

視覚特性に基づく照明応用の考え方とその実践



立命館大学 情報理工学部
教授 篠田 博之

1 はじめに

照明は視環境を左右する最大の要素であるにもかかわらず、光と視覚についての理解が不十分で、その影響力が過小評価されている。本稿では、照明と視覚について光学のおよび心理物理学的な側面から解説し、照明の潜在能力を再認識したい。さらに、照明光による快適で機能的な光・色彩環境創造の応用例を紹介する。

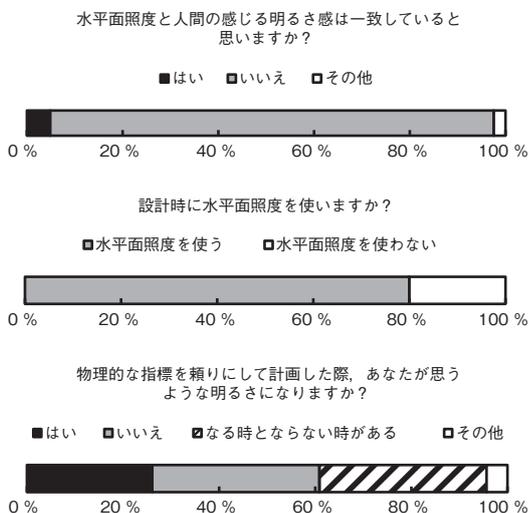
2 空間の明るさ感

2.1 明るさ感尺度による光環境創造

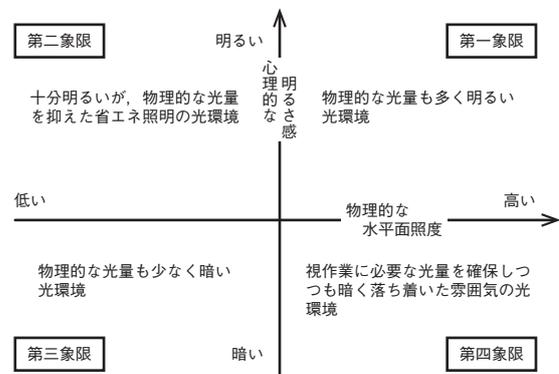
輝度や照度などの測光量は放射量を人の分光感度で変換した単位であり、知覚に対応した光の尺度と言える。しかしLED (Light Emitting Diode) など新光源の普及や照明手法の多様化により測光量と明るさ感が一致しない状況が増えた。ゼネコン、ハウスメーカー、設計事務所などの光環境設計者による住居の光環境に関するアンケート[1] (第1図)によると、水平面照度と明るさ感の不一致を認め (93%)、それでも設計時は水平面照度を使わざるを得ず (80%)、その結果思い通りの明るさに

ならないと不満を洩らす (70%)。光環境評価で参照するJIS照度基準は工場やオフィスなど作業性を重視した光環境には有効であるが、くつろぎや安心感など、雰囲気重視の光環境評価には適さない。

心理的な光量 (明るさ感) と物理的な光量 (例えば照度) の組み合わせで新しい光環境創造が可能になる (第2図)。物理的な光量だけでは「光量が多く明るい」か「光量が少なく暗い」という光環境しかない。心理的な尺度が加わると二次元尺度になり、新たに2つの特徴的な光環境が生まれる。「十分明るい光量を抑えた省エネの光環境」(第二象限)と「視作業に必要な光量を確保しつつも暗く落ち着いた雰囲気の光環境」(第四象限)である。これらは照明業界にとっては未開拓マーケットで、光源や器具、照明手法のターゲットになる。



第1図 光環境設計者のアンケート結果[1]



第2図 照度と明るさ感の二次元尺度による光環境創造

2.2 明るさ感の定量化

明るさ感測定法として色モード境界輝度法を提案した。灰色色票に部屋の照明と独立の光源でスポット照明を当て、観察者が光源の強度を調整して物体色に見える上限の輝度に設定する[2]。この物体色モード上限輝度は色モード境界輝度とも呼ばれ、知覚反射率が上限の1.0となる輝度、つまり知覚照明強度そのものである。マグニチュード推定法 (ME法) による明るさ感評価値の比は色モード境界輝度比の1/2乗に比例することも確認している[3]。色モード境界輝度は良い指標だが、被験者

による測定をその都度行うのは実用的でない。そこで岩井ら[4]はさまざまな照明空間で色モード境界輝度を測定し、視野内輝度分布から色モード境界輝度値を推定する計算式を導出し、空間の明るさ感指標Feu（フー、仏語で火や炎の意）とした。

空間の明るさ感は光源の強さ感ではなく空間に光が満ちている光量感である[5]。この知見に基づき新しい明るさ感コンセプトWeluna（ウェルナ）が開発された。照明から直接目に届く成分は光源の強さ感の決定因子であるため、それ以外の間接光成分を光量感に対応させ、その量を眼前照度（lx）で表現する。野口ら[6]は実空間で眼前照度と明るさ感の関係を検討し、直接光成分を含む眼前照度よりも直接光成分を差し引いた間接眼前照度の方が明るさ感との相関が高く明るさ感尺度として適切とした。

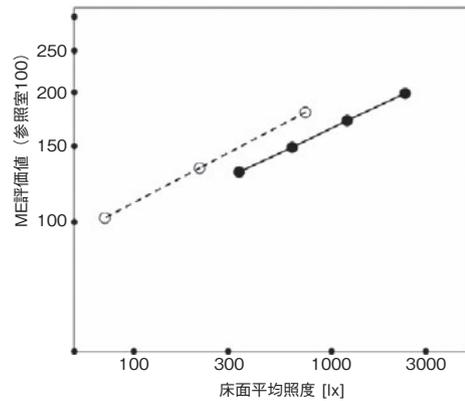
2.3 明るさ感尺度の課題

明るさ感尺度の導入で、視認性や視作業は照度、雰囲気は明るさ感で光環境を扱えるようになり、光を効率的に配する省エネの照明設計に貢献した[7]。しかしFeuもWelunaも完璧ではない。主な課題は色と窓の影響である。

明るさ感は照明光の色[8]と空間内の物体色の影響を受ける。後者では色鮮やかな物を室内に配することで明るさ感が向上する[9][10][11]。参照室（無彩色）とテスト室（有彩色）の模型の明度を等しく揃え、参照室の照明光を調光してテスト室と同じ明るさになるよう被験者に設定させる。多くの場合、参照室（無彩色）をテスト室（有彩色）よりも高照度に設定し、この明るさ感向上は最大1.5倍にもなる[11]。

窓のある室の明るさ感も適切に評価できない。明るい戸外との対比で室内が暗く感じるからだ[12][13]。実験では窓なしの部屋（参照室）と窓ありの部屋（テスト室）の模型を比較し、ME法で明るさ感を評価した（第3図）。グラフの横軸は床面の平均照度（lx）、縦軸は参照室の明るさを100としたときのテスト室のME評価値である。天井照明だけで100 lxあった部屋に窓を設けると外光により照度が上昇し明るさ感も上昇する（●）。しかし窓なしの部屋で天井灯のみで照度を変化させたときのME評価値（○）に比べて低い。

昼光を利用すればその分だけ室内の照明出力を下げられ省エネである。このとき一定照度を確保する調光制御では、窓から昼光が入るほど暗く感じるはずである。実験結果はそう示唆する。物理的な光は必要だが明るさ感の観点からは高輝度の窓を見せたくない。そのための工夫も提案されている。



第3図 窓による室内の明るさ感低下[12][13]
窓なし (○), 窓あり (●)

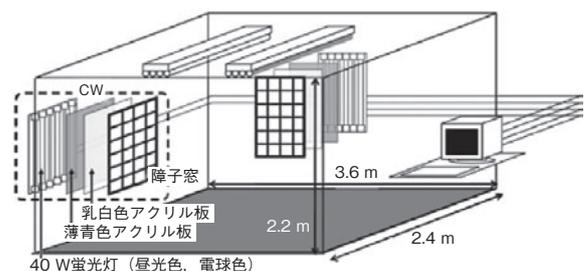
3 窓と照明制御

3.1 コミュニケーションウィンドウライティングCWL

窓がない部屋は息苦しく閉塞感で居心地は悪い。採光が窓の役割のすべてではない。人は窓から見る景色、光や色から外の様子を知る。景色がなくても障子に映る色と光で方角や天気、時刻がわかる。外界とのつながりが断たれることが無窓室の閉塞感の正体だ。

戸外とのインターフェースを重視してIkedaら[14]は擬似窓をコミュニケーションウィンドウライティングCWLと呼んだ。当時は障子裏に色温度の異なる蛍光灯で任意の色と明るさを提供した[15][16]（第4図）。現在はLEDの薄型壁掛け型も可能だ。室外照度に合わせた実時間制御だけでなく、事前に測定したデータで任意の時間や天気、方角を再現できる。

CWLでは輝度と色の絶対値より変化が重要で、入会后5分、10分と時間経過に伴って外界情報（時刻、天気、



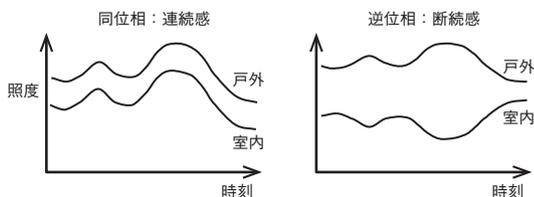
第4図 コミュニケーションウィンドウライティングCWL[14][15][16]

方角)が伝わる。被験者実験で確認し快適性も調べた[16]。閉塞感や不快感が軽減することは明白だが、CWLから外界情報が室内に伝わると外の天気に応じて居室者の心理状態が変化する。室内照明による演出も効果には限度があるが、外界情報をCWLに再現すると演出力が劇的に向上する。外が灼熱の太陽の下の砂浜なのか、陰鬱な雨天の森なのか、室内の雰囲気も変わるから不思議である。

3.2 連続感照明

物理的に隔てられた室内と屋外を心理的につなぐ窓。室内照明を適切に調整すると、戸外と室内が同一空間として感じられる状態があり、これを戸外と室内の空間に「連続感」と表現する[15][17][18][19]。外は常に変化するため、室内照明を戸外に連動して調光する。いわゆる連続感照明[19]である。照度を等しくしても連続感は得られない。さまざまな天候や時間帯で被験者は室内を調光しながら室内が戸外と連続的に感じるレベルに設定し続け、連続感を与える室内照度を戸外照度の関数として求めた。その関数を用いて室内を自動調光する。夕暮れ時、室内も暗く調光される状況では手元のタスクライトで視作業の照度を確保しつつ、雰囲気は連続感を壊さないようにすればよい。雰囲気の明るさ感と視作業のための照度の使い分けである。

連続感照明では室内に居ながら外に居るような感覚が得られ[15]、外出できない高齢者や入院患者などに喜ばれる。空調の効いた別荘に居ながら自然を満喫できる。逆に連続感があると気が散るため小学校の教室には不向きだ。その場合は戸外と逆位相に調光すればよい(第5図)。前述の昼光利用の省エネ照明制御は逆位相調光である。一定照度は確保されるが、室内の雰囲気は今ひとつ。明るさ感だけでなく連続感の不成立も一因かもしれない。



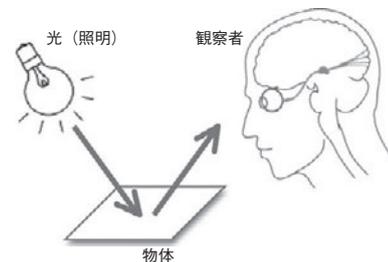
第5図 連続感照明による照明制御[15]

4 照明と色覚

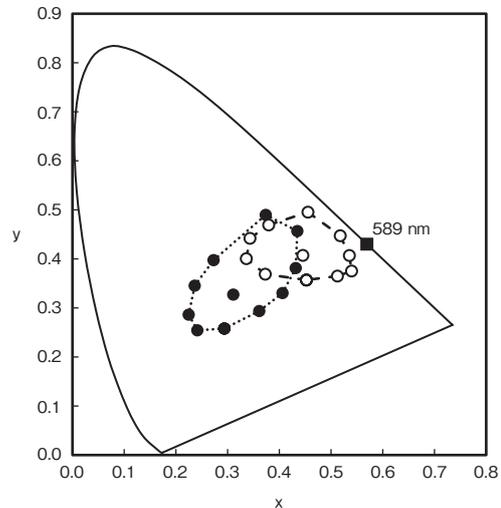
4.1 色発現の三要素

色の発生には照明、物体、観察者が必要で、これを色

発現の三要素と言う(第6図)[20][21]。目に入射する光の分光分布は光源の分光分布と物体表面の分光反射率との積であり、同じ物体でも照明により反射光の分光組成が変わる。例えば同一明度($V=6$)、同一彩度($C=8$)の有彩色(5P, 5PB, 5B, 5BG, 5G, 5GY, 5Y, 5YR, 5R, 5RP)と無彩色N6を、D65光源、A光源、低圧ナトリウム灯で照明すると色度は第7図となる。D65光源に比べてA光源には長波長光が多く、反射光の色度も全体的に黄赤の方向に移動し、低圧ナトリウム灯は589 nmの単色光なのですべての色度がスペクトル軌跡上の589 nmの1点に集まる。



第6図 色発現の三要素[20][21]

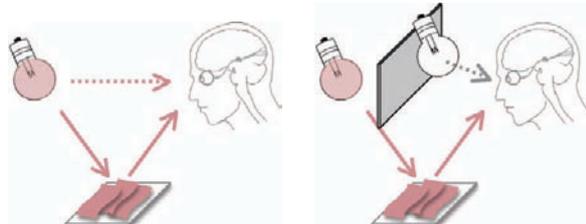


第7図 照明光と物体色の色度(●D65, ○A, ■低圧ナトリウム灯)

4.2 照明分離による色恒常性不軌

反射光分光組成の通りに色を知覚させるには、対象物と観察者への照明分離による色順応排除が必要だ[21][22]。精肉・鮮魚の照明や舞台照明の手法である。肉を新鮮に見せようと長波長光を多く含む照明光で部屋全体を照明したとする(第8図左)。肉からの反射光には長波長光が多い。しかし同じ照明光が観察者に届き視覚系は赤い光に色順応する。そのため赤への感度が下がり肉

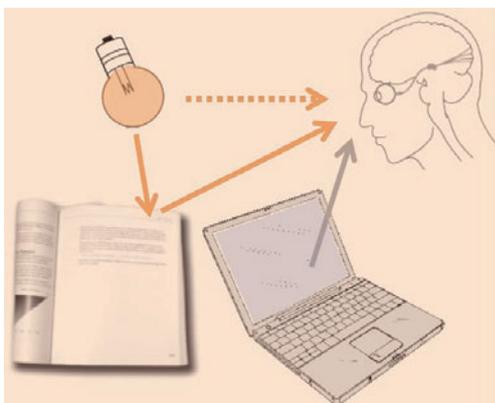
からの反射光はそれほど赤いと判断されない。これこそが色恒常性である。一方、第8図右では赤い照明は肉だけを照らし、観察者には白色照明を施す。赤への色順応はおこらず、反射光の波長組成の通りに赤と知覚される。色恒常性は成立しない。



第8図 照明分離と色恒常性[21][22]

4.3 自発光ディスプレイの色恒常性不軌とカラーマネジメント

一般に色デバイスでは原色が異なるため色再現にはカラーマネジメントシステム (CMS) が必要で、多くはデバイスに依存しないXYZやLABなどの測色値を介して色を変換する。しかし測色値は標準観測者の色を表現するため、条件など色では個人個人の色の見えは一致しない。さらに深刻な問題は同じ測色値でも照明光への色順応で色の見えが大きく変化することである。照明は物体表面からの反射光の分光組成を左右するだけでなく、色順応を通して色覚に影響する。照明への色順応は反射物体の色恒常性に寄与するが自発光ディスプレイでは色恒常性不軌の原因となる。例えば第9図の低色温度の照明光には長波長光が多く含まれ、白紙の表面からの反射光も長波長光を多く含む。しかし視覚系は黄色い照明光に順応し黄への感度を下げたため、目に入射した光は黄ではなく白と判定される。しかし自発光ディスプレイからは照明に関係なく一定の光が目が届き、その光を照明



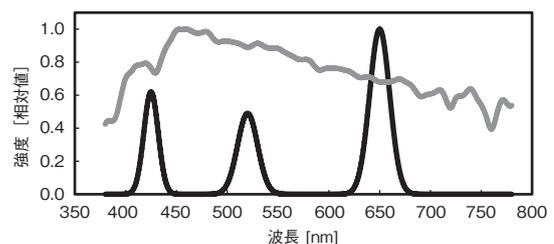
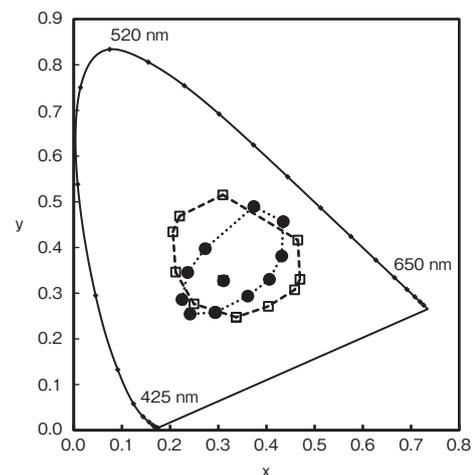
第9図 反射物体の色恒常性と自発光ディスプレイの色恒常性不軌[22]

に色順応した視覚系が判定すると照明の色と反対方向の色にずれて知覚する[22]。図の例では黄色い照明に順応した視覚系には青みがかった色のディスプレイと判断される。

上記の問題を解決するため反射物体の色恒常性を利用するCMSを提案した[22][23][24]。観察者がそれぞれの照明下で色票の色と等しくなるようにディスプレイを調整し、等しい色の見えを実現するための変換式を求めているのである。これによりディスプレイ個体差、観察者の個人差、照明光への色順応に対応でき、高額な測色機器を用いた校正も不要となる。ウェブでの色彩教育教材やテストの提供、インターネットショッピングでの実用化を進めている。

4.4 照明と物体色の彩度

無彩色はそのままに有彩色を色鮮やかにすることもできる[21]。第10図の●は第7図と同じ色票をD65光源で照明したときの反射光の色度で、□は第10図下の分光分布をもつ光源で照明したときの色度である。N6の仮想光源下の色度□とD65光源下の色度●は一致し、色温度はどちらも6500 Kである。有彩色色票の色度、とくにRとG付近が外側に移動した。仮想光源はそれぞれ425 nm, 520 nm, 650 nm付近に狭帯域の分光分布をもち、色度図上では●の色相環を425 nm, 520 nm, 650 nmの



第10図 同一色温度の照明による物体色の彩度変化[21]
(●D65光源, □仮想光源)

光で摘んで広げたことになる。バランスよく引っ張れば中央の無彩色の色度はずれない。しかしG-R方向に引っ張るためY-B方向でわずかに内側に移動した。このような照明はすでにLEDで実現可能である。

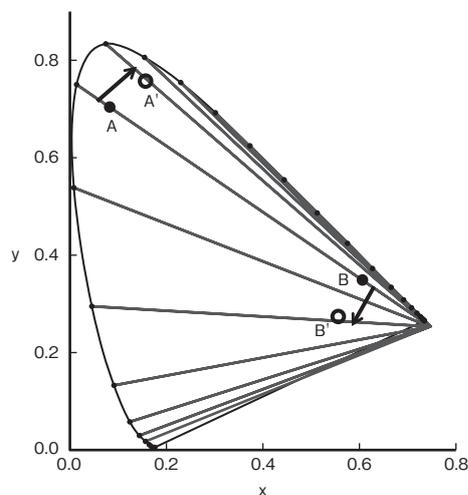
色が鮮やかになると空間の明るさ感が向上する。3波長形蛍光灯でも可能だが、LEDなどの新光源の方が効果的である。物体色の彩度は演色性に関連する。これまでは一般に基準光源下の色に比べて低彩度であり、高演色評価数は高彩度を意味した。しかし新光源では基準光源下よりも高彩度となることがあり、色が鮮やか過ぎて演色評価数が低下する。新光源の登場で演色評価数の見直しが迫られている。

5 多様な視覚への対応

5.1 混同色線とカラーバリアフリー照明

カラーバリアフリー照明の目的は物体色の混同色を弁別可能な色に変えることである。例えば第11図のAとBは色覚正常者には緑と赤に見えるが、同じ混同色線上にあるため二色型第一色覚者にとっては混同色となる。そこで照明を変えA'とB'とできれば二色型第一色覚者にとっても弁別可能になる[25][26]。評価指標 i_{CD} (Color Discriminability index) を定義して最適な分光分布を求め[27]、実際の照明光を用いた被験者実験により有効性を検証した[28]。

カラーバリアフリー照明はすべての色を弁別可能にするものではない。照明によって弁別可能になる色がある一方、逆に混同色になる色もある。カラーバリアフリー照明は部屋全体に定常的に施すのではなく、通常の白色照明と併用して補助照明として必要に応じて点灯すれば

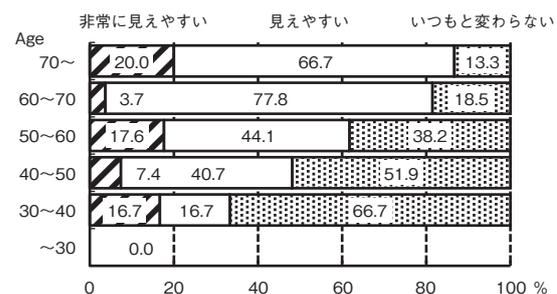


第11図 二色型第一色覚異常の混同色線とカラーバリアフリー照明[25][26]

よい。具体的には、懐中電灯型や案内表示をすぐ近くで照らす掲示板用照明などが考えられる。カラーバリアフリー照明は比較的自由に波長が選べる新光源の用途として期待される。また補助照明なので出力的に不安がある光源でも対応できる。

5.2 高齢者用彩度回復照明

白内障は目の水晶体が白濁化する病気で、中でも加齢白内障が多い。特別な目の疾患というより老化の1つと考えてよく、高齢者の視環境では避けて通れない問題である。光学的には濁った水晶体により眼内で光が散乱し、対象物からの光に周囲からの光が重なる。周囲からの光は平均すると無彩色で、それが混ざると色の彩度が下がる[25][29][30]。しかし一室一灯の照明ではこの問題を解決できない。対象物と周辺への照明を分けて対象物への照明を十分に強くし、周辺の照明を減ずれば、相対的に周辺光の散乱は減る。この彩度回復照明を試着室に適用しCRS (Color Recovery System) とした[31]。百貨店に設置しグッドデザイン賞も受賞した。彩度回復効果は測色とカラーネーミング、顧客アンケートにより確認した。「試着した服の色や柄は見えやすかったですか？」の問いに、30歳代や40歳代は「いつもと変わらない」と回答した。しかし年齢上昇に伴って「非常に見えやすい」や「見えやすい」の回答が増え、70歳以上では85%以上が見えやすいと答えた(第12図)。若齢者の透明な水晶体では色に変化はなく、高齢者から見えやすいと回答を得たことは、彩度回復照明の原理の正当性を証明している。



第12図 彩度回復照明の顧客アンケート[31]
(試着した服の色や柄は見えやすかったですか?)

6 さいごに

多様な照明手法や新光源の普及により、測光量や演色評価数など既存の尺度では照明や視環境を適切に評価できない状況が増えた。新しい技術は古い尺度では測れないことがあり、新規テクノロジーに合わせて新しい尺度や指標を提案することが必要である。何よりも新たな尺

度の提案は新しい価値とマーケットの創造につながる。LEDの長所として低消費エネルギーや長寿命ばかりが注目され、蛍光灯などの全般照明の置換需要が大勢を占める。しかし固体照明の長所は波長選択の自由度が高いこと、形状や点灯の制御において空間的、時間的に自由度が高いことである。人間の視覚特性を積極的に活用することで新光源でなければ実現できない機能や用途を創造することが肝要ではないだろうか。

参考文献

- [1] 木村真由子 他, “住居における室内の光環境に関するアンケート調査-居住者と設計者の意識比較-,” 第29回照明学会東京支部大会, 2003.
- [2] 山口秀樹 他, “照明認識視空間の明るさサイズの測定による実環境における空間の明るさ感の評価,” 照明学会誌, 86-11, pp.830-836, 2002.
- [3] 山口秀樹 他, “色モード境界輝度による空間の明るさ感評価,” 照明学会誌, 91-5, pp.266-271, 2007.
- [4] 岩井彌, “快適な照明空間創りのための新しい照明設計の考え方-空間の明るさ感指標「Feu」に基づく照明設計,” 住宅電気利用技術懇話会誌, 25, pp.25-33, 2007.
- [5] 石田泰一郎 他, “空間の明るさ感の心理的決定要因: 光源の強さ感と空間の光量感,” 照明学会誌, 84-8A, pp.473-479, 2000.
- [6] 野口瑠子 他, “目に入射する間接光を用いた空間の明るさ感評価方法の検討,” 平成22年度照明学会東京支部大会講演予稿集, p.21, 2010.
- [7] 大阪府環境情報センター, “地球温暖化対策技術開発事業-白色LEDを使用した省エネ型照明機器に関する技術開発-成果報告書,” 平成16年度環境省委託事業, 2005.
- [8] 山口秀樹 他, “照明光色温度の違いが空間の明るさ感に与える影響-色モード境界輝度による検討-,” 照明学会第42回全国大会講演論文集, p.172, 2009.
- [9] 池田光男 他, “照明認識視空間への初期視覚情報の影響-明度と彩度の場合-,” 照明学会誌, 80-5, pp.319-324, 1996.
- [10] H. Yamaguchi et al., “The effect of interior chromaticness on space brightness evaluated by border luminance of color appearance mode,” Proc. of 3rd CJK Lighting Symposium, Seoul, pp.83-86, 2010.
- [11] H. Takada et al., “Effect of interior chromaticness of space brightness,” i-Perception, 2-4, p.369, 2011.
- [12] 丸山隆志 他, “窓のある照明空間の明るさ感評価,” 平成22年度日本色彩学会関西支部大会予稿集, pp.10-11, 2011.
- [13] T. Maruyama et al., “Space brightness evaluation for a daylight room,” i-Perception, 2-4, p.371, 2011.
- [14] M. Ikeda et al., “Communication window lighting to furnish the amenity with residents,” Proc. of Lux Pacifica 97, pp. A176-A180, 1997.
- [15] 池田光男, “照明認識視空間の照明設計への応用(その2),” 照明学会誌, 84-1, pp.50-53, 2000.
- [16] 山口秀樹 他, “コミュニケーション・ウィンドウ・ライティングによる外界情報伝達,” 照明学会誌, 94-5, pp.267-274, 2010.
- [17] 池田光男 他, “2つの照明認識視空間の間の連続性,” 照明学会誌, 79-11, pp.710-713, 1995.
- [18] 池田光男 他, “戸外から室内を見た場合の連続感最大点の室内照度レベル,” 照明学会誌, 80-5, pp.372-374, 1996.
- [19] 村中泰一 他, “居住空間における連続感照明の自動化,” 照明学会第34回全国大会講演論文集, p.231, 2001.
- [20] 篠田博之 他, “色彩工学入門,” 東京, 森北出版, 2007.
- [21] 篠田博之, “色発現の三要素(その1)-照らす光と照らされる物体-,” 日本色彩学会誌, 35-2, pp.113-117, 2011.
- [22] 篠田博之, “色発現の三要素(その2)-視覚系の色順応-,” 日本色彩学会誌, 35-3, pp.227-233, 2011.
- [23] 石橋諒一 他, “色恒常性に基づく測色機器を用いないカラーマネジメント,” 日本色彩学会誌, 33-Sup., pp.38-39, 2009.
- [24] 古川幸司 他, “色恒常性を利用した携帯電話ディスプレイのカラーマネジメント,” 平成22年度日本色彩学会関西支部大会予稿集, pp.28-29, 2011.
- [25] 篠田博之, “多様な色覚への対応-色覚異常と高齢者-,” 日本色彩学会誌, 35-4, pp.339-345, 2011.
- [26] 西井敦 他, “カラーバリアフリー照明の提案,” 照明学会第39回全国大会, 講演論文集, p.178, 2006.
- [27] 永井達哉 他, “カラーバリアフリー照明に対する最適なスペクトル推定と評価,” Optics & Photonics Japan 2008, 講演予稿集, pp.52-53, 2008.
- [28] 永井達哉 他, “色覚バリアフリー照明に対する光源スペクトルの評価と検証,” 日本色彩学会誌, 33-Sup., pp.76-77, 2009.
- [29] 池田光男 他, “白内障擬似体験ゴーグルによる色票の見えの変化,” 日本色彩学会誌, 27-2, pp.113-124, 2003.
- [30] 小浜朋子 他, “白内障擬似体験ゴーグルに入射する環境光によって生じる色票の彩度低下,” 色学誌, 28-2, pp.95-101, 2004.
- [31] 篠田博之 他, “白内障による彩度低下防止用照明,” 信学技報, HIP2005-15, pp.13-16, 2005.

《プロフィール》

篠田 博之 (しのだ ひろゆき)

1989 東京工業大学 理学部 卒業
 1991 東京工業大学大学院 博士課程修了
 1995 京都大学大学院 博士課程修了 博士(工学)
 1995-2004 立命館大学 理工学部 専任講師, 助教授, 教授
 1988-1999 米国 ロチェスター大学 客員研究員
 2004-現在 立命館大学 情報理工学部 教授

専門技術分野:

視覚情報処理, 心理物理学, 色彩工学

主な著書:

色彩工学入門(森北出版, 2007)
 知覚心理学(ミネルヴァ書房, 2011)