

A-1 オゾン層の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究

(6) オゾン層観測データ等を用いたオゾン層変動の総合的解明に関する研究

研究代表者

国立環境研究所

中根 英昭

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ

オゾン層研究チーム

中根 英昭・林田 佐智子

衛星観測研究チーム

笹野 泰弘

高層大気研究室

杉本 伸夫・松井 一郎

平成2-4年度合計予算額 36,508千円

[要旨] 本研究では、国立環境研究所に設置されたオゾンレーザーレーダーによって蓄積されたデータ等を解析した。オゾンレーザーレーダーによるオゾン高度分布の観測データについては、系統誤差評価の手法を明らかにすると共に、衛星センサーSAGE IIデータとの比較を行い良い一致を得た。測定高度範囲は15km-45kmである。また、オゾンレーザーレーダーの非吸収波長(351nm)を用いて30kmから80kmの高度範囲の気温高度分布を得られること、オゾン層変動と関連のあるプラネタリー波の活動を検出する手段として有効であることが明らかになった。また、オゾンの季節変化については、高度毎に異なることが明瞭に示された。更に、課題A-1のいくつかのサブテーマの協力により集中観測を行った結果、通常では得られないデータを得ることができた。1991年6月のピナツボ火山噴火がオゾンレーザーレーダーに及ぼす影響を補正する手法を開発し、良い結果が得られた。集中観測期間のオゾン及び気象データの解析を実施した。

[キーワード] オゾンレーザーレーダー、オゾン高度分布、オゾン層の季節変化、ピナツボエアロゾル、NDSC

## 1. 序

北半球中高緯度におけるオゾン減少トレンドは1980年代後半に顕著に増大したが、1992年-1993年にはこれまでの減少トレンドを越える大きなオゾン全量の低下が観測されている。また、南極においても、オゾンホールが過去最大規模に発達するなど、オゾン層破壊はますます深刻化している。このようなオゾン層破壊は、フロン等のオゾン層破壊物質濃度の増大を抜きにして理解することは、不可能である。同時に、このような大きなオゾン全量の減少は、大気中塩素・臭素濃度の増大のみで説明することは困難であり、ピナツボ火山噴火エアロゾルの影響、大気循環の影響等がオゾン層破壊速度の増大に寄与している可能性がある。従って、オゾン層変動を、その原因と共に捉えることのできるような、多くの情報を系統的に集めるような観測が必要である。こ

のような要請に対応した国際的な観測計画の一つとして、高度な地上遠隔計測装置による国際的ネットワーク「成層圏変化検出のためのネットワーク（N D S C）」が進められている。

本研究は、N D S Cにおいて主要な測器であるレーザーレーダー観測を中心にオゾン層変動に関してどのようなデータが得られるか、また、本課題の他の観測手法と協力した観測によってどのように観測のポテンシャルが増大するか等について検討した。また、期間中に噴火したピナツポ火山起源の成層圏エアロゾルについて、レーザーレーダーによるオゾン観測に対する影響の除去手法を検討した。

## 2. オゾンレーザーレーダーの原理と装置

オゾンレーザーレーダーは、能動的遠隔計測手法（アクティブリモートセンシング）の一種であるが、高精度、高分解能であること、高度40 kmまで観測することが可能であることから、N D S Cの一環として世界各国で配備されてきている（図1）。

図2にオゾンレーザーレーダーの原理を示す。オゾンのような気体成分濃度を測定するレーザーレーダー（差分吸収ライダー；D I A L）では、気体によって強く吸収される波長とあまり吸収されない波長のレーザー光をパルス的に発射し、空気やエアロゾルによって散乱されて戻ってきた光を望遠鏡で集光した後に検出器で検出する。そして、レーザー光が発射されてから戻ってくるまでの時間遅れから高度が計算できる。そして、二波長の信号のオゾンによる減衰の程度の違いからオゾンの高度分布を計算することができる。

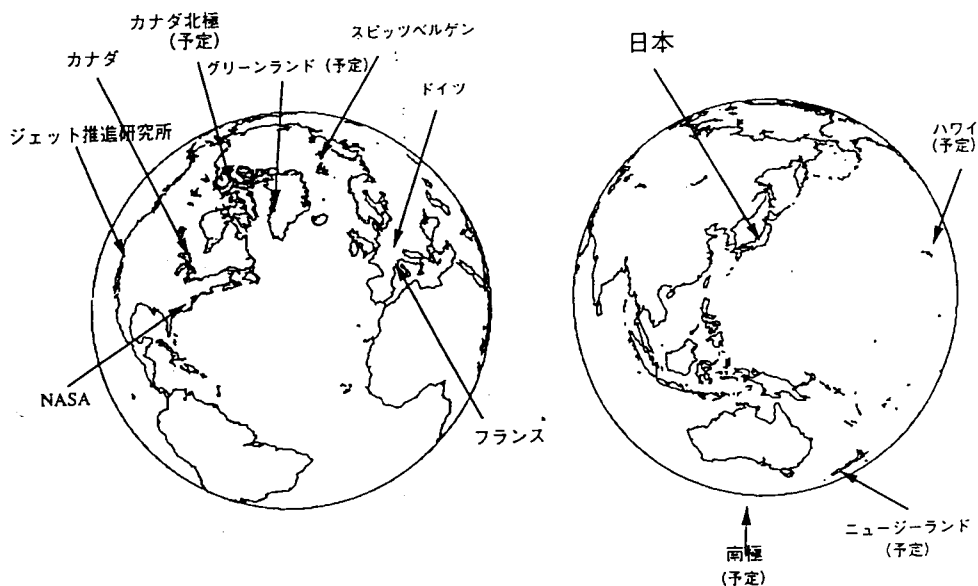


図1 世界のオゾンレーザーレーダーの設置状況。「成層圏変化検出のためのネットワーク（N D S C）」において重要な観測地点にほぼ一致する。

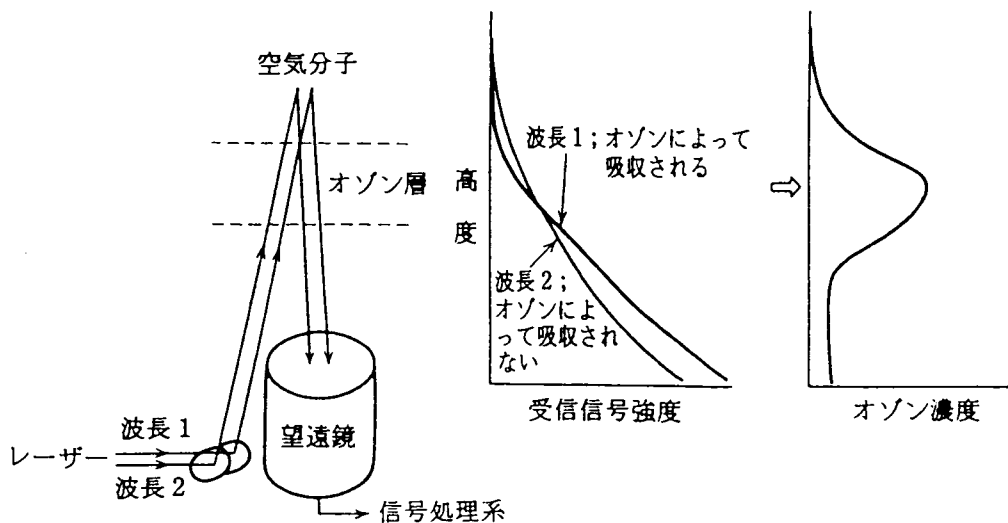


図2 オゾンレーザーレーダーの原理

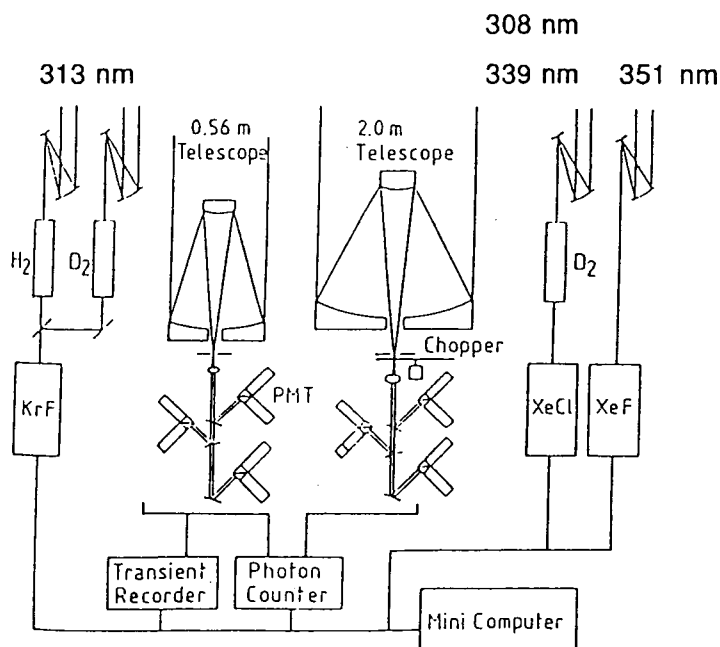


図3 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーのブロック図

国立環境研究所のオゾンレーザーレーダーのブロック図を図3に示す。オゾンレーザーレーダーシステムは、高度15kmから45km付近までを測定する高高度システムと高度15kmまでを観測する低高度システムから構成されている。高高度システムは2台のエキシマレーザーと直径2mの望遠鏡を持ち、308nm、339nm、351nmの3波長を使って観測を行う。低高度システムは1台のレーザーと直径56cmの望遠鏡を持ち、277nm、292nm、313nmの3波長を使って観測を行っている。3波

長を使用するのは、空気だけではなくエアロゾルによるレーザー光の散乱があるのでその影響を検出したり補正するためである。本報告では、成層圏を観測する高高度システムについて主に記述する。

### 3. オゾンレーザーレーダーによって得られたデータの誤差評価

オゾンレーザーレーダーによって得られたデータについては、信号強度からランダム誤差を推定して標準偏差の形で誤差評価・誤差表示を行っている。しかし、系統誤差の評価は容易ではない。そこで、339nmと351nmのレーザー出射光を独立にアライメントしていることから、308nm-339nmの波長組と308nm-351nmの波長組で観測されたオゾン高度分布の比較を行っている。この比較は、エアロゾルの影響の診断、光学系のアライメントの良否の診断を行う上で有効である。図4に2波長組から得られたオゾン高度分布を重ねて示したが、両者がほとんど重なっておりエアロゾルの影響やミスアライメントによる系統誤差を検出することのできない良好なデータであると考えて良い。また、オゾンレーザーレーダーの観測結果は、衛星センサーSAGE IIの観測結果と比較されたが良好な一致が得られている(図5)。このように、オゾンレーザーレーダーデータ自身に基づく評価と比較観測による評価を行っているのである。

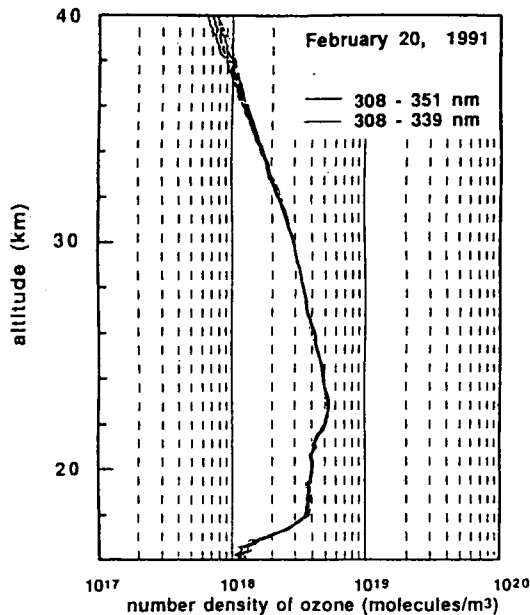


図4 308nm-351nm、308nm-339nmの2波長組の信号から得られたオゾン高度分布。両側の実線は誤差(標準偏差)を示す

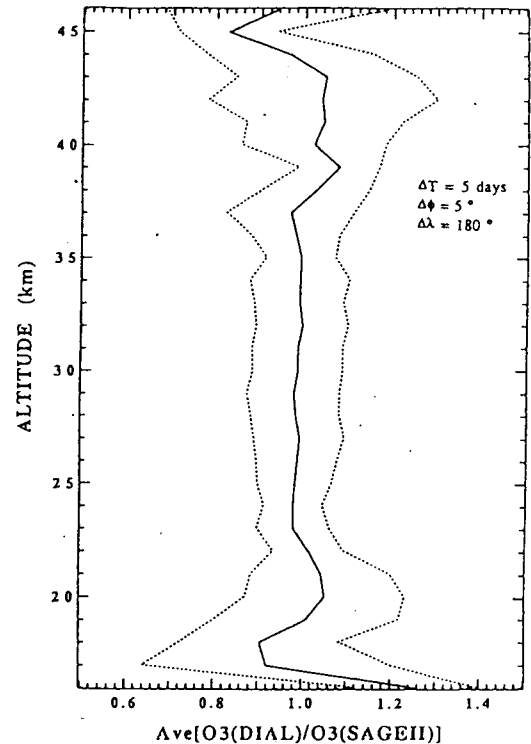


図5 オゾンレーザーレーダーと衛星センサーSAGE IIによるオゾン高度分布の比較

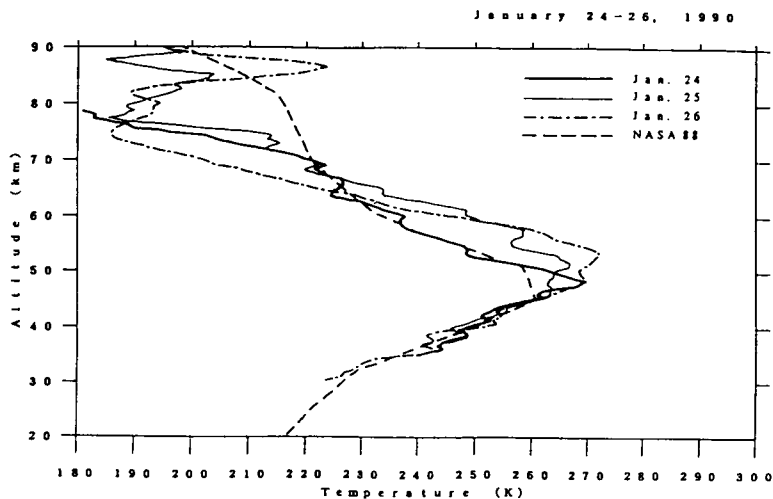


図6 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって測定された気温高度分布。国際的な集中観測、DYANA期間中のもの。

#### 4. レーザーレーダーによる気温の観測

オゾンによる吸収の無い波長の信号に高度の自乗をかけたものは、エアロゾルが無視できる高度(30km以上)では、空気密度に比例する。そこで、理想気体の式、静水圧の式を用いると気温の絶対値の高度分布を求めることができる。図6は結果の一例である。30km~75km以上の高度領域のデータが得られている。通常の気球観測の到達高度は30km、通常のロケット観測では50kmであるので、レーザーレーダー以外では得ることの困難なデータである。高度55kmでは1日で20度以上の温度上昇が見られるが、これはオゾン層の変動に大きな影響を及ぼす、成層圏突然昇温に関連した現象と見られる。

オゾンの減少による紫外線吸収量の減少は気温の低下を引き起こす。また、二酸化炭素の増加は成層圏、中間圏では気温の低下につながる。従って、オゾンレーザーレーダーによる気温鉛直分布の長期観測によって、オゾン層破壊や二酸化炭素増大の影響の検出が可能である。

#### 5. 観測結果

##### 5. 1 レーザーレーダーによって観測された成層圏オゾン層の変動

図7に1988年9月から1992年12月までの、高度別のオゾン数密度(濃度)の変動を示す。最も顕著な変動は季節変化であるが、その様子は高度で異なる。高度20kmでは冬から春にかけてオゾン数密度が最大になるが、25kmではその傾向が小さい。30km、35kmでは逆に夏にオゾン数密度が極大になる。40kmでは季節変化はそれほど大きくない。下部成層圏ではオゾンの輸送がオゾン変動を主に支配し、上部成層圏では光化学過程が主としてオゾン変動を支配することに対応している。上記の季節変化を鉛直分布で見たものが図8である。8月15日のデータと1月29日のデータを比較

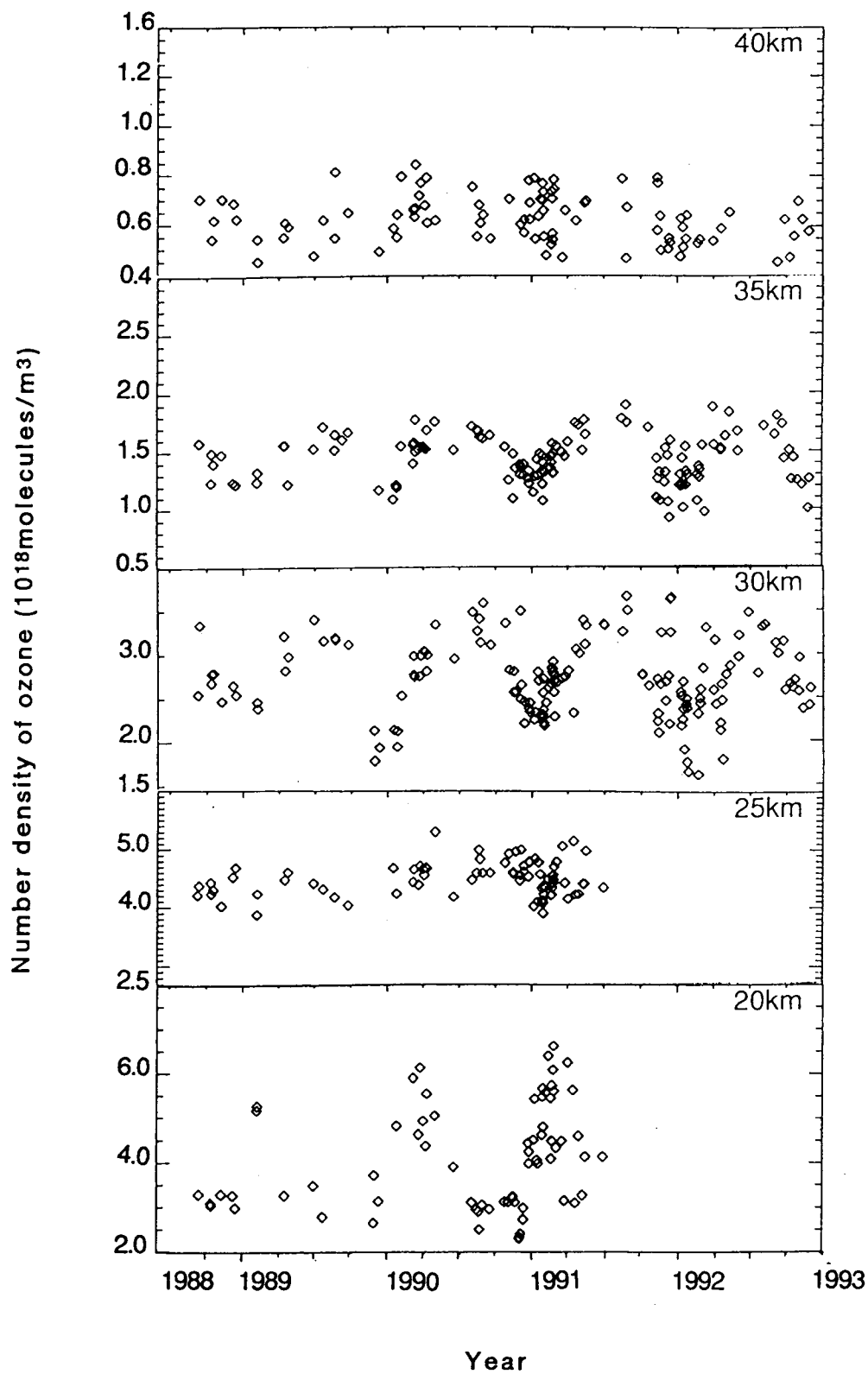


図7 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって観測した高度毎のオゾン変動。

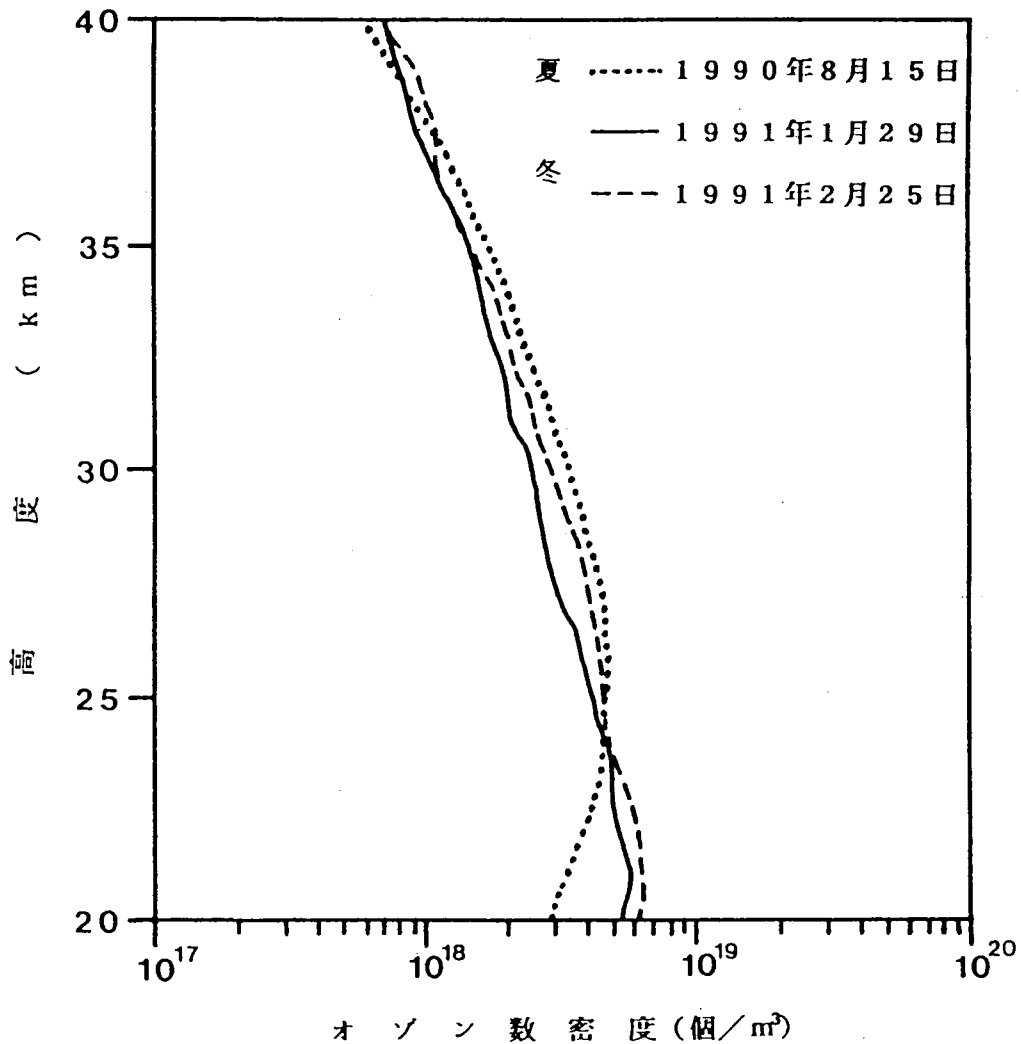


図8 オゾンレーザーレーダーによって観測された夏季と冬季のオゾン高度分布

すると、高度23km付近で交差している。これより低高度では冬場のオゾンが夏場より高く、これより高高度では逆になっているからである。40km付近では再び夏と冬のオゾン数密度が接近しており、季節変化が小さくなっている。また、1月29日と2月25日のオゾン高度分布の違いは、冬季のオゾン変動の大きいことの一端を示している。

## 5. 2 地上からのオゾン層集中観測

1991年12月、1992年1月、2月にピナツボ火山起源成層圏エアロゾル存在下でのオゾン層集中観測を実施した。図9に結果の一部を示す。異なった測器によるデータをつなぎ合わせることによって、地上から高度60km以上までのオゾン、気温の高度分布が得られている。図に示したデータの他に、赤外ヘテロダイン分光計によるメタン、N<sub>2</sub>Oの高度分布が得られている。大気球による観測を除けば、日本において成層圏におけるこのような総合的な鉛直分布が得られたことはこれまでにない。この間の日本上空のオゾン層変動の中には、オゾン層破壊の影響を受けている可能性が示唆されるケースがあり、トラジェクトリー計算、衛星センサーTOMSのデータ、ポテン

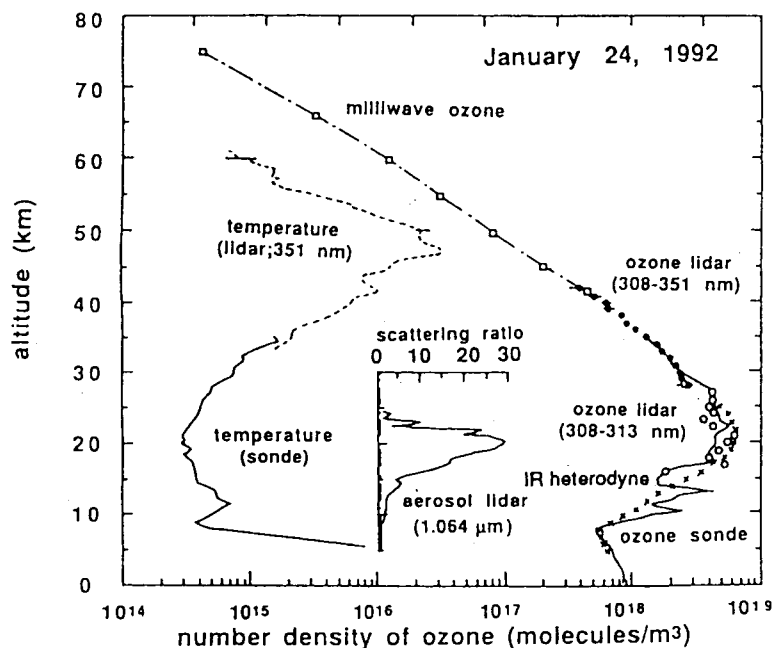


図9 オゾン層集中観測におけるオゾン層、気温、エアロゾル高度分布の測定例。レーザーレーダー観測は国立環境研究所、赤外ヘテロダイン観測は東北大学理学部、ミリ波分光計は名古屋大学理学部、オゾンゾンデ観測は国立環境研究所・高層気象台によって行われた。

シャル渦度等を用いて解析を行って来たが、ヨーロッパ上空のオゾン高度分布データ等のデータが公開されるまでは結論を出すのは適当でないと。

### 5. 3 オゾンレーザーレーダー観測におけるピナツボ火山起源エアロゾルの影響の除去

1991年6月中旬に噴火したフィリピンのピナツボ火山のエアロゾルは、光学的原理に基づいたオゾン測定法の多くに系統誤差を与えているが、オゾンレーザーレーダーのデータにも大きな影響が生じた。国立環境研究所のオゾンレーザーレーダーの場合にはオゾンによって吸収される波長（共鳴波長；308nm）、オゾンによって吸収されない波長（非共鳴波長；351nm）の他に第三の波長を使用しているため、エアロゾルの影響の補正が可能である。

図10に、ある観測日のピナツボ火山起源エアロゾル高度分布、未補正のオゾンレーザーレーダー観測結果、補正後のオゾン高度分布を示す。ここで用いられたエアロゾルに関連するパラメータは、 $\alpha_1$ ；エアロゾルの消散係数、添字1はエアロゾル（2は空気）を示す、 $\beta_1$ ；エアロゾル



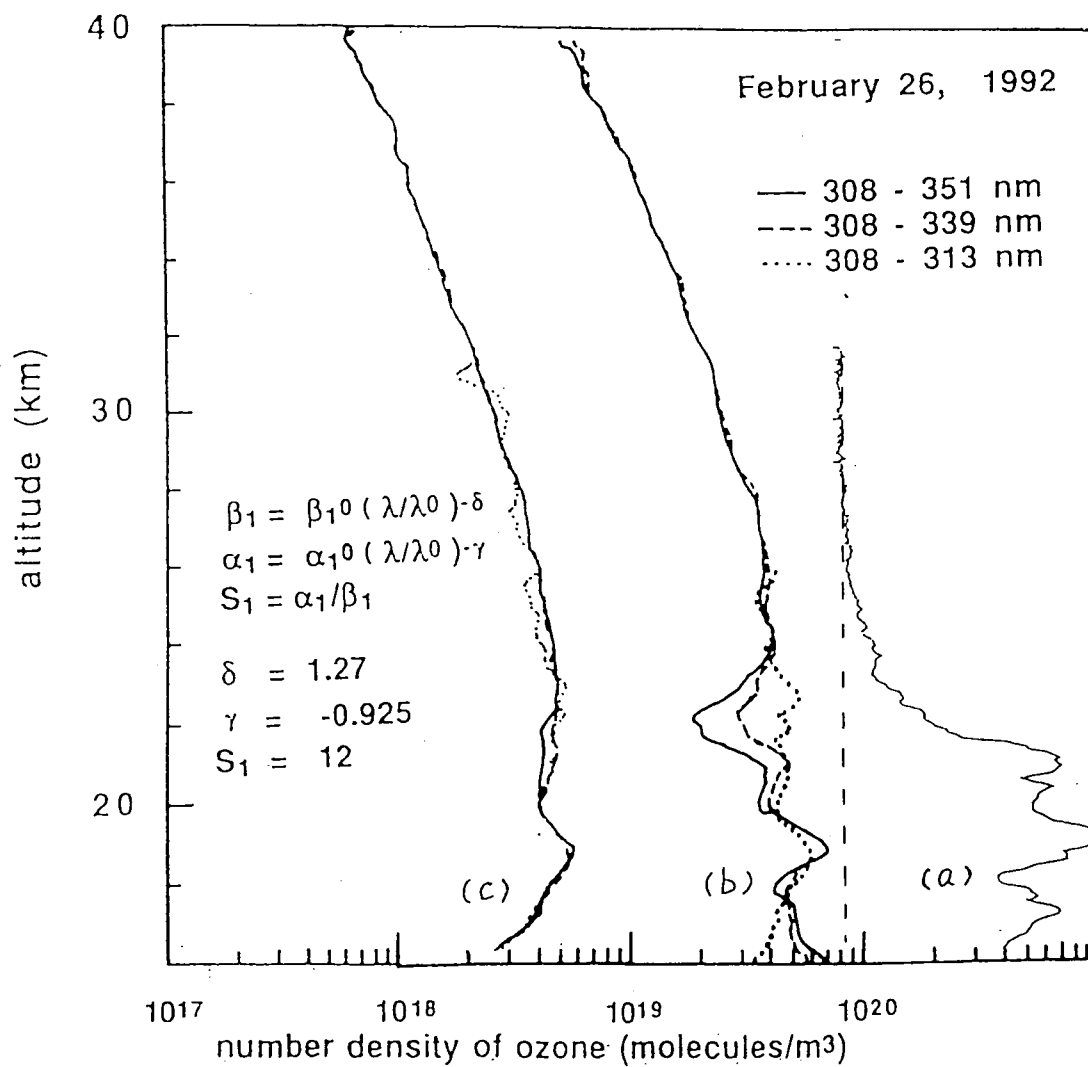


図 10 ピナツボ火山噴火起源成層圏エアロゾルの高度分布 (a)、オゾンレーザーレーダー観測によって得られたオゾン高度分布 (b ; 未補正、c ; エアロゾルの影響補正済み)

の後方散乱係数、 $\lambda$  ; レーザー波長、 $\gamma$  及び  $\delta$  ;  $\alpha_1$  及び  $\beta_1$  の波長依存性、である。補正後のオゾン高度分布は、エアロゾルに関連するパラメータとして、 $\delta = 1.27$ 、 $\gamma = -0.925$ 、 $S_1 = 12$  を与えた時に、オゾン分布が観測波長組によらず一致することを示している。このエアロゾル関連パラメータの値は、YAGレーザーの基本波 (1064nm)、第二高調波 (532nm)、第三高調波 (355 nm) 三波長を用いたエアロゾルレーザーレーダー (三波長レーザーレーダー) の観測値を最適化することにより得られた。未補正のデータと補正後のデータを比較すると、未補正データにおいては、波長差の小さい308nm-313nmの波長組のデータが最も系統誤差が少ないが、補正後のデータにおいては、308nm-313nmの波長組のデータのばらつきが、他の波長組における補正し切れない系

統誤差より大きいように見える。しかし、これについては多くのデータに同様の補正を行った後に判断すべきであろう。

## 6. おわりに

オゾンレーザーレーダーによって得られる観測データがオゾン層変動の解明に有効であることを示してきた。この期間中にピナツボ火山が噴火し、オゾン観測が困難になったが、本レーザーレーダーが3波長以上を有しているという特長を生かして、補正方法を開発し、良い結果が得られた。なお、オゾン層変動に関連する気象データ等の解析の詳細はA-3(3)で記述することにした。

### 〔国際共同研究等の状況〕

共同研究名 N D S C カウンターパート N D S C 運営委員会（米国、英国、フランス、ニュージーランド等の研究者により構成）

参加・進捗状況 1992年10月6-8日にパリで開催された運営委員会、及び1993年9月20-22日に米国テーブルマウンテン観測所で開催された運営委員会に参加。1992年11月19日には国立環境研究所に正・副運営委員長を招き「N D S C 日本ワークショップ」を開催した。N D S C 運営委員会メンバー。

### 〔研究発表の状況〕

Nakane, H., Y. Sasano, S. Hayashida-Amano, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Minato and M. P. McCormic(1993); Comparison of ozone profiles obtained with NIES DIAL and SAGE II measurements, J. Meteorol. Soc. Japan, 71, 153-159.

Nakane, H., S. Hayashida, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui and A. Minato(1992): Observation of stratospheric ozone with NIES lidar system in Tsukuba Japan, 16th Int. Laser Radar Conf., Boston

Nakane, H., S. Hayashida, I. Matsui, N. Sugimoto, A. Minato and Y. Sasano(1992); Lidar observation of ozone over Tsukuba (36°N, 140°E), Proc. of the Quadrennial Ozone Symposium 1992, in press.

Nakane, H., S. Hayashida, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui and A. Minato(1992); Vertical profiles of temperature and ozone during DYANA Campaign with NIES ozone lidar at Tsukuba, J. Geomag. Geoelectr., 44, 1017-1083(1992).