

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18899

研究課題名（和文）ヒートアイランド対策としての京町家における井水利用暖房

研究課題名（英文）Well water heat-pump systems for a traditional Japanese house, Kyo-machiya as countermeasure against heat island phenomena

研究代表者

銚井 修一（Hokoi, Shuichi）

京都大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：80111938

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：a)京町家の内外温熱環境の測定、エネルギー使用量の調査による実態把握に基づく京町家の温熱環境改善策の提案、b)調査対象住戸および周辺住戸における井戸の水温・水位、HPシステムの運転状況調査に基づく地下水流が地盤の温度変化に及ぼす影響についての検討および井戸水温度と水位を再現するシミュレーションモデルの作成と地下水流速の推定を行うと共に、c)井水の一部汲み上げにより井戸水利用HPシステムの冬季暖房効率を改善し、井戸利用HPシステムによる暖房の可能性を示した。また京都市の井戸分布調査、井戸水利用HP運転による地盤温度低下の算定を行い、ヒートアイランド対策としての可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒートアイランドによる夏期の高温化は深刻な問題となっているが、その点では京都市も例外ではない。一方で、伝統的住宅の代表とも言える京町家は土壁・坪庭などに象徴される木造住宅でありその存続が望まれているが、現代的な生活スタイルへの適応および省エネルギーへの対応には多くの課題を抱えている。本研究は長い年月にわたる地盤蓄熱に着目し、その抑制低減がヒートアイランド問題の解決につながるという視点より対応策を提案するものであり、個々には解決が難しい都市環境問題と伝統的市街地住宅の温熱環境問題を、井戸水を利用したヒートポンプ暖房を通して同時に解決することを目的としており、その学術的および社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：a)Understanding present situation and proposing improvement measures of thermal environment of a traditional residence, Kyo-machiya, based on surveyed results on thermal environment and energy consumption, b) examination of influence of groundwater flow on ground temperature, development of simulation model calculating well water temperature and level, and estimation of groundwater velocity based on the measured well water temperature, level and HP system operation were carried out, and c) applicability of the proposed HP system using well water was confirmed by improvement of system efficiency by draining well water. d) Potential of the proposed HP system as countermeasure against heat island phenomena was shown based on surveyed result on well distribution in Kyoto city and simulated reduction in ground temperature by the operation of HP system using well water.

研究分野：建築環境工学

キーワード：ヒートアイランド 京町家 室内温熱環境 井戸 水冷ヒートポンプ 地盤蓄熱

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化も加わり、ヒートアイランドによる都市の夏期の高温化は深刻な問題となっているが、京都市も例外ではない。一方で、伝統的住宅の代表とも言える京町家は、土壁・瓦屋根・坪庭などに象徴される木造住宅でありその存続が強く望まれているが、現代的な生活スタイルへの適応および省エネルギーへの対応には多くの課題を抱えている。

2. 研究の目的

本研究は長い年月にわたる地盤温度上昇（蓄熱）に着目し、その抑制さらには低減がヒートアイランド問題の根本的な解決につながるという視点より対応策を提案するものであり、個々には解決が難しい都市環境問題と伝統的市街地住宅の温熱環境問題を、井戸水を利用したヒートポンプ（以下 HP）暖房により解決することを目的としている。

3. 研究の方法

以下の項目について検討を行った。

- (1) 京町家の温熱環境とエネルギー使用の実態把握と温熱環境改善策の提案
 - ① 調査対象京町家の内外温熱環境の測定、エネルギー使用量の調査による実態把握
 - ② 京町家の温熱環境改善策の提案
- (2) 井戸水と HP システムの状況調査と井戸水温度・水位のシミュレーションモデル
 - ① 調査対象住戸および周辺住戸の井戸の水温・水位、HP システムの運転状況調査
 - ② 調査対象住戸の井戸水温度と水位を再現するシミュレーションモデルの作成、対象住戸と周辺住戸の井戸における測定結果による地下水流速の推定
- (3) 地下水・井戸利用 HP システムによる暖房の可能性
 - ① 井戸水利用 HP システムの暖房効率の実態
 - ② HP システムの暖房効率の汲み上げによる効率改善
 - ③ 地下水・井戸利用 HP システムによる暖房の可能性検討：実験およびシミュレーション
- (4) 地下水利用 HP 暖房システムによるヒートアイランド抑制効果の検討
 - ① 地下水流が地盤温度に及ぼす影響の検討
 - ② 都市部地盤温度解析モデルの作成と地盤温度の予測
 - ③ 京都市における井戸の分布の調査と提案システムの利用可能性検討

4. 研究成果

(1) 京町家の温熱環境とエネルギー使用の実態把握と温熱環境改善策の提案

- ① 京町家の温熱環境とエネルギー使用の実態把握（省略）
- ② 温熱環境改善策の提案（省略）

(2) 井戸水と HP システムの状況調査と井戸水温度・水位のシミュレーションモデル

- ① 調査対象住戸および周辺住戸における井戸の水温・水位、HP システムの運転状況調査

1) 概要

京都市に数多く存在する伝統的な住居である京町家の多くには井戸があり、井戸水の熱を利用した HP 暖房は地中熱という再生可能エネルギーの有効利用につながる。地下水の熱を利用するため、地盤の温度を下げ中長期的には京都市の夏季の高温を緩和する。そのような観点より、まず京町家にある既存の井戸の水温と水位を測定し、それらと外気温や降水量との関係について検討した。

2) 井戸水温度・水位の実測調査

HP 冷暖房システムと測定点 2013年12月に京都市西陣地区の京町家の井戸に HP 冷暖房システムを導入し、継続的に調査を行った。測定対象住宅はこの HP 設置住宅とその周辺に位置する4軒である（図1、住戸A～D）。HP 設置住宅の井戸は直径約80cmで、地表面からは約9.0mの深さがある。HP による冷暖房システムと測定点の概要を図2に示す。長さ約26mの採熱管はらせん状に井戸中へ投入されている。HP 室外機と採熱管に不凍液を循環させ熱交換を行い、採熱した熱を暖房に用いる。

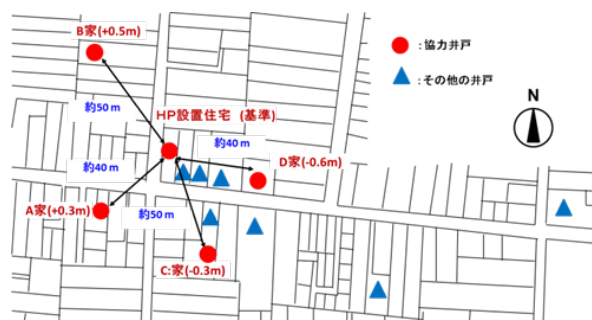


図1. 測定対象住宅の位置

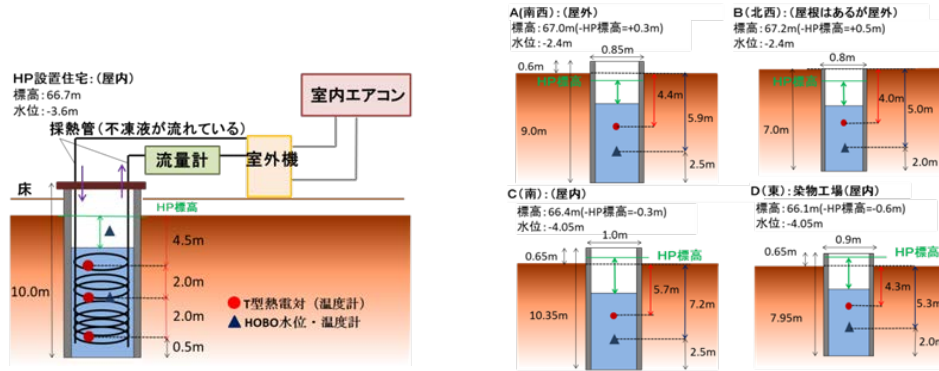


図 2. HP 冷暖房システムと測定点の概要

井戸水温の変化 1年間の井戸（中部）の水温と京都市の外気温を図 3 に示す。HP 設置住宅の井戸水温は冷房期間中は大きく上昇し、暖房期間中に大きく下降し、使用停止 2 週間後にほぼ一定の温度に戻る。

井戸水位の変化 7 月～3 月の井戸水位と京都市の日積算降水量を図 4 に示す。降水量が多い時は井戸水位が上昇すること、西に位置する井戸ほど水位が高いこと、降雨の多い時期を除くと井戸水位は平均的には±0.5 m ほど変動していることが分る。水位変化は住戸 A, B で大きい。住戸 A の井戸は屋外に、住戸 B の井戸は屋根のある屋外に、住戸 C, D, HP 設置住宅の井戸は屋内にあり、井戸への降雨の影響程度が異なるためと考えられる。

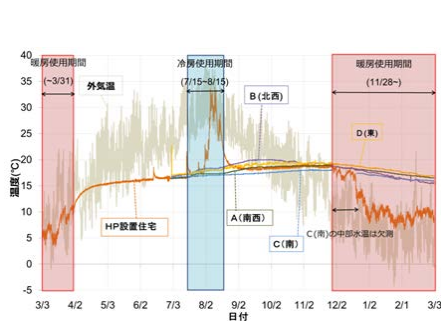


図 3. 対象住宅 5 軒の井戸（中部）の水温

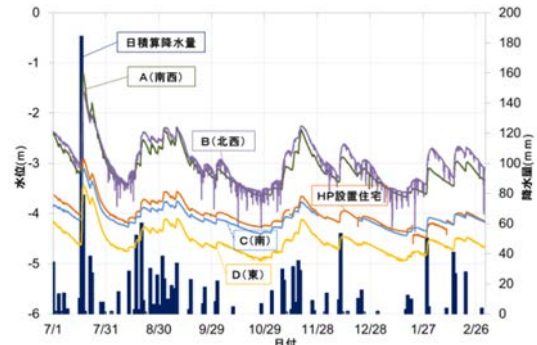


図 4. 井戸水位と降水量

②井戸水温度と水位を再現するシミュレーションモデルの作成と地下水流速の推定

1)はじめに すでに京町家の井戸が HP 暖房熱源として利用可能であることを示しているが、採熱管の位置や井戸への地下水流入の位置、井戸内部での水流などについては推定値を用いていた。ここでは CFD により井戸水温度の実測結果を再現し、流入地下水や井戸内水流の影響を明らかにする。

2)HP 設置井戸内の流体解析モデル HP を設置した井戸内部とその周辺地盤を解析対象とした。井戸排水時の観察結果より、採熱管は井戸底面から約 3m の高さに集中して配置されていると近似した。不凍液と井戸水間の熱貫流率は不凍液還り温度が実測値と合うように設定した。さらに井戸底面から 500mm までの範囲で地下水が流出入するとした。流入する地下水の温度は計算期間の周辺井戸水温の実測値から、流量は停止時の温度回復速度が合うように設定した。

計算には Flow Designer13 を使用し、計算モデルは乱流・高レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルとした。冬季序盤で暖房があまり使用されておらず井戸内の水温がほぼ一様である時期(期間①)と、冬季中盤で暖房が頻繁に使用されて井戸内上下の温度差が大きくなり、井戸水温と地盤温度が著しく低下する時期(期間②)について計算を行った。該当期間の井戸初期水温、不凍液入口温度、流量を計算条件として与えた。

温度の実測結果との比較 冬季序盤では不凍液出口温度の解析結果が実測値よりやや低くなったが、それ以外は大略再現できた。冬季の中盤では暖房使用中の水温変化にややずれが見られた。解析結果の上部水温の低下が小さく遅くなったが、初期条件の水温を上部と中・下部に分けて大きく温度差をつけたことが原因として考えられる。また解析結果の中部・下部の温度低下が遅くなっていることから、地下水の温度をやや高めに設定している可能性がある。

井戸内部の水流の解析結果 期間①では運転開始 10 分後に採熱管の束の内部で上向き、外側で下向きの流れが発生するが、時間経過とともにその流れは小さくなり、下部で循環水流が発生する。期間②では開始直後から下部での循環水流が大きい。

結果として井戸内部の流れは採熱管の下部で生じること、地下水流量は 5.4×10^{-4} [m³/分]程

度であることが分かった。

(3)地下水・井戸利用 HP システムによる暖房の可能性

①はじめに 井戸水利用 HP 暖房システムは長期間の暖房使用に伴い水温が低下するため、継続的な使用が難しい。効率的な井戸水温度回復手法として井戸水の排水を行い、温度や水深、消費電力などの測定結果から効率性の評価、井戸からの排水が井戸水温度に与える影響を検討した。

②実験概要

実験対象 (図 5) 採熱管と排水管は独立して設置されている。水面 (TS)・中部 (TM)・下部 (TL) における水温、井戸の水深、不凍液のヒートポンプ入口・出口温度、不凍液の流量、ヒートポンプと排水ポンプの消費電力を計測した。また、排水限界調査のための簡易実験を行い、排水ポンプの取水口が井戸底面から約 2.5m にあること、排水ポンプ稼働時の水深低下速さは 115cm/h であり、水深回復速度も同程度であることが分かった。

運転概要 一日平均 10 時間の通常の暖房運転を行いながら井戸水をポンプで排水し、排水が水温に及ぼす影響を検討した。ポンプ稼働実験期間は 1 月 3 日～2 月 2 日である。

③実験結果

他井戸との比較 図 6 に他井戸と対象井戸の水深の比較を示す。排水期間の対象井戸の水深変動は大きい平均の変化は小さく、他井戸への影響もほぼない。地下水の容量は大きく排水が地下水深に与える影響は小さい。降水による一時的な水深上昇、冬季の降水量減少に伴う水深の低下が見られる。

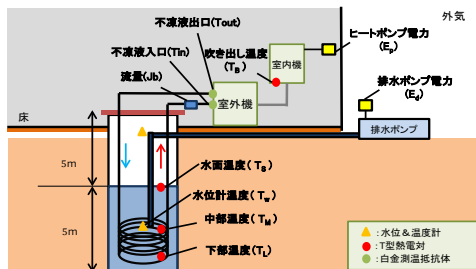


図 5. 測定概要

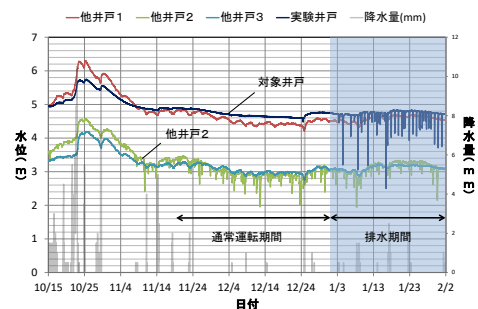


図 6. 対象井戸と他井戸の水深変化

水温の比較 (図 7, 8) 排水を行わない場合 (図 7)、暖房運転中は中・下部の温度が継続的に低下し、停止後ゆるやかに回復する。排水を行うと (図 8)、水温は急激に上昇し、排水停止後に急速に水深が回復する。これより、周囲の比較的高温な地下水が井戸内に流入する。排水無しの場合には 1°C の温度回復に約 5h を必要とするが、1.5h 排水を行うと約 5.3°C の温度上昇が見られた (図 8)。

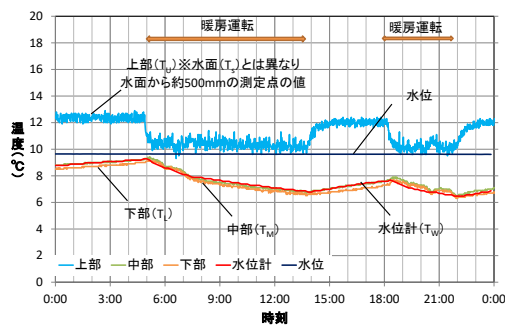


図 7. 排水無しの場合の水温 (02/15)

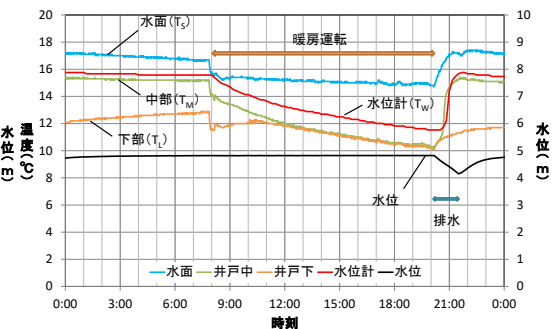


図 8. 排水有りの場合の水温 (01/18)

消費エネルギーの比較 井戸からの取得熱量 $Q_b = c_b \rho_b J_b (T_{out} - T_{in})$ と消費電力 E_p から、暖房システムの成績係数を算出した。排水を行わない場合に比べて COP は約 13% 上昇する。これは、水温上昇による蒸発温度の上昇、それに伴う不凍液の循環流量の減少によると考えられる。また、排水ポンプと HP の消費電力を加えた総消費電力は排水が無い場合の消費電力より少ない。

(4)地下水利用 HP 暖房システムによるヒートアイランド抑制効果の検討

①目的

京都市規模の地盤を対象に、井戸水を利用した HP による冬季暖房を行うことにより地盤の温度をどの程度低下させられるか、また建物が地表を覆うことが地盤温度に及ぼす影響の検討を行う。本節では HP 暖房を行う 1 住戸を中心とする通りを単位として、2 次元円筒地盤を対象として、地表面および地盤深部における温度低下について調べる。

②計算対象地盤と境界条件

井戸を中心軸とする半径方向 8m、深さ方向 20m の地盤を想定した。地下水の流れは比較的遅いとみなし熱拡散のみを扱う。井戸水は、半径 50cm、地表からの深さ 4m~10m の水塊と見なし、HP 運転期間 (11~3 月) には温度 6°C を与え、停止時には周辺地盤と同様にふるまうものとした。地表の一部に建物 (半径 4m) がある場合を想定し、その部分における外気と地表との間の熱伝達抵抗を大きな値とすることで近似する。外気温は平均 16°C、振幅 11.5°C の 1 年周期変化し、日射については、夜間放射と降雨の蒸発冷却による温度低下で相殺されると近似し考慮しない。

③解析結果

井戸水による冷却が無い場合 (図 9)、地中 19.5m の温度はほぼ外気温平均 16°C、8 月の地表面温度は 8m の位置で 24.40°C となる。地表に建物が無く暖房があると (図 10)、8 月の地表面温度はほぼ 24°C、8m で 24.12°C となる。地表に建物があり暖房を行うと (図 11)、15m 以深では 11.9°C 程度であり、井戸冷却による低下は 4°C と大きい。8 月の地表面温度は建物から 8m 離れた位置で 24.07°C となり、上部に建物がある方が、夏季地表面では 0.05 (最遠部)、10°C (建物下) 程度、地盤深部では 0.2°C 程度低くなる。建物はヒートアイランドを抑制する方向に作用する。

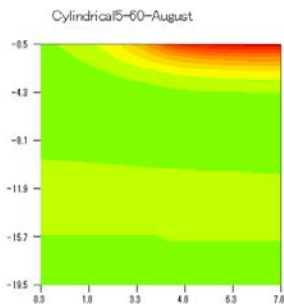


図 9. 暖房無し

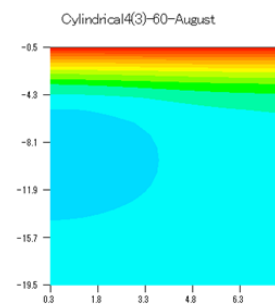


図 10. 暖房有・建物無し

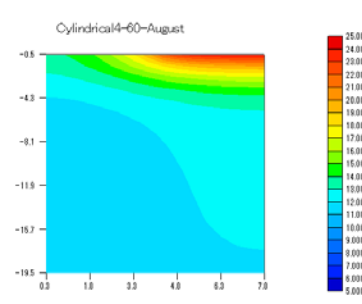


図 11. 暖房有・建物有

④京都市における井戸分布と提案システムの利用可能性検討

京都市内の井戸の分布、個数を示す適切な資料が見つからないが、災害時のための災害協力井戸マップによると、京都市には使われていないが数多くの井戸が存在しており、2) の規模のモデルの適用が可能と考えられる。

京都盆地は、大阪層群とその被覆層から成る堆積層を地盤とした、東西約 8km、南北約 20km の細長い盆地である。礫・砂・粘土層の互層から成る堆積層はその内部に帯水層 (深度 0~100m) を含み、豊富な地下水を貯えている。京都市の大部分の地層は砂礫層で、井戸深度 1.5~21.5m (平均 5.8m)、地下水面 0.2~13.5 m (平均 1.4m) である。井戸としては、主に都市部地表水涵養型が利用可能と考えられる。また地下水流動解析では鴨川沿いと鴨川と桂川とに挟まれた地域に、北から南に向かう地下水流があると推定されている。

また、京都市の地盤構成 (柱状図、図 12) より判断すると、水盆の上層 20m 位には地表水が涵養されていると推定され、提案する HP システムにとって好ましい状況と考えられる。

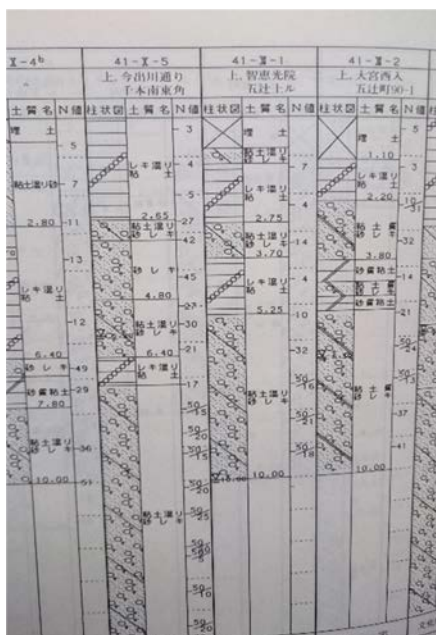


図 12. 柱状図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chiemi Iba, Shun Takano and Shuichi Hokoi	4. 巻 11
2. 論文標題 An experiment on heat recovery performance improvements in well water heat-pump systems for a traditional Japanese house	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1023
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en11051023	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Yonghui Li, Yumai Feng, Zhenyi Kong, Shuichi Hokoi	4. 巻 13
2. 論文標題 Optimization and Assessment of the Protective Shed of the Eastern Wu Tomb	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1652
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en13071652	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Shuichi Hokoi	4. 巻 2
2. 論文標題 Review Paper: Complication-simplification spiral in hygrothermal research	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japan Architectural Review	6. 最初と最後の頁 5-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） org/10.1002/2475-8876.12075	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高野駿・伊庭千恵美・銚井修一
2. 発表標題 京町家の井戸水を利用した暖房が井戸水温度に与える影響の検討 その2 排水ポンプの併用による採熱効率改善効果の検討
3. 学会等名 平成30年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野駿・伊庭千恵美・銚井修一
2. 発表標題 京町家の井戸水を利用した暖房が井戸水温度に与える影響の検討 その2 排水ポンプの併用による採熱効率改善効果の検討
3. 学会等名 平成30年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shun Takano, Chiemi Iba, Shuichi Hokoi
2. 発表標題 Numerical analysis of a ground-source heat-pump system in traditional Japanese "Kyo-machiya" dwellings
3. 学会等名 7th International Building Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中澤結、伊庭千恵美、小椋大輔、山本秀哉
2. 発表標題 町家の断熱改修手法の検討と室内温熱環境評価
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019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
研究 分 担 者	伊庭 千恵美 (Iba Chiemi) (10462342)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	