

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11635

研究課題名（和文）ドローンを活用した大気エアロゾルのフラックス計測

研究課題名（英文）UAV-borne atmospheric aerosol flux measurement

研究代表者

宮川 拓真（Miyakawa, Takuma）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門（地球表層システム研究センター）・副主任研究員

研究者番号：30707568

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、2機のドローンを用いて、それぞれ大気エアロゾル濃度と気象要素の鉛直観測を行い、勾配法による大気エアロゾルの鉛直フラックス計測を試行した。ドローンによる各観測の精緻化に関わる実験を行ったうえで、神奈川県横須賀市にて観測フライトを実施し、気象条件などを厳しく精査して、わずか3例ではあるが沈着フラックスの定量に成功した。ドローンを用いた世界で初めての例であると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温室効果気体・大気エアロゾルといった大気組成成分について、濃度だけでなく、移動量（フラックス）の観測も数値モデルの検証・精緻化に強く求められてきたものの、これまで場所・設備の問題から観測は制限されてきた。本研究では、大気エアロゾルを対象として、沈着および放出を調べるための鉛直フラックス計測をドローンを用いて実現させることで、これまでの制限を超えるフラックス観測点の拡張を目指した。現時点では定量されたフラックス量に不確かさもあるが、ドローンを用いたフラックス観測の可能性を世界で初めて示すことに成功した。これまでに利用されてきたタワー・航空機観測と比べて圧倒的に低コストであり、この意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we tried to perform vertical flux measurements of atmospheric aerosols based a gradient method using two unmanned aerial vehicles (UAVs) measuring atmospheric aerosols and meteorological parameters (e.g., horizontal wind speed). We evaluated the methods to accurately observe aerosol concentrations and meteorological parameters on a drone, one of UAVs, and then, performed their airborne observations using two drones in Yokosuka city, which is located to an industrial area, Japan. Through the rigorous verification, we found that we successfully conducted the aerosol flux measurements in three cases in total. To the best of our knowledge, this is the first time to evaluate the aerosol flux using UAVs.

研究分野：大気化学

キーワード：大気エアロゾル 沈着 フラックス ドローン 粒子サイズ分布

## 1. 研究開始当初の背景

温室効果気体、大気汚染物質、大気エアロゾルといった大気微量成分の濃度計測ネットワークは、国内～領域・全球スケールで確立されつつあり、(例、そらまめくん、IMPROVE、WMO GAW) 大気微量成分の動態把握や数値モデルの検証などに活用され、地球温暖化の将来予測や大気質予報の高精度化に貢献している。しかしながら、ある成分の大気中濃度は、その成分の移流と放出/反応/沈着といった素過程のバランスで決定されており、本質的な意味で素過程の検証に資する観測も、連続的・多点的な観測ネットワークの構築と同等に重要で、そのためには素過程を強く反映する観測量の計測が必要である。素過程の一つである物質交換(移動)過程を定量的に診断できる移動量(=フラックス)は、従来はタワーなどの高層構造物などにおいて、渦相関法、緩和渦集積法、濃度勾配法などにより計測されている。温室効果気体のフラックス計測はすでに連続観測網が構築され、かつデータベース化も進んでいるが、エアロゾルのフラックス計測に関しては研究例そのものがほとんどない。

## 2. 研究の目的

本研究では、**エアロゾルのフラックス定量の観測点拡張**を最終目的として、ドローンを用いた濃度勾配法に基づくフラックス計測を実現するために、ドローンによる気象観測と大気エアロゾル観測を精緻化し、安全に2機同時の運用が可能かどうかを含め、コンセプト実証に向けた飛行観測を行う。

## 3. 研究の方法

鉛直フラックス推定法の一つである濃度勾配法は、以下の式で示すように、高度  $z$  における対象成分 A の濃度  $C_A$  の鉛直方向の勾配 ( $dC_A/dz$ ) と乱流拡散係数 ( $K$ ) によりフラックス  $F_A$  を算出する。

$$F_A = \frac{dC_A}{dz} \cdot K \quad (\text{Eq. 1})$$

濃度鉛直分布だけでなく、 $K$  で特徴づけられる乱流輸送は風のシアーや浮力による大気中の乱れで生じる渦によって駆動されるため、気象要素の鉛直分布の取得も必要となる。そのために、気象パラメータの計測能を持つドローンと大気エアロゾルの計測能を持つドローンを同時に運用し、 $K$  推定のために気温と風速の鉛直分布、濃度勾配計測のために大気エアロゾル濃度の鉛直分布を取得する。

フラックス推定時に必要な乱流拡散係数  $K$  にはいくつかの推定法が提案されているが本研究では以下の手法を採用した。(Oke, Boundary Layer Climates, 2<sup>nd</sup> Edn., 1987)

$$K = k^2 z_r^2 \frac{dU}{dz} \frac{1}{\phi} \quad (\text{Eq. 2})$$

$k$  はカルマン定数 (0.4)、 $z_r$  は高度  $z_2$  と  $z_1$  の対数平均高度 ( $\equiv (z_2 - z_1)/\ln(z_2/z_1)$ )、 $dU/dz$  は風速の高度勾配 ( $s^{-1}$ )、 $\phi$  は大気安定度の補正項である。 $1/\phi$  が以下の Eq. 3 と Eq. 4 で計算される。

$$\frac{1}{\phi} = (1 - 5R_i)^2 \quad (R_i > 0; \text{stable condition}) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\frac{1}{\phi} = (1 - 16R_i)^{3/4} \quad (0 > R_i; \text{unstable condition}) \quad (\text{Eq. 4})$$

$R_i$  は局所的(勾配型)リチャードソン数と呼ばれる無次元パラメータであり、 $U$  だけでなく、 $T$  (実際には温位) も使用して算出される。(Kaimal and Finnigan, Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurements, 1994) この補正項は、 $R_i$  が  $-0.1 \sim 0.1$  で適用可能であり、この範囲を超えると補正項の過大評価が  $K$  推定時の問題となる。

### (1) 気象観測

ドローンに超音波風速計などの風速センサーを搭載し、上空の風を直接的に計測する手法においては、ドローン自身のプロペラの回転に伴う旋回風が風速センサーの取り付け位置によっては計測値に影響を及ぼす可能性が懸念される。本研究では、日本気象協会/京都大学(JWA/KyoU)が所有するドローン(SPIDER CS-6; ルーチェサーチ株式会社)での風観測におけるプロペラ旋回風の影響を屋内実験により定量的に評価した。調査は自然風の影響を受けない屋内ドローン練習場で行った。二次元超音波風向風速計(FT-702; FT Technologies 社)を搭載した

CS-6 を練習場中央付近で 5 分間ホバリングさせ、風速データを 1 Hz で取得した。床面からのホバリング高さは 2 m および 3.5 m とした。また、屋内に設置した風速計によりホバリング時に生じる室内風 (床面からの高さ 2 m) を計測した。さらに、調査に用いる機体および風速センサー (および取り付け位置) を変えたケースについても同様の屋内実験を追加で行った。追加調査で、機体には DJI 社製の Matrice600Pro、風速センサーには FT-205 (FT Technologies 社) を使用し、センサーの取り付け位置は機体中心から上部 20 cm、30 cm、40 cm の 3 通りとした。なお、上部 40 cm の試行では、センサー間の比較のため、先行調査と同じ FT-702 でも調査を実施した。

## (2) 大気組成観測

本研究では、2 種類のセンサー・測器類のテストをはじめに実施した。具体的には、光吸収法に基づく小型なブラックカーボンエアロゾル (BC) 計測器、光散乱法に基づく小型な粒径別エアロゾル計数装置 (OPC) の 2 種を試した。また、大気組成情報に加え、小型な温湿度圧力 (PTU) 測定能を備え、かつ GPS 情報取得が可能な InterMet 社製 iMet-XQ2 を選定した。

【超小型 BC 計測器】本研究では、BC 計測のために、Aethlabs 社のハンドヘルド型の BC 計である AE51 を選定した。本装置はフィルター捕集したエアロゾルによる光の減衰量 ATN (参照高強度/透過高強度比の自然対数の 100 倍と定義。) の測定をもとに BC 濃度を定量する。(フィルター光吸収法) AE51 のようにフィルター光吸収法に基づく BC 濃度定量手法には、フィルター上に累積したエアロゾル量が多くなると光吸収測定線の線形性が担保できなくなる問題 (a) と光散乱成分が干渉する問題 (b) が知られている。参照機器として、単一すず粒子計測 (Single Particle Soot Photometer (SP2), Droplet Measurement Technologies, Ltd) を使用した。SP2 は光散乱成分の影響を強く受けずに BC 濃度を計測できる。(a) と (b) に関わる不確定性を独立に評価した。

【小型 OPC】本研究では、粒径別の粒子個数濃度の計測のために Handix 社の小型 OPC である Printed Optical Particle Spectrometer (POPS) を選定し、屋内実験にて評価を行った。POPS に微分型電気移動度分析 (Differential Mobility Analyzer, TSI, Inc.) と粒子発生器 (Miyakawa et al., AE, 2016) を用いて、既知サイズの硫酸アンモニウムとポリスチレンラテックス (PSL) 粒子を生成し、POPS へ導入することで、既知粒子由来の光散乱信号を収集した。Mie 散乱から予想される信号強度の粒子サイズ依存性と比較することで粒子サイズ測定能の評価とした。

## (3) ドローンを用いたテスト観測と本観測

エアロゾル観測用のドローンとして、DJI 社製の Matrice600Pro に小型 OPC である POPS と PTU センサー iMet-XQ2 を搭載させた。なお、AE51 はテストを行った時期に不調であったために搭載を断念した。Matrice600Pro の下に設置した POPS に試料空気を導入するために、チューブを使い、プロペラ面より高さおよそ 50 cm までポールを伝って、プロペラによる旋回流の影響を大きく受けにくい大気を吸引できるようにした。このチューブによる粒子の配管損失についてはほぼ無視できる。iMet-XQ2 はプロペラ面より約 10 cm の高さに取り付けた。本観測と同じ神奈川県横須賀市に位置する JAMSTEC 横須賀本部のグラウンド (35.32°N, 139.65°E) でテストフライトを行い、運用に問題がないことを事前に確かめた。こまた、Matrice600Pro とは別に空撮用のドローンである DJI 社製の Phantom 4 を使い、飛行中の挙動を観察することを試みたが、使用する 2 GHz 帯の信号間で混信などの問題も特に起きず、2 台が同時に比較的近い空域にて安全に飛行できることも確かめた。

2019 年 12 月 9-11 日に JAMSTEC 横須賀本部のグラウンドにて、観測を実施した。周囲には、北側に山があるため、地形性の気象場の影響を受ける可能性があるが、事前の予備調査で地上より 50 m より高い高度であれば、その影響が小さいと判断できたので、75 m を中心に  $\pm 25$  m の 3 高度でホバリングしながらデータを取得し、高度プロファイルの取得を行った。つまり、Eq.2 においては、 $z_2 = 100$  m、 $z_1 = 50$  m を設定し、50-100 m の間で各パラメータの高度方向の勾配を計算する。その中間の 75 m のデータは、50-100 m の間に異なる気塊の移流がないか (不連続な高度プロファイルになっていないか) のチェックに使用した。また、参照のために地上に気象ステーションと別機種 OPC (model 805, MetOne) を設置して連続観測を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 気象観測

CS-6 を用いて、床面から高度 2 m および 3.5 m で 5 分間のホバリングを各 3 回実施し、1 秒ごとの風速値を比較した。すべての試行で瞬間的には最大で  $1.4 \text{ m s}^{-1}$  程度、最低で  $0 \text{ m s}^{-1}$  付近の風速値が計測され、変動幅が大きかったものの、同一のホバリング高度における風速の平均値・変動幅ともに試行毎の差異が小さく、繰り返し再現性は良かった。高度 2 m と 3.5 m の風速平均値はともに  $0.9 \text{ m s}^{-1}$  であった。一方で、ホバリング中はドローンの飛行により、各試行とも  $0.3 \text{ m s}^{-1}$  の室内風が発生しており、この値をバックグラウンドとみなして差し引くと、ドローンのプロペラ旋回流により発生する風速バイアスは  $+0.6 \text{ m s}^{-1}$  と算出される。これは、同機体と風速センサーの組み合わせにより過去に実施した屋外の気象観測鉄塔との並行観測から算出された  $+0.5 \text{ m s}^{-1}$  のバイアスともほぼ一致していた。

追加調査によって得られた Matrice600Pro の場合において、風速計測値 ( $W_{raw}$ ) と室内風 ( $W_{BG}$ ) の差で求めたプロペラ旋回風に伴う風速バイアス  $W_{bias}$  を調べた結果、風速センサーとその取り付け高度に応じて、 $+0.6\text{--}1\text{ m s}^{-1}$  と変化することがわかった。(図 1) CS-6 と大差はないが、風速センサーの違いも  $W_{bias}$  に影響を与えていることがわかる。

ドローンを用いて上空の風を直接計測する場合には、プロペラ回転に伴う旋回風の影響を考慮するため、使用する機体・風速センサー・センサー取り付け位置に応じた  $W_{bias}$  をあらかじめ評価しておくことが重要であることがわかった。(佐々木他、京都大学防災研究所年報、2020)

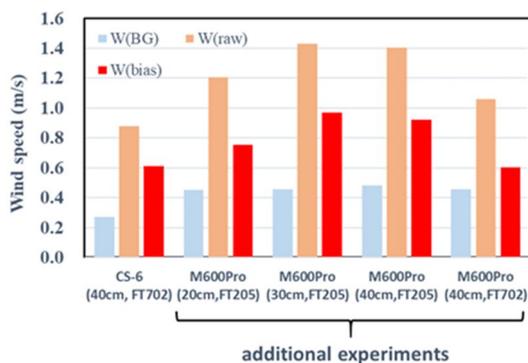


図 1. 機体及びセンサーによる風速計測値比較

## (2) ドローンに搭載可能な小型センサー類の陸上テスト

【超小型 BC 計測器】AE51 の感度補正係数  $f$  は、ATN の関数として線形モデルで表現できることがわかった。

$$f(ATN) = 1.16 \cdot (1 - 0.0044 \cdot ATN) \quad (\text{Eq. 5})$$

この  $f$  で観測された BC 濃度の生値を除すことでセクション 3. (2)の(a)の効果を補正ができる。先行研究においても時間的に断片的かつ簡易的な評価で求めた  $f$  が存在するが、それと同程度の傾きをもっていることもわかった。しかしながら、本研究で得た結果は、世界で初めて精緻かつ系統的に求めたものであるため、最も信頼度の高い評価結果と考えている。

この補正だけでは、非 BC 成分の影響が残留するので、バイアスが残ったままである。(セクション 3. (2) の(b)の効果) これについては参照器の SP2 で計測された非 BC と BC の濃度比で補正できることがわかった。また、この非 BC 成分の影響も一定の仮定のもとでは SP2 のデータがなくても、大気環境モニタリングなどのオープンデータを用いて補正できることもわかった。(Miyakawa et al., AST, 2020)

【小型 OPC】POPS の信号レスポンスと粒子直径の関係性を調べたところ、 $150\text{ nm}$  から  $2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$  の粒子を Mie 理論とも整合的に計測できることがわかった。(図 2) OPC 全般に言えることだが、 $1\text{ }\mu\text{m}$  を境に、それより粗大な粒子については分解能を荒く設定する必要があるが、サブミクロン域に関しては高分解能で計測できる可能性を秘めている。

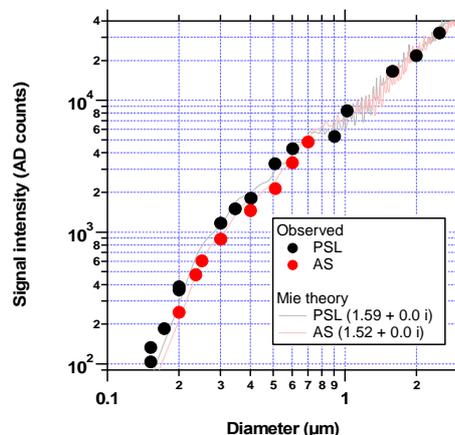


図 2. 装置の信号レスポンスと粒子直径の関係性。マーカーが観測値、実線が装置の光学系と mie 散乱から予測される理論値。黒が PSL、赤が硫酸アンモニウム。

## (3) ドローンによる大気エアロゾルフラックス観測

2019 年 12 月 9-11 日まで、計 22 回のフライトを実施し、2 機同時運用のドローン飛行観測を成功させた。そのうち 1 つのフライトに関してはエアロゾル計測のデータ取得部に不備があり、実質的には計 21 回のフライトとなった。観測時には、独立な空撮用のドローン DJI 社製 Phantom 4 を定期的に運用し、2 機の高度差を調べ、JAMSTEC の Matrice600Pro の高度に JWA/KyoU の CS-6 の高度を合わせるように調整した。

すべてのフライトにおいて、各種パラメータ (おもに風速・エアロゾル濃度) に関し、スムーズな高度方向の勾配が見えているわけではなかった。 $50\text{--}100\text{ m}$  の間で水平方向の移流がランダムに起こった結果であると考えている。その場での鉛直輸送成分の検出を勾配法で見ることが適当でないと判断した。U とエアロゾル濃度  $C_A$  の勾配が  $50\text{--}75\text{--}100\text{ m}$  (もしくは  $100\text{--}75\text{--}50\text{ m}$ ) でスムーズでないデータを排除し、この選別されたデータに対してのみ解析を試みた。(図 3)

平均的に  $C_A$  は  $100\text{ m} > 50\text{ m}$  であり、濃度勾配からは下向きのフラックス、つまり大気エアロゾルの沈着が予想される。この U と T を用いて、平均の  $R_i$  を計算したところ、 $-0.39$  であったため、Eq.3 と 4 を利用できる条件を満たしていなかった。 $R_i$  が条件を満たすデータのみをさらに選別すると、わずか 3 例であったが、平均で下向きに  $5.66 \pm 0.34 \times 10^3\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  と算出された。

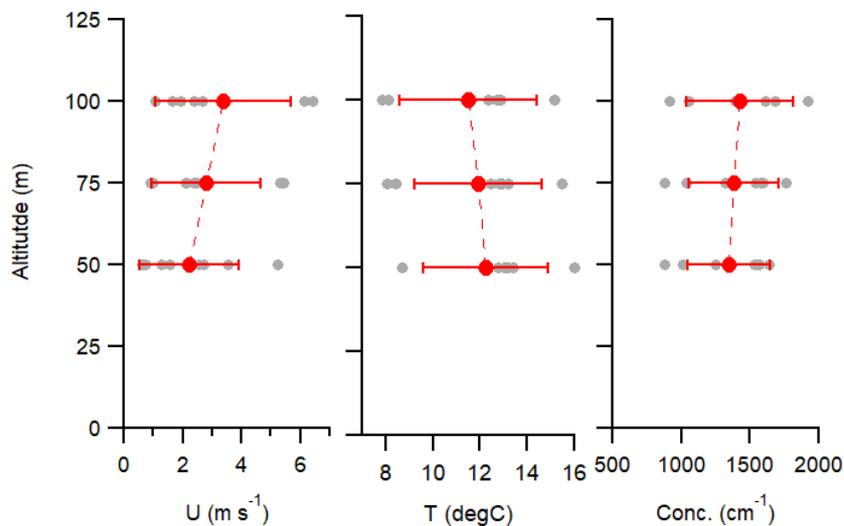


図 3. 選別後の各種パラメータの高度プロファイル。(灰色マーカー、左パネルから風速、気温、エアロゾル濃度) 赤のマーカーとエラーバーが各高度における平均と標準偏差。

本研究では、2機のドローンを同時に運用することで勾配法に基づく鉛直フラックス計測に取り組んだ世界で初めての試みである。研究当初は発生源近傍を観測場所としたことから、放出速度としての上向きフラックスの計測を期待したが、結果として下向きの沈着フラックスが定量された。例としては少ないが、当初の狙いであった「場所を選ばないフラックス計測の実現」による「観測点拡張」の最初の段階は達成することができたと考えている。

#### (4) 議論

得られた沈着フラックスの妥当性の検証するために、フラックスを濃度で除することで、交換速度が算出されるので、それをもとに検討が可能である。下向きフラックスの場合、沈着速度(雨がなくて乾生沈着速度)となる。この結果からは  $4.5 \pm 1.9 \text{ cm s}^{-1}$  と算出される。通常、エアロゾル粒子の乾生沈着速度は、表面の土地利用や摩擦速度により変わるものの、サブミクロンサイズでは  $0.1\text{--}1 \text{ cm s}^{-1}$  が相場であるため、約1ケタほど高い数値になっている。エアロゾル濃度は粒径別で測定しているため、今後さらに粒子サイズ別の解析を行い、粒径別沈着速度の算出を試みる。通常、サブミクロン域は極小になるため、サイズ依存性を調べることで、さらなる検証が可能である。様々な要素を検討し、今後も定量されたフラックスの妥当性の検証を続ける。

得られるフラックスの符号については、場所・季節・気象条件など様々な要因で変わるものであり、事例を増やせば、さまざまなケースの物質交換過程を調べることが可能であるといえる。しかしながら、体系的な結果を得るためには、数多くのフライトを実施する必要があり、それは“labor intensive”であることは間違いない。解決策としては、気象観測とエアロゾル観測を一台のドローンで実施すること、フライトの自動化が挙げられる。について、すでに超小型な風向風速センサーFT205の導入について、JAMSTECにおいてもデータ取得系とドローンマウントの整備を進めた。本研究における成果をもとに、将来的なドローンの機能集約化は可能であると考えている。について、これがもっとも難しい課題であるが、すでに具体化に向けた検討を行った。ドローン運用の自動化に関する検討は、ドローンを使用したサービス (Drone as a Service; DaaS) を主業務とする民間企業のなかには、すでに構想・技術開発が進んでいるところもあり、そのなかの1社であるセンシンロボティクス社とともに、JAMSTEC内の他分野の研究者との共同研究として、地球表層の陸域生態系(植生)の観察について、ドローンの自動運用・観測に挑戦した(永井、宮川他、日本リモートセンシング学会誌、2020; [https://www.sensyn-robotics.com/news/case\\_jamstec](https://www.sensyn-robotics.com/news/case_jamstec))。現在も引き続きこの協力体制を維持しており、将来的には自動運行ドローンによる気象・エアロゾル観測を試みることで、体系的な観測にも取り組みたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Miyakawa, T., P. Mordovskoi, and Y. Kanaya	4. 巻 54
2. 論文標題 Evaluation of black carbon mass concentrations measured using a miniaturized aethalometer in comparison with continuous soot monitoring system (COSMOS) and single-particle soot photometer (SP2)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aerosol Science and Technology	6. 最初と最後の頁 811-825
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/02786826.2020.1724870	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 該当する

1. 著者名 Sasaki, K., M. Inoue, T. Shimura, and M. Iguchi	4. 巻 12
2. 論文標題 In Situ, Rotor-Based Drone Measurement of Wind Vector and Aerosol Concentration in Volcanic Areas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/atmos12030376	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 佐々木寛介、志村智也、井口正人、井上実	4. 巻 63B
2. 論文標題 ドローンによる上空の風観測手法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 京都大学防災研究所年報	6. 最初と最後の頁 282-290
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮川拓真、Petr Mordovskoi、金谷有剛
2. 発表標題 小型エサロメータによるブラックカーボン計測の評価
3. 学会等名 第60回大気環境学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木寛介
2. 発表標題 ドローンによる上空気象観測手法の開発（基礎検討結果）
3. 学会等名 令和元年度京都大学防災研究所成果発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮川拓真、Petr Mordovskoi、金谷有剛
2. 発表標題 UAVを用いた大気組成計測のための小型装置の検討
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://sites.google.com/site/mykwjam/home?authuser=0">https://sites.google.com/site/mykwjam/home?authuser=0</a> <a href="http://www.jamstec.go.jp/souran/html/Takuma_Miyakawa_3d0b2-j.html">http://www.jamstec.go.jp/souran/html/Takuma_Miyakawa_3d0b2-j.html</a>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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	佐々木 寛介  (Sasaki Kansuke)  (10578967)	日本気象協会・環境エネルギー事業部・担当部長    (82692)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	井上 実  (Inoue Minoru)	日本気象協会・環境エネルギー事業部  (82692)	

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