

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04238

研究課題名（和文）高層ビル街の大気汚染物質立体計測のための高距離分解能ライダーの開発

研究課題名（英文）Development of a mobile vehicle lidar with a high range resolution for observing spatial distributions of atmospheric pollutants along streets with high-rise buildings

研究代表者

矢吹 正教（Yabuki, Masanori）

京都大学・生存圏研究所・特定研究員

研究者番号：80390590

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：高層ビルが並ぶ都市キャノピー周辺の汚染物質は、小さなスケール内でおこる輸送・拡散・変質過程により、局所的な高濃度域を含む複雑な濃度変動を示す。汚染物質の動態を建物～街区スケールで把握するため、近距離から数十センチメートル間隔で大気汚染物質の空間分布計測ができる高距離分解能ライダーを開発した。このライダーを用いた車載移動計測から、高層ビル街に囲まれた都市キャノピー内外の精緻な大気エアロゾル分布の立体構造を可視化し、交通量の少ない早朝に出現するビルの高さより低い高度内のエアロゾル多層構造や、東京湾から内陸に向かう道路上の境界層高度の特徴などを調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の都市大気環境問題は、広域汚染に加えて、住環境や健康被害を建物（～10 m）・街区（～100 m）スケールで考える環境影響評価が重要視されている。本研究課題で開発した前例のない高い時空間分解能での大気汚染物質分布を提供する技術は、大気汚染物質の予測精度向上のための評価や数値モデルへのデータ同化、都市大気環境の理解深化、それらの結果を反映した大気汚染対策や都市計画に貢献する。

研究成果の概要（英文）：Knowledge of localized air quality within street canyons is important in urban areas with high-rise buildings that alter wind and pollutant transport. The purpose of this study is to construct a mobile lidar for profiling optical properties of near-surface aerosols along the street canyon while maintaining the safety condition of the laser beam. We tested the practical applicability of the proposed lidar for aerosol detection in the Tokyo Bay area and found the multi-layered structure near the surface before progressions of the convective mixing along with the increase in traffic.

研究分野：大気物理学

キーワード：車載ライダー 高距離分解能 近傍計測 アイセーフ 都市大気 都市キャノピー エアロゾル 移動観測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

微小粒子状物質 $PM_{2.5}$ に代表される大気汚染は、肺がんや呼吸器疾患など健康に甚大な影響を及ぼす。近年の都市大気環境問題は、従来の広域汚染に加えて、住環境や健康被害を建物 (~10 m)・街区 (~100 m) スケールで考える環境影響評価が重要視されている。高層ビルが並ぶ都市キャノピー周辺では、ビルの上を流れる背景風速場や地表付近の構造物、人工排熱・放射熱等により複雑な渦構造が生じている。このため、都市キャノピー内の汚染物質は、小さなスケール内でおこる輸送・拡散・変質過程により、局所的な高濃度域を含む複雑な濃度変動を示す。多くの人・車両が行き交う高層ビル街の大気汚染物質の変動要因を、観測・理論の両面から精査し、その対策や都市計画の評価に活用することが求められている。

都市キャノピー内の風の流れや自動車等から排出される大気汚染物質の予測および対策評価には、熱流体解析や流れの非定常数値シミュレーションが用いられる。計算機性能の向上により、近年では高解像度の気象・大気化学モデルと結合したり、汚染物質の濃度分布を数十センチメートルの空間分解能で推定したりする数値解析実験が試みられている。シミュレーション結果の精度検証は風洞実験やモデル間の比較が主であり、数値計算に近い解像度で実測から汚染物質の時空間変動を検証した例はほとんどない。

大気物質のプロファイル計測をするリモートセンシングに、大気ライダーが広く使われている。その距離分解能は数十メートル~数百メートルであり、またレーザーと望遠鏡の視野重なりの影響で、観測可能な下限高度は 100 m 以上となるものが多い。そのため、従来型リモセンは、都市(地域)スケールの現象の理解には有用であるが、数十~数百メートル内の空間を解像する建物~街区スケールの研究には積極的に適用されてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、数十センチメートル間隔で大気汚染物質の空間分布を近距離から計測できる高距離分解能ライダーを開発し、従来型リモセンと地上定点観測との空間ギャップを補間する。高層ビル街でライダーの車載移動観測を実施し、都市キャノピー内での大気汚染物質の時間・空間的な変動を高解像度で可視化する。計測基盤技術として確立するためには、ライダー計測から得られる「推定値の精度評価」と「時空間分解能の定量化」が重要となる。ライダー視野を水平方向に向けた水平観測と地上観測、および車載移動観測とルート上の高層ビルをプラットフォームとした高所の直接観測との同期計測データを利用して、ライダー推定値の検証を行う。

3. 研究の方法

車載ライダー開発にあたり、以下の観点から開発を行った。

- (1) 近傍計測を可能とする新しい受光光学系の構築
- (2) 数十センチ以内の高距離分解能計測を実現する光源および信号処理部の構成
- (3) 都市域で安全に運用するためのレーザー照射に対する安全対策
- (4) 機動性の高い普通自動車に搭載可能な小型・低電力のシステム構成

また、得られたデータの検証観測を、比較観測装置の設備が整う滋賀県の大学観測施設、および東京の高所観測点(東京理科大学(飯田橋)など)近くで行った。実証観測は、東京湾から内陸部(墨田区・新宿区・港区・中央区周辺)の一般道上で実施した。

4. 研究成果

(1) 車載ライダーの概要

図 1 に、開発した車載ライダーの概要を示す。ライダーの光源には、波長 355 nm、パルス幅約 1 ns のレーザーを用いた。このレーザーは、射出点における単位面積あたりのパルスエネルギーが「最大許容露光量 (JIS C 6802)」と比べて 2 桁小さいくアイセーフ条件を満たす。さらに、都市域の一般道を走ることを考慮し、車が下を通過する陸橋など、道路横断構造物上へのレーザー照射を避ける機構を追加した。この機構では、0.1 秒ごとに 360 度面走査を行う障害物検知ライダーにより進行方向上空の障害物を検知し、ビームシャッターで物理的にレーザー射出を停止させることができる。評価実験では、検知領域内の 16 m 先に障害物が通過してからビームシャッターを閉じるまでの遅延時間は、 226 ± 51 ms (最大で 316 ms) であった。これは、高さ 5 m の陸橋を時速 50 km/s で通過する場合に、その約 8 m 以上手前でレーザー射出を止めることに対応する。

検出部・データ処理部は、観測対象に応じて 2 種類から選択できるようにした。1 つ目は、サンプリングレート 1.6 GHz のフォトンカウンタであり、最大で 32 波長の同時計測が可能である。2 つ目は、サンプリングレート 400 MHz でアナログ計測 2ch とフォトン計測 1ch の同時計測ができるデータ収集モジュールと専用の光電子増倍管から構成される。前者はラマン散乱・蛍光など

の多波長計測に、後者は広いダイナミックレンジが要求されるような観測に適している。また、望遠鏡の前に複数の小型ウェッジプリズムを置いたライダー用光学系を構築し、重なり関数補正後の近傍可測距離を最良で望遠鏡から 2m まで近づけた。評価用の車載ライダーでは、遠方の信号強度とのバランスを考慮し、近傍可測距離を 7~8 m に設定した。

ライダーは、サンルーフ付きのミニバン（ホンダ・オデッセイ）に搭載した。車の振動に対応するため、レーザー・望遠鏡およびサンルーフ下の打ち上げ用ミラーは、連結した光学定盤上に固定した。高層ビル街でも正確な位置推定が期待できる準天頂衛星も受信可能な GNSS 受信機を搭載し、計測ルートの記録や道路の起伏を考慮したライダー信号の高度補正に用いた。その他、必要に応じて、エアロゾル粒子数濃度を直接計測する粒子数計数装置、道路や建物表面の温度計測用のサーマルセンサの搭載が可能である。これらの装置は、小型のバッテリーで 24 時間以上運用できる。また、検証観測や圃場の上の移動観測に対応するため、2 枚のミラーを用いた水平移動観測にも対応した。

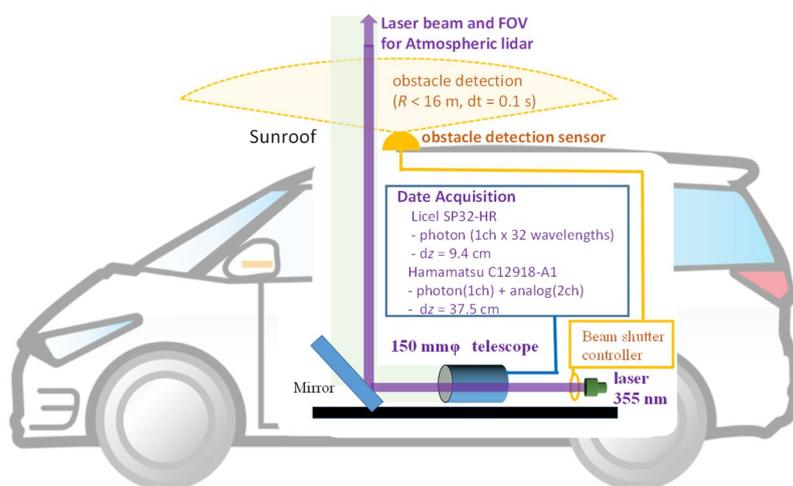


図 1 車載型ライダーの概要

(2) 車載ライダー実証観測例

東京湾周辺のエアロゾル空間分布観測

東京湾周辺では、走行距離約 25 km の一般道を速度 50 km/h 以下で移動観測する実験を、1 年に数回 ~ 10 回の移動観測を実施した。信号積算時間は 1 秒に設定したが、データ保存等の処理に時間がかかり、実際は約 1.8 秒ごとの計測となった。信号は高度 100 m までは 0.375 m、それ以降は 1.875 m に平均化した。ここでは、夏季と冬季の観測例を紹介する。

図 2 に、2020 年 7 月 3 日 6:27 ~ 7:55 JST の高度 650 m 以下の大気境界層エアロゾル消散係数の空間分布を示す。場所だけでなく時間的な変化も含まれるが、境界層高度および消散係数の値が海側で低く、内陸部で高くなるような傾向が見られた。とりわけ、浅草・上野周辺で濃度が最大となった。また、本装置の特徴である高度 100 m 以下の近傍計測結果を図 3 に示す。このルート上は、湾岸部は大型の物流倉庫や工場が立ち並ぶが、内陸部の多くは高さ数十メートル以上のビル群に囲まれている。早朝の交通量が少ないときは、地表面近くのエアロゾル濃度が相対的に高く、またビルに囲まれた地域ではビルの高さより低いところにエアロゾルの少ない空間が存在するなど複雑な多層構造がみられた（図 3 左）。一方、太陽が昇り交通量が増える時間帯になると、鉛直方向には均一に混合され、海からかの距離、交差点の有無、交通量等に対応した地域ごとの差が顕著になった。また、冬季の観測例となる 2021 年 12 月 24 日 3:58 ~ 5:28 JST のケースでは、高度数百メートルの非常に安定した大気境界層が広域に分布することが示唆された（図 4）。

本課題で開発した車載ライダーにより、大きな交差点や、高速道路の高架橋など局所的な排ガスの発生源が想定される場所、および両サイドを高層ビルに囲まれた道路上空等、従来の観測では捉えるのが難しかったエアロゾルの不均一な空間分布が可視化された。

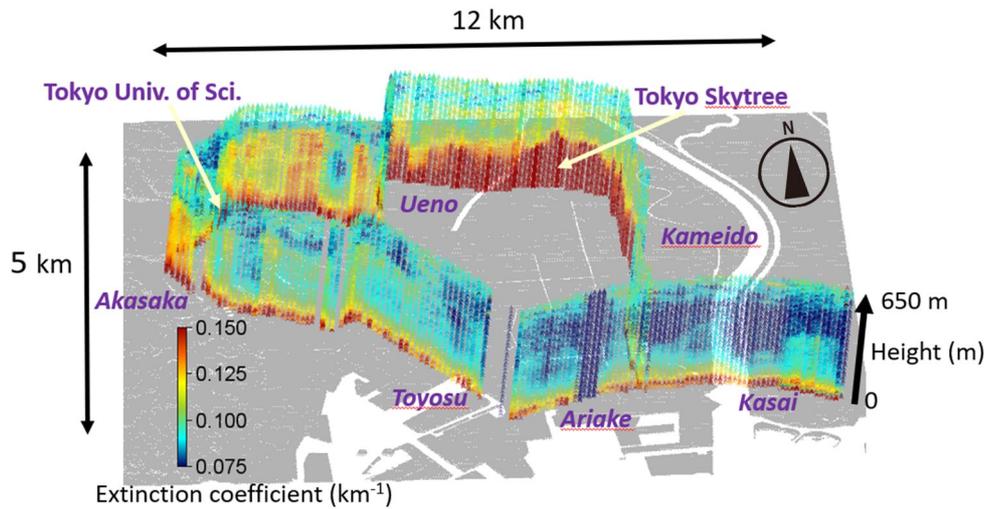


図2 東京湾エリアにおけるエアロゾル消散係数空間分布（波長 355 nm、観測高度 7 ~ 650 m、2020 年 7 月 3 日 6:27-7:55 JST）

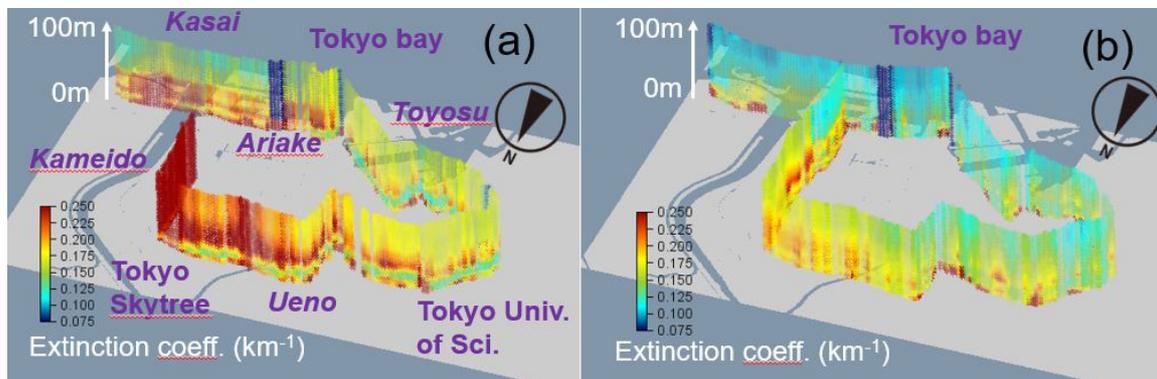


図3 東京湾エリアにおける地表付近のエアロゾル消散係数空間分布（波長 355 nm、観測高度 7 ~ 100 m、左：2020 年 7 月 3 日 5:00-6:20 JST、右：同日 6:27-7:55）

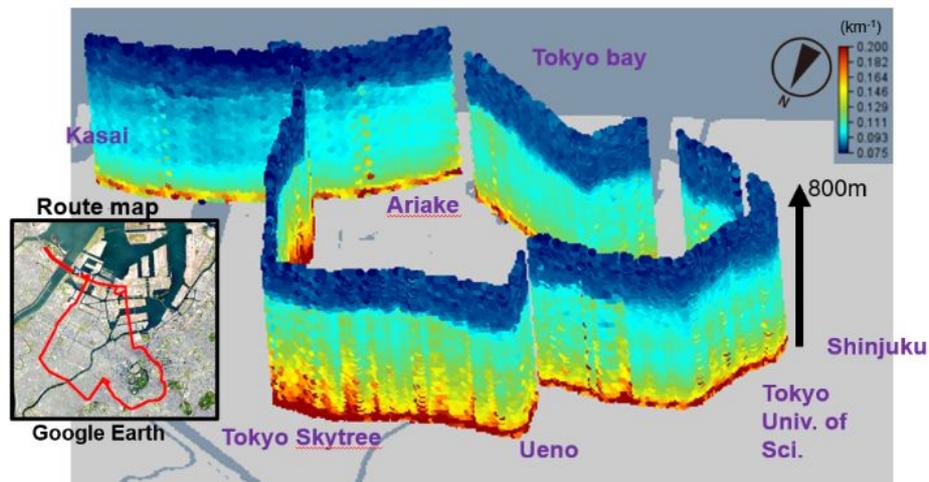


図4 東京湾エリアにおけるエアロゾル消散係数空間分布（波長 355 nm、観測高度 7 ~ 800 m、左：2021 年 12 月 24 日 3:58-5:28 JST）

圃場のアロゾル水平分布観測

約 600 m 四方の圃場（水田）を対象とした高度約 1.5 m の周回移動観測の結果を図 5 に示す。農地一周あたりの所要時間は約 5 分で、観測車の平均速度は約 30 km/h であった。図 5(左)は、車に搭載した光散乱式粒子計数器 (OPC) で計測したルート上の粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 以上のエアロゾル数濃度である。周囲の大気を吸引する直接計測装置で車載移動観測を行う場合、前方を走る車の排気の影響が大きく受けるため、交通量がほとんどない地域でのみ有効である。ここでは、ルート上の土手の草刈りをした付近で、粒子濃度が高くなる傾向がみられた。一方、ライダーを用いると道路以外の圃場の広い範囲のエアロゾル水平分布を面的に捉えることができる（図 5(右)）。この車載ライダーの特徴をスマート農業の大気・環境センサとして活用すべく、エアロゾル以外の計測項目の拡充を検討している。

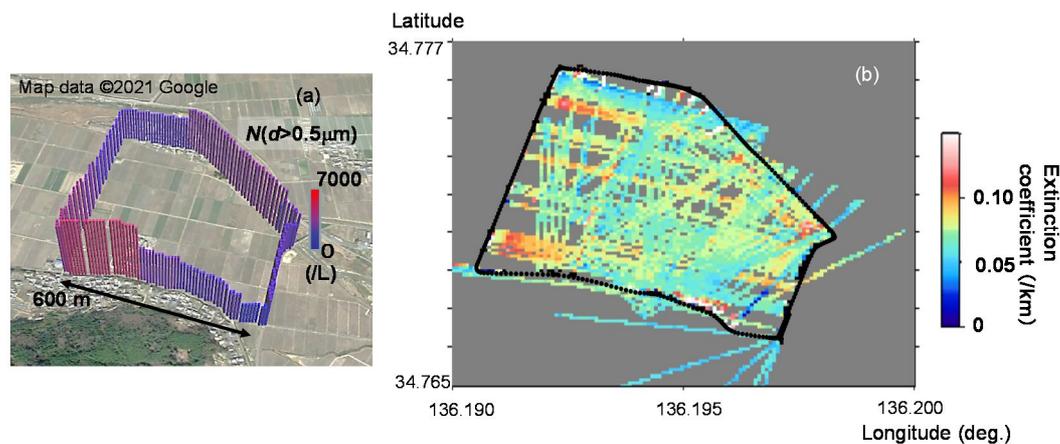


図 5 (左) 約 600 m 四方の圃場（水田）を囲むルート上のエアロゾル数濃度（粒径： $0.5 \mu\text{m}$ ）(右) 圃場からの高さ約 1.5 m の波長 355 nm のエアロゾル消散係数（2021 年 8 月 22 日 14:49–14:55 JST）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yabuki, M., K. Miura, T. Mori, H. Hayami, and H. Kuze	4. 巻 -
2. 論文標題 Aerosol Spatial Distribution Observed by a Mobile Vehicle Lidar with Optics for Near Range Detection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 五十嵐 博己、森 樹大、三浦 和彦、岩本 洋子、大河内 博、和田 龍一、加藤 俊吾	4. 巻 37
2. 論文標題 夏季の富士山頂における粒子数濃度の経年変化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 エアロゾル研究	6. 最初と最後の頁 36～44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11203/jar.37.36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 三浦 和彦	4. 巻 45
2. 論文標題 東京都心における大気エアロゾル粒子の変動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 大気化学研究	6. 最初と最後の頁 A03
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yabuki Masanori, Kawano Yuya, Tottori Yusaku, Tsukamoto Makoto, Takeuchi Eiji, Tsuda Toshitaka	4. 巻 237
2. 論文標題 A Raman Lidar with a Deep Ultraviolet Laser for Continuous Water Vapor Profiling in the Atmospheric Boundary Layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 3001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202023703001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 矢吹正教, 三浦和彦, 久世宏明, 松木一人, 内保裕一, 竹内栄治, 長谷川壽一
2. 発表標題 紫外ライダーによる地表面に近い大気の気象・環境観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yabuki, M., K. Miura, T. Mori, H. Hayami, and H. Kuze
2. 発表標題 Aerosol Spatial Distribution Observed by a Mobile Vehicle Lidar with Optics for Near Range Detection
3. 学会等名 30th International Laser Radar Conference (ILRC-30) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yabuki, M., K. MIURA, T. Mori, H. Hayami, and H. Kuze
2. 発表標題 A mobile vehicle lidar for observing aerosol spatial distributions with high-range resolutions
3. 学会等名 12th Asian Aerosol Conference (AAC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢吹正教, 三浦和彦, 森樹大, 速水洋, 久世宏明
2. 発表標題 車載ライダーによる都市大気境界層内のエアロゾル観測
3. 学会等名 第39回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢吹正教、石井侑志、三浦和彦
2. 発表標題 車載型ライダーによる地上付近のエアロゾル水平分布観測
3. 学会等名 第39回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢吹正教、藤井一輝、三浦和彦、森樹大、速水洋、久世宏明、齊藤保典
2. 発表標題 近距離計測に対応した車載型ライダーによる高層ビル街上空のエアロゾル立体分布計
3. 学会等名 第38回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢吹正教、藤井一輝、三浦和彦、速水 洋
2. 発表標題 大気エアロゾル立体観測のための車載ライダーの開発
3. 学会等名 第37回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢吹正教、北藤典也、速水 洋
2. 発表標題 近距離のエアロゾル分布計測に対応した高距離分解能ライダー
3. 学会等名 第36回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yokoyama M., A. Maeda, T. Sato, H. Igarashi, T. Mori, K. Miura, R. Misumi, Y. Uji, Y. Iwamoto, Y. Tobo, J. Uetake
2. 発表標題 Characteristics of the cloud condensation nuclei measured in the Tokyo Skytree
3. 学会等名 11th Asian Aerosol Conference (AAC) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山晶美, 三浦和彦, 森樹大, 三隅良平, 宇治靖, 岩本洋子
2. 発表標題 2018-2019年の東京スカイツリーにおける雲凝結核の測定
3. 学会等名 第24回大気化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丑久保裕太, 五十嵐博己, 佐藤丈徳, 森樹大, 三浦和彦, 三隅良平, 宇治靖, 速水洋
2. 発表標題 東京スカイツリーにおける新粒子生成及び粒子成長イベントの観測
3. 学会等名 日本大気電気学会第98回研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三浦 和彦 (Miura Kazuhiko) (00138968)	特定非営利活動法人富士山測候所を活用する会(富士山環境研究センター)・第一研究部・シニアリサーチフェロー (92671)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------