

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：13301
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2021
課題番号：19K15485
研究課題名(和文)都市地下環境の数値再現に基づく地中熱利用ポテンシャルデータベースの構築と汎用化

研究課題名(英文) Database construction and generalization for potential utility of shallow geothermal energy through numerical modeling of underground environments in urbanized areas

研究代表者
阪田 義隆 (Sakata, Yoshitaka)
金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：10754236
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、札幌扇状地をモデル化し1921～2020年の100年間に至る地下水温度分布の計算した結果、河川からの地下水涵養による冷水塊が市街地の井戸揚水によって下流へ誘導されることを示すことで、自然的要因と人為的要因が気候変動の影響を受けながら複合して地下温度場を形成する実態を明らかにした。

また全国62流域の地下水流動シミュレーションに基づく地盤情報データベース化から、全国500mグリッドでの必要地中熱交換器長さとして、地下水が豊富なわが国の地中熱利用ポテンシャルを明らかにした。更にガウス過程回帰モデリングを適用することで任意の位置の必要長さを簡易推定する汎用化手法の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

わが国には豊富な地下水資源があり、特に地形勾配の大きい地域も多い。また都市部では井戸揚水が積極的に行われ、それに伴う地下水流れも活発である。こうした自然的・人為的地下水流れの双方が複合するとともに気候変動の長期的な影響を合わせ、都市部の地下温度分布が形成されることを示すことができた点に学術的価値がある。

また豊富な地下水流れに着目することで地中熱システムのコストの主要因である地中熱交換器長さをデータベース化するとともに、回帰モデルによる簡易評価手法を開発した。これにより従来よりリーズナブルな地中熱設計が可能となり今後、再生可能エネルギーである地中熱利用の更なる普及に繋がることが期待される。

研究成果の概要(英文)：This study calculated spatial-temporal distributions of ground temperatures in an alluvial fan, Sapporo, Japan, during a one-century duration, 1921-2020, indicating that the low-temperature plume of groundwater moves from a losing section of a river in the alluvial fan downward to the center of the city due to extensive extractions of groundwater. The numerical study realized that the ground temperatures were affected by natural and artificial impacts in the long term.

This study also estimated the required lengths of a borehole heat exchanger in residence on a regular 500-m grid across the land of Japan, considering groundwater flow effects.

Finally, this study developed the regression models based on Gaussian processes as an efficient method to estimate the required length of the borehole heat exchangers at any location. This approach without computational costs is applicable in practice for the design and planning of ground-source heat pump systems.

研究分野：地盤環境エネルギー工学

キーワード：地中熱 地下水 地中温度 井戸揚水 気候変動 ヒートポンプ 回帰モデリング 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

自然再生可能エネルギーの内、地中熱は深度 100 m 付近までに賦存する熱源であり、ヒートポンプを介して冷暖房や給湯、融雪に使用される。地中熱は安定した熱源ゆえ、ヒートポンプの高効率運転が可能であり、省エネ効果が期待できる。特に地中熱はどこにでも賦存するエネルギーのため、欧州並みの普及率で全国に導入が拡大すれば、大きな環境貢献効果が期待できると試算されている（阪田ほか、2018）。一方、わが国は地質が複雑なため、地域によって地中熱利用の適正（ポテンシャル）が異なる。特に地中熱需要のある都市の大半は、未固結土が厚い堆積平野に位置し、土砂主体の地盤の有効熱伝導率は平均 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 前後に留まり、岩盤が浅い欧米での平均 ($3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 前後) の半分程度に過ぎない。このため、都市部で熱伝導効果のみで地中熱を無尽蔵に利用するには限界がある。

一方、わが国には地下に豊富な地下水が賦存することが注目される。地中熱交換器周辺で活発に地下水が流れる地域は、移流効果によって採放熱量の向上が期待でき、地中熱利用ポテンシャルが高い地域である。ただし地中熱交換器周辺に移流効果が現れるのは地下水流速 $101 \sim 102 \text{ m/y}$ 以上の場合に限られる（葛ほか、2015）。このため、自然動水勾配が概して小さい平野に位置する都市部では地下水による移流効果は期待できないと考えられてきた。また、平地に発達する都市では井戸が多数設置され、日常的に大量の揚水が行われている。こうした人為的な地下水流れがある場に、地中熱交換器の性能向上が期待できることが近年、報告されている（Sakata et al., 2017; Fujii, 2018）。しかし、こうした人為的な地下水流れがどの程度の範囲、程度で各都市の地中熱利用に効果を与えるか定量的に分析した研究はない。

更に都市では地中熱を利用する建物や施設の規模や種類が多様であり、地中熱に求める効果も省エネによる経済効果から CO_2 排出量削減等の環境効果など様々である。また期待する目標値も異なる。これまで様々な自治体や研究機関が地中熱利用ポテンシャルをマップとして示してきたが、それぞれ異なる手法、評価基準で作成され、統一されていない現状にある（NEDO, 2017）。わが国の複雑な地質・地下水条件下において、任意地点において様々な評価基準・目標値に対応した汎用性のある地中熱利用ポテンシャル評価が求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地中熱利用が見込まれる都市部にて自然・人為双方の地下水流れを含めた地下環境を数値再現し、開発した地中熱利用評価システムに組み込むことで、地中熱利用ポテンシャルを明らかにすることである。ここで地中熱利用評価ポテンシャルを「地中熱の持続的に利用でき、目標性能条件を満たす可能性」として定義し、全国各地で条件を達成するために必要な地中熱交換器規模（必要長さ）を示すことでポテンシャル評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 都市地下環境の数値再現

地下水流動が活発かつ都市が発達する代表地として、豊富な地下水を有する扇状地に立地し、人口約 200 万人を抱える札幌市を選定し、都市が発達する 100 年間における気候変動も加味した地下熱環境の数値再現を試みた。

まず、気候変動下での地中温度変化を再現するため、地表から地下水面に至る熱フラックスを計算し、地下水面付近での地下温度の推移を推定した。本研究では、解析領域を土地利用の違いから 12 のブロックに分け、それぞれにおいて地下水を供給する境界条件として、地表面に蒸発散、表面流出を簡易水収支に基づく涵養量を与えた。その際、積雪・融雪判定は、既往研究の成果（阪田ほか、2017）を用いた。この地下水面への涵養量を条件として、一次元不飽和水分・熱輸送数値計算により札幌が都市として発達する前の 1921 年から現在 2020 年までの 100 年間に至る地下水面での温度分布を推定した。なお解析コードには Dtransu（岡山大学、三菱マテリアル、ダイヤコンサルタント）を用いた。

次いで、三次元地下水・熱輸送シミュレーションを行った。札幌扇状地を囲む 10km スケールでの既往モデル（Koikzumi et al., 2018）から新たに水理地質基盤までの地質時代ごとに 5 層

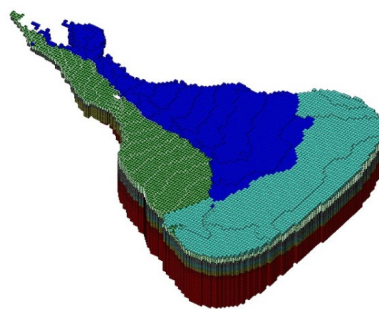


図-1 地下水・熱輸送数値モデル

に分類したユニフォームドグリッド化した (図-1)。本研究で着目する都市での大量揚水に起因する地下水流動場を再現すべく、井戸による揚水量を国交省深井戸資料台帳に記載の揚水井戸を入力し、スクリーンに対応するメッシュを流量境界とし、解析期間中の揚水量の変化は人口との相関を仮定し設定した。解析エンジンは浸透流が MODFLOW2005、熱輸送が MT3DMS とし、物質輸送と熱輸送のアナロジーに基づき物性値を設定した。境界条件として上記の地下水面での地中温度とともに、札幌市を貫流する豊平川に沿って河川水位を与え、地下水の涵養源・流出源を設定した。河川水位の実測のない期間の値は、実測と降水量との非線形回帰モデルから予測した。なお地下水位および地中温度について、観測値と計算値の比較を行うことで、計算モデルの妥当性を評価している。

(2) 地中熱利用ポテンシャルのデータベース化と汎用化

本研究では、地下水流動を考慮した全国地中熱利用ポテンシャル評価を行うべく、人口の 90% をカバーする 63 流域 (図-2) の地下水流動モデル (丸井ほか, 2009) をベースに、地下水流速の再現性を高めるため、モデルの 1km 要素を 0.5 km 要素に細分化するとともに、各メッシュの透水係数分布を地質の分布確率の対数加重平均法 (阪田ほか, 2018) により推定した。この地下水流速と、既往研究による有効熱伝導率分布 (Sakata et al., 2018) を組み合わせることで、地中熱設計に必要な地盤物性データベースを構築した。

シミュレーションで計算される地下水流速場に対し、わが国の平均延べ床面積 (120 m²) を有する戸建て住宅に地中熱暖冷房ヒートポンプシステムの導入を想定した場合での必要地中熱交換機長さをした。戸建て住宅は、省エネ基準に基づく断熱性能を有するとし、暖冷房を処理する熱負荷を夏季の室温が 27℃、冬季の室温が 22℃ で一定とすることを想定して時刻別に求め、その熱負荷に対し、既製品の地中熱ヒートポンプ (10 kW 級) を設置した場合での目標平均成績係数 (Seasonal Performance Factor: SPF) を SPF=4.0 を達成する必要地中熱交換機長さを求めた。地中熱交換機は径 150mm にシングル U チューブを挿入、砂利充填した仕様とし、北海道大学環境システム工学研究室で開発した地中熱システム設計性能予測ツール Ground Club を用いて地中熱交換機長さを 15 m ごとに 60m から 180m まで計算し、それぞれの SPF を求めたうえで、SPF=4.0 を達成する必要地中熱交換機長さを全国 0.5 km グリッドで推定しデータベース化した。

南北に長いわが国では気候が地域によって大きく異なるほか、地質 (有効熱伝導率) や地下水流速の条件も大きく異なる。様々な気候・地盤条件の違いを踏まえた必要地中熱交換機長さデータベースを、任意の気候・地盤条件へ汎用化するため、緯度・経度 (気候)、その箇所での有効熱伝導率と地下水流速を説明変数とする地中熱交換機規模を算定する回帰モデルを導出した。本研究では、回帰モデルとして、通常よく用いられる単純線形モデルに加え、これら説明因子の影響を非線形的に説明しうるガウス過程回帰モデルの適用性について比較した。

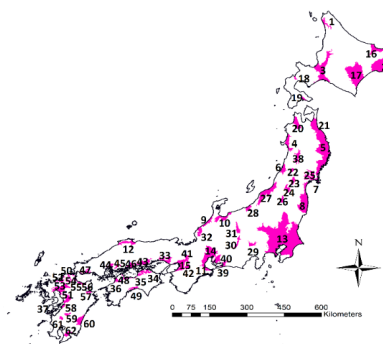


図-2 解析を行った地下水領域

4. 研究成果

(1) 都市地下環境の数値再現

1次元不飽和水分・熱輸送計算を札幌市の土地利用変遷の異なる 12 ブロックに対して 1921~2020 年間で実施した 100 年間の地下水面での地中温度の推定結果を図-3 に示す。本図から、地下水面における地中温度は日・季節変動を伴いながら 100 年間で 1~3℃ 上昇しているが、ブロックによって変動幅や上昇率が異なることが示された。このように同じ年においても被覆率や地下水面の深さ、透水性などの物性によって地表から地下へ伝わる熱輸送が異なり、かつこれが長期的な地下温度の上昇幅の違いに現れることが、本研究によって明らかとなった。

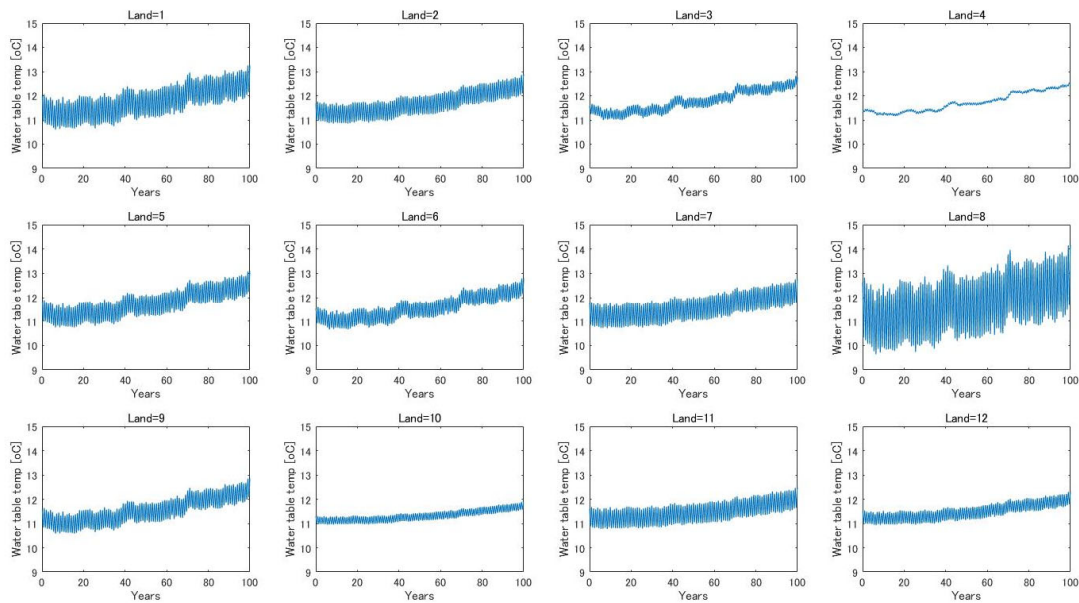


図-3 地下水面上における地中温度の100年（1921～2020年）変化の推定

図-4 に下流（扇端）A，中流（扇央）B，上流（扇頂）C における60年間（1961～2020年）における地下温度の推定結果である。下流 A においては，地下水温は深部では一定であるが中間では減少，表層付近では上昇している。この違いは，中間深度は都市部の開発によって井戸揚水が増加したことによって相対的に温度が低い浸透した河川水の影響，表層部は気候変動の進行に伴う地中温度の上昇が現れている。本研究により，札幌扇状地では，地下水流動が活発な都市域では河川水からの地下水涵養という自然的要因に加え，都市の発達に伴う井戸揚水という人為的要因の双方が複合的に関わり，更に長期的な気候変動を加わりながら，複雑な地下温度分布が形成されることが明らかになった。こうした自然的要因と人為的要因の複合による地下温度形成は札幌扇状地に限らず，わが国の多くの都市あるいは世界の各都市にも言えることであり，本研究ではその複雑な現象を数値的に再現することに成功しており，今後，他地域の地中熱利用を検討する上で本研究手法が応用されると期待される。

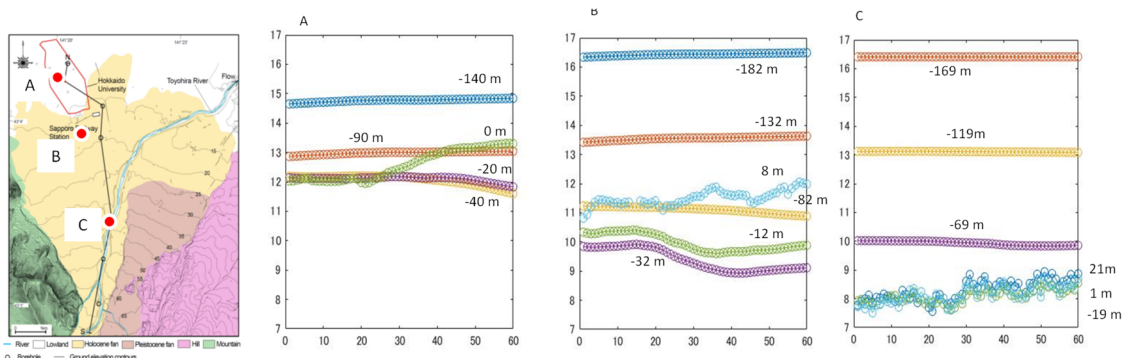


図-4 解析領域の下流から上流までで推定した深度ごとの地中温度の推移推定

(2) 地中熱利用ポテンシャルのデータベース化と汎用化

全国62流域の地下水流動場において，それぞれ500m水平解像度に対して実施し，地中熱交換器長さを評価した結果を図-6に示す。必要地中熱交換器の長さは，熱負荷の大きい北海道で長くなり，全国平均では77.5m（標準偏差12.3m）であった。地下水流れを考慮することによる削減長さはすべての評価点の平均をとると，わずか3.4mだが，地下水流速の速い地点に限れば10m以上の削減効果が，関東平野や大阪平野など，大都市圏でも期待できることが示される。

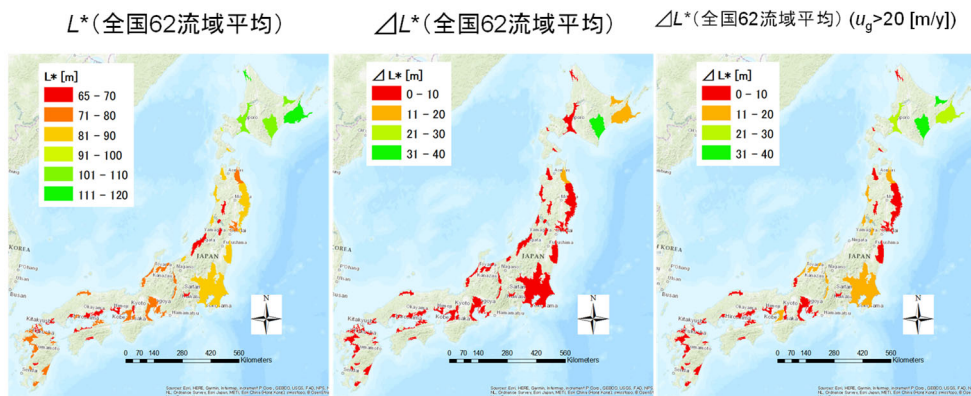


図-6 必要地中熱交換器長さの全国推定結果
(左：平均長さ，中央：削減長さ平均，右：ダルシー流速 20m/y 以上での削減長さ平均)

シミュレーションで得られた必要地中熱交換器長さ
と回帰モデルにより同じ地点で簡易推定した地中熱交
換器長さを比較した図を図-7 に示す。説明変数に対す
る線形回帰モデルではシミュレーションを再現できな
いが、ガウス過程回帰モデルを採用することで、精度
よくシミュレーションを再現できる。すなわち、任意
の位置に対し、地盤情報データベースから熱物性と地
下水情報を連動させて読み込ませることで、計算負荷
を要するシミュレーションをせずとも地中熱設計に重
要な地中熱交換器長さを見積もることができる。この
データベースの汎用化を今後、日本に限らず、世界各
地に適用し、地中熱設計におけるグローバルスタン
ダードな手法として確立することが今後の研究課題とな
る。

<引用文献>

- 葛隆生ほか (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), pp. 355-344.
- 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) H29 新エネルギー成果報告会予
稿集.
- 阪田ほか(2016)積雪寒冷地における領域モデルを用いた湧水比流量の分布推定—現在と将来—. 土
木学会論文集 G(環境), 72(5), pp. I_253-264.
- 阪田ほか (2018) 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その 2：確率加重平均
による平均透水係数推定法の評価. 地下水学会誌, 60(3), pp. 273-287.
- 阪田ほか (2018) 地中熱利用ヒートポンプシステム導入による CO₂ 排出量削減の全国評価：戸建
住宅への暖房利用を例として. 土木学会論文集 G(環境), 74(5), pp. I_359-I_367.
- 阪田ほか (2018) 全国地中熱ポテンシャルマップ構築への取り組み：大阪平野における地中熱
利用の可能性と課題—. 地下水技術 59(2・3・4), pp. 41-50
- 丸井敦尚ほか (2009) 地下水賦存量調査報告書, 産業技術総合研究所報告書
- Fujii, H. et al., Improvement of Efficiency of GSHP Systems using Artificial Groundwater
Flow, 45th IAH Congress, Daejeon, Korea, Sep 13, 2018
- Sakata et al. (2017) Field analysis of stepwise effective thermal conductivity along
a borehole heat exchanger under artificial conditions of groundwater flow. Hydrology,
4(2), pp. 1-21.
- Sakata et al. (2018) Estimation of ground thermal conductivity through Indicator
kriging: nation-scale application and vertical Profile analysis in Japan. Geothermics,
88, pp. 101881_1-11.

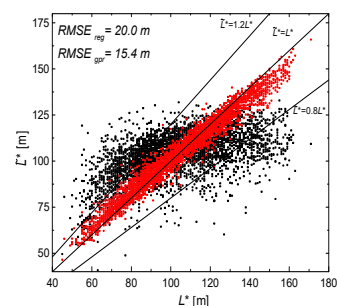


図-7 必要地中熱交換器長さのシミュ
レーション結果 L^* と回帰モデルによる
推定結果 \hat{L}^* の比較 (黒：線形回帰モデ
ル, 赤：ガウス過程回帰モデル)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoshitaka Sakata, Takao Katsura, Katsunori Nagano, Atsunao Marui
2. 発表標題 Nation-scale evaluation of required borehole heat exchangers considering advection effects of groundwater flow in Japan
3. 学会等名 IAH Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 明山雄真, 阪田義隆, 葛隆生, 長野克則
2. 発表標題 気候変動・都市化に伴う地中熱冷暖房システム性能の長期予測
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会北海道支部第54回学術講演
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	ブリティッシュコロンビア大学		