

水蒸気 DIAL 水平スキャン観測波長の誤差シミュレーション

高坂 直矢, 阿保 真
首都大学東京 システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Feasibility study on optimal wavelength for horizontal scan observations of water vapor DIAL

Naoya KOUSAKA and Makoto ABO
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Recently, frequency of localized heavy rain is increasing. This is a big problem, especially in urban areas. To predict the heavy rain area, observations of horizontal water vapor distribution are important, because the occurrence area of heavy rain and the convergence area of water vapor are closely related. Differential absorption lidar (DIAL) is the system that observes water vapor concentration using two wavelengths with different absorption. Horizontal scan observations with DIAL of water vapor concentration for real time monitoring of the horizontal distribution of water vapor has been proposed. We decide lidar parameters including wavelength for practical use of the water vapor DIAL system for the local heavy rain forecast to meet laser safety standards.

Key Words: local heavy rain, DIAL, horizontal scan, water vapor

1. はじめに

近年、地球温暖化により危惧されていた極端な雨の降り方が現実に日本各地で起きている。特に、インフラが高密度で複雑に集積する大都市では、自然災害に脆弱であるため、災害をもたらす積乱雲急発達の機構解明と予測手法の高精度化が強く求められている。

局地的大雨対策として、高性能レーダによってリアルタイムで雨雲の様子が確認できるシステムや、豪雨直前予測システムが実用化されつつある。しかし、それらは雲内の雨粒観測による降雨強度推定のため、雨粒の発生前段階での予測は不可能である。

そこで、通常鉛直方向の観測に用いられる水蒸気 DIAL を水平方向にスキャン観測することにより、下層水蒸気の面的分布を求め、水蒸気の収束地点をリアルタイムで検出し、局地的大雨発生場所を予測するシステムが提案されている¹⁾。本研究では、水平スキャン観測水蒸気 DIAL に用いる、最適な波長をアイセーフや、具体的なライダーパラメータを考慮し検討する。

2. 差分吸収ライダー

差分吸収ライダー(DIAL)は、吸収の大きな波長(on波長)と小さな波長(off波長)の2波長を用い、受信信号の違いから測定対象分子の濃度分布を求める。DIALでは、測定対象分子の適当な強さの吸収線があること、測定対象以外の吸収が少ないこと、また大気からの十分な後方散乱光が測定の条件となる²⁾。

DIALにおける測定精度の要因のうち信号強度に起因する統計誤差は次の式で求められる。

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2n\Delta\sigma\Delta R} \sqrt{\sum_{j,k} P_{jk}^{-2}} \quad (1)$$

ここで、 n は平均気体濃度、 σ は吸収断面積、 R は距離、 P は各波長及び距離における受信光子数を表す、 $j=1,2$ はそれぞれ on 波長と off 波長に対応し、 $k=1,2$ はそれぞれ距離 R_1, R_2 に対応する。

水平スキャン型 DIAL システムは、数台のシステ

ムで 23 区内をカバーすることを想定し、半径 7km で最大 1km メッシュの空間分解能となるよう、スキャン角度分解能、1方向の観測時間を設定する。

3. アイセーフ

水平スキャンライダーは人が行動する空間での計測を想定しているため、人の目に入る危険性がある。そのため、レーザの安全基準として最大許容露光量(MPE)を十分考慮する必要がある。

MPE は以下に示す要求事項(a)(b)(c)の基準の内、最も厳しいものを用いて決定される³⁾。

要求事項(a):単一パルスエネルギーによる制限

要求事項(b):パルス列全エネルギーによる制限

要求事項(c):パルス間のインターバルを無くし、連続したロングパルスと見なす制限

要求事項(b)と(c)は繰り返し周波数に依存し、(c)は、個々のパルスが 10^{-9} よりも長いことが条件である。Fig.1 に繰り返し周波数 10kHz における波長に対する MPE を示す。

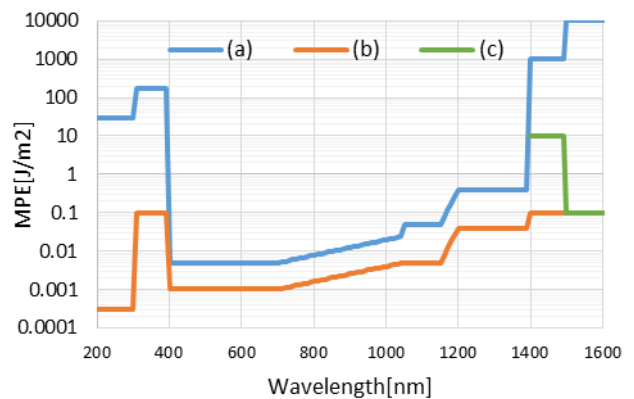


Fig.1 MPE for wavelength of the condition of (a) a single pulse, (b) average, and (c) a train of pulses at repetition rate of 10kHz.

3. 誤差シミュレーション

局地的大雨は水蒸気量の多い夏季の昼間に多く、今回は最近 5 年間の 8 月の東京の平均気温と湿度 (27°C、78%) から $N=6.7 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$ と想定した。この水蒸気密度で式(1)の誤差が 10% で観測距離が最大となる on 波長の吸収断面積を求めたところ、波長 750nm~1550nm の範囲で $1.9 \times 10^{-24} \sim 3.6 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ であった。Fig.2 に波長 750nm~1550nm の地上の標準気温、気圧における水蒸気の吸収断面積と水蒸気 DIAL に適した吸収断面積の範囲を示す。

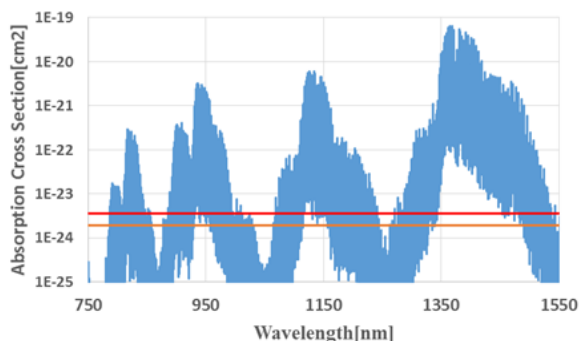


Fig.2 Absorption cross section of water vapor for wavelength and optimal cross section for DIAL observations in summer of Tokyo.

Fig.2 から、測定に適した吸収断面積は波長が 780、870、1030、1250、1550nm 付近に存在することが分かる。この 5 つの波長を on 波長の候補とし、式(1)により水平距離に対する統計誤差を計算し比較検討する。なお、off 波長は「on 波長との波長差が 1nm 以下」「on 波長との吸収断面積の差が 2 桁以上」という条件を元に後に検討するため、仮に on 波長 + 1nm を off 波長とする。Table.1 にシミュレーションに用いた各波長共通の DIAL パラメータを示す。検出法は直接検波のフォトンカウント方式とした。

Table.1 Parameters of H₂O DIAL

Observation time (1 round)	10min
Observation time (1 direction)	13.6s
Angular resolution	8.2deg
Range resolution	1km
Repetition frequency	10kHz
Receiving telescope diameter	20cm
Laser beam diameter	4cm

各波長に対して Fig.1 より MPE を求め、レーザービーム径から対応するレーザーエネルギーを求めた。近距離でのフォトンカウントのカウントレートを求め、10Mcps を越える場合にはレーザー出力を調整した。角度分解能は、東京都 23 区に 3 台のシステム配置する場合を想定し、8.2 度とした。繰り返し周波数は 10kHz に設定し、時間分解能は水平方向 360 度を 10

分 (1 方向は 13.6 秒)、距離分解能は 1km とした。また、検出器は光電子増倍管(浜松ホトニクス、R943-02, H10330B) とアバランシェフォトダイオード(東京インスツルメンツ、AU01) の 2 つを設定し、カタログの量子効率を用いた。Fig.3 に式(1)で計算した各波長のシミュレーション結果を示す。

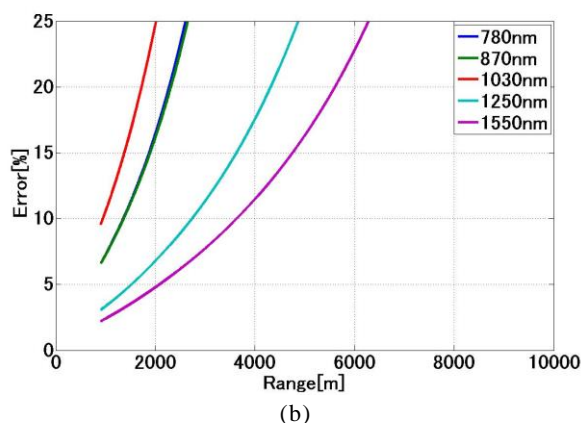
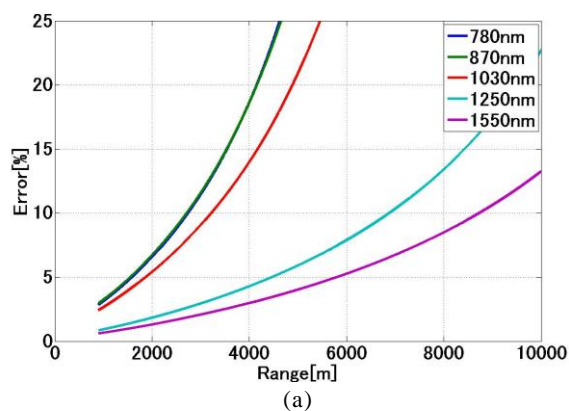


Fig.3 Statistical error for horizontal range of each wavelength with (a)APD and (b)PMT.

Fig.3 より、誤差 10% 以下で最も遠くまで測定可能な条件は検出器 APD、波長 1550nm であることが分かる。この時のレーザーパルスエネルギーは 0.126mJ であり、吸収断面積は $3.56 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ である。対応する on 波長は 1547.96nm, off 波長は 1548.71nm が候補として挙げられる。

4. まとめ

局地的大雨予測のための水平スキャン観測水蒸気 DIAL には、検出器 APD を使用した 1550nm 帯の波長が最適であることが分かった。最終的な波長は、時間分解能や距離分解能も含め、具体的なレーザーの仕様を検討して決める必要がある。

参考文献

- 1) 菊田達也他：第 33 回レーザーセンシングシンポジウム, P-23 (2015).
- 2) 阿保 真:大気中の微量気体を測るライダー, 計測と制御, **56** (2017) 342.
- 3) 光産業技術振興協会:レーザー安全ガイドブック 第 4 版, ((株)コミュニケーションズ, 2006) p.139