MCS による室内照明空間における 3 次元色彩分布表示の試み

専門会員 長 田 正 義 (徳島大学)

非会員 伊 祁 恵 都 嗣 (四国システム開発)

非会員 下 村 直 行 (徳島大学)

An Attempt to Represent Three-Dimensional Color Distribution in Lighting Room using Monte Carlo Simulation

Fellow Member **Masayoshi Nagata** (Faculty of Engineering, The University of Tokushima),

Non Member **Etsushi Iki** (Shikoku System Development Co. Ltd),

Non Member **Naoyuki Shimomura** (Faculty of Engineering, The University of Tokushima)

ABSTRACT

This paper describes an attempt to represent three - dimensional color distribution in lighting rooms using Monte Carlo simulation (MCS).

Generally speaking, the lighting space is usually expected to have different spectral radiant exitances and color distributions in various positions throughout it, since lighting rooms have many types of light sources and room surface walls with various spectral properties.

Because the human being perceives a color stimulus with his eyes from a wide visual field, it is important to discuss three dimensional color distribution with regard to human vision at any point in the lighting space.

A formulation for the Monte Carlo simulation technique is performed to estimate three dimensional color distribution as quantitatively as possible. Firstly, the model room is composed of imaginary 1,000- unit subdivisions formed by uniformly dividing the lighting room into many single unit spaces. Next, the three - dimensional color distribution on six specified surfaces of a single unit space in the lighting room is investigated by using MCS

It was found that spectral radiant exitance distributions on both sides of the imaginary partitions are quite variable according to their positions and human perceptual location, so three - dimensional color distribution is also complicated by variations in these factors.

KEYWORDS, Monte Carlo simulation, three - dimensional color distribution, unit subdivision, spectral radiant, exitance, imaginary partition.

1. は じ め に

快適で良好な視機能を保証する視環境設計には、2次元ならびに3次元的な測光量の評価に加えて、室内空間において適切な配色を考慮する必要がある。我々人間の動的で3次元的な動作と空間的な色彩効果を考慮すると、様々な水平ならびに鉛直入射角で変化する3次元的な色彩分布を室内空間各部で検討することが必要とされる。照明空間の室内壁面や内部に設置されている各種家具の表面は、通常、各種分光反射・透過・吸収特性を有している。たとえ光源が白色光源であってもそれらの表面色はもとより、室内照明空間各部分においては光源からの直射光ならびに反射光束や透過光束の合成光束により、入射角によって光源色と比較して複雑で3次元的な色彩分布を呈することが予想される¹⁻⁵⁾。相互反射あるいは透過作用単独による室内面上の2次元的な色彩変化の

検討は比較的以前から行われているが³⁻⁷⁾、相互反射と透過作用両方を同時に考慮し、かつ、室内空間を3次元的に細分化した面素上で分光放射発散度と色度値を求め、3次元的な色彩分布を定量的に検討した事例はあまりないようである⁶⁻¹⁰⁾。

本文は、室内空間の3次元的な色彩分布を定量的に検討する試みとして、室内面ならびに内部に設置した仮想区分板が、様々な分光反射・透過・吸収特性を有する場合に、まず、室内面の内外面や区分板両面の分光放射発散度分布をモンテカルロシミュレーション(MCS)により求めた。次に、これらに基づくCIE, x-y色度値が室内空間の各位置で、光束の入射角度によってどのように変化するかを検討した結果について報告する。

2. 室内照明空間の設定

MCSによる3次元的な色彩分布の検討を行ったモデル室内空間の概略を図1に示した。光源としては380[nm]~760[nm]の波長範囲で一定出力をもつ白色点光源を仮定し、天井面中心部に設

本論文の一部は第26回、27回および28回照明学会全国大会で発表した。

室内空間各部で X, Y, Z 3 座標軸と直交する仮想単位小空間 6 壁面上で分光放射散度値を計算するために、光束を多数の光子束に分割し、個々の光子束が放射後吸収されるまで反射や透過を繰り返す飛行軌跡を以下のように追跡した。図 1 に示したモデル室内空間各部で任意の単位小空間内から放射された光子束が、どの面に入射し、反射あるいは透過作用により、再びどのように飛行するかその手順を以下に述べる。

まず、放射光子束の飛行軌跡を追跡するために、図4のように鉛直角 θ 、水平角 ϕ をもって単位時間当り移動する単位距離を速度ベクトル V と定義し、その X, Y, Z 軸3方向成分を、それぞれ、 V_x, V_y, V_z とすると式(1)で表される。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \sin\theta \cos\phi \\ V_y &= \sin\theta \sin\phi \\ V_z &= \cos\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

A diagram of a sphere with three axes: Z (vertical), X (pointing down and left), and Y (pointing right). A vector originates from the center and points to the surface. The angle between this vector and the Z-axis is labeled θ . The angle between the projection of this vector onto the XY-plane and the Y-axis is labeled ϕ . The components of the vector are labeled: $V_z = \cos \theta$ along the Z-axis, $V_y = \sin \theta \sin \phi$ along the Y-axis, and $V_x = \sin \theta \cos \phi$ along the X-axis. A dashed line indicates the projection of the vector onto the XY-plane. Text labels include "垂直角基準方向" (Vertical angle reference direction) pointing to the Z-axis and "水平角基準方向" (Horizontal angle reference direction) pointing to the X-axis.

657

表1 完全拡散反射
Table.1 perfectly diffusing reflection

	surface ①	surface ②	surface ③	surface ④	surface ⑤	surface ⑥
V_x	$\cos \theta$	$-\cos \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$
V_y	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \theta$	$-\cos \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$
V_z	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \theta$	$-\cos \theta$

表2 完全拡散透過
Fig.2 perfectly diffusing transmittance

	surface ①	surface ②	surface ③	surface ④	surface ⑤	surface ⑥
V_x	$-\cos \theta$	$\cos \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$
V_y	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$-\cos \theta$	$\cos \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$
V_z	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\sin \phi \cdot \sin \theta$	$\cos \phi \cdot \sin \theta$	$-\cos \theta$	$\cos \theta$

表3 完全鏡面反射
Fig.3 perfectly specular reflection

	surfaces ①, ②	surfaces ③, ④	surfaces ⑤, ⑥
V_{2x}	$-V_{1x}$	V_{1x}	V_{1x}
V_{2y}	V_{1y}	$-V_{1y}$	V_{1y}
V_{2z}	V_{1z}	V_{1z}	$-V_{1z}$

図5 水平角 ϕ と鉛直角 θ をもつ速度ベクトルの一例
Fig.5 An example of velocity vector with horizontal angle ϕ and vertical angle θ

放射光子束が入射した6壁面で(i)完全拡散反射(ii)完全拡散透過および(iii)完全鏡面反射する場合、速度ベクトルの3成分 V_x , V_y , V_z は、それぞれ、表1、表2および表3で示したように記述される。一例として6面の内の3面で+方向面①, ③, ⑤への入射光子束が、それぞれ拡散反射した事例の3軸方向成分 V_x , V_y , V_z の模様を図5に示す。

3.2 光子束の入射面判定

3.2.1 入射面判定の手順

仮想単位小空間の6壁面は、一辺が単位長さで、透過率 $\tau=100\%$ と仮定しているが、場所によっては様々な分光特性をもつ区分板で構成されることもある。任意の単位小空間で任意の方向に3次元的に放出された光子束の飛行軌跡を連続して捕捉するため

に、次にどの面に入射するか、その判定方法を以下に述べる。

図6に示す単位小空間の面5上の1点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ (ただし, $0 \leq x_0 \leq 1, 0 \leq y_0 \leq 1, z_0 = 0$) から、速度ベクトル $V(V_x, V_y, V_z)$ をもつ光子束が鉛直角 θ と水平角 ϕ で放射される場合を考える。点 P_0 から x 軸に垂直な面(面①あるいは面②)までの距離 dx は、

(1-a), $V_x < 0$ のとき、

$$dx = x_0 \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{V_y}{V_x} \right)^2 + \left(\frac{V_z}{V_x} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1-b), $V_x > 0$ のとき、

$$dx = (1 - x_0) \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{V_y}{V_x} \right)^2 + \left(\frac{V_z}{V_x} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、

(1-c), また, $V_x=0$ のとき, d_x は無限大となり, どちらの面にも入射しない,

のいずれかの事例に分類される,

同様に, y 軸に垂直な面 (面③あるいは面④) までの距離 d_y , Z 軸に垂直な面 (面⑤あるいは面⑥) までの距離 d_z は, それぞれ次のように与えられる,

(2-a), $V_y < 0$ のとき,

$$d_y = y_0 \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{V_x}{V_y} \right)^2 + 1 + \left(\frac{V_z}{V_y} \right)^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

(2-b), $V_y > 0$ のとき,

$$d_y = (1 - y_0) \cdot \left\{ \left(\frac{V_x}{V_y} \right)^2 + 1 + \left(\frac{V_z}{V_y} \right)^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

(2-c), また, $V_y = 0$ のとき, d_y は無限大となり, 面③あるいは面④には入射しない, 一方,

(3-a), $V_z < 0$ のとき,

$$d_z = z_0 \cdot \left\{ \left(\frac{V_x}{V_z} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{V_z} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{V_z} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

(3-b), $V_z > 0$ のとき,

$$d_z = (1 - z_0) \cdot \left\{ \left(\frac{V_x}{V_z} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{V_z} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

となり,

(3-c), また, $V_z = 0$ のとき, d_z は無限大となって, これらの面には入射しない,

以上, 式(2)~式(7)より求められる d_x , d_y , d_z についてその大きさを比較することにより, 入射面は次の i) ~ vi) の場合のいずれかで決定される,

- i) d_x が最小で, かつ, V_x が負ならば, 面①に入射する,
 - ii) d_x が最小で, かつ, V_x が正ならば, 面②に入射する,
 - iii) d_y が最小で, かつ, V_y が負ならば, 面③に入射する,
 - iv) d_y が最小で, かつ, V_y が正ならば, 面④に入射する,
 - v) d_z が最小で, かつ, V_z が負ならば, 面⑤に入射する,
 - vi) d_z が最小で, かつ, V_z が正ならば, 面⑥に入射する,
- 次に, 実際例について検討する,

図6 光子束の入射面判定の一例
 Fig.6 An example for deciding incident surface of photon bundle

3.2.2 計算例

図6に示すような単位小空間の面⑤において, 一例として点 P_0 . $(X_0, Y_0, Z_0) = (0.5, 0.6, 0)$ から, 水平角 $\phi = 130^\circ$ と鉛直角 $\theta = 50^\circ$ で放射された光子束が, どの面に入射するか判定する. ここで, 各面の座標範囲は,

面①: $X=0, 0 \leq Y \leq 1, 0 \leq Z \leq 1$

面②: $X=1, 0 \leq Y \leq 1, 0 \leq Z \leq 1$

面③: $0 \leq X \leq 1, Y=0, 0 \leq Z \leq 1$

面④: $0 \leq X \leq 1, Y=1, 0 \leq Z \leq 1$

面⑤: $0 \leq X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1, Z=0$

面⑥: $0 \leq X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1, Z=1$

である. 速度ベクトルの3成分は, 式(1)から

$$V_x = \cos(130^\circ) \cdot \sin(50^\circ) = -0.492$$

$$V_y = \sin(130^\circ) \cdot \sin(50^\circ) = 0.587$$

$$V_z = \cos(50^\circ) = 0.643$$

となる,

点 P_0 から YZ 平面に含まれる点 P_1 までの距離 d_x , 点 P_0 から ZX 平面に含まれる点 P_2 までの距離 d_y および P_0 から XY 平面に含まれる点 P_3 までの距離 d_z は, 式(2), (5), および式(7)から, それぞれ次のように求まる,

$$d_x = x_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_y}{V_x} \right)^2 + \left(\frac{V_z}{V_x} \right)^2} = 0.5 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{0.587}{-0.492} \right)^2 + \left(\frac{0.643}{-0.492} \right)^2} = 1.02$$

$$d_y = (1 - y_0) \cdot \sqrt{\left(\frac{V_x}{V_y} \right)^2 + 1 + \left(\frac{V_z}{V_y} \right)^2}$$

$$= (1 - 0.6) \cdot \sqrt{\left(\frac{-0.492}{0.587} \right)^2 + 1 + \left(\frac{0.643}{0.587} \right)^2} = 0.68$$

$$d_z = (1 - z_0) \cdot \sqrt{\left(\frac{V_y}{V_z} \right)^2 + \left(\frac{V_x}{V_z} \right)^2 + 1}$$

$$= (1 - 0) \cdot \sqrt{\left(\frac{0.587}{0.643} \right)^2 + \left(\frac{-0.492}{0.643} \right)^2 + 1} = 1.56$$

図7 色彩分布計算のフローチャート
 Fig.7 Flow chart for calculating color distribution.

その結果、 d_y が最小で、かつ V_y は正であるので、前述の(iv)の場合にあてはまる。したがって、この光子束は面④に入射し、入射点 P_2 の座標は($x_2=0.165$, $y_2=1$, $z_2=0.438$)である。

このように放射光子束が室内面あるいは区分板に吸収されるまで、単位小空間を順次追跡して行くが、以上の概要をまとめたフローチャートを図7に示す。

4. 分光放射発散度と CIE, x-y 色度値

4.1 入射分光光子束数と分光放射発散度の関係

光源から放射される全放射束を Φ_0 [W]、全放射光子束数を N 、ある面素から発散する分光光子束数を $n\lambda$ 、面素の面積を S [m²]、分光波長幅を $\Delta\lambda$ [nm]とすれば、この面素上の分光放射発散度 M は次式によって求まる。

$$M = \frac{\Phi_0 \cdot n\lambda}{N \cdot S \cdot \Delta\lambda} \quad [W/(m^2 \cdot nm)] \quad \dots\dots\dots(8)$$

MCS 数値計算では $\Phi_0=1$ [W]、 $\Delta\lambda=5$ [nm]、 $S=10^{-2}$ [m²]、 $N=2 \times 10^7$ とした。

モデル室内空間には、1,000個の単位小空間があり、その6壁面の内外両面計12面において平均分光放射発散度を計算しているので、合計12,000面素上で、これらの値が求められる。

4.2 色度値への変換

任意の面素への入射分光放射束を Φ_λ 、分光反射(透過)率が ρ (λ)の三刺激値 X , Y , Z は

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K \int_{380}^{760} \rho(\lambda) \Phi_\lambda \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$K = 100 \int_{380}^{760} \Phi_\lambda \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

で与えられる。 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数である。式(9)から

$$\Sigma = \int_{380}^{760} \rho(\lambda) \Phi_\lambda \bar{x}(\lambda) \Delta(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{760} \rho(\lambda) \Phi_\lambda \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{760} \rho(\lambda) \Phi_\lambda \bar{z}(\lambda) \Delta(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots(10)$$

とおくと、x-y色度座標は

$$x = \frac{\int_{380}^{760} \rho(\lambda) \Phi_\lambda \bar{x}(\lambda) \Delta(\lambda) d\lambda}{\Sigma}, \quad y = \frac{\int_{380}^{760} \rho(\lambda) \Phi_\lambda \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda) d\lambda}{\Sigma} \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。分光放射束 Φ_λ は式(12)となる。

$$\Phi_\lambda = \frac{\Phi_0 \cdot n\lambda}{N \cdot \Delta\lambda} \quad [W/nm] \quad \dots\dots\dots(12)$$

5. 分光放射発散度と色度値分布

本手法では室内空間を1,000分割した個々の単位小空間6壁面の内外12面において、分光放射発散度とそれに基づくCIE, x-y色度値を求めることができる。本研究では、単位出力の白色光源を用いて遮光板有無により室内空間内に設定した対象面における分光放射発散度とx-y色度値を計算し、遮光板が室内空間各部の3次元的な色彩分布に与える影響を検討する。なお、MCS計算によって求めたx-y色度値は、対象面素位置において物理眼の視角180度で得られる測定値であり、例えば色彩色差計(M社, CL-100)を設置して得られる測定値に対応している。なお、+ならびに-方向とは図8中に示した矢印の方向にセンサーの受光面を設置したことを示す。

図8 中空室内照明空間の対象面位置(Y-Z平面)
Fig.8 Location of color calculation surface in lighting room without screen.

5.1 中空室内空間の色度値分布

まず、対象面の一例として、図8に示すような室内断面図において、鉛直断面 V_{x4} の仮想面上+、-両方向の分光放射発散度分布を図9(a)(b)に示した。仮想面の設定位置と受光面方向の違いに

図9 分光放射発散度分布, (a)+方向, (b)-方向
Fig.9 Distribution of spectral radiant exitance, (a)Positive direction, (b) Negative direction.

よって、光源からの直射光と壁面からの反射光の割合が異なるために、分光放射発散度分布はかなり相違する。(a)図では、壁面からの反射光のみがこの対象面に入射しており、分光放射発散度は約600~760[nm]の長波長範囲で大きな値を持っている。約600[nm]以下の短波長領域では前者の約1/10以下の値になっていることがわかる。(b)図に示した一方向の入射光は、壁面からの反射光に加えて光源からの直射光の和で構成されるため、(a)図の値と比べて全体的に10倍近くに増加するとともに天井面に近づくほど、波長による相違が小さくなり、波長特性が弱まっていることがわかる。床面近くでは長波長光の割合が比較的大きく、(a)図のものに相似している。これらの分光放射発散度分布を基に、x-y色度値を求めた結果が図10(a)(b)である。図中で、×印は白色光源色、○印はMCS数値実験値、△印は白色光源からの直射光が壁面で反射した反射光色、●印はこの赤色反射光が再び壁面で反射した反射光色を、それぞれ、示している。また、矢印の方向に対象面素が床面から天井面に近づくことを示している。(a)図では入射光が壁面からの反射光のみで構成されるために、その色度値は対象位置が床面から天井面に変化しても、ほぼ、一定値になっている。しかし(b)図では入射光が壁面からの赤色反射光に加えて光源からの白色直射光との混合割合が面素位置によって異なるために、床面から天井面に接近するに従って赤色光色から光源色にまで変化していることがわかる。

図10 対象面の色度図、(a)+方向、(b)-方向
Fig.10 Chromaticity diagram of color calculation surface, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

対象断面が図11のように水平断面 $H_{Z2}(V_{X0-10}, V_{Y4-5})$ の場合、Z軸方向と逆方向を+、またZ軸方向を一方向として分光放射発散度分布を求め図12(a)(b)に示した。(a)図では+方向からの対象面への入射光が床面からの反射光のみで構成されており、図9(a)と、ほぼ、同様な分光分布特性を持っている。一方、図12(b)の一方向では、対象面への入射光が天井面からの反射光と光源からの直射光の和で構成されるために、全般的に値が大きくなるとともに中央部の面素5の値が両端部の面素1や10のものと比較して、分光放射発散度値は僅かながら大きくなっている。しかし、対象面が天井面から相当離れているために、これら面素位置の相違が分光分布特性に大きな影響を及ぼすまでには至っていない。図12(a)(b)の結果からx-y色度値を計算し、その結果を示したものが図13(a)(b)である。+方向では対象位置が室内中心部位置から両端の壁面に接近しても、色度値変化は小さく、(a)図のように、ほぼ、赤色光色に相当する値に集中している。しかし、一方向では、(a)図とは逆に(b)図から明らかなように白色光源からの直射光の成分が比較強く入射しているので、面素位置に関わらず長波長成分の割合が減少して、光源色と比較的近い色度値に変化している。

図11 中空室内照明空間の対象面位置(X-Y平面)
Fig.11 Location of color calculation surface in lighting room without screen.

図12 分光放射発散度分布、(a)+方向、(b)-方向
Fig.12 Distribution of spectral radiant exitance, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

図13 対象面の色度図, (a)+方向, (b)-方向
Fig.13 Chromaticity diagram of color calculation surface, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

5.2 遮光板をもつ室内空間

次に、室内空間に挿入された遮光板の影響を検討するために、室内空間に図4に示す分光反射・吸収・透過特性をもち高さ・幅が、それぞれ、0.5[m]の遮光板を図14のように鉛直面 V_{x3} の位置

図14 遮光板をもつ室内照明空間の対象面位置 (Y-Z平面)
Fig.14 Location of color calculation surface in lighting room with screen.

に Y-Z 平面と相対して設置し、中空室内空間の事例と同一対象面において分光放射発散度分布と x-y 色度値分布を求めた。まず、対象面両面の分光放射発散度分布を示したものが図15(a)(b)である。中空時の図9(a)(b)と比較して特徴的なことは、遮光板近くで遮光板の吸収特性により長波長領域で値が減少しており、特に床面近くで相当小さくなって、遮光板の影響が明瞭に出ていることである。その結果、(b)図でも、床面に近い面素1~6においては赤色光成分の大半が遮光板に吸収されるために、全波長領域で、ほぼ、一定値となっている。これらに対応する色度値分布を図16(a)(b)に示した。なお、図中で、□と▲印は、図10の説明に加えて、それぞれ、白色光が遮光板を直射後、これを透過した透過光色と壁面反射光が遮光板を透過した透過光色を示している。(a)図では床面から天井面に向かう面素上で、色度値は中空時よりも相当広範囲に拡がり赤色領域から光源色にまで分布している。(b)図でも、これらの面素上での色度値の範囲は(a)図と比べ

で僅かに縮小しており、遮光板の赤色領域の吸収特性によって光源色に若干近づく分布となっている。遮光板の分光・透過・吸収特性が壁面の分光反射特性と大略、正反対の分光特性を有するために両者の影響が相殺し合い、結果的により光源色に近づく分布になったものと考えられる。次に、水平面方向の色度値分布を調べるために、図17に H_{z2} 水平対象面と遮光板の位置関係を示した。+-両方向における分光放射発散度分布を示したものが図18(a)(b)である。中空時と比較して、遮光板近傍で遮光板の吸収効果により値が相当減少していることがわかる。これに対応した色度値を示す図19(a)(b)では、矢印の方向が面素番号の増加方向を示している。中空時と比較して、+、-両方向とも色度値の分布範囲がかなり拡大するとともに、面素番号の増加につれて赤色領域に移動しており、遮光板の影響が顕著に現れている。

図15 分光放射発散度分布, (a)+方向, (b)-方向
Fig.15 Distribution of spectral radiant exitance, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

図16 対象面の色度図, (a)+方向, (b)-方向
Fig.16 Chromaticity diagram of color calculation surface, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

図17 遮光板をもつ室内照明空間の対象面位置 (X-Y 平面)
Fig.17 Location of color calculation surface in lighting room with screen.

図19 対象面の色度図, (a)+方向, (b)-方向
Fig.19 Chromaticity diagram of color calculation surface, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

6. 反射・透過・吸収作用に伴う色彩変化

室内照明空間の任意点で、この点を座標原点とする X, Y, Z, 3 軸と直交する仮想単位小空間の 3 方向面素上で求めた分光放射発散度分布を基に、3 次元的な x-y 色度値分布が記述できることをすでに、明らかにした。これらの色度値はその面素に入射する光束の分光成分に依存しており、光源からの直射光、壁面からの反射光および遮光板からの透過光等の合成光束の分光特性によって決定される。

本研究では、光源が 380~760[nm] の波長範囲で一定のエネルギーをもつ白色 W 光を仮定しており、これによる壁面からの反射光は壁面反射特性と相似して赤色光であり、これを仮に R 光と呼ぶ。遮光板の反射率は値が小さく、かつ一定値を仮定しており、従ってその反射光色は、光源色と同一であって、色彩変化に与える影響は比較的少ない。一方、遮光板からの透過光は光源光に分光透過率を乗じたものでこれを WT 光とする。R 光が再度壁面に当たり反射した光を R² 光、そして R 光が遮光板を透過した光を RT 光と定義する。室内空間の任意点を中心点とする 3 次元的な色彩は、主としてこれらの 4 色光による加法混色により大略決定されると考えられる。一例として、図10(a)に示した中空時の鉛直断面 V_x 面の一方方向の色度値は、対象面素が床面から天井面に接近するとともに入射光、すなわち、天井面からの反射 R 光と白色光源 W 光の 2 色光の混合割合が変化するので、床面近くの R 光色から天井面近くの W 光色に、ほぼ、直線的に変化していることがわかる。また、図13に示した中空時で水平断面面素上の色度値分布のうち、(a)図の+方向の色度値は、床面からの反射光のみで構成され、床面の分光反射特性と相似した長波長領域を主成分とする分光放射発散度値によって決まり、ほぼ、R 光色と一致している。一方、同一室内空間の床面に遮光板を設置した場合(図17)、遮光板が室内壁面と異なる分光透過・吸収特性を有するために W 光、R 光および RT 光などとの混色結果として、図19(a)に示したように色度値は R² 光色から WT 光色まで広範囲に分布していることがわかる。従って、この室内照明空間における 3 次元的な色彩分布は、主として W 光、R 光および T 光による 3 色光の混色で大半が決定される。しかし、室内空間の位置や受光方向によってはこれらの色光に加えて、さらに室内面や遮光板との 2 次反射や透過作用に伴う R² 光、RT 光および R²T 光などとの混色が生ずる結果、室内照明空間の各所で色度値が、広範囲に、かつ、複雑に変化したものと考えられる。

図18 分光放射発散度分布, (a)+方向, (b)-方向
Fig.18 Distribution of spectral radiant exitance, (a)Positive direction, (b)Negative direction.

7. ま と め

本研究では、室内照明空間を仮想区分板で1,000個の仮想単位小空間に等分割し、単位小空間6壁面の内外両面、合計12面上で分光放射発散度値を求めた。さらに、この分光放射発散度値を基にCIE, $x-y$ 色度値を計算し、室内空間各部で3次元的な色彩分布を算出することができた。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 室内空間を1,000個の仮想単位小空間に等分割し、その中心で各々の単位小空間の内外12面の分光放射発散度値から X , Y , Z , 3座標軸と直交する面上で3次元的な色彩分布が得られた。

(2) 光源から放射される光子束の動きを速度ベクトルで表して、光子束放射後、次の入射面を簡単に判定できた。

(3) 室内空間の各部面上の色度値は、入射する光源直射光、室内面ならびに遮光板の反射光および透過光等の合成光による混色結果として得られる。

(4) 室内空間に設置した遮光板は、光束の吸収体であるとともにその分光透過および反射特性が室内空間各部の3次元色彩分布に複雑な影響を与える。

本研究では、基礎的な検討例として、室内面全ての分光特性を同一に選んだ。しかし、実際の室内環境では2色以上で構成される配色問題が重要であり、今後の検討課題と考えている。また、実際の照明空間におけるMCS, $x-y$ 色度値と同じく色彩色差計による測定値との比較検討を詳細に行うが、現在までに得られた色度値分布に関する一部の実測値とMCS数値実験値は比較的よく一致することが確認できた^{9,10)}。

最後に、筆者を色彩研究へお導き下された中京大学河合 悟教授と東京理科大学池田紘一教授に衷心より謝意を表するとともに、MCS数値実験と色彩分布の実測において協力を得た、当時、本学大学院学生中島健夫(現京セラ)、内林輝(現三菱エンジニアリング)および現同岩田光弘の諸君にも感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 納谷：照明環境と色彩，照学誌，55-3，p.155，(1971)。
- (2) Y. Nayatani: Color Appearance and its Application to Illuminating Engineering, CIE-22nd session, Div.1, pp.73-83, (1991)。
- (3) 鈴木他：室内照明空間における相互反射光の色彩変化に与える影響評価，照学誌，76-10，pp.530-535，(1992)。
- (4) 長田・伊祁：分光反射・透過面をもつ室内空間の分光光束発散度分布と色彩変化の検討，照学誌，Vol.77，No.6，pp.374-375，(1993)。
- (5) 長田：モンテカルロシミュレーションによる無限長室内空間の照度分布計算，照学誌，Vol.71，No.6，pp.349-354，(1987)。

- (6) 長田・伊祁：分光反射・透過面をもつ3次元照明空間の分光光束発散度分布と色彩変化の検討，平成5年電気学会全国大会，68，(1993)。
- (7) 長田他：分光反射・透過・吸収面をもつ室内空間の分光光束発散度分布と色彩変化のモンテカルロシミュレーション，第10回色彩工学コンファレンス論文集，9-1，pp.139-142，(1993)。
- (8) 長田他：照明空間における3次元色彩分布，カラーフォーラム Japan'94論文集，8-2，pp.127-130，(1994)。
- (9) 長田他：MCSによる照明空間の3次元色彩分布，平成7年電気学会全国大会，53，(1995)。
- (10) 長田他：MCSによる室内照明空間の3次元色彩分布(II)，平成7年度照明学会全国大会，75，(1995)。

(受付日1995年5月8日/採録日1995年7月4日)

ながた まさよし
長田 正義 (専門会員)

徳島大学工学部電気電子工学科

いき えつし
伊祁 恵都嗣 (非会員)

四国システム開発㈱

しもむら なおひこ
下村 直行 (非会員)

徳島大学工学部電気電子工学科

1964年9月28日生。1989年熊本大学大学院修士課程修了。1990年同工学研究科博士課程中退。同年徳島大学工学部電気電子工学科助手，現在に至る。この間，主としてパルスパワーおよび高電圧の研究に従事。電気学会，日本物理学会各会員。