

博士論文

温室効果ガス観測衛星を用いた  
エアロゾル高濃度域における CO<sub>2</sub> 濃度導出手法の改良  
(Improvement of CO<sub>2</sub> retrieval method  
using greenhouse gas observing satellite over aerosol dense areas)

岩崎 千沙



# 学位論文

温室効果ガス観測衛星を用いた  
エアロゾル高濃度域における CO<sub>2</sub> 濃度導出手法の改良  
(Improvement of CO<sub>2</sub> retrieval method  
using greenhouse gas observing satellite over aerosol dense areas)

2018 年 12 月 博士 (環境学) 申請

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 自然環境学専攻

岩崎 千沙



## 要旨

Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) は、温室効果ガスを観測することを主目的とした日本の人工衛星であり、大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) とメタン ( $\text{CH}_4$ ) を観測している。Photon path length Probability Density Function-Simultaneous (PPDF-S) 法は、GOSAT の短波長赤外域 (Short Wavelength InfraRed: SWIR) で観測された放射輝度スペクトルから  $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_4$  の気柱平均濃度 (それぞれ  $X_{\text{CO}_2}$ ,  $X_{\text{CH}_4}$ ) を導出 (リトリーバル) するための手法の 1 つである。この手法では、誤差要因となる大気中の雲/エアロゾルによる光の反射/多重散乱に伴う光路長変動を、独自の PPDF パラメータを用いて、大気透過率の変化として表す。これまでの  $X_{\text{CO}_2}$ ,  $X_{\text{CH}_4}$  の導出アルゴリズムの多くは、厳密な放射伝達計算によって光の反射/多重散乱を取り扱う、いわゆる Full Physics (FP) 法に基づいてきた。それに対し PPDF-S 法は解析精度を維持したまま高速計算 (一般に FP 法より 1 桁以上高速) が可能な新たな手法として期待されている。本研究では、様々なタイプのエアロゾルおよび地表面反射率の観測条件に対するシミュレーションに基づき、解析された  $\text{CO}_2$  濃度の鉛直プロファイルの形を解析誤差の指標として PPDF-S 法の改良を図った。まず、リトリーバルに用いる波長チャンネルの選択である。GOSAT の観測波長帯である  $1.6\mu\text{m}$  帯と  $2.0\mu\text{m}$  帯の  $\text{CO}_2$  吸収帯のチャンネルに対し、各大気層での濃度変化が観測スペクトルに与える影響を評価する指標 ( $d\text{Tr}/dz$ ) を導入し、チャンネルの選択を行った。できるだけ各大気層に感度ピークを持つ波長を均等に選択することで解を安定化し、バイアスが小さくなるケースもあるものの、全体として情報含有量が減り、大気全層の  $\text{CO}_2$  濃度変化に対して有意な解析結果とならないことが示されたため、本研究ではチャンネル選択を実施しないという結論に達した。次に、解析パラメータの適正化である。PPDF-S 法では、 $\text{CO}_2$  濃度と同時に PPDF パラメータがリトリーバルされるが、PPDF パラメータの初期値への拘束条件が必要以上に緩いと解が適切な値から大きく離れ、 $\text{CO}_2$  濃度のリトリーバル結果に影響を与える。そこで、その影響の大きさを、PPDF パラメータの変動幅に対応した放射輝度の大きさによって評価し、影響の大きいパラメータを見つけ、これを適正化した。この改良は、特にエアロゾルを含む大気でのリトリーバル解析に対して有用であった。これらの結果を踏まえ、パラメータ適正化後の PPDF-S 法を西シベリア域のバイオマス・バーニング発生域で観測された GOSAT データの解析に適用した。その結果、煙の存在する条件下でもリトリーバルできているケースも含め、これまで解が得られず解析できなかったデータに対し、リトリーバル可能となったデータ数が約 70 % と大幅に増加した。さらに、シミュレーション解析と GOSAT データ解析の結果より、 $X_{\text{CO}_2}$  と同時に解析された PPDF パラメータの値によって、 $\text{CO}_2$  解析に影響を与えたエアロゾル種を特定できる可能性があることが示唆された。この判定により、Dust-like タイプまたは Soot タイプのエアロゾルを含む大気と特定された場合に対し、さらなる解析精度を向上させるアルゴリズムを提案した。本研究で改良した PPDF-S 法は、2018 年 10 月に打ち上げられた GOSAT-2 のデータ解析にも適用されることが期待されている。特に、GOSAT-2 で新

たに観測対象となった一酸化炭素 (CO) と、CO<sub>2</sub>、エアロゾルとの観測を同時に行えば、ガスとエアロゾルが多く発生する地域で CO<sub>2</sub> : CO : エアロゾル比という炭素収支解析において重要な情報が得られるようになるものと期待される。

## Abstract

Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) is a Japanese satellite whose main purpose is to observe greenhouse gases, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>). Photon path length probability density function - Simultaneous (PPDF-S) method is one of the GOSAT retrieval methods to derive column average concentration of CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>) and CH<sub>4</sub> (XCH<sub>4</sub>) from Short Wavelength InfraRed (SWIR) of GOSAT data. For the retrieval from SWIR, the main analysis error is the optical path length modification caused by light reflection/multiple scattering by clouds/aerosols in the atmosphere. In the PPDF-S method, these optical processes are expressed as a change of atmospheric transmittance using unique PPDF parameters. Many of the retrieval algorithms of XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> have been based on the so-called Full Physics (FP) method which deals with light reflection/multiple scattering by exact radiation transfer calculation. On the other hand, the PPDF-S method is expected as a new method which is capable of high-speed calculation maintaining analysis accuracy. In this study, we tried to improve the PPDF-S method referring to the vertical profile of the retrieved CO<sub>2</sub> vertical profiles as an index of analysis error based on the simulation for observation conditions of various types of aerosols and surface albedos. The first improvement is the selection of the wavelength channel used for the retrieval. We introduced an index for evaluating the influence of concentration change in each atmospheric layer on the observation spectrum,  $dTr/dz$ , for the GOSAT measurement channels in the CO<sub>2</sub> absorption bands of 1.6  $\mu\text{m}$  and 2.0  $\mu\text{m}$ , and then the channel selection has been executed. As a result, although the sensitivity of the CO<sub>2</sub> vertical profile could be changed depending on the combination of channels, it was not possible to obtain low-biased results for the whole atmosphere. The next improvement is the optimization of the analysis parameters. In the PPDF-S method, the PPDF parameter is retrieved at the same time as the CO<sub>2</sub> concentration. However, if the constraint condition on the a priori value of the PPDF parameter is looser than necessary, the solution can take errata value and can affect the retrieval result of the CO<sub>2</sub> concentration. Therefore, the magnitude of the influence was evaluated by the magnitude of the radiance corresponding to the variance range of the PPDF parameter, and then the parameter having a large influence was found and optimized. This improvement was particularly useful for retrieval analysis in the atmosphere including aerosol. Based on these simulation results, the improved PPDF-S method was applied to the analysis of GOSAT data observed in the region of biomass burning in Western Siberia. As a result, the number of data that became retrievable has increased by about 70 % to the data which could not be analyzed until now, including cases where retrieval was possible under the condition that smoke existed. Furthermore, from the results of the simulation study and the GOSAT data analysis, it was suggested that the value of PPDF parameter analyzed simultaneously with XCO<sub>2</sub> may be able to identify aerosol species that affected CO<sub>2</sub> analysis. Once it is determined as the atmosphere including Dust-like or Soot type aerosols, we can apply an additional algorithm to improve the analysis accuracy furthermore. The PPDF-S method improved in this research is expected to be applied to data analysis of GOSAT-2

launched in October 2018. Especially, if we can simultaneously observe carbon monoxide (CO) which was newly observed by GOSAT-2, important information for the biomass burning process such as CO<sub>2</sub>: CO: aerosols ratio can be obtained in the areas where many gas and aerosol are generated. These studies are expected to contribute to the progress of the carbon-cycle sciences.



# 目次

<b>1 研究背景</b> .....	<b>2</b>
1.1 温室効果ガスの衛星観測.....	2
1.2 温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT.....	6
1.3 GOSAT の SWIR スペクトルからガス濃度をリトリートする手法 .....	8
1.4 本研究の目的.....	10
<b>2 PPDF-S 法</b> .....	<b>12</b>
2.1 原理 .....	12
2.2 開発の歴史.....	14
2.3 現状のパフォーマンス.....	15
<b>3 PPDF-S 法の改良</b> .....	<b>18</b>
3.1 リトリートの基本式とリトリート・アルゴリズム.....	18
3.2 シミュレーション解析に基づく CO <sub>2</sub> リトリート .....	21
3.3 改良の方法.....	23
3.3.1 チャンネル選択.....	24
3.3.2 解析パラメータの適正化.....	25
<b>4 改良の結果</b> .....	<b>27</b>
4.1 チャンネル選択の結果.....	27
4.2 解析パラメータの適正化の結果.....	31
4.2.1 $\sigma_a$ を適正化するパラメータの決定 .....	31
4.2.2 清浄大気への適用 .....	32
4.2.3 エアロゾルを含む大気への適用 .....	34
<b>5 GOSAT データ解析への応用</b> .....	<b>40</b>
5.1 清浄大気 .....	40
5.1.1 TCCON データによる検証結果 .....	40
5.1.2 Yekaterinburg でのデータによる検証結果 .....	41
5.2 エアロゾルを含む大気.....	42
5.2.1 西シベリア域のバイオマス・バーニング発生地域 .....	42
5.2.2 XCO <sub>2</sub> 解析結果.....	44
5.2.3 PPDF パラメータ解析結果.....	47

5.2.4 PPDF パラメータによって表されるエアロゾルの光学的特性 .....	48
6 議論 .....	51
7 結論 .....	63
参考文献 .....	66
謝辞 .....	73



# 1 研究背景

## 1.1 温室効果ガスの衛星観測

産業革命以降、人間活動の増加に伴う化石燃料の燃焼や土地利用の変化により、人為起源の温室効果ガスの大気中濃度が急増している。代表的な温室効果ガスである二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) の濃度は、それぞれ 1750 年で 278±5 ppm (parts per million; 100 万分の 1)、722±25 ppb (parts per billion; 10 億分の 1)、270±7 ppb であったのに対し、2011 年には 390.5±0.1 ppm、1803±4 ppb、342.2±0.2 ppb へと増加している。地球温暖化によって気候変動が生じた結果、洪水、台風、ハリケーンの増加、干ばつの発生、さらに海水面の上昇といった現象が引き起こされ、地球上生物に甚大な被害をもたらすことが大問題とされている。この地球温暖化の要因は人為起源の温室効果ガスの増加による可能性が極めて高いとされている (IPCC AR4)。なかでも、CO<sub>2</sub> は特に重要な温室効果ガスである。ある物質の気候変動への影響の大きさは放射強制力という指標によって表され、その値が正であれば対流圏界面以下の大気を加熱する働きを、負であれば冷却する働きを示すよう定義されている。Figure 1 は各因子の変動を 1750 年からの変化として定義したときの放射強制力の大きさを示しており、CO<sub>2</sub> がもつ放射強制力による影響は他のガスと比べて 2 倍以上大きな正の値であることがわかる。そのため、1997 年に京都議定書が採択されたのを皮切りに、CO<sub>2</sub> 削減は近年の世界各国共通の重要な課題となっている。

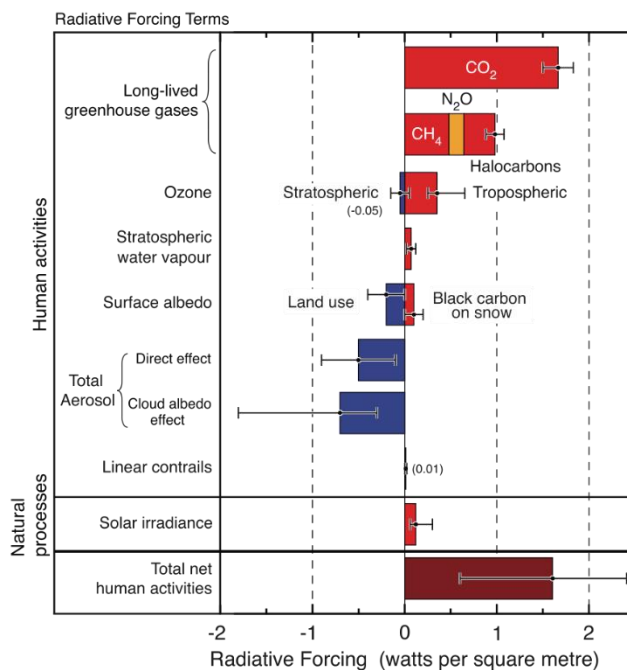


Fig. 1. 各種気候変動因子の放射強制力 (IPCC AR4, 2007)

人為起源の CO<sub>2</sub> は約 45 %が大気中に残り、約 55 %が陸と海に吸収されるという大まかな循環はわかっているものの、地域的な分布、発生・消失量、時間的変動性には大きな不確定性がある。そこで、CO<sub>2</sub> を地上の現場で測定し、時空間変動を明らかにする試みがなされてきた (Baker et al., 2006)。現場測定は、約 0.025% (約 0.1ppmv) という非常に高精度な観測が可能であるため、その場での濃度変動を厳密に捉えることができる。しかし、CO<sub>2</sub> の観測サイトは陸上の、しかも先進国に多く分布しており地域的な偏りが大きく、さらには海上全域にわたって定点観測サイトがほとんどないという問題点がある。そのため、大幅な観測点の増加を目的に、莫大なコストはかかるものの、全球規模での定期的な測定が可能である衛星観測が有用であるとされてきた。

このような背景のもと、1990 年代より衛星センサによって観測された熱赤外 (Thermal InfraRed: TIR) スペクトルから CO<sub>2</sub> 濃度を導出する試みが始まった。Chédin et al. (2003) は初めて TIR スペクトルから CO<sub>2</sub> の信号を検出した。これは High-Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS) で測定されたスペクトルが上部対流圏の CO<sub>2</sub> 濃度変化に感度をもつことを示したものである。さらに Chédin et al. (2005) により、その方法が CO<sub>2</sub> のソース/シンク解析に有用であることが示された。これらの研究に続いて、同様のタイプのセンサを用いて多くの研究が行われてきた。以下はそれら衛星センサの例である; Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS) 搭載の Interferometric Monitor for Greenhouse gases (IMG) センサ (Imasu et al., 2000; Ota and Imasu, 2016)、Meteorological Operational Satellite Program of Europe (MetOp) シリーズ搭載の Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) センサ (Chevallier et al., 2009b)、Earth Observing System (EOS)-B 搭載の Tropospheric Emissions Spectrometer (TES) センサ (Kulawik et al., 2010)、Aqua 搭載の Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) センサ (Chahine et al., 2006)、そして温室効果ガス観測技術衛星 (Greenhouse Gases Observing Satellite: GOSAT) 搭載の Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer (TANSO-FTS) センサ (Saitoh et al., 2009; Saitoh et al., 2016)。なお、GOSAT 搭載の TANSO-FTS センサの TIR バンドは補助的な位置づけにあるが、詳細は 1.2 節で述べる。

これら TIR センサは、一般に上層大気中の CO<sub>2</sub> 濃度に対する感度があるが、表面付近では感度が比較的低い。この点は、CO<sub>2</sub> 発生源や吸収源の大部分が表面近くに位置していることから、CO<sub>2</sub> の地表面での正味フラックスの研究にとっては不利である。CO<sub>2</sub> の地表面での正味フラックスとは、単位時間・単位面積当たりの CO<sub>2</sub> 排出量と消失量のトータル量を指す。これを推定する方法の一つとして、CO<sub>2</sub> 濃度の解析結果と大気輸送モデルとを組み合わせる方法があり、その解析はインバージョン解析と呼ばれる。例えば、対流圏上部 (~150hPa) に感度をもつ AIRS センサからの CO<sub>2</sub> 濃度をインバージョン解析した地表面フラックスは、地上のサンプリング観測データを用いたインバージョン結果に対して低い値を示すというような研究例もある (Chevallier et al., 2009a)。また、より高度の低い対流圏中部 (~550hPa) に感度をもつ TES センサからの CO<sub>2</sub> 濃度データを用いたインバージョン解析では、南アメリカなどで地表面フラックスの拘束を改善できたことが報告されている (Nassar et al., 2011)。

TIR に対し、短波長赤外域 (Short Wavelength InfraRed: SWIR) は、表面付近の CO<sub>2</sub> 濃度変化により敏感である。SWIR で観測されたスペクトルからは CO<sub>2</sub> の気中平均濃度 (XCO<sub>2</sub>) を導出することができる。最初に SWIR スペクトルから XCO<sub>2</sub> を導出するのに成功した衛星センサは Environmental Satellite (ENVISAT) 搭載の Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY) である (Buchwitz et al., 2005)。ただし、SCIAMACHY の目的は CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> を含む対流圏と成層圏の多種多様な微量ガスを全球観測することであり、その設計は CO<sub>2</sub> の観測には最適化されていなかった。一方、GOSAT は温室効果ガスの観測を主目的とする世界初の衛星であり、搭載する Thermal and Near-infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer (TANSO- FTS) センサで大気中の CO<sub>2</sub> とメタン (CH<sub>4</sub>) を観測している (Yokota et al., 2009)。さらに、2018 年 10 月 29 日には GOSAT の 2 号機である GOSAT-2 の打ち上げが成功した。GOSAT-2 は 1 号機よりも高精度なスペクトル観測が可能であり、新たに一酸化炭素 (CO) も観測することから、今後、温室効果ガスに対する科学的知見がより深まることが期待されている。他にも各国から CO<sub>2</sub> 観測を目的として SWIR スペクトルを取得する衛星が打ち上げられている。現在運用中または打ち上げ予定の SWIR を観測する衛星を Table 1 に示す。なお、GOSAT は SWIR (Band 1, 2, 3) と TIR (Band 4) の両波長帯を観測するため、どちらの観測帯も Table 1 に記載する。SWIR の特徴として、そのバンドを利用することで、鉛直方向に積分した CO<sub>2</sub> の信号を得ることができる。しかし、そのスペクトルは大気中の雲およびエアロゾルに起因する光の反射/多重散乱の影響を受けやすいという性質ももつ。そのため、SWIR から XCO<sub>2</sub> を正確に導出するためには、その影響を考慮した解析を行う必要がある。

**Table 1.** 現在運用中または打ち上げ予定の SWIR スペクトルを取得する衛星

衛星	開発機関	観測波長帯 [ $\mu\text{m}$ ]	観測対象ガス	プロダクト	関連文献
GOSAT (2009.01.23-)	環境省; 国立環境研 究所; JAXA <sup>1</sup> (日本)	Band1: 0.758~0.775	O <sub>2</sub>	XCO <sub>2</sub> ・XCH <sub>4</sub> ,	Yokota et al. (2009); Kuze et al. (2009)
		Band2: 1.56~1.72	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> ・CH <sub>4</sub> 鉛直 プロファイル	
		Band3: 1.92~2.08	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> ・CH <sub>4</sub> 鉛直 プロファイル	
		Band4: 5.56~14.3	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> 鉛直プロ ファイル	
GOSAT-2 (2018.10.29-)	環境省; 国立環境研 究所; JAXA <sup>1</sup> (日本)	Band1: 0.758~0.775	O <sub>2</sub>	XCO <sub>2</sub> ・XCH <sub>4</sub> ,	-
		Band2: 1.56~1.69	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> ・CH <sub>4</sub> 鉛直 プロファイル	
		Band3: 1.92~2.38	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub> 鉛直プロ ファイル	
		Band4: 5.5~8.4	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> 鉛直プロ ファイル	
		Band5: 8.4~14.3	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> 鉛直プロ ファイル	
OCO-2 <sup>2</sup> (2014.7.2~)	NASA <sup>3</sup> (アメリカ)	O <sub>2</sub> -A band: 0.757~0.775	O <sub>2</sub>	XCO <sub>2</sub> ,	Boesch et al. (2015)
		CO <sub>2</sub> の弱吸収帯: 1.594~1.627	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 鉛直プロ ファイル	
		CO <sub>2</sub> の強吸収帯: 2.043~2.087			
TanSat <sup>4</sup> (2016.12.21~)	MOST <sup>5</sup> ; CIOMP/CAS <sup>6</sup> ; SIMIT <sup>7</sup> ; NSMC <sup>8</sup> (中国)	O <sub>2</sub> -A band: 0.758~0.778	O <sub>2</sub>	XCO <sub>2</sub> ,	Yang et al. (2018)
		CO <sub>2</sub> の弱吸収帯: 1.594~1.624	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 鉛直プロ ファイル	
		CO <sub>2</sub> の強吸収帯: 2.042~2.082			
CarbonSat <sup>9</sup> (打ち上げ予 定)	ESA <sup>10</sup> (欧州)	O <sub>2</sub> -A band: 0.757~0.775	O <sub>2</sub>	XCO <sub>2</sub> ,	Bovensmann et al. (2010)
		CO <sub>2</sub> の弱吸収帯: 1.559~1.675	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 鉛直プロ ファイル	
		CO <sub>2</sub> の強吸収帯: 2.043~2.095			

1 JAXA: Japan Aerospace eXploration Agency (宇宙航空研究開発機構)

2 OCO-2: Orbiting Carbon Observatory-2

3 NASA: National Aeronautics and Space Administration

4 TanSat: Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite Mission

5 MOST: Ministry of Science and Technology

6 CIOMP/CAS: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics/Chinese Academy of Sciences

7 SIMIT: Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology

8 NSMC: National Satellite Meteorological Center of CMA (China Meteorological Administration)

9 CarbonSat: Carbon Monitoring Satellite

10 ESA: European Space Agency

## 1.2 温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT

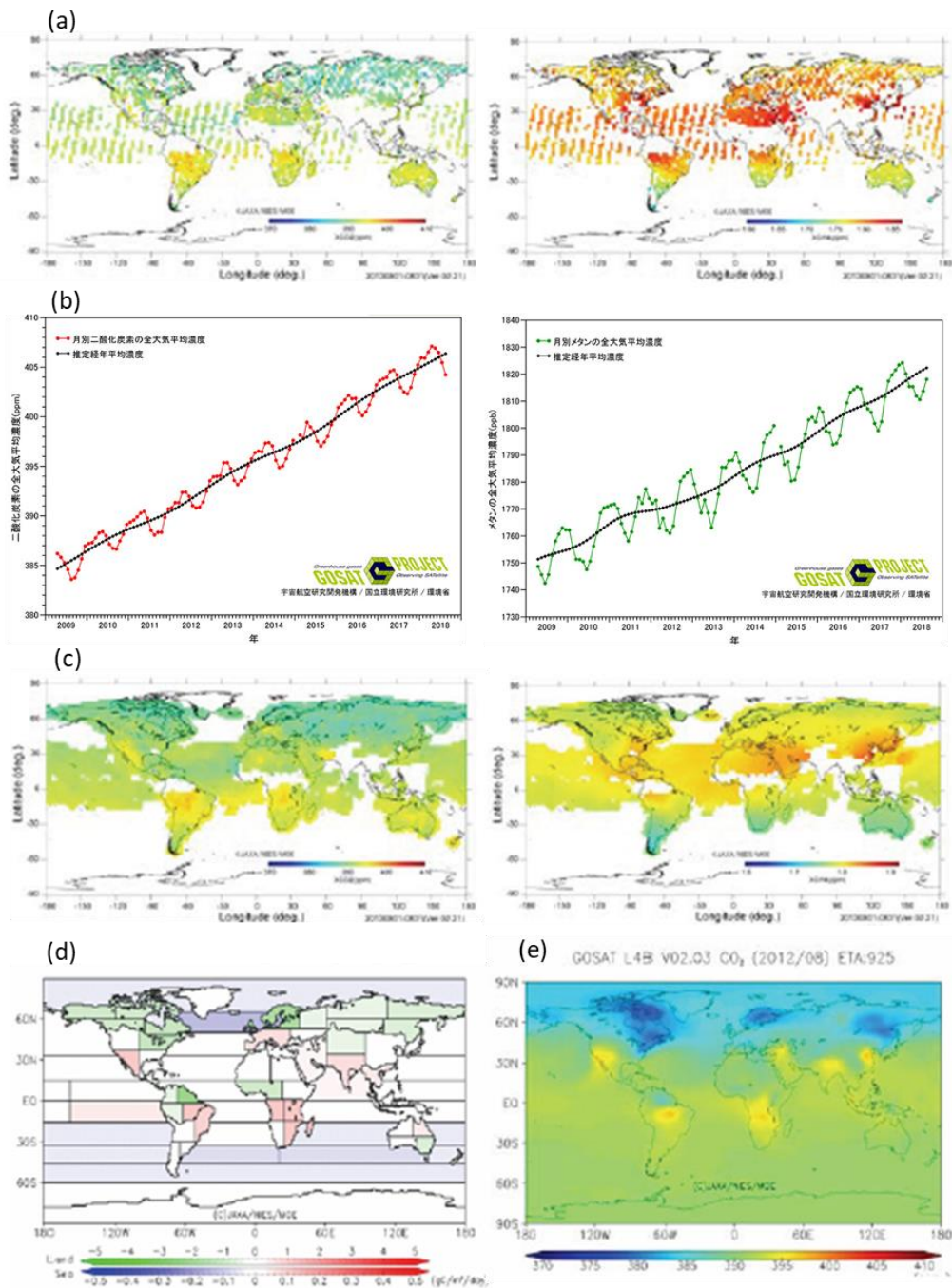
GOSAT は世界初の温室効果ガスの観測を主目的とする日本の衛星であり、大気中の CO<sub>2</sub> とメタンを観測するために 2009 年 1 月 23 日に打ち上げられた。高度約 666 km を周回し、3 日間の準回帰日数でほぼ全球を観測する。搭載センサは TANSO と呼ばれ、温室効果ガス観測センサであるフーリエ変換型分光器 (FTS) と雲・エアロゾルセンサ (Cloud and Aerosol Imager: CAI) の 2 つのセンサで構成される (Kuze et al., 2009)。Figure 2 に GOSAT の外観を示す。

GOSAT は 2009 年の打ち上げから 9 年以上観測を続けてきた。その結果、長年にわたって蓄積されてきた観測データを解析することにより、CO<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub> について様々な知見が得られてきた。その元となる観測データについて、解析の処理レベルに応じた様々なプロダクトが提供されている。これらは、公式なプロダクトとして、GOSAT プロダクト提供サイト GDAS (<https://data2.gosat.nies.go.jp/>) から提供されている。Figure 3 (a), (b) はそれぞれ CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> の気柱平均濃度 (レベル 2 データ) の空間分布と全大気中の月平均濃度の経年変化である。同様に、観測点における気柱平均濃度に対して時空間内挿を施して得られた気柱平均濃度 (レベル 3) の全球分布 (Fig. 3 (c)) や、風向、風速などの全球気象データと組み合わせることで推定した地域別の吸収・排出量 (レベル 4A) (Fig. 3 (d))、さらにそれに対して大気輸送モデルを用いて時空間変動を再計算した濃度 (レベル 4B) (Fig. 3 (e)) なども GDAS より入手可能である。



Fig. 2. GOSAT の外観





**Fig. 3.** GOSAT の観測からわかる CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> の情報; (a) 2013 年 8 月の晴天観測点における CO<sub>2</sub> (左) と CH<sub>4</sub> (右) の気柱平均濃度、(b) 2009 年からの CO<sub>2</sub> (左) と CH<sub>4</sub> (右) の全大気中の月平均濃度の経年変化、(c) (a) に対して時空間内挿を施した CO<sub>2</sub>(左) と CH<sub>4</sub>(右) の気柱平均濃度の全球分布、(d) 2012 年 8 月の CO<sub>2</sub> の地域別の月平均吸収・排出量、(e) (d) を元に再計算した 2012 年 8 月、高度約 800 m の CO<sub>2</sub> の全球濃度分布。いずれの図も国立環境研究所の GOSAT プロジェクトのホームページ (<http://www.gosat.nies.go.jp/index.html>) より入手。

### 1.3 GOSAT の SWIR スペクトルからガス濃度をリトリートする手法

多くの衛星センサが TIR または SWIR のいずれかのスペクトルを観測する一方、Table 1 に示すように、GOSAT は TANSO-FTS で SWIR (Band 1, 2, 3) と TIR (Band 4) の両方の波長範囲で大気放射スペクトルを観測するため、両波長域を複合利用することで、より詳細なガスの鉛直分布が明らかにされることが期待される。ただし、本研究では SWIR スペクトルのみからの XCO<sub>2</sub> 導出に着目する。

ガスのリモートセンシング観測の分野では、センサで観測した放射輝度スペクトルからガス濃度を導出する過程は、リトリートと呼ばれる。これまで、GOSAT で観測された SWIR スペクトルから XCO<sub>2</sub> をリトリートするために、様々な解析アルゴリズムが開発されてきた。前述の通り、SWIR スペクトルは光の反射/多重散乱の影響を受けやすいため、それらの効果は解析誤差の要因となる。そのため、開発されてきた解析アルゴリズムごとに光の反射/多重散乱過程を考慮する工夫がなされている。これらのアルゴリズムの多くは、いわゆる Full Physics (FP) 法に基づいており、国立環境研究所の GOSAT プロジェクトから公開されている XCO<sub>2</sub> の標準プロダクトを処理するために使用されるアルゴリズム (Table 2 に示す NIES アルゴリズム) も、FP 法に分類することができる。この手法では、雲/エアロゾルの微物理とそれらの光学特性を考慮した放射伝達方程式を解くことによって、光反射/多重散乱プロセスを厳密に計算する。FP 法を採用するアルゴリズムの例を Table 2 に示す。

**Table 2.** FP 法に基づくリトリバブル・アルゴリズム

アルゴリズム	研究機関	文献	アルゴリズムの詳細
NIES <sup>1</sup>	国立環境研究所 (日本)	Yoshida et al. (2010); Yoshida et al. (2011); Yoshida et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GOSAT の CAI センサでの観測に基づいた雲スクリーニング</li> <li>• SPRINTARS モデルでシミュレーションしたエアロゾル情報を取り入れた厳密な放射伝達計算</li> </ul>
ACOS <sup>2</sup>	NASA JPL <sup>3</sup> (アメリカ)	Crisp et al. (2012); O'Dell et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水雲、氷雲、広範囲の地域で見られる数種類のエアロゾルを想定した厳密な放射伝達計算</li> </ul>
RemoTeC <sup>4</sup>	SRON-KIT <sup>5</sup> (オランダ、ドイツ)	Butz et al. (2009); Butz et al. (2011); Guerlet et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GOSAT の CAI センサでの観測に基づいた雲スクリーニング</li> <li>• 鉛直方向にガウス分布である光学的厚さをもつエアロゾルを取り入れた厳密な放射伝達計算</li> </ul>
UoL-FP <sup>6</sup>	レスター大学 (イギリス)	Bösch et al. (2006); Boesch et al. (2011); Cogan et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氷の巻雲、広範囲の地域で見られる数種類のエアロゾルを想定した厳密な放射伝達計算</li> </ul>
YCAR-CAI <sup>7</sup>	ヨンセイ大学 (韓国)	Kim et al. (2016); Jung et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GOSAT の CAI センサでの観測に基づいた雲スクリーニング</li> <li>• 東アジアに特化したエアロゾル種を想定した厳密な放射伝達計算</li> </ul>

1 NIES: National Institute of Environmental Studies

2 ACOS: Atmospheric CO<sub>2</sub> Observations from Space

3 JPL: Jet Propulsion Laboratory

4 Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) through the Emmy-Noether programme, grant BU2599/1-1

5 SRON-KIT: Netherlands Institute for Space Research/Karlsruhe Institute of Technology

6 UoL-FP: University of Leicester Full Physics

7 YCAR-CAI: Yonsei Carbon Retrieval-Cloud and Aerosol Imager

一方、光反射/多重散乱に伴う光路長変動を光路長の確率密度関数 (Photon path length Probability Density Function: PPDF) に基づき、より簡略化する表現にした導出方法が提案されている (Bril et al., 2008; Oshchepkov et al., 2008, 2009; Oshchepkov et al., 2011; Oshchepkov et al., 2013b)。この方法では、光路長変動は独自の PPDF パラメータを用いた雲/エアロゾルを含む大気透過率により表現され、厳密な放射伝達計算を必要としない。そのため高速計算が可能であることから (計算速度は FP 法と比べて PPDF-S 法の方が 1 桁以上速い)、観測直後のクイック・ルック用などにも利用できる。また、様々な改良を短時間でより容易に試すことができるといった利点をもつ。PPDF に基づく手法の詳細は、第 2 章で述べる。

GOSAT の打ち上げ当初、XCO<sub>2</sub>のリトリーバル解析精度は1% (約4 ppm) が目指されていた。この精度は、リトリーバル結果と大気輸送モデルを組み合わせることで、CO<sub>2</sub>の地表面フラックスの推定が可能とされる精度である (Takagi et al., 2014)。その後、さまざまなリトリーバル・アルゴリズムの改良が進められた結果、現状では約0.1% (約0.4 ppm) にまで精度が向上している (Morino et al., 2011; Yoshida et al., 2013; Oshchepkov et al., 2012; Oshchepkov et al., 2013a; Zhou et al., 2016; Iwasaki et al., 2017)。一方、地上でのガスのフラスコ・サンプリングといった現場測定の精度は約0.025% (約0.1 ppm) であることから、今後はさらなる改良や新しい手法によって、衛星観測でも同等の精度で全球のXCO<sub>2</sub>を解析することを目指す段階にまできていると言える。

多くのリトリーバル・アルゴリズムがFP法に基づくなか、FP法に特有の誤差や問題もあるため、異なる手法による解析結果と比較することは非常に有意である。PPDFに基づく手法はGOSATデータを用いた研究コミュニティ内では、研究的課題の位置づけにあるものの、新しい観点でSWIRからのリトリーバルに取り組むものであり、リトリーバルの精度向上に対してブレークスルーを与え得るものとして期待されている。

PPDFに基づく手法の最新バージョンはPPDF-S法と呼ばれ (詳細は第2章)、現在GOSATプロダクト提供サイトGDASより、FP法により解析されたXCO<sub>2</sub>の標準プロダクトと合わせ、公募研究 (Research Announcement) の課題代表者 (Principal Investigator) に対してのみ、PPDF-S法によるXCO<sub>2</sub>の解析データが提供されている。本研究は、国立環境研究所と東京大学大気海洋研究所の共同研究の枠組みの中で行われ、PPDF-S法によるデータ解析処理の実施や、解析結果の検証作業にも貢献してきた。それらの結果は、解析データやリトリーバル・アルゴリズム基準書 (Algorithm Theoretical Basis Document: ATBD) などの形で公開されている。

## 1.4 本研究の目的

これまでの研究 (Iwasaki et al., 2017) では、NIES FP アルゴリズムで得られたXCO<sub>2</sub>とPPDF-S法に基づくアルゴリズムによるXCO<sub>2</sub>を比較すると、エアロゾル高濃度域で値の差が大きいことが指摘されてきた (詳細は第3章)。この中で、両アルゴリズムでエアロゾルによる光反射/多重散乱の効果を取り扱う方法が異なることが要因である可能性が示唆された。一方、PPDFアルゴリズムは、エアロゾルの光学的特性によっては解が不安定になる場合があることもわかり (詳細は第4章)、時に解が収束せずに解析データ数が減少する場合もある。そこで、本研究の目的を、PPDF-S法を改良し、高濃度エアロゾル域でも高精度にXCO<sub>2</sub>を導出可能にすることとする。特に、基本的な考え方として、エアロゾルの有無、あるいは、エアロゾルの種類によらず、汎用的に様々な大気状態に適用できる手法への改良を目指す。その上で、エアロゾルの種類や特性に関する情報が得られれば、それを踏まえてより適切な手法を用いるというアルゴリズムを構築する。

本研究で改良した PPDF 法は、2018 年 10 月に打ち上げられた GOSAT-2 のデータ解析にも適用されることが期待されている。特に、新規に追加された測定波長帯により、新たに一酸化炭素 (CO) も観測する。CO を CO<sub>2</sub> と同時に観測することにより、物質の燃焼の仕方を特徴付ける燃焼効率 (combustion efficiency) という指標の導出に繋げることができる (Kaufman et al., 1990; Super et al., 2016)。加えて同時に発生するエアロゾル種や量も判別できれば、バイオマス・バーニング発生域や都市域といった、ガスとエアロゾルが同時に多く発生する地域で観測されたデータから、CO<sub>2</sub>:CO:エアロゾル比という炭素収支解析において重要な情報が得られるようになるものと期待されている。

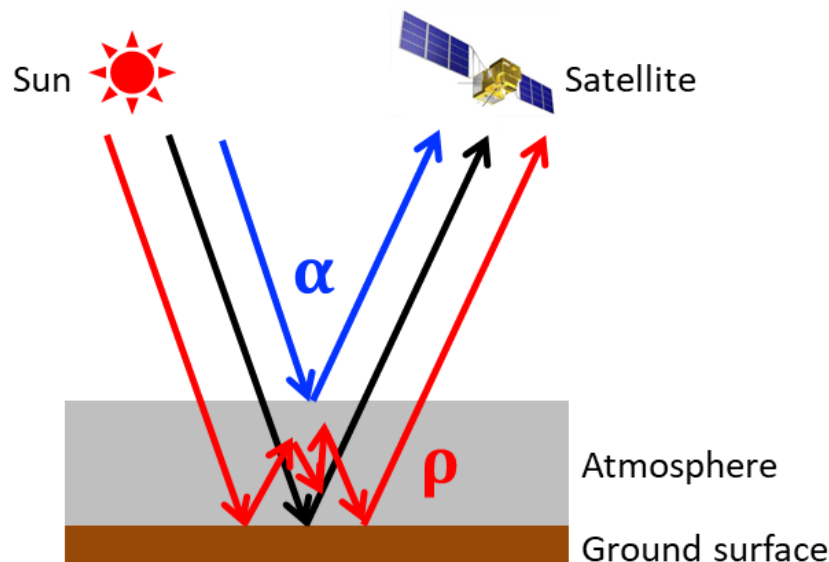
## 2 PPDF-S 法

### 2.1 原理

GOSAT 搭載の TANSO-FTS をはじめとする、大気中の気体成分を測定するために設計されたセンサの大半は、地球に入射する太陽光のうち地球大気または地表面で後方散乱された放射輝度スペクトルを観測する。ただし、SWIR 域のスペクトルは大気中の雲/エアロゾルによって反射/多重散乱の影響を受ける。そのため、太陽と衛星のそれぞれの天頂角の大きさとエアロゾル層の高度で決まる幾何学的な光路長に対し、太陽光が地球に入射し GOSAT センサで感知されるまでに様々な長さの光路を辿り、光路長は複雑に変化する。そこで、PPDF に基づくリトリバルでは、光路長変動を透過率の変化として PPDF パラメータを用いて表現することが考えられた。以下はそのために用いられる 4 つの基本的な PPDF パラメータである；

- $h$ : 雲/エアロゾル層の高度
- $\alpha$ : 雲/エアロゾル層の反射率
- $\rho$ : 雲/エアロゾル層と地面との間の平均経路長
- $\gamma$ : 調整パラメータ

$\alpha$  と  $\rho$  の定義の模式図を Fig. 4 に示す。



**Fig. 4.** PPDF パラメータ  $\alpha$ ,  $\rho$  の定義の略図。黒色線は、幾何学的に決まる基本の光路長を示す。青色線は  $\alpha$  で表される光反射によって光路長が短くなった効果を表し、赤色線は、 $\rho$  で表される光の多重散乱によって光路長が長くなる効果を表す。

Oshchepkov et al. (2013b) は、Fig. 5 に示すような 3 層の大気モデルに対し、PPDF パラメータを用いて光路長変動を表現することを提案した。大気層を下から順に第 1, 2, 3 層とすると、エアロゾル濃度は地表面近くで高いことを考慮し、第 1 層では大気分子によるレイリー散乱とエアロゾルによる散乱の影響を受ける層、第 2 層ではレイリー散乱の影響のみを受ける層、そして第 3 層では散乱の影響を受けない層とし、各層での光路長変動を透過率の変化として PPDF パラメータを用いて表現した。用いる PPDF パラメータは全部で 8 つあり、そのうち、4 つの  $h_r$ ,  $\alpha_r$ ,  $\rho_r$ ,  $\gamma_r$  はレイリー散乱に伴う反射/多重散乱の効果を、残りの 4 つのパラメータ  $h_a$ ,  $\alpha_a$ ,  $\rho_a$ ,  $\gamma_a$  は大気中のエアロゾルによる効果を表す (ここでは、雲は無いと仮定している)。そして、これらの PPDF パラメータを用いて、第 1 層の透過率  $T_1$ 、第 1+2 層の透過率  $T_{12}$ 、第 3 層の透過率  $T_3$  を組み合わせることで、有効透過率 (Effective Transmittance)  $T_{eff}$  を表す。その表現式を式 (1)-(8) に示す。

$$T_{eff} = \alpha_r T_3 + (1 - \alpha_r) T_{12}^r T_a T_3, \quad (1)$$

$$T_3 = \exp[-C_\mu \tau_3], \quad (2)$$

$$T_{12}^r = \exp[-C_\mu (1 + \delta_r) \tau_{12}], \quad (3)$$

$$T_a = (1 - \alpha_a) \exp[-C_\mu \tau_a \delta_a] + \alpha_a \exp[+C_\mu \tau_a] \quad (4)$$

ここで、

$$\delta_r = \rho_r \exp[-\gamma_r \tau_{12}], \quad (5)$$

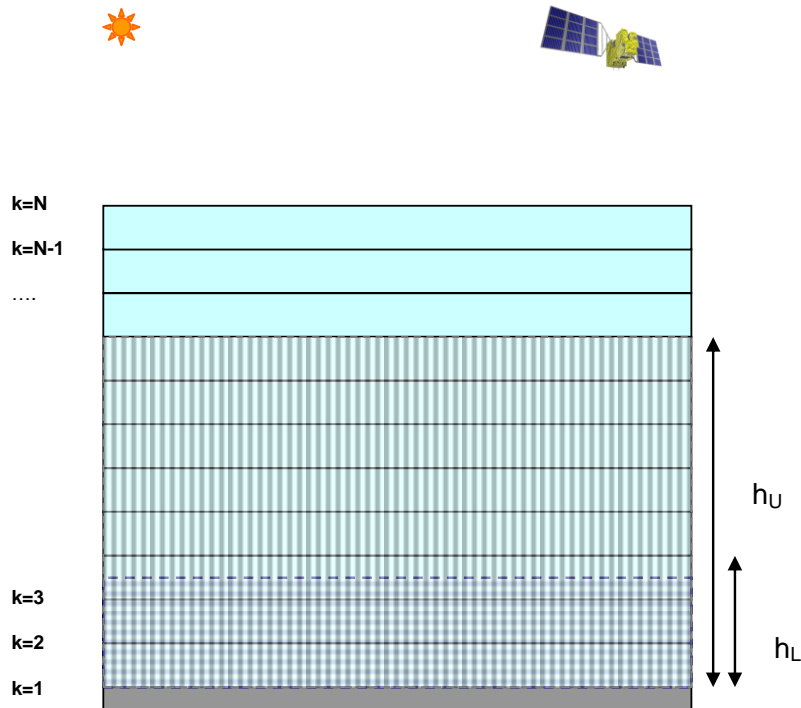
$$\delta_a = \rho_a \exp[-\gamma_a \tau_a], \quad (6)$$

$$C_\mu = 1 / \cos \theta + 1 / \cos \theta_0, \quad (7)$$

$$\tau_a = \int_0^{h_a} k(h) dh, \quad \tau_{12} = \int_0^{h_r} k(h) dh, \quad \tau_3 = \int_{h_r}^{h_{TOA}} k(h) dh, \quad (8)$$

である。また、 $\theta$  と  $\theta_0$  はそれぞれ太陽天頂角と衛星天頂角、 $k(h)$  は高度  $h$  におけるガス吸収係数、 $h_{TOA}$  は大気上端の高度である。

また、Oshchepkov et al. (2013b) で提案された手法では、上記の式に基づき、ガス濃度と PPDF パラメータとが同時に (Simultaneously) 導出されるため、その手法は PPDF-Simultaneous (PPDF-S) 法と名付けられた。PPDF-S 法は、GOSAT のデータ解析に適用される、PPDF に基づくリトリバル手法の最新バージョンである。PPDF-S 法の開発の歴史を 2.2 節で、その手法の現状の性能を 2.3 節で述べる。



**Fig. 5.** Oshchepkov et al., 2013b で定義された 3 層大気モデル。下から順に第 1, 2, 3 層とすると、 $h_r$  と  $h_u$  はそれぞれ第 1 層と第 2 層の層の上端高度である (Oshchepkov et al., 2018)。

## 2.2 開発の歴史

PPDF に基づくリトリバル手法の開発は、GOSAT の SWIR スペクトル解析への適用を目的に国立環境研究所で開発が開始された。まず、モンテカルロ・シミュレーションによって光子の軌道を統計的に解析し、その結果に基づいて 4 つの PPDF パラメータである  $h$ ,  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\gamma$  が導入された (Bril et al., 2007)。次に Oshchepkov et al. (2008) は、XCO<sub>2</sub> リトリバルのために PPDF パラメータを利用し、PPDF に基づくリトリバル手法の基礎を確立した。そして、砂漠ダストエアロゾルを含む大気への施用のために改良された後 (Bril et al., 2008)、それは 3 層の大気モデルに適用された (Oshchepkov et al., 2009)。さらに、その手法は Oshchepkov et al. (2011) によって GOSAT のデータ解析に用いられた。Bril et al. (2012) では、GOSAT の海上データからも XCO<sub>2</sub> を導出している。

ここまでの手法の解析精度を評価するため、Oshchepkov et al. (2012) は、地上観測から得られた XCO<sub>2</sub> データとの比較により、GOSAT データからリトリバルされた XCO<sub>2</sub> の結果を検証した。なお、用いられた地上観測データは、GOSAT の TANSO-FTS センサと同じようにフーリエ分光器を用いて、地上から XCO<sub>2</sub> を測定する Total Carbon Column Observing Network (TCCON) (Wunch et al., 2011) の 12 サイトから提供されたデータである。検証の結果、PPDF に基づく手法で導出された XCO<sub>2</sub> が -0.43ppm のバイアスを持ち、その標準偏差は



1.80ppm であると報告した。また、PPDF パラメータにより表される光路長変動の効果は、エアロゾルの輸送モデルから導出されたエアロゾル光学的厚さの季節トレンドと、宇宙からのライダー観測からわかった巻雲の光学的厚さの時間変動と整合的であることも示した。さらに、Oshchepkov et al. (2013a) は、PPDF に基づくリトリーバル結果と、FP 法に基づく様々なリトリーバル・アルゴリズムによって導出された XCO<sub>2</sub> の結果を相互比較した。その結果、TCCON 12 サイトのデータとの比較による検証結果は、PPDF に基づく手法で導出された XCO<sub>2</sub> は、他の FP 法に基づいたリトリーバル・アルゴリズムに対して遜色ない解析精度をもつことを示した。

そして、Oshchepkov et al. (2013b) により 2.1 節で示した PPDF-S 法が開発され、そのリトリーバル結果は 12 サイトの TCCON データと比較し検証された。その結果、XCO<sub>2</sub> バイアスは 0.08ppm、その標準偏差は 1.90ppm であると報告した。

## 2.3 現状のパフォーマンス

Iwasaki et al. (2017) は PPDF-S 法で導出された XCO<sub>2</sub> と XCH<sub>4</sub> の解析期間を拡大し、それらの精度と全球での特性について評価した。精度評価は、先行研究に倣い TCCON のデータとの比較による検証結果によって議論した。用いた TCCON データは Table 3 で示す 11 サイトで得られたデータであり、緯度・経度差が 2° 以内、観測時間差が 30 分以内の GOSAT データからリトリーバルされた XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> の値と比較した。その結果、XCO<sub>2</sub> のバイアスとその標準偏差はそれぞれ、0.73 ppm と 1.83 ppm、また XCH<sub>4</sub> については 0.66 ppb と 15.41 ppb であることを示した。比較のため、FP 法により導出された、国立環境研究所から提供されているレベル 2 (L2) データのうち、GOSAT の標準プロダクトである一般ユーザー (General Users: GU) 向けのプロダクト (GU プロダクト) も同様に検証した。その結果、PPDF-S 法で導出されたデータの精度は、GU プロダクトのそれとほぼ同等であった。

**Table 3.** 用いた TCCON データ (Iwasaki et al. 2017)

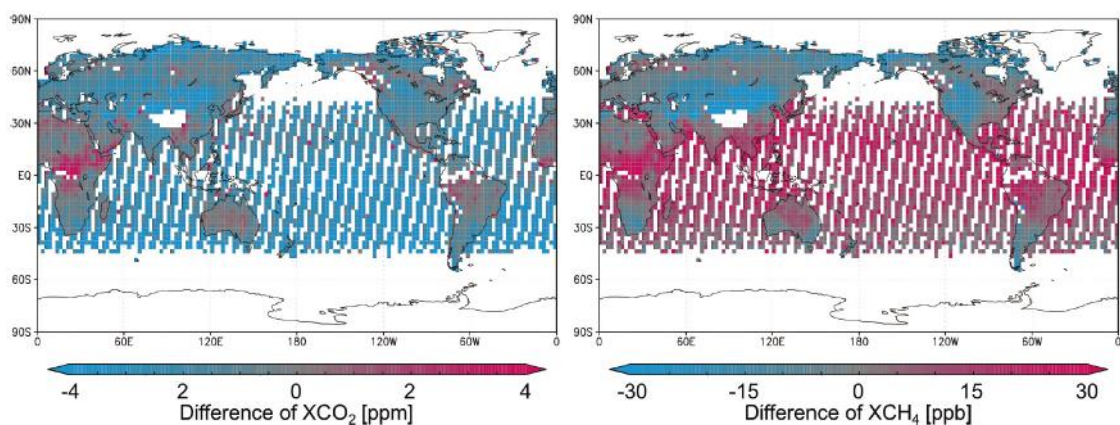
Site	Latitude	Longitude	Dataset reference	TCCON software version and release number
Bialystok	53.23°N,	23.03°E	Deutscher et al., 2015. doi:10.14291/tcon.ggg2014.bialystok01.R1/1183984.	GGG2014.R1
Bremen	53.10°N,	8.85°E	Notholt et al., 2014. doi:10.14291/tcon.ggg2014.bremen01.R0/1149275.	GGG2014.R0
Garmisch	47.48°N,	11.06°E	Sussmann et al., 2014. doi:10.14291/tcon.ggg2014.garmisch01.R0/1149299.	GGG2014.R0
Orléans	47.97°N,	2.11°E	Warneke et al., 2014. doi:10.14291/tcon.ggg2014.orleans01.R0/1149276.	GGG2014.R0
Lamont	36.60°N,	97.49°W	Wennberg et al., 2016. doi:10.14291/tcon.ggg2014.lamont01.R1/1255070.	GGG2014.R1
Park Falls	67.37°N,	90.27°W	Wennberg et al., 2014. doi:10.14291/tcon.ggg2014.parkfalls01.R0/1149161.	GGG2014.R0
Sodankylä	67.37°N,	26.63°E	Kivi et al., 2014. doi:10.14291/tcon.ggg2014.sodankyla01.R0/1149280.	GGG2014.R0
Tsukuba125HR	36.05°N,	140.12°E	Morino et al., 2016. doi:10.14291/tcon.ggg2014.tsukuba02.R1/1241486.	GGG2014.R1
Darwin	12.43°S,	130.89°E	Griffith et al., 2014a. doi:10.14291/tcon.ggg2014.darwin01.R0/1149290.	GGG2014.R0
Lauder125HR	45.05°S,	169.68°E	Sherlock et al., 2014. doi:10.14291/tcon.ggg2014.lauder02.R0/1149298.	GGG2014.R0
Wollongong	34.41°S,	150.88°E	Griffith et al., 2014b. doi:10.14291/tcon.ggg2014.wollongong01.R0/1149291.	GGG2014.R0

以上のようにバイアスと標準偏差を評価した上で、FP 法と PPDF-S 法でのリトリバル結果の違いを全球的に把握することを目的とし、GU プロダクトと、PPDF-S 法に基づく XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> データの値の差の全球分布を作成した (Fig. 6)。その結果、アフリカ大陸中央部とシベリア全域のバイオマス・バーニング発生地域において、両手法間で XCO<sub>2</sub> と XCH<sub>4</sub> に大きな差が見られた。バイオマス・バーニングは植物や森林など生物由来のものが燃焼する現象で、ガスとともにススなどのエアロゾルも多く発生する。そのため、この地域で見られた両手法間での差は、FP 法と PPDF-S 法とでエアロゾルによる光の反射/多重散乱の効果の取り扱い方法が異なることが原因である可能性があることがわかった。

エアロゾルの光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness: AOT) はエアロゾル濃度の指標として用いられるが、大きな値の AOT が観察されたときの XCO<sub>2</sub> の解析精度も検証した。ここでは、GU プロダクト同様、FP 法で導出され L2 データとして国立環境研究所から提供されているデータのうち、公募研究 (Research Announcement) の課題代表者 (Principal Investigator) 向けのプロダクト (RA プロダクト) も用いられた。GU プロダクトは、AOT などの大気パラメータ、地表面状態、放射パラメータなどを基準としたスクリーニング・テストにより RA プロダクトから抽出されたデータである。そこで、AOT の値によるスクリーニング・テストで落ちた (つまり、エアロゾル濃度が高い) RA プロダクトの XCO<sub>2</sub> と、同じシーンの PPDF-S 法で導出された XCO<sub>2</sub> とを比べた。その結果、前者のバイアスとその標準偏差はそれぞれ -1.27 ppm と 3.03 ppm であったのに対し、後者は 0.32 ppm と 1.47 ppm であった。このように、後者の方が TCCON データとの差が小さかったことから、FP 法でエア

ロゾルが多いと判断された状況において PPDF-S 法ではより精度良く解析が可能である場合があることが示唆された。

このように、エアロゾル高濃度域において、光の反射/多重散乱の取り扱い方法が FP 法とは異なる PPDF-S 法について、その高精度化を目指すことは、解析手法として多様なアプローチを行うという観点からも重要である。本研究では、次章に示すシミュレーション解析に従い、様々なエアロゾル大気・地表面に対して PPDF-S 法の解析精度を多角的に調べ、さらなる解析の精度向上を目指し PPDF-S 法の改良を試みた。



**Fig. 6.** GU プロダクトと PPDF-S 法に基づく解析結果の差。XCO<sub>2</sub>(左) と(右)の全球分布 (Iwasaki et al. 2017)。

### 3 PPDF-S 法の改良

#### 3.1 リトリバルの基本式とリトリバル・アルゴリズム

PPDF-S リトリバル・アルゴリズムは、式 (9) で定義される重み付き最小二乗差で表される評価関数  $J(\mathbf{x})$  の値を最小にする最適推定法 (Rodgers, 2000) に基づく。ここで、測定された放射輝度スペクトル  $\mathbf{R}^*$ 、シミュレーションした放射輝度スペクトル  $\mathbf{R}'$ 、解析のターゲットである状態ベクトル  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{x}$  に対する先験値データ  $\mathbf{x}_a$  である。また、 $f(\mathbf{x})$  は PPDF パラメータに基づいて観測される放射輝度を計算するフォワード・モデル、 $\mathbf{S}_y$  は観測スペクトルの測定誤差の共分散行列、 $\mathbf{S}_a$  は先験値がもつ誤差の共分散行列を表す。

$$J(\mathbf{R}^*, \mathbf{x}_a, \mathbf{x}) = (\mathbf{Y}^* - \mathbf{F}(\mathbf{x}))^T \mathbf{S}_y^{-1} (\mathbf{Y}^* - \mathbf{F}(\mathbf{x})) + (\mathbf{x}_a - \mathbf{x})^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}), \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}^* = -\ln(\mathbf{R}^*), \quad \mathbf{F}(\mathbf{x}) = -\ln(\mathbf{R}') = -\ln(f(\mathbf{x})), \quad (10)$$

ここで、

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_{gas} \\ x_{nongas} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_a = \begin{pmatrix} S_{a,gas} & 0 \\ 0 & S_{a,nongas} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

であり、状態ベクトル  $\mathbf{x}$  は、各大気層における CO<sub>2</sub> 濃度に関する状態ベクトル  $\mathbf{x}_{gas}$  と、 $h_r$ ,  $\alpha_r$ ,  $\rho_r$ ,  $\gamma_r$ ,  $h_o$ ,  $\alpha_o$ ,  $\rho_o$ ,  $\gamma_o$  を含む他のパラメータに関する状態ベクトル  $\mathbf{x}_{nongas}$  によって構成される。 $\mathbf{S}_a$  も同様である。

Gauss-Newton 法に従って、解は反復的に得られ、反復回数  $i+1$  番目の  $\mathbf{x}(\mathbf{x}_{i+1})$  は 1 つ前の解析結果 ( $\mathbf{x}_i$ ) を用いて以下のように表される；

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \left( \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K}_i + \mathbf{S}_a^{-1} \right)^{-1} \left[ \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} (\mathbf{Y}^* - \mathbf{F}(\mathbf{x}_i)) - \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a) \right], \quad (12)$$

ここで  $\mathbf{K}$  はヤコビアンと呼ばれ、 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_i$  に関して以下の式で表される；

$$\mathbf{K}_i = \left. \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_i}. \quad (13)$$

ヤコビアンは、状態ベクトル  $\mathbf{x}$  のある要素が変化するとき放射輝度のフォワード計算結果にどれほど影響を与えるかの指標である。その式は、 $\mathbf{x}$  の各要素に対して設定されており、式 (13) は CO<sub>2</sub> 濃度、式 (14)-(17) は  $\alpha_r$ ,  $\rho_r$ ,  $\gamma_r$ ,  $h_r$ 、式 (18)-(21) は  $\alpha_o$ ,  $\rho_o$ ,  $\gamma_o$ ,  $h_o$  に関するヤコビアンである。

$$-\frac{\partial T_{eff}}{\partial x_{k^*}} = \begin{cases} C_{\mu} \tau'_{k^*} [\alpha_U + (1 - \alpha_U) T_{12}^U T_L] T_3, h_{k^*} \geq h_U \\ C_{\mu} \tau'_{k^*} (1 - \alpha_U) (1 + \delta_U - \gamma_U \tau_{12} \delta_U) T_{12}^U T_L T_3, h_L \geq h_{k^*} > h_U \\ C_{\mu} \tau'_{k^*} (1 - \alpha_U) T_{12}^U T_3 \times \\ \left[ (1 + \delta_U - \gamma_U \tau_{12}) T_L + (1 - \alpha_L) (\delta_L - \gamma_L \tau_L \delta_L) \exp(-C_{\mu} \tau_L \delta_L) - \right. \\ \left. - \alpha_L \exp(C_{\mu} \tau_L) \right], h_{k^*} < h_L \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial \alpha_U} = T_3 - T_3 \cdot T_{12}^U \cdot T_L \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial \rho_U} = -(1 - \alpha_U) T_3 \cdot T_{12}^U \cdot T_L \cdot C_{\mu} \cdot \tau_{12} \cdot \exp(-\gamma_U \cdot \tau_{12}) \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial \gamma_U} = (1 - \alpha_U) T_3 \cdot T_{12}^U \cdot T_L \cdot C_{\mu} \cdot \tau_{12}^2 \cdot \gamma_U \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial h_U} = T_3 \cdot C_{\mu} \cdot k(h_U) \cdot [\alpha_U - (1 - \alpha_U) \cdot T_{12}^U \cdot T_L \cdot \delta_U \cdot (1 - \gamma_U \cdot \tau_{12})] \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial \alpha_L} = (1 - \alpha_U) \cdot T_3 \cdot T_{12}^U [\exp(C_{\mu} \tau_L) - \exp(-C_{\mu} \tau_L \delta_L)] \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial \rho_L} = -(1 - \alpha_U) \cdot (1 - \alpha_L) \cdot T_3 \cdot T_{12}^U [C_{\mu} \tau_L \cdot \exp(-C_{\mu} \tau_L \delta_L) \cdot \exp(-\gamma_L \tau_L)] \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial \gamma_L} = (1 - \alpha_U) (1 - \alpha_L) T_3 \cdot T_{12}^U \cdot C_{\mu} \cdot \tau_L^2 \cdot \delta_L \cdot \exp(-C_{\mu} \tau_L \delta_L) \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_{eff}}{\partial h_L} = (1 - \alpha_L) \cdot T_{12}^U \cdot T_3 \cdot C_{\mu} \cdot k(h_L) \times \\ [\alpha_L \exp(C_{\mu} \tau_L) - (1 - \alpha_L) \cdot \exp(-C_{\mu} \tau_L \delta_L) \cdot \delta_L \cdot (1 - \gamma_L \tau_L)] \quad (22)$$

上記の基本原理に基づいた PPDF-S リトリーバル・アルゴリズムのフローチャートを Fig. 7 に示す。そこに示されるように、シミュレーションにおいてリトリーバル結果を得るには以下の手順の計算を行う。

- (1)  $\mathbf{x}$  の先験値データ  $\mathbf{x}_a$  と GOSAT の観測に対応する地表面/大気状態を与え、PPDF パラメータに基づくフォワード計算で観測スペクトル  $\mathbf{Y}^*$  に対応するスペクトル  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  を計算する

- (2) 式 (9) で示した評価関数  $J(\mathbf{x})$  の値が最小になるよう  $\mathbf{x}$  を更新する  
(3) この過程を、収束テストをクリアするまで繰り返し行う  
(4) 収束テストをクリアした後は情報含有量などのパラメータによるスクリーニング・テストを経て、リトリバル結果を得る。

手順 (2) の  $\mathbf{x}$  の更新では、パラメータの解析中での変化勾配を表すアジョイントの式を用いる。アジョイントの式は、ヤコビアン同様、 $\mathbf{x}$  の各要素に対して設定されており、CO<sub>2</sub> 濃度に関するアジョイントを  $A_{CO_2}$ 、また  $\alpha_r, \rho_r, \gamma_r, h_r$  に関するアジョイントを  $A_{\alpha_r}, A_{\rho_r}, A_{\gamma_r}, A_{h_r}$ 、そして  $\alpha_a, \rho_a, \gamma_a, h_a$  に関するアジョイントを  $A_{\alpha_a}, A_{\rho_a}, A_{\gamma_a}, A_{h_a}$  とすると、それぞれ以下の式で表される；

$$A_{CO_2} = -\frac{\frac{\partial y}{\partial CO_2}}{a \text{ priori } CO_2} \quad (23)$$

$$A_{\alpha_r} = -2 * x_{\alpha_r} * \left( \alpha_r' * \frac{\partial y}{\partial \alpha_r} + \rho_r' * \frac{\partial y}{\partial \rho_r} \right) \quad (24)$$

$$A_{\rho_r} = \frac{\rho_{rayl.-Band1}}{\alpha_{rayl.-Band1}} * \alpha_r * ScaleFactor_{\rho_r} * \frac{\partial y}{\partial \rho_r} \quad (25)$$

$$A_{\gamma_r} = -2 * \frac{\partial y}{\partial \gamma_r} * x_{\gamma_r} * (\gamma_r' - 2) \quad (26)$$

$$A_{h_r} = \frac{\partial y}{\partial h_r} \quad (27)$$

$$A_{\alpha_a} = -2 * x_{\alpha_a} * \left( \alpha_a' * \frac{\partial y}{\partial \alpha_a} + \rho_a' * \frac{\partial y}{\partial \rho_a} \right) \quad (28)$$

$$A_{\rho_a} = \frac{\rho_{rayl.-Band1}}{\alpha_{rayl.-Band1}} * \alpha_a * ScaleFactor_{\rho_a} * \frac{\partial y}{\partial \rho_a} \quad (29)$$

$$A_{\gamma_a} = -2 * \frac{\partial y}{\partial \gamma_a} * x_{\gamma_a} * (\gamma_a' - 2) \quad (30)$$

$$A_{h_a} = \frac{\partial y}{\partial h_a} \quad (31)$$

( $X'$  : 反復回数 1 回前の  $X$ )

また、手順 (3) で反復計算する理由は、リトリバル問題は非線形問題であるため、式 (12) にある線形の逆行列計算 1 回だけの  $\mathbf{x}$  の更新では最適解に近づかない可能性があるため、複数回の更新によってより適正な値を得るためである。

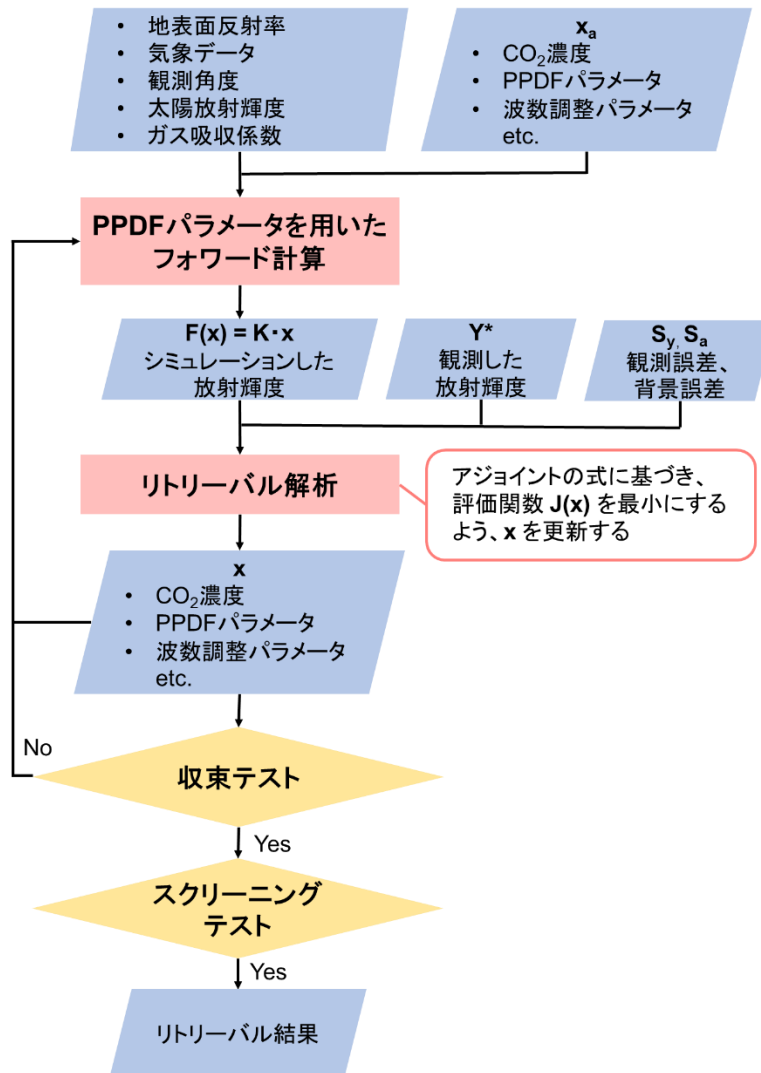


Fig. 7. PPDF-S リトリバル・アルゴリズムのフローチャート

### 3.2 シミュレーション解析に基づく CO<sub>2</sub> リトリバル

PPDF-S 法によるリトリバル精度を調べるために、以下に示すように放射輝度をシミュレーションし、それに対してリトリバル解析を行うという方法で精度評価を実施した。解析では、まず、様々な大気条件と地表面特性を仮定した大気放射伝達モデルによって、式 (9) および Fig. 7 の  $Y^*$  の観測輝度をシミュレーションし、計算した放射輝度から CO<sub>2</sub> 濃度を導出した。最終的に、導出した XCO<sub>2</sub> からシミュレーションで真値として仮定した XCO<sub>2</sub> を引くことにより計算される XCO<sub>2</sub> バイアスの値によって、リトリバル精度を評価した。

観測輝度のシミュレーション計算では、以下の気圧グリッドで大気を層分けした (単位は hPa); 0.1, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 850, 900, 925, 950, 975, 1000。その大気層に対するシミュレーションには、Table 4 に示す大気放射伝達モデル、

パラメータ設定およびデータセットを使用した。また、Table 4 に示す設定に加え、清浄大気 (エアロゾルが無い大気) の状態をエアロゾルの光学的厚さ (AOT) の値を 0.0 と設定することにより仮定した。以下、本文では、 $\mathbf{x}_a$  の各要素を  $x_a$ 、 $\mathbf{S}_y$ 、 $\mathbf{S}_a$  の各対角要素の平方根の値をそれぞれ  $\sigma_y$ 、 $\sigma_a$  と記述する。

一方、式 (9) および Fig. 7 の  $F(\mathbf{x})$  は、リトリーバル・プロセスにおいて PPDF パラメータを用いたフォワード計算により計算される。太陽入射光、太陽/衛星天頂角、地表面反射率および大気プロファイルは、エアロゾルモデルを除いて Pstar3 によるシミュレーションに使用されるモデルや値と同じである。PPDF に基づくフォワード計算では、光路長変動は、エアロゾルモデルを用いず、PPDF パラメータを用いて表される有効透過率の変化として説明される。状態ベクトル  $\mathbf{x}$  に含まれる各パラメータの先験値 ( $x_a$ ) および偏差 ( $\sigma_a$ ) を Table 5 に示す。また、 $\sigma_y$  の値は以下の通りである。

$$\text{Band 1 での } \sigma_y: 4.0 \times 10^{-7} / \text{SNR} [\text{W/m}^2/\text{str/cm}^{-1}]$$

$$\text{Band 2 での } \sigma_y: 3.5 \times 10^{-7} / \text{SNR} [\text{W/m}^2/\text{str/cm}^{-1}]$$

$$\text{Band 3 での } \sigma_y: 2.5 \times 10^{-7} / \text{SNR} [\text{W/m}^2/\text{str/cm}^{-1}]$$

$$\text{SNR (Signal to Noise Ratio)} = 400$$

**Table 4.** 放射輝度の計算に使用した大気放射伝達モデル、パラメータ設定およびデータセット

モデル、パラメータ、データセット	詳細
大気放射伝達モデル	Polarization System for Transfer of Atmospheric Radiation3 (Pstar3) (Ota et al., 2010)
太陽入射光	Band 1: Kurucz's model Band 2, 3: Toon's model
天頂角	太陽: 30° / 衛星: 0°
地表面反射率	0.05~0.50 (波長依存性なし; Band 1, 2, 3 で共通の値)
地表面気圧	気象庁の Grid Pointed Value (GPV) データ (夏の中緯度の大気を仮定)
気温鉛直プロファイル	
水蒸気 (H <sub>2</sub> O) 鉛直プロファイル	
CO <sub>2</sub> 鉛直プロファイル	鉛直一様に 390 ppm
ガス吸収	High resolution TRANsmission molecular absorption database (HITRAN) 2004 を用いた Line-By-Line (LBL) 計算結果 (Rothman et al., 2005)
エアロゾル種	Dust-like (土壌性), Urban (都市型), Rural (郊外型), Soot (スス)
エアロゾルの光学的厚さ (AOT)	0.05~1.0 (0.55 μm における値)



**Table 5.** 各リトリバーブル・パラメータの先験値と偏差

パラメータ	先験値 ( $x_0$ )	偏差 ( $\sigma_0$ )
CO <sub>2</sub>	鉛直方向に一様に 385 ppm	$\sigma_a^{i,j} = \left(\sigma_a^{i,i} \cdot \sigma_a^{j,j}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-0.5 \left \ln\left(p_i / p_j\right)\right \right]$ , ここで $\sigma_a^{i,i} = 6$ ppm、 $p_i$ は $i$ 番目の大気層での気圧である。
$h_r$	5 km	0.001 km
$\beta_{\alpha r^1}$	$\sqrt{-\ln(\alpha_{r,Band1})} \times (\Gamma_i / \Gamma_1) \approx 2$ , ここで、 $\Gamma_i$ is surface alb は Band $i$ ( $i = 1, 2, 3$ ) での地表面反射率である。	0.01
$\beta_{\rho r^2}$	1	0.01
$\beta_{\gamma r^3}$	3	0.002
$h_a$	5 km	0.5 km
$\beta_{\alpha a^1}$	$\sqrt{-\ln(\alpha_{r,Band1} / 20)} \times (\Gamma_i / \Gamma_1) \approx 3$	0.1
$\beta_{\rho a^2}$	1	$0.1 \times \sqrt{10}$ (Gain H <sup>4</sup> ), $0.1 \times \sqrt{0.5}$ (Gain M <sup>5</sup> )
$\beta_{\gamma a^3}$	3	$0.1 \times \sqrt{10}$ (Gain H <sup>4</sup> ), $0.1 \times \sqrt{0.5}$ (Gain M <sup>5</sup> )

<sup>1</sup>  $\alpha = \exp[-\beta_\alpha^2] \times ScaleFactor_\alpha$  ( $ScaleFactor_\alpha$ :  $\alpha$ に関する波数調整パラメータ)

<sup>2</sup>  $\rho = \frac{\rho_{r,Band1}}{\alpha_{r,Band1}} \times \beta_\rho \times ScaleFactor_\rho$  ( $ScaleFactor_\rho$ :  $\rho$ に関する波数調整パラメータ)

<sup>3</sup>  $\gamma = \exp[-\beta_\gamma^2] \times ScaleFactor_\gamma$  ( $ScaleFactor_\gamma$ :  $\gamma$ に関する波数調整パラメータ)

<sup>4</sup> Gain H: センサのゲイン設定が“High”の場合

<sup>5</sup> Gain M: センサのゲイン設定が“Middle”の場合

### 3.3 改良の方法

GOSAT プロジェクトの開始当初、センサ設計にあたり XCO<sub>2</sub> の解析精度は 1% を目標としていた。しかし、衛星打ち上げ後、実際に取得されたデータを用いた FP 法による解析精度の向上の努力により、約 0.1% の精度が達成されてきた。一方、PPDF-S 法は、フォワード計算での大気層分割の適正化 (Oshchepkov et al., 2011) やヤコビアン式の改善などの改良が図られ、その解析精度は他のリトリバーブル手法と同様に約 0.1% にまで向上した。そして、1.3 節で述べたように、地上や航空機によるサンプリング観測の精度である約 0.025% という精度を目指す段階まできている。

本研究では、まず PPDF-S リトリバーブル・アルゴリズムに衛星データの解析に一般的に用

いられる方法であるスペクトルのチャンネル選択を取り入れることで、清浄大気での解析精度を向上させることを試みた。また、現在の PPDF-S 法よりもエアロゾルを含む大気により解析精度の高い解析ができるようになることに加え、解が得られず解析不能となっていたケースでも安定した解が得られることで、より多くの観測データの解析が可能になることを目指し、リトリーバルに用いる解析パラメータの適正化を行った。

### 3.3.1 チャンネル選択

TIR スペクトルを用いたリトリーバル解析では、観測スペクトルのある波数の、各高度の状態ベクトルに対する感度は、高度 ( $z$ ) 方向の透過率 (Transmittance:  $Tr$ ) の変化率である  $dTr/dz$  (荷重関数と呼ぶ) で表すことができる。そして、 $dTr/dz$  で表される感度は、TIR では Fig. 8 に示すように鉛直方向に一様に分布するように選択することができることが知られている (Imasu, 1992)。

GOSAT の SWIR 域での観測波長帯では、解析対象である  $CO_2$  以外にも  $H_2O$  の吸収帯を含むため、解析に用いるチャンネルから  $H_2O$  の吸収の影響を強く受けた波数を除くことで、 $CO_2$  濃度解析に影響を及ぼす  $H_2O$  濃度の推定誤差の影響を低減させる。また、複数の波数が同じ高度に感度をもつことが多いため、各大気層に感度ピークを持つ波長の数を均等になるようにチャンネルを選択することで、解の安定性を担保するだけでなく計算コストを削減することが期待される。

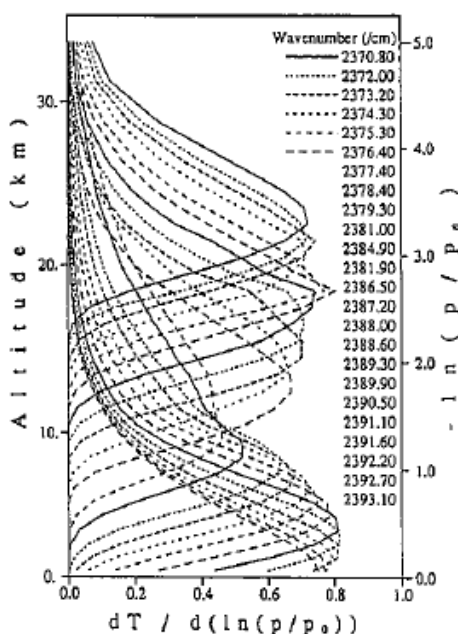


Fig. 8. 4.0  $\mu m$  の  $CO_2$  吸収帯における荷重関数 (Imasu, 1992)

一方、SWIRにおける感度の高度分布は、TIR域での放射の射出による効果の指標である  $dTr/dz$  の値では議論できない。これは、TIRでは透過率が変化する原因はガス濃度の変化と温度変化のみであるのに対し、SWIRでは加えて光反射/多重散乱の効果が大きいいため、ガスの濃度変化の要素のみを抽出する指標とすることが難しいためである。そこで、本研究ではGOSATの観測スペクトルのSWIR域のうちCO<sub>2</sub>の吸収帯であるBand 2, 3に対し、 $dTr/dz$  に変わる新たな指標の値で鉛直方向の感度を調べ、チャンネル選択を行った。ここでは、

$$dTr(z) = dTr_{down}(z) + \Gamma \cdot dTr_{up}(z) \quad (13)$$

と定義した。式中の  $dTr_{down}(z)$ ,  $dTr_{up}(z)$ ,  $\Gamma$  はそれぞれ、高度  $z$  での下向き放射の透過率、上向き放射の透過率、地表面反射率である。そして、観測から得られた各高度の情報を平等に観測結果に反映させるよう、チャンネル選択を行った。

### 3.3.2 解析パラメータの適正化

XCO<sub>2</sub>の精度の向上のために、これまで各種努力が行われてきたことは前述の通りであるが、さらなる精度向上のためには、何らかのブレークスルーとなる方法が必要と考える。その一つの試みとして、解析結果のCO<sub>2</sub>プロファイルに着目する。これまでの手法の精度評価においては、XCO<sub>2</sub>のみに着目していたが、実際、解析されたCO<sub>2</sub>プロファイルを調べると、非常に不自然な形をしている場合が多く見受けられた。そのため、このプロファイルを改善することが、XCO<sub>2</sub>の解析精度向上に繋がるのではないかと考え、それを評価の指標の一つとした。

PPDF-S リトリバルでは、各層でのCO<sub>2</sub>濃度とPPDFパラメータを含む全39個のパラメータが同時に導出されるため、それぞれのパラメータを含む状態ベクトルの  $\mathbf{x}_{gas}$  と  $\mathbf{x}_{nongas}$  の解析結果が相補的に影響し合う可能性がある。そのため、CO<sub>2</sub>プロファイルの解析結果を安定させるためには、 $\mathbf{x}_{gas}$  のみならず  $\mathbf{x}_{nongas}$  を適切に導出しなくてはならない。しかし、放射伝達プロセスが複雑である一方、PPDF-S リトリバルでは限られた数のPPDFパラメータで多くのタイプの光反射/多重散乱を表現しなければならず、その先験値および背景誤差の適切な値を決定することは困難である。それぞれの値は、 $\mathbf{x}_{nongas}$  に関する先験値ベクトル  $\mathbf{x}_\sigma$  の各要素である  $x_\sigma$  と、その背景誤差の共分散行列  $\mathbf{S}_{\sigma,nongas}$  の対角要素の平方根の値である  $\sigma_\sigma$  に設定される。もし、実際の  $\mathbf{x}_{nongas}$  の母集団の広がりよりも必要以上に  $\sigma_\sigma$  を大きく設定した場合、不適切な値のパラメータを導出する確率が高まり、同時に解析されるXCO<sub>2</sub>に悪影響を及ぼす可能性がある。

現在設定されている  $\sigma_\sigma$  よりも適正な値を見つける方法の1つは、 $\sigma_\sigma$  が不必要に大きいパラメータを見つけ、その値を小さく再設定することである。 $\mathbf{x}_{nongas}$  に含まれる各パラメータは、リトリバル解析中に  $\sigma_\sigma$  の範囲で変動することで、放射輝度を通してCO<sub>2</sub>濃度の解析値に影響する。そのため、各パラメータがもつ  $\sigma_\sigma$  に対応する輝度スペクトルの大きさは、その影響力を評価するための良い尺度となり得る。そこで、その尺度として、放射伝達方程

式  $Y=K \cdot x$  に従い  $K \cdot \sigma_a$  の値を用いた。そして、対応する  $K \cdot \sigma_a$  が不適切に大きなパラメータを探し、その  $\sigma_a$  を小さくすることで  $\text{CO}_2$  濃度の解析値すなわち  $\text{CO}_2$  鉛直プロファイルの解析結果を安定化させることを試みた。また、 $\sigma_a$  を小さくすることは  $x_a$  への拘束条件を強めることを意味するため、同時に  $x_a$  の適正化も行った。

## 4 改良の結果

以下、XCO<sub>2</sub> バイアスを、XCO<sub>2</sub> のリトリーバル解析値からシミュレーションで仮定した値を引いた値と定義し、その値によって改良の有効性を評価した。

### 4.1 チャンネル選択の結果

全層で感度が一定となるようにすることを目的とし、GOSAT 観測波長帯のうち、CO<sub>2</sub> の吸収帯である Band 2, 3 の  $dTr/dz$  のピークをとる高度が異なる波数を組み合わせてリトリーバル解析した。まず、Band 2 (1.6 $\mu\text{m}$  帯) と Band 3 (2.0 $\mu\text{m}$  帯) に含まれる波数をそれぞれの  $dTr/dz$  のプロファイルの形によってタイプ分けし、各タイプ、または、タイプの組み合わせでの波数を用いて (チャンネル選択して) リトリーバル解析した。

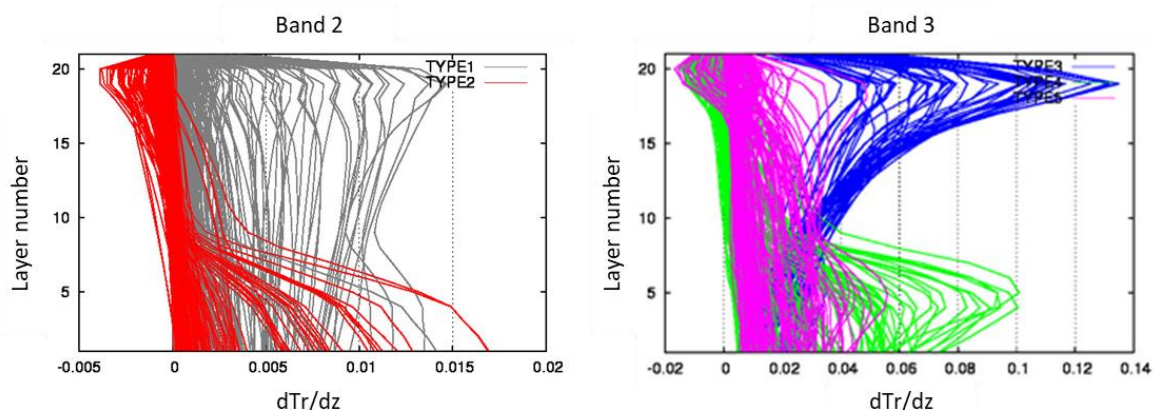
なお、このリトリーバル解析のシミュレーションにおいて、放射輝度スペクトルを求めるフォワード計算に用いた大気モデルは、3.2 節で示したような気圧グリッドで 21 層に分けられた大気モデルであり、11 層目付近を境に対流圏 (11 層より下) と成層圏 (11 層より上) に分けられる。Figure 9 は、大気層を定義するための気圧グリッドの番号 (0~21) に対し、Band 2, 3 の  $dTr/dz$  をタイプごとに色分けしてプロットした図である。ここでは、以下のようタイプ分けを行った;

#### Band 2

- Type 1: 全層で  $dTr/dz$  が一定 (灰色線)
- Type 2: 下層の  $dTr/dz$  が大きい (赤色線)

#### Band 3

- Type 3: 上層の  $dTr/dz$  が大きい (青色線)
- Type 4: 下層の  $dTr/dz$  が大きい (緑色線)
- Type 5: 全層での  $dTr/dz$  が一定 (ピンク色線)



**Fig. 9.** Band2, 3 の各大気層での  $dTr/dz$ 。Band 2 (左) の波数はその形状ごとに Type 1 (灰色線) または Type 2 (赤色線) に、Band 3 (右) の波数は Type 3 (青色線)、Type 4 (緑色線)、Type 5 (ピンク色線) のいずれかに分類される。

Figure 10 に各タイプ、または、タイプの組み合わせでの波数を用いてリトリーバル解析した結果を示す。ただし、ここでは Type 4, 5 の波数は用いなかった。Type 4 の波数を用いなかった理由は、Band 3 で大気下層に感度がある Type 4 には  $CO_2$  のみならず  $H_2O$  の吸収線も含むことがわかったからであり、その影響を取り除くためである (このこと自体がチャンネル選択であるとも言える)。また、Type 5 の波数を用いなかった理由は、すでに Band 2 に対し全層に感度をもつ Type 2 を選択していることから、Type 5 を選択せず解析に用いる波数をできるかぎり減らすことで計算コストの削減を図ったためである。そのため、Fig. 10 では、Type 1~3 に対する結果を示している。示した結果は上から順に、選択された波数 (チャンネル) の数、アベレージング・カーネル (Averaging Kernel: AK)、 $CO_2$  鉛直プロファイル、情報含有量 (Degree Of Freedom for Signal: DOFS) の解析値、 $XCO_2$  バイアスである。AK は各高度の情報かどの高度まで広がって解析されるかを表し、DOFS は鉛直方向に有意に解析可能な層数を表す指標である。 $CO_2$  濃度の先験値と真値は鉛直一様に 385.35 ppm と 387.25 ppm とし、それぞれ  $CO_2$  の鉛直プロファイルの図中にピンク色線とオレンジ色線で示した。青色線は、解析結果である。また、先験値が真値から大きく離れたときの解析結果も調べるため、 $CO_2$  濃度の先験値を鉛直一様に 400 ppm としたときの解析も行った。その解析結果は黒色線で示してある。なお、AK、DOFS、 $XCO_2$  バイアスの結果は、 $CO_2$  濃度の先験値が鉛直一様に 385.35 ppm であるときの結果である。また、AK の縦軸は Fig. 9 同様、大気層を定義するための気圧グリッドの番号 (0~21) である。

全チャンネル (Type 1+2+3+4+5) を用いたときの波数の数は 989、DOFS は 1.24、 $XCO_2$  バイアスは -1.05 ppm であった。その結果に対し、Fig. 10 に示されるように、チャンネル選択後の解析結果は Type ごとに大きく変わることがわかった。まず AK と  $CO_2$  鉛直プロファイルに着目すると、Type 2 に分類される波数を用いると成層圏での  $CO_2$  の感度が多少上がるものの、全 Type に共通して成層圏での感度が低いことがわかった。次に DOFS に着目する

と、Type 1 または Type 3 に分類される波数のみを用いたとき、それぞれの値は 0.69、0.60 であり、鉛直方向に平均した値である XCO<sub>2</sub> を表すために必要である 1.0 の値を大幅に下回った。さらに、CO<sub>2</sub> 鉛直プロファイルの結果から、成層圏での CO<sub>2</sub> 濃度は先験値に非常に近く、その高度に対する感度はほとんどないことがわかった。それぞれに対応する XCO<sub>2</sub> バイアスは -0.01 ppm と -0.20 ppm と低い値だが、これは対流圏での CO<sub>2</sub> 濃度の増加分と成層圏での先験値に近い濃度とが打ち消し合い、このような非常に小さな値を示したと考えられる。また、他の Type またはそれらの組み合わせについては、成層圏での感度は多少上がるものの、DOFS が 1.0 を下回るだけでなく、XCO<sub>2</sub> バイアスが 4 ppm を超える大きな値を示す結果となった。

以上の結果から、水蒸気の影響低減と処理の高速化のためにはチャンネル選択は有効であると考えられるが、DOFS を 1 に近い値に保ちつつ CO<sub>2</sub> 鉛直プロファイルの安定化と XCO<sub>2</sub> バイアスを低減させるという点では有用ではないため、チャンネル選択は XCO<sub>2</sub> バイアスの低減にあまり有用ではないと考え、今回の PPDF-S 法の改良の手段には加えなかった。

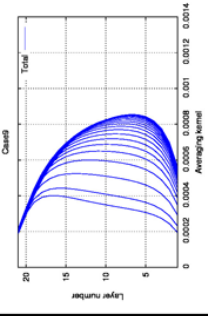
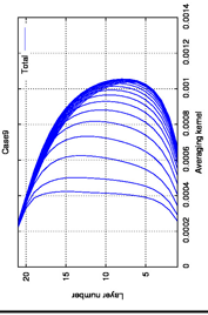
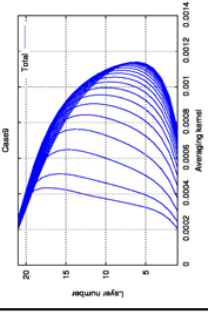
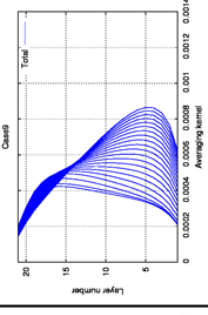
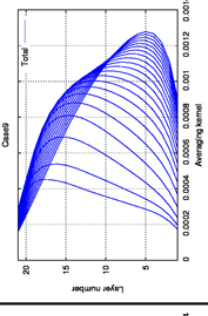
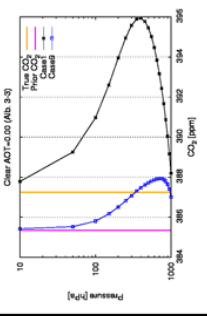
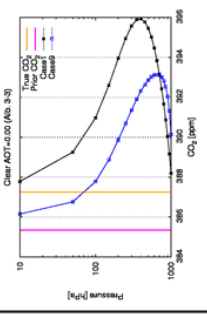
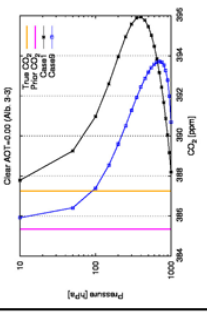
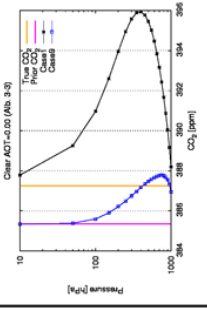
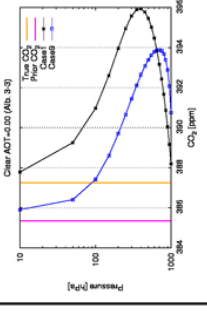
Band2		Band3		Band2+3	
Type1	Type2	Type1+2	Type3	Type1+2+3	
波数の数	176	211	387	47	434
AK					
CO <sub>2</sub> profile					
DOFS	0.69	0.86	0.92	0.60	0.98
Bias	-0.01 ppm	+4.21 ppm	+4.47 ppm	-0.20 ppm	+4.6 ppm

Fig. 10. 各タイプ、または、タイプの組み合わせでの波数を用いてリトリバーバル解析した結果



## 4.2 解析パラメータの適正化の結果

### 4.2.1 $\sigma_a$ を適正化するパラメータの決定

各 PPDF パラメータの  $K \cdot \sigma_a$  の値を比較し、放射輝度を通して  $\text{CO}_2$  濃度の解析値に及ぼす影響の大きさを評価した。その結果、エアロゾルによる光反射の効果を表す  $\alpha_a$  の  $K \cdot \sigma_a$  の値が他のパラメータに対して2桁以上のオーダーで大きいことがわかった。ここでは例として Band 2 における  $\alpha_a$ ,  $\rho_a$ ,  $\gamma_a$  の  $K \cdot \sigma_a$  のスペクトルを Fig. 11 に示す。このことから、解析における  $\alpha_a$  の変動が必要以上に大きいため  $\text{CO}_2$  鉛直プロファイルの不安定性を引き起こしていた可能性があると考え、 $\alpha_a$  の  $\sigma_a$  とその初期値を適正化することを試みた。

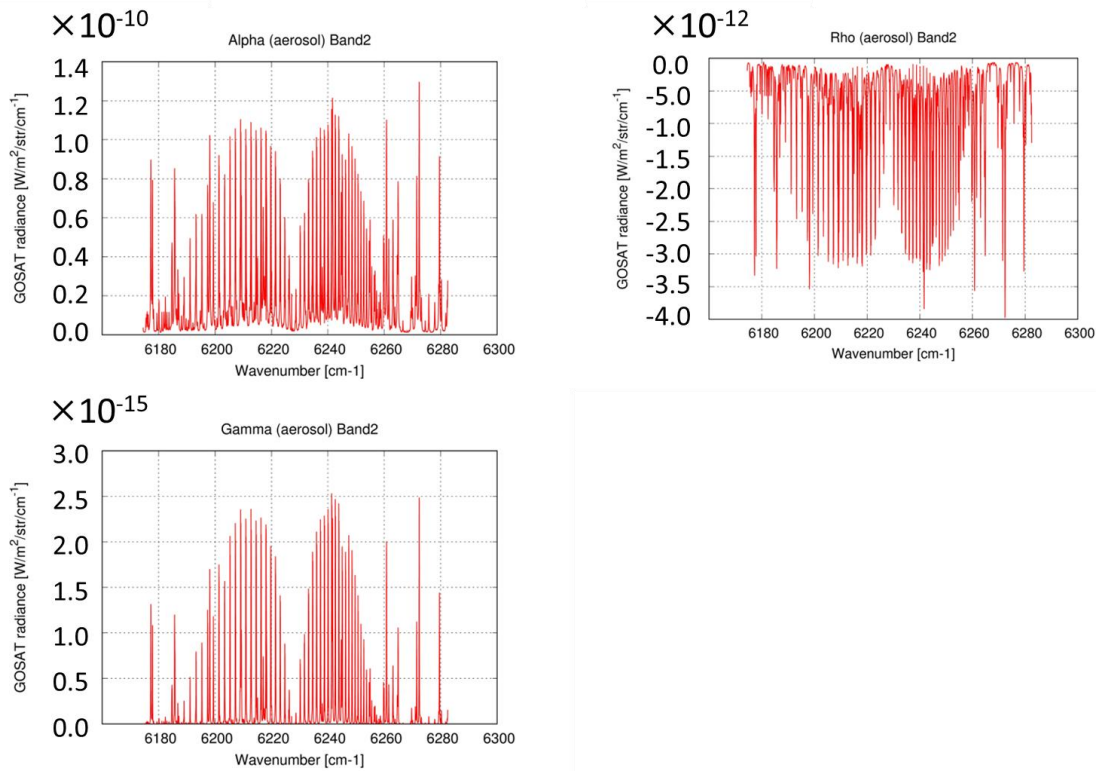


Fig. 11. Band 2 における  $\alpha_a$ ,  $\rho_a$ ,  $\gamma_a$  の  $K \cdot \sigma_a$  のスペクトル

## 4.2.2 清浄大気への適用

$\alpha_o$ に関する $\sigma_o$ の値を、元の値に対し、1から1/100までの倍率を掛けた値に変えて、リトリバー解析した。解析に用いた輝度スペクトルは、大気放射伝達モデル Pstar3 で以下の地表面反射率と大気を仮定してシミュレーションした観測スペクトルである。

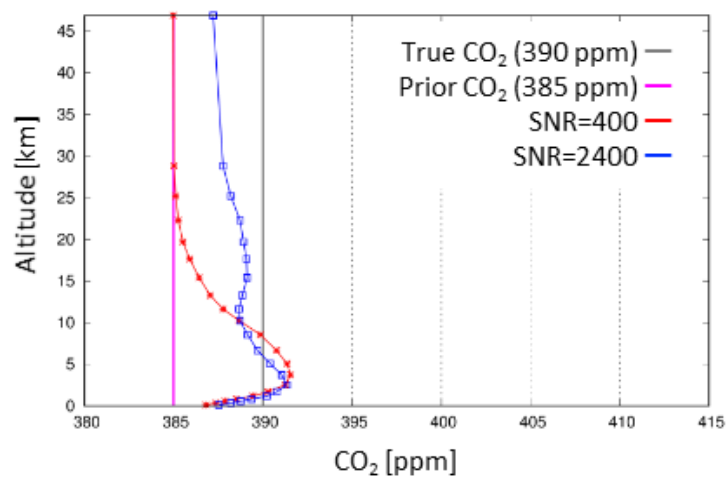
- 地表面反射率: 波長依存性が無いとし GOSAT の観測波長帯 Band 1~3 で共通して 0.2
- 大気: 清浄大気および  $0.55 \mu\text{m}$ での AOT の値が 0.8 の 4 種のエアロゾル (Dust-like, Urban, Rural, Soot) を含む大気

シミュレーションで 0.05 から 0.5 の範囲の地表面反射率と、0.05 から 1.0 の範囲の AOT の組み合わせによる様々な観測条件に対し、CO<sub>2</sub>鉛直プロファイルの形と XCO<sub>2</sub>の解析値を参照し、様々な $\sigma_o$ についてのリトリバー解析結果の中から $\sigma_o$ の適正値を決めた。その結果、先験値 $\alpha_o$ を元の値から 1/10 倍にした上で、 $\sigma_o$ を元の値の 1/20 倍にすることが、CO<sub>2</sub>鉛直プロファイルを安定化させ、XCO<sub>2</sub>バイアスを低減させることに有用であることがわかった。この節では清浄大気における結果のみを示し、エアロゾル大気についての結果は 4.2.3 節で述べる

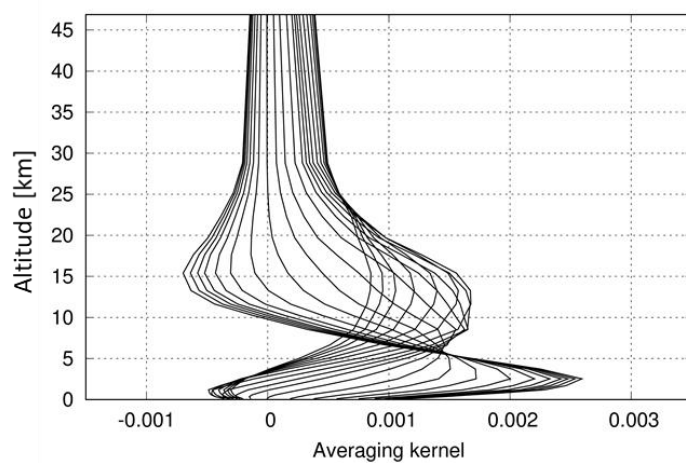
Figure 12~14 はそれぞれ、 $\alpha_o$ に関する $\sigma_o$ を適正化する改良を施した後の PPDF-S 法で、清浄大気についてリトリバー解析したときの、CO<sub>2</sub>鉛直プロファイル、AK、そして XCO<sub>2</sub>に与える各高度の寄与率を表す Column Averaging Kernel (CAK) の結果である。CAK は、気柱量に対する感度の高度分布を表す指標である。これらの解析結果は改良前後でほぼ不変であったため、ここでは改良後の結果のみを示す。Figure 12 に図示されるピンク色線と灰色線はそれぞれ、鉛直一様に与えた 385 ppm の先験値と 400 ppm の真値を表す。また、赤色線は SNR=400 のときの結果であり、それとあわせ、比較のため、SNRが理想的に非常に高い場合としてその値が 2400 のときの結果も青色線で示した。一方、Fig. 13, 14 は SNR=400 のときの結果である。

Figure 12 より、SNR=400 のときの CO<sub>2</sub>プロファイルは、先験値と真値のプロファイルとの間に存在するが、その形は Fig. 14, 15 でも示されているように、対流圏の中層にピークを持ち、鉛直方向に一様ではないことがわかる。また、SNR=2400 のとき、観測誤差は非常に小さいため、解析結果は観測の情報を重んじて真値のプロファイルに近づくが、依然として完全には鉛直方向に均一ではない。この結果については第 6 章で議論する。

これら CO<sub>2</sub>鉛直プロファイル、AK、CAK と同様の条件での解析結果に対応する XCO<sub>2</sub>のバイアスは、改良前後でそれぞれ -0.47 ppm と -0.63 ppm であった。このように、XCO<sub>2</sub>の解析精度は清浄大気においては多少悪化するものの、実際の大气中で起こる各種現象に起因する CO<sub>2</sub>濃度の変動と比較すると十分小さい値である。



**Fig. 12.** 改良後の PPDF-S 法で清浄大気についてリトリーバル解析したときの、CO<sub>2</sub> 鉛直プロファイル。赤色線と青色線はそれぞれ  $SNR=400, 2400$  のときの結果である。CO<sub>2</sub> 濃度の先験値と真値は、鉛直一様にそれぞれ 385 ppm (ピンク色線) と 390 ppm (灰色線) とした。



**Fig. 13.** 改良後の PPDF-S 法で清浄大気についてリトリーバル解析したときの AK ( $SNR = 400$ )

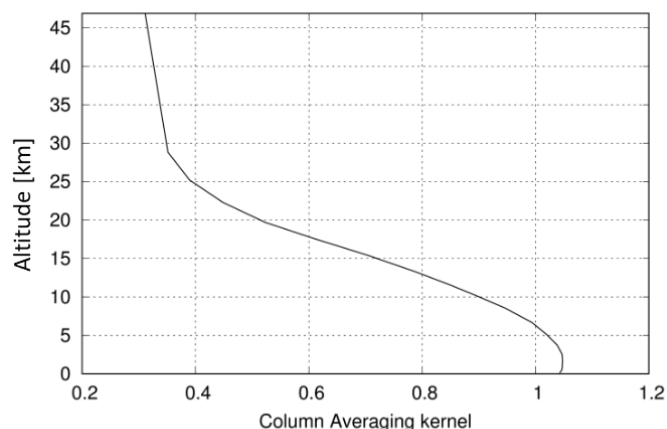
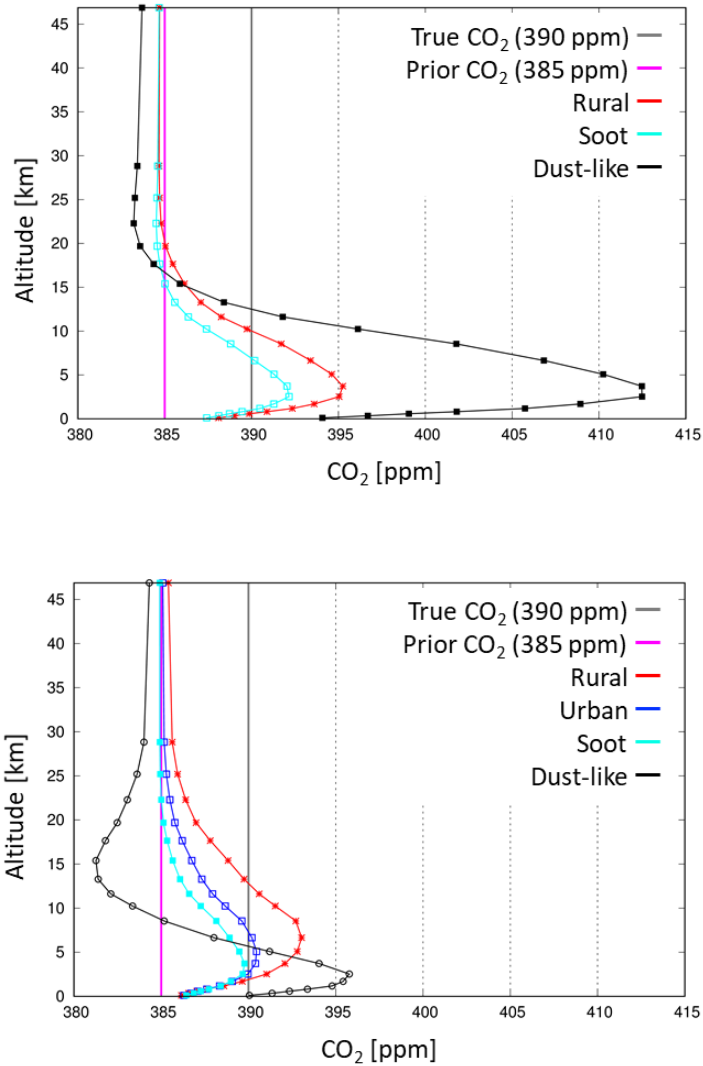


Fig. 14. 改良後の PPDF-S 法で清浄大気についてリトリーバル解析したときの CAK ( $SNR = 400$ )

#### 4.2.3 エアロゾルを含む大気への適用

Figure 15 は、シミュレーションで大気中に Dust-like, Urban, Rural, Soot の 4 種のエアロゾルがそれぞれ存在すると仮定し、各エアロゾル種の AOT (波長  $0.55 \mu\text{m}$  での値) を 1.0、地表面反射率を 0.2 としたときの  $\text{CO}_2$  鉛直プロファイルの解析結果である。上図が改良前、下図が改良後の結果を表す。それぞれ赤色線で Rural、青色線で Urban、水色線で Soot、黒色線で Dust-like の結果を、また Fig. 12 同様、先験値と真値のプロファイルをそれぞれピンク色線と灰色線で示す。なお、AK と CAK の解析結果は清浄大気に対する結果とほぼ同等であったため、ここでは示していない。Figure 15 の上図には Urban の結果が図示されていないが、これは、改良前の PPDF-S 法では、Urban を含む大気に対しては Gauss-Newton 法に基づく反復計算において収束する  $\mathbf{x}$  の解が見つからなかったためである。一方、改良後では、全てのエアロゾルに対して解が得られた。また、特に Dust-like については、改良後は対流圏における  $\text{CO}_2$  濃度の変動が小さくなり、 $\text{CO}_2$  鉛直プロファイルが安定化した。

また、Fig. 15 の鉛直プロファイルに対応する  $\text{XCO}_2$  のバイアスを Table 6 に示す。Rural, Urban, Dust-like については PPDF-S 法の改良後に  $\text{XCO}_2$  のバイアスが低減したことがわかった。しかし、Soot については負の方向にバイアスが增加した。この結果については第 6 章で議論する。

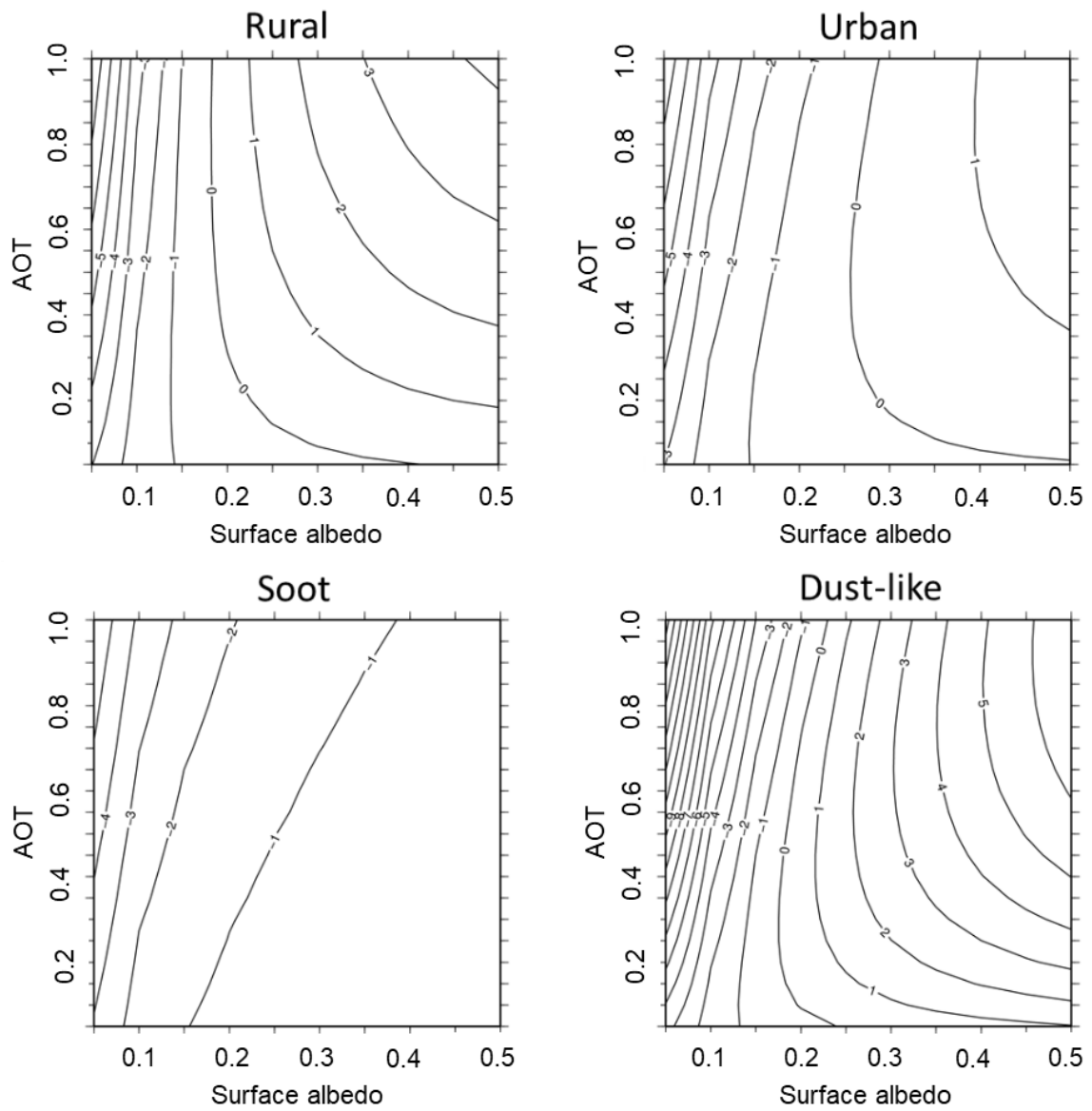


**Fig. 15.** シミュレーションで地表面反射率を 0.2、AOT を 1.0 と仮定したときの、CO<sub>2</sub> 鉛直プロファイルの解析結果 (上図: 改良前の PPDF-S 法による結果、下図: 改良後の PPDF-S 法による結果)。赤色線で Rural、青色線で Urban、水色線で Soot、黒色線で Dust-like の結果を、また、先験値と真値のプロファイルをそれぞれピンク色線と灰色線で示す。

**Table 6.** Fig. 15 の鉛直プロファイルに対応する XCO<sub>2</sub> のバイアス

	改良前	改良後
Rural	1.31 ppm	0.48 ppm
Urban	解なし	-1.27 ppm
Soot	-0.95 ppm	-2.03 ppm
Dust-like	11.38 ppm	-1.22 ppm

さらに、Table 3 に示すように、地表面反射率を 0.05~0.50、エアロゾルを Dust-like, Urban, Rural, Soot の 4 種、各エアロゾル種に対して AOT (波長 0.55  $\mu\text{m}$  での値) を 0.05~1.0 と仮定した条件に対してリトリーバル解析した。地表面反射率と AOT の大きさはどちらも 0.05 刻みで変化させ、試したシミュレーションの数は全部で 800 (=10 $\times$ 4 $\times$ 20) となる。Figure 16 は、それらの地表面反射率と AOT 対し、計算された XCO<sub>2</sub> バイアス (単位は ppm) の等高線図である。バイアスが地表面反射率、エアロゾル種、AOT に依存することが分かる。特に地表面反射率が小さい場合、全てのエアロゾル種で XCO<sub>2</sub> バイアスが大きな負の値を示し、バイアスの AOT への依存性が大きい。また、Rural, Urban, Dust-like に対してはバイアスが 0 となる線があるのに対し、Soot については全ケースで負のバイアスが見られた。Dust-like については、バイアスは $\pm 5$  ppm を超えるケースもあり、他のエアロゾル種の結果よりも相対的にバイアスが大きかった。また、Rural, Urban, Dust-like に対して見られたバイアスが 0 となる線は、地表面反射率が 0.2 から 0.3 のときに現れた。ここでは、先験値  $\alpha_o$  を元の値から 1/10 倍、 $\sigma_o$  を元の値の 1/20 倍にしたときの結果を示しているが、その他の値を設定した場合にも、バイアスが 0 となるのは、地表面反射率が 0.2 から 0.4 の範囲の値を取るときであった。



**Fig. 16.** 様々な地表面反射率と AOT の条件に対して計算された XCO<sub>2</sub> バイアス (単位は ppm) の等高線図

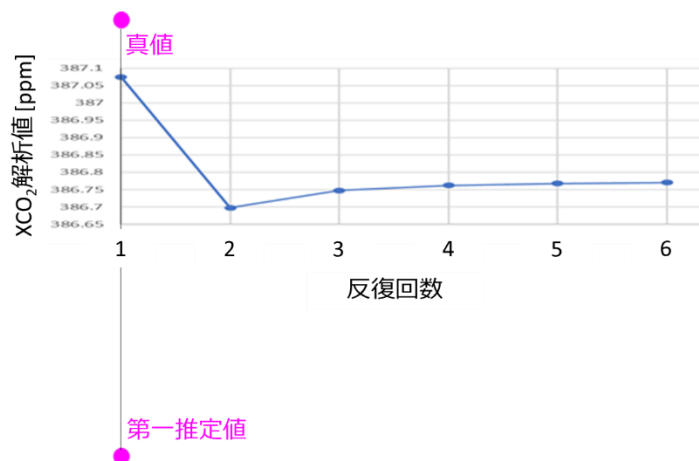
さらに、実際の GOSAT の観測に近いシミュレーションにより XCO<sub>2</sub> の解析精度を評価するため、模擬計算される観測スペクトルのシミュレーションに、波数依存性を考慮した、より現実的な地表面反射率を与えた。与えた反射率は、Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) のスペクトル・ライブラリに基づいて設定された 19 分類の土地被覆タイプ (0: water, 1: evergreen needleleaf forest, 2: evergreen broadleaf forest, 3: deciduous needleleaf forest, 4: deciduous broadleaf forest, 5: mixed forest, 6: closed shrublands, 7: open shrublands, 8: woody savannas, 9: savannas, 10: grasslands, 11: permanent wetlands, 12: croplands, 13: urban and built-up areas, 14: cropland/natural, 15: snow and ice, 16: barren or sparsely vegetated areas, 17: water bodies, and 18: tundra) の値である。Figure 17 は、土地被覆タイプごとの XCO<sub>2</sub> バイアスの結果である。この結果からも、Fig. 16 で示された結果と同様、water または snow and ice のような小さな値の地表面反射率に対してバイアスが大きな負の値を取ることがわかる。また、Dust-like のバイアスが他のエアロゾル種と比べて絶対値が大きいことも示された。この結果については、第 6 章で議論する。

また、シミュレーションで仮定するエアロゾル種によって、フォワード計算とリトリーバルを繰り返す計算の反復回数ごとに XCO<sub>2</sub> 解析値が変動する様子が異なることがわかった。例として、Fig. 18 に Dust-like を仮定したときの結果を示す。ここで示すように、XCO<sub>2</sub> 解析値は、第一推定値 (385.75 ppm) からスタートし、1 回目の計算で真値 (387.5 ppm) に最も近づいた後、2 回目に真値から離れる値を取り、3 回目以降はほぼ変化しないという特徴的な変動を示す傾向がある。本来であれば、解析値は反復回数を重ねるごとに真値へ近づくはずである。しかし、1 回目の計算で解析値が真値に最も近い結果が得られ、その後、再度真値から離れるという挙動を示すということは、状態ベクトル  $\mathbf{x}$  等の初期値が、Dust-like を含む大気に対しては適切ではない可能性を表している。このような示唆があるものの、今後、反復回数ごとの XCO<sub>2</sub> 解析値の変動の様子によって、大気中のエアロゾル種を判別することのできる可能性について、今後、詳細に検討していくべきと考える。そして、一旦、その変動の様子からエアロゾル種が Dust-like と判別されれば、1 回目の計算値をリトリーバル結果として採用することで、より適した解を得ることができるといえる。このよう方法が、エアロゾル種が判別した後のアルゴリズムの改良点として考えられる。





**Fig. 17.** 土地被覆タイプ(0: water, 1: evergreen needleleaf forest, 2: evergreen broadleaf forest, 3: deciduous needleleaf forest, 4: deciduous broadleaf forest, 5: mixed forest, 6: closed shrublands, 7: open shrublands, 8: woody savannas, 9: savannas, 10: grasslands, 11: permanent wetlands, 12: croplands, 13: urban and built-up areas, 14: cropland/natural, 15: snow and ice, 16: barren or sparsely vegetated areas, 17: water bodies, and 18: tundra) ごとの XCO<sub>2</sub> バイアス



**Fig. 18.** シミュレーションでエアロゾル種として Dust-like を仮定したとき、反復回数ごとに XCO<sub>2</sub> 解析値が変動する様子

## 5 GOSAT データ解析への応用

この章では、 $\alpha_a$ の分散である $\sigma_a$ および初期値を適正化した PPDF-S 法を、GOSAT の実データ解析へ応用した結果を述べる。まず、清浄大気における解析精度を調べた後に、高濃度エアロゾル域である西シベリア域に改良後の PPDF-S 法を適用した。解析した GOSAT の観測データは、2009 年 6 月から 2014 年 5 月にかけて観測された、V161.160 の L1B 相当の輝度データである。

なお、GOSAT データ解析では、ガス吸収係数の計算を LBLRTM の代わりに、ACOS/OCO-2 グループから提供されている吸収係数 (Absorption Coefficient: ABSCO) のルックアップテーブル (Look Up Table: LUT) (v3.0) を利用した。これらの LUT は、波長、温度および気圧の関数として表される三次元のパラメータの関数として表される吸収断面積を  $O_2$ ,  $H_2O$  および  $CO_2$  に対して用意しており、non-Voigt line shapes, speed dependence, line mixing また、分子同士の衝突によって誘発される吸収などの様々な放射の効果を考慮している。さらに本解析では、オリジナルの PPDF-S リトリバーブル・アルゴリズムに対し、リトリバーブル解析内で用いる装置関数と、GOSAT の観測スペクトルの電気信号から放射輝度へ単位換算するための変換係数を、L1B データ V161.160 に対応するバージョンのデータセットに更新した。装置関数は、 $0.01\text{ cm}^{-1}$  の波数分解能でフォワード計算された輝度スペクトルを畳み込み積分し、 $0.2\text{ cm}^{-1}$  刻みの GOSAT の観測スペクトルに合わせるために用いられた。

### 5.1 清浄大気

清浄大気への適用として、TCCON の 11 サイトと、西シベリア域に位置する Yekaterinburg ( $57.038^\circ\text{N}$ ,  $59.545^\circ\text{E}$ ) の近辺で得られた GOSAT データについてリトリバーブル解析を行い、それらの結果をそれぞれ TCCON と Yekaterinburg での地上観測から得られた  $XCO_2$  データと比較して検証した。

#### 5.1.1 TCCON データによる検証結果

用いた TCCON データは、Iwasaki et al. (2017) と同様、Table 3 に示した TCCON の 11 サイトから得られた  $XCO_2$  データである。GOSAT データと TCCON データの同期条件は、緯度・経度差が  $2^\circ$  以内、観測時間差が 30 分以内とした。

$XCO_2$  バイアスを、GOSAT データからの解析結果から TCCON データを引いた値と定義し、その値によって解析精度を評価した。その結果、改良前の PPDF-S 法での解析結果は、 $XCO_2$  バイアスとその標準偏差がそれぞれ  $0.37\text{ ppm}$  と  $3.04\text{ ppm}$  (データ数は 2537) であったのに対し、改良後は  $-0.39\text{ ppm}$  と  $3.56\text{ ppm}$  (データ数は 2587) となり、バイアスが負の方向へややシフトし標準偏差が増加した。しかし、解析精度は大きく劣化することはなかった。

Table 6 に改良後の PPDF-S 法による XCO<sub>2</sub> の解析結果について、TCCON サイトごとの検証結果を示す。

**Table 6.** PPDF-S 法に改良を施した後の、TCCON サイトごとの検証結果

TCCON サイト	改良前			改良後		
	データ数	XCO <sub>2</sub> バイアス [ppm]	標準偏差 [ppm]	データ数	XCO <sub>2</sub> バイアス [ppm]	標準偏差 [ppm]
Bialystok	61	0.38	2.65	65	-0.70	2.90
Bremen	32	1.53	2.61	32	0.89	3.14
Garmisch	106	0.69	2.65	109	-0.24	2.91
Orléans	176	0.12	2.00	178	-0.75	2.30
Lamont	770	0.49	2.82	782	0.31	2.88
Park Falls	192	-0.02	2.88	198	-1.24	3.29
Sodankyla	48	0.87	2.32	48	0.04	2.54
Tsukuba	340	2.55	3.14	344	1.83	3.52
Darwin	303	-0.77	2.46	313	-2.10	3.88
Laudar	128	-1.47	1.96	131	-2.21	2.40
Wollongong	381	-0.24	2.45	387	-1.33	2.93
Total	2537	0.37	3.04	2587	-0.39	3.56

### 5.1.2 Yekaterinburg でのデータによる検証結果

Yekaterinburg は TCCON には属していないが、地上設置型の類似のフーリエ分光器による観測により XCO<sub>2</sub> を解析しており、その解析精度は TCCON とほぼ同等であることが報告されている (Rokotyán et al., 2015)。Yekaterinburg は 5.2 節で示す対象地域内に位置しており、そこで得られた XCO<sub>2</sub> データは対象地域に対する検証データとして位置づけられる。データはこのサイトを運用している国立ウラル大学より提供を受けた。

ここでは、GOSAT データからの解析結果との比較条件は、緯度・経度差が 2°以内、観測時間差が 90 分以内とした。Figure 19 は GOSAT データの解析結果と、Yekaterinburg でのデータとの相関図である。この結果に対し、TCCON データでの検証と同様に、XCO<sub>2</sub> バイアスを、GOSAT データからの解析結果から地上観測のデータを引いた値として定義する。その結果、XCO<sub>2</sub> バイアスとその標準偏差の改良前と後の値は、それぞれ 0.75 ppm と 0.57 ppm (データ数は 5)、0.69 ppm と 1.79 ppm (データ数は 7) であり、TCCON データでの検証結果と同じく、改良後の精度が大きく劣化することはなかった。

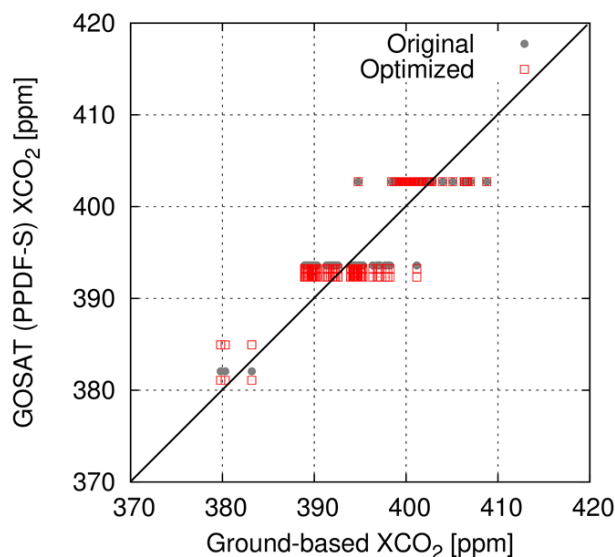


Fig. 19. GOSAT データの解析結果と Yekaterinburg での地上観測データとの相関図

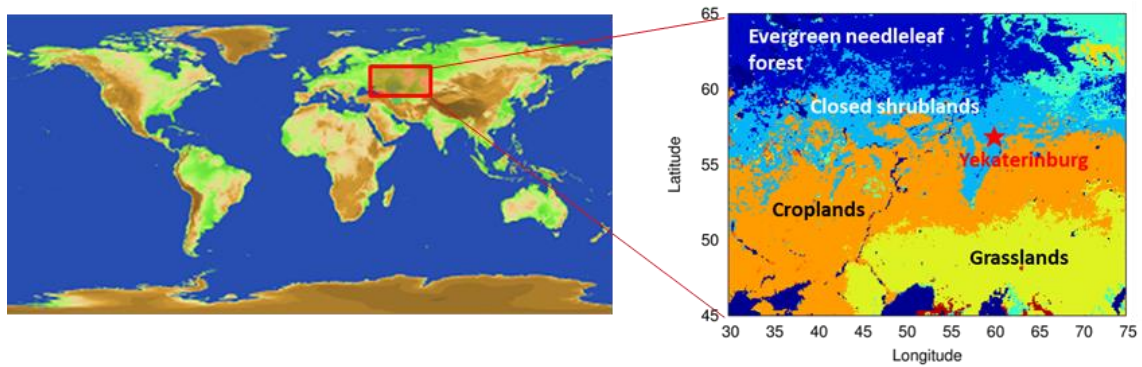
## 5.2 エアロゾルを含む大気

### 5.2.1 西シベリア域のバイオマス・バーニング発生地域

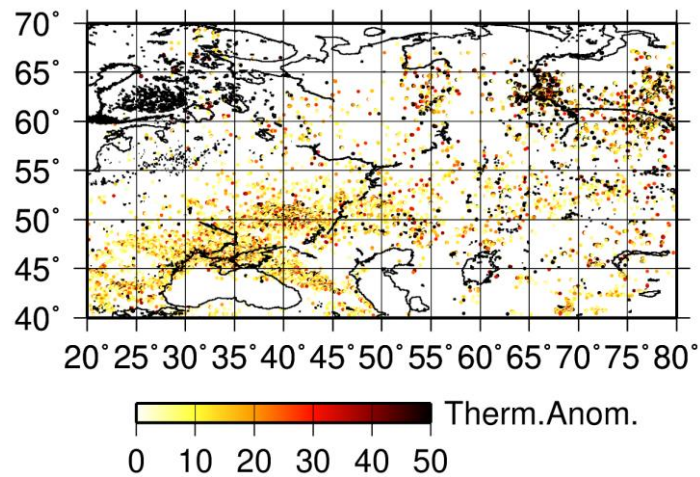
この節では、本研究の目的である、エアロゾル高濃度域における GOSAT データ解析への適用の結果を示す。ここでは、エアロゾルが高濃度となる原因の現象として、バイオマス・バーニングに着目した。バイオマス・バーニングは、森林、草原、および穀物残渣などが燃焼することを指す一般的な用語であり、温室効果ガスとともに、ブラック・カーボンおよび有機炭素のエアロゾルを大気中に放出することが知られている。

西シベリア域は、最大のバイオマス燃焼地域の一つである。この地域の南部では、農作業の一環として春小麦の残渣の燃焼がなされるが、その野焼きがうまく管理されていないときはさらに森林火災が引き起こされる可能性がある。そこで、本研究での対象地域は、西シベリア域の緯度 45°N-65°N、経度 30°E-75°E の地域とした。この地域での土地被覆タイプを The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) の定義する 19 種の土地被覆分類に基づいて調べたところ、主要なタイプは北方針葉樹林と耕作地であった (Fig. 20)。また、この領域は地上で CO<sub>2</sub> とエアロゾルを測定する Yekaterinburg の観測サイトも含んでいる。

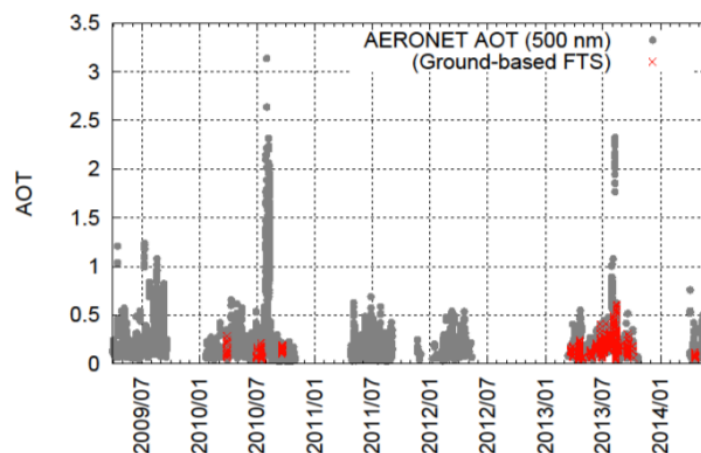
解析期間は、2013 年 6~8 月とした。この時期には、バイオマス・バーニングと同定され多数の火災件数と、そこから放出された煙のプルームが MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) によって検出された。この領域におけるバイオマス・バーニングの活性度の尺度として、MODIS によって検出された Thermal anomaly の累積数を Fig. 21 に示す。さらに、Yekaterinburg は地上から sun spectral photometer を用いてエアロゾルを測定するネットワークの Aerosol Robotic NETwork (AERONET) に属するが、この時期に Yekaterinburg でも高い AOT が観測されたことが確認されている (Fig. 22)。



**Fig. 20.** 本研究での対象地域 (緯度 45°N -65°N、経度 30°E-75°E) の主要な土地被覆タイプと、Yekaterinburg の観測サイトの位置



**Fig. 21.** MODIS によって検出された Thermal anomaly の累積数。解析期間は 2013 年 6~8 月。

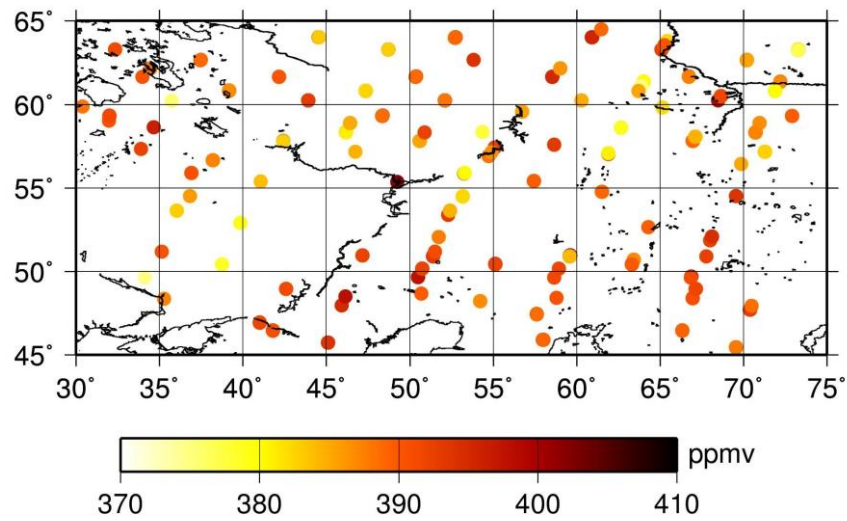


**Fig. 22.** Yekaterinburg で観測された AOT。AERONET の観測から得られた AOT の全データを灰色点で示し、そのうち、AERONET の観測時間の 30 分以内に地上に設定された FTS で CO<sub>2</sub> の観測がなされ XCO<sub>2</sub> データが解析されたときの AOT を赤色点で示す。

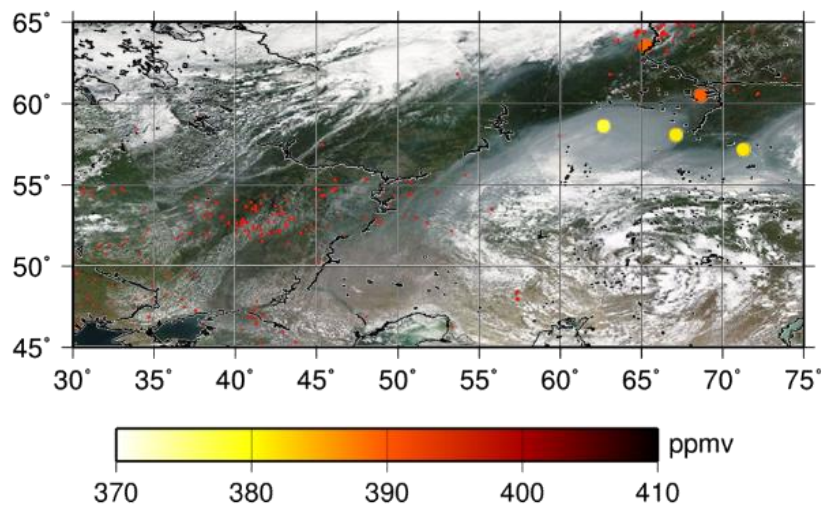
### 5.2.2 XCO<sub>2</sub> 解析結果

対象地域・期間に対し、改良前の PPDF-S 法で解析された XCO<sub>2</sub> データの数は、FP 法で解析された RA プロダクトの数よりも少なかった。しかし、改良後の PPDF-S 法で解析されたデータの数は、改良前の元の数より大幅に増加した。対象地域・期間での観測された GOSAT データのうち、雲スクリーニングを通過して解析対象となるデータ数は約 1700 であるのに対し、改良前に解析できた数は約 700 だった。一方、改良後の解析数は約 1200 であり、データ数が約 70 % 増加した。Figure 23 は、新たに導出された XCO<sub>2</sub> の分布である。なお、基本的に衛星による観測点が固定されているため、多くの観測点が重なっている。これらの結果の中には、バイオマス燃焼による煙の存在する条件下でも、改良後の手法で XCO<sub>2</sub> を導出できた例があることもわかった。その例として 2013 年 8 月 10 日の観測シーンを Fig. 24 に示す。背景は MODIS /AQUA による可視合成画像である。

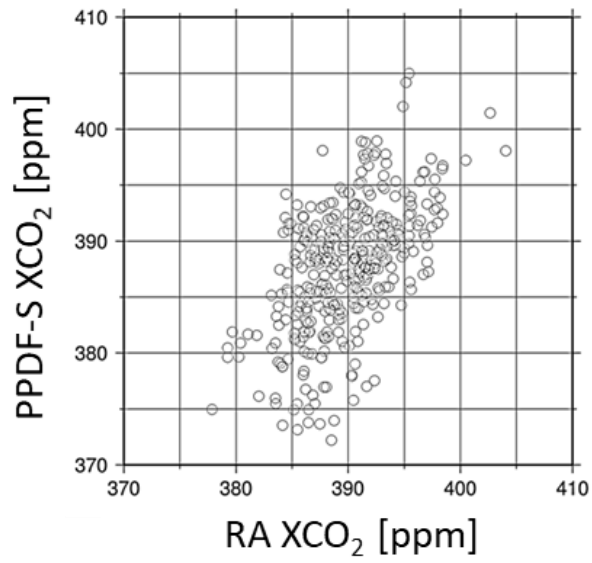
改良後の PPDF-S 法で導出された XCO<sub>2</sub> と RA プロダクトとを比較した結果が Fig. 25 である。その結果、これらのデータは概ね良い相関をもつが、改良後 PPDF-S 法で導出されたデータの約 10 % は 370~380 ppm の低い XCO<sub>2</sub> を示すことがわかった。このような低い値を取ることは 6 章で議論する。



**Fig. 23.** 改良後の PPDF-S 法で新たに導出された XCO<sub>2</sub> の分布。衛星による観測点が固定されているため、多くの観測点が重なっている。解析されたデータの数は約 1200 個。



**Fig. 24.** バイオマス・バーニングの煙の存在する条件下で XCO<sub>2</sub> (オレンジ色と黄色の大きな点) が解析された例 (観測日: 2013 年 8 月 10 日)。背景は米国の衛星搭載センサ MODIS/AQUA による可視合成画像。赤い小さな点は MODIS/AQUA・TERRA で検知されたホット・スポット。

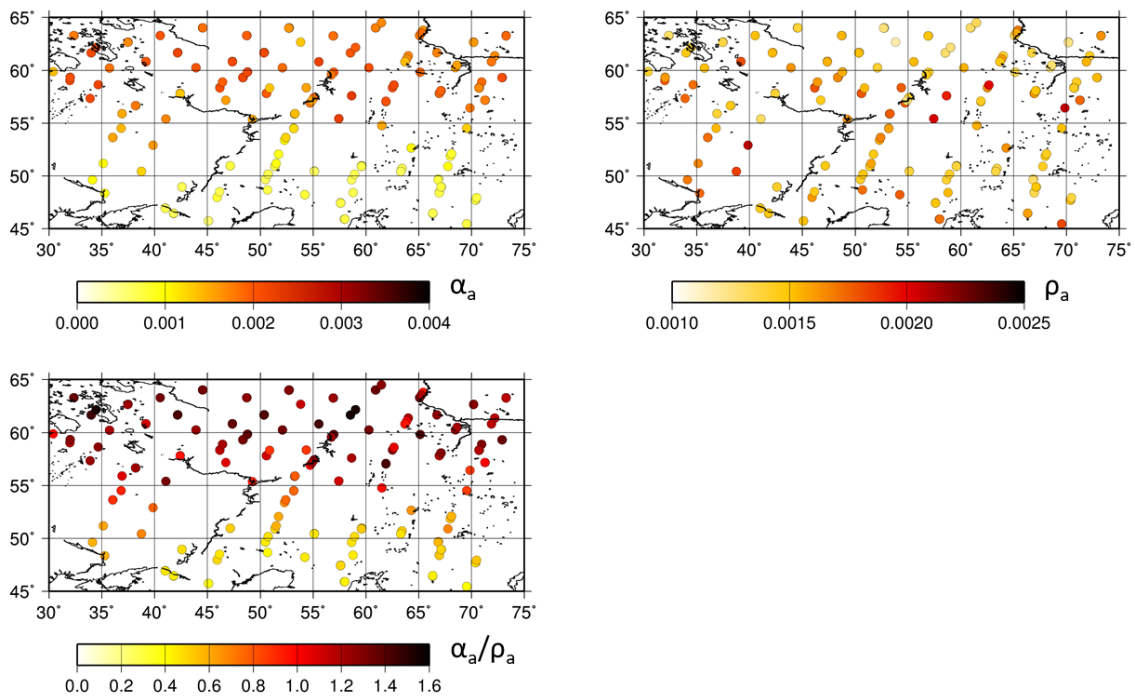


**Fig. 25.** 改良後の PPDF-S 法で導出された XCO<sub>2</sub> と RA プロダクトとの関係

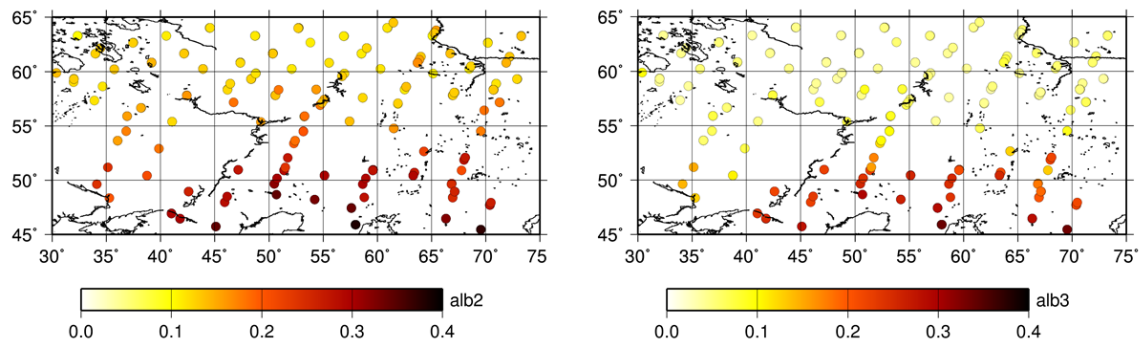


### 5.2.3 PPDF パラメータ解析結果

Figure 26 は、XCO<sub>2</sub> と同時に新たに導出された、エアロゾルに関する PPDF パラメータの  $\alpha_a$  (左上)、 $\rho_a$  (右上) および  $\alpha_a/\rho_a$  (左下) の空間分布である。 $\alpha_a/\rho_a$  は、光の反射によって光路長が短くなる効果 ( $\alpha_a$ ) と光の散乱に起因して光路長が長くなる効果 ( $\rho_a$ ) の比を表す指標とすることができる。また、Fig. 27 は GOSAT の観測波長帯の Band 2, 3 での平均地表面反射率の空間分布である。この図から、Band 2, 3 での平均地表面反射率が 55°N よりも高緯度の領域で 0.1 以下の低い値を取るのに対応して、 $\alpha_a$  と  $\alpha_a/\rho_a$  は同じ領域で高い値を示すことから、これらパラメータの地表面反射率への依存性が高いことが分かる。



**Fig. 26.** PPDF-S 法改良後に新たに XCO<sub>2</sub> と同時に導出された、エアロゾルに関する PPDF パラメータである  $\alpha_a$  (左上)、 $\rho_a$  (右上) および  $\alpha_a/\rho_a$  (左下) の空間分布



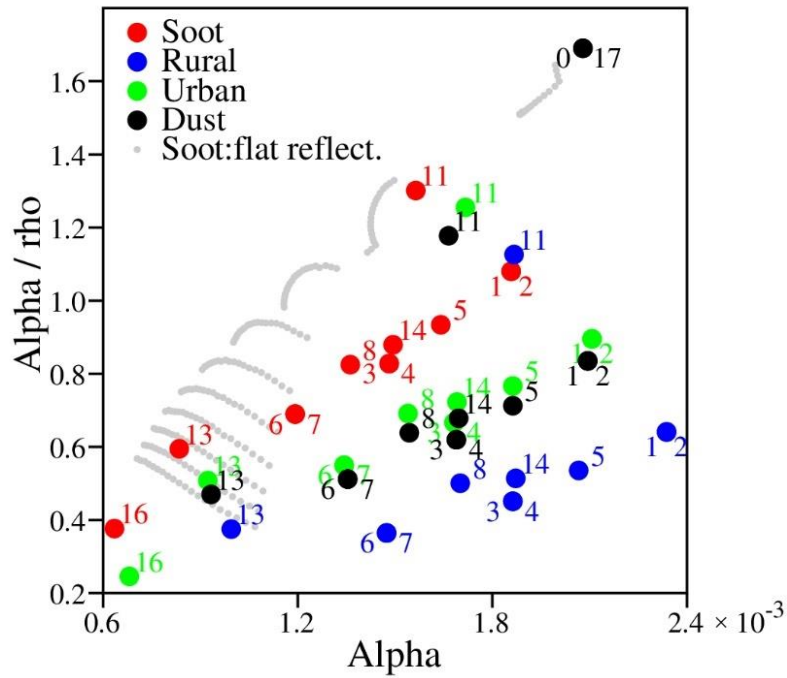
**Fig. 27.** Band 2, 3 での平均地表面反射率の空間分布

## 5.2.4 PPDF パラメータによって表されるエアロゾルの光学的特性

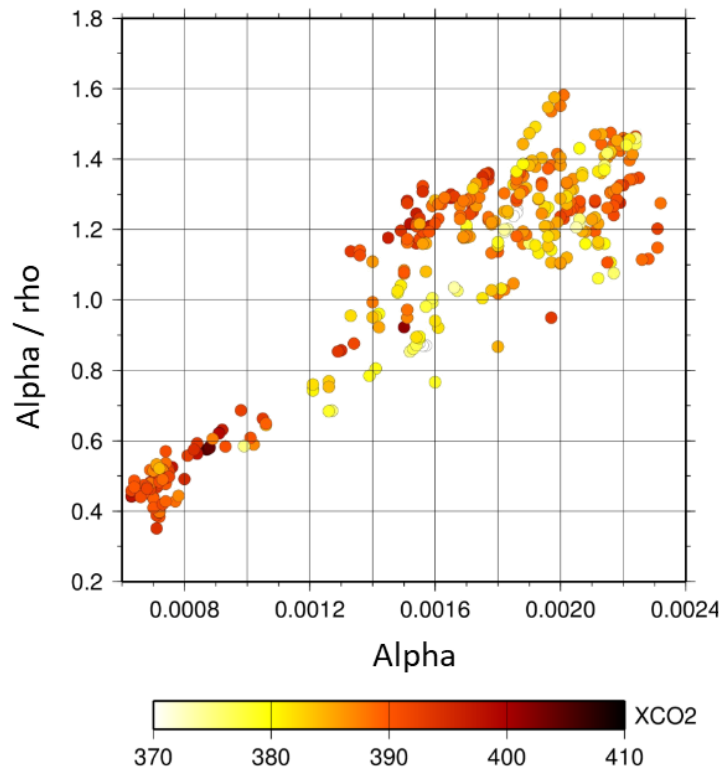
各種エアロゾルは、それぞれの屈折率および粒径分布に対応する光反射/散乱の特性を有する。一方、地表面反射率およびその波長依存性は、土地被覆ごとに異なる。さらに、5.2.3 節で示したように、 $\alpha_o$ と $\alpha_o/\rho_o$ の地表面反射率への依存性は高い。そのため、 $\alpha_o$ と $\alpha_o/\rho_o$ の値によって、エアロゾル種ごとの光学特性に関係性がないかを調査した。ここでは、大気放射伝達モデル Pstar3 を用いて、エアロゾル種と土地被覆を変えて GOSAT の観測スペクトルをシミュレーションし、そのスペクトルに対してリトリーバル解析を施した結果、導出された $\alpha_o$ と $\alpha_o/\rho_o$ の値を調べた。仮定したエアロゾルは $0.55\ \mu\text{m}$ における AOT の値が 0.5 の Soot, Rural, Urban, Dust-like の 4 種であり、それぞれのエアロゾルを個別に Pstar3 に代入した。エアロゾルは、高度 0~2km まで一様な混合比で存在すると仮定している。また、土地被覆は 4.2.3 節と同様、IGBP 定義に基づく 19 種の土地被覆分類を仮定した。

Figure 28 はシミュレーション解析で導出された $\alpha_o$ と $\alpha_o/\rho_o$ の相関図のチャート (以降、 $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャートと呼ぶ) である。Soot, Rural, Urban, Dust-like の結果をそれぞれ赤色点、青色点、緑色点、黒色点で示しており、各点に隣接する数字は土地被覆の種類を表す。また、比較のため、Soot についてのみ、波数依存性のない地表面反射率を 0.05 から 0.5 まで変化させ、かつ、 $0.55\ \mu\text{m}$ での AOT を 0.05 から 1.0 まで変化させたときの結果を灰色点で示す。横軸と縦軸の範囲は、次に Fig. 29 で示す GOSAT のデータ解析から得られた結果に合わせて制限した範囲を設定している。その結果、土地被覆タイプが water, water bodies, snow and ice および tundra である場合、 $\alpha_o$ と $\alpha_o/\rho_o$ が大きすぎるため、軸の範囲を超え、Fig. 28 には示されていない。なお、エアロゾルに関する PPDF パラメータの AOT への依存性については第 6 章で議論する。

上記のシミュレーションに対し、GOSAT のデータ解析から得られた $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャートを Fig. 29 に示す。カラー・バーの色は、導出された XCO<sub>2</sub> の値を表す。この結果を Fig. 28 で示したシミュレーション解析から得られた図と比較すると、データの広がりや勾配と絶対値は、シミュレーションにおける Soot の結果とほぼ同じであった。このことから、対象地域での観測期間中の大気には Soot 性のエアロゾルが含まれていると推測される。この結果から、 $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャートに基づいて各観測シーンの大気中のエアロゾル種を識別することができる可能性があることが示唆された。



**Fig. 28.** 様々な土地被覆を仮定したシミュレーション解析から得られた  $\alpha_a$  と  $\alpha_a / \rho_a$  の相関図のチャート ( $\alpha_a - \alpha_a / \rho_a$  チャート)。赤色点: Soot、青色点: Rural、緑色点: Urban, 黒色点: Dust-like。各点に隣接する数字は土地被覆の種類を表す (0: water, 1: evergreen needleleaf forest, 2: evergreen broadleaf forest, 3: deciduous needleleaf forest, 4: deciduous broadleaf forest, 5: mixed forest, 6: closed shrublands, 7: open shrublands, 8: woody savannas, 9: savannas, 10: grasslands, 11: permanent wetlands, 12: croplands, 13: urban and built-up areas, 14: cropland/natural, 15: snow and ice, 16: barren or sparsely vegetated areas, 17: water bodies, and 18: tundra)。灰色点は、波数依存性のない地表面反射率を 0.05 から 0.5 まで、 $0.55 \mu\text{m}$  での AOT を 0.05 から 1.0 まで変化させたときの Soot についての結果。



**Fig. 29.** GOSAT のデータ解析から得られた  $\alpha_a - \alpha_a / \rho_a$  チャート。カラー・バーの色は、導出された XCO<sub>2</sub> の値を表す。

## 6 議論

4.2.1 節で示したシミュレーション解析の結果、清浄大気に対して  $SNR = 2400$  と仮想的に観測誤差を非常に小さく設定した場合でも、完全には鉛直方向に均一な真値のプロファイルとは一致しなかった。これは、Pstar3 に基づく Discrete Ordinate Method (DOM) という光の多重散乱の計算と、PPDF-S 法で PPDF パラメータを用いたフォワード計算の間で放射伝達計算が異なるためであると考えられる。清浄大気での光路長変動の主な要因はレイリー光散乱であるため、これら2つのモデル間で Band 1 におけるレイリー散乱の効果を含む透過率の差を調べると、 $O_2$  の吸収線上で最大約 0.25 % の差があることがわかった (Fig. 30)。なお、この結果は、地表面反射率は波長依存性が無いとし全波数で 0.2 としたときのシミュレーション解析に基づいている。

PPDF-S 法で導出された Band 1 の透過率が DOM での値と異なることが、PPDF-S 法での  $CO_2$  濃度の解析値にどのように影響し得るかを考える。いくつかのリトリバル・アルゴリズムでは  $O_2$  吸収帯である Band 1 から  $XO_2$  (酸素の気柱平均濃度) および地表気圧をリトリバルするが、PPDF-S 法は地表気圧を導出せず、気象データに基づく初期値を解析に用いる。そのため、PPDF-S 法において Band 1 の透過率が DOM での値と異なっても、地表気圧を通して  $CO_2$  濃度の解析値 (Band 2, 3 を使用) に影響を与えることはない。一方、Table 5 の注釈 2 の式に示すように、Band 1 から導出されたレイリー散乱の PPDF パラメータ  $\alpha_r$  と  $\rho_r$  は、Band 2, 3 でのエアロゾルによる散乱の  $\rho_o$  の初期値を決める式に用いられている。そのため、 $\rho_o$  の初期値を通して  $CO_2$  濃度の解析値に影響を与える可能性がある。その影響の大きさについては、今後、定量的に議論・検討したいと考えるが、 $\rho_o$  の初期値を 0~1 倍したときのそれぞれの  $XCO_2$  解析の変化は 0.1% を下回ったことから、 $\rho_o$  の初期値を通しての影響は小さいと考えている。

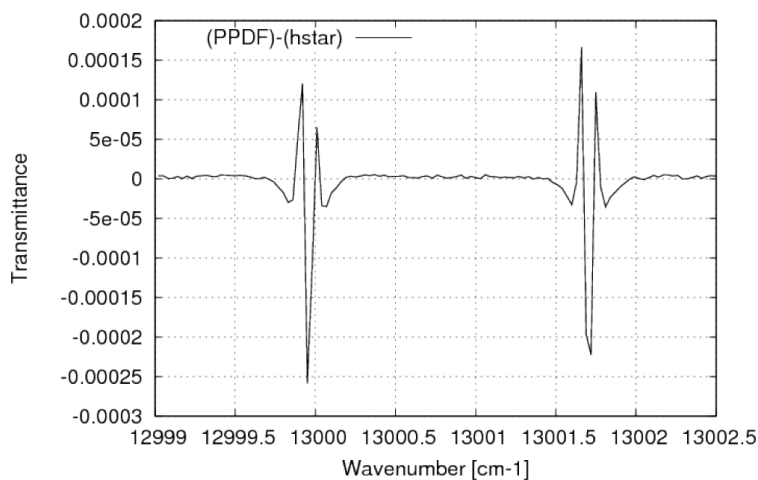
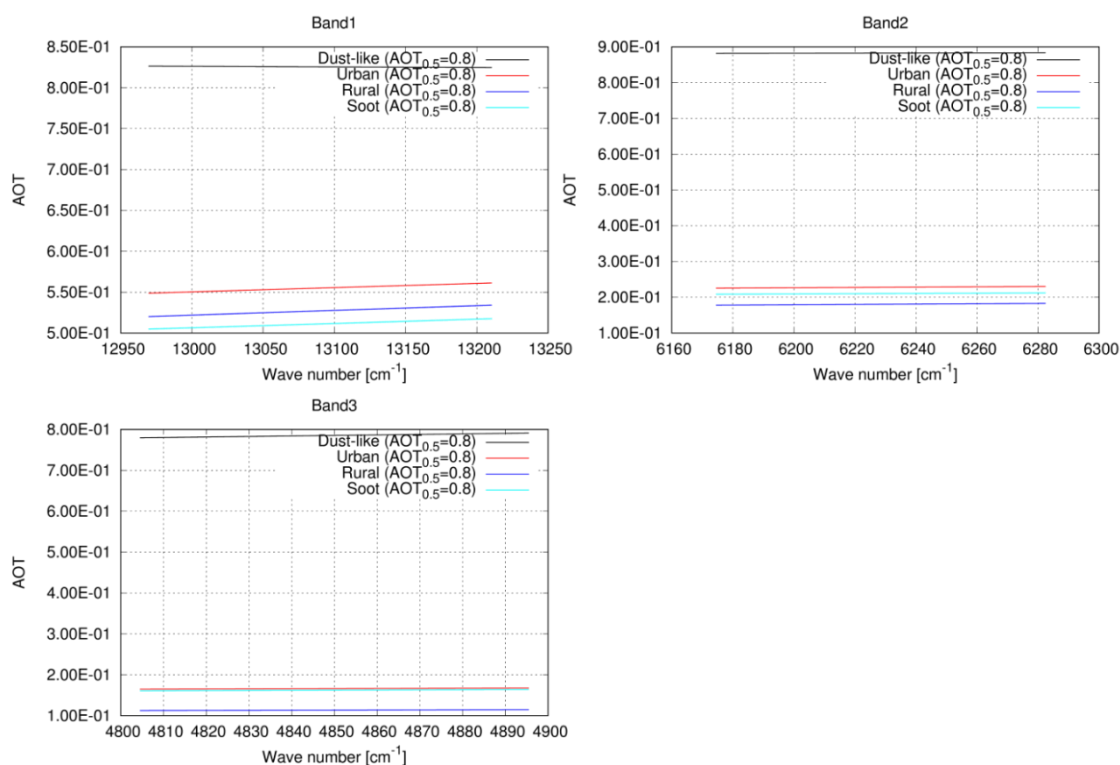


Fig. 30. Pstar3 と PPDF-S 法による計算の間での、Band 1 におけるレイリー散乱の効果を含む透過率の差。地表面反射率は波長依存性が無いとし全波数で 0.2 とした。

シミュレーション解析において、エアロゾルを含む大気については、Dust-like を含む大気に対する XCO<sub>2</sub> バイアスが、他のエアロゾル種 (Urban, Rural, Soot) の結果に比べて非常に大きいことがわかった。これは、4 種のエアロゾルの複素屈折率の実部 (屈折率の大きさを表す) の大きさはほぼ同等だが、Dust-like の粒径が SWIR の波長 (1.0 μm のオーダー) とほぼ同じオーダーの大きさであることから、Dust-like は効率よく SWIR 域の光を反射させるためと考えられる。Figure 31 は Band 1~3 での AOT のスペクトルであり、全バンドにおいて Dust-like の AOT の値が最大で、他のエアロゾル種の AOT に対し 4 倍以上大きいことがわかる。



**Fig. 31.** Band 1~3 での AOT のスペクトル。黒色線は Dust-like、赤色線は Urban、青色線は Rural、水色線は Soot の AOT を表す。

次に、大気中に Soot が含まれる場合、シミュレーション解析において XCO<sub>2</sub> バイアスは常に負の値を示し、XCO<sub>2</sub> は過小評価されたことについて考察する。観測されるスペクトルに現れる CO<sub>2</sub> の吸収線の深さは、光源から観測点までの光路長と、その間に存在する CO<sub>2</sub> の濃度の掛け合わせによって決まる。そのため、光路長が短く（長く）なった効果を適切に推定できなかった場合、CO<sub>2</sub> 濃度は過小（過大）評価されることがわかった。上記の考えに基づくと、Soot が大気中に含まれるときに XCO<sub>2</sub> が過小評価される原因は、PPDF パラメータを用いたフォワード計算において、光路長が短くなった効果を適切に推定できていないためと推測される。

以下、この推測が正しいかを、Soot の光学特性をもとに考察する。Figure 32 は複素屈折率の波長依存性の図であるが、Rural は 70% の Water-Soluble と 30% の Dust-like、また Urban は 20% の Soot と 80% の Rural で構成されるため、ここでは Water-Soluble, Dust-like, Soot の複素屈折率を示す。この図から、一般に光の吸収性を表す複素屈折率の虚部について、Soot の値が他のエアロゾル種よりも 2 桁程度大きいことがわかる。このことが、光散乱や吸収特性に及ぼす影響を考える。Figure 33 は複素屈折率の虚部  $m_i$  をパラメータとした、サイズパラメータ  $x$  ( $x = 2\pi r/\lambda$ ; ここで  $\pi$  は円周率、 $r$  は粒子の半径、 $\lambda$  は光の波長である。 $x$  は光の波長に対する粒子の相対的な大きさを意味する) と散乱効率因子 ( $Q_{sca}$ ) との関係を示す図である。典型的な値として、例えば Soot の  $m_i$  が 0.5、 $r$  が約 1.0  $\mu\text{m}$  とすると、波長 1.6  $\mu\text{m}$  の光における  $x$  の値は約 1.0 であり、同じ粒径で  $m_i$  が Soot よりも 2 桁オーダーで小さい他種のエアロゾルに比べ、 $Q_{sca}$  が数桁大きいことが分かる。そのため、Soot は光の吸収性が強いだけでなく、同じ粒径の他種のエアロゾルよりも、波長 1.6  $\mu\text{m}$  の光の散乱に効果的に働くことがわかる (柴田, 1999)。このことから、大気中に Soot が含まれるとき、以下の現象が生じることが考えられる; (1) 波数 1.6  $\mu\text{m}$  付近の光に対し Soot の光散乱性が大きいことから、エアロゾル層上端で反射される効果と、エアロゾル層で多重散乱される効果が増大する、(2) 波数 1.6  $\mu\text{m}$  付近の光に対し Soot の光吸収性が大きいことから、エアロゾル層で多重散乱された光は効果的に吸収される。これら 2 つの現象により、全層を通しての平均光路長は短くなると考えられ、そのとき、エアロゾル層上端での反射率を表す  $\alpha_o$  の値は大きくなり、エアロゾル層で多重散乱された光の光路長を表す  $\rho_o$  の値は小さくなると推測される。

大気中の Soot が平均光路長を短くする効果をもつことを、大気透過率変化に関するシミュレーションにより調査した。エアロゾルを含む大気と清浄大気での波長 1.6  $\mu\text{m}$  帯での大気透過率の比 ( $Tr_{ratio} \equiv Tr_{aerosol} / Tr_{clear}$ 、ここで  $Tr_{aerosol}$  と  $Tr_{clear}$  はそれぞれエアロゾルを含む大気および清浄大気での大気透過率) を計算する。この値は、CO<sub>2</sub> 吸収線上と CO<sub>2</sub> 吸収線から外れたベースライン上での値の違いなどの特徴を見ることで、エアロゾルによる光路長の変化を表す指標とすることができる。例えば、ベースラインよりも CO<sub>2</sub> 吸収線上で  $Tr_{ratio}$  の値が小さくなれば、エアロゾルの多重散乱の影響により光路長が長くなり、光が CO<sub>2</sub> によって効果的に吸収されたことを表す。逆に、CO<sub>2</sub> 吸収線上で  $Tr_{ratio}$  の値が大きくなった

場合は、エアロゾルの散乱の影響によって光路長が短くなったことを表す。そこで、Rural, Urban, Soot, Dust-like を含む大気での  $Tr_{ratio}$  を調べたところ、Rural, Urban, Dust-like はベースラインよりも  $CO_2$  吸収線上で  $Tr_{ratio}$  の値が小さくなるのに対し、Soot は  $CO_2$  吸収線上で値が大きいことがわかった。例として、 $0.55 \mu m$  での AOT が 0.5、地表面反射率が波数に関係なく 0.2 であるときの  $Tr_{ratio}$  を Fig. 34 に示す。この結果より、前者 3 種のエアロゾル種が  $1.6 \mu m$  帯での光路長を長くするよう働くのに対し、Soot は光路長を短くする効果をもつことがわかる。このことは、複素屈折率の虚部の大きさと、光路長との関係に関する上記説明が正しいことを示している。

Figure. 4 の  $\alpha$ ,  $\rho$  の概念図で示したように、 $\alpha_o$  はエアロゾル層上端で反射されることで光路長が短くなる効果を表す。そこで、光路長が短くなる効果を大きく推定するよう、 $\alpha_o$  の初期値を大きく再設定することで、 $XCO_2$  の過小評価を解消させることを試みた。 $\alpha_o$  の初期値は、Table 5 で示したように  $\sqrt{-\ln(\alpha_{r, Band1}/20)} \times (I_i/I_1)$  の式によって決められるが、Figure 35 の横軸は、上式の“ $1/20$ ”の値に代わる値、縦軸はバイアスの値である。この結果が示すように、 $\alpha_o$  の初期値を変えることで、バイアスを 0 に近づけることが可能であることがわかる。このシミュレーションの結果から、バイアスを低減させるのに  $\alpha_o$  の初期値を決める式に 0.18 の値を用いることが最も有効であった。このように、いったんエアロゾル種が Soot と識別できれば、 $\alpha_o$  の初期値を 0.18 倍にすることで、 $XCO_2$  バイアスの低減を図ることができることがわかった。



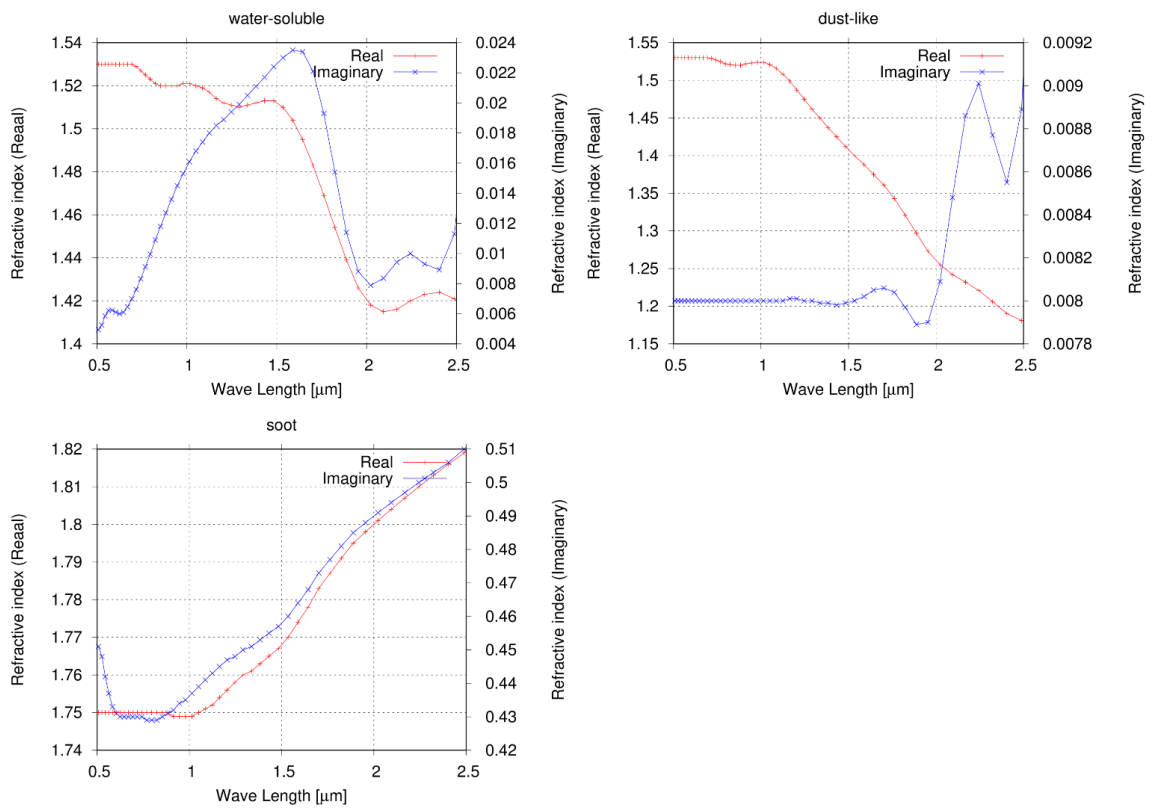


Fig. 32. Water-Soluble, Dust-like, Soot の複素屈折率。赤色線は実部、青色線は虚部を示す。左縦軸は実部、右縦軸は虚部の軸である。

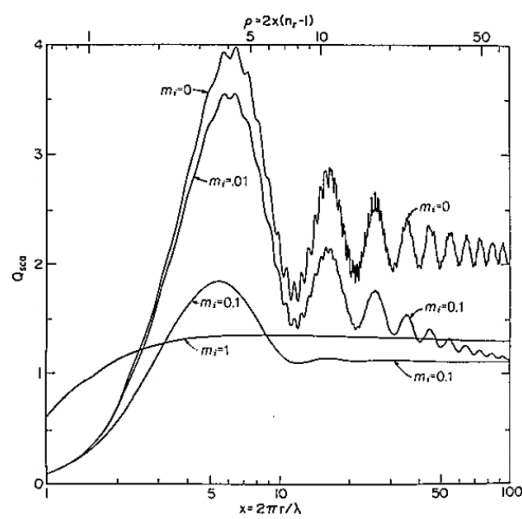
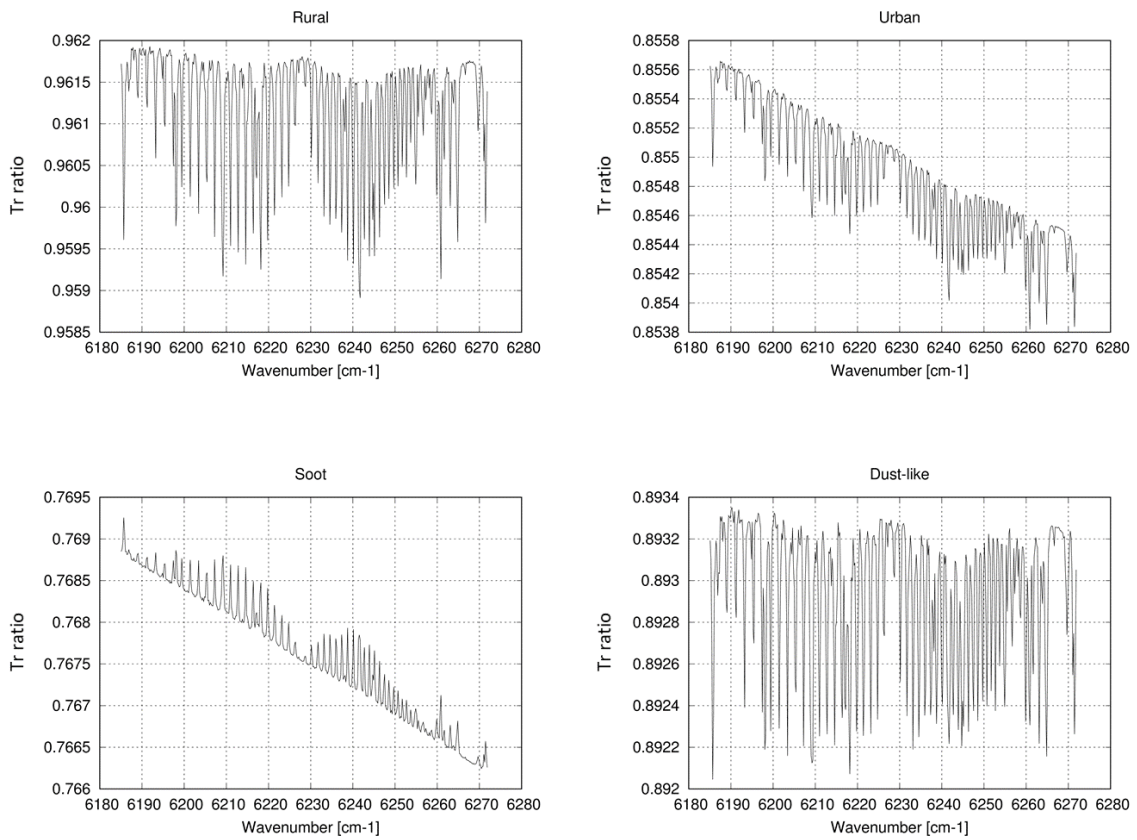
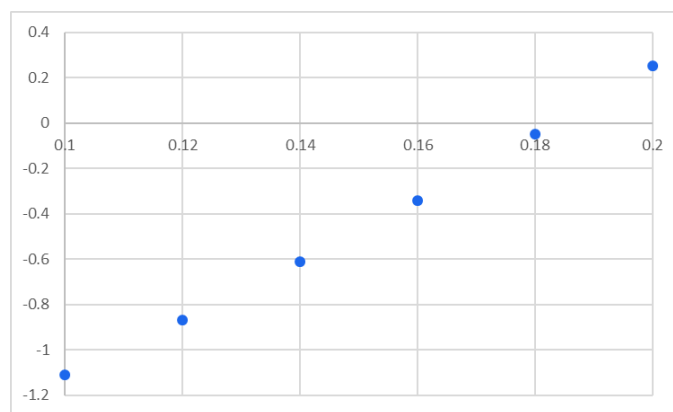


Fig. 33. 複素屈折率の虚部 ( $m_i$ ) ごとのサイズパラメータ ( $x$ ) と散乱効率因子 ( $Q_{sca}$ ) との関係



**Fig. 34.** Rural, Urban, Soot, Dust-like を含む大気での  $Tr_{ratio}$  の例。0.55  $\mu\text{m}$  での AOT が 0.5、地表面反射率が波数に関係なく 0.2 であると仮定したときのシミュレーション結果。



**Fig. 35.**  $\alpha_o$  の初期値と Soot に対しての  $\text{XCO}_2$  バイアスの関係。横軸は  $\alpha_o$  の初期値を決める式、 $\sqrt{-\ln(\alpha_{r, \text{Band}1}/20)} \times (\Gamma_i/\Gamma_1)$  に用いる値。

さらに、PPDF-S 法でのエアロゾルの光吸収項の表現に関して、もう 1 点見直すべき点は、地表面反射率と、解析変数の一つである各種光特性の波長依存性を表現するパラメータ（ポリノミアル）の推定方法である。ポリノミアルについては後述する。現在、地表面反射率は GOSAT の観測バンド内では一律な値が推定されている。GOSAT の観測バンド  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) での反射率を  $\Gamma_i$ 、バンド  $i$  に含まれる波数の数を  $n_i$ 、バンド  $i$  に含まれる  $k$  番目の波数を  $\nu_k$ 、 $\nu_k$  での地表面反射率を  $\Gamma_{\nu_k}$  とすると、 $\Gamma_i$  は以下の式によって表される。

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} \Gamma_{\nu_k}}{n_i} \quad (32)$$

$$\Gamma_{\nu_k} = \frac{\nu_k \text{ における観測輝度}}{\text{地表面反射率を 1 とし、} \nu_k \text{ における}} \quad (33)$$

ガスによる光吸収と空気分子によるレイリー散乱を考慮して計算された輝度

PPDF-S パラメータを用いたフォワード計算では、バンド  $i$  の放射輝度を求めるとき、 $\Gamma_i$  が用いられる。しかし、 $\Gamma_i$  は、バンド  $i$  で値が一定であるため、地表面反射率の、バンド  $i$  の内での波長依存性を表現できていない。さらに、大気中にエアロゾルがあった場合、式 (33) の「 $\nu_k$  における観測輝度」はエアロゾルの光学特性の  $\nu_k$  依存性の影響を受けているため、 $\Gamma_{\nu_k}$  の値は純粋な地表面反射率の値ではなく、エアロゾルの光学特性の波長依存性が  $\Gamma_{\nu_k}$  に含まれてしまう。そこで PPDF-S 法は、 $\Gamma_i$  の式では表されなかった地表面反射率とエアロゾルの光学特性の波長依存性を表現するために、ポリノミアル項  $\Pi$  を導入し、式 (10) に基づいた以下の式によって、放射輝度のフォワード計算を行っている。

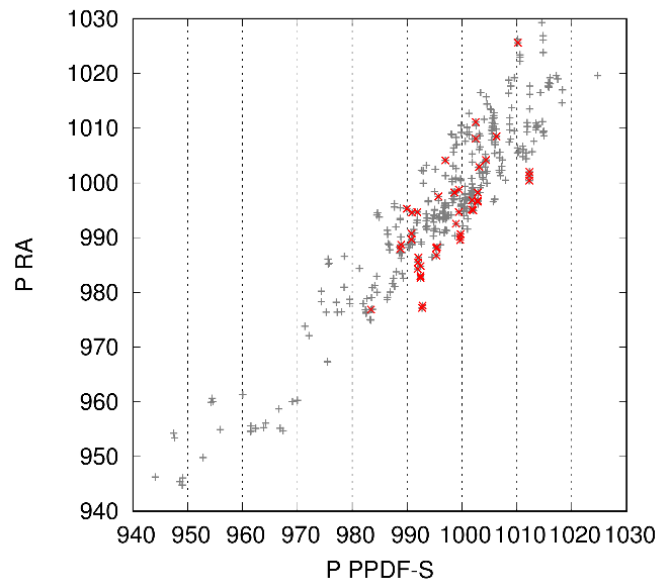
$$F(\mathbf{x}) = -\ln(\mathbf{R}') = -\ln\left(\left\langle S_{\nu}^0 \cdot T_{\text{eff}}(\mathbf{x}) \right\rangle\right) + \Pi \quad (34)$$

ここで、 $S_{\nu}^0$  は太陽入射輝度、 $T_{\text{eff}}(\mathbf{x})$  は式 (1)-(8) に従い状態ベクトル  $\mathbf{x}$  によって表される大気の有効透過率である。ポリノミアル  $\Pi$  も  $\mathbf{x}$  同様、 $\Pi$  に関するアジョイントとヤコビアンが用意されており、リトリーバル解析中に  $\mathbf{x}$  と同時に導出される。地表面反射率とエアロゾルの光学特性のそれぞれの波長依存性をより正確に表現するには、地表面反射率を波数ごとに推定した上で、エアロゾルの光学特性に対する  $\Pi$  の式を考えることも今後必要であると考えられる。さらには、エアロゾル種ごとに光学特性の波長依存性をシミュレーション解析で調べられるため、いったん大気中のエアロゾル種が判別できれば、種ごとに適切な  $\Pi$  の式を設定することができると考えられる。

次に、5.2.2 節で示した、西シベリア域で新たに解析されたデータの約 10% の 43 ケースで XCO<sub>2</sub> が 370~380 ppm の低い値であったことについて考察する。XCO<sub>2</sub> の解析値が低くなる理由として、3 つの理由が挙げられる；(1) CO<sub>2</sub> 濃度が実際に低いため、(2) PPDF-S リトリーバルで、airmass (空気の総質量、通常、地表気圧の値が対応) を実際の値よりも過大評価しているため、(3) PPDF-S リトリーバルで、エアロゾルにより光路長が短くなった効果を

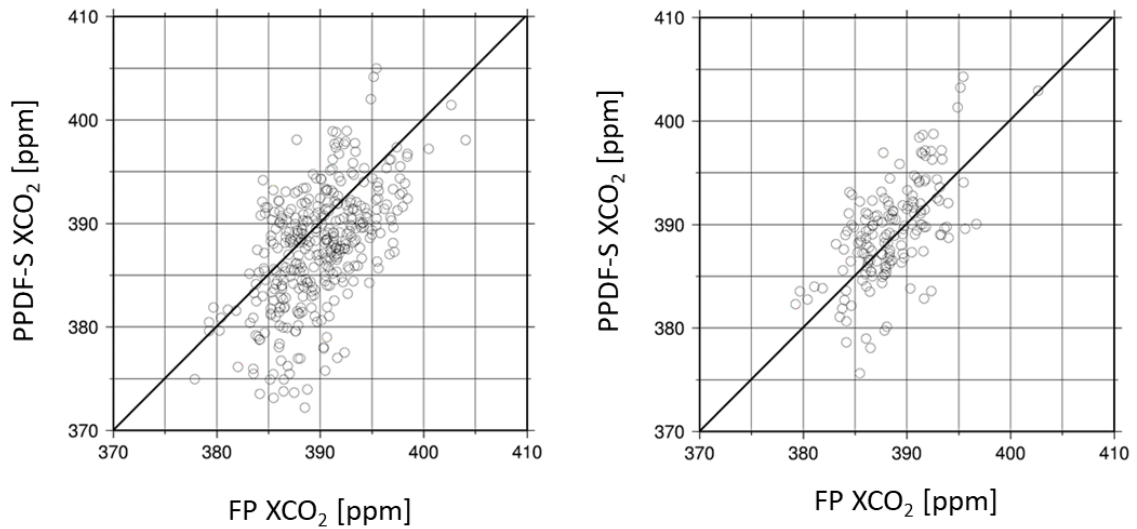
適切に推定できていないため。さらに、Fig. 17で示したように、シミュレーション解析の結果から、水を含む土地被覆に対して負の XCO<sub>2</sub> バイアスが見られたことから、上記3つの理由に加えて、43 ケースの観測時の GOSAT 視野内 (直径 10 km) での土地被覆に水域などが存在したことも理由として考えられる。この点については、今後、気象条件や土壌水分量などを調べることで、その妥当性を調査したい。以下、(1) から (3) について考察する。

もし 43 ケースの観測条件が清浄大気であった場合、(1) または (2) のどちらかが理由となる。しかし、(1) については検証データが無いために確認できないものの、380 ppm 以下の XCO<sub>2</sub> 値は、その年の XCO<sub>2</sub> のバックグラウンドレベルと比較しても非常に小さいことから、実際にそのような値の濃度であったとは考えにくい。(2) については、もし実際よりも大きな airmass すなわち地表面気圧を推定した場合、実際の大气中の CO<sub>2</sub> の量は変わらないのに対して、全体の空気量を過大評価することになるため、CO<sub>2</sub> の気柱平均量である XCO<sub>2</sub> は過小評価される。PPDF-S 法では、地表面気圧はリトリーブしないため、地表面気圧の初期値が直接 XCO<sub>2</sub> の導出に用いられる。そのため、初期値が実際の地表面気圧よりも大きいことにより、XCO<sub>2</sub> が過小評価された可能性がある。そこで、FP 法でリトリーブされた地表面気圧の値と PPDF-S 法で用いられた初期値を比較して、初期値の妥当性を調べた。その結果を Fig. 36 に示す。ここで、灰色点は 3.3.3 節で述べた手法により新たに解析された全データについての結果を、赤色点は改良後の PPDF-S 法で 370~380 ppm の低い XCO<sub>2</sub> を解析したデータに対する結果を示す。その結果、赤色点は黒色点と同じ傾向をもち、特段、地表面気圧の過大評価が見られないことから、370~380 ppm の低い XCO<sub>2</sub> の解析値の理由は、(1) の PPDF-S 法での地表面気圧の設定ミスではない可能性が高いと結論付けられる。



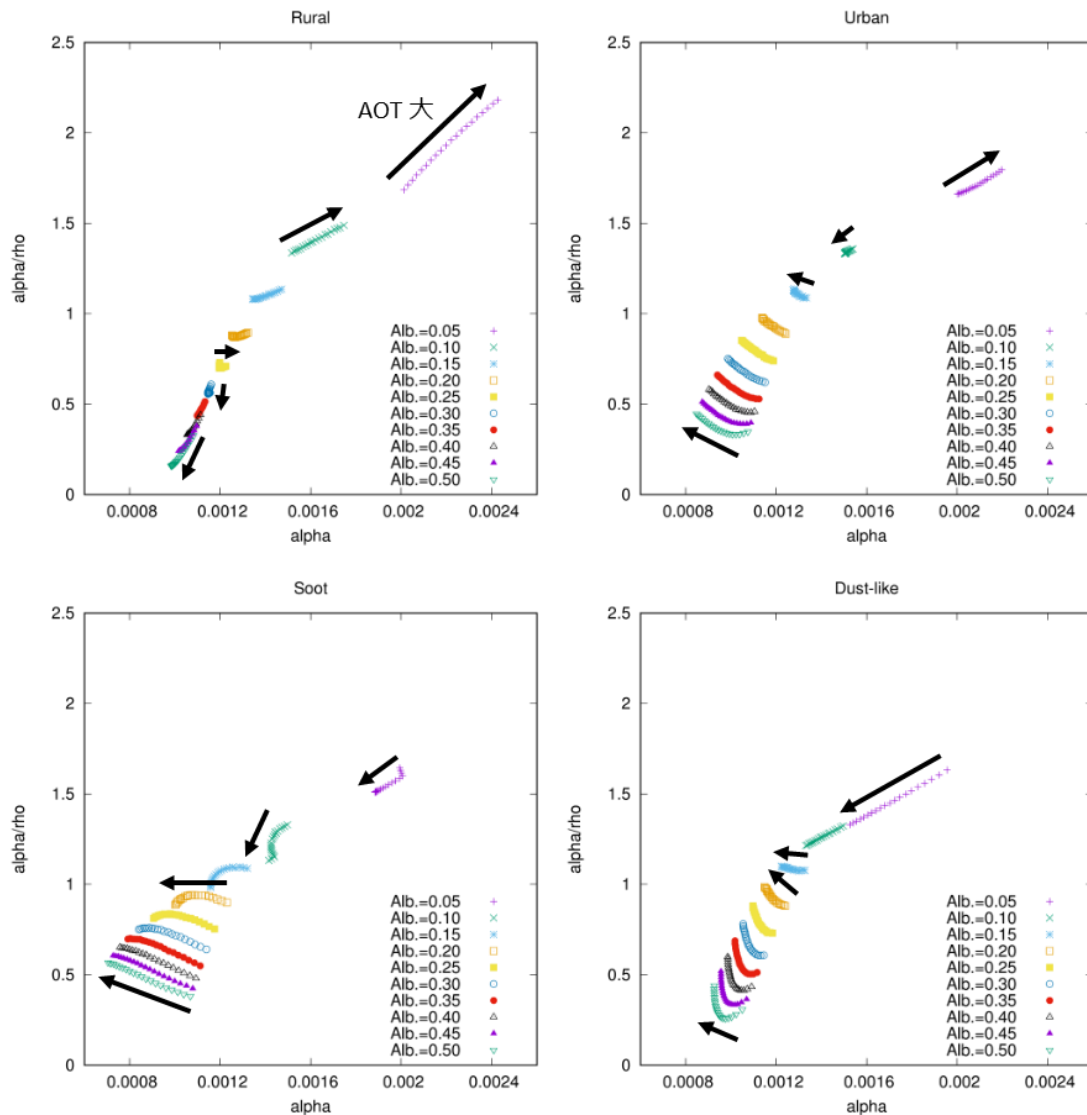
**Fig. 36.** FP 法でリトリバルされた地表面気圧の値と PPDF-S 法で用いられた初期値を比較した結果。灰色点は新たに解析された全データについての結果を、赤色点は改良後の PPDF-S 法で 370~380 ppm の低い XCO<sub>2</sub> を示したデータを示す。

最後に(3)として、Fig. 28, 29 の  $\alpha_a - \alpha_a / \rho_a$  チャートで示されたように、43 ケースでの観測条件はエアロゾル (Soot) を含む大気であった可能性について検討した。Soot を含む大気でも (1), (2) の理由が考えられるが、上記のようにそれらの可能性は低いため、Soot の働きによって光路長が短くなる効果についてのみ検討した。Soot が含まれる大気に対して、Fig. 35 に示したように、 $\alpha_a$  の初期値を決める式に最適値と考えられた 0.18 の値を用いてリトリバルし、XCO<sub>2</sub> 解析値がどのように変化するかを調べた。その結果、43 ケースのうち 18 ケースしか解析されなかったものの、その解析値は約 5 ppm 増加し、より現実的な値となった。また、Fig. 25 の RA プロダクトと比較した図でプロットされた全 393 ケースに対しても  $\alpha_a$  の初期値を再設定して解析したところ、解析されたケース数は 169 に減少したものの、RA プロダクトとの相関は良くなった (Fig. 37)。このことから、 $\alpha_a - \alpha_a / \rho_a$  チャートから新たに解析されたデータについては Soot を含む大気状態であるとの判定は妥当であり、 $\alpha_a$  の初期値をより適切な値に変えたことにより、より現実的な XCO<sub>2</sub> が得られたと考えられる。なお、43 ケースでの FP 法でリトリバルされた AOT の値は 0.1 から 0.4 の範囲であり、そのときの大気のエアロゾル濃度は必ずしも高かったとはいえない。しかし、Fig. 16 で示したように、シミュレーション解析の結果によると、大気中に Soot が含まれていると、その AOT が小さくても負の XCO<sub>2</sub> バイアスを示す。そのため、43 ケースが観測されたときの大気中に Soot が含まれていた場合、XCO<sub>2</sub> が過小評価された可能性はあると言える。



**Fig. 37.** PPDF-S 法で導出された XCO<sub>2</sub> と RA プロダクトとを比較した結果。α<sub>a</sub> の初期値を元の値に 0.18 の値をかける前後での結果を、それぞれ左図と右図に示す。

以上の結果を踏まえ、改めてエアロゾルに関する PPDF パラメータの解析結果の AOT 依存性を調べた。Figure 38 は、シミュレーション解析において、波数依存性のない地表面反射率を 0.05 から 0.5 まで、光の波長 0.55 μm での AOT を 0.05 から 1.0 まで、それぞれ 0.05 刻みで変化させたときの、 $\alpha_o - \alpha_o / \rho_o$  チャートである。Figure 28 の灰色点で示した Soot の結果とあわせ、Rural、Urban、Dust-like についても示す。それぞれの結果に見られる、20 個のプロットの連なりは、黒矢印の方向に沿って AOT が大きな値に変化することで  $\alpha_o$  と  $\alpha_o / \rho_o$  の値が変わる様子を示す。また、20 個のプロットの塊が 10 個見られるが、これは地表面反射率の違いである。右の塊ほど、反射率が小さいときの結果を表す。このように、AOT と、光反射を表す  $\alpha_o$  と光の多重散乱を表す  $\rho_o$  との大小関係は、エアロゾル種や地表面反射率によって異なることがわかる。このことは、エアロゾルの量と光路長変動との関係性が非常に複雑であることを示している。しかし、Fig. 28, 29 の図の比較から、Fig. 29 に示した GOSAT の観測時に Soot が存在していたという結論に影響はないと判断される。



**Fig. 38.** シミュレーション解析において、波数依存性のない地表面反射率を 0.05 から 0.5 まで、 $0.55\ \mu\text{m}$ での AOT を 0.05 から 1.0 まで、それぞれ 0.05 刻みで変化させたときの、 $\alpha_\sigma$ - $\alpha_\sigma/\rho_\sigma$ チャート。黒矢印の方向に沿って、AOT が大きいときの結果を示す。

さらに、PPDF パラメータのエアロゾル層の高度への依存性を調べた。Table 4 で示したシミュレーションで考慮したエアロゾルモデルは、4 種のエアロゾル全て、高度 2 km まで混合比が一定の鉛直分布をもつと仮定した。そこで、上記のエアロゾルモデルで仮定するエアロゾルの高度を 2 km から 3 km に変えてシミュレーション解析し、Fig. 28 で示した  $\alpha_\sigma$ - $\alpha_\sigma/\rho_\sigma$ チャートがどのように変化するかを調査した。その結果、 $\alpha_\sigma$  および  $\alpha_\sigma/\rho_\sigma$  の値は、Rural, Urban, Soot, Dust-like に対してそれぞれ約 5 %, 2.5 %, 0.01 %, 3 % というわずかな変化しか見られず、PPDF パラメータのエアロゾル層の高度への依存性は低いことがわかった。そのため、 $\alpha_\sigma$ - $\alpha_\sigma/\rho_\sigma$ チャートによってエアロゾル種を判別する方法は、エアロゾルを含

む様々な状況に対して適用可能であることが示唆された。

最後に、さらなる PPDF-S リトリーバル・アルゴリズムの改良に向けて議論する。Figure 18 では、PPDF-S 法でのフォワード計算の反復回数ごとに XCO<sub>2</sub> 解析値が変動する様子によって大気中のエアロゾル種が Dust-like であると判別できる可能性を示した。また、Fig. 28, 29 の結果からは、 $\alpha_a - \alpha_a / \rho_a$  チャートに基づいて各観測シーンの大気中のエアロゾル種を識別することができる可能性があることが示された。さらに、Soot を含む大気での解析で見られた負のバイアスは、 $\alpha_a$  の初期値を変えることで、その値を 0 に近づけることが可能であることがわかった。そこで、これらの結果と本章での議論を踏まえた上で、Fig. 7 に示したフローチャートに替えて、Fig. 39 に示すフローチャートにより、今後さらに高精度な XCO<sub>2</sub> が解析できる PPDF-S リトリーバル・アルゴリズムとすることができると考える。

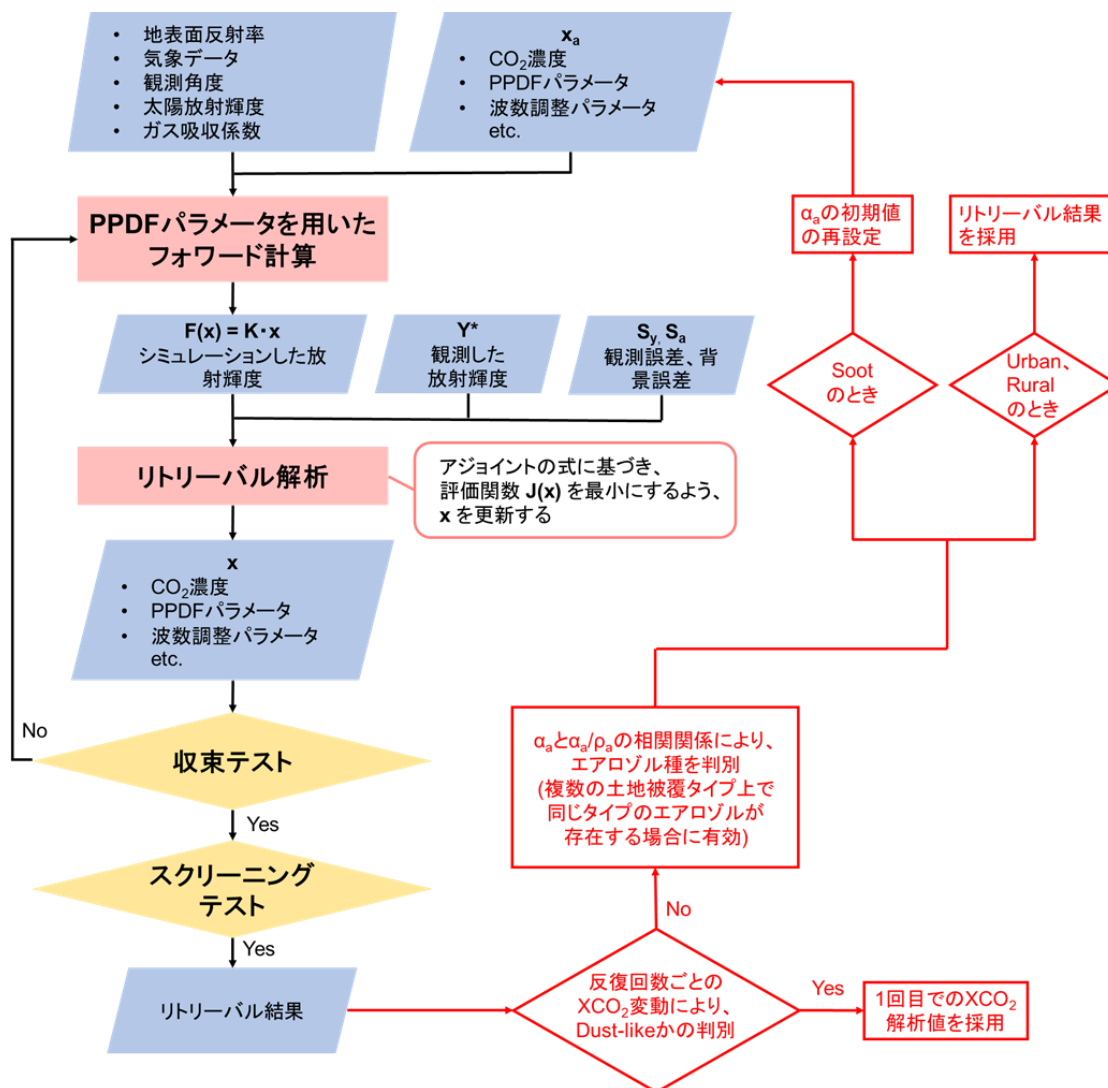


Fig. 39. エアロゾル種が判別できる場合の PPDF-S リトリーバル・アルゴリズムのフローチャート。Figure 7 に対しエアロゾル種が判別できた場合の処理を赤字で追記してある。



## 7 結論

GOSAT は温室効果ガスを観測することを主目的とした初の人工衛星であり、大気中の  $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_4$  を観測している。また、2018年10月29日にはその2号機の GOSAT-2 が打ち上げられ、温室効果ガスの発生・消失源に関する理解が深まることが期待されている。本研究は、この GOSAT センサで観測された放射輝度スペクトルからガス濃度を導出するリトリバル手法のうち、解析の誤差要因となる光路長変動を独自の PPDF パラメータで表現する PPDF-S 法について改良を行い、エアロゾル高濃度域で  $\text{XCO}_2$  の解析精度を向上させることを目的とした。

$\text{XCO}_2$  の解析誤差として、解析値と真値の差をバイアスとして定義する。これまでの研究 (e.g., Iwasaki et al., 2017) などから、このバイアスが大きくなる場合、 $\text{CO}_2$  の鉛直プロファイルが異常な形を示したり、解析途中で不安定になったりすることでバイアスが大きくなるケースが多いことが分かった。そのため、この  $\text{CO}_2$  鉛直プロファイルを指標の一つとし、リトリバル解析手法の改良を試みた。具体的には、エアロゾル種や地表面反射率を変化させシミュレーションされた放射輝度スペクトルに対しリトリバル解析を行い、 $\text{CO}_2$  鉛直プロファイルの形やバイアスの大きさにより、改良方法の評価を行った。

その方法の一つとして行ったのがリトリバルに用いる波数チャンネルの選択である。できるだけ各大気層に感度ピークを持つ波長を均等に選択することで解は安定化し、バイアスが小さくなるケースもあったものの、全体として情報含有量が減り、大気全層の  $\text{CO}_2$  濃度変化に対して有意な解析結果とならないことが示されたため、本研究ではチャンネル選択を実施しないという結論に達した。

次に、リトリバルに用いる解析パラメータを適正化することで  $\text{XCO}_2$  バイアスの低減を図った。PPDF-S法に基づくリトリバル解析手法では、 $\text{CO}_2$  濃度とあわせ、光路長変動を表すための PPDF パラメータなど 39 個の物理量も同時にリトリバルされる。しかし、それらのパラメータの初期値への拘束条件が必要以上に緩いと解が適切な値から離れ、それが  $\text{CO}_2$  濃度のリトリバル結果に影響を与える可能性がある。これらのパラメータは次元も異なるため、直接比較ができないことから、これらのパラメータの影響の大きさを、その可動範囲に対応する放射輝度の大きさ ( $K \cdot \sigma_a$ ) によって評価し、影響の大きいパラメータの拘束条件を見つけ、これを適正化することとした。その結果、エアロゾルによる光の散乱を表すパラメータ ( $\alpha_a$ ) の初期値への拘束条件が異常に緩いため  $\text{CO}_2$  濃度のリトリバル結果に影響を与えていた可能性があることがわかった。このパラメータについて、様々なシミュレーション解析の結果に基づき、その初期値  $\alpha_a$  と共分散値  $\sigma_a$  を適正化した。

清浄大気を仮定したシミュレーション解析では、 $\text{XCO}_2$  バイアスは、適正化前は  $-0.47$  ppm、適正化後では  $-0.63$  ppm とやや悪化したものの、4 種のエアロゾル (Urban, Rural, Soot, Dust-like) を含む大気を仮定したシミュレーションでは大幅な改善が見られた。特に、地表面反射率を 0.2、AOT を 1.0 と仮定したとき、適正化前では Urban を含む大気ではリトリバルでき

なかったのに対し、適正化後では対流圏でのCO<sub>2</sub>濃度の異常な変動を抑えられた結果、全エアロゾル種に対して妥当な解析値が得られた。ただし、XCO<sub>2</sub>バイアスはDust-like、Urban、Ruralに対しては低減できたものの、Sootについては負の方向にバイアスの値が大きくなった。また、Dust-likeに対しては他のエアロゾル種と比べてバイアスの絶対値が大きかった。この原因は、Dust-likeの粒径が比較的大きいため、XCO<sub>2</sub>解析に用いる波長でのAOTの値が他のエアロゾル種の値と比べて4倍以上大きく、光散乱の影響を受けやすいためと考えられる。シミュレーションに基づくリトリーバル解析の結果から、大気中にDust-likeが含まれた場合、リトリーバル解析での反復回数ごとのXCO<sub>2</sub>解析値の変動の様子が特徴的であり、反復回数1回目のXCO<sub>2</sub>解析値が最も真値に近いことがわかった。そのため、今後、Dust-likeと判別できた場合は、反復回数1回目のXCO<sub>2</sub>解析値をリトリーバル結果として採用するで、より高精度なXCO<sub>2</sub>の解析値を得るというアルゴリズムが考えられる。

改良したPPDF-S法を西シベリア域のバイオマス・バーニング発生域で観測されたGOSATデータの解析に適用したところ、煙の存在する条件下でリトリーバルできているケースも含め、これまで解が得られず解析できなかったデータに対し、リトリーバル可能となったデータ数が約70%と大幅に増加した。ただし、増加したデータ数の約10%については、FP法の結果と比較してXCO<sub>2</sub>値が370 ppm~380 ppmと不自然に低い値を示していた。

本研究において特に注目すべき点として、解析されたPPDFパラメータのうち、エアロゾルによる光の反射による光路長の減少の効果を表す $\alpha_o$ と、光の多重散乱による光路長の増加の効果を現す $\rho_o$ について、 $\alpha_o$ と $\alpha_o/\rho_o$ との相関関係( $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャート)を指標として、CO<sub>2</sub>解析に影響を与えたエアロゾル種を特定できる可能性があることが示唆された。これは、シミュレーションにより得られる $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャート上に観測データをプロットすることで、どのエアロゾル種についての相関と同じかを判断することにより、エアロゾル種を特定するものである。 $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャートは、エアロゾル層の高度の影響をあまり受けないこともシミュレーションにより確認されていることから、非常に汎用的な指標となり得るものと言える。これを西シベリア域のバイオマス・バーニング発生域で観測されたGOSATデータ適用した例では、エアロゾル種はSootタイプである可能性が示された。

ここで、シミュレーション解析においてSootを含む大気に対して負のXCO<sub>2</sub>バイアスが見られた原因を検討したところ、PPDF-Sリトリーバルで、Sootにより光路長が短くなった効果を適切に推定できていないことが考えられた。そこで、地表面反射率や大気状態の違いなど可能な限りの調査を行った上で、370 ppm~380 ppmと不自然に低いXCO<sub>2</sub>値が解析された原因は、Sootにより光路長が短くなった効果を適切に推定できていなかったためと判断し、 $\alpha_o$ の初期値を大きくして再度リトリーバルしたところ、XCO<sub>2</sub>解析値は約5 ppm増加し、より現実的な値となった。

以上の結果より、反復回数ごとのXCO<sub>2</sub>解析値の変動の様子からDust-likeと判断する手法と合わせ、 $\alpha_o$ - $\alpha_o/\rho_o$ チャートを用いた手法により、一度エアロゾル種を特定し、その上で、再度リトリーバル解析を行うときに、特定されたエアロゾル種に適した初期値設定な

どを行うことで、CO<sub>2</sub>濃度の解析精度をさらに向上させることができる可能性があるアルゴリズムを提示した。

今後、本研究で示した改良を施したPPDF-S法を、2018年10月29日に打ち上げられたGOSAT-2のデータ解析にも適用することが計画されている。特に、この衛星で新たに観測対象となった一酸化炭素 (CO) の解析にも適用し、ガスとエアロゾルが同時に多く発生する都市部やバイオマス・バーニング発生域でCO<sub>2</sub>、CO、それにエアロゾルを同時観測することで、都市部での人為起源のCO<sub>2</sub>の発生量やバイオマス・バーニング域での炭素循環研究の推定に貢献したいと考えている。

## 参考文献

- NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team (2001). ASTER Level 2 Surface Reflectance Product. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls, SD, USA. Available online: <https://lpdaac.usgs.gov> (accessed on 14 October 2018).
- Toon, G.C. (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, MA, USA). Personal communication, 2011.,
- Kurucz, R.L. (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA). Personal communication, 2008.,
- Bösch, H., Toon, G. C., Sen, B., Washenfelder, R. A., Wennberg, P. O., Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Crisp, D., Christi, M., Connor, B. J., Natraj, V., and Yung, Y. L.: Space-based near-infrared CO<sub>2</sub> measurements: Testing the Orbiting Carbon Observatory retrieval algorithm and validation concept using SCIAMACHY observations over Park Falls, Wisconsin, *J. Geophys. Res.*, 111, 10.1029/2006JD007080, 2006.
- Baker, D. F., Law, R. M., Gurney, K. R., Rayner, P., Peylin, P., Denning, A. S., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Prather, M., Pak, B., Taguchi, S., and Zhu, Z.: TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO<sub>2</sub> fluxes, 1988–2003, *Global Biogeochemical Cycles*, 20, 10.1029/2004GB002439, 2006.
- Boesch, H., Baker, D., Connor, B., Crisp, D., and Miller, C.: Global Characterization of CO<sub>2</sub> Column Retrievals from Shortwave-Infrared Satellite Observations of the Orbiting Carbon Observatory-2 Mission, *Remote Sensing*, 3, 10.3390/rs3020270, 2011.
- Boesch, H., Brown, L., Castano, R., Christi, M., Connor, B., Crisp, D., Eldering, A., Fisher, B., Frankenberg, C., Gunson, M., Granat, R., McDuffie, J., Miller, C., Natraj, V., O'Brien, D., O'Dell, C., Osterman, G., Oyafuso, F., Payne, V., Polonsky, I., Smyth, M., Spurr, R., Thompson, D., and Toon, G.: OCO (Orbiting Carbon Observatory) - 2 Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document, Pasadena, CA. Available online: [https://disc.gsfc.nasa.gov/OCO-2/documentation/oco-2-v6/OCO2\\_L2\\_ATBD.V6.pdf](https://disc.gsfc.nasa.gov/OCO-2/documentation/oco-2-v6/OCO2_L2_ATBD.V6.pdf) (accessed on 1 October 2018), 2015.
- Bovensmann, H., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Reuter, M., Krings, T., Gerilowski, K., Schneising, O., Heymann, J., Tretner, A., and Erzinger, J.: A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO<sub>2</sub> emissions from space and related applications, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 781-811, 10.5194/amt-3-781-2010, 2010.
- Bril, A., Oshchepkov, S., Yokota, T., and Inoue, G.: Parameterization of aerosol and cirrus cloud effects on reflected sunlight spectra measured from space: application of the equivalence theorem, *Appl. Opt.*, 46, 2460-2470, 10.1364/AO.46.002460, 2007.

- Bril, A., Oshchepkov, S., and Yokota, T.: Correction of atmospheric scattering effects in space-based observations of carbon dioxide: Model study of desert dust aerosol, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 109, 1815-1827, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.02.012>, 2008.
- Bril, A., Oshchepkov, S., and Yokota, T.: Application of a probability density function-based atmospheric light-scattering correction to carbon dioxide retrievals from GOSAT over-sea observations, *Remote Sensing of Environment*, 117, 301-306, [10.1016/j.rse.2011.10.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.005), 2012.
- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J., Meirink, J. F., Goede, A. P. H., Bergamaschi, P., Körner, S., Heimann, M., and Schulz, A.: Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 941-962, [10.5194/acp-5-941-2005](https://doi.org/10.5194/acp-5-941-2005), 2005.
- Butz, A., Hasekamp, O. P., Frankenberg, C., and Aben, I.: Retrievals of atmospheric CO<sub>2</sub> from simulated space-borne measurements of backscattered near-infrared sunlight: accounting for aerosol effects, *Appl. Opt.*, 48, 3322-3336, [10.1364/AO.48.003322](https://doi.org/10.1364/AO.48.003322), 2009.
- Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., Schepers, D., Galli, A., Aben, I., Frankenberg, C., Hartmann, J. M., Tran, H., Kuze, A., Keppel-Aleks, G., Toon, G., Wunch, D., Wennberg, P., Deutscher, N., Griffith, D., Macatangay, R., Messerschmidt, J., Notholt, J., and Warneke, T.: Toward accurate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observations from GOSAT, *Geophys. Res. Lett.*, 38, [10.1029/2011gl047888](https://doi.org/10.1029/2011gl047888), 2011.
- Chédin, A., Serrar, S., Scott, N. A., Crevoisier, C., and Armante, R.: First global measurement of midtropospheric CO<sub>2</sub> from NOAA polar satellites: Tropical zone, *J. Geophys. Res.*, 108, [10.1029/2003JD003439](https://doi.org/10.1029/2003JD003439), 2003.
- Chédin, A., Serrar, S., Scott, N. A., Pierangelo, C., and Ciais, P.: Impact of tropical biomass burning emissions on the diurnal cycle of upper tropospheric CO<sub>2</sub> retrieved from NOAA 10 satellite observations, *J. Geophys. Res.*, 110, [10.1029/2004JD005540](https://doi.org/10.1029/2004JD005540), 2005.
- Chahine, M. T., Pagano, T. S., Aumann, H. H., Atlas, R., Barnett, C., Blaisdell, J., Chen, L., Divakarla, M., Fetzer, E. J., Goldberg, M., Gautier, C., Granger, S., Hannon, S., Irion, F. W., Kakar, R., Kalnay, E., Lambrigtsen, B. H., Lee, S.-Y., Le Marshall, J., McMillan, W. W., McMillin, L., Olsen, E. T., Revercomb, H., Rosenkranz, P., Smith, W. L., Staelin, D., Strow, L. L., Susskind, J., Tobin, D., Wolf, W., and Zhou, L.: AIRS, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 911-926, [10.1175/BAMS-87-7-911](https://doi.org/10.1175/BAMS-87-7-911), 2006.
- Chevallier, F., Engelen, R. J., Carouge, C., Conway, T. J., Peylin, P., Pickett-Heaps, C., Ramonet, M., Rayner, P. J., and Xueref-Remy, I.: AIRS-based versus flask-based estimation of carbon surface fluxes, *J. Geophys. Res.*, 114, [doi:10.1029/2009JD012311](https://doi.org/10.1029/2009JD012311), 2009a.
- Chevallier, F., Maksyutov, S., Bousquet, P., Bréon, F.-M., Saito, R., Yoshida, Y., and Yokota, T.: On the accuracy of the CO<sub>2</sub> surface fluxes to be estimated from the GOSAT observations, *Geophys. Res. Lett.*, 36, [10.1029/2009gl040108](https://doi.org/10.1029/2009gl040108), 2009b.
- Cogan, A. J., Boesch, H., Parker, R. J., Feng, L., Palmer, P. I., Blavier, J. F. L., Deutscher, N. M., Macatangay,

- R., Notholt, J., Roehl, C., Warneke, T., and Wunch, D.: Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations, *J. Geophys. Res.*, 117, n/a-n/a, 10.1029/2012jd018087, 2012.
- Crisp, D., Fisher, B. M., O'Dell, C., Frankenberg, C., Basilio, R., Bösch, H., Brown, L. R., Castano, R., Connor, B., Deutscher, N. M., Eldering, A., Griffith, D., Gunson, M., Kuze, A., Mandrake, L., McDuffie, J., Messerschmidt, J., Miller, C. E., Morino, I., Natraj, V., Notholt, J., O'Brien, D. M., Oyafuso, F., Polonsky, I., Robinson, J., Salawitch, R., Sherlock, V., Smyth, M., Suto, H., Taylor, T. E., Thompson, D. R., Wennberg, P. O., Wunch, D., and Yung, Y. L.: The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm &ndash; Part II: Global XCO<sub>2</sub> data characterization, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 687-707, 10.5194/amt-5-687-2012, 2012.
- Guerlet, S., Butz, A., Schepers, D., Basu, S., Hasekamp, O. P., Kuze, A., Yokota, T., Blavier, J. F., Deutscher, N. M., Griffith, D. W. T., Hase, F., Kyro, E., Morino, I., Sherlock, V., Sussmann, R., Galli, A., and Aben, I.: Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO<sub>2</sub> from GOSAT shortwave infrared measurements *J. Geophys. Res.*, 118, 4887-4905, 10.1002/jgrd.50332, 2013.
- Imasu, R.: 人工衛星による大気成分濃度の測定, *資源と環境*, 1, 11-22, 1992.
- Imasu, R., Ogawa, T., and Shimoda, H.: Meridional distribution feature of minor constituents as observed by IMG sensor aboard ADEOS satellite, *Advances in Space Research*, 25, 959-962, 10.1016/S0273-1177(99)00929-1, 2000.
- Iwasaki, C., Imasu, R., Bril, A., Yokota, T., Yoshida, Y., Morino, I., Oshchepkov, S., Wunch, D., Griffith, D. W. T., Deutscher, N. M., Kivi, R., Pollard, D., Roehl, C. M., Velazco, V. A., Sussmann, R., Warneke, T., and Notholt, J.: Validation of GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> Retrieved by PPDF-S Method and Comparison with Full Physics Method, *SOLA*, 13, 168-173, 10.2151/sola.2017-031, 2017.
- Jung, Y., Kim, J., Kim, W., Boesch, H., Lee, H., Cho, C., and Goo, T.-Y.: Impact of Aerosol Property on the Accuracy of a CO<sub>2</sub> Retrieval Algorithm from Satellite Remote Sensing, *Remote Sensing*, 8, 10.3390/rs8040322, 2016.
- Kaufman, Y. J., Tucker, C. J., and Fung, I.: Remote sensing of biomass burning in the tropics, *J. Geophys. Res.*, 95, 9927-9939, doi:10.1029/JD095iD07p09927, 1990.
- Kim, W., Kim, J., Jung, Y., Boesch, H., Lee, H., Lee, S., Goo, T.-Y., Jeong, U., Kim, M., Cho, C.-H., and Ou, M.-L.: Retrieving XCO<sub>2</sub> from GOSAT FTS over East Asia Using Simultaneous Aerosol Information from CAI, *Remote Sensing*, 8, 10.3390/rs8120994, 2016.
- Kulawik, S. S., Jones, D. B. A., Nassar, R., Irion, F. W., Worden, J. R., Bowman, K. W., Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Biraud, S. C., Fischer, M. L., and Jacobson, A. R.: Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO<sub>2</sub> for carbon cycle science, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5601-5623, 10.5194/acp-10-5601-2010, 2010.
- Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., and Hamazaki, T.: Thermal and near infrared sensor for carbon

- observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring, *Appl. Opt.*, 48, 6716, 10.1364/ao.48.006716, 2009.
- Morino, I., Uchino, O., Inoue, M., Yoshida, Y., Yokota, T., Wennberg, P. O., Toon, G. C., Wunch, D., Roehl, C. M., Notholt, J., Warneke, T., Messerschmidt, J., Griffith, D. W. T., Deutscher, N. M., Sherlock, V., Connor, B., Robinson, J., Sussmann, R., and Rettinger, M.: Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1061-1076, 10.5194/amt-4-1061-2011, 2011.
- Nassar, R., Jones, D. B. A., Kulawik, S. S., Worden, J. R., Bowman, K. W., Andres, R. J., Suntharalingam, P., Chen, J. M., Brenninkmeijer, C. A. M., Schuck, T. J., Conway, T. J., and Worthy, D. E.: Inverse modeling of CO<sub>2</sub> sources and sinks using satellite observations of CO<sub>2</sub> from TES and surface flask measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6029-6047, 10.5194/acp-11-6029-2011, 2011.
- O'Dell, C. W., Connor, B., Bösch, H., O'Brien, D., Frankenberg, C., Castano, R., Christi, M., Eldering, D., Fisher, B., Gunson, M., McDuffie, J., Miller, C. E., Natraj, V., Oyafuso, F., Polonsky, I., Smyth, M., Taylor, T., Toon, G. C., Wennberg, P. O., and Wunch, D.: The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm – Part 1: Description and validation against synthetic observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 99-121, 10.5194/amt-5-99-2012, 2012.
- Oshchepkov, S., Bril, A., and Yokota, T.: PPDF-based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space, *J. Geophys. Res.*, 113, D23210, 10.1029/2008jd010061, 2008.
- Oshchepkov, S., Bril, A., and Yokota, T.: An improved photon path length probability density function–based radiative transfer model for space-based observation of greenhouse gases, *J. Geophys. Res.*, 114, D19207, 10.1029/2009jd012116, 2009.
- Oshchepkov, S., Bril, A., Maksyutov, S., and Yokota, T.: Detection of optical path in spectroscopic space-based observations of greenhouse gases: Application to GOSAT data processing, *J. Geophys. Res.*, 116, D14304, 10.1029/2010jd015352, 2011.
- Oshchepkov, S., Bril, A., Yokota, T., Morino, I., Yoshida, Y., Matsunaga, T., Belikov, D., Wunch, D., Wennberg, P., Toon, G., O'Dell, C., Butz, A., Guerlet, S., Cogan, A., Boesch, H., Eguchi, N., Deutscher, N., Griffith, D., Macatangay, R., Notholt, J., Sussmann, R., Rettinger, M., Sherlock, V., Robinson, J., Kyrö, E., Heikkinen, P., Feist, D. G., Nagahama, T., Kadyrov, N., Maksyutov, S., Uchino, O., and Watanabe, H.: Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space: Validation of PPDF-based CO<sub>2</sub> retrievals from GOSAT, *J. Geophys. Res.*, 117, n/a-n/a, 10.1029/2012jd017505, 2012.
- Oshchepkov, S., Bril, A., Yokota, T., Wennberg, P. O., Deutscher, N. M., Wunch, D., Toon, G. C., Yoshida, Y., O'Dell, C. W., Crisp, D., Miller, C. E., Frankenberg, C., Butz, A., Aben, I., Guerlet, S., Hasekamp, O., Boesch, H., Cogan, A., Parker, R., Griffith, D., Macatangay, R., Notholt, J., Sussmann, R., Rettinger, M., Sherlock, V., Robinson, J., Kyrö, E., Heikkinen, P., Feist, D. G., Morino, I., Kadyrov,

- N., Belikov, D., Maksyutov, S., Matsunaga, T., Uchino, O., and Watanabe, H.: Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 2: Algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO<sub>2</sub> retrievals over TCCON sites, *J. Geophys. Res.*, 118, 1493-1512, 10.1002/jgrd.50146, 2013a.
- Oshchepkov, S., Bril, A., Yokota, T., Yoshida, Y., Blumenstock, T., Deutscher, N. M., Dohe, S., Macatangay, R., Morino, I., Notholt, J., Rettinger, M., Petri, C., Schneider, M., Sussman, R., Uchino, O., Velasco, V., Wunch, D., and Belikov, D.: Simultaneous retrieval of atmospheric CO<sub>2</sub> and light path modification from space-based spectroscopic observations of greenhouse gases: methodology and application to GOSAT measurements over TCCON sites, *Appl. Opt.*, 52, 1339-1350, 10.1364/AO.52.001339, 2013b.
- Oshchepkov, S., Bril, A., and Yokota, T.: ALGORITHM THEORETICAL BASIS DOCUMENT (ATBD) FOR PPDF-BASED CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> COLUMN AMOUNTS RETRIEVAL FROM GOSAT TANSO-FTS SWIR, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan. Available online: [https://data2.gosat.nies.go.jp/GosatDataArchiveService/doc/RA/ATBD\\_FTSPPDF-SL2\\_V1.0\\_en.pdf](https://data2.gosat.nies.go.jp/GosatDataArchiveService/doc/RA/ATBD_FTSPPDF-SL2_V1.0_en.pdf) (accessed on 1 October 2018), 2018.
- Ota, Y., Higurashi, A., Nakajima, T., and Yokota, T.: Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 111, 878-894, 2010.
- Ota, Y., and Imasu, R.: CO<sub>2</sub> Retrieval Using Thermal Infrared Radiation Observation by Interferometric Monitor for Greenhouse Gases (IMG) Onboard Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 94, 471-490, 10.2151/jmsj.2016-027, 2016.
- Rodgers, C. D.: *Inverse Methods for Atmospheric Sounding, Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, Volume 2*, WORLD SCIENTIFIC, 256 pp., 2000.
- Rokotyan, N. V., Imasu, R., Zakharov, V. I., Griбанov, K. G., and Khamatnurova, M. Y.: The amplitude of the CO<sub>2</sub> seasonal cycle in the atmosphere of the Ural region retrieved from ground-based and satellite near-IR measurements, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 28, 49-55, 10.1134/S102485601501011X, 2015.
- Rothman, L. S., Jacquemart, D., Barbe, A., Chris Benner, D., Birk, M., Brown, L. R., Carleer, M. R., Chackerian, C., Chance, K., Coudert, L. H., Dana, V., Devi, V. M., Flaud, J. M., Gamache, R. R., Goldman, A., Hartmann, J. M., Jucks, K. W., Maki, A. G., Mandin, J. Y., Massie, S. T., Orphal, J., Perrin, A., Rinsland, C. P., Smith, M. A. H., Tennyson, J., Tolchenov, R. N., Toth, R. A., Vander Auwera, J., Varanasi, P., and Wagner, G.: The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 96, 139-204, 10.1016/j.jqsrt.2004.10.008, 2005.
- Saitoh, N., Imasu, R., Ota, Y., and Niwa, Y.: CO<sub>2</sub> retrieval algorithm for the thermal infrared spectra of the Greenhouse Gases Observing Satellite: Potential of retrieving CO<sub>2</sub> vertical profile from high-resolution FTS sensor, *J. Geophys. Res.*, 114, D17305, 10.1029/2008JD011500, 2009.



- Saitoh, N., Kimoto, S., Sugimura, R., Imasu, R., Kawakami, S., Shiomi, K., Kuze, A., Machida, T., Sawa, Y., and Matsueda, H.: Algorithm update of the GOSAT/TANSO-FTS thermal infrared CO<sub>2</sub> product (version 1) and validation of the UTLS CO<sub>2</sub> data using CONTRAIL measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2119-2134, 10.5194/amt-9-2119-2016, 2016.
- Super, I., Denier van der Gon, H. A. C., van der Molen, M. K., Sterk, H. A. M., Hensen, A., and Peters, W.: A multi-model approach to monitor emissions of CO<sub>2</sub> and CO in an urban-industrial complex, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2016, 1-31, 10.5194/acp-2016-807, 2016.
- Takagi, H., Houweling, S., Andres, R. J., Belikov, D., Bril, A., Boesch, H., Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., Maksyutov, S., Morino, I., Oda, T., O'Dell, C. W., Oshchepkov, S., Parker, R., Saito, M., Uchino, O., Yokota, T., Yoshida, Y., and Valsala, V.: Influence of differences in current GOSAT XCO<sub>2</sub> retrievals on surface flux estimation, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2598-2605, 10.1002/2013gl059174, 2014.
- Wunch, D., Wennberg, P. O., Toon, G. C., Connor, B. J., Fisher, B., Osterman, G. B., Frankenberg, C., Mandrake, L., O'Dell, C., Ahonen, P., Biraud, S. C., Castano, R., Cressie, N., Crisp, D., Deutscher, N. M., Eldering, A., Fisher, M. L., Griffith, D. W. T., Gunson, M., Heikkinen, P., Keppel-Aleks, G., Kyrö, E., Lindenmaier, R., Macatangay, R., Mendonca, J., Messerschmidt, J., Miller, C. E., Morino, I., Notholt, J., Oyafuso, F. A., Rettinger, M., Robinson, J., Roehl, C. M., Salawitch, R. J., Sherlock, V., Strong, K., Sussmann, R., Tanaka, T., Thompson, D. R., Uchino, O., Warneke, T., and Wofsy, S. C.: A method for evaluating bias in global measurements of CO<sub>2</sub> total columns from space, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12317-12337, 10.5194/acp-11-12317-2011, 2011.
- Yang, D., Liu, Y., Cai, Z., Chen, X., Yao, L., and Lu, D.: First Global Carbon Dioxide Maps Produced from TanSat Measurements, *Advances in Atmospheric Sciences*, 35, 621-623, 10.1007/s00376-018-7312-6, 2018.
- Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S.: Global Concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results, *SOLA*, 5, 160-163, 10.2151/sola.2009-041, 2009.
- Yoshida, Y., Oguma, H., Morino, I., Suto, H., Kuze, A., and Yokota, T.: Mountaintop observation of CO<sub>2</sub> absorption spectra using a short wavelength infrared Fourier transform spectrometer, *Appl. Opt.*, 49, 71-79, 10.1364/AO.49.000071, 2010.
- Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., Kikuchi, N., Nobuta, K., Tran, H., Morino, I., and Yokota, T.: Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 717-734, 10.5194/amt-4-717-2011, 2011.
- Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., Bril, A., Saeki, T., Schutgens, N., Toon, G. C., Wunch, D., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Griffith, D. W. T., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Connor, B., Rettinger, M., Sussmann, R., Ahonen, P., Heikkinen, P., Kyrö, E., Mendonca, J., Strong, K., Hase, F., Dohe, S., and Yokota, T.: Improvement of the retrieval

algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data, Atmos. Meas. Tech., 6, 1533-1547, 10.5194/amt-6-1533-2013, 2013.

Zhou, M., Dils, B., Wang, P., Detmers, R., Yoshida, Y., O'Dell, C. W., Feist, D. G., Velazco, V. A., Schneider, M., and De Mazière, M.: Validation of TANSO-FTS/GOSAT XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> glint mode retrievals using TCCON data from near-ocean sites, Atmos. Meas. Tech., 9, 1415-1430, 10.5194/amt-9-1415-2016, 2016.

柴田, 清.: 光の気象学, 応用気象学シリーズ, 1, 朝倉書店, 1999.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導とご支援がありましたことを、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

指導教員の今須良一教授は、本研究を進める上で、数あまたの、そして長時間にわたる議論の場を設けてくださいました。さらに、リトリーバル研究の基本からその分野の最先端までを教授してくださいました。自身の性格を理解して下さったのきめ細やかなご指導に対し、最上の感謝の意をここに表します。

PPDF-Sリトリーバル・アルゴリズムの実施は、Institute of Physics of National Academy of Sciences of BelarusのAndrey Bril氏の協力なしでは為し得ませんでした。氏には2016年の半年間、東京大学 大気海洋研究所に来ていただきました。その間、数多くの議論をしていただいたことに感謝申し上げます。

本研究で使用したGOSATデータとデータ処理プログラムは、国立環境研究所より特別に提供していただきました。GOSATプロジェクトリーダーの横田達也氏、吉田幸生氏をはじめ、富士通エフ・アイ・ピー株式会社の中村東奈氏に対し、感謝申し上げます。

TCCON データは、TCCON Data Archive (doi:10.14291/tccon.archive/1348407) よりダウンロードしました。有益なデータを無料で配布している Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) に感謝致します。ABSCO データは、NASA の Jet Propulsion Laboratory (JPL) グループより提供を受けました。ロシア Yekaterinburg での XCO<sub>2</sub> データは、国立ウラル大学より提供していただきました。

最後に、家族たちの日々の見守りに感謝致します。