

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04813

研究課題名（和文）調光・調色制御による動的LED照明空間の最適化

研究課題名（英文）Optimization of dynamic LED lighting space by dimming and toning control

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：照明光の色度の黒体軌跡からのずれduvが空間内の光の色味知覚、明るさ知覚に与える影響を、壁・床の反射率も考慮した箱模型で検討した。結果、以下が明らかになった。

1) duv=0.00の場合は、内装反射率が不均一で、床面が低照度の場合の方が空間内の光に色味を知覚しやすい。2) 相関色温度2700Kでは、duv変化後60秒間順応した後も、空間内の光に赤みを知覚する。3) duvがマイナス側に变化することで、低色温度の場合は空間の明るさ評価が若干上昇、高色温度の場合は明るさ知覚が低下する傾向にある。4) duv変化が空間の明るさ知覚に与える影響は、内装反射率が均一の場合の方が不均一な場合よりも顕著である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在市販されている調光・調色型のLED照明システムは、2種類のLED光源を組み合わせ、両者の色度の範囲で制御するものが一般的である。組み合わせる元のLED光源は、単体としては極力、黒体放射軌跡上（温度放射による太陽や白熱電球等の色度）に色度が乗るよう設計されているが、調色の段階で黒体放射軌跡から色度がずれる（以下、duv）領域がどうしても生じてしまう。

本研究成果により、内装材の反射率の影響も考慮した上で、調色制御の過程で生じるduvが空間の明るさ知覚、空間内の色味知覚に与える影響を明らかにし、視的快適性を損ねないduv変化の許容範囲を示した。今後の調色制御向けLED照明の設計目標が示された。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to identify the effects of chromaticity shift from the Planckian locus duv on the perception of the tinted colour of illumination and the spatial brightness. All 240 conditions with 3 levels of the illuminance, 4 conditions of the correlated colour temperature, 5 levels of duv and 4 patterns of interior reflectance including non-uniform luminance distribution were experimented.

The effect of duv change to the negative side on spatial brightness differed according to the correlated color temperatures, and that was larger in the case of uniform interior reflectance than in the case of non-uniform reflectance.

研究分野：建築光環境

キーワード：LED照明 調光 調色 照明制御 duv 明るさ知覚 色味知覚

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本では、一昔前まで明るいこと(高照度)が経済的にも建築空間的にも豊かであることと捉えられてきた風潮がある。建築の運用エネルギーに占める照明の割合は大きく、例えば、オフィスビルでは、設備にかかる運用一次エネルギー全体の約2割を照明設備が占めてきた。照明用エネルギー削減の重要性は認識されてはいたものの、一向に省エネルギー化が進まない期間が長く続いていた。しかし、東日本大震災に端を発する電力供給力不足により、建築照明のLED化は一気に進んだ。照明の省エネルギー化はある一定水準には達したが、単なる省エネルギーでなく、居住者の健康・快適性に配慮した、現況より一歩先に進んだ照明空間の実現に向けたLED照明の活用が今後は求められる。

このような照明空間の実現には、光の量・色の自在なコントロールが不可欠となる。LED照明は従来の一般照明用光源(白熱電球や蛍光灯)と比べ、光色設定の自由度が高く、次世代照明空間の実現の一助となることは間違いない。しかし、現在市販されている調光・調色型のLED照明システムは、製造コストも勘案して、2種類のLED光源を組み合わせ、両者の色度の範囲で制御するものが一般的であり、調色過程で黒体放射軌跡から色度がずれる領域がどうしても生じてしまう。しかし、調光・調色によって生じる色度のずれによる問題は、あまり認識されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複数の内装色で構成される建築室内の照明環境について、調色制御を行った場合に生じる照明光の黒体放射軌跡からの色度差(以後、 $d_{uv}$ と記す)による影響について明らかにすることである。本研究では、大きくわけて以下の二点を検討した。

- (1) 照明を調色した際に生じる照明光の色度の黒体軌跡からのずれ  $d_{uv}$ が空間内の光の色味と空間の明るさ知覚に与える影響
- (2) 複数の色で構成される空間全体の色印象の決定プロセス

照明光の  $d_{uv}$  変化が単一の視対象の色の見えに与える影響についてはこれまでも研究が行われてきたが、(1)、(2)の双方を明らかにすることで、建築照明空間全体の印象に対する  $d_{uv}$  変化の影響を明らかにすることが可能となる。

3. 研究の方法

2章の研究目的(1)、(2)に対応させて記す。

- (1)  $d_{uv}$  変化が空間内の光の色味と空間の明るさ知覚に与える影響

実験には図1に示す模型(W: 450 mm×D: 450 mm×H: 240 mm)を用いた。模型天井には光源装置(調光・調色可能なLED照明PGL-HUE-1-W-01(COLORKINETICS, ビーム角100度×100度)を4本均等に配置)を設置し、トレーシングペーパーを透過した拡散光が模型内部を均等に照らすようにした。模型内部の壁と床の反射率は、表1に示す4条件に設定した。図2に各条件の模型内部の様子(床面平均照度810 lx, 相関色温度4600K,  $d_{uv}=0.00$ の条件で撮影)を示す。模型内床面には、被験者が模型空間の明るさを判断しやすいように、無彩色の立体物(反射率約60%)を2つ、被験者の目線高さ(模型床面から160 mm)を越えないように設置した。

照明は表2に示す60条件(模型内床面の平均照度: 220 lx/ 440 lx/ 810 lx, 相関色温度: 2700K/ 3400K/ 4600K/ 7000K,  $d_{uv}$ : -0.02/-0.01/0.00/+0.01/+0.02)に設定した。これに模型内部の反射率4条件を組み合わせると計240条件を被験者には評価させた。照明の設定値は、壁・床の反射率が約94%で均一の内装条件にて、相関色温度と  $d_{uv}$  は模型内床面中央で、床面照度は模型内中央と周囲4点の計5点の平均値が設定目標値とほぼ同等になるように定めた。同じ照明設定値を他の内装条件にも適用した。従って、内装反射率の条件ごとに実際の各値は異なる。

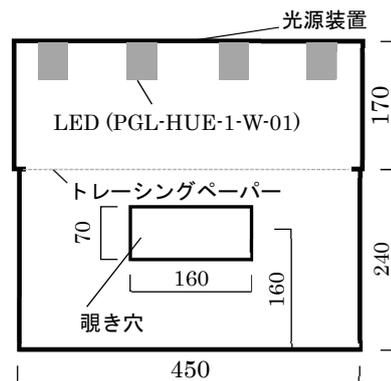


図1 実験装置 単位[mm]



図2 各条件の模型内部の様子 (810 lx, 4600K,  $d_{uv}=0.00$  のとき)

表1 模型内部の反射率条件

壁反射率	床反射率	平均反射率
94%	94%	94%
80%	80%	80%
97%	49%	78%
90%	63%	79%

表2 照明条件

$d_{uv}$ 設定値	相関色温度			
	2700K	3400K	4600K	7000K
-0.02	-0.018/385	-0.019/295	-0.019/219	-0.018/142
-0.01	-0.011/374	-0.011/293	-0.012/220	-0.009/148
0.00	-0.003/381	-0.004/303	-0.002/222	0.001/146
+0.01	0.007/377	0.008/295	0.008/222	0.011/144
+0.02	0.013/377	0.016/304	0.017/222	0.019/146

$d_{uv}$ /mired [MK<sup>-1</sup>]

る。床面照度は、全ての内装反射率条件で同じ光源の設定値を適用したため、壁と床の反射率が異なる不均一条件で均一条件よりも床面 5 点の照度差が大きくなったが、いずれの条件でも均斉度（最小値/平均値）は 0.9 以上であった。

被験者には 10 名の大学生（男性 8 名、女性 2 名、平均 21.6 歳）を用いた。いずれも一般色覚者であったが、うち 2 名（いずれも男性）はブルーライトカット機能付きの眼鏡を装着していたことが実験終了後に判明した。両者の眼鏡レンズは、波長 420 nm 以下の光の透過率が著しく低かったため、光の色味評価に影響を与える可能性が大きいと判断し、残り 8 名（男性 6 名、女性 2 名、平均 21.5 歳）の評価結果を分析対象とした。

実験は窓のない室にて行い、模型と光源装置全体は暗幕で覆って、模型内に光源装置以外からの光が入らないようにした。被験者は模型内観察、評価時以外も実験室内で待機した。被験者の疲労を考慮して、1 回の実験で評価するのは 20 条件とし、12 回に分けて全条件を体験させるようにした。一回の実験は 1 時間 30 分以内に終了した。一回の条件では、床面平均照度と内装条件を固定し、相関色温度と  $d_{uv}$  の組み合わせ 20 条件を被験者ごとにランダムに提示した。

被験者は任意の内装反射率、床面平均照度と相関色温度、 $d_{uv}=0.00$  に設定された条件（以下、基準条件と記す）で照明された模型内部を覗き穴から 60 秒間観察した後に、模型空間の明るさ、模型空間内の光の色味を VAS（Visual Analog Scale）で評価した。模型空間の明るさ評価には

“明るいー暗い”の両極スケールを用いて、7 段階で評価させた。模型空間内の光の色味評価は、まず色味を感じるか感じないか判定した後に、色味を感じた場合には、感じた色味を赤/黄/緑/青/紫の 5 色の中から 1 色を選択して、“感じた色味ー白”の両極スケールで、感じた光の色味の程度を 7 段階で評価させた。評価後に再び基準条件を 10 秒間観察させた後、任意の  $d_{uv}$  に照明条件を変化させ（床面平均照度と相関色温度は同条件。以下、比較条件と記す）、比較条件に変化した直後に、被験者は再度、模型空間の明るさと光の色味を評価した。評価後もう一度、比較条件を 60 秒間観察し、模型空間の明るさ、光の色味を評価した。模型内部を観察する際には、模型内部に設置した立体物周辺に視線を向け、天井の発光面は直視しないよう被験者には教示した。

## (2) 空間全体の色印象の決定プロセス

空間全体の色構成と色印象の関係を明らかにすることを目的に、写真を用いた評価実験を行った。評価対象には、新建築住宅特集 11 に掲載された住宅写真（居間と寝室）100 枚を用いた。紙面版雑誌の写真はスキャンし、デジタル版雑誌の画像と共に、縦 750 pixel × 横 1,000 pixel、解像度 300 ppi にそろえた。画像は 14 インチのモニター（Lenovo IdeaPad S540、解像度 1920×1080）に映し、被験者はモニター中心を視距離 400 mm の位置から注視した（画像の視角サイズ縦 44°×横 68°）。モニター以外の周辺部が被験者の視野に入らないよう、モニター前面には仕切り板を設け、中央に観察用の開口（縦 800 mm×横 1,600 mm）を設けた。被験者の目の位置の鉛直面照度は約 250 lx とした。

被験者には、石原色覚検査によって色覚に異常がないことを確認した学生 20 名（平均 21.5 歳）を用いた。被験者は、目の位置の鉛直面照度が約 250 lx に設定された視野装置を 3 分間注視し、十分に順応した後に評価画像を観察した。各画像の観察時間は 5 秒間とした。被験者は各画像の全体の色印象に最も近い色を 10 の色票および「該当なし」の 11 の選択肢の中から回答した。続いて、各画像の印象を 12 の形容詞対について 7 段階で評価した。25 枚の画像の評価を終えた時点で、5 分間の休憩を挟み、同手順を 4 回繰り返した。

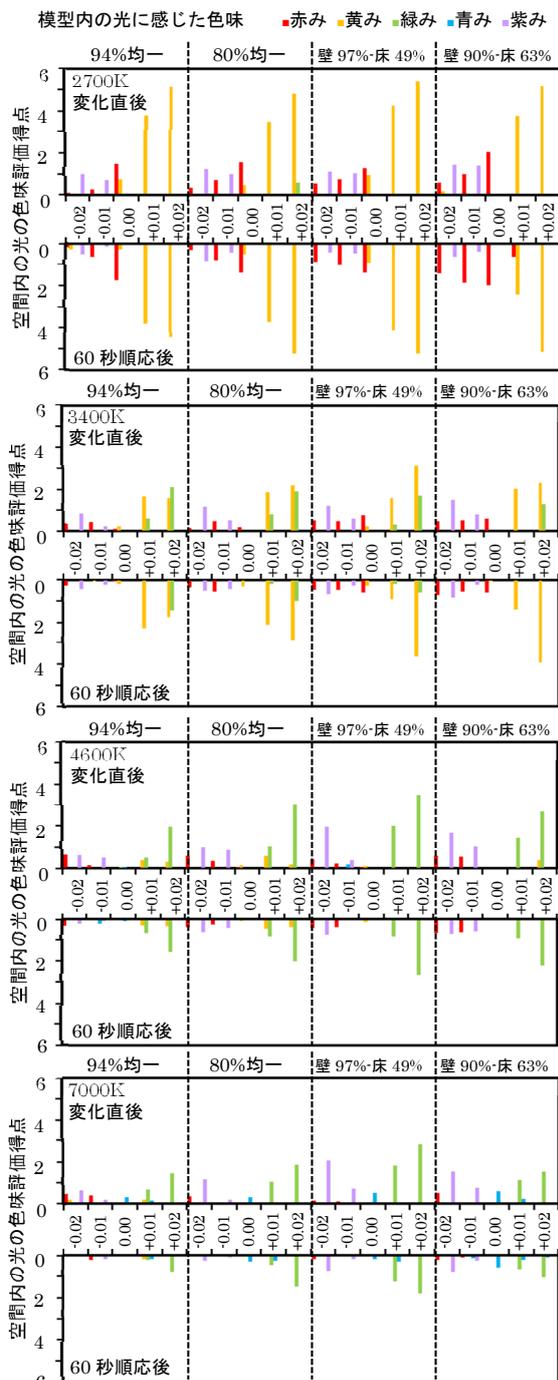


図 3  $d_{uv}$  変化による光の色味知覚の変化（床面平均照度 440 lx）

て、全100枚の画像すべてを評価した。実験完了までに約2時間を要した。

#### 4. 研究成果

(1)  $d_{uv}$ 変化が空間内の光の色味と空間の明るさ知覚に与える影響

図3に例として、床面平均照度440 lxの場合に、 $d_{uv}$ が0.00から任意の $d_{uv}$ に変化した直後、ならびに変化した $d_{uv}$ に60秒間順応した後に評価した模型内の光の色味評価得点を比較する。2700Kでは $d_{uv}$ がプラス側に变化すると黄みの知覚が大幅に増え、60秒間経過後も黄みを知覚した状態が続いた。3400Kでも2700Kと同様の傾向が見られたが、 $d_{uv}$ がプラス側に变化した場合には緑みを知覚する人もいた。4600Kと7000Kでは、 $d_{uv}$ がマイナス側に变化した場合に、2700K、3400Kと同様、変化直後に赤みや紫みを一部の被験者が知覚していたが、60秒間経過後には色味知覚はほとんどなくなった。一方で、 $d_{uv}$ がプラス側に变化した直後には、緑みを知覚するようになり、60秒間経過後も色味知覚がなくなる訳ではなかった。

光の色味評価得点について、相関色温度別に四元配置分散分析(内装反射率×床面平均照度×比較条件の $d_{uv}$ ×評価タイミング)を行った結果、2700Kでは赤みと黄みで、3400Kと4600Kでは緑みで、7000Kでは黄み以外の全ての色味で、 $d_{uv}$ 変化直後と60秒間経過後との間で色味知覚の程度に有意差があった。

図4に例として、相関色温度2700K・床面平均照度440 lxと相関色温度7000K・床面平均照度810 lxの場合について、 $d_{uv}$ 変化による空間の明るさ評価差を示す。空間の明るさ評価差は、 $d_{uv}$ 変化直後の明るさ評価( $y_a(t=60)$ ,  $a$ は任意の $d_{uv}$ )と $d_{uv}$ が変化した比較条件を60秒間観察した後の明るさ評価( $y_a(t=120)$ )のそれぞれから、 $d_{uv}$ が0.00で一定条件の明るさ評価を引いた差分として、以下の式より求めた。

- ① 経過時間(順応)の明るさ評価への影響 =  $y_{0.00}(t=60) - y_{0.00}(t=0) = y_{0.00}(t=120) - y_{0.00}(t=0)$  (1)
- ②  $d_{uv}$ 変化の明るさ評価への影響(直後) =  $y_a(t=60) - y_{0.00}(t=60)$  (2)
- ③  $d_{uv}$ 変化の明るさ評価への影響(順応後) =  $y_a(t=120) - y_{0.00}(t=120)$  (3)

ただし、 $d_{uv}$ が変化していない場合にも、空間の光に対する赤みと青みの知覚には時間経過による有意差があったため、特に赤み知覚が大きかった2700Kと青み知覚が大きかった7000Kの条件では、光の色味知覚による明るさ評価への影響も併せて相殺されることになる。いずれの相関色温度でも、床面平均照度が高くなるにつれて、 $d_{uv}$ 変化による空間の明るさ評価差は大きくなる傾向にあった。壁と床の内装材反射率が異なる不均一条件でも同様であったが、壁と床の反射率が均一な条件の方が、また、反射率が高い方が $d_{uv}$ 変化による空間の明るさ評価の低下が顕著であった。2700Kでは、 $d_{uv}$ がマイナス側に变化すると空間の明るさ評価が若干上昇する傾向が見られた。

$d_{uv}$ 変化による空間の明るさ評価差について、相関色温度別に四元配置分散分析(内装反射率×床面平均照度×比較条件の $d_{uv}$ ×評価タイミング)を行った。結果、7000Kでのみ、比較条件への変化直後と比較条件に60秒間順応した後の空間の明るさ評価差の間に有意差( $P < 0.05$ )があった。内装反射率が94%均一の場合には、 $d_{uv}$ がプラス側に变化することで、60秒間の順応後にも空間の明るさ評価が有意に低下した。一方で、内装反射率がほぼ等しい3条件では、60秒間の順応後は基準条件での空間の明るさ評価に近づき、 $d_{uv}$ 変化による明るさ知覚への影響はほぼなくなった。

#### (2) 空間全体の色印象の決定プロセス

画像全体の色印象の選択肢とした10の色クラスター<sup>2)</sup>を、圧縮前の元画像の各ピクセルに割り当てて(元画像の各ピクセルのRGB値と最も距離の近い色クラスターを割り当てた)画像を再生すると図5のようになる。各画像の全体的な色の傾向は、10の色クラスターで概ね捉えることができたと判断し、被験者20名のうち、過半数の10名以上が同じ色票を選択した画像35枚を分析対象とした。

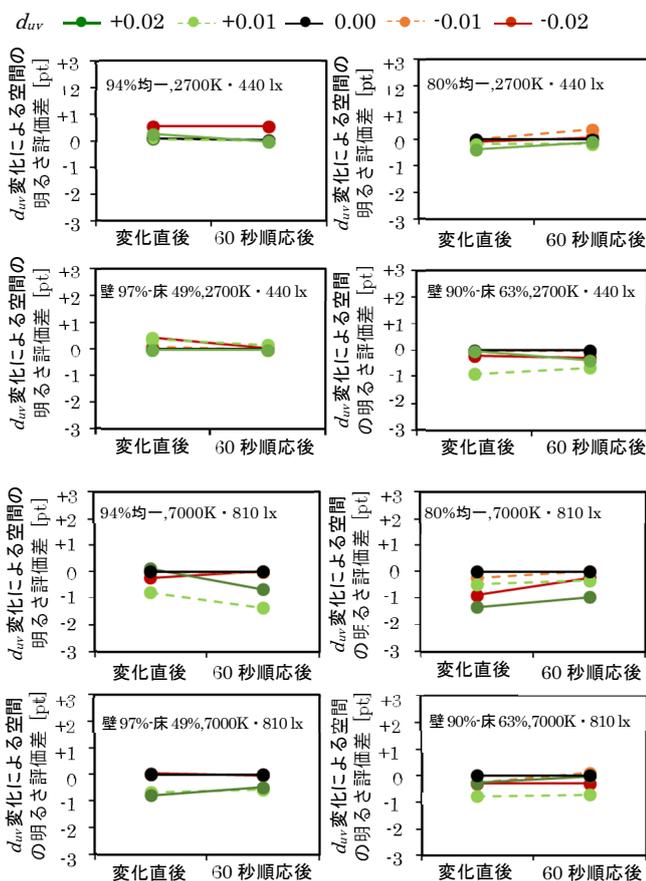


図4  $d_{uv}$ 変化による空間の明るさ評価差

被験者が12の形容詞対で評価した画像の印象評価結果(中央値)について、因子分析(斜交回転パイコーティミン法)を行った。表3に抽出された3つの因子の因子負荷量を示す。第二因子までで今回評価した画像の印象の約6割を説明できることが示された。図6に各画像の第一因子(力量性因子)と第二因子(快適性因子)の得点分布を示す。また、因子得点分布の第1~4象限にある各画像の全体の色印象として選択された色票の $u'$ 、 $v'$ 色度を図7に示す。図中×は白色点である。第一因子、第二因子ともがプラス(明るい、居心地が良い)に評価された画像の色印象は白色点よりも黄~黄緑寄りに、第一因子がマイナス、第二因子がプラス(暗い、居心地が良い)に評価された画像の色印象は白色点よりも黄緑~青寄りであった。第二因子がマイナス側(居心地が悪い)に評価された画像の色印象は、ほとんどが白色点に近かった。図8に示す被験者が選択した色票の $L^*$ 値と明るさ評価の関係をみると、白色点よりも黄赤寄りの色印象となる場合は、輝度が低いにも関わらず明るく感じており、ヘルムホルツ・コールラウシュ効果が生じていた可能性もある。

画像全体の色印象を決定する要因を明らかにするため、「各色クラスターが画像全体に占める割合」「各色クラスターが画像中心部に占める割合」「各色クラスターの $L^*$ 値」「各色クラスターの全10色クラスター平均色度からの距離」の4つを説明変数、選択された色クラスターを目的変数として判別分析を行った。表4に結果を示す。「画像内に占める色の割合」は、色印象の判定に有意に影響していなかった。画像に含まれる色度の範囲が狭い場合は、4つの説明変数のいずれも有意でなかったが、画像に含まれる色度の範囲が広い場合は、「画像全体に含まれる色度の平均に近い色」が全体の色印象として選ばれた。

### 5. まとめ

LED照明の調色制御の過程で生じる $d_{uv}$ の瞬時変化が空間の明るさ評価、空間の色味知覚に与える影響を明らかにすることを目的に、壁・床で反射率の異なる不均一輝度分布の箱模型を用いて検証した。また、住宅写真を用いて、空間全体の色印象を決定する要因と、色印象による雰囲気評価の違いを検討した。結果、以下の点が明らかになった。

- ・ $d_{uv}$ 変化直後と変化した $d_{uv}$ に60秒間順応した後とで、空間内の光の色味知覚には有意差があり、2700Kでは60秒間の順応後も赤み知覚が増した。
- ・ $d_{uv}$ がマイナス側に変化することによる空間の明るさ知覚への影響は相関色温度によって傾向が異なり、低色温度では空間の明るさ評価を若干上昇、高色温度では低下させる傾向にある。
- ・ $d_{uv}$ 変化が空間の明るさ知覚に与える影響は、内装反射率が均一の場合の方が不均一な場合よりも顕著である。
- ・空間全体の色印象は、白色より黄~黄緑、青色味がかっている方が、居心地が良いと評価される。黄赤味がかかった色印象の場合は、明るいと感ずても居心地が悪いと評価された。

LED照明を調色制御する際には、 $d_{uv}$ がマイナス側にずれてしまうと、特に光色が低色温度の場合に、明るさ評価は上昇するが、光色に赤みを知覚することになり、変化後しばらく居心地が悪くなる可能性があるため、注意が必要である。

### <引用文献>

- 1) 新建築住宅特集, 2007~2021年
- 2) 高橋, 坂本, 加藤: イメージ写真からの代表色とクラスター特長量の抽出によるインテリアブランドの分析, 日本感性工学会論文誌, Vol. 15, No. 1, pp. 203-212, 2016



図5 抽出した色クラスターによる画像再生

表3 因子負荷量

変数	因子1	因子2	因子3
居心地良い-悪い	-0.028	<b>0.928</b>	0.157
くつろいだ-緊張	-0.033	<b>0.888</b>	-0.053
好き-嫌い	0.170	<b>0.780</b>	0.021
楽しい-つまらない	0.502	0.188	-0.403
自然-人工的	0.003	0.565	-0.005
開放的-閉鎖的	0.399	0.397	-0.002
静か-うるさい	-0.284	0.212	<b>0.854</b>
暖かい-冷たい	0.412	0.297	-0.210
陽気-陰気	<b>0.762</b>	0.077	-0.215
明るい-暗い	<b>0.945</b>	-0.128	-0.042
軽い-重い	<b>0.780</b>	0.132	0.383
統一感のある-バラエティに富んだ	0.105	-0.036	<b>0.777</b>
累積寄与率	40%	62%	75%

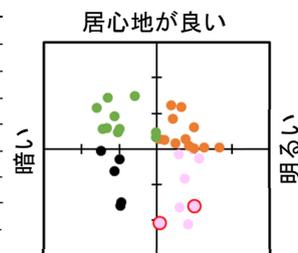


図6 因子得点分布

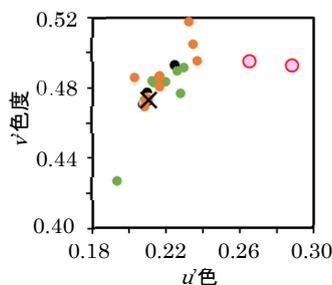


図7 色印象と印象評価

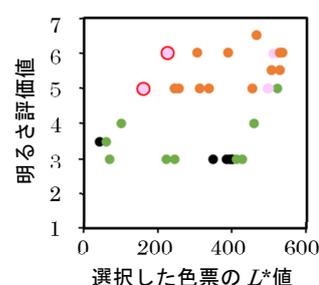


図8 色印象と明るさ評価

表4 画像全体の色印象の決定要因に関する判別分析(P値)

変数	色度範囲狭	色度範囲広
画像全体に占める割合	0.114	0.567
画像中心部に占める割合	0.157	0.458
$L^*$ 値	0.535	0.172
全クラスター平均からの色度距離	0.543	0.0015**

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 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mochizuki, Etsuko and Murakumo, Takayuki	4. 巻 5
2. 論文標題 Effects of chromaticity difference from Planckian locus duv of lighting on tinted color of illumination and brightness in space (part 1): Experiment using a scale model with uniform luminance distribution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japan Architectural Review	6. 最初と最後の頁 507-516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12278	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 -

1. 著者名 望月悦子、村雲貴之	4. 巻 第87巻
2. 論文標題 照明光の黒体軌跡からの偏差duvが空間内の光の色味、明るさに与える影響 (その1)	5. 発行年 2022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 403-410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.403	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 -

1. 著者名 望月悦子	4. 巻 86
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 望月悦子
2. 発表標題 視覚疲労を軽減する休憩時の照明環境
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村雲貴之、望月悦子
2. 発表標題 LED照明の照度及び色偏差が明るさ評価に与える影響 - 輝度分布が不均一な空間での検証 -
3. 学会等名 照明学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月悦子
2. 発表標題 空間全体の色印象と印象評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村雲貴之、望月悦子
2. 発表標題 LED 照明の照度及び色偏差が明るさ評価に与える影響
3. 学会等名 照明学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村雲貴之、望月悦子
2. 発表標題 LED照明の黒体軌跡からの偏差が空間の明るさ知覚に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Musashi KOYAMA, Etsuko MOCHIZUKI
2. 発表標題 EFFECTS OF LUMINOUS COLOUR SHIFT Duv ON COLOUR PREFERENCE
3. 学会等名 CIE Midterm Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------