

地中熱ヒートポンプ暖房システムの性能予測および設計ツールの開発

佐々木 正史*1, 金野 彩佳*2, 服部 裕太*2, 遠藤 登*3

Predictions of performances and development of a design tool for ground source heat pump heating systems

Masafumi SASAKI*1, Ayaka KONNO*2, Yuta HATTORI*2 and Noboru ENDOH*3

*1, *2, *3 Kitami Institute of Technology
165 Kouen-cho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507, Japan

Received 26 December 2014

Abstract

A ground source heat pump (GSHP) heating system is one of the most effective and realistic renewable energy plants which reduce energy consumption and carbon dioxide to be about a half in comparison with an oil heater in cold climate region. In spite of such superior performance, utilization of GSHP has not been extended in Japan, while that has been remarkably increased in Europe and USA. A design tool which is easy to use for builders is required in Japan. Energy balances in an actual renewable energy house, equipped with a GSHP air conditioning system were observed by real-time continuous monitoring systems from 2005 to 2013 and analyzed in Kitami City, Hokkaido, subarctic region, Japan. Real-time continuous monitoring of soil temperature distributions were also carried out from July in 2007. Thermal demand of heating (=heat loss) from house and thermal input caused by residents were well predicted using house configurations and meteorological data (mainly ambient temperature and wind speed). We set the allowable lowest soil temperature at the vicinity of a heat collecting tube 0°C under a common ambient temperature condition in order to maintain healthiness of soil. Seasonal and cumulative changes in soil temperature distributions were successfully analyzed with FEM from the beginning of GSHP operation in 2005 to the end of that in spring, 2014. A prediction method of required lengths of a U-tube to the required heating demands in various domestic cities which have various soil temperatures has been developed. Builders will easily use these simplified methods as a new design tool.

Key words : Ground Source Heat Pump (GSHP), Air conditioning system, Design tool, Heat collecting tube, Free cooling, U-tube, Cold climate regions, Renewable energy

1. 緒 言

北海道の家庭用エネルギー消費の特徴は一世帯あたりの暖房エネルギーが全国平均の3倍以上であり、このため一世帯あたりの温室効果ガス GHG (Greenhouse Gases : 主に二酸化炭素 CO₂) 発生量も全国平均の3倍以上と突出していることである(住環境計画研究所, 2009)。これが北海道など寒冷地のエネルギー・環境問題の根幹のひとつと考えられる。ヒートポンプを用いた暖房システムでは灯油や電気加熱を用いる在来型暖房方式に比べて、エネルギー(すなわち化石燃料, とりわけ灯油)使用量及び GHG を著しく削減することができる(Akpan, et al., 2006b)。一方、北海道東部(道東)や北部(道北)地域のように厳冬期の気温が著しく低下する場合には、大気を低温熱源とするヒートポンプ(いわゆる通常のエアコン : air conditioner)よりも低温熱源温度の高い地中熱を

No.15-00002 [DOI:10.1299/transjsme.15-00002], J-STAGE Advance Publication date : 15 June, 2015

*1 正員, フェロー, 北見工業大学(〒090-8507 北海道北見市公園町165)

*2 北見工業大学大学院

*3 正員, 北見工業大学

E-mail of corresponding author: sasaki-m@mail.kitami-it.ac.jp

熱源とする地中熱ヒートポンプ（以下 GSHP : Ground Source Heat Pump）が成績係数の面で有効である。北見工業大学では、北見市内の建設業者らと共同で、2005 年から高断熱高気密の一戸建てモデル住宅に設置した GSHP 暖房システムの実用化研究を実施してきた。その結果、モデル住宅の熱需要を高精度に予測する技術を確立すると共に、GSHP 単独での暖房により、従来の灯油暖房と比較して GHG 排出量半減、エネルギー使用量は約 40% 減、ランニングコストは北海電力の独自のメニューと相まってほぼ半減することなどを実証してきた(Sasaki, et al., 2007)。しかし、GSHP 暖房システムはヨーロッパや北米では 1980 年代以降急速に普及してきた中で、我が国の普及率は著しく低迷している(Lund, et al., 2004, Yasukawa and Takasugi, 2003, Sanner, et al., 2003)。その理由のひとつとして、建設・施工業者が所要採熱管深度を容易に決定する手法が確立されておらず、高いイニシャルコストにもかかわらず時として失敗（暖房熱量が不足）するリスクが排除できないことから、施工業者が GSHP を敬遠することが挙げられよう。本研究の主たる目的は、国内各地において、GSHP 施工者が比較的容易に所要採熱管深度を決定できる設計ツールを開発することである。そのために先ず国内の主要都市における平年気温から家屋（一戸建て住宅）の暖房需要を求め、その都市の地中温度推定データから所要採熱管深度を予測する手法を確立した。さらに、北見のモデル住宅における観測値に基づいてより実際的な簡易設計手法を開発し、日本における GSHP 暖房システムの普及に資するものとする。

2. 記号

| | | | |
|-------------------|--|-----------------|---|
| A | 総床面積 [m^2] | u | 風速 [m/s] |
| COP | ヒートポンプの成績係数 ($=Q_1/W_c$) | W_m | 家電の使用時電力 [W] |
| c_p | 熱媒の比熱 [$\text{J}/(\text{kg K})$] | W_c | 圧縮機投入電力量 [GJ/season] |
| D | 入居期間日数 | W_M | 人 1 人当たりの発熱量 [$\text{W}/\text{人}$] |
| d | 期間中の日数 [day] | WL | 帯水層レベル [m] |
| F | 熱媒の流量 [m^3/s] | z | 地表面からの深さ方向距離 [m] |
| h_a | 地表面の空気の熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$] | α | 採熱管汲上能力 [$\text{GJ}/(\text{m season})$] |
| H_E | 家電からの入熱 [GJ/season] | β | 初期地中温度差比 |
| H_h | 暖房需要 [GJ/season] | β' | 初期地中温度比 ($t_{cr}=0^\circ\text{C}$ と仮定した場合) |
| H_{loss} | 家屋熱損失 [W] | λ_s | 平均土壌熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m K})$] |
| H_M | 入居者の人体からの入熱 [GJ/season] | ΔH_{RT} | 室温による補正量 [J/season] |
| L | 採熱管深度 [m] | ΔT | 室内外温度差 [K] ($=RT_{\text{set}}-T_a$) |
| n | 実質在宅者数（滞在時間換算）[人] | Δt | 測定期間 [s] |
| Q_1 | 汲上熱量 [GJ/season] | Δt_g | 初期地中温度と採熱管近傍温度の差 [K] |
| Q_2 | 採熱量 [GJ/season] | ΔT_{EG} | 熱媒出入口温度差 [K] |
| \dot{Q}_2 | 採熱量及び熱還流量 [W] | ρ | 熱媒の密度 [kg/m^3] |
| QV | 熱損失係数 (Q 値) [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$] | γ | 北見と他地域における暖房需要比 ($=H_h/H_{h0}$) |
| q_2 | 採熱側熱流束 [W/m^2] | | |
| R_m | 家電等の入熱割合 | 添字 | |
| R | 採熱管からの半径方向距離 [m] | i | 1 時間ごとの番号 (1day=24 hour) |
| RT | モデル住宅で実測された室温 [$^\circ\text{C}$] | j | 月ごとの番号 (北見における暖房期間は $j=1:10$ 月～ $j=8:5$ 月の 8 ヶ月) |
| RT_{set} | 設定室温 [$^\circ\text{C}$] | m | 各家電等の番号 |
| t | 家電の 1 日当たりの使用時間 [s] | 0 | 北見における値 (基準値) |
| T_a | 外気温 [$^\circ\text{C}$] | | |
| t_{cr} | 地中の低温限界温度 [$^\circ\text{C}$] | | |
| t_g | 初期地中温度 [$^\circ\text{C}$] | | |

3. GSHP 冷暖房システムを適用したモデル住宅の概要

3・1 モデル住宅と GSHP システム

モデル住宅及び GSHP 冷暖房システムの概要を図 1 に示す。モデル住宅は外断熱総二階建ての戸建住宅で、総床面積 97.8 m²、熱損失係数 (式(4) : 後述) Q 値=1.09 W/(m²K)、相当すきま面積 C 値=0.3 cm²/m² の高気密高断熱住宅である。家屋の詳細な構造や壁や屋根など各部の伝熱特性は既報(Sasaki, et al., 2007)に詳述されている。外気は地中の熱交換ダクトを経由し、床暖房からの熱損失を回収する。その値は通年の熱需要の約 10%に及び、見掛け上の Q 値≒1.0 W/(m²K)として扱うことができる。東西南に隣接家屋があるため、日射条件は悪い。本 GSHP (SUNPOT 製 GSHP701 : 定格圧縮機動力は 1.5 kW, 定格ポンプ動力は 0.22 kW) は熱負荷の変化に伴い、圧縮機動力をインバータ制御し、省エネ運転を行っている。採熱管として 2005 年 2 月から 2009 年 6 月は深度 91 m, 2009 年 7 月から 2013 年 1 月現在は深度 100 m のシングル U チューブを埋設、それまでの 91 m の採熱管と切り替えて使用している。GSHP は暖房専用とし給湯には用いていない。夏期には GSHP を停止し、ファンコンベクタと地中との間で熱媒を循環させてフリークーリングによる冷房運転をすると同時に地中に熱を還流している。立地の地層構成は掘削時の排土サンプリングから求めた。また、住宅は河川の近くに立地し深度 3 m に帯水層があったが、流動や水位の変動は認められなかった。

3・2 観測方法及び観測結果

採熱 (地中) 側の不凍液 (エチレングリコール : 以下 EG) ラインおよび汲上げ (床暖房) 側の不凍液 (プロ

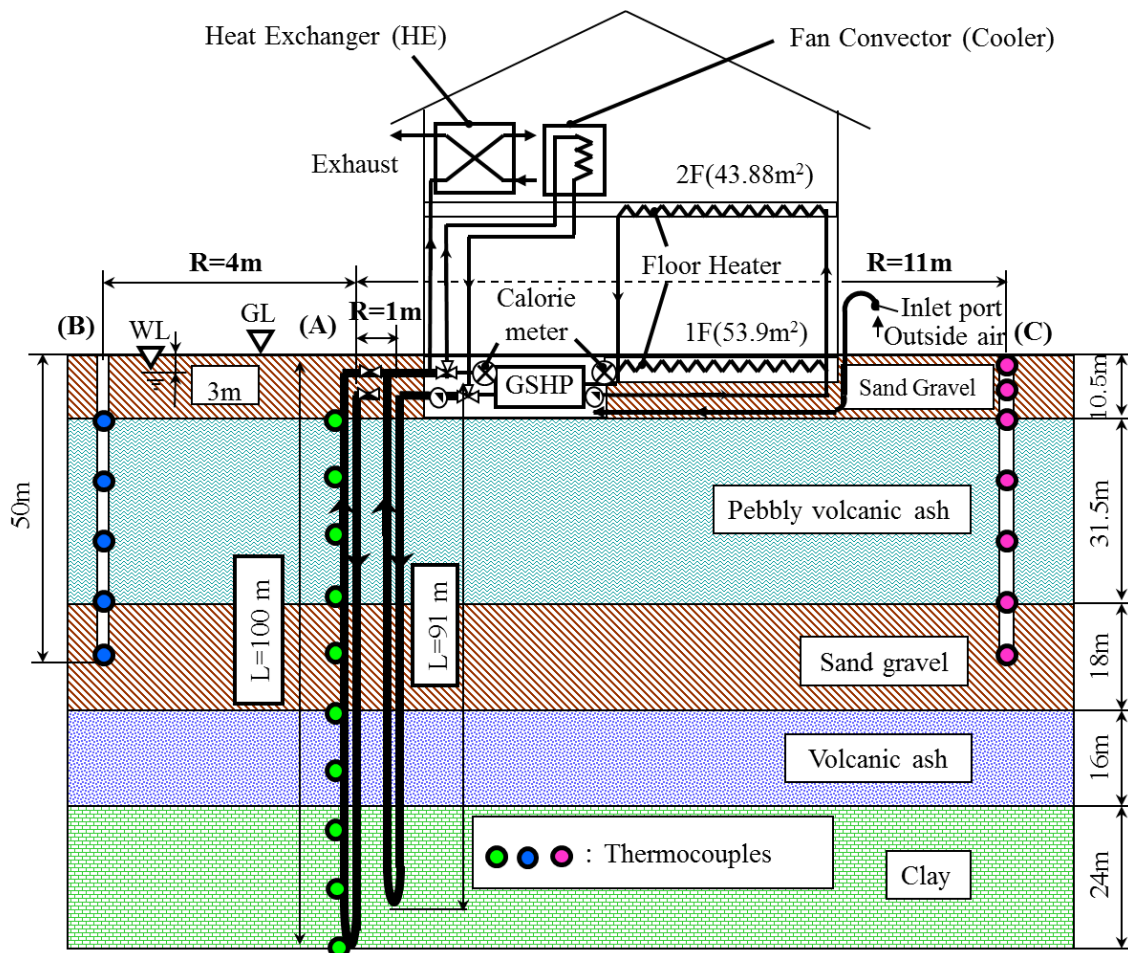


Fig. 1 Schematic of ground source heat pump air conditioning system

Feb. 2005~June 2009 L = 91 m : R = 1.5, 10 m

July 2009~ L = 100 m : R = 0.4, 11 m

ピレングリコール：以下 PG) ライン中にカロリメータ (いずれもライン往還の温度差と熱媒流量を計測・演算して出力) を設置して、それぞれ採熱量 Q_2 および汲上熱量 Q_1 を計測した。また GSHP の圧縮機及び不凍液循環ポンプの投入電力をそれぞれ電力計で連続計測している。各暖房期間の汲上熱量 Q_1 、採熱量 Q_2 、圧縮機投入電力量 W_c の値 (いずれも GJ/season) を図 2 に示す。この単位[GJ/season]は一暖房期間全体の熱量を示し、北見においては年によるが、およそ 10 月初旬から翌年の 5 月末である。2011-2012 年度を除く (後述) 観測期間 (2007~2014 年度) の年平均は Q_1 が約 44 GJ/season、 Q_2 が約 33 GJ/season、 W_c が約 13 GJ/season となった。エネルギー保存式

$$Q_1 = Q_2 + W_c \tag{1}$$

が成立していないのは、主として W_c が正味の圧縮機動力ではなく圧縮機効率および駆動モーター効率を含んだ実駆動動力を用いたことに起因する。但し、 W_c には不凍液循環ポンプ動力は含まれていない。

図 2 中の COP は、式 (2) のとおり、やはり実駆動動力に対して定義されたものであるが、月間の運転時間が十分長い 11 月~4 月の間の 6 か月の平均値を示した。

$$COP = Q_1 / W_c \tag{2}$$

2007 年には地中温度分布測定のための掘削作業を行い、図 1 のように地中に T 熱電対を埋設した。熱電対の埋設位置を図 1 中 (o) 印で示す。地中温度は採熱管深度 $L=100$ m の時、採熱管近傍 (深度 100 m)、採熱管から 4 m 及び 11 m 離れた地点 (いずれも深度 50 m) において、深さ方向に 10 m 間隔で T 熱電対を埋設し、データロガーで連続測定をしている。 $R=11$ m 地点のみは深度 1 m および 5 m でも測定した。2007 年 7 月 20 日から採熱管 (U-tube) 周囲の土壌温度分布の連続観測を開始した。採熱管周囲の地中温度分布を図 3 に示す。地中温度実測値の一部に ND (No data) と記した期間は、欠測を示す。停電時のバッテリーによるバックアップが正常に作動しなかったことが原因と思われる。また、2009 年暖房期に一時的に $R=1$ m の区間があるが、これは一旦 $L=100$ m の採熱管に切替えた後、再度 $L=91$ m の採熱管に切替えて短期間運転した結果を示す。温度計測点が相対的に採熱管から 1 m 離れたために地中温度が上昇して見える。右縦軸が地中温度を、左の縦軸は気温を示す。

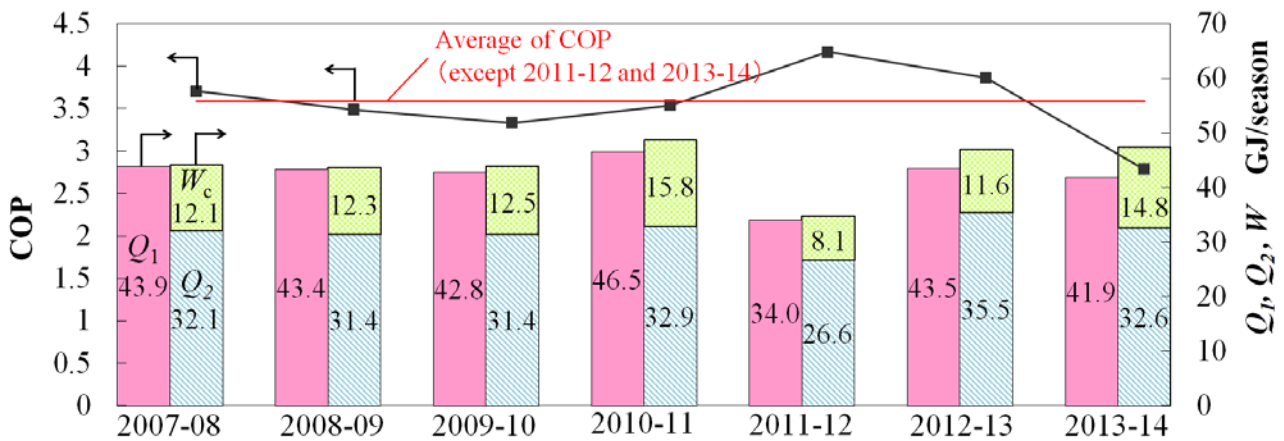


Fig. 2 Seasonal changes of energy balance and COP in heating operations.

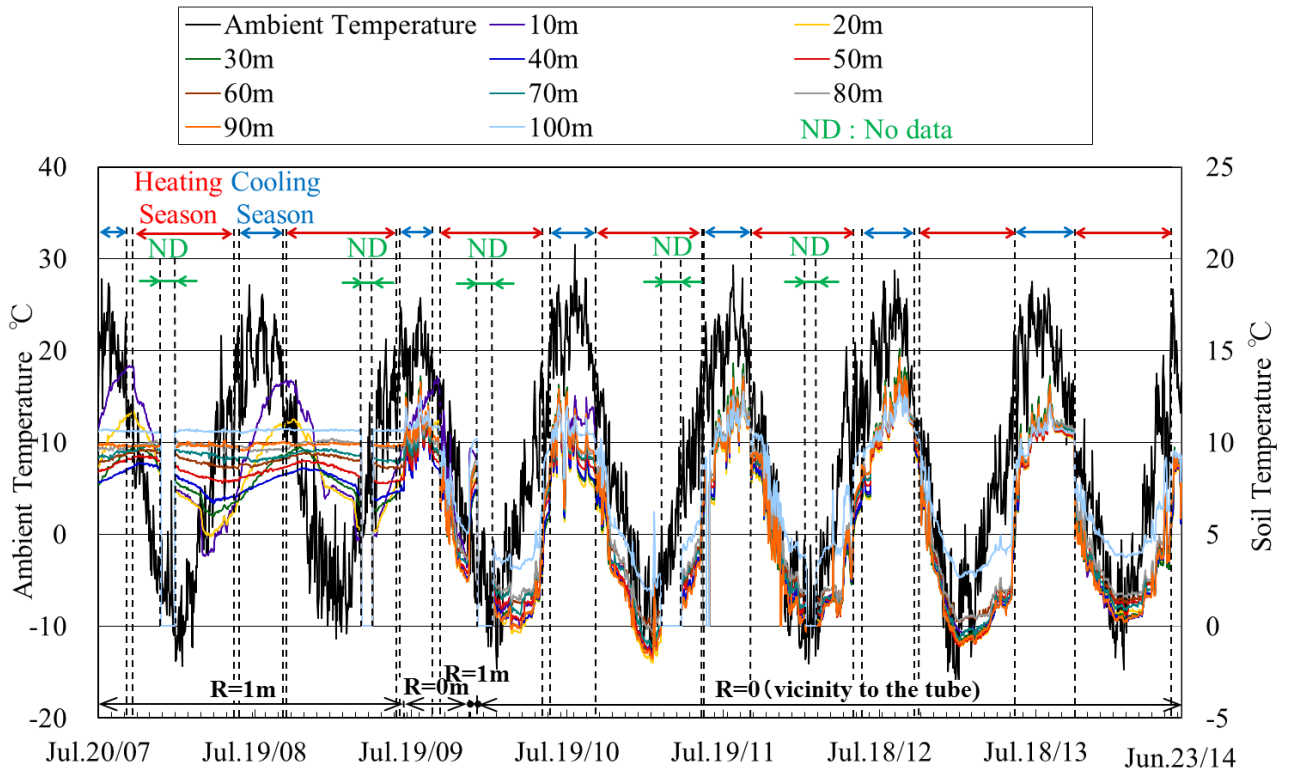


Fig. 3 Seasonal changes in soil temperature distribution

3・3 採熱量および熱還流量の計算

採熱量及び熱還流量をデータ収集期間毎に算出し、期間平均の採熱量 \dot{Q}_2 [W]としてまとめた。採熱量の算出は以下の2つの方法を比較した。

(1) 熱媒温度差による算出方法

いわゆるカロリーメータにより期間(積算)採熱量を計測し、期間 Δt (s)で除して求める。ただし、冷房期間中は不凍液EGの地中からの戻り温度と地中への送り温度との温度差 ΔT_{EG} およびEGの循環量 F から式(3)により熱還流量 \dot{Q}_2 を求める。ここでは採熱量を正とする。冷房(フリークーリング)時は $\Delta T_{EG} < 0$ となり、熱還流量を表すことになる。

$$\dot{Q}_2 = c_p \rho F \Delta T_{EG} \tag{3}$$

c_p : 熱媒の比熱 (=3460 J/(kg・K)) ρ : 熱媒の密度 (=1035 kg/m³)

F : 熱媒の流量 m³/s ΔT_{EG} : 熱媒出入口温度差 K

(2) 熱収支による算出方法 (エネルギー保存則から計算)

上記 \dot{Q}_2 と同様カロリーメータから汲上熱量 Q_1 を、電力計からコンプレッサ投入電力 W_c をそれぞれ測定し、採熱量 Q_2 を式(1b)のとおり期間 Δt (s)で除して求める。

$$\dot{Q}_2 = Q_2 / \Delta t = (Q_1 - W_c) / \Delta t \tag{1b}$$

採熱量及び熱還流量をデータ収集期間毎に算出し、採熱量 \dot{Q}_2 としてまとめたものを図4に示す。図中○はカロリーメータで計測した採熱量である。冷房運転期間において式(3)で算出した熱量がフリークーリングによる熱還流量である。シンボル△は式(1b)で求めた採熱量であるが、熱還流量は求められないため、図4中では便

宜的に 0 となっている。採熱量 \dot{Q}_2 は互いによく一致すると共に外気温に連動して変化していることが読み取れる。

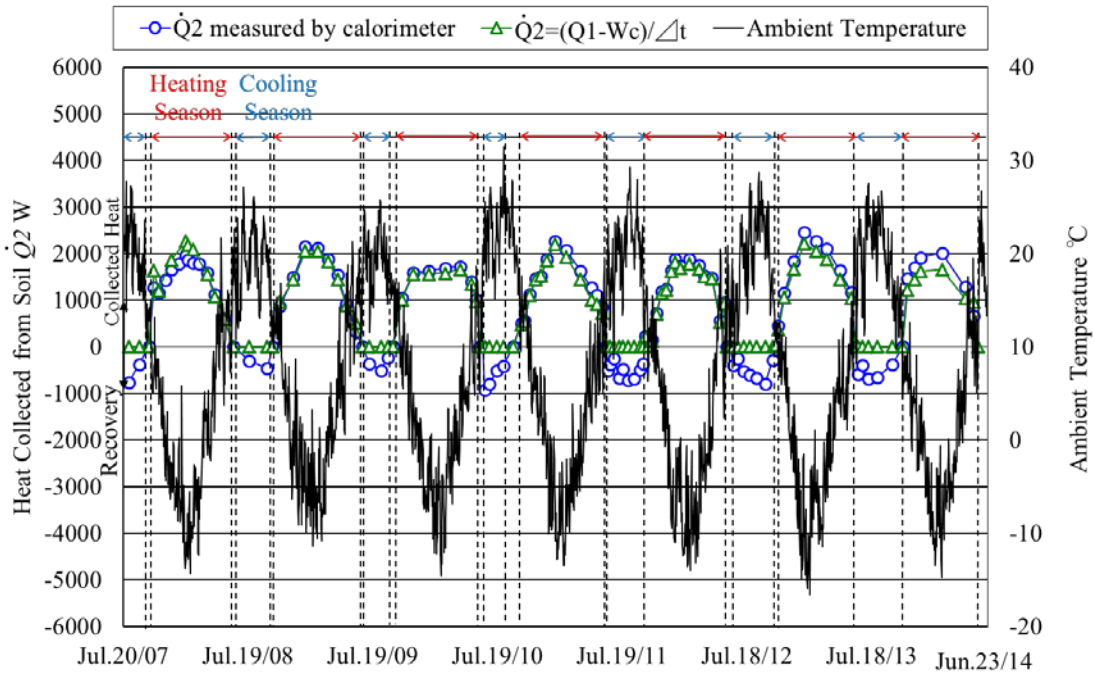


Fig. 4 Annual changes in heat collected from soil for several operating years.

4. 暖房需要の推計

全国各地の施工業者が GSHP 暖房システムを導入しようとする際には、各地における適切な採熱管深度を決定する必要がある。地域差は気温の違いによる暖房需要の差と、地中温度の違いによる地中の採熱能力の差の双方の影響の結果として表れる。本研究において GSHP を設計する上での基本的な指針を以下の通りとした。

- (1) 暖房需要の設計は平年気温に基づいて実施する
- (2) 平年気温は温暖化（主に都市化に伴う）以前の影響を排除するため、過去 10 年間の平均値を基準とする
- (3) 採熱に伴う地中温度低下の限界値を地中健全性維持のため平年気温の暖房期間に対し 0 °C とする
- (4) 観測による推計値の検証が豊富な北見の諸元を基準に、各地の諸条件による補正を行う

本章では、先ず暖房需要の推計手法について述べる。

4・1 暖房需要 H_h

従来、暖房需要の推計方法として、観測した日射データから晴天日（明け方の冷え込みが厳しいが日中の気温は高い）と曇天日（冷え込みは少ないが最高気温も低い）という特徴的な外気温パターンに 2 分し(double grade model)、暖房期を厳寒期（12～2 月）と端境期（10, 11 および 3～5 月）の 2 つに区分することで、観測した熱需要を高精度で再現することに成功していた (Akpan, et al., 2006a)。しかし、上述の指針のように平年値に基づいて暖房需要を推計する場合、特定年度の実際の気象データによる高精度な予測手法はもはや無意味である。一方、暖房期全体の主要な熱需要を支配する厳寒期については 3 ヶ月の合計では平年値に対する偏差が埋没し、各月の差を比較する方がその年度の暖房期の特徴が明瞭になることから、暖房期全体を月別に評価することにした。

家屋の主たる設計要件の差異は熱損失係数（Q 値 $W/(m^2K)$ ）と総床面積 $A \text{ m}^2$ に集約でき、定義上暖房需要はこれらに比例する ($H_h \propto Q \text{ 値} \times A$)。ただし、Q 値は式 (4) によって定義される。従来建設業界（国土交通省）が家屋の断熱（熱損失）性能を表記するのに用いられる指標で、Q 値が小さいほど高断熱であることを意味する。

$$Q \text{ 値} : QV = \text{家屋熱損失 } H_{\text{loss}} [\text{W}] / (\text{総床面積 } A [\text{m}^2] \times \text{室内外温度差 } \Delta T [\text{K}]) \quad (4)$$

3.1 節に述べたごとく、家屋の構造から熱通過率を計算して求めた Q 値は $QV = 1.09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ であるが、外気が地中熱交換によって回収する熱量が約 10% であったことから、以下の計算において相当 Q 値は $QV = 1.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ とした。この値は将来の高断熱家屋の目標値としても妥当である（現在の北海道地域の省エネ住宅目標値は $QV = 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ）。熱損失特性を表す指標は、2013 年度より熱損失係数 Q 値から「外皮平均熱貫流率 U_A 値」に移行したが、本モデル住宅の場合 U_A 値 = $0.47 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ に相当する（ただし U_A 値では換気損失を含めない）。

設定室温 RT_{set} を一定とすると（本研究では $RT_{\text{set}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ とする）、 RT_{set} と外気温 T_a の差 $\Delta T (= RT_{\text{set}} - T_a) \text{ K}$ は地域によって大きく異なる。まず過去 10 年間の外気温を 1 時間毎に平均し、暖房期間（北見市の場合 10~5 月の 8 ヶ月 ($j=1\sim 8$)）の月ごとに平均外気温のプロファイルを求める。暖房期間における各月の日数を d とすると各月の暖房需要 $H_h \text{ J/season}$ は式 (5) で求められる。この暖房需要と汲み上げ熱量 Q_1 を等しくすることにより適正な暖房が実現する。ただし、 T_{ij} は毎時間値 (1 day = 24 h) である。

$$H_h = QV \times A \times \sum_{j=1}^8 d_j \sum_{i=1}^{24} \Delta T_{ij} \times 3600 \times 10^9 \quad \text{GJ/season} \quad (5)$$

一方、モデル住宅で実測した室温 RT は常に一定ではないため、予測値と比較する場合は暖房需要の実測値（汲み上げ熱量 Q_1 ）は、 $RT = RT_{\text{set}}$ 一定となるように補正する必要がある。モデル住宅で実測した暖房需要（汲み上げ熱量 Q_1 ）に対し、室温による補正量を ΔH_{RT} とすると、室温を補正した時の暖房需要は式 (6) で求められる。

$$H_h = Q_1 + \Delta H_{RT} = Q_1 + QV \times A \times (RT_{\text{set}} - RT) \quad (6)$$

式 (5) で求めた暖房需要予測値と、式 (6) から求めた暖房需要実測値（室温補正） Q_1 を比較して図 5 に示す。2011~2012 年度を除き予測値は実測値に対しよい一致を示しており、本予測手法の妥当性が検証された。

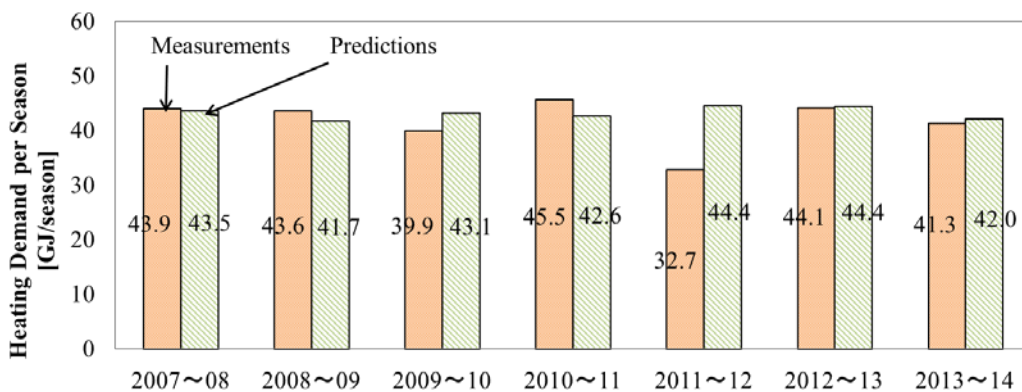


Fig.5 Demand of heating in Kitami City.

式 (5) から求めた北見の平年暖房需要は $H_{h0} = 43.7 \text{ GJ/season}$ （基準：総床面積 100 m^2 ，Q 値 $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ）となり、他の地域との比較の際には扱いの整合上、この推計値を基準値（添字 0）として用いることとする。この基準の暖房需要に対する任意の地域の暖房需要の比を γ とすると、 γ は式 (7) で表すことができる。所要採熱管深度 $L \text{ m}$ は暖房需要 H_h ($= \gamma H_{h0}$) に比例するものとして決定する。

$$\gamma = \frac{H_h}{H_{h0}} = \frac{QV \times A \times \sum_{j=1}^8 d_j \sum_{i=1}^{24} \Delta T_{ij}}{QV_0 \times A_0 \times \sum_{j=1}^8 d_{0j} \sum_{i=1}^{24} \Delta T_{0ij}} \quad (7)$$

4・2 暖房需要推計の簡素化および妥当性の評価

GSHP 冷暖房システムの普及のためには、所要採熱管深度設計ツールの暖房需要の計算に使用する外気温のデータを簡素化することが望ましい。従来では月ごとの1時間値の外気温プロファイルを作成し暖房需要の計算に使用している。一方、AMeDAS (<http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>)の観測データでは各地域における1981年から2010年の30年分の月ごとの平均外気温が掲載されており、これを平年値として利用できればツールの簡素化に著しく寄与できる。この30年間の月平均値を暖房需要の計算に利用可能か検討した。

本研究では地球温暖化や都市化による温暖化の影響を考慮するため、外気温は過去10年間の平均値を使用し、それより過去のデータを排除してきた。そこで温暖化の程度を確認するために、1981年から2010年の30年間の平均外気温と、2002年から2012年の10年間の平均外気温を比較した。外気温の比較結果を図6に示す。全国9都市全てにおいて、30年平均値よりも10年平均値の方が高く、平均すると約0.25℃高いことが分かった。地球温暖化の影響による温度上昇は過去100年で0.6℃であり、上記は地球温暖化に都市化による温暖化が加わった結果と考えられる。

次に10年間の1時間値の外気温を用いて計算した暖房需要と、30年間の月平均値の外気温を用いて求めた暖房需要を比較した。10年間の1時間値の外気温を用いて計算した暖房需要 H_h は式(5)、30年間の月平均値の外気温を用いて求めた暖房需要は式(8)を用いて算出した。

$$H_h' = QV \times A \times \sum_{j=1}^8 (d_j \times \Delta T_j) \times 24 \times 3600 \times 10^9 \quad \text{GJ/season} \quad (8)$$

各暖房需要の比較結果を図7に示す。10年間の1時間値を使用して求めた暖房需要を基準とした時の30年間の月平均値を使用して求めた暖房需要の相対誤差は、全国で平均すると+1.6%であり、最も相対誤差が大きかった大分で+4.6%であった。温暖化の影響は全ての都市について認められたものの、暖房需要への影響は許容範囲内であり、この結果から本GSHP設計ツール内においては、暖房需要計算にAMeDASの30年間の月平均値の外気温を平年値として組み込むこととした。

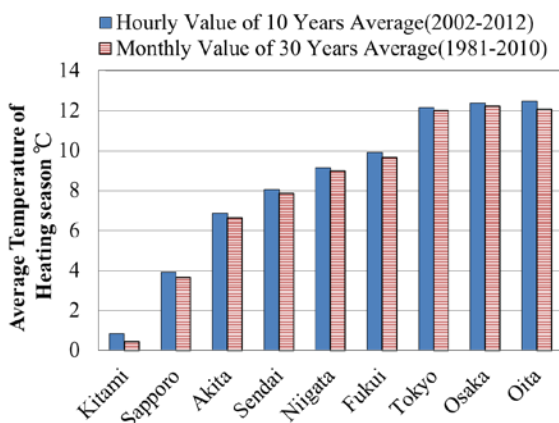


Fig.6 Average temperature of heating season

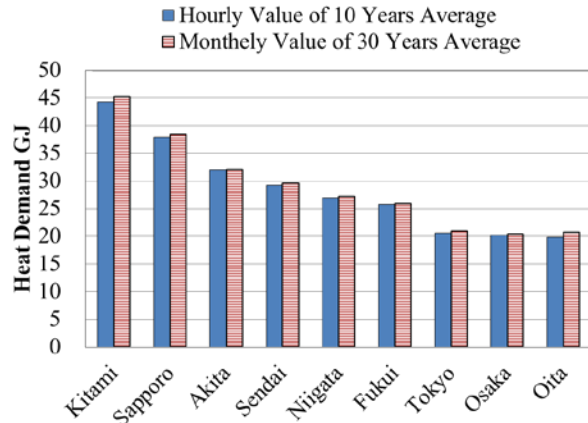


Fig.7 Heating demand ($QV=1W/(m^2K)$, $A=100m^2$)

4・3 冷房期の熱還流

北見のような寒冷地域においては、フリークーリングでも満足な冷房性能が得られるが、除湿機能は凝結水の排水のみで、必ずしも快適とは言えない。冷房時の室温設定は27℃程度が適当と考えられるが、これでは殆ど運転されない。Fig.4の熱還流(採熱量 ≤ 0)は $RT_{set}=15.4\sim 26.9^\circ C$ の結果であるが、平均4.21 GJ/seasonであり、平年暖房需要の約10%に相当する。

4・4 入居者による内部入熱

前節図5において、2011~2012年度の暖房需要は計算値に比べ実測値 Q_1 は20%以上低く、予測精度が著しく低くなっている。これはこの暖房期間のみ入居家族があったことが原因だと考えられる。住宅に居住世帯がある場

合、居住者や使用した家電等から家屋内に発生する内部入熱の評価を行った。

2011~2012年度暖房期間(2011年9月20日から2012年3月31日までの194日間)にはモデル住宅に4名の入居者がいた。その内3名は平日の日中モデル住宅には不在である。人からの入熱計算を簡略化するため、昼間不在の3名は1日の1/3(8時間)を在宅するものと考え、常時2.57名がモデル住宅に在宅しているものとして取り扱った。家電(含む照明) m の使用時における平均電力量を W_m 、1日当たりの家電使用時間を t_m 、家電からの入熱割合を R_m 、暖房期間日数を D (=194日)とすると家電からの入熱 H_E は式(9)で求められる。また人1人当たりの発熱量を W_M (=100W/人とした)、実質(滞在時間換算)在宅者数を n とすると、入居者の人体からの入熱 H_M は式(10)で求められる。

$$H_E = \sum_{m=1}^k (W_m \cdot t_m \cdot R_m \cdot D) \times 24 \times 3600 \times 10^9 \quad \text{GJ/season} \quad (9)$$

$$H_M = W_M \cdot n \cdot D \times 24 \times 3600 \times 10^9 \quad \text{GJ/season} \quad (10)$$

入居者の生活に係る入熱の内訳を表1に示す。また、これらの標準日スケジュールを図8に示す。式(10)より算出した2011~2012年度の暖房需要(計算値)は44.4GJ/seasonであった。この計算値と実測値の差は11.7GJ(26%)である。一方上記の手法で求めた内部入熱は6.75GJであり、2011~2012年度の大幅な暖房需要の減少は居住世帯による内部入熱の影響が大きいことが明らかになった。しかし内部入熱の評価はまだ不十分であり、今後さらに検討を要する課題である。

GSHP設計時に居住世帯による内部入熱をどう見積もるかは施行者の任意設計要件とというものの、一般向けGSHP冷暖房システムは20年程度の稼働が期待されるが、このような比較的長期にわたる生活展望の上で選択されるものとするれば、稼働期間中の家族構成の変動は避けられないものであり、コストを重視して施工時の家族構成を前提に設計すると後年(例えば独り暮らしになった時)暖房出力が不足になる場合も出現することが予想される。余裕を見て内部入熱が無いことを前提に設計することを推奨するが、考慮する場合でも居住者が最大1名のケースを想定すべきである。

Table 1 Breakdown of thermal inputs by residents.

| Electric Appliances | m | | Rated power [W] | W_m [W] | t_m [h/day] | R_m | Heat input per day [GJ] | H_m [GJ] |
|--------------------------------|----|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------|-------|-------------------------|------------|
| Lighting | 1 | Entrance | 240 | 240 | 0.5 | 80% | 0.00035 | 0.07 |
| | 2 | Living room | 120 | 120 | 11 | 80% | 0.00380 | 0.74 |
| | 3 | Toilet | 80 | 80 | 0.25 | 80% | 0.00006 | 0.01 |
| | 4 | Laundry room | 60 | 60 | 0.5 | 80% | 0.00009 | 0.02 |
| | 5 | Bathroom | 180 | 120 | 1.5 | 80% | 0.00052 | 0.10 |
| | 6 | Kitchen | 40 | 40 | 1.5 | 80% | 0.00017 | 0.03 |
| | 7 | 2F(Rooms and Hall) | 60 | 60 | 0.25 | 80% | 0.00004 | 0.01 |
| Household Electrical Appliance | 8 | Television | 85 | 60 | 10 | 30% | 0.00065 | 0.13 |
| | 9 | Refrigerator | (390kWh/yr) | 390*(194/365)[kWh/heat season] | | 30% | | 0.22 |
| | 10 | Electric Heater | 900 | 500 | 1.5 | 100% | 0.00270 | 0.52 |
| | 11 | IH Cooker | 3500 | 1000 | 0.5 | 50% | 0.00090 | 0.17 |
| | 12 | Microwave Oven | 1310 | 900 | 0.1 | 100% | 0.00032 | 0.06 |
| | 13 | Rice Cooker | 700 | 500 | 1 | 100% | 0.00180 | 0.35 |
| Person | | (2.57 persons live all day in house) | | 257 | 24 | 100% | 0.02220 | 4.31 |

Total 6.75 [GJ]

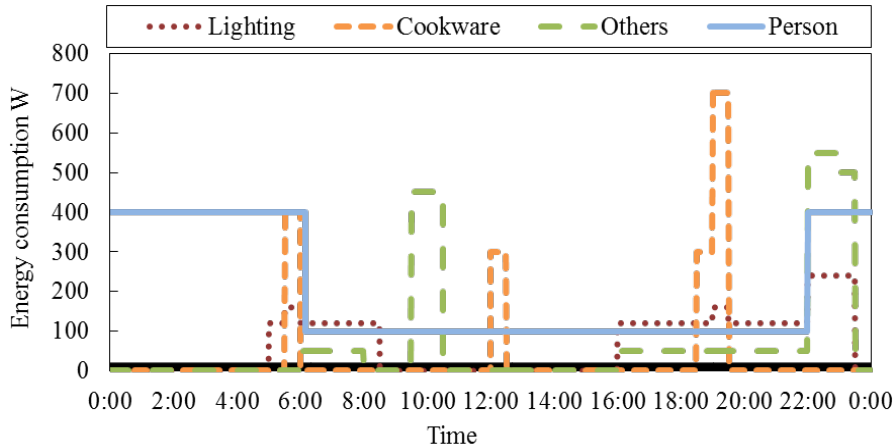


Fig.8 Standard daily energy consumption schedule

5. 地中温度分布の推計

各地における適切な採熱管深度を決定する際、暖房需要の他に地中温度の違いによる汲上能力の違いを考慮する必要がある。そこで採熱に伴う土壌温度分布とその季節変動を観察するために有限要素法 (FEM) による土壌温度解析を行い、モデル住宅 (北見) の実測値と比較することで計算の妥当性を検証する。

5・1 計算モデル

計算には汎用 FEM 解析ソフト ANSYS ver.13.0 を使用した。解析する土壌モデルは図 9 に示すように、採熱管を中心軸とした半径 $r = 15\text{ m}$ および深さ $z = 120\text{ m}$ の 2 次元軸対称モデルとした。要素分割図及び境界条件を図 10 に示す。採熱管近傍では温度勾配が大きくなると考えられるため、採熱管から半径方向 $r = 0\sim 1\text{ m}$, $1\sim 5\text{ m}$, $5\sim 15\text{ m}$ でのメッシュサイズをそれぞれ 0.25, 0.5, 1 と温度勾配の大きい部分で要素が細くなるように設定した。要素タイプは四辺形 (PLANE77) で、節点数は 30872 である。地表面の境界条件は外気との線形熱伝達で、地表面の空気の熱伝達率 h_a は風速 u (AMeDAS を参照) を用いてユルゲス (Jurges) の式、

$$h_a = 5.8 + 3.9 u \tag{11}$$

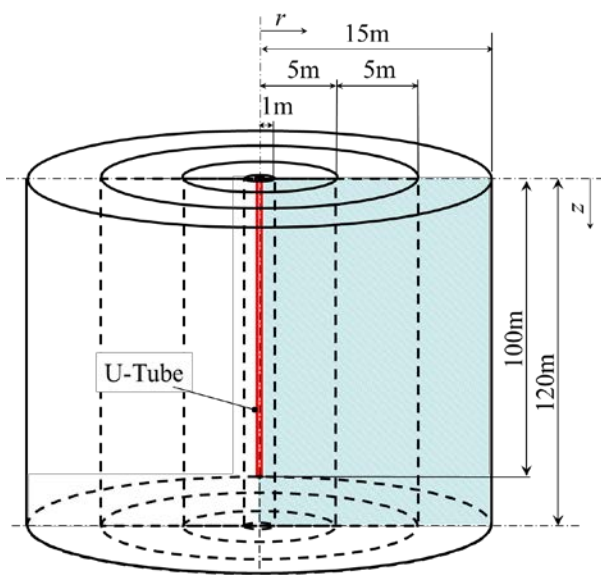


Fig.9 An axisymmetric model of a collecting tube and soil

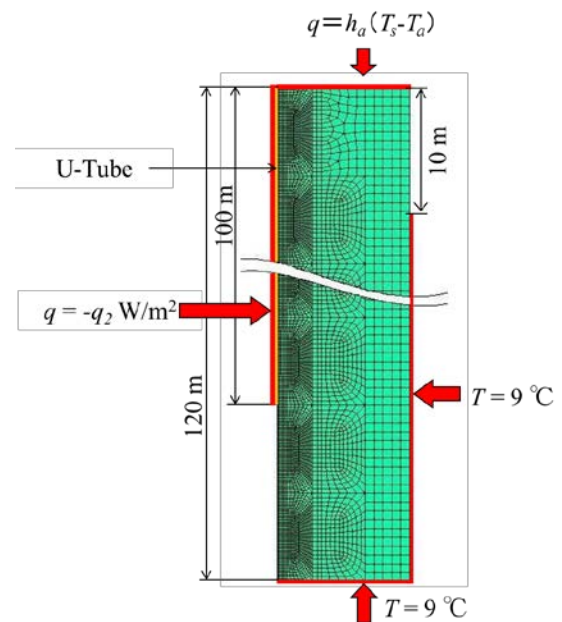


Fig.10 FEM model and boundary conditions

から算出した。採熱や熱還流は、採熱管の外周ライン ($r=0.0336$ m) にモデル住宅における採熱量の実測値から求めた熱流束 q_2 W/m² を与えた。また半径 $r=15$ m および深さ $z=120$ m の節点に温度荷重 (=北見の初期土壌温度 9 °C) を与えることにより、影響範囲外の土壌熱容量を無限として解析した。ただし、地表面から深度 $l=10$ m までは外気の影響を受けると考え除外した。これは地中温度の実測値から深度 10 m で年間の地中温度変動がほぼなくなったことから定めた境界条件である。

解析期間は、GSHP システムの暖房運転が開始された 2005 年 2 月 5 日から 2013~2014 暖房終了日である 2014 年 5 月 29 日までとし、全期間 (9 年間余り) の非定常伝熱解析を行った。初期条件は全接点を初期土壌温度 $t_{s0}=9$ °C として開始し、0.5 カ月ごとに境界条件である外気温、風速、採熱量の平均値を更新して解析を行った。時間ステップは 1 hr である。

5・2 土壌熱伝達率 λ の推計

土壌中では熱伝導による熱移動が主であり、土壌の熱伝導率が解析結果に大きく影響を及ぼす。本解析で用いる熱伝導率について以下のとおり検討した。

(1) 地層構成からの推計：掘削時に観察した深度 0~100 m までの地層構造 (図 1) と土壌含水比を仮定し、地層厚さに対する加重平均熱伝導率を推計したところ 1.338 W/(mK) であった。

(2) 土壌の熱応答試験による推計：施工完成時に採熱管に導入した熱媒の出入り口温度差により熱伝導率を計算する地中熱応答試験が提案されている。これは日本工業規格 JIS R 2616 (非定常熱線法による熱伝導率の測定) を応用した土壌平均熱伝導率計測法である。非常に優れた結果が得られる例もある (ミサワ環境技術, 2010)。本モデル住宅の土壌についても熱応答試験を約 40 時間実施したが、解析時間区間によって時間 (対数時間) に対する土壌受熱量の勾配が著しく変化してしまい、得られた平均土壌熱伝導率 λ_s は、 $1.92 \sim 5.6$ W/(mK) と大幅に値がばらついた。最小値の 1.92 W/(mK) を用いて解析しても土壌温度が年間を通じて実測値よりかなり高く計算されたため不適当だと判断した。熱応答試験による λ_s の決定には今後さらに慎重を期して取り組む。

(3) 実測値とのフィッティング：採熱管の中央部分 (深度 20~80 m) において採熱管近傍の土壌温度の測定値を最も良く再現する λ_s は 1.5 W/(mK) であった。以下の解析では $\lambda_s=1.5$ W/(mK) を使用した。

地中熱伝導率 λ_s の値は採熱能力を決定づける物性値で、地層や含水比が異なれば値が変動するものと考えられる。しかし、我が国の特に平野部は多く火山灰起源の土壌に覆われ、気候もまた湿潤なため、地域差による極端な λ_s の差異は少ないものとしている。砂漠などの乾燥地帯や、さらに未分解の有機物が混入している地層では 1 未満となる場合も認められる (望月, 小岩崎, 2005)。これとは反対に採熱管が豊富な地下水脈の水流に曝されているようなケースでは相当熱伝導率はかなり大きくなるのが想定される。

5・3 地中温度の解析結果

採熱管近傍の解析値と実測値の比較を図 11 に示す。2005 年 2 月 5 日から 2009 年 7 月 3 日の間は採熱管長が 91 m である。地中温度は深度 10 m まで外気温の影響を強く受けている。解析値は深度 20~80 m の間ほぼ同等であるが、実測値は深い地点ほど温度が高い。冷房期間には土壌に熱を還流しているため、土壌温度が回復している。91 m の採熱管での実測値は採熱管から 1 m 離れた地点での値であり、採熱管近傍の計測値より高目である。採熱管 100 m の場合では解析値のプロット点は実測値と同じ測定点に対応している。

2006~2007 年度暖房期から GSHP による本格的な暖房運転を行い、91 m 採熱管システム単独で 3 暖房シーズンをまかなった。採熱量は約 30, 32, 31 GJ/season とほぼ同等にも関わらず、採熱管近傍温度の最低値は年々低下し、2009 年 1 月末には -4 °C に至った。これはこのモデル住宅における暖房需要に対して採熱管深度が不足していることが原因である。2009~2010 年度暖房期からは 100 m の採熱管を利用しているが、各年の寒さの程度に従って地中最低温度は上下し、次期の暖房開始までにはほぼ地中温度は回復している。これはモデル住宅の熱需要に対して、採熱管深度が適切であることを示している。解析値は地表面における外気冷却の影響が小さくなる深度 $z=30\sim 80$ m においてほぼ同じ値 (r 方向の 1 次元的温度分布) であるが、実測値は深度と共に上昇する。その主な要因は深度方向の地中温度勾配であり、これを 0.03 °C/m (鈴木, 2008) とすると実測値を比較的良好に再現できた。以下特に断らない限り $z=50$ m における地中温度を平均 (代表) 値とする。

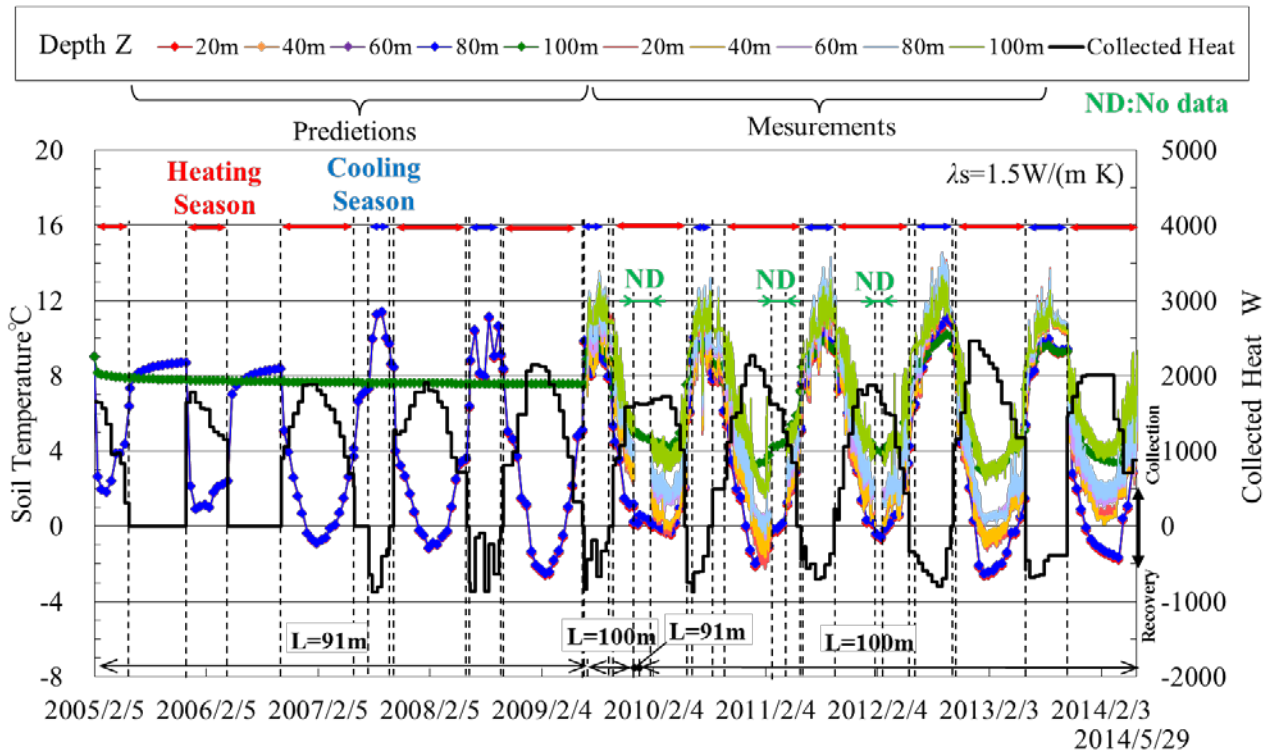


Fig.11 Predicted and measured soil temperature distributions

6. 所要採熱管深度 L の推計

6・1 地中温度による汲上能力の差の推計

地中温度の違いは汲上げ能力の違いをもたらす。北見におけるシングル U チューブの汲上能力 α_0 は、4・1 節の式 (5) から求めた北見の平年暖房需要 $H_{h0} = 43.7 \text{ GJ/season}$ とモデル住宅で使用した採熱管深度 $L = 100 \text{ m}$ から、 $\alpha_0 = 0.437 \text{ GJ/m/season}$ と定めた。

採熱量 \dot{Q}_2 は採熱管近傍の地中温度 (≒熱媒温度) と採熱影響範囲外の周囲地中温度 (≒初期地中温度 $\Delta t_g = t_g - t_{cr}$ °C) との差に比例するものと仮定 (定常温度分布から類推) すると、

$$\beta = \dot{Q}_2 / Q_{20} = (t_g - t_{cr}) / (t_{g0} - t_{cr}) \quad (12)$$

地中の低温限界 t_{cr} を長期にわたる地中の凍結を避けるために地域によらず $t_{cr} = 0 \text{ °C}$ とすると、式 (12) は便宜的に式 (13) となり、初期地中温度比 β' が採熱量比を与えることになる。

$$Q_2 = Q_{20} (t_g / t_{g0}) = \beta' Q_{20} \quad (13)$$

この仮定を検証するために異なる t_g に対し、採熱管から β' 倍に相当する採熱を行った時の採熱管近傍の温度変化を計算した。計算は汎用有限要素法解析ソフト ANSYS ver13.0 を用いて 2 次元円筒座標系の非定常熱伝導解析を行った。外気温は 0 °C 一定、地表における大気の熱伝達率は $13.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 一定 ($u = 2 \text{ m/s}$: 式 (11)) とし採熱管近傍の土壌温度が低温限界 $t_{cr} = 0 \text{ °C}$ に到達する期間を求めた。 $t_{g0} = 9 \text{ °C}$ を基準とし、 $15, 20 \text{ °C}$ と異なる t_g に対し、採熱管から β' に相当する倍率で採熱を行った時の採熱管近傍の温度変化を図 12 に示す。いずれも同様の期間 (23 日目程度) で低温限界 $t_{cr} = 0 \text{ °C}$ となり、式 (12) および式 (13) の妥当性が確認できた。

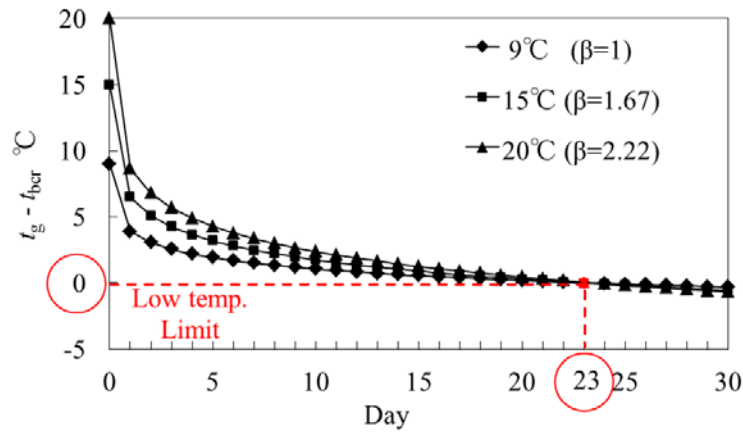


Fig. 12 Soil temperature at vicinity of the U-tube (at 50m in depth)

汲上熱量 $Q_1 = Q_2 + W = \beta Q_{20} + W$ だから、任意の地域における GSHP システムにおける汲上能力 α は、

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \frac{Q_1}{Q_{10}} = \alpha_0 \cdot \frac{\beta \cdot Q_{20} + W}{Q_{20} + W} = \alpha_0 \cdot \frac{\beta \cdot \frac{Q_{20}}{W} + 1}{\frac{Q_{20}}{W} + 1} \quad (14)$$

6・2 所要採熱管深度 L

所要採熱管長さ L は式 (15) のように暖房需要 H_h と採熱管汲上げ能力 α から求まる。

$$L = \frac{H_h}{\alpha} \quad (15)$$

2007~08 年度から 2013~14 年度までの暖房期間 (2011~2012 年度暖房期間を除く) の北見の年間 COP の平均値を COP_0 とすると、

$$COP_0 = \frac{Q_{10}}{W} = 1 + \frac{Q_{20}}{W} \quad \text{より} \quad \frac{Q_{20}}{W} = COP_0 - 1 \quad (16)$$

よって式 (14) は

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \frac{\beta \cdot \frac{Q_{20}}{W} + 1}{\frac{Q_{20}}{W} + 1} = \alpha_0 \cdot \frac{\beta(COP_0 - 1) + 1}{COP_0 - 1 + 1} = \alpha_0 \cdot \frac{\beta(COP_0 - 1) + 1}{COP_0} \quad (17)$$

式 (7), (15) 及び式 (17) から所要採熱管深度 L を求める式は

$$L = L_0 \cdot \frac{H_h}{H_{h0}} \cdot \frac{\alpha_0}{\alpha} = L_0 \cdot \gamma \cdot \frac{COP_0}{\beta(COP_0 - 1) + 1} \quad (18)$$

北見における GSHP の平均成績係数は $COP_0=3.59$ (図 2) である。採熱管近傍の最低土壌温度を 0°C に設定したため、低温熱源の温度は地域によらず同等で、 COP_0 が地域によって大きく変わらないと仮定すると、式 (18) は式 (19) のように書き表すことができる。

$$L = L_0 \cdot \gamma \cdot \frac{COP_0}{\beta(COP_0 - 1) + 1} = L_0 \cdot \gamma \cdot \frac{3.59}{2.59\beta + 1} \quad (19)$$

式 (19) から日本各地に対して所要採熱管深度 L を計算した結果を図 13 (緑色のバー) に示す。実際にはヒートポンプの高温熱源温度は温暖地方では低めで良いので同じ機器でも COP_0 は北見より高めになるものと予想され、本計算は安全側の評価である。バーの下の数値は 50 m 深度における地中温度の推定値を示す。国内各地の地中温度データベースに対し、深さ方向の温度勾配を $0.03^\circ\text{C}/\text{m}$ (鈴木, 2008) として深度 50 m の地中温度を求めた。温暖地方ほど暖房需要 H_h (オレンジ色の網がけバー) が小さく、地中温度が高いほど採熱管汲上能力 α (ピンク色の■印) が高いという重畳効果によって、緯度が低くなるほど必要な採熱管長さ L が短くなる。東京以西の地域になると大気熱源のエアコンが暖房機として現実的になって来るのでコスト面での競合が厳しくなる。しかし冷房期の熱は大気ではなく地中に還流するため、ヒートアイランド現象の緩和には有効と考えられる。

本設計手法が適用できる範囲としては、日本国内の火山灰主体の平野部の地層と湿潤な気候を想定している。例えば伏流水など、地下水脈の流動が大きい場合は相当熱伝導率が非常に高くなり本研究で開発した手法では採熱管深度は過大となる。また、温泉地などで局所的に地温が非常に高い場合にも本手法では過大な深度を推奨してしまう。そのような格別な適地を期待できない、ごく一般的な日本国内平野部に対して、多少余裕のある採熱管深度を推奨するようにした。しかしながら、局地的な地中熱伝導率のデータを集積することは今後 GSHP を普及する上で極めて重要であり、業者各位には設置時に必ず慎重に加熱応答試験を実施し、データを公開していただくよう要請するものである。

7. 結言

北海道北見市の一戸建てモデル住宅において地中熱ヒートポンプ (GSHP) 暖房システムの 7 暖房期間 (2005 ~ 2014 年) にわたる実証運転を実施した。2007 年からは連続計測を行い、性能予測結果と比較したところ、各年の家屋の暖房需要や地中温度分布などが良く再現できることが明らかになった。この結果に基づき過去 10 年間の

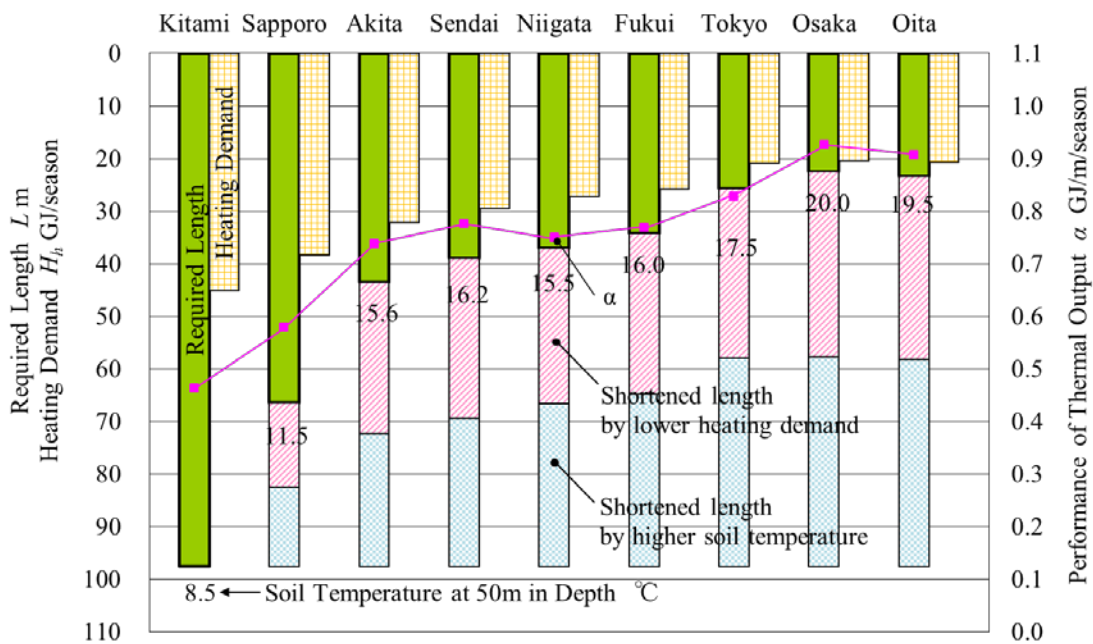


Fig. 13 Required depth of U-tube in various cities

平年値に基づいて GSHP システムの設計ツール開発に取り組んだ。得られた知見等を以下にまとめる。

- (1) 過去 10 年間の平均化による平年気温は, AMeDAS に記載されている過去 30 年間の平年気温に対し, 北海道～沖縄の 9 都市全てで上回り, 平均で約 0.25 °C 高い。しかし暖房需要の誤差 (増加) は 1.6% に過ぎず, 温暖化の暖房需要への影響は無視できる。
- (2) 居住者からの内部入熱は無視できないほど大きい。しかし, 長期的な家族構成の変動を考慮した初期設計が望まれる。具体的には最多でも居住者 1 名を前提とした熱需要設計が必要である。
- (3) 非常定常土壌温度解析より, 土壌からの採熱量は暖房期間の許容土壌最低温度 (採熱管近傍) と初期地中温度の温度差に比例することを示した。これに基づき各地における汲み上げ能力を算出し, 所用採熱管 (シングル U チューブ) の深度を算出する手法を確立した。ただし, 土壌および土壌生態系の健全性を維持するために許容土壌最低温度を平年熱需要時に対し 0 °C とした。
- (4) 温暖な気候の都市においては外気温が高く暖房需要が低いことと, 地中温度が高いために採熱管の熱汲み上げ能力が高いことの双方の重畳効果により, 所要採熱管深度が北海道東部地方 (北見市) より大幅に小さくて済むことが明らかになった。

以上をまとめると, AMeDAS 平年気温および家屋構造などから国内各地の GSHP 暖房システムの所要採熱管深度を設計する簡便な手法が開発できた。今後これを設計ツールとして建設業界に提供し GSHP システムの普及を促す。

謝 辞

モデル住宅および GSHP 冷暖房システムを長期にわたる連続計測に供して頂いた, (株) 光栄建設 土屋氏および (有) ライフアート 佐藤氏に深謝する。また, 張 馳, 相澤和紀, 渡部 紘, 吉川友啓, 川瀬大樹の各氏 (当時北見工業大学学生) には, 観測および解析に協力を頂き謝意を表す。尚, 本研究の一部は北見工業大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (SVBL) の研究プロジェクトとして実施したものである。

文 献

- Akpan, I.E., Sasaki, M. and Endoh, N., Simplifications of simulation on energy balances and estimations of a hybrid renewable energy system for use in cold climate regions, JSME International Journal, Series B, Vol. 49, No. 3 (2006a), pp. 839-846.
- Akpan, I.E., Sasaki, M. and Endoh, N., Optimization of domestic-size renewable energy system designs suitable for cold climate regions, JSME International Journal, Series B, Vol. 49, No. 4 (2006b), pp. 1241-1252.
- 地中温度データベース, available from <<http://www.chinetsu.jp/zenkoku-chicyu.php>> (参照日 2013 年 7 月 22 日).
- 住環境計画研究所, 家庭用エネルギーハンドブック 2009, 省エネルギーセンター, ISBN 978-4-87973-355-9 (2009).
- 日本工業規格 JIS R 2616-2001, 耐火断熱れんがの熱伝導率の試験方法. Testing method for thermal conductivity of insulating fire bricks (2001).
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R. and Hellström, G., Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview, GHC Bulletin (2004), pp.1-10.
- ミサワ環境技術, 地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム実証試験結果報告書 (詳細版), 環境省環境技術実証事業 (2010).
- 望月秀俊, 小岩崎真, 砂の熱伝導率に対する有機物量の影響について, 農業土木学会全国大会講演要旨集 (2005), pp.856-857.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinis, D. and Rybach, L., Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, Geothermics, Vol.32 (2003), pp.579-588.
- Sasaki, M., Akpan I.E. and Endoh,N., Simulation and feasibility study on a 'renewable house' with a geothermal heat pump-powered floor heating system in cold climate regions, Journal of Power and Energy Systems, Vol. 1, No. 3 (2007), pp.251-262.
- 鈴木隆広, 温泉資源の多目的利活用に向けた複合解析研究, 地質研究所ニュース, Vol. 24, No. 3 (2008).
- Yasukawa, K. and Takasugi, S., Present status of promotion of underground thermal utilization in Japan, Geothermics,

References

- Akpan, I.E., Sasaki, M. and Endoh, N., Simplifications of simulation on energy balances and estimations of a hybrid renewable energy system for use in cold climate regions, *JSME International Journal, Series B*, Vol. 49, No. 3 (2006a), pp. 839-846.
- Akpan, I.E., Sasaki, M. and Endoh, N., Optimization of domestic-size renewable energy system designs suitable for cold climate regions, *JSME International Journal, Series B*, Vol. 49, No. 4 (2006b), pp. 1241-1252.
- Database of soil temperature, available from <<http://www.chinetsu.jp/zenkoku-chicyu.php>> (accessed on 22 July, 2013) (in Japanese).
- Jyukankyo Research Institute Inc., Handbook of domestic energy 2009, The Energy Conversion Center, Japan, ISBN 978-4-87973-355-9 (2009) (in Japanese).
- Japan Industrial Standard, JIS R 2616-2001, Testing method for thermal conductivity of insulating fire bricks (2001) (in Japanese).
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R. and Hellström, G., Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview, *GHC Bulletin* (2004), pp.1-10.
- Misawa Environmental Technology Co., Experimental report on heat pump air conditioning system using ground source and waste water, Environmental Technology Verification Program (2010) Ministry of the Environment (in Japanese).
- Mochizuki, H. and Koiwasaki, M., Effect of organic matter content on thermal conductivity of sand. *Proceedings of JSIDRE* (2005), pp.856-857 (in Japanese).
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D. and Rybach, L., Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, Vol.32 (2003), pp.579-588.
- Sasaki, M., Akpan I.E. and Endoh,N., Simulation and feasibility study on a 'renewable house' with a geothermal heat pump-powered floor heating system in cold climate regions, *Journal of Power and Energy Systems*, Vol.1, No. 3 (2007), pp.251-262.
- Suzuki, T., Report on combined analysis for the multipurpose utilization of geothermal water resources, *Geological Survey of Hokkaido News*, Vol. 24, No. 3 (2008) (in Japanese).
- Yasukawa, K. and Takasugi, S., Present status of promotion of underground thermal utilization in Japan, *Geothermics*, Vol.32 (2003), pp.609–618.