

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01595

研究課題名(和文)健康な入浴環境設計のための血圧予測モデルの作成

研究課題名(英文)Blood pressure model for designing healthy bathing environment

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) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：入浴時の人体生理応答と周辺温熱環境・被験者の行動との関係を被験者実験により調べた。入浴時の生理応答(皮膚・深部温度、血流、血圧、心拍数)とともに、血管系の時間的変化を超音波画像診断装置を用いて測定し、心拍出量の特徴、頭部、上下半身など身体各部の血流を明らかにした。測定結果をもとに入浴時における血圧や各部温度を再現する生理量予測モデルを作成した。このモデルは周辺環境の非一様性を考慮して皮膚温度や深部温度を予測するとともに、血圧・血流量を算定する心臓血管制御モデルを統合したものである。これを用いて入浴時の解析を行い、測定結果を再現できること、心拍数変化を考慮すると一致は更に良くなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、高齢者を中心に浴室内での事故が多く発生している。その原因として主に、血圧変化により引き起こされる心血管系疾病、入浴時の行為に伴う血流変化による立ち眩みなどが挙げられている。従って、安全な入浴には浴室周りの温熱環境の適切な設計とともに、入浴時の行動に伴う温熱生理応答を理解することが不可欠である。本研究は、安全で健康的な入浴を可能とする入浴環境設計の基礎となる温熱生理モデルを提案しており、その社会的意義は大きい。また、提案した人体温熱生理モデルは、姿勢変化や非一様な周辺環境、深部・皮膚温度などの温熱生理応答と血圧・血流量との相互関係を考慮しており、学術的にも独創性の高いものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, a bathing experiment was conducted to study the human physiological response during bathing. The core temperature, blood pressure, blood flow, and heart rate were measured.

We proposed a novel integrated thermo-cardiovascular regulation model merged with a human thermoregulation model (HTM) and a cardiovascular regulation model (CRM), to predict the human physiological response in transient and non-uniform bathing environment considering the blood flow volume with the thermal environment, the metabolism rate, and the heart rate changes. Meanwhile, the time-varying heart rate is used to adjust the cardiac output of the CRM's circulation in real-time. The results show that the proposed model can accurately predict the subject's thermal physiological response, including blood pressure, and blood flow volume during bathing. The consideration of the metabolic rate and heart rate changes improved the prediction accuracy of the thermo-cardiovascular regulation model.

研究分野：建築環境工学

キーワード：入浴環境 高齢者 非一様環境 非定常環境 血流分布 放熱特性 人体温熱モデル 心臓血管制御系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高齢者を中心に浴室での事故が多く発生している。その原因として主に、周辺温熱環境の急激な変化による血圧変動により引き起こされる心血管系疾病、入浴時の行為に伴う血流変化による立ち眩みが挙げられている。従って安全な入浴には浴室周りの温熱環境の適切な設計とともに、入浴時の行動に伴う温熱生理応答を理解することが不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、安全で健康的な入浴を可能とする入浴環境設計および安全な入浴行為のあり方を明確にするための基礎として、与えられた周辺温熱環境および人体の身体活動において、体温や血圧などの生理応答を適切な精度で予測するための生理量予測モデルを構築し、入浴時における生理量、特に血圧を把握することを目的とする。

### 3. 研究の方法

入浴時の脱衣室 - 浴室 - 浴槽 - 脱衣室間の移動に伴う人体生理応答と周辺温熱環境および被験者の行動との関係を被験者実験により調べ、得られた測定結果を基に入浴時における血圧や人体各部温度の変化を再現する生理量予測モデルの作成を行う。さらにそのモデルを用いて、安全な入浴環境条件を明らかにする。

- (1)被験者実験による入浴に伴う生理応答(各部皮膚温度、深部温度、血流、血圧など)の測定
- (2)超音波画像診断装置による心臓・静脈など血管系の挙動の測定  
心拍出量の時間的変化を調べ、解析モデルに用いるコンプライアンスについて検討  
血流の時間的、場所的変化の特徴を検討
- (3)皮膚表面温度や筋温度、深部温度を予測する人体熱モデルの作成  
冷たい浴槽への手や背中との接触、下半身のみが湯に浸かっている場合などの人体周辺環境の非一様性を考慮したモデル
- (4)心臓、血管などの循環系を表現し血圧を予測する心臓血管制御モデルの作成
- (5)人体熱モデルと心臓血管制御モデルにおける血流量の対応を考慮した統合モデルの作成
- (6)測定結果の再現によるモデルの検証と安全な入浴条件の検討  
両解析モデルに現れる種々のパラメータ値の決定(一部推定)  
人体周辺温熱環境及び人体体位を考慮した入浴時のシミュレーション  
安全な入浴条件の検討

### 4. 研究成果

- (1)被験者実験による入浴に伴う生理応答(各部皮膚温度、深部温度、血流、血圧など)の測定  
実験概要(図1)

実験は冬季に行った(Jan.24,2020)。被験者は健康な50才男性(身長172cm、体重69.3kg)。図1に実験スケジュールを示す。準備室(21)で椅座・安静、脱衣室(18)で脱衣、浴室で50分浴槽入浴(40)、脱衣室で着衣、退室という入浴過程を通して生理量を測定した。測定した生理量は、皮膚温度12点(額、手、上腕、胸、背、腹、腰、大腿[前・後]、下腿[前・後]、足)、コア温度(直腸)、心拍数、血圧、血流量である。血流量は10分毎に3ヶ所(頭部:総頸動脈、下半身:浅大腿動脈、心拍出量:大動脈)で測定し、被験者は温冷感をASHRAE7段階スケールで申告した。

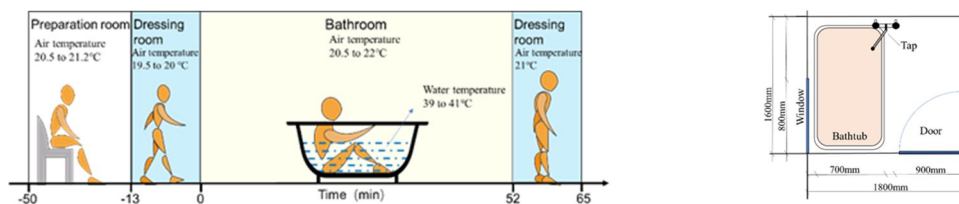


図1 実験スケジュールと浴室構成

#### 測定結果

- 1)図2に周辺環境の温度と相対湿度を示す。湯温は39~41であった。

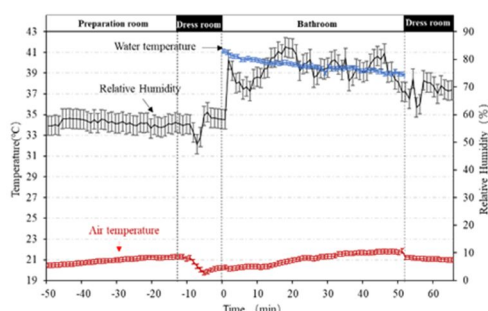


図2 周辺環境の温湿度

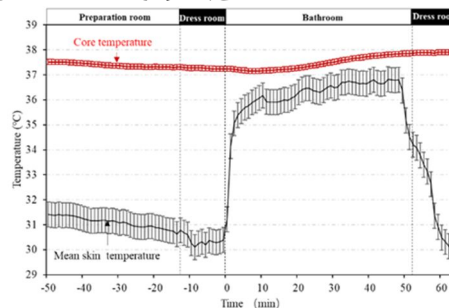


図3 平均皮膚温度とコア温度

## 2) 平均皮膚温度とコア温度

図3に平均皮膚温度とコア温度を、標準偏差とともに示す。平均皮膚温度(T<sub>skin</sub>)は、準備室では比較的安定、脱衣室で脱衣すると低下、浴槽内で急速に上昇した後ゆっくり上昇、浴槽から出ると急速に低下し、脱衣室でも低下を続けた。コア温度(T<sub>core</sub>)は、浴槽に入ったときは少し低下し、10分後に増加に転じ、浴室を出るときには38℃に達する。これは通常の行動と比べて大きな変化である。比較的低温の脱衣室においても、コア温度は低下せずほんの少し増加する。

## 3) 温冷感申告

表1に入浴実験中の温冷感申告値を示す。準備室で減少、浴槽入浴時に増加、入浴後再度減少する。図3と表2より、入浴前は平均皮膚温度はゆっくり減少するが温冷感は一3まで低下し、皮膚温度は浴槽に入った直後に急速に増加し入浴中はゆっくり上昇するが、温冷感はそれに対応して上昇すること、脱衣室では温冷感は減少するがコア温度は上昇を続けることが分かる。

表1 温冷感申告

時刻(分)	-34	-24	-14	0	7	21	35	50	55
温冷感	-1	-2	-3	-3	+1	+2	+3	0	-2

## 4) 心拍数と血圧

図4(a)(b)に心拍数と血圧の時間変化を示す。心拍数は入浴前の脱衣室で急速に低下し、入浴時に上昇を続ける。心拍数の変化傾向は図2の空気温度の変化に似ており、心拍数が周囲空気温度に強く影響を受けていることを示している。安静時の成人の通常血圧は90~140mmHg(収縮期)、60~90mmHg(拡張期)であり、一般的に90/60mmHg以下の血圧は低血圧症と見なされる。被験者の血圧は、準備室では健康の範囲内にあるが(図4(b))、入浴時には徐々に低下し、35分後に拡張期血圧は60mmHgより低くなり低血圧症を示している。

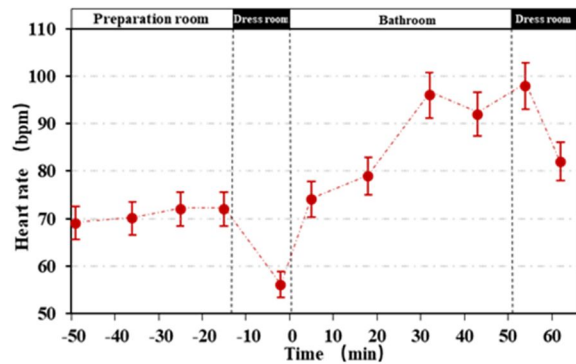


図4(a)心拍数の変化

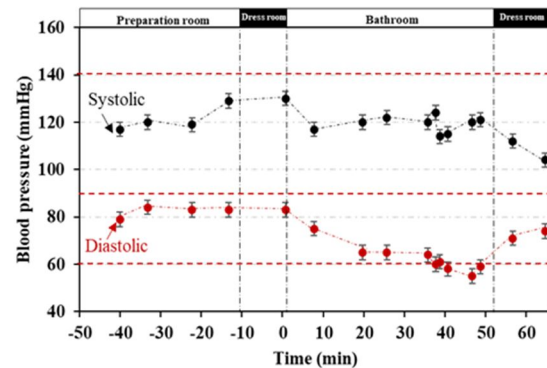


図4(b)血圧の変化

## (2) 超音波画像診断装置による心臓・静脈など血管系の挙動の時間的変化の測定

図5に心拍出量、頭部、下肢の血流量を示す。準備室では、各部分の血流量は少ししか変化しない。入浴中は、心拍出量、頭部、下肢の血流はほぼ1.4、4.7、2倍増加する。入浴前は頭部と下肢は同じ温度の空气中にあり血流は比較的安定していたが、入浴中は頭部と下肢の環境は異なり下肢の周辺は温かい湯となった。一方、頭部は湯より低温の空気に晒されており、下肢の血流は頭部よりも変動が大きかった。入浴後、両パートにおける血流は減少した。

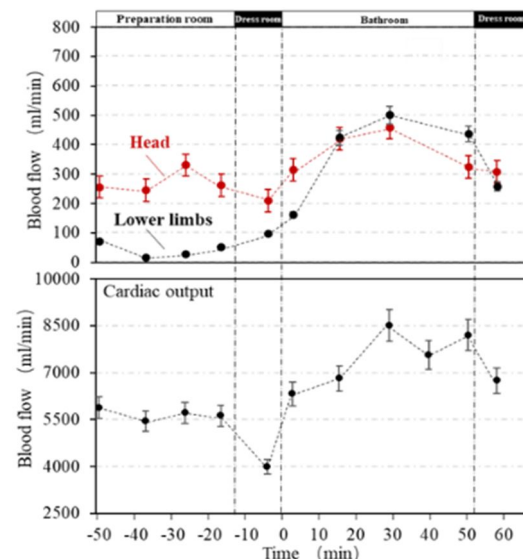


図5 心拍出量、頭部、下肢の血流量

表2 頭部・下肢・他部位の血流量比

	入浴開始時	入浴35分後
Head	5%	9%
Lower limbs	3%	9%
Other parts	93%	84%



非一様な入浴環境が血流分布に及ぼす影響を調べるために、身体各部の血流量比(心拍出量に対する各部分の血流量の比)を計算した。表2に入浴開始時と35分後の血流量比を示す。入浴中、体は非一様な温熱環境下にある、すなわち頭部、上部、上肢は空気中に、下半身、下肢は温かい湯の中にある。入浴開始時と35分後の結果を比較すると、暖かい湯の中にある下肢の血流量比は3%から9%に、頭部は5%から9%に増え、他の部位は93%から84%に減少した。温かい湯の中にある下肢の血流量比は空気環境下にある頭部より顕著に増加すること、入浴は異なる環境下にある身体の血流量分布を変化させることが分かる。

### (3)皮膚表面温度や筋温度、深部温度を予測する人体熱モデルの作成

入浴時の皮膚温度、コア温度、血圧、血流量を含む人体の生理応答を予測するために、StolwijkモデルとWindkesselモデルを結合した真杉モデルに基づいて温熱-心臓血管系制御モデルを提案した。Stolwijk modelを改良するために心拍測定値による代謝量変化を考慮し、Windkessel modelを改良するために心拍測定値によるコンプライアンスの変化を考慮した。

Stolwijk modelに基づく人体温熱制御モデルを図6に示す。入浴時の人体周辺環境の非一様性を考慮するために、より細かい分割モデル(全部で37ノード)とした。特に、空気に接する上半身と湯に浸かる下半身を考慮するために躯幹を2分割した。

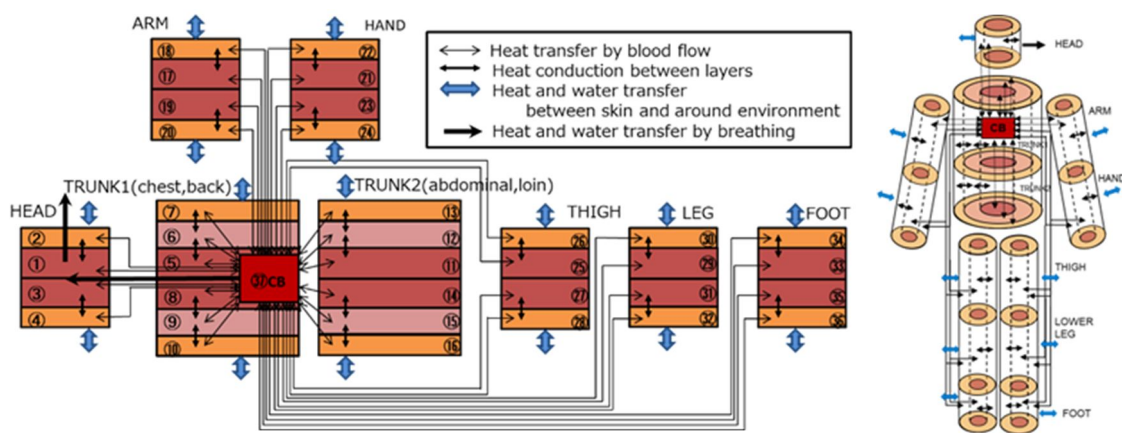


図6 人体温熱制御モデル

### (4)心臓、血管などの循環系を表現し血圧を予測する心臓血管制御モデルの作成

入浴中の血圧と血流量変化を予測するために、Windkessel modelを拡張したモデルを開発した。図7に提案したモデルを示す。このモデルは心、体、肺循環システムよりなり、更に体循環システムは頭部、躯幹、上肢、下肢に、心システムは左右の心室・心房に分けられる。

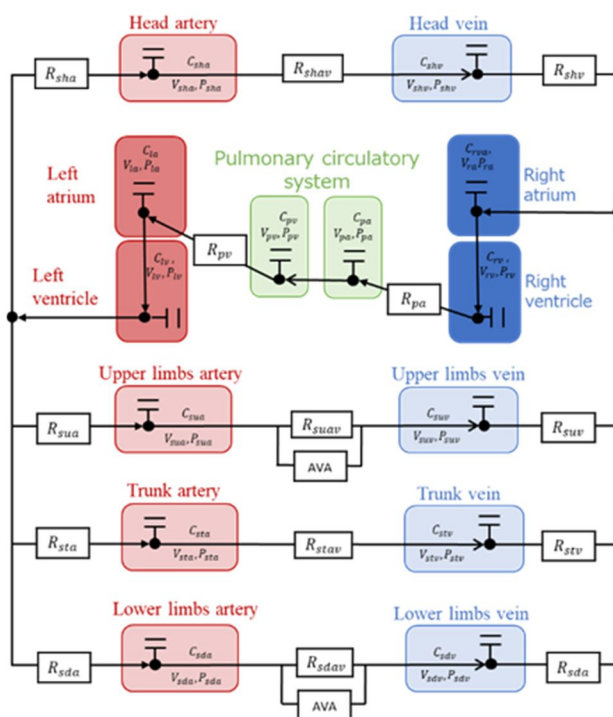


図7 心臓-血管系制御モデル

### (5)人体熱モデルと心臓血管制御モデルにおける血流量の対応を考慮した統合モデルの作成

人体熱モデルでは各部位の熱収支を、心臓血管制御モデルでは各循環系の容量を算出するために血流量を用いるが、両モデルにおける人体の分割方法は異なる。本研究では、両モデルにおける血流量の考え方や部位の対応関係を明確にし、両モデルを統合した（詳細は省略）。

### (6)測定結果の再現によるモデルの検証と安全な入浴条件の検討

両解析モデルに現れる種々のパラメータ値の決定（一部推定）

提案する人体熱モデル - 心臓血管制御モデルの妥当性を検証するために、本入浴実験と同じ温熱環境条件下で解析を行った。その際、22 才の被検者を用いた入浴実験に関して、真杉により検証された Stolwijk と Windkessel の統合 model のパラメータを、本実験の 50 才の被験者にも適用可能と仮定して用いた。但し、心室のコンプライアンスは心拍数の関数とし、心拍数には測定値を用いた。

人体周辺温熱環境及び人体体位を考慮した入浴時のシミュレーション

1)皮膚温度、コア温度、血圧（図 8）、血流量（図 9）

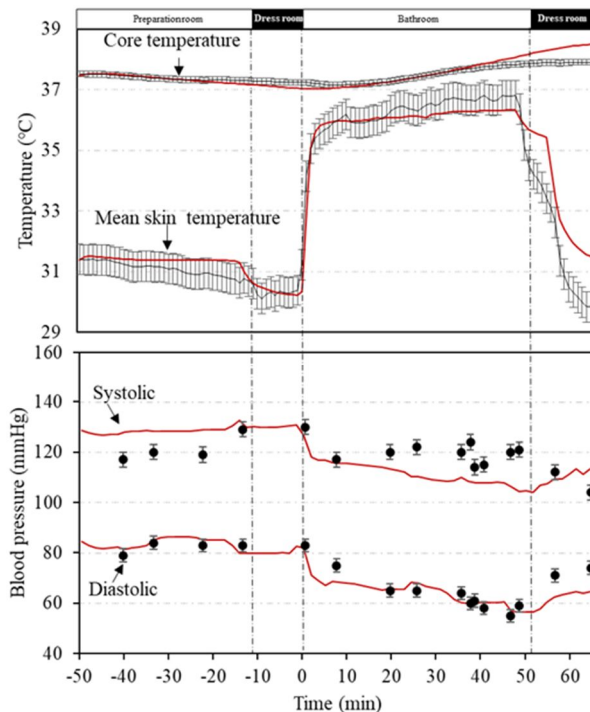


図 8 平均皮膚温度，コア温度，血圧の測定値と計算値の比較

⊥ Experimental results      — Calculation results

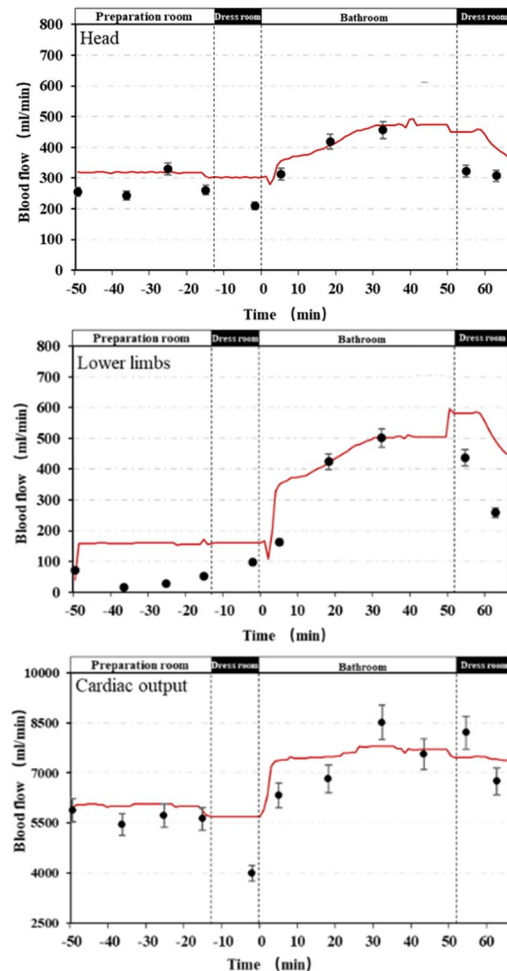


図 9 血流量の測定値と計算値の比較

計算値は測定値によく一致し、提案するモデルの妥当性が示されたと言える。予測精度の向上を目的として、モデルに登場するパラメータ値と代謝量（の心拍数による変化）、コンプライアンス（の心拍数による変化）との関係について検討し、心拍数の変化が及ぼす影響を考慮することにより予測精度が向上することを明らかにした。

安全な入浴条件の検討（結果の詳細は省略）

以上の報告では 50 才の被験者に対する入浴実験の結果のみを示したが、それに続き 20 才代、70 才代の被験者各 1 名を加えた同様の入浴実験（30 分程度の入浴）を行った。基本的には同様の結果が得られ、提案するモデルが妥当であること、さらに高齢被験者の温熱応答が若年被験者に比して遅く変化幅が小さいことが示された。入浴時間、湯温度に応じた適切な対応を取ることにより高齢者でも安全な入浴が可能となること、高齢者よりレスポンスが早く大きい若年者の方が寧ろ入浴時に危険性が高い可能性があることを示した。

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 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高田暁、今井悠喜、銚井修一、小椋大輔、伊庭千恵美	4. 巻 第85巻
2. 論文標題 多数室換気解析に基づく室内環境の改善策の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 249-258
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.85.249	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 Han Liu, Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Chiemi Iba	4. 巻 228
2. 論文標題 Study on physiological response considering blood flow volume in transient and non-uniform bathing thermal environment using thermo-cardiovascular regulation model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 109826
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2022.109820	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 Ayaka Takii, Chiemi Iba, Shuichi Hokoi	4. 巻 232
2. 論文標題 Analysis of temperature preference of guests from various countries/regions during summer and winter in a budget hotel in Kyoto, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 110052
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2023.110052	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 浅野智司・伊庭千恵美・銚井修一・土居信一
2. 発表標題 食品スーパーにおける滞在者の生理量・心理量の変化と生理量予測モデル
3. 学会等名 平成令和元年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居信一・浅野智司・伊庭千恵美・銚井修一
2. 発表標題 食品スーパーにおける空調の最適制御を目標とした滞在者の温冷感予測に関する研究(その1)食品スーパーにおける滞在者の生理量・心理量の変化
3. 学会等名 令和元年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野智司・伊庭千恵美・銚井修一・土居信一
2. 発表標題 食品スーパーにおける滞在者の生理量・心理量の変化と生理量予測モデル(その2)食品スーパーにおける滞在者の生理量予測モデル
3. 学会等名 令和元年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居信一・伊庭千恵美・浅野智司・銚井修一
2. 発表標題 食品スーパーにおける滞在者の生理量・心理量の変化と生理量予測モデル
3. 学会等名 空気調和衛生工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野智司・伊庭千恵美・銚井修一・土居信一
2. 発表標題 スーパーマーケットにおける温熱環境・設備使用に関する実態調査
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 浅野智司・伊庭千恵美・鉾井修一・土居信一
2. 発表標題 スーパーマーケットにおける温熱環境・設備使用に関する実態調査
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 土居信一・伊庭千恵美・浅野智司・鉾井修一
2. 発表標題 スーパーマーケットにおける温熱環境・設備使用に関する実態調査
3. 学会等名 空気調和衛生工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧井 彩加、伊庭 千恵美、鉾井 修一
2. 発表標題 冬期のビジネスホテルにおける室内温湿度環境に関する検討
3. 学会等名 令和4年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 Noor Hanita Abdul Majid, Nozomi Takagi, Shuichi Hokoi, Tomoko Uno, Sri Nastiti N Ekasiwi	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Nova, Science Publishers, Inc., New York.	5. 総ページ数 164
3. 書名 Indoor Environment and Air-conditioning of Residential Buildings in a Hot, Dry Climate (Oman): Present and Future, in Oman in the 21st Century: Issues and Challenges, Ch. 4	



1. 著者名 Tomoko Uno, Shuichi Hokoi, Sri Nastiti N Ekasiwi	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 559
3. 書名 Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia, Chapter 23	

1. 著者名 Tomoko Uno, Daisuke Oka, Shuichi Hokoi, Sri Nastiti N Ekasiwi, and Noor Hanita Abdul Majid	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 559
3. 書名 Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia, Chapter 13	

1. 著者名 Tomoko Uno, Shuichi Hokoi and Sri Nastiti N. Ekasiwi	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 559
3. 書名 Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia, Chapter 39	

〔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)	
研究分担者	小椋 大輔  (OGURA DAISUKE)  (60283868)	京都大学・工学研究科・教授   (14301)	

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
---------	---------