

研究

低層大気構造観測用ライダーにおける
幾何光学的効率と送受信光学系の設計

杉本 伸夫・松井 一郎・笹野 泰弘

国立公害研究所 〒305 つくば市小野川 16-2

(1990年5月7日受付, 1990年7月19日受理)

Design of Lidar Transmitter-Receiver Optics for
Lower Atmospheric Observations: Geometrical
Form Factor in Lidar Equation

Nobuo SUGIMOTO, Ichiro MATSUI and Yasuhiro SASANO

The National Institute for Environmental Studies,
16-2, Onogawa, Tsukuba 305

(Received May 7, 1990; Accepted July 19, 1990)

Geometrical form factors in the lidar equation were calculated for lidar systems for measuring the lower atmospheric structures. Dependence of the geometrical form factor on optical configuration and on misalignment of the optical system were investigated. The optimal design of lidar transmitter-receiver optics for measuring aerosol distributions from near ranges was discussed. The experimentally-determined geometrical form factor for a lidar system designed based on the present consideration agreed with the calculated geometrical form factor for the system.

1. はじめに

ライダーは大気中のエアロゾル分布の測定に有効な手法で、エアロゾルをトレーサーとして大気構造を可視化することができる¹⁻⁶⁾。なかでも、エアロゾルの鉛直分布の測定は、大気混合層高度の連続的な観測を可能とし、大気汚染現象の監視や予報に有用な情報を与える⁵⁻⁸⁾。大気混合層高度の測定では鉛直方向に固定してライダー観測を行う方法が簡便であるが、ライダーは近距離では送信ビームと受信視野の重なりが十分でないために信号が小さく、したがって、大気底層からの観測はむずかしい。視野の重なり関数(幾何光学的効率関数)はライダーの送受信光学系の設計に依存するので、地表近くからのエアロゾル分布の測定が必要な大気境界層の測定を目的とするライダーでは、送受信光学系に特別な配慮が必要である。本研究では、幾何光学的効率関数の計算プログラムを開発し、送受信光学系の配置(送受信ビーム二軸型、同軸型)と幾何光学的効率関数の形状の関

係、送信ビームのミスアラインメントに対する影響の大きさ、幾何光学関数を利用したライダー信号のダイナミックレンジの改善について考察した。このような考察はこれまでも報告されているが⁹⁻¹¹⁾、本研究ではとくに大気低層からのエアロゾル鉛直分布の測定を目的とするライダーについて具体的な考察を行った。

本論文、第2節では、幾何光学的効率関数の計算方法について述べる。この計算は幾何光学により行い、回折等の効果は考慮していないが、ライダーの設計において有用である。第3節では計算例を示して考察を行う。本論文第4節では、大気低層からの測定を必要とする大気混合層モニター用ライダーの送受信光学系の設計に関する考察と、これに基づいて製作されたライダーによる実験との比較について述べる。

2. 幾何光学的効率関数の計算

2.1 幾何学的モデル

ライダー受信信号は次式で表される¹⁾。

$$P_t(R) = P_i L \beta(R) A Y(R) R^{-2} T^2(R) \quad (1)$$

ここに、 $T(R)$ は距離 R までの大気透過率、その他の記号は Collis¹⁾ に従った。 $Y(R)$ が送信ビームと受信望遠鏡視野の重なりを表す関数、すなわち幾何光学的効率関数である。

幾何光学的効率関数 $Y(R)$ を一般的に扱うため Fig. 1 に示すような幾何学的モデルを考える。距離 R における大気による送信レーザーの散乱光を Fig. 1 の O-Plane 上の点光源の集合として取り扱う。送信レーザービームの位置、ビームパターンは各点光源の強度の分布で与える。いま、1点のみを考え、この点が受信望遠鏡の視野絞りの位置、すなわち A-Plane 上に作る光束を計算する。Fig. 1 では望遠鏡を P-Plane における等価なレンズに置き換えて示してあるが、望遠鏡の副鏡の影は幾何光学的効率関数に寄与するので S-Plane における障害物として考慮されている。副鏡の影のほかに、光源が有限の距離にあることによる像のぼやけの効果が幾何光学的効率関数を決定する要素である。Fig. 1 中に示した F-Plane は望遠鏡の焦点面を表す。 f_R は距離 R における点光源の結像する面の主鏡からの距離で次式で表される。

$$f_R = fR / (R - f) \quad (2)$$

また、 R_s は主鏡から副鏡までの距離、 D_s は副鏡の直径、 D は主鏡の直径を表す。A-Plane の位置は主鏡の後ろの任意の位置 (主鏡から距離 f_A) に置くものとする。

以下では点光源から主鏡に入射する光束の位置と直

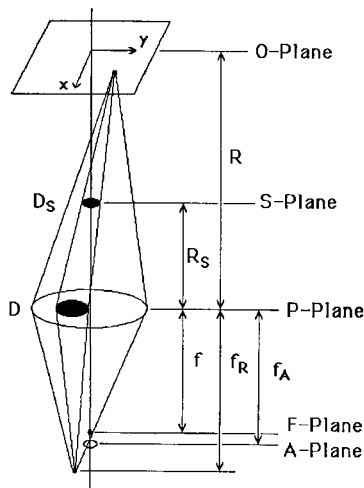


Fig. 1 Geometrical model used for the calculation.

径、および副鏡の位置と直径を O-Plane, S-Plane, P-Plane, A-Plane において順次計算し、最終的に視野絞り内に入る光の割合を求める。さらに、O-Plane においた点光源の格子を考え強度分布を与え、各点の寄与の和をとることにより送信ビームパターンを考慮する。以上の計算を距離ごとに行い重なり関数を求める。

この方法により、送受信光学系が二軸型 (biaxial) でも同軸型 (coaxial) でも取り扱うことができる。また、送信光学系を副鏡とは別に望遠鏡の口径内に置く場合についても障害物を追加することにより対応できる。また、送信ビームと受信望遠鏡の光軸の傾き、送信ビームの広がりも任意に与えることが可能である。

2.2 各面における光束と影の計算

S-Plane における光束と影を Fig. 2 (a) に示す。 (x_s, y_s) は光束の中心の座標、 d_s はその直径を表すものとする、これらは O-Plane 上の点光源の位置 (x, y) を用いて次式で書ける。

$$\begin{aligned} x_s &= R_s x / R, \\ y_s &= R_s y / R, \end{aligned} \quad (3)$$

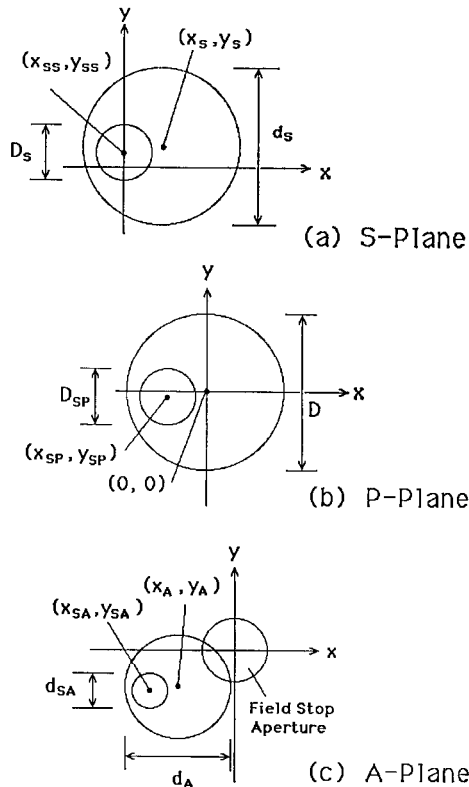


Fig. 2 Positions and diameters of the received light beam and the shadow of the obstacle at the S-, P-, and A-planes.

$$d_s = (R - R_s)D/R$$

ここで、 D は主鏡の直径で、主鏡の中心は P-plane の原点にあるものとした。

一方、ここで副鏡の中心の位置を (x_{ss}, y_{ss}) 、その直径を D_s として与える。

P-plane における光束と副鏡の影を Fig. 2 (b) に示す。ここに (x_{sp}, y_{sp}) は影の中心の位置、 D_{sp} は影の直径を示す。これらは次式で書ける。

$$\begin{aligned} x_{sp} &= R(x_{ss} - x_s)/(R - R_s), \\ y_{sp} &= R(y_{ss} - y_s)/(R - R_s), \\ D_{sp} &= RD_s/(R - R_s) \end{aligned} \quad (4)$$

視野絞りの面、A-plane における光束と影を Fig. 2 (c) に示す。原点を中心とする円は視野絞りを表す。光束の中心は (x_A, y_A) 、その直径は d_A 、影の中心は (x_{sA}, y_{sA}) 、その直径は d_{sA} である。これらの値は f_A が f_R より大きい場合も小さい場合も次式で表される。

$$\begin{aligned} x_A &= -f_A x/R, \\ y_A &= -f_A y/R, \\ d_A &= |(f_R - f_A)/f_R| D, \\ x_{sA} &= x_A + x_{sp}(f_R - f_A)/f_R, \\ y_{sA} &= y_A + y_{sp}(f_R - f_A)/f_R, \\ d_{sA} &= |(f_R - f_A)/f_R| D_{sp}. \end{aligned} \quad (5)$$

これを用いて、幾何光学的効率関数 $Y(R)$ は次の式で計算される。

$$Y(R) = \frac{(\text{光束の、影でなく絞りに入る面積})}{(\text{影の部分を除く光束の全面積})} \quad (6)$$

ここで、光束内の光の強度は絞り面内で一様であると仮定しているが、この仮定は望遠鏡の有効焦点距離が口径に比べて長い場合には良い近似である。

副鏡の影の全体が光束の内側にある場合には

$$Y(R) = \frac{(\text{絞り内の光束の面積}) - (\text{絞り内の影の面積})}{(\text{影の部分を除く光束の全面積})} \quad (7)$$

と表され、 $Y(R)$ は解析的に計算できる。

送信レーザー光のビームプロファイルを計算に取り込むために 0-plane 上に格子を考え、各格子点上にある点光源に強度分布を与えた。各点光源に対する $Y(R)$ に、強度に応じた重みをつけて平均することによりビームプロファイルを考慮した $Y(R)$ を計算した。

3. 計算結果と考察

最初に A-plane における光束と副鏡の影のパターンを距離を変えて表示した例を Fig. 3 に示す。Case A-D は二軸型の送受信光学系の場合、Case E は同軸型の場合である。Case A-E のシステムパラメータは Table 1 に掲げた。図中で座標原点を中心とする円は視野絞りを表す。Case A では視野絞りは無限遠に対する焦点面に置かれているので、副鏡の影を中心にもつドーナツ状の光束が、遠距離になるほど小さく座標の中心に収束してゆく様子がみられる。Case B-D では視野絞りが距離 400 m に対する実像の面の位置に置かれている。Case C, D ではさらに、送信ビームが望遠鏡の光軸方向に、それぞれ 400 m と 300 m で中心にくるように傾けられている。Case E は同軸型の光学系で光束は常に原点を中心とする円である。視野絞りは無限遠の焦点面に置かれている。

Fig. 3 では送信ビームの広がりには考慮していないが、このような表示はライダーの設計を行ううえで大変有用である。二軸型、同軸型いずれの場合も近距離では受信光はまったく視野絞りに入らない、すなわち、幾何光学的効率がゼロとなることがわかる。送信光のビーム広が

Table 1 System parameters for the Case A-E in Fig. 3.

Telescope diameter	0.3 m				
Secondary mirror diameter	0.1 m				
Secondary mirror position	(0, 0), $R_s = 1.2$ m (see Fig. 1)				
Effective focal length	1.5 m				
Field stop aperture diameter	1 mm				
	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
Aperture position f_A (m)	1.5	1.5056*	1.5056*	1.5056*	1.5
Laser beam position at a range R	$x=0$	$x=0$	$x=0$	$x=0$	$x=0$
	$y=0.2$	$y=0.2$	$y=0.2$	$y=0.2$	$y=0$
	biaxial	biaxial	biaxial	biaxial	coaxial

* Image plane for $R = 400$ m.

りを考慮すると, Fig. 3 における像はビーム広がり角に相当する大きさでぼやけることになる.

ガウス型の送信レーザービームパターンを入れて幾何光学的効率関数 $Y(R)$ を計算した例を Fig. 4 に示す. 仮定したシステムパラメータは Case A-E については Table 1 と同じであるが, $R=0$ における送信ビーム径を 5 mm, 広がり角を 0.4 mrad とした. Case F, G はそれぞれ Case A, E でビーム広がり角をゼロとしたものである. ビーム広がり角を入れた場合, いずれの場合も $Y(R)$ はかなり遠距離まで 1 に達しない. また, 約 100 m 以下の近距離では $Y(R)$ はゼロとなる.

近距離のライダー観測では $Y(R)$ の補正を行うことは不可欠であるが, 逆にいえば $Y(R)$ がゼロでない限りは実験的に $Y(R)$ 関数の補正が可能である¹²⁾. しかしながら, この場合, 信号強度が小さいことによる不規則誤差だけではなく, たとえば光学系の熱的歪などによる送信ビームのミスアラインメントに起因する測定誤差の大きさを評価しておくことがシステム設計上非常に重要である. ミスアラインメントの影響を確かめるために, 送信ビームをビーム広がり角の半分 (0.2 mrad) だけずらせた場合の $Y(R)$ の変化を Fig. 5 に示した. Fig. 5 では $Y(R)$ の変化 (すなわち, ビームがずれたことによる

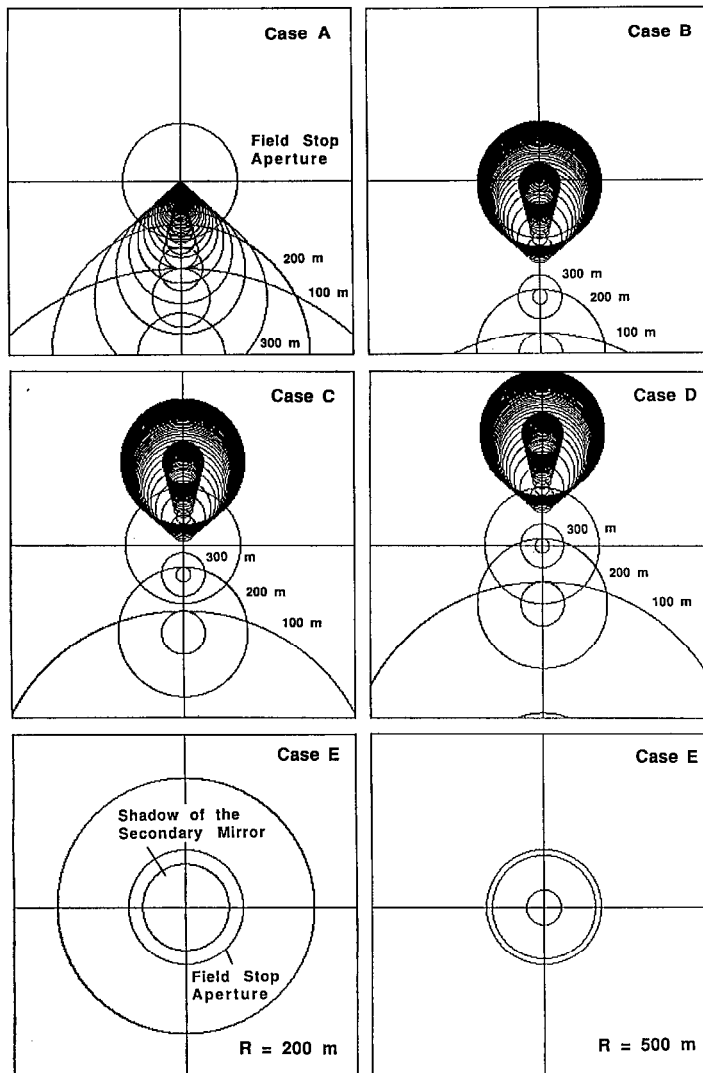


Fig. 3 Calculated images of the received light at the field stop aperture plane. System parameters for the Case A-E are listed in Table 1. Transmitting laser beam diameter and the divergence is assumed to be zero.

誤差)を割合, $(Y(R)' - Y(R))/Y(R)$, として表示した. この結果, 二軸型の光学系では, $Y(R)$ のビームのアライメントへの依存性はきわめて大きいことがわかる. この原因のひとつは, Fig. 4に見られるように二軸型の場合の $Y(R)$ 自体が近距離で小さいことによる. また, 二軸型では $Y(R)$ の変化がビームのずれの方向に依存する. これらのことから, $Y(R)$ の補正を行って近距離からの測定を行う場合は, 二軸型の光学系よりも同軸型の

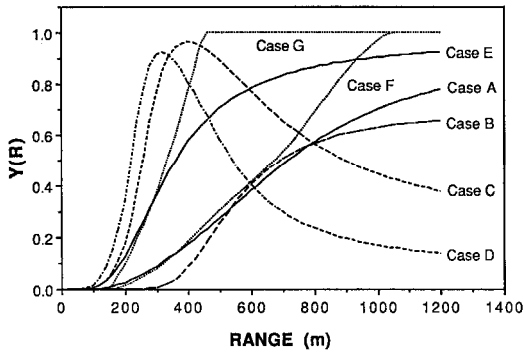


Fig. 4 Calculated geometrical form factor as a function of range. System parameters for Case A-E are listed in Table 1. The laser beam diameter is 5 mm. The beam divergence is 0.4 mrad. The parameter for Case F and G are the same as Case A and E, respectively, except that the beam diameter and the divergence are assumed to be zero.

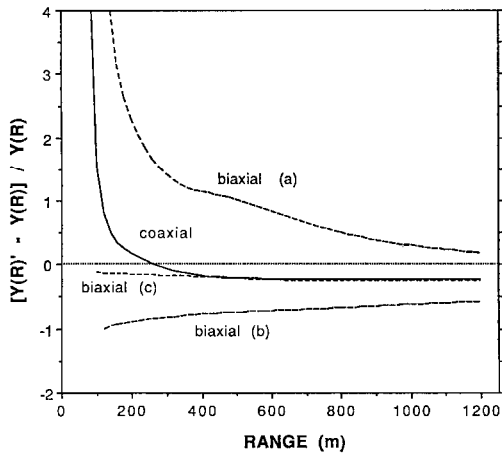


Fig. 5 Change in the geometrical form factor due to the 0.2-mrad misalignment in the transmitting beam direction for the coaxial system (Case E) and the biaxial system (Case A). For the biaxial system, three cases of the beam tilt, (a) toward the telescope center, (b) away from the telescope, (c) perpendicular to the direction toward the telescope center, are shown.

送受信光学系を用いるほうが良いことが結論される.

4. 大気混合層観測用ライダーの送受信光学系の設計

大気低層からの測定を行うためには, 近距離でゼロでない $Y(R)$ が得られる光学系が必要である. このため, たとえば二軸型光学系においては送信ビームと望遠鏡の距離をできる限り近づける, また, 同軸型光学系ではビーム径を大きくし副鏡の影の影響を小さくする, あるいは, 軸はずしの望遠鏡を用いる等の方法が考えられる. 著者らは望遠鏡の副鏡の影の影響を小さくするために Fig. 6 に示したように, 望遠鏡の口径の中から小さな直角プリズムを用いてレーザービームを送信する方法で実験を行った.

Fig. 7 にこの光学系について計算した幾何光学的効率関数を示した. また, 同じ望遠鏡を用いた場合の二軸型光学系および同軸型光学系と比較して示した. システムのパラメーターは Table 2 に示した. ここで採用し

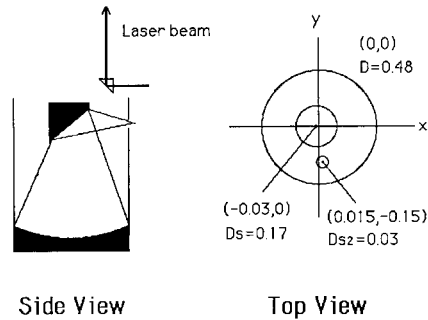


Fig. 6 A design of the lidar transmitter-receiver optics for near field observations.

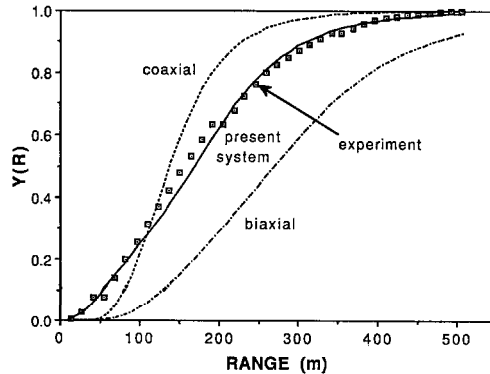


Fig. 7 Geometrical form factor as a function of range. System parameters are listed in Table 2. Experimentally-determined geometrical form factor is also shown for the present system shown in Fig. 6.

Table 2 System parameters for the calculation shown in Fig. 7-9.

Telescope diameter	0.48 m		
Secondary mirror diameter	0.17 m		
Secondary mirror position	(-0.03, 0), $R_s=1.12$ m		
Effective focal length	1.2 m		
Field stop aperture diameter	3.2 mm		
Transmitting beam diameter	7 mm		
Transmitting beam divergence	1 mrad		
	Present system	Coaxial system	Biaxial system
Aperture position f_A (m)	1.2	1.2	1.2
Transmitting beam position and diameter of obstacle	(0.015, -0.15) $D_{S2}=0.03$	(-0.03, 0) N. A.	(0.325, 0) N. A.

た光学系では近距離まで $Y(R)$ が伸びている。一方、大気がよく混合している状態でのライダー観測から実験的に求めた $Y(R)$ を計算結果と比較して Fig. 7 に示す¹²⁾。両者はよく一致している。さらに、このシステムについて送信ビームのミスアラインメント(ずれ角 ± 0.5 mrad) に対する $Y(R)$ の依存性の計算結果を Fig. 8 に示した。この図より、ここで採用した光学系は、特に約 75 m 以下の距離で、送信ビームのずれに対する依存性が小さく優れていることがわかる。

筆者らは Fig. 6 の光学系を用いて、高度 15 m から上空のエアロゾル高度分布を測定することができた。このシステムを用いて冬期の大気境界層の観測を実施しよい結果を得た^{7,8)}。

視野絞りの大きさと、幾何光学的効率関数 $Y(R)$ 、ミスアラインメントの影響についてまとめると次のようにいうことができる。いま、ミスアラインメントがビーム広がり角に対して一定の割合の角度でおけるとすると、視野絞りがビーム広がり角に比べて同程度または小さい場合、遠方においてもミスアラインメントの影響が残る。これに対して、視野絞りがビーム広がりより大きい場合、像の大きさ(焦点が合わないことによる)が、視野絞りと同じ大きさになる距離において、ミスアラインメントの影響が最も大きい。しかし、この影響は絞りが大きいほど小さく抑えられる。

一方、絞りが大きくなるに従って、 $Y(R)$ が 1 となる距離は近距離に移動するが、ライダー信号は距離の 2 乗に反比例するため信号のダイナミックレンジの観点からは $Y(R)$ があまり近距離から 1 に近づくことは好ましくない。視野絞りは、検出器の特性等を考慮して適当な大きさに設定する必要がある。副鏡など障害物の影響が小さいとき、すなわち、 $Y(R)$ が像のぼやけによって決ま

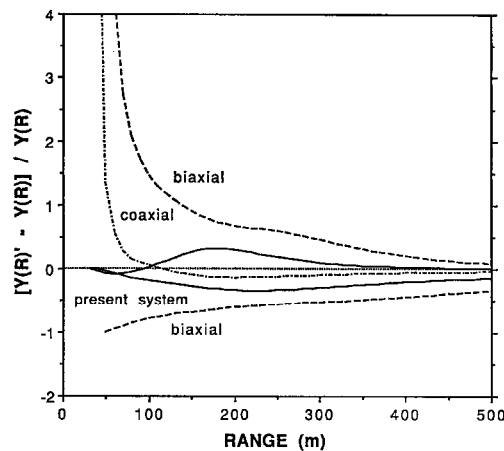


Fig. 8 Change in the geometrical form factor due to the 0.5-mrad misalignment in the transmitting beam direction for the present system, coaxial system, and biaxial systems. The system parameters are the same as those in Fig. 7. For the biaxial system, the effects of misalignment in the most sensitive directions are shown.

る場合は、 $Y(R)$ は近距離で距離の 2 乗に比例する。この場合、むしろ小さな視野絞りをを用いることにより信号のダイナミックレンジを改善する方法が有効である。

近距離からの測定を目的とするライダーにおいては、 $Y(R)$ の補正は不可欠であるので、その設計においては、ダイナミックレンジの改善の効果(視野絞りが小さい方が有利)と光学系のアラインメントのずれの影響(視野絞りが大きい方が有利)の双方を十分に検討する必要がある。このため、光学系の熱歪等によるアラインメントのずれ角を事前に評価して、この影響が十分小さく抑えられるように送信ビーム広がり角、視野絞りの大きさなどを設定することが重要である。

文 献

- 1) R. T. H. Collis and P. B. Russel: "Lidar measurement of particles and gases," *Laser Monitoring of the Atmosphere* (Topics in Applied Physics, vol. 14), ed. E. D. Hinkley (Springer-Verlag, New York, 1976).
- 2) T. Kobayashi: "Techniques for laser remote sensing of the environment," *Remote Sens. Rev.*, **3** (1987) 1-56.
- 3) Y. Sasano, H. Shimizu and N. Takeuchi: "Convective cell structures revealed by mie laser radar observations and image data processing," *Appl. Opt.*, **21** (1983) 3166-3169.
- 4) H. Nakane and Y. Sasano: "Structure of a sea-breeze front revealed by scanning lidar observation," *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **64** (1986) 787-792.
- 5) Y. Sasano, H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda: "Diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer observed by a computer-controlled laser radar," *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **58** (1980) 143-148.
- 6) Y. Sasano, A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda: "On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low-level radiosonde observations," *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60** (1982) 889-895.
- 7) 松井一郎, 笹野泰弘: "レーザーレーダーで観測される都市域の夜間低層大気構造と高濃度大気汚染," *環境科学会誌*, (1990) 投稿中.
- 8) 松井一郎: "ミー散乱レーザーレーダーによる都市域における低層大気構造の連続観測," *光学*, **19** (1990) 438-449.
- 9) T. Halldorsson and J. Langerholc: "Geometrical form factors for the lidar function," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 240-244.
- 10) J. Harms, W. Lahmann and C. Weitkamp: "Geometrical compression of lidar return signals," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 1131-1135.
- 11) R. M. Measures: *Laser Remote Sensing*, Chapter 7 (A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 1984).
- 12) Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda: "Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination," *Appl. Opt.*, **18** (1979) 3908-3910.