

近赤外 O₂ 吸収線を利用した気温・気圧ライダー A lidar for measuring atmospheric temperature and pressure using near-infrared absorption lines of O₂

松田 景一、柴田 泰邦、長澤 親生
Keiichi MATSUDA, Yasukuni SHIBATA and Chikao NAGASAWA

首都大学東京大学院
Tokyo Metropolitan University

Abstract: A new lidar technique for measuring atmospheric O₂ density, temperature and pressure by using two O₂ absorption lines in the 1.2μm O₂ absorption band is proposed. One absorption line is insensitive to atmospheric temperature, but the other is sensitive to atmospheric temperature. Moreover, it is shown that accuracies for atmospheric O₂ density, temperature and pressure measurements can improve significantly by applying the interactive method to this lidar technique.

1.はじめに

竜巻や乱気流の発生などの突発的な気象災害の予知には対流圏の気温や気圧を精度よく測定することが重要である。また、IPCC の報告書にもあるように、近年 CO₂ 濃度の増加と相反するように、大気中の O₂ 濃度が減少していることが報告されているが報告例は少ない。大気中の O₂ 濃度や気温、気圧の空間分布を測定するには、ライダーは有力な手段となる。Schwemmer et al. (1987) は波長 760nm 付近の O₂ 吸収線を用いた気温・気圧ライダーを提案したが、この波長での O₂ の吸収強度が大きすぎることから実用化されていない。

本研究では、波長 1.27μm 付近の O₂ の吸収線で気温に敏感な吸収線と気温に鈍感な吸収線の2本の吸収線を用いたライダー測定により O₂ 濃度、気温、気圧を測定する方法を提案する。さらに測定した O₂ 濃度、気温、気圧を用い相互に反復計算することにより、大きな測定精度向上が得られることを、計算機シミュレーションにより示す。

2.ライダー信号と吸収スペクトル

ライダー受信信号 S は、

$$S = \frac{(E\lambda/hc)A\eta\beta Qc\Delta t}{2Z^2} \exp\left(-2\int_0^Z \alpha dZ\right) \quad (1)$$

で表せる。ここで、 Z は散乱体までの高度、 E はレーザーの出力エネルギー、 A は受信鏡の面積、 η は光検出器の量子効率、 β は大気の後方散乱係数、 Q は受信器の光透過率、 c は光速、 Δt は信号積算時間、 α は大気の消散係数である。また、 α は

$$\alpha = \alpha_s + N\sigma \quad (2)$$

である。ここで、 α_s は大気分子およびエアロゾルの消散係数、 N は対象分子の数密度、 σ はその吸収断面積である。

吸収断面積 σ は、波長 λ 、気温 T 、気圧 P の関数である Voigt 関数と吸収線の線強度 S_l を用いて次のように表される

$$\sigma = \sigma_0 \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-v^{*2})}{y^2 + (x - v^*)^2} dv^* \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{S_l}{\gamma_D} \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{1/2}$$

$$x = \frac{v - v_0}{\gamma_D} (\ln 2)^{1/2}, \quad y = \frac{\gamma}{\gamma_D} (\ln 2)^{1/2}$$

ここで、 v は波数、 v_0 は吸収線のピーク波数であり、 γ 、 γ_D は以下のように定義される。

γ は、気圧による吸収線の広がり幅で

$$\gamma = \gamma_{air} \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_{air}} \quad (4)$$

である。ここで、 v_{air} は $P=P_0=1[\text{atm}]$ 、 $T=T_0=296[\text{K}]$ のときの γ の値であり、 n_{air} はローレンツ幅の気温への影響を表す係数である。

γ_D は、ドップラー効果による吸収線の広がり幅で

$$\gamma_D = \frac{v_0}{c} (2k_B T \ln 2 / m)^{1/2} \quad (5)$$

である。ここで、 m は対象分子の質量、 k_B はボルツマン定数である。

線強度 S_l は、次式のように表される

$$S_l = S_{l0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \exp\left[\frac{E''hc}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (6)$$

ここで、 S_{l0} は $P=P_0=1[\text{atm}]$ 、 $T=T_0=296[\text{K}]$ のときの S_l の値であり、 E'' は下位順位のエネルギー、 h はプランク定数である。

3.吸収線の検討

先ず、Schwemmwer et al. (1987) が提案した波長 760nm 付近の O₂ 吸収帯を用いる方法と 1.27μm 付近の吸収帯を用いる方法との比較を行う。吸収断面積 σ の気温に対する変化量を次式で評価する。

$$\delta = \frac{\sigma(\lambda, P, T) - \sigma(\lambda, P, T + \Delta T)}{\sigma(\lambda, P, T)} \quad (7)$$

Eq.(7) より吸収線ごとに気温に対しての依存性を求めることができる。

Fig.1 に 760nm 付近の O₂ の透過率を示す。他の分子の影響として水蒸気の吸収による影響が考えられるが、この付近では水蒸気の吸収は無視できる。760nm 付近の O₂ 吸収線について Eq.(7) を用いて気温差 $\Delta T=1K$ に対する吸収断面積の変化率 δ を計算した結果 764nm 付近では気温に対する変化率が小さい吸収線があることがわかった。しかし、Fig.1 より 764nm 付近は透過率が非常に大きく受信信号が小さくなるため、差分吸収法による長距離の測定が困難であるということがわかる。

次に、1.27μm 付近の O₂ 吸収線を用いて測定を行うことを検討する。Fig.2 に O₂ と H₂O の透過率をそれぞれ示す。Fig.2 より 760nm 付近の O₂ 吸収線に比べ透過率が小さく長距離の測定が可能であることがわかる。Fig.3 に 1270nm 付近の O₂ 吸収線についての Eq.(7) を用いて気温差 $\Delta T=1K$ に吸収断面積の変化率 δ を示す。Fig.3 より 1269nm 付近では気温に対する変化率が小さい吸収線がある。これらの結果より、O₂ 密度の測定には水蒸気などの他の分子の吸収の影響が少なく気温に対する吸収断面積の変化率が小さいピーク波長 1269.0675nm の吸収線を用いて、また気温と気圧の測定にはその吸収線の付近で比較的気温に対する吸収断面積の変化率が大きいピーク波長 1268.6835nm の吸収線を用いて測定を行うことを提案する。

4.測定方法

4.1 O₂ 密度測定方法

Eq.(1),(2)を吸収の強い波長と吸収の弱い波長それぞれに対する受信信号 P_{on} 、 P_{off} の比をとり、O₂ 密度 N を導くと次式が得られる。

$$N = \frac{1}{2\Delta\sigma} \left[\frac{d}{dZ} \left\{ \ln\left(\frac{P_{off}}{P_{on}}\right) - \ln\left(\frac{\beta_{off}}{\beta_{on}}\right) \right\} + \alpha_{s_{off}} - \alpha_{s_{on}} \right] \quad (8)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は on 波長と off 波長の吸収断面積の差であり

$$\Delta\sigma = \sigma_{on} - \sigma_{off} \quad (9)$$

である。

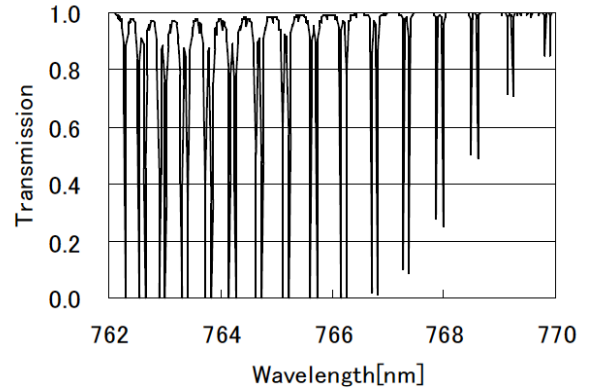


Fig.1 Transmission of O₂ in 760nm absorption band (HITRAN).

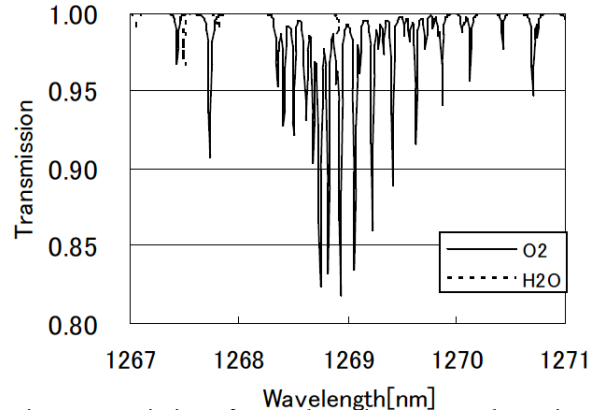


Fig.2 Transmission of O₂ and H₂O in 1270nm absorption band (HITRAN).

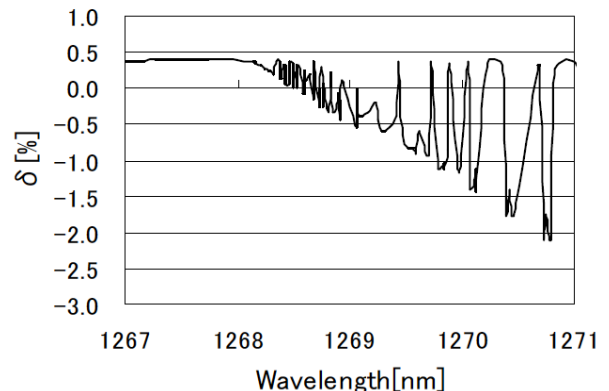


Fig.3 Calculated result of change rate of absorption cross section for $\Delta T=1K$ in 1270nm absorption band.

Eq.(7) により気温差 ΔT に対する吸収断面積の変化率の小さい吸収線を用いて Eq.(8)により O_2 密度が求まる。

4.2 気温測定方法

気温測定には、気温に対する吸収断面積の変化率の大きな吸収線を用いる。また、Fig.4 に示すように吸収スペクトルには気圧の変化に対して吸収強度の変化が鈍感な波長が存在する。この波長を用いることで気圧の変化に対する気温測定の誤差を小さくすることができる。気温測定は気圧の依存性が低い波長と吸収率の低い波長のライダー受信信号を比較することにより気温を測定する。

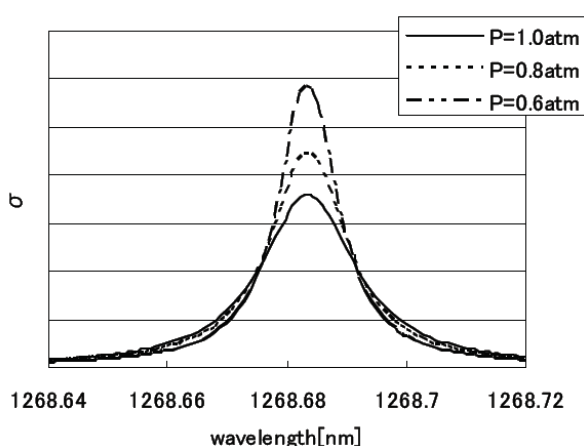


Fig.4 Spectra of O_2 absorption line.

4.3 気圧測定方法

気圧測定には、気温に対する吸収断面積の変化率の大きな吸収線のピーク波長を用いて気温測定と同様の方法で行う。

Fig.5 に O_2 密度、気温、気圧の測定に用いる波長 λ_n 、 λ_t 、 λ_p および off 波長の関係を模式的に示す。また、Table.1 に各波長の特性を示す。

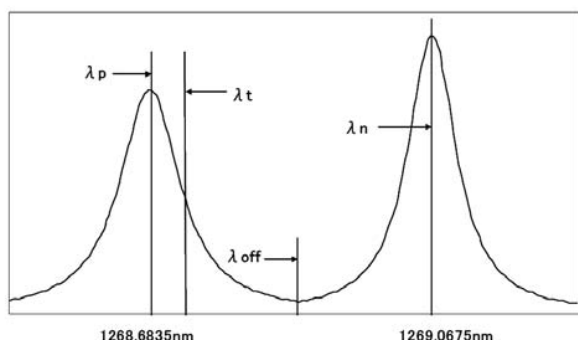


Fig.5 Relation between absorption spectra of O_2 and laser lines. λ_n : density, λ_t : temperature, λ_p : pressure and λ_{off} : off-line.

Table 1 Characteristics of wavelength

Wavelength	Characteristic
λ_N	Insensitive to temperature and sensitive to pressure
λ_T	Insensitive to pressure and sensitive to temperature
λ_P	Sensitive to temperature and pressure
λ_{off}	Insensitive to temperature and pressure

5.反復計算

吸収スペクトルの形状は、同時に密度、気温、気圧の影響を受ける。したがって、 O_2 密度、気温、気圧の鉛直分布の測定をそれぞれ行う際には他の要素の鉛直分布を仮定するか、または他で測定した値を用いる必要がある。また、その測定に用いる鉛直分布と実際の大気鉛直分布との差が測定値に影響を及ぼす。そこで、測定結果を用いて繰り返し反復計算を行うことにより、測定精度を上げることが可能である。

具体的な測定の流れを Fig.6 に示す。

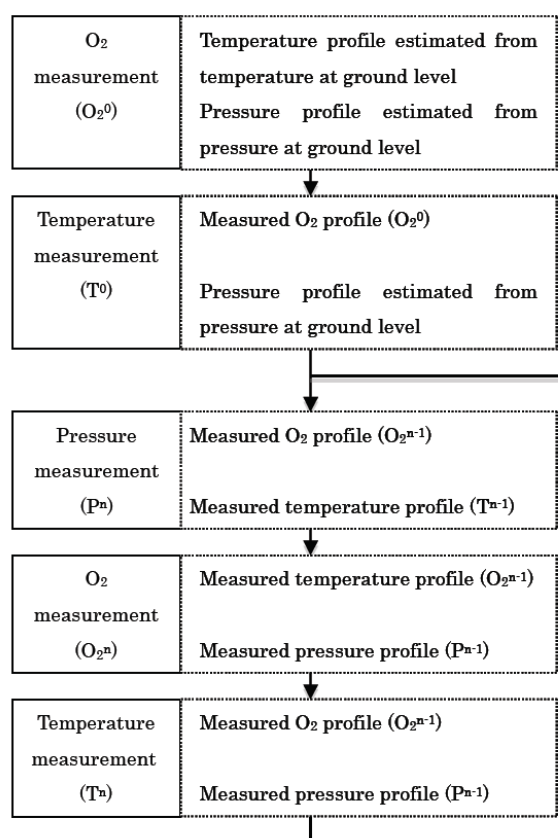


Fig.6 Algorithm of the Iterative method.

実際の測定では各高度の気温、気圧は、未知であるが、地上の気温、気圧に静水圧仮定を適用して仮の気温、気圧分布を利用することから測定を開始する。この気温と気圧を用いて、 O_2 密度を測定する。その密度を用いて、気温、気圧を測定する。この操作を繰り返すことにより測定精度を向上させる。

6. 計算機シミュレーションによる検証

上記の反復計算の方法で O_2 密度、気温、気圧をどの程度精度よく測定することができるかを計算機シミュレーションにより検証した。

まず、モデル大気(真値)として、2006年に茨城県館野でラジオゾンデにより得られたある日の気温と気圧の観測データを用いた。 O_2 密度は、一定の混合比を仮定した。

本計算では、ライダーの受信信号の統計的な揺らぎによるランダム誤差や測定装置の精度に起因するシステム誤差は考慮しない。

まず真値から各高度のスペクトルを計算し、 O_2 密度を測定する。その密度を用いて、気温、気圧を測定する。シミュレーションで得られた観測値と各高度での真値との差を測定誤差 ϵ とする。Fig. 7, 8, 9 に O_2 密度、気温、気圧の測定誤差 ϵ_N 、 ϵ_T 、 ϵ_p をそれぞれ示す。Fig. 7 の O_2 密度のシミュレーション結果より、シミュレーションによる測定では ϵ_N が 1% 以上となったが、反復計算を数回行うことでほぼ真値と一致した。また、Fig. 8 および Fig. 9 の ϵ_T および ϵ_p のシミュレーション結果も同様に反復計算を行うことで真値とほぼ一致した。以上のシミュレーション結果より、反復計算を行うことで測定精度の向上が得られるという結果となった。

7. まとめ

本研究では、まず、ライダーによる $1.27\mu\text{m}$ 付近の O_2 吸収線を利用して、吸収断面積の変化率の異なる吸収線を用いて O_2 密度、気温、気圧を測定する方法を提案した。次に、測定した結果を用いて繰返し反復計算を行うことによって、 O_2 密度、気温、気圧を高精度で測定することが可能なことを、実際の $1.27\mu\text{m}$ 付近の O_2 吸収線を用いた計算機シミュレーションによって示した。

今後、レーザー散乱光の統計的な揺らぎによるランダム誤差や測定装置の精度に起因するシステム誤差を考慮した総合的な検証を実験的に行う予定である。

参考文献

- [1] Geary K. Schwemmer et al, Review of Scientific Instruments, 58, 1987, 2226-2237.
- [2] Jeremy Dobler et al, 24th ILRC, 2008, 23-27.
- [3] Syed Ismail and Edward V. Browell, Applied Optics, 28, 1989, 3603-3615.

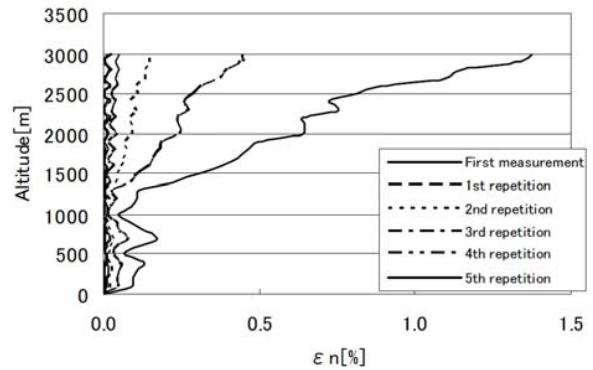


Fig.7 Error profiles for the O_2 density measurement in 1270nm absorption band.

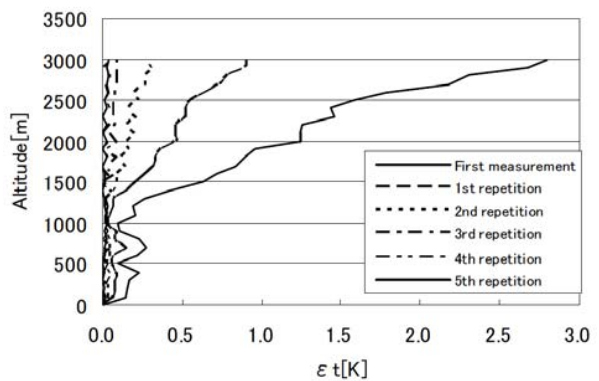


Fig.8 Error profiles for the atmospheric temperature measurement in 1270nm absorption band.

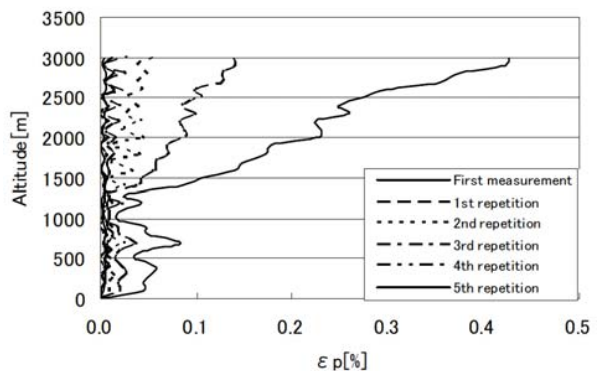


Fig.9 Error profiles for the atmospheric pressure measurement in 1270nm absorption band