

近赤外 O₂ 吸収線を利用した気温・気圧測定ライダー (2) A lidar for measuring atmospheric temperature and pressure using near-infrared absorption lines of O₂ (2)

松田 景一、長澤 親生、柴田 泰邦、阿保 真

Keiichi MATSUDA, Chikao NAGASAWA, Yasukuni SHIBATA and Makoto ABO

首都大学東京大学院

Tokyo Metropolitan University

Abstract: In previous LSS, we reported a temperature/pressure lidar using 1.27 μ m absorption lines of O₂. In spite of advantage of better quantum efficiency and less contamination from absorption lines of other species, the temperature/pressure lidar using 760nm absorption lines of O₂ has been excluded from the subject of the study, because the absorption cross sections of their lines are sensitive to temperature. In this paper, we find out more optimal lines in the 760nm absorption band than 1.27 μ m absorption lines of O₂ for the temperature/pressure lidar. The procedure selecting the optimal wavelength in the 760nm band and the results of error analysis of the temperature/pressure lidar using 760nm absorption lines of O₂ are reported.

1. はじめに

前回の本シンポジウムで、波長 1.27 μ m 付近の O₂ の吸収線を利用した O₂ 濃度、気温、気圧を測定し、反復計算を用いて測定精度を向上させることのできる差分吸収ライダー(DIAL)を提案した。その検討の過程で、もう一つの測定波長の候補となる 760nm 付近の O₂ の吸収線を利用すると、受光デバイスの量子効率や他の分子の吸収の影響が少ないなど、波長 1.27 μ m 帯の吸収線を利用したものよりも有利な点が多いものの、DIAL で分子濃度を測定する場合の一般的な指針である気温に鈍感な波長を採用すると、透過率が小さすぎることから DIAL による長距離の測定には適さないことから、波長 760nm の利用を排除した。

今回、反復計算を用いて測定精度を向上させる手法を更に吟味した結果、吸収線の収束条件を少しだけ緩めることで、波長 760nm 付近の気温に敏感であるが比較的透過率の大きい O₂ 吸収線が利用できることが分かった。本研究では、760nm 付近の最適吸収線の選択方法と実際の測定に則したライダーの受信信号のランダム誤差や発振レーザーの同調誤差やレーザースペクトル広がりを考慮した測定精度を計算機シミュレーションにより検証し、760nm 付近の O₂ の吸収線を利用した高精度の O₂ 濃度、気温、気圧測定ライダーの有用性を示した。

2. 760nm 付近の O₂ の吸収線の検討

Fig.1 に 760nm 付近の O₂ の透過率を示す。また、Fig.2 に 760nm 付近の O₂ 吸収線についての気温差 $\Delta T=1K$ に吸収断面積の変化率 δ を示す。O₂ の濃度を測定する吸収線は気温に鈍感な吸収線を用いて測定を行うことが望ましいが、Fig.1,2 より気温に鈍感な波長 764nm 付近の O₂ 吸収線は透過率が小さすぎることから差分吸収法による長距離の測定が適していない。そこで、波長 770nm 付近の気温に敏感であるが比較的透過率の大きい吸収線を用いて測定する方法を検討した。

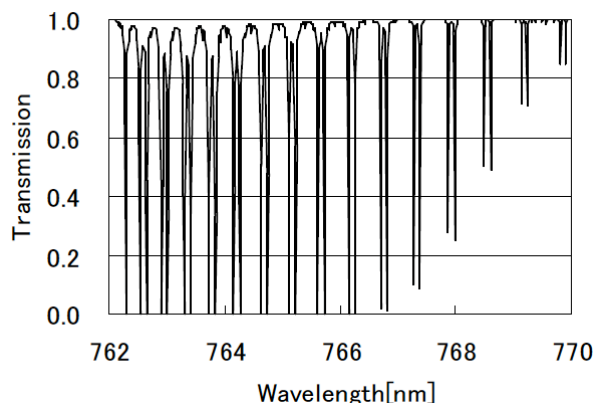


Fig.1 Transmission of O₂ in 760nm absorption band (HITRAN).

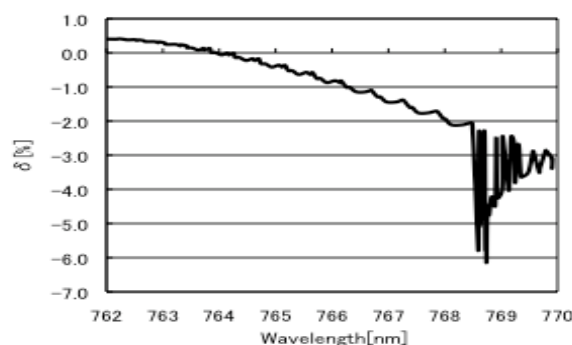


Fig.2 Calculated result of change rate of absorption cross section for $\Delta T=1K$ in 760nm absorption band.

3. 反復計算の収束条件

吸収スペクトルは、濃度、気温、気圧に依存する。したがって、O₂ 濃度、気温、気圧の鉛直分布測定を各々行う際には、他の要素の鉛直分布を仮定する必要があり、その鉛直分布と実際の大気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。反復計算を用いて測定精

度を向上させるためには、再計算する前と後で測定誤差が小さくならなくてはならない。

波長 λ での吸収断面積 σ の気温 T と気圧 P に対する変化率を次式で評価する。

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial T} = \frac{\sigma(\lambda, P, T) - \sigma(\lambda, P, T + \Delta T)}{\Delta T \cdot \sigma(\lambda, P, T)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial P} = \frac{\sigma(\lambda, P, T) - \sigma(\lambda, P + \Delta P, T)}{\Delta P \cdot \sigma(\lambda, P, T)} \quad (2)$$

各測定誤差の相互関係を気温および気圧の変化率を用いて次式に近似する。

$$\begin{aligned} N \cdot \sigma(T, P, \lambda) &= (N + \Delta N) \cdot \sigma(T + \Delta T, P + \Delta P, \lambda) \\ &\approx (N + \Delta N) \cdot \left(\sigma(T, P, \lambda) + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \sigma(T, P, \lambda) \cdot \Delta T \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \sigma}{\partial P} \cdot \sigma(T, P, \lambda) \cdot \Delta P \right) \end{aligned} \quad (3)$$

各波長での測定誤差を Eq.(3) で表し、気温の測定誤差 ΔT で解くと次式が得られる。

$$\Delta T_n = \frac{1}{\frac{\partial \sigma(\lambda_r)}{\partial T}} \left\{ \frac{\partial \sigma(\lambda_n)}{\partial T} + \frac{\partial \sigma(\lambda_n)}{\partial P} \left(\frac{\partial \sigma(\lambda_r)}{\partial T} - \frac{\partial \sigma(\lambda_r)}{\partial T} \right) \right\} \cdot \Delta T_{n-1} \quad (4)$$

したがって収束条件は次式となる。

$$\left| \frac{\Delta T_n}{\Delta T_{n-1}} \right| = \left| \frac{1}{\frac{\partial \sigma(\lambda_r)}{\partial T}} \left\{ \frac{\partial \sigma(\lambda_n)}{\partial T} + \frac{\partial \sigma(\lambda_n)}{\partial P} \left(\frac{\partial \sigma(\lambda_r)}{\partial T} - \frac{\partial \sigma(\lambda_r)}{\partial T} \right) \right\} \right| < 1 \quad (5)$$

上式の収束条件を満たすように吸収線を選択することで濃度の測定に気温に鈍感な吸収線を用いなくても反復計算により精度向上が得られることがわかった。

4. 吸収線の決定

前章で述べた収束条件を満たすように吸収線を選択することで気温に鈍感な吸収線を用いなくても反復計算による精度向上が得られる。したがって、波長 770nm 付近の気温に敏感であるが比較透過率の大きい吸収線を用いての測定が可能である。この結果より、 O_2 濃度の測定にはピーク波長 768.4870nm の吸収線を用いて、また気温と気圧の測定にはピーク波長 769.1295nm の吸収線を用いて測定を行うことを提案する。

5. ランダム誤差に起因する測定誤差

ライダーの受信信号の揺らぎによるランダム誤差を考慮し、上記の反復計算の方法で O_2 濃度、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。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真値とした。この真値から静水圧仮定により大気密度を求め O_2 の混合比を 0.209 として O_2 密度分布の真値を設定した。

Table.1 Specifications of the lidar system

Pulse energy	200mJ
Repetition	100Hz
Telescope Diameter	60cm
Range resolution	500m
Measurement time	30min

シミュレーションで得られた結果と真値との差を測定誤差 ε とする。この ε は Table.1 から算出した統計誤差を含んでいる。Fig.3,4 に、気温の測定誤差 ε_T をおよび気圧の測定誤差 ε_P をそれぞれ示す。Fig.3 の気温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。上記のライダーシステムのスペックでは、気温は 5km まで 1K 以下、気圧は 0.3% 以下の精度で測定できることがわかった。

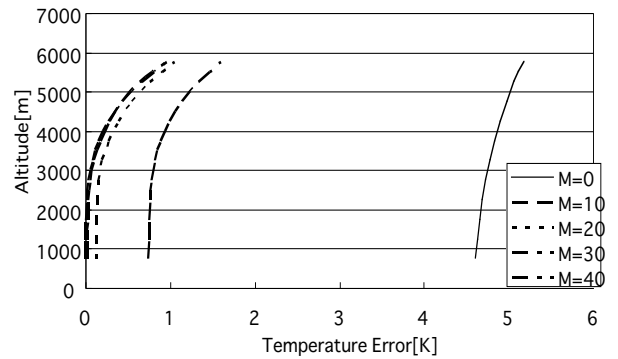


Fig.3 Error profiles for the atmospheric temperature measurement in 760nm absorption band caused by random error.

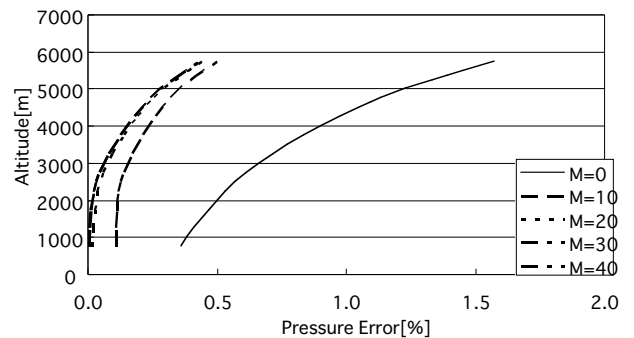


Fig.4 Error profiles for the atmospheric pressure measurement in 760nm absorption band caused by random error.

6. 発振レーザーの同調誤差に起因する測定誤差

6.1 計算機シミュレーションによる検証

実際に送信レーザー光を吸収線に同調する場合、数十 MHz 程度の誤差が発生する。そのため、吸収断面積はその変動分に応じて微小であるが変化し、その変化が測定に影響を及ぼす。Fig.5,6 に、発振レーザーの同調誤差を 10MHz から 50MHz に設定した場合の気温の測定誤差 ϵ_T および気圧の測定誤差 ϵ_P の計算機シミュレーション結果をそれぞれ示す。

Fig.6 より、同調誤差が 10MHz でも気圧の測定誤差が 1%以上となることがわかる。これは、気温を測定する波長が吸収線の気圧に鈍感であるエッジの部分を用いているため、吸収断面積の変動分が大きく、反復計算してもその影響は抑えられない。

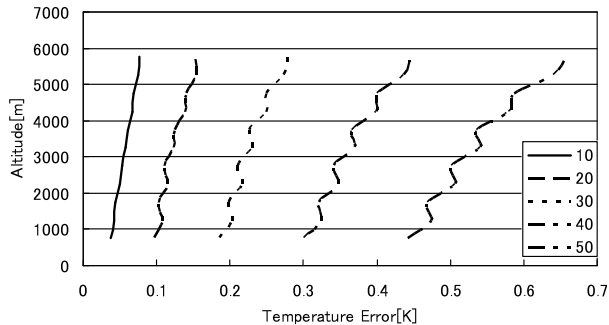


Fig.5 Error profiles for the atmospheric temperature measurement in 760nm absorption band caused by tuning error.

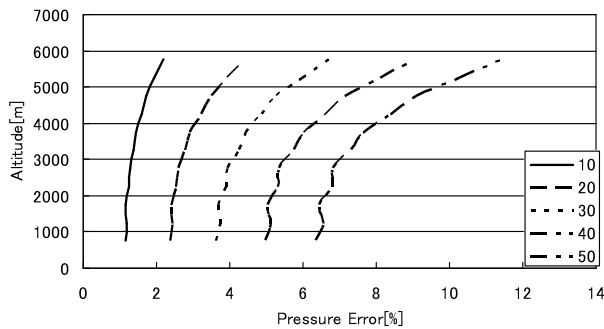


Fig.6 Error profiles for the atmospheric pressure measurement in 760nm absorption band caused by tuning error.

6.2 同調誤差に起因する測定誤差の高精度化

気温測定波長が吸収線のエッジの部分であるため、測定誤差に大きく影響を及ぼしている。この影響を低減させるために、Fig.7 に示すように気圧に鈍感な2波長を用いて気温を測定する方法を提案する。もう対照的な2波長を用いることにより、吸収断面積の変動を補正することができ、同調誤差に起因する測定誤差を小さくすることができる。

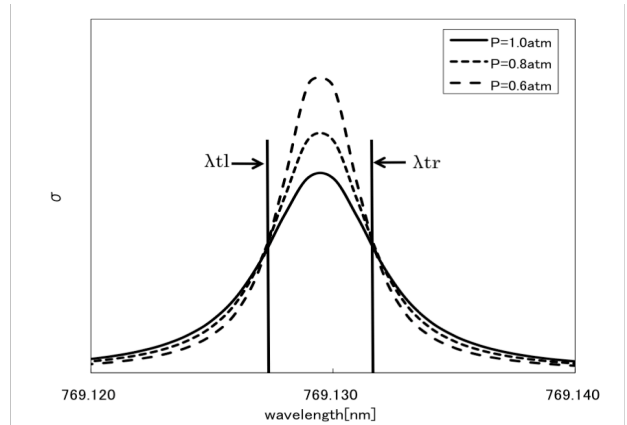


Fig.7 Spectra of O₂ absorption line.

Fig.8 に、両方の気圧に鈍感な波長を用いて気温を測定した場合の同調誤差に起因する気圧の測定誤差 ϵ_P の計算機シミュレーション結果を示す。

Fig.8 より、両方の気圧に鈍感な波長を用いて気温を測定することで測定精度を上げることができるとがわかった。

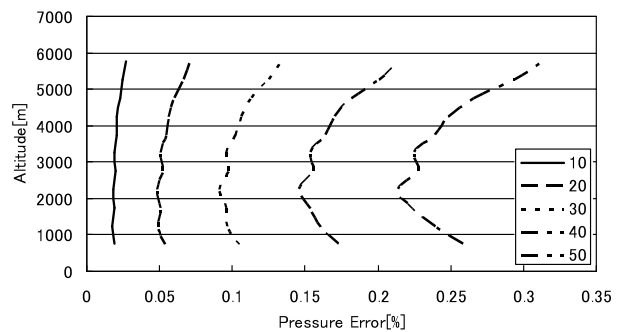


Fig.8 Error profiles for the atmospheric pressure measurement in 760nm absorption band caused by tuning error.

7. レーザースペクトル広がり を考慮した誤差

レーザーのスペクトルは、発振波長を中心 to 有限の幅を持つ。したがって、吸収断面積の値はレーザーのスペクトルの広がり を考慮した吸収断面積の実効値を考慮する必要がある。このときの吸収断面積の実効値 σ_{eff} は次式で与えられる

$$\sigma_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\nu) f(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} f(\nu) d\nu} \quad (6)$$

Fig.9,10 に、上式を用いて半値幅 0 から 3000MHz としたときの吸収断面積の実効値を用いてレーザー スペクトル広がり を考慮した場合の気温の測定誤差 ϵ_T をおよび気圧の測定誤差 ϵ_P の計算機シミュレーション結果をそれぞれ示す。Fig.9,10 の計算機シミュレーションは発振レーザーの同調誤差を 20MHz とし、ランダム誤差を無視した場合の高度 6km の測定誤差を示している。Fig.9 より気温の測定誤差はレーザーのスペクトル幅が広がるにつれて測定誤差は小さくなっていることがわかった。Fig.10 より気圧の測定誤差はスペクトル幅が広がるにつれて僅かに大きくなっていることがわかった。

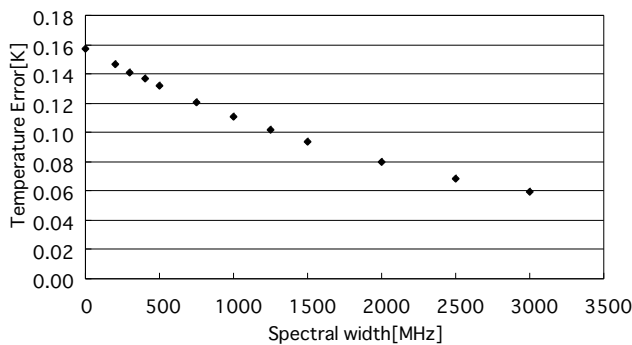


Fig.9 Error profiles for the atmospheric temperature measurement in 760nm absorption band caused by tuning error and spectral width at 6km altitude.

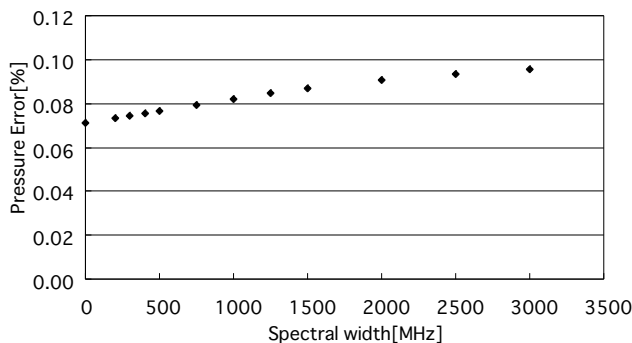


Fig.10 Error profiles for the atmospheric pressure measurement in 760nm absorption band caused by tuning error and spectral width at 6km altitude.

8. まとめ

O₂ 吸収線を利用した気温/気圧測定 DIAL において、波長 760nm 付近の O₂ 吸収線は受光デバイスの量子効率や他の分子の吸収の影響が少ないなど、波長 1.27 μm 付近の O₂ 吸収線より測定に有利であるが、気温に鈍感な波長 760nm 付近の O₂ 吸収線は透過率が小さすぎることから DIAL による長距離の測定には適さないことから、波長 1.27 μm 付近の O₂ 吸収線を利用した DIAL が提案されて来た。

本研究において、反復計算を用いて測定精度を向上させる手法を更に吟味した結果、吸収線の収束条件を少しだけ緩めることで、波長 760nm 付近の気温に敏感であるが比較的透過率の大きい吸収線を用いての測定が可能であることがわかった。

更に、本研究では波長 760nm を利用した気温/気圧測定 DIAL において、より実際に則した誤差解析を行うために、受信信号のランダム誤差やレーザーの同調誤差やレーザー スペクトル広がり を考慮した測定精度を計算機シミュレーションにより行なった。その結果、高度 5km まで、気温は 1K 以下、気圧は 0.3% 以下の精度で測定できることがわかった。吸収スペクトルの両エッジの気圧に鈍感な波長を用いて気温を測定することによって同調誤差に起因する測定誤差を片方の場合より高精度に測定することができるとわかった。気温の測定誤差はレーザーのスペクトル幅が広がるにつれて測定誤差は小さくなるが、気圧の測定誤差はレーザーのスペクトル幅が広がるにつれて僅かに大きくなることわかった。この結果は、ライダーのシステムの大きさにも依存するのでこの点は講演で詳細に述べる。

以上の結果より、760nm 付近の O₂ の吸収線を利用した高精度の O₂ 濃度、気温、気圧測定 DIAL が実現可能なことがわかった。

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.