

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1901 国際観測網への発展を可能とするGOSAT-2の微小粒子状物質及び
黒色炭素量推定データの評価手法の開発
(JPMEERF20192001)
令和元年度～令和3年度

Development of GOSAT-2 PM_{2.5} and BC Product Validation Methodology Applicable to
an International Observation Network

〈研究代表機関〉
国立大学法人千葉大学

〈研究分担機関〉
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
国立研究開発法人国立環境研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としてしております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	2
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 地上観測によるGOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発 (国立大学法人千葉大学)	・・・・・・・・・・	13
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 アルゴリズム研究及び他衛星データとの比較による GOSAT-2プロダクトの誤差解析 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)	・・・・・・・・・・	29
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		

II-3 GOSAT-2のPM _{2.5} /BCデータ評価手法の提案 (国立研究開発法人国立環境研究所)	44
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	59
IV. 英文Abstract	68

I. 成果の概要

課題名 2-1901 国際観測網への発展を可能とするGOSAT-2の微小粒子状物質及び黒色炭素量推定データの評価手法の開発

課題代表者名 入江 仁士（国立大学法人千葉大学環境リモートセンシング研究センター・准教授）

重点課題 主：【重点課題⑧】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） （2-4）衛星観測データを用いた微小粒子状物質及び黒色炭素量推定結果の評価手法の開発

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

113,148千円（合計額）

（各年度の内訳：令和元年度：39,923千円、令和2年度：37,973千円、令和3年度：37,973千円）

研究体制

（サブテーマ1）地上観測によるGOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発

（国立大学法人千葉大学）

（サブテーマ2）アルゴリズム研究及び他衛星データとの比較によるGOSAT-2プロダクトの誤差解析

（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）

（サブテーマ3）GOSAT-2のPM_{2.5}/BCデータ評価手法の提案（国立研究開発法人国立環境研究所）

研究協力機関はない。

本研究のキーワード PM_{2.5}、ブラックカーボン、GOSAT、国際観測網、エアロゾル

1. はじめに（研究背景等）

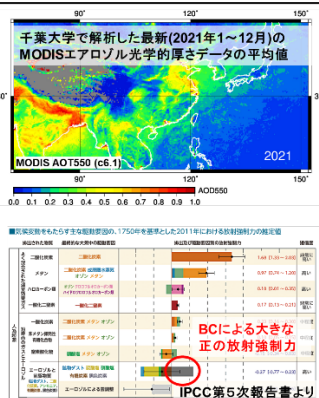
平成30年10月に打上げられた温室効果ガス観測技術衛星2号「いぶき2号」(GOSAT-2)は、雲・エアロゾルセンサ2型(TANSO-CAI-2)を搭載し、大気中の微小粒子状物質(PM_{2.5})及び黒色炭素(BC; ブラックカーボン)量の推計を目指す。しかし、その推計結果を評価するにあたり、衛星観測データから推計する手法と既存の地上計測手法とは、捉えている物理現象が異なるため、直接比較することが困難である。このため、衛星観測データからの推計結果を比較可能な新たな評価手法が必要となっている。

PM_{2.5}は健康への悪影響を及ぼす極めて重要な環境因子である。人口が集中し、健康影響がさらに懸念される都市域では、化石燃料の燃焼などに起因する一次/二次粒子は主に微小粒子側に存在する。その主成分のひとつがBCである。BCはまた、二酸化炭素とメタンに次いで3番目に大きな正の放射強制力を持つ。本研究はこれらの重要性を持つPM_{2.5}とBCを対象とし、そのモニタリング・動態理解は、大気汚染監視、ひいては、気候変動に関する政策への貢献が大いに見込まれるので、科学的・技術的意義が極めて高い。

本研究に関連する研究動向として特筆すべきは、環境省がGOSAT-1、-2の後継として、GOSAT-GWの計画の詳細を検討していることである。GOSAT-1、-2の成果は、GOSAT-GWへの計画、ひいては、GOSATシリーズ3機からのアウトプットをフル利用した応用研究・政策決定へ繋がるので、大きな波及効果・貢献が期待される。

微小粒子状物質(PM_{2.5})・黒色炭素(BC)の重要性

- ▶ 人間活動に起因する高濃度エアロゾル(PM_{2.5}を含む)による大気質・健康等への悪影響が危惧されている。
- ▶ 依然として、アジア域は高濃度エアロゾル汚染域である。
- ▶ BCは、都市域のPM_{2.5}の主成分であるだけでなく、3番目に大きな正の放射強制力を有す。
- ▶ 本研究課題は、これらの重要性を持つPM_{2.5}とBCを対象とし、それらのモニタリング・動態理解は、大気汚染監視、ひいては気候変動に関する政策へ繋がるので、**科学的・技術的意義は極めて高い。**



GOSATシリーズ(1, 2, GW, ...)の計画

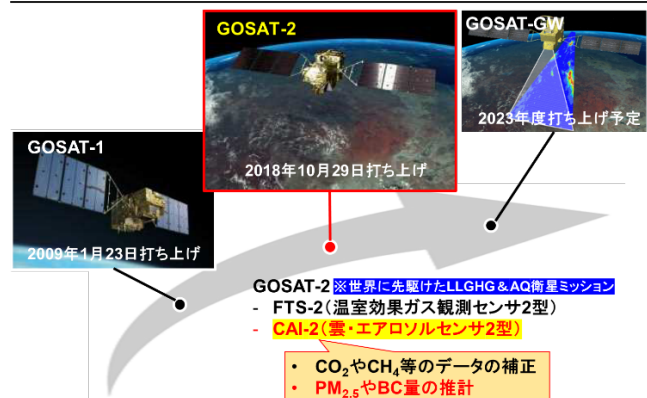


図0.1 PM_{2.5}とBCの重要性とGOSATシリーズの計画における位置づけ。

2. 研究開発目的

本研究は、GOSAT-2の衛星観測データからのPM_{2.5}及びBC量の推計結果を評価する新たな方法を開発することを目的とする。その上で、開発した評価方法を国際観測網に展開させる方法を提案することを目指す。この最終目標を達成し、本研究によって提案された評価手法とGOSAT-2 プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている手法を用いて総合的に評価することで、GOSAT-2 によるPM_{2.5}及びBC量の推計の信頼性向上が期待される。また、GOSAT-2 データのみならず、GOSATシリーズのデータの利活用が促進されると共に、これらの物質のより精緻な分布状況や発生地域の把握に貢献することが可能となり、全球規模での排出抑制効果が期待される。GOSAT-2が既に打ち上がって評価方法の開発が急務の中、これらの波及効果を念頭に置きつつ、研究代表者らがもつ優位性を最大限活かしながら、千葉大学・宇宙航空研究開発機構(JAXA)・国立環境研究所(NIES)との共同研究体制を構築し、この喫緊に対応すべき問題に立ち向かう(図0.2)。

国際観測網への発展を可能とするGOSAT-2の 微小粒子状物質及び黒色炭素量推定データの評価手法の開発

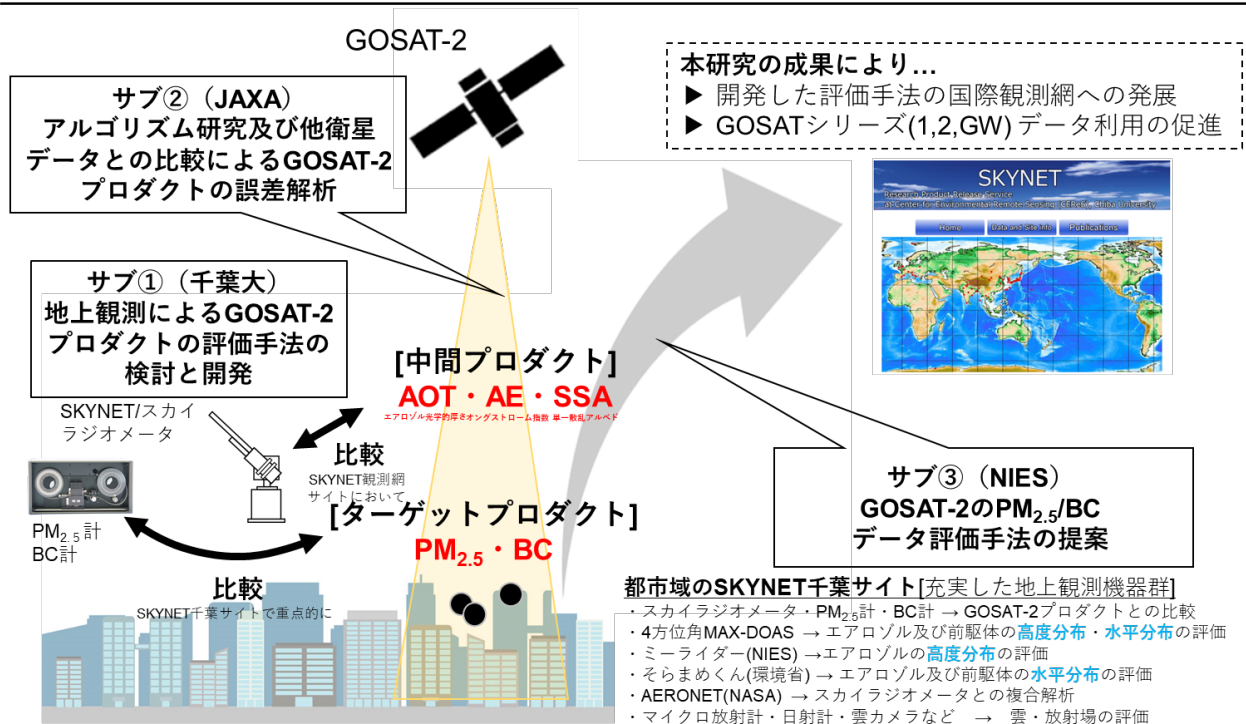


図0.2 本研究のイメージ。基本的に研究開始時のポンチ絵だが、一部、最新情報で改変されている。

3. 研究目標

全体目標	本研究は、GOSAT-2のエアロゾル観測の重要なターゲット域である都市域であり、かつ、既に充実した地上観測機器群を有す、SKYNET千葉サイトでの通年連続観測及び集中観測により、GOSAT-2のPM _{2.5} 及びBC量推定データの評価方法(最適な観測方法や必要なアルゴリズム等)を開発し、さらに、それを国際観測網に展開させる方法を提案することを最終目標とする。
サブテーマ1	地上観測によるGOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発
サブテーマリーダー/所属機関	入江仁士/国立大学法人千葉大学
目標	SKYNET千葉サイトで通年連続観測及び集中観測を行い、この観測データとGOSAT-2データ等との比較解析に基づいて、GOSAT-2のPM _{2.5} 及びBC量推定データの評価方法(最適な地上観測方法や必要なアルゴリズム等)を、国際観測網への展開に活用できる精度・確度を目標として開発する。開発には、サブテーマ2による誤差解析結果やサブテーマ3が作成したGOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている評価方法のリストを考慮する。

サブテーマ2	アルゴリズム研究及び他衛星データとの比較によるGOSAT-2プロダクトの誤差解析
サブテーマリーダー/所属機関	橋本真喜子/国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
目標	GOSAT-2エアロゾルプロダクトのアルゴリズムを用いて、理論的な観点から、GOSAT-2のPM _{2.5} 及びBC量推定データの主要な誤差要因を特定してそのリストを作成し、各誤差を定量的に評価する。また、光学特性データについては、他衛星のデータとの比較を通じて、ロバストな整合性評価・誤差解析を実施する。主要な誤差要因のリストおよび定量化された誤差評価の結果をサブテーマ1に提供する。

サブテーマ3	GOSAT-2のPM _{2.5} /BCデータ評価手法の提案
サブテーマリーダー/所属機関	森野勇/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	サブテーマ1で開発した評価方法を国際観測網に展開させる方法を提案する。この最終目標を達成するために、GOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている方法を、サブテーマ1が開発した評価方法と対比可能な形でリストを作成して整理する。

4. 研究開発内容

本研究は、GOSAT-2の微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 及び黒色炭素 (BC; ブラックカーボン) 量推定データの評価手法を開発することを目的として実施した。これは、行政ニーズ (2-4) に良く合致するうえ、PM_{2.5}やBCは大気汚染監視、ひいては、気候変動研究において重要視されているので、科学的・技術的意義が極めて高く、さらにはGOSATシリーズのデータ利用の促進にも繋がるので、推進すべき重要な研究である。独自の国際観測網 (SKYNET) を基盤に、GOSAT-2のエアロゾル観測の重要なターゲット域である都市域 (千葉) に充実した地上観測機器群・最先端のアルゴリズムを有す、本研究チームが唯一可能で、本研究チームが独自の切り口で取り組む研究である。GOSATプロジェクトで検証を実施している中心メンバーの参画を活かし、開発した評価手法は国際観測網に展開させる方法論として確立させた。本研究では、また、GOSAT-2/TANSO-CAI-2のアルゴリズム開発者が参画することで、その観測方式および推計手法を十分理解した上で、PM_{2.5}及びBC量の推計結果の比較評価手法を検討・開発した。また、その手法を用いて実際のGOSAT-2衛星観測データを評価した。

サブテーマ1：地上観測によるGOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発

千葉大学は、独自の国際観測網 (SKYNET) を基盤に、GOSAT-2のエアロゾル観測の重要なターゲット域である都市域 (千葉) に充実した地上観測機器群および最先端のアルゴリズムを有している。本プロジェクトでは、その設備や蓄積された知見を基盤に、ブラックカーボン (BC) の光吸収を利用した自動連続装置であるBC計 (日本カノマックス社製ブラックカーボンモニターBCM3130; COSMOSとして東京大学にて開発された装置; 精度~10%) を千葉に設置し、既設の小型PM_{2.5}計 (精度<10 µg/m³) 等の各種観測機器との通年連続観測を初年度である2019年11月に開始した。本研究期間中では、通年連続観測に加え、集中観測を毎年度1回、合計3回実施し、千葉大学の地上観測機器群に加え、サブテーマ3の協力の下で標準法 (FRM) やフーリエ変換赤外分光計 (EM27/SUN) との同時観測を確実に実施した。

地上観測機器群のひとつであり本研究にとって重要なスカイラジオメーターと多軸差分吸収分光法 (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy; MAX-DOAS) のアルゴリズム開発・改良・品質管理・品質保証も実施したうえで、様々なエアロゾル光学特性データをPM_{2.5}重量濃度やBC重量

濃度のデータと比較してそれらの相関関係を調べ、GOSAT-2のPM_{2.5}やBC導出アルゴリズムの評価・改良への活用を念頭に詳細な検討を実施した。特に、地表のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとなる光学パラメーターを見い出すことを試みた。この検討は、充実した地上観測機器群を有す本研究の利点を生かし、千葉でまず実施した。そのうえで、千葉の観測データから得られた結果をもとに、他の厳選されたSKYNETスーパーサイト（福江サイトなど）に解析を拡張し、さらには、そういったプロキシパラメーターのトレンド解析を実施し、BCの長期トレンドといった応用研究への活用も試みた。

サブテーマ2と共同で、GOSAT-2エアロゾルプロダクトの評価を実施した。評価のために、2019年2月から2021年9月までの期間にスカイラジオメーターとMAX-DOASの観測が同時に実施された4地点で衛星観測と地上観測の比較を実施した。GOSAT-2のアルゴリズムにおけるエアロゾルプロダクトへの相対湿度や大気境界層高度の影響を調べ、サブテーマ2との議論を通じて、アルゴリズムの問題点を指摘するとともに改善点の提案を試みた。このように本研究独自の方法で得られたデータを解析して、GOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発を進めた。

本研究で見出した地表付近のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとして有効な光学パラメーターの解析を、本プロジェクト提案の国際観測網（A-SKY）のサイトである千葉サイト、ソウルサイト（韓国）、ハルドワニサイト（インド）について2022年1～3月の期間に特に着目して実施した。千葉については、地表に設置したPM_{2.5}計やBC計で測定したそれぞれの重量濃度との比較から本研究で見出したプロキシパラメーターの妥当性の最終確認を行った。そのうえで、PM_{2.5}計やBC計が配備されていない海外サイトでのA-SKY国際観測網におけるPM_{2.5}やBC重量濃度の推計を試みた。

目標を上回るエクストラな研究として、2021年12月6日にSKYNET/A-SKY国際観測網の千葉サイトに、トレースガスアナライザーLI-7810（LI-COR Biosciences）を設置し、長寿命温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）とメタン（CH₄）の大気中濃度の連続測定を開始した。スカイラジオメーターやMAX-DOASによる大気環境にとって重要なエアロゾルや各種大気微量ガスの高精度な観測機器との同時観測が開始されたことで、一層、世界的にも類を見ないユニークな我が国の観測サイトになった。BC重量濃度などやMAX-DOASによって測定される二酸化窒素（NO₂）濃度との相関を2023年度打ち上げ予定のGOSAT-GW衛星（温室効果ガス・水循環観測技術衛星）のミッションを念頭に考察した。

サブテーマ2：アルゴリズム研究及び他衛星データとの比較によるGOSAT-2プロダクトの誤差解析

GOSAT-2 CAI-2エアロゾル導出アルゴリズムを用いた数値実験を行い、輝度誤差やエアロゾルモデルの設定を変えた際の誤差解析を行った。また、PM_{2.5}とBC量の地上検証のための感度解析として、機械学習（Random forest）により重要度を計算することで、PM_{2.5}とBCに対して相関の高い変数の調査を実施した。説明変数としては、中国及びインドの研究者の協力を得てPM_{2.5}とBC量の地上観測結果と、GOSAT初号機の雲・エアロゾルイメージャ（CAI）からGOSAT-2/CAI-2エアロゾル導出アルゴリズムで導出したエアロゾル特性、及び気象場などの補助データを用いた。また、導出されたエアロゾル特性の評価のため、エアロゾル地上観測ネットワークSKYNETとAERONETのデータ、及び他衛星（Suomi-NPPVIIRS、Aqua/MODIS、Himawari-8/AHI）のデータをGOSAT-2/CAI-2データに合わせて整備し、比較を行った。SKYNETのデータについては2019年2月から2021年9月まで継続的な解析を実施し、サブテーマ1と協力し比較精度評価を実施した。地上観測・他衛星観測との比較では、CAI-2より得られたエアロゾル特性の精度（バイアスやバラツキ）、整合性の評価を行った。誤差解析と感度解析よりアルゴリズムがもつ誤差特性とエアロゾル特性に生じるバイアス、PM_{2.5}とBC量を比較する上での考慮すべきパラメーターについてまとめ、結果を他サブテーマに共有した。さらには、アルゴリズムへのフィードバックとして、誤差解析と地上観測・他衛星観測との比較により得られた誤差要因について考察を行い、エアロゾル特性導出の精度向上に向けたエアロゾル特性導出アルゴリズムの改良点について提案事項としてまとめた。

サブテーマ3：GOSAT-2のPM_{2.5}/BCデータ評価手法の提案

サブテーマ1と連携して、日本の標準測定法でPM_{2.5}を測定するために、夏季と冬季に集中観測を実施し、国立環境研究所（つくば市）および千葉大学（千葉市）において、PM_{2.5}のフィルタ捕集を行った。

本研究ではPM_{2.5}の捕集は各地点において、標準法に基づくFRM (Federal reference method) サンプラ (Model 2000、Thermo社製あるいはR&P社製) を2台ずつ用いて行った。更に、集中観測がより総合的な観測キャンペーンとなるように、2019年、2020年は可搬型FTS (Fourier Transform Spectrometer、EM27/SUN) を千葉大学の工学系総合研究棟屋上に設置し、2021年は、これまでの2年の観測結果を踏まえて都市大気の空間変化を明確に捉えることを目指し千葉大学に加えてさいたま市秋ヶ瀬公園に設置して、平日晴天時に大気微量成分の吸収を受けた太陽直達光スペクトルを測定した。

国立環境研究所大気モニター棟などにおいてPM_{2.5}および三機種によるPM_{2.5}中BCの連続測定を行った。本研究では2019年11月1日から2022年3月31日の間の測定データを用いた。2021年4月からは簡易PM_{2.5}センサーも使い、モニターを行った。その一方で、BCは光吸収法によるCOSMOS (MODEL 3130、カノマックス) とマルチアングル吸光度法によるMAAP (5012、Thermo Scientific) によって測定した。本研究では1時間で平均化して1時間値とし、フィルタ法との比較、および機種間の比較を行った。さらに、2020年夏季以降の集中観測期間に合わせて、国立環境研究所マイクロナノ粒子研究棟において、エサロメータ (AE33、MAGEE SCIENTIFIC) およびスス粒子エアロゾル質量分析計 (SP-AMS, Aerodyne) による計測も行った。

以上の結果を踏まえつつ、本推進費の進捗に沿って、GOSAT-2 検証計画・検証実施計画の内容の把握、GOSAT-2 サイエンスチーム会合の内容と議論の共有を行い、キックオフ会合、アドバイザーボード会合、アルゴリズム勉強会、GOSAT-2/CAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せ、メールでの議論を通じて、事業と研究の切り分け、検証作業への落とし込みを行った。さらに、サブテーマ1と共同で本研究において開発した評価手法を国際観測網に展開させる方法論を提案した。

注釈：

- ・ スカイラジオメーター： 複数の波長で太陽放射照度を計測し、大気に入射する太陽放射照度との差から大気での減衰分を求め、Lambert-Beerの法則に基づいてエアロゾルの光学的厚さを導出する。また、波長依存性から粒径に関する情報 (オングストローム指数) も導出する。さらに、スカイラジオメーターは天空放射輝度の角度分布も計測し、散乱角に依存したエアロゾルの様々な光学特性 (複素屈折率、一次散乱アルベド、非対称因子) も導出する。
- ・ SKYNET： スカイラジオメーターユーザーの国際グループ。
- ・ MAX-DOAS： Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopyの略。差分吸収分光法 (Differential Optical Absorption Spectroscopy; DOAS法) の一種。DOAS法とは、高波長分解能で測定したスペクトルに含まれる観測対象物 (微量ガス) の特徴的な吸収スペクトル構造を利用し、Lambert-Beerの法則に基づいて微量ガスの濃度を導出する方法。測定されるスペクトルには微量ガスだけでなくレイリー散乱やミー散乱等による影響も含まれるが、そういった微量ガスの吸収構造よりも低周波 (波長方向に緩やかな構造) の影響は多項式で近似して除去する。これにより、0.1%以下のわずかな吸収をも同定し微量ガスの濃度を高精度で導出できる。MAX-DOAS法は、このDOAS法に太陽散乱光の低仰角測定機能を加え、各種大気汚染物質の大気中カラム濃度と鉛直分布データを得るための地上設置型のリモートセンシング装置またはその技術。
- ・ 大気境界層： 対流圏のうち、流体としての大気が地表面の影響を受ける高度2 kmぐらいまでの層をいう。温帯域では1 kmぐらい、熱帯域では2 kmぐらいの厚みを持つ。地表面の影響をほとんど受けない自由対流圏と区別される。大気境界層内では自由対流圏に比べ人間活動などの地表の影響が顕在化する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

黒色炭素（BC；ブラックカーボン）の光吸収を利用した自動連続装置であるBC計を千葉に設置し、既設の小型PM_{2.5}計等の各種観測機器との通年連続観測を初年度に開始した。最終年度までの通年連続観測期間中のBC/PM_{2.5}重量濃度比はおおむね0.1以下であり、全期間の平均値は0.03±0.02であった。この通年連続観測に加え、集中観測を毎年度1回、合計3回実施し、千葉大学の地上観測機器群に加え、サブテマ3の協力の下で標準法（FRM）やフーリエ変換赤外分光計（EM27/SUN）との同時観測を確実に実施した。FRMとの同時観測から、低湿度環境下（相対湿度RH<60%）においてPM_{2.5}計とFRMのPM_{2.5}重量濃度データは良く一致することが分かった。環境基準で採用されているPM_{2.5}重量濃度は相対湿度の条件で定義されているため、GOSAT-2データの検証を行う上で、RHの情報が必須である。MAX-DOAS観測からこの重要なRHの情報をエアロゾル消散係数の高度分布と同時に精度良く得られることが分かった。同一地点における異なる測定法間の比較において、PM_{2.5}計測の精度は約23%以内（テフロンフィルタによる標準法を用いた場合と等価装置との相違）であった。また、PM_{2.5}中BCの測定法には標準法がなく、装置の機種の違いによる固有の器差があることから、真値を得ることは難しいが、本研究で使用した装置の範囲内ではBCは平均値から±50%以内（今回用いた6手法の相違）で測定された。

様々なエアロゾル光学特性データをPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のデータと比較してそれらの相関関係を調べたところ、PM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとなる光学パラメーター（それぞれ、fAOD（0-1km）とfAAOD（0-1km））をスカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測から導出できることを見出した。2015-2021年の千葉においてfAAOD（0-1km）の減少トレンドが見い出され、地表付近のBC重量濃度の減少が示唆された。スカイラジオメーターとMAX-DOASはいずれも単体では既に国際観測網化されている中、上記の結果はそれらの観測技術が国際観測網展開に活用できる精度・確度を有することを裏付ける。

GOSAT-2/TANSO-CAI-2のアルゴリズム開発者の参画を強みに、GOSAT-2エアロゾルプロダクトのアルゴリズムを用いて、理論的な観点から、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの主要な誤差要因の特定を試みた。また、地上観測と他衛星のデータとの比較を通じて、ロバストな整合性評価・誤差解析を実施し、主要な誤差要因のリスト化と定量化を行った。さらには、感度実験としてエアロゾル光学特性のほか、境界層高度（PBLH）やRHなどのデータも説明変数に含めた機械学習により重要度を計算し、算出精度向上や地上観測による検証に重要な変数の調査を実施した。その結果、PM_{2.5}とBCの導出には、微小粒子AOD、PBLH、RHが重要であることが分かった。また、GOSAT-2/CAI-2エアロゾル導出アルゴリズムを用いたエアロゾル特性解析を実施し、地上観測との比較も行った。SKYNET千葉サイトとの詳細な比較の結果、エアロゾル光学的厚さ（AOD or AOT）はやや過大評価傾向、オングストローム指数（AE）は全体に過小評価であり、CAI-2エアロゾルモデルの粒径分布によりAEに最大で-0.5のバイアスが生じることが分かった。一次散乱アルベド（SSA）は光吸収に感度のある紫外バンドで相関が見られた。さらに、インド地上観測ARFINETとCAI-2のBCデータの比較では、北インドのBCが多い場所・時期において、相関係数が0.74以上で65%以上が差2 μg/m³以内で一致し、仮にGOSAT-2においてPM_{2.5}の20 μg/m³の観測精度が達成できれば目標精度10%を満たす結果であることが分かった。これらの結果を参考に、本研究で見出したPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとなる光学パラメーターを用いてGOSAT-2データとの比較解析を行い、PBLHやRHが比較結果に及ぼす影響を調べたところ、GOSAT-2のエアロゾルアルゴリズムにおいて、PBLHとRHが誤差要因として重要なパラメーターであることが分かった。このように、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測は、GOSAT-2の最終プロダクトであるPM_{2.5}やBCデータの誤差を見積もるだけでなく、アルゴリズムの重要なパラメーター（PBLHやRH）や中間プロダクト（AOD、fAOD、fAAOD、および、それらの大気境界層中の部分カラム量）も評価することで、より精密なアルゴリズムの評価、ひいては、それに基づく迅速なアルゴリズムの改良が期待される。

本推進費の研究における評価法の開発と、GOSAT-2プロジェクトの事業として行っている評価とを整理した。アルゴリズム開発において懸案となっている項目、地上データによる評価において必要なGOSAT-2/CAI-2データ項目などについて理解が進み、プロジェクトと研究のギャップを埋めることができた。

GOSAT-2プロジェクトとしては、一般公開とサクセスクライテリア達成に向けた単純な検証作業のみを実施することが分かった。他方、本推進費で提案の検証研究は、上記のように精緻な検証のためには重要である。このような本研究の成果を受けて、国際観測網に展開させる方法として、スカイラジオメーターとMAX-DOASの両方を配備する観測網A-SKYを提案した。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

気候変動問題や広域大気汚染問題に取り組むうえで、キーとなる大気パラメーターのグローバル観測は必須である。我が国のGOSAT衛星は主要な長寿命温室効果ガス (LLGHG; Long-Lived Green House Gas) である二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) の濃度を宇宙から観測することを専門とした世界初の人工衛星であり、多くの顕著な成果を上げている。他方、即効性のある地球温暖化の緩和策として短寿命気候強制因子 (SLCFs) (あるいは、短寿命気候汚染物質 (SLCPs) ともいう) への関心が高まっている。LLGHG と SLCFs 等の大気汚染 (AQ) の発生源が類似していることから、国際的にLLGHGとAQの両方を同時観測する衛星ミッションと、それを活用した最先端の環境研究の重要性が急速に高まっている (e. g., European Copernicus anthropogenic CO₂ monitoring mission (CO2M))。GOSAT-2 衛星は両方を観測ターゲットとしており、世界に先駆けたLLGHG & AQミッションであると位置づけられる。また、2023年度に打ち上げが計画されているGOSATシリーズのGOSAT-GW衛星も、主要なSLCFsである二酸化窒素 (NO₂) の観測が追加され、LLGHG & AQミッションとしての系譜を引き継ぐ。定量的な研究やそれに基づく合理的な政策決定に貢献するには、地上の国際観測網による人工衛星観測の精度検証が必須であり、LLGHG & AQミッションも例外ではない。このように、気候変動問題や広域大気汚染問題に取り組むには、人工衛星とその精度検証を担う国際観測網を「両輪」とした観測体制が不可欠である。GOSAT-2データを使った最先端の環境研究 (LLGHG & AQ) を推進するために、GOSAT-2のエアロゾルプロダクトの評価 (検証) は急務である。本研究で開発した評価方法は、そういった評価を可能としたため、極めて重要な成果をもたらした。

本研究において、PM_{2.5}とBCの新しいモニタリング技術を開発した。これは、地上設置型の2種類のリモートセンシング技術 (スカイラジオメーターとMAX-DOAS (マックスドアズ)) を組み合わせたものである。何れのリモートセンシング技術も校正をオンサイトで行うことができるため、メーカーでの定期的な校正は不要であり、ランニングコストを抑えることができる。また、リモートセンシングを採用しているため、得られたデータの空間代表性が高いことも特長である。この技術はこのように、優れた費用対効果が期待される。さらには、これら2種類のリモートセンシング技術は国産であるため、利用価値を高めていくことで我が国の国際社会におけるリーダーシップも期待される。本研究では、こういった世界を先導する新規性を有するスカイラジオメーターとMAX-DOASを同時に採用する国際観測網 (A-SKY) を提案し、既に7サイトの観測網を構築するに至った。

本研究では目標を上回る特別研究として、A-SKY国際観測網の最重要拠点である千葉サイトで、国際観測網 (COCCON) において使用されているフーリエ変換赤外分光計 (EM27/SUN) によるCO₂とCH₄の大気中濃度の観測を3回もの集中観測期間に行い、さらには、トレースガスアナライザーLI-7810 (LI-COR Biosciences) を設置しCO₂とCH₄の大気中濃度の連続測定を開始した。このように、A-SKY国際観測網をLLGHG & AQをターゲットとして世界をリードする国際観測網の受け皿として活用するための一歩を踏みこむことができた。

A-SKYは我が国発の国際観測網であり、そういった観点からも、我が国の国際社会におけるリーダーシップが期待される。こういった当初の目標を越えた特別研究の成果も含め、本プロジェクトの成果によって、GOSATシリーズのデータ利用が促進されて最先端の環境研究が推進され、その結果、我が国が国際

的なLLGHG & AQミッションを牽引することが期待され、ひいては、即効性のある地球温暖化の緩和策への貢献が期待される。また、A-SKY国際観測網のさらなる国際展開・データ蓄積により、国民生活の質の向上のみならず、気候変動問題や広域大気汚染問題への合理的な政策決定に資する科学的知見の創出につながると期待される。

5-3. 研究目標の達成状況

GOSAT-2のエアロゾル観測の重要なターゲット域である都市域であり、かつ、既に充実した地上観測機器群を有す、SKYNET千葉サイトでの通年連続観測及び集中観測により、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの評価方法(最適な観測方法や必要なアルゴリズム等)を開発することができた。そのうえで、誤差の見積もりに留まらず、精密なアルゴリズムの評価、それに基づく迅速なアルゴリズムの改良が可能となる評価方法まで発展させた。さらには、効果的な検証方法としてスカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測を行う国際観測網へ展開させる方法を提案するという最終目標を達成することができた。

サブテーマ1：計画通り、SKYNET千葉サイトで通年連続観測及び集中観測を行い、この観測データとGOSAT-2データ等との比較解析に基づいて、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの評価方法(最適な地上観測方法や必要なアルゴリズム等)を、国際観測網への展開に活用できる精度・確度を目標として開発できた。開発には、サブテーマ2による誤差解析結果やサブテーマ3が作成したGOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている評価方法のリストを考慮するといったサブテーマ間の密な連携のもとで効率良く実施することができた。

サブテーマ2：計画通り、GOSAT-2エアロゾルプロダクトのアルゴリズムを用いて、理論的な観点から、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの主要な誤差要因を特定してそのリストを作成し、各誤差を定量的に評価できた。また、光学特性データについては、他衛星のデータとの比較を通じて、ロバストな整合性評価・誤差解析を実施できた。主要な誤差要因のリストおよび定量化された誤差評価の結果をサブテーマ1に提供した。

サブテーマ3：計画通り、サブテーマ1で開発した評価方法を国際観測網に展開させる方法を提案することができた。この最終目標を達成するために、GOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている方法を、サブテーマ1が開発した評価方法と対比可能な形でリストを作成して整理することができた。

プロジェクト開始時はスカイラジオメーターの観測をもとにAODやSSAなどを中間プロダクトとして評価することを目指した(図0.2)が、それよりも有効なfAOD(0-1km)やfAAOD(0-1km)といった光学パラメーターを見出し、そのデータを得ることができるスカイラジオメーターとMAX-DOASを同時に配備するA-SKY国際観測網の提案、さらには、国内外7サイトの観測網構築に至った点は、当初の予定を上回る成果である。また、千葉においては、BC・PM_{2.5}・NO₂などと同時にCO₂やCH₄の連続観測も開始し、GOSAT/GOSAT-2/GOSAT-GWの応用研究のための科学的知見を創出できたことも当初の目標を越えた成果として特筆する。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

19件

<主な査読付き論文>

- 1) Kim, J., U. Jeong, M.-H. Ahn, J. H. Kim, R. J. Park, H. Lee, C. H. Song, Y.-S. Choi, K.-H. Lee, J.-M. Yoo, M.-J. Jeong, S. K. Park, K.-M. Lee, C.-K. Song, S.-W. Kim, Y.-J. Kim, S.-W. Kim, M. Kim, S. Go, X. Liu, K. Chance, C. C. Miller, J. Al-Saadi, B. Veihermann, P. K. Bhartia, O. Torres, G. G. Abad, D. P. Haffner, D. H. Ko, S. H. Lee, J.-H. Woo, H. Chong, S. S. Park, D. Nicks, W. J. Choi, K.-J. Moon, A. Cho, J.-M. Yoon, S.-K. Kim, H. Hong, K. Lee, H. Lee, S. Lee, M. Choi, P. Veefkind, P. Levelt, D. P. Edwards, M. Kang, M. Eo, J. Bak, K. Baek, H.-A. Kwon, J. Yang, J. Park, K. M. Han, B. Kim, H.-W. Shin, H. Choi, E. Lee, J. Chong, Y. Cha, J.-H. Koo, H. Irie, S. Hayashida, Y. Kasai, Y. Kanaya, C. Liu, J. Lin, J. H. Crawford, G. R. Carmichael, M. J. Newchurch, B. L. Lefer, J. R. Herman, R. J. Swap, A. K. H. Lau, T. P. Kurosu, G. Jaross, B. Ahlers, M. Dobber, T. McElroy, and Y. Choi, New Era of Air Quality Monitoring from Space: 1 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), *Bulletin of the American Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0013.1>, 2020 (IF: 8.766).
- 2) Go, S. J. Kim, J. Mok, H. Irie, J. M. Yoon, O. Torres, N. Krotokov, G. Labow, M. Kim, J. H. Koo, M. Choi, and H. Lim, Ground-based retrievals of aerosol column absorption in the UV spectral region and their implications for GEMS measurements, *Remote Sensing of Environment*, 245, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111759>, 2020 (IF: 10.164).
- 3) Nakajima, T., M. Campanelli, H. Che, V. Estellés, H. Irie, S.-W. Kim, J. Kim, D. Liu, T. Nishizawa, G. Pandithurai, V. K. Soni, B. Thana, N.-U. Tugjurn, K. Aoki, M. Hashimoto, A. Higurashi, S. Kazadzis, P. Khatri, N. Kouremeti, R. Kudo, F. Marengo, M. Momoi, S. S. Ningombam, C. L. Ryder, and A. Uchiyama, An overview and issues of the sky radiometer technology and SKYNET, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4195-4218, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020>, 2020 (IF: 4.176).
- 4) Irie, H., D. Yonekawa, A. Damiani, H. M. S. Hoque, K. Sudo, and S. Itahashi, Continuous multi-component MAX-DOAS observations for the planetary boundary layer ozone variation analysis at Chiba and Tsukuba, Japan from 2013 to 2019, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 31, <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00424-9>, 2021 (IF: 3.784).
- 5) Damiani, A., H. Irie, K. Yamaguchi, H. M. S. Hoque, T. Nakayama, Y. Matsumi, Y. Kondo, and A. Da Silva, Variabilities in PM_{2.5} and black carbon surface concentrations reproduced by aerosol optical properties estimated by sky radiometer and MAX-DOAS instruments, *Remote Sensing*, 13(16), 3163, <https://doi.org/10.3390/rs13163163>, 2021 (IF: 5.353).
- 6) Yamada M., A. Fujioka; N. Fujita, M. Hashimoto, Y. Ueda., Takanobu Aoki, T. Minami, M. Torii; Efficient Examples of Earth Observation Satellite Data Processing Using the Jaxa Supercomputer System and the Future for the Next Supercomputer System," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, pp. 5735-5738, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554038, 2021 (IF:0.7).
- 7) Shi, C., M. Hashimoto, K. Shiomi and T. Nakajima, Development of an Algorithm to Retrieve Aerosol Optical Properties Over Water Using an Artificial Neural Network Radiative Transfer Scheme: First Result From GOSAT-2/CAI-2, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 12, pp. 9861-9872, doi: 10.1109/TGRS.2020.3038892, 2021 (IF:5.6).
- 8) Fujitani, Y., A. Fushimi, K. Saitoh, K. Sato, A. Takami, Y. Kondo, K. Tanabe, S. Kobayashi: Mid carbon(C₆⁺-C₂₉⁺) in refractory black carbon aerosols is a potential tracer of open burning of rice straw: Insights from atmospheric observation and emission source studies, *Atmospheric Environment*, 238, 117729, 2020 (IF: 4.8).
- 9) Yoshino, A., A. Takami, K. Hara, C. Nishita-Hara, M. Hayashi, N. Kaneyasu: Contribution

of local and transboundary air pollution to the urban air quality of Fukuoka, Japan, Atmosphere, 12(4), 431, 2021 (IF: 2.7).

- 10) Thi Ngoc Trieu, T., I. Morino, O. Uchino, Y. Tsutsumi, T. Sakai, T. Nagai, A. Yamazaki, H. Okumura, K. Arai, K. Shiomi, D.F. Pollard, B. Liley: Influences of aerosols and thin cirrus clouds on GOSAT XCO₂ and XCH₄ using Total Carbon Column Observing Network, sky radiometer, and lidar data, International Journal of Remote Sensing, 43(5), 1770-1799, 2022 (IF:3.2).

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

その他誌上発表（査読なし）	3件
口頭発表（学会等）	68件
「国民との科学・技術対話」の実施	11件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	2件

7. 国際共同研究等の状況

(1) SKYNET国際観測網・A-SKY国際観測網・スカイラジオメーター・MAX-DOAS関係

[連携内容] International SKYNET committee、観測網サイトオーナー、サブネットワークマネージャなどとしての連携。国際共著論文執筆・学会発表。

[本研究成果にもたらす効果] 国際観測網の運営、データ共有、国際共著論文執筆・学会発表を通じた成果の創出。

- 1) 中国 中国気象局(CMA) Huizheng Che, Xianyi Yang : SKYNET, SKYNET-AERONET相互比較等
- 2) 中国 中国科学院安徽光学精密機械研究所(AIOFM)
Dong Liu, Zhenzhu Wang : SKYNET, SKYNET-AERONET相互比較等
- 3) 米国 NASA Brent Holben, Jungbin Mok : SKYNET-AERONET相互比較等
- 4) タイ チュラロンコン大学 Thanawat Jarupongsakul : SKYNET, A-SKY
- 5) インド India Meteorological Department (IMD) Vijay Kumar Soni : SKYNET
- 6) インド Indian Institute of Tropical Meteorology (IITM) Govindan Pandithurai : SKYNET
- 7) インド ARIES Manish Naja : SKYNET, A-SKY
- 8) イタリア CNR-ISAC Monica Campanelli : SKYNET
- 9) スペイン Universitat de València Victor Estellés : SKYNET
- 10) モンゴル モンゴル科学技術大学 Nas-Urt Tugjsurn : SKYNET
- 11) 韓国 ソウル国立大学 Sang-Woo Kim : SKYNET, A-SKY
- 12) 韓国 延世大学 Jhoon Kim : SKYNET
- 13) スイス World Radiation Center Stelios Kazadzis : 放射観測相互比較

(2) MAX-DOAS関係

[連携内容] MAX-DOAS法に関わる国際共著論文執筆・学会発表。

[本研究成果にもたらす効果] 国際共著論文執筆・学会発表を通じた成果創出。

1) ベルギー Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB)

Michel Van Roozendael, Gaia Pinardi : MAX-DOAS相互比較等

2) ドイツ University of Bremen Andreas Richter : MAX-DOAS相互比較等

3) オランダ Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)

Ankie Pitters : MAX-DOAS相互比較等

(3) 衛星観測関係

[連携内容] 衛星観測に関わる国際共著論文執筆・学会発表。

[本研究成果にもたらす効果] 国際共著論文執筆・学会発表を通じた成果の創出。

1) ベルギー Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB)

Michel Van Roozendael, Gaia Pinardi : TROPOMI, GOME-2, OMI検証

2) 韓国 延世大学 Jhoon Kim : GEMS

3) 中国 中国科学院空天信息創新研究院 石 崇 : GOSAT-2 エアロゾル特性導出アルゴリズム

4) インド インド宇宙研究機関 Mukunda M Gogoi : ARFINET地上観測とGOSAT-2/CAI-2のBC比較

8. 研究者略歴

研究代表者

入江 仁士

名古屋大学大学院理学研究科修了、博士（理学）、国立環境研究所NIESポスドクフェロー、海洋研究開発機構研究員、国立大学法人千葉大学環境リモートセンシング研究センター特任准教授、現在、国立大学法人千葉大学環境リモートセンシング研究センター准教授

研究分担者

1) 齋藤 尚子

奈良女子大学大学院人間文化研究科修了、博士（理学）、国立環境研究所NIESポスドクフェロー、東京大学気候システム研究センター特任助教、千葉大学環境リモートセンシング研究センター助教、現在、千葉大学環境リモートセンシング研究センター准教授

2) 橋本 真喜子

東京大学大学院理学研究科博士後期課程修了、博士（理学）、東京大学大気海洋研究所特任研究員、宇宙航空研究開発機構宇宙航空プロジェクト研究員、現在、宇宙航空研究開発機構研究開発員

3) 森野 勇

総合研究大学院大学数物科学研究科修了、博士（理学）、工業技術院産業技術融合領域研究所ポスドクフェロー、理化学研究所基礎科学特別研究員、産業技術研究所環境管理研究部門NEDOフェロー、国立環境研究所主任研究員、現在、国立環境研究所地球システム領域主幹研究員

4) 高見 昭憲

英国オックスフォード大学博士課程修了、博士（D.Phil）、国立環境研究所主任研究員、室長、センター長を経て、現在、国立環境研究所地域環境保全領域領域長

5) 藤谷 雄二

北海道大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、国立環境研究所NIESポスドクフェロー、国立環境研究所任期付き研究員、国立環境研究所主任研究員、現在、国立環境研究所主幹研究員

II. 成果の詳細

II-1 地上観測によるGOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発

国立大学法人千葉大学

入江 仁士

齋藤 尚子

<研究協力者>

国立大学法人千葉大学

Hossain Mohammed Syedul Hoque(令和元年度)

Alessandro Damiani(令和2~3年度)

【要旨】

本サブテーマでは、GOSAT-2の衛星観測データからの微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 及び黒色炭素 (BC; ブラックカーボン) 量の推計結果を評価する新たな方法を開発するために、BCの光吸収を利用した自動連続装置であるBC計を千葉に設置し、既設の小型PM_{2.5}計等の各種観測機器との通年連続観測を初年度に開始した。これは、我々独自の国際観測網 (SKYNET) を基盤に、GOSAT-2のエアロゾル観測の重要なターゲット域である都市域 (千葉) に充実した地上観測機器群 (スカイラジオメーターや多軸差分吸収分光法 (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy; MAX-DOAS) を含む) および最先端のアルゴリズムを有していることで可能となった。最終年度までの通年連続観測期間中のBC/PM_{2.5}重量濃度比はおおむね0.1以下であり、全期間の平均値は0.03±0.02であった。この通年連続観測に加え、本研究期間中では、集中観測を毎年度1回、合計3回実施し、千葉大学の地上観測機器群に加え、サブテーマ3の協力の下で標準法 (FRM) やフーリエ変換赤外分光計 (EM27/SUN) との同時観測を確実に実施した。FRMとの同時観測から、低湿度環境下 (相対湿度RH<60%) においてPM_{2.5}計とFRMのPM_{2.5}重量濃度データは良く一致することが分かった。環境基準で採用されているPM_{2.5}重量濃度は相対湿度の条件で定義されているため、GOSAT-2データの検証を行う上で、RHの情報が必須である。MAX-DOAS観測からこの重要なRHの情報をエアロゾル消散係数の高度分布と同時に精度良く得られることが分かった。また、スカイラジオメーターについて、自動オンサイトキャリブレーション法を含むアルゴリズムパッケージ (SR-CEReS) を基盤に、エアロゾルの各種光学パラメーターや粒径分布の情報を得る手法を開発・改良し、AERONETサンフォトメーターデータなどとの整合性が高いことを確認した。そのうえで、様々なエアロゾル光学特性データをPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のデータと比較してそれらの相関関係を調べたところ、PM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとなる光学パラメーター (それぞれ、fAOD (0-1km) とfAAOD (0-1km)) をスカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測から導出できることを見出した。ここでfAOD (0-1km) は高度0-1kmの微小粒子エアロゾル光学的厚さ、fAAOD (0-1km) は高度0-1kmの微小粒子光吸収エアロゾル光学的厚さである。2015-2021年の千葉においてfAAOD (0-1km) の減少トレンドが見い出され、地表付近のBC重量濃度の減少が示唆された。スカイラジオメーターとMAX-DOASはいずれも単体では既に国際観測網化されている中、上記の結果はそれらの観測技術が国際観測網展開に活用できる精度・確度を有することを裏付ける。これらの結果をもとに、地上観測データを用いてGOSAT-2データとの比較解析を行った。GOSAT-2のAODや微小粒子AOD (fAOD) データは地上観測データと良い相関を示したが、他の光学特性パラメーター (AE, SSA, AAOD)、PM_{2.5}やBC重量濃度データとの相関は比較的不明瞭だった。境界層高度 (PBLH) やRHが比較結果に及ぼす影響を調べたところ、GOSAT-2のエアロゾルアルゴリズムにおいて、PBLH (あるいはAOD (0-1km)/AOD比) とRHが誤差要因として重要なパラメーターであることが分かった。このように、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測は、GOSAT-2の最終プロダクトであるPM_{2.5}やBCデータの誤差を見積もるだけでなく、アルゴリズムの重要なパラメーター (PBLHやRH) や中間プロダクト (AOD, fAOD, fAAOD、および、それらの大気境界層中の部分カラム量) も評価することで、より精密なアルゴリズムの評価、ひいては、それに基づく迅速なアルゴリズムの改良が期待される。この開発された評価方法は、GOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている評価方法とは異なる (サブテーマ3のリストより)。したがって、双方の方法を活用して総合的に評価することで、GOSAT-2によるPM_{2.5}

及びBC量の推計の信頼性向上が期待される。

1. 研究開発目的

平成30年10月に打上げられた温室効果ガス観測技術衛星2号「いぶき2号」(GOSAT-2)は、雲・エアロゾルセンサ2型(TANSO-CAI-2)を搭載し、大気中の微小粒子状物質(PM_{2.5})及び黒色炭素(BC)量の推計を目指す。しかし、その推計結果を評価するにあたり、衛星観測データから推計する手法と既存の地上計測手法とは、捉えている物理現象が異なるため、直接比較することが困難である。このため、衛星観測データからの推計結果を比較可能な新たな評価手法が必要となっている。PM_{2.5}は健康への悪影響を及ぼす極めて重要な環境因子である。人口が集中し、健康影響がさらに懸念される都市域では、化石燃料の燃焼などに起因する一次/二次粒子は主に微小粒子側に存在する。その主成分のひとつがBCである。BCはまた、二酸化炭素とメタンに次いで3番目に大きな正の放射強制力を持つ。本研究はこれらの重要性を持つPM_{2.5}とBCを対象とし、そのモニタリング・動態理解は、大気汚染監視、ひいては、気候変動に関する政策への貢献が大いに見込まれるので、科学的・技術的意義が極めて高い。

このような背景のもと、本研究は、GOSAT-2の衛星観測データからのPM_{2.5}及びBC量の推計結果を評価する新たな方法を開発することを目的とする。開発した評価方法は国際観測網に展開させる方法の提案を目指すという本プロジェクトの最終目標につながる。本研究によって提案された評価手法とGOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている手法を用いて総合的に評価することで、GOSAT-2によるPM_{2.5}及びBC量の推計の信頼性向上が期待される。また、GOSAT-2データのみならず、GOSATシリーズのデータの利活用が促進されると共に、これらの物質のより精緻な分布状況や発生地域の把握に貢献することが可能となり、全球規模での排出抑制効果が期待される。

2. 研究目標

SKYNET千葉サイトで通年連続観測及び集中観測を行い、この観測データとGOSAT-2データ等との比較解析に基づいて、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの評価方法(最適な地上観測方法や必要なアルゴリズム等)を、国際観測網への展開に活用できる精度・確度を目標として開発する。開発には、サブテーマ2による誤差解析結果やサブテーマ3が作成したGOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている評価方法のリストを考慮する。

3. 研究開発内容

千葉大学は、独自の国際観測網(SKYNET)を基盤に、GOSAT-2のエアロゾル観測の重要なターゲット域である都市域(千葉)に充実した地上観測機器群および最先端のアルゴリズムを有している。本プロジェクトでは、その設備や蓄積された知見を基盤に、ブラックカーボン(BC)の光吸収を利用した自動連続装置であるBC計(日本カノマックス社製ブラックカーボンモニターBCM3130; COSMOSとして東京大学にて開発された装置¹⁾; 精度~10%)を千葉に設置し、既設の小型PM_{2.5}計²⁾(精度<10 µg/m³)等の各種観測機器との通年連続観測を初年度である2019年11月に開始した。PM_{2.5}計は名古屋大学太陽地球環境研究所とパナソニック株式会社の共同研究により開発された、光散乱法に基づく手のひらに載るほどのコンパクトでローコストなPM_{2.5}計測装置であり、国際観測網化への敷居はかなり低いと考えられる。BC計新設にあたり、千葉で既に利用中のその場観測用インレット等の設備やサブテーマ3のサポートを活用し、速やかにかつ確実にBC計による連続観測を開始した。

本研究期間中では、通年連続観測に加え、集中観測を毎年度1回、合計3回実施し、千葉大学の地上観測機器群に加え、サブテーマ3の協力の下で標準法(FRM)やフーリエ変換赤外分光計(EM27/SUN)との同時観測を確実に実施した。令和元年度は11月18日~12月2日に、令和2年度は11月30日~12月13日に、令和3年度は7月26日~8月8日にそれぞれ千葉キャンペーン2019, 2020, 2021として集中観測を実施した。令和元年度と2年度は秋季に実施したが、それに対して令和3年度は夏季に実施し、異なる季節とすることで大気中の湿度条件の影響を考察できるよう計画した。例として、令和3年度の集中観測において稼働した測器と観測項目のリストを表1.1に示す。また、主要測器であるスカイラジオメーター、多

軸差分吸収分光法 (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy; MAX-DOAS)、PM_{2.5}計、BC計の外観を図1.1に示す。

表1.1 千葉キャンペーン2021集中観測において稼働させた測器と観測項目のリスト。千葉キャンペーン2019集中観測、千葉キャンペーン2020集中観測もほぼ同じ測器での観測を実施した。

測器	パラメーター
スカイラジオメーター (POM-02)	AOD, SSA, AE, k 粒径分布, PWV, COD, Re
AERONET/CIMEL サンフォトメーター	AOD, SSA, AE, k 粒径分布, PWV
(PENTA-)MAX-DOAS	AEC, NO ₂ , H ₂ O (RH) HCHO, CHOCHO, SO ₂ , O ₃
マイクロ波放射計	PWV, LWC
PM _{2.5} 計	PM _{2.5}
BC計 (BCM3130, COSMOS)	BC
NIES FRM × 2	PM _{2.5} , EC
Skyview	全天カメラ画像、雲被覆率
全天日射計	全天日射量
MS-700	分光放射スペクトル
PAR-01D	光合成有効放射
MaxiMet GMX 600	風向・風速、気温、気圧 相対湿度、降水量
NIES FTS (EM27/SUN)	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO, XH ₂ O
NIES LIDAR	AEC
タイムラプスカメラ × 5	RGB ビデオ

スカイラジオメーターの解析には、千葉大学が開発した、自動オンサイトキャリブレーション法を含むアルゴリズムパッケージ (SR-CEReS)^{3,4)}を用いて、測定された天空高輝度分布からエアロゾル光学的厚さ (AOD、あるいは、AOT)、オングストローム指数 (AE)、一次散乱アルベド (SSA) 等の光学パラメーターや粒径分布を導出した。本研究では、各光学パラメーターと AERONET/CIMEL との比較を行い、精度評価を行った。また、スカイラジオメーターの 15 年間の長期観測から得られたデータを用いて、光吸収のエアロゾル光学的厚さ (AAOD = AOD × (1-SSA)) を光吸収性エアロゾル種ごとに分ける新しい方法を開発し、それによって得られた結果から千葉における全 AAOD に及ぼすブラウンカーボンエアロゾル (BrC) の寄与率を定量的に評価した。加えて、任意の粒径範囲に寄与する AOD の割合 (f) を計算する方法を新たに開発した。例えば、粒径 2.5 μm 以下の AOD の割合 (f_{2.5}) は、導出された粒径分布のうち粒径 2.5 μm についてミー散乱計算を行うことで見積もった。さらに、エアロゾルの光吸収の波長依存性を表す光吸収オングストローム指数 (AAE) を算出する方法も開発した。そのうえで、通年データを用いて、微小粒子エアロゾル光学的厚さ (fAOD) や AAE の妥当性を評価した。

MAX-DOAS 観測については、本プロジェクトにおいて千葉では 4 台の MAX-DOAS 装置を設置し、それぞれの視線を異なる方位に向け (4-different-azimuth-viewing MAX-DOAS; 4AZ-MAXDOAS)、三次元観測を行った (図1.2)。千葉キャンペーン2021集中観測期間中では北東に視線を向けた装置も加え、5 台の装置に

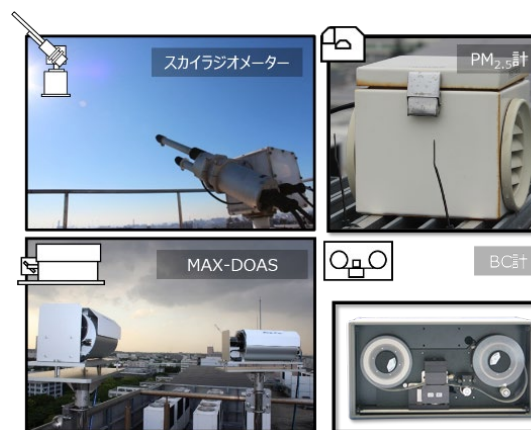


図1.1 スカイラジオメーター、MAX-DOAS、PM_{2.5}計、BC計の外観。

よる同時観測を行った(図1.2)。各観測について、独自のアルゴリズムであるJM2(Japanese MAX-DOAS profile retrieval algorithm, version 2)⁵⁻⁷⁾を用いて、複数の仰角で測定された天空光スペクトルをDOAS法、放射伝達モデル、インバージョン法を組み合わせで解析し、下部対流圏のエアロゾル(357と476 nmの2波長)や微量ガス(二酸化窒素、水蒸気など)の高度分布情報を同時に導出した。図1.2にJM2でリトリートされた下部対流圏のエアロゾル消散係数(AEC)の高度分布の例を示す。AECを高度方向に積分した値がAODになる。高度分布は、AOD、 $F_1(=F(0-1\text{km}))$ 、 F_2 、 F_3 の4つのパラメーターで表現される。Optimal Estimation法により4つのパラメーターの最適解がリトリートされる⁵⁾。本研究では、4方位のデータを平均してその標準偏差を空間均一性の指標として解析し、地上センサやGOSAT-2のデータと比較した。このように、MAX-DOAS観測を用いてエアロゾルの高度分布・水平分布も考慮した。さらには、MAX-DOASの水蒸気濃度の高度分布データのうち、0-1 km層のデータを用いて相対湿度(RH)を見積もった。このMAX-DOAS観測から算出したRHデータは地上の湿度計で測定されたRHデータと比較し、そのあいだの整合性を確認した。このRHデータは、RHが100%になると雲が生成するという雲物理過程に基づく雲スクリーニング手法に利用するとともに、GOSAT-2アルゴリズムにおけるRHの誤差要因としての重要性の議論にも利用した。

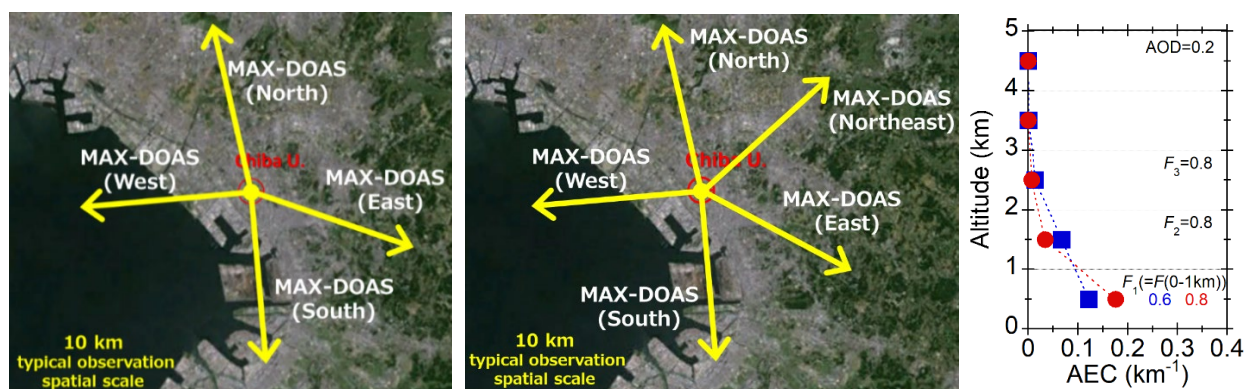


図1.2 (左) 本研究において千葉で常時稼働させた4台のMAX-DOAS装置(4AZ-MAXDOAS)の視線方位を示す。(中央) 千葉キャンペーン2021集中観測期間中はさらに北東に視線を向けた装置も加え、5台の装置による同時観測を行った。(右) MAX-DOASのエアロゾル消散係数(Aerosol Extinction Coefficient; AEC)の高度分布データの例。AECを高度方向に積分した値がAODになる。 $F(0-1\text{km})$ は0-1 km高度層のAODの割合。0-1 km高度層のAODをAOD(0-1km)と表記した場合、 $F(0-1\text{km})$ はAOD(0-1km)/AODに相当する。 $F(0-1\text{km})=0.6$ と 0.8 の高度分布がそれぞれ青と赤で示されている。 $F(0-1\text{km})$ 、あるいは、AOD(0-1km)/AODが大きいほど、より多くのエアロゾルが地表付近にあることを意味する。

このように、スカイラジオメーターとMAX-DOASのアルゴリズム開発・改良、さらには品質管理(QC)・品質保証(QA)も実施したうえで、様々なエアロゾル光学特性データをPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のデータと比較してそれらの相関関係を調べ、GOSAT-2のPM_{2.5}やBC導出アルゴリズムの評価・改良への活用を念頭に詳細な検討を実施した。特に、地表のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとなる光学パラメーターを見出すことを試みた。この検討は、充実した地上観測機器群を有す本研究の利点を生かし、千葉でまず実施した。研究を進めていく中でSSAデータは短波長ほど信頼性が高いことが判明した(Damiani et al, 2021)⁸⁾ため、スカイラジオメーター・MAX-DOASともに紫外域のデータに特に着目して解析を行った。そのうえで、千葉の観測データから得られた結果をもとに、他の厳選されたSKYNETスーパーサイト(福江サイトなど)に解析を拡張した。さらには、そういったプロキシパラメーターのトレンド解析を実施し、BCの長期トレンドといった応用研究への活用も試みた。

サブテーマ2と共同で、GOSAT-2エアロゾルプロダクトの評価を実施した。このプロダクトのリトリートにはMulti Wavelength and multi Pixel Method (MWPM)⁹⁾が用いられた。評価のために、2019年2月から2021年9月までの期間にスカイラジオメーターとMAX-DOASの観測が同時に実施された4地点(千葉、福江、春日、つくば)で衛星観測と地上観測の比較を実施した。各観測サイトを中心とした5 km×5 km

の領域で平均されたGOSAT-2データを比較に用いた。福江については、千葉と同型のBC計(COSMOS)が海洋研究開発機構によって、PM_{2.5}計が長崎大学によって運用され、そのデータを各機関から提供していただき、本研究に使用した。また、環境省の地上観測網である「そらまめくん(AEROS)」の観測サイトのPM_{2.5}データも使用し、結果の類似性を確認した。衛星データとの比較には、GOSAT-2衛星のオーバースパス時刻の±1時間前後に収集した地上データの平均値を使用した。また、地上データを9~15時(地方時)で平均した値を日平均値とした比較検証も実施した。結果は概ねオーバースパス時刻±1時間の結果と同様であり、衛星観測からリトリバルされたデータが日平均値とみなせることが分かった。そのうえで、GOSAT-2のアルゴリズムにおけるエアロゾルプロダクトへの相対湿度や大気境界層高度の影響を調べ、サブテーマ2との議論を通じて、アルゴリズムの問題点を指摘するとともに改善点の提案を試みた。このように本研究独自の方法で得られたデータを解析して、GOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発を進めた。

本研究で見出した地表付近のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとして有効な光学パラメータの解析を、本プロジェクト提案の国際観測網(A-SKY)のサイトである千葉サイト、ソウルサイト(韓国)、ハルドワニサイト(インド)について2022年1~3月の期間に着目して実施した。千葉については、地表に設置したPM_{2.5}計やBC計で測定したそれぞれの重量濃度との比較から本研究で見出したプロキシパラメータの妥当性の最終確認を行った。そのうえで、PM_{2.5}計やBC計が配備されていない海外サイトでのA-SKY国際観測網におけるPM_{2.5}やBC重量濃度の推計を試みた。

目標を上回る特別研究として特筆すべきは、2021年12月6日にSKYNET/A-SKY国際観測網の千葉サイトに、トレースガスアナライザーLI-7810(LI-COR Biosciences)を設置し、長寿命温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)とメタン(CH₄)の大気中濃度の連続測定を開始したことである。LI-7810の測定原理は光学フィードバック強化型キャビティ吸収分光法(OF-CEAS; Optical Feedback - Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy)に基づく。スカイラジオメーターやMAX-DOASによる大気環境にとって重要なエアロゾルや各種大気微量ガスの高精度な観測機器との同時観測が開始されたことで、一層、世界的にも類を見ないユニークな我が国の観測サイトになった。BC重量濃度などやMAX-DOASによって測定される二酸化窒素(NO₂)濃度との相関を2023年度打ち上げ予定のGOSAT-GW衛星(温室効果ガス・水循環観測技術衛星)のミッションを念頭に考察した。

4. 結果及び考察

図1.3に本研究にて千葉にBC計を新設した2019年11月からプロジェクト終了の2022年3月までのBC重量濃度、PM_{2.5}重量濃度、および、BC/PM_{2.5}質量濃度データの日平均値の時系列プロットを示す。2020年8~9月にBC計のヒーター部の故障により予期せぬデータ欠損が生じたが、他の期間は連続測定を行うことができた。この経験により、装置は可能であれば2台体制が望ましいことを学んだ。そこで、比較的ローコストなPM_{2.5}計については2号機を設置し同時連続観測を実施した。図1.3から、著しいデータ欠損が生じることなく長期にわたってデータが取得できたことが分かる。観測期間中のBC/PM_{2.5}重量濃度比はおおむね0.1以下であり、全期間の平均値は0.03±0.02であっ

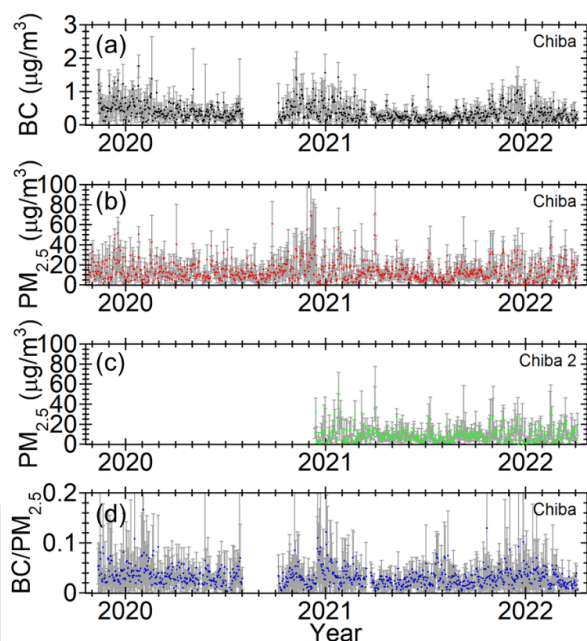


図1.3 本研究にて千葉にBC計を新設した2019年11月からプロジェクト終了の2022年3月までの(a) BC重量濃度と(b) PM_{2.5}重量濃度の日平均値の時系列プロット。(c) 確実な連続データが取得できるよう設置したPM_{2.5}計2号機のPM_{2.5}重量濃度データ。(d) BC/PM_{2.5}質量濃度比データ。日平均値の標準偏差が灰色のエラーバーで示されている。

た。これは先行研究と整合的であった。これらの結果から、採用したPM_{2.5}計とBC計により地表付近のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度を高精度で測定でき、これらのデータと比較することでGOSAT-2の微小粒子状物質及び黒色炭素量推定データの誤差を評価可能なことが分かった。

図1.4は、千葉キャンペーン2019集中観測と千葉キャンペーン2020集中観測におけるPM_{2.5}質量濃度の時系列プロットを示す。PM_{2.5}計のデータとサブテーマ3の協力で実施した標準法（FRM）によるサンプリングデータが示されている。また、観測サイトに設置された湿度計で測定した地上付近の相対湿度（RH）のデータも示されている。図1.4が示すように、両集中観測は秋季に行われたため湿度は20～30%まで低下した日もあった。高湿度条件下では、PM_{2.5}計のデータがFRMの値よりも大きくなる傾向があることが分かる。FRMはRH=35%でフィルタを秤量しているため、この傾向は合理的である。この影響を最小に抑えて定量的な比較を行うために、RHが60%以下の条件で得られたPM_{2.5}計のデータを抽出し、さらに、そのデータ数がFRMの各サンプリング期間中の50%以上であったケースに着目し、統計値を整理した。これらの条件を満たす各ケースの統計値を表1.2と表1.3に示す。各ケースのFRMサンプリング期間中のPM_{2.5}計の平均値と標準偏差は図1.5のオレンジで示されたデータに対応する。これらの図や表が示すように、PM_{2.5}計とFRMの値はよく一致することが分かった。サンプリング期間中のPM_{2.5}計のデータの標準偏差を考慮したり、PM_{2.5}計のデータをスマートカルクでFRM等価濃度に換算してもこの結果は本質的に変わらなかった。なお、夏季に行われた千葉キャンペーン2021集中観測ではRHが60%を下回ることが稀だった（図1.5）ため、同様の低湿度環境下での比較は困難であった。

図1.5には、千葉キャンペーン2021集中観測期間におけるMAX-DOAS観測から算出された高度0-1 kmのRHの時系列プロットを示す。この集中観測では同時稼働のMAX-DOAS装置を5台に増やし、千葉サイトから5方位（N:北、W:西、E:東、S:南、NE:北東）の観測を行った。観測1回の誤差は18%程度と見積もられており⁶⁾、それよりも大きい方位間の差は水蒸気濃度の不均一性によるものと考えられる。このことを考慮すると、MAX-DOAS観測から見積もられたRHは温湿度計のデータと良く相関していることが分かる。このように、MAX-DOASの水蒸気観測から、大気境界層中のRHを見積もれることが分かった。環境基準で採用されているPM_{2.5}重量濃度は相対湿度の条件で定義されているため、GOSAT-2データの検証を行う上で、同時に相対湿度のデータが必須である。この重要な情報をMAX-DOASが提供できることが分かった。

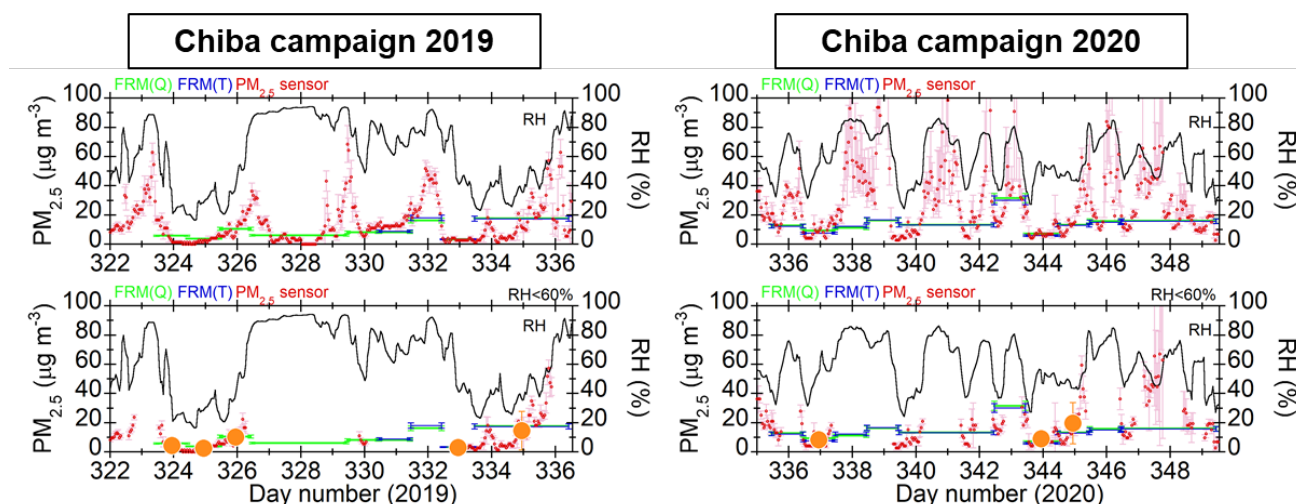


図1.4 (左) 千葉キャンペーン2019集中観測（11月18日～12月2日）と（右）千葉キャンペーン2020集中観測（11月30日～12月13日）におけるPM_{2.5}質量濃度の時系列プロット。PM_{2.5}計のデータが赤で示されている。また、サブテーマ3の協力で標準法（FRM）を用いて石英フィルターとテフロンフィルターにより得られたデータがそれぞれ緑と青で示されている。PM_{2.5}計のデータは1時間毎の中央値で、エラーバーは67%レンジを示す。FRMのデータは、1つのフィルターで各サンプリング期間中に一定の値がプロットされている。また、黒色は観測地点の湿度計で測定した相対湿度（RH）データを示す。下段には、上段の図と同様だが、PM_{2.5}計のデータはRHが60%以下の場合のみ示されている。FRMサンプリング期間中のPM_{2.5}計の平均値と標準偏差は、サンプリング期間中に50%以上のデータが得られた場合のみ、オレンジで表示

されている。なお、夏季に行われた千葉キャンペーン2021集中観測ではRHが60%を下回ることが稀だった(図1.5) ため、同様の低湿度環境下での比較は困難であった。

表1.2 千葉キャンペーン2019集中観測でPM_{2.5}計とFRM(石英(Q), テフロン(T)フィルターを使用)でサンプリングされたPM_{2.5}質量濃度(μg/m³)。低湿度環境下(RH<60%)でPM_{2.5}計がFRMのサンプリング時間の50%をカバーした時間帯の統計値。ePM_{2.5}はPM_{2.5}計のデータをスマートカルクで換算したFRM等価濃度。

Time (mid-time in day number)	FRM (Q)	FRM (T)	PM _{2.5} sensor (data availability)	RH (%)	*ePM _{2.5}
Nov. 19 11:00 - Nov. 20 10:00 (323.94)	5.8	-	4.3±5.5 (79%)	40±20	3.9
Nov. 20 11:05 - Nov. 21 10:00 (324.94)	3.8	-	2.5±1.8 (100%)	28±7	2.4
Nov. 21 11:05 - Nov. 22 10:00 (325.94)	10.5	-	10.3±5.1 (83%)	44±20	9.0
Nov. 28 11:00 - Nov. 29 10:00 (332.94)	3.3	3.5	3.0±0.5 (58%)	54±16	2.4
Nov. 29 11:00 - Dec. 2 10:00 (334.94)	17.6	17.5	14.7±13.2 (82%)	47±19	12.6

*ePM_{2.5} is an FRM-equivalent PM_{2.5} value from a PM_{2.5} sensor.

表1.3 表1.2と同様だが、千葉キャンペーン2020集中観測におけるPM_{2.5}質量濃度の統計値。

Time (mid-time in day number)	FRM (Q)	FRM (T)	PM _{2.5} sensor (data availability)	RH (%)	*ePM _{2.5}
Dec. 1 11:00 - Dec. 2 10:30 (336.94)	9.2	7.7	8.3±4.2 (79%)	51±10	6.8
Dec. 8 11:00 - Dec. 9 10:30 (343.94)	7.1	6.0	9.0±5.0 (100%)	47±9	7.7
Dec. 9 11:00 - Dec. 10 10:30 (344.94)	13.2	13.1	**19.8±14.1 (92%)	50±10	**16.5

*ePM_{2.5} is an FRM-equivalent PM_{2.5} value from a PM_{2.5} sensor.

**The median values are 14.0 and 11.7 μg m⁻³, respectively.

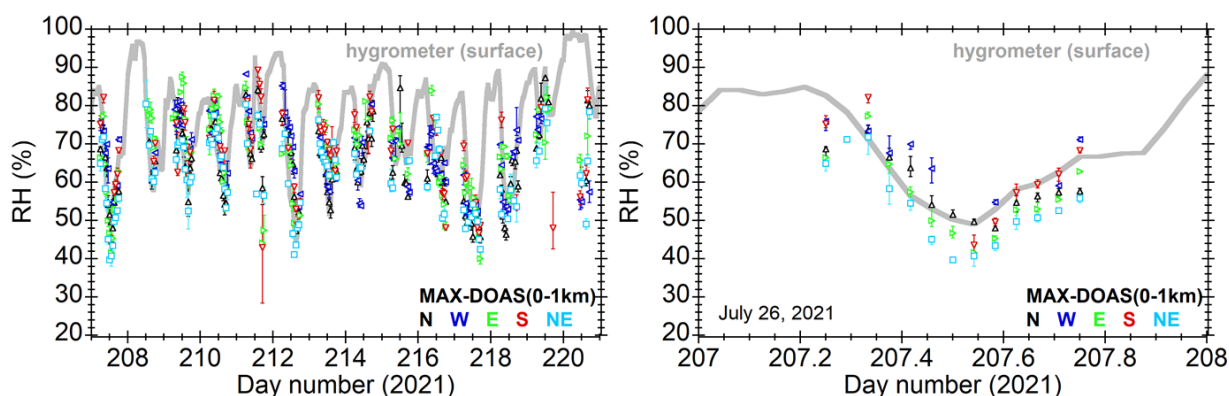


図1.5 (左) 2021年7月26日～8月8日に実施した千葉キャンペーン2021集中観測期間におけるMAX-DOASによる観測から導出された高度0-1 kmの相対湿度(RH)の時系列プロット。この集中観測では同時稼働のMAX-DOAS装置を5台に増やし、それぞれ異なる方位に向け三次元観測を行った。各方位(N:北、W:西、E:東、S:南、NE:北東)のデータがそれぞれ黒、青、緑、赤、水色で示されている。地上の湿度計で測定したRHは灰色で示されている。(右)2021年7月26日を拡大した時系列プロット。

SKYNET各サイトでの連続観測を継続しつつ、これまでのSKYNETデータの再解析を実施し、AODやAAEの季節変動・年々変動が妥当であることが分かった。スカイラジオメーターのAODデータは衛星データの検証のために十分な精度・確度を有している^{10,11)}。しかしながら、AEやSSAについては必ずしも自明ではない。そこで、SR-CEReS^{3,4)}によってリトリバルされたエアロゾルパラメーターのデータ質の検証を行うために、AERONETサンフォトメーターと同時に観測を行ったSKYNETスカイラジオメーターのデータを解析した。両観測から得られたAOD、AE、SSAのいずれの光学パラメーターについても、SKYNETとAERONETの値は良く一致した^{3,10,11)}。また、スカイラジオメーターの15年間の長期観測から得られたデータを用いて、光吸収のエアロゾル光学的厚さ(AAOD = AOD × (1-SSA))を光吸収性エアロゾル種ごとに分ける新しい方法を開発し、それによって得られた結果から千葉における全AAODに及ぼすブラウンカーボンエアロゾル(BrC)の寄与率を定量的に評価した(図1.6)。

その結果、従来よりもBCの地域特有の光学特性を考慮したBCとBrCのAAODが得られるようになった。また、本研究で得られたBCとBrCの全AAODへの寄与率(それぞれ、約90%と約10%)は同じ千葉の観測点で異なる観測機器(AERONETサンフォトメーター)で求められた先行研究¹²⁾の結果(約92%と約8%)と整合し、本研究で得られた寄与率が妥当であることが確認できた。さらに、この解析で着目した紫外可視7波長を積分したBrCのAAODの寄与率は全体のAAODの12%を占めており、BrCがエアロゾル全体の光吸収に無視できない量の影響を与えていることが分かった。これらの結果は、SR-CEReSによってリトリバルされたSKYNETスカイラジオメーターデータとAERONETサンフォトメーターデータとの整合性が極めて高いことを示す。さらには、SSAの理論的な誤差を見積もったところ、スカイラジオメーターのSSAの精度はAODが高いほど良いことが分かった⁸⁾。エアロゾルレベルが比較的低いと期待されるサイトでは特に、AODが高くなる紫外域のSSAデータを使うことが望ましい。このことは、エアロゾルレベルが低いサイトでのより高精度なSSAデータの検証を可能とする。

上記の集中観測や通年連続観測データの解析、さらにはQA/QCの研究結果などを踏まえ、解析期間を2021年まで拡張して、GOSAT-2エアロゾルプロダクトの評価(検証)方法を検討した。具体的には、PM_{2.5}計で測定したPM_{2.5}重量濃度と各種エアロゾル光学パラメーターとの詳細な比較解析を行った。すると、スカイラジオメーターとMAX-DOASから見積もられたfAOD(0-1km) (= $f_{2.5} \times \text{AOD}(0-1\text{km})$)が地上付近のPM_{2.5}重量濃度と良く相関することが分かった(図1.7)。このことは、GOSAT-2エアロゾルプロダクトの検証研究において、高度分布の情報が重要であることを裏付ける。PM_{2.5}に加えて、同様の解析をBCについても行った。様々な解析を行ったところ、スカイラジオメーターとMAX-DOASから見積もられたfAAOD(0-1km) (= $f_{2.5} \times \text{AOD}_{357}(0-1\text{km}) \times (1 - \text{SSA})$)が、地上付近のBC重量濃度と良く相関することが分かった(図1.7)。中間評価の時点では、千葉だけで、しかも限られた期間のデータだけの予備的解析結果であったが、本プロジェクトの後半の研究の進展に伴い、千葉とは別のSKYNETサイトである福江の観測データを比較し、さらなる評価を行った。2地点で同等の観測が行われた2019年から2020年までの2年間で解析を行った。すると、福江においてもfAODとPM_{2.5}重量濃度、fAAODとBC重量濃度に直線的な正の

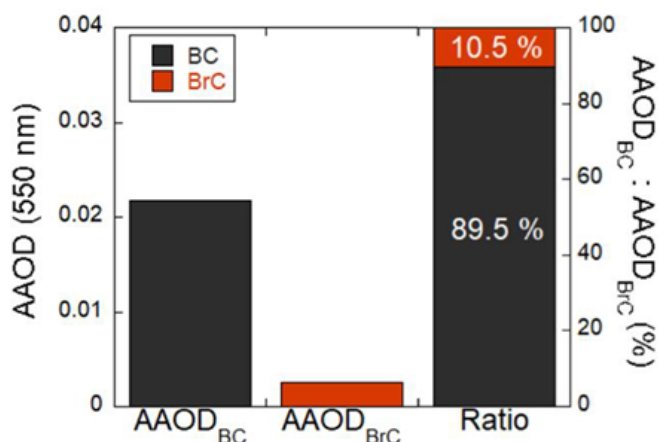


図1.6 千葉でのスカイラジオメーターによる15年間の長期観測から得られたデータを再解析して見積もられたBCとブラウンカーボンエアロゾル(BrC)の光吸収のエアロゾル光学的厚さ(AAOD)、および、それらの全AAODへの寄与率。AERONETサンフォトメーターで求められた先行研究¹²⁾と整合していた。

関係が確認された（図1.7）。fAODとPM_{2.5}重量濃度の関係について千葉と福江で比較すると、傾き（fAOD/PM_{2.5}）が両サイトで極めて近いことが示された。この結果は2地点間でエアロゾルの化学組成が異なる可能性はあるものの、質量あたりの消散係数に有意な差はないことを示唆している。また、fAAODとBC重量濃度の関係については、福江の傾き（fAAOD/BC）が千葉よりも大きい傾向が見られた。これは福江と千葉では光吸収エアロゾルの特性が異なるためと考えられた。今後の光吸収エアロゾルの動態理解の進展が、このfAAOD-BC相関関係の高精度な理解につながると期待される。図1.7にはさらに、fAAOD357 (0-1km) から、スカイラジオメーターのAAEデータを使って550 nmに波長変換して求めたfAAOD550 (0-1km)とBC重量濃度の相関プロットも示す。相関係数は約0.8と高かった。相関関係の傾きは質量吸収係数に相当（550 nmにおいて～9 m²/g）すると考えられるが、報告されている値^{12,13}とオーダーで一致しており、大変興味深い。

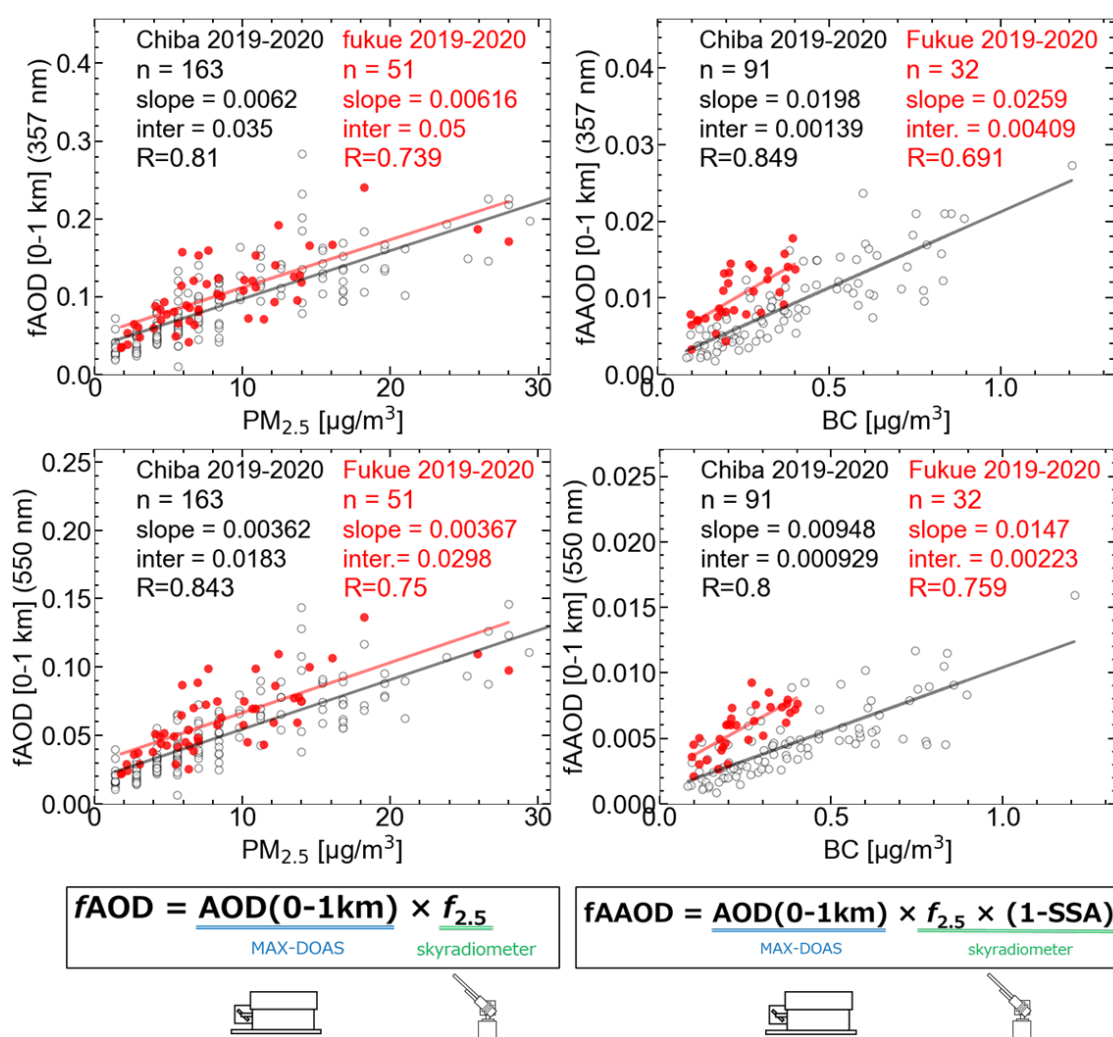


図1.7 本研究で見出した（左）地表付近のPM_{2.5}重量濃度とfAOD(0-1km)の相関関係、および、（右）BC重量濃度とfAAOD(0-1km)の相関関係。上段は357 nmの値が、下段には550 nmの値がプロットされている。fAOD(0-1km)やfAAOD(0-1km)の波長変換はそれぞれ、オングストローム指数とAAEを用いて行われた。fAAOD(0-1km)とBC重量濃度の相関関係の傾きは質量吸収係数に相当（550 nmにおいて～9 m²/g）すると考えられる。

先に示したように、fAAOD(0-1km)はBC重量濃度とあいだに明瞭な正の相関関係が見出された。したがって、fAAOD(0-1km)がBC重量濃度の変動を示すプロキシとして利用可能なことが期待される。図1.8はfAAOD(0-1km)の長期にわたる時系列プロットを示す。この図が示すように、2015年以降、千葉のfAAOD(0-1km)は減少傾向にあることが分かった。本研究で見出された相関関係から、357 nmのfAAOD(0-1km)=0.02

は、およそBC重量濃度 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に相当する。その換算式を適用すると、2015年から2021年にかけて、BC重量濃度は $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ から $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に半減したことになる。福江のfAAOD(0-1km)値は千葉よりも高かった。このことは中国大陸に近い影響でBC重量濃度が高いことと整合的である。2020年から2021年にかけて減少していないことも、同時期に中国上空の対流圏二酸化窒素(NO_2)カラム濃度の増加が衛星観測が示していることと整合している (<http://www.cr.chiba-u.jp/lab/Irie-laboratory/research.html>)。スカイラジオメーターとMAX-DOASはいずれも単体では既に国際観測網化されている中、上記の結果はその国際観測網への展開に活用できる精度・確度を有することを裏付ける。

上記の集中観測・通年連続観測から得られた結果などを踏まえ、地上観測から得られたデータとGOSAT-2観測から得られたデータの比較解析を行った。図1.9は、千葉と福江でのGOSAT-2観測からリトリバルされた各エアロゾルパラメーターと地上観測から求めたデータのあいだの相関係数を示す。GOSAT-2のAODデータは相関係数が概ね0.5よりも高かったことから、地上観測データと良好な相関を示したことが分かる。相関係数は可視域よりも紫外域で高くなる傾向があることも分かった。同様に、fAODの変動もGOSAT-2観測によってよく再現されていることが分かる。他方、AE、SSA、AAODについては、相関は比較的弱かった。BCについては、衛星と地上データの比較可能なケースが少なかったが、 $\text{PM}_{2.5}$ とBCの両プロダクトは地上観測と中程度の相関があった。全体的に福江のほうが千葉よりも相関係数が高かったが、これは地表面アルベドが福江周辺で比較的均一であったためと推察される。絶対値としては、GOSAT-2のAODとfAODの値は過大評価、GOSAT-2のAEは過小評価される傾向が認められた。これは、GOSAT-2のfine mode fraction(FMF)が地上観測のFMFより小さいことと整合し、粗大粒子の割合が過大評価されていることを示唆する。

図1.10は、GOSAT-2データから求めたfAOD(340nm)と地上で測定された $\text{PM}_{2.5}$ 重量濃度データのあいだの相関係数を示す。千葉と福江に加え、BC計による観測が行われていないがスカイラジオメーターとMAX-DOASによる同時観測が行われたつくばと春日も含め、各々のサイトについてGOSAT-2データとの比較を行った。図1.10が示すように相関係数は0.5よりも高かった。ここで、境界層高度(PBLH)が比較結果に及ぼす影響を調べるために、AOD(0-1km)/AOD比が高い日のデータだけを使って同様の解析を行った。すると、4サイト全てにおいて相関係数は約0.8以上となり、相関関係が大きく改善したことが分かった。こ

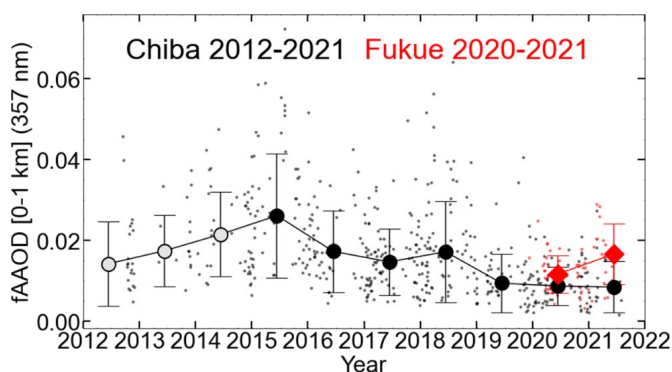


図1.8 本研究で見出した地表付近のBC重量濃度のプロキシパラメーターであるfAAOD(0-1km)の時系列プロット。357 nmの値がプロットされている。千葉と福江のfAAOD(0-1km)の値がそれぞれ黒と赤で示されている。小さいシンボルは日毎の中央値を、大きいシンボルは年毎の中央値を示している。2012~2014年は1年間のデータ数が少なかったため、参考値として白抜きシンボルで区別してプロットされている。

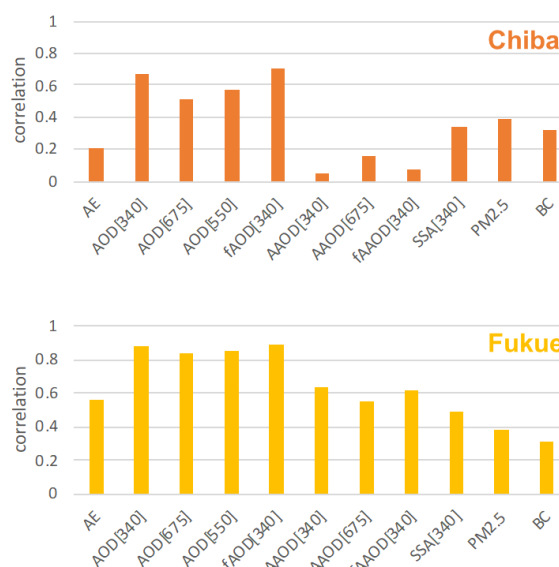


図1.9 (上)千葉と(下)福江における各エアロゾルパラメーターの地上データとGOSAT-2データのあいだの相関係数。

のように、GOSAT-2のエアロゾルデータを検証し、さらにはアルゴリズムを改善するために、PBLH、あるいは、AOD(0-1km)/AOD比が考慮すべき重要なパラメーターであることが明確となった。実際、現在のGOSAT-2のエアロゾルアルゴリズムでは全てのエアロゾルが最下層1 kmに存在すると仮定しており、このことは改善すべき課題である。現時点であっても、スカイラジオメーターとMAX-DOASを複合利用してAOD(0-1km)/AOD比を利用することで、PBLHの上昇によってGOSAT-2のPM_{2.5}値が異常に高くなった日を特定・除去することができるとも分かった(図1.11)。

図1.12は、千葉で測定されたPM_{2.5}重量濃度とGOSAT-2のPM_{2.5}データの散布図を示す。先に分かったPBLHの影響を抑えるために、AOD(0-1km)/AOD比が高い日のデータだけを使って得た相関関係も示す。総じて、GOSAT-2のPM_{2.5}データは過大評価の傾向があることが分かる。この過大評価の原因を探るために、MAX-DOASの水蒸気データから求めたRHによる依存性を調べた(図1.12)。すると、個々のデータの誤差は大きいものの、RH<50%の条件下では、地上で測定されたPM_{2.5}重量濃度とGOSAT-2のPM_{2.5}データは両者とも平均値は約10~20 μg/m³を示した。他方、RHが高くなるとGOSAT-2のPM_{2.5}データが過大となる傾向が見られGOSAT-2のエアロゾルプロダクトの誤差要因としてRHも重要なパラメーターであることが示唆された。

このように、スカイラジオメーター・MAX-DOAS・PM_{2.5}計・BC計を用いて地上から測定した値との比較によって、GOSAT-2の最終プロダクトであるPM_{2.5}やBCデータの誤差を見積もることに留まらず、アルゴリズムの重要なパラメーター(PBLHやRH)や中間プロダクト(AOD、fAOD、fAAOD、および、それらの大気境界層中の部分カラム量)も評価でき、より精密なアルゴリズムの評価、ひいては、それに基づく迅速なアルゴリズムの改良が期待される。そのイメージを図1.13に示す。この開発された評価方法は、GOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている評価方法とは異なる(サブテーマ3のリストより)。したがって、双方の方法を活用して総合的に評価することで、GOSAT-2によるPM_{2.5}及びBC量の推計の信頼性向上が期待される。

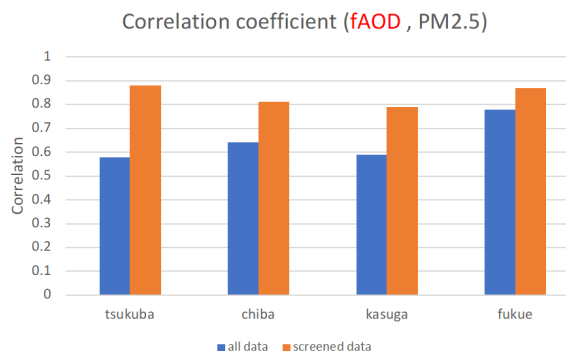


図1.10 GOSAT-2データから求めたfAOD(340nm)と地上で測定されたPM_{2.5}重量濃度データとのあいだの相関係数。つくば、千葉、春日、福江についての値が示されている。全データを使った場合の相関係数が青で、AOD(0-1km)/AOD比が高い日のデータだけを使って得られた相関係数がオレンジで示されている。

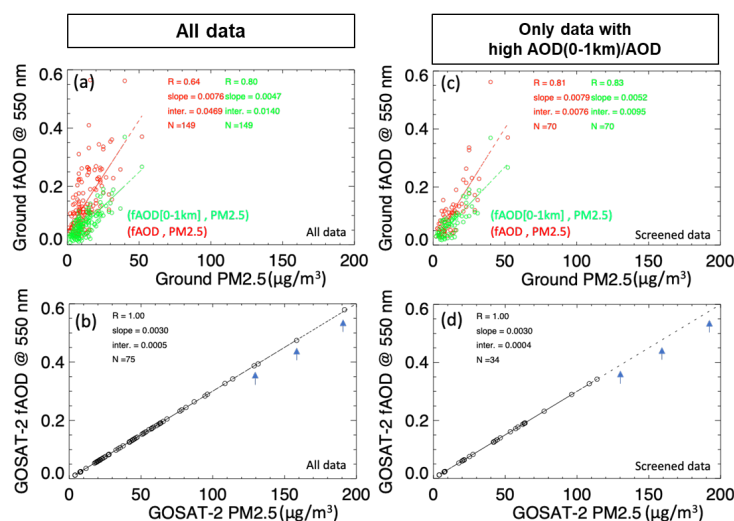


図1.11 (左上) 千葉における地上観測のfAODとPM_{2.5}重量濃度データの相関関係(赤)、および、fAOD(0-1km)とPM_{2.5}重量濃度データの相関関係(緑)。(左下) GOSAT-2のfAODとPM_{2.5}重量濃度データの相関関係。(右上) 左上の図と同様だが、AOD(0-1km)/AOD比が高い日のデータだけを使って得た相関関係。(右下) 左下の図と同様だが、AOD(0-1km)/AOD比が高くなっているデータ(矢印)が特定・除去できていることが分かる。これらのデータが得られた日はPBLHが上昇していた。

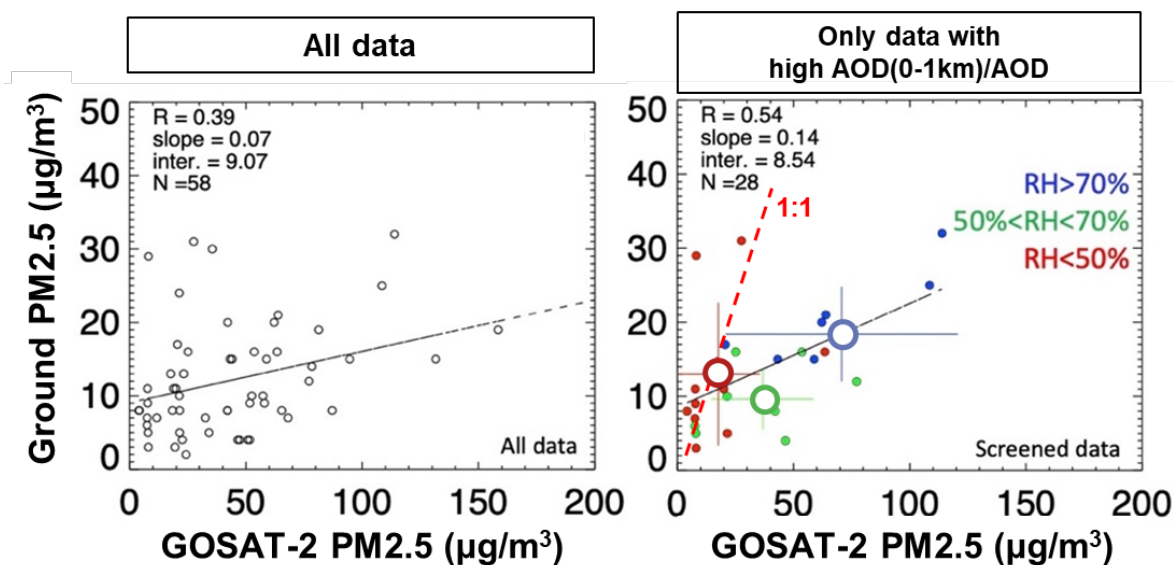


図1.12 (左) 千葉で測定されたPM_{2.5}重量濃度とGOSAT-2のPM_{2.5}データの散布図。(右) AOD(0-1km)/AOD比が平均値よりも高い日のみの散布図。RHによって色分けされている。白丸とエラーバーは各RHグループについての平均と標準偏差を示す。x軸とy軸のスケールが異なることに注意。

本研究で見出した地表付近のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシパラメーターであるfAOD(0-1km)とfAAOD(0-1km)の妥当性を最終確認するために、2022年1~3月について本プロジェクト提案の国際観測網(A-SKY)のサイトである千葉サイト、ソウルサイト(韓国)、ハルドワニサイト(インド)、のデータを時系列で解析した(図1.14)。千葉については、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測から得られたfAOD(0-1km)に加え、地表に設置したPM_{2.5}計で測定した重量濃度データを本研究で見出した相関関係を使って変換したfAOD(0-1km)も示す。この時系列プロットが示すように、両者のfAOD(0-1km)は良く一致したことが確認される。同様にfAAOD(0-1km)の時系列も良い一致が示された。

そのうえで、PM_{2.5}計やBC計が配備されていないがスカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測が開始されている海外サイトでのA-SKY国際観測網での具体的な活用を試みた。ソウルサイトでは、fAOD(0-1km)は最大で0.5程度で千葉と同程度だったことからPM_{2.5}重量濃度も同程度(<55 µg/m³)であること、fAAOD(0-1km)は最大で約0.08まで達していて千葉のBC重量濃度の2倍程度(<2 µg/m³)であることが推測された。ハルドワニサイトのfAOD(0-1km)とfAAOD(0-1km)からはそれぞれ、PM_{2.5}<55 µg/m³、BC<10 µg/m³であったことが推測された。このようにPM_{2.5}計やBC計が配備されていない海外サイトでのA-SKY国際観測網の有効性を示した。PM_{2.5}計やBC計による測定値の確度について依然として議論があるが、その状況が続く、あるいは、PM_{2.5}計やBC計がない場所については、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測が効果的な検証方法となる。この結果に基づき、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測を行うA-SKY

サブテーマ1:開発した評価方法

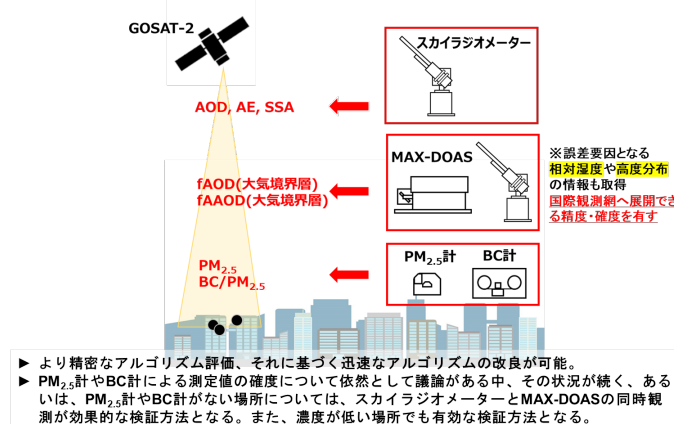


図1.13 本研究で開発したGOSAT-2のPM_{2.5}・BCプロダクトの新しい評価(検証)方法のイメージ。

国際観測網を提案する(サブテーマ3)。今後、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測を行う国際観測網が拡張されることにより、衛星プロダクトのより詳細な評価が可能になることが期待される。

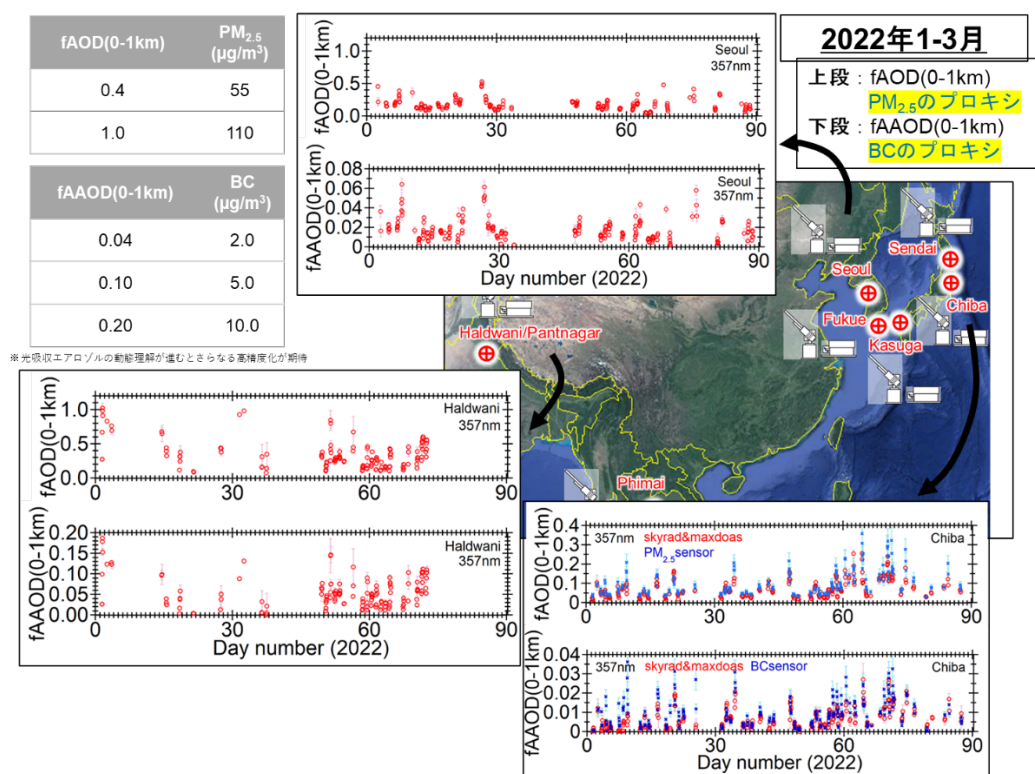


図1.14 本研究で見出した地表付近のPM_{2.5}重量濃度やBC重量濃度のプロキシとして有効な光学パラメーター。それぞれのプロキシであるfAOD(0-1km)とfAAOD(0-1km)の日平均値が赤で示されている。本プロジェクト提案のA-SKY国際観測網(サブテーマ3)の抜粋として千葉サイト、ソウルサイト(韓国)、ハルドワニサイト(インド)について2022年1~3月のデータを示す。千葉の時系列プロットについては、地表に設置したPM_{2.5}計やBC計で測定したそれぞれの重量濃度データから、本研究で見出した相関関係を使って変換されたfAOD(0-1km)とfAAOD(0-1km)を青で示している。本研究で見出した相関関係に基づく重量濃度と光学パラメーターの対応表を左上に掲載した。

目標を上回る特別研究として、2021年12月6日に千葉サイトにトレースガスアナライザーLI-7810(LI-COR Biosciences)を設置し、温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)とメタン(CH₄)の大気中濃度の連続測定を開始した。スカイラジオメーター・MAX-DOAS・BC計・PM_{2.5}計などの既設の観測機器との同時観測が開始されたことで、一層、世界的にも類を見ないユニークな観測サイトになった。12月の時系列プロットを図1.15に示す。前年のデータ(速報値)になるが、気象庁の観測地点である綾里、南鳥島、与那国島のCO₂の月平均濃度はそれぞれ、421.2, 415.2, 419.4 ppmvだった。また、CH₄はそれぞれの観測地点で1989, 1937, 1980 ppbvだった。これらの値に比べて、2021年12月の千葉における濃度は常に高かったことが分かる。また、CO₂濃度とBC重量濃度との相関は非常に高く、また、二酸化窒素(NO₂)濃度との相関もありそうなことが分かった。2023年度打ち上げ予定のGOSAT-GW衛星(温室効果ガス・水循環観測技術衛星)とも関連しそうで大変興味深い。このように、BC・PM_{2.5}・NO₂などと同時にCO₂やCH₄の連続観測も開始し、GOSAT/GOSAT-2/GOSAT-GWの応用研究のための科学的知見を創出できた。

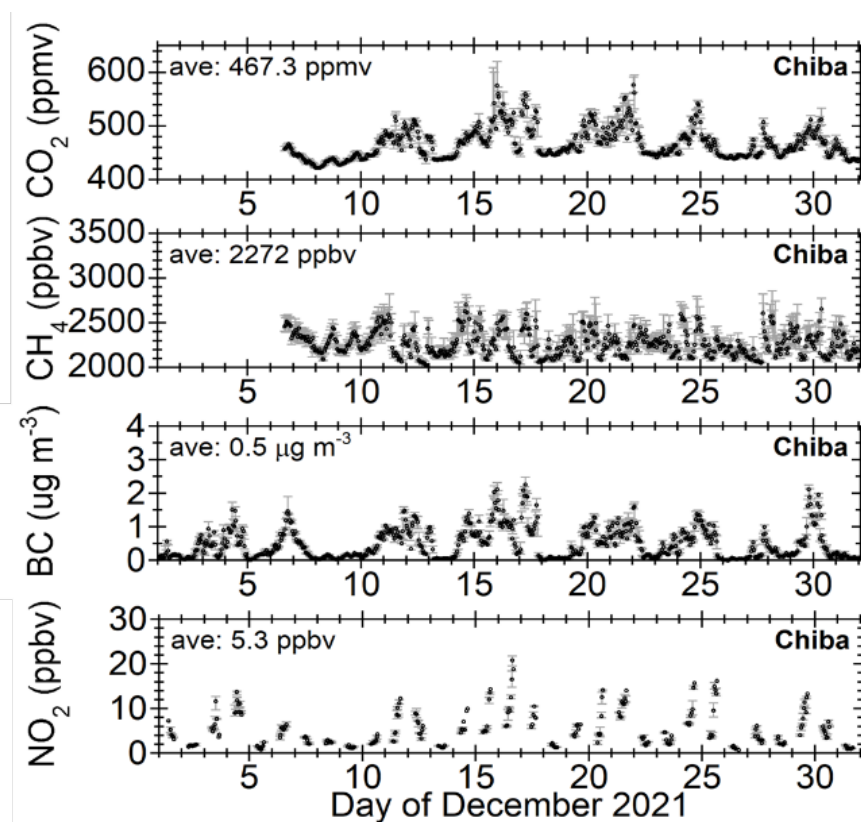


図1.15 2021年12月のSKYNET/A-SKY千葉サイトにおける二酸化炭素(CO₂), メタン(CH₄), BC、二酸化窒素(NO₂)の濃度の1時間毎の中央値の時系列プロット。エラーバーは各時間の67%の変動幅を示す。12月中の平均値が各図の左上に記載されている。CO₂, CH₄, BCについては地表付近の濃度、NO₂については高度0-1 kmの平均濃度。

5. 研究目標の達成状況

計画通り、高確度・高精度観測の実績があるBC計(日本カノマックス社製ブラックカーボンモニターBCM3130; COSMOSとして東京大学にて開発された装置)を千葉に設置し、既設の小型PM_{2.5}計(名古屋大学/長崎大学開発)等の各種観測機器との通年連続観測を開始した。通年連続観測に加えて集中観測も毎年度実施し、地上観測測器群との同時観測を実施した。また、GOSAT-2データとの比較を行い、相違点を明らかにした。計画以上の進展として、誤差の見積もりに留まらず、精密なアルゴリズムの評価、それに基づく迅速なアルゴリズムの改良が可能となる評価方法を考案した。また、効果的な検証方法としてスカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測を提案し、さらには、それらの精度や確度が十分であることが確認されたので、その国際観測網を提案することができた。プロジェクト開始時はスカイラジオメーターの観測をもとにAODやSSAなどを中間プロダクトとして評価することを目指したが、それよりも有効なfAOD(0-1km)やfAAOD(0-1km)といった光学パラメーターを見出し、そのデータを得ることができるスカイラジオメーターとMAX-DOASを同時に配備するA-SKY国際観測網の提案に至った点は、当初の予定を上回る成果である。また、千葉においては、BC・PM_{2.5}・NO₂などと同時にCO₂やCH₄の連続観測も開始し、GOSAT/GOSAT-2/GOSAT-GWの応用研究のための科学的知見を創出できたことも当初の目標を越えた成果として特筆する。

6. 引用文献

- 1) Kondo, Y., Sahu, L., Kuwata, M., Miyazaki, Y., Takegawa, N., Moteki, N., et al., Stabilization of the mass absorption cross section of black carbon for filter-based absorption photometry by the use of a heated inlet. *Aerosol Sci. Technol.* 43, 741-756, 2009.

- 2) Nakayama T., Matsumi, Y., Kawahito K., et al., Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor, *Aerosol Science and Technology*, 52:1, 2-12, DOI: 10.1080/02786826.2017.1375078, 2018.
- 3) Mok, J., N. Krotkov, O. Torres, H. Jethva, Z. Li, J. Kim, J.-H. Koo, S. Go, H. Irie, G. Labow, T. Eck, B. Holben, J. Herman, R. Loughman, E. Spinei, S. S. Lee, P. Khatri, and M. Campanelli, Comparisons of spectral aerosol single scattering albedo in Seoul, South Korea, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 2295-2311, <https://doi.org/10.5194/amt-11-2295-2018>, 2018.
- 4) Irie, H., H. M. S. Hoque, A. Damiani, H. Okamoto, A. M. Fatmi, P. Khatri, T. Takamura, and T. Jarupongsakul, Simultaneous observations by sky radiometer and MAX-DOAS for characterization of biomass burning plumes in central Thailand in January-April 2016, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 599-606, <https://doi.org/10.5194/amt-12-599-2019>, 2019.
- 5) Irie, H., Y. Kanaya, H. Akimoto, H. Iwabuchi, A. Shimizu, and K. Aoki, First retrieval of tropospheric aerosol profiles using MAX-DOAS and comparison with lidar and sky radiometer measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 341-350, 2008.
- 6) Irie, H., H. Takashima, Y. Kanaya, K. F. Boersma, L. Gast, F. Wittrock, D. Brunner, Y. Zhou, and M. Van Roozendaal, Eight-component retrievals from ground-based MAX-DOAS observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1027-1044, <https://doi.org/10.5194/amt-4-1027-2011>, 2011.
- 7) Irie, H., T. Nakayama, A. Shimizu, A. Yamazaki, T. Nagai, A. Uchiyama, Y. Zaizen, S. Kagamitani, and Y. Matsumi, Evaluation of MAX-DOAS aerosol retrievals by coincident observations using CRDS, lidar, and sky radiometer in Tsukuba, Japan, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 2775-2788, doi:10.5194/amt-8-2775-2015, 2015.
- 8) Damiani, A., H. Irie, K. Yamaguchi, H. M. S. Hoque, T. Nakayama, Y. Matsumi, Y. Kondo, and A. Da Silva, Variabilities in PM_{2.5} and black carbon surface concentrations reproduced by aerosol optical properties estimated by sky radiometer and MAX-DOAS instruments, *Remote Sensing*, 13(16), 3163, <https://doi.org/10.3390/rs13163163>, 2021.
- 9) Hashimoto, M., and T. Nakajima, "Development of a remote sensing algorithm to retrieve atmospheric aerosol properties using multi-wavelength and multi-pixel information", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, Issue12, pp.6347-6378, DOI:10.1002/2016JD025698, 2017.
- 10) Nakajima, T., M. Campanelli, H. Che, V. Estellés, H. Irie, S.-W. Kim, J. Kim, D. Liu, T. Nishizawa, G. Pandithurai, V. K. Soni, B. Thana, N.-U. Tugjsurn, K. Aoki, M. Hashimoto, A. Higurashi, S. Kazadzis, P. Khatri, N. Kouremeti, R. Kudo, F. Marengo, M. Momoi, S. S. Ningombam, C. L. Ryder, and A. Uchiyama, An overview and issues of the sky radiometer technology and SKYNET, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4195-4218, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020>, 2020.
- 11) Irie, H., and T. Nakajima, SKYNET, In: Akimoto H., Tanimoto H. (eds) *Handbook of Air Quality and Climate Change*, Springer Nature, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_52-1, 2022.
- 12) Cho, C., Kim, S., Lee, M., Lim, S., Fang, W., Gustafsson, Ö., Andersson, A., Park, R. J., Sheridan, P. J., Observation-based estimates of the mass absorption cross-section of black and brown carbon and their contribution to aerosol light absorption in East Asia, *Atmospheric Environment*, 212, 65-74, 2019.
- 13) Kanaya, Y., F. Taketani, Y. Komazaki, X. Liu, Y. Kondo, L. K. Sahu, H. Irie, and H.

Takashima, Comparison of black carbon mass concentrations observed by multi-angle absorption photometer (MAAP) and continuous soot-monitoring system (COSMOS) on Fukue Island and in Tokyo, Japan, *Aerosol Science and Technology*, 47, 1-10, 2013.

II-2 アルゴリズム研究及び他衛星データとの比較によるGOSAT-2プロダクトの誤差解析

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

第一宇宙技術部門地球観測研究センター 研究開発員 橋本 真喜子

〔要旨〕

温室効果ガス観測技術衛星2号「いぶき2号」(GOSAT-2)は、雲・エアロゾルセンサ2型(TANSO-CAI-2、以下CAI-2)を搭載し、PM_{2.5}と世界で初めてBCを提供する。PM_{2.5}とBCは定義・観測上、直接サンプリングにより測定されるため、衛星観測で算出されるPM_{2.5}、BC相当量と観測しているものが物理的に異なる。そのため衛星・地上観測データ、プロダクト導出手法を考慮したより高精度な検証手法の開発し、プロダクトの精度向上やデータの信頼性を高めていく必要がある。サブテーマ2では、GOSAT-2エアロゾルプロダクトのアルゴリズムを用いて、地上観測との直接比較のため、推定手法や使用変数などアルゴリズムの詳細情報を他のサブテーマと共有した。光学特性データについては、理論的な観点から、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの主要な誤差要因を特定し、地上観測と他衛星のデータとの比較を通じて、ロバストな整合性評価・誤差解析を実施し、主要な誤差要因のリストおよび定量化された誤差評価の結果をサブテーマ1に提供を行った。エアロゾル特性(中間プロダクト)のエアロゾル光学的厚さ(AOT)、Ångström指数(AE)、一次散乱アルベド(SSA)については、アルゴリズムを用いた数値実験により、校正係数導出とアルゴリズム間で生じる輝度誤差と、アルゴリズムで仮定したエアロゾルモデルにより生じるエアロゾル特性の誤差を算出した。PM_{2.5}とBCについては、感度実験としてエアロゾル光学特性のほか、緯度経度、時期、境界層高度などのデータも説明変数に含めた機械学習により重要度を計算し、算出精度向上や地上観測による検証に重要な変数の調査を実施した。その結果、PM_{2.5}とBCの導出には、微小粒子の光学的厚さ(AOT_{fine})と境界層高度、相対湿度や、緯度情報や植生指数(NDVI)などの場所や季節性に関する変数が重要であることがわかった。その導出に必要なAOT_{fine}やAE、SSAの精度について、数値計算によりエアロゾルモデルと相対湿度の影響があることを定量的に示した。また、GOSAT-2/CAI-2エアロゾル導出アルゴリズムを用いたエアロゾル特性解析を2019年3月データから継続的に実施し、PM_{2.5}やBCを算出する際に重要な中間プロダクトであるAOT、AE、SSAについて地上観測との比較を行った。解析結果を地上観測や他衛星観測と比較することで、衛星アルゴリズムの誤差・バイアス調査を実施し、アルゴリズムの特性と改善課題、及びPM_{2.5}とBCに与える誤差影響について示した。SKYNET千葉大学サイトとの詳細な比較の結果、AOTはやや過大評価傾向、AEは全体に過小評価(AOT>0.3で相関、バイアスとバラツキは-0.07と0.34)であり、CAI-2エアロゾルモデルの粒径分布によりAEに最大で-0.5のバイアスが生じることがわかった。SSAは光吸収に感度のある紫外バンドで相関がみられ、AOT>0.3の場合両バンドでバイアスとバラツキは-0.01と0.035程度であった。インド地上観測ARFINETとCAI-2のBCの比較では、北インドのBCが多い場所・時期において、相関係数が0.74以上で65%以上が差2 µg/m³以内で一致し、仮にPM_{2.5}の20 µg/m³の観測精度が達成できれば目標精度10%を満たす結果であることがわかった。他衛星VIIRS、MODIS、HimawariとCAI-2のエアロゾル中間プロダクトの比較では、AOTの相関係数0.8前後と高い結果が得られられた一方で、海上で過大評価、砂漠域で過小評価の顕著な傾向がみられた。要因として、海上では解析に用いる短波長の海面射出の影響、砂漠域では反射率の高い長波長の影響が考えられる。以上の結果は、PM_{2.5}やBC算出に重要な変数の感度調査結果とともにまとめ、解析データや知見をサブテーマ1と共有した。AOTと粒径分布はPM_{2.5}とBCの導出に用いるため、精度改善要素であり、アルゴリズムの課題と改善事項としてエアロゾルモデルを領域別に考慮した改良、地表面(海面)反射と波長選択等の提案を行った。

1. 研究開発目的

大気中の微小粒子状物質(PM_{2.5})や黒色炭素(BC)は健康被害で注目される他、BCは二酸化炭素とメタ

ンに次いで3番目に大きな正の放射強制力をもち（IPCC第5次報告書）、気候影響としても注目されている。2018年10月に上げられた温室効果ガス観測技術衛星2号「いぶき2号」（GOSAT-2）は、雲・エアロゾルセンサ2型（TANSO-CAI-2、以下CAI-2）を搭載し、PM_{2.5}と世界で初めてBCを提供する。特にBCは衛星では新規プロダクトであるため、衛星・地上観測データ、プロダクト導出手法を考慮したより高精度な検証手法の開発し、プロダクトの精度向上やデータの信頼性を高めていく必要がある。PM_{2.5}とBCは定義・観測上、地上サンプリングにより測定されるため、衛星観測で算出されるPM_{2.5}、BC相当量とは物理的に異なる。そのため、直接的な比較は難しく、アルゴリズムへのフィードバックは困難である。本研究では衛星観測量と地上観測量を直接比較する評価手法を開発することによって検証精度を上げ、最終的には本成果をCAI-2のエアロゾル導出アルゴリズムにフィードバックさせることが目的である。また、成果は他衛星のPM_{2.5}やBCを含むエアロゾルプロダクト精度向上にも貢献するものであり、国際展開されれば波及効果は高いと考える。地上観測に実績のある千葉大学、及びグローバルにエアロゾル観測網を持つNIESと連携することで、効果的な研究の実施に繋がることが期待される。

2. 研究目標

GOSAT-2エアロゾルプロダクトのアルゴリズムを用いて、理論的な観点から、GOSAT-2のPM_{2.5}及びBC量推定データの主要な誤差要因を特定してそのリストを作成し、各誤差を定量的に評価する。また、光学特性データについては、他衛星のデータとの比較を通じて、ロバストな整合性評価・誤差解析を実施する。主要な誤差要因のリストおよび定量化された誤差評価の結果をサブテーマ1に提供する。

3. 研究開発内容

衛星観測と地上観測では観測手法と物理量が異なるため、比較を行うにあたり衛星エアロゾル特性導出アルゴリズムの特性により生じる誤差の把握が重要となる。そこで、他サブテーマと3回の勉強会などの会合を開催してエアロゾル導出アルゴリズムの詳細を共有し、本アルゴリズムを用いて、(1)輝度校正とエアロゾル導出のアルゴリズムに用いられる放射伝達モデルによる輝度の差異の調査、(2)仮定するエアロゾルモデルによる導出エアロゾル特性に生じる誤差について誤差解析、(3)PM_{2.5}とBC量の地上検証のための感度解析として、観測を用いた機械学習を通してPM_{2.5}とBCについて相関の高い変数の調査、(4)他衛星データとの比較のため、他衛星データの整備と比較、(5)GOSAT-2/CAI-2データからエアロゾル特性導出を行い、サブテーマ1と共同で地上観測との比較を行った。以上の結果より、アルゴリズムがもつ誤差特性とエアロゾル特性に生じるバイアス、PM_{2.5}とBC量を比較する上での考慮すべきパラメータについてまとめ、結果をサブテーマ1に共有した。また、結果よりエアロゾル特性導出の精度向上に向けたエアロゾル特性導出アルゴリズムの改良点について提案事項としてまとめた。以下にアルゴリズム及び(1)-(5)の研究手法について述べる。

エアロゾル導出に用いるセンサCAI-2は紫外・可視・短波長赤外の7波長10バンドのイメージング観測を行う：前方視観測（衛星直下点より衛星進行方向前方に20°指向；波長339、441、672、865、1630nm）；後方視観測（後方に20°指向；波長377、546、672、865、1630nm）。エアロゾル導出アルゴリズムにはMulti-wavelength and -pixel method (MWPM)¹⁾が用いられている。MWPM法は複数のピクセルと複数の波長を同時解析することで、エアロゾル光学的厚さ（AOTまたはAOD）と光吸収特性、粒径情報であるÅngström指数や微小・粗大粒子別のAOT（AOT_{fine}とAOT_{coarse}）を導出する。

衛星観測では地表面反射率（ A_g ）が異なると観測される太陽光の反射（または有効反射率 R ）が異なるため、近接する複数の観測点毎に放射伝達式が得られる。エアロゾル粒子は空間方向に滑らかに分布すると仮定しこれを連立方程式として解くことでエアロゾル光学的厚さと光吸収特性が得られる。MWPMでは最適化法を用いて式(2.1)の評価関数を解くことにより、エアロゾル光学特性を導出する。

$$\phi = [\mathbf{R} - \mathbf{f}(\mathbf{u})]^T \mathbf{S}_e^{-1} [\mathbf{R} - \mathbf{f}(\mathbf{u})] + (\mathbf{u} - \mathbf{u}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_a) + \sum_{ix} \gamma_{ix} (\mathbf{u}_{b,ix} + \mathbf{D}_{ix} \mathbf{u})^T (\mathbf{u}_{b,ix} + \mathbf{D}_{ix} \mathbf{u}) \quad (2.1)$$

ここで、 \mathbf{R} は観測ベクトル(State vector)； $\mathbf{f}(\mathbf{u})$ ，放射伝達モデルRstar7²⁻⁴⁾ (forward model)； \mathbf{u} ，導出変数のベクトル、下付き文字 \mathbf{a} と \mathbf{b} は先験値と境界条件； \mathbf{S}_e と \mathbf{S}_a ，観測値と先験値の誤差共分散行列； \mathbf{D} ，二次微分演算子； γ ，導出変数の空間方向の平滑化パラメータを示す。 \mathbf{u} はAOT550fine, AOT550coarse, 黒色炭素体積混合比 (BCF)，各波長の地表面反射率 (A_g) から成り、補助データとして相対湿度、オゾン量、地表面気圧を与える。エアロゾルモデルは表2.1に示す対数正規分布の2山の粒径分布 (陸上はfine modeと coarse mode)、図2.1に示す各粒子モデルの複素屈折率を仮定している。微小粒子には、75%硫酸とスス (soot, ここではBCとして扱う) の2種の内部混合を仮定し、BCFは微小粒子中の体積比 ($BCF \equiv V_{BC}/V_{fine}$ 、 $V_{fine} = V_{H_2SO_4} + V_{BC}$ 、 V は体積を示す)、複素屈折率は体積比合成している。微小粒子と粗大粒子は外部混合を仮定している。

表2.1 GOSAT-2エアロゾル導出アルゴリズムに用いられているエアロゾル粒子の粒径分布、対数正規分布のモード半径 (r_m) と分散 (S)

	Fine mode	Coarse mode
Particle model	75% H_2SO_4 + Soot	Dust
r_m [μm]	0.175	4.00
S	2.24	3.00

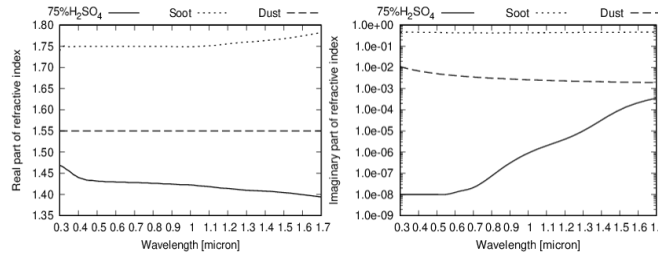


図2.1 エアロゾルモデル粒子の複素屈折率 (左: 複素屈折率実部、右: 複素屈折率虚部)

さらに、粒径と複素屈折率は大気相対湿度による吸湿成長 (Hanel's notation)⁵⁾を仮定している。成長粒子半径は、 $r(a_w) = r_0 \{1 + \rho \cdot [m_w(a_w)/m_0]\}^{1/3}$ で計算される。 a_w (α 相対湿度)は水活性変数； r_0 ，成長前の乾燥粒子半径； m_w と m_0 ，凝縮水と乾燥粒子の質量； ρ ，水に対するエアロゾル粒子密度比である。また、複素屈折率， n ，は吸湿成長した粒子と乾燥粒子の体積比で計算される。

MWPMにより導出した各波長 λ のAOT(τ)を用いてÅngström指数(AE)が算出され、AOT550fine(τ_{fine})とBCF(f_{BC})を用いてePM2.5 (単位： $\mu g/m^3$)とBC量 (単位： $\mu g/m^3$)が式(2.2)と(2.3)により算出される。

$$ePM2.5 = \frac{1}{m} \{(1 - f_{BC})\rho_{H_2SO_4} + f_{BC}\rho_{BC}\} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dv_{fine}}{d \ln r} d \ln r, \quad (2.2)$$

$$BC = \frac{1}{m} f_{BC}\rho_{BC} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dv_{fine}}{d \ln r} d \ln r, \quad (2.3)$$

ここで、 ρ_{BC} はBCの密度 (1.8 g/cm³を仮定)； $\rho_{H_2SO_4}$ ，硫酸の密度 (1.5 g/cm³を仮定)； v_{fine} ，微小粒子の体積； r ，粒子半径； m ，エアロゾル高度に関する変数である。特にエアロゾルモデル、PM_{2.5}とBCF (またはBC量)の定義、算出方法が異なるため、以下の誤差解析・感度解析を実施した。この結果は検証時に考慮すべきポイントとなる。本アルゴリズムを用いて行った上記(1)～(5)の手法を以下に示す。

(1) 輝度校正とMWPMに用いられている放射伝達モデルは、それぞれPstar⁶⁾とRstar7であり基本的に光散乱・吸収計算、エアロゾルモデルは同じものが組み込まれているが、Pstarがストークスパラメータによる偏光計算を含む点と計算設定が異なる。輝度校正ではUS standard大気29層を設定し、MWPMではUS standard大気6層の設定で計算を行なっている。比較のため、共通のurbanとdust (yellow sand) エアロゾル粒子 (光学的厚さの範囲はそれぞれ0～0.5, 0～0.5)を用いて計算される観測反射率の比較を行い、その差異よりエアロゾル特性への影響を見積もった。

(2) エアロゾル粒径や複素屈折率などの物理特性や光学特性は様々であるが、GOSAT-2/CAI-2衛星観測ではそれらの特性全てを推定することは難しい。MWPMでは表2.1、図2.1に示したエアロゾルモデルを仮定しており、導出エアロゾル特性にバイアス誤差が生じる。そこで、地上検証で考慮すべき変数を調査するため、MWPMで用いているエアロゾル層高度、エアロゾルの粒径分布のモード半径分散、複素屈折率

の実物と虚部、相対湿度による粒子の吸湿成長について誤差解析を行い、観測反射率、エアロゾル光学的厚さ (AOT)、Ångström指数 (AE)、一次散乱アルベド (SSA) に生じるバイアス誤差を見積もりリストを作成した。

(1) と(2) で導出エアロゾル特性の誤差 Δu を見積るにあたり、MWPMを用いて導出エアロゾル特性 (AOT550fine, AOT550coarse, BCF) の感度、つまり荷重関数 ($df(u)/du$) を計算し、観測誤差 $\Delta f(u)$ から導出エアロゾル特性の誤差 Δu を見積もった。感度は波長や地表面反射率により異なるため、地表面反射率0.01-0.6について計算を行った。

(3) PM_{2.5}とBCは地上付近で採取された空気から濃度を測定するがGOSAT-2衛星観測では導出した大気柱AOTとBCFから算出している。検証およびPM_{2.5}とBC導出精度の改善に有効な変数について機械学習 (Random Forest) を用いた調査を行った。説明変数は、GOSAT/CAI: AOT550fine, AOT550coarse, BCF, NDVI, 観測年・月・日・時間, 緯度・経度, ECMWF: 気温, 相対湿度, 風速, 気圧, 境界層高度, 目的変数は、PM_{2.5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Hourly)、BC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Hourly) である。説明変数のエアロゾル特性はMWPMを用いてGOSAT/TANSO-CAIより導出し、気象場はECMWFより取得した。目的変数には図2.2に示す中国PM_{2.5} (2013-2018年) とインド (2013-2015年) の地上観測データを用い、全データ数それぞれ、177297と91データの内、教育に90%、検証に10%のデータを用い、Random Forestより説明変数の重要度 (Feature Importance) を求めた。

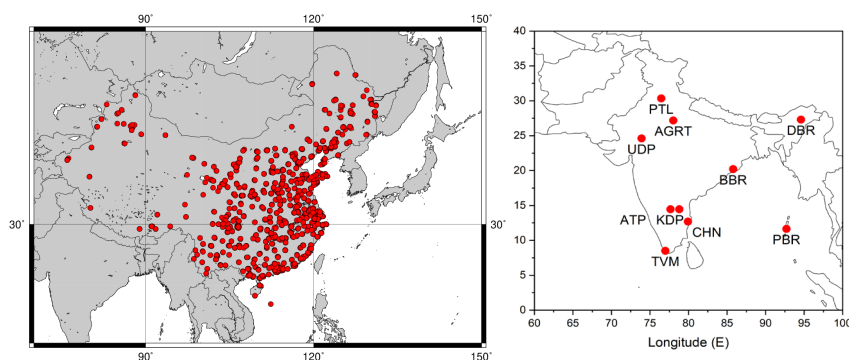


図2.2 機械学習に用いたPM_{2.5}とBCの観測点分布

(4) 他衛星の比較のため、VIIRS、MODIS、Himawari-8のデータを整備し (期間: 2019年3月~2020年4月)、エアロゾル特性の誤差要因となる、地表面反射率についてVIIRSと、エアロゾル特性についてVIIRS、MODIS、Himawari-8と比較を行い、アルゴリズムの特徴の調査・検証を行った。

(5) MWPMを用いてCAI-2データよりエアロゾル特性 (AOT550fine、AOT550coarse、AE、SSA) を導出し (期間: 2019年3月~)、サブテーマ1と共同でSKYNET地上観測と比較を行った。また、地表面反射率の影響を見るためにAERONET地上観測ネットワークとのエアロゾル特性の比較し、インドARFINET (BCの地上サンプリングネットワーク) とのBCの比較を行い、BCの多い場所でのBC導出精度を調査した (図2.3)。

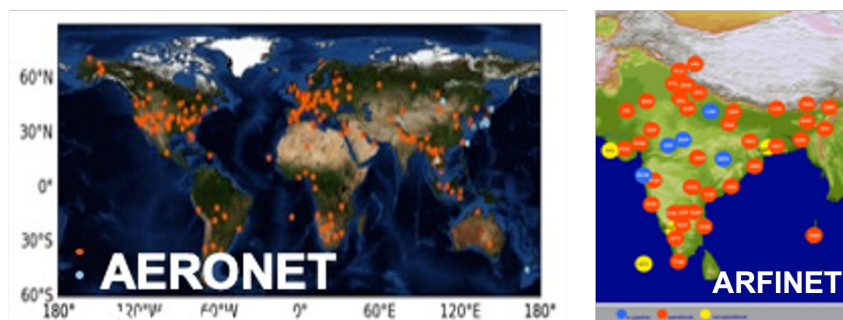


図2.3 CAI-2エアロゾル特性プロダクトとの比較に用いたエアロゾル地上観測ネットワーク。AERONET (左) とARFINET (右)

(1)～(5)の結果のまとめ及び研究結果よりアルゴリズムの問題点と改良点の提案を行った。

4. 結果及び考察

3節に示した(1)～(5)の結果について説明する。まず、PM_{2.5}やBC導出の中間プロダクトである波長550 nmでの微小粒子AOT (AOT550fine ≡ fAOD) の感度解析の結果を図2.4に示す。解析はMWPMで仮定しているエアロゾルモデルを用いて式2.4により地表面反射率 (Ag) 別に計算した。

$$K \equiv \frac{df}{du} = \frac{f(u+du)-f(u)}{(u+du)-u}, \quad (2.4)$$

ここで、 $f(u)$ は放射伝達モデル、 u は導出エアロゾル特性である。図2.4の上段と下段は黒色炭素体積混合比 (BCF) がそれぞれ0.01と0.1の場合のAOT550fineの感度を示す。結果より、地表面反射率 (Ag) によって感度が異なり、BCFが小さいとき反射率が低い地表面上で正感度が高く、BCFが大きくなると反射率が高い地表面上で負の感度が高い。感度が0を通る点は、Neutral surface reflectance⁷⁾と呼ばれ、エアロゾルの光吸収特性 (BCFやSSA) によって異なる。この結果を用いて、AOT550fineの誤差 Δu を、 $\Delta u = (K^T \Delta R^{-2} K)^{-2} K^T K$, より見積もる。

(1) 観測値の校正とエアロゾル導出に用いた放射伝達モデル間の有効反射率の差異は、近紫外～近赤外域で2-3%であり、地表面反射率により $\Delta AOT550fine$ は0.04-0.10あることがわかった。

(2) 次に、MWPMで仮定しているエアロゾルモデルの、エアロゾル層高度(AHL)、エアロゾルの粒径分布のモード半径(r_{mod})と分散(S)、複素屈折率の実部(mr)と虚部(mi)、相対湿度(RH)による粒子の吸湿成長について誤差解析を行い、観測反射率、エアロゾル光学的厚さ(AOT)、Ångström指数(AE)、一次散乱アルベド(SSA)に生じるバイアス誤差を見積もり、リストを作成した(表2.2, 図2.5)。計算設定は太陽天頂角 = 30°、衛星天頂角 = 20°、相対方位角 = 0°、AOT550fine = 0.4、エアロゾルモデルの設定は表4.2.1の”Test values”(Test値)に示す。 ΔAE と $\Delta SSA340$ はTest値とDefault値との差で、 $\Delta AOT550fine$ はエアロゾルモデルの違いによって生じる反射率の差異から算出した。結果より、エアロゾル層高度は ΔAOT への影響は小さく、AEとSSAに変化はない。複素屈折率は、特に実部はAE、虚部はSSA、粒径変数の r_{mod} とSはAE、相対湿度は粒子成長と屈折率の凝結水合成よりAEとSSAのバイアス誤差が大きいことがわか

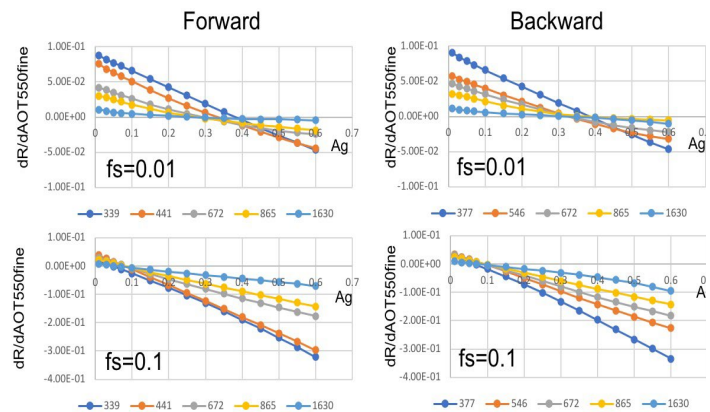


図2.4 地表面反射率0.01～0.60におけるAOT550fineの感度(荷重関数)。左図はGOSAT-2/CAI-2の前方視、右図は後方視を示す。計算条件は、太陽天頂角30度、衛星天頂角30度、相対方位角0度、AOT550fine=0.4。図中の f_s はBCFを示す。上図はBCF = 0.01(1%)、下図はBCF = 0.1(10%)。

表2.2 エアロゾルモデルのAOT550fine、AE、SSA340に対する誤差評価リスト。Default(D)はMWPMエアロゾルモデルの設定値または比較基準値(相対湿度が該当)、Test valuesは実験設定値

Aerosol Model	Default value (D)	Test value	$ \Delta AOT550 $ Ag=0.05 BCF= 0.01/0.10	ΔAE	$\Delta SSA340$
Aerosol layer height (AHL)	1-3km	1-1km 1-5km	0.0006/0.0015 0.0001/0.0004	-	-
Refractive index, real part (mr) (1)75% H_2SO_4 , (2)Soot	(1) 1.43 (2) 1.75	1.3 1.5 1.8	0.09/0.26 0.03/0.09 0.20/0.57	0.09 -0.06 -0.26	-0.016 0.001 0.010
Refractive index, imaginary part (mi) (1)75% H_2SO_4 , (2)Soot	(1) 1.E-08 (2) 0.44	D x 0.5 D x 1.5	0.08/0.24 0.07/0.21	0.03 -0.02	0.043 -0.039
Aerosol size, mode radius (r_{mod})	0.175um	0.135um 0.155 0.195 0.215	0.03/0.09 0.01/0.04 0.01/0.03 0.02/0.07	0.21 0.10 -0.09 -0.17	0.001 0.001 -0.001 -0.003
Aerosol size, dispersion (S)	2.24	3.0	0.01/0.35	-0.15	-0.011
Relative humidity	30% (dry)	50% 70 80 90 99	0.002/0.007 0.01/0.02 0.02/0.06 0.03/0.08 0.04/0.12	-0.004 -0.05 -0.14 -0.27 -0.85	0.003 0.040 0.074 0.096 0.127

った。また、AOTはBCFの値によって各項目（ALTやmiなど）で誤差が異なることがわかった。

また、式2.2と2.3より、 $\Delta AOT_{550fine}$ 、 ΔAE 、 ΔBCF (ΔSSA) による $ePM_{2.5}$ とBCへの誤差 $\Delta ePM_{2.5}$ と ΔBC はそれぞれ、 $\Delta ePM_{2.5} = \sqrt{(2.5\Delta\tau_{550fine})^2 + (0.2\Delta f_{BC})^2} \cdot ePM_{2.5}$ 、 $\Delta BC = \sqrt{(2.5\Delta\tau_{550fine})^2 + (\Delta f_{BC}/f_{BC})^2} \cdot BC$ と計算される。その他、粒径分布の仮定や物質とその密度の仮定によっても値は変化し誤差要因となる。

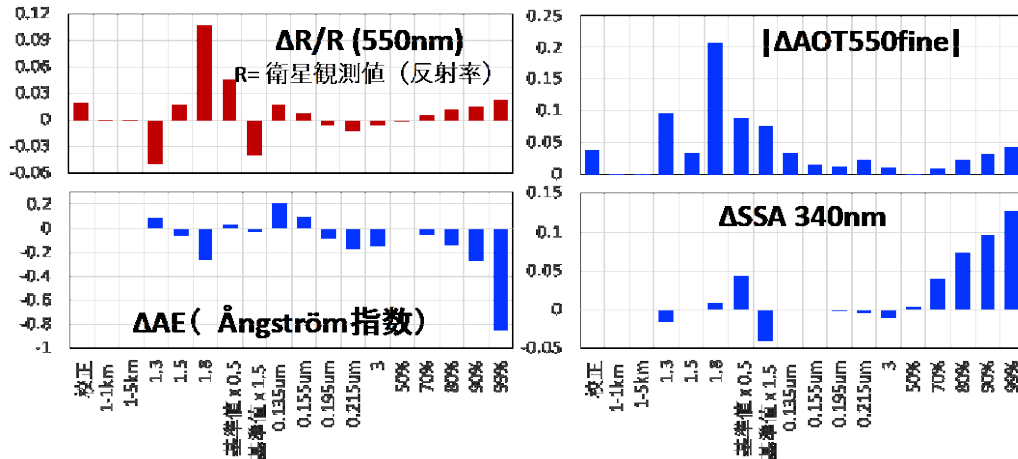


図2.5 観測反射率(R)、微小粒子エアロゾル光学的厚さ(AOT550)、一次散乱アルベド(SSA340)、Ångström指数(AE)に生じるエアロゾルモデルによるバイアス誤差の数値実験による見積もり結果。縦軸はDefault値との差(Rについては割合)。横軸は左から、校正(輝度校正: +2%誤差); AHL (1-1 km、1-5 km); mr (1.3、1.5、1.8) とmi (基準値×0.5、×1.5); r_{mod1} (0.135 μm 、0.155 μm 、0.195 μm 、0.215 μm)と S_1 (3); RH (50~99%)。

(3)機械学習により導出した $PM_{2.5}$ とBCの機械学習Random Forestによる目的変数に対する重要度 (Feature Importance) の上位5位の結果を図2.6に示す。重要度は導出精度向上に寄与する変数、つまり $PM_{2.5}$ 、BCの検証および導出精度の改善に有効な変数を意味する。機械学習による $PM_{2.5}$ の導出精度(RMSE)は23.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、他研究による機械学習の導出精度(15~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)と近い精度で導出されている。重要度の結果より、植生変数 (NDVIag)、月、AOT550fine、境界層高度、緯度の寄与が大きく、衛星から観測されるAOT550fine、つまり微小粒子のエアロゾル光学的厚さと鉛直分布に関連する境界層高度が、 $PM_{2.5}$ 導出に重要であることがわかった。また、観測月、NDVI、Latitudeの寄与率が高いことから、 $PM_{2.5}$ は季節性や地域性があると考えられ、検証の際には地上観測の $PM_{2.5}$ に加え気象場や粒子の組成も同時に測定する必要があることを示唆する結果が得られた。BCは教育データが91データと非常に少なく、機械学習による導出精度としての評価は難しいが、重要度の結果より、気温、境界層高度、気圧、相対湿度、AOT550fineの寄与が大きく、 $PM_{2.5}$ と同様に微小粒子のエアロゾル光学的厚さと鉛直分布に関連する境界層高度が重要であることがわかった。また、吸湿成長による光吸収特性の変化に重要な相対湿度も重要であり、数値計算による誤差リストの結果と整合する結果が得られた。この結果は、サブテーマ1で示された、 $fAOD_{357}$ (0-1km)と $PM_{2.5}$ や $fAOD_{357}$ (0-1km)とBCの高相関の結果と関連するものであり、検証には高度分布と組成の把握が重要であると言える。

上記結果を、サブテーマ1と共有した。感度解析より $PM_{2.5}$ とBCの導出には微小粒子エアロゾル量 (AOTfine) の他に高度情報(ここでは境界層高度)が重要であることが示された。また、 $PM_{2.5}$ とBCの中間プロダクトで、精度と直結するAOTやAE、SSAはアルゴリズムのエアロゾルモデル(複素屈折率、粒径分布)、相対湿度によるバイアス誤差があり、検証時に考慮する必要があることがわかった。

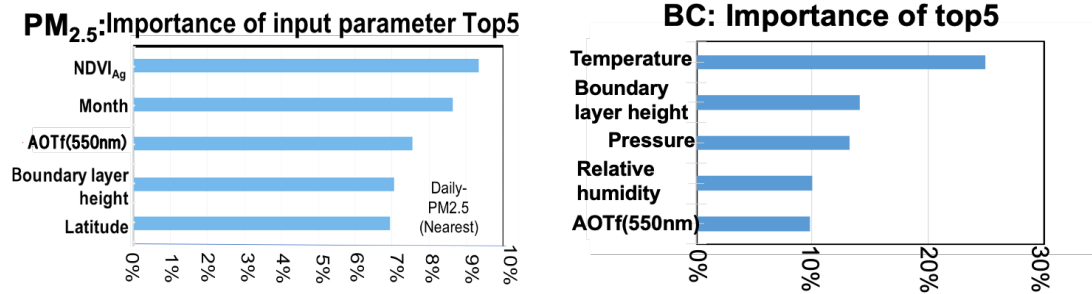


図2.6 機械学習の地上観測との比較と重要度 (Feature Importance) の上位5位の結果。説明変数は次の変数を設定した：AOT550fine (AOTf)、AOT550coarse (AOTc)、fs (sootf)、観測年月日・時間 (year, month, day, hour)、緯度・経度 (latitude, longitude)、気温 (temperature)、風速 (uwind, vwind)、気圧 (pressure)、可降水量 (water column)、相対湿度 (relative_humidity)、境界層高度 (boundary layer height)、オゾン量 (ozone)、植生指数 (NDVIag)。

(4) Suomi NPP/VIIRS、Aqua/MODIS、Himawari/AHIとCAI-2のエアロゾルプロダクトについて比較を行った。エアロゾルプロダクトの誤差要因となる地表面反射率については、全球をカバーするVIIRS L3地表面反射率プロダクトをCAI-2幾何に合わせてBRDF補正し比較を行った。エアロゾル特性の比較期間は2019年3月から2020年4月、地表面反射率の比較期間は2019年8月1日から12日、観測時間差1.2時間以内、最近傍のデータで比較を行った。エアロゾル特性の比較はCAI-2の品質フラグが0(7%未満で収束)、5×5ピクセルの分散が10%以下を使用した。地表面反射率の比較結果を図2.7に、バイアスとバラツキの計算結果を表2.3に示す。VIIRSにはUV波長を搭載しないため、比較はCAI-2のBand2～Band5、Band7～Band10を比較している。CAI-2とVIIRSの地表面反射率はバイアス-0.01～+0.003、バラツキ0.02～0.04であり、概ねVIIRSの地表面反射率と一致する結果である。

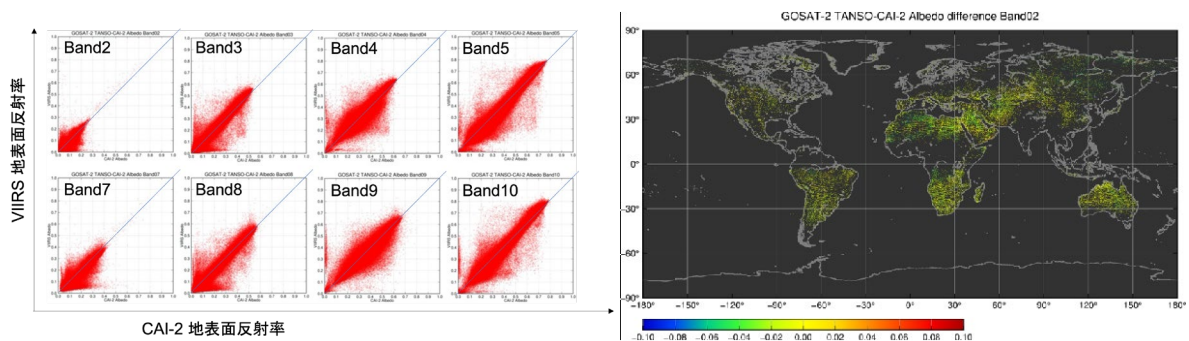


図 2.7 CAI-2 と VIIRS L3 地表面反射率プロダクトの散布図(左)及び差分(CAI2-VIIRS)のマップ (CAI-2 Band2) (右)

表2.3 CAI-2とVIIRS L3地表面反射率のバイアスとバラツキ

Band	バイアス	バラツキ	データ数
2	-0.0100	0.0232	840367
3	+0.0001	0.0290	840367
4	+0.0038	0.0402	840367
5	-0.0019	0.0408	840367
7	-0.0189	0.0244	835687
8	-0.0067	0.0302	835687
9	-0.0072	0.0398	835687
10	-0.0025	0.0402	835687

図2.8, 2.9, 2.10に、CAI-2とVIIRS、MODIS、Himawari-8/AHIのAOT550の比較結果を示す。AOT550はVIIRS、MODIS、HimawariとCAI-2の決定係数 R^2 はVIIRSとの比較結果は2～5月で0.347～0.60（相関係数 R は0.58～0.77）の値をとるが、その他の月は $R^2 > 0.7$ （ $R > 0.83$ ）で一致している。MODISとHimawariはすべての月で $R^2 > 0.7$ （ $R > 0.83$ ）で一致する結果となった。一方で、CAI-2のAOT550がVIIRSとMODISと比較して過小評価と過大評価するケースが見られ、それぞれ、海上（沿岸部）とサウジアラビアなどの高反射率領域で生じていることがわかった。原因としては、海上のエアロゾル推定でCAI-2はUV～VISの波長領域も含めてエアロゾル特性を推定しているため、クロロフィル等による海面射出の影響で過大評価、砂漠域では近赤外の高地表面反射率の波長を解析に含めているため、エアロゾルによる反射が相対的に小さくなり検出ができず、先験値（AOT550～0.2付近）に収束したと考えられる。本結果より、PM_{2.5}やBCの比較の際に、海上や砂漠のような高反射率領域でのエアロゾル特性プロダクトの精度に注意する必要があるが、また、地表状態に対応してアルゴリズムを改良する必要があることがわかった。

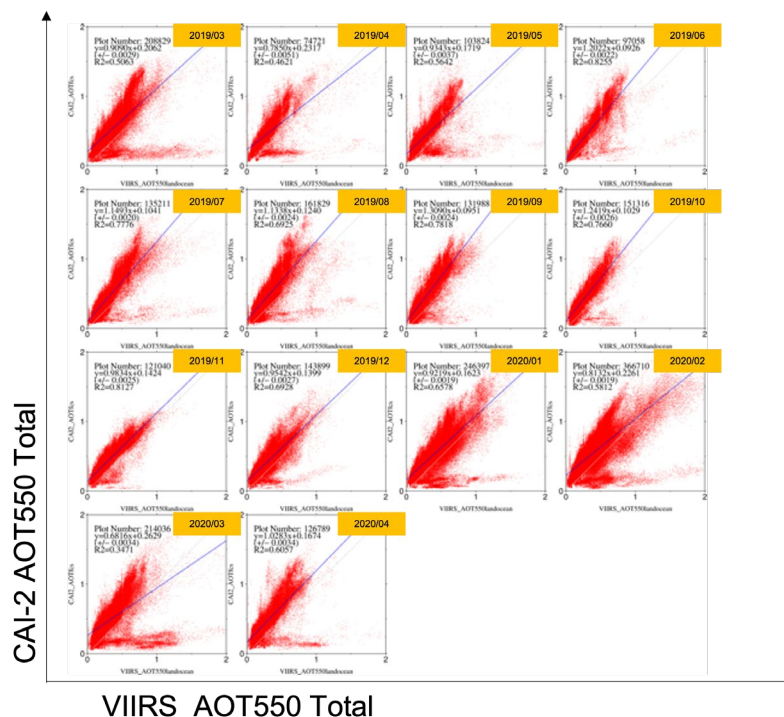


図2.8 CAI-2とVIIRSのAOT550の比較結果。期間は2019年3月から2020年4月。

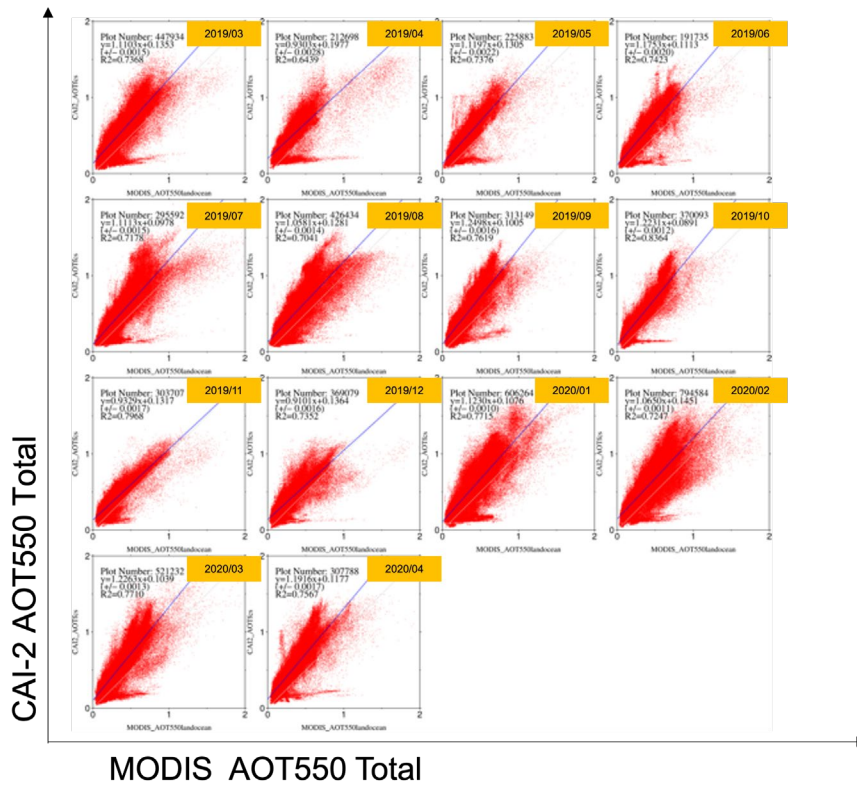


図2.9 CAI-2とMODISのAOT550の比較結果。期間は2019年3月から2020年4月。

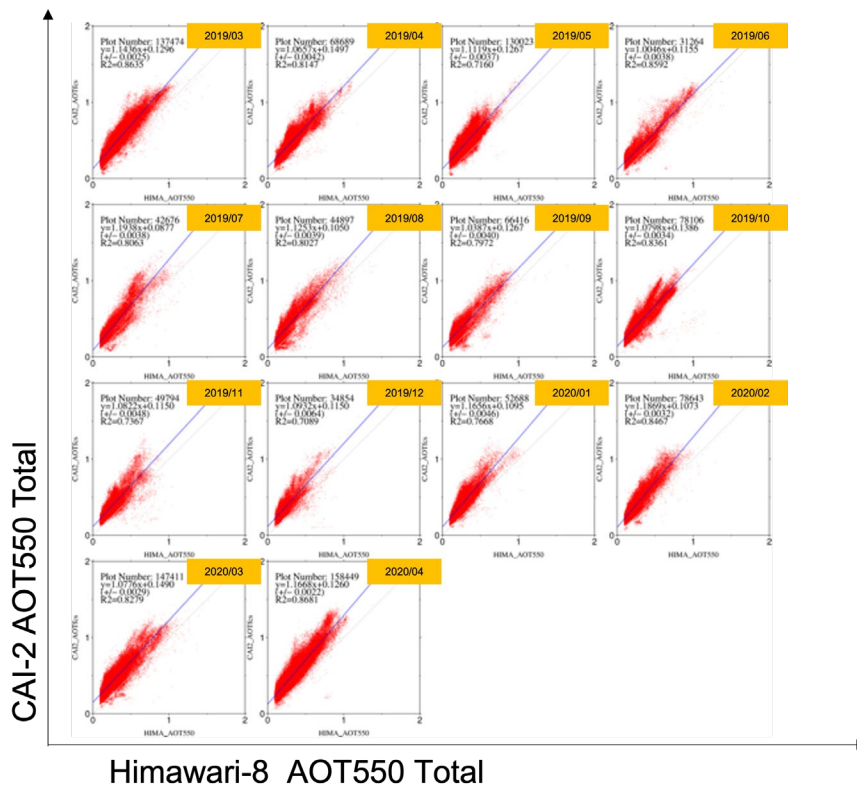


図2.10 CAI-2とHimawari-8のAOT550の比較結果。期間は2019年3月から2020年4月。

(3) CAI-2データを用いたエアロゾル特性の導出結果と地上観測SKYNETの比較結果(AOT550、AE、SSA340)を図2.11に示す。MWPMを用いて2019年3-2020年5月の期間のデータを解析しエアロゾル地上観測網であるSKYNET(千葉、福江、つくば、大阪、甲府、陸別、春日、高山、辺戸、ソウル、ウランバートル、ローダー)の観測値と比較を行った。比較は地上観測で晴天判定され、MWPMで解析誤差が~7%以下、5×5ピクセルのAOT550の分散が10%以下、SKYNET前後1時間の分散10%以下の平均のデータについて行った。AOT550はCAI-2の結果は過大評価傾向であることがわかる。AEとSSA340について、AOT550>0.3で比較すると相関が見られ、AEのバイアスとバラツキはバイアスとバラツキは-0.07と0.34、SSA340についてバイアスとバラツキは-0.01と0.035程度であった。

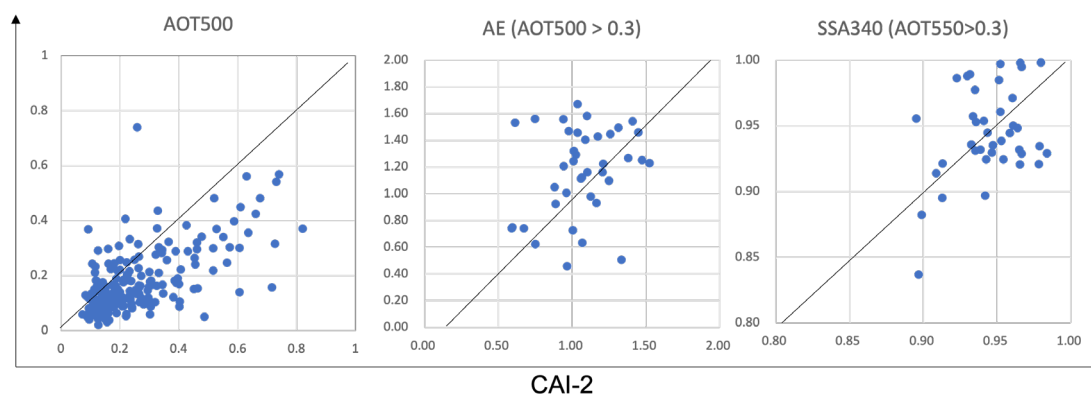


図2.11 CAI-2データを用いたエアロゾル特性の導出結果と地上観測 (SKYNET: 千葉、福江、つくば、大阪、甲府、陸別、春日、高山、辺戸、ソウル、ウランバートル、ローダー) との比較結果。期間: 2019年3月から2020年5月。左図は波長550nmでのAOT(AOT550)、中図はÅngström指数(AE)、右図はSSA340の比較。縦軸はCAI-2、横軸はSKYNETの結果。

SKYNET千葉大学サイト及び福江サイトの時系列のエアロゾル特性(AOT、AE、SSA340)の値を図2.12に示す。AOT550が小さい箇所ではAE、SSA340のCAI-2とSKYNETとの差異が大きいがわかる。千葉大学サイトにおいて2019年3月から10月付近でCAI-2のAOT550の過大評価が見られる。図2.13に示す千葉大学サイトでの地表面反射率 A_g の時系列結果を見ると、同じ時期に地表面反射率が他の時期に比べて大きい傾向にあることがわかる。また、Band1(340 nm)やBand6(380 nm)の A_g の時系列のバラツキも大きく、正確な A_g が導出できていない可能性があり、AOT550の過大評価の原因の一つと考えられる。

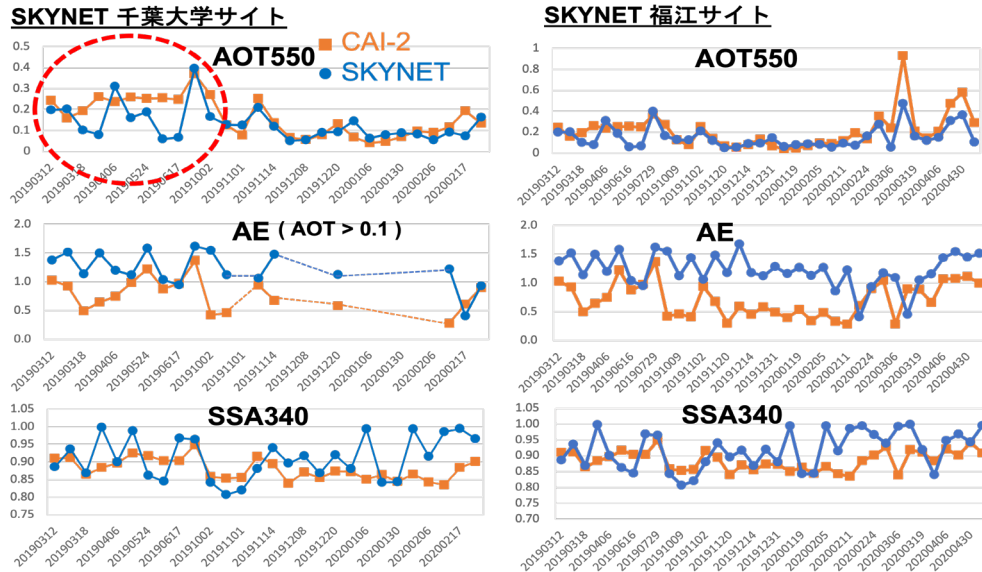


図2.12 CAI-2データを用いたエアロゾル特性の導出結果と地上観測SKYNET、千葉大学サイト(左)、福江サイト(右)との時系列比較結果。期間：2019年3月から2020年5月。上図は波長550 nmでのAOT(AOT550)、中図はÅngström指数(AE)、下図はSSA340の比較。横軸は日付。

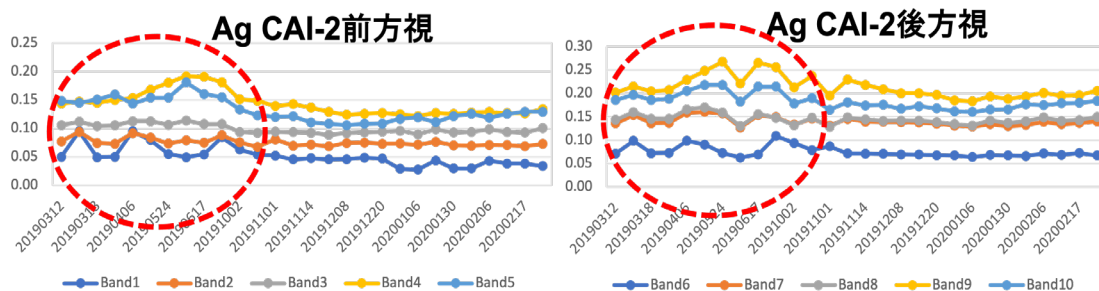


図2.13 CAI-2データから導出した地表面反射率のバンド毎の時系列の値。左図はCAI-2前方視、右図はCAI-2後方視の値。横軸は日付。

地表面反射率(Ag)によるAOT550の推定精度の確認のため、陸上観測データ量がSKYNETより豊富であるAEORNETのデータを用いて、AgによるAOT550推定結果の確認を行った結果を図2.14に示す。比較期間は2019年3月から2020年2月である。CAI-2の品質フラグは0(収束条件0.07未満)、CAI-2の5x5ピクセルの平均、AERONETのCAI-2の観測時間に最も近い観測(1.2時間以内)で比較を行い、Ag0.05刻みに比較を行った。CAI-2のサクセスクライテリアはAg<0.07で定義されており、AERONETでの比較の結果、Ag<0.1ではAOT550はRMSD<0.1、相関係数R>0.8で推定できており、Agが大きくなるにつれて、AOT550の推定誤差が大きくなっていることが確認できた。PM_{2.5}やBCの算出の際にはAgの範囲についても考慮する必要があると言える。

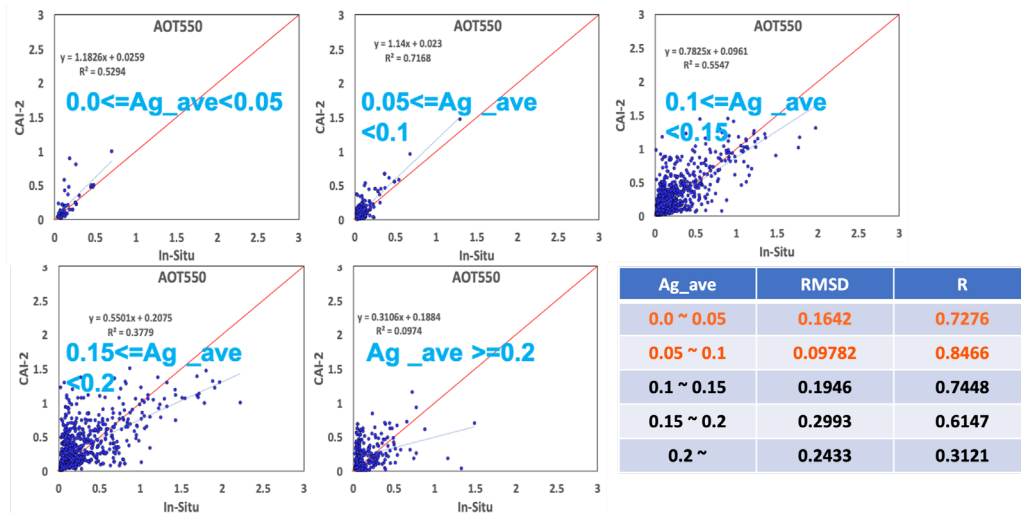


図2.14 CAI-2とAERONET地上観測のAOT550の地表面反射率(Ag)の範囲別の比較。散布図の横軸はAERONETのAOT550、縦軸はCAI-2のAOT550の値。右下図は、Ag範囲ごとの平均二乗偏差(RMSD)と相関係数(R)を示す。

CAI-2のオングストローム指数(AE)、地上観測SKYNETとの粒径分布の比較を行った結果を図2.15に示す。SKYNET千葉大学サイト2009、2011、2012、2014、2015年の5年間分のデータとCAI-2エアロゾル導出アルゴリズムで仮定しているエアロゾルモデルの粒径分布について比較を行った。SKYNETは粒径分布が導出されているが、CAI-2のエアロゾルモデルに合わせて、2山の対数正規分布を仮定し、月平均のモード半径($r_{\text{mod}1}$ と $r_{\text{mod}2}$)とその分散(S_1 と S_2)をフィッティングにより算出した。図2.15より、年平均のエアロゾル粒径分布(左図)と比較すると、CAI-2で設定している粒径分布($r_{\text{mod}1} = 1.75 \times 10^{-5}$ cm, $r_{\text{mod}2} = 4 \times 10^{-4}$ cm, $S_1 = 2.24$, $S_2 = 3$)は大きいことがわかる。地上観測される粒径分布は月年変動しており定まった値はない(右図)。CAI-2のAEバイアスを見積もるため、地上観測で得られた最小と最大の粒径分布から、AEのバイアスの範囲を見積もった(表2.4)。結果より、最大で約-0.5のAEのバイアス(過小評価)を生じることがわかった。千葉大学以外のSKYNETサイトについて、2015年から2018年について、粒径分布のモード半径の平均と分散の算出結果を図2.16に示す。図のように、サイトによって粒径分布は大きく異なり、同一の粒径分布のエアロゾルモデルの使用により、AEのバイアス誤差が生じることがわかる。よりAEの精度を向上させるためには、地上観測データを用いて、領域別に特徴的な粒径分布を許容誤差の範囲で設定する必要があると考える。

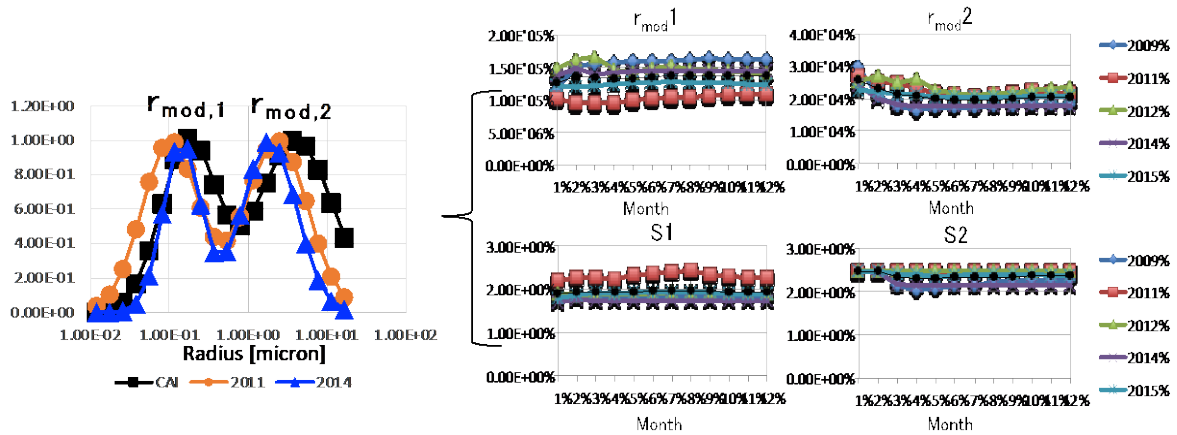


図2.15 CAI-2で設定しているエアロゾル粒径分布とSKYNET千葉大学サイト（2011、2014年）の年平均の粒径分布（左）とSKYNET千葉大学サイト(2009、2011、2012、2014、2015年)の月平均の粒径分布（右）。月平均の粒径分布は2山の対数正規分布を仮定し取得。 r_{mod1} と r_{mod2} はモード半径、 S_1 と S_2 はその分散をそれぞれ示す。黒線は5年平均の月平均値を示す（右）。

表2.4 CAI-2の粒径分布とSKYNETの粒径分布（5年平均、 r_{mod} が最小と最大）の取り得るÅngström指数(AE)の最小値と最大値

	r_{mod1}	S_1	r_{mod2}	S_2	AE(最小)	AE(最大)
CAI-2	1.75E-05	2.24	4.00E-04	3.00	-0.02	1.40
5年平均	1.25E-05	1.90	2.10E-04	2.40	-0.08	1.84
最小 r_{mod}	1.03E-05	2.31	1.84E-04	2.20	-0.12	1.76
最大 r_{mod}	1.56E-05	1.85	2.35E-04	2.48	-0.07	1.66

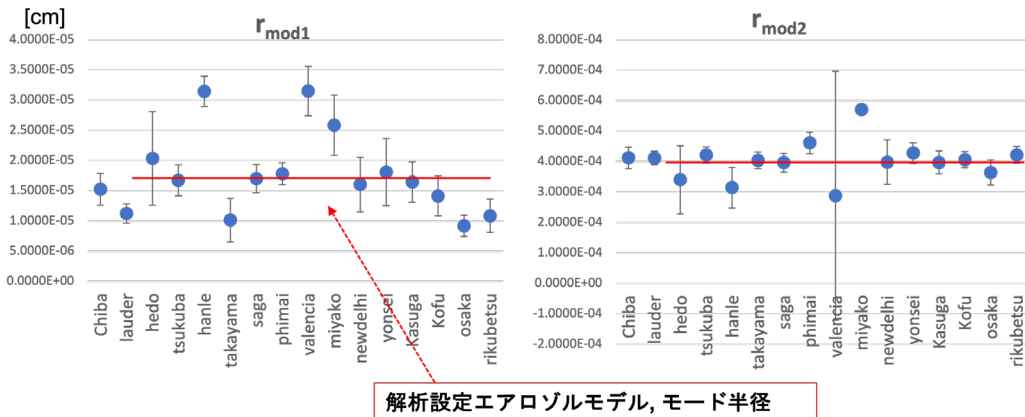


図2.16 2015年から2018年のSKYNETサイト（横軸）の粒径分布のモード半径 (r_{mod1} と r_{mod2}) の平均（点）と分散（エラーバー）。赤線はCAI-2エアロゾルモデルのモード半径を示す。

また、インド宇宙研究機関のMukunda M Gogoi博士の協力を得てインド地上観測ARFINETとCAI-2のBCの比較を行った。ARFINETでは地上サンプリングによりBCの観測を行っている。CAI-2のBC解析結果を2019年3月～2020年4月の期間比較した結果を図2.17に示す。北インドのBCが多い場所・時期において、相関係数が0.74以上で65%以上が差2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内で一致し、一方で、BCが少ない時期や場所では差異が大きい結果となった。本結果は、AOT550がある程度（本研究中では>0.3）大きい場所でSSA340の値に相関がある結果と一致する。また、仮に $\text{PM}_{2.5}$ の20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の観測精度が達成できれば目標制度10%を満たす結果である。

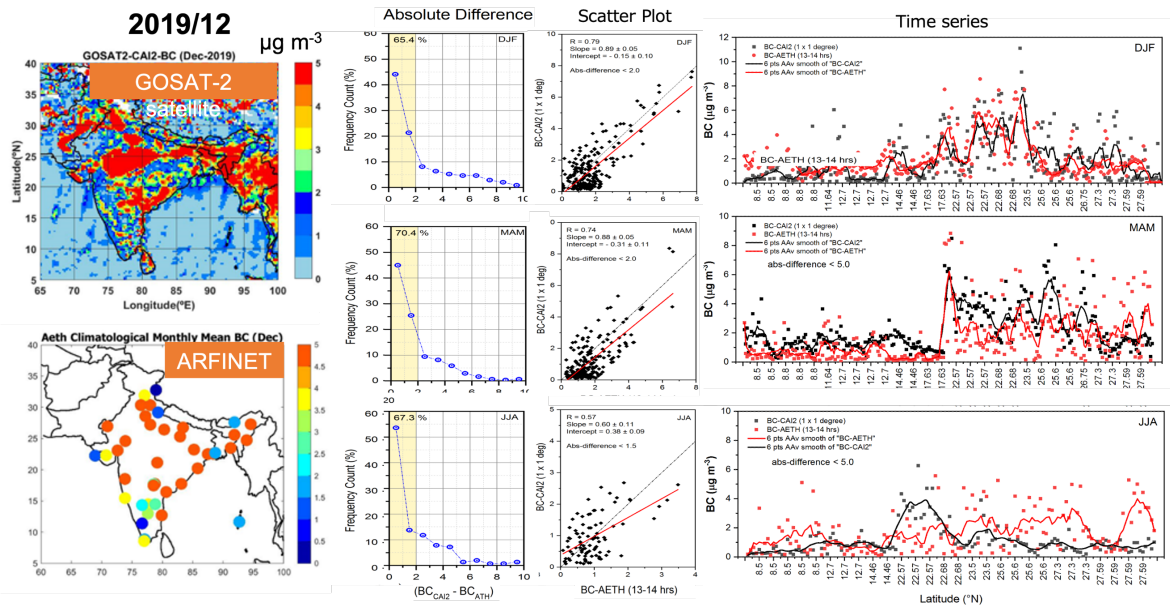


図 2.17 2019年から2020年のGOSAT-2/CAI-2とARFINETの比較。左から、CAI-2とARFINETの2019年12月のBC分布、CAI-2とARFINETのBCの差異、散布図、時系列分布（黒:CAI-2、赤:ARFINET）。BC分布(左)以外について、上段、中絶、下段はそれぞれ、時期DJF、MAM、JJAを示す。

(1)～(5)の結果より、PM_{2.5}とBCの検証のための比較として、微小粒子のエアロゾル光学的厚さとエアロゾルの高度情報、及び相対湿度が重要なパラメーターとなり、サブテーマ1の結果とも整合する結果が得られた。検証の際に重要となる中間プロダクトである、エアロゾル光学的厚さ(AOT)とオングストローム指数(AE)、BC導出の際に重要な一次散乱アルベド(SSA)についての誤差要因を調査し、数値計算により、それぞれ、エアロゾル粒子の複素屈折率実部(mr)と観測輝度精度、mrと粒径分布と相対湿度、複素屈折率虚部(mi)と相対湿度が主要な誤差要因となり、それぞれの寄与をリストにまとめサブテーマ1に提供した。地上観測と衛星観測によるCAI-2のエアロゾル特性(中間プロダクト)の比較結果より、AOTは過大評価、AEは過小評価傾向(AOT>0.3で相関、バイアスとバラツキは-0.07と0.34)であり、CAI-2エアロゾルモデルの粒径分布の過大設定のためAEに最大で-0.5のバイアスが生じることがわかった。また、複数観測点の粒径分布の調査により時期や地域差があるため、精度向上のために季節・領域別のエアロゾルモデルが必要であることが示唆された。SSAは光吸収に感度のある紫外バンドで相関がみられ、AOT>0.3の場合両バンドでバイアスとバラツキは-0.01と0.035程度であった。AOT過大評価・誤差要因としては、輝度校正の他、地表面状態や地表面反射率(Ag)の値やその誤差が考えられる。特に、他衛星との比較により海洋と砂漠等反射率の高い場所で、AOTがそれぞれ過大・過小傾向であることがわかり、適切な波長での反射率を考慮したアルゴリズムの改良が必要であることを示す結果となった。

以上の結果より、エアロゾル特性の精度向上、ePM_{2.5}・BCの算出精度の向上に向けて、本研究より以下の改善を提案する

- エアロゾル光学的厚さの導出精度の改善：
 - 海上エアロゾルの過大評価について、現在海洋射出光を考慮したアルゴリズムの導入(準備中)(Shi et al., IEEE-TGRS 2020)⁸⁾
 - 砂漠域の高反射率省域での過小評価について、解析使用波長を地上面反射率が低い紫外～可視に限定したアルゴリズムへの改良
 - 継続した地上・他衛星との相互構成による輝度校正係数の最適化
- オングストローム指数(AE)の過小評価傾向：
 - 地上観測結果を考慮した領域別エアロゾルモデルの導入。
- ePM_{2.5}とBC算出：

→ 境界層高度などの高度情報と水蒸気情報の導入及びサブテーマ1による、fAOD、AAODとPM_{2.5}、BCを紐付ける係数の導入の検討

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマの計画であるTANSO-CAIの観測方式及びアルゴリズムの詳細について2回の勉強会を開催し他サブテーマと知見を共有した。数値実験により、CAI-2エアロゾル特性導出アルゴリズムを用いて、PM_{2.5}とBCの導出に重要なエアロゾル特性（中間プロダクト）の誤差解析を実施しリストにまとめた。また、PM_{2.5}とBCの導出に重要な変数について機械学習を用いた感度解析を実施することで、地上観測で重要となる変数の調査を行った。数値実験と感度解析の結果はリスト（例えば図2.6）に纏め、サブテーマ1と共有した。また、GOSAT-2のエアロゾル解析を行い、地上観測との比較、集中観測へのデータ提供を行った。他衛星の比較ではVIIRS、MODIS、Himawari-8のデータを整備し、CAI-2エアロゾルプロダクトの比較を実施した。誤差・感度解析、および地上観測や他衛星データとの比較により、エアロゾル特性の誤差要因や、BC、PM_{2.5}の検証・算出の際の重要変数を定量的に評価した。結果はリストともに他のサブテーマと共有し目標を達成した。さらに、各比較を通して、CAI-2エアロゾル導出アルゴリズムの現在の問題点とアルゴリズムの改善点について識別を行い改良点の提案を行った。本研究結果より、アルゴリズム検証や改良に繋がる重要な知見が得られたと考える。

6. 引用文献

- 1) Hashimoto, M., and Nakajima, T., Development of a remote sensing algorithm to retrieve atmospheric aerosol properties using multi-wavelength and multi-pixel information. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Vol. 122, Issue 12, pp6347-6378, 2017.
- 2) Nakajima, T., and M. Tanaka, Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 35, 13-21, 1986.
- 3) Nakajima, T., and M. Tanaka, Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 40, 51-69, 1988.
- 4) Sekiguchi, M. and T. Nakajima, A *k*-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109, Issues 17-18, 2779-2793, doi:10.1016/j.jqsrt.2008.07.013, 2008.
- 5) Shettle, E. P., and R. W. Fenn, Models of aerosols of lower troposphere and the effect of humidity variations on their optical properties. AFCRL Tech. Rep. 79 0214, Air Force Cambridge Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, 100 pp., 1979.
- 6) Ota, Y., A. Higurashi, T. Nakajima and T. Yokota, Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 111, doi:10.1016/j.jqsrt.2009.11.021, 878-894, 2010.
- 7) Kaufman, Y. J., Satellite sensing of aerosol absorption, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 92(D4), 4307-4317, 1987.
- 8) Shi, C., M. Hashimoto, K. Shiomi and T. Nakajima, Development of an Algorithm to Retrieve Aerosol Optical Properties Over Water Using an Artificial Neural Network Radiative Transfer Scheme: First Result From GOSAT-2/CAI-2, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 12, pp. 9861-9872, doi: 10.1109/TGRS.2020.3038892, 2021.

II-3 GOSAT-2のPM_{2.5}/BCデータ評価手法の提案

国立研究開発法人国立環境研究所

地球システム領域	衛星観測研究室	森野 勇
地域環境保全領域		高見 昭憲
環境リスク・健康領域	統合化健康リスク研究室	藤谷 雄二

[要旨]

本サブテーマでは、大気中の微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 及び黒色炭素 (BC) 量の推計量の評価に関して、本推進費の研究における評価法の開発と、GOSAT-2 プロジェクトの事業として行っている評価とを整理した。この結果、GOSAT-2 プロジェクトとして行う検証内容と本推進費で行う内容を明確に分けることが出来た。GOSAT-2 プロジェクトとしては、一般公開とサクセスクライテリア達成に向けた単純な検証作業のみを実施することが分かった。本推進費で行おうとしている項目は、GOSAT-2 プロジェクトのみでは、マンパワーと予算が限られており、実施が困難であるが、精緻な検証のためには重要であることが分かった。さらに、本推進費で網羅する基本的な検証から精緻な検証の手法が達成できれば、国際観測網に展開させる方法として提案が期待出来ることが分かった。本推進費のサブテーマ1がサブテーマ2と協力して評価法を検討した結果、PM_{2.5}及びBCが高濃度な地域では地上測定データとの比較により衛星データの評価が可能であり、一方で濃度が低い地域では比較が極めて困難であるが、本推進費で開発した評価手法は濃度が低い地域においても比較可能な非常にユニークな手法であることが、明らかとなった。この結果を受けて、国際観測網に展開させる方法として、スカイラジオメーターとMAX-DOASの両方を配備する観測網A-SKYを提案した。

また、関連する装置を用いた通年連続観測や集中観測及びアルゴリズム誤差解析等のサポートとして、(1) 集中観測期間における標準法によるPM_{2.5}測定と可搬型FTSによる大気微量成分の気柱観測、(2) 国立環境研究所におけるPM_{2.5}およびPM_{2.5}中ブラックカーボンの連続測定、(3) アルゴリズム誤差解析等のサポートとしての検証データ収集とアルゴリズム勉強会及びCAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せを実施した。(1)と(2)では、同一地点における測定法間の比較において、PM_{2.5}計測の精度は約23%以内(テフロンフィルタによる標準法を用いた場合と等価装置との相違)であった。また、PM_{2.5}中BCの測定法には標準法がなく、装置の機種の違いによる固有の器差があることから、真値を得ることは難しいが、本研究で使用した装置の範囲内ではBCは平均値から±50%以内(今回用いた6手法の相違)で測定された。上記の地上観測結果を踏まえた国際観測網展開への提言をまとめた。キャンペーン観測における可搬型FTS観測では、3回目は千葉とさいたまにそれぞれ設置して観測を行ったため、観測時の気象状況と2ヶ所の濃度の時系列変化を組み合わせ、より詳細な大気微量成分の時空間変動を理解することが可能となった。この結果とサブテーマ1で行われたエアロゾル、PM_{2.5}とBC及び大気汚染物質の観測結果を総合的に解析することにより、GOSAT-2プロダクトの一般公開後のより詳細な検証解析に利用することが期待される。(3)からは、ウェブページ上で公開されているPM_{2.5}やBCの観測データを、PCを用いた自動収集機能を活用して、効率的に収集し、検証解析に利用した。アルゴリズム勉強会及びCAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せでは、プロジェクトで行っている検証解析、本推進費で行っている研究開発の状況を共有することにより、アルゴリズム開発において懸案となっている項目、地上データによる評価において必要なGOSAT-2 CAI-2データ項目などについて理解が進み、プロジェクトと研究のギャップを埋めることに大きく貢献することが出来た。

1. 研究開発目的

平成30年10月に打上げられた温室効果ガス観測技術衛星2号「いぶき2号」(GOSAT-2)は、雲・エアロゾルセンサ2型(TANSO-CAI-2)を搭載し、大気中の微小粒子状物質(PM_{2.5})及び黒色炭素(BC)量の推計を行っ

ている。宇宙航空研究開発機構(JAXA)、環境省、国立環境研究所(NIES)が、GOSAT-2を推進するプロジェクト(GOSAT-2プロジェクト)を共同で推進している。GOSAT-2プロジェクトの事業として、PM_{2.5}とBCの公開とフルサクセスクライテリアの達成に向けて評価を進めており、一方で本推進費の研究においても新たに評価法を開発するが、本推進費の研究を明確化するために、それぞれの評価項目を整理する必要がある。更に、本研究で開発した評価手法を国際観測網に展開させる方法論として確立・提案することを目指す。このため、GOSAT-2プロジェクトの検証事業での最新の状況を共有し、議論を行い、表にまとめることを行う。また、BC計設置などの関連の通年連続観測や集中観測及びアルゴリズム誤差解析等のサポートを行うことを目指す。この結果、GOSATプロジェクトと推進費の研究の行う評価項目の明確化、更に、サブ1で行う評価方法の開発とサブ2で行うアルゴリズム誤差解析への貢献が期待される。また、確立・提案する方法論は、GOSAT-2のみならず、今後の大気汚染観測衛星への活用が期待される。

2. 研究目標

サブテーマ1で開発した評価方法を国際観測網に展開させる方法を提案する。この最終目標を達成するために、GOSAT-2 プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている方法を、サブテーマ1が開発した評価方法と対比可能な形でリストを作成して整理する。

3. 研究開発内容

GOSAT-2プロジェクトの検証事業での最新の議論を纏めると共に、GOSAT-2のフルサクセスクライテリアを念頭に、BC計設置などの関連の通年連続観測や集中観測及びアルゴリズム誤差解析等のサポートを行う。更に、本研究で開発した評価手法を国際観測網に展開させる方法論として確立・提案する。具体的には下記の通りである。

(1) GOSAT-2 プロジェクトの検証事業での最新の議論の取り纏めと本研究で開発した評価手法を国際観測網に展開させる方法論としての確立・提案

GOSAT-2 プロジェクトの事業としての検証作業は、GOSAT-2 検証計画・検証実施計画を基に、プロジェクトのマンパワーと予算を考慮し、実施されることとなっている。しかし、GOSAT-2 検証計画と検証実施計画にはGOSAT-2 サクセスクライテリアと検証作業の関係が記載されているが、事業と研究の切り分け、具体的な検証作業への落とし込みが不十分であると言える。そこで、サブテーマ1と共同で、GOSAT-2 検証計画・検証実施計画の内容の把握、GOSAT-2 サイエンスチーム会合の内容と議論の共有を行い、キックオフ会合、アド会合、アルゴリズム勉強会、GOSAT-2 CAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せ、メールでの議論を通じて、事業と研究の切り分け、検証作業への落とし込みを行った。更に、サブテーマ1と共同で本研究において開発した評価手法を国際観測網に展開させる方法論を提案した。

(2) 集中観測期間における標準法によるPM_{2.5}測定と可搬型FTSによる大気微量成分の気柱観測

サブテーマ1と連携して、日本の標準測定法でPM_{2.5}を測定するために、夏季と冬季に集中観測を実施し、国立環境研究所マイクロナノ粒子実験棟の地上裏(つくば市)および千葉大学工学系総合研究棟1屋上(千葉市)において、PM_{2.5}のフィルタ捕集を行った。本研究ではPM_{2.5}の捕集は各地点において、標準法に基づくFRM(Federal reference method) サンプラ(Model 2000、Thermo社製あるいはR&P社製)を2台ずつ用いて行った。本体は屋外に設置し、SPMインレットを地面あるいは建物の屋上から約3 mの高さになるように設置した。その下流にPM_{2.5}カット用のVSCサイクロンを経てフィルタに捕集した。サンプリング開始時刻は基本的に11時、終了時刻は次の日の10時半とし、23.5時間、16.7 L min⁻¹で採気した。週末は両サンプラとも、金曜日の11時から翌週月曜日の10時半までの捕集とし、71.5時間の捕集時間とした。捕集に用いたフィルタはテフロンフィルタ(FP-500、住友電工:47 mmφ)、石英フィルタ(2500QAT-UP、Pallflex:47 mmφ)である。

フィルタ試料は捕集された粒子質量を求めるために用いた。粒子質量はサンプリング前後のフィルタ

を含めた秤量値の差から算出した。秤量は温度21.5℃、相対湿度35%に調整されたチャンバ (CHAM-1000、HORIBA) 内で、電子天秤 (UMX2、Mettler Toledo、最小表示0.1 μg) を用いて行った。1つの試料につき2回秤量を行い、その平均値を秤量値とした。2回の秤量値の差が2 μgを超えた場合には再度秤量を行い、許容誤差以下となった2つの秤量値を平均することとした (ただし実際の繰り返し測定の違いは最大で0.6 μgであった)。粒子質量を採気量で除して大気中濃度を得た。石英フィルタはフィルタ自体に吸湿性があるため、秤量の24時間以上前からチャンバ内に入れてから秤量作業を行った。石英フィルタ試料はさらに元素状炭素 (EC) の分析を含む炭素分析に供し、熱分離・光学補正式炭素分析計 (DRI Model 2001 Carbon Analyzer) を用いて行った。Carbon Analyzerでは段階的に試料を加熱し、揮発温度の差を利用して有機炭素 (OC) とECを分離・定量する。また分析中に試料の反射光・透過光をモニタすることで、OCの炭化 (PyOC) 分を補正する。分析条件にはIMPROVEプロトコル (OC1: 120° C、OC2: 250° C、OC3: 450° C、OC4: 550° C (以上、He雰囲気)、EC1: 550° C、EC2: 700° C、EC3: 800° C (以上、2%O₂/98%He雰囲気)) を用い、ECは EC1 + EC2 + EC3 - PyOCとした。

更に、集中観測がより総合的な観測キャンペーンとなるように、2019年、2020年は可搬型FTS (Fourier Transform Spectrometer、EM27/SUN)¹⁾ を千葉大学の工学系総合研究棟屋上に設置し、2021年は、これまでの2年の観測結果を踏まえて都市大気空間変化を明確に捉えることを目指し千葉大学に加えてさいたま市秋ヶ瀬公園に設置して、平日晴天時に大気微量成分の吸収をうけた太陽直達光スペクトルを測定した。2021年は、規模が大きくなったため、JAXAのEM27/SUNを借りて、推進費以外のJAXAとNIESの関係者 (塩見慶氏、大山博史氏、Frey M. Matthias氏、堀晃浩氏) の協力を得て実施した。EM27/SUNは、波数分解能0.5 cm⁻¹で、1 scan 6秒でデータを取得し、10 scanで1測定として平均しスペクトルを保存した。10:00~15:30の間を測定し、スペクトルを解析することにより、温室効果気体のCO₂、CH₄、H₂O、大気汚染関連気体のCOのカラム平均濃度を導出することが出来る。図3.1に観測機器の配置と観測の様子を示す。観測実施日は、2019年は冬期の11月18日、11月20日、11月21日、11月29日、12月3日、12月4日の6日であった。2020年は冬期の11月30日、12月1日、12月4日、12月7日、12月9日の5日であった。2021年は、千葉とさいたまで同時に観測した日は、東京オリンピック前後の7月19日、7月20日、7月28日、7月29日、8月4日、8月5日、8月10日、8月11日、8月19日の9日であった (千葉みの観測は、7月16日、7月21日、7月26日、8月3日、8月6日、8月18日も実施した)。



図3.1 2021年キャンペーン観測における可搬型FTS及びTCCON FTSの配置と観測の様子

(3) 国立環境研究所における PM_{2.5} および PM_{2.5} 中ブラックカーボンの連続測定

国立環境研究所大気モニター棟などにおいてPM_{2.5}および三機種によるPM_{2.5}中ブラックカーボン (BC) の連続測定を行った。本研究では2019年11月1日から2022年3月31日の間の測定結果を示す。PM-712 (紀本電子) は、PM_{2.5}をβ線吸収方式(線源:¹⁴C)で連続測定する自動計測器であり、環境省が実施した「標準測定法との等価性の確認のための並行試験」において、「標準測定法と等価性を有する」と評価された機種である。PM_{2.5}を1時間に1スポットで採取し測定し、1時間値を出力する。PM_{2.5}はフィルタや粒子の吸湿により質量濃度に影響し、標準法では相対湿度35%の環境下で秤量するため、実環境では湿度の影響を取りのぞく必要がある場合がある。PM-712のテープろ紙には、吸湿、吸着の少ないふっ素樹脂ろ紙を採用し、「スマートカルク」機能により、吸湿・発散による質量の変動を測定時の試料湿度から計算し、標準法に等価換算したPM_{2.5}濃度を出力している。また除湿のための試料加熱を行わないので、半揮発性物質の飛散が抑制される。さらにOBC(光学的ブラックカーボン)センサを微小粒子側に搭載し、反射型近赤外光散乱方式によりOBC濃度が得られる。2021年4月からは簡易PM_{2.5}センサ²⁾も使い、モニタを行った。

一方、BCは光吸収法によるCOSMOS (MODEL 3130、カノマックス) とマルチアングル吸光光度法によるMAAP (5012、Thermo Scientific) によって測定した。Petzold et al. (2013)³⁾ の定義によれば、これらはEquivalent BC (eBC) と表現されるBCである。COSMOSはBCを含む粒子を加熱処理した後に連続的にグラスファイバフィルタ上に捕集し、LED波長565 nmの光吸収量の変化をフォトダイオードで検出し、質量吸収係数(10 m²/g)を用いて濃度に換算する。最小検出限界は1分値で0.05 μg/m³であり、流量は0.8 L/minである。特徴は捕集部の前にある加熱抽出部である。加熱抽出部でサンプル大気を加熱した後、誤差要因となる散乱性エアロゾルを除去してBCを計測することができる。なお、COSMOSは通年ではなく、特定期間のみ稼働である。MAAPは連続的にグラスファイバフィルタ上に捕集し、LED波長670 nmの光源を使い、散乱光と光吸収量を測定し、質量吸収係数(10 m²/g)を用いて濃度に換算する。最小検出限界は2分値で0.01 μg/m³である。特徴は一般に採用されている透過光式計測方法では、粒子のサイズや形状による光の反射又は散乱の影響を受けるが、MAAPでは光の吸収のみならず、複数の散乱角度における散乱光も測定し、捕集された粒子とフィルタ層での多重散乱を考慮した放射伝達計算を行いBCを算出している。COSMOSおよびMAAPのデータはそれぞれ5分値および1分値が記録されている。本研究では1時間で平均化して1時間値とし、フィルタ法との比較、および機種間の比較を行った。さらに、2020年夏季以降の集中観測期間に合わせて、つくば市国立環境研究所マイクロナノ粒子研究棟において、エサロメータ(AE33, MAGEE SCIENTIFIC) およびスス粒子エアロゾル質量分析計(SP-AMS, Aerodyne) によるeBCおよびrefractory BC(rBC)の計測も行った。エサロメータは0.8 L/minで吸引してサイクロンによりPM_{1.0}を50%カットを行った上で連続的にテトラフルオロエチレンでコーティングされたグラスファイバフィルタ上に捕集する。フィルタ上の堆積された粒子によって生じる波長370-950 nmの間の7波長の光の光吸収量の変化をフォトダイオードで検出し、質量吸収係数(7.77 m²/g@870 nm)を用いてBC濃度に換算する。主に本稿ではBC以外の吸収の寄与が小さい波長870 nmの測定結果を報告する。SP-AMSによるrBC測定は、装置内部において、波長1064 nmのNd:YAG 連続発振型レーザーにより、多光子イオン化やプラズマ化が起こらないレーザー強度においてレーザー誘起白熱法により光吸収性のrBCを含むエアロゾルを蒸発させる。蒸発された成分は、電子衝撃法でイオン化されて高分解能飛行時間型質量分析計で測定される。eBCとは異なる測定原理で測定される。試料空気は3 L/minにてPM_{2.5}を50%カットしたのち、さらに夏季にはナフィオンドライヤを通気させて乾燥させ、装置には0.06 L/minで導入した。装置内部の粒子透過率を考慮すると、測定対象粒径はPM_{1.0}となる。なお、エサロメータ、SP-AMSともにPM_{1.0}の測定であるが、BCが存在する主要な粒径域はPM_{1.0}に含まれるため、測定対象にPM_{2.5}やPM_{1.0}の違いがあってもBCとしての濃度には大きく影響しない。

(4) アルゴリズム誤差解析等のサポートとしての検証データ収集とアルゴリズム勉強会及びCAI-2 PM_{2.5} 及びBCの比較結果の共有に関する打合せ

アルゴリズム誤差解析等サポートして、国立環境研究所所有のスカイラジオメータ運用とweb page

で公開されているPM_{2.5}やBCデータの収集を行った。陸別、佐賀、ニュージーランドライダーの観測データを千葉大学環境リモートセンシング研究センターのSKYNET(スカイネット)サーバーに転送し、観測データからエアロゾル光学特性が導出され、これらのデータは千葉大学環境リモートセンシング研究センターのSKYNETウェブページで公開される。加えて、インターネットで公開されている膨大なPM_{2.5}やBCデータの収集も行った。収集する期間は、GOSAT-2プロダクトのデータ期間と合わせて2019年1月以降を対象とした。これらは、本推進費やプロジェクトでのアルゴリズム誤差解析や検証解析等に使用する予定である。

GOSAT-2 CAI-2からのPM_{2.5}及びBC導出アルゴリズムについて理解を深め、地上観測データ等を用いてどのように検証を行うかが、GOSAT-2プロジェクト及び本推進費では重要な点となっている。しかしながら、地上測定、地上及び衛星リモートセンシング等の幅広い研究者がGOSAT-2の検証に関わっているが、検証手法と物理量の定義・単位が共有認識化されていない。このため、サブテーマ1及び2と連携して、計2回(1回目:9月13日(金)10:00~12:00、場所:国立環境研究所地球温暖化研究棟第1会議室、2回目:2019年12月4日(水)10:00~12:00、場所:千葉大学環境リモートセンシング研究センター1階会議室)、PM_{2.5}及びBCアルゴリズム勉強会を行った。

PM_{2.5}及びBCアルゴリズム勉強会の後、アルゴリズムGOSAT-2 L2プロダクトの処理が進み、アルゴリズム誤差解析、GOSAT-2プロジェクトの事業における評価、本推進費で開発した評価法による評価が始まった。GOSAT-2 STM等のオフィシャルな場で行えば、最初に行うべき科学的・技術的な情報共有と議論が出来なくなることが想定されるために、本推進費の研究活動の一環として、CAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せを、2021年1月14日(木)14:00~17:00に、オンラインで実施した。

4. 結果及び考察

(1) GOSAT-2 プロジェクトの検証事業での最新の議論の取り纏め

サブテーマ1と共同で、検討を行った結果を表3.1にまとめた。表から分かるようにGOSAT-2プロジェクトとして行う検証内容と本推進費で行う内容を明確に分けることが出来た。GOSAT-2プロジェクトとして、一般公開とサクセスクライテリア達成に向けた単純な検証作業のみを実施することが分かる。本推進費で行おうとしている項目はGOSAT-2プロジェクトのみでは、マンパワーと予算が限られており、実施が困難である。さらに、本推進費で網羅する基本的な検証から精緻な検証の手法が達成できれば、国際観測網に展開させる方法として提案が期待出来る。本推進費で行おうとしている項目には、GOSAT-2プロダクトの活発な利用のために必要な、より精緻な検証作業項目が網羅されていることが分かる。なお、千葉サイト、福江サイト、春日サイト、仙台サイト、ピマイサイト、ハルドワニ、ソウルでは、スカイラジオメーターとMAX-DOASの同時観測サイトであり、千葉サイトと福江サイトにおいてはPM_{2.5}計とBC計も既に配備されている。本推進費のサブテーマ1がサブテーマ2と協力して評価法を検討していった結果、PM_{2.5}及びBCが高濃度な地域では地上測定データとの比較により衛星データの評価が可能であり、一方で濃度が低い地域では比較が極めて困難であるが、本推進費で開発した評価手法は濃度が低い地域においても比較可能な非常にユニークな手法であることが、明らかとなった。この結果を受けて、国際観測網に展開させる方法として、スカイラジオメーターとMAX-DOASの両方を配備する観測網A-SKYを提案した(図3.2、更にライダーがあれば望ましい)。なお、PM_{2.5}やBCは主にPBL内に存在するので、ADnetのライダーがそのまま利用でき、ハルドワニ以外は既にライダーが設置され観測が行われている。つくばもA-SKYの観測機器とライダーが揃っているため、更なる観測網の拡大が見込まれる。

表3.1 GOSAT-2のPM_{2.5}およびBCプロダクトの検証観測リスト。本推進費開始以前のGOSAT-2プロジェクトのリスト^aと本推進費プロジェクトが提案するリストを示す。

項目	カテゴリー (直接 ^b /間接 ^c /補助 ^d)	GOSAT2 プロジェクト ^a	本推進費 プロジェクト
PM _{2.5} 計	直接	○	○
BC計	直接	○	○
PM _{2.5} 計とBC計による同時観測 ^e	直接	×	○
スカイラジオメーター(サンフォトメーター)	間接	○	○
スカイラジオメーター(サンフォトメーター) の高次プロダクト ^f	間接	×	○
MAX-DOAS ^g	間接	×	○
スカイラジオメーター(サンフォトメーター) とMAX-DOASの同時観測	間接	×	○
「直接」「間接」の同時観測 ^h	直接+間接	×	○
ミーライダー ⁱ	補助	×	○
「直接」「間接」「補助」の同時観測 ^j	直接+間接+補助	×	○
「直接」「間接」「補助」の同時多点観測 ^j	直接+間接+補助	×	○

^aプロダクトリリースにおけるデータ質確認及びサクセスクライテリア達成評価のためのリスト。本推進費開始時点(2019年4月)の暫定案。本推進費プロジェクトの進展・成果に伴い、さらなる精緻化が期待される。

^b直接比較により検証に役立つ観測を意味する。

^c間接比較(リトリバーブル計算の中間プロダクトの比較)により検証に役立つ観測を意味する

^d検証を補助する観測を意味する。

^eGOSAT2のPM_{2.5}およびBCプロダクトの検証に役立つPM_{2.5}/BC体積混合比の算出が可能となる。

^fGOSAT2のPM_{2.5}およびBCプロダクトの検証に役立つ微小エアロゾル光学的厚さや吸収エアロゾル光学的厚さのデータの活用を意味する。

^gGOSAT2のPM_{2.5}およびBCプロダクトの検証に役立つエアロゾル層高度情報だけでなく、湿度データ、さらには、複数方位角の観測を行えばエアロゾルの三次元分布データの取得が可能となる。SLCPと関連の深い二酸化窒素等の微量ガス(すなわちSLCF)の観測も可能となり、さらには他の最新大気化学衛星(TROPOMIやGEMS)データ検証も可能となる。

^hリトリバーブルされる中間および最終プロダクトを同時に評価することが可能となる。

ⁱGOSAT2のPM_{2.5}およびBCプロダクトの検証に役立つエアロゾル層高度情報の取得が可能となる。

^jGOSAT2のエアロゾルプロダクトの主要な誤差要因を網羅したロバストな検証が可能となることで、これまでにない精密な評価が可能となる。



図3.2 国際観測網に展開させるA-SKY観測網の配置図、A-SKYは、スカイラジオメーターとMAX-DOASの両方を配備することとし、ライダーがあれば望ましい。なお、千葉サイトと福江サイトにおいては、PM_{2.5}計とBC計も配備されている。

(2) 集中観測期間における標準法によるPM_{2.5}測定と国立環境研究所におけるPM_{2.5}およびPM_{2.5}中ブラックカーボンの連続測定

図3.3、図3.4に連続測定機による測定結果を示す。PM_{2.5}とBCは夏季に低く、秋季から冬季にかけて高くなる年間変動となっていた。2019年11月1日から2022年3月31日の間のPM712で測定されたPM_{2.5}の平均値は9.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。またBCは三機種で測定されたが、それらで測定された平均値は0.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。PM_{2.5}とPM_{2.5}中BCの比は人工衛星の解析から出てくる値であるため、人工衛星の結果と比較する上で必須となるパラメーターである。BC/PM_{2.5}比（BCは三機種の平均値）は冬季に高い傾向にあり、全期間平均値は0.06であった。

次につくばにおける全集中期間の測定結果を示す（図3.5）。PM_{2.5}およびBCあるいはECの濃度変化はおおむね一致していた。またそれぞれの測定対象内においても異なる測定手法であっても濃度変化はおおむね一致していた。フィルタ試料で得られたPM_{2.5}およびECの期間平均濃度は冬季の方が夏季よりも高い傾向にあり、また、EC/PM_{2.5}比、BC/PM_{2.5}比も冬季に若干高い傾向にあった。これらの季節間の大小関係は、先の長期連続測定の結果とも整合する傾向であった。

図3.6にPM_{2.5}の比較結果を示す。標準法に準拠するFRMサンブラによるフィルタ試料採取にはテフロンと石英の二種類の材質のフィルタを使用している。両者は相関係数0.98と極めて高かったが、系統的に石英フィルタ試料で得られた濃度が高く、テフロンフィルタ試料に比べて平均で0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （テフロンフィルタ試料の値の9%）高くなる結果であった。これは石英繊維へのガス吸着により、正のアーティファ

クトとなることが知られているが、その影響を受けたものと考えられる。よってテフロンフィルタで得られた試料が最も精度が高いと言える。等価性試験をクリアした連続測定機による測定結果はテフロンフィルタ試料の結果と高い相関 ($r = 0.95$) が得られ、一部のデータは1:1直線に乗る結果となったが、全体としては外れた場合が多く、テフロンフィルタ試料結果と比べて23%ほど過小評価となった。また、その傾向は季節によらなかった。サンブラや連続測定機のポンプの流量制御の精度はいずれも5%の誤差は許容されているが、本結果はそれ以上の乖離があったことになる。定期的にメンテナンスを行っているものの、使用過程で装置の状態が変化している可能性がある。一方、簡易センサの結果は、標準法に比べて過小評価となったが、等価性試験をクリアした連続測定機の結果との比較では遜色なかった。

PM_{2.5}測定の標準法 (FRMサンブラ) によりつくばサイトと千葉サイトで同時に捕集されたテフロンフィルタ試料の結果を比較した場合、測定場所による差 (10%) は同一地点 (つくば) で測定された結果の手法間の差 ($\pm 30\%$) よりも小さい結果となった。これらの結果は広域的なPM_{2.5}濃度分布が一様であり、手法間の違いよりも場所による差の方が小さくなる場合があることを示している。高濃度地域であると発生源のホットスポットにより局所的な影響を強く受ける場合があるため、本結果は低濃度である日本に特有の現象と考えられる。

図3.7につくばにおける異なるBC測定法の比較結果を示す。ECに対するMAAP、PM712およびCOSMOSによるBC測定値の相関係数は $r = 0.9$ 以上と高いものの、測定値はECに比べ30-50%ほど小さな値となった。また、PM712はMAAPに比べ20%ほど濃度が高い結果であったが、COSMOSは34%ほど小さな値となった。先行研究⁴⁾によるMAAPとCOSMOSの比較によれば、MAAPはCOSMOSに対して、清浄な地域で1.56倍、都市で1.8倍系統的に高い値になるという報告がある。よって、これらの系統的な差は、本研究で使用している装置の個体の問題ではなく、機種間の固有の差が主な原因であることが示唆される。エサロメータおよびSP-AMSの測定値は先の3機種と比べECとの相関が $r = 0.7-0.8$ ほどと低くなったものの、一定の相関関係は得られた。

図3.8に2020夏季、冬季、2021夏季の大気観測で得られた測定波長別のBC濃度を370 nmの濃度で規格化して示す。また参考として発生源データであるディーゼル排気粒子 (DEP)、木材燃焼 (wood)、稲わら燃焼 (rice straw)⁵⁾も示す。ディーゼル粒子や木材燃焼のように、比較的高温で燃焼し、発生する粒子が黒い場合は波長依存性は小さいが、稲わら燃焼のように比較的低温で燃焼して発生するブラウンカーボンを含む粒子の場合は波長依存性が大きくなる。冬季と夏季のつくば大気観測データは、それらの間にあると言えるが、冬季の方が若干波長依存性が大きく、秋季から冬季にかけて頻度が高くなる野焼きの影響によってバイオマス燃焼由来の粒子が若干混入している可能性がある。このように大気観測データでも測定波長の違いにより最大20%程度の相違が生じることから、eBC同士の比較には測定波長による違いも考慮に入れる必要がある。今回使用した機種においても測定波長が異なるものの比較であったが、測定されたBC濃度は互いに相関はあるため、質量吸収係数 (m^2/g) 等を適切に設定すれば絶対値は一致に近づくとと思われる。BCは標準測定法がないことから、本研究において真値を決定することはできないが、現状では全ての測定手法の平均値から $\pm 50\%$ の範囲に収まる結果となった。

図3.9に異なる測定地点で同時に採取した試料のECの地点間比較結果を示す。ECの測定場所の違いによる差 (最大30%) は、同一場所 (つくば) で測定された手法の違いによる差 ($\pm 50\%$) よりも小さい結果であった。PM_{2.5}と同様、比較的低濃度の環境で採取場所の近隣に大きな発生源がない場合の結果であり、必ずしも同一の結果が世界のどこでも当てはまる訳ではないことに留意が必要である。

図3.10につくばにおけるフィルタ法と連続測定機で得られたEC (BC)/PM_{2.5}比の比較結果を示す。なお、このBCはMAAP、COSMOS、PM712で得られた数値の平均値である。両手法が10%以内で一致する期間 (2020年冬季) はあったが、一致しない期間が大半であった (最大70%の相違)。分母のPM測定値であるPM712は標準法に比べて過小であったが、それ以上に分子のMAAP、COSMOS、PM712のBC測定値がECに対して過小となったことが大きな相違の原因となっている。図3.11に異なる測定地点で同時に採取した試料のEC/PM_{2.5}比の地点間比較結果を示す。EC/PMの測定場所の違いによる差 (最大20%) は同一場所 (つくば) で測定された手法の違いによる差 (最大70%) よりも小さい結果であった。両測定値と同様に、それらの比についても測定場所が異なる同一手法の結果同士の差の方が小さくなることが明らかになった。

本研究で得られた結果を総括すると、同一地点における測定法間の比較において、PM_{2.5}計測の精度は約23%以内（テフロンフィルタによる標準法を用いた場合と等価装置との相違）であった。また、PM_{2.5}中BCの測定法には標準法がなく、装置の機種の違いによる固有の器差があることから、真値を得ることは難しいが、本研究で使用した装置の範囲内ではBCは平均値から±50%以内（今回用いた6手法の相違）で測定された。以上の地上観測結果を踏まえた国際ネットワーク展開への提言として下記に記す。

- ・グランドトゥールースのための地上データとして、PM_{2.5}やBCの既存のデータベースを活用する場合は、測定手法や測定装置に系統的な差がある可能性があることから、測定手法や装置等の情報も合わせて収集する必要がある。

- ・自ら地上観測を実施する場合、装置トラブルの早期発見や欠測となることを防ぐため、測定値が異なるとしても複数装置による運営が望ましい。

- ・国際ネットワークで採用する装置は、地点間の比較がしやすいよう、精度の良い同一装置を展開することが望ましい。本研究では同一地点、同一機種の複数台による比較はできなかったが、同一装置内の個体差に関しても留意が必要である。

- ・同一手法による測定値の測定場所の違いよりも同一測定場所の測定手法による違いの方が大きいという結果は、日本のような比較的low濃度環境の場合に顕著であると予想される。この大小関係は国際ネットワーク展開に必要な測定精度と測定場所の代表性の関係性、すなわちどの程度の精度の装置を、どの程度の空間密度で設置して展開するか、最適な解の決定に関わる。この大小関係は濃度によっても異なることが予想されることから、高濃度環境においても複数の測定地点で同一手法での同時測定および同一地点での複数の手法により測定を行って結果を比較し、空間的ばらつき、測定手法間のばらつきの大小関係を確認する必要がある。

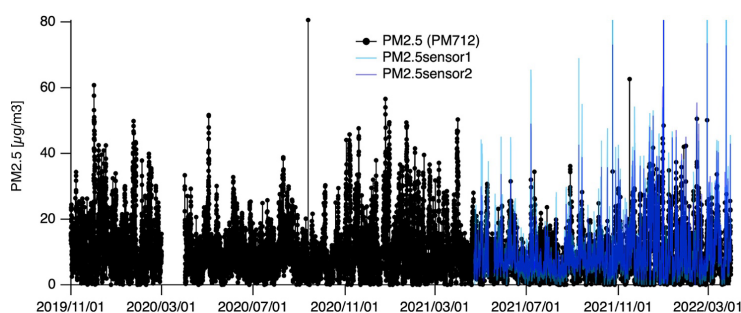


図3.3 等価法によるPM_{2.5}濃度測定結果（2019/11/1-2022/3/31・つくば）

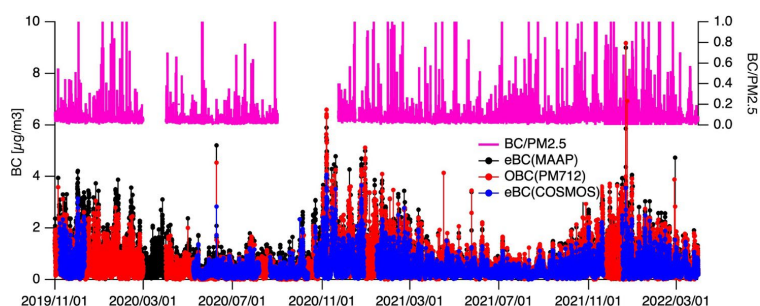


図3.4 PM_{2.5}中BC濃度およびPM_{2.5}に対する割合（2019/11/1-2022/3/31・つくば）

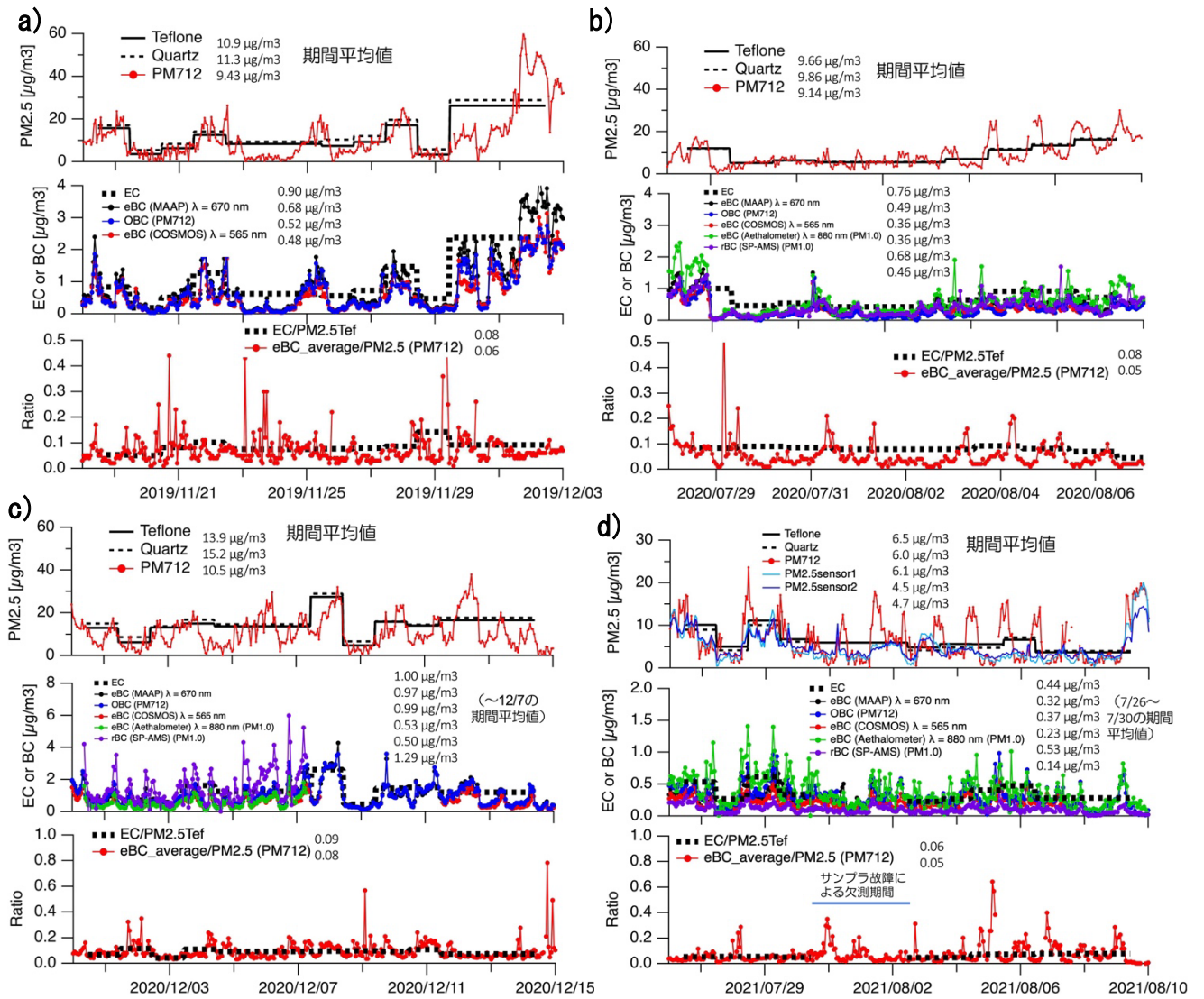


図3.5 異なる測定法の比較結果 (集中観測期間・つくば)
 上からPM_{2.5}、BC (EC)、BC (EC) /PM_{2.5}比
 a) 2019年冬季 b) 2020年夏季 c) 2020年冬季 d) 2021年夏季

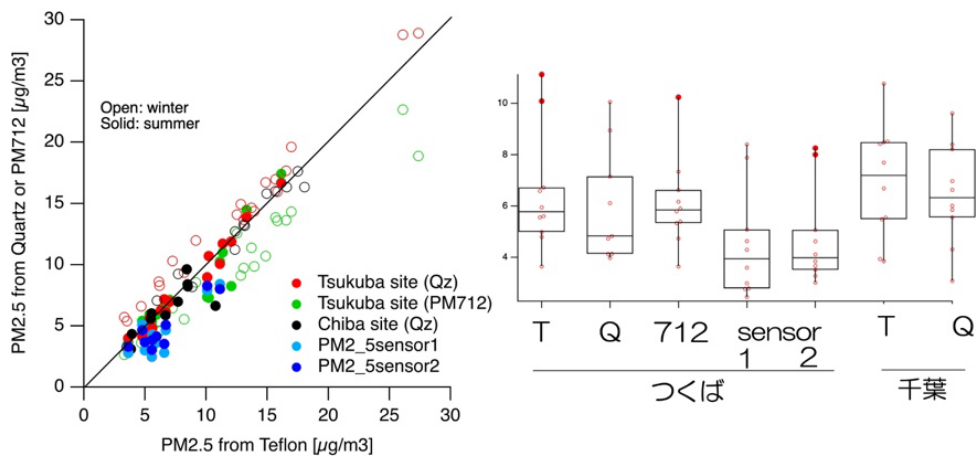


図3.6 異なるPM_{2.5}測定法および測定地間の比較結果 (集中観測期間)
 左：全集中観測期間データ 右：2021年夏季

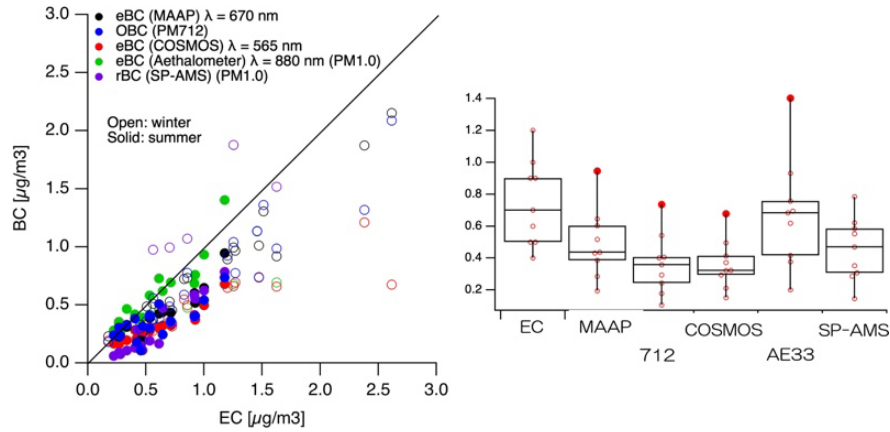


図3.7 異なるBC測定法の比較結果（集中観測期間・つくば）
 左：全集中観測期間データ 右：2021年夏季集中観測期間データ

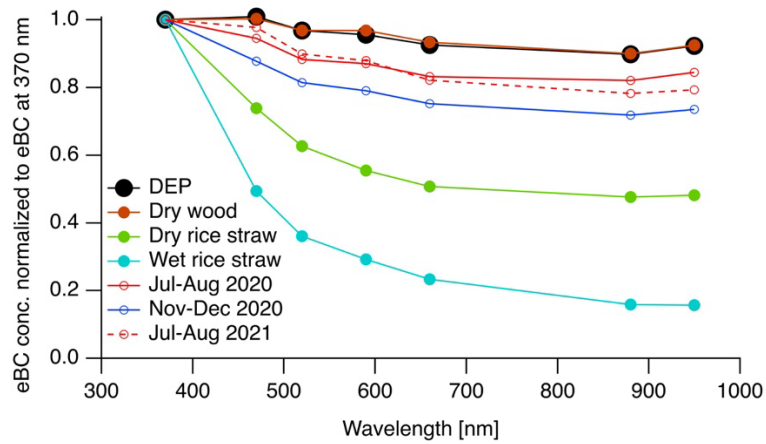


図3.8 つくば大気観測データおよび発生源粒子を対象としたエサロメータによる波長別BC濃度（370 nmの濃度で規格化） DEP：ディーゼル排気粒子；Wood：木材燃焼；rice straw：稲わら燃焼

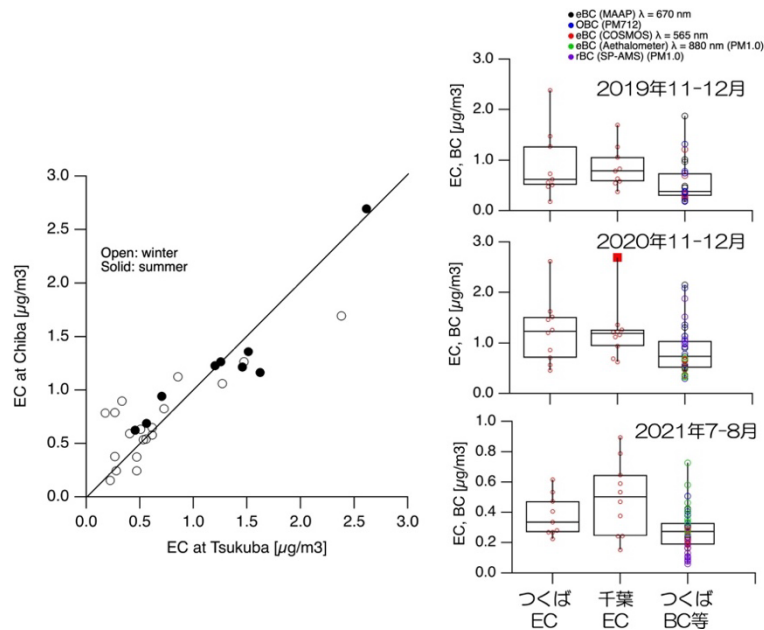


図3.9 異なる測定地点間のEC比較結果（集中観測期間）
 左：全集中観測期間データ 右：各集中観測期間データ

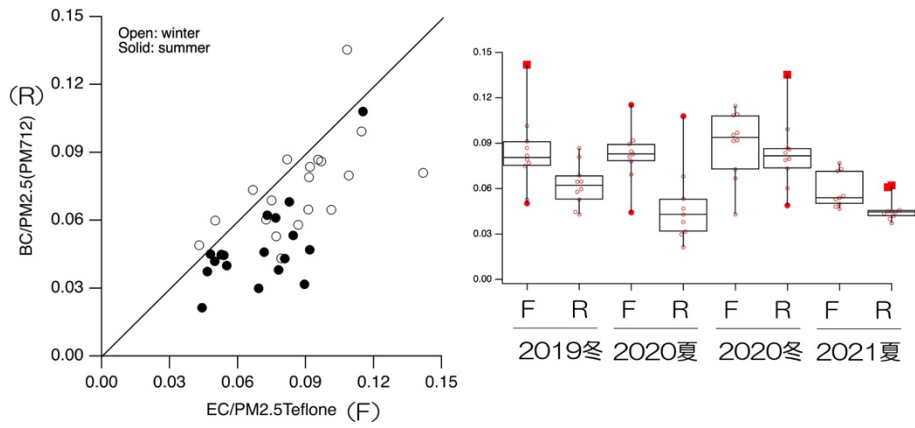


図3.10 異なる測定法間のBC/PM_{2.5}比の比較結果（集中観測期間・つくば）
 左：全集中観測期間データ 右：各集中観測期間データ

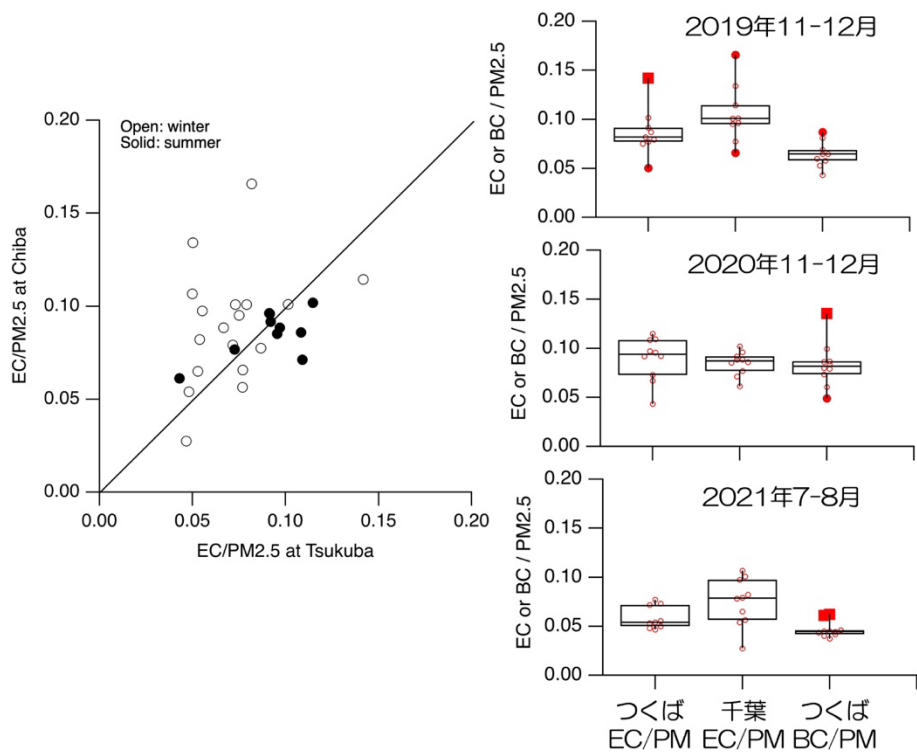


図3.11 異なる測定地点間のBC/PM_{2.5}比の比較結果（集中観測期間）
 左：全集中観測期間データ 右：各集中観測期間データ

(3) 集中観測期間における可搬型 FTS による大気微量成分気柱量観測

2019年と2020年は冬期に、可搬型 FTS 1台を千葉県千葉大学工学系総合研究棟1屋上に設置して観測を行い、2021年は東京オリンピック前後にこれまでの2年の観測結果を踏まえて都市大気の空間変化を明確に捉えることを目指し千葉大学に加えてさいたま市秋ヶ瀬公園に設置して、平日晴天時に大気微量成分の吸収をうけた太陽直達光スペクトルを測定した。千葉とさいたままで同時に行った2021年の大気微量成分気柱量の観測結果を図3.12に示す。XAIRは、乾燥空気のカラム平均濃度であり、観測装置の安定性を示す指標として使われており、地表面気圧から計算した乾燥空気気柱量を酸素吸収スペクトルから導出し計算した乾燥空気気柱量で割ったものである。XAIRの変動が小さいことから装置は問題なく動作していたことが分かる。2019年と2020年は、可搬型 FTS 1台で観測していたため、観測時の気象状況を踏まえて濃度変化の因果関係を解釈した。2021年は、千葉県とさいたまの2ヶ所で観測を実施したため、濃度の時系列変化のみでもある程度濃度変化の因果関係が分かるようになった。例えば、8月4日は、千葉は都市大気の影響が観測されているが、さいたまではバックグラウンド大気であった。一方、8月11日は、千葉とさいたま共に、都市大気の影響が観測されていた。更に、観測時の気象状況と2ヶ所の濃度の時系列変化を合わせて、より詳細な時空間変動を理解することが可能となった。また、2021年の東京オリンピック前後は、XCOやXCH₄の減少が、GOSAT やつくば TCCON の観測で見られており、可搬型 FTS の観測結果でも観測されていることから、可搬型 FTS は問題なく観測が行われていたことが確認できた。なお、この現象は、この時期に複数の台風が関東を通過しておりこれにより、太平洋のバックグラウンド大気に移入してきたためであると考えられる。同様の現象はサブテーマ1のMAX-DOAS観測の結果でも見られている。東京オリンピックの交通規制による影響は検出できていないと考えている。この結果とサブテーマ1で行われたエアロゾル、PM_{2.5}とBC及び大気汚染物質の観測結果を総合的に解析することにより、GOSAT-2プロダクトの一般公開後のより詳細な検証解析に利用することが期待される。

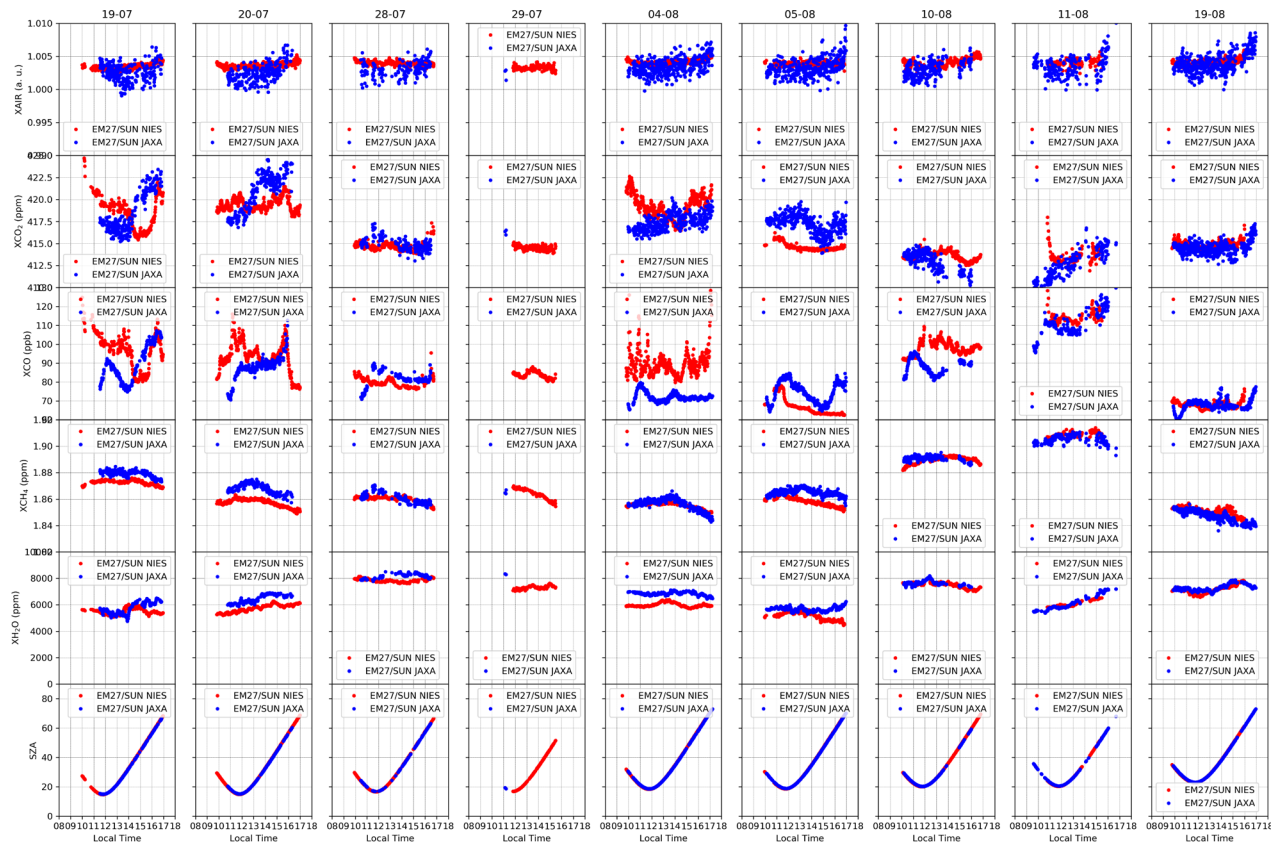


図3.12 2021年に可搬型FTS測定した千葉(赤)とさいたま(青)の大気微量成分変動。上段から観測空気、CO₂、CO、CH₄、H₂Oのカラム平均濃度(XAIR、XCO₂、XCO、XCH₄、XH₂O)を示し、左か

ら2021年7月19日、7月20日、7月28日、7月29日、8月4日、8月5日、8月10日、8月11日、8月19日(JST)の9日の観測を示す。

(4) アルゴリズム誤差解析等のサポートとしての検証データ収集とアルゴリズム勉強会及びCAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せ

PC を用いた自動収集機能により取得可能なものは全て取得に成功し、2021 年度に収集した検証データは約 43GB となった。このデータは検証解析に使用された。本推進実施中に、インドの PM_{2.5} 地上データが公開されるようになったことは極めて重要で、高濃度地域の GOSAT-2 PM_{2.5} の検証が大きく進むことが期待される。

アルゴリズム勉強会で確認された事項例を以下に列挙する。

全体的なこととして、GOSAT-2と地上測定で使用するPM_{2.5}の定義、BCの定義の明確化と明記が必要である。また、GOSAT-2における前提としている導出の仮定や条件の明記も必要である。例えば、PM_{2.5}には湿度依存性、BCには波長依存性、更に両者には高度分布があることである。地上とGOSAT-2の比較には以下のような問題がある。

- ・鉛直方向の代表性の問題：GOSAT-2では地上から大気上端までの気柱量を導出することになっているが（ただしPM_{2.5}やBCは大気境界層まで情報が支配的）、地上測定で得られるデータは地表付近の値である。地上測定の値は地上から大気境界層までの代表値とならない場合、何らかの仮定で比較する必要がある。
- ・水平方向の代表性の問題：GOSAT-2は多ピクセルに対して均質と仮定し導出するため局所的な変動が見えないが、地上測定では局所的な影響を捉えることがあり、単純な比較場合は結果に影響を受ける場合がある。地上データを時間的あるいは空間的に平滑化するなど工夫が必要である。
- ・時間の代表性の問題：PM_{2.5}地上観測の一時間値は担保されていない。またフィルタ法は一日（せいぜい数時間の）平均値となる。一方でGOSAT-2は、13時頃の観測のみである。このため、代表性を考慮して解析する必要がある。

また、GOSAT-2の導出における仮定で、大きな誤差を生む要因として、エアロゾルモデルが荒すぎるのではないか、適切な初期値となっているのか、全球同じもので良いのかなどが挙げられた。GOSAT-2では湿度が含まれたエアロゾルを導出しているが地上観測の乾燥エアロゾルとの変換式、大気境界層までの気柱量を導出したときの高度情報パラメーターの妥当性等の議論が行われた。

CAI-2 PM_{2.5}及びBCの比較結果の共有に関する打合せでは、(1)アルゴリズム研究及び他衛星データとの比較によるGOSAT-2 プロダクトの誤差解析、(2)地上観測によるGOSAT-2プロダクトの評価手法の検討と開発、(3)GOSAT-2プロジェクトで行うCAI-2プロダクトの評価の進捗状況の共有と質疑が行われた。(1)に関しては、この打合せ後、研究が進みサブテーマ2の研究結果にまとめられている。(1)に関しては、打合せ時はGOSAT-2データに適用されていなかったが、PM_{2.5}だけでなくBCに関しても評価手法の見通しが得られたこと報告された。なお、GOSAT-2に適用した結果が、サブテーマ1の研究結果にまとめられている。(3)では、全球に対する評価をSKYNETとAERONETデータを用いて、AOD、AE等の評価が進められており、SKYNETは比較的良くあっていることが報告された。PM_{2.5}やBCの地上観測データの比較を行おうとしたが、比較可能という段階ではなかった。つまり、SKYNETとAERONETデータを用いてAOD、AE等の評価を進めていき、そこから明らかになるアルゴリズム改善点を適切に対処することによってAOD、AE等のデータ質を改善後、初めてPM_{2.5}やBCの地上観測データの比較が漸く開始できるということであった。

5. 研究目標の達成状況

計画通り、サブテーマ1で開発した評価方法を国際観測網に展開させる方法を提案することができた。提案する国際観測網はA-SKY観測網と命名され、観測地点にはスカイラジオメーターとMAX-DOASの両方を配備することとする(更に、ライダーがあれば望ましい)。この最終目標を達成するために、GOSAT-2プロジェクトの検証事業で想定している、あるいは議論されている方法を、サブテーマ1が開発した評価

方法と対比可能な形でリストを作成して整理することができた。

BC計設置などの関連の通年連続観測や集中観測及びアルゴリズム誤差解析等のサポートを行い、以下の成果を得た。同一地点における測定法間の比較において、PM_{2.5}計測の精度とBCの測定精度を明らかにし、地上観測結果を踏まえた国際観測網展開への提言をまとめた。また、キャンペーン観測に可搬型FTS (EM27/SUN)の設置・観測し、解析を行い有用なデータ取得に成功し、PM_{2.5}やBCと相関が高いXCOデータを組み合わせることにより、PM_{2.5}やBCの評価の精緻化に貢献出来ることが分かった。更に、GOSATやGOSAT-GWに向けた総合的な検証観測法やGOSAT-GWの温室効果ガスの排出量評価必要な都市域の地上定常観測法の開発を行うことが出来た。

6. 引用文献

- 1) Gisi, M., F. Hase, S. Dohe, T. Blumenstock, A. Simon, A. Keens: XCO₂-measurements with a tabletop FTS using solar absorption spectroscopy, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2969-2980, <https://doi.org/10.5194/amt-5-2969-2012>, 2012.
- 2) Nakayama, T., Y. Matsumi, K. Kawahito, Y. Watabe: Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor, *Aerosol Science and Technology*, 52, 2-12, 2018.
- 3) Petzold, A., J. A. Ogren, M. Fiebig, P. Laj, S.-M. Li, U. Baltensperger, T. Holzer-Popp, S. Kinne, G. Pappalardo, N. Sugimoto, C. Wehrli, A. Wiedensohler, and X.-Y. Zhang: Recommendations for reporting "black carbon" measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8365-8379, 2013.
- 4) Kanaya, Y., F. Taketani, Y. Komazaki, X. Liu, Y. Kondo, L. K. Sahu, H. Irie, H. Takashima: Comparison of Black Carbon Mass Concentrations Observed by Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP) and Continuous Soot-Monitoring System (COSMOS) on Fukue Island and in Tokyo, Japan, *Aerosol Science and Technology*, 47, 1-10, 2013.
- 5) Fujitani, Y., A. Fushimi, K. Saitoh, K. Sato, A. Takami, Y. Kondo, K. Tanabe, S. Kobayashi: Mid carbon (C₆⁺-C₂₉⁺) in refractory black carbon aerosols is a potential tracer of open burning of rice straw: Insights from atmospheric observation and emission source studies, *Atmospheric Environment*, 238, 117729, 2020.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) Kim, J., U. Jeong, M.-H. Ahn, J. H. Kim, R. J. Park, H. Lee, C. H. Song, Y.-S. Choi, K.-H. Lee, J.-M. Yoo, M.-J. Jeong, S. K. Park, K.-M. Lee, C.-K. Song, S.-W. Kim, Y.-J. Kim, S.-W. Kim, M. Kim, S. Go, X. Liu, K. Chance, C. C. Miller, J. Al-Saadi, B. Veihermann, P. K. Bhartia, O. Torres, G. G. Abad, D. P. Haffner, D. H. Ko, S. H. Lee, J.-H. Woo, H. Chong, S. S. Park, D. Nicks, W. J. Choi, K.-J. Moon, A. Cho, J.-M. Yoon, S.-K. Kim, H. Hong, K. Lee, H. Lee, S. Lee, M. Choi, P. Veefkind, P. Levelt, D. P. Edwards, M. Kang, M. Eo, J. Bak, K. Baek, H.-A. Kwon, J. Yang, J. Park, K. M. Han, B. Kim, H.-W. Shin, H. Choi, E. Lee, J. Chong, Y. Cha, J.-H. Koo, H. Irie, S. Hayashida, Y. Kasai, Y. Kanaya, C. Liu, J. Lin, J. H. Crawford, G. R. Carmichael, M. J. Newchurch, B. L. Lefer, J. R. Herman, R. J. Swap, A. K. H. Lau, T. P. Kurosu, G. Jaross, B. Ahlers, M. Dobber, T. McElroy, and Y. Choi, New Era of Air Quality Monitoring from Space: 1 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), *Bulletin of the American Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0013.1>, 2020 (IF: 8.766).
- 2) Go, S. J. Kim, J. Mok, H. Irie, J. M. Yoon, O. Torres, N. Krotokov, G. Labow, M. Kim, J. H. Koo, M. Choi, and H. Lim, Ground-based retrievals of aerosol column absorption in the UV spectral region and their implications for GEMS measurements, *Remote Sensing of Environment*, 245, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111759>, 2020 (IF: 10.164).
- 3) Nakajima, T., M. Campanelli, H. Che, V. Estellés, H. Irie, S.-W. Kim, J. Kim, D. Liu, T. Nishizawa, G. Pandithurai, V. K. Soni, B. Thana, N.-U. Tugjurn, K. Aoki, M. Hashimoto, A. Higurashi, S. Kazadzis, P. Khatri, N. Kouremeti, R. Kudo, F. Marengo, M. Momoi, S. S. Ningombam, C. L. Ryder, and A. Uchiyama, An overview and issues of the sky radiometer technology and SKYNET, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4195-4218, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020>, 2020 (IF: 4.176).
- 4) Pinardi, G., M. V. Roozendael, F. Hendrick, N. Theys, N. Abuhassan, A. Bais, F. Boersma, A. Cede, J. Chong, S. Donner, T. Drosoglou, U. Frieß, J. Granville, J. R. Herman, H. Eskes, R. Holla, J. Hovila, H. Irie, Y. Kanaya, D. Karagkiozidis, N. Kouremeti, J.-C. Lambert, J. Ma, E. Peters, A. PETERS, O. Postylyakov, A. Richter, J. Remmers, H. Takashima, M. Tiefengraber, P. Valks, T. Vlemmix, T. Wagner, and F. Wittrock, Validation of tropospheric NO₂ column measurements of GOME-2A and OMI using MAX-DOAS and direct sun network observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 6141-6174, <https://doi.org/10.5194/amt-13-6141-2020>, 2020 (IF: 4.176).
- 5) Verhoelst, T., S. Compennolle, G. Pinardi, J.-C. Lambert, H. Eskes, K.-U. Eichmann, A. M. Fjærraa, J. Granville, S. Niemeijer, A. Cede, M. Tiefengraber, F. Hendrick, A. Pazmiño, A. Bais, A. Bazureau, K. Bognar, A. Dehn, S. Donner, M. Gebetsberger, F. Goutail, M. Grutter de la Mora, A. Gruzdev, G. Hansen, H. Irie, N. Jepsen, Y. Kanaya, D. Karagkiozidis, R. Kivi, P. Levelt, C. Liu, M. Müller, M. N. Comas, A. PETERS, J.-P. Pommereau, T. Portafaix, O. Puentedura, R. Querel, J. Remmers, A. Richter, J. Rimmer, C. R. Cárdenas, L. S. de Miguel, V. Sinyakov, K. Strong, M. V. Roozendael, P. Veefkind, T. Wagner, F. Wittrock, M. Y. Gonzalez, C. Zehner, M. Gratsea, A. Elokhov, K. Kreher, and K. F. Boersma, Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandora global networks, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 481-510, <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>, 2021 (IF: 4.176).

- 6) Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatri, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, and M. Mikami, Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables, *Geosci. Model Dev.*, 14, 2235-2264, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2235-2021>, 2021 (IF: 6.135).
- 7) Irie, H., D. Yonekawa, A. Damiani, H. M. S. Hoque, K. Sudo, and S. Itahashi, Continuous multi-component MAX-DOAS observations for the planetary boundary layer ozone variation analysis at Chiba and Tsukuba, Japan from 2013 to 2019, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 31, <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00424-9>, 2021 (IF: 3.784).
- 8) Damiani, A., H. Irie, K. Yamaguchi, H. M. S. Hoque, T. Nakayama, Y. Matsumi, Y. Kondo, and A. Da Silva, Variabilities in PM_{2.5} and black carbon surface concentrations reproduced by aerosol optical properties estimated by sky radiometer and MAX-DOAS instruments, *Remote Sensing*, 13(16), 3163, <https://doi.org/10.3390/rs13163163>, 2021 (IF: 5.353).
- 9) De Smedt, I., G. Pinardi, C. Vigouroux, S. Compernelle, A. Bais, N. Benavent, F. Boersma, K.-L. Chan, S. Donner, K.-U. Eichmann, P. Hedelt, F. Hendrick, H. Irie, V. Kumar, J.-C. Lambert, B. Langerock, C. Lerot, C. Liu, D. Loyola, A. PETERS, A. Richter, C. Rivera Cárdenas, F. Romahn, R. G. Ryan, V. Sinha, N. Theys, J. Vlietinck, T. Wagner, T. Wang, H. Yu, and M. Van Roozendaal, Comparative assessment of TROPOMI and OMI formaldehyde observations and validation against MAX-DOAS network column measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 12561-12593, <https://doi.org/10.5194/acp-21-12561-2021>, 2021 (IF: 6.546).
- 10) Xue, Z., H. Kuze, and H. Irie, Retrieval of Aerosol Optical Thickness with Custom Aerosol Model Using SKYNET Data over the Chiba Area, *Atmosphere*, 12(9), 1144, <https://doi.org/10.3390/atmos12091144>, 2021 (IF: 2.682).
- 11) Momoi, M., H. Irie, T. Nakajima, and M. Sekiguchi, Efficient calculation of radiative intensity including the polarization effect in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 277, 107976, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107976>, 2022 (IF: 2.468).
- 12) Momoi, M., H. Irie, M. Sekiguchi, T. Nakajima, H. Takenaka, K. Miura, and K. Aoki, Rapid, accurate computation of narrow-band sky radiance in the 940 nm gas absorption region using the correlated k-distribution method for sun-photometer observations, *Progress in Earth and Planetary Science*, 9, 10, <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00467-6>, 2022 (IF: 3.784).
- 13) Itahashi, S., and H. Irie, Surface and aloft NO₂ pollution over the greater Tokyo area observed by ground-based and MAX-DOAS measurements bridged by kilometer-scale regional air quality modeling, *Progress in Earth and Planetary Science*, 9, 15, <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00474-7>, 2022 (IF: 3.784).

【サブテーマ 2】

- 1) Yamada M., A. Fujioka; N. Fujita, M. Hashimoto, Y. Ueda., Takanobu Aoki, T. Minami, M. Torii; Efficient Examples of Earth Observation Satellite Data Processing Using the Jaxa Supercomputer System and the Future for the Next Supercomputer System," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, pp. 5735-5738, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554038, 2021 (IF:0.7).
- 2) Shi, C., M. Hashimoto, K. Shiomi and T. Nakajima, Development of an Algorithm to Retrieve Aerosol Optical Properties Over Water Using an Artificial Neural Network Radiative

Transfer Scheme: First Result From GOSAT-2/CAI-2, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 12, pp. 9861-9872, doi: 10.1109/TGRS.2020.3038892, 2021 (IF:5.6).

【サブテーマ3】

- 1) Fujitani, Y., A. Fushimi, K. Saitoh, K. Sato, A. Takami, Y. Kondo, K. Tanabe, S. Kobayashi: Mid carbon(C₆⁺-C₂₉⁺) in refractory black carbon aerosols is a potential tracer of open burning of rice straw: Insights from atmospheric observation and emission source studies, Atmospheric Environment, 238, 117729, 2020 (IF: 4.8).
- 2) 吉野彩子、高見昭憲:長崎福江島における大気質観測—COVID-19による越境大気汚染への影響—, 大気環境学会誌, 55 巻, 6 号, 248-251, 2020 (IF: -.).
- 3) Yoshino, A., A. Takami, K. Hara, C. Nishita-Hara, M. Hayashi, N. Kaneyasu: Contribution of local and transboundary air pollution to the urban air quality of Fukuoka, Japan, Atmosphere, 12(4), 431, 2021 (IF: 2.7).
- 4) Thi Ngoc Trieu, T., I. Morino, O. Uchino, Y. Tsutsumi, T. Sakai, T. Nagai, A. Yamazaki, H. Okumura, K. Arai, K. Shiomi, D.F. Pollard, B. Liley: Influences of aerosols and thin cirrus clouds on GOSAT XCO₂ and XCH₄ using Total Carbon Column Observing Network, sky radiometer, and lidar data, International Journal of Remote Sensing, 43(5), 1770-1799, 2022 (IF:3.2).

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

- 1) Irie, H., International air quality and sky research remote sensing network (A-SKY): Its development and satellite atmosphere product validation, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, 41, 5, 575-581, <https://doi.org/10.11440/rssj.41.575>, 2021.

【サブテーマ2】

- 1) 樋口 篤志, 本多 嘉明, 中島 孝, 石坂 丞二, 弓木 桂也, 堀之内 武, 中島 正勝, 木村 俊義, 橋本 真喜子, 棚田 和玖, 村上 浩: 次期静止ミッション検討分科会における次期ひまわり搭載イメージャに関する検討, Journal of the Remote Sensing Society of Japan 41(4), p.461-468, 2021.
- 2) 今須 良一, 岡本 幸三, 橋本真喜子, 佐藤世智, 本多 嘉明: 次期静止ミッション検討分科会における赤外サウンダー搭載に向けた検討, Journal of the Remote Sensing Society of Japan 41(4), p.469-477, 2021.

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

【サブテーマ1】

- 1) Fatmi, A. M., H. Irie, H. M. S. Hoque, A. Damiani, P. Khatri, T. Takamura, T. Jurupongsaku, and G. Pandithurai, Observations of aerosol optical properties by sky radiometers at SKYNET Southeast and South Asian sites、日本地球惑星科学連合大会、千葉県千葉市、2019年
- 2) 山口航大、入江仁士、P. Khatri、竹村俊彦、山本浩万、スカイラジオメーターを用いた日本におけるエアロゾルの光吸収オングストローム指数の変動要因の解析、日本地球惑星科学連合大会、千

千葉県千葉市、2019年

- 3) 米川大地、入江仁士、2013-2018年に千葉で観測されたNO₂、VOC、対流圏オゾン濃度のトレンド、日本地球惑星科学連合大会、千葉県千葉市、2019年
- 4) Damiani, A., H. Irie, T. Horio, T. Takamura, R. Kudo, P. Khatri, H. Iwabuchi, R. Masuda, T.M. Nagao, Cloud optical properties from various ground and satellite instruments evaluated during an intensive campaign, 日本地球惑星科学連合大会、千葉県千葉市、2019年
- 5) 入江仁士、H.M.S. Hoque, A. Damiani, A. M. Fatmi, P. Khatri, 高村民雄, and T. Jurupongsaku, Simultaneous observations by sky radiometer and MAX-DOAS for characterization of biomass burning plumes in central Thailand in January-April 2016, 日本地球惑星科学連合大会、千葉県千葉市、2019年
- 6) 北村克樹、齋藤尚子、ひまわり8号データを用いたGOSAT衛星の雲判定精度の検証、日本地球惑星科学連合大会、千葉県千葉市、2019年
- 7) Kitamura, K. and N. Saitoh, Validation of cloud judgements in TANSO-FTS FOVs by using Himawari-8/AHI data, the 15th International Workshop of Greenhouse Gas Measurements from Space, Sapporo, 2019.
- 8) Hoque, H.M.S. and H. Irie, imultaneous observations of formaldehyde and glyoxal using MAX-DOAS as part of international remote sensing network SKYNET, 4th Atmospheric Composition and the Asian Monsoon (ACAM) workshop, Universiti Kebangsaan Malaysia (Selangor), 2019.
- 9) Hori, M., H. Murakami, R. Miyazaki, T. Kobayashi, T. Nagao, K. Ogata, R. Shimada, Y. Honda, K. Nasahara, K. Kajiwara, T. Y. Nakajima, H. Irie, M. Toratani, T. Hirawake, and T. Aoki, Post-launch validation of GCOM-C/SGLI geophysical products, IGARSS 2019, Pacifico Yokohama (Yokohama), 2019.
- 10) Pinardi, G., S. Compennolle, M. van Roozendaal, F. Hendrick, H. Eskes, A. Cede, M. Tiefengraber, A. Richter, A. Piters, T. Wagner, S. Donner, A. Bais, H. Irie, Y. Kanaya, M. Grutter, C. Rivera, Sentinel-5p Tropospheric NO₂ Data Assessment using MAXDOAS and Direct-Sun Measurements, Copernicus Sentinel-5 Precursor Validation Team Workshop, ESA/ESRIN (Frascati), 2019.
- 11) Fujitani Y., Fushimi A., Saitoh K., Sato K., Takami A., Source Apportionment of Refractory Black Carbon in Aerosols during Period of The Harvest Season in Suburban Area in Japan. 15th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, マレーシア・クアラルンプール, 2019.
- 12) 蔡穎、入江仁士、2011-2019年における春季の越境汚染に対する日本のエアロゾル光学的厚さの応答に関する観測的研究、日本気象学会、福岡県福岡市、2019年
- 13) 米川大地、入江仁士、2013-2018年に千葉で観測された窒素酸化物、VOC、対流圏オゾン濃度のトレンド、日本気象学会、福岡県福岡市、2019年
- 14) 佐野春香、入江仁士、齋藤尚子、Patra Prabir、Naveen Negi、Dmitory Belikov, ACTMにより算出された東シベリア域のメタンカラム濃度の季節変動の再現性、日本気象学会、福岡県福岡市、2019年
- 15) 山口航大、入江仁士、P. Khatri, 竹村俊彦、山本浩万、スカイラジオメーターを用いた日本におけるエアロゾルの光吸収オングストローム指数の変動要因の解析、日本気象学会、福岡県福岡市、2019年
- 16) 桃井裕広、工藤玲、三浦和彦、入江仁士、スカイラジオメーターとMAX-DOASの複合観測による対流圏下部のPM_{2.5}濃度のリモートセンシング観測、日本気象学会、福岡県福岡市、2019年
- 17) 工藤玲、岩渕弘信、鷹野敏明、入江仁士、Alessandro Damiani, Pradeep Khatri、不均質に分布した雲の地上リモートセンシング手法の開発、日本気象学会、福岡県福岡市、2019年

- 18) 米川大地, 入江仁士, 2013-2018年に千葉で観測された窒素酸化物、VOC、対流圏オゾン濃度のトレンド、大気化学討論会、愛知県蒲郡市、2019年
- 19) 入江仁士, H.M.S. Hoque, A. Damiani, A.M. Fatmi, 高村民雄, P. Khatri, T. Jarupongsakul, バイオマスバーニングブルームのキャラクタリゼーション: スカイラジオメーターとMAX-DOASによる同時観測、大気化学討論会、愛知県蒲郡市、2019年
- 20) 北村克樹、齋藤尚子、ひまわり8号データを用いたGOSAT衛星の雲判定制度の検証、北村克樹、齋藤尚子、大気化学討論会、愛知県蒲郡市、2019年
- 21) Irie, H., H. M. S. Hoque, A. Damiani, H. Okamoto, A. M. Fatmi, P. Khatri, T. Takamura, T. Jarupongsakul, Simultaneous observations by sky radiometer and MAX-DOAS for characterization of biomass burning plumes in central Thailand in January-April 2016, 2019 AGU Fall Meeting, Moscone center (San Francisco), 2019.
- 22) Yamaguchi, K., H. Irie, P. Khatri, T. Takamura, H. Yamamoto, Analysis of factors causing variations in the Absorption Ångström Exponent of aerosols in Japan using skyradiometers, 2019 AGU Fall Meeting, Moscone center (San Francisco), 2019.
- 23) Momoi, M., R. Kudo, K. Miura, A. Damiani, S. Hoque, H. Irie, and H. Okamoto, Development of an algorithm retrieving near-surface fine mode aerosol information from simultaneous sky-radiometer and MAX-DOAS observations, 2019 AGU Fall Meeting, Moscone center (San Francisco), 2019.
- 24) Yonekawa, D., and H. Irie, Recent trends of NO₂, VOC, and tropospheric ozone concentrations observed around Chiba, Japan in 2013-2018, 2019 AGU Fall Meeting, Moscone center (San Francisco), 2019.
- 25) Irie, H., T. Takano, T. Y. Nakajima, H. M. S. Hoque, A. Damiani, X. Yang, and H. Che, Validation study of GCOM-C atmosphere products based on SKYNET for success criterion evaluation, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission, TKP Shimbashi (Tokyo), 2020.
- 26) Khatri, P., T. Hayasaka, H. Irie, and T. Takamura, Validation of SGLI/GCOM-C Cloud and Radiation Budget Products Using data of Various Sources, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission, TKP Shimbashi (Tokyo), 2020.
- 27) 植木洗亘, 高島久洋, Martina M. Friedrich, 入江仁士, 福岡都市圏におけるNO₂の時空間変動～多地点MAX-DOASとドップラーライダーの複合解析～、第22回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム、千葉県千葉市、2020年
- 28) Irie, H., Introduction of Chiba (Japan) site, Pandora Asia Network (PAN) Online Conference, online, 2020.
- 29) Pinardi, G., S. Compornolle, T. Verhoelst, M. Van Roozendaal, F. Hendrick, H. Eskes, A. PETERS, A. Cede, M. Tiefengraber, A. Richter, A. Bais, D. Karagkiozidis, F. Gkertsis, Y. Kanaya, M. Grutter, C. Rivera, S. Niemeijer, P. Raptis, S. Kazadzis, X. Zhao, V. Fioletov, H. Irie, and the NIDFORVAL and PGN teams, Sentinel-5p Tropospheric NO₂ Data Assessment using MAX-DOAS and Direct Sun Measurements, DOAS Workshop 2020, virtual, 2020.
- 30) Irie, H., D. Yonekawa, A. Damiani, H.M.S. Hoque, K. Sudo, and S. Itahashi, Utilizing Continuous Multi-Component MAX-DOAS Observations for the Near-Surface Ozone Sensitivity Diagnosis at Chiba and Tsukuba, Japan for 2013-2019, AGU Fall Meeting, online, 2020.
- 31) Irie, H., Validation study of GCOM-C atmosphere products based on SKYNET for success criterion evaluation, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission, online, 2021.
- 32) Khatri, P., T. Hayasaka, H. Irie, and T. Takamura, Validation results of SGLI cloud and radiation budget products, online, 2021.

- 33) Damiani, A., H. Irie, K. Yamaguchi, H. M. S. Hoque, T. Nakayama, Y. Matsumi, and Y. Kondo, Linking BC and PM_{2.5} surface concentrations with aerosol optical properties jointly estimated by skyradiometer and MAX-DOAS instruments, 大気化学討論会、online, 2020年
- 34) 山口航大、入江仁士、A. Damiani, 光吸収のエアロゾル光学的厚さに及ぼすブラックカーボンとブラウンカーボンの寄与率の定量的評価：千葉でのスカイラジオメーターによる長期観測より、大気化学討論会、online, 2020年
- 35) 工藤玲、入江仁士、A. Damiani, 岩渕弘信、P. Khatri, 雲・エアロゾルの地上リモートセンシング手法の開発、東京理科大学研究推進機構総合研究院大気科学研究部門成果報告会、online, 2021年
- 36) Lerot, C., F. Hendrick, I. De Smedt, N. Theys, J. Vlietinck, H. Yu, M. Van Roozendael, J. Stavrakou, J.-F. Müller, L. Alvarado, A. Richter, P. Valks, D. Loyola, H. Irie, V. Kumar, T. Wagner, and C. Retscher, TROPOMI glyoxal tropospheric column retrievals: description, inter-satellite comparison and validation, EGU General Assembly 2021, online, 2021.
- 37) Rawat, P., M. Naja, H. Irie, C. Lerot, and S. Lal, Long-term variations of NO₂, SO₂, HCHO, and CHOCHO over the Himalayan foothills: Observations from MAX-DOAS, TROPOMI, and GOME-2, 6th International SKYNET Workshop 2021 Japan, online, 2021.
- 38) Khatri, P., T. Hayasaka, H. Irie, and T. Takamura, Important factors affecting the relationship between sky radiometer and satellite observed cloud properties, 6th International SKYNET Workshop 2021 Japan, online, 2021.
- 39) Kobayashi, H., H. Irie, M. Momoi, and T. Ohno, Classifying aerosol types over Japan by k-means clustering from sky-radiometer observations, 6th International SKYNET Workshop 2021 Japan, online, 2021.
- 40) Momoi, M., H. Irie, T. Nakajima, and M. Sekiguchi, PSTAR/Pn-IMS: Efficient calculation of sky radiative intensity including the polarization effect in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, 6th International SKYNET Workshop 2021 Japan, online, 2021.
- 41) Damiani, A., H. Irie, D. Belikov, T. Takamura, S.H.M. Hoque, and R.R. Cordero, Peculiar COVID-19 effects in the Greater Tokyo Area revealed by the variability in tropospheric gases and light-absorbing aerosols, 6th International SKYNET Workshop 2021 Japan, online, 2021.
- 42) Irie, H., A. Damiani, T. Takamura, T. Jarupongsakul, M. Naja, and S.-W. Kim, Development of international air quality and sky research remote sensing (A-SKY) network, 6th International SKYNET Workshop 2021 Japan, online, 2021.
- 43) Lerot, C., F. Hendrick, M. Van Roozendael, I. De Smedt, N. Theys, J. Vlietinck, H. Yu, J. Van Gent, H. Lee, L. M.A. Alvarado, A. Richter, T. Stavrakou, J.-F. Müller, P. Valks, D. Loyola, H. Irie, V. Kumar, T. Wagner, S. F. Schreier, V. Sinha, T. Wang, P. Wang, and C. Retscher, Harmonised Satellite Glyoxal Data Records from TROPOMI, OMI and GOME-2, ATMOS 2021, online, 2021.
- 44) Lerot, C., F. Hendrick, M. Van Roozendael, I. De Smedt, N. Theys, J. Vlietinck, H. Yu, J. Van Gent, H. Lee, L. M.A. Alvarado, A. Richter, T. Stavrakou, J.-F. Müller, P. Valks, D. Loyola, H. Irie, V. Kumar, T. Wagner, S. F. Schreier, V. Sinha, T. Wang, P. Wang, and C. Retscher, Consistent glyoxal tropospheric column data sets from satellite nadir LEO instruments and initial retrievals from GEMS, AGU Fall Meeting, New Orleans and online, 2021.
- 45) Irie, H., Validation study of GCOM-C atmosphere products based on SKYNET for success

- criterion evaluation, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission, online, 2022.
- 46) Khatri, P., T. Hayasaka, H. Irie, and T. Takamura, Validation of SGLI/GCOM-C cloud products using surface and MODIS observation data, 日本地球惑星科学連合大会、online、2021年
- 47) 山本浩万, 入江仁士, Validation of HIMAWARI-8 AHI Aerosol Products with SKYNET and AERONET Measurements, 日本地球惑星科学連合大会、online、2021年
- 48) 齊藤輝、入江仁士, A. Damiani, Validation and correction of TROPOMI tropospheric NO₂ column density data using 4AZ-MAXDOAS at Chiba, Japan, 日本地球惑星科学連合大会、online、2021年
- 49) 小林拓, 田中典章, 塩原匡, 平沢尚彦, 山内恭, 入江仁士, 日暮明子, 原圭一郎, 矢吹正教, 長田和雄, 林政彦, 南極昭和基地においてスカイラジオメータで観測された大気エアロゾルの光学的厚さおよび光学特性の長期変動、第38回エアロゾル科学・技術研究討論会、online、2021年
- 50) 大野健、入江仁士、A. M da Silva、再解析エアロゾルデータの精度検証に基づくインドシナ半島の光散乱/吸収AODの時空間変動、大気化学討論会、online、2021年
- 51) 齊藤輝、入江仁士、A. Damiani、4方位角MAXDOASを利用したTROPOMI対流圏NO₂カラム濃度データの検証と補正、大気化学討論会、online、2021年

【サブテーマ2】

- 1) Hashimoto, M., S. Chong, M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, and T. Nakajima: Monitoring of Air Pollution From Space by GOSAT, GOSAT-2 and Himawari-8. LCLUC SARI 2019, DoubleTree by Hilton Hotel Johor Bahru/Johor Bahru, Malaysia, 2019.
- 2) 橋本真喜子, 石崇, 竹中栄晶, 中島映至, 衛星エアロゾル特性導出アルゴリズム開発とGOSAT-2/CAI-2への適用及び誤差解析, 気象学会秋季大会, オンライン, 2020.
- 3) Hashimoto, M., H. Takenaka, C. Shi and T. Nakajima: Development of an aerosol retrieval algorithm and aerosol properties from GOSAT-2/TANSO-CAI-2, IWGGMS-17, オンライン, 2021.

【サブテーマ3】

- 1) Fujitani, Y., A. Fushimi, K. Saitoh, K. Sato, A. Takami, Source Apportionment of Refractory Black Carbon in Aerosols during Period of The Harvest Season in Suburban Area in Japan. 15th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality. (マレーシア・クアラルンプール), 2019.
- 2) Fujitani, Y., K. Takahashi, A. Fushimi, S. Hasegawa, Y. Kondo, K. Tanabe, S. Kobayashi, Long-term trend of emission factors of particle number from diesel vehicles: New approach deducing from monitoring data at a traffic intersection, 11th Asian Aerosol Conference (Hong Kong), 2019.
- 3) 藤谷雄二, 佐藤圭, 高橋克行, 重油ボイラーにおける凝縮性ダストの測定、第36回エアロゾル科学・技術研究討論会、広島県、東広島市、2019年
- 4) Fujitani, Y., K. Sato, K. Tanabe, K. Takahashi, J. Hoshi, X. Wang, J.C. Chow, J.G. Watson, Intermediate and Semi-volatile Organic Compound Emissions from Sludge Waste Combustion by Fuel Oil, European Aerosol Conference 2019 (Gothenburg), 2019.
- 5) Morino, I., Y. Tsutsumi, O. Uchino, H. Ohyama, T. Thi Ngoc Trieu, M. Frey, Y. Yoshida, T. Matsunaga, A. Kamei, M. Saito, H. Noda, TCCON Partners, Status of GOSAT and GOSAT-2 FTS SWIR L2 Product Validation, IWGGMS-16, 2020.
- 6) 森野勇, 堤之智, 内野修, 大山博史, 齊藤龍, T. Thi Ngoc Trieu, M. Frey, 酒井哲, 永井智広, 奥村浩, 新井耕平, B. Liley, 山崎明宏, 吉田幸生, 松永恒雄, 亀井秋秀, 齊藤誠, 野田響, TCCON

- partners, GOSAT及びGOSAT-2短波長赤外プロダクト検証の進捗, 第25回大気化学討論会, 2020.
- 7) 藤谷雄二, 自動車排ガス由来の超微小粒子について, 第61回大気環境学会年会都市大気エアロゾル分科会, 2020.
 - 8) 吉野彩子, 高見昭憲, 鶴野伊津志, 林政彦, 原圭一郎, 西田千春, 春季福岡、福江における粒子の質量と化学組成の変化, 第37回エアロゾル科学・技術研究討論会(オンライン開催), 2020.
 - 9) Thi Ngoc Trieu, T., I. Morino, O. Uchino, Y. Tsutsumi, T. Sakai, T. Nagai, A. Yamazaki, H. Okumura, K. Arai, B. Liley, GOSAT series product validation with TCCON, Sky radiometer and lidar data, JpGU-AGU Joint Vertical Meeting 2020, 2020.
 - 10) Morino, I., Y. Tsutsumi, O. Uchino, H. Ohyama, T. Thi Ngoc Trieu, M. Frey, Y. Yoshida, T. Matsunaga, A. Kamei, M. Saito, H. Noda, TCCON partners, Progress on validation of GOSAT and GOSAT-2 FTS SWIR L2 Products, JpGU-AGU Joint Vertical Meeting 2020, 2020).
 - 11) 藤谷雄二, レーザー蒸発型エアロゾル質量分析計を用いたブラックカーボンの発生源寄与評価, 第37回エアロゾル科学・技術研究討論会, 74-75, 2020.
 - 12) 藤谷雄二, 高見昭憲, 森野勇, 入江仁士, PM_{2.5} およびブラックカーボンの測定法間の差異と空間的代表性との関連, 大気環境学会第62回年会, オンライン, 2021.
 - 13) 松見豊, 中山智喜, 林田佐智子, 上田佳代, 安富奈津子, 荒木晶, 山崎高幸, 岡本渉, 高見昭憲, 藤谷雄二, 入江仁士, 遠隔地で多点展開が可能なPM_{2.5}、O_x、CO、NO_x などの大気汚染物質の超小型でローコストな計測装置の開発, 第62回大気環境学会年会, オンライン, 2021年
 - 14) Fujitani, Y., Measurements of condensation particles at combustion sources. The 12th Meeting for Bilateral Cooperation on PM_{2.5}, Between Japan and the Republic of Korea, online, 2021

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 可搬型FTSを用いた大気観測の講習会(座学、質疑、観測機器の紹介)(Frey Matthias、大山博史、森野勇他、千葉大学環境リモートセンシング研究センター、2019年11月22日(金)、参加者約10名(ソウル国立大学の助教授及び大学院生3名、千葉大学の学部生、大学院生、研究員等)
- 2) Japan-China Joint Discussion on Atmospheric Remote Sensing(2019年12月19-20日、参加者約25名)にて、特別研究交流と研究成果の発信
- 3) 第14回「地球気候系の診断に関わるバーチャルラボラトリーの形成」講習会～気候変動研究におけるリモートセンシングの役割～(入江仁士、オンライン(千葉大学環境リモートセンシング研究センター主催)、「大気リモートセンシング(短寿命微量ガスとエアロゾル)」(2021年3月8-9日、参加者約100名)
- 4) 第14回「地球気候系の診断に関わるバーチャルラボラトリーの形成」講習会～気候変動研究におけるリモートセンシングの役割～(齋藤尚子、オンライン(千葉大学環境リモートセンシング研究センター主催)、「衛星リモートセンシングによるGHG観測」(2021年3月8-9日、参加者約100名)
- 5) インターネット上で観測データ等の継続的な発信(<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/> と <http://atmos3.cr.chiba-u.jp/a-sky/>)

【サブテーマ2】

- 1) Youtube配信:JAXA Satellites for SDGs 3 - Air Pollution Monitoring(橋本真喜子)、2019年12月3日～現在

【サブテーマ3】

- 1) 国立環境研究所夏の公開2019において、大気環境に関する催し「展示・研究紹介「粒子をみてみよう！」」を開催(藤谷雄二、国立環境研究所(茨城県つくば市)、2019年7月20日、来場者約

400名)

- 2) 可搬型FTSを用いた大気観測の講習会(座学、質疑、観測機器の紹介)(Frey Matthias、大山博史、森野勇他、千葉大学環境リモートセンシング研究センター、2019年11月22日(金)、参加者約10名(ソウル国立大学の助教授及び大学院生3名、千葉大学の学部生、大学院生、研究員等)
- 3) 一般財団法人 大気環境総合センター特別セミナーにおいて、「燃焼発生源から排出される有機物質を対象とした揮発性分布の測定」を講演(藤谷雄二、オンライン、2021年4月14日、参加者約50名)
- 4) 一般財団法人 大気環境総合センター定期セミナーにおいて、「凝縮性粒子の測定法と大気環境影響」を講演(藤谷雄二、オンライン、2021年7月20日、参加者約50名)
- 5) 2021年度フォトンクス技術フォーラム第1回研究会、研究会テーマ:「3D LiDAR (3D マッピング)による環境計測」において、「衛星と地上からの温室効果気体を中心とする大気微量成分の分光リモートセンシング」を講演(森野勇、オンライン、2021年8月6日、参加者約50名)

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない

(5) 本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

- 1) 2021 Outstanding Student Paper Award (2021年度日本大気化学会学生優秀発表賞)、再解析エアロゾルデータの精度検証に基づくインドシナ半島の光散乱/吸収 AODの時空間変動, Thailand、2021年11月11日(令和3年度)、大野健(入江仁士の指導学生、共著)
- 2) 千葉大学大学院融合理工学府学府賞、Development of the efficient calculation of polarized radiative transfer based on the correlated k -distribution method and forward peak truncation approximation、千葉大学、2022年3月(令和3年度)、桃井裕広(入江仁士の指導学生)

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない

IV. 英文Abstract

Development of GOSAT-2 PM_{2.5} and BC Product Validation Methodology Applicable to an International Observation Network

Principal Investigator: Hitoshi IRIE

Institution: Chiba University, 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba 263-8522, JAPAN

Tel: +81-43-290-3876 / Fax: +81-43-290-3876

E-mail: hitoshi.irie@chiba-u.jp

Cooperated by: Japan Aerospace Exploration Agency

National Institute for Environmental Studies

[Abstract]

Key Words: PM_{2.5}, Black carbon, GOSAT, International observation network, Aerosol

The Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2), launched in 2018, is equipped with the Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation Cloud and Aerosol Imager 2 (TANSO-CAI-2) and aims to observe the amounts of fine particulate matter (PM_{2.5}) and black carbon (BC). PM_{2.5} is an extremely important environmental factor with adverse health effects. One of its main components is BC, which also has the third largest positive radiative forcing after carbon dioxide and methane. Thus, monitoring PM_{2.5} and BC is of great scientific significance and expected to contribute significantly to climate change related policies. However, it is difficult to directly compare the satellite PM_{2.5} and BC data with those from existing ground-based measurements, because they capture different physical phenomena. Here, continuous year-round observations with the BC instrument (COSMOS) and various ground-based instruments (PM_{2.5} sensor, sky radiometer, MAX-DOAS, etc.) were started in Chiba, Japan. In addition, intensive observations were conducted three times with the Federal Reference Method (FRM) and the portable Fourier Transform Infrared Spectrometer (EM27/SUN). The PM_{2.5} sensor and FRM PM_{2.5} mass concentration data were found to be in good agreement under dry conditions. The MAX-DOAS observations showed that important relative humidity (RH) information could be obtained together with the aerosol height distribution. Various aerosol optical property data were compared with PM_{2.5} and BC data to investigate their correlations, and it was found that optical parameters that proxy for PM_{2.5} and BC mass concentrations can be derived from simultaneous sky radiometer and MAX-DOAS observations. Detailed theoretical analyses, comparisons with other satellite data, and sensitivity experiments were conducted using the GOSAT-2/CAI-2 aerosol retrieval algorithm to list and quantify the major error components. In addition, machine learning revealed that the fine-mode aerosol optical thickness, planetary boundary layer height (PBLH), and RH are important for the retrieval of PM_{2.5} and BC. We also compared GOSAT-2/CAI-2 data with the optical parameters found in this study as proxies for PM_{2.5} and BC mass concentrations and confirmed that PBLH and RH are important. Thus, the simultaneous observation of sky radiometer and MAX-DOAS not only estimates the uncertainty in PM_{2.5} and BC data, but also evaluates important parameters of the algorithm. Thereby, more precise algorithm evaluation, and eventually, rapid algorithm improvement are expected. Upon these results, we proposed a new international observation network,

A-SKY, which deploys both sky radiometers and MAX-DOAS.