

レーザーレーダー

—地球環境のリモートセンシング—

小林 喬 郎

Laser Radar: Remote Sensing of the Earth Environment

Takao KOBAYASHI

Introductory review is presented for the laser radar or lidar techniques as active remote sensors of the atmosphere and the sea of the earth. Basic characteristics and recent results of the laser radar schemes are introduced including Mie scattering, Rayleigh scattering, Raman scattering, fluorescence, resonance scattering, absorption and Doppler laser radar schemes. Future possibility of these sensor systems is discussed.

Key words: laser radar, lidar, remote sensor, laser scattering, fluorescence, absorption spectroscopy, Doppler scheme

最近、地球を取り巻く大気や海洋、生物などの環境状態の保全が人類の生存にとってきわめて重要な課題として関心を集めるに至っている。とくに、大気汚染やオゾン層破壊、酸性雨、異常気象、地球温暖化などの環境問題の解明とその対策が緊急な課題となってきた。これらの現象は、地球規模でのグローバルな空間スケールと数か月から数十年の長い時間スケールで進行しており、多くの事象が複雑に絡み合っている。そのため、その解明には多次元かつ大量の環境情報の収集と解析法の開発が必要である。このような現象の観測には光を利用したセンシング技術が適しており、それには自然光を利用するパッシブ型（受動型）と人工の電磁波を照射するアクティブ型（能動型）センサーがある。

本講義は地球大気や陸域、海洋などの環境の遠隔アクティブセンサー技術として、レーザーを用いるリモートセンサー技術について環境情報の計測という視点から基本的事項を示し、さらに具体的センサーシステムについて概観する。

1. レーザーレーダーの基本動作¹⁻⁸⁾

レーザーレーダー (laser radar) は気象学の分野ではラ

イダー (lidar: light detection and ranging) ともよばれており、まず、その動作法について示す。図1にレーザーレーダー計測法の概念図を示す。一般的にはパルス動作のレーザーを送信光源として用いて、コリメーターを通して平行ビームにして大気中に送り出す。遠方の物体または微小散乱体で散乱されたレーザー光の後方散乱光を、集光鏡（受信鏡）で集光し、フィルターで背景光などを取り除き、目的とするスペクトルを選択して光検出器で電気信号に変換する。受信パルス信号の時間波形から物体や微小散乱体の位置の情報を、また信号の大きさからそれらの密度、またスペクトルから成分などの情報を信号処理部で演算して、その結果をディスプレイ上に表示するものである。

1.1 光と物質の相互作用過程

光波（電磁波）の性質は、その強度、周波数（波長）、位相、偏光、伝搬方向などの物理量により決定される。また、光と物質の相互作用過程としてミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱、蛍光、共鳴散乱、吸収、およびドップラー効果などが利用され、それらの特性から各種散乱体の物理的、化学的な情報が計測できる。

1.2 レーザーレーダー方程式

パルスおよびCW動作のレーザーレーダーの受信電力

は次のレーザーレーダー方程式で与えられる。

(a) 地形物ターゲット (topographic target) の場合：

$$P(R) = P_0 K T^2(R) \sigma_0 A_r / R^2 \quad (A_0 \leq A \text{ のとき}) \quad (1)$$

$$= 4 P_0 K T^2(R) \sigma(\pi) A_r / \pi \Delta\theta^2 R^4 \quad (A_0 > A \text{ のとき}) \quad (2)$$

ここで、 A_0 は物体面でのレーザービームの断面積、 A は物体の幾何学的断面積である。また、 P_0 はレーザー光の出力、 R は反射体までの距離、 A_r は受信鏡面積、 K は送信受信光学系の全効率、 $T(R)$ は途中の大気的光透過率、 $\Delta\theta$ はレーザービームの広がり角である。また、反射体の表面の散乱係数を σ_0 とすると、反射体全体での後方微分散乱断面積は $\sigma(\pi) = A\sigma_0$ 、拡散表面 (ランバート反射体) では、 $\sigma(\pi) = rA/\pi$ (r は表面反射率) となる。

(b) 微小粒子や原子・分子気体などの空間分布した散乱体をパルスレーザーで計測する場合：

$$P(R) = P_0 L K \beta(R) T^2(R) Y(R) A_r / R^2 \\ = c E_0 K \beta(R) T^2(R) Y(R) A_r / 2 R^2 \quad (3)$$

ここで、 $L = c\tau/2$ (τ : パルス時間幅、 c : 光速) はレーザーパルスの空間長の半値、 E_0 はレーザーパルスエネルギー ($E_0 = P_0\tau$)、 $Y(R)$ は送信ビームと受信視野の重なりを示す係数で、通常は $Y(R) = 1$ の領域を利用する。

$\beta(R)$ は散乱体の体積後方散乱係数とよばれ、散乱体の密度を $N(R)$ 、後方微分散乱断面積を $d\sigma(\pi)/d\Omega$ として、同一の散乱体の場合には

$$\beta(R) = N(R) (d\sigma(\pi)/d\Omega) \quad (4)$$

また、粒子の径が分布している散乱体の場合には、粒径分布に対する積分値として与えられる。さらに、 $T(R)$ は距離 R までの大気的光透過率で

$$T(R) = \exp\left[-\int_0^R \{\alpha_s(r) + \alpha_a(r)\} dr\right] \quad (5)$$

と与えられる。ここで $\alpha_s(r)$ は散乱による消散係数で $\alpha_s(r) = N(r) \sigma_s(r)$ 、 σ_s はすべての散乱角に対する全散乱断面積、 $\alpha_a(r)$ は光の吸収係数である。

ターゲットの距離 R は、パルス動作のレーザーレーダーでは、送信-受信両パルスの時間差 t より

$$R = ct/2 \quad (6)$$

と求められる。また、距離計測の分解能 (精度) は、光検出部の時間測定精度を Δt として、

$$\Delta R = \{(c\tau/2)^2 + (c\Delta t/2)^2\}^{1/2} \quad (7)$$

と与えられ、レーザーパルス幅 τ と Δt に依存する。

空間分布した散乱体の体積後方散乱係数は、受信散乱光

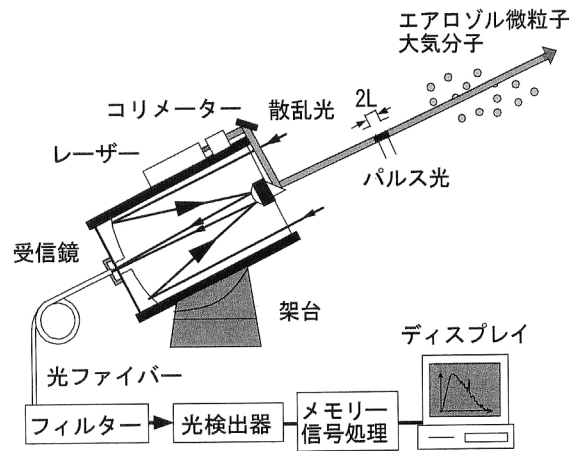


図1 レーザーレーダーの構成と計測法。

電力の空間変化 $P_r(R)$ より、式(3)を変形して

$$\beta(R) = k P(R) R^2 / T^2(R) Y(R) \quad (8)$$

の関係より求められる。ここで、 k は装置定数である。この式で不確定要素は $T(R)$ のみであり、近距離では $T(R) \sim 1$ と仮定することができるが、遠距離ではこの値の補正が必要となる。

1.3 光検出法

受信光は光検出器により電気信号に変換されるが、光信号の検出法には、光の電力 (エネルギー) に比例する電流成分を測定するインコヒーレント法として、直接検出法や光電子数を計数する光子計数法が、また光の電界と位相成分を測定するコヒーレント検出法にはヘテロダイン法などがあり、微弱な信号光の計測に利用されている。また、信号対雑音比 (S/N) により測定精度が決定される。

1.4 レーザー波長

レーザーレーダーに用いるレーザー波長は次のような条件により決定される。a. レーザー光の波長が大気分子の吸収が小さく透過率の大きい“大気の窓”の波長領域であること。図2に大気の透過率スペクトルを示す。b. 実用的には、肉眼への最大許容露光量 MPE (maximum permissible exposure) の値の大きい、肉眼への安全度が高い波長の利用が重要であり⁹⁾、400 nm 以下の UV 域、または 1.5 μm 以上の赤外域がアイセーフ条件を満たしている。つぎに、各種のレーザーセンサーについて具体的に示す。

2. ミー散乱レーザーレーダー¹⁰⁾

ミー散乱は、レーザー光の波長 λ_0 とほぼ同程度以上のサイズの粒子 (半径 $a \geq \lambda_0/2\pi$) に対して散乱断面積が増大する弾性散乱過程 ($\lambda_r = \lambda_0$) である。可視域のレーザーに対して 0.1 μm 以上のサイズ分布の大気中の微小粒子であるエアロゾルがミー散乱領域に入り、粒子1個当たりの

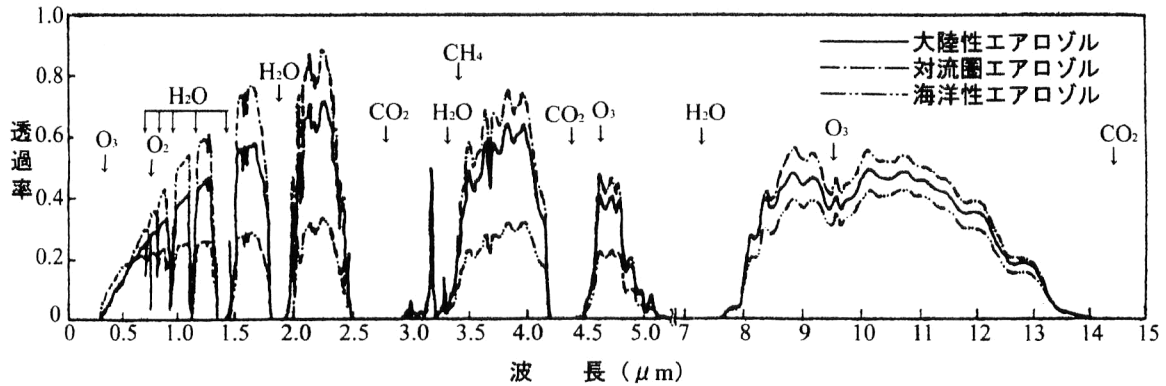


図2 標準大気透過率スペクトルと吸収分子 (光路長 10 km, 海拔 0 m, 視程 23 km).

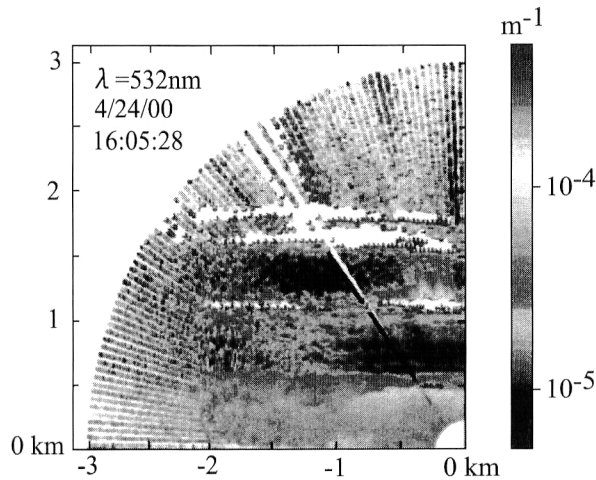


図3 海洋性エアロゾルの鉛直方向2次元分布の測定例¹¹⁾.

全方向への散乱強度、すなわち全散乱断面積は幾何学的な断面積の2倍の値 $\sigma_s = 8\pi a^2$ に近くなるため、大きな値を示す。

大気中には、直径数 nm～数 μm に至る固体粒子エアロゾルや $0.1 \mu\text{m}$ ～数 mm の水滴や氷晶などが浮遊していてレーザー光を強力に散乱するため、ミー散乱レーザーレーダーは計測感度が高く、小型の装置で計測可能な応用が多いので、最も広く実用化されている。システム構成として固定型、車載型、衛星搭載型などがある。

ミー散乱測定においては、体積後方散乱計数 β または消散計数 α を求め、エアロゾルの重量密度 $N(R)$ [g/m^3] の粒径平均値が求められる。つぎに、応用分野を示す。

2.1 粒子状大気汚染物質の分布測定

ミー散乱方式は、火力発電所や工場、自動車からの排煙である浮遊粒子状物質 (SPM) の遠隔地への移動状態を直接的に測定できる。ビームを空間的にスキャン (掃引) することにより、2次元断面および3次元立体分布が求められる。図3に海洋性エアロゾルの鉛直方向2次元分布の測定例を示す¹¹⁾。肉眼では見えない排煙を固定型では約 10 km, 航空機搭載型では移動しながら 300 km 以上の距離ま

で追跡している¹²⁾。このように、エアロゾル分布の広い領域での測定により大気汚染の発生源や拡散、輸送特性が、また海洋上における大気対流構造などの実態が把握できる。そのため、環境監視システムおよび環境アセスメントの手段となっている。

2.2 エアロゾル分布の測定

エアロゾルの測定から、高度約 10 km 以下の対流圏大気内の混合層や温度逆転層の構造やプルームなどの接地境界層の発達過程や内部構造を詳細に観測することができる。また、高度約 15～30 km に至る成層圏には硫酸および硫酸塩を主成分とするエアロゾル層が分布し、地球の気候変動を決定する重要な因子となっており、それらの量が観測されている。

また、ミー散乱方式では装置の小型化、自動計測化が進められ¹³⁾、世界各地に設置した観測局のデータがネットワークで集められるようになってきた。

図4に、筑波におけるアジア大陸からの黄砂の高度分布の時間経過のレーザーレーダーによる観測例を示す。体積後方散乱計数 β (上図) と偏光解消度 (下図) が同時観測されている。ここで、偏光解消度 $\rho = P_t/P_p$ で、 P_p はレーザー光の偏光方向と平行方向の受信光電力、 P_t は直角方向の受信光電力である。粒子の形状が水滴のような球形の場合には $\rho = 0$ 、球形よりずれて非対称になるに従って ρ の値が増加する性質があるため、形状や種類が識別できる。図4の観測では、黄砂とその他のエアロゾルが識別されている。さらに多数の地点で観測して移動状態を観測できる、ネットワークが実現しており、黄砂の移動や拡散状態の観測が行われている¹⁴⁾。

成層圏エアロゾル層の散乱比 R_s は、大気分子のみによる体積後方散乱計数 β_m とエアロゾルの体積後方散乱計数 β_a から次式により求められる。

$$R_s = (\beta_a + \beta_m) / \beta_m \quad (9)$$

エアロゾルの屈折率や粒径分布が一定と仮定すれば、 β_a は

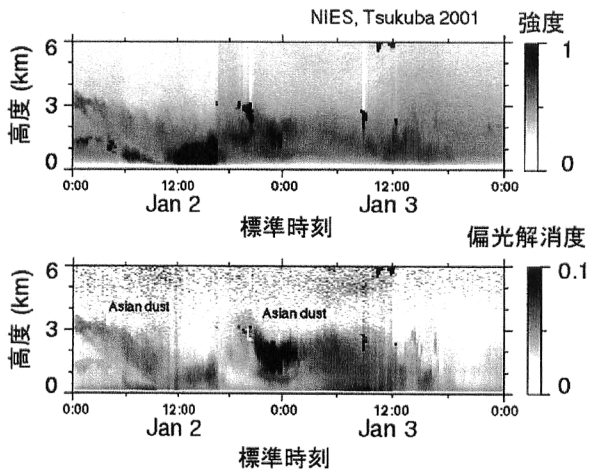


図4 黄砂の高度分布の経時変化の観測¹¹⁾。上図：体積後方散乱係数 β ，下図：偏光解消度。

エアロゾルの個数または重量密度に比例し、 $(R_s - 1)$ より混合比が求められる。

2.3 雲、霧、雪、雨などの分布測定

雲底高度を測定する雲高計（シーロメーター）は、小型レーザーレーダーシステムとして実用化が進んでいる。光源として小型の GaAs 半導体レーザー（800~900 nm）や Er^+ レーザー（1.54 μm ）などが用いられ、空港での航空機の離着陸のための気象データの自動計測システムとして市販されている。さらに、雲や霧の構造の測定、比較的薄い場合には、レーザー光の減衰係数より水滴密度（含水量）や平均粒径などの測定が可能である。また、水滴に比べて氷晶は偏光解消度が大きいことから、受信光の偏光解消度を測定することにより雲の水と氷の構成比が測定される。

2.4 風向・風速ベクトルの測定

3次元的にレーザービームをスキャンしてエアロゾル塊の空間パターンを時間をずらして測定した2枚の画像の空間的な相関係数を計算することにより、各点の移動がわかり、風速と風向の3次元ベクトル表示が可能である。

2.5 視程と消散係数の導出

レーザーレーダーにより斜め方向の視程が求められる。式(3)のレーザーレーダー方程式で受信電力 P_r より $P(R)R^2$ の値の空間変化を求め、この傾斜がレーザー光の透過率 $T^2(R)$ にほぼ比例することから、視程の概略値を求めている。

また、 β と消散係数 α の高精度の導出法として、逆散乱問題の検討が行われている¹⁰⁾。すなわち、 α と β の関係として $\alpha/\beta = S$ (定数)、または $\alpha^k/\beta = S$ と仮定する。ここで、 k はレーザー波長とエアロゾルの性質に依存する係数である。この関係を式(3)のレーザーレーダー方程式に代入し、微分方程式の解として、 $P(R)R^2$ の測定値を空間積

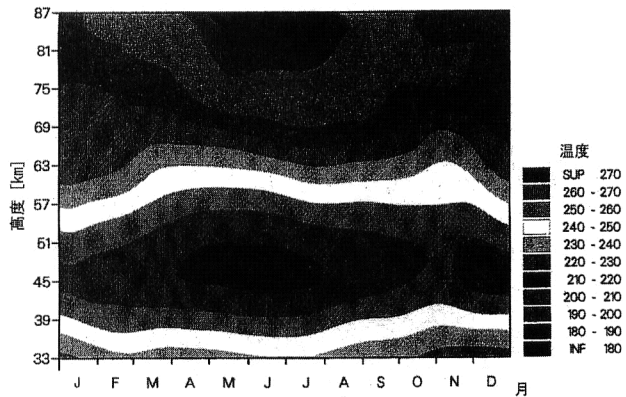


図5 超高層大気温度の高度分布の季節変化測定¹⁷⁾。

分して R 点での $\alpha(R)$ を求めるもので、とくに後者の条件より導出する方法は Klett の方法とよばれ¹⁵⁾、多重散乱が小さいときには雲や霧などの比較的散乱強度の大きい場合にも成り立つことが知られている。

また、多波長のレーザー光を用いて散乱係数と消散係数の波長依存性を求め、エアロゾルの粒径分布を求める導出手法も研究されている¹⁶⁾。

3. レイリー散乱レーザーレーダー

半径約 0.1 μm 以下の微小粒子や原子や分子に対し $a \ll \lambda_0/2\pi$ となり、 $\lambda_r = \lambda_0$ の弾性散乱過程である。大気分子によるレイリー散乱成分の β_m は $1/\lambda^4$ の波長依存性を示し、紫外域の短波長レーザー光に対してその値が大きくなり、効率よく検出できる。

3.1 高層大気密度と温度の測定

エアロゾルがほとんど存在しない高度約 30 km 以上の大気では、後方微分散乱係数 $\beta(R)$ は大気分子によるレイリー散乱成分 β_m のみになる。ラジオゾンデでは高度約 30 km 付近までは大気密度測定が可能であるが、それより上空はレイリー散乱レーザーレーダーによる β_m の値より大気密度の絶対値測定が可能である。また、気体の状態方程式と気圧の高度変化の関係式を利用し、 β_m の測定値より大気温度が求められる¹⁷⁾。

図5に、フランス南部における超高層大気温度の高度分布の季節変化の測定結果¹⁷⁾を示す。観測期間 1984~1989年の6年間の平均値である。Nd:YAG レーザーの第二高調波（平均出力 6 W）を用いて、高度 70 km まで、密度の測定誤差 0.3% 以下、気温 1 K 以下の高精度測定が実現されている。これらの測定により、大気密度の重力波や温度の振動波動に関する研究が可能となっている。

3.2 対流圏の気温測定

しかしながら、対流圏ではエアロゾルによる強いミー散

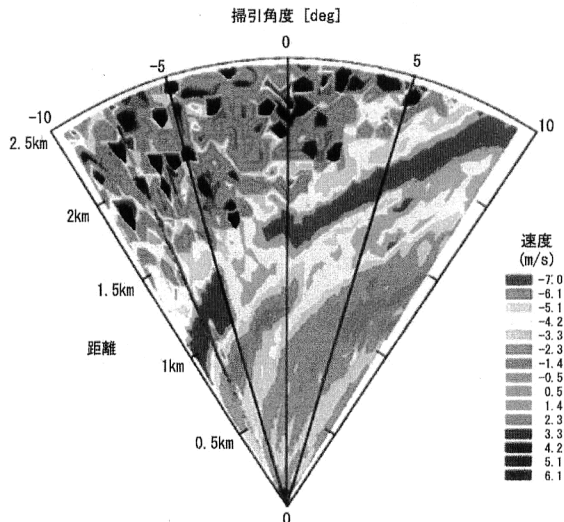


図6 風速（レーザービーム方向）の2次元分布測定（PPI表示）²⁰⁾。

乱光が同じスペクトルに重畳してくるため(図7参照)、高スペクトル分解能ライダー（HSRL）技術が利用される。レーザー波長（532 nm）を単一にして I_2 分子吸収線に一致させ、 I_2 分子フィルターでミー散乱成分を6桁以上取り除き、スペクトル幅が広いレイリー散乱光の裾の部分を受信し、ドップラーのスペクトル幅が気温 T の $1/2$ 乗に比例することを利用して気温の測定が可能であり、高度約5 kmまで精度約1 Kが達成されている¹⁸⁾。しかしながら、レーザー周波数の不安定性などのために5 K程度の絶対値のずれがあり、これらの改善が望まれる。さらに、実用的に重要なアイセーフのUV域で、レイリー散乱方式の気温計測システムの開発が進められている。

4. ドップラーレーザーレーダー

大気の流れである風速や風向の空間分布情報は、環境学や気象学分野においてきわめて重要な役割をもっている。散乱体に光波を照射すると、ドップラー効果により散乱波の周波数がシフトする。風に運ばれるエアロゾルによるドップラー効果を利用して、風速を計るドップラーレーザーレーダーが開発されている。

4.1 ヘテロダイン方式による風向、風速、乱流の測定

ヘテロダイン方式のドップラーレーザーレーダーの開発の歴史は長く、初期にはCWの CO_2 レーザーを利用して、航空機の後方に発生する渦流の風速測定が行われた。

大型機では15 m/sもの高速の2つのロール状の渦流が発生していることが見いだされ、航空機事故の発生が予測された。さらに、パルス動作のシステムでは距離分解した風速測定が可能である¹⁹⁾。

図6に、レーザービームを水平方向に掃引して測定した

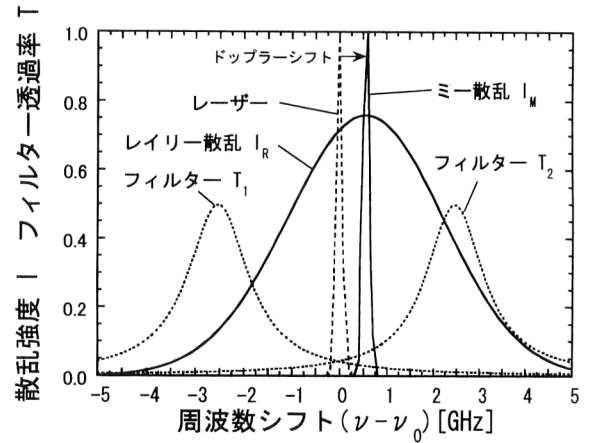


図7 直接検波型ドップラー方式のフィルターと受信信号のスペクトル特性（波長：354.7 nm）。

風速成分の距離分布を示すPPI表示の例を示す²⁰⁾。このようなドップラーレーザーレーダーの測定対象としては、①大気の流れ、風速および風の分布の測定、②渦流や晴天乱流の測定、③排煙などの速度と排出量の算定、④航空機などの周囲の大気に対する速度の測定、⑤ロケットなどの移動物体の速度測定、などがあげられる。⑥航空機搭載による小型なシステムの実用化が進められている。さらに、⑦宇宙ステーションからグローバルな地表面の風向・風速の高度分布を測定するヘテロダイン方式の開発が通信総合研究所で進んでいる。

4.2 直接検波方式による風向・風速の測定

また、直接検波法（インコヒーレント法）を利用し、高分解能のフィルターを用いたドップラーレーザーレーダーが開発されている。

図7に、ミー散乱とレイリー散乱を利用するドップラー方式レーザーレーダーの測定原理を示す。超高スペクトル分解のファブリー・ペロー（FP）干渉フィルター2個を利用し、その透過率 T_1, T_2 よりドップラーシフト量を求めるものである。

この方式では、エアロゾルのみならず、大気分子によるレイリー散乱のドップラースペクトルが利用可能となる^{21,22)}。一般に高度3 km以上ではエアロゾルが少なく、レイリー散乱が卓越するため、対流圏全域での風速の測定はこの方式に限定される。ESA（欧州航空宇宙局）で、衛星搭載のドップラーシステムではこの方式の開発が進展している。

5. ラマン散乱レーザーレーダー⁴⁻⁶⁾

ラマン散乱は物質に固有な振動や回転運動に伴って生ずる非弾性散乱過程であり、散乱波長 λ_r がレーザー波長 λ_0 から物質固有の値だけ偏移することが特徴である。このた

め、物質の種類と密度、温度などの定量測定ができる利点がある。その利用分野はつぎの通りである。

5.1 大気密度と光消散係数の測定

振動ラマン散乱の測定により、大気中の N_2 分子の高度分布を比較的大型の装置を用いて、分子密度が高度 40 km まで求めている。また、 N_2 分子のラマン散乱電力から大気中の分子密度の空間分布を仮定することにより、レーザー光の透過率 T と消散係数 α の距離変化が高精度で求められる。

5.2 水蒸気（湿度）と微量分子の測定

H_2O 分子のラマン散乱光を測定するレーザーレーダーにより、約 3 km の高度までの湿度分布が昼間でも測定可能となっており、湿度分布の主要な計測法となっている。また、振動ラマン散乱方式は単一波長のレーザー光源で多数の物質の種類と密度の定量測定ができ、距離分解能が高く、温度や圧力などの状態が変化しても安定な測定が可能のため、排気ガスなどの成分計測に利用される。しかしながら、散乱断面積が回転ラマン散乱では $2 \times 10^{-33} \text{ m}^2$ 、振動ラマン散乱では $5 \times 10^{-35} \text{ m}^2$ （いずれも $\lambda_0 = 530 \text{ nm}$ での N_2 分子に対して）と小さいので、1 ppm 以下の微量物質の検出には利用できない。

5.3 回転ラマン散乱による気温の測定²³⁾

さらに、回転ラマン散乱のスペクトル形状が温度によって大きく変化することを利用した大気温度の測定法も種々検討されており、紫外域レーザーを用いたシステムでは約 5 km の距離で $\pm 1 \text{ K}$ の精度が得られている。しかしながら、高出力レーザーが必要となるため、システムが大型となることが欠点である。

6. 共鳴散乱レーザーレーダー

波長可変レーザーを用いて原子の固有吸収波長に近づけると、レイリー散乱断面積が 10^{-15} m^2 と著しく増大する。これが共鳴散乱過程であり、完全に波長同調した場合には共鳴蛍光 (resonance fluorescence) とよばれる。

地球上層の 80~120 km の高度の Na などの金属原子層は、共鳴散乱レーザーレーダーによって密度の高度分布の高精度な観測が可能となっている²⁴⁾。現在まで、Na (共鳴波長 580.0 nm) 以外に、K (769.9 nm)、Li (670.8 nm)、Ca (422.6 nm)、 Ca^+ (393.3 nm)、Fe (372 nm) などの微量原子密度の測定が行われている。これらの金属原子の生成には流星説と海水説があり、密度の季節変化などから生成論の解明が進められている。

さらに、Na 共鳴線のドップラースペクトル広がり幅の測定より原子層付近の温度、およびドップラースhiftから

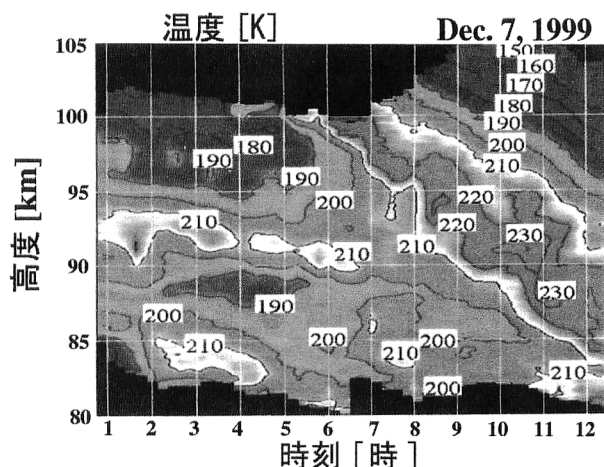


図8 Na 原子層の温度分布の時間変化²⁴⁾。

風速の測定が行われている。図8に Na 層の温度分布の時間変化の測定例を示す²⁴⁾。温度では 1 K 以下、速度では 1 m/s 以下の測定誤差で観測可能となっている。また、観測時間を短く設定することにより、重力波による短周期変動も測定されている。

しかしながら、これらの超高感度の共鳴散乱光も、地表付近の大気中では消光効果により散乱断面積が著しく低下してしまうため、利用できない。

7. 蛍光センサー^{4,5)}

レーザー誘起蛍光 (LIF: laser induced fluorescence) 過程は、散乱断面積がラマン散乱よりも数桁以上大きいため、大気微量物質の遠隔計測の利用が考えられる。しかしながら、大気分子による蛍光の消光が大きく、また放出スペクトルがきわめて広がる場合が多いため背景光雑音の除去が困難となり、またエアロゾルも蛍光を発生するため、大気の遠隔計測にはほとんど利用されていない。この欠点が補われる用途として、つぎの分野で活用されている。

7.1 微量分子のポイント計測

遠隔計測法とは異なり、近地点でのポイント計測、いわゆる非接触の *in situ* (その場) 測定法により高感度の LIF センサーが開発されている。大気中の NO_2 分子の測定では感度 0.6 ppb が得られている。

また、大気中で光化学反応に重要な役割をもつ OH 基の蛍光 (282 nm) 測定では、密度約 10^6 cm^{-3} (0.3 ppt) と超高感度の検出が実現されている。

7.2 海洋、河川の水質汚濁の広域分布計測

遠隔測定可能な蛍光レーザーレーダーは、海洋や湖沼、河川などの物質測定に主に利用されている。すなわち、航空機に蛍光センサーを載せて下方にレーザー光を送り出し、水面や水中からの蛍光成分を測定するものである。

このように蛍光センサーでは、水中のクロロフィル密度分布、廃油や水質汚染の分布、などの測定が可能であり、海洋や河川の広域汚染分布のマッピングに利用できる。

8. 差分吸収レーザーレーダー²⁵⁾

光の吸収は、物質により入射光の共鳴波長成分が減衰を受ける過程である。共鳴と非共鳴の2波長での透過率の差を求める計測法であり、差分吸収法とよばれる。吸収の断面積は分子では 10^{-22} m^2 、原子では 10^{-15} m^2 といずれも大きいので、高感度の物質の定量測定に利用できる。しかし、微量物質の吸収断面積は、大気的主要な物質などの吸収スペクトルが重なり合って干渉雑音となることが多く、それらの補正を考慮しなければならない。

吸収過程を利用するレーザーセンサーには、a. CW レーザー光を固定のリトロ反射鏡で反射する長光路吸収法と、b. パルスレーザー光を建物などの地形物散乱体に照射して、光路長も求める長光路吸収レーザーレーダーがある。いずれも物質の吸収スペクトルの山（共鳴）と谷（非共鳴）の2波長 λ_1 、 λ_2 のレーザー光を用いてそれぞれの受信電力 $P(\lambda_1)$ 、 $P(\lambda_2)$ を測定し、

$$N = (1/2\Delta\sigma L) \ln\{P(\lambda_1)P_0(\lambda_2)/P(\lambda_2)P_0(\lambda_1)\} \quad (10)$$

の関係式より、光路長 L における平均（積算）分子密度 N を求める。ここで、 $\Delta\sigma$ は物質の吸収断面積の2波長における差分値、 $P_0(\lambda_1)$ と $P_0(\lambda_2)$ は、 λ_1 、 λ_2 でのレーザー出力である。すなわち、以上の吸収方式では、距離分解した分布状態の測定はできない。

これに対して、浮遊粒子をターゲットとして2波長でミー散乱強度を測定し、吸収量の空間変化から大気中の物質の密度分布を距離分解して測定する差分吸収レーザーレーダー方式は DIAL (differential absorption lidar) とよばれる。この方式で、分子密度分布 $N(R)$ は次式により導出される。

$$N(R) = (1/2\Delta\sigma L) \ln\left\{\frac{P(\lambda_1, R)P_0(\lambda_2, R+L)}{P(\lambda_2, R)P_0(\lambda_1, R+L)}\right\} \quad (11)$$

ここで、 $P(\lambda_1, R)$ と $P(\lambda_1, R+L)$ は共鳴波長 λ_1 での距離 R 点および $(R+L)$ 点からのミー散乱受信電力、 $P(\lambda_2, R)$ と $P(\lambda_2, R+L)$ は非共鳴波長 λ_2 での2点からの受信電力であり、また L は吸収測定の空間分解能である。すなわち、4つの受信電力値から $N(R)$ が求まり、この操作を繰り返して行えば L のきざみで全空間の密度分布が導出できる。このように、DIAL 方式は散乱方式と吸収方式の結合した技法である。

2波長発振のレーザーを用いてエアロゾルなどのミー散乱光を測定する DIAL は、大気分子や汚染分子などの定量

的な遠隔計測法として研究開発が進んでいる。

一般に差分吸収センサーの測定感度は、式(10)からわかるように、最小検出可能密度 N_{\min} と距離分解能（または光路長） L の積 $S = N_{\min} \cdot L$ の値で評価される。すなわち、 L を長くすることにより N_{\min} が減少し、高感度特性が得られる。つぎに、これらのセンサーの具体的な動作例について示す。

8.1 微量分子密度の区間平均値の測定

リトロ反射鏡で光を折り返す長光路吸収法では、CW 動作の波長可変赤外域半導体レーザーや CO_2 や CO 分子レーザーによる C_2H_4 (エチレン) や O_3 の測定が、また光パラメトリック発振器 (OPO) や差周波発生などの非線形光学素子により CH_4 や CO_2 、 NO など、また、可視や紫外域の色素レーザーでは NO_2 、 SO_2 、 O_3 など多数の分子の測定が試みられている。1 mW 程度の小出力光源でも、数百 m にわたる微量分子密度の区間平均値の測定が可能である。

また、地形物をターゲットとして利用する長光路吸収レーザーレーダーでは、装置を移動させて2次元平均密度分布が求められる。比較的小出力のパルスレーザー光源でも、光路長を1 km 程度に長くすることにより数 ppb の微量密度の高感度測定が可能である。

8.2 DIAL による大気汚染分子の立体観測

DIAL を用いた大気汚染分子密度分布の測定は、色素レーザーや OPO などの波長可変レーザーが用いられ、 SO_2 や NO_2 分子の野外計測が車載型 DIAL 装置により可能となっている。図9に、UV 域のエキシマーレーザーにより測定した成層圏 O_3 分子密度の高度分布の年変化の測定結果を示す²¹⁾。

また、DIAL システムを、航空機や船舶に載せた移動測定も行われている。NASA では、高度約3 km の上空から下方の O_3 や水蒸気、 SO_2 や NO_2 、エアロゾルなどの高度分布測定を行っており、陸上や海洋上の汚染状態や大気構造の広域分布についての詳細なデータを得ている²³⁾。

以上の大気成分の遠隔計測レーザーセンサーの検出感度（最小検出可能密度）と、測定距離の概略値を比較した結果を図10に示す。ここで、DIAL での距離分解能を100 m、 $S/N=100$ を仮定している。この結果より、各方式の距離や密度の適用範囲などが判断できる。

レーザーレーダーは、その研究が開始されてほぼ40年の長い年月が経過した。すでに地球環境研究における観測手段として広く利用され、広域空間での物質の分布や変動の画像表示など、他の手段では達成できないユニークな観測機能を実現してきた。

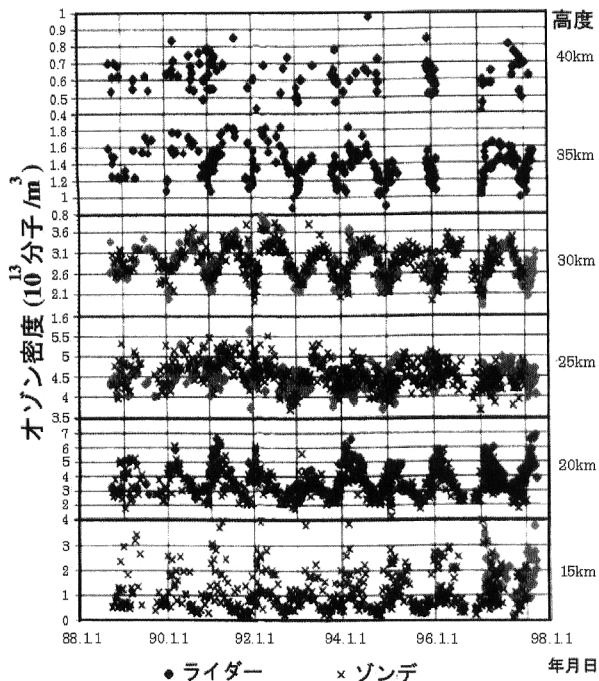


図9 O₃密度高度分布の経時変化のDIAL観測結果^(注1)。

今後さらにレーザーレーダーの可能性はどこまで進展するか、その夢をあげてみよう。

- 大気汚染ガスや危険ガス、温暖化ガスなどの小型で簡易な画像計測システムの実用化が進むか
- 風向・風速、気温、湿度など、都市大気環境アセスメントや高精度の局地気象予測用の小型システムが実現できるか
- 航空機搭載や空港における大気乱流計測システムが実用化されるか
- 衛星搭載による風向・風速ドップラーシステムとオゾン分子などのDIALシステムが実現するか

このような地球環境の保全や安全確保のための情報収集センサーとして、レーザーレーダーの応用分野はますます広がっていくと考えられ、それにより光エレクトロニクス産業の一角を占めるようになるものと期待される。新しいセンサーの原理アイデアの提案や、高効率で小型の全固体レーザー²⁶⁾の構想など、研究開発の興味は当分尽きそうもない。

注

注1) NIES ホームページ : <http://info.nies.go.jp:8094/>

文 献

- 1) E. D. Hinkley ed.: *Laser Monitoring of the Atmosphere* (Springer-Verlag, 1976).
- 2) D. K. Killinger and A. Mooradian ed.: *Optical and Laser Remote Sensing* (Springer-Verlag, 1983).

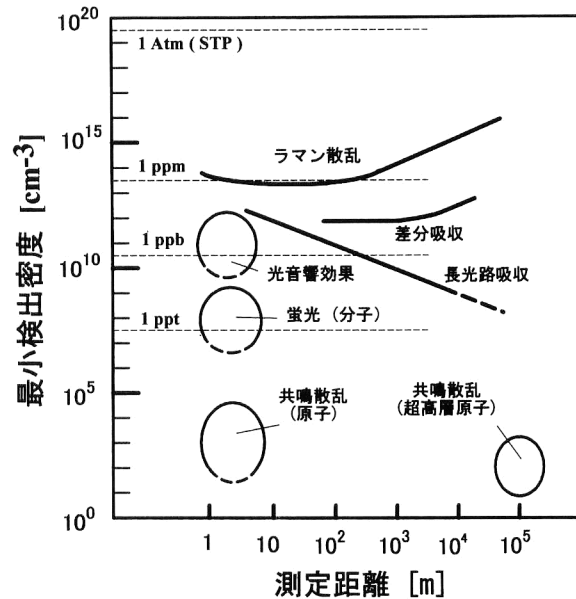


図10 大気成分のレーザーセンサーの検出感度と測定距離の比較(概略値)。

- 3) R. Measure: *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications* (John Wiley & Sons, 1984).
- 4) 小林喬郎：“環境情報のレーザーリモートセンシング技術”，日本リモートセンシング学会誌，**5** (1985) 17-40.
- 5) T. Kobayashi: “Techniques for laser remote sensing of the environment,” *Remote Sensing Rev.*, **3** (1987) 1-56.
- 6) 杉本伸夫，竹内延夫：“レーザーレーダーによる大気計測”，*応用物理*，**63** (1994) 444-453.
- 7) 竹内延夫編：地球大気分光リモートセンシング (学会出版センター，2001)。
- 8) W. B. Grant and E. V. Browell ed.: *Laser applications in remote sensing*, (Optical Engineering Press, 1997).
- 9) (財)光産業技術振興協会編：レーザー安全ガイドブック (新技術コミュニケーションズ，1992)。
- 10) J. A. Reagan, M. P. McCormik and J. D. Spinhirne: “Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and stratosphere,” *Proc. IEEE*, **77** (1989) 433-448.
- 11) S. K. Sharma, B. R. Lienert and J. N. Porter: “Scanning lidar measurements of marine aerosol fields at a coastal site in Hawaii,” *Proc. of SPIE Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring* (2000) pp. 159-166.
- 12) E. E. Uthe, W. Viezee, B. M. Morley and J. K. S. Ching: “Airborne lidar tracking of fluorescent tracers for atmospheric transport and diffusion studies,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **66** (1985) 1255-1262.
- 13) J. D. Spinhirne: “Compact eye safe lidar systems”，*レーザー研究*，**23** (1995) 112-118.
- 14) T. Murayama, N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sasaki, T. Shibata, K. Arao, B.-J. Shn, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga and Y. Iwasaka: “Ground-based network observation at Asian dust event of April 1998 in east Asia,” *J. Geophys. Res.*, **106** (2001) 345-359.
- 15) J. D. Klett: “Stable analytical inversion solution for processing lidar returns,” *Appl. Opt.*, **20** (1981) 211-220.
- 16) Y. Sasano and E. V. Browell: “Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations,” *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1670-1679.
- 17) A. Hauchecorne, M. Chanin and P. Keckhut: “Climatology

- and trends of the middle atmospheric temperature (33–87 km) as seen by Rayleigh lidar over the south of France,” *J. Geophys. Res.*, **96** (1991) 297–309.
- 18) J. W. Hair, L. M. Caldwell, D. A. Krueger and C. She: “High-spectral-resolution lidar with iodine-vapor filters: Measurement of atmospheric-state and aerosol profiles,” *Appl. Opt.*, **40** (2001) 5280–5294.
 - 19) R. T. Menzies and R. M. Hardesty: “Coherent Doppler lidar for measurements of wind field,” *Proc. IEEE*, **77** (1989) 433–448.
 - 20) R. Targ, B. C. Steakly, J. G. Hawley, L. L. Ames, P. Forney, D. Swanson, R. Stone, R. G. Otto, V. Zarifis, P. Brockman, R. S. Calloway, S. H. Klein and P. A. Robinson: “Coherent lidar airborne wind sensor II: Flight-test results at 2 and 10 μm ,” *Appl. Opt.*, **35** (1996) 7117–7127.
 - 21) B. M. Gentry, H. Chen and S. X. Li: “Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar,” *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1231–1233.
 - 22) C. Flesia and C. L. Korb: “Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355 nm,” *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1466–1468.
 - 23) A. Behrendt and J. Reichardt: “Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator,” *Appl. Opt.*, **39** (2000) 1372–1378.
 - 24) C. S. Gardner: “Probing the atmosphere at the edge of space: Lidar capabilities for upper atmosphere remote sensing,” *CLEO/Pacific Rim 2001 Technical Digest* (2001) II-537.
 - 25) E. Browell: “Differential absorption lidar sensing of ozone,” *Proc. IEEE*, **77** (1989) 419–432.
 - 26) 小林喬郎編：固体レーザー（学会出版センター，1997）。
- (2001年11月22日受理)