

ライダーによる都市大気環境警報システムの検討 Study on the Lidar for warning system of the urban atmospheric environment

内田 行紀, 阿保 真, 長澤親生, 柴田泰邦
Yukinori Uchida, Makoto Abo, Chikao Nagasawa and Yasukuni Shibata

首都大学東京システムデザイン研究科
Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

Abstract

The problem of high oxidant concentration has not improved for years, and the origin of this have not been obvious yet. Monitoring of oxidant (O₃) with high time- and range-resolution is necessary for warning system of the urban atmospheric environment. In this paper, we discuss about the feasibility on horizontal measurements using a UV ozone DIAL. We obtain the results that the maximum measurement range is about 4.2km in high O₃ concentration model (120ppb) with moderate ozone DIAL using 290.3nm(on) and 298.5nm(off) wavelength pair.

1. はじめに

日本では大気環境改善のために、工場のばい煙規制や自動車排出ガスの削減対策が実施され、都市域の大気環境は大幅に改善している。しかし光化学オキシダントについては、環境基準を達成できていない地域が依然多く存在する。これらの原因として、越境汚染を含めた広域大気汚染の影響が考えられるが、その実態はまだ未解明である。

オゾンは大気汚染の原因のひとつであるオキシダントの大部分を占め、光化学スモッグを引き起こす。現在東京都では、都内の48の測定局において大気汚染物質の常時監視を行っており、その測定項目として、オゾン濃度を測定している。しかし、オゾン濃度の局所的かつ急激な増加を観測するには、観測点の間隔並びに1時間という観測間隔は必ずしも十分ではない。そこで、高い時間・空間分解能でオゾン濃度分布を測定するライダーを提案する。

本提案は、今までの地上測定局での観測だけでなく、ライダーを用いてオゾン濃度の水平方向の分布測定を都市域で行うことにより、その発生源の推定や、きめ細かく精度の良い光化学スモッグ予報や警報発令の実現を目指す。今回は、東京都において夏季に観測されたオゾン濃度の実際の測定値を元にモデルを作成し、水平方向における観測可能性をシミュレーションにより検討した。

2. オゾン DIAL の波長選択

オゾン濃度の測定にはDIALを用いる。受信信号強度に起因する気体濃度統計誤差 $\Delta n/n$ は次式で与えられる。^[1]

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2\Delta\sigma n(R_2 - R_1)} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[\frac{(S_{ij} + B)F + D}{S_{ij}^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma$:on波長とoff波長における気体吸収断面積の差、 n :気体濃度、 S :受信信号、 B :背景光雑音、 F :ディテクタの雑音指数、 D :ダークカウントである。また、 $i=1,2$ は距離 R_1, R_2 に、 $j=1,2$ はon波長とoff波長に対応する。

測定目標を半径5km圏内とすると、波長選択の範囲は限られる。Fig.1にon-offの波長差を20nmに固定したときの、on波長に対する最大測定可能距離のシミュレーション結果を示す。距離分解能は100m、測定誤差10%以内の距離を最大測定可能距離とした。その他のライダーのパラメータはTable.1に示す。背景光は文献[2]の値を利用した。また、オゾン濃度の水平分布モデルとして、オゾン濃度を光化学スモッグ注意報の発令基準である120ppbとした高濃度なオゾンモデルを作成した。Fig.1より、on波長が290-300nmのときに測定可能距離が伸びることがわかった。以下では、この波長範囲での選択を想定する。

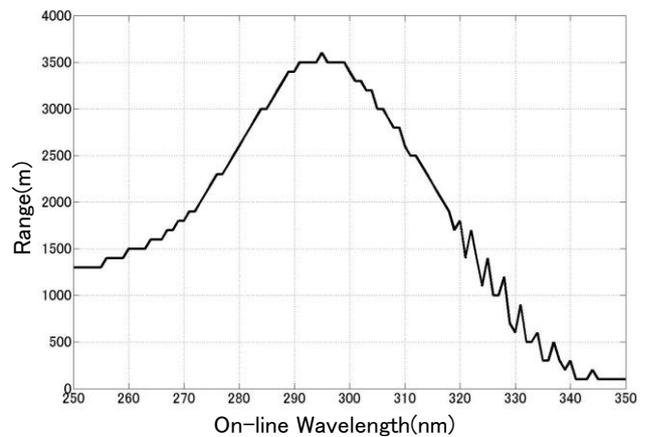


Fig.1 Maximum observable horizontal range for on-line wavelength. The separation of on-off wavelength is 20nm.

Table.1 DIAL System parameters

| | |
|----------------------------------|---------------------|
| Laser pulse energy | 10mJ |
| Pulse rep.rate | 100Hz |
| Telescope diameter | 0.3m |
| Optical efficiency | 0.1 |
| Detector quantum efficiency(PMT) | 0.3 |
| Dark count | 1000s ⁻¹ |
| Noise factor | 2.5 |
| Shot number | 30000 |

3. 波長選択の検討

on波長とoff波長における受信信号強度を P_{on}, P_{off} , 後方散乱係数を β_{on}, β_{off} , 消散係数を $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ とすると, 距離 R における測定対象の気体の濃度 $n(R)$ は次式で導出される^[3].

$$n(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \ln\left(\frac{P_{on}}{P_{off}}\right) + \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \ln\left(\frac{\beta_{on}}{\beta_{off}}\right) - \frac{\Delta\alpha}{\Delta\sigma} \quad (2)$$

ここで, $\Delta\alpha = \alpha_{on} - \alpha_{off}$ である. 第2項, 第3項は補正項と呼ばれ, 正確なオゾン濃度を得るためにはこの補正項を推定する必要があるが, 推定値には誤差が含まれるため, 最終的なオゾン濃度の精度に影響を与える.

大気分子及びエアロゾルの水平分布が一様と仮定すると, 後方散乱係数に起因する補正項である第2項は無視できる. 消散係数に起因する補正項である第3項は, 波長差が十分に小さいとき次式で近似される.

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\sigma} \approx B_\lambda(u\alpha_{aer} + 4\alpha_{mol}) \quad (3)$$

ここで, u はオングストローム指数である. また, B_λ はスペクトル因子と呼ばれ, 次式で表される.

$$B_\lambda = \frac{1}{\lambda_{off} \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\lambda}\right)} \quad (4)$$

$\Delta\alpha/\Delta\sigma$ が測定精度に与える影響を考えるために, u の相対推定誤差を50%としたときの, 各on波長毎のon-offの波長差に対する $\Delta\alpha/\Delta\sigma$ によるオゾン濃度の測定誤差の計算結果をFig.2に示す. 消散係数に起因する誤差はon波長とon-offの波長差両方に依存していることがわかる.

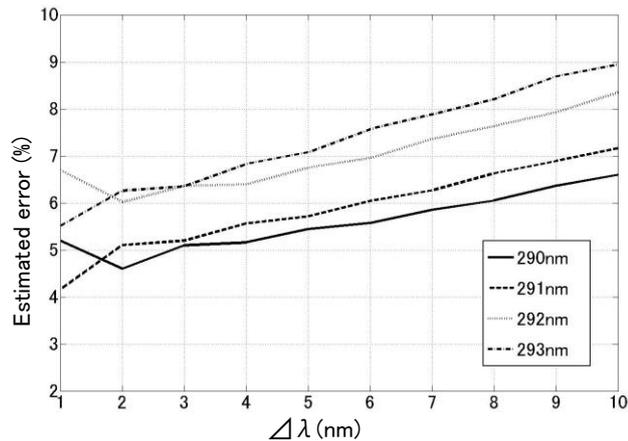


Fig.2 Extinction coefficient dependent error as a function of wavelength difference of on- and off-line for various on-line wavelength.

ここで, 測定可能距離が伸びるon-offの波長組を見つけるために, 以下の条件を設定した.

- ① on波長の範囲はFig.1の結果より290~300nmとする.

- ② オゾンの最終測定誤差目標を10%以下とした場合, 式(1)の統計誤差と消散係数に起因する誤差が等しいと考えると Fig.2の消散係数に起因する誤差が7%を下回る波長組のみ考える.
- ③ オゾンの吸収と同じ波長範囲に吸収線を持つSO₂による吸収の影響を最小限に抑えるよう, SO₂の吸収断面積^[4]が小さくかつ等しくなる2波長を選ぶ.

これらの条件を満たす波長の組は, on波長は290.3, 291.5, 293.4nmの3つに対して波長差9nm以下の組み合わせの合計12組となった.

4. 測定誤差のシミュレーション

候補となった波長組の, 消散係数に起因する誤差も考慮した誤差シミュレーションを行った. Fig.3に例として3つの波長組のシミュレーション結果を示す. 距離分解能は500mとし, Table.1のパラメータを用いた. 測定誤差10%以内での測定可能距離が最大になる波長組は290.3/298.5nmとなり, このとき最大測定可能距離は4200mとなった.

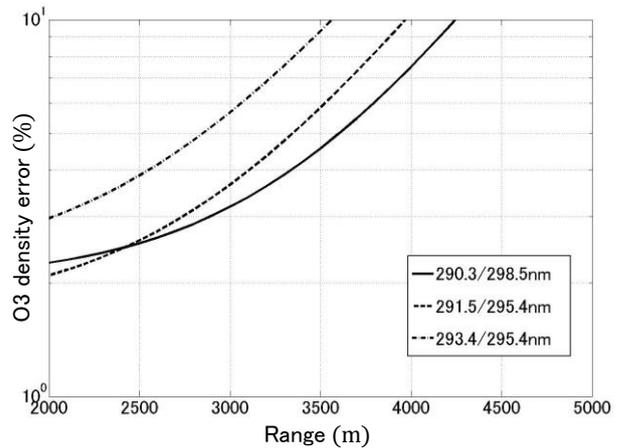


Fig.3 DIAL O₃ density error as a function of range for selected wavelength pair with high concentration model.

5. まとめ

光化学スモッグ注意報が発令されるレベルの高濃度なオゾンの水平分布測定に最適な波長組を検討した結果, 290.3/298.5nmが最適であり, 誤差シミュレーションにより, 4.2kmまで測定誤差10%以内での測定が可能ながわかった. 今後は, オングストローム係数の推定法の検討と評価並びに実際のシステム実現のための全固体化レーザシステムの検討を行っていく.

参考文献

- [1] Syed Ismail et al., Applied Optics, Vol.28, No.17, 3603-3615, 1989.
- [2] S. Wuttke et al., Theor. Appl. Climatol.85, 131-148, 2006
- [3] M. Nakazato, et al., Applied Optics, Vol.45, No.12, 2269-2279, 2007.
- [4] D. J. Brassington, Applied Optics, Vol.20, No.21, 3774-3779, 1981