

# 照明計算とコンピュータグラフィックスへの応用

田島 秀樹

建設物のライトアップや屋内照明の照明効果を事前に視覚的にわかりやすく表現する手法として、コンピュータグラフィックス（以下、CG という）が利用されるようになって久しい。元々は、照度分布や輝度分布がどのようにになっているのかを2次元の等高線表示によって表現することから始まり、やがて3次元表示になり、コンピュータの急速な性能向上に伴って、等高線表示からカラー輝度分布表示によるフォトリアスティックなCG画像へと発展してきた。光をシミュレートするための基本的なアルゴリズムは、十数年前にほぼ出尽くしていたが、ハードウェアの向上により、今日ではすべてのアルゴリズム計算が可能になっている。

われわれのような照明メーカーやゼネコン、サブコン、設計事務所などのいわゆる光環境に関係する業界においては、①意匠検討のためのシミュレーション、②建築物や照明器具と周囲との調和を確認するための景観シミュレーション、③インテリア、エクステリアのシミュレーション、④照明空間の明るさや色の状態のシミュレーションなどにCGを利用している<sup>1-3)</sup>。CGでは光が当たっている面の輝度を計算し、しかるべき手法で画像として表現している。これは、物体の面などで光が反射することによってはじめて光を知覚することができるためである。また、オフィスや競技場などでは、光源と面（机上面や壁面や競技面など）との間の空間の光の状態、空間照度が非常に重要である。空間照度をシミュレートし、可視化する手法なども開発されている<sup>4)</sup>。

以下、照明計算手法とその結果を視覚化するCGシミ

ュレーションについて、実例を交えながら紹介する。

## 1. 照明計算

ところで、光の状態を視覚的な画像として表現する照明シミュレーションでは、製品デザインなどをCGで表現する場合と違って、非常に多くの光源を考慮する必要がある。例えば、全長2km程度の吊り橋ライトアップを検討する場合、光源数が200台を超える。さらに、個々の光源ごとに照明器具の反射板によって制御された配光特性を考慮して計算しなければならない。

### 1.1 直射照度計算

照明器具の配光特性は、配光測定装置を用いて、照明器具を固定し、そのまわりに多数の受光器を設置するか、または、受光器を回転させて測定される<sup>5)</sup>。

この配光特性から、任意の点における直射照度を計算することができる。計算点と光源との距離が十分に離れている場合、点光源（位置だけが定まり大きさをもたない光源）として、式(1)により距離の逆二乗の法則で簡単に被照面における直射照度を求めることができる<sup>6)</sup>。

$$E = I/h^2 \quad (1)$$

$E$  : 照度 [lx]

$I$  : 光度 [cd]

$h$  : 被照面と光源との距離 [m]

計算点の位置が、光源直下から $\theta$ だけずれた位置にあるときの被照面の水平面照度は、式(2)により求めることができる<sup>6)</sup>。

$$E_h = E \cdot \cos \theta \quad (2)$$

$E_h$  : 被照面の水平面照度 [lx]

また、直線状の線光源の場合には、

$$E_n = I(a + \sin a \cdot \cos a) / 2p \quad (3)$$

東芝ライテック(株)研究所 (〒237 横須賀市船越町 1-201-1)  
E-mail: tashima@yoko.tlt.co.jp



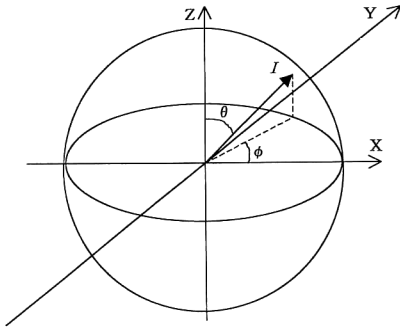


図2 光子束放射角の決定.

$F$ : 全光束

$A$ : 面素の面積

光源から放射される光子束の放射角は、例えば光源を均等配光の点光源とした場合、図2に示すような方位角  $\phi$  ( $0 \leq \phi \leq 2\pi$ ) と鉛直角  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) で表され、それぞれ次のように決定される。

方位角は、光子束放射特性は一樣としているため、式(6)で求められる。

$$\phi = 2\pi\zeta \quad (6)$$

$\zeta$ : 乱数

また、鉛直角  $\theta$  の放射確率  $P(\theta)$  は  $\theta$  の関数で式(7)のように表される。このため、放射角  $\theta'$  は  $P(\theta)$  を0から  $\theta'$  まで積分し、乱数  $\zeta$  と対応させて式(8)のように求めることができる。

$$P(\theta)d\theta = 2\pi \sin \theta d\theta / \int_0^\pi 2\pi \sin \theta d\theta = \sin \theta d\theta / 2 \quad (7)$$

$$\int_0^{\theta'} (1/2) \sin \theta d\theta = (1 - \cos \theta') / 2 = \zeta \quad (8)$$

$$\theta' = \cos^{-1}(1 - 2\zeta)$$

### 1.3 輝度分布計算モデル

光が当たった物体の見え方は、輝度分布によって表現される。照明シミュレーションによって最終的に出力される画像は、この輝度分布をディスプレイが表示することができる階調範囲内で相対的な数値として求められたものである。フォトリアリスティックな画像を生成するためには、物体の質感を忠実に再現するように物理特性に則って計算すればよいが、そのまま計算したのでは計算時間がかかりすぎる。そこで、本物らしく表現できるような輝度分布計算モデルが研究されてきた。現在、最も一般的に用いられているモデルとして、また、今回紹介している照明シミュレーション画像の生成モデルとし

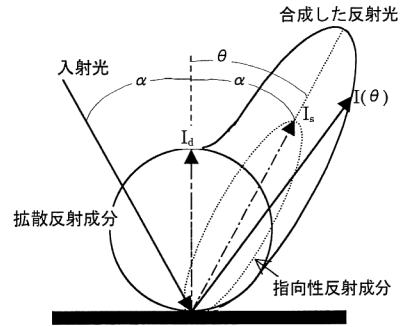


図3 画像生成のための反射特性モデル.

て Phong のモデルがある<sup>1,2,14)</sup>。これは、物体の反射を拡散反射成分と指向性反射成分とに分けて、それぞれの反射光を合成して輝度を求めるモデルである。それを図3、および、式(9)に示す。

$$I(\theta) = I_d \cos \theta + I_s \cos^n(\theta - \alpha) \\ = (dF \bullet R_d / \pi) \cos \theta \\ + ((dF \bullet R_s) / (2\pi(n+1))) * \cos^n(\theta - \alpha) \quad (9)$$

$I(\theta)$ :  $\theta$  方向への反射光の光度

$I_d$ : 均等拡散反射成分の光度の最大値

$I_s$ : 指向性反射成分の光度の最大値

$dF$ : 入射光の光束

$R_d$ : 面素の拡散反射率

$R_s$ : 面素の鏡面反射率

ただし、 $R_d + R_s \leq 1.0$  とする。

$I_s$  は正反射角 ( $\alpha$ ) のまわりに  $\cos^n(\theta - \alpha)$  の角特性に従って広がる。 $n$  の値が0に近いほど広がりが大きくなりぼやけた感じになり、大きいほど広がり小さくなりシャープに輝く。

## 2. CGによる照明シミュレーション

### 2.1 照明設計とCG

照明計画において、色や輝度分布をどの程度忠実に表現するか、計算時間をどの程度かけるかなどによって、CGの要求レベルが決められる。

忠実な光環境シミュレーションは、物理的な法則に則って画像を生成するため、照明効果を計画段階で視覚的に確認でき、適切な照明設計を行うことができる。シミュレーションには、次の3つの項目が要求される。

#### ① 照明器具 (光源)

- 照明器具の取付位置、エイミング (照明器具がねらう方向)
- 照明器具の配光特性 (図4参照)

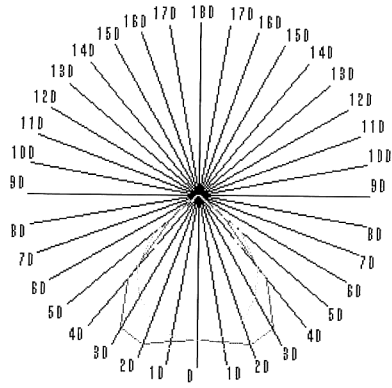


図4 照明器具配光特性の例.

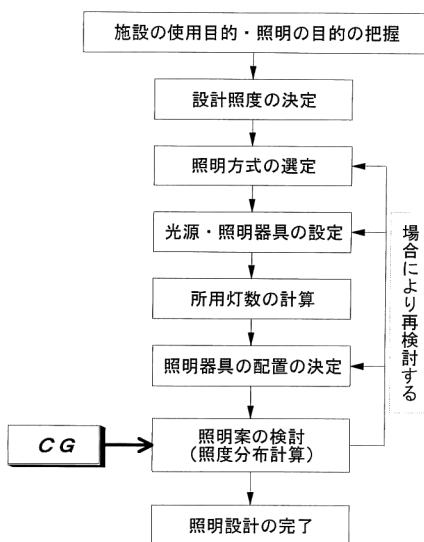


図5 照明設計フローチャート.

- ・光源色
- ② 形状属性
  - ・照明計算の対象となる面の色
  - ・照明計算の対象となる面の反射率・透過率
- ③ 視点位置と視線方向

図5に、照明設計手順のフローチャートを示す。照明設計を行うに当たって、まず、施設の使用目的・照明の目的などを把握する。それに沿って、設計照度の決定や照明方式の決定など一連の作業を行う。最後に照明案の検討段階では、設計照度値あるいはJISなどの照度基準値が得られているかを確認する。一般には、照度分布図・輝度分布図などの簡易な表示手段が用いられる。ここで、満足の得られる結果が出なかった場合、再び前段階あるいは前々段階へと戻り、試行錯誤を繰り返すな

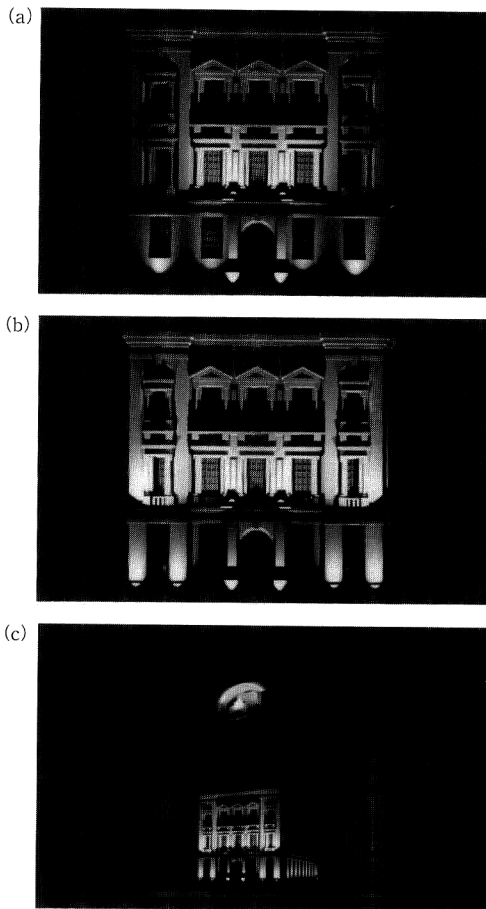


図6 ライトアップ照明検討。(a) 照明計画案 A, (b) 照明計画案 B, (c) 照明計画案 Bの全景.

がら照明案をつめていく。最終案が決定したら、CGによるシミュレーションを行う。2次元の照度分布図・輝度分布図では、照明された光環境がどのようになっているのか、どのように見えるのかが、一般の顧客や建築設備設計関係者はもちろんのこと、熟練した照明設計者であっても十分な分析を行うことは容易ではない。このため、最終的な照明計画案の確認と、顧客等への設計イメージの容易な伝達手段として、CGによるシミュレーションを行う。

## 2.2 CGによるライトアップ照明検討

ライトアップでは、建築物をどのように照明したら最も効果的に浮かび上がるか、形状の凹凸による陰影の状態が悪くないか等を検討する。屋外照明のシミュレーションの場合、ほとんどのケースでは、直射計算を行うだけで十分にフォトリアリスティックな画像を得ることができ、CGでライトアップ照明計画を検討で

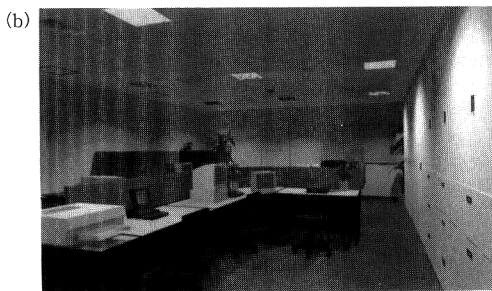
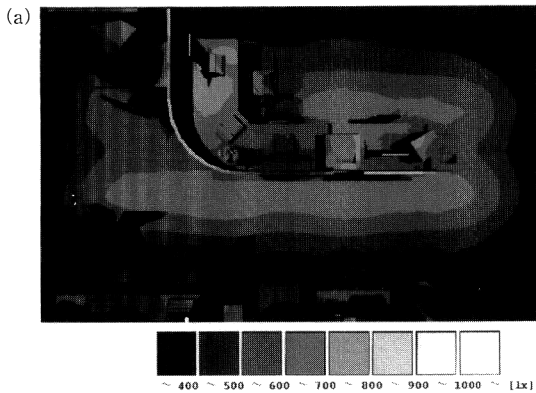


図7 屋内照明環境。(a) CGによって作成した屋内照明照度分布図、(b) CGによって作成した屋内照明環境の画像、(c) 実際の屋内照明環境の写真。

きる。

図6は、陰影のつき方の検討をCGによって行った例である。図6(a)、(b)は、それぞれ柱と柱の間を照明した場合と、柱を照明した場合である。陰影のつき方で、その建築物の印象が異なることがわかる。精密に計算し、現実に近い画像を表示することで、照明設計者の意図を視覚的に表現でき、顧客への説得力のあるプレゼンテーションが可能になる。また、顧客の意見を取り入れた設計を行うことも可能である。図6(c)は、実際に採用された(b)案でライトアップされた建築物全景をシミュレートした画像である。

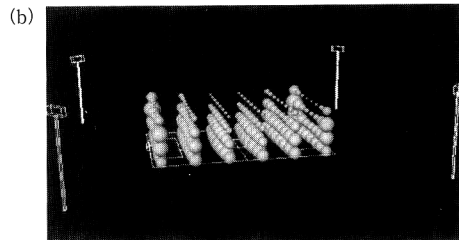
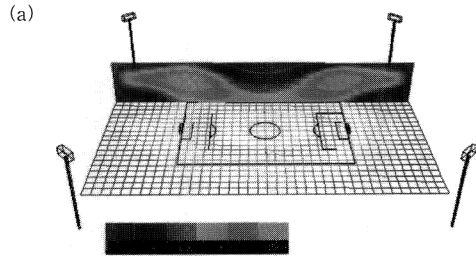


図8 サッカー場における空間の照明状態の可視化。(a) 任意断面上のカラーコンター表示、(b) 空間照度計算点上の球による分布表示。

### 2.3 屋内照明検討

屋内照明環境では、柱や梁などによる凹凸に加え、什器類や家具類などの複雑な形状をした光遮蔽物が多く配置されている。また、壁面や床面、什器類表面などでの光の繰返し反射、相互反射を考慮しなければならない。相互反射光を考慮した屋内照明環境のシミュレーション例を図7に示す。主にコンピューター作業を行う室内のため、グレアやVDTへの照明器具の写り込みを抑えるように設計された照明器具を使用している。シミュレーションに使用した光源の配光データは図4に示したものである。図7(a)は、グレースケールによる照度分布図を示している。ここでは、7回反射まで考慮している。このため、およそ10%程度の誤差で照度計算値が得られている。図7(b)は、輝度分布によるフォトリアリスティックな画像を視点を変えて示している。同じアングルから撮影した実際の照明環境の写真を図7(c)に示す。グレア防止のため厳しく配光制御された照明器具を使った場合の壁面の照明状態が、CGで忠実にシミュレートされている様子がよくわかる。

### 2.4 空間の照明状態検討

照明環境をシミュレートする場合、通常のCGでは、物体からの反射光を輝度で計算し、それをディスプレイに相対的な輝度分布として表示している。しかし、光は空間の中に存在しており、その分布状態がどのようになっているかで、人の顔や空間に配置されているオブジェ

クトなどの見え方などが様々に変化する。例えば、野球やテニスのような空間内をボールが飛び交うようなスポーツ競技の場合、空間の照明状態がある程度均一でないと、ボールが見えたり見えなかったりして競技どころではなくなる。つまり、空間の照明の状態が非常に重要である。

空間における光の強さや方向性を示す指標として照明ベクトルの研究は昔から行われていたが、それを3次元的にCGを利用して表示する研究も行われ、実用化されている<sup>4,15-17)</sup>。図8は、サッカー場における空間の光の分布状態を光の強さ(平均球面照度)で表した例である。図8(a)は、空間の任意断面における光の強さをカラーコンター表示したもので、断面は連続的にリアルタイムに移動することが可能である。図8(b)は、同じ解析データを空間照度の計算点上において、光の強さを球体の大きさで示したものである。全体的に球体の大きさが揃っており、空間の照明状態がほぼ均一でよい状態であることを示している。

本稿では、実用レベルでの照明シミュレーションを紹介してきたが、他に、リアリティを追求した大気や雲のシミュレーション、霧やもや・霞の効果、睫毛と瞳孔の回折効果、水上・水中照明などを考慮したCGも研究報告されている<sup>18-20)</sup>。また、比較的簡易に本物らしく表現する手法として、写真などを貼り付けるマッピング手法などもある。

CGシミュレーションシステムを照明計画・設計を支援するための一手段として利用することで、照度分布図・輝度分布図をもとにした従来の照明設計技術を補い、より質の高い光環境の設計ができるようになった。また、設計者の意図を視覚的に顧客へ伝えるためのツールとしても必要不可欠なものとなっている。しかしながら、システムの使い勝手や計算負荷の改善、あるいは、よりいっそうのリアリティの追求など、やるべき課題は多々ある。これらの課題を一つずつ解決し、照明CGの発展のために努力していく所存である。

## 文 献

- 1) 金子直礼, 菊地壮一, 高橋貞雄: “照明計画支援コンピュータグラフィックスシステム”, 照明学会誌, **72** (1988) 652-656.
- 2) 菊地壮一, 鹿倉智明: “照明計画支援コンピュータグラフィックスシステム”, 日本建築学会・第12回情報システム利用技術シンポジウム資料 (1989) pp. 481-486.
- 3) 田島秀樹, 小谷朋子: “光環境のCGシミュレーション”, 建築と社会, **10** (1994) 45-48.
- 4) 小谷朋子, 田島秀樹, 鹿倉智明, 高橋貞雄: “空間照度の可視化システムの開発”, 照明学会誌, **79** (1995) 191-197.
- 5) (社)照明学会: ライティングハンドブック (オーム社, 1987) pp. 179-181.
- 6) (社)照明学会: ライティングハンドブック (オーム社, 1987) pp. 223-224.
- 7) (社)照明学会: ライティングハンドブック (オーム社, 1987) pp. 230-234.
- 8) 高橋貞雄, 石野正敏, 西 敏弘, 藤井克人, 黒沢涼之助: “室内照明における照度予測の電子計算化”, 照明学会誌, **54**, No. 12 (1970) 21-31.
- 9) 西田友是: “照明計画シミュレーション”, 計測と制御, **34** (1995) 577-581.
- 10) 長田正義: “モンテカルロ法による照明解析”, OHM, **4** (1995) 107-112.
- 11) 長田正義: “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”, 照明学会誌, **71** (1987) 349-354.
- 12) 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** (1988) 596-601.
- 13) 鈴木雅史, 吉村 昇, 木村 修, 粟田昌延: “モンテカルロ法を用いた相互反射光による色彩変化のシミュレーション”, 照明学会誌, **78** (1994) 107-113.
- 14) 中前栄八郎, 西田友是: 3次元コンピュータグラフィックス (昭光堂, 1986).
- 15) 佐々木嘉雄, 肥後尚志, 篠田之孝, 高橋貞雄, 鹿倉智明, 小谷朋子: “照明空間における光の流れの可視化について”, 照明学会全国大会梗概集 (1992) p. 50.
- 16) T. Shikakura and T. Kotani: “A study on the visualization of spatial illuminance,” *Lux Europa, the IVth European Lighting Conference*, **2** (1993) pp. 779-782.
- 17) 小谷朋子, 田島秀樹, 鹿倉智明, 肥後尚志, 佐々木嘉雄, 篠田之孝: “照明空間における空間照度の可視化について”, 照明学会全国大会梗概集, No. 58 (1993) p. 75.
- 18) T. Nishita, T. Miyawaki and E. Nakamae: “A shading model for atmospheric scattering considering luminous intensity distribution of light sources”, *Comput. Graphics*, **21** (1987) 304-310.
- 19) 中前栄八郎: “CGによる照明シミュレーション入門”, 照明学会技術セミナー資料 (1992) pp. 1-7.
- 20) 多田村克己, 中前栄八郎: “水上および水中照明シミュレーション”, 照明学会誌, **79A** (1995) 385-391.

(1997年9月1日受理)