

大気環境のレーザ・リモートセンシング

— レーザ・レーダシステム —

鹿野哲生・野村彰夫・斉藤保典

信州大学工学部情報工学科

Laser Remote Sensing for the Atmospheric Environment

— Laser Radar System —

Tetsuo KANO, Akio NOMURA and Yasunori SAITO

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu University

Abstract : Laser radar systems are developed and constructed for the purpose of diagnosis of an atmosphere, and the concept of these systems are described. Errors caused by noises are also discussed. Examples of experimental results are shown with regard to our three types of laser radar systems, i.e., the differential absorption, the Mie scattering and the resonance scattering types. The differential absorption laser radar having a simultaneously tunable two-wavelength dye laser is applied to the measurement of NO₂ concentration in the atmosphere and the feasibility was confirmed. The Mie scattering laser radar, Nd-YAG laser one, is useful and practically used to the measurement of the distribution of small particles like an aerosol. The resonance scattering laser radar consisting of a dye laser excited by a coaxial flash lamp and a pulse gate photon counting system is adapted to the observation of the mesospheric sodium layer, and gravity waves and upper stratospheric temperature profiles are observed.

Key words : Laser Radar, Remote Sensing, Differential Absorption, Atmospheric Environment, Air Pollution.

レーザーレーダー, 遠隔計測, 差分吸収, 大気環境, 大気汚染

1. まえがき

レーザ・レーダシステムは1960年のレーザの出現と同時にその重要な応用面として研究が始められた。特に、1962年、米国の R.W.Hellwarth¹⁾らのルビーレーザによる巨大パルス光の発生の成功は、レーザ・レーダシステムに実用化の緒を与えた。以来、米国を始めとする世界の主要各国で、レーザ・レーダに関する研究が進められて来たが、実用面においても、現在、大気環境の問題は地球全体のグローバルな重要問題となって来ておるなど、レーザ・レーダは大気の広域環境診断装置として実用面でも益々その有用性を増している。

レーザ・レーダは、レーザを光源とし、指向性の鋭

い強力なレーザパルス光を大気中に放射し、対象物質からの反射または散乱されて来る光を計測することによって、計測対象の位置、形状、移動速度を初めとし、気圧、気温、さらに成分など、遠隔的に検知する装置である。これは従来のマイクロ波やミリメートル波帯のレーダと比べて波長が2~4桁も短いので、指向性や分解能の点で優れているほか、対象物質の原子、分子との相互作用特性を利用することが出来、これより物質の選択検出が可能となる。

レーザ・レーダのような方式は、本質的には三次元分布計測システムであり、高い時間的、空間的分解能で分析可能な特性を有しておる事から原理的に種々の計測法が考えられている。特に気象、環境関係ではライダー (Lidar: Light detection and ranging) と呼

ばれ、気圧、気温など超高層も含む大気環境の広域計測システムとして国際的観測にも欠かせないリモートセンシングシステムとなって来ている。

筆者らは、大気環境診断に関する研究の一環として、長野市域上空の大気環境の監視、保全を含めて、目的に応じたレーザ・レーダシステムの開発、整備を行って来たが、ここでは、これらのシステムの概要および実測例、付随する問題点、今後の展望などについて述べる。

2. レーザ・レーダの動作原理

レーザ・レーダには一般のレーダと同様にパルス方式と連続波方式とがあり、各々目的に応じて特長のあ

るシステムが開発され用いられている。レーザ・レーダから大気中に放射されたレーザビームは、大気中に浮遊する原子、分子または粒子（エアロゾルなど）により散乱、吸収される。これらの散乱光により測定対象の位置が検知されるが、散乱光の強度の変化から、測定対象気体の濃度が測定される。

2-1. レーザ・レーダで利用される散乱・吸収方式
物質による光の散乱、吸収の大きさは、散乱断面積（または吸収断面積）に直接影響され、用いる光の波長と測定対象の大きさの関係で相互作用方式が分類される。²⁾³⁾ 表1に現在レーザ・レーダで利用されている相互方式を示す。⁴⁾なお共鳴を利用する場合、非共鳴の場合より遙かに散乱断面積が大であり、従って選択

表1 レーザ・レーダに利用される相互作用

(S; 散乱断面積, 非; 非共鳴, 共; 共鳴, λ ; 散乱光波長)

方式	$\frac{dS}{d\Omega} \left(\frac{m^2}{str} \right)$	特長	備考
レイリー散乱 (Rayleigh)	非 10^{-30} 共 10^{-27}	Sはミー散乱に比べて小さい 散乱光強度 \propto 粒子密度 " $\propto \lambda^{-4}$ $\lambda = \lambda_i$	λ に比べて十分に小さい分子 (\AA オーダー)が対象、ミー散乱成分との分離困難、ミー散乱の小さい地球高層又は超高層の大気密度計測、化学成分の同定は出来ない。
ミー散乱 (Mie)	非 10^{-30} 共 10^{-12} ($1 \mu m$ 粒子)	Sは他の散乱に比し大、 散乱光強度 $\propto \lambda^{-\alpha}$ $\lambda = \lambda_i, (\alpha = 0 \sim 4)$	λ と同程度又は大きい直径の微小粒子が対象、大気層のエアロゾルの計測に最も多く使用。化学成分の同定は出来ない。
ラマン散乱 (Raman)	非 10^{-33} 共 10^{-30}	Sは非常に小さい。 物質の選択的検出可能、 散乱光強度 \propto 粒子密度	S小のため微量気体成分は困難だが、大気主成分 (N_2, O_2, H_2O, CO_2 等)、湿度、温度、視程、排煙の計測に適する。
蛍光 (Fluorescence)	非 10^{-30} 共 10^{-28}	Sは比較的犬、物質の選択的 検出可能、共鳴状態ではミー 散乱との分離困難	大気中では“消光” (quenching) 効果大、気圧の低い成層圏や中間層 (1 Torr以下、50km位) で物質濃度測定に使用。
吸収 (Absorption)	$10^{-23} \sim 10^{-24}$	気体の場合Sが大、 物質の選択的検出可能 $\lambda = \lambda_i$	波長可変レーザー光源が必要、高効率で気体分子濃度の計測可能、差分吸収散乱法は現時点では最も実用性に富む。

効果も大である。原子（例えばNa原子など）を対象にしたレイリー (Rayleigh) 散乱方式での共鳴過程の場合、特に共鳴散乱 (Resonant scattering) 方式と呼ばれ、これによる原子密度分布や大気環境の温度分布のレーザ・レーダによる遠隔計測が行われている。

レイリー散乱 (Rayleigh scattering) は、原子、

分子における弾性散乱で、大気中では対流圏や成層圏、中間圏またはそれ以上の高度における大気構成原子・分子による散乱である。この散乱方式での共鳴過程である共鳴散乱では、原子の種類への選択性が得られる。レーザ・レーダではレイリー散乱により、測定対象の密度、大気の屈折率、温度分布が遠隔的に測定される。

ミー散乱 (Mie scattering) は、入射光波長と同程度およびそれ以上の粒径のエアロゾルや黄砂、紛塵などの微粒子による散乱で、いろいろな波長のレーザー光で散乱強度の波長依存性や偏向 (偏向解消度) を測定することにより、粒子の密度のほか粒径分布、粒子の形状、屈折率などの測定が出来る。散乱断面積も大きいので、レイリー散乱と共に、レーザー・レーダでは最も多く用いられる方式である。また、ドップラー効果との併用により、大気中の風向、風速分布の遠隔計測の試みがなされている。

ラマン散乱 (Raman scattering) は、散乱光波長が入射レーザー光により物質固有の波長だけ偏移して散乱される非弾性散乱で選択検出も可能である。即ち、物質組織の分析、密度、温度の計測が可能であるが、表記のように散乱断面積が他の方式に比べて非常に小さいのでレーザー・レーダのような遠隔計測では実用上の制限が生じて来る。

蛍光 (Fluorescence) は、レーザー光の共鳴吸収に伴う自然放出で、物質固有の光 (蛍光) が放出される現象であり、ラマン散乱より散乱断面積が大きいので、選択的検出が実用的に可能である。但し、対流圏など空気密度が高い領域では、蛍光が大気中の空気分子と衝突して消光が生じて来て急速に減衰してしまう。また散乱断面積も、圧力や温度、湿度の依存度が高いので、大気中での計測には現在あまり用いられていない。しかし、将来、人工衛星を用いての超高層領域での利用は充分考えられる。また大気以外で、水中のクロロフィルや藻、油膜などの検出、菌細胞の検出など生物体への応用がなされており、今後ともこの分野での積極的な利用、新しい計測法の進展が予想される。

吸収 (Absorption) は、入射光が物質固有の吸収特性により共鳴波長成分が吸収され減衰を受ける現象であり、吸収断面積も気体の場合他の方式に比べ大きい。従って物質の選択的検出について実用的にも他の方式に比べ優れており、物質の組成分析、密度、圧力、温度など大気環境に関する殆ど全ての因子の遠隔計測が可能である。吸収を利用するレーザー・レーダでは、二つの光波長間での吸収、散乱の度合の差からとめる差分吸収 (Differential absorption) 方式が現在最も実用性に富むとされている。⁵⁾

筆者らの場合、地上110kmまでの Na 原子層分布の遠隔計測には Na 原子の共鳴散乱、対流圏のエアロゾルや黄砂、紛塵を対象とする場合はミー散乱、大気中の NO₂ やオゾンのような微量の汚染気体の遠隔計測では NO₂ の共鳴、非共鳴の同時二波長、オゾンでは交

互二波長による差分吸収方式を用いている。

2-2. 動作原理

一般のレーダと同様に、レーザー・レーダの場合も送受信電力間の関係を示すレーザー・レーダ方程式が基本となる。即ち、受信光電力を P_r(Watt)、送信光電力を P₀(Watt)、対象物質までの距離を R (m) とすると、対象物質が粒子や原子・分子気体のような散乱体の場合、受信光電力を P_r は次式のように表される。²⁾³⁾

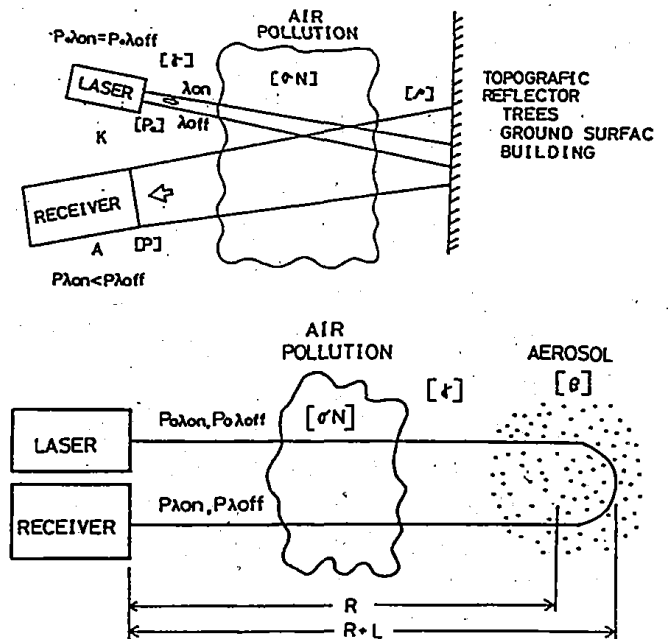
$$P_r = \frac{P_0 \cdot \ell \cdot K(\nu_i) \beta_i(R) T(\nu, R) T(\nu_i, R) A_r Y(R)}{R^2} \dots\dots\dots (1)$$

上式で $\ell = c\tau/2$ (c : 光速、 τ : 光パルスの時間半値幅)、 ν : 放射光周波数 (Hz)、 ν_i : 散乱光周波数 (i は散乱粒子の種類を示す)、 $K(\nu_i)$: 送受信光学系の全効率、 $\beta_i(R)$ は粒子の体積後方散乱係数と呼ばれ、 $\beta_i(R) = N_i(R) (dS/d\Omega) \dots\dots\dots (2)$ で表示される。但し、 $N_i(R)$ は粒子または原子・分子の密度 (個/m³)、 $dS/d\Omega$ は微分散乱断面積 (m²/str) である。T(ν, R) および T(ν_i, R) はそれぞれ透過率を示し、光の減衰定数を σ とすると散乱光に対し、

$$T(\nu_i, R) = \exp \left\{ -\int_0^R \sigma(\nu_i, \gamma) d\gamma \right\} \dots\dots\dots (3)$$

一般的には物質の種類によってあまり違いはないとし、 $T(\nu, R) = T(\nu_i, R) = T(R)$ として差し支えない。A_r は受光望遠鏡の有効面積 (m²)、Y (R) は送信レーザー光と受信レーザー光の重なり (視野の重なり) を示すパラメータで、送信部と受信部が同一構成部にあるシステムでは Y (R) = 1 となる。

図1 差分吸収方式レーザー・レーダ概念図



2-3. 差分吸収法

差分吸収を利用した差分吸収方式レーザ・レーダ (Differential Absorption Lidar) はDIALとも略称されているが、吸収過程を利用する場合の動作方式は、散乱の場合と少し異なる。即ち、測定対象の気体分子固有の吸収のほか、放射レーザ光を受信系側にもどすための反射体 (反射鏡や建物、地形物など) による反射、または散乱体 (エアロゾルなど微粒子) による広射、または散乱体 (エアロゾルなど微粒子) による後方散乱とを組み合わせた方式となる。図1の概念図による吸収の差を測定する動作方式のものは長光路差分吸収方式と呼ばれる。この場合測定対象物質による吸収は、測定区間内での平均値を示すことになるが、筆者らのNO₂を測定する近距離 (500m以内) 用のシステムはこの方式に相当するものである。⁶⁾

この方式は送信光電力が小さい小型のシステムでも、微量成分の定量測定が出来る利点を有し、大気中微量成分の測定においては、現在、最も高感度の分析・計測が可能な方式である。一方、微少散乱体からの散乱を利用する方式は、2波長における散乱強度を測定することにより吸収量の距離変化が得られ、これより大気中の対象物質の密度分布が測定される。即ち、距離分解能が得られるが、一般に長光路方式に比べ検出感度は低くなる。⁶⁾⁷⁾ 差分吸収方式では、測定対象気体の吸収曲線において、出来るだけ近接した極大、極小に同調した2波長とを用いることにより、測定において誤差の原因となる不確定要素 (システムの効率、視野の重なり、後方散乱係数、大気の減衰係数など) の影響をすべて打ち消すことが出来る。差分吸収方式の場合、レーザ・レーダ方程式により測定気体濃度は次式のように表される。⁸⁾

$$\int_0^R N(R) dR = \frac{1}{2 \sigma_d} \ell n \left(\frac{P_{off,R}}{P_{on,R}} \cdot \frac{P_{o,on}}{P_{o,off}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$N(R) = \frac{1}{2 \sigma_d} \frac{d}{dR} \left(\frac{P_{off,R}}{P_{on,R}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

N(R) は距離Rにおける測定気体濃度、on, off はそれぞれ吸収の極大、極小を示す。σ_d は極大と極小における吸収断面積の差、P_{on,R}、P_{off,R} は受信光電力 P_{o,on}、P_{o,off} は出射光電力である。背景光は無視した。これより、DIALでは近接2波長の受信信号の比をとり距離微分することにより、測定気体の濃度分布を求めることが出来る。また、距離R間の平均濃度をN̄とし、システムについて実測より決められるシステム定数をCとすると、(4)式より次式が得られる。⁶⁾⁹⁾

$$\bar{N} = \frac{1}{2 \sigma_d R} \ell n \left(C \frac{P_{off,R}}{P_{on,R}} \cdot \frac{P_{o,on}}{P_{o,off}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

上式は長光路差分吸収方式における、実測での測定気体平均濃度の算出に用いられる。即ち、物質の吸収特性での極大、極小点の波長の光の送信および受信電力値のみから測定気体濃度が求められ、種々の誤差要因が除去されることを示す。なお、Rは距離分解能と等しくなる。

筆者らの場合、短距離の大気中NO₂の計測については、建築物の壁からの反射を利用した長光路DIAL方式、⁶⁾ 遠距離のオゾン層については、微粒子からの散乱を利用した距離分解能を有するDIAL方式を用いている。⁷⁾

2-4. 最小検出濃度, 測定誤差

レーザ・レーダは、信号光を能動的に発生させ、外部の対象物質からの反射、散乱光より情報を取り出す、いわゆる能動的な遠隔計測システムである。このため、動作に伴いシステム自体から種々の雑音が発生し、特性に影響を及ぼし測定誤差要因となるため、これにより最小検出濃度が決められる。これらの雑音源としては、送信系、外部環境、受信系に存在するものに分けて考えられる。⁹⁾ レーザ・レーダのシステムを設計、製作するに当たっては、これらの雑音などの誤差要因を出来る限り小さくし、測定に影響を与えないようにせねばならないが、先ず第一にシステムによる計測の限界を把握しておく必要がある。

通常のパルス動作方式のレーザ・レーダでは、送信系での雑音源は、高出力レーザ光源励起用電源のパルス動作時の on-off により生ずる電氣的雑音が最も大きく、他への影響も大であるので極力制御する必要がある。このため厳重な電氣的遮蔽 (シールド) が必要となる。

外部環境は、レーザ・レーダによる計測の対象となる部分であるが、レーザ光を大気空間に放射した場合、大気空間の気象による変動や、目的とする対象物質以外の障害物による反射、散乱および吸収は、いわゆる背景雑音 (または背景光雑音) として、外部の発光源からの光雑音と共に受信系の光電変換器に検出され誤差の原因となる。太陽からの自然放射光や、ネオンなど外部光源による蛍光、赤外光などの背景光雑音は、光学フィルタおよび視野絞りの光学的方法で除去されるため、影響を少なくすることが出来る。

受信系に関する雑音としては、受信器の損失による散乱光雑音、光電変換器によるショット雑音、増幅器における電流性、電圧性雑音などの雑音や、デジタル

処理を行う場合は、A/D変換器における信号の量子化に付随する量子化雑音が生じて来る。光電変換器は、レーザ・レーダでは微弱信号光の検出のため、高感度の光電子増幅管が用いられるが、この部分は初段部の能動的な雑音（光電子流に関するショット雑音）源として、システムの性能に影響して来る。またA/D変換器による量子化雑音は、レーザ・レーダの場合、距離分解能にも直接関係して来るものであるが、特に長距離計測の場合、最小検出濃度などの性能に大きく影響して来る。

レーザ・レーダシステムの良否は、最小検出濃度で評価されるが、最小検出濃度の式は(4)式に基づいて導出される。濃度を求める際、実際に測定値として得られるものは電力値であるが、これに誤差が含まれると考える。すなわち距離分解能がLの場合、距離R~R+L区間内の平均濃度をN、それに含まれる誤差をΔNとして、相対誤差の自乗の形で表すと次のようになる。¹⁰⁾

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 = \left(\frac{1}{2\sigma_d L N}\right)^2 \times \left\{ \frac{1}{M} \sum_{\substack{i=on \\ off}} \left\{ \left(\frac{\Delta P_{i,R}}{P_{i,R}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{i,R+L}}{P_{i,R+L}}\right)^2 \right\} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この場合の最小検出濃度N_{min}は、信号光と雑音による電力が等しい場合（信号対雑音比=1の場合）で表示される。

$$N_{min} = \frac{1}{2\sigma_d L N} \times \left\{ \frac{1}{M} \sum_{\substack{i=on \\ off}} \left\{ \left(\frac{\Delta P_{i,R}}{P_{i,R}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{i,R+L}}{P_{i,R+L}}\right)^2 \right\} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

上(7)、(8)式でMは積算回数、iはon、offの場合を示し、RとR+Lからの信号光であることを示す。P_{i,R}、P_{i,R+L}はそれぞれ距離RおよびR+Lからの信号光電力、ΔP_{i,R}、ΔP_{i,R+L}はそれぞれそれらに含まれる誤差電力である。σ_dは、on, offの波長での吸収断面積σ_{on}、σ_{off}の差である。ただし、上式ではP_{i,R}とP_{i,R+L}との共分散の項を無視した。

誤差要因として、窮極的に問題となるものは、光電子増倍管のショット雑音による(ΔP/P)_sおよびシステム動作時の電気雑音による(ΔP/P)_eである。電気雑音は電磁輻射雑音と増幅器による雑音およびA/D変換器による量子化雑音が考えられる。それぞれ

電圧値V_R、V_A、V_{A/D}で表示すると式(8)の誤差の部分は次式のように表される。¹⁰⁾

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 = \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_s^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_e^2 = \frac{2eB}{SP} + \frac{V_R^2 + V_A^2 + V_{A/D}^2}{(SGZP)} \dots\dots\dots (9)$$

上式でeは電子の電荷、Bは測定系の帯域幅、SおよびGは、それぞれ光電子増倍管の陰極放射感度と電流増倍率である。Zは光電子増倍管の負荷抵抗である。

表2 誤差計算に用いた主なパラメータ

記号	定義	値
P	出射パワー	5 kW
λ	波長	465.8 nm
A	受光面積	0.2 m ²
K	光学系効率	1 × 10 ⁻⁴
Y	視野重なり	1
ρ	反射体反射率	10%
σ _d	吸収断面積の差	1.3 × 10 ⁻²³ m ²
V	大気視程	10 km
e	電子の電荷	1.6 × 10 ⁻¹⁹ C
B	測定系帯域幅	25 MHz
S	陰極放射感度	64 mA/W
G	電流増倍率	5.3 × 10 ⁵
V _R	輻射ノイズ電圧	0 V
V _A	増幅器ノイズ電圧	400 μV (積算1) 5 μV (1000)
V _{A/D}	1LSB電圧	400 μV
Z	負荷抵抗	50 Ω

図2 最小検出濃度および誤差の距離依存性

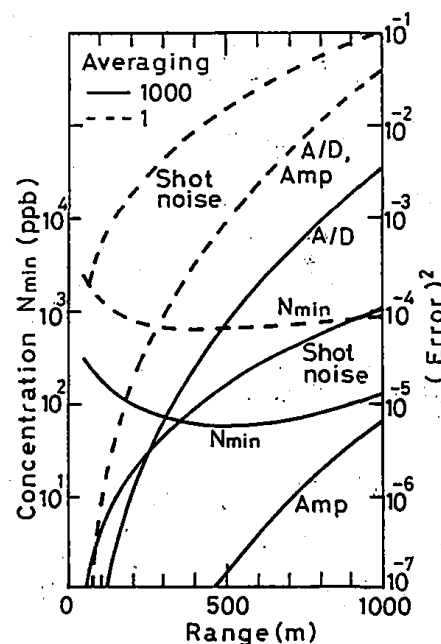
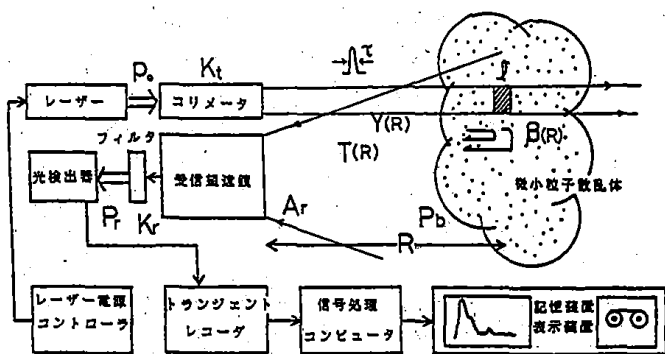


図2は長光路差分吸収方式において、信号対雑音比=1とした場合の最小検出濃度および各種雑音源による誤差の影響の距離依存性を示す。各種雑音成分は、受信光電力が距離の自乗に反比例して減少するため、距離と共に増大する。計算は実測値に基づき行われ、用いたパラメータを図2に示した。

3. レーザ・レーダの装置

レーザ・レーダのシステム構成は図3に示すように、レーザ光を放射するレーザ光源(パルスまたは連続光)とコリメータからなる送信系と、微弱信号光を検出するための集光用望遠鏡と光を電気信号に変換する光検出器からなる受信系と、電気信号を記憶、処理、表示するためのトランジエントレコーダ、コンピュータおよび記録、表示装置からなる信号処理系から成っている。

図3 レーザ・レーダの一般的構成



大気環境において、地球をとりまく超高層や地表面の大気の動態などの気象条件、大気中に含まれる微粒子、汚染物の影響などは、人間生活に直接関わって来るものである。特に汚染物については、地勢および気象によっては長時間にわたる滞留や、遠方地域からの影響も無視出来なくなる。筆者らは大気環境の診断として、グローバルな大気の動態に関することから、地域内大気環境の監視保全および広域計測可能なリモートセンサとしてのレーザ・レーダ(ライダ)システムの開発に関する研究を行ってきた。筆者らの現有システムとしては、測定対象により異なるが、表3に示すように、近距離(500m以内)、中距離(5 km以内)および長距離(超高層120km以内)用の3種類のシステムにつき開発整備し、使い分けを行っている。

近距離用のものは車載型移動式で、主として市街地内での汚染物質(NO₂が主体象)濃度を測定する。これは筆者らが開発した窒素レーザ励起の同時2波長色

表3 レーザ・レーダセンシングシステム

	測定方式	測定対象	システム形態
近距離用 (移動型)	同時2波長光路 差分吸収方式	500m以内、 道路上のNO ₂ 、 粉塵	窒素レーザ励起 同時2波長色素レーザ、 50cm径フレネルレンズ鏡遠鏡
中距離用 (固定型)	Mie散乱方式	3 km以内、 エアロゾルの 空間分布	フラッシュランプ励起 Nd-YAGレーザ、 45cmニュートン型反射鏡遠鏡
"	同時2~3波長 DIAL方式	NO ₂ 、エアロゾルの 空間分布、オゾン	エキシマレーザ励起 同時2~3波長色素レーザ
遠距離用 (固定型)	Rayleigh散乱、 共鳴散乱方式	垂直120km以内、 Na原子、エアロゾル、 温度分布	同軸型フラッシュランプ励起 色素レーザ、 1m径ニュートン型反射鏡遠鏡

素レーザ光源を用い、長光路差分吸収方式により計測を行うものである。中距離用のものはフラッシュランプ(2本)励起のNd-YAGレーザを光源とする固定式で、ミー散乱によるエアロゾルおよび粉塵を計測の対象とする。この特性としては、信号対雑音比(Signal to Noise Ratio)が3で約3 kmまでの検出性能をもち、長野市街地を含む広範囲の測定を可能とする。遠距離用のものは、同軸型フラッシュランプ励起色素レーザを光源とする固定式で、対流圏から中間圏領域において、共鳴吸収散乱法によるNa原子層の垂直分布の計測を主体象としている。これはNa原子をキャリアとして、超高層大気環境の動態を探るものであるが、レイリー散乱光によるエアロゾルや、さらに温度の垂直方向分布の計測も同時に行う。また、NO₂およびオゾン測定対象にしたエキシマレーザ励起色素レーザを光源とするDIAL方式(距離分解能33~78m)のものも、現在システムの構成が進んでいる。表4にこれらのシステムの仕様を示す。

表4 システムの仕様

Specification of laser radar sensing systems.

Transmitter	N ₂ laser pumped dye laser	Flash lamp pumped Nd:YAG laser	Flash lamp pumped dye laser
Output	50 kw	25 MW (1st)	400 kw (0.2 J/pulse)
Repetition	10 pps	5 pps	0.5 pps
Pulse duration	5 ns	20 ns	500 ns
Line width	4 nm	10 nm (1st), 10 nm (2nd)	0.003 nm
Wavelength	λ 463.1 nm λ 465.8 nm	1064/532 nm	589.0 nm
Divergence	< 1 mrad	0.5 mrad	1.0 mrad
Wavelength tuning	I.F. filter	Mirror, KDP (SHG)	Prism, Etalon
Dye	DAMC(10 ⁻² mol/l)		Rhodamin 6G
Receiver	Fresnel lens	Newton	Newton
Type			
Diameter	50 cm	45 cm	100 cm
Focal length	80 cm	100 cm	246.2 cm
Field of view	1 mrad	1 mrad	1 mrad
Photomultiplier	R376 (HTV)	R376 or R268 (HTV)	R 585
Driver	Manual	Auto	Fix (Vertical)
	Type Azimuth-Elevation Resolution angle 0.05°		
	Stepping Motor (LF-653HG2, Oriental Motor)		
	Motor driver (UDX5107)		
	Driver controller (PC 9801)		
Processor			
Transient recorder	DM902(Iwatsu)		
Min sampling time	10 ns, Resolution 8 bit		
μ-COMP-PC9401-VM	(NEC)		
RAM	128 KB, Machine cycle 8 MHz		
	Multi-Channel pulse Gate photon Counting System.		

図4は筆者らが特に差分吸収方式レーザ・レーダに適用するため開発したレーザ光源の原理図である。これは紫外域レーザ（窒素レーザまたはエキシマレーザなど）励起色素レーザにより、干渉フィルタ同調法で同時に同一光路上に2波長を放射させることが出来る¹¹⁾ また、干渉フィルタの傾斜角より波長の調整も可能で、必要とする光の波長に出力光を容易に設定出来る。図5において、実線はNO₂の計測のためにon, offの二つの波長に設定した色素レーザ光源のスペクトル特性を示し、破線はNO₂の吸収特性を示す。測定時にはこの2波長の出力光の差から測定対象の密度

図4 同時2波長色素レーザの同調回路の原理図

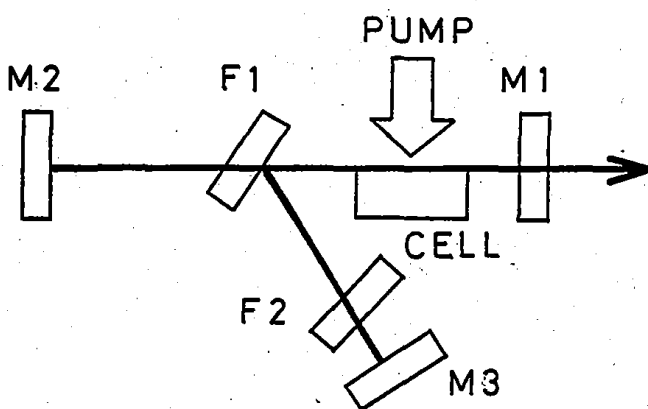
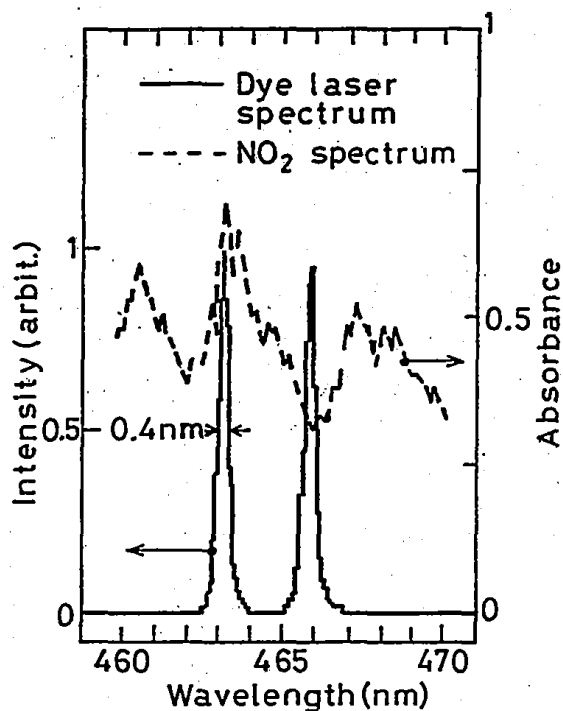
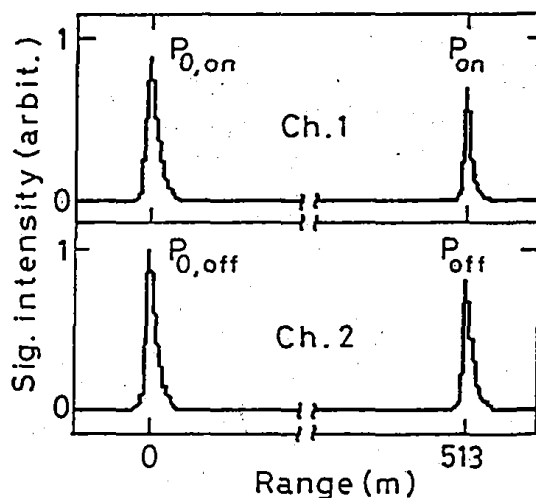


図5 同時2波長色素レーザ同調スペクトルおよびNO₂吸収スペクトル



(濃度)が分かる。図6は一つのレーザパルス光の受信信号の一例である。同時に2波長のレーザパルス光が放射される場合は、前述の(6)式で示されるように、この4つの信号の強度比により、システムから反射体まで(距離R)に存在するNO₂の平均濃度が求められる。このため、受信系を構成する光電変換器(光電子増倍管)や増幅器およびA/D変換器を有するトランジェントレコーダなどは全て2チャンネル構成となっている。この場合、システム定数Cは実験値として1.3の値を得ている。

図6 受信信号例
(長光路差分吸収方式の場合)



4. 測定結果例

目的に応じてレーザ・レーダシステムが構成され、それらのシステムによる大気環境計測がなされた。以下それぞれの測定結果例を示す。

図7 NO₂濃度測定 I

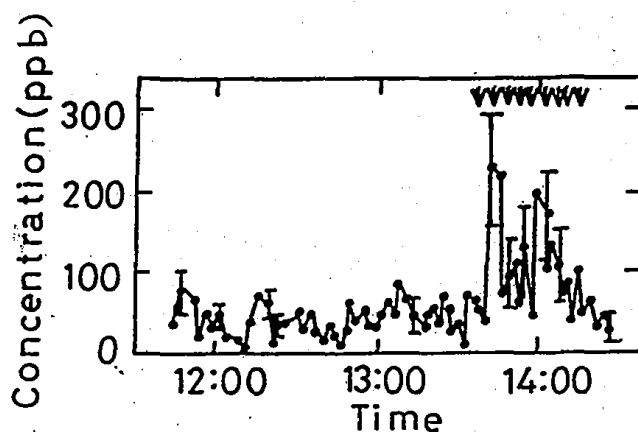


図7はNO₂濃度の計測について、新たに開発、構成された、近距離用の同時2波長差分吸収方式レーザーレーダによる測定結果例である。図8に示すように、比較的交通量の多い国道18号をはさみ、工学部情報棟の屋上(地上30m)に設置されたシステムから513mの距離に位置する反射体(建物の壁)の上部にある煙突から断続的に排出される黒煙を診断したものである。図において矢印は黒煙の排出時刻を示す。図9は、前

図8 システムと測定対象物の位置

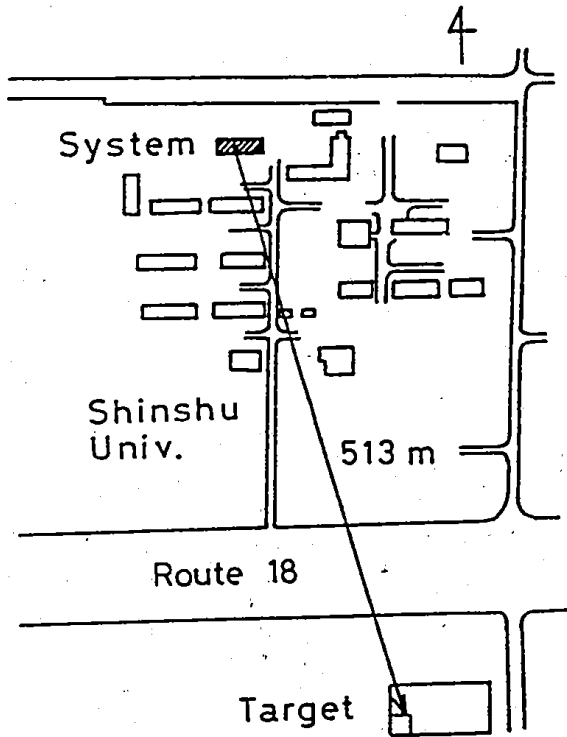
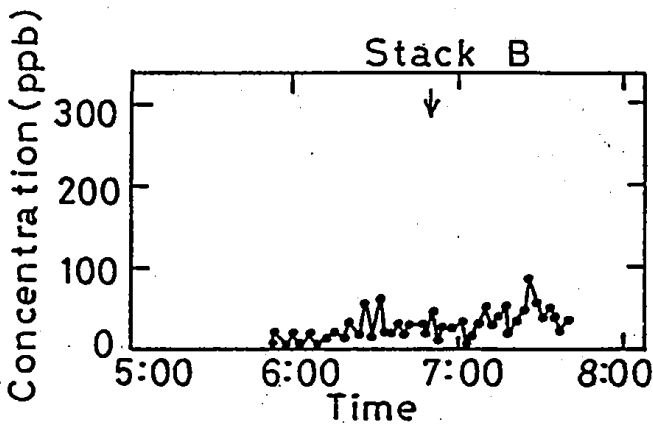


図9 NO₂濃度測定II



記煙突より10mだけシステムに近い位置にある煙突(水蒸気の白煙を放出)に対する測定例である。これらの結果より、排出された黒煙中には、高濃度のNO₂が

含まれていることが分かる。測定では1000回の積算平均を行った。このシステムによる測定では、1ショット4個のデータは、60msで得られるが積算平均処理および記録に要する時間を考慮して、パルスの繰り返し数を10ppsとした。従って、測定時間は積算平均で約1分40秒である。

測定の精度として、排煙のないときは最大約50ppb(±25ppb)、排煙時には140ppb(±70ppb)と約3倍ほど大きくなる。この原因としては積算平均の間のNO₂濃度そのものの変化のほか、光電子増倍管のショット雑音、システム動作時の電気雑音、大気状態の変動の影響等が考えられる。図7、図9の両図は、2波長が非常に近接(2.7nmだけ異なる)しており、信号光電力の比を取るにより、測定対象物以外からの影響は大幅に除去されるという差分吸収方式の特徴を示すものである。

図10 ミー散乱方式による微粒子分布測定例

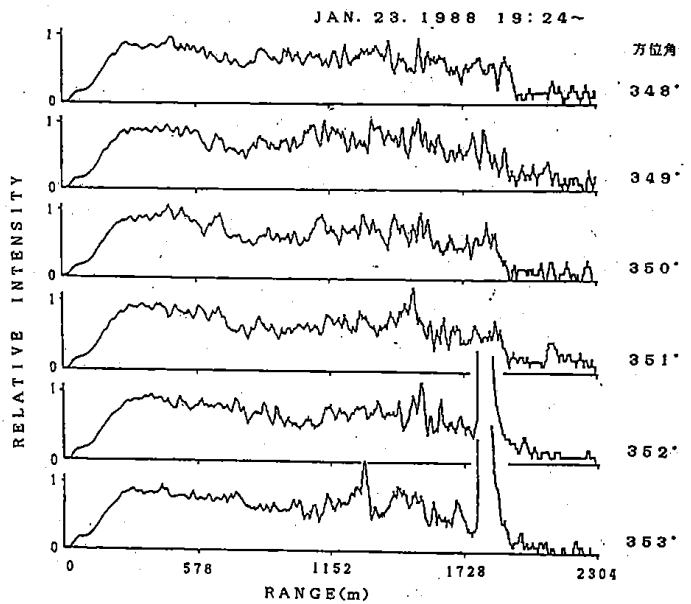
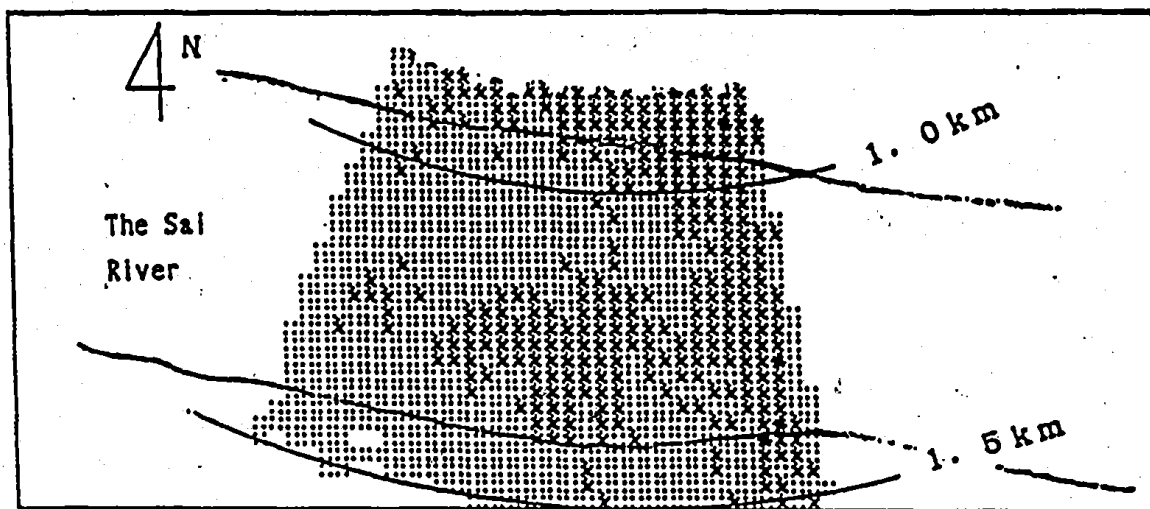


図10はミー散乱方式によるエアロゾルなど微粒子分布を計測した結果例で、水平方向に掃査し、各角度方向での距離と散乱光強度の関係(Aスコープ表示)を示す。大気中にエアロゾルなど微粒子が存在している場合、散乱光強度の増大となって示される。

図11は水平掃査した場合の受信散乱光強度の水平分布を示す。水平方向の最小掃査角度は0.08°であるが、これは3kmの距離前方では約2mの横方向移動となり、その地点での水平放射角度による横方向の分解能に相当する。レーザー光の放射方向の距離分解能は、使用したA/D変換器のサンプリング速度(8bit, 10ns/sample)で決まり、本システムの場合1.5mである。

図11 受信散乱光強度の水平分布 (水平掃査した場合)



Filename: fe292720 Date: 12/31/87 Time: 03:31:23 - 04:17:51 Weather: Temp: 5.0 Humidity: 60.0

図12、図13は、Na 原子の共鳴波長に同調した、単波長パルス色素レーザー・レーダ (ピーク電力200Kw ~ 2 Mw) による共鳴散乱方式による実測例である。¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾ 超高層 (75~110km) における散乱強度の大きさは、Na 原子密度を示すが、図12はシステムによる測定データを、さらにコンピュータによる処理を行った例で、オーロラの出現による大気動態の変化を示すものである。¹²⁾¹³⁾ 図13は、温度の垂直方向分布 (23km以上) の測定例であり、気象ゾンデによる実測結果 (24km以下の実線) との比較を示している。¹⁴⁾

受信系としては、現在1m直径のニュートン型反射望遠鏡で受光している。超高層からの散乱光は極めて微弱であるため、光を光子の数として個数を計数する光子計数法において、低雑音での検出可能なパルスゲート光子計数方式の受信システムを試作して用いている。¹⁵⁾ 一方、エアロゾルからのミー散乱光など、比較的近距离からの強い散乱光は、光子集団のアナログ

量として検出し、A/D変化して情報処理を行うアナログ-デジタル受信方式に受信系を切り換えるなど、散乱光強度に応じて受信系の使い分けを行っている。

図13 共鳴散乱方式による実測例II (大気の垂直方向温度分布)

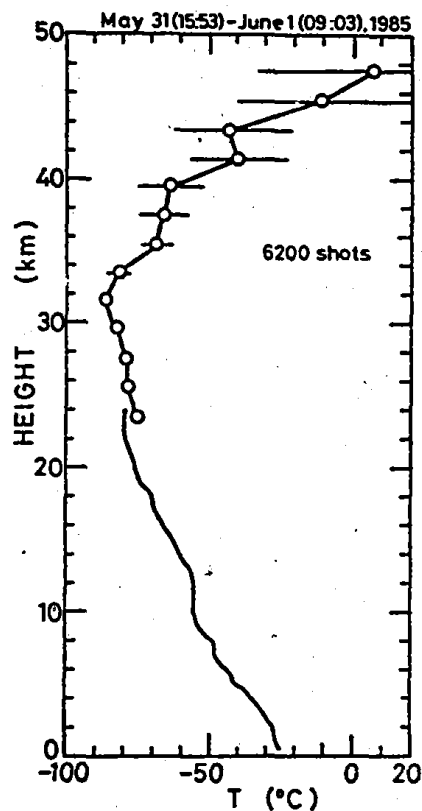
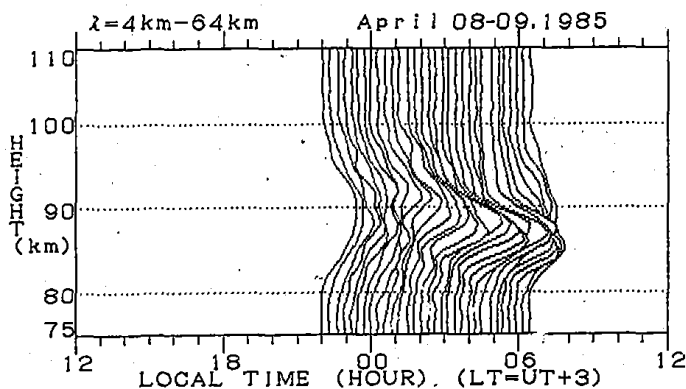


図12 共鳴散乱方式による実測例I (Na 原子の垂直方向密度分布の経時変化)



5. あとがき

レーザ・レーダは、大気環境の広域計測可能なレーザリモートセンシングシステムとして、その開発研究の歴史は既に20数年に及ぶが、現在までミー散乱利用の方式は実用的にも完全に定着するなど、気象、環境関係で着実にその有用性を増して来ている。しかし、未だ多くの面で基礎研究が重要な段階にあり、実用化に関しての問題の解決、測定対象に応じた新しい方式の開発など積極的に進める必要がある。本稿では、筆者らの開発して来たシステムを中心に問題点、特性および測定例を述べた。また、雑音の問題にも触れたが、これは極微弱光計測においてシステムの性能を決定する本質的な問題でもある。

システムの方式として、差分吸収方式では、波長の近接した2波長を同時に放射するレーザ光源を使用することは、不要な変動の測定値への影響を大幅に除去出来る。ミー散乱方式は、エアロゾルの空間分布をはじめとして、逆転層、ナイトスモッグ、黄砂、冬から春期のスパイクタイヤ粉塵の計測に有効である。共鳴散乱方式は、中間層 Na 原子層の計測に用いられ、大気中の重力波の存在や、南極においては、オーロラの影響など明確に計測されるなど、その有用性が実証された。

長野市のような地方中規模都市における大気環境保全のためのライダーシステムとしては、中距離程度のシステムで主要区域の計測は充分可能と考えられ、これと移動式の近距離用システムを併用すれば、より一層厳密なデータが得られる。さらに遠距離用システムの併用は、季節による変化、外部要因の地域環境への

影響など、よりグローバルな計測を可能とし、地域でのデータと併せて有用な情報を得ることが出来る。

リモートセンシングシステムとしてのレーザ・レーダの今後の課題としては、先ず、構造的にさらに小形・軽量化する問題がある。現在レーザ・レーダの人工衛星への搭載が検討され始めており、小形、軽量さらに高効率、長寿命の高速のレーザ光源やコンピュータの開発が問題となる。レーザ・レーダは本質的に実時間、三次元計測システムであり、測定対象の大気環境中には種々のパラメータを含むなど、情報処理においては多元情報の高速処理技術が基礎となる。このため、高速、大容量プロセッサやそれに関するソフトウェア技術の開発が常に問題となって来る。レーザ・レーダの性能向上に常に付随する基本的な問題として、測定距離の長距離化がある。これは究極的には低雑音、高感度化であるが、低雑音レーザ光源(半導体レーザなど)からなる送信系や、低雑音検出素子を用いた受信方式(光計数法、光ヘテロダイン法など)を有する高性能システムの開発は今後とも実用の面で重要な課題である。また測定対象の多様化、広域化に応じた新しいレーザ・レーダの開発、システムの広域ネットワーク網化など、人工衛星への搭載と相まって、レーザ・レーダは地球の大気環境の地域的およびグローバルな監視、保全のための三次元計測システムとして、益々その特徴を発揮し、重要性を増して行くものと思われる。

おわりに、レーザ・レーダシステムの実現にあたり、システムの設計、製作をはじめ、改良、整備など終始協力を頂いた、本学情報工学科小林史利技官に深謝する次第である。

文 献

- 1) F. J. McLung and R.W. Hellwarth : J. Appl., 33, 823. 1962.
- 2) 鹿野哲生, 野村彰夫 : レーザレーダとその装置, 光学技術コンタクト, Vol. 19, No. 3, pp. 10~19, 1981
- 3) 小林喬郎 : 環境情報のレーザ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, Vol. 5, No. 1, pp. 17~39, 1985.
- 4) 鹿野哲生, 野村彰夫 : レーザレーダによる大気環境計測, 文部省「環境科学」報告集, B-125-R50-4, pp. 73~77, 1982.
- 5) R. M. Schotland: Errors in the Lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption, J. Appl. Meteorol., Vol. 13, pp. 71~77, 1974.
- 6) 斉藤保典, 藤本哲知, 野村彰夫, 鹿野哲生 : NO_2 濃度測定用同時2波長長光路差分吸収方式レーザ・レーダシステム, 電子通信学会技報, OQE85-24, pp. 85~92, 1985.
- 7) 斉藤保典, 野村彰夫, 樋口隆一, 鹿野哲生 : 同時二波長発振色素レーザーとDIALへの応用, レーザ研究, Vol. 13, No. 3, pp. 51~59, 1985.

- 8) 齊藤保典, 野村彰夫, 鹿野哲生 : 二波長同時差分吸収方式レーザーレーダーシステムの開発, 国立公害研究所 研究報告, 第77号, pp. 117~133, 1985.
- 9) 鹿野哲生, 野村彰夫, 齊藤保典 : レーザレーダ計測における雑音の問題, 電子情報通信学会技報, EMCJ87-10, pp. 17~24, 1987.
- 10) 齊藤保典, 野村彰夫, 鹿野哲生 : 同時2波長長光路差分吸収方式レーザーレーダによる排煙内 NO₂ の濃度測定, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J70-C, No. 2, pp. 207~215, 1987.
- 11) Y.Saito, T.Teramura, A.Nomura and T.Kano : Simultaneously tunable two-wavelength dye laser using two dielectric multilayer filetes, Applied Optics, Vol. 22, No. 12, pp. 1799~1800, 1983.
- 12) A.Nomura, T.Kano, Y.Iwasaka, H.Fukunishi, T.Hirasawa and S.Kawagauchi : Lidar Observations of the Mesospheric Sodium Layer at Syowa Station, Antarctica, Geophysical Research letters, Vol. 14, No. 7, pp. 700~703, 1987.
- 13) A. Nomura, Yasunobu Iwasaka and T. Kano : Gravity wave activities over Syowa Station, Antarctica, Proc. of the NIPR Symposium on Polar Meteorol and Glaciology, No. 2, pp. 1~7, 1989.
- 14) A. Nomura, H. Kanzawa and T. Kano : Upper stratospheric temperature profiles obtained by lidar measurements at Syowa Station, Antarctica, Proc. of the NIPR symposium on Polar Meteorology and Glaciology, No. 2, pp. 8~15, 1989.
- 15) 楠沢英夫, 齊藤保典, 野村彰夫, 鹿野哲生 : 微弱光用マルチチャンネル信号処理システムの試作研究, 第33回応用物理学関係連合講演会, 4 a-M-8, 1986.