

# 大気中でのレーザービームの可視化

青木 義郎・豊福 芳典・入倉 隆

交通安全公害研究所交通安全部 〒181 三鷹市新川 6-38-1

## Visualization of Laser Beam in the Atmosphere

Yoshiro AOKI, Yoshinori TOYOFUKU and Takashi IRIKURA

Traffic Safety Division, Traffic Safety and Nuisance Research Institute, 6-38-1, Shinkawa, Mitaka 181

The utilization of the laser beam is expected for the visualization of the runway centerline in the airport that forbids the use of the inset lights. In this paper, the laser beam was analyzed by Monte Carlo simulation. The results show that the luminance of laser beam varies with not only the atmospheric transmissivity but also the atmospheric particle size. The beam luminance of the laser, installed on runway end, is higher in the good visibility than that of laser installed on runway threshold, because the forward scattering of light is used. The laser power, required to visualize runway centerline, is 2 W or more in the good visibility and during the night.

### 1. はじめに

パイロットは着陸時において、空港に設置された灯火等を見ることにより、航空機の位置、傾き、速度を知る手がかりとしている<sup>1)</sup>。そして、その空港に設置された灯火の中で着陸時に最も重要視するのが、滑走路中心線灯であるといわれている<sup>2)</sup>。しかしながら、防衛庁管理の空港（民間との共用空港）においては、小型戦闘機のランディングギアへの衝撃の懸念などから、この滑走路中心線灯が設置されていない場合が多い。

民間航空会社がパイロット等に行った調査<sup>3)</sup>によると、こうした滑走路中心線灯の未設置空港に対して、92%の人が着陸の困難を感じ、86%の人が夜間離着陸時に横風速度や滑走路視距離に対し何らか制限を設ける必要があるとしている。こうしたことから、滑走路中心線灯の未設置空港に対し、この滑走路中心線灯と同等の視覚援助システムの導入が望まれており、この方法のひとつとして考えられているのが、レーザービームを滑走路中心線の視覚化<sup>3)</sup>に応用する方法である。

本論文では数値シミュレーションにより、大気混濁度や粒径分布等がレーザービームの散乱強度に及ぼす影響

の解析を行った。さらに、このレーザービームによる滑走路中心線視覚化システムを空港に設置する場合に必要なレーザー出力の解析等を行った。それらの結果について報告する。

### 2. レーザー光を利用した滑走路中心線可視化システム

空港では一般的に、航空機の走路などに灯火を埋設あるいは地上設置し、それを点灯することにより空港の位置情報がパイロットに提供される。滑走路中心線灯はこれら埋込型灯火の一種であり、航空機の離着陸時において滑走路と航空機との位置関係を知るために重視される灯火である。これに対し、このレーザー光を利用したシステムは、大気中での光散乱により可視化されるレーザー光線を利用し滑走路に灯火を埋設することなく中心線といった位置情報を提供するものである。その構成図をFig. 1に示す。

### 3. レーザービーム解析の数値シミュレーション手法

ミー理論に基づくモンテカルロシミュレーション (Fig. 2) により、視程や観測位置により見かけのレーザー光の散乱輝度等がどのように変化するのかを解析す

る。そして、そのレーザー光の結果に、昼光ならびに灯光による光散乱、路面反射、直達光の結果を重ね合わせることにより、空港を見たときのコンピューターグラフィック（以下CG）化（Fig. 3）も行う。

なお、この散乱光を考慮したCG化手法は、霧の擬似的なCG化手法と異なり、高次の散乱を考慮し多数の模擬光子数を設定することにより、粒径により異なる微粒子の散乱特性や多重散乱の振舞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。

## 4. 実験方法

### 4.1 レーザー光散乱特性解析実験

#### 4.1.1 霧箱による実験

本論文では、Fig. 2 の数値シミュレーション手法による計算値が実測値と整合するかを調べるために、霧箱を用いたレーザー光散乱特性実験を行う。その実験状況を Fig. 4 に示す。暗箱内において、平均半径約  $4 \mu\text{m}$  程度の霧を発生させる。そして、霧の濃度が比較的均一な状態において、透過率、およびレーザー（He-Ne レーザー：光束  $0.19 \text{ lm}$ 、波長  $0.633 \mu\text{m}$ ）ビームの輝度測定を行う。

なお、使用した輝度計視野角は  $2^\circ$  である。その視野の中心にレーザービームが入るように輝度計の方向を設定する。輝度計とレーザー光源との距離は  $3 \text{ m}$  とし、光軸から輝度計は  $5^\circ$  ずらした位置にセットする。そして、光軸と輝度計の視線とのなす角は  $6.5^\circ$  とする。

#### 4.1.2 数値シミュレーションによる実験

Fig. 2 に示す手法により、レーザー光散乱強度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を行う。なお、計算は実測実験と条件を同じにして行うものとする。全模擬光子数は  $10^8 \sim 3 \times 10^8$ 、屈折率は水の屈折率とした。

### 4.2 空港設置時のレーザー光散乱強度の解析実験

Fig. 5 に示す灯火のうち白丸で示される滑走路中心線灯や設置帶灯を設置せずに、レーザー光源を滑走路末端（runway threshold：着陸進入時における最近の滑走路地点）あるいは滑走路終端（runway end：着陸進入時における最遠の滑走路地点）付近に設置した場合、その散乱強度が視程や観測位置によってどのように変化するかを解析する。なお、レーザー光源が滑走路末端に設置される場合にはその光軸は滑走路終端の方に向か、滑走路終端に設置される場合には光軸は末端の方に向かるものとする。

この計算で設定されたパラメーターを Table 1 に

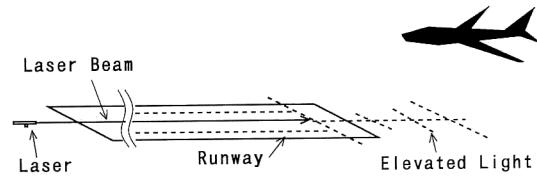


Fig. 1. Visual system of runway centerline by use of laser beam.

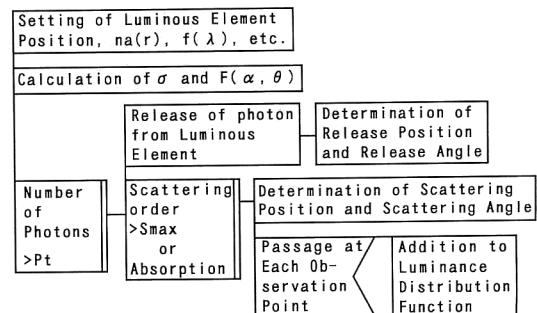


Fig. 2. Basic flow chart to analyze the spatial distribution of scattered light.

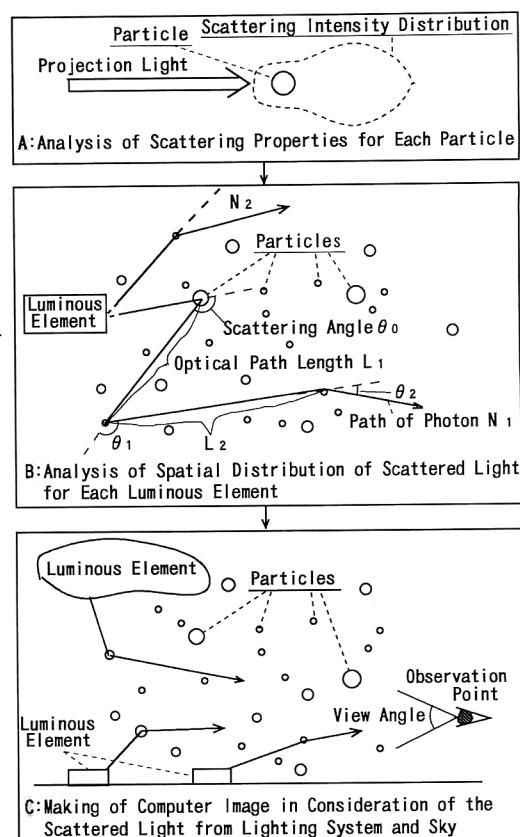


Fig. 3. Procedure for making computer image in consideration of scattered light.

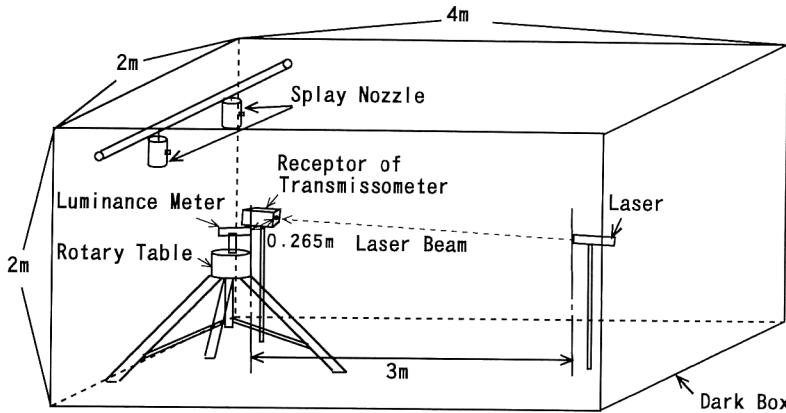


Fig. 4. Experimental situation in cloud chamber.

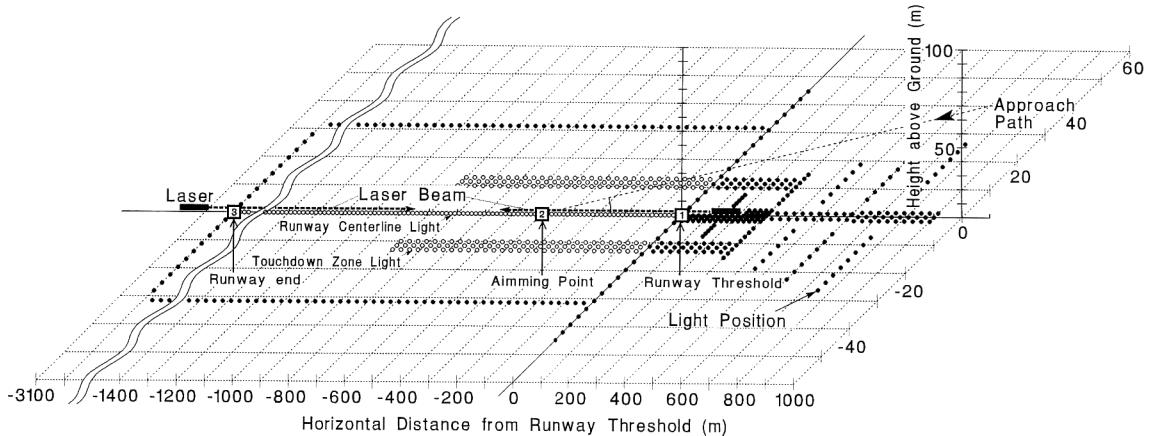


Fig. 5. Laser installed on airport.

Table 1. Parameters of calculation.

Mean particle radius	0.3, 3 $\mu\text{m}$
Total number of mock photon	$10^8 \sim 5 \times 10^8$
Maximum scattering order	$\geq 16$
Refractive index	$1.33 + 0.00 j$
Visibility	100-100,000 m
Laser position	100(m) from runway threshold and/or -100(m) from runway end
Laser wavelength	0.7 $\mu\text{m}$

$$n_a(r) \sim r^{-4} \quad (r_1 \leq r \leq r_2; r_1 = r_2/100) \quad (1)$$

(2) 平均粒子半径が  $1 \sim 100 \mu\text{m}$  のとき：Deirmendjian 分布関数<sup>4,6)</sup>（積雲の粒径分布）

$$n_a(r) \sim ((r/q)e^{1-r/q})^b \quad (0 \leq r \leq \infty; b=6.0) \quad (2)$$

## 5. 実験結果

### 5.1 レーザー光散乱特性解析実験

霧箱におけるレーザービーム散乱輝度の実測値と計算値とを Fig. 6 に示す。

実測値と計算値 ( $S_{\max}=16$ ) は、光学深さ (optical depth : 減衰係数  $\times$  観測距離) が  $0 \sim 6$  (視程時の 2 倍の大気混濁度) の範囲においてよく整合することを示している。このように最大散乱次数を 16 次と十分大きくすれば、灯光<sup>7)</sup>や昼光<sup>8)</sup>と同様に、幅広い光学深さ条件に對して、レーザー光の散乱輝度は今回の数値シミュレーション手法により正確に計算できることが明らかになった。

示す。

なお、過去の調査結果<sup>4-6)</sup>等に基づき各平均粒子半径  $r$  における粒径分布の関数  $n_a(r)$  を次のように仮定する。

(1) 平均粒子半径が  $1 \mu\text{m}$  以下のとき：ヤング分布関数<sup>4,5)</sup>（大陸性もやの粒径分布）

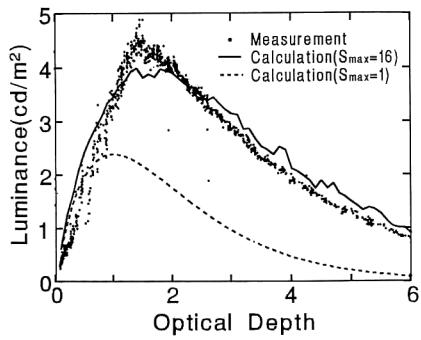


Fig. 6. Scattering luminance of laser beam in cloud chamber.

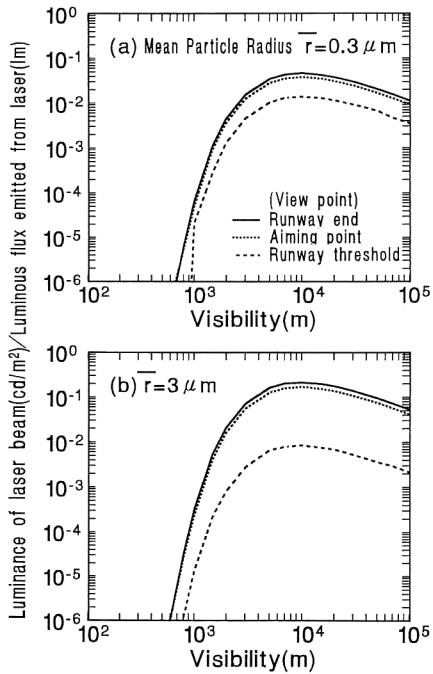


Fig. 7. Scattering luminance of laser beam vs. visibility (where laser position is runway end).

## 5.2 レーザービームによる滑走路中心線灯の可視化

### 5.2.1 レーザービーム強度と視程との関係

レーザービームの散乱輝度と視程 (visibility : 計算値は  $V_s = 2.996 / \text{減衰係数} (\text{m})$  を用いる) との関係を Fig. 7～Fig. 9 に示す。なお図中の輝度値は、レーザーから発せられる光束 1lmあたりの各観測位置からの見かけ上の輝度であり、ビーム幅 1 min (ビーム中心から  $-0.5 \sim 0.5 \text{ min}$ ) の平均輝度を計算したものである。また、図にはレーザービームのうち、滑走路終端、エイミングポイント (aiming point)、滑走路末端での輝度

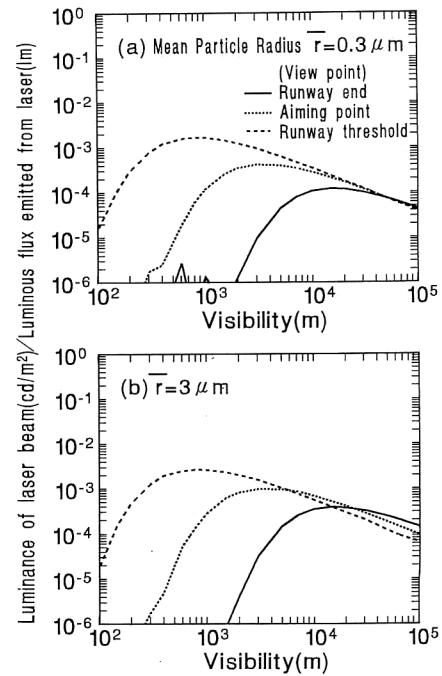


Fig. 8. Scattering luminance of laser beam vs. visibility (where laser position is runway threshold).

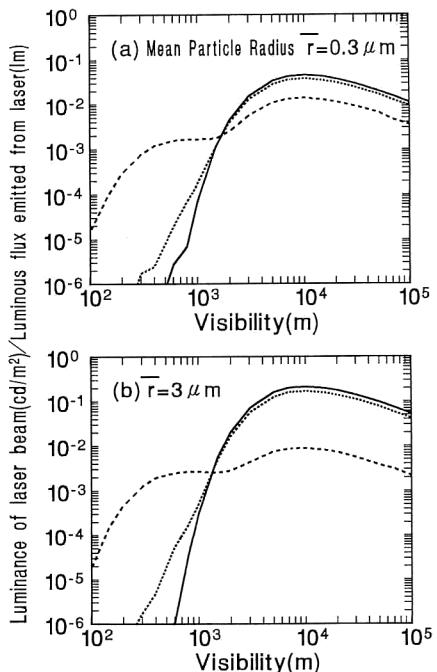


Fig. 9. Scattering luminance of laser beam vs. visibility (where laser positions are runway end and runway threshold).

値を示している。観測地点はいずれも着陸進入経路における滑走路末端から水平距離 200 m 地点とする。

レーザーが滑走路終端位置に設置される場合 (Fig. 7) には、レーザービームは、視程 10 km 程度のときに輝度がピークとなり、それ以下の視程では輝度は急激に低下している。すなわち、この場合には光源と観測位置との距離が 3 km 以上と長くなるため、視程 1 km 以下の低視程時よりも、視程 10 km 以上の良視程時のほうが見かけ上強いレーザービーム輝度が得られる。また、この散乱強度が最大となる観測者とレーザー光源との間の光学深さは 1 度に相当する。

レーザーが滑走路末端位置に設置される場合 (Fig. 8) には、視点および観測位置によって、散乱輝度がピークとなる視程の値が異なることが示されている。視点が滑走路終端よりもエイミングポイント、エイミングポイントよりも滑走路末端位置というように、観測距離が短くなるほど散乱輝度がピークとなる視程が低くなる。

また、Fig. 7 と Fig. 8 との結果を比較すると、Fig. 7 の場合はレーザー光の前方散乱光、Fig. 8 の場合はレーザー光の後方散乱光を用いるという点から、散乱強度は Fig. 7 のほうが全体的に高くなっている。しかしながら、視程が低く視点が観測位置に近いときには、光源と観測位置との距離が短くビームの光減衰が抑制されるため、Fig. 8 のほうが散乱輝度が高くなる場合もある。

また Fig. 7 および Fig. 8 には、大気中微粒子の平均粒径が  $0.3 \mu\text{m}$  と  $3 \mu\text{m}$  の結果がそれぞれ示されている。これらの結果を比較すると、レーザービームの輝度は大気の混濁度だけでなく、微粒子の粒径分布によっても変化することが明らかである。

滑走路末端および滑走路終端の両方に設置した場合の結果を Fig. 9 に示す。この場合には、このシステムが運用可能な視程条件が広がることが推定される。

### 5.2.2 視覚の空間加重を考慮したビーム強度

Fig. 9 の結果に対して、視覚の空間加重を考慮し実効輝度に換算した結果を Fig. 10 に示す。なお、空間加重特性には種々のものが提案されているが、ここでは均一輝度の円形光源により求めた閾上レベルの結果<sup>9)</sup>を用いる。また、背景輝度は  $10 \text{ cd/m}^2$  とする。

Fig. 9 と Fig. 10 の結果を比較すると、ビームの実効輝度は空間加重特性により 10 倍程度高くなることが示されている。また、空間加重効果は低視程時のほうが大きいことが示されている。これは視程が低いときほど、光源から観測位置に到達する光のうち多重散乱成分が上

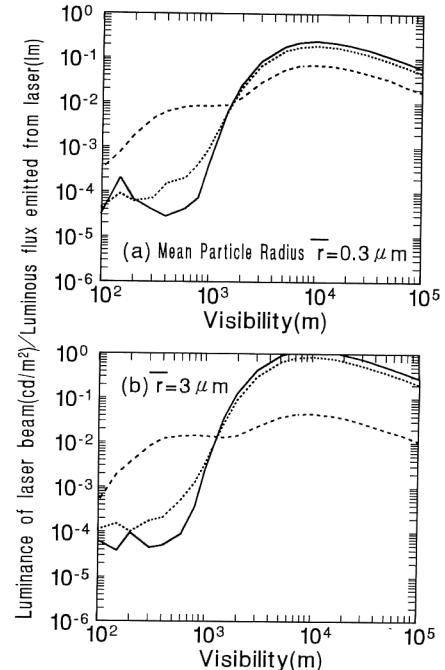


Fig. 10. Luminance of laser beam in consideration of spatial summation (where laser position are runway end and runway threshold).

昇し、見かけ上、レーザービームの広がりが大きくなることが原因である。したがって、視程の低下に伴い、レーザービーム中心付近の輝度は急激に低下 (Fig. 9 参照) するが、その周辺の散乱輝度を付加すればその低下率は若干縮小されることになる。また、粒径が大きい場合のほうが低視程時の空間加重効果は大きくなることが示されている。ただし、光散乱によりビームが広がり輪郭がぼやけた場合には、空間加重効果はこの場合よりも抑制される<sup>10)</sup>ことが予想される。この詳しい解析は今後の課題とする。

### 5.2.3 レーザービームの可視化に必要なレーザー出力

レーザービーム各地点の実効輝度 (Fig. 10) を点光源 (視角 1 分) の実効光度に換算し、レーザービームの識別限界時のレーザー出力を算出したものを Fig. 11 に示す。なお、点光源の識別が限界となる角膜照度値は、ICAO の  $8 \times 10^{-7} \text{ lx}$  (夜) を用いる。そして、そのときの視覚の空間加重特性を考慮した結果 (Fig. 11) から必要なレーザー出力を計算する。なお、光量 (lm)/レーザー出力 (W) は 500 とした。

Fig. 11 に示されるように、滑走路中心線の可視化システム (レーザー光源を滑走路の両側に設置) を運用するには、夜間かつ良視程時 (視程 10 km 以上: ここで

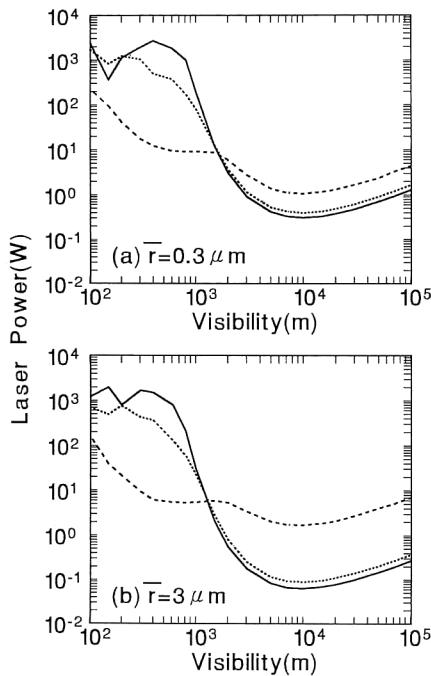


Fig. 11. Laser power required to visualize runway centerline (where laser positions are runway end and runway threshold).

は視程 10~100 km に限定する)において、少なくとも両側それぞれ 2 W 程度のレーザー出力が必要とされる。そして視程 1 km まで運用する場合には 100 W 程度、視程 1 km 以下で運用する場合にはさらにそれ以上のレーザー出力が必要とされることが明らかになった(以上は Fig. 11 のうちエイミングポイントの結果から求めたもの)。

なお、可視領域で 100 W 以上の高出力が得られるレーザは見当らないため、低視程運用が要求される場合には赤外レーザーと赤外カメラを組み合わせたシステム、あるいは複数のレーザー光源の利用等といった特殊なシステム形態が求められると思われる。これについては今後の検討課題とする。

また、粒径が大きいときのほうが必要なレーザー出力は若干低下することが示されている。

#### 5.2.4 滑走路中心線可視化システムの CG 画像

レーザー光を空港に適用し滑走路中心線灯可視化システムとしたときのコンピューターグラフィックス(CG) 画像を Fig. 12 に示す。なお、レーザーの設置は滑走路の両側(終端および末端)に行うものとする。平均粒子半径は 3  $\mu\text{m}$  とする。

Fig. 12 に示されるように、視程  $V_5=3,000 \text{ m}$  の場合

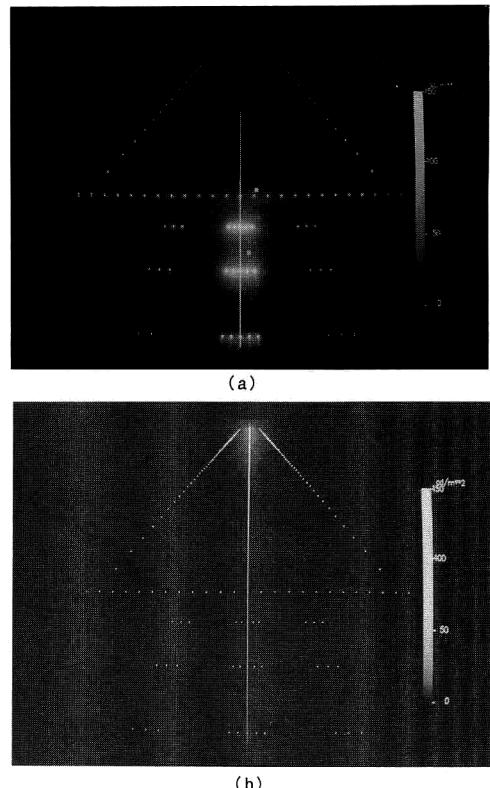


Fig. 12. Computer image of visual system of runway centerline by laser beam. (a)  $V_5=800 \text{ m}$ , Laser power = 200 W; (b)  $V_5=3,000 \text{ m}$ , Laser power = 50 W.

に比べて、視程 800 m のように低視程の場合には、レーザービームの可視化のためにより高いレーザー出力が必要となることが示されている。また、視程 800 m のように低視程の場合には、滑走路終端に設置されたレーザーによるビーム強度よりも滑走路末端に設置されたレーザーによるビーム強度のほうが高くなり、したがってこれらを重ね合わせたレーザービームは観測位置に近くなるほど輝度が高くなることが示されている。しかし、視程が高い場合には滑走路終端位置でのビーム輝度が最大となる傾向が示されている。

## 6. まとめ

本論文では、滑走路中心線灯の未設置空港において導入が期待されているレーザービームによる滑走路中心線灯の可視化システムに関し数値解析を行った。解析はモンテカルロ法により行い、レーザービームの散乱強度や可視化に必要なレーザー出力等を調べた。さらに、このレーザービームによる可視化システムを空港に設置した場合に、どのように見えるかを知るため CG 化を行っ

た。その結果、以下のことことが明らかになった。

- (1) レーザービームの輝度は大気中の混濁度だけではなく、微粒子の粒径分布によっても変化する。
- (2) レーザー光源を滑走路終端位置に設置したほうが末端位置に設置する場合よりも前方散乱を用いることから、レーザービームの輝度は全体的に高くなる。しかし、低視程時には、光源と観測位置との距離が短くビームの光減衰が抑制される末端位置設置の場合のほうがビーム輝度は高くなる。
- (3) レーザービームの視認性は視覚の空間加重効果により上昇する。そして、その空間加重効果は低視程時のほうが大きい。
- (4) 滑走路中心線の可視化には、夜間かつ良視程時において、少なくとも滑走路両側それぞれ2W程度のレーザー出力が必要とされる。そして視程1kmまで運用する場合には100W程度、視程1km以下で運用する場合にはさらにそれ以上のレーザー出力が必要とされる。

今後もレーザービームに関する解析を種々の条件に対して行っていく。

## 文 献

- 1) 航空振興財団：航空照明（航空振興財団, 1986）pp. 136-141.
- 2) 航空灯火のパターン評価調査研究委員会：航空灯火のパターン評価に関する調査報告書（照明学会, 1983）.
- 3) 日本エアシステム冬期空港分科会資料（1993）.
- 4) D. Deirmendjian: "Scattering and polarization properties water clouds hazes in the visible and infrared," Appl. Opt., 3 (1964) 187-196.
- 5) H. Harrison, J. Herbert and P. Waggoner: "Mie-theory computations of lidar and nephelometric scattering parameters for power law aerosols," Appl. Opt., 11 (1972) 2880-2885.
- 6) E. Bauer: "The scattering of infrared radiation from clouds," Appl. Opt., 3 (1964) 197-202.
- 7) 青木義郎, 谷口哲夫, 入倉 隆：“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）”, 照明学会誌, 80 (1996) 81-88.
- 8) 青木義郎, 谷口哲夫, 入倉 隆：“モンテカルロ法による昼光散乱のコンピュータグラフィックス”, 電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会講演論文集 (1995) p. 247.
- 9) 入倉 隆, 谷口哲夫, 青木義郎：“いき上レベルにおける視覚の空間的寄せ集め特性が灯火の明るさ知覚に及ぼす影響”, 照明学会誌, 77 (1993) 36-40.
- 10) 青木義郎, 谷口哲夫, 入倉 隆：“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）”, 照明学会誌, 80 (1996) 89-96.