

abstract—Both pulse lasers and continuous wave lasers have been used for the lidar transmitter. The latter is applied for lidars such as the random modulation continuous wave lidar (RM-CW lidar). The M-sequence is usually used for the modulation code of the RM-CW lidar. In this paper, it is shown that two response functions can be gotten simultaneously with the RM-CW lidar using new sequences which have no correlation. And we show usefulness of applications to a differential absorption lidar (DIAL) of the RM-CW lidar.

1. はじめに

大気中の水蒸気分布を高精度に測定する装置として、差分吸収パルスライダーが開発されている¹⁾。しかし、高ピークパワーを持つパルスレーザーは、レーザーの寿命や、屋外で用いるときの人の目への危険性等の問題がある。それに対し擬似ランダム変調ライダー²⁾は、擬似ランダムパルス系列を用いて変調された連続波レーザーを利用するなめに、パルスレーザーほどの高ピークパワーを持たなくとも、平均パワーが大きければ実質的な出力を高められる。このことより、光源に半導体レーザーのようなピークパワーの低いものの使用が可能となり、半導体レーザーを用いることにより小型で可搬性に富むライダー装置を実現することができる。

本研究では、M系列を拡張した新しい系列でレーザー光を変調し、差分吸収法で水蒸気測定を行った場合の水蒸気密度の測定精度について、地上から測定した場合と、飛翔体から測定した場合をシミュレーションにより検討した。

2. 原理

周期 N の M 系列 a_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N-1$) のバイナリ系列を a'_i とすると ($a'_i = 2a_i - 1$)、この系列の符号を交互に反転、2 個毎に反転させることにより 2 つ (A1 系列、A2 系列) のバイナリ符号系列が発生される³⁾。ここで、A1 系列の長さは $2N$ 、A2 系列の長さは $4N$ である。A1 系列、A2 系列の相関関数は、M 系列の場合ほど関数的にはならないが、極めてそれに近い形となる。また、これらの符号系列は、系列 1 周期内の 1 と 0 の個数が一致するという特徴を持つ。それにより、背景光ノイズのバイアス成分を完全に除去することができる。さらに、これらの符号系列間には相関性が存在しないという重要な性質があり、これより、2 つの系列を用いて同時に別々の応答関数を求めることができる。その結果、2 波長同時測定が可能となり、2 つの異なる波長での測定が必要な差分吸収ライダー (DIAL) への適用が有効となる。

3. シミュレーション

シミュレーションに用いた各パラメータを Table 1 に示す。レーザーは CW の半導体レーザーを想定し、水蒸気の吸収線と重なる波長域、690~700, 810~840, 980~1000nm を対象とし、この間での最適波長を決定した。なお、DIAL の信号強度に起因する水蒸気密度の測定誤差⁴⁾ は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2\Delta\sigma n(R_2 - R_1)} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[\frac{1}{(SN_{ij})^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma$: on 波長と off 波長における吸収断面積の差、 n : 水蒸気密度である。また、擬似ランダム変調

ライダーの SN は次式で与えられる。

$$SN_{RM-CW} = \sqrt{MN} \frac{\xi P_0 G_l}{\sqrt{2\xi P_0 \sum_{i=0}^{N-1} G_i + 4\xi \bar{b}}} \quad (2)$$

ここで、 \bar{b} : 背景光ノイズの平均値、 M : 積算回数、 N : 符号系列長、 P_0 : 送信レーザーパワー、 ξ : 光電変換率、 G : 応答関数、 $i=1,2$ は、距離 R_1, R_2 に、 $j=1,2$ は on 波長と off 波長に相当する。

エアロゾルの大気後方散乱係数は Ismail et al. の地上視程 23km のバックグラウンドエアロゾルモデルを用い、大気分子の体積後方散乱係数は U.S.標準大気のもので計算により求めた。また、水蒸気分布は中緯度、夏を仮定した。測定は夜間を想定し、背景光ノイズは 0 とした。水蒸気吸収線のデータは HITRAN データベースのものを用いた。

Table.1 Parameter of the water vapor DIAL system

Laser power	0.03W
Aperture	0.35m
Quantum efficiency (Si-APD)	690nm 0.7
	830nm 0.5
	980nm 0.2
Optical transmittance	0.3
Range resolution	100m
Sequence length	1020
Additional number	10^6

4. シミュレーション結果

4. 1. 地上からの水蒸気測定シミュレーション

各波長帯域で、吸収線強度の異なるさまざまな波長を用い、式(1)及び(2)より、地上からの測定を想定して水蒸気密度の測定誤差のシミュレーションを行った。

Fig.1 に、それぞれの波長帯域で最も統計誤差の少なかった波長での、高度に対する水蒸気密度測定誤差の図を示す。積算回数は 10^6 回で、測定時間にして、約 11 分である。この図より、3 つの波長の間には大きな違いは見られないが、690nm 帯の半導体レーザーは可視域であるために、eye safety の問題がある。また、980nm 帯の半導体レーザーは、ファイバーアンプ用のものでスペクトル幅の広いものが多く、ライダー計測には不向きである。830nm 帯の半導体レーザーは、スペクトル幅も狭く、さまざまな力のものが市販されており、この中では最も適しているといえる。

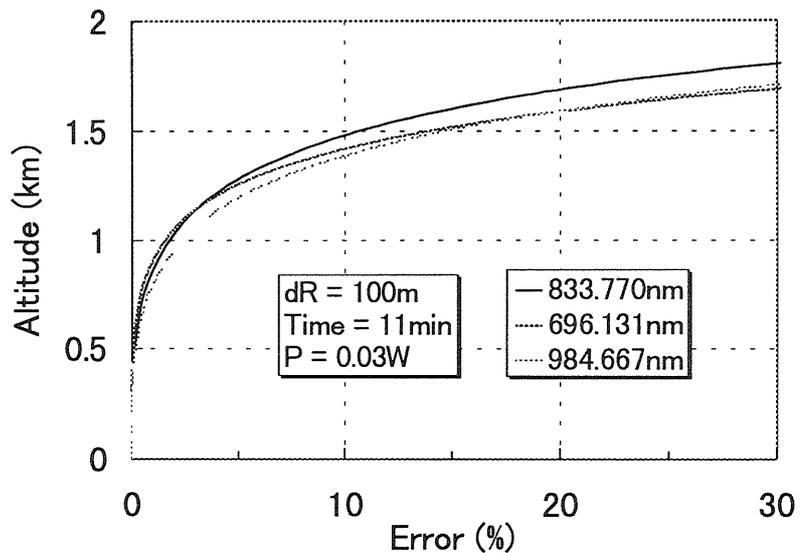


Fig.1 Error profiles at the three wavelengths

Fig.2 は、波長 833.770nm (線強度 $S_0=2.58 \times 10^{24}$ [cm⁻¹/(mol cm⁻²)] の半導体レーザを用い、出力を 0.03W から 0.15W まで変えたときの高度に対する水蒸気密度測定誤差の図である。なお、高度 500m よりレーザ光と望遠鏡の視野が重なるようにした。これより、空間分解能 100m、0.15W で 1700m までが誤差 10%以内で測定できることが示された。

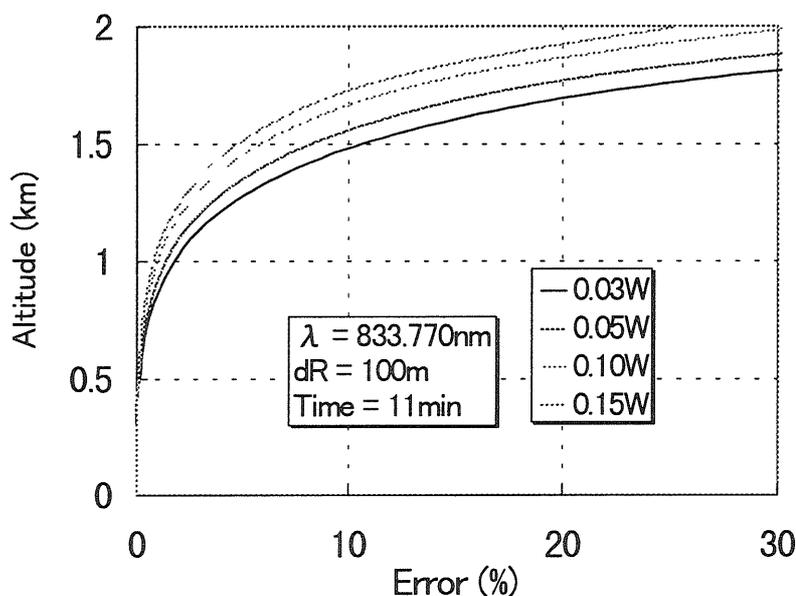


Fig.2 Error profiles at the various laser powers with a range resolution of 100m

4. 2. 飛翔体からの水蒸気測定シミュレーション

次に、飛翔体に搭載した場合について検討した結果を示す。Fig.3 は、地上 5km の飛翔体から鉛直下向きにレーザを発振した場合のシミュレーション結果である。ただし、高度 4km よりレーザと望遠鏡の視野が重なるように仮定している。830nm 帯で、832.899nm のように比較的吸収線強度の弱い波長 (線強度 $S_0=1.70 \times 10^{24}$ [cm⁻¹/(mol cm⁻²)] を on 波長として用いると、上空の水蒸気密度の小さいところでの誤差が大きくなる。それに対し、825.482nm のように比較的吸収線強度の強い波長 ($S_0=6.06 \times 10^{24}$ [cm⁻¹/(mol cm⁻²)] を on 波長として用いると、上空での誤差は小さくなるが、地表付近の水蒸気密度の大きいところでの信号強度が弱くなるため、その付近での誤差が大きくなる。地上からの測定時間同様、833.770nm を用いることにより、高度 4km から地表付近まで、レーザパワー 0.15W、空間分解能 100m、測定時間約 2分 (積算回数 2×10^5) で、誤差 20%以内で測定することが可能であるという結果が得られた。ただし、このシミュレーションでは、地表からの反射光は考慮していない。

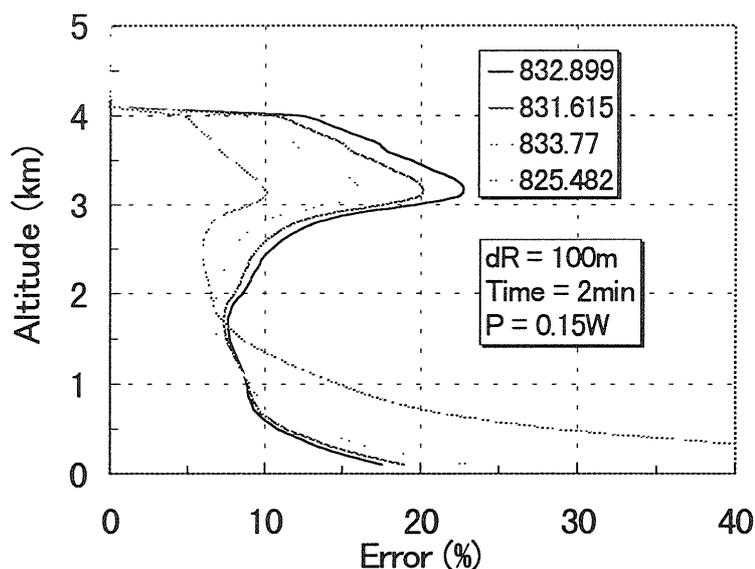


Fig.3 Error profiles from the airborne H₂O DIAL system of the 5km altitude.

さらに Fig.4 に、高度 2km より視野が重なるように仮定した場合を示す。高度の低いところでは上述のように on 波長の吸収線強度の小さい方が誤差が小さくなる。図からも、最も吸収強度の小さい 832.899nm を on 波長として用いることにより、高度 2km から地表付近まで、統計誤差 10%以内で水蒸気を測定することが可能であるという結果が得られた。

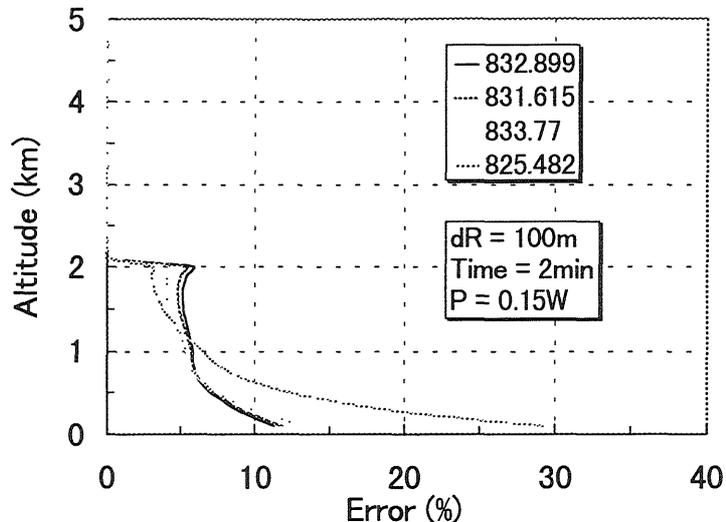


Fig.4 Error profiles from the airborne H₂O DIAL system of the 5km altitude.

5. まとめ

今回のシミュレーションで、擬似ランダム変調法を DIAL に適用し、水蒸気を測定したときの精度についての検証を行った。そして、833.770nm の半導体レーザを用いることにより、地上からは空間分解能 100m で 1.5km 程度まで測定可能であることを示した。さらに、飛翔体に搭載することにより、地上からの測定に比べ、幅広い高度で精度良く水蒸気密度を測定できることを示した。これにより、半導体レーザによる軽量コンパクトな水蒸気 DIAL が可能なことが示された。

現在、CW 半導体レーザによる水蒸気 DIAL を試作中であり、実際に水蒸気測定を行う予定である。

<参考文献>

1. 長澤親生, 阿保 真, 君山健二, 内野 修, “PAS セルを用いた準同時 2 波長水蒸気差分吸収ライダー”, レーザ研究, Vol.22, pp.1000-1006 (1994)
2. N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba, and K.Sakurai, “Random modulation cw lidar”, *Applied Optics*, Vol.22, pp.1382-1386(1983)
3. Nagasawa, M. Abo, H. Yamamoto, and O. Uchino, “Random modulation cw lidar using new randomsequence”, *Applied Optics*, Vol.29, pp.1466-1470(1990)
4. 杉崎哲理、長澤親生、阿保真、内野修 “飛翔体搭載 DIAL による水蒸気観測のシミュレーション”, 第 17 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, pp.193-196, 1995.