

# B11

## 波長シフターを用いた水蒸気 DIAL 法

### A water vapor DIAL method using a wavelength shifter

後藤 貴史、阿保 真、長澤 親生

Takashi GOTOH, Makoto ABO and Chikao NAGASAWA

東京都立大学大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University

**Abstract:** We propose a new method to measure the atmospheric water vapor by a differential absorption lidar(DIAL). This method uses two parts of one water vapor absorption line profile. We can realize a simple water vapor DIAL using this method and a wavelength shifter. Computer simulation shows possibility of water vapor density measurement with error less than 10 percent from altitude 5km to the ground by using the airborne DIAL.

#### 1.はじめに

大気中の水蒸気分布を測定するライダーの1つとして差分吸収ライダー(DIAL)がある。従来の DIAL 測定においてはレーザーの波長を吸収線の中心波長と吸収の無い波長にそれぞれ同調する必要があった。本研究ではシステムの簡略化を実現するために、波長シフターを用いて1つの吸収線の異なる吸収断面積の波長で得られる信号の差分から水蒸気分布を測定する新しい水蒸気 DIAL 測定法を提案する。この測定法を用いた飛行体搭載水蒸気ライダーの測定誤差のシミュレーションを行い、従来の DIAL 測定法との比較を行う。また、本測定法を用いた基礎実験の結果を示し、本測定法の有効性について述べる。

#### 2.原理

従来の DIAL では Fig.1 の様に吸収線のピーク(on)と吸収線のない波長(off)にレーザーを同調することによりその吸収断面積の差分から水蒸気濃度を測定するが、本測定法は Fig.2 の様に水蒸気吸収スペクトルのピークからずれた部分に合わせた波長(on1)と波長シフターを用いて同じ吸収線の弱い吸収部分に合わせた波長(on2)を利用する。この方式の利点は波長シフターを使った簡単なシステムで瞬時に、且つ正確にレーザーの送

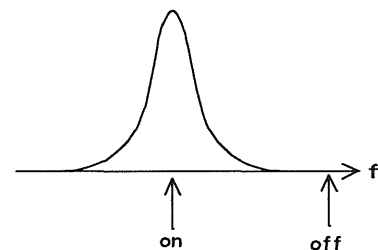


Fig.1 Wavelength selection of the conventional DIAL.

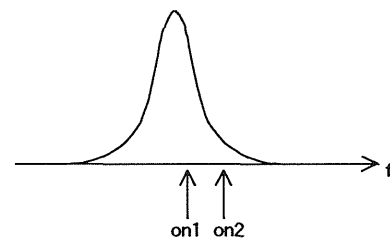


Fig.2 Wavelength selection of the new DIAL.

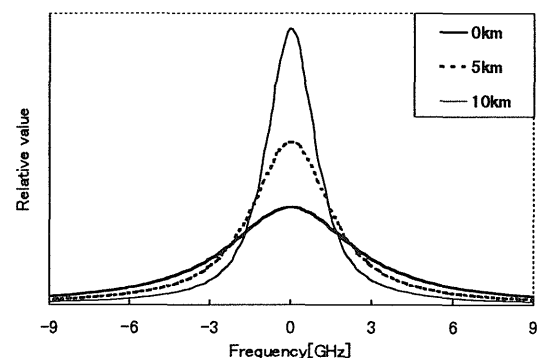


Fig.3 H<sub>2</sub>O absorption spectrum for each altitude of 0, 5, 10km.

信波長をシフトできる点にある。水蒸気吸収線は、温度と気圧によりそのスペクトルが変化する

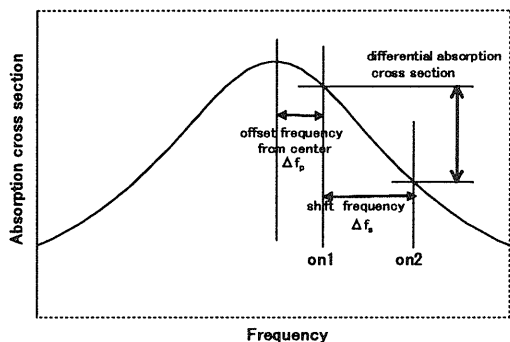


Fig.4 Differential absorption cross section between on1 and on2.

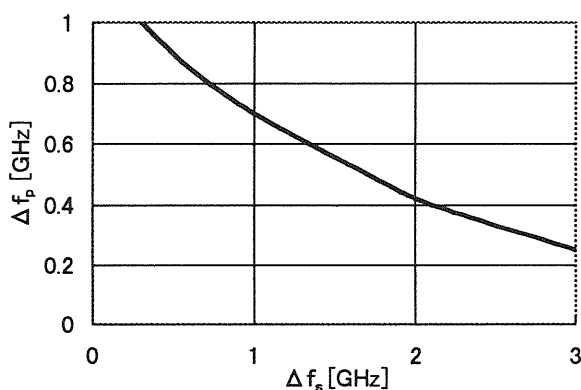


Fig.5 Optimum  $\Delta f_p$  versus  $\Delta f_s$  for absorption spectrum at an altitude of 5km.

る。Fig.3 に各高度における水蒸気吸収線スペクトルの計算例を示す。高度が高くなるにつれ、吸収線の半値幅が狭くなりピークの吸収断面積は増加する。同時にピーク以外の波長での吸収断面積も変化する。本測定法では、これらの影響を考慮する必要がある。

### 3. on1 と on2 波長の最適化

DIAL では吸収断面積の差が大きいほど、水蒸気濃度の測定精度が良くなる。一方、ブラッグ回折を利用した市販の波長シフターはシフト周波数が大きいほど効率が悪くなる。従って、可能な限り少ないシフト周波数で広範囲にわたって精度良く水蒸気分布測定が行える on1 と on2 の組み合わせを得る必要がある。Fig.4 に吸収スペクトルと on1、on2 の位置関係を示す。on1 に相当する吸収波長のピークからの周波数のずれを  $\Delta f_p$ 、on2 に相当する on1 からのシフト周波数を  $\Delta f_s$  とする。吸収線の形が与えられると  $\Delta f_s$  に対して吸収断面積の差が最大となる  $\Delta f_p$  が存在し、

on1、on2 の最適化が行える。また、高度により吸収線の形が変化する為、on1、on2 の最適条件が高度により異なる。例として高度 5km の温度と気圧における吸収線の  $1\Delta f_s$  に対する最適な  $\Delta f_p$  を Fig.5 に示す。

### 4. 測定誤差シミュレーション

新しい DIAL 測定法における水蒸気測定精度を高度 5km から地表に向けた飛翔体搭載水蒸気 DIAL を想定し、信号強度に起因する統計誤差をシミュレーションにより求め、従来の DIAL による測定誤差との比較を行った。

DIAL において信号強度に起因する水蒸気濃度の統計誤差は次式で与えられる<sup>1)</sup>。

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

ここで  $\Delta\sigma$ : on1 波長と on2 波長における有効吸収断面積の差、 $S$  は受信フォトン数、 $i=1,2$  は距離  $R_1, R_2$  に、 $j=1,2$  はそれぞれ on1 波長、on2 波長に相当する。飛翔体搭載水蒸気 DIAL の主なパラメータを Table1 に示す。光源としては高出力固体レーザーの Ti:サファイアレーザーを想定し、このレーザーの発振波長域である 820nm 帯の水蒸気吸収線を選び、夜間の測定を想定し背景光雑音は無視した。水蒸気の吸収断面積は HITRAN のデータベースを用い、エアロゾル及び大気モデルの体積後方散乱係数は文献 2 と同じものを用いた。水蒸気密度は HITRAN の緯度 45° 夏のモデルを用いた。また、スペクトル純度を考

Table1. Simulation parameters of a water vapor airborne DIAL.

Pulse Energy	0.06J
Shot Number	500
Altitude	5km
Horizontal Resolution	1km
Range Resolution	100m
Aperture	0.2m
Quantum Efficiency	0.8
Optical Transmittance	0.2
Wavelength	810~830nm
Spectral Purity	0.995

慮し、これによる誤差を文献 2 と同様のシミュレーションにより求めた。

### 5.シミュレーション結果

最適な吸収断面積を持った吸収線を選択する為、ピークでの吸収断面積に対して測定誤差 10% 以下で測定可能な高度範囲を従来の DIAL 測定法と本測定法についてシフト周波数:  $\Delta f_s$  が 1、2、3GHz の場合についてシミュレーションを行った。 $\Delta f_p$  は Fig.5 より  $\Delta f_s$  に対して最適な設定を行った。結果を Fig.6 に示す。ここで例として(a)は従来の DIAL 測定法では  $5 \times 10^{-27} \text{m}^2$  の吸収線を選択した場合、5~2.7km の水蒸気濃度が測定誤差 10%以内で測定可能ということを示す。従来の DIAL 測定法では  $1.2 \times 10^{-27} \text{m}^2$  の吸収断面積の吸収線を用いることにより高度 5km から地表までの水蒸気濃度が測定可能となる。これに対し本測定法では、 $\Delta f_s=3\text{GHz}$  では  $0.9 \times 10^{-27} \text{m}^2$  以下、 $\Delta f_s=2\text{GHz}$  では  $0.8 \times 10^{-27} \text{m}^2$  以下の吸収線を用いることにより高度 5km から地表付近までの水蒸気濃度が測定可能となる。一方、 $\Delta f_s=1\text{GHz}$  の場合、高度 5km から地表までのすべての範囲の水蒸気濃度測定は不可能であり、シフト周波数としては適当でない。以上より、 $\Delta f_s$  を 2GHz 以上にとり、適当な吸収線を選択する必要があることがわかった。次に各シフト周波数に対して最適な吸収線を選択した時の水蒸気濃度測定誤差のシミュレーション結果を Fig.7 に示す。従来の DIAL 測定法では  $824.270\text{nm}$  ( $\sigma_0: 1.2 \times 10^{-27} \text{m}^2$ )、 $\Delta f_s=2\text{GHz}$ - $\Delta f_p=0.4\text{GHz}$  の組み合わせで  $820.7\text{nm}$  ( $\sigma_0: 5.7 \times 10^{-28} \text{m}^2$ )、 $\Delta f_s=3\text{GHz}$ - $\Delta f_p=0.25\text{GHz}$  で  $811.007\text{nm}$  ( $\sigma_0: 9.42 \times 10^{-28} \text{m}^2$ ) の吸収線を選択している。この結果から、 $\Delta f_s=2\text{GHz}$  で高度 5km から地表付近までの水蒸気濃度を測定誤差 10%以下で測定可能となることがわかる。

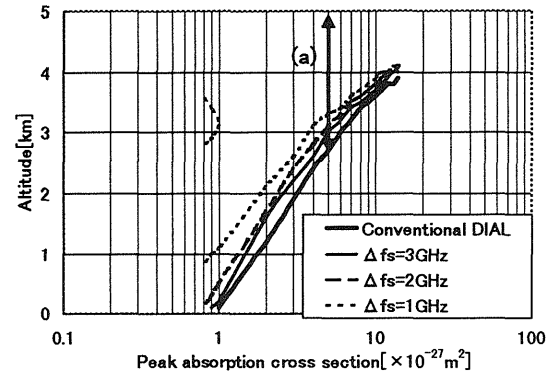


Fig.6 Range of the altitude where percent error is less than 10% versus peak absorption cross section. (a) shows the range where water vapor density can be measured within an error of 10% in the case of cross section of  $5.0 \times 10^{-27} \text{m}^2$  using the conventional DIAL.

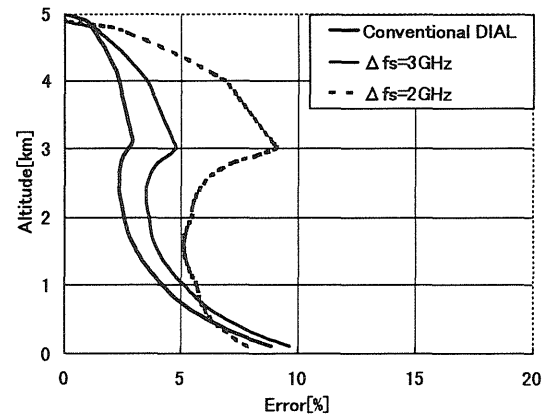


Fig.7 Calculated error profiles for the airborne water vapor DIAL from altitude 5km for each  $\Delta f_s$  (2, 3GHz).

### 6.実験

本測定法の有効性を示す為、地上から新しい水蒸気 DIAL 測定と従来の DIAL 測定を行い、求められた水蒸気濃度を比較した。光源として CW の半導体レーザーの出力を AO 変調器によりパルス化して、Table2 に示すライダーシステム

Table2. Specifications of the experimental setup.

LD Output	0.02W
Pulse Length	0.67 $\mu$ s
Repetition Rate	4kHz
Shot Number	2700000
Range Resolution	30m
Telescope Aperture	0.2m
Detector	PMT
Elevation Angle	45°

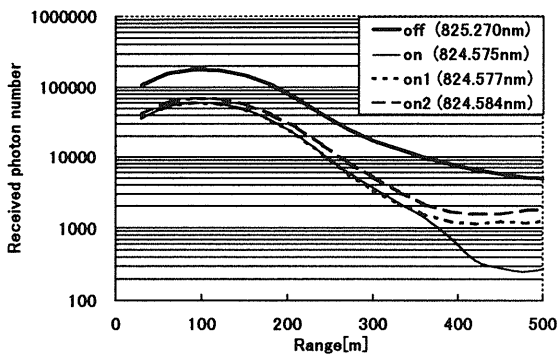


Fig.8 Atmospheric backscattered signal for each wavelength.

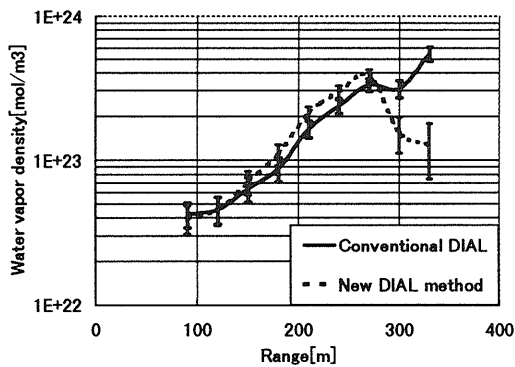


Fig.9 Water vapor density profiles measured by the conventional DIAL method and the new DIAL method.

により水蒸気濃度測定を行った。ここでは、まだ波長シフターは用いず、半導体レーザーの温度を変えることにより波長をシフトさせた。本方式による測定では中心波長が  $824.575\text{nm}$  ( $\sigma_0: 5.6 \times 10^{-27}\text{m}^2$ ) の吸収線を用い  $\Delta f_s = 3\text{GHz}$  ( $7.0\text{pm}$ ) とした場合の  $\Delta f_p$  の最適値  $0.8\text{GHz}$  ( $1.8\text{pm}$ ) を用いた。距離に対する各波長の受信フォトン数を Fig.8 に示し、これから求めた水蒸気濃度を信号強度に起因するエラーバーと共に Fig.9 に示す。従来の DIAL 測定法では on-off の組み合わせから、本測定法では on1-on2 の組み合わせから水蒸気濃度を算出した。従来の測定法と本測定法により求められた水蒸気濃度を比較すると、距

離  $90\sim 270\text{m}$  の範囲で誤差内で一致していることがわかる。 $300\text{m}$  より遠くでの水蒸気濃度の違いは波長切りかえの時間経過によるエアロゾル濃度の変化による影響と考えられる。この測定結果より、本測定法を用いた水蒸気濃度の測定が従来の DIAL と同様に可能といえる。

## 7.まとめ

シミュレーション結果から波長シフターを用いる本測定法により、高度  $5\text{km}$  の飛翔体搭載 DIAL により測定誤差  $10\%$  以下で高度  $5\text{km}$  以下の水蒸気濃度測定が可能という結果を得た。また地上から水蒸気密度測定の基礎実験を行い、従来の測定法により求められた水蒸気濃度と本測定法により求められた水蒸気濃度がほぼ一致し、本測定法の有効性が示された。本測定法を用いることにより広範囲な高度の水蒸気濃度の測定が可能となる。

今回の基礎実験では出力の小さい半導体レーザーを用いて測定を行った為、測定可能な距離が短かったが、今後、高出力のパルスレーザーによる測定を行い、高々度において従来の測定法との比較を行う予定である。

## <参考文献>

1. Syed Ismail, and Edward V. Browell, "Airborne and Spaceborne lidar measurement of water vapor profiles: a sensitivity analysis", Applied Optics, Vol.28, pp3603-3615(1989)
2. 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 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, pp.193-196(1995)