

炭酸ガスパルスレーザーを用いた差分吸収型レーザーレーダによる  
大気中オゾンの測定

Measurements of Atmospheric Ozone  
using a Differential-Absorption CO<sub>2</sub> Laser Radar

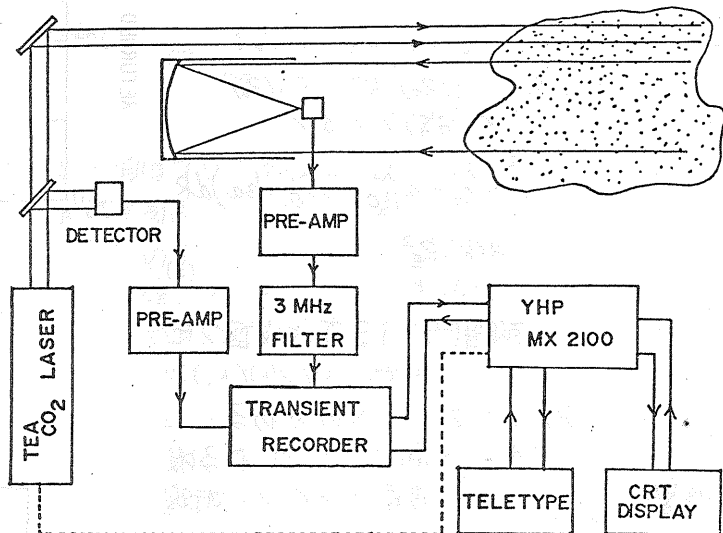
浅井和弘 板部隆和 五十嵐 隆

Kazuhiro Asai Toshikazu Itabe Takashi Igarashi  
郵政省 電波研究所

Ministry of Posts and Telecommunications, Radio Research Laboratories

1. はじめに

CW CO<sub>2</sub> レーザを用いた、長光路差分吸収法による大気中オゾンの測定(1976年)まで実施され、小型軽量のほぼ実用可能な装置の開発を行い、長期間のオゾンモニターを行った。しかし、CW CO<sub>2</sub> レーザを用いた方法では、測定分子の距離分解能を持たせた測定ができていない。そのため距離分解能を持つ、炭酸ガスパルスレーザーレーダの開発を行い、1978年夏の光化学スモッグ発生時に、大気中オゾンの測定に成功した。今回はその測定結果とその問題点について報告する。



2. 大気中オゾンの測定結果

炭酸ガスレーザーを用いたレーザーレーダの野外実験は、大気中の水蒸気を測定した例がある。筆者らの装置も、それとほぼ同様であり、装置については前回のシンポジウムで報告した。装置の概略図を図1に示す。

炭酸ガスパルスレーザーレーダを用いたの光化学スモッグ発生時の大気中オゾンの測定は昨年の7月から8月にかけて実施された。充分注意して、送受信光学系の軸合せを、前もって行っておくことにより、測定に入ってから、それほど大きな光軸調整を要することなく実験することができた。

波長λのレーザーの送信電力P<sub>入</sub>として、面積Aの受信鏡で集光される距離Rから散乱した受信電力P<sub>入</sub>は、次のように知られたレーザーレーダ方程式で表わされる。

$$P_{入}(R) = P_{入} \cdot A \cdot K \cdot \frac{B(R)}{R^2} \cdot T_{λ}(R) \quad (1)$$

図 1

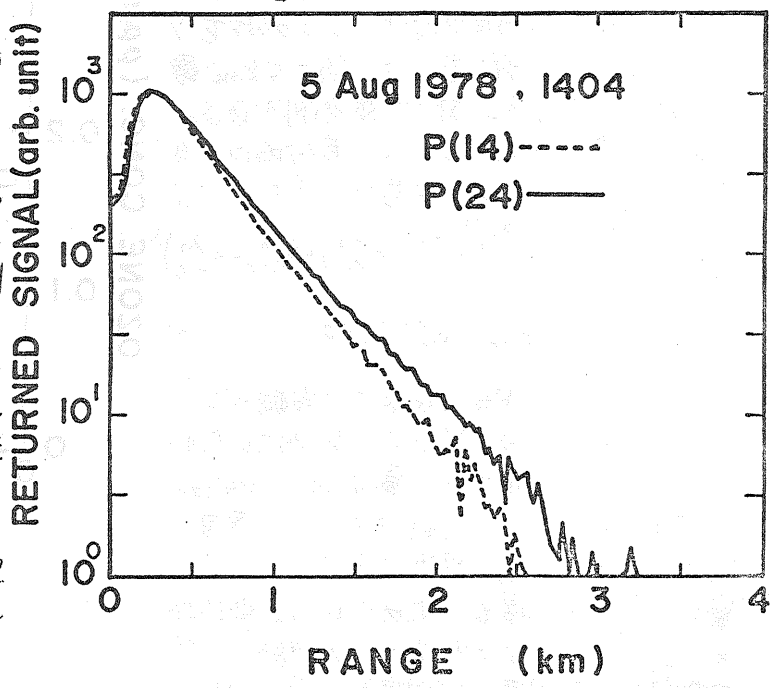


図 2

ここで $\beta$ は、散乱体である微小粒子の後方散乱係数、 $K$ は装置の光学的効率であり、使用している二波長間での差は無視できるほど小さい。 $T_{\lambda}$ は、大気の透過率で、オゾン( $k_{O_3}^{\lambda}$ )水蒸気( $k_{H_2O}^{\lambda}$ )炭酸ガス( $k_{CO_2}^{\lambda}$ )に

よる吸収と、微小粒子( $k_a$ )による減衰からなる。受信電力は、150 m( $R_0$ )の受信電力 $P_{r\lambda_1}(R_0)$ で規格化されているので、小型計算機に記憶されている受信電力値 $F_{\lambda}(R)$ は

$$F_{\lambda}(R) = \frac{P_{r\lambda_1}(R)}{P_{r\lambda_1}(R_0)} = \frac{\beta(R)}{\beta(R_0)} \cdot \frac{R_0^2}{R^2} \cdot \frac{T_{\lambda}(R)^2}{T_{\lambda}(R_0)^2} \quad (2)$$

である。(2)式の自然対数をとると

$$\ln F_{\lambda}(R) = -2 \int_0^R (k_{O_3}^{\lambda} + k_{H_2O}^{\lambda} + k_{CO_2}^{\lambda} + k_a) dR + \ln \frac{\beta(R) R_0^2}{\beta(R_0) R^2} \quad (3)$$

となる。(3)式の距離に対する変化が図2に示されている。図2の実線は $P(24)(\lambda_2)$ で、鎖線は $P(14)(\lambda_1)$ に対するものである。 $\lambda_2$ の波長に対する(3)式の値はオゾンによる吸収係数( $k_{O_3}^{\lambda}$ )が、 $\lambda_1$ の波長に比べて一桁程

度小さいのでその分だけ図の曲線に差がでている。今回の積算ではオゾンの吸収をうけて $P(24)$ の受信電力は、約2.5 km 零レベルまで落ちる。図3は夜の例である。

オゾン濃度を求めるには、差分吸収の手法に従って、(3)式の二波長での差をとって

$$\ln \frac{F_{\lambda_1}(R)}{F_{\lambda_2}(R)} = - \int_0^R [(k_{O_3}^{\lambda_1} - k_{O_3}^{\lambda_2}) + (k_{H_2O}^{\lambda_1} - k_{H_2O}^{\lambda_2}) + (k_{CO_2}^{\lambda_1} - k_{CO_2}^{\lambda_2})] dR \quad (4)$$

となるので、(4)式から水蒸気と炭酸ガスによる差分吸収の分を差し引くことで求められる。大気中の炭酸ガスの量は330-340 ppm であり、これはオゾンの濃度に換算して11-12 ppb 程度である。水蒸気量は、湿度と温度から求められる。電波研と、レーザーレーダの光路近くの数箇所を測定された湿度及び温度から得られた水蒸気量は、実験の期間中18-19 Torr の同

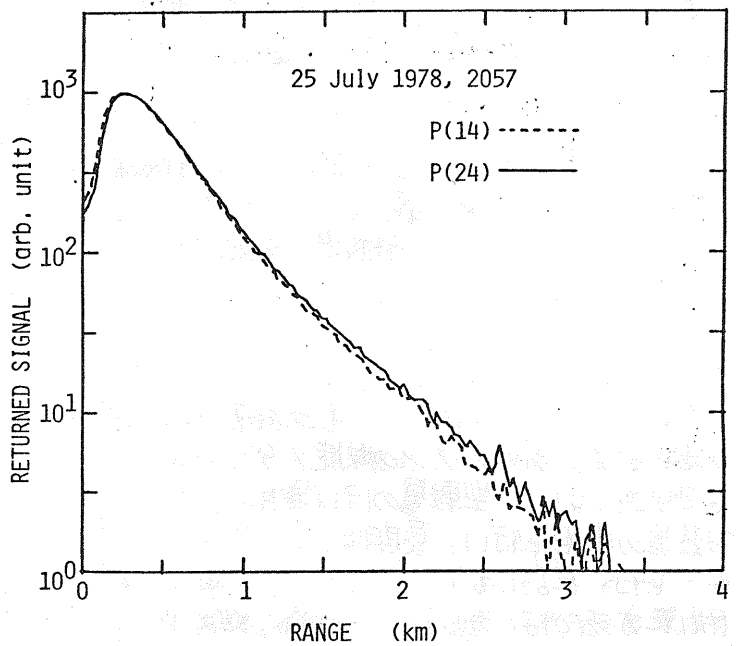


図 3

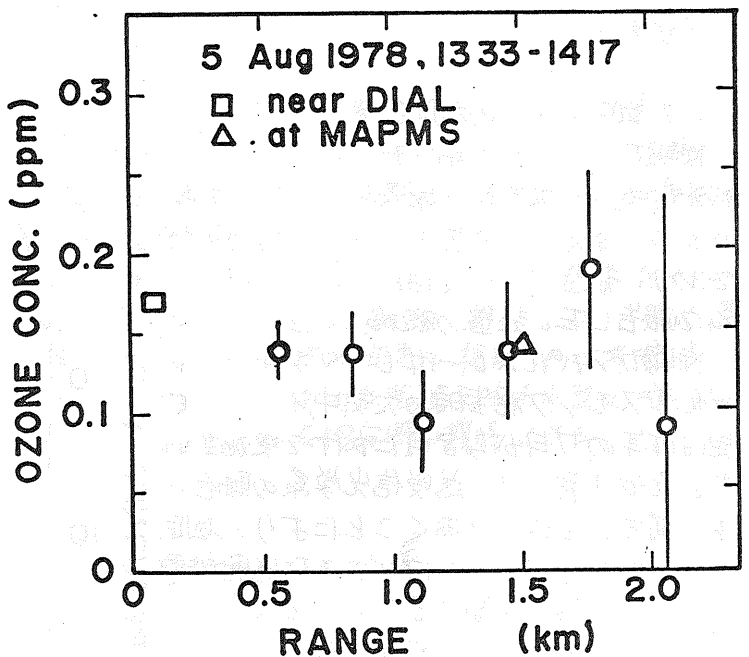


図 4

い値であり、暗想的にもほぼ一定であった。この水蒸気量はオゾン濃度に換算して3-4 ppb程度である。(4)式から距離分解能 $\Delta R$ (300m)ごとの平均濃度 $n$  ppmは、(3)式を考慮して次式から求められる。

$$n_{\text{ppm}} = \frac{1}{N \cdot \Delta R} \cdot \frac{1}{\sigma \lambda_1 O_3 - \sigma \lambda_2 O_3} \cdot \ln \left[ \frac{F \lambda_1(R)}{F \lambda_2(R)} \cdot \frac{F \lambda_2(R + \Delta R)}{F \lambda_1(R + \Delta R)} \right]$$

-0.013 [ppm] (5)

ここで、 $N$ は大気分子の個数密度である。(5)式に示されているように、

水蒸気及び炭酸ガスの差分吸収法の妨害ガスによる項はオゾン測定の際のオフセット値に反映している。しかし夏季でのそのオフセット値の変動による誤差は5%以下である。また装置自体のシステム誤差は3%以下であった。図4はレーザレーダからのオゾン濃度分布の例を示す。図4のオゾン濃度の値は、1回の測定2分でのその約30分間の平均値であり誤差はその平均誤差である。図4には、電波研に設置してある市販のオゾンモニターと小金井の東京都大気汚染監視施設で測定されたオゾン濃度が同時に示されている。

レーザレーダで測定された値と電波研での市販のオゾンモニター及び小金井での測定を表1にまとめる。表2のうち昼間の値は、レーザレーダから求められたオゾン濃度が他の測定法によるものと良好一致を示している。

Date		near DIAL	1.5 km
		(ppm)	(ppm)
25 July, 1300-1430 JST	DIAL	0.05-0.09	0.04-0.09
	P.M.	0.04-0.1	0.05-0.06
27 July, 1025-1130 JST	DIAL	0.07-0.1	0.07-0.1
	P.M.	0.1 -0.11	0.08-0.1
5 Aug. 1230-1400 JST	DIAL	0.08-0.18	0.12-0.19
	P.M.	0.16-0.2	0.14-0.15
25 July 2000-2111 JST	DIAL	0.02-0.04 <sup>a</sup>	
		0.0-0.005	

<sup>a</sup>The values were averaged between 0.5 km and 2 km.

表 1

### 3. おわりに

試作した、差分吸収方式炭酸ガスレーザレーダ装置は、光化学スモッグ発生時に約2km程度までの大気中オゾン濃度を距離分解能300mで測定できた。測定されたオゾン濃度は他のポイントサンプリング方式で求められたものと良好一致を示し大気汚染のオゾン濃度分布の測定法として有効であることが認められた。対流圏下部でも分散体となるエアロゾルが存在し、同様のオゾン測定が鉛直方向にも可能である。

なお、この研究は「国立機関等公害防止に関する試験研究の1つとして」環境庁のサポートを受けて行われたものである。

### 参考文献

- 1) 浅井 和弘, 黒岩 博司, 五十嵐 隆: CO<sub>2</sub>レーザによる長光路差分吸収法を利用した大気中オゾンの測定 電子通信学会論文誌(1977), J60-C, 624
- 2) K. Asai, T. Itabe, and T. Igarashi: Range-resolved measurements of atmospheric ozone using differential-absorption CO<sub>2</sub> laser radar Appl. Phys. Lett., 35, 60
- 3) E. R. Murrey, R. D. Hake, Jr., J. E. van der Laan, and J. G. Hawley: Atmospheric water vapor measurements with infrared (10μm) differential-absorption lidar system Appl. Phys. Lett., 28, 542.