

研究ノート

世田谷区における地下地盤情報に基づく再生可能エネルギーとしての
地中熱のポテンシャル評価

Evaluation of Potential of Ground-Source Heat Pump System as Reusable Energy based on Boring
Data Set in Setagaya area, Tokyo, Central Japan

キーワード：『再生可能エネルギー』、『地中熱』、『ポテンシャルマップ』

植村 杏太

UEMURA, Kyota

(日本大学文理学部自然科学研究所 研究員)

高野 洋一

TAKANO, Yoichi

(日本大学大学院総合基礎科学研究科 博士前期課程)

竹村 貴人

TAKEMURA, Takato

(日本大学文理学部地球システム科学科 准教授)

1. はじめに

世田谷区にはかつて六郷用水、玉川用水そして、玉川用水から分水された北沢、烏山、三田、品川用水路があり、古くから水の利用を積極的に行ってきた地域であるといえよう。また、国分寺崖線や等々力溪谷などを始めとした湧水箇所も多くある地域である。一方で、普段、目にするものがない地下に目を向けると、地下水の帯水層となる武蔵野礫層をはじめとした礫層内の不圧地下水と礫層より上位に堆積する関東ローム層中に貯まる地下水である宙水が区内各所に見られる。このような地下水は年間を通じてその温度がほぼ一定（概ね地下 10m 以深の地下水での水温）であり、それ故に、夏は冷たく冬は温かい地下水を汲むことができ、この熱エネルギーは地中熱と呼ばれる。

近年、このような温度が年間通じて一定である地下水の特徴を活かした空調技術である地中熱ヒートポンプが、ヒートアイランドによる都市部の温度上昇や東日本大震災以降の節電意識の高まりを受けて注目を集めている。また、地中熱ヒートポンプは、空調コストを大幅に減らすだけでなく、空気熱ヒートポンプ（室外機をもつエアコン）と異なり熱を大気中に放出しないため、ヒートアイランドの抑制にも繋がるものである。例えば、東京都内のオフィスビルに導入された地中熱ヒートポンプシステムでは、夏場で空調費用の約 60%の削減に成功している事例などが報告されている（笹田ほか、2013）。この地中熱の利用は、2010 年の政府によるエネルギー基本計画の中に再生可能エネルギーの一つに加えられ、事業促進の支援対象となったことから、この数年の間に急速に普及しつつある（環境省水・大気環境局、2010）（図 1）。

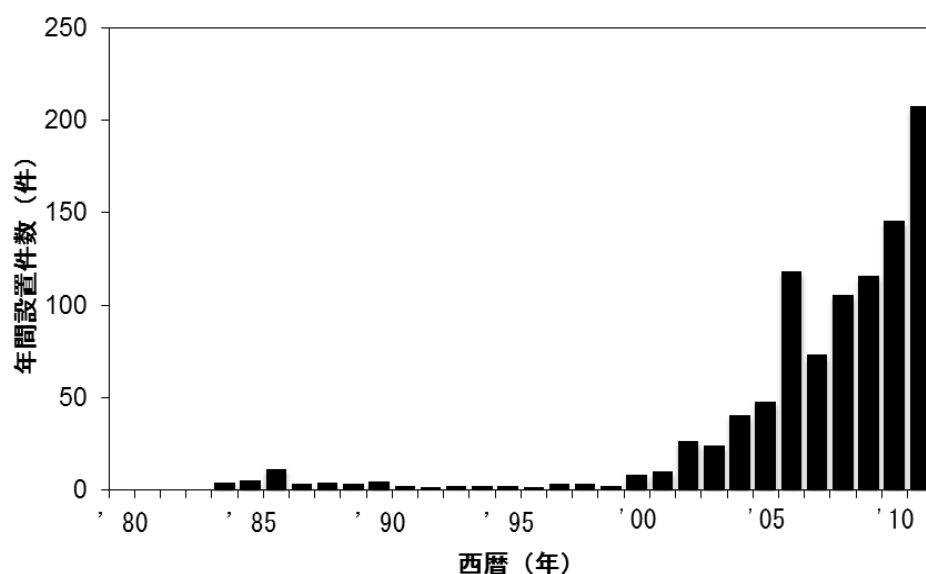


図1 国内における地中熱ヒートポンプ設備の導入量の推移 (環境省水・大気環境局 (2010) より作成).

しかしながら、欧米と比較してその導入量は極めて低いのが現状である (図2) (Lund et al., 2010). 既に、ヨーロッパでは低炭素型スマートシティでの熱エネルギーの有効利用に積極的に活用されている。また、国内においても、自治体レベルでのスマートシティ構想に地中熱利用が組み込まれており、都内においても東京スカイツリーや羽田空港ビル等にも規模の大きなものが導入されている。また、世田谷区においても、世田谷代田駅などにも導入されており、今後、さらに導入が進んでいくものと考えられる。

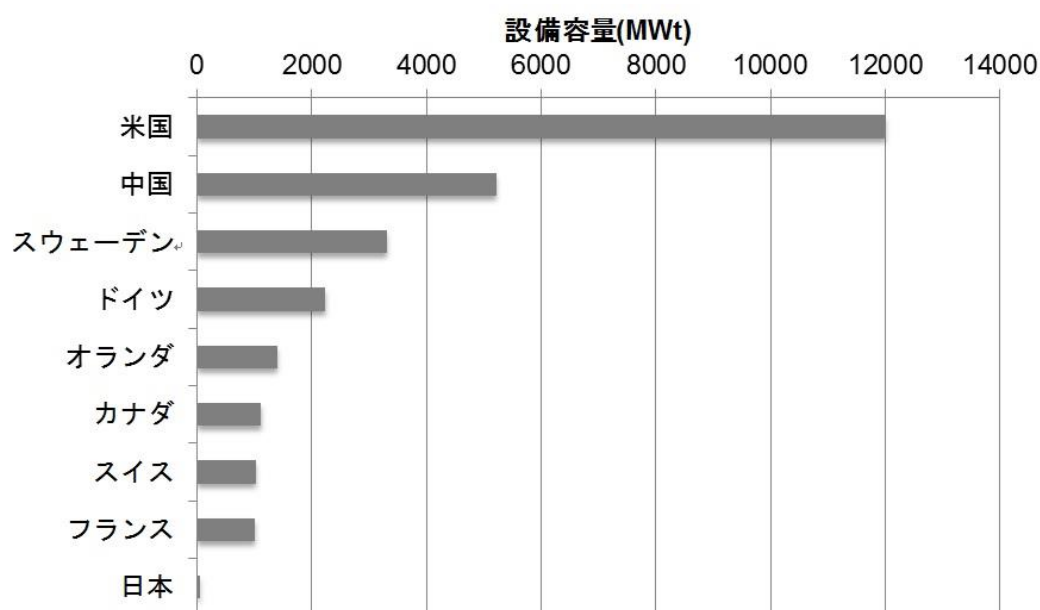


図2 欧米各国との地中熱ヒートポンプ設備の導入量の比較 (Lund et al. (2010)に基づく).

地中熱の導入において、事前に地盤の採熱率が最も重要なものとなってくる。近年、自治体において地中熱導入の事前評価のために、地中熱を効率よく稼働させることができるかの指標を表示したポテンシャルマップが作成されつつある。地域レベルでのポテンシャルマップがあることは、地域の中核となる学校施設や公的な建物に地中熱などの再生可能エネルギーの導入を見据えた町づくりの計画に役立つであろう。

本論では、地中熱利用のためのポテンシャルマップの作成を行うことを目的とし、世田谷区内において、地中熱利用を効率的に行える地域の検討を行う。ポテンシャルマップを作成するにあたり、区内全域の地下地盤情報を正確に把握する必要があるため、世田谷区により公開されているボーリングデータの基本情報を基に地層の熱の貯め易さの指標を面的に捉えることを行った。

2. 世田谷の地下地盤情報

2.1 世田谷区の地形と地質の概要

世田谷区の地形・地質については世田谷区（1962）によってまとめられているが、近年の地質学の進展（貝塚ほか、2000；日本地質学会，2008；地盤工学会関東支部編，2014 など）により、時代定義や地形・地質形成の見方が変わってきている。そのため、本項ではまず世田谷区の地下地盤をつくる地質情報について以下に述べる。

世田谷区は、その大部分が関東平野武蔵野台地上に位置し、一部が多摩川低地である（図3）。

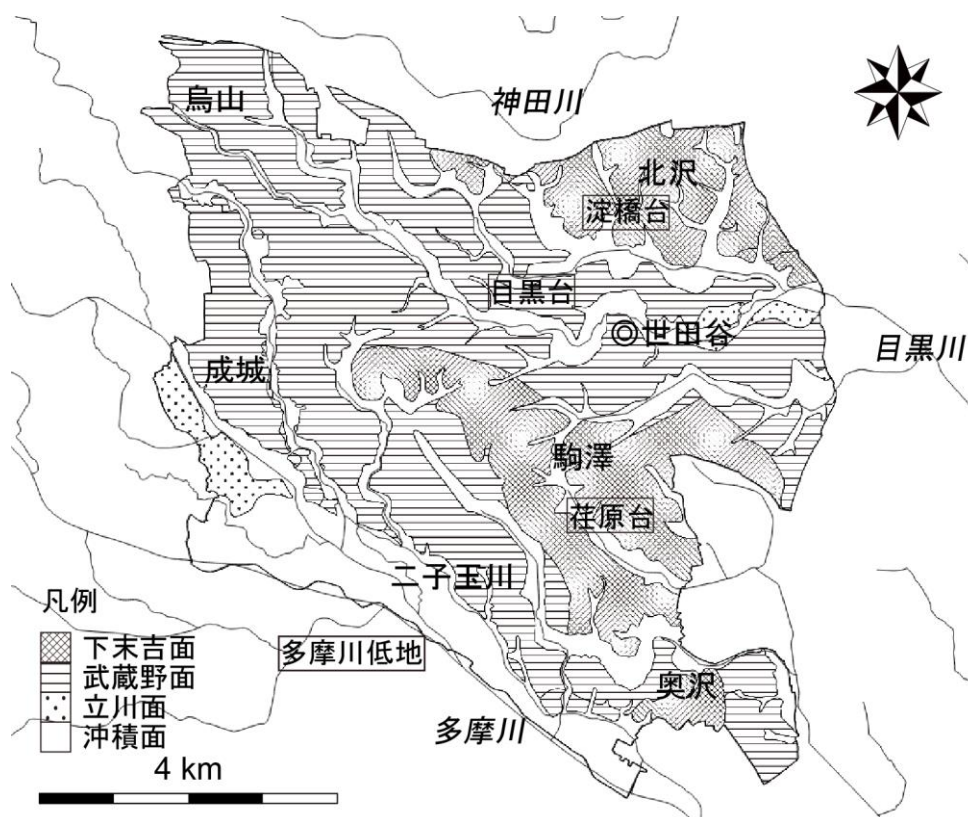


図3 世田谷区における地形分類図

地質層序は、台地において地表面から順に土壌、関東ローム、段丘構成堆積物、下総層群（おおむね従来の東京層群）、上総層群、安房層群（三浦層群）、先新第三系基盤岩類、低地において地表面から順に土壌、沖積層、上総層群、安房層群（三浦層群）、先新第三系基盤岩類とされている（日本地質学会，2008）。ここで、沖積層あるいは後述する沖積面は、最終氷期以降の堆積物もしくはそれ以降から現在までに形成された地形面を意味しており、おおまかに東部では縄文海進などによる海成堆積物が、西部では多摩川による河成堆積物が分布している。世田谷区内の地形はおおむね西から東へ傾斜しており、多摩川の流れに沿うように数段の段丘がみられる。世田谷区周辺の各段丘面は高位から、下末吉面、武蔵野面、立川面、沖積面が分布する（岡・菊池，1984；久保，1988；貝塚ほか，2000；羽鳥，2004；日本地質学会，2008 など）。段丘地形は、過去の気候変動や地殻変動によって形成されたと考えられ（日本第四紀学会，2009 など）、段丘面ごとに形成された時代・環境や構成する堆積物など特徴が異なる。地形が形成されたときの堆積物は表層付近の地質を反映していることから、地形の特徴と地表付近を構成する地質・地盤の特性はおおむね対応している。また、区内の台地において、関東ローム層は、段丘構成堆積物との境界付近において粘土質になっていることが多く、難透水層として機能し粘土層の直上に宙水を形成することがある。その下位にある段丘構成堆積物は、砂層あるいは砂礫層からなり堆積時の環境によって岩相が異なる。また、後述の武蔵野面・立川面でみられる砂礫層は地下水の主要な帯水層として機能しており、湧水箇所での排水がみられる層となっている。

このような地形と地質の関係を踏まえて区内の地形を細かくみていく。区内で最も高い段丘面である淀橋台（桜上水から大原付近にかけての甲州街道に沿う高台）と荏原台（桜丘から駒澤・等々力にかけての高台）は下末吉面に対比される。下末吉面は、グローバルに温暖であった約 12.5 万年前の MIS（海洋酸素同位体ステージ）5e の海進期に波食台として平坦面が形成されたと考えられ、地下には主に海成の砂層が分布する。下末吉面を除く武蔵野台地上の平坦面は武蔵野面であり、現在よりもやや寒冷であった約 10～6 万年前（MIS 5c～4）に多摩川の扇状地・氾濫原として形成されたと考えられ、河成の砂礫層が分布する。区南部には、国分寺崖線を境として多摩川が流れる多摩川低地が広がる。喜多見付近には後述の沖積面よりもわずかに高い段丘面が分布し、立川面に対比されている。立川面を上流へ追うと低地との比高を増していく。立川面は、最終氷期（MIS 3～2）に形成されたと考えられており、主に河川成の砂礫層が分布する。最も低位である現在多摩川が流れる多摩川低地は沖積面であり、縄文海進で知られる温暖期が含まれる完新世以降（MIS 1）に形成されたものである。沖積面には、昨今の人為的な流路改変以前の蛇行跡や自然堤防の痕跡がみられる。沖積面にはいわゆる沖積層が分布しており、シルト・砂・砂礫層などからなる。また、台地内部には、平坦面を刻む多くの開析谷が目立つ。開析谷は山川・野川・北沢川・烏山川に代表される中小河川が形成したものであり、これら中小河川の多くは、現在では湧水や雨水を水源としているが、名残川と呼ばれるかつての多摩川流路や濤の跡を引き継いだものと考えられている（羽鳥，2004 など）。開析谷底には砂・シルト層や泥炭層などが分布する。

段丘構成堆積物または沖積層下位の地質にも触れる。これらは、地域により異なるものの東京礫層（下総層群相当）、舎人層、東久留米層・北多摩層（上総層群）、安房層群（三浦層群）、先第三系基盤

岩類の順で分布する（東京都土木技術研究所，1996；日本地質学会，2008）．区内の下総層群相当層（中部更新統）は，現在の武蔵野台地が形成される以前の扇状地を形成していた堆積物と考えられ（羽鳥，2004），埋没谷の基底礫や谷埋め堆積物として認められている．東京礫層は支持層として古くから知られており，世田谷区には北部の淀橋台地下に分布する．南部の砧付近には埋没谷が分布し，世田谷層と呼ばれ東京礫層に相当するとされている．上総層群（新第三系鮮新統～下部更新統）は大部分が深海から陸棚の堆積した未固結な海成層（砂や泥など）である．安房層群（三浦層群）は，関東平野初生期（新第三紀中新世）の海成堆積物であり，その下位の基盤岩類とされる関東山地を構成する古・中世界が地下深くに連続すると考えられている．世田谷区周辺では，府中で地下約 2 km，江東区で地下約 2.5 km 以深に分布することが確認されている（日本地質学会，2008 など）．

このように世田谷区の地形・地質・地盤は，長期間にわたる地殻変動とグローバルな気候変動および海水準変動など複合的な要因で形成されてきたものである．

2.2 既存地盤データを活用した世田谷区の地下地盤

建物の建築時や土木工事に伴い行われるボーリング調査により，地下の情報がボーリング柱状図としてまとめられている．このボーリング柱状図は「世田谷区地盤図」として区役所にて閲覧が可能である．また，東京都においても「東京の地盤 WEB」としてインターネット上で閲覧ができる．本論では，世田谷区ボーリング柱状図データを数値化して区内約 8,000 点のデータセットを作成し，地下地盤情報をまとめた．

前項でも述べたように，世田谷区の地下において，地下水の存在は帯水層となる礫層と宙水の受け皿となる礫層上部の粘土層が重要となってくる．また，地中熱利用という視点からみても，礫層の存在はその効率性を大きく高めるものである．表 1 は地質の種類ごとの有効熱伝導率の概算値（北海道大学地中熱利用システム工学講座，2007）をまとめたものである．

表 1 地層別の有効熱伝導率（北海道大学地中熱利用システム工学講座（2007）より）

	有効熱伝導率 (W/mK)
ローム層	1.00
粘土	1.27
砂礫	2.00
砂	1.53
シルト	1.44

ここで，有効熱伝導率は地盤の熱の伝導率を示しており，地中熱利用の際にはこの値が大きいほど地中熱ヒートポンプ利用時の効率が高くなる．ここでは，世田谷区内の礫層の厚さの分布と粘土層の厚さの分布マップを作成することを行った．データは全ボーリング柱状図データを用いて，それぞれのデータから座標および礫層，粘土層の厚さデータを抽出しデータセットを作成した．次に，世田谷区

内を 200m×200m メッシュに区切り、各メッシュ内に入る礫層、粘土層の厚さのデータセットを平均化し代表値とした。ここで、分布図の作成には SAGA GIS(System for Automated Geoscientific Analyses) (Olaya, 2004)を用いた。図 4(a)は用いたボーリングデータの存在するメッシュの分布を示した物である。空白部はボーリングデータが存在しなかった地区である。図 4 (b), (c) にそれぞれ、礫層、粘土層の厚さの分布を示した。

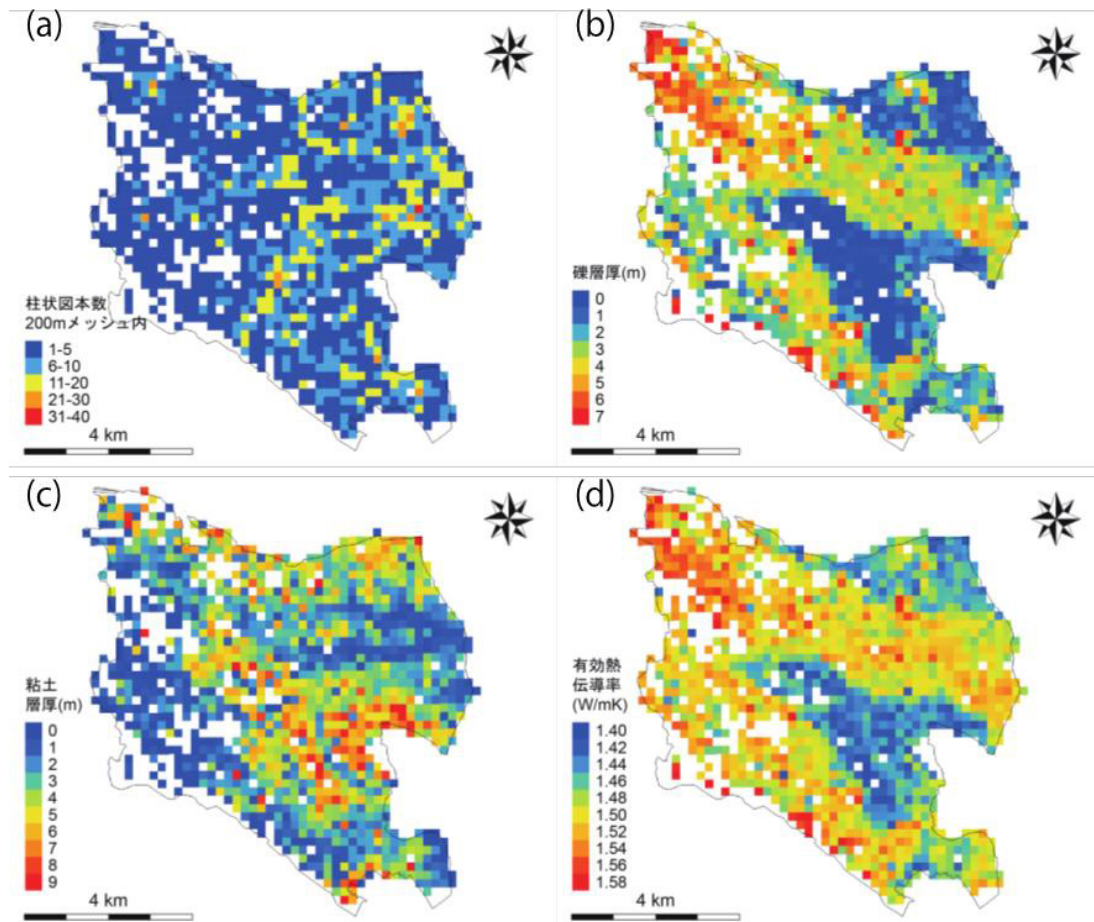


図4 (a) 200m×200m メッシュ内のボーリング柱状図データの有無。白塗りのメッシュはデータがないことを示す。ボーリング柱状図データによる (b) 礫層の厚さ分布マップと (c) 粘土層の厚さ分布マップ。 (d) ボーリング柱状図データから算出された有効熱伝導率の分布マップ。

3. 地中熱利用のためのポテンシャルマップの作成

地中熱の導入を検討する際、その地盤の採熱率がヒートポンプ稼働時の性能を左右する。例えば、都内で導入されている地中熱ヒートポンプを導入することを考えると、クローズドループ方式という地盤に熱交換器（ポリエチレン性チューブ）を埋設する方式で設置される。この熱交換器を地中に埋設する際、その総延長が建物に必要な必要熱量を満たさなければならない。この熱交換器の総延長は

当然ながら埋設する地盤が放熱・採熱しやすいかどうかで変わってくる。例えば、広島県の三次市立塩町中学校に導入された地中熱ヒートポンプシステムでは、述べ床面積806㎡で100mのボアホール21本に熱交換器を導入しエネルギー使用率を空気熱源と比較して37%の削減に成功している(内藤, 2012)。ここで、地盤の放熱・採熱のしやすさの度合いは有効熱伝導率で決まってくるため、事前に地盤の有効熱伝導率の推定ができれば、導入コストの見積もりもでき地中熱利用に関する将来計画を立て易くなると考えられる。

本研究での地中熱ポテンシャルマップは、各地層の有効熱伝導率(表1)を参考にし、各ボーリング柱状図に記載されている地層ごとに有効熱伝導率を割当て平均化しボーリングごとの有効熱伝導率を算出し、200m×200mメッシュ内で平均化したものの分布を示したものである(有効熱伝導率 K は $K = \sum(L_i \times K_i) / \sum L_i$ とした(竹村ほか, 2014))。ここで、 L_i は i 番目の地層の厚さを、 K_i は i 番目の地層の熱伝導率である)。算出用のデータには「世田谷区地盤図」のボーリング柱状図に掲載されているデータを用いた。また、対象深度は標高-17mとしたが、掲載されているボーリング柱状図には標高-17mに満たないものもある。そこで本研究では次の方法によりデータの選別を行った。世田谷区の地層はその大部分が地表から関東ローム、粘土、礫、砂・シルト層となっているため、粘土層もしくは礫層まで到達していないデータは使用せず、砂・シルト層に到達しているもののみを使用した。砂・シルト層まで到達して且つ標高-17mに満たないボーリング柱状図に関しては、2章でも述べたように礫層以深の砂・シルト層は連続して深くまで存在しているため、標高-17mの深度までであるものとして補間し、全ての深度標高-17mとした。図4(d)に世田谷区における地中熱ポテンシャルマップを示す。空白部はグリッド内にボーリングデータがない箇所である。地中熱ポテンシャルマップを見ると、世田谷区北西部から東部にかけて帯状にポテンシャル値(地盤の平均熱伝導率)の高い地域が分布している。地層ごとの熱伝導率は礫層が他の地層に比べて高いため、礫層が厚く、関東ローム層が薄い地域でのポテンシャル値が高くなる傾向にある。世田谷区の場合、そのような地域は、南部の駒沢地区と北部の北沢地区に分布する下末吉面の段丘面(図3)を除く地域、いまいえると武蔵野面と沖積面等であるといえよう。また、本研究では、地下地盤の地質でのみ有効熱伝導率を推定し地中熱のポテンシャルとしているが、礫層中を流れる地下水に流動がある場合、飛躍的に有効熱伝導率が増加し熱交換の効率が上昇することが想定される。しかしながら礫層中の地下水の流速は不明な点が多いため本研究では考慮していないが、実際には流動しているため、図4(d)の有効熱伝導率の高い地域はさらに高く効率の良い地域となるであろう。

4. おわりに

本研究では、世田谷区内における地中熱のポテンシャルの分布を既存のボーリング柱状図資料から作成した。その結果、区内の地形地質によりその傾向が異なり、特に武蔵野面と沖積面で高い値を示すことが明らかとなった。その中でも、特に北西部(烏山地区)と南西部(二子玉川地区)では特に高いポテンシャルをもっており、区内において地中熱利用を公的に進めるにはこれらの地域で導入することで高い効率で稼働することができ、導入コストも低く抑えられることが想定される。一方で、

地中熱ヒートポンプを設置することで夏場には地下地盤と熱交換をするため、地下水に熱が放出されることによる環境への影響が懸念される。現時点での地中熱の地下水への影響は熱交換器の埋設された井戸直近（数 cm）では地盤温度（地下水温度）が数度ほど変動するものの数 m 離れた位置ではその変動幅は微小であり、地下水質への影響も観測されていない（Takemura et al., 2014）。現時点で、地中熱の利用に伴う地下水への環境影響に関する報告はされていないが、特に烏山地区での宙水の保全や区内 8 ヶ所にある湧水保全重点地区は地下水と密接に関係しているため、例えば、使用上限を設定するなどの配慮が必要であろう。

今後、二酸化炭素の削減問題への対応や省エネルギー対策を積極的に行う機能を伴うスマートシティを構築する上で、地中熱の利用は熱の効率利用という視点で大きな貢献ができるものと思われる。将来の都市計画の中で、未利用エネルギーである地中熱のポテンシャルマップが活用されることを期待する。

謝辞

本研究は（独）科学技術振興機構の CREST 課題名「地圏熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発」および日本大学理事長特別研究「電力削減と教育環境整備の両立を目指した省エネルギー型キャンパスの創成に関する総合研究」により行われた。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 羽鳥謙三（2004）『地研ブックレットシリーズ 11 武蔵野扇状地の地形発達』。地学団体研究会，45p.
- 北海道大学地中熱利用システム工学講座（2007）『地中熱ヒートポンプシステム』，オーム社，165p.
- 地盤工学会関東支部編（2014）『新・関東の地盤』。地盤工学会，237p.
- 貝塚爽平・小池一之・遠藤邦彦・山崎晴雄・鈴木毅彦編（2000）『日本の地形 4 関東・伊豆小笠原』。東京大学出版会，349p.
- 環境省水・大気環境局（2010）『地中熱利用にあたってのガイドライン』，環境省，54p.
- 久保純子（1988）「相模野台地・武蔵野台地を刻む谷の地形」．『地理学評論』，61，pp. 25-48.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., Boyd, T. L.（2010）“Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review”．*Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, pp. 25-29.
- 内藤春雄（2012）『地中熱利用ヒートポンプの基本がわかる本』，オーム社，167p.
- 日本第四紀学会編（2009）『デジタルブック最新第四紀学』，日本第四紀学会，CD-ROM.
- 日本地質学会編（2008）『日本地方地質誌 3 関東地方』。朝倉書店，570p.
- 岡 重文・菊地隆男（1984）『東京西南部の地質。地域地質研究報告（5 万分の 1 図幅）』，地質調査所，148p.
- Olaya, V.（2004）“A Gentle Introduction to SAGA GIS”．126p.
- 笹田政克，高杉真司，館野正之（2013）「都心での地中熱利用」，『応用地質』，51，265-272.
- 世田谷区（1962）自然環境．『新修世田谷区史上巻』。世田谷区，pp. 1-60.

- Takemura, T., Funabiki, A., Kaneki, A., Ito, Y., Hamamoto, S., Saito, T., Komatsu, T. (2014)
“Effect of Thermal Change by Ground Source Heat Pumps on Groundwater and Geoenvironment
in the Late Pleistocene Terrace Area of Tokyo”, *Japan. In Engineering Geology for Society
and Territory - Volume 5 Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation*
(Edited by Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F.),
Springer, pp. 1201-1204.
- 竹村貴人・中里勝芳・田島丈雅・高野洋一 (2014) 「地中熱利用のための地盤条件の抽出と熱及び水力
による独立電源型システムの開発」, 『日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要』, 49, pp.
155-162.
- 東京都土木技術研究所 (1996) 『東京都(区部)大深度地下の地盤』. 東京都土木技術研究所, 66p.