

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18892

研究課題名(和文)皮膚乾燥現象における温湿度の短期的・長期的影響の理論的解明

研究課題名(英文)Theoretical elucidation of short-term/long-term effects of temperature and humidity exposure on skin dryness

研究代表者

後藤 伴延(GOTO, TOMONOBU)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20386907

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文):短期的(一時的)な温湿度環境曝露による皮膚への影響として、室内絶対湿度が高い条件だけでなく、室内温度が高い条件でも皮膚含水率が高くなることを明らかにした。温度上昇に伴う皮膚含水率の上昇については、角層における水分の拡散係数がアレニウスの関係によって増大するためと推定された。一方、長期的(日常的・継続的)な温湿度環境曝露による影響として、夏から冬へかけて皮膚含水率が低下することを明らかにするとともに、この現象が角層平衡含水率の長期的変化によるものであることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温湿度環境による皮膚乾燥への影響に関しては、従来、理論的解明が不十分であったが、本研究によって、短期的影響と長期的影響の2つのメカニズムによって説明できることが明らかになった。そのメカニズムに基づけば、皮膚乾燥防止の観点からは、室温が高ければ室内湿度下限値を緩和し得ることや、夏と冬の室内湿度下限値が同一である必要が無いことが推定される。このように、室内湿度基準の改正や明確化に寄与する知見が得られたことの意義は大きい。

研究成果の概要(英文):Our experiments demonstrated that there were both short-term (temporary) and long-term (accumulative) effects of temperature and humidity exposure on skin moisture. As the short-term effect, it was found that skin moisture content increased due to not only high indoor absolute humidity but also high indoor temperature. The increase in skin moisture content with high indoor temperature could be attributed to the increase in the moisture diffusion coefficient in stratum corneum according to the Arrhenius relationship. As the long-term effect, it was found that the skin moisture content was decreasing as the season changed from summer to winter. This phenomenon was considered to be due to the long-term change of the equilibrium moisture content of stratum corneum.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：皮膚乾燥 低湿度 温湿度環境 皮膚含水率 経皮水分損失量 角層 乾燥感

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、建築物衛生法では、相対湿度の下限値を40%と定めているが、ASHRAE Standard¹⁾では、根拠不足として下限値を定めていない。湿度下限値の緩和は省エネに繋がる可能性が高い一方で、皮膚乾燥による不快感や、アトピー性皮膚炎の悪化の原因にも成り得る。皮膚乾燥に関しては、皮膚含水率と温熱環境要素との関係性を示す既往研究が複数存在するものの、その結果は必ずしも一致しておらず、また、何故そのような関係性になるのかメカニズムが明確に説明されてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、皮膚乾燥に対する温湿度の影響には、一時的にある室内温湿度環境へ曝露されることにより皮膚含水率が変化する短期的影響と、日常的にある外気温湿度環境へ曝露されることにより皮膚特性が変化する長期的・累積的影響の2種類があるとの前提に立ち、短期的な(一時的な)温湿度環境曝露と皮膚含水率の関係性に関するメカニズムを解明すること、長期的な(日常的・継続的な)温湿度曝露状態と皮膚特性の変化との関係性を把握することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 皮膚乾燥に対する温湿度の短期的・長期的影響の把握(実験I)

東北大学人間・環境系建築実験棟の人工気候室で、2018年8月4日~10日、10月13日~21日、12月1日~9日の各期間に実施した。調査対象は20歳代の健康な男性5名とした。実験条件と実験スケジュールを表1および図1にそれぞれ示す。各季節において、これら4つのSessionの実験を行った。温熱性発汗の無い状態で実験を行うため、被験者には熱的中立が得られるユニフォームを着用させた。ただし、温冷感の個人差に配慮し、基本となる上述の状態から、着衣を増やしたり、減らしたりすることを許可した。測定項目・機器を表2に示す。各測定の間について、被験者には室内で着席して読書をさせた。

(2) 非平衡熱力学に基づく皮膚含水率変化メカニズムの考察(考察I)

建築壁体内の水分移動に関する理論として、非平衡熱力学に基づき、水分の化学ポテンシャルを駆動力として水分移動を計算する理論²⁾が知られている。この理論を皮膚角層に適用し、実験Iで観察された皮膚含水率の変化についてメカニズムの分析を行った。

(3) 角層の含水特性の長期的変化に関する検証(実験II)

東北大学人間・環境系実験棟人工気候室で、2019年9月1日~11日、10月28日~11月5日、12月7日~16日の各期間に実施した。調査対象は20代の健康な男女それぞれ1名とした。実験では、角層の含水特性(平衡含水率曲線)を把握するため、測定部位の皮膚温度を固定しつつ、近傍空気の水蒸気分圧を変化させながら皮膚含水率測定を行った。実験条件を表3に示す。測定部位にはダクトからの吹出気流を当て、皮膚表面の湿気伝達率を極力大きくした。これにより、ダクト吹出空気の水蒸気分圧および皮膚温度から、角層表面の不飽和水分ポテンシャルが算定できるものと仮定した。測定項目・機器を表4、実験スケジュールを図2に示す。実験は、吹出空気の水蒸気分圧を上昇させるSession1と下降させるSession2を2回ずつ行った。

表1 実験条件(実験I)

	Session 1	Session 2	Session 3	Session 4
室内温度	18°C		25°C	
室内水蒸気分圧	730Pa ⇒1130Pa ⇒1530Pa	1530Pa ⇒1130Pa ⇒730Pa	730Pa ⇒1130Pa ⇒1530Pa	1530Pa ⇒1130Pa ⇒730Pa
着衣	下着・半袖Tシャツ・長袖シャツ・セーター・長ズボン・靴下を基本とし、靴・ダウンベスト・ベンチコート追加やユニフォームの一部を脱ぐことを許可した。		下着・半袖Tシャツ・長袖シャツ・長ズボン・靴下を基本とし、靴・セーターの追加やユニフォームの一部を脱ぐことを許可した。	

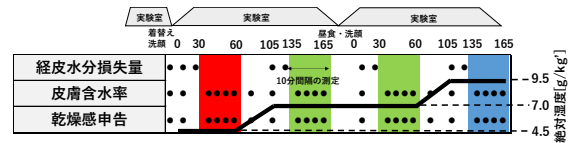


図1 実験スケジュール(実験I)
(Session 1 または 3 の例)

表2 測定項目・機器(実験I)

測定項目	測定部位	使用機器
皮膚含水率	右頬, 左手首	モイスターチェッカー MY-808S (スカラ)
経皮水分損失量	右頬, 左手首	据置型発汗計 POS-02 (スキノス技研)
室内温湿度	床上 1.1 m	温湿度計 TR-72Ui (TandD)

表3 実験条件(実験II)

	Session 1	Session 2
ダクトからの吹出空気の水蒸気分圧・温度	30°C 1060 Pa ⇒29°C 2000 Pa ⇒29°C 3000 Pa ⇒28°C 3780 Pa	28°C 3780 Pa ⇒29°C 3000 Pa ⇒29°C 2000 Pa ⇒30°C 1060 Pa
ダクトからの吹出風速	4.0 m/s	
皮膚温度	33°C (吹出温度とペルチェ素子により調節)	
室内温湿度	23°C, 46%	
着衣	熱的中立が得られるものとし、全ての実験で同一の着衣(下着・長袖Tシャツ・長袖シャツ・長ズボン・靴下)を使用。	
ダクトおよびペルチェ素子の設置状況		

表4 測定項目・機器(実験II)

測定項目	測定部位	使用機器
皮膚含水率	右頬	Corneometer CM825 (Courage +Khazaka electronic GmbH)
皮膚温度	右頬	非接触体温計 UT-701 (AandD)
室内温湿度	床上 1.1 m	湿度センサー-2119A (江藤電気)
吹出温湿度	吹出口	湿度センサー-2119A (江藤電気)
吹出風速	吹出口	CLIMOMASTER Model:6501 (日本カノマックス)

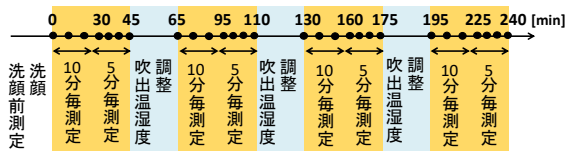


図2 実験スケジュール(実験II)

(4) 皮膚含水率の短期的変化に関する検証 (実験 III)

実験 I では、室温の異なる条件下で皮膚含水率を測定する際、着衣調節によって熱的中立を確保していたが、実験 III では、ペルチエ素子を用いて測定部位の皮膚温度のみを変化させ、人の温熱生理状態の違いを極限まで排除した。水蒸気分圧については、実験 I と同様に室内の水蒸気分圧を変化させた。実験場所と被験者は実験 II と同様で、実験期間は 2019 年 11 月 6 日～15 日とした。実験条件を表 5 に示す。水蒸気分圧に関する実験は、水蒸気分圧を段階的に上昇させる実験と、下降させる実験を 1 回ずつ行った。皮膚温度に関する実験は、皮膚温度の変化に時間を要したことから、それぞれの皮膚温度条件の測定を個別に 2 回ずつ行った。測定項目・機器を表 6 に示す。

(5) 皮膚含水率測定器の温度依存性の検証 (実験 IV)

実験 III で使用した皮膚含水率測定器の温度依存性を検証するため、測定環境の温度を 2 水準に設定し、厚さの異なるフィルムを飽和状態の較正用パッド (図 3) に被せた状態で較正計測を行った (表 7)。

(6) 紙の含水率の短期的変化に関する検証 (実験 V)

皮膚含水率の温度依存性について、発汗や血圧といった人体特有の要因によるものかを検討するため、角層の代わりに紙を用いた実験を行った。コピー用紙 (材質: 植林木パルプ、坪量: 68 g/m², 紙厚: 0.09 mm) を 3 枚重ねて図 4 の実験装置に設置した。実験は、20℃・80%, 30℃・44% (ともに水蒸気分圧 1870 Pa) の 2 条件の温湿度環境で行った。この条件に調整された恒温恒湿槽に実験装置を入れ、1 時間ごとに含水率、表面温度、装置の重さを 7 回計測した。測定部周辺には風除けを設置し、槽内の循環気流の影響を受けないようにした。表面温度の測定は赤外線放射温度 (testo830-T1) を使用し、それ以外は実験 III と同じとした。

(7) 皮膚含水率の温度依存性に関する考察 (考察 II)

実験 III～実験 V の結果に基づき、皮膚含水率が温度によって変化するメカニズムについて考察を行った。

4. 研究成果

(1) 皮膚乾燥に対する温湿度の短期的・長期的影響の把握 (実験 I)

皮膚含水率と乾燥感申告に関して、温湿度の短期的影響に関する結果を図 5, 6 に示す。右頬の皮膚含水率は、絶対湿度が高いほど有意に高く、室温 25℃の方が 18℃よりも有意に高かった。左手首の皮膚含水率は、室温 18℃のときに、絶対湿度が高いほど有意に高かった。乾燥感申告に関しては、差は小さいものの、絶対湿度が低いときに右頬において乾燥感が強くなる傾向がみられた。

皮膚含水率、経皮水分損失量、乾燥感申告に関して、長期的影響に関する結果を図 7, 8, 9 に示す。右頬では、外気の温湿度が低くなっていく 8 月から 12 月にかけて、皮膚含水率が有意に低下した。経皮水分損失量は 8, 10 月

表 5 実験条件 (実験 III)

	水蒸気分圧に関する実験			皮膚温度に関する実験		
	750Pa	1300Pa	1850Pa	1300 Pa		
皮膚温度	33℃			30℃	33℃	36℃
室内温度	23℃					

表 6 測定項目・機器 (実験 III)

測定項目	測定部位	使用機器
皮膚含水率	右頬	Corneometer CM825 (Courage+Khazaka electronic GmbH)
皮膚温度	右頬	非接触体温計 UT-701 (AandD)
経皮水分損失量	右頬	Tewameter TM300 (Courage+Khazaka electronic GmbH)
室内温湿度	床上 1.1 m	湿度センサー-2119A (江藤電気)



図 3 含水率較正用パッド (実験 IV)

表 7 実験条件 (実験 IV)

	Case 1	Case 2
室内温度	30℃	15℃
室内相対湿度	45%	
フィルムの厚さ	2.5μm, 4μm, 6μm, 15μm	

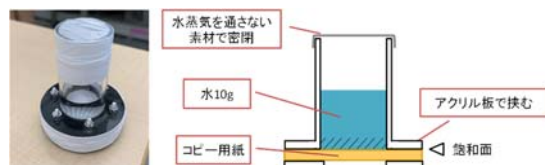
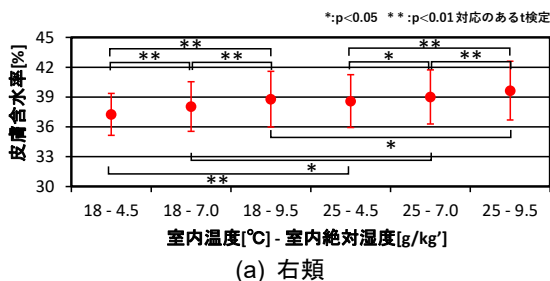
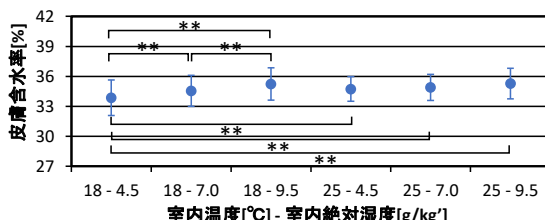


図 4 実験装置 (実験 V)



(a) 右頬



(b) 左手首

図 5 皮膚含水率への短期的影響 (実験 I)

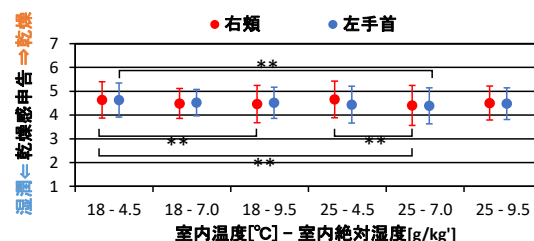


図 6 乾燥感申告への短期的影響 (実験 I)

より12月の方が有意に高かった。これらのことより、低温湿度環境に日常的に曝される冬に向かって、右頬の皮膚の水分保持機能、バリア機能がともに低下したと考えられる。一方、左手首では、経皮水分損失量が8月より10、12月の方が有意に低かった。これは、10、12月では左手首が衣類に覆われて環境曝露の影響を受けにくくなり、バリア機能が回復したためと考えられる。乾燥感申告に関して、右頬では、8月より10、12月の方が有意に乾燥側の申告となった。また、左手首では、8月より12月の方が有意に乾燥側の申告となった。

(2) 非平衡熱力学に基づく皮膚含水率変化メカニズムの考察 (考察 I)

角層内において、建築壁体と同様に気相・液相混合の水分移動が起こっていると仮定し、さらに、角層が非常に薄いことから、角層内の温度分布を無視できるもの仮定すると、以下の式が成り立つ。

$$\rho_{SC,dry} \frac{\partial \Psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \quad (1)$$

$\rho_{SC,dry}$: 絶対乾燥時角層の密度 [kg(drySC)/m³]
 Ψ : 絶対乾燥時角層重量に対する重量含水率 [kg/kg(drySC)]
 μ : 不飽和水分ポテンシャル [J/kg]
 t : 時間 [s]
 λ' : 角層の気相・液相混合水分伝導率 [kg/m·s·(J/kg)]
 x : 角層表面からの深度 [m]

この式に基づくと、実験 I において皮膚含水率が季節によって変化したのは、角層の含水率特性 $\partial \Psi / \partial \mu$ が変化したためだと推定できる。また、絶対湿度による皮膚含水率への短期的影響についても、不飽和水分ポテンシャル μ に変化が生じたためと説明できる。一方で、実験 I で観察された室温による短期的影響については、この式によって説明することができない (図 10)。仮に、角層内の μ の分布が不変のまま皮膚温度が高くなったとすると、角層表面の水蒸気分圧は高くなり、空気層との水蒸気分圧差が大きくなる。そのため角層表面から空気層への湿流量が増加し、それに伴って角層内の湿流量も増加しなければならない。従って、角層内の μ は不変ではいられず、その勾配が急になるはずである。結果として皮膚含水率は低下すると予想されるが、実験 I の結果と矛盾する。

(3) 角層の含水率特性の長期的変化に関する検証 (実験 II)

実験 II で求めた各季節の平衡含水率曲線を図 11 に示す。被験者 1 (男性) では、考察 I で推定した通り、夏季から冬季にかけて平衡含水率曲線が下方へ推移する様子が確認された。一方、被験者 2 (女性) では、季節による平衡含水率曲線の変化はみられなかった。被験者 2 では、日々の化粧や保湿ケアの影響で季節間の差が出なかった可能性がある。

(4) 皮膚含水率の短期的変化に関する検証 (実験 III)

皮膚含水率と経皮水分損失量の測定結果を図 12、13 に示す。両被験者とも、水蒸気分圧の上昇に伴って皮膚含水率が有意に上昇し、経皮水分損失量が有意に減少した。また、皮膚

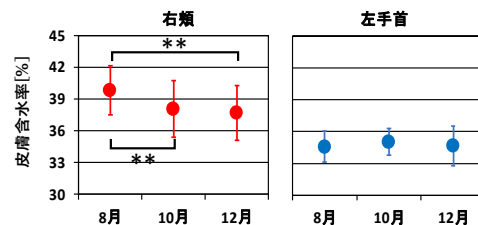


図 7 皮膚含水率への長期的影響 (実験 I)

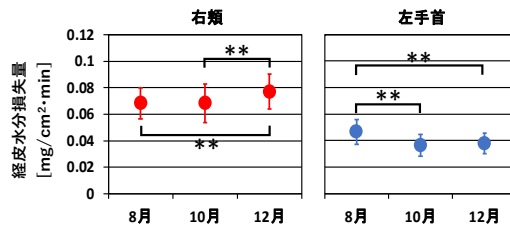


図 8 経皮水分損失量への長期的影響 (実験 I)

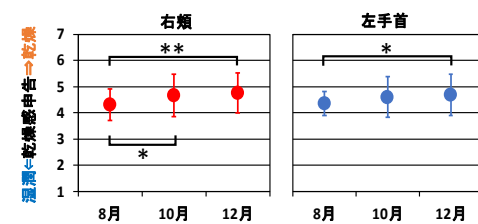


図 9 乾燥感申告への長期的影響 (実験 I)

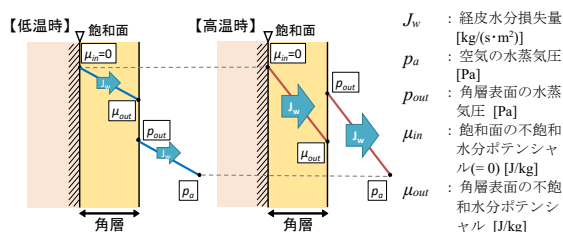


図 10 皮膚含水率変化の予想 (考察 I)

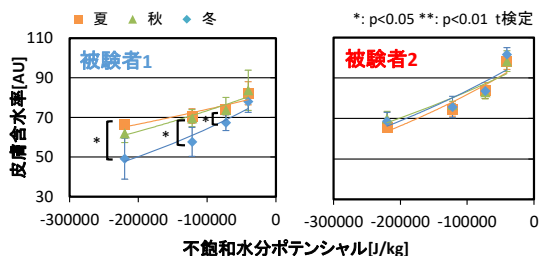


図 11 平衡含水率曲線 (実験 II)

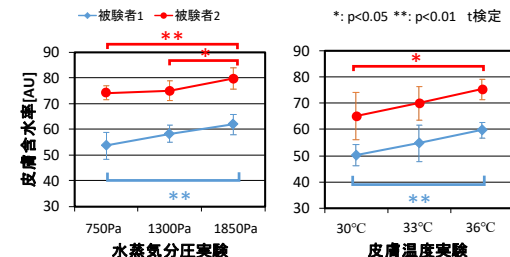


図 12 皮膚含水率 (実験 III)

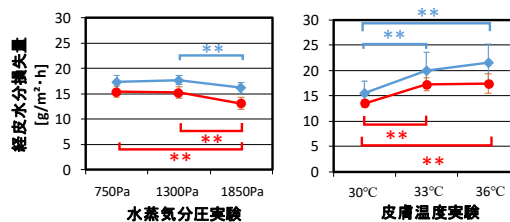


図 13 経皮水分損失量 (実験 III)

温度の上昇に伴って皮膚含水率が有意に上昇し、経皮水分損失量も有意に上昇した。実験 II で求めた平衡含水率曲線と、実験 III で測定した皮膚含水率・経皮水分損失量から、式(1)に基づいて角層の水分伝導率を推定した。その結果、水分伝導率が皮膚温度に依存している可能性が示された (図 14)。

(5) 皮膚含水率測定器の温度依存性の検証 (実験 IV)

測定結果を図 15 に示す。どのフィルム厚さにおいても温度による差異はみられず、実験 III で使用した測定器に温度依存性が無いことが確認された。

(6) 紙の含水率の短期的変化に関する検証 (実験 V)

測定結果を図 16 に示す。含水率と水分蒸発量の両方が高温条件で有意に高くなる結果が得られ、温度上昇に伴う含水率の上昇は、人体特有の現象ではないことが確認された。

(7) 皮膚含水率の温度依存性に関する考察 (考察 II)

以上の実験結果から、角層の水分伝導率には温度依存性があり、皮膚含水率の温度依存性はこれに起因するものと推定できる。既往研究において Scheuplein³⁾は、水で満たした 2 つの容器の間に人から採取した角層を挟み込み、トリチウム水 (HTO) の透過量を測定する実験を行っている。その結果、温度上昇に伴って透水係数が増大することを示すとともに、この現象をアレニウスの関係 (拡散係数の温度依存性) によって説明している。本研究と Scheuplein の研究とは、実験方法が全く異なるものの、観察された現象には本質的な違いは無かったことが推測され、本研究でみられた水分伝導率の変化も、アレニウスの関係によるものと推定される。

[参考文献]

- 1) ASHRAE: ASHRAE Standard 62.1-2019, 2019.
- 2) 尾崎 他: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力—, 日本建築学会計画系論文集, 61(488), pp.17-24, 1996.
- 3) R.J. Scheuplein: Mechanism of percutaneous adsorption, I. Routes of penetration and the influence of solubility, Journal of Investigative Dermatology, 45(5), pp.334-346, 1965.

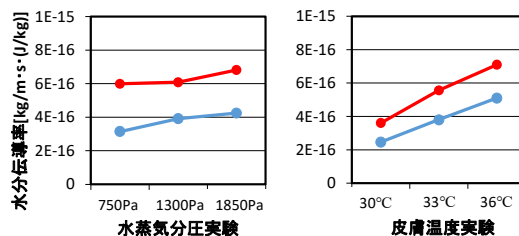


図 14 水分伝導率の推定値 (実験 III)

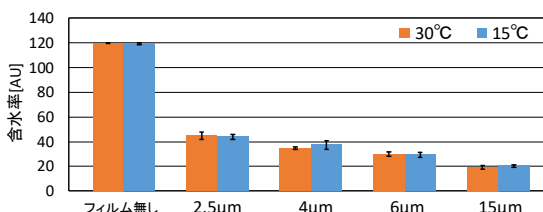


図 15 測定器の検証結果 (実験 IV)

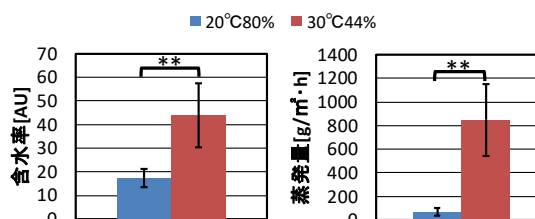


図 16 紙の含水率と蒸発量 (実験 V)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 我孫子太一, 八島唯, 松橋佳菜未, 高木理恵, 後藤伴延
2. 発表標題 短期的・長期的な温湿度環境曝露による皮膚乾燥メカニズムに関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 我孫子太一, 八島唯, 高木理恵, 後藤伴延
2. 発表標題 室内温湿度および季節変化が皮膚乾燥に及ぼす影響に関する被験者実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
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
研究協力者	高木 理恵 (TAKAKI RIE) (30466536)	東北工業大学・ライフデザイン学部・准教授 (31303)	