全国地盤物性データベースを用いた地中熱利用 ヒートポンプ暖房システムの導入効果分析

阪田 義隆^{1*}・葛 隆生²・長野 克則³

¹正会員 北海道大学大学院特任准教授 工学研究院 (〒060-8628北海道札幌市北区北13西8)

E-mail: y-sakata@eng.hokudai.ac.jp

²非会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-4628北海道札幌市北区北13西8)

E-mail: katsura@eng.hokudai.ac.jp

³非会員 北海道大学大学院教授 工学研究院 (〒060-5628北海道札幌市北区北13西8)

E-mail: nagano@eng.hokudai.ac.jp

本研究の目的は、開発した全国地盤物性データベースからの有効熱伝導率の三次元情報と地中熱シミュレーションを組み合わせ、地中熱利用ヒートポンプ暖房システムを戸建て住宅に導入した場合の環境負荷低減効果を計算し、北日本全体の地中熱ポテンシャルマップとして示すことである。その際、期間平均成績係数(COP)を導入指標とし、目標COPを得るための地中熱交換器長さ L_b の決定法を提案する。その結果、標準的な $L_b=100$ mのシステムを戸建て住宅に導入する場合、COPは北海道で4.0程度、東北以南で4.4程度と計算された。より合理的な導入のため、目標COPを4.25に設定する場合、東北以南で $L_b=80$ m程度とより短く、北海道で130 m程度とより長く必要になると計算された。CO₂排出量削減率は、45～60 %程度と電力使用時の排出係数に依存し、東北以南で高い導入効果が示された。

Key Words : ground source heat pump system, geologic property database, potential map, design optimization, CO₂ emission

1. はじめに

再生可能エネルギーの内、地中熱は深度200 m付近より浅の安定した熱エネルギーであり、建物の空調設備の熱源とする地中熱利用ヒートポンプシステム(Ground Source Heat Pump system: GSHPs)による利用が進んでいる¹⁾。わが国でも2000年代以降、導入数が急速に増えつつあるが^{2),3)}、北欧・北米などに比べ未だ大きな開きがある。

GSHPsの導入効果の一つに、安定な熱源を用いた高いエネルギー効率がもたらす省エネルギーとCO₂排出量抑制などの環境負荷低減効果が挙げられる。その導入効果は個別導入事例にて数多く報告され、空気熱源ヒートポンプ(エアコン: ASHP)と比べても高い省エネルギー効果が期待できることが分かっている^{4)など}。今後、GSHPsの優位性の認知が進み、現在の個別導入が広域的に普及拡大することで、GSHPsの環境負荷低減効果が地域・国レベルで発揮され、地球温暖化対策に繋がると期待される。

一方、GSHPsの導入効果は、建物の断熱性や用途、気象条件、ヒートポンプ、地中熱交換器その他付帯設備などが複合して決まる。例えば、建物のエネルギー消費性

能判定WEBプログラム⁵⁾でもGSHPs導入時の評価が可能だが、GSHPsの知識や導入経験がない場合、様々な計算条件の設定を忌避する結果、他システムとの比較が十分なされることが懸念される。

このような背景において、GSHPs導入を検討する施工主や設計者あるいは補助事業を推進する国や自治体が、その導入効果を容易に判断できる「地中熱ポテンシャルマップ」の整備が必要となる⁶⁾。地中熱ポテンシャルマップとは、数値計算や地理情報システム(GIS)などの技術を用いて、システム効率、コスト、省エネ効果などGSHPs導入効果指標を広範囲で示したものである。地中熱ポテンシャルマッピングは、これまでに多くの研究成果^{10),15)}があるほか、国¹⁶⁾や自治体^{17),20)}も盛んに実施してきた。近年は各地で地中熱マッピングが取り組まれる現状から、用語の定義や手法の規格化を進める動きがある²¹⁾。

地中熱ポテンシャルマッピングにおいて課題となるのが地盤物性、特に有効熱伝導率の分布推定である。有効熱伝導率の土質・地質毎の一般値をまとめた文献やデータベースは多い^{22)など}。しかし実際の地盤は不均質であり、例えば同じ砂層でも、淘汰のよい砂の場合と礫や泥が混

じる場合、その頻度で有効熱伝導率は異なる²³⁾。また地下水流れが速い場合、見掛けの値が増加する場合もある²⁴⁾。有効熱伝導率のデータベースは、土質・地質の一般値ではなく、地域の地層構造から各層の土質・地質の複雑さや地下水流れの影響まで含め、地点毎に推定する必要があるが、その推定手法は確立されていなかった。

更にボアホール間接型の地中熱交換器を想定する場合、少なくとも標準的な埋設深度100 mまでのデータベースとする必要があるが、既往の地盤調査の大半は深度数10 m以浅の支持層確認で調査を終える。例えば「KuniJiban」²⁵⁾で検索すると、全110946地点のコアボーリングデータ中、深度100 mに達するデータは584データ（全体の0.5%）に留まる。このため、物性値（現位置試験結果）の入手どころか地質データそのものの入手も困難となる。

これらの課題を踏まえ、NEDO「自然再生可能エネルギー熱利用技術開発」²⁶⁾の一つとして、全国地盤物性データベースの開発が進められている^{27), 28)など}。全国地盤物性データベースは、地中熱計算のみならず比較的深い深度での地下開発全般への利用を想定し、深度100 m付近までを対象に、有効熱伝導率や透水係数などの地盤物性を地質区分の分布確率から推定し、全国を網羅する三次元グリッドにて提供するデータベースである。この全国地盤データベースを用いることで、複数の都道府県にまたがる地中熱ポテンシャルマップを同一のデータ・手法で作成することができ、GSHPs導入効果を広域で比較分析することが可能となる。こうした広域ポテンシャルマップは、各地域で詳細なポテンシャルマップを作成する場合のリファレンスマップの役割も担えると期待される。

本研究では、暖房負荷が大きくCO₂排出量削減効果が見込める北日本（北緯36°以北）を対象に、全国地盤データベースの有効熱伝導率データと地中熱シミュレーションを組み合わせた地中熱ポテンシャルマップを示す。ここでは、戸建て住宅へのGSHPs導入を想定し、①地中熱交換器の標準長さ(100 m)に対する期間平均の成績係数(Coefficient Of Performance: COP)、②GSHPsの導入規模の目安となる目標期間平均COPに対する地中熱交換器長さ、③GSHPs導入によるCO₂排出量削減率を計算、マッピングし、これらの地域比較から導入効果の分析を行う。

2. 研究手法

(1) 全国地盤物性データベース

全国地盤物性データベースの特徴は、a. 深度100 m付近までを対象とすべく、コアボーリングデータの不足を補うため、地下水利用井戸の掘削記録（井戸データ）を併せて用いる、b. 三次元グリッドにて存在しうる全ての地質区分の分布確率をクリギング推定しデータベースとする、c. 固有物性値と分布確率の重ね合わせにより有効

熱伝導率などの地盤物性値を推定する点にある。これら特徴は既に報告されており^{27), 28)}、ここでは手法の概要と本研究で追加した点について述べる。

図-1に、対象地域において収集・利用した地質データを示す。コアボーリングデータは先述の KuniJiban より深度30 m以上に絞り1514点、コアボーリングデータの不足を補うために用いる井戸データは「いどじびき」²⁹⁾より2172点、「地下水（深井戸）資料台帳」³⁰⁾から15395点を用いた。データの平均深度は109 mであった。

地質データは深度ごとの地質分布を多様な名称で記載しているが、これを大きく8種類（未固結な「土」を4種類：「粘性土」、「砂質土」、「礫質土」、「火山灰質土」、固結した「岩」を4種類：火山地域に多く現れる「第四紀火山岩」、固結度の低い新第三紀の「泥質岩」、「砂岩・礫岩」、固結度の高い「基盤岩（その他）」）に分類し、深度1 m毎に整理した。その際の地質形成年代の判定には「三次元水文地質モデル」³¹⁾の地層区分を用いた。なお同モデルでは、第四紀と新第三紀の地質年代境界を約180万年前としており、近年定められた年代定義（約260万年前）³²⁾と異なることに留意する必要がある。

この地質データを用い、三次元グリッドでの任意地点・深度にて、全ての地質区分($k=1\sim 8$)の分布確率を、インディケータクリギングにより推定する³³⁾。

$$p_{ik}(u; k) = \sum_{\alpha=1}^n \mu_{\alpha}(k) [i(u_{\alpha}; k) - p(k)] + p(k) \quad (2)$$

ここで、 $p_{ik}(u; k)$ は地質区分 k が任意地点 u に出現する確率、 $i(u_{\alpha}; k)$ はインディケータと呼ばれ、地質区分 k がデータ α の位置 u_{α} に出現する場合に1、他の地質区分の場合は0を与える。 $p(k)$ は地質区分 k の平均分布確率、 μ_{α} はクリギング係数で、インディケータデータから推定し

図-1 研究に用いた地質データ

たバリオグラムによる連立線形方程式を解いて求める。

推定に用いるデータは、推定点を中心とする探索半径内で、かつ推定点と同一の地形分類および地層分類に属するものを用いた。この際、地形分類や地層分類の判定は「国土数値情報（土地分類メッシュ）」³⁴および三次元水文地質モデルに基づき行う。なお地形分類は元々の35種類の分類（主分類）を5種類（「山地」、「丘陵地」、「山麓・扇状地」、「台地」、「低地」）に再分類した。井戸データの探索半径とバリオグラムの異方性は、推定結果が井戸データの地質と最も一致する組み合わせをあらかじめ交差検証法により把握し、推定点毎の条件に応じた最適な組み合わせを逐次決定している²⁷。

地質推定のグリッド間隔は任意だが、ここでは北日本全体のマップとして視覚的に分かりやすい10 kmグリッドを採用した。深度方向の推定は、井戸データの記録精度を勘案し5 mとし、深度225 mまで推定を行った。本システムでは深度100 m付近までを主な対象とするが、より深い深度にもそのまま適用可能である。ただし、井戸データがない深度では上位の地質区分が連続すると仮定し、新第三紀以前の層に該当する深度では全て基盤($k=8$)と仮定した。探索半径の最大距離は5 kmとし、データが乏しい山間部ではクリギング推定に代えて、10 kmグリッド中の井戸データによる平均分布 $p(k)$ を推定結果とした。更に10 km格子内にデータが無い場合、国土数値情報に含まれる「表層地質分類」を8地質区分に分類し、分布確率1を与えた。その際、分類が「岩($k=5\sim8$)」の場合、表層の第四紀層は地形毎に山地、丘陵地、台地は砂質土($k=2$)、山麓・扇状地にて礫質土($k=3$)、低地にて粘性土($k=1$)に分類し、「土」の場合、第三紀以

前の層は全て基盤($k=8$)とした。

図-2に、検討範囲における深度50m、10 kmグリッド（計2129点）での最大分布確率の地質区分を示す。従来の地質図は表層付近の地質を示すに留まったが、本データベースでは任意深度の地質をグリッドで図示することができる。更に分布確率の情報も有するため、地質分布の複雑さや推定の不確実性の評価も可能である²⁷。わが国では山地が大半を占め、全体に基盤($k=8$)が分布しつつ、臨海部や大河川沿いは未固結層($k=1\sim4$)が、火山周辺は火山灰($k=4$)や火山岩($k=5$)が、局所的に新第三紀

図-3 深度50mまでの平均有効熱伝導率

図-2 深度50mの最大分布確率の地質区分（10kmグリッド）

図-4 深度50～150m間の平均有効熱伝導率の増加量

層 ($k=6\sim7$)が分布すると推定された。

本データベースでは、対象深度までの平均物性値を、地表からその深度まで各グリッドで存在しうる全ての地質区分の分布確率と固有物性値を掛け合わせて推定する。有効熱伝導率の固有値 λ_k ($k=1\sim8$)は、収集した熱応答試験 (76 箇所) を再現するよう最小二乗法で決定している²⁹⁾。推定誤差は、地下水流れの影響が推測される試験結果を除き、約 $0.2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であり、この値は有効熱伝導率をパラメータとする感度解析によれば、GSHPs導入に必要な地中熱交換器長さに換算して約 10m の長さの違いに相当する。なお本研究では、有効熱伝導率への地下水流れの影響は考慮していない。飽和・不飽和の判定は、地下水面グリッドデータ³⁹⁾を用い、不飽和帯の固有有効熱伝導率は、飽和帯の値の0.7倍を仮定した。

図-3は、10 km グリッドでの深度 50 m までの平均有効熱伝導率 λ_e の分布である。全体には $\lambda_e=1.5\sim2.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 程度で、基盤が浅い山地や丘陵地では $\lambda_e=3.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 程度の高い値となり、臨海部や河川沿いの平地においては $\lambda_e=1.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 程度の低い値となった。

図-4 は、深度 50~150 m 間の有効熱伝導率の増加量 $\Delta\lambda_e$ である。深度に向かって「土」から「岩」になるため、 $\Delta\lambda_e$ は概ね正の値となり、丘陵地や台地では「基盤 ($k=8$)」の出現割合が多くなるため値が大きくなる。一方、 $\Delta\lambda_e=-0.1\sim0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ と変化が小さい地域も多い。これらの地域は、深度 150 m 付近まで未固結な「土」が厚い堆積平野・盆地か、浅くに「基盤」が現れる山地か、10 km グリッド内に井戸データがなく、地質を「土」か「岩」の2種類のみで仮定したかのいずれかに該当する。

その他計算に用いる物性として、体積熱容量は文献³⁶⁾を参考に一定 ($3 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$) と仮定した。温度不易層の深度と温度は、既往文献³⁷⁾がとりまとめた一連の成果³⁸⁾に基づき設定し、地温勾配は $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ を一律仮定した。

(2) 地中熱ヒートポンプシステムシミュレーション

本研究では、全国地盤物性データベースの λ_e 分布を用い、GSHPsシミュレーションを行った。計算には、わが国で普及するGSHPs設計性能予測ツール「Ground Club」⁴⁰⁾を用いた。Ground Clubは、地中熱交換器周辺の地盤温度変化を理論解の重ね合わせで計算することで、FEFLOWなどの有限要素法に比べ高速計算が可能で、かつヒートポンプのCOP条件など任意の条件変更に対応できるため、効率的な広域マッピングに特に有効である。

GSHPs導入を想定する建物は、平成25年省エネルギー基準の解説書⁴¹⁾ (以下、解説書) と同じ標準戸建て住宅を想定した。ただし熱負荷は暖房負荷のみを想定し、解説書と同じ熱貫流負荷の時刻別定常計算を行った。

$$Q_h = U_A \times (T_i - T_o) \times A_e \times \alpha, \quad T_i < T_o \quad (2)$$

ここで、 Q_h は暖房熱負荷 [W]、 U_A は外皮平均熱貫流率

[W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$)]で解説書に従い全国7地域区分の設定値 ($U_A=0.46\sim0.87 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$)を用いた。 A_e は外皮面積 [m^2]で想定住宅の場合、 312 m^2 (延床面積120 m^2) である。 α は負荷補正率であり、想定住宅の居住空間のみの暖房負荷を想定した ($\alpha=0.68$)。 T_o は時刻別外気温 [$^\circ\text{C}$]で、推定箇所近傍の拡張アメダスデータ⁴²⁾を用いた。拡張アメダスデータは、統計期間が1980~2000年と最新の気象庁の平年値の統計期間 (1981~2010年) とほぼ同一であり、建築設計に必要な様々な気象データが整備されることから、現在、実務・研究双方に広く用いられている。 T_i は暖房室内設定温度 [$^\circ\text{C}$]で、解説書と同じく 22°C 一定とした。

地中熱交換器は、鉛直埋設の間接型 (クローズド) 方式とし、ボアホール掘削径120 mm、Uチューブを呼び径25Aシングル、ボアホールの充填材を珪砂 ($\lambda_e=1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) とし、熱媒体はエチレングリコール系不凍液を想定した。地中熱交換器長さ L_b は、50 m から225 m まで25 m 間隔、計8ケースにてシミュレーションを行った。

本研究では、寒冷地では採熱に伴い地盤温度が 0°C を下回る場合があるため、潜熱を考慮した温度計算を行った。潜熱考慮領域 (凍結最大範囲) は地中熱交換器中心から半径0.3 m の円筒領域を仮定し、地盤温度を等温条件 (0°C) とした温度回復法⁴³⁾により計算した。その際、時刻別負荷の累積に応じて凍結領域をドーナツ状に増加させ、凍結領域の間隙水が氷 ($\lambda_e=2.2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) に凝固する際の有効熱伝導率を定常直列モデルで計算した。

ヒートポンプのCOPは、従来の計算では定格COP一定を仮定することが多いが、COP特性が計算結果に大きく影響する。ここでは住宅向け市販製品 (定格出力 $Q_0=10 \text{ kW}$) の成績試験結果に基づき、暖房温度 $T_{2\text{out}}$ 、1次側計算入口温度 $T_{1\text{in}}$ 、部分負荷 (採放熱量と定格出力との比 Q/Q_0) それぞれの補正係数 ε を二次式で近似し、基本COP ($=3.7$) に掛け合わせて、時刻毎のCOPを推定した。

$$\text{COP} = \text{COP}_0 \times \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \varepsilon_3 \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_j = a_j x^2 + b_j x + c_j \quad (3.2)$$

ここで、 x は補正係数 ε_j の要素で、 $T_{2\text{out}} (j=1)$ 、 $T_{1\text{in}} (j=2)$ 、 $Q/Q_0 (j=3)$ のいずれかである。表-1に補正係数の一覧を示す。本研究で想定する市販製品のCOPの上限は4.5とした。また暖房機は、2型ファンコイルユニット6台とし、ヒートポンプから暖房機への送水温度は 40°C 一定とした。

計算手順として、まず1次側温度を(2)式による時刻別暖房熱負荷に対しGround Clubを用いて計算する。次いで、計算温度と部分負荷率から(3.1)、(3.2)式によりヒートポン

表-1 ヒートポンプのCOP特性式における補正係数

	$T_{1\text{in}} (j=1)$	$T_{2\text{out}} (j=2)$	$Q/Q_0 (j=3)$
a	7.00×10^{-5}	2.47×10^{-2}	1.80
b	1.10×10^{-3}	1.94×10^{-2}	1.01
c	3.30×10^{-3}	1.01	1.18

プの時刻毎のCOPを求め、ヒートポンプの消費電力を計算する。一連の計算を初期温度から開始し、毎年同じ時刻別負荷条件にて3年繰り返し、3年目の年間消費電力の総和を計算した。これと暖房熱総負荷の比として、GSHPs性能の目安となる期間平均COP ($\overline{\text{COP}}$)を求めた。

(3) 目標COPに対する地中熱交換器長さの決定

GSHPs設計では、深度当たりの単位採放熱量(W/m)を一定と仮定し、暖冷房熱負荷に対応できる地中熱交換器長さ L_b を決定することが多い。ただし単位採放熱量は、その地点の λ_e を反映し値が変わるほか、同じ地点でも想定する L_b が違えば値は変わりうる。そこで本研究では、GSHPsの目標COP(target COP: $\overline{\text{COP}}$)を指標とし、 $\overline{\text{COP}}$ を得るために必要な L_b を地中熱交換器の必要長さとする。

図-5に、 L_b を50~150 mにて10 m毎に変えた場合に、3つの異なる λ_e (1.0, 2.0, 3.0 W/(m・K)) に対する $\overline{\text{COP}}$ の計算例を示す。検討箇所は札幌市(緯度43.06°, 経度141.35°)である。なお地中熱交換器出口での熱媒体の最低温度の下限を -15°C とし、図-5では計算温度が下回る場合の結果は除外している(ここでは、 $\lambda_e = 1.0$ W/(m・K)に対する $L_b = 50$ m, 75 m, $\lambda_e = 2.0$ W/(m・K)に対する $L_b = 50$ mの結果)。図-5から、 L_b に対し $\overline{\text{COP}}$ は連続的に増加し、その増加量は L_b が短い場合に大きく、 L_b が長い場合に小さいことが分かる。すなわち、 λ_e が小さい地盤では L_b を長くすることで $\overline{\text{COP}}$ 増加が期待できるが、 λ_e が大きい地盤では L_b が短くても $\overline{\text{COP}}$ が元々高く、 L_b を長くする効果は限られる。

実際の地盤では L_b の変化に対し λ_e は一定でない。また不易層温度や暖房熱負荷も箇所により異なる。このため、本研究では、グリッド毎で L_b の長さを変えたGSHPsシミュレーションを行い、 L_b と $\overline{\text{COP}}$ の関係を逐次求めた。次に各グリッドの L_b と $\overline{\text{COP}}$ の関係を二次曲線で近似し、 $\overline{\text{COP}}$ に対する L_b を内挿推定で求めた。また本研究では、目標とする $\overline{\text{COP}}$ は、競合するASHPの寒冷地での実測

$\overline{\text{COP}}$ が2.6程度⁴⁴⁾であることと、想定するGSHPのCOP上限が4.5であることを考慮し、 $\overline{\text{COP}} = 4.25$ と設定した。図-5の例では、 $\lambda_e = 1.0, 2.0, 3.0$ W/(m・K)の場合に $\overline{\text{COP}} = 4.25$ を得る必要長さはそれぞれ $L_b = 74$ m, 91 m, 130 mとなる。この必要長さ L_b を検討対象とする北日本全体にて10 kmグリッドで計算し、マッピングした。

(4) CO₂排出量削減率の計算

GSHPs稼働に伴うCO₂排出量は暖房熱総負荷を $\overline{\text{COP}}$ で除して消費電力とし、これに排出係数を乗じて計算する。

$$W_{\text{CO}_2} = \Sigma Q_h / \overline{\text{COP}} \times w_E \quad (4)$$

ここで、 W_{CO_2} はGSHPs稼働時のCO₂排出量[t-CO₂/season]、 ΣQ_h は暖房熱総負荷[kWh]である。 w_E は電力使用時の排出係数[t-CO₂/kWh]で、北海道電力、東北電力、東京電力、北陸電力の管内で順に6.69, 5.56, 5.00, 6.27 $\times 10^4$ t-CO₂/kWhとした⁴⁵⁾。なお本研究ではGSHPs稼働時の排出量のみ計算し、設置や償却に伴う排出量は計算に含めなかった。

比較する既存暖房システムの熱源は、空気(ASHP)、灯油、ガスのいずれかを仮定し、統計資料⁴⁶⁾から北日本での普及率 β_i ($i = 1 \sim 3$)をそれぞれ16, 81, 3%とした。各熱源の暖房機器を稼働した場合のCO₂排出量に β_i を掛け合わせた和を既存システムのCO₂排出量 W_{CO_2}' とした。

$W_{\text{CO}_2}' = \Sigma Q_h (1/\overline{\text{COP}}_{\text{ASHP}} \times w_E \times \beta_1 + w_{\text{Oil}}/\eta_{\text{Oil}} \times \beta_2 + w_{\text{Gas}}/\eta_{\text{Gas}} \times \beta_3) \quad (5)$
ここで、 W_{CO_2}' は既存システムによるCO₂排出量[t-CO₂/season]であり、 w_{Oil} , w_{Gas} は灯油、ガス暖房それぞれの排出係数[t-CO₂/kWh]であり、ここでは理論値を用いた⁴⁷⁾。 η_{Oil} , η_{Gas} は灯油、ガス暖房の燃焼効率であり、いずれも0.85とした。(4), (5)式より W_{CO_2} と W_{CO_2}' を計算し、GSHPs導入によるCO₂排出量削減率 ΔR_{CO_2} [%]を求めた。

$$\Delta R_{\text{CO}_2} = (1 - W_{\text{CO}_2} / W_{\text{CO}_2}') \times 100 \quad (6)$$

本研究では、 $L_b = 100$ mのGSHPsを戸建て住宅へ導入する場合の ΔR_{CO_2} をグリッド計算し、マッピングした。

3. 結果と考察

(1) 暖房熱負荷と期間平均COP

図-6に、年間の暖房熱総負荷 ΣQ_h の計算結果を示す。 ΣQ_h は検討地域では12000~28000 kWh程度であり、全般には北に位置するほど値が大きいが、南の地域でも U_A が小さくなるため、高地等で局所的に値が大きくなる。

図-7に、わが国の標準的な地中熱交換器長さである $L_b = 100$ mの場合で計算したGSHPsの $\overline{\text{COP}}$ を示す。東北以南では、 ΣQ_h が小さく不易層温度も高いため、採熱による地盤温度の低下(地中熱交換器の熱交換温度差)は相対的に小さい。このため、GSHPsのCOPは高地などの一部を除き、上限COPに近い $\overline{\text{COP}} = 4.4$ 前後と計算された。一方、北海道では、 ΣQ_h が大きく不易層温度も低いため、 $\overline{\text{COP}}$ は東北以南に比べ低くなる。ただし、北海道でも全

図-5 異なる平均有効熱伝導率の地盤における地中熱交換器長さ L_b と $\overline{\text{COP}}$ との関係

図-6 年間（シーズン）での暖房熱総負荷

図-7 地中熱交換器長さ $L_b=100$ m の場合の $\overline{COP}$

体に $\overline{COP}=4$ 前後は見込める結果となった。

図-8は、10 kmグリッドの各地点にて $L_b = 50, 75, 100$ mとした場合の λ_e に対する $\overline{COP}$ プロットである。一般に、 λ_e が大きいほど $\overline{COP}$ が高くなる。この正の相関は図-8では、 $L_b = 50$ mかつ $\lambda_e < 2.0$ W/(m·K) の場合に顕著に認められる。また図-5でも、 λ_e が低い場合に、 L_b の増加に対する $\overline{COP}$ の増加が大きくなる傾向が示された。以上からGSHPs導入コスト低減のために L_b を短くする場合には地盤条件(λ_e)が $\overline{COP}$ により影響を与える可能性に留意が必要である。一方、図-7から標準長さ $L_b = 100$ m の場合は地点によらず $\overline{COP}$ は4.0前後かそれ以上は見込まれることから、想定した戸建て住宅とヒートポンプ性能でのGSHPs導入の場合には、先ず標準長さで設計する選択肢も考えられる。

図-8 有効熱伝導率 λ_e と $\overline{COP}$ の関係

(2) 目標期間平均COPを得るための地中熱交換器長さ

図-9に、 $\overline{COP} = 4.25$ の場合に必要な L_b のマップを示す。また図-10には、北海道、東北6県、北関東・北陸に分けた場合の L_b のボックスプロットを示す。必要長さ（中央値）は、暖房負荷の大きい北海道で長く $L_b = 128$ m、東北では $L_b = 82$ m、北関東・北陸では $L_b = 76$ mと試算された。暖房負荷が大きい北海道で必要な L_b が長く、東北と北関東・北陸での差は小さかった。標準偏差は概ね15 m前後であるが、5～95 %範囲は北海道で中央値に対し ± 50 m、東北や北関東・北陸では ± 30 m程度と比較的大きい。またグリッド単位で見る場合、 λ_e や ΣQ_h の違いによって、隣接グリッドでも L_b が20～40 m程度異なって計算される。

標準長さ $L_b = 100$ mと比較する場合、東北以南では $\overline{COP} = 4.25$ を得る必要長さ（中央値）は約20 m短くなり、設置コストの縮減が見込める。一方、北海道での必要長さは約30 m長くなり、設置コストが増加することになる。

図-9 $\overline{COP}=4.25$ を得るために必要な地中熱交換器長さ L_b

このため、実際の設計で L_b を検討する場合には、 $\overline{COP}$ 増加によるコスト低減との比較が必要となる。また、これらの評価は地域毎の目安に過ぎず、図-9で隣接グリッド間で L_b が異なることから、 λ_e や ΣQ_h など各地点の設計条件に基づくシミュレーションを個別に行い、適切な L_b を検討していく必要がある。シミュレーションに用いる λ_e の入手には、熱応答試験を行う費用・時間的制約を考慮すると、まずは本データベースの活用が有効であり、データベースの λ_e が $2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ を下回ると予想される場合、図-8より λ_e の不確実性に $\overline{COP}$ が影響を受ける可能性から、熱応答試験により λ_e を実測するという手順が考えられる。

(3) CO₂排出量削減率

図-11に、 $L_b = 100 \text{ m}$ のGSHPsを導入した戸建て住宅の暖房使用時の ΔR_{CO_2} を示す。電力会社によって計算に用いる電力使用時の排出係数 w_E が異なるため、事業範囲の境界で ΔR_{CO_2} の分布が不連続となるが、北日本全体では未だ灯油暖房が占める割合が大きいため($\beta_2 = 81\%$)、高効率なGSHPsを導入することで $\Delta R_{CO_2} = 45 \sim 60\%$ 程度の高い環境負荷低減効果が期待できることが分かる。

図-12に、北海道、東北6県、その他北関東・北陸での ΔR_{CO_2} のボックスプロットを示す。本計算では、既存システムの暖房熱源の割合 β_1 を一律としたため、 ΔR_{CO_2} は総負荷量、GSHPsの $\overline{COP}$ および電気使用時の排出係数に依存する。 $\overline{COP}$ が相対的に低くかつ w_E が大きい北海道では $\Delta R_{CO_2} = \text{中央値 } 45\% \pm \text{標準偏差 } 1\%$ 程度に留まる。一方、高い $\overline{COP}$ が期待できる東北以南では、東北で $\Delta R_{CO_2} = 54\% \pm <1\%$ 、関東・北陸で $\Delta R_{CO_2} = 58\% - 4 \sim +1\%$ と高い値となる。ただし北陸電力管内は w_E が大きいので、 ΔR_{CO_2} が小さく関東・北陸のボックスを下方向に拡大させている。ただし、いずれの地域も ΔR_{CO_2} の標準偏差は小さく、隣接グリッドの変化は1%程度であり、 $\overline{COP}$ を得るための L_b (図-9)の場合と異なり、 ΔR_{CO_2} の比較は地域(電力会社管内)単位で可能である。

本研究により、灯油暖房が主流な北日本ではGSHPsの導入に伴い高い環境負荷低減効果が広範囲に得られることが改めて示された。現在、GSHPs導入は北海道で先行するが⁴⁾、東北以南では比較的短い L_b で高い $\overline{COP}$ が得られ、 ΔR_{CO_2} も比較的大きい値が見込めることが分かり、今後、GSHPsの積極的な導入が期待される。

このように広域での地中熱ポテンシャルマップは、地域単位でのGSHPs導入可能性を視覚的に明らかにすることで、地域毎のポテンシャルを考慮したGSHPsの普及促進を働きかけることが可能となる。また地球温暖化対策としての環境負荷低減効果を地域・国レベルで評価する上で、広域マッピングは特に有効であり、今後、北日本だけでなく日本全体を対象に整備を進めていきたい。

図-10 必要地中熱交換器長さ L_b の地域別ボックスプロット
(ボックス：中央値±標準偏差，バー：5-95%範囲)

図-11 暖房利用GSHPs導入による戸建住宅のCO₂排出量削減率(地中熱交換器長さ $L_b = 100 \text{ m}$ の場合)

図-12 CO₂排出量削減率の地域別ボックスプロット
(地中熱交換器長さ $L_b = 100 \text{ m}$ の場合)

4. まとめ

本研究では、地中熱利用を想定する深度100 m付近までをカバーする全国地盤物性データベースの有効熱伝導率の推定分布を用い、想定した標準戸建て住宅に地中熱利用ヒートポンプシステムGSHPsを北日本全体に導入する場合の期間平均成績係数 $\overline{COP}$ 、必要な地中熱交換器長さ L_b 及びCO₂排出量削減率 ΔR_{CO_2} を計算し、地中熱ポテンシャルマップとして示した。以下に結果をまとめる。

- ・データベースによる深度方向の有効熱伝導率 λ は、北日本全体では $\lambda = 1.5 \sim 2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 程度で分布し、山地や丘陵地では $\lambda = 3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 程度まで高く、臨海部や河川沿いの平地では $\lambda = 1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 程度まで低くなると推定された。また深度方向に緩やかに増加する傾向が示された。

- ・必要な地中熱交換器長さ L_b の計算法として、 L_b を変えた場合の λ の変化を考慮した地中熱シミュレーションを行い、各地点毎に L_b と $\overline{COP}$ との関係を求め、目標 $\overline{COP}$ を得るための L_b を内挿推定する手法を提案した。

- ・わが国における標準長さ $L_b = 100 \text{ m}$ によるGSHPsを導入する場合、北日本全体で $\overline{COP}$ は4.0程度かそれ以上となり、標準長さを設計に用いる妥当性を確認できた。より合理的なGSHPsとして目標 $\overline{COP} = 4.25$ を設定する場合、東北以南では必要な L_b は80 m程度と標準長さに比べより短く済み、設置コストが削減できる可能性が示された。一方、北海道では L_b は130 m程度とより長く必要と計算された。この場合には、設置コストと $\overline{COP}$ 増大による稼働コストを比較し、適切な L_b を決定していく必要がある。

- ・GSHPs導入による戸建て住宅の暖房時の ΔR_{CO_2} は45～60%程度となり、未だ灯油暖房の占める割合が大きい北日本で高い導入効果が見込まれた。特に電力使用時の排出係数が小さい東北以南では ΔR_{CO_2} は比較的大きくなると試算され、 $\overline{COP}$ も北海道に比べ高い値が期待できることから、今後、GSHPsの一層の普及が期待される。

なお本研究では地下水流れによる地中熱利用の効率向上効果が考慮されていない。このため、地下水が豊富で、動水勾配の大きい山間部や扇状地などでは、GSHPsの導入効果が過小評価されている可能性が高い。このため、データベースに地下水流れの情報も加えるとともに、複層地盤・地下水流れを考慮した計算手法²⁹⁾を導入することで、移流効果も含めた地中熱ポテンシャルの評価を改めて行う必要がある。また今後、北日本のみならず、冷房需要も含めた日本全体へ検討対象を拡大し、住宅・非住宅など様々な建物から構成される実際の都市条件を考慮した計算を行い、分析精度を高めていきたい。

謝辞：本研究は、NEDO再生可能エネルギー熱利用技術開発事業として進められた。全国地盤物性データベース構築に際して、産業技術総合研究所の丸井敦尚博士及び

地中熱利用促進協会の笹田政克博士から貴重なご意見を頂くとともに、データ整備では(株)日伸テクノ及び本研究の院生らから協力を得た。また本計算に必要なGround Clubの改良に際し、ジーエムラボ(株)の協力を得た。ここに記し謝辞とします。

参考文献

- 1) 長野克則：地下熱利用技術 2. 地下熱利用技術とは、地下水学会誌, Vol. 53, No. 1, pp. 83-90, 2011.
- 2) Nagano, K. : The progress of GSHP in Japan. IEA Heat Pump Centre News Letter, Vol. 33, No. 3, pp. 21-25, 2015.
- 3) 環境省：平成 28 年度地中熱利用状況調査の結果，報道発表資料，<http://www.env.go.jp/press/103827.html>，(2017. 3. 31 閲覧)
- 4) 藤塚哲朗，佐藤郁太郎，坪谷剛：地中熱を利用したヒートアイランド対策技術の地盤環境への影響評価，地球環境シンポジウム講演論文集，Vol. 15, pp. 183-188, 2007.
- 5) 笹田政克，高杉真司，館野正之：都心での地中熱利用—小規模オフィスビルへの地中熱ヒートポンプシステムの導入—，応用地質，Vol. 51, No. 6, pp. 265-272, 2010.
- 6) 岡田浩一，山崎智雄，鶴田祥一郎，中野勝行，金岩貢，平野彰秀，岡村鉄兵：地中熱利用事業及び小水力発電事業の評価，地球環境シンポジウム講演論文集，Vol. 21, pp. 43-48, 2013.
- 7) 石上孝，渡部敦史，石黒幸治，辻弘一，谷口聡子，大島和夫：地中熱利用冷暖房・融雪システムの概要と長期運転実績評価，建築設備と配管工事，Vol.48, No.2, p.39-44, 2010.
- 8) 建築環境・省エネルギー機構：一次エネルギー消費量及び基準達成率算定支援ツール，<http://ees.ibec.or.jp/tool/index.php>，(2016. 12. 10 閲覧).
- 9) 内田洋平，吉岡真由美：3.3.5 地中熱ポテンシャル評価，日本地熱学会：地熱エネルギーハンドブック，pp. 461-479, 2014.
- 10) 濱田靖弘，田中慎哉，長野克則，田村裕，滝川郁美，中村靖，丸谷薫，清水康博，高田雅之：国土数値情報を用いた地下熱利用システムの導入可能性に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，Vol. 143, pp. 1-10, 2000.
- 11) 内田洋平，奥田佑季，藤井光，宮本重信，吉岡真弓：地中熱利用適地の選定方法その 1 地下水流動・熱輸送解析と GIS を用いた地中熱利用適地マップの作成，日本地熱学会誌，Vol. 32, No. 4, pp. 229-239, 2010
- 12) 吉岡真弓，内田洋平，奥田佑季，藤井光，宮本重信：地中熱利用適地の選定方法その 2 地下水流動・熱輸送解析を用いた熱交換量マップの作成，日本地熱学会誌，Vol. 32, No. 4, pp. 241-251, 2010.
- 13) 大谷具幸，河地浩平，小嶋智，笹田政克：自然条件と社会条件を考慮した地中熱利用の広域的な賦存量と導入ポテンシャルの評価手法，Vol. 35, No. 1, pp. 17-31, 2013.
- 14) 富樫聡，西山浩平，山本晃，壇智之，高橋勉：広域を対象とする地中熱ポテンシャル評価手法の提案，

- 日本地下水学会 2013 年春季講演会講演要旨集, pp. 104-109, 2013.
- 15) シュレスタ ガウラブ, 内田洋平, 吉岡真弓, 藤井光, 井岡聖一郎: 地中熱ヒートポンプシステムにおけるポテンシャルマップの高度化, 日本地熱学会誌, Vol. 37, No. 4, pp. 133-141, 2015
 - 16) 環境省: 平成 24 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書, 平成 24 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書, pp. 183-206, 2013.
 - 17) 岐阜県・岐阜市・帝国建設コンサルタント: 地中熱利用可能性調査, 201p., 2011.
 - 18) 黒石市: 黒石市地中熱利用ポテンシャル調査事業報告書, 188p., 2011.
 - 19) 青森県: 青森県地中熱・温泉熱利用ポテンシャル調査事業報告書, 219p., 2012.
 - 20) 東京都: 東京都地中熱ポテンシャルマップ, http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/energy/renewable_energy/ne2/tichumap/index.html, 2015, (2017. 3. 10 閲覧).
 - 21) 生田目 修士: NEDO におけるポテンシャルマップの取組, 第 24 回地中熱利用シンポジウム講演資料, 地中熱促進協会, 2017.
 - 22) 日本熱物性学会編: 新編熱物性ハンドブック, 776p., 養賢堂, 2008.
 - 23) Farouki, O.-T.: Thermal properties of soils, CRREL Monograph 81-1, United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H., 137 p., 1981.
 - 24) 葛隆生, 長野克則, 中村靖: 複層地盤を考慮した地中熱交換器のシミュレーションツールの開発とその応用, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 32, No. 3, pp. 335-344, 2015.
 - 25) 国土交通省, 土木研究所, 港湾空港技術研究所: 国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>, (2016.3.18 閲覧).
 - 26) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 再生可能エネルギー熱利用技術開発, http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100067.html, (2017. 1. 15 閲覧).
 - 27) 阪田義隆, 葛隆生, 長野克則, 丸井敦尚: 井戸データベースを用いた地盤情報推定システムの開発: 地質区分のクリギング推定と逐次パラメータ決定法, 地下水学会誌, No. 59 (2), 105-123, 2017.
 - 28) 阪田義隆, 橋本隼樹, 葛隆生, 長野克則: 地盤・地下水データベースに基づく地中熱利用ポテンシャルマップと設計性能予測ツールの開発その 3 地質区分の予測分布確率を用いた熱・水理物性値の推定, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 51 回学術講演会論文集, 2017.
 - 29) 丸井敦尚: 地質調査所版全国井戸・水文データベースの概要と新版「いどじびき」について, 地質ニュース, 522, pp. 32-36, 1998.
 - 30) 国土交通省: 全国地下水 (深井戸) 資料台帳, <http://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html>, (2016. 9. 16 閲覧).
 - 31) 越谷賢, 丸井敦尚, 伊藤成輝, 吉澤拓也: 日本列島における三次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算, 地下水学会誌, Vol. 53, No. 4, pp. 357-377, 2011.
 - 32) 日本第四紀学会: 第四紀の定義, <http://quaternary.jp/news/teigi09.html>, (2017. 5. 31 閲覧).
 - 33) Deutsch, C.V.: Geostatistical reservoir modeling, 376p., Oxford University Press, 2002.
 - 34) 国土交通省: 国土数値情報 (土地分類メッシュ), <http://nrb-www.mlit.go.jp/ksj/>, (2015.10.4 閲覧).
 - 35) 越谷賢, 丸井敦尚: 日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定, 地下水学会誌, Vol. 53, No. 2, pp. 179-191, 2011.
 - 36) 北海道大学地中熱利用システム工学講座: 地中熱ヒートポンプシステム, pp. 92-99, オーム社, 2007.
 - 37) 新居正: 地域分析のための熱・水収支水文学, pp. 142-145, 古今書院, 2004.
 - 38) 木内四朗兵衛: 土壌気象の研究, 地学雑誌, No. 59, pp. 88-92, 1950.
 - 39) 大和田道雄: 日本における地中温度の分布について, 地理学評論, No. 42, pp. 138-144, 1969.
 - 40) 地中熱利用促進協会: 地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル, pp. 33-37, オーム社, 2014.
 - 41) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 省エネルギーに準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅, 1082p., 2013.
 - 42) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 223p., 日本建築学会, 2005.
 - 43) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門, pp. 193-208, 丸善, 1985.
 - 44) 野川貴史, 本郷一郎, 石川光浩, 清水克浩: 寒冷地住宅に適したルームエアコンの開発とフィールド計測, 平成 22 年度空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp. 2019-2022, 2010.
 - 45) 三菱総合研究所: 平成 24 年度エネルギー消費状況調査 (民生部門エネルギー消費実態調査) 報告書, pp. 38-61, 2013.
 - 46) 環境省: 電気事業者別排出係数 (特定排出者の温室効果ガス排出量算定用) -平成 26 年度実績-, 報道発表資料, <http://www.env.go.jp/press/101746.html>, 2015, (2016. 12. 10 閲覧).
 - 47) 日本 LP ガス協会: 燃料の排熱量・CO₂ 排出係数, http://www.j-lpgas.gr.jp/nenten/data/co2_ichiran.pdf, (2016. 12. 10 閲覧).

(2017.4.7 受付)

REGIONAL EFFECIENCY ANALYSIS OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS WITH GEO-PROPERTY DATABASE

Yoshitaka SAKATA¹, Takao KATSURA² and Katsunori NAGANO⁶

¹Faculty of Engineering, Hokkaido University

The purpose of this study is to evaluate an efficiency of ground source heat pump systems (GSHPs) in a standard residential on a regional scale by the numerical simulation with the three-dimensional database of the effective thermal conductivity. The database was constructed through the indicator-kriging procedure based on the available borehole and water-well data to cover the depths beyond about 100 m for installation of borehole heat exchangers (BHEs). This study also proposed the methodology to determine required lengths of BHEs for a target value of seasonally averaged coefficients of performance ($\overline{\text{tCOP}}$) in the GSHPs. The GSHPs simulation was demonstrated by using the Ground Club algorithm in a regular grid of 10 km over the northern area (the latitude $> 36^\circ$) of Japan. First, this study showed that the $\overline{\text{COP}}$ values were calculated at about 4.0 in the Hokkaido area and about 4.4 in the Tohoku and northern Kanto areas when the BHE was assumed to be a standard length of 100 m. Next, the required median length of BHE for $\overline{\text{tCOP}} = 4.25$ was estimated at about 80 m in the Tohoku and the northern Kanto areas. The smaller BHE length means that the initial costs for GSHPs could be efficiently reduced. On the other hand, the required median length was about 130 m in the Hokkaido area because the heating loads were relatively high in the cold region. The reduction ratio of CO₂ emissions was estimated at about 45–60 % when the ground source heat pump systems were utilized over the area instead of the conventional electric, oil and gas boiler systems. The reduction ratio was relatively large in the Tohoku and northern Kanto areas, indicating the potential increase of GSHPs in the future.