仮想輝度分布法による空間の明るさ感の物理的な評価法 —均等拡散面の場合—

正会員 荻 内 康 雄 (京都大学)

正会員 石 田 泰 一 郎 (京都大学)

Physical Estimation of Brightness of a Space by Virtual Luminance Distribution Method

Member Yasuo Ogiuchi (Kyoto University)

and Member Taiichiro Ishida (Kyoto University)

KEYWORDS : brightness of a space, virtual luminance distribution, perception of lighting environment

1. 緒言

人間がある空間を見るとき、その空間全体に対する明るさの感覚が生じる。以下ではこの明るさの印象のことを「空間の明るさ感」と呼ぶ。照明環境の設計にあたっては空間の明るさ感を考慮することはきわめて重要であり、空間の明るさ感評価に関する研究も数多く行われている。例えば、視点を通る水平線を中心とする上下20°の範囲の平均輝度 (B40平均輝度)¹⁾が空間の明るさ感と相関が高いという結果が得られている。また、視野内に光源のきらめきを配置することで部屋全体が明るく感じられるという結果²⁾、室の隅角部を明るく照らすことが室全体の明るさ感の向上につながるという結果³⁾も明らかにされており、照明設計への応用が提案されている⁴⁾。また空間の全般的な明るさ感を表す指標として空間内のある点の球面照度や円筒面照度が用いられている⁵⁾。このように様々な要因が明るさ感に影響を与えることが報告されているものの、現段階では室空間に対して幅広く適用可能な空間の明るさ感の評価方法は確立されていない。

空間の明るさ感は空間内の何らかの光の強さに関係する感覚であると考えられるが、それが具体的にどのような光の成分に対応しているのか必ずしも明らかではない。著者らは、空間の明るさ感の一般的な評価方法を開発するためには、まずこの感覚が具体的に空間内のどのような光の特徴を捉えたものであるのか明らかにし、その上で、この特徴の知覚量に対応する物理量を算定する必要があると考える。

そこで、空間内の光を、光源から直接室内に照射される成分と、それが室内で反射して空間全体を満たしている成分に大別して考え、それぞれの成分に対する感覚量と空間の明るさ感の関係を調べた。実験の詳細は前報⁶⁾に記述してあるので、ここでは実験条件を簡単にまとめておく。実験では「テストボックス」と「基準ボックス」という2つの模型室を用意した。模型サイズは実際の部屋の10分の1程度を想定している。テストボックスの条件は内部の反射率3段階(42, 27, 12%)×配光パターン4種類の12種類である。配光パターンは次のとおりである。

(1) 照明条件 Dr (直接照明) : 拡散板・ルーバーを用いずに、上面

に取り付けたメインの蛍光灯のみで内部を直接照明する。

(2) 照明条件 Df (拡散照明) : 拡散板 (白色アクリル板) を通してメインの蛍光灯のみで照明する。

(3) 照明条件 Lv (ルーバー) : ルーバーを取り付け、メインの蛍光灯のみで照明する。

(4) 照明条件 W1 (ウォールライティング) : 拡散板を通して内部を照明する拡散照明に加えて、補助光源によって奥の壁のみを照明するウォールライティングを付け加える。

基準ボックスの内部反射率は66%、内部は照明条件 Df と同じく拡散板を通して蛍光灯で照明されている。床面には被験者が内部の照明状況を把握する手がかりになるように、3種の明度 (反射率: 75%, 58%, 27%) のいずれかによって塗装された無彩色の立体が4個置かれている。

被験者は、テストボックス内部に対して、光源からの直接光の量に対する感覚(光源の強さ感)、空間を満たしている光の量に対する感覚(空間の光量感)、および空間の明るさ感のそれぞれについて、基準ボックス内部のそれぞれの感覚を100として数字で評価した。被験者に与えられたインストラクションは以下のとおりである。「基準ボックスの内部空間に感じられる『光源の強さ』『空間に満ちている光の量』『空間の明るさ感』のそれぞれを100としたとき、テストボックスの『光源の強さ』『空間に満ちている光の量』『空間の明るさ感』がそれぞれいくらかであると感じられるか数字で評価してください」。評価に際して、被験者は開口を通して模型内部を自由に観察することができる。ただし、光源を直接見ることはできない。

実験の結果、空間の明るさ感は空間の光量感と高い相関を示したのに対して、光源の強さ感とは直接的な相関を示さなかった。この結果より、空間の明るさ感を決めている主要な光の要素は空間に満ちていると感じられる光であることが明らかになった。

次のステップでは、この空間の光量感を決めている物理量の算定方法を検討し、それに基づいて空間の明るさ感の評価手法を構築することが目標になる。本研究の目的は、空間の光量感に対応する物理量を算出する方法を提案し、先の著者らの実験結果の分析によって、その有効性を確認することである。

2. 方法

2.1 仮想輝度分布法

空間に満ちている光の認識がどのような情報に基づいて成立するのか詳細は明らかではないが、基本的には空間全体にわたる拡散的な光の成分が主要な決定要因になると思われる。したがって、空間の光量感に対応する物理量を算出するためには、空間内の光の分布から局所的な変化の成分を除外して、空間全体にわたる成分を抽出することが必要になる。ここで、人間が空間の光の状況を把握するための情報源は空間の輝度分布であることから、空間の光量感に対応する物理量は輝度分布から抽出することが有効と思われる。

問題は輝度分布からどのようにして空間全体にわたる光の認識に寄与する成分を抽出するかということである。現実の視環境を想定した場合には、局所的な照度や反射率の変化として認識される成分と、空間全体に満ちていると認識される光の成分を、輝度分布の情報のみから数学的に分離することは困難である。そこで考え方を換え、あらかじめ拡散的な光によって室内が満たされている状態を仮定し、そのときの輝度分布を現実の輝度分布にあてはめることによって、現実の室の拡散的な光の量を評価することを試みる。すなわち、室の形状、内壁や床の反射率の情報は既知とし、そこに拡散性の光源の存在を仮定する。このとき、この室内は拡散性の光によって満たされ、ある輝度分布が形成される。人間がこの空間に満ちていると認識する光による輝度分布は、この仮想的な輝度分布と類似したパターンを示すはずである。この仮想的な光源による室内の輝度分布、すなわち室内に拡散的な光が満ちている状態を仮定したときの輝度分布（以下、仮想輝度分布と呼ぶ）を基準として、それを現実の室空間の輝度分布にあてはめ、そこから空間に満ちていると認識される光の成分を算出する試みである。現実の輝度分布に仮想輝度分布をあてはめる場合、輝度分布の基底をなす部分のフィッティングを行えば、局所的な光や反射率の変化による変動成分は排除され、空間全体にわたる光の量が評価できると考えられる。このような空間の光量感に対応する物理量の算出方法を仮想輝度分布法と呼ぶことにする。

ただし、この手法には仮想的な光源をどのようなものにするかという問題点がある。これは人間がある室空間に満ちている光を認識したとき、その光がどのような光源に由来するものと解釈するのかという問題を取り扱うことに相当し、将来的な課題である。今回は次項で説明するように天井面全体を均等拡散面の光源とし、室の壁面や床面は均等拡散反射面として計算した結果を報告する。

2.2 計算方法

次に仮想輝度分布法による空間の明るさ感推定値の具体的な算出方法を説明する。

まず、仮想輝度分布を与える空間として、サイズ・内部反射率は表1のとおりで、かつその天井面が均等拡散面光源となっているような空間を考えた。各面の反射性状は均等拡散反射であると仮定する。なお、仮想空間のサイズ・内部反射率はマグニチュード評価実験で用いられた基準ボックスの条件と同じものである。このように空間の条件を仮定すると、パラメータとして変化するのは仮想光源の輝度のみであり、ある測定点*i*の仮想輝度*L_i*と仮想光源の輝度*L_s*との間に次の関係が成立する。

$$L_i = a_i L_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

*a_i*は点*i*の仮想輝度と光源輝度の比を表す係数（以下輝度係数

表1 仮想空間の物理条件

Table 1 Physical properties of the virtual space.

内部反射率	床面・開口部以外の壁面	0.66
	天井面	0.8
	開口部	0
サイズ（幅×奥行き×高さ、単位 [m]）		0.30×0.45×0.25
その他		各面は完全拡散反射 天井面は完全拡散面光源

と呼ぶ)で、面上の各点でそれぞれ固有の値を持つ。また、光源輝度*L_s*=1のときの各点の輝度と考えることもできる。

各測定点の輝度係数*a_i*は次の手順⁷⁾により算出する。この計算では、*L_s*=1のときの輝度分布として*a_i*を算出している。まず、各面を1cm×1cmの正方形メッシュに分割し、メッシュの各頂点の直接照度から各面の平均直接照度を計算する。続いて間接照度の計算を行う。今回は計算の簡略化のため、各面の間接照度は一定であると考えている。各面の反射率と平均直接照度はわかっているので、各面相互の形態係数を計算すれば、各面の全照度を未知数とする連立方程式ができる。これを解くことにより、各面の全照度と間接照度が計算できる。最後に*a_i*を計算するために、各測定点における直接照度を計算し、間接照度を加えて全照度を算出する。全照度*L_{total}*と反射率*ρ*から各測定点での輝度係数*a_i*が次のように算出される。

$$a_i = \frac{\rho L_{\text{total}}}{\pi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで各面が拡散反射面であるという仮定を使用している。

続いて、テストボックスの12の条件のそれぞれで被験者の視点位置からの輝度分布を測定する。実際の測定では輝度計(Minolta CS-100)を使って、床面・壁面(左右と奥)の9点ずつ、計36点を測定した。測定点の概略は図1に示すとおりである。測定点の位置は各面について被験者から見てほぼ均一に分布するように選定した。また、測定時には心理評価のときに床に置かれていた立体は取り除いている。

実測した被験者の視点位置からの各測定点の輝度と仮想輝度分布の輝度係数をもとに、明るさ感推定値を算出する。ここで、テストボックスの実測輝度分布の形状は仮想輝度分布の形状とは一般に異なる。そこで、実測輝度分布から仮想輝度分布の形状に合う成分を抽出するために、仮想光源輝度*L_s*の代表値を求めること

図1 輝度測定点の概略

交点の○が測定点を示す。A-A'、B-B'線については後述

Fig.1 Illustration of the luminance measurement points. The circles on intersection points show the points whose luminance were measured.

になる。具体的には、輝度係数に仮想光源輝度をかけて得られる仮想輝度 L_i' の分布を、各測定点での実測輝度 L_i の分布に対して何らかの方法でフィットさせることになる。前述のとおり、フィッティングの際のパラメータは光源輝度 L_s のみである。このフィッティングで得られた仮想光源輝度 L_s が、空間全体に満ちている光の量、すなわちその空間全体の明るさ感を推定する量（以下、明るさ感推定値と呼ぶ）に対応していると考えることができる。

問題はこの分布の当てはめをどのような方法に基づいて行うかである。この方法として、今回は次の2つを考えた。一つは、各測定点での実測輝度 L_i と仮想輝度 L_i' の差の二乗和 $S = \sum_{i=1}^n (L_i - L_i')^2$ を最小にする仮想光源輝度 L_s を算出する方法（最小二乗法）である。もう一つの方法では、まず各測定点について実測輝度条件を満たす仮想光源輝度 $L_s = L_i/a_i$ を計算する。次いで各測定点について求められた全36個の L_s の値の分布から、下5パーセンタイル値を仮想光源輝度の代表値とする。最小二乗法によるフィットは輝度分布の全体的な傾向を抽出できるというメリットがある。その反面、局所的な輝度変動の成分も代表値にある程度影響することになる。一方、 L_s の下5パーセンタイル値による方法は実測された輝度分布のベースとなる成分に重点を置くフィッティングになり、局所的な輝度の成分は算出される代表値に影響しない。これは、空間の光量感に影響するのは輝度分布のベースに当たる部分であり、そこから外れている高輝度な部分は「局所的な光」と感じるという被験者の内観報告を考えると、妥当なフィッ

ティング方法と考えられる。

フィッティングの方法は空間の光量感が輝度分布のどのような特徴から決定されているかということと関連する問題であり、今後も検討が必要である。

3. 解析結果

仮想輝度分布法による解析の結果の例を図2に示す。図2(a)～(d)は、36点の輝度測定点に対してフィットされた仮想輝度分布と実測輝度の関係を、図1のA-A'線上の測定点、およびB-B'線上の測定点について示したものである。テストボックスの反射率条件は27%の結果を取り上げ、4種類の配光パターンの違いをシンボルによって区別している。横軸はA-A'線、B-B'線について最初の測定点（左壁）からの距離を表す。したがって、(a)と(b)においては0～25cm、25～55cm、55～80cmがそれぞれ左壁、床、右壁を表す。また、(c)と(d)においては、0～45cm、45～75cm、75～120cmがそれぞれ左壁、奥壁、右壁面上の測定位置を表す。縦軸は輝度（実測または仮想）である。

図2(a)、(c)に示されているように、5パーセンタイル値によるフィットの結果は、図に示された測定範囲で見ると、実測よりもかなり低い値になっている。一方最小二乗法によるフィッティングの結果は実測輝度のおおよそ中間を通る値になっている。例えば5パーセンタイル値によるフィッティングの場合、床面中央の実測輝度（図2(a)の横軸40cmの点）は代表値の決定に寄与して

図2 実測輝度に対する仮想輝度分布マッチングの結果

図1中のA-A'線およびB-B'線上の測定点について、実測輝度と仮想輝度を各線上に沿って測定した距離に対してプロットしてある。(a)、(b)はそれぞれA-A'線上における、5パーセンタイル点と最小二乗法によるフィット結果、(c)、(d)は同様にB-B'線上での結果。

Fig. 2 The results of matching of virtual luminance distribution to measured luminance

Measured luminances and virtual luminances of the measurement points on A-A' and B-B' line in figure1 are plotted against the distance along each line. (a) and (b) show the results of 5-percentile fit and least square fit on A-A'; (c) and (d) show the results on B-B'.

図3 明るさ感推定値算出の結果

明るさ感心理評価値を、(a)5パーセンタイル点フィットによる推定値、(b)最小二乗法フィットによる推定値に対してプロットしてある。

Fig. 3 The results of the calibration of presumed brightness.

Psychologically estimated brightness is plotted against presumed brightness by (a) 5-percentile fit, and (b) least square fit.

いないが、最小二乗法の場合には影響していることがわかる。

図3(a), (b)は実験での12条件のそれぞれについて、仮想輝度分布法による明るさ感評価値(フィッティングによる L_v の代表値)と被験者による明るさ感の心理評価値の関係を示したものである。仮想輝度分布と実測輝度のフィットの方法は5パーセンタイル値と最小二乗法の2つである。横軸は明るさ感推定値、縦軸は被験者による明るさ感心理評価値である。図中の各点はそれぞれ実験での12条件に対応している。また、感覚量は物理量の対数に比例するとされていることを踏まえて、対数曲線による回帰を行っている。

いずれのフィット法でも明るさ感の推定値と心理評価値との間の相関は比較的高い。ただし、5パーセンタイル点によるフィットのほうが相関がよくなっており、明るさ感の推定をうまく行えている。これは前述の2つのフィッティング方法の違いが表われたものであろう。実験時の内観報告によると、条件Lvに対する被験者の印象は「床だけは明るく照らされているが、全体としては暗い」というものになっている。最小二乗法によるフィッティングでは、比較的高い床面の輝度によって空間全体の明るさ感推定値が高くなるのに対して、5パーセンタイル値によるフィッティングでは、輝度分布の中で被験者が注目したベースとなる部分をとらえることができたものと考えられる。

4. 考察

仮想輝度分布法と比較する意味で、従来の研究で提案されてきた空間の明るさ感評価の指標と明るさ感心理評価値の関係を図4(a)~(c)に示す。図の横軸はそれぞれB40平均輝度、視野全域の平均輝度、被験者の視点位置での鉛直面照度であり、縦軸は被験者による明るさ感の心理評価値である。また、図3と同じく対数曲線による回帰を行っている。

いずれの指標においても、明るさ感推定値と心理評価値との間の相関はかなり高くなっている。しかし、従来提案されている明るさ感評価指標について考えてみると、例えば、B40平均輝度のよう空間内のある領域の輝度の平均などの統計量を用いる場合、その値には局所光による輝度の変動も含まれる。したがって、局部的に輝度の高い部分は空間全体の明るさ感に影響を与えないという結果を考えると、特に不均一さが顕著な照明の場合には指標値と空間の明るさ感に差が生じることが予想される。あるいは空間内のある点における球面照度を指標とした場合も照明の不均一

図4 従来からの明るさ感評価指標と明るさ感心理評価値との関係

明るさ感心理評価値を、(a)B40平均輝度、(b)視野全域の平均輝度、(c)被験者の視点位置での鉛直面照度に対してプロットしてある。

Fig. 4 The relationship between brightness estimation indice and psychologically estimated brightness.

Psychologically estimated brightness is plotted against (a) B40 average luminance, (b) average luminance of all visual field, and (c) vertical illuminance at the eye of the subject.

さの影響を免れない。例えばウォールライティングでは、壁面の輝度が高くなるため空間に満ちている光が多いと認識される。しかし、空間の物理的な光の分布は不均一であるため、測定点によっては球面照度は必ずしもこの効果を反映しない。

一方、提案する仮想輝度分布法は、空間の明るさ感に寄与しない局所光の影響を排除することができること、また、室の形状及び壁面と床面の反射率が分かれば、どのような室にも適用可能であること、などの点で従来の指標より優れている。実験を行った条件では、従来からの指標と仮想輝度分布法による明るさ感推定値で明確な差はなかったが、これは実験において、テストボックスの内部の反射率が一様であり、また照明にも大きな不均一さがなかったことが反映していると考えられる。仮想輝度分布法の有効性を検証していくためには、さらに複雑な輝度分布の下での実験が必要である。

また、仮想輝度分布の算出の際に導入した仮想空間や仮想光源の物理条件や、明るさ感推定値算出の際の仮想輝度分布と実測輝度のフィッティング方法などで、今回はいくつかの仮定を行っている。見方を変えれば、仮想輝度分布法は仮想光源などの形で、人間が認識している空間と照明に対するモデルを与えていることになるため、この点についても人間の照明認識の特性などを含めた形でさらに検討することが必要である。またこの方法は著者が提案した空間の明るさ感評価のための参照マッチング法を計算に置き換えたとして理解することもできる。視感評価による参照マッチング法と物理計測による仮想輝度分布法の関連性も興味深い問題である。

本研究の一部は平成11年度照明学会研究・教育助成金奨励研究によって行われた。

参考文献

- (1) Loe, D. L., Mansfield, K. P. and Rowlands, E. : Appearance of lit environment and its relevance in lighting design : Experimental study, Light. Res. Technol., 26-3, pp.119-133 (1994).
- (2) Akashi, Y., Akashi, I., Tanabe, Y., and Kanaya, S. : The sparkle effect of liminaires on the sensation of brightness, Proc. CIE, 1, pp.176-179 (1995).
- (3) 岩井彌, 齋藤良徳, 墨貞宏, 阪口敏彦 : 住宅居間の明るさ感—ダウンライトを設置した場合—, 照学誌, 83-2, pp.81-86 (1999).
- (4) 明石行生, 向健二, 坂上美香, 田辺吉徳 : 省エネルギーと快適性の両立を目指したオフィス照明システム—パーソナル&アンビエント照明方式の実用化—, National Tech. Rep., 43-2, pp.200-206 (1997).
- (5) 照明学会編, 「ライティングハンドブック」, オーム社, p. 255 (1987).
- (6) 石田, 荻内 : 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—, 照学誌, 84-8A, pp.473-479 (2000).
- (7) 照明学会編, 「ライティングハンドブック」, オーム社, pp. 223-244 (1987).
- (8) 石田, 荻内 : 参照マッチング法による空間の明るさ感評価

の基礎的検討, 照学誌, 83-5, pp.295-305 (1999).

(受付日1999年12月1日/採録日2000年4月13日)

荻内 康雄 (正会員)

京都大学大学院工学研究科

石田 泰一郎 (正会員)

京都大学大学院工学研究科生活空間学専攻

昭和49年11月5日生まれ, 平成9年3月京都大学工学部建築学科卒業, 平成11年3月京都大学大学院工学研究科生活空間学専攻修士課程修了。現在同博士課程在学中。照明学会, 日本建築学会, 日本照明委員会会員。

昭和37年9月11日生まれ, 昭和61年東京工業大学理学部卒業, 平成3年東京工業大学大学院物理情報工学専攻博士課程修了。工学博士。現在, 京都大学大学院工学研究科助教授。専門は建築視環境, 照明, 色彩, 視覚心理物理学。日本建築学会, 日本色彩学会, 日本光学会, 日本照明委員会, 日本視覚学会, OSA 各会員。