モンテカルロ法応用の室内直接照度の計算

CALCULATION OF DIRECT ILLUMINANCE OF INTERIORS USING MONTE CARLO METHOD

永田 忠彦*, 田辺 智彦**

Tadahiko NAGATA and Tomohiko TANABE

The authors at first argue about what the necessary and sufficient condition is with regard to Monte Carlo simulations for the calculation of illuminance of interiors. Although this condition has rarely been definitely argued about, when you devise a new simulation, it is very important to accurately understand what the condition is. After showing the condition, the authors give some newly-devised simulations together with a conventional one, discuss their validity, and compare advantages and disadvantages among them.

Keywords : *calculation of illuminance , direct illuminance , Monte Carlo method , weighted particle of light*

照度計算, 直接照度, モンテカルロ法, 重みつき光子束

1. はじめに

従来使用されてきた室内照度計算法の多くは, 現今の多様化した室内照明環境に十分対処できていない。すなわち, 室内照明環境の面からいえば, 光を発する光源や照明器具の配光は千差万別であるし, 室内周壁面や家具表面のような光を反射する室内表面の形状や反射特性もまた千差万別である。他方, これに対処すべき室内照度計算法の面からいえば, 直接照度については, 十分に精確な計算法が幾つか既に考案されているが, 間接照度又は間接照度を含めた室内照度については, 十分に精確な計算法が確立されているとはいえない。従来比較的精密な解法とされている多元連立1次方程式を利用する方法でも, 室内表面の均等拡散性反射を仮定しているのだから, 常に精確な値が得られるわけではない。

こうした背景のもとに近年, モンテカルロ法を応用した室内照度の計算が試みられるようになってきた^{1) 2)}。モンテカルロ法応用の照度計算法は乱数を使用する近似

計算法であるが, 複雑な室内照明環境にも十分対処できる有用な手法であることも知られるようになって来た。一般に, モンテカルロ法応用の室内照度計算法では, 通常は空間的に連続的な広がりを持つ光束を, 空間を直進して室内表面ではシミュレーションの方法に応じた特有の仕方で反射又は吸収される性質を持つ空間的な広がりを持たない離散型の十分に多くの「光子束」に置き換えて, 光束の室内での伝達を光子束の室内での飛行挙動でシミュレートする方法が採られている¹⁾。

このシミュレーションにおいては, 室内表面を十分に小さな十分に多くの適当数の面積要素に分割しておき, 光源から発散される光子束の全量を光源から発散される光束の全量に対応させ, それぞれの光子束については, その重み・飛行方向・室内表面での反射又は吸収の仕方をそれぞれ一様乱数 $R[0, 1]$ を用いて確率事象として適切にシミュレートし, 最終的にどこかの面積要素で吸収されてしまうまで追跡し, その過程で各面積要素に入射

* 福井大学工学部環境設計工学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University, Dr. Eng.

** 福井大学大学院博士前期課程 大学院生

Graduate Student, Fukui University

する光子束の量を加算していく。このような計算過程を光源から発散される全光子束について繰り返すと、結局各面積要素に入射する光子束の量を求めることができ、その面積要素の照度を求めることができる。ここで用いた $R[0,1]$ という記法は、 R が変数で、その変数のとり得る値の下限が0で上限が1であることを意味するものとする。以後、数値の範囲を示すために $[a, b]$ のような表記が使われるときには、 a が下限で b が上限である。

上記の計算過程では光子束の挙動を確率事象として扱っているため、各面積要素に入射する光子束の量は当然に確率事象と見なされている。従って、シミュレーションの方法としては、『光源から発散される全光子束量に対する各面積要素に入射する光子束量の比の期待値は、光源からの全発散光束に対するその面積要素に入射する光束の比に等しい。』という条件を満たしていなければならないし、逆に、その条件が満たされていれば、どのようなシミュレーションの方法が採られてもその方法は照度の計算法として通用する。この条件は、自明なことと考えられていたためかどうかは分からないが、従来あまり強調されていないが、いろいろなシミュレーションを案出する際の理論的根拠として重要である。

本論文では、室内の直接照度に関して、モンテカルロ法を応用した計算法として通用するシミュレーションの方法を、従来普通に採用されていたものも含めて幾つか示し、それらの長短を比較検討する。間接照度に関しては改めて別稿で論ずることとする。

本論文では各種変量の単位として、面積は(m^2)、光束は(lm)、照度は(lx)、光度は(cd)、角度は(rad)、立体角は(sr)をそれぞれ用いることとする。

2. 基本的な考え方

受照面上のある点の照度は、その点を含む面積要素への入射光束の面積密度と定義することができる。従って、室内表面のある面積要素 A_i に入射する光束 F_i を求めれば、その面積要素の照度 E_i は次の式(1)のように求めることができる。

$$E_i = \frac{F_i}{A_i} \quad (1)$$

式(1)に含まれる F_i は、「はじめに」で述べた条件が満たされているのであれば、近似的に式(2)のように求めることができる。ここに、 F_t は光源からの全発散光束であり、 B_i は各面積要素に入射する光子束の量、 B_t は光源から発散される全発散光子束の量である。

$$F_i = F_t \times \frac{B_i}{B_t} \quad (2)$$

従って、各面積要素の照度 E_i は、式(1)、(2)から近似的に式(3)のように求めることができる。

$$E_i = F_t \times \frac{B_i}{B_t} \times \frac{1}{A_i} \quad (3)$$

以上の手順を含めて、直接照度の計算手順を示すと次のようになる。

- ① 室内表面を適当な大きさを持つ適当な個数の面積要素に分割する。
- ② 各面積要素への入射光子束の初期値を0に設定する。
- ③ 光源から発散させる全光子束の個数を決める。
- ④ 光源から光子束を発散させる。発散光子束の方向と重みは、光源の配光に基づいて乱数を使用して適切に定める。
- ⑤ 室内空間を直進する光子束がどの面積要素に到達するかを調べ、その光子束の量をその面積要素のそれ以前の入射光子束量に加算する。
- ⑥ 光源から発散される全ての光子束について④⑤を繰り返す。
- ⑦ 式(3)から各面積要素の照度を求める。

3. 光源から発散する光束のシミュレーション

図1. 光子束の発散方向と立体角

本稿では、図1に示すように鉛直角 $\theta[0, \pi]$ と方位角 $\phi[0, 2\pi]$ で定まる方向を $D(\theta, \phi)$ と表し、この光源の $D(\theta, \phi)$ の方向への光度を $I(\theta, \phi)$ と表すことにする。このとき、 $D(\theta, \phi)$ の方向の立体角要素 $d\omega(\theta, \phi) = \sin\theta d\phi d\theta$ の中に発散される光束 $dF(\theta, \phi)$ は、次の式(4)で表される。

$$dF(\theta, \phi) = I(\theta, \phi) \sin\theta d\phi d\theta \quad (4)$$

これは一般には θ と ϕ の両方の関数である。また、この光源からの全発散光束 F_t は次のように表される。

$$F_t = \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin\theta d\phi \quad (5)$$

また、光源から $D(\theta, \phi)$ の方向に発散する光子束の重みを $W(\theta, \phi)$ と表すことにする。

本稿では光子束の発散方向を表すためにも、広く一般に方向を表すためにも、同じく θ と ϕ を用いているが、特に混乱することはないと思われる。

光源から発散される光束を光子束でシミュレートする

には、光源から発散されるそれぞれの光子束の重みと発散方向を適切に定めてやればよい。その際には、「はじめに」に述べた条件が満たされていればよいわけであるが、その条件は下記のように言い換えることができる。

条件：『光源から発散される全光子束量に対する光源から任意の立体角内に発散される光子束量の比の期待値は、光源から発散される全光束に対する光源からその立体角内に発散される光束の比に等しい。』

上記の条件は下式のように表すこともできる。

$$\frac{N \cdot P(\theta, \phi) \cdot W(\theta, \phi)}{B_t} = \frac{I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi d\theta}{F_t} \quad (6)$$

ここに、 N は光源から発散される光子束の総数であり、 $P(\theta, \phi)$ は、光子束が光源から $D(\theta, \phi)$ の方向の立体角要素 $d\omega(\theta, \phi) = \sin \theta d\phi d\theta$ の中に発散される確率である。

各シミュレーションにおいては、独立の2個の一樣乱数 $R_1[0, 1]$ 、 $R_2[0, 1]$ から光子束の発散方向 $D(\theta, \phi)$ が定められる。その際、乱数の組 (R_1, R_2) が、 R_1 が $[R_1, R_1 + dR_1]$ で R_2 が $[R_2, R_2 + dR_2]$ の領域要素の中に選ばれる確率は $dR_1 dR_2$ であるから、この領域要素に対応して定められる $D(\theta, \phi)$ の方向の立体角要素 $d\omega(\theta, \phi)$ の中に光子束が発散される確率 $P(\theta, \phi)$ は当然 $dR_1 dR_2$ に等しい。従って、 $P(\theta, \phi)$ は式(7)から求めることができ、それを式(6)に代入すれば $W(\theta, \phi)$ を定めることが可能となる。 $\left| \frac{\partial(R_1, R_2)}{\partial(\theta, \phi)} \right|$ は R_1, R_2 の θ, ϕ に関する Jacobianの絶対値である。

$$\begin{aligned} P(\theta, \phi) &= dR_1 dR_2 \\ &= \left| \frac{\partial(R_1, R_2)}{\partial(\theta, \phi)} \right| d\theta d\phi \quad (7) \end{aligned}$$

さて、シミュレーションの方法としては、上記の条件を満たしていればどのようなものであっても構わないが、下記の①～⑥は上記の条件を満たすものの例である。このうち①は従来も普通に採用されていた方法である。

- ① 各光子束の重みを発散方向の如何に関わらず一様に定数 C (通常は $C=1$ として差し支えない。)と仮定し、各光子束の発散方向については、式(8)によって一樣乱数 $R_1[0, 1]$ から θ を定め、次に式(9)によって別の一樣乱数 $R_2[0, 1]$ から ϕ を定める。

$$R_1 = \frac{\int_0^\theta d\theta \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi}{\int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi} \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{\int_0^\phi I(\theta, \phi) d\phi}{\int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) d\phi} \quad (9)$$

式(8)、(9)を用いる根拠は次のように示すことができる。すなわち、光源から鉛直角 θ が $[0, \theta]$ の範囲に発散される光束の光源から発散される全光束に対する比 $P(\theta)$ は式(10)のように表されるから、これを一樣乱数 R_1 と対応させる。

また、光源から鉛直角 θ が $[\theta, \theta + d\theta]$ の範囲で方位角 ϕ が $[0, \phi]$ の範囲に発散される光束の、鉛直角 θ が $[\theta, \theta + d\theta]$ の範囲全体に発散される光束に対する比 $Q(\phi)$ は式(11)のように表されるから、これを一樣乱数 R_2 と対応させる。

$$P(\theta) = \frac{\int_0^\theta d\theta \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi}{\int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q(\phi) &= \frac{d\theta \int_0^\phi I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi}{d\theta \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta d\phi} \\ &= \frac{\int_0^\phi I(\theta, \phi) d\phi}{\int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) d\phi} \quad (11) \end{aligned}$$

- ② 上記①の方法で θ, ϕ を定める順序をかえて、まず方位角 ϕ を定め、次に鉛直角 θ を定めてもよいことは当然である。

この場合には一樣乱数 R_1 を用いて式(12)から ϕ を定め、次に別の一樣乱数 R_2 を用いて式(13)から θ を定めればよい。

$$R_1 = \frac{\int_0^\phi d\phi \int_0^\pi I(\theta, \phi) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi I(\theta, \phi) \sin \theta d\theta} \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{\int_0^\theta I(\theta, \phi) \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi I(\theta, \phi) \sin \theta d\theta} \quad (13)$$

- ③ 上記①②の方法で、光源の配光が複雑な場合には、その配光を表す関数が複雑なために、光子束の発散方向 $D(\theta, \phi)$ を正確に求められないことも考えられる。その場合には何らかの近似的な解法によって求めなければならない。その方法も当然いろいろなものが考えられるが、上記①の θ を求める近似的な解法の一例として次のようなものが考えられる。

はじめに鉛直角 $\theta[0, \pi]$ を必ずしも等間隔ではない十分多数の M 個の微小区間 $[\theta_{m-1}, \theta_m]$ ($1 \leq m \leq M$, $\theta_0=0$)に分割し、式(10)の関数 $P(\theta)$ を用いて $P(\theta_m)$ を求めておき、一樣乱数 $R_1[0, 1]$ を用いて式(14)または式(15)を満足する θ_{m-1}, θ_m を探しだし、式(14)を満

足すれば式(16)によって、式(15)を満足すれば1次補間によって式(17)のように θ を定める。

$$R_1 = P(\theta_n) \quad (14)$$

$$P(\theta_{n-1}) < R_1 < P(\theta_n) \quad (15)$$

$$\theta = \theta_n \quad (16)$$

$$\theta = \theta_{n-1} + \frac{R_1 - P(\theta_{n-1})}{P(\theta_n) - P(\theta_{n-1})} (\theta_n - \theta_{n-1}) \quad (17)$$

この方法では、分割数 M が小さいと誤差が大きくなるので、十分に大きい M を採用する必要がある。他の式(9)(12)(13)から θ 、 ϕ を正確に求められない場合にも同様の方法で定めることができる。

- ④ 光子束の発散方向を鉛直角 θ 、方位角 ϕ のどちらについても一様の密度となるように定める。つまり、次の式(18)(19)のように一様乱数 $R_1[0, 1]$ 、 $R_2[0, 1]$ を用いてそれぞれ θ 、 ϕ を定める。

$$R_1 = \theta / \pi \quad (18)$$

$$R_2 = \phi / 2\pi \quad (19)$$

この場合には発散させる光子束の重み $W(\theta, \phi)$ を式(20)のように定めて上記の条件を満たすようにすればよい。つまり、光子束の重みを $D(\theta, \phi)$ の方向の立体角要素の中に発散される光束 $dF(\theta, \phi)$ に比例するように定めればよい(C :任意定数)。

$$W(\theta, \phi) = C \cdot I(\theta, \phi) \sin \theta \quad (20)$$

- ⑤ 光子束の発散方向を立体角に関して一様な密度となるように定める。つまり、次の式(21)(22)のように、一様乱数 $R_1[0, 1]$ 、 $R_2[0, 1]$ を用いてそれぞれ θ 、 ϕ を定める。

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\int_0^\theta d\theta \int_0^{2\pi} \sin \theta d\phi}{\int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} \sin \theta d\phi} \\ &= \frac{\int_0^\theta \sin \theta d\theta}{2} \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{d\theta \int_0^\phi \sin \theta d\phi}{d\theta \int_0^{2\pi} \sin \theta d\phi} \\ &= \phi / 2\pi \quad (22) \end{aligned}$$

この場合には、発散させる光子束の重み $W(\theta, \phi)$ を式(23)のように定めて上記の条件を満たすようにすればよい。つまり、光子束の重みを $D(\theta, \phi)$ の方向の光度 $I(\theta, \phi)$ (cd)に比例するように定めればよい(C :任意定数)。

$$W(\theta, \phi) = C \cdot I(\theta, \phi) \quad (23)$$

- ⑥ 上記①②の方法の長所は、光束が多く発散される方面には多くの、逆に光束が少なく発散される方面には少しの、それぞれ同等の重みを持つ光子束を発散させるので、現実の光束の挙動に即した素直な方法と考えられることであるが、最大の短所は、光源の配光が複雑な場合に θ 、 ϕ を正確に求められないことである。一方、上記④⑤の方法の長所は、光子束の重みを調整することで光源の配光が複雑な場合にも、光子束の発散方向を容易に定められることであるが、短所は、光束のあまり発散されない方面には重みの小さい光子束を発散させることになり、光源の配光に大きな偏りがある場合には、照度の計算結果に与える影響が小さい光子束に対しても影響度の大きい光子束と同等の計算時間を費やすことである。両者の長所短所はちょうど逆になっているので、両者の長所だけを組み合わせた方法も当然考えられてよい。一例として、上記①の方法を基礎にして、それが光源の配光が複雑な場合にも容易に対応できるように、上記④⑤の方法を取り入れた方法を次に示す。

光源の配光が複雑な場合には式(8)(9)が θ 、 ϕ について解けないことが考えられる。その場合には、式(8)(9)の中の光度 $I(\theta, \phi)$ を、式(8)(9)が θ 、 ϕ について解けるような比較的単純な関数 $I'(\theta, \phi)$ で近似して代用し、式(24)(25)から①の方法と同様に一様乱数を対応させて θ 、 ϕ を定める。その方向に発散させる光子束の重みは上記の条件を満たすように式(26)のように定める(C :任意定数)。

$$R_1 = \frac{\int_0^\theta d\theta \int_0^{2\pi} I'(\theta, \phi) \sin \theta d\phi}{\int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} I'(\theta, \phi) \sin \theta d\phi} \quad (24)$$

$$R_2 = \frac{\int_0^\phi I'(\theta, \phi) d\phi}{\int_0^{2\pi} I'(\theta, \phi) d\phi} \quad (25)$$

$$W(\theta, \phi) = C \cdot \frac{I(\theta, \phi)}{I'(\theta, \phi)} \quad (26)$$

4. 計算結果の比較

シミュレーションの方法が異なったり、同じ方法であっても使用する乱数が異なれば当然照度の計算結果は異なる。本研究では、上記の②③の方法は①の方法と理論的な違いがないので、①～⑥のうちから①④⑤の方法を取り上げて、下記の条件の下で室内の直接照度の計算を行い、それらの計算結果を比較検討し、各方法の妥当性及びそれらの長短を検討してみた。

4.1. 計算例における仮定

図2. 計算に使用した室内空間

モンテカルロ法を応用した室内照度の計算法は、「はじめに」で述べたように、複雑な室内照明環境への対応を期待される手法であるが、本稿では、上記の条件を満足するいろいろな方法の妥当性を検討することを目的の1つとしているので、実行プログラムの構成や計算時間などの利便性を考えて次のような比較的に単純な室内照明環境を仮定した。

室内空間は、図2のような4.0×6.0×2.5(m)の直方体形の中空のものを仮定した。この室内空間に図2のように床面の一角を原点とするxyz座標系を設定する。この室内表面をx軸(0≤x≤6.0)、y軸(0≤y≤4.0)、z軸(0≤z≤2.5)をそれぞれ24, 16, 10等分し、0.25×0.25(m)の正方形の面積要素に分割する。

光源は天井の中央部に1.0×1.0(m)の正方形の面光源を仮定した。この光源を0.01×0.01(m)の1万個の面積要素に分割し、その各面積要素の中央よりそれぞれ同数の光子束を発散させる。光源の配光特性は全面積要素を通じて一様と仮定し、次のような光源Ⅰ、Ⅱの2通りを仮定した。なお、鉛直下方を $\theta=0$ とする。光源Ⅱの配光はかなり非現実的であるが、各シミュレーションの妥当性を検討するために敢えて仮定してみた。光源Ⅰ、Ⅱともに全発散光束を20,000(lm)(各面積要素では2(lm))、発散光子束数を50万個と500万個(各面積要素では50個, 500個)の2通りの場合を計算した。

- ・光源Ⅰの配光 ($I(0)=2/\pi$ (cd))

$$I(\theta) = \begin{cases} I(0)\cos\theta & (0 \leq \theta \leq \pi/2) \\ 0 & (\pi/2 < \theta \leq \pi) \end{cases}$$

- ・光源Ⅱの配光 ($I(0)=6/(5\pi)$ (cd))

$$I(\theta) = \begin{cases} I(0)(1+\sin\theta)\cos\theta & (0 \leq \theta \leq \pi/2) \\ 0 & (\pi/2 < \theta \leq \pi) \end{cases}$$

4.2. 計算結果の比較

前記の仮定に基づいて行った前記①④⑤のシミュレー

ションによる床面直接照度の計算結果を図3～図6に示す。図中の*i*は図2の原点から床面長辺方向にそって数えた床面積要素の番号、*j*は短辺方向にそって数えた床面積要素の番号である。これらの図では、*j*=4の列と*j*=8の列に沿った照度の分布が示されている。

光源Ⅰの場合は、均一輝度均等拡散性面光源であるから、立体角投射率を用いて直接照度を理論的に求めることができる。その理論値と比較することでモンテカルロ法を応用した計算法の妥当性を検討することができる。図3から分かるように、発散光子束数が50万個の場合には多少のばらつきはあるものの理論値と比較して、まずまずの程良い値を示している。発散光子束数を500万個に増すと、図4のように非常にばらつきが小さくなり、ほぼ理論値に等しくなっている。また、計算に要した時間も各方法の間にほとんど差はなかった。この計算結果を見る限り、①④⑤の方法は何れも妥当なものとしてよく、また、これらの間に特に優劣を認めることはできない。

光源Ⅱの場合にも、精度や計算時間の面からみて、光源Ⅰの場合と同様に、①④⑤の方法の間に特に優劣を認めることはできない。

光源Ⅱの場合には、①の方法でシミュレートする場合に、式(8)が $\sin\theta$ の3次式になるので、 θ を代数的に求めることが可能であったが、代数的に求めることが不可能な場合を想定して、試みに③の方法でも計算をしてみた。その結果、ここでは計算についての詳細は示さないが③の方法で①の方法と同程度の精度を持つと思われる計算結果を得るためには、分割数*M*を十分に大きくする必要がある、①よりもかなり長い計算時間を要することが分かった。①の代用として③を用いることはあまり賢明とはいえないようである。

図3. 照度分布の計算結果(1)
(光源: Ⅰ, 発散光子束数: 50万個)

図4. 照度分布の計算結果(2)
(光源: 1, 発散光子束数: 500万個)

図5. 照度分布の計算結果(3)
(光源: 1, 発散光子束数: 50万個)

図6. 照度分布の計算結果(4)
(光源: 1, 発散光子束数: 500万個)

5. おわりに

均一輝度均等拡散性面光源に対して①④⑤の方法による直接照度の計算結果が理論値と非常によく一致していることから①④⑤の各方法の妥当性が確認されたものとしてよい。このことはまた、上記で示した条件を満たすシミュレーションの方法であれば、上記で示したものの以外のどのようなものであっても構わないことを改めて示唆しているものとも考えられる。

本稿では、⑥の方法による計算結果を特には示していないが、実は、④⑤の方法は⑥の応用例と考えることができる。つまり、④⑤の方法では $I(\theta, \phi)$ の近似として代用する $I'(\theta, \phi)$ をそれぞれ式(27)(28)のようにした場合であると考えることができる。

$$I'(\theta, \phi) = \frac{1}{\sin \theta} \quad (27)$$

$$I'(\theta, \phi) = 1 \quad (28)$$

このことは、式(27)(28)を⑥の式(24)(25)(26)に代入して、それぞれ式(18)(19)(20)、式(21)(22)(23)と比較することにより容易に確認することができる。

④⑤を⑥の応用例としてみた場合に、式(27)(28)から明らかなように $I'(\theta, \phi)$ は光源の配光を近似したものではない。それに関わらず、④⑤の方法による直接照度の計算結果は①の方法と変わらずかなり精確な照度値を得ることができる。このことは、⑥の方法の妥当性を示すものであることは勿論のこと、 $I'(\theta, \phi)$ は、光源の配光を非常によく近似できていればそれに越したことはないが、配光を大雑把に近似している程度で十分であることを示すものである。しかしいくら大雑把とはいっても、実際の光源で広い範囲にわたって $I(\theta, \phi) = 0$ でもないし $I(\theta, \phi) \neq 0$ でもない場合にその範囲に対して $I'(\theta, \phi) = 0$ を用いるようなことはしてはならない。もしそのようなことをすると、その方面には光子束が全く発散されなくなってしまい、「光源から発散する光束のシミュレーション」で述べた条件に反するからである。また、広い範囲にわたって $I(\theta, \phi) = 0$ となっている場合に、その範囲に対して $I'(\theta, \phi) > 0$ とすることも好ましいことではない。

以上のように各方法には長短があるので、特定の方法に固執することなく、室内の照明環境に応じて適当な方法を選択あるいは考案すればよいと思われる。

参考文献

- 1) 長田正義: モンテカルロシミュレーションによる凹閉面室内空間の照度分布計算, 照明学会誌, 72-10, pp. 596-601, 1988
- 2) P. R. Tregenza: The Monte Carlo Method in lighting calculations, Light. Res. & Tech., 15-4, pp. 163-170, 1983

(1995年9月10日原稿受理, 1995年11月20日採用決定)