低高度水蒸気観測用小型イメージング DIAL の開発

高田 直輝, 阿保 真
東京都立大学 システムデザイン研究科（〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6）

Development of a Compact Imaging DIAL for Water Vapor Observations in the Lower Troposphere

Naoki TAKADA and Makoto ABO
Tokyo Metropolitan Univ, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Recently, heavy rainfall disasters caused by linear precipitation zones have become a serious problem. The accuracy of rainfall prediction can be improved to mitigate such disasters, and information on the distribution of water vapor in the lower atmosphere is useful for this purpose. We have designed an imaging lidar to observe water vapor at low altitudes up to 2000m. Simulation results show that the lidar can observe water vapor density in the altitude range from 60 to 2000 m with a statistical error of less than 10%. We constructed a system using a laser diode and a cooled CMOS camera, and succeeded in obtaining signals at two wavelengths through initial experiments.

Key Words: bistatic lidar, imaging lidar, DIAL, water vapor

1. はじめに

一般にゲリラ豪雨と呼ばれる局地的大雨や，長時間に渡って大雨をもたらす線状降水帯の発生により河川の氾濫などの豪雨災害が近年では深刻な問題となっている．豪雨災害の発生による被害は事前の予測精度を高めることで被害を軽減させることができるが，予測精度向上にはライダーによる大気下層の水蒸気分布情報が有用であることが指摘されている [1,2]．

一般的なライダーは，送受信視野の重なりのない低高度域のデータを得ることができない．これに対して，カメラを受信系に用いたバイスタティックイメージングライダーは，低高度からの測定が可能である [3]．近年はすべての高度に焦点が合う Scheimpflug の原理を満たすようにカメラを傾けた Scheimpflug Lidar（SLidar）が提案されエアロゾル観測などに用いられている [4]．

本研究では，測定領域を高度 2km 以下の低高度域に限定し，調整やメンテナンスが容易な連続波レーザと CMOS カメラを用いてコンパクトに設計した水蒸気差分吸収ライダー（DIAL：Differential Absorption Lidar）を提案する．シミュレーションにより受信信号画像を作成し高度分解能等を考慮して，システムの仕様や配置，焦点位置を設計した．さらに装置を試作しその性能を評価した．

2. イメージングライダーの原理

イメージングライダーは，レーザ光散乱飛跡を離れた位置から望遠鏡に接続したカメラで撮影し，画像処理により散乱光強度の高度分布を得る装置である．すでに提案されている SLidar は Fig.1 に示すように Scheimpflug の原理（イメージセンサ面，レンズ主面，物体面が同一線上で交わるように配置すると，近距離にあるものと遠距離にあるものに同時にカメラが焦点を合わせることができる）を応用しているため，焦点を合わせる高度について考慮する必要がない．しかしセンサが斜めになるため入射角度により感度の低下が生じる．今回提案するイメージングライダーは Fig.1 に示すようにイメージセンサ面とレンズ主面を平行に取り付けるため，入射角度による感度低下は起こらないが，焦点を合わせる高度以外のレーザ散乱飛跡が拡がって写る．これにより距離分解能が広くなるが，DIAL に用いる場合に距離分解能が実用上問題ないように設計をする．

イメージングライダーにおける受信信号強度$P(R)$は次式で表される [3]．

$$P(R) = \frac{P_t K A T_t T_r \Delta\alpha}{L} \beta(R,\theta) + P_b \tag{1}$$

ここでP_tは送信光強度，Kは光学効率，Aは受信望遠鏡の開口面積，T_tおよびT_tはそれぞれ送信系から散乱体までと散乱体から受信系までの大気の透過率，$\Delta\alpha$は 1 画素当たりの鉛直方向の視野角，Lは送受信系間の距離，$\beta(R,\theta)$は高度Rにおける散乱角θ方向の体積散乱係数，P_bは背景光強度である．

3. シミュレーション

本研究で設計したライダーの主な仕様を Table 1 にシステムの構成図を Fig.2 に示す．半導体レーザとカメラを用いることで小型化を実現した．波長は水蒸気の吸収帯でカメラの感度が高い 830nm を用い，冷却 CMOS カメラを用いることにより低ノイズで長時間の露光を可能とした．また，高度 2km までの低高度域を重点的に観測するために焦点距離の長い天体望遠鏡を用いた．

DIAL は吸収の強い on 波長と吸収の弱い off 波長の 2 波長を交互に射出し，その 2 波長の散乱信号の差分を使用する．高度Rにおける水蒸気濃度$n(R)$は次式で表される [5]．

$$n(R)=\frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R}\ln\left(\frac{\gamma_{on}(R_1)\gamma_{off}(R_2)}{\gamma_{off}(R_1)\gamma_{on}(R_2)}\right) \tag{2}$$

ここで添字on，offはそれぞれ on 波長と off 波長，nは水蒸気の分子数密度，$\Delta\sigma$は on 波長，off 波長の吸収断面積の差，ΔRは DIAL の距離分解能，γは背景光を除いた受信光子数を表す．

DIAL による統計誤差$\varepsilon(R)$は次式で表される．

$$\varepsilon(R)=\frac{\Delta n(R)}{n(R)}=\frac{1}{2\Delta\sigma n(R)\Delta R}\left\{\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\left(\frac{(\gamma_{ij}+B)F+D}{\gamma_{ij}{}^{2}}\right)^{2}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

ここで添字iは on 波長または off 波長，添字jはR_1またはR_2，Bは背景光の光子数，Fは過剰雑音指数，Dはダークカウント数を示す．

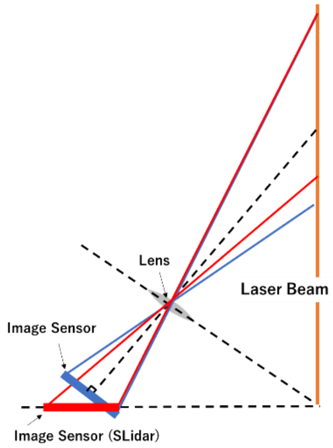

Fig. 1 Geometry diagram of the SLidar and the imaging lidar designed in this experiment.

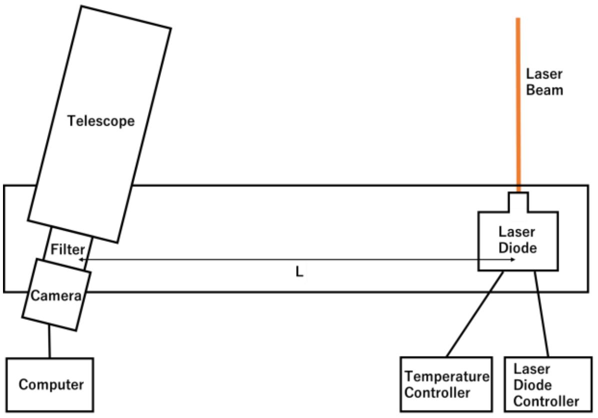

Fig. 2 Schematic diagram of the compact bistatic imaging lidar system.

Table 1. Parameters of the imaging lidar system

Transmitter	
Wavelength	830nm
Laser Power	0.65W
Beam Diameter	30mm
Receiver	
Active Pixels	5496(H)×3672(V)
Pixel Size	2.4μm(H)×2.4μm(V)
Telescope Diameter	110mm
Telescope Focal Length	1035mm
Quantum Efficiency	34%
Optical Efficiency	50%
Distance of transmitter from receiver	0.8m

3.1 高度分解能を考慮した焦点位置の検討

今回提案するイメージングライダーは焦点を合わせる高度以外のレーザ散乱飛跡は拡がって写るため焦点高度について考慮する必要がある．測定上限高度を 2km とし，全高度領域で高度分解能が 60m 以下となるように設計した結果，焦点高度は 1690m となった．焦点が全高度で合っている場合（SLidar）と焦点を高度 1690m に合わせた場合の各高度の高度分解能を Fig.3 に示す．また， シミュレーションによって得られた画像と対応する高度を Fig.4 に示す．

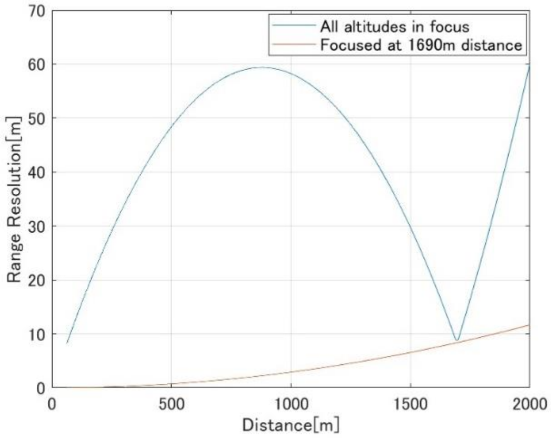

Fig. 3 The range resolution for the SLidar (all altitudes in focus) and focused at 1690m altitude.

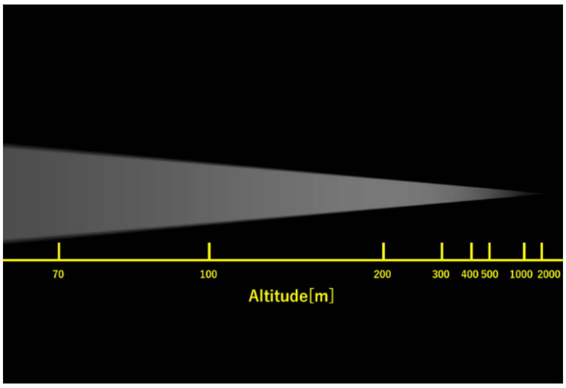

Fig. 4 The image of the laser beam generated by the simulation.

3.2 水蒸気 DIAL の統計誤差シミュレーション

夜間を想定し，焦点位置のずれを考慮した on 波長，off 波長の各画像を作成した．得られた on 波長，off 波長の画像から高度に対する受信信号強度を求め，式(3)より統計誤差を求めた． $\Delta\sigma$を$1\times10^{-27}\mathrm{m}^2$，$P_b$を 0 としたときの高度に対する受信信号強度を Fig.5 に，露光時間 60 秒，距離分解能 60m 並びに 100m における DIAL の統計誤差を Fig.6 に示す．シミュレーション結果から，夜間において露光時間 60 秒で撮影した場合，距離分解能 60m とすれば高度 2km まで誤差 14%以下，距離分解能 100m とすれば 7%以下で観測が可能であることが分かった．

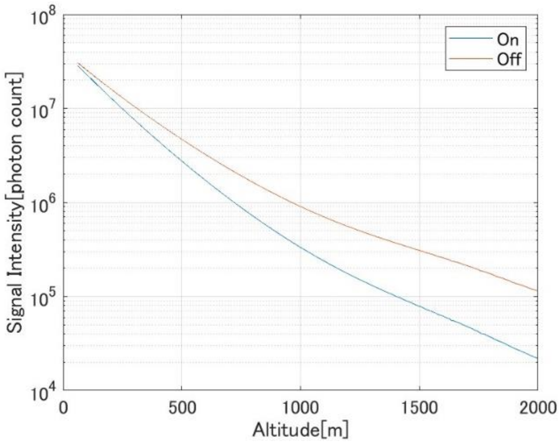

Fig. 5 Calculated received photon counts at on and off wavelengths for the imaging DIAL.

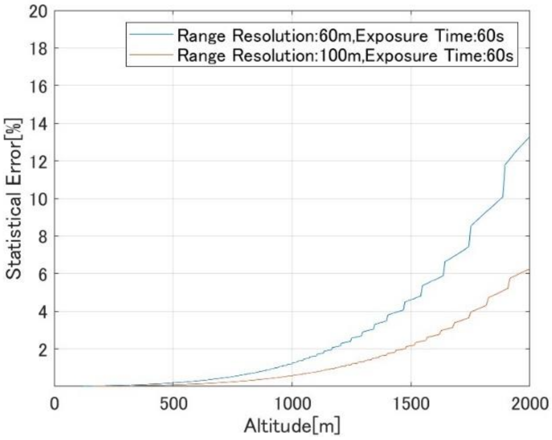

Fig. 6 Statistical error of water vaper density for the imaging DIAL with vertical resolutions of 60m/100m and exposure time of 60s.

4. 水蒸気観測用小型イメージング DIAL による実験結果

東京都立大学日野キャンパス（東京都日野市）において試作したイメージング DIAL を用いて仰角 20°，露光時間 180 秒で撮影を行った．送信用レーザには LD830-SE650(Thorlabs)，望遠鏡と CMOS カメラはそれぞれ VMC110L(Vixen)，ASI183MM Pro(ZWO)を使用した．波長は on 波長/off 波長を温度を変えることにより切替えた.観測によって得られた off 画像を Fig.7 に,on 波長/off 波長の高度に対する受信光強度を Fig.8 に示す．on 波長信号が水蒸気の吸収により off 波長より減衰していることが確認できた.

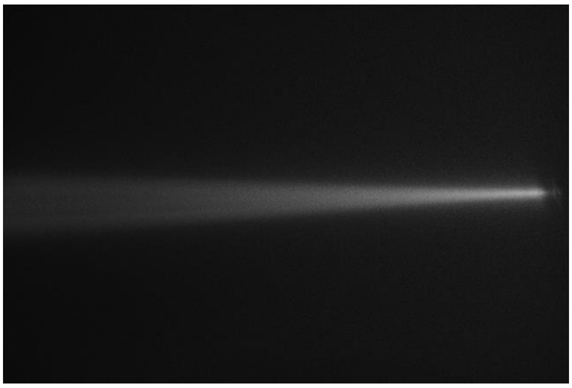

Fig. 7 The image recorded by the imaging DIAL (off wavelength). The exposure time is 180s.

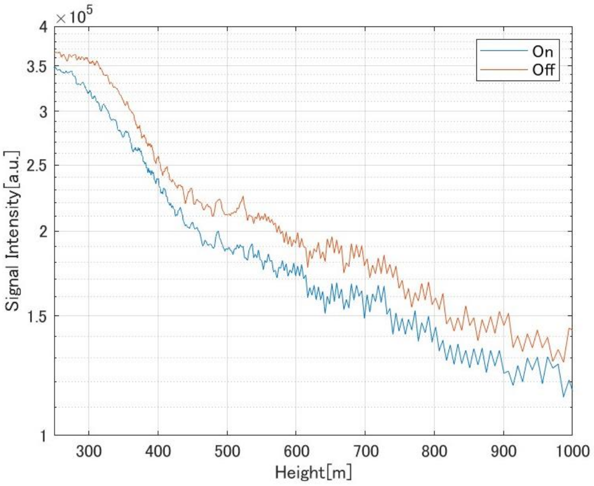

Fig. 8 Signal intensity at on and off wavelengths obtained by the imaging DIAL.

5. まとめ

イメージングライダーの水蒸気 DIAL への実用化を目標としたシミュレーション結果から，分解能を選ぶことで高度 60～2000m の範囲の水蒸気密度を統計誤差 10%以下で観測が可能であることが分かった．今後これらの検討を踏まえた上で実験を進め，背景光の影響を受ける昼間観測を行い，実際の水蒸気密度の高度分布の測定を試みる．また，現在は 1 台の半導体レーザで波長切替えを行っているが、将来的には波長制御された DBR レーザを光スイッチにより切替え、テーパアンプにより増幅する方法に変更する予定である．

参考文献

1) 吉田 智：計測と制御，61（2022）37.
2) 阿保 真他：レーザセンシング学会誌，**1**（2020）72.
3) 林 錦明他：レーザー研究，**27**（1999）827.
4) Zheng Kong et al.：Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer **254**（2020）107212
5) S. Ismail and E. V. Browell：Appl. Opt.，**28**（1989）