

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12436

研究課題名(和文)浅層型地中熱システムのための適地評価手法の開発～リモートセンシングの活用～

研究課題名(英文) Suitable evaluation of shallow ground source heat exchanger, using remote-sensing

研究代表者

濱元 栄起 (HAMAMOTO, HIDEKI)

埼玉県環境科学国際センター・土壌・地下水・地盤担当・主任研究員

研究者番号：40511978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化問題やエネルギーの問題に対応するために再生可能エネルギーの活用が重要である。このうち地中熱エネルギーも重要な候補のひとつである。本研究では浅層型の地中熱源ヒートポンプの適地評価に役立つ手法の開発した。浅層型のは、一般的な深層型と異なり、地表面の温度影響を受けやすい。本研究では衛星熱画像を用いた新たな評価手法を提案し、研究対象地域(関東平野)で実測した地表面温度データと比較することでその利用の有効性を検証した。さらにオープン式の場合には地下水質が適否の重要な要因となることから、多地点の地下水試料を用いて分析を行い評価手法の検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

浅層型地中熱源ヒートポンプは小型の掘削機で施工できることから住宅や小型施設への導入が期待されている。この浅層型システムの導入において地表面温度変動による影響を設計や施工時の反映することがシステムの最適化には重要である。最も直接的な方法は、設置場所で1年程度地表面温度を測定することであるが、施工期間等の問題から現実的ではない。本研究で検証した衛星熱画像を使う方法が社会実装されれば、このような実測する手間をかけず既存の衛星熱画像データを解析することで設置場所の地表面温度を把握することができる。以上のことから本成果を社会実装することで浅層型地中熱源ヒートポンプシステムの普及に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：The utilization of the renewable energy is important in order to deal with the global warming problem and the problem of the energy. Shallow geothermal energy is one of the important candidates. In this study, the technique which was useful for the suitable site evaluation of shallow ground source heat pump was developed. The shallow type is susceptible to the temperature of the ground surface unlike the general deep type. In this study, a new evaluation method using satellite thermal images were proposed, and the effectiveness of the utilization was verified by comparing with the ground surface temperature data measured in the research object area (The Kanto Plain). In addition, in the case of open type, groundwater quality is an important factor of the suitability. Therefore, this paper carries out analysis using groundwater samples of multiple sites, and examines an evaluation method.

研究分野：地球科学、地球熱学、再生可能エネルギー学、地下水学

キーワード：再生可能エネルギー 地中熱エネルギー 地中熱源ヒートポンプ 地下温度 地表面温度 衛星データ リモートセンシング 地下水質

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策やエネルギー問題への対応のために、再生可能エネルギーが今後重要な役割を果たす。このなかで再生可能エネルギーのひとつである地中熱エネルギーの活用も期待されており、特にヒートポンプと組み合わせた地中熱源ヒートポンプは国内外で普及している。

地中熱源ヒートポンプは、大きくクローズド式とオープン式に大別される。クローズド式は深さ数 m から百 m 程度ボーリング掘削を行い、U 字状の管を挿入し循環液を流すことで、地中の冷熱や温熱を地上部で利用するという仕組みである (図 1)。一方でオープン式は地下水を揚水し、その熱をヒートポンプの内で直接熱交換して熱源として利用するものである。地下水資源等の問題から国内ではクローズド式が利用される割合が高い。これらのシステムの選定や設計、施工には地下環境の条件が大きく影響するため、各設置場所の地下環境条件を把握することがシステムの最適化には必要不可欠である。

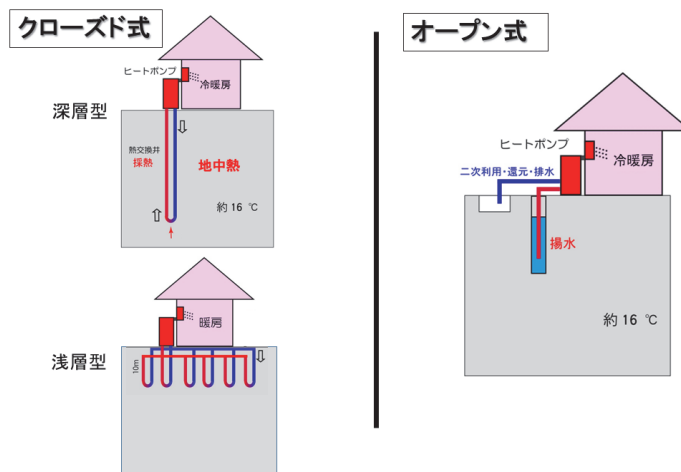


図 1 地中熱源ヒートポンプの概念図

2. 研究の目的

地中熱源ヒートポンプのクローズド式は、熱交換井の形状によって深層型と浅層型に分けられる。深層型は深さ 100m 程度掘削を行うのに対して、浅層型は深さ数 m から数十 m 程度の比較的浅いボーリングで、多数の本数を掘削し浅層の熱を利用するものである。浅層型は小型のボーリング機材で対応できることから住宅用など小型施設での普及が期待されている。浅層の地下温度は、地表面における季節的な温度変動の影響を受けていることから、浅層型のクローズド式のシステムを設計や施工する場合には地下温度の時間変動も考慮する必要がある。しかし、設置場所の地表面温度を 1 年以上測定して、設計や施工を行うということは現実には難しい。本課題においては、これまで長期間のデータが蓄積されている衛星データに着目し地表面の温度変動を面的に把握する方法について検証することを第 1 の研究の目的とする。この手法が確立されれば、現場での長期間の温度の実測なしに、すぐに設計や施工が可能となる。さらにこれらの手法やデータは浅層型や深層型の広域的な評価を行う際にも利用することができる。

オープン式については地下水を揚水し、ヒートポンプ内で熱交換を行うことから揚水量とともにスケールの評価などが必要であり地下水質が適地を決定する場所の要因となる。本研究では関東平野中央部を対象として地下水質について分布や適地評価に適した指標の検証を行うことを、第 2 の研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 浅層温度による影響の評価方法

地下深度数 m から 10m 程度では地下温度が擾乱されることが知られている。この原因としては、地表面温度の季節変動が主要因であることから、本研究では地表面付近における温度のモニタリングを実施した。図 2 に関東平野中央部の加須市の環境科学国際センター生態園の草地エリアに温度ロガーを設置した際の様子を示す。測定深度は、この地点では表層 5cm に設置した (サンプリング間隔: 60 分)。また、面的な違いを調べるために数十 m 離れた位置に合計 3 箇所測定した。これらの地点には、上述した深さ 5cm に加えて、30cm、60cm、100cm の深度でも測定しており、地表面の温度の伝搬過程を把握する目的のものである。

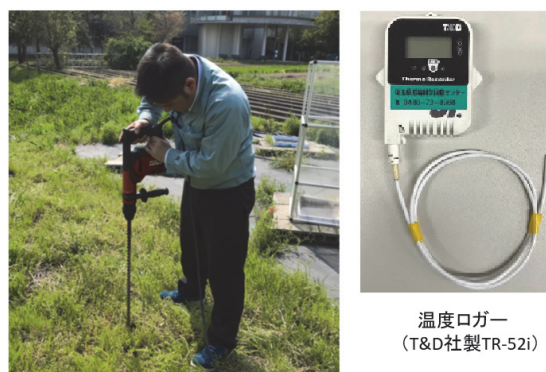


図 2 温度ロガーの設置

(2) 熱画像の活用を活用した評価の検証方法

地表面付近の温度を実測せず、各地点の地表面温度変動を把握する方法として衛星の熱画像を利用することを本研究では提案した。この衛星データはMODIS（中分解能撮像分光放射計）によるデータセットであり、NASAの人工衛星Tera及びAquaによって取得されたものである。これまで20年近く赤外センサーによって地表面の面的な熱画像を取得している。本研究では、この衛星熱画像を時系列解析することによって、場所ごとの地表面温度の時系列データを抽出し、

(1)で示した方法によって実測した温度データを比較することで、浅層型地中熱ヒートポンプの設計や施工に活用できるかを検証する。さらに、近年ドローン技術が急速に進歩し、熱画像を撮影できる機材も開発されている。本研究では埼玉県加須市をモデル地点として熱センサー付きのドローンを用いて地表面温度を実測した。ドローンによる熱画像（面分解能は高度によって異なるが数m以下）は、先述した衛星熱画像（面分解能 1000m×1000m）に比べて面分解能が高いことから、衛星熱画像を解釈するうえで役立つことが分かった。

(3) 地下水質の評価の方法

オープン式において地下水質がヒートポンプ内へのスケールの付着等を評価する際に重要である。そこで関東平野中央部を対象として、埼玉県の行政事業と連携し多地点での地下水採取及び地下水の水質分析をした（図3）。分析項目は、基礎水質及び重金属類、イオンバランス等である。これをもとに、本研究の目的に合致した評価手法を検討するため既存研究等の情報収集を行った。

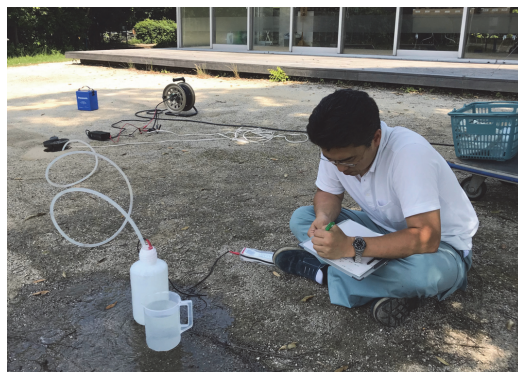


図3 地下水の採取及び現場の水質測定

4. 研究成果

(1) 浅層温度測定の結果

本研究において、地表面付近の温度データを1年以上取得することができた。また深度別のデータを解析することで、地下へは熱拡散によって主に伝搬していることが明らかになった。ただし、大量の降雨がある場合には、地表面から地下への水の涵養にともなう熱移流が起こっていることも確認できた。本課題においては、埼玉県戸田市、関東平野西部の神奈川県温泉地学研究所（小田原市）の敷地においても同様の測定を行った。さらに先行して地表面付近の100cmの温度モニタリングを長期間実施している地熱学会の「地球環境と浅層熱収支に関する研究会」と連携し、その他6地点の浅層温度のモニタリングデータも得た。

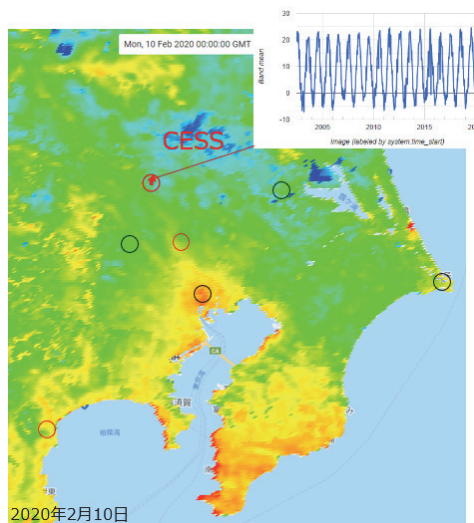


図4 衛星熱画像の解析結果（関東平野）

(2) 衛星熱画像の活用を検証結果

NASAによるMODISデータを収集し、過去20年間の画像解析を行った。図4に冬季の関東平野の熱画像を示す。この事例においては房総半島南部および三浦半島西部、そして東京都心の地表面温度が高めであることが分かる。一般には気温データにおいてこのような解析が行われているが、地表面温度に着目して解析する事例は少ない。地表面温度は気温とは相関はあるが、浅層温度の評価において直接の要因となるものは「地表面温度」であることに留意しなければならない。時系列温度の把握する解析を行った。ここでは地表面温度の実測を行った埼玉県加須市を事例に過去の衛星熱画像から地表面温度を時系列的に抽出した。その結果についても図4に併せて掲載している。これと(1)で実施した地表面温度の実測データと比較した結果、この両者は整合的であることを確かめることができた。以上のような地表面温度による熱伝搬過程の知見や関東平野における温度データは、浅層型地中熱源ヒートポンプの設計や施工を行う際に有効に活用できることが分かった。

(3) 地下水質の評価の結果

関東平野中央部の地下水質を調べるため埼玉県行政事業と連携し埼玉県内 158 地点で地下水採取や分析を行った。特にオープン式のスケール問題を議論する場合には、カルシウムやマグネシウム、鉄、マンガンなどに考量する必要がある。本研究ではスケールの評価にあたっては、RI 指標に注目した。この指標は、値が大きい場合には腐食性を、値が小さい場合にはスケール生成を示すというものである。ここでは地中熱源ヒートポンプにより変化する地下温度・地下水温度がスケール生成に及ぼす影響を試算するため、ここでは地下水温が 1℃、5℃、17℃、40℃になった場合の RI を算出し、スケール生成の可能性について検討を行った(図 5)。また、通常は想定しない条件であるが、参考のため 60℃、80℃の場合についても RI を算出した。以上の分析及びその評価によって、対象地域における地下水によるスケールによる影響は小さいことが分かった。ただし、長期間の利用を予定する場合には基準を厳格化しシステム方式やヒートポンプ交換温度の設定をする必要がある。

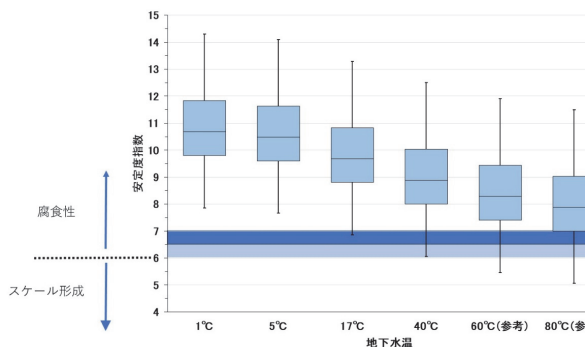


図 5 地下水質の RI 指標による評価

本研究によって、浅層型地中熱源ヒートポンプの広域評価を行う場合に衛星熱画像を活用できることや、オープン式を利用する場合の地下水質を評価する手法について検証することができた。ただしこれら評価や手法については、さらに基礎データの蓄積や検証を積み重ねて社会実装することが重要である。これらについては、引き続き関連の研究が必要である。

【謝辞】本研究を進めるうえで、調査場所やデータ提供、助言等において、埼玉県環境部エネルギー環境課、同水環境課、日本地熱学会「地球環境と浅層熱収支に関する研究会」に御協力頂きました。また埼玉県の事業や他の科研費事業で得られた知見等も活用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 江原幸雄, 藤井光, 津谷俊介, 野田徹郎, 松林修, 松本光央, 笹田政克, 神谷章夫, 福岡晃一郎, 濱元栄起, 西塔幸由	4. 巻 43
2. 論文標題 (技術報告) 1m深地温観測による地球温暖化・ヒートアイランド現象の実証的理解	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地熱学会誌	6. 最初と最後の頁 19-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Endo A., M. Yamada, Y. Miyashita, R. Sugimoto, A. Ishii, J. Nishijima, M. Fujii, T. Kato, H. Hamamoto, M. Kimura, T. uKumazawa, J. Qi	4. 巻 13
2. 論文標題 Dynamics of Water-Energy-Food Nexus Methodology, Methods, and Tools	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Current Opinion in Environmental Science & Health	6. 最初と最後の頁 46-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coesh.2019.10.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 濱元栄起, 有本弘孝, 谷口真人, 斎藤哲也, 中戸靖子, 神谷浩二	4. 巻 1
2. 論文標題 大阪平野における地下温暖化の将来予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学会「地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム」学術論文集	6. 最初と最後の頁 182-186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 有本弘孝, 濱元栄起, 谷口真人, 斎藤哲也, 中戸靖子, 神谷浩二	4. 巻 1
2. 論文標題 大阪都心部における地下温暖化の実態(その3)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学会「地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム」学術論文集	6. 最初と最後の頁 176-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 松林修 , 江原幸雄 , 神谷章夫 , 西塔幸由 , 笹田政克 , 津谷駿介 , 野田徹郎 , 濱元栄起 , 福岡晃一郎 , 藤井光 , 松本光央
2. 発表標題 1m 深地温観測に基づく地表面熱収支へのアプローチ(2021 年アップデート)
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮越昭暢 , 林武司 , 濱元栄起 , 八戸 昭一
2. 発表標題 首都圏の地下温度長期観測に認められた地下温暖化 観測井を活用した地下水・地下温度モニタリングと地下環境評価への適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱元栄起 , 白石英孝 , 中山雅樹 , 内山真悟 , 石黒修平 , 竹島淳也
2. 発表標題 埼玉県における地中熱源ヒートポンプ実証試験と地下温度変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱元栄起 , 白石英孝 , 中山雅樹 , 内山真悟 , 石黒修平 , 竹島淳也
2. 発表標題 埼玉県における地中熱ヒートポンプ運転実証試験
3. 学会等名 日本地熱学会令和 2 年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松林修, 江原幸雄, 神谷章夫, 西塔幸由, 笹田政克, 津谷俊介, 野田徹郎, 濱元栄起, 福岡晃一郎, 藤井光, 松本光央
2. 発表標題 1m深地温の長期観測に基づく地表面熱収支の解明へのアプローチ
3. 学会等名 日本地熱学会令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Osamu Matsubayashi, Hideki Hamamoto, Sachio Ehara
2. 発表標題 Research on the current thermal energy budget of land surface by continuous observation of near-surface ground temperature in Kanto Plain, Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山野誠, 田中明子, 濱元栄起, 後藤秀作, 松本 拓己
2. 発表標題 Re-evaluation of thermal data in the Japanese Islands for better estimation of the temperature structure in the crust
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮下雄次, 濱元栄起
2. 発表標題 沿岸自噴帯地下水の湧出に関する調査結果 - UAVによる地下水湧出調査 -
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 誠, 杉本亮, 宮下雄次, 濱元栄起, 王 智宏
2. 発表標題 海底湧水調査におけるUAVを用いた海面温度測定法の最適化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hamamoto H., H. Shiraishi
2. 発表標題 The Effects of Subsurface Temperature and Groundwater Flow on a Ground-Source Heat Exchanger
3. 学会等名 2019 Fall Meeting, AGU (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hamamoto H., M. Yamano, S. Goto, T. Matsumoto
2. 発表標題 Reconstruction of the past ground surface temperature histories in the central part of Japan
3. 学会等名 IUGG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taniguchi M., A. Miyakoshi, H. Hamamoto
2. 発表標題 Subsurface warming revealed from repeated measurements of temperature-depth profiles in the world
3. 学会等名 IUGG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsubayashi O., H. Hamamoto, S. Ehara
2. 発表標題 Study of Land Surface Heat Transfer by Combining 1m deep Ground Temperature Monitoring and TIR Repeated Observation from a Satellite
3. 学会等名 IUGG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka A., M. Yamano, H. Hamamoto
2. 発表標題 Towards a Better Understanding of the Thermal Structure of the Lithosphere in and Around Japan: Releasing the New Database
3. 学会等名 IUGG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taniguchi M., A. Miyakoshi, H. Hamamoto, V. Cermak
2. 発表標題 Subsurface warming revealed from repeated measurements of temperature-depth profiles in the world
3. 学会等名 2019 Fall Meeting, AGU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱元栄起, 八戸昭一, 宮越昭暢, 林武司, 小泉謙
2. 発表標題 地下水観測井を活用した地下水・地下熱環境評価 - 2 関東平野中央部における地下熱環境の把握と地中熱利用 -
3. 学会等名 応用地質学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱元栄起, 白石英孝, 中山雅樹, 大澤千恵子, 増田直人, 染谷由浩
2. 発表標題 関東中央部における地中熱ヒートポンプ実証試験
3. 学会等名 日本地熱学会令和元年学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miyakoshi A., T. Hayashi, H. Hamamoto, S. Hachinohe
2. 発表標題 Evaluation of groundwater environment changes due to urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan: Application of subsurface temperature observation integrated of long-term
3. 学会等名 46th Annual congress of the International Association of Hydrogeologists
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林武司, 宮越昭暢, 八戸昭一, 濱元栄起
2. 発表標題 流域水資源管理に求められる広域地下水流動評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮越昭暢, 林武司, 八戸昭一, 濱元栄起
2. 発表標題 流域水資源管理に求められる地下水モニタリング-首都圏既設観測井網を活用した地下水開発の影響評価-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中明子, 山野誠, 濱元栄起, 後藤秀作, 松本拓己
2. 発表標題 Towards a better estimation of the temperature distribution beneath the Japanese Islands
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮下雄次, 濱元栄起
2. 発表標題 震災復興工事に伴う大槌自噴帯湧水の変化
3. 学会等名 2019年度 日本水文科学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江原幸雄, 藤井光, 野田徹郎, 松林修, 松本光央, 笹田政克, 神谷章夫, 福岡晃一郎, 濱元栄起
2. 発表標題 1m深地温測定による地球温暖化・ヒートアイランド現象の実証的理解(その5)
3. 学会等名 日本地熱学会令和元年学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 濱元栄起	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日報ビジネス	5. 総ページ数 雑誌記事
3. 書名 地球温暖化 2021年7月号 (寄稿) 地中熱源ヒートポンプの効率の高さを確認	

1. 著者名 濱元栄起、山野誠	4. 発行年 2019年
2. 出版社 産業技術総合研究所 地質調査総合センター	5. 総ページ数 データベース・CD-ROM
3. 書名 日本列島及びその周辺域の地殻熱流量データベース	

1. 著者名 濱元栄起、八戸昭一、石山高、柿本貴志、白石英孝	4. 発行年 2019年
2. 出版社 埼玉県	5. 総ページ数 219
3. 書名 埼玉県環境科学国際センターセンター報（地中熱利用システム導入のための地下環境情報の整備 及び導入コストの削減）	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 熱物性測定装置および熱伝導率の測定方法	発明者 濱元栄起	権利者 埼玉県
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-031643	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

〔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
研究分担者	八戸 昭一 (Hachinohe Shoichi) (70415397)	埼玉県環境科学国際センター・研究推進室・室長 (82405)	
研究分担者	石山 高 (Ishiyama Takashi) (80297621)	埼玉県環境科学国際センター・土壌・地下水・地盤担当・担当部長 (82405)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	柿本 貴志 (Kakimoto Tkashi) (00462747)	埼玉県環境科学国際センター・土壌・地下水・地盤担当・専門研究員 (82405)	
研究分担者	宮下 雄次 (Miyashita Yuji) (40416079)	神奈川県温泉地学研究所・研究課・専門研究員 (82716)	

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