

ドローンによる上空の風観測手法の検討

Considerations for Lower Layer Atmospheric Wind Observation Using Unmanned Aerial Vehicle

佐々木寛介・志村智也・井口正人・井上実⁽¹⁾

Kansuke SASAKI, Tomoya SHIMURA, Masato IGUCHI and Minoru INOUE⁽¹⁾

(1) 一般財団法人 日本気象協会

(1) Japan Weather Association, Japan

Synopsis

This manuscript describes an approach a rotor-based unmanned aerial vehicle (UAV) that measures the lower atmospheric wind. The propeller downwash effect on the measurements of wind speed using UAV equipped with anemometer was validated by indoor experiments. To maximize the potential for UAV equipped with anemometer to provide reliable wind observations, it is important to have an understanding the downwash effect quantitatively for the combination of UAV body, wind sensor and sensor layout used. The optimal observation protocols to get the vertical profiles of wind using UAV were found by the comparative observation with Doppler lidar. The vertical profiles of wind observed by UAV which was moving upward or downward vertically at 1 m/s showed a good agreement with lidar measurements same as hovering UAV measurements. The developed method was applied to field observations near a volcano, and characteristic vertical profiles of wind were captured. The feasibility of wind turbulence measurement by UAV equipped with high time resolution anemometer was also investigated using the tower-mounted reference instrument.

キーワード: ドローン, 風観測, 乱流計測

Keywords: UAV, wind observation, wind turbulence 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; Unmanned Aerial Vehicle) は空撮のみならず, 橋梁や送電線などのインフラ点検, 物流など様々な分野での活用が進んでいる. 防災分野においても, 災害時における被災状況の把握, 行方不明者の捜索など活躍の場が広がっている. 一方で, ドローンを用いて上空の気象観測を実施する試みは, 以前からあり, 従来は固定翼のUAVによる観測事例が多かったが (例えばVan den Kroonenberg et al., 2008), ここ数年は電動モーターを搭載したマルチコプターによ

る事例が増加し, 異なるプラットフォーム (機体) 間での相互比較観測も実施されている (Barbieri et al., 2019). 上空の気象要素のうち風向風速の鉛直プロファイルは, 大気の成層状態・安定度にも深く関わり, 気象のみならず, 火山ガスや火山灰, 大気汚染物質の移流拡散を支配する重要な要素でもある. したがって, 上空の風向風速の鉛直プロファイルを把握することは, これらの現象を理解し, シミュレーションモデルの検証をするうえでも不可欠である. 地上から1000 m程度までの上空風を観測する手段としてはラジオゾンデが古くから用いられており, 近年はドップラーソーダやドップラーライダーなどのリモ

ートセンシング法も普及している。上空の風をドローンで観測するメリットとしては、1) 低コストでの運用が可能 2) 限られた地上スペースで観測可能 3) 常時電源の確保が不要 4) 移動観測容易である といった点が挙げられる。

著者らは、2014年からドローンによる上空の気象観測技術の確立に取り組み、観測システムの開発および野外での実証フライトを実施してきた。これまでに地上～1000 mまでの上空の気温・湿度および風向・風速を計測することを想定し、風洞実験、気象観測鉄塔との並行観測など通じて、ドローンの耐風性能の評価、ドローンの姿勢データからの風向風速の推定方法の検討、気温センサおよび超音波風速計搭載ドローンによる気象観測精度の評価を行った (佐々木ら, 2016; 佐々木ら, 2018; Shimura et al, 2018). 本稿では、超音波風速計搭載ドローンを使用して、より適切に上空の風観測を行うために実施した、ドローンのプロペラ回転に伴う旋回風の影響調査、観測プロトコルの検証結果を報告する。また、本研究ではこれまで多くのフィールドでの実証フライトを実施しており、これらの観測結果から、気象庁GPVによるモデル推定値との比較事例や、上空の乱流観測におけるドローンの適用可能性についてもあわせて報告する。

2. 使用したドローン

本研究において主に使用したドローンは6枚のプロペラを有する電動マルチコプター (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 であるが、実際のフライトでは気象観測用センサ、火山ガスモニタ、PMセンサ、ロガー等を含めて約2000 gであった。飛行可能時間は最大約25分である。プロペラの材質はカーボンで、17インチのものを使用した。風向風速計測時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、その先端に超音波風速計センサ部を設置した。超音波風速計はFT Technologies社製のFT-702 (一部調査ではFT-205) を使用し、データロガーで原則1秒毎のデータを取得した。なお、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

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。

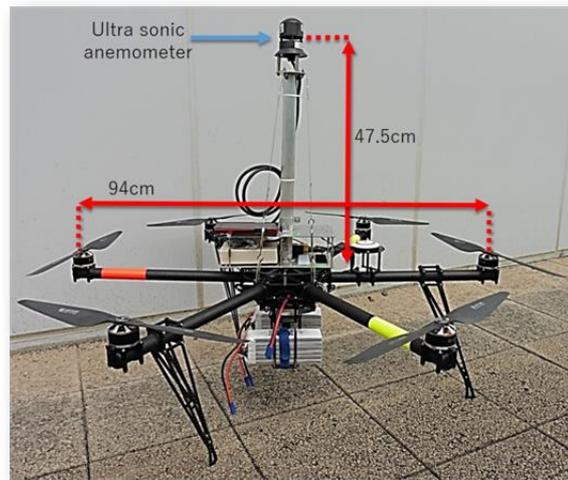


Fig. 1 Drone installed with ultra-sonic anemometer and thermo-hygrometer.

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

3. ドローンによる風観測

3.1 プロペラ旋回風の影響評価 (屋内実験)

ドローンで上空の風向風速を計測する手法としては、空中でのドローンの姿勢 (傾斜角と傾斜方位) から間接的に計測する方法と、ドローンに風速センサを搭載し、直接的に計測する手法がある。前者は、一般的にドローンが、ホバリング時には風上に正対して機体が傾きながら定位置を保っており、この時の傾きの大きさ (傾斜角) は風速に、機体の傾斜方向は風向に依存することを利用している (Neumann and Bartholmai, 2015; Polomaki et al., 2017). 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と風速の関係式が導出されており (佐々木ら, 2016), この関係式から求められた風速は、野外で実施したドローンに搭載した超音波風速計による風速との比較でも良好な一致を示した (佐々木ら, 2018).

また、ドローンに超音波風速計などの風速センサを搭載し、上空の風を直接的に計測する手法は、本

研究のみならず、近年いくつかの調査事例が報告されている (例えば Neumann and Bartholmai, 2015; Nolan et al., 2018). 一方で、マルチコプターではプロペラの回転に伴う旋回風が風速センサの取付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。これについては、既往調査の気流シミュレーションや屋内実験の結果より、機体中心上部が最も影響が小さくなることが報告されている (Hwang et al., 2015; Roldán et al., 2015; Villa et al., 2016; Alvarado et al., 2017). 本研究でも、これらの報告と整合する形で、Fig. 1 に示したとおり、機体中心上部50 cm の位置に超音波風速計を搭載し、観測を実施している。しかしながら2017年に実施した気象観測鉄塔との比較観測の結果を統計的に解析したところ、ドローンに搭載した超音波風速計による風速は、気象観測鉄塔の風速計の値に対して+0.5 m/s のバイアスが認められた (Shimura et al, 2018). そこで、本研究では、引き続きドローン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。

(1) 調査方法

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 (Fig. 2). 二次元超音波風向風速計 (FT-702) を搭載したドローン (SPIDER CS-6) を練習場中央付近で5分間ホバリングさせ、その間の風速データを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、プロペラ停止時 (床面静置時) には風速が0 m/sになることを確認するとともに、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。

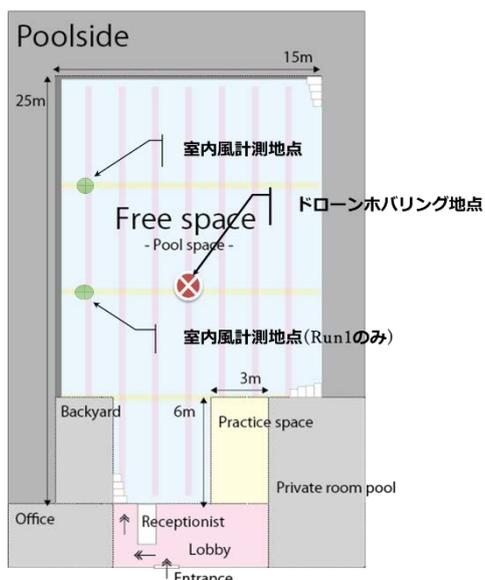


Fig. 2 Experimental apparatus layout in the indoor drone test field.



Fig. 3 Hovering drone installed with ultra-sonic anemometer at 2 m from floor.

(2) 調査結果

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3Run実施し、1秒ごとの風速値をboxplotとして整理した (Fig. 4). 各Runともに瞬間的には最大で1.4 m/s程度の風速値が計測されているが、最小値についても0 m/s付近となっており、変動幅が大きい。また、同一のホバリング高度における、風速の平均値・変動幅についてはRun毎の差異は小さく、繰り返し再現性は良いといえる。高度2 mと3.5 mを比較すると、計測された風速平均値は両者ともに0.9 m/s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Runとも0.3 m/s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補正 (差し引く) を行くと、ドローンのプロペラ旋回風により発生する風速バイアスは+0.6 m/sと算出された。これは、本研究において屋外の気象観測鉄塔との並行観測から算出された+0.5 m/s のバイアス (Shimura et al., 2018) とほぼ一致する。

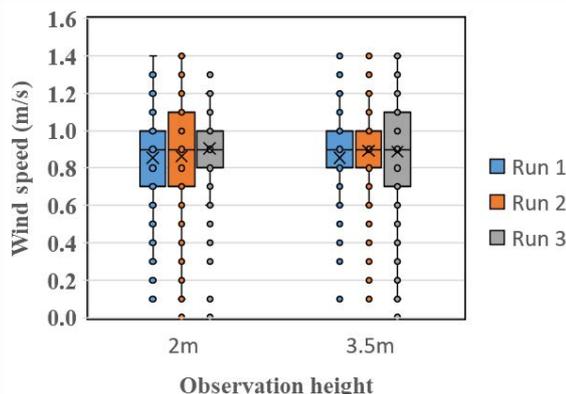


Fig. 4 Box plots of wind speed measured by drone during hovering.

この調査で求められたプロペラ旋回風による風速バイアスはあくまでも、本調査に用いたドローンと風速センサ (取付位置も含む) の組み合わせでの値であり、機体の種類や、センサの種類、取付位置が

変われば、風速計測値に与えるプロペラ旋回風の影響も異なる可能性がある。そこで、調査に用いる機体および風速センサ（取付位置）を変えたケースについても同様の調査を追加で行った。追加調査では、機体にはDJI社製のMatrice 600Pro、風速センサにはFT-205を使用し、センサの取付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のケースについては、センサ間の比較のため、先行調査と同じFT702でも調査を実施した。なお、調査日は先行調査とは異なるが調査場所は同じ屋内ドローン練習場である。追加調査で得られたケースごとの風速計測値W (raw) および室内風W (BG) と、風速計測値W (raw) を室内風W (BG) で補正して求めたプロペラ旋回風に伴う風速バイアスW (bias) を Fig. 5 に示した。また、比較のため、先行調査によるSPIDER-CS6とFT-702の組み合わせにおける結果も併せて示した。Fig. 5 より、まず機体をCS-6からMatrice 600Pro に変更したことによって、ドローンに搭載した風速計の計測値W (raw) だけでなくホバリング時に生じる室内風W (BG) も大きくなることわかる。これは、Matrice 600Proの方が同じヘキサコプターでもプロペラ径が21インチ (CS-6は17インチ) と大きいためと考えられる。また、センサ取付位置については、Matrice 600Proでは機体上部 20cm の場合バイアスW (bias)が最小となる。さらに、センサ取付位置が機体中心上部から40 cmで同一の場合でも、センサがFT-702の場合はFT-205よりも0.3m/sバイアスが小さくなる結果が得られた。これらの結果より、ドローンに風速センサを取り付け、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、センサ取付位置に応じたバイアス (補正值) をあらかじめ把握しておくことが重要である。

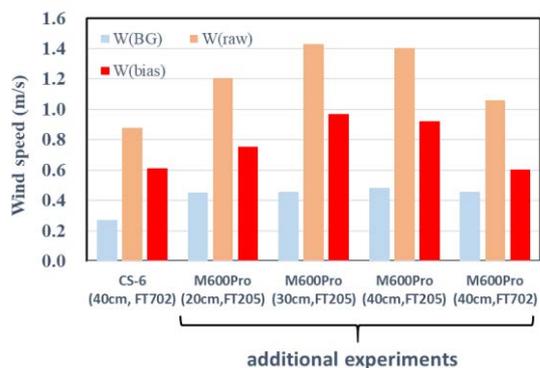


Fig. 5 Comparison of down wash effect for wind speed measured by drone. W(BG) means background wind (indoor wind). W(raw) means raw wind speed measured by drone without correction. W(bias) means corrected wind bias caused by down wash effect, calculated from $W(\text{bias}) = W(\text{raw}) - W(\text{BG})$.

3.2 ドローンによる上空風の観測プロトコルの検討

(1) 調査方法

本調査ではドローンにより地上～1000 m上空までの風向風速の鉛直プロファイルを観測するプロトコルとして、下記の2通りの方法について検討した。

- ①指定高度で一定時間ホバリングし、その平均値をその高度の代表値として扱う。複数の指定高度で計測を行うことで鉛直プロファイルを把握する
- ②地上から上空までドローンが鉛直方向に移動しながら、風向風速を計測する。計測した瞬時値を繋げることで鉛直プロファイルを把握する

上記①のプロトコルでは瞬間的な風の変動の影響が軽減され、平均場としての風のデータが取得できることが期待される一方で、鉛直方向の分解能が密なプロファイルを得るためには多数の指定高度での計測が必要となり、1機のドローンでは1セットのプロファイルを取得するのに時間がかかる欠点がある。一方、②のプロトコルでは連続的な鉛直プロファイルデータが得られるものの、瞬間的な風の変動の影響を受けることと、ドローンが移動していることで発生する相対的な鉛直流、すなわち、ドローンが上昇する際は機体から見て下降流、ドローンが下降する際は逆に上昇流が発生するため、これが搭載した超音波風速計で計測される水平方向の風向風速にも影響を及ぼす可能性が考えられる。

本調査では鹿児島県桜島の黒神地獄河原地区を調査地点 (標高120 m) として、ドローンの離着陸地点にドップラーライダー (DIABREZZA_W; 三菱電機) を設置し、上記①②のプロトコルでドローンにより観測した風向風速の鉛直プロファイルとの比較を行った。ドップラーライダーは鉛直方向に3秒毎に15m間隔のデータを取得できる設定とした。最大取得高度は気象条件によって左右されるが、本調査の観測時間帯では地上から約600 mであった。ドローンについては、FT-702を搭載したSPIDER-CS6を使用し、1秒毎にデータを取得した。①の観測プロトコルでは、地上から100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 mを指定高度として、それぞれ1分間ホバリングを行い計測を行った。②の観測プロトコルでは、ドローンを移動速度1.0 m/sおよび3.0 m/sで上昇・下降しながら計測を行った。

(2) 調査結果

はじめに上記①の観測プロトコルで観測された風向風速とドップラーライダーによる観測結果を比較した(Fig. 6)。図中のプロットはドローンおよびドップラーライダーにより観測された平均値、エラーバ

一は標準偏差を示している。なお、ドローンの風速値については、旋回風のバイアス値を+0.5 m/sとして補正をした。また、ドップラーライダーについてはドローンのフライト時間中の平均値および標準偏差を示している。Fig. 6 より、ドップラーライダーの観測値を基準として考えた場合、地上～上空600 mまで風向は北西で一定しており、風速は全体としては弱風場であるが、上空になるに従って徐々に大きくなり高度500 mで約4.0 m/sとなっている。指定高度でホバリングしたドローンで観測された風速は、高度400 mで、平均風速がやや過大となっているが、風速の変動幅を考慮すると、鉛直プロファイルとしてはドップラーライダーでの観測結果とほぼ一致するといえる。また、風向については、すべての指定高度についてドップラーライダーと同様、北西となっていた。

次に、上記②の観測プロトコルに従って、移動速度1.0 m/sおよび3.0 m/sで上昇・下降しながら計測した風向風速の鉛直プロファイルと同観測時間帯のドップラーライダーの観測値と比較した結果をFig. 7 に示す。図中のプロットでは、ドローンが上昇時に計測したデータ(↑)と、下降時に計測したデータ(↓)について凡例を区別した。ドップラーライダーの観測結果では、地上から高度200 mまでは非常に風が弱く、風向は大きな変動があるが、高度300 mよりも上空では、5.0 m/s前後の北西風が安定して吹いているのが特徴的である。ドローンによる観測結果と比較すると、移動速度が1.0 m/sの場合は、風速についてはドローン上昇時に計測された値は高度200 m付近でやや過小であるが、鉛直プロファイル全体としては、上昇時・下降時ともにドップラーライダーの観測結果と良く一致している。また風向についても、風向が安定してる高度200 m以上ではドップラーライダーの観測結果との乖離は非常に小さい。次に移動速度が3.0 m/sの場合で比較すると、ドローン上昇時に計測された風速プロファイルはドップラーライダーとほぼ一致するが、下降時の風速はライダー計測値の変動幅を考慮しても全体的に過大となる傾向が見られた。風向については、変動の少ない高度200 m以上に限定しても、ドローン下降時には、ライダーの風向とはズレが生じている層(高度400 m付近)が見られた。この結果より、ドローン下降時に発生する鉛直方向の気流、すなわち風速センサから見ると上昇気流が搭載した風速計に正のバイアスを与えているもの考えられる。一方で移動速度が3.0 m/sの場合でも上昇時にはドップラーライダーの風速値との差は小さい。したがって、同じ移動速度であっても、ドローンの機体構造により上昇時と下降時には発生する鉛直方向の強さや後流渦の発生状況に差がある、

もしくは鉛直方向の向き(上昇気流か下降気流か)によって風速計に及ぼす影響の度合いがセンサの特性により異なる可能性が考えられる。

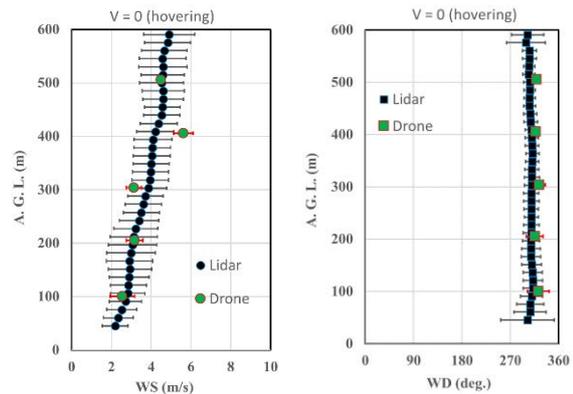


Fig. 6 Comparison of wind speed (left chart) and wind direction (right chart) between lidar and hovering drone.

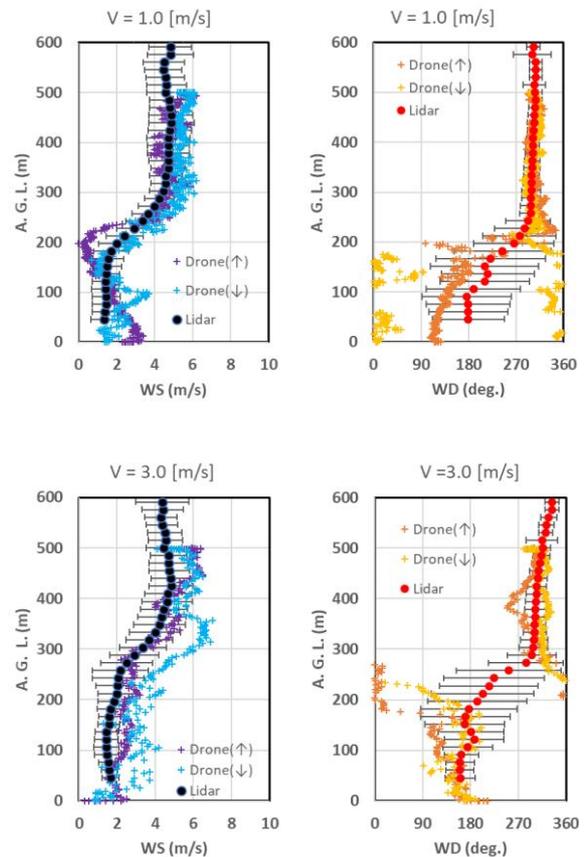


Fig. 7 Comparison of wind profiles between lidar and moving drone. Left charts show wind speed, right charts show wind direction. Top charts show the data of moving speed at 1.0 m/s, bottom charts show the data of moving speed at 3.0 m/s. Legend symbol(↑) represents the data measured during upward moving, symbol(↓) represents the data measured during downward moving.

本調査結果より風速センサを搭載したドローンにより上空の風を直接的に観測する際に、指定高度でホバリングして計測することで精度の高いデータが得られることが確認できた。また、ドローンを鉛直方向に移動させながら計測する場合についても、移動速度が1.0 m/sでは上昇時・下降時ともにドップラーライダーと同等の鉛直プロファイルが取得できるものと判断される。一方で移動速度が3.0 m/sになると、下降時に風速を過大評価する可能性が示唆された。ただし、これらの特徴は前述のプロペラ旋回風の影響と同様に、観測に使用する機体、風速センサ、センサ取付位置によっても変わる可能性がある点は留意するべきである。

3.3 ドローンによる上空風の観測事例(気象庁GPVとの比較)

本研究では、これまでに風速センサを搭載したドローンにより、実フィールドにおいても上空の風観測を多数実施し、実用可能性の評価を行ってきた。ここでは、これまでの観測事例のうち、特徴的な風向風速の鉛直プロファイルをつ捉えたケースについて、ドローンによる観測値と気象庁GPV-MSMによるモデル値と比較した結果を報告する。

(1) 観測概要

鹿児島県桜島の春田山 (Fig. 8 ●印; 標高408 m) において、2018年1月にドローンによる上空の風観測を実施した。使用したドローンはSPIDER-CS6、搭載した風速センサはFT-702である。観測プロトコルは複数の指定高度で3分間ずつホバリングすることで地上から上空1000 mまでの風向風速の計測をおこなった。



Fig. 8 Location of observation site. Drone observation site is marked with a red circle. Grid point of GPV-MSM for comparison of wind profile is marked with a blue rectangle.

(2) 観測結果

2018年1月30日に観測した事例をCase 1、翌31日に観測した事例をCase 2として、Fig. 9 に示す。ドローンによる風速の鉛直プロファイルについては、プロペラ旋回風の影響を補正済みである。なお、Fig. 9 にはドローンで観測された鉛直プロファイルとともに、気象庁の数値予報モデルであるGPV-MSMによる鉛直プロファイルも併せて示した。GPV-MSMの鉛直プロファイルはドローンによる観測時刻に最も近い初期時刻の調査地点直近グリッド (Fig. 8 ■印) におけるデータを抽出し整理した。

Fig. 9 よりCase 1ではドローンにより観測された鉛直プロファイルでは高度500 m~1050 mまで風向は北であり、風速は7 m/s~9 m/sまではほぼ連続的に増大していた。気象庁GPV-MSMによる鉛直プロファイルでも同様であり、両者は良く一致しているといえる。一方Case 2ではドローンにより観測された風向に着目すると、高度600 mまでは北風、高度800 m以上では南風に変化する特徴的な風向の鉛直シアがみられた。他方、気象庁GPV-MSMでも同様の特徴がみられるが、風向が変化する高度がドローンによる観測値よりも約200 m高かった。風速に着目すると、ドローンによる観測では高度400 m付近から高度800 mまでは徐々に弱くなり、高度1000 m付近から急激に風速が大きくなる傾向が見られた。気象庁GPV-MSMでも高度400 m付近から上空へいくにしたがって風速が低下し、高度1000 m以上では風速が大きくなっているが、風向と同様に風速が変化する境界高さはドローンによる観測よりやや高かった。

Case 2における両者の差異は、ドローンによる観測精度あるいは気象庁GPVによる推定精度に起因している可能性は無論否定はできない。しかしながら、気象庁GPV-MSMは10 km格子の代表値である一方で、ドローンで計測したプロファイルはジャストポイントでの観測結果である。Fig. 8 からもわかる通り、調査地点は急峻な地形の中にあることから、ドローンで計測されたデータは局所的な地形影響が反映されているものと考えられる。したがって、これらの結果は、調査地点周辺の10 km格子の平均的の場としては、気象庁GPV-MSMの推定値のとおりであるが、それよりも小さい空間スケールでは気象条件によっては、局所的に平均場とはズレが生じており、ドローンで観測されたように、風向風速の境界高度が変化している (すなわちドローンによる観測値、気象庁GPV-MSMの両者とも正しい) という解釈もできる。

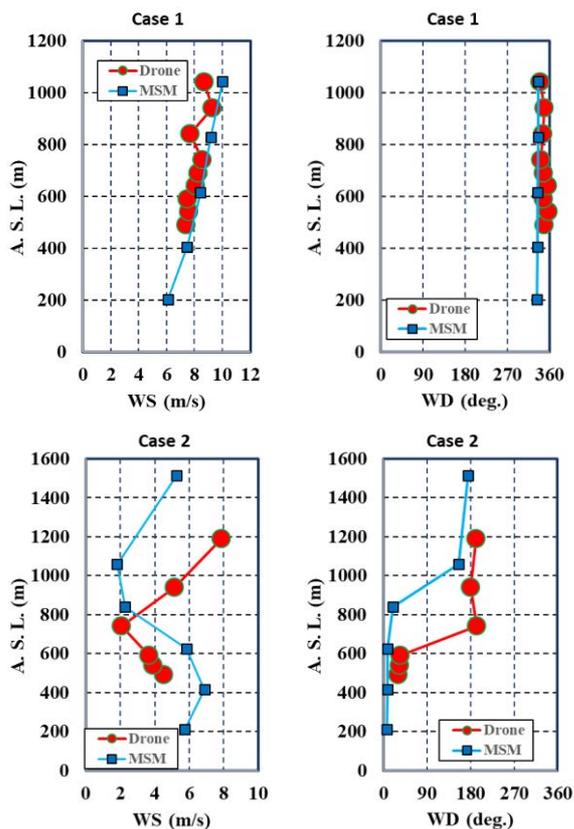


Fig. 9 Comparison of wind profiles between drone measurements and GPV-MSM data. Left charts show wind speed, right charts show wind direction.

3.4 ドローンによる乱流計測

これまでの、いかにして上空の“平均的な”風の場をドローンで計測するかに着目したが、本節では計測の時間分解能を細かくし、風の乱れの大きさ(乱流)を観測した事例を報告する。単位時間内における風速変動の大きさは大気中に存在する物質の拡散現象を支配するほか、近年建設が進んでいる風力発電所での風車の設計にも重要な指標である。また高時間分解能での乱流計測は大気中微量成分のフラックス測定にも応用可能な技術である。本研究では、超音波風速計を設置した気象観測鉄塔の近傍において風速センサ搭載ドローンとの比較観測を行った。

(1) 調査方法

本調査は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリにある気象観測鉄塔を利用して実施した。気象観測鉄塔は全体の高さは55 mであるが、途中の高さ24 mのステージには三次元超音波風速計(DA-600; カイジョー)が設置されており10 Hzで風の観測を行っている。この風速計の近傍でドローンによる風観測を行い、両者の比較を行った。ドローンはSPIDER-CS6を使用し、風速センサは10 Hzでの計測に対応するため、二次元超音波風速計(FT-205;

FT Technologies)を搭載した。ドローンは鉄塔の近傍、南側の地点(Site A)と北側の地点(Site B)において高度25 mでホバリングさせ、1セット10分間の風向風速を10 Hzで取得した。ホバリング時におけるドローンと鉄塔に設置された風速計の直線距離は、Site Aで約20 m、Site Bで約5 mである。鉄塔とドローンの観測地点、鉄塔設置の風速計の位置関係をFig. 10に示す。本調査の観測時間帯の主風向は南～南南西で安定しており、Fig. 10にあわせて示した。また、Site Bでホバリング中のドローンと鉄塔の位置関係を地上から見た様子をFig. 11に示す。

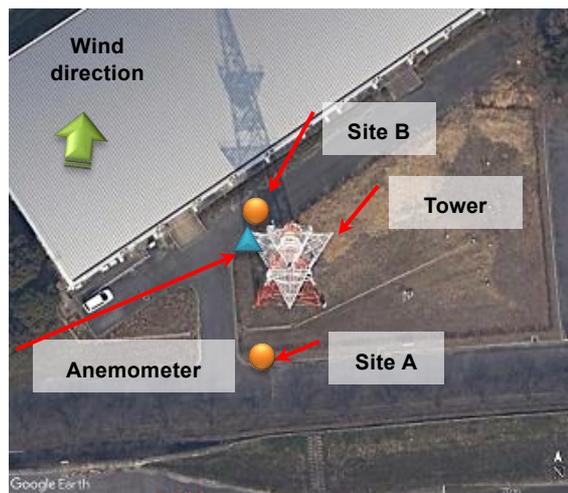


Fig. 10 Satellite image of observation site. Green arrow shows prevailing wind direction during observation period.



Fig. 11 Hovering drone at Site B nearby meteorological observation tower equipped with ultra-sonic anemometer.

(2) 調査結果

Fig. 12にSite毎の観測事例を示す。ドローンによる計測データは10 Hzの時系列変化、10分間のデータによるBoxplot、およびFFT(高速フーリエ変換)によるスペクトル解析を行い、気象観測鉄塔の風速計による解析結果と比較した。Fig. 12よりSite Aでの観

測結果では10分間の平均風速はドローンでは、4.6 m/s、鉄塔風速計では3.8 m/s であり、ドローンの方は鉄塔と比較して0.8 m/s過大となっていた。一方で、風速の変動幅（標準偏差）はドローンで1.2 m/s、鉄塔風速で1.1 m/sと同程度であった。平均風速がドローンの方が過大となっている原因としては、プロペラ旋回風によるバイアスもしくは、当日の主風向と鉄塔の配置から鉄塔風速計は塔体の影響を受けて減速している可能性が考えられる。またスペクトル解析の結果は両者に大きな差はみられず、低周波成分から高周波成分まで、ほぼ直線的にエネルギーが減衰しており、この傾きは概ねコルモゴロフの-5/3乗則に一致していた。一方、Site Bの観測結果では、平均風速についてはドローンと鉄塔風速計で差はなく（3.0 m/s）、変動幅（標準偏差）についても同程度（ドローン 1.0 m/s、鉄塔風速計 0.9m/s）であった。一方で、スペクトルに着目すると、ドローンで計測された風速は1 Hz以上の高周波側での減衰が鉄塔風速計よりも小さくなる特徴が見られた。これは、観測時間帯の主風向が南から南南西であったことから、Site Bは鉄塔の風下に位置することとなり、ドローンによる計測値は塔体による後流渦の影響を反映している可能性がある。この点については、風向別の観測事例を増やすなど、さらなる調査が必要と考えている。

4. おわりに

本研究では、ドローンにより上空の風を適切に観測するためにプロペラ旋回風の影響評価、観測プロトコルの検討を行った。これらの検討結果より、風速センサ搭載ドローンにより上空風を精度よく計測する際には、事前に使用する機体と風速センサの組み合わせにおけるプロペラ旋回風の影響を定量的に評価する必要性が示された。また、ドップラーライダーとの並行観測の結果より、指定高度で一定時間ホバリングすることで平均風速・風向を取得する方法以外にも、1 m/sの移動速度でドローンが上昇もしくは下降しながら連続的にデータを取得する方法でも同程度の精度で風の鉛直プロファイルが計測できることが明らかとなった。さらに、高時間分解能の風速センサを搭載することにより、風の乱れ（乱流）の計測が可能であることが示唆された。

本研究の成果を活かし、ドローンによる上空風の鉛直風をおこなうことは、豪雨などの局地的な気象現象、火山活動、大気汚染等の現象解明、シミュレーションモデルの検証につながるものと考えられる。また、ドローンによる乱流計測法の確立は、大気中微量成分のフラックス計測、ウインドファームにおける後流渦の実態解明などへの応用が期待される。

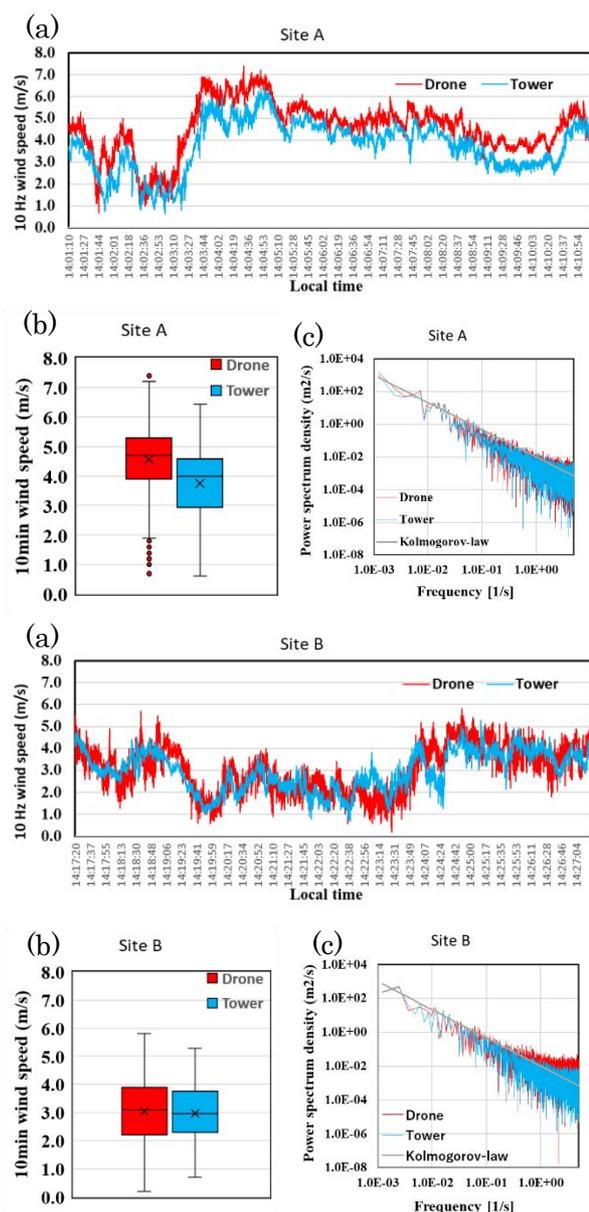


Fig. 12 Comparison of wind turbulence measured by hovering drone and meteorological observation tower; (a): Time series of 10 Hz wind speed; (b): Box plots of wind speed data during 10-min; (c): Wind turbulence spectrum. Grey line shows the slope of Kolmogorov-law.

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、ドップラーライダーとの並行観測では丸山敬教授に、観測データの提供等、多大なご協力を頂きました。なお、本研究は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および科研費（18K11635）の助成を受けて実施した研究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

- 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.
- 佐々木寛介・志村智也・辻本浩史・井上実・小林朋樹 (2018): ドローンによる機動的な大気環境手法の開発, 京都大学防災研究所年報B, Vol. 61(B), pp. 582-588.
- Alvarado, M., Gonzalez, F., Erskine, P., Cliff, D. and Heuff, D. (2017): A methodology to monitor airborne PM10 dust particles using a small unmanned aerial vehicle, *Sensors*, Vol. 17, 343.
- Barbieri, L., Kral, S. T., Bailey, S. C. C., Frazier, A. E., Jacob, J.D., Reuder, J., Brus, D., Chilson, P.B., Crick, C., Detweiler, C., Doddi, A., Elston, J., Foroutan, H., González-Rocha, J., Greene, B. R., Guzman, M. I., Houston, A. L., Islam, A., Kempainen, O., Lawrence, D., Pillar-Little, E. A., Ross, S. D., Sama, M. P., SchmaleIII, D. G., Schuyler, T. J., Shanka, A., Smith, S. W., Waugh, S., Dixon, C., Borenstein S. and Boer. G. (2019): Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign, *Sensors*, Vol. 19, 2179.
- Hwang, J. Y., Jung, M. K. and Kwon, O. J. (2015): Numerical study of aerodynamic performance of a multirotor Unmanned-Aerial-Vehicle configuration, *Journal of Aircraft*, Vol. 52, pp. 839-846.
- Neumann, P. P. and Bartholmai, M. (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.
- Nolan, P., Pinto, J., González-Rocha, J., Jensen, A., Vezzi, C., Bailey, S., de Boer, G., Diehl, C., Laurence, R., Powers, C., Foroutan, H. C., Ross, S. D. and SchmaleIII, D. G. (2018): Coordinated Unmanned Aircraft System (UAS) and ground-based weather measurements to predict Lagrangian Coherent Structures (LCSs), *Sensors*, Vol. 18, 4448.
- Palomaki, R. T., Rose, N. T., van den Bossche, M., Sherman, T. J. and Wekker, S. F. J. D. (2017): Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 34, No. 5, pp. 1183-1191.
- Roldán, J. J., Joossen, G., Sanz, D., del Cerro, J. and Barrientos, A. (2015): Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouse, *Sensors*, Vol. 15, 3334-3350.
- Shimura T., M. Inoue, H. Tsujimoto, K. Sasaki and M. Iguchi (2018): Estimation of wind vector profile using a hexa-rotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above surface, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35, 1621-1631.
- Van den Kroonenberg, A., Martin, T., Buschmann, M., Bange, J. (2008): Measuring the wind vector using the autonomous mini aerial vehicle M²AV, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 25, pp. 1969-1982.
- Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L. and Gonzalez, F. (2016): Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements, *Sensors*, Vol. 16, 2202.

(論文受理日 : 2020年8月31日)