

水蒸気 DIAL に用いる統計誤差に関する検討

太田 史也, 阿保 真

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

Consideration on the Statistical Error Used for Water Vapor DIAL

Fumiya OTA and Makoto ABO

Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: It is expected that the prediction accuracy of heavy rain will be improved, if the inflow of moist air is caught by the vertical distribution measurement of water vapor by the lidar and the data is assimilated to the numerical forecast system. However, statistical errors of the DIAL data have not been fully verified. In this study, the error obtained by the conventional statistical error equation was compared with the actual error by the simulation using the real data measured by the compact water vapor DIAL. It was shown that the error in the conventional statistical error equation was estimated smaller than the actual error. Then, we propose modified statistical error equation.

Key Words: DIAL, water vaper, statistical error, heavy rain

1. はじめに

気象庁のアメダスの観測データでは1時間あたり50mm以上の降水を観測した回数は10年平均で35年前と比べて1.4倍に増加しており¹⁾, 毎年のように国内では大雨による災害が発生している。

ライダーによる水蒸気の鉛直分布測定により大雨発生の原因の一つである湿った空気の流入が捉えられ, 数値予報システムへのデータ同化が可能になると大雨発生の場所や時間, 降雨量の予測精度向上が期待される。データ同化においてライダーデータを使用する際には, 誤差情報の妥当性も重要であるが, 時間的, 空間的にも濃度変化の大きい水蒸気を差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) で測定した場合の統計誤差についての検証は十分に行われていない。

本研究では小型水蒸気 DIAL で実際に測定されたデータを用いて従来の統計誤差の式で求まる誤差と, シミュレーションによって導き出された実際の誤差を比較検討した。

2. 差分吸収ライダーの原理と誤差

DIAL は吸収の強い on 波長と吸収の弱い off 波長の2波長で散乱信号を測定し, 高度 r における水蒸気濃度 $n(r)$ は次式で求める²⁾。

$$n(r) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[\frac{S_{on}(R_1)S_{off}(R_2)}{S_{on}(R_2)S_{off}(R_1)} \right] \quad (1)$$

ここで $\Delta\sigma$ は on 波長, off 波長の吸収断面積の差, ΔR は DIAL の距離分解能を表す。 $i = on, off$, $j = R_1, R_2$ とすると S_{ij} は, 受信信号強度 P_{ij} から背景光強度 B_i を引くことにより求まる。また $R_1 = r - \Delta R/2$, $R_2 = r + \Delta R/2$ となる。

S_{ij} , P_{ij} を光子数とすると DIAL の統計誤差 ε_n は各受信信号の統計誤差 ε_p と誤差の伝搬式を用いて以下の式で計算される³⁾。

$$\varepsilon_{p_{ij}}(r) = \sqrt{\frac{P_{ij}}{S_{ij}^2}} \quad (2)$$

$$\Delta n(r) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\varepsilon_{p_{ij}}(r) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{n_{ij}}(r) = \frac{\Delta n(r)}{n(r)} \quad (4)$$

3. シミュレーション

半導体レーザベースの小型水蒸気 DIAL⁴⁾によって実際に観測されたフォトンカウントデータを用いて, 統計誤差のシミュレーションを行った。使用したデータの時間分解能は1分, 距離分解能は15mである。

3.1 シミュレーションデータの作成法

off 信号には5分積算したデータをそのまま使用した。擬似 on 信号 S'_{on} は off 信号 P_{off} から背景光を引いた後, 式(5)を用いて水蒸気の吸収を付加し, 再度背景光を加算した。水蒸気濃度 $N(r)$ は気温 22°C, 相対湿度 80% に対応する値 $5 \times 10^{23} [\text{m}^{-3}]$ を高度によらず一定の値として計算した。

$$S'_{on}(r) = S_{off}(r) \exp \left[-2 \int_0^r \{ N(r) \Delta\sigma \} dr \right] \quad (5)$$

最後に off 信号, on 信号ともにポアソン雑音を加えてシミュレーションデータとした。

3.2 シミュレーション結果

作成した擬似 on 信号, off 信号から実際のデータ処理と同じように水蒸気濃度 $n(r)$ と統計誤差 ε_n を求めた。データは24時間分のデータを用い, DIAL の距離分解能 ΔR は 210m として計算した。

Fig.1(a)に横軸を式(4)で推定された統計誤差, 縦軸を設定値との誤差 $\ln(n(r)-N(r))/N(r)$ とした散布図を, Fig.1(b)に統計誤差 $\varepsilon_n = 10 \pm 0.5\%$ における設定値との誤差のヒストグラムを示す。

Fig1(b)では一定の統計誤差のデータ群の実際の誤差の分布が正規分布に従わず正方向に偏っている。

ることが確認できる. Table 1 に統計誤差毎の各信頼区間内の信頼度を示す. 信頼度の値も正規分布から外れていることがわかる.

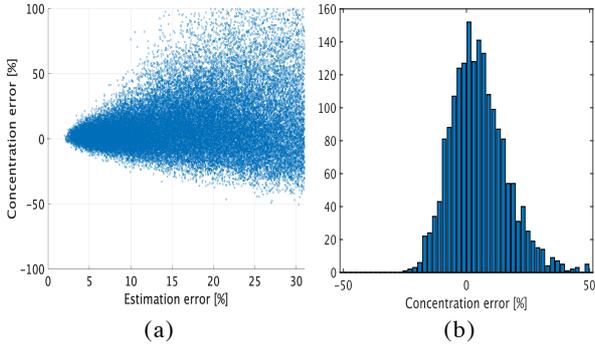


Fig.1 (a) Scatter plot of the actual error and the statistical error. (b) Histogram of actual error within $\varepsilon_n = 10 \pm 0.5\%$

Table 1 Confidence interval of probability density function in Fig.1(a)

	σ	2σ	3σ
$\varepsilon_n = 10 \pm 0.5\%$	63.3%	90.1%	97.3%
$\varepsilon_n = 20 \pm 0.5\%$	59.6%	84.4%	94.2%
$\varepsilon_n = 30 \pm 0.5\%$	62.2%	82.8%	91.7%

3.3 修正した統計誤差式の提案

実際の誤差が正規分布に従わない理由として DIAL 特有の問題が考えられる. DIAL では測定距離が遠くなるほど S_{ij} の値に大きな差が出来, 各受信信号の統計誤差 ε_p のばらつきが大きくなる. この場合誤差伝搬の二乗平均により求めた誤差と実際の誤差に大きな差が出易くなると考えられる. そこで, 最も条件の悪い誤差を重点的に評価するように統計誤差の式を以下のように修正して 3.2 と同様のシミュレーションを行った.

$$\varepsilon'_p(r) = \max[\varepsilon_{p_{ij}}(r)] \quad (6)$$

$$\Delta n'(r) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left\{ 4 \left(\varepsilon'_p(r) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{n_{ij}}'(r) = \frac{\Delta n'(r)}{n(r)} \quad (8)$$

Fig.2(a)に統計誤差と設定値との誤差の散布図を, Fig.2(b)に統計誤差 $\varepsilon_n = 10 \pm 0.5\%$ における設定値との誤差のヒストグラムを示す. Fig.1(b)と比べると正方向の分布の偏りが軽減されている. Table 2 と Table 1 を比べると従来法より正規分布に近づいていることが確認できる.

4. 観測データを用いた処理

Fig.3 にシミュレーションに用いた 2018 年 6 月 6 日に観測されたデータを用いて. 統計誤差 20% 以下の水蒸気密度分布のプロットを示す. 従来の統計誤差を基準にした結果に比べて, 不自然なデータが少なくなっている.

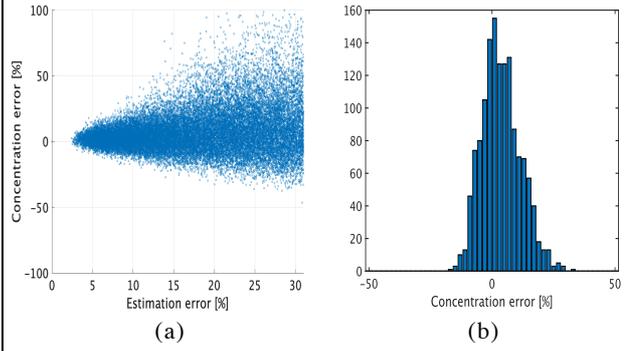


Fig.2 (a) Scatter plot of the actual error and the modified statistical error. (b) Histogram of actual error within optimized $\varepsilon'_n = 10 \pm 0.5\%$

Table 2 Confidence interval of probability density function in Fig.2(a)

	σ	2σ	3σ
$\varepsilon'_n = 10 \pm 0.5\%$	77.1%	97.3%	99.9%
$\varepsilon'_n = 20 \pm 0.5\%$	75.5%	94.6%	99.5%
$\varepsilon'_n = 30 \pm 0.5\%$	76.4%	94.9%	99.0%

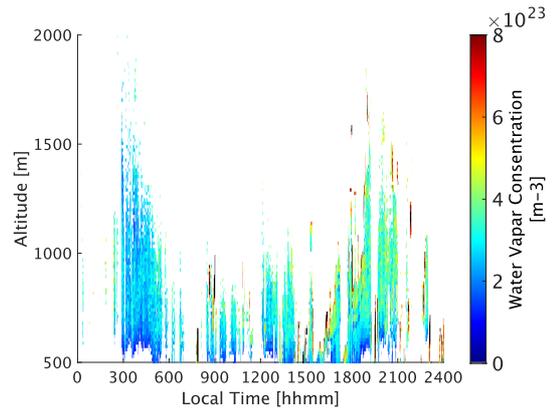


Fig.3 Example of time height distribution of water vapor concentration observed by the compact DIAL ($\varepsilon'_n \leq 20\%$).

5. まとめ

実際のデータを用いたシミュレーションにより従来の統計誤差式での誤差は, 実際の誤差よりも小さく推定されていたことがわかった. そこで統計誤差式を修正することにより実際の誤差が正規分布に近づくことが確認できた. 今回提案した方法を採用しても是正しきれていない点があるため, さらに検討を進めていく.

参考文献

- 1) 気象庁:大雨や猛暑日などのこれまでの変化 www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 2) 阿保真:計測と制御 **56** (2017) 342.
- 3) S. Ismail and E.V. Browell: Appl. Opt. **28** (1989) 3603.
- 4) M. Abo et al.:EPJ Web of Conf. **176** (2018) 04015.