

解説

レーザーレーダーとその応用

竹内 延夫

国立公害研究所大気環境部大気物理研究室 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小川 16-2

(1987年3月4日受理)

Laser Radar and Its Application

Nobuo TAKEUCHI

National Institute for Environmental Studies,
Onogawa, Yatabe-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305

1. はじめに

1.1 レーザーレーダーの原理と測定

レーザーレーダー (laser radar; 以下 LR と略す) はライダー (lidar: light detection and ranging) と呼ばれ、レーザー光を大気中に送出し、その散乱・反射光を検出して、その距離や散乱体濃度を計測する手法である¹⁻⁵⁾。通常の LR は図1に示すようにパルス光を送出するレーザーと同一の場所に置かれた望遠鏡で後方散乱(反射)を受光する。レーザーは波長が短いので、幅が狭く指向性が良いパルス光を使用でき、距離方向にも角度方向にも空間分解能が良い測定が可能である。測定できる物理量としては、距離、物質密度、形状、散乱体(反射体)移動速度などがある。すなわち、反射体からもどってくる時間を測定するとその物体(飛翔体を含む)までの精密測距が可能である。これについては本号に人工衛星の測距について紹介されている⁶⁾。また散乱光強度をもどってくる時間の関数として測定することによって、光線方向の物質密度分布を測定できる。レーザー光の送出方向を走査することによって2次元・3次元的な空間分布が得られる。物質の種類は相互作用の種類によって粒子状物質(Mie散乱)、空気分子(Rayleigh散乱)であったり、特定の気体分子(蛍光、ラマン散乱、差分吸収散乱)であったりする¹⁻⁵⁾。

偏波面が決まったレーザー光を送出して、散乱光の偏光解消度を測定することによって散乱体粒子の非球状性の情報が得られる。また散乱光周波数のドップラーシフトを測定することによって散乱体の移動速度が測定でき

る。たとえばエアロゾルの周波数シフトを測定すればエアロゾルをトレーサーとした風の測定が可能である。

物質濃度、形状、速度などの直接測定量から他の情報を導出するには各現象に特有の性質を利用する。たとえば、
[気象要素]

1. 気温: ラマン散乱光ストークス線強度の温度依存性
2. 湿度: ラマン散乱強度から求めた水蒸気濃度と別途測定した温度を組み合わせる。
3. 視程: 散乱光強度の距離減衰率(スロープ法)

[大気環境]

4. 混合層高度: エアロゾル滞留層高度
5. 排煙移流: 空間分布プロファイルデータから求められる。

その他複数波長の測定を組み合わせたり、空間分布パターンを解析して種々の情報が得られる。

1.2 到達距離

LRの受信信号光強度はLR方程式

$$P_r(R) = P_0 K A_r l \beta_r(R) T^2(R) Y(R) / R^2 + P_B \quad (1)$$

で与えられる。ここで $P_r(R)$ は距離 R からの散乱光強度、 P_0 は送出レーザー光ピークパワー、 K は受光光学系の効率、 A_r は受光光学系開口面積、 $l = ct_p/2$ (c は光速、 t_p はレーザー光パルス幅) はレーザー光の空間長の1/2、 $\beta_r(R)$ は後方散乱係数、 $Y(R)$ は距離 R でレーザー光が受信視野に含まれる割合、 P_B は背景光強度である。距離 R までの透過率 $T(R)$ は

$$T(R) = \exp \left\{ - \int_0^R \alpha(r) dr \right\} \quad (2)$$

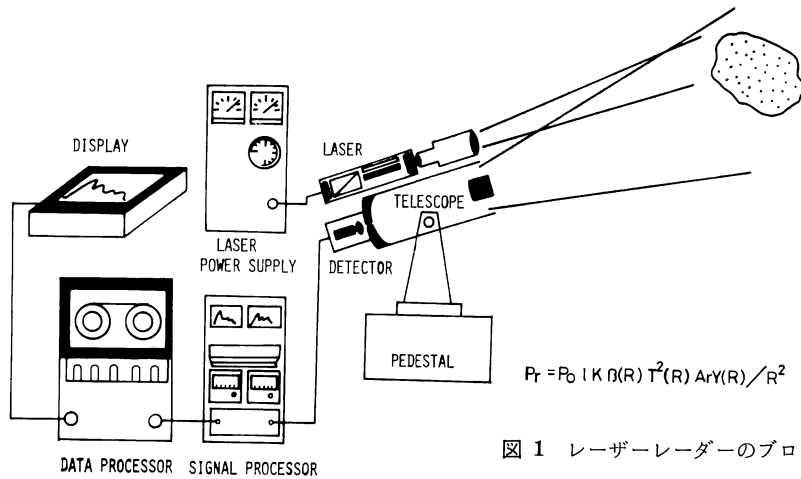


図 1 レーザーレーダーのブロック図

で表わされる。α(R) は消散係数である。(1)式では測定対象物はレーザービーム断面積より十分大きい場合を考えており、分母の距離依存性は R² だけとなる。後方散乱係数 β_r は

$$\beta_r(R) = N_s(R)\sigma_s \quad (3)$$

で与えられる。N_s は散乱体密度、σ_s は散乱断面積である。Mie 散乱断面積は粒径 a、複素屈折率 m(=m_r-imi) によって大きく変化し、β_r は

$$\beta_{r, \text{Mie}} = \int_0^\infty N_p(a)\sigma_{s, \text{Mie}}(a, m) da \quad (4)$$

で与えられ、σ_{s, Mie} は 10⁻⁸~10⁻²⁰ cm² と大きな値をとる。一方、Raman 散乱の σ_s は 10⁻³⁰ cm² 程度と非常に小さく、N₂, O₂, H₂O などの空気の主成分や排煙中の高濃度汚染気体の検出に適している。蛍光は周囲分子との衝突によって消光 (quenching) され、上部成層圏、中間圏のように気圧の低い大気中で有効である。大気中での微量成分の LR 測定には差分吸収法 (DIAL: 2 波長での微量成分の吸収の差とエアロゾルによる後方散乱を利用) が利用される。

測定距離が長くなると(1)式の受光信号が減少し、信号雑音比 (SN) も減少して必要な値以下となる。この限界距離が LR の到達距離である。β_r が大きいほど受信信号は大きくなる。たとえば典型的な LR としてパルス当りのエネルギー 100 mJ、繰返し 10 Hz、開口 30 cm の受光望遠鏡をもつシステムを考える。積算時間を 1~2 s とすると到達距離は、大気中のエアロゾルに対しては数 km 程度、排煙に対しては 10 km 程度である。微量成分気体 (DIAL) に対しては 1~3 km 程度である⁷⁾。

1.3 測定のスケールと測定値

LR の測定対象として大気汚染、気象現象を考える。

大気汚染のスケールは汚染物質の輸送、変形過程、除去過程の相互的寄与の大きさによって表 1 のように分類される⁸⁾。ヒートアイランド等都市域に特有な都市汚染は数~数十 km のスケールである。気象現象はそのメカニズムとして機械的乱流、熱的乱流、熱気泡、対流雲、雲の集団、高低気圧、プラネタリー波 (地球を循環する波動)、などが考えられ、1 km 以下から 100 km 以上にわたっている。これらのスケールに対して測定手段としての LR は到達距離と測定場所 (platform) の二つの観点から眺められる。LR の到達距離は小型のもので 1~数 km、大型のもので数十 km である。Platform としては固定局 (一地点に固定)、移動局 (車載型)、航空局 (航空機搭載)、衛星局 (衛星搭載) に分けられる。LR の性能 (到達距離) の限界によって、各現象のスケールにあった platform が存在する (表 1)。移動局は測定したい対象物の近くまで出かけて測定できるが到達距離は数 km である。固定局は国立公害研究所の大型 LR⁹⁾ では約 50 km の到達距離を有し、都市地域のモニターに適している。それ以上の広域になると航空局¹⁰⁾ が適しているがわが国では航空機を利用した例¹¹⁾ は少ない。衛星局はスペースシャトルや衛星に搭載するシステムが計画されている段階である¹²⁾。成層圏エアロゾルのようにグローバルのスケールの測定では世界各地の多数のシステムでネットワークを構成して測定されている。

1.4 フィールド用レーザーレーダーの条件

LR 自体がフィールド現象を測定する装置である。このうち固定局は、1) LR の計測手法開発のために大型化・高性能化が可能、2) 特定地域のモニター、3) ネットワーク観測の構成点、といった特徴を有する。一方、測定場所がどこであっても問題なく使用できる実用的シ

表1 大気汚染現象のスケール

スケール	現象	例	過程			Platform
			輸送	変質	除去	
マイクロ (0~10 km)	発生源近傍汚染	交叉点, 道路際	◎	×	×	移
局所 (1~10 km)	高濃度汚染	広域高濃度汚染	◎	○	△	移, 固
メソ (10~100 km)	中距離輸送	光化学スモッグ	○	○	△	固, 移, 航
リージョナル (100~1,000 km)	長距離輸送	酸性雨	○	◎	○	航, 衛
地球規模 (>1,000 km)	大循環	成層圏汚染	×	×	◎	衛, 航

Platform; 移: 移動局, 固: 固定局, 航: 航空局, 衛: 衛星局

システムを狭義のフィールド用 LR と定義すると、その必要条件としては、

1. 小型軽量であること
2. 電力消費量が少ないこと
3. 耐環境性, 耐振動性, 耐雑音性に優れていること
4. 信頼性が高いこと
5. 操作性に優れていること

などである。航空局ではさらに厳しい条件が必要となる。

そのほか野外では寒暑の差が厳しく、雨中の観測が必要なこともある。温度の変化, 防湿・防水や日射による光学的 alignment の歪みなどに注意する必要がある。実用的な小型システムでは到達距離, 掃引範囲等の性能は大型装置に比べ制限されるので、広い空間分布を測定するには移動しながら測定することが必要となる。

2. 装置と構成

実用的なフィールド用 LR としては小型・軽量のもの望ましいことは、述べたとおりであるが、フィールド計測手法の開発のためには高精度の測定が可能な装置が適している。その観点からここでは国立公害研究所の大型 LR⁹⁾ を例にとり装置の構成を説明する。

この LR は短時間で 50~60 km の広域のエアロゾル分布を精度良く測定できることを目的として製作された。固定局であるので、整備もゆき届き、常時観測できる体制にある。装置は図2のブロック図に示すように、レーザー部 (Nd: YAG レーザー: 基本波 (1.064 μm) のピークパワー 80 MW, 2倍高調波 (532 nm) 30 MW, 繰返し: 毎秒 25 回), 受光部 (望遠鏡: 有効径 1.5 m のカセグレン型反射望遠鏡, 光電検出器 (光電子増倍管) のダイノードにゲート電圧印加可能), 信号処理部 (トランジエントレコーダーでデジタル化, ミニコンで積算し, 磁気テープに収録), 制御部 (ミニコンでプログラ

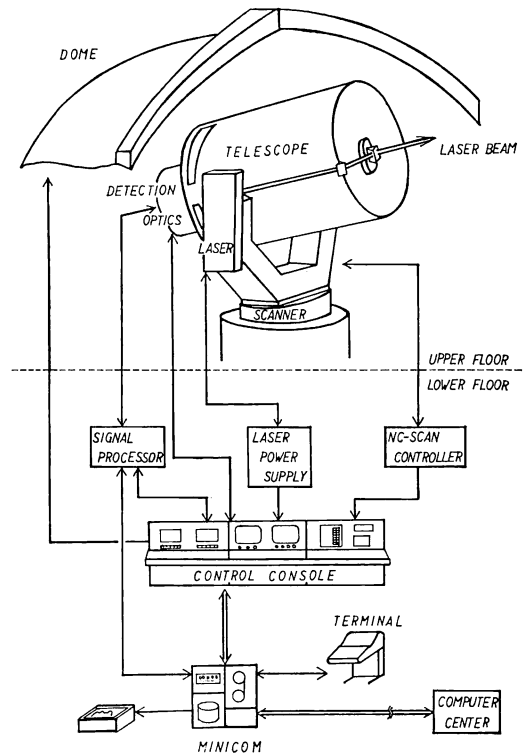


図2 国立公害研究所大型レーザーレーダーブロック図

ム制御), 走査部 (高位-方位方式) から構成される。

その他, 車載型の LR の例としては、国立公害研究所の計測車搭載型¹³⁾, 米国スタンフォード研究所 (SRI) の MARK IX¹⁴⁾, SRI¹⁵⁾, スウェーデン大気保護局¹⁶⁾ の DIAL システムなど多数のシステムが報告されている。また, cw 動作半導体レーザーを光源とした擬似ランダム変調 CW ライダー¹⁷⁾ はエアロゾルを測定対象とした場合到達距離が約 1 km であるが, ライトバンに積んで一人で運搬・操作が可能である。

3. データ表示と解析法

LR 測定データの表示には、画像は2次元であるので3次元空間・時間から2軸を選び、信号強度を濃淡として表わすことが多い。表示法としては、LR の生信号をそのまま図示したAスコープ、信号強度を濃淡(グレースケール)で表わす THI, RHI が代表的である。濃淡をカラースケールで表示することも行なわれており、基本的には濃淡表示と同じである。信号強度を一軸にとり、立体的に表示する方法を鳥観図法 (perspective) と呼び、通常陰の部分の消去(陰線消去)する。

LR データを表示するための解析にはまず前処理が必要である。前処理としては

- 1) 背景光 P_B などによる直流成分の除去
- 2) 距離自乗補正 ((1)式)の分母を補正する
- 3) 幾何学的効率(レーザービームが望遠鏡視野に含まれる割合)の補正を行なう。

(1)式で透過率の項に含まれる減衰の補正としてはもっとも単純には全ての距離で減衰係数が一様であると仮定する方法である。この方法は距離が短く透過率が1に近いときには近似的に正しい値を与えるが、精度を要求するときには減衰係数 $\alpha(R)$ と後方散乱係数 $\beta(R)$ の間に

$$\beta = k_1 \alpha^2 \tag{5}$$

の関係を仮定して、(1)式を α (または β) の微分方程式として解く方法が用いられる。Klett によって境界条件を遠方において精度良く計算する方法¹⁸⁾ が提案された。それによれば

$$\alpha(R) = \frac{X(R)^{1/k_2}}{\frac{X(R_c)^{1/k_2}}{\alpha(R_c)} + \frac{2}{k_2} \int_R^{R_c} X(r)^{1/k_2} dr} \tag{6}$$

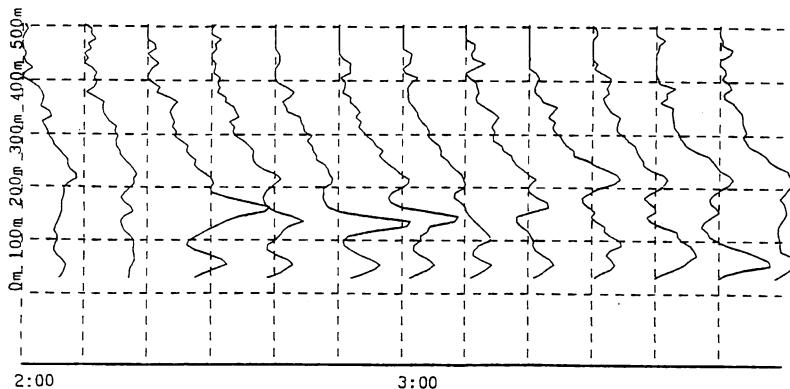


図3 時間シフトさせて表示したエアロゾル鉛直分布のAスコープ(夜間接地境界層, 1986年2月27日, 於筑波)²⁰⁾

ただし、 $X(R)=[P(R)-P_B]R^2/Y(R)$

となる。この方法はさらに空気分子の寄与を考慮する方法¹⁹⁾や α と β の間の関係が距離とともに変化する場合などが研究されている。

このようにして精度良く α が求められた後、極座標から直角座標に変換され、2次元データとして表示される。

以上は後方散乱係数 β_r の求め方を述べたが、差分吸収ライダー (DIAL) の場合は透過率 ((2)式) の $\alpha(R)$ を

$$\alpha_i(R) = N(R)\sigma_i + \alpha_M(R) \tag{7}$$

($i=1, 2$ は気体の吸収線と非吸収線の2波長)と書き直し、2波長における吸収 σ_i の差から気体濃度 $N(R)$ を求める。 α_M は吸収以外の消散項である。2波長の信号強度比を求めるので前処理は直流成分除去を除き必要としない。

4. 応用分野と測定例

レーザーレーダーの測定例として、大気境界層の観測、広域エアロゾル分布、海風前線、黄砂の観測について測定例のいくつかを紹介する。

4.1 大気境界層の観測

大気境界層は地上の影響が及ぶ高度2km程度までの大気層を指す。大気汚染でよく話題になる混合層や逆転層は境界層の一部である。時間変化のもっとも簡単な表示法はAスコープを時間軸をずらして表示する方法である。図3に DL-RM-CW ライダーで大気境界層を測定した例を示す。レーザー光が望遠鏡の視野に入らない blind の区間はレーザー光を水平に出し、視野に入った所で鏡を用いて光路を曲げ、地表面から鉛直分布を測定している²⁰⁾。本図では距離自乗補正を行ない、linear プ

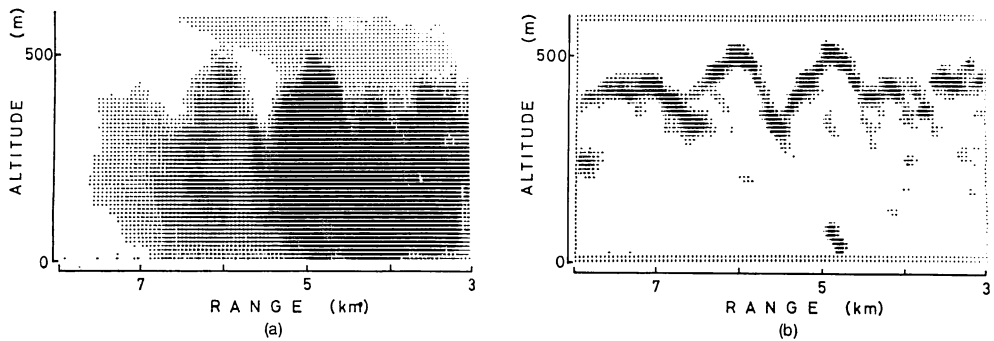


図4 混合層構造鉛直断面図 (RHI)²¹⁾
(a)距離未補正, (b)edge enhancement 手法を適用

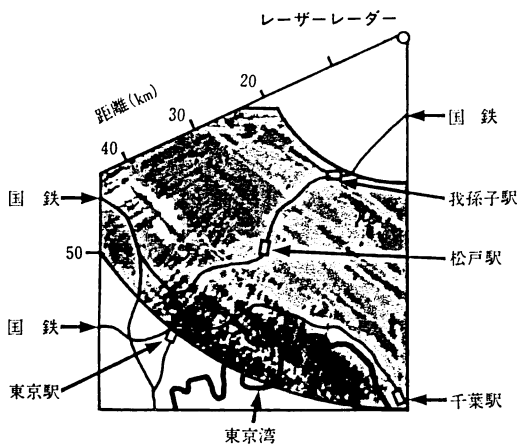


図5 水平面内の広域 (50 km 圏) エアロゾル濃度分布 (PPI)²²⁾
測定領域: 東京・千葉以北 40 km×40 km,
測定日時: 1984年2月9日 20時3分, 測定
時間: 22.5分, 風向: 北西, 風速: 4.7 m/s

ロットをしている. 図3も一種の THI である. 紙面の都合で割愛するが, DL-RM-CW ライダーによって視程, 道路沿道での排ガス分布・走行風や, 数 km までの雲などが観測されている.

図4には混合層 (境界層の中で日射によって混合が起こっている層を指す) の RHI 測定を示す²¹⁾. 図4(a)は距離自乗補正していない例, 図4(b)は鉛直方向に規格化し, 濃度が急激に薄くなる層を抽出 (edge enhancement) した例である.

4.2 広域エアロゾル分布の計測

エアロゾルは大気中に浮遊する粒子状物質からなり, その光減衰が視程を与え, 大気汚染現象の指標物質としても重要である.

50 km 遠方まで測定した例として, 図5に当研究所から東京方向の測定 (PPI) を示す²²⁾. データの処理については Klett の方法¹⁸⁾を発展させた Fernald の解析法¹⁹⁾を使用し, 全領域にわたって, 濃度の誤差は 20%

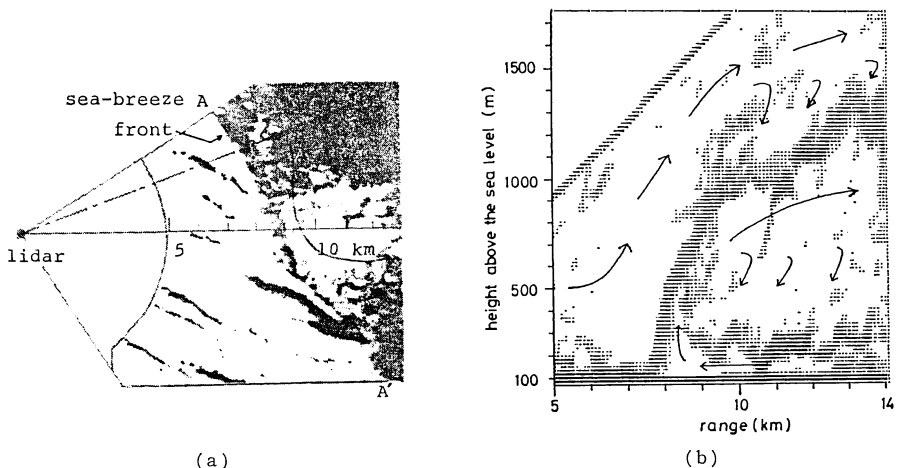


図6 海風前線の進入の様相²³⁾
(a) 平面位置 (PPI), (b) 鉛直断面構造 (RHI: edge enhancement 法を適用)

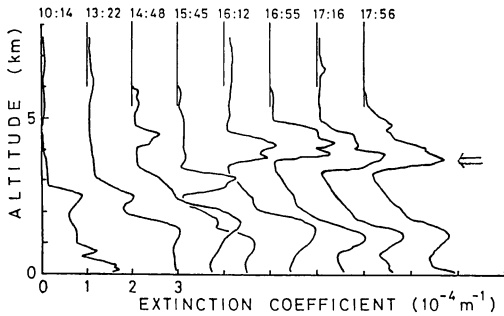


図7 黄砂飛来時のエアロゾル濃度鉛直分布
(1986年3月13日)²⁴⁾
矢印が黄砂と思われる層

以下と見積られる。東京方面は汚れていることが示されている。

4.3 海風前線の観測

当研究所は鹿島灘からの海風と東京湾からの風系が入り込む位置に属する。海水面が低温で、内陸が熱せられる気象条件では海風が発達し、内部に進入してくる。図6に海風の前線の平面位置 (PPI) と鉛直断面 (RHI) を示す²³⁾。図6(b)では edge enhancement の手法を適用し、風の向きを矢印で示した。海風前線のようすを時間を追って測定し、その内陸への進入のようすが観測されている。

4.4 黄砂の観測

黄砂はアジア大陸内部の砂漠地帯から巻き上げられ、春先に西よりの風に運ばれ、ハワイまで達するといわれている。日本上空では 2~5 km の高度を通過することが多い。図7は当研究所の大型レーザーレーダーで測定した黄砂の飛来時のエアロゾル濃度鉛直分布²⁴⁾ であるが、高度約 4 km の層を飛来してきていることがわかる。現在国内のレーザーレーダーグループがネットワークを作って同時観測する計画が進行中である。

5. おわりに

以上レーザーレーダーについてフィールド観測の観点から国立公害研究所の研究を中心に概要を紹介した。紙面の関係から述べられなかったことも多い。最近の研究に関しては関連専門誌 (Applied Optics に比較的多くの論文が掲載されている)などを参照されることを望む。

文 献

- 1) E. D. Hinkley (ed.): *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Topics in Appl. Phys., 14 (Springer-Verlag, New York, 1976) p. 380.
- 2) R. M. Measures: *Laser Remote Sensing* (Wiley-Inter-

science, Toronto, 1983) p. 510.

- 3) 竹内延夫, ほか: “レーザーレーダー”, レーザーハンドブック, レーザー学会編(オーム社, 東京, 1982) pp. 527-545.
- 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) 17-39.
- 5) 竹内延夫: “環境計測と光学”, 光学, 11 (1982) 107-113.
- 6) 土屋 淳: “レーザーによる人工衛星の測距”, 光学, 16 (1987) 296-297.
- 7) 竹内延夫, 清水 浩, 杉本伸夫: “レーザーレーダーによる大気状態の測定”, 応用物理, 52 (1983) 644-656.
- 8) 竹内清秀: “輸送過程”, 大気汚染物質の動態, 磯野謙治編, 第5章 (東京大学出版会, 東京, 1979) pp. 143-172.
- 9) H. Shimizu, *et al.*: “Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area,” *Appl. Opt.*, 24 (1985) 617-626.
- 10) たとえば E. V. Browell, *et al.*: “NASA multipurpose airborne DIAL system and measurements of ozone and aerosol profiles,” *Appl. Opt.*, 22 (1983) 522-534.
- 11) 板部敏和, ほか: “航空機搭載オゾン測定用 DIAL システム”, 第11回レーザーレーダーシンポジウム, B2 (1986) pp. 23-24.
- 12) R. J. Curran: “Lidar remote sensing from space,” *Proc. of 13th Int. Laser Radar Conf.*, A2, Toronto, Canada (1986).
- 13) H. Shimizu, *et al.*: “A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena,” *Opt. Quantum Electron.*, 12 (1980) 159-167.
- 14) R. T. H. Collis and P. B. Russell: “Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption,” *Laser Monitoring of the Atmosphere*, ed. E. D. Hinkley (Springer-Verlag, New York, 1976) pp. 71-151.
- 15) J. G. Hawley, *et al.*: “Ground-based ultraviolet DIAL system and measurement,” *Optical and Laser Remote Sensing*, ed. D. K. Killinger and A. Mooradian (Springer-Verlag, New York, 1983) pp. 128-137.
- 16) K. A. Fredriksson: “DIAL technique for pollution monitoring: improvements and complementary systems,” *Appl. Opt.*, 24 (1985) 3297-3304.
- 17) N. Takeuchi, *et al.*: “Diode-laser random-modulation CW lidar,” *Appl. Opt.*, 25 (1986) 63-67.
- 18) J. D. Klett: “Stable analytical inversion solution for processing lidar returns,” *Appl. Opt.*, 20 (1981) 211-220.
- 19) F. G. Fernald: “Analysis of atmospheric lidar observations,” *Appl. Opt.*, 23 (1984) 625-643.
- 20) 竹内延夫, ほか: “半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダーによる夜間フィールド観測”, 第11回レーザーレーダーシンポジウム, A1 (1986) pp. 1-2.
- 21) Y. Sasano, *et al.*: “Convective cell structures revealed by Mie laser radar observations and image data processing,” *Appl. Opt.*, 21 (1982) 3166-3169.
- 22) 中根英昭, ほか: “大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル濃度分布の定量的測定”, 国立公害研究所研究報告, No. 77 (1985) 75-99.
- 23) H. Nakane and Y. Sasano: “Structure of a sea-breeze front revealed by scanning lidar observation,” *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 64 (1986) 787-792.
- 24) 笹野泰弘, 林田佐智子, 中根英昭: “国立公害研究所大型レーザーレーダーによる黄砂粒子の空間分布観測”, 第11回レーザーレーダーシンポジウム, A5 (1986) pp. 9-10.