

1.6 $\mu\text{mCO}_2$ -DIAL の気温・気圧同時測定による高精度化の研究Studies on high accurate measurement of  $\text{CO}_2$  density, temperature and pressure profiles from 1.6 $\mu\text{m}$  DIAL returns

長澤親生、大城雄一、柴田泰邦、阿保 真

Chikao Nagasawa, Yuichi Oshiro, Yasukuni Shibata, Makoto Abo

首都大学東京大学院

Tokyo Metropolitan University

Abstract: We proposed a high accuracy  $\text{CO}_2$ -DIAL method which measures  $\text{CO}_2$  density, the atmospheric pressure and temperature using  $\text{CO}_2$  absorption lines in the near infrared region, and applies the iterative method. We estimate measurement accuracy in consideration of the tuning accuracy and the laser linewidth by computer simulation. It is found out that there is the optimal laser linewidth to minimize the density error. Moreover, we perform the iterative calculation including random error, and estimate the tuning accuracy and laser linewidth required for the high accuracy  $\text{CO}_2$ -DIAL. Also we compare between absorption line models provided by Voigt profile and that provided by Galatry profile.

## 1. はじめに

我々は、2007年に波長 1.57 $\mu\text{m}$  帯  $\text{CO}_2$  吸収線を利用した DIAL (差分吸収ライダー) によって、 $\text{CO}_2$  濃度垂直分布測定に成功したが、さらに高精度での測定を目指している [1]。

前回、我々は従来の DIAL を用いた密度測定に加えて、気圧に対して吸収強度が鈍感な波長 ( $\lambda_T$ ) を使用した気温測定と、気圧に敏感な吸収線の中心波長 ( $\lambda_p$ ) を用いた気圧測定を同時に行い、それらの値を用いて反復計算をすることで密度測定精度を向上させる手法を提案した[2]。

今回は、前回未検討課題であったレーザーの波長幅および同調精度に起因する誤差の検討を行い、必要となる同調精度を決定した。また、 $\text{CO}_2$  吸収線の pressure shift に起因する誤差の検討および、Voigt 関数と Galatry 関数で与えられる各吸収スペクトルモデルの比較を行った。

## 2. 吸収断面積の実効値

Fig.1 に本研究で用いる密度、気温、気圧測定波長を示す。気温・気圧測定には同じ吸収線を使用し、気温測定波長は、気圧測定波長( $\lambda_p$ )から 10[pm]程度ずれたウイングの波長を用いる。

今回は、計算を容易にするために、レーザー線幅をデルタ関数とみなして反復計算のシミュレーションを行った。しかし、現実的に得られるスペクトルは Fig.2 のように、発振波長を中心に有限の幅を持つ。そのため、DIAL で使用する吸収断面積の値は実際のレーザスペクトルを考慮した吸収断面積の実効値を考慮する。このとき吸収断面積の実効値  $\sigma_{eff}$  は次式で表される。

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

$\nu$  は波数、 $\sigma(\nu)$  は吸収断面積、 $f(\nu)$  はレーザーのスペクトル波形であり、本研究ではローレンツ型と仮定する。Fig.3 に線幅を 200MHz、300MHz、400MHz としたときの、密度測定波長における吸収断面積と吸収断面積の実効値との差を示す。高度が高くなるにつれて、吸収断面積の実効値と吸収断面積の差は大きくなるのがわかる。また、線幅が大きくなると、その差は大きくなるのがわかる。

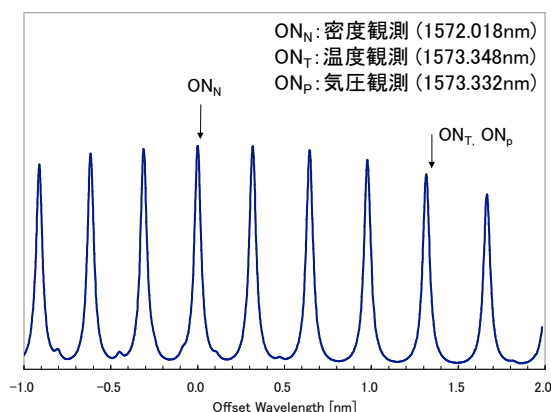


Fig.1 Wavelength used for the measurement of density, temperature and pressure

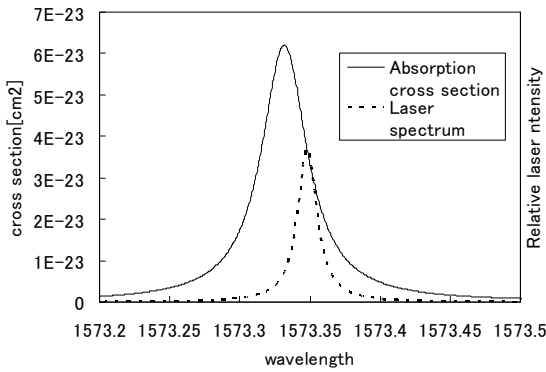


Fig.2 Laser spectrum

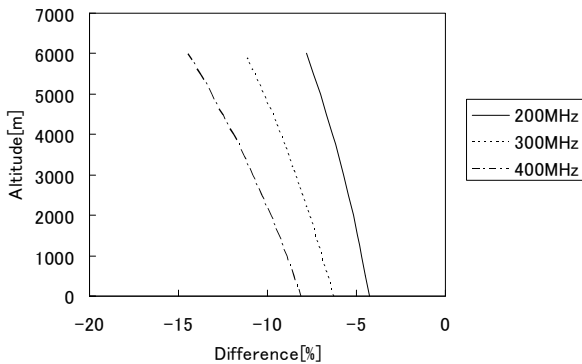


Fig.3 Difference of  $\sigma$  and  $\sigma_{eff}$

### 3. 同調精度

Fig.4 に同調精度の図を示す。実際の測定において DIAL で使用するレーザーを測定に必要な吸収スペクトルの位置に同調させる場合、同調誤差 ( $\Delta f$ ) が発生する。そのため、吸収断面積はその変動分に応じて  $\Delta\sigma$  だけ変化する。特に、気温測定で用いる波長には、吸収スペクトルのウイング波長を用いるため、僅かなレーザー波長のずれが気温測定精度に影響し、それが密度精度にも影響する。

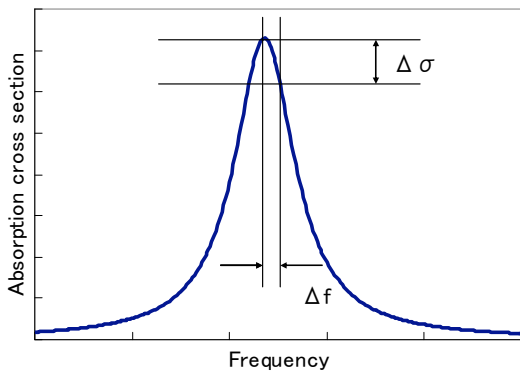


Fig.4 Tuning error

### 4. 同調精度に起因する密度誤差

Fig.5 にレーザー線幅を 200MHz (FWHM) とし

たときの同調精度に起因する密度誤差を示す。同調精度が 10MHz のとき、それに起因する密度誤差は 0.5% であり、20MHz のときは 1% 程度である。これより、同調精度が 2 倍になれば密度誤差も 2 倍になることがわかる。

Fig.6 に同調精度 10MHz としたときの高度 6km における密度誤差を示す。横軸はレーザー線幅である。線幅を考慮することで、同調精度は向上していることがわかる。また、レーザー線幅が 1.2GHz 付近で密度誤差が最小になっている。

Table.1 に本研究で仮定したシステムパラメータを、Fig.7 にランダム誤差を含めた同調精度 2MHz としたときの高度 6km における密度誤差を示す。ランダム誤差に起因する密度、気温、気圧誤差は Table.1 のシステムパラメータから見積もる。Fig.7 より、ランダム誤差を考慮することで、レーザー線幅が 200MHz 程度の際に密度誤差が最小になることが確認できる。

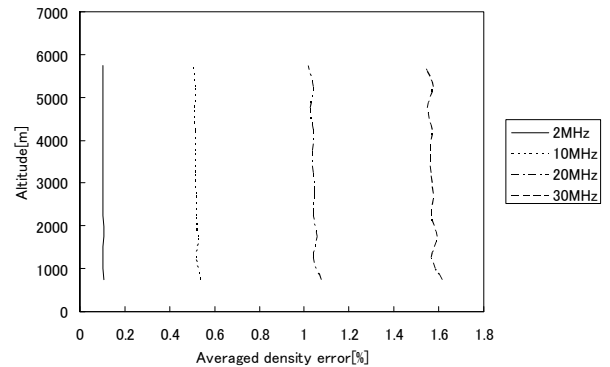


Fig.5 Averaged density error caused by tuning error

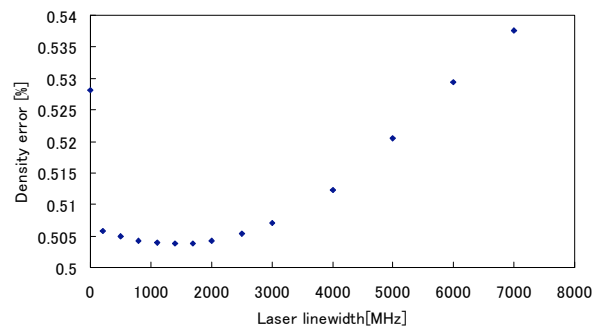


Fig.6 Averaged density error for  $\Delta f = 10\text{MHz}$  at 6km altitude

Table.1 Assumed system parameter of CO<sub>2</sub> DIAL

Energy	50mJ/pulse
Repetition rate	100Hz(5 pairs)
Quantum efficiency	5%
Receiver diameter	80cm
Total efficiency	60%
Altitude resolution	500m

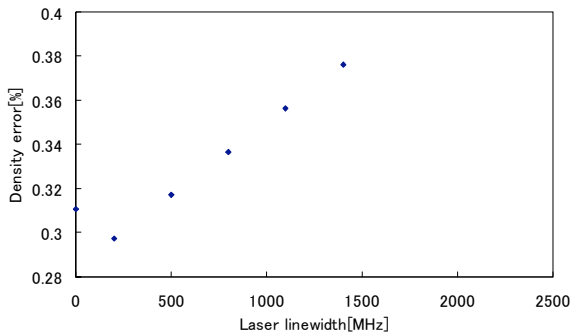


Fig.7 Averaged density error for  $\Delta f = 2\text{MHz}$  at 6km altitude included random error.

#### 4. Pressure shift

スペクトルの中心波長は圧力によって変化する。HITRAN2008には圧力シフト係数が記載されている。また、Predoi-Cross et al.(2009)は圧力シフトの気温依存係数の測定も行っている[3]。Fig.8に密度測定に用いる吸収線と気温・気圧測定に用いる吸収線での各高度における圧力シフトの大きさを示す。地表から上層に向かうにつれて圧力シフトの大きさは小さくなるのがわかる。

圧力シフトにより吸収断面積の実効値が変動するが、吸収断面積を求める際に圧力シフトの値を考慮することで補正が可能となる。仮に圧力シフト係数の不確定性が限りなく小さければ、本研究の反復計算を用いることで、圧力シフトによる誤差も小さくすることができる。しかし、実際には不確定性が存在するため、それが誤差要因となる。本研究では HITRAN2008 に記載されている圧力シフト係数を用いて、圧力シフトに起因する密度誤差を見積もる。

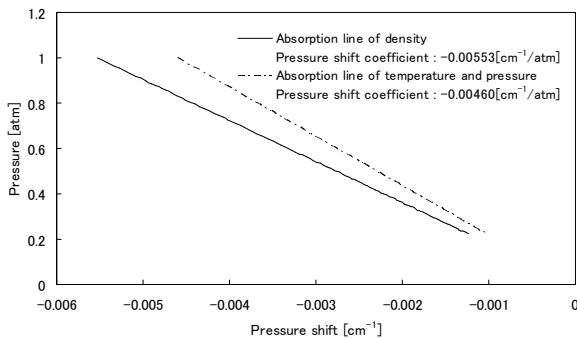


Fig.8 Pressure shifts for the absorption lines used in density, temperature and pressure measurements

#### 5. Pressure shift に起因する密度誤差

Fig.9 に圧力シフト係数の不確定性を 10%としたときの高度 6km における密度誤差を示す。Fig.6 の同調精度の結果同様、密度誤差が最も小さくなるレーザー線幅が存在することがわかる。レーザー線幅が 3GHz 程度で密度誤差が最小になり、その後、密度誤差が大きくなっていることが確認できる。

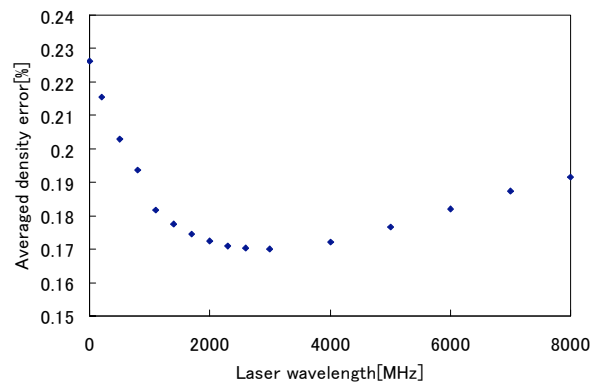


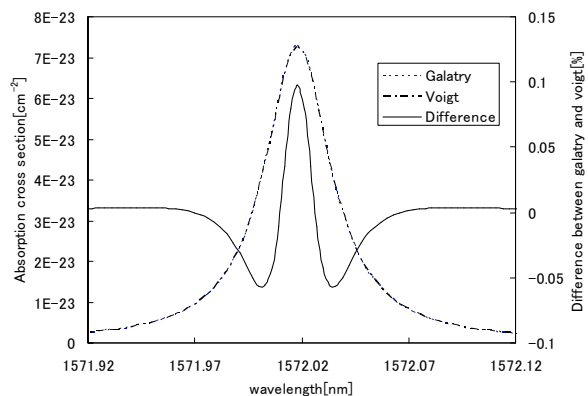
Fig.9 Averaged density error for uncertainty of pressure shift coefficient = 10% at 6km altitude

#### 6. Galatry 関数[3]

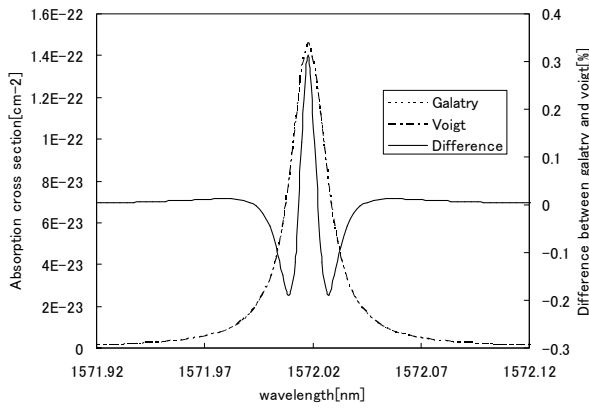
分子の衝突が吸収線に及ぼす影響として、スペクトルの中心波長が変化する圧力シフトと吸収スペクトルが狭まる collisional narrowing がある。Galatry 関数とは、collisional narrowing を考慮した関数である。一般的にスペクトル解析には Voigt 関数が用いられるが、この関数には collisional narrowing が考慮されていない。そのため、この影響が誤差要因になる。そこで、本研究では Galatry 関数と Voigt 関数の比較を行う。

Fig.10 に Galatry 関数と Voigt 関数で描いた吸収スペクトルおよび、それらの差を示す。Fig.10(a) は地上付近、(b)は高度 6km での吸収スペクトルである。ピーク波長とウイングの波長のときに、Voigt 関数と Galatry 関数との差が大きくなるのがわかる。また、地上よりも高度 6km での結果の方が差が大きくなっている。

Fig.11 に  $z$  および  $z$  に対する  $y$  の比( $r$ )の高度分布を示す。 $y$  は normalized pressure broadened parameter、 $z$  は normalized narrowing parameter である。高度が高くなるにつれて  $z$  と  $r$  は小さくなるのがわかる。



(a) At the ground



(b) At 6km altitude

Fig.10 Comparison between Galatry and Voigt profile

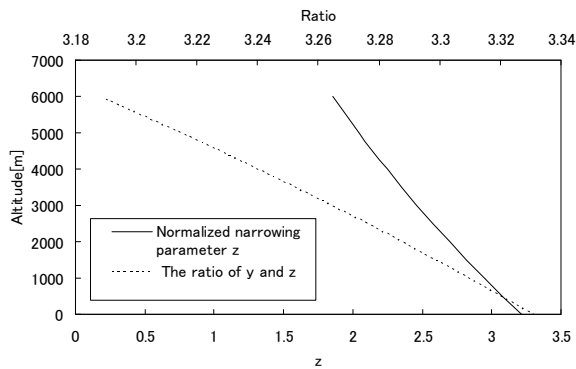


Fig.11 Altitude distribution of normalized narrowing parameter z and the ratio of normalized pressure broadened parameter y to z.

## 7. まとめ

今回は前回未検討課題であった同調精度に起因する誤差と pressure shift に起因する誤差、分子の衝突を考慮した Galatry 関数について検討した。

同調精度に起因する密度誤差は、同調精度 2MHz で 0.1%程度になった。また、レーザー線幅を考慮することで、デルタ関数として考えた場合よりも密度誤差が小さくなり、レーザー線幅が 1.2GHz 程度で最小になることを示した。ランダム誤差を含めた同調精度の計算では、レーザー線幅が 200MHz 程度で密度誤差が最小となることが確認でき、使用するパルスレーザーの最適線幅が決定できることが分かった。

Pressure shift に起因する密度誤差は、同調精度の結果同様、密度誤差を最小とするレーザー線幅が存在することがわかった。圧力シフト係数の不確定性を 10%と仮定した場合の密度誤差は 0.2%程度である。

密度測定吸収線を Galatry 関数と Voigt 関数で描き、比較したところ、吸収線のピーク波長とウィングの波長でそれらの差が大きくなり、高度が高いほどその差は大きくなることを示した。それらの差は最高で 0.3%程度である。

今後は、圧力シフト係数の温度依存係数を考慮した pressure shift に起因する誤差と Galatry 関数で

反復計算シミュレーションを行った場合の密度誤差の見積もり、レイリー散乱のスペクトルを考慮した反復計算シミュレーションについて検討する。

## 参考文献

- [1] Daisuke Sakaizawa, Chikao Nagasawa, Tomohiro Nagai, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Masahisa Nakazato, and tetsu Sakai, "Development of a 1.6  $\mu\text{m}$  differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO<sub>2</sub> profile" Appl. Opt. 48 (4), pp.748-757 (2009)
- [2] 大城雄一他、第 56 回応用物理学会学術講演会予稿集、30p-ZM-12/Ⅲ、pp1172
- [3] A. Predoi-Cross, A. R.W. McKellar, D. Chris Benner, V. Malathy Devi, R. R. Gamache, C. E. Miller, R. A. Toth, and L. R. Brown, "Temperature dependences for air-broadened Lorentz half-width and pressure shift coefficients in the 30013←00001 and 30012←00001 bands of CO<sub>2</sub> near 1600 nm" Can. J. Phys. 87(5): 517-535 (2009)