

1.57 μm CO₂ LAS/DIAL と多点配置した *in situ* センサの同時測定 Complementary measurement between variations of the atmospheric CO₂ obtained from the 1.57 μm LAS-DIAL and multi-positioned *in situ* sensors

境澤 大亮、川上 修司：宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

中島 正勝：宇宙航空研究開発機構 GOSAT プロジェクトチーム

澤 庸介、松枝 秀和：気象研究所

Daisuke SAKAIZAWA, Shuji KAWAKAMI: Earth Observation Research Ctr., JAXA

Masakatsu NAKAJIMA: GOSAT Project Team, JAXA

Yosuke SAWA, Hidekazu MATSUEDA: Meteorological Research Institute

Abstract: The Green-house gas Observation SATellite (GOSAT) was developed and launched to determine the continental CO₂ inventories less than 1% relative accuracy. Meanwhile, a laser remote sensor based on the differential absorption spectrometry was developed to indicate the properly varidated performance less than 0.5% accuracy without no bias for a candidate of a future space-based missions to observe the trace gases. A prototype of the newly developed active remote sensor has been performed to demonstrate it with ground-based measurements. The resultants indicate that variations of the atmospheric CO₂ obtained from that is good agreement within 2.8ppm standard deviation compared with that of the in-situ sensors.

はじめに:

宇宙からの継続的な地球環境計測は数値予測が指摘する気候変動に関する諸問題の検証やその対策のために重要な基礎データを与える。特に微量気体の経年変動を高精度な遠隔計測器を用いて全球観測を実施することは二酸化炭素(CO₂)の将来予測において現在問題となっている吸排出量のミッシングリンクを解消する有意な観測値であると指摘されている[1,2]。それらを背景に GOSAT は相対精度1%以下で CO₂ カラム量を観測すべく2009年1月に打ち上げられた。搭載センサは受動光学センサであり、1.6 μm 帯の観測波長帯で地表から大気上端までの鉛直カラム量を観測し、10 μm の赤外チャンネルにより 800hPa の気圧高度よりも上層のカラムおよびプロファイルを取得する。

一方、能動型のレーザセンサを搭載し吸収分光法(Laser Absorption Spectrometry: LAS)や長光路差分吸収法(Integrated path differential absorption: IPDA)により気圧で重み付けされた CO₂ カラム量の全球観測が NASA, ESA それぞれで計画されている。受動観測センサと比較して北半球冬季の高緯度帯観測や日中夜を同じ観測量で比較することができる。しかし現在 NASA, ESA で進められているシステムも含め、LAS や IPDA を用いたライダーシステムによる CO₂ 観測はその高精度測定(0.3%~0.5%)を実証する過程にある。JAXA でも GOSAT 校正検証のフレームワークで LAS をベースにした CO₂ DIAL システムの開発を実施し、幾度かの地上性能評価試験を行った。本稿では2009年5月に実施した CO₂ の in-situ 測定器との比較試験について報告する。

システム原理:

本研究ではシステムとターゲット間にある大気中 CO₂ の混合比について、その経路平均値 $\langle X_{\text{CO}_2} \rangle$ を求め in-situ センサの測定値と比較する。本システムから得られる観測量は経路中の CO₂ 濃度に対応した光学的厚さ(Differential absorption optical depth: DAOD)とシステムターゲット間の距離 L である。これらデータの取得後に経路中の大気圧、気温、水蒸気を以下の式を用いて外挿し、 $\langle X_{\text{CO}_2} \rangle$ を求める。

$$\langle X_{\text{CO}_2} \rangle = \frac{\langle DAOD \rangle}{\Delta\sigma_{\text{CO}_2} N_{\text{dair}} \langle L \rangle} = \frac{1}{\Delta\sigma_{\text{CO}_2} N_{\text{dair}} \langle L \rangle} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{P_{\text{mon,off}} P_{\text{rec,on}}}{P_{\text{mon,on}} P_{\text{rec,off}}} - C \right) - X_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\Delta\sigma_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta\sigma_{\text{CO}_2}}$$

ここで、 $\langle \dots \rangle$ は平均値を表し、混合比については経路平均値を、DAOD および L については時系列データの移動平均を表す。 $\Delta\sigma_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}}$ はそれぞれ On 波長 Off 波長における CO₂, H₂O の差分吸収断面積を表し、気温気圧の関数として求める。 N_{dair} は乾燥大気における大気分子数、 $P_{\text{mon/rec,on/off}}$ はそれぞれ On 波長, Off 波長の信号強度、 C_{nst} はシステムの校正係数であり、動作環境に関わらず定数である。上記の式中、第2項は水蒸気による干渉を表すが、その影響は On 波長 Off 波長の選択により最小限に抑える。

ある波数(ν)における吸収断面積の計算は Voigt 関数を含む以下の式を用いた。

$$\sigma(\nu) = s(T) \frac{1}{\gamma_D(T) \pi^{1.5}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_L(P, T)}{\gamma_L^2(P, T) + (\nu - x)^2} \exp \left[- \left(\frac{x - \nu_0}{\gamma_D(T)} \right)^2 \right] dx$$

$s(T)$ は任意の気温(T)における線強度、 $\gamma_L(P, T)$ は任意の気温(T)、気圧(P)にけるローレンツ拡がり、 $\gamma_D(T)$ は任意の気温(T)におけるドップラー拡がりを表し、それぞれ以下の式で求める。

$$s(T) = s_{\text{ref}} \frac{Q(T_{\text{ref}})}{Q(T)} \frac{1 - \exp(-hc\nu_0/k_B T)}{1 - \exp(-hc\nu_0/k_B T_{\text{ref}})} \exp \left[- \frac{hcE_l}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right]$$

$$\gamma_L(P, T) = \left(\gamma_{L,ref} \frac{P - P_{self}}{P_{ref}} + \gamma_{L,sref} \frac{P_{self}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{n_L}, \quad \gamma_D(T) = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2 \ln 2 RT}{m}}$$

s_{ref} は参照気温 $T_{ref}=296.15\text{K}$ における線強度、 E_L は遷移エネルギーの低位準位、 h, c, k_B はプランク定数、光速、ボルツマン定数である。任意の気温における線強度を計算する場合、分配関数 $Q(T)$ は分子構造の気温依存性を表す。分配関数は HITRAN データベースに付属のサブルーチンにより提供されるが、本研究では $Q(T)$ を振動、回転各準位の分配関数の積により表す。 $\gamma_{L,ref}, \gamma_{L,sref}$ はそれぞれ参照気温における乾燥空気に対する圧力広がり係数、自己圧力広がり係数を表す。指数にある定数は CO_2 のような無極性分子は1、極性のある H_2O では 1.5 である。また、 R は気体定数、 m は分子質量である。式中の中心波数 (ν_0) は HITRAN データベース 2008 版に記載されている吸収線中心 (ν_{c0}) と圧力シフト係数 (δ_{sh}) により $\nu_0 = \nu_{c0} + \delta_{sh} P/P_0$ で求める。ここで $P_0 = 1013.25\text{hPa}$ である。気体の分光パラメータは HITRAN, GEISA, JPL とある中で HITRAN2008 データベースを利用した[3-6]。

この Voigt 関数含む式の厳密な計算には多大な時間を要するため、実際の計算は Humlicek のアルゴリズムをもとに Knutz, Ruyten により提示された近似式を適用し計算時間を低減した[7]。近似式と Voigt 関数の数値積分を比較した結果、吸収断面積の差分は $\pm 0.1\%$ 以内で一致し、計算時間は厳密解の計算と比べて数百分の1に圧縮されている。

観測システム:

本試験で用いたシステムは連続波(CW)レーザを搭載したシステムであり、構成する光学回路のほぼ全てを光ファイバで構成している。システム開発過程および基本パラメータについては参考文献[8]に詳しい。ここではシステムの動作について簡単に記す。On, Off 波長の基準光源はファイバカップリングされた DFB レーザを用いており、On 波長用 DFB レーザは CO_2 を 0.1 気圧で封入したガスセルにより波長の安定化を行い、Off 波長用の DFB レーザは注入電流、素子温度を調整して行われている。両波長の発振位置を図1に示す。

両出力はそれぞれ異なる電気光変調器で強度変調され、合波した後ファイバアンプ(EDFA)で増幅される。EDFA の出力は送信用ビームエキスパンダを通して照射される。従って On, Off 波長の光出力はターゲットへむけて同時にかつ、同一光軸で照射することが可能である。ターゲットで散乱された光は望遠鏡でマルチモード光ファイバへ集光され、光ディテクタで検出される。これと同時に EDFA の出力の一部は参照信号として別の光検出器で検出される。On, Off 波長の信号分離はラップトップ PC 上で FFT により分離する。表1にはシステムの緒言を抜粋した。表から分るとおり望遠鏡の開口径は相対的に小さく、大気揺らぎやトポグラフィターゲットのスペckルによる影響を顕著に受けるが、On, Off 波長で同時に同じ伝播路が利用されるため、スペckルの影響は On, Off 波長の差 (30GHz) のみに依存する。30GHz の波長差が及ぼす影響はより大きな波長差よりも信号積算による抑圧がより期待できる。

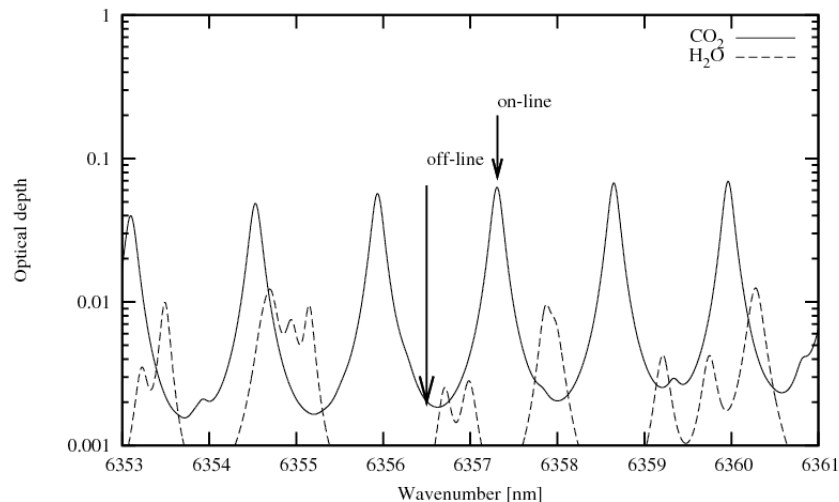


図1- Carbon dioxide (solid line) and water vapor (the dashed line) optical depth around 6357cm^{-1} in the absorption band ($30012 < -00001$) of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, and positions of operating on-line/off-line wavelengths. An optical length of 1km along the horizontal path, CO_2 mixing ratio of 380 ppmv, H_2O mixing ratio of 20 g/kg, atmospheric pressure of 1013 hPa, and temperature of 300 K are assumed in this figure. Relative interference of the water vapor on the DAOD is less than 10^{-5} . Spectroscopic data is derived from Toth et al. and HITRAN2008.

表1. Specification of the $1.57\mu\text{m}$ laser absorption spectrometer

Transmitter[3]				
On-line wavenumber	[cm^{-1}]	6357.3067	Beam diameter	[mm] 60
Off-line wavenumber	[cm^{-1}]	6356.4991	Transmitter power	[W] 1.2 (Fiber end)
Stability	[cm^{-1}]	0.4×10^{-4} (on)	Beam divergence	[mrad] 0.06 (half angle)
		1.6×10^{-3} (off)		
Modulation frequency	[kHz]	15kHz(on)		
		25kHz(off)		

Receiver[3]					
Trans-impedance gain	[ohm]	100x10 ⁶	Receiving aperture	[mm]	110
Field of View	[mrad]	0.2	Distinguish On/Off	-	FFT
Data store time	[s]	4(A/D) 4(FFT)			

In situ センサとの同時測定:

システムの観測パスに沿って CO₂ の in-situ センサを複数配置して比較観測を行った。システムは国立環境研究所の建屋 (8F、地上 30m) に設置し、北北東 2.8km 離れた木々 (高度 15m: path1) と東北東 2.5km の木々 (地上 10m: path2) をターゲットとした。In-situ センサは筑波宇宙センター (TKSC) 内に1台設置し、空気の採取口を 1.5m に配置して大気中の CO₂ 濃度の変動を連続観測した。センサは Li-COR、社モデル Li840 を使用し、別途ダイアフラムポンプで絶えず大気をセンサ内部へ導入している。システムは約 6 時間ごとに CO₂ 標準ガス (日酸田中) を用いて絶対値校正される。また観測パス脇では気象研究所内の鉄塔に設置された4つの大気採取口 (1.5m, 25m, 100m, 200m) より大気中の CO₂ を連続観測している。in-situ 観測で得られるデータの絶対値精度は 1ppm 以下である。大気圧、気温、相対湿度、風向風速等のデータは館野の気象台データを利用した。また観測ターゲットを含む経路中の様子は CCD カメラを用いて相対的な変動を記録した。



図 2 - The location (36°03.0'N140°07.2'E) included the observation path1 (2.8km) and path2 (2.5km) of the LAS and positions of the in situ measurement. Observation path length (white line) of the LAS positioned on the 8th floor of the building in the NIES (indicated as the "LAS @ NIES" in this figure) and the positions of the in situ measurement (indicated as TKSC (Li840) and MRI tower in this figure).

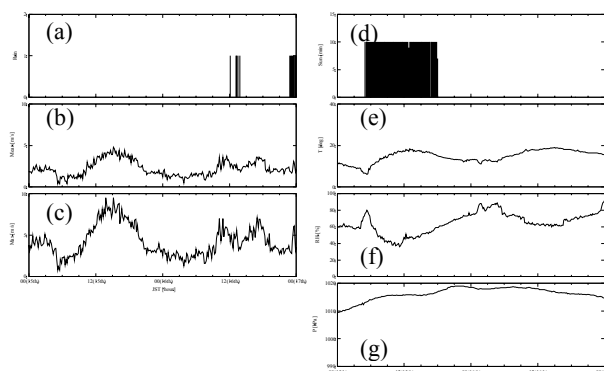


図3- The meteorological parameters of May 15-17 extracted from the local meteorological observatory at Tateno, Japan. (a) Rain fall within 10 min, (b) Mean wind velocity (10minutes average), (c) Maximum wind velocity (within 10 min), (d) The time of daylight (maximum 10 minutes), (e) Atmospheric temperature, (f) Relative humidity, (g) Local atmospheric pressure.

観測結果:

本稿では15日16日の2日間のデータについて述べる。図3に館野の気象台で観測された気象データを記す。15日には太陽照度が日中全時間帯にわたって観測されている一方で、16日は曇天により日照データがほとんど得られない状況である。加えて16日は日中と夜間に降雨が観測されている。この時期の日の出、日没はおよそ 0430 JST, 1840 JST である。

本システムで得られた観測値は乗法性ノイズを低減するために移動平均処理を行った。1 分相当の移動平均により信号の RMS エラーは path1、path2 でそれぞれ 2.2%、1.9%が得られた。実際に経路平均値を求める場合は25~30分相当の移動平均処理を行っている。そのため各誤差はそれぞれ 0.41%、0.34%と見積もられる。システム依存の誤差見積もりはベースライン安定性 (CO₂ 0ppm 時におけるゼロレベルの偏差) について 0.11%、システムターゲット間の測距精度は 0.12%、波長安定性に依存する誤差は 0.1%である。波長安定性については、分光パラメータである圧力シフト係数は考慮していない。また経路中の気温、気圧、相対湿度は一定値と仮定しているため、各データの偏差をそれぞれ 1K, 1hPa, 10%とした場合、見積もりは 0.19%となる。これらを誤差伝搬の法則によりトータル量を見積ると path1 に対しては 0.5%、path2 に対しては 0.43%となった。

図4(a)は鉄塔観測データで得られた CO₂ 濃度、(b)は本システムで得られた CO₂ の経路平均値と観測経路とほぼ同じ高度に設置された鉄塔観測データ(採取口高度 25m)と宇宙センター(TKSC)内と鉄塔観測データの地表面観測値(採取口高度 1.5m)である。図から CO₂ の日変化は地表面で最も高く 50ppm を超えている。上層につれて変化量が小さくなり、ピークを迎える時刻がシフトしている。また15日と16日の日中では特に顕著な差が確認できる。15日日中では TKSC、MRI の地表面観測データでほぼ 1ppm 以内でよく一致しているが16日ではデータの偏差が広がっており、その相関も15日日中と比べると小さくなっている。また15日日中は 1.5m、25m 100m 200m と高度が高くなるに従って CO₂濃度が高くなっており、CO₂ の反転部が確認できるが16日日中は高度間で顕著な濃度差を確認できない。この高度分布は日射により暖められた地熱により熱対流が生じ、夜間地表面に滞留したCO₂が上方へ輸送さ

れることが主要因である。一方16日日中は日射が弱く、熱対流による輸送よりも大気風による乱流輸送により地表面にたまった CO₂ が掻き混ぜられ CO₂ 濃度の上層への輸送が起きている。15日比べると熱対流による CO₂ の輸送では高度方向には濃度差が生じるが、水平方向については広い領域にわたって拡散均一化されており、in-situ で得られる観測値も広域の代表性を示す一方、16日日中の大気風による乱流輸送は熱対流と比べて均一化は弱く、in-situ で得られる観測値の代表性はより狭い範囲となる。この仮定をもとに本システムで得られた経路平均値のデータと鉄塔観測値(採取口高度 25m)のデータを比較すると、15日日中の濃度変化は 2.8ppm の標準偏差でよく一致を示しており、16日日中のデータは15日と比べると偏差が大きくなっている。両日の日中における in-situ と経路平均値の相関係数は 0.95 と高い値が得られた。

また経路平均値では夜間と日中でデータの偏差が異なっている。これは主に大気揺らぎに起因する空間的コヒーレンスの変化によるものと考えられる。シンチロメータを用いて比較観測を実施した日とは別の日に地表面の大気屈折率構造定数 Cn₂ を測定したところ、夜間で 10⁻¹⁴~10⁻¹⁵、日中日射が強い状態で 10⁻¹³ 程度のオーダが得られた。経路の高度は地表面よりも高い位置にあるため相対的な比較となるが、この値をもとに望遠鏡の開口面上でのスペックルセル数(M)を考慮すると夜間で M=3~5、日中は10以上となる。M の値が小さい場合、空間的コヒーレンスと望遠鏡開口径の大きさが近くなり、受信信号強度の統計的な挙動は負の指数分布に従う。したがって受信信号強度の平均値に対してその偏差の比が大きくなる。一方で M が大きい場合はガンマ分布もしくはガウシアン分布に従い、平均信号強度に比べて偏差の値は小さくなり、相対的な挙動は観測された偏差の振舞いと対応している。

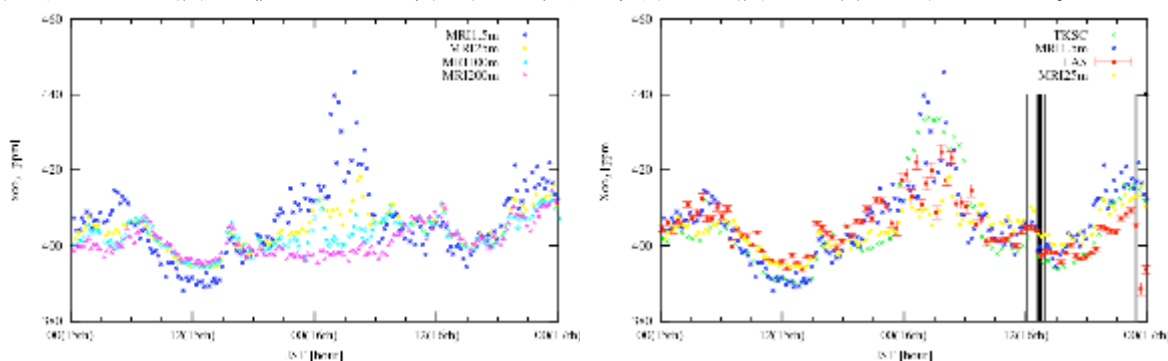


Fig. 6- The atmospheric CO₂ mixing ratio obtained by the LAS, the in situ sensor at TKSC, and on the meteorological tower at the MRI over two-day periods (May 15-16 2009). (a) is the entire data of meteorological tower measurement, (b) variations of the atmospheric CO₂ at the height of 25 m on the meteorological tower, path-averaged data (height difference is 15 m above ground) and 1.5m datas between MRI and TKSC.

まとめ:

レーザ差分吸収分光法をベースにした 1.57μmCO₂ リモートセンサーで得られる CO₂ 濃度の経路平均値と、その経路に沿って配置した in-situ の連続測定によって得られた CO₂ 濃度の比較試験を実施した。日射による熱対流や大気風による乱流輸送などで大気中の CO₂ が混合されている状況下では経路平均値と in-situ で得られたデータの相関は高く、0.95 という相関係数が得られた。特に熱対流による混合が活発になる状況下で双方の値は 2.8ppm の標準偏差で一致した。また装置定数や観測データから推定した統計誤差の値は 0.5%以下である。したがって本システムで得られる観測値は大気中 CO₂ の日変動や季節変動を観測するのに十分な精度を有していることが示され、リモートセンサとして期待される性能 0.5%を以下を実現した。

参考文献:

1. S. Solomon et al., "The Physical Science Basis: The fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change," Cambridge University Press, Cambridge, (2007)
2. P. Ciais, et al., "The Integrated Global Carbon Observation Theme: A Strategy to Realize a Coordinated System of Integrated Global Carbon Cycle Observations," IGBP, Stockholm, (2004)
3. L. S. Rothman et al., "The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database," J. Quant. Radiat. Transfer **110**, 533-572 (2009)
4. R. A. Toth, et al. "Line Strengths of ¹²C¹⁶O₂: 4550-7000 cm⁻¹," J. Mol. Spectrosc. **239** 221-242 (2006)
5. R. A. Toth et al, "Air-Broadening Halfwidth and Pressure Shift Coefficients of ¹²C¹⁶O₂: 4550-7000 cm⁻¹," J. Mol. Spectrosc. **246** 133-157 (2007)
6. R. A. Toth et al, "Self-Broadened Widths and Shift Coefficients of ¹²C¹⁶O₂ Bands: 4750-7000 cm⁻¹," J. Mol. Spectrosc. **239**, 243-271 (2006)
7. J. Humlicek, "Optimized computation of the Voigt and complex probability functions," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **27** 437-444 (1982)
8. S. Kemayama et al. "Development of 1.6 μm Continuous-Wave Modulation Hard-Target Differential Absorption Lidar System for CO₂ Sensing," Opt. Lett. **34** 1513-1515 (2009)