

三次元地盤物性情報に基づく地中熱利用システム導入による環境貢献効果の全国評価

北海道大学 正会員 ○阪田 義隆
 北海道大学 非会員 葛 隆生
 北海道大学 非会員 長野 克則
 産業技術総合研究所 非会員 丸井 敦尚

1. 研究背景

地中熱は、自然再生可能エネルギーの一つとして深度 100 m 付近までに賦存する一定温度の安定した熱源であり、どこでもだれでもいつでも利用可能なメリットがある。とりわけ土地の制約が大きく、省エネルギー需要の大きい東京や大阪などの都市部において、その利点は大きい。地中熱利用は通常、ヒートポンプを介して暖冷房、給湯などに利用される。この地中熱利用ヒートポンプシステム (Ground Source Heat Pump system: GSHP システム) は、従来システムに比べ高いエネルギー効率と少ない一次エネルギー消費量が特徴であり、戸建て住宅から大型商業施設まで世界各地で幅広く導入されており、わが国でも 2000 年代以降、急速に導入が進んでいる (環境省, 2017)。パリ協定(2015)では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く 1.5°C に抑える努力をすることとし、温室効果ガス排出量の増大をやめ、21 世紀後半には排出量と森林等による吸収量のバランスをとることが掲げられた。わが国でも 2030 年度の温室効果ガス排出量を 26%削減することが目標として定められ、目標達成の施策の一つとして、2020 年までに新築公共建築物等、2030 年までに新築建築物の半数の ZEB 化実現を掲げられた。これまで GSHP システム導入は寒冷地に偏りが見られたが、今後、ZEB 実現に向けた自然再生可能エネルギー利用設備として、全国各地で導入検討が進むと予想される。

GSHP システム普及の課題は初期コストである。従来の空気熱源 HP システムに比べ、地下へ採放熱するための地中熱交換器設置の費用がかかるほか、設備費や工事費も価格・開発競争が限られ、相対的に割高になりやすい。GSHP システムの高効率運転による電気代節約によるペイバックが見込まれるが、初期コストの負担は個人や事業者にとって設備導入の大きな判断材料となる。国や自治体からも補助金もあるが、その費用の妥当性による議論や限られた予算から効果的な導入地域への集中投資を行う検討も必要と考えられる。このため、GSHP 導入による経済性あるいは環境貢献の効果について、全国各地で定量的に分析し、従来システムとの比較あるいは、地域との導入効果の優劣を比較評価することが求められる。

本研究の目的は、開発した三次元地盤物性システムと地中熱システム高速グリッドシミュレーションを組み合わせることで、適切な地中熱システムの導入規模、特に初期コストに最も大きな割合を占める地中熱効果器の適切な長さ・本数を算定し、全国に最適システムを導入した場合の CO₂ 排出削減量を示すことで、地中熱利用システムの環境貢献効果の全国評価を行うことである。

2. 深井戸データからの地盤熱物性の推定

GSHP システムの性能は、想定する建物の規模、構造と気象条件との関係による暖冷房負荷、採放熱を行う地盤条件、ヒートポンプ設備によって決まる。特に、地中熱ポテンシャルを評価する上で課題となるのは、地盤情報の入手である。通常、地盤情報とはコアサンプリングボーリングによる地質柱状図が用いられるが、通常、力学的支持層が分布する深度数 10 m までで調査を終えるため、地中熱交換器の設置を検討する深度 100 m 付近までの深部の地盤情報については大半の地域で入手が困難となる。また性能評価に必要な平均有効熱伝導率などの地盤熱物性になると、その入手は更に限られる。

本研究では、地中熱交換器を埋設する深部地盤情報を井戸の掘削記録である井戸データを用いたクリギング法により、8 つに区分した各地質 (粘性土、砂質土、礫質土、火山灰質土、第四紀火山岩、新第三紀泥岩、新第三紀砂岩・礫岩、基盤岩) の分布確率をインディケータクリギング (Indicator kriging) により推定する¹⁾。

キーワード 地中熱、地盤データベース、有効熱伝導率、ヒートポンプ、シミュレーション、CO₂ 排出量

$$p_{IK}(z; i) = \sum_{a=1}^{N_a} \mu_a (I_a(i) - p_0(i)) + p_0(i) \quad (1)$$

$p_{IK}(u; k)$ は地質単元 k が任意地点 u で現れる確率, $p(k)$ は分類 k の平均分布確率, μ_a はクリギング係数である. 次に, 地盤の地表から地中熱交換器埋設深度 L までの平均有効熱伝導率を対象深度に分布する各地質の固有の物性値と分布確率との重ね合わせとして推定した²⁾.

$$\bar{\lambda}^*(u, L) = \frac{1}{L} \left[\sum_{k=1}^{N_k} \lambda_k \left(\sum_{z=1}^{L_{sat}} \gamma_k p_z(u; k) + \sum_{z=L_{sat}+1}^L p_z(u; k) \right) \right] \quad (2)$$

ここで, λ^* は位置 u , 深度 L の物性値の推定値($W/(m \cdot K)$), λ_k 及び L_k は地質 k ($1 \sim N_k$)の固有有効熱伝導率($W/(m \cdot K)$)及び出現深度数(m)である. L_{sat} は位置 u における飽和帯(地下水面)までの深度(m), γ_k は λ_k の飽和・不飽和比である. 地質固有の物性値は, 収集した原位置試験結果と一致するよう最小二乗法で決定した.

3. 導入効果の評価方法

本研究では, GSHP システムシミュレーションを全国 10km グリッドで地中熱交換器の長さ・本数を変えながら実施し, 稼働中常に地盤温度が安定する条件を満たす最小の地中熱交換器長さを算定し, 年間消費電力の従来エアコンシステムとの差を CO_2 排出量削減量として換算し, GSHP システムの導入効果とする.

想定建物は, 住宅は H25 省エネ基準でのモデル戸建て住宅(延べ床面積 $A = 120 \text{ m}^2$), 非住宅は建築研究所 HP に示される IBEC 事務所モデル(1000m²)を相似的に拡張した 3 ケース ($A = 330, 720, 2050 \text{ m}^2$)とした. 暖冷房負荷は 25 省エネ基準解説書(住宅・非住宅)に基づき日別値で算定し, 時刻別に配分した.

GSHP システムは, 地中熱交換器がボアホール埋設のクローズド型(Uチューブ 25A シングル, 熱媒体はエチレングリコール 30%, グラウト材は砂利)で共通とし, 長さを 50~200 m まで 15m 単位, 非住宅は本数を 5~50 本, 5 本単位で設定した. ヒートポンプは, 10kW 級ヒートポンプ, 非住宅計算用のヒートポンプは定格出力 50 kW×最大時刻負荷を賄う台数を想定した. 長さ・本数の各ケースに対し, 北海道大学が開発した地中熱システム設計性能予測ツール Ground Club を用い, 10 年間のシステム稼働計算を行い, 10 年目のシステム COP と地盤・熱媒温度を計算する. 地中熱交換器の最適な長さ・本数は, 計算地盤温度が移動平均にて外気温の変動幅にあり, かつ COP 増加が収束する組み合わせとした. GSHP システムと従来システムとの CO_2 排出量をそれぞれ計算し, それらのグリッド毎の差分とゼンリン GIS 住宅データと組み合わせ, 地中熱システム導入による CO_2 排出削減量を全国 10km 単位で計算した.

4. 評価結果

図 1 に, 算定した CO_2 排出削減量のマップを示す. 個々建物の個別削減量は負荷の大きい寒冷地にて多い傾向があったが, 建物密度と組み合わせることで, 東京, 名古屋, 大阪を中心とした都市部とそれらを結ぶ太平洋地域への導入ポテンシャルが高いことが示された. 特に導入数が少ない温暖地でも導入可能性が高いことが示された.

5. まとめ

本研究では, 地中熱システムの導入による環境貢献効果について全国評価を行い, 高い効果が期待できることが改めて示された. 今後, 都市部に着目した各地域での高解像度計算や複層地盤構造・地下水流れを考慮した評価を行う予定である.

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の一環として進められた. 建物 GIS データはゼンリンより格別なご配慮を賜った. ここに記して謝辞とします.

参考文献: 1) 阪田義隆ほか (2017a): 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, 59(2), 105-123. 2) 阪田義隆, 葛隆生, 長野克則 (2018) 確率加重平均法による地盤の有効熱伝導率の推定に関する研究, 日本地熱学会誌, 40(1), 33-44.

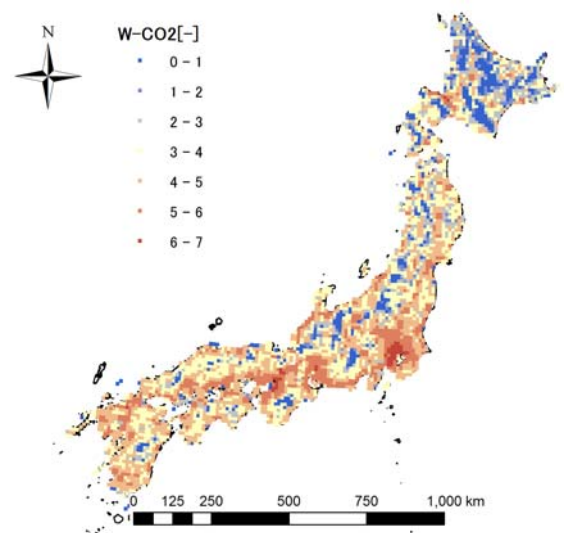


図1 地中熱利用システム導入による CO_2 排出削減量算定マップ