大気中の微粒子による散乱光を考慮した灯火システムの コンピュータグラフィックス (その1) —モンテカルロ法により算出した灯火散乱光の精度—

正会員 青木 義郎 正会員 谷口 哲夫 正会員 入倉 隆
(交通安全公害研究所)

Computer Graphical Simulation of Light Signal System Including Light Scattering by Atmospheric Particles (Part 1).

—Accuracy of Monte Carlo Simulation of Lamplight Scattering—

Member Yoshiro Aoki, Member Tetsuo Taniguchi, Member Takashi Irikura

(Traffic Safety and Nuisance Research Institute)

ABSTRACT

Analysis of light scattering by atmospheric particles is useful for studying the appearance of light signals. The spatial distribution of scattered lamplight was calculated by Monte Carlo simulation. Comparison of simulation results with measured values revealed that

- 1) the simulation results agree well with the measured values,
- 2) the maximum times of scattering in the simulation must be increased as the optical depth increases, and
- 3) when simulating airport lights, the maximum scattering times should be about 60 for optical depths of up to 10 and calculation error of less than 1%.

KEYWORDS: computer graphics, atmospheric particles, Monte Carlo Simulation, numerical simulation, atmospheric optics, Mie scattering

1. まえがき

光が大気中でどの様に散乱するかを解析することは、灯火の見え方等を推定する上で役立つものと考えられる。しかしながら、これを実測により種々の条件の組合せについて詳細にそして正確に解析を行うことは、微粒子濃度、粒径分布、散乱光輝度分布等の測定を正確にかつ長期的に行うことが要求されるので、極めて困難なものとなる。そのため、空港灯火の使用光度等を定める際、灯火散乱光の影響は十分考慮されていない。

霧中での灯火散乱光(光源ハロー)測定実験^{1)~4)}は過去にもいくつか行われてきた。しかし、それらは、実験結果の解析のために、粒径分布についての測定が行われていなかったり、実験条件の測定が十分でないものが多い。また、その実験値と Mie 理論に基づいた理論計算値との照合が行われた例も見あたらない。このような実測値と計算値との比較等から、数値シミュレーションにより散乱光が精度良く模擬できることが実際に明らかにできれば、この数値シミュレーションを応用して、散乱光が灯火の見え方にどの様に影響するかを、従来の屋外や霧箱による実験よりも容易にそして精度良く調べられるものと期待される。

筆者らは、以前に Mie 理論によって求められる散乱特性に基づ

き、モンテカルロ法により散乱光の空間分布を解析する数値シミュレーションプログラムを開発した⁵⁾⁶⁾。

本論文では光源ハローについて、数値シミュレーションによる計算と霧箱を用いた実験とを行い、光源ハローが種々の条件によってどの様に变化するのかを解析するとともに、その計算値と霧箱での実測値との整合性について調べた。そして、数値シミュレーションにより精度の良い散乱輝度分布、すなわち散乱光を考慮したコンピュータグラフィックス(CG)画像を求めるためには散乱次数(光子が発光体から放出されてから観測位置に到達するまでに、大気中の微粒子により散乱した回数を示す)をどの程度考慮する必要があるのか解析を行った。それらの結果について報告する。

2. 散乱光を考慮した灯火システムの CG 化手法

2.1 Mie 理論

Mie 理論⁷⁾によると、球状粒子に単位照度平面波が入射する時の、散乱強度 $I(\alpha, \theta)$ 及び散乱効率 $K(\alpha)$ (散乱断面積/幾何学断面積)は、散乱角 θ 、粒子屈折率 m 、サイズパラメータ $\alpha = 2\pi r / \lambda$ (r : 微粒子半径, λ : 光波長) との関係式により導きだせる。

$$I(\alpha, \theta) = \lambda^2 \{i_1 + i_2\} / 8\pi^2 \quad (1)$$

本論文の一部は、平成6年度照明学会全国大会で発表した。

$$K(\alpha) = (2/\alpha^2) \sum_{v=1}^{\infty} (2v+1) (|a_v|^2 + |b_v|^2) \quad (2)$$

ただし、 i_1, i_2 は、

$$i_1 = \left| \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2v+1}{v(v+1)} \left\{ a_v \frac{P_v^1(\cos\theta)}{\sin\theta} + b_v \frac{dP_v^1(\cos\theta)}{d\theta} \right\} \right|^2 \quad (3)$$

$$i_2 = \left| \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2v+1}{v(v+1)} \left\{ b_v \frac{P_v^1(\cos\theta)}{\sin\theta} + a_v \frac{dP_v^1(\cos\theta)}{d\theta} \right\} \right|^2 \quad (4)$$

$P_v^1(\cos\theta)$ は Legendre 多項式、 a_v, b_v は 1 次、2 次 Ricatti-Bessel 関数 ψ_v, ξ_v 及びその導関数よりなる。

各微粒子における散乱特性である散乱効率 $K(\alpha)$ や散乱強度 $I(\alpha, \theta)$ が求まれば、微粒子が複数個存在する空間での散乱光分布が推定できる。

2.2 大気中の微粒子を考慮したモンテカルロ法による散乱光の空間分布解析手法⁵⁾⁶⁾

散乱効率 $K(\alpha)$ により、大気中を光が進行した時の減衰係数 σ (m^{-1}) が求まる。

$$\sigma = \pi \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} r^2 n_a(r) f(\lambda) K(\alpha) dr d\lambda \quad (5)$$

ただし、 $n_a(r)$ ：微粒子濃度分布 (個/ m^3)

$f(\lambda)$ ：光の波長確率密度分布

この σ により、光子が次に散乱するまでの予測距離 L が求まる。

$$L = -\ln(\text{ran1}) / \sigma \quad (6)$$

ただし、 ran1 ：0～1 の一様乱数

そして、散乱角確率密度分布 $F(\alpha, \theta)$ 、

$$F(\alpha, \theta) = \int_0^{\theta} w(\phi) I(\phi) d\phi / \int_0^{\pi} w(\phi) I(\phi) d\phi \quad (7)$$

ただし、 $w(\phi)$ ： ϕ での立体角

により、各散乱地点における散乱角 θ を予測できる。

$$\theta = F^{-1}(\alpha, \text{ran2}) \quad (8)$$

ただし、 ran2 ：0～1 の一様乱数

このようにして、光子が放出してから、どの位置でどの方向に順次散乱していくのか、一つ一つ予測していくことができる。

そして、この光子を複数個とり、その進行状況を重ね合わせて統計分布を求めることにより、空間に微粒子が複数個存在する時の散乱光空間分布特性を求めることが可能となる。そのモンテカルロ法による散乱光空間分布解析のフローチャートを図 1 に示す。

2.3 散乱光を考慮した灯火システムの CG 化

屋外での風景の輝度分布に影響を及ぼし得る各灯光や日光における散乱光の空間分布の算出が、前節の手法により可能となる。そして、それらを重ね合わせることで、発光体や反射体が複

数個含まれる風景を任意の位置及び方向から見たときの輝度分布すなわち CG 画像が算出できる。

その各発光体の散乱光の空間分布から CG 画像データ $G(\psi_x, \psi_y)$ を算出するための手順を以下(1)～(5)に示す。ただし、 ψ_x, ψ_y は観測方向を示すものである。

(1) 微粒子特性、観測位置、視程 V_s 、昼光データ(天候状態)、灯数 N_L 、各灯火の位置及び光軸等の条件設定

(2) 設定された微粒子特性に対する各灯火の散乱光空間分布データ $P(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \xi)$ を入力 (直射光成分も含む)

$$\begin{aligned} P(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \xi) \\ = Q(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \xi) \times (L_s/O)^2 \\ = Q(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \xi) / \sigma_s^2 \end{aligned} \quad (9)$$

但し、 Q ：灯火散乱光による輝度分布データ (cd/m^2)

σ_s ：シミュレーションでの光の減衰係数 (m^{-1})

L_s ：シミュレーションでの各光学深さにおける観測距離 (m)

O ：光学深さ (= 観測距離 $\times$ 減衰係数, Optical Depth.

光学的厚さとも呼ばれるが、この呼び方で統一する)

θ_x, θ_y ：観測位置から見た光源の方向

ϕ_x, ϕ_y ：観測方向と、 θ_x, θ_y との相対角

ξ ：観測位置から見た光軸のずれ

注) なお、灯火が点光源で微粒子以外により散乱や吸収が起こらない場合には、散乱光空間分布データ P の値は、光源と観測位置との間の光学深さ O や微粒子特性 (粒径分布や屈折率) が同じ時、観測距離や視程に対して変化しない。なぜなら、光子が次に散乱する間の予測光学深さ $L \times \sigma$ は、(6) 式により乱数のみで決定されるので、発光体から無数の光子が空間に拡散していく様子は、そのスケールを光学深さに置き換える ((9) 式では $L_s \rightarrow O$) と、理論上常に同じ状態になるからである。なお、輝度分布 Q の値は、光学深さが同じ場合、視程や観測距離の二乗に反比例することになる。従って、入力すべきデータを輝度分布 Q でなく P として光学深さごとに求めデータベース化しておけば、観測距離や視程が変わっても改めて P を求める必要はなく計算時間を短縮することができる。この工夫によりはじめて、光源が広い範囲に数多く分散している様な大規模灯火システム例えば空港灯火システムを、今回の手法により CG 化することが現状の計算処理速度で可能となる。そして多くの観測距離や視程の条件でその CG シミュレーションを行うことも可能となる。

(3) 設定された条件時の昼光散乱による輝度分布データ $D(\psi_x, \psi_y)$ を入力

(4) 観測位置と各灯火との位置関係(方向 θ'_x, θ'_y 、距離 L' 及び光学深さ $O' = 2.996 \times L' / V_s$) や、その観測位置での光軸のずれ ξ' の算出を行う。

(5) 各観測方向 ψ'_x, ψ'_y から見た時の、各灯火からの散乱光による付加輝度を算出し、CG 画像データに加算していく。

$$\begin{aligned} G(\psi_x, \psi_y) &= D(\psi_x, \psi_y) \\ &+ \sum_{N=1}^{N_L} P(O', \theta'_x, \theta'_y, \phi'_x, \phi'_y, \xi') \times O'^2 / L'^2 \end{aligned} \quad (10)$$

このようにして各発光体についての散乱光の空間分布から CG 画像データが算出できる。

以上 2.1 節から示してきた、散乱光を考慮した CG 画像算出のための一連の手順を図 2 に示す。なおこの CG 化手法は、微粒子による散乱が Mie 理論によって求められ、そしてモンテカルロ法により多くの散乱次数を考慮することができる。そのため、昼光散乱の解析⁸⁾ やその CG 化⁹⁾ によく用いられている Koschmieder 理論

図 1 散乱光の空間分布解析の基本フローチャート

Fig. 1 Basic flowchart for analysis of spatial distribution of scattered light.

図2 散乱光を考慮した灯火システムのCG化手順
Fig. 2 Making of computer graphical image of light signal system in consideration of scattered light.

(本来、背景の輝度が均一で、対象物が微小な場合に対し適合する理論。光の散乱は完全拡散を前提とし多重散乱の影響は考慮されない。そして、光源ハローの解析には活用できない。)と異なり、正確なシミュレーションが可能である。また、光の散乱を簡略化し計算を容易にしつつ、できるだけ現実感を出すことを目的として最近研究されてきた霧の疑似的なCG化手法(例えば、ビーム光を円柱で構築しその重ね合わせで光散乱を表現する手法¹⁰⁾、霧や炎を無数の動きのある粒子で表しその残像効果(そのレベルはイメージにより段階的に変化)によって表現する手法¹¹⁾)とも異なり、粒径により異なる微粒子の散乱特性や多重散乱のふるまいを理論的に考慮し、混濁大気での光散乱が正確にシミュレートできる。

しかし、図2の手順を連続的に実行して、多くのCG画像を求めていくことは、現存の計算機的能力では極めて困難なことでありと推定される。従って、これらの計算は各ブロックに分割して行う。すなわち、各ブロックで、各微粒子における散乱特性、及び各発光体についての散乱光の空間分布特性を算出し、それをデータベース化する。そして、それを次のブロックでの計算に活用する。各ブロックにおいて必要とされる計算時間を表1に示す。

表1 各ブロックでの計算時間
Table 1 Calculation time in the each block.

Aブロック	散乱効率 $K(\alpha)$ の計算時間：約1時間 ($\alpha=10^{-1} \sim 10^6$, $\log \alpha$ の刻み幅は0.01) 散乱強度 $I(\alpha, \theta)$ の計算時間：約500時間 ($\alpha=10^0 \sim 10^6$, $\Delta \log \alpha=0.02$, $\Delta \theta=1$ 分)
Bブロック	灯火散乱光空間分布の計算時間：約200時間 (1灯, 最大散乱次数60, 全模擬光子数 2×10^7) 昼光散乱光空間分布の計算時間：約50時間 (最大散乱次数 ∞ , 全模擬光子数 10^8)
Cブロック	1画像作成時間： 約4時間(着陸進入時の空港灯火の場合) 約1時間(15×15マトリクス状灯火の場合)

注) 計算時間はspark station10 model40 (SPECfp92 64, 7)によるもの、この論文での計算は、この機種とHP735を併用して行った。

3. 実験方法

本論文では、光源ハローが種々の条件に対しどの様に変化するか実験を行う。なお、実験は霧箱による測定と数値シミュレーションとの2種類の方法で行う。そして、それらの結果を比較することにより、散乱光を考慮したCG画像をこの数値シミュレーションを用いて精度良く求めることが可能かどうか、そして精度良く求めるためには散乱次数をどの程度考慮する必要があるのか調べるものとした。霧箱での実験方法を3.1節に、数値シミュレーションでの実験方法を3.2節に示す。

3.1 霧箱を用いた光源ハロー測定実験

本論文では霧箱を用いて、光源ハローの測定実験を行う。その実験状況を図3に示す。暗箱内において、自然の霧に比較的近い半径 $4 \mu\text{m}$ 程度の人工霧を発生させる。そして、霧の濃度が比較的均一な状態において、1台の光源と2台の輝度計を用いて、透過率及び散乱光輝度の測定を行う。その暗箱内に設置された輝度計及び光源の向きを図4に、実験に用いた光源の配光を図5、光束波長分布を図6、霧箱内での微粒子粒径分布を図7に示す。なお、粒径分布は液浸法により測定した。実験中に、微粒子濃度が空間的に不均一にならないように、内部の空気は攪拌する。また、輝度計レンズへの結露を防ぐため、輝度計上方にフードを付け、そして輝度計本体への加温を行う。

各輝度計の視角は2度、輝度計受光部の面積は 5.3cm^2 、光源の面積は 4.18cm^2 であった。また、輝度計の焦点距離は3m程度とした。なお、霧の濃度は、光源と輝度計との間の光学深さが最大6程度

図3 霧箱での実験状況
Fig. 3 Experimental situation in cloud chamber.

図4 輝度計及び光源の向き

Fig. 4 Direction of luminance meter and light source.

図5 実験灯火の配光

Fig. 5 Luminous intensity distribution of experimental light.

図6 実験灯火の光束波長分布

Fig. 6 Luminous flux wavelength distribution of experimental light.

図7 霧箱内での微粒子粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution in cloud chamber.

と視程の2倍になるまで上げることが可能である。測定は、それぞれの条件において光学深さが6程度から0近くに減少する間に約1秒間隔で2,000回程度行われた。

3.2 数値シミュレーションによる光源ハロー解析実験

図1に示す手法により、光源ハローの数値シミュレーションを行い、前節の方法により求められた実測値と比較検討等を行う。なお、粒径分布、実験灯火の配光、光束波長分布、輝度計及び光源の向き、輝度計の視野角等の計算条件は、全て霧箱での実験と同じにする。そして、霧箱内の輝度計により測定される透過率及びハロー輝度のシミュレーション計算を行う。最大散乱次数は1~60までいくつか変化させて計算を行い、計算に必要な最大散乱次数を調べる。全模擬光子数は $10^8 \sim 3 \times 10^8$ とした。粒子屈折率は水の屈折率とした。

4. 実験結果

4.1 光源ハロー散乱特性実験

4.1.1 測定値及びシミュレーション計算値

光源が配光1及び灯色白である場合の、散乱光による付加輝度の実測値並びにシミュレーション計算値を図8に示す。ハロー測定方向は光源から右3度~右9度、光軸方向はハロー測定用輝度計から0度~右9度に設定した(図4参照)。また、シミュレーション計算は、最大散乱次数を1次、5次、16次及び60次として、各種条件における値を求めた。

各種条件において、最大散乱次数を16次及び60次と大きくした場合、計算値と実測値はよく整合することが示されている。また、光源と測定位置(輝度計の位置)との間の光学深さが大きくなる程、最大散乱次数を16次、60次と大きくした場合と、1次、5次とした場合との散乱付加輝度の計算値の差は相対的に大きくなり、1次、5次の計算値における誤差の割合が大きくなる傾向が示されている。そして、測定方向が光源から離れたり、光軸方向が測定位置から離れたりすることによっても、各最大散乱次数における付加輝度値の差は相対的に若干大きくなる傾向が示されている。

次に、光源が配光2及び灯色白である時の結果を図9、配光1及び灯色青である時の結果を図10、配光1及び灯色赤である時の結果を図11に示す。これらの結果には図8の場合と同様、最大散乱次数を16次、60次と大きくした場合のシミュレーション計算値は、灯色や配光の違いによる影響を受けずに実測値とよく整合することが示されている。また、図8の場合と同様、光学深さが大きくなったり、測定方向が光源から離れたり、光軸方向が測定位置から離れたりする程、各最大散乱次数における付加輝度値の差は、相対的に大きくなっていくことが示されている。

ゆえに、以上の図8~図11の結果から、本研究に用いたモンテカルロシミュレーションは、光源ハローの計算に関し、灯色、配光、測定方向、光軸方向、光学深さ等の種々の条件に対して広い範囲で、概ね良好な結果を導き出し得ることが明らかになった。また、光学深さが大きくなったり、測定(観測)方向が光源から離れたり、光軸方向が測定(観測)位置から離れたりする程、高次の散乱次数成分の割合が増すため、そのシミュレーション計算は最大散乱次数を多くとる必要性が増すことが明らかになった。この中で散乱次数成分の割合に特に影響が大きいのが、光学深さである。例えば、散乱付加輝度のうち一次散乱成分が大部分を占めるのは、光学深さ0~0.3の範囲に限られており、それよりも大きな光学深さでは多重散乱成分を考慮しなければ光源ハローの正

(a) 測定方向：(光源から) 右3度、光軸方向：(観測位置から) 0度

(b) 測定方向：右6度、光軸：0度

(c) 測定方向：右9度、光軸：0度

(d) 測定方向：右3度、光軸：右9度

(e) 測定方向：右6度、光軸：右9度

(f) 測定方向：右9度、光軸：右9度

図8 光学深さに対する散乱光輝度 (配光1, 光軸光度67cd, 灯色白)

Fig. 8 Additional luminance with scattered light vs optical depth.

(Luminous intensity distribution : Fig. 4 (a). Luminous intensity of optical axis : 68cd. White light.)

(a) 測定方向：右3度、光軸：0度

(b) 測定方向：右6度、光軸：0度

(c) 測定方向：右9度、光軸：右0度

図9 光学深さに対する散乱光輝度 (配光2, 光軸光度1,166cd, 灯色白)

Fig. 9 Additional luminance with scattered light vs optical depth.

(Luminous intensity distribution : Fig. 4 (b). Luminous intensity of optical axis : 1,166cd. White light.)

(a) 測定方向：右3度、光軸：0度

(b) 測定方向：右6度、光軸：0度

(c) 測定方向：右9度、光軸：右0度

図10 光学深さに対する散乱光輝度 (配光1, 光軸光度41cd, 灯色青)

Fig.10 Additional luminance with scattered light vs optical depth.

(Luminous intensity distribution : Fig. 4 (a). Luminous intensity of optical axis : 41cd. Blue light.)

図11 光学深さに対する散乱光輝度（配光1，光軸光度34cd，灯色赤）

Fig.11 Additional luminance with scattered light vs optical depth.

(Luminous intensity distribution : Fig. 4 (a). Luminous intensity of optical axis : 34cd. Red light.)

確な解析は困難であることが確認された。これは、高次の多重散乱を正確に解析できる本手法の有利性を示すものである。

そして、図8～図10においては、最大散乱次数を16次とした場合と、60次とした場合との計算値が、図では識別できないほどよく接近しており、最大散乱次数をある水準以上あげても計算値はほとんど変化が生じなくなることが明らかである。すなわちこのことは、散乱次数は ∞ まで考慮しなくても、ある水準まで考慮すれば十分高い計算精度を得られることを示すものである。なお、計算時間はこの最大散乱次数に比例して上昇するため、それぞれの条件、例えば空港灯火の運用条件で計算に必要な最大散乱次数を調べておくことは重要である。これについては4.1.2節で述べるものとする。

また、図8～図11において、今回整合性が確認された実測値と計算値（最大散乱次数16，60次）からいえることは、光源から3度～9度離れた部分の光源ハローは、光学深さが0から大きくなるにつれてハローの輝度も上昇し、光学深さ1～1.3程度でその輝度は最大になるということである。その後光源ハローは、光学深さの上昇に伴って高次の散乱次数成分の割合も上昇し、ハローの輝度は空間的に均一化しながら全体的に低下するような傾向になる。こうした傾向は雲の光学的厚さと天空輝度及び昼光照度との関係でも見られる¹²⁾。そして、配光の拡散性が強くなるほど（配光2よりも配光1の方が）、その光源ハローの輝度分布も緩やかになる傾向が図8と図9の(a)，(b)，(c)に示されている。そして、Arnulfらの測定によると⁷⁾、波長による霧の透過率の差はほとんど見られないとしているが、光源ハローの特性に関しても平均粒子半径が4 μ m程度の場合、灯色による影響はほとんどないことが、配光の拡散性が同じ図8，図10，図11の(a)，(b)，(c)に示されている。

（散乱付加輝度の値は、灯色によって変化しているが、これは光源の光度変化によるもので、“散乱付加輝度／光源の光軸光度”は、それぞれの条件でほぼ同じになる。）

4.1.2 シミュレーション計算値の精度

今回のモンテカルロシミュレーションにおいて、最大散乱次数と最大模擬光子数は計算時間の制約から有限に設定せざるを得ないので、計算誤差はわずかであっても必然的に生じることになる。図12に各散乱次数における計算精度を示す。

ここで求められる各散乱次数 n における計算誤差とは、

$$(F_{500} - F_n) / F_{500} \quad (11)$$

ただし、 F_{500} ：最大散乱次数が500次の受光散乱光量

F_n ：最大散乱次数が n 次の受光散乱光量

により求められるものである。なお、真値を求めるには最大散乱

次数を ∞ とする必要があるが、計算値はある水準まで最大散乱次数を上げれば十分高い精度になることが前節により確認されているので、ここでは可能な限り最大散乱次数を大きくした時の結果 F_{500} を代用する。なお、ここで誤差を調べるために求めた値は光源ハローの輝度値でなく光軸から0～20，0～180度方向での直射光成分を除く総受光量であるため、模擬光子数を 10^7 と少なくでき、500次散乱までの計算 F_{500} が可能となった。

図に示されるように、光学深さ、受光角（光軸方向の全観測位置に対する相対角の範囲）が大きくなる程、同じ散乱次数における誤差も大きくなる傾向が示されている。すなわち、これらの値が大きくなる程、必要となる最大散乱次数も大きくなる。また、この中でも、誤差や必要となる最大散乱次数に最も影響を及ぼすのは、光学深さであることが図に示されている。これに対して配光の拡散性は、最も強指向性のレーザ光から完全拡散光まで、あまり誤差に影響を及ぼさないことが示されている。

なお、着陸中に空港灯火を見た時、パイロットの視野（約20度）の中で散乱光輝度分布に影響が強い灯火は、光軸方向が観測（パイロット）位置に対して20度以内となるものが大半である。従って、空港灯火についてCG画像を求める場合、光学深さを10程度まで考慮すると、計算誤差を5%以内とするならば最大散乱次数は16次程度、1%以内とするならば60次程度必要であることが図12(a)より想定される。

4.2 CG画像の作成結果

前節において、光源ハローの輝度分布は本論文での数値シミュレーションにおいて最大散乱次数を多くとれば、高い精度になることが霧箱による実験結果との比較などから確認された。なお、比較に用いた霧箱実験は、スケールが小規模で単独灯に対するものである。そのため、霧箱の実験条件と実際の灯火システム（例えば空港灯火）の運用条件とが、大きく異なっている以下の2点が、シミュレーションの正当性に影響を及ぼすようであれば、その灯火システムの散乱光分布の解析、すなわちCG化にこの数値シミュレーションを適用することは困難となる。

- 1) 灯数の違い（霧箱の場合は1灯。空港灯火の場合は500灯以上）
- 2) 観測距離の違い（霧箱の場合は3 m。空港灯火の場合は10 m から1 km以上）

1) の灯数に関していうと、灯火散乱光のうち多重散乱成分の割合が多い場合（この時、種々の散乱経路の光が混在し観測位置に到達するまでの総距離にばらつきが生じる）、あるいは光源が空港等で用いられている白熱灯（灯光がインコヒーレント）である場合には、光源同士の散乱光が干渉し合うことはない。よって、

(a)滑走路灯

(b)完全拡散灯(全方向に対して等光度)

(c)レーザー光(波長0.9 μm)

図12 最大散乱回数に対する計算誤差

Fig.12 Calculation error vs maximum times of scattering.

この場合に個々の光源のシミュレーション結果を重ね合わせて複合灯火の結果を求めても、その正当性に問題は生じない。これは、複合灯火でなく面光源の場合も同じである。

2)の観測距離に関していうと、2.3節の注)に記述されているように、光学深さが同じならばスケールが変わっても、すなわち縮尺あるいは拡大しても、理論上散乱光分布(光学深さに対する光束の広がり)に変化は生じない。従って、これにより正当性に問題が生じないことは明らかである。これは、視程(=2.996×観測距離/光学深さ)の場合も同じことがいえる。

図13 散乱光を考慮した灯火システムのCG画像

Fig.13 Computer generated image of light signal system taking account of scattered light.

従って、この実験結果とシミュレーション計算値との整合性は、そのまま空港灯火のような大規模な灯火システムにもあてはまると考えられる。ゆえに、図2に示す手順で複合灯火システムの散乱光を考慮した輝度分布すなわちCG画像を精度良く求めることが可能である。図2の手順に従って求められたCG画像例を図13に示す。なお、この図はパイロットが着陸中に滑走路進入灯火を見たときのCG画像である。

なお、シミュレーション結果の正当性に問題が生じるとすれば、以下の様なケースが考えられる。

(a) 計算処理能力の限界から、高精度な結果を得るのに必要な最大散乱回数や模擬光子数が与えられない。

(b) 粒子の散乱特性がMie理論に適合しない。

(a)に関していうと、軸対象配光以外の光源を用いる場合や、微粒子以外の反射や吸収を考慮しなくてはならない場合(例えば明るい壁面を持つ室内での光散乱)については、現状の計算処理能力(表1参照)では十分な最大散乱回数や模擬光子数が与えられないため、この場合のCG化は行えないという問題がある。(b)に関していうと、粒子が球形でない場合、例えば、重力によってその形状が球にならないような大きな雨滴の場合には、Mie理論をそのまま適用すると問題が生じる可能性がある。これらの問題については今後の検討課題とする。

なお、(a)、(b)の様な特殊な状況が起こらない限りにおいては灯火システムのCG化及びそのCGを用いた実験を行うことに問題は生じない。今後、このようなCG画像を用いた灯火システムの評価などを行っていくものとする¹³⁾。

5. 最後に

筆者らは以前に、Mie理論に基づきモンテカルロ法により散乱光の空間分布を解析する数値シミュレーションプログラムを開発した。この手法は、粒径により異なる微粒子の散乱特性や高次の多重散乱を考慮することが出来る。この手法により散乱光分布が精度が良く計算できることが明らかになり、そしてそれをCG化することができれば、散乱光が灯火の見え方にどの様に影響するかを容易にそして精度良く調べられるものと期待される。本論文では、このモンテカルロシミュレーションにより灯火散乱光分布を算出し、実測値との比較検討等を行った。その結果、以下のこ

とが明らかになった。

- (1) 灯火散乱光に対し、本論文でのシミュレーション計算値と実測値はよく整合し得る。
- (2) 光源ハローの計算を行う場合、光学深さが大きくなったり、ハローの観測方向が光源から離れたり、光軸方向が測定位置から離れたりする程、精度を良く保つためには最大散乱次数も高くしなければならない。
- (3) 光学深さ、観測位置から見た光軸のずれ、そして配光といった光学条件の中で、散乱光の計算誤差や必要となる最大散乱次数に最も影響を及ぼすのは、光学深さである。
- (4) 空港灯火についてCG画像を求める場合、光学深さを10程度まで考慮すると、計算誤差を5%以内とするならば最大散乱次数は16次程度、1%以内とするならば60次程度必要である。
- (5) 光源ハローの輝度は、光学深さ1~1.3程度で最大となる。そして、光源の配光の拡散性が強くなるほど、そのハローの輝度分布も緩やかになる。また、平均粒子半径が4 μ mの場合には、灯色は光源ハローの特性にほとんど影響しない。

今後、今回の手法によるCG画像を用いた視認性実験を行うなどして、大気中の微粒子による散乱光が灯火の見え方にどのような影響を及ぼすのか調べていくものとする。

参考文献

- (1) 航空振興財団：滑走路灯火の試験研究報告書（その1 縦列灯火の研究）（1976）
- (2) 松本陽ほか：霧中における後部灯火の視認性について、交通安全公害研究所報告（1975）pp.13-31
- (3) 大浦浩文：霧による透過光のぼけ、低温科学（1946）pp.123-129
- (4) 照明学会、航空灯火の適正光度調査研究委員会：航空灯火の適正光度に関する調査研究報告書（1983）
- (5) 青木義郎ほか：大気中の微粒子を考慮したモンテカルロ法による散乱光の空間分布解析、照明学会誌77-2（1993）pp.28-35
- (6) Aoki, Y. et al : Analysis of Space Distribution of Scattered Light by Monte Carlo Method in Consideration of Atmospheric Particles, J. Light & Vis. Env. 18-2（1994）pp.30-39
- (7) 久保田広ほか：光学技術ハンドブック増補版（1975）pp.1113-1116
- (8) 照明学会：照明用語辞典、オーム社（1990）p.47
- (9) 青島正和ほか：景観シミュレーションに用いる消散係数の推定法に関する一考察、生産研究45-11（1993）pp.29-35

- (10) 牧野光則ほか：大気中の微粒子を考慮したレイ・トレーシングによるビーム光の表現、電子情報通信学会論文誌D-2（1987）pp.53-56
- (11) 荒木浩：Partical System とはなにか、Pixel No.114（1992）pp.56-59
- (12) 青木義郎ほか：大気中の微粒子を考慮した昼光散乱の空間分布解析、照明学会誌79-8（1995）pp.408-415
- (13) 青木義郎ほか：大気中の微粒子による散乱光を考慮した灯火システムのコンピュータグラフィックス（その2）、—CG画像を用いた灯火の視認性評価—、照明学会誌80-2（1996）pp.29-36

（受付日1994年8月1日／採録日1995年10月2日）

あおき よしろう
青木 義郎（正会員）

運輸省交通安全公害研究所交通安全部

昭和39年12月13日生まれ、昭和62年3月横浜国立大学工学部電気工学科卒業、昭和63年4月運輸省交通安全公害研究所入所、現在に至る、主として、大気中で光散乱に関する研究に従事。日本シミュレーション学会、日本工学会会員。

たにぐち てつお
谷口 哲夫（正会員）

運輸省交通安全公害研究所交通安全部

昭和24年9月生まれ、昭和51年3月富山大学大学院工学研究科機械工学修士課程修了、同年4月運輸省交通安全公害研究所に入所、平成2年4月同研究所航空研究室長、平成7年同研究所走行性能研究室長、日本機械学会会員。

いりくろ たかし
入倉 隆（正会員）

運輸省交通安全公害研究所交通安全部

昭和31年5月12日生まれ、昭和54年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業、昭和57年4月運輸省交通安全公害研究所入所、現在同研究所主任研究官、航空照明の研究に従事。平成6年照明学会研究奨励賞受賞、日本光学会会員。