特集

大気汚染研究におけるレーザーレーダー利用の現状

笹野 泰弘*

(1989年2月2日 受理)

Present Status of the Laser Radar Application
to Air Pollution Studies

Yasuhiro SASANO*

(Received February 2, 1989)

The present paper describes the present status of laser radar (lidar) applications to air-pollution and related studies. Among various laser radar techniques so far developed, special attention is paid to the Mie laser radar and DIAL (Differential Absorption Lidar) because of their maturity as a tool for field investigation. Examples are given to show what kinds of information are derived from the measurements by these laser radars. They include atmospheric structures revealed by scanning laser radars and air pollution gas distributions observed by DIAL.

Key Words: Laser radar, Lidar, Air pollution, Aerosol, Remote sensing.

1. はじめに

レーザー発振の成功後間もない1963年, Fiocco and Smullin¹⁾によって, 超高層エアロゾルの初のレーザーレーダー観測がなされて以来, すでに4半世紀が過ぎた。この間のレーザーレーダー技術の進歩は著しいものがあつた。その一つは, 物質と光の相互作用のおよそ考えられるすべてがレーザーレーダー技術へ応用され, レーザー発振波長の多様化とあいまって, 各種の

物質分布, 気象要素分布の計測の可能性が示されてきたことにある²⁾ また, 信号処理としては, デジタル化, コンピュータ化の進展は, より高精度の測定を可能にした。一方, レーザー発振器の安定化, 高出力化, 信号処理システムの高信頼化は, 計測車, 航空機などへの搭載を可能にし, 広域の計測が可能となってきた。

元来, レーザーレーダーは物質と光の相互作用を利用して種々の物質の同定とその分布の計測が出来ること, 遠隔計測が可能で非破壊計測

* 環境庁国立公害研究所大気環境部 (〒305 つくば市小野川16-2)

* The National Institute for Environmental Studies (16-2, Tsukuba, Ibaraki, 305)

であることを特徴としている。これらのことから、ガス成分、エアロゾル等の空間分布を時間的に連続してリアルタイムで測定できるという点で、従来のポイントサンプリング型の計測器にはない利点が認められる。そのため、古くから、気象学や大気汚染研究への利用が図られ、多くの先駆的な研究がなされてきた。また、先に述べたような、最近のレーザーレーダー技術の著しい進歩は今後、大気的主要ガス成分、微量ガス成分、エアロゾル、雲などの計測を通して、局所的な大気汚染研究のみならず、地球規模の大気環境動態、気候変動等の研究に一層多くの寄与を成すものと考えられる。

本稿では、このように発展してきたレーザーレーダー技術の大気汚染研究への応用に焦点をおいて、その現状について紹介することをねらいとしている。したがって、現時点で実験段階のレベルから出て、実用的にフィールド観測において用いられているミー散乱レーザーレーダー、差分吸収レーザーレーダーの例をとり挙げる。これらのレーザーレーダーの原理、装置の構成等に関しては既に多くの解説が書かれている³⁾ので、ここでは詳しく述べないが、本稿の内容の理解に必要な範囲の下で説明を加える

(第2章)。大気汚染研究の具体的な応用例を第3章、第4章で紹介する。

2. レーザーレーダーの原理

具体的な紹介の前に、簡単にレーザーレーダーの原理について述べておきたい。ここでは、現時点ですでに実験室のレベルを出て実用的にフィールド観測に供されているものとして、ミー散乱レーザーレーダー、差分吸収方式レーザーレーダーを取り挙げる。

2.1 ミー散乱レーザーレーダー

ミー散乱レーザーレーダーでは、レーザー光パルスが大気中に送信し、大気中に浮遊するエアロゾル等の微粒子で散乱される光のうち、後方に散乱される光を集光望遠鏡で受信する。そして、パルス発射から受信までの時間の遅れか

ら対象までの距離を、受信光の強度から対象のエアロゾル等の濃度に関する情報を得ることを原理としている。パルス光を送信するので、後方散乱光を時間分解能をもって受信することで、レーザーパルスの光路に沿った後方散乱光強度分布が得られる。

今、距離を R で表すと、レーザーレーダーによる後方散乱光の受信信号は次式で表される²⁾。

$$P(R) = KP_0\beta(R) [T(R)]^2/R^2$$

$$T(R) = \exp \left[-\int_0^R \{ \alpha(r) + \sigma N(r) \} dr \right]$$

ここで、 K はシステムの定数、 P_0 は送信レーザー出力強度、 β はエアロゾルによる後方散乱係数 β_1 と空気分子による後方散乱係数 β_2 の和、 α は同様に消散係数 α_1 と α_2 の和である。また、 N は吸収を示す気体成分の濃度、 σ はその吸収断面積を意味している。ミー散乱レーザーレーダーでは通常、気体による吸収の無視できるレーザー波長を用いるので、 $\sigma=0$ と考えてよい。

ミー散乱レーザーレーダーの受信光強度 $P(R)$ から $\beta_1(R)$ または $\alpha_1(R)$ を求めることでエアロゾルの空間分布を知ることが出来る。しかし、定量的に絶対値として求めることは必ずしも容易ではなく、ミー散乱レーザーレーダーはエアロゾル分布の定性的な把握に用いられることが多かった。近年、定量的な解析の手法についての研究が進んでいる。

レーザーレーダー信号の定量的な解析と言うのは、(1)式で表される受信信号 $P(R)$ から消散係数 α_1 または後方散乱係数 β_1 の空間分布を絶対値として求める事を意味している。しかし、(1)式から明かなように、 α_1 と β_1 は不可分の形で $P(R)$ に関係づけられており、また、システム定数 K の決定が必ずしも容易でないという事情から、ミー散乱レーザーレーダー信号は単に距離自乗の補正だけが施され、エアロゾル分布構造の定性的な解釈にとどまることが多かった。このとき、指数関数で表される大気透過率の項、レーザー出力の変動を含むシステム定数の項が無視される。

近年、Klett⁴⁾をはじめとして、レーザーレ

ダー信号の定量的解析についての議論が活発となり消散係数、後方散乱係数の分布が絶対値として求められるようになった。これは、エアロゾルによるレーザー光の減衰が無視出来ないような広域の観測データの解釈を行う上でも重要な進展であった。また、これにより、時期の異なる観測データの比較、さらに、エアロゾルの光学的な性質（大気的光学的厚さ、散乱係数）、大気放射への影響などについての議論が可能になった。また、多波長を用いたミー散乱レーザーレーダーの観測からエアロゾルのタイプの識別をする試みも現実的なものとなってきた⁵⁾。

2.2 差分吸収方式レーザーレーダー

差分吸収方式レーザーレーダー (Differential Absorption Lidar) は DIAL と呼ばれ、気体による吸収を積極的に利用する方式である。気体の吸収線に同調した波長 λ_{on} と吸収の少ない波長 λ_{off} の 2 波長で測定を行い、2 波長における受信信号の比から $N(R)$ を求めるものである。今、 $N(R)$ を R から $R+L$ の区間の平均濃度を表すものとする、 λ_{on} , λ_{off} の受信信号 P_{on} , P_{off} を用いて、 $N(R)$ は次の式で与えられる⁶⁾。

$$N(R) = \frac{1}{2(\sigma_{on} - \sigma_{off})L} [F + B + A]$$

ここで、

$$F = \ln \left\{ \frac{P_{off}(R+L) P_{on}(R)}{P_{off}(R) P_{on}(R+L)} \right\}$$

$$B = \ln \left\{ \frac{\beta_{off}(R) \beta_{on}(R+L)}{\beta_{off}(R+L) \beta_{on}(R)} \right\}$$

$$A = -2 \int_R^{R+L} \{ \alpha_{on}(r) - \alpha_{off}(r) \} dr$$

であり、 σ_{on} , σ_{off} , α_{on} , α_{off} , β_{on} , β_{off} は、それぞれ λ_{on} , λ_{off} に対する気体の吸収係数、大気（エアロゾル＋空気分子）の消散係数、後方散乱係数である。通常は λ_{on} , λ_{off} は近接する 2 波長を用いるので $\alpha_{on} = \alpha_{off}$, $\beta_{on} = \beta_{off}$ とみなせ、 $B = T = 0$ とおける。したがって、受信信号 P_{on} , P_{off} と σ_{on} , σ_{off} の知識から $N(R)$ が計算される。DIAL では、濃度を求めようと

する気体の分子の吸収線に同調したレーザーを光源として必要とする。これまでに、 H_2O , NO_2 , SO_2 , O_3 を初めとして、各種の気体成分濃度の測定が試みられている。

3. ミー散乱レーザーレーダーの大気汚染研究への応用

3.1 混合層、接地逆転層の観測

一般に、エアロゾルは地上付近に排出源を有することから、大気の下層にはその時々気象条件と排出条件に対応して、高濃度のエアロゾル層が形成されることがある。最も顕著な例は、晴れて風の弱い日の夕方から朝方にかけて、地上付近に形成される接地逆転層に伴う高濃度エアロゾル層であろう。接地逆転層は同時に、地上付近の排出源から排出されるその他の汚染気体をも閉じこめることから、高濃度大気汚染の発生と深いつながりがある⁷⁾。

一方、晴れた日の風の弱い日中には、混合層が形成される。これは太陽放射によって暖められた地面がその直上の大気を暖めることから、対流現象を引き起こすことに起因している。十分な対流の結果、地面からある高度まではエアロゾルを始めその他の反応性の低い汚染物質はほぼ一様に分布する。対流のおよぶ高さは混合層高度と呼ばれ、混合層の上端には通常、気温分布が上空に行くほど高くなる、いわゆる気温逆転層が形成されている。混合層高度は、地上付近で排出される汚染気体の希釈体積に関係する。すなわち、混合層高度が低いほど層内の平均的な汚染質濃度は高く、逆に混合層が十分に発達した日には、平均濃度は一般に低くなる⁷⁾。

このようなことから、混合層あるいは接地逆転層の構造や、それらの発達のメカニズムを知る努力が多くなされてきた。その中で、ミー散乱レーザーレーダーを用いた混合層や接地逆転層の観測は、レーザーレーダーの大気計測への応用として、かなり初期の段階からその有用性が認識され、種々の観測が試みられてきた。特に、1970年代後半以降、コンピュータによるデータ処理が取り入れられてからは、このような

Fig.1 Time dependent vertical profile of aerosol distribution in lower atmosphere⁸⁾.

大気低層の構造を探る試みが一層盛んとなり、多くの研究に用いられてきた。

鉛直上方だけを測定対象として、時間的に連続して測定を行なう (THI方式) ことにより、

Fig.2 Cell structures during the developing stage of a mixed layer (processed by an edge-enhancement technique)⁹⁾.

Fig.3 Crosssection of a mixed layer (white area is the mixed layer). The mean height of the mixed layer and transition layer are indicated¹⁸⁾.

エアロゾル分布をトレーサーとして混合層や接地逆転層の発達の様子を明瞭に捉えることが出来る。Fig.1は筆者ら⁸⁾が行った測定の一例であり、夜間から早朝にかけての接地逆転層の発達に伴う、地上付近のエアロゾル高濃度の出現、日の出後の混合層の発達とそれに伴う層内の濃度の減少が見い出せる。

さらに、詳細に見ると混合層の発達時には、混合層高度は必ずしも滑らかに増加していない。これは対流セルによるエントレインメント現象が関係しており、混合層上端の空間構造を反映している。このような混合層の空間構造と、混合層の発達に関する研究がレーザーレーダー観測により行なわれてきた。特に、スキャン可能な地上設置型のレーザーレーダーと、航空機搭載の移動型レーザーレーダーがこれらの観測に威力を発揮する。

Fig.2は筆者らのグループが行なった対流セルの観測結果⁹⁾で、ここでは画像強調の一手法として、縁辺強調を施している。また、Fig.3はウィスコンシン大学のグループが行なった一連の混合層の観測の結果の例¹⁰⁾である。彼らはスキャンタイプのレーザーレーダーを用いて、混合層の発達時における構造を詳しく調べ、そのモデル化を行なっている。

Fig.4には、航空機搭載レーザーレーダーによる南カリフォルニア沿岸域での大気汚染エアロゾルの分布と混合層構造の観測例¹¹⁾を示した。この観測では複雑な沿岸地形における汚染質の輸送と拡散の実態がレーザーレーダーにより把握された。

3.2 汚染質の拡散と輸送

大気汚染制御の観点から、煙突より排出される煙の拡散を、記述あるいは予測することはきわめて重要であり、微気象学の一分野として多くの研究がされてきた⁷⁾。しかし、煙流拡散の実態把握は非常に困難である。多くの場合、地上に展開したサンプリング測定点のデータから、ある理論モデルに従って拡散幅を記述するパラメータを決定するという方法に頼らざるを得な

Fig.4 Aerosol distribution over Los Angeles district revealed by an airborne laser radar. Potential temperature distribution is shown by contours¹¹⁾.

いのが現状であった。これに対して、ミー散乱レーザーレーダーはリモートセンシングの利点をフルに發揮して、大気中を輸送・拡散される煙粒子、煙粒のパターンそのものを測定できることから、煙流拡散あるいは有効煙突高度等の測定に応用されてきた。

Fig.5はスキュンタイプのレーザーレーダーによる煙流断面の測定例¹²⁾である。その他の方法では、決して得られない種類の測定データと言えよう。

航空機搭載レーザーレーダーの場合、地上設置のスキュンタイプのレーザーレーダーに比べて、その機動性のゆえにさらに多くの情報を得んことが出来る。例えば、煙流拡散の測定等では風向に直角な断面での測定が容易に出来るほか、風下方向に十分遠方までの測定も可能である。Fig.6は、そのようにして求めた拡散幅を風下距離の関数として示したものである¹³⁾。

Fig.7に示したのは、交通量の多い道路における、自動車排出ガス中のエアロゾルの拡散状況である¹⁴⁾。道路に対して直角方向で、かつ水平にレーザーレーダーを向けて連続的に測定し

た。このとき、風向は道路にほぼ直角であったので、交通流に対応して間欠的にエアロゾルが排出されていることや、それが風下方向に拡散しながら輸送されることなどが分かる。Fig.8には、冬季のスパイクタイヤ使用による道路粉塵の発生・拡散状況を測定する目的で、鉛直上方を対象にして時間的に連続して測定した例¹⁵⁾を示した。この測定では、半導体レーザーを用いた小型のレーザーレーダーを使用した。

航空機搭載レーザーレーダーではさらに機動性を發揮した数百km以上の広い領域の観測が行なわれている。NASAラングレー研究所のBrowellのグループでは多波長のレーザーレーダーを航空機に搭載し、エアロゾルとオゾンの鉛直分布を広い範囲に亘って観測し、大気境界層と自由大気との間の積雲を介しての物質の輸送¹⁶⁾、対流圏オゾン・エアロゾルの分布¹⁷⁾、成層圏気塊の対流圏への流れ込み¹⁸⁾など、大気汚染とも密接に関係する多くの興味ある現象の観測に成功している。また、これとは別に同研究所のMcCormickらは航空機搭載のミー散乱レーザーレーダーを用いて成層圏エアロゾルの緯度分

Fig.5 Time dependent crosssection of plumes from a power plant (10km downwind)¹²⁾

Fig.6 Crosswind plume dispersion coefficients measured with an airborne laser radar. Pasquill-Gifford dispersion curves A-F are superimposed¹³⁾.

Fig.7 Aerosol dispersion from a congested road observed by a horizontally-oriented laser radar¹⁴⁾.

Fig.8 Aerosol vertical distribution over a congested road observed by a vertically-oriented laser radar¹⁵⁾.

布を地球的な規模で測定しており、火山性エアロゾルの輸送の実態を明らかにした¹⁹⁾。

3.3 汚染気塊の動き—海風の侵入—

海風は晴れた日の日中に、太陽で暖められた地面と海面の温度差に起因して発生する局地的な風系である。沿岸部に多く工業地帯などが立地する地域などでは、海風の発生が沿岸部、内陸部の大気汚染状況に大きく影響することから、その研究が盛んに行なわれてきた⁷⁾。しかし、海風層の高さが数百mに達するため、従来の気象観測の方法ではその立体像を捉えることは大変難しい。Nakane and Sasano²⁰⁾ は地上設置のスカンタイプ的大型レーザーレーダーを用

Fig.9 Vertical structure of a sea-breeze front revealed by a scanning laser radar²⁰⁾.

Fig.10 Sea-breeze front intrusion inland obtained by consecutive laser radar measurements²¹⁾.

いて、海風前線の立体構造とその内陸への侵入過程を、エアロゾルの空間分布をトレーサーとして初めて捉えた (Fig.9)。また、スカン測定を時間的に繰り返して行ない、海風前線の内陸への侵入の状況を時々刻々、捉えた²¹⁾ (Fig.10)。これによれば、前線の侵入速度は必ずしも一定ではなく、また、おそらくは地表面状態の違いが影響して前線の形状は直線とはならないことが分かる。

3.4 風向風速の測定

大気汚染質の輸送の担い手としての風の情報を得ることは、汚染の制御、予測の上できわめて重要である。しかし、上空の風の情報を精度

よく、また時間的にも密に（あるいは連続して）入手することは、従来の計測手法を用いる限り容易ではない。そのため、ドップラソナーなど音波を利用した風の測定法の研究とともに、光を利用したレーザーレーダーによる風測定法の研究も、活発に行なわれてきた。まだ、十分に実用的な段階にまで達したものはないものの、エアロゾル分布の不均一性を利用したミー散乱レーザーレーダーによる風測定などが実験的に行なわれている。

エアロゾル分布の濃度パターンが保存されながら、風によって運ばれて行くものと仮定すると、多点で測定したエアロゾル濃度の時間変化から風向・風速を求めることが出来る（時間相関法）。Matsui et al²²⁾ はコニカルスキャン方式のレーザーレーダーを考案し、時間相関計算からエアロゾルの移動速度ベクトルを求める手法を提案した。また、Elorantaのグループでは、3方向に固定してレーザーレーダー観測を行ない、同様に風向風速の鉛直分布を求めた²³⁾。

一方、Sasano et al²⁴⁾ は、スキャンタイプのレーザーレーダーを用い、時間をおいて測定したエアロゾルの空間分布パターンデータから、空間相関法によってパターンの移動速度ベクトルを算出し、風向風速を求めた。

4. 差分吸収方式レーザーレーダー (DIAL) による大気汚染ガス成分濃度の計測

大気環境中の汚染ガスの計測としては、排出源モニタリングと環境濃度監視の二つの役割が望まれている。排出源近傍と一般環境中とでは濃度そのものに大きな違いがあるため、装置を製作する上で基本的に区別して考える必要がある。

ヨーロッパ各国では工場などの排出源からのSO₂、NO₂などを対象とするDIAL方式のレーザーレーダーの研究が活発に進み、煙突、工場周辺のフィールド調査などへの応用が試みられている。スウェーデンのグループが行なった、製紙工場周辺のSO₂濃度の空間分布の測定の結果をFig. 11に示した²⁴⁾。

Fig. 11 Sulfur dioxide distribution obtained by scanning DIAL measurements²⁴⁾.

一方、広域化する大気汚染現象、酸性雨現象等を考える時、汚染質の輸送を含めて、ある広い領域に出入りする汚染質の量的把握が必要となる。今後は、排出源のモニタリングと同時に環境濃度の監視、さらには、汚染質の流量の計測が重要になると考えられる。杉本ら²⁵⁾ は、このような考えに基づいて環境濃度測定用のDIALシステムを開発した。このシステムはNO₂の鉛直分布の測定を目的としたもので、鉛直上方だけに測定方向を限定した。そのため、複雑な

Fig. 12 Time variation of the vertical distribution of NO₂ obtained by DIAL measurements²⁵⁾.

スキャン機構を必要とせず、また装置の重量などの制限が少なくなり、大出力レーザー、大口径望遠鏡の使用が可能となった。その結果、高度1.5kmまでの高度範囲の環境濃度の NO_2 が、距離分解能100m、感度2 ppbの高感度測定が可能となったものである。Fig. 12は、 NO_2 濃度の鉛直分布の時間変化を求めた結果である。

電波研究所（現在、通信総合研究所）のAsai et al.²⁶⁾は、 CO_2 レーザーを用いた低層大気環境中のオゾン濃度測定用レーザーレーダーの開発を行ってきた。最近では、さらに航空機測定用に発展させ、広域に亘るオゾン濃度分布の測定に適用しようとしている。

紫外域波長のレーザーを用いたオゾン測定は、九州大学のグループにより長年研究が行なわれ、特に成層圏オゾンの測定に成果を納めてきた²⁷⁾。最近のフロンガスによる成層圏オゾンの破壊の問題に関連して、筆者らのグループでも新たに成層圏・対流圏オゾン測定用の多波長レーザーレーダー（差分吸収方式）を開発し、研究を開始した²⁸⁾。また、気象研究所においても成層圏オゾン測定用レーザーレーダーを用いた研究が進められている²⁹⁾。

4. おわりに

本稿では、大気汚染研究におけるレーザーレーダーの利用状況について、若干の例を示し、その現状を報告した。しかし、筆者の不勉強のために最新の情報について必ずしも網羅できていない。また、重要な文献を見落としているかも知れない。お詫しを乞う次第である。

レーザーレーダーの研究は、原理、ハードウェア、データ処理、応用の各方面で極めて多様な展開を見せている一方で、本当の意味で大気汚染研究のための実用的な測定器の域に達したと言えるものは多くない。単なる技術開発研究に終わらせることなく、「レーザーレーダーを使って大気汚染の何が分かった」、「大気汚染対策にこれこれの有効な手が打てた」と言えるようになるために、レーザーレーダー研究者、大気汚染研究者の両者の、より密接な関係プレー

が必要とされているのではないだろうか。

参考文献

- 1) G. Fiocco and L. D. Smullin: *Nature*, **199** (1963) 1275.
- 2) E. D. Hinkley(ed): *Laser monitoring of the atmosphere* (Topics in Applied Physics, vol. 14; Springer-Verlag, New York, 1976).
- 3) 小林喬郎: 日本リモートセンシング学会誌, **5** (1985) 123.
- 4) J. D. Klett: *Appl. Opt.* **20** (1981) 211.
- 5) Y. Sasano and E. V. Browell: to be published in *Appl. Opt.* (1989)
- 6) R. M. Schotland: *J. Appl. Meteorol.*, **13** (1974) 71.
- 7) 竹内清秀: 「大気汚染物質の動態」磯野謙治編 (東京大学出版会, 1979) 第5章.
- 8) Y. Sasano et al.: *J. Meteorol. Soc. Japan*, **58** (1980) 143.
- 9) Y. Sasano et al.: *Appl. Opt.*, **21** (1982) 3166.
- 10) R. Boers and E. W. Eloranta: *Boundary Layer Meteorol.*, **34** (1986) 357.
- 11) R. M. Wakimoto and J. L. McElroy: *J. Climate and Appl. Meteorol.*, **25** (1986) 1583.
- 12) W. S. Lewllen and R. I. Sykes: *J. Climate and Appl. Meteorol.*, **25** (1986) 1145.
- 13) J. L. McElroy et al.: *Atmos. Environ.*, **15** (1981) 2223.
- 14) 笹野泰弘他: エアロゾル研究, **2** (1987) 128.
- 15) 松井一郎他: 応用物理, **57** (1988) 407.
- 16) J. K. S. Ching et al.: *Atmos. Environ.*, **22** (1988) 225.
- 17) E. V. Browell et al.: *J. Geophys. Res.*, **93(D2)** (1988) 1431.
- 18) E. V. Browell et al.: *J. Geophys. Res.*, **92(D2)** (1987) 2112.
- 19) M. P. McCormick and M. T. Osborn: *NASA Ref. Pub.* 1172 (1986).
- 20) H. Nakane and Y. Sasano: *J. Meteorol. Soc. Japan*, **64** (1986) 787.
- 21) H. Nakane and Y. Sasano: *Abstracts for Symposium on the lower troposphere profiling*, Boulder, May, 1988, p. 169.
- 22) I. Matsui et al.: *Appl. Opt.* (submitted 1989).
- 23) W. P. Hooper and E. W. Eloranta: *J. Climate and Appl. Meteorol.*, **25** (1986) 990.
- 24) A-L. Egeback et al.: *Appl. Opt.*, **23** (1984) 722.
- 25) 杉本伸夫他: レーザー研究, **15** (1987) 170.
- 26) K. Asai et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 60.

27) O. Uchino et al.: J. Geophys. Res., **88**
(1983) 5273.

29) O. Uchino et al.: *Abstracts for International
Laser radar Conference*, June, 1988, p. 409.

28) 杉本伸夫：センサ技術, **9(2)** (1989) 22.