

7.6, 12.5

## 成層圏および対流圏オゾン鉛直分布の測定を目的とする多波長オゾンレーザーレーダーの製作

杉本伸夫・笹野泰弘・中根英昭  
林田佐智子・松井一郎・湊淳

環境庁国立公害研究所 ▼305 つくば市小野川 16-2

(1989年4月18日 受理)

### Multiple Wavelength Laser Radar for Measuring the Stratospheric and Tropospheric Ozone Profile

Nobuo SUGIMOTO, Yasuhiro SASANO, Hideaki NAKANE,  
Sachiko HAYASHIDA-AMANO, Ichiro MATSUI and Atsushi MINATO

The National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba 305

(Received April 18, 1989)

A multiple wavelength differential absorption laser radar has been constructed to measure the ozone profiles from the lower troposphere up to the upper stratosphere. The system consists of two subsystems; one (the low altitude system; LA) for the tropospheric measurements and the other (the high altitude system; HA) for the stratospheric measurements. The LA system employs a KrF excimer laser with a deuterium and a hydrogen Raman shifter to generate 277, 292 and 313 nm laser pulses, and a receiving telescope with a diameter of 0.56 meter. The HA system has a XeCl laser with a deuterium Raman shifter and a XeF laser to generate 308, 339 and 351 nm laser pulses, and a receiving telescope with a diameter of 2 meters. The whole system is controlled by a mini-computer. Details of the system and some measurement examples are presented.

**Keywords:** laser radar, lidar, differential absorption, ozone, stratosphere, troposphere, excimer laser

### 1. ま え が き

近年、フロンガスなどの人為起源の微量物質による成層圏オゾン層の破壊の問題は大きな社会問題となっている。国立公害研究所では1988年4月から5年計画で、成層圏オゾン層の観測、オゾン変動機構の解明とモデル化、オゾン変動の生物への影響の評価を内容とする研究プロジェクトが

スタートした。

この研究の開始に先立って1988年の3月に、地上から成層圏までのオゾン濃度の鉛直分布を観測する大型の差分吸収レーザーレーダーを完成させた。レーザーレーダーによるオゾンの観測は、高度分布を精度よく測定できる点で成層圏オゾンの最も有効な手法であり、特にフロンガスなどの影響が最も現れやすいといわれる30 kmより上

層のオゾン濃度の変動をいち早く検知することが可能である。

本論文では、国立公害研究所オゾンレーザーレーダーの設計と製作、および性能評価について報告する。差分吸収レーザーレーダーを用いた成層圏オゾンの観測はこれまでにフランスの研究グループ<sup>1)</sup>や九州大学<sup>2,3)</sup>、ドイツのグループ<sup>4)</sup>などにより行われており、最近、米国のジェット推進研究所 (JPL) や NASA でもオゾンレーザーレーダーが製作されている。国立公害研オゾンレーザーレーダーもこれらと同じ測定原理に基づくが、本装置の特徴は測定対象領域に応じて高高度 (主として成層圏) 測定用と低高度 (主として対流圏) 測定用の二つのサブシステムに分けたこと、それぞれのサブシステムで三つの波長 (合計6波長) のレーザー光を用いることで、エアロゾルの存在による系統的誤差の軽減を図ったことにあり、対流圏から成層圏までの測定を同時に高精度で行うことができる。

本論文では、主として装置の製作および性能に関する事項について詳しく報告する。まず、第2章ではこの装置の基本設計について述べる。第3章では装置各部の詳細について述べ、第4章では観測結果を用いた装置の性能評価について報告する。特に、これまでに整備をほぼ終えた高高度システムの結果を中心に述べる。

## 2. 基本設計

まず最初に、差分吸収レーザーレーダーによる濃度測定の原理と、理論的な濃度測定の信号対雑音比の評価の方法を簡単に述べる。差分吸収レーザーレーダーは2波長のレーザーレーダー信号の減衰の違いから濃度分布を求める。今、オゾンによる吸収の大きい波長を添え字 on で、吸収の小さい波長を off で表すことにする。今、 $N(R)$  が  $R$  から  $R+\Delta R$  の区間の平均濃度を表すものとするとき次式により濃度が計算される<sup>5)</sup>。

$$N(R) = (1/2\sigma_a \Delta R) \{ \ln [P_{on}(R)/P_{on}(R+\Delta R)] - \ln [P_{off}(R)/P_{off}(R+\Delta R)] + B + T \} \quad (1)$$

ここに、 $P(R)$  はレーザーレーダー受信信号強度、 $P(R)$  は距離  $R$  の関数として次式で表される。

$$P(R) = Y(R) P_0 d A \eta \{ \beta_1(R) + \beta_2(R) \} R^{-2}$$

$$\times \exp \left[ -2 \int_0^R \{ \alpha_1(r) + \alpha_2(r) + \sigma N(r) \} dr \right] \quad (2)$$

ここに、 $Y(R)$  はレーザー光と望遠鏡の視野の重なりを表す関数、 $P_0$  はレーザー出力強度、 $d$  はレーザーパルス空間長の半分、 $A$  は望遠鏡の面積、 $\eta$  は光学系の効率である。また、 $\beta_1, \beta_2$  はそれぞれエアロゾルおよび大気分子による後方散乱係数、 $\alpha_1, \alpha_2$  はエアロゾルおよび大気分子による消散係数である。また、 $\sigma$  はオゾンなどの測定対象分子による吸収断面積、 $N$  は分子濃度である。

(1)式の  $\sigma_a$  は差分吸収断面積と呼ばれ、 $\sigma_{on} - \sigma_{off}$  である。また、 $B, T$  の項は次式で表される。

$$B = -\ln [\beta_{on}(R)/\beta_{on}(R+\Delta R)] + \ln [\beta_{off}(R)/\beta_{off}(R+\Delta R)]$$

$$T = -2(\alpha_{on} - \alpha_{off}) \Delta R$$

ここで、 $\beta = \beta_1 + \beta_2$ 、 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$  である。2波長の波長間隔が小さく、 $\beta, \alpha$  の波長依存性が無視できる場合は  $B = T = 0$  である。実際には、オゾンの測定の場合これらの項は無視できず系統的誤差を生じるため、補正やこれらの項を最初から取り入れた解法が必要となる。

(1)式において、ショットノイズに起因するランダム誤差について誤差の伝搬を考えると次式が得られる。

$$(\Delta N(R)/N(R))^2 = (1/4M\sigma_a^2 \Delta R^2 N(R)^2) \left[ \sum_{i=on, off} \{ (\Delta P_i(R)/P_i(R))^2 + (\Delta P_i(R+\Delta R)/P_i(R+\Delta R))^2 \} \right] \quad (3)$$

ここに、 $M$  は受信信号の積算回数である。また、 $\Delta P/P$  はレーザーレーダー受信信号の誤差で次式で表される。

$$(\Delta P/P)^2 = [(h\nu/\eta_Q T)(P + P_B) + P_D]^2 / P^2 \quad (4)$$

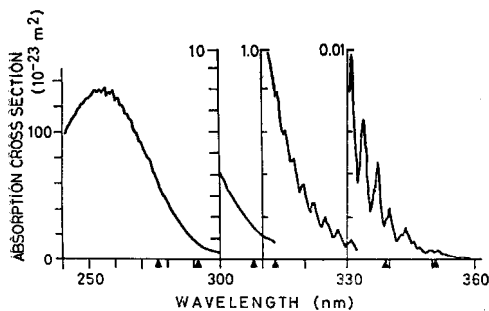
ここに、 $h$  はプランク定数、 $\nu$  は光の周波数、 $T$  は信号処理系のサンプリング時間幅、 $\eta_Q$  は光電子増倍管の量子効率である。 $P_D$  は暗電流に相当する強度、 $P_B$  は背景光強度である。通常  $P_D$  は小さく、背景光強度  $P_B$  の小さい夜間の測定では  $(\Delta P/P)^2$  は受信信号強度に逆比例する。昼間の測定では  $P_B$  の項が支配的となるので、受信光学系に狭帯域のフィルターを用いるなどの方法で  $P_B$  を小さく抑えることが重要となる。(3)式より、濃度の測定誤差は受信信号が大きいほど小さいこと、差分吸収断面積が大きいほど誤差は小さ

いことがわかる。実際には受信信号強度は吸収断面積に大きく依存するので、測定する距離に応じて波長の最適値が存在することになる。

**Fig. 1** に紫外領域のオゾンの吸収スペクトルを示した<sup>9)</sup>。この波長域のレーザーとしては、エキシマレーザーとラマンシフターの組み合わせ、YAGの第三高調波、YAGレーザーの第四高調波とラマンシフターの組み合わせ、あるいは色素レーザーの第二高調波の利用などが考えられる。エキシマレーザーを用いる方法は九州大学の研究グループにより開発され、これは高出力が得られるという特長をもつ<sup>2,3)</sup>。西ドイツのグループもこの方法を採用している<sup>4)</sup>。一方、フランスの研究グループは近接する任意の2波長を得られることから色素レーザーを用いたシステム<sup>1)</sup>や、YAGレーザーの第四高調波をベースとするシステム<sup>7)</sup>を開発してきた。

国立公害研のシステムでは、高出力が得られること、システムが簡単で定常観測において取り扱いが容易であることなどの理由で、エキシマレーザーとラマンシフターの組み合わせを用いる方法を採用することとした。使用波長はKrFレーザーと水素、重水素ラマンシフターの組み合わせ、XeClレーザーと重水素ラマンシフターの組み合わせ、およびXeFレーザーから発生される277, 292, 313, 308, 339, 351 nmである。

この6波長のうち339 nmと351 nmは、**Fig. 1**からもわかるように、オゾンによる吸収がほとんど無視できるので、これらの二つの波長の信号からエアロゾルによる散乱の波長依存性の情報が得



**Fig. 1** Ozone absorption spectrum in the UV region. The wavelengths used in the NIES ozone laser radar system are indicated by the solid triangles.

られ、エアロゾルによる系統的誤差を補正することができる。この補正方法は吸収のある波長であっても適用可能で、3波長の組み合わせによるオゾン濃度導出の方法がすでに提案されている<sup>8)</sup>。

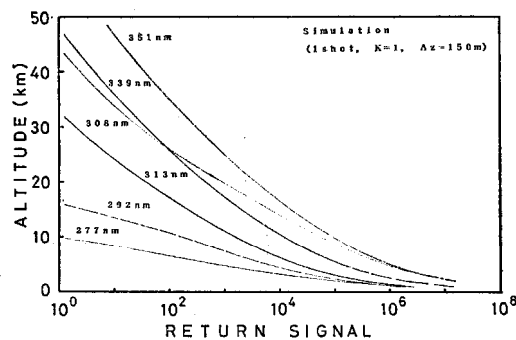
**Fig. 2** に、エキシマレーザーを用いたシステムの、各波長の受信信号のシミュレーションの結果を示す。仮定したシステム定数は**Table 1**に掲げた。オゾン高度分布のモデルには米国標準大気<sup>9)</sup>を、またエアロゾルについてはバックグラウンドを想定して Elterman のモデル<sup>10)</sup>を用いた。**Fig. 2** で、例えば 351 nm, 339 nm ではオゾンの吸収は非常に小さく、受信信号は高度 50 km 以上まで伸びているのに対して、277 nm の受信信号はオゾンの吸収のため数 km で減衰してしまうという特徴が読み取れる。

2波長の組み合わせでオゾン濃度を測定する場合の、誤差評価の結果を**Fig. 3**に示す。これによれば、ランダム誤差のみを考えると 10 km より上空では 308 nm と 339 nm の組み合わせが、

**Table 1** System constants used for the simulation of ozone measurements by laser radar.

Laser wavelength (nm)	Laser energy (mJ)	Area of receiving telescope (m <sup>2</sup> )
277	50	0.246
292	25	0.246
308	100	3.14
313	50	0.246
339	25	3.14
351	70	3.14

Quantum efficiency of the photomultipliers 0.25  
Optical efficiency of the whole system 1.0



**Fig. 2** Simulated return signals for an ozone laser radar. Assumed specifications are listed in Table 1.

6 km から 10 km の領域では 292 nm と 313 nm, 6 km 以下では 277 nm と 292 nm の組み合わせが最適であることがわかる. Fig. 3 では(3)式で表されるランダム誤差のほかに, エアロゾルによる散乱係数および消散係数が2波長で等しいという仮定より生じる誤差も示した. これを見ると対流圏, 特に高度 5 km 以下では, この誤差は無視できないことがわかる. また, ここでは示していないが成層圏においても大きな火山の噴火後は高度 20 km 前後に濃いエアロゾル層が生じるた

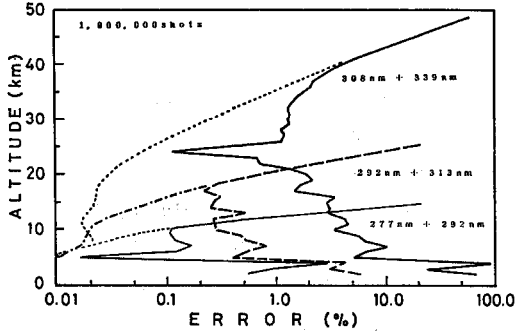


Fig. 3 Simulated errors for ozone measurements with 1,000,000 laser shots and the system specifications shown in Table 1. The dotted and the dot-dashed curves are for the random errors due to shot noise and the solid and the dashed curves are for the sum of errors due to random and systematic errors caused by aerosol effects.

め, エアロゾルによる系統的誤差の補正は重要となる. そこで国立公害研では, エアロゾルの光学的性質を仮定して2波長のみのレーザーレーダー信号からエアロゾル分布とオゾン濃度分布を同時に精密に求める手法や, さらに多波長の信号を用いてエアロゾルの光学的パラメーターまで同時に求める手法を開発している<sup>9)</sup>.

国立公害研オゾンレーザーレーダーでは以上の結果に基づいて, 高度ごとに測定を最適化し, さらにエアロゾルの補正を行うため, Fig. 2 に示した6波長すべてを用いることとした. また, 低高度と高高度のそれぞれに測定を最適化するために, 独立した送受信システムをもつ二つのサブシステムからなる構成とした.

### 3. オゾンレーザーレーダーシステムの詳細

以上の基本的な考え方にに基づき, 詳細設計ならびに製作は米国 Spectra Technology 社が担当した. 製作された国立公害研オゾンレーザーレーダーシステムのブロック図を Fig. 4 に示す. システムは高度 15 km 以上の高高度領域と 1.5~15 km の低高度領域に最適化した二つのサブシステムから構成され, それぞれ独立した送受信系をもつ. データの収集と測定の制御は共通のミニコンピュータにより行われる. システムの主な仕

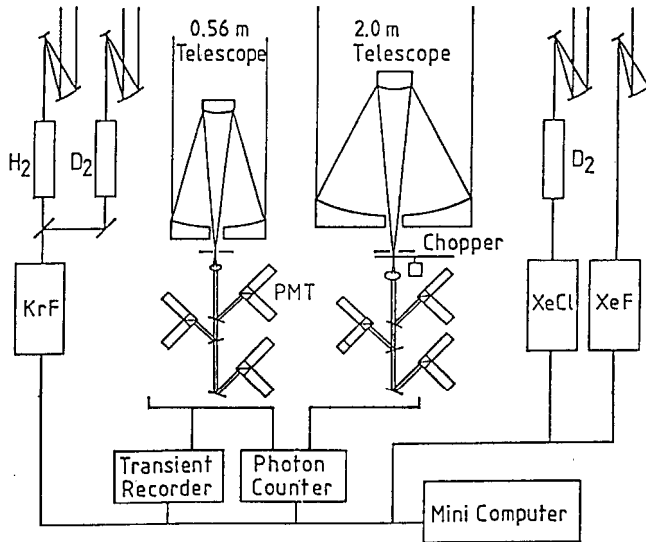


Fig. 4 Schematic diagram of the NIES ozone laser radar system.

**Table 2** Specifications of the multiple wavelength laser radar for ozone measurement.

Low Altitude Transmitter	
KrF excimer laser (Lambda Physik EMG 201 MSC)*	
277.1 nm	1st Stokes of H <sub>2</sub>
313.2 nm	2nd Stokes of H <sub>2</sub>
291.9 nm	1st Stokes of D <sub>2</sub>
High Altitude Transmitter	
XeCl excimer laser (EMG 160 TMSC)**	
308.2 nm	Primary
339.5 nm	1st Stokes of D <sub>2</sub>
XeF excimer laser (EMG 160 TMSC)***	
351.1 nm	Primary
Output power *27 W, **36 W, ***18 W	
Spectral bandwidth **0.003 nm, ***0.01 nm	
Low Altitude Receiver	
0.56 m telescope (Telescopic)	
Dichroic mirrors, Interference filters,	
6 photomultipliers (EMI)	
High Altitude Receiver	
2 m telescope (Hextek)	
Mechanical chopper, Dichroic mirrors,	
Interference filters, Narrow-band etalons,	
6 photomultipliers (EMI)	
Data Acquisition System	
Photon Counter (DPS)	
12 input channels, <100 MHz counting rate	
1 microsecond gate time, 2048 segments, 8-bit accuracy	
High speed averager (<250 Hz repetition rate) with 24-bit accuracy	
Transient Recorder (DSP)	
6 input channels, 30 MHz sampling rate	
8192 segments, High speed averager with 24-bit accuracy	
Minicomputer (Digital Equipment PDP 11/53)	

**Fig. 5** The high altitude system.**Fig. 6** The low altitude system.

様を **Table 2** に掲げる。 **Fig. 5, 6** は高高度、低高度各システムの外観である。システム全体は約 80 m<sup>2</sup> の観測室内に設置された。 **Fig. 7** にシステムのレイアウトを示す。観測室の天井には低高度・高高度システムそれぞれのための天窓があり、観測時にはこれを開ける。

システム各部の詳細は以下のとおりである。

### 3.1 送信部

高高度システム、低高度システムそれぞれについて、3波長のレーザー光をエキシマレーザーとラマンシフターにより発生させ、送信光学系によりコリメートした後、鉛直上方に送信する。 **Fig. 8** に高高度システムの送信部の写真を示す。

#### 3.1.1 レーザーおよびラマンシフター

高高度システムでは、2台のエキシマレーザー

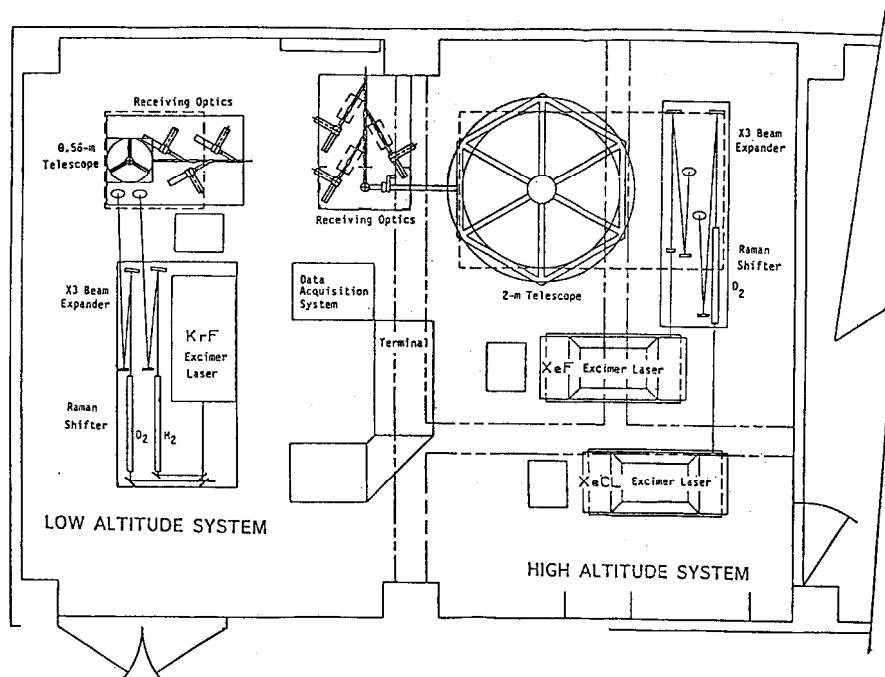


Fig. 7 Layout of the system in the laboratory.



Fig. 8 Transmitter for the high altitude system (on the optical bench).

(XeCl, XeF) と1台のラマンシフター ( $D_2$ ) で得られる 308, 339, 351 nm の3波長を用いる。狭帯域の受信光学系を用いた屋間の測定に対応するために、これらのレーザーには注入同期を用いた狭帯域のものを使用した (Lambda Physik 社 EMG 160 TMSC)。ラマンシフターは Lambda Physik 社 RS 75 を用いた。レーザーの繰り返し数は最大 250 Hz である。

低高度システムでは、1台の KrF レーザーと2台のラマンシフター ( $H_2$ ,  $D_2$ ) により 277, 292, 313 nm を発生させる。レーザーは Lambda

Physik 社 EMG 201 MSC, ラマンシフターは Lambda Physik 社 RS 75 である。レーザーの繰り返し数は最大 80 Hz である。長時間安定した出力が得られるように、KrF レーザーにはレーザー出力安定化装置 ILC (Lambda Physik 社) とガス清浄化装置 GP 2000 (Oxford Lasers 社) を使用した。

ラマンシフターはガス循環型のものではないが、低高度システムの場合、80 Hz までの繰り返し数では変換効率の著しい低下は見られない。低高度システムでは  $H_2$ ,  $D_2$  とともに通常  $2 \times 10^6$  Pa で使用している。高高度システムではレーザーが注入同期でビームの性質が非常によく、ラマンシフターは高い変換効率を得られる。しかしながら、効率がよすぎると 308 nm の基本波の出力が低下して観測には逆に不都合であるため、 $D_2$  の気圧を  $3 \times 10^5$  Pa として 308, 339 nm の出力を最適化している。250 Hz までの繰り返し数ではラマンシフターの変換効率の著しい低下は見られない。

レーザー発射のタイミングは高高度の3波長が同時、低高度の3波長が同時である。高高度と低高度はタイミングも繰り返し数も異なるが、互いに重なり合わないよう設計されている。これに

についてはデータ収集システムの項で述べる。

### 3.1.2 送信光学系

送信レーザービームは、軸はずし放物面鏡を用いて3倍に拡大される。これにより送信光のビーム広がり $\theta$ は $0.07 \text{ mrad}$ となる。色収差を防ぐためにラマンシフター<sup>1)</sup>の出力には平面の窓を用い、レンズを使用せず直接、軸はずし放物面鏡に入射させた。平行光にされた送信ビームは、平面鏡により鉛直上方に折り曲げられる。送信ビームの方向は、この平面鏡のマウントをステッピングモーターで駆動することにより、データ収集システムのミニコンで制御される。

### 3.2 受信部

受信部は高高度システム、低高度システムそれぞれについて、受信望遠鏡、ダイクロイックミラー、干渉フィルターなどからなる受信光学系および光電子増倍管から構成され、光信号を受信して電気信号に変換する。高高度システム、低高度システムの受信部の構成を Fig. 9, 10 に示す。

#### 3.2.1 受信望遠鏡

高高度システムの受信望遠鏡は、オゾン測定用レーザーレーダーとしては世界最大の $2 \text{ m}$ の口径をもつ。この望遠鏡は Hextek 社によって製作されたもので、カセグレン型、主鏡の焦点距離は $3 \text{ m}$ である。コーティングは Al の上に  $\text{SiO}_2$  をオーバーコートしたもので、反射率の実測値は波長 $250\sim 400 \text{ nm}$ において約 $90$ パーセントであった。また、星の像による面精度のテストにより点光源の像の全体が $0.154 \text{ mrad}$ 以内に集光される

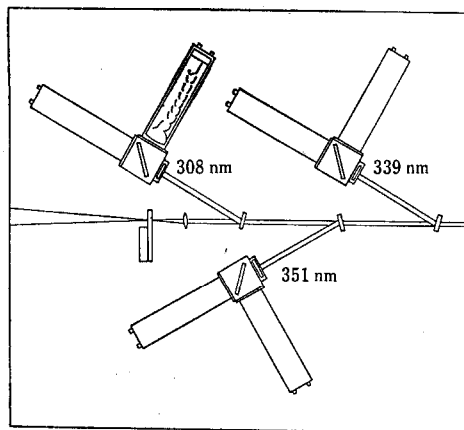


Fig. 9 Configuration of the receiving optics for the high altitude system.

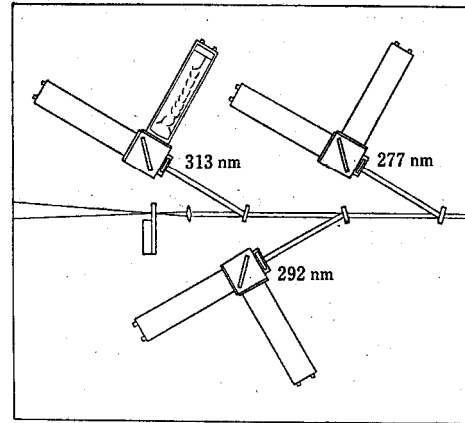


Fig. 10 Configuration of the receiving optics for the low altitude system.

ことが確かめられた。副鏡を含めた有効焦点距離は $28.34 \text{ m}$ である。

低高度システムの望遠鏡は口径 $0.56 \text{ m}$ のカセグレン型である。Telescopic 社により製作された。主鏡、副鏡ともコーティングは Al の上に  $\text{MgF}_2$  のオーバーコートで、反射率は $88$ パーセント以上である。有効焦点距離は $7.94 \text{ m}$ である。

#### 3.2.2 視野絞り

高高度、低高度システムともに、視野絞りは回転式で適宜、口径を選択できる。この回転式視野絞りはステッピングモーターにより駆動され、コンピュータにより制御される。

#### 3.2.3 メカニカルチョッパー

高高度システムでは、近距離からの強い不要な信号を遮断するためのチョッパーを用いている。回転数は $188 \text{ Hz}$ とし、立ち上がり時間を速くするためにチョッパーの前にレンズを付けて望遠鏡の有効焦点距離を $1/3$ にしている。これにより、立ち上がり時間 $22 \mu\text{s}$ が得られる。また、測定に使用するすべてのタイミング信号は、このチョッパーからのタイミング信号に基づいて発生される。

#### 3.2.4 ダイクロイックミラーとバンドパスフィルター

高高度、低高度各システムとも受信された信号はダイクロイックミラーと干渉フィルターで分光され、光電子増倍管により波長ごとにレーザーレーダー信号が記録される。Fig. 2 に見られるように、特に低高度システムでは三つの波長の信号の

大きさが非常に異なり、しかもこれらが同時に受信されるので、他の波長からの信号の漏れを押さえることが重要である。このことを考慮してダイクロイックミラーの順序を Fig. 9, 10 に示すように設定した。ダイクロイックミラーは鋭い波長特性をもつ Twardy Technology 社製バンドリフレクションミラーである。ダイクロイックミラーへの信号光の入射角は鋭い波長特性が得られるように 30 度とした。

低高度システムの干渉フィルターは、各波長について狭いバンド幅 (2.5 nm) をもつ高透過率のもの、ブロッキング比の高いもの (バンド幅 10 nm) を重ねて使用した。計算から求められた全光学系の透過率は数パーセントである。また、高高度システムについては狭帯域フィルター (バンド幅 2 nm) と可視光を遮断するためのフィルターを組み合わせることにより 20~40% の透過率を得ている。

### 3.2.5 光電子増倍管

レーザーレーダー信号は非常にダイナミックレンジが広いので、低高度システム、高高度システムともに各波長それぞれにゲインの異なる 2 系列の検出系を用いた。低ゲインのチャンネルは受信光の一部 (約 8%) をコーティングなしの石英ガラス板で取り出している。低ゲインの光は必要に応じて ND フィルターで減衰させている。光電子増倍管はフォトンカウンティング用のもの (EMI 社 9813 QB) である。

近距離からの強い不要な信号を遮断するために、すべての光電子増倍管にゲインスイッチ (EMI 社 GB 1001 A/PULSE) を装備した。ゲートは光電子増倍管の第一ダイノードの電位を切り替えることにより行っている。ゲートのタイミングは低高度システム、高高度システムで独立に、また、高ゲイン、低ゲインのチャンネルで独立に設定できる。

### 3.3 データ収集システム

データ収集システムでは、受信部で電気信号に変換された 12 のチャンネルの信号を記録する。信号のダイナミックレンジが大きいため、低高度の六つのチャンネルではフォトンカウンティングとアナログ方式を併用している。これは受信光子の同時計数誤差が問題となるような低い高度領域

の強い信号に対しても、有効な信号が受信できるようにするためである。このとき、光電子増倍管は基本的にフォトンカウンティングモードで動作させ、2 系列の出力をもつ増幅器の一方の出力をローパスフィルターに通した後にトランジェントレコーダーに入力する。フォトンカウンターとトランジェントレコーダーは同時に動作する。高高度の 6 チャンネルはすべてフォトンカウンティングされる。

データ収集システムは CAMAC モジュールとミニコンピューター (Digital Equipment 社 PDP 11/53) とで構成される。データ収集システムの構成を Fig. 11 に示した。

#### 3.3.1 フォトンカウンター

フォトンカウンターはマルチチャンネルスケララー (DSP 社 2090) とアベレーシングメモリー (DSP 社 4101) から構成され、1  $\mu$ s のゲートで 2048 セグメントの時間分解データを収集する。1 ゲート当たりの分解能は 8 ビットで、カウンターのカウンティングレートは最大 100 MHz である。1 MHz のクロック信号は、後述の外部タイミングボードから与えられる。また、アベレーシングメモリーでは各セグメント 24 ビットの積算を行うことができる。本システムでは各チャンネル 1 台ずつ合計 12 セットのフォトンカウンターを用いている。

#### 3.3.2 トランジェントレコーダー

低高度の六つのチャンネルでフォトンカウンティングと併用している。トランジェントレコーダー (DSP 社 2030) とアベレーシングメモリー (DSP 社 4100) から構成される。セグメント数は 8192、AD 変換の精度は 8 ビットである。クロックレートは 20 MHz で、フォトンカウンターと同様に外部タイミングボードから与えている。アベレージャーでは各セグメント 24 ビットの積算を行うことができる。

#### 3.3.3 ミニコンピューター

ミニコンピューターは CAMAC システムを制御し、データの収集と測定の制御を行う。ミニコンピューターシステムの構成を Fig. 12 に示す。主な周辺装置は CAMAC システムのほかに、9トラック磁気テープ、カラー端末、モノクロ端末、タイミングボード、Mタイマーボード、



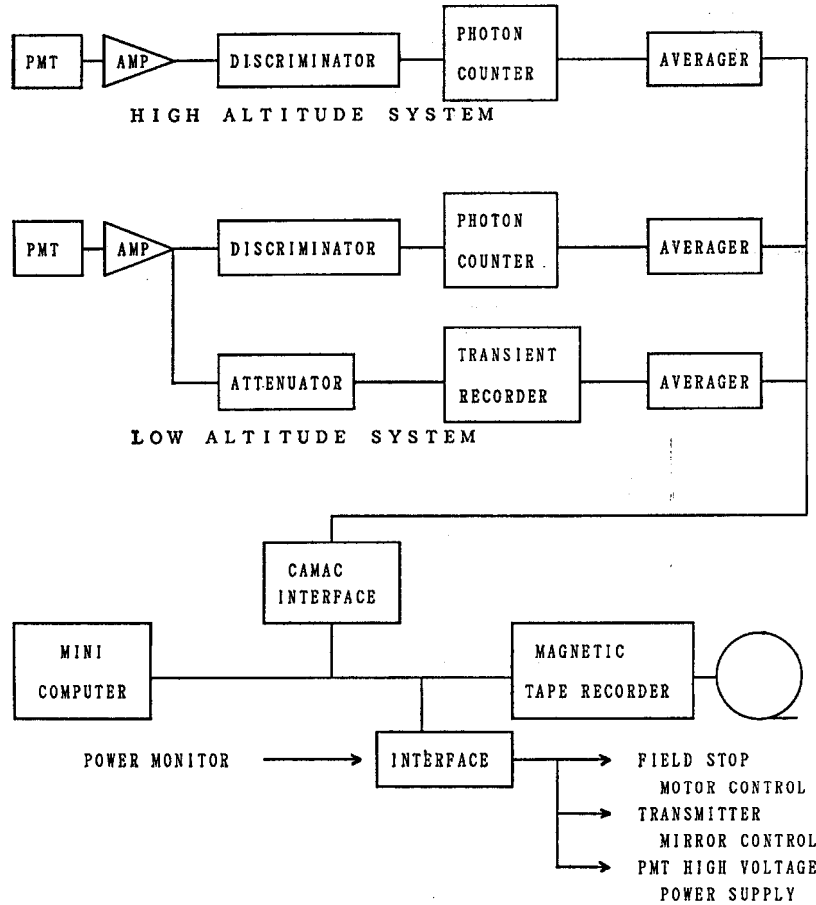


Fig. 11 Blockdiagram of the data acquisition system.

レーザー出力測定装置, 送信ミラーおよび視野絞りのステッピングモーター駆動装置である。

### 3.3.4 タイミングボードおよびMタイマー

チョッパーからのタイミング信号に基づいて, タイミングボード (Spectra Technology 社製) と Mタイマーボード (Codar Technology 社製) により測定に必要なすべてのタイミングが発生される。タイミングボードとMタイマーボードの機能を Fig. 13 に示す。

### 3.4 データ収集用ソフトウェアプログラム

データ収集システムのミニコンピュータの行う主な機能は, 1. タイミングなど測定パラメーターの設定, 2. 送信用平面鏡および視野絞りの駆動, 3. データの収集と測定データの磁気テープへの記録, 4. 測定データの表示である。

測定データはすべて磁気テープに記録される。ミニコンピュータでは, 測定データをチェック

することを目的とした簡単なデータ処理と表示を行う。表示の内容は各チャンネルの受信信号のAスコープ表示と, 指定した2波長の組によるオゾン濃度の表示である。このオゾン濃度の導出には(1)式を用い, 補正項は無視している。処理はオフラインで行っており, 詳細なデータ解析は大型計算機により行っている。

## 4. 試験観測

受信信号を用いてシステムの性能評価を行った。Fig. 14 は高高度システム, 低高度システムで得られた受信信号の例である。いずれもフォトンカウンティングによる測定データで, 低ゲインチャンネルの信号が, ある適当な高度範囲で, 高ゲインチャンネルの信号に一致するように定数倍することにより, 両者を接続して一つの信号として表している。受信信号の時間応答波形の特徴は

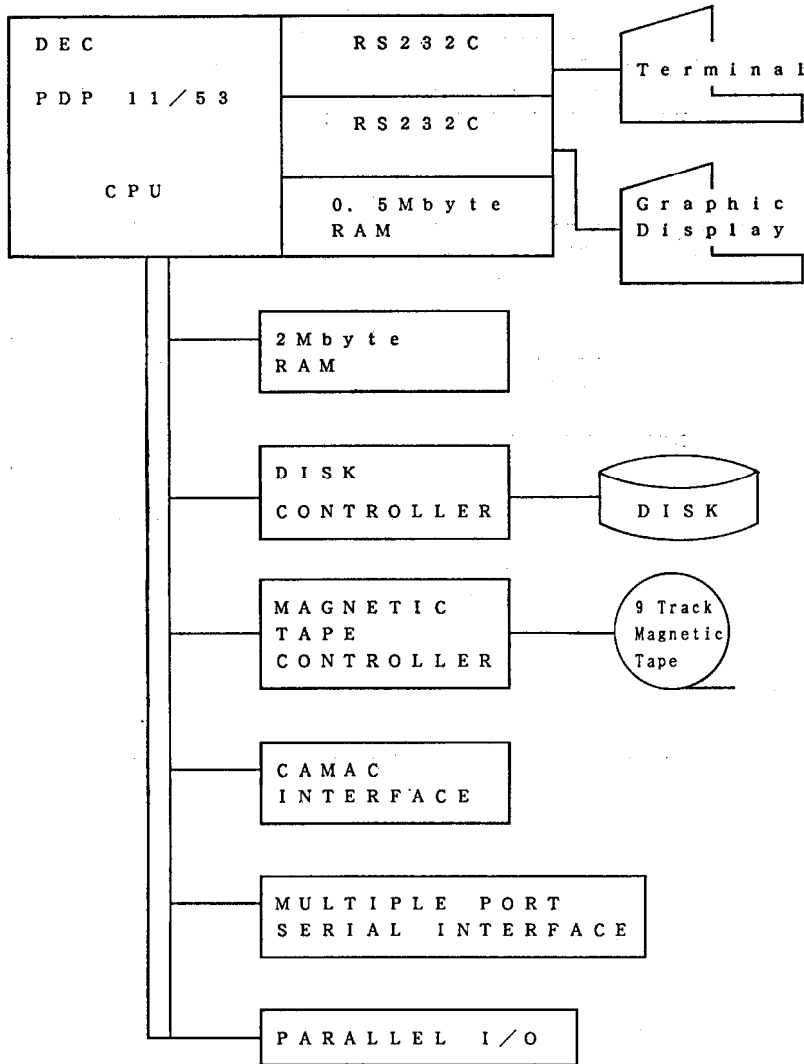


Fig. 12 Minicomputer system.

Fig. 2 とよく一致している.

オゾン濃度の鉛直分布, ランダムな測定誤差はそれぞれ(1)式, (3)式により評価できる. 高高度システムについて, 受信信号を144万ショット分積算した実測値を用いて評価した, オゾン濃度と測定誤差の鉛直分布を Fig. 15 に示した. ここで, 高度 30 km 以上は波長が 308 nm と 351 nm の高ゲイン受信信号 (308H+351H) から, 高度 33 km 以下は 308 nm と 339 nm の低ゲイン受信信号 (308L+339L) からそれぞれオゾン濃度を求めている. 図中, オゾン濃度は太い線で, 測定誤差は標準偏差の幅を細い2本の実線で示してい

る. またこのとき, 距離自乗補正を施した受信信号は 2 km 幅の移動平均 (2次式のあてはめ) により平滑化し, また, (1)式の  $\Delta R$  を 2 km とした. また, 大気分子による消散項については標準大気モデルを用いて補正した.

Fig. 15 に示されたように 144万ショット (約4時間半) を用いた測定で, 308 nm と 351 nm の組み合わせによって, 高度 35 km, 40 km でそれぞれ相対誤差 2.8%, 11.2% を得ている. 測定に要する時間 (レーザーショット数/レーザー繰り返し周波数)  $\Delta t$ , 信号平滑化の幅  $L$ , オゾン濃度導出の高度分解能  $\Delta R$  と, 測定の相対誤差  $\epsilon$  の

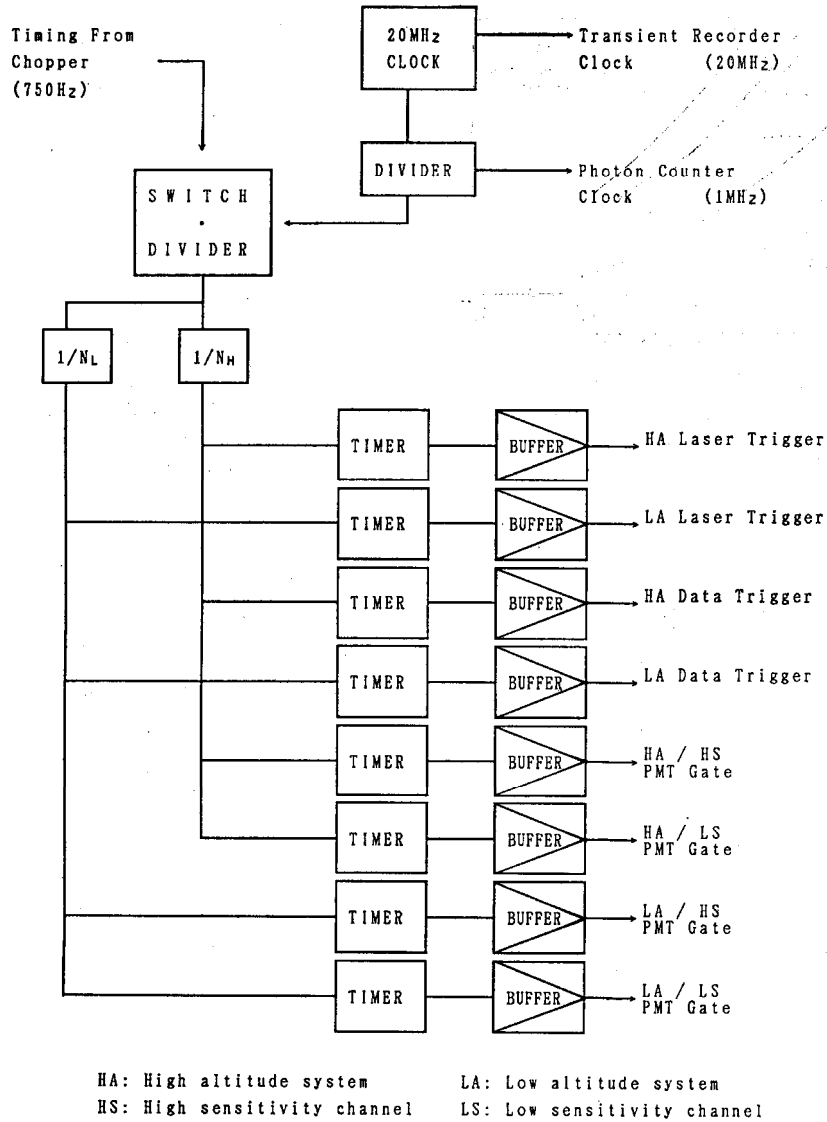


Fig. 13 Function of the timing board and M-timer.

間には

$$\epsilon \sim (\Delta t L)^{-1/2} \cdot \Delta R^{-1}$$

の関係がある。これによれば、例えば高度 40 km では一晩 (8 時間) の測定で、信号平滑化の幅 5 km、高度分解能 5 km で約 2 パーセントの測定精度が得られることがわかる。

一方、受信信号にはランダム誤差のほかに、光電子増倍管の信号誘起雑音などによる系統的なひずみが重畳している可能性がある。そこで、このような系統的誤差を評価するために、オゾンの吸収の少ない 339 nm と 351 nm の受信信号の比

較、チョッパーのタイミングを変えた受信信号の比較を行い、これらの誤差が十分に小さいことを確かめた。Fig. 16 には、308 nm と 351 nm の組み合わせ、308 nm と 339 nm の組み合わせのそれぞれで求めたオゾン濃度を混合比の形で示した。混合比の算出にあたっては、空気分子密度プロファイルとして米国標準大気モデルを用いた。ランダム誤差の大きさの範囲内で両者の結果は非常によく一致しており、系統的誤差の影響が小さいことを示している。

Fig. 17 には、オゾンレーザーレーダー観測と

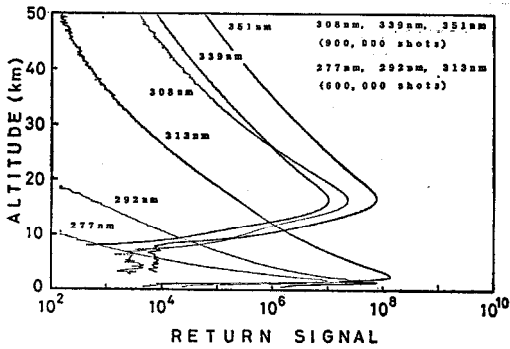


Fig. 14 Received signals of the high and the low altitude systems. High-gain and low-gain signals are combined to form a single profile for each wavelength.

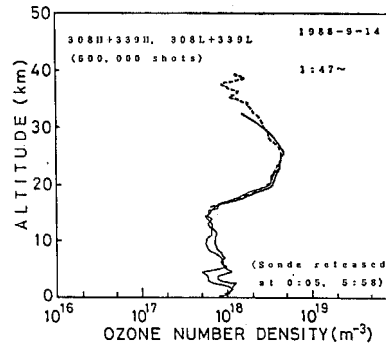


Fig. 17 Comparison of ozone profiles derived from laser radar measurement (dotted curve) and from sonde measurements (solid curves).

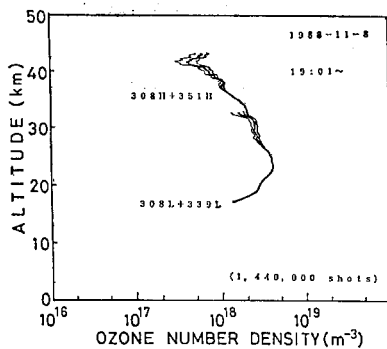


Fig. 15 Ozone concentration (bold curve) and the magnitude of measurement error profiles (shown by two thin curves) obtained with the high altitude system. In the figure, the combinations of signals used are shown as 308 H+351 H and 308 L+339 L where the numbers mean wavelengths and H (L) means high (low) gain channel.

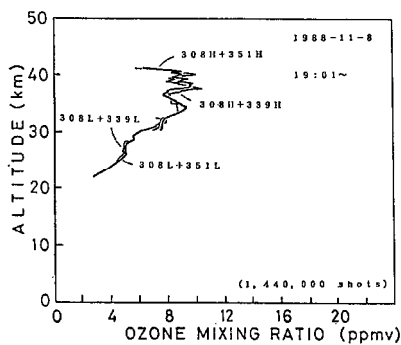


Fig. 16 Comparison of ozone profiles derived from combination of signals with different wavelengths.

同時に行ったオゾンゾンデ観測データを併せて示している。ゾンデは明星電機社製 RSII-KC 79 D 型を使用した。レーザーレーダーは 308 nm と 339 nm の高ゲイン、低ゲイン信号を組み合わせ用い、高度 18 km から 40 km までのオゾン濃度分布を求めた。一方、オゾンゾンデは高度 30 km 付近までのオゾン濃度分布が求められた。両者が重なる高度領域で両者の一致はよい。

### 5. む す び

本論文では、1988 年 3 月に国立公害研究所が導入した成層圏・対流圏オゾン測定用の多波長レーザーレーダーについて、その製作にあたっての考え方、装置の概要と試験観測の結果について報告した。

本装置は、成層圏を主な測定対象とした高高度システムと、対流圏を主な対象とした低高度システムの 2 系列からなっており、それぞれを最適化するようにレーザー波長の選択、受信光学系の設計が行われている。また、エアロゾルの存在による測定上の誤差を軽減するために、各システムで 3 波長 (合計 6 波長) を用いている。

現段階では、特にフロンガスによるオゾン破壊が最も顕著に現れると考えられている上部成層圏の測定を最優先させ、測定手法の確立を目指している。そこで、本報告ではこれまでに整備をほぼ終えた高高度システムに重点を置いて、試験観測の結果を示した。対流圏オゾンについても地球温暖化の一要因として重要であることから、低高度

システムの調整・整備を早急に進めることにしており、その結果は別報にて報告する。

#### 謝 辞

本レーザーレーダー装置の開発にあたり、国立公害研究所総合解析部地域計画研究室長清水浩氏には多くの助言と励ましをいただいた。また、九州大学工学部柴田隆氏からは、基本設計にかかわる貴重な助言をいただいた。ここに、謝意を表する次第である。

#### 文 献

- 1) G. Megie, G. Ancellet and J. Pelon: *Appl. Opt.* **24** (1985) 3454.
- 2) O. Uchino, M. Maeda, J. Kohno, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono: *Appl. Phys. Lett.* **33** (1978) 807.
- 3) T. Shibata, T. Fukuda, T. Narikiyo and M. Maeda: *Appl. Opt.* **26** (1987) 2604.
- 4) J. Werner, K. W. Rothe and H. Walther: *Appl. Phys.* **B 32** (1983) 113.
- 5) R. M. Schotland: *J. Appl. Meteorol.* **13** (1974) 71.
- 6) M. Griggs: *J. Chem. Phys.* **49** (1968) 857.
- 7) A. Papayannis, G. Ancellet, J. Pelon and G. Megie: *Abstr. Int. Laser Radar Conf., San Candido, 1988*, p. 472.
- 8) Y. Sasano: *Appl. Opt.* **27** (1988) 2640.
- 9) US Standard Atmosphere, 1976 (U. S. Government Printing Office, Washington, DC., 1976).
- 10) L. Elterman: *Air Force Cambridge Research Laboratories, Environmental Research Papers No. 28* (1968) 5.