

# 差分吸収レーザーレーダーを用いた宇宙からの オゾン観測の可能性について\*

林 田 佐智子・杉 本 伸 夫・笹 野 泰 弘・清 水 浩\*\*

## 要 旨

差分吸収方式レーザーレーダー (DIAL) による宇宙からのオゾン観測の可能性を検討した。極軌道衛星、宇宙ステーション、スペースシャトルに搭載を想定し、5年から10年の開発期間で実現の可能性のあるDIALの性能を仮定し、シミュレーションを行った。エアロゾルがバックグラウンド状態にある場合や、エアロゾルのきわめて少ない40 km付近では、オゾンDIALは宇宙から成層圏オゾン層の観測に有効であることが示された。

## 1. 研究の背景

成層圏オゾンのクロロフルオロカーボンによる破壊や、炭酸ガスなどの増加による地球温暖化といった地球規模の環境問題が指摘されて久しいが、最近になって、これらの環境異変が現実に見われてきたのではないかと考えられ始めている。例えば、オゾントレンドパネル (Watson *et al.*, 1988) の報告によればオゾン層の破壊は現実に起こり始めている。このような背景の中、地球規模の環境異変が現実に進行しているかどうかを早期に検出するための観測体制の確立がこれまでも増して必要とされている。

地球規模の現象を観測する手段として人工衛星が有効であることは議論の余地がない。しかし、これまでの人工衛星搭載センサーはもっぱらパッシブセンサーが主流であり、距離分解能が粗いことや、夜間の観測、特に極夜の観測ができないことなどの欠点があった。これに対し、アクティブセンサーには、空間分解能に優れていること、夜間の観測が可能であることなどの利点がある。技術的にも、アクティブセンサーの搭載は可能になって

きており、例えば、降雨レーダー (TRIMM) を宇宙ステーションに搭載することが計画されている。

レーザーレーダー (またはライダー) はレーザー (光) を用いた一種のレーダーであり、1960年にレーザー発振が成功してまもなく、大気計測に応用された。地上ベースのレーザーレーダーによる大気計測技術の発展は近年著しく、エアロゾル、雲はもとより、オゾンをはじめ、二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ )、二酸化イオウ ( $\text{SO}_2$ )、亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) などの大気微量成分が測定されている。成層圏オゾン他の微量成分の観測では、差分吸収方式のレーザーレーダー (Differential Absorption Lidar: 以下DIALと略す) が有効で、地上から高度50 kmまでのオゾン観測が行われている (Sugimoto *et al.*, 1988)。

成層圏オゾンは太陽紫外線から生物を守っているだけでなく、成層圏で最も主要な熱源であり、成層圏の他の微量成分分布を決める大きな要因でもある。そしてまた、大気の運動のトレーサーとしても興味ある測定対象である。このため、宇宙からのオゾン観測はこれまでにSBUV (Solar Backscattering Ultra Violet), LIMS, SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) などのセンサーによって試みられ、成果をあげてきた。人工衛星やスペースシャトルにオゾン測定用DIALを搭載してオゾンを観測する構想はNASAなどにあり、スペースシャトル搭載のKrFレーザーを応用したシステムの性能評価シミュレーションが、Uchino *et al.* (1986) によって行われている。現実に搭載された例は世界に

\* A feasibility study of a ozone DIAL from space.

\*\* Sachiko Hayashida-Amano・Nobuo Sugimoto・Yasuhiro Sasano・Hiroshi Shimizu, 国立公害研究所。

—1989年1月30日受領—  
—1989年5月9日受理—

まだないが、米国で計画されている地球観測システム (EOS) や、ヨーロッパで打ち上げが計画されている極軌道プラットフォームに、オゾンやエアロゾル、雲、気温 (大気分子密度) の測定用レーザーレーダーが候補センサーとして挙げられている。こうした背景を受けて、本研究では、5年から10年後に実現の可能性の高いと考えられる性能を仮定し、オゾンを測定対象として、極軌道衛星 (軌道 800 km)、宇宙ステーション (軌道 460 km)、スペースシャトル (軌道 300 km) に搭載を想定して、DIAL システムによるオゾン測定シミュレーションを行った。これまで、オゾンの測定には、KrF、XeCl などのエキシマレーザーが有効と考えられており、これを用いた場合のシミュレーションもいくつかすでに行われている (例えば、Uchino, 1986; LASA, 1987)。しかし、近年、半導体励起の YAG レーザーの高効率化が進んでいる。半導体励起の固体レーザーは、軽量、小型化が可能であるばかりでなく、ガス交換などの手間もなく、高信頼性、高寿命であることが期待できる。また、一方で、エキシマレーザーの高出力化の研究も進んでいる。このような研究の進展をふまえ、本研究では YAG レーザーで構成されたシステムとエキシマレーザーで構成されたシステムの2つのシステムについて、地球規模でのオゾン観測に必要なレーザーレーダーの性能を検討した。本研究の目的は、これらの検討結果をもとに、レーザーレーダーの基本要素の今後の開発目標を明らかにすることである。

## 2. 計算に用いた基本式

ある波長 ( $\lambda$ ) のレーザー光 1 ショットに対する、レーザーレーダーの距離  $R$  における  $DR$  あたりからの信号は、次の式のように表わせる。

$$E(R) = E_0 A_r C_k Y_r \beta(R) / DR \exp \left[ -2 \int_0^R (N(r) \sigma + \alpha(r)) dr \right] R^2 \quad (1)$$

ここに、

- $E$ : 受信信号のエネルギー (J)
- $E_0$ : 出力レーザーのエネルギー (J)
- $A_r$ : 望遠鏡面積 ( $m^2$ )
- $C_k$ : 光学的効率
- $Y_r$ : 視野重なり (=1 と仮定)
- $R$ : レーザーレーダーからの距離 (m)  
=(衛星軌道半径-地表からの高度)
- $DR$ : 距離分解能 (m)
- $N$ : 吸収物質の濃度 ( $m^{-3}$ )

- $\sigma$ : オゾンの吸収断面積 ( $m^2$ )
- $\alpha, \beta$ :  $\alpha = \alpha_a + \alpha_m$  消散係数 ( $m^{-1}$ )  
 $\beta = \beta_a + \beta_m$  後方散乱係数 ( $m^{-1}sr^{-1}$ )  
(添え字 a はエアロゾル, m は空気分子の寄与を表わす。)

また、受信光検出器に光電子増倍管を使用したとし、その量子効率  $\eta(\lambda)$  をとすると受信信号として得られる光電子数 ( $p$ : photoelectron number) は、次の式で与えられる。

$$p(R) = \eta(\lambda) w(\lambda) E(R) \quad (2)$$

ここに、 $w(\lambda)$  はエネルギーを光電子数に換算するための定数である。

いま、オゾンの吸収係数の大きいレーザーの波長を波長 1 (ON-RESONANCE)、吸収の小さい波長を波長 2 (OFF-RESONANCE) として距離  $R$  および  $R+DL$  からの受信光電子数を式 (1), (2) に従って求め、その比を

$$f_i(R) = p_i(R+DL) / p_i(R) \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

とする。ここで、 $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2$  とおくと、式 (3) から次の関係式が成り立つ。

$$2\sigma_d \int_R^{R+DL} N(r) dr = \ln(f_2/f_1) + \ln \left[ \frac{\beta_1(R+DL)\beta_2(R)}{\beta_2(R+DL)\beta_1(R)} \right] - 2 \int_R^{R+DL} (\alpha_1 - \alpha_2) dr \quad (4)$$

を得る。従って、求めるオゾン濃度は距離  $DL$  の間の積分値の平均として

$$M(R, DL) = \frac{1}{DL} \int_R^{R+DL} N(r) dr = \frac{1}{2\sigma_d DL} \{ \ln(f_2/f_1) + B + A_a + A_m \} \quad (5)$$

ここに、

$$B = \ln \left[ \frac{\beta_1(R+DL)\beta_2(R)}{\beta_2(R+DL)\beta_1(R)} \right] \quad (6)$$

$$A_a = -2 \int_R^{R+DL} (\alpha_{1,a} - \alpha_{2,a}) dr \quad (7)$$

$$A_m = -2 \int_R^{R+DL} (\alpha_{1,m} - \alpha_{2,m}) dr \quad (8)$$

で与えられる。ここで  $B$  項は、エアロゾルの後方散乱係数の波長と空間分布への依存性を表わす。また、 $A_a$  項、 $A_m$  項は、それぞれ、エアロゾルと大気分子の消散係数の波長依存性を表わす項である。通常、 $B$ ,  $A_m$ ,  $A_a$  はいずれも無視されるので、これらは、系統誤差を与えることになる。

第1表 オゾン測定用 DIAL 基本性能パラメータ

	フェイズ1				フェイズ2					
	システム1			システム2	システム1			システム2		
波長 (nm)	288	299	355	308	353	288	299	355	308	353
出力 (mj)	10	10	100	100	100	100	100	200	200	200
光学的効率					0.2					
望遠鏡直径 (m)					0.8					
望遠鏡面積 (m <sup>2</sup> )					0.503					
望遠鏡視野角 (mrad)					0.1					
PMT* 量子効率					0.25					
干渉フィルター幅 (nm)					0.1					

\* PMT (Photo Multiplier Tube)

信号の不規則誤差は光検出器（ここでは光電子増倍管を仮定）のショットノイズで決まり、

$$\epsilon_r = \frac{1}{2\sigma_d M(R, DL)} \times \left[ \sum_{i=1,2} \frac{p_i(R) + 2pb_i}{p_i(R)^2} + \frac{p_i(R+DL) + 2pb_i}{p_i(R+DL)^2} \right]^{0.5} \quad (9)$$

で表わされる。ここに、pb は背景光雑音（バックグラウンドノイズ）を光電子数で表わしたものである。太陽背景光の計算は Therakaekara (1974) のデータをもとに次の式から計算した。

$$pb = I(\lambda) \Omega Ar (2DR/c) D\lambda \cdot \eta \quad (10)$$

ここに、c は光速を表わし、

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) Al / \pi \quad (11)$$

$$\Omega = \pi \phi^2 / 4 \quad (12)$$

と表わされ、

$I_0$ : 太陽からの放射フラックス

Al: アルビド (=0.2)

$\phi$ : 望遠鏡視野全角 (radian)

D $\lambda$ : フィルター透過幅

である。

### 3. 計算に用いたレーザーレーダーの性能と大気モデル

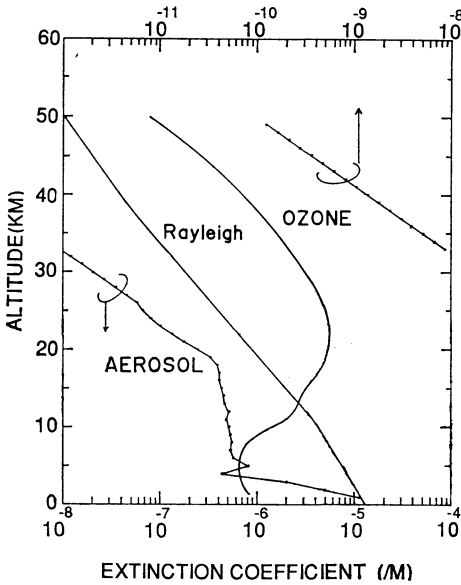
本稿で計算に用いたレーザーレーダーの性能は第1表に示す通りである。フェイズ1、フェイズ2はそれぞれ、開発第1期、第2期を想定した、見当として5年後、10年程度後に搭載を想定したものである。ここでは、オゾン観測用に二種類のシステムを考えた、ひとつ

は現時点で最も信頼性が高いとされている YAG レーザーの第4高調波 (266 nm) の重水素ラマンシフト線 (ファーストストークス線, 289 nm) と水素ラマンシフト線 (ファーストストークス線, 299 nm) を YAG レーザーの第3高調波 (355 nm) と組合わせたシステムである。また、いまひとつは、XeCl エキシマレーザーの基本波 (308 nm) とその水素ラマン線 (353 nm) を用いたシステムである。フェイズ1のシステムのレーザー出力は実験室、または、地上ベースのレーザーレーダーですでに達成されている値を基にしている。例えば、地上ベースのオゾンレーザーレーダーで使用されている Lamda Physics 社製 EMG201TMSC を用いた XeCl レーザーでは最大 250 Hz で 36W の出力が可能である (Sugimoto *et al.*, 1988)。また、カンテル社製 YAG レーザー-580-10 では第3高調波 160 mj の出力が可能である。フェイズ2では、より効果的な観測を行うために必要な性能を検討するために、開発目標としての値を想定している。実験室では半導体励起の YAG レーザーの高効率化が進んでおり、Allik *et al.* (1989) は入力電力に対し、出力効率 47.7% を報告している。また、Hasama *et al.* (1989) によれば放電励起の XeCl レーザーで最大出力 50 J を得ており、また出力 17.6 J の時最大効率 3.1% 得ている。これらの値は実験室で達成されたばかりで宇宙への応用はすぐには現実的ではないが、今後10年間にこれらの技術が成熟するとすれば第1表の値は妥当なものであろう。

大気モデルは the U.S. Standard Atmosphere (1976)、エアロゾルの消散係数は Elterman (1968) のモデルを用い、消散係数と後方散乱係数の比は 50 とした。Elter-

第2表 オゾン吸収断面積

波長	システム1			システム2	
	288 nm	299 nm	355 nm	308 nm	353 nm
吸収断面積 (m <sup>2</sup> )	1.0 (-22)	3.2 (-23)	1.8 (-26)	1.2 (-23)	1.3 (-26)

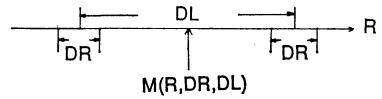


第1図 308 nm におけるオゾン、空気分子(レイリー散乱)、エアロゾル(Elterman, 1968)の消散係数プロファイル。エアロゾル消散係数は32km以上については図上のスケール(その他は図下のスケール)で示した。

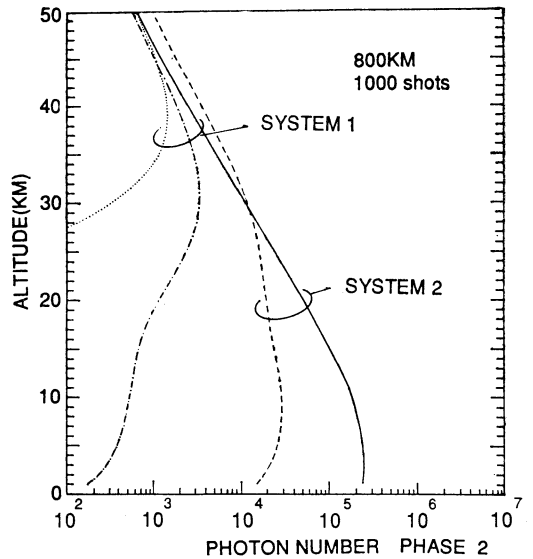
man (1968) のモデルはバックグラウンド状態を表わしているといえる。第1図に308 nmでのオゾン、大気分子、エアロゾルの消散係数の高度分布を示した。エアロゾルによる系統誤差は前節で示したとおり、波長と距離分解能にのみ依存するが、ランダム誤差はレーザーの出力、積算パルス数などに依存する。本研究では系統誤差とランダム誤差を別々に評価して示す。第2表に各波長でのオゾンの吸収断面積を示した(Bass and Paur, 1984)。

4. 計算結果

計算された信号はS/N(信号対雑音比)を改善するために平滑化して解析を行った。平滑化した範囲をDR、吸収物質の平均濃度を求める距離間隔をDLと表わす。



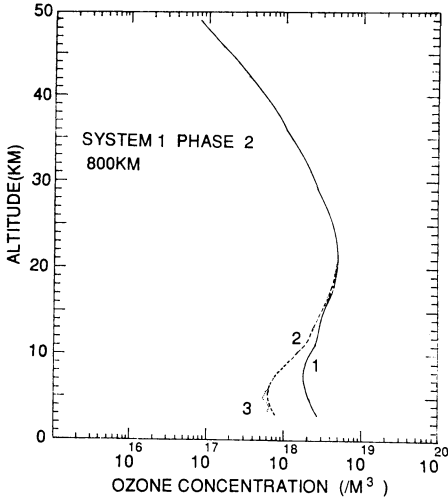
第2図 平滑化範囲(DR)とオゾンの平均濃度を求める距離間隔(DL)の関係。



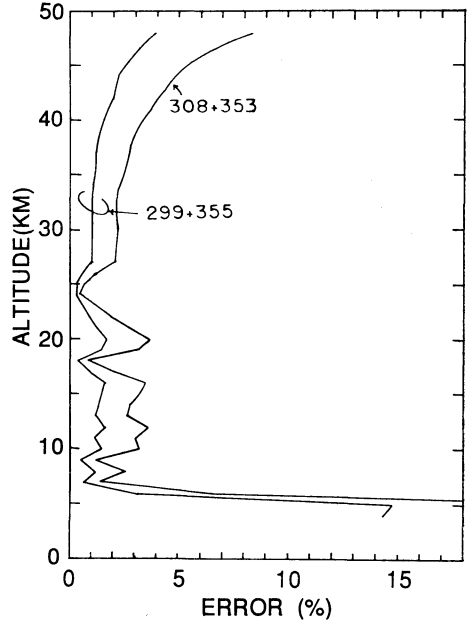
第3図 計算された受信信号強度(光電子数)。計算に用いた性能は第1表に示す。軌道は極軌道衛星(高度800 km)を仮定し、1,000ショットの積算とした。図下の目盛りは光電子数を示す。フェイズ2の結果を示した(本文参照)。

DR, DL, M (R, DR, DL) の関係を第2図に示した。通常の DIAL 信号の解析では DR=DL とするのが普通であるが、DR が大きくなると信号のひずみが生じる可能性があるため、ここでは DR と DL を独立に扱うことにした。

第3図に、式(1)、(2)から計算された、後方散乱による受信信号の強度を1,000ショットのレーザーパルスによる積算で表わした。ここでは、DR=1 km とした、



第4図(a) シミュレーションされた信号から求めたオゾン濃度プロファイル。  
 曲線1：系統誤差の補正を全く考慮しなかった場合  
 曲線2： $A_m$  項のみの補正を行った場合  
 曲線3： $A_m$ ,  $A_a$ , B 項の補正を行った場合



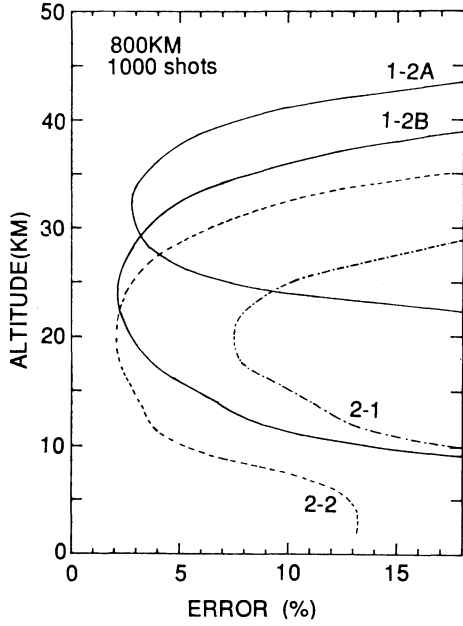
第4図(b) エアロゾルに起因する系統的誤差のオゾン濃度に対する相対値。図中の数字は波長の組合せを示す。

縦軸に地上からの高度、横軸に光電子増倍管から出力される光電子数を示した。横軸目盛りはフェイズ2の結果を示している。353 nm と 355 nm の結果は、波長が非常に近いこと、1パルスあたりの出力パワーが同じで、受信光学系のパラメータが同じであることにより、ほとんど差がない。オゾンによって強い吸収を受ける短波長の光はオゾン層を通過する際に大きく減衰している。ここではフェイズ2のみの結果を示したが、フェイズ1では信号の形は変わらず、全体に信号強度が小さくなる。フェイズ1における 355 nm (システム1), 308 nm, 353 nm (システム2) の信号強度は、それぞれフェイズ2の約8%, 289 nm, 299 nm は約1.6%である。

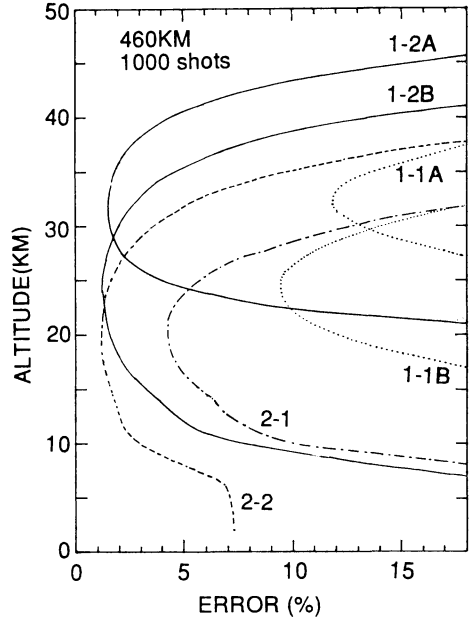
第4図(a)は、計算された信号から、式(5)を用いて求められるオゾン濃度の図である。曲線1は系統誤差の補正をまったく考慮しなかった場合であるが、曲線2は  $A_m$  項を、曲線3はさらに  $A_a$  項、B 項まで含めて補正を行った場合である。曲線3によって、与えたデータ(標準大気)がよく再現されている。第4図(a)では 299 nm と 355 nm の組合せによる DIAL システムを例にとって示したが、他の波長の組合せの場合でも、 $A_a$ ,  $A_m$ , B 各項の系統誤差への影響の大きさは同様である。ただし、ここでは、エアロゾルについてはバックグラウ

ンド状態を想定したモデルを用いている。第4図(a)からわかるように、高度 20 km 以下ではレイリーの光学的厚さによる系統誤差 ( $A_m$  項による) が大きいため、この誤差を補正する必要がある。従って、大気分子密度を正確に知ることが必要である。季節別の大気モデルをゾンデなどの観測値から求めることや、エアロゾルのほとんどないと考えられる高度 35 km 以上の領域で、オゾン DIAL の OFF-RESONANCE の信号から大気分子密度を求めることによって、 $A_m$  項を正確に評価することが可能である。

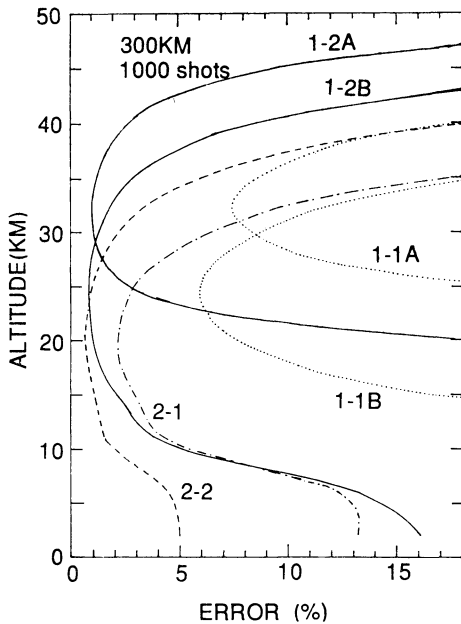
エアロゾルに起因する系統誤差についてはエアロゾルの分布、消散係数の波長依存性などを知らなければ補正はできない。エアロゾルの影響は第4図(a)から明らかとなり、対流圏で顕著となる。エアロゾルに起因する系統誤差の影響をさらに詳しくみるために、第4図(b)に、 $A_a$  項と B 項による誤差をオゾン濃度に対する相対値として示した。図中に、DIAL 計算に使用した波長の組を示した。火山起源のエアロゾルや極成層圏エアロゾル (Polar Stratospheric Cloud: PSC) などが存在する場合は、エアロゾルに起因する系統誤差がこの図で示されるよりも大きくなると考えられる。オゾン濃度に対する誤差の合計は、第4図(b)で示した系統誤差



a



b



c

第5図 (9)式から計算した不規則誤差をオゾン濃度に対する相対誤差で示した。1,000ショット積算とし、 $DR=DL=3\text{ km}$ とした。図中に条件を示した。

1-1 システム1, フェイズ1

A : 288 nm + 355 nm B : 299 nm + 355 nm

1-2 システム1, フェイズ2

A : 288 nm + 355 nm B : 299 nm + 355 nm

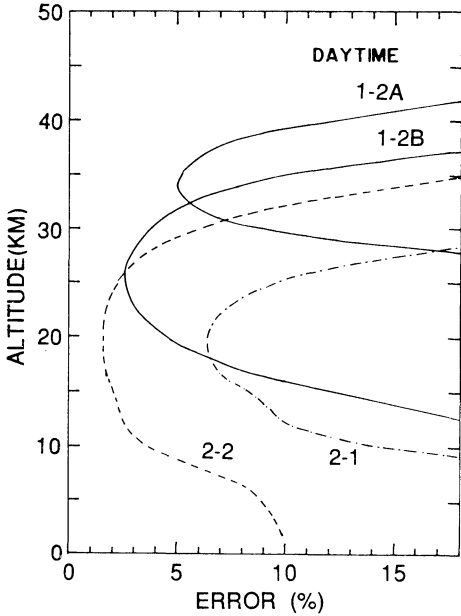
2-1 システム2, フェイズ1

2-2 システム2, フェイズ2

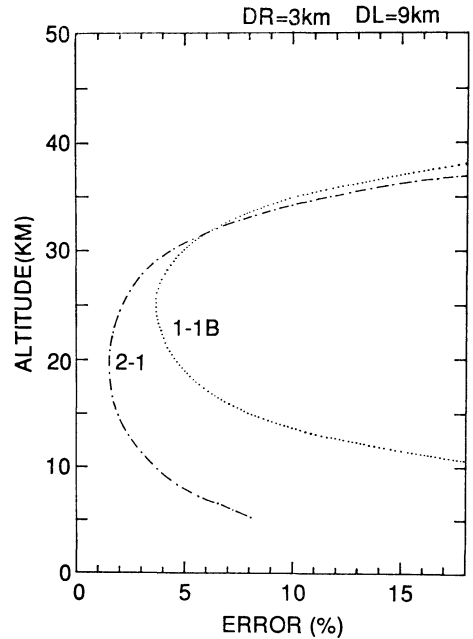
a : 極軌道衛星 (軌道高度 800 km)

b : 宇宙ステーション (軌道高度 460 km)

c : スペースシャトル (軌道高度 300 km) について計算したもの。



第6図 昼間の不規則誤差. 1,000ショット積算, DR=DL=3 km, 軌道高度 460 km. 1-2 などの記号は第5図に同じ.



第7図 フェイズ1の不規則誤差. 軌道高度 460 km, DR=3 km, DL=9 km とし計算した. 1-1 などの記号は第5図に同じ.

と第5図～第7図で示す不規則誤差の合計で表わされる。系統誤差は波長の組合せで決まるが不規則誤差はレーザー出力、積算ショット数に依存する。

第5図に、(9)式から求められる、信号の不規則誤差を示した。ここでは DR=3 km, DL=3 km とした。第5図(a)は極軌道衛星(軌道 800 km), 第5図(b)は宇宙ステーション(軌道 460 km), 第5図(c)はスペースシャトル(軌道 300 km)を、それぞれ仮定した。図中の 1-1, 1-2, 2-1, 2-2 は、最初の数字がシステムを、あとの数字がフェイズを表わしている。また、システム1で、289 nm と 355 nm の組合せをAとし、299 nm と 355 nm との組合せをBとした。示していないものは、値が18%以上であるためである。いずれも1,000ショットのレーザーパルス積算である。式(1)から明らかなように、信号は距離の2乗に逆比例し、式(9)が示すように不規則誤差は信号の平方根に逆比例するので、第5図(a)～(c)に示した不規則誤差は、ほぼ軌道に比例して大きくなっている。レーザーの繰り返しを10 pps とすると、1,000ショットでの空間分解能はおおよそ700 km に相当する。繰り返しを上げることにより、空間分解能(水平、垂直とも)を上げることができ、また同じ空間分解能とすれば不規則誤差が減少する。エキシ

マレーザーを用いたシステムでは、繰り返しを 100 pps 程度にまで上げることが可能であると考えられるので、距離分解能を上げるという点では有利である。

第6図に、昼の不規則誤差を示した。昼は太陽の光がノイズとなり、精度が悪くなる。ここでは、フィルター幅を 0.1 nm とし計算してある。

また、第7図に、システム1、システム2のそれぞれフェイズ1について、DR=3 km, DL=9 km とした場合の不規則誤差を示した。第5図と比較すると、DL を大きくとることによって、不規則誤差が減少している。不規則誤差は、おおよそ、DR の1/2乗、DL の1乗に反比例して小さくなる。しかし、10キロ以下の対流圏では、エアロゾルの影響で系統誤差が大きく、不規則誤差をいくら改善しても全体の誤差を改善することは困難である。

### 5. 議論

現在までに行われた数値モデルによる予測結果では、クロロフルオロカーボンによるオゾン破壊の影響は高度40 km 付近で最も顕著であるとされている。1980年から

クロロフルオロカーボンの放出率が毎年1.5%の割合で増加するというシナリオで計算すると、オゾン全量は10年で約0.5%、20年で約1%減少すると予測されている(WMO, 1985)。この際、オゾン濃度は各高度で一様に減少するのではなく、高度40 km付近でもっとも顕著に減少し、10年で5~10%、20年で10~20% (数値モデルに依存してばらつく) 減少すると予測されている。従って、ドブソン計や TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) などによるオゾン全量観測では、成層圏オゾン濃度の減少を早期に検出することは困難であるが、高度40 km付近を重点的に観測することによって、これを早期検出することが可能であると考えられる。現在、高度40 km付近のオゾン濃度を観測できる人工衛星搭載センサーは、SBUV, SAGE センサーである。しかし、SBUVでは、システムの一部であるディフューザー (拡散板) が経年劣化することによって系統的な誤差が生じるので、オゾンの長期トレンドの観測には向かないことが指摘されている。SAGE センサーは自分自身でキャリブレーションができるため、このような系統的誤差を受けず、40 km 付近の減少傾向を観測したと報告されている (Watson *et al.*, 1988)。しかし、SAGE はオカルテーション法で測定を行うものであるから、日の出、日の入りの地点に測定が限定される上、全球的オゾン分布を測定するには時間がかかるのが欠点である。

オゾン DIAL では、全体の装置の経年的劣化があったとしても、それは信号の S/N を悪くするだけで系統的な誤差を生じない。また、高度30 km以上ではエアロゾル濃度は非常に低いと考えてよいので、エアロゾルによる系統的誤差は無視できる。さらに、OFF-RESONANCE の信号から大気分子密度を導出できるので、オゾン濃度を混合比に換算することもできる。また、衛星が1日に地球を周回する間、地上に向かって観測を続けるため、観測回数も SAGE より多くとれる。このような理由から、オゾン DIAL は、高度40 km 付近の観測に有利な点を数多く持っているといえる。

オゾン DIAL では、第5図で示したように波長の組合せを変えて、最も精度よく測定できる領域が異なる。例えば、289 nm + 355 nm の組合せでは35 km 付近が最も精度よく測定できる。軌道460 km の場合、第5図 (b) のシステム1、フェイズ2の結果 (曲線1-2 A) が示すように、35 km 付近で2%、40 km 付近で4%の精度でオゾン濃度を観測できる。これは、鉛直分解能3 km、水平分解能700 km (10 pps を仮定した場合、

100 pps では70 km) で観測を行った場合の、1プロファイルの精度であるから、月平均値などの時間平均をとって数年間観測を継続すれば、オゾン濃度減少の早期検出は十分可能と考えられる。一方、フェイズ1 (システム1) の性能では、この目的には十分な性能とはいえない。しかし、フェイズ1で不規則誤差が大きいことの原因は、ON-RESONANCE の波長のレーザーの出力が小さいためであるので、これが100 mJ までゆかないまでも数十 mJ にすることができれば、ほぼ目的は達せられる。また、40 km 付近の観測には289 nm よりもさらに短い波長を使用するほうが有利であるので、より短波長で高出力のレーザーが開発されることが望ましい。Uchino *et al.* (1986) にあるような KrF レーザーをベースにした仕様も考えられる。

オゾンの全球分布を観測することの意義はクロロフルオロカーボンの影響を早期検出することだけにはとどまらない。もともとオゾンは、地球物理学的に多くの興味をもたれる観測対象である。また、オゾン濃度の鉛直・緯度分布、その季節変化など、地球物理学的観点から観測を行うことは、オゾン層破壊の予測に現在使われている2次元モデルの検証ともなる。これまでに、パッシブセンサーによる成層圏オゾン層 (20~25 km) の観測結果の解析は数多く、季節変動、QBO との対応などの理解に多くの貢献があった。オゾン DIAL による観測は、これまでのパッシブセンサーに比べ、空間分解能 (水平、垂直とも) が改善できる。特に、オゾン層の中心付近では不規則誤差が小さく (第5図参照)、さらに垂直分解能を上げることができる。さらに、インバージョン法を使うパッシブセンサーに比べ、空間分解能の定義が明確であるという利点がある。水平分解能500 km 程度、垂直分解能3 km 程度で、オゾン濃度の精度10%が得られれば、研究対象として意味のあるデータと考えられている (EOS, 1988)。本研究で仮定した性能のうち、最も効率の悪いシステム1、フェイズ1の性能 (第1表) では、軌道460 km の場合、第5図 (b) で示すように、垂直分解能3 km で10%以上の不規則誤差があり、この要請を満足してはいない。しかし、第7図で示すように、DL (オゾン濃度を計算する距離間隔) を9 km にまで落とすことによって不規則誤差を5%程度 (高度20~30 km) まで小さくすることができる。この場合、スケールの小さな現象はとらえられないが、オゾンの全球分布、季節変動、QBO との対応などについては調べることができるかと期待できる。フェイズ2に示されたよ



うな程度のレーザー出力、望遠鏡サイズであれば、さらに空間分解能を上げることが可能であり、より小さなスケールの現象に対し有効であることはいうまでもない。

これまで、大気分子およびエアロゾルからの後方散乱を利用する方式について検討してきたが、これ以外に、地表面からの反射を利用してオゾン全量を求める方式についても検討してみよう。衛星からのオゾン全量の観測は、太陽光の、地表面および対流圏からの反射、後方散乱を利用した TOMS などで行われているが、当然のことながら昼間の観測しかできない。オゾン DIAL では、夜間の観測を相補的に行えるという意味で興味もたれるところである。地表面からの反射光の信号強度を表わす式は、(1)で  $\beta DZ$  を  $Al/\pi$  に置き換えて得られる。対流圏の 300 nm 付近の後方散乱係数は  $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$  程度であるから、 $DZ=1$  km,  $Al=0.2$  とすると地表面からの反射強度は、対流圏からのエコーと同じオーダーかそれ以下である。しかも、 $Al$  の波長依存性を補正できないため系統的誤差が大きくなるので、地表面反射を利用することは有利とはいえない。むしろ、対流圏上部からの強いエコーを利用して、成層圏のオゾン全量を求める方がよい。例えば、第 7 図は、16 km~25 km までのオゾンの積分値を 2% 以下の精度で求められることを示している。たとえ、フェイズ 1 の段階でも DL を大きくとることによって、成層圏中のオゾン気柱量をモニターすることができる。

不規則誤差は、レーザーの繰り返し速度、レーザー出力、望遠鏡面積の大型化に加え、垂直分解能を落とすことで改善できるが、残る問題は、第 4 図に示したようにエアロゾルに起因する系統誤差である。極域の冬(夜)に大量に生成される PSC や、エルチチョン火山噴火のあとに観測されたような火山性エアロゾルが大量に存在する場合には、系統誤差はオゾン濃度導出に深刻な影響をもたらす。例えば、Uchino *et al.* (1986) によれば、火山噴火直後の成層圏エアロゾルモデルに対して、313~359.8 nm の組合せで得られるオゾン濃度には、60~100% の系統誤差が含まれる。従って、このような場合には 2 波長での DIAL 方式でオゾンを測定することは困難であろう。さらに OFF-RESONANCE の波長のレーザーをいくつか用意し、エアロゾルの消散係数の波長依存性を測定し、補正をする必要がある (Sasano, 1988)。

本研究で検討した フェイズ 2 のオゾン DIAL 装置の性能では、エアロゾルがバックグラウンド条件である限り、高い精度でオゾン分布を観測でき、成層圏オゾン層

変動の早期検出に適用可能である。フェイズ 1 で想定した装置性能であっても、垂直分解能を多少大きくする、時間平均をとるなどの解析上の操作によって、地球規模のオゾンの挙動を研究することに足る精度を得ることができる。

本研究で仮定したレーザーレーダーは、受信望遠鏡については、宇宙用に開発が進んでいるハニカム構造のものを活用することや、レーザーについてはオプティカルベンチにカーボンハニカムを使うなどして軽量化を図ることによって、およそ 200 kg 程度の重量にすることも不可能ではないと考えられる。また、エキシマレーザーの場合、電力効率を約 2% とするとレーザーに使用する電力は、レーザー出力 100 mj, 100 pps を仮定しても 500 W 程度である。データ処理部分に要する電力はレーザーに要する電力に比較すれば十分小さい。一方、日本で計画されている極軌道衛星 ADEOS の搭載可能重量 (ペイロード) は約 600 kg である。また、NASA/ESA の計画している極軌道衛星のペイロード重量は、それぞれ 3.3 t と 2.5~2.6 t, ペイロード電力 4 kW と 3.5 kW である。このような値とレーザーレーダーの重量、必要電力を比較すると、レーザーレーダーの衛星搭載は現実的であることがわかる。しかし、今後、無重力、真空などの宇宙環境に耐えられるだけのレーザーの開発、軽量大型の望遠鏡開発、狭帯域フィルターの開発など、技術的な研究の推進がさらに必要である。最近、Ti ドープサファイアなどの新しい固体レーザーの開発が進んでいる (e.g., Schulz, 1988)。Ti ドープサファイアは 700~1,000 nm で波長可変であり、3 倍波で 300 nm 付近のレーザーが出せるので、宇宙レーザーレーダーへの応用が有望視されている。今後、これらの研究が精力的に進められ、宇宙からのレーザーレーダー観測が実現することを希望する。

## 謝 辞

本研究を行うにあたって、有意義な助言、議論をいただいた国立公害研究所、中根英昭氏、湊 淳氏、松井一郎氏に感謝します。

## 参考文献

- Allik, T.H., W.W. Hovis, D.P. Caffey, and V. King, 1989: Efficient diode-array-pumped Nd: Yag and Nd: Lu: YAG lasers, *Optical Letters*, 14, 116-118.
- Bass, A.M., and R.J. Paur, 1984: The ultraviolet cross section of ozone I. The measurements. in

- Atmospheric ozone, ed. by C.S. Zerefos and A. Ghazi, 606-610, D. Reidel, Dordrecht.
- Earth Observing System, 1984: NASA Technical Memorandum No. 86129.
- Elterman, L., 1968: UV, Visible, and IR attenuation for altitudes to 50 km, 1968, AFCRL-68-0153, Environmental Research Papers, No. 285.
- Hasama, T., K. Miyazaki, K. Yamada, and T. Sato, 1989: IEEE J. Quantum Electronics, 25, 113-119, 1989.
- LASA, 1987: NASA Instrument Panel Report, Vol. IId, Ed. R.J. Curran.
- Sasano, Y., 1988: Simultaneous determination of aerosol and gas distribution by DIAL measurements. Appl. Opt., 27, 2640-2641.
- Schulz, P.A., 1988: Single-Frequency Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ring laser, IEEE J. Quantum Electronics, 24, 1039-1044.
- Sugimoto, N., Y. Sasano, S. Hayashida-Amano, H. Nakane, I. Matsui, H. Shimizu, N. Takeuchi, and H. Akimoto, 1988: Multi-wavelength ozone lidar for stratospheric and tropospheric measurements. 14th international laser radar conference, Abstract, 187-189.
- Thekaekara, M. P., 1974: Extraterrestrial solar spectrum, 3000-6100 Å at 1 Å intervals, Appl. Opt., 13, 518-522.
- Uchino, O., M.P. McCormick, T.J. Swissler, and L.R. McMaster, 1986: Error analysis of DIAL measurements of ozone by a Shuttle excimer lidar. Appl. Opt., 25, 3946-3951.
- U.S. Standard Atmosphere, 1976: U.S. GPO Washington, DC.
- Watson R.T. and the Ozone Trend Panel, M. Prather and an Ad-Hoc Theory Panel, and M.J. Kurylo and the NASA Panel for data evaluation, 1988: Present state of knowledge of the upper atmosphere, 1988: An assessment report., NASA reference publication. June 1988.
- WMO, 1985: Atmospheric Ozone, Global ozone research and monitoring project report No. 16.



山崎道夫・仲吉良功・

大城繁三 編

### 沖縄の気象

日本気象協会沖縄支部発行

B 6 版, 275頁, 1,500円

(税込 1,545円)

近年沖縄で“伊志嶺安進著：沖縄気象歳時記，石島英著：台風学のすすめ”が出版されたが，また一つ本書が加わった。

本の構成は，あらし，春・梅雨，夏，秋，冬と資料編に大別され，全体で57項目から成っている。気候と災害の特徴，デイゴの開花に始まり，梅雨，アメダスとレーダー，チリ地震津波，アジアモンスーン，亜熱帯高気圧，台風関係7題，航空・農業・電力と気象など県民にかかわりの深い気象現象・自然災害・産業との関係に触れている。沖縄気象台職員やOBの分担執筆で，最近の気象学・技術の動向や気象業務を平易に示そうと努めた様子が伺える。当然ながらニンガチカジマイ，カー

ナーベ，ミーニンなど琉球特有の事象や表現について解説があり興味深い。

沖縄地方は緯度的に太平洋高気圧の南縁に当たるため，冬の季節風は北西でなく北東寄りである。夏は偏東風帯に入って天気系が東から西に変わることが多い。また，南の島国なので季節変化が乏しいと思われ勝ちだが，必ずしもそうでないことが理解できる。

しかし，何といても本書一冊ですべてをというのは無理である。編者が述べている通り，海洋関係の項目が不足であるし，沖縄本島が中心とはいえ石垣島などで1万人以上の死者を出した明和の天津波（1771年4月24日）の記述が欲しかった。台風銀座の沖縄としては，できれば大項目に“台風”が望ましかった。

ともあれ，沖縄地方における気象知識の普及のために本書が出版されたことは，沖縄気象台に勤務した経験をもつ者として非常に喜ばしく思う。一般の人々にも分りやすく書かれた良書である。ぜひ一読をおすすめする。

(日本気象協会調査部・鈴木 義男)