

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 (令和元年度～3年度)

【重点課題⑧】 地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

【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

<研究代表者>

入江仁士 (千葉大学 環境リモートセンシング研究センター)

<サブテーマ担当機関>

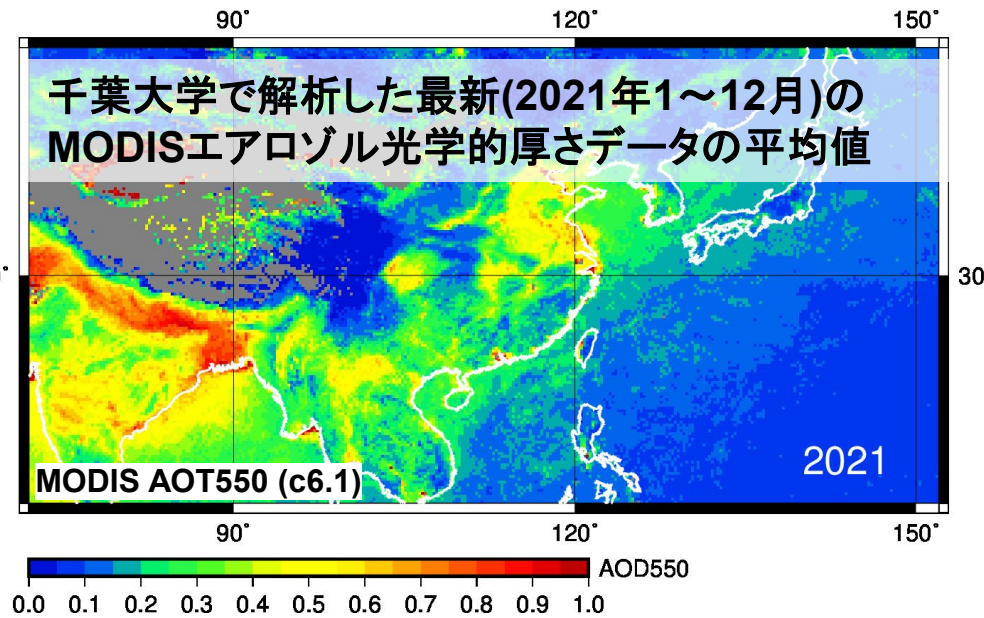
サブテーマ(1) 千葉大学(入江仁士、齋藤尚子)

サブテーマ(2) 宇宙航空研究開発機構(橋本真喜子)

サブテーマ(3) 国立環境研究所(森野勇、高見昭憲、藤谷雄二)

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。



■気候変動をもたらす主な駆動要因の、1750年を基準とした2011年における放射強制力の推定値

排出された物質	最終的な大気中の駆動要因	排出及び駆動要因別の放射強制力	確信度
よく混合された温室効果ガス	二酸化炭素	二酸化炭素	1.68 [1.33 ~ 2.03] 非常に高い
	メタン	二酸化炭素 成層圏水蒸気 オゾン メタン	0.97 [0.74 ~ 1.20] 高い
	ハロカーボン類	オゾン クロロフルオロカーボン類 ハイドロフルオロカーボン類	0.18 [0.01 ~ 0.35] 高い
	一酸化二窒素	一酸化二窒素	0.17 [0.13 ~ 0.21] 非常に高い
人為起源の短寿命のガスとエアロゾル	一酸化炭素	二酸化炭素 メタン オゾン	0.23 [0.16 ~ 0.30] 中程度
	非メタン揮発性有機化合物	二酸化炭素 メタン オゾン	0.19 [0.05 ~ 0.15] 中程度
	窒素酸化物	硝酸塩 メタン オゾン	-0.15 [-0.34 ~ -0.03] 中程度
	エアロゾルと前駆物質 (鉱物ダスト、二酸化硫酸、アンモニア、有機炭素、黒色炭素)	鉱物ダスト 硫酸塩 硝酸塩 有機炭素 黒色炭素	-0.27 [-0.77 ~ 0.23] 高い
	エアロゾルによる雲調整		

BCによる大きな正の放射強制力

IPCC第5次報告書より

- ▶ 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

GOSAT-1

2009年1月23日打ち上げ

GOSAT-2

2018年10月29日打ち上げ

GOSAT-GW

2023年度打ち上げ予定

GOSAT-2 ※世界に先駆けたLLGHG&AQ衛星ミッション

- FTS-2(温室効果ガス観測センサ2型)
- CAI-2(雲・エアロソルセンサ2型)

- CO₂やCH₄等のデータの補正
- PM_{2.5}やBC量の推計

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」

【背景・必要性】

GOSAT-2は、搭載予定のTANSO-CAI-2の観測データから、大気中の**微小粒子状物質**及び**黒色炭素量**の推計を目指している。しかし、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。

本研究課題の研究開発目的

- ▶ GOSAT-2の微小粒子状物質及び黒色炭素量の推定データの**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。
- ▶ 開発した評価方法は**国際観測網に展開させる方法を提案**する。

研究目標(抜粋)

【全体】

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】

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。

【サブテーマ2】

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】

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。

研究開発内容のイメージ

(基本的に研究開始時のポンチ絵)

GOSAT-2



サブ② (JAXA)
 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① (千葉大)
 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

SKYNET/スカイ
 ラジオメータ



PM_{2.5}計
 BC計

比較

SKYNET観測網
 サイトにおいて

[ターゲットプロダクト]

PM_{2.5}・BC

比較

SKYNET千葉サイトで重点的に

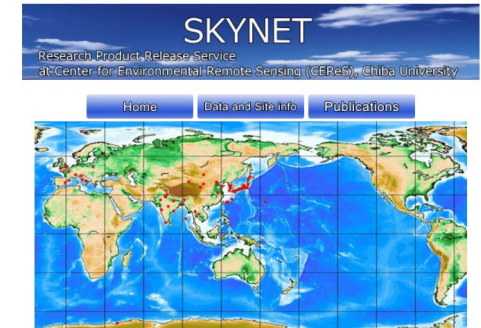
[中間プロダクト]

AOT・AE・SSA

エアロゾル光学的厚さ オングストローム指数 単一散乱アルベド

本研究の成果により...

- ▶ 開発した評価手法の国際観測網への発展
- ▶ GOSATシリーズ(1,2,GW) データ利用の促進



サブ③ (NIES)
 GOSAT-2のPM_{2.5}/BC
 データ評価手法の提案

都市域のSKYNET千葉サイト[充実した地上観測機器群]

- ・スカイラジオメータ・PM_{2.5}計・BC計 → GOSAT-2プロダクトとの比較
- ・4方位角MAX-DOAS → エアロゾル及び前駆体の**高度分布**・**水平分布**の評価
- ・ミーライダー(NIES) → エアロゾルの**高度分布**の評価
- ・そらまめくん(環境省) → エアロゾル及び前駆体の**水平分布**の評価
- ・AERONET(NASA) → スカイラジオメータとの複合解析
- ・マイクロ放射計・日射計・雲カメラなど → 雲・放射場の評価

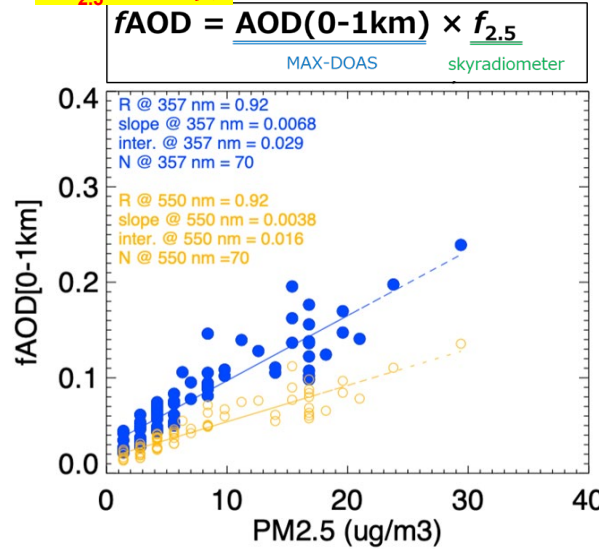
研究成果・成果の概要

サブ1: 評価方法開発のための観測

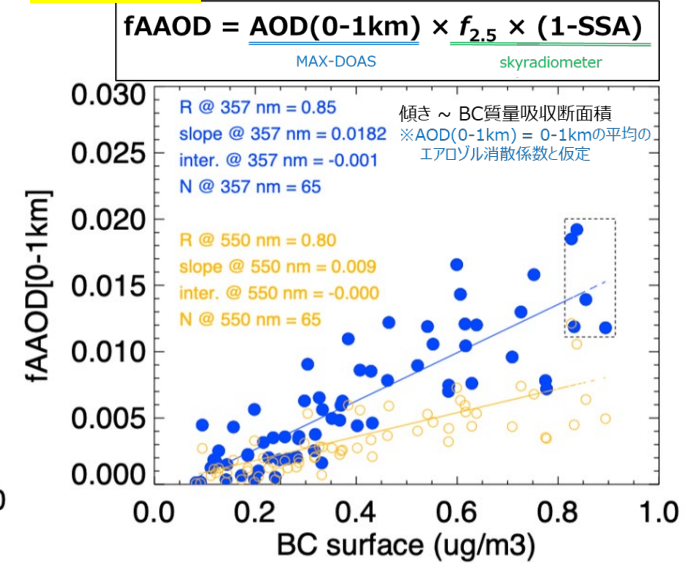
3回の集中観測と通年連続観測の実施



PM_{2.5}のプロキシ

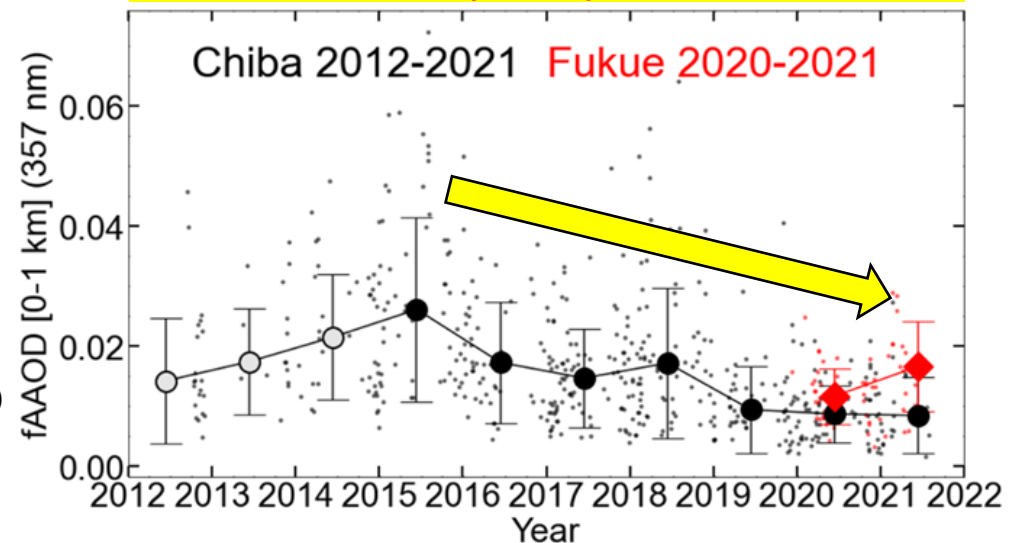


BCのプロキシ



Damiani and Irie et al. (2021)

トレンド解析 fAAOD(0-1km)の減少 → BCの減少



【アルゴリズム開発】

スカイラジオメーター (SR-CEReS)

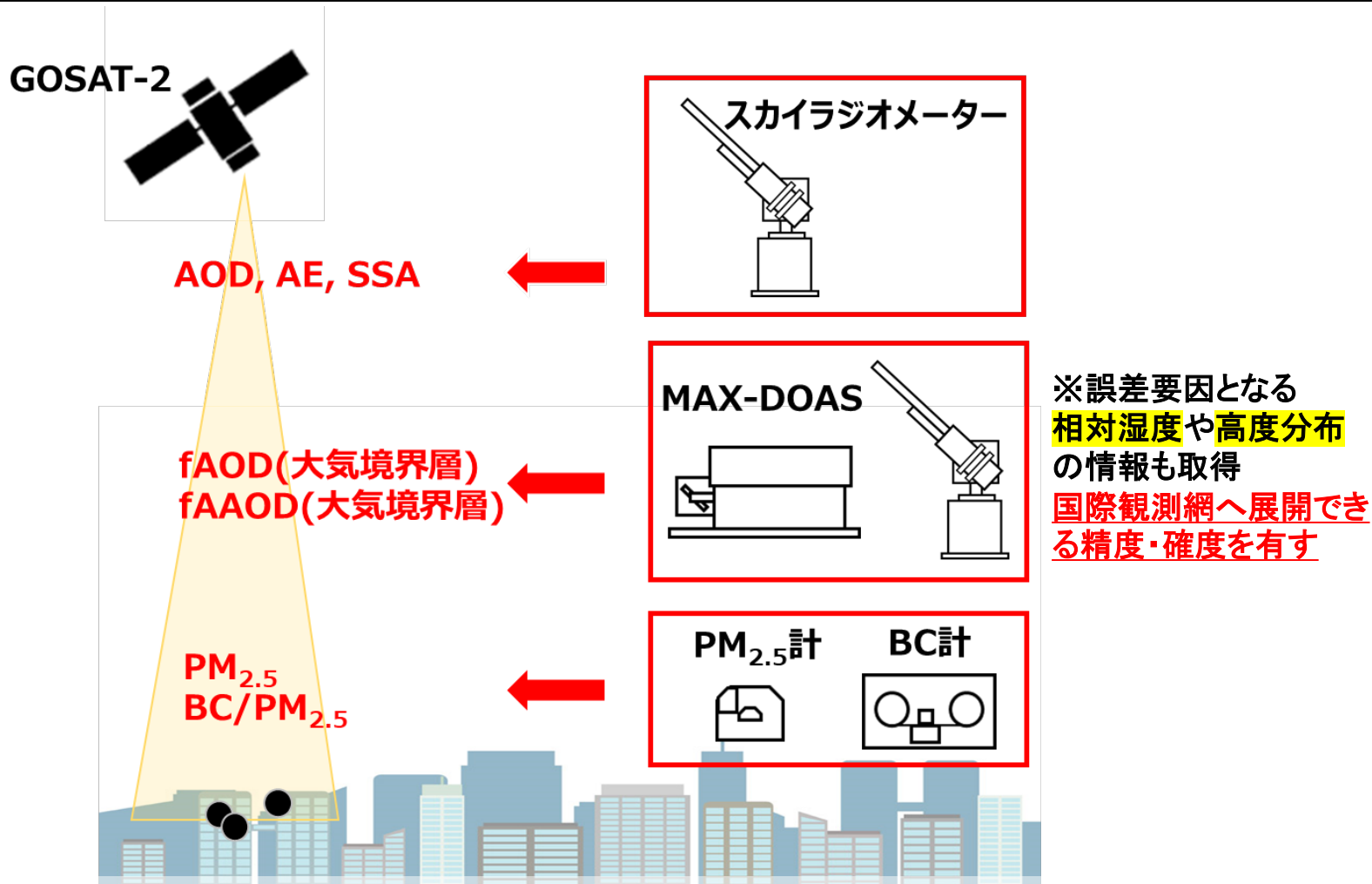
(e.g., Mok & Irie et al., 2018; Irie et al., 2019)

- AOD, SSAの高精度化と検証
- AAOD(光吸収のAOD)
- AAE(光吸収のオンゲストローム指数)
- $f_{2.5}$ (微小粒子エアロゾルのフラクション)など

MAX-DOAS (JM2) (e.g., Irie et al., 2011, 2015, 2020)

- エアロゾル消散係数(AEC)と各種微量ガス(NO₂等)の高度分布
- 水蒸気濃度→相対湿度(RH)

サブテーマ1：開発した評価方法



- ▶ より精密なアルゴリズム評価、それに基づく迅速なアルゴリズムの改良が可能。
- ▶ 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中、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。また、濃度が低い場所でも有効な検証方法となる。

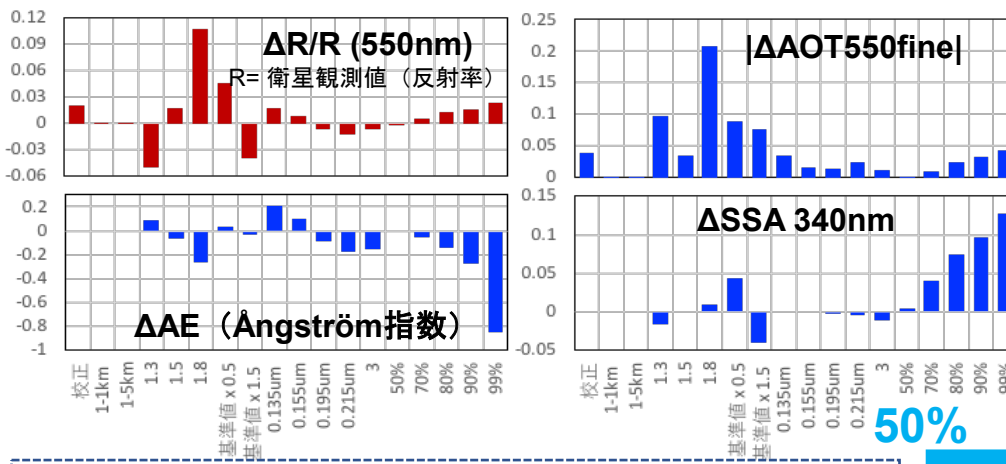
サブ2: 誤差要因の評価とリスト作成

誤差評価と誤差要因のリスト

CAI-2輝度校正、MWPMエアロゾルモデルによる中間プロダクトのバイアス誤差評価

エアロゾルモデル (基準値) と誤差評価に用いた実験値
 ※BCF=0.01を仮定

エアロゾルモデル基準値	エアロゾル層高度(厚み)	屈折率実部	屈折率虚部	粒径モード半径	粒径分散	相対湿度
基準値	1-3km	1.43	4.40E+03	0.175 μ m	2.24	30%(乾燥)
実験値	1-1km 1-5km	1.3 1.5 1.8	基準値x0.5 基準値x1.5	0.135 μ m 0.155 μ m 0.195 μ m 0.215 μ m	3	50% 70% 80% 90% 99%



複素屈折率実部 → AOT & AE, 粒径 → AE
 虚部 → SSA, 相対湿度 → AE & SSA

50% → 99%
 相対湿度

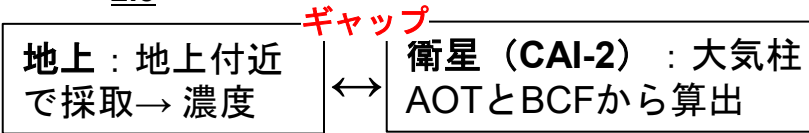
▶ ePM_{2.5}・BCデータへの影響 → ΔAOT_fやΔSSAの関数となっている (境界層高度一定のもと)

$$ePM_{2.5}の誤差 = f(\Delta AOT_f, \Delta SSA) \quad \Delta BCの誤差 = f(\Delta AOT_f, \Delta SSA)$$

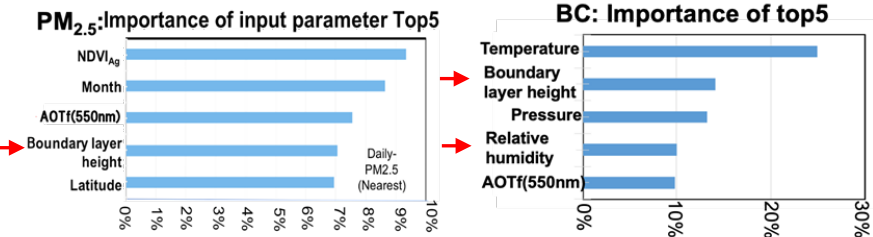
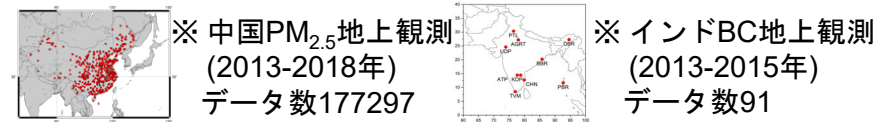
□ これらの評価結果・リストは、スカイラジオメーターからは取得できない境界層高度や相対湿度の重要性とともに、サブテーマ1に提供した。

□ サブテーマ1で示されたfAOD₃₅₇(0-1km)やfAAOD₃₅₇(0-1km)の結果と密接に関連する

PM_{2.5}・BC検証に有効な変数の調査



検証および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 → 精度改善に有効なImportance (IP) を出力 (下図)



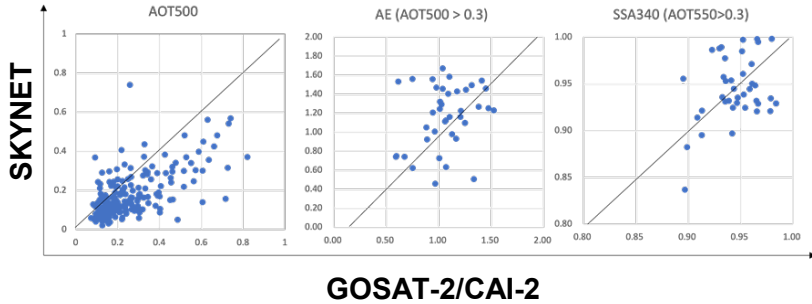
- PM_{2.5}・BCの導出には、微小粒子エアロゾル (AOT_f)、境界層高度・相対湿度が重要
- NDVI、月、緯度のIP高 → 季節性や地域性
- ※ 注) BCはデータが少ない

サブ2: 地上観測・衛星観測との比較と提案

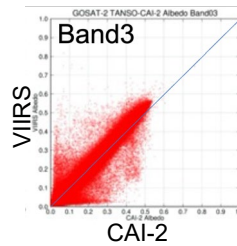
□ SKYNET vs. GOSAT-2データとの比較

• MWPM解析結果：2019年3月~2020年5月

- AOT550：SKYNETより過大評価
- AE, SSA：AOT550 > 0.3 (緑)で相関



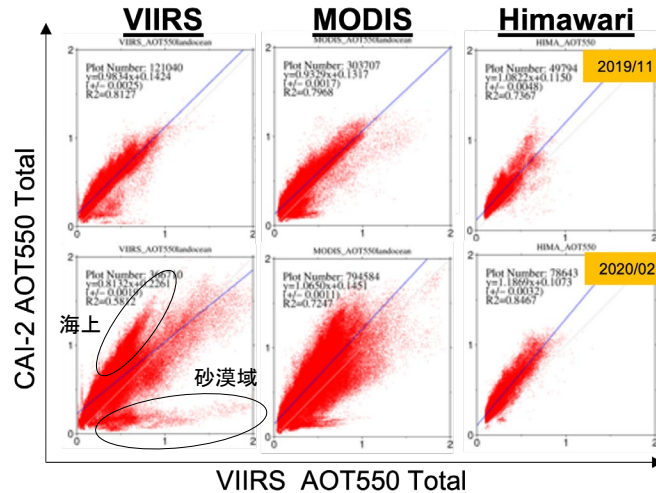
□ 地表面反射率の比較 (CAI-2 vs VIIRS BRDF補正有)



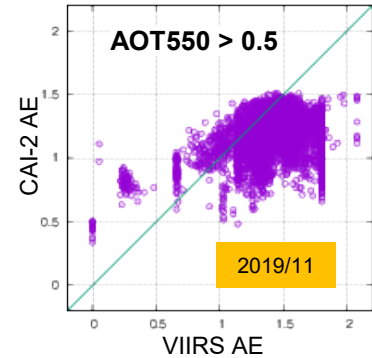
Band	バイアス	バラツキ	データ数
2	-0.010	0.023	840367
3	+0.000	0.029	840367
4	+0.003	0.040	840367
5	-0.001	0.040	840367
7	-0.018	0.024	835687
8	-0.006	0.030	835687
9	-0.007	0.039	835687
10	-0.002	0.040	835687

- 2019年8月1-12日
- AOT550の比較
- バイアス：-0.01 ~ +0.003、バラツキ0.02~0.04
- 概ねVIIRSの地表面反射率と一致

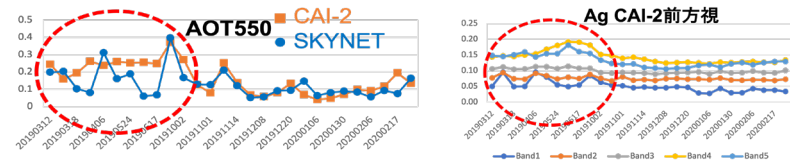
□ VIIRS, MODIS, Himawari-8との比較



AOT550やAEのデータ質を相関係数などで評価

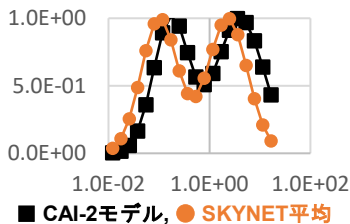


□ SKYNET千葉大学サイトでの比較 (時系列)



- AOTは過大傾向
- 地表面反射率(Ag)が大きい時に過大となる傾向

エアロゾルモデル粒径分布の比較 (AE比較)



	最小AE	最大AE
Default	-0.02	1.40
SkyNET5年平均	-0.08	1.84

- エアロゾルモデルにより最大 $\Delta AE \sim -0.5$ のバイアスが発生 (千葉サイトのAE年変動 ~ 0.2)

□ アルゴリズム改善への提案

- AEの過小評価傾向：→ 地上観測データを用いた地域別のエアロゾルモデルの導入
- エアロゾルの過小・過大評価：海洋射出光を考慮 (Shi et al., IEEE-TGRS 2020を準備中)。砂漠域では短波長のみ使用に改良
- ePM_{2.5}とBC算出方法：境界層高度情報と水蒸気情報、サブ1の結果の導入

サブ3：G2プロジェクトと本課題提案の検証方法のリスト

表 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)	GOSAT-2 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 ^k	直接+間接+補助	×	○

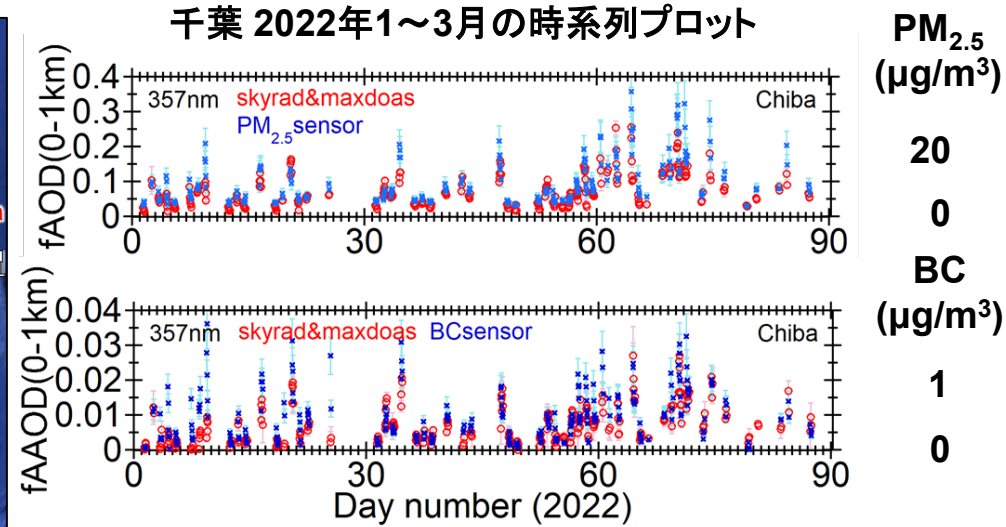
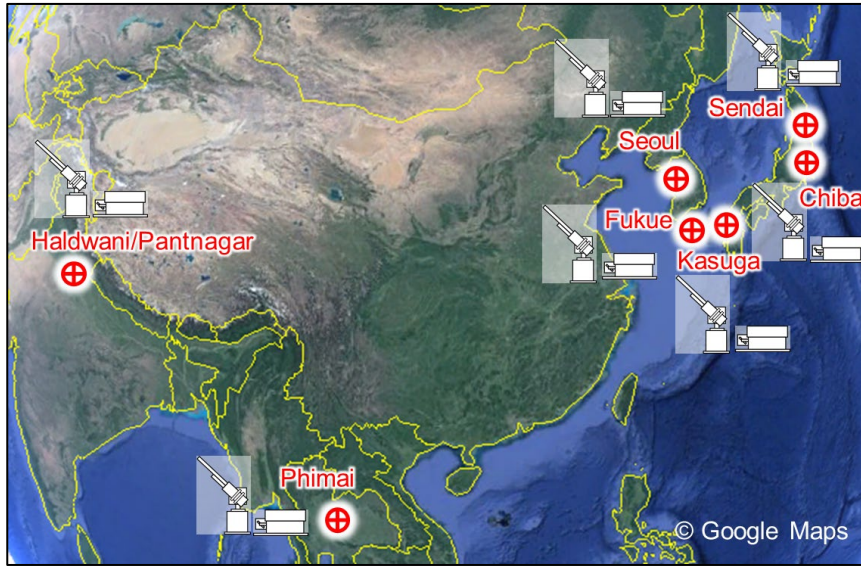
サブ3:A-SKY国際観測網の提案



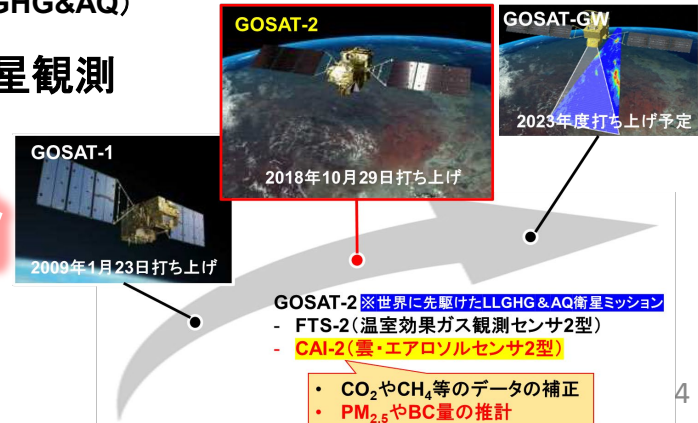
環境政策等への貢献

■新たに開発したリモートセンシング技術 → PM_{2.5}とBCの全国モニタリング展開へ

国産・空間代表性高い・費用対効果高い



■新たに開発した我が国発の国際観測網 → 最先端環境研究での我が国のリーダーシップへ (LLGHG&AQ)



研究目標の達成状況

【全体】

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。

☆さらに...



目標を上回る成果

世界をリードするLLGHG&AQをターゲットと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んだ



【サブテーマ1】

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。

【サブテーマ2】

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】

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。

研究成果の発表状況

◎誌上発表<論文(査読あり)> : 19件

- Nakajima, T., H. Irie, et al., 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.
- Damiani, A., H. Irie, et al., 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.
- 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.
- Fujitani, T., 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.

◎その他誌上発表 : 3件

- 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.

◎口頭発表 : 68件

- **SKYNET 国際Workshop主催**。15か国からの参加。

◎「国民との科学・技術対話」の実施 : 11件

◎本研究に関連する受賞 : 2件

