

反射率分布を用いた輝度分布のコントロールに関する基礎的検討

環境図形科学研究室

藪中功嗣

Abstract

空間の光環境は、空間の印象や広さ感、明るさ感などに影響を与える¹⁾。特定の光環境を実現することは非常に重要であり、様々な方法がこれまで提案されてきた。本研究は、空間の反射率分布を操作することで、輝度分布をコントロールすることを目的としている。まず、光束伝達法の応用により、相互反射を考慮した輝度分布コントロールのための反射率算出式を得た。それを用いて、輝度分布が一樣となるような反射率を与えた時と、反射率が一樣である時等の輝度や画素階調値のばらつきを、シミュレーションと実験により分析・比較した。反射率分布を操作した時の輝度のばらつきは、反射率一樣の時と比較して小さくなっており、反射率分布を用いた輝度分布のコントロールが可能であることが示された。

1. はじめに

特定の光環境を実現する方法として、飯田らによる光束伝達法を応用した例²⁾や、中田らによるGAを利用した例³⁾が知られているが、これらはいずれも光源・開口部の位置や光源強さにより光環境をコントロールするものであり、反射率分布を用いるものではない。また、著者らは、これまで、入隅の詳細な光環境の分析を行ってきた⁴⁾。入隅空間は空間の印象や大きさの把握に影響を与えると考えられており、入隅部の光環境をコントロールすることで空間の印象などを変化させる手法の1つとして、反射率分布を用いた方法を提案している。

2. 光束伝達法を用いた反射率算出式の導出

光束伝達法の式(1)において、フォームファクターは形態と要素間の位置関係に依存する(図1参照)値なので既知である。輝度が一樣となる条件は、各要素の平衡状態の未放射光束が定数の時である。各要素の初期放射光束は光源と要素の関係より求められ、直接照度で表すことができる(式(2))。これらより、輝度を一樣にするための反射率の式(3)を得た。

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1^0 \\ \vdots \\ M_n^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_1 f_{11} & \cdots & \rho_1 f_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_n f_{n1} & \cdots & \rho_n f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_n \end{pmatrix} \quad \text{式(1)}$$

$$M_n^0 = E_n^0 * \rho_n \quad \text{式(2)}$$

$$\rho_n = M_n / \left(E_n^0 + M_n * \sum_{i=1}^N f_{ni} \right) \quad \text{式(3)}$$

ρ_n : 反射率
 N : 要素数
 n : 要素番号

E_n^0 : 直接照度
 M_n^0 : 初期放射光束
 M_n : 平衡状態の未放射光束

$$f_{ij} = \frac{1}{S_i} \iint \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi^2} dS_i dS_j$$

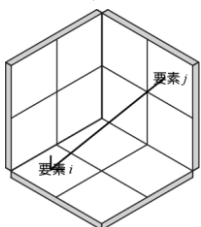


図1 フォームファクター

3. 輝度分布コントロールのシミュレーション

3.1 シミュレーション条件

2種類のモデル空間を用いて輝度のシミュレーションを行った。それぞれの計算対象空間と光源の条件は表1、図2の通り。また、CASE1、CASE2ともに、光源の強さは800lmとして、未放射光束が初期放射光束の0.1%未満となった時に計算を打ち切った。

LVECS⁵⁾を用いて、それぞれの条件下において、全ての要素の反射率を一樣(0.7)とした時の輝度分布と、全ての要素の輝度が一樣となる反射率を算出して、各要素に与えた時の輝度分布を比較した。

表1 シミュレーション条件

	CASE1	CASE2
空間形状	入隅のみ	直方体
要素サイズ	1000	500
要素数	8	360
光源数	1	3
光源の位置	(500,1000,500)	(500,500,2000) (0,-500,1500) (-1000,0,1500)

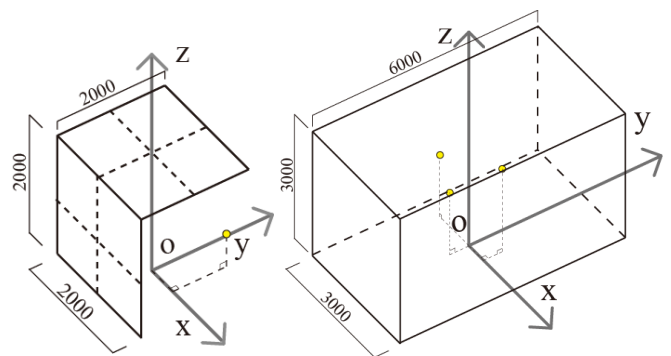


図2 モデル空間(左: CASE1 右: CASE2)

3.2. シミュレーション結果

CASE1: 図3は反射率操作前後の輝度分布画像であり、左図が各要素の反射率を一樣(0.7)とした時の輝度分布画像、右図が反射率操作後の輝度分布画像である。また、各要素の輝度は図4の通り。反射率操作前後の輝度の統計量は表2のようになった。

CASE2: 図5が反射率操作前後の輝度分布画像で、図6が各要素の輝度である。また、反射率操作前後の輝度の統計量は表3の通り。

3.3. シミュレーション結果の考察

各条件のシミュレーションの結果より、理論上では、反射率を操作することにより輝度分布を操作することが可能であることがわかった。また、今回は全ての面の輝度分布を一樣にするために、各要素の目標輝度を一樣としたが、特定の面、場所、要素の輝度のみを操作することも可能である。しかし、光源と特定の要素が他の要素に比べて近い場合や、大空間において、光源の位置が偏るなど、光源からの直接光照度に各要素で極端な差がある場合には、反射率の値が0以上1未満となる範囲の目標輝度が小さい値に限られる。シミュレーションでは、各要素の反射特性は完全均等拡散反射であるが、実空間では複雑な反射特性をもつ素材がほとんどである。また、障害物が相互反射に影響を与えることも考えられる。それらの要因がどの程度、輝度コントロールに影響を与えるかを検討する必要がある。

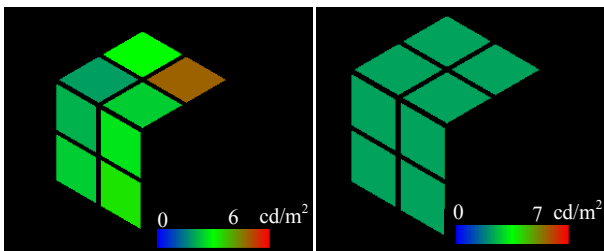


図3 CASE1の輝度分布計算結果

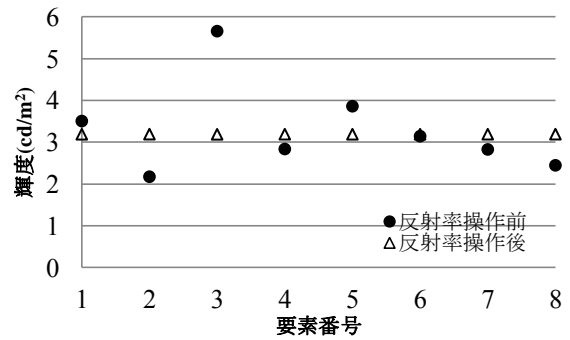


図4 CASE1の各要素の輝度の計算結果

表2 CASE1の輝度の統計量

	反射率操作前	反射率操作後
最小輝度	2.17 cd/m ²	3.19 cd/m ²
最大輝度	5.65 cd/m ²	3.19 cd/m ²
平均輝度	3.30 cd/m ²	3.19 cd/m ²
標準偏差	1.02	0.00
変動係数	0.31	0.00

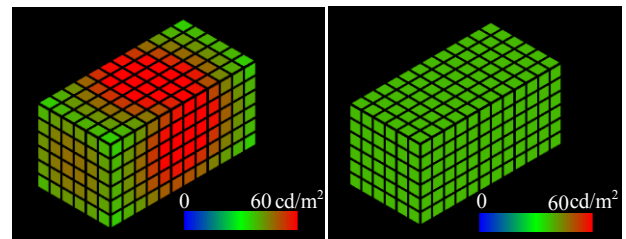


図5 CASE2の輝度分布計算結果

表3 CASE2の輝度の統計量

	反射率操作前	反射率操作後
最小輝度	12.17cd/m ²	38.19cd/m ²
最大輝度	55.39cd/m ²	38.20cd/m ²
平均輝度	19.86cd/m ²	38.20cd/m ²
標準偏差	6.34	0.00
変動係数	0.32	0.00

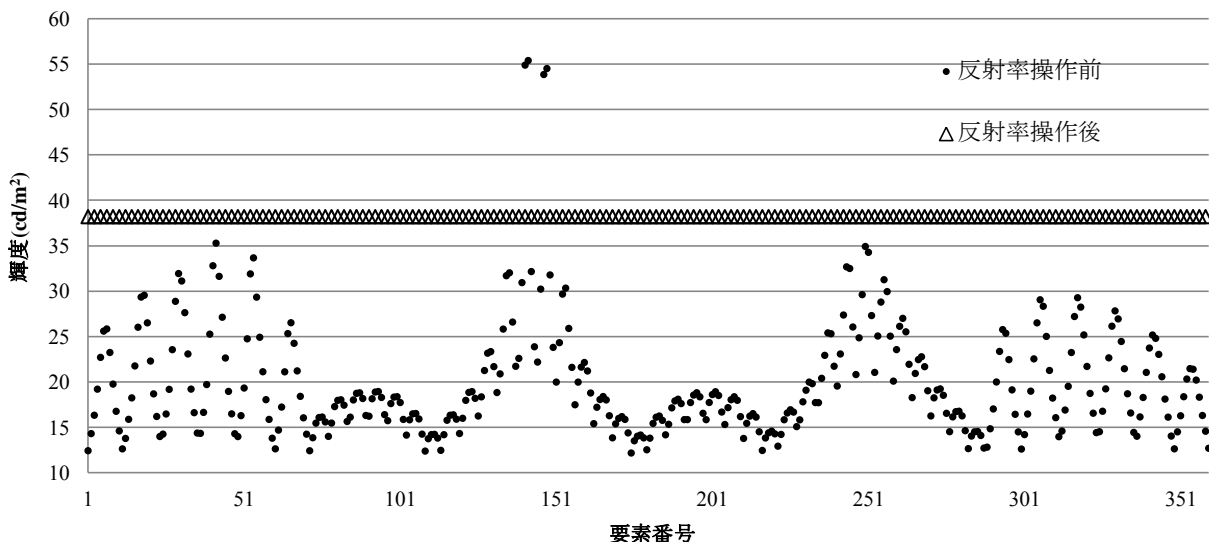


図6 CASE2の各要素の輝度の計算結果

4. 実空間での輝度コントロール実験

4.1. 相互反射光を考慮しない輝度コントロール

4.1.1. 実験フロー

はじめに、グレーレベルの明度を測定してその値を基にグレーレベルと反射率の関係を求めた。次に、暗室内において測定面の各点における照度を測定した。このとき、面の反射率は同様であるが、各測定点における照度は、光源との位置関係や距離により異なる。面の輝度を一樣にするために、各測定点における目標輝度を、測定によって得られた輝度値の最小値に定めて、測定した照度と目標輝度により、反射率を計算した。そして、得られた反射率を、グレーレベルと反射率の関係式に代入して、輝度を一樣とするためのグレーレベルを得た。得られたグレーレベルを面の各測定点に与え、照度測定時と同じ条件下で照らして、各測定点の輝度を測定した。測定した輝度の最大輝度、最小輝度、標準偏差、変動係数を、面の反射率が同様であった際の照度分布と比較することで、輝度分布のコントロールが行われているかを分析した。

4.1.2 紙の反射特性

実験ではスーパーファイン紙の反射特性を完全均等拡散と仮定しているが、実際には多少の鏡面反射成分などを含むと思われる。そこで、紙の反射特性を分析した。測定には色彩輝度計(MINOLTA、CS-100A)を用いた。暗室内においてスーパーファイン紙を蛍光灯で照らして、面に対して 60°から 10°刻みで輝度を測定した。色彩輝度計と測定点との距離は 80cm とした(図 7 参照)。測定の結果、標準偏差は 1.11、変動係数は 0.01 となった。これより、スーパーファイン紙の反射特性は、完全均等拡散と仮定してよいと考えた。

4.1.3.RGB 値と反射率の関係

Illustrator (adobe、グラフィックソフトウェア) を用いて、画素階調値を(0,0,0)~(255,255,255)まで 5 刻みで増加させてスーパーファイン紙 (EPSON 製、KA3N100SFR)にプロッター(EPSON 製、MAXART K3 PX7500)で印刷を行った。プロッターの印刷設定はカラー(C):カラー、印刷品質(Q):きれい、色補正:自動(EPSON 基準色 sRGB)で印刷をしている。以下、画素階調値(n,n,n)で印刷したものをグレーレベル n とする。

グレーレベル n の明度を色彩色差計(MINOLTA 製、CR-400)により測定して、反射率 ρ と明度 V の近似式(4)を用いてグレーレベルと反射率との関係を求めた(図 8 参照)。これにより、反射率 ρ とグレーレベル n の関係式(5)を得た。

$$\rho = V(V - 1)/100 \quad (2 < V < 8) \quad \dots \text{式(4)}$$

$$\rho = 8 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0.0006 \cdot n + 0.0315 \quad \dots \text{式(5)}$$

4.1.4. 照度の測定

暗室内において、照明器具(株YAMAZEN 製、10w、蛍光灯)によりスーパーファイン紙を照らして、照度計(KONICA MINOLTA 製、ILLUMINANCE MATER T-10)を用い照度を測定した。照明器具と測定点の位置関係を図 9、各測定点で測定された照度の値を図 10 に示す。図 10 より、光源から遠ざかるほど照度が小さくなっていくのがわかる。

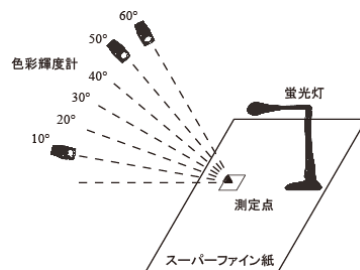


図 7 測定条件

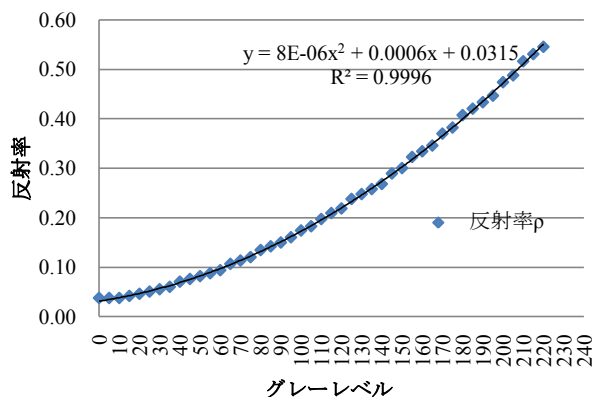


図 8 反射率とグレーレベルの関係

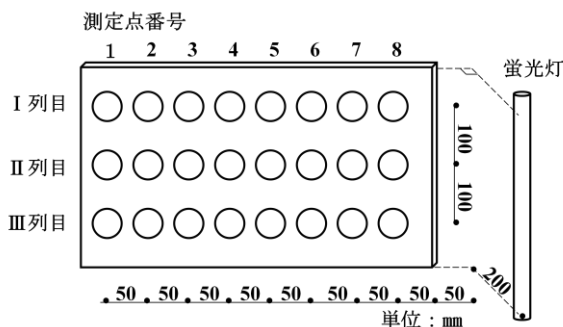


図 9 照明器具と測定点の位置関係

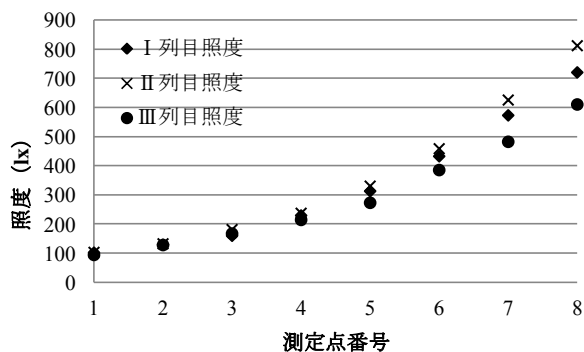


図 10 各測定点の照度

4.1.5. 反射率操作とグレーレベル

各点における目標輝度 L を $20(\text{cd}/\text{m}^2)$ とした。面の反射特性を完全均等拡散と仮定して、各点の照度を E とすると、 $M=\pi * L$ 、 $M=\rho * E$ となるから、各測定点を目標輝度とするための反射率 ρ は式(6)となる。

$$\rho = \pi * L / E \quad \dots \text{式(6)}$$

これらより、得られた反射率を表4、グレーレベルを表5に示す。

4.1.6. 反射率操作後の輝度分布

グレーレベルを各測定点に与えた後、照度測定時と同一の条件下で照らして、輝度分布を測定した。測定結果を図11に示す。輝度分布は一様に近づき(表6参照)、目標輝度に近い値となった。しかし、グレーレベルは整数のみであることなどにより完全に一様とすることはできなかった。また、今回はスーパーファイン紙を均等拡散反射面と捉えているが、均等拡散ではない反射成分も存在すると考えられ、完全に一様な輝度分布にするためには課題が残っている。また、測定した輝度分布では一定値に近づいているが、目視で確認した範囲でも明暗が認められた。

表4 各点に与えた反射率

	1	2	3	4	5	6	7	8
I	0.62	0.49	0.39	0.27	0.20	0.15	0.11	0.09
II	0.61	0.47	0.35	0.26	0.19	0.14	0.10	0.08
III	0.66	0.49	0.37	0.29	0.23	0.16	0.13	0.10

表5 各点に与えたグレーレベル

	1	2	3	4	5	6	7	8
I	241	208	182	143	114	88	68	53
II	246	211	173	144	114	87	65	48
III	245	203	171	145	122	93	77	61

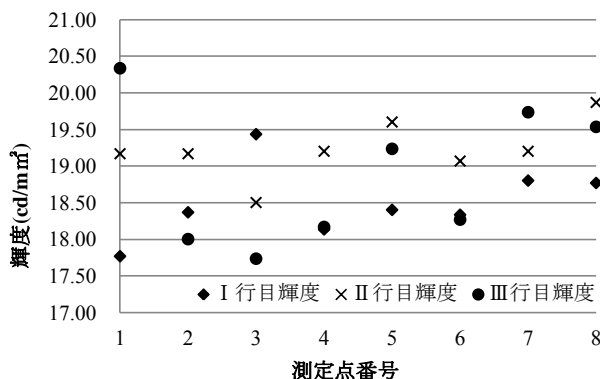


図11 反射率操作後の各測定点の輝度

表6 反射率操作後の輝度の統計量

平均	最小輝度	最大輝度	平均	標準偏差	変動係数
I	17.77cd/m ²	19.43cd/m ²	18.50cd/m ²	0.47	0.03
II	18.50cd/m ²	19.87cd/m ²	19.22cd/m ²	0.37	0.02
III	17.73cd/m ²	20.33cd/m ²	18.88cd/m ²	0.89	0.05
total	17.73cd/m ²	20.33cd/m ²	18.87cd/m ²	0.74	0.04

4.2. 相互反射を考慮した輝度コントロール実験

4.2.1. 実験フロー

相互反射を考慮した輝度コントロールのための反射率式を用いて、相互反射が起こる空間での輝度コントロール実験を行った。スチレンボードで作成した直方体空間を、点光源と仮定した電球を用いて照らして、反射率操作前後の画素階調値のばらつきを分析することにより輝度コントロールが行われているかを確認した。

反射率を与える方法は3.1と同様の方法を用いている。また、得られた反射率分布は要素分割された状態であるが、実空間での輝度は滑らかに分布しているので、反射率分布も滑らかに変化すべきである。そこで、要素分割で得られた反射率分布を、滑らかに変化させるためにバイリニア補間を行った。

4.2.2. バイリニア補間

バイリニア補間とは、隣接する4つのまとまった要素のグレーレベルの平均値を用いて、距離による重みづけを行い、滑らかなグレーレベルを得ることである(図12参照)。図13はバイリニア補間を行う前後の画像であり、要素分割されて与えられているグレーレベルが滑らかになっていることが分かる。

4.2.3. 実験条件

直方体空間の形状は $400 * 400 * 300 \text{mm}^3$ とした(図14)。光源位置は(100,-50,200)であり、電球(旭光、パイロットランプ、5WT10 E10 110W)の光度は $1.31(\text{cd})$ であった。測定にはデジタルカメラ(CASIO, EXILIM EX-H30)を用いて、撮影条件はISO感度800、絞りF7.9、シャッタースピードを0.5秒に設定して、暗室内で測定を行った。反射率はグレーレベルで与えられているため、測定面はスーパーファイン紙である。また、反射率一様の条件に関してはグレーレベル140(反射率0.27)とした。

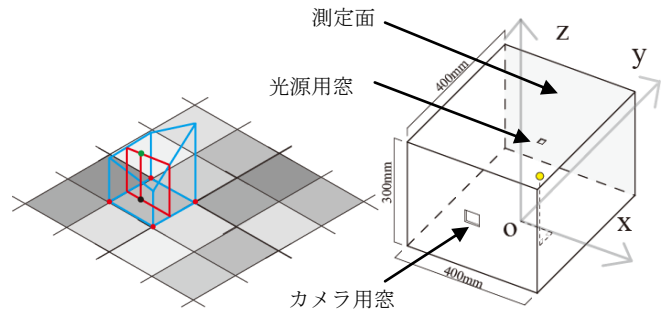


図12 バイリニア補間のイメージ 図14 模型形状

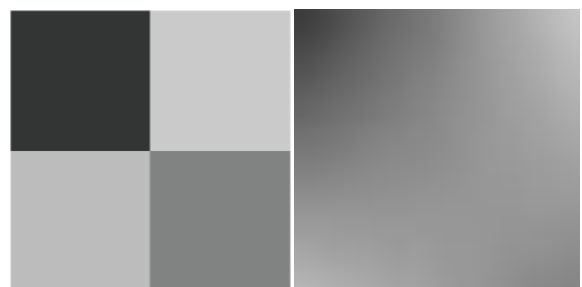


図13 バイリニア補間の様子(左:補間前 右:補間後)

4.2.4. 実験結果

—反射率一様のととき

図 15 は反射率を一様に与えた時の画像であり、図 16 は測定時の測定面の様子である。図中右側から左側に向かって暗くなっていることが分かる。これは、光源の位置が模型中心よりずれていることにより、直接光による照度が多いためである。表 7 は測定面の画素階調値の統計量である。グレーレベルは、画素階調値(n,n,n)で与えているが、測定結果の RGB それぞれの値には差異があった。これは、用いた光源が白色光の光源でなく、電球を用いているためと考えられる。

—バイリニア補間なし

図 17 はグレーレベルによって輝度を一様にする反射率を与えた時の測定面の画像であり、図 18 は測定時の測定面の様子である。測定面の大きさは 300*400mm² であり、反射率を求める際の要素分割は、要素の一边の長さを 10mm としているため、測定面には 1200 要素ある。

表 8 は画素階調値の統計量であり、反射率一様の時と比較してばらつきが小さくなっていることがわかる。

—バイリニア補間あり

図 19 は反射率操作後の測定面の画像であり、図 20 は測定時の測定面の様子である。測定面の反射率分布はバイリニア補間を行っているため、滑らかな分布になっている。表 9 は画素階調値の統計量である。反射率が一様の時、および、バイリニア補間を行わない時と比較してばらつきが小さくなっている。これより、バイリニア補間を行った場合がもっとも輝度コントロールが行われているといえる。

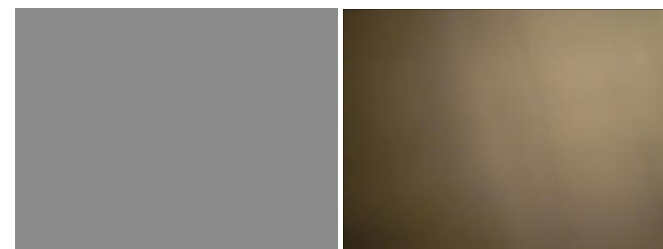


図 15 反射率一様の時の測定面の画像

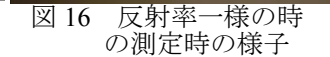


図 16 反射率一様の時の測定時の様子

表 7 画素階調値の統計量

	R	G	B	RGB の平均	変動係数
平均	121.14	104.26	78.40	100.91	0.28
標準偏差	30.53	28.50	25.90	28.18	

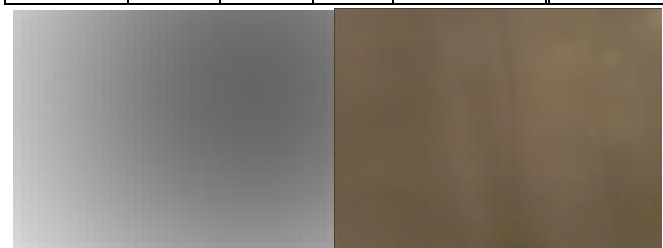


図 17 補間を行わない時の測定面の画像

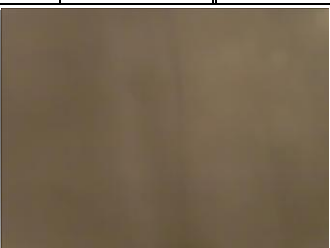


図 18 補間を行わない時の測定時の様子

表 8 画素階調値の統計量

	R	G	B	RGB の平均	変動係数
平均	114.80	97.91	75.98	95.90	0.07
標準偏差	7.62	7.75	6.63	7.06	

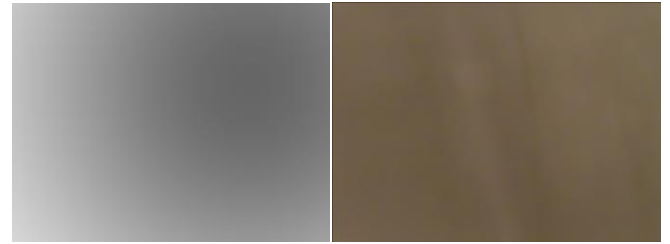


図 19 補間を行った時の測定面の画像

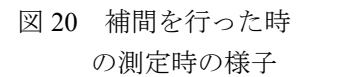


図 20 補間を行った時の測定時の様子

表 9 画素階調値の統計量

	R	G	B	RGB の平均	変動係数
平均	112.36	95.77	74.11	93.75	0.06
標準偏差	5.54	5.53	5.323	5.37	

5. 複数の目標輝度を持つ輝度分布コントロール

5.1. 反射率式の導出

1. で得られた式(3)は、全ての要素の目標輝度を同じとして、輝度分布を一様にするための式である。しかし、光束伝達法を応用した反射率操作の手法は、特定の面、あるいは特定の要素に他の要素とは異なる目標輝度を与えることも可能である。そこで、目標輝度を複数設定した時の輝度コントロールを検討した。

目標とする輝度を二種類として検討を行う。ある要素群 $k-l$ の目標光束を M_α 、その他の要素の目標光束を M_β とした時、式(1)は式(7)のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} M_\beta \\ \vdots \\ M_\beta \\ M_\alpha \\ \vdots \\ M_\alpha \\ M_\beta \\ \vdots \\ M_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 * E_1^0 \\ \vdots \\ \rho_{k-1} * E_{k-1}^0 \\ \rho_k * E_k^0 \\ \vdots \\ \rho_l * E_l^0 \\ \rho_{l+1} * E_{l+1}^0 \\ \vdots \\ \rho_n * E_n^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_1 f_{11} & \cdots & \rho_1 f_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{k-1} f_{k-11} & \cdots & \rho_{k-1} f_{k-1n} \\ \rho_k f_{k1} & \cdots & \rho_k f_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_l f_{l1} & \cdots & \rho_l f_{ln} \\ \rho_{l+1} f_{l+11} & \cdots & \rho_{l+1} f_{l+1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_n f_{n1} & \cdots & \rho_n f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_\beta \\ \vdots \\ M_\beta \\ M_\alpha \\ \vdots \\ M_\alpha \\ M_\beta \\ \vdots \\ M_\beta \end{pmatrix} \quad \text{式(7)}$$

式(7)を、それぞれの行に分解して、反射率について解くと、目標輝度を二種類与えた時の輝度コントロールのための反射率式を得ることができる。式(8)が要素の目標光束 M_α の時の反射率の式、式(9)が要素の目標光束 M_β の反射率の式である。

$$\rho_i = M_\alpha / \left(E_i^0 + M_\beta * \left(\sum_{j=1}^{k-1} f_{ij} + \sum_{j=l+1}^n f_{ij} \right) + M_\alpha * \sum_{j=k}^l f_{ij} \right) \quad \text{式(8)}$$

$$\rho_i = M_\beta / \left(E_i^0 + M_\beta * \left(\sum_{j=1}^{k-1} f_{ij} + \sum_{j=l+1}^n f_{ij} \right) + M_\alpha * \sum_{j=k}^l f_{ij} \right) \quad \text{式(9)}$$

5.2. 輝度コントロールシミュレーション

目標輝度を 2 種類与えた時の輝度コントロールシミュレーションを行った。空間形状、光源位置、要素の大きさなどは 2.で行ったシミュレーションの CASE2 と同様である。天井面及び、壁面のうち 1 面のみの目標輝度を、その他の壁面および床面の半分として、反射率を計算した。図 21 は輝度コントロール後の輝度分布画像である。図より、天井面及び 1 壁面と、その他の面の輝度分布が異なっていることが分かる。また表 10 は、それぞれの面に与えられた目標輝度別の輝度の統計量である。これより、各目標輝度を与えられた、それぞれの面での輝度コントロールが行われていることを確認できた。

6. まとめ

光束伝達法の応用により、輝度をコントロールするための反射率式を得た。また、輝度分布を一様にするための式は、シミュレーションにより確認された。次に、実空間において輝度コントロールを行うために、反射率とグレーレベルの関係を調べ、相互反射が起こらない空間での輝度コントロールおよび、相互反射が起こる空間での輝度コントロール実験を行った。これにより、実空間においても、相互反射を考慮した輝度コントロールが可能であることが示され、また、バイリニア補間を行うことでより精度の高い輝度コントロールが可能であることが示された。

シミュレーションと実験において用いた式は輝度分布を一様にするための式であったが、光束伝達法の式を応用して得られた式は、各要素に任意の目標輝度を与えることも可能である。目標輝度を 2 種類与えたシミュレーションを行うことによって、目標輝度が複数存在する場合においても、輝度コントロールが可能であることが示された。

これらより、光源条件が固定された任意の空間において、反射率の分布を用いることで、任意の輝度分布を得ることが可能であることが示された。

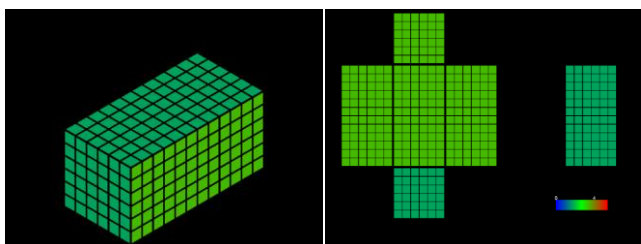


図 21 目標輝度を 2 つ与えた場合の輝度の計算結果

表 10 輝度の統計量

	最小輝度	最大輝度	平均	標準偏差	変動係数
天井面+ 壁面 1	1.27 cd/m ²	1.27 cd/m ²	1.27cd/m ²	0.00	0.00
床面+ 壁面 4	2.54 cd/m ²	2.55 cd/m ²	2.55cd/m ²	0.00	0.00

7. 課題と展望

実空間における輝度コントロールの実験では、反射率操作をすることで画素階調値のばらつきが小さくなり、輝度コントロールが実現されていることが分かるが、輝度コントロールのための反射率算出式において、完全均等拡散として計算を行っていることや、反射率を与える際のグレーレベルは整数値でしか指定できない事などにより、実空間での完全なコントロールは実現できていない。課題として、素材に応じた反射特性を考慮したフォームファクターを用いて、反射率を算出することで輝度コントロールの精度を上げることが考えられる。また、今回は入隅のみの形状や、直方体形状のような全ての要素が水平、あるいは垂直に接する形状の検討しか行っていないが、日常的に生活する空間は、柱があることや、鋭角・鈍角に交わる空間、あるいは曲率を持った面なども多く存在する。そのような空間においても、フォームファクターを計算して、輝度コントロールの検討を行う必要があると考える。光源に関しても、点光源ではなく、面光源や、複雑な配光特性を持った光源などについても検討する必要がある。

今回の研究は、矩形かつ、完全均等拡散、点光源という限られた条件の中での輝度コントロールであり、その他の光環境に影響する様々な要因を含めた輝度コントロールを行うことが、実空間への応用に必要である

また、今回は、反射した面の輝度をコントロールすることを目的としており、面の目標輝度を設定することで反射率を導いているが、電球や蛍光灯のシェードに応用して、透過率や屈折率などを考慮して、透過後の面の輝度を設定することで、輝度分布が一様な、どのような場所から見ても等しい明るさに見えるシェードを作成することなどにも応用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 「光と色の環境デザイン」、編者 社団法人、日本建築学会、発行者 佐藤政次、発行所 株式会社 オーム社
- 2) 「照明設計における光源決定手法の提案」、飯田 都之磨、平手 小太郎、安岡 正人、学術講演梗概集. D-1, 1911-1912
- 3) 「光環境を評価指標とした遺伝的アルゴリズムによる建築・照明デザイン手法 その1 建築形状の決定」、中田 早香、吉澤 望、武田 仁、兼松 学、学術講演梗概集. D-1, 2008, 571-572
- 4) 「実測とシミュレーションによる入隅の光環境の分析」、藪中 功嗣、鈴木 広隆、学術講演梗概集. D-1, 2010, 451-452
- 5) 「直射日光・天空光・地物反射光・相互反射光を考慮した昼光シミュレーションシステムの開発」鈴木 広隆、上谷 芳昭、三木 保弘、戸倉 三和子 学術講演梗概集. D-1, 2005, 285-286

討議等

◆討議 [梅宮教授]

光源位置や、光源そのものを変えれば、再計算は必要になるのか？

◆回答

再計算が必要である。初期放射光束が、光源の位置などに依存するため、配光特性などが変われば再計算が必要となる。

◆討議 [西岡教授]

実験において、予想出来なかった課題はあったか？
どのような場所に応用可能か？
均等拡散面以外では使えないのではないか？

◆回答

予想できなかった課題として、反射率操作後の空間は予想していたよりも暗くなったことである。
応用場所としては、美術館にある絵画などを、光源の映り込みを起こさずに目立たせることが出来ると考えられる。
均等拡散面を用いないと、見る位置によって輝度が変わってしまうので、どこから見ても一様な輝度にするためには均等拡散面である必要がある。

討議 [遠藤講師]

その他の応用場所はあるか？

◆回答

商店の入隅を明るくするなどにより、空間に広がりを与えることなどが可能である。