

特別セッション

ドローン (UAV) を用いた関東上空の大気汚染計測

○米持真一¹⁾ 市川有二郎¹⁾ 野尻喜好¹⁾ 山本祐志²⁾

(¹埼玉県環境科学国際センター,²グリーンブルー (株))

1. はじめに

我が国で大気環境基準の設定されている 9 項目のうち、光化学オキシダント(Ox)は依然として基準達成率が低く、春季から夏季には、この濃度が毎時 120 ppb を超過することで光化学スモッグ注意報が発令される。Ox の主成分であるオゾン(O₃)は、主に都心や東京湾岸地域で排出された NO_x、揮発性有機化合物(VOC)が、海風によって内陸に輸送される過程で、光化学反応により生成すると考えられている。

埼玉県は、年間の光化学スモッグ注意報発令日数が全国最多となることが多く、春から夏にかけて日射が強く風の弱い日に O₃ 濃度が上昇し、午後 2 時～4 時頃に注意報が発令され、午後 5 時～6 時に解除となることが多い。

大気汚染物質は、国内で約 2,000 地点の大気汚染常時監視測定局(常監局)で測定されているが、そのほとんどは地上(平地)に設置されている。地上付近の大気境界層と呼ばれる空気塊は、高度 1,000～2,000 m ほどの厚みを持つが、常監局によって上空の状況を把握することはできない。

埼玉県には、西部の秩父盆地の手前に標高 1,000 m 前後の山地が存在するが、この山地の標高約 850 m に位置する常監局である東秩父測定局(東秩父、図 1 参照)では、夏季の日中に上昇した O₃ 濃度が、夜間を通して高い状態が続く現象がしばしば観測されている。山地で日没後に O₃ 濃度が上昇する要因には、平野部から輸送された高濃度 O₃ を含む空気塊が山肌に沿って上昇する可能性も考えられるが、日没とともに地上の O₃ が低下した後も夜間を通して高濃度が継続することや、風下側の常監局では濃度上昇が見られないなど、この現象を十分に説明できない。

近年、世界中でドローン(Unmanned aerial vehicle, UAV)の開発が加速し、様々な分野に応用されつつある。上空の大気観測には、これまで航空機やヘリコプターなどが使用されたが、燃料の燃焼に伴う排ガスの影響を受ける可能性があり、また、正確な位置や高度で静止して測定を行うことは難しい。更に多くの費用がかかるなど課題があった。気象観測では気球を活用した計測があるが、目的とする位置、高度で静止して計測を行うことは難しく、高価な O₃ や PM_{2.5} 計測機器の回収にも難がある。ドローンはこれらの課題を解決した計測が可能であり、同様に近年性能向上が著しい小型センサーなどの計測機器を組み合わせることで、従来難しかった上空の大気観測の可能性が見えてきた。

我々は、2018 年～2020 年夏季の O₃ 濃度が上昇しそうな日に、東秩父局と埼玉県環境科学国際センターでドローンを用いて上空の大気汚染物質を計測した。

2. 方法

調査地点を図 1 に示す。東秩父局(標高 850 m)を活用した調査は、2018 年 7 月 30 日(月)、7 月 31 日(火)に 12 時、15 時、18 時、21 時の 4 回ずつ、2019 年は 8 月 5 日(月)15 時から翌朝 6 日(火)6 時の間に計 9 回実施した。飛行高度はいずれも 850 m～1,000 m とし 30 m 毎に 2 分間ずつ計測を行った。また、埼玉県環境科学国際センター(環境科学)では、2020 年 8 月 5 日(水)の 10 時 30 分～18 時の間に計 8 回実施した。飛行高度は最高 300 m とし、奇数回に捕集管(Air Toxic, CAMSCO)とミニポンプ(MP-W5P, SIBATA)を用いた VOC 採取(高度 300 m のみ)、偶数回に O₃ 及び PM 計測(高度 100 m、200 m、300 m)を行った。ドローンは Matrice 600 (DJI 社) をカスタマイズして使用した(図 2)。



図 1 調査地点と常監局の位置

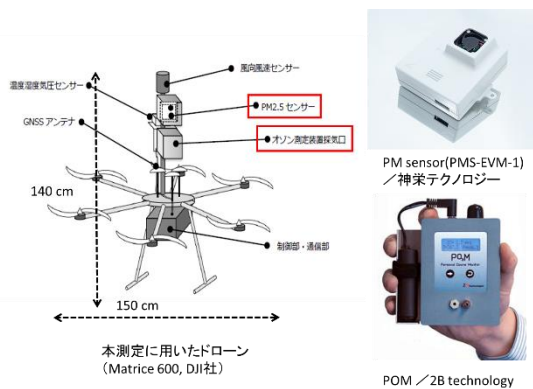


図 2 使用したドローンと計測装置

計測機器は、O₃ は model POM(2B テクノロジーズ)、PM_{2.5} は PM sensor PMS-EVM-1(神栄テクノロジー)または SPS3000(センシリオン)を用いた。全ての飛行でドローンに温度、湿度、気象センサーも搭載した。POM は O₃ 計測器として、米国環境保護庁の認証(FEM: EQOA-0815-227)を受けており、検出限界は 3 ppb(分解能 0.1 ppb)、重量は電池込みで 450 g である。ドローンと搭載した機器を含めた最大重量は約 10kg である。なお、計測は離陸前と着陸後にも行い、測定値の再現性の確認も行った。

3. 結果と考察

3.1 東秩父局上空の O₃ と PM_{2.5} 観測

2018 年の観測時の常監局の O₃ 濃度を図 3 に示す。7 月 31 日に O₃ 濃度の顕著な上昇が見られ、東秩父局と地上(平地)の O₃ はほぼ同期して上昇した。地上では 16 時~18 時にピークとなり減少したのに対し、東秩父では上昇を続け 21 時にピークとなった。その後も緩やかな低下は見られたものの、翌朝まで 60 ppb を超える濃度で推移し、再び濃度が上昇した。高度別の PM_{2.5} 濃度と O₃ 濃度を図 4 に示す。PM_{2.5} は 6~11 μg/m³ で時刻や高度によってほとんど差が見られなかったのに対し、O₃ では時間の経過とともに濃度が上昇し、上空で高くなる傾向が見られた¹⁾。7 月 31 日に本観測を行った時間帯(12 時~21 時)に東秩父上空(高度 1,000 m)を起点とし、NOAA の提供する HYSPLIT を用いて後方流跡線解析を行った。その結果、どの時刻も概ね東方向から、ほぼ同じ高度の空気塊の輸送が示唆され、特に 24 時間以内では環境科学を含む埼玉県北部上空の空気塊の輸送を示していた。図 3 に示すように地上の常監局では O₃ 濃度の日中の変動は似ているが、これらの地点で上空の O₃ 濃度の計測ができれば、本現象の解明に繋がるものと考えられる。なお、本観測では夜 21 時で観測を終了したが、21 時以降の状況を知ることも必要と考え、2019 年は夕方から翌朝までの上空観測を行った。

図 5 に東秩父局と周辺の常監局における O₃ 濃度の変化を、図 6 に高度別の O₃ 濃度を示す。8 月 5 日日中の O₃ 濃度は 14 時~15 時にかけて 80 ppb まで上昇した。この時ドローン調査では地上と比べて 10~20 ppb 高くなった。その後、東秩父のみ再上昇して 20 時~23 時に 40 ppb 前後で推移し、22 時には 1,000 m の O₃ が 850 m より 22 ppb 高くなり、その後減少した。後方流跡線は南東方向から太平洋上の空気塊の流入を示唆していた。首都圏の O₃ 濃度は光化学スモッグ注意報発令レベルまで上昇せず、比較的清浄な空気が東秩父上空に流入したことで、顕著な濃度低下が見られた可能性が考えられる。

今回計測したのは O₃ と PM_{2.5} であるが、O₃ 生成には NO_x と VOC が深く関係している。O₃ 上昇時にこれら物質の計測が可能となれば、更にこの現象の解明が進むものと考えられる。

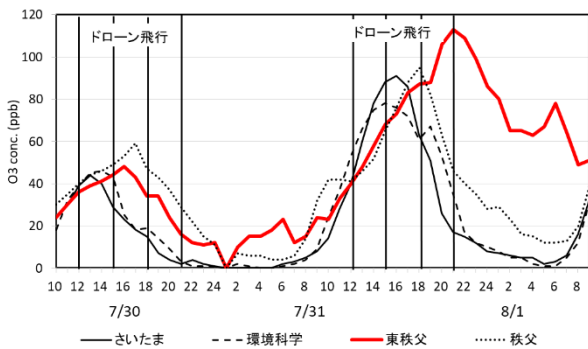


図 3 東秩父局と周辺の O₃ 濃度変化 (2018 年)
図中の縦線はドローン飛行を実施した時刻

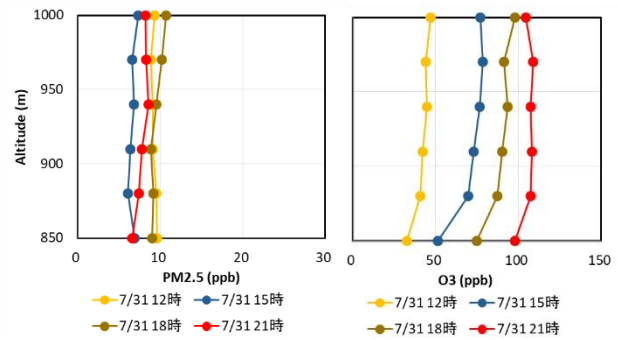


図 4 高度別 PM_{2.5} と O₃ 濃度 (2018 年 7 月 31 日)

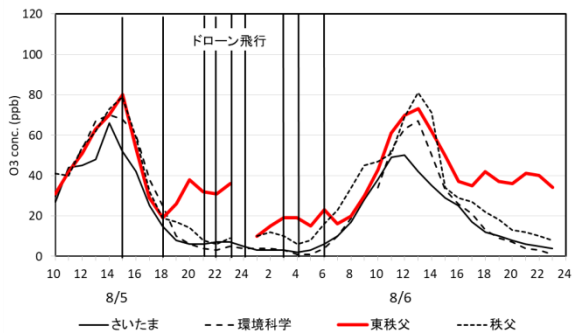


図 5 東秩父局と周辺の O₃ 濃度変化 (2019 年)
図中の縦線はドローン飛行を実施した時刻

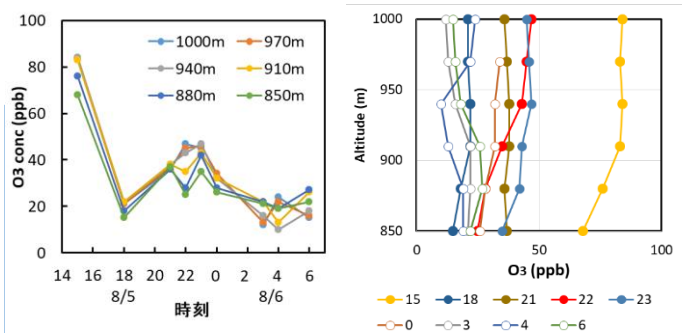


図 6 高度別 O₃ 濃度変化 (2019 年)

3.2 平野部 (環境科学) 上空の O₃ と VOC 観測

2018 年と 2019 年の観測から、東秩父上空 1,000 m の O₃ 濃度変化は輸送された気塊の起源との関係が示唆されたため、2020 年は埼玉県加須市に立地する埼玉県環境科学国際センター(環境科学)の上空で観測を行った。本来であれば、東秩父局上空と同じ、高度 1,000 m での観測が理想であったが、航空法等の制約により 300 m までとした。なお、使用したドローンは性能上は 1,000 m の飛行も可能である。

図 7 に環境科学および周辺の常監局における O₃ 濃度の変化を示す。全ての地点で 14 時~16 時に O₃ 濃度はピークとなり、その後減少した。観測は奇数回 (図中の水色縦線) に最高高度 300 m での VOC 採取と、偶数回(図中の黒色縦線)の O₃ 計測がセット (図中の丸数字) となっている。データ収集や機器の載せ替え等に時間を要することから、飛行開始時刻には約 45 分の時間差がある。上空の観測は①、②は濃度上昇中、③はピーク時、④は濃度減少中となり、ほぼ目的とするタイミングで実施できた。図 8 に高度別 O₃ 濃度を示すが、いずれの時刻でも上空の方が O₃ 濃度が高く、特にピークとなった 15 時は地上と 300 m で 39 ppb の濃度差が見られた。また、図 9 に分析を行った VOC の種類別合計濃度の、地上と上空 300 m の濃度比 (300 m/地上)を示す。芳香族やハロゲン化物では、地上と上空とで濃度には大きな差は見られないが、パラフィン類では上空の方が濃度が高い成分が見られた。また、オレフィン類では全体的に上空の方が濃度が低く、特に O₃ 濃度がピークとなった③で濃度比が小さくなった。

図 8 から、③では地上と上空 300 m の O₃ 濃度の差も大きく、これらの中では最も反応性の高いグループであるオレフィン類で、地上と上空の差が明瞭に現れた可能性がある。

日中の大気境界層高度は通常 1,000 m 以上と考えられるため²⁾、地上で排出された VOC が上空に拡散・輸送されても、上空 300 m では VOC の組成比は保持されると考えられる。オレフィン類で見られた顕著な差は、高濃度 O₃ 存在下における地上と上空の大気化学反応の速度を反映している可能性があり、空気塊全体を把握するためには、これら物質の上空における実測データの蓄積が必要である。

4. 今後の課題

3 年にわたりドローンを活用した上空の大気観測を行った。個々の観測は断片的ではあるものの、今後大気中の動態解析を行う上で貴重な知見が得られたものと考えている。特に燃焼に伴い排出される濃度レベルの低い VOC を調べるためには、燃焼排ガスを一切放出しないドローンの活用が最適である。また、大気観測では、O₃ 濃度の上昇など目的とする現象を的確に捉えたタイミングでの実施が求められるため、予備日を含めた調査期間と機動的な実施が必要であり、航空機等と比べて小回りの効くドローン観測の優位性は高い。

一方、ドローンでは飛行高度、飛行時間の確保のため、積載重量を可能な限り軽くする必要があり、計測機器の精度も十分に考慮する必要がある。更に近年では、航空法等の飛行に関する法規制も厳しくなりつつあり、これら全てを満たし的確な観測を行うことが可能な機関は限られている。

ドローンを用いた上空の大気観測は、これまで十分に解明できなかった大気汚染物質の動態や反応メカニズムを明らかにできる可能性を秘めている。今後のドローン及び計測技術の開発の一層の進展が期待される。

謝辞: ドローンを用いた本観測の一部は科学研究費補助金(17K00535)により実施されました。またドローンパイロットの Right Kristopher 氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 米持ほか: 第 60 回大気環境学会年会講演要旨集、1D0930 (2019).
- 2) 土器屋ほか: 山の環境科学、養賢堂 (2001).

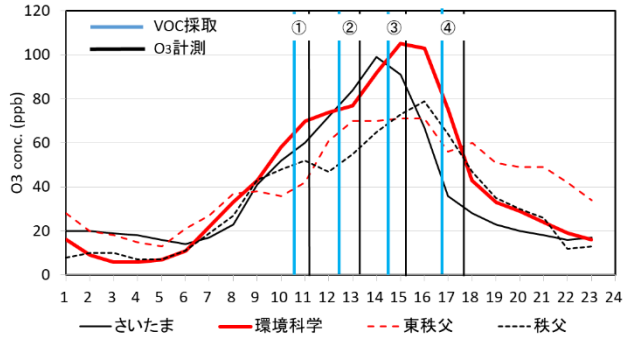


図 7 環境科学と周辺の O₃ 濃度変化 (2020 年)
図中の縦線はドローン飛行を実施した時刻

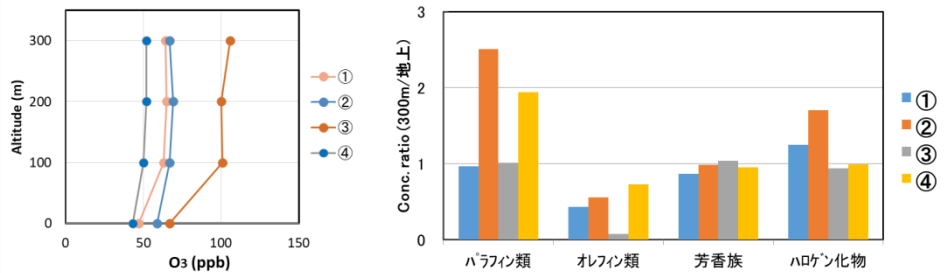


図 8 高度別 O₃ 濃度 (2020 年) 図 9 種類別 VOC の地上と上空の濃度比