

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02300

研究課題名(和文) 帯水層蓄熱運用時の帯水層内温度分布の実態把握及び蓄熱井戸間の熱干渉に関する研究

研究課題名(英文) Investigation of actual condition of temperature distribution in aquifer and thermal interference between heat storage wells during aquifer heat storage operation

研究代表者

西岡 真稔(Nishioka, Masatoshi)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40287470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,600,000円

研究成果の概要(和文)：実運用される蓄熱井戸に対して、距離27m(観測井1)と40m(観測井2)の地点に、観測井を構築し、水温の計測を実施した。観測井は冬期に冷水を蓄熱する熱源井戸から離隔して設けており、2019年度の冬期から2021年度の冬期までの3年に渡り、冷水を帯水層内に蓄熱する際の、周囲への冷水塊の広がり状況を水温変化として観測しデータを蓄積した。三次元熱流動シミュレーションによる水温計算値と観測井における水温測定値を比較することにより、両者が一致するときの熱流動パラメータを探索し、帯水層厚さ、地下水流速、熱分散長を同定した。また、数値計算により、熱源井戸周囲の水温分布を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

観測井の温度観測値を用いることで熱源井戸における揚水温度を用いた同定では評価することのできなかつた帯水層厚さや地下水流速についての評価が可能であることを明らかとした。また同定結果をもとに、観測井戸の以外の地点の水温分布について内挿・外挿により求めた。以上の成果は、先行研究では不明であった帯水層内部の蓄熱水塊の広がり状況を実測に基づく推定値を示した新規の知見であり、帯水層蓄熱において熱干渉を考慮した井戸配置を設計する際の有用な基礎資料となろう。

研究成果の概要(英文)：The observation wells were constructed at a distance of 27m (observation well 1) and 40m (observation well 2) from the actual reservoir, and the water temperature has been measured. Two observation wells were constructed near a heat source well to store cold water in winter. Over the three years from the winter of 2019 to the winter of 2021, the spread of cold water masses around the heat source wells was observed and recorded as changes in water temperature. By comparing the calculated water temperature by the three-dimensional heat flow simulation with the measured water temperature in the observation well, we searched for the heat flow parameters when they match, and identified the aquifer thickness, groundwater flow velocity, and heat dispersion length. In addition, the water temperature distribution around the heat source well was estimated by numerical calculation.

研究分野：都市の熱環境・エネルギー有効利用

キーワード：帯水層蓄熱 冷暖房 省エネルギー 低炭素 温度分布 地中熱利用

1. 研究開始当初の背景

地中蓄熱利用方式のひとつである帯水層蓄熱システム（以下では ATES と略す）は冷房用に用いる冷水を蓄熱する場合は、揚水井戸から地下水を汲み上げ、熱交換器を介して冷却し、還水井戸から地中の戻し冷水を地中に蓄える蓄熱方式である。土壌蓄熱方式（ボアホール式ともいう）と比較すると、冷水や温水を直接地中に出し入れを行うため、井戸 1 本あたりの蓄熱能力が大きくコスト的に有利であり、地中熱利用の進んだヨーロッパでは、ATES が 3000 件以上も稼働している。一方、日本では厳しい揚水規制のため実施の導入が数十件にとどまり、研究も広がりを見せていない。しかし、現在では地盤沈下は沈静化し地下水位は回復しており、2014 年に水循環法が成立し地下水の「適正かつ有効な利用」が認められる時代となった。さらに 2015 年から環境省は「地下水採取規制のあり方」について検討を開始している。また、大阪市は 2018 年 8 月に帯水層蓄熱利用の普及に向けた国家戦略特区の規制緩和提案を発表しているなど、近い将来に普及が期待される有望な技術となった。

ヨーロッパでは帯水層の厚さが数十 m に及ぶ例が多いが、日本では数 m~10m 程度と薄い場合が多く、また上下に薄い層が積層するなど複雑な構造となることもある。このような帯水層の地質構造の違いは、帯水層内での蓄熱熱塊の広がりにおいても違いをもたらす。例えば、薄い帯水層での蓄熱塊は水平方向に扁平で面的に大きく広がる形態となるはずであり、水平方向の熱の広がり状況がかなり異なると予想される。しかし、帯水層内の蓄熱水塊の広がり状況について、実態把握を主題とした研究論文は、海外においては数例あるものの、日本では皆無である。

2. 研究の目的

本研究では、ATES が数十年の期間にわたり長期に運用される際に、生成された蓄熱水塊が帯水層および上下の不透水層の熱環境に及ぼす影響について、温度変化の生じる空間の大きさおよび温度差を明らかにすることを目的とする。

本研究では、次の 2 項に要約されるシンプルな研究目的をたてた。

- ・蓄熱井戸周りに複数の観測井を設け、実用規模で運用された ATES の帯水層内温度分布を観測し、蓄熱塊の広がり実態を解明し、2 年間の継続観測により知見を蓄積する。
- ・観測結果を基に、帯水層の熱流動パラメータを同定し、対象帯水層を模擬する数値モデルを構築する。数値計算により、井戸間の干渉による混合損失を評価する。

熱源井戸から離隔距離 27m と 35m の位置に観測井を設け、そこで得られる水温の時系列変化を用いる分析を行うが、これは、体積 30 万~40 万 m³ に及ぶ還水の結果であり、約 1 ヶ月かけて離隔距離 27m の位置に到達した蓄熱水塊は、実運用された ATES 敷地で無ければ得られない大規模な蓄熱水塊である。

3. 研究の方法

(1) 観測井の構築と帯水層内温度の観測について

図 1 に示すように、研究対象地の蓄熱井戸は、東西軸に沿って熱源井戸（低温）と熱源井戸（高温）の 1 対の熱源井戸で構成され、両者の離隔距離は 154m である。ボーリング調査に基づき、帯水層は図 2 のように深さ 42.5m 位置（厚さ 5.1m）と深さ 51.7m 位置（厚さ 2.3m）の存在が確認され、それにあわせてスクリーンが設置された。観測井戸は熱源井戸を結ぶ方向に沿って配置する予定であったが、敷地の関係から、やや南方向にずらした配置とし、低温井戸から東南東に 27m 地点（観測井戸 1）、40m（観測井戸 2）の 2 本を設置した。蓄熱水塊と周辺部の境界に現れる前線（空間温度の急勾配箇所）は、蓄熱塊半径と還水半径の中間に現れるので、観測井戸 1 は注水開始約 30 日後に、観測井戸 2 は約 50 日後に蓄熱水塊の前線が通過する際の温度時間変化を観測できると予想した。この温度の時間変化から、次項の数値シミュレーションと合わせた分析により、帯水層内の空間的溫度分布を推定する。

(2) 数値シミュレーションを用いた帯水層熱流動パラメータの同定と帯水層内空間温度分布の推定

報告者の既往研究に基づき、揚水温度の時間変化を観測し、熱流動パラメータのうち、熱分散長、熱伝導率、環境流速（地下水の自然流れの流速）について、熱流動パラメータ毎に、順次分けて同定する。その後、最後のステップとして、同定された熱流動パラメータを用いてシミュレーションを行い帯水層内の空間分布を明らかにする。

4. 研究成果

(1) はじめに

筆者らの既往研究を含め、帯水層の熱流動パラメータを同定する先行研究は、熱源井戸の還水・揚水温度変化をもとに熱流動パラメータを同定する方法が用いられてきた。これに対し、本研究では実運用に供されている帯水層蓄熱システムを対象に観測を行い、熱源井戸から発して観測井戸に至る蓄熱水塊の膨張過程について水温観測により把握する方法を用いる。前述したように、このような観測が行われた先行研究は国内外にみあたらず、この方法による熱流動パラ

メータの同定自体が新規の試みである。

(2)対象とする帯水層蓄熱システムと観測井戸における水温変化

兵庫県神戸市にある工場敷地内で実運用の供されている帯水層蓄熱システムの熱源井戸（低温側）に近接して観測井戸を設置した（図1）。熱源井戸1における帯水層の深さおよび井戸のスクリーン位置を図2に示す。ボーリング調査から判定された帯水層は2層に分かれておりそれぞれにスクリーンが設けられている。本研究ではスクリーン位置が蓄熱に寄与する帯水層と考えて分析を行った。ATESは、2019年12月より運用が開始され現在も運用中であり、表1に運用条件の概要を、表2にATESの運転モードと開始日・終了日を示す。

2010年12月～2022年3月までの運用状況として、冬期と夏期のシーズン毎の積算蓄熱量を図3に示す。冷水蓄熱量を負の値、温水蓄熱量を正の値で示している。第1サイクルはコロナ禍で対象地建物の空調運転が通常では無かったため、冷水蓄熱量と温水蓄熱量がバランスしていないが、第2サイクル以降では、冷水蓄熱量と温水蓄熱量を徐々にバランスさせるよう運転が行われている。実運用されたATESシステムであるので、実験規模とは異なり積算蓄熱量は1000GJを超える大規模な蓄熱が行われていることがわかる。

観測井戸1、2において、深さ約45mの位置に熱電対を設置し水温観測を行った。2019年12月から2022年3月までの観測井戸における水温変化を図4に示す。研究当初の予想通り、熱源井戸から還水された蓄熱水塊は還水開始から1～2ヶ月ほどの時間経過の後、観測井戸における水温変化として観測された。以下では、熱流動数値計算と観測井戸1で実測された水温変化を比較照合し、実測の水温変化を説明できるような数値計算条件（熱流動パラメータ）を求める方法で同定を行う。熱流動数値計算は、参考文献[1]に示す方法と同様であり、着目する熱流動パラメータの適合性検討を順次進めた。

以下では、筆者らが従来行っていた同定法を「熱源井戸水温同定法」と称し、本研究で検討する同定法を「観測井戸水温同定法」と称する。熱源井戸水温同定法は熱源井戸において帯水層に還水（注入）する水温・流量を入力条件とし、数値計算により揚水時の水温・流量を応答として求め、実測値と最も適合する数値計算条件に用いた熱流動パラメータを同定値とする同定法である。これに対し、観測井戸水温同定法は熱源井戸において帯水層に注入（還水）する水温・流量を入力条件とし、数値計算により観測井戸位置の帯水層内部の水温を応答として求め、実測値と最も適合する数値計算条件に用いた熱流動パラメータを同定値とする同定法である。観測井



図1 熱源井戸と観測井戸の配置

図の左右方向が東西軸である。熱源井戸1・3は低温井戸であり、熱源井戸2は高温井戸である。熱源井戸3は流量確保のために熱源井戸1の近傍に追加された井戸であり、両者は一体として運用されている。

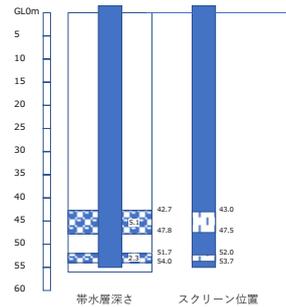


図2 熱源井戸1における帯水層深さとスクリーン位置

表1 帯水層蓄熱システムの運用条件

事項	内容
週間スケジュール	平日(8:00～18:00運転)、土日祝(停止)
夏期還水温度	23℃
冬期還水温度	10℃
還水流量	熱負荷に応じて200m ³ /日～600m ³ /日

表2 運転モードと開始・終了日

蓄熱サイクル	運転モード	年月日
第1サイクル	冬期還水開始	2019年12月2日
	冬期還水終了	2020年3月18日
	夏期揚水開始	2020年7月27日
	夏期揚水終了	2020年10月22日
第2サイクル	冬期還水開始	2020年12月3日
	冬期還水終了	2021年3月31日
	夏期揚水開始	2021年5月25日
	夏期揚水終了	2021年10月18日
第3サイクル	冬期還水開始	2021年11月8日
	冬期還水終了	2022年3月24日

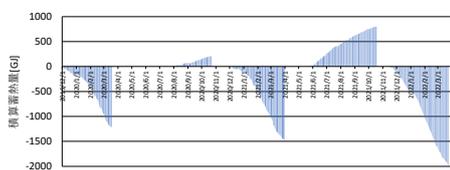


図3 冬期・夏期別の積算蓄熱量

表3 同定ステップ毎の計算条件

同定項目	帯水層深さ [m]	環境流速 [m/year]	数値計算値として用いたレイヤー深さ [m]	縦断長さ [m]
ステップ1 帯水層深さの同定	3.1, 5.1, 7.1の3水準	0	-43.0～-45.6の6レイヤー平均	1
ステップ2 環境流速の同定	3.1	20, 40, 60の3水準	-43.0～-45.6の6レイヤー平均	1
ステップ3 ヤー選定	3.1	40	-43.0～-45.6の6レイヤー平均	1
ステップ4 熱分散長の同定	3.1	40	-46.6と-48.2の2レイヤー平均	0.5～2.3水層

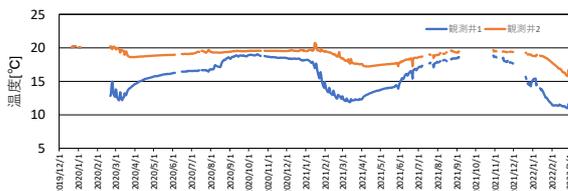


図4 観測井戸の実測温度

戸位置の温度は、熱源井戸から還水された蓄熱水塊が、観測位置まで流動した結果で決まる水温であるので、帯水層熱流動パラメータが同定できれば、観測井戸位置の水温が推定されるのみならず、熱源井戸から観測井戸に至る帯水層水温の空間分布が推定できたといえよう。

(3) 観測井戸水温同定法

事前検討により、熱流動パラメータと観測井戸水温との関係を、次のように把握した。

- ・観測井戸への蓄熱水塊の到達時期に対して、帯水層厚さの影響が支配的であること
- ・還水終了時から次サイクルの還水開始時までの水温変化に対して、環境流速の影響が支配的であること
- ・観測井戸の水温変化に対して、熱分散長の影響は帯水層厚さと環境流速が与える影響と比べて小さいこと
- ・観測井戸の水温変化に対して、容積比熱と熱伝導率が与える影響は、熱分散長と比べて無視できること

以上の知見をもとに、表3に示す4段階のステップで同定を行った。

①同定ステップ1：帯水層厚さの同定

予備検討において、観測井戸に蓄熱水塊が到達する時期に最も影響の大きな要因は、帯水層厚さであることがわかったので、先ず帯水層厚さについて検討した。第2サイクル還水開始日(2020/12/3)から還水終了日(2021/3/31)の期間について、帯水層厚さを3.1m~7.1mまでの3水準で変化させ、観測井戸水温計算値を実測値と比較し図5に示す。また、図6は温度の時間変化勾配[K/day]を示す。ここでは帯水層厚さ3.1mが、温度の時間変化勾配のピークの出現日および時間変化勾配が最も適合している結果が得られた。帯水層厚さは図3に示すスクリーン位置から2箇所スクリーンの合計値である6.1m(4.5m+1.7m)と想定していたが、それより薄い帯水層厚さと同定される結果となった。なお、帯水層厚さの同定は、観測井戸水温同定法により初めて同定される結果であり、先行研究では同定されたことがない。

②同定ステップ2：環境流速の同定

環境流速について、東から西方向流れとして0m/year~60m/yearの5水準で変化させて、数値計算結果を実測値と比較し図7に示す。第1サイクル冬期還水終了後(2020/3/18)から第2サイクル冬期還水開始(2020/12/3)までの間の水温変動は、環境流速の影響を大きく受けており、流速40m/yearの時に、還水開始時(2020/12/3)の数値計算水温は実測値と最も適合する結果が得られた。ただし、還水停止時(2021/3/31)の水温計算値は実測値と1Kほど外れており乖離は大きい。従来法では、環境流速に対する熱源井戸揚水温度変化の感度は高くなく、流速の同定は曖昧であったが、観測井戸水温を用いた同定では明確に同定された。

③同定ステップ3：水温計算値における深さ温度分布の検討

観測井戸の実測値は深さ45m付近の局所的な水温である。一方、深さ方向に空間分割しており、深さ方向温度分布がある。同定ステップ1~2においては、-43.5m~-45.6mの6層(レイヤー)平均値を用いていたが、図7で示したように還水停止時(2021/3/31)に数値計算値と実測値に乖離があり、その原因は実測値と計算値の深さが対応していない可能性があるかと推測した。そこで、深さ別の水温計算値と実測値を比較し、最も適合する深さの数値計算値を探索した。図10によれば、-46.2mと-46.6mの2層の中間値が実測値と最も適合している結果が得られた。この

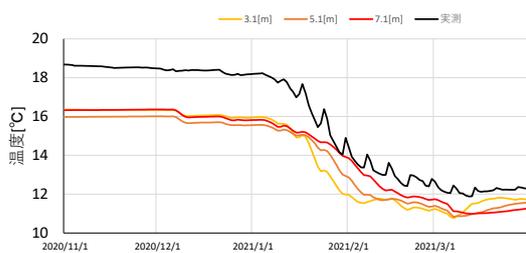


図5 観測井戸温度に関する計算値と実測値の比較(環境流速0、縦熱分散長1.0m)

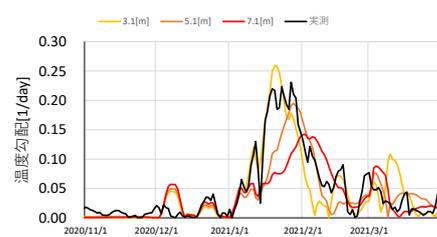


図6 観測井戸温度の時間勾配に関する計算値と実測値の比較(環境流速0、縦熱分散長1.0m)

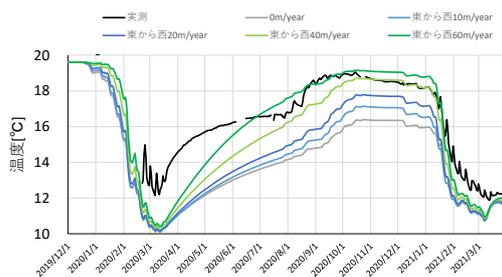


図7 観測井戸温度に関する計算値と実測値の比較(帯水層厚さ3.1m、縦熱分散長1.0m)

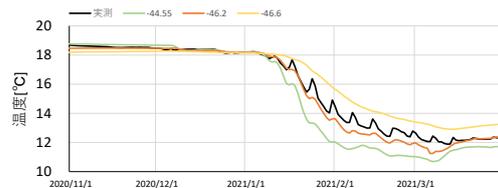


図8 観測井戸温度に関する計算値と実測値の比較(帯水層厚さ3.1m、縦熱分散長1.0m、環境流速40m/year)

同定ステップは現段階では、推測に基づくものであり、実測により深さ方向温度分布の詳細を計測し照合することは今後の課題として残った。

④同定ステップ4：熱分散長の同定

従来の同定法である熱源井戸水温同定法では、熱分散長が揚水温度推定に対して最も影響の大きいパラメータであったが、観測井戸温度を用いた同定では、最も影響が小さいので、最後のステップとして同定した。縦熱分散長を0.5m~2.0mまで（横熱分散長は縦熱分散長の1/10）の3水準で変化させ、適合度合いを判定したが、0.5mを除外できたが1.0mと2.0mの差はほとんどみられないので、縦熱分散長は1~2m程度と同定した。

以上の同定手順で得た熱流動パラメータ（帯水層厚さ、環境流速、熱分散長）を用い、観測期間全体にわたり実測値と計算値を比較すると図9である。第1サイクルの冬期還水終了時水温、第2サイクルの還水開始時水温および還水終了時水温はよく適合している。冬期還水終了後から夏期の還水終了にわたる期間では乖離が大きい、現在のところ、この原因を解明できていない。

(4) 帯水層内の空間温度分布

数値計算により帯水層内の空間温度分布を推定し、図10に示す。図10では第2サイクル冬期還水開始直前(2020/12/2)における温度分布と冬期還水終了時(2021/3/31)における温度分布計算値を示すとともに、同時期の観測井戸における実測値を示した。このように実測値を踏まえた上で、帯水層内の空間温度分布を推定した先行研究はこれまでに無く、本研究によって新規の知見が得られた。熱源井戸から約80m地点まで蓄熱水塊が広がっていることが把握され、熱源井戸1と熱源井戸2の離隔距離である154mの中間位置に及んでおり、蓄熱水塊の広がりから考えると、80m付近の位置では熱干渉が生じている可能性がある。低温蓄熱塊と高温蓄熱塊の混合による熱干渉の分析は、本研究課題の最終課題として掲げたが、今後の課題として残すことにした。

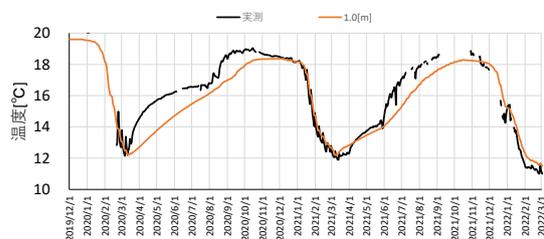


図9 観測井戸温度に関する計算値と実測値の比較（同定値を用いて計算した。観測期間全体を示す）

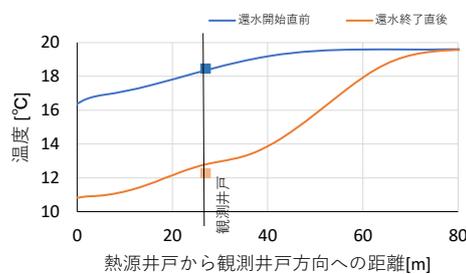


図10 冬期還水開始直前と冬期還水終了時の帯水層内温度分布

参考文献

[1]仲西琴音, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜. 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究(第4報)蓄熱井近傍温度を用いた蓄熱特性同定. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集. 2020, vol. 2, p. 173-176.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 中尾正喜, 仲西琴音, 西岡真稔, 中曾康壽	4. 巻 2
2. 論文標題 帯水層蓄熱システム企画のための揚水温度予測手法（第1報）既往研究の無次元化アプローチと課題	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	6. 最初と最後の頁 169,172
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 仲西琴音, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜	4. 巻 2
2. 論文標題 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究（第4報）蓄熱井近傍温度を用いた蓄熱特性同定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	6. 最初と最後の頁 173,176
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜	4. 巻 2
2. 論文標題 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究（第5報）2層利用型帯水層蓄熱システムの提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	6. 最初と最後の頁 177,180
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 仲西琴音, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 中曾康壽	4. 巻 1
2. 論文標題 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究（第6報）冬期冷水蓄熱の増量手法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	6. 最初と最後の頁 1,4
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 中谷公亮, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜	4. 巻 2
2. 論文標題 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究 (第3報) 地下水流速、井戸配置、積算流量が熱回収率に与える影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	6. 最初と最後の頁 145, 149
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 仲西琴音, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜	4. 巻 -
2. 論文標題 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究 -蓄熱塊の広がりや踏まえた蓄熱特性の同定-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 -
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------