection performances of GHEXs in the range of turbulent flow is only less than 2% even in the where the flow rate is up to more than thrice. When the number of U-tubes is two and flow rate per the one U-tube is set at 6 L/min, the ratios of heat extraction performance of GHEXs using pre-casting concrete pile and steel pile compared to the borehole GHEX are 1.35~ 1.58 and 1.29~1.40, respectively.

Keywords: *Ground Source Heat Pump System, Ground Heat Exchanger, Coefficient of Heat Extraction or Injection, Internal Thermal Resistance, Effective Thermal Conductivity, Ground Water Flow*

地中熱ヒートポンプシステム, 地中熱交換器, 単位採放熱係数, 内部熱抵抗, 有効熱伝導率, 地下水流れ

はじめに

最近我が国でも地中熱ヒートポンプ(Ground Source Heat Pump; 以下 GSHP とする)システムは高効率で暖冷房給湯が行える、環境負荷の小さな熱源システムとして幅広く認知されるようになってきている。一方で、年間数千~数万台の GSHP システムが導入されている欧米のような本格的な普及に至るまでには解決すべき課題も数多く残っている。現状においてその課題の主たるものとしては、導入コストの低減やヒートポンプ機種の充実、そして信頼性の高いシステムの設計・運用手法の確立が挙げられる。

GSHP システムは一般的に他の熱源システムと比較して、計画・設計時に高度な技術と知識が要求されると言われているが、これは適切な地中熱交換器の仕様・規模の設計が必要となるためである。地中熱交換器の規模は筆者らの開発した GSHP システム設計・性能予測ツール^{1)~3)}のような性能予測プログラムを用いて決定する方法の他に、これまで行われてきた実験や実測の経験則に基づいて示された、地中熱交換器の採放熱性能をもとに簡易的に決定する方法がある⁴⁾。一方で、ボアホールを掘削する場合や杭利用を行う場合など、多様化されている地中熱交換器に対して、U字管の挿入本数、U字管1本あたりの循

環流量などといった仕様を決定する方法については、特定の条件を除いては示されていないのが現状である^{5), 6)}。

地中熱交換器の仕様を決定するためには、地中熱交換器の仕様条件に対して、採放熱量を明らかにする必要がある。地中熱交換器の採放熱性能(採放熱量)については、一般的なボアホールシングルUチューブ型地中熱交換器で、これまでの GSHP システムの運転実績や、濱田らの実験結果などから 25~40 W/m とされている^{4), 7)}。また、大口径を有する杭を地中熱交換器として用いた場合や、地下水流れを有する場合の地中熱交換器の採放熱量は、一般的な値よりも大きくなり、筆者らの 150 m/年程度の地下水流速が測定された地点⁸⁾における、鋼管杭を地中熱交換器として用いた運転実績では採熱時(冬期暖房時)で約 140 W/m、放熱時(夏期冷房時)で 250 W/m⁹⁾、岩田らの 1.39×10^{-4} m/s(4384 m/年)の地下水流速が見積もられた地点での採熱実証実験では 200 W/m の採熱量が得られたという報告もある¹⁰⁾。しかしながら、これらの採放熱量を得るための解析的なメカニズムを明らかにしておかなければ、試験結果のみが一人歩きし、その結果として誤ったシステム設計を行ってしまい、設計の信頼性を損なってしまう恐れがある。

* 北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科
専任講師・博士(工学)

** 北海道大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*** 新日鉄エンジニアリング(株) 工修

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu, Ph. D.

Prof., Faculty of Engineering, Graduate School of Hokkaido University, Dr. Eng.

Nippon Steel Engineering, M. Eng.

地中熱交換器の採放熱量を計算するモデルの作成については、落藤・金¹¹⁾、藤井ら¹²⁾の理論解析を応用したものや、落藤ら¹³⁾、長野ら¹⁴⁾、濱田ら¹⁶⁾、藤井⁵⁾、南・大岡⁶⁾らの数値解析によるものなど、多種多様にわたって行われているものの、これらについては特定の地盤条件や地中熱交換器条件に対応したものとなっていることから、任意の地盤条件や地中熱交換器条件に対して採放熱量を定量化することは難しい。

そこで本論文では、地盤条件や地中熱交換器仕様条件、採放熱条件に応じた採放熱量を定量化する。さらに定量化した採放熱量を比較することにより、適切な地中熱交換器を設計する方法について考察する。

記号

A : 面積	[m ²]
α : 温度伝播率	[m ² /s]
C_f : ヌセルト数を計算するための係数	
c : 比熱	[kJ/(kg・K)]
c_p : 定圧比熱	[kJ/(kg・K)]
d : 直径	[m]
G : 体積流量	[m ³ /s]
G_r : グラスホフ数	[-]
g : 重力加速度	[m/s ²]
J_x : x 次の第一種ベッセル関数	
K : 熱貫流率	[W/(m ² ・K)]
L : 長さ	[m]
N_u : ヌセルト数	[-]
Q : 採熱量	[W]
q : 単位長さあたりの熱量	[W/m ²]
q' : 単位採放熱係数(単位長さ・温度差あたりの熱量)	[W/(m・K)]
R : 熱抵抗値	[(m ² ・K)/W]
R_e : レイノルズ数	[-]
R_a : レイリー数	[-]
r : 径方向距離、半径	[m]
T : 温度	[°C]
t : 時間	[s]
u : 地下水流速	[m/年]
V : 体積	[m ³]
x : 固有値	
Y_x : x 次の第二種ベッセル関数	
α : 対流熱伝達率	[W/(m ² ・K)]
β : 体膨張係数	[K ⁻¹]
λ : 熱伝導率	[W/(m・K)]
ρ : 密度	[kg/m ³]
τ : 時間に関する変数	
ν : 動粘性係数	[m ² /s]
添え字	
f : 熱媒流体	
fw : 熱媒流体から水	
in : 入口	
m : 平均	
out : 出口	

p : 地中熱交換器

s : 土壌

U : U 字管

Up : U 字管表面から地中熱交換器表面

Uw : U 字管表面から水

pw : 地中熱交換器表面から水

$p-outw$: 地中熱交換器外表面から水

w : 水

$-in$: 内側

$-out$: 外側

1 連続採放熱時における単位採放熱係数

1. 1 単位採放熱係数の考え方

まず、本論文では地盤が単一の地層で構成されているものと仮定する。地中熱交換器の採放熱性能に影響する要素は、地中熱交換器周囲土壌の構成、地中熱交換器の仕様、地中熱交換器内部熱媒の循環流量などが挙げられるが、最も影響が大きい要素は地中熱交換器内部熱媒の温度である。例えば採熱時においては、ヒートポンプの性能等を見無視して熱媒温度を下げることであれば、地中との温度差が大きくなり、それにより採熱量を増大させることも可能である。しかしながら、ヒートポンプの性能低下はもちろん、運転可能範囲などといった信頼性の問題も生じることから、熱媒温度を過度に変化させることは不可能である。

落藤ら¹²⁾、長野ら¹⁴⁾、濱田ら⁷⁾は過去の地中熱交換器を用いた採放熱試験において、地中熱交換器の採放熱性能を見積もるために、長さあたりの採熱量から初期の地中温度と地中熱交換器内部熱媒の温度の温度差を除くことによって得られる、長さ・温度差あたりの採熱量を用いていた。筆者らは、この長さ・温度差あたりの採熱量は地中と熱媒の温度差に関する考慮がなされているため、任意の地盤、任意の地中熱交換器に対する採放熱性能を示す値として用いることが可能であると考え、これを単位採放熱係数として用いることとした。

単位採放熱係数は次式によって計算が可能である。

$$q'_p = q_p / (T_{pm} - T_{s0}) = q_p / \Delta T_{pm} \quad (1)$$

式(1)より、単位採放熱係数は熱媒温度を初期温度から 1°C 変化させることによって得られる採放熱量を示していることがわかる。一方、式(1)にある熱媒の温度変化 ΔT_{pm} については、地中からの採熱量が Q_p で一定であると仮定することにより、次式によって表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta T_{pm} &= -R_{p-out} Q_p / A_{p-out} + (T_s(r_{p-out}, t) - T_{s0}) \\ &= -R_{p-out} Q_p / A_{p-out} + \Delta T_s(r_{p-out}, t) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)右辺第 1 項は図 1 に示される内部熱媒から地中熱交換器表面までの内部熱抵抗による温度変化を表している。この熱抵抗は採放熱を開始して数時間以内でほとんど一定となることが、実証実験などの結果より明らかとなっている¹⁷⁾。一例として、 $\phi 800\text{mm}$ 鋼管杭を地中熱交換器として用い、12 時間毎に放熱量一定条件で行った試験の、地中熱交換器出入口温度・地中熱交換器(鋼管杭)表面温度・循環流量、採放熱量と内部熱抵抗値の変化を図 2 に示す¹⁷⁾。なお、採放熱量と内部熱抵抗値については、下式により算出している。

$$Q_p = c_{pf} \rho_f G_f (T_{pout} - T_{pin}) \quad (3)$$

図1 地中熱交換器内部・外部熱抵抗概念図

図2 $\phi 800\text{mm}$ の鋼管杭を用いた放熱試験における地中熱交換器出入口温度、鋼管杭内表面温度、循環流量、採放熱量、内部熱抵抗値の変化

$$R_{p-out} = -A_{p-out} (T_{pm} - T_s(r_{p-out}, t)) / Q_p \quad (4)$$

図2より、このような内部に膨大な熱容量を有する大口径の地中熱交換器の場合でも、放熱量と熱抵抗値は放熱開始より数時間で $0.09 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W} \sim 0.1 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ の範囲で収まっていることがわかる。従って、図2のように地中熱交換器表面と熱媒(出入口温度)の温度差が一定であれば、地中熱交換器の条件に関らず式(2)の熱抵抗値は一定として扱ってよいといえる。

式(2)右辺第2項の $\Delta T_s(r_{p-out}, t)$ は地中熱交換器表面の採熱による温度変化を表すものであり、採熱量が一定であればこの大きさは地中熱交換器外部熱抵抗に依存する。外部熱抵抗は地中熱交換器周囲の有効熱伝導率を指しており、この有効熱伝導率については熱伝導の他に地下水流れによる移流効果も含んでいる。 $\Delta T_s(r_{p-out}, t)$ については、地中熱交換器周囲土壌の熱移動が熱伝導のみで行われるものとするれば、無限円筒理論¹⁸⁾を応用して次式で計算できる。

$$\Delta T_s(r_{p-out}, t) = -\frac{2Q_p}{\pi A_{p-out} \lambda_s} I(r_{p-out}, t) \quad (5)$$

ここで、

$$I(r, t) = \int_0^\infty (1 - e^{-a_s x^2 t}) \frac{J_0(xr) Y_1(xr_{p-out}) - Y_0(xr) J_1(xr_{p-out})}{x^2 [J_1^2(xr_{p-out}) + Y_1^2(xr_{p-out})]} dx$$

式(5)より $\Delta T_s(r_{p-out}, t)$ は時間の経過に伴い変化することを示している。従って、これをもとに計算される ΔT_{pm} 、 q'_p についても時間の経過によって変化することとなる。

1.2 各計算条件における単位採放熱係数

地中熱交換器の内部仕様や採放熱条件、さらには地盤条件の違いによる内部熱抵抗値の変化について検討した。計算条件を表1に示す。地中熱交換器についてはボアホールU字管型、PHC杭利用、鋼管杭

表1 計算条件

地中熱交換器	U字管 本数	循環 熱媒	U字管1本 あたり循環 流量 [L/min]	T_{pmset} (T_{pm} の設定 値) [°C]	地中有効 熱伝導率 [W/(m·K)]	地中 熱容量 [kJ/m³]
ボアホール	1~2本					
PHC杭利用	1~4本	水	2、4、6、 8、12、16	採熱時8℃、 放熱時30℃	1.0、1.5、 2.0	3000
鋼管杭利用	1~4本					

利用の3種類について検討した。各地中熱交換器の仕様は図3に示す通りであり、全てU字管を使用するものとした。地中熱交換器内のU字管1本あたりの循環流量は2~16 L/minの範囲で検討した。なお、地中熱交換器全体の循環流量についてはU字管の本数に応じて増加するように設定しているため、例えばU字管が2本で、1本あたりの循環流量が8 L/minの場合、全体の循環流量は16 L/minとなる。また、今回は内部の熱媒は水とし、U字管内部熱媒の対流熱伝達率を計算するために必要な粘性係数を決定するための熱媒温度は採熱時を8℃、放熱時を30℃と設定した。地盤条件については有効熱伝導率を1.0 W/(m·K)、1.5 W/(m·K)、2.0 W/(m·K)のそれぞれの条件で計算した。熱容量については一般的な地盤の範囲内(2000 ~ 3500 kJ/m³)では、有効熱伝導率に比べてその変化が与える採放熱量の増減は非常に小さいことから¹⁹⁾、3000 kJ/m³の一条件のみを与えた。

ボアホールU字管型、PHC杭利用の地中熱交換器における内部熱抵抗については、次式によって計算した²⁰⁾。

$$R_{p-out} = 1 / K_{p-out} \quad (6)$$

ただし、

$$K_{p-out} = \frac{A_{U-out}}{\left\{ A_{U-out} R_{Up} + A_p r_{U-out} \left(\frac{1}{\lambda_U} \ln \frac{r_{U-out}}{r_{U-in}} + \frac{1}{r_{U-in} \alpha_f} \right) \right\}}$$

なお、(6)式の R_{Up} については既報²⁰⁾と同様に境界要素法を用いて算出し、 α_f については、以下の式によって求めた。

$$\alpha_f = N_{uf} \lambda_f / d_{p-in} \quad (7)$$

ここで、ヌセルト数 N_{uf} は流れの状態によって異なるため、各条件について以下のように計算することとした²¹⁾。なお、遷移域は下式のように線形近似による補間を行っている。

層流($Re < 2100$)

$$N_{uf} = N_{uf1}$$

遷移域($2100 \leq Re < 3000$)

$$N_{uf} = \{N_{uf1}(3000 - Re) + N_{uf2}(Re - 2100)\} / 900$$

乱流($3000 \leq Re$)

$$N_{uf} = N_{uf2} \quad (8)$$

ここで、

$$N_{uf1} = 3.65$$

$$N_{uf2} = \frac{(C_f/2)(Re - 1000)P_{rf}}{1 + 12.7 \sqrt{C_f/2} (P_r^{2/3} - 1)}$$

また、

$$Re = u_f d_{U-in} / \nu_f \quad (9)$$

$$C_f = 0.079 / Re^{0.25} \quad (10)$$

$$P_{rf} = \nu_f / \alpha_f \quad (11)$$

である。

一方、鋼管杭利用の地中熱交換器については、内部に水を充填する間接熱交換型熱交換器の内部熱移動計算²²⁾をもとに、図4に示す内

部熱抵抗の計算プログラムを作成し、計算することとした。プログラムに与える地中熱交換器の仕様、地盤条件については表 1 と同様にし、 $t_{max} = 1000 \text{ h}$ 、 $T_{s0} = 16.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ とした。

なお、図 4 内に示される各値については以下の式で計算する²²⁾。また、計算の簡略化のため

$T_s(r_{p-out}, t) = T_{p-out} = T_{p-in}$ としている。

$$\alpha_{Uw} = N_{uUw} \lambda_w / L_p \quad (12)$$

$$N_{uUw} = 0.13 (P_{rw} G_{rw})^{1/3} \quad (13)$$

$$P_{rw} = v_w / a_w \quad (14)$$

$$G_r = L_p^3 g_w \beta_w |T_w - T_{U-out}| / v_w^2 \quad (15)$$

$$\alpha_{pw} = N_{upw} \lambda_w / L_p \quad (16)$$

$$N_{upw} = 0.13 (P_{rpw} G_{rpw})^{1/3} \quad (17)$$

$$G_r = L_p^3 g_w \beta_w |T_{p-in} - T_w| / v_w^2 \quad (18)$$

$$Q_{fw} = K_{U-out} A_{U-out} (T_w - T_{pm})$$

$$= \frac{1}{\left\{ r_{U-out} \left(\frac{1}{\lambda_U} \ln \frac{r_{U-out}}{r_{U-in}} + \frac{1}{r_{U-in} \alpha_f} \right) \right\}} A_{U-out} (T_{U-out} - T_{pm})$$

①

$$= \alpha_w A_{U-out} (T_w - T_{U-out}) \quad (19)$$

$$c_{pf} \rho_f V_f \frac{dT_{pm}}{dt} = c_{pf} \rho_f G_f (T_{pin} - T_{pout})$$

$$+ K_{U-out} A_{U-out} (T_w - T_{pm}) \quad (20)$$

$$c_{pw} \rho_w V_w \frac{dT_w}{dt} = K_{U-out} A_{U-out} (T_{pm} - T_w)$$

$$+ K_{p-outw} A_{p-out} (T_{p-in} - T_w) \quad (21)$$

$$T_s(r_{p-out}, t) = -\frac{2}{\pi A_{p-out} \lambda_s} \int_0^t Q_p(t-\tau) \frac{\partial U(r_{p-out}, \tau)}{\partial \tau} d\tau + T_{s0} \quad (22)$$

計算結果の一例として、ボアホールシングル U 字管型熱交換器を使用して、採熱時を想定し循環流量を 6 L/min とした場合の、経過時間に対する単位採放熱係数の変化を図 5 に示す。経過時間 2880 h (=120 日)における単位採放熱係数は $\lambda_s = 2.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ で $2.35 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ となっており、ここで、寒冷地域(札幌)の暖房運転時を想定して、 $T_{s0} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{pm} = -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ と設定すれば $\Delta T_{pm} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、この時の採熱量は 28.5 W/m となる。この値は、濱田ら⁷⁾の連続採熱実験から得られた 120 日目のシングル U 字管型地中熱交換器の採熱量 26.9 W/m と同程度であり、妥当な値といえる。また、冷暖房期間を半年ずつとして考えると、冷暖房時間はそれぞれ 4380 h となることから、これ以降では 4000 h の単位採放熱係数を用いて、各条件に対する採放熱性能を検討することとした。

各地盤条件、地中熱交換器の仕様条件における、U 字管 1 本あたりの循環流量に対する単位採放熱係数を図 6～図 8 に示す。まず、採熱・放熱時の採放熱量(単位採放熱係数)を比較すると、鋼管杭を使用した場合を除いて、その他の条件が同じであればほとんど差が見られないことがわかる。鋼管杭の場合は、放熱時の方が内部熱媒と地中(地中熱交換器表面)の温度差が大きくなり、それにより内部充填水の自然対流が大きくなるため、採放熱量が増大する。また、循環流量に対する採放熱量については流れの状態が層流から乱流と変わる 2 L/min から 6 L/min の間で増加割合は大きくなっており、U 字管 2 本使用時に

図 3 各地中熱交換器の仕様条件

図 4 鋼管杭の内部熱抵抗値計算フロー

図5 経過時間に対する単位採放熱係数の変化

おける採放熱量の増加割合はボアホール型で5～8%、PHC杭利用型で7～12%、鋼管杭利用で6～10%となった。一方で、流れの状態が乱流となると増加割合は小さく、いずれの条件でも流量が6 L/min から20 L/minに増大しても、増加割合は2%未満にとどまった。このことから、地中熱交換器内部の循環流量については、対流熱伝達率が極端に小さくなる層流とならない大きさに保つことが重要であることが定量的に示された。また、不凍液使用時には動粘性係数(粘度)が増大することから、これに応じて流れが層流とならない循環流量を設定する必要がある。図9に25AU字管(内径26 mm)を使用した場合の、レイノルズ数が2100、3000以上となる循環流量を示す²³⁾。30 °Cの水を使用する場合は、循環流量が2 L/min、3 L/min程度でレ

図6 ボアホール型地中熱交換器における循環流量に対する単位採放熱係数

図7 PHC杭利用型地中熱交換器における循環流量に対する単位採放熱係数

図 8 鋼管杭利用型地中熱交換器における循環流量に対する採放熱係数

イノルズ数が 2100、3000 以上となるが、その他の熱媒ではレイノルズ数を 3000、もしくは 2100 以上に保つために、その数倍の循環流量が必要となる。さらに、地盤条件、地中熱交換器の仕様、循環流量が同じであれば、表面積の大きい PHC 杭、鋼管杭、ボアホール型地中熱交換器の順に採放熱量が大きくなっていることがわかる。U 字管 2 本使用、循環流量 6 L/min 時における PHC 杭、鋼管杭の採放熱量はボアホール型地中熱交換器に対して、それぞれ 1.35～1.58 倍、1.29～1.40 倍となった。

また、図 8 をもとにして得られる鋼管杭の採熱量を、筆者ら²²⁾の実証試験の結果と比較した。有効熱伝導率 1.5 W/(m·K)における 1 本使用時・循環流量 10 L/min、U 字管 2 本使用時・循環流量 5 L/min(合計 10 L/min)の単位採放熱係数はそれぞれ 2.45 W/(m·K)、2.65 W/(m·K)となり、 $\Delta T_{pm} = 6.8$ °C ($T_{s0} = 9.3$ °C、 $T_{pm} = 2.5$ °C)として採熱量を計算すると 16.7 W/m、18.0 W/m となる。この値は実証試験から得られたそれぞれの採熱量 17.0 W/m、19.9 W/m とよく一致した。このことから本方法による採放熱量の評価は有効であるといえる。

1. 3 限界採放熱量

地中熱交換器の口径(ボアホール口径、杭口径)や地盤条件が決まってしまう場合、地中熱交換器の採放熱量が最大となるのは、地中熱交換内部熱抵抗値、すなわち式(2)において $R_{p-out} = 0$ となる場合である。従って、地中熱交換器の内部に納まれば、いかなる形状であっても、採放熱量はその最大の採放熱量よりも大きくなることはないため、これを地中熱交換器の限界採放熱量とした。図 6～図 8 に $t = 4000$ h とした場合の、各地中熱交換器条件、地盤条件における地中熱交換器の限界採放熱量を示した。

2 地下水流れを有する場合における単位採放熱係数

地下水流れは地中熱交換器の採放熱に対する地中温度変化、すなわち式(2)について地中熱交換器表面温度の変化に対して影響を与える。ここで、地下水流れが地盤全層に渡って同様に存在していると仮定す

れば、地下水流速 30 m/年における、一定加熱時の地中熱交換器表面温度 $\Delta T_s (r_{p-out})$ の変化は図 10 に示される通りとなる。なお、温度変化については既報²⁴⁾で示した数値計算プログラムによって計算した。図 10 から 30 m/年の微小な流速の範囲においても、いずれの口径でも、一定採放熱条件時における温度の変化は 2000 時間程度でほぼ定常状態に達することかがわかる。

このことから、30 m/年以上の地下水流れが存在する場合には、暖冷房を行っている期間中に温度変化が定常状態に達すると考えられることから、定常状態に達した時点での温度変化をもとに単位採放熱係数を検討した。各地中熱交換器条件について U 字管 1 本、2 本を使用した場合の採熱時を想定し循環流量を 6 L/min とした場合の、地下水流速に対する単位採放熱係数を図 11、図 12 に示す。地下水流速の増大に伴い、採放熱量も増大するが、杭表面から U 字管までの距離が大きく、熱抵抗の大きい PHC 杭は増大効果が最も小さくなっている。U 字管 2 本使用時における、地下水流速 0 m と比較した採放熱量の増大効果は、地下水流速 100 m/年で 2.6 倍(ボアホール)、3.0 倍(鋼管杭)、2.6 倍(PHC 杭)、地下水流速 1000 m/年で 5.8 倍(ボアホール)、5.0 倍(鋼管杭)、3.2 倍(PHC 杭)となった。また、図 12 をもとにして得られる採熱量を、筆者らの鋼管杭を地中熱交換器として用いた運転実績である約 140 W/m と比較した⁹⁾。地下水流速を流速測定試験の結果をもとに 150 m/年とすれば、鋼管杭 U 字管 2 本使用時の単位採放熱係数は 8.8 W/(m·K)となり、 $\Delta T_{pm} = 9$ °C ($T_{s0} = 12$ °C、 $T_{pm} = 4$ °C)として採熱量を計算すると 79.2 W/m となる。地下水流速 0 m の場合の採熱量(24.1 W/m)と比較するかなり近い値となるが、まだ小さい値となっている。この原因については、GSHP システムの運転条件によるものであると考えられるが、この詳細については次報で述べることとする。

まとめ

本論文では、長さ・温度差あたりの採熱量を、単位採放熱係数とし

水、不凍液の条件

- ①水-10℃ ②水-30℃ ③20%EG水溶液-0℃
 ④20%EG水溶液-30℃ ⑤40%EG水溶液-0℃
 ⑥40%EG水溶液-30℃ ⑦20%PG水溶液-0℃
 ⑧20%PG水溶液-30℃ ⑨40%PG水溶液-0℃
 ⑩40%PG水溶液-30℃ ⑪有機酸系不凍液-0℃
 ⑫有機酸系不凍液-30℃
 EG→エチレングリコール PG→プロピレングリコール

図9 動粘性係数に対するレイノルズ数が3000、2100以上となる循環流量

図10 地下水流速30 m/年における一定加熱時の地中熱交換器表面温度変化

図11 地下水流速に対する単位採放熱係数(U字管1本使用時)

図12 地下水流速に対する単位採放熱係数(U字管2本使用時)

て定義し、地盤条件や地中熱交換器仕様条件、採放熱条件に応じた採放熱量を定量化した。さらに定量化した採放熱量を比較することにより以下の知見が得られた。

- 1) U字管2本使用時において循環流量が2 L/min(層流域、遷移域)から6 L/min(乱流域)となる時の採放熱量の増加割合はボアホール型で5~8%、PHC杭利用型で7~12%、鋼管杭利用で6~10%となった。一方で、6 L/minから20 L/minに循環流量が増大しても、その採放熱量の増加割合は2%未満となった。
- 2) U字管2本使用、循環流量6 L/min時におけるPHC杭、鋼管杭の採放熱量はボアホール型地中熱交換器に対して、それぞれ1.35~1.58倍、1.29~1.40倍となった。
- 3) 単位採放熱係数をもとにして得られる採熱量を実験値と比較したところ、ボアホール型地中熱交換器、鋼管杭利用型地中熱交換器のいずれの条件でも、実験に近い値が得られていることを確認した。
- 4) U字管2本使用時における、地下水流速0 mと比較した採放熱量の増大効果は、地下水流速100 m/年で2.6倍(ボアホール)、3.0倍(鋼管杭)、2.6倍(PHC杭)、地下水流速1000 m/年で5.8倍(ボアホール)、5.0倍(鋼管杭)、3.2倍(PHC杭)となった。

次報はGSHPシステムの運転条件に応じた、採放熱量の定量化の方法などについて示す。最終的にはU字管のコストなどの条件を含めた、地中熱交換器の仕様、特にU字管本数の設計方法の検討を行う予定である。

謝辞

本研究を遂行するに当たって、北海道大学大学院工学研究科地中熱利用システム工学講座の関係者各位ならびに(株)藤原環境科学研究所代表取締役 藤原陽三氏から多大なる御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

また、本研究の一部は地球温暖化対策技術開発事業「冷房主体の温暖地域にも普及拡大し得る少水量対応高効率地中熱ヒートポンプビルマルチシステムとその設計・運用方法の技術開発」(代表者：高橋博行 新日鉄エンジニアリング株式会社)によったことを付記します。

参考文献

- 1) 長野克則, 葛隆生: 土壤熱源ヒートポンプシステム設計・性能予測ツールに関する研究 (第1報) 単独垂直型地中熱交換器の設計・性能予測ツールの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, No.101, pp.11-20, 2005
- 2) 葛隆生, 長野克則, 武田清香: 土壤熱源ヒートポンプシステム設計・性能予測ツールに関する研究 (第2報) 複数埋設管への設計・性能予測ツールの拡張, 空気調和・衛生工学会論文集, No.111, pp.48-56, 2006
- 3) 葛隆生, 長野克則, 金田一清香, 中村靖: 土壤熱源ヒートポンプシステム設計・性能予測ツールに関する研究 (第3報) 地中熱交換器の配管仕様に応じた温度計算手法とその応用, 空気調和・衛生工学会論文集, No.134, pp.1-10, 2008
- 4) 北海道大学地中熱利用システム工学講座著: 地中熱ヒートポンプシステム, オーム社, 2007
- 5) 藤井光: 大地結合ヒートポンプシステムにおける熱交換井設計について最適化手法の検討, 日本地熱学会誌, Vol.24-1, pp.29-46, 2002
- 6) 南有鎮, 大岡龍三: 地中熱空調システムのための地中熱採・放熱量予測モデルの開発(第2報)実物件への適用による地中熱交換器の配置と循環水量の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No.147, pp.1-8, 2009

- 7) 濱田靖弘, 落藤澄, 長野克則, 中村真人, 永坂茂之: 垂直埋設管 U 字管を用いた地中蓄熱型冷暖房システムの実験と解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.61, pp.45-55, 1996
- 8) 堀彰吾, 葛隆生, 中村靖, 藤原陽三, 長野克則, 岡和田達, 永恵慎也: 少量対応型地中熱ヒートポンプビルマルチシステムの開発(その 7)地下水流動を考慮した熱応答試験, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 43 回学術講演会論文集, pp.131-134, 2009
- 9) 葛隆生, 長野克則, 武田清香, 堀彰吾ら: 札幌市立大学桑園キャンパスの地中熱ヒートポンプシステムの運転評価(その 1~その 3), 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2007~2008
- 10) 岩田宜己, 小林利文, 深谷玄三郎, 横原恵一, 新堀雄一: 地下水流動を考慮した地中熱利用ヒートポンプシステムの実証実験, 日本地熱学会誌, Vol.27-4, pp.307-320, 2005
- 11) 落藤澄, 金南燦: 長期蓄採熱における地中垂直埋設管の熱伝導に関する理論解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.35, pp.1-9, 1988
- 12) 藤井光, 大久保博晃, 糸井龍一, 小早川洋幸: 不均一地層における U 字管型地中熱交換井の温度挙動解析, 日本地熱学会誌, Vol.28-2, pp.199-210, 2006
- 13) 落藤澄, 西岡純二, 長野克則, 中村真人: 垂直埋設管を用いた不凍液循環型ヒートポンプによる土壌採熱の実験と解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.51, pp.103-111, 1993
- 14) 長野克則, 落藤澄: 土壌熱源ヒートポンプシステムに関する研究(第 1 報) 不飽和度における凍結を伴う土壌採熱および土壌温度に関する数値計算と実験, 空気調和・衛生工学会論文集, No.54, pp.55-65, 1994
- 15) 長野克則, 落藤澄, 西岡純二: 土壌熱源ヒートポンプシステムに関する研究(第 2 報)垂直埋設管による凍結を伴う土壌採熱のフィールド実験とシミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No.56, pp.25-34, 1994
- 16) 濱田靖弘, 落藤澄, 長野克則, 中村真人, 横山真太郎, 永坂茂之: 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, No.71, pp.53-62, 1998
- 17) T. Katsura, Y. Nakamura, T. Okawada, S. Hori, K. Nagano: Field test on heat extraction or injection performance of energy piles and its application, Effstcok 2009 The 11th International Conference on Energy Storage, 146, 2009
- 18) H.S.Carslaw, J.C.Jaeger: Conduction of Heat in Solid, Oxford University Press, 1959
- 19) 金南燦: 長期土壌蓄採熱システムの特性解析とその応用に関する研究, 北海道大学博士論文, 1988
- 20) K. Nagano, T. Katsura, S. Takeda: Development of a Design and Performance Prediction Tool for the Ground Source Heat Pump System, Applied Thermal Engineering, Volume 26, Issues 14-15, pp.1578-1592, 2006
- 21) 日本機械学会編: 伝熱工学資料改訂第 4 版, p.55, 2001
- 22) 長野克則, 葛隆生, 武田清香, 中村靖: 鋼管基礎杭を地中熱交換器として用いた採熱実証試験とその応用, 空気調和・衛生工学会論文集, No.108, pp.11-20, 2006
- 23) ASHRAE Fundamentals 2001, Chapter 21, 2001
- 24) ショーワ(株): フードブライン技術資料, 2003
- 25) 葛隆生, 長野克則, 武田清香, 中村靖: サーマルプローブ法による地下水流速と温度応答の関係に関する考察, 空気調和・衛生工学会論文集, No.112, pp.51-59, 2006

(2010年 8 月 6 日原稿受理, 2010年10月 5 日採用決定)