

ドローンによる機動的大気環境観測手法の開発

Development of Flexible Observation Method Using Drone for Atmospheric Environment

佐々木寛介・志村智也・辻本浩史⁽¹⁾・井上実⁽¹⁾・小林朋樹⁽¹⁾

Kansuke SASAKI, Tomoya SHIMURA, Hirofumi TSUJIMOTO⁽¹⁾, Minoru INOUE⁽¹⁾ and
Tomoki KOBAYASHI⁽¹⁾

(1) 一般財団法人日本気象協会

(1) Japan Weather Association, Japan

Synopsis

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs), also known as drones, have been becoming useful platform in such fields as inspection of disaster areas, or maintenance management of bridges in off-limits areas. In this study, we investigated the ability of drone as a platform to measure vertical profiles of wind and temperature in upper air. Temperature and wind measured by the drone equipped with meteorological sensors were compared to observations by a meteorological tower. The meteorological drone observation system was applied to real field, and we were able to measure the vertical profiles of wind, temperature and humidity up to an altitude of 1000m. In addition, the another approach for wind estimation by attitude of hovering drone was found to be valuable method for detection of strong wind. Moreover, the feasibility test flights of drone equipped with SO₂ and PM sensors revealed the possibility as a new volcanic observation platform.

キーワード: ドローン, 気象観測, 火山観測, *in situ*測定

Keywords: drone, weather observation, volcanic observation, *in situ* measurement

1. はじめに

近年, マルチコプターに代表されるドローン (UAV; 無人飛行体) が, 災害地域における上空からの写真撮影や人が立ち入れないような橋梁部などの保守点検に活用される事例が急増している. 一方で, ドローンを気象観測や火山観測などの大気環境の計測に用いた事例は以前より報告されているが, その多くは固定翼のUAVや, エンジンを搭載したラジコンヘリコプターによるものであった (Villa et al., 2016). しかし最近ではブラシレス電動モーターを搭載したマルチコプターを活用した大気環境計測の観測事例が増加してきている (例えば, Platis et al., 2015;

Brady et al., 2016). 大気環境計測の観点からは, マルチコプタードローンを活用することにより, リモートセンシングや有人航空機による従来の観測手法と比較して, 以下のようなメリットがある.

- ・低コストで観測ができる
- ・限られた地上スペースで観測可能 (滑走路が不要)
- ・常時電源の確保が不要
- ・移動観測が容易
- ・種々の計測器・センサを搭載することで, 様々な要素が *in situ* 計測可能

これらの特徴は, 例えば火山噴火など突発的な災害発生時において, 迅速かつ任意の場所で機動的に観測データを取得することができ, 得られたデータ

を被害予測や避難計画の検討にも活用できることが期待される。そこで著者らは、上空1000 m 程度までの気温や風向風速などの上空の気象観測にドローンを活用するため、ドローンの耐風性能の評価や、ドローンの姿勢データによる風向風速の推定手法の検討などを行ってきた (佐々木ら, 2016) 。本研究では、ドローンに搭載した気象センサによる観測データと気象観測鉄塔での観測値の比較による精度検証、実フィールドにおける上空1000 mまでの気象観測、火山ガスセンサやPMセンサを搭載したドローンによる火山観測の実証試験などを行った。

2. 調査方法

2.1 ドローンの仕様

本研究で使用したドローンは6枚のプロペラを有するマルチコプター (SPIDER CS-6; ルーチェサーチ株式会社) で、搭載されているジャイロセンサやGPSセンサにより自律的な航行やホバリングが可能な機体である (Fig. 1). フライトコントローラーにはDJI社のA2コントローラーを使用している。

主な仕様はTable 1 に示すとおりであり、機体重量は約3800 g、ペイロード (搭載重量) は最大で約4000 g、飛行可能時間は最大約25分である。ブレードの材質はカーボンで、17インチのものを使用した。気象センサはプロペラの回転に伴う旋回風による測定値への影響を軽減するため、機体中心に長さ45 cmのアルミポールを取り付け、その先端にセンサ部を設置した。アルミポールは飛行中の振動を防ぐため、3方向のワイヤーステーで固定した。データロガーや気象センサ駆動用のモバイルバッテリーはドローン上面中心部にアルミニウム製のデッキを装着し、収納した。

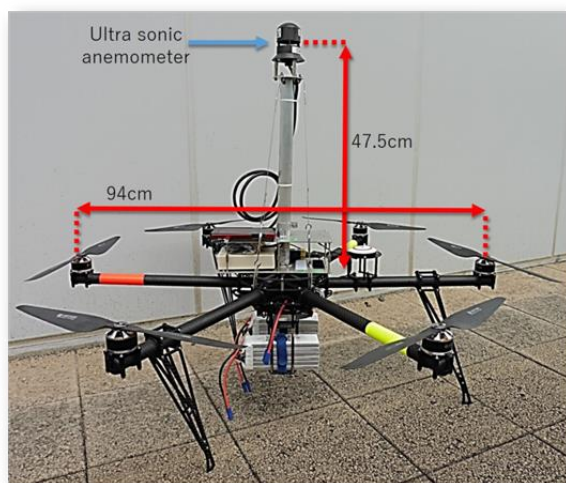


Fig. 1 Drone installed with ultra-sonic anemometer and thermo-hygrometer.

Table 1 Drone specification

Brand name	SPIDER CS-6 (Luce Search Co., Ltd.)
Size	950×950×400 mm
Weight	3800 g
Flight Endurance	Max 25 min
Pay load	4000 g

2.2 気象観測鉄塔との比較観測

気象センサを搭載したドローンを気象観測鉄塔の近傍でホバリングさせ取得したデータを、気象観測鉄塔での観測データと比較した。気象センサは、二次元超音波風向風速計 (FT702; FT-Technologies), 温湿度センサ (HYT939; Innovative Sensor Technology IST AG) をドローンに搭載した。データは1秒間隔でデータロガーに蓄積し、フライト終了後にデータ回収を行った。気象観測鉄塔は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリに設置されている高さ55mの施設を利用した (Fig. 2). 本研究では気象観測鉄塔の高さ40 mもしくは55 mに設置されている風車型風向風速計および温湿度計の観測データをドローンによる観測値との比較対象とした。気象観測鉄塔の観測データは原則として1分値を解析に用いた。ドローンと気象観測鉄塔の比較観測は2016年10月26日および2016年11月9日に実施し、合計5フライト分の気象観測データを取得した。各フライトとも、ドローンを気象観測鉄塔の40 mもしくは55 mの高度に合わせて、鉄塔の近傍およそ10m以内で最大15分間ホバリングを行い、データを取得した。ドローンのホバリング高度は、目視およびドローンからテレメトリーでリアルタイムに送信される飛行高度により確認した。



Fig. 2 Meteorological observation tower and hovering drone. Red circle shows zoom up image of hovering drone at 40 m height.

2.3 上空気象観測

ドローンに気象センサを搭載し、実フィールドにおいて、上空1000 mまでの気象観測を実施した。調査地点は鹿児島県桜島の有村地点とし、別途島内のハルタ山地点、黒神地点の2カ所にドップラーライダー (LR-07F typeIII; 三菱電機株式会社) を設置して、風の鉛直プロファイルを観測した (Fig. 3)。調査は2017年4月19日～20日に実施した。ドローンに2.2節に記載した気象センサを搭載し、指定高度 (50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m) でそれぞれ3分間ホバリングさせ、1秒間隔でデータを取得した。ドローンの最大飛行可能時間の制約上、1フライトでは上記指定高度すべてのデータを取得できないため、5フライトに分割して1セットの鉛直プロファイルのデータを取得した。

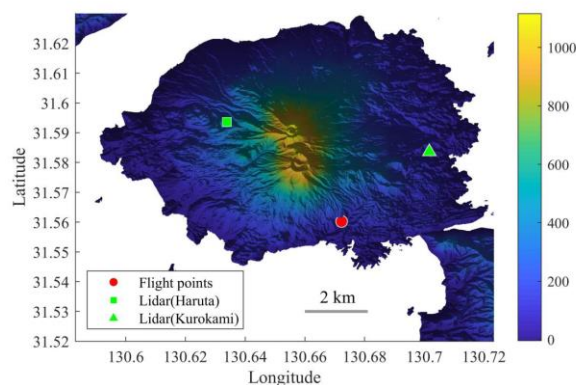


Fig. 3 Field observation site at Sakurajima, Japan. Color scale indicates elevation (unit: m).

2.4 火山観測ドローンの実証試験

ドローンを火山調査に活用することを目的に、火山ガス (SO_2 および H_2S)、火山灰 (PM_{10} および $\text{PM}_{2.5}$) 濃度の空間分布、鉛直プロファイルの計測を想定した実証試験を実施した。調査地点は宮崎県と鹿児島県の県境に位置する新燃岳の火口から東南東へ約8 kmに位置する場所で、2018年3月26日に観測を行った (Fig. 4)。ドローンに、気象センサ (150WX; AIRMAR) に加え、火山ガスモニタ (QRAE3; RAE Systems) およびPMモニタ (ヤグチ電子工業株式会社) を搭載し、指定高度 (50 m, 100 m, 150 m, 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m) でそれぞれ3分間のホバリングにより、火山ガスおよび火山灰の鉛直濃度プロファイルを計測した。気象データおよび火山ガス、火山灰 (PM) についてもデータ取得間隔は1秒とした。前述の桜島での上空気象観測と同様の理由により、4フライトに分割して、1セットの鉛直プロファイルデータを取得した。

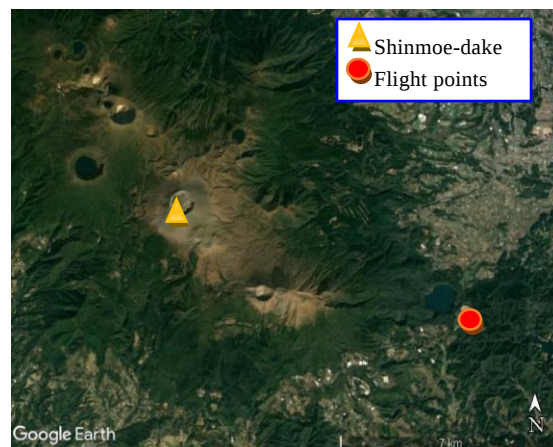


Fig. 4 Field observation site at Shinmoe-dake, Japan for volcanic observation.

3. 結果および考察

3.1 気象観測鉄塔との比較観測

2016年10月26日にドローンで観測した気温と気象観測鉄塔 (40 m) で観測された値を比較した結果を Fig. 5 に示す。両者の観測値の差は小さく、 0.3°C 以内であった。Fig. 5 に示した観測期間中については、気象観測鉄塔の気温については変動がほとんどみられなかった。一方、ドローンの観測値はホバリング直後は気温の低下がみられており、離陸したから、ホバリング高度に達するまでの気温の変化に対して、センサの応答が遅れている可能性が示唆される。ドローンで上空の気温を計測するという観点から、観測高度を変えた場合には気温が急激に変化することが想定されるため、気温の急激に変化に対するセンサの追従性 (応答性) については、今後さらなる検証が必要である。

2016年11月9日に実施した高度55 mにおける風向・風速の比較観測結果の一例を Fig. 6 に示す。なお比較にあたっては、気象観測鉄塔の観測値が1分値であることを考慮し、ドローンの観測データは風向については、1分毎の瞬間値、風速については1秒ごとの値とともに1分間の平均値を示した。この事例では観測期間中には北寄りの風が8 m/s前後観測されており、後述する10月26日の事例と比較すると強風事例であるといえる。Fig. 6 より、風向については、ドローンによる観測値は気象観測鉄塔による観測値とほぼ一致していると判断できる。風速についてもドローンによる1秒ごとの瞬間値は、バラツキが見られるものの、1分平均値で比較すると、変化傾向および絶対値ともに良く一致している。

次に、2016年10月26日に実施した高度40 mにおける比較観測の結果の一部を Fig. 7 に示す。この事例

では、観測期間中は東寄りの風が1 - 2 m/sで推移し、比較的風が弱かった。Fig. 7より、ドローンによる観測値は風向については気象観測鉄塔の観測値とほぼ一致している一方で、風速については、やや過大に計測されていることがわかる。この原因としては、ドローンのプロペラ回転に伴う旋回風がドローン周辺の気流を乱し、この影響が弱風時には相対的に大きくなっている可能性が考えられる。この影響の大きさはドローンの機体特性（ローター数やプロペラ径など）や搭載する気象センサによっても異なるものと考えられるが、本研究と同様のヘキサコプターの上部30cmに超音波風速計を取付けて観測された風速は0.5 m/s過大になるという報告例もある(Palomaki et al., 2017)。

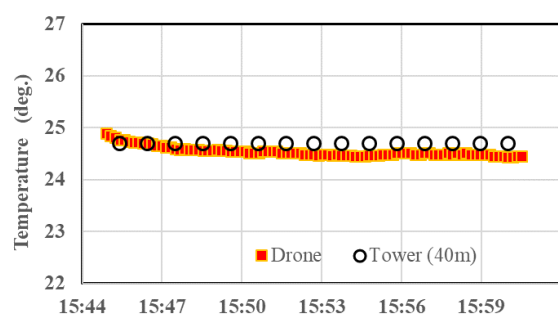


Fig. 5 Time series of measured temperature by drone and meteorological tower.

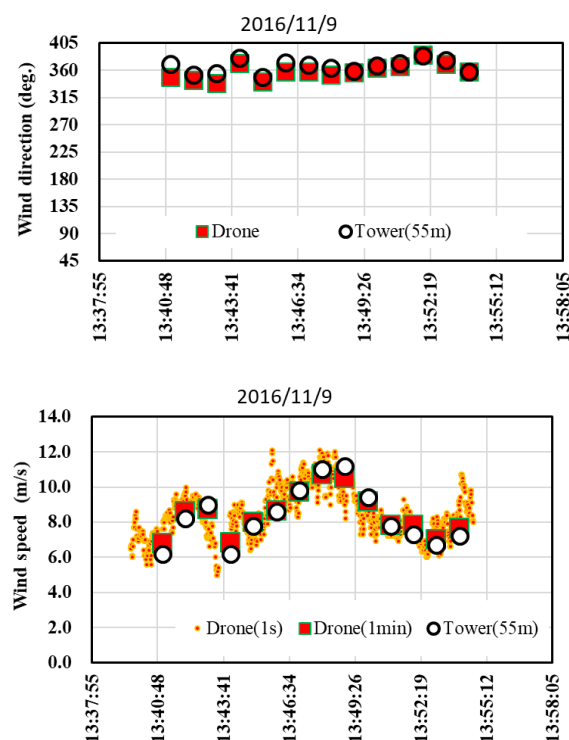


Fig. 6 Time series of measured wind direction and wind speed by drone and meteorological tower under the strong wind condition.

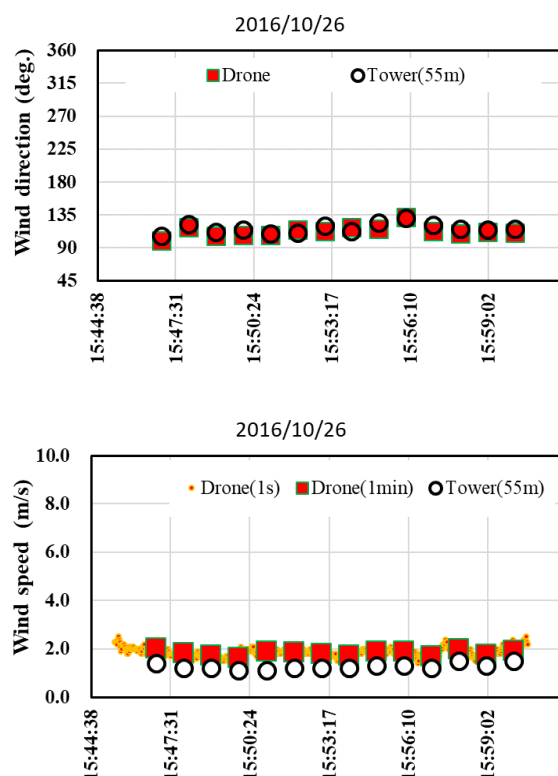


Fig. 7 Time series of measured wind direction and wind speed by drone and meteorological tower under the weak wind condition.

3.2 ドローンによる上空の気象観測

2017年4月19日午前に観測した、桜島上空1000 mまでの風向風速の鉛直プロファイルを図. 8 に示す。図中には同時に実施した島内2地点のドップラーライダーによる観測結果も併せて示した。Fig. 8 より、風向はドローンおよびライダーともに、高度200 m以上で北西風であった。ドローンにより観測された風速の鉛直プロファイルは、桜島火口を中心に風下に位置する黒神地点のドップラーライダーの観測結果と最下層を除いてほぼ一致することが確認できる。ドローンにより観測された気温及び相対湿度の鉛直プロファイルを図. 9 に示す。Fig. 9 より高度800 m付近までは100 mあたり1.0°Cの気温通減が見られる方、上空800 m以上では気温通減率が変化するとともに、相対湿度の低い乾いた空気塊が観測された。これらの結果からこの事例においては、大気境界層の高さ（高さ）が900 m前後であることが示唆された。大気境界層の高さは、後述する火山ガスや火山灰の拡散やPM_{2.5}や光化学オキシダントなどの大気汚染の実態を把握するうえでも重要な情報であり、ドローンによる観測手法は、関連する大気質濃度データも同時に取得できるため、これらの調査にも非常に有効であると考えられる。

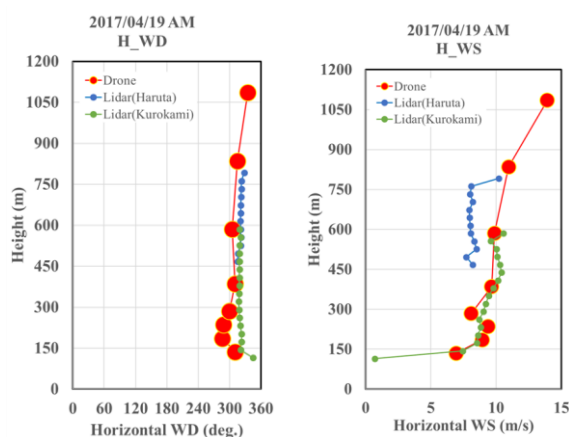


Fig. 8 Vertical profile of measured horizontal wind direction and wind speed by drone and Doppler LIDAR.

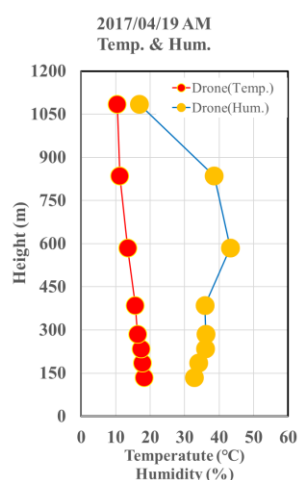


Fig. 9 Vertical profile of measured temperature and relative humidity.

一般的にドローンは、ホバリング時は風上に正対して機体が傾き定位置を保っている。この時の傾きの大きさ（傾斜角）は風速に依存するため、ドローンの姿勢データから風向風速を推定する手法が報告されている（Polomaki et al., 2017; Neumann and Bartholmai, 2015）。著者らのこれまでの研究でも、風洞実験から本研究で使用したドローンの傾斜角は、風速の2乗に比例して大きくなり、この関係式が導出されている（Fig. 10）（佐々木ら, 2016）。そこで、この関係式を用いて2017年4月19日午後のフライトで得られたドローンの姿勢データから推定した風向風速と、ドローンに搭載した超音波風速計による観測値を比較した（Fig. 11）。なお、ドローンの姿勢データ（ロール、ピッチ）は、ドローン搭載したスマートフォン（Arrows M02; 富士通株式会社）内蔵の傾斜センサから取得した。また、風向についてはロール、ピッチから算出したドローンの傾いている方向（傾斜方位）から推定した。Fig. 11より、ドローンの姿勢

データから推定した風向および風速は、超音波風速計の観測値とややズレが生じる高度があるものの、鉛直プロファイルの傾向はほぼ一致することが確認できた。マルチコプターに代表されるドローンは、自律飛行のため搭載したジャイロセンサ、傾斜センサなどから姿勢データを取得していることが一般的であり、今回の結果は超音波風速計などの気象センサを非搭載でも姿勢データから、周囲の風向風速を推定することが可能であり、強風時の自動帰還モードへの移行判断などには十分な精度が得られることを示唆するものである。

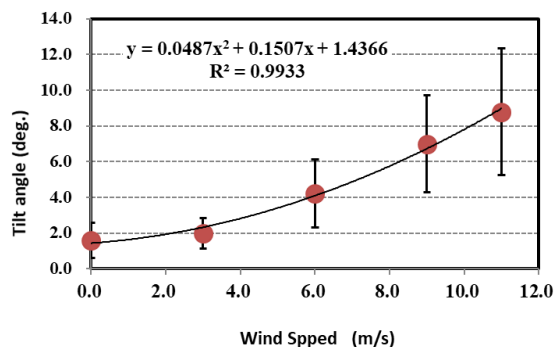


Fig. 10 Relationship between wind speed and tilt angle of drone (Sasaki et al., 2016).

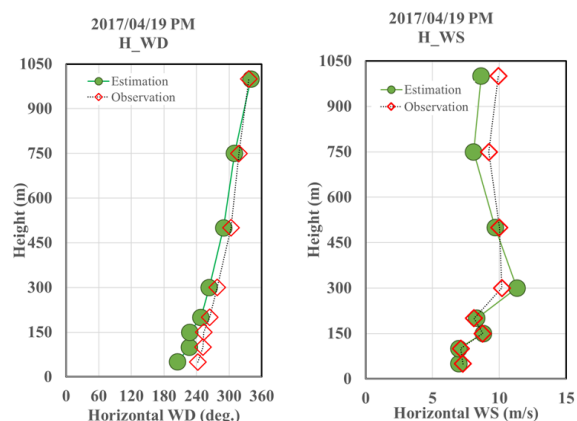


Fig. 11 Vertical profile of measured and estimated horizontal wind direction and wind speed by drone.

3.3 ドローンによる火山観測の実証試験

ドローンによる火山観測を実施した2018年3月26日に観測された新燃岳の火山性地震は2回で前日（2018年3月25日）の141回と比較すると激減しており、火山活動は比較的落ち着いた状況であったといえる（気象庁, 2018a; 気象庁, 2018b）。また、調査地点からの目視でも目立った噴煙は認められなかった。当日は、午前、午後にそれぞれ1セットの高度1000 m（海拔1380 m）までの火山ガス・火山灰の鉛直プロファイルデータを取得した。火山ガスについては、 SO_2 、 H_2S 濃度とともに火山ガスモニタの検出下限値未満

(<0.1 ppm) であった。観測日である2018年3月26日の SO_2 濃度については、宮崎県が設置している調査地点近傍の大気常時監視局である高原町役場 (調査地点の北西約6 km) の日最高値が0.004 ppm、小林保健所 (調査地点の北約11 km) で0.001 ppmであり (宮崎県, 2018), 地上濃度のみでの比較となるが今回のドローンの観測結果と整合的である。Fig. 12 に火山灰 (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) 濃度および、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比の鉛直プロファイルの観測結果を示す。Fig. 12 より、最下層の高度50 m (海拔430 m) では、 $\text{PM}_{2.5}$ は $11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} で $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であったが、両者とも上空ほど濃度が増加する傾向がみられ、 $\text{PM}_{2.5}$ は高度750 m (海拔1130 m) で $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} は高度1000 m (海拔1380 m) で $37.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の最大値が観測された。 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比は下層から上層まで今回の観測高度では0.8前後で推移しており、鉛直プロファイルとして顕著な特徴はみられなかった。 $\text{PM}_{2.5}$ および PM_{10} は火山灰以外にも海塩粒子などの他の自然起源、自動車などの人為起源の寄与があるため、今回の観測結果が火山灰の寄与を反映しているかどうかは判断しがたい。参考までに調査地点近傍でSPM (PM_{10} に概ね相当) と $\text{PM}_{2.5}$ の地上濃度を計測している大気常時監視局である小林保健所における当日の観測値は、日平均濃度で $\text{PM}_{2.5}$ が $18.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SPMが $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった (宮崎県, 2018)。

今回の観測結果ではドローンにより観測された火山ガスや火山灰濃度から火山活動の状況や、噴煙の拡散状況などを把握することはできなかったが、これからも火山地域におけるフィールド観測の実績を積み重ね、観測データの蓄積を図る予定である。また今後は、ドローンによる火山ガスや火山灰濃度の観測結果についても、気象と同様に観測鉄塔やエアロゾルライダー、DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 等を用いたリモートセンシング法による比較観測で精度検証を行う必要があると考えている。

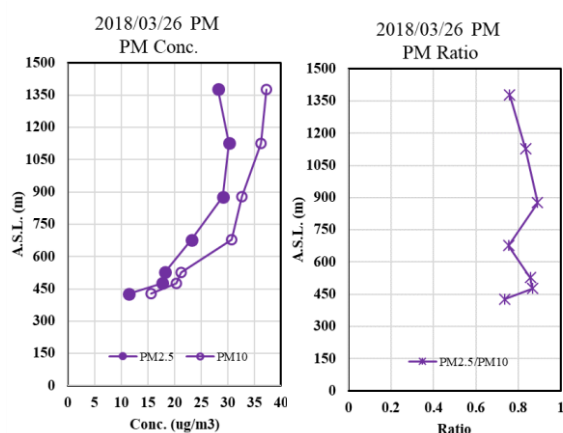


Fig. 12 Vertical profile of measured PM concentrations and $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ ratio.

4. まとめ

本研究では、機動的な大気環境計測手法として、ドローンによる上空1000 m 程度までの気象や大気質の*in situ*計測のための実証試験を行った。フィールドでの実証に先立って実施した気象観測鉄塔との比較観測では、弱風時にドローンに搭載した超音波風速計による風速が過大になる傾向が見られたが、強風時の風速や風向および気温については気象観測鉄塔での観測値と良く一致することが確認できた。

実フィールドでのデータ取得を目的とした桜島での上空気象観測では、ドローンにより高度1000 mまでの風向・風速および気温・湿度の鉛直プロファイルを観測することができ、大気境界層高さの把握も可能であることが示された。また、ドローンの傾斜角と傾斜方位から推定した風速はドローンに搭載した超音波風速計による観測結果ともよく一致した。

新燃岳でのドローンによる火山観測手法の実証フライトでは、火山ガス (SO_2 および H_2S) は検出できなかったが、この結果は、調査地点近傍の大気常時監視局での SO_2 観測結果とも整合的であった。また、火山灰を想定したPM濃度についてはPMセンサを搭載したドローンにより、 $\text{PM}_{2.5}$ および PM_{10} 濃度の鉛直プロファイルを観測することができた。

一方で、本研究でのドローンによる実フィールドでの気象観測や火山観測実証試験の結果から、上空でのホバリングでは気温低下によるバッテリー性能の低下や、火山ガスセンサなど多数のセンサ類を同時に搭載した場合のペイロード増加に伴う飛行可能時間の減少など、実運用に向けてはいつかの課題も示唆された。

今後はフィールドでの観測事例を積み重ねるとともに、気温センサの応答速度の確認、大気質センサによる観測値の精度検証などを行い、ドローンによる大気環境計測手法を確立したいと考えている。

謝 辞

気象観測鉄塔での比較観測の実施に際しては、防災研究所気象・水象災害研究部門の堀口光章助教には、観測データの提供等、多大なご協力を頂きました。また、本研究は京都大学防災研究所の共同利用・共同研究拠点の助成を受けて実施した共同研究、および文部科学省の次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトによる成果の一部であることを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 気象庁 (2018a): 火山名 霧島山 (新燃岳) 火山の状況に関する解説情報 第49号,
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/activity_info/551.html, (2018.6.5 アクセス)
- 気象庁 (2018b): 火山名 霧島山 (新燃岳) 火山の状況に関する解説情報 第50号,
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/activity_info/551.html, (2018.6.5 アクセス)
- 佐々木寛介, 井上実, 小島啓美, 河見博文, 町田駿一, 渡辺豊, 名取悦朗, 福田信行, 平坂直行 (2016) : UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた高層気象観測技術の開発, 京都大学防災研究所年報B, Vol. 59(B), pp. 395-402.
- 宮崎県 (2018): みやざきの空 局別日報,
<http://www.miyazaki-taiki.jp/kankyo/taiki/hourreport/>, (2018.5.30 アクセス)
- Brady, J. M., Stokes, M. D., Bannardel, J. and Bertram, T. H. (2016) : Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements, *Environmental Science & Technology*, Vol. 50, pp. 1376 - 1383.
- Neumann, P. P. and M. Bartholmai, 2015: Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 235, pp. 300 – 310.
- Palomaki, R. T., N. T. Rose, M. van den Bossche, T. J. Sherman, and S. F. DeWekker, 2017: Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 34, No. 5, pp. 1183 - 1191.
- Platis, A., Altstädter, B., Wehner, B., Wildmann, N., Lampert, A., Hermann, M., Birmili, W. and Bange, J. (2015) : An Observational Case Study on the Influence of Atmospheric Boundary-Layer Dynamics on New Particle Formation, *Boundary-Layer Meteorol*, 19, DOI 10.1007/s10546-015-0084-y.
- Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z. D. and Morawska, L. (2016) : An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Perspectives, *Sensors*, Vol. 16, 1072, DOI 10.3390/s16071072.

(論文受理日 : 2018年6月13日)