ライフサイクルコストに基づく地中熱交換器規模の算定と地下水流れがもたらす削減効果の分析：戸建て住宅を例として

阪田義隆*・葛 隆生*・長野克則*

Life-cycle-cost based analysis of borehole heat exchanger lengths considering groundwater flow effects in a residence as a case study

Yoshitaka SAKATA*, Takao KATSURA* and Katsunori NAGANO*

Abstract

This study estimated required borehole heat exchanger lengths in ground source heat pump systems for an assumed residence to minimize the life cycle costs considering groundwater flow effects. As a case study in Morioka City, Area 3 among 7 climate areas in Japan, the estimated lengths decreased as the logarithms of Darcy velocity increased between 10 and 200 m/y. The lengths were converged when the velocity was over the range in both large and small effective thermal conductivities. The results were also dependent largely on the heating/cooling loads, indicating the differences among the comparison areas. The target reduction ratios of the initial cost indicated that the systems were possibly economical relative to the conventional systems in the cold Areas 1 and 2 even when the Darcy velocity was neglected, and in the moderately warm Areas 3 and 4 when the Darcy velocity was over 100 m/y.

Key Words: groundwater flow, ground source heat pump system, borehole heat exchanger, Darcy velocity, life cycle cost, target reduction ratio of initial cost

概要

本研究では、戸建て住宅に地中熱ヒートポンプ暖冷房システムを導入する場合にライフサイクルコストを最小とする地中熱交換器長さを算定し、その地下水流れによる削減効果を分析した。気候区分した全国7地域の内、3地域（盛岡市）における削減効果は、ダルシー流速が10 m/yから現れ、そのオーダー変化と相関し、200 m/y以上で有効熱伝導率に関わらず一定値に収束する。また算定結果は各地域の暖冷房熱負荷に強く依存し、地域間で異なる結果となる。本研究で提案するイニシャルコスト目標削減率から、寒冷的な1,2地域に加え、比較的温暖的な3,4地域でもダルシー流速100 m/y以上の場合、従来システムに対して経済的なシステムになることを示した。

キーワード：地下水流れ、地中熱ヒートポンプシステム、地中熱交換器、ダルシー流速、ライフサイクルコスト、イニシャルコスト目標削減率

* 北海道大学 大学院工学研究院
Faculty of Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

地中熱ヒートポンプシステム (Ground Source Heat Pump system: GSHPs) は、深度200 m 付近までの地下に賦存する安定した熱エネルギーをヒートポンプを通じて建物の暖冷房や給湯、道路の融雪に利用するシステムである。GSHPs は、大気に比べて安定した熱源を利用することから、従来の一般的な空調機であるルームエアコン (以下、エアコン) に比べ高効率な運転を実現し、かつ化石燃料である灯油やガス熱源に比べ CO₂ 排出量を抑制できる点で環境性能にも優れたシステムであり、世界各地で普及が進んでいる。わが国においても2000年代以降、急速に導入数が増大している (環境省, 2017)。

GSHPs の課題として、しばしば指摘されるのが導入時のイニシャルコストである。GSHPs は、導入時に採放熱する地中熱交換器の設置費用が必要となるため、従来システムの導入費に比べ高額になる傾向がある。特にわが国では GSHPs の需要がある都市部に分布する軟弱な未固結堆積物は効率的な掘削が難しく、掘削費が割高になりやすい。例えば日本の10 kW 級 GSHPs 導入コストは北米の約1.5倍、その内、地中熱交換器設置費が約2倍になるという試算もある (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2017)。

わが国における GSHPs の導入件数は、2015年度末時点で2230件であり、この内住宅向けが991件とほぼ5割を占める (環境省, 2017)。今後も戸建て住宅への GSHPs の導入が見込まれるが、施工主が個人であるため、自治体や事業者以上に高額なイニシャルコストが導入選択の妨げになる可能性がある。一方、GSHPs は高効率運転により、従来のシステムに比べ電気代や燃料代 (オペレーションコスト) を節約できるため、中長期的なイニシャルコストの余剰分を回収 (ペイバック) することができる。したがって、戸建て住宅への GSHPs 導入促進に向けては、イニシャルコストとオペレーションコストを考慮したライフサイクルコスト (Life Cycle Cost: LCC) を従来システムとの比較を含めて示すことが重要となる。

GSHPs の性能や LCC は、建物や用途に応じた

熱負荷と採放熱する地盤及びヒートポンプ等設備の組み合わせにより決まる。この内、地盤条件としては有効熱伝導率や比熱、地温、地下水流れが挙げられる。なお本論文では有効熱伝導率は、地下水流れの影響を含めない地盤中の土粒子と間隙水の合成熱伝導率とする。地中熱交換器の埋設深度が深くなるほど地盤情報の入手が困難となる。特に地下水流れは推定地点の地質構造に加え、周辺の水文環境にも依存するため、既存資料からの精度の良い推定は通常困難であり、GSHPs の設計施工では地下水流れを考慮しないことが多い。研究分野では、地下水流れの効果を考慮した GSHPs の性能評価について多数、報告されている (濱田ほか, 1998; 新堀ほか, 2002; 内田ほか, 2010; 吉岡・内田, 2013; 葛ほか, 2015 など)。またコスト削減に着目した地下水流れ効果の研究も幾つか挙げられるが (葛ほか, 2006; シュレスタほか, 2015)、評価が熱負荷や電気料金など個別条件に依存するため、特定地域の事例研究として示される場合が多い。

わが国では、各地に豊富な地下水が賦存し、国土の大半が山地で占められ地下水流れが速い地域も多いことから、GSHPs の設計施工では地下水流れの効果を考慮することが望まれる。本来、地下水流れの適切な評価には、特定地域の地質・水文データの詳細な分析に基づく水理地質モデルの構築と地下水・熱シミュレーション等による三次元・非定常的な推定が必要である。しかしながら、戸建て住宅への GSHPs 導入を個人や住宅メーカー等が検討する際は、既存資料から検討地点の地形の種別や地盤を構成する主な地質を判別し、地下水流れの可能性を判別する程度と予想される。一方、こうした地形・地質の簡易情報から地下水流れをオーダー範囲のダルシー流速として概略推定することも可能である (国立研究開発法人土木研究所, 2004)。こうした背景において、わが国の各地域の代表的な暖冷房負荷条件に対し、遭遇しうる様々な地下水流れをオーダー単位のダルシー流速として想定し、GSHPs 導入時の LCC 分析を行うことは、とりわけ戸建て住宅への GSHPs 導入を検討する個人や住宅メーカー等に対し有用な情報になりうると考えられる。

本研究の目的は、全国を気候で7区分した各地

域の戸建て住宅への標準的な暖冷房熱負荷データを用いて、異なるダルシー流速の条件に対し、イニシャルコストに最も影響を与える地中熱交換器長さ $L_{\min}$ とその場合の LCC を算定し、経済性に着目した GSHPs への地下水流れ効果を分析することにある。その際、もう一つの地盤条件となる有効熱伝導率については、粘性土・砂質土地盤を想定した二つの値を想定し、地下水流れ効果を比較する。また従来システムとしてのエアコンと LCC が釣り合う（ペイバックする）イニシャルコスト目標削減を導入指標として設定し、全国7地域における GSHPs の導入可能性について考察する。

2. 研究手法

2.1 比較7地域と暖冷房熱負荷データ

「エネルギー使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）が平成25年に改正され、住宅については平成27年より床面積合計300 m^2 以上の全てについて一次エネルギー消費量を算定し届け出ることが義務化された。同基準の解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所, 2013）では、消費量算定に用いる目標外皮性能を評価するための標準規模の戸建て住宅（1階にリビングと和室、台所、2階に寝室と二つの子供部屋の居住空間計84 m^2 、延べ床面積120 m^2 、

2階建て木造）が設定されている。併せて年間時刻別の暖冷房熱負荷が、全国を気候別に7区分した各地域にて断熱水準や日射遮蔽、通風、熱容量、運転パターンなど様々な条件の組み合わせによる標準データが公開されている。

本研究では、解析に用いる暖冷房熱負荷データとして、上記公開データの内、外皮性能を平成11年省エネ法改正にて設定された断熱基準、空調運転パターンを寒冷地である1,2地域が全館常時稼働（稼働パターン A）、中間地域である3,4地域は暖房期が居住空間のみ部分常時稼働（同 B）、冷房期が居住空間のみ部分間欠運転（同 C）、温暖地域である5～7地域が居住空間のみ暖房・冷房とも部分間欠運転（同 C）とした場合のデータを用いた。なお部分間欠スケジュールは部屋、暖房・冷房、平日・休日毎に設定されており（財団法人建設環境・省エネルギー機構, 2009）、例えばリビング・平日・暖房運転の場合、稼働時間は6～10, 12～14, 18～24時となる。

表1に、各地域に該当する主な都道府県、外皮平均熱貫流率 U_A 、暖房熱負荷 Q_h 、冷房熱負荷 Q_c 、暖冷房合計熱負荷 Q_{h+c} 、想定する代表都市とその平均外気温 T_0 をまとめる。なお実際の地域区分は市町村毎に設定され、その詳細は解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所, 2013）にまとめられている。特に5,6地域は同一都道府県の中で5もし

表1 比較7地域の想定住宅の解析条件（主な都道府県、想定住宅の外皮熱貫流率、暖冷房負荷及び代表都市とその平均外気温）

Table 1 Analysis configurations of the assumed residence in 7 comparison areas.

Area	Main prefectures	U_A [W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)]	Heating		Cooling		Total Q_{h+c} [GJ/y]	Example City	T_0 [°C]
			Mode*1	Q_h [GJ/y]	Mode*1	Q_c [GJ/y]			
1	Hokkaido (north area)	0.46	A	48.15	A	3.38	51.53	Kitami	7.29
2	Hokkaido (south area)	0.46	A	41.36	A	3.48	44.84	Iwamizawa	8.96
3	Aomori, Iwate, Akita	0.56	B	30.18	C	3.50	33.68	Morioka	11.68
4	Miyagi, Yamagata, Fukushima, Tochigi, Niigata, Nagano	0.75	B	32.83	C	5.59	38.42	Nagano	13.08
5	Others *2	0.87	C	13.84	C	5.32	19.16	Utsunomiya	14.76
6		0.87	C	10.57	C	12.73	23.30	Okayama	17.19
7	Miyazaki, Kagoshima	0.87	C	5.16	C	15.41	20.57	Miyazaki	18.92

*1 A: all time in entire space, B: all time in living space, C: living time in living area

*2 Ibaraki, Gunma, Saitama, Chiba, Tokyo, Kanagawa, Toyama, Ishikawa, Fukui, Yamanashi, Gifu, Shizuoka, Aichi, Mie, Shiga, Kyoto, Osaka, Hyogo, Nara, Wakayama, Tottori, Shimane, Okayama, Hiroshima, Yamaguchi, Tokushima, Kagawa, Ehime, Kochi,

くは6地域に該当する市町村が混在する。表1より、 U_A は寒冷地ほど低く断熱性能が高く設定されていることが分かる。また Q_{h+c} は各地域の気候を反映し、寒冷地である1地域で最大51.53 GJ/yであり、その大半が Q_h で占められ、暖房主体となる。 Q_{h+c} は南に向かって減少し、5地域で19.16 GJ/yと約4割まで減少する。更に南に向かうと6地域では Q_c と Q_h がほぼ釣り合い、7地域では Q_c が大半を占め、冷房主体となる。

2.2 地下水流れを考慮した地盤温度計算

本研究では、北海道大学が開発したGSHPs設計性能予測シミュレーションツール「Ground Club」を解析に用いた。Ground Clubは、わが国で初めて商用化されたGSHPsシミュレーションツールであり、現在に至るまで地中熱利用の設計実務に広く用いられている（地中熱利用促進協会, 2015）。Ground Clubの特徴として、地盤温度計算に非定常円筒理論解の近似解を導入することで実用的な計算精度と時刻別暖冷房負荷に対する高速計算を可能にした。またヒートポンプ性能などの設備条件や電気料金など個別に設定でき、実運転に近い条件での性能予測やライフサイクルコスト計算も可能である。Ground Clubの計算手法及び地下水流れ対応への拡張に関する理論的詳細は文献（長野・葛, 2005; Nagano et al., 2006; 葛ほか, 2006）を参照するとし、ここでは概要を述べる。

Ground Clubでは、地中熱交換器表面を一定熱流となる円筒熱源とみなし、非定常熱移動の理論解と無次元時間・温度領域で近似的に一致するモデルを用い地中熱交換器周縁の無次元温度変化 ΔT_s^* を時刻別温度応答の重ね合わせとして計算する。ここで地下水流れがある場合、各無次元時間の温度応答に移動線熱源理論から予め計算した係数 C_c を乗じて補正する（葛ほか, 2006）。

$$\Delta T_s^*(t^*) = \sum_{\tau^*=0}^t q^*(t^* - \tau^*) \frac{\partial (T_s^*(\tau^*) \times C_c(U, \tau^*))}{\partial \tau^*} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{T_{sw}^*(t^*)}{T_s^*(t^*)} \quad (U > 0) \quad (2)$$

ここで、 ΔT_s^* は無次元化した温度変化（ $=2\pi\lambda T_s/q^*$ ）、 ΔT_s は地盤温度 T_s の温度変化（℃）、 λ は地盤の有効熱伝導率（W/(m・K)）、 t^* はフーリエ数（ $=at/r^2$ 、 a は温度拡散率（m/s²）、 t は時間（s）、 r は半径（m）で円筒管表面で無次元化（ $=1$ ）する）、 q^* は円筒表面の熱流束（W/m²）、 q' は円筒単位長さ当たりでの熱流束（W/m）、 C_c は地下水流れを考慮する場合の無次元温度 T_{sw}^* と考慮しない場合の無次元温度 T_s^* の比（補正係数）で無次元流速 $U^* (=Ur/a)$ と流向 ϕ (°)で決まる。 U はダルシー流速（m/s）である。

Ground Clubでは地盤温度計算の後、地中熱交換器内部の熱媒体平均温度 T_b を熱収支式に基づき計算する。熱媒体から地中熱交換器表面までの熱貫流率は、理論式と境界要素法を併用し求める。時刻毎の T_b と熱負荷からヒートポンプの消費電力 E_{HP} をヒートポンプの特性から計算し、その年間合計で Q_{h+c} を除すことでGSHPsの期間平均成績係数 COP_G を得る。なお本研究では、ヒートポンプは市販10 kW級とし、特性式は阪田ほか（2017）と同一とした。

計算で想定した地中熱交換器は、ボアホール埋設（掘削径120 mm）のクローズド型とし、Uチューブを呼び径25Aシングル、充填材は珪砂（有効熱伝導率1.5 W/(m・K)）、熱媒体はエチレングリコール系不凍液（濃度35%、凍結温度-15℃）を想定した。地中熱交換器長さは20～150 mまで10 m刻みで設定し、LCCを最小化する長さ L_{min} を決定した。その他計算に用いる地盤条件の内、湿潤密度は1700 kg/m³、比熱は2.2 MJ/(kg・K)で一定と仮定し、地盤初期温度 T_{s0} は深度 Z の線形式にて計算した（新井, 2004）。

$$T_{s0} = T_0 + \Delta T_0 + A(Z - Z_0) \quad (3)$$

ここで T_0 は各地域の年平均気温（表1）、 ΔT_0 は恒温層における地盤温度と T_{s0} の温度差（℃）、 A は地盤温度の深度勾配（℃/m）、 Z は計算対象深度（m）であり、地中熱交換器埋設の中間深度（ $L/2$ ）とする。 Z_0 は恒温層深度である。本研究では、新井（2004）から $A=0.03^\circ\text{C}/\text{m}$ 、長野（2007）から $\Delta T_0=1.5^\circ\text{C}$ 、 $Z_0=10\text{ m}$ とそれぞれ仮定した。

本研究では、計算に用いるダルシー流速 U は

各地域で様々な値が起こりうることを想定し、オーダー変化するように設定した。GSHPsに地下水流れの効果が現れるのは $U > 10$ m/y以上とされるため(濱田ほか, 1998; 葛ほか, 2015), 地下水流れのある条件を $U = 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000$ m/yとし、地下水流れない(十分遅い)条件($U = 1$ m/y)を加えた計8ケースとした。これらの条件は、透水性が低いシルトでは動水勾配の大きい山地、礫層では動水勾配が小さい平地でも生じうる範囲である(国立研究開発法人土木研究所, 2004)。地盤の有効熱伝導率 λ は、粘性土主体の地盤に対応する $\lambda_1 = 1.0$ W/(m·K)と砂質土主体の地盤に対応する $\lambda_2 = 2.0$ W/(m·K)の2ケースを想定した。なお礫質土主体や岩盤主体になれば λ が2を超える場合も実際には予想されるが、先行研究(阪田ほか, 2017)では λ が2を超えると戸建て住宅程度の熱負荷と想定するヒートポンプの特性に対して COP_G はほぼ一定になり λ に依存しなくなったことから、本研究でも同様と想定し、 λ_1 と λ_2 のみを比較対象とした。

2.3 ライフサイクルコストに基づく地中熱交換器長さの算定

本研究では、地中熱交換器長さを各地域の暖冷房熱負荷データと地盤条件(λ と U の組み合わせ)に対して最小のLCCが得られる長さ $L_{\min}$ として算定する。GSHPsのLCCは本来、イニシャルコスト(Initial Cost: IC)、オペレーションコスト(Operation Cost: OC)、メンテナンスコスト(Maintenance Cost: MC)、リノベーションコスト(Renovation Cost: RC)、廃棄コスト(Disposal Cost: DC)の和となる(長野, 2007)。本研究ではLCCの検討年数 t_0 をヒートポンプの耐久寿命とされる20年($t_0 = 20$ y)とし、RC、DCをLCCの分析対象から除外し、更に戸建て住宅ではMCはゼロと仮定した。この場合のGSHPsのLCCである LCC_G は下式で計算される。

$$LCC_G = IC_G + \sum_{t_y=1}^{t_0} OC_G (1 - IR)^{t_y} \quad (4)$$

$$IC_G = IC_0 + N \times L \times IC_1 \quad (5)$$

$$OC_G = \sum_{t_m=1}^{12} EC_1(t_m) + \sum_{t_h=1}^{8640} EC_2(t_h) E_{HP}(t_h) \quad (6)$$

ここで、 IC_G はGSHPsのIC、 OC_G はGSHPsのOC、 IR は金利(わが国のインフレ目標3%と仮定)、 IC_0 は地中熱施工費以外のIC(円)、 N は地中熱交換器本数(戸建て住宅として $N = 1$ と仮定)、 L は地中熱交換器長さ(m)、 IC_1 は地中熱交換器の深度当たり施工費(円/m)、 EC_1 、 EC_2 は電気料金の月単価(基本料金、円/月)及び時刻単価(円/kWh、月毎に使用した累積電力量毎に設定)、 E_{HP} はヒートポンプ及び循環ポンプ(一次側、二次側各0.01 kWと仮定)を合わせた消費電力(kWh)、 t_y 、 t_m 、 t_h は時間(年、月、時)である。(6)式中の8640は1年間の累積時間である。 IC_0 及び IC_1 は施工実績(地中熱利用促進協会, 2010)を参考に、 $IC_0 = 2.76$ 百万円、 $IC_1 = 1$ 万円と設定した。表2に、解析に用いた各地域の EC_1 、 EC_2 を示す。本研究では2017年度の各地域の電力会社の従来電灯B契約(40 kVA)を設定した。累積使用電力量0～120 kWhでの EC_2 は、最も高い1地域で23.5円/kWh、最も低い7地域で17.2円/kWhと約4割の差がある。

本研究では、通年での時刻別暖冷房負荷の計算を3年間繰り返す、計算温度が安定する稼働3年目の結果から LCC_G を計算した。この計算を $L = 20 \sim 150$ mの範囲で10m刻みにて繰り返し行い、それらの LCC_G を内挿補間し最小値を推定し、その際の地中熱交換器長さ $L_{\min}$ を算定した。また制約条件として、時刻別 T_b の24時間平均 $T_{b,MA}$ が熱媒体の凍結温度 $T_f (= -15^\circ\text{C})$ を常に下回らないこととした。

表2 LCC計算に用いる比較7地域の電気料金(円): 月基本料, 時刻別料金, カテゴリーは毎月の累積使用量が0～120 kWh, 120～300 kWh (Area1, 2のみ120～280 kWh), 300kWh以上 (Area1, 2のみ280 kWh以上)の場合

Table 2 Basic rates and monthly amount rates unit prices of electricity consumptions in 7 comparison areas for the LCC calculation.

Area	1, 2	3	4	5	6	7
EC_1	1339.2	1296.0	1123.2	1123.2	1598.4	1166.4
EC_2 Category	1	23.5	18.2	19.5	20.7	17.8
	2	29.7	24.9	26.0	25.1	23.7
	3	33.4	28.8	30.0	28.0	25.6

2.4 従来システムとのコスト比較による導入指標

本研究では、GSHPs 導入判断の経済的目安として、同じ t_{y0} 年に対する既存システムの LCC (LCC_A) と比較し、 LCC_G が LCC_A と一致する（ペイバックできる）ためのイニシャルコスト IC_G の目標削減率（target Reduction ratio for Cost Agreements; $tRCA$ ）を設定する。

$$tRCA = \frac{LCC_G - LCC_A - SC}{IC_G} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 SC は GSHPs の導入補助金(円)であり、「平成29年度住宅・ビルの革新的省エネルギー技術導入促進事業」(経済産業省, 2017) で定める $SC=0.75$ 百万円とした。 $tRCA=0$ の場合、 LCC_G と LCC_A が SC を前提として釣り合い、 t_{y0} がペイバックタイムとなる。 $tRCA<0$ の場合、 t_{y0} より短い期間でペイバックできる可能性を示し、負の値が大きいほど GSHPs が従来システム（ここではエアコン）に対し経済的に有利となる。一方、 $tRCA>0$ の場合には、想定期間 t_{y0} 以内に GSHPs がペイバックすることが難しいため、 IC_G の削減か SC の増額が必要となる。

本研究では、比較する従来システムとしてエアコンを想定し、そのイニシャルコスト IC_A を (8) 式により計算した。

$$IC_A = (aP_A + b) N_A + IC_{0A} \quad (8)$$

ここで、 P_A はエアコン定格出力 (kW)、 N_A は設置台数、 IC_{0A} は設置工事費 (円) である。 a 、 b は係数であり、ここでは赤林ほか (2014) の値を用いた (表3)。 $P_A=4$ kW、 $N_A=4$ 、 $IC_{0A}=10$ 万円とする場合、 IC_A は冷房時 ($a=23942$ 、 $b=38286$) に $IC_A=63.6$ 万円が最大となる。またエアコンのオペレーションコストは消費電力に伴う電気代のみとし、(6) 式で計算する。その際、時刻毎のエアコンの消費電力は暖房、冷房、低温暖房 (外気温 2°C 以下) での成績係数 COP_A を (9) 式から推定し同時刻の熱負荷を除して計算した。

$$COP_A = (cP_A + d) R \quad (9)$$

ここで、係数 c 、 d は赤林ほか (2014) の値、 R は定格 COP と実 COP との比として赤間ほか (2007) の実測データ平均とし、表3にまとめた。 $P_A=4$ kW を想定する場合、(9) 式から COP_A は冷房時5.56、暖房時3.06、低温暖房時1.93と計算される。時刻別の消費電力を計算した後、エアコンのオペレーションコスト OC_A を (6) 式と同様に計算し、 IC_A と足して LCC_A とした。

3. 結果と考察

3.1 GSHPs シミュレーション計算例

図1に、GSHPs シミュレーション計算例として、比較7地域の内、3地域における時刻別暖冷房熱荷データと二つの異なるダルシー流速 $U=1$ 、 100 m/y での熱媒体温度 T_b 及び24時間平均 T_{b-MA} を示した。この場合の計算条件は $L=60$ m、 $\lambda=\lambda_1$ (1.0 W/(m·K)) とした。暖冷房熱負荷 (図1上) は、3地域では10～6月まで GSHPs は暖房利用で居室空間のみ常時運転 (ピーク負荷5.96 kWh)、それ以外の期間は冷房利用で居室空間のみの間欠運転 (同5.87 kWh) の場合である。この暖冷房負荷に対し、 T_b (図1下) は時刻別の暖冷房負荷を反映し細かく振幅するが、 T_{b-MA} の変化は暖房期間には低下、冷房期間には上昇する傾向が緩やかに認められる。地下水流れが遅い場合 ($U=1$ m/y) には T_{b-MA} は冬季に一時的 (ここでは1月6日と2月19日) に熱媒体凍結温度 ($T_f=-15^\circ\text{C}$) を下回る。このため、 $U=1$ m/y かつ $\lambda=\lambda_1$ の場合には $L_{\min}$ は60 m より長くする必要がある。なお、この場合の $L_{\min}$ は次節より69 m となる。 $U=100$ m/y の場合、 T_{b-MA} は T_f を下回ることなく年間を通じて安定し、暖房利用時も概

表3 エアコンの本体価格及び成績係数の計算に用いる係数

Table 3 Coefficients for calculation of commercial prices and COP_A of household room air conditioners.

Conditions	a	b	c	d	R
Cooling	23942	38286	-0.4137	5.168	1.583
Heating (High T_0)	19602	40070	-0.2481	5.484	0.682
Heating (Low T_0)	23153	8703	-0.1021	3.242	0.682

ね0℃を上回る。特に暖冷房熱負荷が小さい6月と9月では、 T_b は地盤初期温度13.18℃((3)式に盛岡市の年平均外気温 T_0 (11.68℃)+温度差 ΔT_0 (1.5℃))付近で安定する。この結果、 $U=100$ m/yの場合の L_{min} は $\lambda=\lambda_1$ の場合で45 mとなり、先の $U=1$ m/yでの L_{min} (=69 m)に比べ、24 m短くなる。

3.2 地中熱交換器規模とライフサイクルコストの算定例

図2に、図1と同じ3地域における U の違いによる COP_G 、 LCC_G 、 LCC_A 、 $tRCA$ の計算結果を $\lambda=\lambda_1$ 、 λ_2 の場合に分けて示す。 L_{min} は、 λ がいずれの場合も $U=10\sim 200$ m/yの範囲で U のオーダー変化に対し減少し、地下水流れによる削減効果が認められる。削減量は10 m/yと200 m/yでの比較で $\lambda=\lambda_1$ の場合に26 m (39%)、 $\lambda=\lambda_2$ の場合に8 m (17%)であった。一方、 $U=200$ m/y以上の場合、 L_{min} の削減は1 m未満に留まり、地下水流

れ効果が収束することが示される。また $U=200$ m/y以上では、 $\lambda=\lambda_1$ 、 λ_2 の L_{min} は一致し、有効熱伝導率の違いは L_{min} の算定に無視されるようになる。また $U=1$ m/yと10 m/yの比較では L_{min} が数mの変化に留まり、10 m/y以下と地下水流れが遅い場合も効果が期待できないことが分かる。 COP_G も U の増加に伴い値が向上するが、 L_{min} と同様、 $U=200$ m/y以上にて収束する。ただし $U=1$ 、1000 m/yを比較した増加は $\lambda=\lambda_1$ で0.12、 $\lambda=\lambda_2$ で0.09に留まり、 COP_G への地下水流れ効果は L_{min} に比べ顕著ではない。

LCC_G も $U=10\sim 200$ m/yの範囲にて地下水流れによる削減効果が認められる。その削減額は $U=1$ m/yと $U=200$ m/yでの差として、 $\lambda=\lambda_1$ の場合で0.36百万円(約10%)、 $\lambda=\lambda_2$ の場合で0.14百万円(約4%)となった。この削減割合は L_{min} に比べ小さいが、これは COP_G が U の増加に対してあまり向上せず、 OC_G の削減が進まないためである。また $U=200$ m/y以上では $LCC_G=3.20$ 百万円一定となり、地下水流れによる削減効果が収束する結果となった。 LCC_G が一定となった $U=200$ m/yにおける LCC_G と LCC_A (=2.34百万円)の差額は0.77百万円であり、補助金 SC (=0.75百万円)にはほぼ一致し、 $tRCA$ も0.63%とほぼゼロの値となった。このことから3地域(盛岡市)では地下水流れが十分速ければ($U=200$ m/y以上あれば)、GSHPsは想定年($t_{y0}=20$ y)でのペイバックが可能と予想される。また U が小さくなる程 $tRCA$ は増加し、ペイバックにはイニシャルコストの削減か補助金の増額が求められるが、概ね10%以下に収まっており、この程度のイニシャルコスト縮減は現実的に可能と考えられる。

3.3 算定結果の地域比較

表4に、比較7地域における L_{min} 、 LCC_G 、 $tRCA$ を代表値となる $U=1$ 、10、100、1000 m/yにて算定し、 $\lambda=\lambda_1$ 、 λ_2 の場合で取りまとめた。それらの結果を図3にプロットして示す。なお COP_G は図2と同様、他の地域も U の変化に対し安定するため、ここでは割愛した。表4及び図3から L_{min} が同一地域での地盤条件(U と λ)よりも地域間(暖冷房熱負荷)で大きく異なることが分かる。また同じ Q_{h+c} でも Q_h と Q_c の割合で異なる。これは

図1 3地域(盛岡市)における暖冷房負荷データ(上图)と異なるダルシー流速($U=1$ 、100 m/y)で計算した熱媒体温度(下图、 T_b :時刻別熱媒体温度、 T_{b-MA} :24時間平均熱媒体温度、 T_i :熱媒体凍結温度)

Fig. 1 Hourly heating/cooling loads (upper) and simulated fluid temperatures (lower) as an example at Morioka City in Area 3.

冷房利用時には GSHPs の消費電力に伴う熱量を地盤に放出するためである。例えば, 5, 7 地域を比較する場合, Q_{h+c} は 20 GJ/y 付近ではほぼ同じだが, 同一の λ , U の条件でも $L_{\min}$ は両地域で異なる結果となる。

同一地域では, $L_{\min}$ は U や λ が大きくなると短くなるが, その削減効果は暖冷房熱負荷の条件によって異なる。例えば, Q_{h+c} が最も大きく大半

図2 3地域(盛岡市)におけるGSHPsシミュレーション結果:必要地中熱交換器長さ, 期間平均成績係数, ライフサイクルコスト及びイニシャルコスト目標削減率

Fig. 2 GSHPs simulation results under different Darcy velocities in Morioka City, Area 3.

が Q_h である1地域の場合、 $\lambda = \lambda_1$ の場合の $L_{\min}$ は $U=1$ m/y の時に146 m、 $U=1000$ m/y の時に63 m となり、地下水流効果によって83 m (57%)、 $L_{\min}$ を削減できる。一方、 Q_{h+c} が最小の5地域では $U=1$ m/y と1000 m/y の場合の $L_{\min}$ の差は $\lambda = \lambda_1$ にて25 m (52%) と削減割合は1地域と同様だが、削減量が大きく減少する。また λ の違いによる差は、いずれの地域も $U=1, 10$ m/y の場合に10 m 以上認められるが、 $U=100, 1000$ m/y では10 m 程度かそれ以下に留まる。

LCC_G も、 U が大きくなるほど $L_{\min}$ が短くなるとともに COP_G も向上することで安くなる。 $U=1, 1000$ m/y の場合の LCC_G の差額を比較する場合、 $\lambda = \lambda_1$ で0.64百万円 (5地域) ～0.87百万円 (1地域)、 $\lambda = \lambda_2$ で0.33百万円 (5地域) ～0.48百万円 (1地域) であった。また LCC_G は地域 (暖冷房負荷) や電気料金単価の違いも反映する。例えば、 Q_{h+c} が大きい1地域と小さい5地域の LCC_G の差は $U=1$ m/y と $\lambda = \lambda_1$ の場合で、1.43百万円となり、同一地域での U や λ の違い以上に差が大きい。また Q_{h+c} が同程度の6, 7地域でも、電気料金単価がより安い7地域の方が全般に LCC_G が安くなる結果となった。

GSHPs の導入指標とする $tRCA$ は、寒冷地で

図3 比較7地域において算定した必要地中熱交換器長さ、ライフサイクルコスト、イニシャルコスト目標削減率プロット (■: $\lambda = \lambda_1$, ●: $\lambda = \lambda_2$, 上から $U = 1, 10, 100, 1000$ m/y)

Fig. 3 Plots of estimated borehole heat exchanger lengths, life cycle costs and target reduction ratios of the initial cost in 7 comparison areas.

表4 比較7地域において算定した想定住宅における地中熱交換器長さ、ライフサイクルコスト及びイニシャルコスト目標削減率

Table 4 A result summary of estimated borehole heat exchanger lengths, life cycle costs and target reduction ratios of the initial cost for the assumed residence in seven comparison areas.

Area	λ [W/(m ² ·K)]	LCC_A [M yen]	$L_{\min}$ [m]				LCC_G [M yen]				$tRCA$ [%]			
			$U=1$	10	100	1000	$U=1$	10	100	1000	$U=1$	10	100	1000
1	1.0	3.90	146	137	93	63	4.96	4.86	4.40	4.09	7.35	5.08	-6.78	-16.5
	2.0		105	102	80	60	4.54	4.51	4.27	4.06	-2.89	-3.70	-10.67	-17.6
2	1.0	3.59	110	105	74	49	4.48	4.42	4.08	3.82	3.63	2.10	-7.43	-16.0
	2.0		80	78	64	47	4.17	4.14	3.98	3.80	-4.78	-5.65	-10.59	-16.7
3	1.0	2.43	69	66	45	40	3.56	3.50	3.29	3.20	11.0	9.47	3.43	0.64
	2.0		49	48	41	40	3.36	3.35	3.25	3.20	5.54	5.25	2.21	0.63
4	1.0	2.64	84	80	55	37	3.90	3.83	3.55	3.37	14.2	12.4	4.83	-0.64
	2.0		60	59	47	35	3.65	3.64	3.51	3.36	7.74	7.46	3.72	-0.96
5	1.0	1.96	48	40	27	23	3.53	3.33	3.08	2.89	25.3	19.6	12.2	6.02
	2.0		36	30	26	23	3.22	3.12	3.08	2.89	16.3	13.4	12.3	6.02
6	1.0	1.87	67	60	44	30	3.70	3.56	3.20	3.09	31.5	28.0	18.1	15.4
	2.0		52	50	36	28	3.40	3.39	3.18	3.00	23.8	23.6	17.9	12.5
7	1.0	1.47	69	69	46	27	3.55	3.47	3.16	2.96	38.6	36.2	29.2	24.4
	2.0		44	40	36	27	3.18	3.12	3.08	2.95	30.0	28.5	27.6	24.1

ある1, 2地域において小さく、3～7地域と南に向かって大きくなる傾向がある。特に1, 2地域では、 $\lambda=\lambda_2$ の場合には U の値に依らず $tRCA$ は常に負値となり、地下水流れを考慮しなくてもGSHPsがペイバックできる結果となった。また $\lambda=\lambda_1$ の場合でも地下水流れが $U=100$ m/y以上と速い場合には $tRCA$ は負値となり、やはりペイバックできる結果となった。最も地盤条件が不利な $U=1$ m/yかつ $\lambda=\lambda_1$ の場合でも $tRCA$ は10%以下であり、この程度のコスト削減は現実的に可能と予想される。

一方、冷房負荷 Q_c が相対的に大きい5～7地域は、エアコンの冷房時の COP_A を5.05と COP_G (4.0～4.4程度)より高く想定したため、冷房負荷が大きいほど LCC_A と LCC_G の差額が大きくなり、 $tRCA$ が増加する。この結果、 $tRCA$ は最も地盤条件が有利な $U=1000$ m/yかつ $\lambda=\lambda_2$ の場合でも10%以上、最も不利な $U=1$ m/yかつ $\lambda=\lambda_1$ の場合にあっては30%以上となる。このため、冷房負荷の大きい温暖地域の戸建て住宅へのGSHPs導入を促すには一層のイニシャルコスト削減が必要であり、現在進行する様々な技術開発(例えば、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(2017)など)や市場発展によるGSHPsの低コスト化が期待される。

中間の3, 4地域は、3地域での地下水流れが速い条件($U=1000$ m/y)を除き、 $tRCA$ は正の値となるため、GSHPs導入促進には相応のイニシャルコスト削減が必要となる。ただし $U=100$ m/y以上の場合には λ に関わらず $tRCA$ は5%以下であり、この程度のコスト削減は現実的に可能と考えられるほか、地下水流れが遅い場合($U=1$ m/y)でも $tRCA$ は概ね10%前後であり、前述のような技術開発が今後進めば、十分ペイバックできるようになると期待できる。

以上から、地下水流れを想定することで戸建て住宅のGSHPsの $L_{\min}$ や LCC_G を削減できる効果が期待できることが改めて示された。特にGSHPs導入が進む寒冷な1, 2地域に加え、より温暖な3, 4地域においても地下水流れが $U=100$ m/y以上と速い場合には、その効果を考慮することで現状でもGSHPsがペイバックできる可能性が示されたことから、同地域への普及拡大が期待され

る。また本研究では、イニシャルコストを30%程度削減できれば、わが国の大半の地域でGSHPsのペイバックできる見込みが示されたことから、今後、こうしたコスト削減に向けた技術の開発が期待される。このように本研究成果は、導入時のコスト削減の目安としてGSHPs導入を検討する個人や住宅メーカー等の参考になるほか、今後の技術開発における目標値になりうると考える。一方、GSHPsの性能やLCCは評価地点の建物、地盤、設備の組み合わせに依存するため、実際に導入を検討する際は、本成果で示したと同じ地域に該当しても実性能やLCCは実際には異なることを前提に個別検討が必要である。

本研究の次の課題としては、戸建て住宅のみならず、オフィスビルなど様々な建物を対象にするとともに、有効熱伝導率や地下水流れ(ダルシー流速)の分布を全国データベース化し、暖冷房負荷計算と併せて、地点毎に評価を行うことである。また異なる地中熱ヒートポンプ性能に対する感度分析や灯油・ガス暖房を組み合わせた従来システムの想定も必要であり、今後の研究課題としたい。

4. まとめ

本研究では、戸建て住宅への地中熱ヒートポンプ暖冷房システム(GSHPs)導入を想定し、全国7地域における標準的な暖冷房負荷データを用いたシミュレーションにより、20年間ライフサイクルコストを最小とする地中熱交換器の必要長さと、その場合のライフサイクルコストを算定した。また地下水流れ(ダルシー流速)を1～1000 m/yの範囲で想定した場合の算定結果を示すとともに、従来システム(ルームエアコン)との比較による経済的な導入指標として、イニシャルコストの目標削減率を計算し、地下水流れの効果によるGSHPs導入可能性を分析した。以下に研究結果をまとめる。

- 1) 比較7地域の内、3地域において算定した必要地中熱交換器長さ及びライフサイクルコストは、ダルシー流速が10～200 m/yの範囲で地下水流れによる削減効果が認められた。削減長さは、ダルシー流速の対数変化に相関

し、200 m/y 以上では削減効果は収束する結果となった。また削減効果は、地盤の有効熱伝導率が小さい場合により大きくなるが、ダルシー流速が200 m/y を超える場合には有効熱伝導率による結果の差はほとんどなかった。

- 2) 必要地中熱交換器長さやライフサイクルコストの算定結果は、地盤条件（ダルシー流速や有効熱伝導率）とともに、想定する暖冷房熱負荷に依存し、地域間で異なる結果を示した。この内、地下水流れ効果は、想定する暖冷房熱負荷が大きい寒冷な1,2地域にて顕著であり、冷房熱負荷が大きい温暖な5～7地域では必要地中熱交換器長さやライフサイクルコストが比較的大きくなった。
- 3) イニシャルコスト目標削減率は、寒冷な1,2地域ではダルシー流速が100 m/y 以上の場合や地盤の有効熱伝導率が高い場合に負値となり、GSHPs のペイバックが可能なことを示した。一方、冷房需要が大きい温暖な5～7地域では、目標削減率は全体に10～30%以上と高く、GSHPs の導入促進には一層のコスト削減もしくは他の対策（例えば冷房熱負荷の軽減等）が必要となる。また中間の3,4地域では LCC_G が比較的少なく、地下水流れがダルシー流速で100 m/y 以上と速い場合には目標削減率は5%以下となることから、GSHPs 導入は現実的に可能であり、今後のGSHPs 普及促進が期待される。

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。一般社団法人地中熱利用促進協会には、ライフサイクルコスト計算に用いる貴重な資料を提供頂いた。共同研究事業者であるジーエムラボ株式会社及び当研究室の橋本準樹君ほか大学院生にはシステム構築に支援を頂いた。匿名の査読者2名には有益なコメントを頂き、本論文が修正された。ここに記し謝辞とします。

参考文献

- 赤林伸一・坂口 淳・大嶋拓也・市川裕幸・有波裕貴 (2014)：住宅用エアコンのCOPの現状とAPFの地域特性. 日本建築学会技術報告集, 20 (44), 187-190.
- 赤間英樹・赤林伸一・坂口 淳 (2007)：家庭用エアコンの実使用時における成績係数に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, 613, 35-40.
- 新井 正 (2004)：地域分析のための熱・水収支水文学. 古今書院, 144-145.
- 内田洋平・奥田 佑・藤井 光・宮本重信・吉岡真弓 (2010)：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, 32 (4), 229-239.
- 葛 隆生・長野克則・武田清香・中村 靖 (2006)：地下水流れを有する地中温度の計算手法とその応用. 空気調和・衛生工学会論文集, 115 (9), 9-18.
- 葛 隆生 (2009)：地中熱利用システム設計・性能予測ツールの開発とその応用に関する研究. 北海道大学博士学位論文, 242-256.
- 葛 隆生・長野克則・中村 靖 (2015)：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, 32 (3), 335-344.
- 環境省 (2017)：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>. (2018. 3. 31閲覧)
- 経済産業省 (2017)：平成29年度住宅・ビルの革新的省エネルギー技術導入促進事業. http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeh/170313a/. (2017. 8. 25閲覧)
- 国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所 (2013)：平成25年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅. 1042p.
- 国立研究開発法人建築研究所 (2016)：第三章暖冷房負荷と外皮性能, 平成28年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報 (住宅). <http://www.kenken.go.jp/becc/house.html>. (2017. 5. 10閲覧)
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2017)：再生可能エネルギー熱利用技術開発の取り組み. 平成29年度 NEOD 新エネルギー

- 成果報告会熱利用分野予稿集, 107.
- 国立研究開発法人土木研究所 (2004): 建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル, 43-46.
- 財団法人建設環境・省エネルギー機構 (2009): 第3章 暖冷房熱負荷計算, 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説, 35-64.
- 阪田義隆・葛 隆生・長野克則 (2017): 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, 土木学会論文集 G (環境), 73 (5), 189-98.
- シェレスタガウラブ・内田洋平・吉岡真弓・藤井 光・井岡聖一郎 (2015): 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, 37 (4), 133-141.
- 地中熱利用促進協会 (2010): III 熱効率実証調査, H22 群馬県緑の分権改革事業推進事業報告書, 1-8.
- 地中熱利用促進協会 (2015): 地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル, 33-35.
- 長野克則・葛 隆生 (2005): 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 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, 101, 11-20.
- 長野克則 (2007): 1章地中熱利用について, 6章地中熱ヒートポンプシステムの評価と将来展望, 地中熱ヒートポンプシステム (北海道大学地中熱利用システム工学講座編), オーム社, 11-12, 110-116.
- 新堀雄一・岩田宜己・森不可止・深谷法三郎 (2002): 坑井を用いた地中熱利用 HP の設計と地下水流動との関係についての一考察, 日本地熱学会誌, 24 (2), 339-348.
- 濱田靖弘・落藤 登・長野克則・中村真人・横山真太郎・永坂茂之 (1998): 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, 53-62.
- 吉岡真弓・内田洋平 (2013): 地中熱ポテンシャル評価のための水理地質情報の利用, 情報地質, 24 (2), 35-42.
- Nagano, K., Katsura, T. and Takeda, S. (2006): Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, 26 (14-15), 1578-1592.

(受付: 2017年12月2日, 受理: 2018年6月27日)