

令和 3 年 5 月 10 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06677

研究課題名(和文) 建築ストックの健康寿命延命のための照明レトロフィットに関する指針提案

研究課題名(英文) Proposal of guideline for retro-fitting of lighting to extend healthy life span of building stocks

研究代表者

望月 悦子 (Mochizuki, Etsuko)

千葉工業大学・創造工学部・教授

研究者番号：80458629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：空間用途を考慮した建物本来の価値を損ねない照明改修の方法を明らかにすることを目的に、以下の2点を検討した。

(1) 建築空間の雰囲気を的確に表現する画像呈示手法、(2) 照明条件が内装面、空間全体の印象に与える影響
(1)では、全天球画像を画像に用いた。「空間全体の色味」は全天球画像による再現は難しいこと、実空間における広範の輝度を全て画像上に表現するのではなく、実空間の印象に近づける輝度の表現範囲を明らかにしていく必要性を示した。(2)では、表面凹凸の小さい材では、照明の照射方向による印象評価への影響はないが、同照度であっても、白熱電球とLED、有機ELとで印象評価が有意に異なることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

後世に向けて建設当初の雰囲気を保持しつつ、また、新たな用途にも転用できるように重要文化財の照明改修を行う際に、考えられる影響を内装材・空間全体の見えの観点から検討した。また、空間の雰囲気を適切に表現・記録する手法についても検討した。

照明用光源が新規光源に置き換わった際には、同じ設定照度であっても、光源の種類(波長分布、光の指向性等)によって、内装材や空間の印象が有意に異なることを示した。また、空間の雰囲気を適切に伝える記録手法について、安価かつ簡易に行える方法で検討した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this task is to identify the lighting renovation method that retains the value of the building at original with consideration of the space use. The following two points were examined.

(1) Proper image presentation method that accurately expresses the atmosphere of the space, and (2) Effects of lighting conditions on interior surfaces and overall impression of the space.

In (1), spherical images were applied for the impression evaluation. It was identified that "color of the entire space" was hard to reproduce by spherical image, and the necessity to identify the luminance range to be expressed by spherical image that can give closer impression of the actual space. In (2), it was identified that the direction of illumination had no effect on the impression evaluation of interior materials with small surface irregularities, but that the impression evaluation was significantly different between incandescent lamp, LED, and OLED even at the same illuminance level.

研究分野：建築光環境

キーワード：照明改修 LED照明 文化財 全天球画像 印象評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築物の長寿命化が求められる中、建物のライフサイクルの中で光源あるいは照明器具の交換は、定期的に複数回行われることとなる。一般照明用光源は約 60 年周期で新規光源に置き換わってきた歴史がある。建築物が長寿命化すれば、新規光源に対応した照明改修が今後は必ず求められるようになる。また、人口減少など社会構造も変化する中で、建物の用途変更が余儀なくされる場合には、用途に応じた照明改修を迫られることもある。特に歴史的価値の高い建築物は、用途変更をした上で現役の施設として利用しつつ、竣工当時の様子をも一般に広く知らしめる役割を担うこととなる¹⁾。しかしながら、新しい用途に対応させるための照明改修によって、必ずしも竣工当時の様子を実現できているとは限らず、安易な照明改修が建築物の美的価値や文化的価値を損ねた事例も過去にはある²⁾。空間用途を考慮しつつ、建築物本来の空間価値を損なわない照明改修の方法について明らかにすることが求められている。

2. 研究の目的

本研究課題は、築 50 年以上の公共建築物のストックを対象に、建物用途、建築様態、光源・照明器具の特徴・性能を統合的に分析し、全構成要素によって醸成される照明空間の雰囲気を実確に表現しつつ、建築ストックが有効活用され続けるための照明改修の方針について提案ことが目的である。

保存・活用が所望される重要文化財などで、照明改修が空間の印象にもたらす影響を検証することが望ましいが、実験条件設定上の制約も大きいことから、本研究では大きくわけて以下の 2 点を目的に、被験者実験による検討を行った。(1)が空間全体の印象に関するマクロ的評価、(2)が空間内部の詳細の印象に関するミクロ的評価の視点での検討である。

- (1) 建築空間の雰囲気を的確に表現する画像呈示手法の検討
- (2) 照明条件が室内装面、空間全体の印象にもたらす影響の検討

3. 研究の方法

以降、2 章の研究目的(1)～(2)に対応させて記す。

(1) 建築空間の雰囲気を的確に記録する視覚的表現手法の検討

実空間での条件設定が難しい場合には、画像により実験条件を呈示し印象評価実験を行うことがある。本研究で対象とする歴史的建築物の場合は、空間構成が複雑なものも多く、二次元の写真表現では、奥行き感の表現に難があり、呈示範囲も限定されることから、評価条件の呈示手法として不十分と判断した。そこで、全天球画像を用いた印象評価実験の可能性についてまずは検討することとした。

(1)-1 全天球画像による空間の大きさ、明るさ、色味の再現性に関する検討

まずは単純な空間構成の場合に「空間の大きさ」「光の量と色」を再現できる画像の呈示手法を検討した。全天球画像で撮影した様々な条件の空間を VR とプロジェクタで呈示し、実空間での評価と比較して各要素の再現性を検証した。表 1 に評価した空間、条件を示す。大きさの異なる 3 空間 (評価空間 A, B、基準空間 C)、照明の照度 2 条件 (100 lx/200 lx) と光色 2 条件 (昼白色/電球色) の組合せ 4 条件を実空間と全天球画像による画像 (VR/プロジェクタで呈示) の両方で評価した。

表 1 実験(1)-1 評価条件一覧

評価空間A(174.4m ² ×4.35m)	評価空間B(51.8m ² ×4.35m)	基準空間C(78.9m ² ×4.35m)
評価空間D(13.74m ² ×2.5m)		
基準空間: 昼白色(明)	評価空間: 昼白色(暗)	評価空間: 電球色(明)
		評価空間: 電球色(暗)

被験者には、建築学科の学生 20 名(平均年齢 22.5 歳)を全実験共通で用いた。はじめに被験者は、実空間の印象評価を行った。評価時の実空間を全天球画像で撮影し、VR・プロジェクタで呈示して、別途、印象評価をしてもらった。被験者は「空間全体の広さ」「天井面/床面の広さ」「開放感」「空間全体の明るさ」「窓面のまぶしさ」「空間の色味」等を実評価した。

表 2 実験(1)-2 評価対象空間一覧

(1)-2 全天球画像による複雑な空間様式の再現性に関する検討

様々な様式(室用途、形状、内装仕上げなど)の空間を有する文化財にて(1)-1 と同様に実験を行い、より複雑な構成の空間を再現できる画像の呈示手法を検討した。

評価対象は、文化財 F の 6 空間と文化財 S

文化財 F	評価空間 a (47.4m ² ×4.2m) 照度: 前196.6lx 後121.4lx	評価空間 b (21.5m ² ×8.3m) 照度: 前80.1lx 後618.5lx	評価空間 c (74.6m ² ×4.2m) 照度: 前53.5lx 後48.6lx
	評価空間 d (9.4m ² ×3.8m) 照度: 前226.1lx 後101.8lx	評価空間 e (3.1m ² ×3.3m) 照度: 前130lx 後118.2lx	評価空間 f (21.3m ² ×3.5m) 照度: 前137.7lx 後75.3lx
	評価空間 g (47.5m ² ×3.2m) 照度: 前29.4lx 後13.7lx	評価空間 h (15.7m ² ×2.5m) 照度: 前984lx 後30.4lx	評価空間 i (34.1m ² ×2.7m) 照度: 前26.32lx 後20.63lx
文化財 S			

の3空間とした。表2に評価対象空間の一覧を示す。各空間を全天球画像で撮影した画像をVR・プロジェクトで呈示、被験者に評価させた。被験者には建築学科の学生13名ないし19名(平均年齢21.9歳)を用いた。被験者は、「空間全体の広さ」「空間の奥行き」「開放感」「空間の明るさ」「空間の色味」等に加え、6つの形容詞対によるSD法で空間の印象を評価した。

(2) 照明条件が室内装面、空間全体の印象にもたらす影響の検討

(2)-1 光源種類による内装材の印象評価の違い

実験には、図1に示す評価装置(W:900×D:900×H:600)を3つ用意した。天井面には光源装置を設置した。図2に実験に用いた各光源の分光分布を示す。有機EL照明(OLE-P0909-G2B)は天井面全体から、白熱電球(LW100V40WWL2P)とLED電球(LDA7L-G/K40/DW)は均等に配置された6箇所の天井開口から模型内部を照明するようにした。相関色温度はいずれも約2700Kで、模型中央の床面で40lxと100lxの2条件に設定した。被験者は、覗き穴から正面に見えるよう設置された内装材(内装材設置面以外はN9.5の無彩色)の印象を評価した。表3に評価した内装材を示す。

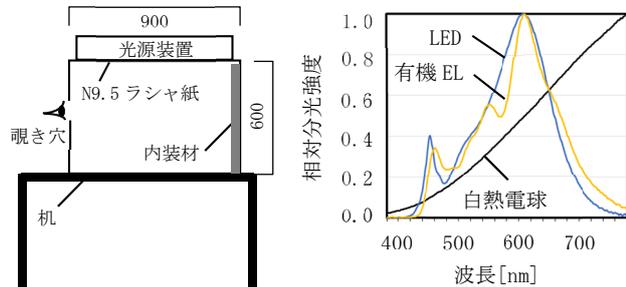


図1 実験(2)-1 評価装置 図2 評価した光源の分光分布

表3 実験(2)-1 で評価した内装材

材料(写真は左から順に上→下)		視感測色	表面粗さ[μm]
木材	焼杉	10YR2/1	4.98
	杉	5YR 8/4	5.30
	檜	7.5YR8/4	2.44
タイル	白12mm	5Y9/2	0.797
	白24mm	5Y9/2	0.549
	モザイク24mm	5PB2/8	2.58
レンガ	凹凸大	2.5YR5/8	20.7
	凹凸小	2.5YR6/9	9.00
塗料	漆喰	N9.5	21.1
	珪藻土	10Y9/1	10.5

被験者には20名の学生(22~25歳)を用いた。被験者は、基準条件(白熱電球40lx)に対する各条件の印象10項目をME法で評価した(内装10条件×4条件)。また、20の形容詞対によるSD法で、60条件(内装10条件×光源3種類×照度2条件)を評価した。

(2)-2 内装材の質感表現に対する照明の照射方向による影響に関する検討

デジタル画像で内装材の質感を表現する際に、実物と同等の印象を与える照明の照射方法について検討した。

実験には図3に示す装置(W:450×D:450×H:730)を用いた。覗き穴から見て正面に見える試料(90×90)を照射方向の異なる5条件(照度は模型内中心で200lxに設定)で照明し、被験者は表面の粗さ、凹凸の違いによって内装材の質感の印象がどの様に異なるか評価した。

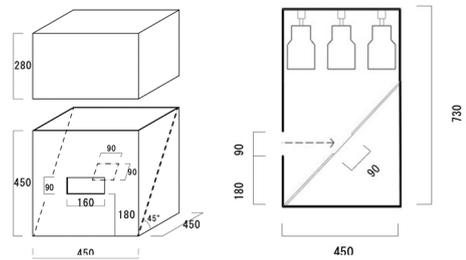


図3 実験(2)-2 に用いた装置

被験者は建築学科の学生20名(平均21.7歳)で、表4に示す表面粗さ、凹凸が異なる内装材7条件の印象を、実物と画像(中心輝度が実物と画像で等しくなるよう撮影、2416万画素、Nikon DIGITAL D3400)でそれぞれ評価(9つの形容詞対による7段階評価)した。

表4 実験(2)-2 で評価した内装材

材料	L*a*b 色度	反射率	表面粗さ[μm]
ノースパイン	83.26/4.83/21.54	0.63	2.83
漆喰	95.46/0.24/2.96	0.89	8.22
ビニルクロス	92.25/0.10/3.77	0.84	8.92
布クロス	65.95/-0.96/2.98	0.27	8.85
コンクリート	68.42/1.03/8.92	0.39	4.23
大谷石	71.15/-0.83/6.52	0.44	9.7
タイル	84.66/-0.36/4.39	0.65	3.59

4. 研究成果

(1)-1 空間の大きさ、空間の明るさ、空間の色味の全天球画像による再現

表5に、空間全体の広さと空間全体の明るさに関する評価の相関分析の結果を示す。実験日の屋外条件により、評価空間の平均輝度に少な

からずばらつきがあったため、日中に行った実験については、実験日ごとに分析した。被験者グループaは有効回答数が少なかったため、ここでは、グループb~dの結果について分析した。

夜間の昼光が入射しない条件では、評価空間Bで「空間全体の広さ」評価は、VRとプロジェクトともに実空間での評価と相関関係が見られた。また、昼光が入射する日中においても、VRで全天球画像を呈示した場合には、実空間での評価と高い相関関係があった。

一方で、「空間全体の明るさ」評価については、実空間での評価と全天球画像での評価に相関関係が見られた実験条件、被験者グループに一貫性がなかった。一枚の全天球画像では、画像上

に表示できる度範囲が限定されてしまうため、高輝度部分を表現できなかったことが一因に考えられる。そこで、視野内輝度分布から光環境の状態を表すいくつかの指標を求め、全天球画像で「空間全体の明るさ」を再現できる光環境の要件を示そうと考えた。表6に各光環境指標と実空間での評価と全天球画像をVR、プロジェクタで呈示した際の評価の相関係数について相関分析を行った結果を示す。評価空間Aでは最大輝度/最小輝度、変動係数CVの相関が高かったが、全てを説明できる指標は今回の実験結果からは見出すことはできなかった。

「空間全体の色味」評価は、全天球画像による評価と実空間での評価とで相関係数は全体的に低く、全天球画像による再現は難しいと判断した。

(1)-2 複雑な空間様式の全天球画像による再現

実験(1)-2で呈示した条件に対する印象評価の構造を明らかにするため、被験者の申告中央値を用いて文化財ごとにバリマックス回転による主成分分析を行った。表7に結果を示す。文化財F、文化財Sともに、第1主成分(広さ)、第2主成分(質感)、第3主成分(色の見え)、第4主成分(明るさ)の4つの成分で空間の印象の約7割を説明できることがわかった。

表8に、実空間で評価した際の各空間の主成分得点と、全天球画像で評価した際の主成分得点について、評価空間ごとに相関分析を行った結果を示す。評価空間b、c、d、fでは、VR、プロジェクタとも、全主成分で実空間での評価と全天球画像での評価に相関関係がみられた。評価空間gでは、全天球画像をVRで呈示した場合のみ全主成分で実空間での評価と全天球画像での評価との間に相関関係がみられた。

(2)-1 内装材の印象に対する光源種類の影響

各条件に対する被験者20名の申告中央値を用いて因子分析(プロマックス法、規準化あり)を行った。実験(2)-1で呈示した条件については、全5因子で約7割を説明できることがわかった。このうち、主に内装材の形状や色に起因する因子は3つあった(因子3(丸み、柔らかさ)、因子4(曲線性)、因子5(形状の複雑さ))。照明条件に起因する因子1(快適性)と因子2(力動性)の得点分布を図4に示す。どの内装材も設定照度が高い方が因子1(快適性)の得点は高く、因子2(力動性)は内装材の種類によって概ね決まり、白熱電球で得点が高くなる傾向にあった。

図5に例として、レンガ凹凸大と珪藻土のME法(基準条件を100)による印象評価の結果(被験者20名の申告値の幾何平均値)を示す。白熱電球100lxでは、全ての内装材で類似の評価傾向を示したが、LEDと有機EL40lxでは、一部の内装材で「やわらかさ」「明るさ」「鮮やかさ」等の項目の評価傾向が異なった。評価項目別にWilcoxonの符号付順位と検定により、照明条件によるME評価の有意差を検定した。表9に結果を示す。「やわらかさ」「まぶしさ」はLED、有機ELとも、「光沢感」「明るさ」「鮮やかさ」「華やかさ」はLEDで、白熱電球との間に有意差は確認されなかったが、その他の評価項目では、同照度であっても、白熱電球とLED、有機ELと

表5 空間全体の広さ、空間全体の明るさ評価の相関分析結果

a:2名
b:7名
c:5名
d:6名

	実験Ⅲ-1								実験Ⅲ-2			
	評価空間A(大)				評価空間B(小)				昼白色	電球色		
	昼光(有)		昼光(無)		昼光(有)		昼光(無)		暗	明	暗	
	b	c	d	b	c	d	b	c	d			
空間全体の広さ	VR	.73	.645	.756	.064	.894	-.391	.781	.431	.389	.391	.391
空間全体の明るさ	PJ	-.17	-.968	-.926	.176	-.949	.221	-.947	-.579	.332	.326	.34
空間全体の明るさ	VR	-.333	-.028	.914	.347	.881	.408	-.426	-.11	.226	.285	.29
空間全体の明るさ	PJ	-.132	-.389	.539	-.006	.52	.645	-.853	.228	.377	.451	.456

±0.4~±0.7 : 相関がある ±0.7~±0.9 : 強い相関がある ±0.9~±1.0 : 極めて強い相関がある

表6 光環境の状態を表す指標と空間の明るさ再現性の相関分析結果

	max /min	median /average	(75%-25%tile) / (max-min)	(75%-25%tile) /median	(90%-10%tile) / (max-min)	(90%-10%tile) /median	CV (stdev/ave)
評価 VR	0.94	-0.63	-0.60	0.15	-0.54	0.41	0.68
空間A PJ	0.73	0.40	-0.95	-0.79	-0.94	-0.51	0.94
評価 VR	-0.12	0.41	0.03	-0.69	0.11	-0.32	-0.07
空間B PJ	0.48	-0.17	-0.55	-0.15	-0.48	0.62	0.51

表7 文化財F(左)、S(右)の印象評価 主成分分析結果

形容詞対	成分1	成分2	成分3	成分4	
空間全体が広い	空間全体が狭い	.903	.223	.058	.044
床が広い	床が狭い	.88	.093	.116	-.219
開放的	閉鎖的	.757	.333	.102	.218
天井が高い	天井が低い	.756	.038	-.02	.301
奥行きがある	奥行きがない	.719	.457	.125	.088
和風な	洋風な	.412	.223	-.348	-.098
単純な	複雑な	.361	-.806	-.084	-.084
細かい	粗い	-.308	.697	.092	.195
平面的な	立体的な	.259	.689	.197	.192
物が多い	物が少ない	-.07	.648	.05	-.164
鮮やかな	地味な	.432	.515	.053	.069
暖かい	冷たい	.136	-.129	.818	-.042
澄っぽい	青っぽい	.043	.331	.72	-.02
天井が高い	天井が低い	-.289	.093	-.309	-.767
明るい	暗い	-.049	.055	.318	.758
累積寄与率(%)		26.7	45.8	56.6	66.5

形容詞対	成分1	成分2	成分3	成分4	
床が広い	床が狭い	.916	.046	.02	.217
天井が高い	天井が低い	.889	.268	.09	-.077
空間全体が広い	空間全体が狭い	.874	.12	.219	.072
奥行きがある	奥行きがない	.815	.292	.285	-.067
天井が高い	天井が低い	.792	.048	.218	-.197
開放的	閉鎖的	.712	-.183	.063	.53
鮮やかな	地味な	.527	.456	-.426	-.009
単純な	複雑な	.255	.881	.02	.212
平面的な	立体的な	.073	.83	.209	-.143
物が多い	物が少ない	-.161	.743	-.006	-.363
細かい	粗い	-.394	.642	.014	.406
和風な	洋風な	.362	.385	-.023	-.268
澄っぽい	青っぽい	.228	.142	.791	.036
暖かい	冷たい	.207	.037	.7	.251
明るい	暗い	-.099	-.045	.249	.833
累積寄与率(%)		33.0	53.2	63.8	74.3

表8 文化財の実空間と全天球画像での印象相関関係

	a		b		c		d		e		f		g		h		i	
	VR	PJ																
主成分1	.439	.439	.51	.488	.675	.528	.416	.568	.254	.284	.482	.606	.667	.318	.39	.354	.479	.41
主成分2	.532	.396	.476	.481	.67	.516	.418	.563	.283	.321	.465	.592	.661	.318	.373	.351	.491	.365
主成分3	.517	.385	.417	.411	.496	.41	.396	.444	.432	.306	.491	.602	.686	.336	.091	.363	.199	.208
主成分4	.547	.428	.5	.468	.314	.396	.369	.434	.372	.37	.504	.608	.659	.379	.071	.222	.251	.13

で印象評価に有意差が確認された。

(2)-2 内装材の質感表現に対する照明の照射方向の影響

図6に一例として、照明の照射方向による大谷石の印象評価結果の違いを示す。結果は被験者20名の申告中央値で示した。照明の照射方向による差はほぼ見られず、他の内装材も同様の傾向を示した。今回の実験条件は、表4に示した通り、比較的表面凹凸の小さい内装材であったため、照明の照射方向による印象の差はほぼなかった。表面凹凸の大きい材については、照明の照射方向や光源の配光角が材表面の輝度分布に少なからず影響するため、今後更なる検討が必要である。

<引用文献>

- 1) 福田ほか: 文化財建物保存修理研究会, Vol. 3, pp. 24-37 (2018)
- 2) 東京都教育委員会編: 東京都指定有形文化財 旧前田侯爵邸洋館修理工事報告書 (1999)

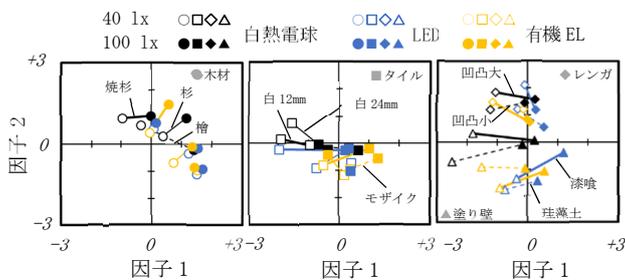


図4 因子1と因子2の得点分布

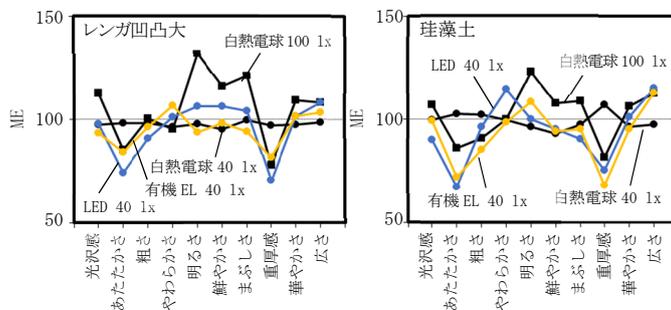


図5 ME法による評価結果

表9 白熱電球 40 lx に対する印象評価の有意差

照明条件	光沢感	あざやかさ	粗さ	やわらかさ	明るさ	鮮やかさ	まぶしさ	重厚感	華やかさ	広さ
白熱電球 100 lx	**	**	**		**	**	**	**	**	**
LED 40 lx		**	**					**		**
有機EL 40 lx	*	**	**		*	*		**	*	**

** : p<0.01 * : p<0.05

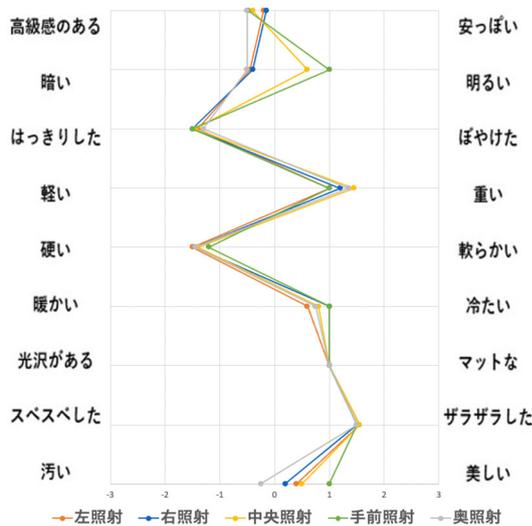


図6 照明の照射方向による印象評価の違い (大谷石の場合)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 望月悦子	4. 巻 779
2. 論文標題 照明光の黒体軌跡からの偏差duv が空間の明るさ評価に与える影響	5. 発行年 2021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 51-58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.86.51	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 児玉大輔、望月悦子
2. 発表標題 全天球画像を用いた空間呈示による印象評価の可能性
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉大輔、望月悦子
2. 発表標題 複雑なテクスチャを持つ建築空間の写真による印象評価の可能性
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月悦子
2. 発表標題 照明改修が室内光環境の印象に与える影響 -光源種類による内装材の印象評価の違い-
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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