

# 大阪大学における大気観測用 レーザーレーダーシステムの現状

大阪大学工学部  
電気工学教室  
レーザー工学研究施設

山中千代衛 中井貞雄 長尾泰明  
佐部市朗 檜原俊昭 近田彰夫  
西村正太郎 鈴木 胖 村上吉繁  
北村新三 土師総一 小林 純

## 1. まえがき

レーザー (Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) の発達によってコヒーレントな光ビームが得られるようになり、電波の領域が可視域にまで拡大された。レーザービームは単色性にすぐれ、かつ指向性は回折による広がりによるのみであるから、ビームの広がり  $\theta$  は  $\lambda/D$  程度となる。ここに  $\lambda$  は波長、 $D$  はレーザービーム送出径である。したがって  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  ラジアンがえられ、たとえば波長  $1\mu$  のビームを直径 50cm のレンズで送出すれば、月面における広がりはずかに 1.9 km 内外である。

またQスイッチ技術が開発され、レーザー発振器のQ値を瞬間的に高めることにより、短かい幅の大出力パルスを送出できることになり、先の指向性とともレーダー方式に非常に好都合の条件が与えられた。特に電波レーダーに比べ波長が5ケタ以上も短いので、微小の対象物、大気分子、スモッグ、温度、密度の変動にきわめて鋭敏に感じるので、気象学でいう逆転層、ミスト、霧、雲、晴天乱流をはじめ一般の大気構造の解明に広く用いることができる。さらに大気汚染のほか上層大気、イオン層などの観測にも使用される。

筆者の一人はレーザー光の散乱によるプラズマ計測を完成したが、その関連技術としてレー

ザーによる大気汚染の研究をはじめ、ルビーレーザーによる大気逆転層の観測に成功した。

その結果に沿ってルビーレーダーの実用化につとめ大阪大学工学部にレーザーレーダードームを完成した。この間大阪府立工業奨励館においてレーザー計測部会が発足し学界のみならず広く産業界にも呼びかけレーザー計測の開発を推進することになった。学内においてはレーザー計測懇談会が結成され、専門の異なる研究者間でのレーザー計測の討論が広く実施されている。

昭和47年度には大阪大学工学部にレーザー工学研究施設が開設され、レーザー工学に関する研究を集中的に実施することになっている。その第3部門がレーザー計測を分担する予定である。

またレーザーレーダーシステムをロケットに搭載する計画も順調に進展し、東大宇宙航空研究所の L-3H-5, L-3H-7 ロケットを用い、

AZL 観測の名の下に超高層のエアロゾルを半導体レーザーレーダーにより観測した。この計画は昭和45年9月19日、昭和46年9月3日の2回にわたって成功裡に実施を終了した。

現在レーザーの多様化と共に対象物質を弁別しうるレーザーレーダーの計画が急速に進展中である。

筆者らの他の一人は環境問題をシステム工学的に処理する計画を立て上記のグループと密接

に協力し鋭意研究を開始した。

以上のように大阪大学においてはレーザーの出現以来夙にレーザーシステムの研究が実施されており、工業の発展が人間生活の条件と調和して行われるよう科学技術の一側面より努力している次第である。

## 2. レーザーレーダー

### 2.1 レーザーのレーダーへの応用

近年、レーザー光を遠隔計測の手段として用いる試みがいろいろと工夫されている。これは対象物によるレーザー光の反射あるいは散乱光を受信し、その物の存在する位置その他に関する情報を得るもので、方法はマイクロ波レーダーと類似している。レーザー光はそのすぐれた指向性のため、遠距離測距や物体表面の高精度の測定が可能な反面、空気中を透過する際に微粒子や原子分子の影響を著しく受ける。この点に着目し、従来のマイクロ波レーダーでは観測不可能であった大気成分の分析をレーザーが可能にした。最近では多くの処でレーザーレーダーに関する研究が行なわれているが、大阪大学においては種々の大気観測用レーザーレーダーの開発が進んでいる。

### 2.2 大気汚染の測定方式

大気汚染物質は約40種類にのぼり、そのほとんどはガス状で分布し、分子の場合の濃度は通常0.01~10ppm。金属蒸気の場合は0.01~10ppb.であるといわれる。いままでこれら汚染物質の測定には、数分から数時間にわたり変化を積分する湿式法と呼ばれる化学分析法が用いられてきたが、汚染状況の時々刻々の変化を広範囲に感度よくその場で観測する必要が生じてきた。そのためにレーザーレーダーを用いる方式が脚光をあびており、その試みが各方面で進められている。その方式を大別すると汚染物質のレーザー光による散乱を利用するものと、吸収を利用するものがあり、(1)ラマン後方散乱、(2)共鳴後方散乱、(3)弾性散乱、(4)共鳴吸収の4つの方式に分類される。次にその個々について述べる。

### (1) ラマン後方散乱

ラマン後方散乱は他の方式に比べて単一レーザー光源にて種々の汚染物質を検出できるという利点をもっている。分子のラマン散乱光は振動周波数によってきまる特有のエネルギー幅だけレーザー光よりシフト(ストークス光)するからである。図1に代表的な汚染分子のラマン

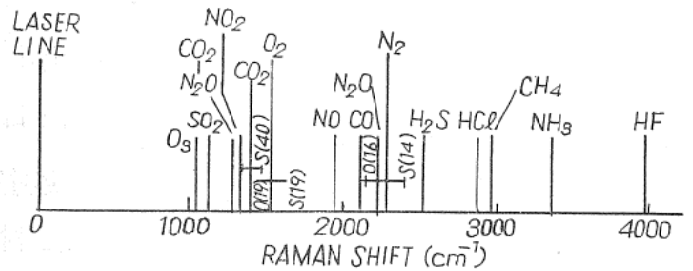


図1 各種汚染分子のラマンシフト

シフトを示した。散乱光の絶対較正は大気中の窒素や酸素の散乱光との比較から容易に行なうことができる。

この方式の難点は後方散乱断面積の小さいことで、従って高出力のレーザー光が必要となる。この後方散乱断面積は波長が短いほど大きな値をもつが、レーリー散乱やミー散乱及び酸素による吸収のため、有用なレーザー波長としては2500Å程度までである。

ラマン後方散乱断面積 ( $\sigma^{Ram}$ ) の立体角 ( $\Omega$ ) に対する微分形は次の式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$\left(\frac{d\sigma^{Ram}}{d\Omega}\right)_{0,1} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 c^2}\right)^2 \omega_1 \omega_2^3 r_{0,1}^2 \alpha^2$$

ここに  $\omega_1$  は励起周波数、 $\omega_2$  はラマン周波数、 $\epsilon_0$  は絶対誘電率、 $c$  は光速、 $r_{0,1}\alpha$  はラマン分極率である。 $\omega_1$  と  $\omega_2$  の差は振動モード周波数  $\omega_0$  で  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0$  である。レーザーパルスより時間  $t$  後の後方散乱ラマン光強度  $I^{Ram}$  は次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$I^{Ram}\left(t = \frac{2R}{c}\right) = \left(\frac{d\sigma^{Ram}}{d\Omega}\right) \frac{N_0(R) T_1 T_2}{R^2} \times \frac{c}{2} \frac{\omega_1}{\omega_2} W_1$$

ここに  $W_1$  は1レーザーパルスあたりの全エネルギー、 $R$  は時間  $t$  の間にレーザー光の進む距離、 $N_0(R)$  は汚染物質の濃度、 $T_1$  と  $T_2$  は  $\omega_1$

と  $\omega_2$  の光の大気の透過率である。

実際のラマン検出装置では、レーザー光はコリメーターを通して平行光にして送出され、受光反射望遠鏡にて集光され、ミー散乱やレーリー散乱光を除去するフィルターを通して分光器に入れ、光電子増倍管で増幅して検出される構成になっている。

送出レーザー光としてQスイッチルビーレーザーの第2高調波 3471Å, パルス幅 30ns エネルギー 1J のものを考え、受光系のパラメーターや光電子増倍管の信号対雑音比(S/N)等を考慮すると、最小検知密度は図2の様になる<sup>1)</sup>。

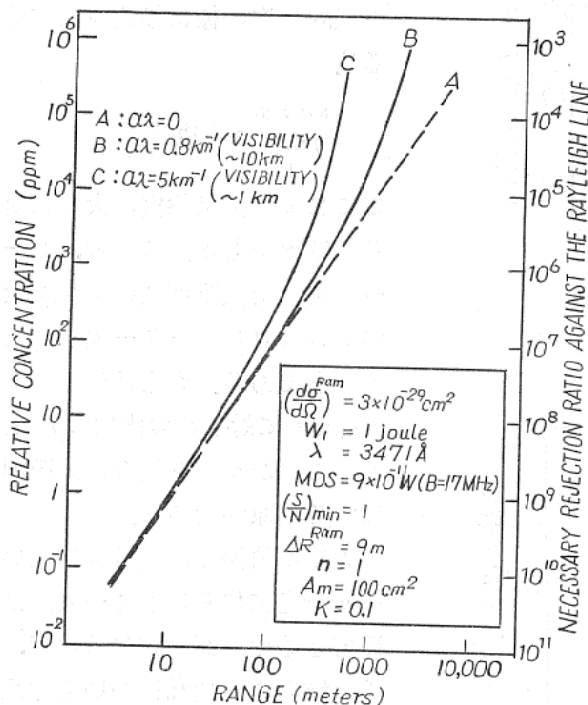


図2 ラマン散乱方式の最小検知密度

図中  $\lambda$  は送出レーザー光波長,  $\alpha_1$  は視程(km) に対する大気の減衰定数, MDS は最小検知信号強度,  $B$  は光電子増倍管の帯域幅,  $\Delta R^{Ram}$  はラマン後方散乱に対する距離分解能,  $n$  はレーザーパルス数,  $A_m$  は受光面積,  $K$  は受光系の全効率を示す。これによると遠隔検知可能距離は 1km にとどまり, 100m の距離における最小検知密度は  $10^{-4}$  (100ppm) のオーダーである。この方式はばい煙や排気ガス ( $10 \sim 10^4$  ppm) の近距離検知にしか今のところ使えず, 通常の大気汚染 (0.01~0.1ppm) の検出は不可能である。

ラマン後方散乱断面積は, 励起光周波数を汚染分子の電子遷移周波数に近づけることにより, 共鳴的に大きくなることが示唆されているが, たいていの汚染分子の電子遷移の周波数は紫外域に分布しており, この帯域において大気が不透明であり, かつ紫外域の波長可変高出力レーザーが未開発のため, それを利用する方式は現在完成されていない。

(2) 共鳴後方散乱

波長可変のレーザーを用いると, 汚染物質を選択的に励起することが可能である。赤外線レーザーを用いれば分子の振動レベル間遷移がとらえられるし, 電子遷移は可視域から紫外線に分布する。

$SO_2, O_3, NO, NO_2, NH_3, HCOH, C_6H_6$  等は紫外域に吸収帯域をもち<sup>2)</sup>, 電子遷移をするが, 個々の物質間でこの帯域が重複しているものが多く, また広い吸収帯をもつものもいくつかあるので, 区別には困難を極める。また, 紫外線に対する大気の不透明性のため, 多くは赤外域の振動レベル間遷移をする別の汚染分子を対象を限ることになる。電子遷移について重要なものは, As, Be, Cu, Zn, Na, Hg などの金属蒸気を検出する際である。高度 90km 付近の Na 層が, 波長可変色素レーザーの 5896Å を用いてこの方式で検出されている<sup>3),4),5),6)</sup>。

CO は振動レベル間遷移をする代表的な汚染物質であるが, この遷移は蛍光寿命が長いので, 距離分解能は乏しい。

図3に  $SO_2, NO_2, C_6H_6$ , 図4に CO の最小検知密度を考察した結果を示す<sup>1)</sup>。図中の  $F$  は蛍光の検知率,  $S_D$  は検知器 (InSb) の感度を表わし, 他の記述は既出のものと同じである。

(3) 弾性散乱

大気の透過率は弾性散乱は次に述べる吸収によって制限される。この方式及び次の方式は, この透過率の変化を利用するものである。

弾性散乱にはレーリー散乱とミー散乱と呼ばれるものがあるが, 前者は粒子径より波長が短い場合を言い, 後者は粒子径と波長とが同程

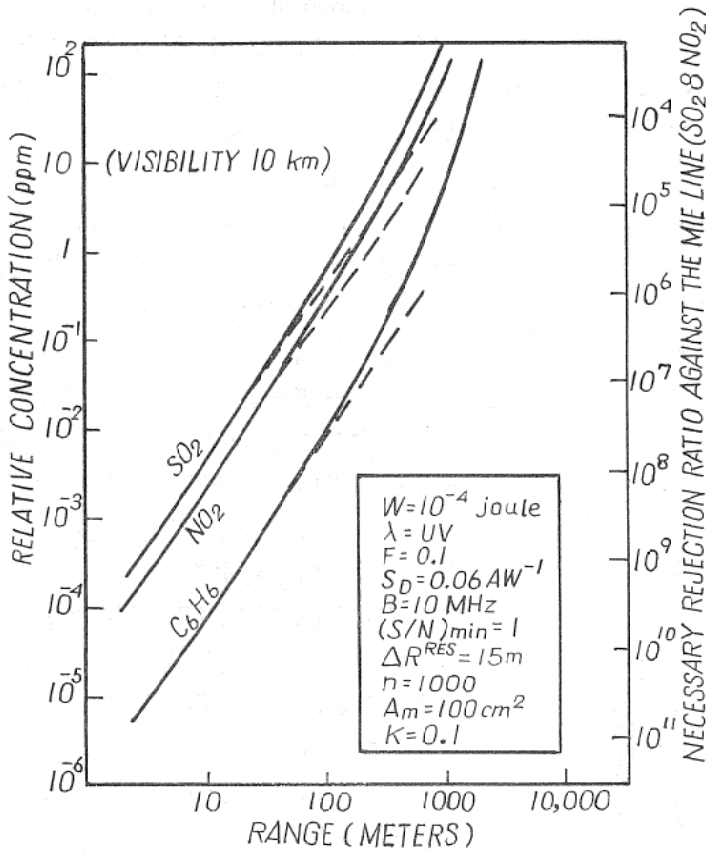


図3 共鳴散乱方式による SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> の最小検知密度

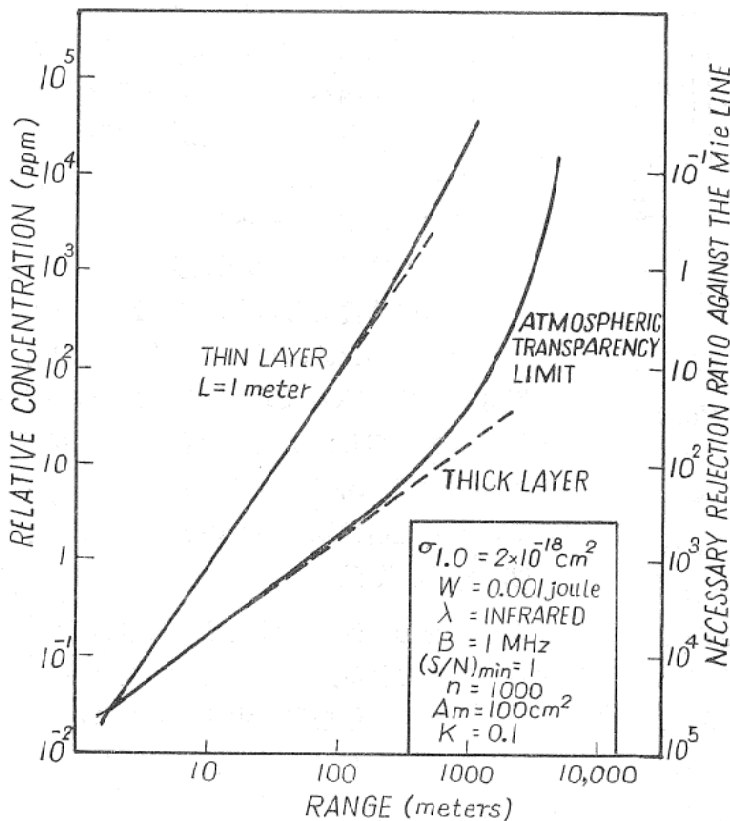


図4 共鳴散乱方式による CO の最小検知密度

度の散乱を言う。ミー散乱は波長依存性がほとんどなく、可視域から赤外域にわたって、通常レーリー散乱よりはるかに大きい。レーリー散乱は汚染濃度の変化にほとんど依存せず一定であるのに対し、ミー散乱は大きく依存する。弾性散乱は前述のラマン後方散乱と共鳴後方散乱に対しては、重要な障害となることはすでに述べた通りである。

一つの汚染物質によるレーリー散乱とラマン後方散乱の強度比は近似的に次の様に与えられている<sup>1)</sup>。

$$\frac{I_{\text{Rayleigh}}}{I_{\text{Ram}}} \sim 10^3 \eta^{-1}$$

ここに  $\eta$  は汚染物質の大気に対する濃度比である。これは、レーリー散乱の衝突断面積はラマン散乱のそれより3オーダー大きいということである。たとえば  $\eta = 10^{-6}$  (1ppm) に対しこの比は  $10^9$  となる。これがラマン後方散乱を困難にする主要原因である。

大気が清浄で、紫外線に近いレーザー光になるほどミー散乱は無視できるオーダーになるので、赤外線域のミー散乱について考えることが重要である。ミー散乱定数  $\alpha_1^{Mie}$  を導入すると散乱光強度は次式で表わされる<sup>1)</sup>。

$$I_{Mie} \sim \frac{\alpha_1^{Mie}}{4\pi R^2} \frac{c}{2} W$$

ここに文字は既出の意味を表わす。

弾性散乱を利用すれば、汚染物質の判別は不可能であるが、汚染度の検出には有効である。

#### (4) 共鳴吸収

共鳴吸収は汚染物質の検出に用いられる。この方式は、送信局と

受信局が個別であるかまたは反射器を必要とする。また距離分解能がなく、汚染量の積分値のみを測定するという欠点があるが、比較的手軽で、感度もよく、レーザー光の出力も比較的小さくてすむなどの利点があり、一定場所の汚染の変化の様子を経年的に測定する場合などに適している。また、広範囲に分散した汚染の検出にはこの方式が最もすぐれている。

図5にレーザー光強度の減衰率 ( $\Delta I/I$ ) をパラメーターにして、CO 汚染の最小検知積分濃度を示す<sup>1)</sup>。

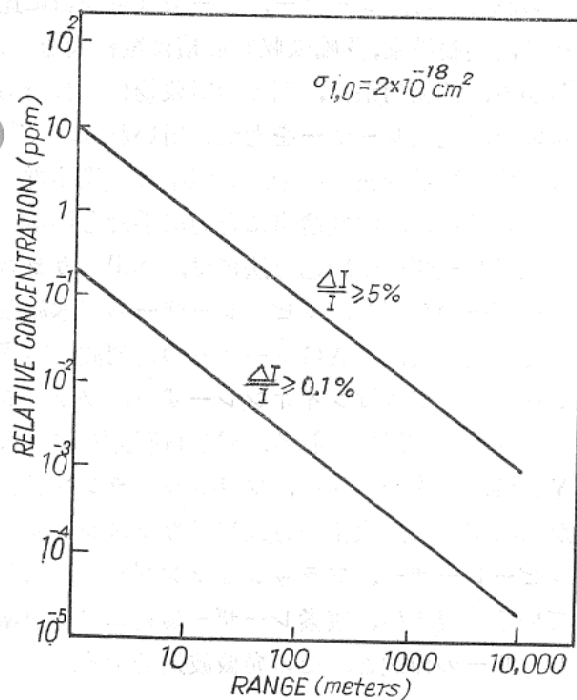


図5 共鳴吸収方式によるCOの最小検出濃度

### 3. 大阪大学大気観測用レーザー局

大阪大学においては電波より赤外線にわたる種々の波長を用いたレーザーが設置され、ミニコンピューターと連動して観測を実施するよう構成している。以下その各部分について略述する。

#### 3. 1. レーザー用レーザー

##### (1) 固体レーザー

ルビーレーザーは  $6943\text{\AA}$  の赤色光、ガラス、YAG レーザーは共に  $1.06\mu$  の赤外光を発生し、きわめて取扱いが容易であるためレーザーの主要光源となっている。これらは非線形光学

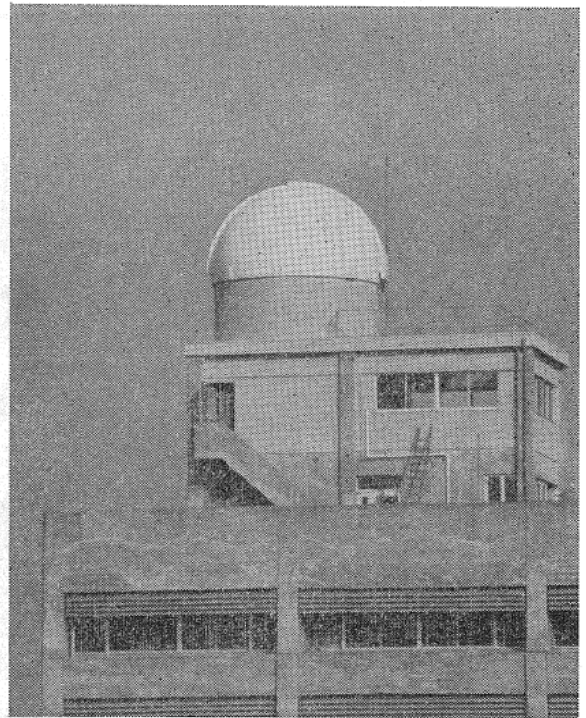


図6 大阪大学大気観測用レーザーレーダー局

結晶を用いた倍調器により波長  $3471\text{\AA}$ 、 $5300\text{\AA}$  の可視光に変換出来る。

筆者らの用いている固定局用Qスイッチルビーレーザーは、ポッケルセル方式と回転プリズム方式であり、 $10\text{mm} \times 120\text{mm}$  のルビーロッドを用いてパルス幅  $30\text{ns}$  ピーク出力  $80\text{MW}$  程度のジャイアントパルスが発生することができる。強制循環冷却方式を採用し、 $1\text{pps}$  程度の繰り返しは容易である。

送出望遠鏡を通して  $5\text{mrad}$  程度のビーム拡がりを持つ直径  $10\text{cm}$  のレーザー光として送出している、受光反射望遠鏡は直径  $30\text{cm}$  であり、集光された信号は光電子増倍管で電気信号に変えられ、処理される。尚、送出系と受光系は平行光軸をもち(図7)、方位角、仰角ともにポテンショメーターにて位置検出され、サーボモーターで駆動できるようになっている。これらはコンピューターとオンラインで結ばれていて、動作、信号処理ともコンピューターの操作で行なわれる。処理結果はCRT表示で実時間表示される。

超高層現象を対象とする遠距離レーザーでは、高繰り返し、高出力が要求される。送受光系一体方式では、おのずからレーザー発振器の

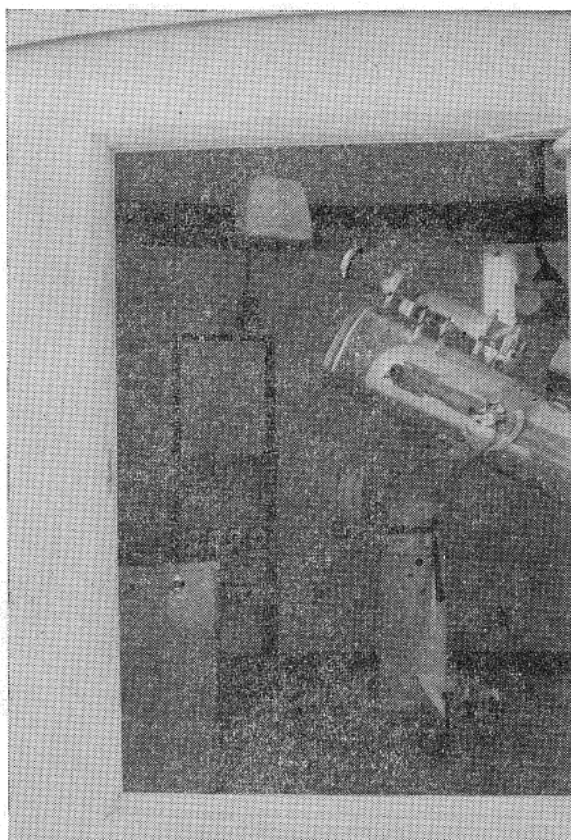


図7 レーザーレーダー装置

大きさ、重量に制限を受け、出力に制約を受ける。この制約を解決するために、レーザー発振器と送信光系とは別箇に設置し、全反射プリズムあるいはミラーでレーザー光を送出望遠鏡に導く。

自動車による移動観測用レーザーレーダーも

準備中である。これには次にのべる色素レーザーが用いられる(図9)。

(2) 色素レーザー

色素レーザー数百Åにわたる幅広い発振スペクトルを持っている。色素の種類を変えることにより現在では 3400Å から 11750Å にいたる領域の発振が実現している。種々な波長選択素子、例えば、プリズム、回折格子、干渉フィルター、エタロン等を用いることにより発振波長と、発振スペクトル幅の制御が可能であり、ガスレーザーに匹敵する狭帯域発振スペクトルが得られている。レーリ、ミー散乱断面積に比べて、共鳴散乱、共鳴吸収断面積は数桁大きく、しかも、共鳴効果は、個々の対象物に特有であるので、色素レーザーを光源に用いれば、高層大気中の微量金属原子や、大気中の汚染物質の種別の判定と、濃度検出に有力な手段となる。

色素レーザーの励起方法には、Nd<sup>3+</sup> ガラスレーザーの高調波、ルビーレーザーの基本波及びその高調波、YAGレーザーの高調波、窒素レーザー、アルゴンイオンレーザー、フラッシュランプ等が用いられる。高繰り返し方式には、YAG、窒素レーザー、フラッシュランプ励起が適している。大出力方式にはガラスレーザー、ルビーレーザー、フラッシュランプ励起が適している。表1に、窒素レーザー励起による色素レーザーの種類と、その発振波長を示す。

表1 窒素レーザー励起による色素レーザー

Dye	Spectral range (Å)	Peak power ratios	Pulse width (os)
Rhodamine 6G	6,200~5,650	0.22 (6,000 Å)	4
		0.12 (5,750 Å)	4
4-methylcoumarin 7-diethylamino POPOP	4,900~4,450	0.25 (4,650 Å)	5
		0.27 (4,500 Å)	5
α-NOPON	4,450~3,900	0.13 (4,650 Å)	8
		0.18 (4,500 Å)	8
Fluorescein	4,450~4,300	0.18 (4,000 Å)	6
		0.20 (6,000 Å)	4
Diphenyl-anthracene	6,000~5,200	0.03 (5,500 Å)	7
		0.08 (4,500 Å)	2
Diphenyl-stilbene	4,500~4,350	(4,370 Å)	5
		0.23 (4,050 Å)	8
α-NPO	4,200~4,000	0.12 (3,850 Å)	8
	3,950~3,900		



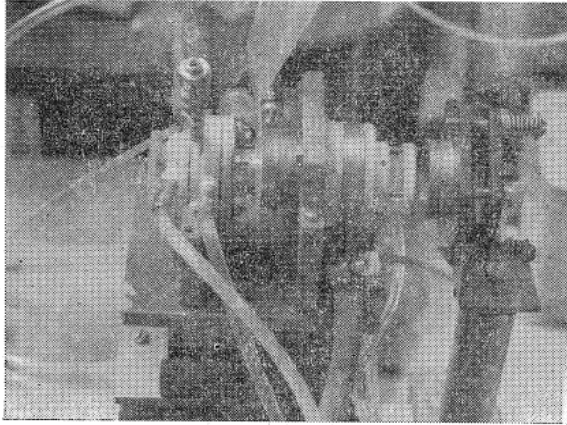


図8 高繰り返し色素レーザーヘッド

高繰り返し色素レーザーヘッドの写真を図8に示す。色素循環セル、フラッシュランプ、冷却水ジャケットが同軸状に配置してある。放電電極はステンレス鋼である。低インダクタンスコンデンサと同軸フラッシュランプは直結してあり、放電回路のインダクタンスを極力減少させる様な構造になっている。スイッチ用ギャップは電極にアルミニウムを用いた3点ギャップで窒素を流している。低インダクタンスコンデンサは、アルミニウムフォイルにマイラを介在させて円筒状に巻いたもので、耐圧は20KV以上で、電気容量は $0.17\mu\text{F}$ である。色素セルは、内径4mm、長さ80mmで、フラッシュランプの放電部分は59mmである。ローダミン6Gの $5 \times 10^{-5}\text{M/l}$ のメタノール溶液を用いて実験を行なっている。三重項消光剤としては、溶液中に $\text{O}_2$ を飽和させている。放電用ガスには窒素、キセノン、アルゴンを用いている。キセノンの場合は、ランプは封じ切りで、窒素、アルゴンの場合は、放電間隙中を流した。フラッシュランプの立ち上がりは800~900nsecで、半値幅は $4.4\mu\text{sec}$ であった。繰り返しの最も上がったのは、アルゴンガスを350~400torで用いた場合で、最高繰り返し周波数21ppsを得た。単発発振出力は8.7-kwであった。共振器は99.5%と100%の誘電体多層膜ミラーで構成してある。さらに色素セル及び放電間隙を30mm延長して、それぞれ、110mm、89mmとして、低インダクタンスコンデンサの容量を $0.15\mu\text{F}$ にして実験を行なった結果、回折格子と60%出

カミラーの構成で1pps、500kW~1MWの出力が得られた。また発振スペクトルの狭帯域化のため、誘電体多層膜ミラー（反射率30%）を2枚用いてエタロンを構成した。エタロンを共振器内に挿入すると、挿入しない場合に比べて発振出力は $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ に低下したが、スペクトル半値幅は $0.1\text{\AA}$ 以下になっている。

このようにして色素レーザー光をナトリウムの $D_2$ 線に合致させ、垂直上方に射出し、地上90km付近のナトリウムの共鳴散乱の測定に成功した<sup>5)</sup>。この場合図11、12に示すと同様の光子計数を実施し、ゲートは90kmに相当する600 $\mu\text{s}$ の遅延時間で開け、エコー光子を計数した。ゲート時間はナトリウム層の厚さと同程度の5km、すなわち33 $\mu\text{m}$ にした。

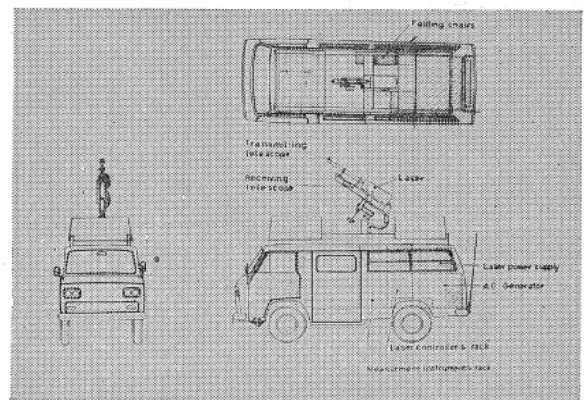


図9 レーザーレーダ移動局

空気のレーリ散乱により交正し、ナトリウムの密度は大体 $10^3\text{cm}^{-1}$ 程度であることがわかった。

次の目標としてレーザー光のスペクトル幅をさらに小にし、散乱光スペクトル分布を検出することにより、上層大気の温度の日変化を求める計画である。

またカリウム、リシウムなどを対象とした計測も興味深いものがある。本年10月7日のジャコビニチンナ彗星の影響についてはよく分らなかった。

### (3) 半導体レーザー

GaAs P-n 接合半導体レーザーは、発光効率が最も高く、発光機構の点でも、結晶作成の面でも、現在のところ他の半導体素子よりすぐれ

ている。励起方法には、*p-n* 接合による電流注入の他に、光励起、電子線励起がある。

常温と、77°K とでは、発光効率が30倍も違うので、素子を冷却することが必要である。水分や急冷による素子の変質を防ぐために、伝導型冷却をする。図10の様に素子を銅ブロックに

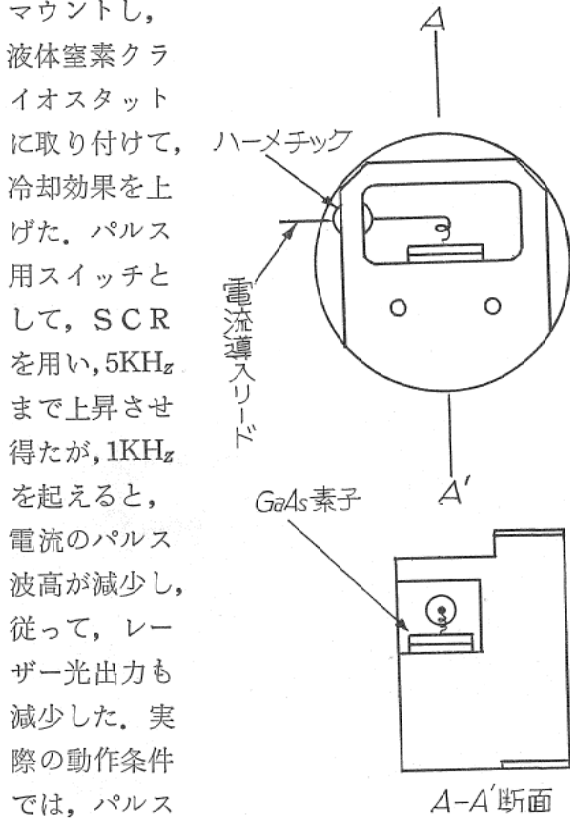


図10 GaAs レーザー銅マウント

マウントし、液体窒素クライオスタットに取り付けて、冷却効果を上げた。パルス用スイッチとして、SCRを用い、5KHzまで上昇させ得たが、1KHzを起えと、電流のパルス波高が減少し、従って、レーザー光出力も減少した。実際の動作条件では、パルス幅 1μsec 繰り返し周波数 1

KHzで動作させるのが最も効率が良かった。発振波長は、8570Å、ビーム広がり、5～15度であった。出力は、10W以上が得られた。このレーザーは東大宇宙航空研究所の科学観測ロケット(図20)に搭載された(図21)受信光は次に述べる同期光電子計数法を用いた。原理を図11に示す。散乱光受信時の光倍管の出力パルスは、受信光による光電子と、ノイズよりなる。他方散乱光の入射しない時間では、出力パルスはノイズのみである。ノイズは背景光による光電子と光電面およびダイノードからの熱放出電子(暗電流成分)による。受信光による光電子パルスの平均頻度を  $f_s$ 、ノイズパルスのそれを  $f_n$  とすると、これらを時間  $T$  のあいだ計数し、両計数値の差をとると、受信散乱光に対

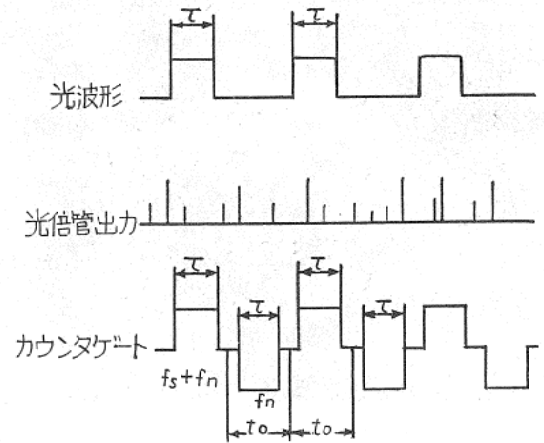


図11 同期光電子計数法の原理

する計数值として、

$$N_s = f_s \eta T$$

を得る。ここに  $\eta (= \tau / t_0)$  は計数時間  $\tau$  の周期  $t_0$  に対する比である、他方カウンターへの全入力

$$N_s + 2N_n = [(2f_n + f_s) \eta T]$$

であり計数值の分散  $v$  は

$$v = [(2f_n + f_s) \eta T]^{1/2}$$

となり  $S/N$  比は、

$$N_s / v = f_s (\eta T)^{1/2} / (2f_n + f_s)^{1/2}$$

となる。これより  $\eta$  および  $T$  を大きくすることにより、 $S/N$  比は改善される。 $\eta$  はレーザー動作特性により決まる。この計測例およびその結果についてはあとで述べることにする。

### 3. 2. 電波レーダー

電磁波と物質との相互作用は、入射電磁波の波長と対象物質の大きさによりきまる。本学ではこれまでレーザーレーダーによる大気汚染計測法の開発研究を行ってきたが、可視域のレーザー光線では、分子、微粒浮遊塵等が測定対象となり、雨滴、濃い煙霧等には、より波長の長い電波レーダーが適していると思われ、両者を併用することにより、逆転層、煙霧層より汚染物質にわたるまでの総合的汚染状況の把握が可能となる。

以上のような理由により、レーザーレーダーとの比較検討を実施するため、レーザーレーダー局と同一場所に近距離用レーダーを設置し、実験を行なっている。



(1) レーダー方程式

$P_t$  [w] の送信電力が自由空間へ無指向性に放射されたと仮定すると、距離  $r$  [m] の点での電力密度は  $P_t/4\pi r^2$  [w/m<sup>2</sup>] となるが、レーダーの場合、アンテナの電力利得を  $G_0$  とすれば主放射方向の距離  $r$  の点における電力密度は  $G_0 P_t/4\pi r^2$  [w/m<sup>2</sup>] である。この地点に目標物があると電波は散乱し入射方向と逆方向に反射される電力はその点の電力密度に比例するので  $\sigma G_0 \times P_t/4\pi r^2$  [w] で表わすことができる。この比例定数  $\sigma$  は面積のディメンジョンを持ち、目標物の後方散乱断面積または単にレーダー断面積と呼ばれる。一般にその目標物の形状、材質およびレーダー波の波長によって異なる値を示す。反射された電力が放射源として再び距離  $r$  [m] を伝播してレーダーまで戻ってくると、その点での電力密度は  $\sigma G_0 P_t / (4\pi r^2)(4\pi r^2)$  [w/m<sup>2</sup>] となり、したがって有効開口面積  $A_0$  [m<sup>2</sup>] の受信アンテナに集められる電力  $P_r$  は

$$P_r = \frac{A_0 \sigma G_0 P_t}{(4\pi)^2 r^4} \text{ [w]}$$

となる。これをレーダー方程式という。

しかし、この式はレーダー波は伝播の途中では吸収されないで、ただ空間に拡散するだけであると仮定した場合であって、実際にはマイクロ波は酸素、水蒸気および小さな水滴などの誘電体損のために伝播の途中で減衰し、また比較的大きな水滴による乱反射のために減衰する (図12)。

雨滴、浮遊塵群からの反射波はおおのこの雨滴や浮遊塵からの反射電界が随意の位相で多数加わりあった合成電界となるので、その

強さはある確率分布に従った不規則な量となる。すなわち熱雑音の波形にきわめてよく類似した反射波形が得られる。熱雑音と雨滴や浮遊

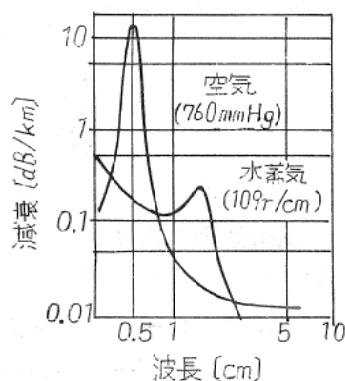


図12 レーダー波の波衰

塵群からの反射波を区別しやすいようにするためには、受信機の通過帯幅  $B$  をレーダーの送信パルス幅  $\tau$  に対し、 $B=1.2/\tau$  で与えられるよりも十分に広く、 $B=(4\sim6)/\tau$  にとり、熱雑音の幅をエコーの幅よりも十分に小さくすることが望ましい。また、普通の場合、雨滴群や浮遊塵群の広がりにはレーダーの1個のパルス波の広がりより大きいからパルス・パケットに含まれる全雨滴、全浮遊塵からの反射波がレーダー受信機に入ることになる。すなわち送信されるレーダーの全エネルギーはパルス・パケットの中に含まれているのであるから、パルス・パケットよりも大きな広がりを持っている目標に当たると、レーダーの全エネルギーに比例したエネルギーが反射されることになり、反射電力の強さは目標のレーダーからの距離には無関係なものとなる。従って有効面積  $A$  の受信アンテナに集められる雨滴、浮遊塵からの反射波電力  $P_r$  は

$$P_r = \frac{k P_t}{4\pi r^2}$$

の形となる。

送信アンテナは水平面内で旋回することができるとはならず、可動台上に設置することにより垂直面内で俯仰しうるようにし、天空を仰げるようにして実験に用いている。

(2) レーダー仕様

型式	FRC-40	(古野電気製)
送信周波数	9375MHZ	繰返し周波数 800HZ
アンテナ長さ	200cm	
尖頭出力	20KW	空中線回転数 20rpm
パルス幅	0.08 $\mu$ S (0.5, 1.5マイルレンジ)	1.0 $\mu$ S (3.0, 6.0, 12, 24, 48マイルレンジ)
距離分解能	20m以下	最小探知距離 25m以下
ビーム幅	水平 1.23°	垂直 25°

(3) 実験現況

現在までの観測によると、一様にかかった薄雲などのエコーは出なかったが、雨雲のエコーは明らかに観測された。図14 (a), (b), (c) にそのデータを示す。

受信回路に改良を施し、薄雲のエコーも観測

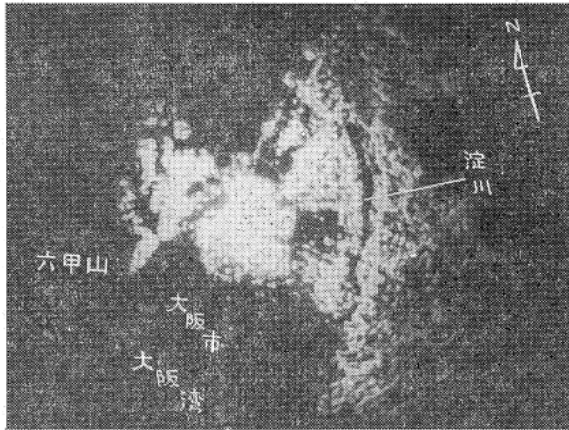


図13 大阪大学周辺のエコー  
 空中線 水平  
 距離レンジ 1レンジ1マイル  
 日時 1972.9.13.午後8時  
 天候 薄曇

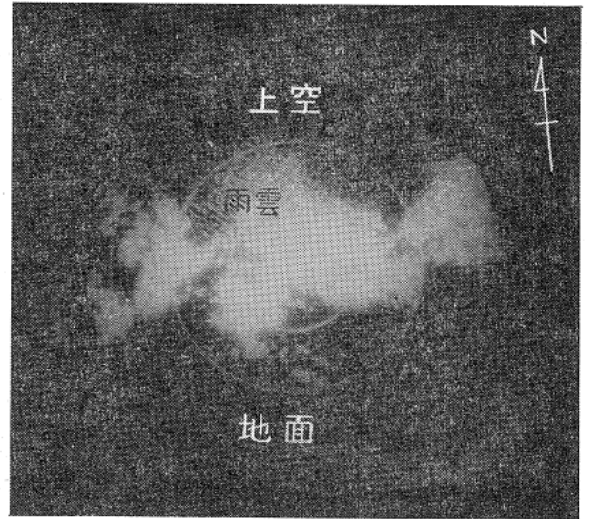


図14(b) 雨雲のエコー  
 空中線 南空仰角 70°  
 距離レンジ 1レンジ1マイル  
 日時 1972.9.14.午後4時  
 天候 全空を厚い雨雲がおお  
 い、雨が降り出した

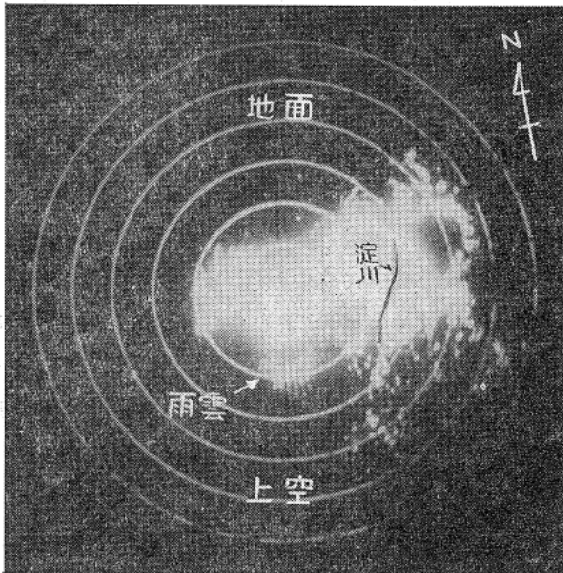


図14(a) 雨雲のエコー  
 空中線 南空仰角 45°  
 距離レンジ 1レンジ1マイル  
 日時 1972.9.14.午後3時  
 天候 厚い雨雲が南空をおお  
 っている

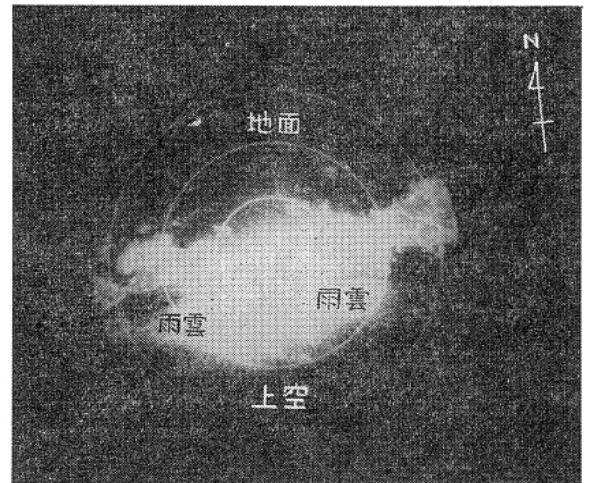


図14(c) 雨雲のエコー  
 空中線 北空仰角 70°  
 距離レンジ 1レンジ1マイル  
 日時 (b)に同じ  
 天候 (b)に同じ

しうるよう計画巾である。

#### 4. 信号処理システムとその計画

レーザーレーダーを大気汚染等の観測に用いシステム解析を可能とするためには、レーザーレーダーより得られる情報を実時間で処理するシステムが必要である。この目的のためにオンライン計算機処理システムを開発している。システムの第一段階として、ルビーレーザーレーダーの信号処理システムが現在ほぼ完成した。

ここではこれを中心に述べる。

##### 4.1 信号処理システム

初期のレーザーレーダーにおいては、受光信号をシンクロスコープでとらえ(Aスコープ)、オフラインでレーザーレーダー方程式

$$P_R(r) = P_o R_o \eta_T \eta_R N(r) \bar{\sigma}_s(r) \exp(-2 \int_0^r \alpha(r) N(r) \bar{\sigma}_s(r) dr) A_R / r^2$$

ただし  $P_o$  = レーザー出力  $P_R(r)$  = 受信光入力  $R_o = \tau c / 2$  ( $\tau$  = レーザーパルス幅  $c$  =

表 2

ルビールーザー出力, 波長, パルス幅	max 30MW, 6943 Å, ~30ns
送光望遠鏡	口径 10cm 屈折式
受光望遠鏡	口径 30cm 反射式
サンプリング, A/D, メモリー	BIOMATION 610B, 100ns, 6ビット, 256ワード
デジタル計算機	HITAC-10, コアメモリー 8 Kワード, ドラムメモリー 64Kワード
テープパンチャー	FACIT 4070, 75 rows/s
CRTディスプレイ	SONY-TEKTRONIX 604形

光速)

$\eta_T \eta_R =$  送受信系の効率

$N(r) \bar{\sigma}_s(r) =$  レーダー散乱断面積

$A_R =$  受光望遠鏡の有効開口面積

$r =$  散乱点までの距離

$\Omega_R = A_R / r^2 =$  散乱点より見た受信望遠鏡の開口面の張る立体角

(exp の項) = 大気吸収および散乱による損失

$N(r) =$  点  $r$  における粒子密度

$\alpha = \int_0^\infty n(a) \bar{\sigma}_T(a) da / \int_0^\infty n(a) \sigma_T(a) da$   
= 減光係数

$n(a) =$  粒子径  $a$  なる粒子密度

$\sigma_T(a) =$  粒子径  $a$  なる粒子の全散乱断面積

$\bar{\sigma}_s(r) =$  平均後方散乱断面積

に基いた信号処理を行なうのが大部分であっ

た。しかし、この方法では大量のデータを処理することは不可能に近い。そこでオンライン信号処理システムを開発した。

図15は信号処理システムの概略を、表2は現在使用中の各機器の仕様を示している。

受信光は光電子増倍管で電気信号に変換され増幅後、時間サンプリングおよび A/D 変換を受けてメモリーに入る。つぎにデジタル化された信号は、オフラインの形で紙テープにせん孔されるか、またはオンラインの形でデジタル計算機に転送される。テープ出力の場合には、データは2進数並列形式でパンチされ、このデータをレーダー方程式の求解プログラムを用意したデジタル計算機の入力とする。この場合には、信号処理に人間が介入することになるが、データの保存および後にのべる移動局によるデータの集積に対して有効となる。一方オンラインのデータ伝送では、レーザーレーダーが11階ドーム、計算機が2階に位置しているのでこの間に同軸ケーブルによる伝送線を設置し、かつ2階にバッファレジスタを含むインターフェースを置いている。この場合にはデータはミリ秒以内に全て転送され、自動的に計算機の求解が始まる。

計算機ではレーダー方程式と入力データより、レーザー光の投射経路に沿った物質の散乱強度  $N \cdot \sigma$  (いまの場合はミー散乱を行う物質の密度と後方散乱断面積の積) を距離の関数として求める。また、レーザーレーダーには駆動用のサーボが装備されており、方位角、仰角の制御を行うとともに位置はアナログ電圧として検出され、これは A/D 変換されて計算機の入力となる。

レーザーレーダーより得られる大気状

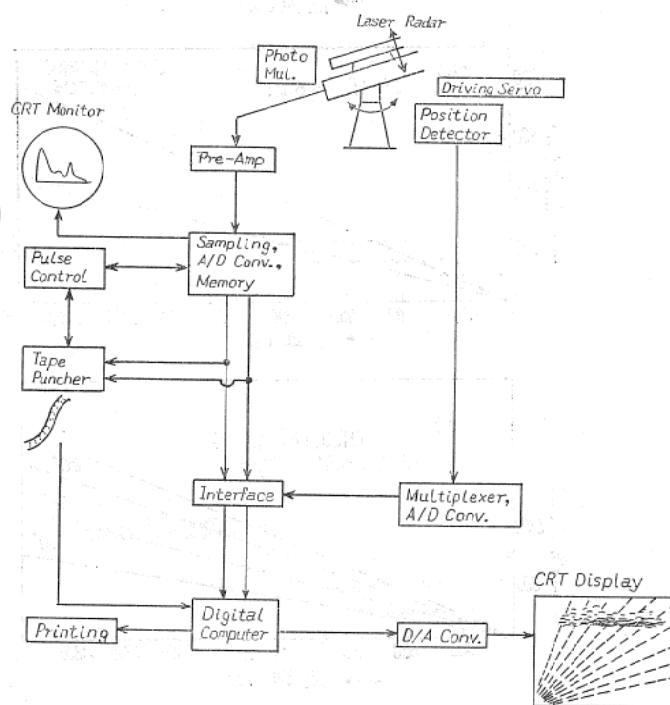


図15 レーザーレーダーの信号処理システム

況の表示として、このシステムではCRTディスプレイを用いる。その表示形式としては、Range-Height Indication (図19と類似) および Time Height Indication (図16)と Plan-Position Indication (図17)が可能である。まずRHIでは

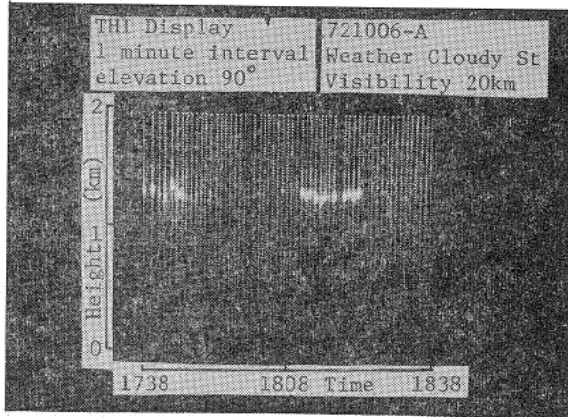


図16 Time Height Indication

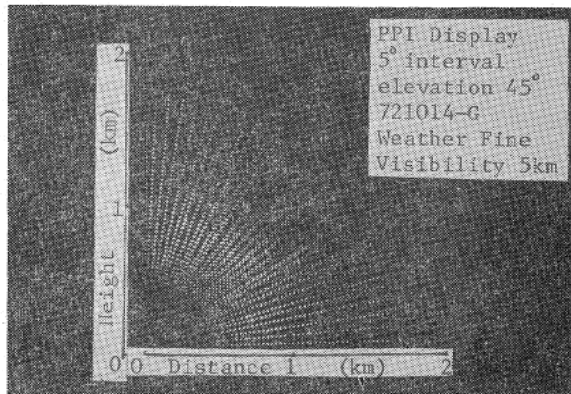


図17 Plan-Position Indication

レーザーレーダーの方位角を一定として、適当な間隔の仰角でレーザー光を大気に投射することにより得られる信号を計算機で処理し、各投射経路での散乱強度をメモリーに蓄える。つぎに、仰角の大きさを考慮して、CRT上に横軸を距離、縦軸を高度として、散乱強度に比例した輝度変調を行うことにより、大気状況の二次元的分布を直観的にとらえることが可能である。PPIでは、仰角を一定とし方位角を変更する方式で原理はRHIと同様である。THIは時間と高度の表示である。これらの処理を行うデジタル計算機は、大容量メモリーとしてドラムを装備しており、さらに高級な表示も可能である。

図18は本システムによる観測結果とそれに対応した $N \cdot \sigma$ の計算例を示したもので、図中2.3 km付近の大きなエコーは雲によるものである。

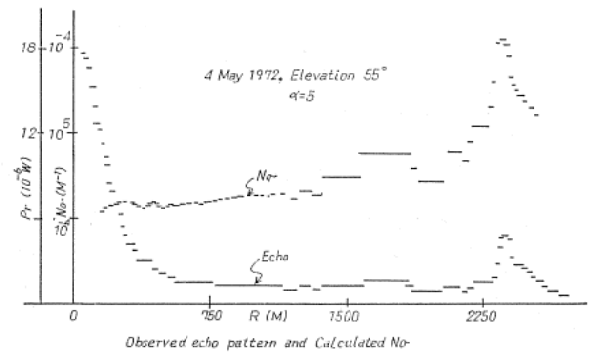


図18 観測波形と  $N \cdot \sigma$  の一例

## 5. 観測例

大阪大学固定観測局 (図6, 図7) で観測した若干の大気観測例を上げる。

(a)は濃霧のデータであるが、地上100m以下に散乱が多く出ていて、水蒸気粒子が地表近くまで濃く分布していることを示している。この時はS/Nがかなり悪いが、それでも十分観測にかかった。直距離1.5km, 仰角18.5°に強

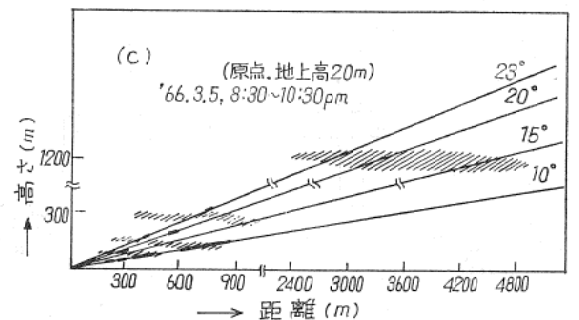
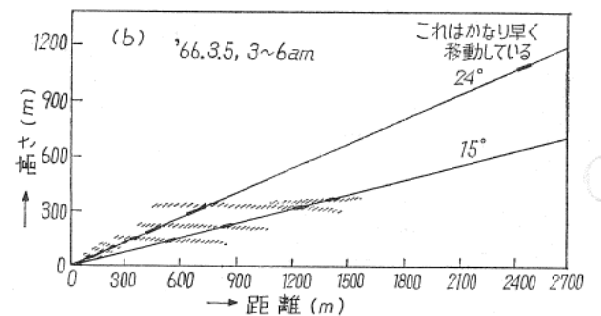
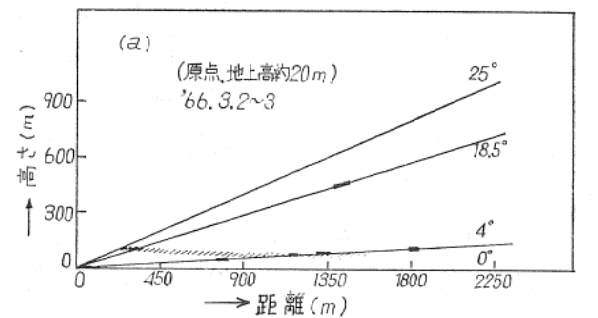


図19



い反射があるが、これは高度450m位の雲か、または観測点では雨は降っていなかったが1.5km西で雨がかったものと思われる。

図19(b)は各仰角で同一高度に層のあることを示している。仰角24°、高度1kmのエコーはかなり厚い雲である。雲の厚さは190m位である。またこの雲は1分間に厚さが大きく変化し、時速4.8kmで移動していることもたしかめられた。図19(c)はその2時間後の様子を示す。高度1.2kmのところを範囲1kmにわたって相当大きな雲が存在している。時間とともに気象条件は悪化し、低い位置でエコーが多く出ている。

一般の傾向としては

- (1) 風の強い日は損失が小さく、弱い日はスモッグなどがかかりやすく損失が大きくなる。
- (2) 晴天は損失小さく、曇天、雨天は大きい。
- (3) 湿度大の日も損失が大きい。
- (4) 視界に対する相関は大きく、1kmあたりの損失は視界6kmのとき約3db、1.5kmの時は約10dbとされている。スモッグが発生すると20dbにも及ぶ。筆者らの実験では $4.3 \times 10^{-11}$ /13.7km、1kmあたり7.55dbである。

つぎにレーザーレーダーをロケットに搭載しエアゾルの観測を実施した結果を述べよう<sup>78)</sup>、これは半導体レーザーよりパルス光を射出し、同期光電子計数法により散乱光を計測し、信号処理を機上で実施し、結果をテレメーターで地上に送信したものである。

まず、地上予備実験により搭載レーザーの開発、同期光電子計数計測法による微弱光検出技術の確立、信号処理方式の開発などを行ない、ロケット搭載装置製作の基礎実験を行なった。これらの技術、資料にもとづき、第1号搭載装置が製作され、その第1回ロケット観測実験は1970年9月19日、20時30分に内之浦より発射されたL-3H-5号機のブースタに搭載されて行なわれた。この経験にもとづき、若干の改良を施した第2号機は1971年9月3日、21時に同じく内之浦よりL-3H-7号機に搭載され、第2

回観測実験が行なわれた。第1回は上昇時のみ、第2回は上昇、下降時とも装置は正常に動作し、観測は成功した。

超高層における浮遊微粒子に起因する最も顕著な現象は夜光雲である。これの観測は、これまでほとんど地上からの光学観測によるのみであり、高度、層の厚さなどについて若干知られているのみで、夜光雲の成因、構成微粒子については推測の域を出ていない。地上からの観測によれば高度70kmから100kmあたりに存在し、この領域は大気球および人工衛星による観測の谷間にあたり、観測ロケットによる直接計測が重要となる。

超高層におけるエアゾルの観測方法としてはこれまで、①飛しょう体による直接採集、②マイクロホン、薄膜検知器などの物理計測器によるロケット搭載観測、③地上からのレーザーレーダーによる方法、などが用いられている。①の方法は最も直接的であるがロケットの回収が必要であり、水滴のような採集後形態の変化するものには適さずかつ高度分解して採集するのはむずかしい。②の方法では、これまで広く用いられてきたマイクロホン法によるデータは上昇に伴う温度変化により発生するノイズではないかとされ、全面的に検討され直さなくてはならない。薄膜検知器など新しい方法が開発され、観測が実施されつつある。③の方法は定常観測を行なえる利点があり、近年盛んに開発されている。しかし現在までのところ地上100kmが限度であり、それ以上の高度からの微少散乱光を地上で観測するにはいたっていない。筆者

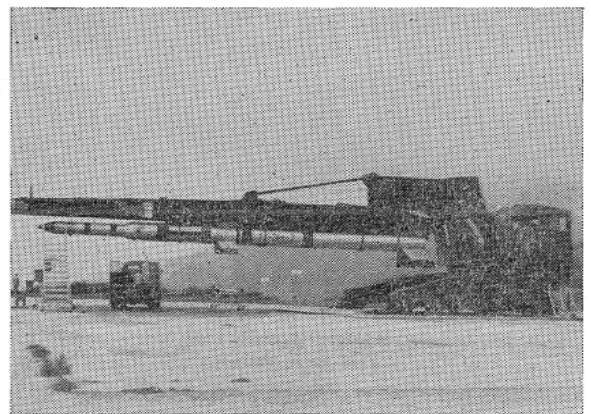


図20 L-3H-7型 ロケット  
内之浦宇宙観測実験所

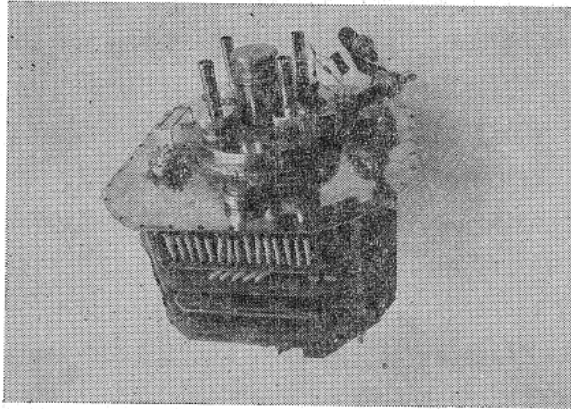


図21 ロケット搭載半導体レーザーレーダー

らの開発した搭載レーザーレーダーによる方法は、このような制限がなく他の方法による観測結果と相まってエアゾルによる光散乱強度の高度分布、粒径、粒子密度分布などに関する、広範な高度にわたる情報がえられるものである。この方法は、同調型色素レーザーなど、新しい搭載レーザーの開発により、微量化学組成の定量観測に応用しうるものであり、ロケット観測技術としては重要なものである。

図20は L-3H-7 ロケットを、図21は搭載半導体レーザーレーダーを示したものである。

得られたデータよりレーザーレーダー方程式を用いて  $N\sigma$  の高度分布を求めることができる。いまチャンネル1 (S+N) の出力を  $X_1$  (N) の出力を  $X_2$  (Volt) とすると受信パワー  $P_r$  (Watt) は

$$P_r = \frac{100}{500} \frac{(X_1 - X_2)}{5} \frac{h\nu}{\eta} \times 10^{-6}$$

となる。ここに  $h\nu$  はレーザー光の光子エネルギー、 $\eta$  は光倍管光電面の量子効率であり、用いた光倍管 (EMI 9684A) では 0.37% が与えられている。さらにレーザー光波形を  $1\mu\text{sec}$  幅の短形波と近似している。受光面積  $A$  は、カセグレン型集光鏡の副鏡支持アーム、レーザー光射出口などを差し引くと  $290\text{cm}^2$ 、送受信効率率はレーザー光集光レンズの表面反射、集光鏡での2回反射、フィルタの透過率を考慮すると約15%となる。これらの数値を用い、得られたデータより  $N\sigma$  を算出した結果を図22に示す。図22左端は上昇時、右端は下降時の観測値 ( $N\sigma$ ) をプロットしたものである。中央に測定器が飛行した高度時間軌跡を描き、これにそえ、ロケット動作のタイムシーケンスを記入してある。地上での投光器その他の入射光による光倍管の劣化を防ぐため発射5秒後に光倍管高電圧を印加し、(HP<sub>on</sub>)、パイレックス窓を通して観測を開始した。初段燃焼終了 (B<sub>1bo</sub>) 28秒、初段2段切放し (B<sub>1sep</sub>) 33.85秒、スピンモータ点火 (S<sub>pi9</sub>) は34.35秒で、1~2秒燃焼は持続した。その後37.75秒に2段点火 (B<sub>2ig</sub>)、75.4秒燃焼終了 (B<sub>2bo</sub>) 2段と3段の切放し (B<sub>2sep</sub>) は94.35秒、3段(メイン)点火 (M<sub>ig</sub>) は100.05秒。その後メインの噴煙に測定器がさらされないよう配慮をし、104.35秒にパイレックス窓を脱着装置によりとりはずし (AZL<sub>open</sub>) 集光鏡を露出して観測を続けた。窓とりはずしのさい射出レーザー光が飛びさる窓材に反射され、光倍

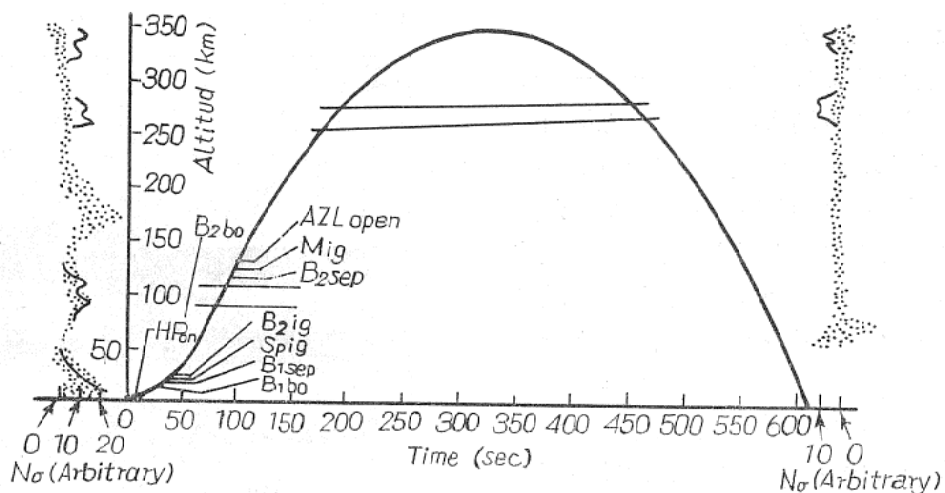


図22 散乱強度の高度分布



管を劣化させるのを防ぐため、開窓時に同期して3秒間高電圧をオフした。高度55km~65kmに原因不明の強いノイズが共載の他の測定器ともに入り、この区間は測定値の読み取り不可能であった。

測定結果より、大気圏では散乱強度は上昇とともに減少し、さらに高々度になると90kmと110km付近にダブルピークをもつ散乱層の存在が見られる。150kmから200kmにかけての大きな散乱強度はメインの噴煙の影響および光倍管高電圧オフ後の光倍管ノイズレベルの乱れによるものと考えられる。さらに高々度の255km~275km、320km~340km付近にも散乱光がみられる。これは上昇時および下降時ともほぼ対応した位置に観測されている。

高度50kmまでの上昇ともなう散乱強度の減少は、大気密度の減少にほぼ比例しており、これは地球大気の構成ガス分子によるレーリ散乱によるものと考えられる。大気密度の高度分布はよく知られており、かつ $O_2, N_2$ のレーリ散乱断面積は実験室において測定されているから、この領域での観測値は測定器の絶対校正値として用いることができる。

高度90~110kmでの散乱層は、夜光雲の原因と考えるエアゾルによるものであろう。高度はこれまでの夜光雲の観測結果(70~100km, 平均82km)よりはかなり高い。地上での夜光雲の観測はほとんど北緯 $45^\circ$ 以北に限られており、地上からのレーザーレーダーによる観測も北緯 $60^\circ$ である。われわれの観測器は北緯 $30^\circ$ から $31^\circ$ あたりを飛んでおり、この高度の相異が緯度によるものか、あるいは時期的変動によるものかは今後の観測にまたねばならない、興味深い問題である。この散乱層のピークでの散乱強度は、地上20km付近での散乱強度に対応している。最近の地上レーザーレーダーによる観測によれば、高度20~30km付近に光散乱の異常に大きな層の存在が推測されており、散乱強度がその場所での標準大気の2倍にもなることがある。このような微細構造を無視し、一応の目安として標準大気の散乱強度の値をとると、 $N\sigma \approx 7 \times 10^{-12} \text{cm}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1}$ となる。

今回の観測結果の最も特異な点は、250km以上の高度での散乱層の存在である。このような観測結果は、これまでも報告されておらず、物理的にも存在が予測されていない。しかし上昇、下降時ともに観測されており、一時的に出現するものとしても、この観測時点で存在したことはほぼ間違いないものと考えられる。観測点をプロットした図22で、この層の特徴をみると、130km以下の高度では観測点はある値の上下に分散しているのに対し、高々度での散乱層では、平均として零カウントを示す多数の観測点の内に、時々高散乱強度を示す観測点が入ってくる。この特徴は射出レーザービームの中に入ってくる散乱体の数が少なく、しかもその粒径が大きいと考えることにより定性的には説明しうる。詳細は今後の観測に待たねばならない。

## 6. むすび

レーザーレーダーの特長は、短時間において広範囲の大気状況が観測可能となることである。とくに大気汚染のシステム解析を行う立場からいえば、レーザーレーダーは非常に有力な武器となる。

レーザーレーダーの観測可能距離および分解能は、レーザー出力、受光望遠鏡口径、サンプリング、A/D変換器の特性に大きく依存している。このために、現在固定局システムの大型化、高精度化の計画を進めており、その完成とともに大気汚染に関する観測データの集積を行う。他方、移動局として小形レーザーレーダーを搭載した観測車も製作段階にあり、とくに局地汚染を対象として活動を開始する予定である。

ラマン、共鳴、蛍光等の散乱を用いたレーザーレーダーによるなら、汚染物質の識別、定量が可能となることはすでに述べた。これらの方式では一般に散乱強度が小さいので、受光には光電子計数を用いるとともに分光を行う必要がある。これらのレーダーの実用化研究も進行中であり、信号処理システムとしては図15のものが基本となろう。

以上のようなレーザーレーダーを用いること

により、広域、局地汚染のオンライン観測が可能となるならば、大気汚染を分布定数系、大規模系としてとらえるシステム解析の手法が問題の解決にとって非常に有効な手法を与える。また共鳴吸収方式により、非常に広範囲の大気汚染の大まかな測定が可能であり、パターン認識等の手法を用いることにより、汚染パターンの分類や経時変化の解明が可能となろう。

公害とくに大気汚染の問題は現時点において、わが国にとって主要かつ緊急に解決をせまられている課題である。工業が極度に発達し、地域狭少のわが国において将来の発展を保証するためには、この問題の調和のとれた処理が不可欠である。

このため大気域汚染状態の実時間観測を常時実施することが必要である。レーザーレーダーを用いて得られる計算機技術を駆使して実時間処理する。大阪大学では共同研究によりレーザーレーダープロジェクトを推進し、環境システムの解析を実施し公害問題の解決に寄与したいと考えている。動的な環境システムの管理が科学技術の手段により実施しうる日が近いものと思われる。

おわりに一言付加えるならば、このレーザーレーダープロジェクトは単に公害対策のみではなく、地球周辺から超高層にわたる物理現象の解明をも目標にしている。大出力レーダーのみならずロケット搭載のレーザーレーダーも強力にとり上げ総合的に研究を推進して行く計画である。

以上の研究プロジェクトに関連し、次のような研究費の補助をうけた。厚く感謝する次第である。

昭和39. 40. 41年

文部省科学研究費 レーザービームの空間伝播特性の研究 (特定)

京阪神地域における大気汚染防止の工学的研究 (機関)

昭和46. 47年 公害観測用レーザーレーダーシステムの開発に関する研究 (一般)

昭和47年 レーザーレーダーによる大気観測と環境システムの解析 (特定)

昭和43年 厚生省公害調査研究レーザーレーダーの開発

#### 参 考 文 献

- 1) H. Kildal and R.L. Byer, "Comparison of Laser Methods for the Remote Detection of Atmospheric Pollutants". Proc. IEEE, vol.59, Dec. 1971, p. 1644
- 2) P.L. Hanst. "Infrared Spectroscopy and Infrared Lasers in Air pollution Research and Monitoring" Appl. Spectrosc., vol. 24, 1970, p. 161
- 3) R.D. Hake, E.K. Proctor and R.A. Long, "Tunable Dye Lidar Techniques for Measurement of Atmospheric Constituents" Reprint of paper presented at the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers' Seminar-in-Depth on Remote Sensing of Earth Resources and the Environment, Nov. 1971
- 4) M.R. Bowman, A.J. Gibson and M.C.W. Sandford, "Atmospheric Sodium Measured by a Tuned Laser Radar," Nature, vol.21, Feb. 1969, p. 456
- 5) 山中他東京大学宇宙航空研電離圏シンポジウム 昭和47年度
- 6) 上山他応用物理学会 1P-A-2 昭和47年
- 7) 山中千代衛他 東京大学宇宙航空研究所報告, vol. 6, 1970, p. 220
- 8) 中井 貞雄他 東京大学宇宙航空研究所報告, vol. 8, 1972, p. 87