

特集 光センシング I

吸収分光法を利用した微量ガス計測

柴田 泰邦

東京都立大学システムデザイン学部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Application of absorption spectroscopy for trace gas measurement

Yasukuni Shibata

Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

(Received August 1, 2021)

Optical spectroscopy based on photo absorption becomes a powerful tool in atmospheric environmental monitoring and the industrial field. The strength of the permeated light is related to the absorber concentration according to Lambert-Beer's law. There are several methods which uses the principle of absorption phenomena in the wavelength range from vacuum ultraviolet to mid-infrared region. These include non dispersive infrared (NDIR), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), cavity ring-down spectroscopy (CRDS), Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), integrated path differential absorption lidar (IPDA-lidar), laser differential absorption spectrometer (LAS), and differential absorption lidar (DIAL). This review reports on the basics of these commonly used measurement techniques.

キーワード：吸収, レーザ分光, モニタリング, センシング, 濃度

Key Words: Absorption, Laser spectroscopy, Monitoring, Sensing, Concentration

1. はじめに

地球温暖化, オゾン層破壊, 光化学スモッグ等の大気環境に関する問題は, 窒素(N_2), 酸素(O_2), アルゴン(Ar), 水蒸気(H_2O)以外の大気中に存在する低濃度成分である大気中の微量気体の動態により支配されている。温室効果ガス, 窒素酸化物(NO_x), 硫黄酸化物(SO_x), フロンや揮発性有機化合物などが大気中の微量気体に該当する。 NO_x , SO_x や光化学オキシダントの環境基準は 0.1 ppm 以下であり, この濃度レベルでの高精度の計測が要求される。また, 工業技術の進歩により, 低公害装置の普及に対応した高精度ガス濃度計測技術に高い要求が寄せられている。公害ガスを計測器にサンプルする場合, ガスに含まれる水の凝縮を防ぎ, 水溶性成分の溶解による損失を低減するため, 空気などで数倍に希釈して濃度計測を行う。昨今の厳しい排出ガス規制により, 希釈して計測を行うとガス濃度の計測器は ppb ~ ppm オーダーの感度が必要となる。

光学式的气体濃度計測は, 計測対象分子が固有にもつ振動回転エネルギーに相当する光の吸収, ラマン散乱, 蛍光などに基づく。そのため, 計測対象物質を非接触で, 高感度かつ高時間分解能で計測が可能である。最近では, 点の計測だけでなく, リモートセンシング技術による面的, 立体的な分布計測への期待が高まっている。本解説記事では, 特に光吸収を利用した微量ガス計測法の基礎と最近のトピックスについて概説する。

2. 吸収分光法

吸収分光法は, 原子や分子が固有の波長の光を吸収する性質を利用した計測法である。分子に光を照射し

たとき、この分子の電子状態もしくは振動回転状態のエネルギーレベルに光の波長が一致すると、その波長の光が分子に吸収される。紫外から可視域の場合は主に電子励起であり、赤外域は主に振動回転励起である。Fig. 1はGATS, Inc. 提供のWebサイトで計算した波長0.3~5.0 μmの範囲における大気中の気体分子の吸収強度である¹⁾。大気モデルはUS Standardを用い、高度は0 km (気温 296 K, 気圧 1.0 atm)とした。3 μm以下ではH₂O (黒)の強い吸収帯が複数みられる。また、0.78 μm付近にO₂ (紫)の、4.3 μm付近にCO₂ (赤)の強い吸収が見られる。分子固有の吸収スペクトルに合わせてレーザやLEDの波長を同調すれば、そのガス成分のみを計測することができる。ただし、計測対象外の分子の干渉がない吸収線を選択することが必須となる。

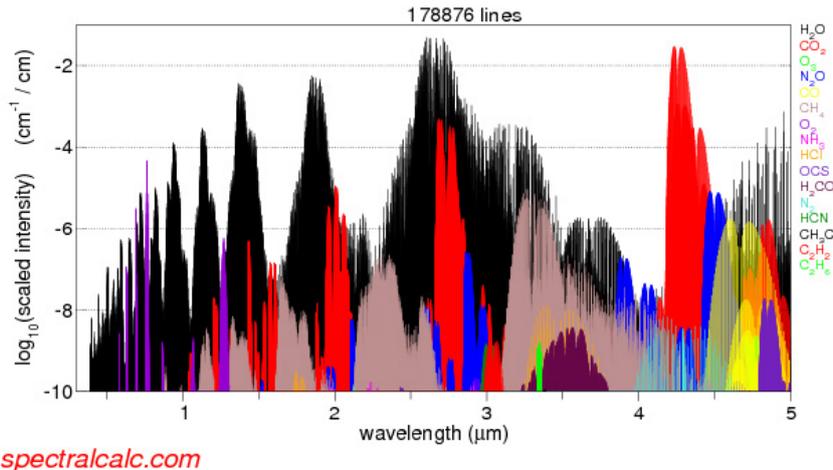


Fig. 1 High-resolution simulated molecular absorption spectra from SpectralCalc.com, High-resolution Spectral Modeling (Ref. 1).

個々の吸収スペクトルは熱運動によるドップラー拡がりを表すガウス分布と、圧力拡がりを表すローレンツ分布の畳み込みで表されるVoigt分布によって近似される^{2,3)}。このVoigt分布は温度と圧力を変数とする関数であるため、高精度な計測が要求される場合は計測環境場の温度と圧力を計測して、吸収スペクトル分布を補正する必要がある。Voigt分布を計算するために必要なパラメータは、HITRANデータベースから入手可能である⁴⁾。また、参考文献1で示したサイト以外にも、HITRANデータベースを使って吸収強度や吸収スペクトルを計算するWebサイトがいくつか存在する。

空間中に存在するガスによる光吸収量は式(1)で示すランバート・ベール(Lambert-Beer)の法則で表せる。

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha L) = I_0 \exp\{-N\sigma(\lambda)L\} \quad (1)$$

ここで、透過光強度 I_t 、入射光強度 I_0 、吸収係数 α [1/m]、光路長 L [m]、ガスの分子数密度 N [1/m³]、吸収断面積 $\sigma(\lambda)$ [m²]、波長 λ である。したがって、 L と $\sigma(\lambda)$ が既知であれば、 I_t を計測することにより N を求めることができる。以下の章では、光吸収分光の原理を応用した各種ガス計測法について紹介する。

3. 各種計測法

3.1 非分散赤外吸収法(NDIR)

非分散赤外線吸収法(Non Dispersive Infrared: NDIR)は、分子の赤外線吸収を利用する方法で、多くのガス成分の計測が可能である^{5,6)}。使用範囲は非常に広く、プラントのプロセス制御用、公害監視用、研究用など、多目的に利用されている。NDIRを用いた分析計は、構造が簡単でメンテナンスが容易であり、さらに連続測定に適した特徴を持つ。NDIRの一般的な構造をFig. 2に示す。赤外線光源、試料セル、光学フィルタ、赤外線受光部より構成され、光学フィルタの仕様により1波長方式と2波長方式に大別される。1波長方式において、光源より発せられた赤外光は対象ガスが流れるセルを通過し、赤外線受光部へと達する。赤外線受光部には対象ガスの吸収波長を透過する光学フィルタが配置されている。セル中の対象ガス分子が多

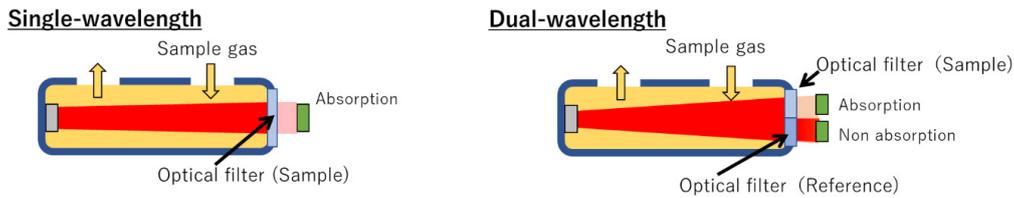


Fig. 2 Schematic of typical NDIR sensors. The sensor with a single-wavelength method consists of an infrared broadband source, a tube with a sample gas inlet and outlet, an optical filter, and an optical detector. In the sensor with a dual-wavelength method, the two filters and two detectors form the active channel and reference channel, respectively.

ければ赤外線はそれだけ多く吸収され、受光部に到達する赤外線の強度が減少する。この信号の減少量から(1)式により濃度が計測される。構造は非常にシンプルであるが、光源出力の揺らぎが計測誤差となる欠点がある。2波長方式はガス吸収を受けない参照光を用い、吸収波長と非吸収波長の干渉フィルタ透過光強度の比から対象ガスの濃度を計測することができる。参照光を用いるため、光源出力の揺らぎの影響を受けにくい利点がある。

2020年以降、新型コロナウイルス感染拡大に伴い、飲食店などで換気が十分機能しているか調べるため、Fig. 1に示す4.3 μm付近のCO₂吸収を用いたNDIR式のCO₂濃度センサを設置する事例が増加している。400~1000 ppm程度の環境であれば、長さ数cm程度のセルで透過率が数十%となるため感度が高く、小型化が容易である。測定精度は市販の安価なタイプで±50~100 ppm程度、高精度のもので±3 ppm前後である。

吸収分光法を用いたガス濃度計測を高感度に行うための基本的なアプローチとして、式(1)のランバート・ベールの法則に従い、光路長を拡張することが有効である。試料セルの両端に凹面鏡を付けたWhiteセルやHerriottセル等を用い、多重反射させることで実効光路長を数百mまで長くする手法もある⁷⁾。

3.2 長光路差分吸収法(DOAS)

長光路差分吸収法(Differential Optical Absorption Spectroscopy: DOAS)は数十m~数kmのオープンパス光路における気体の平均濃度を計測する手法である⁸⁻¹⁰⁾。定点観測に比べ、より地域的、広域的な大気の状態を計測できる利点がある。大気中のCO₂、二酸化硫黄(SO₂)、オゾン(O₃)といった様々な汚染物質が計測可能であり、また複数の大気汚染物質を同時に計測できることからDOAS法の適用例は多く、様々な計測が行われている。DOAS法では、Fig. 3で示すように光源と受光装置を対面して設置する他、遠方にレトロリフレクタを設置し、光源と受光装置を同じ場所に設置することができる。レトロリフレクタは再帰反射許容角の大きさから、リフレクター側の調整はあまり正確でなくても良く、長期間の計測を行う場合の利便性は高い。使用する光源は長距離伝搬させる必要性から平行光化されたものを利用し、受光効率を上げている。受動的な光源として航空障害灯が利用されている。航空障害等灯は遠方からでも視認できるように高いピーク強度でほぼ水平方向に点滅しているため、発光時のスペクトルと非発光時のスペクトルの差分によって、背景光を除去することが可能である。能動的な光源として高輝度ランプやレーザを利用する。レーザはビームの広がり角を1 mrad以下にすることが可能であり、高い効率で長距離伝搬を行うことが可能である。特に都市部は航空障害灯を有するビルが多いので、大気微量物質の環境動態を把握するうえで有効な手段である。一方、対象気体濃度に空間的な疎密がある場合、気流(風)の状況によりDOAS計測結果が大きく変動してしまう。さらに、霧が発生すると光の多重散乱によって計測精度が悪化するなど、気象条件

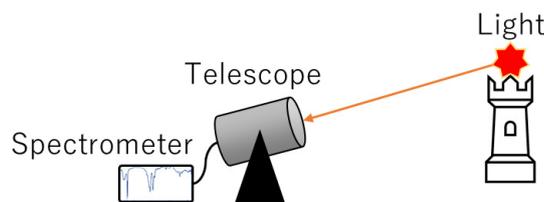


Fig. 3 Schematic diagram of DOAS measurement using existing light source.

の影響を受ける場合がある。

また、火山噴煙中に含まれる二酸化硫黄(SO₂)のカラム量の2次元分布を CCD カメラで計測する手法が提案されている^{11, 12)}。Fig. 4 で示すように、紫外光に感度のある CCD カメラ (Cam1) で、SO₂ の吸収帯に当たる波長(310 nm)だけを撮像し、光の吸収量から SO₂ カラム量を算出する。エアロゾルの影響などを取り除くため、二酸化硫黄の吸収帯からずれた波長(330 nm)のイメージも同時に別の CCD カメラ (Cam2) で撮像し、これら2波長のイメージを処理する。

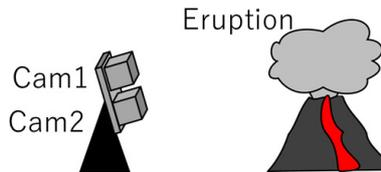


Fig. 4 Schematic of the SO₂ imager system using two CCD cameras with 310 nm and 330 nm bandpass filters.

3.3 キャビティリングダウン分光法(CRDS)

吸収分光法を高感度で計測する手法に、キャビティリングダウン分光法(Cavity ringdown spectroscopy: CRDS)がある¹³⁻¹⁵⁾。Fig. 5 に示すように、CARS は2枚の高反射率ミラーで共振器が構成され、レーザ光をその光軸上で多重反射させることにより狭い共振器内において、数 km もの実効光路長を得る手法である。共振器内に吸収物質による光減衰がない状態にしておいても、ミラーのごくわずかな損失により共振器外へ光が漏れ出し、ミラー面で反射するごとに少しずつ共振器内の光強度が減衰する。この減衰の時定数(リングダウン時間)からガス濃度計測を行う。ミラーの反射率を R とすると、共振器透過光の時間波形 $I(t)$ は

$$I(t) = I_0 \exp\left\{-\left(1-R\right)\frac{ct}{L} - N\sigma(\lambda)ct\right\} \quad (2)$$

となる。ここで c は光速である。リングダウン時間 ($I(t)$ が $1/e$ になるまでの時間) τ は

$$\tau = \frac{L}{c\{(1-R) + N\sigma(\lambda)L\}} \quad (3)$$

となる。この τ と、対象ガスがない ($N = 0$) 場合のリングダウン時間 $\tau_0 (= L / \{c(1-R)\})$ から対象ガス濃度 N は以下のように τ と τ_0 の測定から直接決定できる。

$$N = \frac{1}{c\sigma(\lambda)} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (4)$$

τ までの間に光パルスが反射する回数 M は、 $M = 1/2(1-R)$ で表せる。例えば、 $R = 0.9999$ の場合、 $M = 5000$ となり、 $L = 10$ cm とすれば実効光路長は $5000 \times 2 \times L = 1$ km となる。他の吸光分光法と異なり、式(4)からリングダウン時間の測定だけで済む利点がある。CARS は大気成分分析のほか、同位体分光やラジカル計測にも応用されている¹⁶⁾。

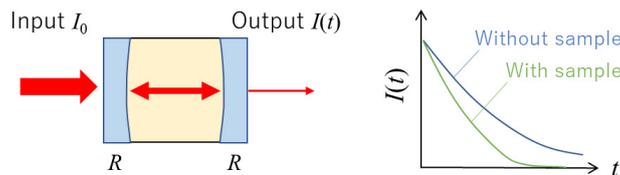


Fig. 5 Schematic diagram of the principle of CRDS and schematic light intensity as a function of time in a CRDS system with and without a sample having resonant absorbance.

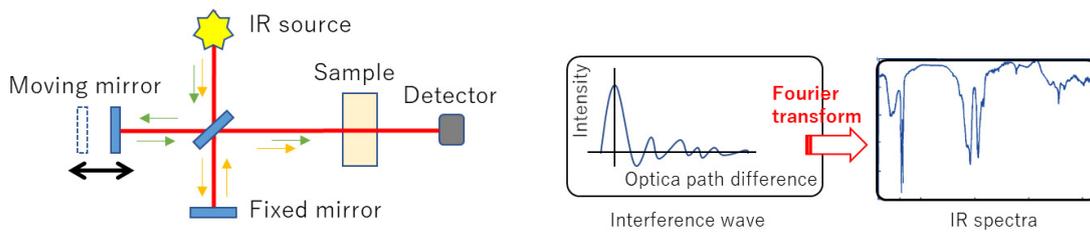


Fig. 6 Schematic diagram of the basic compounds of an FTIR instrument. After passing through the interferometer, the IR radiation passes through the sample before entering the detector from which the signal can be encoded into the resulting spectrum.

3.4 フーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)

赤外スペクトルを高感度で測定するフーリエ変換赤外分光光度計(Fourier transform infrared spectrometer: FTIR)がある^{17, 18)}。FTIRはFig. 6に示すように赤外光源、干渉計、試料室および検出器、フーリエ変換を含む各種データ処理用のPCで構成される。光源から出射される赤外光はビームスプリッタで移動鏡側と固定鏡側に分けられる。移動鏡と固定鏡で反射された赤外光はビームスプリッタに戻り、再び合成される。このとき、移動鏡の位置(光路差)により異なる光の干渉波が得られ、各位置における干渉波の信号強度をフーリエ変換することで各波数成分に分離する。通常、試料が無い場合のスペクトルと試料がある場合のスペクトルの比によって透過率として表わされる。回折格子を利用する分光器では、スリット幅を狭くすることで波数分解能を高めるが、S/Nが低くなる問題点がある。一方、FTIRでは、移動鏡の移動距離を伸ばすことで波数分解能を上げられるが、測定時間が長くなる問題点がある。

3.5 長光路差分吸収ライダー(IPDA-lidar), レーザ差分吸収分光計(LAS)

衛星や航空機搭載によるH₂OやCO₂観測のため、地表面や構造物をターゲットに用いたカラム量測定を行う長光路差分吸収ライダー(Integrated path differential absorption lidar: IPDA-lidar)とレーザ差分吸収分光計(Laser differential absorption spectrometer: LAS)がある¹⁹⁻²²⁾。IPDA-lidarはパルスレーザを用い、LASは変調したCWレーザを用いて、Fig. 7に示すように地表面や構造物、雲からの反射光強度を計測する。計測原理は測定対象である分子の吸収線スペクトルで強い吸収の波長(λ_{on})と弱い吸収の波長(λ_{off})に同調した2つのレーザ光を、同じ測定対象域に送信後、地表面や構造物からの反射光を受信し、on, off 2波長の受信強度 $P_{on}(R_1)$, $P_{off}(R_1)$ の差分から光路区間における測定対象分子のカラム量を導出する。非吸収波長(λ_{off})の参照光を利用するので、光路途中のエアロゾルによる吸収などの影響はキャンセルされる。IPDAおよびLASは、強い受信強度を利用して衛星や航空機に搭載するのに容易な小型化と高精度化が可能である。この場合、2波長のパルス時間間隔を短く(ダブルパルス化)することで、高速移動時における反射領域の同一性を確保する工夫が必要である。

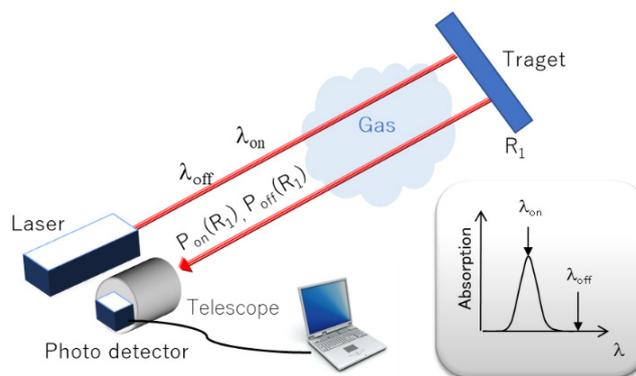


Fig. 7 Schematic diagram of the IPDA and the LAS concepts, and absorption cross section at wavelengths λ_{on} , λ_{off} .

3.6 差分吸収ライダー(DIAL)

差分吸収ライダー(Differential absorption lidar: DIAL)の基本原理はIPAD-lidarやLASと同じだが、Fig. 8(a)に示すように大気分子やエアロゾルからの散乱光を受信する²³⁻²⁶。散乱光を用いるので、送受信時間差を測定することにより送信点からの距離情報を得られる点がIPAD-lidarやLASと異なる。2波長の間隔が近接し、エアロゾル散乱・吸収の波長依存性が無視できる場合、次式で示すDIAL方程式から対象分子の数密度 N [m^{-3}]を導出することができる。

$$N = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left[\ln\left(\frac{P_{\text{off}}(R_2)}{P_{\text{off}}(R_1)} \frac{P_{\text{on}}(R_1)}{P_{\text{on}}(R_2)}\right) - \ln\left(\frac{\beta_{\text{off}}(R_2)}{\beta_{\text{off}}(R_1)} \frac{\beta_{\text{on}}(R_1)}{\beta_{\text{on}}(R_2)}\right) \right] - \frac{\Delta\alpha}{\Delta\sigma} - \frac{N_{\text{IF}}\Delta\sigma_{\text{IF}}}{\Delta\sigma} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\sigma(=|\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}|)$ は差分吸収断面積 [m^2]、 $\Delta R(=|R_1 - R_2|)$ は距離分解能 [m]、 β は大気後方散乱係数 [m^{-1}]、 $\Delta\alpha$ は2波長における大気消散係数 [m^{-1}]の差 ($\alpha_{\text{on}} - \alpha_{\text{off}}$)、 N_{IF} と $\Delta\sigma_{\text{IF}}$ は測定対象外のガス濃度と差分吸収断面積である²³。 β と α に含まれるエアロゾル成分の波長依存性は、エアロゾルの大きさや形状、組成に依存するため正確に推定するのは困難であり、これが最終的な誤差要因となる。一方、2波長が近接し、 β と α の波長依存性や他のガスによる吸収の影響が無視できる場合は式(5)の第2項以降がキャンセルされ、2波長の受信信号強度から直接 N を求めることができる。例えば、非常にブロードな吸収帯をもつ O_3 をDIALで計測する場合、 λ_{on} と λ_{off} の間隔を数nmと広くとる必要があるので、式(5)をそのまま用いる。 H_2O や CO_2 、 CH_4 等を計測する場合、これらの吸収スペクトル幅は1nm以下と狭いので、2波長の間隔は十分狭くなり、式(5)の第1項のみ用いることができる。一方、近接する2波長の光源を実現するため、狭帯域化されたパルスレーザと、吸収のピークに同調するための波長安定化機構が必要となる²⁴⁻²⁶。

Fig. 8(b)に1.57 μm CO_2 DIALを用いて東京都立大学日野キャンパス(東京都日野市)で2018年8月18~19日に観測された CO_2 混合比の鉛直分布を示す。各プロファイルの時間分解能は30分、鉛直分解能は300mである。夜半過ぎから明け方にかけて高度1.5km以下の CO_2 混合比が増加している様子が分かる。このようにDIALは距離分解を持った観測が可能である点が上記の方式と大きく異なる。

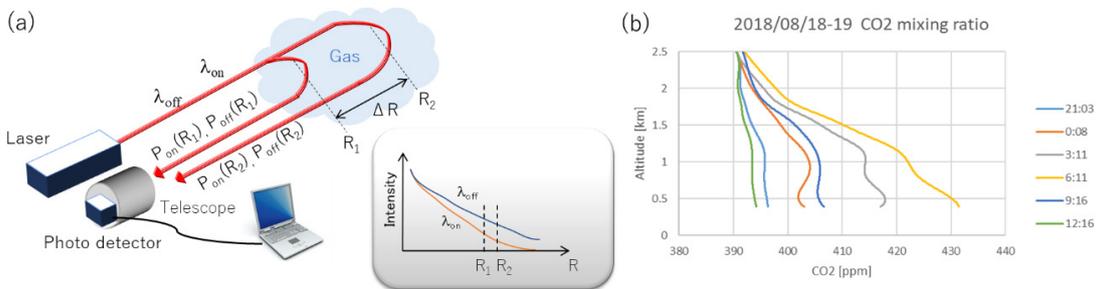


Fig. 8 (a) Schematic diagram of the DIAL concepts, and signal-reflection powers at wavelengths λ_{on} , λ_{off} . (b) Vertical distributions of the CO_2 mixing ratio obtained with the 1.57 μm DIAL at the Tokyo Metropolitan University on 18–19 August 2018.

4. まとめ

光吸収を利用した微量ガス計測技術に関する研究は2000年代前半より急激に活発になっており、紹介した手法を基盤とした計測装置の中には商用化された装置もある。光源、光検出器、波長変換技術などの周辺技術の発展によって、高感度化、高精度化、可搬化などの要求を満たしたリアルタイム計測が可能な新しい環境計測装置の開発が行われていくであろう。

引用文献

- 1) GATS, Inc. SpectralCalc. com, High - resolution Spectral Modeling. Access online on 20 May 2021 from <http://www.spectralcalc.com/info/about.php>
- 2) K. L. Letchworth and D. C. Benner: Rapid and accurate calculation of the Voigt function, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans-

- fer, 107, 173–192, 2007.
- 3) R. T. Menzies and D. M. Tratt: Differential laser absorption spectrometry for global profiling of tropospheric carbon dioxide: selection of optimum sounding frequencies for high precision measurements, *Appl. Opt.*, 42, 6569–6577, 2003.
 - 4) I. E. Gordon, L. S. Rothman, and C. Hill et al. : The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database, *J. Quant. Spectrosc. Radiat.*, 203, 3–69, 2017.
 - 5) C. R. Martin, N. Zeng, A. Karion, R. R. Dickerson, X. Ren, B. N. Turpie, and K. J. Weber: Evaluation and environmental correction of ambient CO₂ measurements from a low-cost NDIR sensor, *Atmos. Meas. Tech.*, 10 (7), 2383–2395, 2017.
 - 6) Z. Zhu, Y. Xu, and B. Jiang: A one ppm NDIR methane gas sensor with single frequency filter denoising algorithm, *Sensors*, 12 (9), 12729–12740, 2012.
 - 7) Y. Sakamoto, K. Tanaka, T. Asakawa, and K. Tonokura: Wavelength modulation spectroscopy detection of N₂O using mid-infrared laser from a direct-bonded quasi-phase-matched LiNbO₃ ridge waveguide, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 062401, 2011.
 - 8) H. Edner, P. Ragnarson, S. Spännare, and S. Svanberg: Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system for urban atmospheric pollution monitoring, *Appl. Opt.*, 32 (3), 327–333, 1993.
 - 9) Y. Yoshii, H. Kuze, and N. Takeuchi: Long-path measurement of atmospheric NO₂ with an obstruction flashlight and a charge-coupled-device spectrometer, *Appl. Opt.*, 42 (21), 4362–4368, 2003.
 - 10) Y. Kambe, Y. Yoshii, K. Takahashi, and K. Tonokura: Continuous monitoring of urban air quality with a pulsed DOAS technique, *Urban Climate News*, 33, 33–35, 2009.
 - 11) 橋本武志, 寺田暁彦, 江尻 省, 中村卓司, 阿保 真: 一般用デジタルカメラを利用した簡易 SO₂ カメラの製作, *火山*, 57 (4), 219–225, 2012.
 - 12) 森 俊哉: 紫外線 CCD カメラを用いた火山ガス噴煙中の二酸化硫黄の可視化, *可視化情報学会誌*, 38 (149), 2–6, 2018.
 - 13) A. O’Keefe and D. A. G. Deacon: Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, *Rev. Sci. Instrum.*, 59, 2544–2551, 1988.
 - 14) K. W. Busch and M. A. Busch: Introduction to cavity-ringdown spectroscopy, American Chemical Society, 7–19, 1999.
 - 15) A. A. Kosterev, A. L. Malinovsky, F. K. Tittel, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho: Cavity ringdown spectroscopic detection of nitric oxide with a continuous-wave quantum-cascade laser, *Appl. Opt.*, 40 (30), 5522–5529, 2001.
 - 16) S. Affolter, D. Fleitmann, and M. Leuenberger: New online method for water isotope analysis of speleothem fluid inclusions using laser absorption spectroscopy (WS-CRDS), *Clim. Past*, 10 (4), 1291–1304, 2014.
 - 17) 小野 暁, 小屋政裕, 藤光康宏, 江原幸雄: 阿蘇火山におけるフーリエ変換赤外分光法(FT-IR)による火山噴気の遠隔観測, *火山*, 44 (3), 123–130, 1999.
 - 18) N. M. Gavrilov, M. V. Makarova, A. V. Poberovskii, and Y. M. Timofeyev: Comparisons of CH₄ ground-based FTIR measurements near Saint Petersburg with GOSAT observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 7 (4), 1003–1010, 2014.
 - 19) S. R. Kawa, J. Mao, J. B. Abshire, G. J. Collatz, X. Sun, and C. J. Weaver: Simulation studies for a space-based CO₂ lidar mission, *Tellus B*, 62, 759–769, 2010.
 - 20) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima: Performance improvement and analysis of a 1.6 μm continuous-wave modulation laser absorption spectrometer system for CO₂ sensing, *Appl. Opt.*, 50 (11), 1560–1569, 2011.
 - 21) J. B. Abshire, A. Ramanathan, H. Riris, J. Mao, G. R. Allan, W. E. Hasselbrack, and E. V. Browell: Airborne measurements of CO₂ column concentration and range using a pulsed direct-detection IPDA lidar, *Remote Sensing*, 6, 443–469, 2013.
 - 22) R. T. Menzies, G. D. Spiers, and J. Jacob: Airborne laser absorption spectrometer measurements of atmospheric CO₂ column mole fractions: Source and sink detection and environmental impacts on retrievals, *J. Atmos. Ocea. Tech.*, 31, 404–421, 2014.
 - 23) M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai, and Y. Hirose: Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide, *Appl. Opt.*, 46, 2269–2279, 2007.
 - 24) Y. Shibata, C. Nagasawa, and M. Abo: Development of 1.6 μm DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO₂ concentration profiles, *Appl. Opt.*, 56, 1194–1201, 2017.
 - 25) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, M. Inoue, M. Morino, and O. Ucino: Comparison of CO₂ Vertical Profiles in the Lower Troposphere between 1.6 μm Differential Absorption Lidar and Aircraft Measurements Over Tsukuba, *Sensors*, 18, 4064, 2018.
 - 26) M. Abo, T. Sakai, P. P. Le Hoai, Y. Shibata, and C. Nagasawa: Measurements of water vapor profiles with compact DIAL in the Tokyo metropolitan area, *EPJ Web of Conf.*, 176, 04015, 2018.

**柴田泰邦**

1997年東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了，博士（工学）。東京都立大学工学部助手，首都大学東京大学院システムデザイン研究科助教，准教授を経て，現在，東京都立大学大学院システムデザイン研究科准教授（2020年大学名変更）。ライダーやLEDによる環境計測手法の開発，レーザ開発に従事。微量ガス観測（二酸化炭素，水蒸気，オゾン，NO₂など），ドップラーライダーによる風計測，ミーライダーによる雲・エアロゾルの観測など，多岐にわたる。応用物理学会，計測自動制御学会，気象学会，AGUなどの会員。