

東京都立大学工学部 〇杉崎哲理 長澤 親生 阿保 真  
 気象庁 内野 修

## Computer simulation for measurements of water vapor by a spaceborne DIAL

Tetsuri Sugisaki, Chikao Nagasawa, Makoto Abo  
 Tokyo Metropolitan University

Osamu Uchino  
 Japan Meteorological Agency

**Abstract:** Passive remote sensing techniques from space provide global coverage of H<sub>2</sub>O distribution but do not provide good vertical resolution. High vertical resolution (<1km) measurements over both regional and global scales are needed in understanding the hydrologic cycle, global circulation and dynamics, storm phenomena, dynamics of the atmospheric boundary layer, and atmospheric radiative transfer. This paper presents an evaluation of the random and systematic error sources associated with differential absorption lidar (DIAL) measurements of tropospheric water vapor profiles from spaceborne platform with a vertical resolution of 500m, 1000m and a horizontal resolution of 100km.

### はじめに

現在、人工衛星による大気環境測定用センサーにはパッシブなものが用いられているが、将来、鉛直方向の距離分解能に優れたライダーを用いたアクティブな計測のための技術開発が期待されている。今回、特に熱収支等に大きな影響を与える水蒸気の全地球的な鉛直濃度分布情報の取得を目的とした飛翔体(ここでは人工衛星を想定)搭載の差分吸収ライダー(DIAL)方式による測定を行なう際に生じる測定誤差について、種々の大気モデルを用いて計算機シミュレーションを行い、システムに最適な吸収断面積及び距離分解能の組み合わせを検討した。

### 原理

距離  $R$  からのライダーの受信フォトン数  $S$  は次式で表される。

$$S(R) = \frac{(E/h\nu)A\eta\beta Qc\Delta t}{2R^2} \exp\left(-2\int_0^R \alpha dR\right) \quad (1)$$

ここで、 $E$ : レーザのパルスエネルギー、 $h$ : プランク定数、 $\nu$ : 光の周波数、 $A$ : 受信鏡面積、 $\eta$ : デテクターの量子効率、 $\beta$ : 大気の体積後方散乱係数、 $Q$ : 光学系の全効率、 $c$ : 光速、 $\Delta t$ : ゲート時間、 $\alpha$ : 吸収を含む大気の消散係数である。

ライダーの受信光に含まれる背景光雑音の大き

さ(フォトン数)  $B$  は次式で与えられる。

$$B = \frac{L}{h\nu} \cdot \rho \cdot \pi \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 A\omega Q\eta \Delta t \exp(-2\tau) \quad (2)$$

ここで、 $L$ : 太陽放射、 $\rho$ : 地表の反射率、 $\theta$ : 受信視野角、 $\omega$ : 干渉フィルターのスペクトル幅、 $\tau$ : 大気の光学的厚さである。

DIALの水蒸気密度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式で求められる。

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2\Delta\sigma n(R_2 - R_1)} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[ \frac{(S_{ij} + B_j)F + D}{S_{ij}^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

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、 $F$ : デテクターの雑音指数、 $D$ : ダークカウントで、 $i=1,2$  は距離  $R_1, R_2$  に、 $j=1,2$  は on 波長と off 波長にそれぞれ相当する。

スペクトル純度はレーザーパルスの持つエネルギーのうち吸収線に吸収される割合を示したものである。スペクトル純度が1の時とそうでない時の受信フォトン数から求まる水蒸気密度の相対誤差を、スペクトル純度による誤差とした。

## ライダー及び大気モデル

シミュレーションに想定した衛星搭載ライダーの主な諸元を Table 1 に示す。レーザは Ti:サファイアレーザを用い、波長を 810~820nm とした。

Table 1  
Parameter of a spaceborne  
water vapor DIAL system

Pulse energy	0.1[J]
Rep. rate	50[Hz]
Spectral purity	0.999
Altitude	460[km]
Ground velocity	7[km]
Wavelength	810~820[nm]
Aperture	1[m]
Field of view	0.1[mrad](day)
Filter band width	0.01[nm](day)
Optical transmittance	30[%](day) 50[%](night)
Quantum efficiency	50[%](APD)
Dark count	50[count/s]

エアロゾルの体積後方散乱係数は地上 3km までは Ismail et al.<sup>1)</sup> の地上視程 23km のバックグラウンドエアロゾルモデルを、3km より上は EOS Report<sup>4)</sup> のモデルを用いた。大気分子の体積後方散乱係数は U.S.標準大気<sup>2)</sup> の分子密度より計算<sup>3)</sup> により求めた。

水蒸気密度の高度分布は海洋の中緯度の冬と夏の代表値として、館野(茨城)の高層気象台における 1992年2月及び8月の21時のゾンデによる湿度と温度データから、2月は地上8kmまで、8月は地上11kmまでの水蒸気密度を求め、地上12~30kmは冬夏共に U.S.標準大気の中緯度の平均値を用いた。また低、中、高緯度の値として、HITRAN データベースから熱帯(15° N)及び中緯度(40° N)の夏冬(Fig.1)、亜寒帯(60° N)の夏冬(Fig.2)の水蒸気データも併せて用いた。

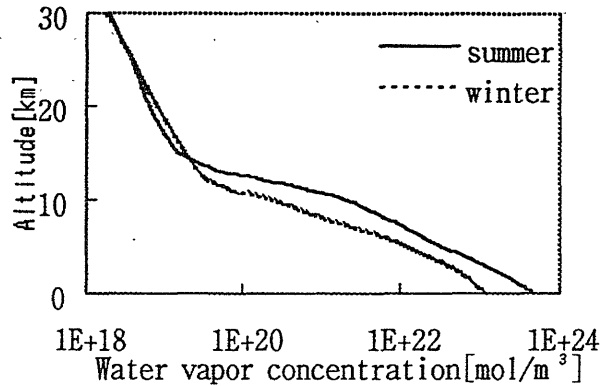


Fig.1 Model profiles plotted as a function of altitude (40° N)

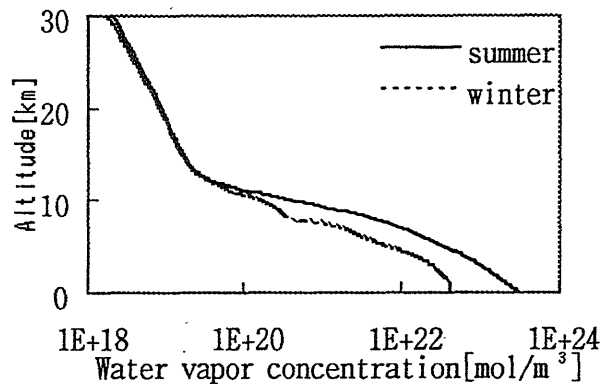


Fig.2 Model profiles plotted as a function of altitude (60° N)

## シミュレーション結果

式(1)、(2)、(3)より各水蒸気モデルを用い、水蒸気測定誤差のシミュレーションを行なった。特に断らない限りシミュレーションは夜間を想定した。

最適な吸収断面積と距離分解能の組み合わせを決定するため、式(3)で求められる測定誤差が 10% 以下となる、吸収断面積変化に対する高度範囲を求めた。尚、820nm 帯の吸収線強度が最大のものを吸収断面積の上限としてある。

Fig.3 及び Fig.4 では、それぞれの距離分解能(500m, 1000m)において誤差 10% 以下となる最高高度の限界を上曲線で、最低高度の限界を下曲線で示した。Fig.3 は館野の夏季についてシミュレートした結果である。吸収断面積  $1 \times 10^{27} \text{m}^2$ 、距離分解能 500m で地上 3km まで、吸収断面積  $4 \times 10^{27} \text{m}^2$ 、と  $2 \times 10^{26} \text{m}^2$  の 2 波長を用い分解能 1000m で 3~

11km を測定すれば、地上 0km から 11km までをカバー出来る。

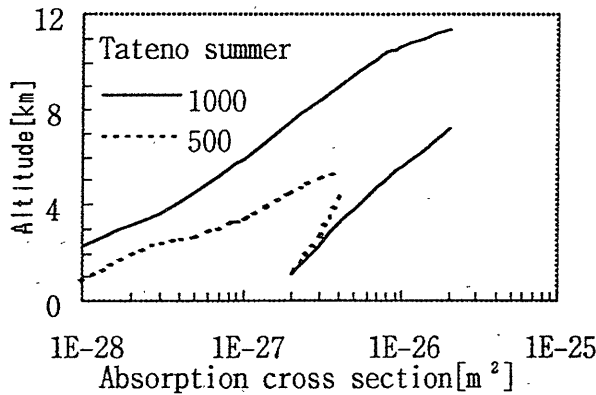


Fig. 3 Range of altitude where percent error is less than 10%

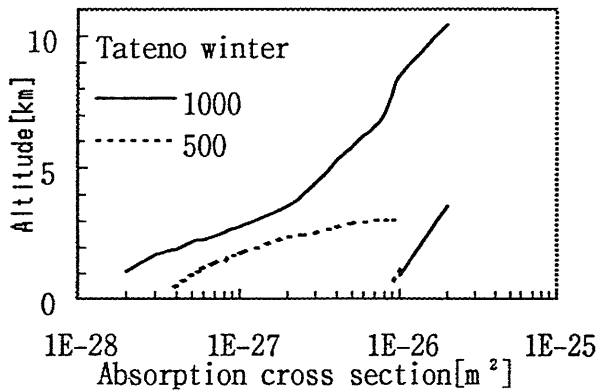


Fig. 4 Range of altitude where percent error is less than 10%

Fig. 4 は館野の冬季のシミュレート結果である。高高度まで観測するためには分解能 1000m で吸収強度の強い(吸収断面積の大きい)波長を選ぶ必要があるが、高度 4km 以下は吸収のやや弱いものを使い、高さに応じて分解能を変える必要がある。

館野の夏冬と各緯度の水蒸気データ(計 7つ)を基にシミュレートした結果から、吸収断面積と距離分解能の組み合わせのうち

- ①  $1 \times 10^{-27} \text{m}^2, 500\text{m}$
- ②  $4 \times 10^{-27} \text{m}^2, 500\text{m}$
- ③  $4 \times 10^{-27} \text{m}^2, 1000\text{m}$

④  $2 \times 10^{-26} \text{m}^2, 1000\text{m}$

から 2~3 組を選ぶことで、緯度、季節に関わらず地上 0km から最低 7.2km、最高 11.4km まで統計誤差 10%以下で測定できる事が分かった。例えば館野の夏季に於いては、上の 4 組中①、③、④を用いて高度 12km まで高精度の測定が可能となる (Fig. 5)。

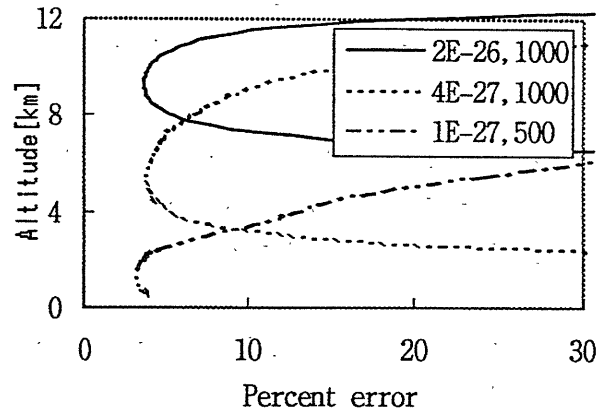


Fig. 5 Error profiles in Tateno (summer)

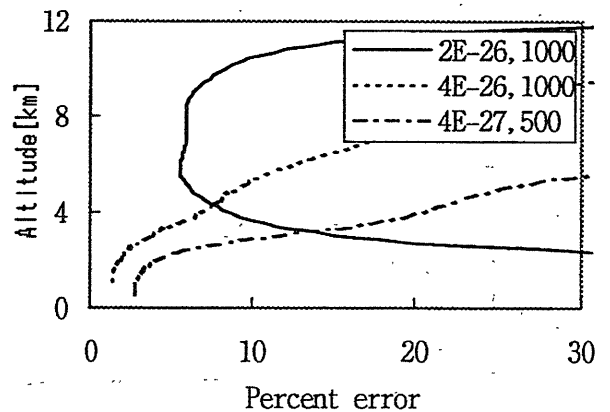


Fig. 6 Error profiles in Tateno (winter)

同じく冬季には②、③、④を選ぶことにより地上 10km まで 10%以下で測定可能となる (Fig. 6)。

Fig. 7 には吸収断面積  $4 \times 10^{-27} \text{m}^2$ 、距離分解能 1000m の時のスペクトル純度(99.00、99.90、99.99、100%)による誤差への影響を示した。純度 100%から離れるに従って誤差が大きくなるため、可能な限り純度の高いレーザー光を用いることが誤差を少なくする重要な条件であることが判る。

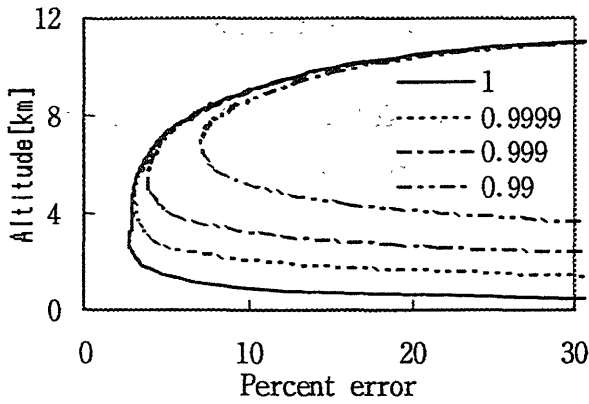


Fig.7 Influence of spectral purity

Fig.8 には吸収断面積  $4 \times 10^{-27} \text{m}^2$ 、距離分解能 1000m の時の、夜(式(2)の太陽放射 0)と昼間の異なる地表面の状態による背景光の誤差への影響を示した。グラフの数字はアルベド(地表反射率)を表し、0.3 は陸地の平均値、0.8 は雪原または雲の場合を想定したものである。地表面が水(海面など)である場合にはアルベドは 0.03 で夜間と大きな差はない。昼間の測定は、地表の状態による影響は少なく、Table 1 に示した狭い受信視野とフィルタを用いれば夜間に劣らない精度で測定可能である事が言える。

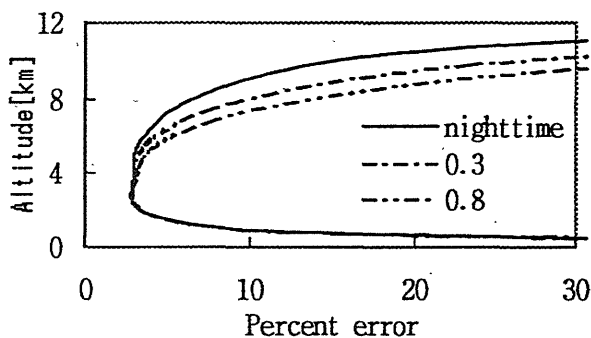


Fig.8 Error profiles operating over night and various daytime background condition

### まとめ

全地球的な水蒸気分布観測用の人工衛星に搭載するライダーシステムにおいて、吸収断面積と距離分解能の最適な組み合わせは、3ないし4つにまとめられることが判った。より高層の観測のためには 930nm 帯のより強い吸収線を用いる必要がある。

### 参考文献

- 1) S. Ismail and E. V. Browell : Airborne and spaceborne lidar measurements of watervapor profiles : a sensitivity analysis, Applied Optics, 28, 17, 3603-3614 (1989).
- 2) U.S. Standard Atmosphere (U.S. Government Printing Office.1976).
- 3) R. M. Measures : Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications. John Willey & Sons (1984).
- 4) NASA : Lidar Atmospheric Sounder and Altimeter. Earth Observing System Vol. IId. Instrumental Panel Report(1987).